平成２５年度

建設施工と建設機械シンポジウム
論文集・梗概集

平成 25 年 11 月 13 日～11 月 14 日

東京・機械振興会館

一般社団法人　日本建設機械施工協会

平成 25 年度

「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集・梗概集

目　次

○印　口述発表者

Ⅰ　論文集

1．電動式飛行ロボットの活動適用例と技術的な課題に関する考察　・・・・・・　1

キャリオ技研(株)　○富田　茂

2．造粒技術による災害廃棄物の復興資源化　・・・・・・　7

清水建設（株）　○大友 信悦、須々田嘉彦

恵和興業（株）　勅使河原 和則

3．分級と改良を用いたゴミ混じり津波堆積土砂の再資源化に関する試験施工　・・・・・・　13

東北大学大学院環境科学研究科　○高橋　弘

東亜建設工業(株)　泉　信也

(株)森環境技術研究所　柴田　聡

4．市街地や構造物近傍での液状化対策を可能とした静的締固め砂杭工法の開発　・・・・・・　19

日本海工（株）　○ 篠井　隆之

（株）熊谷組　森　利弘

5．放射性底泥除去システムの開発　・・・・・・　23

東亜建設工業(株)　泉　信也、○松島弘樹

6．既存施設直下地盤の液状化対策

―長距離に対応した曲り削孔システム―　・・・・・・　29

東亜建設工業（株）　○大野康年、泉　信也

7．第 4 世代無人化施工の緊急対策工事への適用

－超長距離遠隔操作実証実験から北股斜面崩壊災害復旧工事適用へ－　・・・・・・　33

(株)熊谷組土木事業本部機材部　北原成郎、○坂西孝仁

8．土木系技術者数の推移と今後の建設生産体制の課題について

－統計データから見る建設生産改革の必要性－　・・・・・・　37

(独)土木研究所先端技術チーム　○大槻　崇、藤野健一、茂木正晴

9．無人化施工と有人施工における作業性の比較実験報告

－無人化施工技術の作業効率向上に向けた一考察－　・・・・・・　41

(独)土木研究所　○茂木正晴、藤野健一、西山章彦

10．都市部における地下街等冠水対策検討　・・・・・・　45

国土交通省関東技術事務所　○増尾　健、田中義光、村上　大幹

11．緊急小型車両の通行を想定した新しい緊急橋の実験的研究　・・・・・・　49

広島大学大学院 工学研究科　○近広雄希、有尾一郎

施工技術総合研究所 研究第二部　小野秀一

東北学院大学 工学部　中沢正利

12．ブラスト処理による除染作業の効率化

－ﾄﾞﾗｲｱｲｽﾌﾞﾗｽﾄおよびﾊﾞｷｭｰﾑﾌﾞﾗｽﾄﾛﾎﾞｯﾄによる実証試験－　・・・・・・　55

戸田建設(株)　技術研究所　○澤田晃也

環境事業推進室　森　一紘

環境品質管理部　高橋昌宏

13．省力化した壁面放射線量の測定方法　・・・・・・　59

戸田建設(株)　○板谷俊郎、森　一紘、澤田晃也

15. 3D スキャナによる山岳トンネルの情報化施工
－中部横断自動車道　八之尻トンネル工事－　・・・・・・　６９
清水建設(株)　土木事業本部　○藤井　攻
関東支店土木部　真下義章

16. GNSS 衛星測位を用いた出来形管理の検討
～高さ精度向上機能による計測精度の検証について～　・・・・・・　７５
(株) トプコン　○ 平岡　茂樹
(一社)日本建設機械施工協会　椎葉　祐士
国土技術政策総合研究所　梶田　洋規

17. RTK-GNSS を用いた出来形管理要領の検討
～高さ補完装置導入に向けた手引きと精度確認ｶﾞｲﾄﾞﾗｲﾝについて～　・・・・・・　８１
国土技術政策総合研究所　○梶田洋規
(株)トプコン　先村律雄
(株)トプコン　平岡茂樹

18. TS を用いた出来形管理の適用工種拡大とデータ再利用に
向けた標準的なモデルに関する研究　・・・・・・　８５
国土交通省国土技術政策総合研究所　○谷口寿俊、梶田洋規
(一社) 日本建設機械施工協会施工技術総合研究所　椎葉祐士

19. 3 次元ブロックモデルを利用した盛土の施工管理システム　・・・・・・　８９
西松建設(株)　技術研究所　○岩谷隆文、佐藤靖彦
土木設計部　杉本幸信

20. 太陽光発電による自律式ネットルーティングの開発　・・・・・・　９１
大成建設株式会社　○新見孝之、近藤高弘、志波由紀夫

21. ロックフィルダム盛立における ICT 施工の定量評価　・・・・・・　９５
前田建設工業(株)　技術研究所　○ 松尾健二
京極ダム(作)　石突寿啓
総合企画部　藤谷雅義

22. 情報化施工での設計データ流通の最適化の課題と対策の方向性　・・・・・・　１０１
(独)土木研究所　○藤野健一、山口　崇
(一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所　藤島　崇

23. 建設機械制御データのアウトプット機能について　・・・・・・　１０７
鹿島道路㈱　福川光男

24. 振動ローラ加速度応答法による盛土締固めの品質管理への適用
～粗粒材料を対象とした大型土槽実験～　・・・・・・　１１１
中日本高速道路　○中村洋丈
高速道路総合技術研究所　藤岡一頼
大林組　古屋　弘
酒井重工業　内山恵一
安藤ハザマ　松本江基
不動テトラ　淺田浩司

25.
ＭＣ施工を前提とした情報化施工技術の新たな施工管理への展開　・・・・・・　１１７
国土交通省関東地方整備局　○坂本鋼三、二瓶正康、稲垣義明

26. ブルドーザ作業機自動制御の適用範囲拡大　(D61EXi/PXi-23)　・・・・・・　１２３
(株)小松製作所　○嶋田健二郎、林　和彦、石橋永至

27. 加速度応答法の品質管理への適用
－振動ローラを用いた締固め管理に関する大型土槽実験結果と考察－ ・・・・・・ １２７
(株)大林組 ○古屋 弘
前田建設工業(株) 松尾健二、飯島 健
酒井重工業（株） 内山 恵一
中日本高速道路(株) 中村 洋丈
(株)高速道路総合技術研究所 藤岡 一頼

28. シールド施工におけるペーパードレーン材の切削技術の開発 ・・・・・・ １３１
（株）大林組 ○久田英貴、羽立征治、的場一彦
三菱重工メカトロシステムズ（株） 杉山 雅彦

29. セグメント施工品質を向上させるテールクリアと真円度の
連続計測システムの開発 ・・・・・・ １３５
（株）フジタ ○平野高嗣、浅沼廉樹

30. 新幹線直上に高架橋架設を行う機械装置の開発（東北縦貫線工事の実績） ・・・・・・ １３９
鹿島建設（株） 永田敏秋、○穴井秀和、幸野寛伸

31. 矩形アンダーパス工事に特化した密閉式掘削機による
地下連絡通路の施工実績 －新御茶ノ水駅連絡出入口設置工事－ ・・・・・・ １４３
鹿島建設(株) ○諸橋敏夫、坂根英之

32. 基礎杭施工時の振動波形による支持地盤の判定
－地盤評価装置による基礎杭施工への適応評価－ ・・・・・・ １４７
大成建設（株） 技術センター ○近藤高弘
ひびきエル・エヌ・ジー（株） 溝口敬義
千代田化工建設（株） 佐々木睦雄

33. 低コスト及び環境配慮型の低変位超高圧噴射攪拌工法
（機械攪拌と高圧噴射攪拌のハイブリッド式深層混合処理工法） ・・・・・・ １５１
小野田ケミコ（株） ○近藤省一
国土交通省長崎河川国道事務所 西島純一郎
中央大学理工学部 齋藤邦夫

34. 切削状態モニタリング技術を用いた高圧噴射攪拌工法の高効率施工 ・・・・・・ １５７
三信建設工業（株） ○島野 嵐、山﨑淳一

35. カメラ式鉛直器を利用した逆打ち支柱精度管理技術の高度化 ・・・・・・ １６３
（株）大林組 技術研究所 ○ 池田 雄一
東京本店 平野裕二、深谷茂樹

36. 電磁波を利用した土の現場密度試験の適用性
－2 種類の砂質土による実験結果－ ・・・・・・ １６９
(独)土木研究所 ○橋本 毅、茂木正晴、藤野 健一

37. 回収型掘進機を利用した環境負荷低減対策 ・・・・・・ １７３
（株）奥村組 東日本支社 機械部 ○宇留間高弘
土木部 高畠哲朗、川嶋英介

38. 粉塵防止型セメントミルク混合装置の開発 ・・・・・・ １５７
鹿島道路（株） 平藤雅也、○大竹元志、端 孝之

39. 建設機械へのバイオディーゼル燃料(B100)の使用と取組
～中部横断自動車道 八之尻トンネル工事～ ・・・・・・ １６３

清水建設（株）土木事業本部　機械技術部　○藤井　攻、前田全規
（株）セベック　小豆嶋　和洋
40. 多様な環境技術とＣＯ2 モニタリング装置を組合せた
シールド環境対応システムの開発　・・・・・・　１６９
（株）フジタ　○平野高嗣、川上　勝彦
41. ジャッキダウン式環境配慮型ビル解体工法の
100m を超える超高層ビルへの適用　・・・・・・　１７３
鹿島建設（株）　機械部　水谷　亮
東京建築支店　藤澤武志、○大橋正音
42. アスファルトプラントにおける固形燃料燃焼システムの開発　・・・・・・　１７９
日工（株）　○榊　真司、吉野健治
（株）NIPPO　相田　尚
43. ハイブリッド化に伴う発電機自動発停システムの開発　・・・・・・　１７９
東亜建設工業（株）土木事業本部機電部　○宮本憲都、永木君治、今村一紀
44. 実稼働状態の建設機械排出ガス計測結果における一考察　－車載型
計測装置による油圧ショベルの排出ガス計測方法及び結果について－　・・・・・・　１７９
（独）土木研究所　○石松　豊、杉谷康弘、西山章彦、藤野健一
45. ロングブーム吹付機開発による切羽作業の安全性向上　・・・・・・　１６９
清水建設(株)土木技術本部機械技術部　○藤吉卓也
技術開発部　鈴木正憲
宮狩トンネル作業所　田代浩信
46. 掘削用機械のつり荷走行時におけるつり荷重の変動計測　・・・・・・　１７３
(独)労働安全衛生総合研究所　○堀　智仁、玉手　聡
47. 振動加速度計の計測によるコンクリートの圧送性評価システムの提案　・・・・・・　１７９
福岡大学　工学部　○橋本紳一郎、江本幸雄
大学院　案浦侑己
48. 海底ゴミ回収装置の開発　・・・・・・　１６９
(独)港湾空港技術研究所　○平林丈嗣、吉江宗生
国土交通省　四国地方整備局　杉浦悠介
49. 冬期道路交通に影響する道路有効幅員の計測手法の検討　・・・・・・　１７３
(独)土木研究所 寒地土木研究所　○大上哲也、住田則行、三浦 豪
50. 作業船設備予知保全における診断システムの開発
－予知保全技術の作業船への適用事例－　・・・・・・　１７９
東亜建設工業（株）　○ 長澤太一
ｼﾞｬﾊﾟﾝﾏﾘﾝﾕﾅｲﾃｯﾄﾞ株式会社　戸村雅一
（株）IMC　柴田勝規
51. 音源探査装置（音カメラ）を用いたフィンガージョイントの
劣化診断に関する研究　・・・・・・　１７９
中日本高速道路（株）　○築山有二、川井田実
（株）熊谷組　大脇雅直
52. ネットワーク型河川 GIS モデルを用いたシミュレーションによる
土木機械設備の社会的影響度評価手法の検討　・・・・・・　１７９
（独）土木研究所　藤野健一、○山尾　昭
(現)国土交通省関東地方整備局　竹田　英之

Ⅱ　梗概集

Ⅱ－１　ポスターセッション要旨

１．放射線量を可視化する装置 Orion ScanPlot
－様々なフィールドで放射能汚染箇所を正確に特定－　・・・・・・　１８３
（株）大林組　○上條宏明

２．重機運転者の被ばく量を低減する放射線シールドシート
－装置が簡便な後付け遮蔽シートで運転者の安全を確保－　・・・・・・　１８４
（株）大林組　○清酒芳夫

３．小型 FWD による地盤特性評価手法の高度化に関する研究
－小型 FWD 試験装置の新たな可能性について－　・・・・・・　１８６
（株）東京測器研究所　○岡野　剛、葉山和則
立命館大学　横山隆明、建山和由

４．岸壁耐震補強に用いる、国内最大級掘削機　Ein Band ドリルの開発　・・・・・・　１８８
日特建設㈱技術本部　○菅　浩一

５．建設現場における機械施工の効率化の提案
低コストで現場の施工技術を革新する機械式ﾏｼﾝｶﾞｲﾀﾞﾝｽ（法面整形編）　・・・・・・　１８９
（株）カナモト　○笹原久之
（株）オービット　久徳　誠

６．ＷＣＳ工法　加水制御を用いた自走式土質改良機
による砂防ソイルセメント（ＩＮＳＥＭ材）の製造技術工法　・・・・・・　１９１
玉石重機（株）　○西　敏臣、片岡廣志、濱山祐司

７．油圧ハイブリッドシステムを搭載した省燃費型油圧ショベルの開発
－CAT ３３６ＥH／３３６ＥＬＨハイブリッド油圧ショベル－　・・・・・・　１９３
キャタピラージャパン（株）　○ 白澤博志

８．排出ガス・騒音ゼロの脱着式ＬＥＤライト
－夜間作業における作業員の安全確保と第三者からの視認性向上－　・・・・・・　１９４
（株）アクティオ　稲葉誠一、○今関政美

９．道路、法面、河川敷の竹やぶ、雑草や雑木の粉砕及び回収装置のご紹介
（ブッシュチョッパー＆アースシェーバー）　・・・・・・　１９５
西尾レントオール（株）　○相良幸雄

10．ゴンドラ用「スカイジャスター」(SJ－G)　－空中での回転制御でゴンドラの揺れを低減し、外壁の補修・清掃時の作業環境を飛躍的に改善－　・・・・・・　１９５
（株）大林組　椎名肖一、○柏原一樹

11．分粒装置付きロードスタビライザの開発
－ストーンセパレータの紹介－　・・・・・・　１９５
鹿島道路（株）　○端　孝之、木下　洋一

Ⅱ－２　研究開発助成成果報告

１．複雑作業への適用を目的とした無人化施工における車載・環境カメラの
　　可動性効果の検証とその半自動コントロール手法に関する基礎的研究」　・・・・・・　１９６
　　早稲田大学理工学術院総合研究所　講師　　亀﨑允啓
２．フィードバック変調器による油圧駆動型建設機械の精密位置決めの容易化　・・・・・・　１９６
　　神戸大学大学院工学研究科　教授　　横小路泰義
３．動電式加振器のコンクリート構造物地震時損傷評価への応用　・・・・・・　１９６
　　東北大学大学院工学研究科　教授　　鈴木基行
４．回転表面波機構を用いた防塵防水型レスキューロボットの開発　・・・・・・　１９６
　　東京工業大学大学院理工学研究科　卓越教授　　広瀬茂男

Ⅰ　論文集

電動式飛行ロボットの活動適用例と技術的な課題に関する考察

キャリオ技研株式会社　　○富田　茂

１．緒言

産業界の様々な分野で無人化およびロボットによる機械化が進む中，調査・探査作業についても開発が期待されている。特に上空作業の無人化により，いち早く安価で安全に活動ができるので，情報取得を主とした地上状況の画像取得はとても有用である。当然多くの研究例からも無人ロボットの開発が期待されている [1-3]。

弊社は，機上カメラによる無人飛行体操縦の簡便化を目指して，探査用無人飛行ロボットシステム（SARA：Search and Rescue Aircraft）の開発を行ってきた [4-5]。視界外運行を目指して，無線カメラと GPS（全方位位置システム）を導入して遠隔操作を行い，特定した場所で空中停止（ホバーリング）や広域パターン飛行（スキャニング）することが可能となり，上空作業時に活躍する事が期待されている。本稿では，電動無人飛行体の運用による探査システムの実証事例を報告する。

表-1　回転翼型無人飛行体の仕様

項目	回転翼型
全長×全幅×高(mm)	1343×210×424
質量(g)	約 5500
動力	ブラシレス DC モータ
飛行時間(min)	15
操縦系通信周波数(GHz)	2.4
電源	リチウムイオン電池
翼長(mm)	1582
翼弦長(mm)	60
翼面積(mm^2)	9.49×10^4
翼面荷重(N/mm^2)	5.68×10^{-4}
翼弦 Re 数	8.8×10^5
飛行速度(m/s)	27.8

表-2　多軸回転翼型無人飛行体の仕様

名称	SARA-X
全長×全幅×高(mm)	670×670×450
質量(g)	約 2700
動力	ブラシレス DC モータ
飛行時間(min)	20
操縦系通信周波数(GHz)	2.4
電源	リチウムイオン電池
翼長(mm)	300
翼弦長(mm)	25
翼（6 枚分）面積(mm^2)	4.5×10^4
翼面（6 枚分）荷重(N/mm^2)	5.88×10^{-4}
翼弦 Re 数	3.3×10^4
飛行速度(m/s)	9.2

２．回転翼型飛行体と飛行システムの概要

回転翼型災害探査用無人飛行体には，GPS センサや姿勢制御センサを搭載している。**図-1** は回転翼型飛行体（SARA-H）を，**表-1** は回転翼型無人飛行体の仕様を示す。回転翼型無人飛行体の代表例であるヘリコプタは高速航行とホバーリングが可能であるため，離発着用の用地が無い場合や定点での探査活動が必要な場合に向いている。

低速での航行だが，狭所内を飛行するには多軸回転翼型無人飛行体（SARA-X，**図-2**，**表-2**）がある。各ロータ径が小さく，ロータの周りをバンパーで囲い，狭所内での運行が可能である。



図-1　回転翼型無人飛行体（SARA-H）



図-2　多軸回転翼型無人飛行体（SARA-X）

表-3　無人飛行体に搭載したカメラの仕様

	カメラ
操縦・ 探査用	1920 万画素小型ハイビジョンビデオ 3 次元立体視（3D）カメラ



図-3　地上で操縦者が利用するモニタ

上空探査を目的とした無人飛行体はカメラを取り付けるので，排煙，振動，オイル飛散，騒音等が少ない電気動力式の方が，エンジン動力式より，好ましいと考えられる。

上空からの状況を把握するために，無人飛行体に以下の示すカメラを機体に設置し運用を行った。**表-3** は使用したカメラの仕様を示す。

目視外飛行試験では，**表-3** のカメラを機体下部に**図-1** に示すように設置，操縦時にモニタから前方部を見えるように配置している。目視外飛行を行うため，操縦用カメラからの映像は 1.2GHz 帯の電波により伝送する事で運用でき，電波の空中線出力に応じた半径約 1km の探査範囲を確保する事が可能である。この探査用カメラ（SARA-V）は操縦用カメラを流用し，録画も同時に行った。

図-3 には地上操縦者が使うモニタの様子を示す。1 台のモニタで操縦用カメラと探査用カメラを流用して運用を行っている。具体的には，ビデオカメラは，電動モータが取り付けてある雲台に載せてあり，地上にいる操縦者からの無線信号で雲台の画角を動かすことができ，その他の場合は無人飛行体に搭載したジャイロセンサと同期して，雲台の姿勢を保つようにしてある。操縦時には概ね前方が写るように，雲台の位置を調整する。

３．開発事例と上空活動事例

3.1　災害探査用飛行体による被災地の上空撮影

2011 年 9 月に岐阜県御嵩町で発生した大雨による広域自然災害事故後の飛行体による調査報告をする。

撮影状況は，被災状況を把握するために，無人飛行体（SARA-HV）に**表-3** に示されたカメラを機体下部に設置し（**図-1** 参照）運用を行った。



図-4　無人飛行体が撮影した災害状況写真



図-5　約 150m 高度からの災害現場空撮

図-4 と**図-5** は電動の無人飛行体（SARA-H）を用いた，カメラ（SARA-V）運用時の取得画像の結果を示す。

3.2　広域農地上空での無人飛行体活動事例

表-2 に示した無人飛行体を用いて広域農地での上空からの撮影活動実験を行った（**図-6** 参照）。**図-7** は，上空約 5m から取得した農地の画像である。**図-8** はゴルフ場のテレビジョン放送用として取得した例である [6]。

GPS による飛行データから飛行高度も記録されている。昼間に高度情報と経路情報を検証し，自動飛行プログラムを作成することで，夜間での GPS 情報による自動航行が可能となり，夜間での探査活動が可能と考えられる。

3.3　無人監視用ロボットとしての開発例

狭所用無人飛行体として，**図-2** に示す多軸回転翼型無人飛行体（SARA-X）を使いし，探査用カメラ（SARA-V）を搭載して，遠隔から法面工事状況の画像取得を試みた。無人飛行体（SARA-XV）の概略を**表-2** に示した。**図-9，10** では，SARA-XV が法面工事現場を撮影した。安定したホバーリングと制振技術により，振れの少ない高画質な画像を取得することに成功した。**図-11** では，空撮した写真から簡単な 3 次元画像処理を施し，立体的な画像にした。

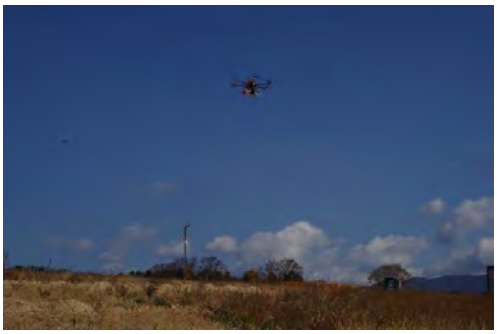


図-6　広域農地で飛行する無人飛行体 SARA-XV



図-7　約 5m 上空からの取得画像



図-8　ゴルフ場での運用例



図-9　無人飛行体（SARA-XV）が空撮した法面完成工事全景写真



図-10　無人飛行体（SARA-XV）が空撮した法面工事の接近写真



図-11　空撮した法面の 3 次元画像処理



図-12　亜炭鉱内（地下）で安定飛行した無人飛（SARA-XUV）

3.4　GPS 信号が無い状況で活躍が期待される探査用無人飛行体の開発例

GPS が無い環境下で無人飛行体を安定して飛行させる実証を試みるために，地下探査用多軸回転翼型無人飛行体（SARA-XUV）を開発し，亜炭鉱内での建設作業現場状況の画像取得を試みた。図-12 に示すように，地下約 5m 以下に掘られた亜炭鉱内は高さ 1500mm 程度の地下洞窟で，坑内温度は約 15 度だが湿度が 90%を超える環境であった。そこで，搭載部品に防水処理を施し，放熱板をロータからの風があたる部分に設置した。GPS 信号は受信不可能なので高性能高度センサを取り付けた。

3.5　薬剤散布時に活躍が期待される飛行ロボットの開発例

探査用の無人飛行体に，薬剤が入ったボールを搭載し，遠隔信号で上空からボールを投下する実証を試みた（**図-13**）。
無人飛行体を GPS 信号でホバーリングさせて，真下を見ることができる無線カメラ（SARA-V）からの画像で狙いをつけて，適所に命中させた。

3.6　補助バッテリシステム

飛行中に電池切れが起こった場合に備えて補助電池サブシステムを開発した。主電池の他に補助電池を搭載し，制御部で主電池の消耗を監視し（積分型電流計），電池切れを検知あるいは予測して補助電池に切り替える一方，これらのデータは無線により地上に送られる。**図-14** に機体搭載部を，**図-15** に地上部の写真を示す。



図-13　薬剤を積載した無人飛行体　(SARA-XFV)

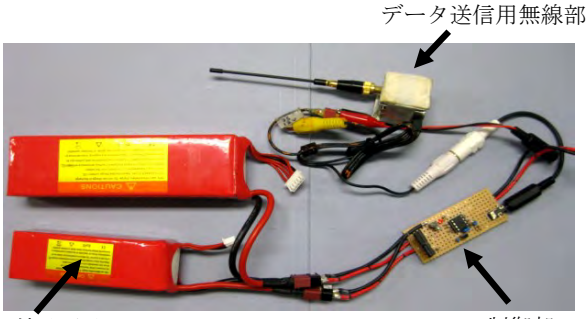


図-14　試作中の補助電池サブシステム



図-15　受信機（上左）と表示部（下）

４．まとめと今後の研究課題

本発表では，上空からの探査用回転翼型無人飛行体の飛行システムの開発事例を紹介し，実際に様々な上空での活動事例を報告した。その結果を以下に示す。

電動回転翼型無人飛行体を，GPS 信号による位置及び姿勢制御することにより，様々な場面での活用を検証することができた。補助バッテリシステムの搭載により，電池切れのリスクを減らすことができた。

今後の研究課題を以下に示す。

① バッテリ充電容量と使用電気量を常時監視すること
② 既存の2次元マップ情報と飛行体の取得画像情報を連携すること

バッテリを充電した時の電気容量と飛行中での使用電気量を常時監視することで，電池切れのリスクを回避できるだけでなく，充電電池の劣化なども飛行体搭載前に検知することが可能となり，より安全性の高い飛行体の運用が可能となる。

インターネットで配信されている 2 次元地図情報と飛行体が取得した上空からの画像情報と重ね合せて活用することで，現在の地上情報との比較することが可能となり，災害時の土石量の見積もりなどに活用できる。

参考文献

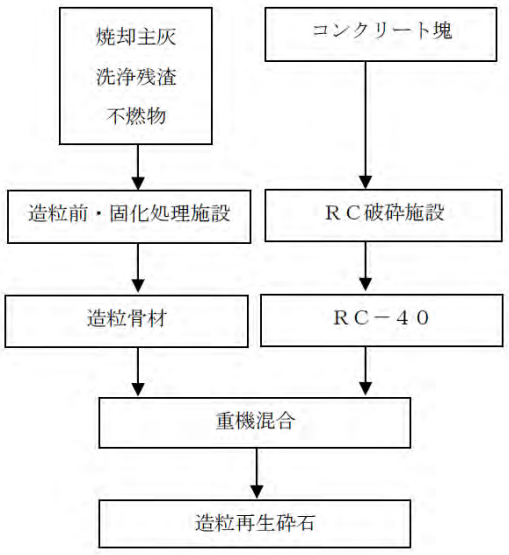
1) 森川泰,「小型無人ヘリコプタの自動飛行制御システムの研究」，第 48 回飛行機シンポジウム講演集，pp.420～423，2010
2) 河野敬他 4 名,「小型無人飛行船の地上運用性改善に関する研究」，第 48 回飛行機シンポジウム講演集，pp.409～413，2010
3) 戸田拓海他 3 名,「狭い空間を通過できる自律誘導無人飛行機の研究」，第 48 回飛行機シンポジウム講演集，pp.498～503，2010
4) 富田茂，北川一敬,「災害探査用途を目指した無人電動ヘリコプタの飛行システムの研究開発」,日本航空宇宙学会第 42 期年会講演会講演集，pp.275～279，2010
5) 岐阜放送　「岐阜オープンクラシック 2013」岐阜放送 2013.4.14

造粒技術による災害廃棄物の復興資源化

清水建設（株）○大友　　信悦
清水建設（株）　須々田　　嘉彦
恵和興業（株）　勅使河原　和則

１．はじめに

宮城県災害廃棄物処理業務（気仙沼ブロック（南三陸処理区）では、災害廃棄物から発生する処理物のリサイクル率向上を図るために造粒処理を行っている。従来は埋め立て処分対象とされていた焼却主灰、洗浄残渣、ガラス・カワラ・陶器片・石等の不燃物を造粒骨材として再資源化し、コンクリート塊を破砕した再生砕石と混合して新たな造粒再生砕石を製造する技術を開発・実用化した。**図−１**に造粒再生砕石製造フローを示す。



図−１　造粒再生砕石製造フロー

２．造粒骨材

南三陸の現場では、可燃物焼却処理によって発生する焼却主灰が４０～５０ﾄﾝ、津波堆積物等洗浄工程から回収される残渣が３０～４０ﾄﾝ、混合物から分別された不燃物が３０～４０ﾄﾝものものが毎日発生している。これらを埋め立て処分する最終処分場の受入量にも限界があり大きな問題となっている。

その解決方法として造粒技術を用いた災害廃棄物の再資源化に取り組んだ。造粒技術開発は恵和興業（株）と共同で行った。同社が実用化した建設系廃棄物に対する造粒システムを基本に、災害廃棄物残渣に適応出来るよう、特殊ミキサ選定試験や、各種配合による試験練り・検査を行い新しい造粒技術を確立した。災害廃棄物不燃混合物や、津波堆積物等の洗浄残渣、焼却主灰をまとめて造粒するのは今回が初めての取り組みである。

また、焼却主灰については、地域柄漁網の廃棄物が多量にあるため、焼却灰への鉛含有が心配された。対応方法としては、日々の管理によりそれぞれ濃度別に分別保管を行い、造粒に適さない濃度の物は最終処分を行い、それ以外は適宜混合し、ある基準濃度以下になるよう品質管理を行っている。製造された造粒骨材は既往の造粒骨材評価基準をふまえて、各材料を用いた場合の品質特性を評価し、検証試験を行うことで、焼却主灰、洗浄残渣、不燃混合物を原料とした造粒骨材を製造することができた。**写真−１**に造粒固化処理施設、**写真−２**に生成された造粒骨材、**図−２**に造粒システムフロー図を示す。



写真−１　造粒固化処理施設



写真−２　造粒骨材

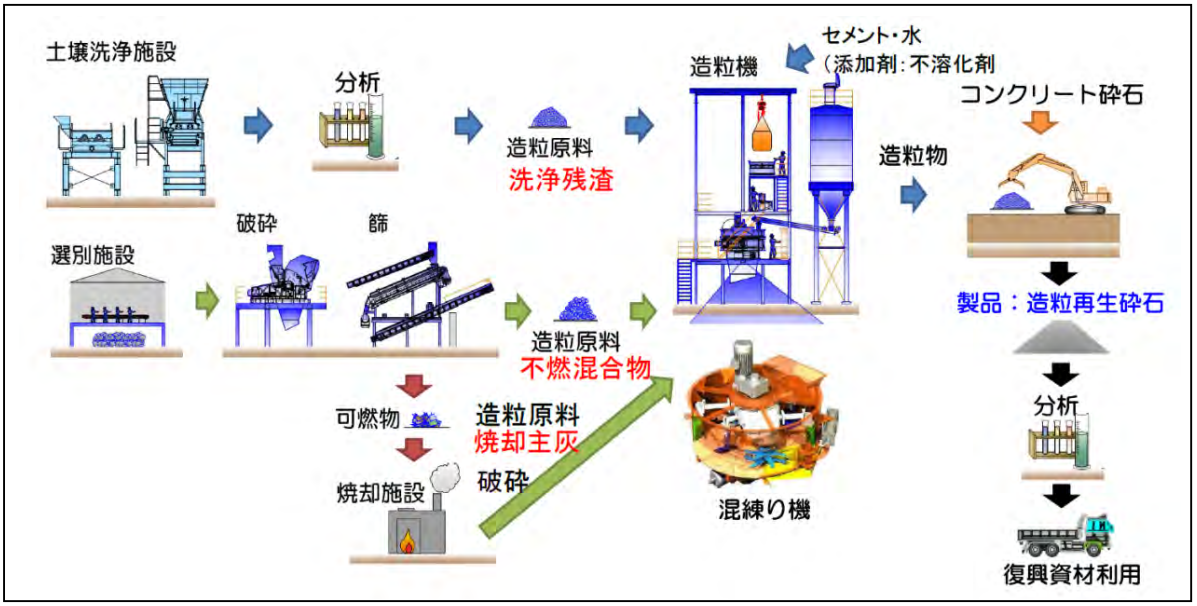


図-２　造粒システムフロー図

2.1　造粒前処理

良質な造粒骨材を製造するためには①不純物の除去②適切な配合③ミキシング制御が必要である。原料となる焼却主灰（**写真-３**）は金属異物を取り除いてから破砕機と選別機にかけられる。混合物から選別された不燃物は、破砕機を数回通過させ６ｍｍ以下の粒子になるまで徹底的に粉砕される（**写真-４**）。



写真-３　焼却主灰



写真-４　粉砕された不燃混合物

ライン作業には磁選機、比重差選別機、風力選別機、伸縮式フルイ等各種機械設備を導入し不純物を取り除き高品質な原料が製造される。粉砕されたそれぞれの材料に不溶化剤を加えて強制的に撹拌混合を行い造粒原料ができる。（**写真-５**）

2.2　造粒固化処理

撹拌混合された不燃物と焼却主灰からなる造粒原料は、洗浄残渣（**写真-６**）とそれぞれ別ラインで造粒固化処理装置に送られる。造粒固化処理装置は計量器と特殊ミキサで構成されている。造粒原料、セメント、水、不溶化剤を適切なタイミングで投入・高速撹拌を行うことで造粒骨材が製造される。



写真-６　洗浄残渣

2.3　造粒骨材品質管理

出来上がった造粒骨材は、有害物質溶出量・含有量、放射能濃度、土質試験を行い七日間養生され、品質に問題がないことを確認してから造粒再生砕石製造に使用される。



写真−５　造粒前処理施設（選別・破砕）

３．造粒再生砕石製造

災害廃棄物を用いた造粒再生砕石は、焼却主灰、洗浄残渣、不燃混合物からなる造粒骨材と、40㎜以下に破砕されたコンクリート塊（主に建築物解体で発生したもの）とを重機を使用して重量比１対１の割合で混合・粒度調整を行い製造する。できあがった造粒再生砕石を**写真−６**に示す。



写真−６　造粒再生砕石

４．品質管理

造粒再生砕石は、日々の品質管理に基づき各種試験を実施している。造粒再生砕石の品質規格は、宮城県の公共工事資材と、岩手県の復興資材に関する基準をクリアするとともに、環境省土壌汚染対策法に基づく特定有害物質の溶出量検査、含有量検査においても基準を満足している。また、放射性物質の量は1kgあたり100ﾍﾞｸﾚﾙ以下の安全な製品であることを確認している。なお、造粒再生砕石は宮城県グリーン製品「RCB-40KS」として認定されている。

4.1　材料試験規格値

「宮城県共通仕様書（土木工事編Ⅰ）」における下層路盤、および、「岩手県復興資材活用マニュアル」における再生砕石（RC-40,RB-40相当）の品質規格を表-１に示す。

表−１　再生砕石品質規格

再生クラッシャラン(RC−40,RB−40相当)			岩ずり		必要な試験
規格項目		品質基準値	品質基準値		
粒度	ふるい目	通過百分率(%)	路床用	最大寸法200mm	骨材のふるい分け試験(JIS A 1102)
	53mm	100			
	37.5mm	95〜100			
	31.5mm	−			
	19mm	50〜80	路体用 盛土用 埋戻し用	最大寸法300mm	
	13.2mm	−			
	4.75mm	15〜40			
	2.36mm	5〜25			
修正CBR(%)		40%以上	20%以上		修正CBR試験（ρdmax×95%に対して）
塑性指数IP		6以下	−		土の液性・塑性限界試験(JIS A 1205)
最大乾燥密度 最適含水比		−	−		突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)
すり減り減量		50%以下	50%以下（路床用に限る）		ロサンゼルス試験機による粗骨材のすり減り試験(JIA A 1121)

4.2　有害物質規制値

土壌汚染対策法に基づく有害物質規制値は以下のとおりである。

・有害物質溶出量
　評価基準：土壌汚染対策法
　　特定有害物質 26 項目
　管理基準：土壌環境基準
　分析方法：環境省告示第 18 号
・有害物質含有量
　評価基準：土壌汚染対策法
　　第二種特定有害物質 9 項目
　管理基準：土壌環境基準
　分析方法：環境省告示第 19 号

4.3　放射性物質規制値

環境省通知に基づく放射性物質規制値は以下のとおりである。放射性物質濃度の評価基準を表-２に示す。

・放射性物質濃度
　評価指標：東日本大震災からの復旧のための公

共工事における災害廃棄物由来の再生資源活用について
管理基準：放射性セシウム（Cs134+Cs137）クリアランスレベル
測定方法：ゲルマニウム半導体検出器による測定

表−２　放射性物質濃度の評価基準

100Bq/kg（クリアランスレベル）以下	利用制限なく使用できることとする。
100Bq/kg超 3,000Bq/kg 以下	利用者や周辺居住者の被ばく線量が 0.01mSv/年（10μSv/年）以下となるよう覆土等により使用環境を整えることとする。
3,000Bq/kg超 8,000Bq/kg 以下	管理型最終処分場で処分することとする。
8,000Bq/kg 超	指定廃棄物として国が処理･処分することとする。

（環境省告知　環廃対発 120525001 号）

５．期待される造粒再生砕石の活用事例

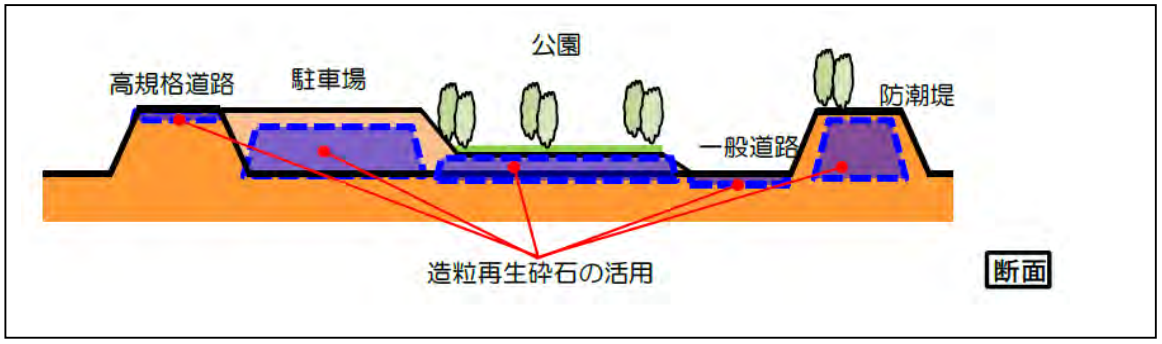
被災地では今後道路や街づくり等の復興計画が早急にすすめられていく。現在の復興需要による建設資材不足が懸念されるなか、今回、南三陸災害廃棄物処理業務の現場では、総量１４万ﾄﾝにもおよぶ造粒再生砕石を製造できる見込みである。災害廃棄物から再資源化された造粒再生砕石を含む再生資材は、これらの復興事業の資材として広く活用されていく見込みである。今後期待される活用事例としては、復興街づくり事業における道路路盤材や嵩上げ用盛土材（**図−３**）がある。

今回製造された造粒再生砕石は南三陸町指定の復興資材仮置き場へ運搬・収集している。これらの一部は南三陸町内「伊里前福幸（ふっこう）商店街」にある駐車場の路盤材に使われ始めた。今後、道路や公園、防潮堤での地盤強度を有する埋め戻し材料としての使い方を町に提案していく。

６．おわりに

平成２３年３月に発生した東日本大震災から２年が経過し、被災地における災害廃棄物の処理・再資源化は最盛期を迎えている。被災した地域の復旧・復興は建設業界が総力を挙げて取り組むべき課題である。今後も災害廃棄物の処理・再資源化の早期完了に向けて取り組むとともに、様々な課題に対して積極的に解決に向けた取り組みをしていくことで、被災地の早期の復旧・復興に貢献していきたい。

造粒再生砕石が一定の品質基準を満足することで復興資材として活用方法が大きくひろがった。適宜ご指導をいただいた東北大学高橋弘教授に厚く御礼を申し上げる。



図−３　復興街づくり事業における造粒再生砕石の活用案

分級と改良を用いたゴミ混じり津波堆積土砂の再資源化に関する試験施工

東北大学大学院環境科学研究科　　高橋　弘
東亜建設工業(株)　○ 泉 信也
(株)森環境技術研究所　　柴田 聡

１．はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では，日本における観測史上最大のマグニチュード9.0を記録した．この地震により場所によっては波高10m以上の大津波が発生し，沿岸部に未曾有の被害をもたらした．大震災により発生した津波堆積物は約1,300～2,800万トンにもなると報告されている[1)]．現在，可燃物は焼却処分し，金属類などは分別してリサイクルに回すなどの処理が精力的に行われており，2013年5月末時点で約7割の処理が完了し，目標としていた2013年度末までの処理完了が実現されつつある[2)]．

一方，比較的ガレキ・ゴミの少ない津波堆積物は防潮堤建設への使用が決まるなど，徐々に処分が進みつつあるが，大量のガレキ・ゴミが混ざった津波堆積物は直接利用が困難であり，処理が遅れているのが現状である[2)]．このゴミ混じりの津波堆積物から比較的容易にゴミを除去でき，かつ津波堆積物の土砂分を復興資材などに再利用できれば，被災地の復旧・復興に大きく貢献できると考えられる．

そこで著者らは，(一社)東北地域づくり協会「技術開支援＜東日本大震災復興関係＞」を受け，東亜建設工業(株)が開発した分級技術(ソイルセパレータマルチ工法)と東北大学と(株)森環境技術研究所が共同で開発した泥土改良技術(ボンテラン工法)を組み合わせ，ゴミ混じり津波堆積物からガレキやゴミを除去し，津波堆積土砂を砂と粘土に分離して，津波堆積土砂の全量を再資源化する実証試験を宮城県大郷町の(株)柿崎工務所大郷工場で実施した．本報ではその内容について報告する．

２．ゴミ混じり津波堆積物

本実証試験では，宮城県が亘理処理区(名取市)で管理するゴミ混じりの津波堆積物を約10m^{3}ほど提供頂き，宮城県大郷町の(株)柿崎工務所大郷工場で平成24年6月11～13日の工程で実施し，6月12日に実証試験の一部を公開した．

写真-1に津波堆積物の外観を示す．津波堆積物には，大小の木片，木くず，ビニール片，空き缶，プラスチック，鋼材など様々なガレキが混合されていた．試験に先立ち，ゴミ混じり津波堆積物の性状把握のため分級試験を実施した結果，ガレキ・礫，砂，シルト・粘土，水分の質量割合は表-1に示す通りとなった．ただし，水分以外は乾燥質量である．また土粒子の粒度分布を図-1に示す．また確認のため，津波堆積物の放射線量を測定した結果，0.13μSv/hであった．津波堆積物から十分



写真-1 ゴミ混じり津波堆積物

表-1 津波堆積物中の質量割合

ｶﾞﾚｷ・礫	砂	ｼﾙﾄ・粘土	水分
4%	42%	28%	26%

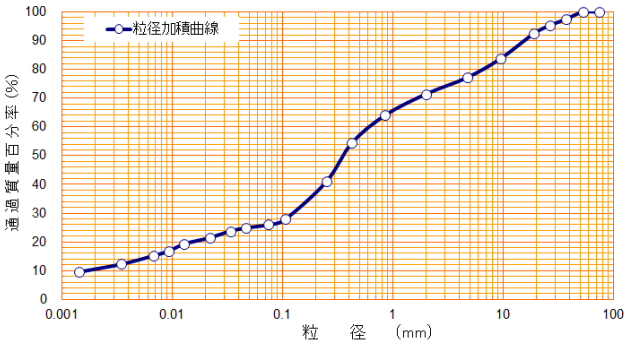


図-1 土粒子の粒度分布

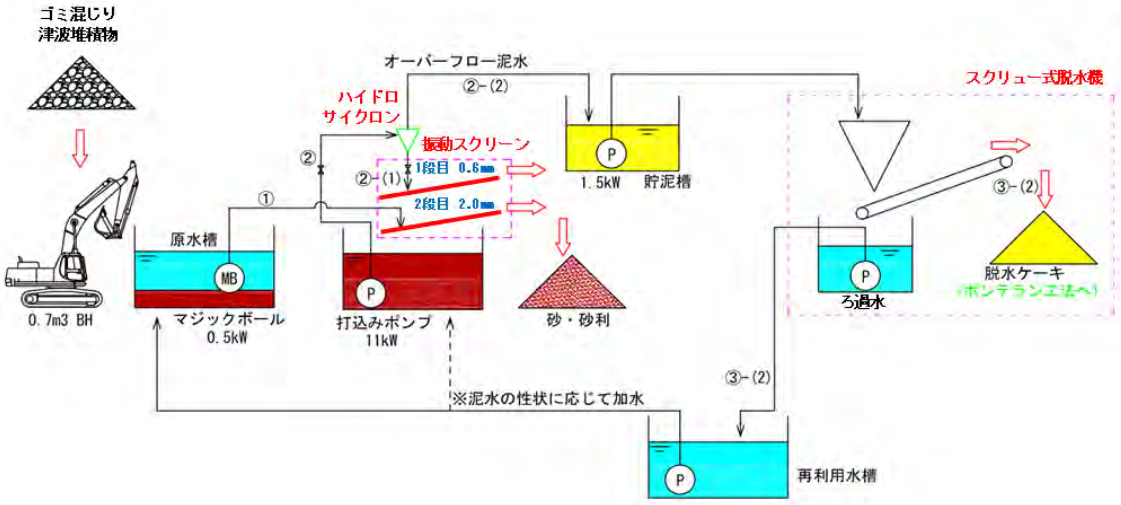


図-2 分級工程の概略

に離れた空間線量は0.05μSv/hであり，空間線量と比べるとやや高いものの，放射線量としてはほとんど問題ないレベルであった(写真-1参照).

３．実証実験概要

本試験では，分級技術(ソイルセパレータマルチ工法)を用いてゴミ混じり津波堆積物からゴミを除去し，砂を分級した後，分級工程から排出されるフロック(粘土)に改良技術(ボンテラン工法)を適用して緑化基盤材を生成する一連の工程を確認することを目的としている.

分級装置(日処理量3～5m^3)の外観を写真-2に示す．また分級工程の概略を図-2に示す．分級工程は以下の通りである.



写真-2 実証試験に用いた分級装置

① ゴミ混じり津波堆積物をホイールローダですくい取り，水槽に投入する.

② ゴミ混じり津波堆積物に加水し，サンドポンプを用いて水槽内で津波堆積物を撹拌する．サイズが大きく軽いゴミや木片などのゴミはこの時点で水面に浮いてくるので，網ですくい取る.

③ 浚渫装置(マジックボール)を水槽内に沈め，津波堆積物を浚渫する．浚渫装置の吸い込み口はメッシュ状になっており，サイズが大きく重いゴミは，最終的に水槽内に残るので，これは最終処分する.

④ 分級装置に流送された泥水は，初めに2段目のスクリーンに入る．スクリーンのメッシュサイズは2㎜であり，ここで2㎜以上の礫や小さなゴミが除去され，分級装置から排出される.

⑤ ２段目のスクリーンを通過した泥水は，スクリーン下部に設置した水槽に落下する.

⑥ 水槽中の泥水は，水中ポンプによりハイドロサイクロンに流送される.

⑦ ハイドロサイクロンの上部からはシルト・粘土など粒径の小さな粒子が水とともに泥水として流出し，隣に設置した貯泥槽に一旦貯えられる．下部からは粒径の大きい粒子が排出され，１段目のスクリーン上に落下する．１段目のスクリーンのメッシュサイズは0.6㎜であり，ここで砂が分級され，分級装置から排出される.

⑧ 貯泥槽の泥水は濁水処理装置に流送され，凝集剤により，フロックと呼ばれる粘土の凝集物を生成させ水と分離させる.

⑨ 生成されたフロックは，スクリュー式脱水機によって脱水された後，粘土として排出され，改良工程に搬送される．脱水された水は再度，津波堆積物の加水・攪拌に利用されるので，全体の処理システムから外部に水は排水されない.

以上の工程により，ゴミ混じり津波堆積物は，ゴミ，砂，粘土に分級される．砂はそのまま復興資材として再利用できる．例えば，液状化対策として用いられるサンドドレーン工法の砂材として使用する．一方，粘土はそのままでは再利用できないので改良が必要である．本試験では，粘土を緑化基盤材として再資源化するため，粘土の改良工程は以下のようになる．

① フロック(粘土)の含水比を計測し，古紙破砕物の添加量を決定する．粘土を緑化基盤材として再資源化するので，古紙の質量：土粒子の乾燥質量比が1：6になるように古紙破砕物の添加量を決める．この比率は著者らの先の研究[3)]で求められた最適混合比率である．
② 上述の計算で決定された量の古紙破砕物を粘土に添加し，撹拌・混合する．
③ 水溶性ポリマーを所定量だけ添加し，撹拌する．水溶性ポリマーは繊維質物質と土粒子を結合させる接着剤の役割を果たす．水溶性ポリマーの添加量はこれまでの研究[3)]にならい1.2kg/m^{3}とする．
④ 生成された土砂を天日乾燥した後，解砕し，篩により粒度を整え，製品とする．

４．実証実験結果および考察

ゴミ混じり波堆積物に加水している様子を写真-3に示す．加水する水の量は任意で構わないが，山積みにされている津波堆積物はかなりの乾燥状態であり，土粒子の団粒化も見られたので，水槽内での撹拌を容易にするため，津波堆積物の量に対して数倍の水量を加水した．水槽内に加水する工程で浮上した比較的大型のゴミを写真-4右に，また撹拌工程で土砂から分離・浮上した木片等の小さなゴミを写真-4左に示す．これらのゴミは前述の通り網ですくい取った．

写真-5に浚渫装置(マジックボール)を示す．実証試験期間中，浚渫自体は特に問題なく，ゴミ混じり津波堆積物中の土砂を円滑に浚渫して分級装置に流送できることが確認された．

上述したように，浚渫土は初めに分級装置の2段



写真-3 津波堆積物に加水している様子



写真-4 水槽内で分離されたゴミ(右：加水時に浮上したゴミ，左：撹拌過程で浮上した木片)

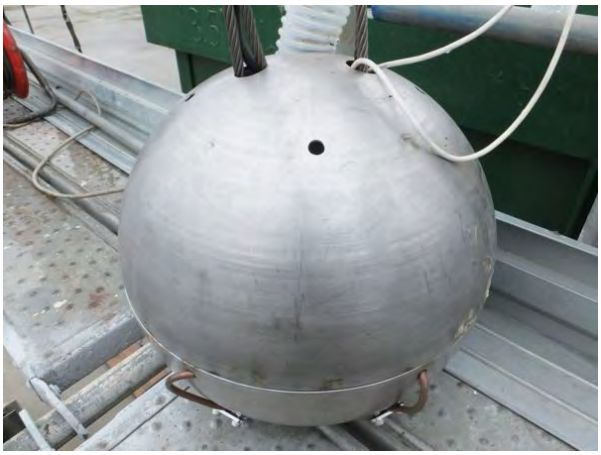


写真-5 浚渫装置(マジックボール)



写真-6 分級された礫や砂(左：2段目スクリーンの礫，右：1段目スクリーンの砂)

目のスクリーンに送られ，礫や撹拌水槽では浮上しなかった小さなゴミが除去される．写真-6左に2段目スクリーンから排出された礫などを示すが，小さな木片に泥が付着したものが礫と一緒に排出されていた．写真-6右には1段目スクリーンから排出された砂を示すが，2段目スクリーンから排出された礫や泥混じりのゴミの量に比べて，約1/10程度の量にとどまった．本来であれば1段目スクリーンから多量な洗い砂を排出させたかったが，想定よりも微量にとどまった原因として，今回の実証試験は小型で簡易な撹拌水槽を使用したため水槽内での撹拌が不十分であったことが考えられる．今回の試験で使用したゴミ混じり津波堆積物は，震災後約2年半を経過し，かなりの乾燥状態になっており，土粒子の団粒化・固結化が見られた．つまり砂粒子の周りに粘土・シルトがこびりついた状態で，加水程度では砂粒子の周りにこびりついた粘土・シルトを剥がすことができなかったためであると推察される．その結果，小さな木片の周りに粘土・シルトだけでなく砂分もこびりつき，見かけ上の粒子径が2mmより大きくなってしまったものは2段目のスクリーンで排出されてしまい，ハイドロサイクロンを経て1段目のスクリーンから排出された砂が当初の想定よりもかなり少なくなってしまったと考えられる．

しかし，東亜建設工業(株)が2012年5月に気仙沼市で実施した津波堆積物の分級試験では，機械式の撹拌装置を用いて強力に土砂撹拌を行い，分級装置を用いて津波堆積物から粘土・シルトがほとんど含まれない状態のクリーンな砂の分級に成功しており[4]，また今回の実証試験でもサンドポンプを用いて水槽内での撹拌を十分に行った際には写真-6右のような砂が得られた．つまり水槽内の撹拌を十分に行えば，粘土・シルトが含まれないクリーンな砂の分級は可能であると考えられる．逆に本実証試験を通してゴミ混じり津波堆積物のような団粒化・固結化が見られる土砂を分級してクリーンな砂を取り出すためには，水槽内の撹拌を十分に行う必要があることが確認された．

砂については，上述したように当初の想定よりも微量な回収量にとどまったので，今回の試験で得られた砂を復興工事現場に提供するまでには至らなかった．そこで，水槽内での撹拌が十分に行われ，クリーンな砂が得られたと仮定した場合，どのような粒度分布になるかを東亜建設工業(株)が2012年5月に気仙沼市で実施した津波堆積物の分級試験[5]から推定した．その結果を図-3に示す．図中にはドレーン砂の適用範囲[6,7]も併せ示してあるが，想定される砂の粒度分布はほぼこの範囲内に入っており，簡易な粒度調整によりドーレン材として十分使用可能であると推察された．

写真-7にスクリュー式脱水機から排出されたフロックを示す．このフロック内には全くゴミは混入しておらず，いわゆるクリーンな粘土状態であった．すなわち，濁水処理・フロック排出は当初の想定通りの結果が得られた．

上述したように，フロックはこのままでは再利用し難いので，本実証試験ではフロックにボンテラン工法を適用し，緑化基盤材として再資源化することにした．本実証試験で得られたフロックの含水比は200%であったので，古紙の乾燥質量：土粒子の乾燥質量が1：6になるように古紙破砕物の添加量を70kg/m^{3}と決定した．写真-8にフロックに古紙破砕物を添加・混合している様子を示す．撹拌が終了した後，水溶性ポリマーを添加しさらに撹拌・混合を行った．写真-9に生成された緑化基盤材を示す．写真-9はポリマーの添加・撹拌を終えた直後の写真であり，実際にはこれを天日乾燥し，解砕して粒度を整えて最終的な緑化基盤材に仕上げる．

ところで，濁水処理工程では凝集剤により粘土の凝集物を生成しているので，新たに水溶性ポリマーを添加する必要はないとも考えられる．そこ

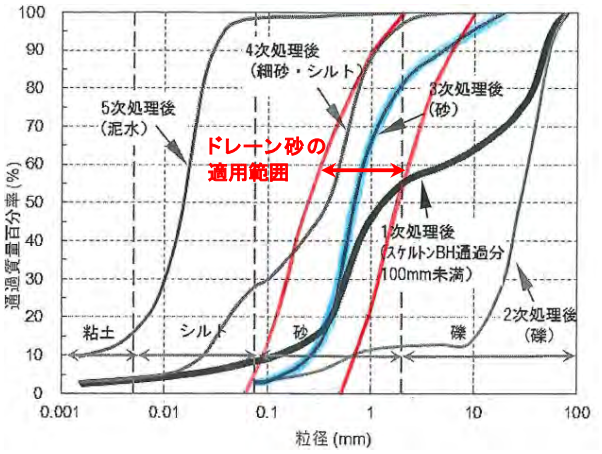


図-3 想定される砂の粒度分布


写真-7 スクリュー式脱水機から排出されたフロック



写真-8 古紙破砕物の添加・混合

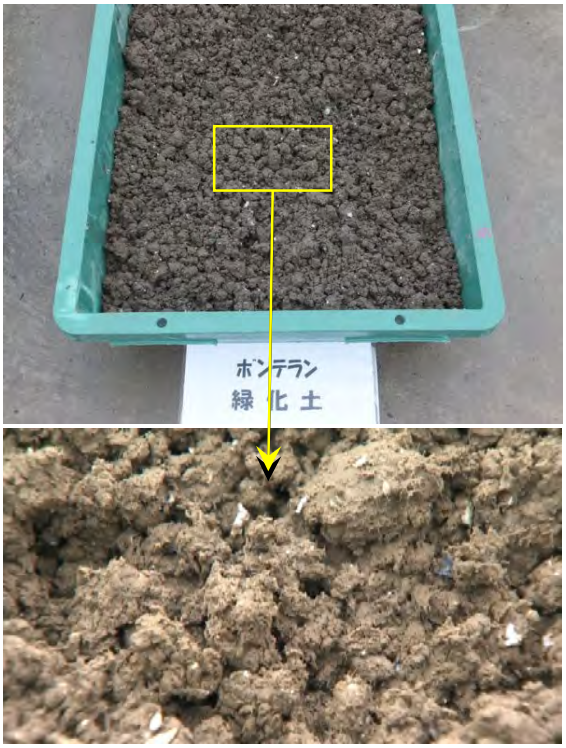


写真-9 生成された緑化基盤材

で，本試験では水溶性ポリマーを添加したものと添加しないものの両方の緑化基盤材を作成し，保水力，軽量性，透水性，保肥力の4つの土壌物理性能を比較した．これらの土壌物理性能は下記の項目で評価した．

- 保水力：pF1.5～3.8における有効水分量
- 軽量性：pF1.5における湿潤比重
- 透水性：透水係数
- 保肥力：塩基置換容量(CEC)

土壌物理性能の目標値は，著者らのこれまでの研究[3)]に従い，以下のように設定した．

- 保水力：100 [Liter/m^3]以上
- 軽量性：1.0[-]以下
- 透水性：1×10^{-3}[cm/s]以上
- 保肥力：6[cmol(+)/kg]以上

表-2 緑化基盤材の土壌物理性能比較

	目標値	ポリマー添加	ポリマー無添加
保水力 [Liter/m^3]	100 以上	143	175
軽量性[-]	1.0 以下	1.17	1.15
透水性 [cm/s]	1×10^{-3} 以上	2×10^{-3}	2.4×10^{-5}
保肥力 [cmol(+)/kg]	6 以上	25.2	30.9

表-2に両者の性能比較を示す．保水力に関しては，ポリマーの添加の有無にかかわらず100[Liter/m^3]の目標値を満足している．保肥力については両者とも目標値を大きく超える極めて高い値を示している．軽量性については，両者とも目標値を満足していないが，目標値に僅かに足らない程度であり，ほぼ満足できる値になっている．大きく異なるのは，透水性であり，ポリマーを添加した緑化材は目標値を満足しているが，無添加の緑化材は目標値を大きく下回っており，透水性が悪く湿害を起こす可能性がある．すなわち，フロックを緑化基盤材に改良するためには，濁水処理工程で添加される凝集剤だけでは不十分であり，改良工程で水溶性ポリマーを添加する必要があることが確認された．

なお，本実証試験で作成した緑化基盤材は，名取市が被災地の地盤を嵩上げする際のイメージとして造成した盛土の一面を緑化する際の基盤材の一部として全量再利用された．写真-10に緑化工事の様子を示す．また写真-11に緑化工事から約1ヶ月後の植生状況を示す．名取市で発生したゴミ混じり津波堆積物を処理して緑化基盤材を作成し，その基盤材を用いて名取市のイメージ盛土を緑化するという，いわゆる廃棄物の地産地消が実現された．今後，被災地のゴミ混じり津波堆積物を有効利用する際の1つの可能性を示すことができたと考えている．



写真-10 緑化工事の様子

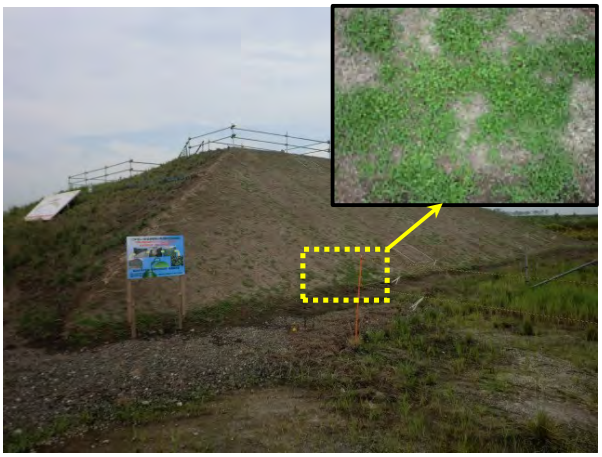


写真-11 緑化工事から1ヶ月後の植生の様子

５．むすび

分級(ソイルセパレータマルチ工法)と改良(ボンテラン工法)を融合することにより，ゴミ混じり津波堆積物からゴミを除去し，土砂を全量再資源化することが可能であることを今回の実証試験により確認した．分級された砂は復興資材として利用可能であり，改良された粘土は緑化基盤材として利用可能である．本工法では，砂のみならず粘土も緑化基盤材として売却可能であるので，トロンメル分級と比較しても経済的な工法であると考えている．

なお，改良工程でセメント系固化材を添加すれば，破壊強度・破壊ひずみが大きく，乾湿繰り返しに対する耐久性が高く，液状化し難い地盤材料を生成することが可能である[8)]．本実証試験の結果を広く発信し，被災地の復旧・復興に貢献して行きたいと考えている．

謝辞

本実証試験は，(一社)東北地域づくり協会 技術開支援＜東日本大震災復興関係＞を受けて実施したことを付記し，謝意を表する．

参考文献

1) 一般社団法人廃棄物資源循環学会，津波堆積物処理指針（案）（平成23年7月5日）．
2) 7月2日付け建設工業新聞(1面)，2013.
3) 山﨑 淳，高橋 弘，金成 英夫，森 雅人：土壌物理特性の観点から見た緑化基盤材の生成に関する実験的研究，J. of MMIJ，Vol.124，No.12，pp.809-817, 2008.
4) 東亜建設工業(株):「津波堆積土砂からのがれき分別と土砂の分級による良質な建設材料の有効利用」総合報告書，pp.3-25～3-31，2012.
5) 居場 博之，御手洗 義夫：ソイルセパレータ・マルチ工法を用いた津波堆積物の有効利用技術，地盤工学会誌，Vol.61，No.7，pp.32-33，2013.
6) パック・ドレーン専業者協会：http://www.packdrain.com/machine/
7) 稲葉 真一，冨谷 昌義，西田 一彦，西形 達明：砕石屑のドレーン材としての適性に関する基礎的研究，土木学会第59回年次学術講演会，pp.967-968, 2004.
8) 高橋 弘：軟弱泥土を高機能性地盤材料に再資源化－ボンテラン工法の原理と特徴－，建設の施工企画，No.757, pp.50-55, 2013.

市街地や構造物近傍での液状化対策を可能とした静的締固め砂杭工法の開発

日本海工株式会社　　○ 篠井　隆之
株式会社熊谷組　　森　　利弘

１．はじめに

比較的緩い砂質地盤に強い地震動が作用すると液状化現象が発生し，構造物に甚大な被害をもたらす。新潟地震，兵庫県南部地震，新潟県中越地震，近年では東北地方太平洋沖地震などにおいても大きな液状化被害が発生している。

液状化を防止する有効な方法のひとつは，緩い砂質地盤を締め固め，密度の増大を図ることであり，その代表的な地盤改良技術が大型振動機を用いて地盤中に締固め砂杭を造成するサンドコンパクションパイル工法（以下、SCP 工法）であった。しかし，近年，市街地や構造物近傍における施工の需要が増加し，前述した振動式の SCP 工法ではこのような現場への適用が困難となり，振動式 SCP 工法と同等の改良効果を有しつつ低振動・低騒音で施工が可能な工法の開発が必要とされた。

本論文では，大型振動機に代えてオーガモーターを使用し低振動・低騒音で施工できる締固め砂杭工法の開発と，実施工における改良効果の検証について報告する。

２．工法概要

2.1　使用機械

写真-1 に施工機械の全景を示す。施工機はクローラ式サンドパイル打機をベースマシンとし，前装備には CP 貫入・引抜用に下部オーガモーター（45kW×2），CP 管内の改良材排出・締固め用に上部オーガモーター（90kW×1），その下部に CP（φ508mm）が装備され，先端部には上部オーガモーターと鋼管で接続されたインナースクリューを有する。CP の貫入・引抜には施工機の油圧ウインチにより貫入・引抜方向の張力をワイヤーを介して付与する構造としている。

2.2　造成メカニズム

締固め砂杭は，規定深度まで CP を貫入後，CP 内に充填した改良材を CP 内部に設置されたインナースクリューの回転により地盤中に強制排出することで造成する。なお，改良材については砂・スラグ・再生砕石（RC-40）・再生砂など多様な材料が使用可能である。

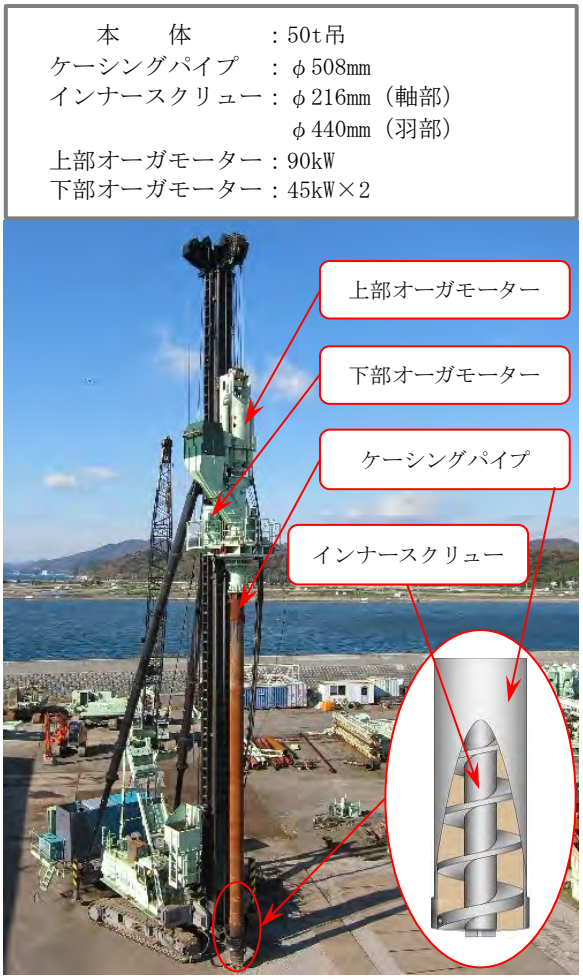


写真-1　施工機械全景

造成メカニズムの概要を図-1 に示す。まず CP 内に充填された改良材はインナースクリューの回転により強制的に地盤中に排出・拡径締固めされる。この排出を確認しつつ CP を回転させながら引抜を開始する。インナースクリューと CP は独立駆動しているため，③の最終締固め時には状況に応

じて CP の回転を停止させることで回転の相対速度に変化を与え，改良材の排出効果を高める。造成時における改良材の排出量は，CP 上部に設置したレーザー距離計で管内砂面を計測し，常時管理しながら締固め砂杭を造成する。

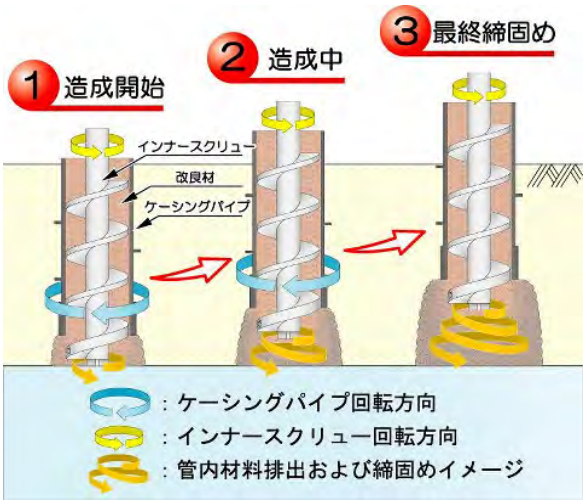


図-1　締固め砂杭造成メカニズム概要

2.3　施工手順

施工手順の模式図を図-2 に示す。まず CP をあらかじめ測量した打設位置に誘導し，原地盤の混入防止として CP 内に改良材を充填した後，CP を回転させながら規定深度まで貫入する。

図中①～③の工程は締固め砂杭 1m の造成を示すもので，その詳細は前項の図-1 に示したとおりである。杭頭深度までの造成は上述した①～③の工程を繰返すこと，つまり図中の STEP 施工部分により造成される。この間，CP 内にある改良材は材料面検出用のレーザー距離計によって常時計測されており，1m の造成に対して改良材の不足が生じる場合は事前に CP 内へ改良材を補給する。

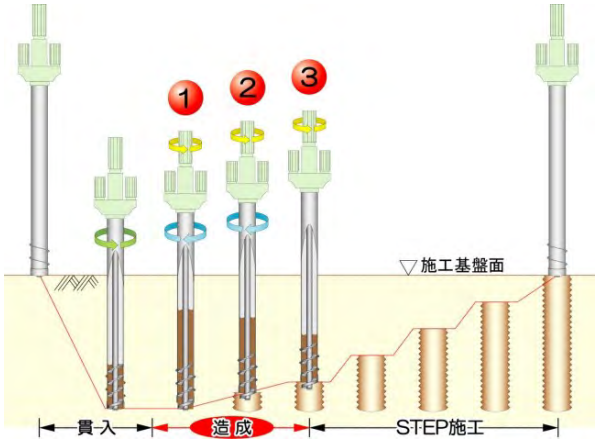


図-2　施工手順の模式図

2.4　施工管理

施工は CP 先端深度と CP 内材料面高さの計測に基づいた締固め砂杭造成 1m ごとの材料使用量について管理する。CP 先端深度の計測は CP 移動記録用ワイヤーを介したセルシン変換機により，CP 内材料面高さの計測は CP 上部に設置したレーザー距離計により計測する。

写真-2 にレーザー距離計を示す。通常、SCP 工法における CP 内の材料面の変動は CP 上部より吊り下げた重錘を上下させることで計測するが，機構上，トラブルが発生しやすい。一方，本工法で使用するレーザー距離計は CP 上部から材料面にレーザーを照射し，その反射光を検出することで材料面の変動を計測するため，上述した重錘による計測で発生するトラブルは皆無である。また，施工中の材料面計測時における重錘の上下操作が必要ないなどの利点がある。

計測された CP 先端深度と CP 内材料面の変動は操作室の施工管理システムで処理され，その状況はオペレーションモニターに表示される。この情報を基に造成した締固め砂杭のデータは施工管理システムに記録され，オシログラフの施工記録データの基となる。写真-3 にオペレーションモニターを示す。



写真-2　レーザー距離計概要



写真-3　オペレーションモニター

３．実施工における検証

本工法が従来の振動式 SCP 工法と同等の改良効果を有することの検証として，施工後における締固め砂杭の出来形および砂杭間における地盤強度の増加の確認を行った。また，開発目的である低振動・低騒音の地盤改良工法であることの検証として振動・騒音計測を行い，振動式 SCP 工法と比較した。

3.1　出来形確認

写真-4 に出来形平面および断面を示す。地表面から 2.5m の深度（GL-2.5m）まで地盤を掘削して形状を確認したところ，平面・断面共に設計径である φ700mm を確保していることが分かった。

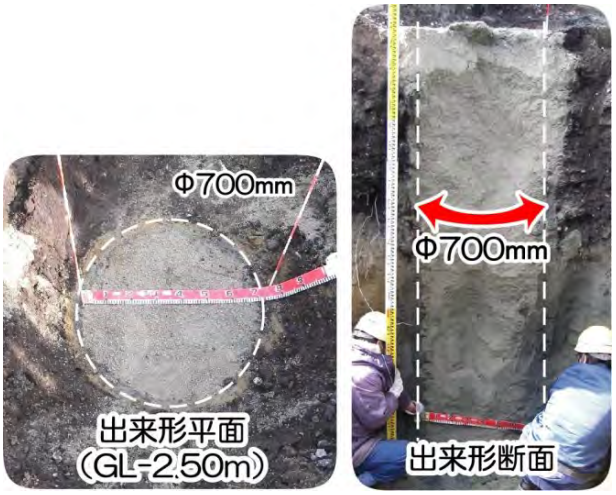


写真-4　出来形平面および断面

3.2　地盤強度増加の確認

本工法で造成される締固め砂杭は振動式 SCP 工法と造成杭径が同径であり，材料使用量についても差異がないため，振動式 SCP 工法と同等の締固め砂杭が造成されると考えられる。しかし，造成メカニズムが異なるため，改良効果の検証として原地盤の細粒分含有率（F_c）ごとに分類した杭間強度の比較を行った。

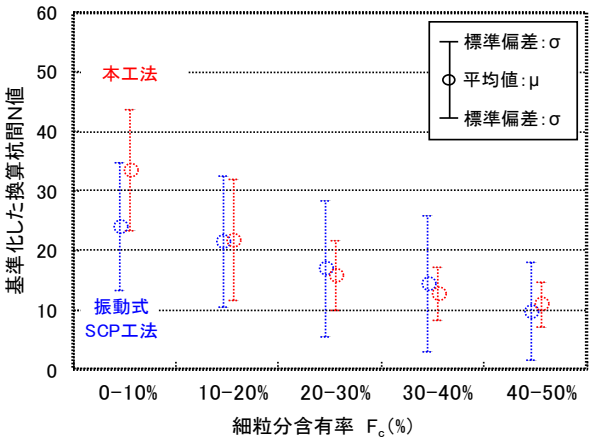


図-3　杭間強度比較

図-3 は参考文献[1]中にある F_c が杭間 N 値に及ぼす影響を示した図に本工法の施工実績を加筆したもので、横軸に F_c，縦軸は式(1)に示すように有効上載圧（σ'_v）によって基準化した杭間 N 値（N_1）を用いている。

$$N_1=167\cdot N/(69+\sigma'_v)\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(1)$$

ここで

N_1　：基準化した N 値
N　：N 値
σ'_v　：有効上載圧（kN/m^2）

図-3 より，F_c に関係なく振動式 SCP 工法とほぼ同じ杭間 N 値が得られており，振動式 SCP 工法と同等の改良効果が得られていることが分かった。

3.3　振動・騒音の計測

図-4 に振動式 SCP 工法と本工法との振動レベルの比較，また，図-5 に騒音レベルの比較を示す。

振動・騒音レベルは，ともに振動式 SCP 工法を大きく下回り，振動レベルにおいては施工機の CP 貫入地点より 2m，騒音レベルについては 5m の地点においても特定建設作業規制基準の規制値を下回ることが確認できた。

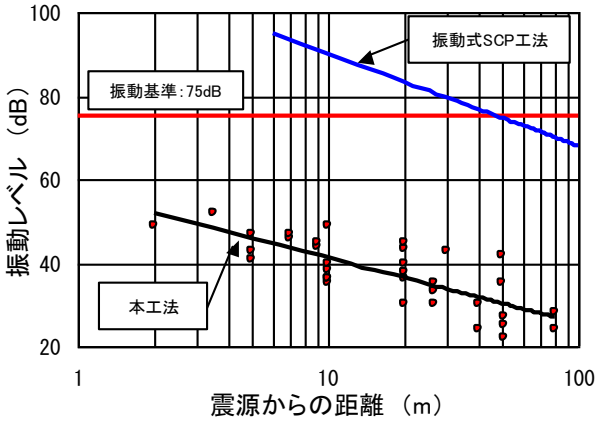


図-4　振動レベル比較

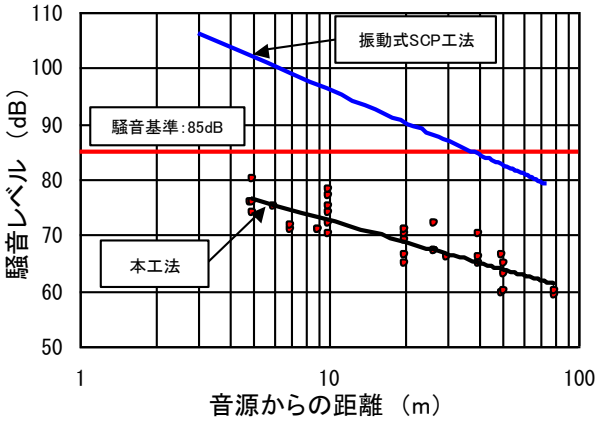


図-5　騒音レベル比較

４．設計法

施工に先立ち，地盤中または地盤上に構築される各種構造物に応じた要求性能を満足する地盤改良仕様を設計する必要がある。

改良効果の推定方法として地盤の F_c を考慮した設計法（方法 C）が長く使用されてきたが，近年では SCP 施工に伴う地盤の体積変化も考慮した方法 D[2)]も建築および土木分野で広く使用されるようになっている。本報告では本工法の両設計法に対する適用性を検証した。

4.1　方法 C および方法 D

地盤改良の推定方法として一般的に使用されてきた方法 C は，地盤改良後推定 N 値を改良前 N 値，F_c，置換率（a_s）から推定しており，砂杭の施工後に地盤の盛り上がりが発生しないことを前提としているが，方法 D では砂杭施工後の地盤の盛り上がりを考慮し，その盛上り土量を地盤の F_c と関連付けることで改良後地盤の間隙比および相対密度について評価する設計法である。図-6 に両設計法における地盤間隙比の考え方を示す。

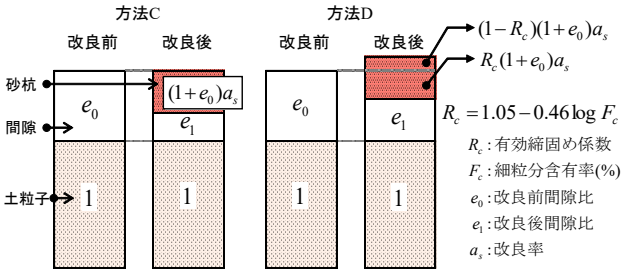


図-6　改良後における地盤間隙比の考え方

4.2　実施工との比較

図-7 に施工後の標準貫入試験による杭間 N 値およびオートラムサウンディング試験による換算杭間 N 値と，方法 C による計算杭間 N 値との比較，図-8 に方法 D による計算杭間 N 値との比較を示す。全体的に方法 D による計算 N 値が方法 C の計算 N 値に対して若干大きな値を示しているが，両設計法による計算 N 値と実測値がほぼ 45 度線上にプロットされており，両設計法が本工法に適用可能であることが分かった。

５．おわりに

本工法は振動式 SCP 工法と比較して施工実績が乏しく，データ量も十分とは言えない。今後は幅広い分野で施工実績を積み重ね，各種データの収集・分析を行うことで本工法を成熟させたいと考える。

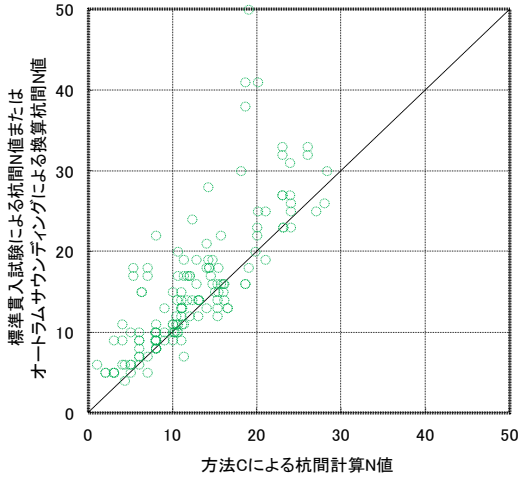


図-7　方法 C による設計値と
実施工後試験値による杭間強度比較

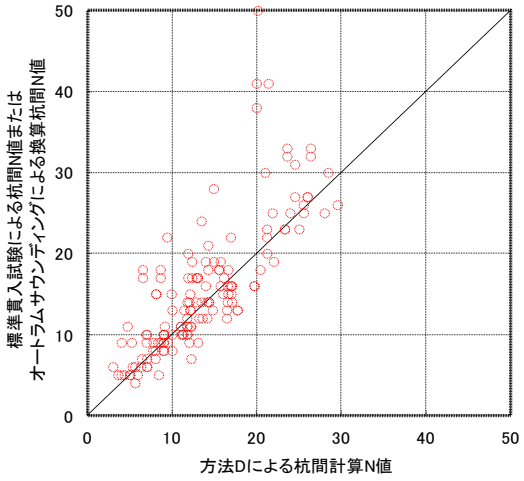


図-8　方法 D による設計値と
実施工後試験値による杭間強度比較

参考文献

1) 原田健二、石田英毅；大地震における建築構造物の締固めによる直接基礎改良地盤の評価に関する実証的研究（実務に見る地盤改良工法の技術的諸問題（社団法人日本建築学会）pp. 93～98　1999))

2) 打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法設計・施工マニュアル（社団法人地盤工学会　pp. 96～101　2009)

放射性底泥除去システムの開発

東亜建設工業㈱　　泉　信也
○　松島　弘樹

１．はじめに

福島第一原子力発電所事故により、放射性物質を含有する土砂が各地の水域に堆積し、その除去が復旧・復興作業の課題の一つとなっている。

水域での放射能汚染については、対応方針や除去基準が明確に策定されておらず、現状ではほとんど未着手となっているが、陸域の汚染物質は降雨などにより、やがては水域に移行し、最終的には水域の底泥に集積される。水域が農業用ため池であれば耕作地の再汚染に、漁場（湖や海域）であれば採餌を通じて魚類の汚染につながることが懸念される。

このような汚染の拡散を防止するためには、水域に集積した汚染底泥を除去することが最も効果的と考え、汚染底泥除去システムを考案し、福島県内のため池で実証実験を行ったので以下に報告する。

２．事前調査

本実験に先立ち、実施箇所の農業用ため池の汚染状況を調査・確認した。

事前調査の結果、ため池底質の放射性セシウムは**図-1** に示す通り、底泥の表層部分（厚さ約 10cm）に最大 5,300 Bq/kg（乾泥）、水と底泥の間に位置する浮泥層に最大 12,100 Bq/kg（乾泥）と、上層ほど高濃度で存在することが確認された。また、ため池の面積 660m2 中に堆積している放射線量の総量は約 6,500 万 Bq と推定された。

以上より、厚さ 10cm 程度の底泥除去が可能な施工システムを検討・開発・導入することとした。

３．汚染底泥除去システムの概要

ため池などでは貯水を排水して、陸上建設機械で底泥を除去する方法（ドライ施工）も考えられるが、この方法では高濃度に汚染されている表層泥や浮泥が流出・拡散し周辺域を再汚染する可能性が懸念される。そこで、次の 3 つの着眼点から効率的な汚染底泥の除去技術を考案・実用化した。

①薄層の除去：必要以上に底泥を除去すると最終的に処理する土量が多くなってしまう
②濁り発生抑制：除去時に濁りが発生すると効率的に底泥の除去ができないばかりか、底泥に堆積したセシウムが再拡散してしまう
③除去土砂の減容化：除去した底泥の脱水による減容化が不十分だと、最終的に処理する土量が多くなってしまう

上記を勘案して、汚染底泥を薄層で浚渫除去でき、減容化が可能な底泥除去システムを考案・開発した。本システムは以下の要素技術・装置から構成される。

（１）底泥除去装置マジックボール（薄層浚渫対応）

マジックボールは、ダムや調整池・貯水池等に堆積した土砂を除去するために開発された球体型の浚渫装置である（平成 21 年 3 月開発）。本研究では、浮泥や底泥を低汚濁かつ薄層で浚渫除去可能とするため、**図-2** に示すような釣鐘型の装置に改良した。

本装置は、釣鐘型の底部に、底泥に切れ目を入れ、なおかつ水ジェット噴射により吸入口に向かう水流を形成させるための整流板を装着することにより、粘性土や浮泥の濁りを発生させずに吸入・除去できるような設計とした。（**図-3**）

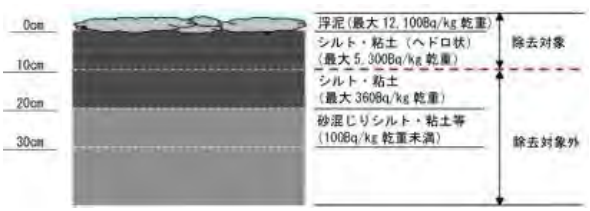


図-1　ため池底泥の汚染状況調査結果

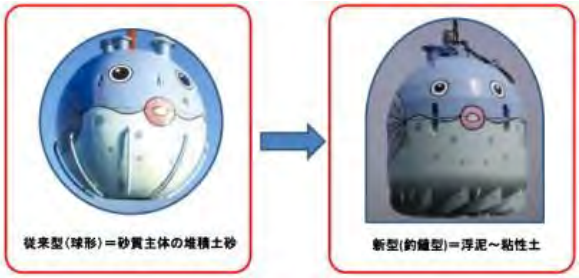


図-2　底泥除去装置マジックボールの改造

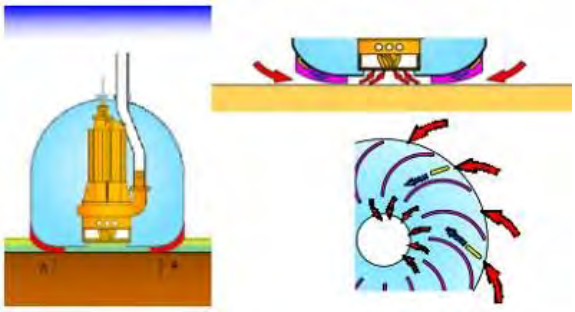


図-3　釣鐘型マジックボールの水流効果

施工システムとしては台船（3.5m×3.4m）に、マジックボールを艤装し、ウインチによるマジックボールの上下および位置の決定をしている。また、台船上には施工管理用の GPS や音響測深器を装備している。(**写真-1**)



写真-1　台船上に搭載した底泥除去装置



図-4　底泥除去イメージ

（２）固液分離・脱水システム

セシウム等の放射性物質は、細粒分に付着して沈殿することが知られているため、本実験では、汚染底泥の最終的な処分量を低減するため、凝集剤による固液分離によって、除去した土砂の減容化が可能なシステムを導入した。

前述の底泥除去装置では、底泥除去時に土砂とともに水も取り込み、処理設備へ送られるものは泥水状態となるため、本実験では泥水処理設備を使用して固液分離し、生成されたフロックを簡易的に脱水することで減容化処理を行った。(**写真-2**)



写真-2　固液分離・脱水プラント

（３）袋詰・運搬・仮置き

脱水処理後のフロック（放射性物質含有底泥）をフレキシブルコンテナに詰込み、借置場（一時）へ運搬・仮置きし、その後本仮置場へと運搬した。

本実験で袋詰したフレキシブルコンテナの総数は 54 袋であった。



写真-3　袋詰状況

３．評価項目・方法

底泥除去による成果確認として実証実験中に行った概要を**表-1** に示す

表-1　測定項目

測定項目		頻度
底泥除去工	出来形（水深）	事前、事後
処理工	重量	1回/フレキシブルコンテナ1袋
	放射性物質濃度	1回/フレキシブルコンテナ5袋
	湿潤密度、含水比	
排水	濁度・pH・水温	2回/日
	放射性物質濃度	1回/週
事後調査	放射性物質濃度	事後

４．結果

実証実験を実施するため池の形状は**図-5** の通り。ため池は 49m×43m の台形状であり、全体面積約 900m² のうち支障物を除いた作業可能範囲の面積は約 660m² であった。水深は 1.7m～2.4m 程度であった。



図-5　施工範囲図

表-2 に示す通り、調査位置における底泥除去の平均層厚は 14cm 程度であり（最大 23cm、最小 8cm）、設定した表層から 10cm までの深さの底泥を概ね除去できた。

また、表-3 に示す通り 74m³ の底泥を除去しており、計画数量の 66m³ 以上を除去することができた。

袋詰めしたフロック（放射性物質含有底泥）をフレキシブルコンテナごとに測定した重量を**表-4** に示す。

袋詰めしたフロックの総重量（処理土量）は約 50t であった。

袋詰めしたフロック（放射性物質含有底泥）の物性（湿潤密度・含水比）および放射性物質濃度を**表-5** に示す。

以上より、処理土量と放射性物質平均濃度からため池より除去した放射性物質量を算出した。

除去放射性物質量は下式により約 5,712 万 Bq であった。

処理土量　50,061kg
　　×放射性物質平均濃度　1,141Bq/kg
＝除去放射性物質量　57,119,601 Bq

表-2　水深比較表

（単位：m）

st	事前水深	事後水深	差	備考
1	−2.25	−2.38	0.13	
2	−2.28	−2.36	0.08	最小
3	−1.80	−1.90	0.10	
4	−2.18	−2.40	0.22	
5	−2.40	−2.54	0.14	
6	−2.31	−2.49	0.18	
7	−2.07	−2.20	0.13	
8	−2.16	−2.26	0.10	
9	−1.98	−2.08	0.10	
10	−1.84	−1.99	0.15	
11	−1.68	−1.91	0.23	最大
		平均	0.14	

表-3　底泥除去体積計算表

測線	測線間距離	断面積	平均断面積	測線間体積
6.7				
10	3.30	3.29	1.65	5.43
15	5.00	2.83	3.06	15.30
20	5.00	2.84	2.84	14.18
25	5.00	2.25	2.55	12.73
30	5.00	1.84	2.05	10.23
35	5.00	1.76	1.80	9.00
40	5.00	1.10	1.43	7.15
41.4	1.40	0	0.55	0.77
			合計	74.77

表-4　底泥袋詰重量一覧

No.	重量(kg)	No.	重量(kg)	No.	重量(kg)	No.	重量(kg)
5	768	19	1,060	33	976	47	732
6	827	20	684	34	1,082	48	901
7	736	21	1,013	35	1,160	49	980
8	688	22	1,020	36	820	50	890
9	1,087	23	937	37	1,098	51	867
10	681	24	933	38	983	52	926
11	732	25	995	39	695	53	1,072
12	805	26	890	40	1,063	54	1,008
13	811	27	1,055	41	1,015	55	1,020
14	1,042	28	878	42	766	56	1,005
15	859	29	958	43	925	57	1,008
16	1,125	30	980	44	805	58	1,032
17	964	31	979	45	980		
18	1,025	32	821	46	899		
						合計	50,061

表-5　底泥の物性・放射性物質濃度一覧表

No.	湿潤密度	含水比	放射性セシウム濃度	
	(g/cm3)	(%)	(Bq/kg湿)	(Bq/kg乾)
6	1.13	229.6	850	2,700
11	1.13	255.0	950	3,300
15	1.09	271.3	1,300	4,700
20	1.14	253.7	1,160	4,000
25	1.11	225.8	1,050	3,400
30	1.08	203.6	1,770	5,400
35	1.15	180.0	1,080	3,000
40	1.17	194.0	1,100	3,100
45	1.13	208.4	1,250	3,800
50	1.13	191.5	900	2,600
平均	1.126	221.3	1,141	3,600

５．まとめ

底泥除去装置マジックボールでは、ジェットポンプの使用の有無による濁りの拡散を目視確認したが、台船上からは濁りの発生は視認できず（ため池の平均水深約 2m)、ジェットポンプの使用の有無にかかわらず濁りの発生はほとんど無かった。

また、固液分離・脱水後の排水からセシウムは検出されず（検出限界 1Bq/kg で測定)、安全かつ効率的な汚染底泥の減容化が可能であることを確認できた。

本実証実験によって除去した汚染底泥の質量は、脱水後で約 50t となり、その中に含まれる平均放射線量は 3,600Bq/kg（乾泥）であった。

また、除去放射線総量は約 5,700 万 Bq となり、ため池中に堆積していた放射線量（前述約 6,500 万 Bq）の約 88%に相当する放射線量を除去することができた。

その一方で、マジックボール単体による薄層浚渫では、１ヶ所あたりの浚渫時間が数分から 10 数分程度と短く、頻繁な移動を余儀なくされることから、今後さらに広範な水域への適用も考えると、１ヶ所あたりの施工能力（施工面積）を向上させる必要がある。例えば図-6 のように複数のマジックボールを連結することも検討しており、模型実験によって４連型でも単体と比べて能率低減がないことは確認している。[1)]

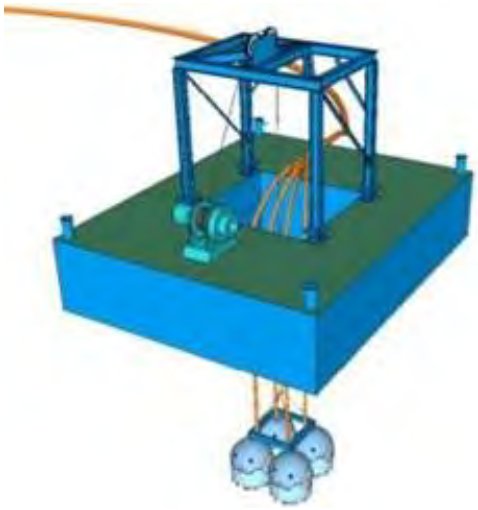


図-6　複数連結型（４連式）マジックボール

６．おわりに

今回の研究では、福島県内のため池での汚染底泥除去システムの現場実証実験を経て、底泥除去装置模型に改良を施し、マジックボールの形状や連結方法、ジェットや整流板の有無、土質の差違などによる掘削能力変化を確認したが、今後その知見を元に、実際の水域での実証実験にも改めて取り組みたい。

また、マジックボール型だけではなく、バックホウやクレーンなどの車輌系建設機械、あるいは小型ポンプ船や高濃度軟泥浚渫船など既存の浚渫船と組み合わせることのできる新たなアタッチメントなども考案・開発し、実際の水域で効率的に汚染底泥除去が可能なシステムを開発していければと思う。

最後になりますが、現場実証実験に際してご指導・ご協力いただいた福島大学をはじめ、関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

1) 泉　信也：汚染底泥除去システムに関する研究開発，作業船，No.312，pp.31-34，2013.

既存施設直下地盤の液状化対策

― 長距離に対応した曲り削孔システム ―

東亜建設工業株式会社　　○ 大野　康年
同　上　　泉　信也

１．はじめに

近年，コンビナート港湾の強靭化等，既存施設の耐震補強が求められている。既存施設の耐震補強として施設の直下および周辺地盤の地盤改良による補強が挙げられるが，これらの施設は供用中であるとともに施設の周辺が狭隘であるため，従来の地盤改良工法では適用が難しい。

本文で紹介する液状化対策工法[1)]は，恒久型薬液を用いた薬液注入工法の一つである。同工法は，**図-1** に示すようにコンビナート港湾等の狭隘な条件下では，200m 以上離れた場所から既存施設直下の地盤改良が可能な長距離曲り削孔システムを有する。

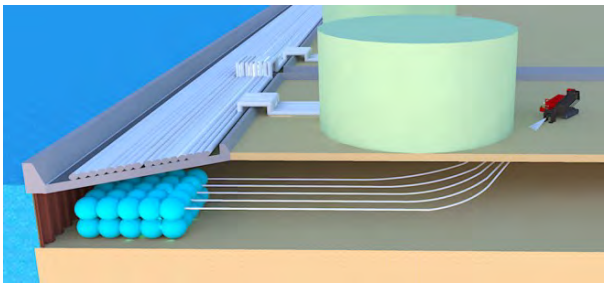


図-1　本工法の適用イメージ

本文では，工法概要と曲り削孔性能を確認した現地試験結果について紹介する。

２．工法概要[1),2)]

2.1　概　要

本工法は，ボーリングマシンにて地盤を削孔し，長期耐久性を有する恒久型薬液を地盤に注入し，固結させることで地盤強度を増大させる。

施工設備は，削孔機，薬液注入ポンプ，配合プラント，管理装置等により構成され，非常にコンパクトである。また，既存施設直下地盤の改良が可能で，しかもその稼働を止めることなく施工を行うことができる。

同工法は，2008 年に開発されて以来，2013 年 6 月末で 38 件の施工実績がある。その内訳は，液状化対策 26 件，岸壁・護岸裏埋土砂の吸出し対策：8 件，止水対策 2 件，土圧軽減対策 1 件およびすべり対策 1 件である。また，液状化対策では，岸壁・護岸，タンク基礎，河川堤防，工場建屋他の実績ある。

2.2　施工手順

本工法の施工手順を以下の(1)～(3)に示す。

(1) 削　孔（図-2 (a)）

削孔は，ケーシングロッドを回転圧入することで直線削孔する。曲げる場合は、回転を止めてケーシングロッドを圧入することにより削孔ビッドの修正版（テーパー）が地山を反力として方法修正する。なお，削孔軌道の計測は，ビーコン型計測器および小型ジャイロセンサを用いている。

(2) 注入用外管挿入（図-2 (b)）

削孔終了後，ケーシングロッド内に注入管を挿入してケーシングを引き抜く。この時，注入管先端に装着されたアンカーを展張設置することでケーシング引抜き時の注入管の共上がりを防止する。

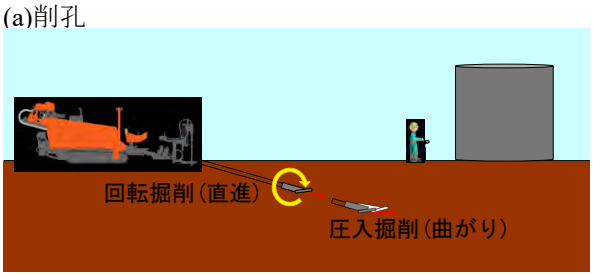
(3) 薬液注入（図-2 (c)）

薬液注入は，注入時の削孔軌道に沿った薬液逸走を防止するため，まず注入口の上部に配置されたゴム製バルーン部に 20 秒以内でゲル化する特殊水ガラスを充填してバルーンを膨張させる。その後，注入口より低圧で割裂を伴わない浸透形態にて薬液を地盤に注入する。

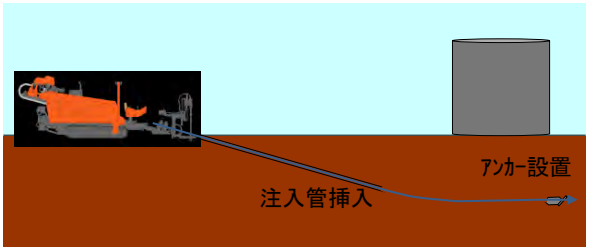
2.3　使用機械

本工法における曲り削孔システムは，曲り削孔機，削孔管理システム，計測装置（小型ジャイロセンサ，ビーコン型計測器），注入管挿入装置および送水ユニットにより構成される。同機の削孔能力は，押込み力，引抜き力が 178kN を有し，削孔可能な地盤種別は砂礫，砂および粘土である。曲り削孔機，削孔管理システムを**写真-1, 2** に示す。

(a)削孔



(b)注入管挿入



(c)薬液注入

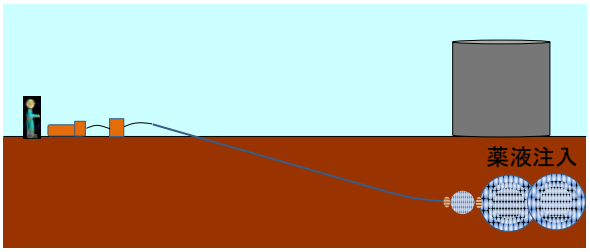


図-2　施工手順（曲がり削孔システム）



写真-1　曲り削孔機

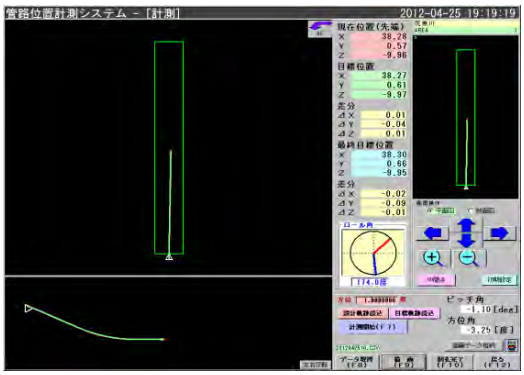


写真-2　曲り削孔管理システム

３．曲り削孔システムの特長

本工法における曲り削孔システムは，1)ロッド先端に取り付ける削孔ビット形状の改良による土壌とケーシングとの摩擦低減，2)粘り強い特殊鋼をケーシングロッドに用いることによる耐久性向上および 3)小型ジャイロシステムの精度向上を行うことで，従来の 2 倍となる 200m の長距離削孔を高精度で実現している。

ケーシングロッドの耐久性については，ロッドを R=30m にて曲げたまま長時間回転させ、発生する最大応力を測定し，その耐久性を確認している。

従来のジャイロシステムを適用する場合，計測中に削孔ロッドの内径とジャイロセンサプローブ径の差が変化することで，削孔ロッド内でジャイロセンサプローブの姿勢が安定せず偏角 θ が生じてしまい，ジャイロの精度に影響を与えていると考えられる（**図-3** 参照）。本システムでは，**図-4** に示すようにジャイロセンサプローブの前後にアタッチメントを装着することで計測中のジャイロセンサプローブが常時ロッドの中心に保持させている。これにより，偏角 θ を極限まで減らすことで測定精度の向上を図っている。

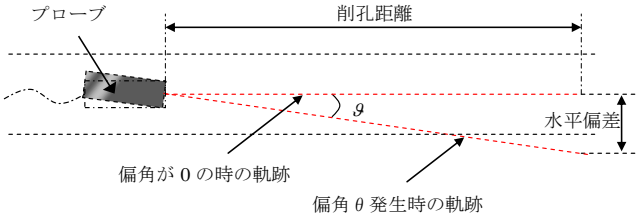


図-3　ジャイロセンサの誤差原因

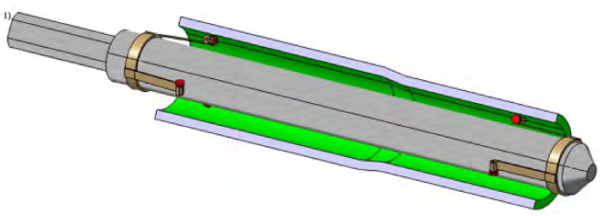


図-4　ジャイロセンサプローブアタッチメント

４．曲り削孔性能確認試験

本試験は，本工法の曲り削孔システムの実地盤への適用性を確認する目的で 200m の曲り削孔を実施し，削孔時の削孔能力と削孔精度を確認した。

4.1　試験サイトの概要

試験サイトは，山口県下関市内の埋立て地盤で，地層は，地表面から GL-1.80m まで盛土，その下部にN値5～10の細砂層と粘土層が互層に分布する。地下水位は GL-2.10m である。**図-5** に柱状図と N 値を示す。

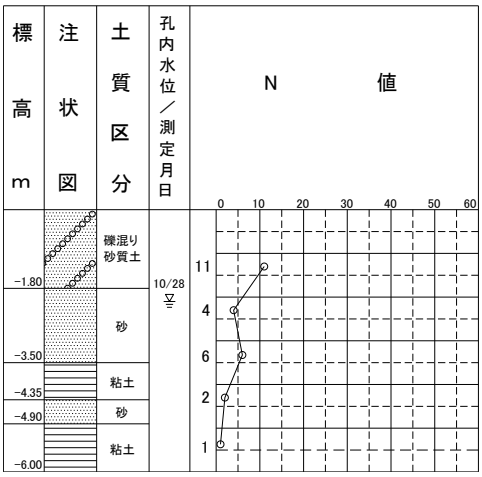


図-5　柱状図と N 値

4.2　試験内容

試験は，削孔長，削孔深度および曲り回数を変えて削孔を行った。削孔軌道は小型ジャイロセンサおよびビーコン型測定器にて計測し，計画軌道に誘導しながら削孔を行った。**表-1** に試験ケース，**図-6** に削孔平面図を示す。

表-2　試験ケース

ケース	入射角	削孔長	深度	曲り回数
1	10°	100m	-1.5m	1回(鉛直)
2	10°	200m	-4.0m	2回(鉛直)
3	10°	200m	-4.0m	3回(鉛直2, 水平1)

試験は，削孔終了後，注入管を地中に設置し，削孔到達箇所にて削孔先端部（アンカー）を発掘することで削孔位置の精度確認を行った。

写真-3 および **写真-4** に試験時における小型ジャイロセンサおよびビーコン型測定器の計測状況を示す。

4.3　試験結果

試験ケース 2, 3 における削孔軌道の計測結果（実測値）と計画軌道との比較を**図-7** (a), (b) に示す。削孔軌道は小型ジャイロセンサおよびビーコン型測定器にて計測したものである。

図-7 (a), (b) より，削孔軌道は、計画軌道に対し、30cm 以内で誘導出来ていることがわかる。

試験ケース 2,3 における削孔先端部の発掘写真を**写真-5** (a), (b) に示す。

削孔先端部位置は，小型ジャイロセンサおよびビーコン型測定器による軌道計測結果と同様に，計画位置に対し，30cm 以内位置に存在している。

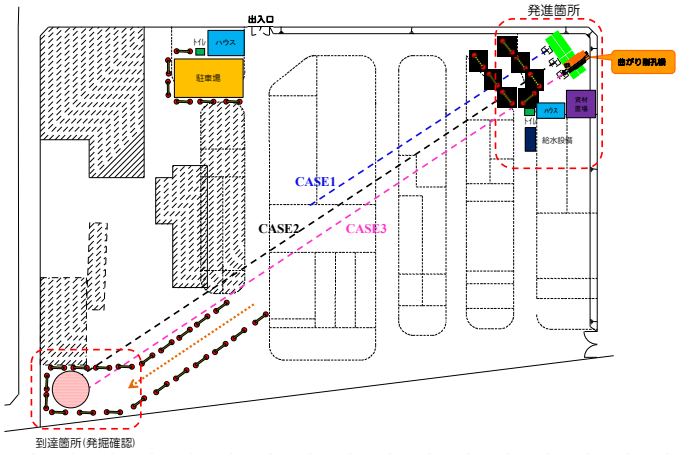


図-6　削孔平面図

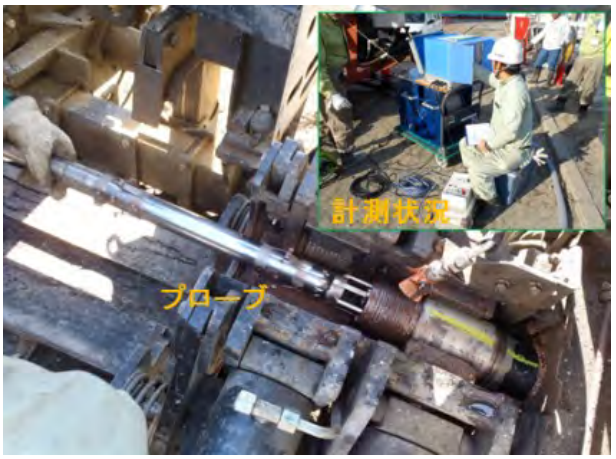


写真-3　小型ジャイロセンサ計測状況



写真-4　ビーコン型測定器計測状況

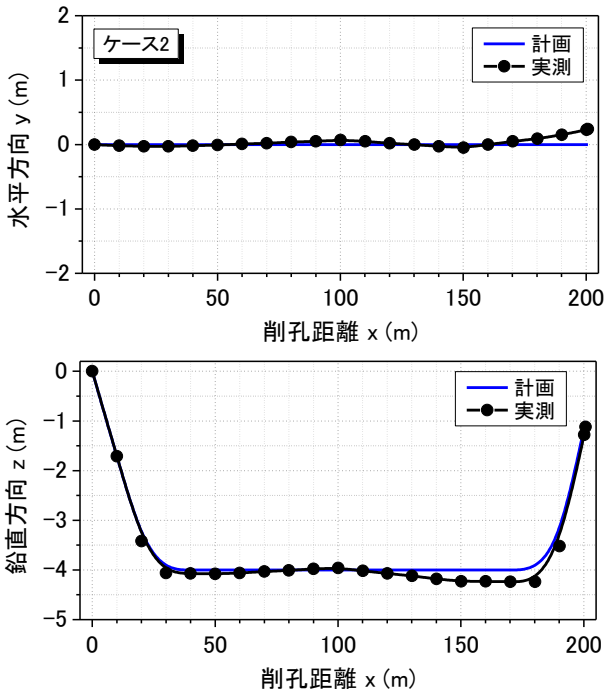


図-7(a)　削孔軌道測定結果(ケース 2)

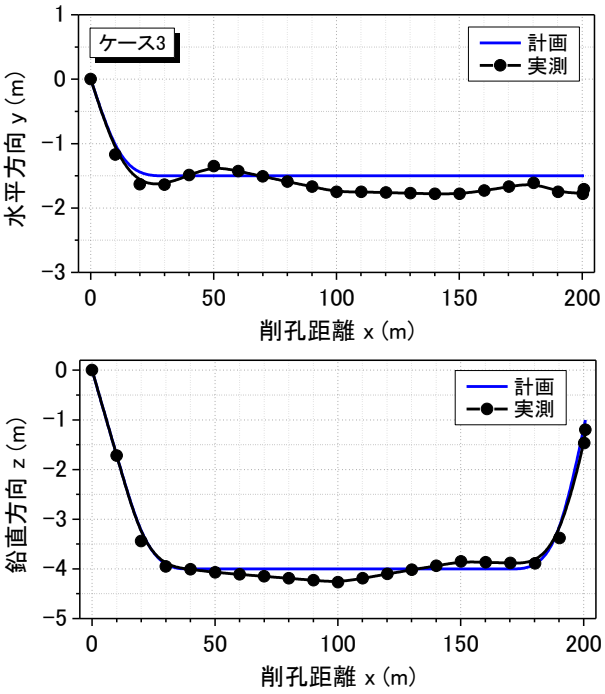


図-7(b)　削孔軌道測定結果(ケース 3)



写真-5(a)　削孔先端部の発掘写真(ケース 2)



写真-5(b)　削孔先端部の発掘写真(ケース 3)

５．おわりに

既存施設地盤の液状化対策が可能な液状化対策工法の曲り削孔システムの概要，特長および現地性能試験結果について紹介した。

本工法は、200m 離れた箇所から曲がり削孔が可能な削孔技術を有し，供用中のコンビナート港湾の耐震化および空港滑走路の液状化対策等に有効な工法である。

今後は，現行基準を満足しない既存の岸壁・護岸，河川・海岸堤防，地下埋設物等の液状化対策，側方流動対策等に提案していきたいと考えている。

参考文献

1) 大野康年：恒久型薬液を用いた注入固化工法の開発と適用例，土木学会土木建設技術発表会講演集Ⅲ-4，pp.181-186，2009.
2) 大野康年：薬液の逸走防止性能を向上させた薬液注入固化工法，地盤工学会誌，Vol.59 No.3 Ser.No.638，pp28～29, 2011.

(2013. 8. 22受付)

第４世代無人化施工の緊急対策工事への適用

超長距離遠隔操作実証実験から北股斜面崩壊災害復旧工事適用へ

(株)熊谷組土木事業本部機材部　　北原　成郎
(株)熊谷組土木事業本部機材部○ 坂西　孝仁

１．はじめに

これまで様々な緊急災害現場に対応していくため，無人化施工システムの新たな技術開発を行いステップアップをしてきた．無人化施工の適用範囲を広げる第４世代ネットワーク型無人化施工技術は国土交通省で実施された「超長距離からの遠隔操作実証実験」結果を参考に，北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事，赤松谷川11号床固工工事で使用し現場導入しながら開発を進めている．その開発と課題へのアプローチを紹介し，今後の課題と展望について述べる．

２．第４世代無人化施工とは

2.1　無人化施工の変遷

無人化施工は，人間が立ち入ることができない危険な作業現場において，遠隔操作が可能な建設機械を使用し，作業を行うことである．

当社では雲仙普賢岳の除石工事，砂防えん堤工事を皮切りに有珠山復旧工事，荒砥沢治山工事，南大隅町災害復旧工事，赤松谷川床固工工事等の無人化施工に従事してきた．こうした中で無人化施工技術は徐々にブラシュアップされて来た．

この発展の歴史を大きく分けて次の４世代に分類してみた．(図-1)

(1) 第１世代　建設機械へ遠隔操作の導入

80年代後半に遠隔で操作できる建設機械が登場した．特定小電力無線を使用して30m程度の範囲から操作できる水中ブルドーザや，遠隔操作式油圧ショベル等が登場した．

(2) 第２世代　長距離遠隔操作技術の確立

特定小電力無線が届かない300m以上の距離から建設機械を遠隔操作する技術が確立された．無線中継機等を使用し映像カメラを作業エリアに設置して，操作室でモニターしながら遠隔操作する現在のスタイルが確立された．

(3) 第３世代　情報化施工の導入

無人化施工では丁張りレスを目的としてＧＮＳＳ等を使用した情報化施工がいち早く導入された．振動ローラの転圧回数管理，ブルドーザの排土板制御や油圧ショベルのマシンガイダンスシステム等である．こうした技術は雲仙普賢岳の災害復旧工事を中心に開発され，盛土やＲＣＣコンクリートの施工精度向上とオペレータの負担の軽減や作業効率の向上に貢献した．

(4) 第４世代　ネットワーク技術の導入

これまでの無人化施工で使用される操作系，映像系，情報系(情報化施工データ)データはアナログやデジタル機器が混在した状態で，それぞれ個別の無線機で伝送をしていた．ネットワーク型無人施工ではこれを全てデジタルデータに変換してネットワーク上で伝送する．これにより光ファイバケーブル等の高速通信網にも対応でるようになり，超長距離からの遠隔操作が可能になった．また操作室設置位置の自由度が向上し，適用工事の範囲が拡大すると共に，設置の省力化と，無線混信の減少が図れる．

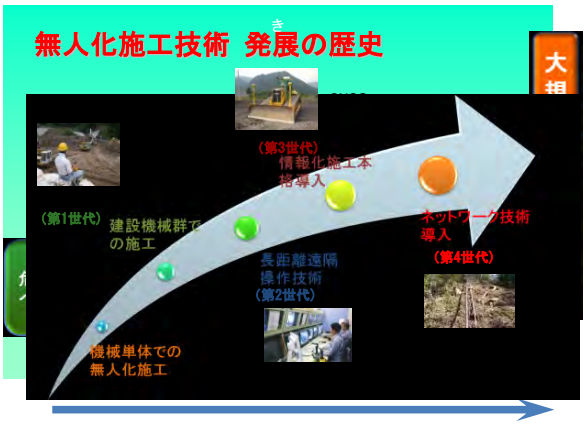


図-1　無人化施工技術発展の歴史

2.2　第３世代の課題

従来は操作系に関してはラジコンに使用されている特定小電力無線，映像系であればアナログ式の50GHz簡易無線，情報系は2.4GHz小電力データ無線等と別々の無線によるシステムを使用してきた．設定に時間がかかり，調整は運用しながら行っていた．こうした中で高速大量データの伝送のできる無線LANが導入され，操作系，映像系，情報系データを全てデジタルデータ化してネットワークに乗せることが試みられるようになってきた．(図

-2）操作系データは低レートでリアルタイム性が重要．映像系データはデータ量が大きく高品質で効率よくデジタル化する機器の選択が重要．情報系データは高度なネットワーク機器が必要である．これらの条件を満たすにはその特性に合わせた機器選定が必要となる．

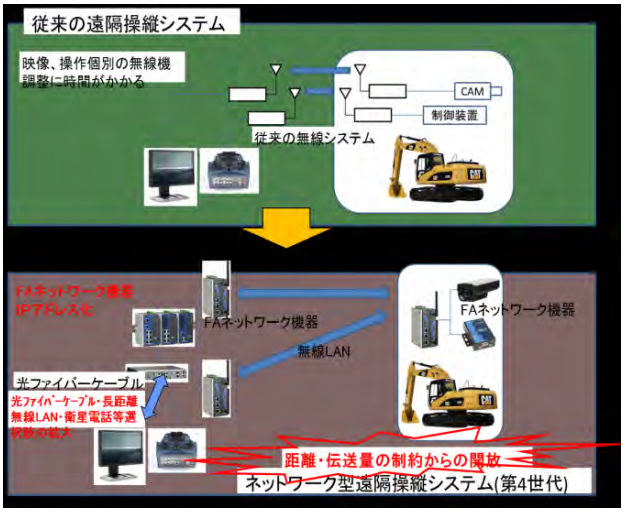


図-2　従来型とネットワーク型無人化施工の違い

3．超長距離からの遠隔操作実証実験

「超長距離からの遠隔操作実証実験」は国土交通省が平成23年に雲仙復興事務所で実施したものである．この実験結果はその後の貴重な指針となった．その内容は以下のとおりである．(図-3)

3.1　実験概要と成果

実験は東日本大震災を機に国土交通省が火山等広範囲に立入制限された大規模災害を想定し，国土交通省専用光ファイバケーブル網等の長距離通信手段を活用し，数キロ～数十キロメートルの超長距離無人化施工技術について実証実験をしたものである．これまで無人化施工は，そのほとんどが1km程度の距離にある操作室からの遠隔操作であり，10kmを超える長距離からの遠隔操作については，施工実績もなく適用性についても技術的検証事例がなかった．この実験は長距離通信手段として光ファイバケーブル，長距離無線LAN，衛星通信の使用，近距離の通信手段として特定小電力無線，無線LAN，公共ブロードバンド（BB）無線を使用した．各方式のデータ伝送能力，伝送遅延や映像劣化が操作性に与える影響，オペレータの技量差や操作限界について検証を実施し，雲仙普賢岳おしが谷実験場にある建設機械を30km以上離れた操作室（長崎河川国道事務所）から光ファイバケーブル使用して無人化施工が可能であることが検証できた．



図-3　超長距離遠隔操作実験の実験概要図

3.2　実験課題

実験結果から以下の課題が浮かび上がった

(1)回線変化に対する対応

この実験は国土交通省の高規格機器と専用光ファイバケーブル回線を使用した条件であったが，実際に公衆用一般回線や自主回線で光ファイバケーブルを使用した場合の各データへの影響がどの程度か判らない．またネットワークを構築する際の機器選定も課題であった．

(2)多数建設機械稼働時のネットワーク状況の把握

今回の実験で同時稼働した建設機械は4m3油圧ショベル１台と45ｔダンプトラック１台で，他の建設機械は単独実験であり，ネットワーク上の問題は発生しなかった．しかし多数の建設機械が同時に稼働する場合どのような状態になるのか，またその時のシステム構築方法や，ネットワークの管理方法の確立は今後の課題となった．

(3)デジタルアナログ変換機の選定

操作系，映像系，情報系それぞれをネットワーク回線に載せるための変換機の選定とその設定方法の確立が必要であり，個別には対応研究はしてきたが統合した場合のネットワークの状況や無線機との相性についての課題があった．

4．北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事



写真-1　北股地区河道閉塞緊急対策工事施工状況

昨年2月に平成23年9月の台風12号災害で発生した奈良県北股地区の天然ダム緊急対策工事において本格的な第４世代光ファイバケーブル統合ネットワーク型無人化施工システムを導入し，実験課題を検証する機会を得ることが出来た．（写真-1）

4.1 工事概要

工事名　北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事
発注者　国土交通省近畿地方整備局
住　所　奈良県吉野郡野迫川村北股地先
工　期　平成23年9月30日～平成24年8月31日
工　種　法面整形工（無人化施工）
（有人施工：6,700m3　無人施工：5,100m3）

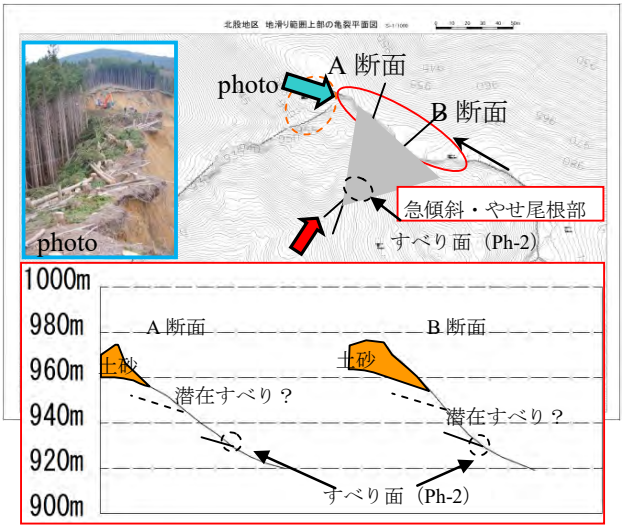


図-4　掘削部平面図および無人化施工提案箇所

本緊急対策工事を施工した北股地区は高野山裏側の奈良県南西部，和歌山県境付近に位置する．法面崩壊は北股川左岸支沢北側斜面で発生し，規模は標高差約200m，最大幅約200m，面積約8,25 ha，崩壊土量約116 万m3 である．崩壊土砂は尾根部より南西側方向へ流れ支沢を閉塞させ，いわゆる天然ダムを形成し，更に土砂は支沢で西側へ屈曲し下流の北股集落の一部に至った．

本工事は，天然ダム背後に湛水した流入水を速やかに排出し，通水機能を持たせる仮排水路の設置と崩壊した斜面にて工事用道路の敷設を行いながら散在した倒木の処理を行い，その後，崩壊地の安定化を図るため，崩壊地法肩部の緩んだ地盤を除去しながらの法面整形を行った．そして頭部の尾根部分は脆弱な土砂状地盤が分布しているので，更なる土砂崩壊等の発生を抑えるため，尾根頂部を掘削により山全体を安定させる必要性があった．しかし頭部の数箇所は脆弱なやせ尾根上での不安定化，および急傾斜面側への転落が懸念され，地山内での潜在的な流れ盤すべりによる崩壊の危険もあることから，建設機械作業による２次災害の危険性を考慮し，今後も崩壊の影響のない場所からの遠隔操作型無人化施工システムにより法面整形工を実施することになった．（図-4）

4.3 無人化施工の詳細

(1) 機器設備構成

建設機械の操作室は二次災害防止の観点や，新設される砂防堰堤施工の関係もあり，被害影響の無かった旧北股小学校に設置した．操作室から施工場所は見通しがなく，手前の山に隠れるように左直角方向に位置しており，高低差が250m程度ある．これにより無人化施工エリアの頂部無線基地局と操作室間は1km程度となり直接無線では伝送が難しい地形であった．光ファイバケーブルは既設モノレールが設置されていたので，これに沿わす形で敷設した．（図-5）



図-5　北股地区河道閉塞緊急対策工事仮設配置

また現場の無線基地局から遠隔操作建設機械間は5GHz帯無線LANシステムを使用して各データを伝送した．映像は現場に固定カメラ3台，ハイビジョン1台と車載カメラが各2～3台搭載され使用された．また法面監視用に防護土堤にハイビジョンカメラを設置して無線基地局まで25GHz小電力無線機で映像を伝送した．

(2) 使用機械

除根，掘削作業5100m3を0.45m3油圧ショベル，0.8m3油圧ショベル，16tブルドーザ，10t不整地運搬車の4台を使用して施工した．（写真-2）



写真-2　北股地区河道閉塞緊急対策工事使用建設機械

(3)北股無人化施工の特徴

①カメラ映像遠隔操作型無人化施工システム

現場施工範囲は100m程度であるが，現場滑り面周囲で起伏が大きく湾曲しているので目視が難しく，建設機械が施工エリアに入ると周囲の地盤は滑る可能性があるので安全を考慮しカメラ映像遠隔操作型無人化施工を採用した．(写真-3)



写真-3　北股地区河道閉塞緊急対策工事操作室内

②マルチタイプ光ファイバケーブルの使用

光ファイバケーブルは伝送容量と距離(1000m以下)からマルチタイプケーブルを使用した．扱い易いので光ファイバケーブル敷設には，現場頂部に行く既設モノレールを使用できたので２日で敷設できた．(写真-4)



写真-4　光ファイバケーブル敷設状況

③LAN上に情報化施工システム（ﾏｼﾝｶﾞｲﾀﾞﾝｽｼｽﾃﾑ）

通常建設機械にあるシステムコントロールボックスを操作室に設置するために，ネットワーク伝送装置（CAN-LAN 変換）を開発し，全ての操作を操作室で行うことが可能になった．(写真-5)

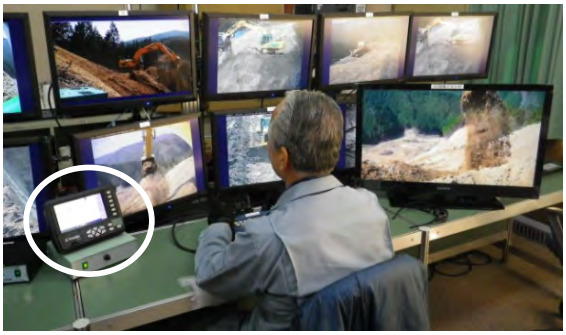


写真-5　ネットワーク伝送装置（CAN-LAN 変換）

4.4 施工成果

(1)仮設光ファイバケーブル敷設して使用

また伝送容量は使用台数等からL2スイッチ等は全て100Mベース機器を採用し，仮設の光ファイバケーブルでもコスト的に対応可能であることを示した．課題であった機器の選定等や管理方法について，実際の現場で対応したことにより，多くの貴重なデータやノウハウを得ることが出来た．

(2)情報化施工システム使用

情報化施工システム機器を操作室に設置しても誤動作がなく施工できることを示した．これにより情報化施工が取り込みやすくなり，今回は法面施工の安全性が高まった．

(3)天然ダム上での本格的無人化施工

潜在的な流れ盤すべりによる崩壊の危険もある厳しい条件での施工を実施し，天然ダム上での本格的無人化施工を光ファイバケーブル使用で可能になったことで操作室のレイアウトの自由度が向上し，他の災害復旧等へ無人化施工の可能性を広げることが示せた．

(4) 工期の短縮

使用機材全体の調整は全体のIP 化により事前設定が可能でありシステムの立ち上げ時間が20%程度（２日）短縮した．

無線機は複数使用が無くなり機器コストは低減したが，ネットワーク対応人員が必要になった．

4.5 施工課題

(1)ネットワーク対する管理方法の確立

当初ネットワークトラブル時に問題箇所の切り分けが出来ず解決に時間がかかってしまった．ネットワークシステムトラブルは，

①ハード的に切り分けるために，ネットワーク機器類のインジケータ表示についてのまとめ．

②ネットワーク管理ソフトを使用した管理手法の確立．

等の対策をしておかないと把握対応が難しい．

(2)使用機器の研究

使用機器の大半が外国製で日本語資料も無くシステム構築を手探りでしている状態なので，資料翻訳や動作テスト等が必要である．また最新技術情報，製品情報等の収集をして全体の動向をつかむ必要がある．現在の無線機の主力は5GHz帯無線LANで，外国の製造メーカでコストも高く，能力も現在の大容量映像を送るには十分な無線能力であるとはいえない．特殊な用途なので一民間企業では新規機器開発をすることが難しい分野でもあるが，官民一体となった機器開発も必要と思う．

(3)コストの低減

予算では従来と比較して機器コスト10%減と試算していたが，機器等のマッチングの不具合もあ

り変わらなかった．逆にシステム管理にかかる人件費が10%程度増えてしまった．またなかなか有能な人材がタイムリーにおらず，人材育成の必要な分野であると思われる．今後，国産民生用の汎用機器を使用したコスト削減や，トラブル時の対応も進める必要がある．

5．赤松谷川11号床固工工事へ

現在課題と取り組みながら施工中の赤松谷川11号床固工工事について紹介する．

5.1 工事概要

工事名　赤松谷川１１号床固工工事
発注者　国土交通省　九州地方整備局
住　所　長崎県南島原市深江町上大野木場地先
工　期　平成24年12月11日～平成27年3月30日
工　種　掘削工　200,247 m3
　　床固工　RCCコンクリート48,445 m3
　　無人化施工仮設　一式



写真-6　赤松谷川11号床固工 操作室と施工現場風景

5.2 工事建設機械

遠隔操作車　19台

45t重ダンプトラック3台，40tｱｰﾃｨｷｭﾚｰﾄﾀﾞﾝﾌﾟﾄﾗｯｸ(ｴｼﾞｪｸﾀｰﾀｲﾌﾟ)2台(写真-7)，63tブルドーザ，16 tブルドーザ，測量車，4m3油圧ショベル，1.2m3油圧ショベル2台，0.8m3油圧ショベル，清掃車，清掃吸引車，高圧洗浄車，無線中継車，カメラ車3台，11t振動ローラ



写真-7　40t ｱｰﾃｨｷｭﾚｰﾄﾀﾞﾝﾌﾟﾄﾗｯｸ(ｴｼﾞｪｸﾀｰﾀｲﾌﾟ)

5.3 作業フローと無線システム

コンクリート製造工場から10ｔダンプトラックで積換設備まで運搬し40ｔ重ダンプに積換え打設場所へ運搬し，ブルドーザで敷均し，振動ローラで締固める．(図-6)

無線システムは操作室から赤松谷川10号床固工堰堤上にある無線基地局までは(400m) 2線の光ファイバケーブルを使用し．無線基地局から建設機械までは最大400m程度あるので，無線中継車を設置しその伝送には25GHz小電力無線機を使用している．無線中継車と建設機械間は5GHz帯無線LANを使用している(図-7)

5.4課題施工へ取り組み

北股無人化施工に対しての課題の取組については以下のとおり実施している．

(1) ネットワーク対する管理方法

稼働台数が19台に及びIPアドレスだけでも500以上に及ぶので，理解し易いアドレス体系の導入とその集中管理をしている．

各建設機械に設置されている機器のインジケータの意味の整理や，マニュアルの整備をしてトラブル時の俊敏な対応が可能になった．

ネットワーク管理にIPアドレスグループ毎に管理用パソコン用意して管理ソフトを使用してネットワーク状況を把握して全体管理が出来るようにした．これにより何処の部分で回線の負荷がかかっているのか把握ができるようになり，予めの対応が出来てトラブルの減少につながっている．

(2)使用機器の研究

ハイビジョンカメラ等の大容量データ送信の必要箇所には11nの5GHz帯無線LANを使用している．国産汎用機が使用できる，トラブル対応も容易となった．

(3)コストの低減

一定期間ネットワーク専門家を配置してシステムの問題点，ポイントを整理した．これによりシステム常駐費用が低減できている．

６．今後の展望

今後の展望を見据えて以下の実験を北股無人化施工で行った．

①急斜面登坂実験

油圧ショベル等の遠隔操作施工機械を使用して傾斜15～25度登坂試験と時間，カメラ機器配置についての研究．より難しい傾斜地での無人化施工が可能になる．

②連続土嚢構築実験

連続土嚢(長さ10m)使用した連続土嚢の作成実験．無人化施工にて施工可能か確認した．

③３Ｄ高画質映像比較実験

ハイビジョン映像，３Ｄハイビジョン映像，標準映像による作業効率比較の研究．３Ｄ等導入効果の確認により，費用対効果の検討できる．

こうした実験を今後も続け，作業の適用範囲を広げ，最適な無人化施工を追及していく．

7．おわりに

第４世代のネットワーク型無人化施工システムは超長距離遠隔操作実験から始まり北股地区災害復旧工事を経て技術の確立がなされ，今後は工期短縮，費用低減につながる標準無人化施工システムとして確立し，災害復旧工事の施工範囲も広がるだろう．紹介したように現在施工中の雲仙普賢岳赤松谷川11号床固工工事にもこのノウハウが活かされている

こうして確立できたのも国土交通省九州地方整備局，国土交通省近畿地方整備局等多くの関係者方々をはじめとする現場関係者の努力が実を結んだ結果と思う．この場を借りてお礼を申し上げたい．今後は無人化施工等の新規工種への適用を目指して精進し，機器開発や技術提案のすそ野広げていきたいと考えている．

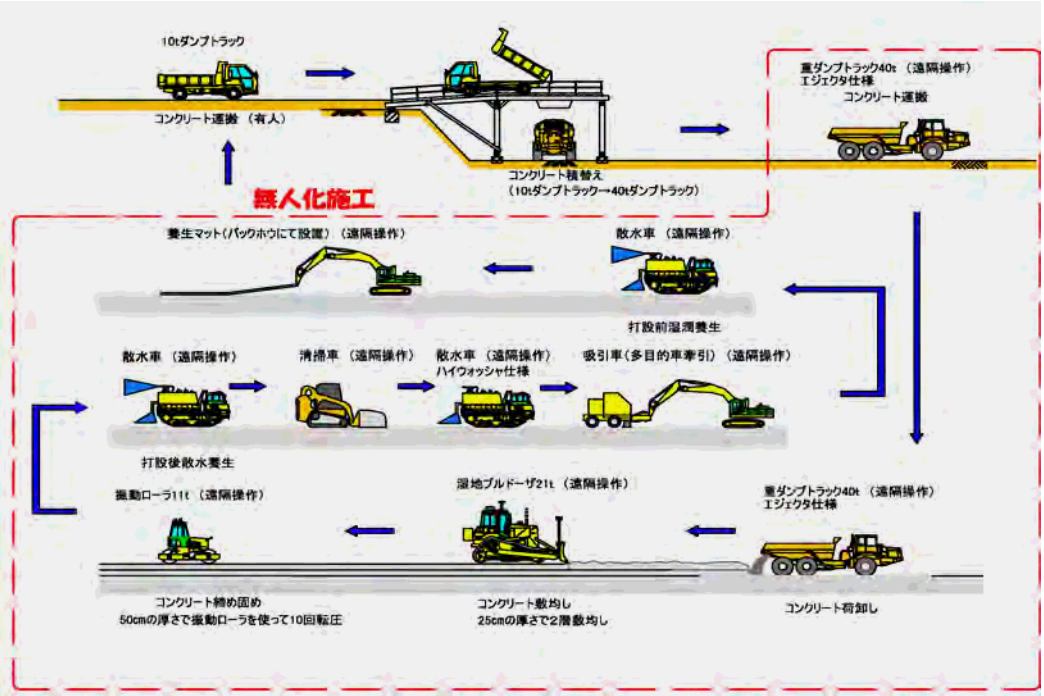


図-6　赤松谷川 11 床固工コンクリート打設フロー

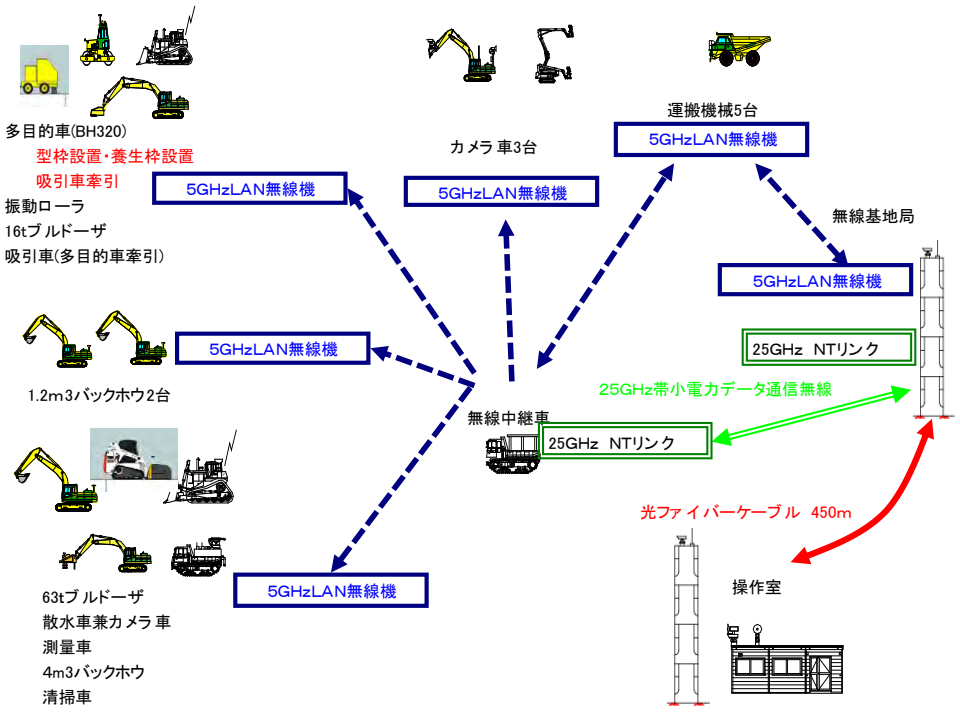


図-7　赤松谷川 11 号床固工　無線システム

土木系技術者数の推移と今後の建設生産体制の課題について

統計データから見る建設生産改革の必要性

(独)土木研究所　先端技術チーム　○大槻　崇
同　藤野　健一
同　茂木　正晴

１．はじめに

情報化施工の必要性や、来るべき大規模災害に向けた建設生産体制の発展が求められる中、これからの土木社会インフラを支える建設生産システムのあり方を論ずる上で、具体的にどれだけの生産性の向上を目指さすべきであるか、その生産性はどのように実現されるべきかを考えることは有益である。しかし、その値について具体的に試算された例は見られない。

そこで本稿では、関係する統計資料をもとに、その値についての一つの試論を示したい。

まず、現在まで、土木系技術者数についての統計資料をおさえ、一人当たりが支えてきた土木投資の実質額の変遷とその背景事象を調べ、過去の生産性の変動とその最大値を調べた。

次に、将来の土木系技術者の推移を予測し、過去の最大生産性の値をかけて、土木投資の実質額ベースでの対応可能額(供給力)を求めた。

一方、国土交通省及び内閣府等の資料をもとに、将来必要とされるであろう土木投資額を試算(大震災等の復旧投資を含む)し、それらから、土木系技術者一人当たりが将来対応しなければならない土木投資額を予想し、この予想値と過去の値との比較から目指すべき生産性の値を簡易的に評価することを試みた。

最後に、この結果をもとに生産性ギャップ解消のために必要な取り組みについて考察・整理する。

２．土木系技術者の現在までの推移と今後の動向

2.1　国勢調査にみる土木技術者の推移とその背景

土木技術者の数についての統計調査は、総務省の国勢調査の職業別推計の記録が得られる限りにおいて、その記録が残る最古の昭和 15 年(1940)調査からその推計を見ることができる。

これは、明治維新以降、日本の経済活動の近代化において欠くことのできない、また土木技術者がその数を注視するべき存在であったことを思わせる。

戦後の昭和 25 年調査(1950 年)から再開された国勢調査においては、建築技術者とともに合算されていたが、昭和 45 年調査（1970 年）から土木・測量技術者としてその推計が行われてきており、その推移を図 1 に示す。

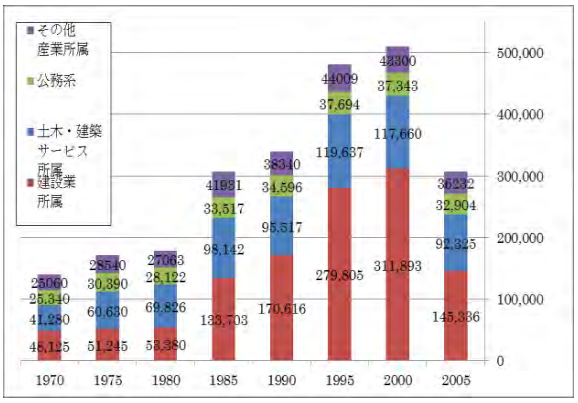


図-1　土木・測量技術者数の推移（「国勢調査」（総務省）より編集）

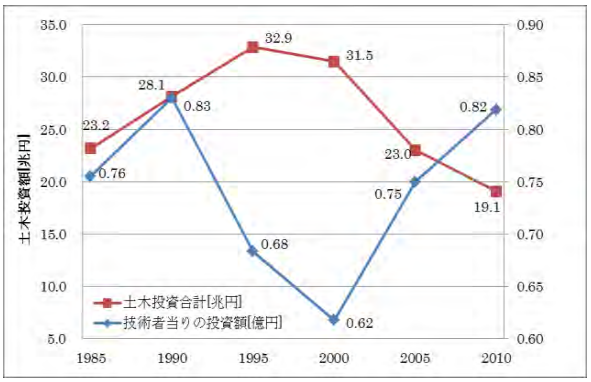


図-2　国内土木実質投資額(H17 年基準)と土木技術者一人当たり金額の推移

平成 12 年(2000 年)までの間、土木技術者は所属する各産業分野においてそれぞれその数を増やし、経済停滞期に突入する H2 年(1990 年)以降も、図 2 に赤線で示す土木投資額の上昇に伴い増え続け、平成 12 年(2000 年)には、最大数の 51 万人に達した。

しかし、図 2 の青線で示す通り H2 年(1990 年)以降、投資額の伸び以上の割合で土木技術者数が

増加し続けていたことにより、土木技術者一人あたりの土木投資額は減少を続け、またそのような状況下に加えて、平成 12 年(2000 年)以降の土木投資減少の時代に突入し、土木技術者一人当たり土木投資額の急激な減少の中で、大幅な調整期を迎え、多くの企業において新規卒業者の採用抑制と大規模なリストラが敢行され、平成 17 年(2005 年)にはその数を半減させることとなり、技術者一人あたりの土木投資額（平成 17 年を基準年とした実質額換算）の回復が図られた。

団塊の世代の退職を迎え、一人あたりの土木投資額の過度な上昇を防ぐため、図 3 に示す建設通信新聞社のレポートの通り、平成 20 年(2008 年)頃から各建設会社共に採用拡大に舵を切ったが、業界全体としては人材獲得に苦労を強いられている。

2009年版第３章 人材を確保する・育てる
1 人材採用――ゼネコン
他産業への流失どうくい止めるか

「応募数が減り、しかも選考後の辞退が多かった」と、ある準大手ゼネコンの人事担当者は苦戦した2008年4月の新卒採用を振り返る。ゼネコン各社がいっせいに採用数を増やし、学生獲得の難しさが一気に表面化した。09年4月の採用計画も拡大傾向にあり、さらに人材確保が難しくなる可能性が生じている。
08年4月採用では大手・準大手クラスの33社のうち22社は当初計画していた採用予定者数を確保したものの、残る11社は予定者数を下回った。無事に確保できた22社でも、半数を超える13社が予定枠の確保に苦労したという。学生の建設業離れが深刻化し、他産業への流出が人員確保の難しさに輪をかけている。
08年4月から清水建設、鹿島、竹中工務店は初任給を1万円引き上げた。大成建設、大林組は09年から引き上げる予定でいる。準大手クラスでも初任給アップに乗り出す動きがある。金銭的な待遇改善で他産業への流出をくい止めるねらいからだ。
建設会社の初任給の水準は他産業に比べ低く、売り手市場が鮮明になったことで、いっせいに初任給の引き上げに動いた格好だ。ただ、初任給の引き上げは全体の底上げ（ベースアップ）でなく、入社初年度に限定した上積み。一般管理費比率の削減を至上命題とする中での応急措置だが、大幅な引き上げは前年入社の社員より給与額が高くなる逆転現象を生む。初任給引き上げを検討する企業ではそうした逆転現象が起こるケースが多く、結果として入社2年目以降の給与水準を変更する社内調整に時間を割かなければならなくなっている。
貼り付け元 <http://www.kensetsunews.com/?p=1721>

図-3 「建設人ハンドブック 2009 年版」（建設通信新聞社 HP より）

2.2 土木系学科新卒の潜在供給に頼れない土木

建設業界の人材獲得、つまり新卒採用の苦労はどこにその主要因があるのか。比較的賃金水準が低いことが課題であるなどの指摘があるが、土木系学科の新卒者の就職実態について調べた。

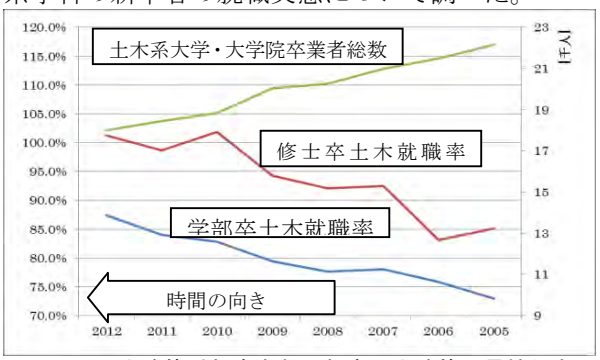


図-4 土木建築系新卒者数と新卒土木建築測量技術者の推移（※グラフは右から左に時間が推移）

土木建築系学科を卒業した大学学部及び大学院修士等の卒業総数と、そのうち就職を決めた学生の中での土木建築系技術者に就いた学生の割合について、文部科学省の実施している「学校基本調査」結果から分析した。(図 4)

すると、学部卒・修士卒ともに土木建築系技術者への「就業率」は上昇傾向にあり、前出の建設通信新聞社のレポートで議論している時期の 2008 年から 2009 年以降では、学部生においては 80%以上、また修士卒に至っては就職を選んだ卒業生のほぼ 100%が土木建築系技術者に就業していることが分かった。

一方で、土木建築系学部の卒業者数が減少傾向にある。つまり、新規採用においては、土木系への就職数を増やすには、土木系学科への進学数を増やすか、他学科出身者の積極採用しかなく、建設業における土木技術者の新卒者の確保は難しい局面を迎えていることがわかる。

2.3 今後の土木技術者の推移とその課題

(1) 今後の土木技術者数の推移と年齢構成の推定

これら新規採用が難しい局面において、今後の土木技術者総数がどのように変化していくかについての試算を行った。試算においては、将来人口推計や国土交通省の建設技能者の将来数予測において用いられている、年齢区分ごとの推移から将来予測を行うコーホート法を用いて推計を行った。

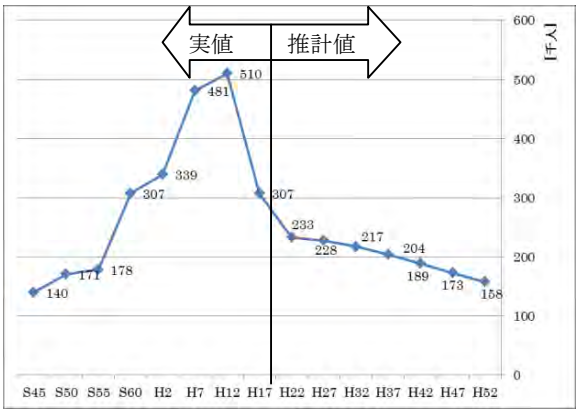


図-5 国土木技術者の平成 52 年までの予測

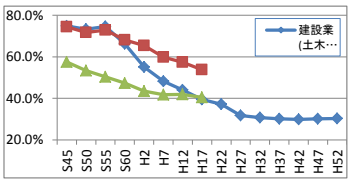


図-6 各部門の 40 歳未満の技術者・人口が占める割合（※建設業のみ H22～H52 までの推計がある）

ある世代が 5 年後に次の 5 歳上の階級へ移行する割合である移行率は、その値がほぼ 100%と安定的に推移した平成 7 年(2005 年)と平成 12 年(2010

年)の国勢調査結果から割り出される値を採用した。

その結果が図 5 である。一見、減少に歯止めがかかったように見え、人口減少社会においては土木技術者の必要数を満たしているとも考えられそうである。が、図 6 を見てほしい。これは 40 歳未満の労働力が占める割合の H17 年までの推移と、土木技術者については、H22 年から H52 年までの推計を描いたものである。緑のラインで示す人口全体に占める 40 歳未満率に比して、青の建設業及び赤の全産業での技術者の 40 歳未満労働力率は約 20%ほど大きいことが分かる。しかし、建設業の土木技術者のそれは H2 年あたりから下降傾向を見せ、H17 年時点では全人口での比率と重なり、今後は約 30%まで低下する期間が H32 年(2020 年)から H47 年(2035 年)まで続くことが予想される。

これは、現状、ものづくり技術の伝承とその技術に基づく新たな発想が生むイノベーションのむずかしさが騒がれている日本の産業全体の技術者に占める 40 歳未満技術者の割合と比して、きわめて低水準であることがわかる。(※土木技術者は平成 22 年において、40 歳未満技術者割合が 40%を切っている。)

技術伝承と若手の育成、はたまた幅広い世代間での多様な議論から生み出されるイノベーションをどのように進めるかということについて、土木技術者は最も難しい立場に置かれることになることを理解しておく必要がある。

また、当然のことであるが、土木技術者数が減少することで、年間あたりに対応可能な土木投資額は、一人あたりの土木投資対応実質額を H22 年(2010 年)の水準と同程度とすると、その年の額である 19.1 兆円/年から、H52 年(2040 年)には、約 13.8 兆円(H17 基準)となり約 30%の減少となる見込みである。

(2) 予想される維持管理需要と土木技術者数予測との関係

図 6 に国土交通省が試算する社会資本の維持更新費等推計の資料を示す。

この資料は、きわめて保守的にかつ予算制約に自然体で取り組んだ場合を示したものだが、平成 52 年(2040)年頃には、維持・更新だけで約 10 兆円/年の投資が必要となることが予想され、これと組み合わせると、それ以外に振り向けられる土木投資対応額は約 3.7 兆円/年となるが、これは平成 24 年時点の民間土木投資額である 4.4 兆円/年を下回ってしまう。これを土木技術者数に換算すると、約 0.9 万人（=0.7 兆円/年÷0.82 億円/人年）の不足となる試算結果がでてくる。さらに、東日本大震災以降、大規模災害の発生が予想される中で生じる復旧復興対応も考えるとなると、その土木投資対応力に何らかの補強が必要となることは明らかである。これについては、次節でさらに検討することとする。

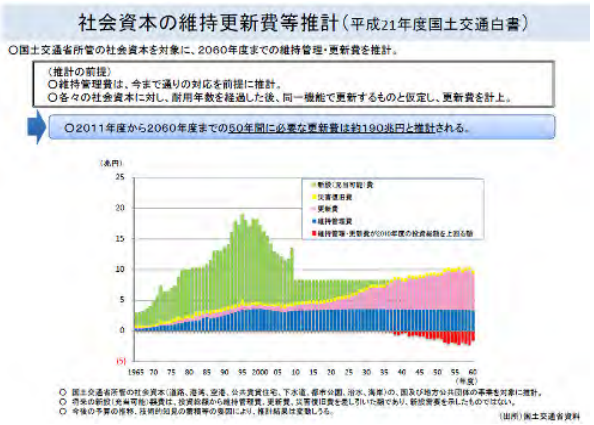


図-7　社会資本の維持更新費の推計資料（国土交通省）

(3) 行政内部の土木系技術職員の状況

ここまで土木技術者全体の推移と課題について見てきた最後に、これとは別に、公共土木インフラを支える役割を担う自治体土木部門職員の定員が大きく減少していることを見ておきたい。図 7 に総務省「地方公共団体定員管理調査」の結果から国土交通省が整理した結果を示す。

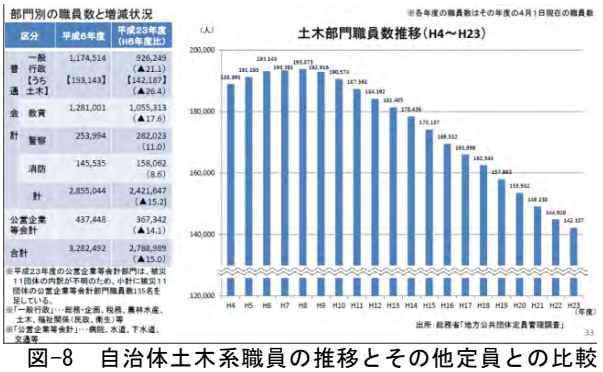


図-8　自治体土木系職員の推移とその他定員との比較（国土交通省審議会資料より）

この整理を見ると、他のあらゆる職種と比べて、土木系部門職員の定員が最も大きな減少幅でその数を減らしていることがわかる。

公的機関の運営において、社会的資産である施設インフラの管理や災害時の対応力の低下はないか、少なくともその必要数についての検証を行うことが必要であると思われることも付言しておく。

3．非常時の土木投資に対応するために必要な土木技術者数の試算

前節の後段において、大規模災害時に必要となる技術者の必要数の把握が必要と述べた。ここでは、その数の試算を行う。

3.1　非常時に必要な土木投資額の推定

東日本大震災において、多くの人命が失われた。これは最も大きな悲しみであり、計算のできよう

もない損失であった。そのようなことを少しでも防ぐためのインフラを整え、災害の教訓を広くまた永く受け継いでいくことが重要であることは論を待たない。

今から約 20 年前、平成 7 年(1995 年)1 月 17 日の早朝に兵庫県南部を震源とする地震に伴う阪神大震災が発生したが、その際、港湾物流施設も一時壊滅的な被害を受け、港湾物流がほぼ全面的にストップした。その後、関係者の努力により、半年を待たずに多くの港湾設備の復旧が行われたが、残念なことに、神戸港の荷役取扱高は、阪神大震災前を回復するどころか大きくそれを下回ったまま現在に至っている。

また、阪神大震災から 20 年近くの月日が経つが、神戸市が 150 万人の人口を取り戻すのに 7 年、18 あった「まちづくり協議会」の半数解散に 13 年、被災マンションの再建完了と復興担当職員の配置終了に 16 年の歳月をかけたことを思い起こすと、迅速な対応とともに息の長いコミュニティー再生に取り組む責務をインフラを担当するものが負っていることがわかる。

ではまず、この阪神大震災の被害規模と東日本大震災の被害規模を確認する。

東日本大震災の被害総額は、その時点までで約 17 兆円。　阪神・淡路大震災は約 9.6 兆円であった。そのうち、インフラ関連の被害額は、東日本大震災が 6.5 兆円、阪神・淡路大震災は 3.3 兆円に上った。(表 1)

表-1　阪神大震災及び東日本大震災におけるインフラ等の損失額（内閣府推定資料）

H23．6．24

（参考）被害額推計の比較について

		東日本大震災（内閣府（防災担当））	東日本大震災（内閣府（経済財政分析担当）） ケース１	東日本大震災（内閣府（経済財政分析担当）） ケース２	阪神・淡路大震災（国土庁）
建築物等（住宅・宅地、店舗・事務所・工場、機械等）		約１０兆４千億円	約１１兆円 建物等の損壊率の設定津波被災地域：阪神の２倍程度 非津波被災地域：阪神と同程度	約２０兆円 住宅等の損壊率の設定津波被災地域：ケース１より特に大きい 非津波被災地域：阪神と同程度	約６兆３千億円
ライフライン施設（水道、ガス、電気、通信・放送施設）		約１兆３千億円	約１兆円	約１兆円	約６千億円
社会基盤施設（河川、道路、港湾、下水道、空港等）		約２兆２千億円	約２兆円	約２兆円	約２兆２千億円
その他	農林水産	約１兆９千億円	約２兆円	約２兆円	約５千億円
	その他	約１兆１千億円			
総　計		約１６兆９千億円	約１６兆円	約２５兆円	約９兆６千億円

注：ストックの区分は内閣府（防災担当）の推計で用いたものによるものであり、推計により若干異なる。

内閣府が行ったこの推定値は、それと同様なインフラを改めて作り上げるのにかかる金額を表しているわけではなく、内閣府でとりまとめた「社会資本ストック 2012」での社会資本ストックの純資産価値ベースでの値を表示しており、資産自体の減価償却などを経た値となっている。

表 2 は、その「社会資本ストック 2012」の抜粋である。昭和 28 年(1953 年)から投資されてきた投資額を平成 17 年を基準年とした建設デフレータにより実質投資額に割り戻して表示している。

表-2　社会資本ストックの実質累計投資額と現在価値の比率（内閣府推定資料）

実質累積投資額［百万円］			ストック(2005 暦年基準)［百万円］	
新設改良	災害復旧		試算①	試算②
866,494,377	32,364,542		462,861,211	377,071,122
898,858,919		比率	0.51	0.42

表 2 の左下はその実質投資の累積額であり、右上は資産の減価償却後の評価額である。この比較から、評価額は累積投資額のほぼ半分の額を表していることがわかる。（表２の右欄下段に記載）つまり、内閣府が示している表 1 の東日本大震災のインフラ等への被害額は、それらの施設を単純に復旧再建しようとするとそれにかかる費用は概ねその倍の額が必要であるということである。

つまり、現在、東日本大震災の復旧・復興の投資に 19 兆円の政府予算が投入され、さらに平成 26 年度概算要求において 2 兆円規模の追加が議論されているが、東日本大震災における 6.5 兆円と表示された被害額を単純に復旧再建するとした場合でも、概ねその倍である 13 兆円分の投資が上記の 21 兆円に含まれていなければいけないことがわかる。

3.2　非常時に必要な土木投資額に対応する土木技術者数

3.1 での試算に引き続き、ここでは、その土木投資額への対応にひつような土木技術者数について検討する。

阪神大震災での実績から、被害額：6.6 兆円に対して土木投資対応力 40 兆円、土木投資対応力の 16.5%の被害額であれば、2 か月～半年での「復旧」が可能となっている。

一方、「復興」に関しては、街づくりなどの合意形成や資機材・技能者などの制約やそれらに伴う通常時の業務に比した非効率性の発生から、3.1 で述べた年数、7～16 年の年数が復興にかかっていると考えられる。

表 3 における内閣府の南海トラフ巨大地震の被害想定額から、陸側ケースの被災が起きたとして、準公共及び公共部門を合わせて 21.1 兆円程度の被害額が生じる計算となるが、これに投資額ベースへの転換をすると約 42 兆円となる。

現時点での土木投資対応力約 19 兆円の 16.5%は、3.1 兆円であり、ここから割り戻すと、復旧だけで約 2 年～約 7 年かかることになってしまう。

もし、19 兆円の土木投資対応力がフルで復旧作業に取りかかれたとしても、約 5 か月～1 年はかかることとなる。

これを 2 か月から半年の間で対応するとした時、そのために必要な土木系技術者の数は、少なくとも現在の 2 倍、阪神大震災と同様の比率なら 13 倍

の人員が必要となる。

さらに、平成 52 年(2040 年)の土木投資対応力ベースでみると、約 3 倍～約 18 倍の人員が必要と試算される。

これだけの人員を常時雇用すること、また、災害時に急遽確保することも共に難しい。すると、非常時と平常時のインフラ整備のあり方、また、土木系技術者の生産性の上昇による対応が必要となるが、この点については次節で考察する。

表-3　南海トラフ巨大地震の被害想定額（内閣府試算Ver.2 H25.3）

		基本ケース	陸側ケース
○資産等の被害【被災地】	（合計）	９７．６兆円	１６９．５兆円
・民間部門		８３．４兆円	１４８．４兆円
・準公共部門（電気・ガス・通信、鉄道）		０．６兆円	０．９兆円
・公共部門*		１３．６兆円	２０．２兆円
＊公共部門に含むもの ライフライン（上水道、下水道）、公共土木施設（道路、港湾等） 農地・漁港、災害廃棄物			
○経済活動への影響【全国】			
・生産・サービス低下に起因するもの		３０．２兆円	４４．７兆円
・交通寸断に起因するもの（上記とは別の独立した推計）			
道路、鉄道の寸断		４．９兆円	６．１兆円
〔参考〕港湾被害		（１０．８兆円）	（１６．９兆円）

4．非常時を考慮した土木投資対応力の構築に向た対応の方向性　-未来を拓く「3 つの鍵」-

ここまで、非常時に必要とされる土木投資額及びそのために必要な土木投資対応力について試算してきた。ではこれへの対応力をどのように築いていけばよいのだろうか。

災害を受けた際に、単純に損壊したインフラの回収のみを行うと考え、それに対して、土木系技術者が調査・計画・合意形成・設計・施工などに携わりその生産力をもって対応すると考える。すると、それらの関係を次式で表すことができる。

$$\text{「復旧にかかる時間」} = \frac{\text{インフラ量 [金額]} \times \text{損壊率 [\%]}}{\text{土木系技術者数 [人]} \times \text{一人当たり投資対応力 [金額/人/時間]}}$$

この関係式から、復旧にかかる時間をなるべく短くするためには、必ずしも土木系技術者の数を増やすだけでなく、インフラの災害時の損壊率を低減すること、または一人あたりの土木系技術者の投資対応力を増加させるという選択肢が見えてくる。ここでは、それぞれについて検討してみたい。

4.1　インフラ被害及びその機能不全による経済波及被害を最小限に抑えるための事前のインフラの強靭化策

そもそもではあるが、少ない土木技術者で膨大なインフラ被害に対応するのは土台無理なことである。3 節での試論の通り、その必要人数は非常時には膨大になるが、通常期とのギャップはきわめて大きい。そこで、前出の関係式から損壊率を如何に低減するかという視点で考えてみたい。

まず現実的なのは、そもそも発生する被害をできる限り低減することである。この対策は、災害発生後に対応しなくてはならない事象自体を低減させられるし、なおかつそのための対策に取り組むに当たり、災害発生前にある程度長い時間をかけて、限られた土木投資対応力の範囲の中で取り組んでいくことが許される点で現実的である。

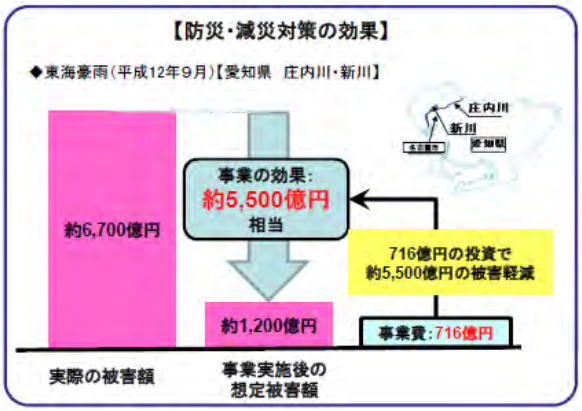


図-9　東海豪雨災害と同様被害が起きたと仮定した時の投資効果（国土交通省）

実際、住宅等の耐震化においては、その対策をする被害総額を半減させることさえ可能との試算も出ている。また、平成 12 年(2000 年)に中部地方にて発生した東海豪雨災害に関しては、事前に 716 億円分の土木投資を行うことで 5,500 億円分の対応量の低減を図ることが可能であったと試算している。（図 9）

この対策は、いわゆる「国土強靭化」に取り組むことと言えると考えるが、非常時の土木投資対応力の不足を補う点でもきわめて有効であることがわかる。

4.2　計画策定の合意形成進捗を高める住民側土木技術者制度の創設

どんなに事前の対策を施しても、先にみたように 10 倍近くの対応力が求められる可能性もある。また、4.1 の備えが十分に整えていなかった現場での被害が発生することも予想される。その際には、平常時の土木技術者の奮闘に頼らなければいけないわけであるが、如何せん、合意形成における問題が事業進捗の最大の課題となる。

実際、阪神・淡路大震災の街づくり協議会はじめ、東日本大震災の移転地検討においては、2 年 3 年経っても議論進捗が思うように進まないところが多い。

議論の進まない原因の一つとして大きな要因は、信頼感が醸成されきらないことにある。自分にとってどういいのか、損をしてないか、コミュニティーにとっていいことなのかを多面的に見たいが、開発側の用意した建設コンサルタントの方の言うことは、その構造上、どんなに公平な専門家とされる方であっても、信頼を醸成することが難しい。

この解消のためには、シンプルに、住民側の技術的判断をサポートする土木技術者の存在が有益であろう。計画の意味を開発側・行政側・発注側でない独立した専門技術者が説明してくれることは、住民の方々の心理的バイアスを取り除くことに役立つ可能性は高く、それに住民の方々の深い理解に基づく発想や納得感ある計画策定は、きっと早期の復興に役立つだろうと思われる。

この役割には、すでに建設会社や建設コンサルタントなどから自立した、シニア・土木技術者に頼りたい。豊富な経験と何より、現役の開発事業者から独立した立場の専門家は、上記の要件に合致するからである。

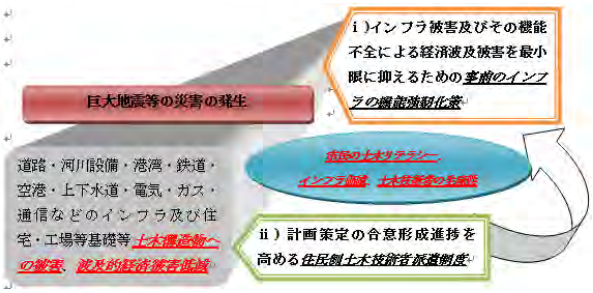


図-10　災害時の膨大な土木投資需要への取組（ⅰ，ⅱ）の位置づけとその効果（赤字）

この仕組みを平常時など、ⅰ)強靭化における合意形成にも導入することで、相乗効果で平常時の事業進捗にも役立つとともに、市民の土木リテラシーが高まる。これにより、インフラの利用価値・機能を高め、土木技術者の生産性が高まり、日本の社会インフラが豊かさ高めることに貢献できる。

4.3　情報化施工技術・CIMの活用

これら4.1,4.2 に取り組み、少ない土木系技術者が社会経済・生活の基盤たるインフラを支えることが可能となるが、その二つを進めていくうえで、強力なサポート・ツールとなるのが、情報化施工であり、またCIM（Construction Information Modeling)である。

国土強靭化を図るうえで、工事を効率的に進められるほか、施工情報や出来形・品質データを効率的に採取・管理し、設計上で考えられた強度等を確実に実現させることが可能となる。

また、CIMによって情報を効率的に管理でき、かつ、より一般の方々にもわかりやすいインタフェースとして整備するインフラの情報や維持管理情報を見えるかできるようになることは、図10のⅱ）の市民との連携が図られやすくなることは明らかである。

「３．」にて議論した通り、これらのツールを使い、土木系技術者1人当たり生産高を2倍から可能であるならば18倍まで伸ばすことが求められると考えるところである。

５．まとめ ～今後の建設産業に必要な３つの鍵

。来るべき大規模災害に向けた建設生産体制の発展が求められる中、これからの土木社会インフラを支える建設生産システムのあり方を論ずる上で、具体的にどれだけの生産性の向上を目指さすべきを考えてきた。纏めとして、今までの議論を整理したい。

①土木系技術者の新卒採用の拡大は、そもそも土木系への進学を高めるか、他学科出身者の積極採用が無ければ拡大できない。

②土木系技術者が過去最大の生産性で土木投資に対応しても、H52(2040)年には約 1 万人の不足を招く。

③また、建設業の土木系技術者の 40 歳未満の占める割合が 30%と他産業に比べて 15%も低く、日本の人口構成と比べても低水準となる可能性がある。

④災害時には対応可能額を超える土木投資への対応が求められるがその対策のためには、土木系技術者一人あたりの生産性を、現状の約 2～3 倍、最大で 18 倍まで高めていく必要がある。

⑤それらの対策のために、非常時の損壊率低減、平常時の需要創造として、国土強靭化等の計画面での対応とともに、それを支える情報化施工・CIM 等の生産性改革が不可欠となる。

本稿はあくまで試算であり、今後、議論を進めていくうえでのたたき台としていただければ幸いである。

参考文献

1) 総務省：国勢調査，昭和15～平成22年
2) 国土交通省：建設工事総合統計，昭和60年～平成23年
3) 建設通信新聞社(HP)：建設人ハンドブック2009年版
4) 文部科学省：学校基本調査，平成17年～平成22年
5) 国土交通省：建設産業の再生と発展のための方策2012
6) 経済財政諮問会議：第10回会議資料，平成25年5月7日
7) 内閣府(防災担当)：東日本大震災における被害額の推計について，平成23年6月24日
8) 内閣府 政策統括官(経済社会システム担当)：社会資本ストック2012，平成24年11月
9) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について(第2次報告)，平成25年3月18日

無人化施工と有人施工における作業性の比較実験報告

無人化施工技術の作業効率向上に向けた一考察

土木研究所　○ 茂木　正晴
土木研究所　藤野　健一
土木研究所　西山　章彦

１．はじめに

現在、日本では災害発生時（地震・噴火などによる災害）における初動対応として無人化施工が適用されており、人が立ち入ることのできない危険な箇所で利用されている。近年、この無人化施工技術は、災害の規模や現場状況（人への危険度合い）によって迅速かつ安全な施工技術として期待されている。

しかし、導入・活用が進めてられている中で、現場での作業効率の向上は、迅速な現場での復旧活動の課題となっている。

そこで、土木研究所では、現場で利用されている遠隔システムをベースとした作業効率の向上を目的とした研究を進めている。

本研究報告では、建設機械に搭乗操作した場合と遠隔操作による作業効率としてサイクルタイムの比較実験を行った。実験では、１年未満の初心者オペレータ、５年以上の経験を持つ熟練オペレータ、熟練したオペレータかつ遠隔操作経験が５年以上のオペレータといった３つのカテゴリを比較対象としてサイクルタイムによる比較評価を行うとともに、操作時におけるオペレータの視点から熟達による作業効率向上のポイントを考察することとした。

２．実験

実験では、作業効率の評価指標としてサイクルタイムの比較検証を実施した。

実験に利用した遠隔操作システムは、雲仙普賢岳で利用されている遠隔システムをベースに土木研究所によって構築したシステムとした。

対象とするベースマシンは、土木研究所保有の油圧ショベル 0.5㎥（写真-1）を使用した。

また、建設機械による搭乗操作と遠隔操作システムによる比較実験は、実際の施工現場での掘削積込み作業を想定した施工モデルとした。



写真-1　遠隔操作機能付き油圧ショベル（土研保有）

実験での施工モデルは、図-1 に示すエリアで、図-2 の障害物を乗り越えて作業エリア近傍まで走行移動することとした。作業エリアでは、掘削作業に見立てて写真-2,3 に示す 3 つの対象物をバケットで掴み移動することとした。移動に際して、オペレータは、対象物を所定の位置に移動し、マーキングされた箇所内に対象物を移動することとした（写真-3）。

なお、実験回数については、各オペレータ 5 回とした。

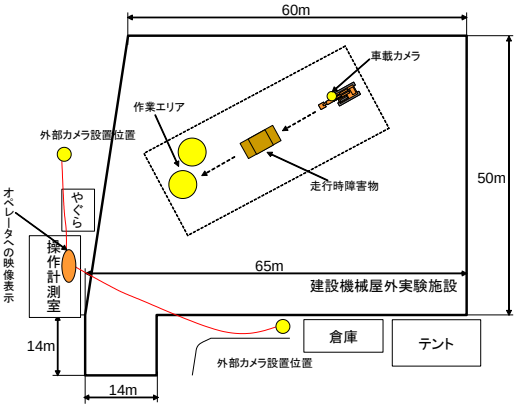


図-1　実験フィールド

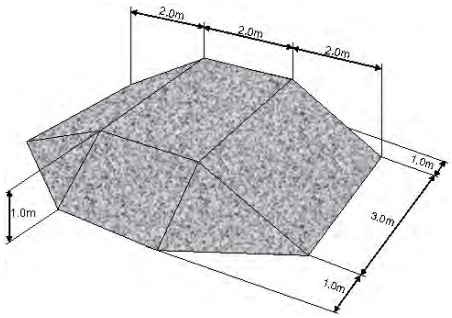


図-2　走行障害物

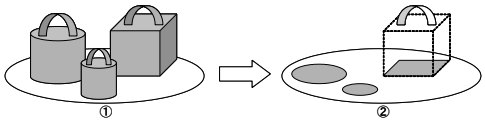


図-3　対象物の移動



写真-2　対象物



写真-3　対象物の移動

本実験でのオペレータは、熟達度合いを比較するうえで、以下に示すカテゴリ分けしたオペレータ（各々3名）を対象とした。

・カテゴリ１：建設機械の操作経験１年未満
・カテゴリ２：建設機械の操作経験５年以上
　搭乗操作のみの経験者
・カテゴリ３：建設機械の操作経験５年以上
　遠隔操作の経験も５年以上の者

実験に関しては、図-4 に示すように出発地点から目標とする作業エリアまでの移動、作業エリア内での対象物の移動設置作業、作業エリアから出発地点までの移動としたサイクル動作とした。

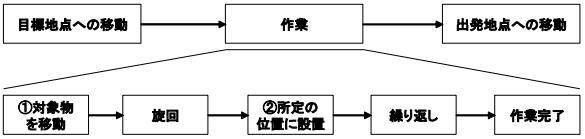


図-4　１サイクル動作

なお、遠隔操作システムによる実験については、写真-4 に示すようにプレハブ内での操作とし、外部の情報がプレハブ内で分からないように窓ガラスを遮蔽したうえで実験を実施した。



写真-4　操作状況（遠隔操作）

また、本実験における搭乗操作に関しては、遠隔操作とのサイクルタイムの比較のほか、カテゴリの違いによる操作時におけるオペレータの視点についてアイカメラにより視線軌跡を記録した。

３．実験結果

カテゴリ１～３のオペレータの走行・掘削までの作業時間記録データについて、搭乗操作データと遠隔操作データの解析を行い、それぞれ３人の平均結果を図 5～10 に示す。

サイクルタイムにおいて、搭乗操作に関しては、カテゴリ１のトータルサイクルタイムで150sec 程度の低減が見られた。

また、カテゴリ２オペレータに関しては、遠隔操作においてカテゴリ１のオペレータと同様な500sec 程度の低減が見られた。

2010 年に実施した遠隔操作経験者による熟達度の確認する実験結果[(1)(2)]では、3 回目以降からサイクルタイムの収束が見られており、本実験でのカテゴリ１のオペレータとカテゴリ２のオペレータ（いずれも遠隔操作未経験者）に関しても類似した結果がみられた。

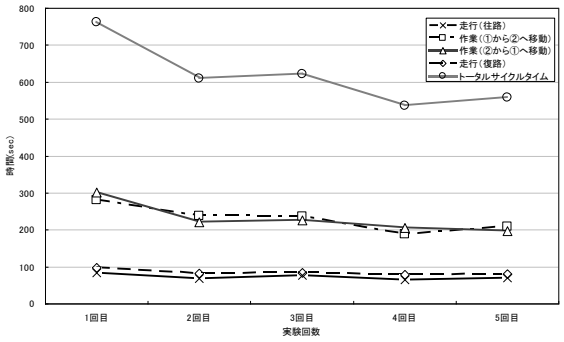


図-5　カテゴリ１　サイクルタイム（搭乗操作）

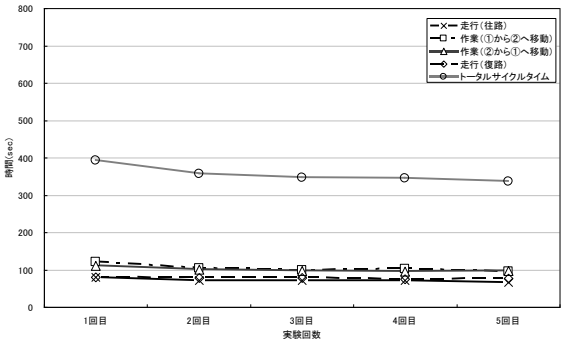


図-6　カテゴリ２　サイクルタイム（搭乗操作）

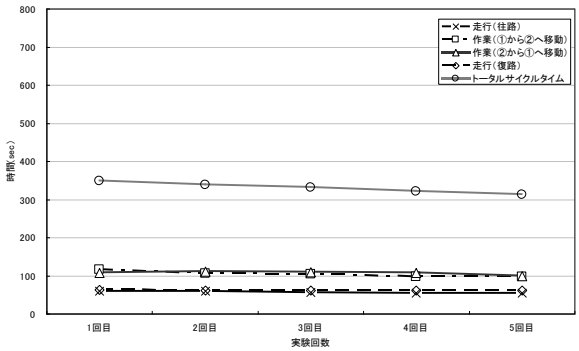


図-7　カテゴリ３　サイクルタイム（搭乗操作）

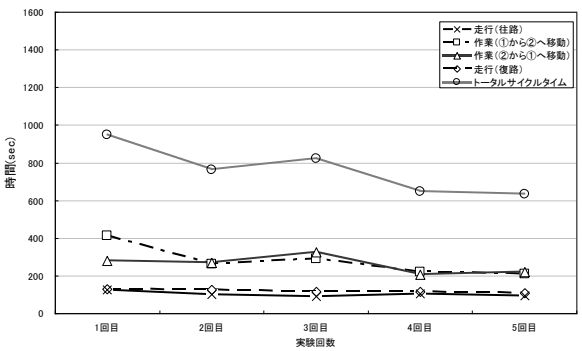


図-8　カテゴリ１　サイクルタイム（遠隔操作）

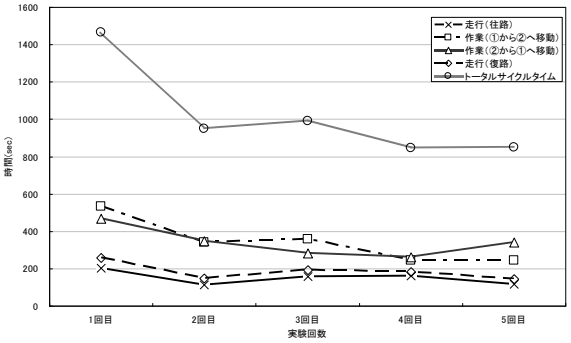


図-9　カテゴリ２　サイクルタイム（遠隔操作）

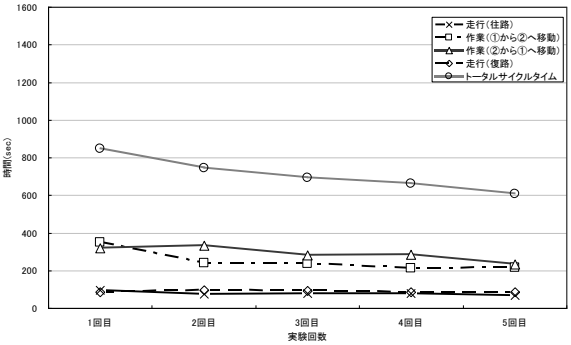


図-10　カテゴリ３　サイクルタイム（遠隔操作）

４．まとめ・考察

4.1 搭乗操作と遠隔操作の作業効率の違い

図-11 に示すように実験操作回数２回目以降の搭乗操作と遠隔操作とサイクルタイム差として、遠隔操作は搭乗操作の約２倍であった。

この実態を踏まえ、搭乗操作におけるサイクルタイムを指標に現場で活用されている遠隔操作システムを定量的に評価し改善を進めることが肝要であると考えられる。

なお、作業効率改善のポイントとしては、搭乗操作に比べて遠隔操作で大きく不足している人の知覚認知特性及び知覚情報と人の行動を加味した臨場感の高いシステム導入が必要だと考えられる。

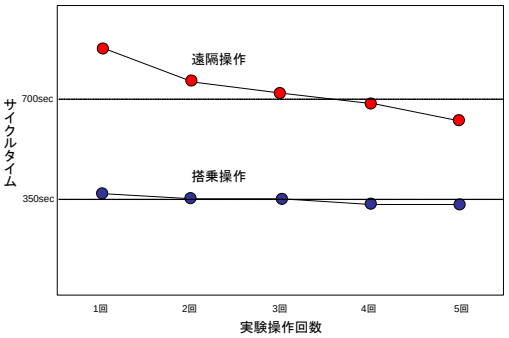


図-11 搭乗操作と遠隔操作のサイクルタイム差

4.2 カテゴリ差による操作の視点

写真７は、カテゴリ１のオペレータの視点をアイマークカメラによって捉えたものであり、対象物を捉えようとするポイントが掴めずに視点が泳いでいるような状況が視点移動（バケット部周辺の色帯線）より分かる。一方、写真８は、カテゴリ２，３のオペレータの視点をアイマークレコーダによって捉えたもので、対象物を掴もうとする場合、左右の位置関係を的確に捉えていることが分かる。

このことは、作業内容の把握、作業の手順、作業するうえでの自身の位置や対象物の配置及び建設機械の状態把握といった空間把握の構築が熟練者と未熟練者の間に違いとして定性的に現れているものと考えられ、写真７に示すカテゴリ１の無駄な視点の動きが目的とする円滑な動作を阻害する要因だと考えられる。

また、経験１年未満のオペレータの操作に関する阻害要因を解消する方策として考えられることとして、オペレータの作業内容の把握、操作方法・手順の把握とカテゴリ２，３に模倣した作業視点の習得と視覚情報のとらえ方を得ることによってカテゴリ２，３に近づくことができるものと考えられる。このことは、遠隔操作技術のサイクルタイムの向上にも起因するものといえる。



写真-7　オペレータ作業視点（経験１年未満）



写真-8　オペレータ作業視点（経験５年以上）

５．今後の課題

本報告では、カテゴリ毎に３名のオペレータによる実験データであり、今後、データ数を増やすことによってデータの信頼性を向上させる必要がある。

また、本研究成果によって得られた、基礎データに基づき、オペレータの作業内容の把握、操作方法の把握と作業視点を提供している環境のとらえ方、遠隔操作時おいて作業効率に起因する知覚情報の検証を進める必要がある。

参考文献

1）茂木正晴・藤野健一・大槻崇：建設現場への無人化施工技術の普及と今後の技術ニーズ-遠隔操作システムの検証実験報告-，第12回建設ロボットシンポジウム論文集，pp89～96，2010.9

2）Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Takashi Ootuki, Takeshi Hashimoto :ORESEARCH ON VISUALPOINT OF OPERATOR IN REMOTE CONTROL OF CONSTRUCION MACHNERY, The28th International Symposium on Automation and Rodotics in Construcion, pp532-537, 2011.6

3）藤野健一・茂木正晴・西山章彦・橋本毅：無人化施工におけるオペレータの熟達に関する研究，第13回建設ロボットシンポジウム論文集 pp，2012.9

都市部における地下街等冠水対策検討

国土交通省関東技術事務所　○ 増尾　健
田中　義光
村上　大幹

１．はじめに

本報告は、発生が懸念されている首都直下地震等での高波・津波の発生や、地震で脆弱化したインフラにおける洪水との複合被災により、都市部の地下構造物が冠水した場合などの具体的事例を想定し、現有災害対策用機械の有効活用を含めた対策の検討を行った。また、大規模災害により首都圏の大規模停電が発生した場合の現有災害対策用機械の運用検討を行ったものである。

２．検討内容

2.1　検討方法

本報告での検討が、地下構造物冠水対策に関する従来検討と最も大きく異なる点は、従来検討が「冠水させないためにはどうするか」の予防対策の視点での検討であったのに対し、本検討では「冠水したらどうする」の対処方法を検討した点である。その他、具体的な施設を対象としてケーススタディを行う事により、現状の施設における問題点、現有災害対策用機械を活用する上での改善点を具体的に洗い出したことも特徴として挙げられる。

このような既往状況から、今回検討の着手にあたっては、検討方法の構築から始める必要があった。

実施方針は、大きく以下の２項目である。

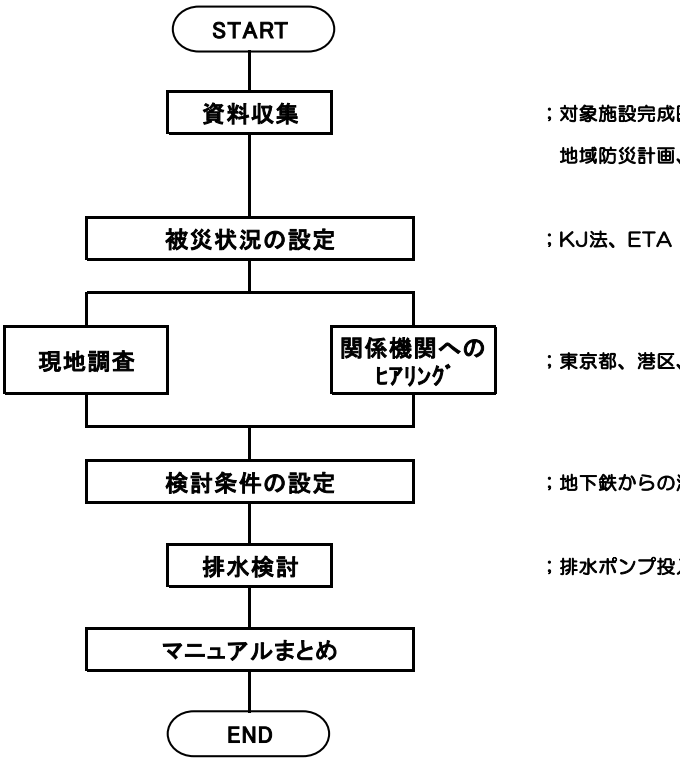
①現地調査による現場条件把握を重視する

②問題点の洗い出しを広く行う

検討の概要フローを図－１に示す。

検討を進める上で、既往資料が少なく、関係機関へのヒアリング、現地調査の果たす役割が大きかった。

地下街の冠水対策検討では、地下鉄からの流入は湛水量が膨大であることから、検討条件として除外することも考えたが、地下街と地下鉄は接続している関係上、地下街の冠水対策検討と地下鉄の浸水状況は不可分であると判断した。



図－１　検討の概要フロー

2.2　資料収集

対象施設の完成図書の他、管轄の地方自治体の地域防災計画、冠水した水の排水先のとして下水道幹線図および現地調査結果を基に、冠水災害時の復旧検討を念頭に置き、施設仕様として、湛水容量・排水先・既設排水設備仕様等を一覧として取りまとめた。日本橋地下街の例を表－１に示す。

表－１　施設仕様（日本橋地下街）

施　設　名	日本橋地下街	延長	300m
施設区分	地下街	幅員	28m
周辺河川	日本橋川	湛水容量	33,600m^3
位　　置	東京都中央区日本橋室町	地下鉄接続	あり：三越前、新日本橋



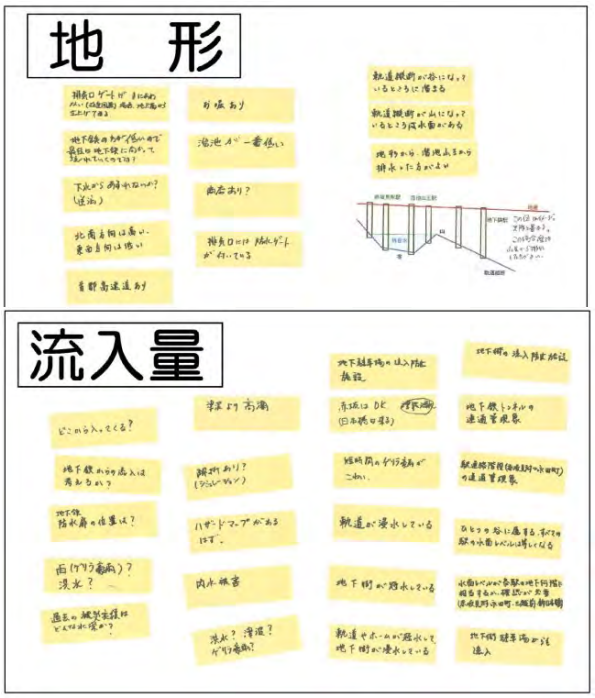
非常時排水先	河川	日本橋から日本橋川へ排水する。
	下水道	該当下水道なし
ポンプ設置個所	換気口、B6出口階段、B5出口階段 ※A9出口階段部オープンスペースは設置条件良好なるも、排水先に制限あり	

既設排水設備	施設名称	日本橋地下街ポンプ場		管理者	関東地方整備局東京国道事務所		
	①	形式		実揚程		全揚程	
		吐出量×台数		口径		電動機容量	
	②	形式		実揚程		全揚程	
		吐出量×台数		口径		電動機容量	
	③	形式		実揚程		全揚程	
		吐出量×台数		口径		電動機容量	
	④	形式		実揚程		全揚程	
		吐出量×台数		口径		電動機容量	
	総吐出量			総動力		総台数	

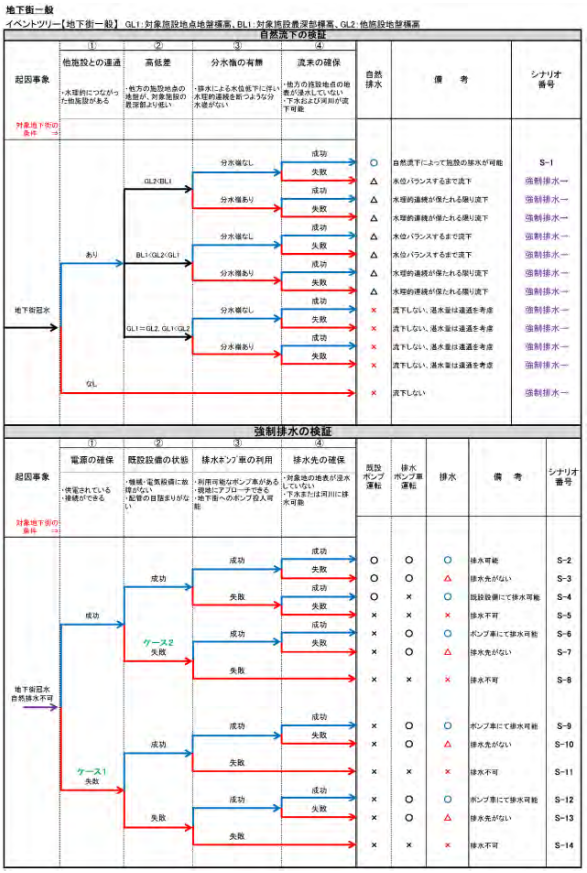
※ただし、赤字は詳細資料がない事による想定値

2.3　被災状況の設定

被災状況の設定は、洪水リスク・内水リスク等に関する既往検討結果を整理するとともに、ＫＪ法による課題点洗い出し、ＥＴＡによる被災シナリオを整理することにより、どのような状況で冠水災害に至るかを取りまとめた。ＫＪ法にて整理したもの（抜粋版）を図－２に、ＥＴＡにて整理したもの（地下街）を図－３に示す。



図－２　ＫＪ法による課題洗い出し（抜粋）

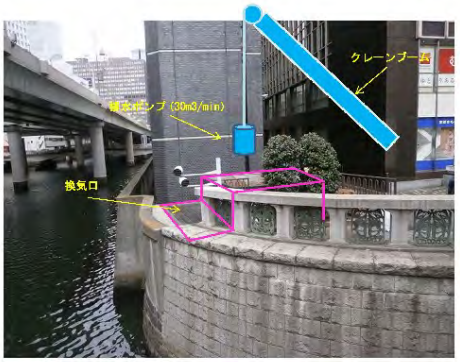


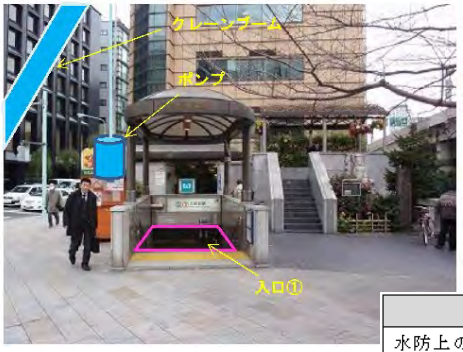
図－３　ＥＴＡによるイベント整理（地下街）

2.4　現地調査

対象施設の排水計画を立案する上での条件を明確にする観点でポンプ投入口、冠水被災時の緊急排水先等の確認を行った。対象施設は下記のとおり。

・日本橋地下街、赤坂地下街
・渋谷ｱﾝﾀﾞｰﾊﾟｽ、本町ｱﾝﾀﾞｰﾊﾟｽ、大井ｱﾝﾀﾞｰﾊﾟｽ





図－４　現地調査検討

2.5　関係機関ヒアリング

地下街冠水対策検討に必要となる情報入手の目的で、赤坂地下街の位置する自治体として港区、地下街に接続する地下鉄の運営機関である東京地下鉄株式会社(東京メトロ)、その他、消防関連の現状についての確認のため新宿消防署にヒアリングを行った。

東京メトロのヒアリング結果概要を表－２に示す。

いずれの機関でも、予防主体であり、冠水時の対応に関しては今後の課題としていた。

2.6　検討条件の整理

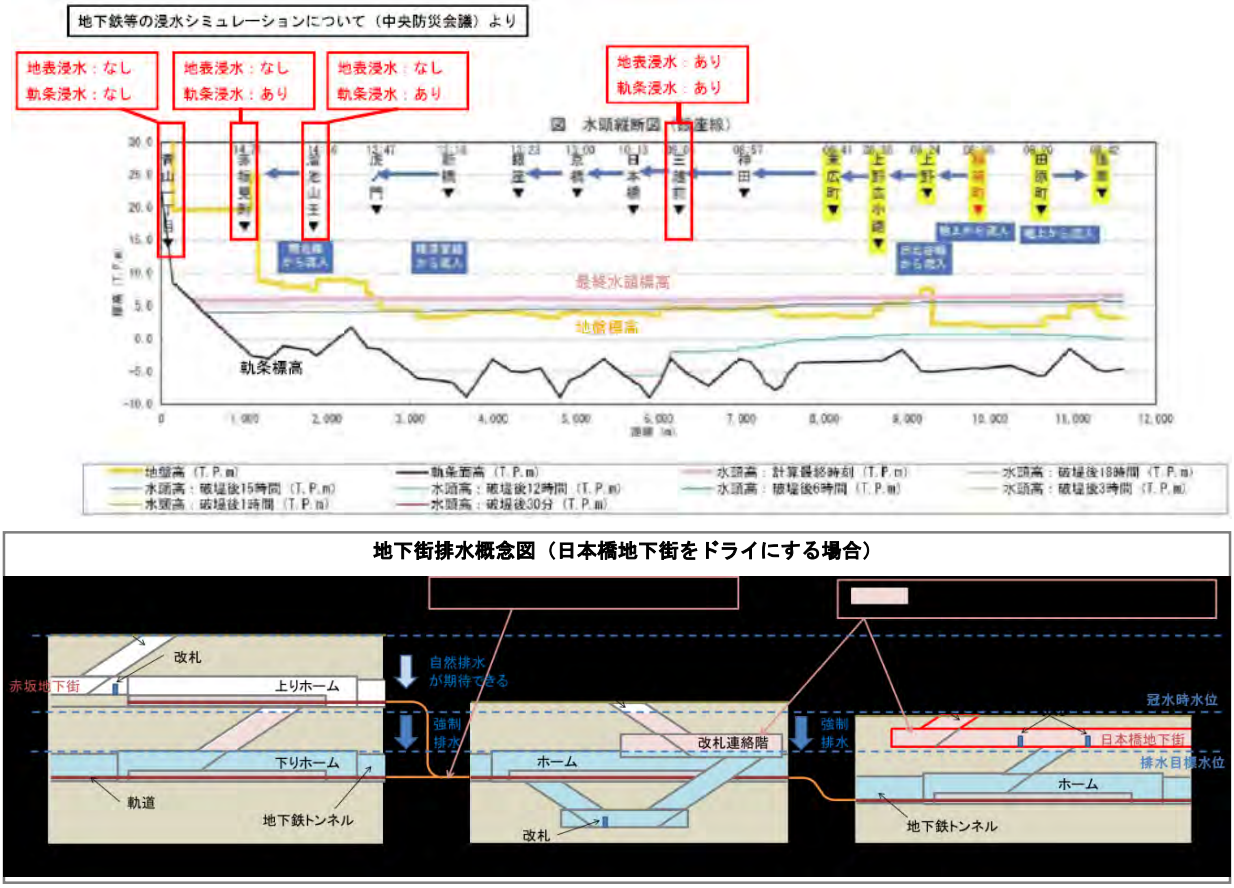
資料収集、現地調査、関係機関ヒアリング結果を基に、冠水時の排水検討を行う際の検討条件を取りまとめ、湛水領域を考慮した湛水量、排水時間の検討を行った。日本橋地下街における施設条件をまとめたものを表－３に示す。また、地下街冠水検討条件概念図（日本橋地下街）を図－５に示す。

表－２　東京メトロヒアリング結果

項　　目	確認事項
水防上の基本方針	水の侵入を未然に防ぐことを基本方針としている。
	構内の利用者をいち早く構外に避難させることを第一としている。
	現在は周辺機関と連携した防災計画は整備できていない。
	消防との連携は訓練含め、各駅で提携して実施している。
換気口について	浸水防止機は東京湾の過去最高高潮位以下の換気口を対象に設置している。
	浸水防止機は地上から手動操作が可能。
	浸水防止機を開け、グレーチングを外すことでポンプの投入は可能と考えられる。
	日本橋付近にある換気口は東京メトロのものであると考えられるが、あまり深くないため釜場としての有効性については疑問あり。
駅出入口止水板について	止水板はすべての出入口に設置している。
	止水板の高さは 700mm としている。
	荒川堤防決壊想定より今後の新たな対策として出入口建屋の改良や遠隔化の検討なども実施している。
	出入口が周辺施設の構造物にある場合は、設計段階で東京メトロと同等の止水板を設けるよう依頼している。管理は施設所有者が行っている。
	他社敷地にある止水板の設置作業は原則的に駅員が行う。周辺施設の協力を得ているケースもある。
地下鉄構内排水設備	駅および駅間に湧水等の排水のための排水設備を設けている。排水枡から排水ポンプによって下水管へ排水する。
	ポンプ規模は小さく、災害時を想定したものではない。
地下鉄トンネル防水ゲートについて	河床が崩落した際に、地下鉄を通って河川水が都心へ流れないために設けている。
	河川下横断部の都心側に設置している。坑口等からの流入を想定したものではない。

表－３　施設条件の整理（日本橋地下街）

項　目		日本橋地下街	備　考
利用		商業施設あり	三越などの商業施設が存在する。商業施設地下階とのフロアレベルはほぼ同一。
地下街規模		大	三越に直結する出入口があり、利用者が多い。
地下鉄駅との接続		三越前駅、新日本橋駅	ホーム階はいずれも地下街より下の階層にある。新日本橋駅とのアクセスは多少のアップダウンがあるものの、分水嶺となりうる規模ではない。
地盤標高		低い（約 E.L.+5.0）	隅田川以西の都心では最も地盤の低いエリアに該当する。冠水時の自然排水は期待できない。
既設排水設備		不明	図面、台帳等の情報がなく、現地でも発見できなかった。
排水先	近隣河川	日本橋川	B4,5,6 番出口は日本橋川に近接しており、日本橋上から排水が可能と考えられる。
	下水道幹線	なし	周囲の下水管は多くがφ300 程度と小口径である。A5 出口付近にφ900 の管がある。
ポンプ釜場	ｵｰﾌﾟﾝｽﾍﾟｰｽ	あり（A9 出口）	A9 出口がオープンスペースとなっており、重機を使った大容量ポンプ搬入検討の余地がある。止水板があるため運用につき要確認。
	換気口	あり	日本橋付近に大規模な換気口あり。
	エレベータ	あり	B4,A5,A7 出口にあり。いずれも地上ー地下１階運転。ホーム階へは行かない。
	階段	あり	あり。一部商業施設内へ直結。



図－５　地下街冠水検討条件概念図（日本橋地下街）

2.7　排水ポンプ車による排水作業の検討

検討条件に基づき、対象施設に関し、湛水容量算定、ポンプ投入口の検討、排水先の検討等具体的な排水計画の立案を行った。

概略検討フローを図－６に示す。



図－６　概略検討フロー

2.8　照明車の運用検討

大規模停電を想定し、重要施設（対象施設として日比谷公園、道路照明設備）における被災者(避難者)の安全対策として、照明車を活用した運用対策について検討を行った。

他施設での事例調査で確認された既設分電盤の改造事例を基に、日比谷公園内分電盤での自家発電装置からの受電可能な形式への検討を行った。

また、法的課題の検討として東京電力に、既設照明設備用分電盤を自家発電装置からの受電可能な形式に改造する場合の手続き/申請の要否・内容について確認を行った。その結果、新設の切替盤は申請対象とならないが、自家発電装置自体が“自家用電気工作物”と見なされるため、出動が想定される災害対策用車両の登録を経済産業省に届け出る必要がある。

３．まとめ

今回の検討結果を基に、他施設での検討に資する検討項目チェックシート（検討フロー、チェックリスト）をとりまとめ、検討時の漏れ防止を図るようにした。冠水施設排水計画検討項目チェックリストを表－４に示す。

４．今後の課題

以下の項目について、整理検討を行えば更なる精度向上が見込まれる。

4.1　地下街、アンダーパスのＤＢ作成

管内のアンダーパス、地下街について、以下の項目を明確にし、冠水対策検討ＤＢとして整理する。

・排水（冠水）容量　　・既存排水ポンプ施設とアンダーパス、地下街の標高関係

・地下街と地下鉄の接続有無　　・排水先

4.2　アンダーパスの施設別優先度設定

アンダーパスは当該施設が位置する道路の運行機能を考慮の上、冠水時の復旧優先順位を設定しておくことが必要と考える。今回の検討対象施設である大井アンダーパスの場合、東京湾横断トンネル部は大井アンダーパスに比べ低い標高に位置する。トンネルが冠水状態のまま、大井アンダーパスの冠水を解消しても、道路全体としての機能回復には繋がらない。当該施設の位置する道路を含めた近傍の道路網の機能回復を考慮した対応が必要である。

4.3　関連公共機関との協議立上げ

本検討において、対象地下施設の関連機関は、現状、浸水/冠水災害について、予防措置に重点を置いており、冠水後の対策については未着手であることが明らかとなった。

冠水対策手段として、国土交通省が保有する排水ポンプ車のポテンシャルは高く、地下鉄等隣接施設の普及にも充分貢献できる。

今後、これら機関との協力体制について、協議を行う機会を設け、具体的対策・手段について協議・決定し、「地下街冠水対応協定書(仮称)」として取りまとめるような協力体制の構築を思考していくことが望まれる。

表－４　冠水施設排水計画　検討項目チェックリスト（地下街）

No.	検討すべき事項		作成資料	参照資料	確認項目		チェック
1	計画準備	検討材料となる資料の収集	－	－	1-01	対象施設の構造図面	
					1-02	排水ポンプ車の諸元	
					1-03	洪水・津波シミュレーション、ハザードマップ	
					1-04	下水道台帳	
					1-05	対象施設所轄自治体の地域防災計画	
					1-06	対象地周辺の河川整備計画	
					1-07	地下鉄縦断図	
2	条件整理	対象施設の概要	(1)対象施設諸元	施設構造図面、 既設排水設備仕様 （寸法等仕様がわかる資料）	2-01	既設構造物の寸法、標高の確認	
					2-02	既設排水設備の諸元の確認	
					2-03	他の地下施設との接続はあるか	
					2-04	地下鉄駅とは接続しているか	
					2-05	周辺駅との標高差	
3	現地調査		－	－	3-01	階段の配置	
					3-02	地下鉄換気口の配置と寸法	
					3-03	エレベータの配置と寸法	
					3-04	オープンスペースの有無と配置	
					3-05	地下街内の勾配やアップダウン	
					3-06	構造図面がない場合は現地寸法計測	
					3-07	周辺河川の状況、配置	
					3-08	人の往来	
	関係機関との協議		－	－	4-01	所轄自治体との協議（災害時体制等の確認）	
					4-02	排水先管理者との協議（排水許可）	
					4-03	地下鉄事業者との協議（地下鉄設備確認）	
					4-04	消防機関との協議（災害時活動の確認）	
4	条件整理	災害の想定	(2)イベントツリー	地形図、 災害シミュレーション結果、 ハザードマップ等	5-01	浸水リスクの確認	
					5-02	浸水状況の想定	
					5-03	自然排水の有無の検討	
					5-04	排水開始時間の検討	
					5-05	設備の故障等の整理	
5	排水設備	既存排水設備の能力評価、 排水ポンプ車の能力評価	(3)湛水量・排水時間計算書	施設一般図 （寸法がわかる資料）、 排水ポンプ車仕様	6-01	地下鉄トンネルによる水連通の確認	
					6-02	地下通路による連通の確認	
					6-03	湛水領域の同定	
					6-04	湛水量の計算	
					6-05	排水ポンプ車諸元の整理（揚程・吐出量等）	
					6-06	排水時間の計算	
					6-07	排水ポンプ車適用性の評価	
6	排水先	周辺河川等への排水検討	(4)排水ルート図 （周辺河川へ）	周辺地形図、 地図情報、 地域防災計画	7-01	周辺河川の配置確認	
					7-02	周辺河川の計画流量確認	
					7-03	周辺河川への排水許容量の確認	
7	排水先	下水道への排水検討	(5)下水道流下能力計算書 (6)排水ルート図（下水管へ）	下水道台帳 （管径、勾配がわかるもの）、 地図情報	8-01	下水管方式の確認（合流式、分流式）	
					8-02	合流式は、汚水流量の想定	
					8-03	周辺下水道の管径および勾配確認	
					8-04	流下能力計算	
					8-05	有力排水先の抽出	
					8-06	有力排水先の配置確認	
8	排水設備	ポンプの設置方法検討	(7)ポンプ設置図	ポンプ設置箇所構造図面 （施設構造図面、 換気口構造図面、 エレベータ構造図面）、 現地調査資料	9-01	オープンスペースへのポンプ設置検討	
					(1)	オープンスペースの諸元把握	
					(2)	ｵｰﾌﾟﾝｽﾍﾟｰｽへのポンプ設置スペース確認	
					(3)	ｵｰﾌﾟﾝｽﾍﾟｰｽへのから排水先までの距離	
					9-02	換気口へのポンプ設置検討	
					(1)	換気口の諸元把握	
					(2)	換気口へのポンプ設置スペース確認	
					(3)	換気口へのから排水先までの距離	
					9-03	EVシャフトへのポンプ設置検討	
					(1)	EVシャフトの諸元把握	
					(2)	EVシャフトへのポンプ設置スペース確認	
					(3)	EVシャフトへのから排水先までの距離	
					9-04	階段へのポンプ設置検討	
					(1)	階段の諸元把握	
					(2)	階段へのポンプ設置スペース確認	
					(3)	階段へのから排水先までの距離	
					9-05	その他の投入口の検討	
9	排水設備	排水ポンプ車の配置検討	(8)排水ポンプ車配置図	周辺地形図面、 道路平面図、 排水ポンプ車仕様、 地図情報	10-01	ポンプ設置位置周囲の駐車スペース確認	
					10-02	駐車可能スペースからポンプまでの距離確認	
					10-03	駐車時の交通への影響確認	
					10-04	交通確保のための対策検討	
10	一時貯留池	一時貯留池の検討	(9)湛水容量計算書、 (10)排水ルート図	一時貯留地諸元、 周辺地形図、 地図情報	11-01	一時貯留池候補地の抽出	
					11-02	湛水容量の計算	
					11-03	止水方法の検討	
					11-04	ポンプ設置位置からの距離確認	
					11-05	貯留後の排水先までの距離確認	
11	調達	排水ポンプ車配備状況の確認、 排水ポンプ車走行経路の確認	(11)排水ポンプ車配備状況一覧 (12)排水ポンプ車の走行経路図	当該地域の 排水ポンプ車の所在、 特定緊急輸送道路図	12-01	ポンプ車配備状況の確認	
					12-02	災害時走行可能経路の確認	
					12-03	輸送ルートの想定	
					12-04	ポンプ車到着までの所要時間算定	
12	調達	必要台数、必要人員の確認	(13)必要資機材・人員数量表	備蓄資機材リスト	13-01	ポンプ車必要台数の検討	
					13-02	必要物資の確認	
					13-03	必要数量計算	

緊急小型車両の通行を想定した新しい緊急橋の実験的研究

広島大学大学院 工学研究科　○近広　雄希
広島大学大学院 工学研究院　有尾　一郎
施工技術総合研究所 研究第二部　小野　秀一
東北学院大学 工学部　中沢　正利

1．はじめに

最近，九州北部豪雨(2012.7)や東日本大震災(2011.3)などの広域な地域災害をはじめ，自然災害に起因する社会基盤構造物の被害は世界中で後を絶たない。特に，**写真**-1 に示す流橋や地すべり等の被害による交通ネットワークの断絶は，被災後の復旧対応やレスキュー活動を大きく左右するため，早期回復を優先すべき課題の一つである。しかしながら，一般的な災害現場は切迫した危険と物理的に制約された条件が多く，工事車両や緊急車両等の進入が困難であり，十分な作業エリアが確保できないなどの問題がある。また各地方整備局が所持している応急組立橋を用いた交通路復旧法でさえ，被災後の出動要請から供用に至るまで 1 週間以上を要する [1]。

一方で，橋梁パーツを予めモジュール化することにより現場施工作業を簡略化させる技法 [2]やFRP[3]，空気膜[4]などの軽量素材を用いた新しい応急組立橋の開発研究を各橋梁メーカーが行っている。しかし，これらの応急組立橋もまた重機や架設ヤードの使用など現場依存性を持つため，根本的な早期復旧法の改善には至っていない。

以上のように，災害が多い我が国でさえ「復旧スピード」を最優先としたツールは乏しく，今後の被災に備えた新しい緊急仮設システムを構築しておくことは，必要不可欠な要件である。そこで著者らは，被災直後の緊急対応性を重視した，数時間で緊急的にも仮復旧が可能な折畳み仮設橋システム(モバイルブリッジ，以下 MB と称す)をこれまでに提案している [5),6)]。本稿では，現在開発中である MB の概要と実車両を用いた載荷試験結果について報告する。

2．緊急折畳み橋モバイルブリッジについて

MB は Michell の構造最適化問題における研究 [7]をヒントに，はさみのようなX状の連鎖機構を橋梁の構造形式に採用する緊急折畳み橋で，従来の上/下弦材を有するトラス橋とは本質的に異なる構造体である。展開構造の分野ではこの機構をシザーズ機構と呼び，はさみ状の骨組み部材をピン回



写真-1　集中豪雨による流橋被害例(2012.7)

動で組み合わせた構造ユニット体から構成される。このように，構造物全体を折畳める構造にすることで，優れた収納性・運搬性・架設性を生み，これまで問題であった重機による組立や架設ヤードの確保が不要となり，現場ニーズに即した施工問題に対応できると考えられる。

しかし，シザーズ構造系をはじめ折畳み構造体は仮設ドーム，昇降機，宇宙構造物以外に積極的な活用がされてこなかった。まして橋梁構造になると自重の影響に加えて，車両等の活荷重が問題視されるため，構造力学上では実現不可能もしくは不安定構造物と認識され，土木構造物への応用はこれまでに少ない。例えば，歩道橋 [8]やアルミニウム合金製応急組立橋 [9]などへのデザイン設計や解析的検討までに留まり，軍事橋などの特殊な例を除いては実現に至っていない。そのため，設計概念や力学的に未明な部分も多い。

著者を含む当研究開発グループでは，これまでに人が渡れる程度の小型実験橋に基づいた基礎実験を実施し，力学特性の把握や MB の設計法の構築についての基礎研究を重ねてきた [10)-15)]。しかしながら，歩道橋スケールでの MB の設計計算や解析手法が実スケールサイズのシザーズ構造体でも同等に成立するとまでは言い難い。そこで本研究では，MB の使用限界の評価として小型車両 1 台程度の通行を想定した 2 格間部分試作機(以下

MB1.0 と称す)を実験的に試作し，力学実験を実施する。活荷重として実車両を用いた車両通行実験をすることにより，MB1.0 上における車両位置と応力分布の変化を捉え，車両通行時におけるシザーズ橋の安全性および力学特性についての評価を試みる。また, MB1.0 の簡易的設計モデル，解析モデルを構築し，実験値との整合性を比較することにより，設計モデルの妥当性を検証する。

３． 実験用モバイルブリッジの概要

車両通行を想定したモバイルブリッジの 2 格間実験橋(MB1.0)の概略図を**図**-1 に示す。MB1.0 は, 2 つのシザーズユニットが連なる下路橋タイプの折畳み可能なシザーズ橋である。展開後(シザーズ展開角：60°の場合), 全長 6.98m, 全高 2.00m を想定しており，本体フレームとシャフト，ピン等の構造部品を含め全重量 8.50kN (867kgf)となった。軽量化のために，シザーズ構成部材にはアルミニウム合金 A6N01 材を用い，車両走行路には押出材からなるアルミニウム合金 A6063 材の床版を用いている。アルミニウム合金製床版は，自重低減のために 1 枚当たりの幅を 1 車輪相当に制限しており，シザーズ 1 格間につき左右輪分の 2 枚が敷設されている。また格間毎の床版同士は溝形材をベースとしたジョイント材を介して連結されている。

MB1.0 の収納状態からシザーズ展開完了までの様子を**写真**-2(a)から(d)にそれぞれ示す。展開構造体である MB1.0 は，**写真**-2(a)のように収納時にはコンパクトに折畳まれ，横倒しとした状態で保管が可能である。使用の際には，本体シザーズ部を架台部から起立させ，展開することにより橋となる(**写真**-2(b)-(d))。収納時に折畳まれた状態であったアルミニウム合金製床版は，シザーズ部材の展開動作に連動して展開され，展開完了後に走行路となる。このことにより，シザーズ展開後に床版を敷設する時間が省かれ，架設時間を大幅に短縮することができる。展開されたアルミニウム合金製床版は格間毎に定尺長で設置され，ジョイント材がシャフト上に重なる形で固定され，弦材のように橋を補強する構造となる。

４．アルミニウム合金製床版の耐荷力実験

車両通行実験用走行路であるアルミニウム合金製床版の曲げ耐荷力および特性について評価する。

4.1 アルミニウム合金製床版概要

車両走行用のアルミニウム合金製床版を**写真**-3 に示す。アルミニウム合金製床版は 1 枚当たり全長 3200mm, 幅 500mm であり，両端部には脱輪防止縁部が備わっている。材質は A6063-T5 材を用いており，幅 200mm と幅 100mm の押出中空材を溶接接合することにより構成している。1 枚当たりの重量は 0.49kN(50kgf) である。

4.2 実験概要

アルミニウム合金製床版 1 枚当たりの輪荷重に対する耐荷力を把握するため, 3 点曲げによる耐力実験を実施した。ジョイント部とアルミニウム合金製床版の接合部である両端ピン部にφ8mm の丸鋼を通し, MB1.0 上での支持状況を再現した。荷重は試験機により，アルミニウム合金製床版の中央部に与えた。載荷板は, Eurocode の橋梁デザインよりタイヤ接地面相当の 175mm*175mm の鋼板とゴム板を使用した。

4.3 実験結果

アルミニウム合金製床版中央部の載荷点位置に

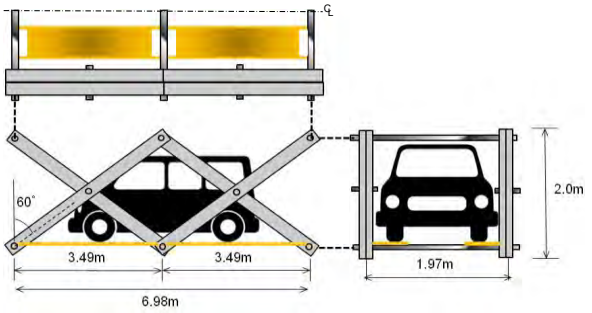


図-1 実験橋概要図



(a)収納状態 (b)展開前



(c)展開動作中 (d)展開完了

写真-2 展開/収納時の挙動

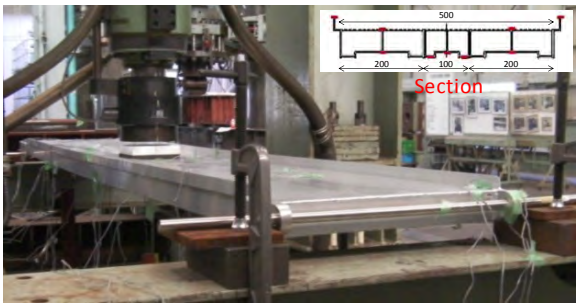


写真-3 車両走行用アルミニウム合金製床版

おける荷重-変位曲線を**図**-2 に示す。縦軸に試験機による与えた荷重(kN)を，横軸に試験機ヘッド部分の変位(mm)をそれぞれ示す。1kN まで 0.2kN 刻みで，1kN 以降は 1kN 刻みで荷重 14kN を計測後，除荷し再び残留ひずみ，アルミニウム合金製床版の変形状態を確認した。除荷後，変位 10mm ごと増加させた。最大荷重 15.1kN 付近でアルミニウム合金製床版は表面にセル状の座屈を生じ耐荷力を失った。最大荷重時におけるアルミニウム合金製床版の中央たわみは 117.3mm であった。

4.4　中央断面における応力分布状態

アルミ合金床版の中央部における応力分布図を**図**-3 に示す。**図**-3 上図の赤くマークされた箇所はひずみゲージを貼付した位置を，**図**-3 下図は各荷重値が 4.5kN, 5kN, 5.5kN 時の中央断面における応力分布図を，それぞれ示す。応力分布図において，縦軸は応力値(MPa)，横軸は断面中央からの距離(mm) をそれぞれ示す。また図中の赤ラインは，JIS 規格により最低保証される A-6063 材の降伏応力である σ_y=110MPa を示す。

図-3 より，荷重値が 5kN 以上の時に下面側の凸状部が先行して降伏した。よって，今回のアルミニウム合金製床版 1 枚当たりの使用限界荷重は 5kN までであることが確認でき，MB1.0 上において，左右輪で 10kN 以内の軸荷重を持つ車両の通行が可能であることが示された。

５．小型車両を用いた静的載荷実験

5.1　実験概要

単純梁状態とした MB1.0 を用いて車両通行実験を実施した。ひずみ値は前輪，車両中央，後輪が特定箇所に来た場合に停車し，静的に計測した。**表**-2 に MB1.0 上での車両停車位置を示す。車両停車は 1 格間目の床版中央部，本体中央部に着目し，5 パターンで測定した。車両はスロープを通り MB1.0 内に進入し，架台側の設置したスロープを通過する。ひずみゲージは応力集中が生じると考えられるピボット部およびヒンジ部周辺およびその上縁と下縁部分にそれぞれひずみゲージを貼付した。

車両はホンダ製 STREET と日産製 AD バンの 2 種類の車両を用い，3 ケースの荷重を与えた。使用した車両重量の概要を**表**-3 に示す。STREET は全長*全幅*全高が 3195 mm*1395 mm*1870mm，重量が 7.9kN，車軸間距離は 1900mm からなる。運転手込みで 9.6kN および 11.8kN の 2 通りを計測した。AD バンは全長*全幅*全高が 4370mm*1895mm*1510 mm，車量が 12.3kN，車軸間距離は 2535mm からなり，運転手を含み最大重量は 13.8kN であった。

5.2　平面骨組解析概要

本解析は Autodesk 社の CAD 内に連動する内部プログラミング(ANSYS) を用い，骨組解析を行っ

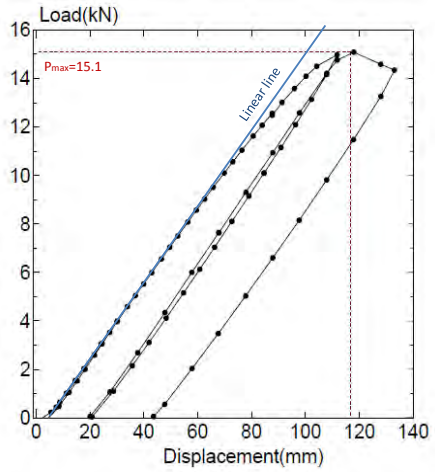


図-2　荷重-たわみ曲線

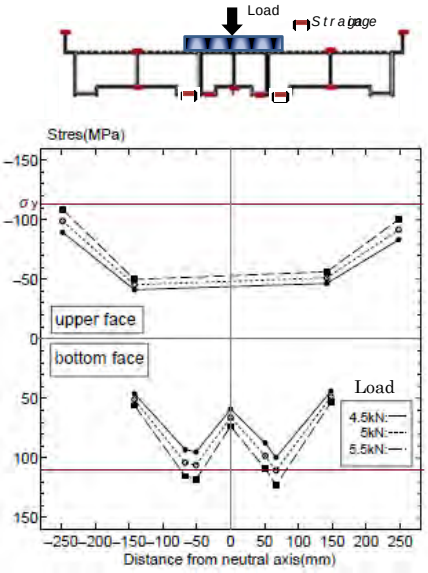


図-3　中央断面位置における応力分布

表-2　車両停車位置

Measure condition	
A	FW is the center of first slab
B	Middle of the vehicle is the center of first slab
C	FW of the vehicle is the center of MB
D	Middlle of the vehicle is the center of MB
E	RW of the vehicle is the center of MB

※FW=Front wheel, RW=Rear wheel

表-3　車両概要

Case	Vehicle	Loading condition(kN)		
		Total	Front axle	Rear axle
1	STREET	9.6	5.2	4.4
2	STREET	11.8	6.3	5.5
3	ADvan	13.8	7.5	6.3

た。本車両通行実験は車両通行に耐える使用限界内での使用を前提としているため，解析は全て弾性解析とした。また要素は全て梁要素を用いた。

5.2.1　解析条件

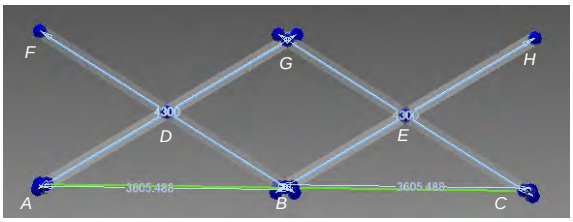
解析モデルを**図-4** に示す。便宜上，節点 A から H を定義する。**図-4** (a)は床版を考慮したモデル，**図-4** (b)は床版を考慮していない簡易解析モデルである。部材交差部であるヒンジおよびピボットについては，**図-5** に要素モデルを示すように，回転を許容する要素を節点に共有させることでシザーズの連結を再現している。また床版については，節点 AB 間および BC 間に対してそれぞれ梁要素を与えている。要素端部をモーメントフリーなピン結合とすることにより，MB1.0 を簡易的に模している。**図-4** (a)より，床版を考慮したモデルでは，アルミ合金床版上において車両が停車した位置に相当する場所に輪荷重を作用させる。**図-4** (b)より，簡易解析モデルでは，アルミ合金床版に作用した車両重量を，シザーズ部材が交差するピン接合部(点 A, B, C)に等価節点外力として作用させる。境界条件として，両端部のシャフト部である点 A と点 C をピン固定とし，単純梁状態とする。

5.3　車両走行実験結果

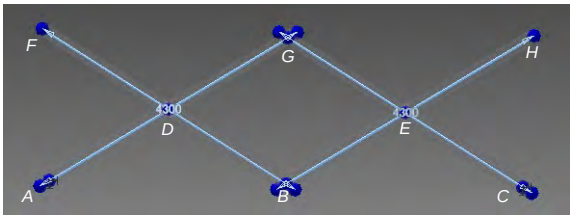
実験および解析結果として，MB1.0 中央部に前輪が一致した Case C の着色したひずみ分布を**図-6** に，MB1.0 中央部に車両の中央部が一致した Case D の着色したひずみ分布を**図-7** にそれぞれ示す。横軸は車両進入部からの距離を示し，縦軸は部材に発生したひずみ分布を示す。また**図**(a)は赤く着色した「∧」型に配置された部材のひずみ分布を，**図**(b)は着色した「∨」型に配置された部材のひずみ分布状態をそれぞれ表す。グラフ内において実験値は点で，床版を考慮したモデルの解析結果は実線で，床版を考慮していない簡易モデルの解析結果を破線で，それぞれ示す。

実験および解析結果より，「∧」型に配置された部材が車両による荷重に対して抵抗し，「∨」型に配置された部材にはほとんどひずみが生じていない。これは，「∨」型に配置された部材の端部はフリーな状態であるため，ほとんど抵抗しなかったと考えられる。

「∧」型に配置された部材に着目したとき，部材中央部の縁ひずみにおいて最大値/最小値が確認された。これは部材中央部でシザーズ部材に対する曲げひずみが最大値/最小値を取るためであり，人用実験橋による既往研究[10)-12)]と同様の傾向が得られた。また**図-6**(a)，**図-7**(a)より，車両重量の変化に伴い部材中央部の上/下縁ひずみ分布は増加していることが確認できる。最大ひずみは，　AD バン



(a)　床版を考慮した解析モデル



(b)　骨組のみの簡易解析モデル

図-4　平面骨組モデル

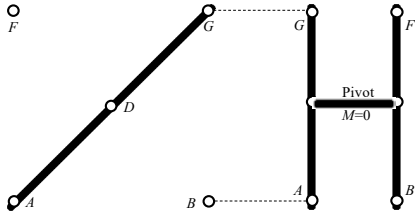
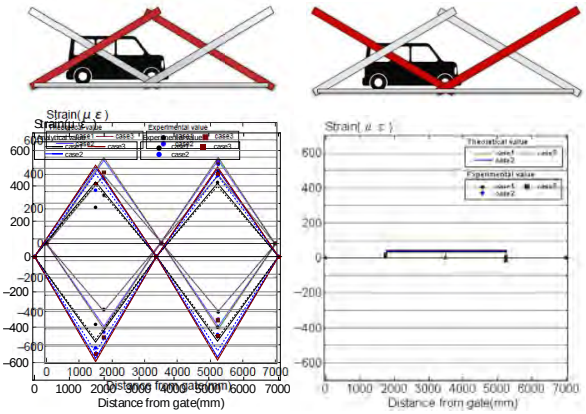
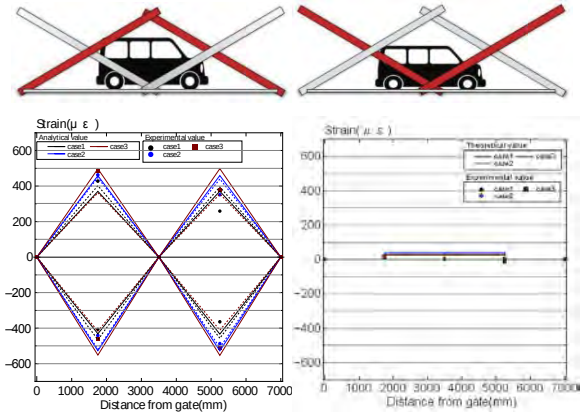


図-5　ピボット部のモデル化



(a)　∧型に配置された部材　(b)　∨型に配置された部材

図-6　Case C ひずみ分布



(a)　∧型に配置された部材　(b)　∨型に配置された部材

図-7　Case D ひずみ分布

(13.8kN)積載時で 512με と弾性範囲内に収まった。同車種を用いた STREET でのひずみ増分変化に着目すると，2.2kN の輪荷重増加に伴い発生したひずみが 8 から 13%ほど増加した。また車両の重心位置がある格間上において，50με から 100με ほど圧縮ひずみの方が引張ひずみに比べ大きいことが確認できる。これは車両の重心が位置する格間上の部材に対して圧縮力が作用するためと考えられる。

「∨」型に配置された部材に注目したとき，端部からピボット部分までは無応力であるが，ピボット部からヒンジ部にかけひずみが生じている。これはピボット接合部において内力が生じるため，ピボット-ヒンジ間において，軸力が生じているためだと考えられる。**図**-6(b)と**図**-7(b)では共に 10 μ 程度のひずみが確認でき，軸力として 250N 程度の力が作用していることが分かる。

5.4　解析結果および実験値との比較

解析モデルが結果に与える影響について比較する。**図**-6, 7より，床版を考慮した解析モデルの方が簡易解析モデルより3%から6%ほど高いひずみ分布を示した。よって二つの解析モデルからは大きく異なった結果は生じないことが分かった。またひずみについて実験値と解析値と比較すると，ひずみの分布傾向が局所的に異なる部分はあるものの，両モデルとも最大もしくは最小ひずみを6%程度の誤差で捉えられており，解析結果は実験値に比べ安全側の結果となった。

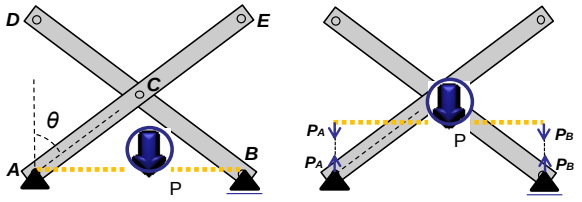
以上のことから，車両積載時における部材のひずみ分布は，車両から伝わる輪荷重を等価節点外力として作用させることで簡易的にかつ設計上安全側で算定することができると分かった。

6．シザーズの平衡力学理論モデルへの反映

既往の研究[5), 10)]においてシザーズ構造体の設計は梁理論をベースに行われていた。そこで本節では簡易解析モデルの考え方を応用し，車両通行を想定したシザーズ構造体の設計モデルの構築について検討する。**図**-8(a)に床版を組込んだ単位シザーズモデルを，**図**-8 (b)に単位シザーズと床版を独立させた FBD を示す。**図**-8(a)より，節点 AB 間に床版を敷くことにより，車両通行が可能となる。図中に示す輪荷重により，床版には**図**-8 (b)のように支点反力が発生する。床版に生じた支点反力は単位シザーズ本体に外力として伝達される。床版から伝わる輪荷重は車輪位置によって変化するため，シザーズ部材および床版に発生する応力とひずみの分布は車両位置に伴い変化する。

6.1　単位シザーズの力学

単位ユニットから成る 1 格間シザーズの FBD を



(a)　全体系　　(b) 床版を考慮した FBD

図-8　床版を考慮した単位シザーズ

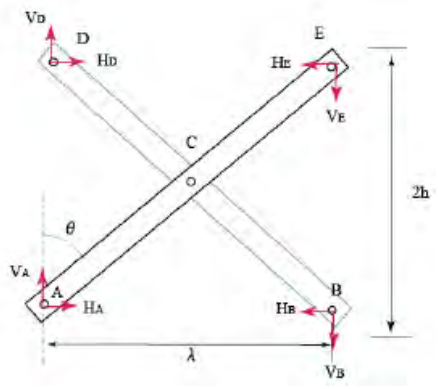


図-9　単位シザーズの FBD

図-9 に示す。図中のピン各点に作用する力(H_i, V_i)の力の釣合式を導く。図中の点 C が回転を許容するピン結合されたピボットが存在する。水平方向と鉛直方向の力の釣合いより，次の式(1)が求まる。

$$\left.\begin{aligned}\sum H &= H_A - H_B + H_D - H_E = 0,\\ \sum V &= V_A - V_B + V_D - V_E = 0\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

各節点に対するモーメントの釣合式を立てると，以下の式(2)を得る。

$$\left.\begin{aligned}\sum M_{atA} &= (H_D - H_E)2h + (V_B + V_E)\lambda = 0,\\ \sum M_{atB} &= (H_D - H_E)2h + (V_A + V_D)\lambda = 0,\\ \sum M_{atD} &= (-H_A + H_B)2h + (V_B + V_E)\lambda = 0,\\ \sum M_{atE} &= (-H_A + H_B)2h + (V_A + V_D)\lambda = 0,\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

シザーズを構成する各部材(AE, DB)に着目し，ピボット(C 点)回りのモーメントの釣合式を立てる。

$$\left.\begin{aligned}&\text{Member of } AE: M_C = -H_A h + V_A(\lambda/2) = H_E h - V_E(\lambda/2),\\ &\quad\therefore (-H_A - H_E)h + (V_A + V_E)(\lambda/2) = 0,\\ &\text{Member of } DB: M_C = H_D h + V_D(\lambda/2) = -H_B h - V_B(\lambda/2),\\ &\quad\therefore (H_B + H_D)h + (V_B + V_D)(\lambda/2) = 0\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

以上の 8 つの式を整理し，行列形で表示すると，

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1\\ 0 & 0 & 0 & S & S & 0 & -C & S\\ 0 & S & 0 & 0 & C & S & -C & 0\\ -C & 0 & C & S & 0 & 0 & 0 & \lambda\\ -C & S & C & 0 & 0 & S & 0 & 0\\ -C & S & 0 & 0 & 0 & 0 & -C & S\\ 0 & 0 & C & S & C & S & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_A\\ V_A\\ H_B\\ V_B\\ H_D\\ V_D\\ H_E\\ V_E \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0\\0\\0\\0\\0\\0\\0\\0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式(4)からなる関係式を得る。ここに，S=$Sin\theta$=λ/L,

表-4　ピボット部(D 点)におけるひずみ値

Case	Experiment		FE analysis		Scissors theory	
A	-285	215	-247	215	-207	203
B	-487	374	-483	421	-406	396
C	-550	411	-596	517	-511	499
D	-459	486	-552	497	-487	475
E	-468	346	-491	476	-462	452

C=$Cos\theta$=2h/L となる。式(4)に境界条件，荷重条件を考慮することで未知の支点反力を算定することが可能となる。各部材に発生する断面力は，算出した反力(Hi,Vi)を用いると，式(5)のように軸力とせん断力の関係が導出される。

$$\left.\begin{aligned} N_i\sin\theta+S_i\cos\theta&=-H_i\\ N_i\cos\theta-S_i\sin\theta&=-V_i\end{aligned}\right\}\longrightarrow\begin{bmatrix}\sin\theta & \cos\theta\\ \cos\theta & -\sin\theta\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}N_i\\ S_i\end{Bmatrix}=-\begin{Bmatrix}H_i\\ V_i\end{Bmatrix}$$

$$\therefore\quad\begin{Bmatrix}N_i\\ S_i\end{Bmatrix}=-\begin{bmatrix}\sin\theta & \cos\theta\\ \cos\theta & -\sin\theta\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}H_i\\ V_i\end{Bmatrix}\qquad(5)$$

6.2　理論計算値との比較

車両実験の各荷重ケース時に対応した理論計算および実験値と解析値によるひずみの値を表-4 に示す。ひずみの値は 1 格目のピボット部である D 点に着目した。活荷重は AD バン(13.8kN)である。また解析値はアルミニウム合金製床版を考慮した結果を示す。理論計算の結果に着目した場合，実験値および解析値と比較すると軸ひずみによる影響が少なく，引張域と圧縮域で近似した値が得られているため，曲げひずみが支配的であると考えられる。実験結果と比較した場合，Case A と B の最小値で 20%から 25%程度の誤差は生じたものの，残りの車両載荷位置 Case C から E では 10%程度の誤差内に収まり，簡易的に最大/最小縁ひずみを予測する設計モデルとして妥当な結果を得た。

7．結語

本研究では，MBの実スケール実験橋1.0を用いて，基本的な伸縮動作および車両通行時における力学的特性について検討した。本研究より明らかになったこと以下にまとめる。

- 最大荷重 13.8kN に対して MB1.0 が使用限界範囲内であることを確認し，車両通行時の安全性を示した。
- 今回使用したアルミニウム合金製床版は，1 枚当たり 10kN の荷重まで耐えられることが分かった。
- 骨組解析を用いて，簡易解析モデルの妥当性を示し，シザーズの理論モデルに適用できた。
- 今後はより厳密なモデルを理論モデルへと反映し，設計時の予測精度を向上させる。

謝辞

本研究は研究代表者有尾一郎の科学研究費基盤研究(B)の研究課題の成果の一部であり，関係各位に深謝する。また，星軽金属工業(株)には試作のためのアルミニウム合金製床版を提供頂き，ここに深く感謝申し上げる。

参考文献

1) 稲垣考：応急組立橋の架設と供用上の課題，橋梁と基礎, Vol.46, No.8, pp.87-90, 2012
2) 松尾エンジニアリング(株)：災害復旧用の橋として威力発揮, IHI 技報, Vol.51, No.4, 2011
3) FRP 橋梁設計技術小委員会：FRP 橋梁設計技術小委員会報告書，構造工学技術シリーズ, No.53, 2006
4) 鈴木圭：超軽量エアービームの災害復旧への活用，橋梁と基礎, Vol.46, No.8, pp.111-114, 2012
5) 有尾一郎, P. Pawlowski・J. Holnicki：災害用の軽量展開構造系の設計概念と構造解析，全国大会年次学術研究講演, CD-ROM, 2007
6) 中沢正利，有尾一郎，谷倉泉，小野秀一：MFM 概念とそれを応用したモバイルブリッジの研究開発，土木学会全国大会第一部門, CD-ROM, 2009
7) 有尾一郎，Kim.H.A.：３次元空間における形態形成の Michell 問題，日本機械学会最適化シンポジウム講演論文集, Vol.7, pp.179-184, 2006
8) 西山健一，石井信行：張力安定構造を用いた伸縮式橋梁デザイン，構造工学論文集, Vol.45A,pp.589-596, 1999
9) 和光太郎，笠野英行，今井里織，依田照彦 : 展開可能なアルミニウム製応急橋に関する基礎的研究,土木学会第 59 回年次学術講演会,CD-ROM,愛知工業大学,2004
10) 古川祐輔，有尾一郎，田中義和，近広雄希，作野裕司，椿涼太：シザーズ機構を持つモバイルブリッジの架設動的実験とその解析，広島大学大学院工学研究院研究報告, Vol.59, No.1, 2010
11) 有尾一郎，田中義和，中沢正利，古川祐輔，近広雄希：高効率で折畳める橋構造物の開発研究（解析編）,第 25 回 JAXA 宇宙構造材料シンポジウム, pp.104-107, 2009
12) 田中義和，有尾一郎，中沢正利，古川祐輔，近広雄希：高効率で折畳める橋構造物の開発研究(実験編)，第 25 回 JAXA 宇宙構造材料シンポジウム, pp.108-111, 2009
13) 中沢正利，有尾一郎：シザーズ構造を応用した応急展開橋の力学特性,安全問題研究論,Vol.5,pp.133-138,2010
14) Masatoshi Nakazawa, Ichiro Ario : Structural Characteristics of Scissors type-Emergency Bridges, Australian Small Bridges Conference, Gold Coast, 2012
15) 近広雄希，有尾一郎，田中義和，中沢正利：スマートブリッジ概念に基づく折畳み型の緊急復旧対策用モバイルブリッジの研究開発，広島大学大学院工学研究科研究報告, Vol.60, No.2, 2011

ブラスト処理による除染作業の効率化

ドライアイスブラストおよびバキュームブラストロボットによる実証試験

戸田建設(株)　技術研究所　○ 澤田　晃也
同　環境事業推進室　森　一紘
同　環境品質管理部　高橋　昌宏

１．はじめに

福島第一原発事故を発端とする放射性物質の拡散による汚染は広範囲にわたり，以前の環境を取り戻すためには確実な除染が急務となっている。また，除染においては廃棄物の保管や作業員の被曝対策など様々な問題が顕在化している。

一般的な除染工法としては水を用いた高圧水洗浄法が多く採用されているが，使用した水の回収や回収した汚染水の減容化処理，さらに作業時の二次汚染に対する処置などの課題がある。水を使用しない乾式の除染工法では，水の回収等の課題は解決できるものの，作業中に多くの粉塵が発生するといった課題も指摘されている。

このような問題を解決する手段として，ドライアイスブラスト工法（以下，DIB 工法）とバキュームブラストロボット工法（以下，VBR 工法）についての実証試験を実施したので報告する。

２．工法の概要

2.1　DIB 工法の概要

本工法は，直径約 3 ㎜，長さ約 10 ㎜程度のドライアイスペレットを家屋の壁や屋根，駐車場などのアスファルト舗装面等の対象面に投射（ブラスト）し，除染対象面から放射性物質を除去する工法である。DIB 工法の概念を図-1 に示す。



図-1　DIB 工法の概念

高圧でドライアイスのペレットを対象面に打ち付け，ドライアイスが昇華する際の爆発力と表面の凍結効果により効率的に除染する。

今回の実証実験では，以下に示す 3 種類の養生方法にて実施し，違いを確認した。さらに除染対象面にゲル状の物質を吹き付けるゲルスプレー工法についても実証試験を実施した。

表-1　養生方法の比較

【局所隔離】 ﾜｲﾄﾞﾊﾞｷｭｰﾑ方式	除染対象位置で吸引を行い，粉塵の飛散を防止する。
【部分隔離】 ｸﾞﾛｰﾌﾞﾊﾞｯｸ方式	対象面を部分的に隔離し，粉塵の飛散を防止する。
【全体隔離】 隔離養生方式	対象面を全面的に隔離し，粉塵の飛散を防止する。

2.2　VBR 工法の概要

本工法は，金属片（研掃材）を道路などの対象面に投射（ブラスト）し，表面を切削することで除染対象面から放射性物質を除去する工法である。

ブラストと同時に吸引を行うことで放射性物質を含む切削したダストおよび研掃材を回収する。VBR 工法の概念を図-2 に示す。

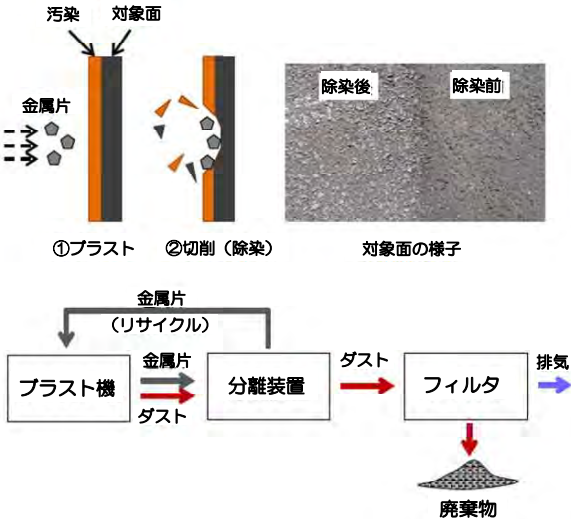


図-2　VBR 工法の概念

３．実証試験計画

3.1　全体概要

(1) 試験計画

実証試験は福島県内の公共施設の建屋外壁及び駐車場アスファルト舗装路面にて実施した。建物の配置（施工位置）図を図-3 に，敷地内全体状況を写真-1 に示す。計画概要は以下の通りである。

①所 在 地：福島県内集会所
②敷地面積：約 800 ㎡
③除染対象：建屋外壁，駐車場舗装面
④試験期間：5 日間
⑤適用工法：DIB 工法，VBR 工法

(2) 試験の目的

①除染効果の確認

放射性物質で汚染された建築物（外壁・屋根等）や工作物（壁面・路面等）におけるドライアイスブラストとバキュームブラストによる除染の効果を確認する。

②飛散防止効果等の確認

複数の飛散防止措置を実施し，除染作業により放射性物質が付着した粉塵等の飛散の状況を確認する。また，除染面に粉塵飛散防止材（ゲル化剤）を塗布することによる回収の効果を確認する。

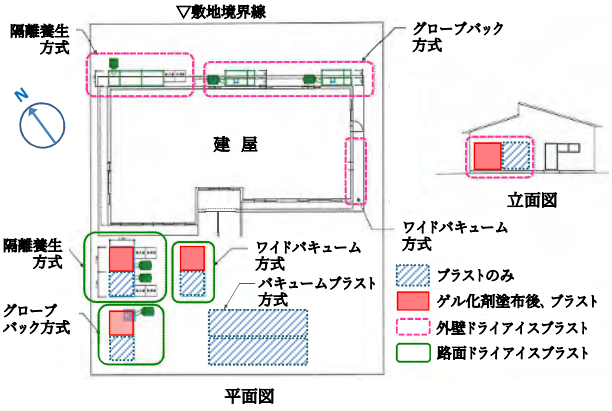


図-3　配置（施工位置）図



写真-1　全体状況

3.2　DIB 工法の計画

(1) 工法の特徴

ドライアイスブラストは，飛散性アスベストの除去や機械設備の表面洗浄等に利用されており，高圧でドライアイスのペレットを対象面に打ち付け，ドライアイスが昇華する際の爆発力と表面の凍結効果により効率的に汚れを除去する。

ドライアイスペレットが対象物に衝突する際，ドライアイスは気体に変化（昇華）し，体積が 800 倍に膨張して汚れを剥離する。ドライアイスペレットは-79℃と低温のため，ペレットが打ち付けられた対象物の表面は凍り，対象物から汚れが剥離する。

(2) 試験の方法

建屋の外壁および路面について，それぞれ 1 箇所あたり幅 4m×高さ 2m を除染対称面とした。除染対象面の区分を図-4 に示す。除染対象面の半分には，粉塵飛散防止剤（多糖類を主成分としたゲル化剤に食紅を溶かしたもの）を塗布後，除染を行う。粉塵飛散防止剤を塗布する目的は以下の通りである。

① ゲルが浸透した汚染物質を捕集することによる除染効果の向上を図る。
② ゲルを着色することで施工を目視で確認する。
③ ゲルが凍結することによる粉塵を回収しやすくする。

(3) 除染効果の確認

除染対象面のドライアイスブラスト実施後に表面放射線量を測定し，事前の測定結果と比較する。ブラスト処理は 1 箇所に 2 回実施し，放射線量を測定する。測定点は図-4 に示す 5 ポイント（中心と四方 4 ポイント）とし，平均値を求めた。

ブラスト →表面測定 →ブラスト →表面測定
（1 回目）　（1 回目）　（2 回目）　（2 回目）

(4) 飛散防止効果の確認

粉塵量の測定位置を図-4 に示す。除染対象面より 1m 離れた地点（四方 4 ポイント）において，除染実施前と実施後に測定する。

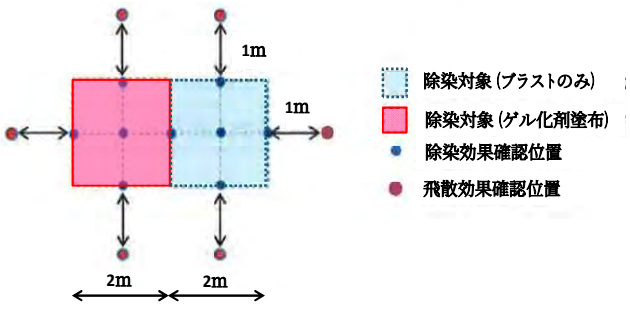


図-4　除染対象面と測定位置

(5) 養生の方法

養生方法の詳細を表-2 に，施工状況を写真-2 に示す。3 種類の飛散防止措置を実施し，周辺への粉塵の飛散状況を確認する。

表-2　養生方法の詳細

分類	養生方法
ワイドバキューム方式	除染対象面に集塵機の吸引口を当て，粉塵を吸引する。
グローブバック方式	除染対象面をプラスチックシートで養生し，グローブを設置する。作業者は，養生の外からグローブに手を入れて作業を行う。
全体隔離養生方式	除染対象面をプラスチックシートで養生し，負圧除塵機にて区画内を負圧に保つ。作業者は区画（養生）内に入り，除染作業を行う。



(a) ワイドバキューム



(b) グローブバック



(c) 全体隔離養生



(d) ゲル化剤塗布

写真-2　DIB 工法 施工状況

3.3　VBR 工法の計画

(1) 工法の特徴

バキュームブラストは船舶や燃料タンクの塗膜除去等に利用されており，バキュームユニットで吸引しながら作業をするので，粉塵の飛散を減少できる。バキュームブラストロボット工法のシステム図を図-5 に示す。吹き付けされた金属片（研掃材）は粉塵とともに吸引されリサイクルユニットで分離され，再利用する。粉塵はバグフィルターで処理され，排気ガスと廃棄物（放射性物質）に分類される。

システムユニットとバキュームユニットの状況を写真-3 に示す。システムは，バキュームユニットと車載式システムユニット（8t 車）およびコンプレッサー（4t 車）から構成される。システムユニットには，リサイクルユニット，バグフィルタユニット，ブロアーユニット，発電機が搭載されている。バキュームユニットとシステムユニットはフレキシブルホースで接続され吸引を行う。バキュームユニット内は常に吸引されているので真空状態となり，路面に吸い付き粉塵の飛散を防止する。本ブラスト機の操作は遠隔で行う。

(2) 試験の方法

施工場所は駐車場アスファルト舗装の路面 2 箇所とし(1 箇所の面積：2m×8m)，施工速度および施工回数を変えて実施した。施工状況を写真-4 に示す。施工前後の表面線量および周辺の粉塵量を測定した。測定方法，測定位置はドライアイスブラストと同様とした。

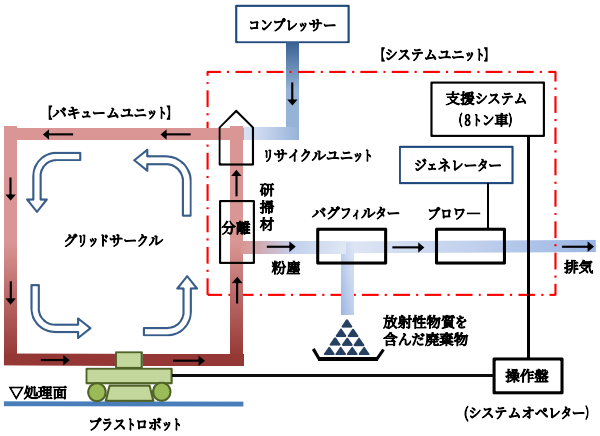


図-5　VBR 工法 システム図





(a) システムユニット　　(b) バキュームユニット

写真-3　各ユニットの状況



写真-4　VBR 工法 施工状況

４．結果と考察

4.1　粉塵量の結果

ドライアイスブラストにおける養生種別および作業工法の違いによる粉塵量の比較を図-6 に示す。養生なしと比較して粉塵の飛散量が 1/10 以下に削減された。バキュームブラストは養生は行ってないが，完全養生と同等の粉塵飛散量であった。

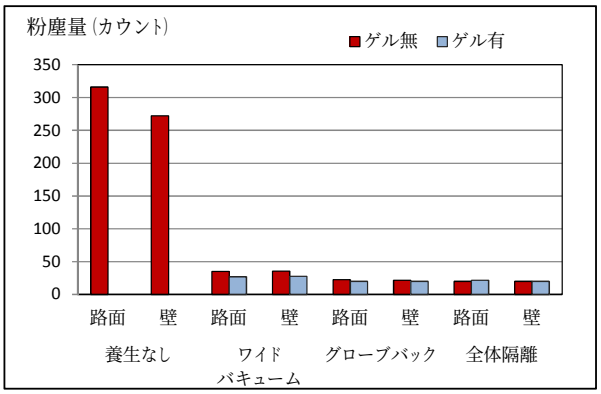


図-6　DIB 工法 養生別粉塵量

4.2　DIB 工法の結果

養生種別の違いによる施工速度の比較を図-7 に，除染率を図-8 に示す。グローブバック方式（部分隔離）では，作業が制約されることから作業効率が低下した。養生の違いによる除染結果に差はなかった。壁面において，ゲル化溶液を塗布することにより，除染率が高まった。

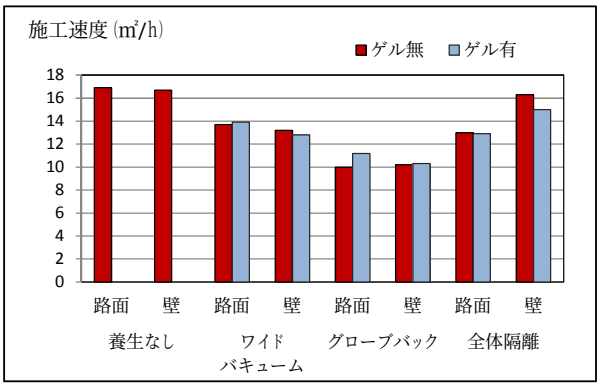


図-7　DIB 工法 養生別施工速度

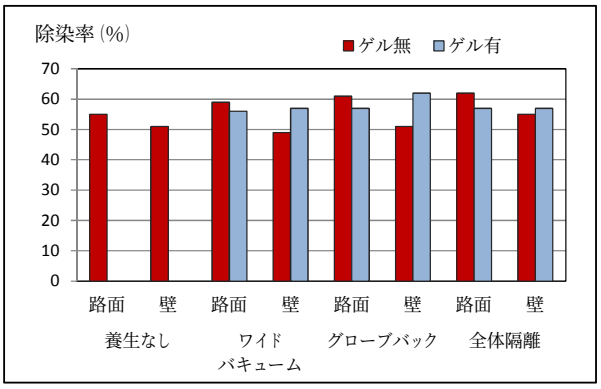
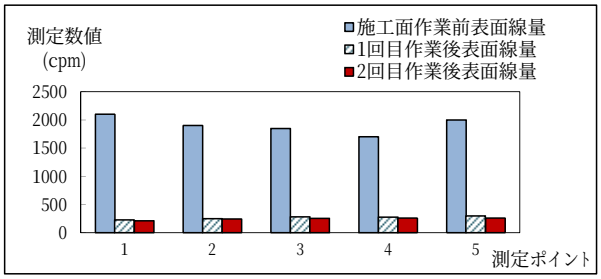


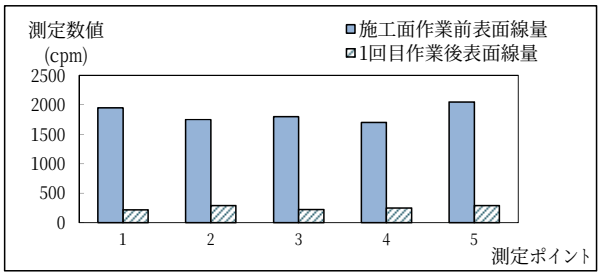
図-8　DIB 工法 養生別除染率

4.3　VBR 工法の結果

施工速度および回数の違いによる除染効果の比較を図-9に示す。(a)は除染速度2.5m/minで2回施工した結果である。1回目で概ね除染され，2回目は下がらなかった。除染率は93%であった。(b)が除染速度2.0m/minで1回施工した結果である。施工速度による除染効果の差は確認されなかった。測定ポイントごとにも大きな差はなかった。一定の速度で作業を行う為，施工によるムラ無く除染できる為と考えられる。除染率は92%であった。



(a)除染 2 回（速度 2.5m/min）



(b)除染 1 回（速度 2.0m/min）

図-9　VBR 工法 除染回数別除染結果

５．まとめ

今回の実証試験の結果，以下の知見を得た。

(1) 適切な養生を行うことで，粉塵の飛散量が大幅に減少する。養生の違いによる除染率には差がなかったが，粉塵の飛散と除染速度には差が出た。

(2) ゲル化溶液を事前に塗布することにより，粉塵の飛散の減少と除染率の向上することが確認できた。

(3) バキュームブラストロボット工法では吸引効果により，粉塵の飛散は抑制される。除染回数による差はなく，1回の作業で除染されることが確認された。

除染作業は，作業場所の状況や周辺の状況，汚染の程度を考量し，適切な工法を選択することが重要であると考える。

謝辞

本実証試験は，平成 24 年 6 月 4 日から 6 月 8 日の間，三協興産株式会社と共同で実施した。関係者に感謝いたします。

省力化した壁面放射線量の測定方法

戸田建設株式会社　○ 板谷　俊郎
同　森　一紘
同　澤田　晃也

１．はじめに

平成23年3月の東日本大震災に伴って発生した福島第一原子力発電所の事故により、放射性物質が大気を介して東日本の広い範囲に飛散した。特に、福島県内の事故現場近隣の住民は避難を余儀なくされた。そのため、避難対象となった地域では、街の活動が完全に停止してしまった。

さらに、放射性物質が拡散したと考えられる地域では、様々な風評被害を被っており、農作物や海産物などの放射線量の測定が求められている。

また、事故発生地から離れた地域においてもホットスポットと呼ばれる放射線量の高い地域が存在し、住民に大きな不安を与えている。

このように、事故が発生した原発近隣のみならず広範な地域において、リアルタイムの放射線量管理は重要な意味合いをもっている。

そこで、既存建物の安全性を確認するための一手段である、放射線量を測定する方法について省力化を狙った装置を考案した。本報では、この省力化測定装置について概要を紹介する。

２．現状の放射線量の測定方法

放射線量に関しては、空間線量率や対象物表面汚染密度を確認する。そこで、それぞれに適した測定機器を用い、所定の位置において測定を行う。

特に、外壁面の放射線量については、壁面の直近に測定器を設置する必要があり、壁面全体について調査する場合には、仮設足場を全面に組むか、ゴンドラを用いて外周面を順次走査する必要がある。しかし、これには多くの日数、費用を必要とする。

３．壁面放射線量測定装置の概要

今回開発した測定装置は、放射線量測定機器を搭載した小型ボックス状の本体が壁面に沿って上下に移動するものである。

水平方向の移動に際しては、本体を吊している取付アームの設置箇所を移動する。

これにより、比較的廉価で壁面の放射線量を測定することができる。

3.1　装置の構成

本測定装置は、以下の部品により構成される。

①本体　：　図－１に示すように、筐体（300×320×390 mm）の底部および壁面に対する面にキャスターが各４コ付属している。壁面側のキャスターは、本装置が壁面に沿ってスムーズにかつ振動を和らげて移動できるためのものである。また、底部のキャスターは、水平移動と本体を水平面（地表面、屋上面等）に着地させる際の衝撃を和らげるためのものである。

②吊りアーム部　：　図－２に示すように、本体を吊り下げるためのウィンチが付属した水平アーム、これを支える支柱とから成る。アームは360°回転でき、本体へワイヤーを取付ける作業を容易にする。

③吊りアーム保持部　：　アーム支柱を把持し建物に固定するためのもの。建物のパラペットを挟み込んで固定する。

④空間線量率測定器　：　NaI シンチレーションサーベイメータを搭載。ここでは、空間線量率をもって、その測定点における放射線量値としている。測定データは内蔵メモリに保存される。

3.2　装置の諸元

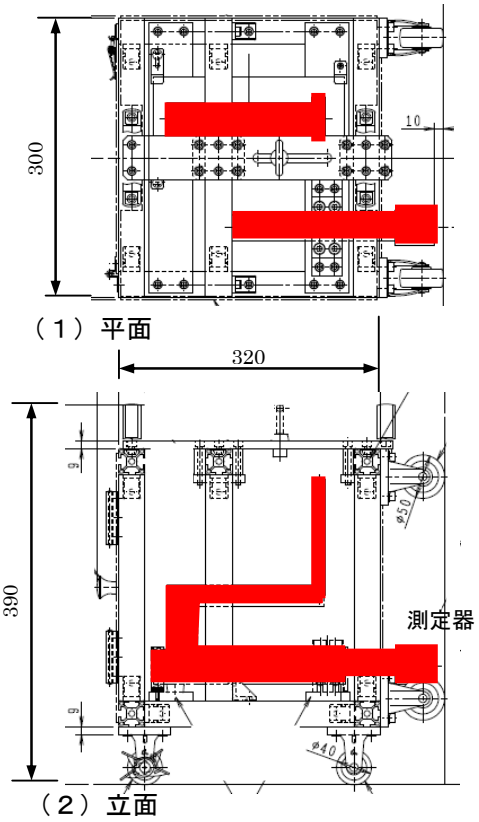
本装置の諸元は表－１に示すとおりである。

表－１　装置の諸元

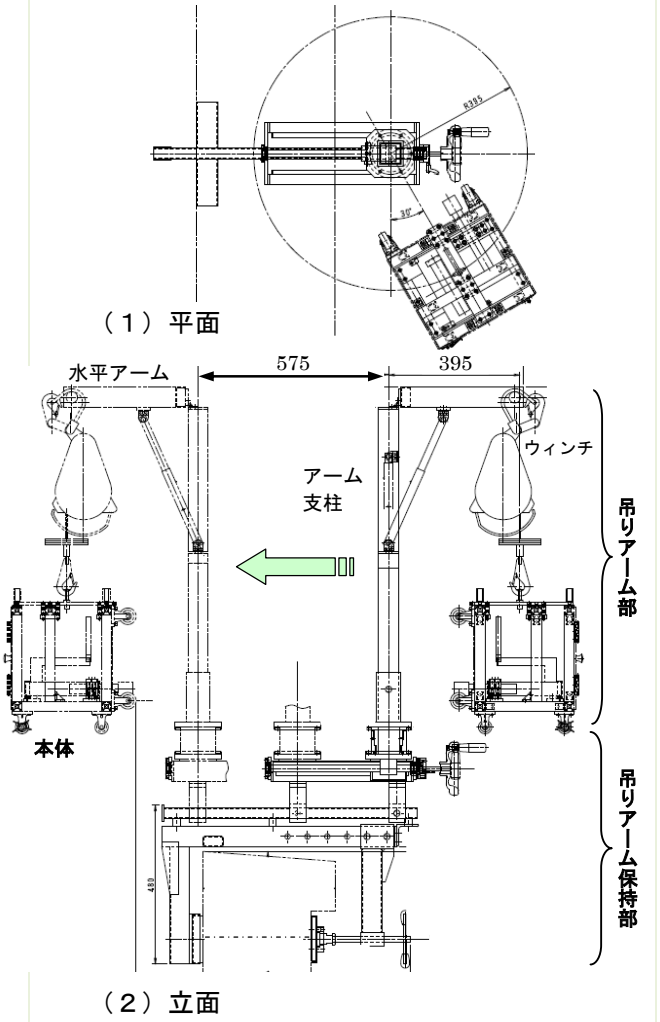
部品	項　目	内　容
本体	1) 上下動速度 2) 揚程 3) 重量 4) 電源	46～60 cm/s 30 m 8.5 kg 100 V（単相・交流）
吊りアーム部	1) 重量 2) スライド範囲 3) 旋回範囲	26 kg（２分割可） 575 mm 360°
吊りアーム保持部	1) 重量 2) 把持範囲	27 kg（２分割可） 100～400 mm

４．放射線量測定装置による測定方法

本測定装置による放射線量の測定方法は、以下のようになる。



図－１　測定装置本体



図－２　測定装置の全景

（１）測定計画

入念に測定計画を立て、水平方向と高さ方向について、測定箇所を設定する。また、装置の移動を踏まえ、効率化を図る。

（２）装置の設置

測定計画に沿って、吊りアーム保持部を建物屋上のパラペットに取り付ける。これに支柱、水平アーム、ウィンチを取り付ける。ウィンチからのワイヤーを本体に接続し、測定器の電源を入れ、測定状態にしてから、本体を外壁面に沿わせて設置する。

（３）測定

①屋上にてウィンチを操作し、所定の高さで本体を保持して、放射線量を測定する。

②次の測定点（高さ）まで、本体を移動する。

③１列分の測定が終わったら、次の列へ吊りアーム保持部を移動して設置し直す。

※以下、①～③を繰り返す。

④測定が終了したら、測定器内の測定データをＵＳＢ通信ケーブルにてパソコンに取り込み、帳票を作成する。

５．本装置の特徴

本装置による長所は以下のとおりである。

・測定者が直接、高所の測定箇所で作業することがないため、危険作業が回避される。
・装置を分割できるため、搬送および現地における移動が容易である。
・簡易な部品構成としているため、比較的安価である。

一方、短所としては、以下のことが挙げられる。

・屋上と地上に、人員の配置が必要となる。
・水平方向の移動時に、装置の設置替えが必要となる。
・壁面で凹凸のある箇所は、測定できない。

６．期待される効果

本装置の活用により、既存建物における放射線量の測定を容易に行うことができる。現在、本装置による実物件での測定を計画している。

安全性の確認が行えないばかりに、使用されないままになっている建物について、放射線量の測定ができ、安全性が確認されて利用できるようになれば、街の活気が回復することが期待される。

なお、本装置の開発にあたっては、(株)オキナヤの協力を得た。ここに謝意を表する。

3D スキャナによる山岳トンネルの情報化施工

－中部横断自動車道　八之尻トンネル工事－

清水建設㈱土木事業本部　　○ 藤井　攻
清水建設㈱関東支店土木部　　真下　義章

１．はじめに

近年，情報技術分野における急速な技術革新において，各種の計測制御機器の機能向上，電子機器類の低価格化，情報処理技術の高度化により、土木工事現場における情報化施工の活用が加速されるようになってきた。とりわけ，山岳トンネル分野においては，施工の品質確保，施工費の削減，リスクマネジメントおよび生産性向上といった観点で飛躍的に活用が進んでいる。

本稿では山岳トンネル工事での情報化施工の事例として，３Ｄスキャナを利用した切羽形状計測（写真-1）と掘削出来形管理の概要を報告する。

併せて明り工事の土量管理における３Ｄスキャナの活用事例についても紹介する。

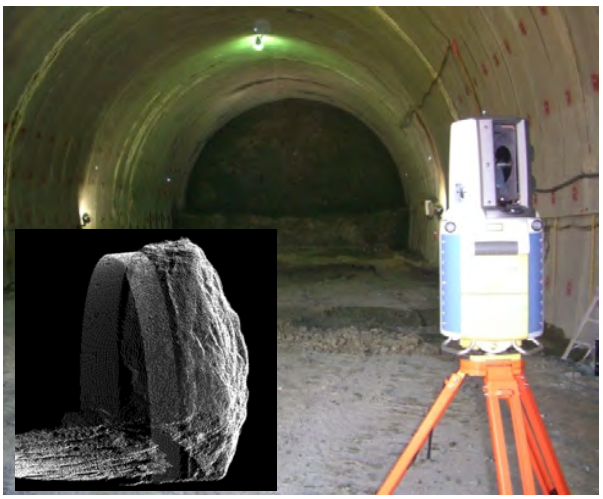


写真-1　3D スキャナによる計測状況

２．工事概要

今回対象とする工事は，新東名・新清水 JCT と中央道・双葉 JCT を結ぶ中部横断自動車道の八之尻トンネル工事である。

以下に工事概要と現場位置図（図-1）を示す。

工事名　　中部横断自動車道
　　八之尻トンネル工事
工事場所　山梨県西八代郡市川三郷黒沢
　　～山梨県南巨摩郡富士川町大椚

工期　　2009 年 12 月 15 日
　　～2015 年 1 月 17 日(1,860 日)
発注者　　中日本高速道路株式会社東京支社
施工業者　清水・岩田地崎建設共同企業体
工事内容
　トンネル工事　掘削延長：2,464m
　　掘削断面積：82m^2
　　掘削工法
　　全断面掘削・補助ベンチ付全断面掘削
　　機械掘削（ブームヘッダ RH-10J-SS）
　明り工事　　インターチェンジ造成(38 万 m^3)

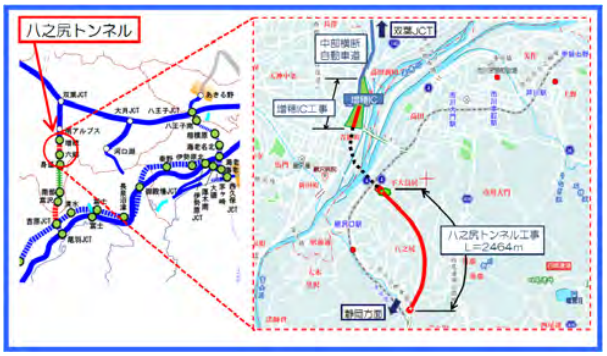


図-1　工事現場位置図

３．3D スキャナ

3D スキャナは，指定した照射範囲・ピッチで連続的にノンプリズムでの測距測角を行うことで，物体の形状を三次元座標(X,Y,Z)を有する点の集まり（点群データ）として取得する測量機器である。１度に数百万点規模の連続計測が可能であり，測定誤差は測距 30m で±4mm 程度である。内臓の CCD カメラを用いて，点群データに(R,G,B)の色情報を持たせることもできる。

なお今回採用した 3D スキャナ GLS-1500（(株)トプコン製）は，操作にノートパソコンの接続が不要なスタンドアローン仕様であり，切羽での計測時間の短縮化と操作性の向上が図られている。計測データはスキャナ本体に装着した SD カードに保存する。

主な仕様を表-1 に示す。

表-1　計測機器スペック

３Ｄスキャナ（GLS-1500）

■スキャニング部	
測距方式	パルス方式（Time of Flight）
測定距離	330m
単発測定精度	
距離精度	4mm（ρ）/1～150m
角度精度	6″
スキャンスピード	30,000 点/秒
スキャン分解能	
計測密度	最大 1mm/20m
最大測点数	V×H：100,000,000 点
測定範囲	鉛直：±35°、水平 360°
■カメラ部	
画角	約 22°（V）×16.5°（H）
画素数	2 メガピクセル(1600×1200)
■外観	
寸法	299(D)×240(W)×566(H)mm
機械高	410mm
質量	16kg

計測データ処理用 PC

CPU	Intel®Core™5Duo　CPU
クロックスピード	2.4GHz
メモリ	8GB
OS	Windows7
グラフィックメモリ	1GB

４．導入経緯

本工事では，機械掘削による全断面早期閉合工法の試験施工に発注者と共同で取り組んでおり，全断面掘削に伴う鏡面（切羽前面）の安定化対策として，球面（曲面）切羽を国内で初めて採用した。球面（曲面）切羽は鏡面を球面（曲面）形状に掘削することで，ドームアクションによる安定化効果を期待する方法である。

球面（曲面）切羽の効果を評価するに当たり，掘削形状を定量的に計測・記録し，分析することが必要である。そのためには 3D スキャナを用いた三次元形状計測が必要不可欠と判断し、本システムを導入した。

また，トンネルの掘削出来形（当り/余掘り量）管理へ適用範囲を拡大することにより，当該作業の省力化，迅速化および高精度化を目指すこととした。

５．切羽形状計測

3D スキャナを使った計測の一連の作業は図-2 のようになる。

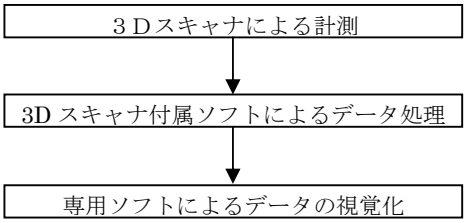


図-2　計測作業フロー

5.1 3D スキャナによる計測

切羽形状計測では 1 切羽当りの計測点数を約 15 万点とし，計測時間を 5 分程度に設定した。その他，機器の立ち上げとキャリブレーション，既知点の後視等を合わせた作業時間は 15 分程度となる。

なお 3D スキャナで計測した点群データは，この時点では相対位置情報のみであり，絶対座標データは持っていない。

測量データの特徴として測定距離が遠くなるほど点群データは粗くなり、近くになるほど密になるため、測定距離は 30m～50m とした。

坑内での計測状況を写真-2 に示す。



写真-2　坑内計測状況

5.2 3D スキャナ付属ソフトによるデータ処理

切羽で計測した点群データに事務所に設置したパソコンにて 3D スキャナ付属ソフトを使って座標データと色データを持たせる（写真-3）。また、基準点の情報を基に測量データを絶対座標系に置き換え、3D モデルを作成する。計測目的外（配管，風管，照明器具など）の不要データはこの時削除し，データ量を必要最低限にする。これらの処理を行った後，点群データ（X,Y,Z,R,G,B）をテキストファイル，DXF 形式等で出力する。

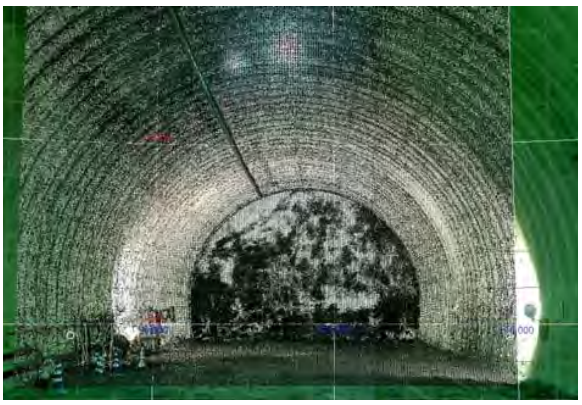
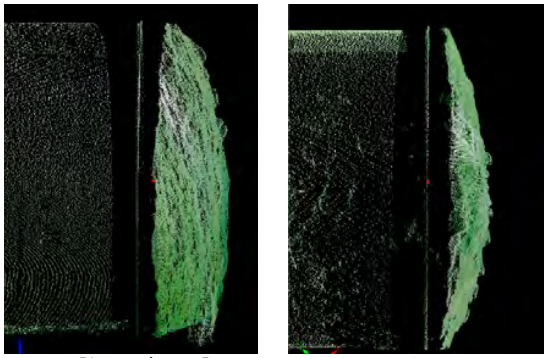


写真-3　切羽計測写真

5.3 3 次元設計ソフトによるデータの視覚化

上記処理後の点群データは，三次元設計ソフトや CAD ソフトを使い，パソコン上で三次元的に表示することができる（図-2）。また，任意の断面で輪切りにした，断面図として表示させることも可能である（図-3）。



［側面ビュー］　［平面ビュー］

図-2　球面切羽形状計測結果

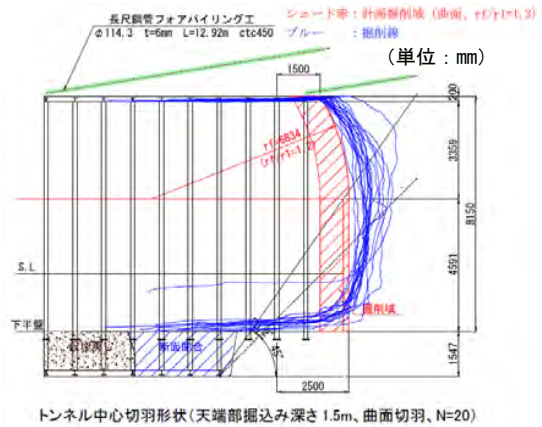


図-3　切羽縦断面形状重ね合わせ図
（センター縦断面×20 断面）

3D スキャナを用いた切羽形状計測結果の分析により，地質毎の鏡面の安定性と切羽形状との相関性が明らかとなるなど，球面（曲面）切羽の有効性の評価が可能となった。

６．3D 出来形管理システムの開発

切羽形状測定では，現場での 3D スキャナ計測そのものは比較的スムーズに行えたが，その後のデータ処理においては専門知識を持つオペレータの手により長時間を掛けて実施したものであり，現場の係員クラスが行うには負担があった。そのため，トンネル掘削の出来形管理への 3D スキャナの適用に当たっては，誰にでも取り扱える簡便性と，山岳トンネル現場であればどこでも水平展開可能な汎用性を確保することを目標に，3D 出来形管理システム（Shimz 3D Scan-view）を新たに開発した（図-3）。

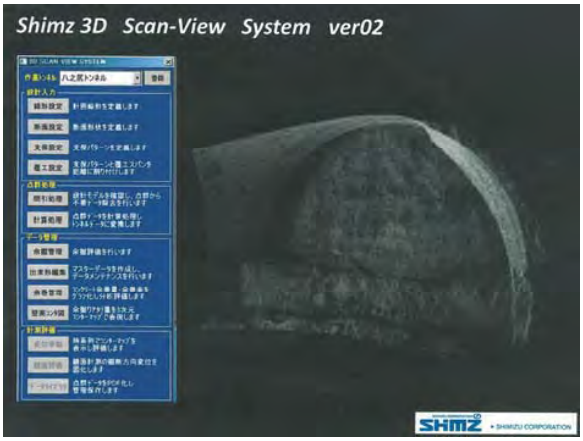


図-3　Shimz 3D Scan-view

本システムはトンネル坑内で計測した一次支保工（吹付けコンクリート）仕上がり面の 3D 点群データから，余掘り（当り）量や二次覆工打設数量をダイレクトに計算し，三次元コンター図や展開図，断面図として容易かつ迅速に結果を得ることが可能なシステムである（図-4）。



図-4　トンネル出来形計測結果表示

初期設定で入力が必要なトンネル線形，断面形状などの設計データは，山岳トンネル現場で一般的に用いられる切羽レーザー照射システムとの共

有化が可能で，3D ビューアを用いてトンネル設計形状を三次元的に表示し確認することができる。（図-5,6）



図-5　設計データ入力

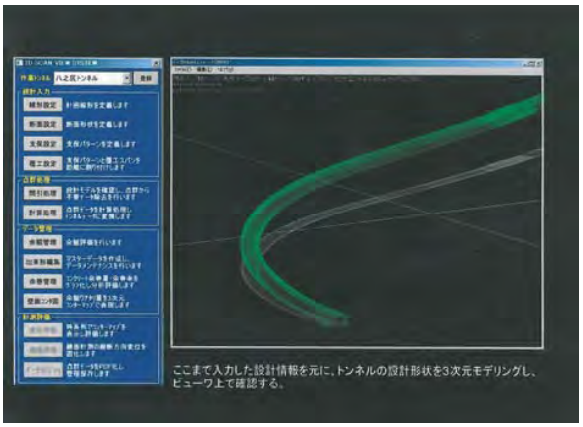


図-6　3D ビューアによる設計形状表示

導入の効果としては出来形管理作業の省力化（5～6 時間/週→15 分/週）および迅速化による生産性向上を実現した。また高精度の出来形管理により、覆工巻厚を確実に確保しつつ余掘り量の低減が可能となった。

7．明り工事における 3D スキャナの活用事例

本工事では明り工事（トンネル両坑口部の切盛土工およびインターチェンジの盛土工）の起工測量，施工中の土量管理および出来形管理において 3D スキャナを活用した。

トンネル北坑口部の切土工における土量管理の状況を写真-4、図-7 に示す。



写真-4　北坑口部切土施工状況

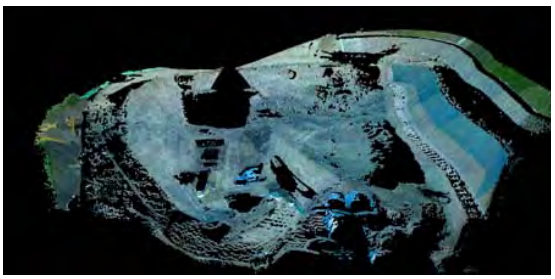


図-7　北坑口部施工中の 3D 点群データ

3D スキャナによる測量データと設計データを重ね合わせることで計画形状の照査（異常点の抽出），施工段階毎の切盛り土量の正確な把握，土配計画のタイムリーな修正などを効率的に実施できた。（図-8）

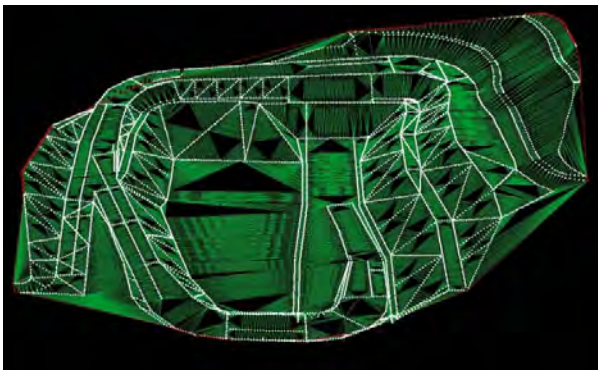


図-8　北坑口部 3D 設計データ

これらの出来形測量の大幅な省力化により，従来の測量費用に対し約 60%のコストダウンを実現できた。

8．おわりに

本工事では「3D スキャナを用いた情報化施工」をテーマに取り組み、明り工事の切盛土工及びトンネルの切羽形状計測へ展開し，球面（曲面）切羽の有効性の定量的評価を実現できた。

また、3D 出来形管理システムの開発により，当該作業の簡便化，汎用化を行い，同システムによる品質，コスト面での改善を行った。効果については，当現場での施工データを更に蓄積することで今後、検証していきたい。

近年では技術の進歩も伴い、3D スキャナについては精度を要求しなければ安価な 3D スキャナでも現場計測の視覚化は十分可能である。今後はそれらも踏まえ、他現場への展開・普及を図り、これらの情報を施工のみならず、設計や維持管理の分野まで広げ、ICT を活用した CIM の普及に役立てられるよう展開していきたい。

GNSS 衛星測位を用いた出来形管理の検討

～高さ精度向上機能による計測精度の検証について～

㈱トプコン　○ 平岡　茂樹
(一社)日本建設機械施工協会　椎葉　祐士
国土技術政策総合研究所　梶田　洋規

１．はじめに

現在、衛星測位はカーナビ等に見られるように広く利用され、米国 GPS に露国 GLONAS を加えた GNSS 衛星測位システムが測量分野で利用されている。しかしながら、施工分野では情報化施工で重機の位置出しに利用される程度で、監督・検査に関連している出来形管理までは利用されていない。この一因として、高さの計測精度が、出来形管理の規格値（許容誤差）に対し十分とは言い難く、測位値が刻々と変化し再現性が低い点があげられる。そこで、GNSS の高さ補正装置(mmGPS)を開発し、高さ精度と安定性の検証をおこなった。

本論文は検証結果から本システムの有効性・汎用性を考察し、出来形管理の適用を提言すると共に、全国に配備されている電子基準点や今後運用が予定されている準天頂衛星の有効活用についても述べる。

２．GNSS 高さ補正装置「mmGPS」の概要

mmGPS は、RTK-GNSS 測位のボトルネックである高さ精度をゾーンレーザにより補正するシステムである。RTK-GNSS 測位で得られた情報は、高さ方向の精度に不安があるため、ゾーンレーザ発光器（以降、発光器）から発光されたレーザ光をゾーンレーザ受光器（以降、受光器）で受光することにより、高さをレーザから計算する、レーザの高さ精度と同等の能力を持つシステムである。

mmGPS は、従来の RTK-GNSS システムで必要な GNSS 基地局、GNSS 移動局に、図-1 に示すレーザ発光器とレーザ受光器を加える。GNSS で得られた位置情報と受光器で計算された高さ情報を合体することにより、mm 単位の高さ精度を実現する。

この発光器は、高低幅 10m（発光位置から±5m）の範囲で受光可能で、回転レーザのようにレーザ発光面に受光器を合わせる作業は必要ない。



図-1　高さ補正装置(mmGPS)システム

３．検証方法および内容

3-1.　検証日時

2013 年 3 月 11 日（月）～3 月 15 日（金）

3-2.　実施場所

施工技術総合研究所

3-3.　観測ポイント

発光器と各観測ポイントは、図-2 に示すような配置とし、観測ポイントは、発光器から距離 100m～300m 間を 50m 毎、高低差は-5m～+5m 間を 2.5m 毎の 25 点を設置した。各観測ポイントの高さはレベルを用いて計測し、高さ精度の検証の基準とする高さとした。また、距離 150m で-2.5m のポイント（大きい丸）は 6 時間連続観測をおこない、データの安定性について検証した。検証は時間によるドリフトを GNSS と比較する。

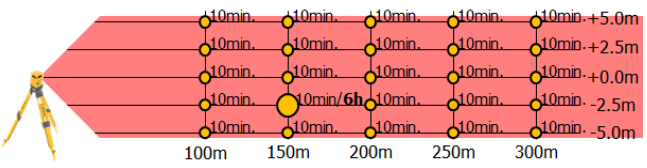


図-2　観測ポイント

3-4.　観測方法

(1) 発光器から高低差-2.5m、-5m の位置

観測ポイントより約 2mの高台に発光器を設置し、エレベータ三脚、伸縮式ポールで高さを調節して観測した（写真-1、図-3 参照)。



写真-1　ゾーンレーザ発光器設置状況

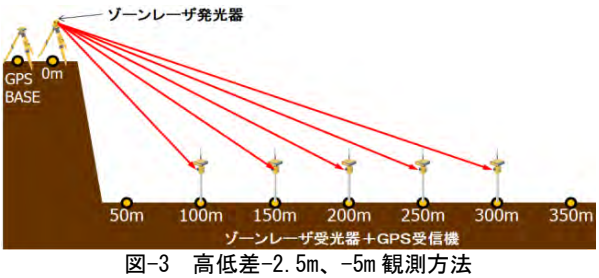


図-3　高低差-2.5m、-5m 観測方法

(2) 発光器から高低差+2.5m、+5m の位置

図-4 に示すよう受光器を高台に設置した。

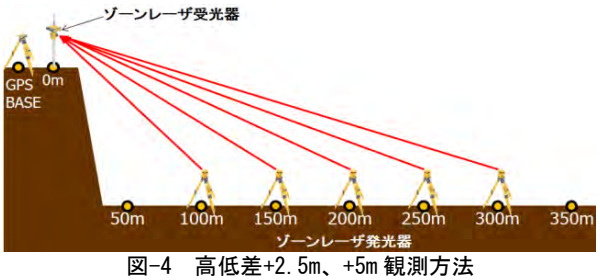


図-4　高低差+2.5m、+5m 観測方法

(3) 発光器からの高低差 0m の位置

図-5 に示すよう 50m 観測ポイントに発光器を設置して観測した。

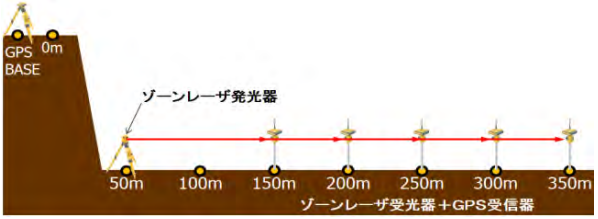


図-5　高低差 0m 観測方法

3-5.　データ取得方法

(1) データ取得

受光器と接続した GNSS 受信機とデータ取得用 PC を接続し、観測データを取得した(写真-2 参照)。



写真-2　データ取集状況

(2) データの取捨選択

GNSS が　Float(最確値が得られない)のときは、高さ計算のバラツキ大きくなるため、GNSS が FIX しているときだけデータを取得した。

(3) データの平均化

公共測量作業規定（RTK-GNSS）に従い、1Hz で 10epoch を取得（1 点当たり 10 秒）し、これを平均したデータを観測データとして比較検証した。どの観測ポイントも 10 分程度連続（約 60 点）観測した。

４．観測結果

TS を用いた出来形管理要領（土工編）に記載されている出来形管理基準および規格値では、土工の基準高の規格値は高低差±50mm であり、その基準値の 20%、(±10mm)をひとつの目安として検証する。観測日と観測時の天候の関係を表-1 に示す。

表-1　観測日と観測時の天候

観測標高差	観測日	天候	平均風速 m
-5m	3 月 11 日	晴れ	4.8
-2.5m	3 月 11 日	晴れ	4.8
+5m	3 月 12 日	曇り	5.0
±0m	3 月 14 日	小雨	4.7
+2.5m	3 月 14 日	小雨	4.7

後述する 4.1～4.5 に、各観測ポイントにおける高さ精度の検証結果を、4.6 に計測精度の安定性の検証結果を示す。図-6～図-9 では、縦軸はレベルで計測した基準とする高さとの差異（m）、横軸は観測回数を示す。図-10 では、縦軸は標高値（m）の比較、横軸は観測時間を示す。

4.1 発光器から 100m 地点の観測結果(図-6)

(1) ±10mm以内に100%入った。(赤枠内)
(2) ±4mm以内に100%入った。
(3) ±3mm以内に99.7%入った。

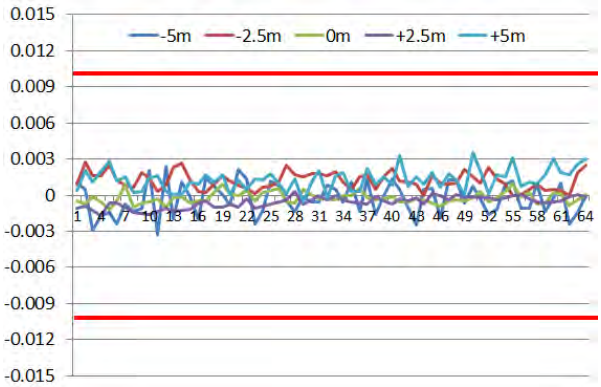


図-6　発光器から 100m 地点の観測結果

4.2 発光器から 150m 地点の観測結果 (図-7)

(1) ±10mm以内に100%入った。(赤枠内)
(2) ±6mm以内に93.4%入った。
(3) ±5mm以内に82.3%入った。
(4) +5mと-2.5mの列は6mm程度シフトした。

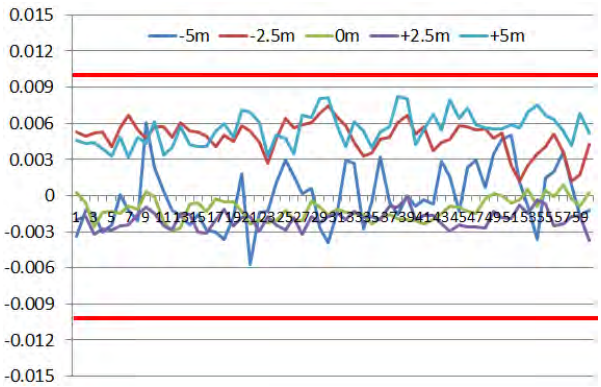


図-7　発光器から 150m 地点の観測結果

4.3 発光器から 200m 地点の観測結果(図-8)

(1) ±10mm以内に100%入った。(赤枠内)
(2) ±5mm以内に81.5%入った。
(3) -2.5mの列で6mm程度シフトした。
(4) -5m、+5mの列で変動が大きくなった。

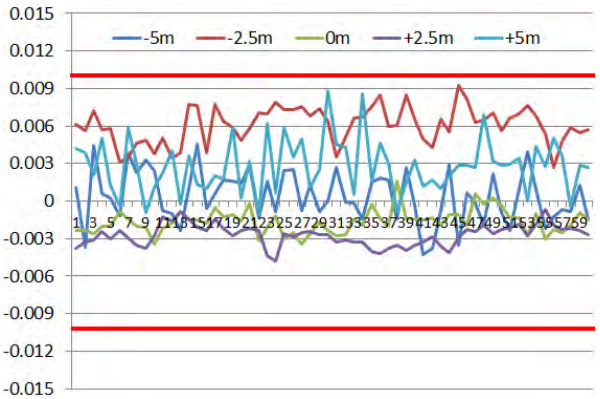


図-8　発光器から 200m 地点の観測結果

4.4 発光器から 250m 地点の観測結果　(図-9)

(1) ±10mm以内に98.7%入った。(赤枠内)
(2) ±12mm以内に100%入った。
(3) -2.5mの列で6mm程度シフトが認められた。再測をおこなったところほぼ±10mm以内に入った。
(4) -5m、+5m の列で変動が大きい傾向があった。

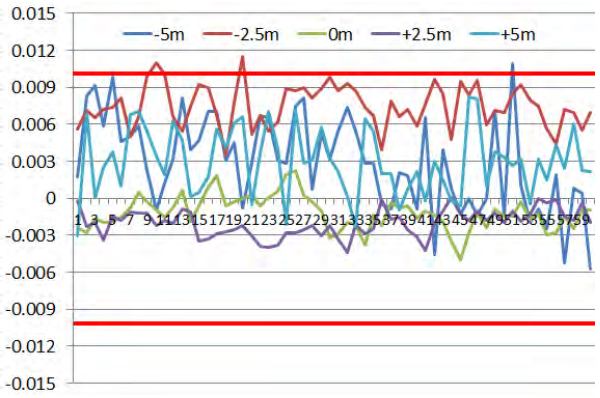


図-9　発光器から 250m 地点の観測結果

4.5 発光器から 300m 地点の観測結果

データ取得率が低減し、評価できる連続したデータ取得ができなかった。発光器の仕様は計測距離 300m であるが、発光器の個体の調整等が考えられる。今回は観測点 250m までを検証対象とした。

4.6 発光器から 150m 地点 6 時間観測結果

(1) mmGPSは、±6mm以内に100%入った。ドリフトは認められなかった(図-10参照)。

(2) RTK-GNSSも公共測量作業規定に従い1Hzで10epoch取得し、平均した。-44mmから+33mmの間でデータがドリフトした。±10mmに47.4%入った。

(3) 図-11は、図-10で観測した際のHDOPと衛星数推移の関係を表したものである。HDOPおよび衛星数の変化とmmGPSの観測高さの相関関係は認められなかった。

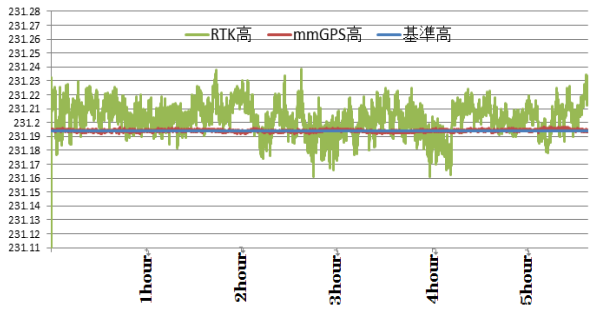


図-10　発光器から 150m 地点、RTK 高と mmGPS 高比較表

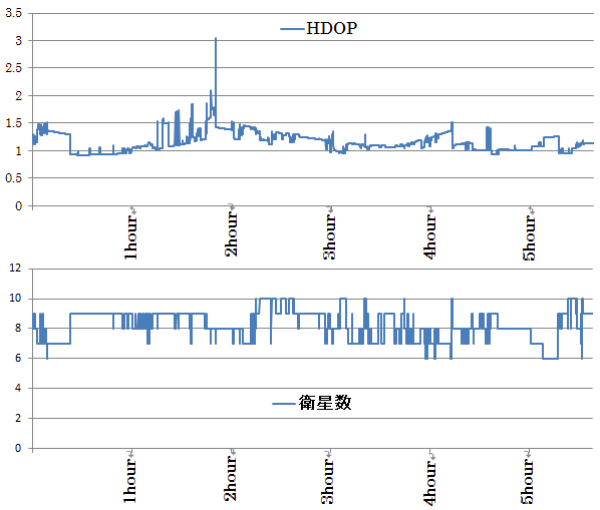


図-11　HDOP、衛星数推移

4.7 観測結果まとめ

(1) mmGPS の高さ精度と安定性

① 発光器から 250m 以内、発光器からの高低差±5m 以内の場合+10mm 以内に全観測ポイントの99%が収まった。

② 実験時の風速は 5m 程度であったが、特に高さ精度に影響はなかった(表-1 参照)。

(2) データの傾向

① 発光器からの距離が離れるほどデータの変動は大きくなる傾向にあった。

② 発光器からの高低差が大きくなると、データの変動も大きくなる傾向にあった。この傾向は、距離 150m 以上から認められた。

５．考察

今回の検証で、mmGPS システムは、小雨や強めの風の中でも発光器から 250m 以内、高さ±5m 以内ならほぼ±10mm 以内で計測できることがわかった。現在、TS を用いた出来形管理要領では、精度確保のための計測距離制限が定められており、2 級 TS を使って 150m 以内との制限がある。mmGPS は 150m 以内のときレベルで出した基準高に対して±6mm 以内に 95%が入った。これは TS とほぼ同等の能力である。よって、土工用出来形管理の観測機器としての性能を有していると言える。

現在、日本には約 1,240 点の電子基準点があり、その配信データをもとにネットワーク型 RTK システムも活用されている。mmGPS はこの電子基準点にも対応可能である（図-12 参照)。



図-12　電子基準点設置位置

６．おわりに

現在、国土交通省発注の公共工事において、TS を用いた出来形実施要領が一般化となり活用されている。一方、電子基準点は約 1,240 点全国に配備されており、一部ネットワーク型 RTK システムとして活用されはじめているものの、一般土木現場でGNSS システムの活用が進んできたとは言い難い状況にある。

世界的にも建設現場において、GNSS の活用が進んできている昨今、高さ精度が回転レーザと同等である mmGPS が土木現場への普及のきっかけとなればと考える。

更に、今後打ち上げられる“みちびき衛星”により、GNSS システム活用の範囲が広がり、mmGPS がGNSS の更なる有効活用のひとつの手段になることを願う。

RTK-GNSS を用いた出来形管理要領の検討

～　高さ補完装置導入に向けた手引きと精度確認ガイドラインについて　～

国土技術政策総合研究所　　○ 梶田　洋規
(株)トプコン　　先村　律雄
(株)トプコン　　平岡　茂樹

1．はじめに

ICT(情報通信技術)を利用した情報化施工技術を構成する要素技術の１つに衛星測位技術RTK-GNSS（図-1）がある。RTK-GNSS は基準点測量に利用され、情報化施工では重機の位置把握に広く利用されるものの、土木構造物の出来形管理には高さの計測精度が十分とは言い切れず監督検査対象部位では広く利用されていない。国土技術政策総合研究所（国総研）では、ＴＳを用いた出来形管理の検討の中で、RTK-GNSS を利用することも検討してきた。現場試行では、条件により、ＴＳより非常に高い効率で行える結果[1)]を得ている。ただ、必要な精度が確保できないという課題[2)]があったが、計測を工夫することで計測精度の向上が覗える[3)4)]ことから、特性を熟知した者が自己責任で利用する際の参考に「RTK-GNSS を用いた出来形管理要領(試行案)」（RTK-GNSS 要領）を改定した。また、RTK-GNSS の高さ補完装置の併用で精度が確保できる知見を得たことから、広く実工事で利用されるよう「手引き」と「精度確認ガイドライン」を作成したので紹介する。

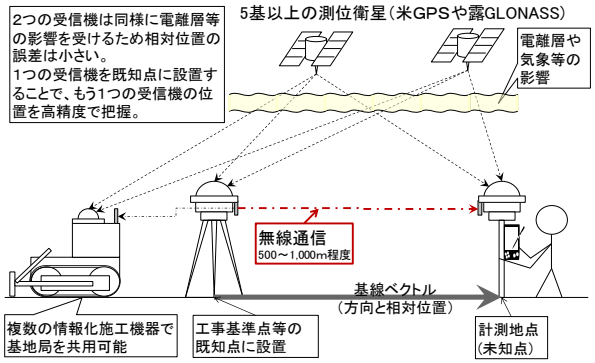


図-1　RTK-GNSSの概要

2．RTK-GNSS で出来形管理する際の課題

RTK-GNSS を土工工事において出来形管理で広く利用しようとした際には、以下の課題がある。

2.1　計測値の再現性

RTK-GNSS は、衛星配置や気象条件等の変動により、固定して計測しても刻々と計測値が変動して再現性が無い（図-2）。公共土木工事では、施工者の施工管理と発注者の監督検査があり、誤差が大きくても再現性が高い機器の場合、施工管理をしっかり行えば監督検査で問題が顕在化しない。RTK-GNSS は再現性が無いため、検査時点で規格値を外れる事態が懸念される[3)]（図-3）。そのため、計測値に再現性がある計測機器よりも、厳格に計測精度を求められ、計測にも注意を要する。

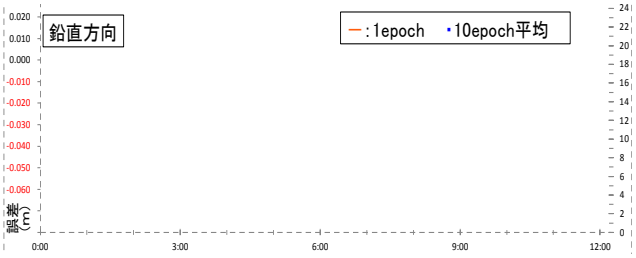


図-2　RTK-GNSSの計測値の変動状況

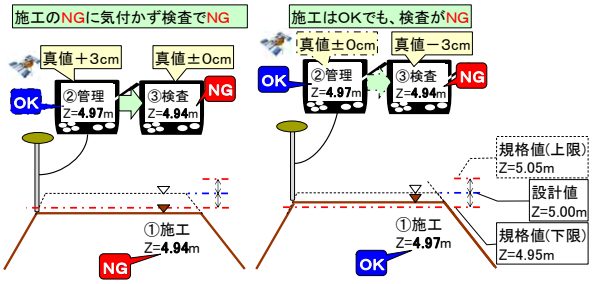


図-3　発生が懸念される事態

2.2　鉛直方向の計測精度

土工の高さの規格値±5cm に対し、施工精度や計測値の再現性を考慮すると、計測精度は± 1 cm 程度必要である。出来形管理に必要な精度は、標準偏差でなく最大値(絶対値)で見る必要があり、RTK-GNSS は±3cm 程度(10epoch 平均値)である（図-4）[2)]。なお、過去の研究で、運用の工夫をすれば、±1cm 程度に向上する報告[3)4)]があるが、数少ない実験データの結果であり、実務に耐えられる運用が確立できるかは、今後、多くのデータによる検証が必要な段階である。

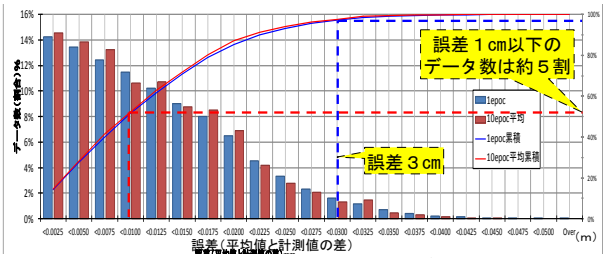


図-4　RTK-GNSSの計測値のばらつき

３．高さ補完機能付き RTK-GNSS の概要

高さ補完機能付き RTK-GNSS とは、何らかの補完機能で高さ精度の向上を図るものである。その方策として、例えば、レベルやＴＳと組合せることが考えられる。通常のレベルだと、出力される計測データは RTK-GNSS のままであり、人が値を読み取り編集する作業（改ざん）が発生する。それだと、ＴＳを用いた出来形管理の様に、取得した計測値の電子データを利用して施工管理（監督検査を含む）を合理化を図ることが出来ない。

国総研が情報化施工の取り組みとして対象とする技術は、精度向上が電子データにも反映される技術であり、その１つに、レーザー光を利用した技術がある（図-5）。

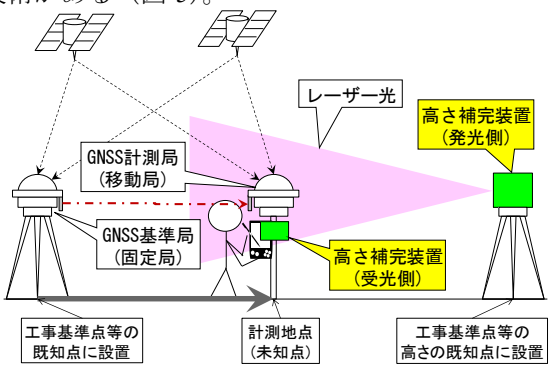


図-5　高さ補正機能付きRTK-GNSSの一例

高さ精度機能付き RTK-GNSS の１技術について、レーザー発光器と受光器の距離 250m 以内・高低差±5m 以内で、必要な計測精度±1cm 程度が確保できる検証データ（図-6）を得たので、この技術を広く利用できる様に、RTK-GNSS 要領に付加する形の手引きと、適切に計測精度を管理するためのガイドラインを作成した。

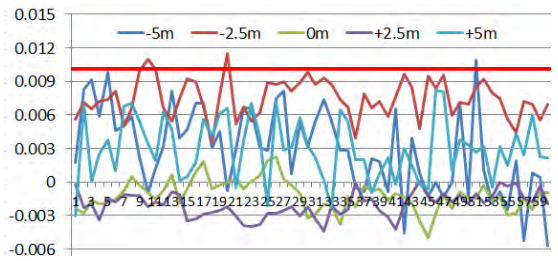


図-6　高さ補正機能付きRTK-GNSSの計測データ（250m）

４．手引き

「高さ補完機能付き RTK-GNSS を用いた出来形管理の手引き(試行案)」（本手引き）は、高さ補完機能付き RTK-GNSS 技術に関し、施工者からの実施希望があった場合、受発注者協議の上、これを円滑に実施可能とすることを目的として作成したものである。

本手引きは、その技術を利用する上で、「RTK-GNSS 要領」とは異なる対応と注意が必要になる点を取りまとめたものである。なお、とりまとめに際し、必要な計測精度が得られることを確認した「mmGPS」技術を取り上げ、具体的に整理した。「RTK-GNSS 要領」の７項目に対応する形で変更点を示した。以下が、その一部である。

4.1　1-1-5 施工計画書

mmGPS 以外の技術が開発されても同様だが、公的な検定制度や校正証明書が無いことから、代替方法を追記した。

c.高さ補完装置の精度管理が適正に行われていることを証明するために、測量機器メーカー等が発行する有効な校正証明書を添付する。mmGPS の場合、精度管理が適正に行われていることを証明する公的な検定制度及び校正証明書等は無いため、測量機器メーカーの発行する検査成績書（１年以内）を添付する。検査成績書（１年以内）が無い場合には、「高さ補完装置の精度確認ガイドライン(mmGPS 編)」で確認した結果に代えて良い。なお、施工計画書作成段階では、当該現場で確認できていないため、前回工事現場等で確認した資料を添付し、現場に入って確認でき次第、監督職員に当該現場で確認した結果を提出する。

4.2　1-1-6 監督職員による監督の実施項目

前項目同様に mmGPS には等級や検定制度が無いことから、施工者が必要な性能を有した機器を利用し、また、適切に管理しているか把握するため、解説に、監督職員の実施項目として、「5）高さ補完装置の精度確認チェックシートの把握」を追加した。

4.3　1-2-2 出来形管理用 RTK-GNSS 本体の計測性能及び精度管理

枠書内の本文で、高さ補完装置に対し「必要な計測精度」と「適正な精度管理」を求めることを示した。

出来形管理用 RTK-GNSS は、…（略）…機器であること。また、高さ補完装置は、必要な計測性能を有し、適正な精度管理が行われている機器であること。受注者は、本管理要領に基づいて出来形管理を行う場合は、利用する RTK-GNSS 及び高さ補完装置の性能について監督職員の承諾を受けること。以下に、…（略）…。

ＴＳには検定制度があり、計測性能を直接記載しなくても、利用者に分かり易い機器の等級で間接的に示すことが出来たが、mmGPS には等級や検

定制度は無い。そのため、土工の出来形管理の必要な計測性能「鉛直方向±10mm 以内、水平方向±20mm 以内」を明記した。

これにより、今後、mmGPS 以外の技術の開発の指標になることも期待できる。

1）計測性能

「国土交通省公共測量作業規程」では…（略）…国土地理院による登録は不要である。

高さ補完装置を含め mmGPS の計測精度に関する規格は無いことから、土工の出来形管理に必要な計測性能（鉛直方向±10mm 以内、水平方向±20mm 以内）が確保できることを、国土交通省または第三者機関等が係わる検証データで整理されていること。

mmGPS には適切な精度管理を行う公的制度は無いため、その代わりの方策を示した。

2）精度管理

GNSS 測量機の…（略）…校正証明書で確認することができる。

高さ補完装置を含む mmGPS の精度管理が適正に行われていることを証明する公的な検定制度及び校正証明書等は無いが、測量機器メーカーの発行する検査成績書（１年以内）で確認することができる。検査成績書（１年以内）が無い場合には、「高さ補完装置の精度確認ガイドライン(mmGPS 編)」で確認することに代えて良い。

4.4　1-2-3 出来形管理用 RTK-GNSS 本体の計測性能及び精度管理

mmGPS は、レーザー光が遮断される等の場合、計測出来なくなるのでは無く、RTK-GNSS 計測が出来てしまうため、解説に、それが判断できる機能を追加した。

(15)高さ補完機能の動作状況確認機能※

※：状況により機能が停止する場合に限る。mmGPS の場合、レーザー光を受信できない場合、RTK-GNSS として計測するので、mmGPS 計測状態と RTK-GNSS 計測状態のどちらであるか確認できる機能が必要。

4.5　1-3-4 出来形管理用 RTK-GNSS による出来形計測

枠書内の本文で、高さ補完装置の設置について言及し、解説で設置の留意点を記載した。mmGPS の設置の留意点として、「距離 250ｍまで、高低差５ｍまで」の計測上の制約、陰が出来て計測出来ない死角があること、及び後述の「精度確認ガイドライン」に従い最遠地点や高低差が大きい位置の計測精度確認を行うことを示した。

2)「mmGPS」の高さ補完装置設置の留意点

1. 出来形計測点を効率的に取得できる位置に高さ補完装置（受光側）を設置すること。なお、高さ補完装置（発光側）と高さ補完装置（受光側）との距離が 250ｍを超えると、大気の状態によって計測できなくなることがある。また、高さ補完装置（発光側）と高さ補完装置（受光側）との高低差が大きくなるとデータのばらつきが大きくなる傾向があるため高低差が小さくなる位置が望ましく、最大で±５ｍ以内とする。
2. 高さ補完装置（発光側）は高さ情報が必要であるため、工事基準点に設置することを標準とするが、設置後に発光部の位置を特定する機能があれば、未知点に設置しても問題無い。
3. 発光側及び受光側は傾きがないように正しく設置すること。
4. 計測中に発光側が動かないように確実に設置…。
5. 設定時に単純な誤りをおかすことが多いので、注意すること。
6. 高さ補完装置（発光側）は柱部分が４方向あり、ゾーンレーザーが陰になり観測できないので、その向きに注意を払う必要がある。
7. 計測範囲に設定した最も距離が離れた位置及び高さ補完装置の発光側と受光側の高低差が大きい位置の計測精度が確保できるか、「高さ補完装置の精度確認ガイドライン」に記載された確認方法に従い、現場内の安全が確保できる場所で確認する。万一、誤差の規定値を超える場合は、高さ補完装置（発光側）を移設するか、精度が確保できる範囲を確認し、その範囲内で利用する。

５．精度確認ガイドライン

高さ補完機能付き RTK-GNSS の高さ計測精度を適切に管理するために、その確認方法を具体的に示したものである。

受注者は、高さ補完機能付き RTK-GNSS による出来形計測を行うに当たって、予め、本ガイドラインに記載の手順に従って計測精度（高さ方向）の確認を行うことで、当該現場への導入可否の判断や機器の適切な設置計画を行うことが出来る。

また、受注者は、確認結果を図-1 に示す「別紙－１　高さ補完装置の精度確認チェックシート」（チェックシート）に記載し監督職員に提出することとした。このシートにより、監督職員は受注者の管理状況を把握することが出来る。

5.1　位置付け

受注者は、本ガイドラインによる事前確認により、高さ補完装置にて所要（鉛直方向±１cm）の計測値が得られる場合に限り、確認した条件内で、手引きを適用することが出来る。ただし、手引きは試行案のため、適用に関しては、受発注者協議により事前承諾を得る必要がある。また、必要に応じ、適用範囲（出来形管理写真の撮影頻度や小黒板の記載項目、監督職員による出来形管理状況の把握頻度、検査職員による実地検査の検査頻度、電子成果品の納品、等）について協議を行う必要がある。因みに、従来手法と同様に行う場合は、受発注者協議は不要である。

5.2　確認手順

レベルと高さ補完機能付き RTK-GNSS の両者で、同じ点の高さを二重計測し、その差を確認することとした。なお、レベルに代えＴＳ（プリズム方式）を用いる方法も規定した。確認作業結果を別紙-1 のチェックシート（図-7）に記載し管理する

こととした。施工現場に持ち込んだ高さ補完機能付き RTK-GNSS は、このチェックシートで事前確認し、精度が確保できる距離や高さの範囲内で利用することとなる。

レベルと高さ補完機能付き RTK-GNSS の両者で、同じ点の高さを二重計測し、その差が規定値以内であることを確認すること。なお、「レベル」に代え「ＴＳ（トータルステーション）プリズム方式」を用いても良い。但し、ＴＳを用いる場合は、レベルより高さの計測精度のばらつき幅があるため、5 回以上計測して平均値を求めること。なお、5 回の計測を連続して行ってはならず、毎回、バック点等に向けてから視準すること。

以下に…（略）…GNSS の確認作業の手順を示す。

① RTK-GNSS の GNSS 基準局（固定局）を設置する。

② 高さ補完装置（発光側）を工事基準点上に設置し、その工事基準点から器械高をスケール等で直接計測するか、他の工事基準点を観測することにより間接的に器械高を求める。

③ 計測点を、高さ補完装置（発光側）に対し、精度確認したい距離や高低差が確保できる位置に設置する。その計測点上に高さ補完装置（受光側）を設置する。

a. 施工現場で確認する際は…（略）…。

b. 安全管理あるいは工程等の理由により、施工現場の設置予定箇所と計測予定点で行えない場合、…（略）…。

④ 計測点の高さ（Z 座標）を計測し、結果を別紙－１「高さ補完装置の精度確認チェックシート」に記入する。なお、…（略）…2 セット行う。

⑤ 計測値は、10epoch 平均値とする。



別紙－１

平成　年　月　日

工 事 名：
受注会社名：
作 成 者：　印

高さ補完装置の精度確認チェックシート（mmGPS）

メーカー：
製品型番：
製造番号　発光側：
受光側：

表－１　チェック表

チェック対象		視準距離（m）	高さ計測点(m)（小数点第3位(mm単位)まで記入） レベル（又はTS） ①Z座標	高さ計測点(m)（小数点第3位(mm単位)まで記入） RTK-GNSS ②Z座標	高さ計測値の差（mm） ③（=②－①）	規定値（判断基準）	確認結果
1回目	1面目					「高さ計測値の差（③欄）」が、全て±10mm以内か?	
	2面目						
	3面目						
	4面目						
2回目	1面目						
	2面目						
	3面目						
	4面目						
本事前確認を実施した箇所（例：設置した工事基準点）							

① 「視準距離」は「RTK-GNSS、ＴＳ、巻き尺」等を利用して計測した距離を記入する。

② 「確認結果」欄は、「高さ計測値の差　③」欄の全ての値が「規定値（判断基準）」の記載を満足することを確認した場合に“○”と記入する。

図-7　チェックシート

５．考察

RTK-GNSS は土工の出来形管理の計測精度が安定して確保できなかったため、現在の RTK-GNSS 要領は試行工事での検証を主とした試行案であったが、高さ補完機能により計測精度が実用レベルになり、それを反映した手引き（精度確認ガイドラインを含む）を作成したことから、RTK-GNSS 要領＋手引きにより実用レベルで利用できる段階になったと考える。また、今回、高さ補完機能付き RTK-GNSS 技術として mmGPS を取り上げて、手引きや精度確認ガイドラインを作成したが、今後の他の高さ補完機能の開発の参考になると考えられ、また、その技術に対応した手引きやガイドラインの作成に際しても、その要点が明確になったと考える。ただし、これらを現場で利用した訳では無いので、現場で利用して、修正点や改良点が無いか検証する必要がある。

６．おわりに

RTK-GNSS 要領及び手引きは、現時点、試行案であるため、その適用を受けて出来形管理（監督・検査を含む）の合理化（写真撮影頻度の低減、小黒板の略図等の省略、実地検査の検査頻度の低減、等）を図るためには、現時点、発注者と協議し承諾を得る必要がある。実用レベルになったことから、導入効果が大きいと考えられる現場では、発注者と協議して導入して貰いたい。なお、精度確認ガイドラインについては、要領や手引きの適用に関係無く、計測ミスによる施工の手戻り発生防止のため、mmGPS の利用者の適切な計測機器の管理の参考に利用されることを願うものである。

参考文献

1) 梶田・北川：施工管理データを搭載したRTK-GNSSによる出来形管理の適用に関する検討，土木情報利用技術講演集，Vol.35，pp.61～64，平成22年

2) 梶田・北川：情報化施工に利用する衛星測量技術「RTK-GNSS」で取得したデータの特徴，土木技術資料，Vol.53 No.5，pp.18～21，平成23年

3) 梶田・北川：衛星測位技術「RTK-GNSS」の施工管理への適用に関する検討　～情報化施工における出来形管理手法の利用技術の拡大に向けて～，建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，平成23年度，pp.59～62，平成23年

4) 梶田・北川：衛星測位技術「RTK-GNSS」の出来形計測精度の確保方策の検討　～情報化施工における出来形管理手法の利用技術の拡大に向けて～，建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，平成24年度，pp.57～60，平成24年

TS を用いた出来形管理の適用工種拡大とデータ再利用に向けた標準的なモデルに関する研究

国土交通省国土技術政策総合研究所　○谷口　寿俊
国土交通省国土技術政策総合研究所　梶田　洋規
（一社）日本建設機械施工協会施工技術総合研究所　椎葉　祐士

１．はじめに

国土交通省では，建設事業における品質確保，生産性の向上，熟練工不足への対策等に資する取り組みとして，新たに発出された情報化施工推進戦略において，平成 25 年度からの５年間に大きな柱として推進する目標とその達成に向けて取り組む項目として５つの重点目標を設定し，ICT（情報通信技術）を利用した情報化施工の一般化に取り組んでいる．

情報化施工推進戦略に掲げられた５つの重点目標の中で，国土技術政策総合研究所（以下、国総研という）では，「①情報化施工に関するデータの利活用に関する重点目標」，および「②新たに普及を推進する技術・工種の拡大に関する重点目標」に関する具体的な検討を行っている．

国総研で検討している情報化施工技術のひとつである「TS（トータルステーション）を用いた出来形管理」については，要領の策定，導入工事の工事点数への加点等，新技術の導入環境を整備したことから，直轄工事における導入数は毎年増加しており，平成 25 年度４月以降の 10,000 ㎥以上の土工を含む直轄工事においては，使用原則化が行えるまでに普及している．

一方，「TS を用いた出来形管理」の一般化技術としての活用場面は，土工の施工段階に限られていることから，当該技術の導入効果をより多く享受するためには，適用場面の拡大が必要となる．

そこで，国総研では，「TS を用いた出来形管理」の適用工種の拡大，データの後工程や維持管理等での利用を目的として，様々な工種を対象に，「TS による出来形管理に用いる施工管理データ交換標準（案）Ver.4.0」による基本設計データ作成の標準形式について検討を行った．

２．標準形式となるモデルの検討

2.1　標準形式となるモデル作成に向けた調査

基本設計データ作成の標準形式の要件として，出来形管理基準への適用が挙げられる．

本研究では、出来形管理基準における「一般舗装工」，「縁石工」，「排水構造物工」，「電線共同溝工」，「擁壁工」，「石・ブロック積（張）工」の計６項目に対し，「TS による出来形管理に用いる施工管理データ交換標準（案）Ver.4.0」による基本設計データ作成の標準形式となるモデルを検討した．標準形式となるモデルの検討フローを図－１に示す．

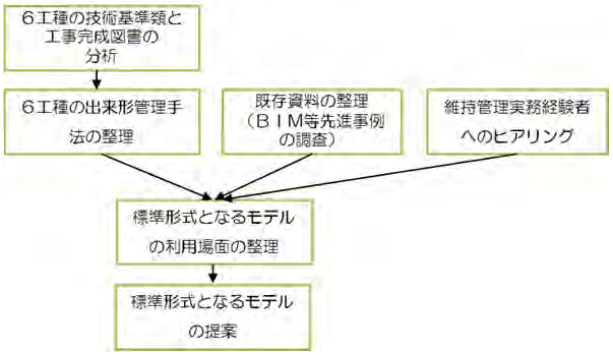


図-1　標準形式となるモデルの検討フロー

標準形式となるモデルの検討にあたって，出来形管理基準および規格値等の技術資料や工事完成図書から，施工手順，管理基準および規格値，管理手法を抽出し，出来形管理の管理手法を整理した．

また，TS に出来形管理の取得データを維持管理等の後工程で再利用することを考慮し，BIM 等先進事例に関する文献調査，および維持管理実部経験者へのヒアリングを実施して維持管理に関するニーズを確認した．

本研究では，これらの調査結果を基に，出来形管理、および維持管理の利用用途に応じた基本設計データ作成の標準形式となるモデル案を提案する．

2.2　標準形式となるモデル作成の方針

前項の調査で整理した出来形管理手法，先進事例やヒアリング等の結果を踏まえて，維持管理等

の後工程での利用も考慮した上で，標準形式となるモデル作成の方針を以下とした．

(1) 出来形管理

６項目に関する出来形管理手法を調査した結果，施工中では，水糸や丁張設置構造物の位置決めに必要な作業を実施している．また，今回対象とする６項目の施工前に位置決めの重要な施工となる出来形管理を実施している．

そのため，位置決め等施工での利用や対象となる構造物に付随する構造物の出来形管理に利用できるモデルとすることで，TS 出来形管理技術の利用頻度を増やすことができる．

そこで，標準形式となるモデルは，丁張設置等の施工中に利用でき，なおかつ基礎工等，対象となる工種の位置決めに必要となる工種を出来形管理できるモデルとする．

(2) 維持管理

BIM 等の先進事例の調査より，３次元形状に使用材料やプレキャスト製品等の型式等の属性を付与することで点検や維持管理に利用していることがわかった．また，維持管理担当者へのヒアリングにおいて，地下埋設物工事における埋設箇所以外の歩道や車道の形状が歩車道の識別に利用できる等の意見があった．

そこで，標準形式となるモデルは，工事完成図書への利活用を前提とし，構造物の材料や型式等の属性情報を付加するとともに，築堤法線や地下埋設物等の周辺形状等，工種別に必要な情報を考慮したモデルとする．

2.3 類似したモデルの統合

標準形式となるモデル案の検討にあたって，「施工管理データ交換標準（案）ver.4.0」に準拠した基本設計データ作成時の標準的な形状モデルとして考えられるものを整理した．

標準形式は，利用者や関係者の共通認識として，データ作成のパターン化やデータ流通・利活用を図る目的があることから，モデルが類似した工種は統合することとし，整理した基準類，現場実態や表現方法を踏まえて類似する工種をモデルパターン毎に分類した．表－１に類似した工種の分類結果を示す．

表-１　類似した工種の分類結果

対象工種	工種	モデルパターンの分類
一般舗装工	アスファルト舗装工	a)アスファルト舗装工タイプ
	半たわみ性舗装工	
	排水性舗装工	
	透水性舗装工	
	グースアスファルト舗装工	
	コンクリート舗装工	
	薄層カラー舗装工	
	ブロック舗装工	
	路面切削工	b)路面切削工タイプ
	舗装打換え工	c)舗装打換え工タイプ
	オーバーレイ工	d)オーバーレイ工タイプ
石・ブロック積（張）工	コンクリートブロック工	コンクリートブロック積（張）タイプ
		連節ブロック張りタイプ
		天端保護ブロックタイプ
	緑化ブロック工	コンクリートブロック積（張）タイプ
	石積（張）工	石積（張）工タイプ
縁石工	縁石工	縁石工
排水構造物工	側溝工	a)側溝工タイプ
	集水桝	b)集水桝タイプ
	管渠工	a)側溝工タイプ
	集水桝・マンホール工	b)集水桝タイプ
	地下排水工	c)地下排水工タイプ
	場所打水路工	d)場所打ち水路工タイプ
	排水工（小段排水・縦排水）	a)側溝工タイプ
	排水性舗装用路肩排水工	a)側溝工タイプ
	排水工	a)側溝工タイプ
電線共同溝工	管路工	a)管路工タイプ
	プレキャストボックス工	b)プレキャストボックス工タイプ
	現場打ちボックス工	c)現場打ちボックス工タイプ
擁壁工	一般事項	a)場所打ち擁壁工タイプ
	プレキャスト擁壁工	b)プレキャスト擁壁工タイプ
	補強土壁工	c)補強土壁工タイプ
	井桁ブロック工	d)井桁ブロック工タイプ
	既製杭工	e)既製杭工タイプ
	落石防護工	f)落石防護工タイプ
	場所打杭工	e)既製杭工タイプ

なお，「施工管理データ交換標準（案）Ver.4.1」と「施工管理データ交換標準（案）Ver.4.0」の中心線形や横断面に関する形状表現の記述ルールは同等であることから，提案するモデルは，「施工管理データ交換標準（案）Ver.4.1」においても適用可能である．

３．基本設計データの標準形式となるモデル案

3.1　標準形式となるモデルの作成手順

標準形式となるモデルの検討結果を踏まえて，対象６項目の各表現方法について検討し，モデル案を作成した．標準形式となるモデルの作成手順を図－２に示す．

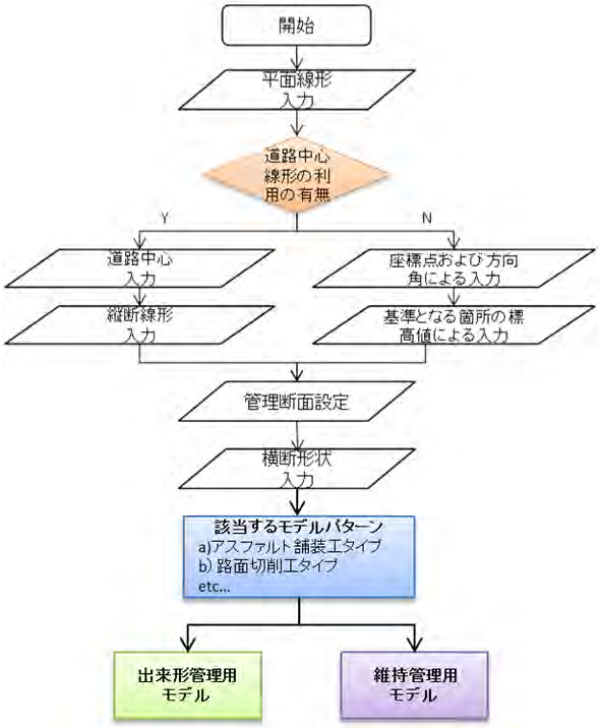


図-2　標準形式となるモデルの作成手順

平面線形や縦断線形については，道路中心線形を利用する場合としない場合とで作成手順を分岐させた．また，モデルは，モデルパターンの分類毎に，横断形状の作成を整理し，出来形管理用と維持管理用との用途に応じて作り込みを変えるものとした．

3.2　電線共同溝工の標準モデル案

標準形式となるモデル案の具体例として，電線共同溝工のモデル案である「管路工タイプ」，「プレキャストボックス工タイプ」，「現場打ちボックス工タイプ」について次に示す．

各モデルの共通事項として，出来形管理が実施できる最低限のモデルを基本とし，基礎工の情報をオプションとして追加できる．また，事故防止のために，管路やボックスの設置後の位置を計測データとして記録する．

(a) 管路工タイプ

出来形管理以外の利用として，掘削時のカッターラインの位置出しへの利用を想定したモデルとする．また，該当工種に付随する基礎工の出来形管理に利用できるモデルをオプションとして定義する．さらに，占用物件等の埋設位置は，縁石等からオフセット管理される場合が多いことから，電線共同溝の埋設形状に加えて，縁石等の周辺構造物も含めたモデルとする．維持管理用の計測は，管や管帯の位置を把握できるように管の上面および管帯の両端部の位置を計測する．

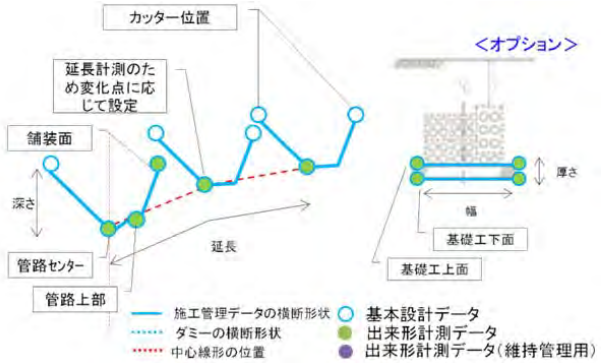


図-3　管路工タイプ（出来形管理用）

図３では，延長管理のために，管路センターに出来形管理箇所を設定し，深さ管理のために管路上部と舗装面に出来形管理箇所を設定している．また，出来形管理に加えてカッターラインの位置出しのために舗装面の掘削位置を作成する．さらに，オプションとして基礎工を管理可能である．

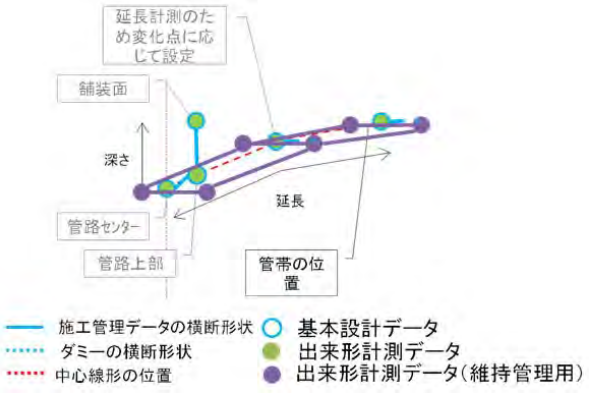


図-4　管路工タイプ（維持管理用）

図４では、計測した管帯上面の両端部の出来形計測データを事項防止のために利用する．

(b) プレキャストボックスエタイプ

プレキャストボックスの設置時のボックス端部の位置ずれ等，施工管理への利用を想定したモデルとする．占用物件等の埋設位置は，縁石等からオフセット管理される場合が多いことから，電線共同溝の埋設形状に加えて，縁石等の周辺構造物も含めたモデルとする．維持管理用の計測は，ボックス工の位置を把握できるように構造物の上面の四隅を計測する．

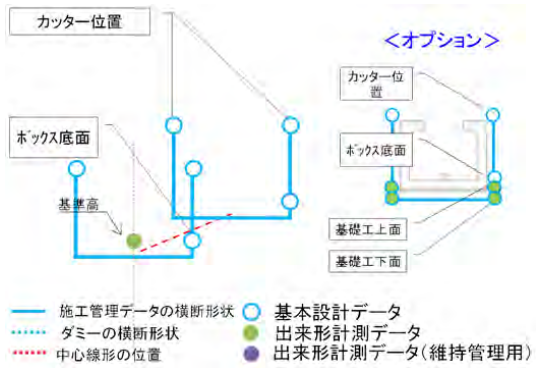


図-5　プレキャストボックスエタイプ（出来形管理用）

図５では，基準高管理のために，ボックス工底部に出来形管理箇所を設定する．また，出来形管理に加えて，カッターラインの位置出しのために舗装面の掘削位置を基本設計データとして作成する．さらに，オプションとして基礎工を管理可能である．

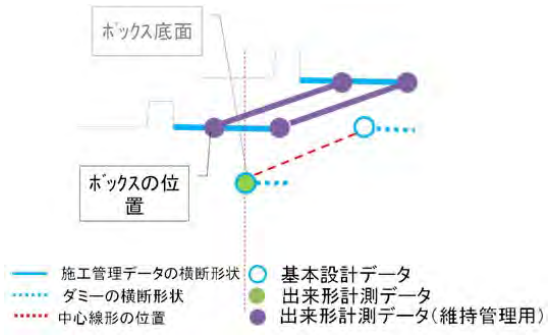


図-6　プレキャストボックスエタイプ（維持管理用）

図６では，計測したボックス工上面の両端部の出来形計測データを事項防止のために利用する．

(c) 現場打ちボックスエタイプ

厚さ，内空幅や内空高さ等，「施工管理データ交換標準（案）Ver.4.0」に対応していない管理項目は対象外とし，基準高，およびブロック長（延長）を出来形管理できるモデルとする．維持管理用の計測は，ボックス工の位置を把握できるように構造物の上面の四隅を計測する．

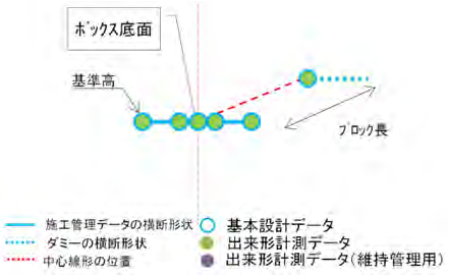


図-7　現場打ちボックスエタイプ（出来形管理用）

図７では，延長管理のために，ボックス工センターに出来形管理箇所を設定し，基準高管理のために内空の底面に出来形管理箇所を設定する．

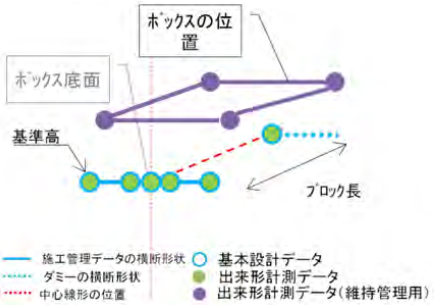


図-8　現場打ちボックスエタイプ（維持管理用）

図８では，ボックス工上面の出来形計測データを事故防止のために利用する．

４．おわりに

本研究では，「TS を用いた出来形管理」の適用工種の拡大，データの後工程や維持管理等での利用を目的として，「一般舗装工」，「縁石工」，「排水構造物工」，「電線共同溝工」，「擁壁工」，「石・ブロック積（張）工」の計６項目に対し，基本設計データ作成の標準形式となるモデル案を作成した．

しかし，検討したモデルは，机上による検討であることから，今後，実現場で提案したモデルを利用して計測可能かを確認する必要がある．また，案の中には，現行のデータ交換標準案や機能要求仕様では対応できない管理項目や算出方法があることから、次期データ交換標準案対応に向けてソフトウェアメーカーと意見交換しながら検討していく必要がある．

参考文献

1) 酒本晋太郎・田中幸悦：ICTによる建築設備工事の合理化: ICTによる施工支援システムとBIMへの展開, 建設機械，Vol.48，No.5，pp.50～55, 2012

2) 平林裕治・吉原裕之・田淵統：BIMを活用した建築施工の現状について，建設マネジメント技術，No.411，pp.23～29, 2012

３次元ブロックモデルを利用した盛土の施工管理システム

西松建設株式会社　技術研究所　　○ 岩谷　隆文
西松建設株式会社　技術研究所　　佐藤　靖彦
西松建設株式会社　土木設計部　　杉本　幸信

１．はじめに

近年，土木工事においても GPS/GNSS などの衛星通信技術を利用した情報化施工システム（ICT）を利用し施工が普及している。ICT の普及は，土木工事の生産システムの合理化を図る上で重要な役割を担うことが期待されており [1)]，その利活用のための研究・開発が盛んに行われている。

盛土工事でも， GPS/GNSS を利用したマシンガイダンスやブレードを自動制御するマシンコントロールなどの ICT が利用されている。ICT の導入は，これまでの点管理から面的かつ連続的な管理が可能となり，盛土施工の効率化および高速施工が可能となった。これに比例するように取り扱う情報量は，以前よりも膨大な量となり，それらの情報を効率的かつ効果的に管理することが今後盛土管理には重要となる。特に，施工管理では，情報を「時間情報」と「空間情報」として関連付けて管理し，情報の「可視化」を行うことができれば，施工に携わった誰もが簡単に情報閲覧でき，工事の意思決定のスピード化，さらには維持管理段階への利活用にも期待できる。

「空間情報」として盛土を管理する場合，面的管理のような平面的な管理ではなく，実際の盛土が立体的な構築物であることから，施工情報を立体的に管理することにより，従来の管理手法よりも盛土全体を正確かつ容易に管理することができる。

筆者らは，これらの考え方から盛土の施工管理に必要な情報を 3 次元化し，転圧管理システムと動態観測と連動し，効率的に管理することができる「３次元モデル盛土管理システム」を開発した。本稿では，開発したシステムの概要および機能と特徴について報告する。

２．システムの概要

2.1　システム構成

開発したシステム構成を図-1 に示す。本システムでは，第一に，盛土を管理する上で重要となる盛土管理情報を取得する。管理情報は，施工日や盛土材料，転圧回数，沈下量などである。第二に，取得した管理情報を外部データベースにより管理する。データベースは， 3 次元モデル用データへの割付け・変換機能を有している。最後に，管理情報を 3 次元表示することにより，管理用データを「可視化」することができ，より盛土施工をスピーディーかつ容易に把握することができる。

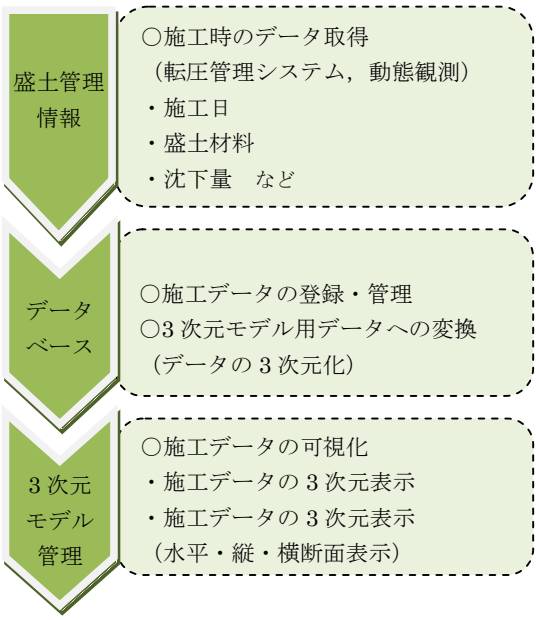


図-1　3 次元モデル盛土管理システム構成

本システムの特徴を以下に挙げる。

・盛土材料の使用箇所，施工状況（転圧回数，地盤剛性値）を 3 次元上で一元管理でき，施工のトレーサビリティーが確保できる。

・盛土施工の進捗状況を 3 次元的に把握できるため，視覚的に状況が分かりやすく，次ステップの施工計画に反映できる。

・転圧システムデータを取り込むだけで，簡単かつ効率的に一連の管理ができる。

・動態観測と一元管理できる。計測データの傾向と盛土材料・施工状況との対比が直接確認・把握

できる。
次に，本システム構成の内容について説明する。

2.2　盛土管理情報の取得

盛土施工では ICT を利用した転圧管理システムが利用されている。転圧管理システムでは，転圧時の施工位置，施工日，盛土材料，転圧回数などが瞬時にデータとして蓄積することができる。本システムは，この転圧システムを活用し，盛土の膨大な管理情報を容易にデータベースに格納することができるシステムである。これにより，これまで盛土管理に要していた時間を短縮するなどの効果が期待できる。

2.3　盛土管理情報のデータベース化

盛土管理情報は，転圧システムより得られる施工データおよび動態観測によって得られる盛土の沈下量データである。これらの盛土管理する上で重要となる情報を外部データベースにおいて一元管理することで，データ検索などが容易となる。

2.4　３次元ブロックモデルの適用

（1）従来の 3 次元モデルによる管理

盛土工事を含めた土木分野では，その対象工事地形をより鮮明に把握し，工事を円滑に進めるために，設計段階から 3D-CAD[2)]などを用いた 3 次元管理が行われている。3D-CAD では，図-2 に示すように設計地形などをサーフェスモデル（境界で閉じられた面の集合体によって表現されたモデル）で表現する。サーフェスモデルによって表現されたモデルは，任意の鉛直断面の表示や土量を計算することができるという利点がある。一方で，盛土の施工管理上重要となる盛土材料や転圧回数，沈下量といった施工段階の情報を施工面サーフェスの情報として与えることができない。さらに，盛土工事の進捗により 3 次元情報が膨大になると操作性が落ちるといった問題が生じる。

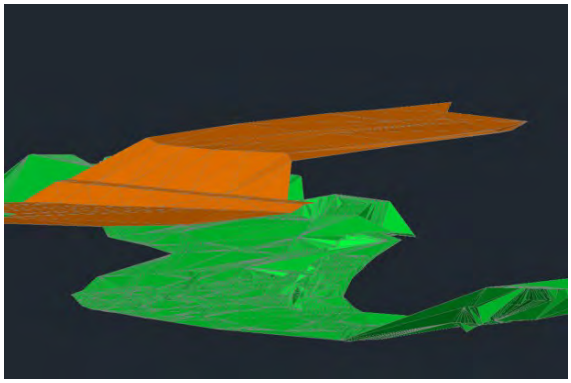


図-2　サーフェスモデル

（2）3 次元ブロックモデルによる管理

これまでに，地形情報を 3 次元ブロック化し，そこへ土質などの情報を属性情報として付加する[3)4)]といったシステムは実際に開発・運用されている。しかし，これらの既存システムは現存する地形を 3 次元ブロックで表現しているものであり，盛土のように，これから構築する対象物を 3 次元ブロックとして表現し管理することができなかった。そこで，筆者らは，これら既存のシステムを応用し，盛土施工への活用を試みた。これにより，これまで 3D-CAD ではできなかった盛土管理情報を 3 次元モデルの属性情報として付加することが可能となった。さらに，3 次元ブロックモデルには，膨大な施工データが蓄積することから，3 次元データのような重いデータを容易に操作できる Autodesk 社の Navisworks[2)]を利用することにより，操作性を確保した。また，3 次元ブロックの辺長はモデル作成時に任意の大きさを指定することができ，工事規模や使用目的に合わせて変更できる。

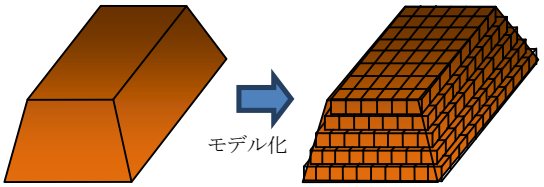


図-3　3 次元ブロックによるモデル化

2.5　3 次元モデル管理システムの保有機能

（1）属性情報の表示機能

属性情報として3次元ブロックへ付加された盛土管理情報は，3次元ブロックをクリックすることで図-4に示すように表示することができる。

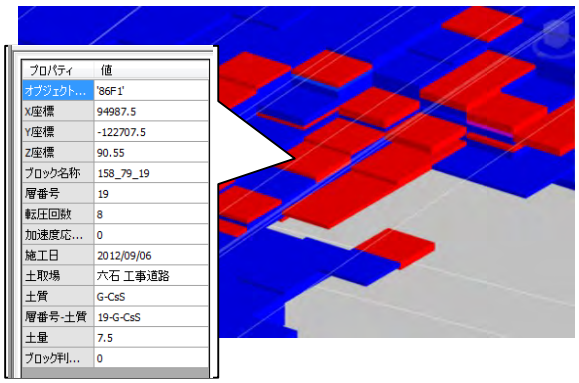


図-4　3次元ブロック内の属性表示

（2）土工量管理機能

盛土形状を3次元ブロック表示しているため，施工した3次元ブロック数から容易に概略の施工土量を計算することができる。また，土量計算時に，土質，施工日等の条件を付け加えることができるため，任意の土質材料の土量や任意施工期間の土量を瞬時に計算することができる。

(3) 属性情報の色表示・検索・抽出機能

属性情報ごとに3次元ブロックに色を割り振ることができる。属性情報表示は，鳥瞰図，水平断面，縦・横断面表示機能を有し，属性情報を視覚的に把握することができる（図-5)。さらに，属性情報を検索・抽出する機能を有しており，特定の属性情報（土質材料，転圧回数等）を検索し，表示することもできる。

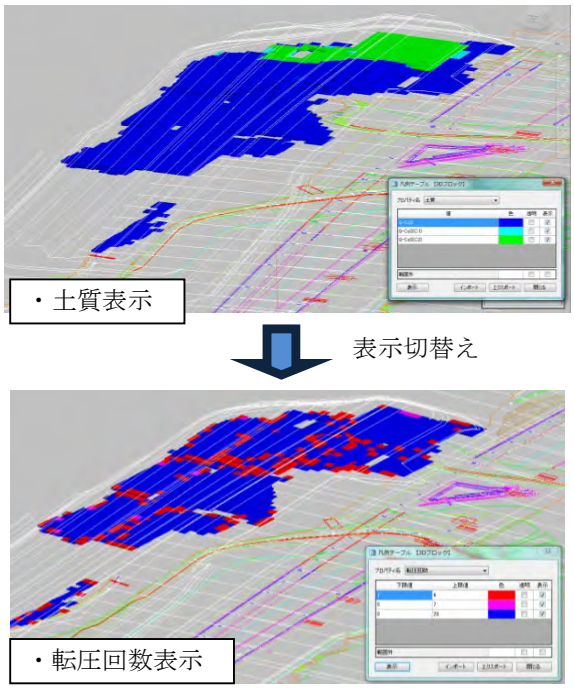


図-5　属性情報の色別表示

(4) 時系列表示機能

属性情報を時系列表示機能，アニメーション機能により，属性情報の進捗過程を再現表示することができる（図-6)。

このように，本システムは盛土施工を管理するための複数の機能を有しており，これらの機能を活用することにより，従来の盛土管理よりもより高度な盛土管理を可能とした。次に，本システムを実際の盛土現場で活用したシステム運用例を紹介する。



(a) 2012 年 7 月 26 日の施工進捗状況

(b) 2012 年 8 月 26 日の施工進捗状況

図-6　属性情報の時系列表示

3．現場におけるシステムの運用

盛土施工現場におけるシステム運用フローを図-7 に示す。

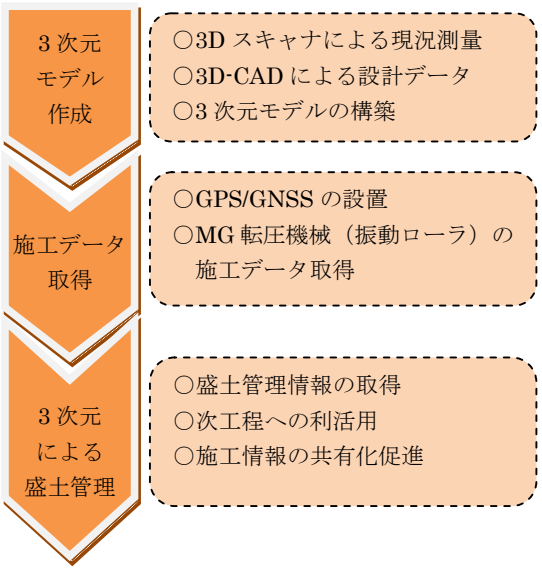


図-7　システム運用フロー

(1) 3次元モデル作成

盛土の 3 次元モデルは，現況地形サーフェスと盛土設計形状データから作成，構築する。現況地形サーフェスは，3D スキャナによる測量点群データを 3D-CAD 上で読み込み作成する。図-8 には，実際の 3D スキャナによる現況点群データを示す。また，盛土設計形状データは，2D データを 3D-CAD で 3 次元データにする（図-9)。

盛土 3 次元ブロックモデルは，ブロックデータ管理の効率性のため，1 ブロックの辺長は，縦 5.0m，横 5.0m，高さ 0.3m とした。

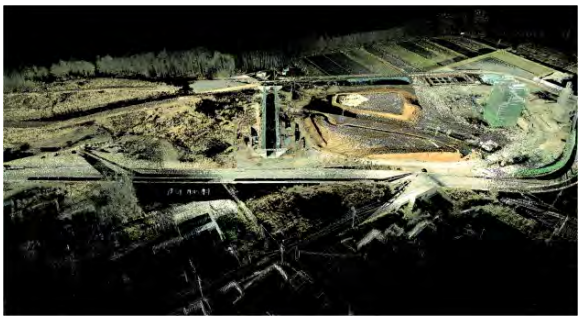


図-8　3D スキャナによる測量点群データ

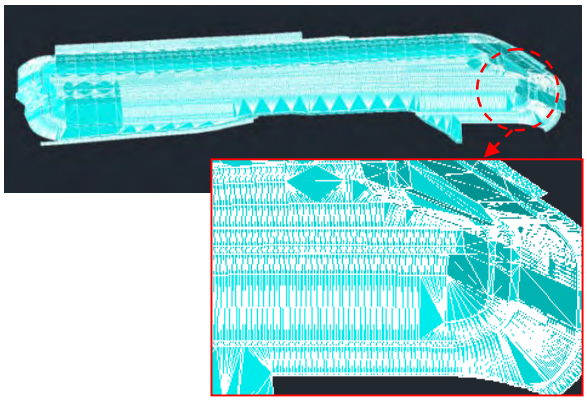


図-9　3D 盛土設計形状データ（サーフェスモデル）

(2) ICT 施工データ取得

GPS/GNSS による転圧管理システムを導入し，3 次元モデル盛土管理システムを適用する。転圧システムから取得されたデータは，通常 50cm メッシュであるが，本システムの 3 次元ブロックサイズに対応するようデータを平均，代表値化処理を行う。



GPS/GNSS の設置



MG 振動ローラ

図-10　施工現場の ICT 化

(3) 3 次元による盛土管理

種々の盛土管理情報を一元的に管理，可視化することで多くの効果が得られる。図-11 には，盛土材料と沈下量の計測データを同時に断面図に出力している。沈下量は，沈下量の推移とともに色が変わるようになっている。これにより，どの盛土材料が盛土の沈下に影響を与えているか簡単に把握できる。データの一元管理，可視化は，状況把握，周囲との情報の共有化が簡便になり，次工程の施工計画，手順など，施工の意思決定のスピード化が図れるなどの効果が期待できる。

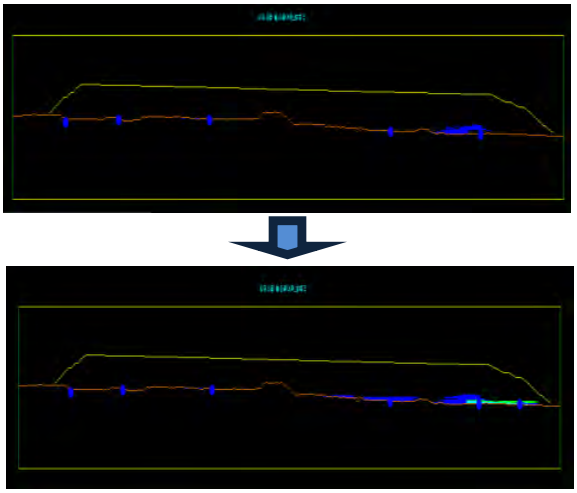


図-11　属性情報の断面図表示例（沈下量と盛土材料）

4．今後の課題と展望

本稿では，3 次元ブロックモデルによる盛土施工管理システムを紹介した。3 次元ブロックによる盛土の 3 次元化，ICT との連携により，盛土施工管理を従来よりも効率的な施工管理を可能とした。しかし，3 次元ブロックモデルにも現時点では課題がいくつか挙げられる。

本システムで使用される 3 次元ブロック自体は，盛土の沈下量の影響は加味されていない。そのため，現地盤が軟弱地盤で沈下量が非常に大きい場合，3 次元ブロックに付加された属性情報と沈下後の実際の 3 次元ブロックに蓄積された属性情報に違いが生じる。また，運用中の 3 次元ブロックモデルを途中で変更することは容易ではない。

今回開発したシステムによる施工データのデータベース化（一元管理），3 次元化による「可視化」は，施工管理だけでなく，盛土施工のトレーサビリティーを可能にし，盛土の維持管理への活用にも有効となる。このような ICT を利用したシステム開発の取り組みは，CIM（Civil Information models ）へ繋がるものと考えられる。

参考文献

1) 国土交通省：情報化施工推進戦略（案），2013.03
2) Autodesk 株式会社 HP：http://www.autodesk.co.jp
3) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 HP：http://www.ctc-g.co.jp
4) 竹本憲充：掘削工事の概略設計への立方体地盤モデルの適用，建設施工と建設機械シンポジウム，pp.210～213, 2011
5) 黒台昌弘：維持管理を視野に入れた施工データの可視化，基礎工，5月号，pp.77～79, 2012

太陽光発電による自律式ネットルーティングの開発

大成建設株式会社　○ 新見　孝之
大成建設株式会社　近藤　高弘
大成建設株式会社　志波　由紀夫

１．はじめに

近年，情報化施工の普及に伴い，広大な施工現場の各所から取得したデータを事務所にて一括管理するシステムが実用化され始めている。

たとえば，無線センサネットワークを用いた土砂災害監視システム [1]では，複数のセンサで計測したデータを無線により，管理事務所へ転送している。しかし，センサへの電源確保や無線通信間の障害物の影響が課題としてあげられている。また，無線センサネットワークの斜面防災への適用に関する実験的研究 [2]において，センサや計測器はリチウム電池で駆動しているため，3 ヵ月に 1 度の電池交換が必要となる。

広域から取得したデータを中継するためには，中継装置を現場内に点在させる必要がある。しかし，中継装置には通信ケーブルや電源ケーブルが必要なため，設置場所はケーブルが届く範囲や作業しやすい場所に制限されたり，ケーブルの設置・盛り替え作業が発生したりして作業や費用が増大する。また，ケーブルレスを目的として，電源供給をバッテリで行うと定期的なバッテリ交換などの作業が必要になる。

そこで，中継装置への電源供給に太陽光発電を用いることにより，ケーブルレスかつメンテナンスフリーな中継システムを構築した。また，無線ネットワークは，情報通信を無線で行うため，通信環境が不安定になりやすいという問題点がある。無線ネットワークの一部が通信不能になっても，自律的にルーティングを行うことができれば，信頼性の高い通信システムを構築することができる。そこで，自律的に無線ネットワークをルーティングするシステムを開発した。

２．中継装置に適した太陽光パネルの選定

中継装置への電源供給には太陽光発電を用いた。昼間は太陽光発電による中継装置への電源供給およびバッテリへの充電を行い，夜間はバッテリからの電源供給で中継装置の機能を維持している。そこで，中継装置の機能維持に適した発電容量の太陽光パネルを選定した。

2.1　太陽光パネルの発電電力量比率

太陽光パネルは，受光面に受ける日射量に応じて発電量が変化するため，太陽光パネル面に対して，できる限り直角に太陽光が当たるように設置することが理想である。太陽光パネルを設置する方角は，北半球では南向きとする。太陽高度は，通年で変化し，夏季は高角度，冬季は低角度になる。季節に合わせて太陽光パネルの角度を変化させることが理想だが，年に何回も太陽光パネルの角度を変えるのは困難なため，通常は固定設置となる。

今回の実験では，発電電力量比率 r を

$$r = \frac{P_w}{P} \quad \cdots\cdots(1)$$

と定義する。ここで，P は太陽光パネルの定格発電容量とし，Pw は実際に発電したソーラ起電力とする。つまり，発電電力量比率 r とは太陽光パネルの発電効率を表している。

年間の最低発電量時（主に冬季間）の発電量が最大となるような角度で太陽光パネルを設置することが必要となる。冬至の南中高度は 32°のため，太陽光パネル面に対して，できる限り直角に太陽光が当たるように太陽光パネルを 58°に傾けて南向きに設置する。

太陽光パネルで発電できる日照時間中のソーラ起電力 Pw をモニタリングするため，6 時～16 時までの 1 時間毎の発電量を記録した。

ここで，ソーラ起電力 Pw を直接測定することは困難なため，太陽光パネルに抵抗負荷を設置し，その抵抗負荷にかかる電圧を測定することによりソーラ起電力 Pw を算出した。

ソーラ起電力 Pw は，

$$P_w = IE \quad \cdots\cdots(2)$$

で求めることができる。ここで，I は電流値，E は電圧値とする。電流値 I はオームの法則より，

$$I = \frac{E}{R} \quad \cdots\cdots(3)$$

で求めることができる。ここで，R は抵抗値とする。式(2)および式(3)より，ソーラ起電力 Pw は，

$$P_w = \frac{E^2}{R} \quad \cdots\cdots(4)$$

となり，電圧値 E および抵抗値 R からソーラ起電力 Pw を算出することができる。

また，今回の実験では，1 V，0.4 w の単結晶太陽電池モジュールを使用しているため，式(4)より抵抗負荷を 2.5Ω に設定した。

実験装置を図-1 に示す。太陽光パネル面に対して，できる限り直角に太陽光が当たるように，太陽電池モジュールの傾きを変化させた。

実験結果を図-2 に示す。実験では，6 時～16 時までの 1 時間毎の電圧値 E を測定し，式(1)および式(4)より，発電電力量比率 r を算出した。図-2 より，時間によって発電電力量比率 r が変化し，正午頃に最大となることがわかる。したがって，太陽光パネルの選定には，

$$P_c < r \times P \quad \cdots\cdots(5)$$

を満たす必要がある。ここで，Pc は機器の消費電力とする。

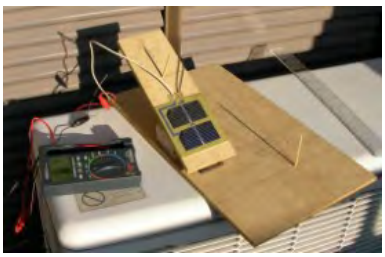


図-1　実験装置

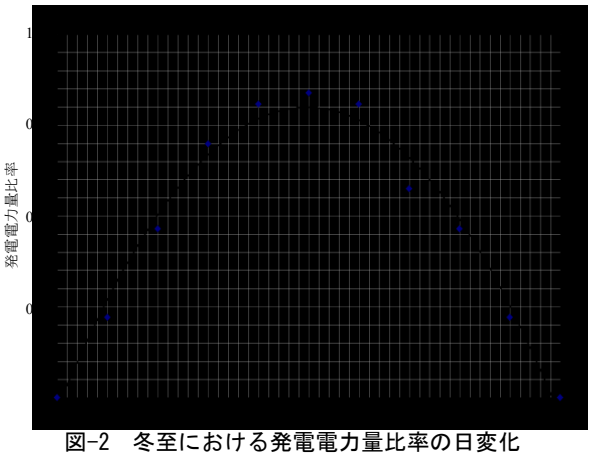


図-2　冬至における発電電力量比率の日変化

2.2　中継装置の構成

今回開発した中継装置は，無線 LAN ユニット，太陽光パネル，バッテリ，電力モニタユニットから構成されている。中継装置の構成を図-3 に示す。

今回の通信モジュールには，特定小電力無線に比べて安価で高速かつ大容量での情報通信ができる無線 LAN を使用した。

また，アドホック機能を付加するために 2 ch の WiFi モジュールを有した中継装置を開発した。今回は特定の中継装置にデータを集約させる機能を追加した。

さらに，中継装置に最適な太陽光パネルの定格発電容量を選定するため，電力モニタユニットを設置し，中継装置が通信を行っている際の消費電力等をモニタリングした。

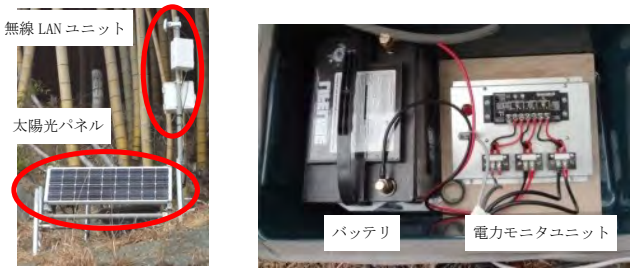


図-3　中継装置の構成

2.3　消費電力モニタリング

開発した中継装置の中継機能を検証するため，第二東名高速道路設楽原パーキングエリア工事現場において，2013 年 2 月から 7 月の約 5 か月間にわたり実証試験を行った。

現場に設置している太陽光パネルの発電容量は，以下の 3 点を設計条件として算出し，決定した。

① 1 時間で 1 日分の消費電力量を発電できる
② 中継装置の消費電力量を 2.5 w と仮定する
③ 発電電力量比率 r を 0.75 と仮定する

ここで，設計条件①は悪天候で太陽光発電が十分にできない場合を考慮している。また，中継装置の消費電力量は通信容量によって変化するため，設計条件②のように仮定した。

以上の条件より，太陽光パネルの発電容量を計算すると

$$2.5w \times 24hr \div 0.75 = 80wh \quad \cdots\cdots(6)$$

となることから，80 wh の太陽光パネルを現場の中継装置に設置した。

現場実証試験では，GPS の測位データを中継した際の消費電力をモニタリングすることにより，式(5)を満たす最適な太陽光パネルの選定を試みることとした。

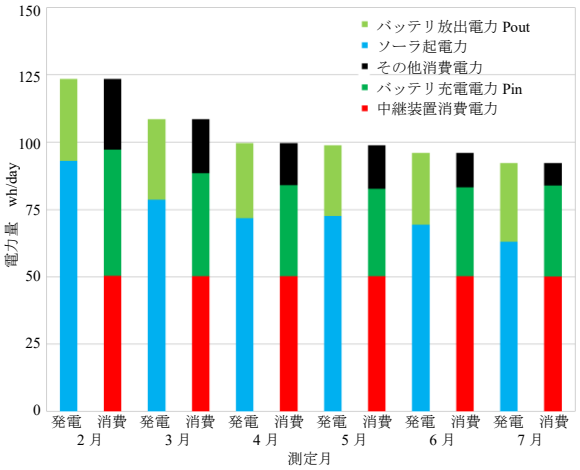


図-4　電力モニタリング結果

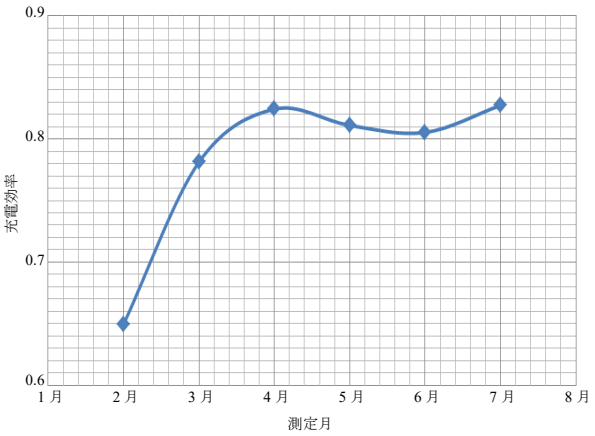


図-5　充電効率の月変化

ソーラ起電力およびバッテリ放出電力，中継装置消費電力，バッテリ充電電力をモニタリングした結果を図-4 に示す。図-4 より季節が冬から夏にかけて太陽光パネルからバッテリに供給される電力 *Pin* が小さくなっていることがわかる。これは，夏の単位時間当たりのソーラ起電力 *Pw* が冬に比べて大きくなることにより，発電電力量比率 *r* が大きくなり，バッテリへの充電が効率的に行われていることを示している。

ここで，充電効率 *E* を

$$E = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \cdots\cdots (7)$$

と定義する。*Pin* は太陽光パネルからバッテリに供給される電力とし，*Pout* は消費されたバッテリ電力とする。

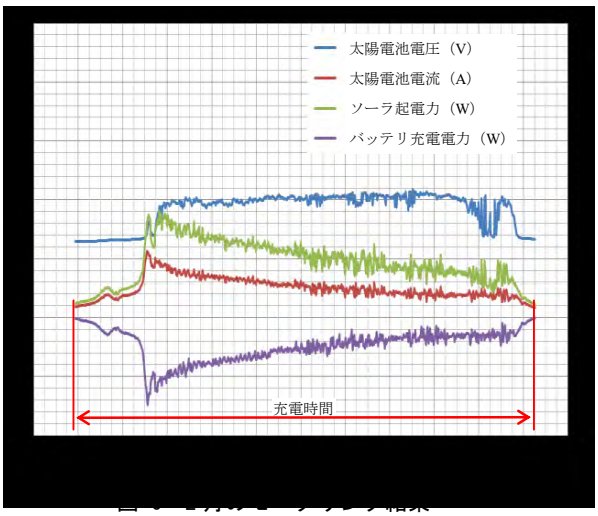
充電効率 *E* の月変化を図-5 に示す。図-5 より，充電効率は季節が冬から夏になるにつれて大きくなっていることがわかる。これは，図-4 に示すように消費されたバッテリ電力 *Pout* がほぼ一定であるのに対し，太陽光パネルからバッテリに供給される電力 *Pin* が小さくなるためである。

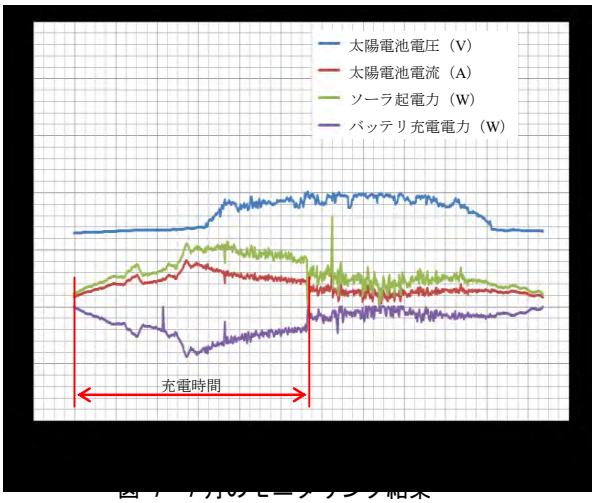
また，2 月と 7 月の日照時間中のソーラ起電力とバッテリ充電電力を図-6 および図-7 に示す。図-6 の 2 月では約 10 時間かけて充電されているのに対し，図-7 の 7 月では約 5.5 時間で充電が完了していることがわかる。つまり、冬より夏のほうが充電時間が短くなっているということである。

これは，先述したとおり，夏の単位時間当たりのソーラ起電力 *Pw* が冬に比べて大きくなることにより，発電電力量比率 *r* が大きくなり，バッテリへの充電が効率的に行われていることに起因していると考えられる。

図-4 より，中継装置の消費電力は 50 w/day つまり 2.03 wh で季節によらずほぼ一定となっていることがわかる。そこで，中継装置の消費電力を基に最適な太陽光パネルを選定する。

図-2 の発電電力量比率 *r* から，発電容量 *P* が 80 wh，40 wh，20 wh，10 wh の太陽光パネルのソーラ起電力 *Pw* の日変化を推定した。





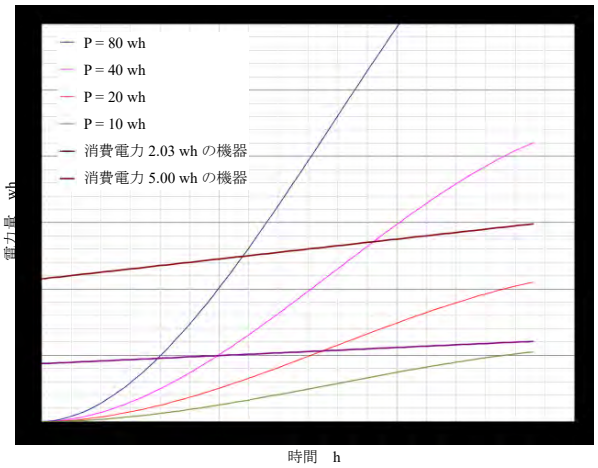


図-8　ソーラ起電力と充電時間

推定した結果を図-8 に示す。また，図-8 には中継装置の消費電力 2.03 wh および一般的な無線機器の消費電力 5.00 wh を重ねた。

定格発電容量が 10 wh の場合，中継装置の消費・充電曲線が 10 wh の曲線と交わる点が充電時間となり，日照時間のほとんどの時間で充電が必要となることがわかる。一方，20 wh のときは充電時間が 4.5 時間, 40 wh のときは 3.0 時間となる。したがって，今回の中継装置には定格発電容量が 20 wh もしくは 40 wh の太陽光パネルが最適であるといえる。

また，一般的な無線機器に対しては，40 wh のときは充電時間が 5.5 時間，80 wh のときは 3.5 時間となる。

以上より，太陽光パネルの選定にあたっては，中継装置の消費電力の約 10～20 倍の発電容量とすることが最適であると考えられる。

3．自律ルーティングシステム

3.1　各種機能の定義

自律ルーティングシステムでネットワークを構築するにあたり，中継装置が自律的に他の中継装置と接続するための役割と名称を定義した。

3.1.1　マスターとスレーブ

中継装置には 0～127 までの ID が割り当てられており，ID 0 の中継装置をマスター，その他をスレーブと呼ぶこととする。マスターは，すべての中継器の上位に来るため，マスターが管理用の PC と接続されることでネットワーク上のデータを取得することができる。

3.1.2　クリエイターとジョイナー

中継装置には 2ch の Wi-Fi モジュールがあり，クリエイター(ch1)とジョイナー(ch2)の 2 つのモードに設定されている。

クリエイターは，ジョイナーからのサーチ・接続要求を受けるのみで，最大 8 つのジョイナーと同時に接続できる。一方，ジョイナーは，クリエイターへのサーチ・接続要求ができる。しかし，複数のクリエイターと同時に接続を行うことはできない。

マスターは ch1・ch2 ともにクリエイターとして固定し，スレーブからの接続を待つのみである。スレーブの ch1 はクリエイターに設定し，ch2 はジョイナーに設定する。

マスターとスレーブのクリエイターおよびジョイナーのイメージを図-9 に示す。

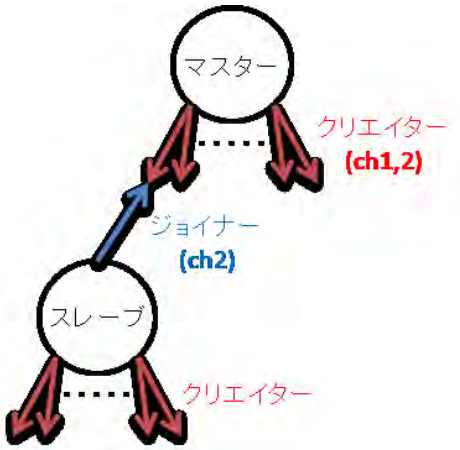


図-9　クリエイターとジョイナーのイメージ

3.1.3　ホップ数

各中継装置の上位・下位の関係を明らかにするため，ホップ数という概念を定義する。

マスターの中継装置はホップ数を 0 とする。マスターに接続している中継装置はホップ数を 1 とする。ホップ数 1 の中継装置に接続している中継装置はホップ数を 2 とする。以下，ホップ数 n の中継装置に接続している中継装置はホップ数を n+1 として定義していく。

どの中継装置にも接続していない中継装置のホップ数は -1 とする。また，ホップ数 -1 の中継装置に接続している中継装置のホップ数も -1 とする。ホップ数のイメージを図-10 に示す。

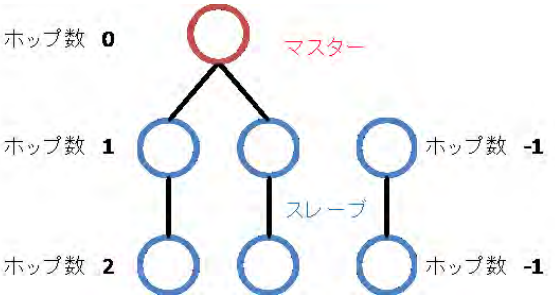


図-10　ホップ数のイメージ

3.1.4　RSSI（電波受信強度）テーブル

RSSI とは，中継装置が別の中継装置からの信号を受信した際の電波強度を表す指標である。表-1 に示すような RSSI テーブルに RSSI が記入されている中継装置とは通信することができる。たとえば，ID＝2 は ID＝0，5，6，7 とは通信（接続）することができるが，ID＝3，4，8，9 とは通信（接続）することができない。

各中継装置は RSSI テーブルに従い，他の中継装置と接続できるかどうか判断する。接続先をサーチできるのはジョイナーのみのため，各ジョイナーは RSSI を取得したクリエイターと接続しようとする。ここで，同じジョイナーが複数のクリエイターから RSSI を取得した場合は，RSSI が最も高いクリエイターと接続する。

たとえば，ID＝7 のジョイナーが ID＝2 のクリエイターに接続するように，RSSI テーブルを用いることにより，ジョイナーは接続可能なクリエイターを見つけることができる。

表-1 RSSI テーブル

クリエイターID	ジョイナーID 1	2	3	4	5	6	7	8	9
0 (ch1)	100								
0 (ch2)	50	86							
1			41	22			31	59	
2					67		43	25	
3	61								
4	72		58						74
5		18				26			
6		9							
7		32							
8	59					17			
9	3			88		9			

3.2　システム立ち上げ時の自律ルーティング

中継装置を現場に導入して中継システムを立ち上げる際，各中継装置はホップ数および RSSI から自律的に最適なルーティングを行う。

システム立ち上げ時の自律ルーティングの手順を以下に示す。

手順(1)　マスター（ID ＝ 0）の中継装置はホップ数を 0 に設定する。マスター（ID ＝ 0）以外の中継装置は自らのホップ数を -1 に設定する。

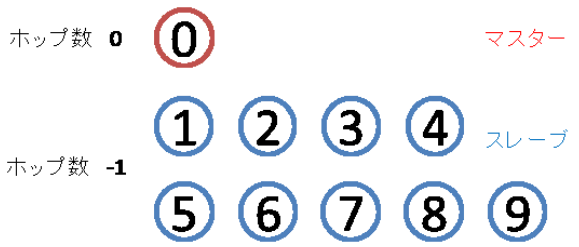


図-11　ホップ数の設定

手順(2)　ジョイナーを使用してマスターもしくは他のスレーブのクリエイターをサーチし，それぞれの RSSI を記憶することにより，RSSI テーブルを作成する。

手順(3)　ホップ数 0 以上の中継装置の中で RSSI が最も大きい中継装置に接続する。接続先をサーチできるのはジョイナーのみのため，表-1 の RSSI テーブルより，ID＝1 および ID＝2 の中継装置がマスター（ID＝0）と接続できることがわかる。ここで，ID＝1 は ID＝0(ch1) の RSSI＞ID＝0(ch2)の RSSI となるため，ID＝0(ch1)と接続する。したがって，図-12 のようなルートが設定される。

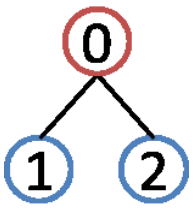


図-12　マスターとの接続

手順(4)　自身のホップ数を「接続した中継装置のホップ数+1」に再設定する。

手順(5)　ホップ数 0 以上の中継装置に接続できなかった中継装置は手順(3)に戻り，接続できる中継装置を探索する。

図-12 および表-1 より，ID＝3 および ID＝4 の中継装置は ID＝1 の中継装置に接続する。

ID＝3 の中継装置にとって ID＝4 の中継装置は ID ＝ 1 の中継装置より RSSI が高いが，ホップ数が -1 のため，接続しない。

また，ID＝5 の中継装置は，ID＝2 の中継装置に接続する。ID＝7 の中継装置は，ID＝1 および ID ＝ 2 の中継装置と接続できるが，RSSI が高い ID ＝ 2 の中継装置と接続する。同様に，ID＝8 の中継装置は ID＝1 の中継装置と接続する。

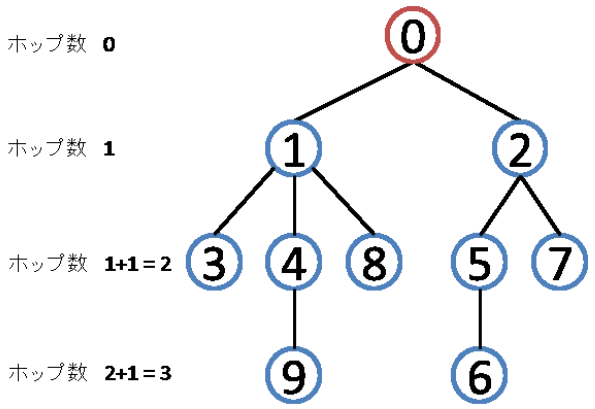


図-13　自律的に構成されたネットワーク

最後に，ID = 6 の中継装置は ID = 5 の中継装置に接続し，ID = 9 の中継装置は ID = 4 の中継装置に接続する。以上より，図-13 のようなネットワークが構成される。

3.3　通信障害発生時の自律ルーティング

3.2 で構成されたネットワークの一部に通信障害等が発生した際，自律的に最適なルートを再探索する手順を以下に示す。例として，図-13 のネットワークで ID = 5 と ID = 6 の接続が切れた場合を考える。

表-1 の RSSI テーブルより，ID = 6 の中継装置は ID = 8 および ID = 9 と接続可能なことがわかる。

ここで，ID = 6 の中継装置は RSSI が高い ID = 8 の中継装置に接続する。このようにネットワークの一部の接続が切れた際は，RSSI テーブルを基に最適なルートを再探索することができる。自律ルーティングにより，再構築したネットワークを図-15 に示す。

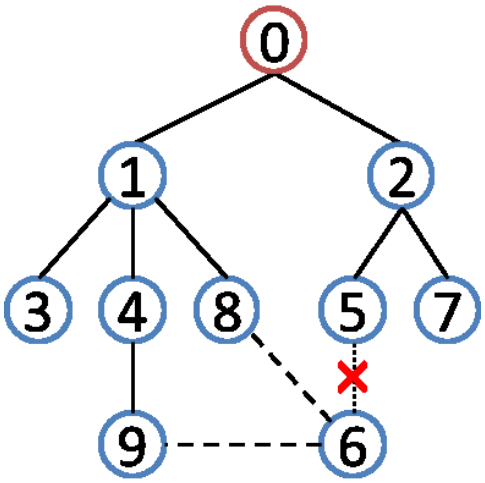


図-14　通信障害が発生したネットワーク

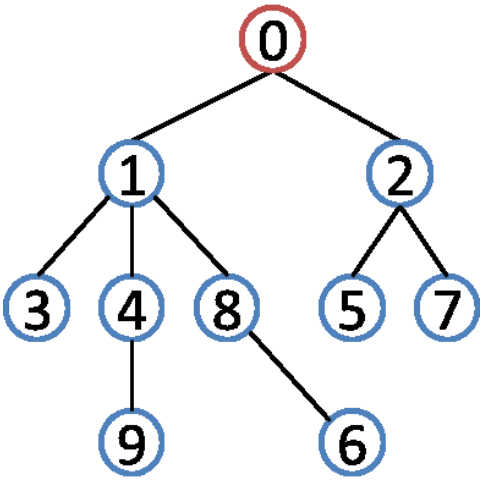


図-15　再構築したネットワーク

4．まとめ

中継装置への電源供給に太陽光発電を用いることにより，ケーブルレスかつメンテナンスフリーな中継システムを構築した。また，現場に設置した中継装置の消費電力をモニタリングすることにより，通信状態の中継装置を駆動させるのに適した発電容量の太陽光パネルを提案した。

中継装置間の最適なルーティングや通信障害発生時のルート再探索ができる自律ルーティングを開発した。今後は，開発した中継装置を使用した自律ルーティング試験を行い，自律ルーティングの理論を実証する予定である。

謝辞

本開発にあたり，開発内容を御理解いただき現場実証試験にご協力いただきました，中日本高速道路株式会社豊川工事事務所の関係者の方々ならびに第二東名高速道路設楽原パーキングエリア工事現場の関係者の方々には，この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

1) 上出定幸，小泉圭吾，尾上一馬，藤田行茂：無線センサネットワークによる土砂災害監視システムの開発，第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，講演番号 9，pp.45-50，2009.
2) 平井一弘，里見知昭，酒匂一成，深川良一：無線センサネットワークの斜面防災への適用に関する実験的研究，歴史都市防災論文集 Vol.3，pp.99-104，2009.

ロックフィルダム盛立における ICT 施工の定量評価

前田建設工業(株) 技術研究所　○ 松尾　健二
前田建設工業(株) 京極ダム(作)　石突　寿啓
前田建設工業(株) 総合企画部　藤谷　雅義

１．はじめに

近年，建設業界において，情報化技術の開発が進んでいる [1]。特に，土工事においては，3DCAD から 3 次元の設計データを作成し，トータルステーション・GPS 等の測量機器と重機を組み合わせた ICT(Information and Communication Technology) 施工の事例も増加している。さらに国土交通省が各地方整備局・北海道開発局にブルドーザ・バックホウのガイダンス技術，GNSS による締め固め管理技術などの ICT 施工技術を一般化推進技術として通知したことから、情報化施工技術の導入がさらに増加することが予想される [2]。

現在，ICT 施工技術の普及に関して多くの事例が報告されている [3) 4)]。その中で、施工精度や施工能力の報告は舗装工事に関して確認できるものの、ロックフィルダムのような大規模土工においてこのような検証の報告が少ない。したがって，大規模土工における ICT 施工の施工精度や施工能力を確認し、導入効果を定量的に把握する必要があると思われる。

北海道電力（株）京極発電所新設工事における中央土質遮水壁型ロックフィルダム(京極ダム)において，ブルドーザ・バックホウのマシンガイダンスシステム（以下 MG），GNSS による締固め管理システムを包括し，3D データを基盤とした前田建設の ICT 土工管理システム（**図-1**）を導入し施工の合理化を推進してきた [5)6)]。ロックフィルダムの施工では，材料のゾーン境界管理および施工厚さ・転圧回数の管理が重要である。また，施工現場は北海道の中でも有数の豪雪地帯であり、年間盛立施工可能期間が５月中旬から１０月中旬の約５ヵ月間に限定されるため，効率的な施工が求められた。そこで，筆者らは本システムの導入が施工精度や施工能力に与える影響を把握するために様々な検証をおこなった。

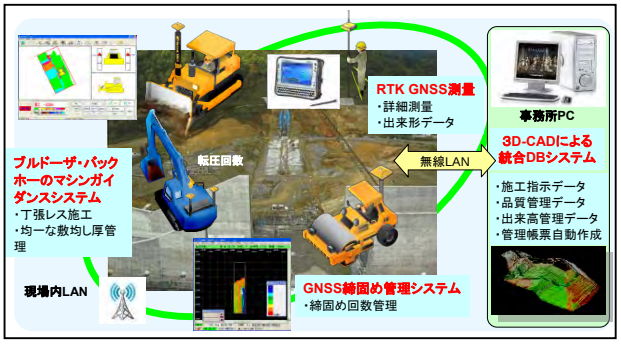


図-1 ICT 土工管理システム概要図

本稿では，ブルドーザ MG 技術，リップラップ整形におけるバックホウ MG 技術の現場への導入に伴う工夫と管理の省力化・施工精度の向上・施工能力の向上といった効果について検証した結果を報告するものである。

２．京極ダム概要

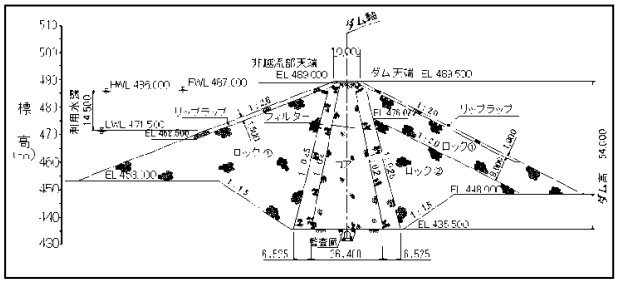


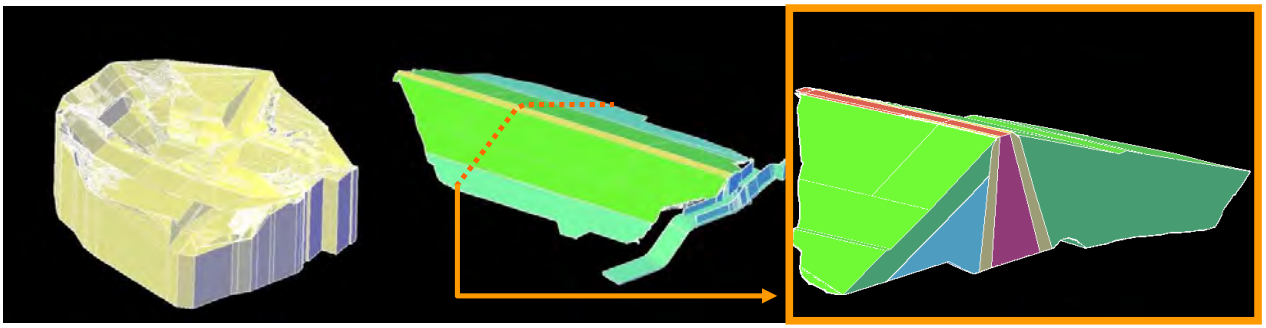
図-2 京極ダム標準断面図

純揚水式京極発電所の下部ダムにあたる京極ダムは，中央土質遮水壁型ロックフィルダムである。堤高 54.0m，堤頂長 332.5m，堤体積 1,318 千 m^3 であり，標準断面図を**図-2** に示す。

平成 23 年～平成 24 年の盛立施工において本システムを導入し，従来施工方法と比較検証した。

３．ICT 土工管理システムの概要

ICT 土工管理システムは，3DCAD を基盤とした統合 DB により施工計画，施工，品質管理の合理化・高精度化を目的としたシステムである。統合 DB を活用して様々なデータ管理とブルドーザ・バックホウ MG 等の運用管理を行う。また，統合 DB は現場内に構築された無線 LAN ネ



a)基礎地盤 3D モデル　　b)堤体 3D モデル　　c)堤体 3D モデル任意断面表示

図-3 統合 DB 表示例

ットワークを介して各システムと連携しており，施工によって得られた情報は逐次 DB に統合され，遠隔での施工状況確認や施工結果の帳票作成が可能である。

本システムの導入によって，①施工(業務)の効率化，②品質管理の高精度化，③盛土品質の見える化，④現場作業の安全性向上といった効果が期待できる。

(1)3DCAD を基盤とした統合 DB

図-2 に示す標準断面図などの設計図面，基礎地盤の詳細な 3 次元測量結果から堤体と基礎地盤の境界が現実の形状と合致する 3D モデルを作成し，3D モデルを基盤として統合 DB を構築した。統合 DB は 3D モデルと施工に必要な情報，および施工を進めていく中で取得される情報が連携している。図-3 に基礎地盤 3D モデルと堤体 3D モデル、さらに堤体 3D モデルの任意断面での表示例を示す。

①統合 DB による施工計画

堤体盛立のリフト計画は施工能力や土量バランス等を考慮して作成する。堤体 3D モデルから材料別の数量を迅速に算出できるため，短時間で複数のリフト計画を立案し比較検討することが可能であり，施工計画の高度化・効率化を図ることができる。**図-4** にはコアゾーンにおけるリフト計画例を示している。

②施工指示データの作成

ブルドーザ MG と GNSS 締固め管理システムでは，**図-5** に示すような施工平面での各材料の材料境界線・まき出し厚さ・転圧回数が設定された施工指示データ，法面の仕上がり形状が施工指示データとして必要である。これらの施工指示データは，3D モデルを利用して作成したうえで統合 DB に格納し，施工時には日々の進捗にあわせて必要な施工指示データを統合 DB から読み込む。また，施工で得られた情報は逐次統合 DB へ格納される。

振動ローラが現場内で複数機稼働する場合でも，施工情報を統合 DB に集約して 1 日の施工結果を帳票出力することができ，施工品質の見える化が図れる。また，帳票は自動生成されることから，帳票作成に関する業務が効率化できる。

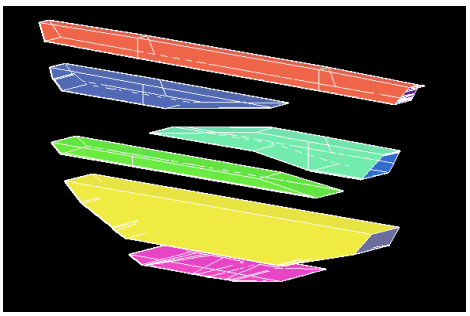


図-4 コア材のリフト計画例

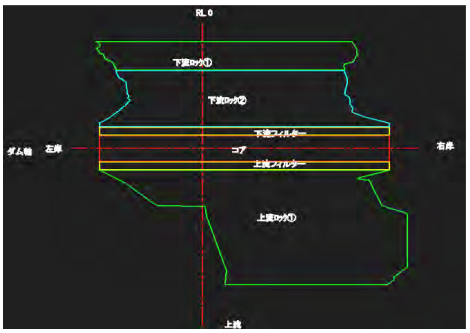


図-5 施工指示データ



図-6 RTK GNSS 測量状況

(2)RTK GNSS 測量

①システムの構成

GNSS 受信用アンテナ，無線 LAN 通信用アンテナ，PDA モニター，バッテリーがセットになっており，現場内の GNSS 基準局からの補正情報を利用することで，高精度の測量が行うことができる。



図-7 ブルドーザ MG の構成

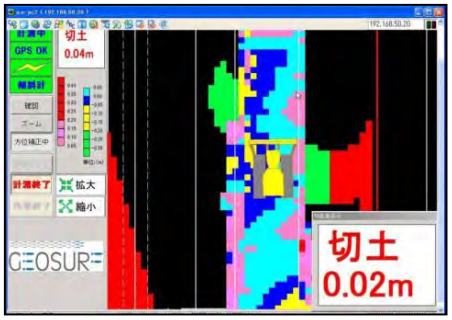


図-8 ブルドーザ MG の指示画面

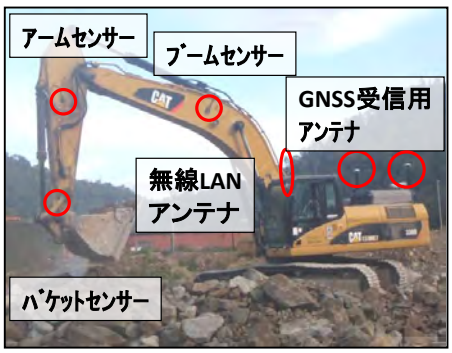


図-9 バックホウ MG の構成



図-10 バックホウ MG の指示画面

②システムの導入効果

図-6 に示すように，光波測距義と異なり手元の人員を必要とせず，機械の据付け作業が必要ないため，測量作業の効率化が図れる。

(3) ブルドーザマシンガイダンスシステム

①システムの構成

ブルドーザに GNSS 受信用アンテナ，無線 LAN 通信用アンテナ，キャビン内に傾斜計とモニターを搭載している（図-7）。

従来はブルドーザのブレード部に GNSS と傾斜計を搭載し，ブレードの下端の位置を算出する。本現場ではコア・フィルターで Dmax150mm，ロック材 Dmax800 ㎜であり，押土中にブレードを超えて GNSS のポールやケーブルに損傷を与える恐れがあったことと，作業がまき出しに限定されることからキャビンに GNSS と傾斜計を搭載した。

GNSS 受信座標とブルドーザの傾斜角から履帯下の座標を算出し，施工指示データの計画高さと比較することで，モニターに 0.5m メッシュでまき出し高さの過不足を色や数値で表示する。

また、ゾーン境界の設計ラインもモニター上に表示される。図-8 にブルドーザ表示画面の一例を示す。

②システムの導入効果

まき出し厚およびゾーン境界の丁張を必要とせず，オペレータがモニターで確認できる。丁張設置による手待ちを防止でき，0.5m メッシュでの確認が行えるため施工精度の向上が期待できる。

(4) バックホウガイダンスシステム

①システムの構成

バックホウに 2 個の GNSS 受信用アンテナ，無線 LAN 通信用アンテナ，傾斜計，ブーム・アーム・バケットにそれぞれ角度センサ，キャビン内にモニターを搭載している（図-9）。

図-10 に示すモニターに仕上がり形状とバケットの刃先から仕上がり形状までの距離が表示されるため，オペレータはこの表示や数値を確認しながら施工することができる。

②システムの導入効果

丁張設置の手待ちやオペレータが重機から下車し仕上がりを目視にて確認する必要がないため，施工の効率化と安全性の向上を図ることができる。

4．ICT 土工管理システムの効果検証

京極ダムでは，堤体盛立におけるブルドーザ MG およびリップラップ整形におけるバックホウ MG での対象期間において，施工歩掛調査や出来形検測を実施し，施工能力や施工精度の検証を行った。ここでは、その定量評価を行った結果を詳述する。

(1) 効果の比較手法

本システムの効果検証に際し同等の施工条件で比較するため，表-1 で示す施工に関係する機械と担当者を固定した。また，ICT 施工と従来施工を切り替えて 1 週間程度の習熟期間を経た後に降雨，堤体の埋設計器施工期間などの施工に影響するイベントを避けた期間において ICT 施工（A 期間），

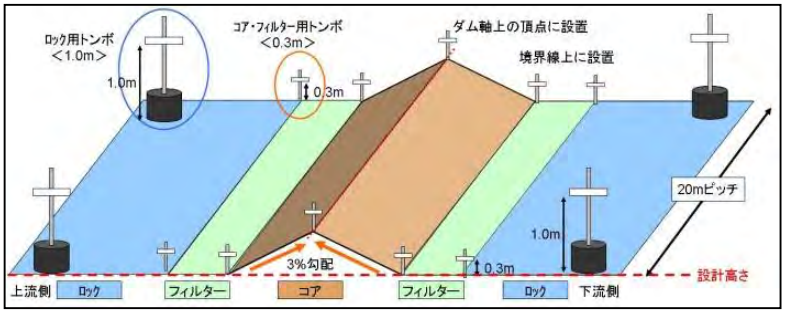


図-11 従来施工における丁張の配置



図-12 ブルドーザ MG 比較



図-13 バックホウ MG 比較

表-1 担当者一覧

作業名	機械	能力	台数	担当者 オペレータ
積込み	バックホウ	3.5m3	1	A
運搬	重ダンプ	55ｔ級	2	B,C
敷均し	ブルドーザ	21ｔ級	1	D
転圧	振動ローラ	10ｔ級	1	E
整形	バックホウ	1.4m3	2	F(上流),G(下流)
測量	光波測距儀	-	1	H,I
測量	RTK GNSS	-	1	H

従来施工（B 期間）を対象期間として設定した。対象期間中は、重ダンプによる盛立材料の運搬量、まき出しに要した時間，何らかの要因で重機に待ちが生じた時間等、施工サイクルにおける様々な情報を詳細に記録した。

バックホウ MG については，リップラップ整形が機械毎の単独作業であることから，設定した C 期間の中で ICT 施工と従来施工を切り替えながら検証した。バックホウ MG ではバックホウの作業時間とその時に施工が完了した面積を記録した。

従来施工のブルドーザによるまき出しは**図-11** に示すように 20m ピッチのトンボと呼ばれる丁張を設置し，オペレータは重機の中からトンボを確認し、まき出しを行う。また，バックホウによるリップラップ整形は，法面形状を示す丁張に合わせて整形する。**図-12，13** に示すように，従来施工

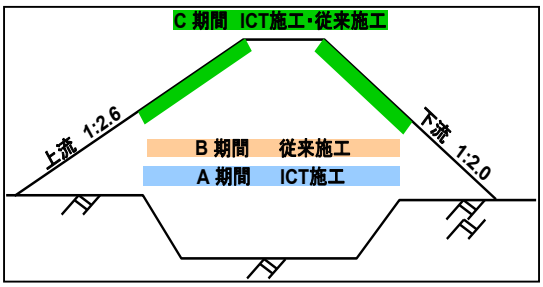


図-14 検証対象期間

では光波測距儀または RTK GNSS を使って丁張設置を行う。一方，ICT 施工では MG を駆使し丁張りレスで施工する。

(2) 施工能力の検証結果

①測量の効率化

表-2, 4 に堤体盛立およびリップラップ整形において，丁張設置に要する測量手間を調査した結果を示す。丁張レスの MG 施工では，ここに示す測量手間が削減できることが確認できた。

②コア・フィルター・ロック盛立の効率化

表-3 にコア・フィルターおよびロック盛立において、1 時間当たり施工能力を調査した結果を示す。30cm/層のコア・フィルターの施工では 10%の向上が確認できた。これは，敷き均し能力が向上した結果ダンプ荷卸しの待ち時間削減等が図れたことによると思われる。一方 1.0m/層のロックの施工では，逆に施工能力が 2%下がる結果となった。これ

表-2　盛立における測量手間比較

施工対象	機械	施工能力（人時/1000m³）	削減率
ｺｱ・ﾌｨﾙﾀｰ（0.3cm/層）	光波測距儀	8.3	—
	RTK GNSS	4.2	▲49%
	ICT 施工	0	▲100%
ロック（1.0cm/層）	光波測距儀	2.1	—
	RTK GNSS	0.9	▲57%
	ICT 施工	0	▲100%

表-3　盛立施工能力比較

施工対象	施工方法	施工能力（m³/hr）	向上率
ｺｱ・ﾌｨﾙﾀｰ（0.3cm/層）	従来施工	192	—
	ICT 施工	212	+10%
ロック（1.0m/層）	従来施工	297	—
	ICT 施工	291	▲2%

表-4　ﾘｯﾌﾟﾗｯﾌﾟ整形の測量手間比較

施工対象	機械	施工能力（人時/100m²）	削減率
ﾘｯﾌﾟﾗｯﾌﾟ	光波測距儀	1.9	—
	ICT 施工	0	▲100%

表-5　ﾘｯﾌﾟﾗｯﾌﾟ整形施工能力比較

施工対象	施工方法	施工能力（m²/hr）	向上率
下流ﾘｯﾌﾟﾗｯﾌﾟ（勾配　1:2.0）	従来施工	16.5	—
	ICT 施工	19.3	+17%
上流ﾘｯﾌﾟﾗｯﾌﾟ（勾配　1:2.6）	従来施工	12.4	—
	ICT 施工	15.6	+26%

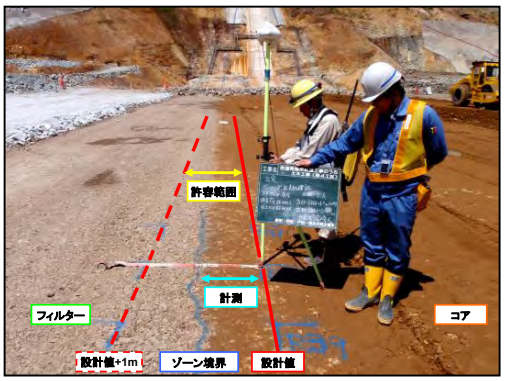


図-15 ゾーン境界出来形計測状況

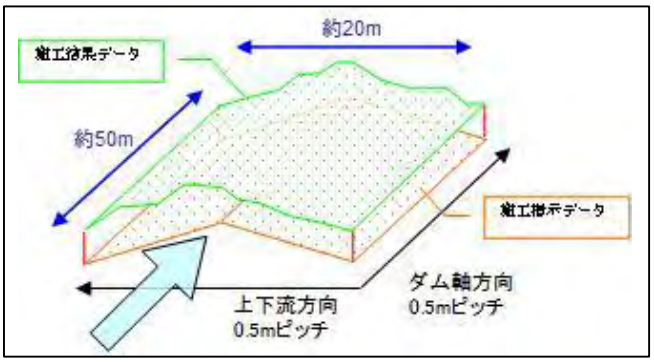
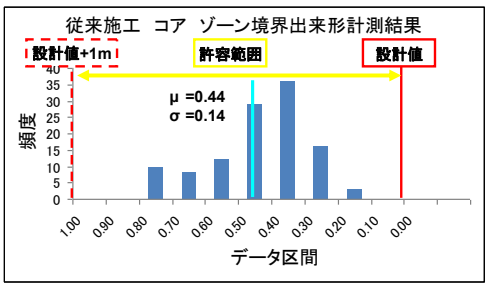


図-17 計測データの分析方法



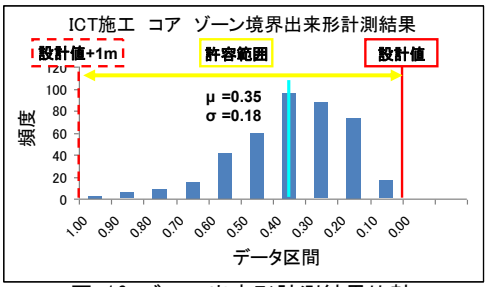
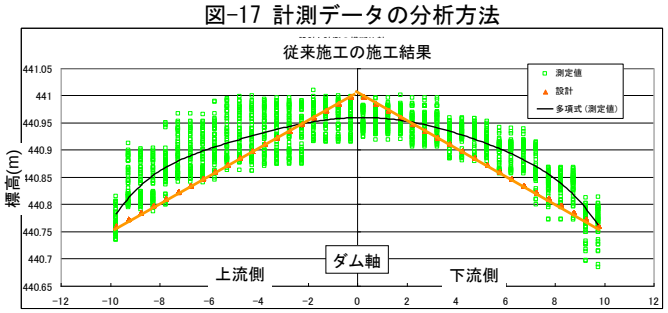


図-16 ゾーン出来形計測結果比較



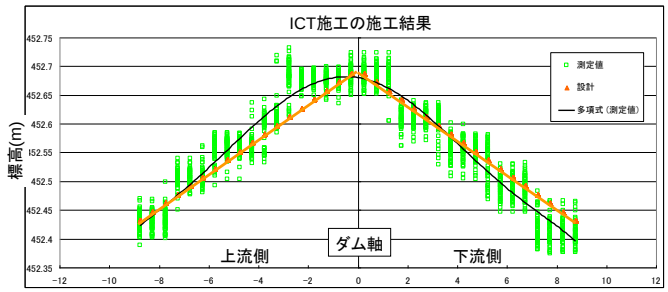


図-18 従来施工と ICT 施工の高さ精度比較

は，施工能力がロック材の積込または運搬能力に支配され，ブルドーザ MG 導入が施工能力向上に対して寄与しなかったためと思われる。

③リップラップ整形の効率化

表-5 にリップラップ整形における 1 時間当たり施工能力の比較結果を示す。下流(1:2.0)では 17%，上流（1:2.6）では 26%の向上が確認できた。法面勾配による整形しやすさの違いやオペレータの熟練度の差異による影響があると思われるものの，上下流の双方で大幅な施工能力の向上が見られ，MG の導入効果を確認することができた。

(3) 施工精度の検証結果

①ゾーン境界部の施工精度の検証

ロックフィルダムの品質管理における重要な項目のひとつに、コアとフィルターのゾーン境界部の出来形検査があり、（**図-15**）京極ダムの管理基準は「設計＋0～1m」に設定されている。検査頻度はダム軸上の 40m 間隔の側線上で標高 2m 毎に検査を行う。**図-16** にゾーン出来形の計測結果を示す。ICT 施工は従来施工よりバラツキがやや大きい結果となったが，これは標本数の違いによる影響も含んでいると思われる（従来施工は比較検証のために限定的に実施しために施工期間が短く、データ数が少ない)。どちらも管理基準内にデータが分布しており、まき出し作業の平面的な精度に施工上の有意な差はないと評価できる。

よって，ICT 施工は管理基準を満たす施工が可能であり，従来施工と同程度の施工精度であることが確認できる。

②まき出し高さの施工精度の検証

本現場では，GNSS による締固め管理システムを導入している。本システムは転圧回数の管理を目的として導入したが，振動ローラに GNSS を搭載しており，高さ情報も記録している。**図-16** に示すように振動ローラの GNSS で計測した転圧完了時の高さ情報をダム軸方向から見た視点で比較してまき出し高さの精度を検証した。

0.5m メッシュ毎の計測データを**図-17** の矢印の方向から見た結果を**図-18** に示す。このグラフは Y 軸上がダム軸として高さを示し，X 軸のプラス方向が下流側，マイナス方向が上流側としている。また，同図には施工時に用いた施工指示データの値（直線）および得られた計測結果の近似曲線も示している。

このグラフからわかるように，ICT 施工では，施工指示データからの差異が従来施工より小さい。また，近似曲線をみると従来施工はトンボが設置してあるゾーン境界付近では施工指示データと近いが全体としてラウンドした形となっている。

一方，ICT 施工では，施工指示データに近い計測結果の近似曲線が現れており，ねらいのまきだし高さに近い施工が行えていることがわかる。

これは、従来施工でゾーン境界に設置するトンボは施工の邪魔にならない範囲で残す場合が多い一方、ダム軸に設置するトンボは施工の支障になるため、まき出し作業の途中で撤去せざるを得ないため、折れ点となるダム軸部の位置があいまいになってしまったことが要因と考えられる。

以上より ICT 施工では高さ方向の施工精度が向上している事が確認できる。

５．まとめ

本稿では前田建設の ICT 土工管理システムの特徴と期待する効果を示し，本システムを現場へ適用し検証した結果を示した。

ICT 施工技術を効果的に活用していくためには，導入効果を定量的に評価することが重要である。本稿で示した検証結果はロックフィルダムの大規模土工における一例であり，工事の種類や施工条件によって導入効果は異なると思われる。ICT 施工はすべての現場で必ず効果を示すものではないと考え，その工事の規模，施工の難易度，現場条件など費用対効果のバランスを鑑みて導入していく必要がある。今後，道路土工等様々な分野で ICT 施工の導入効果が検証され，共有されることを期待したい。

謝辞

北海道電力(株) 京極水力発電所建設所様には，京極ダムにおける ICT を活用した施工の合理化取り組みにおいて，多大なるご理解とご協力を戴きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 情報化施工推進会議：
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/
constplan/sosei_constplan_fr_000015.html
2) 情報化施工技術の一般化・実用化の推進について：国官技第 23 号，国総公第 18 号
3) 総合政策局建設施工企画課ほか: 2009 年度　情報化施工の普及促進に関する研究
4) 日下ほか : 殿ダムにおける ICT 情報化施工技術の導入,建設の施工企画,p21-27,2011
5) 角谷ほか : ICT を活用した京極ダム盛立施工の合理化,土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集,p853-854
6) 3 次元情報とαシステムによる情報化施工：
KT-050054-V,NETIS 登録

情報化施工での設計データ流通の最適化の課題と対策の方向性

(独)土木研究所　○ 藤野　健一
(独)土木研究所　山口　崇
(一社)日本建設機械施工協会
施工技術総合研究所　藤島　崇

１．はじめに

日本においては、建設分野の ICT 導入が活発になっている。数年前より、国土交通省は情報化施工を推進するために、保有する土工構造物の設計データを施工業者に提供する事を試行した。しかし、設計データをそのまま活用できるようなケースは多くは見つからない結果となった。これには建設生産システムにおける様々な課題に起因していると考えられる。その一方で、Construction Information Management （以下、「CIM」という。）の導入が検討されており、今後、情報流通を円滑に進める事は至上命題となる。

本報では建設生産システムの特性や実態を分析し、データ流通の観点から建設事業における最適なデータ活用を行えるような分析とそれに基づく対策を提案するものである。

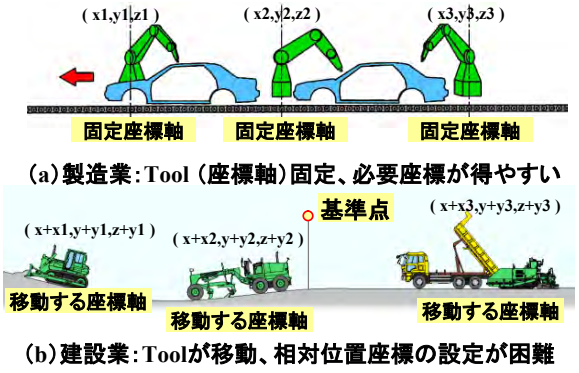
２．目的

今回の報文では、発注者側で作成される設計データの活用を念頭に置き、建設分野における設計データ流通の現実と課題について分析し、今後のあり方を提言する。

３．建設生産システムにおける情報流通の理想

一般的に、製造業での工場生産では、利用者のニーズや使用目的に合わせて設計図面を作成する。これは、x、y、z の座標による表現で CAD などのツールを活用して表現された作成されている。そして、その設計図面は部材設計の元となり、部材設計における x、y、z 座標がマシニングセンタなどのツールに入力され、部品が製作される。この部品を組み合わせて製品が作られるのが一連の流れである。

建設事業においても、コンサルタント等による設計図面を電子化し、工場生産と同等の流れで生産を行うべきというのが理想論と言えよう。まずは現実の建設生産システムへの適用性を考えてみたい。



図−１　座標の考え方の違い

３．建設生産システムにおける情報流通の分類

建設事業は土、骨材、アスファルト、コンクリートその他の材料を使用して道路、トンネル、橋梁、堤防などの構造物を生産・提供するものである。

この中にはプレキャストコンクリート製品や鋼製品などの工場生産品と土構造物やアスファルト構造物などの現地施工品とが混在している。

このうち、プレキャスト製品や鋼製品については、２章に述べた工場生産品と同様の生産形態と考えられる。従って、工場生産と同等の生産方式の適用性は高い。つまり、設計図面が施工図面と同一である限り、座標管理で生産する事が可能である。

一方、土構造物やアスファルト構造物は工場生産ではなく現地生産の形態であり、地形が設計の

前提となる。このため、図面においてもベースマップとして地図（地形図）を利用している特徴がある。また、生産に際して絶対的な基準点を定める事が難しく、いわゆる測量基準点を設置して作業を行わなくてはならない。また、現地における環境変化や周囲との取り合いの中で設計変更される事が多くあるなどの特徴がある。したがって、工場生産と同様の生産形態をとる事には課題がある。

ここでは、前者を工場生産系システム、後者を現場生産系システムと呼ぶこととする。

４．情報化施工と現場生産系システム

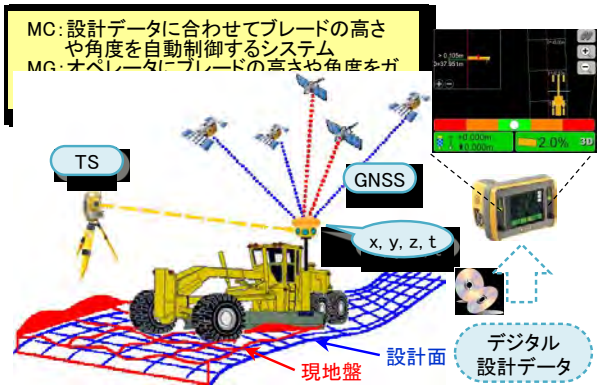
日本では、以下の情報化施工が主流である。

−トータルステーションを利用した出来形管理
−３Ｄマシンコントロール（グレーダー、ブルドーザー）
−３Ｄマシンガイダンス（バックホウ）
−２Ｄマシンガイダンス（バックホウ）

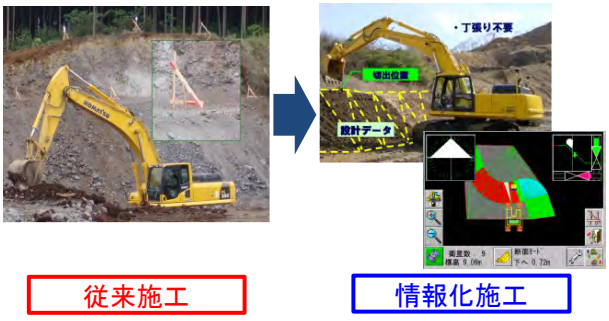
これらのシステムは土工事や道路舗装の工事において最も活用されている。従って、情報化施工は現場生産系システムに属すると言える。

５．現場生産系生産システムにおけるデータ流通の課題の分析

４章に述べた通り、情報化施工でのデータ活用が進まない事は現場生産系システムの特性が影響している．ここでは、現場生産系システムでどのような課題があるかについて、そこに内在する課題について分析を行う．



図−２　MC と MG 概念図



図−３　新旧の施工方法の違い

5.1　設計図面縮尺における課題

ここでは、発注者の設計図面について、道路の設計を例にとって分析する．

設計コンサルタントは発注図面を発注者が定めた設計業務共通仕様書に基づいて作成する。道路の設計はおおむね以下の手順で行われる。

−道路概略設計
−道路予備設計（A,B）
−道路詳細設計

厳密に言えば、歩道の設計や平面・交差点の設計、一般構造物の設計などもある。

これらの設計においては、それぞれの段階で使用するベースマップの種類や縮尺に違いがある。代表的な差異について表−１に示す．

例えば、概略設計の路線図では市販地図を使う。平面図と縦断図には発注者から与えられた縮尺１／５０００（概略設計（A））もしくは１／２５００の地形図（概略設計（B））を使う。一方、詳細設計では路線図に市販地図を使うが、平面図と縦断図には実測した平面図や縦断図を使う。多くの場合、これらの尺度は１／５００である。

これらの縮尺の違いはそれぞれの設計の目的の違いに起因している。道路概略設計は道路の路線自体を検討するために行うものである。道路詳細設計は「工事に必要な詳細構造を経済的かつ合理的に設計し、工事発注に必要な図面・報告書を作成する」ことを目的としている。

CALS/EC の取り組みでは、例えば概略設計の成果が予備設計、予備設計の成果が詳細設計に円滑に使用できる「前提」で成り立っている。しかし、現実には設計段階の目的の違いにより、ベースとする地図や縮尺の違いがある。当然ながら地形図はその主題性によって表現される内容は一様ではない。同様に「縮尺」は、地図の拡大縮小の度合いだけでなく、主に表現する地物も表現していると言える。（近年 GIS の進展は目覚ましいが、拡大縮小が自由な電子地図では、「縮尺」という言葉は地図の「品質」を示す事がとして捉えられている。）また、都市計画図など市中に流通している地形図は数年に一度しか改訂されないため情報の新鮮度が低く、現実の地形とは変わってしまっている事が多々見られる。

道路の設計ではこのような地形図がベースマップに使用されているため、この地形図を使用する段階の設計は道路中心線の「検討」段階までの使用であり、具体的に構造物を設計する段階とは一線を画している。

表−1　道路設計業務の各段階の代表的な相違

	概略設計（A、B）	予備設計（A、B）	詳細設計
使用されるベースマップ	地形図	地形図もしくは測量図	測量図
縮尺	1/5000 (A) or 1/2500(B)	1/1000 or 1/500	1/1000 or 1/500
設計の目的	道路の最適路線の検討	概略設計に基づく経済的、技術的判定によるルートの中心線の決定	工事に必要な詳細構造を経済的かつ合理的に設計し、工事発注に必要な図面・報告書を作成する。

このため CALS/EC で想定された「前設計段階のデータをそのまま流用する（EDIT）」事はできない。現実にはベースマップを差し替え、その上に新たな構造物図面を作成する事は避けられない。

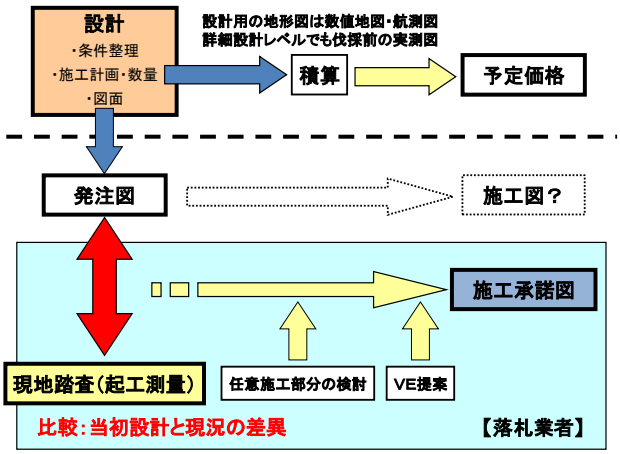
しかし、このときには前段階の設計データをアップデートして新たな図面を得る事はできないが、前の設計成果を生かす参照用のデータとしては活用できる可能性がある。例えば、CAD ソフト上で、あるレイヤーに道路概略設計図を表示させ、参考図として道路中心線の大まかな位置などを確認しながら重ねあわせた別レイヤーに予備設計図を作成して行くというイメージ（REFER）である。

このように、図面はそれぞれ目的や主題があり、その用途を達成するように作成されている。この目的などを確認しながら、データ資産を有効に活用することが最も重要である。

5.2　施工図における課題

道路詳細設計は発注者が行う最終段階の設計である。関東地方整備局発行の道路設計共通仕様書の第 6408 条によれば、この目的は「工事発注に必要な図面・報告書を作成すること」である。つまり、「工事の施工を行う際に必要な図面・報告書」を目的として作成されてはいない。

道路詳細設計の成果は工事発注手続きに使用する「予定価格」の積算に使用される。この後、入札によって施工業者（請負者）が決まる。



図−4　施工承諾図と発注図の違い

一般的には施工業者は与えられた設計図面の照査を行う。照査に当たっては、現地踏査を行い、あらたに起工測量を行う。これらの確認作業は発注者の設計確認の意味もあるが、実際の構造物を施工するために、より詳細に現地の情報を収集する意味がある。このため、設計時の測量よりも緻密な間隔で測量が行われる。

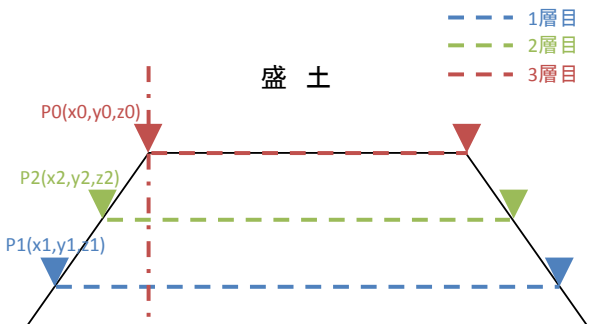
さらに、共通仕様書及び入札で示された特記仕様書における指示事項を除いて、施工業者で任意に工法や仮設を選択する事が認められている。このため、発注者が作成した道路詳細設計図は標準的な手法が示されているのみで、工事を行う際にどの方法をとるかは施工業者が検討の上、選択しなくてはならない。近年では Value engineering による入札契約方式やプロポーザル方式の入札契約方式が採用される事も多く、発注者が作成された設計は施工業者の提案で変わる。このようなプロセスを経て施工業者は修正設計を監督職員に提出し、監督職員はこれを確認する。ここで確認を受けた図面は通常施工承諾図と呼ばれる。

以上のような理由で、一般的には現場生産系システムでは施工承諾図は発注図面とは異なる事が多いと言える。道路土工が屋外で自然環境の中で行うものが主であることから、発注図段階ではまだ確定していない設計要素が多い。

5.3　施工の最適化行動における課題

道路工事では、土工が多く、構造物自体も土を使用する事が多い。土は他の土木材料と比較して均一性が劣り、設計で予測した強度や形状になるとは限らないため、圧密や沈下などの変化は施工を行う際には避けられない不確定要素である。

道路土工のような現場生産系システムで良質な構造物を施工するためには、このような不確定要素に対応し、その状況と設計を整合させる最適化、いわゆる「現場合わせ」が極めて重要になってく



図−５　盛土工事の情報化施工に必要な座標

る。これは施工図面の変更を伴うものになるため、このような最適化作業を可能とするしくみ、つまり、道路土工などの現場生産計システムでは図面が変化し続ける事、言うなれば現地にとって最適な設計に進化し続ける点を考慮する必要がある．

5.4　情報化施工データの作成における課題

一般的に、道路土工などの設計においては、道路の中心線などに基づいて、構造物の設計が行われるが、この設計は最終的な形状について主に作成される。これは、詳細設計の目的が施工の数量を明確に算出し、工事発注を行う、言うなれば予定価格の算出を行う事が必要であるためである。しかし、実際の施工においては、その途中形状でどのような施工を行うのか、段階的に詳細な施工計画が必要となる。

情報化施工を適用する場合には、この途中形状がどうなっているかを明確にしなくてはならない。つまり、情報化施工を実施するためには、段階的な施工図面が要求されることになる．（図−５）

６．現場生産系システムにおけるデータ流通の課題整理

以上の検討を基に、現場系生産システムのデータ流通に関する課題を整理すると、以下の通りである。

①発注図面は道路設計の基本的事項を含んでいるが、施工の観点では不確定要素を含んでおり、そのまま生産品の図面となる訳ではない。

②施工業者が作成する設計図、その後に監督職員の確認を受けた施工承諾図が施工の目的物を正確に示す。

この他、

③施工現場の周辺環境が自然現象などによって変化する事が多く、その確認と調整（現場合わせ）を行う必要がある。

④情報化施工の実施に当たっては、最終形状だけでなく、施工段階別に目的物の座標を設定する必要がある。例えば、盛土の場合、１層ずつの形状を情報化施工機器に入力しなければならない場合がある。

７．検討結果

前述の現実的問題に対処するためには、実際の施工を行うための図面は施工承諾図を作成し、実際に施工に当たる施工業者が作成する事が最適と考えられる。但し、発注者が指示する基本的事項、例えば道路中心線などについては発注者側から提供することができれば、施工図の作成に効果的である事が考えられる。（但し、提供するほどのデータ量にならない事も多いと思われる。）

万一、発注者側で情報化施工に使用するデータを作成し、施工不良が起こった場合、その責任が発注者に及ぶ恐れがある。日本では施工の責任は施工業者が担うことが原則であることから、施工に責任を持つべき施工業者がデータを作成する責任を持ち、発注者はそれを支援することが適切であると考えられる。

また、いくつかの施工業者は発注者が保有する設計データの貸与を望んでいる。これは発注者が現況測量などを詳細に行っている場合があったり、そういった関係データを参照の用途で使いたいのではないかと推察される。このように状況が様々であるため、施工業者の要望に応じて発注者が対応する対応が望ましいように考えられる。

８．結論

以上の通り、現場生産系システムの分野の工事では、屋外の自然の中で構造物を施工することから、その施工は自然と共存して行う必要がある。また、発注者が作成する設計は工事の発注のために必要な設計を行っているものであり必ずしも施工に有効とは言えない。

直近で情報化施工の普及を行うためには発注者側から設計図を３次元電子データとして提供するよりも、最終図面を作成する施工業者にゆだねる事の方が適切であると考えられる。

その一方で、工場生産系システム例えば橋梁や鋼構造を有する設備関係であれば、このような自然環境の影響は限定的であり、設計が固定されればデータを流通させる事は比較的容易と考えられる。

今後はこのような設計対象物がおかれた環境や設計の段階、それぞれの図面の主題や作成目的などを把握した上で建設分野のデータ流通環境を整える事を望みたい。

参考文献

1) 藤野健一：将来の情報化施工について，JCMA東北，2011

建設機械制御データのアウトプット機能について

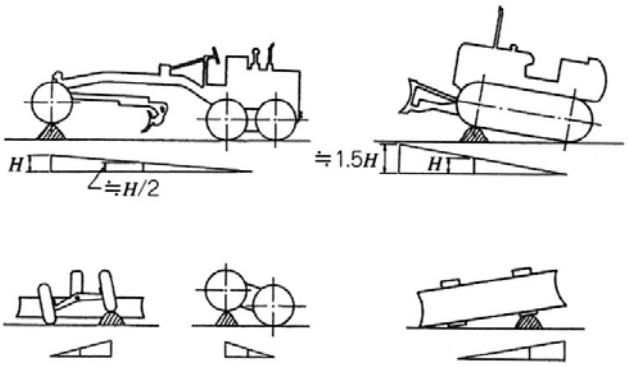
鹿島道路㈱　福川光男

はじめに

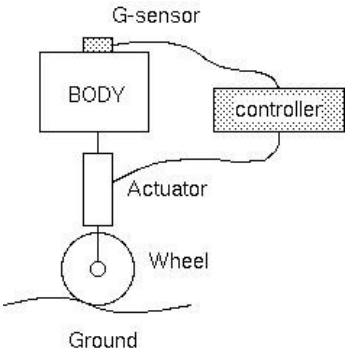
人工衛星測位機能や光学測位機能の発達により、応答性に優れた精度の高い移動体測位が可能となり、近年の建設機械操作の支援として情報化施工システムの機能性向上と実現場での普及促進には目覚ましいものがある。このようなシステムは、我が国の脆弱で複雑な国土に適応する強固な土木構造物構築作業の合理化に大きく寄与している。建設機械操作支援のアウトプット機能としては、人的不得意作業を自動化して機械的操作に委ねるマシンコントロール(Machine‐control=MC)と操作判断情報を提供することにより人的操作作業を容易化させるマシンガイダンス(Machine‐Guidance=MG)とがあり、ここでは、これらのシステムの最近の技術動向と今後の発展傾向について述べる。

１．MC システムの技術動向

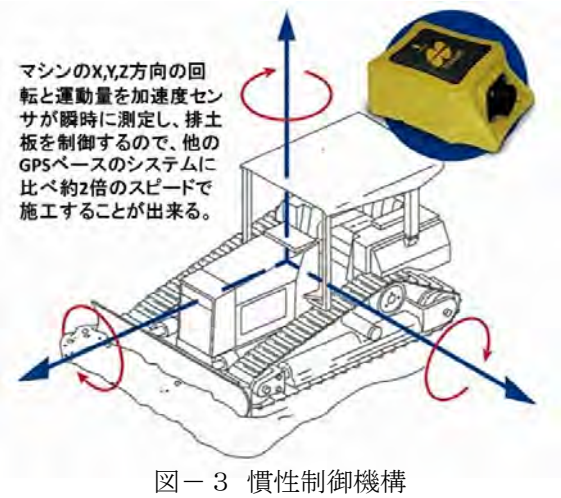
情報化施工システムにおける更なる要求機能としては、施工精度と作業速度の向上であるが、移動体測位機能の性能向上によって測位速度も速くなり、それに伴い作業用アクチュエータへの応答機能の高速化が望まれていた。従来のアクチュエータへの操作指示は、インプットされた設計データ（座標）と作業装置の測位座標との偏差量をもとにこれを電気信号に変換して油圧電磁弁を作動させる仕組みであるが、作業時の負荷状況によりトラクタ本体に上下左右の不規則な動きが発生する。特にブルドーザはブレードがトラクタ前方に位置する構造のため、ブレードの挙動量が大きくなる(図－１)。従って、従来の静的な制御機構では応答機能性に限界が生じ、必然的に作業速度を制御能力に合わさざるを得なくなる。そこで、慣性制御機構を組み込み不規則なトラクタの挙動を制御外乱として捉え、これを除去して制御信号のみを生かした応答機能性の高いスカイフック機構（図－２)を取り入れ、測位速度に対応したより高速な作業速度を可能とした（図－３)。すなわち、静的制御機構から慣性制御機構への移行が始まっている。



図－１　モータグレーダとブルドーザの揺動比較



図－２　スカイフック機構



図－３ 慣性制御機構

２．MG システムの技術動向

操作指示情報をモニタなどに表示させるマシンガイダンスシステムは、自動制御方式のマシンコントロールシステムに比べ、人的操作への依存度は非常に大きく、人的操作スキルのレベルに比例した効果とならざるを得ない。人間の感覚器官を介してインプットされた操作情報が、いかにして操作行動としてアウトプットされるか。そのフローを図－４に示す。



図－４ 人の情報処理フロー

このように、操作情報は先ず刺激として受容部である感覚器官にインプットされ、その情報を脳の中枢神経で解析認識し、効果部である手足によってアウトプットアクションとして操作レバーが動かされる。ゆえに、経験値、トレーニング量、個人能力差によって仕上がり精度は異なってくる。従って、マシンガイダンスのアウトプット機能としては、人間の持つ複数のセンサ機能としての感覚機能に出来る限り優れた操作情報を抽出・表示（あるいは信号音等で指示）できるか、すなわち、分かりやすく、操作しやすいマンマシンインターフェースとしての機能が追求されている。

3．人的感覚機能のアシスト技術

3-1．視覚機能の活用

人間が持つ五感の中で、操作情報を人的センサ機能によってインプットさせる主な感覚機能は、視覚、聴覚、触覚であり、これらの機能を組み合わせて建設機械は操作されている。同様にマシンガイダンスシステムは、人間の感覚機能を活用して効率よく操作情報をインプットさせる構造となる。情報受容部の感覚機能の中で最も多くの情報をインプットできる器官としては目による視覚機能があげられる。従来の施工方法は作業指標として対象面（Work 面上)に設置した丁張りなどが用いられ、設計値との差を目で認識させてきた。この際指標の設置条件により情報の把握が異なってくる。また、情報の読み取り機能は操作員のスキルにも左右される。しかし、情報化施工システムを用いた操作ガイダンス機構においては、移動する建設機械（Tool 側)の操作席前面に設置されたモニタパネル画面、ライトバー装置などにより操作ガイダンス情報を容易に得ることができる。

3-2．視野（ビュー)転換機能

また視野方向（ビュー）転換機能により、操作ガイダンス情報を人間の視野以外の方向からも入手できる機能が備わっている。例えばショベルによる掘削作業では、操作員側からは作業中のバケットの状態把握は

ドライバーズビューとして縦断方向からのみの視野になる。しかし、操作情報としては設計ラインとバケットの挙動を把握したい。そのためガイダンスモニタ画面によって側面から見たサイドビューとして相対位置がイラスト表示され、効率的な認識作業、操作作業を行うことができる。ただし、操作中は作業装置の挙動状況を常に注視する必要があるため、モニタ画面のみを注視することは出来ない。また、モニタ情報を作業装置挙動注視視野の同一画面（視野）に入れることは不可能である。(写真－１)



写真－１　運転席から見たモニタ画面
(バケットとモニタ視野)

3-3. 音声アシスト機能

そこで、聴覚機能を使用して、カーナビゲーションシステムと同様に音声(信号音)による操作アシスト機能が付加されており、作業状況に応じて連続音と間隔を変化させたパルス音を組み合わせてガイダンスを行う。この信号音アシスト機能により操作員はモニタ画面を注視しなくても操作ガイダンス情報を得ることが可能となった。

3-4. 今後の開発展開

今後、視覚情報は産業生産ラインなどで用いられ始めたオーバーヘッドディスプレー (OHD)を用いて、作業箇所視野内にシースルー状態で操作ガイダンス情報を表示させる事が期待されている。(写真－２)

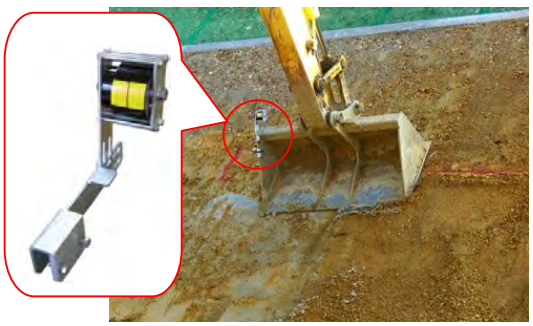


写真－２　ヘッドマウントディスプレイ

3-5. 発想豊かな視覚機能活用事例

一方、Low - Tech 機構でありながら優れたガイダンス機能を持つ、振り子の機能を応用した油圧ショベルの勾配指示装置を紹介したい。この装置は油圧ショベルのバケットに直接取り付けるダイレクトインジケータであり、作業状況確認視野内に設置され勾配情報を表示できる。この装置は、バケットの傾斜状況を指定勾配に設定された固定ドラムと併設された振り子ドラムとのマーキングのズレ量によって、操作員の視野方向から容易に確認できる視野方向転換機能を備えている。

この装置は勾配ガイダンス機能のみであるが、法面整形作業において Hi-Tech 機能を用いたマシンガイダンスシステムに匹敵するガイダンス機能を持ち、高いコストパフォーマンス機能も備えている。(写真－３)



写真－３　ペンジュラム機構を用いた
バケット勾配指示器

3-6. 幅広い人的感覚機能活用の必要性

今後マシンガイダンスによる操作情報アウトプットシステムは、人的感覚機能をさらに活用したシステムへの開発が望まれる。一昔前の機械式モータグレーダの操作では、作業中の負荷状況に応じて視覚、聴覚、触覚を駆使して操作情報を得ていた。(図－５)操作の容易化に伴い操作レバーのフィンガーコントロール化が進んだが、反面このアシスト機能により、操作レバーへの反力という操作に必要なフィードバック情報が得られなくなってしまった。



図－５ 人が持つ様々な感覚を駆使しての操作

おわりに

建設ロボットといえばヒューマノイドタイプが脚光を浴びているが、未だ実用化には至っていない。そこで、実用性機能の高い搭乗型ロボット機能を駆使した情報化施工システムのさらなる開発が望まれる。

参考文献

1) 合田周平　サイバネテックスの考え方、講談社現代新書‘1969, 8

2) 福川光男　舗装 Vol. 42No. 2 ㈱建設図書

振動ローラ加速度応答法による盛土締固めの品質管理への適用

～粗粒材料を対象とした大型土槽実験～

中日本高速道路	○中村　洋丈	高速道路総合技術研究所	藤岡　一頼
大林組	古屋　弘	酒井重工業	内山　恵一
安藤ハザマ	松本　江基	不動テトラ	淺田　浩司

１．はじめに

道路盛土における土の締固めは，高盛土や大規模盛土の施工が増加しており，より一層の効率化，高品質化が求められている。また，道路土工指針[1)]では盛土についても性能規定型の設計を指向するとしており，本来盛土に必要な強度や変形性能を直接的に計測・管理しようとする試みが行われてきている。その一つとして高速道路では平成 10 年頃から振動ローラに取り付けた加速度計による地盤反力の応答値を利用した地盤剛性計測手法[2)]（以下，「ローラ加速度応答法」という。）による盛土品質管理が試みられてきた。

ローラ加速度応答法は，地盤の状況を変形係数の強度指標として表せることが大きな特徴であり，これまでに加速度評価の理論，材料別の適用性，締固め度に替わる新たな品質管理の適用性等が，試験施工により検討されてきた。高速道路では平成 19 年 8 月に土工施工管理要領に路床検査のプルーフローリングに代わる手法としてローラ加速度応答法が基準化され，同時に試験法[3)]も定められた。これを契機にローラ加速度応答法の導入が増加しているが，受注者の提案により従来の RI 管理の補完として行われている程度で本格的な導入事例は少ない。これは実施工レベルの施工管理に適用する場合の基準が明確でないことも一因であったため，高速道路においては，路床や盛りこぼし橋台盛土[4)]等の剛性が必要な盛土施工に用いる品質管理基準を平成 24 年 7 月に定めている[5)]。

このように近年，適用が増加しているローラ加速度応答法であるが，一方で，計測される加速度応答値はどの程度の深さを評価しているか不明確であること，施工層の計測値は盛土下層の影響を受けること等が課題として指摘されている[6)]。そこで，筆者らはこれらの課題に対して基本的な評価をするために粗粒材を用いた大型土槽実験を実施した。具体には，まず一般的な品質管理で用いている転圧回数と締固め状態，ローラ加速度応答法から得られる剛性の整理，大型振動ローラを用いた場合の計測する深さの影響，施工層より下層の施工履歴による剛性値の影響を検証した。この分析によってローラ加速度応答法を盛土締固めの品質管理に用いる際の適用条件について検証した。

２．試験の目的

前述したような課題より本試験の目的は以下の 2 点とした。

2.1　計測層より下層の影響評価

ローラ加速度応答法における計測深さは，70cm 程度という報告[7)]もあるが，正確な計測深さは不明確である。そこで本試験では大型振動ローラを用いて，粗粒材を対象とした計測を行うこととした。計測深さの影響の確認方法は，第一に，コンクリート底面（高剛性）の上に施工層を設け，施工層の累計層厚を変えて試験をし，コンクリート底面の大きな剛性の影響を受けない層厚をローラ加速度応答法の計測深さとする方法，第二に，管を異なる深さに埋設し，加速度応答値が管の深さによって変化することを想定し，通常の管が埋設していない箇所に比べて，剛性の変化がなくなった深さを，ローラ加速度応答法の計測深さとする方法とした。

2.2　下層と施工層の加速度応答値の比較

土槽の一番上の層を試験層（路床施工面）と想定して，施工厚 20cm の層で施工し，その前段階で，下層を準備層 30cm，基盤層 10cm×4 層で施工する。下層の施工時にも，加速度応答値を計測し，下層と施工層の加速度応答値を比較した。

３．大型土槽実験の概要

3.1　試験ヤード

大型土槽を用いた試験のヤード図を**図-1** に示す。土槽は全長 20m，試験区間 15m，幅 3m，深さ 95cm，試験ヤードの平面図は(a)に示すように，長さ 15m，幅 3m，全層厚 90cm，転圧幅・計測幅は 2m，計測点は進行方向 1m おきに 15 点とした。試験断面は(b)に示すように，全層厚 90cm，土槽の下面はコンクリートになっており，その上に準備層 30cm×1

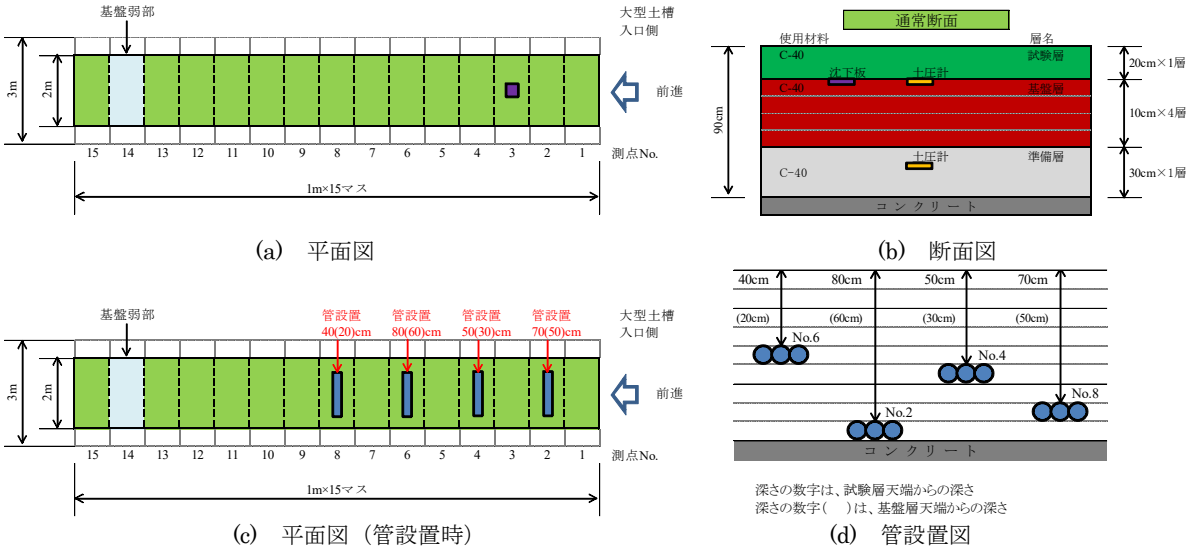


図-1 大型土槽の試験ヤード図

表-1 土質試験結果一覧

項目		砕石(C-40)
工学的分類		細粒分まじり砂質礫(GS-Cs)
土粒子の密度 ρ_s	(g/cm^3)	2.720
自然含水比 w_n	(%)	2.4
最大粒径 D_{max}	(mm)	37.5
粒度（礫分）	(%)	59.8
粒度（砂分）	(%)	30.0
粒度（細粒分）	(%)	10.2
液性限界 w_L	(%)	22.0
塑性限界 w_p	(%)	15.6
塑性指数 I_p		6.4
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	(g/cm^3)	2.296
最適含水比 w_{opt}	(%)	5.6

表-2 転圧機械の諸元

項目		転圧機械の諸元	
機械種別		SAKAI SV512D	SAKAI TW502
運転質量	(kg)	11,050	3,540
質量配分	(kg)	前軸 5,700 後軸 5,350	前軸 1,990 後軸 1,550
寸法 全長	(mm)	5,740	3,105
全幅	(mm)	2,300	1,390
全高	(mm)	2,900	1,700
締固め幅	(mm)	2,130	1,300
起振力 低振幅／高振幅	(kN)	172 / 226	26.5 / 34.3
振動数 低振幅／高振幅	(Hz)	36.7 / 27.5	55 / 55

層，基盤層 10cm×4 層，試験層 20cm×1 層とした。走行レーンは振動ローラのローラ幅を勘案して 1 レーンとした。なお，計測 No.14 は転圧の弱部を作るため，準備層 30cm の位置に発泡スチロールブロックを埋設している。

また，2.1 の計測深さを確認するため，(c)のように，管を計測 No.2,4,6,8 の 4 か所に埋設した。埋設深さは(d)に示すように，試験層の転圧・計測時には 40,50,70,80cm とし，基盤層 4 層目の転圧・計測時には 20,30,50,60cm とした。管の埋設方法基盤層 4 層目の層厚の状態から，小型バックホウ及び手作業で掘削し，所定の位置に埋設後に前後進プレートで十分に締固めた。

3.2 試験に用いた粗粒材

試験に用いた粗粒材の試験結果を**表-1** に示す。材料は通称 C-40 と呼ばれる砕石で，工学的に分類は細粒分まじり砂質礫(GS-Cs)，自然含水比 w_n=2.4(%), 粒度組成は礫分 59.8(%), 砂分 30.0(%), 細粒分 10.2(%)である。また，JIS A 1210 の E-b 法の突き固めによる最大乾燥密度 ρ_{dmax}=2.296(g/cm^3), 最適含水比 w_{opt}=5.6(%)である。

3.3 施工機械と計測項目

表-2に転圧・計測に用いた施工機械を示す。施工機械は2種類用いており，酒井重工業製の質量10t級の振動ローラSV512D（以下，「SV512」という。）と質量4t級のTW502（以下，「TW502」という。）である。なお，本論文の結果整理では高速道路における転圧機械の標準的な起振力を有する10t級振動ローラのSV512の結果を主に用いている。SV512の諸元は締固め幅が2,130(mm)，起振力は低振幅で172(kN)，高振幅で225(kN)，振動数は低振幅で36.7(Hz)，高振幅で27.5(Hz)である。

計測項目はレベルによる表面沈下量の測定，RI計器による含水比測定，密度測定，ローラ加速度応答法による加速度応答値の測定，小型FWD試

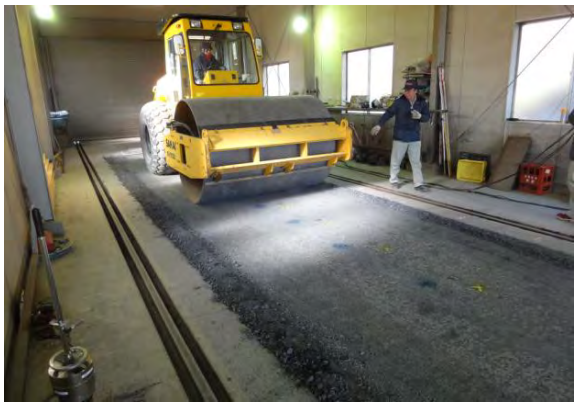


写真-1　SV512 による転圧・計測状況

験機による地盤の変形係数の測定である。ローラ加速度応答法は，αシステム[8]とCCV[9]の2種類を用いた。なお，RI計器による含水比，密度はRI計器と砂置換法の双方を同一地点で試験し，RI計器と砂置換法の計測結果の相関を求めて，補正した値を用いて，結果の整理を行った。

試験状況を**写真-1**に示す。写真は大型の振動ローラであるSV512による転圧・計測状況である。

ローラ加速度応答法の2種類の測定システムは，各々の加速度計を同じ振動輪に取り付け，転圧・計測は同時に行った。また，システムの加速度応答値の基本的な計測原理は同様であるが，計算方法の相違によって加速度応答値の計測間隔が異なる。αシステムでは2秒に1データ，CCVでは0.2秒に1データの取得である。

試験方法の標準パターンは，材料を撒き出し，敷き均しした後に，SV512により前進，後進を繰り返し，前進，後進を各1回とカウントして転圧回数12回（6往復）まで行う。12回転圧後には，施工機械や振幅を変えて，TW502の低振幅，TW502の高振幅，SV512の低振幅，SV512の高振幅の順に転圧・測定した。

４．試験結果

4.1　転圧回数と各計測値

図-1の試験層(施工層厚20cm，下層層厚70cm)における転圧回数と各計測値の関係を以下に示す。

図-2は転圧回数と乾燥密度の関係である。図の横軸は施工機械，振幅と転圧回数を示す。横軸の記号はSV：SV512，TW：TW502，H：高振幅，V：低振幅，数字：転圧回数を示す。図の凡例は各計測点の15点各々である。転圧に応じて乾燥密度は2.20(g/cm^3)程度まで徐々に上昇し，SV512の転圧時には転圧6回程度ではほぼ値が収束している。密度比に直すと転圧6回程度で約90%である。なお，計測点No.13,14,15はNo.14の準備層に設置した発泡スチロールの影響を受けて，転圧による締固め効果が小さく，密度が小さくなっている。また，施工機械が変わってSVH12後のTWL1では再び密度が増加している。これは転圧面が小型の振動ローラで均されて表面付近の乱れがなくなり均一化されたことで密度が上昇したと推測される。

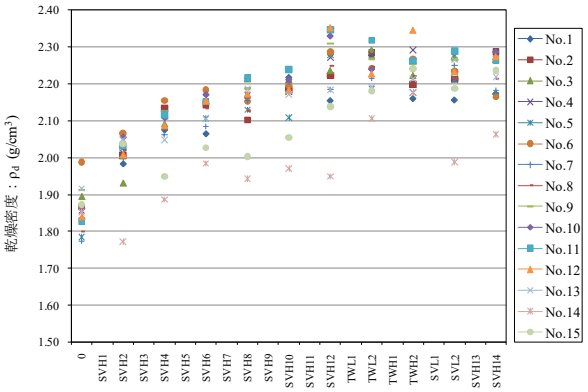


図-2　転圧機種・転圧回数と乾燥密度

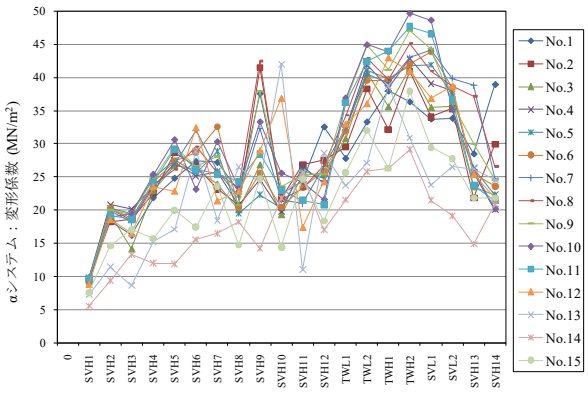


図-3　転圧機種・転圧回数と加速度応答法の変形係数

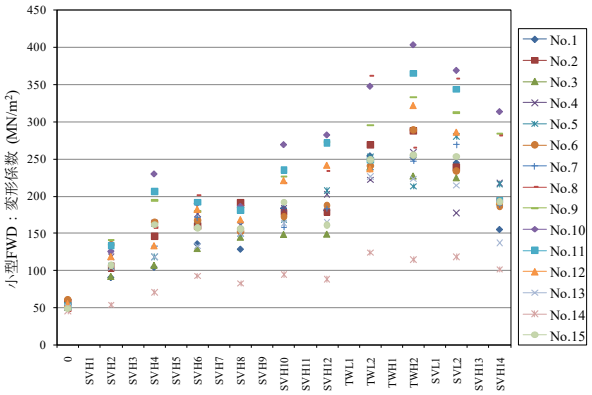


図-4　転圧機種・転圧回数と小型 FWD の変形係数

図-3は転圧回数とαシステムで得られた加速度応答値を機械諸元等で変換した変形係数との関係を示す。変形係数はSVH9では最大40(MN/m^2)程度となるが，前後の傾向から類推するに，SVH9は特

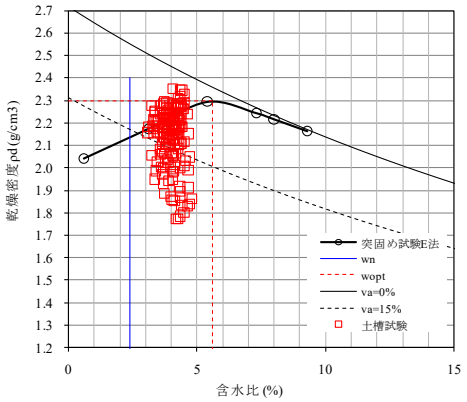


図-5　締固め曲線と土槽試験における含水比・乾燥密度

異値である可能性がある。前後の転圧回数をみるとSVH5～7付近で変形係数は25(MN/m^2)程度に収束している。SVH11では逆に変形係数が若干減少している。試験中の転圧状況を観察すると，SVH10以降は転圧面の剛性が十分に高くなり，かなり振動ローラの振動輪が暴れるような状態となった。したがって過転圧によって転圧面の表層付近が乱されている状況も想定され，その結果剛性が減少していることも考えられる。また，乾燥密度と同様にSVH12以降の変形係数は再び増加する傾向がみられる。これは振動の小さいローラで転圧することにより，転圧表面が均された状態となり，表面の密度が高くなったためと推測される。

図-4は転圧回数と小型FWDの計測による変形係数の関係を示す。変形係数はSVH6付近では150～200(MN/m^2)程度に収束している。その後SHV10,12ではSVHよりも高い計測点が数点あるが，概ねSVH6と同程度である。SVH12以降の小型施工機械を用いたTWLやTWHの計測では，乾燥密度やローラ加速度応答値と同様に変形係数が再び増加する傾向で最大300(MN/m^2)程度となった。その後，大型施工機械によるSVL,SVHでは変形係数がやや低下している。なお，小型FWDの変形係数がローラ加速度応答法の変形係数と異なるのは，両者の荷重の大きさ，載荷面の寸法，載荷時間の違いによると考えられる。小型FWDのほうが，より軽量で載荷面も小さいため，計測している地盤の深さや平面範囲は狭いと推測される。

これらの密度，変形係数の計測結果は，計測値のばらつきの程度や，計測値の感度は異なるが，全体的な傾向としては，SV512の転圧6回程度で収束し，その後，転圧12回まで同程度の値である。大型のSV512で転圧後には小型のTW512で計測すると，密度，変形係数ともにやや増加する傾向にある。最後に再びSV512で計測するとやや低下する。この主因は使用した材料が砕石で盛土材料としては締め固めし易い材料であること，大型施工機械

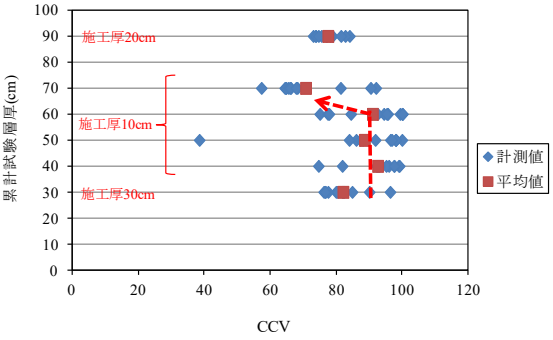


図-6　CCV による計測深さ（SVH6）

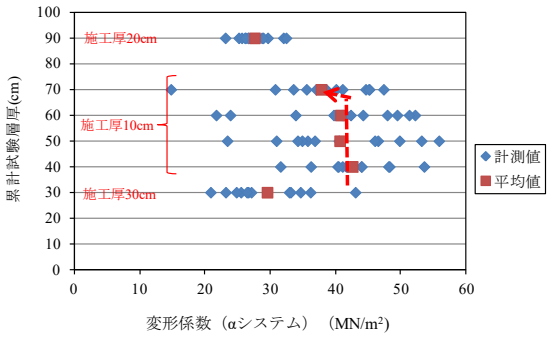


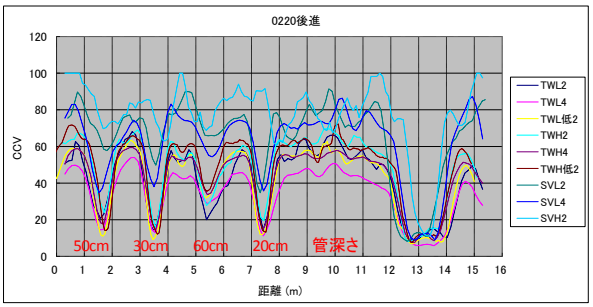
図-7　α システムによる計測深さ（SVH6）

の転圧力は大きいことから，転圧回数が6回程度で収束する傾向にあったと考えられる。

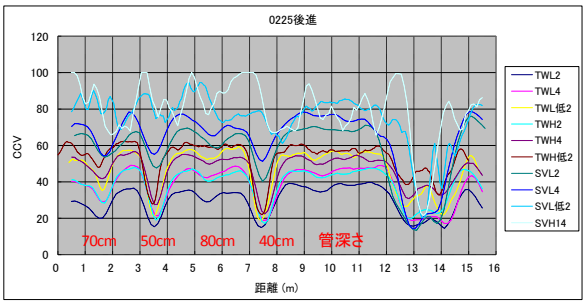
図-5はJIS A 1210のE-b法で突き固めた締固め曲線の結果と，土槽試験で計測した含水比，乾燥密度の結果を示したものである。最適含水比w_{opt}が5.6(%)であるのに対して，施工含水比は3～5(%)であり，やや乾燥側の施工であった。乾燥密度は最大乾燥密度ρ_{dmax}が2.296(g/cm^3)であるのに対して，転圧初期は図中の低い値1.8(g/cm^3)から始まり，最大(最終)では2.3(g/cm^3)程度まで上昇している。これは室内の締固め曲線より上方となっているので，密度比で100%を超える状態である。したがって，土槽試験での転圧エネルギーは突固めE法の4.5E_cのエネルギーよりも最終的には大きくなっている状態である。

4.2　各測定による計測深さ

計測層より下層の影響評価において，ローラ加速度応答法の評価する深さを確認した。コンクリート底面からの層厚と計測値の関係を**図-6**，**図-7**に示す。なお，SV512では転圧が進むと振動輪が大きく跳ね上がる現象がみられたため，このような現象が生じておらず，ある程度転圧が進んだ段階である6回転圧時(SVH6)で図を整理した。なお，計測値は，発泡スチロール設置の影響とヤード端部の影響があると考えられるNo.1,14,15を除いたものである。試験では施工層厚が30cmの準備層，施工層厚が10cmの基盤層を4層，施工層厚が20cmの



(a)　管埋設時の計測（基盤 4 層目）



(b)　管埋設時の計測（試験層）

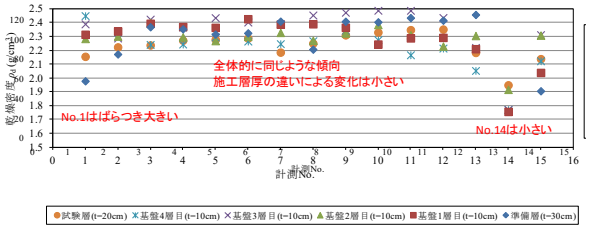
図-8　計測点別の CCV 値

試験層の各計測値をコンクリート面からの累計の試験層厚として整理した。

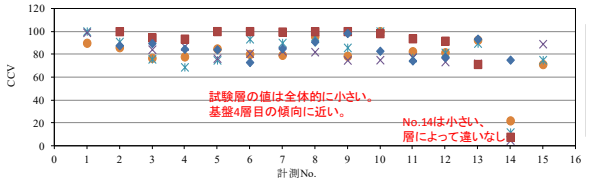
図-6はCCVによる計測深さである。試験層厚が基盤層や試験層で異なるため，深さの影響は，同じ10cmの施工層厚である基盤層の位置で評価することとした。CCVの計測値はコンクリート面から30cm厚の準備層ではCCVが90付近である。施工厚が10cmになる基盤層の累計試験層厚40～60cmではCCV値はほとんど変わらないが，基盤層4層目にあたる層厚70cmではCCVが70程度に低下した。施工条件が同様である基盤層でCCV値が低下したことは，最下層の底面にある剛性の高いコンクリートの影響がなくなり，剛性を評価するCCVの値が小さくなったと考えられる。したがってこの場合，ローラ加速度応答法で評価する深さは70cm程度と評価できる。

図-7は**図-6**と同様の条件で行ったαシステムで計測した変形係数と計測深さの関係である。同じローラ加速度応答法であるCCVと同様に，累計試験層厚40～60cmでは変形係数は40数(MN/m^2)となりほとんど変わらないが，基盤層4層目にあたる層厚70cmではが37(MN/m^2)程度に低下した。この結果はCCVと同じように評価する深さは70cm程度と評価できる。

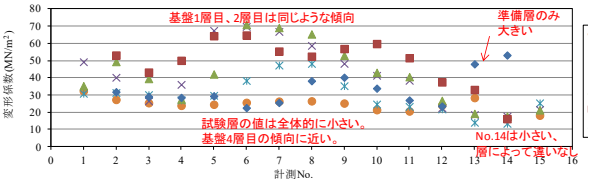
図-8は，管を異なる深さに埋設し，加速度応答値が管の深さによって変化することを想定して，剛性の変化がなくなった深さを，ローラ加速度応答法の計測深さとして整理した図である。図には各施工機械の種類，転圧回数，振動の大きさ別に



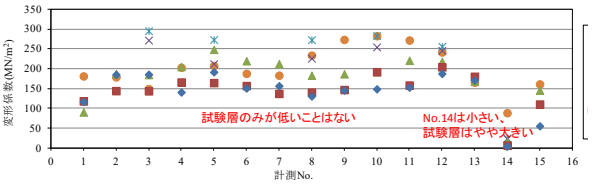
(a)　乾燥密度



(b)　CCV



(c)　変形係数（α システム）



(d)　変形係数（小型 FWD）

図-9　計測点別の CCV 値

凡例を示している。(a)は基盤4層目の転圧面の計測で，管深さは20,30,50,60cm，(b)は試験層の転圧面の計測で，管深さは基盤4層目よりも施工層厚分20cm深くなり，40,50,70,80cmである。(a)図では管が設置されている計測点のCCV値は設置されていない点に比べて小さくなっており10～20程度である。(b)図では管が設置されている計測点のうち，40,50cmは他に比べて値が低下しているが，70,80cmの低下程度が小さい。80cmでは管が設置されていない他の点とほとんど相違ない。
したがって，ローラ加速度応答法で管を感知する深さ，即ち影響深さは70～80cm程度であるといえる。

4.3　下層と施工層の加速度応答値の比較結果

施工最上層の試験層を路床施工面と想定して，施工厚20cmの層で施工し，その前段階で下層を準備層30cm，基盤層10cm×4層で施工した。施工層のみでなく，下層の施工時にも加速度応答値を計測し，下層と施工層の加速度応答値を比較した。**図-9**は横軸に各計測点15点，凡例は施工層の段階

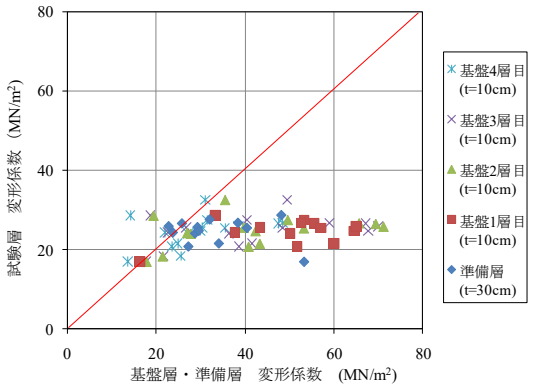


図-10　計測点別の CCV 値

で準備層，基盤層，試験層の乾燥密度，CCV，αシステムによる変形係数，小型FWDによる変形係数の結果である。

(a)乾燥密度は施工層によらず全体的に同じような値を示し，施工層による値の傾向はない。発泡スチロールを設置したNo.14の値は小さい。乾燥密度はRI計器で測定しているが，RI計器は本試験では線源の長さが可変のものを使用しており施工層分のみの計測が可能である。したがって，施工層ごとの一定の傾向はないと考えられる。(b)CCVは試験層の結果は他の層に比べて全体的に小さい。また，試験層の結果は基盤4層目の傾向に近い。これは，試験層の施工ではその下の層である基盤4層目の影響を受けていると考えられる。ローラ加速度応答法の影響深さは約70cmであるが，計測する変形係数はより直下の層の影響を受けやすい結果であるといえる。(c)αシステムの変形係数は，基盤1層目，2層目は同様な傾向である。試験層の値はCCVと同様に他の層に比べて全体的に小さく，基盤4層目の傾向に近い。CCVと同様に計測する変形係数はより直下の層の影響を受けやすいと考えられる。(d)小型FWDによる変形係数はばらついているが，試験層のみの値が小さいといった一定の傾向はない。No.14は他の計測点に比べて小さいが，試験層はやや大きくなっている。これは，試験層まで層厚が厚くなると，準備層に設置した発泡スチロールの影響は小さくなるためと考えられる。

図-10は**図-9**のαシステムの変形係数について，同じ計測点の試験層の結果と，他の層の結果を比較したものである。他の層が試験層と近い値であれば，試験層はその層の影響を多く受けていると判断できる。図より基盤層1層目や2層目は試験層の値と大きく異なるが，基盤4層目は試験層に近い値を示している。

５．結論

1)　砕石を盛土材として大型振動ローラで転圧した場合、土槽のコンクリート面からの影響がなくなる深さ及び管理設による影響深さの結果より、ローラ加速度応答法の評価深さは70cm程度である。

2)　ローラ加速度応答法の評価深さは70cmであるが、一般的な盛土施工と同様に、施工層を積層して施工した場合、計測される加速度応答値は施工・計測層の下層の剛性の影響を受け、その影響度合いは計測層の直下層になるほど大きくなる。

3)　施工層の加速度応答値は下層の影響を受けるため、盛土施工の日常的な管理のように施工層のみの剛性を評価したい場合は、施工層で計測された剛性値は、下層の影響を除いた形で評価する必要がある。その評価は施工層と下層の剛性、ポアソン比、応力の伝達角を考慮して二層系のモデルによる検討も考えられる。

参考文献

1) (社)日本道路協会：道路土工- 盛土工指針，2010.
2) 横田聖哉・益村公人・吉田武男・藤山哲雄・石黒健：道路路床の性能規定化へ対応するための新たな現場管理手法の提案，土と基礎，Vol.50，No.1，pp.13-15，2002.
3) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：NEXCO試験方法第1編土工関係試験方法，pp.58-63，2012.
4) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：設計要領第一集土工編，第2章盛土，2012.
5) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：土工施工管理要領，pp.参127-参166.
6) 横田聖哉・中村洋丈・内山恵一・神庭浩二：施工現場におけるローラ加速度応答法を用いた盛土品質管理手法の検討(その2)，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.67th，pp.839-840，2012.
7) 藤山哲雄・高橋浩・古屋弘・疋田喜彦：振動ローラ加速度応答を利用した締固め管理手法による地盤評価深さの検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.64th，No.1，pp.687-688，2009.
8) 建山和由：振動ローラーの振動挙動計測による土の締固め度評価手法－原理と適用性について－，土と基礎，No.510，pp.1-4，2000.
9) 藤岡一頼・北村佳則ら：ローラ加速度応答法を用いた道路路床の品質管理に関する研究(その1)，Vol.39th，No.2，pp.1343-1344，2004.

ＭＣ施工を前提とした情報化施工技術の新たな施工管理への展開

国土交通省関東地方整備局　　○ 坂本　鋼三
二瓶　正康
稲垣　義明

１．はじめに

国土交通省はこれまで情報化施工の導入を促進するため、平成 20 年７月に「情報化施工推進戦略」として５年間の戦略的な普及方策をとりまとめ、この方針に則り情報化施工の試行工事を実施し、その導入効果を検証してきたところである。

平成 25 年３月に新たな「情報化施工推進戦略」が策定された。経験するための「使う」から、より効率的あるいは確実な施工を実現するための「活かす」という目的にむけた導入促進が求められる段階になってきた。また、平成２５年度より 10,000m3 以上の土工事に於いて施工後の出来形計測では「トータルステーション（以下「ＴＳ」という）を用いた出来形管理の使用原則化が通知されている。

本稿においては、これまで導入促進につとめてきた「ＴＳを用いた出来形管理」やマシンコントロールを用いたモータグレーダ（以下「ＭＣグレーダ」という）施工の機能を活かす新たな施工管理への展開について、これまでの検討と今後の取り組み内容を報告する。

２．舗装工に活用する情報化施工技術

平成 20 年に国土技術総合研究所で「ＴＳを用いた出来形管理（土工編）」が策定された。関東地方整備局では、これを舗装工事に適用するべく、試験施工にて適用検討を行ってきており、この成果は平成 25 年３月に本省より「舗装工事編」として通知された。またＭＣグレーダによる路盤等の施工は「情報化施工推進戦略」においても一般化推進技術として導入を促進している技術である。これまで情報化施工では、従前の品質管理基準や規格値に基づいた施工管理を実施しているが、情報化施工で用いられる技術の特性を「活かす」ものとはなっていない。それぞれの技術特性を考慮した課題及び対策による効果について記述する。

2.1　ＴＳを用いた出来形管理

ＴＳは図-１に示すように、「距離と角度」を同時に測る測量機器であり、計測により測点の座標（x、y、z）が取得できる。また出来形管理用のソフトウェアを用いることで、設計値と出来形計測値との差を算出できる機能や２点の測点データより、その２点間距離を算出する機能等を有している。



図-1　TS を用いた計測状況

ＴＳを用いた出来形管理は効率性向上やトレーサビリティ確保など有用な技術であるが、導入メリットとして具体例には以下のものがある。

①計測は、計測員が２～１名で可能（１名での計測には自動追尾機能が必要）であり、従来のレベル・巻尺での計測より省力化が可能となる。
②出来形計測時、設計値との差を即座に確認が可能となる。
③帳票の自動作成機能により事務作業の省力化が可能となる。また、野帳から管理用書類への転記による記載ミスが解消できる。

2.2　ＭＣグレーダによる施工



図-2　MC グレーダでの施工状況

ＭＣグレーダ（図-２）は、路盤などの敷均しに用いられる情報化施工機械であり、測位技術や機械の状態把握機能を用いて、機械や排土板の位置、進行方向や傾き等の情報を取得する事ができる。

施工時には、予め入力した設計値（目標高さや傾斜）に対する差分をリアルタイムに計算し、排土板を設計値に自動制御できる。

敷均し操作の自動化によるメリットとしては以下のものがある。

①排土板の制御がオペレータの技量に左右されなくなり、施工範囲全面にわたり施工精度が向上する。

②丁張の設置が不要となりオペレータは走行に集中でき、施工効率が向上するとともに安全性が向上する。

③敷均し後の検測作業が減り、作業者の接触事故が低減される。

３．具体的な検討項目

3.1　ＭＣ施工を前提とした施工管理の効率化

一般化推進技術であるＭＣ技術は、モータグレーダのほかブルドーザなどの施工機械へ搭載し、土工や路盤工等において活用されている。従来施工とＭＣ施工による路盤の仕上がりの違いについてイメージを図-3 に示す。現状では従来の施工管理に合わせ丁張りを用いて管理断面毎の出来形計測を行っているが、この技術においては管理断面間の任意点でも同等な品質が確保されるため、出来形計測への対応が可能である。

ＭＣ等の情報化施工では施工用のひな形となる３Ｄ設計データを施工機械に搭載し利用するため、厳密な意味では施工用丁張りは必要無い。しかし、従来基準による施工管理のために丁張りが設置され、施工中の維持管理が必要となっている。加えて、施工時の全面的な施工プロセスが確認できる３次元機械位置情報等の電子データが発生しているが、現在は任意施工の道具であり受発注者ともに利用していない。

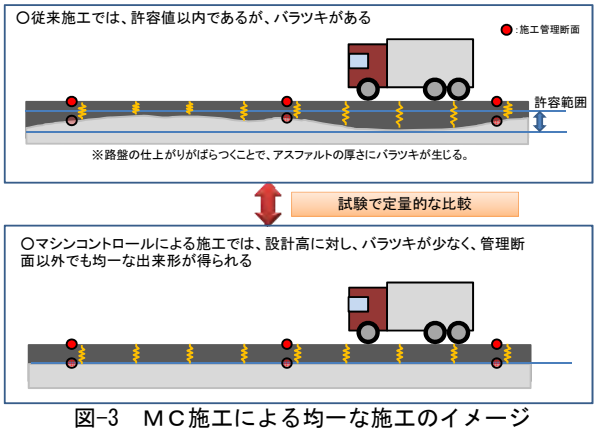


図-3　ＭＣ施工による均一な施工のイメージ

そこで、図-4 上段のような出来形計測の効率化に着目した。従来のような定点による出来形計測ではなく、計測許容範囲を広くした近傍での計測（以下「近傍計測管理」という）や、図-4 下段のような計測点数を間引くことで、従来よりも少ない任意点での計測（以下「代表点管理」という）を行う施工管理の効率化について検討した。

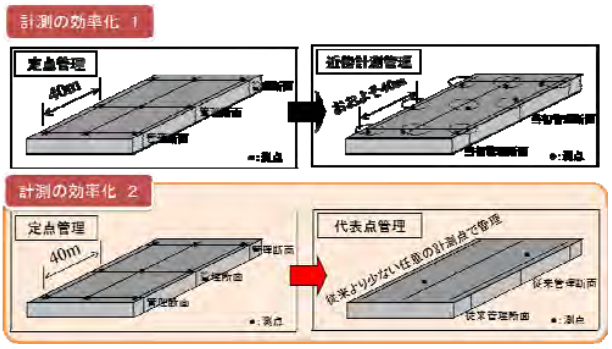


図-4　ＭＣ施工を前提とした施工管理効率化のイメージ

3.2　厳密な評価を可能とする多点管理手法

前項では計測点数を少なくする方向での検討を提示したが、次に面的な多点での計測検討について記述する。

管理断面間で従来よりも多くの出来形計測を行う事で、均一な施工が実際に行われているか確認することができ、従来施工とＭＣ施工との違いを示す事が可能となると考える。多点での出来形計測（以下「多点計測」という）の実施により、均一な施工に対する評価が可能になる。

従来の管理手法である定点管理と面的な管理手法である多点管理の違いについてイメージを図-5 及び図-6 に示す。

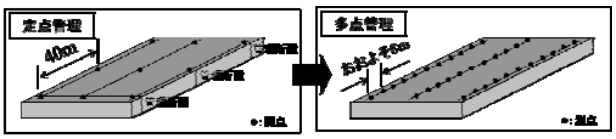


図-5　定点管理と線状多点管理のイメージ

図-5 では線状に多点を計測する手法の一例である。ここでは、「おおよそ 8m」[*1)] という計測ピッチだけを定めており、各層異なる平面位置を計測しても良いこととして、出来形計測をするための丁張設置を不要にすることで、計測作業の効率化が図られる。

また、より詳細な施工評価ができる一例として図-6 のように面的な多点出来形計測も想定される。こちらではコンター図のような表現が可能となり、路盤の均一な施工結果を表す計測手法になり得ると考える。

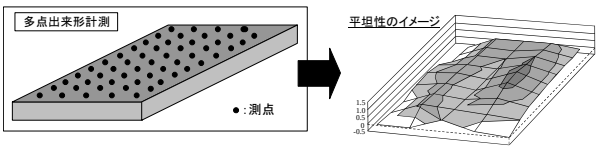


図-6　多点出来形計測および施工結果評価のイメージ

４．課題と対策による効果

4.1　ＭＣ施工を前提とした効率化の課題

4.1.1　課題１　近傍計測での課題

近傍計測管理では、計測点数について従来の管理手法と同等程度であるが、近傍計測管理におけるおおむねの配置や計測範囲を目安として示す必要がある。ただし、近傍計測管理については従来の施工管理と大きな違いは無く、丁張り管理や出来形計測が簡易になり、取組み効果が得やすいものと考える。

4.1.2　課題２　代表点管理での課題

ＭＣグレーダによる施工では、前述の通り施工範囲全面での均一な施工精度が実現出来る。このため、管理断面での定点管理ではなく、代表点で出来形計測を行っても、施工者に対する過大な品質管理を求めることにならない。しかし、従来よりも少ない代表点管理では、その管理手法の妥当性を担保するために従来提出を求めなかった電子データ類の提出を求める事となる。

電子データ類の一例として、ＭＣ施工用の機器をコントロールする３Ｄ設計データや、施工時に発生する位置情報、また施工準備中に実施される機器のキャリブレーション結果等が想定される。これらの提出可否や必要性を精査することにより、施工者に対して負担とならない方法を考える必要がある。

監督検査時の計測点が少ないことについては、これまでも出来形計測箇所全てをチェックすることはごく稀であるため、負担軽減効果はあまり期待できない。

実施手法が効率化に繋がるべく総合的に意見収集を行う必要がある。

4.1.3　課題３　データの蓄積

当面は、ＭＣ施工の現場に於いて管理断面間の計測結果と設計値との差分データを蓄積する事が必要と考える。これらの正確度や精度の実績を積み重ね、「近傍計測管理」や「代表点管理」の更なる効率化も検討する必要がある。

4.2　多点管理手法での課題

4.2.1　課題１　均一な施工把握の有用性

情報化施工の導入効果は、作業の効率化や低コスト化に焦点があてられてきた。しかし従来よりも優れた施工として定量的な評価を行いその施工を評価する有用性を示さなければならない。

これは、ＭＣ施工では施工範囲全面にわたる均一な精度の施工を実現できているが、施工後の出来形は、定められた管理断面（測点）での計測値が規格値内であれば合格となるため、極端なイメージではあるが図-7 に示すような施工面であっても、２つの施工面は同じ評価となり、優れた施工に対して定量的に優位な評価ができていないこととともなる。又、多点計測による管理を行う事で計測作業時間などのコストが増大することも懸念され、計測結果の把握に伴うコスト増大に対して、寿命やコスト縮減など、効果を定量的に説明する事が必要となる。

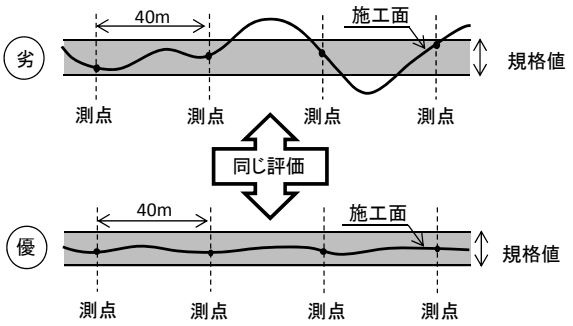


図-7　施工の比較イメージ

定量的な効果検証を行う上で複数の施工要素を持つ土木構造物であるが、個別の要素毎に効果検証を行い、それらの結果を総合的に足し合わせることで評価出来ると想定した。その一部として、ＭＣ施工で実現される均一な路盤の効果を検証するため図-8 のような要素モデルによる耐久性の確認等「施工品質に基づく延命化と低コスト化」について検証していく事を予定している。



図-8　効果確認基礎実験イメージ

4.2.2　課題２　計測間隔の適用性

線上計測の場合「おおよそ 8m」という計測間隔は、試験フィールドでの実験により決定した数値なので、実現場環境における適用時には更なるデータ蓄積などにより継続的に確認することが望ましい。これは均一性の定量的な効果検証結果とも

連動し拡大、縮小等も想定される。

また、計測間隔は幅を持たせて計測管理していくことを考えており、歩測の活用等の運用について関係部署との合意が必要である。

面的計測においては、施工目的物に対する計測点の配置（割合）等こちらも要素試験結果を踏まえ決定する必要がある。

4.2.3　課題３　多点計測の効率化

多点管理を効率良く行うためにノンプリズムＴＳを用いた自動計測機能やレーザースキャナー等の多点計測技術を活用することにより、さらに迅速かつ多くの測点で出来形計測することが可能となる。これにより施工範囲全面にわたる「面的な多点出来形計測」が期待できる。ＴＳを用いた出来形管理では、プリズム（ミラー）を用いた計測が原則となっているが、関東地方整備局では、プリズム方式による計測値とノンプリズム方式による計測値との比較を実際の施工現場にて行い、その計測の妥当性を確認した上で活用できる事として舗装工での運用方法を整備局内及び管内各事務所へ通知した。

前述までの機器を用いた多点の計測手法やデータ処理等の運用方法を検討する必要がある。

4.2.4　課題４　取得した多点データの管理基準

多点計測した結果について、全計測点が規格値に入っている場合を合格とすることは、計測データが増えるほど非現実的である。合格の基準として、閾値を設けて計測点のうちの何%以上が規格値に入っていれば合格とする等、計測データ数の増加に伴う管理基準を定める必要がある。

4.3　期待される効果

ＭＣ施工を前提とした効率化では、現行の「土木工事施工管理基準及び規格値」に準じた計測を行うため実施している施工管理用の丁張りが不要となり、現場管理用の目印レベルで施工が可能となる。丁張りの設置や管理に関わる手間が軽減できる。また、出来形計測時の位置決めを気にする必要が無くなるため、施工管理全体での効率化が図れる。

面的（多点）計測では、従来まで困難であった目的物の形状把握が可能となり、均一な施工に対する評価も可能となるが、一方で計測手間の増加は控える必要がある。

計測点を限定しない出来形管理においても、面的な機械位置情報と計測出来形の相関により、計測点数は少なくとも面的な形状評価が可能となれば、高品質な施工を評価することにも繋がると考えられる。

これらの検討は、従来よりも手間の掛からない手法で、従来以上の施工プロセス把握と施工目的物の評価を可能とする要領等を目指していくものであり、ＭＣ施工実施のメリットを拡大していくことや、ＭＣ施工の評価によって、情報化施工の更なる活用や取り組みへの動機付け等活用促進につながると期待している。

５．今後の方針

今年度は、前述した舗装工をモデルとした要素試験を行い均一な施工の有用性を確認していくとともに、任意計測管理や代表点管理を実施することで出来形管理の効率化を図る事について素案を作成する。

６．おわりに

国土交通省では、平成20年2月に「情報化施工推進会議」を設置して以来、情報化施工の本格導入を目指し、年々試験施工の実施件数を増やしてきているところである。しかし、未だＭＣ施工については一般的な施工技術となっておらず、情報化施工が浸透していないのが現状である。

この現状を打開するには、受発注者のニーズを的確につかみ、容易な技術導入や取り組みが行える環境整備をしていくことが重要と考える。本稿では、その第一歩として、従来の管理基準等にとらわれず、情報化施工技術の機能を活かせるような「新たな管理手法」を提案した。

今後は、この提案を現場試行による実証などを積み重ね、「使うから活かす」を実現できるよう努めたい。

参考文献

1)島田光之:「ＩＣＴを用いた盛土の新たな施工管理手法について」,『平成２４年度　建設施工と建設機械シンポジウム論文集』pp. 91～96, 平成24年

ブルドーザ作業機自動制御の適用範囲拡大

D61EXi/PXi-23

(株)小松製作所　　○ 嶋田　健二郎
同　　林　和彦
同　　石橋　永至

１．はじめに

GNSS 測量技術を利用したブルドーザの作業機自動制御システムは、丁張を廃止しかつ経験年数の少ないオペレータにも熟練者並みの仕上げ施工を可能とすることで施工全体の効率を大幅に改善した。

しかしながら作業機へ過大な負荷が掛かった場合にはオペレータが手動操作により作業機負荷を調整する必要があるため、作業機の自動制御は整地などの軽負荷作業にのみ適用可能であった。

本稿では、コマツで従来から培ってきた油圧ポンプ・モータ等の車体コンポーネント制御技術とGNSS測量技術を融合させることで、従来のマシンコントロール（以下 MC）ブルドーザに対し、作業機の負荷を自動調整する機能を付加し、掘削・運土作業から整地作業まで、MC 作業の適用範囲を拡大した 18t クラスのブルドーザ「D61EXi/PXi-23」について、その特徴を紹介する。



写真-1　コマツ D61EXi/PXi-23　外観図

２．本機の特徴

2.1　GNSS 測量機器

従来の MC 機能を搭載したブルドーザでは、GNSS アンテナおよび慣性センサユニット（以下 IMU＋）のセンサ類を作業機に搭載し、直接的に作業機の刃先位置を計測していた。それに対し本機では、GNSS アンテナをキャビンの天板上に、また IMU＋を車体フレーム内に搭載したため、従来機（図－１イメージ）に対して次の優位性が挙げられる。

① 作業機上の GNSS アンテナマストやケーブル類の廃止により視界性が向上した。
② 車体外部に露出したケーブルの廃止により作業中のひっかけ等による断線の懸案がなく、信頼性が向上した。
③ 毎日の作業終了後に GNSS アンテナの取り外し作業が不要となり、安全性が向上した。
④ 履帯下の位置計測が可能となり、走行するだけでリアルタイムに現況地形の把握ができるようになった。



図-1　従来ＭＣブルドーザイメージ

なお、使用する GNSS 測量機器は、市場で実績のある TOPCON 社製機器を、当社工場出荷時に搭載する。



写真-2 GNSS アンテナ



写真-3 GNSS レシーバ



写真-4 コントロールボックス

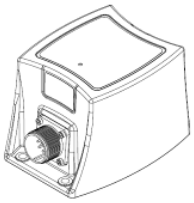


図-2 慣性センサユニット（ＩＭＵ＋）

2.2 ストロークセンシングシリンダ

GNSS アンテナが作業機から車両キャビン天板上へ移設したことによって、GNSS アンテナから作業機刃先の相対座標を計測する必要がある。

本機では、作業機の油圧シリンダ（リフトシリンダ，チルトシリンダおよびアングルシリンダ）に当社製ストロークセンシングシリンダを搭載したことで、車体座標系におけるGNSSアンテナと作業機刃先の相対座標をリアルタイムに計測可能とした。これに、GNSS アンテナによる車両の位置情報と IMU＋により計算された機体姿勢を加算することで、現場座標系における作業機刃先座標を算出する。

また本シリンダは、従来の油圧シリンダに対してローラの回転によってストローク量を検出する機構と、ローラの滑り等によって発生しうる誤差を補正するための補正機構を追加した構成となっている（図－３）

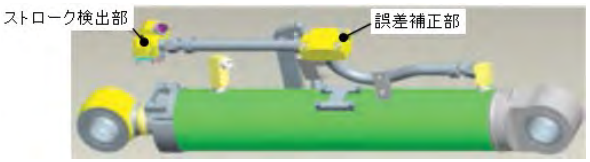


図-3 ストロークセンシングシリンダ

2.3 電子制御作業機バルブ

自動制御にて油圧シリンダを作動させるためには、コントローラからの電気指令で作動する作業機バルブが必要となる。本機では既に大型ブルドーザにて実績のある EPC（Electric Pressure Control）バルブを搭載した電子制御式作業機バルブを採用した。

３．作業機の自動制御

本機の最大の特徴は、従来の MC ブルドーザの作業適用範囲が軽負荷での主に仕上げ整地のみであったのに対し、仕上げ面まである程度の掘削深さがある場合でも、作業機の負荷を最適に制御することで掘削・運土作業も自動化したことである。

また作業が進行して仕上げ面に近づくに従い、自動的に掘削制御から整地制御に切替えることで、仕上げ面へのダメージを気にせずにシームレスな自動施工を可能とした。

本機に織り込んだ作業機自動制御の特徴を以下に紹介する。

3.1 整地制御

作業機刃先座標が、施工現場の設計面データによって決まる目標座標に一致するように油圧シリンダを制御する機能で、従来の MC ブルドーザと同一の機能である。

3.2 掘削制御

作業機にかかる負荷が、コントローラにあらかじめ設定された目標の負荷に一致するように油圧シリンダを作動させて、作業機刃先の高さを制御する。

また、本機のパワートレインには静流体駆動式トランスミッション(以下 HST)を採用しているため、左右のスプロケットに搭載された油圧モータ回路圧と回転数から車体の牽引力が算出可能である。作業機の負荷はこの牽引力を基に補正項加味して算出している。

① ブレードの負荷が増大
② シュースリップが発生しないように自動的にブレードを上げて負荷を調整する。
③ 常に作業機の負荷が一定となるように作業機高さを調整する。



3.3 整地制御と掘削制御の自動切替

現在の作業機刃先高さと最終仕上げの設計面との高さ方向の距離に応じて、掘削制御と整地制御のどちらが最適であるかをコントローラが自動判別し制御モードを切替える。

設計面から離れた距離にある時は掘削制御により作業機負荷を調整し、設計面に近づくと整地制御で仕上げをする。

3.4 掘削開始制御

作業機に負荷がかかっていない状態からの掘削開始では、作業機刃先が徐々に地面に切り込むように制御する。本制御により、土質や現場の地形に依存しない安定した掘削開始が可能となり、施工面も滑らかに仕上がるため、オペレータの疲労軽減にも大きく寄与した。

3.5 シュースリップコントロール

機械の本体に搭載したGNSSアンテナからリアルタイムに計測される位置情報により、機械の移動体速度が得られる。一方、スプロケット回転数から理論車速が得られる。この両者の比率から履帯のスリップを検出している。作業中に一定量のスリップを検出すると、自動的に作業機を上げることで作業機負荷を下げ、スリップを回避する。

3.6 掘削モードの選択機能

作業機の自動制御は、作業の内容に応じてオペレータが４つのモードから選択可能とした。

モードの切替えは、コントロールボックス画面上のアイコンをさわることでサイクリックに切替わる（図－４および図－５）。

アイコンは各モードをイメージしたイラストに切り替わるため、オペレータは現在選択されているモードを容易に視認可能となっている（図－４）。

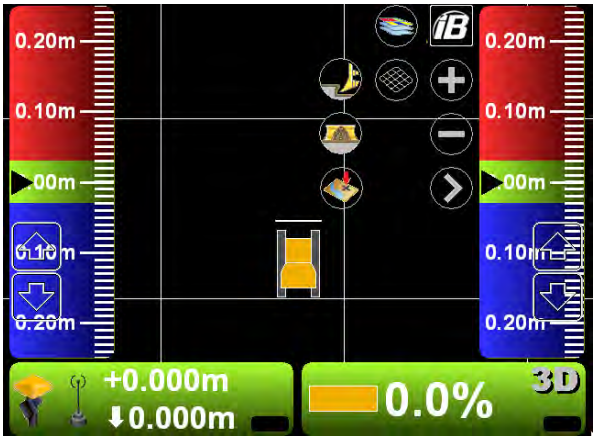


図-4 コントロールボックスのメイン画面

① Cutting & Carry モード
掘削深さが浅く、長い距離を掘削・運土する作業に適す
② Cutting モード
掘削深さがある程度深く、短い距離を掘削する作業に適する。
③ Spreading モード
ダンプトラックが排土したような置き土を、撒き出し・敷き均しする作業に適する。
④ Simple Grading モード
掘削制御を有しない、仕上げ整地のみの作業に適する。



図-5 掘削制御モード選択アイコン

3.7 作業機負荷の選択機能

掘削制御の作業機負荷の目標値は、土質や作業の内容に応じて３つのモードから選択可能とした。モード切替は、モニタ上のアイコンをさわることでサイクリックに切替わる。アイコンは作業機にかかる負荷の大きさをイメージしたイラストに切り替わるため（図－６）、オペレータは現在選択されているモードを容易に視認可能である。

① Light モード　軽負荷作業に適する
② Normal モード　一般作業に適する
③ Heavy モード　重掘削作業に適する



図-6　負荷モード選択アイコン

４．おわりに

MC ブルドーザ「コマツ D61EXi/PXi-23」について、オペレータの作業環境や機器の信頼性を大きく向上した新規構造や、新たな付加価値を生み出す掘削・運土制御機能の特徴を中心に紹介してきた。作業機の自動化技術は、オペレータの疲労軽減のみならず、施工管理システムや最適な作業手順のガイダンス機能などと組み合わせることで更に施工効率の向上につながり、そう遠くない将来において施工現場を自律化・無人化するための大きな前進になったと自負する。ICT 技術を活用する分野は常に継続的な進化を求められており、ユーザーニーズをタイムリーに捉え商品化していくことで、お客様にとってなくてはならないビジネスパートナーとなれるよう、コマツグループ一丸となって努力していく所存である。

加速度応答法の品質管理への適用

振動ローラを用いた締固め管理に関する大型土槽実験結果と考察

(株)大林組　○古屋　弘
前田建設工業(株)　松尾　健二　飯島　健
酒井重工業（株）　内山　恵一
中日本高速道路(株)　中村　洋丈
(株)高速道路総合技術研究所　藤岡　一頼

１．はじめに

平野部における連続高架橋と道路土工部の境界は，交差物件の制約を受けない場合，経済的な盛土高さによりその境界が決定される。しかし，近年の高速道路は山間部に建設されることが多く，道路交差物の制約ではなく地形的な制約から，長大切土，高盛土や橋梁が計画されている。一般的に，道路土工部と橋梁では単位長さ当りの工事費が橋梁よりも土工部の方が安価であることから，橋梁と土工部の境界の経済的な盛土高さも高くなる傾向にある。高盛土部に橋台を構築する場合，構造物を縮小化することでコスト縮減が可能となるため，大きな土圧が作用する箱式橋台よりも図-１に示すような「盛りこぼし橋台 [1)]」が採用される傾向にある。この造成には良質な材料を用いて，十分な締固めを行うことが原則となっており，施工時の品質管理の一つの方法として，振動ローラの加速度応答法を用いることが, NEXCO などの事業者によって現在検討されている [2)]。

本論文では，この品質管理手法の適用性を検証すること，ならびに粗粒材料の転圧特性を検証するために，加速度応答法の適用性の検証を，室内大型土槽を用いて実施した結果に基づき，加速度応答法による品質管理手法の概要と検証，粗粒材料の転圧特性と品質管理手法の適用性に関して報告するとともに，実務への適用に関して提案する。

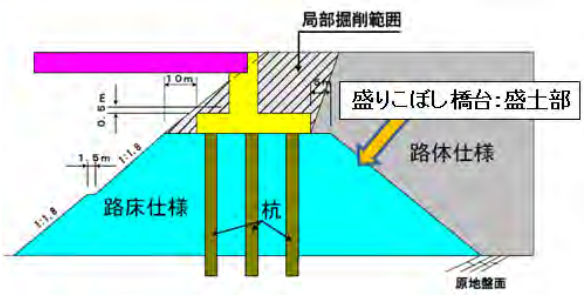


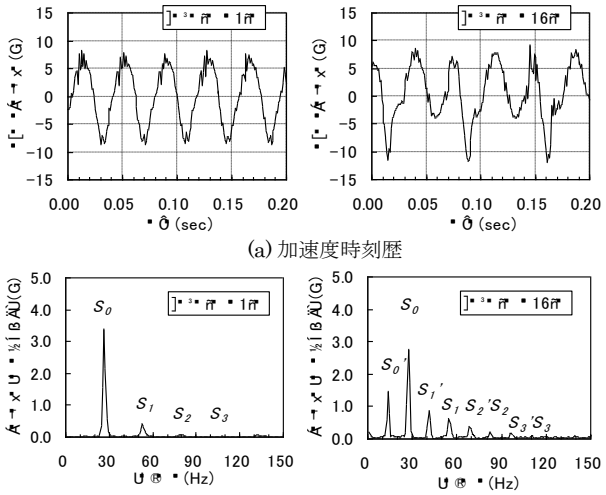
図-１　盛りこぼし橋台の概念図

２．加速度応答を用いた締固め管理

締固め管理の方式には大別して品質規定方式と工法規定方式の 2 方式がある。工法規定に関しては，タスクメーターに変わり，近年では比較的大規模な現場を中心に，GNSS(GPS)を用いた転圧回数管理が用いられるようになっている。品質規定方式において、従来は砂置換法および炉乾燥法（急速乾燥法）による密度・含水量管理が主に行われてきたが，近年は簡便かつ迅速に密度と含水量が計測できる RI 法が普及してきている。しかし，これらは施工後の品質の確認にとどまり，本来の意味での品質管理として十分利用されているとはいい難い。施工上の制約からこれらは致し方ない面があるが，得られたデータを出来る限り迅速に処理し施工にフィードバックする事が重要である点は言うまでもなく，最近では，測定の迅速性，多点ないしは面的管理などを目指した各種の試験計測手法が開発され実用化もなされつつある。

この手法の一つがローラ加速度応答法を用いた盛土の締固め管理であり，1980 年にドイツで開発され [3)]，国内でも 1985 年にこれに関連した調査研究が実施された [4)]。国内の実用化に関しては 2000 年以降に幾つかのシステムが提案されている [5),6),7)]。

今回の実験で用いた加速度応答法（CCV，α システム）も，振動ローラ加速度応答を利用した地盤剛性評価手法 [6)]の一つである。図-２は，道路路床材の転圧試験により得られた振動ローラ加速度波形とその周波数分析結果の一例である。図に示すように，転圧の進行による地盤剛性の増加にともない，地盤からの反発を受けることにより振動ローラの加速度波形が乱れ，その周波数分析結果は起振振動数に対するスペクトル 以外に，高調波スペクトル $S_1, S_2, S_3, S_4, \ldots$，あるいは 1/2 分数調波スペクトル $S_1', S_2', S_3', S_4', \ldots$ が卓越してくる。CCV，α システムとも，この性質を利用し，地盤の締固めを評価する手法である。



(a) 加速度時刻歴

(b) 周波数分析結果

図-２ 転圧にともなう加速度波形の計測例

３．大型室内土槽試験

本報告におけるローラ加速度応答法を用いた施工管理手法に関する研究は，平成 23 年度から振動ローラ加速度応答法の開発者, NEXCO 総研が参画し，品質管理手法や技術的な課題に対する検証を目的として実施している [8),9)]。平成 23 年度には合計 6 現場で試験施工を実施したが，今年度は，平成 23 年度の試験結果で課題となった，振動ローラの振幅の影響，施工層下の基盤や下層の影響，下層の降雨や含水状態の影響を検証するため，室内のピット試験を行った（参考文献 10 参照）。

今回の試験では上述の３つの課題の確認をすることを目的とし，各試験で密度，含水比，変形係数，加速度応答値等を計測し，影響度合いを評価することとした。試験ケースは表-１に示すように設定し，振動ローラの機種の違い（2 機種），振動の違い（高／低振幅），基礎地盤の剛性の影響をそれぞれ調査することとした [10)]。

3.1 大型土槽実験の概要

(1) 試験ヤード

試験ヤードの状況を写真-１に示す。試験ヤード（ピット）は全長 20m，試験区間 15m，幅 3m，深さ 95cm であり，表-１に示す実験を２回に分けて実施した。



写真-１ 大型土槽実験の状況(TW502)

(2) 使用機械，計測器，材料土

試験に用いた振動ローラは，一般土工に用いられる 10t 級(200kN 級振動ローラ)と，路床・路盤に多用される 4t 振動ローラの 2 種類を用いた [10)]。

試験における計測項目は，表-２に示すように，各層の転圧時に加速度応答および土圧計測を，転圧後に沈下量，密度，剛性を計測した。

材料土は, CASE-1 の基盤層は C-40 相当, CASE-1 の試験層は C-40 相当，CASE-2・3 の基盤層は砂質土，CASE-2・3 の試験層は C-40 相当を用いた。

(3) 加速度応答検出装置

今回用いた装置は，国内で用いられている CCV（酒井重工業(株)），およびαシステム（αシステム研究会）を用いた。いずれも振動ローラの振動輪の鉛直加速度を計測し，振動輪の起振周波数と締固めに伴う振動輪の地盤からの反発に起因する周波数の比較により，締固めの指標を算出するものである [11),12)]。今回は，２つのシステムを同時に振動ローラに搭載し，計測を行った。

(4) 試験内容

今回の試験は，振動ローラの大きさ，および振動の低振幅と高振幅による加速度応答の特性の違いを検証するために表-１に示すような内容で行う事とした。本論文では，CASE-1 の実験に関し計測結果と解析をまとめる。なお，実験目的は参考文献 10 にも示すが，以下に示すとおりである。

CASE-1 は, 振動ローラを用いた締固め管理手法

表-１ 大型土槽試験の概要

条件・目的	CASE-1 砕石を使用した 高剛性地盤	CASE-2 砂質土を使用した 高剛性地盤	CASE-3 砂質土を使用した 低剛性地盤
基盤の剛性	砕石C-40を基礎層に使用 地盤剛性が高い	砂質土を基礎層に使用 地盤剛性が高い	砂質土を基礎層に使用 地盤剛性が低い
影響深さの確認	基盤層＋試験層 30～90cmまで (30,40,50,60,70,90cmで計測) 基盤弱部の作成 (発泡スチロールブロック)	基盤層＋試験層 30～90cmまで (30,40,50,60,70,90cmで計測) 塩ビ管(VP)埋設	
転圧機種の違い	4t級振動ローラ（酒井重工業TW502） 10t級振動ローラ（酒井重工業SV512） 仕上げ面(12回転圧後)　加速度応答の違い		
転圧機械の振動の違い	4t級振動ローラ（酒井重工業TW502）　低振幅／高振幅 10t級振動ローラ（酒井重工業SV512）　低振幅／高振幅 仕上げ面(12回転圧後)　加速度応答の違い		

表-２ 試験における計測項目

計測項目	試験機器	数量
含水比，密度測定	RI 計器 (10, 15cm 線源)	15 箇所／層
変形係数測定	小型 FWD	15 箇所／層
表面沈下量	レベル	15 箇所／層
試験層沈下量	沈下板	２箇所
土圧計測	土圧計	４箇所
加速度応答値	ＣＣＶ	連測計測
	αシステム	連続計測

の一つである「加速度応答法」が，地盤の平均的な剛性指標を示すと言われていることから [13,14]，この計測される深度（影響深さ）を求めるための試験である。土槽内に 20cm の準備層(C-40 で構成；土圧計を埋設)を敷設後に，C-40 の試験層を 10cm 毎に転圧回数 12 回の薄層転圧を繰り返し，加速度応答値の変化を計測するものである。

CASE-2 および 3 は，盛土材料の剛性による加速度応答の違いを検証するものである。CASE-1 の実験終了後に表層の 40cm を撤去し，20cm の砂質土層を設け，低剛性エリアを作成するために，CASE-3 で示す部分に散水を行った。

以上の試験を平成 25 年 1 月～3 月に実施し，加速度応答と地盤剛性の相関性を検証した。

3.2 試験結果

今回の実験では，加速度応答による転圧管理手法の検証に，αシステムと CCV を使用している。αシステムと CCV は振動ローラに加速度計を搭載し得られた振幅スペクトルをαシステムは乱れ率として，CCV は CCV 値として算出する。ただし，処理方法の違いによりαシステムは FFT 演算の制約(サンプリング 2ms)から 2 秒毎に，CCV は 0.2 秒毎に値を返す仕様となっている。

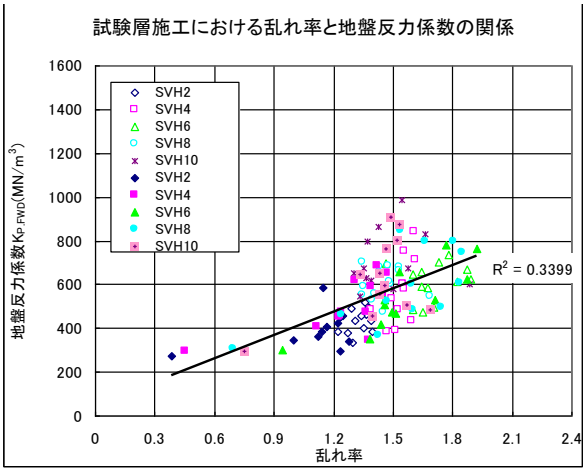


図-３ 加速度応答結果と地盤反力係数の相関

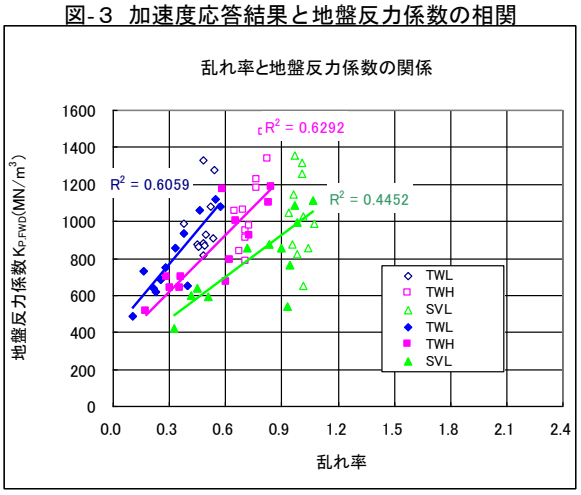


図-４ 機種別の加速度応答結果と地盤反力係数の結果

以下，大型土槽試験において，αシステムから計算される乱れ率と地盤反力係数の相関を比較した結果に関してまとめる。

図-３，４に，加速度応答の演算結果と，小型 FWD 試験による地盤変形係数 $K_{P.FWD}$(MN/m^3)との相関を示す。なお，図中凡例の先頭 2 文字は機種名を表し（SV:SV512D，TW:TW502S），3 文字目は転圧時のローラの振幅(H:高振幅，L:低振幅)を，その後の数字は転圧回数を示す。

図-３は，全試験の計測データを 1 つのグラフにまとめたものである。小型 FWD による地盤反力係数と乱れ率の相関は，乱れ率が大きくなるとばらつきが大きくなっているが，これは過転圧で地盤が固くなり，振動輪が跳ね上がる状況が生じたためである。

図-４は転圧機種毎に振幅の高／低別で計測結果を再整理したものである。SV512D より TW502S の方相関が良くなっている理由は，TW502S は機械重量および転圧力が小さく，過転圧状況が生じなかったためであると考えられる。

過転圧に関しては，一般には粘性土盛土で含水比が高い場合の転圧時の留意点として挙げられているが，粗粒材料においても過転圧に留意する必要があることが解る。

４．FEM によるシミュレーション

大型土槽実験で得られた転圧結果に対して，FEM によるシミュレーション解析を実施し，振動ローラの転圧特性と転圧時の地盤に作用する加速度の状況を再現した。

今回の解析は 2 次元 FEM モデル（図-５参照）による点加振解析とした。解析は以下の手順で実施した。

1) 加振力はローラ起振力+ローラ自重とし，ローラの前後進は影響線を考慮して設定する：今回はローラの速度を考慮し，断面直上±0.25sec を荷重の影響範囲とし，波形強度を三角形分布とした。

2) 図-６に示す手順で，ローラの起振 1 波毎の鉛直ひずみ ε_y を求め，その累積 n 回転圧時の累積残留ひずみ ε_r，単位体積重量 ρt，せん断弾性係数 G0 を求める。なお，波数 N～ ε_y の傾き α_n（$\Delta \log \varepsilon_y / \Delta \log N$）を設定した。この α_n は密度が増加することにより小さくなるように設定し，相対密度(Dr)に応じて文献 15)から，Dr=30%で 0.4，Dr=100%で 0.01 とした。

3) 上記で求めたパラメータを各要素に代入し，各転圧回数での残留変形を FEM 自重解析により求める。

上記の方法を用いて，参考文献 15)に示された粗粒材料地盤(D_{max}=30mm，G_0=12.3MN/m^2, ν =0.3)の締固め解析を実施した。想定地盤の相対密度と間隙比を表-３に，$G/G_0 \cdot h$～γ を表-４に示す。

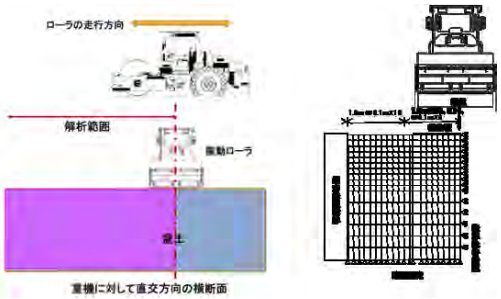


図-５ 解析断面（ローラ進行方向直交断面 1/2 モデル）

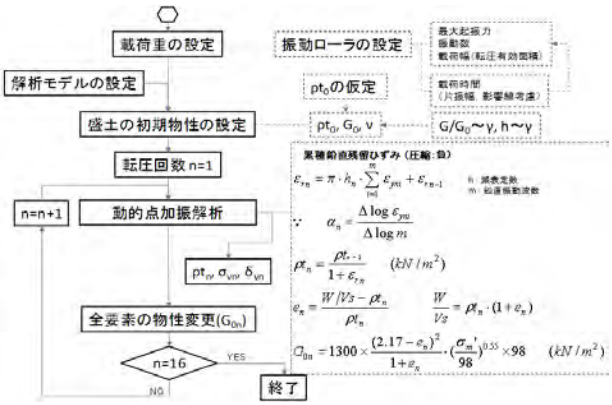


図-６ 解析方法

表-３ 設定地盤の相対密度と間隙比

相対密度 Dr (%)	ρd		e	備考
	g/cm³	kN/m³		
100	2.2	21.56	0.325	e_{min}
80	1.98	19.40	0.400	
60	1.85	18.13	0.467	
30	1.7	16.66	0.560	転圧開始前
0	1.595	15.631	0.662	e_{max}

表-４ 解析に用いた G/G_0・h～γ

γ	1E-06	3.16E-06	1E-05	3.16E-05	1E-04	3.16E-04	1E-03	3.16E-03	1E-02
G/G_0	1.0	0.96	0.91	0.8	0.65	0.44	0.24	0.15	0.10
h	0.02	0.021	0.027	0.035	0.05	0.08	0.128	0.162	0.18

4.1 重機の大きさによる転圧違い

図-７に示す応答加速度波形では，大型ローラ(SV512D)よりも小型ローラ(TW502S)の方が大きな値を示している。これは，高振幅状態において，大型ローラが振動数 26Hz に対し小型ローラは 34Hz であることから，この振動数の影響によるものであると考えられる。一般的に振動ローラの振動数は，締固め対象の土や舗装材料（アスファルトなど）の対象物の締固め効果を研究し，それに適した振動数が選択されている。小型で自重の小さいローラは，締固めにおけるニーディング効果（重機の荷重および振動による粒子再配置ではなく，こね返しによる締固め効果）を高めるために

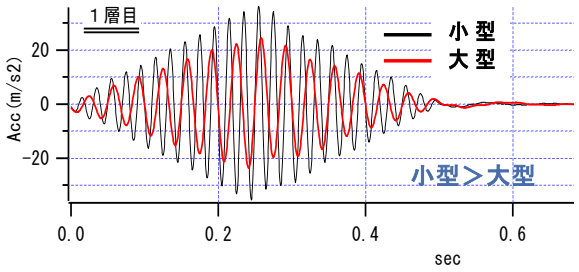


図-７ FEM による解析結果（地表面加速度）

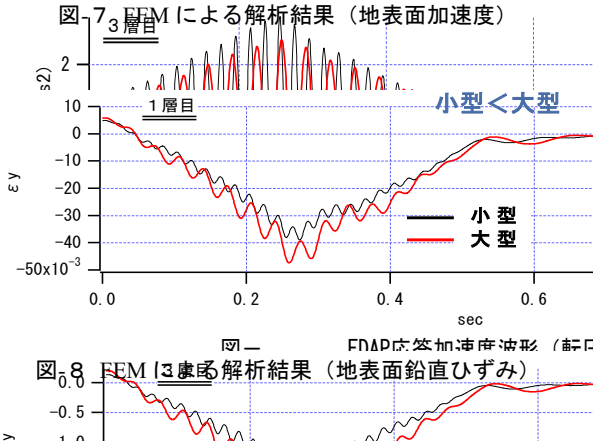


図-８ FEM による解析結果（地表面鉛直ひずみ）

振動数を上げ，締固め効果を向上させる設計がなされているが，今回の解析でもその目的が発揮されていることが解る。ところが，応答加速度に反して，図-８では地盤のひずみは大型ローラの方が大きくなっている。地盤の応答ひずみが大きいと言うことは締固め効果が大きいことを意味し，この結果は大型ローラの方が締固め効果は大きいという一般的な認識と合致するものである。振動ローラの締固めに及ぼす主因は振動荷重による圧縮，すなわち重量であることが解る。

4.2 締固めによる密度増加

大型土槽実験では，試験土を 20cm 毎の薄層で撒出し，転圧を実施したが，FEM において土槽内に均一な状態で土を撒出し，転圧を行った状況を解析したものを，図-９に示す（図中には転圧回数 2,4,8,12 回の分布を表示)。転圧の進行（転圧回数の増加）に従い，土槽内の締固めが進行していく状況と，密度の深度分布の計算値を示している。大型の振動ローラでも，深部までは締固めのエネルギーが到達せず，密度が上がらない状況が表現されている。このことからも薄層撒出しと転圧の重要性が解る。

この結果の地表面部（解析では GL-5cm）の密度と，実際の実験で RI を用いて計測した結果を比較したものが図-１０である。この状況を，盛土の地表面密度(表層から 15cm)で比較したものが Fig.17 である。転圧回数が少ない状況では，解析値の方が密度を低く計算しているが，転圧回数が増加す

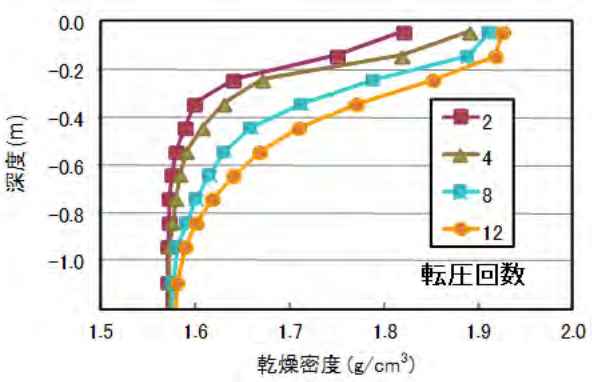


図-９ FEM による解析結果（密度の深度分布）

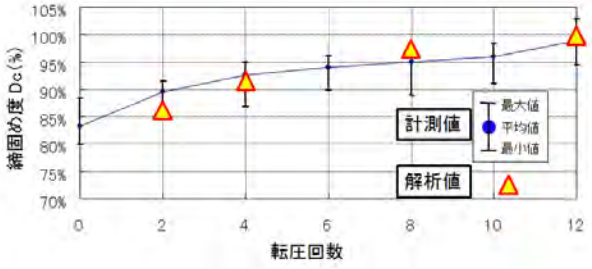


図-１０ 転圧回数と地表面密度の比較

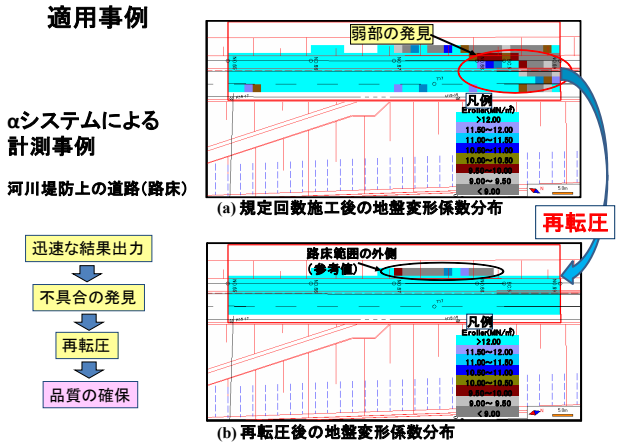


図-１１ 加速度応答法を用いて不具合を処理した事例

るに従い計算値の方が密度を大きく計算し，転圧 12 回で概ね一致している。FEM は比較的良い精度で転圧状況を予測できることが解る。

以上の解析結果から，以下の知見を得た。

1) 大型ローラの方が締固め効果が高い。

2) Fig.16 において，密度の分布から締固め効果を確認すると，地表面から大型ローラで 40cm 程度で密度増加がほとんど無くなっていることから，締固めの効果はこの程度までが限界であることが示唆される。

3) 上記の結果から，薄層転圧は重要である。

５．実務への適用の可能性

加速度応答法は，近年，新しい土工（締固め工事）の品質管理手法として適用される事例が増えてきており，加速度応答法は，2001 年以降，関西国際空港２期島造成工事をはじめ，多くの現場で適用されている。この手法は，盛土材料として粗粒材料の品質管理を対象としたもので，必ずしもすべての土質に適用できるものではない，しかし，適用可能な環境下では，GNSS(GPS)を用いた転圧管理システムと併用することにより，転圧状況（主に工法規定における転圧回数管理）を客観的に管理できるばかりでなく，加速度応答による品質もリアルタイムに計測できる。

通常の盛土工事の品質管理では，施工後に現場密度試験を行うことが一般的で，電子レンジ法(JGS 0122)などの普及により，従来よりも迅速な密度計測が行えるようにはなったが，試験結果が迅速に施工に反映できることはまれで，一種の確認試験的な扱いである。さらに，それらはサンプル検査であり，例えば道路土工指針では 1,000m^3 につき１回（路体の場合）である [16]。すなわち施工領域全体の品質を必ずしも計測しているわけではなく，サンプルの評価によって全体品質を推定（確認）していることとなる。

それに対し，上記のように，加速度応答法は施工を行いながら計測でき，迅速に結果を処理できること，および施工領域全面の品質を施工を行いながら取得できることが大きな特徴であり，不具合（所定の密度や剛性に達していない場合など）が発生した場合に迅速な対処が出来る可能性がある。

図-１１には，2011 年に近畿地方の堤防上部の道路施工に加速度応答法による品質管理を適用したことにより，「転圧不良部を発見し，再転圧を行う事ができた事例」を示している。加速度応答法（α システム）にて弱部を発見し（コンターの色の異なる部分），それを是正した状況が図中の右上の部分に表示されている。ここで示した道路工事のように，道路の路床部で土工の不具合を放置した場合，それより上部の路盤および表層（アスファルト舗装）にまで影響を与えかねないので（疲労破壊に対する耐久性の低下など），不具合の早期是正は重要である。

６．まとめ

今回の実験および解析で以下の知見を得た。

(1) 加速度応答法は，粗粒材料を材料とした盛土工事において，振動ローラの応答を解析することにより，地盤の剛性を評価でき，「盛りこぼし橋台」の品質管理への適用も可能である。

(2) 加速度応答の解析値（乱れ率）は，小型FWDの計測値と相関が高く，地盤の剛性評価に用いることが可能である。
(3) GNSSと組み合わせたシステムを用いることにより，リアルタイムに施工領域全面の品質を取得・評価することができる。
(4) リアルタイムな品質評価は，不具合の早期是正に有効である。

本論文にまとめた加速度応答法は，適用上の課題も多い。例えば粘性土や高含水比の土に対しては，加速度応答値での品質管理は適用が困難であり，これらの適用限界に関しては，現在，独立行政法人土木研究所にて実験を行い，検討を進めている（2013年8月現在）。しかし，適用可能な盛土材料に対しては，これまで示したような品質管理指標として十分な指標（乱れ率やαシステムでは直接変形係数の算出も可能）を取得することが出来るとともに，施工領域全面の品質管理も可能となる。さらに，施工中にデータを取得できることから，重機と作業員の現場での混在を少なくすることができ，安全面でもメリットが生まれる。

海外でも加速度応答法を用いた品質管理は実用化されつつあり，国内でもNEXCOなどで品質管理要領[2)]に記載されていることから，今後は適用事例も増加するものと考える。

土木工事における今後の品質管理は，情報化施工をさらに取り入れ[17),18),19)]，新しい計測手法やデータ解析技術が適用されることとなろう。加速度応答法についても，今後も検討を重ね，国内での適用に対してのノウハウの蓄積と，システムの改善をさらに行い，建設の品質向上に寄与できる技術にまで昇華することを目標としたい。

参考文献

1) 日本道路公団：設計要領 第二集 橋梁建設編，（1998）
2) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：土工施工管理要領，参127，2013.
3) H.Thurner and A.Sandstrom : A new device for compaction control, Proc. of the Int. Conf. on Compaction, pp.611～614, 1980.
4) 建設省土木研究所 機械施工部施工研究室 ： 振動ローラーによる盛土の締固めに関する調査，pp.1～76，1985.
5) 藤山哲雄，建山和由：振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法，土木学会論文集 No.652／Ⅲ-51，pp.115～123，2000.
6) 古屋弘，藤原宗一，三好哲也：加速度計とGPSを利用した締固めの管理方法の高度化，建設の機械化，pp.20～25，2003.
7) 横田聖哉，益村公人，藤山哲雄，石黒健：道路路床の施工管理の合理化に関する考察－（その１）ローラ加速度応答を利用した剛性評価手法の適用性－，第37回地盤工学研究発表会講演集，2002.
8) 古屋 弘,砂町康夫,三井和久,伊藤 悟,横田聖哉,中村洋丈：施工現場におけるローラ加速度応答法を用いた盛土品質管理手法の検討（その１）高速道路高盛土の建設時における圧縮沈下特性，土木学会第67回年次学術講演会，pp.841～842，2012.
9) 横田聖哉，中村洋丈，内山恵一,神庭浩二：施工現場におけるローラ加速度応答法を用いた盛土品質管理手法の検討（その２）高速道路高盛土の建設時における圧縮沈下特性，土木学会第67回年次学術講演会，pp.839～840，2012.
10) 中村洋丈，藤岡一頼，古屋 弘，内山恵一，松本江基，淺田浩司：振動ローラ加速度応答法による盛土締固めの品質管理への適用，平成25年度 建設施工と建設機械シンポジウム（投稿中），2013.
11) 古屋 弘,砂町康夫,三井和久,伊藤 悟,横田聖哉,中村洋丈：施工現場におけるローラ加速度応答法を用いた盛土品質管理手法の検討（その１）高速道路高盛土の建設時における圧縮沈下特性，土木学会第67回年次学術講演会，pp.841～842，2012.
12) 横田聖哉，中村洋丈，内山恵一,神庭浩二：施工現場におけるローラ加速度応答法を用いた盛土品質管理手法の検討（その２）高速道路高盛土の建設時における圧縮沈下特性，土木学会第67回年次学術講演会，pp.839～840，2012.
13) 古屋 弘,藤山哲雄：振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「αシステム」の開発と実用化，建設の施工企画 No.728, pp.42～46, 2010.
14) 藤山哲雄,高橋 浩,古屋 弘,疋田喜彦：振動ローラ加速度応答法を利用した締固め管理手法による地盤評価深さの検討，第64回土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol.64，3-344，pp.687～688，2009.
15) （財）電力中央研究所 土木技術研究所：広いひずみ範囲における粗粒材の動的変形特性と減衰特性，（1980）
16) 社団法人 日本道路協会：道路土工盛土工指針（平成22年度版），2010.
17) 古屋 弘：近年の施工管理技術の中での情報化施工，地盤工学会誌 Vol.58 No.1 Ser.No.624, pp.24～25, 2010.
18) 古屋 弘：【総説】建設事業における情報化施工（ICT）の活用，基礎工 Vol.40, No.5，pp.2～7，2012.
19) 公益社団法人 地盤工学会：土の締固め―地盤工学・実務シリーズ30―，2012.

シールド施工におけるペーパードレーン材の切削技術の開発

株式会社大林組　○ 久田　英貴
株式会社大林組　羽立　征治
株式会社大林組　的場　一彦
三菱重工メカトロシステムズ㈱　杉山　雅彦

１．はじめに

シールド工事においてペーパードレーン材（以下 PD 材）により地盤改良を行った区間を施工する場合、PD 材が施工の障害となるため、施工前にあらかじめ撤去するか施工時に切削撤去する必要がある。シールド機で直接切削撤去する場合、PD 材の切断により過大な引張力が作用すると地盤改良した地盤を乱してしまい強度低下や地盤沈下を招く可能性がある。そのため切削を行う場合には、PD 材へ作用する力を極力小さくする方法が求められており今回新たに開発した貫入式ブレードによる切削方法は、PD 材切削時の引張力を小さく抑えることが可能であることを以下に述べる実験で確認できた。

本報告では、模型による実験から最適なブレードの刃先形状を選定し、また PD 材へ作用する引張力とその周辺摩擦抵抗力の関係から、切削に伴う地盤への影響範囲を算定する方法を新たに提案するとともにその適用性について述べる。

2．切削機構

貫入式ブレードによる切削方法は、シールド機がセグメント組立中などの停止中に機内側からブレードを突出させ PD 材を切削する方法である、この方法は、シールド機のカッター回転停止中にブレードを前方へ貫入させ PD 材を切削による周辺地盤への影響を最小限に抑えることができる。
貫入式ブレードによる切断方法の概要図を図-1 に示す。

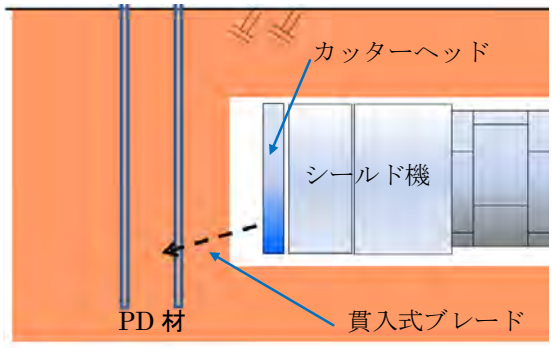


図-1 ブレードによる PD 材切削概要図

貫入式ブレードの構造は、油圧ジャッキにて前後に貫入でき、シールド機隔壁部との取付部は球座構造を用いることにより自由に角度を変えることができ幅広い範囲の PD 材切断が可能な構造となる。

また、引込機構と止水ゲートを装備することで、交換・点検を行えるような構造とする
図-2 のブレードの詳細構造図を示す。

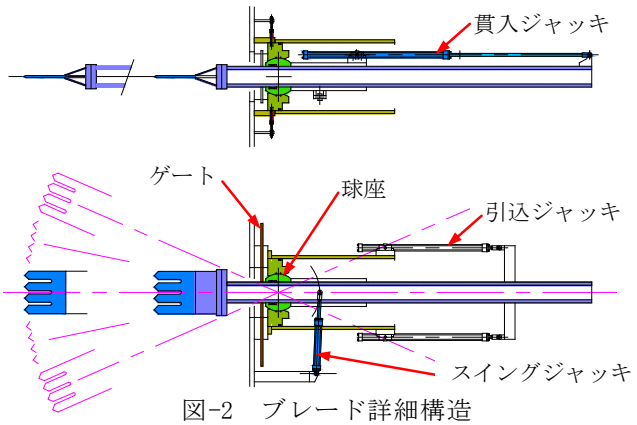


図-2　ブレード詳細構造

3．ブレード形状選定実験

3-1 実験概要

最適なブレード形状ならびに背面地盤による影響を検証するため工作機械の NC 旋盤を用いた実験を行った。
写真-1 に実験状況、図-3 に概要図を示す。また、今回の実験で検討したブレード形状を図-4 に示す。



写真-1　実験状況

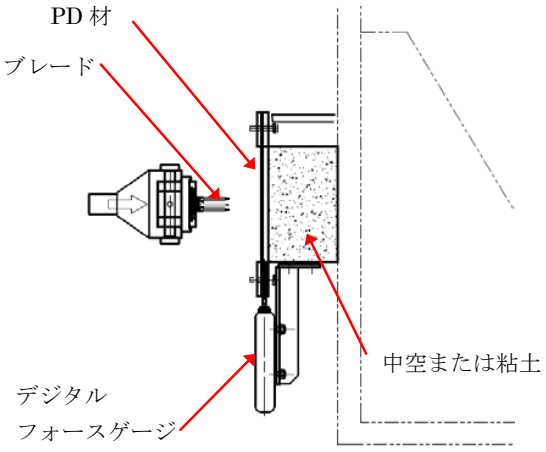


図-3　実験概要図

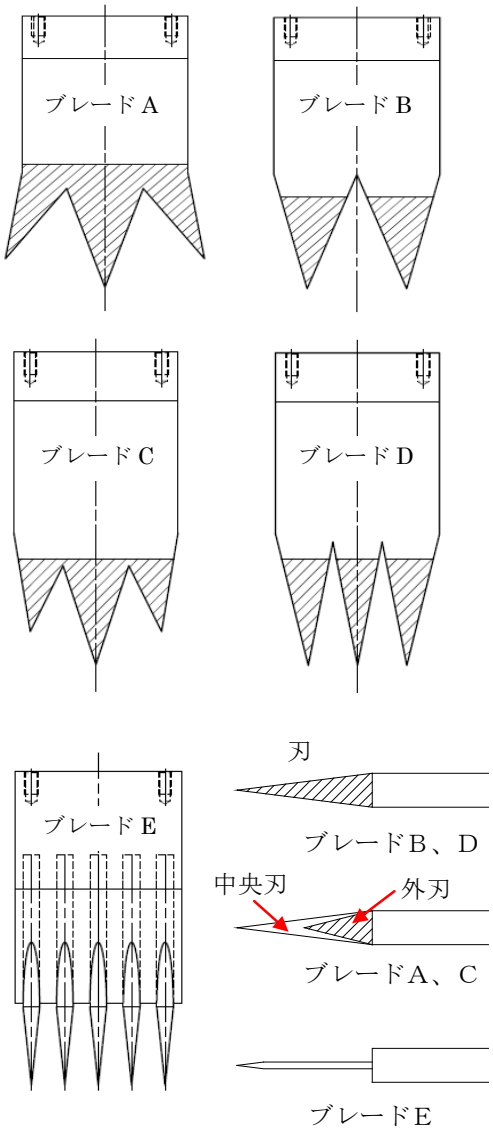


図-4　ブレード比較形状図

3-2 実験結果：ブレード形状による影響

PD 材をブレード材に正対するように配置し突出速度を 1,000 ㎜/min で一定とし切削を行った。その時に PD 材に作用した引張力の計測結果を図-5 に示す。

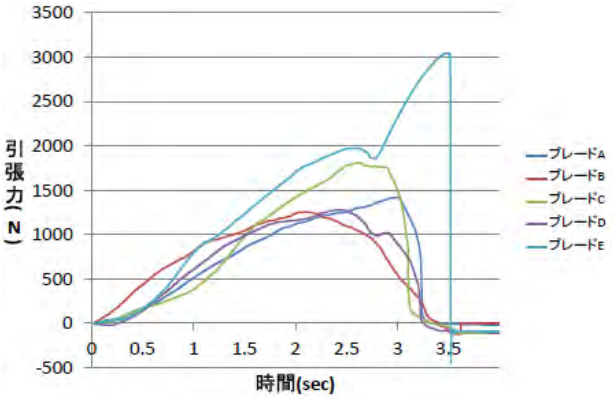


図-5　ブレード形状による比較

刃を 3 本設置したブレード A、C、D を比較するとブレード D が最も引張力が低い値のブレード B とほぼ同等であった。

これは、ブレード A、C は、D に比べ外側の歯が中央の刃より短いことが影響したと考えられる。

そこで、ブレードの刃を複数配置する場合は、同じ形状の刃を並べる方が引張力を低減できることが分かる。

また､5 本の針状の刃を用いたブレード E では、根元が刃になっていないため最終的に引張力が大きくなる傾向がみられた。これらの結果から最も引張力が小さくなるブレード形状は B であるとことが分かった。

3-3 背面地盤の有無による影響

PD 材背面の地盤の影響を評価するため背面が中空の場合と油粘土を詰めた条件で切削した時の引張力の比較を行った。計測結果を図-6 に示す。

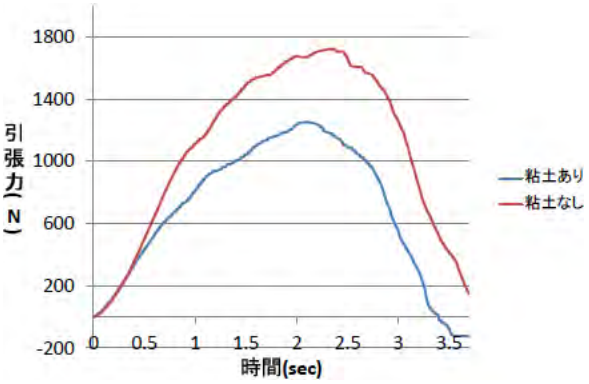


図-6　背面地盤の有無による比較

図-6 の結果より PD 材の背面が中空よりも地盤がある方が PD 材に作用する引張力が減少することが分かった。

4. 地盤を考慮した切削実験

4-1 実験の概要

PD 材背面地盤の強度が切削時に PD 材に作用する引張力に与える影響について実験を行った。切削実験の概略を図-7、写真-2 にその状況、概要図を図-8 に示す。

なお PD 材は引張強度が異なる 3 種類の材料を用いてそれぞれについて切削時の引張力：F、曲がり点からの距離：L および切削時の切込深さ：H について計測した。

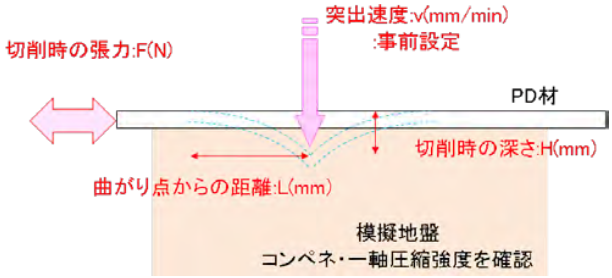


図-7　切削実験の概略図

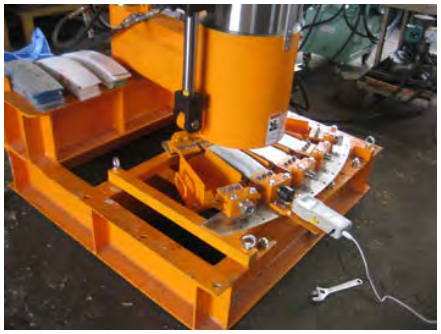


写真-2　切削実験の状況

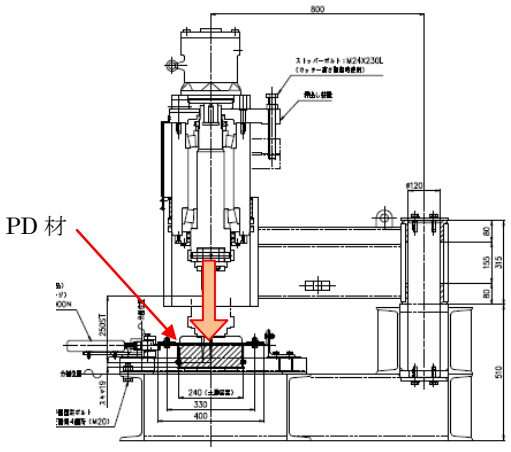


図-8　切削実験の概要図

4-2 実験結果

図-9 に一軸圧縮強度と引張力との関係を示す。また、図-10 および図-11 にそれぞれ一軸圧縮強度と切込深さの関係、一軸圧縮強度と曲がり点距離の関係を示す。

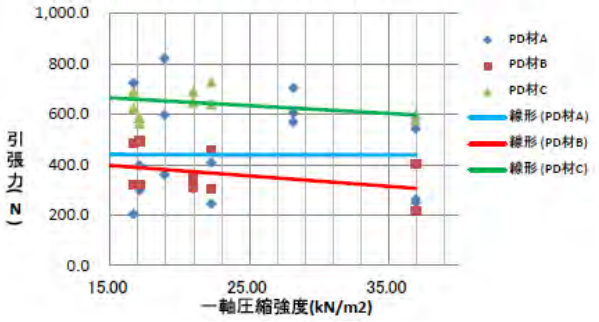


図-9　引張力と地盤強度の関係

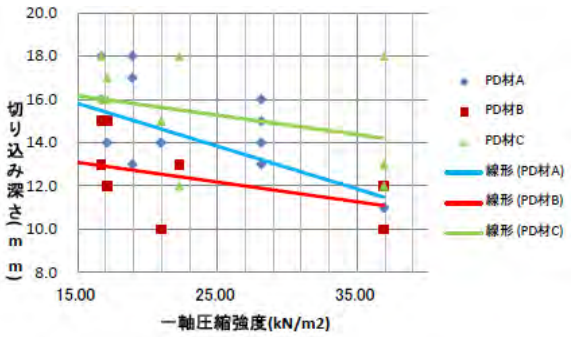


図-10　切込深さと地盤強度の関係

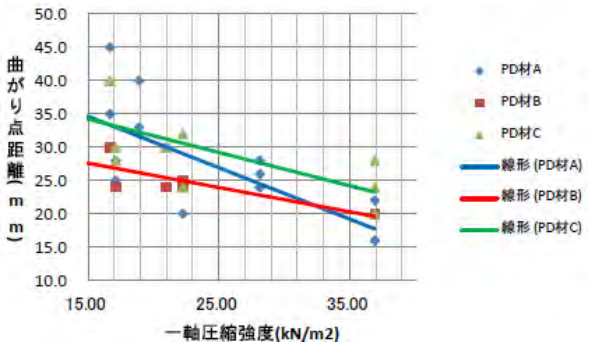


図-11　曲がり点距離と地盤強度の関係

図-9 の最小二乗法により近似した直線を比較すると背面地盤の強度が増加すると引張力が減少する傾向がみられる。その減少量は、今回対象とした一軸圧縮強度の範囲ではその差は、100N 程度であった。

同様に図-10 の切込深さ、図-11 の曲がり点距離について比較すると、一軸圧縮強度が増加するに従い、切込深さならびに曲がり点距離も減少する傾向がみられる。このことは、ブレードで切削する場合、PD 材が設置されている地盤の強度が大きくなるに従い、切削時に影響を与える範囲が小さくなることを示している。

5. 切削時における影響範囲について

5-1 影響範囲の選定方法

ブレードによる PD 材切削時の PD 材変形の模式図を図-12 に示す。

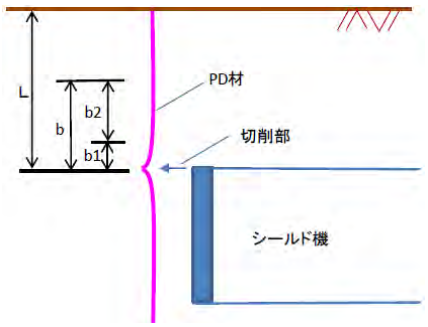


図-12　切削時の PD 材変形の模式材

図中のb_1は、曲がり点距離、b_2は、PD材切削時の引張力に抵抗するために必要な長さであり、式（1）で算出される。切削時にPD材が引き抜けないための最低必要長さをｂとするとこれは、b_1とb_2の和であらわされ、切削時の必要長さLaは、この最低長さｂに安全率Fsを掛けた値として式（2）で算定する。

したがってシールド機内から切削するためのPD材の最小必要長と同様と考えることができる。

$$b_2 = T/(2fc \times c \times w) \quad (1)$$

$$La = Fs \times b \quad (2)$$

ここに、

La：PD材の長さ(m)

Fs：安全率

b：引き抜きに対するPD材必要長さ(m)

b_1：曲がり点距離(m)

b_2:引張力に抵抗するために必要な長さ（m)

T：切削時にPD材に作用する引抜き力（kN)

fc：土のせん断強さの換算係数（=0.7）[1)]

w：土の粘着力（kN/m^2)

なお実験状況から、曲がり点までの周辺地盤は著しく乱されることが予想されるため長さb_1については引抜き抵抗力が作用しないと仮定する。

5-2試算結果

PD材の切削によるシールド機からの影響範囲を検討するために試算を行った。試算条件として地盤の一軸圧縮強度を10、20、30ｋN/㎡の3種類とし、PD材の切削時に作用する引張力を0.8ｋN、1.5ｋNの2種類について検討を行った。

なお、曲がり点距離b_1は、ブレードの実験結果から得られた最大値の0.05m、安全率は2としている。図-13にPD材に作用する引張力とPD材の必要長さとの関係を示す。PD材に作用する引張力が大きくなるに従い、PD材の必要長さが大きくなっている。

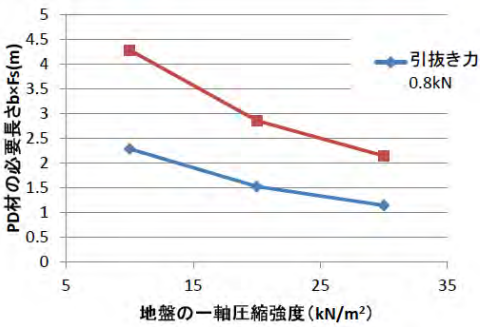


図-13　地盤の一軸圧縮強度と PD 材の必要長さの関係

切削時に必要なPD材の長さは、地盤の一軸圧縮強度が大きくなるに従い、短くなるのが分かる。また、切削時に作用する引張力が小さいほどPD材の必要長さが短くなるため、今回開発した貫入式ブレードによる切削方法を採用することにより、PD材への影響を低く抑えて切削が可能であると考えられる。

6. まとめ

切削時に発生する引張力は最大で800N程度であり，発生する力の大きさも安定している．地盤が緩い場合や比較的土被りの浅い条件において、切削時の引張力を小さくし、シールド掘削による影響を最小にするためには最良の方法であると考えられる。

ただし，PD材の切削はシールド機の掘削が停止している時間に実施する必要があるため全体の施工サイクルへの影響を考慮する必要がある。

以上より，従来の方式とは異なる、貫入式ブレードによるPD材切削技術について適用性の検討結果を報告した。PD材で地盤改良された地盤を掘削する際には、PD材の切削力を小さく抑え、その改良地盤への影響を極力抑えることが重要である。あらかじめボーリング調査等によりトンネル計画位置の条件を確認する事により、土被りおよび地盤条件が既知であれば、本報告の貫入式ブレードによる切削方法およびその検証方法により地表面への影響を与えないPD材の切削方法を事前に検討できると考える。

参考文献

1）嘉門雅史・和田秀俊（1995）：ジオシンセティック水平排水材の工含水比粘性土盛土試験施工への適用，京都大学防災研究所年報 第38号B-2

既論文発表先

第57回地盤工学シンポジウム

平成25年度土木学会　年次学術講演会

セグメント施工品質を向上させるテールクリアと真円度の連続計測システムの開発

株式会社 フジタ　　○ 平野 高嗣
浅沼 廉樹

1．はじめに

シールド工事において，セグメントは必ずしも，シールドマシン内面と同心円状に組立てられるものではなく，偏心したり，楕円状になったりすることがある。特に急曲線を施工する場合，このシールドマシン内面とセグメント外面の隙間(以下，テールクリアランス)を均等に確保することは困難となる。また，近年用いられている二次覆工省略型のセグメントでは，その物自体が製品の為，クラックや漏水等を発生させない品質管理を求められている。しかし，実際の施工では，セグメント組立時の真円度を定量的に測る物はなく，この真円度が低くゆがみが大きいと，セグメント継手のずれが発生し，掘進中にセグメント単体に偏荷重がかかり損傷等のトラブルを生じる。

この原因として，

・シールドマシンとセグメントのテールクリアランス不足による「せり」

・セグメント組立時の真円度の管理不足

が挙げられる。

そこでフジタでは，セグメントの組み立てに必要な計測を，トンネル掘進中に連続的に行うことができる「セグメント真円度計測システム」と「テールクリアランス計測システム」の 2 つのシステム(以下，フジタ高品質シールド)を開発した。これにより，セグメント組立時の真円度測定とシールド掘進時のテールクリアランス計測をすることで歪みの少ないセグメント組立を可能とした。

本論では，これら 2 つの計測システムの概要と現場導入実績を報告するものである。

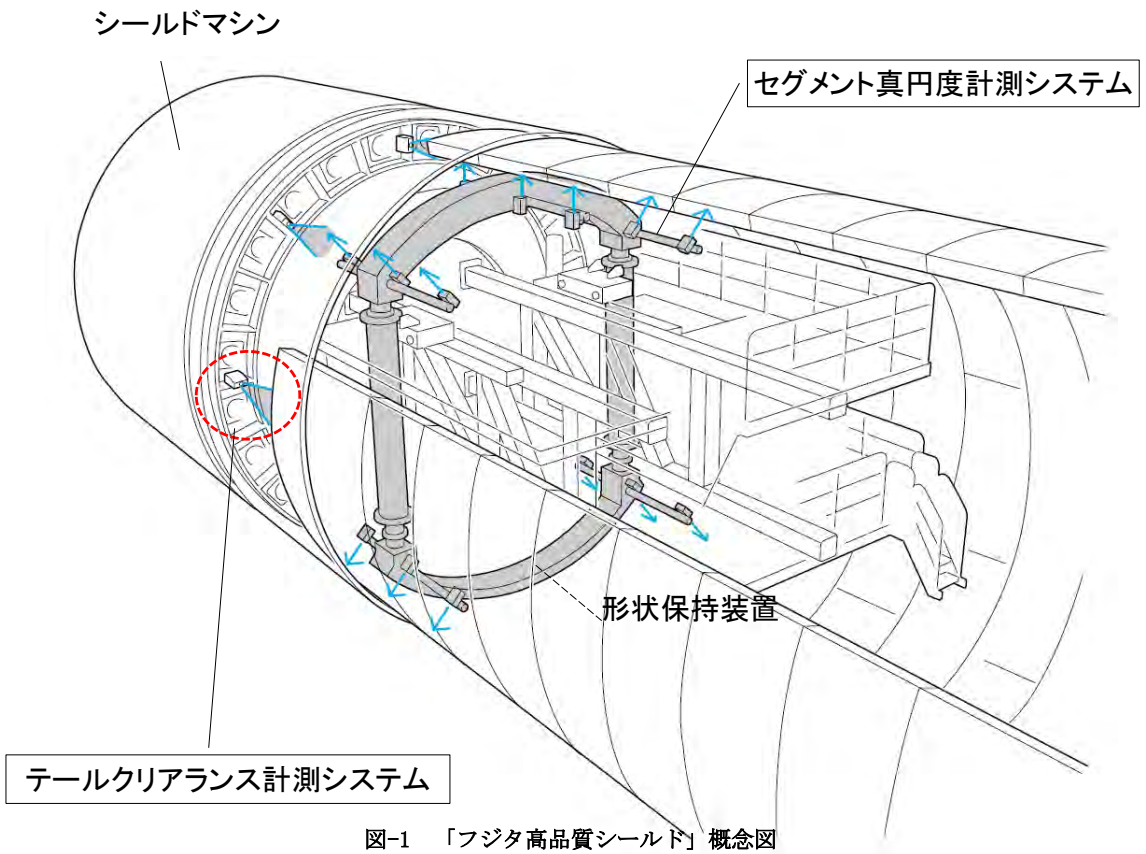


図-1　「フジタ高品質シールド」概念図

２．システム概要

2.1　セグメント真円度計測システム

従来，シールド工事におけるセグメント真円度の測定は，シールドマシン構造の問題や排土設備，油圧配管や計装線，揚荷設備等の支障物により，セグメント組立付近での計測が困難であった。そのため真円度の確認は，シールドマシンと後続台車通過後の障害物がない位置のセグメントを，レーザー測量器や測量用スタッフで計測するのが一般的であった。(写真-1 参照)



写真-1　従来のセグメント真円度計測方法

しかし，この手法ではセグメント組立時から時間が経過しており，単に出来形の形状を確認するだけでセグメントの不具合発生状況やシールドマシン後胴部から地山面通過時のセグメントへの影響を捕らえる事が出来なかった。

そこで，これらの問題の解決策として，シールドマシンに装備されている形状保持装置に注目した。この装置は，シールドマシン掘進時にマシン後部で組立られたセグメント形状を保持するものであり，セグメント組立完了毎にシールドマシン側への移動を行なう。

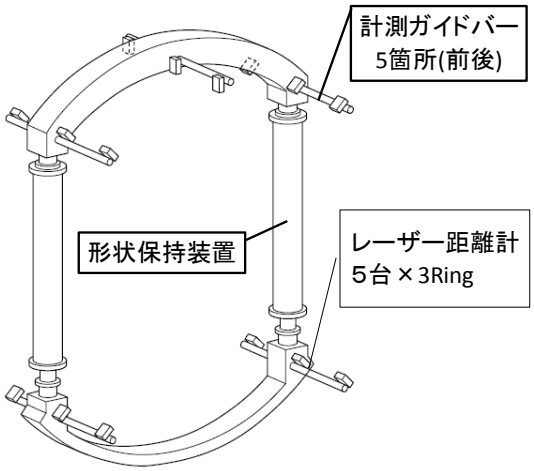


図-2　形状保持装置とセグメント真円計測システム

本システムでは，この形状保持装置の前後に計測ガイドバーを５箇所設置し，レーザー距離計を各リングに対し５台配置することで，３リング分の内空変位を同時計測可能とする。また，形状保持装置はセグメントを上下に支えるため本体が上下動することから，内空変位を求めるセンサとは別に，上下間の計測ガイドバーの距離を計測するセンサを設けた。(図-2 参照)

また，今回使用するレーザー距離計は，セグメントの微小な変化より真円度 [1]を求める事から高精度なものを選定し，シールド工事の悪条件を考慮して専用 BOX 内に収納した。また，レーザー距離計の設置箇所に関しては，保持装置の形状や動作，シールド施工時のセグメント運搬や材料搬出入を考慮し，セグメント底面の計測は行わずにレーザー距離計を天端・左右上 45 度・左右下 45 度の 5 箇所に配置した。(表-1，写真 2 参照)

表-1　レーザー距離計緒元

項　　目	内　　容
測定距離	0.05m～約50m
距離精度	±1.5mm
最小表示単位	0.1mm
光源	レーザーダイオード：620～690nm

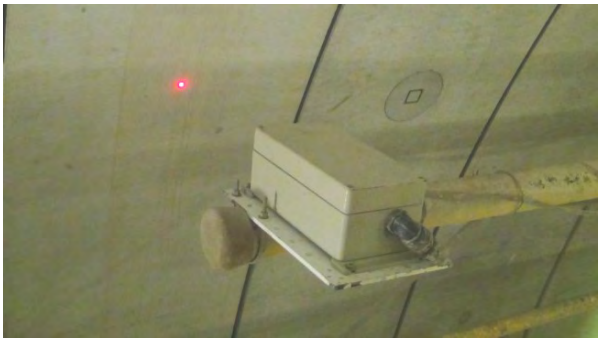


写真-2　レーザー距離計計測状況

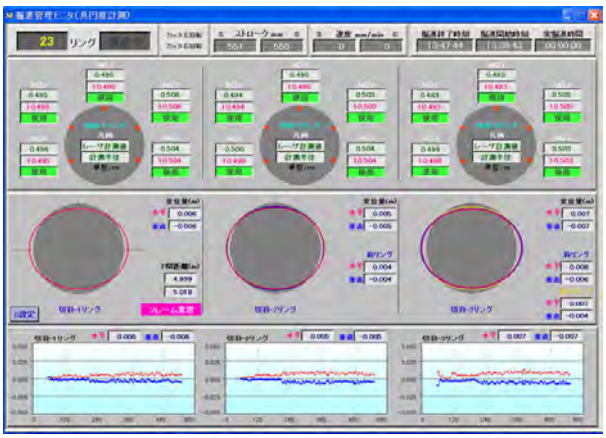


図-3　真円度計測表示画面

レーザー距離計にて計測されたセグメント内空変位は，制御ユニットにて解析され中央制御室(シールド運転室)のディスプレイ上にセグメントの真円度として表示される。シールドマシン操作者は，この 3 リング分の計測データを参考に，掘進中はジャッキ選択に留意すると共に掘進完了時のセグメントの真円度を切羽に連絡し，新しいセグメントの組み方の参考とする。(図-3，写真 3 参照)

これにより，シールド掘進にともない変位するセグメント真円度の推移を連続的に解析し，即時にシールド掘進組立管理に反映・是正が可能となった。

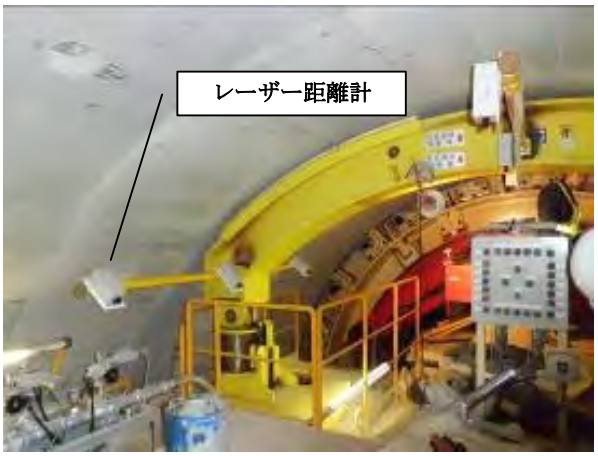


写真-3 真円計測システム稼働状況(上部側)

2.2 テールクリアランス計測システム

シールド工事においてテールクリアランスは，シールド掘進管理だけでなく出来形管理にも極めて重要な要素となっている。従来，このテールクリアランスの計測は，作業員がコンベックスやスチールテープ，楔形の測定片などを用いておこなうことが多く，その計測頻度もシールドマシン掘進に応じて行なわれていた。

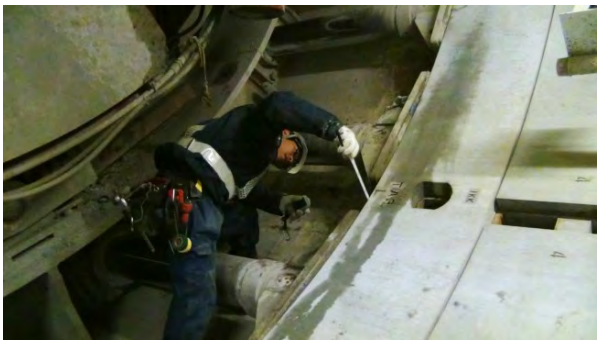


写真-4 従来のテールクリアランス計測状況

しかし，このテールクリアランス計測作業(写真-4 参照)は，シールドマシンの掘進時にシールドジャッキ付近(以下，ＳＪ)に作業員が近づいて計測することから，不安定な足場やトンネル大断面化に伴った高所作業化など計測作業時の安全性が危惧されており，施工安全性への改善が望まれていた。

今迄にも，テールクリアランス計測装置は各社で研究開発(写真-5，-6 参照)されており，現場への導入・運用を行なっているが，計測箇所であるシールドマシンテール部は，裏込め材や地下水の流入により坑内環境が悪く，機器やセンサの故障で運用困難となる事が多く，普及しない原因となっていた。(写真-7 参照)

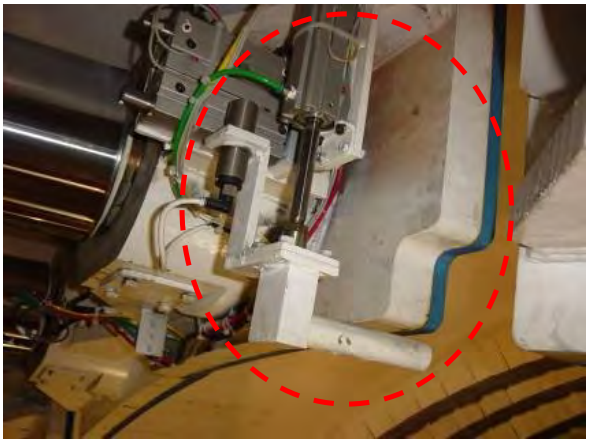


写真-5 シールドマシン組込み型テールクリアランス計測器

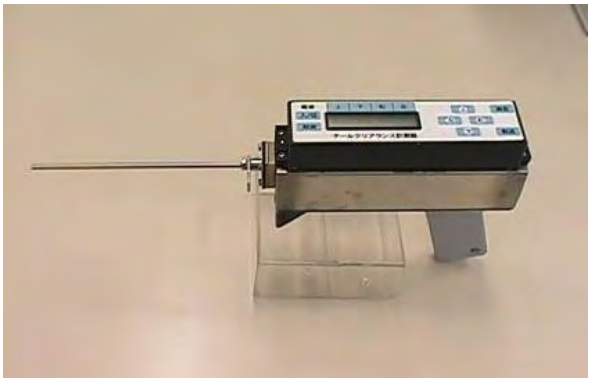


写真-6 ハンディ型テールクリアランス計測器



写真-7 シールドマシンテール部状況(地下水流入)

今回開発されたテールクリアランス計測システムは，これらの問題を解決すべく計測方法にレーザー照射を用いた画像処理方式を採用。切羽側に計測ユニットを設置し，テールクリアランス部にレーザー照射する事で，シールドマシンテール部の環境に影響なく計測が可能となり，セグメント組立だけでなくシールドマシン掘進時のテールクリアランスをリアルタイムに計測可能とした。
(図-4，写真-8，写真-9 参照)

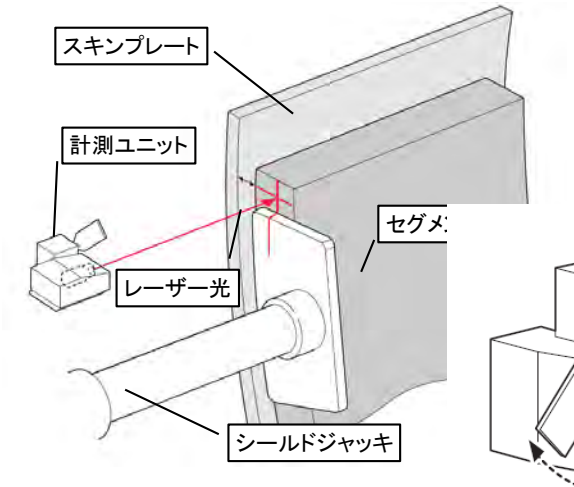
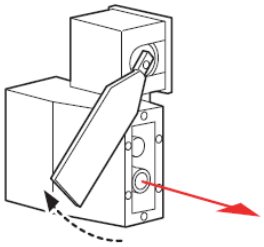


図-4　テールクリア計測システム概

この計測ユニット(表-2,図-5 参照)は，レーザー照射装置と画像認識センサ，シャッタユニットから構成されており，先に述べた様に本ユニットをＳＪ根元付近に配置し，テールクリアランスの計測を行う。また，本ユニットはシールドマシン取り付け方法により，2 つのタイプ(縦型，横型)が設けられ，様々なシールドマシンの外径や形状にも対応可能となっている。

表-2　計測ユニット緒元

項　　目	内　　容
寸法(W×L×H)	195(mm)×195(mm)×65(mm)
重　　量	5(kg)
レーザー出力	クラス2レーザー
供 給 電 源	DC24V(レーザーのみDC6V)



縦型計測ユニット



横型計測ユニット

図-5　テールクリア計測ユニット



写真-8　計測ユニット設置状況



写真-9　レーザー光照射状況

計測ユニットの設置箇所は，上部・右 90 度・左 90 度・下部の 4 箇所を標準とし，下部に関しては現場の施工条件により，水没などの影響がない範囲に移設を行なう。また，最大取り付け数量に制限はなく物理的に設置可能であれば綿密な計測管理も可能である。

次に本システムの計測の流れとしては，

①シールド掘進信号とＳＪストロークをシールドマシン側の掘進管理システムから受信。
②任意のストローク値到達時にシャッタシステムを起動(シャッタ開)。
③セグメント面にレーザー照射を行い，画像認識センサにてテールクリアランスの計測を行う。(写真-10 参照)
④計測完了後は，シャッタシステムを閉じ，テールクリアランス値を演算し，シールド掘進監視システムに転送する。
⑤シールド掘進管理システムからシールド掘進信号を受信中は，②～④の動作を繰り返して行なう。
⑥シールド掘進信号停止後は，次リング計測開始までシステムは待機状態となる。

以上の動作をシールド掘進毎に行い。テールクリ

アランス値をリアルタイムに中央制御室(シールド操作室)のディスプレイ上(図-6 参照)に表示し，シールドマシン操作者は計測データを参考に掘進管理を行なう。



写真-10 テールクリアランス計測状況

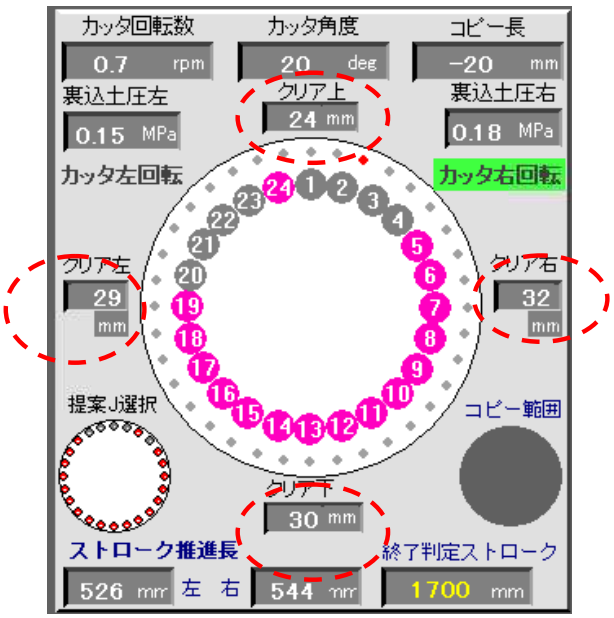


図-6 テールクリア表示画面

３．導入結果

3.1 セグメント真円度計測システム

先ず初めに本システムの導入にあたり，システム計測精度の検証を行なった。検証方法としては，システムで計測されたセグメント内径と前章で述べた従来のレーザー距離計によって求められた内径との比較を行なった。その結果，計測誤差が±2mm 以内を確認が出来たため，システムの運用を開始した。(写真-11 参照)

図-7 は，シールド掘進時のあるリングのセグメントの真円度の変位を表したものである。セグメントの変形は，真円度が 100%を超える場合は縦つぶれ，逆に 100%未満では横つぶれとなる。一般的には，この真円度が±0.4%を超えるとセグメントのヒビ割れが発生すると言われている。



写真-11 真円度計測システム稼働状況(下部側)

従って，シールド掘進とセグメント組立作業では，図-3 と図-7 のデータを，ディスプレイに表示されたデータを基に作業の監理指導を行なった。

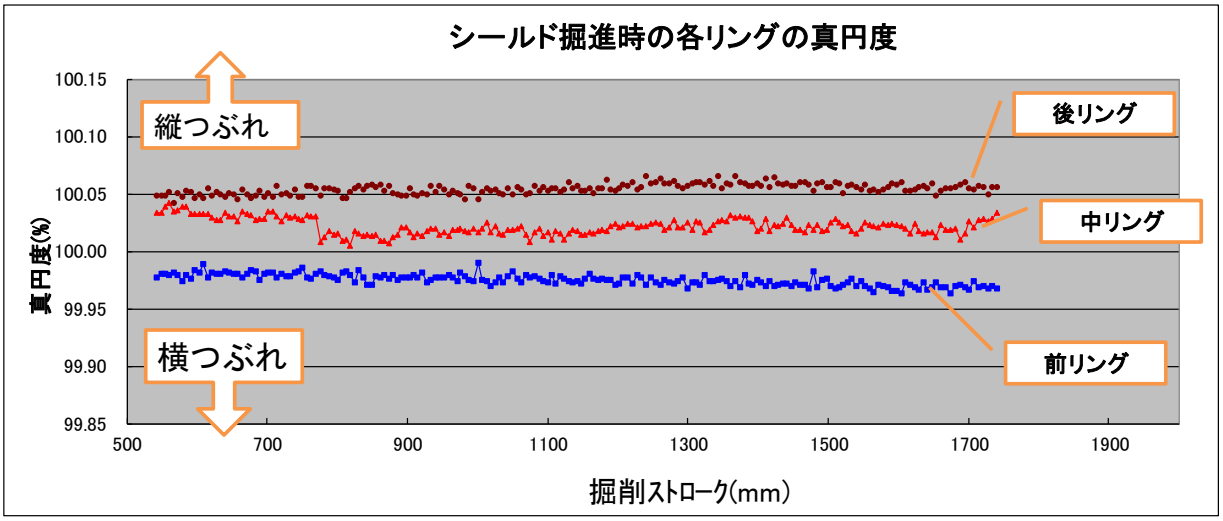


図-7 真円度計測グラフ表示画面

2.2　テールクリアランス計測システム

先ず初めに本システムの導入あたり，システム計測精度の検証を行なった。検証方法としては，シールド掘進開始から終了までの 1 リング分を、人による計測(コンベックス使用)と同時にテールクリアランス計測を自動で行い。そのテールクリアランス値の比較を行なった。(表-3 参照)

表-3　テールクリアランス計精度比較

（単位：mm）

SJ ストローク	20R押し 上クリア 実測	計測	誤差	右クリア 実測	計測	誤差	左クリア 実測	計測	誤差
738	26	25.70	0.30	35	33.95	1.05	27	26.09	0.91
841	25	23.64	1.36	35	35.49	−0.49	27	26.69	0.31
949	24	22.50	1.50	36	36.80	−0.80	28	29.65	−1.65
1,058	25	26.61	−1.61	37	37.82	−0.82	27	26.65	0.35
1,168	24	25.60	−1.60	37	36.50	0.50	27	27.37	−0.37
1,270	24	26.14	−2.14	37	37.86	−0.86	27	28.37	−1.37
1,420	23	25.56	−2.56	39	37.70	1.30	26	26.89	−0.89
1,530	20	18.61	1.39	40	38.80	1.20	26	27.24	−1.24
1,755	21	23.56	−2.56	40	41.23	−1.23	27	27.41	−0.41

表-3 より，本システムの計測精度は，人による計測と比較して数値にバラツキはあるが±2.5mm 以内である事が分かった。また，この計測精度はＳＪストロークが伸びる毎に誤差が増大する傾向が確認された。

各現象の原因と対策を以下に述べる。

①数値のバラツキに関して

画像認識センサは，センシング対象物の位置を画面上で検出するため画面の受光素子の画素数を座標値として演算を行なう。(図-8 参照)※2

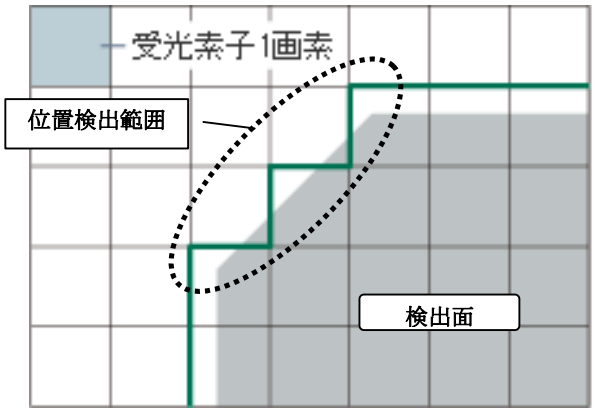


図-8　画像認識概念図

この時，図-8 から分かる様に検出面の位置が受光素子画素をまたがっている場合，検出結果(画素座標値)は変動する。これにより検出結果にバラツキを生じることが考えられる。

この対策としては，画像認識センサ自体の受光素子画素数アップを行い。検出面の細分化により安定するものと考えられる。

②ＳＪストローク伸びによる精度低下

テールクリアランス計測時には，シールド掘進時に対象物(テールクリアランス面)との距離が変化する。これにより，画像認識センサによる画面視野が増大する。(図-9 参照)

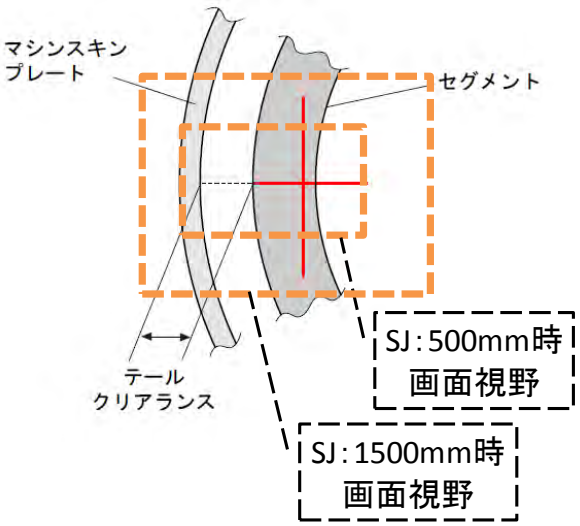


図-9　ジャッキストローク毎の画面視野

これにより，各画面視野での画素に対するスケールが変化し，画面視野が増大するほど画像センサ自体の計測精度低下を生じる。

この対策としては、計測ユニットと対象物との視野を適正なサイズに合わせることであり、

・画像認識センサに取り付けるレンズの変更。
　(望遠やオートフォーカスレンズの採用。)
・適正視野にあわせた画像認識センサの複数化。
　(適正距離に合わせてセンサを切替。)

以上の 2 点が対策として考えられる。

4．おわりに

技術開発が停滞する昨今，今回開発された 2 つの技術は，シールド工事において実現が難しいとされていたテーマであった。しかし，これらが実現出来た要因としては，開発者だけでなく現場が運用・改善を繰り返す事で様々な問題点を解決できたと考える。この 2 つの新技術は，大口径だけでなく小中口径のシールド工事にも適用可能な技術であり、今後は多くのフィールドで運用をして頂き，その有効性を確認して頂きたい。

最後に本技術の開発に際し，ご支援・ご協力いただいた関係各位に紙面をお借りしてお礼を申し上げます。

参考文献

1) 土木学会：シールドトンネルの施工時荷重，pp.44～45
2) キーエンスHPより(http://www.keyence.co.jp)

新幹線直上に高架橋架設を行う機械装置の開発

（東北縦貫線工事の実績）

鹿島建設（株）　永田　敏秋
○穴井　秀和
幸野　寛伸

１．はじめに

東北縦貫線工事は東京駅～上野駅間を新たに在来線で結ぶためのもので、神田駅付近では新たな建設用地の取得が難しく、東北新幹線の直上に高架を重層化して構築するものである。

施工手順としては、まず新幹線の鋼ラーメン高架（橋脚・橋台）上部に鉄骨部材を継ぎ足して重層化し、次に重層化した高架に PC 桁・鋼桁を計 19 橋架設する。

これらの作業は、新幹線のキ電停止時間、かつ在来線の終電から初電までの短い時間内に行う必要があるが、作業条件を満足する既存の設備がないため、以下に示す機械装置を新たに開発し、施工品質を確認しながら安全を最優先に施工することになった。

① 橋脚・橋脚の施工では新幹線の軌道を利用した運搬・揚重設備、並びにその架設方式

② 上記①で架設した橋脚・橋台上空を移動しながら、PC 桁などを 1 夜で架設することができる桁架設機、並びに架設方式

③ 上記②の桁架設機まで最大重量約 560ｔの桁を組立てて運搬するための各種台車装置

以下にこれらの機械装置について実績を報告する。

２．工事概要

東北縦貫線の整備区間は、図-1 に示すように東京～上野間の約 3.8ｋｍで、このうち神田駅付近では新たな用地取得が難しく、図-2 に示すように新幹線の高架を約 600m重層化した。

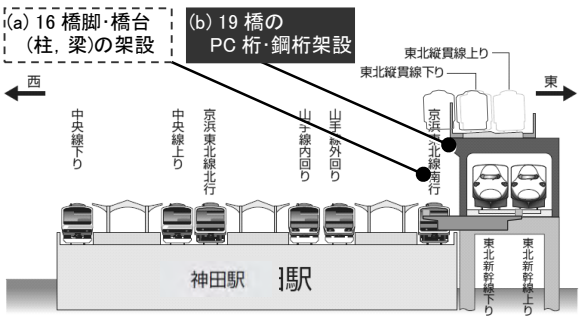


図-2 工事位置断面図（神田駅付近）

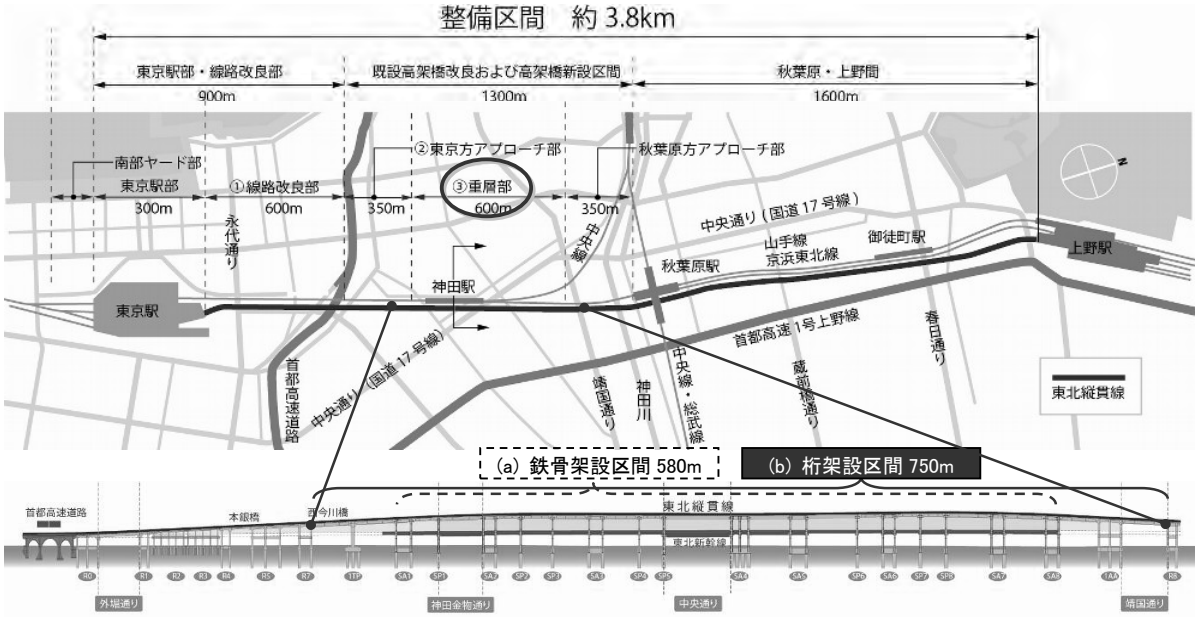


図-1 工事位置平面図（上）と側面図（下）

工事名：東北縦貫線（南部）PC・鋼桁架設他
発注者：東日本旅客鉄道（株）
施工者：鹿島建設（株）
工事場所：東京都千代田区（神田駅付近）
工期：2008 年 3 月～2013 年 9 月

３．新幹線軌道利用の運搬・揚重設備と架設方式

鉄骨架設は周辺道路からの施工が難しいため、ほとんどの部分は新幹線軌道内から行うことにした。施工毎に搬送台車にクレーンと鉄骨を搭載し、東京駅の南側の作業基地から平均約 1.5ｋｍ先の架設箇所まで運搬する方法をとった。

搬送台車は 4 両編成で、1 両目は運転席と動力台車､2 両目にクレーンを搭載するクレーン台車、3・4 両目が鉄骨運搬台車で、3 両目には架設する鉄骨を搭載し、4 両目は油圧ホースなどの緊急時の資材を搭載することにした。

3-1　搬送台車

台車を牽引する駆動輪は、車輪をレールに押し付ける力が不足すると車輪が空転し、駆動力不足となることが懸念される。そのため、クレーン台車に駆動車輪を設けてクレーンの自重を利用するようにし、先端の動力台車には運転席と動力源の機器を搭載した。これにより搬送台車の全体重量の軽減を図った。

表-1　搬送台車の仕様

名称	仕様	備考
全重量	約168 t	鉄骨運搬台車を含む
全長	約40 m	
全幅	3.0 m	
走行速度	最大10 km/h	

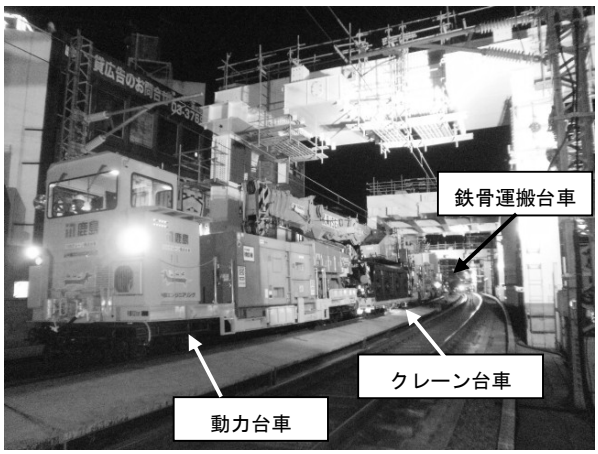


写真-1　搬送台車

また、新幹線軌道内を走行するため、万一作業中や移動中に立ち往生してしまうと翌日の新幹線の運行に支障をきたす恐れがある。これを予防するために､表-2 に示すような安全装置を装備した。

表-2　クレーン搬送台車の主な安全装置

名　　称	内容
新幹線保守安全システム	他の保守車輌や線閉作業箇所との干渉を防止する通信システム
貫通ブレーキ	動力車輌のブレーキをかけると他の牽引車輌も同時にブレーキをかける設備
油圧保障時のバックアップ	クレーン本体や鉄骨運搬台車の油圧装置が故障した場合、搬送台車の油圧源からのバックアップが可能

3-2　移動式制走堤

搬送台車は、昼間は東京駅の南側に留置しておき、新幹線のキ電停止後に移動を開始する。東北新幹線の本線の南端には、新幹線が万一逸走した場合の歯止めとなる制走堤（砂利盛り+鋼材止め）が設けられており、搬送台車が新幹線の軌道を走行するには制走堤を撤去し、作業終了後には復旧する必要がある。そこで、移動式制走堤を開発して撤去・復旧時間を短縮した。

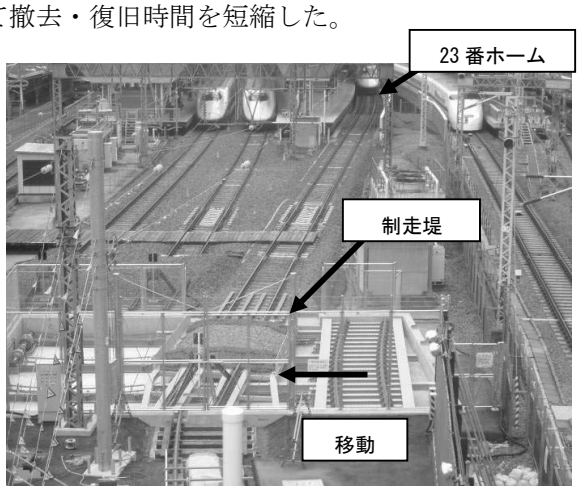


写真-2　移動式制走堤

移動式制走堤はトラバーサーの片方に制走堤を、もう片方には新幹線軌道と接続するレール・枕木を設置し、全体を平行移動すると制走堤とレールが入れ替わり、15 分程度の時間で搬送台車を新幹線の軌道に送り出すことができるようにした。

3-3　クレーンとクレーン台車

架設箇所では新幹線の架線とクレーンのブームや吊上げる鉄骨が干渉することを避けるため、上下線の軌道間を利用して揚重作業をする必要がある。そのためクレーンは横移動に容易に対応可能で安定性に優れたオールテレーンクレーンとし100ｔ吊りを選定した。

クレーンはクレーン台車に搭載され架設位置まで搬送されると台車の外側にアウトリガーを設置し、本体を持ち上げクレーン台車を引抜いた後、覆工板上を上下線の軌道間までステアリングを切り返して横移動させ設置する。

3-4　鉄骨運搬台車

架設する鉄骨を搭載した鉄骨運搬台車もクレーンと同様に揚重作業に当たっては上下線の軌道間に移動する必要がある。

そこで鉄骨運搬台車には、写真-3 に示すように四隅に配置した昇降シリンダーの先端にステアリング機能を持つタイヤタイプの走行装置を装備した。まずステアリングによってタイヤを走行させたい方向に向け、次に昇降シリンダーによって台車全体を持ち上げ、新幹線の軌道から車輪を離線させて、タイヤでの走行を開始する。線路間の覆工板に傾斜がある場合には、搭載した鉄骨がほぼ水平になるように昇降シリンダーで調整すると共に上空の架線には接しないようにした。

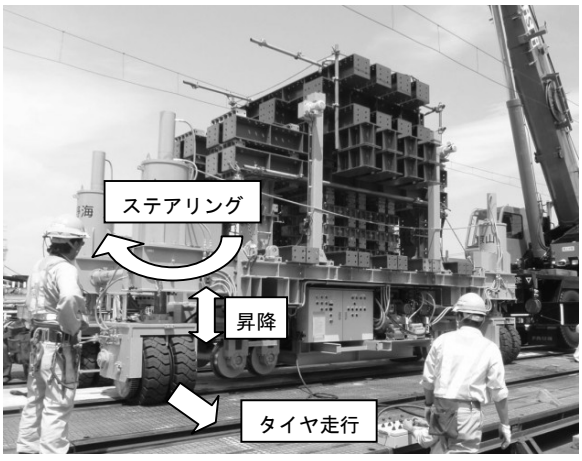


写真-3　鉄骨運搬台車（事前実験にて）

鉄骨運搬台車の主な仕様を表-3 に示す。

表-3　鉄骨運搬台車の主な仕様

名　　称	主仕様
昇降装置	
積載走行重量	25t積
ストローク	400mm
タイヤ走行	
速度	1.5～2.5m/min
タイヤ走行	油圧駆動
ステアリング	電動駆動

3-5　鉄骨架設実績

鉄骨を架設する揚重作業は、新幹線の架線の間約 4.2mを利用して全てが実施される。そのため、クレーンと同様に鉄骨運搬台車も上下線の間に移動させた後に開始されることになる。写真-4 に鉄骨架設の状況を表-4 に架設実績を示す。

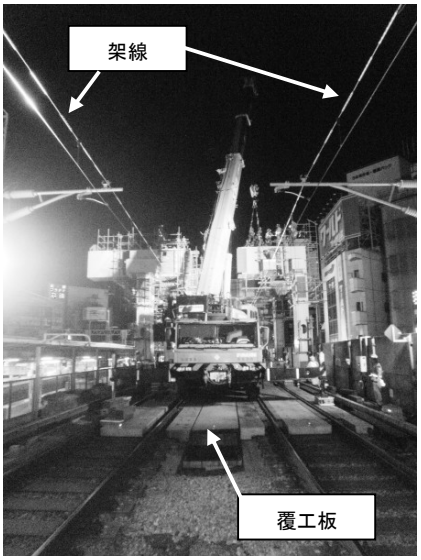


写真-4　鉄骨架設状況

表-4　鉄骨架設数量

名称		数量	単位
架設箇所数	橋台	8	基
	橋脚	8	基
架設ブロック数	地上	36	ピース
	軌道内	218	ピース
	計	254	ピース
架設最大重量		20	t/ピース
架設重量		約2700	t
架設期間	2009年9月～2010年10月（約14ヶ月）		

架設する鉄骨部材の箇所や位置によって異なるが、標準的なサイクルタイムを表-5 に示す。

表-5　標準的なサイクルタイム

時刻	作業内容
0:15 ～ 0:30	制走堤移動･レール締結
0:25	新幹線のキ電停止
0:30 ～ 0:50	搬送台車移動
0:50 ～ 1:20	台車引抜･100t吊りクレーン設置
1:20 ～ 1:35	鉄骨運搬台車横取り
1:35 ～ 1:45	玉掛･足場取付
1:45 ～ 1:55	揚重作業
1:55 ～ 3:05	添接部足場組立･仮ボルト締結
3:05 ～ 3:40	クレーン撤収作業
3:05 ～ 4:00	搬送台車帰還、片付け、跡確認
4:30	キ電停止の解除

4．桁架設機による桁架設

前述の鉄骨架設が完了した橋台・橋脚をまたぐように脚（前部及び後部タワー）を設置して、橋脚・橋台上空を移動しながら連続的に桁を架設できる桁架設機を開発した。

開発した桁架設機による桁架設の手順は以下の通りである。

まずPCまたは鋼桁の組立を行い、桁架設機まで台車で移動し、走行ガーダ上に乗り入れる。このとき、台車の走行面と走行ガーダ上面とは約3mの高低差があるため、桁を運搬する台車は上下に分離できる親子台車を使用し、走行ガーダには子台車のみが乗り入れるようにした。(写真-5は鋼桁の乗り入れ途中の状況を示す）走行ガーダ上の桁は吊ガーダに取付けた鋼棒で吊り上げ、前部及び後部タワーの昇降ジャッキを伸縮させて吊ガーダと共に桁を降下させる。

架設当夜は、桁を走行ガーダから地切りした後、走行ガーダを先送りし、吊ガーダを降下させて桁を設置する。

一方、桁架設機を移動させる時は、走行ガーダを橋台・橋脚に固定した状態で、吊ガーダの後端

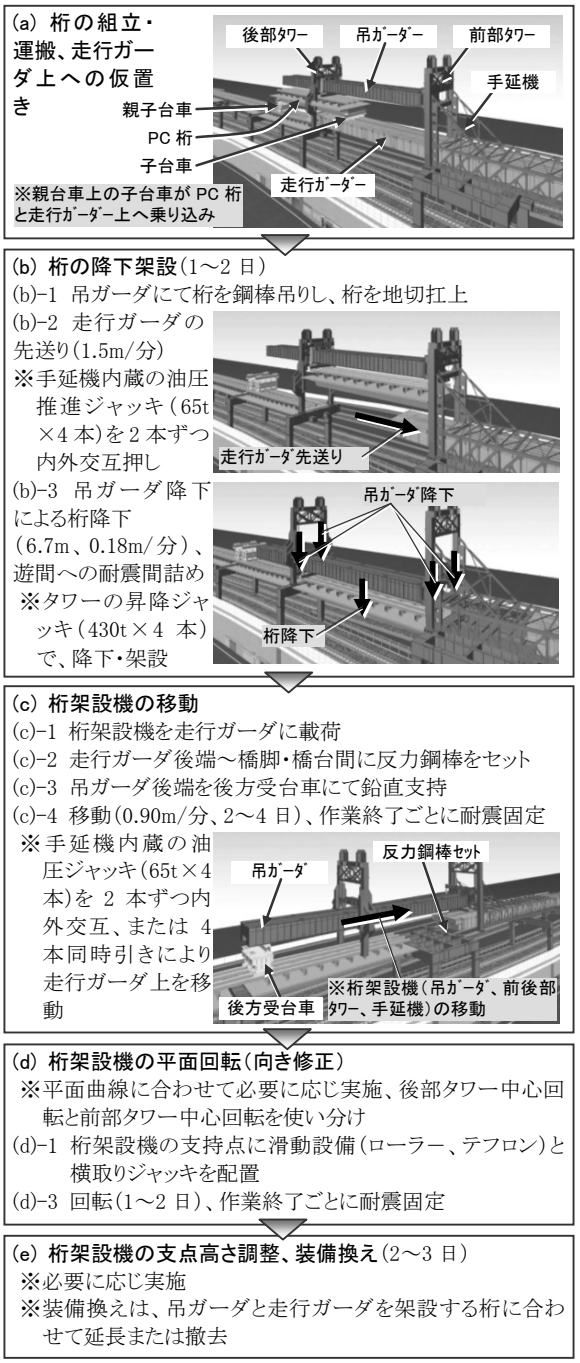


図-3　桁架設工の一連の流れ

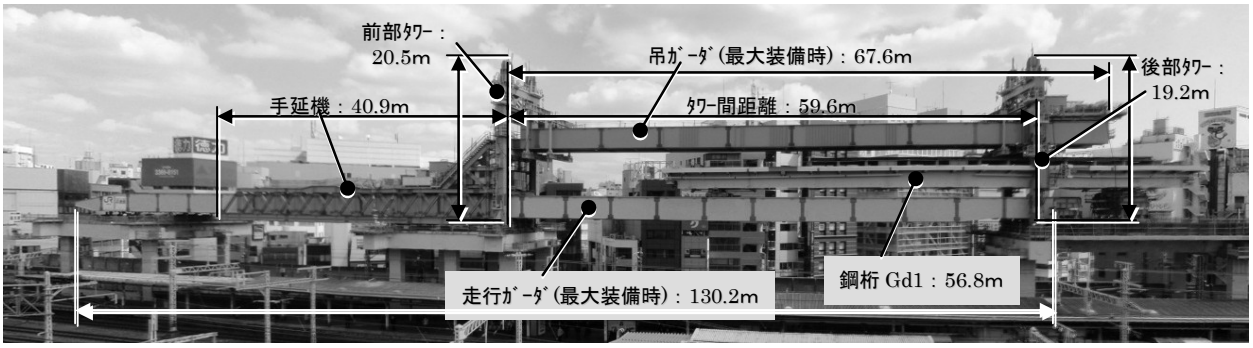


写真-5　桁架設機

を後方受台車で受けながら、桁架設機を
ーダに載荷して移動させる。

なお桁の平面線形（R=800m）を合わせ
には桁架設機の向きを変更する作業が伴う
部タワーの片方の脚などを中心にして桁架
体を平面的に回転させた。また縦断勾配の
は、前部タワーと後部タワーの脚部などに
を設けて桁架設機に勾配をつけて実施した

4-1　架設機装備の油圧機器

推進ジャッキは桁架設機の手延機に設
ており、ジャッキ先端のクランプで走行カ
のレールを把持している。

走行ガーダを先送りする時は、前部及び
ワーを橋脚・橋台上に固定して推進ジャッ
ばしながら行い、桁架設機を移動させる時
に走行ガーダを固定して推進ジャッキを縮めなが
ら行う。

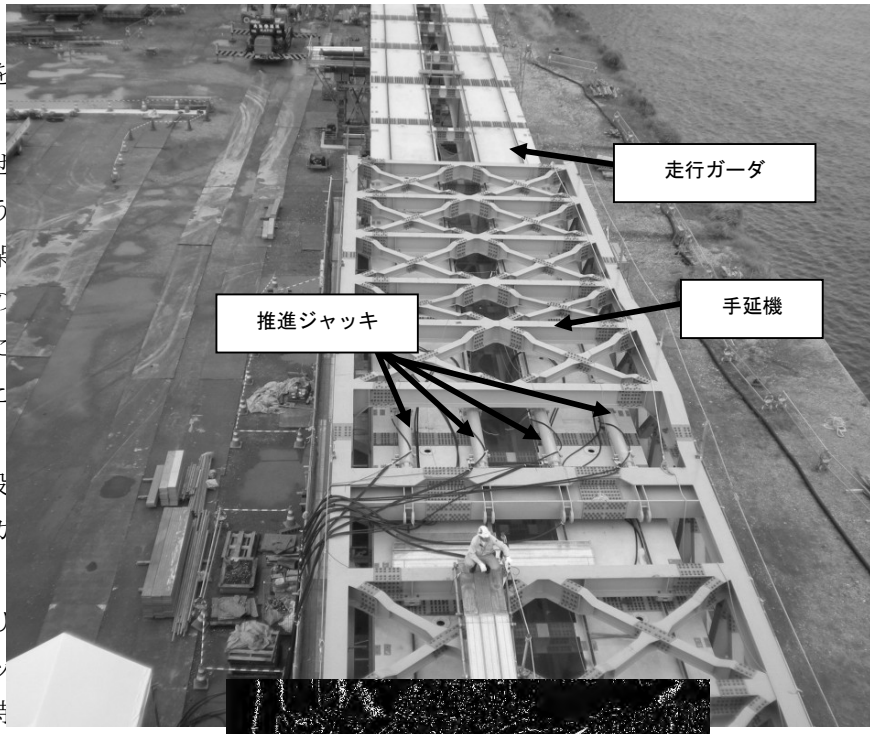
表-6　架設機の主な仕様

名称	仕様	備考
推進ジャッキ	4 本	
ストローク	2000mm	
推力	伸び　800kN／本	走行G先送り
	縮み　649kN／本	架設機移動
伸縮速度	伸び　最大 28mm/min	
	縮み　最大 15mm/min	
油圧ユニット	90ｋW×2 台	6P，400V
昇降ジャッキ	4 本	
ストローク	6，900mm	
吊下げ能力	4，230kN／本	
降下速度	最大 3mm/min	
油圧ユニット	30ｋW×2 台	6P，400V

推進ジャッキ並びに昇降ジャッキは複数本を同時に使用するため、同じ移動量を確保（同調）することが制御の要になる。そこで、油圧回路にサーボ弁を用い、mm 単位で同調させた。

また、万一油圧回路にトラブルが生じた場合を想定して、バックアップ回路を設けておき、切替えによって回避できるようにした。

前部及び後部タワーの脚の間隔は桁の幅より狭いため、後部タワーにクランクを設け、桁の張り出し部が通過できるようにしている。桁を吊り下げるときにはタワーの脚に鉛直荷重がかかるので、このクランクを閉合するためのジャッキを設



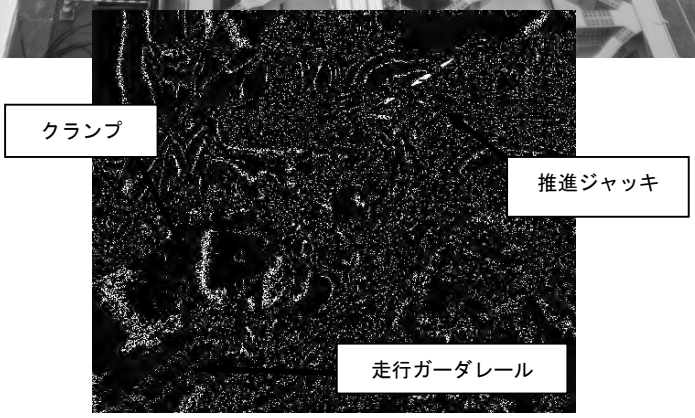


写真-7　推進ジャッキクランプ

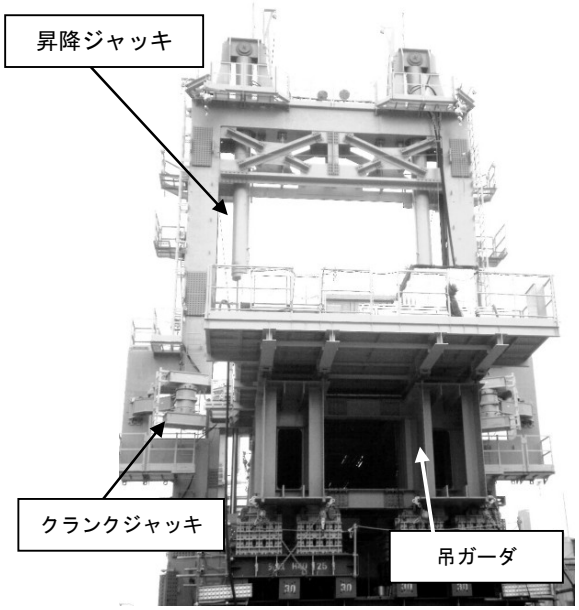


写真-8　後部タワー

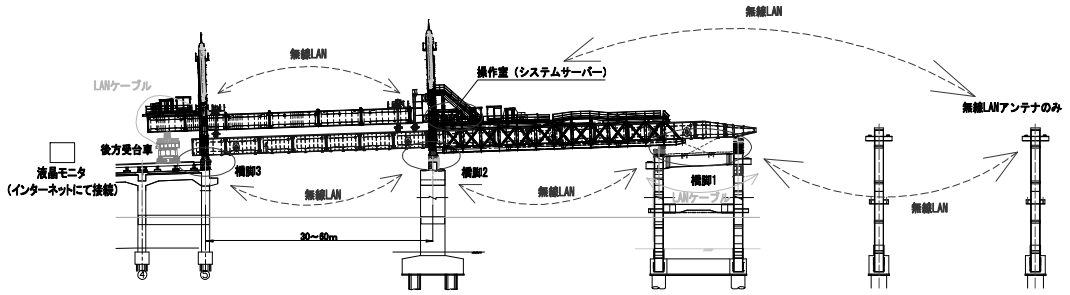


図-4　架設機管理システムのデータ通信方法

4-3　管理システム

架設機の油圧機器の圧力やストローク及び橋脚・橋台上の反力を計測・管理するため、無線 LAN を利用したネットワークシステムを構築した。

このシステムによって離れた場所からでも荷重状況の把握がリアルタイムで可能となり、iPad の利用により現地で作業指揮を取りながら全体の作業状況を確認することができるようにした。

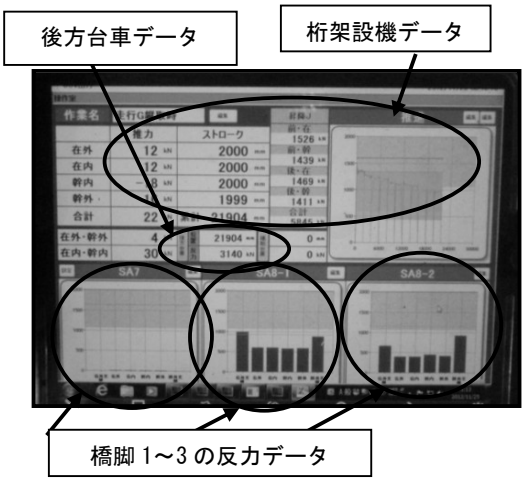


写真-9　桁架設機管理システム画面（桁架設機移動時）

５．台車装置

平地の組立ヤードがないため、PC 桁や鋼桁は構台上や架設した PC 桁上で 1 ピースずつ台車に搭載して引き寄せて組み立てた。

PC 桁の両端のピースは約 60ｔになるため半割構造とし、台車上で予め横締めして全体を引き寄せて組み立てた。

組み立てた桁を架設機まで運搬するのは端部の組立に使用した親子台車をそのまま使用する。親子台車には旋回ベアリングが組み込まれており、曲線部では後ろ側の車輌の上部が旋回して桁と台車の向きずれを補正しながら走行する。また、駆動車輪には左右別々にインバータを搭載しており、モータの周波数を調整して内輪差を解消できるようにした。

表-7　台車の数量

名　称	使用目的	数量
ブロック台車	一般ブロックの組立	15台
牽引台車	ブロック台車の牽引	1台
親子台車	端部ブロックの組立（PC桁） PC・鋼桁の運搬	4台
後方受台車	架設機移動用	1台

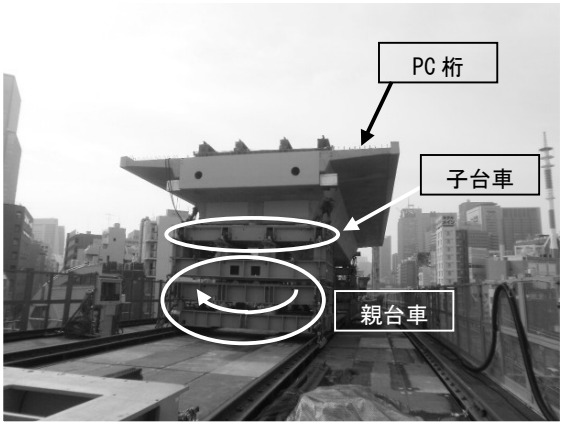


写真-10　PC 桁運搬状況

６．おわりに

2013 年 4 月 19 日深夜に靖国通りを通行止めにして最後の桁を架設した。2009 年 12 月の新幹線軌道内での鉄骨架設開始から 3 年 5 ヶ月に渡る 19 橋の桁架設が完了した。途中、東日本大震災に見舞われるなどさまざまな課題も発生したが、東日本旅客鉄道殿のご指導のもと、関係者の豊かな発想力と熱意で解決してきた。ここに感謝の意を述べる。

この論文が今後の工事の参考になれば幸いである。

矩形アンダーパス工事に特化した密閉式掘削機による地下連絡通路の施工実績

―新御茶ノ水駅連絡出入口設置工事―

鹿島建設(株)　○ 諸橋　敏夫
鹿島建設(株)　　坂根　英之

１．はじめに

近年、新設ビルと地下鉄の駅を結ぶ地下連絡通路工事や、鉄道・道路を立体交差化するアンダーパス工事が増加傾向にある。

これら地下通路やアンダーパス部形状は、矩形断面であることが多い。しかしこれまでは、非開削工法でシールド工法を採用した場合、回転式カッタに伸縮カッタ（オーバーカッタ）を用いて矩形に掘削する工法などが適用されてきたが、そのほとんどが完全な矩形（扁平矩形）にはなっていない。また、通常のシールド機をベースにした矩形マシン（写真-1）であるために、短距離や小断面のニーズが多いアンダーパス工事においては、その合理性やコストパフォーマンスが問題となることがあった。

そこで、完全な扁平矩形断面のアンダーパス工事に適応するＲ－ＳＷＩＮＧ（Roof & SWING cutting ）工法の泥土圧式トンネル掘進機（以下、Ｒ－ＳＷＩＮＧマシン）を開発した。

２．Ｒ－ＳＷＩＮＧ工法について

2.1　Ｒ－ＳＷＩＮＧマシン仕様

(1) 適用地盤条件

アンダーパス工事は比較的深度の浅い場所での施工が多いため、マシンのコストダウンを図るうえで、適用地盤条件を以下のように設定した。

・ 適用地盤： N 値 20 程度の粘性土・砂層
・ 土 被 り： 5～10m 程度
・ 地 下 水： 0.1MPa 程度

(2) 適用寸法

地下連絡通路から 2 車線道路トンネルを対象として、適用寸法を以下のように設定した。

・ 形 状： 矩形
・ 幅 ： 最小 4.6 ～ 最大 9.2m
・ 高 さ： 最小 3.6 ～ 最大 9.0m

(3) Ｒ－ＳＷＩＮＧマシンの基本構造

図-1 に基本型Ｒ－ＳＷＩＮＧマシン外観を示す。前後に 1.5m 伸縮する高さ 0.9m のルーフマシンを上部に、基本高さ 2.7m の本体マシンを下部に配置する。掘削はワイパーのように左右に振れる揺動カッタ方式を採用した。ルーフマシン、本体マシンともに幅 2.3m のユニットを左右 2 セット配置し、左右のカッタを逆方向に揺動することでセグメントに掛かる反力を打ち消す構造とした。また、ルーフマシン、本体マシン後部の函体受座には姿勢制御を目的とした中折れ機構も装備した。

なお、ルーフマシン、本体マシンとも必要に応じ上下左右に結合することができる構造となっており、図-2 のような大断面にも適用可能である。

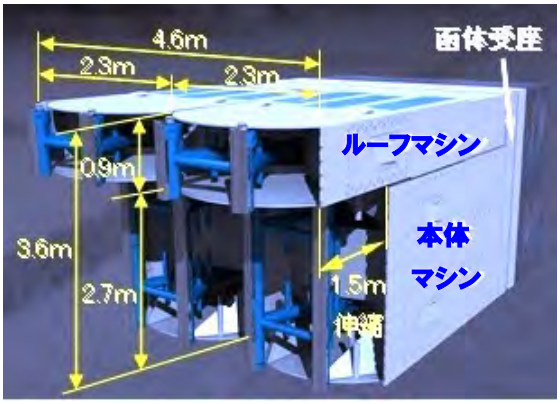
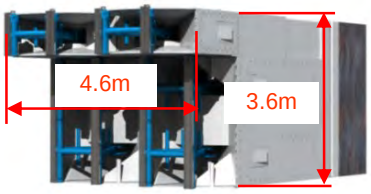


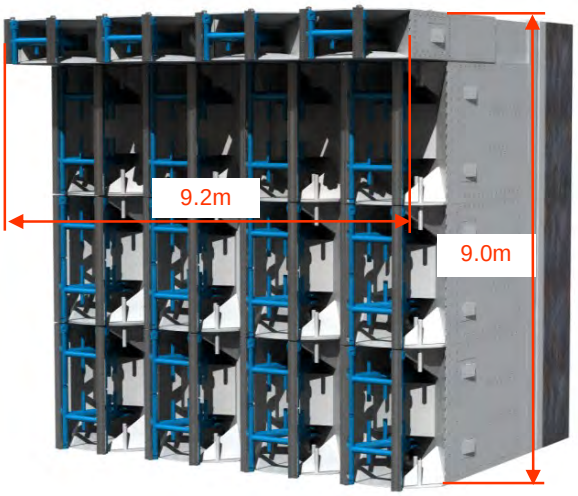
図-1　Ｒ－ＳＷＩＮＧマシン（基本形）



写真-1　通常のシールド機ベースの矩形マシン例



基本型（2×2）



最大拡幅型（4×4）

図-2　R－SWINGマシン適用断面範囲

2.2　R－SWINGマシンの特長

(1) 工法・セグメントの適応性

マシン前方の構造はそのままで、後方の函体受座を変更することで推進工法からシールド工法への対応が可能である。また、鋼製セグメント、RCセグメントにも適用でき、あらゆる現場状況に対応可能である。

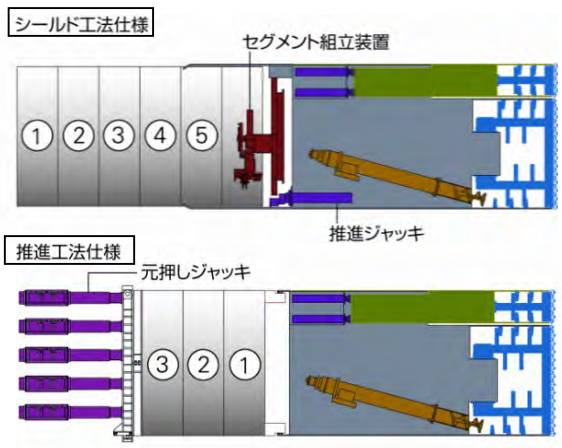


図-3　シールド・推進工法での適用イメージ

(2) 地盤変状抑制と前方探査機構

先行掘進のために設けたルーフマシンは掘進方向に伸縮する構造で、直上の地盤沈下および隆起抑制に寄与するだけでなく、埋設物などの探査機能としても活用でき、より安全に掘進することが可能となった。

(3) マシンのユニット化

油圧シリンダ駆動による揺動カッタ方式の採用によって掘削機構を簡略化し、マシンの製造コストを大幅に低減した。またマシンをユニット化し、1つのユニットの幅は2.3mとトラックでの運搬を考慮したサイズとした。全てのユニット間をボルト結合としたことで溶接作業が殆ど発生しないため、作業環境が良好でかつ組立作業期間が短縮できた。また、ユニット内の揺動カッタなどの可動部位もボルトやピン結合にして取り外せる構造としたことで、施工終了時のメンテナンスも容易となった。

(4) 優れた汎用性

小口径の円形管渠やトンネルの径は同じ寸法であることが多いため、推進機やシールド機は比較的転用し易い状況にある。しかし矩形トンネルの場合、その用途によっては似たような大きさにはなるものの、一般的に現場ごとに微妙に幅・高さが異なるため推進機やシールド機は殆ど単品生産機となる。その問題を解消するべくR－SWINGマシンでは、基本型マシンにスペーサなどを挟み込み寸法調整が容易にできる構造としたことで汎用性が高まり、複数の工事に転用することでマシン費の大幅削減を見込むことができる。この寸法調整方法について以下に説明をする。

a)幅の調整

基本型マシンの1つのユニット幅は2.3mとしているが、揺動カッタは2.8mまで掘削幅が調整できるため、250mmまでのスペーサをマシン本体の両側に取付けることでマシン幅が調整可能である。左右2つのユニットでは最大1,000mmの拡幅まで対応できる。また、それ以上拡幅する場合は小型の揺動カッタを設けたハーフマシンを追加することになる。

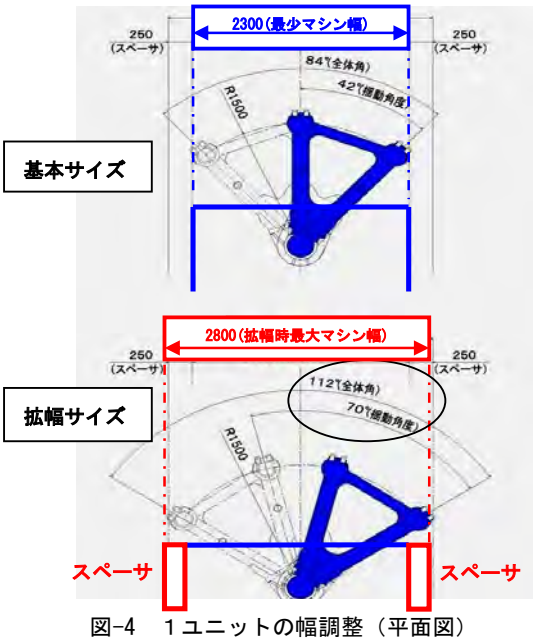


図-4　1ユニットの幅調整（平面図）

b)高さの調整

本体マシンの揺動カッタスポークはマシンの基本高さより上下0.5mずつ長くできるような強度と能力を備えているため、この部分を必要に応じて延伸させ、その隙間にスペーサを挟むことで高さの調整を可能としている（図-5)。

また､基本高さから 1m を超えた場合には別途に掘削機構を設けた中間マシンをルーフマシンと本体マシンの間に入れて対応する。

(5) 地上発進・地上到達技術の組合せ

これまで弊社がシールド工事で行った地上または低土被りでの発進・到達の技術をＲ－ＳＷＩＮＧ工法にも適用できるよう配慮しており、地上発進および地上到達が可能で、現場のニーズに応じて立坑築造に要する工期・費用を大幅に低減可能である（図-6)。

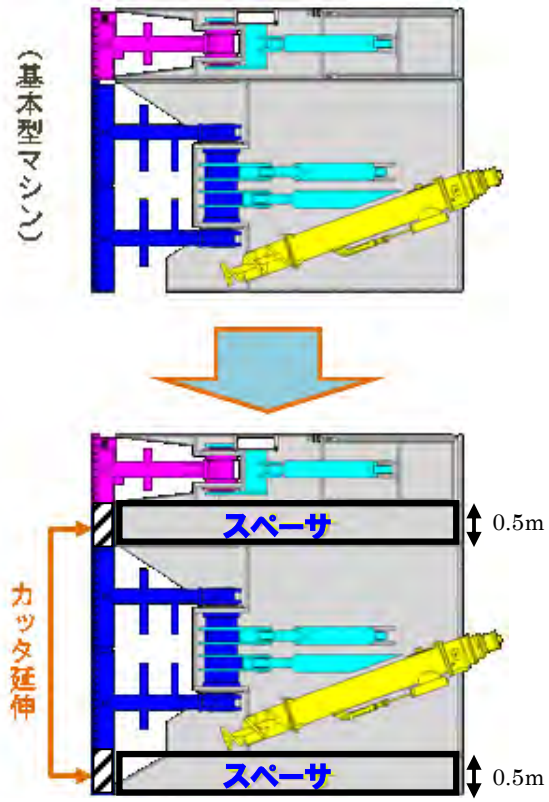


図-5　Ｒ－ＳＷＩＮＧマシン高さ調整（側面図）

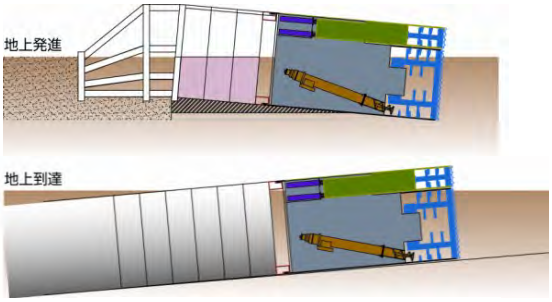


図-6　地上発進・地上到達イメージ

３．施工実績

3.1　工事概要

本工事は、三井住友海上火災保険㈱神田駿河台三丁目計画にともない、三井住友海上駿河台ビル本館地下増築部と地下鉄千代田線新御茶ノ水駅通路部を地下連絡通路（延長約 40m）で接続するものである。

現場周辺は、日中の交通量や人の往来が多く、周辺住民への配慮から振動・騒音の低減が必要な場所での施工ということもあり、極力昼間作業で対応可能な非開削工法が求められた。このうち、中間部の約 26.5m にＲ－ＳＷＩＮＧ工法（推進機仕様）を初適用し、無事に完了した。

・現　場　名：三井住友海上駿河台三丁目計画の内
　　新御茶ノ水駅連絡通路設置工事
・工事場所：東京都千代田区神田駿河台 3-9,11　他
・発　注　者：三井住友海上火災保険株式会社
・施工監理：東京地下鉄株式会社（請願工事）



図-7　施工場所平面位置図



図-8　現場平面図

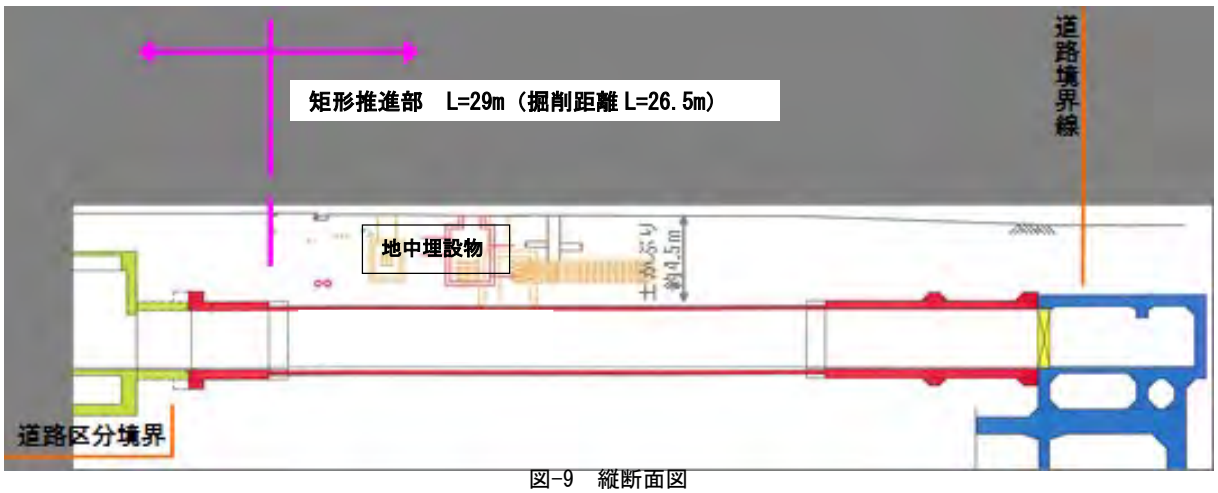


図-9　縦断面図

3.2　諸元・土質条件

・トンネル内空寸法　：幅 4.45m×高さ 3.20m
・セグメント：矩形鋼製、桁高 200mm、L＝1.0m
・矩形推進部：Ｌ＝29m（掘削距離：L＝26.5m）
・平面線形：直線、縦断線形：水平
・掘削土層：細砂礫混じり砂層、地下水位以浅
・N 値：3～20 程度

3.3　Ｒ－ＳＷＩＮＧマシン

本工事では、推進機として施工を行った。

推進機の必要寸法は、幅 4.85m、高さ 3.60m で、幅がマシンの基本型 4.6m に対して 250mm オーバーサイズとなる。従って、マシン中央部に 120mm、側面に 65mm のスペーサを取付けて拡幅した（写真-3）。

排土は、スクリューコンベヤを本体マシンに 2 基、ルーフマシンに 1 基装備し、合計 3 基で行った。

また、マシン後部には、ジャッキを内蔵した函体受座を装備し、中折れ機構を持たせることで、方向修正できる構造とした。

3.4　セグメント

本工事では、鋼製セグメントを使用した。全体形状は、幅 4,850mm、高さ 3,600mm、桁高 200mm、セグメント幅 1,000mm で、これが 4 分割で構成される。

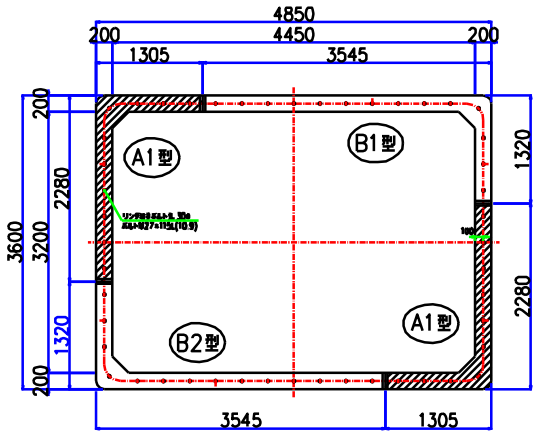


図-10　セグメント全体構造図



写真-2　Ｒ－ＳＷＩＮＧマシン全景（ルーフ張出）

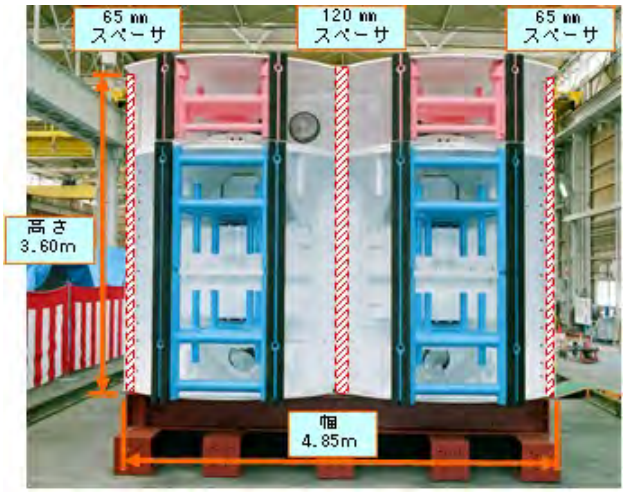


写真-3　Ｒ－ＳＷＩＮＧマシン正面

3.5　推進付帯設備概要

(1) 地上設備

土砂搬出部には圧送ポンプから搬出された掘削土の土砂貯留設備、クラムショベル等の設備を配置し、その周囲には飛散養生用のシートを配置した。資機材搬出入用として、地上に移動式クレーンを配置し、セグメント等の資機材の搬入を行った。換気設備・電気設備等も地上に設置した。セグメントは、地上にて一時仮置きし、シール材を貼り付け後、発進立坑に投入した。



写真-4　発進立坑汚泥搬出状況

(2) 発進立坑設備

発進立坑部には、推進用後続設備、推進用ジャッキ設備、加泥注入設備、滑材注入設備等を設置した。



写真-5　発進立坑内設備配置状況

(3) 坑内設備

トンネル坑内の掘削土搬出設備として圧送ポンプを設置した。



写真-6　坑内設備配置

3.6　施工実績

(1) マシン組立・解体実績

マシンをユニット化したことで、組立はマシン投入から 10 日で掘進可能な状況に、解体は全ユニット搬出までを 2.5 日で完了することができた。



写真-7　マシン引揚状況

(2) 掘進実績

軽微な掘進の不具合はあったものの、掘進時の適切な土圧管理とマシンの姿勢制御により、セグメント出来形および地表面変状も管理値以内に収まり、概ね 5～10mm/min という速度で掘進することができた。

(3) 加泥注入管理

切羽の安定のためには、チャンバ内の塑性流動性の確保が重要である。今回通過土層が砂層および礫混じり砂層であるために高分子系増粘材を使用した。また、地下水位より以浅の掘進であるため逸水・逸泥が多く、また揺動カッタによる圧密脱水も懸念されたために、高分子系吸水材を併用した。

(4) 排土管理

排土量管理は、土砂圧送配管に設置した電磁流量計による土砂圧送容積の計測及び残土搬出時のダンプ搬出容量とピット内の残量を集計して行った。

(5) 姿勢制御

a)ローリング対策

Ｒ－ＳＷＩＮＧマシンは、矩形断面であることから特にローリング対策が重要である。そのため、上下左右の各面に可動ソリ（フラッパ）を計 14 基装備した。また、その可動ソリ部分はスタビライザに換装可能な構造とし、推進中にそれぞれの有効性を確認した。

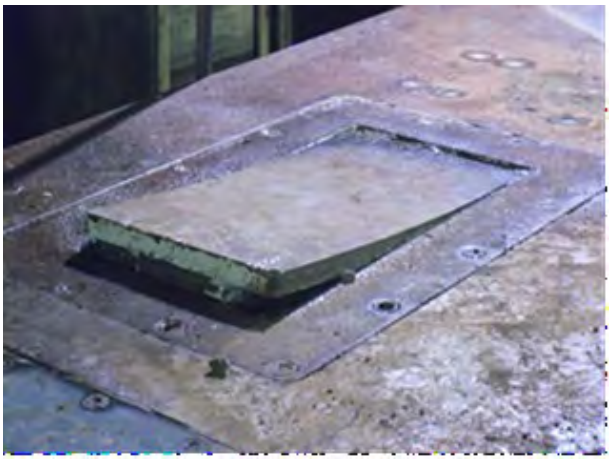


写真-8　可動ソリ（フラッパ）張出状況



写真-9　スタビライザ単体（仮置き状況）

b)方向制御

線形は、直線・水平であるが、推進中の蛇行修正は必要である。よって、以下の方法にて対応した。

・発進立坑の推進ジャッキを左右のブロックで制御し、特に初期推進時の平面方向性を管理
・マシンに装備した、中折れ機構を使用して、上下左右の方向性を管理

以上より、本工事による線形管理結果としては、平面・縦断線形及びセグメント出来形ともに管理値に収めることができた。

(6) 路面変状計測

推進に並行して路面の変状計測を実施した。計測結果は、沈下管理値に収めることができた。



写真-10　トンネル一次覆工完了状況

４．おわりに

今後、アンダーパス工事の社会的ニーズの増加とともに、その施工環境は、超低土被り・重要施設や埋設物との超近接・より一層の低コスト化など、厳しくなることが予想される。

これらの状況の下、Ｒ－ＳＷＩＮＧ工法の今回の施工実績が、今後のアンダーパス工事の進展に大きく寄与するものと考える。

基礎杭施工時の振動波形による支持地盤の判定

地盤評価装置による基礎杭施工への適応評価

大成建設株式会社 技術センター　○近藤　高弘
ひびきエル・エヌ・ジー株式会社　溝口　敬義
千代田化工建設株式会社　佐々木　睦雄

１．はじめに

地盤評価装置はオーガ杭打機を用いる地下ダム施工における止水層である基盤層の削孔判定を目的に開発された。杭打機先端部がこの基盤層まで到達したかの判定手段として，従来は調査ボーリングデータを基に削孔深度と対比しながら杭打機の電流値の変化などを監視し施工経験に基づいて基盤層到達の判定が行われてきた。この地盤評価装置は，杭打機が削孔時発生する掘削振動波形を計測しリアルタイムに波形解析を行い比較評価する事で未経験者でも容易に地盤判定を可能にする技術である。

地下ダム施工として軟岩掘削に対応した地盤評価装置を開発した。一般地層における可能性として基礎杭施工時の支持層判定に適応ができるかを試験施工にて実施した。

２．施工場所の概要

施工場所は，福岡県北九州市若松区向洋町ひびきＬＮＧ基地構内，ひびきＬＮＧ基地建設工事プラント設備工事における杭打工事の施工に地盤評価装置を用いて試験施工を行った。

プレボーリング根固め工法による杭施工を実施，ＰＨＣ杭径φ300～600ｍｍ，削孔深度は 16～20m，施工本数 350 本，支持層は風化花崗岩である。杭打機のオーガ径はφ550ｍｍとφ750ｍｍの２種類で施工した。

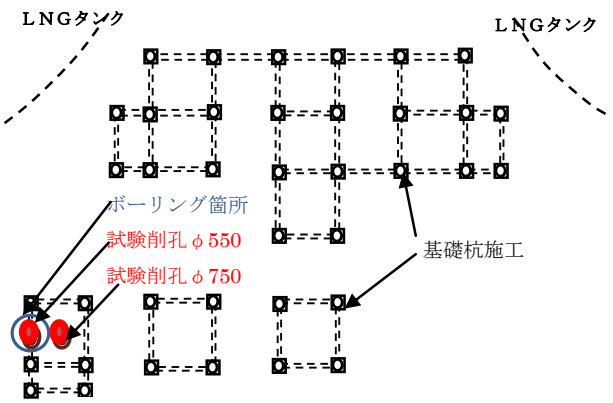


図-１　杭施工エリア

杭打機は２台使用して施工，１台に地盤評価装置を設置し今回の試験施工を行った。

杭打工の工期は 2012 年 12 月～2013 年 3 月まで行われた。試験期間は 12 末～2 月末とした。

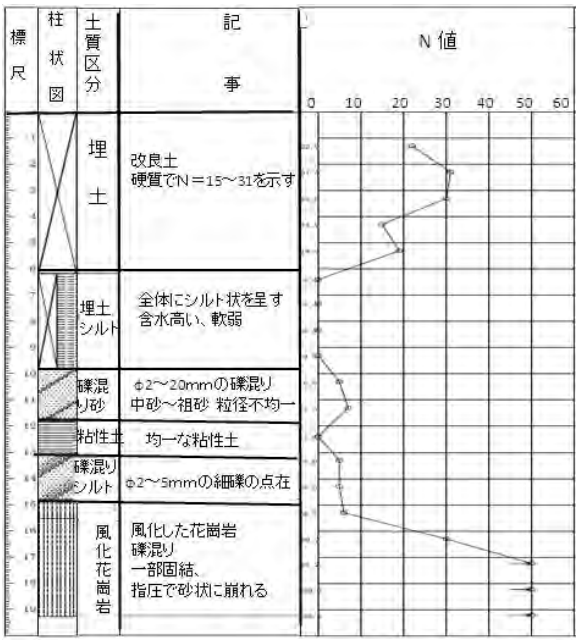


図-２　調査ボーリング結果

試験に際しては事前に試験削孔予定地付近の調査ボーリングを行い地層を把握した。表土は埋土で途中シルト層，軟弱粘土層，粘土層が介在し最終支持層はN値 50 以上の礫混じり砂状の風化花崗岩である。

３．地盤評価装置の概要

地盤評価装置は，杭打機の削孔時に発生する掘削振動および掘削音の波形データを収集し波形解析する事で，支持層部の削孔時発生する特徴的なスペクトルを検知し比較する事で評価判定を行う。

地盤評価装置は，三軸の振動加速度センサと集音マイクのアナログ入力４ch，サンプリング周波数 20KHz，１秒間隔で波形データを計測しリアル

タイムに波形解析を行う装置である。

地盤判定を行う為に比較するためのデータを事前に準備する必要がある。地質が明確な箇所を杭打機で削孔し支持層までの削孔データを収集し，支持層部での波形解析から比較のための基準データとする教師データを作成する必要がある。

この教師データを基準に地盤評価装置はリアルタイムに判定評価を行う。

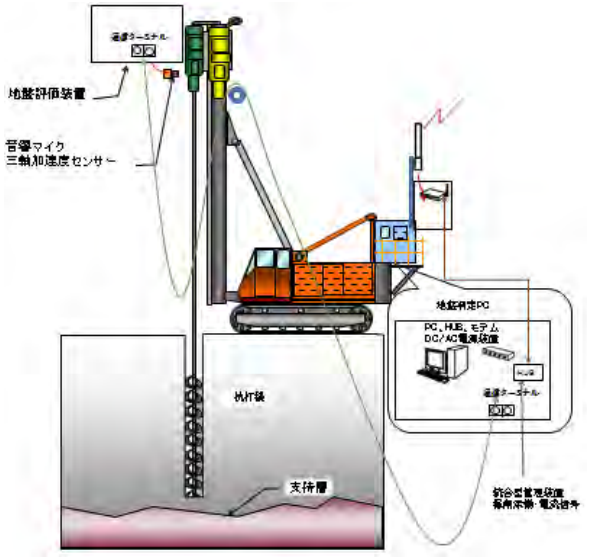


図-3　地盤評価装置システム図

この比較のための類似性の度合いを示す統計学的指標として相関係数を用いる事にした。

ここで相関係数について少し説明する。相関係数は，あくまでも確率変数の線形関係を計測しているもので，確率変数間の因果関係を説明するものではない。例えば「相関係数が 0.2 と 0.4 であることから，後者は前者より 2 倍の相関がある」などと言う一般的な相関とは意味が異なる。あくまで類似の度合いの指標で最大値は 1 を示す。相関分析とは 2 つの 変数の間に線形関係があるかどうか，およびその強さについての分析である。それに対し回帰分析とは，変数の間にどのような関係があるか具体的な関数の形についての分析であり，近似式を作る事を目的としている。

相関係数の数値はあくまでも教師データとの類似度合いを表しているので，基盤判定値のしきい値は施工現場の状況により判断される。

相関係数は，２組の数値からなるデータ列があたえられたとき

$$(x \quad y) = \{(x_i \quad y_i)\}(i = 1,2,3...n) \quad (1)$$

相関係数は以下のように求める。

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

また削孔する地層は均一でないので瞬間的に類似度が高くなることは想像に難しくない。

そこで瞬時の相関結果の移動平均処理を行いある程度平滑化して表示を行う。

教師データは比較する対象波形の種類だけ用意する必要がある。

地盤評価装置を用いて地盤判定を行う場合の具体的な手順を以下に示す。

(1). 施工箇所または近傍で調査ボーリング実施し，地質データを事前に把握しておく。
(2). 調査孔直上および近傍で試験削孔して，掘削波形データの収集と波形解析を行い，教師データを作成する。
(3). 教師データを地盤評価装置に登録設定する。
(4). 運用は，掘削波形データをリアルタイムに波形解析し教師データとの相関係数を算出し支持層の評価判定の表示を行う。

以上の施工手順で運用する。



写真-１　地盤評価装置・センサ取付け状況



写真-２　地盤評価 PC 取付け状況

杭打機は三点支持式杭打機（DH408-95M），オーガ駆動装置（SMD-120HP）の構成で，杭打施工業者は施工情報を管理するための管理装置（統合型管理装置）を備えており，削孔深度・削孔電流

情報を地盤評価装置にリアルタイムに取り込めるようにした。

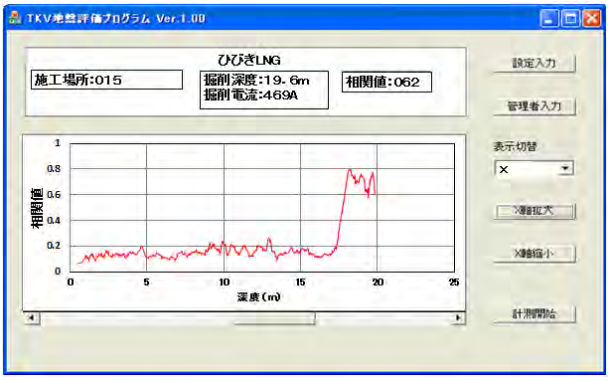


図-４　地盤評価装置の表示画面

地盤評価装置はオーガ駆動装置の上部に設置し，三軸加速度計センサおよび集音マイクはオーガ駆動装置の減速装置のフランジ上部に設置，収集した振動波形データは通信ケーブルを介し杭打機後部の地盤評価 PC に転送されリアルタイムに地盤判定結果をモニター表示している。三軸加速度計の設置座標は杭打機オペレータから見て左右方向がＸ軸（+右），前後方向がＹ軸（+前），上下方向がＺ軸（+上）に設置した。

地盤評価 PC に収集された計測データは無線 LAN を介し事務所に設置した PC に計測データのコピーを転送しデータの二重保管を行っている。

４．教師データの作成

図-１に示す調査ボーリング孔の近傍に試験削孔を（削孔径φ750mmとφ550mm）２か所施工しその時の削孔データを収集し教師データとして利用した。

試験削孔施工時（削孔径φ750mm）の各削孔深度での振動加速度（Ｘ軸方向）の波形解析結果を以下に示す。

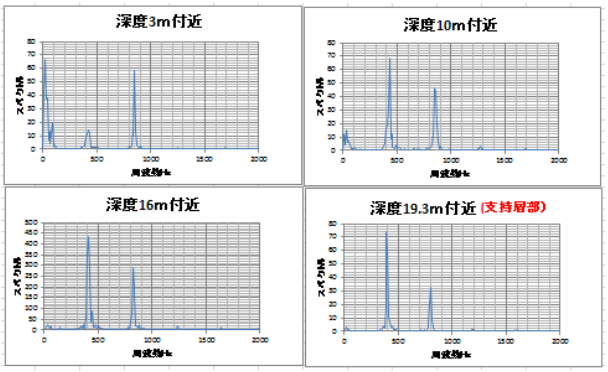


図-5 各削孔深度での解析スペクトル

教師データは試験削孔で収集した削孔深度19.34～19.5ｍの削孔データを加工し採用した。

削孔深度による解析スペクトルの違いが確認できる。支持層部の波形解析結果から，400と800Hzに支持層の特徴的なスペクトルが観測される。しかし0～100Hz附近にも微小なスペクトルを観測する事ができる。

教師データの作成にあたり本来の削孔スペクトル以外のノイズ成分を削除することにより，より一層判定精度が向上すると考えた。そのため機械掘削に伴う機械的な揺れやオーガ駆動装置と杭打機リーダとのあたりによる振動等の周波数成分の低い値は全てノイズ考えて0～100Hzをカット処理した。

各教師データを以下に示す。

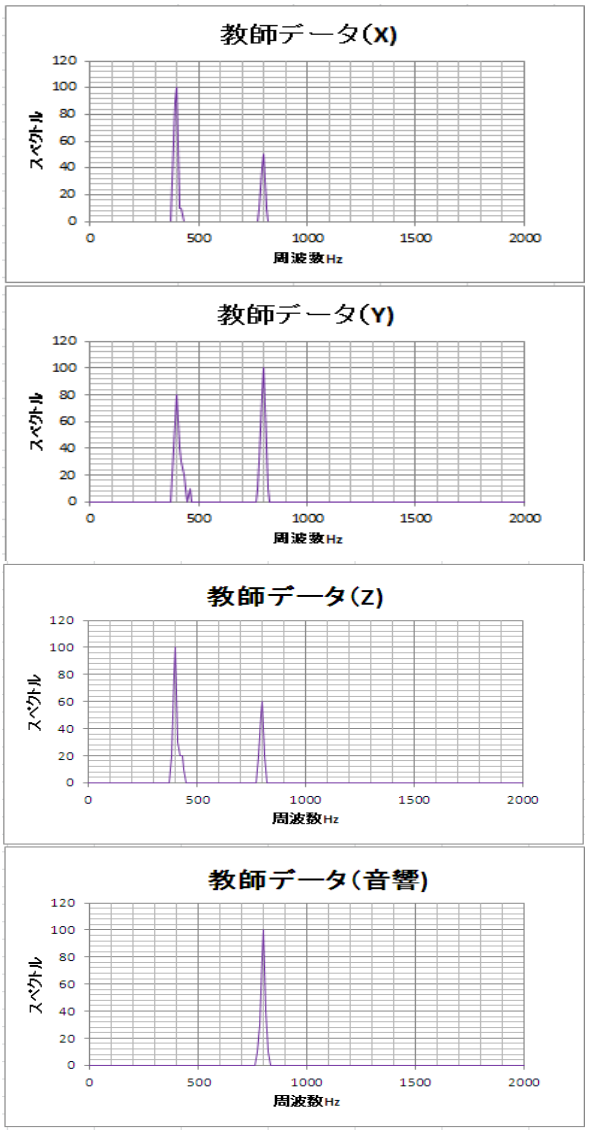


図-6　各教師データのスペクトル

三軸加速度センサの各軸方向で教師データが微妙に異なっている事が確認できる。

５．地盤評価装置の計測結果

現場の支持層到達判定管理は，試験掘の結果，掘削径φ750mmで削孔電流値450A以上１分間をもって支持層と判断している。

今回のひびきLNGでは，削孔径φ750mmとφ550mm合わせて30本の削孔データを収集する事ができた。その全てほぼ同じ傾向にあった。

図-7は削孔径φ750mmによる地盤判定結果を示す。三軸加速度センサと集音マイクおよび削孔電流値をまとめて示している。波線部分は現場の施工管理に基づき支持層と判定したラインである。

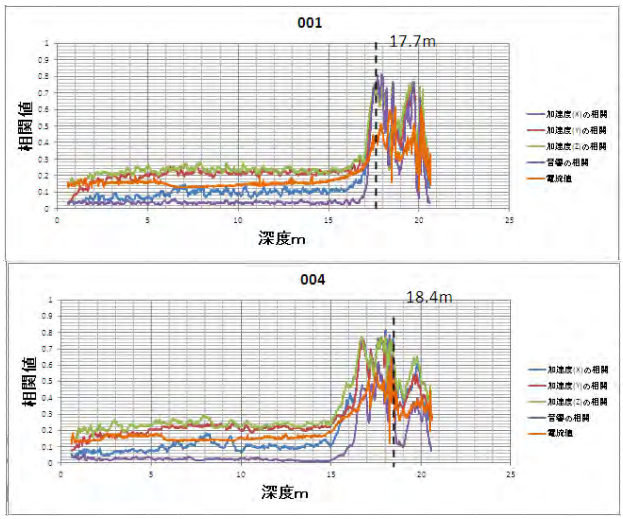


図-7　削孔径φ750の地盤判定結果の一例

支持層判定ラインと地盤評価装置の相関値には明らかに相関関係がある。判定ラインより地盤評価装置の相関値の変化の方が先にある場合もあるが，削孔電流値の変化は杭打機オペレータの吊荷荷重の加え方のなどの操作方法の違いや同じ地層での強弱により多少削孔電流値に影響を与えるものと考えられる。

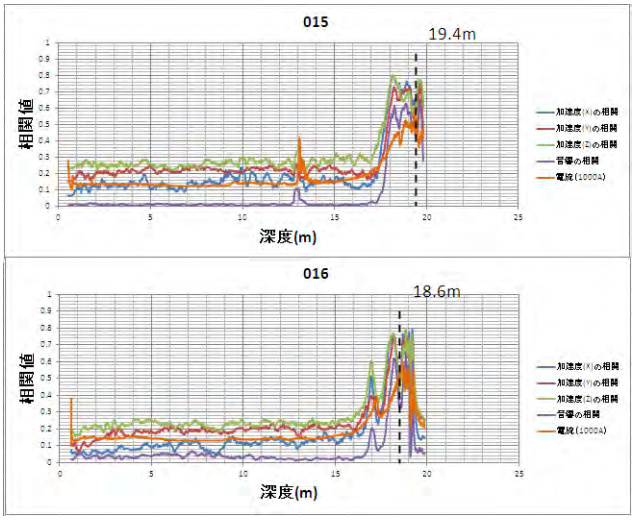


図-8　削孔径φ550の地盤判定結果の一例

同様にφ550mmによる地盤判定結果を図-8に示す。この判定に用いた教師データは先に作成したφ750mmで試験掘した同じ物を使用している。

判定結果から削孔径φ750mmの結果と同様な判定結果が得られ，削孔径φ750mmとφ550mmとの差異はないことが判明した。

今回の地盤判定の教師データは三軸の加速度と音響の4つの教師データ全てにおいて非常の良い判定結果を得る事ができた。これは判定する周波数域が比較的低い可聴域であったため音響データの判定が良かったものと考えられる。

６．おわりに

地盤評価装置は地下ダムの止水層の判定を目的に開発されたが，今回一般的な地質での支持層判定に向けての貴重なデータを収集する事ができた。この地盤判定結果からは実用化への大きな可能性が見えてきた。

地下ダムでは判定用の教師データの周波数は今回の物よりかなり高く，特性も異なっていた。今後は一般基礎工事への利用を考慮して，砂・砂礫・土丹層といった支持層の削孔データを収集解析することで信頼性の高い確実な地盤評価装置へ開発を進めたいと考える。

最後に今回試験に協力していただいた，ひびきＬＮＧ基地建設工事関係者の皆様にお礼を申し上る。

参考文献

1)　近藤高弘・伊佐健次：地下ダム施工における先行削孔での基礎部判定の考察，土木学会第66回年次学術講演会，CS9-013，平成23年

2)　近藤高弘:地下ダム施工における地盤評価装置の開発，建設施工と建設機械シンポジウム，平成24年

低コスト及び環境配慮型の低変位超高圧噴射攪拌工法

（機械攪拌と高圧噴射攪拌のハイブリッド式深層混合処理工法）

小野田ケミコ株式会社　　○ 近藤　省一
国土交通省長崎河川国道事務所　西島純一郎
中央大学理工学部　　齋藤　邦夫

１．はじめに

今日の社会基盤整備では，適切な品質確保とコストの縮減が主要な命題である。一例として，軟弱地盤上に盛土を構築する場合，その用途や機能に応じて基礎地盤の改良強化を図る一方で，改良率を抑制する工夫が出来れば施工コストを低減することが可能となる。しかし，実施工では，同時に環境に対する理解と適切な対応が重要である。

すなわち，多くの地盤改良施工では，攪拌翼を地盤内に貫入し固化材を高圧で吐出させ，強制的に原土と混合攪拌を行って改良体を造成することを原理としている。しかし，これが周辺地盤に非排水変形を生じさせる原因となり，その大きさによっては周辺構造物の機能に多大な影響を与えることも考慮しなければならない。また，こうした影響を避けるため，高圧噴射攪拌工法では，排泥をエアリフトさせる方法もあるが，排出されたスライムの処理に課題を残す。

以上のように，これからの地盤改良工事では，設計原理とこれを確実に実現させる高い施工技術に加え，周辺環境に配慮することのできる工法の選択が重要である。

本文では低変位高圧噴射攪拌工法（LDis 工法）の概略と，これらを鉄道軌道に平行する国道の盛土によるバイパス化事業に伴う地盤改良工に適用した事例について述べる。

２．ＬＤｉｓ工法の概要

LDis 工法（Low Displacement Jet Column method：エルディス）は，攪拌翼先端部にスクリュー型の特殊な排土盤装置と拡径型噴射モニター（以下 LDis ヘッドと記す）を一体型にした拡径型攪拌装置の装着を特徴としている。

図-1 は，LDis 工法の改良と排土原理を示す。LDis ヘッドは，機械攪拌翼形状の排土機能を持つ噴射攪拌装置で，標準直径φ0.6ｍの攪拌翼には整流域を設けた特殊な撹拌翼で，ジェット噴流形状がシャープで強力な切削性能を持つ超高圧ジェット噴流により地盤を切削破壊し大口径の改良体を造成することができる[1)]。

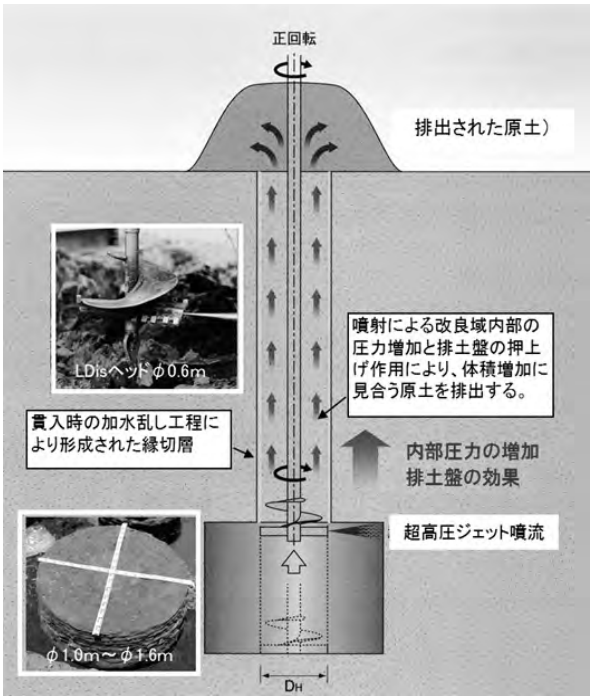


図-1　LDis 工法の改良と排土原理

LDis ヘッドの先端ノズルから水平方向に固化材スラリーを超高圧噴射し，連続的に回転引上げしながら，円柱状の改良体を造成するものである。LDis ヘッドの先端部に取り付けた噴射ノズルからは，固化材スラリーを吐出圧力 p=30～40MPa，吐出量 q=100～150ℓ/分により，地盤を切削・混合する。ロッド回転に伴い LDis ヘッドの背面あるいは，下端部に生じた間隙に負圧が生じることで，切削した土砂と固化材スラリーとの混合土が瞬時に移動する。さらに LDis ヘッドのステップ方式の引上げ改良により，同一位置において繰返し攪拌混合し，高圧噴射攪拌と機械攪拌との複合的な混合攪拌がなされる。同時に LDis ヘッドにより，地上部へ固化材スラリー噴射量に相当する土量の押し上げ作用が発生し，地盤内の固化材液量増加の体積とのバランスが保たれて，地盤変位が抑制される。

３．施工事例

本事業は，超軟弱地盤が広がる地域で交通混雑の緩和，交通環境の改善を目的とした国道のバイパス化事業である。施工箇所は，図-2 に示すように鉄道営業線の軌道に近接し，且つ N≒0 の軟弱なガタ土（Ac 層）が 20m を超えて堆積する環境条件にある。このため，地盤改良に伴う地盤変位により鉄道敷に影響を与えることが懸念された。こうした背景から，固化材供給量と排土量をバランスさせる機能に優れ，地盤変位の抑制に実績のある深層混合処理工法の一つである LDis 工法が選定された。

また，改良杭配置は ALiCC 工法を適用した。ALiCC 工法（低改良率セメントコラム工法）は盛土に発生するアーチ効果を巧みに利用し，盛土荷重をあらかじめ打設した地盤改良体に導くことで，改良体本数を従来工法に較べ大幅に減らす設計法であり，低コスト，工期短縮の課題に応えることができる。このためには設計に合致した改良体の出来形，強度を安定して造成する必要があり，高い施工技術が必須の条件となる。

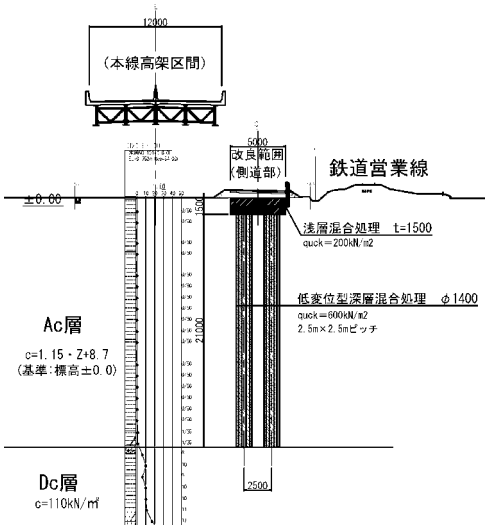


図-2　施工標準断面図

3.1 土質条件

原地盤は，前述したように 20m 超える軟弱な沖積土が堆積し，自然含水比は w_n=100%程度，液性限界が w_L=80～90%であって，地盤は乱れ易く鋭敏性に富む。また，湿潤密度は ρ_t=1.3～1.4g/cm^3，その粘着力は s_u=10～30 kN/m^2 であった。

3.2 設計仕様

表－1 は本工事における LDis 施工の設計仕様である。沈下対策として導入する ALiCC 工法に基づく設計改良仕様は着底型で，改良径 φ1.6 m，改良配置 2.5m×2.5m であり，改良率は ap=12.5%であった。さらに盛土荷重の大きさより，改良体が具備する改良設計強度は q_u=600 kN/m^2 となった。

表-1　設計仕様

施工本数	262本
改良率	ap=12.5%(ALiCC形式)
目標改良径	φ1.0m (su≦30kN/m²よりφ1.6mが造成)
改良長	L=21.0m (av.)
改良強度	qu=600kN/m^2
固化材混入量	aw=153kg/m^3

3.3 施工仕様

設計仕様を具体化する改良仕様は，現場配合試験の結果から設定し表-2 に示すとおりである。

表-2　LDis 改良仕様

吐出圧力	p=40MPa
吐出量	q=100ﾘｯﾄﾙ/分
回転数	20±2rpm
改良時間	t=4.1分/m
専用固化材	ケミコC201S
水・固化材比	W/C=1.0

3.4　施工方法

写真-1 は，LDis 本体の施工機械を示す。LDis マシンはスライドベース上に搭載され，H 鋼レール上を走行・横行し，正確に施工位置にセットできるため，機動性が高い。また，施工時には補助クレーンを使用せずに，機械移動やロッド継切り作業を行うことができるなど施工効率が高い。

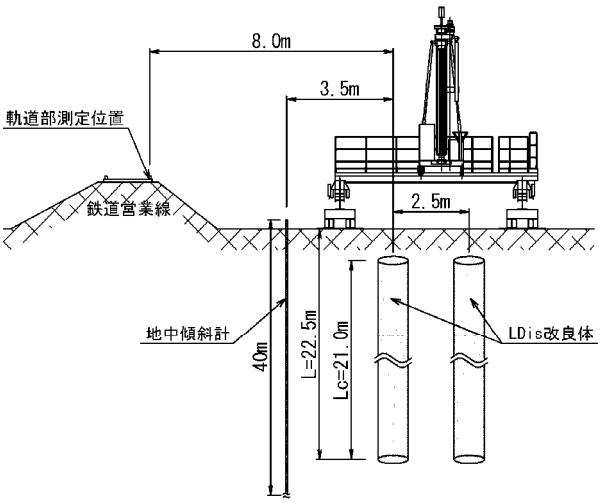


写真-1　鉄道営業線の近接位置による LDis 施工状

3.5　地盤変位の測定方法と結果

(1) 地盤変位測定位置

LDis 施工では，鉄道営業線に近接した施工であるため軌道部への影響について調査した。図-3 は変位測定位置図である。測定位置は，改良体杭芯位置から 3.5m の位置に地中傾斜計を設置し，8.0m 離れた位置に鉄道軌道が敷設されている。なお，本工事では，軌道管理者における施工時の軌道変位量管理では，警戒値が LEVEL①：±8mm，工事中止値が LEVEL②：±14mm と規定されている。軌道変位量とは，5m 毎に設置した測点間の相対変位量であり，レールの通り差異に関する変位量の規定値である。（軌道監視業務資料より）



図－3　変位測定位置計画図

(2) 地中傾斜計による測定結果

図-4 に地中傾斜計測定結果を示す。測定結果は LDis 改良部の全長において，水平変位量が観測されているが，改良施工直後は，いずれの測点においても最大 10mm 程度の水平変位量であり，地中内変位量は微少量である。

(3) 軌道変形量の測定結果

図-5 に軌道変位量の測定結果を示す。測定結果では，変位量は改良施工の進捗とは関係なく微量しか観測されず，軌道変位量の警戒値±8mm に対して水平方向も鉛直方向にも最大値で±2mm 以下であり，鉄道営業線の営業運行にも影響を与えず，施工期間中は中断することなく LDis 施工を完了した。

(4) 地盤変位の比較

図-6 は LDis 施工時の x/L と水平変位量の施工実績と，今回の施工結果を加筆して示した。測点距離 x と施工深度 L の比との水平変位量では，地中傾斜計の位置については x/L=3.5m/22.5m=0.16 で水平変位量 10mm であった。また鉄道軌道部の変位量については，x/L=8m/22.5m =0.36 で水平変位量が 2mm とほとんど水平変位は生じていない。そのため，過去の施工実績と照し合せても本工事の地盤変位が十分に抑制されたことが確認された。

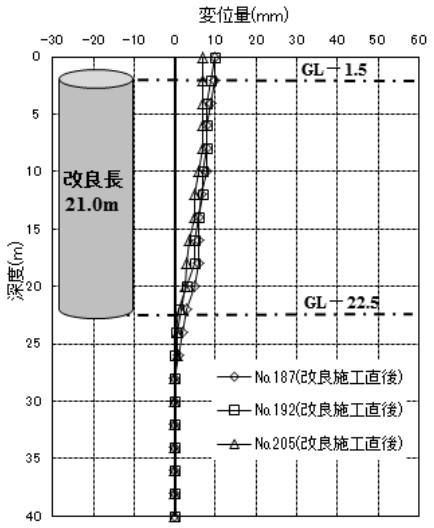


図-4　地中傾斜計測定結果

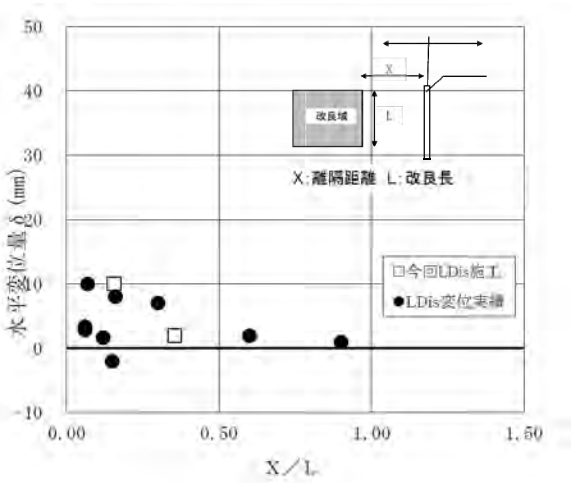
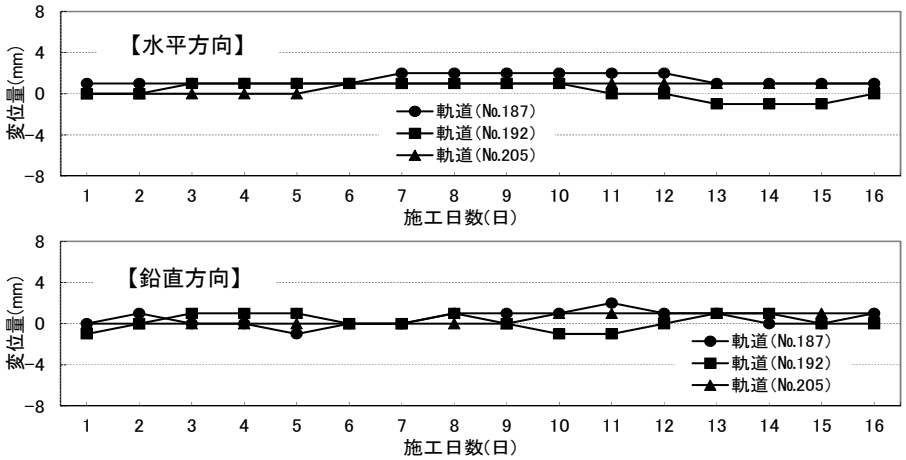


図-6　水平地盤変位量



図－5　軌道変形量測定結果

3.6　改良強度

表-3 に改良後に採取した改良コアの一軸圧縮強さの結果を示す。改良強度は上・中・下層の 3 層に区分して行った。その結果，改良強度は，quf＝4400～5300kN/m^2 であり，設計強度を十分に上回っている。また，改良強度の変動係数 v は，深度方向に増加傾向ではあるが，いずれも v≦20%が確認され，一般的な機械攪拌工法の v=20%～40%と比較しても良好な結果が得られた。また，コアの連続性についても RQD 値 90%以上であり，固結部の連続性が高いことを確認した。

表－3　改良強度結果

採取位置	一軸圧縮強度 q_{uf}(kN/㎡)			平均値 $\overline{q_{uf}}$	標準偏差 σ_{n-1}	変動係数 V
	A12L	G7L	G9R	(kN/㎡)	(kN/㎡)	(%)
上層	4,116	4,500	2,707	4,407	722	16.4
	4,219	4,959	4,501			
	4,699	5,191	4,771			
平均	4,345	4,883	3,993			
中層	5,487	6,098	5,618	5,348	882	16.5
	4,985	5,987	4,893			
	3,303	6,077	5,680			
平均	4,592	6,054	5,397			
下層	3,874	6,106	5,634	4,634	883	19.1
	4,672	3,652	5,210			
	4,552	3,558	4,449			
平均	4,366	4,439	5,098			

3.7　排出土性状および排出土率

表-4 は LDis 施工時に排出された軟泥土の土質性状である。排出された土は，LDis ヘッドの削孔貫入する際に少量加水しているものの，原土とほとんど同じ程度の *w*=84%であった。排出される土は，写真-2 のように乱された状態の原土が円筒状に押し出され，排出形態は軟泥土であり泥水状態にはならない。また，排出土量の計測の結果，1 日の平均排出土量が約 30m^3 であった。1 日当たりの LDis 施工本数は，平均 4 本／2 マシンであり，1 本当たりの固化材噴射スラリー量が約 7.5kℓ で，地盤内へ供給した固化材スラリー量は約 30kℓ となる。

表－4　LDis 施工時排出土の土質性状

湿潤密度 (ρ_t)	原土	1.50g/cm^3
	排出土	1.45g/cm^3
含水比 (w)	原土	84.0%
	排出土	84.5%

排出土率は，100%程度でほぼ固化材スラリー量に相当していたことを確認した。地盤内に混入した固化材スラリー量のほぼ全量が地表面に排出されたことになり，地盤変位の抑制に大きく寄与していることが判断できる。



写真－2　LDis 工法の排土状況

4．まとめ

鉄道営業線などの既設構造物の近傍において地盤改良を行う際には，周辺地盤に有害な変状を与える可能性がある。そのため環境保全への配慮が絶対条件となる。高圧噴射攪拌工法のうち，従来のエアを併用する多重管式工法では，エアリフト作用により多量のスライムが発生して，且つ処分費用・処分場の確保等で環境面での課題が生じる。

LDis 工法は，強度発現に必要な固化材スラリー量を必要最小限とし，かつ LDis ヘッドを介して，混入した固化材スラリー量に相当する原土を地表面に排出することで地盤変位を大幅に抑制することができる。これは，LDis ヘッドによる地山との縁切り効果と排土作用により，固化材スラリー噴射と同時に噴射量に見合う原土を地表へ容易に排出できるからである。大口径の改良体で改良時間も大幅に短縮でき，排出土量には固化材の混入がなく排出土量も少ない。また河川及び港湾部などの水際での施工も可能で水質汚染がないなどの特徴を併せ持ち，低コストで環境に配慮したハイブリッド式の深層混合処理工法である。

参考文献

1) 鈴木孝一・西尾経：機械排土式低変位高圧噴射攪拌工法－SDM工法とLDis工法の設計・施工－，軟弱地盤の改良⑩，総合土木研究所，pp.89～99，1999.11

切削状態モニタリング技術を用いた高圧噴射攪拌工法の高効率施工

三信建設工業株式会社　○島野　　嵐
山﨑　淳一

１．はじめに

高圧噴射攪拌工法は，一般に噴射ロッドの先端に取り付けられた噴射装置より硬化材とエアを水平方向に噴射することにより地盤を切削して土と硬化材を混合攪拌する地盤改良工法である。

従来は立坑築造に伴う底盤改良やシールドの発進到達防護などの都市土木における仮設工事に多く採用されてきたが，東日本大震災による被害を受け，首都直下地震や東海・東南海・南海地震等の切迫性が高く推定される被害が甚大であると指摘されている巨大地震に対する既存建物の耐震化・免震化を目的とした本設利用のニーズが高まっている。

一方，高圧噴射攪拌工法は工法の特性上，切削能力は地盤強度等に受ける影響が大きいため，設計通りの改良径を造成することが難しい。特に，土の構成が一様でない腐植土･砂礫土については，造成径のバラツキが大きくなる。また，実際の造成径を施工中に確認することは難しく，事前の試験施工等により造成径の確認をしているが，これにより施工効率が非常に悪くなっている。

このような背景から，著者らは，予め地盤中に設置した複数の計測管からジェットによる切削音を採取して分析する,「地盤切削状態モニタリング技術」の開発を行い，その結果，改良体の出来形をリアルタイムに「見える化」できるシステムの実用化をし，高圧噴射攪拌工法の高効率施工を可能とした。

本稿では，開発した地盤切削状態モニタリングの原理と計測システムを紹介し，実施工における分析結果について報告する。

２．高圧噴射攪拌工法の概要

高圧噴射攪拌工法は，1960 年代にわが国で開発されて以来発展をつづけ，地盤改良工法の一翼を担っている。高圧噴射攪拌工法は図-1 に示すように，噴射ロッドを回転させ一定時間ごとに数 cm ずつ段階的に引き上げることにより直径 1～5m 程度の円柱状の改良体を造成するものである。地盤の切削は大きく分けて，超高圧硬化材と空気により行う二重管方式と超高圧水と空気により行う三重管方式がある。

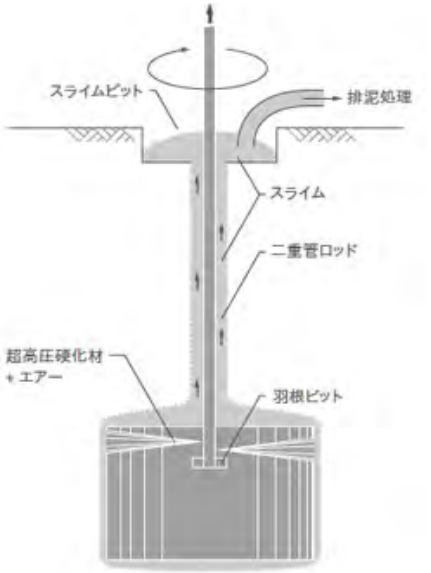


図-1　高圧噴射工法概念図 [1)]

３．モニタリング技術の開発背景

高圧噴射攪拌工法は，一般的に改良体の出来形を目視で確認できないことから，通常は施工後のボーリング調査により造成径および改良状態の確認を行っている。稀ではあるが造成径不足により止水効果が得ることができなかったり，造成径が過剰になり強度不足が発覚した場合などには対応が非常に困難であった。

施工中に造成径を確認する方法として，ジェットによる切削音をマイクにてテープレコーダに録音し，ジェットの到達を確認するといった手法は以前からあったが，これらは音の大小での主観的な判断であり，定量的なデータの採取・解析がなされていなかった。また，音の到達確認は１点での評価であり，深度方向に対して連続的な確認をすることができなかった。

これより，音の大きさを数値化することができれば，造成径の出来形を高精度に計測ができ，な

おかつ深度方向に対して連続的な確認ができ，品質管理をより効率的に実施することが可能となると判断しシステムの開発を行った。

４．モニタリング原理および計測システムの概要

計測システムの概要図を図-2 に示す。本システムは，地盤中の改良範囲に設置した建込み管，建込み管内に挿入してジェットの切削音を採取する集音器(写真-1)，ジェットの噴射ロッドの上昇に連動して集音器を上昇させる自動巻上げ装置(写真-2)，複数の集音器により採取された切削音データや施工深度を計測する音響管理装置(写真-3)からなる。

まず施工に先立ち，改良杭の造成範囲の複数位置に建込み管をボーリングにより設置する。建込み管の設置位置は，改良杭中心からの離れを変化させた 2～4 パターンとする。計測時には，それぞれの建込み管内に挿入した集音器により建込み管に当たるジェット流を音の大きさとしてモニタリングし，これの経時変化を記録する。集音器は噴射ロッドの引き上げに連動して自動的に巻き上げられる。この計測により得られたデータを分析し，地盤切削状態として評価するものである。

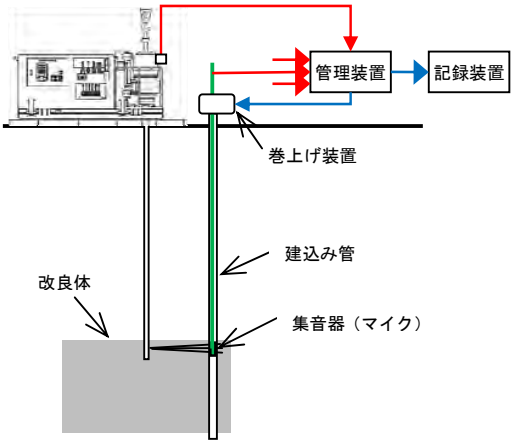


図-2　計測システム概要図 [2)]

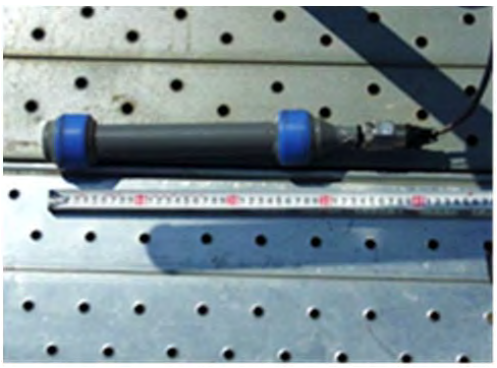


写真-1　集音器（マイク）



写真-2　自動巻き上げ装置



写真-3　音響管理装置



写真-4　計測状況

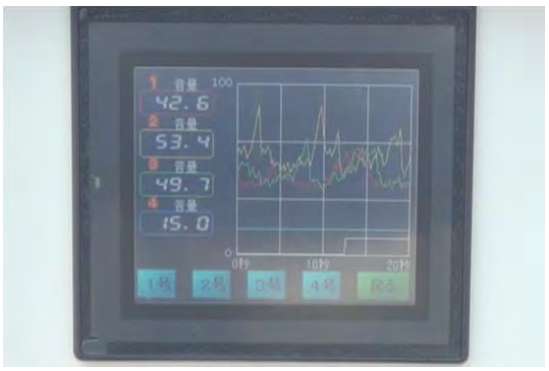


写真-5　表示例

５．切削状態の分析方法

切削状態の分析は，集音器により採取されたジェット流音量の経時変化により行う。建込み管にジェット流が到達している場合，一定間隔で山型のグラフ線形が確認でき(図-3 参照)，噴射エネルギーは山の大きさに比例して噴射ロッドに近い建込み管ほど明確になる。既往の報告[2]では，このジェット流音量の経時変化データと改良体の出来形の関連性を考察し音レベルの振れ幅（最大値－最小値）が 200 を超えた場合に改良体の出来形が建込み管の外側まで達していることが確認されている。(図-4,写真-4 参照)

以下に本システムを用いて切削状態を確認した実施例について報告する。



図-3　ジェット到達音経時変化(計測例)

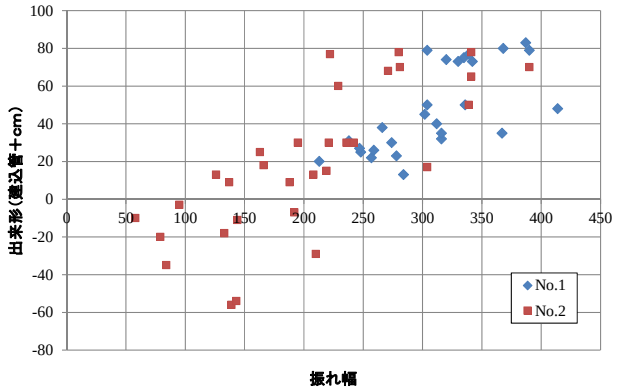


図-4　振れ幅と改良体出来形の関係[2]



写真-4　出来形確認状況[2]

６．実施例

実施例として，腐植土層における計測・分析結果について紹介する。[3]

本現場は N 値が 0～1 で含水比が 600%を超える超軟弱地盤に敷設されるボックスカルバートの支持力増強として高圧噴射攪拌工法が計画されており，対象土が腐植土であることからジェットの到達距離が伸び，設計径以上の改良体ができてしまい設計強度が不足する恐れがあった。施工箇所近傍の土質柱状図を図-5 に示す。

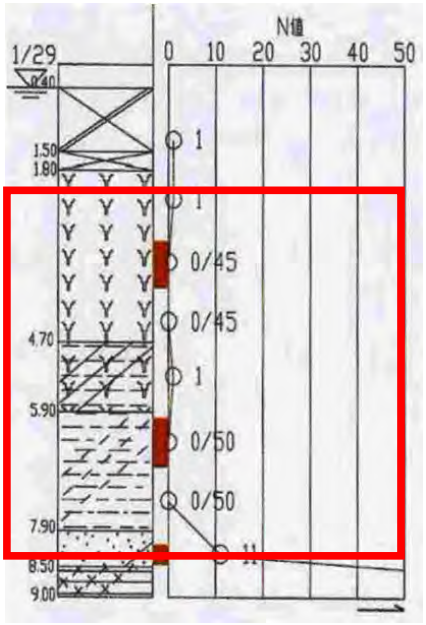


図-5　土質柱状図

施工は二重管式高圧噴射攪拌工法(超高圧硬化材液＋空気での切削)により行い，計測はφ2.0m の設計径に対して設計+0.0m,+0.25m,+0.5m,+1.0m (改良想定径としてφ2.0m,φ2.5m,φ3.0m,φ4.0m) の 4 箇所で行った。計測管の設置平面図を図-6 に示す。

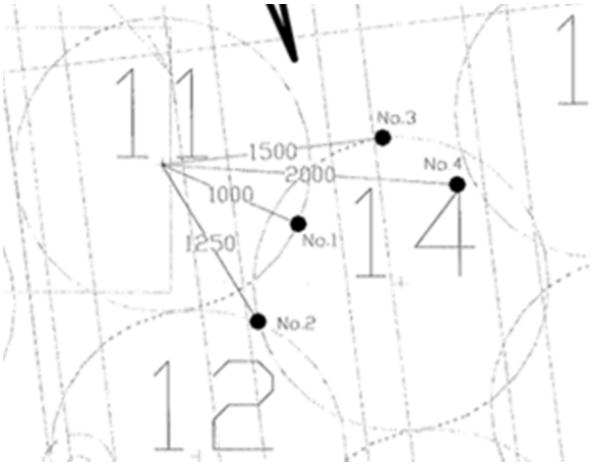


図-6　計測管設置平面図

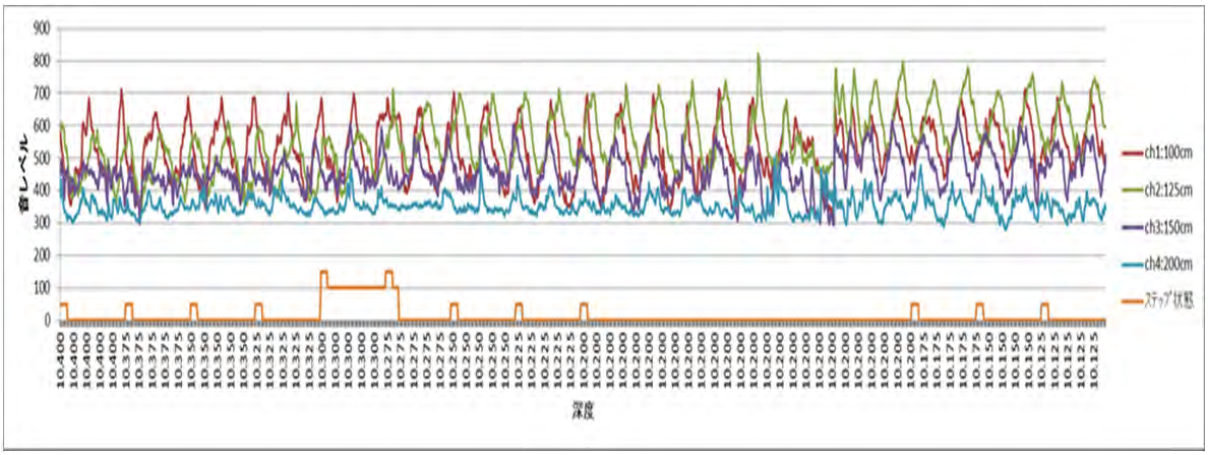


図-7　ジェット到達音経時変化(標準仕様)[3)]

計測で得られたジェット流音量の経時変化について図-7 に示す。杭芯から 2.0m 離れの位置の音レベルの振れ幅は，他の 3 孔に比較すると低い値であるので切削はされておらず，逆に杭芯から 1.0～1.5m に位置の音レベルは所定の振れ幅を確保しており十分に切削がされていることが分かった。これより杭芯から概ね 1.5m～2.0m の範囲を切削しているものと判断出来る。

この結果，当該地層条件において標準施工仕様では計画造成径φ2.0m よりも大きな径(造成径としてはφ3.0～4.0m)になっていると推測された。

これより施工仕様(ロッド回転数・ロッド引き上げ速度)を変え，引き続き切削状態を確認し過剰に切削せずに計画改良径を確保する施工仕様を確立させ施工に臨んだ。

なお，事後調査として行った改良体の掘り出しおよび全長コアボーリングによって，造成径・改良強度が設計値を満たすことを確認した。改良体掘り出しによる出来形確認状況を写真-5 に示す。

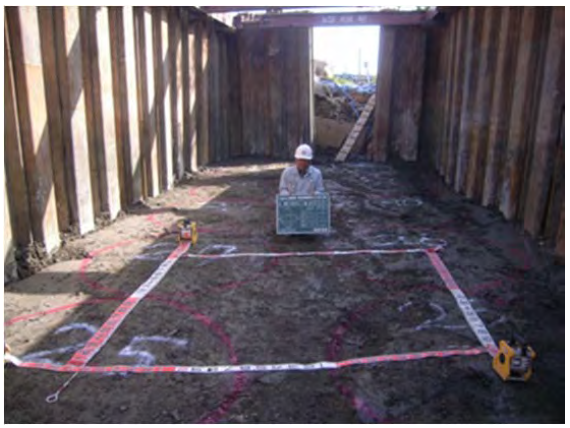


写真-5　出来形確認 [3)]

7．まとめ

本システムの使用により施工中に切削状態を可視化することが出来，即時に地盤切削状態の把握や造成径の想定をすることが可能となった。

また，モニタリングの結果を踏まえて，標準施工仕様(ロッド回転数, ロッド引上げ速度等)を変えることによって，造成径をコントロールすることもできた。

これらにより，従来は困難であった施工中の造成径の出来形を「見える化」することができるので，試験施工やボーリング調査による造成径確認の必要が無く，高効率な施工が可能となった。

今後は，このシステムによる多くの計測データを採取・蓄積し，分析手法を確立するとともに出来形推定の精度を高める研究開発を続ける所存である。

参考文献

1) V-JET 工法　技術積算資料,V-JET 協会,2012.09
2) 森脇ら，高圧噴射攪拌工法における地盤切削状態モニタリング技術の開発，第 46 回地盤工学研究発表会，2011.7.
3) 島野ら,高圧噴射攪拌工法における地盤切削状態モニタリング技術，第 9 回地盤工学会関東支部発表会 2012.10

カメラ式鉛直器を利用した逆打ち支柱精度管理技術の高度化

株式会社大林組　技術研究所　○ 池田　雄一
株式会社大林組　東京本店　　平野　裕二
株式会社大林組　東京本店　　深谷　茂樹

１．はじめに

逆打ち支柱は、地下鉄骨柱（上部）と場所打ちコンクリート杭の芯材（下部）を結合したような構造であり、長さが 40m近くなる場合もある。逆打ち支柱が本体鉄骨である場合、建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事の精度管理が適用される場合がある。その際の支柱の倒れの管理許容差はh/1000､限界許容差はh/700である(h:支柱長さ)。地下約 10m付近に設置した従来の傾斜計による計測のみで、この許容差を満足するのは難しい。

そこで、著者らはカメラ式の鉛直器に傾斜計を組合せたカメラユニットを開発した。カメラユニットは、設置した場所が揺れても備え付けの傾斜計の値からカメラ軸を常に鉛直下方に補正できる鉛直器である。そのカメラユニットを利用した逆打ち支柱建入れ自動計測システムを開発し、性能確認実験を行った。さらに、超高層複合施設の逆打ち支柱建込み工事に適用した。本報では、それらの内容および得られた知見について報告する。

２．従来の計測手法

2.1　逆打ち支柱建込み工事の概要

逆打ち支柱建込み工事の概要を図-1 に示す。同図は先入れ工法を説明したものである。施工手順を以下に示す（施工手順の○数字は同図に対応）。

①ケーシング建込み、掘削
②ケーシングを跨いで架台を設置
③杭の鉄筋カゴ建込み
④逆打ち支柱建込み
⑤支柱を架台に固定、ジャッキで建入れ調整
⑥トレミー管から杭コンクリート打設
⑦ヤットコ取外し、埋戻し、ケーシング撤去

逆打ち支柱の倒れの計測には、通常、傾斜計や水管を利用する。傾斜計を利用する場合、④の段階で傾斜計を取付ける。支柱を通り芯上に再度、吊り込み、支柱が垂直になったところで傾斜計をリセットし、ゼロ点を設定する。その傾斜計の値を確認しながら、⑤の段階で支柱下部に設置したジャッキにて支柱の建入れ調整を行う。⑥の段階で杭コンクリート打設中も傾斜計の値を確認し続けて、可能な限り支柱の建入れを調整する。

2.2　逆打ち支柱の建入れ精度管理の厳格化

地下 4～5 階の大深度地下空間を持つ工事では、逆打ち支柱は 40mを超す長さとなるケースが多い。近年、増々長大化する逆打ち支柱の建入れ精度管理を厳格化するため、ケーシングをより深いレベルまでセットすることにした。これにより、建入れ調整用のジャッキがより深いレベルで反力を取

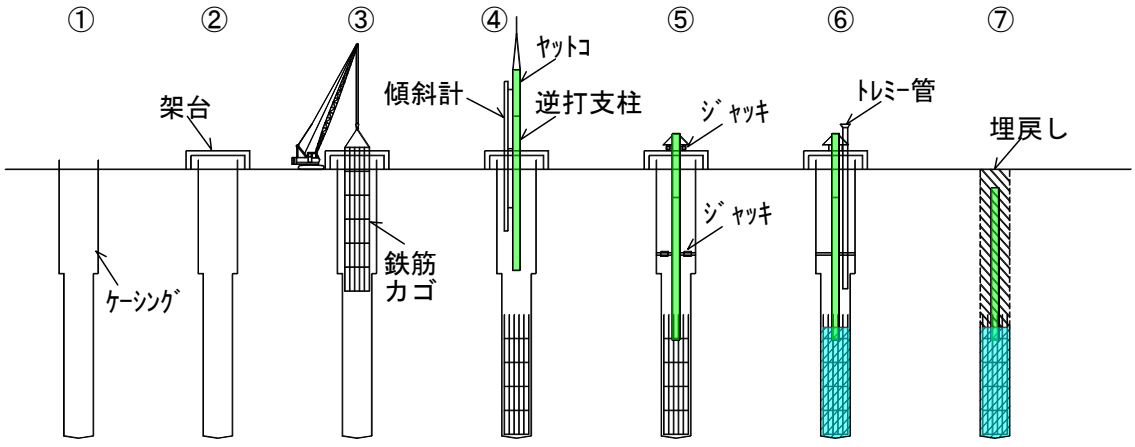


図-1　逆打ち支柱の建込み（先入れ工法）の概要

ることが可能になった。また、杭コンクリート打設時の側圧によって支柱の建入れ精度が悪化するのを防ぐため、杭根入れ部のクロスH部材のウェブに構造性能に影響のない範囲で孔を明け、コンクリートの流動性を良くする対策を講じた。

2.3　従来の支柱の建入れ計測の課題

従来計測で利用する傾斜計を図-2 に示す。支柱に仮設の鋼管を取付け、その中に挿入して計測する。⑦の段階で埋戻し前に傾斜計を取外して次の支柱の建込みに転用するため、取外しが容易な支柱上部に取付けられることが多い。地下空間では、最終的にＣＦＴ構造やＳＲＣ構造となることがほとんどのため、鉄骨のみでは支柱の剛性は高くない。また、建込んだ支柱は、製作誤差や地組み誤差などが累積して許容差内の曲がりを生じている。傾斜計は取付けた部分の倒れを支柱先端まで延長した値を出力するため、支柱が剛体のように直線的に倒れた場合は信頼性の高い計測値を得る。しかし、支柱が曲がりを生じていると、支柱が長いほど計測値は現実とは異なる値となってしまう。

支柱が曲がりを生じていても信頼性の高い計測値を出力でき、より深いレベルで建入れ計測が可能な手法の確立が望まれた。そこで、図-3 に示す鉛直視準器（計測精度：1/40000）を利用した建入れ計測手法を考案した。⑦の段階でヤットコを取外した後に鋼管タイプの逆打ち支柱のベースプレート部に取付けたターゲットを計測できる。数現場に適用した結果、鉛直視準器によって従来より深いレベルの支柱の建入れ精度を計測することが可能になったが、以下の課題が生じた。

- 鉛直視準器を水平に設置するのに時間を要す
- 支柱内部は暗いため、ターゲットへの照射が必要となる
- 距離が遠いとターゲットを視認し難く、読み値にヒューマンエラーを生じやすい
- 計測結果は視準者の主観に依存する
- ヤットコを取外さないと計測できない

３．カメラユニットを利用した逆打ち支柱建入れ自動計測システムの開発

従来の傾斜計や鉛直視準器による建入れ計測手法に対して、逆打ち支柱の建入れを精度良く計測でき、より手軽に継続して計測できる手法の開発が望まれた。そこで、逆打ち支柱建入れ自動計測システムを開発した。

3.1　カメラユニットの開発

カメラユニットの概要を図-4 に示す。剛性の高いベースプレートに鉛直下方を撮影できるカメラとひずみゲージ式変換器タイプの傾斜計を設置した。カメラおよび傾斜計の仕様を表-1 に示す。撮影用にカメラの撮影範囲のみベースプレートに孔を明けた。鉛直下方にある反射シート状の円形ターゲットを撮影し、得られた画像を２値化する。



図-2　従来計測で利用する傾斜計

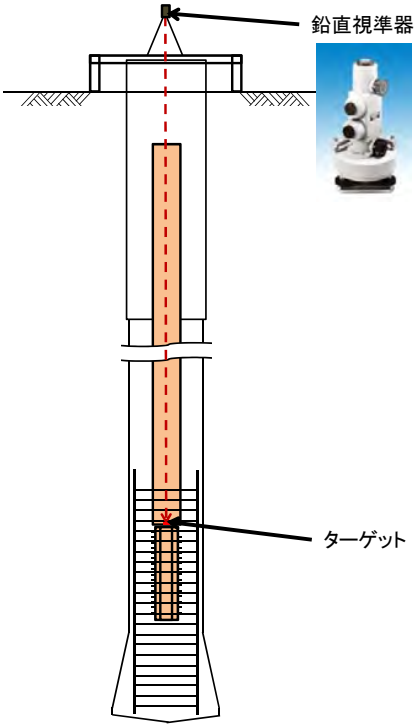


図-3　鉛直視準器による建入れ計測の概要

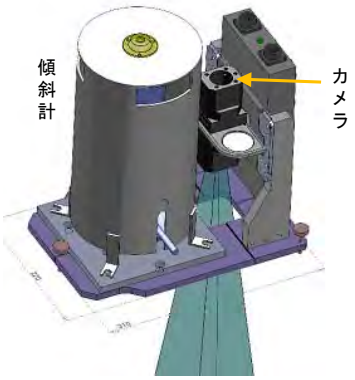


図-4　カメラユニットの概要

２値化によってターゲットが抽出でき、その重心位置の鉛直軸に対するずれ（＝誤差値）を出力する。カメラ軸が鉛直軸と一致するときの傾斜計の値を事前に把握することで、装置の傾き（傾斜計の値）に応じてカメラ軸を鉛直軸方向に補正できる。この他に無線通信ユニットを搭載して信号・映像を堅牢型タブレットＰＣに無線転送し、ケーブルの省配線化を図った。

3.2　自動計測プログラムの開発

(1) 主な機能

上記のカメラユニットを制御し、映像や計測結果を表示する自動計測システムを開発した。同システムの機能を以下に示す。また、システムの画面例を図-5 に示す。

- 計測諸条件の設定
- 画像処理の詳細設定
- 画像および傾斜計の計測値の表示
- 傾斜計の値に応じたカメラ軸の鉛直補正
- 画像の２値化、重心位置の計測
- ３種類の計測モード（1 回計測、10 回計測、連続計測）を搭載
- 設置誤差の入力

ターゲットは円形の反射シート（φ20～40mm）であり、撮影環境に応じて最適な径を選択できる。照明効果や周囲の振動環境に応じて、画像処理パラメータを詳細に設定できる。３つの計測モードを搭載し、状況に応じて選択できるようにした。通常は 1 回計測を行うが、最終値など精密さを要求される場合に 10 回計測を行う。万が一、所定の場所に設置できない場合、ずらして設置しても正しい計測値を出力できるよう、設置誤差を入力できる機能を付与した。

(2) その他の機能

カメラユニットを設置した環境（特に気温や直射日光）によって、同装置のベースプレートが伸縮したり、歪みが発生することが考えられた。また、使用中に傾斜計の取付け角度がずれる可能性も考えられた。このため、鉛直軸を微調整する機能を付加した。鉛直軸を微調整するには、同一環境下において、カメラユニットで正と反による２回計測を行う。正と反の計測値の平均が真値である。この機能により、正のみの計測で真値が得られるように鉛直軸をソフト的に微調整できる。

3.3　システムの性能確認実験

(1) 計測実験

開発したカメラユニットおよび自動計測プログラムを組合せた逆打ち支柱建入れ自動計測システムの全体に関して、以下に示す項目を確認するための計測実験を行った。

- システム全体の計測精度
- 傾斜計の線形性
- 照明の配置、個数

実験には図-6 に示す高さ約 27ｍの高層ステージを利用した。ステージ床に孔を明け、鉛直視準器を利用してステージ上と地上を結ぶ鉛直軸を設定した。ステージ上にカメラユニットと地上にターゲットを設置して、傾斜計の値が 0～±2° になるようカメラユニットの傾きを変化させて計測した。

(2) カメラユニットの性能

実験の結果、傾斜計の線形性は 0.3° 以内で高く、0.3～0.5° の範囲で若干低下した。0.5° を超えるとさらに低下することがわかった。その結果、システム全体として表-2 に示す性能が得られた。装置を 0.3° 以内に設置すれば、計測精度は 1/20000（距離 20ｍで 1mm の誤差）である。同装置の傾きが 0.3～0.5° では、計測精度は 1/10000 である。

表-1　カメラ（左）と傾斜計（右）の仕様

大きさ	165×220×115mm	測定軸数	2軸
センサー	300万画素COMS	測定レンジ	±2°
計測範囲	4～40m	非線形性	0.5%RO
計測精度	±1mm	許容温度	-20～+60℃
ターゲット	φ20～40mm反射板	重量	5kg

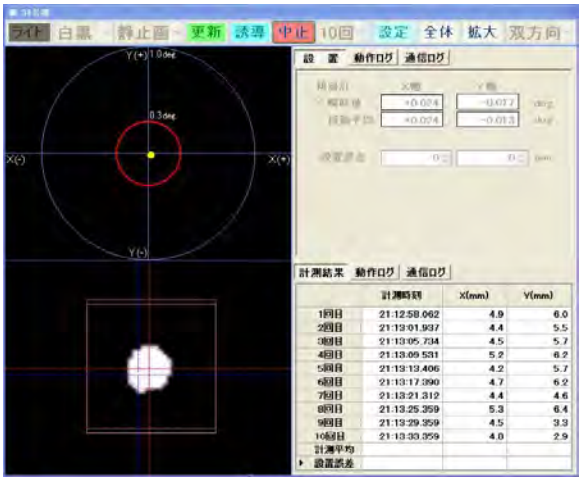


図-5　計測システム画面



図-6　計測実験

精密な計測の場合、0.3° 以内にカメラユニットを設置するのが望ましい。照明については、画像処理に悪影響を及ぼさないよう２個を対照に設置し、集中光より拡散光が適していることがわかった。

(3) 鉛直視準器との各種性能比較

鉛直視準器とカメラユニットの各種性能を比較した結果を表-3 に示す。カメラ軸の鉛直補正機能による計測精度の安定性、画像処理で算出した計測値の客観性、設置の簡便性などが鉛直器に対して優れていた。また、振動環境下でも計測でき、計測値をＰＣ画面に表示するといった鉛直視準器にはない機能も備えている。以上から、カメラユニットの方が総合的に優位であると判断できた。

４．システム適用

4.1　システム適用計画

(1) 適用工事概要

適用工事概要を表-4 に示す。最高高さが 180m の超高層複合施設新築工事である。地下 40m近くまで地下 4 階の大深度地下空間が敷地一杯に広がる建築条件のため、工期短縮効果が得られる逆打ち工法が採用された。逆打ち支柱は全部で 94 本あり、大きく２タイプに分類された。一方は、地下１階までボックス柱、それ以下はクロスH柱である。もう一方は、すべてクロスH柱である。地下 37.5 mに基礎底があり、杭根入れ部を合せると長さ 50 mを超える逆打ち支柱が多数あった。本工事の逆打ち支柱の精度管理は、建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事が適用された。すなわち、支柱の倒れの管理許容差は h/1000、限界許容差は h/700（h：支柱長さ）であり、非常に厳しい条件であった。

(2) 計測計画

上記の厳しい精度管理を要求されたため、精度管理手法を２つに分類した。高層棟の荷重を受ける 54 本の逆打ち支柱は、万が一、倒れが大きい場合、躯体補強が必要となる。設計監理との協議に時間が掛かると地下躯体工事だけでなく、地上工事がストップするリスクを抱えている。そのため、高層棟の荷重を受ける支柱は新手法による厳しい精度管理を行い、それ以外の支柱は従来手法による厳しい精度管理を行う計画とした。新手法の概要を図-7 に示す。同図のように逆打ち支柱に沿って仮設のガイド管を取付け、その最下部にターゲットをセットした。ガイド管の上方にカメラユニットを設置して、最下部のターゲットを計測する。最下部のターゲットはジャッキの設置レベル（N 値の高い孔壁部分）にできるだけ近い基礎底レベルに設定した。これにより、地下１階と２階の中間付近に取付けた傾斜計および基礎底レベルに設置したカメラユニットのターゲットの二通りの計測手法によるダブルチェックが可能になった。

表-2　カメラユニットの仕様および性能

傾斜範囲	±2.0°		
計測距離	40m以内／φ20mm反射板		
計測方法	画像処理（重心計算処理方法）		
計測精度	傾斜 0.3° 以内	傾斜 0.3～0.5°	傾斜 0.5～2.0°
	1/20000(10″)	1/10000(20″)	1/2000(103″)
本体寸法	W340mm×D360mm×H350mm		
本体質量	17kg		
電源	AC100V		
使用温度	0～50℃		

表-3　各種性能比較

	鉛直視準器	カメラユニット
運用時の計測精度	△	○
計測値の客観性	△	○
設置の簡便性	△	○
耐振動環境性	×	○
計測値の共有	×	○

表-4　適用工事概要

建物用途	事務所他
建物規模	地下4階、地上35階、塔屋2階
敷地面積	約　7,000m^2
建築面積	約　4,500m^2
延床面積	約134,000m^2
構　　造	Ｓ造他
最高高さ	SGL+180　m
基礎底深さ	SGL－ 37.5m

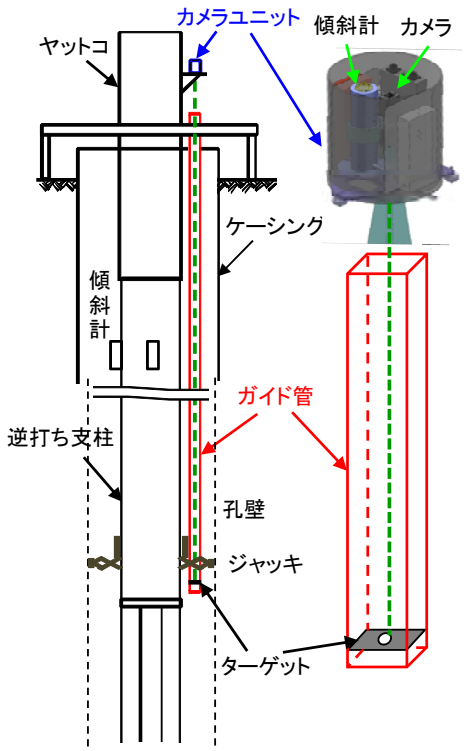


図-7　カメラユニットによる建入れ計測

逆打ち支柱の建入れを調整するジャッキは支柱の東西南北の四面に設置した。また、支柱によって異なるが、杭コンクリート打設用のトレミー管は北東・南西の対角または北西・南東の対角に２本配置した。したがって、ガイド管はトレミー管の配置されない対角に設置できる。ガイド管は真っ直ぐ取付ける必要があるため、通しダイヤフラムなどとの干渉を避けて、支柱から跳ね出して取付けた。ガイド管は□-125×125 の鋼管とし、支柱とは約 3mピッチで溶接にて固定した。逆打ち支柱は柱頭が作業地盤から出ないように計画されることが多いため、通常、柱頭レベルは地上１階と地下１階の中間付近であることが多い。建込み時に支柱上部が作業地盤より上に出ないと建入れ調整できないため、仮設支柱であるヤットコを支柱の最上部にボルト接合にて取付ける。そのヤットコの横にカメラユニットを設置する計画とした。

4.2　システム適用

(1) ガイド管等の取付け

逆打ち支柱は非常に長いため、１本の状態では道路上を運搬できない。そのため、3～5 本程度に分割して搬入され、現場内の地組みヤードにて溶接接合する。溶接接合が終了した後、図-8 に示すように地組みヤードにてガイド管を取付けた。取付けにはアングル材を利用した。図-9 に示すように、ターゲットはガイド管の最下部にはめ込む形式とした。支柱芯からの寸法が所定の値となるようにターゲットを貼付し、溶接で固定した。なお、ガイド管内に孔壁保護用の安定液が浸入するのを防ぐため、ジョイント部の止水対策を確実に行った。また、ガイド管内に結露水が貯まることを想定して、ターゲット設置レベルを嵩上げした。

(2) 建入れ調整

支柱を２台のクレーンで建て起こした後、１台のクレーンで吊り上げ、一旦、杭孔へ支柱を挿入しながら、図-10 のように傾斜計を支柱に取付けた。再び、支柱を吊り上げ、通り芯上に垂直に吊った状態で傾斜計をリセットし、ゼロ点を設定した。ジャッキを取付け、建て込んだ後、支柱は上部を架台に固定され、荷重を架台に預ける。この状態で図-11 に示すようにカメラユニットをヤットコの横に設置する。その後、傾斜計とカメラユニットの計測値を確認しながら、図-12 に示すように東西南北面に設置したジャッキにて建入れ調整を行



図-8　ガイド管の取付け



図-10　傾斜計のセット



図-9　ガイド管最下部のターゲット



図-11　カメラユニットの設置



図-12　ジャッキによる建入れ調整



図-13　コンクリート打設中の建入れ計測

った。傾斜計とカメラユニットの計測値は異なる値を示しても変化量はほぼ同等であった。

(3) コンクリート打設中の計測

杭コンクリート打設時の側圧により、支柱の下部が押され、支柱の建入れ精度が悪化するケースがあった。カメラユニットは図-13 に示すようにコンクリート打設中も計測を継続した。振動により画像がブレない限り、計測値を出力できた。コンクリート打設中は、カメラユニットの計測値が高い応答性を示したのに対して、傾斜計はゆっくり変化する傾向が見られた。双方の値を確認しながら、建入れ調整を継続した。コンクリート打設量が多い支柱では打設後半において、ジャッキでの調整ができなくなった。それ以降も支柱の建入れ精度を保持するため、２本のトレミー管からの打設量や打設速度を微調整した。

4.3　適用結果と考察

(1) ダブルチェックによる運用手法の確立

傾斜計およびカメラユニットの計測結果から、両者は必ずしも同じ値を示さないが、コンクリート打設中に支柱が動いたときの変化量はほぼ同等であり、変化した方向も同一であった。これは、支柱が必ずしも真っ直ぐな状態で建て込まれていないことが理由である。そこで、傾斜計とカメラユニットが異なる計測値を示したときは両者の値を振り分ける方針とした。この方針に従えば、支柱全体の誤差を最小に収めることができる。支柱上部の延長線上の仮想誤差を最小にする従来の精度管理手法より優れている。

(2) 支柱のねじれに対する対応

支柱の芯からオフセットした位置にカメラユニットを設置したため、支柱がねじれると正確な計測値を示さなくなる。そこで、ねじれ量がわかっている場合、その数値を設置誤差として入力することによって、支柱のねじれをキャンセルした計測値を出力できた。

(3) 建入れ精度

逆打ち支柱の建込み工事は全数が終了した。その結果、すべての逆打ち支柱の建入れ精度は、管理許容差である h/1000 以内となった。カメラユニットによる計測作業はクリティカルパスから外れた工程で行ったため、工程遅延を招くことなく、逆打ち支柱を高精度に建込むことができた。

５．おわりに

設置場所が水平でなくても、その傾きに応じてカメラ軸を鉛直軸方向へ動的に補正し、鉛直軸に対する誤差を計測できるカメラ式の鉛直器（カメラユニット）を開発した。そのカメラユニットを逆打ち支柱の精度管理として建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事(支柱の倒れの管理許容差:h/1000、同限界許容差：h/700（h：支柱長さ)）が適用された超高層複合施設新築工事に適用した。逆打ち支柱に沿って仮設のガイド管を取付け、最下部のターゲットをガイド管の最上部に設置したカメラユニットで計測する建入れ計測手法を採用した。その結果、以下の知見を得た。

- 開発したカメラユニットの計測精度は、装置の傾斜が±0.3° 以内のとき 1/20000（距離 20ｍで誤差 1㎜）を確保できた
- カメラユニットはカメラ軸の鉛直補正機能により振動環境下でも安定して計測できるため、杭コンクリート打設中も設置したままの状態で建入れ精度の計測を継続できた
- カメラユニットの建入れ計測は、従来の傾斜計より深い場所で行ったため、計測値の応答性や信頼性が向上した
- 従来の傾斜計とカメラユニットの計測値が異なった場合、振り分ける建入れ調整を行い、すべての逆打ち支柱の建入れ精度を h/1000（h：支柱長さ）以内に収めることができた

本開発に際して、株式会社ソーキ殿にご協力頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

電磁波を利用した土の現場密度試験の適用性

－２種類の砂質土による実験結果－

（独）土木研究所　　○ 橋本　毅
（独）土木研究所　　茂木　正晴
（独）土木研究所　　藤野　健一

１．はじめに

盛土の締固めにおける品質管理は，現場密度試験によって土の乾燥密度を測定し，土の締固め試験（JIS A1210）により得られる最大乾燥密度との比（締固め度）を用いて行われるのが一般的である．主な現場密度試験法には砂置換法（JIS A 1214），水置換法（JGS 1612），コアカッター法（JGS 1613），RI 法（JGS 1614）等があるが，RI 法以外は含水比測定に約 1 日を要するため即日性に劣るという欠点がある．一方，RI 法は約 1～2 分程度で乾燥密度を得ることができるが，放射線を使用しており届け出及び管理に注意が必要であることと，機器が非常に高価であることが普及上の課題となっている．

そこで近年，電磁波を利用した新しい現場密度試験法が提案されている．この方法は RI 法と同様に非破壊試験法であり測定時間も 1 カ所当たり約 2 分程度と即日性に優れているのみならず，放射線を使用していないため安全であり，届け出が必要なく，比較的安価であるといった利点がある．

本稿では，この電磁波を利用した現場密度試験法の適用性を把握することを目的とし，コアカッター法との比較実験結果について報告する．

２．使用機器（電磁波を用いた密度試験器）



写真-1. SDG

本実験では TRANSTECH SYSTEMS 社製 Soil Density Gauge(以下 SDG）を使用した．本機器は複数周波数の電磁波を用いて地盤の静電容量を測定し，その値から地盤表面～300mm 深さまでの地盤の湿潤密度と含水比を算出するものである [1)]．散乱型 RI 密度計と同様に，対象地盤に測定孔を開けずに測定面を地盤上に接地するだけで測定を開始することができ，1 箇所を約 2 分程度で測定できる．（**写真-1**）

３．実験概要

3.1　実験土質

本実験で使用した土の物理特性を**表-1** に，粒径加積曲線を**図-1** に示す．

表-1. 土質材料の物理特性

試験項目	材料 A	材料 B
土粒子密度 ρ_s（g/cm³）	2.666	2.647
細粒分含有率 F_c（%）	14.8	4.3
最大乾燥密度 ρ_{dmax}（g/cm³）	1.625	1.571
最適含水比 w_{opt}（%）	17.8	18.2
地盤材料の工学的分類	砂質土（SF）	砂質土（SF）
実験時含水比　(%)	17.0 程度	16.0 程度

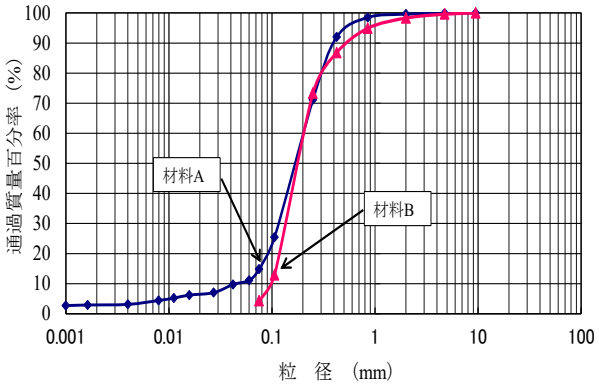


図-1. 粒径加積曲線

3.2　実験フィールド

本実験は土木研究所土工実験施設内の実験ピット(幅 5m，長さ 44.8m，深さ 5m)を使用した．まず山砂を用いてピット底面より高さ 2.8m まで十分に締固められた基礎地盤をピット内に製作し，その上に**表-1** に示す実験材料を仕上がり厚さ 300mm になるよう盛り立てて実験フィールドを製作した．(**図-2**)

3.3　含水比・湿潤密度計測

上記実験フィールド上を、**表-2** で示す締固め機械にて 16 回締固めを行い (8 往復)、0,2,4,6,8,12,16 の各締固め回数時の湿潤密度と含水比を SDG とコアカッター法にて測定した．コアカッター法による測定は JGS 1613 に準じて行い，カッターは内径 100mm，高さ 100mm のものを用いた．その際，表面から 100mm 毎に 300mm 深さまでを測定し，300mm 深さまでの平均値を算出した．(**写真-2**)

表-2. 使用締固め機械

	名称	質量 (kg)	起振力 (kN)	メーカ・型式
小型機械	プレートコンパクタ	66	10.1	三笠 MVC60
	ランマ	62	－	三笠 MT55L
	ハンドガイドローラ	600	10.8	三笠 MRH600
	前後進コンパクタ	330	45	三笠 MVH306
大型機械	タイヤローラ	11000	－	日立 CP210
	振動ローラ 11t	11050	226	酒井 SV512D
	振動ローラ 9t	9000	160	BOMAG BW141AD4

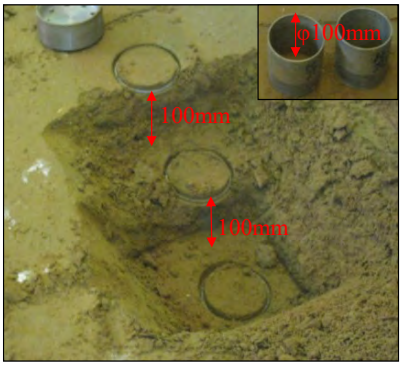


写真-2. コアカッター

各測定点は，締固め回数毎に 3 点ずつとし，SDG とコアカッター法は別個の場所にて測定を行った．また，実際の施工状況と同様に，大型機械は試験ピットの側壁（鉄筋コンクリート製）から 1.7m 離れた位置を，小型機械は側壁に沿ってそれぞれ走行し，密度測定もそれぞれ側壁から 1.7m，0.3m の位置にて行った．(**図-2**，**写真-3**，**4**)

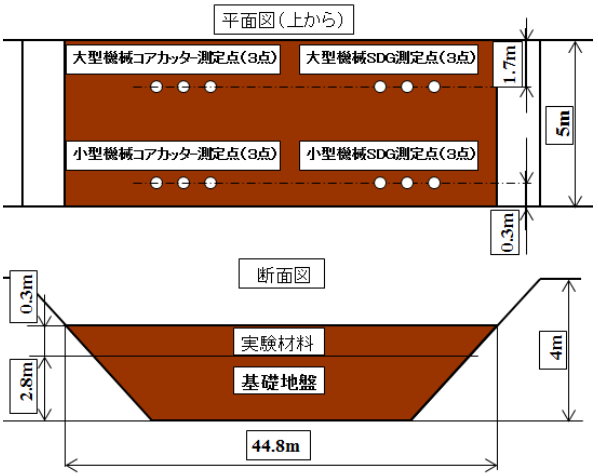


図-2. 実験フィールド



写真-3. 大型機械走行状況と密度測定状況

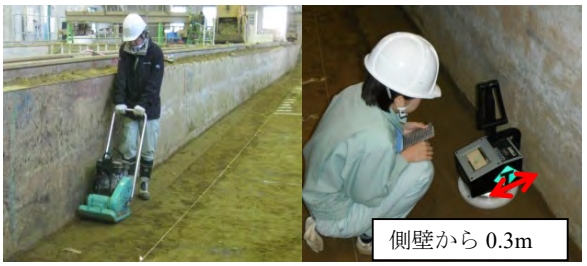


写真-4. 小型機械走行状況と密度測定状況

実施した実験パターンを、**表-3** に示す．

表-3. 実験パターン

	名称	材料 A	材料 B
小型機械	プレートコンパクタ	○	○
	ランマ	○	○
	ハンドガイドローラ	○	○
	前後進コンパクタ	○	○
大型機械	タイヤローラ	○	－
	振動ローラ 11t（振動有）	○	－
	振動ローラ 11t（振動無）	○	－
	振動ローラ 9t	○	○

４．実験結果

4.1　同一締固め回数でのばらつき

同一締固め回数にて測定した 3 点のデータの最大値と最小値の差を**図-3, 4** に示す. データ数は「測定締固め回数（0,2,4,6,8,12,16 の）7 種」×「**表-3** に示した実験パターン 13 種」の 91 個となる．各実験パターンにおいて，材料は十分に撹拌した上で盛り立てを行っているので，同一締固め回数における測定点間での材料のばらつきは少ないものと考えられる．したがって**図-3，4** に示す値は，各測定手法（SDG およびコアカッター法）のばらつきを表しているといえる．

図-3，4 によると，含水比，湿潤密度ともに同一締固め回数におけるデータのばらつきは，コアカッター法による測定結果より SDG による測定結果の方が大きいことがわかる．

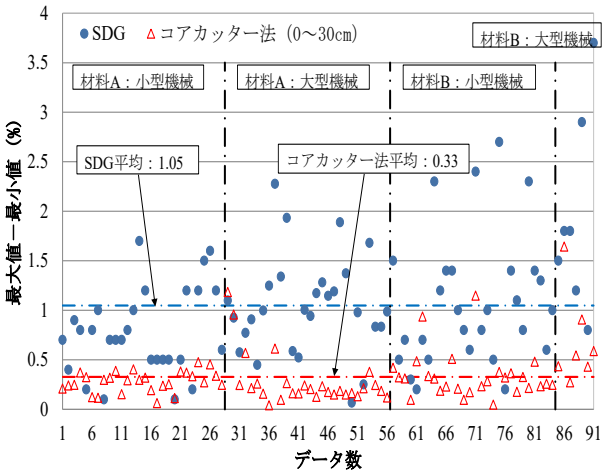


図-3. 同一条件での最大値－最小値（含水比）

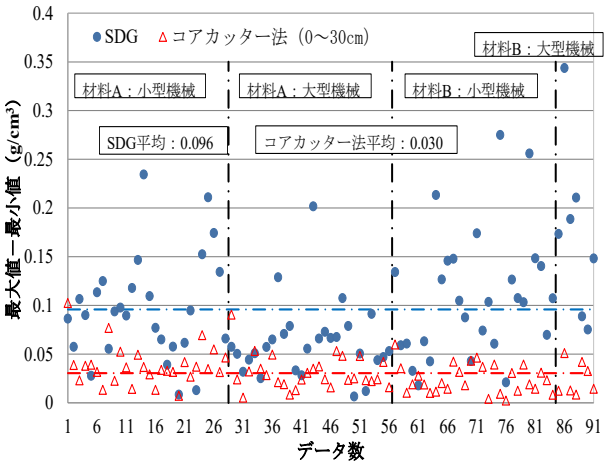


図-4. 同一条件での最大値－最小値（湿潤密度）

4.2　SDG とコアカッター法による測定値の相関

同一締固め回数にて測定した 3 点のデータを平均し，その平均値を用いてプロットしたグラフを**図-5，6** に示す．データ数は前章と同様に 91 個となる．前章で述べたように，同一締固め回数における測定点間での材料のばらつきは少ないものと考えられるため，**図-5，6** はほぼ同一の含水比と湿潤密度を持つ地盤を測定した場合の SDG とコアカッター法による測定値の相関を表しているといえる．また図中の実線は，「SDG による値＝コアカッター法による値」を示しているため，プロットした点が実線に近いほど SDG による測定値がコアカッター法による測定値と同等の値を示していることになる．

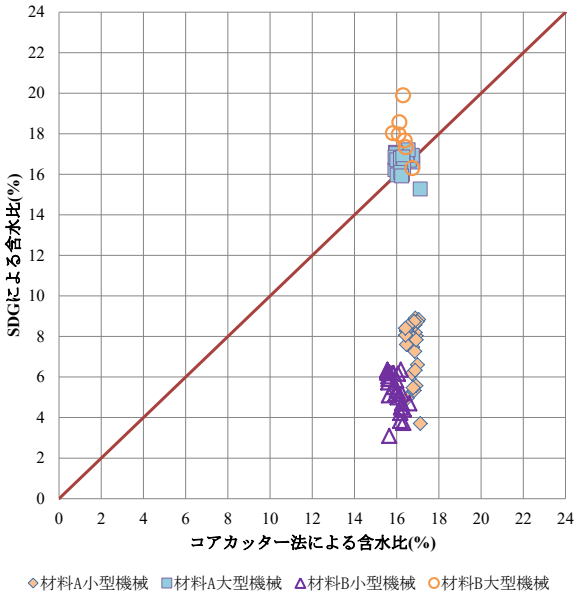


図-5. SDG－コアカッター法（含水比）

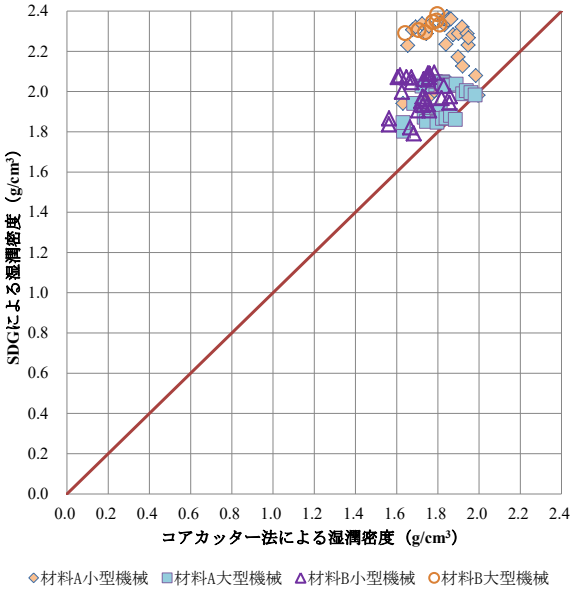


図-6. SDG－コアカッター法（湿潤密度）

図-5 によると SDG による含水比は，大型機械すなわちコンクリート壁から十分離れた場合ではコアカッター法による含水比とほぼ同等の値を示しているが，小型機械すなわちコンクリート壁近傍の場合ではコアカッター法による値に比べ著しく低い値となっている．これは， SDG の測定原理が電磁波により測定した静電容量を用いているため，測定値がコンクリート壁内の鉄筋に影響を受けていると考えられる．

また，図-6 によると SDG による湿潤密度は，コアカッター法による値に比べ，全体的にやや高い値を示している．その差違すなわちグラフ上の実線からの距離は，「材料 A 大型機械」と「材料 B 小型機械」の場合が比較的少なく，「材料 A 小型機械」と「材料 B 大型機械」は比較的大きくなっており，材料・測定環境によって一意的になっていない．したがって SDG とコアカッター法による測定値の差違は，材料・測定環境の影響である可能性は低く，その他の要因によるものと推測できる．

次に SDG の有用性を向上させるために，測定値の補正（校正）を行うことを考えた．図-5，6 を見ると，材料・測定環境によって分けた 4 グループのデータが，それぞれグループ毎にまとまりを持っているため，補正はグループ毎に行えばよいことがわかる．そこで補正は，各グループの SDG による平均値がコアカッター法による平均値と等しくなるように，SDG の値をオフセットすることで行った．補正後の値を図-7，8 に示す．

図-7，8 より，材料および測定環境毎に SDG の値に補正を行うことによって，コアカッター法による値とおおむね同等の値を得ることが可能であると考えられる．

５．まとめ

2 種類の砂質土を用いて、電磁波を利用した新しい現場密度試験法（SDG）とコアカッター法にて得られた測定値の関係を調査した結果、以下のことがわかった。

① ほぼ同一の湿潤密度と含水比をもつ砂質地盤を，SDG とコアカッター法にて複数回測定した場合，データのばらつきは，コアカッター法による測定結果より SDG による測定結果の方が大きい．
② SDG は測定場所近傍に金属構造物が存在する場合，含水比測定値に著しい影響を受けるが，湿潤密度測定値にはほとんど影響を受けない．
③ 材料および測定環境毎に SDG の値に適切な補正（校正）を行うことによって，コアカッター法による値とおおむね同等の値を得ることが可能である．

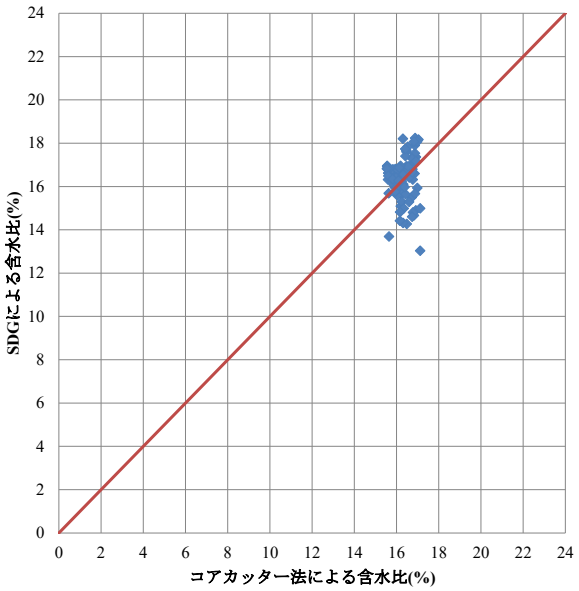


図-7. SDG－コアカッター法（含水比：補正後）

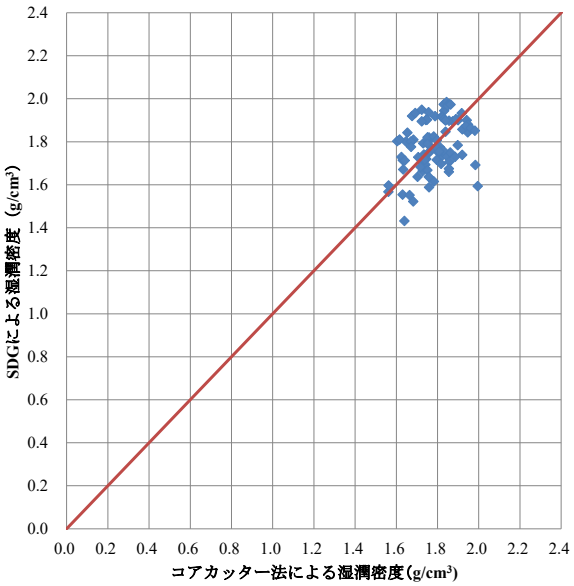


図-8. SDG－コアカッター法（湿潤密度：補正後）

今後は，砂礫系や粘性土など幅広い密度と含水比を持った材料にて実験を行い，SDG と従来手法との相関について引き続き調査を行いたい．

また，同一の条件における RI 計器との比較実験を行い，SDG と RI 計器との差異についても検討を行いたい．

参考文献

1) Pluta, S. and Hewitt, J.: Non-Destructive Impedance Spectroscopy Measurement for Soil Characteristics, Characterization, Modeling and Performance of Geomaterials, pp. 144-149, ASCE, 2009

回収型掘進機を利用した環境負荷低減対策

株式会社　奥村組　東日本支社　機械部　○ 宇留間　高広
株式会社　奥村組　東日本支社　土木部　　高畠　哲朗
株式会社　奥村組　東日本支社　土木部　　川嶋　英介

１．はじめに

本工事は都市部における国道直下の共同溝工事であり，施工箇所周辺への騒音・振動および路上規制による交通への影響などの環境負荷低減対策が必要であった。そこで，当初計画では開削工法での施工が立案されていたが，推進工法を用いた非開削工法に変更し，さらに到達立坑の省面積化と掘進機の回収作業縮減を目的とした回収型掘進機を採用した。

また，さらなる周辺環境への影響低減を図るため，推進工法施工区間において掘進機を地中到達させ，到達立坑を路下で築造する施工方法を考案したので以下に報告する。

２．課題背景

(1) 工事概要

本工事は，既設高輪共同溝と既設三田共同溝の間，約 151m を接続する工事である。

新設する共同溝約 151m のうち過年度工事において築造された路下ヤード部分は現場打ちボックスカルバート構造であり，交差点を含む未開削部分 75.1m は，路下ヤードを発進基地とした呼び径 2,600 の泥土圧推進工によって施工する。

平面図及び工事概要，到達立坑周辺状況写真を**図-1**，**表-1**，**写真-1** に示す。

(2) 施工条件

施工条件は以下のとおりである。

a. 交通量が 45,000 台/日と多い国道 1 号での工事
b. マンション，店舗等が隣接している中での施工
c. 特に到達立坑周辺は埋設物が輻輳している

表-1　工事概要

発　注　者	国土交通省関東地方整備局
工 事 場 所	東京都港区高輪１丁目地先
工 事 延 長	Ｌ＝151m
工 事 内 容	実施設計１式（設計施工一括発注方式） 推進工（φ2,600mm 泥土圧推進）L=75.1m 現場打躯体工 L=55.6m（特殊部 3 箇所） 到達立坑築造 B=6.6m L=11.0m H=12.3m 路下ヤード撤去，歩車道復旧工



写真-1　到達立坑周辺状況

(3) 考案技術

厳しい施工条件に対応するため，推進工法には回収型掘進機を採用し，到達立坑での掘進機解体搬出作業を軽減させる計画としていた。

しかし工事受注後地元へのヒアリングを実施した結果，特に到達立坑付近における騒音・振動対策や交通安全対策といったさらなる環境負荷低減対策が必要であることがわかった。そこで以下に示す点について技術的な検討を行った。

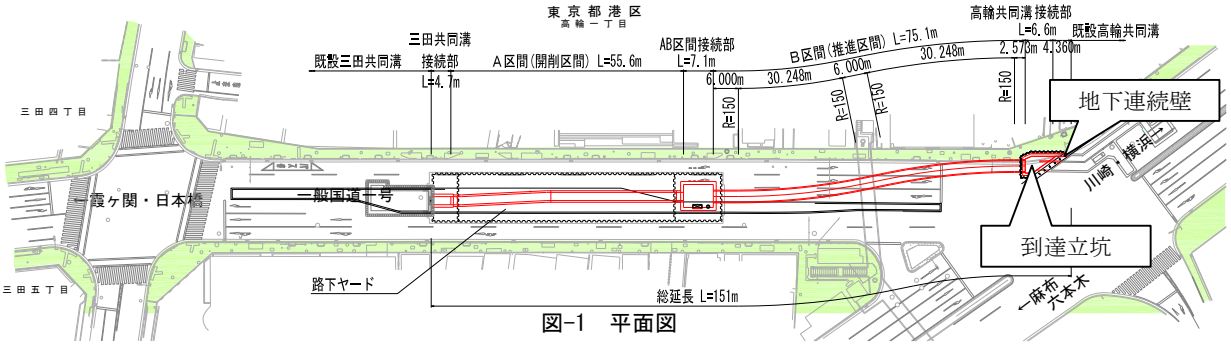


図-1　平面図

a. 騒音・振動や，一般交通への影響を考えると到達立坑築造における地上での作業量を軽減することが必要であると考えた
b. 到達立坑は回収型掘進機を用いることで省面積化を図っていたが，共同坑内に敷設するケーブル切回し断面を確保する必要がある等，省面積化による施工量軽減には限界がある
c. 回収型掘進機を使用していることから，掘進機回収後はトンネル坑内を運搬路として使用可能である

これらの条件を勘案し，回収型掘進機の特徴を生かし，推進工法施工区間において掘進機を地中到達させ到達立坑を路下で築造することで，地上での立坑築造作業を軽減することとした。

３．回収型掘進機「やどかり君」工法について

本施工方法を実施する上で前提となる回収型掘進機を用いた到達方法について，その概要を以下に記述する※1)。

(1) 概要

回収型掘進機は，従来到達後に解体・埋め捨て処分されていた推進・シールド工法用の掘進機を，簡易に組立，回収，再利用をできるようにし，またその特性から地中接合，大口径管推進工事へ優れた適用性を備えた掘進機である。今回使用した回収型掘進機を写真-2 に示す。

回収型掘進機はカッタと駆動部を一体構造とした「内殻」，スキンプレートとしての「外殻」および内殻と外殻の接続調整部材である「中殻」から構成される 3 重分割構造である。掘進機のカッタは，中殻・内殻とともに管路を通じて発進ないし到達側の両者への回収を可能とする分割構造あるいは縮径機能を備えており，各構造部材の接合は主にボルト接合として組立・解体を容易にしている。

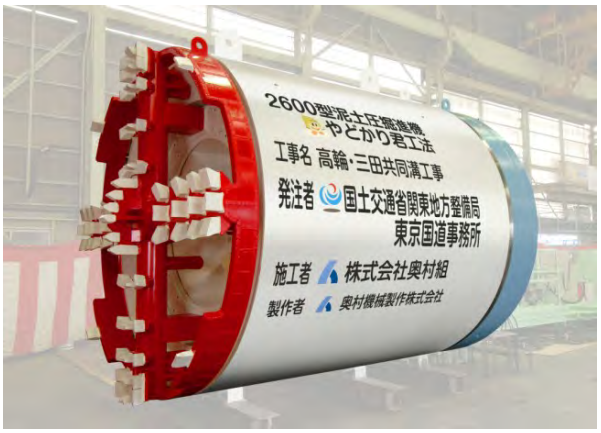


写真-2　回収型掘進機

(2) 特徴

工法の特徴を記述するとともに，回収型掘進機の基本構造と解体・回収手順例をそれぞれ**図-2**，**図-3** に示す。

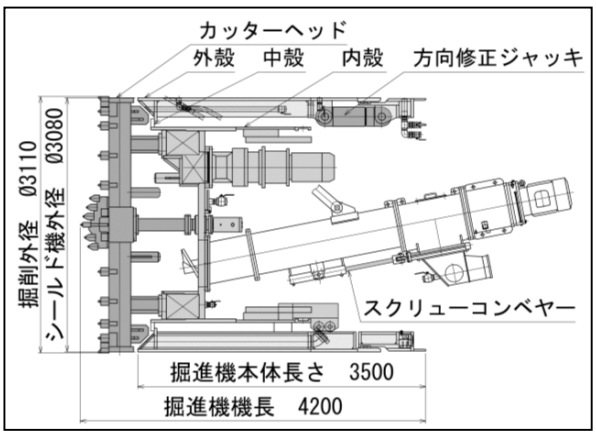
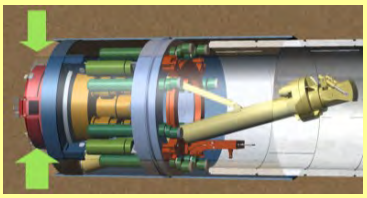
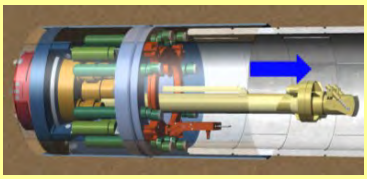


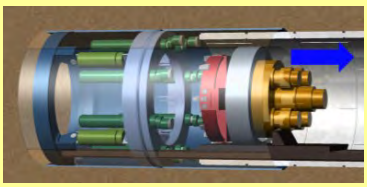
図-2　回収型掘進機基本構造



手順-1　カッター縮径



手順-2　スクリューコンベヤー撤去



手順-3　内殻引戻し

図-3　解体・回収手順例

a. 経済性
・到達立坑の省面積化が可能であり，既設構造物への直接到達も可能である
・内殻を回収して再利用することが可能である
・中殻を交換することにより一つの内殻で数種類のトンネル外径へ適用可能である
・テール部交換により「推進/シールド」工法どちらでも適用可能である

b. 安全・環境
・構造がボルト接合主体で，解体時の溶断作業を低減できる
・ボルト接合主体であるため，組立・解体が容易で安全に作業を行う事ができる

c. 輸送・運搬
・内殻部分はトレーラーに積載可能な寸法で一体運搬が可能

４．到達立坑路下築造方法

環境負荷軽減対策として本工事で立案した到達立坑路下築造方法について，施工方法および施工結果を以下に記述する。

(1) 施工フロー

施工フローを図-4 に示す。

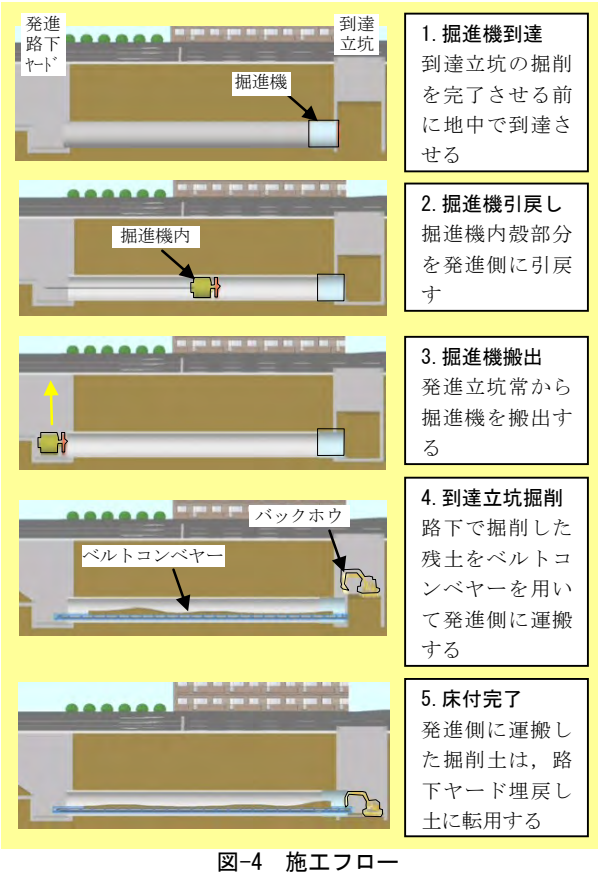


図-4　施工フロー

(2) 課題と対策

地中到達，到達立坑路下築造方法の計画立案には以下の点が施工上の課題となったが，それぞれ対策を実施することで克服した。

a. 地中到達用掘進機仕様

地中到達では掘進機が到達立坑内まで掘進した後，地中で切羽前面に出て掘進機回収のためのカッタースポークや外・内殻連結部分の切断作業が発生する。この際の地山の安定が課題となる。

そこで掘進機は，カッターヘッドに外周リングを設置し切羽外周の土留めとした。

また掘進機外周からの出水防止のため掘進機外殻を貫通させる形で裏込注入用の配管を 4 箇所設置し，さらにチャンバー内の状況を確認するための点検用 2B 配管とチャンバー内清掃用の 4B 排土管をバルクヘッドに設置した。

b. 切羽・土留欠損部防護注入

到達立坑は土留施工後に掘進機を到達させるが，今回は地中での到達となり，いわゆる鏡切作業がないため，土留め壁のトンネル部分は施工せずに欠損部とした。また a. に記述したように，掘進機の到達後に切羽での人力作業が発生するため，地山の安定が課題となった。

そこで，欠損部と切羽部に地盤改良を実施する計画とした。地盤改良は対象土層が透水係数 2.2×10^{-6}m/sec 程度の礫質土であったため，二重管ストレーナ複相式による薬液注入工法とし，溶液型注入材を採用した。注入量は約 88,000L で注入率は土質に応じて 14%～36%とした。

c. 掘削土砂の運搬方法

掘削土砂は施工した推進管路内を利用し発進側へ約 71m 搬送する。よって，内径 2600mm という狭隘な空間で，掘削作業に影響を与えない搬送設備の選定が課題となった。

掘削土の運搬は，鋼車による運搬，自走式台車による運搬，ベルトコンベヤによる運搬を検討した。鋼車の場合は発進側でクレーン設備が必要となること，自走式台車の場合は坑内の換気と運行時の後退走行による安全性が課題となる。これらを比較した結果，連続作業が可能であり，坑内に安全通路を設ける事のできるベルトコンベヤによる運搬方法を採用した。ベルトコンベヤには安全通路を確保した上で設置可能な最大幅 450mm のものを使用したことで，運搬時間が掘削作業に与える影響は軽微なものとなった。

５．施工結果

(1) 施工手順

実際に施工した手順および具体的な施工方法を以下に記述する。

①立坑地上掘削

到達立坑の築造は，タイヤクラムの掘削能力と防護注入路下施工のために必要な空間を考慮し，GL-6.7m までを路上から掘削することとした。施工日数は 9 日で騒音振動についても昼間作業としたことで特に問題とはならなかった(**写真-3**)。

②切羽・土留欠損部防護注入

欠損部と切羽部には防護注入を実施した。周辺への騒音・振動の影響を抑制するため，注入量の約半分は路下施工とした(**写真-4**)。

③掘進機地中到達

掘進機を地中で立坑内の所定の位置まで推進し到達とした。到達後は外殻を貫通させ設置した注入孔から，推進工法用裏込め材による裏込め注入を実施した（**写真-5**)。

④内殻回収

回収型掘進機の内殻を発進立坑へ引き戻すため，チャンバー内の土砂を撤去し，引戻しに支障となるカッタスポークの縮径作業をチャンバー内で行った。引き続きチャンバー内で外殻と内殻を接続する中殻を切断し，内殻を発進立坑へ引き戻した

（写真-6～10）。

⑤到達立坑路下掘削

掘進機の引き戻し完了後，到達立坑に投入した0.1m^{3}級バックホウを用いて施工した。掘削残土は推進管路に幅450mm，機長7mのベルトコンベヤを設置し，発進立坑へ搬送，発進坑口付近に仮置きした。その後，構築の進捗に合わせて路下ヤードの埋戻し土に転用した。（写真-11～14）



写真-3　立坑地上掘削



写真-4　防護注入



写真-5　地中到達



写真-6　中殻切断



写真-7　機内設備撤去



写真-8　内殻引戻し



写真-9　内殻引戻し

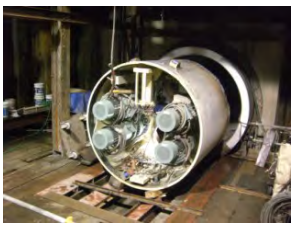


写真-10　引戻し完了



写真-11　立坑路下掘削



写真-12　管内土砂搬送



写真-13　土砂仮置き



写真-14　発進側埋戻し

（2）環境負荷低減効果

回収型掘進機の採用により実施した到達立坑の省面積化と掘進機の地中到達，到達立坑路下施工の結果，在来工法と比較して以下の効果が得られた。

a. 夜間の交通規制日数を掘進機の回収作業で2日，立坑掘削で8日の合わせて10日短縮できた。
b. 到達立坑の省面積化（26%縮小）により掘削土砂を165m^{3}削減できた。
c. 到達立坑を路下施工とした結果，到達立坑掘削土砂の約260m^{3}を転用し，また路下ヤード埋戻し土の260m^{3}を削減できた。
d. 以上の結果，運搬車両台数を116台削減し，また路上作業期間の短縮および掘進機到達後の掘削作業を全て路下作業とすることで，作業で発生する騒音・振動の抑制効果があった。
e. コストと工期の面では，在来の推進工法および立坑の築造方法と比較して，コストを18%削減し，工期で20%短縮できた。コストの削減については立坑の省面積化により土留め延長が短くなった点，路面覆工の範囲を縮小できた点，到達立坑路下築造において汎用の設備を使用したことも要因の一つである。

６．おわりに

本工事は国道直下の共同溝工事であり，周辺環境への影響低減対策が特に重要であった。

環境負荷低減対策として実施した回収型掘進機と地中到達はそれぞれ既存の技術ではあったが，課題解決のためにその2つを合わせて到達立坑路下築造という新たな施工方法を立案することで，十分な環境負荷低減効果が得られたことを確認した。

今回の施工では比較的土被りが浅いことや，発進側に掘削残土をストックすることができたことでこれらの対策実施が可能となった。今後も路上規制が困難な都市部における大断面のシールドや大深度にも適用範囲を広げていきたい。

最後に本工事を行うにあたり，ご指導，ご協力を頂きました関係機関の方々に，この場を借りて感謝致します。

参考文献

1）　木下茂樹：地中接合技術－大口径管推進工事における既設管きょの側面及び正面への地中接合回収型掘進機「やどかり君」工法の適用事例，月刊推進技術，Vol.25 No.2，pp.18～21,2011

粉塵防止型セメントミルク混合装置の開発

鹿島道路株式会社　　平藤　雅也
○ 大竹　元志
端　　孝之

１．はじめに

半たわみ性舗装とは、開粒度アスファルト混合物の空隙に、特殊セメントミルクを注入・硬化させることで、たわみ性舗装に剛性を持たせる舗装である。それによって、圧密・流動に対し優れた抵抗性を発揮し、耐摩耗性・耐熱性を有すると共に、すべりに対しても安全な路面を実現する。また、カラーセメントを使用することでカラフルな舗装もでき、交差点やバス停、駐車場、商店街などの数多くの現場で採用されている。

中小規模の現場における半たわみ性舗装では、作業現場内でセメントと水と添加剤を混合してセメントミルクを製造する。弊社では、このセメントミルクを製造する混合装置を「スリーエスマシン（Super Strong Surface machine)」と称して自社開発してきている。スリーエスマシンは、水タンク、水計量器、撹拌混合ミキサを搭載した自走式の特殊施工機械で、1980 年４月に１号機を完成させ、以来現在までに６台を製作し、現場供用してきたという実績がある。

今回、セメント袋の開封やミキサへの投入、空袋の処理作業中に発生するセメント粉塵を抑制する目的で、新たに粉塵防止システムを開発しスリーエスマシンに搭載した。これにより飛散するセメント粉塵を抑制し、周辺環境および作業環境の改善を図ることができる。本報文では、この粉塵防止システムを現場事例と併せて紹介する。

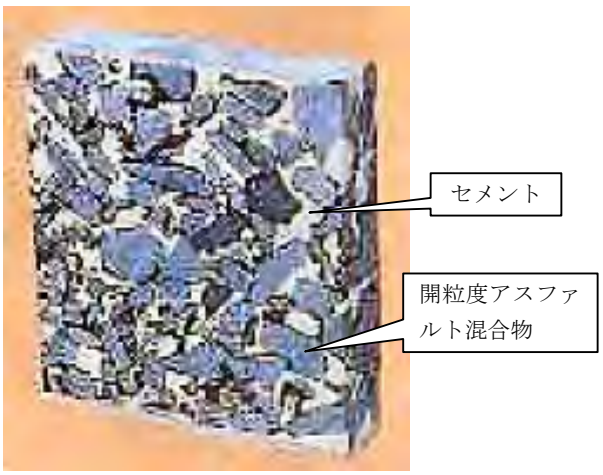
２．半たわみ性舗装

2.1　舗装概要

半たわみ性舗装の作業状況を写真―１に、舗装断面を写真―２に示す。半たわみ性舗装では通常のアスファルト舗装と同様に開粒度アスファルト混合物の舗設を行なった後、そのアスファルトの空隙にセメントミルクを注入することにより、アスファルト舗装とコンクリート舗装の両方の性質を持たせることができる。重交通道路、特にわだち掘れが発生しやすい交差点付近への適用が有効である。また、一般のアスファルト舗装と比較してみると半たわみ性舗装の方は補修サイクルが少なくなるため、イニシャルコストが高くなるがトータルコストではより経済的となる。



写真―1　従来の施工作業全景



写真―2　半たわみ性舗装断面

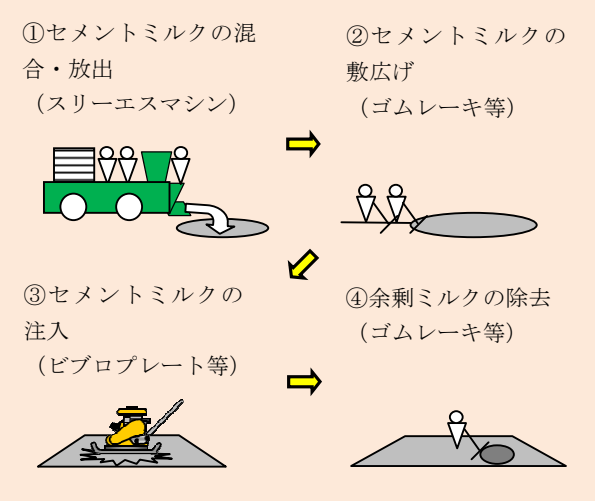
2.2　施工方法

半たわみ性舗装の施工法は、通常のアスファルト舗装と同様に母体アスファルト混合物の舗設を行った後、図－１のようなセメントミルクの混合・注入・仕上げを行う。最後に、所定の養生時間を経たのち（一般用：１～２日間、速硬用：３～６時間)、施工完了となる。

2.3　施工上の問題点

セメントミルクの混合作業では、作業現場内で袋詰の粉体セメントを開封し、撹拌混合ミキサに投入して行う。セメントは平均粒径が 10μm 程度の微粉末であるために発塵性が高く、この投入作業ではセメント粉塵が飛散して問題となっている。作業時の風向きなどによっては粉塵を撒き散らす可能性があることから、住宅街のような人口密集地等における施工では、周辺住民に対する健康被害の心配や、家屋や車などへセメントが付着することが懸念されるからである。

また、セメント粉塵は投入作業を行う作業員の作業環境への影響も懸念される。セメントは水と反応すると水酸化カルシウムを発生させ、強いアルカリ性を示す性質がある。そのため、目や鼻、皮膚に対して刺激性、溶解性があり、硬化前のセメントは付着した状態が続くと目の角膜や鼻の粘膜、皮膚に炎症や出血が起きる可能性がある（セメント皮膚炎)。対して、完全に硬化した後のセメント（モルタル・コンクリート）の場合、水酸化カルシウムは二酸化炭素と反応し中性の炭酸カルシウムとなっているので、炎症を引き起こす可能性は少ない。したがって、セメントを投入する作業員は防塵マスクとメガネを着用して作業にあたる必要がある。しかし、このような作業状況もはたから見ると良いイメージは持たれない。



図－１．半たわみ性舗装の施工構成



写真―3　従来のセメント投入作業

３．粉塵防止システム

3.1　特徴

今回、集塵機メーカの協力の下に耐セメント粉塵を考慮した粉塵防止システムを開発した。粉塵防止システムは、スリーエスマシンにエアパルス



写真―4　粉塵防止システムの構成

脱塵式集塵機・コンプレッサ・発電機・操作盤を搭載し、ミキサ投入口と空袋仮置きスペースに集塵ダクトを設け、セメント粉塵を効率的に集塵するシステムである。ミキサ投入口には集塵ダクトと風よけのためのフードを取り付け、ミキサへのセメント投入時にはフード内から粉塵が漏れ出さないようになっている。また、空いたセメント袋を畳む際にも、袋の中に残ったセメントが粉塵となって飛散する。そのため、集塵ダクト付きの空袋仮置きスペースを設け、あらかじめ袋に残ったセメントを振り落とし畳むことで粉塵の発生を抑制する。

集塵機に吸い取られたセメント粉塵は、写真―５に示すような特殊な耐セメント用フィルタに捕獲される。セメント粉塵は空気中の水分等と反応して固まり、フィルタの目詰まりの原因になることも考えられる。耐セメント用フィルタは金属製でジャバラ構造となっており、多少の目詰まりがあっても集塵能力が低下することは少ない。また、万が一にもセメントが固まりフィルタが目詰まりした際には、集塵機本体からフィルタを取り外し、フィルタ表面の付着物を落として清掃を行えば再利用できる。

また、フィルタはコンプレッサからのエアパルスにより一定間隔で叩かれ、その衝撃で捕獲したセメント粉塵を払い落とし、常にフィルタが清掃される。これにより、集塵能力が低下することがなく、集塵することが可能となる。払い落とされたセメント粉塵は集塵機下部へと溜まり、回収・廃棄の作業も容易にできる。

４．現場紹介

4.1　アーケード商店街（夜間）

広島県内の商店街全蓋アーケード内の舗装打替え工事において、粉塵防止型スリーエスマシンの効果の検証を行った際の状況を写真－６に示す。現場は夜間施工ではあったが商店街ということもあり、セメント粉塵の発生は許されない場所であった。施工中は写真―７のようにミキサ投入口付



写真―5　耐セメント用フィルタ



写真―6　アーケード商店街（夜間）



写真―7　ミキサへの投入作業



写真―8　空袋仮置きスペース

近でも、セメント粉塵の発生はほぼ見られなかった。また、写真―８のように空袋仮置きスペースでも、袋に残ったセメントを振り落としてから空袋を畳んだため、粉塵の発生を抑制することができた。約 700 ㎡の施工で 20kg のセメント袋を 300 袋以上投入したが、集塵機の集塵能力が低下することなく、施工を終えることができた。周辺地域住民からの苦情も無く、現場担当者や作業員からも「粉塵の発生が押えられ作業がやりやすい」と好評を得た。

4.2　一般道半たわみ舗装工事（昼間）

長野県内での半たわみ舗装工事の状況を写真－９に示す。現場はいくつか商店も隣接する狭い道路であり、現場条件は施工面積 4000 ㎡（延長１km）を５日間で施工した。１日の施工時間は５時間程度であり、集塵機の集塵能力が低下することもなく、終始しっかりと集塵することができた。しかし、日中の屋外施工であったこともあり、集塵してない箇所では風などで粉塵が舞うのが目立ち、集塵機による粉塵の回収効果を目視で確認できた。



写真―9　一般道半たわみ舗装工事（昼間）



写真―10　ミキサへの投入作業

4.3　ホテルエントランス外構改修工事（夜間）

東京都内でのホテルエントランス外構改修工事の状況を写真―11 に示す。現場は夜間の施工ではあるがホテルの敷地内ということもあり、セメント粉塵の発生を抑えたい場面であった。粉塵防止型スリーエスマシンを使用し、セメント粉塵を十分に抑制し施工することができた。



写真―11　ホテルエントランス外構改修工事（夜間）

５．おわりに

今回、現行のスリーエスマシンに新たに粉塵防止システムを搭載したプロトタイプを製作し、現場での実際の動作確認を行った。それによって、周辺環境や作業員への影響が改善され、期待通りの集塵効果を確認することができた。今後は集塵機の集塵効果の評価観察を経て、更に効果的な粉塵防止システムに改良していく。さらに、都市部の工事等で積極的に使用していくため、今回のような外付けのシステムではなく、粉塵防止システム内蔵型として新規製作を検討している。また、粉塵防止システムのコンパクト化やユニット化を行い、他の建設現場作業での集塵対応等に展開していく予定である。

参考文献

1)　一般社団法人日本道路建設業協会　：http://www.dohkenkyo.net/pavement/meisyo/hantawa.html（2013年８月時点）

2)　鹿島道路株式会社：スリーエス舗装技術紹介 http://www.kajimaroad.co.jp/tech_data/t001-00011.html（2013年８月時点）

建設機械へのバイオディーゼル燃料（B100）の使用と取り組み

～　中部横断自動車道　八之尻トンネル工事　～

清水建設㈱土木事業本部機械技術部　　○藤井　攻
清水建設㈱ 土木事業本部機械技術部　　前田　全規
㈱セベック　　小豆嶋　和洋

１．はじめに

バイオディーゼル燃料とは生物由来油を原材料として精製された燃料であり、軽油の代替燃料として使用される。バイオディーゼル燃料は軽油の代わりに使用することでカーボンニュートラルの考えに基づいた CO2 削減の効果が見込まれ、地球温暖化対策としても効果を期待できる。

国内のバイオディーゼル燃料は、植物油・動物油脂を原料とし、一般家庭や事業者より排出された食用廃油を精製機を用いて工場で精製し、需給者に供給している。このため、バイオディーゼル燃料の確保には原料である廃食油をどのようにして調達するかが重要になってくる。

本工事では地域におけるモデル事業として食用廃油の収集と生産、運搬までを障害者就労支援施設の NPO 法人に委託し、100%バイオディーゼル燃料を調達し建設工事現場の重機に適用した結果について報告する。(図-1)

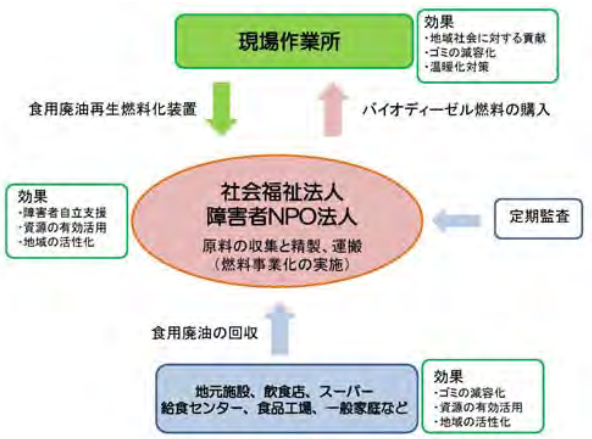


図-1　バイオディーゼル事業モデル

２．工事概要

今回対象とする工事は，新東名・新清水 JCT と中央道・双葉 JCT を結ぶ中部横断自動車道の八之尻トンネル工事である。

以下に工事概要と現場位置図（図-2）を示す。

工事名　　中部横断自動車道
　　八之尻トンネル工事
工事場所　山梨県西八代郡市川三郷黒沢
　　～山梨県南巨摩郡富士川町大椚
工期　　2009 年 12 月 15 日
　　～2015 年 1 月 17 日(1,860 日)
発注者　　中日本高速道路株式会社東京支社
施工業者　清水・岩田地崎建設共同企業体
工事内容
　トンネル工事　掘削延長：2,464m
　　掘削断面積：82m^2
　　掘削工法
　　全断面掘削・補助ベンチ付全断面掘削
　　機械掘削（ブームヘッダ RH-10J-SS）
　明り工事　　インターチェンジ造成(38 万 m^3)

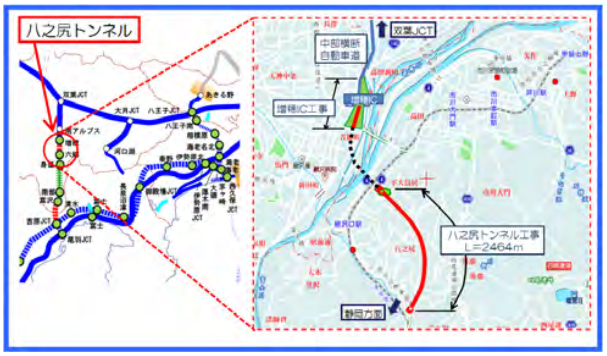


図-2　工事現場位置図

３．バイオディーゼルについて

バイオディーゼル燃料は食用廃油に化学処理を施した、メチルエステルを主成分とする液体燃料である。ディーゼルエンジンの燃料としては着火性が良好なこと、粘度が適正であることが必要な条件となる。植物油はそのままでは粘度が高いため粘度を下げる処理が必要であり、その方法がエステル交換反応である。

植物油にメタノールとアルカリ触媒を加えエステル交換反応と呼ばれる化学反応をさせ、軽油性状と同等なバイオディーゼル（メチルエステル）

を取りだす。その後、燃料の品質を高めるため洗浄・脱水工程を経てバイオディーゼル燃料となる。(図-3)

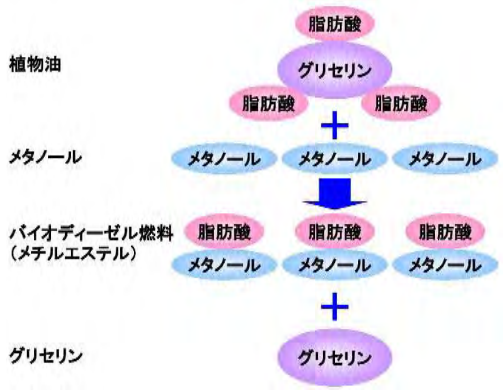


図-3　エステル交換反応図

バイオディーゼル燃料と軽油の性状を比較したものを表-1 に示す。

表-1　燃料性状比較表

項目/燃料	バイオディーゼル	軽油（文献値）
密度	0.887g/cm^3	0.835g/cm^3
引火点	176℃	95℃
動粘度	4.76mm^3/s	3.8mm^3/s
流動点	-5℃	-11.5℃
セタン価	55.3	57
発熱量	9,556kcal/kg	10,960kcal/kg
硫黄分	0.004wt%	0.05wt%以下

バイオディーゼル燃料の特徴としては次のようなものが挙げられる。

・引火点が軽油に比べ約２倍と高いので取扱い、貯蔵において安全性が高い。
・SOx の発生源となる硫黄分は顕著に低い値である。
・バイオディーゼルは成分中に酸素を含んでいるのでエンジン内での燃焼が効率よく行われ、黒煙が著しく減少する。

４．バイオディーゼル燃料の精製と納入

バイオディーゼル燃料の調達・精製・現場への納入は地元の NPO 法人（障害者就労支援施設）に委託することにした。

理由は以下の点である。

・施設は以前より古紙回収などを行っており廃油の回収も可能と考えた。
・バイオディーゼル燃料の精製作業は軽作業であり、施設は障害者の就労向け軽作業を探していた。
・精製機を工事事務所で購入し、製造したバイオディーゼル燃料から機械設備費を回収することで、施設のイニシャルコストを抑えることができると考えた。

使用した精製機の写真と仕様を写真-1、表-2 に示す。



写真-1　精製機

表 - 2　精製機仕様

型式	EOSYS100M
製造能力	100ℓ/約 6h（1 バッチ）
本体寸法(mm)	H1470×D750×W750
重量(kg)	140
供給電源	三相 200V　5.2kw
操作方法	半自動型バッチ式

精製はエステル交換反応方式、1 バッチにかかる時間は約 6 時間であり、6 工程の製造工程を経て BDF を製造する。その過程を図-4 に示す。食用廃油 100ℓから約 90ℓのバイオディーゼル燃料を精製することができた。完成したバイオディーゼル燃料は危険物保管に適した容器で保管し、定期的に納品することとした。



図-4　バイオディーゼル燃料精製過程

５．バイオディーゼル燃料の品質確保

燃料の製造管理については精製機製造メーカより NPO 法人に対し、月 1 回の定期的な指導を実施することとした。品質確保については原料となる食用廃油の品質管理が重要となり、食用廃油の前処理段階から品質の管理を行う。

具体的には確保した原料はまず固形物等を除去し5～10 ミクロンメッシュのフィルターでろ過し、その後 AV チェッカー（写真-2)を使用し廃油の酸化値を測定する。製品の安定度と反応率を上げる

為、測定結果を元に酸化値の高い原料と低い原料を混ぜ合わせ、一定の品質を確保した。その後、別のタンクに製品を移し替え約24時間保管し水分や不純物を分離させる。



写真-2　AV チェッカー

バイオディーゼル燃料の品質に関してはバイオディーゼル燃料に関する知識を有し、バイオディーゼル燃料のデータ測定ができる機関に依頼した。測定項目としてはバイオディーゼル燃料に於けるエステル含有率を分析した。

① 分析方法
欧州 BDF 規格に準じたガスマトグラフによる分析方法

$$\text{エステル含有率} = \frac{\text{エステル分ピーク面積の総和}}{\text{内部標準ピーク面積の総和}} \times \frac{\text{内部標準採取量}}{\text{BDFサンプル採取量}} \times 100$$

② 分析結果
エステル分ピーク面積の総和：1427.8
内部標準ピーク面積の総和：1450.0
BDF サンプル採取量：0.437(g)
内部標準採取量：0.435(g)

③ エステル含有率
エステル含有率(%)=98.0

④ エステル含有率欧州基準値
欧州規格値：96.5%以上

上記検査データと基準値を比較することで品質の向上を図った。
バイオディーゼル燃料の品質における責任は製造者である NPO 法人とし、品質管理の指導は精製機メーカという形態を取った。

６．バイオディーゼル燃料コスト

バイオディーゼル燃料を利用するにあたり、次のような試算を実施した。
使用条件
1 日の精製回数・・・・・1 回
稼働時間・・・・・・・・6 時間
1 日の廃食油処理量・・・100 リットル
1 日の生産量（分留 90%）・・90 リットル

上記条件でバイオディーゼル燃料のコストを軽油と同等の 120 円/ℓと試算した。内訳は以下のとおりである。(表-3)

表-3　バイオディーゼル燃料単価

バイオディーゼル燃料		120 円/ℓ
内訳	機械損料	45 円/ℓ
	添加材・光熱費	30 円/ℓ
	廃油代・人件費	45 円/ℓ

使用実績は次の通りである。

表-4　使用実績

搬入日	数量(ℓ)
平成 23 年 9 月	150
平成 23 年 10 月	500
平成 23 年 11 月	1,120
平成 23 年 12 月	640
平成 24 年 1 月	1,500
平成 24 年 2 月	1,640
平成 24 年 3 月	900
平成 24 年 4 月	1,930
平成 24 年 5 月	1,260
平成 24 年 6 月	2,150
平成 24 年 9 月	2,400
平成 24 年 11 月	2,160
平成 24 年 12 月	1,200
平成 25 年 1 月	1,000
平成 24 年 2 月	800
平成 24 年 3 月	1,800
合計	21,150

７．CO2 削減量

上記の納入実績数量に対して CO2 の削減量を試算した。CO2 排出削減量は下記の算出式を引用した。

BDF 燃料使用量×2.62＝削減量(kg)･･･①
※軽油 1ℓ当たりの CO2 発生量＝2.62(kg)

平成 23 年 9 月から平成 25 年 3 月までの BDF 納入量は 21,150ℓであった。バイオニュートラルの考えに基づき式①より CO2 削減量を算出すると、CO2 削減量は

21,150×2.62＝55,413(kg)

となり、約 55t の CO2 が削減できた。

８．BDF 燃料を使用しての問題点と対策

今回、バイオディーゼル燃料を使用した建設機械とバイオディーゼル燃料を写真-3,4 に示す。



写真-3　BDF を使用した建設機械

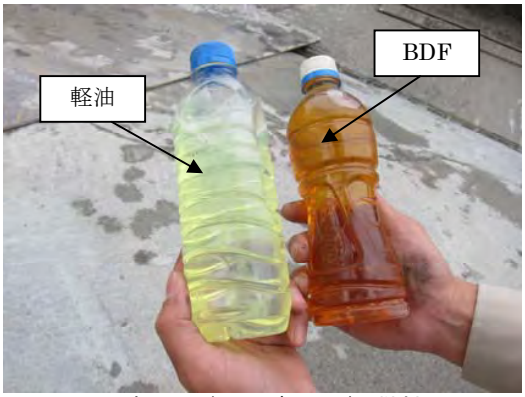


写真-4　バイオディーゼル燃料

バイオディーゼル燃料を使用するに当たり、以下の懸念事項があった。

①　エンジン出力の低下
②　油圧ホースの劣化
③　エンジントラブル
④　燃料フィルターの目詰まり

エンジン出力については他の軽油を使用してる同型機と比較しても体感できるほどの出力低下は見られなかった。

油圧ホースの劣化についても使用開始から 1 年半経過したが、急激なホース劣化はなかった。

エンジントラブルについても致命的なトラブルには至っていない。

これらはバイオディーゼル燃料の精製から運搬、使用するまで継続的な品質管理を行い、一定の品質の燃料を提供できた結果と考える。

一方、燃料フィルターの目詰まりについては低温時にバイオディーゼル燃料に不純物が析出する現象が認められた。(写真-5)

これに対しては使用前の暖気運転や精製後の上水を極力使用するようにし、燃料フィルターの交換を週に 1 回程度に増やし対応した。

また、バイオディーゼル燃料の問題点として物性の特性上、粘度が高く通常時ではマイナス 5℃で流動性を失うと考えられている。そのため冬季間の使用については流動点降下剤を添加して使用した。

流動点降下剤とは低温時における潤滑油中のろう分の結晶化を防止し、流動点を低下させ、潤滑油の適用温度範囲を広げるものである。

今回はバイオディーゼル燃料 1 リットルに対し 2cc（0.2%）の割合で添加した。



写真-5　低温度時の不純物析出状況

９．おわりに

今回、初めて地元の NPO 法人と協働してバイオディーゼル燃料の有効利用に取り組んだ。

作業所としては環境対策として二酸化炭素の排出量を削減でき、地元 NPO 法人にとっては活動の幅を広げるきっかけとなり、地域福祉にも貢献できたと考える。

100%バイオディーゼル燃料については建設機械への有用性が実証できた。当初、予想していた低温時の不純物の析出による燃料フィルターの目詰まりは何度かあったが、流動点添加材の利用などにより大きなトラブルには至らなかった。また、品質についても定期的な品質管理により規格値内の製品を生産できた。

バイオディーゼルの排ガス対策型ディーゼル機関との適合性については今回使用した機械は排出ガス対策型建設機械（2 次基準値）であり大きなトラブルはなかった。

現在は排気ガス対策強化のため、軽油の使用を前提とした建設機械のエンジン開発・改良が進んでいるが、これはバイオディーゼル燃料を使用する際に軽油との特性差がより大きな不具合のリスクになると思われる。しかし、バイオディーゼル使用を見据えたエンジン開発に取り組む建設機械メーカもみられ、早期成果が期待される。

多様な環境技術とＣＯ$_2$モニタリング装置を組合せた シールド環境対応システムの開発

株式会社フジタ　　○ 平野　高嗣
株式会社フジタ　　川上　勝彦

１．はじめに

現在, 国家レベルで地球温暖化対策が推進され, 特に温室効果ガス削減が義務化されつつある。

また改正省エネ法により製造業や流通業などが, 次々とエネルギー使用量を定量的に分析して削減を推進している。

対して建設業では，建設中のエネルギー使用量の分析と削減が，リース品を主体とした仮設機器であるため容易ではく，使用機器の消費電力は，月毎の総量でしか管理出来ないのが現状である。

また，省エネ活動もアイドリング防止や消灯など，定性的な取り組みが多く，定量的に効果を検証することが難しい。

そこで，フジタでは施工時に仮設機器のエネルギー起源による CO_2 の削減を目的として，現場全設備の電力使用情報や，重機等の内燃機関の稼動量（排出ガス量）を比較的容易に「見える化」する技術, CO_2 モニタリングシステム「FCMS（Fujita CO_2 Monitoring System）」を開発し，運用を開始している。

これは各機器の消費電力量データのサーバーへの蓄積・一元管理と，重機の燃料消費モニタリングによるエンジンからの CO_2 ガス排出状況の計測等，個々の稼働状況から，CO_2 発生量が簡単なシステム設置工事で把握出来るシステムである。

使用電力や燃料消費を解析し，非効率な機器の稼動改善や重機の省エネ運転を動機づけることで, 省エネかつ効率的な施工が可能となった。

さらに平行して CO_2 削減として，クレーンの電力回生システムや太陽光発電，風力発電，LED 照明の採用等，個々の CO_2 削減技術にも取り組み，その効果の検証をおこなった。

本論では，これらの技術をシールド工事に導入し,「フジタ高環境シールド」として，工事の省エネ化に取り組んだ導入実績を報告する。

２．FCMS の概要

本システムは，出来るだけ作業所での作業負担や導入コストを低く抑えることを主眼において開発した。そこで、システムは本社のサーバーで一元管理し，作業所にはネットワーク通信機能を有するデータ計測端末のみを設置する形式とした。

データ授受等は現地状況に応じて，数種類の通信手段を用意している。

リアルタイム状況確認や解析用の画面は，各々の PC に管理ソフトをインストールする必要が無い Web 画面で確認できるようにしている。

現状での計測対象としては，作業所での CO_2 発生量に影響が大きい電気（電力モニタリング）と内燃機関（重機モニタリング）としているが，必要に応じてガス・工事用水などのデータ計測・管理も可能である。

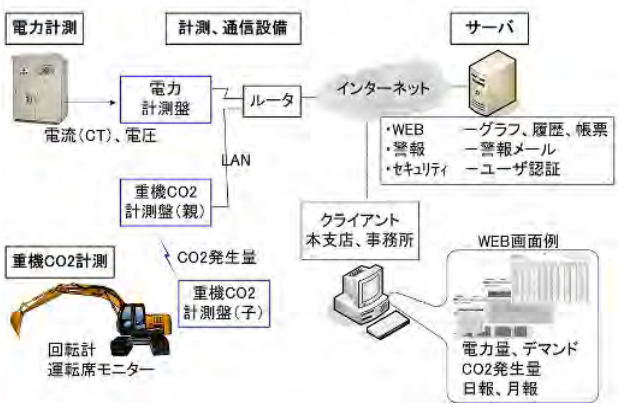


図-1　FCMS システム概要図

本報告は，施工延長約 1500m 仕上り内径約 7m の泥水シールド工事を事例に，計測システムの導入事例を記す。

2.1　電力系システム

負荷設備別に 63 箇所および高圧受電点 1 箇所で計測をおこなった。

なおシールド掘進機は 1 台の負荷として取扱い，照明設備は区分毎に 1 群として計測した。

データとして，

・「有効電力」「無効電力（遅れ，進み)」「力率」

「周波数」
・「有効電力量」「無効電力量（遅れ，進み)」「発電電力量」
・「瞬時 CO2 発生量」「積算 CO2 発生量」
・「デマンド値」「電気料金」
の現在値が表示可能である。

作業所の電力使用量の傾向把握だけであれば有効電力とデマンド値が「見えれば」（図 - 2）十分可能であるが，削減検討の段階では，出来るだけ細分化した負荷別に「見える化」（図 - 3）をおこなうほうが改善ポイントの抽出が容易になる。

そこで多数の箇所で計測するために，直列計測より若干精度は落ちるが写真-1 に示すように CT を用いた方法を採用し，設置工事の簡便化を図った。電力用データ計測端末は 6 箇所の同時計測が可能であり，機器コストも抑えることが出来る。

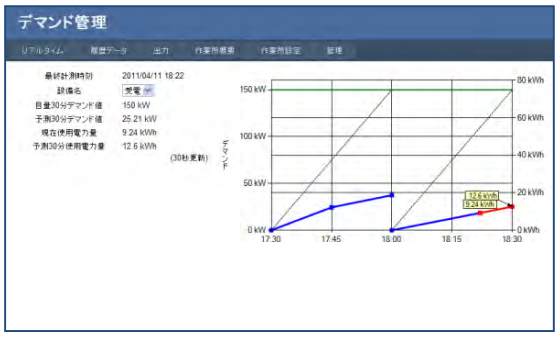


図-2　30 分最大需用電力管理画面例



図-3　負荷設備一覧表示画面例



写真-1　ＣＴ取付け状況

2.2　建設機械（内燃機関）系システム

掘削土搬出用の油圧ショベルの計測を実施した。

内燃機関の CO_2 排出量の計測方法としては
① 排気ガスの直接計測
② エンジン回転数と CO_2 発生量の相関から算出
③ エンジン回転数から燃料消費を予測して算出
④ 燃料使用量から算出
の 4 つが代表的な方法であるが，本システムでは，正確さ，コスト，装着の容易さ，から②を採用している。この方法はエンジン回転数と CO2 発生量の相関関係が必要であるが，代表的な油圧ショベル用エンジンに関しては，事前のデータ計測により相関グラフ（図-4）を作成している。

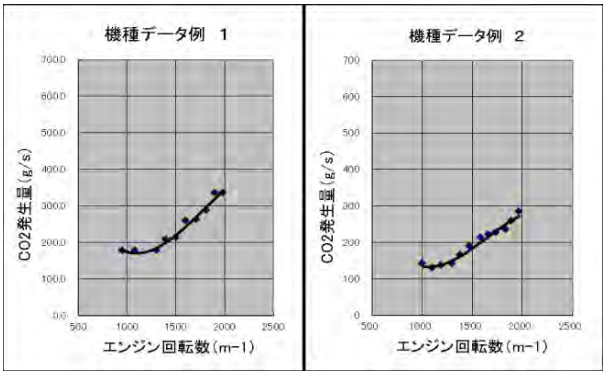


図-4　エンジン回転数－CO_2 排出量相関例

また，データが無い機種に関しては直接計測して相関式を作成するが，エンジン回転計と CO2 センサーを用いて 1 機種 1 時間以内で計測できる。

ここでエンジン回転の検出について述べるが，通常用いる光学式回転センサーでは狭いエンジン室内では取り付けが非常に難しく，また不具合も発生しやすい。

そこで写真-2 に示すように、エンジン補器に貼り付けるだけでエンジン回転の計測ができるセンサーを開発し導入をおこなった。このことにより，入れ替わりの多いリース機械でも簡単に対応可能となり，導入が容易となった。

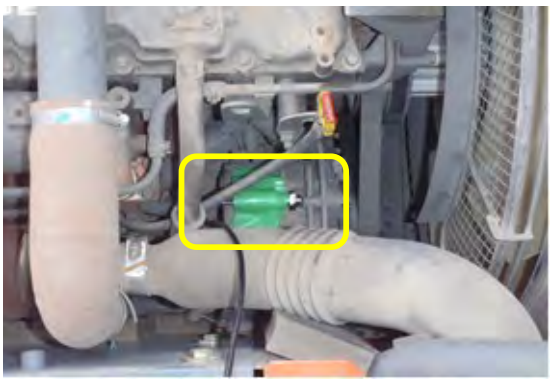


写真-2　エンジン回転センサー取付け状況

また，オペレーターが自機の CO2 排出状況がリアルタイムに「見える化」できるよう運転席内にモニタを設置（写真-3）した。このモニタはタッチパネルになっており，重機機種や通信の設定等が可能になっている。



写真-3　運転席内モニタ

なお，重機用の計測端末は中継型の無線ネットワーク装置を使用し，中継点を適切に配置すれば通常の作業所の敷地範囲内においては無線ネットワークが容易に切断しないシステムとなっている。

３．省エネーCO_2削減の取組み

本事例ではCO_2発生量削減の主な取組みとして，先に述べたモニタリングシステムによる「見える化」以外に

- 再生可能エネルギーの導入
- クレーン回生電力利用
- 無効電力の削減
- 省エネ型照明器具の採用
- 負荷の非効率な運転状態の是正
- 掘削汚泥の減容化
- 重機の省エネ運転

に取り組んだ。以下にその概要を報告する。

3.1　再生可能エネルギーの導入

作業所は海浜地区にあり，良好な日照と海風が期待できるため，太陽光発電と風力発電の２種を導入し評価した（場所は東京）。

導入した太陽光発電システムの最大出力は単相 16.6kW で，1 ヶ月当りの発電実績は，夏期平均 2400kWh，冬期平均 1500kWh という結果であった。

発電可能な日照時間を夏期 8 時間、冬期 5 時間とし，天候を考慮にしないで平均発電量を算出すると 10kWh となる。よって日照時間中の効率は最大出力を 100%とした場合、平均 63%という結果となった。（24 時間とした場合では平均効率は 14%）

風力発電の導入に関しては、大型のものは非常に導入コストがかかるため，実験的にローター直径 1300mm，発電能力 1.5kW（風速 15m）、0.4kW（風速 7m）の小型のものを導入した。太陽光と比べて日照の無い状態でも発電可能であるため設備照明の補助として位置づけた。発電量の 1 ヶ月当りの発電実績平均値は 80kWh という結果であった。これも，風速 7m 時の発電量を 100%として効率を計算すると約 28%という結果となった。ちなみに、東京の年間平均風速は約 3.2m/s である。

いささか乱暴ではあるが，以上の結果で評価すると，日照時間中の効率は太陽光が著しく優れているが，24 時間で評価すると風力発電の効率のほうが若干優れる結果となった。ただし、発電量に対する導入コストに関しては、広く普及している太陽光発電が遥かに優れる状況にある。

3.2　クレーン回生電力利用

クレーンで巻き下げ動作をおこなう際、荷重でモーター軸が回されて電気が発生する。通常この電気は不安定なため回生ブレーキ装置で熱に変化して放出することが多いが、この電気を再利用する装置をクレーンに導入し、省エネの評価をおこなうこととした。

本報告では、泥水シールド工事の立坑上の門型クレーン（12t）の巻上げモーターに回生システムを装着した。この工種でのクレーン作業は揚土が無いため巻下げ作業が主となり、図-5 のように回生による発電が大きいことが予想される。よって、電力回生による省エネ率が 3 割程度といわれている通常のクレーン（例：図-6）よりも大きい省エネ効果が期待できる。

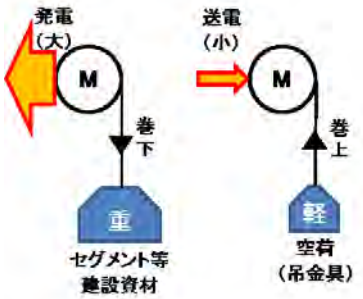


図-5　泥水シールドにおけるクレーン作業

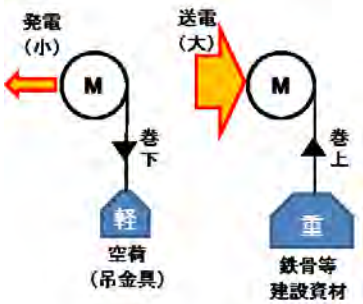


図-5　ビル建築工事おけるクレーン作業

結果として5割近い省エネ率が確認できた。このことにより電力回生システムは立坑の深さにもよるが泥水シールド工事のクレーン適するシステムであることが確認された。

3.3　無効電力の削減

無効電力には「遅れ」と「進み」の2種があるが，建設現場は誘導負荷が多いため，遅れ無効電力が多大となる。

現状では電力会社の方針により,「遅れ」にのみその量に応じて料金負担が課せられるため，多くの建設現場では受電設備に強制的に遅れを相殺する進相コンデンサーを設備している。そのコンデンサー容量は,「遅れる」ことが無いように最大電力使用時の値に設定されることが多く，休憩時，夜間などで使用電力が少ない場合は，副作用として力率が非常に「進む」状態となる。この場合には料金負担は無いが，多大な無効電力を発生している状況には変わりない。

無効電力自体は，電力会社の配電線へ戻るため基本的には無駄とはならないが，必要量より過大な電流が配電路を無駄に往復するため，送電損失は発生する。その際損失する電力は使用量の数パーセントに達する場合もある。

本取組みでは,「遅れ」量に応じて自動的に力率を調整する装置「自動力率調整装置」を導入した。

結果としては，進相コンデンサーのみを設置した他の作業所実績に比して，有効受電力量比で30%ほどの削減が出来た。この数値をエネルギー削減率に変換するとわずか 1%程度にしかならないが,受電電力量が大きい作業所ではCO2削減量としては少なくない数値となる。

3.4　省エネ型照明器具の採用

坑内の仮設照明に蛍光灯型LED照明を採用した。

これは非常に普及した技術であるため，細かい説明は省略するが,蛍光灯に比して実績値で50%の削減結果となった。

3.5　負荷の非効率な運転状態の是正

個別の負荷の状況が「見える化」することにより，非効率な運転状況にある負荷の抽出が容易である。

今回のシールド工事においては，シールドマシン関連の消費電力が全体に占める割合は約 50%であることが判明した。この部分の削減は工事進捗に関わるため，その他の負荷のうちから使用電力量の多い負荷を抽出し，データより稼働状況を確認した。

その結果から，不必要性に連続運転を続ける負荷を抽出し，必要に応じた間欠運転に変更することで負荷ごとに10%以上の電力量削減となった。

この削減率は，投資コストが余り必要ない割には大きく,「見える化」による大きな効果のひとつといえる。

3.6　掘削汚泥の減容化

シールド工事で発生する掘削汚泥の減容化により，搬出車両の削減をおこなった。減容化には高圧薄層フィルタープレスを導入した。これにより搬出汚泥の量を 7%削減することができ，搬出車両にして約2100台が出すCO_2が削減できた。

3.7　重機の省エネ運転

今回,重機のCO_2発生量をモニタリングしたが,シールド工事では，油圧ショベルは汚泥搬出時のみの稼動で，元々から余り無駄にエネルギーを消費する運転となっていない。よって明確な省エネ運転効果は現れなかった。

3.8　各取組みでのCO_2削減結果

以上の取組みにより，削減できたCO_2量を表-1に示す。

表-1　各取組みでのCO2削減量

取組み内容	CO_2削減量
再生可能エネルギー	7.2ton
クレーン電力回生	0.7ton
省エネ照明	8.5ton
負荷の運転状態の是正	5.6ton
汚泥の減容化	66.6ton
合計	88.6ton

４．まとめ

本報告では，CO_2発生量の抑制を仮設機械の観点から取り組み，電力で3%強の削減結果を得たが，京都議定書で決められた目標値△6%と単純に比較するとまだ3%不足している。

しかしモニタリング装置の導入で「見える化」したことにより，各負荷別に分析と評価が出来,更なる取組みの目標設定が容易となった。

製造業の工場とは違い，運用期間の短い建設工事現場では，1現場でエネルギー削減技術の投資コストが回収できない場合が多い。よって，建設工事における環境技術導入に対するインセンティブが明確になることが，今後の課題であり希望である。

なお本技術は，温室効果削減ガスの削減を目的とし開発したが，東日本大震災以降のピーク電力削減ニーズにデマンド管理機能や負荷分析機能が有効に役立つ結果となっている。

現在，建築工事・ダム工事・トンネル工事でも取組みを適用中であり，本報告と同様にCO_2発生量の削減を進めていく所存である。

ジャッキダウン式環境配慮型ビル解体工法の 100m を超える超高層ビルへの適用

鹿島建設株式会社　機械部　水谷　亮
東京建築支店　藤澤　武志
東京建築支店　○ 大橋　正音

１．はじめに

ビル解体工事における環境配慮は特に市街地では重要な課題である。鹿島カットアンドダウン工法（以下 本工法という）はいわゆる「だるま落し」のようにビルを下から解体する工法で，「建物外観を保持」「地上レベルで解体」「一定場所での繰り返し作業」という特長により，多くの環境配慮の効果を有する。

2008 年に本工法の実用化を行ったが，今回，千代田区大手町の超高層ビル群に位置する「りそな・マルハビル」（高さ約 108m）の解体工事に適用した。立地条件と超高層ビルへの適用拡大という条件より環境性能の向上，短工期化などが求められた。

そこで，本工法の特長である環境配慮の効果に新たな環境技術を組み合わせてブラッシュアップし，環境性能の向上を図った。騒音や粉塵の飛散の抑制，CO_2発生量の抑制を狙った設備の設置や新たな環境配慮技術である，アクティブノイズコントロールや帯電ミストなどの導入により，良好な結果を得た。

また，短工期化のためにシステム性能の向上を行い，3 日で 1 フロア解体という工程で，108m の地上躯体解体を約 3 か月で行った。

本報では，これらの内容について述べる。



写真-1　りそな・マルハビル解体工事全景

２．工法概要

従来のビル解体工法は建物の上部から順次解体していく方法が一般的だが，本工法は「だるま落し」のようにビルを下から解体する工法である。

地上レベルで各柱の柱脚部を切断して油圧ジャッキに置き換え，鉄骨柱の切断と建物のジャッキダウンを順次繰り返して建物を降下させる。ジャッキダウンにより地上近くまで降下した下層部を重機により解体する。全ての作業は地上付近で行われ，ビルの外観をそのままに保ったまま解体できることなどから，特に近隣環境に優しいという特長を持つ。また，施工中の耐震安全性はコアウォールと荷重伝達機構で常時確保する。

３．システムの性能向上

環境性能向上，短工期化や安全性向上などを図り，超高層ビルへの適用拡大を行った。

環境面配慮においては，準備作業から躯体解体の全ての工程で，粉塵・騒音・振動・CO_2排出量の抑制性能を向上，近隣環境，作業環境，地球環境への配慮を行った。

短工期化においては，高さ約 108m の S 造，総重量は約 27,000t のビルを，3 日で 1 フロアという従来工法の約 2 倍のスピードで解体するためにシステム性能の向上を図った。

表-1 に性能向上の内容を一覧で示す。

表-1　性能向上一覧

項目	内容
環境性能の向上	・粉塵，騒音，振動，CO_2 事前評価，対策
短工期化	・6 日／フロア　→　3 日／フロア
ジャッキシステムの性能向上	・ジャッキ大型化（８００ｔ→１５００ｔ） ・ジャッキダウン制御の見直し（よりスムーズに） ・操作インターロック，断線検知等の組み込み
耐震機構の合理化	・荷重伝達梁の簡素化，一体化 ・建物位置修正機能の組み込み

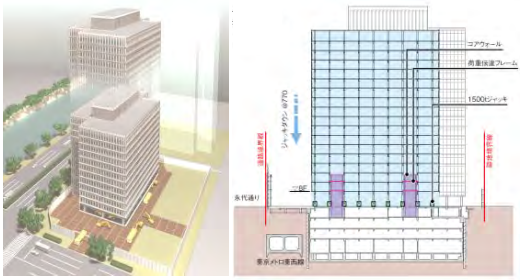


図-1　適用建物パース・断面図

４．各種環境対策について

4.1　粉塵飛散量の抑制

4.1.1 飛散量の評価と抑制対策

工事場所は超高層ビル群の中に位置しており，ビル風による粉塵の飛散が懸念されていた。そこで，近隣建物を忠実にモデリングした気流シミュレーションを用いて，精度の高い粉塵飛散評価を行った。シミュレーション結果に基づき，地上の仮囲い形状を最適化することで，最大 49%の粉塵飛散量低減効果があることを事前に確認した（図-2)。

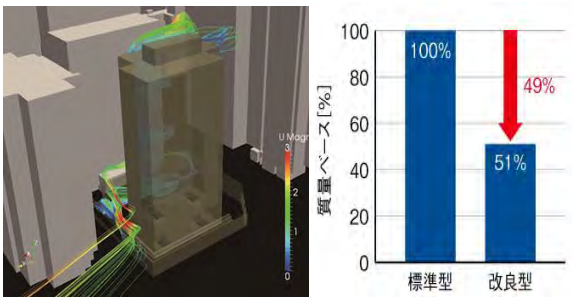


図-2　気流シミュレーションによる粉塵飛散評価

解体工事中の粉塵濃度を測定した結果，敷地境界の粉塵濃度は 0.03～0.05 mg/m³となり，大気中の浮遊粒子状物質（SPM）の濃度※(＝0.04 mg/m³)とほぼ一致する結果となった。

※環境省大気汚染物質広域監視システム
千代田区　国設北の丸測定局　2010 年 1 月平均

4.1.2 帯電ミストの試験導入

工事現場内の粉塵飛散防止対策として新たに開発した帯電ミスト(マイクロ EC ミスト)を試験的に導入し，粉塵飛散量の低減を図った。マイクロ EC ミストは，マイナス帯電させたミストによる粉塵吸着技術である。静電気の力により，これまで難しいとされてきた浮遊粉塵を洗い落す事が可能になり，通常のミスト散水と比較して 2 倍以上の洗い落し性能を有している。



写真-2　マイクロ EC ミスト適用状況

マイクロ EC ミストに用いる水の使用実績は 10ℓ/min であり，通常の散水時の使用量と比較して 1/12 という少ない水量で同等の粉塵吸着効果があることを確認した。

4.2　騒音・振動の抑制

4.2.1 騒音伝搬の評価

高層建物の多い都市部での解体工事は近隣建物上階への騒音を抑制することが課題の１つである。本工法は仮囲いの高さより下のレベルで全ての作業が行われることに加え，解体用重機は躯体の直下で作業を行うため上方向への騒音の伝搬を防ぐことができる特長がある。

騒音伝搬予測プログラムによるシミュレーションを行い，建物低層部の周囲のみに遮蔽対策を施すことで工事現場全体の防音対策ができることを確認した。シミュレーション結果に基づき，外周の防音仮囲いの高さを最適化し，敷地境界線上に 6.8～13.2m の防音パネルを設置した。

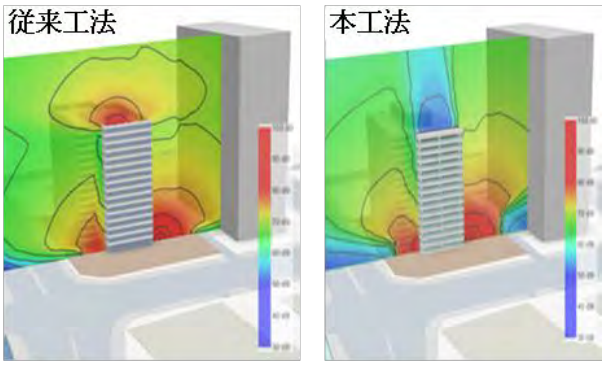


図-3　騒音伝搬予測シミュレーション結果

工事中の騒音測定結果より，隣接するビルの高さ 100m 地点における騒音は，建物上部で解体騒音が発生する従来工法より最大で 35dB 低減できることを確認した。また，屋上の周囲に仮設の防音パネルなどを設置した場合と比べても 10dB 程度低減していることが確認できた。

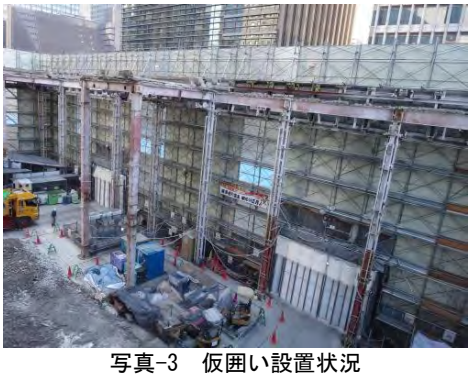


写真-3　仮囲い設置状況

4.2.2 アクティブノイズコントロールの導入

作業時の解体用重機から生じる騒音への対策として，解体用重機の排気口周りに「アクティブノイズコントロール（以下 ANC）装置」を装着した。ANC 装置は騒音に対して逆位相音を発生させることで低周波音域(63Hz，125Hz)の騒音を低減させるものである。



写真-4　ANC 装置の装着状況

騒音低減実績としては，聴覚的に不快感を与える低周波を 10dB 程度低減できることを確認した。

4.3　CO_2発生量の低減

解体工事における施工中の CO_2発生要因としては重機燃料消費により発生するもの，電力消費に由来するもの，躯体解体時の溶断によるものに大別される。

本工法の採用により従来工法比で 17.8%(全体)の CO_2発生量の低減効果を得た。特に重機燃料消費による CO_2削減量は 21.0%となった。地上レベルで解体用重機が作業するため重機の大型化が可能になり，台数の削減や作業時間の低減による効果が得られた。

また，溶断作業による CO_2削減量は 58.3%となった。同じ場所で同じ作業を繰り返すことによる作業員の習熟効果，作業効率向上に加え，自動切断によってガス使用量のバラつきが減ったことが主な要因である。

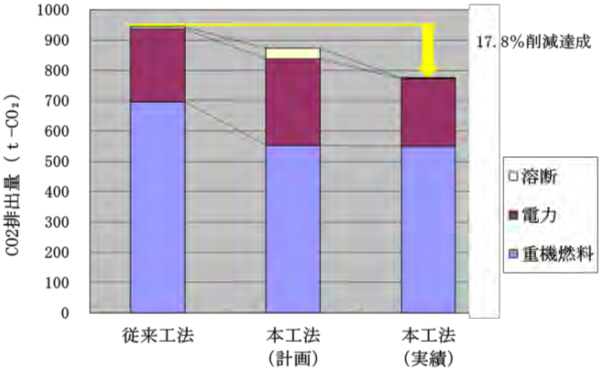


図-4　CO_2発生量低減実績

５．工法比較と効果（評価）

5.1　解体用設備の比較

従来工法と本工法の解体設備の比較を表-2 に示す。従来のビル解体工法は，最上階に解体用重機を揚重して上部から順次解体していく方法(従来工法１)が一般的だが，高層ビルの解体では，タワークレーンなどの揚重機を設置して，建設時とほぼ逆の手順で上部の部材を地上に降ろしていく方法(従来工法２)が採られている。

表-2　解体用設備の比較

項目	従来工法１	従来工法２	鹿島 カットアンドダウン工法
解体用機械	屋上解体用重機 地上解体用重機	タワークレーン 地上解体用重機	地上油圧ジャッキ 地上解体用重機
外部足場	全面総足場	せり下げ式足場	無し
支保工	強力サポート	簡易サポート	無し
躯体補強	無し	ＴＣ受躯体補強	コアウオール
解体方法	上部で解体 仮設開口より投下	ＴＣで解体材荷降し 下部で重機による粉砕	下部のみで解体
解体階	高所・開放	高所・開放	低所・上部閉鎖

従来工法１は中層ビル解体の一般的な工法で，総足場と防音パネルで建物全体を覆ったうえで，大型移動式クレーンで解体用重機を建物屋上に揚重，解体材は全フロアに設けた開口から建物下部に投下し，下部で分別や搬出を行う。解体用重機が乗る床を支えるためにサポートを設置するのが一般的で，順次これらの重機や設備を下層階に盛り替えながら解体していく。

従来工法２は，総足場が難しくなる高層ビルの解体に使用する工法である。タワークレーンなどの揚重機を建物上部に設置し，これを使ってせり下げ式の防音外周足場や解体用設備・機器を外部揚重して，建物屋上部に設置する。解体用機器を使って建物を上部から解体し，揚重機で地上部に吊り降ろす。下部では吊り降ろしてきた解体材の小割や分別，搬出を行う。

一方，本工法は最下階を解体して建物全体をそのまま降ろしていくため，建物上部に手を加える必要が無く，上部の外周養生や解体用機器，サポートなども一切不要である。従来工法が高所・開放型かつ上下 2 か所の解体作業場所を必要とするのに対し，本工法では低所・上部閉鎖型であり，解体作業場所は重機が動きやすい地上部の 1 か所のみである。

低所かつ上部が閉鎖された地上のみで解体作業を行えるという特長が，作業効率向上に加えて環境配慮に対する多くの効果も生み出す要因になっている。

5.2　本工法の環境配慮の効果

①建物上部をそのままにして解体する効果

従来工法は解体作業場所が上下 2 か所となるため各々で騒音・振動・粉塵が発生し，上部にも仮設の防音パネルを設置するなど近接ビルへの影響を抑制する設備が必要になる。また，高所での解体作業で発生する粉塵は遠くまで飛散しやすい。

一方，本工法は全工事期間を通じて上層部の作業は無く，騒音・振動や粉塵が発生しないため，新たな仮設設備を必要としない。

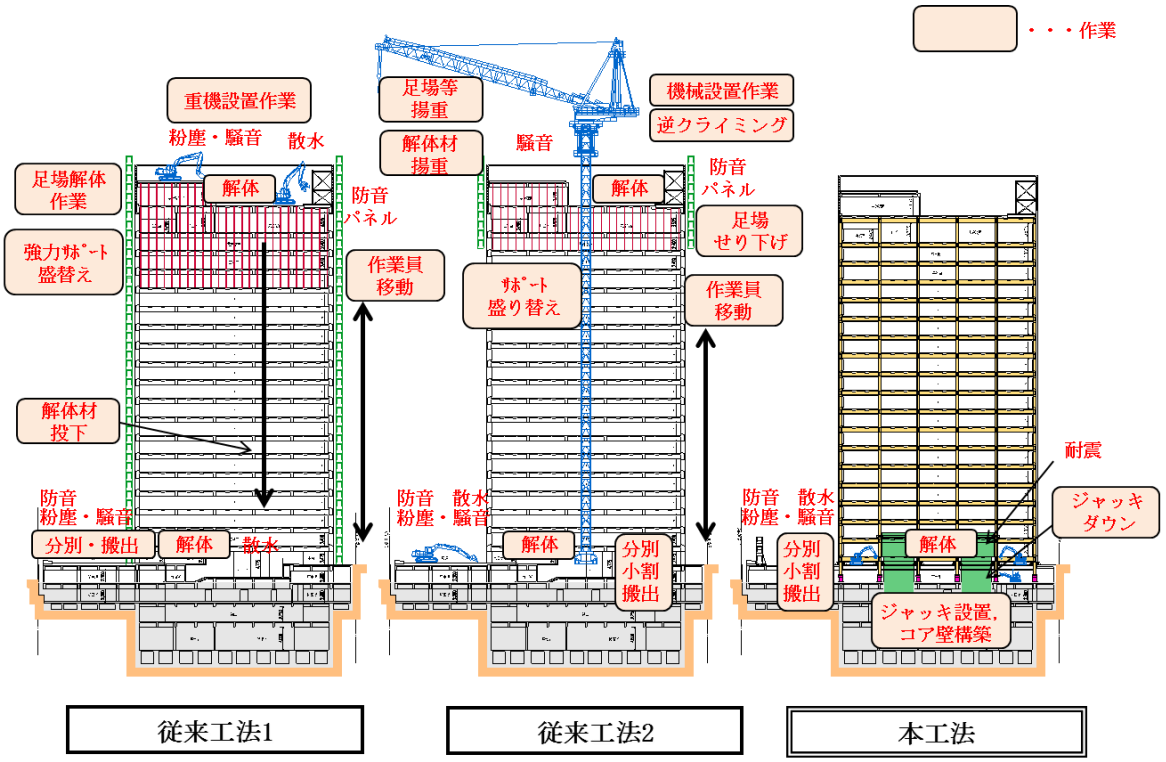


図-5　各解体工法の安全・環境の要因

上部が完全に閉鎖されているため解体材が雨に濡れず，良好な状態で回収・搬出できるためリサイクル率が向上する効果もある。また，建物を解体していること自体に気付かないほど景観にも調和して高所解体による不安感を引き起こさないことや，屋上設備やゴンドラ，ペントハウスなどの手間の掛かる屋上階の解体を地上で安全に効率よく行えるのも大きなメリットである。

②地上の一定場所のみで解体できる効果

従来工法は準備作業としてタワークレーンや外周養生，サポートなどの設置工事や重機など解体機器を高所で外部揚重する作業が生じる。また，建物解体時にはこれらの設備を順次下層階に盛り替えていく作業も発生する。さらには，上部への解体設備を揚重するエネルギーも必要である。

本工法は解体場所の上部が躯体で覆われているため，建物低層部の外周への対策のみでほぼ全面の環境対策ができる。地上付近は上空と比べて風も弱く，仮囲いの最適化などで粉塵の飛散を抑制し，作業環境と近隣環境の保全を両立しやすい。

また，建物全体が順次下りて安定した地上だけでの繰り返し作業となる。内装材も地上近くで順次搬出できるため，作業員の上下移動や荷卸しの手間が省け，効率的に解体作業を進められることによる CO_2 発生量削減の効果がある。

表-3　本工法の効果

項目	従来工法	本工法
騒音振動	・上部，下部に，ブレーカや重機排気音など，騒音発生源あり，対策が必要 ・解体階には外周防音養生が必要	・上部に騒音発生源なし，特に近隣オフィスビルへの影響が少ない ・地上の仮囲いのみで対策が可能 ＋重機排気音低周波にＡＮＣ試行（発生源対策）
粉塵	・上部または下部でスラブ解体に伴う粉塵発生源あり ・上部での粉塵は遠くまで飛散しやすく，十分な散水作業が必要	・粉塵発生源が風速の弱い下部のみに集約され，遠くまで飛びにくい ・飛散対策が地上の一部で済む ・粉塵飛散を抑制し，作業環境と近隣環境を両立 ＋ＥＣミストによる沈降促進を試行（発生源対策）
CO_2	・作業に伴う上下移動が多数あり ・解体設備設置などに伴う揚重エネルギーが必要	・効率的な解体でCO_2発生量削減 ・地上のみで設置工事が完了 ・解体材が濡れず，リサイクル率向上
安全	・建物上部への揚重機や足場設置作業に留意が必要 ・解体材の揚重作業あり，飛来落下対策が必要	・準備段階を含め，工事全期間を通じて揚重機や外周足場設置などの上部作業無し ・解体材揚重による飛来・落下の危険が無い ・コア壁，ジャッキにより耐震性確保
景観安心感	・高所での解体工事という圧迫感を無くす工夫が必要	・景観に調和，不安感抑制（解体していること自体に気づかない）

６．おわりに

今回，鹿島カットアンドダウン工法に新たな環境技術を組み合わせてブラッシュアップし，超高層ビル「りそな・マルハビル」の解体に適用，粉塵の抑制や CO_2 削減量 17.8%，騒音低減量最大 35dB という良好な環境配慮の効果を得た。また，100m を超える超高層ビルの地上躯体を約 3 か月で解体するという短工期の実績も得ることができた。

また，今回導入した ANC や帯電ミストなど新たな環境配慮技術は一般工事への展開をしていき，さらなる環境配慮を図っていきたいと考える。

アスファルトプラントにおける固形燃料燃焼システムの開発

日工株式会社　○ 榊　真司
日工株式会社　吉野　健治
株式会社 NIPPO　相田　尚

１．はじめに

加熱アスファルト混合物（以下，合材）を製造するアスファルトプラント（以下，AP）は，様々な種類の骨材を乾燥・加熱するバーナを複数使用しており，多くの化石燃料を消費し，且つ多くの CO_2 を排出している。近年，地球温暖化問題等の環境問題への関心の高まりから，低炭素社会ならびに循環型社会の構築に寄与する様々な省エネ技術が提案されている。しかし，運転効率が悪い等の技術的な課題や採算性が悪いといった経済的な課題が多いのも現状である。

本研究では，低炭素社会ならびに循環型社会への貢献を目指すため，化石燃料の代替燃料として木材チップや再生資源燃料等の固形燃料を使用した熱風発生装置を AP に増設し，その熱を AP に直接利用するシステムを開発した。本文では，開発したシステムの概要，開発過程での課題と対策，および実工場導入後の検証結果について報告する。

２．固形燃料について

2.1　再生資源燃料

化石燃料の高騰や地球温暖化などにより，環境問題への意識が高まる中，循環型社会の構築として再生資源燃料の使用が進んでいる。その中で，主に産業系廃棄物のうち，マテリアルリサイクルが困難な古紙および廃プラスチック類を主原料とする固形燃料 RPF(Refuse Paper & Plastic Fuel の略称)[2)]に着目した。本装置で使用した RPF を写真-1 に示す。RPF は原料として廃プラスチックを使用しているため，発熱量が木材チップより 2 倍程度高く，固形で密度が高い為，ハンドリングも容易である。また，品質が安定し，不純物混入が少ないため，塩素ガス発生による腐食や，ダイオキシン発生がほとんどない。

2.2　木材チップ

木材チップを写真-2 に示す。本装置で使用する木材チップは，建築廃材や製材残材をチップ化した建廃チップを使用した。木材チップは発熱量が小さく，燃料として利用するために含水比管理や，軽比重のため運搬効率が悪い等課題も多い。しかし，カーボンニュートラルの性質を持っているため，CO_2 排出量削減対策として期待されており，環境負荷低減に有効な燃料である。



写真-1　RPF



写真-2　木材チップ

2.3　固形燃料の特性比較

表-1 に各固形燃料の特性を示す。RPF と木材チップは比重，低位発熱量，理論空気量が大きく異なっており，特性が異なる燃料である。そのため，固形燃料の種類によって燃焼空気量等の諸条件を

変更する必要がある。

理論空気量 A_0 は，表-2 の元素組成をもとに，式(1)より算出した。RPF の元素組成は，実際に使用している RPF をサンプリングし分析した値である。木材チップは，一般的な値を利用した。

表-1　各固形燃料の特性

項目		RPF	木材チップ
密度	kg/m^3	400	200
低位発熱量	MJ/kg	25.1	12.6
燃焼速度		速い	遅い
理論空気量 A_0	m^3(N)/kg	6.44	4.23

表-2　各固形燃料の主要 3 元素

		RPF	木材チップ
C	%	57.68	46.17
H	%	7.90	5.70
O	%	23.90	41.93
S	%	0.11	0.00

$$A_0 = \frac{1}{0.21}\left\{\frac{22.4}{12}C + \frac{22.4}{4}\left(H - \frac{O}{8}\right) + \frac{22.4}{32}S\right\}$$

$$= 8.89C + 26.7\left(h - \frac{O}{8}\right) + 3.3S \quad {}^{1)} \cdots\cdots (1)$$

３．開発コンセプト

AP では，骨材の乾燥・加熱で必要とされる熱量は大きく変動するため，細かな温度管理が要求され，熱量調整を行わなければならない。ただ，固形燃料は液体である化石燃料に比べ燃焼速度が遅く，熱量調整の応答速度も必然的に遅くなる。このため，AP の燃料全てを固形燃料に置き換えることは困難と考え，化石燃料を燃料としたバーナの補助熱量として併用することとした。以下に，開発コンセプト・目標を示す。

(1) 特性が異なる 2 種類の固形燃料を安定的に燃焼する自動制御システムを構築する
(2) AP と固形燃料燃焼装置を安全に連結させるための自動制御システムを構築する。
(3) 熱風は AP のドライヤに利用し，必要熱量の 50%を目標とする。

４．固形燃料燃焼システムの概要

開発したシステムのフローを図-1 に，実工場へ導入した固形燃料熱風発生装置を写真-3 に，主要諸元を表-3 にそれぞれ示す。既存の再生 AP へ固形燃料燃焼装置を増設し，再生ドライヤ燃焼室へ熱風を送り込む設備とした。再生 AP は，再生骨材と呼ばれる，道路工事などで発生したアスファルト発生材を破砕，選別した骨材の乾燥・加熱を行う装置である。以下，システムフローについて説明する。燃焼炉は，ロータリーキルン方式を採用している。この方式は連続投入が可能で，流動性のある材料には最適であり，効率よくガス化させ，燃焼することが可能となる。しかし，固形燃料をガス化させた後に発生する多量の炭化物は燃え残り，無理に燃焼を行うと，クリンカを発生させるという特性をもつ。

固形燃料は，燃料供給ホッパから燃料供給スクリュで定量供給され，ベルコンでロータリーチャンバに投入される。ロータリーチャンバは，内面に 150 mm 厚の耐火キャスタブルを施工しており，これが高温に蓄熱し，尚且つロータリーチャンバの回転により，効率よく固形燃料を燃焼する。助燃バーナは，固形燃料が安定的に燃焼を行うための種火的な役割を担うと共に，運転初期の予熱を行う。固形燃料の燃焼により発生した可燃ガスは二次燃焼室にて完全に燃焼される。二次燃焼室は，発生した可燃ガスを完全に燃焼するのに必要な温度と時間を確保している。二次燃焼室と再生ドライヤ燃焼室は熱風煙道で接続されており，熱風煙道ダンパを開けることで，AP と固形燃料燃焼装置が連結され，熱風を導入する。導入された熱風は，再生ドライヤにて再生骨材の乾燥・加熱に利用される。再生ドライヤから発生した排ガスは，バグフィルタで集塵され，煙突で排気される。

５．開発における課題と対策

5.1　各固形燃料の燃焼最適化

使用する固形燃料によって比重，発熱量，燃焼速度，理論空気量が異なるため，燃焼空気量や，ロータリーチャンバ内の滞留時間を調整する必要がある。実際に燃焼を行うと，表-4 のような燃焼特性が得られた。以下，内容について説明を行う。

まず RPF の場合では，発熱量が高く高温で燃焼するという特性を持っているため，滞留時間を長くすると高温域で滞留した灰が溶融し，クリンカが発生した。写真-4 にクリンカ付着状況を示す。このクリンカを全て除去した後，ロータリーチャンバの回転数を上げ，尚且つ高温域を抑制するために空気比 m=約 2.0，つまりガス中の酸素濃度 O_2 が 10～11 %になるように燃焼空気を導入することで，クリンカ生成は抑制された。空気比 m は，式(2)より算出した。上記より，RPF は非常に燃焼しやすく，高温になるため，温度を抑制する操作が必要となる。空気比 m=約 2.0 で，二次燃焼室温度が 650 ℃以上で燃焼が安定した状態で CO 濃度は 50～260 ppm 程度であった。

木材チップは，RPF に比較して発熱量が小さいた

め，高温域が発生しにくく，クリンカはほとんど発生しない。しかし，高温域が発生しにくいため，ガス化後の炭化物の燃焼が促進されず，大量の炭化物が灰化されないまま排出された。そのため，滞留時間を可能な限り長くすることで，灰化率を向上させた。しかし，ロータリーチャンバ内で完全に灰化させることは困難であった。ガス中の酸素濃度 O_2 は 9 %程度，空気比 m=1.7～1.8 で燃焼状態がよく，CO 濃度は 120～250 ppm であった。

表-3　固形燃料燃焼装置主要諸元

項目	仕様・能力
燃料供給方式	二軸スクリューフィーダ
ロータリーチャンバ	内部耐火キャスタブル 150 mm 施工
最大燃焼能力	2.09 MW
再生バーナ	2 流体バーナ （ターンダウン比 1:10）

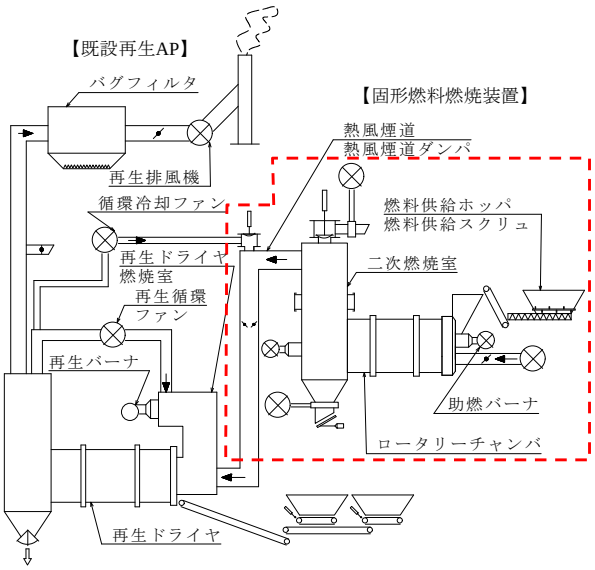


図-1　システムフロー図



写真-3　固形燃料燃焼システム全景

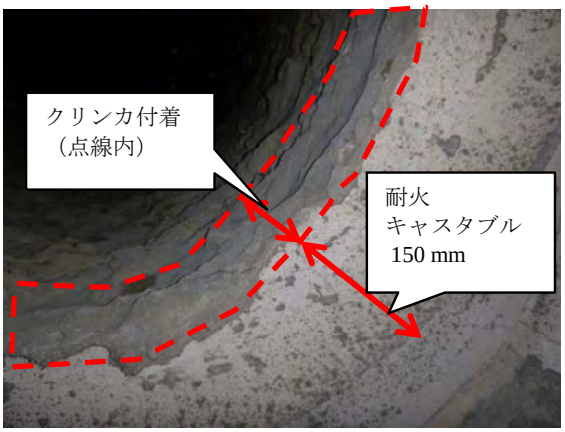


写真-4　クリンカ付着の様子

$$m=\frac{20.9}{20.9-O_2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

表-4　各固形燃料の燃焼特性

	RPF	木材チップ
ロータリーチャンバ 内滞留時間	短(約 20 分)	長(約 45 分)
燃焼空気量	多	少
空気比 m	約 2.0	1.7～1.8

5.2　灰化率の向上

灰化率は，排出された灰の容積を供給量の容積で割った値とした。ロータリーキルン方式の燃焼炉は，ガス化燃焼が終了した後の炭化物に効率よく空気を供給することが困難なため，炭化物の燃焼が促進されず，多量の炭化物が燃え残る特性がある。RPF は，ロータリーチャンバ内で急速に燃焼し，投入部付近で高温になり炭化物も灰化するため，灰の量は少量であった。木材チップの場合は燃焼速度が遅く，ロータリーチャンバ全長のうち半分を過ぎたところでガス化燃焼が終了しているため，炭化物が滞留している箇所は高温になっておらず炭化物が灰化されずに排出されてしまう。木材チップ供給量 300 kg/h で 3 時間運転すると，容量 0.9m^3 の排出ホッパを満たしてしまうため，3 時間以上の運転が困難な状態であった。写真-5 に，供給量 300 kg/h で 3 時間運転した後の炭化物排出状況を示す。この炭化物には C 分が残留しており，空気を送り込み燃焼させると発熱させることが可能となる。すなわち，灰化されないまま炭化物を排出することは，有効な熱を効率よく利用できないこととなる。そこで，図 2 のように四方から空気を送り込み，炭化物の燃焼を試みた。しかし，局所的に炭化物の温度が 1000～1200 ℃になり，灰が溶融してクリンカが発生し排出口が閉塞された。クリンカとは，温度が 1000 ℃を超えたとき，灰の

粒子が溶けて炉壁に固着する現象のことをいう。つまり，炭化物が溜まっている場所に空気を送り込むだけでは，高温になりクリンカが発生するため，何らかの対応策が必要となる。

クリンカが生成する原因としては，排出ホッパに空気を送り込んで炭化物を燃焼させる際に灰の挙動が無く高温状態になりやすいためと推測される。そこで，排出ゲートの上部にエアパージ装置を取り付け，炭化物燃焼用の空気を送り込む際に排出ホッパ内で炭化物を撹拌することが可能となる旋回気流を与え，燃焼させる方式を採用した。この方式により，同じ運転内容で木材チップを燃焼させても，炭化物は大幅に減容化され，クリンカによる閉塞も無くなった。写真-6 に減容化した炭化物の状態を示す。写真-5 と写真-6 を比較しても，その効果は大きい。減容化された灰には□50～100mm 程度のクリンカは存在していたが，排出口で詰まることはなかった。

エアパージの風圧と灰化率の関係を表-5 に示す。エアパージ風圧を 2.25 kPa まで高めると，ほとんどの炭化物が火の粉として飛び，再生ドライヤ内に入り，再生骨材に引火する危険性が高かったため，途中で試験を中止したため，計測不能であった。エアパージ風圧を 1.30 kPa 以上にすると，灰化率は 2%以下になり，良好であった。

表-5　エアパージ風圧と灰化率

エアパージ風圧 kPa	灰化率 %	灰化傾向
0.01	5.0	残留炭化物が多い
0.49	2.2	残留炭化物が少し多い
1.30	1.8	灰化状態良好
1.80	0.5	灰化状態良好
2.25	-	灰化率計測不能



写真-5　木材チップ炭化物排出状況



写真-6　エアパージ装置取付後の炭化物排出状況

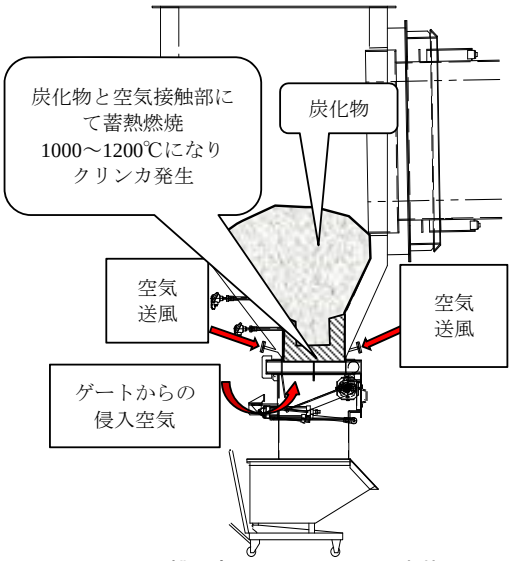


図-2　排出部でのクリンカ発生状況

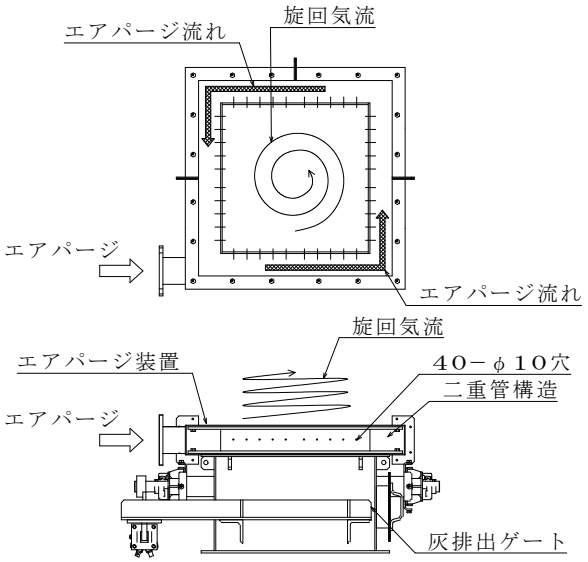


図-3　排出ゲートエアパージ構造

5.3 AP と固形燃料燃焼装置の併用化

既設再生 AP の再生バーナからは 1800 ℃程度の熱風が発生しており，排ガスを循環し燃焼室で混合することで，700 ℃程度の熱風になり，再生ドライヤへ供給される。再生ドライヤの排ガス温度は 160～180 ℃, 加熱後の材料温度は 150～160 ℃で運用している。排ガス温度の温度調整は再生バーナの燃焼量を増減させることで行っている。再生骨材にはアスファルト分が付着しているため，過度に温度を上昇させると火災の危険性が高くなる。そのため，熱風温度，排ガス温度，材料温度の管理は重要な点になる。

本システムでは，外部の装置である固形燃料燃焼装置より再生 AP へ熱量を供給することになり，固形燃料燃焼装置にて異常な燃焼や温度異常が発生した場合には, 即座に再生 AP への熱風供給を停止する必要がある。固形燃料燃焼装置から供給する熱風温度について，排ガス温度以下の温度で熱風を供給した場合，熱風を排ガス温度まで昇温させるための熱量が必要となるため，再生バーナの燃焼量が上昇することとなり，省エネにならない。そのため，熱風供給の条件として，熱風温度が排ガス温度以上であることが求められる。また，総合的な全体熱量の調整は再生バーナ燃焼量で調整しているため，再生バーナが自動制御されていない場合，燃焼量が低下されずに過剰熱量を供給する可能性があり, 火災の危険性が高くなる。また，必要熱量の 50%以上の熱量を供給した場合，再生バーナの制御範囲を逸脱する可能性があり，制御性が著しく低下する。

固形燃料供給量を急激に変化させた場合，燃焼空気量も急激に変化させることになるため，熱風量が大幅に変化する。この変化により，再生バーナの燃焼量が大幅に変化し，燃焼量と排ガス温度のハンチングの原因となる。上記で述べたことから，以下の点に留意して制御システムの構築を目指した。

(1) 既設再生 AP, 固形燃料燃焼装置にて温度異常が発生した場合には，即座に熱風供給を停止する。
(2) 固形燃料燃焼装置のガス酸素濃度が著しく低下した場合には，即座に熱風供給を停止し，固形燃料供給を停止する。(不完全燃焼の危険性があるため)
(3) 熱風供給時，再生ドライヤへ導入する熱風温度が 650 ℃以下，750 ℃以上にならないよう再生 AP の再生循環ファン風量を自動調整する。
(4) 熱風の供給開始は自動で行わず，プラントオペレータによる手動操作で開始する。
(5) 再生 AP の運転が終了した際は，自動で熱風供給を停止する。
(6) 再生バーナが自動制御になっていない場合は，熱風供給を行えないようにする。

5.4 固形燃料燃焼熱量調整制御

本システムの供給装置は二軸式のスクリューフィーダを使用している。二軸式のスクリューフィーダは，木材チップのような繊維質の材料でも詰まりが発生しにくく，安定して供給することが可能である。固形燃料供給量の設定は，事前に固形燃料毎にキャリブレーションを行い，そのデータに基づいて決定した。しかし，固形燃料の比重が大きくなると，質量基準の供給量が増加することになるため，単位質量あたりの発熱量を一定とすると，結果的には固形燃料燃焼により発生する熱量が増加することになり，空気不足による不完全燃焼が発生する可能性がある。そのため，二次燃焼室に設置したジルコニア式酸素濃度計で計測している燃焼ガスの酸素濃度が著しく低下する，もしくは二次燃焼室の急激な温度上昇が発生した場合には空気不足が発生しているとみなし，固形燃料供給量を自動で減少させた。この操作により，必要燃焼空気量が抑制でき，空気不足を解消することが可能となる。このように，酸素濃度と温度で制御することで，固形燃料の発熱量や比重にバラツキが生じても安定して燃焼させることが可能となる。

5.5 固形燃料燃焼装置熱風温度制御

再生ドライヤへ導入する熱風温度は 650～750 ℃の範囲になるのが好ましい。この温度域より低い温度になると，再生ドライヤ投入部で付着が発生し，逆に高いと再生骨材への引火の危険性が懸念される。RPF を燃焼させた場合，過剰空気が入らなければ二次燃焼室でのガス温度が 1000 ℃以上になる場合がある。この場合，再生バーナの熱風と固形燃料燃焼装置の熱風がしっかりと混合されずに再生ドライヤへ導入された場合，750 ℃以上の熱風が導入されることになり，再生骨材へ引火する危険性が上昇することとなる。

固形燃料燃焼装置の熱風温度を低下させるには空気を通常よりも過剰に入れる必要があるが，この場合排ガス量が大幅に増加するため，再生 AP のバグフィルタ，再生排風機の負担が増大する。そこで, 再生 AP の排ガスを一部循環冷却ファンで吸気して熱風煙道に循環させることで，全体の排ガス量を増加させずに温度制御を行うことが可能となった。図-4 に温度制御時のグラフデータを示す。温度制御設定値は 740 ℃で制御しており，温度制御が良好に行われている。

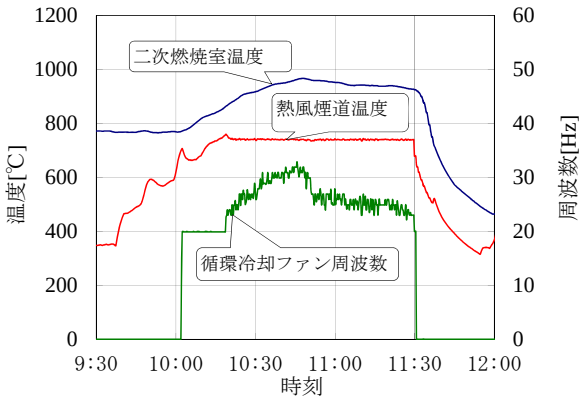


図-4　熱風温度制御結果

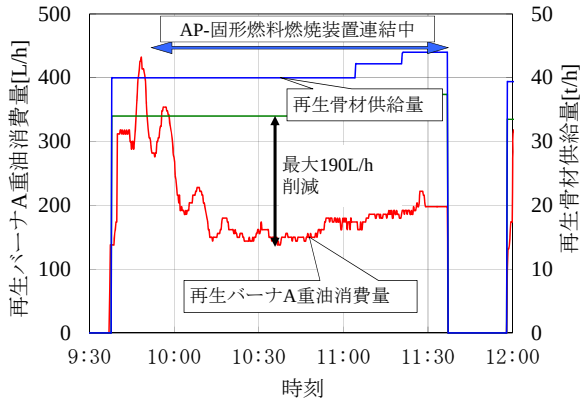


図-5　RPF 利用時運転データ

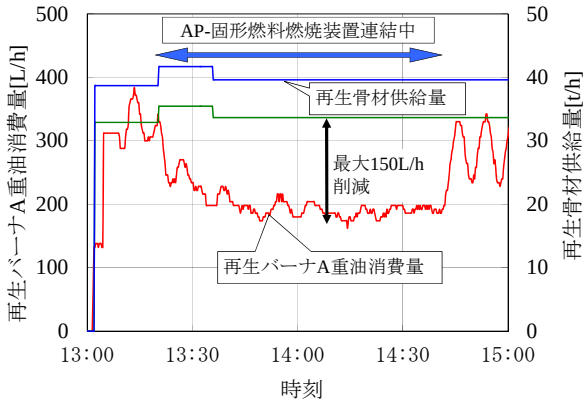


図-6　木材チップ利用時運転データ

6．固形燃料燃焼装置導入の効果

2012 年 8 月宮城県内にある既設 AP 工場へ固形燃料燃焼装置を増設した。9 月より固形燃料燃焼装置の燃焼試運転を開始し，10 月に既設再生 AP との連結試運転を行い，その後課題に対して改善・改良を行った。2013 年 4 月より操業運転を開始した。図-5 に RPF，図-6 に木材チップを燃焼させた時の再生バーナ A 重油消費量推移グラフをそれぞれ示す。再生 AP と固形燃料燃焼装置を連結することで，再生バーナ A 重油消費量が低下する事が確認された。木材チップは，RPF に対して低位発熱量が低く，嵩密度が小さいため，熱風量が減少し A 重油削減量は低下する。しかし，木材チップはカーボンニュートラルの特性を持つため，A 重油燃焼により発生される CO_2 を約 35 %削減することが可能となった。表-6 に固形燃料別の燃焼装置導入効果を示す。A 重油削減量は，実工場の当該燃焼装置導入前の平均 A 重油消費量と連結中の A 重油消費量の差とした。A 重油削減率は，固形燃焼装置連結中において RPF で 56 %，木材チップで 44 %となる。再生 AP 全体での削減量は装置稼働における予熱ロス，また再生 AP 運転条件等により，前述より 10 %程度減少する。

表-6　固形燃料別の燃焼装置導入効果

			RPF	木材チップ
導入前	A 重油消費量	L/h	340	
導入後	A 重油消費量	L/h	150	190
	削減量	L/h	190	150
	削減率	%	56	44

7．おわりに

異なる 2 種類の固形燃料を燃焼させるため，複雑な制御システムが必要であったが，実工場のオペレータに負担を掛けることなく自動制御運転させることが可能となった。設備費用に関してだが，本研究は初めての試みであり，今後の耐久性等を調査している段階のため商業ベースとなる金額は未だ算出できていない。また，本研究では既存設備に増設したが，AP 新設時に予め設計に取り入れ，納入する場合とでは設備費や現地工事費が大きく異なる。また，固形燃料燃焼装置へ投入する燃料熱量によっても本装置の能力が変わるため，設備費は異なる。本装置は，入荷可能な燃料の単価，熱量と設備費のバランスを考慮することが必要である。地球温暖化が危惧される中，燃焼形態の異なる 2 つの燃料を再生 AP で直接熱利用する当技術は，AP の加熱乾燥技術に新たな選択肢を加えたものと考える。今後は，普及展開を図り，更に完成度を高めていく所存である。

参考文献

1) 社団法人 産業環境管理協会：公害防止の技術と法規 大気編，五訂，pp.80～81，2001
2) 一般社団法人 日本RPF工業会:http://www.jrpf.gr.jp/, RPFとは，(2013/8/12)

ハイブリッド化に伴う発電機自動発停システムの開発

東亜建設工業株式会社　土木事業本部機電部 ○宮本　憲都
永木　君治
今村　一紀

１．はじめに

産業革命以降の発展に伴い，様々な分野でエネルギーの消費量が飛躍的に拡大し，近年では地球温暖化の主要因である CO_2 の排出量も増え続けてきた。そのため，環境負荷低減に対する取り組みが様々な分野でなされている。

海上工事に用いられる作業船は，陸上の建設機械に比べて大型のものが多く，作業を行う上で大量の化石燃料を消費しているため，資源の有効利用ならびに環境負荷軽減の面からも消費量を極力抑えることが期待されてはいたが，作業船自体の更新（新造）がなかなか行われないこともあり，あまり実施されていない状況であった。

当社は，平成 22 年の大型深層混合処理船「黄鶴」(写真-1)の建造に際し，エネルギーの高効率化と自然エネルギーの利用による，「作業船ハイブリッドシステム」を開発し CO_2 排出量削減を推進してきた。

今回，深層混合処理工法の施工フローに合わせて発電機の運転台数を自動制御する「発電機自動発停システム」を開発し，この「作業船ハイブリッドシステム」を進化させることができた。ここに，その概要を紹介する。



写真-1　環境配慮型深層混合処理船　黄鶴

２．作業船ハイブリッドシステム

作業船ハイブリッドシステムは，
①昇降ウインチ電力回生システム
②発電設備・統合制御装置
③太陽光・風力発電システム
④コージェネレーションシステム
⑤燃料改質装置
から構成されており，今回新たに「発電機自動発停システム」を加え，従来の作業船に比べ CO_2 の排出量を削減できるシステムとなっている。

（１）昇降ウインチ電力回生システム

処理機の昇降を行う昇降ウインチ（440V，450kW）は，処理機を下降させる際に処理機の重みによって回されることになり，その際に昇降ウインチモータは発電機と同じ働きをし，発電する。

通常は，このとき発生する電気を熱に変換して放出しているが，本船では，発生する電気を発電機側にもどすこと（回生）が可能なシステムとしている。

（２）発電設備・統合制御装置

通常，作業船の建造にあたり発電機容量を決定する際は，負荷設備総容量や各設備の効率や需要率，内燃機関の瞬時過負荷耐量などを考慮し最大負荷時を想定して発電機容量を決定することになる。

深層混合処理船の場合，改良深度や地盤状況など施工条件により負荷（必要とされる電気容量）が大きく変動するため施工条件によっては最大負荷時を想定して容量を決めている大型の発電機では無駄が生じることになる。

発電設備・統合制御装置は，搭載している発電機を従来の作業船に搭載されていた大型の発電機から複数の小型の可搬式発電機（800ｋVA×５台，400ｋVA×1 台）に切り替え，発電機の負荷を分散させることで，稼動効率を高めることができるシステムである。

このシステムは，各々の発電機負荷を均一に分

担させるとともに使用電力量をリアルタイムに監視でき，必要とされる台数の把握が可能となり，最適な台数のみを運転することによって，CO_2 排出量を抑えることができる。

写真-2 に可搬式発電機(800kVA)，図-1 に発電設備・統合制御装置の画面例を示す。



写真-2　可搬式発電機（800ｋVA）

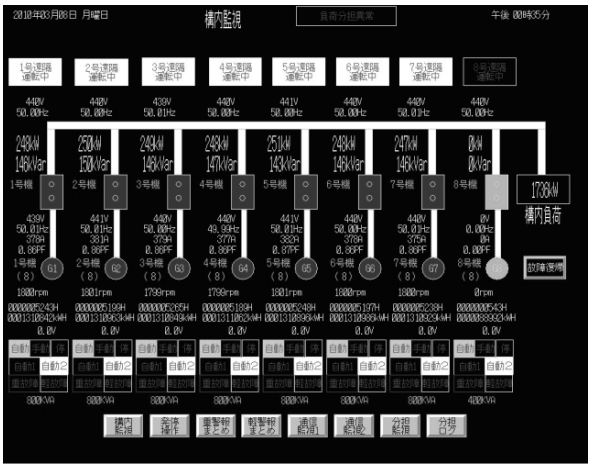


図-1　発電設備・統合制御装置画面表示例

（３）太陽光・風力発電システム

居住区の照明設備用として太陽光及び風力の自然エネルギーを利用した発電設備を採用している。

太陽光パネルは，太陽光に対して直角に向けた方が発電効率が良いが，施工状況により船の向きが変わる作業船では発電効率が低下することが予想された。

深層混合処理船の場合，施工を行うために作業船の位置及び方向を測定する装置は標準的に装備しており，その信号を利用し，船の向きが変わった場合でも，船の向きと時間により太陽パネルの向きを変える太陽光追尾システムを考案したことにより，作業船でも効率よく発電を行えるシステムとした。また，風力発電は太陽光が発電しない夜間を補うために設けている。

（４）コージェネレーションシステム

作業船の電気は，発電機で化石燃料をもとに発電されているが，一般的に発電機は，化石燃料の総エネルギーの 30%を排熱として放出されていると言われている。

コージェネレーションシステムは，各発電機の排気ダクトの周囲に温水配管を通し，排気として出される熱を回収して温水を作り，船内で使用する温水として有効利用している。

（５）燃料改質装置

燃料改質装置は，ケース内部に人体及び自然環境に悪影響を与えない程度の極低レベル放射線（β線・γ線）を照射する性質を持つ特殊セラミックが格納されており，燃料改質装置を通過する燃料にこの放射線を照射することにより，燃料の分子レベルでの改質が行われ燃焼促進効果が発揮されるものである。燃料改質装置は，陸上運搬車両及び重機，また海上輸送船ではすでに多数の実績はあるが，作業船での導入は初めてである。

３．発電機自動発停システム

（１）システム概要

深層混合処理船「黄鶴」は，従来の大型の発電機を搭載した作業船とは異なり複数の可搬式発電機（800ｋVA）を並列運転することにより船内の電源を供給している。

本来，発電設備・統合制御装置には，緩やかな負荷変動に対応して発電機の運転台数を増減できる機能があるが，深層混合処理船では施工対象の地盤によっては負荷変動が激しくなる場合があり，その場合，発電機の発停が追従できないという問題がある。また，施工中の負荷変動を常時監視し，発電機の運転・停止を機関監視室から遠隔で操作を行うことは可能であるが，機関部員の負担が大きくなることから最も使用電力量が上がる支持層に到達した際の電力量をもとに発電機の運転台数を決定しており，使用電力量が減る攪拌翼が水中や気中にある場合でも運転台数の増減は行っていないのが現状であった。

「発電機自動発停システム」は，可搬式発電機の並列運転台数を攪拌翼が水中や柔らかい地盤表層部では使用電力量が少ないことから発電機の運転台数を少なくし，負荷の増える地盤深層部で運転台数を増やすものであり，無駄な発電機の稼動を減らすことで CO_2 排出量の削減を実現している。

（２）システムの制御フロー

図-2 に発電機発停システムブロック図を示す。

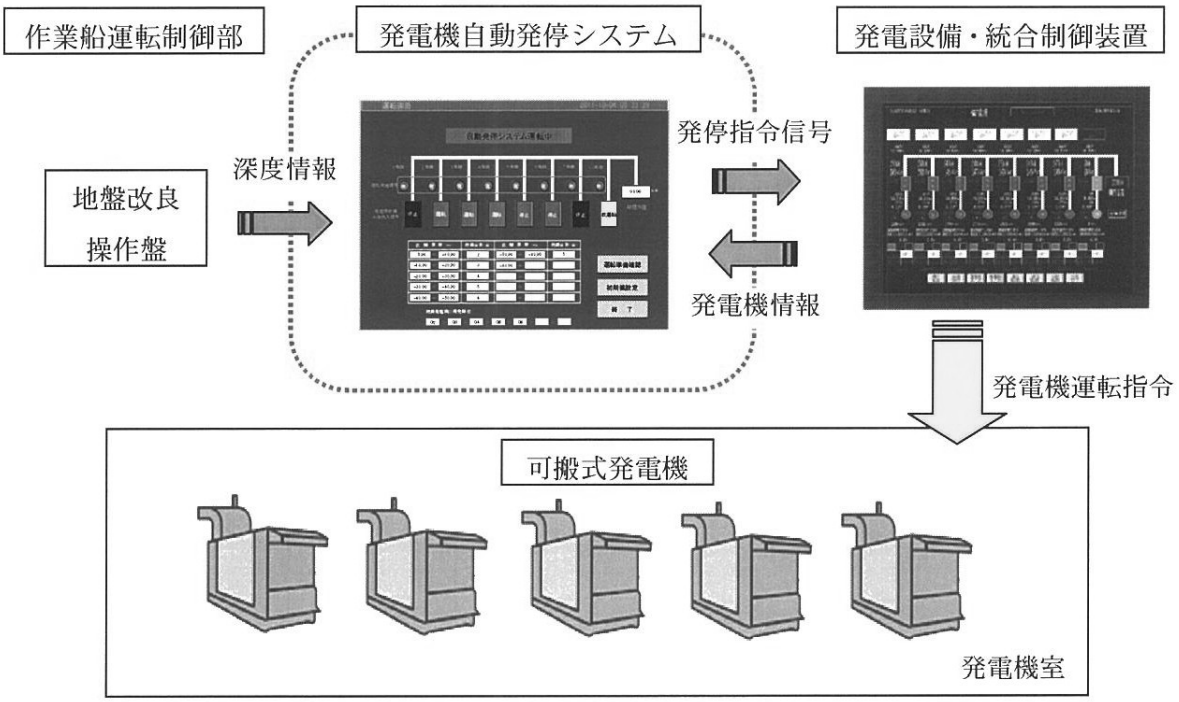


図-2　発電機発停システムブロック図

発電機自動発停システムは，処理機の昇降や攪拌翼の回転数など深層混合処理船の運転制御を行う地盤改良操作盤より得られる処理機の深度情報と発電設備・統合制御装置から得られる消費電力と各発電機の運転状態をもとにあらかじめ設定された発電機運転フローに従い発電設備・統合制御装置を経由して発電機の運転・停止を行うシステムである。

本船が施工中に稼動している主な負荷は，攪拌翼を回転させる攪拌モータ（350kW 440V×4 台），攪拌翼が搭載されている処理機を上下に昇降させる昇降ウインチモータ（450kW 440V×1 台），スラリーセメントを攪拌翼先端より吐出させるスラリーポンプモータ（22kW 220V×8 台），その他の補機（約 200kW）がある。その中でも最も大きく地盤の影響を受けて，負荷変動の激しい機器は，攪拌モータであり，固い地盤では負荷が上昇し，軟らかい気中では負荷が減少する。そこで，ボーリングデータ，試験打ちでの負荷変動状況を確認し，予め各深度ごとに必要発電機台数をＰＣに入力することにより，所定の深度に達すれば各発電機に発停指令を送っている。

（３）システム効果確認

平成23年度に実施された工事にて本システムを使用した場合(システム稼働時)と，これまで通り最大負荷が掛かる支持層に到達した際の使用電力量より運転台数を決めた場合(通常時)で，どれくらいの CO_2 削減効果が得られるか各発電機の燃料消費量と使用電力量を記録し比較を行った。

この工事では，試験打設の結果と数本の施工データより攪拌翼の深度=-20m で発電機を切り替えることとし，それより浅い深度では 2 台運転，深い深度では 3 台運転とした。また，打設杭の種類は改良深度の浅い杭(短杭)と改良深度の深い杭(長杭)があり，打設杭の種類別に削減効果を測定した。

図-3 に発電機運転台数切替イメージ図を示す。

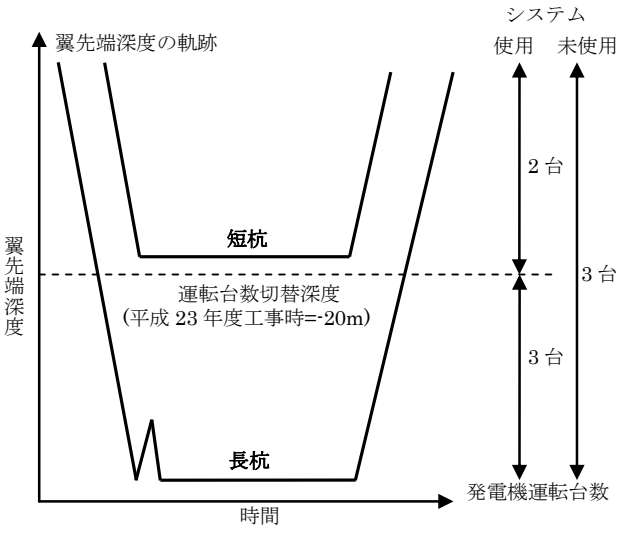


図-3　発電機運転台数切替イメージ図

表-1 に短杭打設時の単位電力量あたりの燃料消費量（＝「測定期間の総燃料消費量」／「測定期間の総発電量」）を示す。

表-1 よりシステムを使用することにより約16.9% (=(0.426-0.354)/0.426)の改善効果が確認された。

表-1　燃料消費比較表（短杭）

打設数	システム有り	システム無し
1本目	0.347	0.419
2本目	0.345	0.429
3本目	0.342	0.422
4本目	0.355	0.435
5本目	0.353	0.435
6本目	0.353	0.433
7本目	0.356	0.416
8本目	0.383	0.414
平均値	0.354	0.426

単位：l/kWh

表-2 に長杭打設時の単位電力量あたりの燃料消費量を示す。

表-2 よりシステムを使用することにより約4.2% (=(0.329-0.315)/0.329)の改善効果が確認された。

表-2　燃料消費比較表（長杭）

打設数	システム有り	システム無し
1本目	0.314	0.333
2本目	0.312	0.332
3本目	0.315	0.324
4本目	0.315	0.331
5本目	0.315	0.329
6本目	0.316	0.325
7本目	0.314	0.328
8本目	0.316	0.330
平均値	0.315	0.329

単位：l/kWh

工事は長杭→短杭→長杭と長杭と短杭が交互に行われることになるが，全体としては 5%の CO_2 削減効果が確認できた。

（5）システムの特徴

本システムの特徴を以下に示す。

①施工条件によっては，10%以上の CO_2 排出量削減が可能。

②発電機の運転時間の偏りが生じないように運転の順番が設定できるようになっている。

③設定を超える使用電力量になった場合，緊急に追加して発電機を運転させるフェールセーフ機能がある。

④発電機の制御電源の入れ忘れやシステム稼動中に手動で発電機を停止させた場合などエラーメッセージを表示させヒューマンエラーを防止する機能を持っている。

4．おわりに

平成 22 年の「黄鶴」建造から約 2 年間で，作業船ハイブリッドシステムで削減された CO_2 削減量を表-3 に示す。

表-3　CO_2 削減量

昇降ウインチ電力回生システム	33.2t(196 日運転)
発電設備・総合制御装置	392.3t(196 日運転)
太陽光・風力発電システム	0.4t(196 日運転)
コージェネレーションシステム	0.0t(196 日運転)
燃料改質装置	2.9t(148 日運転)
発電機自動発停システム	76.1t(137 日運転)
合　計	504.9t

建造から約 2 年間で作業船ハイブリッドシステムは 504.9t もの CO_2 の削減を行うことができた。今後もますます，省エネに対する関心の高まりとそれに対する技術の向上が見込まれるなか，今後，層混合処理船のみならず他の作業船においても各施工方法に適合した発電機の自動発停システムの導入を検討していく考えである。

実稼働状態の建設機械排出ガス計測結果における一考察

車載型計測装置による油圧ショベルの排出ガス計測方法及び結果について

（独）土木研究所　　○石松　豊
杉谷　康弘
西山　章彦
藤野　健一

１．はじめに

建設機械などの公道を走行しない特殊自動車の排出ガス規制（特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律（以下「オフロード法」と言う。）が平成 18 年 10 月より開始された。さらに、2011 年に規制値等の一部が改正され、排出ガス新試験モードの追加（従来からの定常試験モードに加えて、過渡試験モードの追加）、NOx、PM の規制値の大幅な低減など非常に厳しいものとなり、この規制に対応するため新しい排出ガス低減技術が採用されることになった。実際の大気環境が改善される上で大切な事は、規制の強化により高性能となった排出ガス性能が、エンジンベンチ試験でクリアした性能を、使用過程においても維持されていることである。そのためには、適切な点検整備が実施されるとともに、使用過程車の排出ガスを適切に評価する技術があることが望ましい。しかし、実稼働状態での排出ガス性能を計測する方法は確立されていない。

そこで、本研究は現在市場にある車載型排出ガス計測装置を用いて、使用過程車の建設機械において実稼働状態で排出ガスが計測可能なことを確認するとともに、その計測値の結果について考察するものである。

２．研究方法[1)]

2.1 計測対象建設機械

計測に使用した建設機械は、代表機種として油圧ショベルとし、国内で比較的多く販売されているＸ社、Ｙ社、Ｚ社の 3 機種を選定して下記の条件に合うものとした。

・運転質量（機械質量）：20 トンクラス
・標準バケット容量：0.8m³
・定格出力：オフロード法排出ガス規制区分（75kW 以上 130kW 未満）
・排出ガス性能：オフロード法 2006 年基準適合車

各社 1 機種とし、それぞれの機種に付き 3 台（合計 9 台）の計測を実施した。また、計測対象建設機械は、建設機械レンタル会社から実際にレンタルに供されている車両を調達した。各油圧ショベルの稼働時間は、表－1 のとおりである。

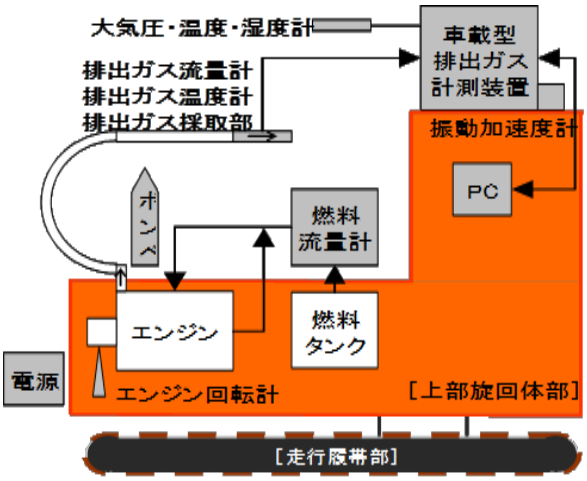
表－1　各計測対象建設機械の稼働時間

単位：時間	X 社	Y 社	Z 社
1 台目	278	2,225	4
2 台目	647	3,932	2,323
3 台目	5,258	5,542	4,960

2.2 計測機器の概要

（１）計測機器の構成

排出ガス計測機器構成状況を図－1 に示す。



図－1　排出ガス計測機器構成図

なお、エンジンに余計な負荷をかけないため、搭載する全ての計測機器の電源については、車両後方に発動発電機を搭載して確保した。また、燃料流量計など排出ガス計測装置本体以外の装置や校正ガスのボンベの搭載には、専用の搭載架台を製作した。

（２）車載型排出ガス計測装置

オフロード法では、排出ガス濃度を計測するための分析計としては、NOx については化学発光分析計（CLD）、CO については非分散形赤外線分析計（NDIR）、HC については水素イオン化法分析計（FID）が標準になっている。車載型排出ガス計測装置としては、これらの分析計を一つの筐体にしてコンパクト収納した装置を使用した。取付場所は、油圧ショベルの運転室（キャブ）の上とし、振動や衝撃を和らげるために専用の取付台にバンドで固定している（写真－2）。計測条件の設定や計測の開始・停止の操作、計測状況の確認などの装置専用のソフトが入っているコントロール PC は運転室（キャブ）内に設置した。



写真－2　車載型排出ガス計測装置設置状況

（３）その他主な計測機器

排気ガスのサンプリングや排気流量などを計測するため、油圧ショベルの排気管から金属製のフレキシブルホースと鋼管で排気管を延長し、専用のアタッチメントを付けた。排出ガスの質量を計算するための要素のひとつである排出ガス流量計測は、排気管の出口にピトー管式流量計を設置した（写真－3）。エンジン回転数の計測は、エンジンの出力軸に光ファイバーセンサを設置した。燃料流量計の計測は、燃料タンクからエンジンに向かう燃料配管の途中に容積式の燃料流量計を設置した。

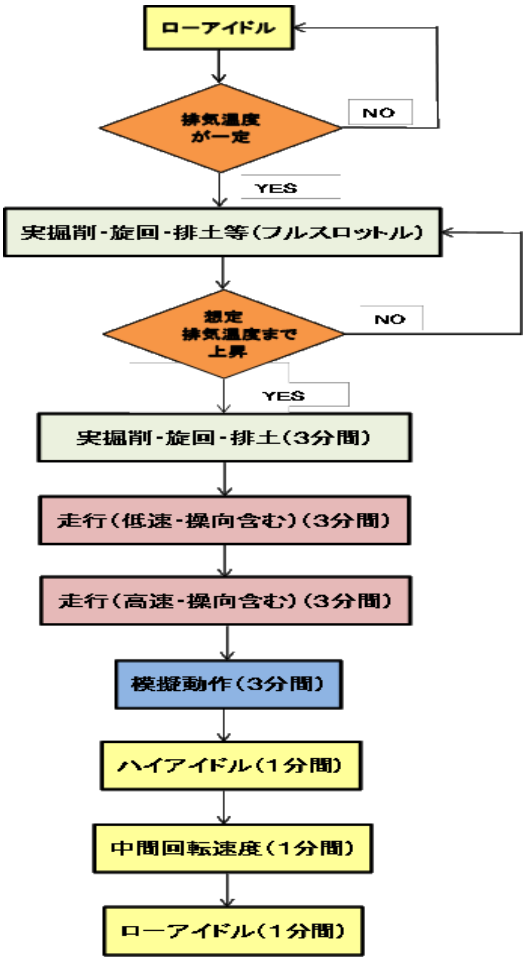


写真－3 排出ガス排気管アタッチメント設置状況

2.3　計測の運転操作手順と計測条件

（１）計測の運転操作手順

計測は図－2 の手順に従い、計測対象建設機械を運転した。実掘削は、ほぐした土をバケットに山積みの状態になるよう掘削し、約 90 度旋回し、排土することを 3 分程度繰り返した。走行は、高速モード・低速モードで、それぞれ 30m の直線を回転数、操作レバーを全開にして、端に着いたら上部を旋回して元の位置に戻ることを 3 分程繰り返した。



図－2　運転操作手順

（２）オペレータ及び試験場所

油圧ショベルのオペレータは、3 人（内 2 人は本研究所の研究員）であり、試験の場所は計測した 9 台の内 8 台は本研究所で実施した。オペレータの熟練度やテラメカニックス等の観点から、データには少なからず、それらのための値のばらつき要素が含まれているが、同じ試験を複数回繰り返すことによって、極端な異常値などについては、排除している。

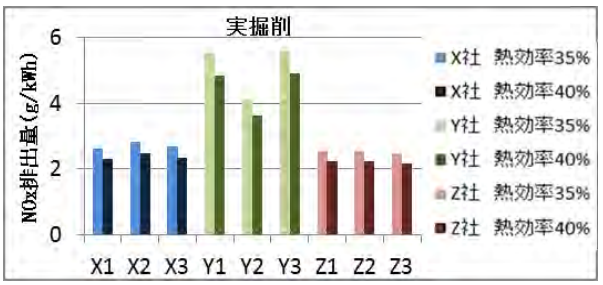
（３）運転モード

各社の油圧ショベルには、通常の運転モー

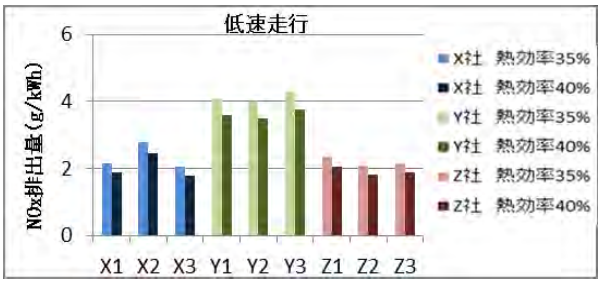
ド（以下「P モード」と言う。）に加え、燃料消費を少なくするための機能として省燃費モード（エンジン回転数を抑えるなどして燃料消費量を抑えるようにプログラム化されている。以下「E モード」と言う。）を設定できるようになっている。計測は、通常モードと省燃費モードの両方について行ったが、本論文では P モードの試験結果について述べる。

3．研究結果

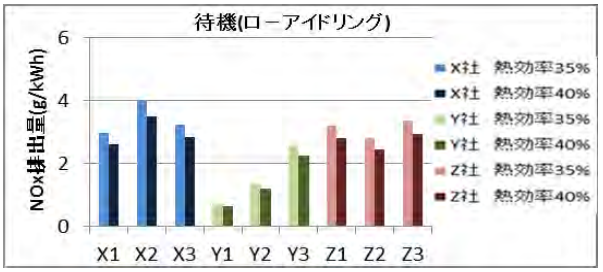
振動・衝撃による計測機器の故障や建設機械の本来の作業を損なうことなく、一連の運転操作手順が行えたことによって、その結果実稼働状態での排出ガス量の計測が可能であることが確認された。NOx（窒素酸化物）、CO（一酸化炭素）、THC（全炭化水素）の排出量を、試験した各油圧ショベル毎に、実掘削、低速走行、待機（ローアイドリング）に分けて整理した結果を図－3～11 に示す。横軸の X1、X2・・・は、X 社の 1 台目、X 社の 2 台目という意味である。なお、規制値の単位（g／kWh：g は排出ガスの質量、kWh はエンジンの仕事量）に対する排出ガス量を計算するためには、本来は仕事量を算出するのに、エンジン出力（kW：$2\pi T \cdot N / 60 / 1000$（T：トルク N・m、N：エンジン回転数 rpm））を算出する必要がある。しかし、使用過程車においてはトルクを直接計測することは困難であり、また燃料消費量、回転数、トルクの 3 つの変数の関係を示した詳細な値は一般には公表されていないことなどから、ここでは簡易的に計測した燃料消費量を熱換算し、建設機械用ディーゼル機関の一般的な熱効率（35%～40%）[2] を仮定して、35%と 40%で仕事量を算出した。また、今回の計測の対象となった各 3 社を比較すると X 社については CO、THC が比較的多く出ている傾向がある。Y 社については NOx が比較的多く出ている傾向がある。Z 社については比較的、突出したものは見られなかった。このように各 3 社の排出ガス量に特徴が見られた。さらに、自動車 NOx・PM 法[3] や大気汚染防止法の観点から重要視される NOx の排出ガス量については、各作業（実掘削、低速走行、待機）の 9 台の平均値、及びそれらの組合せ（JCMAS H 020[4] を参考に動作の構成比を実掘削 56%、走行 11%、待機 33%として排出ガス量を計算した値である。）値を図－12 に示す。その結果、オフロード法 2006 年規制値を下回るという結果になった。なお、オフロード法では、規定の運転モードにおいて排出ガス試験を行い、その試験値が規制値をクリアしていれば規制に適合している。そのため、規定の運転モード以外の運転モード（例えば実稼働状態における「実掘削」のような特定の運転モード）において、仮に規制値を上回る場合があっても法令上は問題がないことになっている。



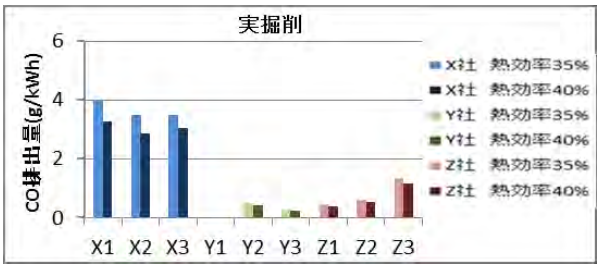
図－3　実掘削のときの NOx 排出量



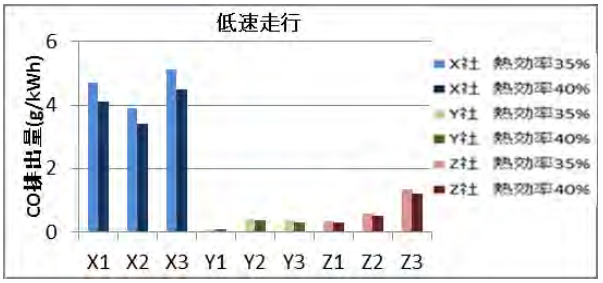
図－4　低速走行のときの NOx 排出量



図－5　待機のときの NOx 排出量



図－6　実掘削のときの CO 排出量



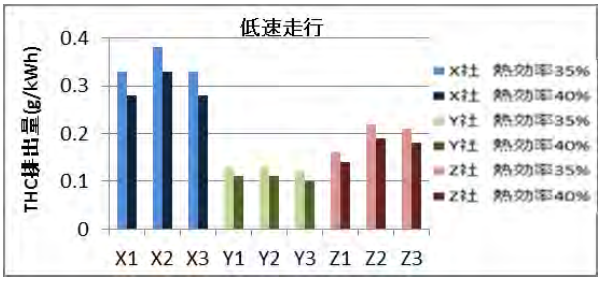
図－7　低速走行のときの CO 排出量



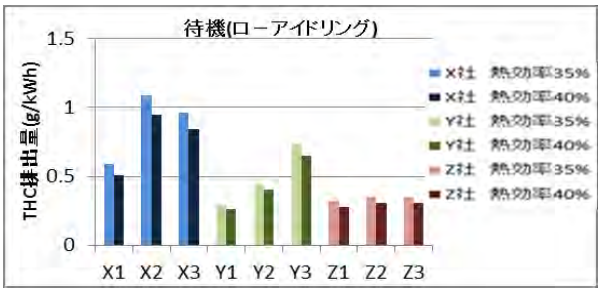
図－8　待機のときの CO 排出量



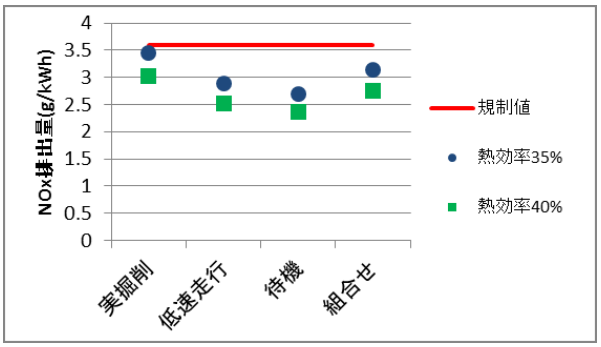
図－9　実掘削のときの THC 排出量



図－10　低速走行のときの THC 排出量



図－11　待機のときの THC 排出量



図－12　NOx 排出量の計算結果

４．考察

今回の計測によって、エンジンベンチ試験による方法ではなく、エンジンを搭載したままでの実稼働状態の排出ガス量を計測することが確認できた。ただ、実験中に振動によりフレキシブル管が破断することが一度あり、もっと強度のある最適な材料を選択するなど改善の余地が見られた。また、今回計測の対象となった各 3 社によって排出ガス量に特徴が見られ、他社とは 2 倍以上の差が出るものもあった。この原因として、近年各メーカとも地球温暖化抑制や原油価格高騰の背景のために省燃費化を向上させつつ、排出ガス規制値をクリアしていることが考えられる。この際、各メーカにおいて搭載する建設機械の特性により排出ガス量の差が出る場合があるのではないかと考えられる。さらに、図－12 の組合せの値の結果から、エンジンベンチ試験で設定されているモードと実稼働状態でのモードは必ずしも一緒ではないが、エンジンベンチ試験のオフロード法 2006 年規制値をクリアしている今回の計測対象建設機械は、データが 9 台ではあるものの、実稼働状態でも規制値をクリア出来ていると考えられる。

５．今後の課題

本研究で、計測対象の油圧ショベルでは、実稼働状態において排出ガス量を計測できることが確認された。今後は、他の建設機械についても確認する必要がある。また、前文で述べたように 2011 年からは NOx、PM などの規制の強化が図られ、DPF（Diesel Particulate Filter）の本格的な導入が始まっており、2014 年からは尿素 SCR（Selective Catalytic Reduction）などの導入が予想される。現段階では、使用される条件によっては、これらの後処理装置の性能劣化が生じることなどが懸念されており、それに対する技術的な開発やモニタリングをする体制が確立されることを切に願う。

参考文献

1)杉谷康弘・藤野健一・石松豊：車載型計測装置による建設機械の排出ガス計測方法の検討、土木技術資料、VOL.53 NO.7、pp.10～13、2011 年 7 月

2)ジョン・F サンフォード：現代の科学 20「熱機関」、1980 年

Yunus A.Cengel、Michael A.Boles 共著：図説基礎熱力学、図説応用熱力学、1997 年

3)自動車から排出される窒素酸化物及び粒子状物質の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法

4)一般社団法人日本建設機械施工協会規格：土工機械－エネルギー消費量試験方法－油圧ショベル

4.2　数式および数学記号

数式は 10.5pt とし，次に示す式(1), 式(2)のように書いて下さい。

$$Z=\sin^2\left(\frac{\pi}{5}+\sum_{m=1}^{\infty}\cos\frac{(2n-1)}{2}\pi+\int_0^{2\pi}(2\sin\theta\cos\theta-2\theta)d\theta\right) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$Fc=k^2z\left[\frac{\partial_U}{\partial z}\right]\left[\frac{\partial p_c}{\partial z}\right]\left[\frac{K_c}{K_m}\quad\phi_m{}^{-2}\right] \quad \cdots\cdots(2)$$

数学記号は，文書中に出てくる場合（例えば Fc）も，数式のフォントと同じものを用いて下さい。

数式は括弧書きで右詰めにします。

本文と数式の間は 1 行空けて下さい。

4.3　図表，写真

(1) 図，表，写真の作成

原稿は，論文集（印刷物）と CDR の両方に掲載されます。論文集は，白黒印刷ですので，図表や写真は白黒を前提とします。カラーの図表，写真は，論文集では不鮮明になることがあります。ご注意下さい。

(2) 図，表，写真の位置

図表，写真はそれらを最初に引用する文章と同じページにおくことを原則とします。入りきらない場合，次ページに追い出すことはかまいませんが，できるだけその図表が説明されている本文に近い箇所に配置して下さい。ただし，本文と図表が混在すると文章が読みにくくなるため，1 頁内に複数の図表を配置するときには，図表はなるべくその頁内の上部か下部にかためて配置して下さい。

図表は，右段，もしくは左段の一段分を使い配置して下さい。小さな図表でもその左右に文字を配置すると読みにくくなるため，そのような配置は避けて下さい。逆に図表の幅が大きく，1 段に入りきらない場合には，左右 2 段分を使い配置して下さい。

図表と本文の間には 1 行の行間スペースを設けて下さい。

図表は鮮明な物を貼り付けて下さい。

図表中の文字が小さすぎると読者には判読することができません。図表中の文字は，標準として

- 漢字・仮名は明朝体の全角 9pt
- 英字・数字は Roman 体の半角 9pt

としますが，既存の図でゴシック体などを用いている場合は，そのままでも良いことにします。

図-1　図，写真のキャプションは下に置き，このように長いときはインデントして折り返します

表-1　表のキャプションは表の上に置く

表

(3) 図，表，写真の文字および表題

図，表，写真中の文字のフォントは，漢字・仮名は明朝体の全角，英字・数字は Times などの代表的な Roman 体を使用して下さい。文字のサイズは 9pt 程度として下さい。文字のサイズが小さいと文字が判読できなくなります。最小でも 6pt 以上の文字を使用して下さい。

図・表の表題は，9pt のサイズのゴシック体で次のように記載して下さい。

図＋半角ハイフン＋番号＋全角スペース＋表題

表＋半角ハイフン＋番号＋全角スペース＋表題

写真＋半角ハイフン＋番号＋全角スペース＋表題

表題は図表の中央に配置しますが，表題が長く１行におさまらない場合には，サンプルの**図-1** のように折り返します。

図と写真の表題は，図，写真の下に，表の表題は，表の上に記載して下さい。

4.4　本文作成上の注意

文章は口語体で，基本的に「である調」で統一して下さい。私的な表現，広告，宣伝に類する内容の記載は避けて下さい。また，原稿は次のような点に留意してまとめて下さい。

(1) 目的を明示するとともに，要点がどこにあるかが明確になるように記述して下さい。

(2) 既往の研究・技術との関連を明らかにして下さい。すなわち，従来の研究・技術のどの部分を発展させたのか，どのような点がユニークなのかを示して下さい。

(3) 単位は原則としてSI 単位を使用して下さい。従来単位系を用いる場合は，かっこ書きで併記して下さい（例：9.8kN/m^3（1 tf/m^3））。

4.5　脚注および参考文献

(1) 脚　注

本文中の脚注や注はできるだけ避けて下さい。本文中で説明するか，もしくは本文の流れと関係ない場合には付録として本文末尾に置いて下さい。

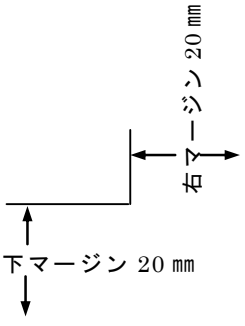
(2) 参考文献

参考文献は本文中の該当箇所の右肩に[1),2)]……として番号順にすべて本文末尾にリストとしてまとめて下さい。参考文献という文字はゴシック体の全角10.5ptで書いて下さい。参考文献リストは，漢字・仮名は明朝体の全角9pt，英字・数字はTimesなどの代表的なRoman体9ptを用いて下さい。参考文献は次の書式に従って書いて下さい。

参考文献

1) 著者1・著者2：論文題目，雑誌名，巻・号，pp.○～○，発行年

2) 著者3・著者4：論文題目，雑誌名，巻・号，pp.○～○，発行年



ロングブーム吹付機開発による切羽作業の安全性向上

清水建設(株)土木技術本部機械技術部　○藤吉　卓也
同　　土木技術本部技術開発部　　鈴木　正憲
同　　宮狩トンネル作業所　　田代　浩信

１．はじめに

山岳トンネル工事における安全性向上のためには、トンネル掘削作業時における切羽安定によるリスク低減が重要課題のひとつである。特に軟弱な地山においては、掘削直後の応力解放時から切羽の挙動が不安定な場合があり、崩壊・崩落まで発展する恐れもある。

このような危険な状況を回避するためには、掘削直後の地山の緩みを抑制し、できるだけ早く切羽を安定させることが重要である。

当社は、早期コンクリート吹付けによる切羽安定を主目的とし、吹付け範囲が通常仕様の約 1.4 倍であるロングブーム吹付機を開発し、現在稼働中の現場へ導入を行った。本稿では機体の開発経緯及び現場での稼働状況について報告する。

２．ロングブーム吹付機開発の目的

切羽安定対策の一つとして、掘削直後に行う鏡吹付けがあり、吹付けコンクリートによって、小土塊の崩落防止や地山の緩み領域拡大の抑制を行う。特別な支保材料や機材の準備必要としない鏡吹付けは、切羽安定に対する補助工法として一般的かつ有用である。

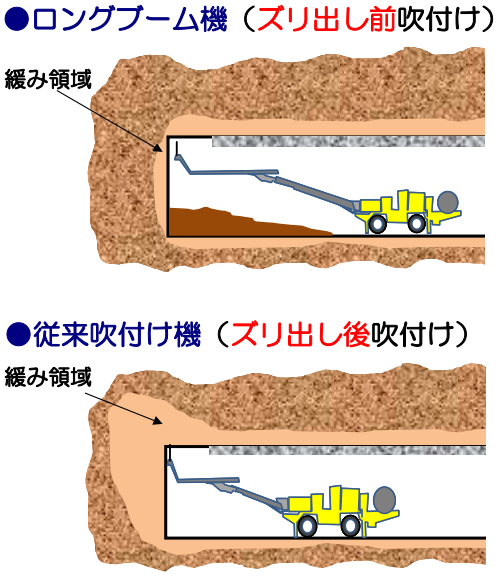


図-1　ロングブームによる緩み領域拡大抑制

このときズリだし作業に先行して吹付け作業を行うことができれば、切羽の緩み領域の拡大を抑制することができる。しかし通常の吹付機のブーム長では、吹付け可能範囲の制約によって、掘削ズリが切羽から撤去されなければ、吹付け作業を行うことが出来なかった。

そこで吹付け機のブームを長尺化し、掘削ズリが切羽近傍に堆積している状態から、吹付け作業を開始することができるロングブーム吹付機開発について検討を進めた(図-1)。さらに大断面トンネルでは、ロングブーム吹付機を壁面近くに寄せることにより、積込み機械と切羽での同時作業も可能である。この開発により、ズリだし作業中の緩み領域の拡大を抑制し(図-2)、切羽作業の安全性向上を図ることを主目的とする。

また吹付け面と機体の離隔距離を大きくとることが可能となることにより、安全性向上の視点では、さらに次のような改善項目が挙げられる。

① 切羽直近での落石により機体が損壊リスクを低減することできる。
② インバート仮閉合（吹付けコンクリート）時に法肩から離れて機体を配置が可能となり、機体の設置路盤の崩壊リスクを低減することができる。

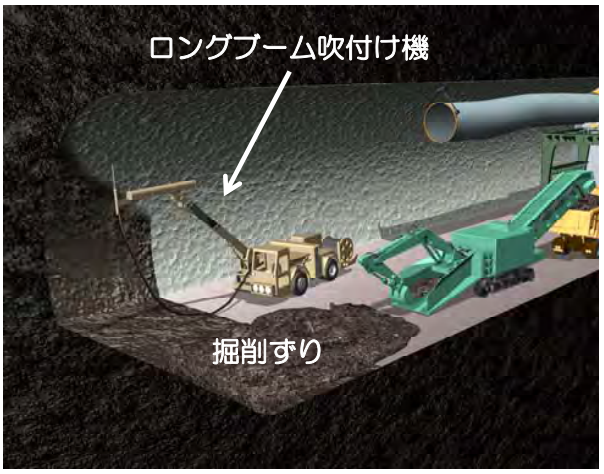


図-2　ズリだしと吹付けの同時施工のイメージ

３．設計における課題

ロングブーム吹付機の開発においては、ロングブーム仕様へ変更したときに発生する問題点を検討し、次の項目を設計時における課題とした。

① 吹付けノズルの振動抑制
② コンクリート閉塞対策
③ 機体の安定性確保

以下に実施事項及び検討内容を示す。

3.1　吹付けノズルの振動抑制

作業性について、先端のノズル部の振動が大きくなりオペレータの吹付け操作に支障がでる可能性があった。事前に検証おこなうために、製作設計に前立ってロングブームを模擬した実験機を用いて、データ収集を行った(図-3)。

振動の計測方法は、ブーム先端付近にマーカーを貼り付け、マーカーの動きをハイスピードカメラで撮影を行い、撮影データより振幅、速度、加速度の計測を行うものとした。ブームの挙動再現性については、現役のオペレータに依頼し実際の吹付作業におけるノズルワークを再現した。

ブームを最も伸ばした姿勢と、ブームを最も縮めた姿勢での吹付け動作における振動を測定し、比較した結果、ブームの振幅はほぼ同程度であった。しかし速度、加速度においては、ブームを縮めた方がより大きい値を示した。これらのデータについて検証を行った結果、ブームを縮めた時に振動が速く激しくなる現象は、ブームを縮めた時のブームの固有振動数と、オペレータのノズル操作による振動数が重なった場合の共振であることが明らかになった。よって振動抑制のために、共振時の振動数が発生しないようブームの剛性強化を本設計における条件の一つとした。

3.2　コンクリートの閉塞防止

ブームの長尺化に伴い吹付けコンクリートの圧送距離が延びるため、ホース内での閉塞の可能性が高くなる。なお、コンプレッサからのエア合流部までは、通常仕様機と条件は同じであるため、コンクリートポンプの能力は検討項目から外した。よって今回はエア合流部より先端側の配管方式について設計検討を行った。

ロングブームに適した方式を検討した結果、マテリアルホースはブームの動きに対してフレキシブルに対応できることから、通常用いる低圧マテリアルホースを延長する方向で設計を進めた。しかしホースの長尺化による施工中の取り回しの不便さや、捻れ等による閉塞が懸念された。対策として、通常地上を這わせるホースを、新規製作した固定器具を用いてブームに固定し、地上に接触しないようにした。またブームの伸縮にホースが滑らかに追従するように固定位置を設定した。

3.3　機体の安定性確保

ロングブーム吹付機は従来機に比べ大きくブームが前方に張り出す姿勢となるため、安定性確保が必要であり、走行時を含めた様々な作業姿勢において、機体の安定性を検討した。

もっとも不安定な作業姿勢における重心位置を部材重量等から算出した結果、重心位置はアウトリガを転倒支点とした前後左右の支点間内に十分収まっており(図-4)、ロングブーム仕様においても機体が十分な安定度を有していることを確認した。

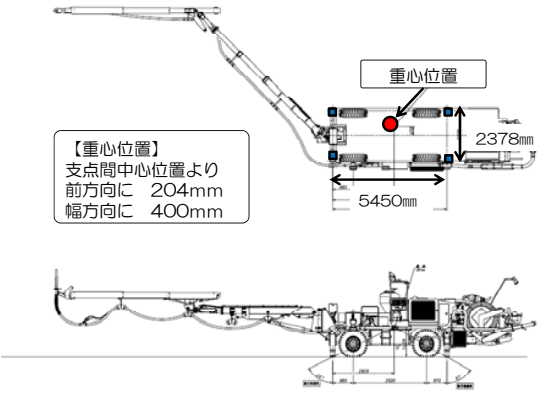
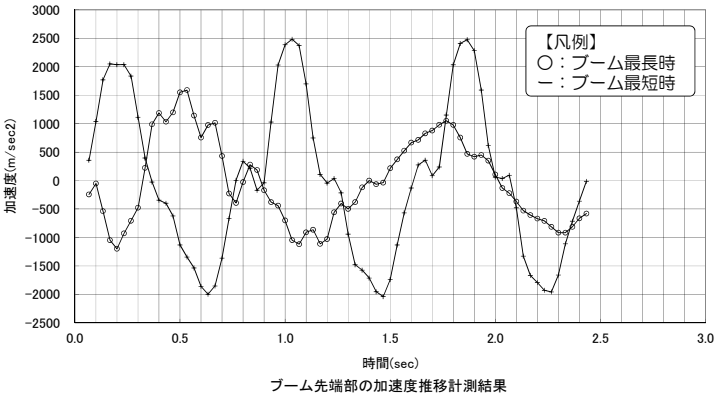


図-4　最も不安定な作業姿勢での重心位置





ブーム先端部の加速度推移計測結果

図 - 3　ロングブーム先端の振動データ取集

４．ロングブーム吹付機開発機概要

以下に、ロングブーム吹付け機の仕様説明および従来機との比較を行う。この機械の開発ではCJM2200E-V（古河ロックドリル株式会社）をベースマシンとし、ロングブーム本体、ブーム取付け部のフレーム、ホースガイド等の新規設計、製作、組立を行った。

4.1　機器仕様

開発機の機器仕様を表-1 に示す。

表-1　ロングブーム吹付機の主な仕様

項目	仕様
1. 全体仕様	
型式	古河機械金属　CJM2200E-V
全長	18280mm（ロングブームCL2-L）
全幅	3000mm
全高	4000mm
総質量	26ton
2. コンクリートポンプ	
型式	シンテック　SP－25
理論吐出量	6～22m2/h（50Hz）、8～25m3/h（60Hz）
理論吐出圧	2.6MPa
質量	1950kg
3. ブーム	
型式	CL2-L
最大水平吹付け範囲	高さ11700mm、幅17100mm(ノズルスライド水平時)
ノズル先端作動範囲	高さ10600mm、幅14100mm(ノズルスライド水平時)
質量	5000kg
4. 急結材供給装置	
型式	デンカ　PAC-400V
輸送能力	4～22kg/min
圧送能力	0.1～0.5MPa
質量	1000kg
5. コンプレッサ	
(1)コンクリート搬送用	
吐出空気量	124m3/min（50Hz）、14.0m3/h(60Hz)
吐出空気圧	0.7MPa
電動機出力	90kw
(2)急結材搬送用	
吐出空気量	6.1m3/min（50Hz/60hz）
吐出空気圧	0.7MPa
電動機出力	37kw

4.2　通常仕様機との比較

図-5 に開発したロングブーム吹付機と古河ロックドリル社の通常仕様機種の吹付け可能範囲を並べて示す。通常仕様機の吹付け可能範囲は 13.3m 高さ 12.0mに対して、ロングブーム仕様機は幅 17.1m、高さ 13.1mの吹付け可能範囲を実現し、奥行方向の吹付けは、通常仕様機よりも約 5m（従来機と比較して約 1.4 倍）遠くから行うことができる。これにより、先に述べた切羽に堆積したズリ越しに切羽の吹付けを行うことを可能とし、緩み領域の拡大抑制、切羽安定に寄与する。

参考として、写真-1 にブームを最も伸ばした状態におけるロングブーム吹付機の全体写真を示す。



写真-1　ロングブーム吹付機の外観

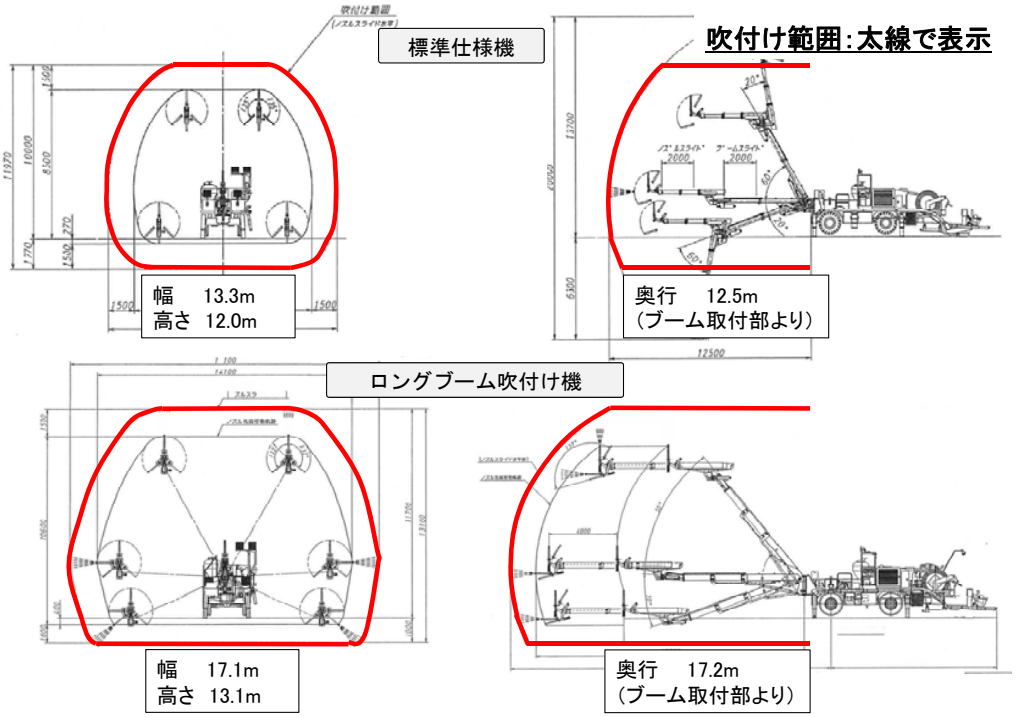


図 - 5　通常仕様機との吹付け範囲の比較

５．現場における稼働状況報告

製作工場での動作確認試験を行った後、平成 25 年 5 月、中部横断道自動車道の宮狩トンネル工事に導入した。現場概要と稼働状況を報告する。

5.1　現場概要

工事名：中部横断自動車道　宮狩トンネル工事
発注者：中日本高速道路東京支社
（南アルプス工事事務所）
工期　：自）平成 24 年 3 月 7 日
至）平成 28 年 4 月 14 日

【トンネル概要】
a)トンネル延長 2,893m
b)掘削断面積　標準部 80m2
（非常駐車帯部 100m2）
c)掘削工法　全断面掘削工法
d)掘削方式　機械掘削・爆破掘削

5.2　現場での適用状況

まず、実機による性能確認を目的として、現場進入路および坑外仮設備ヤードにおける仮設の法面吹付けでの試験施工を行った。その結果、ロングブーム仕様による吹付けノズル稼働範囲の拡大に関しては、従来機では届かなった高所や仮設建物の裏の部分を吹付けできることを確認できた。さらに、ロングブーム化にともない、コンクリートの圧送ホースが従来に比べ大幅に長くなったが、施工中の閉塞などのトラブルは発生せず、通常仕様機と同様の吹付け能力を確認した。

これらの試験施工の結果、ロングブーム吹付け機の施工性能が確認されたため、トンネル本坑の掘削に適用した。宮狩トンネルの坑口部は 3 ヵ所の地滑りが確認されており、坑口部の切羽は地滑りの影響で風化し脆かったので、肌落ちなどの災害リスクが懸念された。長尺先受け工を併用しながら掘削を実施したが、掘削後に切羽の安定の低下が見られたため、ロングブーム吹付け機により、ズリ出し前に切羽の吹付を行った（写真-2）。その結果、肌落ちの危険を回避しながら切羽の安定化を図れたことで、従来に比べ作業員の安全性の向上も確認された。

また、不良な地山が発生した場合も、切羽に堆積したズリ後方にロングブーム吹付機を配置した状態で、ブームを最大に伸ばした吹付けを行うことも可能である（写真-3）。



写真-2　坑口部の吹付け状況



写真-3　堆積ズリ後方からの吹付け作業

６．おわりに

本技術は古河ロックドリル㈱との共同開発である。今後は、現場での適用を通して、ロングブーム吹付け機の施工性に関するデータを収集・解析し、一層の性能の向上を図っていく。

参考文献

1) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案），H17年
2) 土木学会：山岳トンネルの補助工法－2009年版－,H21年

掘削用機械のつり荷走行時におけるつり荷重の変動計測

(独)労働安全衛生総合研究所　○ 堀　智仁
(独)労働安全衛生総合研究所　　玉手　聡

1．はじめに

掘削用機械による荷のつり上げ作業[1]は，労働安全衛生規則第 164 条「主たる用途以外の使用制限」[2]において原則的に禁止されており[3]，その使用については限定されている。一方で，実際の現場では作業の性質上やむを得ず荷をつった状態で走行する，つり荷走行が行われていた。そのような背景のもと，クレーン作業を安全に行うために，一般社団法人日本クレーン協会(JCA)は，「油圧ショベル兼用屈曲ジブ式移動式クレーンのつり荷走行時の能力設定に関する指針」[4),5)]を制定し，つり荷走行を可能とする条件を示した。その後，各メーカにより JCA 規格に準ずる掘削用機械が開発され，広く普及するようになった。しかしながら，同建設機械による災害は多く発生しており，過去の災害事例を調査すると，クレーン作業中の転倒が多くみられた。JCA 規格では，つり荷走行の条件として，つり荷の重さを定格荷重の 1/2 以下とし，その走行路については「水平堅固で傾斜 1%以下の傾斜」[6]としている。しかし，実際の建設現場には起伏や強度のばらつきも存在するため，そのような地盤を走行する際に，機械が不安定化することが考えられる。

そこで，本研究では，掘削用機械のつり荷走行時における荷重変動を計測し，安全作業に必要な条件について検討した。

2．実験条件

2.1　実験条件

過去に発生した掘削用機械の転倒災害に関する調査の結果から，小型の機種で多く発生している[7]ことから，本研究では，小型の機種を用いて実験を行った。実験に使用した機械を図-1 に示す。機械の総質量は 43.5kN，平均接地圧 26kN/m^2，最高速度は 4.2km/h である。

表-1 に実験条件を示す。本実験では，作業半径やつり荷の重さ W_o，走行速度 V，走行路をパラメータとした。作業半径は旋回中心からフック先端までの水平距離を示し，本実験では作業半径を 2.1m および 3m の 2 種類とした。それぞれの定格荷重は 10kN と 5kN であったため，つり荷の重さ(W_o)は，その 1/2 であった。走行速度については，2km/h および 3km/h とした。

つり荷の荷重（以下，つり荷重という）については，格納式フックにロードセル(共和電業製 定格荷重 10kN)を取り付けて計測を行った。

2.2　走行路の条件

本研究では，3 種類の走行路で実験を行った。その走行路は，水平堅固の理想的な走行路を模擬したコンクリート床と，関東ロームを盛土して作



図-1　実験に使用した掘削用機械

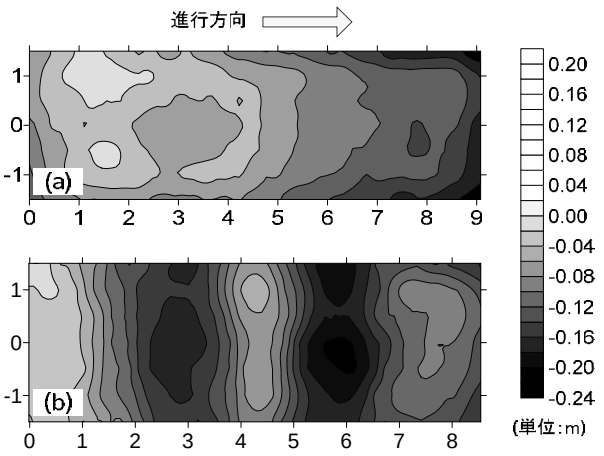


図-2　走行路の地表面形状

表-1　実験条件

実験名	作業半径　(m)	つり荷の重さ W_o (kN)	走行速度 V (km/h)	走行路
Cs1	3	2.5	2	コンクリート床
Cs2	3	2.5	3	コンクリート床
Cs3	3	2.5	2	平坦地盤
Cs4	3	2.5	3	平坦地盤
Cs5	3	2.5	2	起伏地盤
Cs6	3	2.5	3	起伏地盤
Cs7	2.1	5	2	コンクリート床
Cs8	2.1	5	2	平坦地盤
Cs9	2.1	5	2	起伏地盤

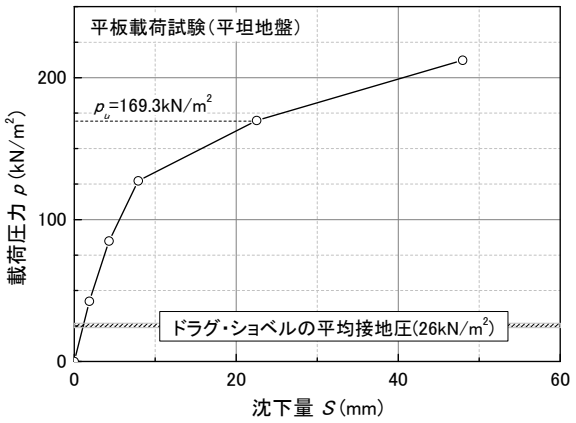


図-3　支持力試験結果

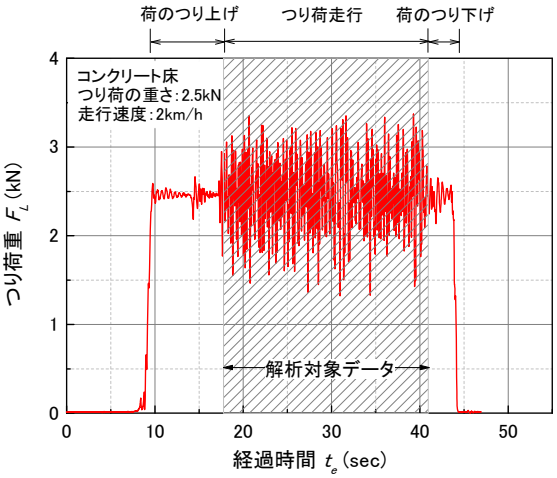


図-4　Cs1 におけるつり荷重 F_L の時刻歴

製した平坦な地盤(平坦地盤)と起伏を有する地盤(起伏地盤)である。盛土はまき出し厚 30cm とし，全 3 層で締固めて作製した。各層の締固めはハンドガイド式の振動ローラにより行った。図-2 に走行路の地表面形状を示す。平坦地盤の高低差は少ない。それに対して，起伏地盤には 2 箇所のくぼみがあり，その最急勾配は 4.5° であった。

関東ロームで造成した走行路の地盤強度を確認するために，平板載荷試験 [8)]を行った。図-3 に平坦地盤における支持力試験の結果を示す。走行路の極限支持力 p_u は 169kN/m^2 であり，本実験で使用した機械の平均接地圧（26kN/m^2）よりも大きな値であった。

3．実験結果

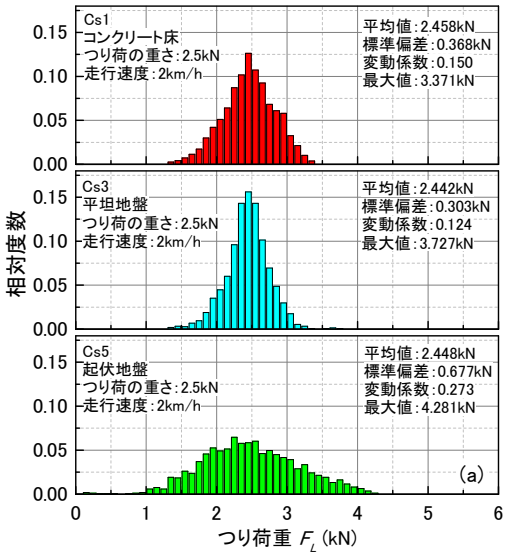
3.1　つり荷重の解析

図-4 に Cs1 におけるつり荷重 F_L と経過時間 t_e の関係を示す。t_e=10～17 秒は，荷をつり上げた状態で機械は静止しているため F_L に変動はみられない。一方，t_e=17～41 秒はつり荷走行時のデータである。機械の前進に伴い F_L は大きく増減している。本研究では，荷重が大きく増減している範囲のデータを解析対象とした。

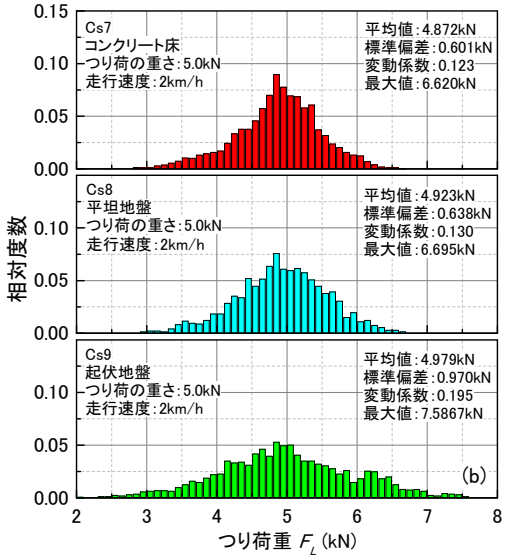
3.2　走行路の違いがつり荷重に与える影響

図-5 に各実験条件におけるつり荷重 F_L の度数分布を示す。F_L の値はつり荷の重さ W_o を中心として，概ね左右対称に分布している。また，理想的な水平堅固条件であるコンクリート床を走行した Cs1 と Cs7 では，W_o の約 1.3 倍が最大 F_L となっている。

図-5(a)に，W_o=2.5kN の結果を示す。Cs1(コンクリート床)と Cs3(平坦地盤)を比較すると，統計値に差はあるもののその分布に大きな違いは見られない。一方，CS5(起伏地盤)の F_L は Cs3 よりも広く分布しており，地盤起伏の影響により荷重の変動が大きくなっている。この結果は，W_o=5kN の結果を示した図-5(b)においても，同様の傾向を示している。コンクリート床と平坦地盤の結果に大きな差がなかった理由は，地盤の支持力が機械の接地圧に比べ十分高く，コンクリート床と同等な「水平堅固地盤」であったためと考えられる。以上の結果から，走行路の起伏の存在は F_L の変動を大きくさせる要因であることがわかった。



(a)つり荷の重さ 2.5kN



(b)つり荷の重さ 5kN

図-5　各実験条件における F_L の度数分布

3.3　走行速度がつり荷重に与える影響

走行速度の違いがつり荷重の変動に与える影響について検討した。図-6 にデータのばらつきの程度を図示することができるボックスチャート [9]を示す。図中には，1，25(第一四分位)，50(中央値)，75(第三四分位)，99 パーセンタイルのほか，最小値，最大値および平均値を示している。走行速度 V=2km/h と V=3km/h の結果を比較すると，すべての条件において，V=3km/h の F_L が広く分布している。

表-2 に，各試験条件における変動係数と 99 パーセンタイルに相当する F_L の値(F_{L99})等を示す。V=2km/h と V=3km/h の結果を比較すると，全てにおいて変動係数および F_{L99} ともに，V=3km/h の値が大きい。中でも起伏地盤の結果である Cs5 と Cs6

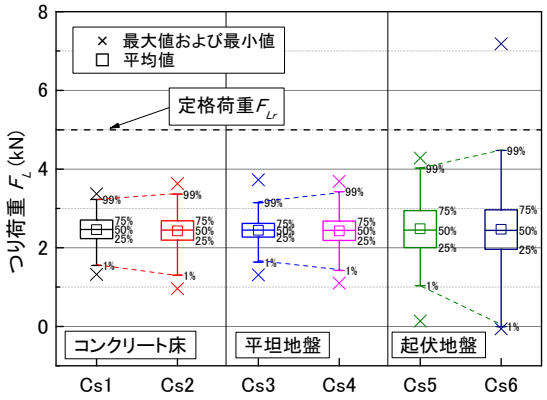


図-6　走行速度がつり荷重変動に与える影響

表-2　各条件における変動係数および F_{L99} 等

実験名	速度	変動係数	F_{L99} (kN)	荷重余裕度 I_a
Cs1	2km/h	0.145	3.23	1.55
Cs2	3km/h	0.169	3.36	1.49
Cs3	2km/h	0.124	3.15	1.59
Cs4	3km/h	0.160	3.42	1.46
Cs5	2km/h	0.273	4.03	1.24
Cs6	3km/h	0.341	4.48	1.12

の比較から，速度の影響が明確に見られる。V=3km/h の F_{L99} は V=2km/h に比べ約 25%増加しており，その値は，つり荷の重さ(W_o)の約 1.8 倍である。ここで，F_{L99} に対する定格荷重(F_{Lr})の割合を荷重余裕度 I_a と定義した。関係式を式(1)に示す。

$$I_a = \frac{F_{Lr}}{F_{L99}} \tag{1}$$

表-2 に各試験条件における I_a を示す。Cs5 と Cs6 の I_a はそれぞれ，1.24 と 1.12 であった。したがって，走行速度の増加に伴って荷重余裕度は減少するため，機械の安定性は低下することがわかった。

以上のことから，速度の増加に伴って荷重の変動は大きくなり，機体の安定性は低下することが確認された。したがって，安定した走行には遅い速度を選択する必要がある。

3.4　つり荷の重さの違いがその荷重に与える影響

つり荷重の変動量を相対的に比較するためにつり荷重 F_L をつり荷の重さ W_o で除した値を正規荷重 F_{LN} と定義した。図-7 に，各試験におけるボックスチャートを示し，表-3 に 99 パーセンタイルの値(F_{LN99})と最大値を示す。

コンクリート床を走行した Cs1(W_o=2.5kN)と Cs7(W_o=5kN)を比較すると，F_{LN99} は Cs1 の方が広く分布している。また，F_{LN99} の値は，Cs1 が 1.29 であるのに対して，Cs7 は 1.23 であった。すなわち，W_o が小さい方が相対的に荷重の変動が大きくなっている。

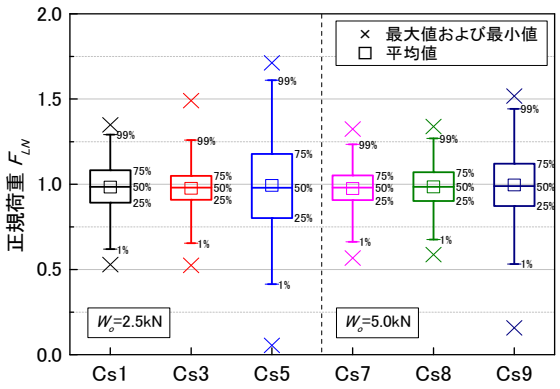


図-7　正規荷重 F_{LN} の比較

表-3　各実験条件における正規荷重 F_{LN}

実験名	正規荷重 F_{LN}	
	F_{LN99}	最大値
Cs1	1.29	1.34
Cs3	1.26	1.49
Cs5	1.61	1.71
Cs7	1.23	1.32
Cs8	1.26	1.34
Cs9	1.44	1.52

一方，平坦地盤を走行した Cs3(W_o=2.5kN)と Cs8(W_o=5kN)の比較では，W_o の違いによる F_{LN99} の差はほとんど見られない。

起伏地盤における Cs5(W_o=2.5kN)と Cs9(W_o=5kN)の比較では，Cs5 の方が F_{LN} の分布は広く，F_{LN99} についても Cs5 は 1.71 であるのに対して Cs9 は 1.52 であった。この結果は，コンクリート床の結果と同様の傾向であり，W_o が小さい方が相対的に荷重の変動量が大きくなることがわかった。

このことから，W_o は定格荷重の 1/2 と同一条件であっても，W_o は小さく作業半径が大きい場合には，荷重変動が相対的に大きくなり，機体は不安定になることがわかった。そのため，安定した走行には，作業半径を小さくする必要があることが明らかになった。

4．まとめ

掘削用機械のつり荷走行時における機械の不安定要因について検討し，以下の知見を得た。

1) コンクリート床のような理想的な水平堅固地盤においても，つり荷走行時にはつり荷の重さ(W_o)の約 1.3 倍の荷重が作用することがわかった。
2) 走行速度の違いがつり荷重 F_L の変動に与える影響を調べるために，走行速度 V=2km/h と V=3km/h で比較を行った。その結果，全ての結果においてつり荷重 F_L の変動量は速度の増加とともに大きくなり，機械の安定性は低下することがわかった。
3) つり荷重の変動について，つり荷の重さに対する相対的な比較を行った。その結果，つり荷の重さの小さい方が，変動は相対的に大きいことがわかった。そのため，安定した走行には，作業半径を小さくする必要がある。
4) 掘削用機械のつり荷走行時のつり荷重の変動を小さくするためには，走行路の平坦さの確認と，走行路の低下が重要なことがわかった。

謝辞：本実験を実施するにあたり，三国智温氏(元東京都市大学大学院生)と石野貴裕氏(東京都市大学学部生)に協力いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

1) 厚生労働省通達：「車両系建設機械を用いて行う荷のつり上げの作業時等における安全の確保について」（平成4年10月1日基発第542号），1992.
2) 労働調査会：安衛法便覧 I 平成19年度版，pp.959-962,2007.
3) 労働基準局長通達：「荷役，運搬機械の安全対策について」（昭和50年4月10日基発第218号），1975.
4) 一般社団法人クレーン協会：一般社団法人日本クレーン協会規格「油圧ショベル兼用屈曲ジブ式移動式クレーンのつり荷走行時の能力設定に関する指針」（JCAS2005-2005）.
5) 杉沢博：JCA規格「油圧ショベル兼用屈曲ジブ式移動式クレーンのつり荷走行時の能力設定に関する指針」について（屈曲ジブ式移動式クレーン委員会報告），クレーン，vol.44，No.8，pp.23-26，2006.
6) ISO4305：1991 Mobile cranes determination of stability.
7) 吉川直孝，伊藤和也，堀智仁，清水尚憲，梅崎重夫，濱島京子，豊澤康男，玉手聡：掘削用機械に係る死亡災害の調査分析，安全工学シンポジウム2013講演予稿集，pp.396-399，2013.
8) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.697-735，2013.
9) B.S.Everitt：統計科学事典，朝倉書店，p.184，p.338，2002.

振動加速度計の計測によるコンクリートの圧送性評価システムの提案

福岡大学工学部　○ 橋本　紳一郎
福岡大学大学院　案浦　侑己
福岡大学工学部　江本　幸雄

１．はじめに

近年，コンクリートのポンプ施工は，多くの施工現場で用いられようになり，一般的な圧送条件での圧送の他，特殊な条件下の圧送も行われるようになった。また，特殊コンクリートの圧送も行われるようになった。

その一方で，圧送中のトラブルや事故も多く報告されており，トラブルの中でもその多くが閉塞である。閉塞の発生には様々な要因が関連するが，現状ではコンクリートの圧送性を評価･確認する方法がないため，ピストン稼働の異常時や筒先からのコンクリート排出状況で，初めて閉塞に気付く。閉塞が発生した際は，その対応作業だけではなく，閉塞時またはその直前までコンクリートポンプや配管に大きな負荷がかかるため，他のトラブルにつながる可能性もある。実際に，輸送管の破裂など非常に危険なトラブルに発展した事例も報告されている [1)]。以上から圧送性を把握することは非常に重要である。

圧送の安全性の事前評価試験として，加圧ブリーディング試験と変形性評価試験 [1)]が提案されているが，実際の圧送条件や施工条件を再現しているわけではないため，完全に施工現場の圧送状態を検討することは難しい。

試験圧送は，実際の圧送条件や施工条件に近い状態で行える試験であるが，特殊なコンクリートの圧送性やコンクリートの品質変化を把握することが主であり，通常の施工現場での圧送に対しては実施しない。また，試験圧送の際の圧送性評価に用いるコンクリートの管内圧力測定やその他に提案 [2)]されている測定方法を通常の施工現場で行うには，計測器具を取り付けるための特殊な配管や多くの測定機材, 人員が必要となるため難しい。

これらに対して，著者らは振動加速度計により計測する簡易な圧送性の評価手法を提案している [3), 4)]。この測定方法は，圧送の際に，コンクリート中の粗骨材が粗骨材粒子群同士あるいは管壁と衝突を繰り返し生じる微細な振動を加速度計により計測する方法である。これまでの室内試験において加速度の値の乱れや周波数と振幅の関係から，コンクリートの配合条件の違いや圧送性の違いを評価可能であることを示しており，また，試験圧送においても，圧送性の違いなどを評価可能であることを示唆した [5)]。しかし，振動加速度計の計測位置などの計測方法や測定結果の定量的な判定・評価方法については，十分な検討が行われていない。

そこで本研究では，実機での試験圧送により振動加速度計での計測を配管位置ごとに行うなど計測位置の影響や測定結果の定量的な判定・評価方法について検討した。

２．実験概要

2.1　使用材料及びコンクリートの配合

使用した材料は，セメントに高炉セメント B 種（密度：3.04g/cm^3），細骨材は福岡県玄界灘産海砂（表乾密度：2.58g/cm^3，吸水率：0.96%，F.M.：2.60），粗骨材は山口県下関産砕石（最大寸法：20mm，表乾密度：2.68g/cm^3，吸水率：1.67%）である。混和剤には，リグニンスルホン酸系の AE 減水剤及びアルキルエーテル系の AE 剤を使用した。

本研究で使用したコンクリートの配合を**表−1** に示す。配合は，配合名：No.1(試験開始時の目標スランプ：15.0±1.0cm)のスランプを低下させた配合を配合名：No.2(試験開始時の目標スランプ：8.0±1.0cm)，配合名：No.3(試験開始時の目標スランプ：3.0±1.0cm)とした合計 3 水準で検討した。

2.2　フレッシュ性状試験

コンクリートのフレッシュ性状試験では，スランプ試験をJIS A1101，空気量試験をJIS A 1128 に従い測定した。配合名:No.1のコンクリートは，所定の目標スランプと目標空気量：4.5±1.0%を満たしていることを確認した後，圧送試験を実施し

た。配合名：No.2と配合名：No.3は，所定のスランプを満たしていることを確認した後，圧送試験を実施した。

2.3　圧送方法

図-1に試験圧送の配管図を示す。配管は，90度ベント管を3箇所と8mのフレキシブルホースを配置した水平換算距離86.9mとした。

圧送方法は，フレキシブルホースをポンプ車に設置することで，繰り返し圧送可能な循環圧送方式とした。圧送速度について，配合名：No.1は15，30，50m³/h，配合名：No.2は15，30³/h，配合名：No.3は15m³/hで圧送した。

2.4　振動加速度計による計測方法及び評価方法

図-1に振動加速度計の加速度センサーの取付け位置（青印）と同時に計測した管内の圧力測定の測定位置を示す。加速度計は，ベント管に3箇所（ポンプ車から筒先に向かって進行方向順にベント管1,2,3と称す），水平管に1箇所設置した。管内の圧力測定は水平管とベント管部の計8箇所に設置し，測定を行った。

振動加速度計は，小型 4 チャンネル式のハンディタイプのデータレコーダーに端子で取り外し可能な直径 1.5cm の小型の加速度センサーを取り付けて使用した。加速度センサーは，先端をマグネット式に加工されたもので，被測振動体（輸送管）にはマグネットで直接取り付け，固定ができるものである。また，配管に取り付けた加速度センサーは，コンクリートの圧送による配管の振動では，外れないことも確認している。

写真-1 に加速度センサーの取り付け状況を示す。ベント管での加速度センサーの取り付け位置は，各ベント管に共通して筒先に向かってベント管入口に 1 点（測定点：1），筒先に向かって内側と外側に各 1 点（筒先に向かってベント管内側が測定点:2，筒先に向かってベント管外側が測定点:3），筒先に向かってベント管出口に 1 点（測定点：4）の計 4 点とした。水平管での加速度センサーの取り付け位置は，筒先に向かって並列に 3 点（測定点：1～3）で計測した。計測後，計測した加速度の評価及び FFT 解析により周波数と振幅の関係で評価した。

3．結果及び考察

3.1　管内圧力定による圧送性評価

図-2 に各圧力計の管内圧力と測定位置の関係を示す。**表-2** に各配合の水平管における平均圧力損失と油圧の変動係数の関係，圧送状態の評価，スランプの実測値を示す。

管内圧力については，各配合でポンプ車側から筒先に向かって圧力は低くなる傾向を示した。また，配合間の関係では，スランプの大きさの順に

表-1　コンクリートの配合

配合名	s/a (%)	w/c (%)	単位量(kg/m³) W	C	S	G	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)
No.1	48	56	166	296	851	929	15±1.0	4.5±1.5
No.2							8±1.0	
No.3							3±1.0	

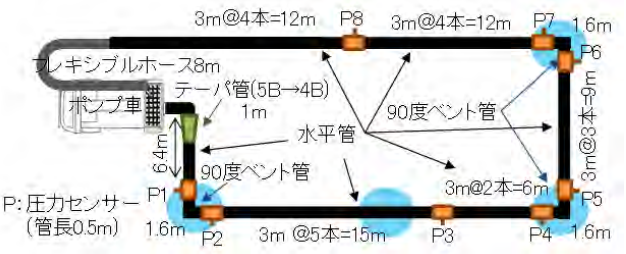


図-1　配管図及び加速度センサーの取り付け位置（青印），管内の圧力測定の測定位置



写真-1　水平管とベント管の加速度センサーの取り付け状況（左：水平管 3 点，右：ベント管 4 点）

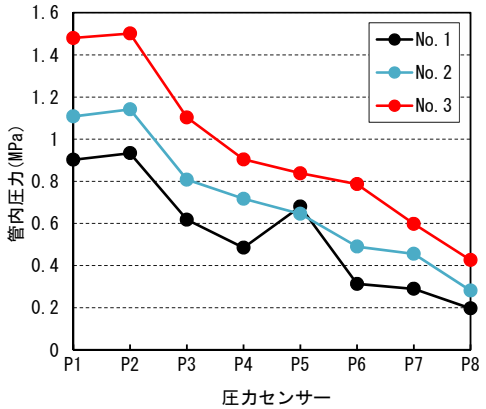


図-2　各圧力計の管内圧力と測定位置の関係

表-2　各配合の圧送状態の判定

配合名	スランプ (cm)	平均ポンプ油圧 (Mpa)	変動係数 (%)	圧送状態
No.1	15cm	0.618	1.719	順調
No.2	8cm	0.708	4.736	
No.3	3cm	1.074	41.38	不安定

管内圧力の関係は示されており，スランプの最も小さい配合名：No.3 の圧力が常に高い値を示した。

また，各配合の圧送状態は，水平管の平均管内圧力と油圧の変動係数の値，目視により筒先からのコンクリートの排出状態から判定した。その結果，油圧の変動係数も低く，常に一定の状態で筒先からコンクリートが排出されていた配合名：No.1 と配合名：No.2 を順調圧送状態（以降，順調と称す）とし，圧送は可能であったが，油圧の変動係数が非常に高く，筒先からコンクリートが不規則に排出されていた配合名：No.3 を不安定圧送状態（以降，不安定と称す）とした。以降，これらの圧送状態と加速度計により計測した結果について検討を行った。

3.2　水平管での振動加速度計の計測による圧送性評価

図-3 にベント管 1 と水平管での測定点：1 で計測した先送りモルタルの計測時間と加速度の関係を示す。加速度の値はベント管 1 と水平管で共に非常に小さく，値に変化は見られなかった。この結果は，既往の室内試験の結果 [4]と同様であり，試験圧送においても粗骨材のないモルタルでは加速度の値は小さく，値に変化が見られないことを示した。

図-4 に水平管の測定点：1 で計測した各配合の計測時間と加速度の関係を示す。各配合の加速度の値に関しては，加速度の値自体も大きく，既往の室内試験の結果 [4]の約 5 倍程度の大きさであった。これは，既往の室内試験とは試験条件が異なり，ピストン式のポンプ車を使用した試験圧送の場合，圧送圧力が高いため加速度の値も大きくなったと考えられる。また，加速度の値は一定時間間隔で確認でき，これはピストン稼働時間と同様であることから，ピストンの動きに合わせてコンクリートが輸送管内を移動していることを示している。コンクリートの配合別では，順調の配合名：No.1 と配合名：No.2 では，スランプの小さい配合名：No.2 の方が加速度の値が大きくなる傾向を示した。また，不安定であった配合名：No.3 は，順調の加速度の形状とは異なるが，その値は小さく，水平管の計測のみで圧送状態を判定することは難しい。

図-5 に配合名：No.1 を水平管の測定点：1 で計測した圧送速度別の計測時間と加速度の関係を示す。圧送速度別の加速度の値に関しては，圧送速度が速くなるに従い，加速度の値は大きくなり，一定間隔で現れる加速度の時間が短くなった。これは，圧送速度が速くなることで，圧送圧力も高くなるため加速度の値も大きくなり，ピストンの稼働も速くなるため，一定間隔で現れる加速度の時間が短くなったと考えられる。

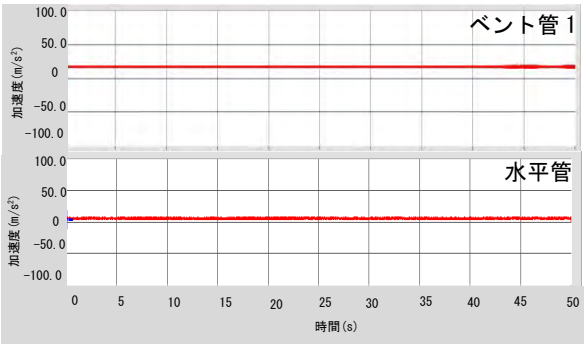


図-3　先送りモルタルの計測時間と加速度の関係

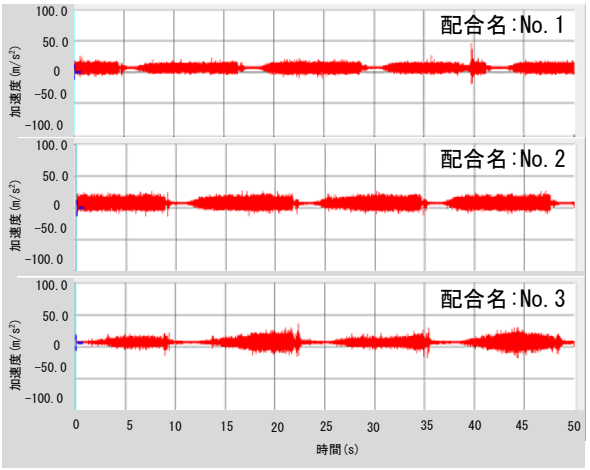


図-4　水平管で計測した各配合の計測時間と加速度の関係

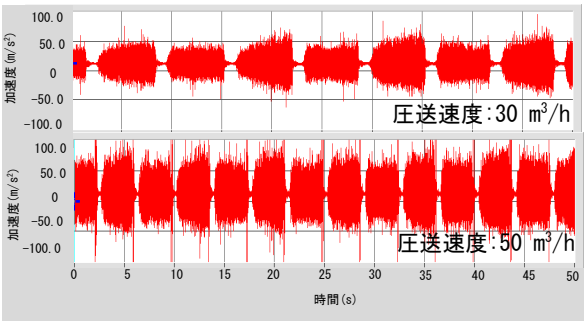


図-5　水平管で計測した圧送速度別の計測時間と加速度の関係

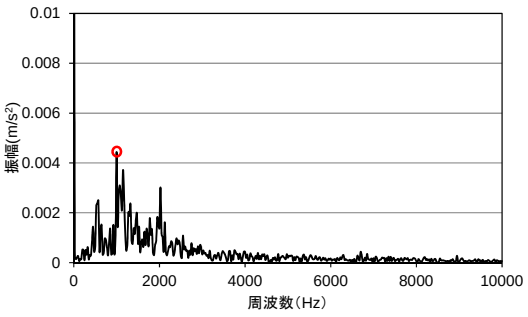


図-6　水平管で計測した周波数と振幅の関係

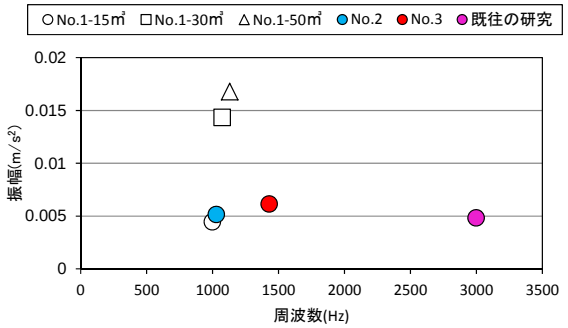


図-7　各配合及び圧送速度別の振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係

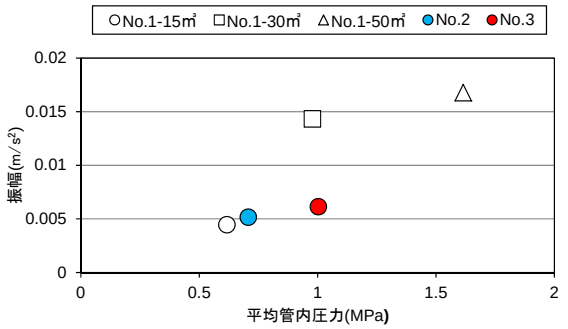


図-8　順調の配合及び圧送速度別の平均管内圧力と振幅のピーク値の関係

図-6 に水平管の測定点：1 で計測した配合名：No.1 の周波数と振幅の関係を示す。図-7 に各配合及び圧送速度別（配合名：No.1）の振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係を示す。図-8 に順調の配合及び圧送速度別（配合名：No.1）の平均管内圧力と振幅のピーク値の関係を示す。配合名：No.1 で振幅のピーク値（マル印）の示された周波数は 1000Hz 付近であった。その他の配合に関しても 1000～1500Hz 付近で確認でき，圧送速度別（配合名：No.1）に比較した場合にも，周波数は 1000Hz 付近であった。既往の結果[4]で，周波数は 2000Hz～3000Hz 付近に確認できたのに対して，本研究の試験圧送の結果は 1/2～1/3 の周波数であった。これは，既往の室内試験[4]や試験圧送の結果[6]では輸送管を治具等で固定し，輸送管が地面から浮いた状態で圧送するのに対して，本研究の試験圧送では通常の施工現場と同様に直接地面に配管していることや，管全体が連結していること，管内部に長距離にわたってコンクリートが充填されていること等の要因から輸送管からの振動が抑制され周波数が小さくなったと考えられる。また，振幅のピーク値と平均管内圧力については，平均管内圧力が大きくなるに従い，振幅のピーク値も大きくなる傾向を示した。特に，圧送速度が速くなるに従い，平均管内圧力と振幅のピーク値が大

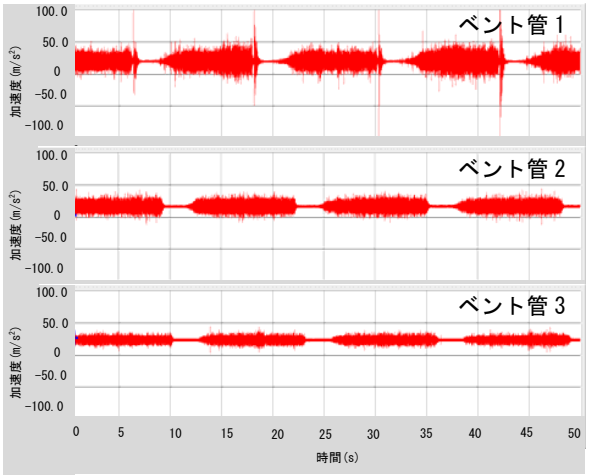


図-9　ベント管：1 で計測した各配合の計測時間と加速度の関係

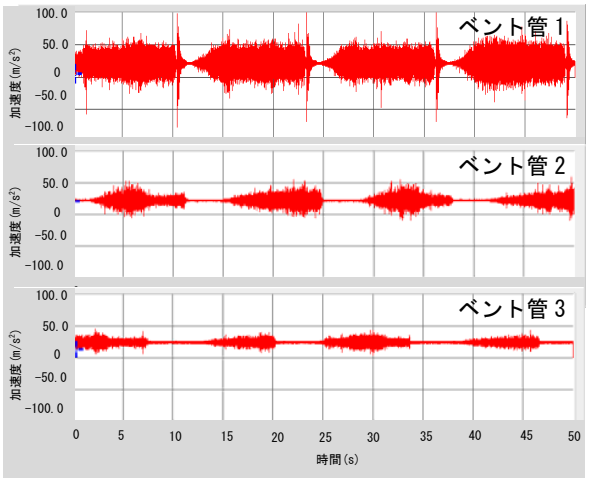


図-10　ベント管：2 で計測した各配合の計測時間と加速度の関係

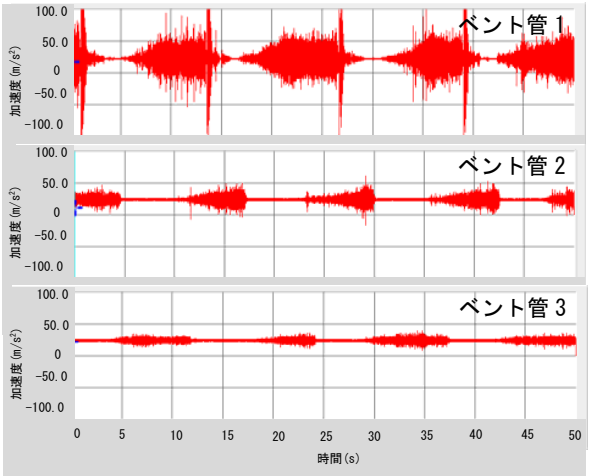


図-11　ベント管：3 で計測した各配合の計測時間と加速度の関係

きくなる傾向が顕著であった。また，順調の場合，振幅のピーク値と平均管内圧力に相関関係があることを明らかにした。

3.2　ベント管での振動加速度計の計測による圧送性評価

図-9～11 にベント管 1～3 の測定点：1 で計測した各配合の計測時間と加速度の関係を示す。

各配合のベント管の加速度の値は，管内圧力の結果と同様にポンプ車側から筒先に向かって配管位置が遠くなるにつれて，加速度の値は小さくなり，加速度の値が示される間隔も短くなる傾向にあった。

また，圧送状態別では，順調の配合（配合名：No.1 と No.2）では，水平管の加速度の結果と同様にスランプの小さい配合名：No.2 が全体的に加速度の値が大きくなり，その傾向はポンプ車に一番近いベント管 1 で明確に確認できた。不安定の配合名：No.3 では，ベント管 1 の加速度の値が順調に比べて非常に大きく，大きな乱れが見られたことから，順調と不安定では全く異なる加速度の測定結果を示した。ベント管 2 とベント管 3 においても，順調と比較して加速度の値や形状に違いが見られたが，ベント管 1 が顕著であった。

以上から，ポンプ車に一番近いベント管の加速度の値の大きさや形状から圧送性の違いを判定できる。

3.3　各測定点での振動加速度計の計測による圧送性評価

図-12 にベント管 1 の各測定点で計測した各配合の振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係，**図-13** に水平管の各測定点で計測した各配合の振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係を示す。

水平管に関しては，順調の配合（配合名：No.1 と No.2）に比べ，不安定の配合（配合名：No.3）の周波数と振幅が大きくなるが，各測定点での値に大きな違いは見られなかった。

ベント管 1 に関しては，筒先に向かってベント管入り口の測定点:1 で計測した各配合の周波数と振幅が大きくなり，その後，筒先に向かってベント管出口に向けて各配合の周波数と振幅が小さくなる傾向にあった。特にその傾向は，不安定の配合名：No.3 の振幅の値に現れており，順調の配合（配合名：No.1 と No.2）や同配合の水平管の結果とも大きな違いを確認することが出来た。これは，圧送の抵抗が最も大きいベント管の曲り部はコンクリートの圧送の動きが急激に低下するため，その直前のベント管入り口で骨材同士の衝突や骨材が管壁へ当る回数が増え，管壁との摩擦が大きくなったと考えられる。その傾向が圧送に乱れの多い配合名：No.3 で顕著であったと考えられる。

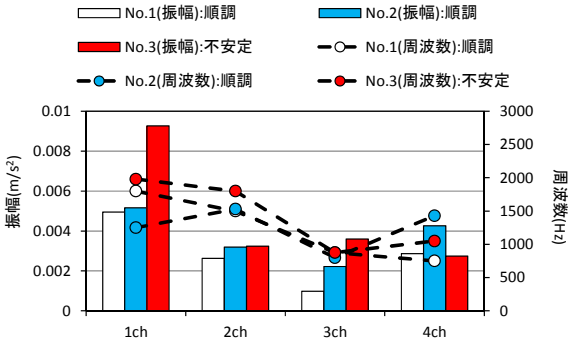


図-12　ベント管：1 の各測定点で計測した振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係

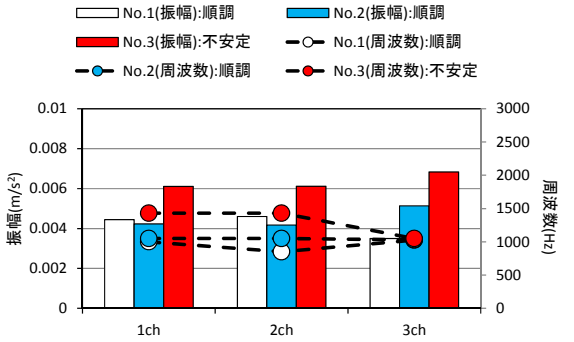


図-13　水平管の各測定点で計測した振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係

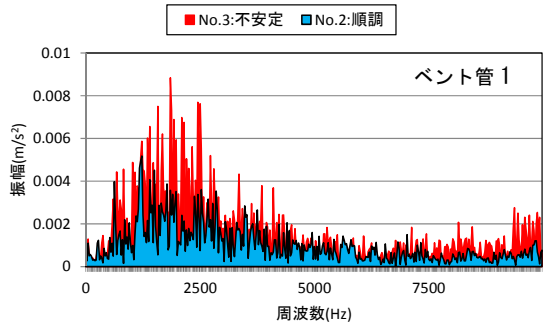


図-14　ベント管：1 で計測した各配合の周波数と振幅の関係

以上から，水平管では測定位置の影響は受けないが，ベント管では測定位置の影響から筒先に向かってベント管入口で計測を行うことが圧送性の違いの判定に有効である。

3.4　振動加速度計の計測による圧送性の判定・評価方法

これまでの結果から圧送性の判定・評価方法として，**図-14** にベント管 1 の測定点：1 で計測した各配合の振幅と周波数の関係，**図-15** に水平管とベント管 1 の測定点：1 で計測した振幅のピーク値を示す。

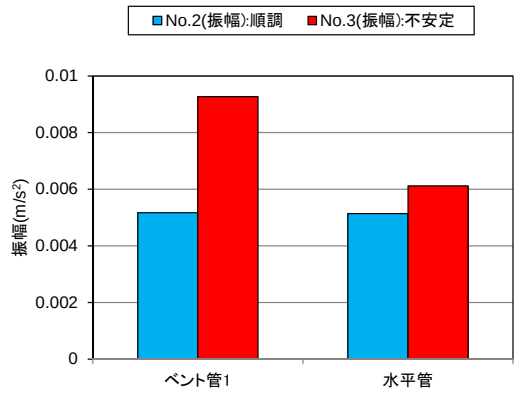


図-15　水平管とベント管：1 で計測した振幅のピーク値

順調の配合名：No.1 と不安定の配合名：No.3 の振幅と周波数の関係について，順調と不安定では振幅と周波数の関係図が大きく異なるため，圧送性の違いが最も表れやすい周波数領域:500～4000Hz の振幅の値を合計して評価を行った。その結果，順調の場合 0.25m/s² に対して，不安定は 0.40m/s² となり，圧送性の違いを定量的に示すことができた。

順調の配合名：No.1 と不安定の配合名：No.3 の振幅のピーク値について，圧送性によらず水平管では同程度の値を示したが，ベント管 1 では圧送性の違いが顕著に表れた。これらの圧送性をベント管 1 だけで評価する場合，順調と不安定の振幅のピーク値から約 0.004m/s² の値の違いが確認でき，また，圧送性を不安定の配合名：No.3 だけで評価行う場合，ベント管 1 と水平管の振幅のピーク値から約 0.003m/s² の値の違いが確認でき，いずれも圧送性の違いを定量的に示すことができた。

以上から，ポンプ車に近い位置のベント管で計測した基準（順調に圧送できたデータ）となる振幅の値や振幅と周波数の値，または，その先の水平管で計測した振幅の値を比較することにより，圧送性の違いを判定・評価できる。

しかし，圧送性の判定・評価を行うには，判定・評価の基準となる閾値を設定できていない。そのため，今後，様々な配合条件や圧送条件での計測データの集計から判定・評価の基準を設定すると同時に，計測時に閉塞危険性を未然に防ぐための対応・管理方法についても検討する必要がある。

4.　まとめ

(1) コンクリートの圧送性や圧送条件によって加速度の値の大きさや加速度が表れる時間間隔が異なる。
(2) 配管の設置条件により周波数の結果は異なる。また，順調の場合，振幅のピーク値と平均管内圧力に相関性がある。
(3) ベント管は，ポンプ車に一番近いベント管の加速度の値の大きさや形状から圧送性の違いを判定でき，また，測定位置の影響から筒先に向かってベント管入口で計測を行うが圧送性の違いの判定に有効である。
(4) ポンプ車に近い位置のベント管で計測した基準（順調に圧送できたデータ）となる振幅の値や振幅と周波数の値，または，その先の水平管で計測した振幅の値を比較することにより，圧送性の違いを判定・評価できる。

参考文献

1) 土木学会編：コンクリートライブラリー135，コンクリートのポンプ施工指針［2012年版］，2012.6
2) 辻村直哉，橋本親典，丸山久一，清水敬二：管内を流れるコンクリートの閉塞感知システムの開発に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.10，No.2，pp.73-78，1988
3) 渡辺健，他：ポンプ圧送の脈動時の変形性を評価できる定量的指標に関する実験的研究，フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題（II）一般論文，コンクリート技術シリーズNo.54，pp.23-32，2003.7
4) 橋本紳一郎，江本幸雄，伊達重之，橋本親典：コンクリートのポンプ圧送性簡易評価手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1186-1191，2012
5) 案浦侑己，橋本紳一郎，渡辺健，橋本親典：振動加速度計を用いたコンクリートの圧送性簡易評価手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1201-1206，2013
6) 日本建築学会近畿支部材料・施工部会：第9回圧送技術研究会報告書，2013

海底ゴミ回収装置の開発

(独)港湾空港技術研究所　　○ 平林　丈嗣
(独)港湾空港技術研究所　　吉江　宗生
国土交通省　四国地方整備局　　杉浦　悠介

１．背景と目的

海面清掃船の活躍により海面浮遊ゴミ回収が実施（図-1）され，船舶の安全な航行と環境保全に役立っている．しかし海底に存在するゴミについては，直接目視による確認ができないため，底曳き網が沈木等に絡まる事案が発生している．

直轄作業船による海底ゴミ回収について，過去の事例として第三港湾建設局広島港工事事務所における海中ゴミ回収試験に関する文献調査を実施した．本試験は昭和 57 年度から昭和 63 年度にかけて実施されており，主に広島湾において海底ゴミ回収を行なっている．また回収機構に関して，初年度は 4 爪錨を用いていたが，次年度からは篭型を利用している（図-2）．これは初年度の回収物について機構的に番線類が多く，他の種類についての回収が少なかったためであった．しかし篭型に変更した後も番線類とカキ殻の割合が多くを占めており，またその形状から，長尺の木材等については篭内に納まることができず把持する機構も無いため，沈木等の回収には不適であると考えられる．

２．回収機構検討

本件における回収対象物として，底引き網漁船の事案を踏まえ長さ5m程度の海底面に点在している沈木と設定した．回収対象が点在している場合，対象物の座標を正確に認識し回収装置をその座標まで誘導する必要がある．ここで回収対象物の座標は事前にサイドスキャンソナーによる測量により把握が可能であるが，誘導については船舶の四点係留および対地定点保持が直轄作業船では困難であると考えられるため，回収機構の検討条件として考慮すべき事項である．そのためピンポイントで位置決めを必要とするグラブ式の機構は本件において適応が困難であるものと考えられる．

対象物の位置が特定できず，把持装置の位置制御に関しても期待ができない場合，チェーンを広域に敷設し絞り込む方式が考えられる．あらかじめ半径 30m 程度の範囲に途中ブイを配置したチェーンを敷設していき，ブイに重りを通し，その重量で引き寄せ・固縛する．広範囲の面積を引き寄せるため，正確な位置決めの必要が無く，対象物の位置が正確に把握できない場合でも運用は可能となる．



図-1　海面清掃船ゴミ回収作業状況



図-2　過去事例での回収機構

しかし敷設のための支援船が必要となる可能性があり，さらに回収に失敗した場合は再度敷設する時間が必要となる．また，チェーン外周が 100m 近くなるため，総重量として非常に重くなる可能性があり，運用には課題が残る．

比較的広域，かつ軽量な回収装置の機構として，消波ブロック等の撤去に実績を有する網チェーン方式（図-3）が挙げられる．これはチェーン以外の稼働部が無く，張力により荷重を受けるため，機構全体の構造が簡単であり軽量である利点がある．しかし点在する対象物を効果的に回収するためには装置の大型化が必要となり，その機構から鋼材のフレームを大きく伸ばす必要がある．本事案のように装置の位置精度が確保できない場合，回収可能面積を広げることで対応することが考えられる．ただし，装置自体を大型化することは重量増加による運用性の低下を招く．さらにクレーンなど周辺装置や甲板の占有面積などを考慮すると，単に大型化することは望ましくない．

これらの課題点や条件を考慮し，海底ゴミ回収機構として網チェーンフレーム改良型を提案する．これは中心部から放射状に伸びる 6 本のアームによって、対象物をかき寄せて回収する方式であり，アームの延長によりある程度広範囲のかき寄せが期待できるものである．また脚部間から抜ける状況への対応策として，脚間にワイヤを通し，回収対象を引っかけ中央へ引き寄せる機構を付加した．さらにワイヤを引っ張ることで，脚先端部を閉じる力に変換されるため，把持力の向上に繋がる．また脚が閉じた状態となれば，アウター管が下がり，脚の広がりを構造的に防ぐことができるため，揚収作業途中での回収物落下などを防止することが期待できる．脚が閉じた状態で回収対象を把持することができれば，脚部材にかかる負荷のほとんどが引張り方向となるため，関節などはワイヤを展開するため強度を有するだけで良く，構造強度面において有利であり軽量化が期待できる．図-4 に水槽用模型を，図-5 に動作概念図を示す．



図-3　網チェーンによるブロック撤去作業

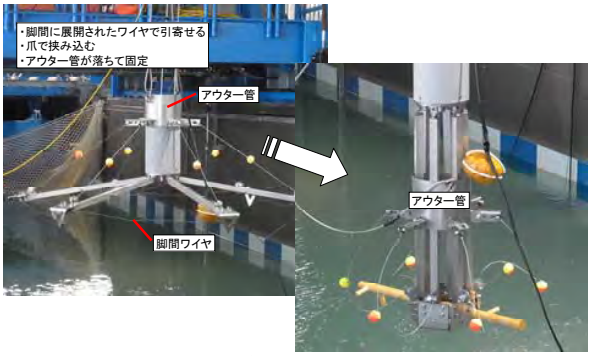


図-4　海底ゴミ回収水槽用模型

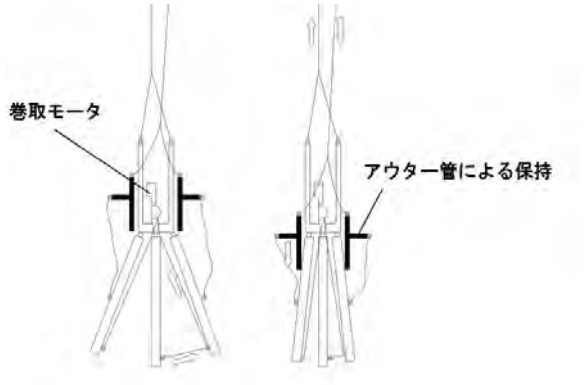


図-5　動作概念図

３．水槽模型による機構検討

3.1　水槽試験による動作確認

提案する機構に関し，水中での回収動作の挙動等の確認を目的として水槽試験を行った．また海底面条件を砂地盤とし，水槽内に直径 3m の砂槽（図-6）を設置した．ここに回収対象物として木材，針金，ロープを設置し，把持成功回数と作業時間を計測する．また波浪の状況によっては船舶の動揺が考えられる．船舶が動揺した場合，船舶クレーンの上下運動に連動し，回収装置も上下運動が起こることが予想される．そこで，水槽上部の門型クレーンに回収用ホイストと展開用ホイストを吊り，作業中に門型クレーンの上下運動を行うことで，船舶の動揺を再現することとした．図-7 にクレーン設置の概念図を示す．

網チェーン改良型においての回収成功確率は，木材の場合に良好な回収結果となった（表-1）．これは長尺である木材では，その一部が爪により把持される場合が多く，巻取り装置により把持力が加えられるためであると考えられる．しかし針金やロープについては失敗した件数が多く見られた．これらは引寄せワイヤに掛からず，脚の間からすり抜けた場合に多く見られ，回収対象に引っ掛かりが少ない場合や小さい場合について本機構は適していないと考えられる．



図-6　水槽内に設置した砂槽

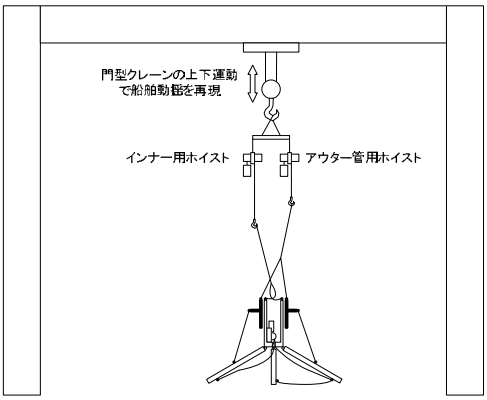


図-7　門型クレーン設置概念図

また波条件として波高 30cm の造波のほか，船舶動揺を再現するために門型クレーン操作による上下運動を付加させた．表-2 に実験結果を示す．これにより海底面離床時に上下運動が加えられ，把持動作完了前に離床する場合があったが，このような場合においても回収効率に大きな差は見られなかった．そのため本機構について波浪の影響は少ないと考えられる．

回収試験では，水面上での操作開始から着水・着底・回収動作を行い，揚収終了までを回収時間とした．実運用時の作業を考えると，ある程度海底面に近い付近まで降ろした状態で位置決めを行うことと，回収後は水面付近まで揚げるだけの動作となるため，この投入・揚収にかかる時間は，回収効率に大きく影響することは無いと考えられる．しかし砂層着底から巻取モータ動作終了までを着床時間としており，この時間は海底面に接地した時間となる．現場海域の潮流により作業船舶が流された場合，回収装置の姿勢変化に関係するため，回収効率に影響を与える時間となる．本試験装置では，回収の確実性を向上させるため動力によるワイヤ巻取りで爪を開閉する機構を用いており，全開で地面に接地した状態でワイヤを巻き取るには負荷が大きくなるため，本体を引き上げつつ巻取り動作を行なったが，実運用を考えると可能な限り着底時間を減少させる必要がある．

表-1　実験結果（波，動揺無し）

回収対象	設置条件	作業回数	成功回数	回収時間平均(秒)	着床時間平均(秒)
木材	露出	5	5	172	106
	半埋没	5	5	184	116
木材枝あり	露出	5	5	164	96
	半埋没	5	5	162	95
針金	露出	6	2	171	106
ロープ	露出	5	5	176	106

表-2　実験結果（波高 30cm，クレーン動揺あり）

回収対象	設置条件	作業回数	成功回数	回収時間平均(秒)	着床時間平均(秒)
木材	露出	5	5	176	108
	半埋没	5	5	165	101
木材枝あり	露出	5	5	173	107
	半埋没	5	5	140	78
針金	露出	9	8	166	101
ロープ	露出	5	4	174	109

3.2　海底着底時間の改善案

本水槽試験では確実な把持のため，巻き取り装置による脚閉じ機構を持たせている．しかし，完全に開いた状態で着底した場合，機構的に初期段階での必要トルクが大きくなり，装置全体を揚げる動作と脚閉じ動作の連動操作が必要となる．このような連動操作のためにはクレーンオペレータと回収装置操作者の二名が海中での装置姿勢を確実に認識する必要がある．また，これらを電子式に制御するためには，脚角度，接地センサ，巻き取り装置回転計や，過負荷防止のためのトルク計測が必要となり，機構が複雑化する．

そこで，インナー管の引き上げで脚を閉じる機構とすれば，二基のウィンチの操作だけで操作可能となり，また引き込み動作時に脚先端が常に着底しているため，回収時間の短縮に大きく寄与できるものと考えられる．ただし，引き込み力は自重に依存するため，回収の確実性は低下すると予想される．

3.3　自重式開閉機構

引上げワイヤにより脚を閉じる場合，図-8 のような取り回しが考えられる．閉じ動作の場合，引上げワイヤのみに張力がかかっており，各脚にかかる張力 F_1 は F を脚の本数で割ったものとなる．ここで軸 J を回転中心とした力 Ft は角度 θ の大きさによって変化することがわかる．把持力を増加するためには角度 θ を大きくする必要があるが，脚が閉じるにしたがって θ 成分が減少する．

そこで図-9 のように隣接する脚に接続すること

で脚を閉じた状態での把持力を増加させることとした．

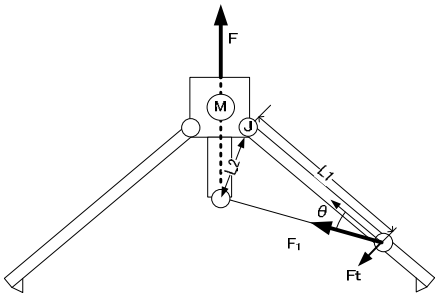


図-8　脚閉じ動作時のワイヤ取り回し

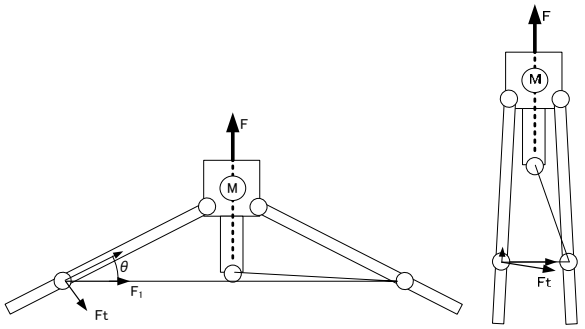


図-9　脚連結による締付け力の向上

脚を広げる場合（図-10）は，アウター管に接続されたワイヤで脚を引き上げることになり，脚を広げるための力Foはワイヤ張力と脚の角度によって定まる．同様に，脚の質量によって脚を閉じる力Fcが発生する．Fo，Fcともに脚の角度によって値が変化するため，脚の可動範囲においてFoがFcより十分大きくなるように吊り環の位置や本体質量Mを設定する必要がある．

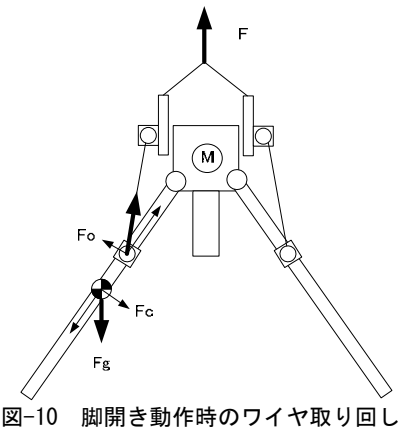


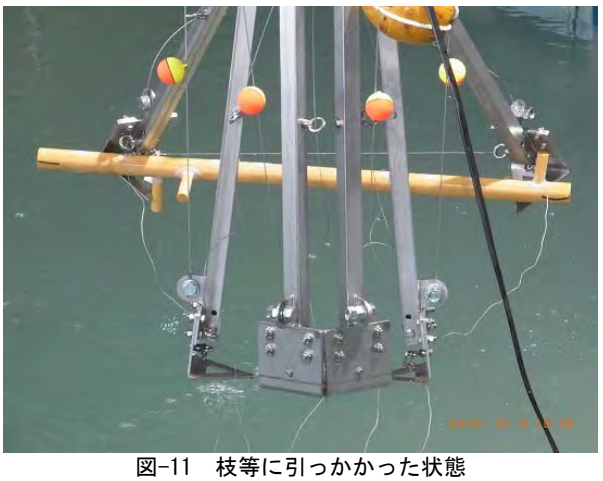
図-10　脚開き動作時のワイヤ取り回し

自重式開閉機構による回収装置の能力を試験するため，前述 3.1 節と同様の水槽実験を行った．条件として，波高 30cm，クレーン動揺ありで行い，着床時間については水中に設置したビデオカメラにより計測した．本回収試験の結果，装置着底から離底までの平均時間は約 10 秒となり，作業時間の大幅な改善が確認できた．

表-3　自重開閉式機構による水槽実験結果

回収対象	設置条件	作業回数	成功回数	回収時間 平均(秒)	着床時間 平均(秒)
木材	半埋没	8	8	70	10.0
木材枝あり		5	5	71	9.3

しかし図-11 に示すように回収物の突起に脚が掛かり各脚の角度が同じとならない場合，ワイヤ張力がかからない脚が発生する．回収作業時の落下を防ぐためには，各脚に接続されたワイヤの長さを滑車等を用いて可変できる機構とし，締付け力を均等に各脚に分散する必要があると考えられる．


図-11　枝等に引っかかった状態

3.4　船舶移動時の回収状況確認試験

海上での作業において係留ができない場合には，潮流により船舶が流されることが予想される．その場合，クレーンで吊り下げる網チェーン式では回収装置自体も船舶と同様に移動する．また回収動作で海底面に着底すると船舶に引きずられる姿勢となり，確実な把持力が期待できない自重開閉型では引き込み動作や，引き上げ時の姿勢により回収効率に影響があるものと考えられる．たとえば船舶が 1 ノットで流された場合，10 秒では 5.14 m流されることとなり，水深-20m の海域では，約 14．1 度の角度がつくこととなる（図-12）．

そのような状況を想定し，門型クレーンを走行（約 0.5m/sec）させながらの回収試験を行った．本試験ではクレーン位置を移動させており，水槽内では対象物との位置関係が把握できないため，気中での試験とした．船舶移動を考慮した回収試験の様子を図-13 に示す．

本試験の結果，引き込みワイヤに掛からなかった場合に失敗した場合が 2 例存在したが，クレーンが移動し引きずられた状態でも，各脚の先端は

地面に設置しており，ほぼ確実な回収を行えた．ただし操作者は直接目視により状況が把握できたため，着底後すぐに回収動作に移行しており，スイッチやカメラの設置等なんらかの形で着底を認識する必要があると考えられる．

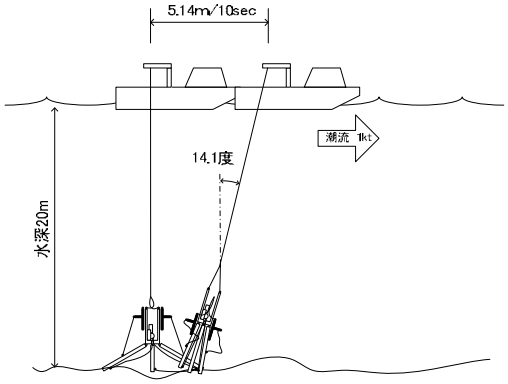


図-12　回収作業時の装置姿勢変化



図-13　姿勢変化時の回収実験

４．回収装置投入時の船舶誘導試験

本回収方式では回収装置を対象物の直上に誘導する必要がある．しかし海底の対象物への直接目視ができず，ブイ等の間接的な目標も敷設自体に手間がかかるため，操船者に対象物位置情報を呈示する必要がある．また船舶は潮流や風，波浪等の外乱を受け，かつ，推力が無い状態では舵が効かないため，目的位置の近傍で位置の修正を行うことは困難である．そこである程度離れた場所からアプローチする方法とするが，風や潮流の状況により操船方法が変わると考えられる．

本誘導試験では，船舶の位置をD-GPS，回収装置の船舶との相対位置をSSBLにより計測した位置データを基に，それぞれの位置関係を平面上に表示するシステムを構築し，実海域試験により投入精度や操船方法について検証した．対象物（海底ゴミ）の位置については，事前の測量により座標が既知であるものとし，本誘導システム画面に目標位置として表示する．

図-14 に使用船舶を，図-15 に投入する錘の座標を取得するためのSSBLを示す．図-16 に実験概要図を，図-17 に誘導システム画面を示す．

実験では目標座標を可能な限り低速で通るように操船し，発信器付きの錘を投下する．錘の着底座標と目標位置の差分，船舶の最接近距離および船舶速度を評価する．さらにアプローチ方法について実験時の操船者にヒアリングを行うこととした．



図-14　使用船舶



図-15　水中座標計測用 SSBL

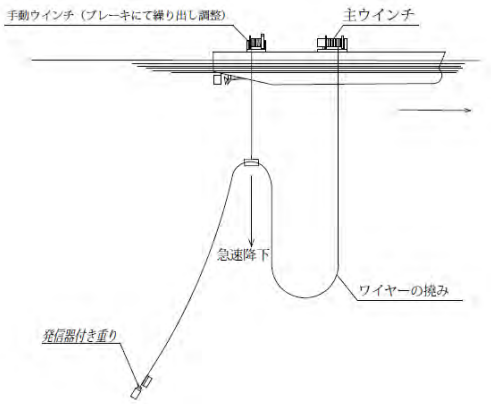


図-16　実験概要図



図-17　船舶誘導画面

本試験の結果として，最高で 0.8m まで船舶を接近させることができた．また潮流に逆らう方向からのアプローチでは推力を用いるため，操舵が可能であり，2m 程度の誤差で接近することができた．

しかし推進力を用いた場合，回収装置が水中の抵抗によって船体後方に大きく振られており，回収装置を落下させた際の着底位置精度が悪化すると考えられる．また，回収装置の姿勢を安定させる翼等が必要になる可能性がある．

このような課題に対しては，潮流に流された状態でアプローチする方法が考えられる．本実験では風上から流されアプローチすることも実施したが，舵が効かず，船舶のノーズと流される方向が異なることもあり，目標座標との接近距離が 3m～5m となった．

しかし回収装置は船舶の真下で姿勢も安定しており，船尾のペラや舵との干渉の危険性が少なく，また回収装置自体の再投入は容易である．さらに操船者のヒアリングでは「操船に習熟（準備期間を充分に確保できる）すれば，潮流に流されながらのアプローチでも船舶前進の場合と同程度に接近できる」との意見もあった．本海上試験では試行回数が少なく，実際には風向と潮流の向きが異なることもあり，実運用時に試行を繰り返しながら，条件に応じて効率の良い方法を選択する必要があると考えられる．

５．まとめ

本報告では，海底に点在する沈木等の回収を目的とした装置の開発と，回収作業に関する装置の投入方法に関して述べた．

回収装置の開発では，運用上の条件を考慮し，広範囲のものをワイヤでかき寄せる機構を提案し，水槽試験模型によりその動作を確認した．また着底時間の短縮を目的とした自重開閉機構についても水槽実験を行った．

装置の投入に関しては，船舶の操船方法について検討し，開発した誘導システムを用いて実海域における投入精度を確認した．

これらの結果から下記の項目が明らかとなった．

・回収装置に関して，脚間にワイヤを張ることで広範囲の回収が可能
・自重による開閉とすることで着底時間を少なくすることが可能
・着底を検知するセンサが別途必要
・すべての脚についてワイヤ張力を発生するため，各ワイヤ長を可変とする機構が必要
・操船精度については推力を用いた場合が良好であるが，回収装置の姿勢が課題
・投入時の姿勢を優先した場合，操船精度は 3m であった．

本年度は発生したこれら課題点を検討し，実海域試験を実施する予定である．

冬期道路交通に影響する道路有効幅員の計測手法の検討

(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○大上 哲也
(独)土木研究所 寒地土木研究所 住田 則行
(独)土木研究所 寒地土木研究所 三浦 豪

１．はじめに

積雪寒冷地に住む人々にとって冬期交通の確保は必要不可欠であり，そのための道路の維持管理（除雪・防雪等）に対するニーズは非常に高い。また，その一方では，近年の経済状況から，コスト縮減のための効率性も強く求められており，住民のニーズを満たす，効率的な維持管理の計画・実施が必要である。

効率的に冬期道路を維持管理するためには，道路状況を把握し，その道路状況が交通に与える影響を勘案しながら除雪などを行う必要がある。例えば，道路有効幅員（**写真-1**）は，路肩の堆雪によって幅員が減少することにより渋滞が生じるなど，冬期交通（旅行速度）に大きく影響する要因の一つである。有効幅員と旅行速度との相関関係を把握することによって，旅行速度に著しく影響する前に必要な幅員を確保するなど効率的な維持管理（除排雪）の計画・実施が可能となる。しかし，現状の道路有効幅員の把握は，パトロール等での目視が主であり，定量的な計測は行われていない。

このことから，本稿では道路有効幅員に着目し，この計測手法の確立を目的に，レーザースキャナを用いた計測システムを試作した。そして構内での精度確認試験及び一般国道での現場適応性確認試験を行うなど，定量的な道路有効幅員の計測手法について検討した。

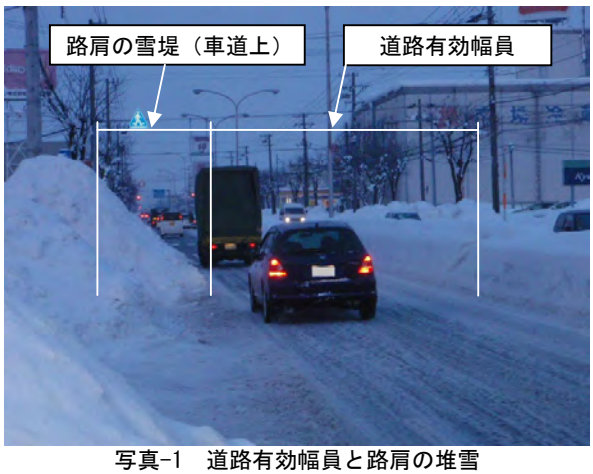


写真-1　道路有効幅員と路肩の堆雪

２．必要条件の設定

計測手法の検討にあたっては，定量的な計測結果が得られるほか，安全性，効率性及び経済性についても考慮しなければならない。本検討では，計測システムに必要な条件として下記の 3 点を設定した。

① 計測員による車道上もしくは車道脇での計測は行わない（安全性）
② 計測員以外の機器等による車道上もしくは車道脇での計測であっても，一般交通に対する影響を最小限に抑える（安全性）
③ 計測対象である道路の有効幅員は，日々の降雪や除雪により刻々と変化するため，計測及び解析が速やかに行える（効率性，経済性）

３．計測システムの構成

計測手法の必要条件を基に，道路有効幅員計測システムを試作した。道路有効幅員の計測イメージを**図-1** 及び**図-2** に，計測システムの構成を**図-3** に，計測データ表示画面を**図-4** に，試作したシステムで使用しているレーザースキャナの仕様を**表-1** に示す。

計測機器には，雪の計測実績があり [1), 2)]比較的安価でシンプルなシステム構成が可能な「レーザースキャナ」を採用した。これにより道路横断をプロファイルする。また，「GPS センサー」を用いて計測位置，時間及び走行速度のデータを取得するほか，「WEB カメラ」により計測箇所の道路状況を撮影する。これら各装置のほか，計測用ソフトウェアを搭載した端末（ノート PC）などを車載し，走行しながら連続して計測することにより，一般交通に対する影響を最小限に抑え，安全で効率的な計測が可能になる。

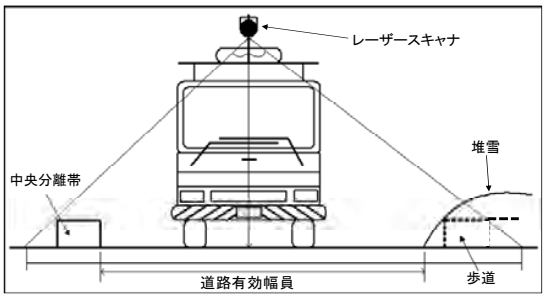


図-1　道路有効幅員の計測イメージ（１）

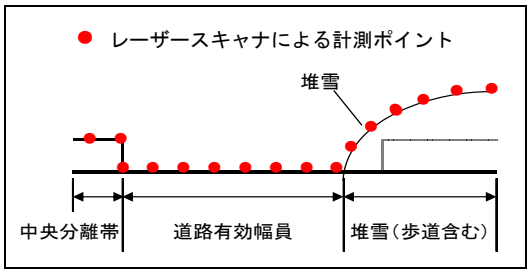


図-2　道路有効幅員の計測イメージ（２）

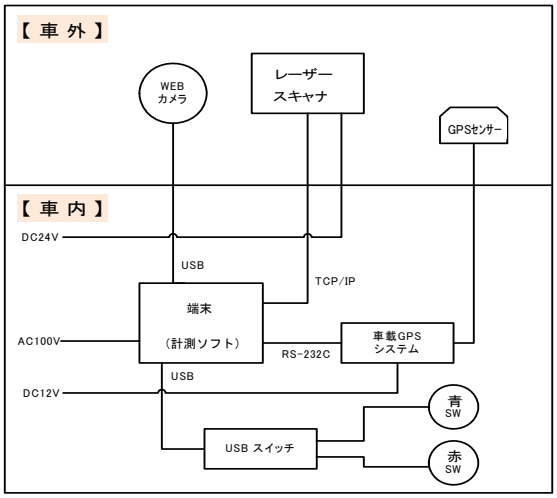


図-3　計測システムの構成



図-4　計測データ表示画面

表－１　レーザースキャナの仕様

SICK社製　LMS111	機器仕様	本システム仕様
計測範囲	270°	180°
	18m ＊1	
計測間隔	25Hz ／ 50Hz	1Hz～10Hz
角度分解能	0.25° ／0.5°	0.5°
システム誤差	±30mm ＊1	
使用周囲温度	−30℃ ～ +50℃	

＊1：反射率が10%以上の計測対象物

４．計測システムの機能

4.1　計測機能

レーザースキャナにより道路横断のプロファイルデータを取得する。例えば，計測間隔を 10Hz に設定し，計測車両が 40km/h で走行した場合には，道路横断のプロファイルデータを約 1.1m のピッチで取得する。

このプロファイルデータを基に，車道と路肩の堆雪や中央分離帯などの道路構造物の境界を自動もしくは手動で判断することにより，道路有効幅員を計測する。なお，同じプロファイルデータから堆雪高さの計測も可能である。

また，堆雪に埋もれない防雪柵などの道路付属施設を含む道路横断を夏期及び冬期に計測することにより，車道部の堆雪幅（車道にはみ出した堆雪の幅）を計測することも可能である。

4.2　計測条件の設定機能

計測システムは，正確な計測結果を得ることを目的としたキャリブレーション機能を有する。具体的には，レーザースキャナの設置位置から計測対象物が無い状態の道路表面までの距離をスキャナにより計測し，その距離をスキャナ高さ位置として計測条件に設定する。

また，レーザースキャナを中心とした左右それぞれの計測幅，計測間隔（1Hz～10Hz），車道と路肩の堆雪などの境界を判断するデータ条件（道路表面からの高さとそのデータの継続数），雪煙などのデータを誤って取得しないように異常値を判断する閾値など，各種計測条件の設定もしくは設定変更が可能である。

なお，境界を判断するデータ条件や異常値を判断するデータの閾値については，計測後の解析時に変更が可能であり，様々な条件で繰り返し解析を行うことができる。

4.3　道路状況画像の表示機能

道路有効幅員の計測と同時に，計測箇所の道路状況を「WEB カメラ」により撮影する。撮影した画像は，レーザースキャナによりプロファイルした同じ位置の道路横断のデータ（グラフ）と並べて，端末の計測データ表示画面内に表示すること

ができる（**図-4**）。

この表示機能により，計測結果の妥当性について，視覚的に検証することができる。

4.4　データのマーキング機能

計測中に端末に接続した青及び赤ボタンを押すことにより，任意の計測データをマーキングする機能を有する。なお，青ボタンはピンポイントデータをマークするのに対し，赤ボタンは範囲データをマークする。

この機能により，例えば，目印となる計測ポイントをマークすることで，解析時のデータ検索が容易になる。また，渋滞や路上駐車などにより正常な計測が不可能だと想定される範囲をマークすることで，解析の範囲を明確化することが可能になる。

4.5　プロファイルデータの重ね合わせ表示機能

計測データ表示画面（**図-4**）において，最大 5 つのプロファイルデータを重ね合わせて表示することができる。

この表示機能によって，同じ位置を継続的に計測することで，時間経過に伴う道路有効幅員等の変化を視覚的に確認することが可能になる。

5．精度確認試験

計測速度及び計測対象物表面の違いが，試作した計測システムの計測精度に与える影響を確認するため，構内において精度確認試験を行った。

5.1　試験方法

試験は，構内に片側 2 車線の車道及び側帯を描画し，その歩道側の側帯に形状寸法が明確である合板製の模擬堆雪を設置した模擬道路で行った。この模擬道路の有効幅員と模擬堆雪高さを計測の対象とし，試験車両（作業車 4t）に車載した計測システムによる計測結果とメジャーを用いて計測した実測値を比較した。

なお，計測速度の違いが計測精度に与える影響を確認するため，車両停止状態を含む 3～4 条件の速度で計測した。また，計測対象物表面の違いが計測精度に与える影響を確認するため，夏期及び冬期に試験を行い，冬期には模擬堆雪の表面に雪を付着させた。

5.2　夏期試験の条件

夏期精度確認試験における条件を以下に示す。また，模擬道路及び模擬堆雪を**図-5** 及び**写真-2** に，試験状況を**写真-3** に示す。

- 道路有効幅員　　：6,990mm（実測値）
- 模擬堆雪高さ　　：912mm（実測値）
- 計測間隔　　：10Hz
- 解析方法　　：手動
- 計測速度（想定）　：0，10，30，50km/h
- 計測回数　　：計測速度毎 3 回

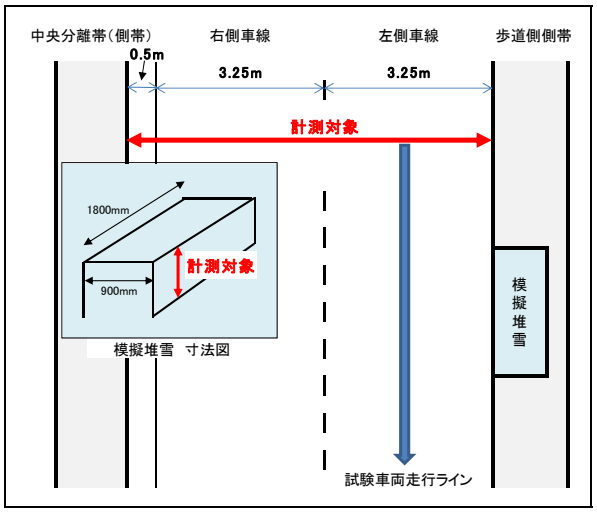


図-5　模擬道路及び模擬堆雪（精度確認試験）

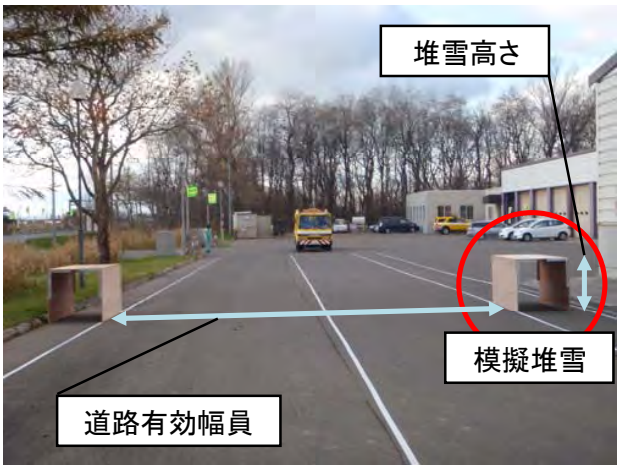


写真-2　模擬道路及び模擬堆雪（夏期精度確認試験）



写真-3　試験状況（夏期精度確認試験）

5.3　夏期試験の結果

夏期精度確認試験の結果を**表-2** に，計測データ表示画面の一例を**図-4** に示す。

試験車両が停止状態での計測では，道路有効幅

員の計測誤差は 20mm 以下，模擬堆雪高さの計測誤差は 9mm 以下であり，これら計測値の誤差は計測機器であるレーザースキャナの仕様値に合致する。

試験車両が走行しながらの計測では，道路有効幅員の計測誤差は，車両停止状態での計測に比べ，計測速度の上昇に伴い大きくなり，計測速度 50km/h では最大 64mm の誤差を確認した。また，模擬堆雪高さの計測誤差は，計測速度 10km/h 及び 30km/h では車両停止状態での計測結果とほぼ同じく 8mm 以下であったが，計測速度 50km/h では最大 37mm の誤差を確認した。

計測速度（車両走行速度）の上昇に伴い誤差が大きくなった原因としては，低速時に比べて路面の不陸等による車両振動（ピッチング）が大きくなり，レーザースキャナの高さ位置が変化したことが考えられる。また，プロファイルデータを一定の時間間隔でサンプリングすることから，計測対象物（長さ 1,800mm）をプロファイルする回数（平均する対象データ数量）が減少し，突出したデータがある場合に平均化が困難になったことも考えられる。

表-2　夏期精度確認試験の結果

計測速度	試験No	ﾃﾞｰﾀ数量 *1	実速度 (km/h)	道路有効幅員 実測値 (mm)	道路有効幅員 計測値 (mm)	道路有効幅員 誤差 (mm)	模擬堆雪高さ 実測値 (mm)	模擬堆雪高さ 計測値 (mm)	模擬堆雪高さ 誤差 (mm)
0km/h	1回目	10	0.0	6,990	6,973	-17	912	903	-9
	2回目	10	0.0		6,970	-20		912	0
	3回目	10	0.0		6,993	3		906	-6
	平均誤差（絶対値）			—	—	13	—	—	5
	最大誤差（絶対値）			—	—	20	—	—	9
10km/h	1回目	4	15.2	6,990	6,967	-23	912	904	-8
	2回目	4	14.7		7,002	12		905	-7
	3回目	4	12.2		6,965	-25		905	-7
	平均誤差（絶対値）			—	—	20	—	—	7
	最大誤差（絶対値）			—	—	25	—	—	8
30km/h	1回目	2	28.9	6,990	7,007	17	912	906	-6
	2回目	2	29.6		6,958	-32		907	-5
	3回目	2	27.4		6,954	-36		905	-7
	平均誤差（絶対値）			—	—	28	—	—	6
	最大誤差（絶対値）			—	—	36	—	—	7
50km/h	1回目	1	45.9	6,990	6,952	-38	912	910	-2
	2回目	1	48.0		6,926	-64		875	-37
	3回目	1	45.0		6,971	-19		879	-33
	平均誤差（絶対値）			—	—	40	—	—	24
	最大誤差（絶対値）			—	—	64	—	—	37

*1：レーザースキャナーが計測対象物をプロファイルした回数

5.4　冬期試験の条件

冬期精度確認試験における条件を以下に示す。また，模擬道路及び模擬堆雪を**図-5** に，試験状況を**写真-4** に示す。

冬期精度確認試験では，走行路面の一部が凍結していたことから，計測速度は 30km/h を上限とした。また，計測対象である合板製の模擬堆雪の表面に水でしめらせた雪を付着させた。なお，レーザースキャナによる計測は，計測表面が明るいほどレーザー光を反射するため検出が容易である [3] とされており，雪は合板に比べて明るいことから夏期精度確認試験に比べて好条件といえる。

- 道路有効幅員　　：7,015mm（実測値）
- 模擬堆雪高さ　　：956mm（実測値）
- 計測間隔　　：10Hz
- 解析方法　　：手動
- 計測速度（想定）　：0，10，30km/h
- 計測回数　　：計測速度毎 3 回



写真-4　試験状況（冬期精度確認試験）

5.5　冬期試験の結果及び夏期試験との比較

冬期精度確認試験の結果を**表-3** に示す。

道路有効幅員の計測では，計測誤差は，計測速度 10km/h までは 15mm 以下であったが，計測速度 30km/h では最大 35mm の誤差を確認した。これらの値は，夏期の試験結果と近似しており，計測速度の上昇に伴い計測誤差が大きくなる傾向も同じである。

次に，模擬堆雪高さの計測では，車両停止状態を含む全ての計測速度において，30mm～40mm 程度の誤差を確認した。しかし，車両停止状態では各計測値の差が最大 4mm であるなど各計測値の分散が小さいことから，計測条件の初期設定などが計測誤差の要因として考えられる。

以上の結果から，本システムによる計測では，計測対象物表面の違いによる明確な計測精度への影響は確認できなかった。また，計測速度の増加に伴い計測誤差が大きくなる傾向を確認したが，実際の計測対象物である雪を計測した冬期試験の最大の誤差率（誤差 35mm／実測値 7,015mm）でも 0.5%であることから，実用には十分に耐えられると考えられる。

表-3　冬期精度確認試験の結果

計測速度	試験No	ﾃﾞｰﾀ数量 *1	実速度 (km/h)	道路有効幅員 実測値 (mm)	道路有効幅員 計測値 (mm)	道路有効幅員 誤差 (mm)	模擬堆雪高さ 実測値 (mm)	模擬堆雪高さ 計測値 (mm)	模擬堆雪高さ 誤差 (mm)
0km/h	1回目	10	0.0	7,015	7,024	9	956	922	-34
	2回目	10	0.0		7,022	7		918	-38
	3回目	10	0.0		7,028	13		918	-38
	平均誤差(絶対値)			—	—	10	—	—	37
	最大誤差(絶対値)			—	—	13	—	—	38
10km/h	1回目	5	9.6	7,015	7,030	15	956	925	-31
	2回目	4	9.3		7,017	2		914	-42
	3回目	5	11.4		7,013	-2		923	-33
	平均誤差(絶対値)			—	—	6	—	—	35
	最大誤差(絶対値)			—	—	15	—	—	42
30km/h	1回目	1	28.4	7,015	7,009	-6	956	933	-23
	2回目	2	30.2		7,015	0		921	-35
	3回目	2	29.6		7,050	35		921	-35
	平均誤差(絶対値)			—	—	14	—	—	31
	最大誤差(絶対値)			—	—	35	—	—	35

*1：レーザースキャナーが計測対象物をプロファイルした回数

6．現場適応性確認試験

試作した計測システムの現場適応性を確認するため，精度確認試験と同様に試験車両に計測システムを車載し，一般国道において冬期の道路有効幅員を計測する現場適応性確認試験を行った。

6.1　計測箇所

計測箇所は，目印となる道路付属施設などが付近に設置され，計測システムのマーキング機能や道路状況画像の表示機能による箇所の特定が比較的に容易だと想定される 4 地点と，道路構造や沿道条件に変化が無く道路有効幅員の変化量が少ないと想定される直線区間約 40m を対象にした。

6.2　計測速度

計測速度の違いが計測結果に与える影響を確認するため，同日に同一箇所を計測した。

計測速度は，冬期の精度確認試験での実績がある 30km/h と，一般車両と同じ旅行速度の 2 つの条件で計測した。旅行速度での計測は，一般交通に対する影響を最小限に抑えられることから，安全かつ効率的な計測が期待できる。

6.3　検証方法

現道での計測であり，メジャーなどによる道路有効幅員の実測が不可能であることから，WEB カメラ画像と見比べることにより，計測結果の妥当性を視覚的に検証した。また，各々の計測値の差から計測速度の影響を確認した。

なお，堆雪高さの計測については，路上の堆雪高さが本計測システムの計測範囲（高さ 3,074mm）を超える箇所が多かったことから，計測結果のとりまとめ対象外とした。

6.4　試験条件

現場適応性確認試験における条件を以下に示す。

・計測箇所　　：一般国道 231 号（L 側）
　　KP8.2，8.7，12.1，13.8
・計測箇所（連続）　：一般国道 231 号（L 側）
　　KP8.0
・計測間隔　　：10Hz
・解析方法　　：手動
・計測速度（想定）　：旅行速度，30km/h

6.5　試験結果

計測データ表示画面の一例を**図-6** に，計測結果を**表-4** 及び**表-5** に示す。

視覚による検証では，旅行速度（平均約 46km/h）での計測でも堆雪及び道路構造物の形状を計測できたことから，本計測手法の現道での適応性を確認した（**図-6**）。

予め定めた 4 地点の計測結果は，構内で実施した精度確認試験に比べて計測値の差が大きかった。また，計測速度の影響は精度確認試験と傾向が異なっている。このことから，計測速度の違いが計測結果に与える影響については確認できなかった（**表-4**）。

この原因としては，本計測システムのレーザースキャナのサンプリング間隔は 0.1 秒毎であり，計測速度 30km/h では道路縦断方向に 83cm のピッチでプロファイルする。しかし，計測対象物の堆雪は連続した不整形状であることから，若干の計測位置のずれが計測結果に大きく影響したことが推測される。また，レーザースキャナは 0.5°（角度分解能）毎に扇状にプロファイルすることから，計測対象物までの距離の増大に伴いプロファイルする道路横断方向のピッチが広くなるため，車道と車道以外の境界の位置精度が低下する。このことから，本試験で計測した道路有効幅員が精度確認試験に比べて広かったことも計測結果の差に影響したと考えられる。

ただし，道路有効幅員の連続計測（約 40m）では，データ件数 45 件のうち 87%は計測値の平均から 100mm の範囲にあるなど計測結果にばらつきが少ないことから，計測結果の妥当性を確認することができた（**表-5**）。

以上の結果から，連続した不整形状である堆雪に対しては，少数のプロファイルデータにより一定区間の道路有効幅員の代表値として評価するのは妥当ではないと考えられる。今後の路上での道路有効幅員の計測にあたっては，計測区間を連続的に計測し，複数断面のプロファイルデータを用いて何らかの統計的処理（平均値，中間値，異常値カット等）を行うことにより，一定区間毎の道路有効幅員の代表値として評価することが可能であると考える。



図-6　計測データ表示画面（現場適応性試験）

表-4　現場適応性確認試験の結果

計測箇所	計測速度（想定）	計測日時	試験No.	実速度(km/h)	道路有効幅員 計測値(mm)	道路有効幅員 差(mm)
ＫＰ８．２（Ｌ側）・片側３車線・歩道有り・中央分離帯有り	旅行速度	1月13日	1回目	47．6	13，306	34
			2回目	48．6	13，340	
	30km/h	2月2日	1回目	27．6	13，127	53
	旅行速度		2回目	43．4	13，074	
	30km/h	2月22日	1回目	30．1	13，170	184
			2回目	30．8	12，986	
ＫＰ８．７（Ｌ側）・片側３車線・歩道有り・中央分離帯有り	旅行速度	1月13日	1回目	44．7	13，036	131
			2回目	50．0	12，905	
	30km/h	2月2日	1回目	27．2	12，979	77
	旅行速度		2回目	47．0	12，902	
	30km/h	2月22日	1回目	30．0	12，886	38
			2回目	30．2	12，924	
ＫＰ１２．１（Ｌ側）・片側２車線・歩道有り・中央分離帯有り	旅行速度	1月13日	1回目	38．7	9，937	30
			2回目	45．8	9，967	
	30km/h	2月2日	1回目	27．6	9，755	208
	旅行速度		2回目	42．2	9，963	
	30km/h	2月22日	1回目	29．6	10，005	67
			2回目	29．6	10，072	
ＫＰ１３．８（Ｌ側）・片側２車線・歩道有り・中央分離帯有り	旅行速度	1月13日	1回目	50．2	10，027	6
			2回目	47．2	10，021	
	30km/h	2月2日	1回目	28．2	10，012	17
	旅行速度		2回目	48．8	10，029	
	30km/h	2月22日	1回目	31．3	9，869	8
			2回目	29．6	9，861	

表-5　現場適応性確認試験（連続計測）の結果

データNo.	ＫＰ	計測速度(km/h)	道路有効幅員(mm)	データNo.	ＫＰ	計測速度(km/h)	道路有効幅員(mm)
1	7．983	29．8	13，243	26	8．000	29．7	13，182
2		29．8	13，245	27		29．7	13，201
3		29．8	13，220	28		29．7	13，203
4		29．8	13，203	29	8．008	29．7	13，188
5		29．8	13，177	30		29．7	13，224
6		29．8	13，179	31		29．7	13，225
7		29．8	13，202	32		29．7	13，214
8		29．8	13，200	33		29．7	13，203
9		29．8	13，224	34		29．7	13，216
10	7．992	29．7	13，202	35		29．7	13，213
11		29．7	13，198	36		29．7	13，241
12		29．7	13，204	37		29．7	13，220
13		29．7	13，213	38	8．016	29．7	13，045
14		29．7	13，225	39		29．7	13，193
15		29．7	13，214	40		29．7	13，176
16		29．7	13，191	41		29．7	13，057
17		29．7	13，175	42		29．7	13，054
18		29．7	13，175	43		29．7	13，026
19		29．7	13，220	44		29．7	13，063
20	8．000	29．7	13，168	45		29．7	13，163
21		29．7	13，211	最大値			13，245
22		29．7	13，169	最小値			13，026
23		29．7	13，190	計測値の差（最大）			219
24		29．7	13，168	平均値（μ）			13，184
25		29．7	13，171				

＊KP計測は1秒毎、道路有効幅員計測は0.1秒毎であるため、表記方法が異なる

７．自動解析の精度向上の検討

試作した道路有効幅員計測システムは，レーザースキャナにより取得したプロファイルデータを基に，車道と車道以外の境界を判断するデータ条件やデータの異常値を判断する閾値の設定により道路有効幅員を自動解析できる。しかし，プロファイルデータを端末画面に表示し，車道と車道以外の境界を目視により判断した手動解析の結果と計測値が大きく乖離するなど，解析の精度が課題となっている。

計測の効率化を図るためには解析の自動化が必要であることから，自動解析での解析精度の向上を目的に，計測条件の設定に新たな閾値などを追加した。

具体的には，計測対象路線の車線数などを計測条件として入力し，この入力条件から道路有効幅員の上限値を定めることとした。また，解析した道路有効幅員の計測値と，その直後のプロファイルデータを解析した道路有効幅員の計測値の差を対象に，予め定めた閾値以上の差が生じた場合には，後のデータを異常値として判断する機能を追加した。

これらの改良により，解析対象ではない交差点部などの計測データを除外できること，また，計測車両と併走する車両が存在した場合などに生じる，その前後の計測値に比べ極端に狭い計測データを除外できるため，自動解析の精度向上が期待できる。

８．まとめ

効率的な維持管理の計画・実施に寄与することを目的に，道路有効幅員の計測手法について検討し，レーザースキャナを用いた道路有効幅員計測システムを試作した。また，試作した計測システムを用いて確認試験を行った結果，システムの計測精度及び現場適応性を確認することができた。

今後は，計測の効率化を目的とした自動解析の精度を検証するほか，道路有効幅員と旅行速度の相関を把握するなど，更なる検討を進めて行く所存である。

参考文献

1) 石川真大・佐々木憲弘・中村隆一・今岡大輔：運搬排雪施工管理システムの開発，第24回寒地機械技術シンポジウム，2008.11
2) 渡辺了・石間計夫：適切な除雪発動を目的とした降積雪量把握装置の開発，土木学会第65会年次学術講演会，2010.9
3) SICK社：LMS111取扱説明書，P21，2008.12

作業船設備予知保全における診断システムの開発

予知保全技術の作業船への適用事例

東亜建設工業株式会社　○ 長澤　太一
ｼﾞｬﾊﾟﾝﾏﾘﾝﾕﾅｲﾃｯﾄﾞ株式会社　戸村　雅一
株式会社 IMC　柴田　勝規

１．開発の経緯

近年、公共工事を初めとする建設事業費の縮減が社会から強く求められている。作業船を使用する大規模な港湾工事においてもコスト縮減は大きな課題であり、工事費で大きな割合を占める大型作業船のライフサイクルコストを削減することは、作業船を保有する事業者共通の課題となっている。作業船のライフサイクルコストを削減するためには、主に次のような問題を解決する必要がある。

第一に作業船の更新時期に関する問題である。作業船の更新には多額の費用が必要となるため、現在の作業船の設備状況をできるかぎり正確に把握し、今後予想される設備トラブルとメンテナンス費用を想定したうえで、更新時期を判断することが望ましい。

一般的に作業船においては、限られたスペースに必要な機材を配置していることが多く、重要部品の状態を点検するために設備を撤去解体する必要性が生じることもある。民間企業においては、設備更新の有無を判断するためだけの目的で多額の費用を要する設備の撤去解体や点検調査を行うことは少なく、通常整備による作業船の延命を図ることが多い。これは、耐用年数を超えた作業船を、割高なメンテナンス費用を支払いながら使用し続けることに等しく、結果として割高な費用を事業者が負担している状況が続いている。

第二に作業船に適した効果的メンテナンス手法の確立である。特殊な形態を持つ作業船で使用する設備部品には、必要なものをその都度発注する受注生産方式で生産されている部品もある。

作業船の故障に伴い発生する経済的損害を最小限にするために、特殊部品や重要部品の交換を決められた運転時間で定期的に行うことも多い。ただし、正常な状態の部品を交換することで故障のリスクが高まるいわゆる『いじり壊し』の事例や、整備する必要のない設備を整備するオーバーメンテナンスによる弊害が発生している。

上記問題を解決するため、当社は JMU 及び IMC と共同で、作業船設備診断及び予知保全を行う作業船設備診断システムの開発を開始した。このシステムは、作業船設備の振動データと弾性波データを取得し、軸受けや歯車等の状態をモニタリングするものであり、設備の劣化兆候と異常原因を迅速に把握し、設備事故防止、補修時期の事前予測、設備保全員の省力化、保全コストの低減、設備の現状把握を目的としている。

２．作業船の特徴

2.1　主な作業船設備

東亜グループでは、ポンプ浚渫船、地盤改良船、杭打ち船などの多くの作業船を保有している。

作業船の主な設備としては、舶用ディーゼルエンジン、発電機、係留ウインチ、大型ウインチ、浚渫ポンプ、スパッド、プラント等がある。

これらの設備の中でも、地盤改良装置や浚渫装置の昇降ウインチやスパッド昇降ウインチ、浚渫ポンプは、施工中に故障が発生した場合、現場で短期間に復旧させることが困難であり、定期的な整備と日常の保守管理が非常に重要である。

構造的には、エンジンや電動機、軸と軸受け、減速機、駆動用歯車で構成されているが、非常に大型の設備であり、解放点検やオーバーホールには多くの費用が必要である。



写真-1　地盤改良船「黄鶴」

2.2　老朽化した作業船のトラブル事例

作業船の老朽化に伴い、これまでには発生しなかった故障が発生している。その多くは減速機歯車やベアリングの損傷であり、故障個所によっては、復旧に多くの時間を要するものもある。

写真-2に、異常摩耗が発生した歯車を示す。これは、当社が保有するポンプ作業船に搭載されている、浚渫装置昇降ウインチ遊星減速機の太陽歯車が摩耗した状態である。材質はクロムモリブデン鋼で、施工前に歯面の点検・寸法確認を実施しており、異常な摩耗は見られなかった。しかし、施工中に急激に摩耗が進行し、浚渫装置の昇降が不可能となり、施工を中断して復旧作業を行った。

写真-3に、破断した歯車を示す。この歯車は、当社が保有する作業船のウインチ駆動軸ピニオンギヤであり、キー溝部の歯面側の谷部に裂が生じ、最終的に破断した状況である。材質は炭素鋼鋼材で、定期的に歯面の点検、浸透探傷検査を実施していたが、破損に繋がると思われる亀裂は発見されなかった。

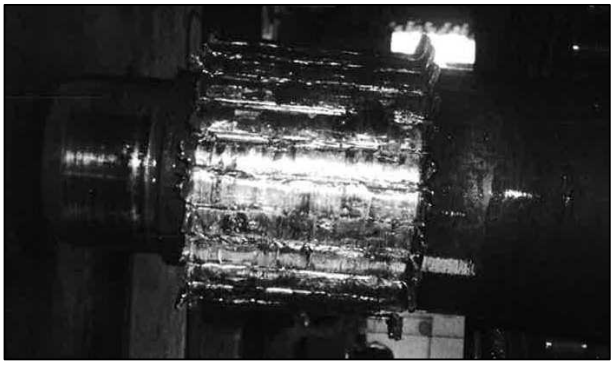


写真-2　太陽ギヤ摩耗状況



写真-3　ピニオンギヤ破損状況

こうしたトラブルは、施工中に振動計測を定期的に実施し、摩耗や亀裂の兆候を事前に把握していれば、大きなトラブルを避けることが可能であったと考えられる。

３．予知保全技術

3.1　振動計測による回転機械の予知保全

設備保全では、運転中の設備の、振動・音響・熱・歪みなどの損失するエネルギーを定量的にとらえ、設備の使用限界の判定を行う。そのうち、振動を測定し、解析することにより設備の異常を診断する方法は、設備診断の中でも最も一般的で有効な手段として知られている。測定する振動は、10Hzまでは変位、10～1ｋHzまでは速度、1ｋHz以上は加速度が最も感度が良い事がわかっている。下表に、測定モードと診断項目を示す。

計測された振動データを評価・診断する方法として、一次的な簡易診断とその簡易診断で異常な兆候が見られた場合に行う精密診断の2つがある。

表-1　計測モード

モード	単 位	周波数帯	異常内容
変位（DISP）	μ	0～10Hz	構造物の緩やかな振動
速度（VEL）	cm/s	10～1kHz	アンバランス、ミスアライメント 基礎不良、ガタ、基礎ボルトの緩み 転がり軸受の著しい損傷
加速度（ACC）	G	1kHz～	転がり軸受の損傷 潤滑不良 歯車損傷

(1) 簡易診断

簡易診断とは、「振動レベルを基準と比較し、設備が正常／異常を判定する方法」で、相対判定法と絶対判定法、相互判定法の3種類の方法がある。1つの方法だけで判定するのではなく、最低2つ以上の方法を組み合わせて判定する事が重要である。

相対判定法とは、一般的には「傾向管理」と呼ばれる方法で、定期的に振動レベル値を測定し、初期値（新設時またはオーバーホール後）・正常時の振動レベル値の何倍（n倍）になったかで判定する方法である。機器ごとの設置状態や運用による振動レベルの差による影響を受けにくいが、基準となる初期値が必要となるので、既に運用が始まっている機器の診断には適さない。

絶対判定法とは、一般的には「絶対値判定」と呼ばれる方法で、振動レベル値をISOやメーカ独自の絶対値判定基準表に当てはめ、判定する方法である。予め基準が定められているため、判定が容易かつ既運用中の機器でも判定可能だが、運用や設置状態が判定基準における想定と大きく異なると、正しい診断ができない場合もある。絶対値判定表には、速度モード（機構部）と加速度モード（軸受）の2種類の判定表がある。

相互判定法とは、同一機種または能力･方式が類似している複数の機器間で振動値を比較し、他と比べて値が突出して大きいものを異常と判定する方法である。機器間相互に比較するため、初期値が不要であり、似たような運用に就いている機器間で比較するため、運用や設置状態による影響を受けにくく、既運用中の機器への適用が容易だが、比較対象となる機器が複数なければならず、また経年劣化の評価が難しい。

(2) 精密診断

精密診断とは、簡易診断で異常と判断した設備に対し、振動に含まれる周期性を解析して、振動の原因、すなわち損傷発生箇所，原因を推定する方法であり、解析手法には高速フーリエ変換FFTを用いる。

通常、回転機械から発生する振動は複雑であり、単純な振動はほとんど無い。この複雑な信号の中にどのような周波数と振幅をもった振動が混ざっているかを判別するのが周波数解析で、この解析に用いられる手法がFFTである。
通常の振動信号は，下図のように、種々の周波数と振幅を持つ正弦波（サイン波）になっている。

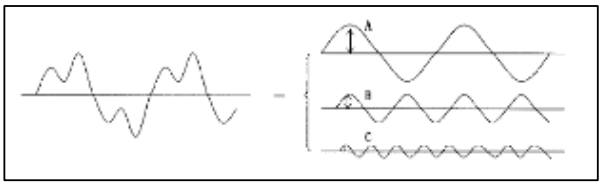


図-1　振動信号

この信号をそれぞれの周波数を持った正弦波に分析し，その振幅の大きさを求めることが周波数分析、または周波数解析である。その解析をFFTという手法を用いて行った場合、FFT解析と言い、解析により求まった振幅値を，周波数の近いものから順に並べたものがスペクトラムである。
この解析を行うことにより、測定したポイントの振動がどういう周期成分を持っているかが判り、その発生原因を特定することが可能となる。

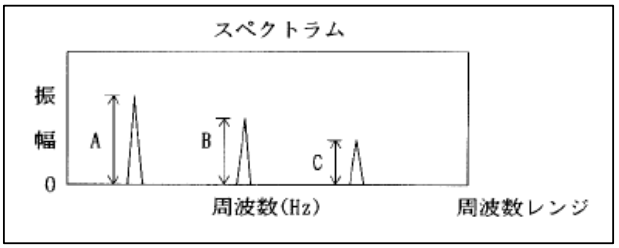


図-2　スペクトラム図

3.2　AE計測による回転機械の予知保全

アコースティックエミッション（AE）とは、「材料が変形したりき裂が発生したりする際に材料が内部に蓄えていたひずみエネルギーを弾性波として放出する現象」と定義されている。この弾性波を材料の表面に設置した変換子すなわちAEセンサで検出し、信号処理を行うことにより材料の破壊過程を評価する手法がアコースティックエミッション（AE）法である。

検出されるAE信号は通常、数kHz～数MHzに周波数帯域を持っている。例えば金属材料では発生するAEは主として100～1000kHzの周波数領域に成分をもつ信号が多く放出される。信号を検出する為に使用するAEセンサは、一般的にPZT（ジルコン酸チタン酸鉛）などの圧電素子を内蔵し、接着剤やシリコングリースなどの音響カップラを介し、材料表面に密着させてAE信号を検出する。

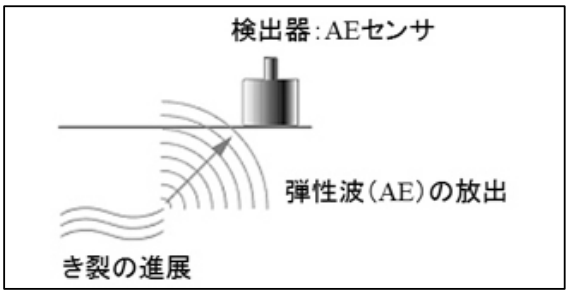


図-3　AE計測概念図

(1) E_area

E_area イーエリアはこの診断器の代表的な診断パラメータで、基本的にこのパラメータにより軸受診断を行う。軸受に異常が発生すると、通常は現れない振幅の大きなAE が発生する。このことに着目し、AE 波形において『正常な軸受状態から逸脱したAE 成分』のみを抽出・定量化する。

測定したAE検波信号（①）の振幅頻度分布を求めると、損傷軸受の場合、最頻振幅（②）に対し高振幅側に非対称な分布（③）が現れる。一方、正常軸受の場合は、ほぼ対称に分布することから、振幅分布の非対称な広がりを数値化し、比較することで診断する。その数値がパラメータE_areaである。

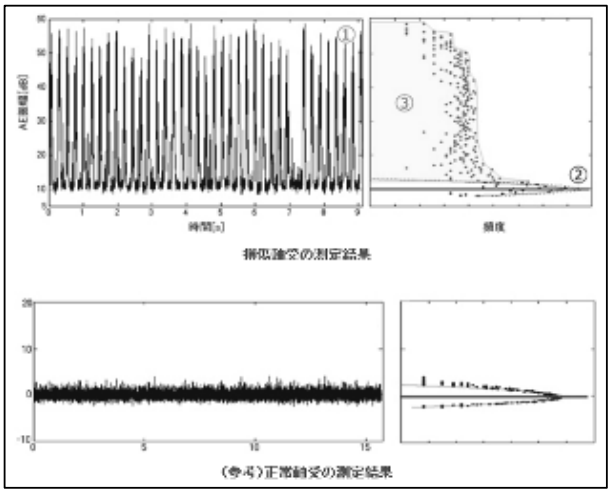


図-4　E_area

E_area は、異常の程度が大きいほど高い値となり、損傷の前駆現象である潤滑不良、異物混入等があると増大し始める。そして、異常状態が悪化したり剥離損傷が広範囲に発生するとさらに大きな値を示す。

(2) E_ratio

E_ratio イーレシオは、軸が一回転する間の『平均的な振幅（①：後述のAve値）』に対し、設定したイベント検出レベル（②）を超えたAE（イベントAE）の割合を軸受状態の診断指標とし、その割合を測定回転数分で平均した値がパラメータE_ratioである。異常の範囲が広くなるほど、高い値となる。

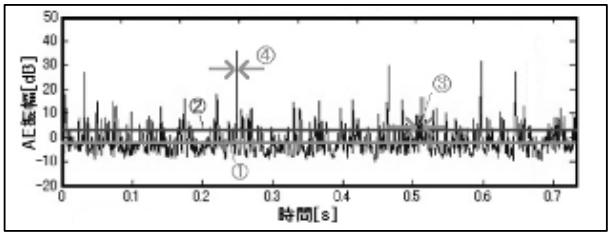


図-5　E_ratio

3.3　作業船に適用する場合の注意事項

作業船の主要機器であるウインチは電動機、減速機を介して最終的にドラム回転数は10回転以下の超低速となる。一般的に、このような低速回転（100rpm以下）軸受に振動法を適用しようとしても困難とされている。その理由は軸受部における傷等の衝突エネルギーが小さく、また衝突エネルギーによる異常信号に対してノイズ率が大きい（S/N比が低い）ためである。そこで、AE法を用いて150rpm以下の軸受部に対して使用可能な低速回転軸受け診断器を選定し採用した。

ウインチの軸受部にはすべり軸受が多く使用されている。すべり軸受は苛酷な条件下においても優れた性能を発揮し、高い信頼性を得ているが、適切な潤滑とそれに応じた軸受周辺設計がなされなければ、異常な摩耗や焼付きなどが短時間で発生する。すべり軸受に発生する損傷については、流体潤滑状態で使用されるため、理論的には連続運転中において固体間の接触は起きない。しかし、実際には様々な要因により固体間の接触を避けられず、流体油膜が破れ、摩耗が生じて重大な損傷につながる実例がある。

これらの損傷が起きる前に、AE診断器にて異常兆候としてとらえることができると考えられる。

４．第三亜細亜丸での適用事例

4.1　第三亜細亜丸の概要

「第三亜細亜丸」は当社が保有する最大のポンプ浚渫船である。1979 年の建造以来、国内外で多くの施工実績があり、現在も当社のポンプ浚渫工事の中心的な作業船である。おもな設備は、操船ウインチ、スパッド昇降ウインチ、ラダー昇降ウインチ、カッターヘッド駆動装置、浚渫ポンプ等である。全装備機関出力は 10,830kW である。

しかし、近年は老朽化が進み、重大な故障の発生が懸念され、作業船設備診断システムを適用することを決定した。

表-2にポンプ浚渫船「第三亜細亜丸」の主要目を、写真-4に全景を示す。

表-2　「第三亜細亜丸」主要目

建造年	1979　年
長さ	78.0　m
幅	19.5　m
深さ	5.5　m
吃水	4.1　m
全装備機関出力	10,830　kW
浚渫ポンプ出力	5,880　kW



写真-4　「第三亜細亜丸」全景

4.2　対象機器と計測ポイント

計測箇所は第三亜細亜丸のラダーウインチ、スイングウインチ、スターンウインチの電動機軸受け、減速機及び減速機軸受け、ピニオン軸受け、ドラム軸受けの合計48カ所とした。

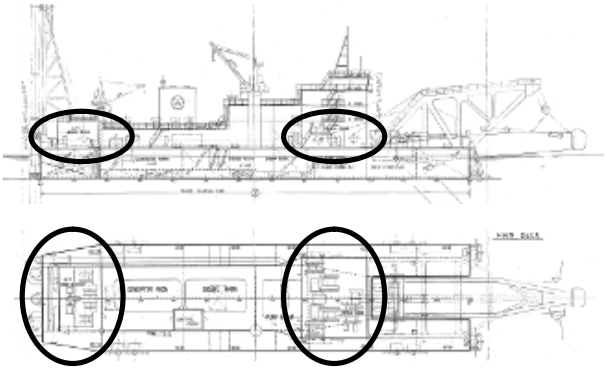


図-6　「第三亜細亜丸」計測箇所

4.3　計測機器

(1) 振動計測器

今回は、操作が簡易で、事前に計測箇所の情報データを設定し、計測時にその場で診断結果が確認できる振動計測器を採用した。取得したデータは、管理ソフトを用いることで、傾向管理、劣化予測、高速フーリエ変換による評価が可能である。



写真-5　振動計測器

(2) AE計測器

一般的に振動では難しいとされる超低速回転部分（150rpm 以下）の診断用として低速回転軸受け診断器を採用した。この低速回転軸受け診断器は、測定箇所 ID と軸回転速度の入力だけで計測が可能であり、診断結果を計測時に確認することができる。

検出した AE 信号の 波形から E_area、E_ratio、E_peak、E_ave 等の診断パラメータを算出し、これらの診断パラメータを駆使することで、適切な状態監視を行い、表計算ソフトを用いることで容易に管理、解析を行うことができる。



写真-6　AE計測器

4.4　計測結果

(1) 振動計測

図-7 に振動計測結果の一例を示す。図-7 に示すような管理ソフトに出力し、分析と評価を行った。その結果、とくに異常は見られなかった。

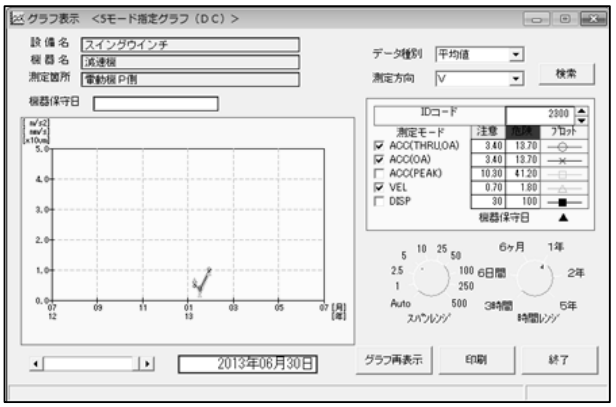


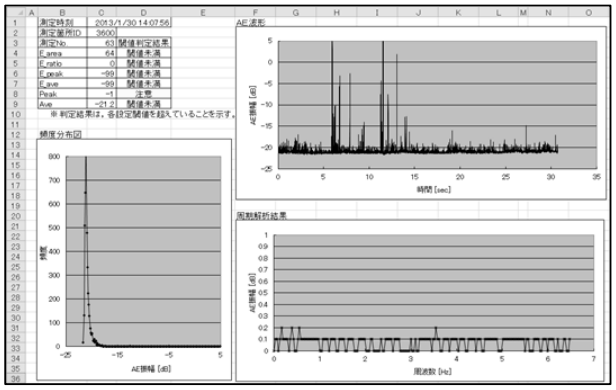
図-7　振動計測結果例



写真-7　振動計測状況

(2) AE 計測

図−8 に AE 計測結果の一例を示す。E_area, E_ratio は正常で、AE 波形に周期性の無い信号が見られる。傷等によるものではないと思われるが経過観察が必要である。



図−8　AE計測結果例



写真−8　AE計測状況

５．今後の取り組みについて

今回導入した振動及びAE計測による予知保全システムにより、これまでのような感と経験による判断から、定量的なデータに基づく判断を行うことが可能となり、突発的な事故の防止や効果的なメンテナンスを行うことができると期待している。今後も継続して計測データを採取し、分析・評価を行う予定である。

さらに今後は、疲労損傷の危険部位を抽出し、その部位に歪み計を取付け、常時計測・劣化診断を行うことが可能な疲労劣化監視技術や、鋼製設備（構造、機械等）の板厚変化を、塗装・錆を除去せずに、孔食部も板厚が計測出来る超音波式有効板厚計測システムの導入を検討している。これらの技術を用いることで、回転機械だけでなく、船体部の状態を定量的に判断することが可能となり、メンテナンス効率のさらなる向上が見込まれる。

最後に、作業船に対する予知保全技術の適用にあたり、全面的にご協力いただきましたジャパンマリンユナイテッド株式会社様並びに株式会社ＩＭＣ様の皆様に心から感謝申し上げます。

参考文献

1）日本工業出版　検査技術　2012 年 3 月号、6 月号

2）日本プラントメンテナンス協会プラントエンジニア　2008 年 3 月号

音源探査装置（音カメラ）を用いたフィンガージョイントの劣化診断に関する研究

中日本高速道路（株）　○ 築山　有二
中日本高速道路（株）　川井田　実
（株）熊谷組　大脇　雅直

１．はじめに

橋梁における伸縮装置の損傷は，通行車両に危険を与えるだけでなく，場合によっては橋の構造にも影響を与える可能性がある。フィンガージョイント部の劣化メカニズムについては検討が行われており，疲労試験や数値解析が進められている[1),2)]。伸縮装置の日常点検は，一般的に走行する車上もしくは路面や伸縮装置下面からの目視で行われるため，点検者の経験的判断に頼るところが大きく，簡単な装置で劣化度などが可視化できるシステムができれば点検の精度や効率が向上すると考えられる。また弊社は，笹子トンネル天井板落下事故を受けて「安全性向上３ケ年計画」を作成した。その施策には「点検業務に関する技術の高度化」も含まれており，本システム開発の重要性は高いと考えている。

そこで本研究では，音源探査装置を用いて鋼製フィンガージョイントの劣化度を推定し，可視化する方法について実験的検討を行った。はじめに，破断しているフィンガージョイント試験体を用いた基礎実験を行った。次に，テストコースに設置したフィンガージョイント試験体を対象に実験を実施し，フィンガージョイントの劣化度を推定する方法について検討を行ったので報告する。

２．ジョイント試験体を用いた実験[3)]

2.1　実験概要

鋼製フィンガージョイントをハンマなどで加振した場合，劣化の度合いによって発生する音が変化すると考えられる。フィンガージョイントにおけるフィンガー部分を一定の加振力でハンマ打撃し，その発生音を測定した。調査対象とした鋼製フィンガージョイントを図-1 に示す。図-2 は試験体を横から見た状況である。フィンガージョイントのフェイスプレートとウェブプレートの接合部分が劣化によって破断している。

発生音の測定には音源探査装置（音カメラ）を用いた。音源探査装置を図-3 に示す。音源探査装置は５つのマイクロホンと１つの CCD カメラを装備しており，マイクロホンで収録した音情報を用いて音源方向を推定し，CCD カメラから得られた映像情報とパソコン上で組み合わせて表示している[4)]。画面上で円の位置が音の到来方向を示し，色の違いは周波数を，円の大きさは音のレベルを表している。

2.2　実験結果

発生音の周波数特性の例を図-4 および図-5 に示す。フィンガー部の①，②，⑩，⑪は健全部，③～⑨はフェイスプレートとウェブプレートの接合部が劣化によって破断している部分である。健全部と劣化部を比較すると，周波数特性に差が見られた。特徴的な周波数範囲を抽出して音源探査装

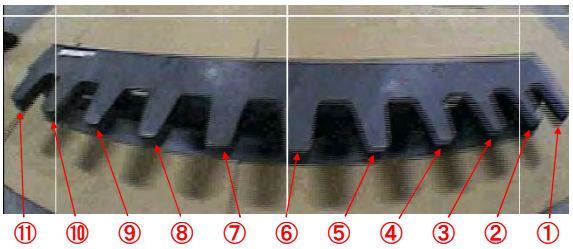


図-1　フィンガージョイント試験体



図-2　フィンガージョイント試験体　劣化状況

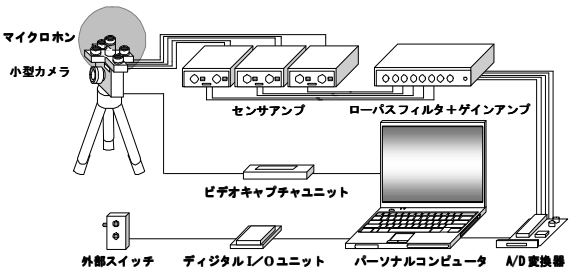


図-3　音源探査装置（音カメラ）システム系統

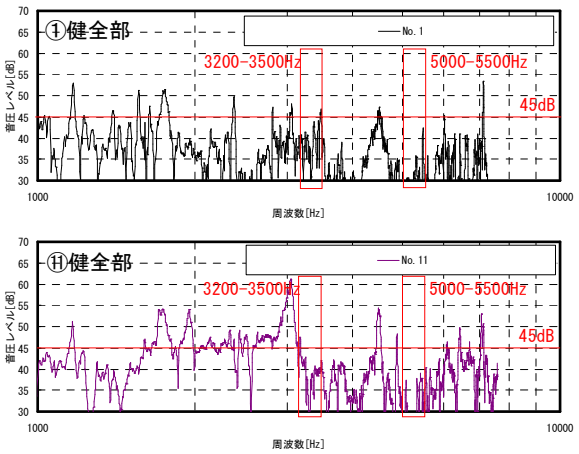


図-4　周波数特性（健全部）

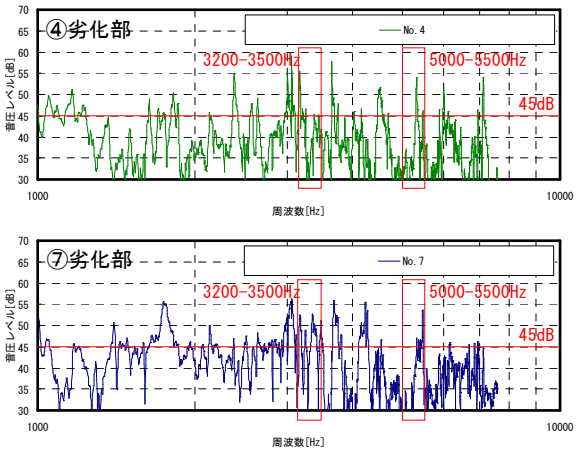


図-5　周波数特性（劣化部）

置の測定データを分析した結果を図-6 および図-7 に示す。音源位置の表示に関するしきい値は 45dB に設定している。3200～3500Hz に着目した場合，図-4，図-5 に示す周波数特性では加振時に発生する音が重なり合い，判別が難しい状況もあったが，図-6 の音源推定方向結果では，健全部と劣化部からの発生音の周波数の違いが色の違いとして確認できる。5000～5500Hz に着目した場合，図-4，図-5 に示す周波数特性では劣化部で卓越した周波数成分が見られる。図-7 の音源方向推定結果では，健全部は音源位置が表示されず，音が変化した加振点は音源位置が表示されていることがわかる。

３．テストコースに設置したジョイントの実験 [5)]

3.1　実験概要

実験は図-8 に示すようにテストコース（幅員 5m，1 周 750m）に設置された鋼製フィンガージョイント試験体を対象に行った。試験体は長さ 1900mm のものを 2 個設置してあり，このうち劣化を想定して長さ 970mm，幅 5mm の模擬亀裂を付加したものを「亀裂有り試験体」，模擬亀裂のないものを「健全な試験体」とした。調査対象とした鋼製フィンガージョイント（亀裂有り試験体）を図-9 に示す。



図-6　測定結果（3200～3500Hz）

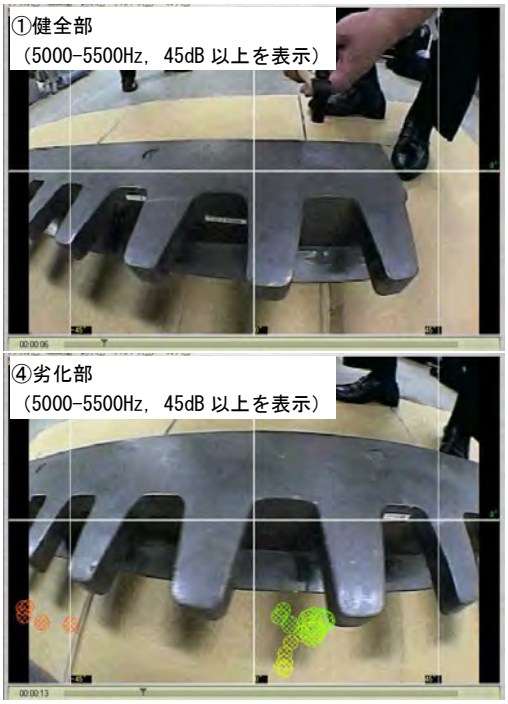


図-7　測定結果（5000～5500Hz）

3.2　ハンマ加振による実験

試験体を一定の加振力でハンマ打撃して発生音を測定した。加振位置はフィンガー部，フィンガー根元部，フェイスプレート部とした。ハンマは 0.23kg（0.5lb）と 1.13kg（2.5lb）の 2 種類を用いた。ハンマ加振による発生音の周波数特性を図-10 に示す。ハンマの種類について比較すると，2.5lb のハンマでは亀裂部を加振したときに 6504Hz 付近に卓越した周波数が見られるが，650Hz

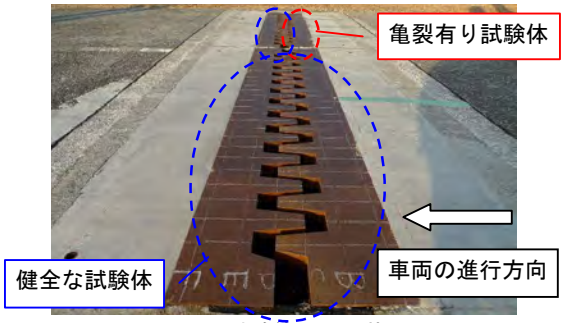


図-8　試験体の設置状況

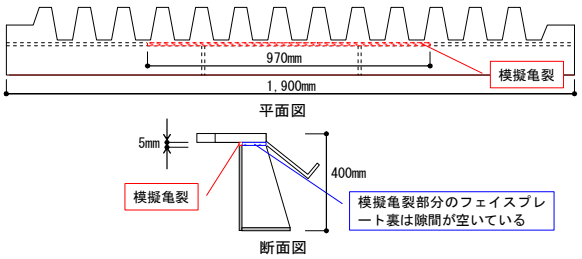


図-9　亀裂有り試験体

付近や 1216Hz 付近, 1446Hz 付近の卓越周波数よりも相対的に音圧レベルは小さい。それを除けば，発生音の音圧レベルに違いはあるが，周波数特性に有意な差は見られなかった。発生音の卓越周波数の測定結果を表-1 に示す。健全な試験体では 1652Hz および 1708Hz 付近の成分が卓越していたが, 亀裂有り試験体では 650Hz 付近や 1216Hz 付近, 1446Hz 付近の成分が卓越しており，卓越周波数に違いが見られた。これは，リブの間隔や模擬亀裂の長さから数値計算で求めた固有振動数に概ね一致していた。

ジョイント試験体を用いた実験においてハンマ加振したときの発生音は，5000～5500Hz の高音域に卓越した周波数成分が見られたが，このときの試験体は疲労などによってできた亀裂であり，場所によって微細な幅であると考えられ，フェイスプレート上からの加振によって亀裂の上下が当たって発音いた可能性がある。今回の実験では高音域の卓越した周波数成分は亀裂部を 2.5lb のハンマで加振した時に見られたが，他の卓越周波数と比べると相対的に音圧レベルが小さく, 0.5lb のハンマ加振時では確認できなかった。実験対象の模擬亀裂の幅は 5mm 以上あって十分開いている状態のため，亀裂の上下が加振によって接触することはない状態であった。ハンマ加振時の発生音における音源方向推定結果の例を図-11 に示す。表示のしきい値は 75dB とした。健全な試験体と亀裂有り試験体を比較すると，発生音の卓越周波数に明確な違いが確認できる。

3.3　車両通過による実験

車両が試験体の模擬亀裂上を通過した場合と健全部上を通過した場合について測定を行った。通過時の発生音は路肩から音源探査装置を用いて測定した。対象とした車両は総重量 20t の大型車である。車両速度は 50km/h とし，試験体上を車両が通過する時にクラッチをオフにした。亀裂有り試験体において，ハンマ加振で特徴的な卓越周波数が見られた 650Hz 付近と 1446Hz 付近について検討を行った。模擬亀裂上および健全部上を通過した場合における FFT による周波数特性を図-12 に示

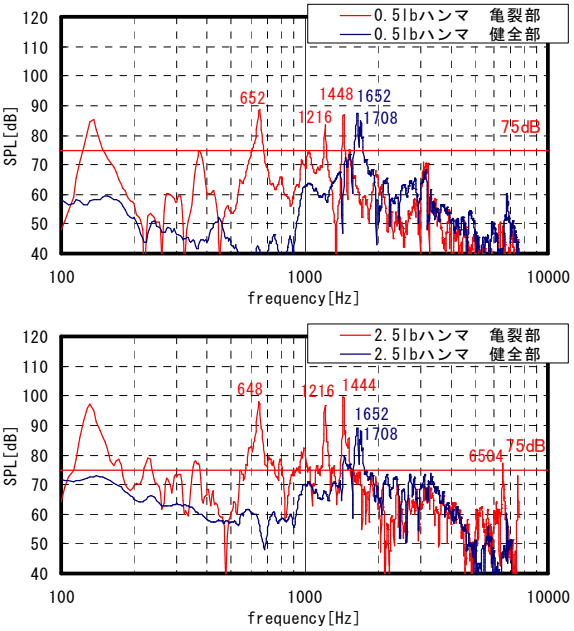


図-10　ハンマ加振時の発生音の周波数特性

表-1　ハンマ加振音の卓越周波数

試験体	主な卓越周波数[Hz]				
健全な試験体				1652	1708
亀裂有り試験体	650	1216	1446		

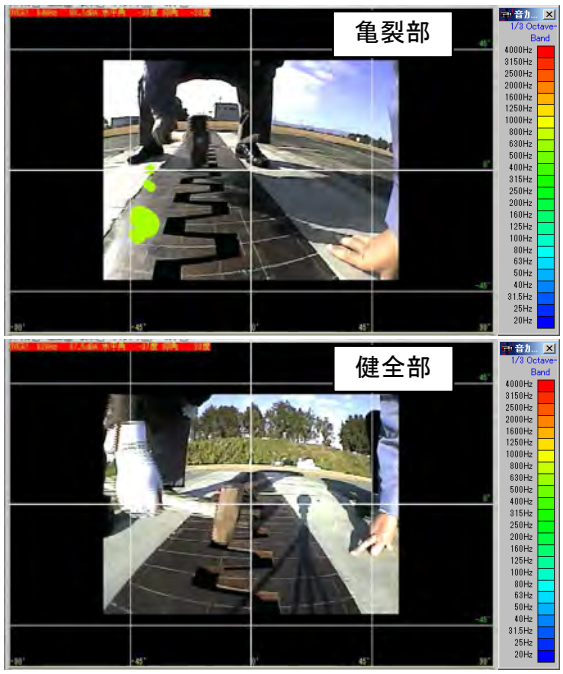


図-11　ハンマ加振時の発生音　650Hz付近

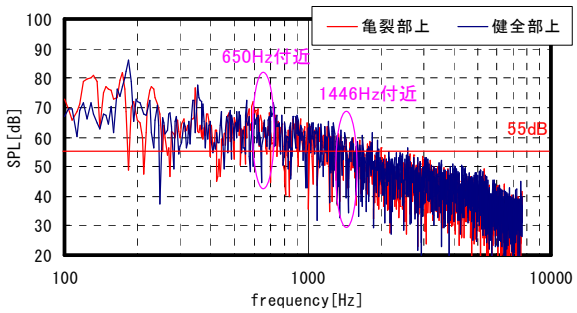


図-12　車両通過時の発生音の周波数特性

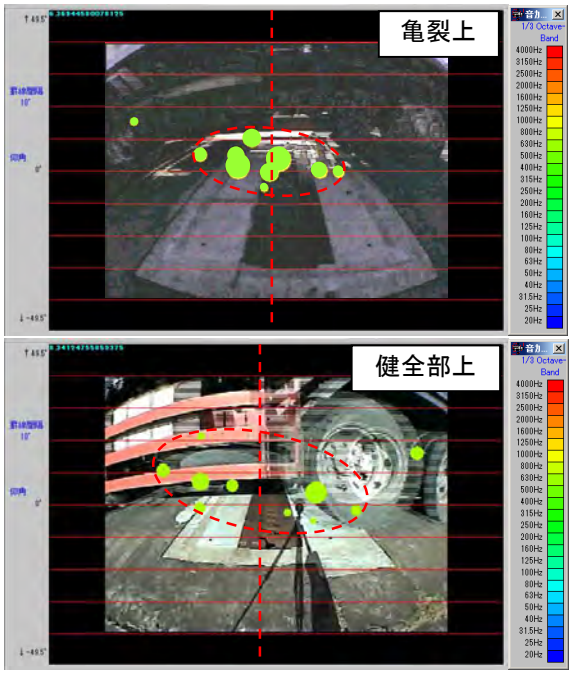


図-13　車両通過時の発生音　650Hz付近

す。周波数特性を比較すると，模擬亀裂上を通過した場合と健全部上を通過した場合では明確な差は確認できない。音源方向の推定結果を図-13，図-14 に示す。表示のしきい値は 55dB とした。模擬亀裂上を通過した場合は音源方向の推定結果が試験体付近に概ね集中しているが，健全部上を通過した場合は音源方向の推定結果が広い範囲にばらつく傾向が見られ，今回の実験では 650Hz 付近のほうが顕著であった。健全部上を走行した場合は試験体から発生する音が相対的に小さく，車両からの発生音などの影響が大きくなったためと考えられる。

4．まとめ

ハンマ加振による発生音によって健全部と亀裂部分の差を確認できた。ジョイント試験体を用いた実験とテストコースに設置したジョイントの実験では劣化部分（亀裂部分）における卓越周波数に違いが見られた。車両通過時の発生音については，通過車両が大型車で，通過時にクラッチをオフにした場合では健全部上を通過した場合と亀

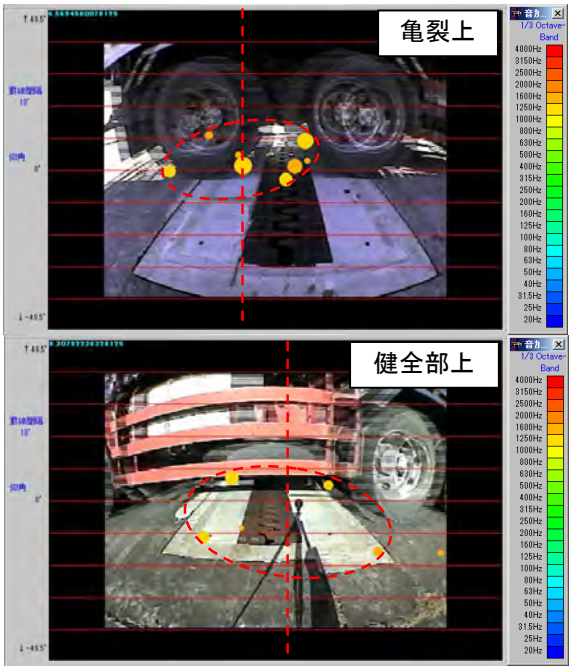


図-14　車両通過時の発生音　1446Hz付近

裂上を通過した場合で音源方向の推定結果に差が見られた。テストコースにおけるフィンガージョイント試験体は亀裂部分の幅が十分に開いていた状態であり，破損が相当進んだ状況を模擬したものであった。鋼製フィンガージョイントの破損が徐々に進んでいるような状態では発生する音が異なる可能性がある。今後は，道路点検車両によるデータ収集などを行い，フィンガージョイントの劣化度と発生音の関係などについてさらに精度よく判断するための手法を検討していく予定である。

謝辞

本研究は中日本高速道路（株）と（株）熊谷組の共同研究によるものです。関係諸氏に深謝します。

参考文献

1)　西浩嗣，荒本貴司，酒井修平，小野秀一：鋼製フィンガージョイントの疲労試験，土木学会第 63 回年次学術講演会，pp.145-146，2008.9
2)　S. Ono, S. Sasaki, T. Imamura：Fatigue evaluation of steel finger type expansion joints for highway bridges, Bridge Maintenance, Safety and Management - IABMAS'10, p661, 2010.7
3)　大脇雅直，築山有二，川井田実：音源探査装置（音カメラ）によるフィンガージョイントの劣化診断に関する研究その１，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012.9
4)　大脇雅直：音カメラの開発と適用事例，騒音制御 Vol.35，No.5，pp.421-426，2011.12
5)　川井田実，築山有二，大脇雅直，財満健史：橋梁伸縮装置の劣化診断に関する実大実験―音源探査装置による劣化度の可視化に関する基礎的検討―，日本音響学会講演論文集　1-3-8，2013.9

ネットワーク型河川 GIS モデルを用いたシミュレーションによる土木機械設備の社会的影響度評価手法の検討

独立行政法人土木研究所　藤野　健一
(現)国土交通省関東地方整備局　竹田　英之
独立行政法人土木研究所　○ 山尾　昭

１．はじめに

土木施設には各種の機械設備が多数導入されている。これらの機械設備について限られた予算内で適切な管理を行っていくためには、個々の施設の評価だけではなく、関連する複数の施設についても社会的な影響度と設備のコンディションを総合評価し、効果的に更新や整備を行っていくことが必要である。

本報告は、河川系土木機械設備を対象とした関連する複数施設の社会的影響度の評価手法について、モデル施設群を用いた検討を行ったので、その概要を報告するものである。

２．目的

国土交通省では、平成 20 年 3 月に「河川用ゲート設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」(以下「河 G 検討マニュアル」という)、「河川ポンプ設備点検･整備更新検討マニュアル(案)」(以下「河 P 検討マニュアル」という）を、また、平成 23 年 4 月には「ダム用ゲート設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」(以下「ダム G 検討マニュアル」という）をそれぞれ策定し運用を開始した。

これらのマニュアルに基づき維持管理を進める場合には、各施設の構成機器・部品毎に健全度(物理的耐用限界)を評価するとともに、施設毎に設備区分の評価（機能を喪失した場合の社会への影響度）を行い、それらの各要素を総合評価して対処の優先順位を決定していくことになる。

しかしながら今後、維持管理予算の増加が見込めない中で老朽化施設が増大していくと、同じ治水機能を有する設備においては、大都市、郊外、農村部といった地域特性や設備の大小という区分だけでは差別化が難しくなることが予想される。本質的には、個別設備の絶対的評価だけでなく、関連する施設群でその重要度を評価することができれば、施設群の中での優先順位付けの根拠が明確になると考えられる。

そこで、関連する施設群として、排水機場を中心とした河川の機械設備を選定し、当該流域内における機械設備の機能が喪失した場合に毀損される便益の算定を行うとともに、各々の機能の補完性を検討することにより、社会への影響度を定量的に評価する手法について検討するものである。

３．社会への影響度を定量的に評価する手法

実際に各施設が稼働したときの便益を計算するために、流域でネットワークを構成している水路に複数の排水機場が設置されているケースを想定し、当該流域における流出解析、水路の水位解析を行う水文・水理解析プログラムを作成した。

当該プログラムの作成にあたっては、過去の出水事例における各施設の稼働状況及び水文データと照合・調整し、解析の精度を高めるとともに、各々の施設が機能を失った場合の内水側湛水状況を予測可能なものとした。

あわせて、河川 GIS に地域の資産情報を重合させて、出水事例毎に施設がカバーした内水側湛水域の資産額を積み上げ可能なものとした。

また、排水機場については、当該プログラムを用いて他の排水機場が機能しない場合の補完機能があるかどうかを模擬的に検証することができるものとし、便益と合わせて補完機能の大小などの評価から、施設群の中における社会的な影響度の評価に資することができるものとした。

４．水門・水理解析プログラムの作成

4.1　モデル流域の選定

機械設備の維持管理情報及び過去の出水事例における各施設の稼働状況及び水文データ等の提供を受ける国土交通省と協議した結果、モデル施設群の条件を満足する現場として、図-1 に示すネットワーク型水路を有する流域を選定した。

4.2　水文・水理プログラムの選定

作成する水文・水理プログラムについては、機械設備を実際に管理している現場事務所等において容易に活用できることを考慮し、当該プログラムが具備する条件について下記のとおり整理した。

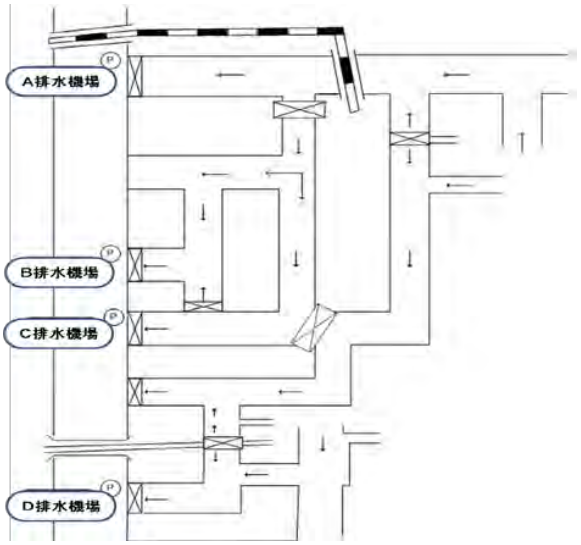


図-1　モデル施設群の排水系統図

表1　各要素モデルの主な機能

要素モデル名	主な機能
1次元不定流	①河道内の水面形（水位・流量）の追跡が可能である。 ②上下流の区別が無く河道内の流向が1方向に限定されない機能。 ③複数河川の分派と合流が可能である。 ④設備要素モデル（水門、排水機場、堰）が接続できる。 ⑤越水・破堤モデルが接続できる。
Nilim氾濫解析	①氾濫原における浸水深の追跡。 ②河道破堤地点と氾濫原の接続関係の指示。 ③氾濫原の接続地点の水位の出力。
越水・破堤	①越水と破堤の選択。 ②横越流時及び正面越流時の越流量の算出。 ③破堤開始と破堤幅。 ④破堤開始水位及び破堤敷高の設定。 ⑤戻り流量の考慮。
排水機場	①一定量の排水の設定。 ②内水位・外水位によって、排水開始と停止を制御する設定。
水門	①水門からの流量を算出（潜り流出、中間流出、自由流出）。 ②上流側水位・下流側水位によって、水門の開閉を制御する設定。 ③水門の河床高の設定。
可動堰	①越流公式による越流量の算出。 ②上流側及び下流側水位によって敷高を制御する設定。

①ソフトウェアの改良を自由にできること。
②デル施設群の解析結果を基に、他の施設群へ応用が可能となること
③将来的な拡張機能の増強が可能であること

これらの条件に対し、最も活用効果が高い解析プログラムを検討した結果、CommonMP を採用することとした。

CommonMP とは、水文・水理などの複合現象を解析するために、異なった機能を有する要素モデルを一体的に協調・稼働させるためのプラットフォームであり、国土交通省・国土技術政策総合研究所・土木学会・建設コンサルタンツ協会等が連携し、技術開発・普及を推進しているものである。

4.3　要素モデルの作成

CommonMP 上で稼働させる要素モデルとして、今回作成する水門・水理プログラムに必要となる機能は表-1 のとおりである。

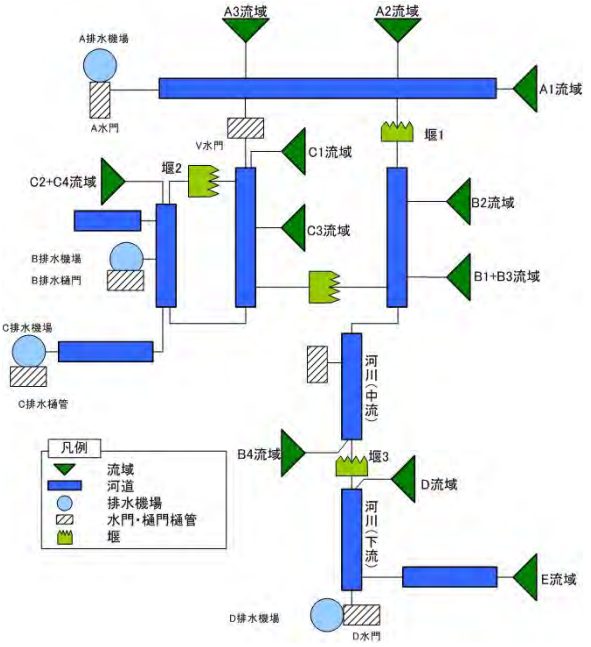


図-2　ネットワーク型河川モデル図

表2　排水機場主要諸元

排水機場名		A		B	C		D	
排水ポンプ号機		1、2	3	1、2	1、2	3	1	2、3
排水ポンプ	吐出量（m3/秒）	25	50	7.5	2.5	10	8.7	8.7
	口径（mm）	3,300	4,600	1,800	1,000	2,000	2,000	2,000
主原動機	出力（PS）	2,700	5,600	720	200	1,250	800	800
	形式	ディーゼル機関					ディーゼル機関＋電動機	ディーゼル機関

4.5　ネットワーク型河川 GIS モデルの作成

図１に示した実際の河川の流域に基づいて、各要素モデルを組み合わせて接続することにより、ネットワーク型河川モデルを作成した（図-２）。

あわせて、河川 GIS に地域の資産情報を重合させ、出水事例毎に施設がカバーした内水側湛水域の資産額を積み上げ可能なものとした。

表-２にモデル施設群に含まれる排水機場の主要諸元を示す。

4.6　はん濫モデルとの接続

各々の施設が機能を失った場合の内水側湛水状況のシミュレーションを行うため、ネットワーク型河川モデルとはん濫モデル(NILIM)を接続した。

５．水文・水理プログラムの精度確認

シミュレーションの精度については、当該流域

表３　検討対象期間

No	年月日
1	平成13年9月10～11日
2	平成16年10月8～11日
3	平成16年10月20～21日

表4　検討ケースにおける排水機場の排水量

検討対象降雨期間	排水機場名	No	検討ケース番号	排水ポンプ号機と稼動・機能喪失			排水機場の排水量(m3)				合計排水量(m3)	
				1	2	3	A	B	C	D	A～D	
平成13年9月10～11日	A	1	H13-1-0	○	○	○	1,894.5	376.2	390.6	242.5	2,903.8	
		2	H13-1-1	×	○	○	1,894.5	376.2	390.6	242.5	2,903.8	
		3	H13-1-2	×	×	○	2,037.0	369.5	406.8	234.8	3,048.1	
		4	H13-1-3	×	○	×	1,894.5	376.2	390.6	242.5	2,903.8	
		5	H13-1-4	×	×	×	0.0	377.6	727.8	494.3	1,599.7	←越水発生
	B	6	H13-2-1	×	○		1,894.5	376.2	390.6	242.5	2,903.8	
		7	H13-2-2	×	×		1,891.5	0.0	705.0	243.0	2,839.5	
	C	8	H13-3-1	×	×	○	1,894.5	376.2	390.6	242.5	2,903.8	
		9	H13-3-2	×	×	×	1,894.5	594.5	0.0	266.5	2,755.5	
	D	10	H13-4-1	×	○	○	1,894.5	376.2	390.6	243.6	2,904.9	
		11	H13-4-2	×	×	○	1,893.0	376.2	390.6	243.6	2,903.4	
		12	H13-4-3	×	×	×	2,022.0	413.6	405.0	0.0	2,840.6	
平成16年10月8～11日	A	13	H16①-1-0	○	○	○	4,725.0	814.5	486.0	160.0	6,185.5	
		14	H16①-1-1	×	○	○	4,800.0	823.5	459.6	162.0	6,245.1	
		15	H16①-1-2	×	×	○	4,758.0	852.8	445.2	156.9	6,212.9	
		16	H16①-1-3	×	○	×	4,335.0	999.0	393.6	165.6	5,893.2	←越水発生
		17	H16①-1-4	×	×	×	0.0	1,645.7	618.6	219.8	2,484.1	←越水発生
	B	18	H16①-2-1	×	○		4,725.0	814.5	486.0	160.0	6,185.5	
		19	H16①-2-2	×	×		4,647.0	0.0	702.3	153.8	5,503.1	←越水発生
	C	20	H16①-3-1	×	×	○	4,725.0	814.5	486.0	160.0	6,185.5	
		21	H16①-3-2	×	×	×	4,663.5	1,284.8	0.0	160.0	6,108.3	
	D	22	H16①-4-1	×	○	○	4,725.0	815.0	487.8	158.4	6,186.2	
		23	H16①-4-2	×	×	○	4,726.5	813.6	523.8	155.8	6,219.7	
		24	H16①-4-3	×	×	×	4,762.5	775.4	0.0	0.0	5,537.9	
平成16年10月20～21日	A	25	H16②-1-0	○	○	○	1,935.0	424.4	0.0	165.1	2,524.5	
		26	H16②-1-1	×	○	○	1,885.5	425.7	0.0	166.7	2,477.9	
		27	H16②-1-2	×	×	○	1,872.0	423.0	0.0	168.7	2,463.7	
		28	H16②-1-3	×	○	×	1,882.5	442.4	0.0	170.3	2,495.2	
		29	H16②-1-4	×	×	×	0.0	701.1	0.0	210.5	911.6	←越水発生
	B	30	H16②-2-1	×	○		1,935.0	424.4	406.8	165.1	2,931.3	
		31	H16②-2-2	×	×		1,933.5	0.0	0.0	168.7	2,102.2	
	C	32	H16②-3-1	×	×	○	1,935.0	424.4	0.0	165.1	2,524.5	
		33	H16②-3-2	×	×	×	1,935.0	424.4	0.0	165.1	2,524.5	
	D	34	H16②-4-1	×	○	○	1,935.0	424.4	0.0	165.1	2,524.5	
		35	H16②-4-2	×	×	○	1,935.0	424.4	0.0	163.1	2,522.5	
		36	H16②-4-3	×	×	×	1,960.5	450.0	0.0	0.0	2,410.5	

凡例　○：操作規則通り稼動、×：排水ポンプ機能喪失状態

表5　各排水機場の稼動時間の差

検討対象降雨期間	排水機場名	No	検討ケース番号	排水ポンプ号機と稼動・機能喪失			各排水機場の排水ポンプの排水時間(分)									
							A			B		C			D	
				1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	3
平成13年9月10～11日	A	1	H13-1-0	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	H13-1-1	×	○	○	-1,263	1,263	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3	H13-1-2	×	×	○	-1,263	0	679	-15	0	0	0	27	-5	-5	-5
		4	H13-1-3	×	○	×	-1,263	1,263	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		5	H13-1-4	×	×	×	-1,263	0	0	3	0	0	226	562	162	163	163
	B	6	H13-2-1	×	○		0	0	0	-836	836	0	0	0	0	0	0
		7	H13-2-2	×	×		-2	0	0	-836	0	0	0	524	1	0	0
	C	8	H13-3-1	×	×	○	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		9	H13-3-2	×	×	×	0	0	0	485	0	0	0	-651	13	21	12
	D	10	H13-4-1	×	○	○	0	0	0	0	0	0	0	0	-181	91	92
		11	H13-4-2	×	×	○	-1	0	0	0	0	0	0	0	-181	-157	340
		12	H13-4-3	×	×	×	85	0	0	83	0	0	0	24	-181	-157	-132
平成16年10月8～11日	A	13	H16①-1-0	○	○	○	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
		14	H16①-1-1	×	○	○	-2,445	1,639	428	20	0	0	0	-44	3	0	1
		15	H16①-1-2	×	×	○	-2,445	-587	1,527	85	0	0	0	-68	-2	-2	-2
		16	H16①-1-3	×	○	×	-2,445	2,303	-59	410	0	0	308	-154	7	4	0
		17	H16①-1-4	×	×	×	-2,445	-587	-59	1,797	50	0	350	221	95	16	5
	B	18	H16①-2-1	×	○		0	0	0	-1,810	1,810	0	0	0	0	0	0
		19	H16①-2-2	×	×		94	-28	-59	-1,810	0	205	205	258	-11	0	-1
	C	20	H16①-3-1	×	×	○	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		21	H16①-3-2	×	×	×	96	-19	-59	638	407	0	0	-810	1	0	-1
	D	22	H16①-4-1	×	○	○	0	0	0	1	0	0	0	0	-243	187	53
		23	H16①-4-2	×	×	○	1	0	0	-2	0	0	0	3	-243	-59	294
		24	H16①-4-3	×	×	×	19	8	0	-87	0	0	0	83	-243	-59	-6
平成16年10月20～21日	A	25	H16②-1-0	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		26	H16②-1-1	×	○	○	-1,036	751	126	3	0	0	0	0	4	-1	0
		27	H16②-1-2	×	×	○	-1,036	-254	624	-3	0	0	0	0	7	0	0
		28	H16②-1-3	×	○	×	-1,036	1,001	0	40	0	0	0	0	9	1	0
		29	H16②-1-4	×	×	×	-1,036	-254	0	615	0	0	0	0	65	23	0
	B	30	H16②-2-1	×	○		0	0	0	-943	943	0	0	0	0	0	0
		31	H16②-2-2	×	×		-2	1	0	-943	0	0	0	678	6	1	0
	C	32	H16②-3-1	×	×	○	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		33	H16②-3-2	×	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	D	34	H16②-4-1	×	○	○	0	0	0	0	0	0	0	0	-288	256	32
		35	H16②-4-2	×	×	○	0	0	0	0	0	0	0	0	-288	-32	316
		36	H16②-4-3	×	×	×	13	4	0	57	0	0	0	0	-288	-32	0

（備考）　：ポンプ機能喪失（稼動無し）

内の流量、水位、流向の各データが揃っている箇所でそれぞれ確認した。

流量については、計算結果が大きく振動する傾向が見られたが、位相は概ね揃っており、概して降雨に対する流出傾向は再現出来ているものとなった。

水位については、実績水位に対して計算結果が過大となる傾向があった。特に排水ポンプの排水後に水位が大きく上昇する傾向が見られた。

水位の時間変化については、概ね同調し整合していた。

流向については、流量のピーク時付近において、流向は実績と計算結果でほぼ整合していた。

６．シミュレーション結果

6.1　排水機能喪失時の代替性

作成したモデルについて、表-３に示した３ケースの実際の出水時のデータを用いて、モデル施設群に含まれるＡ～Ｄの４つの排水機場の排水機能が喪失した場合のシミュレーションを行った。

表-４に実施したシミュレーションの各ケースにおける排水機場の算出排水量を、表-５に各ケースにおける各排水機場の稼動時間の差を示した。

シミュレーションを実施した結果、次の様なことがわかった。

(1) はん濫の可能性

Ａ排水機場の全てのポンプの排水機能が喪失した場合、流域全体の水位が上昇した。また、検討で使用した表-３の３つの出水期間の全てにおいて越水が生じる結果となった。

これはＡ排水機場の排水能力が他の排水機場と比較して非常に大きいため、Ａ排水機場が喪失した排水量を他の排水機場が補完することが困難であったためと考えられる。

(2) 排水機場の代替性

Ｂ排水機場の全てのポンプの排水機能が喪失した場合、Ｃ排水機場のポンプの稼動時間が増加した。逆にＣ排水機場の全てのポンプの排水機能が喪失した場合、Ｂ排水機場のポンプの稼動時間が増加した。

このことからＣ排水機場がＢ排水機場の排水を補完しているだろうことが想定できる結果となった。

また、Ｄ排水機場の全てのポンプの排水機能が喪失した場合、Ａ～Ｃ排水機場の稼動時間及び排水量に増加が見られた。しかし、Ｄ排水機場は排水能力が他の排水機場と比べて小さいことから、Ｄ排水機場が流域全体に与える影響は他の機場と比べて小さいことが分かった。

6.2　被害総定額の算定

はん濫計算を行った検討ケースについて、浸水はん濫計算を行った検討ケースについて、浸水深及び浸水範囲を算定した。浸水範囲は 50ｍメッシュ形式で整理した。

その結果、シミュレーション対象出水№１において、Ａ排水機場の３台全ての排水ポンプの排水機能が喪失した場合（検討ケース H16①-1-4：図-

表6　はん濫による浸水メッシュ数の比較

検討ケース番号	メッシュ数					
	はん濫無し	床下浸水	床上			
			50cm以下	50-100cm	100-150cm	150cm以上
H13-1-4	39,635	319	46	0	0	0
H16①-1-3	39,983	17	0	0	0	0
H16①-1-4	39,187	648	165	0	0	0
H16①-1-4（V水門開）	39,938	49	13	0	0	0

表7　被害算定結果（参考）

		H16①-1-3	H16①-1-4	H16①-1-4（V水門開時）
直接被害	一般被害計	69.6	14,239.5	19.4
	農作物被害（水稲）	0.0	0.2	2.5
	農作物被害（畑作）	0.0	2.7	0.0
	公共土木被害	117.8	24,121.7	32.8
間接被害	営業停止損失	15.0	824.3	3.8
	清掃労働対価	15.3	683.1	0.5
	代替活動等の出費	29.4	1,291.4	1.0
	事務所代替活動	8.0	411.8	2.3
合　計		255.1	41,574.7	62.3



図-3　はん濫計算結果（検討ｹｰｽ H16①-1-3）

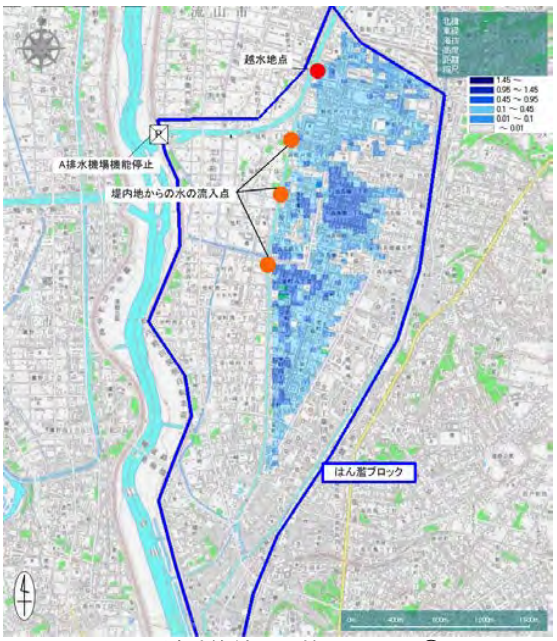


図-4　はん濫計算結果（検討ｹｰｽ H16①-1-4）

６）と２号ポンプ（25m3/s）１台のみ稼動していた場合（検討ケース H16①-1-3：図-５）のシミュレーション結果を比較すると、表-６より床下及び床上を合せた浸水面積比で約 48 倍、面積で約 199 万m2 程度、表７より浸水による被害では約 160 倍程度の差が生じる結果となった。

この結果から、当該流域におけるＡ排水機場の防災効果が特に大きいことが裏付けられた。

７．まとめ

7-1　ネットワーク型河川 GIS モデルを用いたシミュレーション

CommonMP を用いてネットワーク型河川をモデル化し、実際の出水期間のデータを用いて、土木機械設備のうち、排水機場の排水機能喪失時のシミュレーションを行い、その結果に基づき被害想定額の算出を行った結果、実際の出水現象に近い水位･流量をシミュレーションすることができた。また、ネットワーク内の各排水機場の相互補完機能の確認や社会的に与える被害の算定を行うことができた。

この手法に基づく社会的影響度の評価にある程度の目処がつけば、いろいろな条件の降雨による社会的影響度について、その有無や大小を把握することも可能であると思われる。

7-2　今後の課題

今回構築したネットワーク型河川モデル及び水文・水理ソフトウエアを現場で活用しやすいものにするためには、ソフトウエアの簡便化、要素モデルの改良及び実施手順のマニュアル化などが必要である。

また、ネットワーク型河川モデルには水門や堰も存在しており、これらの土木機械設備が停止することによってもはん濫被害の有無または拡大が想定されることから、水門や堰の機能が停止した場合のシミュレーションも必要である。

今後、構築したネットワーク型河川モデル及び水文・水理ソフトウエアを用いて土木機械設備の便益算定手法の確立を図るとともに、各土木機械設備の健全度を評価する手法を併用することにより、複数施設を考慮した維持管理計画の立案手法についても検討を進めたい。

Ⅱ　梗概集

複雑作業への適応を目的とした無人化施工における車載・環境カメラの可動性効果の検証とその半自動コントロール手法に関する基礎的研究

亀﨑 允啓

早稲田大学 理工学術院総合研究所
（早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科）

研究背景

- **無人化施工**は，斜面での土木工事や水中での河底整備作業，１人のオペレータによる複数重機の操縦など，平時における通常利用を中心に応用展開されていた.

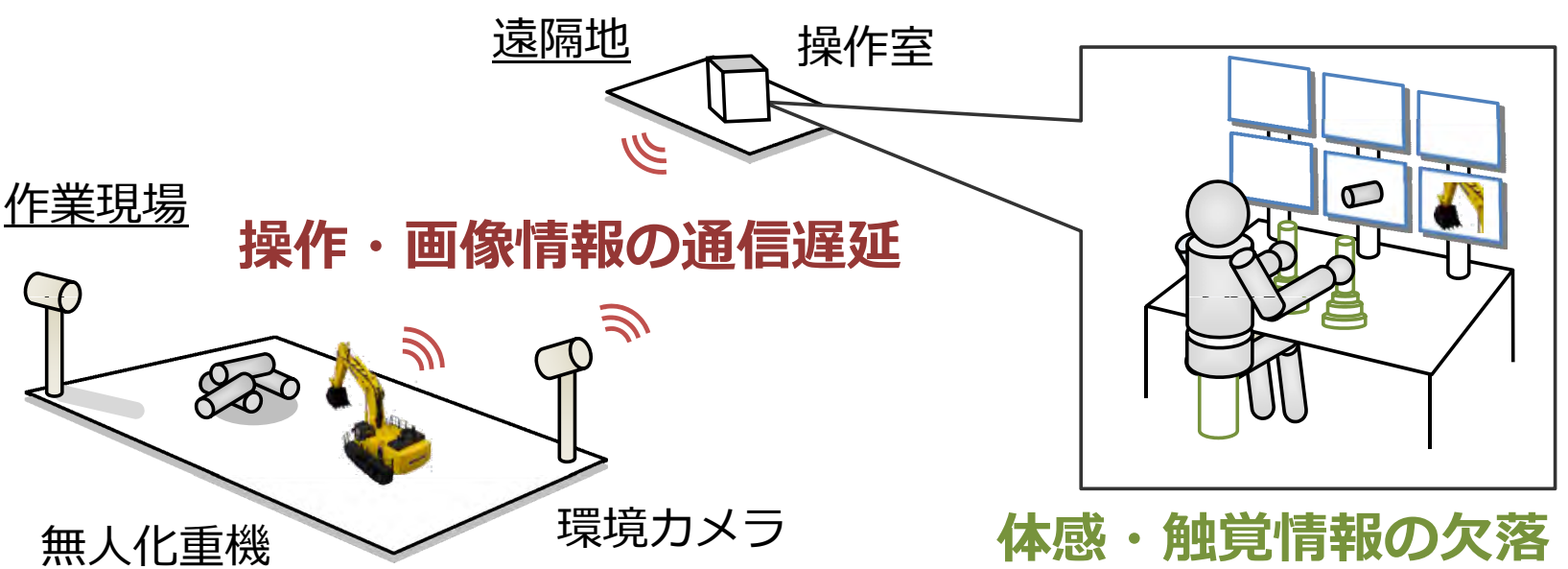
- 雲仙普賢岳への適用事例以降，**災害対応などの有事への適応が強く求められる**ようになっている.

- この度の大震災・大津波被害からの復旧工事や，原子力発電所事故に伴う放射線環境下での解体作業などへの適応を踏まえ，この傾向は近年さらに強くなっている.

無人化施工の主な課題

■ 操縦条件や操縦環境は，根本的に搭乗時のものと異なる
→違和感や不慣れさによって必然的に**作業効率が低下**
→掘削作業における作業効率は，有人時の6割程度

[施工効率を低下させる主な要因]



視覚提示内容の改善

■ 無人化施工の高度化には，遠隔操縦の計画や判断の基本となる**映像情報そのものへの要求が厳しくなる**と予想される

[映像システムに関する従来研究]

– 視点・視野角の適正化：視点解析により車載カメラの適切な視野角を導出

– 可動化：１台の環境カメラで旋回時の安全確保のための方向制御

[提案するシステム]

– **環境カメラの半自動制御システム**

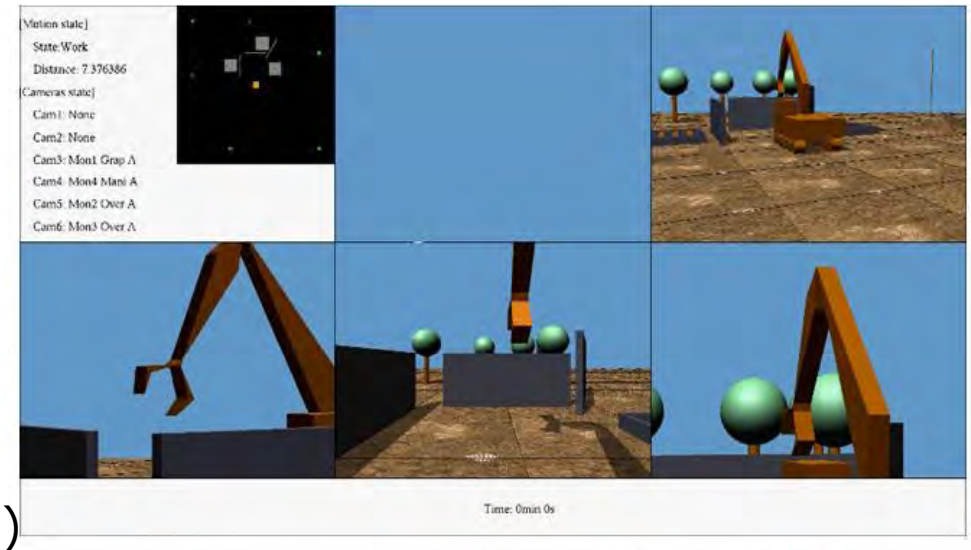
・複数の環境カメラを**作業状況に応じて**カメラの**方向・画角を自動制御**

・**状況に適したカメラを選択**して**適切な制御モード**を割り当て

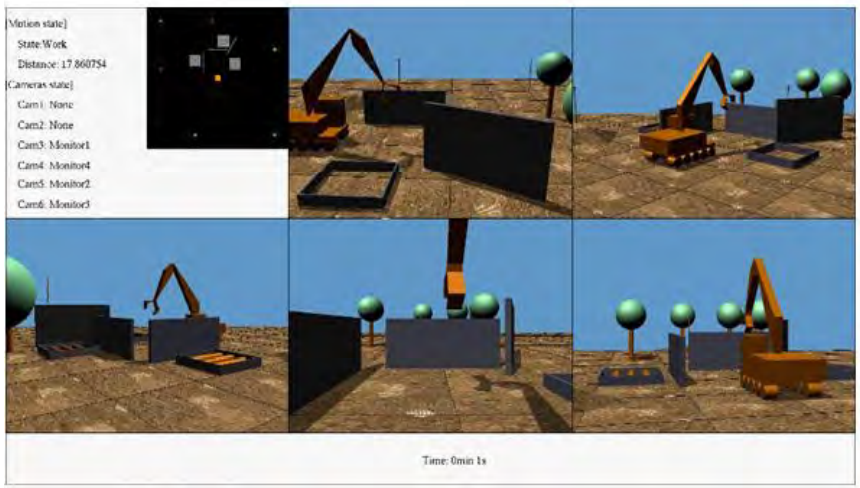
作業状況に応じて半自動的にカメラを制御することで，オペレータの主体性を保ちつつカメラ操作の負担を軽減→見えないがゆえの無駄な動き直しや過度に慎重な動き，疲労などの低減に寄与し，無人化施工の高度化を担う有力なツールになると考えられる

開発した半自動制御システム

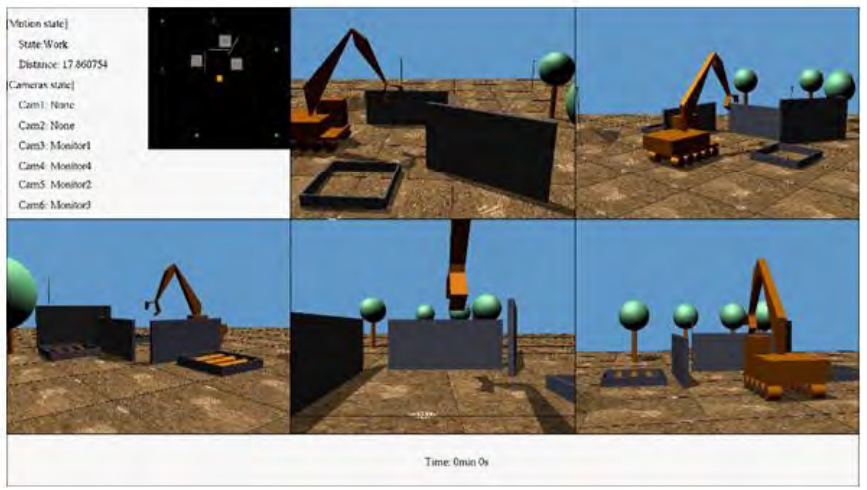
半自動制御



固定カメラ(従来)



手動制御



研究手順

1. バーチャルリアリティ(VR)シミュレータの開発

- 基礎検討に適したVRシミュレータを評価ツールとして用いる
- 任意の位置に複数個のカメラを配置でき，物体把持や接触を再現，位置や接触力などデータ計測を行う

2. 半自動化制御手法の開発

- カメラパラメータ(ピッチ，ヨー，ズーム)の制御方法の開発を行う
- 有限個の制御モードを定義し，モニタに表示するカメラの選択と制御モードの割り当てを行う

3. 実証実験

- 解体機を利用した瓦礫撤去作業をメインタスクとする
- (A)固定(従来手法)，(B)手動制御，(C)半自動制御の3つの操縦システムにおける作業パフォーマンスを評価し，その違いを考察する

1. VRシミュレータの開発

■ 任意の位置に障害物やカメラを配置できる．物体把持や接触が再現されており，接触力なども計測可能である．

[**モジュール**]
A. 操作インタフェース
B. モニタへの出力映像

操縦イメージ
x2

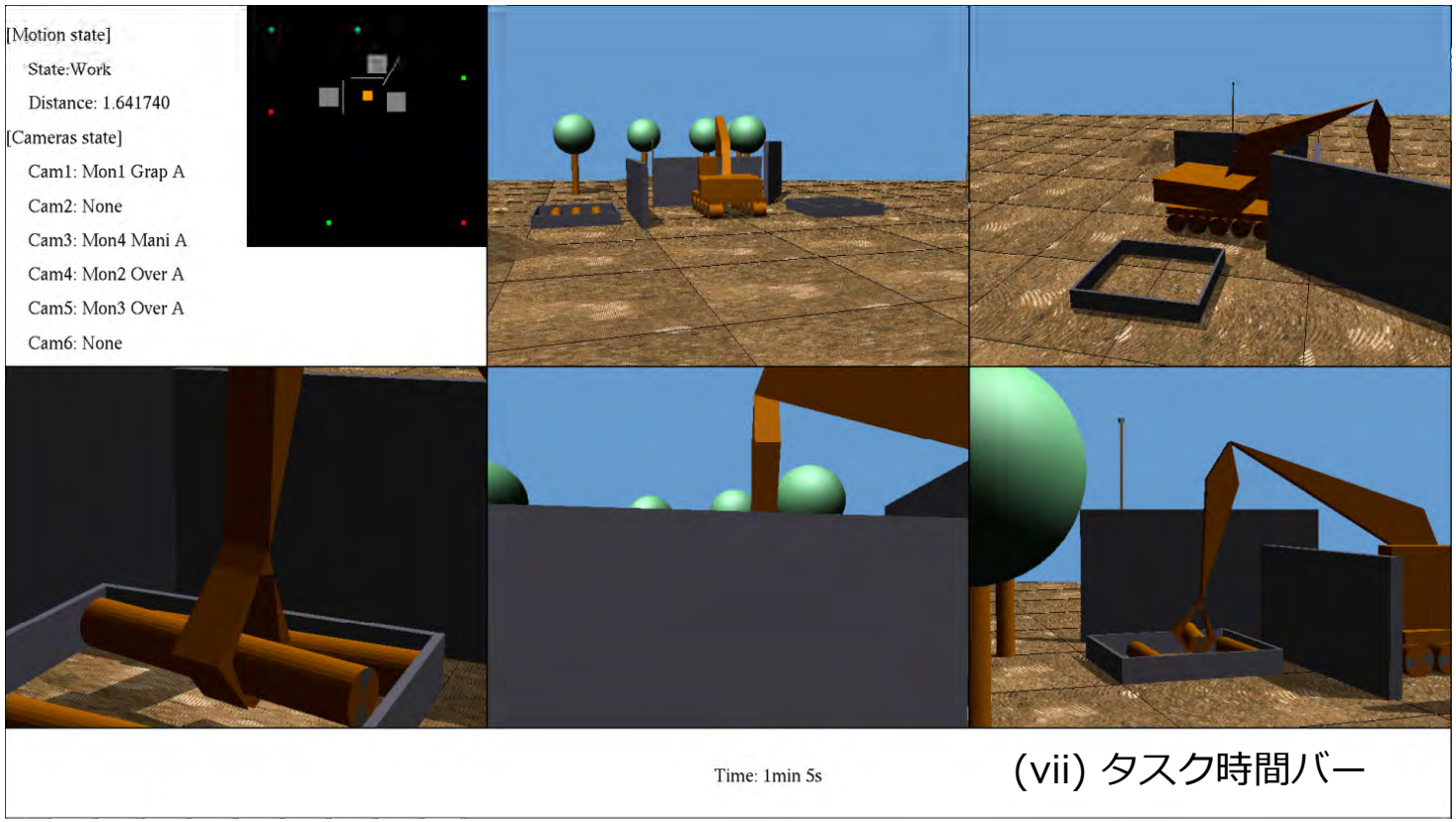


1-A. 操作インタフェース



1-B. モニタへの出力映像

(i) 状態& 2D俯瞰モニタ　(ii)環境カメラ映像　(iii)環境カメラ映像



(vii) タスク時間バー

(iv) 環境カメラ映像　(v) 車載カメラ映像　(vi) 環境カメラ映像

2. 半自動制御手法の開発

■ 有限個の制御モードを定義し，モニタに表示するカメラの選択と制御モードの割り当てを行うシステムを開発した

[**機能モジュール**]
A. カメラロールの定義
B. ロールアサインメントシステムの開発

カメラ操作をすべき状況分析

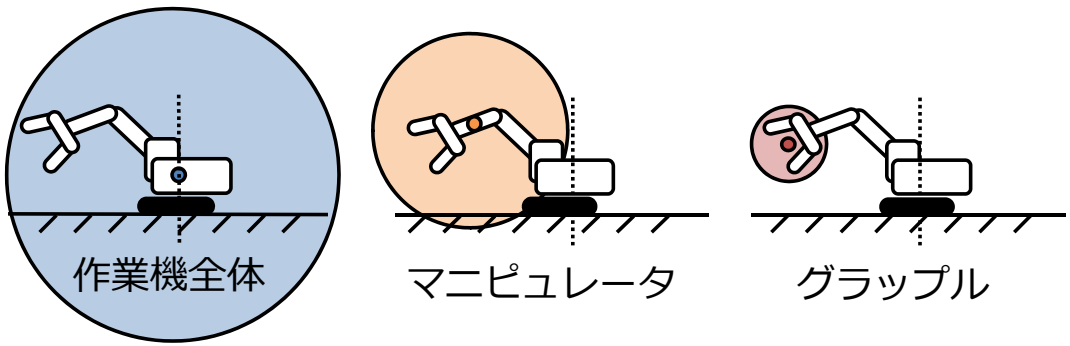
大分類	小分類	必要なデータ
移動	前進 後退 旋回	路面状況
		現場における自己位置
		周辺の障害物状況
		対象物と機体の相対距離情報
マニピュレーション	リーチング 把持 運搬 リリース	周辺の障害物状況
		対象物とグラップルとの相対距離情報
		グラップルの状態
		接触した物体との位置関係

2-A. 撮像対象と撮像モード

■ カメラの向きと画角が調整されるべき状況の分析から，撮像対象と撮像モードを定義した

[**撮像対象**]：カメラの画角中心に捉える対象

– 作業機全体
– マニピュレータ
– グラップル



[**撮像モード**]：撮像対象に対する映像コントロールの方法

– ズーム制御　：状況に応じて画角を調整
– 位置制御　：撮像対象を追従
– 姿勢制御　：カメラの向きと撮像対象の長手方向が直角になるように制御
– 軌道制御　：撮像対象の移動方向に画角中心をオフセット

2-A. カメラロールの定義

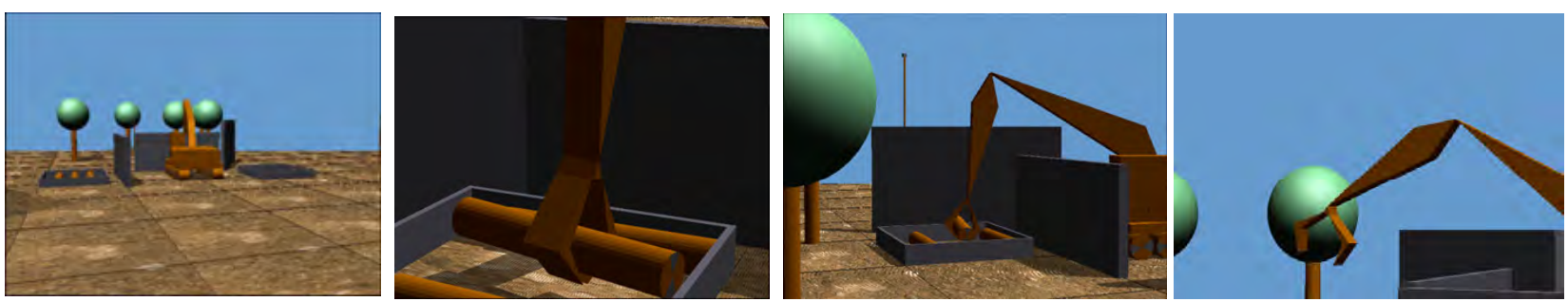
■ 撮像対象と撮像モードを組み合わせて，有用性の観点から，基本的な4つのカメラロールを定義した

[**カメラロール**]：カメラに割り当てる制御方法

(a)車体俯瞰位置制御	：作業機	× 位置制御
(b)手先拡大位置制御	：グラップル	× 位置・拡大制御
(c)マニピュレータ姿勢制御	：マニピュレータ	× 位置・姿勢制御
(d)手先軌道制御	：マニピュレータ	× 位置・姿勢・軌道制御

[**各ロールの映像例**]

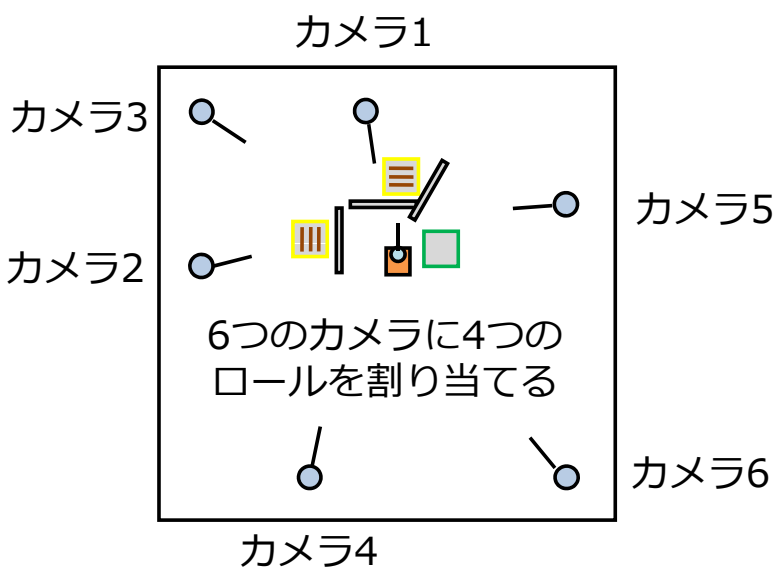
(a) (b) (c) (d)



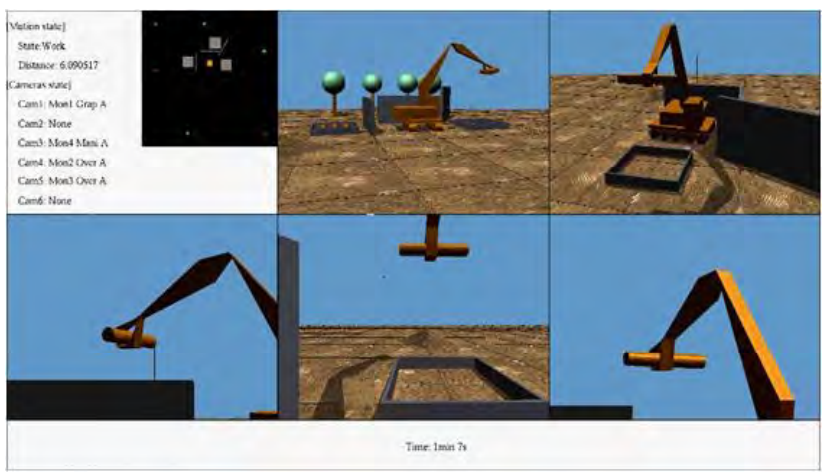
2-B. カメラロールの割り当て

■ 状況に応じて，適切なカメラに適切なカメラロールを割り当てるロールアサインメントシステムを開発した

[**ロールアサインメントシステム**]
(a)ロールの担当可能性チェック
(b)カメラへのロール割り当て/切り替え



2つのカメラでの切替

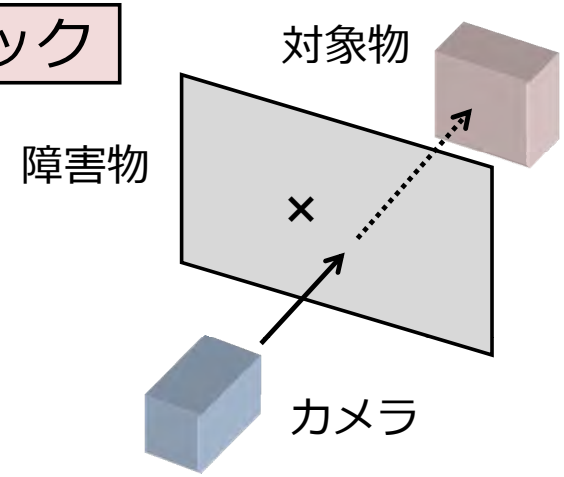


(a) 担当可能性のチェック

A：カメラロールの担当可能性チェック

A-1：対象物が可視状態であること

A-2：カメラが制御範囲内であること
－ピッチ角度・画角



成立する場合

B：カメラロールの変更および交換

B：カメラロールにおける各種条件を満たしていること

成立する場合

成立しない場合

担当可能性あり

担当可能性なし

(b) ロールの割り当て/切り替え

A：当該時刻におけるカメラロールアサイン

A-1：各ロールにつき1つのカメラを割り当てる

A-2：各カメラにつき1つのロールを割り当てる

－手先・作業腕および小さいカメラ番号を優先

ロールを担当できない
カメラが出現した場合

担当できる場合

B：カメラロールのリアサイン

B-1：Non-active cameraへのロール移動を模索する

担当できない場合

担当できる場合

B-2：カメラ全体でのロール交換を行う

担当できない場合

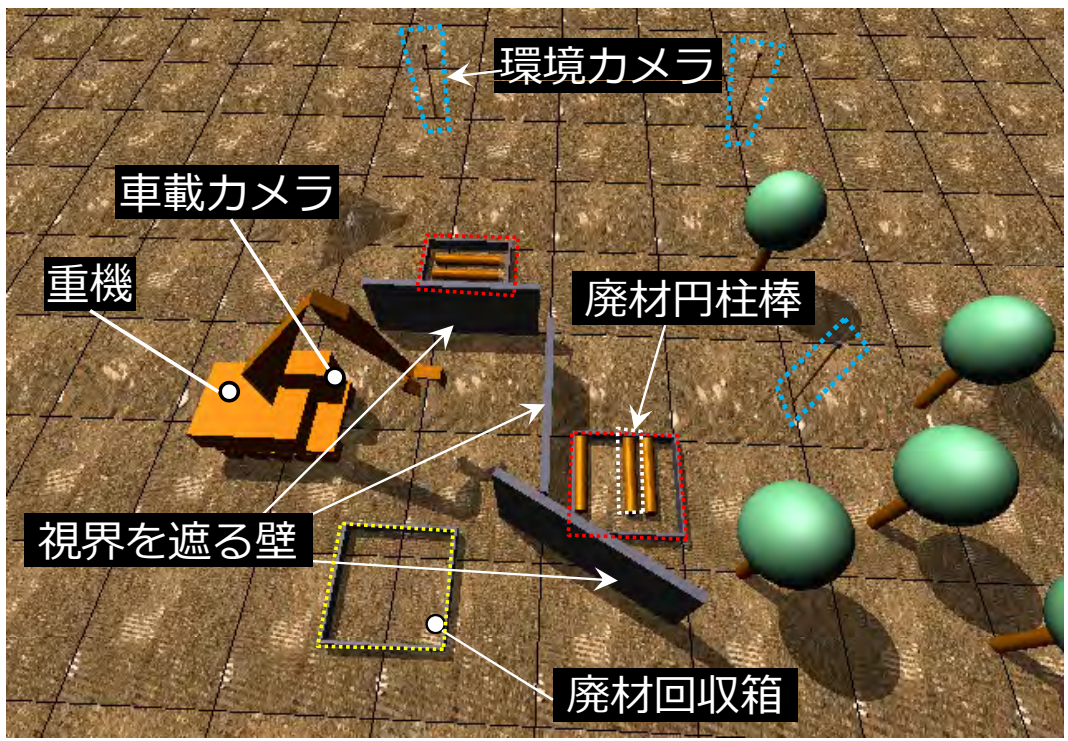
担当できる場合

（最も近い映像を出力できるカメラにアサイン）

3. 比較評価実験

■ 固定・手動・半自動の3システムで，時間効率，安全性，作業品質，主観的な使いやすさを評価した

実験環境



実験内容

6つの物体を素早く，物体の中心を掴んで誤接触なく回収箱まで運搬する．被験者は4人の初心者(4セット)

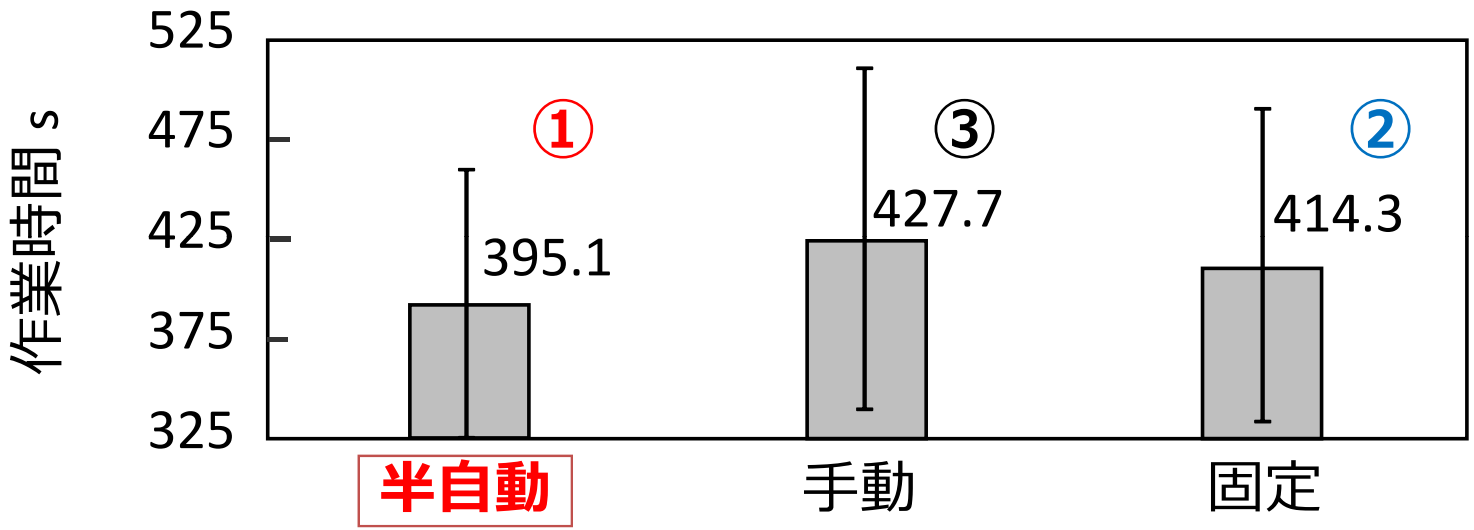
比較実験

固定，手動，半自動

評価指標

A. 時間効率：タスク時間
B. 安全性　：把持ミス，誤接触，過負荷
C. 作業品質：把持位置
D. 主観評価：アンケート

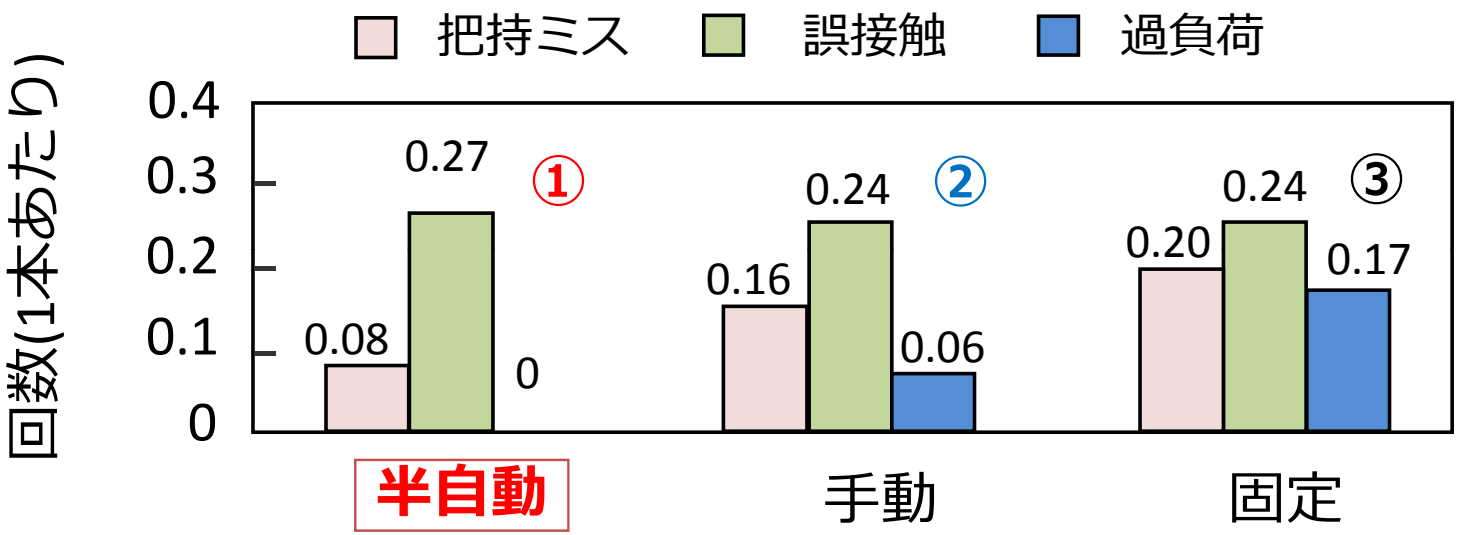
3-A. 作業効率



【半自動制御】作業時間が減少　⇔　【手動制御】固定と比べて作業時間が増加

手動によるカメラ制御では，カメラを操縦する時間が不可避となるため，作業時間が延びてしまった．半自動制御では，カメラ制御を自動で行うためカメラ操縦に費やす時間を削減できた

3-B. 安全性

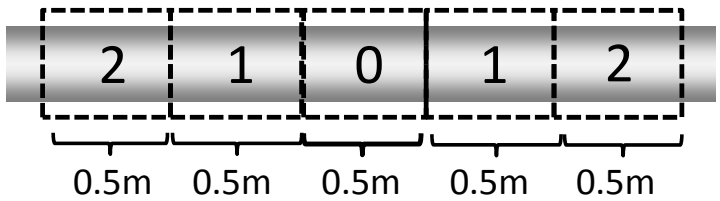


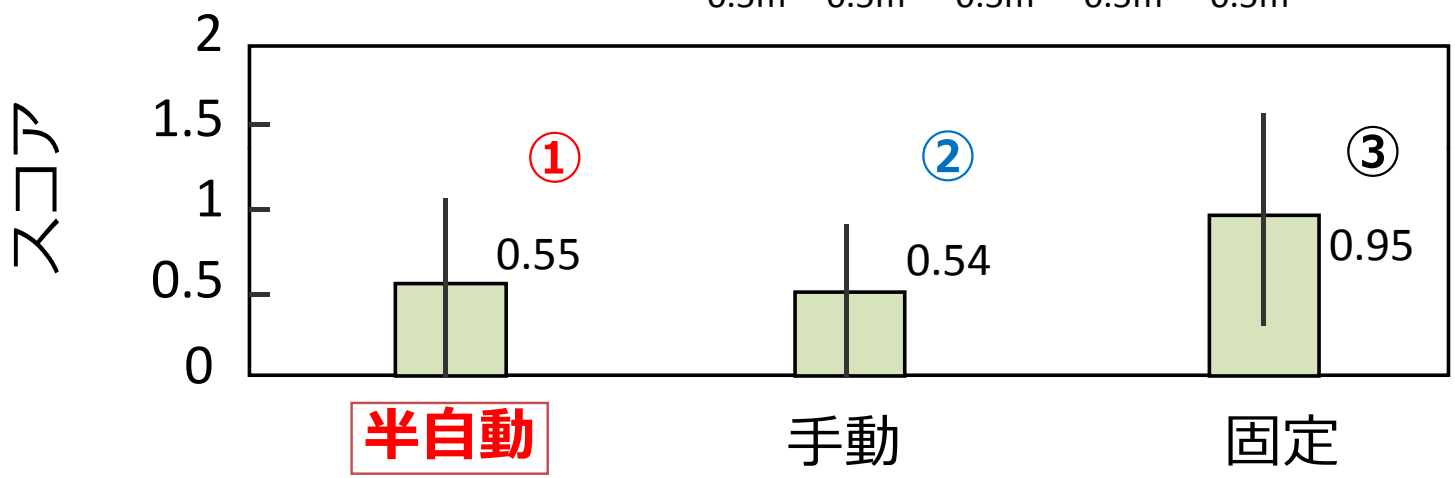
【半自動制御】誤接触回数：他のシステムとほぼ同じ，把持失敗・過負荷回数：減少

固定における物体落下は，物体の端の把持，手動では，物体の安定性を十分に確認できなかったことに起因する．半自動制御での視点は，機体の移動に伴い自動的に追従するため，誤操作を大幅に低下させられた

3-C. 作業品質

物体の把持位置とスコアの関係

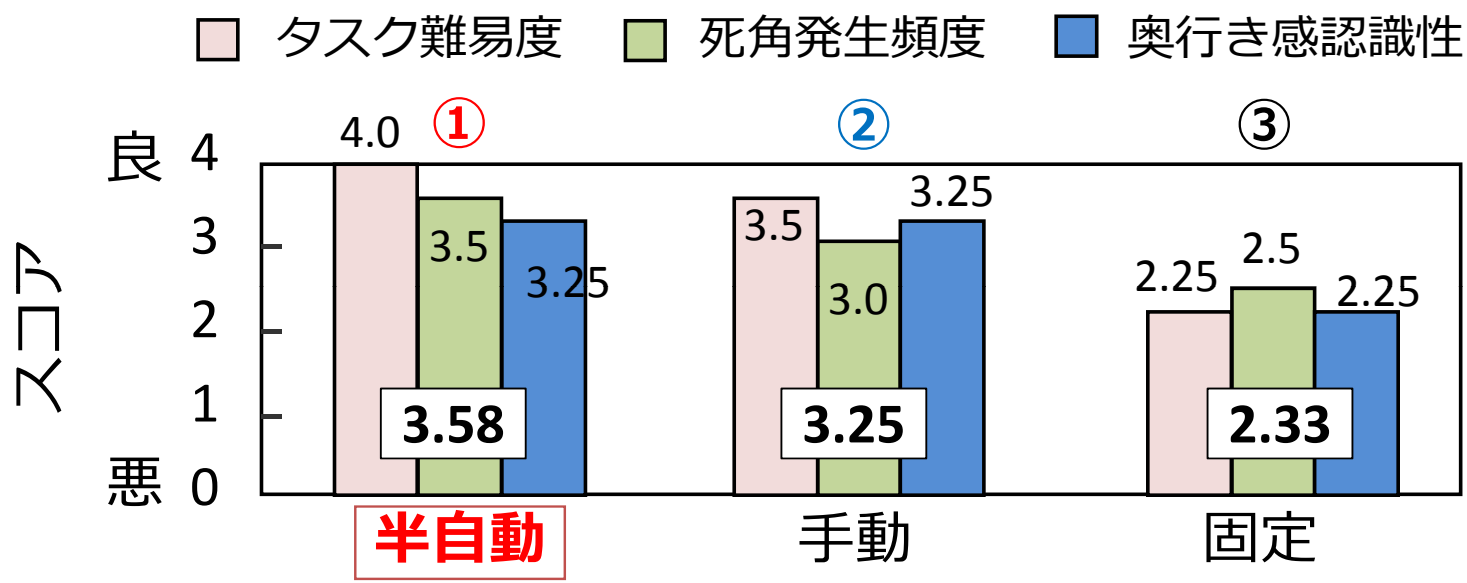




可動カメラ(手動および半自動)では，よいスコアが得られた

固定の場合では，可動カメラの場合と比べ約2倍のスコアとなっている．オペレータが望む映像を提供することで，廃材棒の中心を把持できることから，作業品質向上に寄与することが示唆された

3-D. 主観的使いやすさ



固定よりも手動のほうが良いスコア：カメラの可動化だけでも使いやすさが向上

可動化カメラを半自動的に制御することで，死角の発生を効果的に抑え，タスクの主観的難易度が低下することが分かった．半自動制御により，オペレータの主観的な使いやすさが向上することが示唆された．

まとめ

- 現場環境や作業内容，オペレータの操縦技能によって映像情報の性質が変わってくると考え，可動式カメラの半自動制御手法の開発を行った.

- 3つの注視点と4つの制御モードにより定義されるカメラロールとして，**車体俯瞰位置**，**手先拡大位置**，**マニピュレータ姿勢**，**手先軌道**を定義した．これらを作業状況によってシームレスに切り替え，適切なカメラに割り当てるための**ロールアサインメントシステム**を開発した.

- 固定・手動制御・半自動制御の3システムでの比較実験の結果，固定に比べ，手動を用いることで，把持の失敗や過負荷回数の減少し，物体位置関係の把握性能向上が図られた.

- 半自動制御では，オペレータが必要な映像を当該状況に応じて適切に提供することで，「**作業効率の向上と作業品質の向上の両立**」を実現でき，オペレータの主観的な使いやすさが向上することが示唆された.

今後の展望

- 申請年度で行った基礎検討をもとに，映像提示の有用性向上に関する検討を深める．今後は，被験者の数を増やすとともに，実際の熟練オペレータでの評価実験から現場の意見を伺う．

- アングルとズーム機能を有するカメラを利用していたが，より詳細な状況把握のために，カメラの高さ方向の調整とカメラ自体の移動性も検討する．

- カメラ制御パラメータの設定方法の確立や学習規範の導入，無人化施工における課題である通信遅延対策・体感情報提示に関する技術開発との融合による高度化検討，実環境での実証実験も今後必要になる．

御静聴ありがとうございました

本研究の一部は，(社)日本建設機械化協会「平成23年度研究開発助成」，文科省グローバルCOEプログラム「グローバルロボットアカデミア」ならびに，早稲田大学理工学研究所の支援を受けて行われました．ここに謝意を表します．

フィードバック変調器による
油圧駆動型建設機械の精密位置決めの容易化

横小路泰義（神戸大学）

研究背景

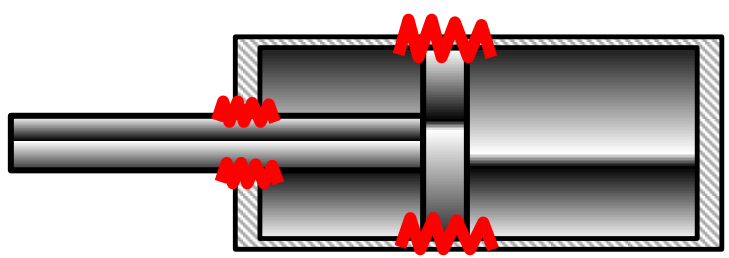
- 建設機械は，災害現場の復興などにも用いられる
  → 建設作業以外の広い応用範囲
- 瓦礫除去や解体作業では時として精度が求められる
  → 操縦には熟練が必要
- 熟練オペレータの不足
  → 初心者でも正確な作業を行える技術が必要



建設機械による解体作業

油圧駆動システムの利点と問題点

- 利点
  - 大出力，高い出力重量比
  - 水，泥など，過酷な環境下で運用可能
- 問題点
  - 油圧シリンダとピストン摺動部の（変動）摩擦
  - 通常の制御では正確な位置決めが困難



正確な作業を行うためには，この問題を克服する制御法が必要

研究目的

- 当研究グループの研究実績
  - 油圧駆動型重作業用レスキューロボットに
    フィードバック変調器(FBM)を適用
  - 摩擦の影響の軽減に成功



T-52援竜

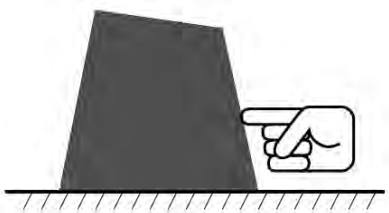
- 本研究の目的
  - フィードバック変調器を小型油圧ショベルに
    適用し以下を検証
    - 初心者でも容易に精密位置決め可能か
    - 低コストな改造で適用可能か
    - 簡単な不感帯補償制御と比較して
      優位性があるか



PC01

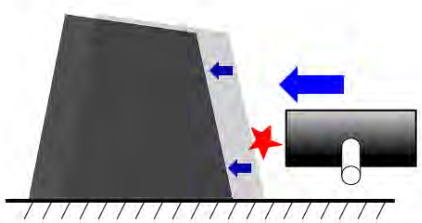
FBMによる摩擦補償の基本的考え方

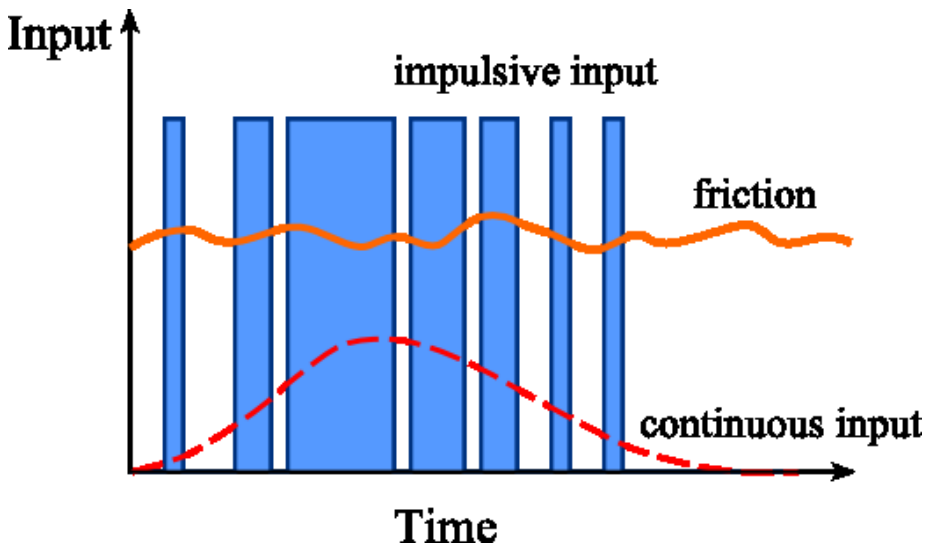
床との摩擦で位置を微調整できない



変換

ハンマーで叩いて調整

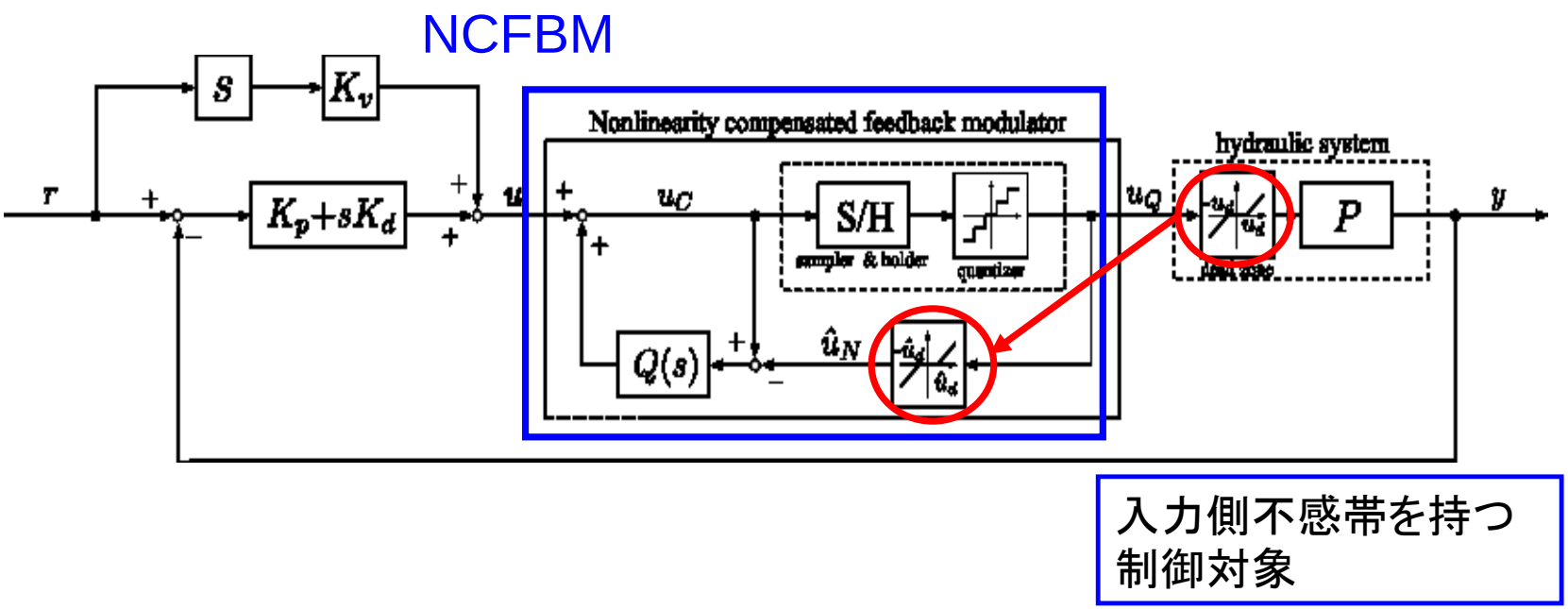




連続値入力からパルス入力への変換
(量子化)にフィードバック変調器(FBM)を使用
(正親ら, 2007)

非線形特性補償型フィードバック変調器(NCFBM)

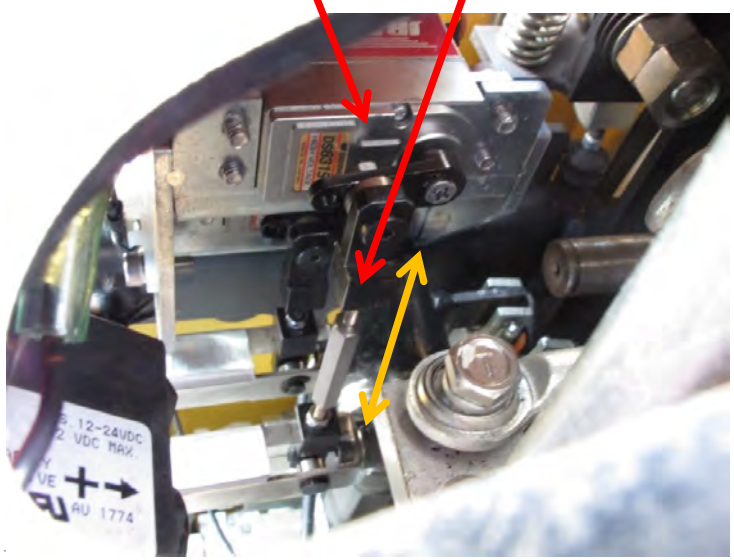
- FBM内のフィードバックループに推定不感帯を挿入
- 制御対象の不感帯の影響を反映でき，制御性能が向上



実験機（1/2）

- コマツ製　マイクロショベル　PC01
- アーム，ブーム，旋回の油圧操作弁をRCサーボで開閉

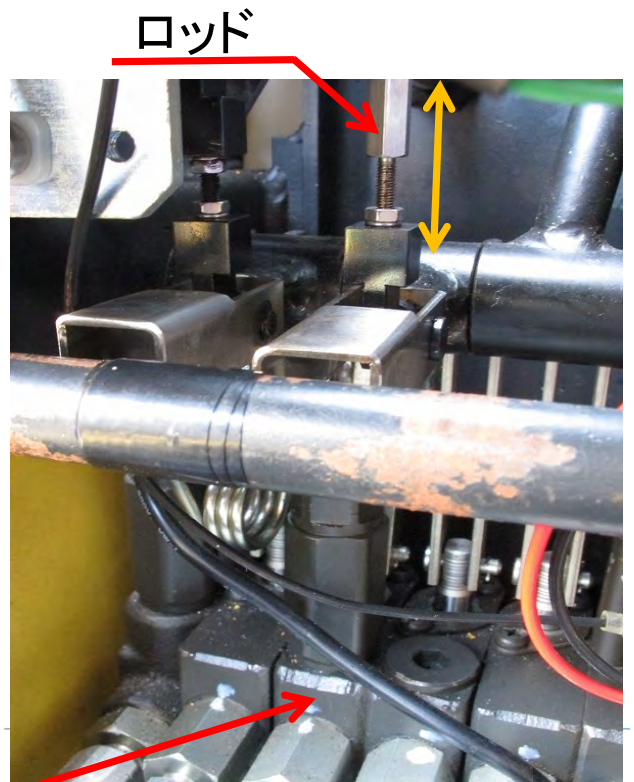




実験機（1/2）

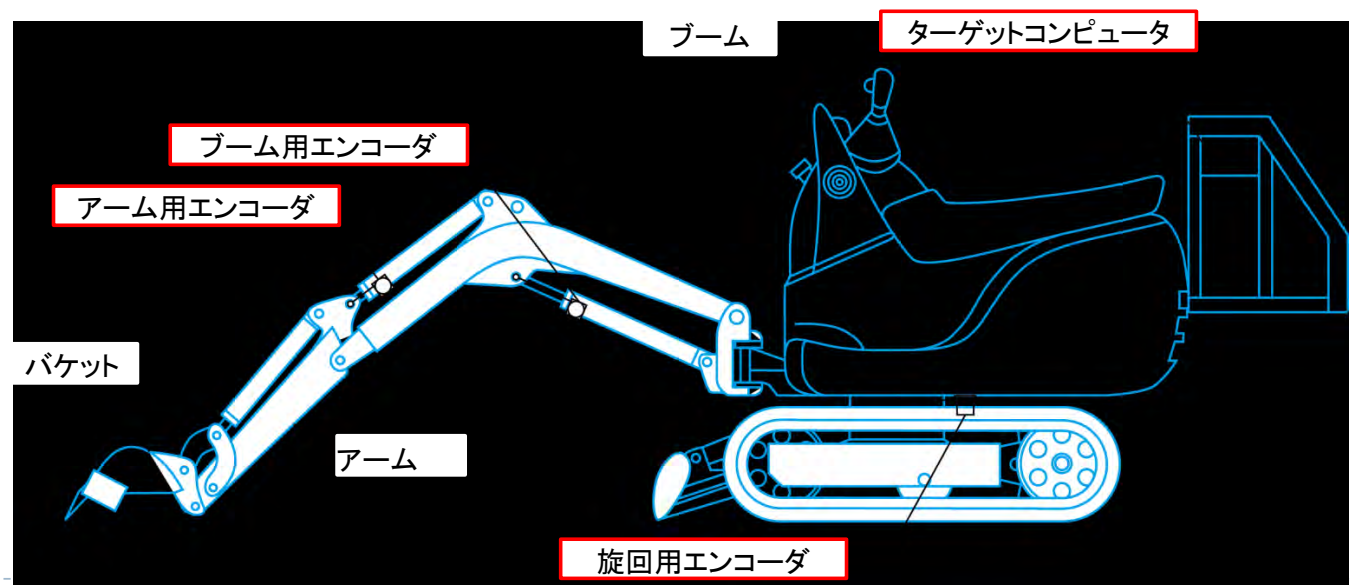
- コマツ製　マイクロショベル　PC01
- アーム，ブーム，旋回の油圧操作弁をRCサーボで開閉





実験機（2/2）

- アームおよびブームのシリンダの伸びと旋回軸角度をエンコーダで計測→バケット先端位置の計算が可能
- 搭載型コンピュータ(VxWorks リアルタイムOS)
- RCサーボへの指令角度 [deg]を制御入力とする



操縦装置

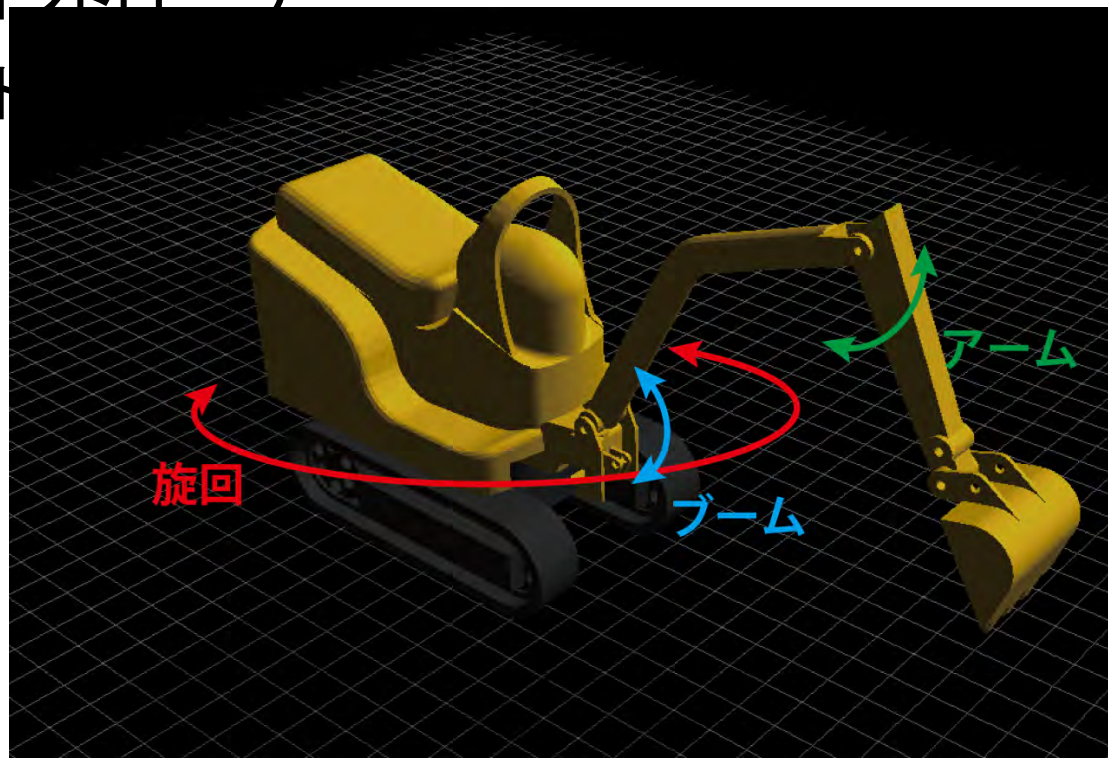
- ジョイスティックコントローラ
- 二つの制御モード
  - 各軸制御モード
  - 手先制御モード



操縦装置

- ジョイスティックコントローラ
- 二つの制御モード
  - 各軸制御モード
  - 手先制御モード

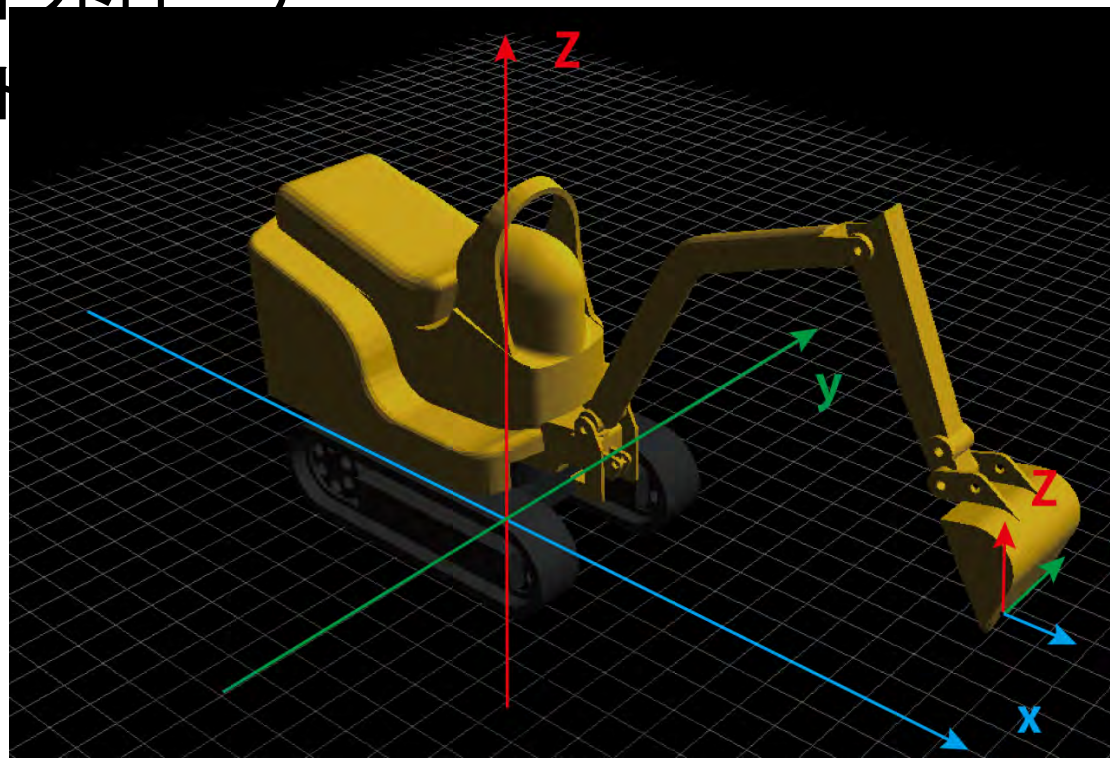




操縦装置

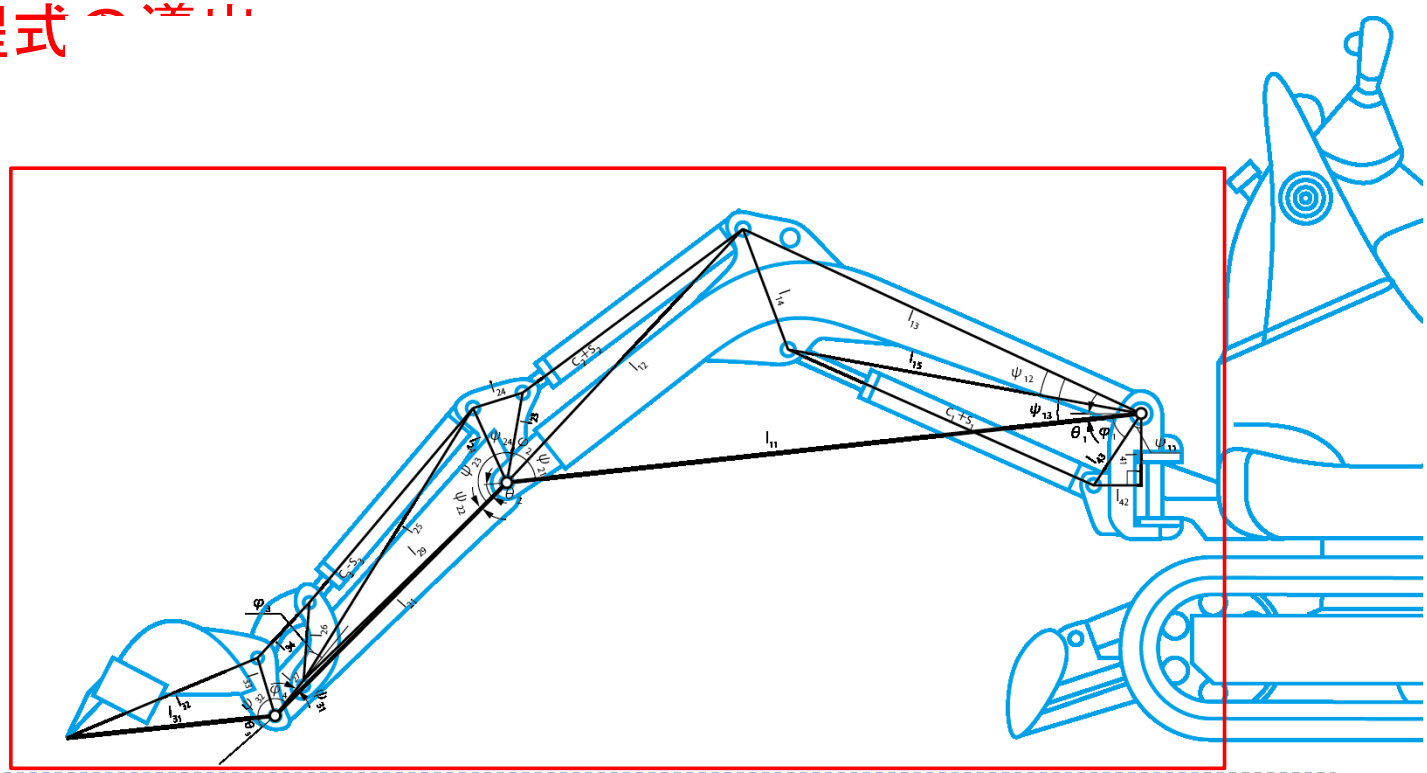
- ジョイスティックコントローラ
- 二つの制御モード
  - 各軸制御モード
  - 手先制御モード





多軸油圧アームにおける手先位置制御

- 多軸油圧駆動アームの運動学モデルの作成
- 手先目標位置からシリンダ目標位置を求める逆運動学方程式の導出

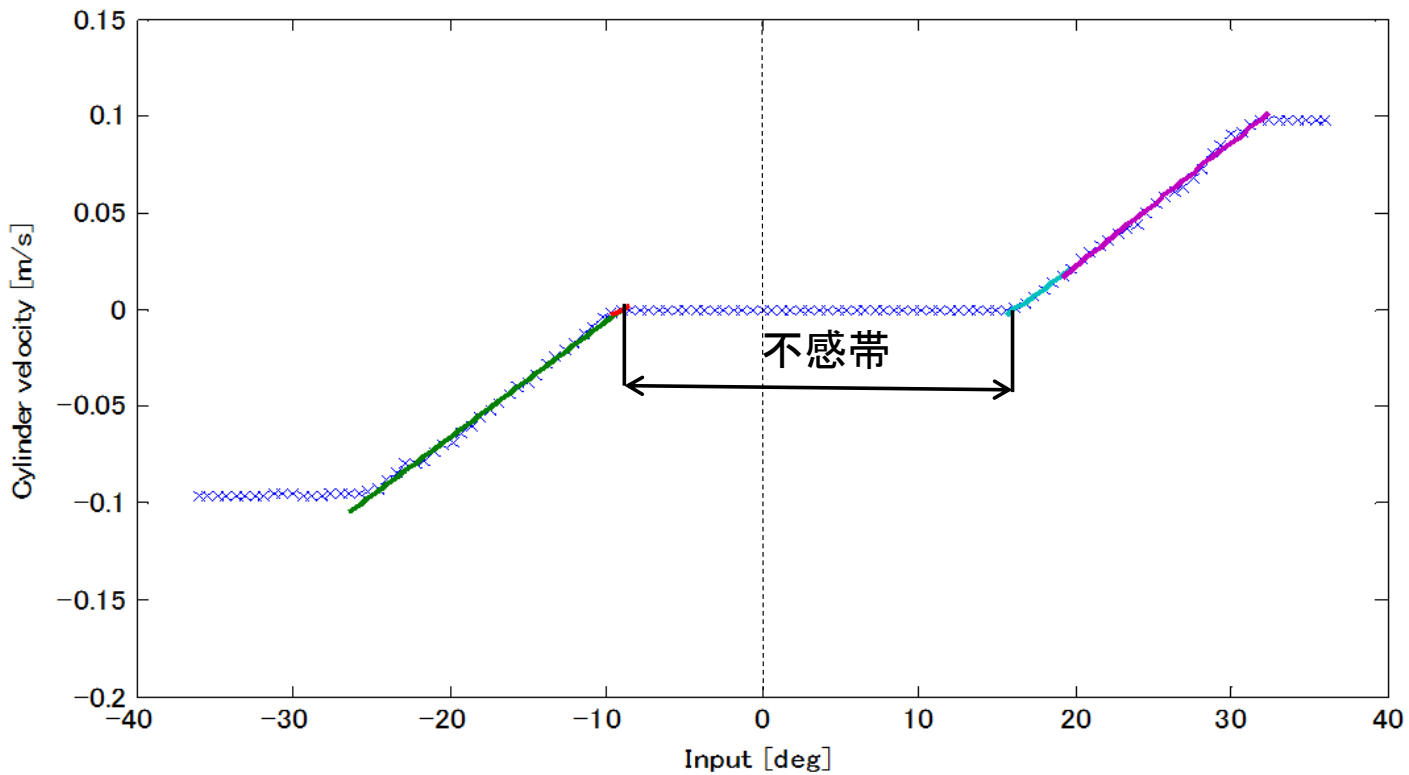


手先位置制御（x軸方向）



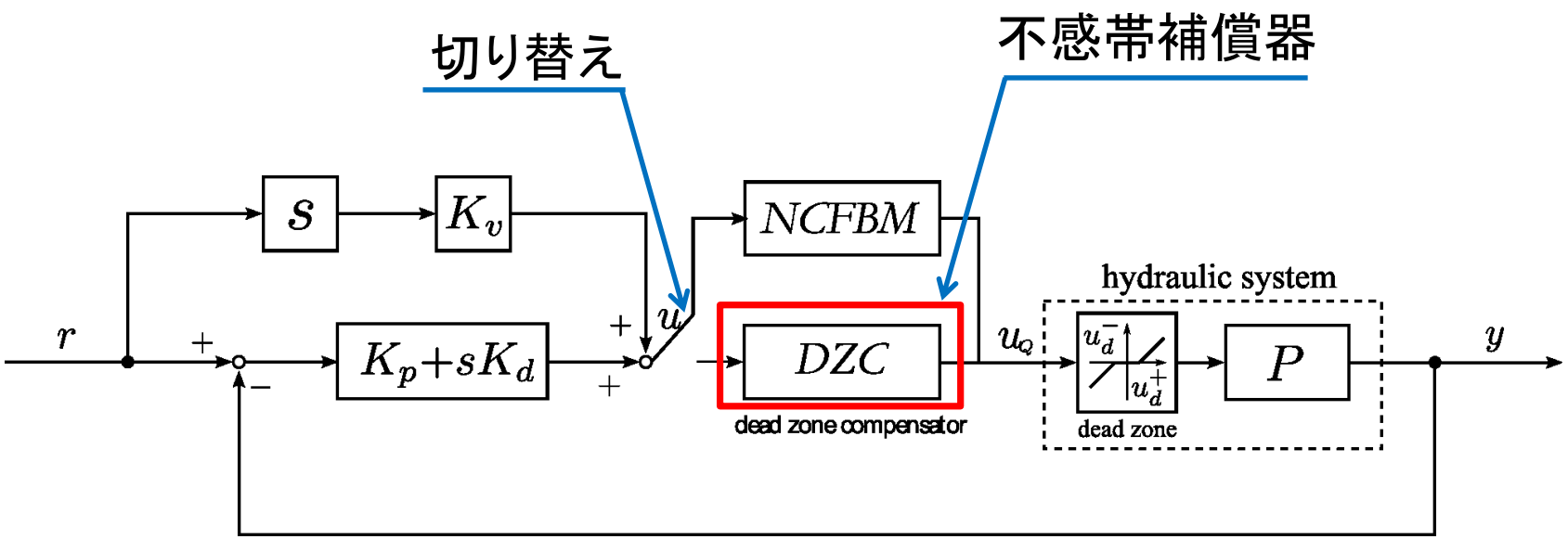
実験機の不感帯特性の同定

- RCサーボ指令値とシリンダ速度との関係をプロット
- RCサーボの指令値（角度[deg]）で不感帯の大きさを表現



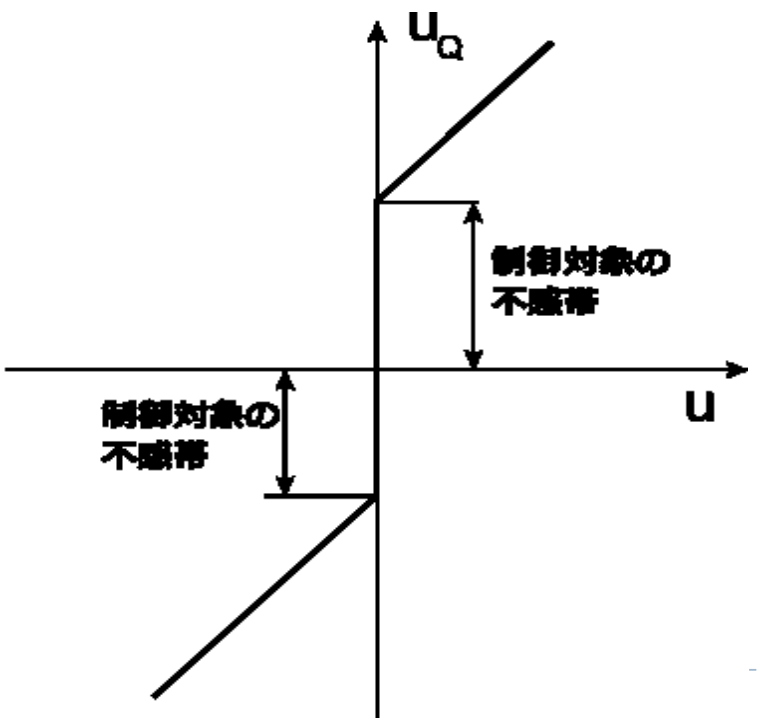
実験内容

- NCFBMと不感帯補償器との性能比較
- 正弦波入力に対するブーム関節への応答



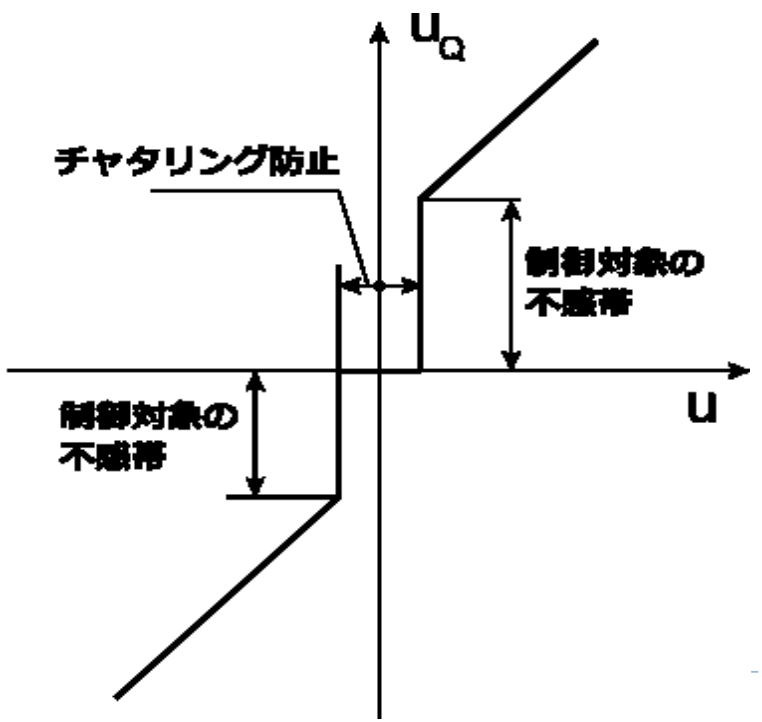
比較対象：不感帯補償器

- 制御対象の持つ不感帯幅分入力を単純に底上げ
- 応答が振動的になるのを防ぐため、微小入力では0を出力



比較対象：不感帯補償器

- 制御対象の持つ不感帯幅分入力を単純に底上げ
- 応答が振動的になるのを防ぐため、微小入力では0を出力

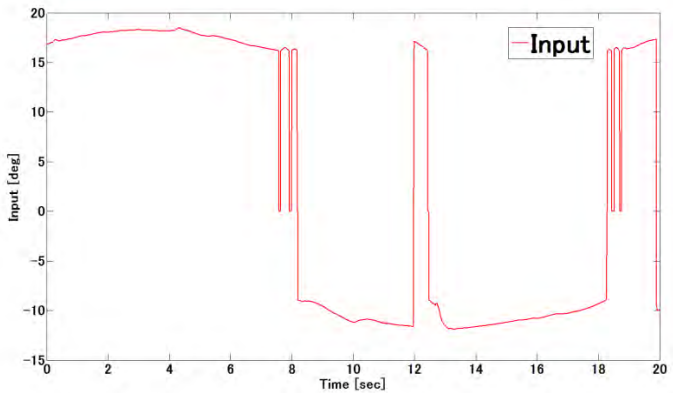


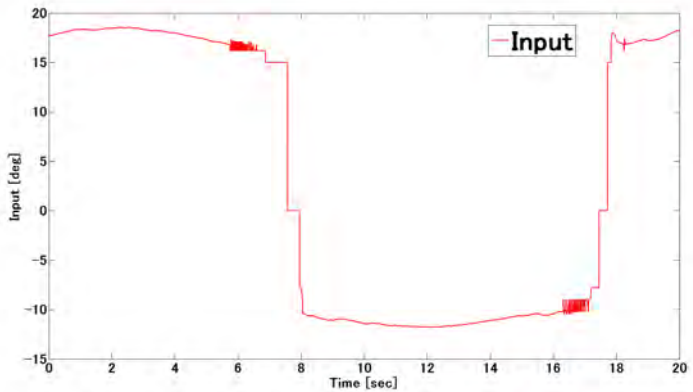
実験結果（不感帯推定が正しい場合）

不感帯補償器

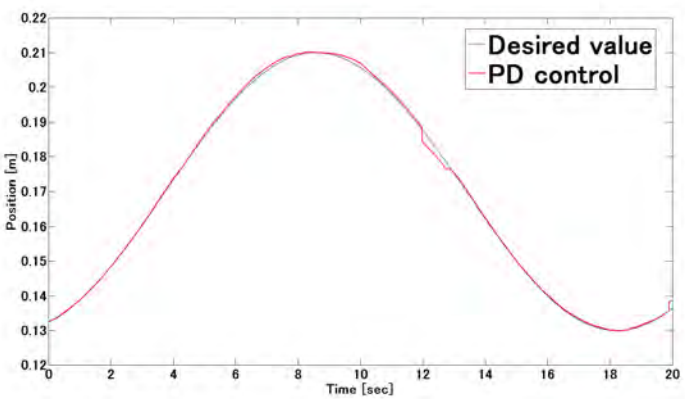
NCFBM

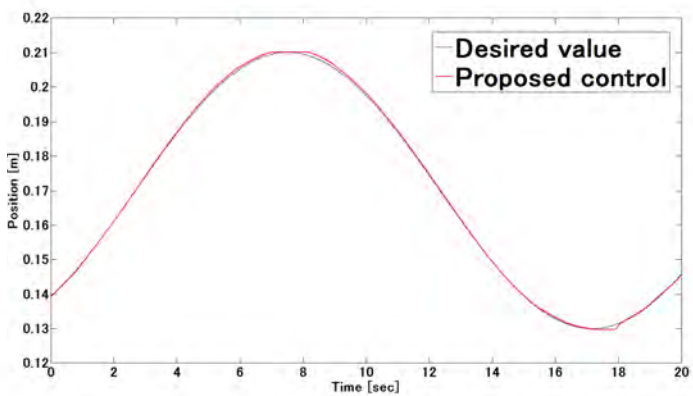
入力





応答



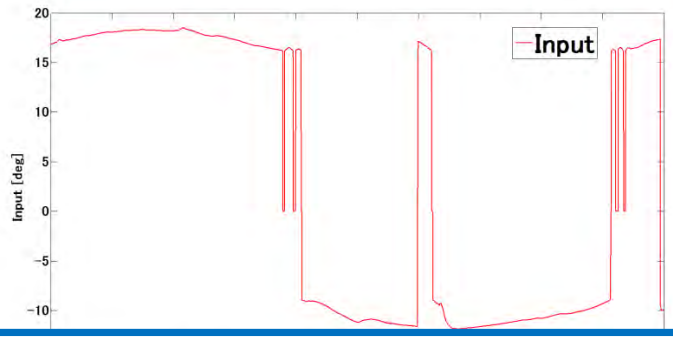


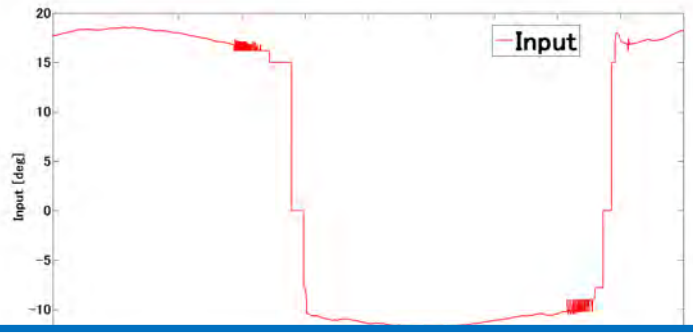
実験結果（不感帯推定が正しい場合）

不感帯補償器

NCFBM

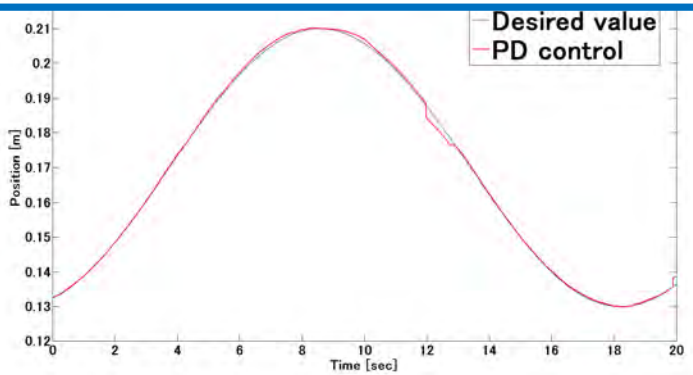
入力

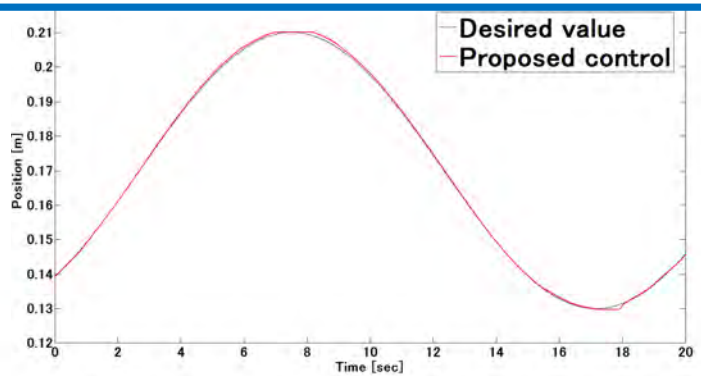




不感帯推定値から変動がなければ，単純な不感帯補償器でも良好な追従が実現できている

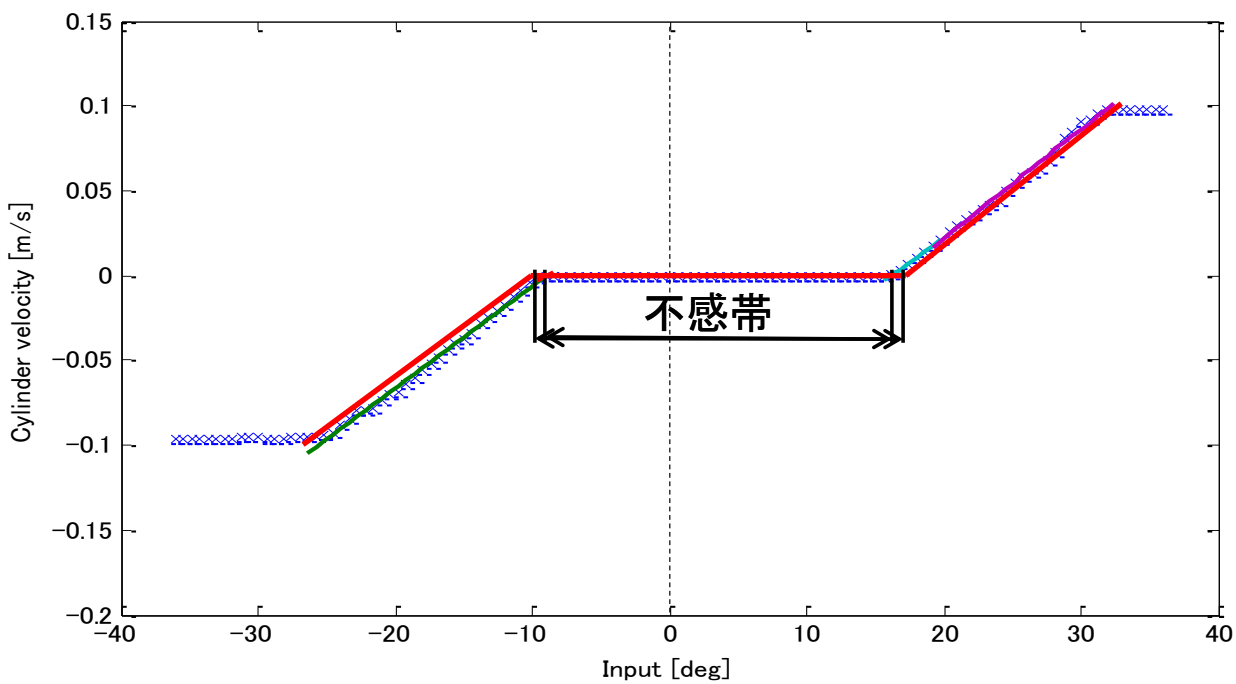
応答





不感帯変動に対するロバスト性の検証

- 不感帯の推定値をRCサーボの指令値換算で1.2[deg]
  実際より大きくする
- 擬似的な不感帯変動

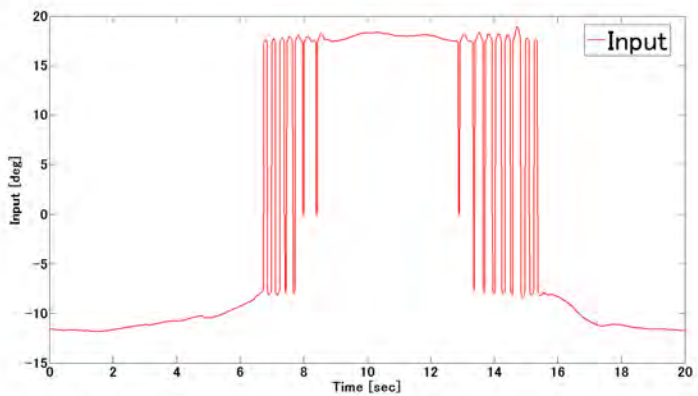


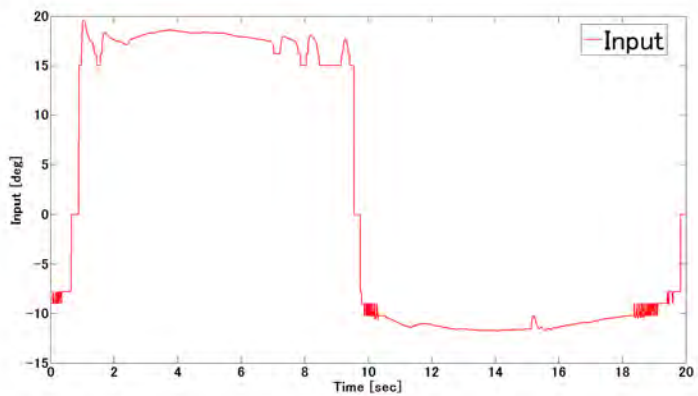
実験結果（不感帯変動あり）

不感帯補償器

NCFBM

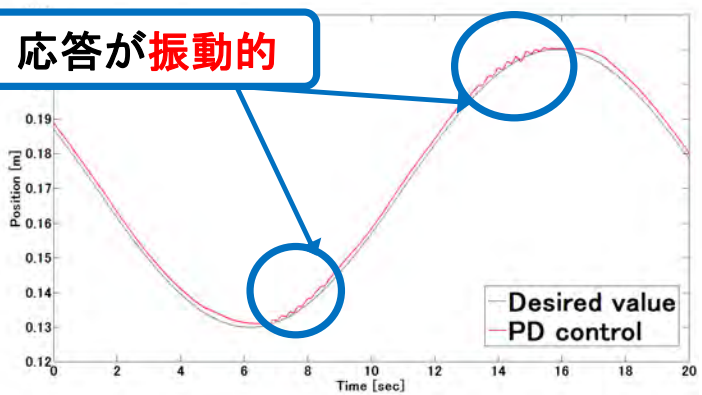
入力



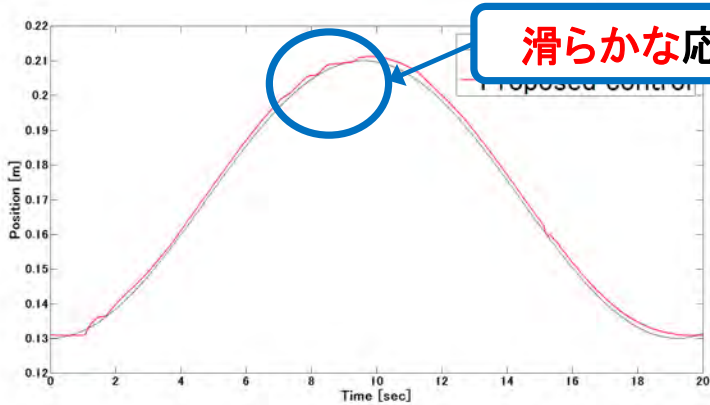


応答

応答が振動的



滑らかな応答

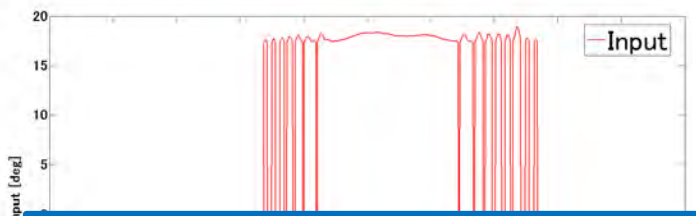


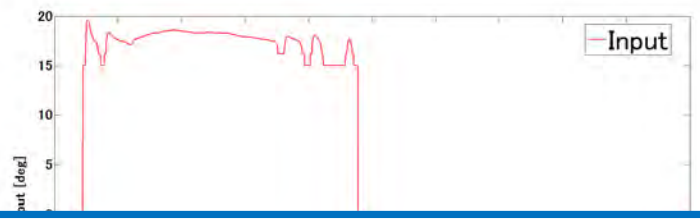
実験結果（不感帯変動あり）

不感帯補償器

NCFBM

入力

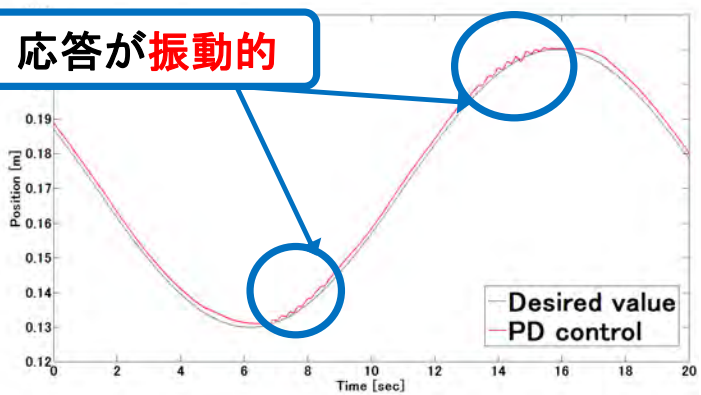




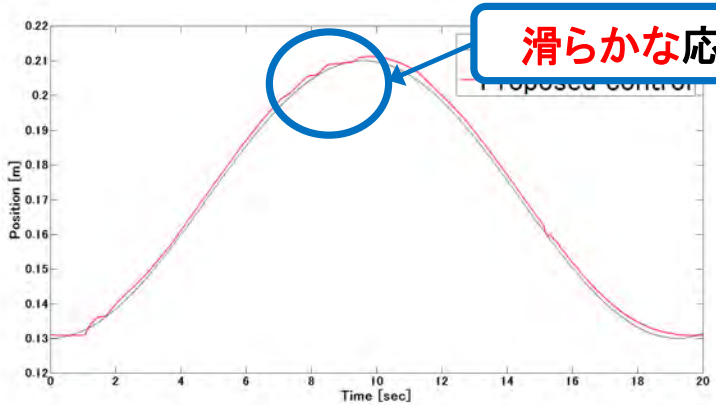
不感帯が変動しても，提案手法では良好な追従が実現できている

応答

応答が振動的



滑らかな応答



まとめと今後の課題

- 油圧駆動型建設機械にフィードバック変調器を適用
- 有用性確認
  - 不感帯変動が生じた場合でも高精度な軌道追従が可能
  - 単純な不感帯補償に対しての優位性
- 低コスト
  - RCサーボによる油圧操作弁の開閉
- 初心者対応
  - 手先制御の実装→複合動作の容易化
  - フィードバック変調器による高精度位置決めの容易化
- 今後の課題
  - 複合動作時に提案手法を適用
  - 高精度な軌道追従制御の実現



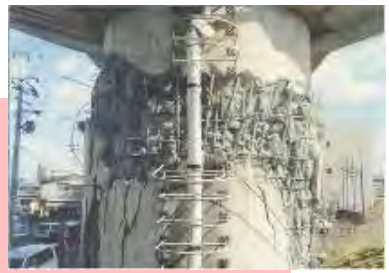
動電式加振器のコンクリート構造物地震時損傷評価への応用

東北大学　大学院工学研究科　土木工学専攻

鈴木　基行
内藤　英樹

研究の背景

レベル2地震動を受けたRC構造物の被害



① 供用に支障をきたす甚大な損傷

座屈・破断・せん断ひび割れなど

➡ 早期に復旧し，供用再開を目指す



② 即時には供用に支障をきたさない損傷

曲げひび割れ程度

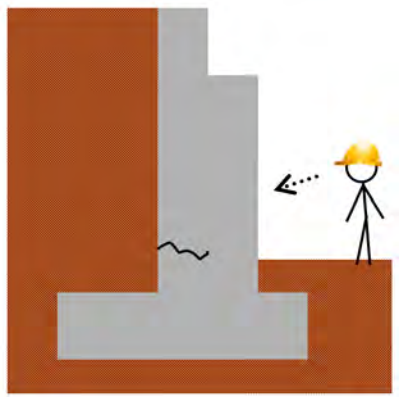
➡ 維持管理の観点から適切な補修補強が必要

研究の目的

点検の課題

目視困難な箇所の点検

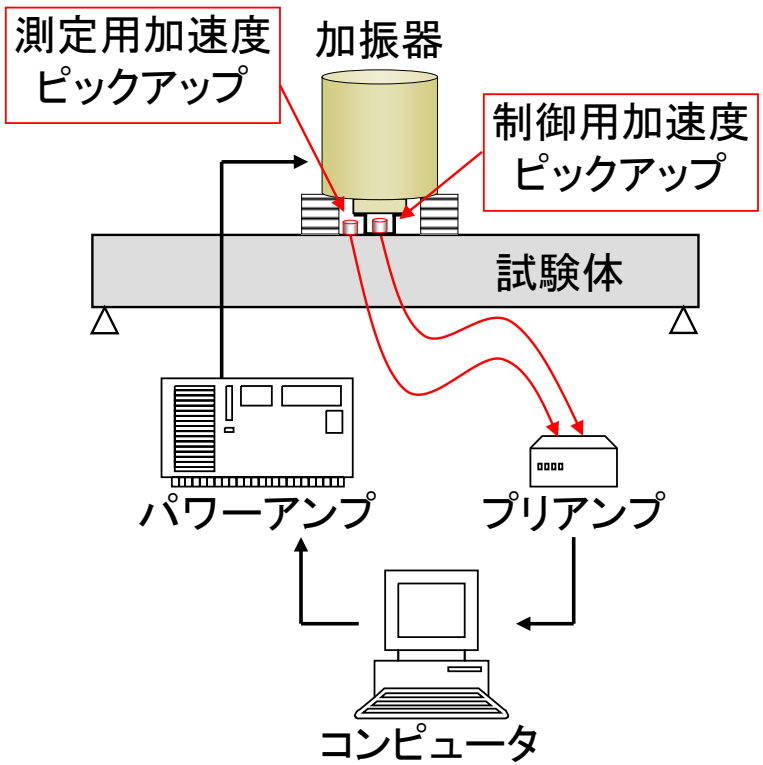
・橋台・擁壁・カルバートなどの背面土側
・杭基礎などの地中構造物
・表面に塗装や繊維シート補強された場合



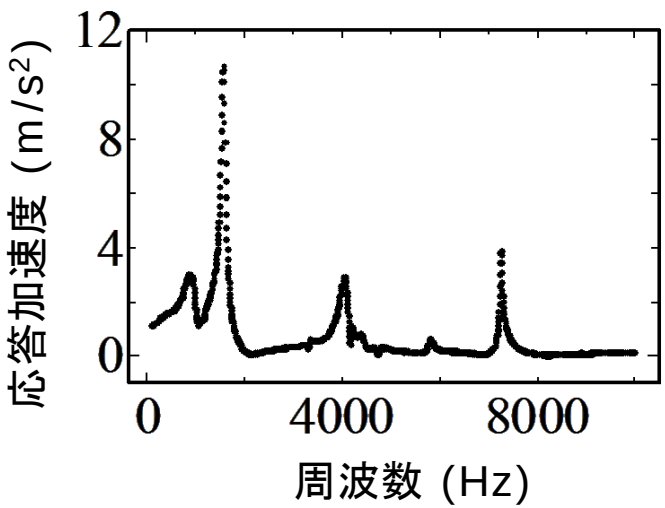
研究の目的

振動試験に基づくRC部材の地震時損傷評価法を提示する.
(特に目視困難箇所の点検手法を目指す)

周波数スイープ試験



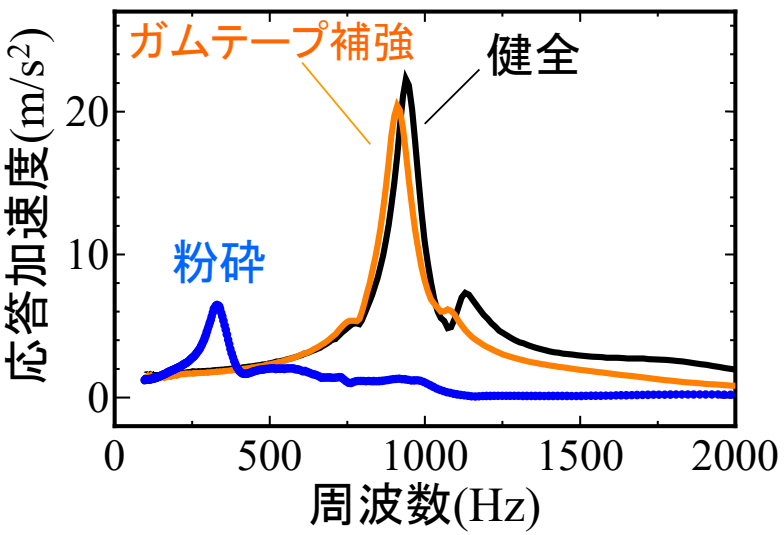




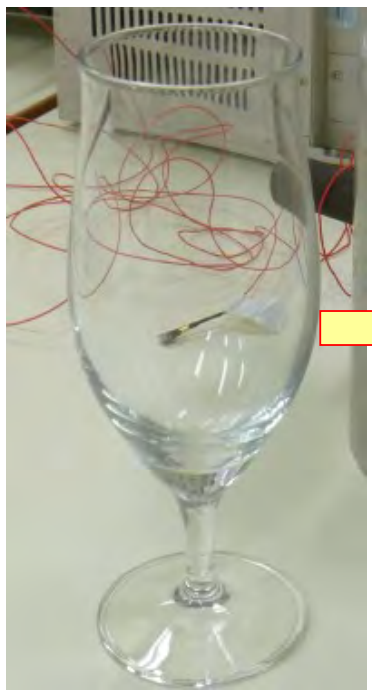
加振器の振動数を変化させて検査対象の周波数応答特性を測定する

損傷と共振周波数の関係

ワイングラスを叩き割って
測定値を比較した.



健全:939Hz



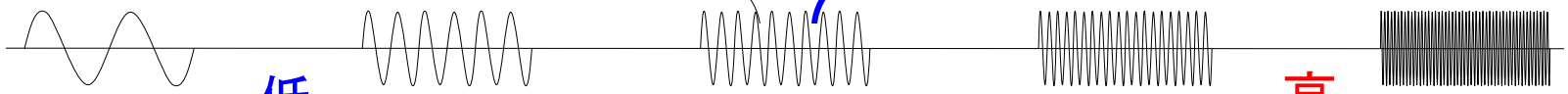
粉砕:333Hz



損傷すると固有振動数 (共振周波数) は低下する

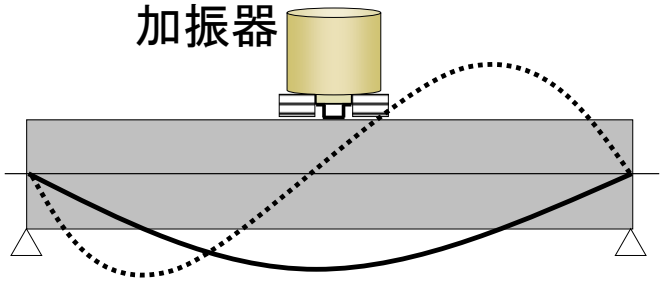
構造物の損傷評価

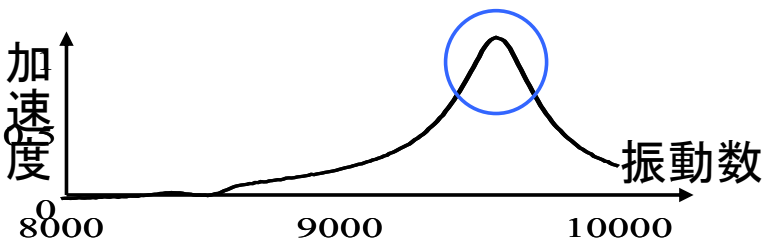
全体振動



低 ⟷ 高

与える振動数



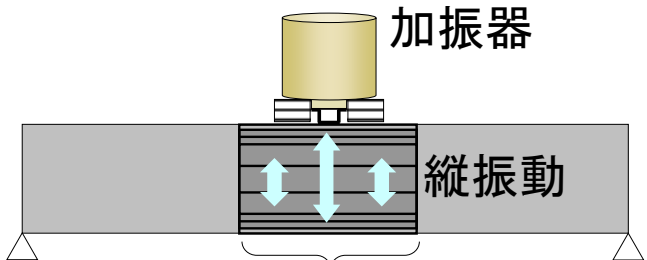


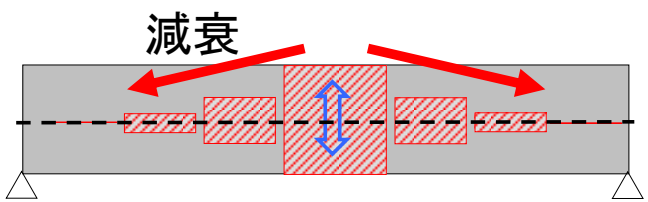
最も振動が励起される振動数
(固有振動数)

⇩

部材全体の平均的な劣化を得る

局所振動



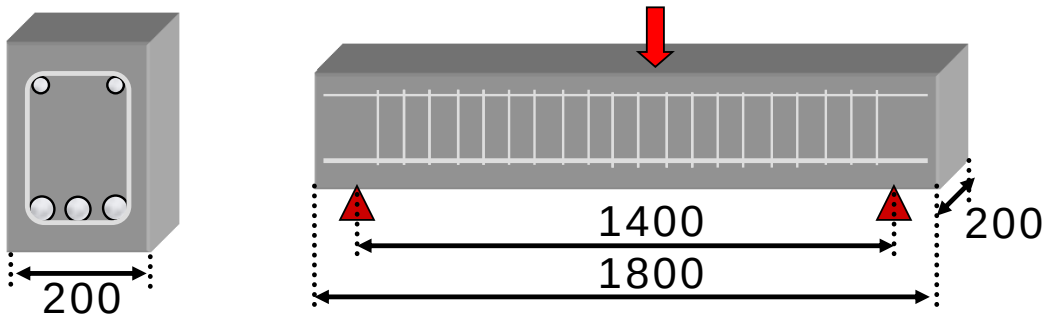


高い振動数で振動させることで
部分的に縦振動を励起させる

⇩

検査範囲での局所的な劣化を得る

供試体一覧

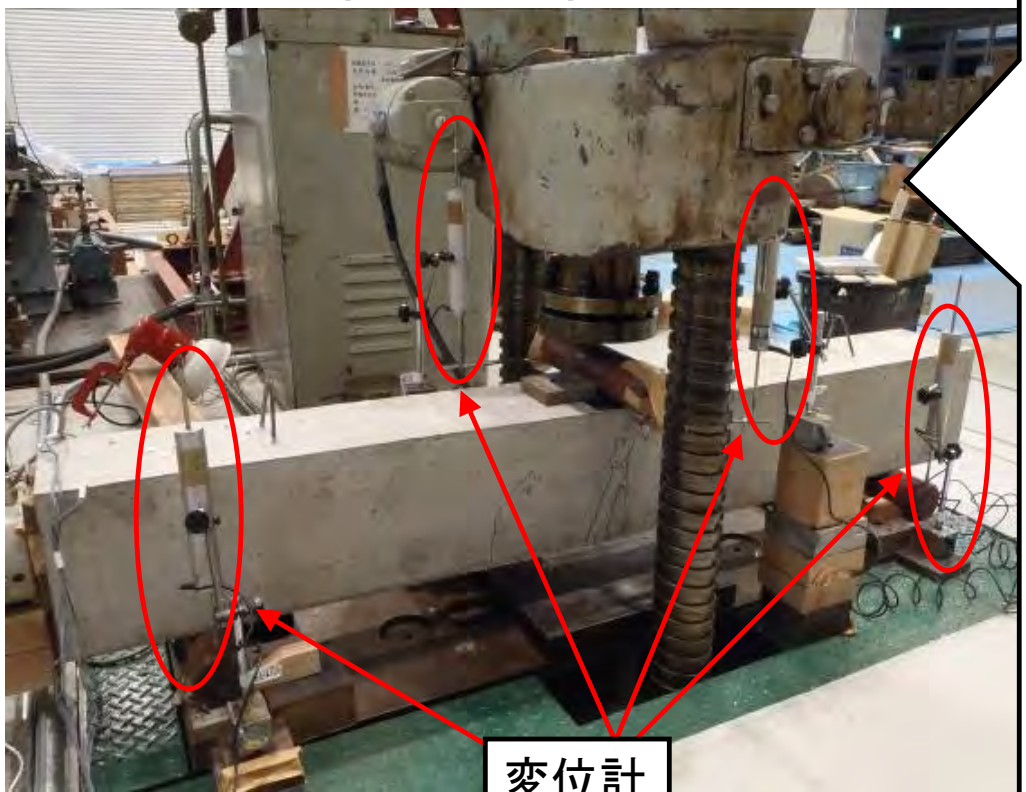


引張鉄筋 ： D13×3本　　スターラップ ： D6@100

供試体名	部材長さ (mm)	断面幅 (mm)	断面高さ (mm)	載荷形式	せん断スパン比
S250	1800	200	250	3点曲げ(S)	3.5
D250				4点曲げ(D)	2.8
S300			300	3点曲げ(S)	2.8
D300				4点曲げ(D)	2.2
S350			350	3点曲げ(S)	2.3
D350				4点曲げ(D)	1.9
S400			400	3点曲げ(S)	2.0
D400				4点曲げ(D)	1.6

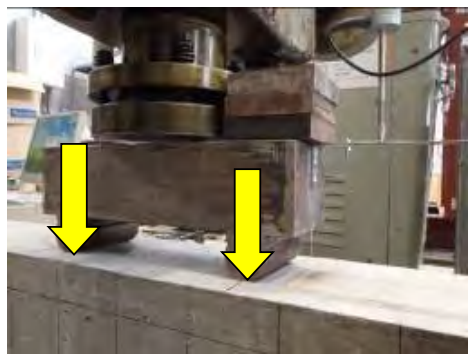
曲げ載荷試験

曲げ載荷試験(3点載荷)





3点載荷(ピン)

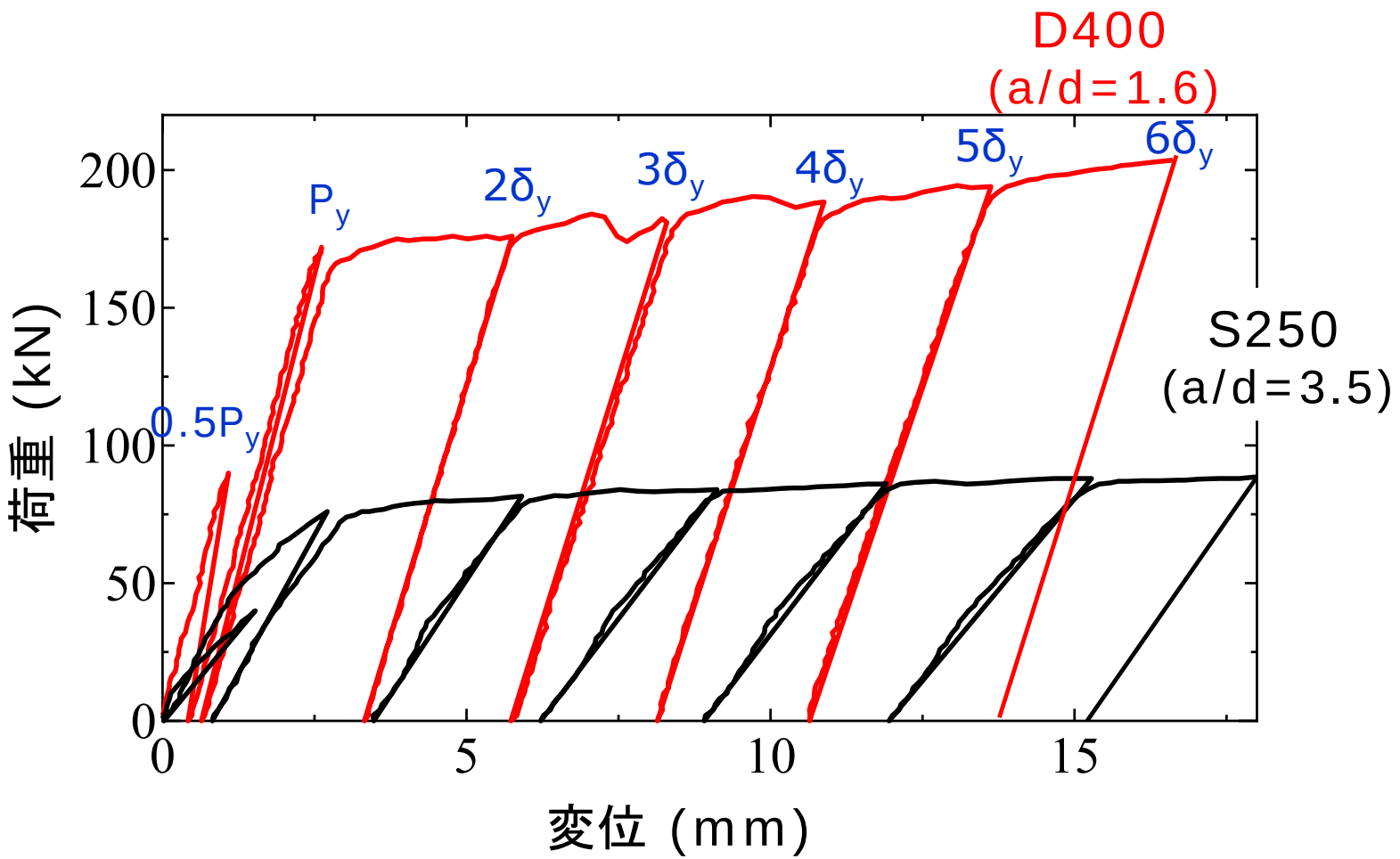


4点載荷(載荷フレーム)

載荷ステップ

$0.5P_y$	P_y	$2\delta_y$	$3\delta_y$	$4\delta_y$	$5\delta_y$	$6\delta_y$

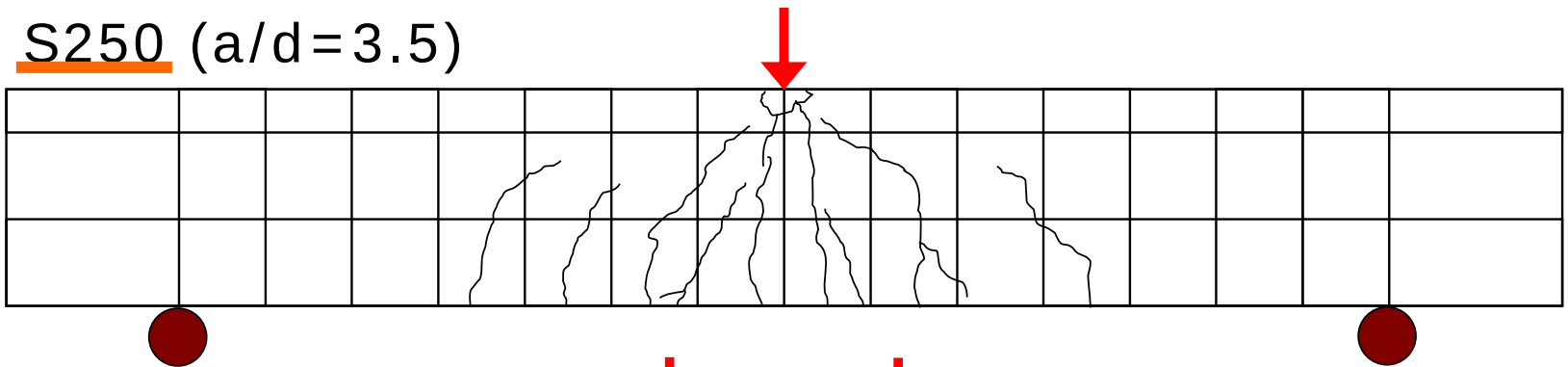
荷重－変位関係


D400
(a/d=1.6)
S250
(a/d=3.5)
P_y
$2\delta_y$
$3\delta_y$
$4\delta_y$
$5\delta_y$
$6\delta_y$
$0.5P_y$
荷重 (kN)
変位 (mm)
0
50
100
150
200
0
5
10
15

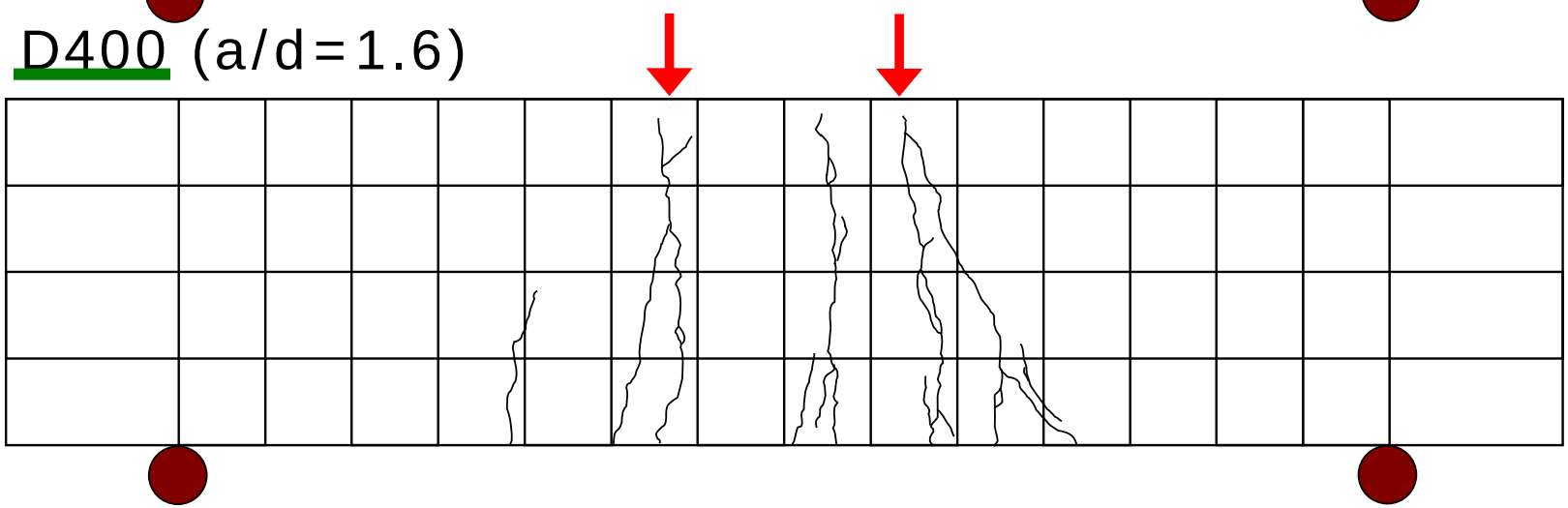
損傷状況

$6\delta_y$まで載荷(δ_y＝降伏変位)

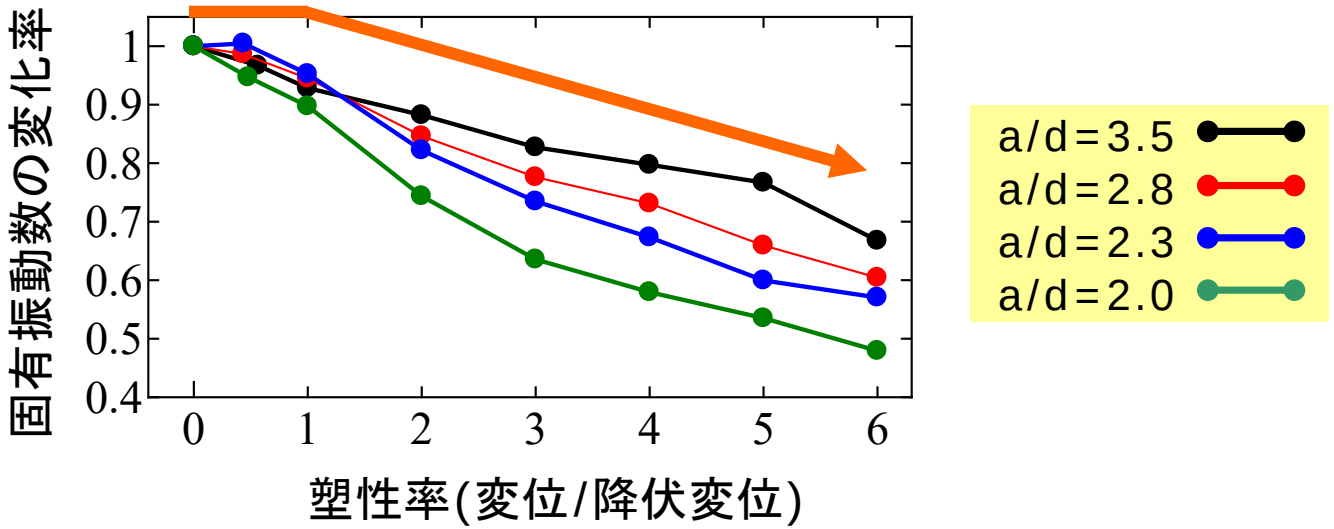
S250 (a/d=3.5)



D400 (a/d=1.6)



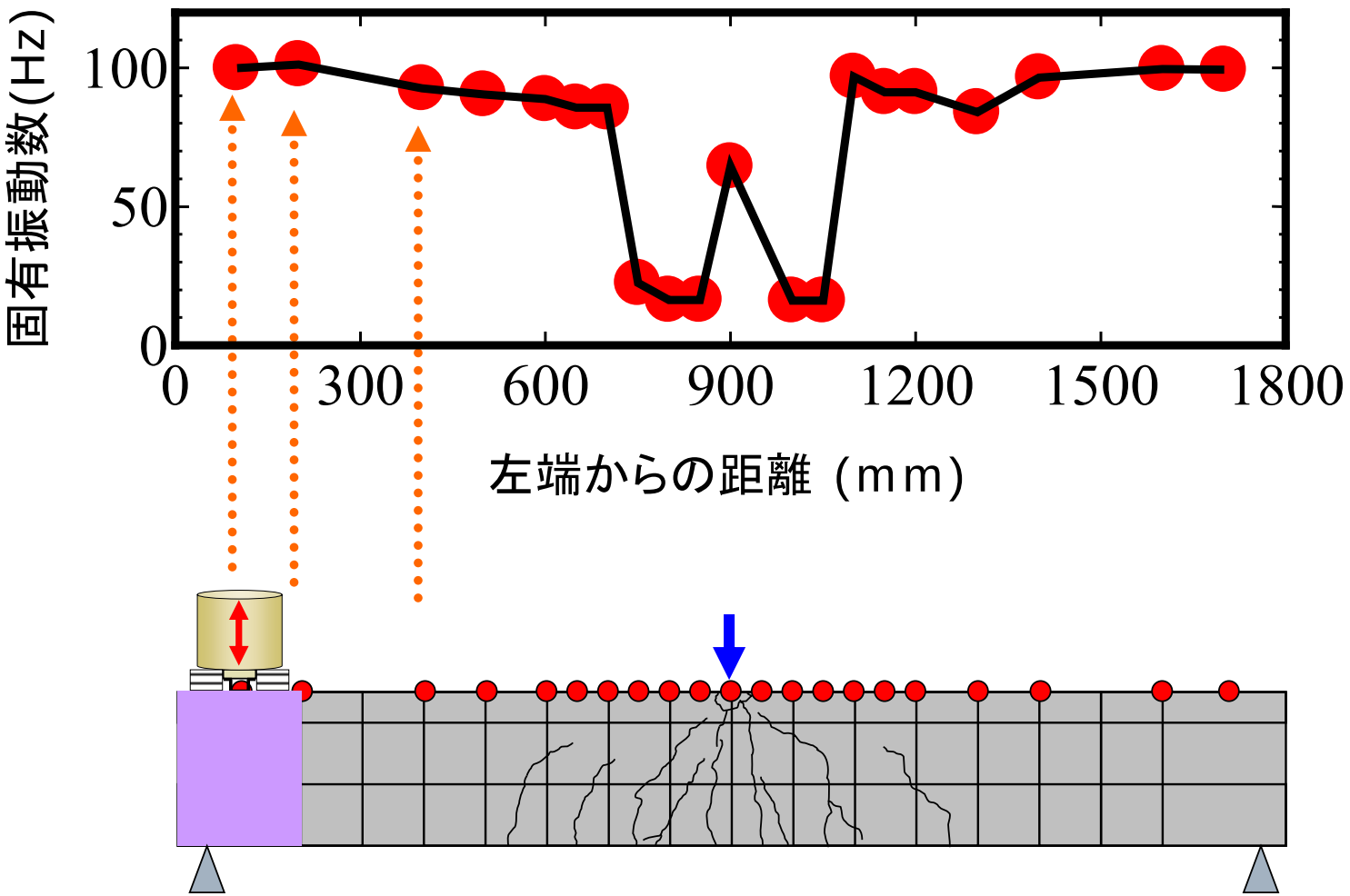
全体振動 (部材の平均剛性)



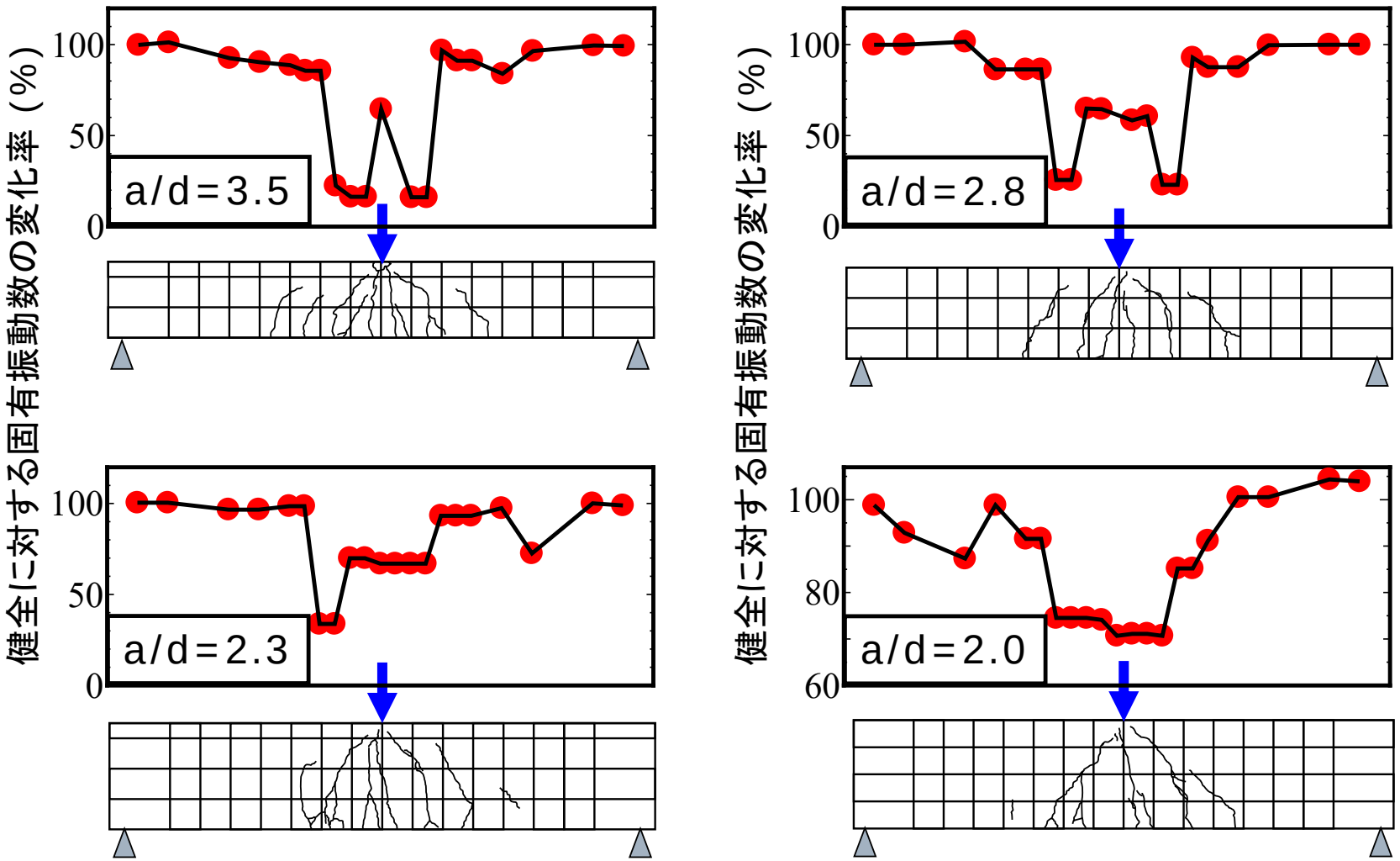
□変形の増加(損傷の進展)に伴って固有振動数が低下する.

□せん断スパン比が小さいほど固有振動数の低下率は大きい.

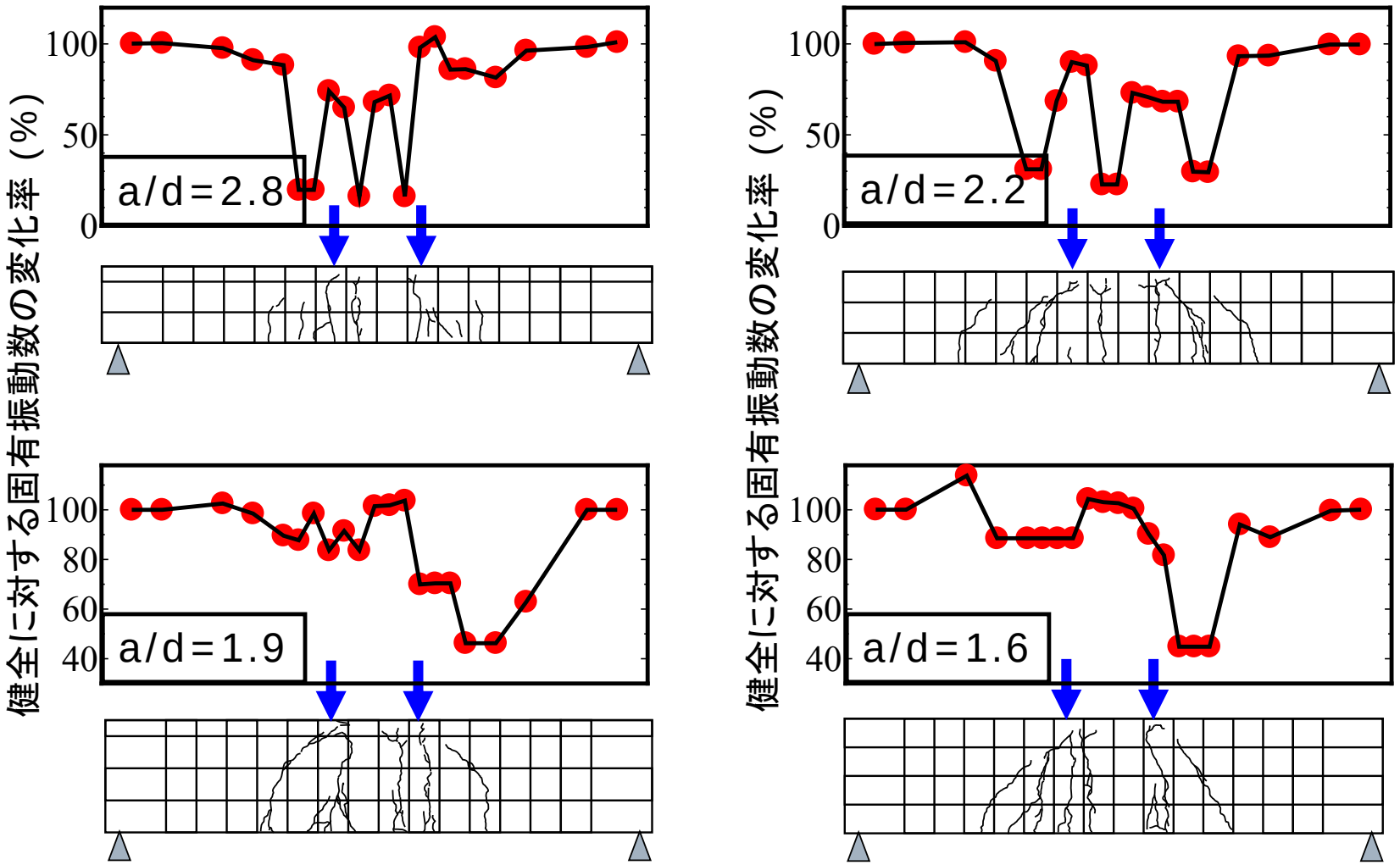
局所振動 (損傷位置の同定)



損傷位置の同定(3点載荷)



損傷位置の同定(4点載荷)



まとめ

加振器を用いて，曲げひび割れを導入したRCはり供試体の損傷同定を試みた.

- 変形の増加に伴って固有振動数が低下する.
  部材の平均的な損傷レベルが評価できる

- 局所的な動的応答の抽出と損傷位置同定が可能である.
  部材内部の損傷や背面側に生じた損傷も発見できる

- せん断スパン比が小さい場合には局所振動は励起されない.
  断面高さに対して部材長さが5倍以上必要である

H25年度の継続研究

1. はり供試体の静的曲げ載荷試験
   (基礎的検討)　完了

2. 柱供試体の振動台実験
   (地震動作用の検討)

3. 実橋の現場試験
   (実用化技術への展開)

今年度も引き続き，検討しています







回転表面波機構を用いた
防塵防水型レスキューロボットの開発
Development of RS-Wave Mechanism



Shigeo Hirose

Tokyo Institute of Technology

2013.11

Outline

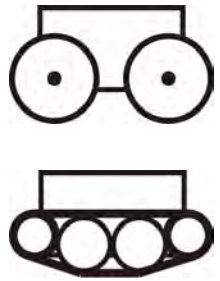
- Background
- Introduction of RS-Wave Mechanism
- Design of RS-Wave Vehicle
- Experiment
- Conclusion

Background

- Wheels and crawlers are widely used on mobile robots

  ×：Infinite rotation → tangle and get stuck easily

  ×：Only single propelling surface.



RS-Wave Mechanism

- A new propulsion mechanism

✓ **Generate wavy motion from the whole surface by a single motor**

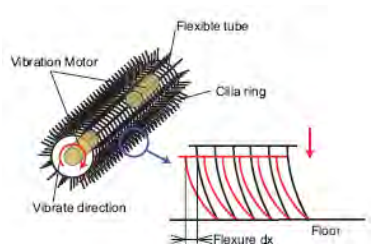
✓ Water and dust protected

Former Studies of the Vehicles with Propulsive Surface

Active Scope Camera
(Tohoku Univ.)



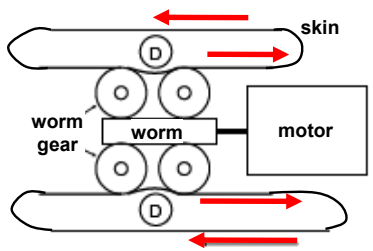
Ciliary vibration mechanism



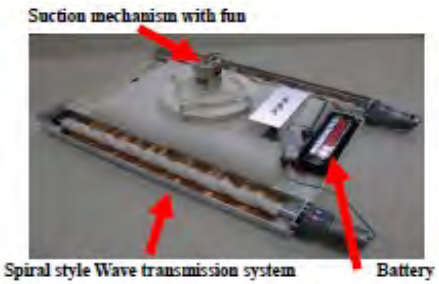
Skin Drive Robot
(CMU)



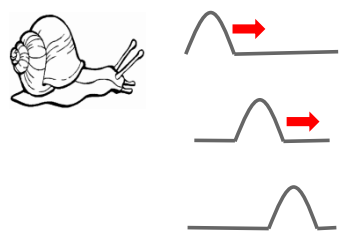
Toroidal Propulsion



Wall Climbing Robot
(Chuo Univ.)



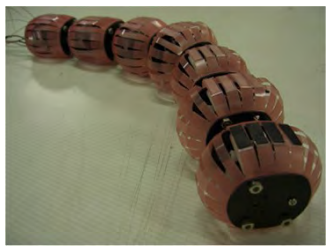
Pedal Wave (Snail)



Former Studies of the Vehicles with Propulsive Surface

Earthworm Robot

(Chuo Univ.)

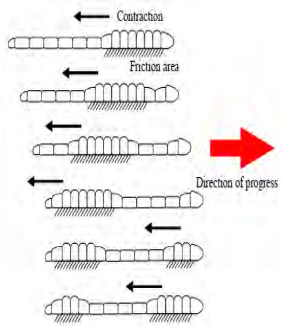


(CWRU)





Peristaltic Motion (earthworm)



Slim Slime Robot

(Tokyo Tech., Ohno, Hirose, 2000)



- Pneumatically driven robot
- Long and thin body
- Multiple locomotion: creep motion, pedal wave, pivot turn…

Rotary Surface Wave (RS-Wave) Mechanism

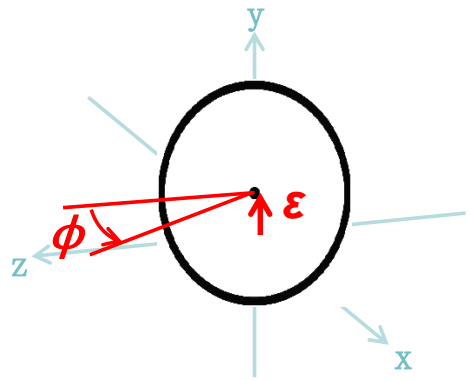


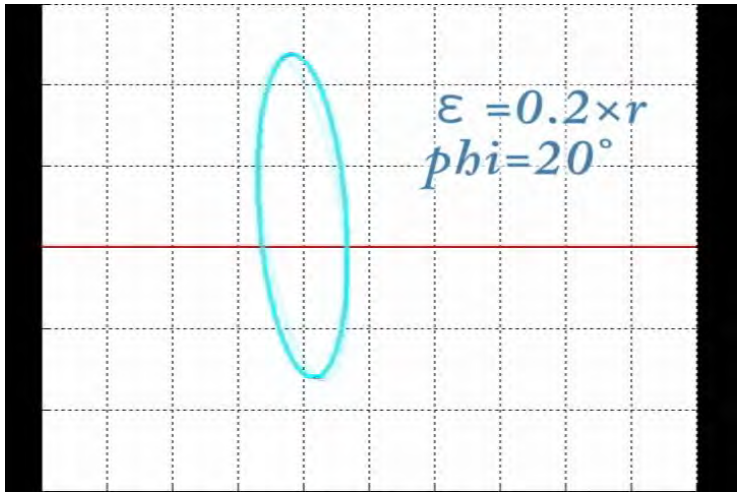
- ✓ **Circular shape**

  All the cylindrical surface generate propulsive motion.
- ✓ **Covered by watertight coating entirely**
- ✓ **Only single actuator**

RS-Wave Mechanism

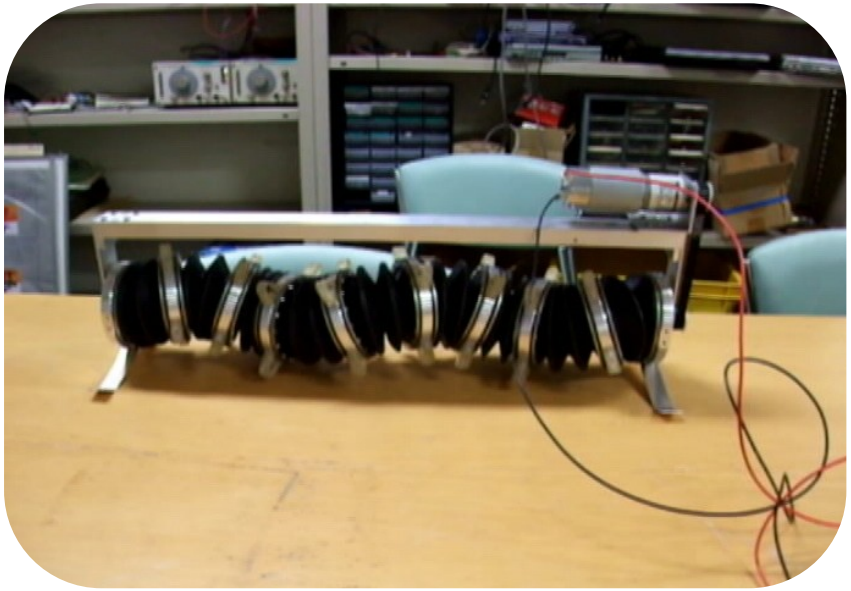
- Propulsive motion produced by the rotation of Eccentric Inclined Plates
  - ε : eccentric distance
  - φ: incline angle







Prototype



○ Smooth and steady

× Moving direction

Dimensions	479.3 × 135.3 × 200.9 (mm)
Weight	3.25 kg
Motor	Mabuchi, DC 13.1W, Gear ratio 71:1

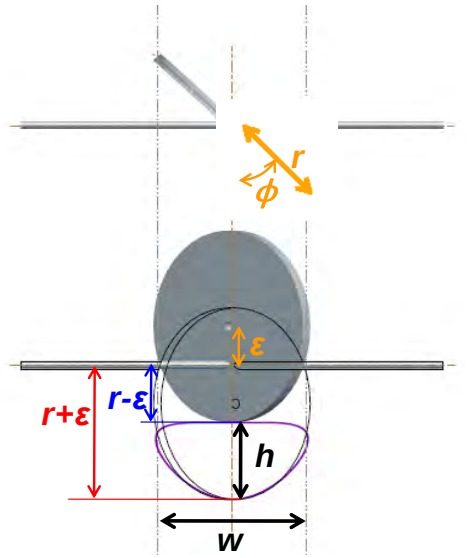
Design Factors

1. Eccentric distance ε
2. Incline angle ϕ

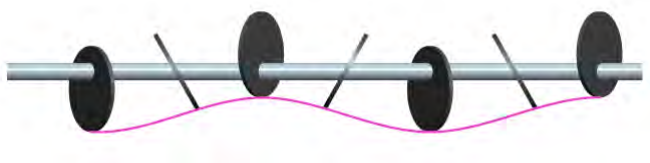
} **Size of trajectory**

Larger ε and ϕ

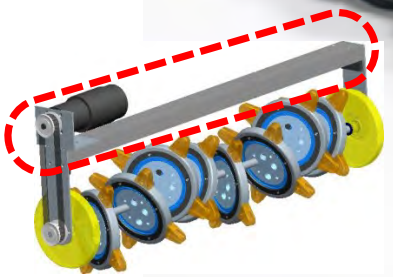
- ○ Bigger stride, higher speed
- × Require more power



3. Phase shift between adjacent plates
   - Wave length
   - Contact points
   - Torsion applied to bellows

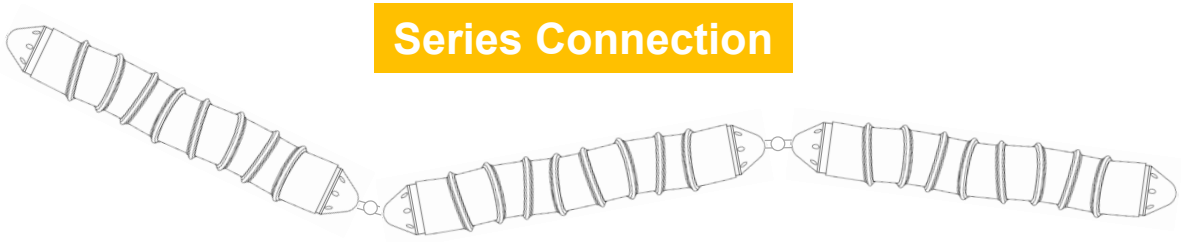


RS-Wave Mechanism with Built-in Actuator

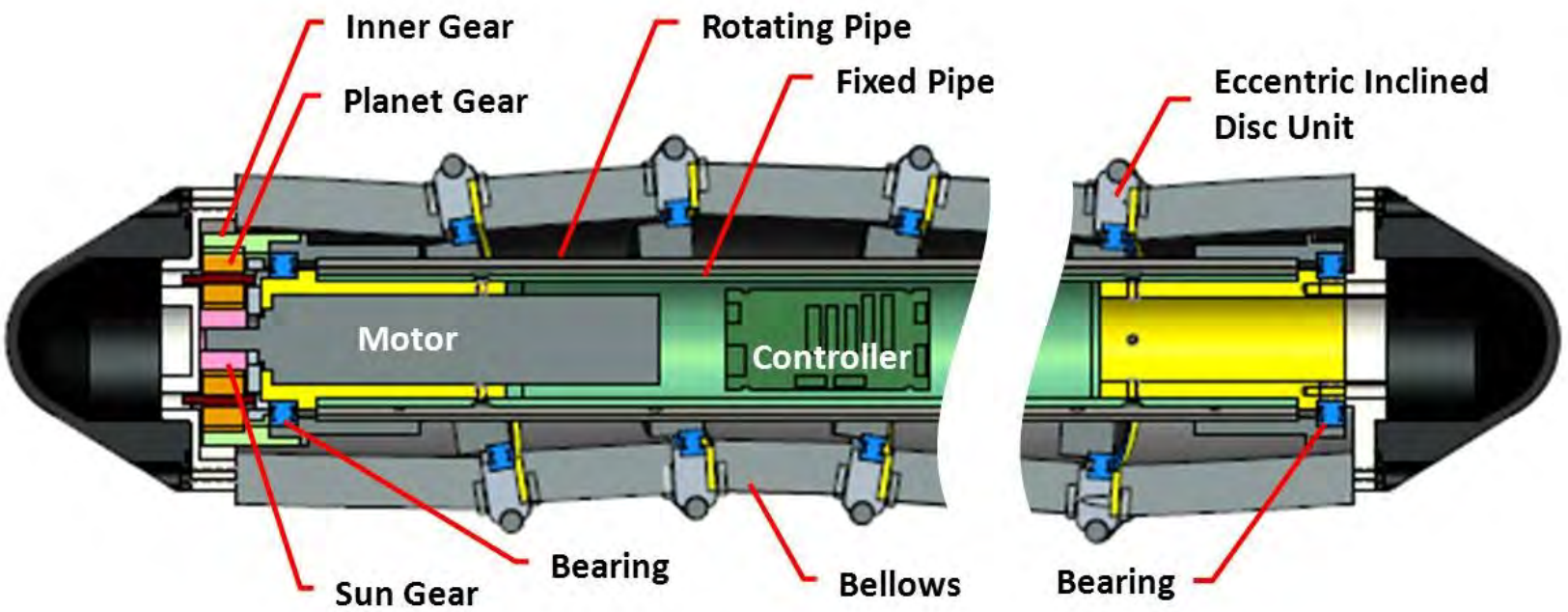


Parallel Connection

Series Connection



Structure


Inner Gear
Planet Gear
Rotating Pipe
Fixed Pipe
Eccentric Inclined
Disc Unit
Motor
Controller
Sun Gear
Bearing
Bellows
Bearing

RS-Wave Vehicle

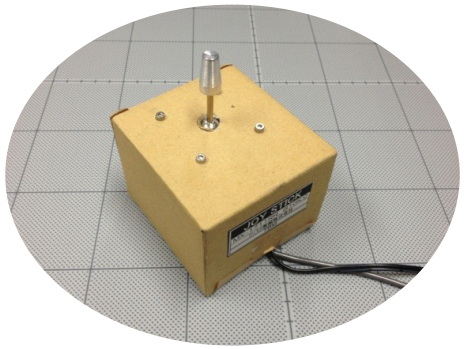






Dimensions: 592.5×243 ×88 (mm)
Speed: 84 mm/s
Weight: 6.8 kg

Motion of RS-Wave Vehicle



Direction Control

	Forward	Backward	Right Rotation	Left Rotation
Motor 1 (R)	CW	CCW	CCW	CW
Motor 2 (L)	CCW	CW	CCW	CW



Forward/backward



Turning

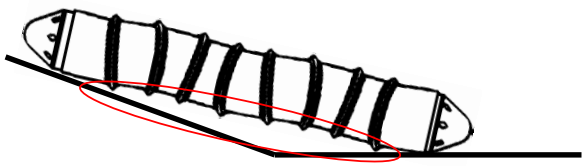
Motion of RS-Wave Vehicle



Slope climbing (15°)

Climbing angle is limited by

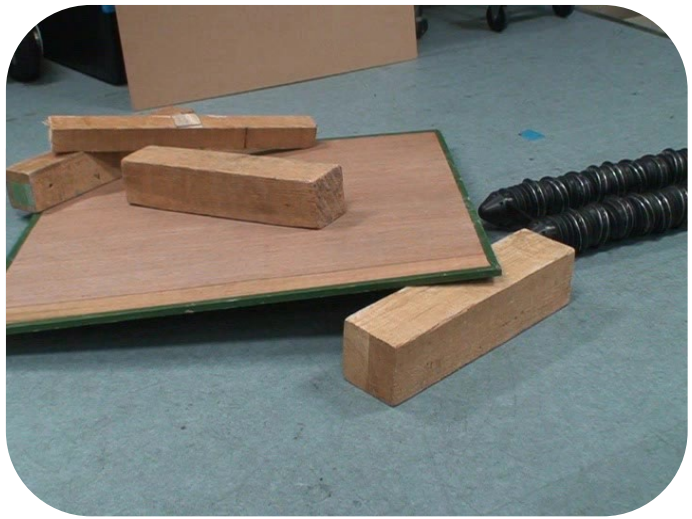
1. Rigid body



2. Lack of friction

Motion of RS-Wave Vehicle





It can enter / escape from narrow space easily.

Motion of RS-Wave Vehicle



keep moving after flipped over

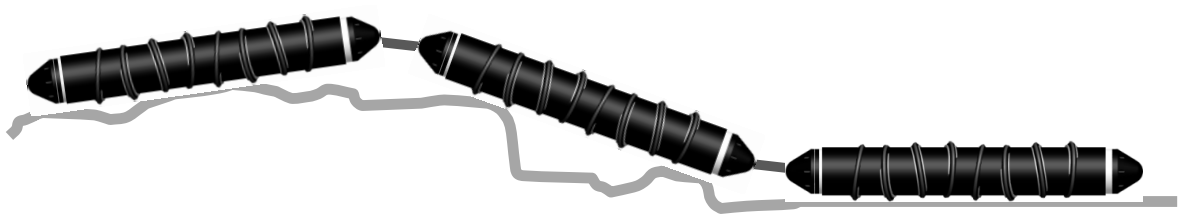
Motion of RS-Wave Vehicle

Underwater

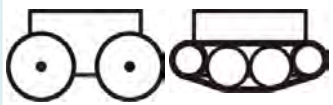
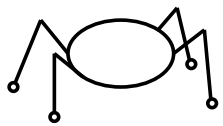


Experimental Result

● Max. speed	**84 mm/s**
● Max. angle of ramp climbing	**15°**
● Max. height of step climbing	**25 mm**
● Large Propulsive Surface	○
● Underwater	○



Propulsion Mechanism Comparison

	Wheel / Crawler	Leg	RS-Wave
			
● Required Actuators	△	×	○
● Efficiency	○	△	△
● Water/Dust Protection	△	△	○
● All-surface Propulsion	×	×	○
● Terrain Adaption	△	○	×

○: Good △: Fair ×: Poor

Conclusion

- A novel propulsion mechanism, “RS-Wave mechanism,” was introduced.
- A mobile robot with RS-Wave mechanism was made, and several motion experiments were presented.
- Future works:
  - Improve the mobility and efficiency of RS-Wave mechanism.

Thanks for your attention!