平成２４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 24 年 11 月 7 日～11 月 8 日

東京・機械振興会館

主催：一般社団法人　日本建設機械施工協会

後援：経済産業省、国土交通省

独立行政法人　土木研究所、公益社団法人　土木学会
公益社団法人　地盤工学会、一般社団法人　日本機械土工協会、一般社団法人　日本機械学会、一般社団法人　日本建設機械工業会、一般社団法人　日本測量機器工業会、建設機械新聞社、日刊工業新聞社、建設機械新報社、日刊建設通信新聞社（順不同）

論文審査規定概要

１．　審査方法

論文アブストラクト及び本論文の２段階で行い、アブストラクトについては全審査員が全編を審査し、論文については１編あたり５名の審査委員が審査を行う。

下記の審査基準に基づき、審査委員会が採択の判断を下した場合に採択される。

２．　審査基準

新規性、有用性、完成度、信頼度並びに本シンポジウムの主旨に合致するかどうかの視点で採否の判断を行う。

３．　審査委員名簿（委員五十音順・敬称略）

	委員名	機関名	所属・役職
委員長	建山和由	立命館大学	理工学部　環境システム工学科　教授 工学博士
副委員長	高橋　弘	東北大学	大学院環境科学研究科環境科学専攻 教授　工学博士
委員	稲垣　孝	国土交通省	関東地方整備局　企画部施工企画課長
委員	小薬賢一	西尾レントオール(株)	東京支店　アドバイザー
委員	小室　洋	キャタピラージャパン(株)	販売促進部長
委員	斉藤秀企	コマツ	開発本部　商品企画室　ﾌﾟﾛﾀﾞｸﾄ･ﾏﾈｰｼﾞｬｰ
委員	竹内幸弘	(株)ﾄﾌﾟｺﾝｿｷｱﾎﾟｼﾞｼｮﾆﾝｸﾞｼﾞｬﾊﾟﾝ	テクニカルサポート部課長
委員	竹之内博行	(一社)日本建設機械施工協会	施工技術総合研究所　技師長
委員	田中利昌	日立建機㈱	建設システム事業部　技術部　部長
委員	玉石修介	(一社)日本機械土工協会	技術委員長　工学博士
委員	中島嘉幸	㈱アクティオ	取締役　東京支店長
委員	行川恒弘	㈱前田道路	工事事業本部工務部部長　機械センター長
委員	西脇徹郎	(一社)日本建設機械施工協会	標準部長
委員	藤野健一	(独)土木研究所	技術推進本部先端技術チーム　主席研究員
委員	前原信之	(一社)日本建設機械施工協会	技術部長
委員	増子文典	㈱大成建設	土木本部　機械部長
委員	溝口孝遠	コベルコ建機(株)	顧問　工学博士
委員	宮武一郎	国土交通省	総合政策局公共事業企画調整課　企画専門官

（一社）：一般社団法人

平成 24 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．河道閉塞災害への「呼び水サイフォン排水装置」の提案
（起動力は「水の力」！）　・・・・・・　1
㈱山辰組　○馬渕和三
日鐵住金建材㈱　岩佐直人
岐阜大学応用生物科学部　平松　研

２．土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の効率的な浄化と減容化　・・・・・・　7
清水建設㈱　○毛利光男、土田　充、中嶋卓磨

３．携帯電話通信による超長距離遠隔操作実証実験の報告　・・・・・・　１３
㈱フジタ　○野末　晃、三鬼尚臣、渋谷光男

４．建設機械遠隔操作の習熟に関する研究
（建設機械の搭乗及び遠隔操作時における作業効率・精度に関する考察）・・・・・・　１９
(独)土木研究所　○茂木正晴、藤野健一、西山章彦

５．災害対策用照明装置の開発
（機動性と遠隔照射能力を有する災害現場対応の照明装置）　・・・・・・　２５
国土交通省九州地方整備局九州技術事務所　牧野千代春、平川良一
日本建設機械施工協会　施工技術総合研究所　○佐野昌伴

６．既存施設直下地盤の液状化対策工法
（バルーングラウト工法）　・・・・・・　２９
東亜建設工業㈱　○大野康年

７．多様な災害に向けた無人化施工技術の開発と適用
（ＩＣＴを活用した多種・多数機械の遠隔操作）　・・・・・・　３３
鹿島建設㈱　○領木紀夫、川音一郎、伊東　真

８．ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式を適用した３DMC の実用化　・・・・・・　３９
大成ロテック㈱　○島田　拓、平野　晃、田中　純

９．ＧＰＳを利用した超高層タワー鉛直精度管理技術の開発
（世界最高高さの自立式電波塔建設工事に国内初適用）　・・・・・・　４５
㈱大林組技術研究所　○池田雄一
㈱大林組東京支店　田辺　潔
㈱大林組本社　原田恒則

10．同心円状レチクル内蔵 TS の開発と斜杭打設システムへの応用　・・・・・・　５１
関西工事測量㈱　○中庭和秀
大阪大学　矢吹信喜
住友金属工業㈱　阿部幸夫

11. 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）・・・・・・ ５７
国土交通省国土技術政策総合研究所情報基盤研究室 ○梶田洋規、北川 順、重高浩一
12. 小型締固め機械に搭載された加速度応答システムの適用性
（砂質土・礫質土においての実験結果） ・・・・・・ ６１
(独)土木研究所 ○橋本 毅、藤野健一
鹿島道路㈱ 山口達也
13. 舗装工の施工管理における効率的ＩＣＴ活用について ・・・・・・ ６５
国土交通省関東地方整備局 二瓶正康、坂本鋼三、○小川拓人
14. 億首ダム本体建設工事におけるダムＩＣＴ施工総合管理システムの適用 ・・・・・・ ６９
大成建設㈱技術センター ○江田正敏、松本三千緒、片山三郎
15. 情報化施工における準天頂衛星（みちびき）を用いた
RTK 測位の精度検証について ・・・・・・ ７５
㈱間組技術研究所 ○黒台昌弘
16. 情報化施工技術を活用した工事の成績評定結果の分析 ・・・・・・ ８１
国土交通省国土技術政策総合研究所 ○渡辺健一、塚原隆夫、市村靖光
17. シールドトンネルのプロダクトモデルの開発と応用 ・・・・・・ ８５
大阪大学 ○矢吹信喜
㈱コンポート 有賀貴志
㈱大林組 古屋 弘
18. ＩＣＴを用いた盛土の新たな施工管理手法について ・・・・・・ ９１
国土交通省関東地方整備局関東技術事務所 ○島田光之
19. 情報化施工現場における問題事例の整理 ・・・・・・・ ９７
一般社団法人 日本機械土工協会 ○技術委員会
20. 多機能型コンクリート舗装機械の開発
（シリンダフィニッシャの多機能性検討） ・・・・・ １０１
大成ロテック㈱ ○田中 純、平野 晃、関口 峰
21. 締固め作業におけるロール振動転圧機構と平面振動締固め機構の機能特性比較
（クローラ式振動コンパクタ深層締固め機能の有効性） ・・・・・ １０７
鹿島道路㈱ ○福川光男
22. 締固め管理手法に基づく盛土のり面の品質評価とその現状 ・・・・・・ １１１
九州大学大学院 ○安福規之
㈱浅川組 谷山 充
福井大学大学院 小林泰三
23. 油圧ブレーカの打撃エネルギーを利用した
バックホウによる法面締固め技術の開発 ・・・・・・ １１７
福井大学大学院 ○小林泰三
㈱浅川組 谷山 充
九州大学大学院 安福規之

24. 打撃破壊方式による岩盤切断機（インパクトカッター）の開発 ・・・・・・ １２１
呉工業高等専門学校 ○重松尚久
㈱松浦建設 松浦一正
㈱スターロイ 小田 登
25. 超低空頭場所打ち杭工法の開発と駅改良工事への現場導入 ・・・・・・ １２５
鉄建建設㈱ ○竹田茂嗣
東日本旅客鉄道㈱ 和田旭弘、小池 明
26. 地下ダム施工における地盤評価装置の開発 ・・・・・・ １２９
大成建設㈱技術センター ○近藤高弘
27. 積雪寒冷地における建設施工のバイオディーゼル燃料適合性調査 ・・・・・・ １３３
(独)土木研究所寒地土木研究所 ○平 伴斉、片野浩司、山口和哉
28. 建設機械における省エネルギー化・排出ガスクリーン化の追求
（次世代環境対応技術を搭載した油圧ショベルの開発） ・・・・・・ １３９
キャタピラージャパン㈱ ○梅谷麻里香

29. 油圧ハンマにおける打撃音低減の試み ・・・・・・ １４３
東亜建設工業㈱ ○田中ゆう子、宮﨑哲史、三輪 徹
30. 連続地中壁施工時における隅角部の安定性 ・・・・・・ １４５
中央大学研究開発機構 ○石井武司
中央大学理工学部 齋藤邦夫
31. リアルタイムアラート伝達システム
（安全情報のリアルタイム伝達システムの構築） ・・・・・・ １５１
東亜建設工業(株) ○岡山健次
32. 100m 以上の超高層建物における閉鎖型解体工法
「テコレップシステム」の開発および実施適用 ・・・・・・ １５５
大成建設(株) ○市原英樹、萱嶋 誠、梅津匡一
33. 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） ・・・・・・ １６１
鹿島道路㈱ ○端 孝之、木下洋一
34. 画像診断によるコンクリートの点検、劣化調査技術の開発と適用 ・・・・・・ １６５
清水建設㈱ ○久保昌史、ファン ウォック、前田敏也
35. ＴＳを用いた出来形管理を活用した埋設物管理手法の検討
（情報化施工で取得した３次元情報の維持管理における利用）・・・・・・ １７１
国土交通省国土技術政策総合研究所情報基盤研究室 ○北川 順、梶田洋規、重高浩一
36. 河川ポンプ設備における状態監視技術に関する研究 ・・・・・・ １７５
(独)土木研究所 ○上野仁士、藤野健一、竹田英之
37. 電磁誘導加熱による鋼橋の塗膜剥離工法に関する研究 ・・・・・・ １８１
日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 ○小野秀一
首都高メンテナンス東東京㈱ 吉川 博、岡部次美

38．車載型移動体３次元計測データを用いた道路維持管理手法の検討について　・・・・・・　１８５
立命館大学　○横山隆明
㈱アスコ　番上勝久
立命館大学　建山和由

Ⅱ　梗概集

Ⅱ－１　ポスターセッション要旨

１．自走式洗浄ロボットによる循環式除染洗浄システム
（ウォータージェット洗浄と凝集沈殿による汚染物質回収）・・・・・・　１９１
日進工業㈱　○中光真史
丸三機械建設㈱　新野富夫
ＮＰＯ法人　再生舎
２．次世代環境技術を搭載した油圧ショベル　・・・・・・　１９２
キャタピラージャパン㈱　○桑田和扶
３．河道閉塞災害への「呼び水サイフォン排水装置」の提案
（起動力は「水の力」！）　・・・・・・　１９３
㈱山辰組営業部　○馬渕　剛
日鐵住金建材㈱　岩佐直人
岐阜大学応用生物科学部　平松　研
４．重機災害撲滅のために開発したシステムのご紹介
（尊い命を守るため、安全作業の取り組み）　・・・・・・　１９５
㈱アクティオ　稲葉誠一、○吉川　晃
５．現況地形３Ｄモデルと設計３Ｄモデルのデータ活用事例
（設計照査と用地境界確認の御提案）　・・・・・・　１９７
㈱コイシ　○白石さやか、加藤　望
６．小型簡易支持力試験機（エレフット）の建設工事現場への適用
（「品質の向上」）と「施工の効率化」）　・・・・・・　１９８
ﾗﾝﾃﾞｯｸｽ工業㈱　○中山憲士
㈱四国総合研究所　岩原廣彦
７．津波堆積物と廃木材チップを用いた機能性地盤材料の開発　・・・・・・　２００
東北大学大学院環境科学研究科　○栗原弘樹、里見知昭、高橋　弘
８．情報化施工（３Ｄ－ＭＣ）最新機器の紹介　・・・・・・　２０２
㈱トプコン　竹内幸弘、○木村徳宏
９．カメラ式舗装高さ自動制御システムの開発
（カメラアイシステム）　・・・・・・　２０４
㈱ＮＩＰＰＯ生産技術機械部　○大西秀樹、高橋幸男、西舘　愛
１０．力仕事のパートナーとしてのコンパクト油圧式ロボット台車の提案　・・・・・・　２０６
立命館大学理工学部　○玄　相昊、鈴木裕太、末若大輔

Ⅱ－２　施工技術総合研究所研究発表

S1. 蛇腹式防水シート工の開発　・・・・・・　２０８

施工技術総合研究所研究第一部　○鈴木健之

藤森工業㈱　高橋俊昭

岐阜工業㈱　稲川雪久

S2. 橋梁のコンクリート床版防水システムに関する研究　・・・・・・　２１２

施工技術総合研究所研究第二部　○榎園正義、谷倉　泉、三浦康治

S3. ICT 搭載型無人化施工機械の施工性検証試験結果について　・・・・・・　２１８

施工技術総合研究所研究第三部　○鈴木勇治

S4. 地盤振動の伝搬経路対策と振動低減効果　・・・・・・　２２４

施工技術総合研究所研究第四部　○齊藤聡輔、佐野昌伴

施工技術総合研究所研究第二部　設楽和久、谷倉　泉

Ⅱ－３　研究開発助成成果報告

１.「電磁界を利用した高張力ボルトの緩み検査センサの開発」　・・・・・・　２２８

大分大学工学部　機械・エネルギーシステム工学科　後藤雄治

２.「柔軟な力制御によるミニショベル掘削作業の知能化に関する調査研究」・・・・・・　２３９

立命館大学理工学部　ロボティクス学科　玄　相昊

㈱竹内製作所　粂内健吾

Ⅰ　論文集

１．河道閉塞災害への「呼び水サイフォン排水装置」の提案

起動力は「水の力」！

(株)山辰組代表取締役博士(農学)○ 馬渕和三
日鐵住金建材(株) 岩佐直人
岐阜大学応用生物科学部 平松　研

１．はじめに

地震，豪雨等により河道閉塞が発生し，二次災害が想定される場合は緊急的に仮排水路を構築する必要がある。仮排水路構築までの間は天然ダムの水位抑制対策が必要であり，その１つとして国土交通省では「大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方（提言）」[1)] において，ほとんど動力を必要とせず排水作業が可能となるサイフォン排水装置の開発の重要性が提言され，多摩川でΦ400mmの送水装置のモデル実験が行われ結果が報告されている[2)3)]。このサイフォンは起動に際し真空ポンプで充水しているが効率的に排水するためには200v，数ｋｗ程度の動力を要するものと思われる。

弊社は平成９年に水中ポンプで起動しサイフォンで稼働する「エコポンプ」を開発し実用化した。しかし，取扱いに重機と200vの電源を要することは共通の課題であると考えた。

そこで，起動力として「呼び水」を利用するサイフォン排水装置を開発し課題を解決した。この排水装置は現場の作業環境に応じて「呼び水」の注水方法を選べることを特長とする。重機や車両が進入できる場合では水中ポンプや国土交通省の災害派遣用排水ポンプ車両で本排水装置の注水合流部材を通して排水ホース内へ「呼び水」を注水しサイフォンを起動する。電源が全く無い場合，又は可搬の小型発電機しかない場合などは，それを使用して仮設の貯水タンクに給水した水を同様に排水ホースに「呼び水」として注水してサイフォン作用を起動する排水装置である。弊社では既に工事現場で小口径の装置を仮設工の水替え作業や散水作業に使用している。

弊社は天然ダムでの排水実績は無いため現場での対応方法が不明な部分も多くあるが，重機や車両が現地に侵入できない場合を想定し比較的小規模な天然ダム対策の排水装置として，人力での運搬や作業を可能とすることをねらいとして開発した。今回，越美山系山の谷第1砂防えん堤に於いてΦ200mmサクションホースを使用した「呼び水」を起動力とするサイフォン排水装置の実験等を行ったのでその成果を報告する。

２．実験の目的

一般的に作業員が災害現地で「呼び水サイフォン排水設備」の設置作業を行う場合に，電子計測器等を使用して管内の数値を確認しながらの作業は現実的ではないため，簡易な測量器具で確認できる揚程高や水頭差を確認する際の目安となる数値を求めることを目的として以下の 3 項目を挙げた。

①　「呼び水」方法によるサイフォン起動実験

柱状に組上げた「貯水タンク」の水圧を利用して排水ホース内の一定部分に「呼び水」を注水する方法でサイフォンの起動が可能か否かを確かめる実験。

②　水頭差の変化に伴う排水量確認実験

同設備を使用して吐出し口を上下することでダム貯水池との水頭差を段階的に変化させて排出量の変化を測定。

③　サイフォンによる限界揚程高の確認

Φ60 ㎜のサクションホースを使用しダム貯水池からの揚程高を段階的に大きくして，負圧下におけるサイフォン作用の揚程限界高を求める。

３．「呼び水」方法によるサイフォン起動実験

3.1　実験設備

実験設備全体図を（**図-1**）に表す。

吸水口となる上流側のホース先端に「雑物吸入防止網」を備え，砂防えん堤貯水池に水深 2m で浮遊させるフロートを取付ける。排水ホースはえん堤袖部を乗越えて下流の小段に至り，さらに下流方向へ進んで副えん堤の下流部の流路工底部で吐出し口を上向けて設置する。小段上において仮設の貯水タンク（**図-2**）から排水ホースへ「呼び水」を注水するための注水パイプが「開閉装置を備えた注水口合流部材（**図-3**）」を通して側面から合流している。

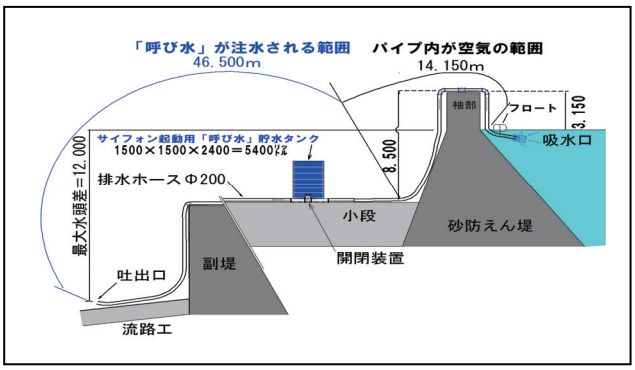


図-1　「呼び水サイフォン排水装置」実験設備図

3.2　流出した浮遊物への対策

「雑物吸入防止網」は 10cm 四角程度の堅固な網目で構成され，この網目を通った雑物は Φ20cm の吸水口から水と共に吸入して下流へ排出する。流出してきた流木など大きな浮遊物が吸水口に吸い付かないように 50cm ほどの間隔を確保することを目的としている。2～3cm 程度の細かい網目とした場合は目詰まり防止のメンテナンスを要するため 10cm 程度とした。吸水ホースの水面部分が浮遊物に挟まれるのを防止するために吸水ホースの水面付近にも堅固な防護網を設けることも良い。

3.3 重機搬入が困難な場合を想定した器材選定

本呼び水サイフォン排水装置の幾つかの「呼び水」の注水方法は前述したが，今回の実験は重機・車両の搬入ができない場合を想定し，排水設備の部材も基本的に人力での小運搬が可能な器材を中心に構成した。水中ポンプ或いは災害派遣用排水ポンプ車輌の代わりを果たす仮設の貯水タンクは，コンクリート打設用の型枠で人力小運搬のできる一般的なメタルフォームを使用，任意の大きさに組み立てることができる（**図-2**）。

図-2　型枠用部材で組上げた仮設タンク

部材 1 枚の大きさは横 1500mm×縦 300mm×厚 55mm，参考重量 13.7kg/枚である。これを組合わせて最終的にメタルフォーム 32 枚を使用し，底辺 1500mm×1500mm×高 2400mm＝容量 5400ﾘｯﾄﾙの仮設の貯水タンクを設置し，内部 5 面を 1 枚のブルーシートで覆って水密性を高めた。本実験の場合，貯水タンクの容積としては排水ホースの総延長 60.65m に対して，「呼び水」を注入する部分が 46.5m（総延長の約 77%）となっているため，排水ホース断面 0.0314 ㎡×46.5m＝1.46 ㎥（容積）となる。本実験で開閉装置は（**図-3**）の物を使用したが，開閉作業に各 1 分程度を要しジャストタイムで開閉できない。このため開閉作業中に流れる水が必要となるためメタルフォームを追加して貯水タンクの容積を排水ホースの注水部の延長の容積の約 3 倍以上の 5.40 ㎥として増加した。

開閉作業が速やかに行える開閉装置があれば「呼び水」も少なくて済み，貯水タンクの部材の運搬・組立作業も少なくて済むため省力化・省資材化のためワンタッチ開閉装置を開発中である。

3.4　注水口合流部材とその役目

貯水タンクから下流側にある排水ホース内へ注水を行いホース内が満水状態となったら注水口合流部材に備えた開閉装置（**図-3**）を閉じる。排水ホース内へ注水された「水」は引き続き流下しようとするが，貯水タンクからの注水が途絶えたため上流側の排水ホース内の空気を引き込む。砂防えん堤の貯水池に投入された排水ホースの吸水口にはストローでジュースを吸込むと同様の現象が発生する。貯水池で吸込まれた水が下流側の吐出口に到達すると排水ホース全体が満水状態で流下を続けるサイフォン作用が起動することとなる。

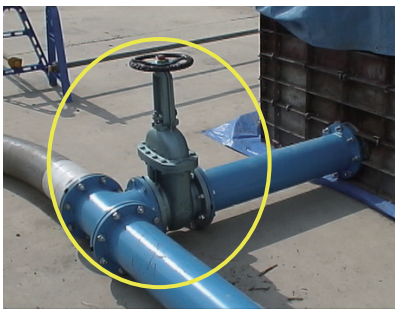


図-3　「開閉装置を備えた注水口合流部材」

「呼び水サイフォン排水装置」とは，サイフォン作用を起動する「呼び水」を排水ホースの中・下流部分へ総延長の 2/3 以上の範囲に注水する際に動力を使用するか否かを問わず，「呼び水」が流下するエネルギーで上流の貯水池の水を吸水しサイフォン作用を起動するシステムであるため「呼び水サイフォン排水装置」と命名した。

3.5　排水ホース（サクションホース）

Φ200mm のサクションホースを使用した。本資材は単位重量が 7290g/m と軽量で，単体延長が 20m で接合部が少なく気密性に優れ，製造メーカーも多数存在し規格も統一され調達し易いと考えた。

3.6　ホース相互の接続金具

ここで，従来の排水ホース相互の接続金具はタケノコ型で挿入部が先端に向かって細い筒形状のため排水ホースから抜け易いという課題があった。弊社では研究を重ね，接続金具の挿入部にボルト貫通用の孔を 4 ヵ所設けた接続金具を開発した。金具挿入後に排水ホースの同じ位置にも穴を開けてホースと接続金具と共にボルトで貫通して固定する特許取得金具である（**図-4**）。これにより、ホ

図-4　抜けない排水ホース接続金具構造

図-5　排水ホースの接合状況（テーピング）

ースをクレーンで吊り上げたり，移動のために重機で引っ張っても，ホースそのものをブラ下げ状態で通水してもホースと接続金具が抜け落ちることは無い。また，接合部は気密性をより補強するためテーピングしている（**図-5**）。

3.7　呼び水サイフォン起動実験

前述したが Φ200mm 排水ホース内全体を満水状態にすることなく「呼び水」によりサイフォンを起動できるかが実験の主目的である。

以下の手順で実験を行った。

① 仮設の貯水タンクへの給水方法は（**図-2**）の手前の送水パイプを使用し 2 インチのエコポンプで給水した。

② 給水完了後，貯水タンクと連結してある注水口合流部材に備えた開閉装置（**図-3**）を開いて排水ホースへ一気に「呼び水」を注水する。

③ 注水当初は排水ホース下流側吐出し口には白い空気混じりの水が出てくるが，1 分程度で透明になるので、そのタイミングで（**図-3**）の開閉装置を素早く閉じる。

④ 開閉装置を閉じると，流下する水と排水ホース内の空気と綱引き状態となるため数秒間は「止まったか」と思うほど流れ出る流量が減少する。

⑤ ダム貯水地の水を呼び込んでサイフォン作用で流れ始めると流量は水頭差 12m 場合 8.74 ㎥/min となり Φ200mm 水中ポンプの標準的流量の約 2 倍の排水能力となる（**図-6**）。

図-6　サイフォン作用による排水状況

4．水頭差の変化に伴う排水量確認実験

この排水設備で下流部吐出し口の高さを上下に段階的に変化させて，上流部の貯水池の水面との各水頭差毎の排水量測定を超音波流量計（ポータフローX）を使用し実施した。各水頭差毎の測定回数 3 回の平均値，及びベルヌーイの定理[4)]により算出した流量を理論値として併記し、実測値との比率も示した（**表-1**）。理論値算出にあたり、吸込み口の形状損失係数は 0.5，配管曲がり部の形状損失係数は 0.2，配管の損失係数は 0.03 とした。

表−1　水頭差と Φ200 ㎜サイフォン排水量

実測値	水頭差（m）	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	流速平均（m）	1.13	1.60	2.07	2.44	2.79	3.15	3.47	3.75	3.89	4.07	4.32	4.50
	流量（㎥/min）	2.18	3.12	4.01	4.75	5.42	6.12	6.74	7.26	7.55	7.91	8.38	8.74
理論値（㎥/min）		2.47	3.50	4.28	4.94	5.53	6.05	6.54	6.99	7.41	7.82	8.20	8.56
理論値との比率（%）		88.4	89.0	93.7	96.1	98.0	101.2	103.1	103.9	101.8	101.2	102.2	102.1
理論値と実測値との流量比率平均=98.4%													
水中ポンプ口径		Φ150㎜		Φ200㎜								Φ250㎜	
標準的流量		2 ㎥/min		4 ㎥/min 以上の排水量								8㎥/min	

理論値に対する実測値の比率は 98.4%となり，実測値と理論値はほぼ同じ結果となった。

また，各水頭差毎の排水量の実測値を水中ポンプの一般的な排水能力と比較したものを（表-1：下 2 行）に表す。

○水頭差 1.0m(2.18 ㎥/min)で Φ150 ㎜水中ポンプ(排水量 2 ㎥/min)と同等以上。

○水頭差 3.0m(4.01 ㎥/min)で Φ200 ㎜水中ポンプ（排水量 4.0 ㎥/min）。

○水頭差 11.0m(8.38 ㎥/min)で Φ250 ㎜水中ポンプ（排水量 8 ㎥/min）と同等以上。

となり，排水計画の参考とすることができる。

５．サイフォンによる限界揚程高測定実験

5.1　頂部圧力測定実験及び気化状況確認方法

リボンテープと圧力計（HTVC-100kp）を取付けたサイフォン試験管（**図-7 左**）の上下流側に口径Φ60 ㎜の透明サクションホースを取付け，えん堤上流側の吸水部にエコポンプを装着し貯水池に浸ける。もう一方は袖部を挟んで下流側小段へ降ろす。サイフォン試験管に取付けた圧力計の数値はケーブルを介して静ひずみ測定器 TDS-303（**図-7 右**）により測定を行った。

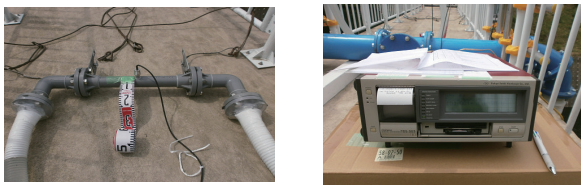


図-7　ｻｲﾌｫﾝ試験管と圧力計(左)と測定器(右)

実験では，サイフォン試験管をクレーンで吊上げ，0.25m～1.0m の間隔で揚程を変化させた（**図-8**）。揚程の段階毎に負圧値と流量等の測定を行うとともに気泡の発生状況を目視で確認しながらサイフォン作用が可能な揚程限界高を求めた。

図-8　負圧値測定状況（ダム上流から望む）

5.2　揚程高の変化に伴なう気泡と気化現象

測定結果を**表-2** 及び**図-9** に表す。**表-2** では各揚程における吐出側配管の内部の観察結果も記載している。

揚程 6m までは配管内に変化は無く、揚程 7m において，管内に気泡が混入し始め流下するのが確認され（**図-10**），さらに揚程を上げると気泡の発生はより激しくなり、揚程 7.5m で流れの分断が確認されたが，流れは継続していて流量の最大値 4.03 ㎥/min（揚程 6m）に対し 3.60 ㎥/min と 89.3%≒約 90%の流量が保たれている。流れの分断の増大は（**図-11**）に示すように、空洞が形成されて明瞭に水面が視認されるようになり，その水面にサイフォン試験管から水が落下する状態で流下し流れは継続している。さらに揚程を上げると、吐出側配管の流れの分断位置は、吐出し口からの水柱高さを一定に保つような挙動（空洞の範囲が大きくなる）を示した。揚程を 9.25m まで上げた時点で流れが停止した。停止時の水柱高さは吐出側 9.05m，吸い込み側 8.55m であった。貯水池水面からの揚程高の増加に伴い負圧値はマイナスに大きくなり続けるが，揚程高 7.0m を超えた時点で増加割合が小さくなり，その後は 90kPa 付近でほぼ一定となった。

表-2　揚程高と頂部圧力・流量の結果表

揚程(m)	流量(L/s)	頂部圧力		気泡発生時吐口側水柱高さ(m)	吐出側管内の観察
		水柱換算(m)	kPa		
5.00	3.97	-6.69	-65.6	－	変化なし。
6.00	4.03	-7.72	-75.7	－	変化なし。
7.00	4.00	-8.97	-88.0	－	気泡が混入し始め流下するのが確認できる。
7.50	3.82	-9.13	-89.5	10.40	気泡の発生が激しく、塊状に確認できる。
7.75	3.60	-9.18	-90.0	10.85	流れが分断され、水面が確認できる。
8.00	3.31	-9.19	-90.1	10.40	分断されているが、未だ流れている。
8.25	2.99	-9.22	-90.4	－	揚程を上げると、分断された水面は一定の高さ（水柱10.4m～10.8m）を維持するように挙動する。流れは継続している。
8.50	2.66	-9.22	-90.4	－	
8.75	2.25	-9.26	-90.8	－	
9.00	1.72	-9.28	-91.0	10.80	
9.25	－	－	－	9.05	流れは完全に停止し、水柱が残っている。水柱の高さは9.05m。
8.00	－	－	－	－	揚程を徐々に下げると8.0mにて再び流れ始めた。

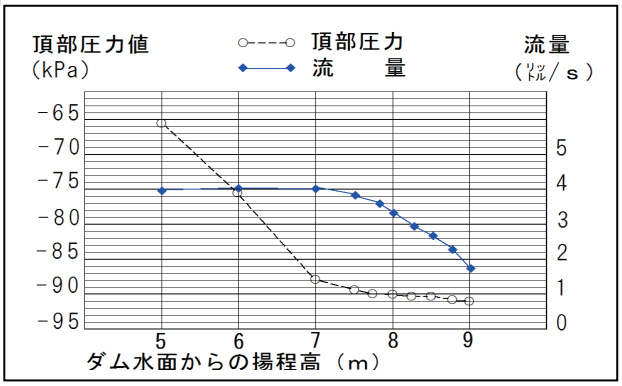


図-9　頂部圧力と流量の変化表

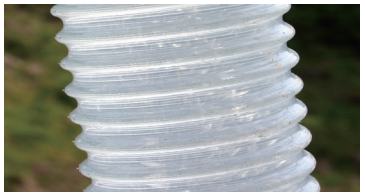


図-10　揚程高 7.0m で流下する微量の気泡

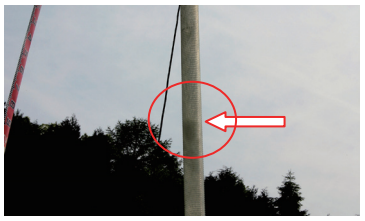


図-11　空洞が形成された流れの分断部分

5.3　流量測定方法

流量測定は、底辺 1.0m×底辺 1.0m×高さ 0.5m＝容積 500 ﾘｯﾄﾙの容器を使用し，容器が満水になる時間をストップウォッチで計測して算出した（**表-2**）。実験当初から 4.0ℓ/ｓとほぼ一定の数値を保っていたが揚程高が 7.0m を超えた時点から減少を始めた。実験値が得られたのは揚程高が 9.0m までで

あった（**表-2**），（**図-9**）。

5.4　気化状況の変化と限界揚程高

揚程高と気化現象実験の結果により，サイフォン排水作業を計画するには吸入側の揚程高は安全側をみて7.0m前後とし激しい気化現象が発生しない状態で行う事が望ましい。この状態で排水ホースの配管延長に伴いどれだけの水頭差を設けることが，より効率の良い状態でのサイフォン排水作業を行う装置となるかを試算する事ができる。

６.「呼び水サイフォン排水装置」による排水計画

6.1　天然ダムを想定した排水計画の目安

これらの実験結果と併せ，天然ダムのサイフォン排水計画の参考資料として，排水ホースの延長毎に基準となる水頭差を求めるため，各延長毎の配管頂部圧力と排水量を土木工学ハンドブック [4] を参考にして(**表-3**)，（**図-12**）のように算出した。

表-3（-1・-2）揚程高 7mの配管頂部圧力制限を考慮した排水量表

表-3-1　水頭差と延長による排水量(㎥/min)

口径Φ200mm	水頭差 単位(m) \ 延長(m)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
	20										
	18									7.72	7.38
	16								7.66	7.28	6.96
	14							7.57	7.16	6.81	6.51
	12						8.02	7.46	7.01	6.63	6.31	6.03
	10					7.96	7.32	6.81	6.40	6.05	5.76	5.50
	8				7.87	7.12	6.55	6.09	5.72	5.41	5.15	4.92
	6			7.72	6.81	6.16	5.67	5.28	4.96	4.69	4.46	4.26
	4	7.46	6.31	5.56	5.03	4.63	4.31	4.05	3.83	3.64	3.48
	2	5.28	4.46	3.93	3.56	3.27	3.05	2.86	2.71	2.57	2.46

表-3-2　水頭差と延長による配管頂部圧力(m)

口径Φ200mm	水頭差 単位(m) \ 延長(m)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
	20										
	18									-9.23	-9.03
	16								-9.19	-8.98	-8.81
	14							-9.14	-8.92	-8.73	-8.58
	12						-9.40	-9.08	-8.84	-8.64	-8.49	-8.36
	10				-9.36	-9.00	-8.73	-8.53	-8.37	-8.24	-8.13
	8			-9.31	-8.89	-8.60	-8.39	-8.22	-8.09	-7.99	-7.90
	6		-9.23	-8.73	-8.42	-8.20	-8.04	-7.92	-7.82	-7.74	-7.68
	4	-9.08	-8.49	-8.16	-7.95	-7.80	-7.69	-7.61	-7.55	-7.50	-7.45
	2	-8.04	-7.74	-7.58	-7.47	-7.40	-7.35	-7.31	-7.27	-7.25	-7.23

ここで，（**表-2**）の微量な気泡が混入し始めた揚程高 7.0m では水柱換算-8.97m，頂部圧力-88kPa，流量は 4.0 ㎥/s と減少傾向になる手前であるため，頂部圧力の水柱換算の検討基準数値を-8.97≒-9.0m とした（**表-3-2**）。

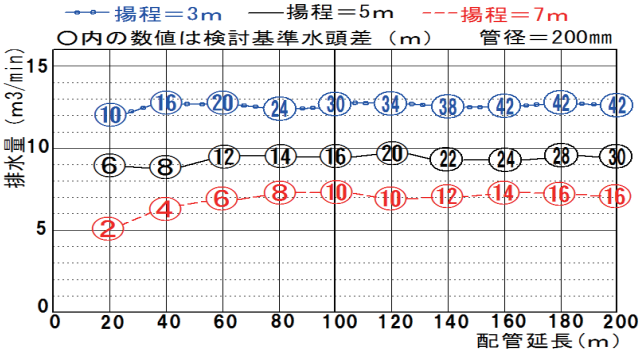


図-12　揚程と配管延長と排水量の関係図

計算に際し吸水側の揚程高は 7m，5m，3m の 3 段階で算出した。また配管延長の単位はサクションホースの 20m 単体長さに合わせて 20m～200m として試算した。吸水側勾配を 1:2 として揚程 7m の場合 15m の吸水側ホース配管を必要とする。

対象とする天然ダムの規模に応じて（**表-3**），(**図-12**)を参考にして①水頭差，②排水ホース配管延長，③排水量，④多条配管本数，⑤仮貯水タンクの大きさを試算し計画することができる。

6.2　具体的な排水計画の試算例

2011 年に和歌山県田辺市熊野（いや）で発生した天然ダムの規模（近畿地方整備局調査結果：2011/9/10 時点）は堰止め高さ 60m，堰止め長さ 250m となっていた。堰き止め湖への流入量を仮に 1.25 ㎥/s とすると 75 ㎥/min の流入量になる。天然ダム天端での揚程高 7m に水位が上昇してからの排水作業を起動水位とし 10m 毎に水頭差を増大した場合の排水ホースの各配管延長図（**図-13**）を作成し（**図-12**），（**表 3-1**）と併せて検討する。

●排水ホース配管最短延長：（**図-12**）でわかるように同一揚程高の場合，配管の延長を伸ばして水頭差を大きくしても排水量には大きな増大が見込めないので，最小限の設備で最大の排水作業ができる排水設備を検討する必要がある。

揚程高 7m の（**表-3-1**）の排水量とし。配管延長 120m（6.81 ㎥/min）と 140m（7.01 ㎥/min）では排水量は 3%程度と殆ど差が無い。ただし（**図-12**）で延長 140m の検討基準水頭差は 12m であり（**図-13**）のように延長を 140m とし水頭差を 20m とすると排水量効率が低下する。最適延長は 120m で検討基準水頭差 10m，1 条あたりの排水量は（**図 3-1**）より 6.81 ㎥/min となる。流入量 75 ㎥/min÷6.81 ㎥/min＝11.01≒11 条配管となる。サクションホースの必要本数は，配管延長 120m×11 条＝1320m÷20m/本＝66 本となる。

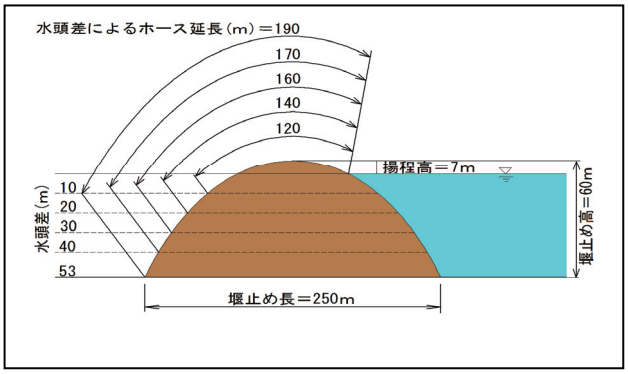


図-13　水頭差毎の配管延長想定図

●水位上昇と排水ホースの延長効果：ただし，降雨等により堰止め湖の水位が上昇した場合、揚程高が減少し水頭差は大きくなり排水量が増大する。

揚程高 3m となった場合は（**表-4**）により検討基準水頭差は 34m となるため地形的条件が許せば同じ 120ｍの延長のまま吐出し口の位置を下げて水頭差 34m を確保して排水量 12.56 ㎥/min として約 1.84 倍にすることができる。一方，地形条件によりこの吐出し口を下げることができない場合は配管延長を 40ｍ追加して 160m とすることで水頭差を 42m として排水量を 12.40 ㎥/min とする方法も考えられるが，(**図-12**)に表すように排水量の増減は配管延長よりも揚程高が大きく影響するため，延長を 160m としても排水量は 120m の 12.56 ㎥/min と殆ど変わらない。このため，現地の地形条件を判断して追加作業方法を選択することとなる。

表-4　揚程高 3m の配管頂部圧力制限を考慮した排水量表

揚程3mの場合の水頭差と延長による排水量表（㎥/min）

口径Φ200㎜	水頭差	延長（m） 10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
	44									12.70	12.08	11.54
	42									12.40	11.80	11.27
	40								12.80	12.11	11.51	11.00
	38								12.47	11.80	11.22	10.72
	36							12.93	12.14	11.48	10.92	10.44
	34							12.56	11.80	11.16	10.62	10.14
	32						13.09	12.19	11.45	10.83	10.30	9.84
	30						12.67	11.80	11.08	10.48	9.97	9.53
	28						12.24	11.40	10.71	10.13	9.63	9.21
	26					12.83	11.80	10.98	10.32	9.76	9.28	8.87
	24					12.32	11.34	10.55	9.91	9.38	8.92	8.52
	22				13.04	11.80	10.85	10.10	9.49	8.98	8.54	8.16
	20				12.44	11.25	10.35	9.63	9.05	8.56	8.14	7.78
	18			13.38	11.80	10.67	9.82	9.14	8.59	8.12	7.72	7.38
	16			12.61	11.12	10.06	9.36	8.62	8.09	7.66	7.28	6.96
	14			11.80	10.41	9.41	8.66	8.06	7.57	7.16	6.81	6.51
	12		12.93	10.92	9.63	8.71	8.02	7.46	7.01	6.63	6.31	6.03
	10	13.19	11.80	9.97	8.79	7.96	7.32	6.81	6.40	6.05	5.76	5.50
	8	11.80	10.55	8.92	7.87	7.12	6.55	6.09	5.72	5.41	5.15	4.92
	6	10.22	9.14	7.72	6.81	6.16	5.67	5.28	4.96	4.69	4.46	4.26
	4	8.34	7.46	6.31	5.56	5.03	4.63	4.31	4.05	3.83	3.64	3.48
	2	5.90	5.28	4.46	3.93	3.56	3.27	3.05	2.86	2.71	2.57	2.46

●貯水タンクの大きさ：排水ホース 1 本の延長 120ｍで，「呼び水」注水範囲は延長の 2/3 以上とする。ホース断面積 0.0314 ㎡×120m×2/3＝2.51 ㎥の容積となる。メタルフォームで底辺 1.5m×1.5m×高さ 1.8m（0.3m×6 段）＝4.05 ㎥（余裕を含みホース内容積の約 1.6 倍となる）の貯水タンクを組み立てる。13 条の各排水ホースへの注水は 1 つの貯水タンクから順次行う事ができるので 1 基で良い。この多条配管起動方法は特許申請中である。

6.3　資器材の調達数と施工費試算について

前記延長 L=120m，水頭差=10m の呼び水サイフォン排水装置を設置するために必要な器材は以下に挙げられる。

① サクションホースΦ200 ㎜：20m/本，66 本
② ホース接続金具Φ200 用　132 個
③ メタルフォーム 1.5m×0.3m　24 枚
④ 開閉装置付き注水口合流部材　11 個
⑤ その他備品（小型発電機・水中ポンプ等）1 式。

施工費については，今回の実験設備の準備には必要機材を搬入後にタンク 1 基，ホース約 61m の設営に作業員 5 名が 1 日を要したが，天然ダムの場合，現場条件が不明で施工量も膨大であり概算の域を外れるため試算は控えさせて頂いた。

7.　今後の課題

頭書に記載した如く実際の災害現場での施工実績は無く、作業には想定外の事象や困難さが伴うことが予想される。人力作業を前提に考案した装置ではあるが，排水ホース専用連結金具で連結されたホースは通常の重機作業でも抜けないのが特長なので，バックホー及びヘリコプターでの吊上げ敷設作業は作業効率を一段と向上させるため選択肢のひとつとして加えてもらいたい。

また、Φ200mm 排水ホースは規格品で市場に多く出ているが，幾つかのメーカーへの調査によれば在庫は 5～10 本/社程度と少ない。調査する中あるメーカーでは在庫 50 本程度と全てのラインをΦ200mm の生産に切り替えて 24 時間体制で毎日 10 本づつを製造する体制を確約して頂けた。有事の際には不足本数を分担する速やかな製造体制や，緊急時のための排水装置敷設作業の訓練の実施など緊急時の資材調達体制と作業体制を構築しておく等の課題があるが，本工法を小規模な天然ダムを対象とするか、他の工法と組み合わせてご検討願いたい。また、災害現場で必要となる仮設電気を本排水装置の水流を利用して発電するためのマイクロ水力発電装置の開発も併せて取組んでいる。

8. おわりに

砂防えん堤での「呼び水」方式のサイフォン排水実験は成功したものの，天然ダムの排水作業に使用するためには多様な災害現地の状況把握と安全を優先した現地施工の可否判断など専門家の支援を多く必要とするためご指導を願いたい。

謝辞：本実験に関して，国土交通省中部地方整備局越美山系砂防事務所，岐阜県，揖斐川町，地元諸家地区，(株)カクイチ，(株)ビーエムアイなど関係者の皆様のご理解とご協力ご指導を賜りましたことに対して心より感謝の意を表します。

参考文献

1) 国土交通省：大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理に関する検討委員会：大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方について（提言），3.天然ダムの危機管理のあり方　3-5対策工事（2）排水対策，2009.3
2) 国土交通省関東技術事務所：武田直人： 32.大規模災害に対応するサイフォン排水技術の開発，建設の施工企画745号：pp.68～73，2012.3
3) 佐々木隆男：大規模災害対応サイフォン排水の現場適応に向けて，建設の施工企画，4月号，pp.92～95, 2012.4
4) 社団法人土木学会：土木工学ハンドブック第四版 I ,p491, 1989.11

２．土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の効率的な浄化と減容化

清水建設株式会社　　○ 毛利　光男
〃　　土田　充
〃　　中嶋　卓磨

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とそれに引き続いて発生した津波により，福島第一原子力発電所が大きな損傷を受け，大量の放射性物質が環境中に放出された。現在、環境放射能のほとんどを占めているのは，放射性 Cs (^{134}Cs, ^{137}Cs)である。原子力発電所から放出された放射性 Cs はエアロゾルなどの形で広域に移流拡散し，降雨に溶けてイオンの形で降り注いだものと考えられている。降雨に伴って地上に降下した放射性 Cs は，市街地や農耕地の土壌と草木類，道路舗装面，森林・緑地の樹木の葉や樹皮，地表の落葉や腐葉土など雨に接触する媒体へ吸着・蓄積された。

環境省は，除染とは環境中にある放射性物質による被曝量を低減させる方法である「取り除く」，「遮蔽する」，及び「遠ざける」を組み合わせて対策を行なうことであると定義し，除染によって人への追加被曝線量を年間 1mSv 以下にすることを長期的目標としている。広範囲な地域で放射性 Cs を含む表層土壌，側溝の汚泥，草木類や落葉を取り除くため，膨大な量の汚染土壌と廃棄物が集積することが予想される。このため，これらの除去物を効率的に減容化する技術が強く望まれている。

土壌洗浄法は重金属類，鉱物油などの汚染物質の多くが砂～粗砂分よりも細粒子分（粘土・シルト）に付着しやすいという性質を利用して，土壌から汚染物質を含有する細粒子分を分離，除去することによって土壌を効率的に浄化・減容化する技術である。同様に，放射性 Cs が砂～細砂分よりも粘土・シルト分に偏在している場合には，土壌洗浄法によって放射性物質汚染土壌の浄化と減容化をかなり効率的に行えると考える。

本論文は，福島県内の校庭と運動場の表層土壌を用いて，スクラビング・フローテーションを強化した土壌洗浄法の浄化と減容化の特性を実験的に検討したものである。実験に先立って，土壌における放射性 Cs の保持機構に関する文献を基に，土壌中の放射性 Cs の存在形態について考察した。これより，放射性 Cs 汚染土壌に対してはスクラビング・フローテーションを強化することが効果的であると考えた。

土壌洗浄試験では最初にロードカーブ試験を行い，土壌粒子径と含有放射能量の関係を調べた。次にスクラビングと超音波による土壌粒子の表面摩耗による含有放射能量の低減効果を調べた。この基礎的な知見を基に一連の洗浄試験を行ない，本洗浄法が放射性物質汚染土壌の効率的な浄化と減容化にどのように寄与しているのかを評価した。

２．土壌における放射性 Cs の保持機構，存在形態

土壌中では粘土鉱物や有機物の表面が負に荷電しているため，Cs^+は，K^+や Ca^{2+}などの陽イオンと同様に，この負電荷を中和する形で土壌表面に吸着する性質を有する [1]。複数の文献 [2)~10)]より考察された土壌における放射性 Cs の保持機構を**図-1** に，放射性 Cs 吸着粒子の存在形態を**図-2** に示す。

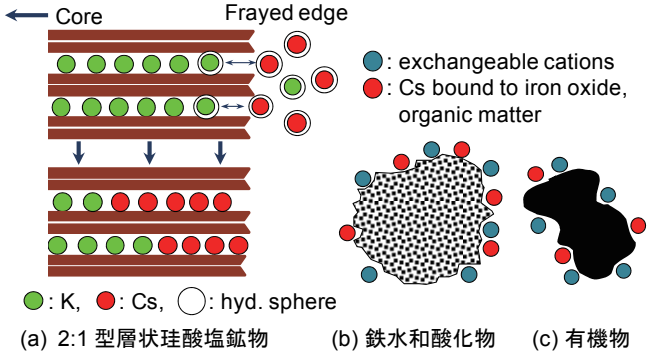


図-1　土壌における放射性 Cs の保持機構

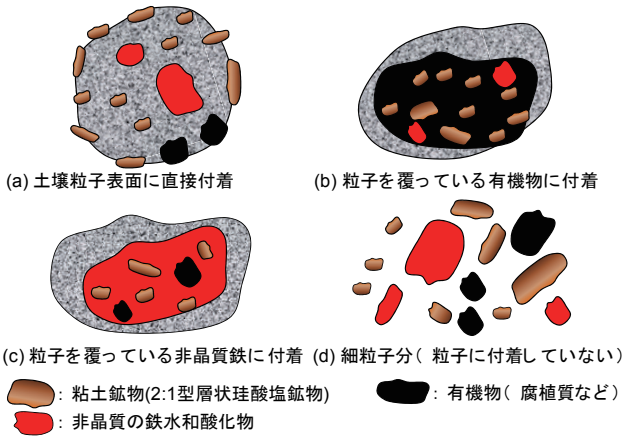


図-2　土壌中の放射性 Cs 吸着粒子の存在形態

塚田ら[5]は，土壌中の ^{137}Cs をイオン交換画分，有機物結合画分，強固な結合画分（抽出残渣）に分類した。土壌中の ^{137}Cs は，K^+，NH_4^+等の陽イオンと置き換わることができるイオン交換態が全体の 10%，有機物結合態が 20%，粘土鉱物等との強固な結合態が 70%であると報告している。

2:1 型の粘土鉱物である雲母類による放射性 Cs の特異吸着に関しては，多数の研究が行なわれてきた[2)~10)]。放射性 Cs は雲母類の風化によって部分的に膨潤した末端部(frayed edge)の層荷電に特異的かつ非可逆的に吸着されること，土壌中の雲母類の含有量が少量(1～2%)であっても大量の放射性 Cs を強く吸着できることがよく知られている[7)]。このため，強く吸着された放射性 Cs は，雨が降っても土壌表層に止まって下方へ移動しない。

雲母類以外での放射性 Cs の土壌への吸着は，粘土鉱物による陽イオン交換，水和酸化鉄や腐植質などへの吸着等によって起きると考えられている。水和酸化鉄は，雲母類と異なり，Cs を固定ではなく吸着する[7)]。Cs の腐植質への吸着は一般的に弱い[7)]。有機物に由来する負電荷に保持された Cs^+ は他の陽イオンによって置換される場合がある。

3．土壌洗浄の処理フローとスクラビング・フローテーションの概要

従来の洗浄フローの一部を強化した処理フローを図-3 に示す。土壌洗浄プラントへ運ばれた汚染土壌は，ストックヤードに仮置きされる。汚染土壌は重機によってストックヤードから受け入れバンカーへ順次投入される。受け入れバンカーに投入された汚染土壌は，湿式フルイにより 2mm 以上の礫・粗砂を取り除いた後，ハイドロサイクロン（図-4(a)）によって細粒子分（粘土・シルト）と砂・細砂分に分離される。一般的に汚染物質はその多くが細粒子分に付着・吸着しているため，細粒子分を分級することによって，砂・細砂分から汚染物質を効率良く分離，除去することができる。砂・細砂分は，スクラバー（図-4(b)）において複数の薬剤により表面処理された後，スクラビング（表面摩耗）によって土壌粒子表面から汚染粒子が効果的に剥離される。続くフローテーション（図-4(c)）において土壌中の汚染物質は，清浄な土壌粒子との表面性状の違いを最大限利用して洗浄・分離される。フローテーションによって洗浄された砂・細砂分は，スパイラルと脱水サイクロンを経て再利用が可能な洗浄処理土となる。汚染物質が濃縮されている濃縮汚染土は脱水ケーキとして処分場（放射性物質汚染土壌の場合は中間貯蔵施設での保管後に最終処分施設）へ搬出される。

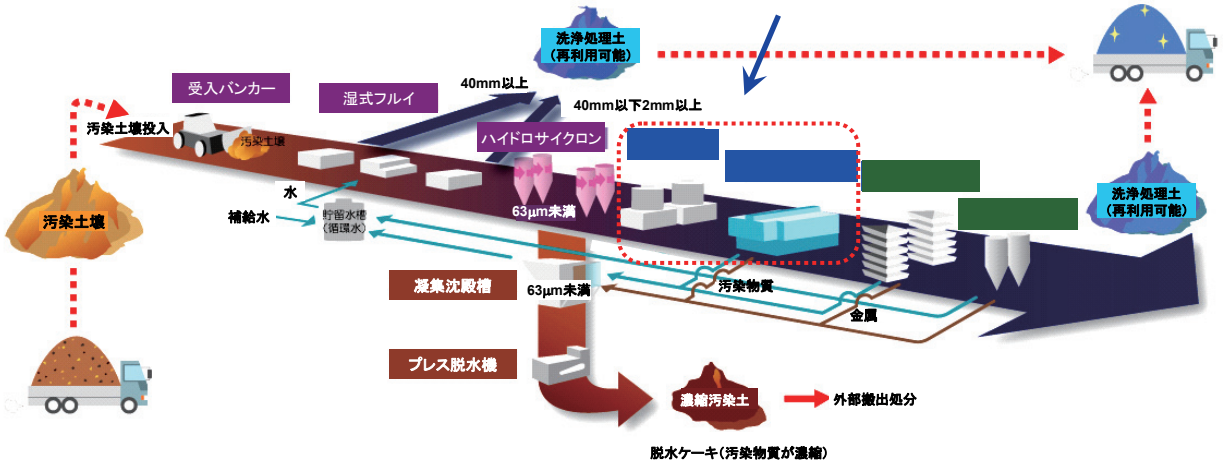


図-3　土壌洗浄の処理フロー（重金属類や鉱物油を対象とした洗浄フローの一部を強化）

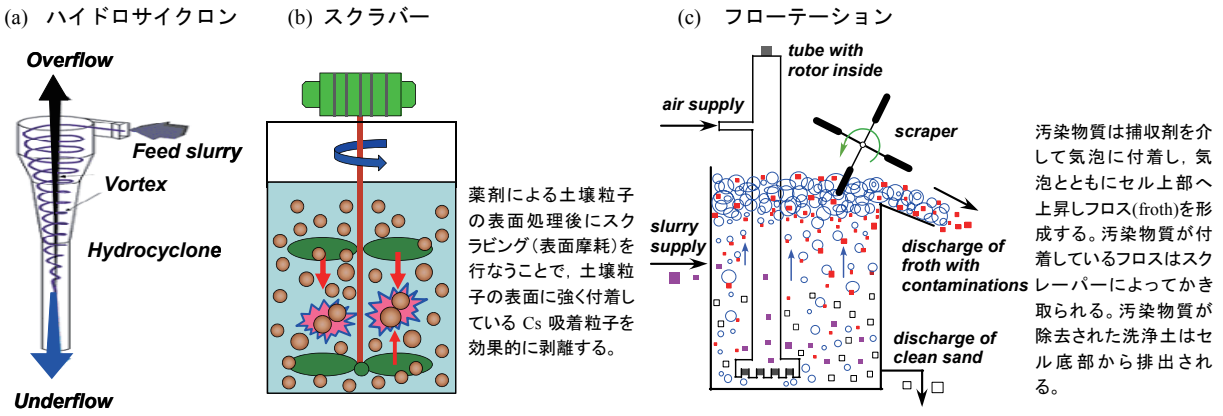


図-4　ハイドロサイクロン，スクラビング･フローテーション（スクラバー＋フローテーション）の概要

４．ロードカーブ試験，表面摩耗試験

放射性物質汚染土壌の基礎的な知見を得るために，ロードカーブ試験とスクラビング・超音波による表面磨耗試験を行った。

4.1　ロードカーブ試験

今回は，福島県内の校庭土壌に対して，湿式分級によるロードカーブ試験を行い，土壌粒子径と含有放射能量(乾燥土の ^{134}Cs+^{137}Cs)の関係を調べた。元土の含有放射能量が低濃度（7610～11350 Bq/kg）である 2 試料のロードカーブを**図−5(a)**に，中～高濃度(41700～70620 Bq/kg)である 4 試料のロードカーブを**図−5(b)**に示す。どの土壌試料についても放射性 Cs は，砂～細砂分よりも土壌粒子径が小さく比表面積が大きな粘土・シルト分に偏在していることが認められた。

前述したように，放射性 Cs の保持に寄与するのは，雲母類，粘土鉱物，水和酸化鉄，腐植質などであり，これらは粘土・シルト分に多く含まれている。既往の知見と今回のロードカーブ試験の結果とは良く合致していると考えられる。

以上より，放射性物質汚染土壌の浄化・減容化に対して土壌洗浄法が十分に適用可能であることが判明した。

4.2　スクラビング・超音波による表面摩耗試験

図−2 からは，土壌粒子表面に付着している放射性 Cs 吸着粒子を土壌粒子表面から剥離させると，土壌粒子の含有放射能量が大幅に低減することが期待される。このため，薬剤を用いないでスクラビングと超音波を用いて土壌粒子表面を摩耗し，粒子表面から放射性 Cs 吸着粒子を物理的に剥離する試験を行った。

湿式振動フルイ機を用いて，校庭土壌試料を 250μm～2mm の粒子分に篩い分けた。スクラビング試験では，スクラバー試験機を用いて 250μm～2mm の粒子分 500gr-dry に水 330mL を加えたセル内の試料に対して 1400rpm×10 分間のスクラビング（表面摩耗）を行なった。超音波試験では，超音波発信機を用いて 250μm～2mm の粒子分 100gr-dry と水 1000mL を入れた 1L ガラス瓶に対して 40kHz の超音波を 100 分間照射した。

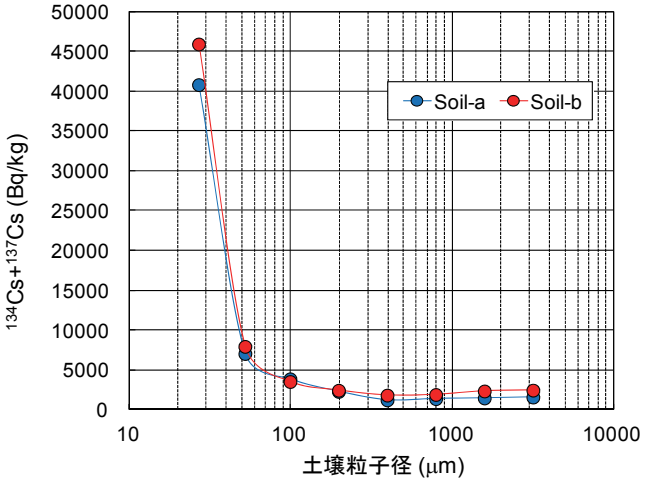
摩耗粒子発生率の定義，および摩耗粒子発生率と摩耗前後の粒子径との関係を**図−6** に示す。この関係式では，土壌粒子が球形であること，表面摩耗が均等に行なわれることを仮定している。

スクラビング・超音波を用いた土壌粒子の表面摩耗（薬剤は無添加）による放射性 Cs の低減効果を**図−7(a)**に示す。表面摩耗前後の土壌粒子径の比率と含有放射能量低減率の関係を**図−7(b)**に示す。

図−7(a)より，粒子量の 5%を摩耗すると含有放射能量低減率は約 45%，10%を摩耗すると低減率は約 70%であった。また，粒子量の 15%以上を摩耗しても含有放射能量低減率は 80%で止まった。

図−7(b)より，粒子量の 5%の摩耗は粒子径が元の 98%に，10%の摩耗は粒子径が元の 96.5%になることに相当する。これは，直径 500μm の粒子の場合には表面の 5μm～8.8μm 厚が削り取られるということを意味する。

(a)　低濃度土壌(7610～11350Bq/kg)



(b)　中～高濃度土壌(41700～70620Bq/kg)

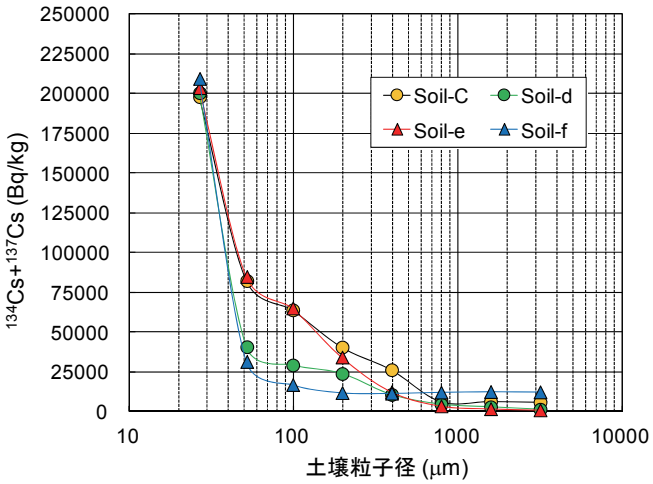
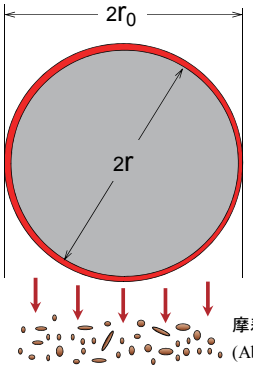


図-5　校庭土壌試料の含有放射能量のロードカーブ



$$RAL = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{4/3\pi\left(r_0^3 - r^3\right)}{4/3\pi r_0^3}$$

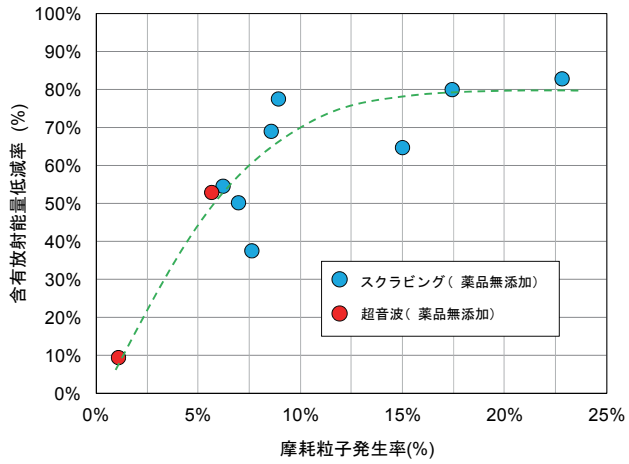
$$= 1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^3$$

$$\therefore \quad \frac{r}{r_0} = \sqrt[3]{1 - RAL}$$

摩耗粒子発生率：Rate of Abrasion Loss (RAL)
摩耗前の粒子径：r_0,　　摩耗前の粒子体積：V_0
摩耗後の粒子径：r,　　摩耗後の粒子体積：V

図-6　摩耗粒子発生率と摩耗前後の粒子径の関係

(a)　摩耗粒子発生率と放射性 Cs 低減率の関係



(b)　摩耗前後の粒子径の比率と放射性 Cs 低減率の関係

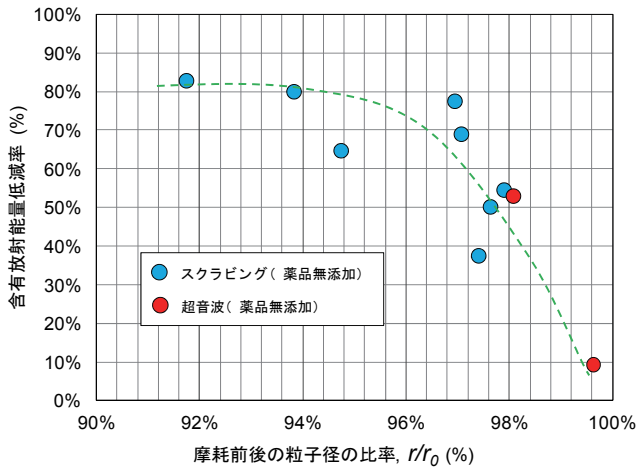


図-7　表面摩耗による放射性 Cs の低減効果

以上より，土壌粒子表面を物理的（薬剤は無添加）に摩耗し，粒子表面から放射性 Cs 吸着粒子を剥離させることは，放射性 Cs の低減に効果的であることが認められた。一方，物理的な表面摩耗のみで放射性 Cs を大幅に低減する場合には，多量の摩耗粒子が発生するという問題があることもわかった。このため，**図-4(b)**に示したように，薬剤による土壌粒子の表面処理後にスクラビングを行うことで，土壌粒子表面に付着している放射性 Cs 吸着粒子を効果的に剥離し，かつ摩耗粒子の発生量を抑制することが合理的であると考えた。

以下の土壌洗浄試験におけるスクラビング・フローテーションは，全て薬剤を添加して実験した。

5．土壌洗浄試験

土壌洗浄試験は，主要プロセスである 2 段湿式フルイ，ハイドロサイクロン，スクラビング・フローテーションのミニプラント試験機を用いて行なった。本試験では，スクラビング・フローテーションを強化した土壌洗浄法の浄化と減容化の特性を実験的に把握することを目的とした。ハイドロサイクロンのオーバーフローを主体とする洗浄排水を循環再利用するためには，良質な処理水を得る必要がある。このため，凝集沈殿試験を行い処理水の放射性 Cs 濃度の検討を行った。

5.1　土壌洗浄試験

今回は 4 試料（小学校校庭土壌×3 試料，運動場土壌×1 試料）の土壌洗浄試験を行なった。

4 試料の粒度分布試験の結果を**図-8** に示す。4 試料の 63μm 以下の細粒子分の割合は 18～26%，63μm～2mm の砂分の割合は 57～71%，及び 2～4mm の粗粒子分の割合は 9～23%であった。これらの 4 試料は，細粒子分の割合が小さいため，土壌洗浄に適した粒度構成であると判断された。

4 試料の洗浄試験の結果を**表-1** に示す。**表-1** には，分級処理（2 段湿式フルイ＋サイクロン）のみの場合と分級処理に続いて洗浄処理（スクラビング・フローテーション）を行った場合の浄化効果と減容率を比較するために，それぞれの場合の含有放射能量，除去率，及び減容率を示した。

図-9 に分級処理のみの場合と分級処理に続けて洗浄処理を行った場合の放射性 Cs の除去率を示す。除去率は，元土(Feed)の含有放射能量に対する除去された含有放射能量の割合を示している。分級処理のみによる除去率は試料によってバラツキが大きく Site-A 試料で 76%，Site-B 試料で 77%，Site-C 試料で 66%，Site-D 試料で 87%であった。分級処理に加えて洗浄処理を行った場合の除去率は試料間のバラツキが小さく 4 試料とも 90～92%であった。Site-A～Site-C の土壌試料については化学的な洗浄処理を追加することによって，放射性 Cs 除去率は 66～77%から 90～92%へと 14～25%も大幅に改善された。一方，Site-D の土壌試料については通常の洗浄処理を追加しても，除去率は 87%から 91%へと 4%しか改善されなかった。Site-D の土壌試料については，フロス発生量が大きくなる条件での洗浄処理を別途行なったところ，除去率は 87%から 9%向上し 96%となった。

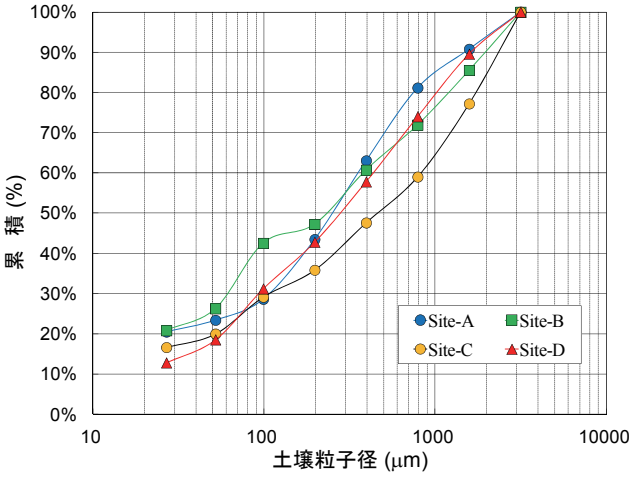


図-8　土壌試料の粒度分布（累積加積曲線）

表-1　放射性物質汚染土壌の土壌洗浄試験の結果

試料名	Feed	分級処理（2段湿式フルイ＋サイクロン）			洗浄処理（スクラビング・フローテーション）			凝集沈殿処理		採取場所
	$^{134}Cs+^{137}Cs$ (Bq/kg)	$^{134}Cs+^{137}Cs$ (Bq/kg)	除去率 (%)	減容率 (%)	$^{134}Cs+^{137}Cs$ (Bq/kg)	除去率 (%)	減容率 (%)	$^{134}Cs+^{137}Cs$ (Bq/kg)	pH (---)	
Site-A	7200	1710	76%	81%	750	90%	77%	< 10	7.5	小学校
Site-B	40900	9520	77%	78%	3290	92%	74%	< 10	7.6	小学校
Site-C	46300	15730	66%	83%	4330	91%	80%	< 10	7.8	小学校
Site-D(1)	21000	2700	87%	84%	1960	91%	81%	< 10	7.8	運動場
Site-D(2)	〃	〃	〃	〃	740	96%	73%	---	---	〃

※　Site-D(2)のスクラビング・フローテーションは，Site-D(1)よりもフロスの発生量が大きくなる条件で行なった。

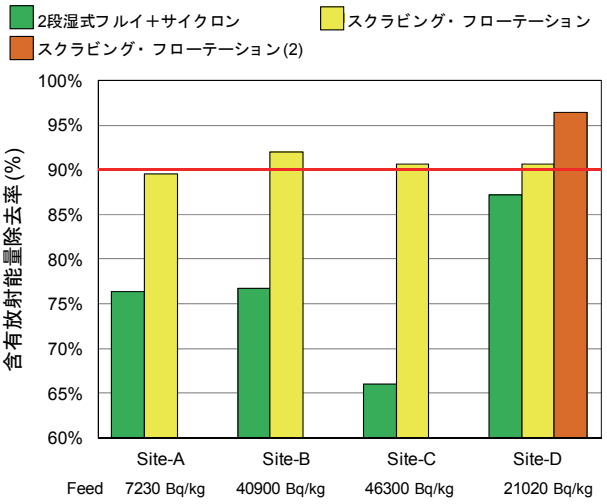


図-9　分級処理のみの場合と洗浄処理を追加した場合の含有放射能量の除去率

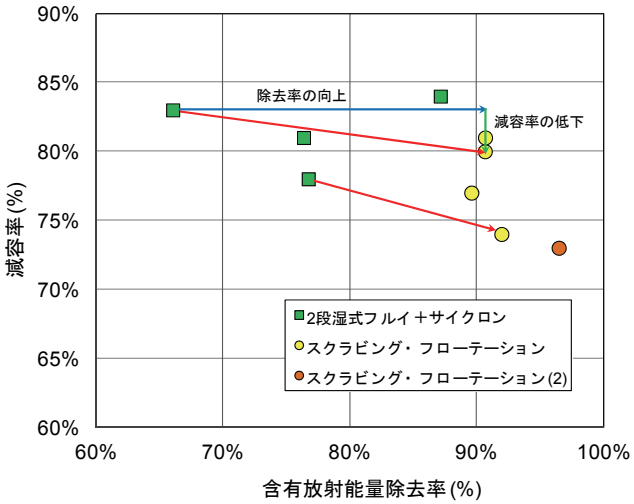


図-10　含有放射能量除去率と減容率の関係

写真-1　フローテーション試験の状況

以上より，放射性物質汚染土壌についても分級処理だけではなく，スクラビング・フローテーションを行なうことで安定して 90%以上の高い除去率が得られることが確認された。

図-10 に含有放射能量除去率と減容率との関係を示す。減容率は，元土(Feed，乾燥重量)に対する洗浄土（乾燥重量）の割合を示している。分級処理（フルイ＋サイクロン）のみよりも洗浄処理（スクラビング・フローテーション）を追加することによって除去率が大幅に向上する反面，減容率が多少低下することが認められた。今回の 4 試料については，分級処理のみの減容率は 78～84%であり，分級処理＋洗浄処理の減容率は 73～81%であった。薬剤を用いない物理的な表面摩耗（4.2 を参照）に比べて，洗浄薬剤を使用するスクラビング・フローテーションでは，濃縮汚染土となる摩耗粒子の発生量が少ないこと，すなわち減容率の低下が僅かであることが認められた。

さらに減容化を進めるためには，スクラビングによって発生する剥離粒子や摩耗粒子の中から，放射性 Cs 吸着粒子を選択的に分離する「フローテーションの選択性」を一段と強化する必要がある。フローテーションの選択性が良好な場合には，放射性 Cs の高い除去率と高い減容率の両方を満足させることが可能となる。この検討結果については，別途報告する予定である。

フローテーション試験の一例を**写真-1** に示す。写真表面に見えるのはフロス（汚染粒子を表面に付着した気泡）であり，このフロスには放射性 Cs が高濃度で含まれていた。フロス付着物を X 線回

折(XRD)で分析したところ，放射性 Cs を強く吸着することが知られている金雲母(phlogopite)が主成分であり，他に蛭石(vermiculite)，石英(quartz)，カオリナイト(kaolinite)，インド石 (indialite)などが含まれていた。約 6%含まれている鉄(Fe)は非晶質の化合物形態で含まれていると考えられた。

5.2 凝集沈殿試験

ハイドロサイクロンのオーバーフローの凝集沈殿試験を行なったところ，無色透明の清澄感のある処理水が得られた。凝集剤には，無機凝集剤（PAC，硫酸バンド）と高分子凝集剤（ノニオン系，アニオン系）の両方を用いた。**表−1**に示すように, 4試料とも処理水の放射性Cs濃度は定量下限値未満(<10Bq/kg)であった。凝集沈殿試験から，放射性物質汚染土壌の洗浄処理において土壌中の放射性Csが水にほとんど溶出しないこと，および処理水の循環再利用が十分可能であることが確認された。

６．まとめ

福島県内の校庭と運動場の表層土壌を用いて，スクラビング・フローテーションを強化した土壌洗浄法の浄化効果と減容率に関する実験的な検討を行った。主要な結果を以下に要約する。

(1) 放射性 Cs は，砂〜細砂分よりも土壌粒子径が小さく比表面積が大きな粘土・シルト分に偏在していた。

(2) 土壌粒子表面を物理的（薬剤は無添加）に摩耗し，粒子表面から放射性 Cs 吸着粒子を剥離させることは，放射性 Cs の低減に効果的であった。しかし，物理的な表面摩耗のみで放射性 Cs を低減する場合には，多量の摩耗粒子が発生するという問題があることも判明した。

(3) このため，薬剤による土壌粒子の表面処理後にスクラビングを行うことで，土壌粒子表面に付着している放射性 Cs 吸着粒子を効果的に剥離し，かつ摩耗粒子の発生量を抑制することが合理的であると判断した。

(4) 分級処理（フルイ＋サイクロン）のみによる除去率は試料によってバラツキが大きく 66%〜87%であった。分級処理に加えて化学的な洗浄処理（スクラビング・フローテーション）を行った場合の除去率は試料間のバラツキが小さく 90〜96%であった。放射能汚染土壌についてもフローテーションを行なうことで安定して 90%以上の高い除去率が得られることが確認された。

(5) 分級処理のみよりも洗浄処理を追加することによって除去率が大幅に向上する反面，減容率（減容率は，元土(乾燥重量)に対する洗浄土（乾燥重量）の割合）が多少低下した。分級処理のみの減容率は 78〜84%であり，分級処理＋洗浄処理の減容率は 73〜81%であった。

(6) ハイドロサイクロンのオーバーフローの凝集沈殿処理水の含有放射能量は定量下限値未満(<10 Bq/kg)であった。放射性物質汚染土壌の洗浄処理において，処理水の循環再利用が十分可能であることが確認された。

参考文献

1) （社）日本土壌肥料学会：土壌・農作物等への原発事故影響WG，セシウム(Cs）の土壌でのふるまいと農作物への移行，http://jssspn.jp/info/nuclear/cs.html, pp.1-2.

2) Bostick, B. C., Vairavamurthy, M. A., Karthikeyan, K. G., and Chorover, J. : Cesium adsorption on clay minerals: An EXAFS Spectroscopic investigation, *Environmental Science & Technology*, Vol.36, No.12, pp.2670-2676, 2002.

3) Sawhney, B. L. : Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: A review, *Clays and Clay Minerals*, Vol.20, pp.93-100, 1972.

4) 石川奈緒, 内田滋夫, 田上恵子：放射性セシウムの水田土壌への収着挙動における粘土鉱物の影響, Radioisotopes, Vol.56, No.9, pp.519-528, 2007.

5) Tsukada, H., Takeda, A., Hisamatsu, S., and Inaba, J. : Concentration and specific activity of fallout ^{137}Cs in extracted and particle-size fractions of cultivated soils, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol.99, No.6, pp.875-881, 2008.

6) Schulz, R. K., Overstreet, R., Barshad, I. : On the Soil Chemistry of Cesium 137, *Soil Science*, Vol.89, Issue 1,pp.16-27, 1960.

7) US EPA : Understanding variation in partition coefficient, Kd, values, Volume Ⅱ: Review of geochemistry and available Kd values for Cadmium, Cesium, Chromium, Lead, Plutonium, Radon, Strontium, Thorium, Tritium(^{3}H), and Uranium, EPA 402-R-99-004B, pp.2.1-2.3, pp.5.16-5.21, pp.D.9-D.19, 1999.

8) Cornell, R. M.：Adsorption of cesium on minerals: a review, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol.171, No.2, pp.483-500, 1993.

9) Rosso, K. M., Rustad, J. R., and Bylaska, E. J. : The Cs/K Exchange in Muscovite interlayers, An ab initio treatment, *Clays and Clay Minerals*, Vol.49, No.6, pp.500-513, 2001.

10) Jackson, M. L. : Interlayering of Expansible Layer Silicates in Soils by Chemical Weathering, *Clays and Clay Minerals*, Vol.11, pp.29-46, 1962.

11) 毛利光男，土田充，保坂幸一，馬場直紀，中嶋卓磨：土壌洗浄による放射性物質汚染土壌の浄化・減容化，第18回　地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会(CD-ROM), S1-12,　pp.55-58, 2012.

12) 毛利光男，貫上佳則：改良BCR逐次抽出法による鉛・フッ素汚染土壌の形態分析と土壌洗浄の処理特性解析，土木学会論文集G, Vol.64, No.4, pp.314-326, 2008.

３．携帯電話通信による超長距離遠隔操作実証実験の報告

株式会社フジタ　　○ 野末　晃
三鬼尚臣
渋谷光男

１．はじめに

1994 年に雲仙普賢岳で始まった無人化施工は，火山堆積物を除石することから始まり，現在ではコンクリート構造物である砂防えん堤を施工することが可能となっている。

2011 年は世界的にも未曾有な巨大地震による災害を経験し，無人化施工技術が福島第一原発の瓦礫撤去に活用された。無人化施工での技術的な課題として，無線の到達距離が短いことと無人化施工設備の立ち上げに時間が掛かり過ぎることが挙げられる。そこで最近，通信速度の高速化が顕著な移動体通信回線網（携帯電話通信）を利用した長距離遠隔操作の有効性の検証を行った。既に 2008 年 10 月に雲仙普賢岳赤松谷川上流部付近にて NTT ドコモが提供する HSDPA の携帯電話通信網を利用した長距離遠隔操作実験を実施し，従来の特定小電力無線による遠隔操作に匹敵する成果を得た[1]。 そこで，次世代高速通信 LTE（Long Term Evolution）元年と言われる 2011 年の 9 月には，HSPA を利用して，操作信号に加えて映像信号を長崎県から約 1,000km 離れた千葉県の油圧ショベルまで伝送する遠隔操作掘削実験を実施した。本論文は，前述の実験での課題，事前の屋内試験における映像伝送の遅延や超長距離遠隔操作実験での課題を整理し，その解決方法と合わせて，携帯電話通信による操作・映像信号伝送の可用性について報告するものである。

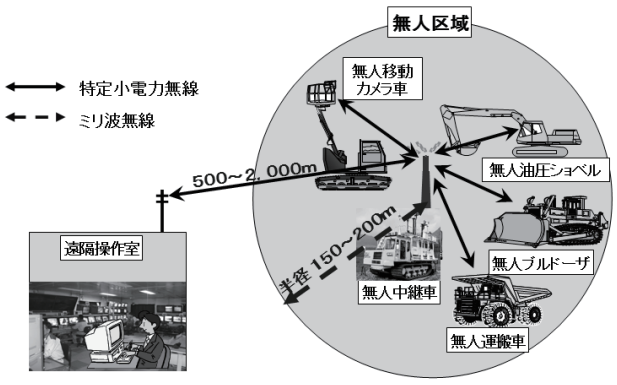


図-1　無線中継方式概要

２．超長距離遠隔操作実験の目的

2.1 無人化施工における課題

従来の無線中継方式を図-1 に示す。この方式は，特定小電力無線の到達距離が短いために比較的到達距離の長いミリ波無線を搭載した移動中継車を介して行うシステムである。

無人化施工においては施工効率と無線環境に関わる課題があり，特に無線環境に関わる課題[2]を以下に示す。

1）操作の遅れがあり，操作しにくい。
2）無線干渉により同時稼働台数が限られる。
3）150m を超える遠隔操作を行うためには中継設備が必要で準備工に多大な時間とコストがかかる。

2.2 超長距離遠隔操作実験の目的

前述の 2）と 3）の解決手段として，携帯電話通信による超長距離遠隔操作実験を行い，その可用性を検証することを目的とした。また，1）に関しても操作の遅延の解析を行うこととする。図-2 に 2008 年に実施した携帯電話通信による遠隔操作実験のシステム構成図を示す。

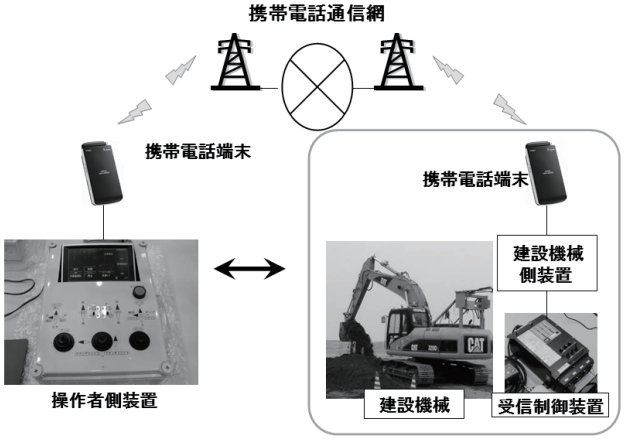


図-2　システム構成図

当時の実験で課題[1]の一つとして建設機械とコントローラの通信セッションの確立があり，さらに操作側のユニットのハードとソフトを独自開発しているために拡張性を阻害している点があった。この 2 点を解決するため今回は，市販のモバイルルータを採用し，検証を行うことも目的とした。

３．無人化施工の映像遅延

3.1 遠隔操作における動画圧縮方式

遠隔操作において映像情報は必要不可欠なものであることから,映像伝送に必要な伝送量を検討する。アナログテレビのカラー映像信号はNTSC方式のコンポジット映像信号であり,伝送フレーム数：30fps,有効走査線:480本である。これはドットに換算すると640×480である。これをデジタル情報として伝送するには640×480＝307,200画素に色情報（24bit）と30フレーム/秒を乗算すると221Mbpsの伝送速度が必要となる。無線LANのIEEE802.11gでの最大伝送速度54Mbpsではあるが実効伝送速度は，15Mbps程度であるので，現状では伝送できない。そこでかなりの圧縮が必要である。現在普及している中で最も圧縮効率の良い（約1/100が可能）H.264動画圧縮方式を採用した。

3.2 遠隔操作における遅延

無人化施工における施工効率の低下の主な要因として操作遅延が挙げられる。従来は，操作信号を特定小電力無線で伝送し，映像信号をミリ波無線で送信している。この場合，映像信号はアナログのまま変調し，広い帯域を利用して送信するため映像の遅れは殆ど無いに等しい。論文[(2)]によると特定小電力無線の場合，ラジコン装置のレバー操作から油圧シリンダが動作するまでの遅延が500ms程度としている。有人搭乗操作の場合が300msとしているので200ms程度が遠隔操作による遅延となる。

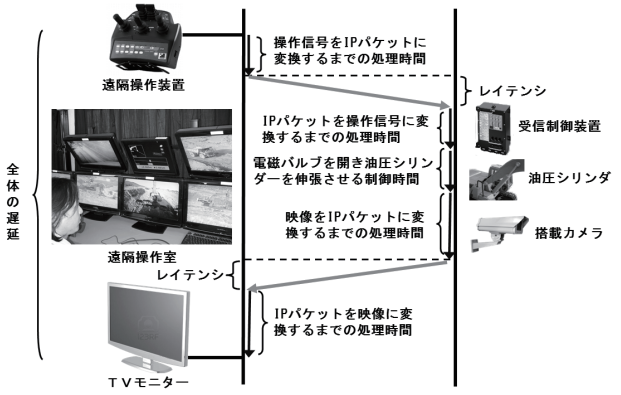


図-3　デジタル伝送による操作遅延と映像遅延

2007年頃から映像信号は無線LANの普及に伴い,デジタル伝送に移行してきた。ビデオコンバータにより,アナログからデジタルにエンコード，伝送後にデジタルからアナログにデコードされるため,遅延が発生し操作性に悪影響を及ぼしている。それゆえ映像の遅延を検討する必要性が生じてきた。今後は図-3に示すようにオペレータはモニターを見て操作しているので，映像遅延も含めた全体の遅延として検討することが重要になる。

3.3 現状の遠隔操作における遅延測定

現状の無人化施工で実施している重機搭載カメラの映像がどの程度遅延があるかを測定し，その値を今回の評価指標値とした。

測定法は遠隔操作器の操作レバー，搭載カメラ映像のモニター，ストップウォッチ表示ソフトのPC画面を同時にデジタルビデオカメラで撮影する。動作の対象は，油圧ショベルのバケット開閉，アーム引き伸ばし，ブーム引き伸ばし，左右旋回動作を各10回ずつ行いレバー動作開始時間とモニター上の建機の動作開始までの遅延量を測定した。

遅延量の測定はビデオデータを1コマずつ再生することで行った。PCの表示ソフトは1秒間に40フレーム表示されるので±25msecの精度となる。

測定結果のグラフを図-4に示すように遅延量は,バケット980ms,アーム1,040ms,ブーム1,210ms,旋回1,210msであった。無線LANと比較して，伝送能力が低いHSPAは評価判定の指標値としてそれぞれの許容増加値は，映像情報の遅延が600ms以上から作業時間が増加する[(3)]とされていることから500ms以内とした。

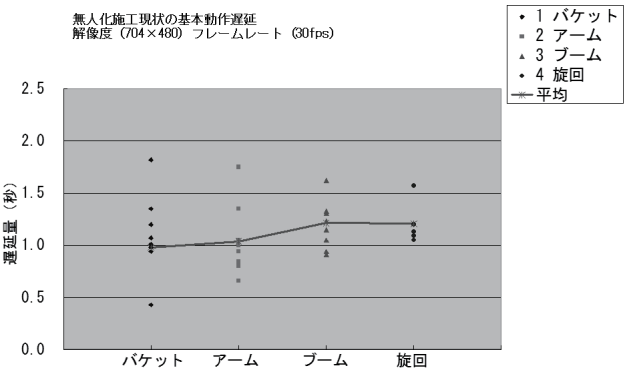


図-4　無人化施工における基本動作遅延測定結果

なお，ビデオエンコーダの各設定値と伝送媒体は，画像解像度：704×480，1秒間のフレーム数：30,圧縮率:30%であり,無線LANを利用している。

3.4 評価試験の仕様策定

超長距離遠隔操作実験の事前評価として屋内による評価試験を実施した。評価指標となる仕様をメーカのデザインツールにより，画像解像度，フレームレート，圧縮率，画像変化率のシミュレーションを行った。画像解像度は高解像度（4CIF:704×480）と低解像度（CIF:352×240）の2種類，フレームレートは10，12，18，24，30の5種類，圧縮率は10,30,50%の3種類,画像変化率は最大,大，中，小，最小の5段階の150通り行った。

画像変化率が最大の結果を表-1に示す。HSPAの上り伝送速度は，300～500kbpsであることから下限を350kbpsとして、高解像度:12fps,50%圧縮,低解像度の場合:30fps,50%圧縮で検証することにした。

表-1　映像パラメータ関連表（画像変化率最大）

画像変化率最大					
フレームレイト（fps）	圧縮率（%）	解像度（pixels）	転送速度（kbps）	解像度（pixels）	転送速度（kbps）
30	10	704×480	1,210	352×240	444
24			1,010		368
18			785		290
12			565		209
10			518		190
30	30		761		302
24			645		252
18			508		199
12			364		141
10			334		128
30	50		690		268
24			572		217
18			452		173
12			324		124
10			296		113

４．HSPA による遠隔操作屋内評価試験

4.1 屋内試験の通信環境調査

評価試験を行う前にHSPAの通信環境調査を実施した。調査は，モバイル PC に HSPA 端末を接続してインターネット上の通信速度測定サイトを利用した。試験場所は埼玉県飯能市であり当然サービスエリア内にあることは確認済みである。
下り受信速度 1,415kbps　上り送信速度　474kbps

4.2 接続試験

2008 年の実験時の課題の解決策としてモバイルルータを採用し，VPN（バーチャルプライベートネットワーク）機能，DDNS（ダイナミックアップデートドメインネームシステム）機能による通信セッション確立の自動化とセッションキープアライブ機能（ハートビート信号）による通信異常切断時自動復旧を検証する。

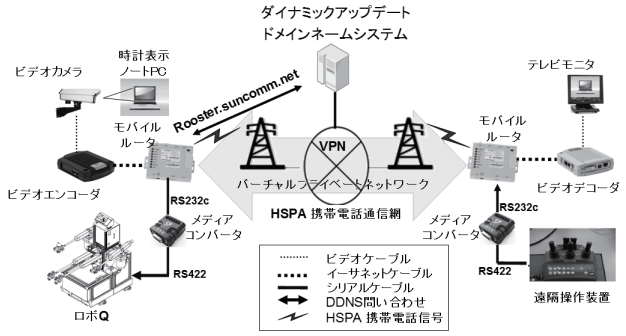


図-5　接続試験の構成図

図-5 に接続試験機器の構成と DDNS 機能の模式図を示す。屋内試験においては，油圧ショベルの代わりに簡易遠隔操縦装置（ロボ Q）を用いた。ロボ Q は国交省九州技術事務所とフジタが共同開発したもので，一般の油圧ショベルに搭載することで遠隔操作を可能するための装置である。

4.3 接続試験結果

モバイルルータの自動接続機能により，立上げ時および回線切断後の再接時に自動で接続が行われることを確認した。自動再接続のためのキープアライブ設定は，60 秒間回線が切断しないと再接続しない。これを 15 秒間に短縮し，実際にアンテナ線を外してからアンテナを再接続後 15 秒間で通信が再開することを検証した。これらのことから HSPA による自動接続・再接続とダイナミック DNS の検証が行えたことは実用システムとして十分機能することを確認した。

4.4 映像伝送遅延測定

超長距離遠隔操作実験の事前評価として屋内での映像伝送評価試験を行った。

HSPA 伝送試験の前にビデオコンバータの性能を測定するためにビデオエンコーダとデコーダを直接ネットワークケーブルで接続して測定した。ネットワークケーブルの伝送遅延は RTT（Round Trip Time：往復遅延時間）1ms 以下なのでほぼ 0 とみなすことが出来る。10 回測定した平均値が 140ms であった。次に図-6 のように HSPA 回線を介して測定したところ 10 回の平均値が 320ms となった。前節の 140ms を差し引いた 180ms が HSPA 回線による伝送遅延と推定した。

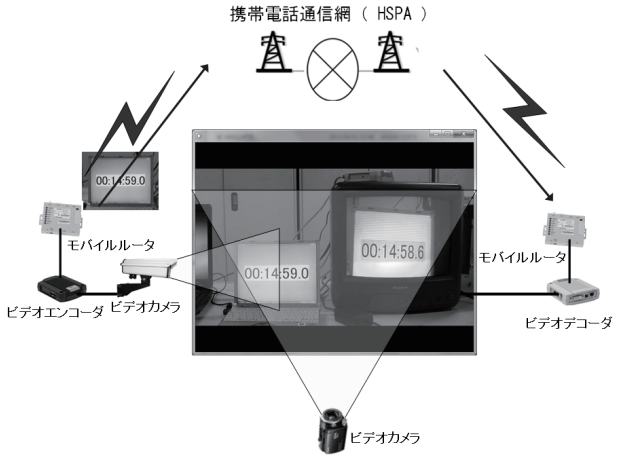


図-6　映像伝送遅延測定状況

５．超長距離遠隔操作実験

5.1 超長距離遠隔操作実験概要

広範囲な警戒区域外から無人化施工による作業を実現するために超長距離の遠隔操作実証実験で携帯電話通信網（HSPA）を利用して実施した。図-7 のように長崎県の遠隔操作室と千葉県の造成現場にある油圧ショベルは 1,000km 離れている。
遠隔操縦専用機は，全国に 2011 年 8 月集計でわずか 54 台（建設無人化施工協会 HP から）が登録されているが既に稼動中等で調達が困難であった。そこで，屋内試験と同様にロボ Q を油圧ショベルに装着して遠隔操作の実験を行った。但し,ロボ Q を搭載したことで遠隔操縦専用機と比較して操作信号を受信してからロボ Q の空圧シリンダが動き

出すまでの制御遅延が 50～100ms あるためその分遅延量は増大することを考慮しなければならない。

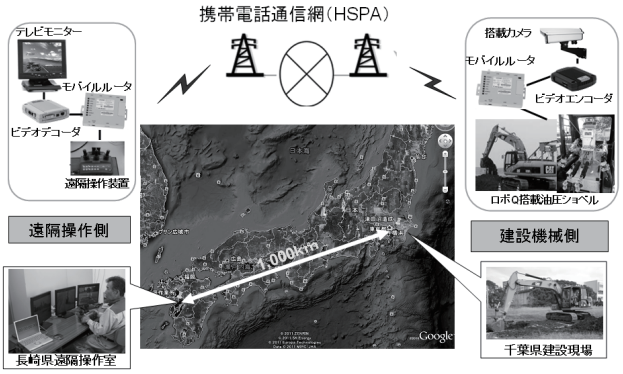


図-7　超長距離遠隔操作実験位置図

5.2 現地通信環境調査

実験を行うには事前に通信環境の調査が必須であり，調査の結果を以下に示す。調査方法は，屋内試験と同様である。

長崎県操作側：下り受信速度　829kbps
　　上り送信速度　530kbps
千葉県建機側：下り受信速度 2,028kbps
　　上り送信速度　**413kbps**

操作信号のデータ量は 2kbps もあれば十分であるので考慮する必要がない。重要なのは,映像信号であり，千葉県側の上りの送信速度 413kbps が上限と考える。表-1 を参照すると低解像度では問題がないが高解像度の場合は，18 フレームの 50%圧縮率が限界と推測することができる。

5.3 基本動作映像遅延測定

実験基本作業実験を行う前に 3.3 で実施した測定と同様に約 1,000km の距離に対し,HSPA 回線網を介して各動作の映像遅延を含めた総合遅延を測定し評価を行った。図-8 が低解像での測定状況である。なお，映像の各パラメータを表-2 に記す。

表-2　映像パラメータと推定伝送速度

ケース名	解像度 (Pixels)	フレームレート (fps)	圧縮率 (%)	推定伝送速度 (kbps)
ケース 1	704×480	18	50	452
ケース 2	352×240	28	50	543
ケース 3	352×240	15	50	149
ケース 4	搭乗運転有人作業			－

表-3 に低解像度の各動作の遅延測定結果と判定結果を示す。基本動作総合遅延として，旋回以外は高解像度と低解像度ともに合格した。

旋回において旋回直後は 2 秒近く遅れるが 2 秒後に直ぐ戻るため基本作業実験の結果を見極めたい。オペレータの意見として，2 秒前後であれば作業できないこともないが 2.5 秒遅れると作業は困難とされている。また,解像度による差異が現れなかったのは伝送速度が同程度でああったためと考えられる。

図-8　基本動作測定状況

表-3　基本動作測定結果判定表

基本動作遅延測定結果判定　　単位(秒)

	バケット	アーム	ブーム	旋回	総合
現状無人化施工	0.98	1.04	1.21	1.21	
評価判定値+0.5	1.48	1.54	1.71	1.71	
ケース１	1.38	1.47	1.48	2.66	
判定	○	○	○	×	△
ケース２	1.41	1.52	1.32	2.01	
判定	○	○	○	×	△
ケース３	1.26	1.20	1.47	1.30	
判定	○	○	○	○	○

5.4 基本作業遠隔操作実験概要

HPSA 回線網を利用した遠隔操作性を検証するために専用オペレータ 1 名による基本作業の実験を行う。実験環境は基本動作実験と同様である。

基本作業は，走行と掘削・横はねのみを対象とする。スタート地点から掘削目標地点まで，約 50m 走行してから，図-9 の①のエリアを掘削して，②のエリアに横はねし積み上げる。エリアの大きさと掘削深さは，3m×3m×1m とする。掘削が終了したらスタート地点に戻る。これを 3 回繰り返し，走行時間，掘削時間，掘削土量を測定した。通常，検証は有人施工との対比で行うが今回は専用オペレータが遠隔地にいるため，同一のオペレータによる比較が出来ない。そこで，別の一般オペレータ（無人化施工未経験）に遠隔操作実験後，ロボ Q を取外して同様の試験を行い掘削土量と時間を測定して施工数量を測量により測定した（有人施工）。

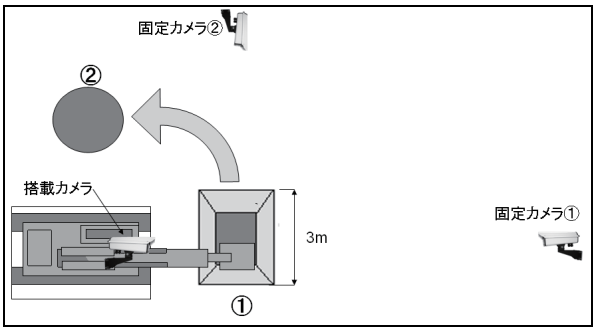


図-9　基本作業実験掘削位置

映像情報として搭載カメラ 1 台と固定カメラ 2 台を配置した。搭載カメラは油圧ショベルのキャ

ビンの中に運転席前方のバケットが映るように広角レンズ(26.3㎜)のビデオカメラを取り付けた。固定カメラ①は走行時用に実験ヤード全体を撮影し,固定カメラ②は掘削時用に油圧ショベルの真横に配置した。各々のビデオカメラは実験後の作業分析用に記録を行った。図-10 に遠隔操作時の状況を示すと共に 3 台のカメラ映像モニターの配置状況を示す。図-11 には固定カメラ②の実験時の映像で掘削箇所と左に90度旋回して横はね箇所が映る画角としている。なお搭載の広角カメラと固定カメラ①は論文 [4] を参考にした。

基本作業実験は，遠隔操作として 3 ケースと評価対象として，搭乗運転の有人作業も実施した。

図-10　長崎県側遠隔操作状況

図-11　千葉県側掘削・積込み実験状況

5.5 基本作業遠隔操作実験結果

実験回数は，Case1:3 回,Case2:2 回,Case3:1 回,Case4:2 回であり，1 回の実験で掘削は 10～13 サイクルであった。実験中に撮影していたビデオカメラの映像を再生して,全てのケースについて走行時と掘削時に分けて各動作のサイクルタイムを算出して分析をした。 図-12 に掘削時の各動作別のサイクルタイムのグラフを示す。

一連の掘削動作を掘削，放土への旋回，放土，掘削への旋回の 4 種類の動作に分けて，サイクルタイムを測定した。図-12 のグラフから有人，無人化施工とも掘削動作と掘削への旋回動作に時間が掛かっている傾向がある。掘削への旋回動作は,掘削開始箇所への位置合わせの時間が大きいことが読み取れる。さらに旋回動作においては，他の動作に比べて速度・加速度ともに大きいことからオーバーランが度々発生したのが位置あわせの時間を増大している要因である。特に無人化施工の Case1 において旋回時の映像遅延が大きく,放土への旋回比率が Case2,Case3 とも 17%増に対して Case1 は 32%増となっている。

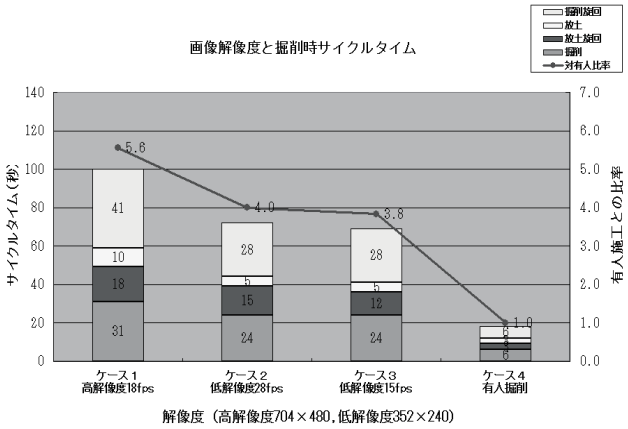


図-12　掘削時サイクルタイム

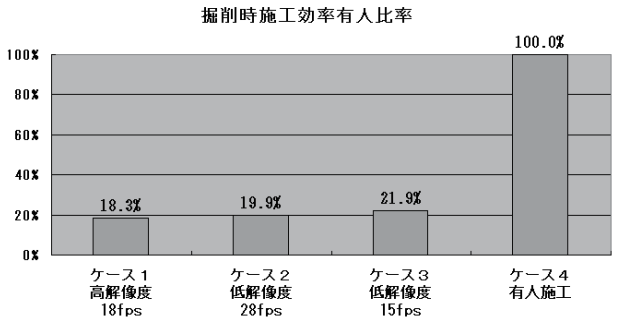


図-13　掘削時施工効率

無人化施工の遠隔操作による効率低下係数は，60%とされている[5]。これと比較すると 20%は低い値であるが本実験は全工程が 3 日間の内､実質 2 日だけの短い期間であった。60%自体が長期の実績によるものであることから,さらに時間を有すれば施工効率は大幅に向上するはずである。

5.6 複合作業遠隔操作実験

2012 年 7 月に長崎県の無人化施工現場において掘削・積込み作業に挑戦したのでここに報告する。図-14 に掘削･積込み作業遠隔操作実験の状況を示す。ケース 3,ケース 2.5（低解像度 20fps）,ケース 4 の 3 ケースを実施しその結果を図-15 に示す。

千葉県での実験では施工効率も低く，掘削・積込み等の複合作業は困難と思われたが,問題なく実施することができた。サイクルタイムの対有人施工比率は 3.8 倍から 2.3 倍まで向上した。

図-14　長崎県おしが谷掘削・積込み実験状況

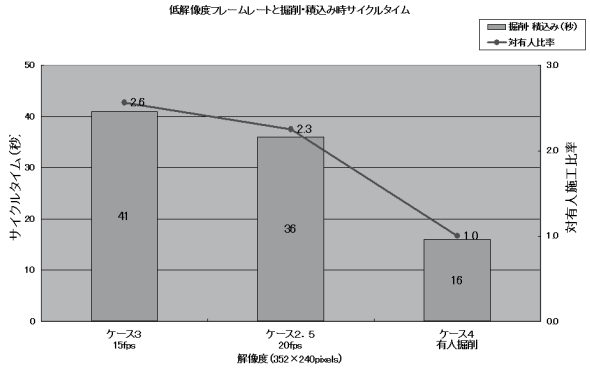


図-15　掘削積込みサイクルタイム

5.6 無人化施工設備の構築時間とコスト

雲仙普賢岳のような本格的な復旧工事においては，遠隔操作室，映像設備，中継設備等の設置工事や配線工事さらに無線と映像の調整に多大の時間とコストを必要としている。通常無人化のための設備の設置・調整に 2 週間程度かかるのが現状であるが今回の実験では 2 時間程度で準備が完了している。これは,緊急時の応急復旧において十分活用できると考えられる。雲仙等の現場においても本格的な設備か構築するまでの間に着工前測量やそのための地盤整形等に有効に利用できる。

5.7 オペレータへのヒアリング

基本作業遠隔操作実験後に今回の実験において,操作性，画面の見易さ，遅延の影響についてケース毎に 5 段階の評価行った。また操作性低くなると思われる原因や操作性を向上するために必要な事についてヒアリングを行った。

その結果を以下にまとめた。

1)低解像度でも作業が可能で,フレームレートが少なくても遅延が少ないほうが操作性は良い。

2)搭載カメラは 2 台あったほうが良かった。走行時に足元用のカメラがあると良い。

3)搭載カメラの画角は操作上で十分な広さである。

操作性低下の要因を順に並べるアンケートでは,以下のとおりとなった。

映像遅延＞フレームレート＞映像の解像度

5.8 本実験のまとめ

本実験の成果を以下にまとめた。

1) 2008 年の実験の課題である通信セッション確立と通信切断時の復旧は,ソフトを開発することなくルータ本来の機能を活用することで解決した。

2) 屋内評価試験においては動画圧縮方式として H.264 の特性を把握し,各パラメータのシミュレーションにより映像伝送の設計に役立つ推定伝送速度の一覧を作成した。

3) 超長距離遠隔操作実験において施工効率は低いものの基本作業の可能性を見出すことができた。

4) 無人化施工現場での追加実験により，複合作業が可能となり，サイクルタイムも 3.8 倍（26%）から 2.3 倍（43%）まで向上した。

5) 携帯電話通信による設備構築時間が短いことで応急対応や現場乗り込み時の活用に期待性が認められた。

６．今後の展望

3.5G の HSPA 通信網は,下りの伝送速度が十分高速であるが上りの伝送速度が 300～500kbps であるため映像伝送にとっては不足であり低解像度でしか利用できない。3.9G の LTE のサービスは現在都市部だけであるが NTT ドコモは，2012 年度末に人口カバー率を 60%,2014 年度末に 98%としているので上り伝送速度は 4～5Mbps となる日はもうそこまで来ている。LTE になれば高解像度でも十分な帯域であり，遅延も激減して施工効率が向上することになる。今後は緊急時の応急復旧や無人化施工の着工時に利用する予定である。

謝辞

本稿を作成するにあたり，国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所，赤松 5 号作業所，おしが谷上流作業所，丸磯建設の多くの方々にご協力を頂きました。記してお礼を申し上げます。

参考文献

1) 林宏樹,山本新吾,三鬼尚臣：“公衆無線網を用いた油圧ショベルの遠隔操作”,建設の施工企画,No.709,pp.69-75, 2009

2) 林宏樹,田村隆幸,野末晃：“油圧ショベルにおける通信遅延の分析と改善提案”,建設機械, Vol.46,pp.32-37, 2010

3) 家永貴史,江渕和久,志堂寺和則,松永勝也：“立体映像環境における情報伝達遅延が作業効率に及ぼす影響”, 日本 VR 学会第 4 回大会講演資料,1999

4) 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ニーズ”,建設ロボットシンポジウム論文集, Vol.12,pp.89-96,2010

5) 無人化施工協会 技術委員会 積算 WG：“無人化施工の積算基準（案)”,建設無人化協会,2005

４．建設機械遠隔操作の習熟に関する研究

建設機械の搭乗及び遠隔操作時における作業効率・精度に関する考察

(独)土木研究所　○ 茂木　正晴
(独)土木研究所　藤野　健一
(独)土木研究所　西山　章彦

１．はじめに

現在、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、雲仙普賢岳等で利用されている。大規模土砂災害等において、この無人化施工技術の適用に関しては、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できるものと考えられる。

無人化施工技術は、土砂災害等発生後の災害緊急対策として、土堰堤工事、除石工事における掘削・積込み・運搬等の機械施工に遠隔操作による無人化施工が導入・活用されている。

土木研究所では、現場で利用されている技術である遠隔システムの操作性に関する研究を進めている。研究は、操作性の向上による習熟度の短縮、作業効率の向上、疲労感の低減を目的とし、モニタの配置、操作、今後のシステム改良に向けた検討を行っている。

本研究報告では、無人化施工に関わる要素技術向上に向けた検討として、建設機械に搭乗して操作を行った場合と現場情報を遠隔地のモニタに表示・操作する遠隔操作システム（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）を用いて操作を行った場合の操作者（オペレータ）の作業効率（時間）及び作業精度の観点から習熟度合いについて実験により検証した結果を報告するものである。

２．無人化施工の作業効率等に関する要素実験

2.1　実験の目的

映像情報として現場情報をモニタより提供し、遠隔にて操作するシステムに関して操作性に関する検証実験を行った。検証実験では、遠隔操作システムの改善を目的に遠隔操作における作業の習熟度を考察するために、作業効率（時間）、作業精度について実験を実施した。

2.2　実験条件

実験では土木研究所保有の油圧ショベル（写真-1）を利用し、土木研究所内建設機械屋外実験場にて実施した。

主に実現場での掘削積込み作業を想定した施工モデルについて、搭乗操作と遠隔操作システムによる操作の比較をすることとした。

検証対象とする遠隔操作システムは、遠隔地において現場情報をモニタにより操作者に提供するものである。計測実験では、操作者（オペレータ）の作業効率（時間）、作業精度について計測、評価した。

写真-1 遠隔操作機能付き油圧ショベル（土研保有）

2.3　実験内容

図-1 に示す建設機械屋外実験場にて、図-2 の障害物を乗り越えて作業エリア近傍まで移動する。

作業エリアでは、掘削作業に見立てて１ｔ土嚢等の対象物（写真-2 及び図-2）を移動する。移動に際して、操作者（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、実験でのルーチンワーク回数については、各操作者 5 回とした。

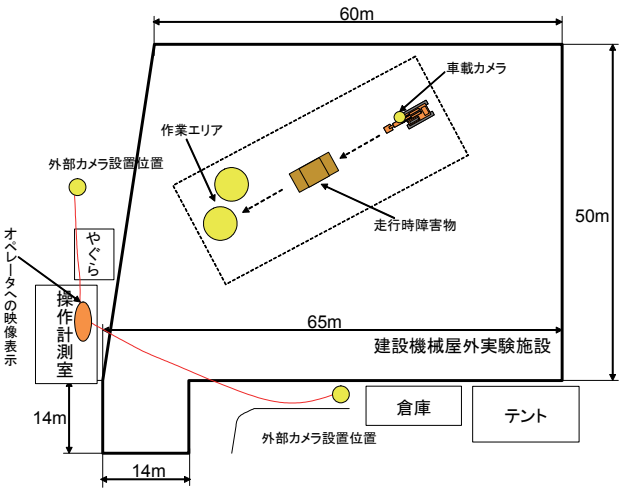


図-1 実験フィールド

写真-3 対象物の移動

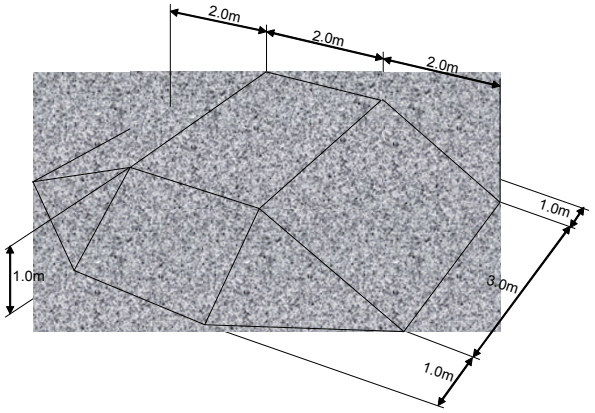


図-2 走行障害物

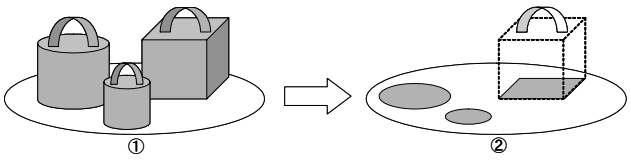


図-3 対象物の移動

写真-2 対象物

1) 操作者（オペレータ）

本実験では、習熟度合いを把握するうえで、以下に示す建設機械操作者（オペレータ）を対象に実施した。操作者（オペレータ）は、主に搭乗での建設機械操作の経験者とした。なお、遠隔操作の経験はないオペレータとした。

- 経験１年未満　３名
- 経験５年以上　３名

2) 実験フロー

実験に関しては、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、作業エリアから出発地点までの移動とし、作業１サイクルは、図-4 に示すものとなる。(実験状況は写真-4 参照)

写真-4 実験状況

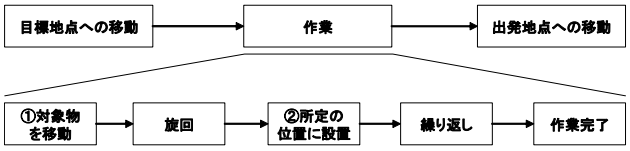


図-4 1サイクル動作

本実験において、搭乗操作に関しては、操作者（オペレータ）の作業効率（時間）・作業精度を評価し、習熟度を検討するうえ指標とする実験ケースである。

遠隔操作システムによる実験については、写真-5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したうえで実験を実施した。

写真-5 操作状況（遠隔操作）

2.4 実験結果

実験結果に関しては、作業効率（時間）・作業精度を以下に基づき整理した。

1）作業効率（時間）

経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と経験 5 年以上の操作者（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-5～8 に示す。

作業効率（時間）において、搭乗操作に関しては、経験 1 年未満のオペレータ操作効率が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、経験 5 年以上の操作者（オペレータ）に関しては、遠隔操作において経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と同様な500sec程度の低減が見られた。

作業効率の観点から熟達度に関しては、搭乗操作及び遠隔操作のいずれも 1 回目の操作以降において操作の慣れが見られる傾向が見られた。

平成22年度に実施した遠隔操作経験者による習熟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、本実験での経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と経験 5 年以上の操作者（オペレータはいずれも遠隔操作未経験者）に関しても類似した習熟を示す結果となった。

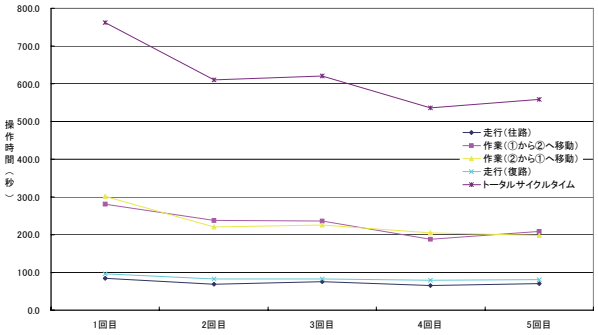


図-5 経験 1 年未満 OP サイクルタイム（搭乗操作）

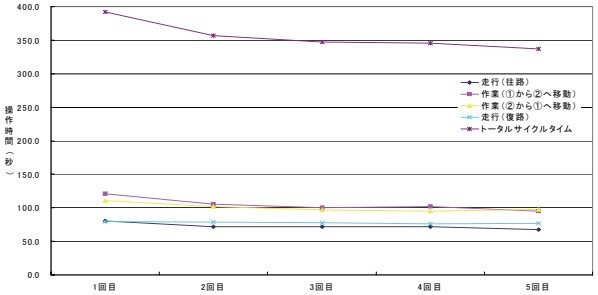


図-6 経験 5 年以上 OP サイクルタイム（搭乗操作）

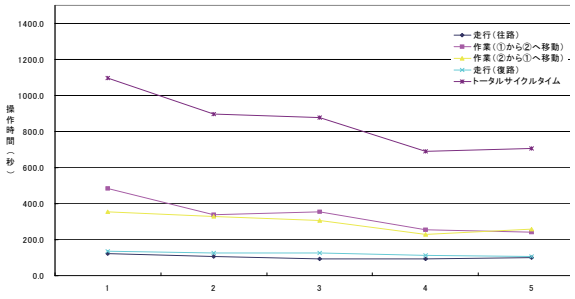


図-7 経験 1 年未満 OP サイクルタイム（遠隔操作）

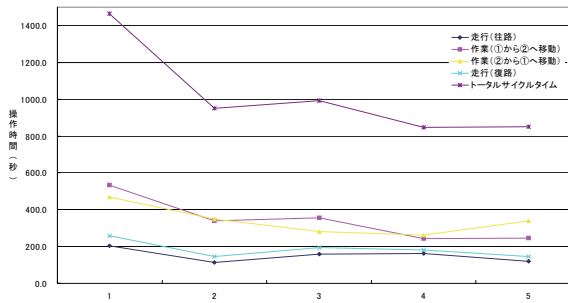


図-8 経験 5 年以上 OP サイクルタイム（遠隔操作）

2) 作業精度

作業精度の計測に関しては、写真-6 に示すように対象物の移動作業後の設置位置のズレについて搭乗操作と遠隔操作において計測を行った。

写真-6 設置位置のズレ計測状況

計測値による精度評価に関しては、当初設置されていた位置を基準として移動作業後に設置した際に生じるズレとの比（作業後設置位置／当初設置位置）を比較評価とし、当初の設置位置に近い位置に戻した場合を施工精度が高いものとして評価を行った。

計測結果については、図-9～12 に示す傾向が確認できた。

搭乗操作に関しては、図-9 に示す経験 1 年未満のオペレータと図-10 に示す経験 5 年以上のオペレータとを比較してみると経験 5 年以上のオペレータが経験 1 年未満のオペレータよりも施工精度が相対的に良好である結果が得られた。

遠隔操作に関しては、図-11, 12 に示すように経験 1 年未満のオペレータと経験 5 年以上のオペレータでは、バラツキが大きく適切な施工精度が得られない結果が見られた。

搭乗操作では経験者が有意であるにも関わらず遠隔操作等では、有意であることが認められる結果は見られなかった。

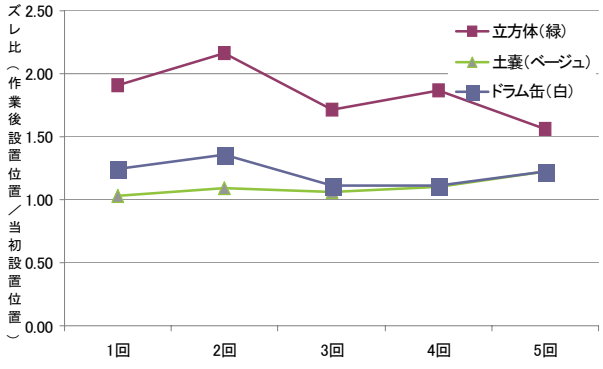


図-9 経験 1 年未満 OP 施工精度（搭乗操作）

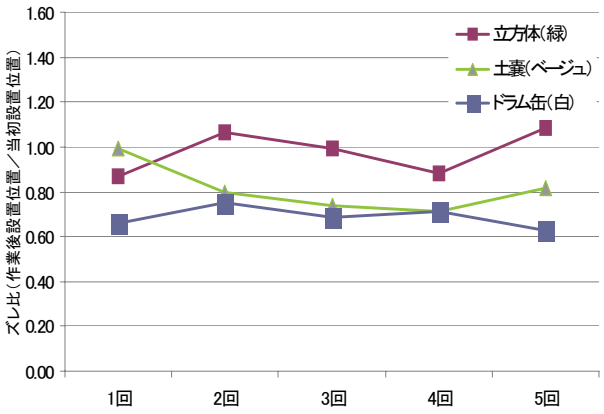


図-10 経験 5 年以上 OP 施工精度（搭乗操作）

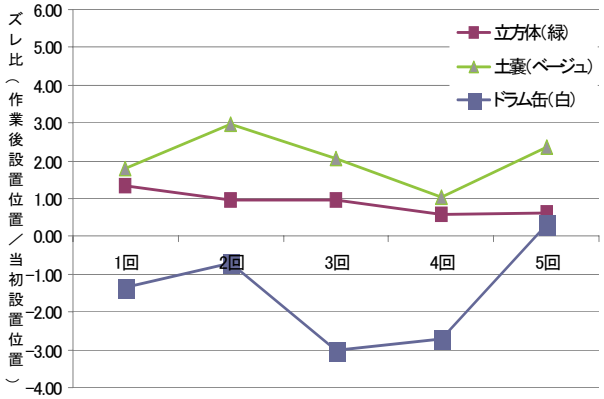


図-11 経験 1 年未満 OP 施工精度（遠隔操作）

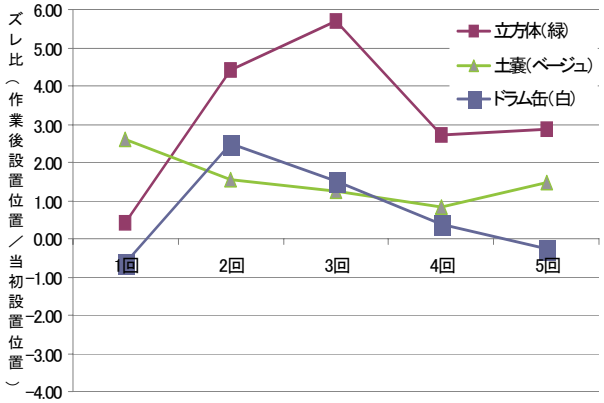


図-12 経験 5 年以上 OP 施工精度（遠隔操作）

また、実験後に操作者（オペレータ）に対してヒアリングを実施した結果、経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と経験 5 年以上の操作者（オペレータ）ともに奥行き感覚をつかむことの難しさが挙げられた。特に遠隔操作において、２次元の映像からの情報のみでは、対象物の掴み作業で奥行き判断に時間を要するとともに所定の設置位置に戻す作業判断にも時間を要した。そのため搭乗

操作と遠隔操作の精度に相対的ではあるが違いがみられた。

３．まとめ・考察

3.1 搭乗操作及び遠隔操作の共通事項

搭乗操作及び遠隔操作に関しては、概ね 2 回以降の操作よりサイクルタイムの収束が見られた。その内訳として、走行と作業に関して大きく大別すると走行に関しては操作回数に関係なくサイクルタイムが安定しており、操作者（オペレータ）の習熟が確認できる結果は顕著に見られなかった。このことから、今回の実験では走行における操作者（オペレータ）の操作回数による個人の技量が左右するものでないことが伺える。

一方、作業に関しては、対象物を掴む動作が付加されていることがサイクルタイムの差異に大きく寄与する結果となった。操作者（オペレータ）は対象物を掴む行動を行ううえで奥行き感覚及び写真-7、8 に示す視点移動（バケット部の色帯線）によって幅感覚や奥行きを知覚しながら作業を行っていることが作業時間の増加につながることが共通事項として考えられる。

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）

3.2 熟達度に関する評価

実験結果（図-5～8）に基づき操作回数の増加に伴い操作者（オペレータ）は熟達していることが分かった。しかし、共通事項でも述べたように奥行き感覚の知覚によって作業（行動）の遅れに寄与していることが操作者（オペレータ）の作業視点（写真-7,8）によって分かってきたが、これと同時に作業の熟達度合いの違いを確認することができた。

写真-7 は、経験 1 年未満の操作者（オペレータ）の視点をアイ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、経験 5 年以上の操作者（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（ルーチンワーク）の把握の有無、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、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。

経験 1 年未満の操作者（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、操作者（オペレータ）の作業内容の把握（操作方法の把握を含む）と作業視点を提供している環境（視覚情報）のとらえ方を模倣すること、そのための方策の検討によって経験 5 年以上の操作者（オペレータ）に近づくことができるものと考えられる。

3.3 作業効率（時間）と精度の関係と習熟

作業効率（時間）と精度の関係を整理した。なお、実験データを整理する中で搭乗運転データと遠隔操作データをまとめているが、遠隔データにバラツキが見られたことから、本報告では、搭乗データのみで考察を述べることとした。

実験結果及び図-13,14 に示すように作業効率（時間）に関しては、2 回目以降から安定したものとっており、バラツキはあるものの精度に関しても安定した結果が見られる。

経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と経験 5 年以上の操作者（オペレータ）を単純に比較してみると経験 1 年未満の操作者（オペレータ）の約半分の作業効率（時間）と精度に関しては、経験 1 年未満の操作者（オペレータ）が約 1.4 に対して経験 5 年以上の操作者（オペレータ）は 0.8 とい

った精度を確保した結果となっており、作業効率（時間）と精度の観点から習熟差を確認することができた。

この習熟差に関しては、寄与する要素として経験によるものが高いものと考えられるが、寄与する要素を考察してみると 3.2 で述べた操作者（オペレータ）の作業内容の把握（操作方法の把握を含む）と作業視点を提供している環境（視覚情報）のとらえ方によるものと考えられる。仮説ではあるが、経験 1 年未満の操作者（オペレータ）の試験回数を多くすることによって、ある回数においてパラダイムシフトが起こり、経験 5 年以上の操作者（オペレータ）と同様な作業内容の把握（操作方法の把握を含む）と作業視点を提供している環境（視覚情報）をとらえることができ、類似した結果が得られるものと考えられる

また、経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と経験 5 年以上の操作者（オペレータ）を比較してみると、作業効率（時間）と効率の試験回数毎のグラフ上の起伏変動に相関が見られる。

例えば、図-13 の経験 1 年未満の操作者（オペレータ）に関しては、試験回数に対する作業効率に若干のバラツキが見られ、このバラツキは作業効率（時間）を短くしようとすると精度が悪くなるといった傾向が見られている。これは、図-14 に示すように技量に依存するところが大きく、安定した技量を獲得することによって安定した精度を操作者（オペレータ）が得られるものと考えられる。

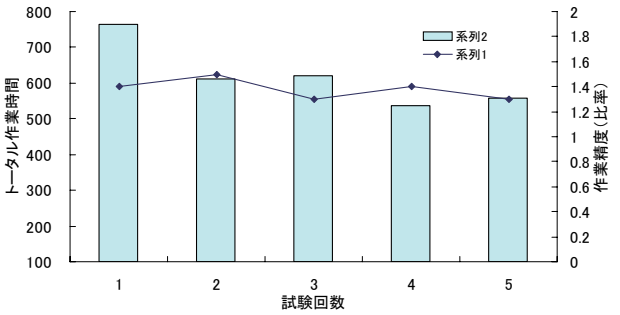


図-13 搭乗運転における初心者 OP の作業時間と精度

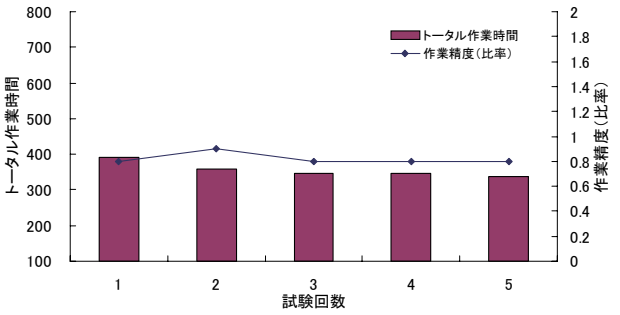


図-14 搭乗運転における熟練 OP の作業時間と精度

なお、本実験において、経験 5 年以上の操作者（オペレータ）において遠隔操作データのバラツキが見られた要因として、実験終了後にヒアリングしたところ通常使用している操作方式（日立式操作方式）に対して、遠隔操作の操作が標準操作方式（JIS 式）となっていたため、経験年数が長い操作者（オペレータ）は遠隔での操作において違和感が生じたために作業効率等にバラツキが生じたものと推定される。

逆に、経験が浅いオペレータはそのような方式の違いはあまり左右されず、熟練者に比べると作業効率等は技量によるバラツキであることが分かった。

４．今後の課題

本報告で述べた実験結果については、経験1年未満と経験5年以上の操作者（オペレータ）それぞれ3名によるデータ構成にしかすぎない。

今後は、被験者数を増やすことによってデータの信頼性を向上させ。本研究成果によって得られた、基礎データに基づき整理した仮説を証明するための実験を進め、操作者（オペレータ）の作業内容の把握（操作方法の把握を含む）と作業視点を提供している環境（視覚情報）のとらえ方について検証を進める予定である。

また、オペレータの作業に関する慣れや遠隔操作を円滑に進めるうえでの奥行き感覚の把握について生態心理学的な観点から研究を進めたい。

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

５．災害対策用照明装置の開発

機動性と遠隔照射能力を有する災害現場対応の照明装置

国土交通省　九州地方整備局　九州技術事務所　　牧野　千代春
国土交通省　九州地方整備局　九州技術事務所　　平川　良一
(一社)日本建設機械施工協会　施工技術総合研究所　○ 佐野　昌伴

１．はじめに

本稿は，二次災害が危惧される災害現場や，照明車の搬入できない災害現場等において，安全かつ確実に照射できる照明装置（以下，照明装置という。）について検討したものである。

開発装置の機能として，既往の災害対策の対応事例から機動性と遠隔照射能力に着目した。また光源は，施工技術総合研究所構内において実施した照射試験結果を踏まえて，LED とキセノンサーチライトを選択した。

これらの結果をもとに照明装置は，「LED とサーチライトの両光源を装備してクローラキャリア等に搭載し機動的に対応するタイプ」と，「２連のサーチライトで遠方から照射する定置型タイプ」の２種類の構想を提案し，詳細仕様と設計図を取りまとめている。

本稿では，この成果について報告する。

２．基本事項の検討

照明装置の開発コンセプトを以下に説明する。

2.1　構　成

災害対応における照明装置はその段階に応じて異なった機能が求められる。段階ごとに必要な照明装置を表-1 に示す。

表-1　災害対応段階と照明装置

災害対応の段階	内　容	照明装置
ステップⅠ 発災直後	・被害状況を把握し，対策の基本方針決定のための情報収集 ・接近の安全性未確認 ・二次災害の危険性あり	遠方からの照射又は無人での接近照明
ステップⅡ 応急復旧工事	・応急対策工事の準備 ・進入路等造成 ・照明装置設置場所未定	履帯式重機又は人力での運搬
ステップⅢ 本格対策工事	・重機を投入して本格工事	従来の照明車等での対応

検討では，従来の照明車等での対応ができないステップⅠ及びステップⅡの段階を対象とした。

近年発生した災害事例をもとに，ステップⅠ及びステップⅡの段階での照明装置に必要な機能を表-2 に示す。

表-2　照明装置に必要な機能

要求機能	理　由
高度な遠距離照射能力	二次災害の恐れがあり，近寄れないケース等
堅牢な装置(不陸地走行，空輸等に耐えられる構造)	照明車等が進入不可能なケース等
良好な演色性	動態監視のための自然な色合い
小型，省エネルギー	運搬，連続運転に伴う燃料補給等の負担軽減

2.2　災害対策用照明装置の光源の選定

光源は非常に多くの種類があるため，最初に，明るさ，効率，大きさ等に優れるキセノン，水銀ランプ，蛍光水銀ランプ，メタルハライドランプ，白色 LED の５種類を選定して詳細な検討を行った。

このうちキセノンは，省エネルギーや寿命の評価が低いが，点光源と見なせるほど寸法が小さく，サーチライト用光源の使用実績があるため，開発装置用の光源に選定した。

次に，キセノンを除いた４種類について，光源の明るさ（全光束），ランプ効率，色温度，定格寿命のバランスの比較を図-1 に示す。

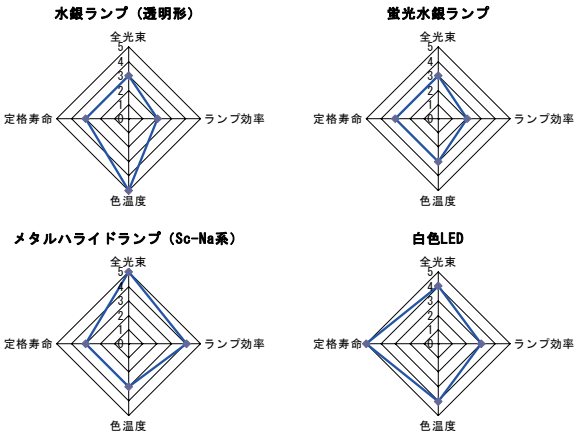


図-1　選定対象光源の特性バランス

開発装置用の光源は，成長途上にある技術ではあるが各特性のバランスが良く堅牢で省エネルギー効果も期待される白色 LED と，白色 LED に次いで特性バランスが良く既存照明装置の標準光源であるメタルハライドを選定した。

各種光源の中から，光源の明るさ，堅牢性，効率等の特性を比較し，災害対策用としての適用性が高い次の光源を照明装置の対象として選定した。

・メタルハライド（現有照明車の光源）
・LED（省エネルギー光源）
・キセノン（サーチライト用）

2.3　照射試験

照明装置の諸元を検討するため，上記で選定した 3 種類の光源（表-3）について照射試験を行った。照射試験の状況を写真-1 に示す。

試験は，施工技術総合研究所のテストコース内の最遠距離 315 m の平坦な芝生で，地上 4 m の高さから水平に照射し，光源から 10 m，20 m，30 m，40 m，80 m，160 m，315 m の地点における光軸中心の照度及び30 m地点における水平方向照度分布を測定した。

表-3　照明試験用光源

ランプ	メタルハライド	LED		キセノン
構成	600W×4	450W×2	1600W×2	1000W×1
出力 (kW)	2.4	0.9	3.2	1.0
写真				
摘要	現状で一般的	省エネルギー	同左･最大出力	サーチライト

写真-1　キセノンランプの照射試験

2.4　照射試験結果

照射試験における各地点の光軸中心の照度及び30 m 地点の水平方向の照度分布と，配光図からの計算結果を比較した結果は，ほぼ一致しているので，以下の検討では 30 m 地点以外の照度分布は配光図により計算した値を使用している。

LED 1,600 W×２，LED 450 W×２，メタルハライド 600 W×４の 30 m，50 m，80 m 地点における 50 lx 以上の照度となる範囲を図-2 に示す。

ここで，基準とした 50 lx は，JIS Z9110 照度基準により，工場内の荷積み，荷降ろし，荷の移動などの作業に必要とされる照度である。

図-2 から LED 1,600 W×２以外は，80 m 地点で 50 lx 以上の範囲はほぼなくなっている。

一方，キセノンの照射範囲は狭いが，遠距離まで照射することが可能である。

500 m 地点での照度分布を図-3 に示す。500 m 地点で 50 lx 以上の範囲は約 6 m である。

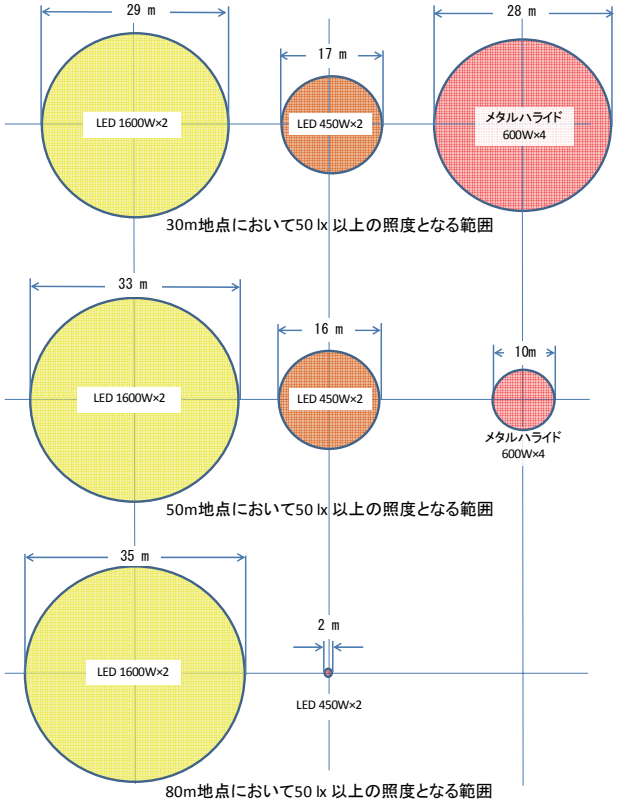


図-2　30m，50m，80m 地点における 50lx 以上の範囲

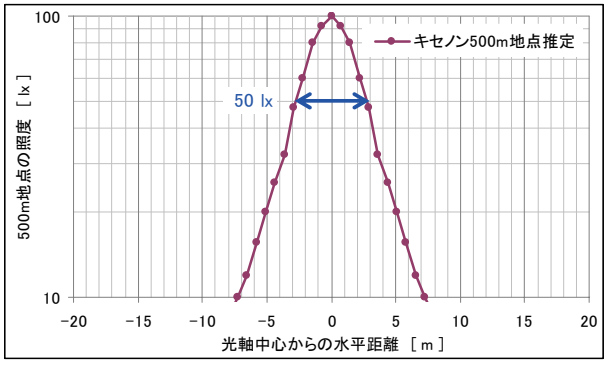


図-3　500m 地点における水平方向の照度分布

2.5　照射試験のまとめ

照射試験により次のことを確認した。

- キセノンは遠距離照射に適している。
- LED は省エネルギー光源であり，1,600 W×２の

80 m 地点で 50 lx 以上の範囲が約 35 m（120 m 地点の計算値では約 23 m）であった。

- LED 450 W×２，メタルハライド 600 W×４は 80 m 地点で 50 lx 以上の範囲がほぼなくなる。

2.6 照明装置の構想案

(1) 光源

照射試験の結果から，照明装置の光源としてメタルハライドは LED に比べて出力に対する照度が低く優位性は無い。

次に LED は，高出力の 1600 W×2 が遠方においても高い照度を保っていることから投光器として適している。

またキセノン 1000 W は，500 m の遠距離においても実用上十分な照度が得られることから，動態監視の光源として適している。

以上より，光源は次の 2 種類とした。

①キセノンランプ　　1,000 W
②LED ランプ　　1,600 W×2

(2) 照明装置の構成

災害の各段階に対応する照明装置の構成を以下に示す。

■ステップⅠ

遠距離照射用定置型（図-4）
ヘリコプター運搬・設置型（図-5）

■ステップⅡ

クローラキャリア等搭載型（図-6）

なお，照射試験より遠距離照射用のキセノンは照射面積が狭いことが確認されたため，２連として照射面積の拡大を図る。配光図より，500 m 地点での 50 lx 以上の範囲は約 14 m 程度である。

また，ヘリコプター運搬・設置型とクローラキャリア搭載型については，照明装置本体は同じ構造のため，運搬・搭載型として検討を行う。

３．照明装置の仕様

照明装置の構成する要素の詳細検討結果を表-4 に示す。

表-4　照明装置仕様

装置	仕様	単位	遠距離照射用定置型	運搬･搭載型
照明器具①	光源	－	キセノン	キセノン
	出力	W×灯数	1,000×2	1,000×1
	入力電力	V	100	100
照明器具②	光源	－	－	LED
	出力	W×灯数	－	1,600×2
	入力電力	V	－	100
伸縮･旋回装置	駆動方式	－	電動	電動油圧
	伸長長さ	m	－	5
	収縮時高さ	m	－	2.2
	伸縮段数	段	－	3
	旋回角度	度	360	360
	ふ仰角度	度	±30	照明①±30
				照明②±90
油圧ユニット	電動機電源	V	－	100
発電機	容量	kVA	8	8
	原動機形式	－	ディーゼル	ディーゼル
	電圧	V	100	100
装置寸法	縦	mm	1,500	1,685
	横	mm	1,700	1,420
	高さ(最低)	mm	2,305	2,200
全体重量		kg	850	1,000

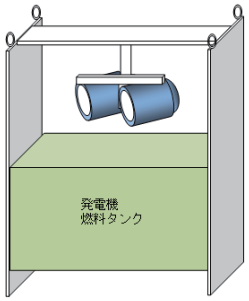


図-4　遠距離照射専用型

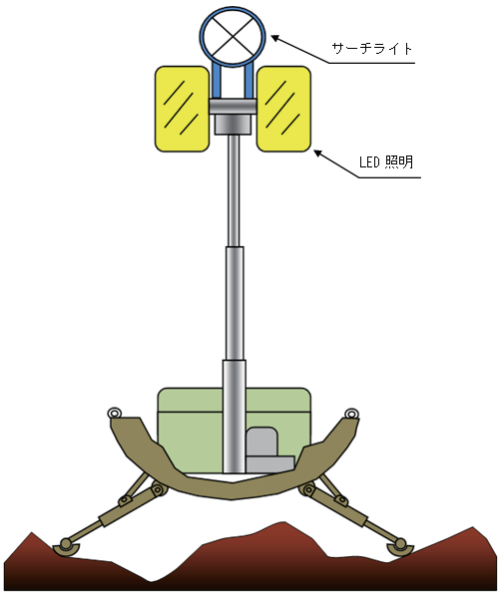


図-5　ヘリ運搬・設置型

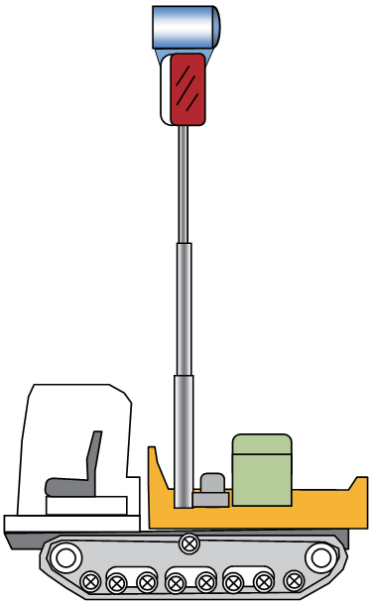


図-6　クローラキャリア運搬型

４．照明装置の設計図

最も汎用的に使用が考えられる「据え置き型２連サーチライト（遠距離照射専用）」（図-4）と「クローラキャリア搭載型」（図-6）を開発対象として提案し，設計図を作成した。

仕様を決定した定置型と運搬・搭載型の照明装置を図-7 及び図-8 に示す。

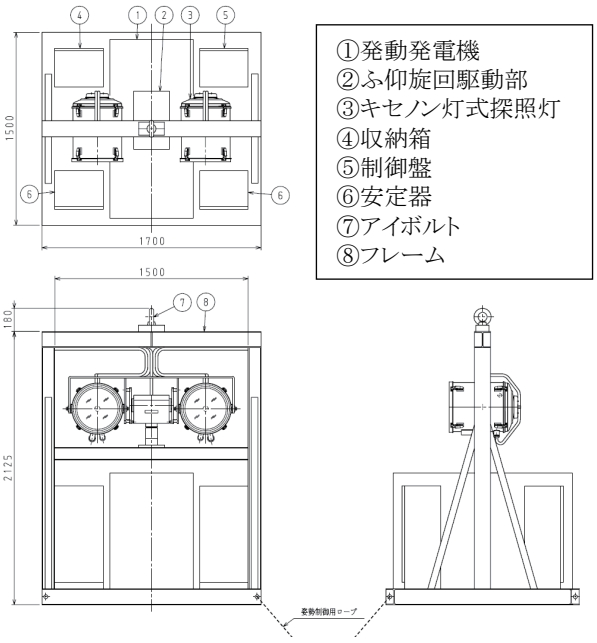
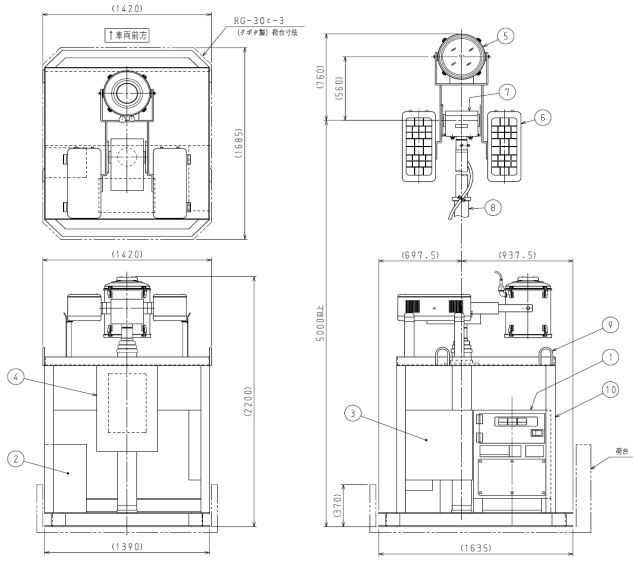


図-7　照明装置（定置型）



①発動発電機　②油圧ユニット
③制御盤　④安定器
⑤キセノン灯式探照灯　⑥LED投光器
⑦ふ仰旋回駆動部　⑧油圧式伸縮柱
⑨吊り下げ用フック　⑩フレーム

図-8　照明装置（運搬・搭載型）

５．まとめと今後の課題

開発装置は，主に災害発生初期の対応に活用しようとするもので，各種の建設機械が稼働可能な状況になれば従来の高性能な照明車と交代する。

開発装置は，既往の技術を組み合わせて構成することを基本として，軽量化と経済性を考慮して機構面はできるだけ簡素なものとしているので，今後，運用を重ねることで改善点が明らかになると考える。現時点で発展性を考えるなら，次の検討項目を挙げることができる。

① 無線化

提案した装置は有線リモコンであるが，二次災害の危険がある場所では現場への滞在時間が制限されることから照射方向の操作を無線化する。

② 長時間連続運転への対応

購入発電機の燃料タンク容量では連続運転 25 時間程度である。消防法による少量危険物取扱いの適用を受けない軽油の貯蔵量は 200 L 未満のため，全体で 192 L となるようタンクを増量し約 77 時間（約 6 夜）運転可能とする。重量増は 108 kg 程度である。

６．おわりに

これまで，災害発生初期の足場不十分な状況では，夜間の危険個所監視や応急復旧作業のために現有の照明車は使用できなかった。

しかし，小型の開発装置を用いることで早い段階から明かりを提供することが可能となり，災害対応の機動性及び安全性の向上が期待される。

６．既存施設直下地盤の液状化対策工法

― バルーングラウト工法 ―

東亜建設工業株式会社　　大野　康年

１．はじめに

近年，岸壁施設，工場施設等，既存構造物直下地盤の液状化対策や，岸壁裏埋め土砂の吸い出し対策に長期耐久性を有する恒久型薬液を用いた薬液注入工法が多く適用されている。この理由は，薬液注入工法が既存施設を供用しながらの施工が可能であること，および狭隘箇所に適用可能であることによる。しかしながら，従来の薬液注入工法には，地盤へ注入した薬液が逸走することにより改良品質が低下するといった施工上の課題があった。

本文では，従来の薬液注入工法の課題に対して，薬液逸走防止機能の向上させた薬液注入工法「バルーングラウト工法」(NETIS No.SK-110016-A)について示すとともに，同工法による現地注入試験結果および既設護岸および供用中岸壁の液状化対策例について報告する。

２．薬液注入工法の施工上の課題

薬液注入工法では，**図－1** に示すように地盤に注入した薬液が逸走した場合，改良品質が低下する。地盤割裂による薬液の逸走は，注入圧力を低くして薬液を注入することによりおおむね対応可能であるが，削孔軌道および注入管に沿った薬液の逸走は，施工方法の工夫が必要となる。従来の薬液注入工法は，削孔軌道および注入管に沿った薬液の逸走を防止するため，1)注入外管と地山との隙間にセメントベントナイト等のシール材を充填したり，2)注入外管に設置されたパッカーを地山に押付けるといった施工方法を採用していた。しかしながら，それぞれの施工方法には a),b)に示す課題があった。

a)シール材を充填する施工方法では，**図―2(a)** に示すようにシール材が注入外管と地山の間に均等に充填されている必要がある。しかし，削孔深度の深い場合や斜め削孔および曲り削孔時には注入外管の建て込み精度や注入外管の自重により，**図―2(b)** に示すように注入外管周りのシール材厚に偏りが生じる。シール材の薄層部では，薬液逸走を防止する性能が低下するため，注入外管と地山の間隙に沿って薬液が逸走しやすい。

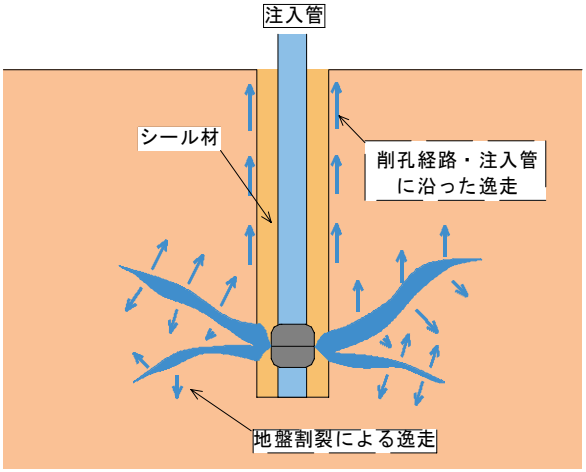
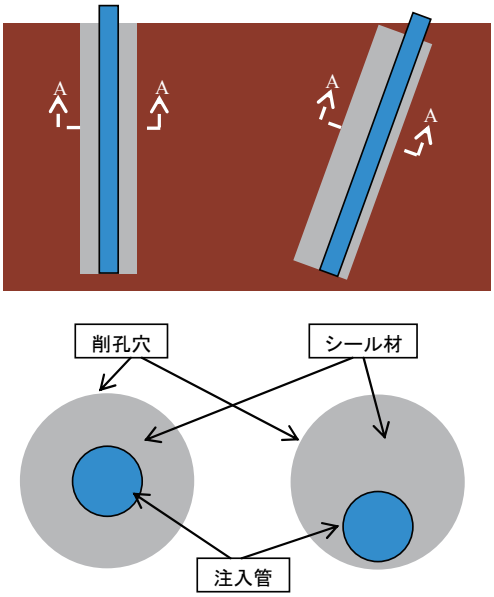


図-1　注入時の薬液逸走



(a)正常　　(b)偏りが生じた状態

図-2　施工上の課題

b)注入外管にパッカーを設置する方法では，礫混じり土砂等の地盤種別によっては削孔穴周辺地盤の乱れやパッカーと地山との密着性の不足により，削孔により乱れた地盤領域や地山とパッカーの隙間を通って薬液が逸走しやすい。

３．バルーングラウト工法の概要

バルーングラウト工法の構造概要を**図-3** に示す。

本工法は，5～20 秒程度でゲル化する特殊水ガラス系の瞬結材にて注入管と地山との隙間を充填することで，注入管と地山との隙間への薬液の逸走防止性能を向上させている。具体的には注入口の上下に二つのバルーンとバルーン間に瞬結材の吐出口を配置し，瞬結材充填によるバルーンの膨張と削孔地山周辺地盤への瞬結薬液の注入により注入管と地山との隙間への薬液の逸走を防止する。

また，本工法の施工イメージを**図-4** に示す。本工法は，既存施設の直下地盤の改良を可能とし，既存施設を傷めることなく，しかもその稼動を止めることなく施工を行うことができる。また，当工法の特長を 1)～4）に示す。

[工法の特長]

1)瞬結材にて注入管と地山との隙間を充填することで注入管と地山との隙間への薬液の逸走防止性能が向上している。

2)薬液の注入圧力が低く（0.5～2kN/m^2 程度），施工に伴う周辺への影響がほとんどない。

3)注入材は，溶液型の特殊シリカ液（恒久型）の他，特殊シリカ液の 10 倍程度の発現強度を有する微粉末スラグ系注入材も条件に応じて使用可能である。

4)作業ヤードは，削孔時：28m^2 程度，注入時：120m^2 程度とコンパクトである。

４．改良効果と施工実績

ここでは，本工法の改良効果を確認するために実施した現地注入実験 [1)]と適用実績について紹介する。

4.1　現地注入実験 [1)]

実験サイトは，愛知県津島市神守町内の自然堆積地盤である。地層は，地表面から GL-0.45m まで盛土，その下部に細砂～中砂が分布する。改良対象層である細砂層は，N 値が 5～10 程度，地下水位は GL-1.59m，土粒子密度は深度によらず ρ_s=2.65 g/cm^3 と一定である。また，平均粒径 D_{50}=0.18mm，細粒分含有率 F_c=16.5%で，緩く液状化危険度が極めて高い地盤である。

実験は，GL-3m 位置に注入口を配置した注入外管を地盤内に設置した後，恒久型薬液を地盤に注入した。注入仕様は，注入率 λ=40.5%，改良体当たりの薬液注入量 Q=4,172 ﾘｯﾄﾙ，注入速度 q=10 ﾘｯﾄﾙ/分および薬液シリカ濃度は 8%とした。注入完了 14 日後に改良体を発掘し，出来型を確認するとともにブロックサンプリングにより改良地盤の乱さない試料を採取し，一軸圧縮試験等の力学試験を実施した。なお，試料採取位置は，改良体半径の中心とした。

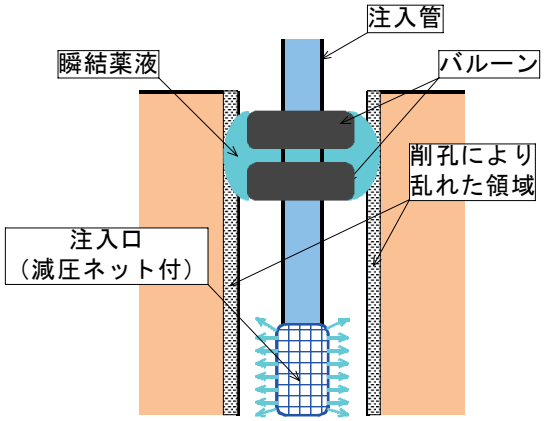


図-3　注入管概要

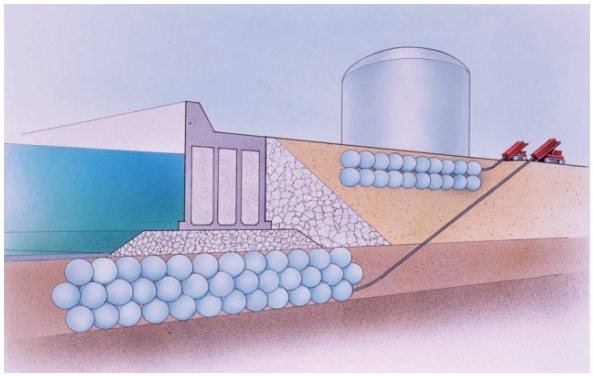


図-4 施工イメージ

写真-1　改良体発掘全景

写真-1 に改良体の発掘写真を示す。改良体の出来形は，計画改良径φ2.7m に対して実測改良径φ2.75m と計画出来型を満足している。また，現地観察により改良体には未改良領域は見られず，連続した一体固結体となっている。

改良体の一軸圧縮強さ q_{uf} は，q_{uf} = 99.4～137.6 kN/m^2 の範囲にあり，平均では q_{uf} = 119 kN/m^2 であった。改良体の現地における一軸圧縮強さは，現地砂を使用した室内配合試験にて得られた室内

平均強度 q_{uL} = 199 kN/m^2 の約 1/2 であった。

改良地盤の液状化強度を確認するため，未改良砂および改良体の非排水繰返し中空ねじり試験を実施した。改良砂はトリプルチューブサンプリングにより改良体と同深度にて採取した試料を使用した。**図-4** に未改良砂と改良体の 7.5%せん断ひずみ両振幅における繰返し回数と応力比の関係を示す。液状化強度比 R_{20L}(20 回の繰返しせん断によってせん断ひずみ両振幅が 7.5%に達するようなせん断応力振幅比)は，未改良砂では $R_{20L(unimp.)}$＝0.19 であるのに対して，改良体では $R_{20L(imp.)}$＝0.58 となっており，改良体の液状化強度比は未改良砂の 3 倍以上に大きくなっていることがわかる。

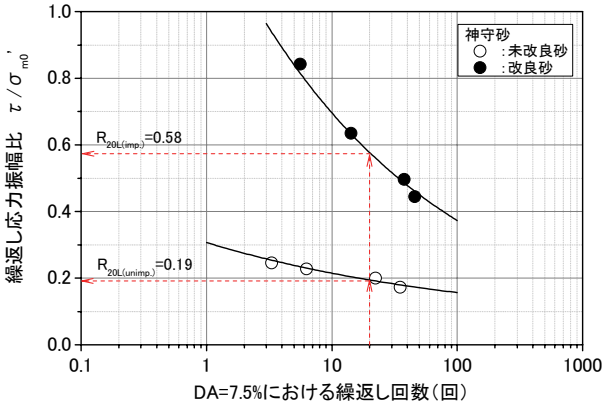


図-4　液状化強度曲線（未改良，改良体）

4.2　適用実績と適用例

バルーングラウト工法は，2008年に開発されて以来，2012年3月現在で29件の施工実績がある。内訳は，液状化対策17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、工場建屋他の実績がある。ここでは，本工法を供用中岸壁の液状化対策例[2]と既設護岸の液状化対策例[3]について紹介する。

(1)既設護岸の液状化対策例[2]

当該事例は，地震時の液状化による変形量の低減を目的として既設護岸直下の置換層の液状化対策を実施した例である。

改良断面を**図-5**に示す。施工は，護岸背面より斜めに10～200kg/個の捨石を削孔し，捨石下部の置換層に微粉末スラグセメント注入材を注入した。施工箇所は，狭隘で護岸直背後に民家が近接していたため，削孔時および注入時のプラント機材は台船上に設置し，削孔時には防音壁を設置し，削孔に伴う民家への騒音低減を図った。**写真-2**および**写真-3**に施工状況および台船上のプラント設置状況を示す。

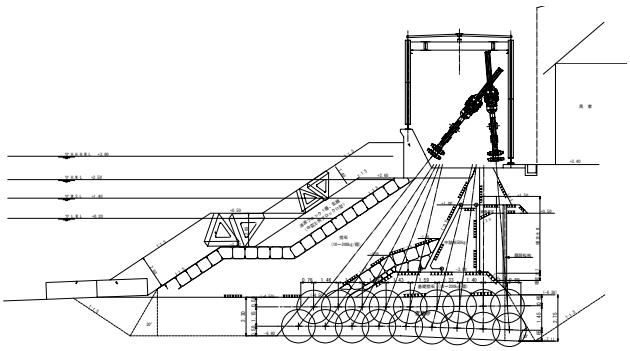


図-5　改良断面図

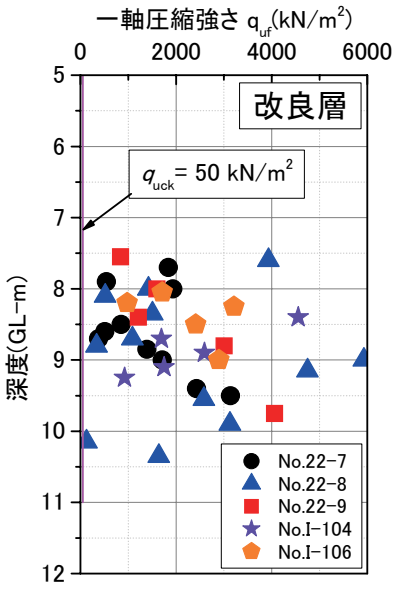
写真-2　削孔状況（防音壁内）

写真-3　プラント（台船上）

改良後の効果確認は，護岸延長約171mの内，事前調査から柱状図区分（改良層厚）の異なる4区間にて各1本のボーリング調査を実施し，一軸圧縮試験にて改良強度を確認した。**図-6**に改良層の一軸圧縮強さq_{uf}の深度分布を示す。改良地盤の一軸圧縮強さは，平均値でq_{uf}（平均）=2,000kN/m^{2}であり，設計基準強度q_{uck}=50kN/m^{2}を十分満足していることが確認された。

(2)供用中岸壁の液状化対策例[3]

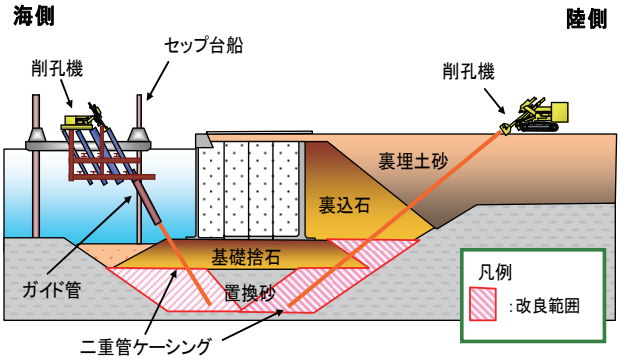
当該事例は，供用中岸壁下部の置換砂の改良を



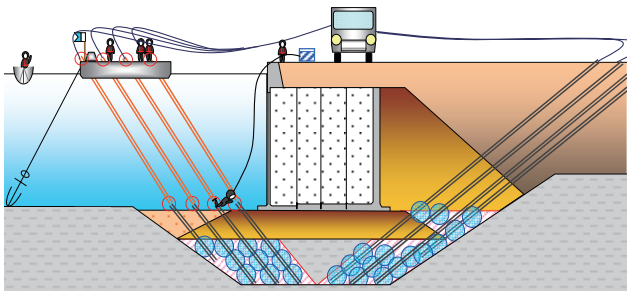
図−6　改良層の一軸圧縮強さ

行った例である。施工は，**図−7**および**図−8**示すように海側および陸側より斜め削孔にて注入管を設置し，恒久型薬液を地盤に注入した。

施工状況写真を**写真−4**に示す。当該工事は岸壁を供用しながらの施工であったため，施工に使用する機材は全て車載式とし，岸壁の供用に大きな影響を与えることなく改良を行っている。



図−7　削工事の施工図



図−8　注入時の施工図

写真−4　施工状況

５．まとめ

本文では，薬液逸走防止機能の向上による改良品質の向上を目指して開発したバルーングラウト工法について述べた。本工法は、既存構造物の直下および周辺地盤の地盤強化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固法の開発と適用例，土木学会土木建設技術発表会講演集，pp181～186，2009.
2) 瀬賀康浩・岩本英浩・大野康年・長谷川智直：薬液注入工法による既設護岸直下地盤の液状化対策，土木学会四国支部第17回技術研究発表会論文集，pp295～296,2011.
3) 東亜建設工業ホームページ (http://www.toa-const.co.jp/)

７．多様な災害に向けた無人化施工技術の開発と適用

ＩＣＴを活用した多種･多数機械の遠隔操作

鹿島建設株式会社　　○ 領木　紀夫
川音　一郎
伊東　真

１．はじめに

無人化施工技術は，約 20 年前に火山活動を再開した雲仙普賢岳での災害復旧工事を契機に実用化され，ICT の飛躍的な進歩により高度化が進んできた。

しかし昨今の災害復旧は，大規模，原子力発電所，特殊作業など多様な形態になってきており，その復旧工事における無人化施工技術もさらなる進化が求められている。

今回，多様な災害に対応する無人化施工技術を開発し，福島第一原子力発電所復旧工事に適用したので，その内容について報告する。

２．無人化技術の沿革

無人化施工技術は雲仙普賢岳噴火災害緊急対策工事での「試験フィールド制度」適用を端緒として発展し続けてきた。その後，有珠山災害復旧工事にて遠隔操作技術が体系化され，近年では ICT の進歩による情報化施工技術も組み込まれている。

本技術は，「人間が立ち入ることが出来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」と定義され，無人化施工における機械の遠隔操作は操作信号やカメラ映像の伝送，およびネットワーク化が主要な構成要素となっている。

2.1　操作信号の伝送

建設機械の遠隔操作に使用する電波は一般に特定小電力無線を用いており，その伝送距離は約 200m までと短い。しかし，無人化施工にはそれ以上の伝送距離となる場合も多く，中継局の設置や無線の高出力化が必要となる。特例として 2W の建設無線も活用されてきたが，通信速度や連続通信に課題があった。図-1 は雲仙普賢岳で実施された「中継方式」，図-2 が有珠山で実施された「建設無線方式」での長距離無線伝送である。

なお，近年では，操作信号を TCP/IP 化し，デジタル伝送を用いて遠隔操作する技術も開発されている。

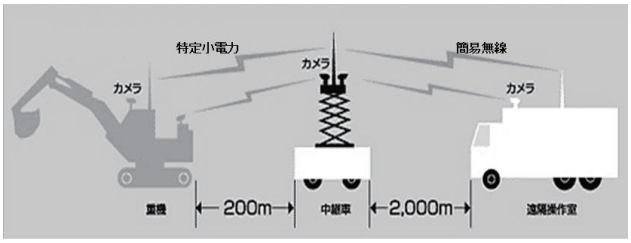


図-1　雲仙普賢岳での「中継方式」

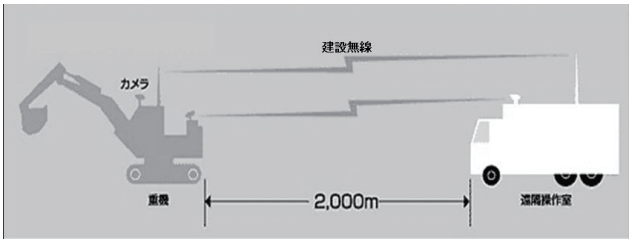


図-2　有珠山での「建設無線方式」

2.2　カメラ映像の伝送

従来はアナログカメラが主流で，映像伝送もアナログ通信で行われるのが一般的であった。カメラ台数が多くなるとアナログ通信の多重伝送には限界があるため，通信設備は過大になる。無線で映像を伝送する場合は，データが大容量となるため，50GHz という指向性が強い周波数帯を使用せざるを得なかった。しかし，昨今は ICT の進歩によって多重伝送が無理なく行えるようになり，通信設備の簡素化，及び指向性の比較的小さい周波数帯での伝送が出来るようになった。

2.3　ネットワーク化

従来，操作信号の伝送とカメラ映像の伝送は別々のものとして構築されてきたが，建設機械やカメラをネットワーク端末とみなして現場全体をネットワーク化することで，操作信号とカメラ映像の伝送の一元化が進んだ。さらに光ケーブルを用いることで，現場だけでなく遠隔地に設置される操作室の機器までもネットワークの一部に組み入れた「超遠隔無人化施工技術」も実証段階にある。

表-1 多様な災害復旧における課題と解決方法 ※（）内は3章内の項目を示す

必要技術	解決すべき課題	解決方法
多数建設機械の遠隔操作	無線による映像伝送	ネットワーク負荷低減・遅延対策（3.1）
多種建設機械の遠隔操作	無線による操作信号伝送	光ケーブル・大容量無線通信（解決済）
立ち入り禁止エリア外からの遠隔操作	長距離大容量通信	メッシュ型無線LANの構築 （3.2）
多工事下における安定した遠隔操作	限られた無線周波数	不具合発生時の対応能力強化（3.3）
広範囲における施工	通信の安定性	大型解体用機械やクレーン遠隔化の実証（3.4）
狭隘な場所での施工	柔軟な無線通信設備の構築	無線周波数の選択（3.2）
様々な地形・障害がある中での施工	ロバスト性の高い通信	
解体などを伴う多様な作業	多種建設機械の遠隔化に伴う操作性・安全性の確認	

3．多様な災害向けの無人化施工技術

これまでの無人化施工技術は土工事が中心であったが，市街地災害，原子力発電所災害などの復旧では，複雑な地形での作業やコンクリート造・鉄骨造の様々な建物の撤去・解体など，多様な対応が必要になってきている。

表-1 に，これら多様な災害復旧に必要な技術，解決すべき課題，その解決方法の関係をまとめた。

以下に本システムで行った解決方法について，その内容を示す。

3.1 ネットワーク負荷低減・遅延対策

無人化施工は緊急性を伴うことが多く，設備の設置作業ですら危険を伴うため，その設備はより簡素であることが望ましい。一方で，建設機械を遠隔操作する場合にオペレータの目の役割を果たすカメラの映像は，操作に支障のない視認性を要し，遅延を最小限に抑える必要がある。

これらの相反する課題を解決するために，以下のような対策を実施した。

① 作業に必要な解像度の評価

通常作業時は HVGA 画質で行い，細かな作業は VGA 画質で行う。HVGA 画質におけるデータ伝送量は VGA の半分となるためネットワーク負荷を半減させることが可能となった。

② アナログカメラの採用

アナログカメラ＋エンコーダ・デコーダ方式を採用することで，web カメラを採用する場合に予想される遅延，フリーズの懸念を解消する。また，画質設定の変更を遠隔操作室から出来るようにすることで，用途に応じた設定での効率的なデータ伝送を可能とした。

③ フルフレーム送信タイミングの調整

一定間隔で送受信するフルフレーム送信のタイミングをずらすことで，データ伝送のピークをカットし，伝送過多によって通信不具合が発生するリスクを軽減した。

これらの対策については，映像遅延・画質の確認を目的とした実機による実験を行った。アナログカメラを直接有線でつないだ映像と，エンコーダ・デコーダでデジタル変換し無線送信した映像

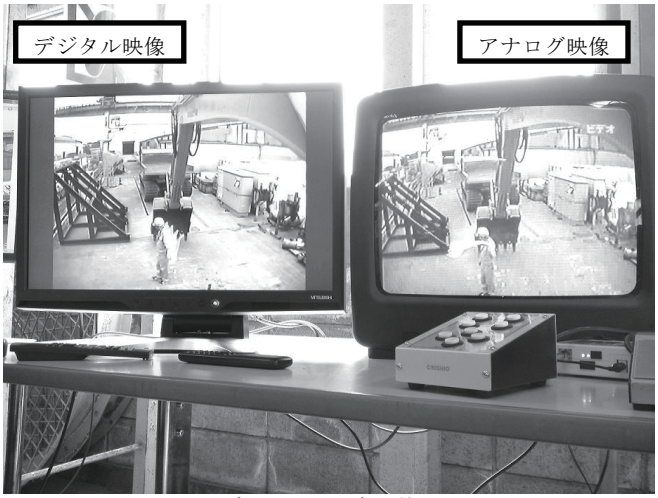


写真-1 遅延確認状況

を比較し，作業に影響のない遅延、画質であることを確認した。（写真-1）

3.2 最適な無線ネットワーク形態の構築

災害時は，有線設備の損傷により無線設備が様々な用途で多用され，無人化施工に使用できる電波が少ない場合も多い。特に 2.4GHz 帯は一般的な無線 LAN で用いられている。無人化施工ではこのような状況下でも安定した通信が必要である。

そこで，本システムでは、遠隔操作信号のみ従来から使用されている 429MHz 帯の特定省電力無線を採用し，カメラ映像の伝送と切り離すことで，無線不具合が操作・映像の両方へ影響することを防ぐこととした。

カメラ映像伝送は建築工事で実績のある 5GHz 帯のメッシュ型無線 LAN を採用した。5GHz 帯の無線は，7 チャンネルとチャンネル数は少ないが，基地局を設置する際に申請が必要であるため，多数の使用者による干渉のおそれが少ない周波数帯でもある。

しかし，5GHz 帯の無線は，高出力で伝送距離が長いことによる相互干渉や，指向性が強いことによる障害物の影響（電界強度の低下）が懸念され，適切な基地局配置が求められる。そこで，表-2 の確認項目に沿って実証実験を行い，適切な基地局配置計画を可能とした。

表－2　確認項目

障害	確認項目
電界強度の低下 ・移動による距離減衰 ・建物陰への移動 ・アンテナ直下での作業	電界強度低下時の映像品質
	複数映像伝送時の相互干渉
	ハンドオーバー機能
	高低差 10m 程度での伝送機能
相互干渉	同一周波数電波の相互干渉

3.3　不具合発生時の対応能力強化

無人化施工においては，各種不具合発生時に，現場に立ち入ることなく原因を絞込める事が重要である。

そこで，システム障害が発生した時に迅速に対応できるよう,「不具合機器探索プログラム」と「メッシュ型無線 LAN 監視プログラム」を導入した。

① 不具合機器探索プログラム

このプログラムは，機器ごとの通信状況を確認するためのものであり，ネットワーク障害が発生した際に，どの機器に異常があるかを迅速に探索することができる。全ての機器に割り当てられた IP アドレスに向けて一斉に信号を発信，レスポンス時間を測定することで異常がある機器を速やかに判定し，異常のない機器を青色，異常がある機器を赤色に表示する。写真-2 にこのプログラム画面の一部を示す。

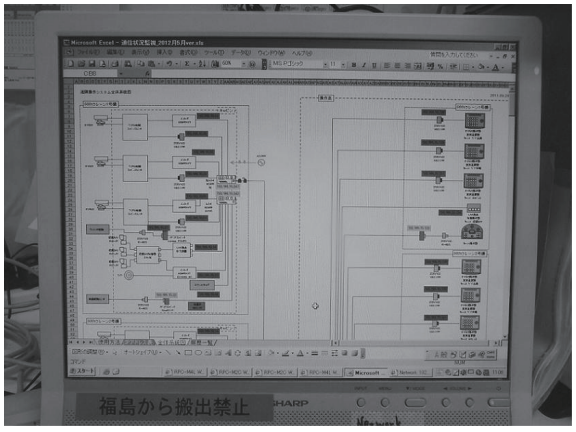


写真-2　不具合機器探索プログラム

② メッシュ型無線 LAN 監視プログラム

遠隔操作建設機械のオペレータは、常に遠隔操作室でメッシュ型無線 LAN を経由した映像を見ながら操作するため，映像が送り続けられていることが重要になる。

そこで、カメラ画像に異常が発生した際に，監視プログラムによりそれが無線の不具合なのか否かを速やかに判断し，原因の絞込みが迅速に行えるようにした。写真-3 は無線監視プログラムの画面である。

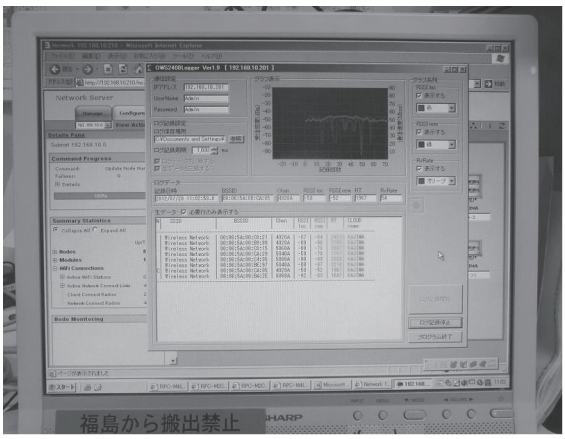


写真-3　メッシュ型無線 LAN 監視プログラム

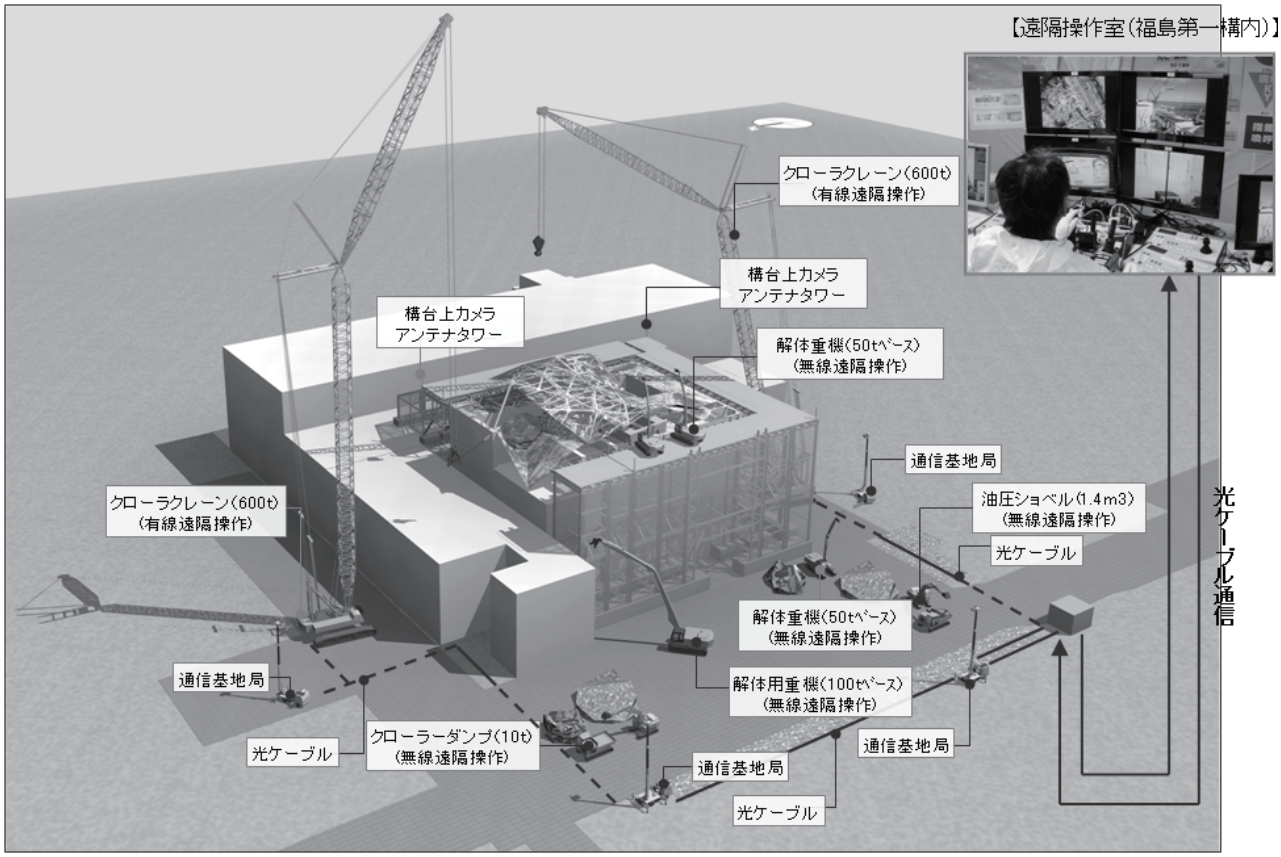
3.4　多種建設機械の遠隔操作

多様な災害に対応するためには，ショベル系建設機械のみならず，大型クレーンや解体用建設機械など様々な建設機械の遠隔化が必要となる。そこで今回，クレーンや大型解体用機械の遠隔操作化を行った。

建設機械の遠隔操作を行う際は，いかにオペレータが作業状態や周囲の状況をリアルタイムかつ正確に把握することができるかが重要な課題である。そのためには，カメラの設置台数と設置位置，ズームやチルトなどの仕様を見極めるとともに，映像の遅延が操作に影響しないことを事前に検証する必要があった。

写真-4 は大型解体用機械による遠隔操作の実機実験の状況である。複数のオペレータによって操作性を確認することを目的に，高さ 20m を越える建物の解体工事での実証を行った。

写真－4　大型解体用機械の遠隔操作実証実験



図－3　全体ネットワーク構成

4．福島第一原子力発電所復旧工事への適用

今回開発したシステムを，福島第一原子力発電所 3 号機復旧工事に適用した。

本復旧工事は原子力発電所構内での災害復旧であり，特殊な条件下での完全な無人化施工が要求された。以下に，そのネットワーク構成と，新たに開発した技術について示す。

4.1　本復旧工事でのネットワーク構成

図-3 に今回構築した無人化施工システムのネットワーク構成を示す。本復旧工事では重量物の揚重が計画されており，大型クレーン 2 台も無人化施工のネットワークに組み込まれている。また，解体用機械は建屋周囲のあらゆるエリアに移動しながら作業を行う。これらの遠隔操作の無線環境を確立するため，無線基地局を地上に 4 箇所，構台上に 2 箇所設置し，光ケーブルで無線基地局と遠隔操作室を接続することで大容量伝送に対応した。ネットワークに接続されている機械・機器の一覧を表-3 に示す。

本復旧工事においては，遠隔操作される建設機械の稼動エリアに対して建物が占める範囲が広く，死角ができやすいため，固定カメラも 16 台設置してオペレータの視野を確保した。さらに，クローラクレーン装着カメラの映像も共用し、俯瞰的に現場を見て構内の状況を把握できるものとした。写真－5 は遠隔操作室の状況である。

カメラの台数が多いため遠隔操作室への情報伝送容量は膨大なものになる。また，通信基地局から遠隔操作室までの伝送距離は 500m と長い。そこで安定した大容量通信を確保し，かつロバスト性も向上させるため，3 条の光ケーブルを敷設した。

また，本復旧工事においては解体用機械とクローラクレーン以外にも，建屋上部の解体のための吊り下げ式機械機も遠隔操作する必要があった。そのため，操作無線の発信器をクローラクレーンのマスト上部にも設置した。

表-3　ネットワーク接続機械・機器一覧

機械名・機器名	台数
解体用機械	8　台
クローラクレーン	2　台
吊り下げ式解体機	2　台
建設機械搭載カメラ用エンコーダ	16　台
建設機械搭載カメラ用接点交換機	10　台
場内固定カメラ用エンコーダ	16　台
場内固定カメラ用操作器	16　台

4.2　無線干渉への対応

構内では，様々な復旧工事が行われており，無線の混信が予想された。操作信号用の 429MHz 帯は，遠隔操作無線として同じエリアで使用できる

チャンネル数は少なく，本復旧工事においては 8 台分の通信が限界であった。そこで，構内で使用する無線機器をリスト化し，作業時間帯や距離を考慮して機械ごとにチャンネルを固定した。また，自動玉掛外し装置や吊り荷姿勢制御装置などの揚重ツールの制御信号の通信には 1.2GHz 帯を採用した。

写真-5　遠隔操作室

4.3　クレーンの遠隔操作化

大型クレーンの遠隔操作化においては，ショベル系機械に比べてより多くの情報を送る必要がある。また，揚重作業中の操作信号・映像の途切れは大事故につながるおそれがあるため，伝送についてはロバスト性を向上させる必要もある。加えて，揚重作業は特性上細かな動作が必要となるため，遅延も最小に抑えなければならない。以下に，これらの課題を解決するために行った対策について示す。

① 吊荷の状況把握用カメラの設置

大型クレーンではジブ先端にカメラを取付け，その映像を運転室内で確認し操作を行うが，クレーンマスト頂部にもカメラを取付けることで吊荷の状況をさらに把握しやすくした。なお，これらのカメラは地上 100m もの位置となるため，420 倍の高性能屋外用カメラを選定した。

② 安全情報の伝送

クレーンの運転室に表示される安全装置の情報は，カメラを用いて遠隔操作室のモニターで確認できるようにした。さらに，荷重値やジブ角度などの音声情報も，運転室内にマイクを配置，音声データとして伝送した。

③ その他安全確保

重大事故を引き起こすおそれのあるワイヤーの乱巻き防止のため，ウィンチドラムの状況を常に監視するカメラを設置した。

写真-6 クレーンの遠隔操作実証実験

写真－7　モニター映像

④　ロバスト性向上と操作・映像の遅延対策

クレーンの操作信号とカメラ映像の伝送には信頼性の高い光ケーブルによる有線方式を採用した。また，遅延を極限まで減らし，かつ作業可能な画質まで画素数や圧縮率の調整も行った。

4.4　吊り下げ式解体機の開発

建屋上部のがれき解体は，大型の解体機械が近づけない状況で行う必要があった。そのため，大型クレーンで吊り下げて解体作業が可能な無線操作の吊り下げ式解体機を開発した。

短期間で開発する必要があったため，大型解体用機械のアーム部分から先とパワーユニットをクローラクレーンで吊り下げる方式とした。

解体時の反力が十分取れるか，回転しないかなどが懸念されたが，開発実験と訓練により十分現場で対応なことを事前に確認した。

写真－8　吊り下げ式解体機

4.5　無人給油装置

従来の無人化施工では，燃料給油の際は補給ヤードまで建設機械を戻していた。しかし，線量が高い場合は機械に人が近づけないため，クレーンによって無人給油が行える装置を開発し，適用した。(特許出願中)

燃料タンクはカートリッジ式で，解体用機械に設けたガイドに沿って装填でき，給油口は自動開閉式で，着床すると自動で給油が行える。給油が開始すると回転灯が点灯し，遠隔操作室のモニターでは給油状況の確認ができる。

写真-9　無人給油状況

５．システムの評価

本システムは、原子力発電所復旧工事において2011 年 8 月から順調に稼動している。施工中であるがこれまでの評価を以下に示す。

①　映像の遅延

懸念された映像の遅延は，実測値で約 0.1 秒と，操作に支障のないレベルである。

② ネットワークの安定性

ロバスト性を持たせたシステムにより，建物の陰でも安定した通信を保っている。

③ 故障モニタリングの効果

不具合時の状態が迅速に特定できるため，的確な対応が取れ，機械の稼働率向上に寄与している。

④ 大型解体用機械の遠隔操作

初めて 30mを越すアームを備えた大型解体用機械の無人化を行ったが，当初の計画通りの解体能力を発揮することができた。

④　大型クレーンの遠隔操作

大型クローラクレーンの遠隔操作化も初めてであったが順調に作業できており，遠隔操作室で把握できる情報は十分であることが確認できた。また，通信異常による作業上の不具合は発生していない。

⑥ その他の遠隔操作機器

吊り下げ式解体機や，無人給油装置などの開発により，特殊作業や付帯作業の無人化も実現した。

６．おわりに

今回，多様な災害復旧への対応を目的に ICT 技術を活用した無人化施工のシステムを開発し，実用化を行った。

現在，難度の高い福島第一原子力発電所 3 号機復旧工事に適用して良好な結果を得ており，無人化施工技術は多様な災害への対応という面でさらに一歩前進したものと考える。

今後は，より多様な災害に対応できるよう，個々の作業に応じた遠隔操作機器，緊急回収などの不具合対応装置，今回の給油装置のような付帯作業用機器など，ハード面の開発も遅滞なく進めていくことが重要であると考える。

参考文献

1）建設無人化施工協会　技術委員会:無人化施工の推移と展望，建設の施工企画，11 月号，pp.6～12，2006 年

８．ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式を適用した 3DMC の実用化

大成ロテック株式会社　　○ 島田　拓
大成ロテック株式会社　　平野　晃
大成ロテック株式会社　　田中　純

１．はじめに

近年の ICT（Information and Communication Technology）の発達により，情報化施工は，建設業界において，広く普及している。特に，三次元マシンコントロールシステム（3DMC）は，生産性の向上及び施工の合理化を実現するツールとして，産学官による戦略的な普及方策が推し進められている。3DMC の代表例として，GNSS（Global Navigation Satellite System）測位方式を利用した制御システムと，測量機器の 1 つである「自動追尾式トータルステーション」を利用した制御システムがある。このうち GNSS 測位方式を用いた制御方式では，既知点に GNSS 基地局を設置し，無線通信にて補正情報を移動局に送信する RTK-GNSS 測位方式が多く採用されている。

RTK-GNSS 測位方式による 3DMC では，①基地局設置の手間，②GNSS 座標値と基準点座標値の照合作業，③舗装工等での高さ方向の精度確保，④システム機器が高額である、等の理由が、技術普及の阻害要因ともなっている。

そこで，大成ロテック（株）では，情報化施工におけるシステムの簡便省力化及び，施工精度の向上，並びにコスト縮減を目的として，『ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式』と『レーザ技術』を融合させた 3DMC の建設機械への適用を検討し，実用化を試みた。

本文では，新案 3DMC システム概要と構成を紹介すると共に，施工事例及び導入効果の検証について報告する。

２．RTK-GNSS 測位方式

2.1　RTK-GNSS 測位方式の概念

RTK-GNSS 測位方式は『現場内の既知点に設置した基地局』，『求点に設置する移動局』，『複数の GNSS 受信機』を用いて構成される。

RTK-GNSS 測位装置の構成を図-1 に示す。

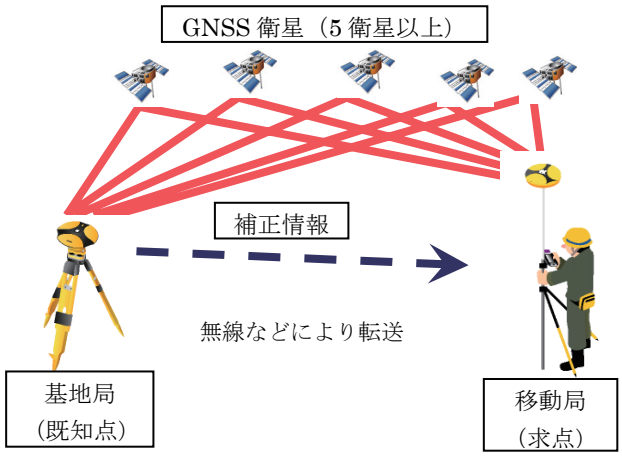


図-1　RTK-GNSS 測位装置構成

RTK-GNSS 測位方式の概念を以下に示す。

① 基地局は，GNSS 衛星からの信号を受信し，既知点との誤差を消去し，補正データを作成する。
② 作成された補正データは，無線装置などを用いて，移動局へ送信される。
③ 移動局では，リアルタイムに補正情報を受信し，即座に現位置における測位演算を行い，位置座標が算出される。

2.2　RTK-GNSS 測位方式の課題

RTK-GNSS 測位方式の課題を以下に示す。

1) 複数の GNSS 受信機及び、基地局を設置するため，機器設置の煩わしさ，システム機器のコスト高が懸念される。
2) システムの運用可能範囲が，無線装置の通信エリア内（距離）に制限される。
3) システム運用のためには，現場既知点（基準点）の設置及び GNSS 座標と基準点座標の照合作業（ローカライゼーション）が必要となり，労務コストが負担となる。
4) 舗装工等の鉛直方向精度が要求される場合には，施工精度の確保が課題となる。

前述した課題を解決する手段として，ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式とレーザ技術を融合させた新しい 3DMC システム（以下，VRS-RTK-GNSS-3DMC システムと記す）を開発し，3DMC システムの簡便省力化及び，コスト縮減，並びに施工精度向上を試みた。

３．VRS-RTK-GNSS-3DMC システム

当該システムの基幹である『レーザ技術』と『ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式』及び、主要装置についての概要を以下示す。

3.1　レーザ技術を用いた鉛直方向補正

従来の RTK-GNSS 測位方式による測位精度は，水平方向精度：±20［mm］程度，鉛直方向精度：±30［mm］程度が一般的であり，ミリ単位の施工精度が要求される舗装工等においては，鉛直方向精度に課題がある。

鉛直方向の精度確保の手段として，施工現場内の既知点にレーザ発光器を設置することで，RTK-GNSS 測位方式の課題である鉛直方向の補正が可能となる。

そこで，当該システムは，レーザ発光器として，ゾーンレーザートランスミッタ「PZL-1」（株式会社トプコン製）、レーザ受光器として，ゾーンセンサ「PZS-1」（株式会社トプコン製）及び，マシンコントロール用ポジショニングセンサ「PZS-MC」（株式会社トプコン製）を採用し，鉛直方向の精度確保を行った。

PZL-1 の特徴として，レーザ光を鉛直方向に放射状に照射することで，レーザ発光器から高低差±5［m］の幅まで受光することが可能であり，ゾーンレーザによる鉛直補正により，鉛直方向の誤差を±10［mm］まで補正することが可能となる。ゾーンレーザを用いた RTK-GNSS 測位方式の構成を図-2 に示す。

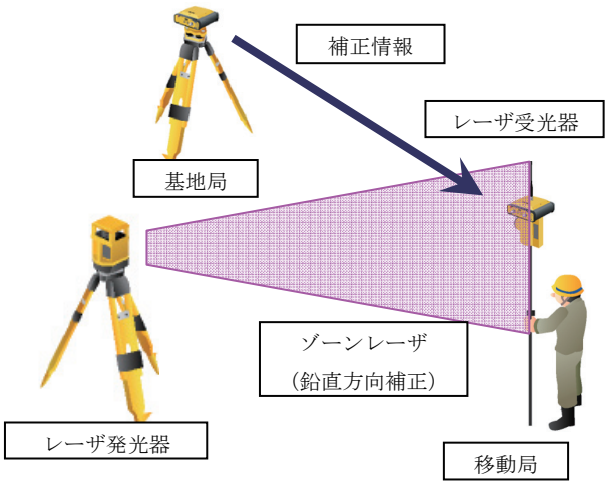


図-2　ゾーンレーザを用いた RTK-GNSS 測位方式

3.2　ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式

ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式（VRS 方式）は，3 点以上の電子基準点での観測データを用いて観測点（移動局）近傍に仮想的な基準局を構築し，電子基準点と移動局の距離に依存せずに短距離基線の RTK-GNSS 測位と同等の測位を実現する。

ここで，VRS とは，Virtual Reference Station：仮想基準点を意味する。また，電子基準点については，国土地理院が運用し民間に開放している全国に約 1,200 点の電子基準点データ（GNSS 連続観測システム）を利用するものである。

VRS 方式の解説を以下に示す。

① 移動局の単独測位情報を携帯電話通信網を使用して，補正情報配信サービス事業者に送信する。

② 補正情報配信サービス事業者では，移動局周辺の電子基準点の観測量から補正情報を求め，仮想基準点における補正データ（位相差）を解析して，その補正情報を再び携帯電話通信網を使用して，移動局へ配信する。

③ 移動局側では，移動局での RTK-GNSS 測位方式による観測データと配信された補正データから基線解析を行い，現位置での位置座標を求める。

ここで，本システムにおいては，補正情報配信サービス事業者として，（株）ジェノバと契約した。

また，携帯電話通信網は，KDDI の CPA 網を使用する（株）ジェノバ専用の通信回路を使用した。

ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式（VRS 方式）の測位概要を図-3 に示す。[1)]

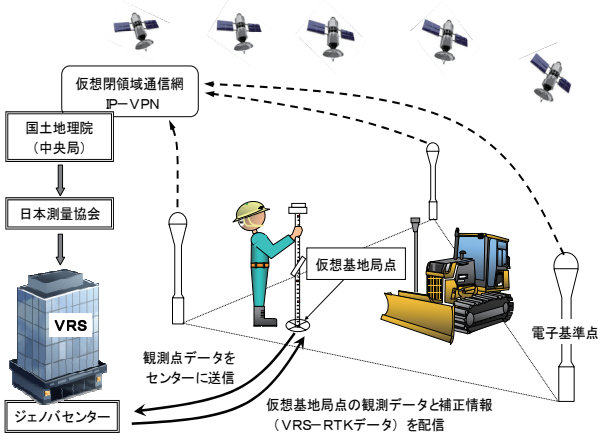


図-3　ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式の概要

3.3　VRS-RTK-GNSS-3DMC システムの移動局

VRS-RTK-GNSS-3DMC システムで、使用する『検測用移動局』および『重機用移動局』の主要構成及び、概要を以下に示す。

3.3.1　検測用移動局

検測用移動局は，通常の RTK-GNSS 測量に用いられる『GNSS 受信機』,『データコレクタ』,『レーザ受光器』,『通信端末 CPtrans-win（株式会社ジェノバ)』で構成される。

検測用移動局の構成を写真-1 に示す。

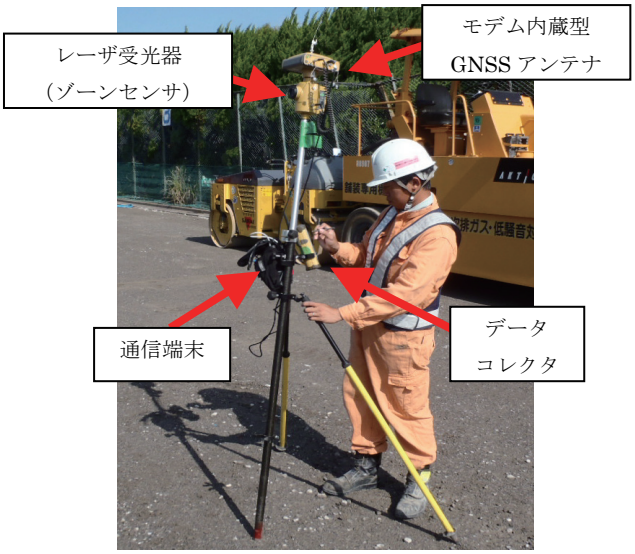


写真-1　検測用移動局構成

通信端末使用の際には，移動局システムを使用し，端末を初期化する必要がある。

配信情報のフォーマットは，通信時間による誤差を減らすため，容量が少なく，通信速度の速い RTCM3.0 を採用した。また，GNSS 受信機とデータコレクタの接続には Blue tooth 通信を用いた。

3.3.2　重機用移動局

重機用移動局のシステム構成を図-4 に示す。

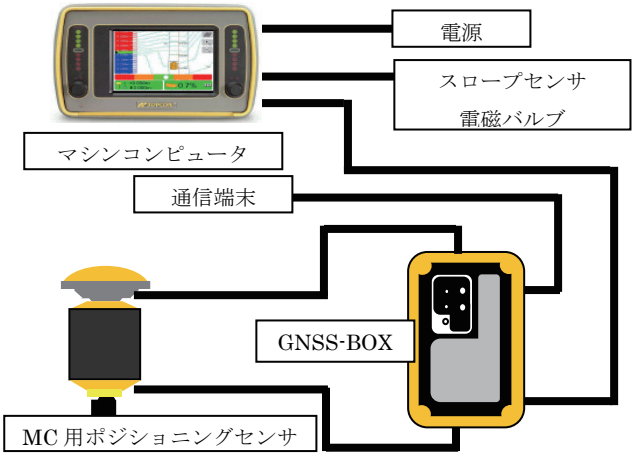


図-4　重機用移動局システム構成

重機用移動局は，RTK-GNSS 測位方式で使用する簡易無線機を通信端末に変更した構成となる。

ここで，通信端末は，検測用移動局と同様のものを使用した。また、重機移動局で用いられるマシンコンピュータには，通信端末初期化機能が備わっていないため，通信端末の初期化作業は，検測用移動局側で実施し，重機に再接続する必要がある。

4．水平測位精度の確認

当該システムによる水平測位精度の確認試験を実施した。精度確認試験の概要を表-1 に示す。

表-1　水平測位精度確認試験の概要

実施時期	2012 年 6 月
実施場所	大成ロテック（株）機械技術センター 埼玉県鴻巣市上谷
試験方法	VRS-RTK-GPS システムの移動局と RTK-GNSS 測位方式の移動局を定点に設置し，60 分計測を行い，位置座標の変位を比較する。

精度確認試験より得られた各システムの座標（X，Y）の変位の分布図を図-5 に示し，測位精度の比較結果を表-2 に示す。

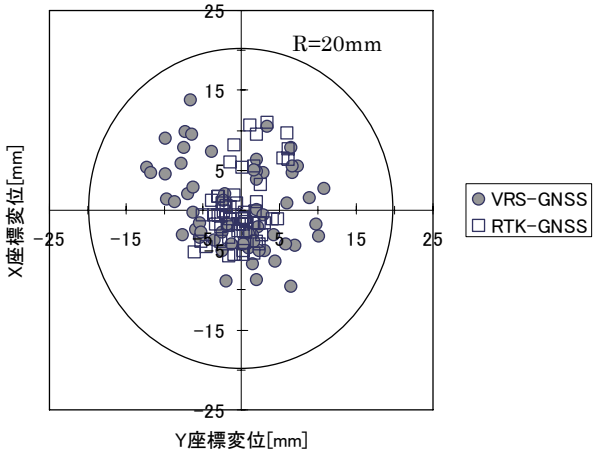


図-5　測位精度の比較結果

表-2 測位精度の比較結果　[mm]

項　目	VRS-RTK-GNSS	RTK-GNSS
X 座標最大変位	13.8	11.0
Y 座標最大変位	10.9	6.1
X 座標標準偏差	5.3	4.3
Y 座標標準偏差	5.1	2.8

図-5，表-2 の結果より，X 座標方向及び Y 座標方向の最大変位及び標準偏差をそれぞれ比較する

と，VRS-RTK-GNSS 測位方式は，RTK-GNSS 測位方式と比較して，変位のばらつきが、若干大きいが，座標の変位範囲は，通常の 3DMC で使用する RTK-GNSS 測位方式の誤差範囲と同等であることが確認でき，実施工においても，適用可能であると判断した。

５．システム実用性の検証

VRS-RTK-GNSS-3DMC の実用性の検証として，現場施工性試験及び，実現場施工にて，測位精度と施工精度の確認検証を行った。以下に実施状況及び，導入効果の検証結果を示す。

5.1　ブルドーザへの適用

VRS-RTK-GNSS システムをブルドーザへ適用し，路盤舗装における施工精度の確認試験を実施した。

ここで，施工精度の比較として，従来の RTK-GNSS-3DMC との比較検証を実施した。

また，試験施工に当たり，設計データは，当該システムによる出来型検測用移動局による現地測量と設計勾配から作成した。

表-3 に試験概要を示す。また，施工状況を写真-2 に示す。

表-3 試験概要

施工時期	2012 年 3 月
施工場所	埼玉県鴻巣市
施工数量	約 270 ㎡（約 18m　×　約 15m）
使用材料	RC-40
施工機械	ブルドーザ（D30PX22）

写真-2 施工状況

5.1.1　試験結果

VRS-RTK-GNSS-3DMC と RTK-GNSS-3DMC による設計高さと仕上がり高さの差のヒストグラムを図-6 および図-7 に示す。また，施工精度の比較を表-4 に示す。

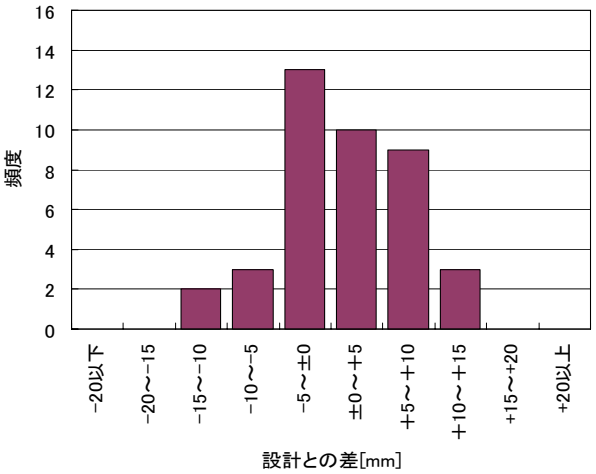


図-6 VRS-RTK-GNSS-3DMC-ﾌﾞﾙﾄﾞｰｻﾞの施工精度

図-6 より，設計高さに対する仕上がり高さの誤差の頻度は，誤差±5［mm］以内に 58%，±10［mm］以内に 83%，±15［mm］以内に 100%となった。

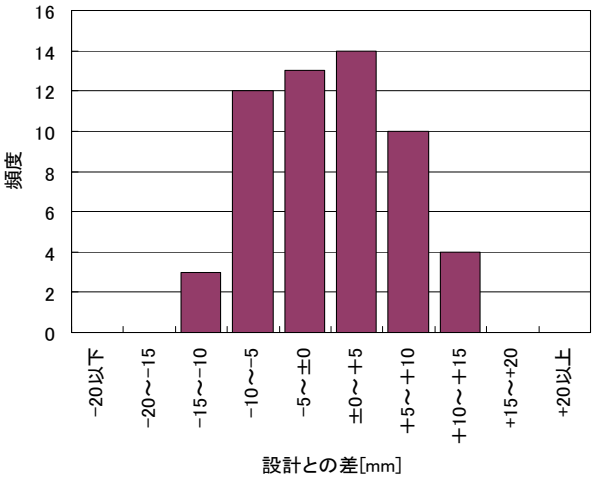


図-7 RTK-GNSS-3DMC-ﾌﾞﾙﾄﾞｰｻﾞの施工精度

図-7 より，設計高さに対する仕上がり高さの誤差の頻度は，誤差±5［mm］以内に 48%，±10［mm］以内に 88%，±15［mm］以内に 100%となった。

表-4 施工精度の比較

項目		VRS-RTK-GNSS 3DMC	RTK-GNSS 3DMC
［%］誤差の頻度	±5［mm］	58	48
	±10［mm］	83	88
	±15［mm］	100	100
	±20［mm］	100	100
最大値[mm]		15	12
最小値[mm]		-12	-13
標準偏差[mm]		6.6	6.3
有効データ数		40	56

表-4 より，標準偏差は，VRS-RTK-GPS-3DMC が，6.6［mm］，RTK-GNSS-3DMC が，6.3［mm］であり，VRS-RTK-GNSS-3DMC の施工精度は，従来の RTK-GNSS-3DMC と比較して，同等の施工精度であると判断できる。

5.2 モータグレーダへの適用事例

千葉県船橋市でのテニスコート路盤不陸整正工事において，VRS-RTK-GNSS-3DMC を適用したモータグレーダを導入して，施工精度の確認検証を実施した。

表-5 に工事概要を示す。また，施工状況を写真-3 及び，写真-4 に示す。

表-5 工事概要

施工時期	2012 年 7 月
施工場所	千葉県船橋市内　テニスコート場
施工数量	約 3,600 ㎡（約 36m　×　約 100m）
使用材料	RC-40
施工機械	モータグレーダ（MG230）

写真-3 施工状況（材料敷き均し）

写真-4 施工状況（ゾーンレーザ）

5.2.1 施工結果

実施工における仕上がり高さの差のヒストグラムを図-8 に示す。また，施工精度の確認結果を表-6 に示す。

表-6 に示すように，実施工における設計高さに対する仕上がり高さの誤差の頻度は，誤差±5［mm］以内に 56%，±10［mm］以内に 93%，±15［mm］以内に 100%となり，標準偏差は 6.6［mm］の結果が得られた。

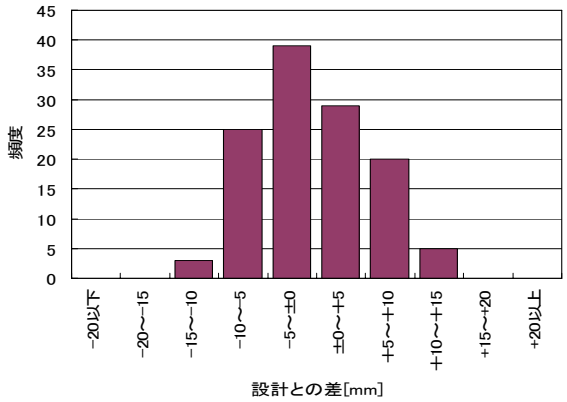


図-8 VRS-RTK-GNSS-3DMC-ﾓｰﾀｰｸﾞﾚｰﾀﾞの施工精度

表-6 施工精度の確認

項目		VRS-RTK-GNSS-3DMC
誤差の頻度［%］	±5mm	56
	±10mm	93
	±15mm	100
	±20mm	100
最大値[mm]		13
最小値[mm]		-12
標準偏差[mm]		5.8
有効データ数		121

5.3 運用効果の検証

当該システムと従来の RTK-GNSS 測位方式による 3DMC の運用効果についての比較検証結果を以下に示す。

5.3.1 システム運用コストの比較

システム運用に関わる機械経費（重機使用料を除く）及び，労務コストの試算結果を表-7 に示す。

表-7 より，従来の RTK-GNSS-3DMC と比較して，VRS-RTK-GNSS-3DMC では，情報通信に携帯電話通信網を使用するため，通信費用が発生するが，基地局の設営が不要になることで、機器コスト，準備作業に関わる労務コストが大幅に縮減され、月額換算で、223,615（円）のシステム運用コストの削減が期待できる。

表-7 システム運用コストの比較

項目	VRS-RTK-GNSS 3DMC システム	RTK-GNSS 3DMC システム
基地局（※1）	設置不要	設置必要
	—	¥111,000
通信費（※1）	基本料金：¥10,185 通信料金：¥5,700	—
データ配信料金	¥31,500	—
準備作業 ※照合作業 動作確認	¥80,000 （内　訳） ¥40,000×2 名×１日 ＝¥80,000	¥240,000 （内　訳） ¥40,000×2 名×3 日 ＝¥240,000
基準点設置	BM のみ	複数の基準点が必要
データ作成	設計データのみで運用可能 （世界測地系座標のみ使用可能）	基準点データ， 設計データが必要 （ローカル座標使用可能）
運用コスト合計	¥127,385	¥351,000 (▲¥223,615)

※　1ヶ月での使用料にて比較。

６．まとめ

今回導入した VRS-RTK-GNSS-3DMC システムの適用性及び，施工精度の確認結果より得られた知見を以下に示す。

① 観測点近傍の電子基準点と整合の取れた補正データの配信が行われるため，測地成果と一致した測位結果が得られる。

② 移動局の補正データは，携帯電話通信網を利用して通信するため，従来の無線通信と比べて広域において高精度の情報化施工が可能となる。

③ ネットワーク型RTK-GNSS測位方式にレーザ技術を融合することで，従来の RTK-GNSS-3DMC と同等のミリ単位での施工精度が確保できる。

④ 現場既知点への基準局設営が不要となるため，それに伴う機器コスト及び，労務コストが縮減され，約 220,000（円/月）の費用削減効果が期待できる。

７．今後の課題

VRS-RTK-GNSS-3DMC システムの現場導入に向けた今後の課題を以下に示す。

1)重機用移動局単独測位情報の通信手段の改善

VRS 方式では，施工開始の際に仮想基準点を構築するために観測点での単独測位情報を補正情報配信サービス事業者に送信する必要（初期化）がある。今回使用した重機用移動局のマシンコンピュータでは、この初期化処理が出来ないため、検測用移動局のデータコレクタを使用して初期化後，重機側へ再接続する必要があった。システム取扱いの簡便化を図るため，重機側での初期化が可能なシステムソフトウェアの検討が必要である。

2)データコレクタ通信速度の向上

GNSS 受信機とデータコレクタの通信手段として，Bluetooth 通信（無線）を使用しているため，検測用移動局での検測した位置情報結果をデータコレクタの画面に表示するまでに，十数秒のタイムラグがある。このタイムラグの対策として，GNSS 受信機とデータコレクタを有線通信で実施することで，より迅速なデータ処理が可能となる。

3)施工データの蓄積

様々な条件下でのシステム運用を試み，汎用性及び信頼性の高いシステムの構築が必要と考える。

８．おわりに

ネットワーク型 RTK-GNSS 測位方式を用いた情報化施工技術は，主に高さ方向に精度（ミリ単位）を要求されない盛土工事や舗装工事の締め固め管理（転圧管理システム）に適用されてきたが，今回，高さ方向の精度を補正するレーザ技術を組み入れることで，ミリ単位の精度が要求される舗装工（各種路盤工・アスファルト基層工等）にも適用できることが確認できた。公共技術を活用することで，民間の設備投資は，軽減され，また，システムの簡便化により，企業としての省力化にも繋がった。情報化施工は，建設生産性を向上させ，魅力ある現場作りを実現する有効なツールになる可能性を持っている。今回のシステム導入を踏まえ，3DMC システムを様々な施工現場に応用し，更なる改善を図ると共に普及に努めていきたい。

謝辞

当該システムの開発導入にあたり，惜しみない御協力いただいた株式会社トプコンソキアポジショニングジャパン様，株式会社ジェノバ様に深く感謝の意を申し上げます。

参考文献

1) 国土交通省国土地理院:ネットワーク型RTK-GPSを利用する公共測量作業マニュアル（案），国土地理院技術資料A-1-No.302，pp1～3，2005年6月

９．ＧＰＳを利用した超高層タワー鉛直精度管理技術の開発

—世界最高高さの自立式電波塔建設工事に国内初適用—

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　　田辺　　潔
株式会社大林組　本社　　原田　恒則

１．はじめに

世界最高高さの自立式電波塔（以下，超高層タワー）は，地上約 500m までの塔体と塔体最頂部から突き出した地上 634m までのゲイン塔で構成される。

塔体の鉄骨工事では，在来手法で上層部に盛替えた基準墨の累積誤差を担保することが最重要課題であった。そこで，ＧＰＳ鉛直精度管理システムを開発し，基準墨の精度を確認した。一方，ゲイン塔工事では，地上付近で組立てられたゲイン塔鉄骨を塔体の狭いシャフト内で傾斜を緻密に管理しながらリフトアップさせることが最重要課題であった。そこで，上記のシステムを利用し，リフトアップ時の動的な挙動管理，および最終位置決めにおける静的な位置決め作業に適用し効果を確認した。

本報では，ＧＰＳ鉛直精度管理技術の開発および超高層タワーの塔体鉄骨工事とゲイン塔リフトアップ工事への適用内容および得られた知見についてまとめた。

２．超高層タワー建設工事の概要

2.1　塔体鉄骨工事

塔体鉄骨工事の概要を表-1 に示す。積層工法による鉄骨工事は，タワークレーンを利用して図-1 のように地上約 500m まで行われた[1)]。鉄骨工事中の作業床はすべて仮設で，常に風やタワークレーンの動きなどによる大きな変位を伴う作業環境であった。鉛直精度を確認できるのは，エレベータシャフト周りの空間に限られる制約があった。

図-1　鉄骨工事の状況

2.2　ゲイン塔リフトアップ工事

ゲイン塔（着色部分）の施工ステップを図-2 に示す。同図左から，STEP 1：ゲイン塔鉄骨の地上付近での組立，STEP 2：塔体シャフト内におけるリフトアップ，STEP 3：塔体最上部 H495

表-1　塔体鉄骨工事の概要

タワー最高高さ	634m
塔体高さ	497m
鉄骨節数	48節（0～47節、展望台別途）
外周鉄骨	丸形鋼管柱
シャフト鉄骨	角形鋼管柱
工事期間	2009/02～2010/11（22ヵ月）

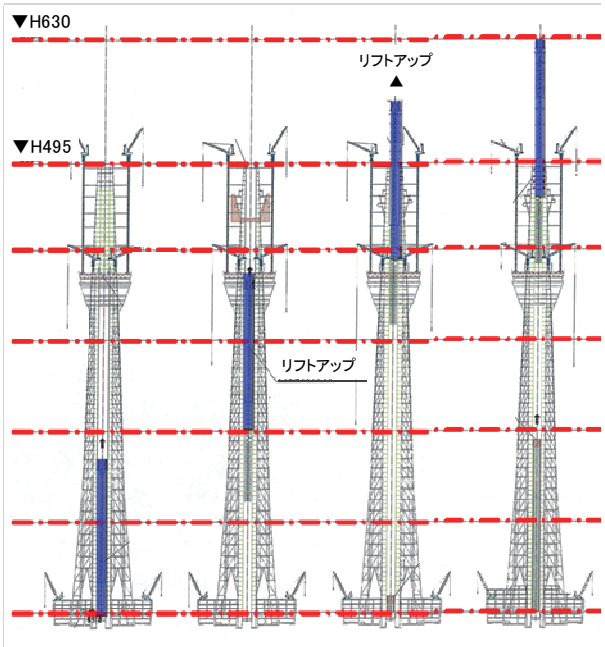


図-2　ゲイン塔の施工ステップ

表-2　ゲイン塔工事の概要

ゲイン塔高さ	約164m（制振装置室，塔体内固定部を含む）
鉄骨節数	17節
構　　造	鉄骨造
リフトアップ回数	14回
リフトアップ高さ	5～15.5m（計約123m）
工事期間	2010/12～2011/03（塔体から突出後）

表-3　基準墨計測手法の比較

	計測方法	制約事項	計測精度	運用のしやすさ	運用上の問題点	総合評価
①	地上に設置したレーザー鉛直器で計測	環境（温湿度、気圧）変化で計測精度が悪化	5mm／200m	計測専用のシャフトが必要	現状よりレーザー出力の高い機種はない	4ポイント 不採用
		1	1	1	1	
②	塔体外部からトータルステーションで計測	環境（温湿度、気圧）変化で計測精度が悪化	5mm／300m	現場外から長期計測が必要	仰角がきつい計測と足場やネット等と干渉	7ポイント 不採用
		1	2	2	2	
③	リアルタイムＧＰＳを利用した動的な計測	近隣に基準局を設置する必要有り	5～10mm／600m	各節ごとＧＰＳアンテナの盛替が必要	超高層領域で精度の確認が必要	13ポイント 条件付採用 （要検証）
		3	4	3	3	

（地上 497m 地点のこと，以下，同様の表記）から突出した状態でのリフトアップ，STEP 4：リフトアップの完了・定着部の接合，を表している。以下では，STEP 3 のリフトアップ時における精度管理について述べる。ゲイン塔リフトアップ工事の概要を表-2 に示す。１回のリフトアップ平均高さは約 10m であり，各リフトアップ作業の後，新たに塔体から突き出した部分に放送用の大型アンテナを取り付けるという作業が繰り返された。

３．鉛直精度管理システムの開発

3.1　システム設計

(1) 座標系の選択

基準墨の管理は，塔体の変位を考慮する必要がない相対座標管理による計測手法をベースにシステム構築を行う設計とした。相対座標管理の場合，累積誤差を把握するため地上や塔体外部に基準を持つ絶対座標管理手法によって基準墨の精度を確認する手法を確立しなければならない。しかし，絶対座標管理では塔体の変位を差し引いて，考慮する必要がある。

(2) 絶対座標管理による計測手法

絶対座標管理で基準墨の精度を計測する３種類の方法を比較検証した。その結果を表-3 に示す。光学式の計測手法（①，②）の計測精度は，空気中の光の屈折率に大きく左右される。光の屈折率は，気温，湿度，気圧によって変化する。雨雲が出現することの多い地上 300m 付近を跨いで計測するような状況下では光の屈折率が大きく変化する。このため，測量器メーカーは同条件下での光学式測量機器の計測精度を保証していない。また，国内土木工事現場において，地下 400m に設置したレーザー鉛直器のレーザー光を地上で受光し，正確に計測できるか実験を行った。クラス２以下の安全なレーザー光では正確に計測できないことがわかり，そのため不採用とした。３次元光波測量器（以下，トータルステーション：ＴＳ）による測量は，塔体高さと同程度離れた現場外の市街地にＴＳを設置して，塔体最上部に設置したプリズムを長時間測量し続けなければならない。しかし，塔体の外周に設置された足場や垂直ネット，養生シートなどにより，外部からの視通を確保できないことを理由に不採用とした。塔体が風などの影響により常時何らかの変位をしていることから，動的な計測が可能なリアルタイムＧＰＳについて調査した。リアルタイムＧＰＳは，ＧＰＳの各種計測手法のうち，基準局を必要とする相対測位･干渉測位の一種で，計測精度が高い。最高 20Hz のサンプリング周波数でデータを取得でき，各データの信頼性が高いことから動的計測が可能である。実際，長時間計測を実施し，統計処理を行うと表-3 に記したような計測精度が得られた。リアルタイムＧＰＳは国内の研究実績 [2)]や海外での工事適用実績 [3)]などから計測手法としての有を把握していたが，さらに検証すべき以下の課題があった。

・実運用上の計測精度（誤差の標準偏差：σ）
・日射や風の影響による鋼構造物の変位量
・タワークレーンなど（マルチパス）によるＧＰＳデータ取得の低減率

(3) ＧＰＳ計測検証実験

上記の検証課題に対して，高さ 195m の鉄骨造タワーの 150m 地点，および超高層集合住宅建設現場の最上階で計測実験を行った結果，以下の事項が明らかになった。

・計測精度は，水平方向約 5mm，高さ方向約 10mm
・日射による変位は，風より１桁大きく，100mm 以上
・昼間のデータ取得率はタワークレーンの稼働により低下し，その向きによって大きく変動する

3.2　専用基準局と座標変換

(1) 専用基準局の設置

干渉測位によるＧＰＳの計測精度は，基準点との間の距離に比例して低下する。計測精度が優先される場合，その距離は 5km 以内が望ましいが，近隣の電子基準点は足立：8km，市川：9km，練馬：16km であった。したがって，現場周辺に専用基準局を設置した。基準局の選定では，不動点であることと，ＧＰＳ受信環境が優れていることとが重要な条件となる。周辺に高いビルがない地域では，不動点であることを優先するため，振動の発生源である幹線道路や鉄道付近

は避ける必要がある。一方，周辺に高いビルが多い都心部では，ＧＰＳの受信環境を優先して低層ビルの屋上などに設置する方が望ましい。今回は，都心部であったため，ＧＰＳ受信環境を優先して近隣ビルの屋上に設置した。

(2) 現場ローカル座標への変換

ＧＰＳから得られた東経，北緯，楕円体高（＝標高＋ジオイド高）の位置座標（以下，ＧＰＳ座標）は WGS-84(World Geodetic System 1984) 楕円体上にある。ＧＰＳ座標から現場ローカル座標を得るには，複数のコントロールポイント（以下，ＣＰ）を設け，同ポイントにおける測量によりＧＰＳ座標とローカル座標を取得し，ヘルマート変換を行う。

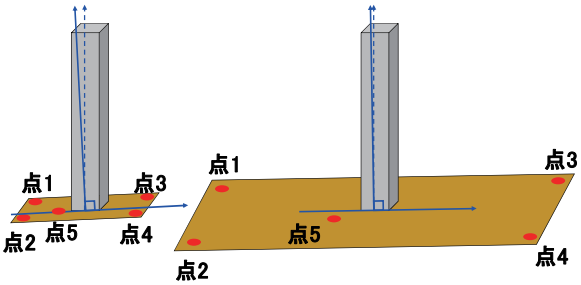


図-3　座標変換エリアの鉛直誤差への影響

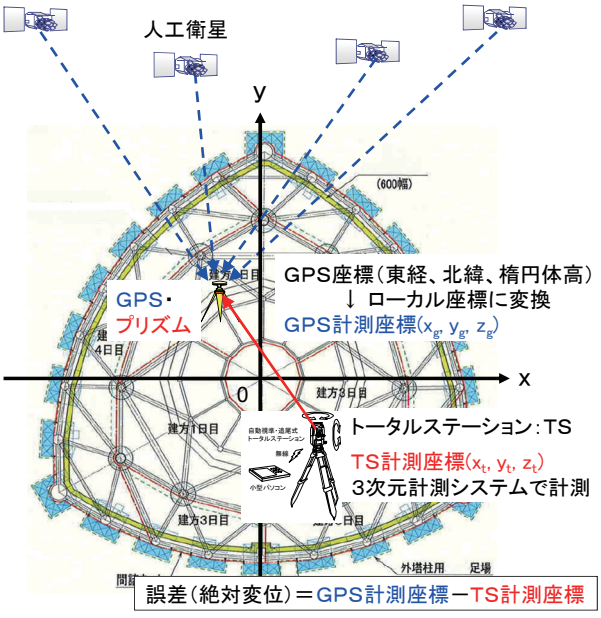


図-4　基準点の絶対変位の算出

図-5　ＧＰＳ設置計画（背景地図は建設時のもの）

(3) ジオイドと鉛直軸の誤差

数学モデルの WGS-84 楕円体に対し，平均的な海水面（重力の等しい面）をジオイドと呼ぶ。ジオイドは数学モデルでは定式化できない不規則な形状をした面である。ジオイド高は，国土地理院から 2km メッシュで提供されており，それ以外のポイントは内挿補間によって求められる。そのため，得られる標高は真値に対して多少の誤差を伴う。一方，各ＣＰでは水平より高さの方が測量誤差は大きい。その結果，両者から導出された座標変換式では，図-3 左のようにローカル座標系の鉛直軸に誤差が生じる。その誤差が 5 秒だと仮定すると，地上 600m では水平誤差が約 15mm となる。座標変換に起因する誤差が顕著になるため，図-3 右のようにできるだけ広域にＣＰを設けて座標変換を行うことで可能な限り鉛直軸の誤差の影響を小さくした。

3.3　ＧＰＳ鉛直精度管理システムの開発

ＧＰＳ座標からローカル座標へ変換された座標値（ＧＰＳ計測座標）は，現場内基準点（鉛直視準器により盛替え）を利用してＴＳにより計測された座標値（ＴＳ計測座標）と比較して誤差（以下，絶対変位）を算出できる（図-4）。得られた絶対変位を詳細に分析するため，下記の機能をもつシステムを開発した。

①絶対変位と風向風速計の計測値をリアルタイム表示し，10 分間または 24 時間の履歴を時刻歴グラフで表示する機能（モニタリング機能）

②指定した時間内における指定した風速値以下に対応する絶対変位データを抽出し，出力する機能（基準墨管理機能）

③同上範囲に対応する絶対変位データを抽出し，出力する機能（風速変位後処理機能）

④各種設定を入力する機能（各種設定機能）

４．超高層タワー建設工事への適用

4.1　塔体鉄骨工事における基準墨の鉛直精度管理

(1) システム適用計画

通信インフラ整備を含むＧＰＳ設置計画を図-5 に示す。塔体芯から約 300m 離れたビルの屋上に基準局を，塔体鉄骨最上部に観測局をそれぞれ設置し，受信したＧＰＳデータを工事事務所に設置したＰＣに取り込み，リアルタイムＧＰＳ解析を行った。基準局の計測データを不動点としてリアルタイム解析を実施することで塔体の動的な計測が可能となった。ＧＰＳ鉛直精

度管理システムの適用計画を図-6 に示す。リアルタイムＧＰＳ解析結果と風向風速計のデータを同システムへ取込み，計測データの表示，保存，分析を行った。風向風速計は H285 の外周部の点検歩廊（工事用垂直ネットの外側）に３台設置し，風向が絶えず変化しても塔体の影響の少ない風速値を確実に取得できるようにした。塔体頂部のＧＰＳ観測局は，塔体芯の変位と塔体回転角を得るために２箇所に設置した。得られた長期間の計測データから，日射の影響がない深夜から早朝にかけての風速値の低い時間帯のみのデータを抽出し，それを統計処理することでＧＰＳ計測座標を取得した。鉄骨工事１節ごとに，これら２箇所で得られたＧＰＳ計測座標から塔体芯（ローカル座標原点）での誤差値と回転角を算出することによって，従来手法のような超高層タワー内のある一点ではなく，節全体としての誤差を把握できるようにした。具体的に誤差の把握は，在来手法で上げた基準墨をＧＰＳで数日間モニタリングし，得られたＧＰＳ計測座標との誤差値をチェックすることで行われた。なお，JASS6 では，高さ H の建物の倒れに関する管理許容差は H/4000+7mm かつ 30mm※以下，限界許容差は H/2500+10mm かつ 50mm※以下と規定されている（※H≧100m では，下線部の値が支配的)。在来測量の累積誤差については最大±20mm と想定した。

(2) 適用結果

実施では，ＧＰＳから得られた基準墨の誤差値が，想定された累積誤差の最大値を超えたことは一度もなく，在来手法で上げた基準墨の正確さが確認できた。さらに，H150，H240，H375，H495 において，ＧＰＳ計測精度の確認測量を実施した。塔体最上部にプリズムを設置し，その直上にＧＰＳアンテナを設置した。塔体外部から現場のローカル座標系でＴＳを利用して測量を行い，ＧＰＳ計測座標と比較したところ，両者の誤差は x，y 座標でほぼ 5mm 以内であり，本システムのＧＰＳで得られた水平座標の正確さが確認できた[4)]。

4.2 ゲイン塔リフトアップ工事における鉛直精度管理

(1) リフトアップ工事の概要

ゲイン塔のリフトアップ用に油圧センターホールジャッキ（以下，リフトアップジャッキ）が塔体最上部に 12 台設置された。リフトアップの最終段階においては，ゲイン塔は塔体内部から大きく突き出し，工事の進捗とともにゲイン塔の重心位置が徐々に高くなるため，ゲイン塔の鉛直精度管理と転倒防止が重要であった。そのため，リフトアップジャッキの他，図-7 に示すようにゲイン塔が塔体上部に突き出してからの転倒を防ぎ，その鉛直精度を調整可能にするための転倒防止ジャッキを塔体最上部付近に設置した。リフトアップ作業では，すべてのリフトアップジャッキを同調動作させ，ゲイン塔の鉛直精度を保持しながら上昇させなくてはならない。さらに，転倒防止ジャッキに対してはゲイン塔の傾きや塔体との位置関係を常に監視し

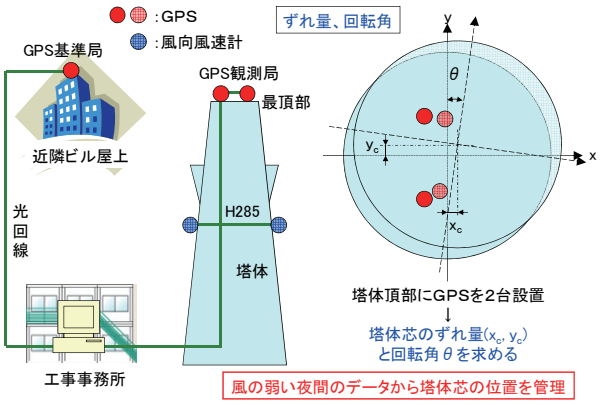


図-6　システム全体配置

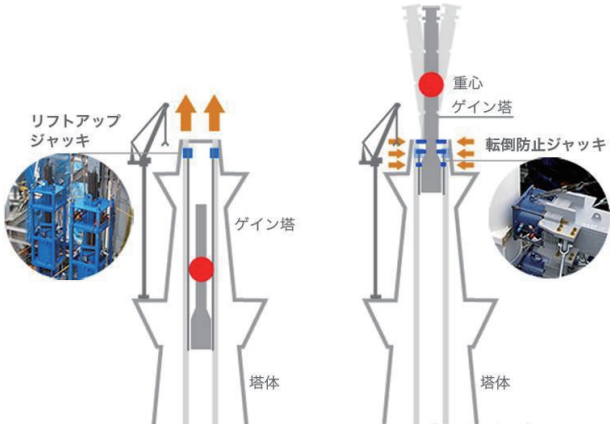


図-7　リフトアップ工事用ジャッキの配置

図-8　リフトアップ工事指令室の概要

ながらの微妙な押し引きの調整が必要となった。そのため，すべてのジャッキは図-8 のように第１展望台内に設置した指令室で集中制御した。指令室では，リフトアップ中のゲイン塔の様々な情報を各種計測管理システムの画面や現場の監視員から無線連絡で収集し，長大なゲイン塔を正確にコントロールした[5)]。

ゲイン塔の鉛直精度管理はゲイン塔の上部，中間部，下部および塔体最上部に設置した傾斜計の値を監視して行う計画であった。それに対して，ＧＰＳ鉛直精度管理システムを併用し，実工事において鉛直精度管理の有効性を確認した。本システムの概要を図-9 に示す。ＧＰＳ基準局は塔体鉄骨工事と同様に設置し，ＧＰＳ観測局はゲイン塔頂部に２台，塔体頂部（H495）に１台設置した。得られた計測値から，ゲイン塔頂部芯のずれと回転，ゲイン塔および塔体の傾斜角が計算処理により求められる。風向風速計は，塔体工事で設置した３台のうちの１台をゲイン塔頂部へ移設し，H285 に２台設置した。

(2) リフトアップ工事への適用

リフトアップ作業は昼間に行われたため，日射や強風の影響を受けてゲイン塔は大きく変位した。その変位はゲイン塔高さ方向に対して線形ではないため，ゲイン塔の上中下段に設置した傾斜計はそれぞれ異なる値を示した。一方，ＧＰＳ鉛直精度管理システムでは，ゲイン塔および塔体をそれぞれ一つの剛体と見なして傾斜を算出する仕組みになっている。ゲイン塔はリフトアップ中，その下部が塔体のシャフト内を通過するが，シャフト内は空間的な余裕がなく，傾斜角を精密に制御しないとゲイン塔とシャフトが接触してしまう。こうした制御を行う必要がある場合には，ゲイン塔全体の大局的な傾斜が把握できるＧＰＳ鉛直精度管理システムの方が，傾斜計による管理手法より管理しやすいことが確認された。

また，初期のリフトアップ作業時にゲイン塔が回転するという想定外の現象が起こった。ゲイン塔の鉄骨柱を押す転倒防止ジャッキの作用点が柱芯から大きくずれると柱のＲ形状に合せて回転力が発生するという仕組みであった。このため，リフトアップ中の転倒防止ジャッキは必要以上に押さない制御方式に修正された。このように，リフトアップ中の回転量が把握可能な点においてもＧＰＳ鉛直精度管理システムの有効性が改めて確認できた。リフトアップ中のシステム画面を図-10 に示す。画面左にＧＰＳ計測値，右に風向風速計の計測値をプロット表示し，傾斜角および回転角等は右端に数値で示した。この日は風が弱く晴天だったため，ゲイン塔および塔体が日射により大きく変位していたが，傾斜角を緻密に制御して鉛直精度を確保しながらリフトアップできた。

(3) ゲイン塔の最終位置決め

転倒防止ジャッキは，鉛直精度をきめ細かく調整するため，その押し出し量を0.1mm単位で制

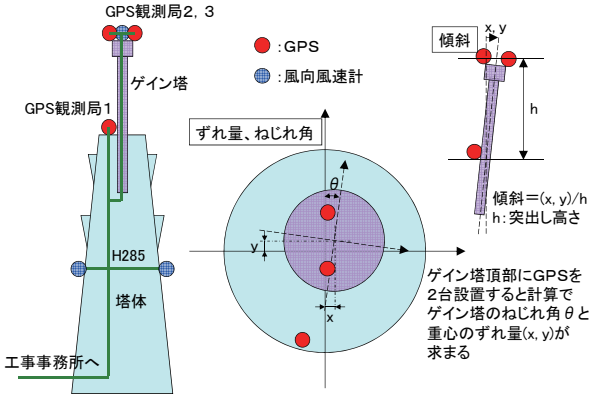


図-9　リフトアップ工事時のシステム適用計画

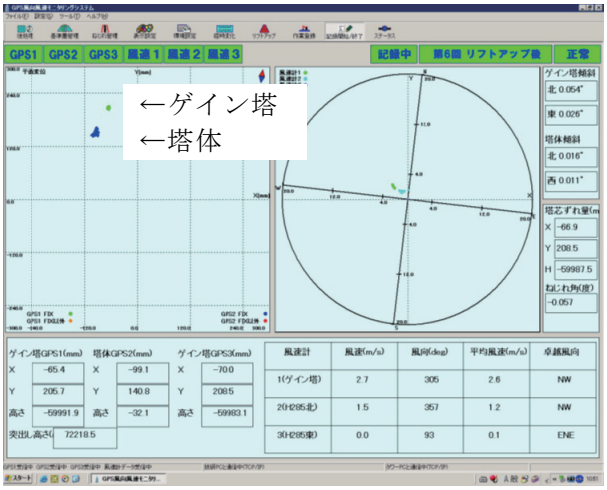


図-10　リフトアップ中のシステム画面

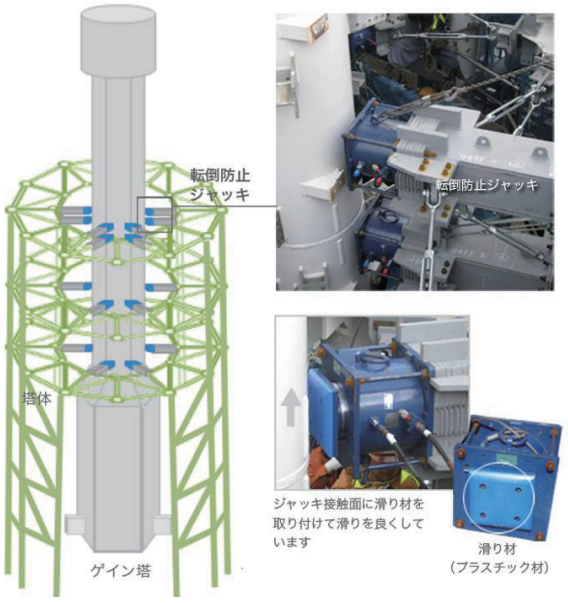


図-11　転倒防止ジャッキの配置

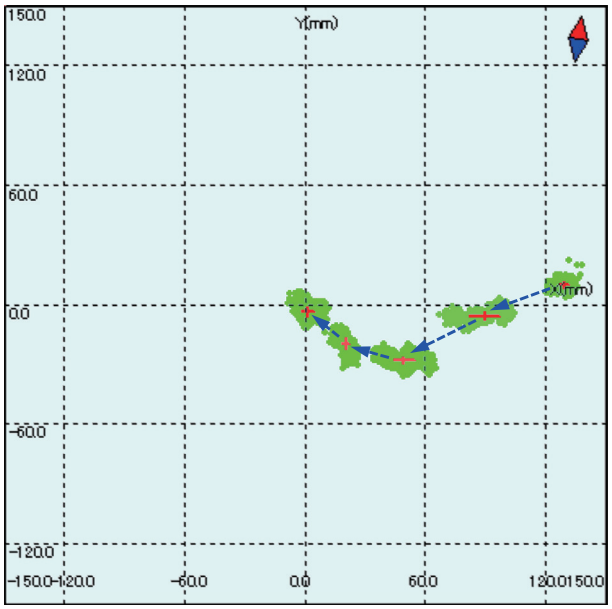


図-12　ゲイン塔頂部の最終位置決めの推移

御できる。転倒防止ジャッキを1mm押すとゲイン塔頂部を逆方向へ約7mm動かせる。リフトアップ中はゲイン塔の鉛直性を保持し，リフトアップ停止時はゲイン塔が転倒しないよう固定するため，図-11のようにジャッキを水平６方向，上下７段（同図には４段のみ表示）に設置し，地震荷重・風荷重に対抗させた。計14回のリフトアップによって，最頂部がH634に到達後，日射及び風の影響を考慮し，到達翌日の深夜から翌々日の早朝に掛け，転倒防止ジャッキを押し引きさせて，ゲイン塔頂部の水平位置および鉛直精度を調整した。作業時の風速は概ね5m/s以下であり，風による影響はほぼ無視できる状況であった。実際には，図-12のように100mm以上ずれた状態から作業を開始し，傾斜計の値を確認しながらゲイン塔の鉛直精度を調整した。ＧＰＳにより最頂部の位置を確認したところ，設計値に対して20mm以内という高い精度で最終位置決め作業を完了できた。

５．まとめ

本報では，超高層タワーの塔体鉄骨工事とゲイン塔リフトアップ工事の２つの場面に対して，精度管理技術を開発し，それぞれ最適な組合せで在来手法に対する適用効果を検証した。これにより，以下に示す知見を得た。

- ＧＰＳの計測精度は計４回実施した精度確認測量結果から，十分に正確であった
- ＧＰＳの計測値からゲイン塔の傾斜角と回転角を算出して，監視することで緻密なリフトアップの制御を容易に行えた
- 風の弱い日の夜間にゲイン塔最頂部の最終位置決めを行った結果，設計値に対して20mm 以内の精度が確保されたことをＧＰＳの計測値で確認した

今回，開発したＧＰＳを利用した鉛直精度管理技術は，工事適用を重ねることで，さらなる改善が進むと考えられる。今後，一般的な超高層ビル建設工事への水平展開を図って行く予定である。

参考文献

1) 田辺潔：東京スカイツリー®の施工 -施工概要および工事工程-，基礎工，Vol.40，No.1，pp.30-32，2012
2) 田村幸雄・吉田昭仁：ＧＰＳ技術を用いた構造物の変位応答モニタリング，計測と制御，Vol.46，No.8，pp.623-627，2007
3) Joel van Cranenbroeck,et.al：Smallest GPS Network for Tallest Building -Core Wall Survey Control System for High Rise Buildings-，GIS DEVELOPMENT，pp.52-56，2007
4) 池田雄一・浜田耕史・田辺潔・原田恒則・田村達一:超高層タワー建設工事における精度管理技術の開発，第 13 回建設ロボットシンポジウム論文集，2012（投稿中）
5) 原田恒則：東京スカイツリー®の施工 -ゲイン塔工事（リフトアップ工法）-，基礎工，Vol.40，No.1，pp.44-47，2012

10. 同心円状レチクル内蔵 TS の開発と斜杭打設システムへの応用

関西工事測量株式会社　○ 中庭　和秀
大阪大学　矢吹　信喜
住友金属工業株式会社　阿部　幸夫

１．はじめに

構造物の基礎工事には構造物の特性や地質条件，施工条件に応じた種々の工法があり，支持層が深い場合には杭基礎が広く採用される。杭基礎には杭を地盤に対して鉛直に打設する直杭基礎と地盤に対して傾斜を持たせて打設する斜杭基礎があり，杭体の形状は円柱が主体である。斜杭基礎を採用すると構造物の地震時水平変位が抑えられるため，耐震性を確保しながら杭径を小さくできるというメリットがある。一方で，斜杭基礎は施工精度を確保することが難しいことや工法が打撃工法に限定され騒音・振動問題を伴うことなどのデメリットからほとんど採用されなかった。しかし近年，建設業界においてコスト縮減が強く求められる中で合理的・経済的な基礎形式として斜杭基礎に注目が集まってきており，その性能に関する研究も行われてきている [1)2)3)]。また，低騒音・低振動であり斜杭基礎の施工も可能である回転貫入工法が開発され [4)]，その実績も増えてきており， 施工性と環境負荷の課題も解消されている。

回転貫入工法による直杭基礎の施工状況を**写真-1** に，斜杭基礎の施工状況を**写真-2** に示す。これらの写真からも判るように，斜杭基礎の場合は杭を所定の角度で地盤に貫入するための施工管理を行うことが求められるが，杭軸角度を精度よく計測できる方法がないのが現状である。また，実工事においては，得られた角度情報を杭打ち機のオペレータにリアルタイムで伝え，そのずれ量を補正しながら施工を進めることができるシステムの開発も望まれている。

そこで，本研究では基礎杭のような円柱構造物の中心軸を計測できる装置として，レチクルの十字線に同心円状のサークルを加えた“Baum”を内蔵したトータルステーション(TS)の開発を行う。また，Baum 内蔵 TS を応用することで，斜杭基礎の施工を精度よく行う管理方法の確立を目指す。

写真-1　直杭基礎の施工状況

写真-2　斜杭基礎の施工状況

２．従来の基礎杭施工の精度管理

直杭基礎の打込み精度を管理する一般的な方法は，建込みにあたり杭先端を所定の位置に設置した後，直角 2 方向に設置した 2 台のトランシットで鉛直度を管理する方法である [5)]。この場合，2 台のトランシットそれぞれに計測員を配置する必要があり工数がかかるほか，計測員の目視で鉛直度

写真-3　傾斜計による杭の傾斜角の計測風景

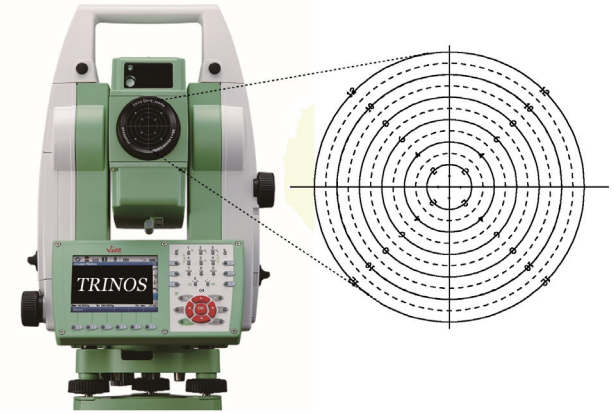


写真-4　Baum 内蔵トータルステーション

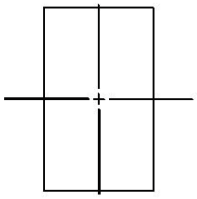


図-1　十字線による長方形の中心位置計測

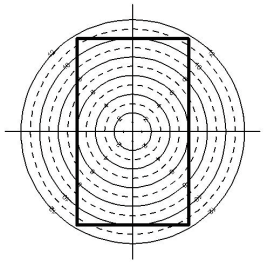


図-2　Baum を用いた長方形の中心位置計測

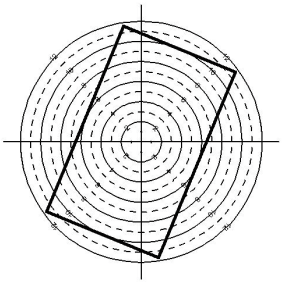


図-3　Baum を用いた傾いた長方形の中心位置計測

を判断するため計測データが残らないという問題もある。

また，ターゲットシールを用いて 1 台の TS で杭の鉛直度を計測する方法もある。これは，杭にターゲットシールを貼り，TS からのレーザーをターゲットに当てることで鉛直度を管理するものである。しかし回転貫入工法では，杭を回転させて打設を行うため，計測するたびに杭の回転を止める必要があり，施工性が悪い。

斜杭基礎の場合は，傾斜計により杭の傾きを計測する方法がある。**写真-3** のように，作業員が杭に傾斜計を直接当てて計測するため，計測時には杭の回転を止める必要があり，施工性に劣る。また，傾斜計を当てる位置や当て方によって計測結果に大きなばらつきが生じるなど，施工精度の面でも問題がある。

別な方法として，杭の周囲の地面に，杭の所定の回転貫入方向と平行に棒状部材を設置し，杭と棒状部材とを照らしあわせることで，杭の傾斜を確認する方法がある。この場合，棒状部材を地盤にある程度以上貫入させる必要があり，手間が掛かるほか，人の目視でずれの修正を行うため，精度管理が難しく，計測データも記録されない。

３．Baum 内蔵 TS の開発

3.1　Baum 内蔵 TS の概要

TS はレチクルに描かれている十字線の交点と計測位置の目印を合わせ，角度と距離を計測する器械である。位置を合わせることが出来る場所が十字線の交点だけであることから，計測位置にピンポイントで目印がなければ，位置を合わせることができない。

Baum 内蔵 TS は，TS のレチクルに描かれている十字線に同心円状の目盛が付いたサークルを加えた Baum をレチクルとしている（**写真-4**）。幅対距離の比が 1:1000 になるような間隔で同心円を配置しているため，Baum を覗いて 1m 先のものを見た場合，同心円の 1 目盛の幅が 1mm（0.001m）として計測される。

レチクルが Baum となることでこれまで対象物に目印がないことで計測できなかったものが，Baum の同心円を目印とすることで計測が可能となる。例えば，長方形の中心を計測する場合，**図-1** のように十字線を用いて長方形の中心を計測しようとしても十字線の交点を合わせる目印がないため正確な中心位置を計測することができない。しかし，**図-2** のように Baum の同心円状のゲージ

を用いて同心円の中心から構造物の左右両端までの距離が同じになるようにすれば左右における中心線上にあわせることができ，同様に上下両端とBaumの円を合わせれば計測対象の上下における中心線に合わせることができるので長方形の中心を計測することができる。また，レチクルが同心円であることで**図-3**のように長方形が斜めであっても同じ手法で中心に合わせることができる。

3.2　Baumのゲージ幅の算出と精度

ゲージの幅と対象物までの距離Lと実際の幅Dの関係を**図-4**に示す。ゲージの幅は，DとLの関係が1:1000となるように0.226mmと定めた。ただし，DとLはレンズのひずみと距離による誤差があり，微妙に比例していない。Lが10mの場合に，Dは10.03mmであり，Lが100mのときDは99.60mmである。すなわち，10m離れた位置では0.03mmの誤差があり，100m離れた位置で0.4mmの誤差ということになる。一般的なTSにおける測距精度は2mm+2ppm，測角精度は5秒である。100m先における5秒の誤差は2.4mmであることからBaumのゲージの精度は測量における精度を十分に満たしているといえる。なお，レチクルのゲージ幅と実際の見え幅はTSのメーカーによって微妙に異なり，現在使用している値はライカ製のTSをもとに算出したものである。

3.3　Baum内蔵TSによる中心軸座標計測

TSが計測できる距離は計測対象物の表面である。そのため円柱構造物の中心軸を直接計測することはできない。そこで円柱構造物表面の座標から中心軸座標を計算により算出しなければならない。そこで**図-5**に示すようにBaum内蔵TSから見える円柱構造物表面の中心線上の異なる2点までの距離と角度を計測した値をもとに円柱構造物の中心軸の傾きを算出し，円柱の半径の長さだけ円柱の中心方向へと平行移動するという計算を行うことにより円柱の中心軸を求める。なお，今回の手法では円柱構造物の半径は既知であるものとする。計算の手順を以下に示す。

① Baum内蔵TSから見える円柱構造物の両端がBaumのゲージの同心円の中の一つの円の接線となるようにBaum内蔵TSの角度を合わせ，その位置の角度と距離を計測する。計測した点を点Aとする（**図-5　①**）。

② 同じ円柱構造物において点Aとは異なる点を①と同様にして角度と距離を計測し，これを点Bとする（**図-5　②**）。このとき，ベクトル $\overrightarrow{AB}$ が円柱構造物の傾きを表す。

③ Baum内蔵TSの器械位置を点Oとし，$\overrightarrow{AB}$ とベクトル $\overrightarrow{AO}$ に垂直で点A始点とする方向ベクトル $\vec{c}$ を求める（**図-5　③**）。

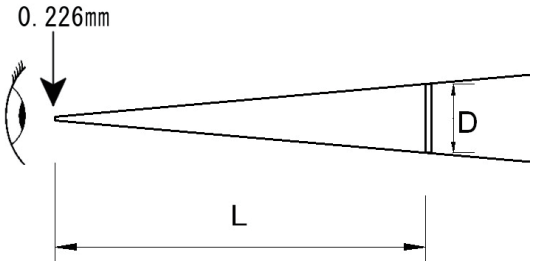


図-4　Baum内蔵TSによる幅の見え方

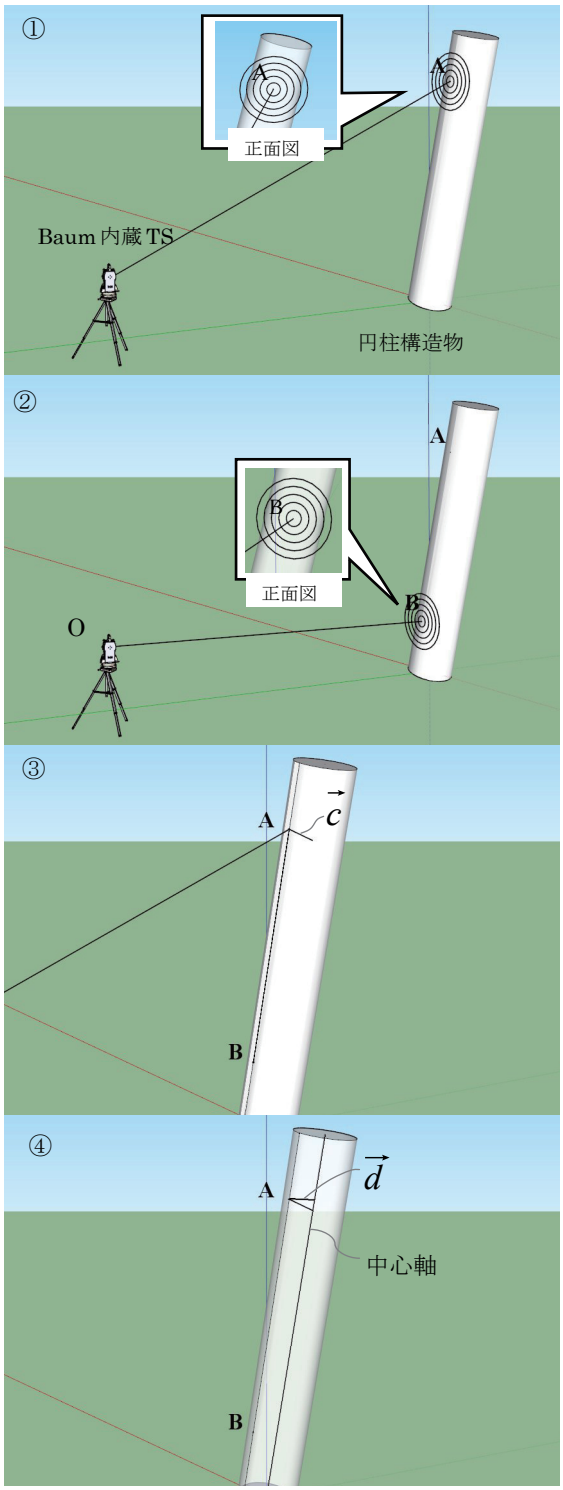


図-5　中心軸計測手順

④　$\overrightarrow{AB}$ と $\vec{c}$ に垂直な方向ベクトル $\vec{d}$ を求め，$\overrightarrow{AB}$ を $\vec{d}$ の方向に平行移動する（**図-5　④**）。平行移動の距離は円柱構造物の半径の長さとする。これによって求められるベクトルが杭の中心軸を表す。

４．斜杭打設システムへの応用

4.1　杭打設ナビゲーションの開発

3 章で述べた Baum 内蔵 TS を用いて杭の中心軸を計測する方法では，測量座標系に基づいた座標値が結果として得られるため杭打ち機や杭打ち機のオペレータの向きを考慮していない。例えば**図-6** のように座標系と杭打ち機の方向がマッチしていない場合，ずれを修正するために，杭打ち機をどの方向に何度傾けるのかが判りにくい。このため，杭打ち機のオペレータが打設のずれを修正する際，迅速に操作することができず，操作ミスが起こる原因にもなる。

そこで斜杭基礎工事に適用するために中心軸を計測することにより求められる杭の傾きや位置と計画値とのずれを求め，このずれが無くなるようにオペレータにナビゲーションするシステムを開発した。これは 3 章で述べた中心軸の算出の計算を行うための専用のアプリケーションをインストールした情報端末に TS と杭と杭打ち機の位置関係を登録することによりオペレータに操作しやすい座標系で杭を傾ける方向を表示することができる。これにより，オペレータの視点で杭の打設状況が把握でき，正確な打設を行うことができる。

4.2　杭打設ナビゲーションの概要

図-7 に杭打設ナビゲーションのシステム概略図を示す。**写真-5** のように Baum 内蔵 TS で計測した杭の情報（杭表面の座標値）が Baum 内蔵 TS に取り付けた送信機から無線を通じて杭打ち機のオペレータ室にある中継機に送信され，Bluetooth に変換されて情報端末に送られる。情報端末に内蔵されたプログラムで杭の位置を瞬時に計算し，杭の偏芯と傾きと正規の位置までの補正量，現在の杭深度がオペレータの操作しやすい杭打ち機の方向で情報端末の画面上に表示される。**写真-6** は Baum 内蔵 TS のレチクルを斜杭の中心線上に合わせたものである。**写真-6** の鋼管杭に書いてある 22 という数字は杭下端から 22m の長さであるということを表し，全周マーキングがされている。このマーキング位置に十字線の交点をあわせて計測することで杭先端深度の計測が可能となる。

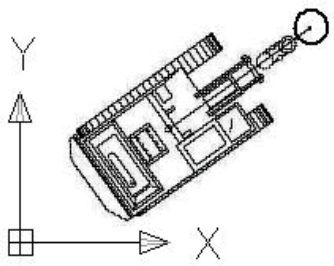


図-6　杭打ち機と平面座標軸

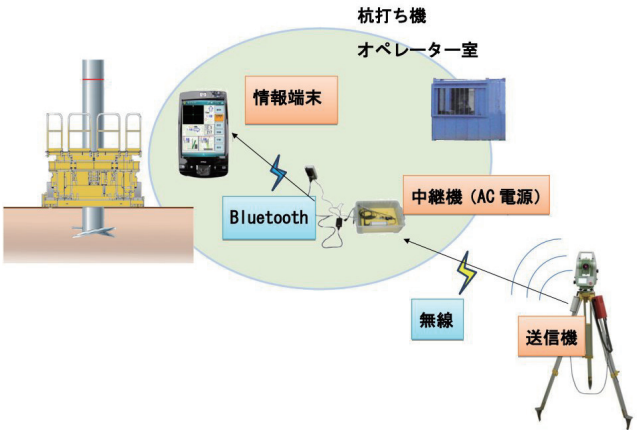


図-7　杭打設ナビゲーションシステム概略図

写真-5　Baum 内蔵 TS を用いた基礎杭の計測風景

写真-6　Baum 内蔵 TS による斜杭計測

4.3　ナビゲーションの流れ

本システムの操作フローを図-8 に示す。まず，Baum 内蔵 TS に送信機の取り付けを行い，杭打ち機のオペレータ室に無線の受信機と Bluetooth への変換機，専用アプリケーションがインストールされている情報端末を設置する。また，杭先端からの長さが既知である位置に全周マーキングをしておく。次に打設する杭の計画座標値と杭の半径を入力する。重機位置の測定では杭打ち機の周囲 4 面のうち 1 面を 2 点計測する。このとき，計測した面がナビゲーション画面の基準の面となるため杭打ち機のオペレータが操作しやすい面を選択する。写真-6 のように全周マーキングと十字線の交点が重なり，Baum を用いて求められる杭の中心線上の点を 1 点目として計測し，杭の中心線上で 1 点目と異なる任意の点を 2 点目として計測する。これらの測定データは送信機を通して自動的に杭打ちのオペレータが持つ情報端末に送られ，計算された結果が情報端末に表示される。ナビゲーションに従って杭のずれを修正しながら施工を進める。

4.4　出力情報

図-9 に杭打設ナビゲーションの情報端末に表示される計測結果画面の一例と画面の説明を示す。補正量が数値化されて表示されるためオペレータは正確にずれの修正を行うことができる。表-1 は直杭基礎の計測履歴を出力したものである。この表に示すように観測日時，杭深度，1 点目と 2 点目の実測座標，計画高における中心座標の計画位置と実測位置，XY 偏芯量と傾きの角度が自動的に記録されるため，時系列ごとの施工の履歴を残すことができる。

5．まとめ

本研究では，従来の十字線に代わり同心円状のサークルが描かれたレチクルである Baum を内蔵した TS の開発を行った。この Baum 内蔵 TS を用いて円柱構造物の表面の 2 点の座標値を計測し，計算によって円柱構造物の中心軸を計測できることを示した。

また，この方法を応用して，基礎杭打設時にオペレータが操作しやすい視点で杭の平面位置と傾きの補正量のナビゲーションを行うシステムの開発を行った。このシステムを用いることで，今まで困難とされていた斜杭基礎の施工管理を精度よく行うことができるため，今後の斜杭基礎の普及に貢献することが期待できる。

さらにこのシステムは，計測員 1 名で，杭の鉛直度，杭芯ずれ，杭の深度を計測でき，その結果をリアルタイムで判りやすくオペレータに伝えることが可能であり，さらにこれらの計測データを時系列に記録できるため，直杭基礎の施工管理シ

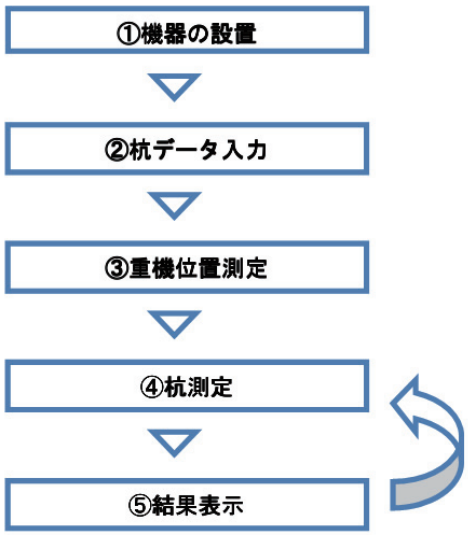
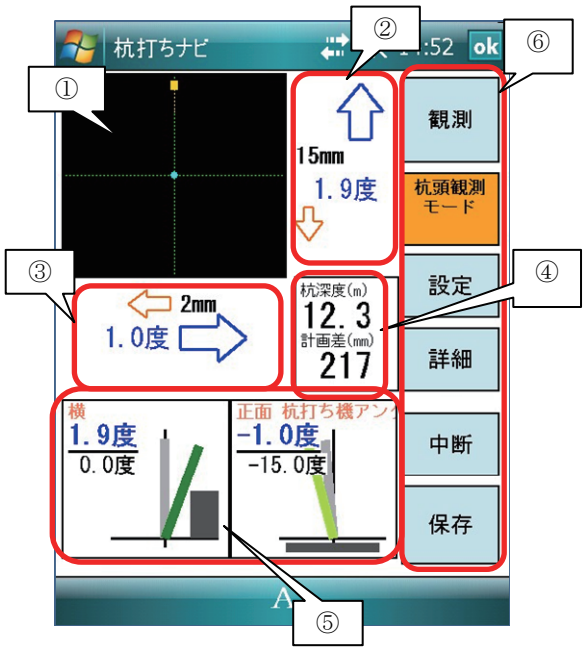


図-8　操作フロー



①：TS と杭の位置関係を示す。十字線の交点が杭の位置となる。基準面として設定した面が画面下部となる視点として表示される。
②：基準面から見て前後の傾きと偏芯量を表す。矢印は計画値に対して修正する方向を示す。
③：基準面から見て左右の傾きと偏芯量を表す。矢印は計画値に対して修正する方向を示す。
④：杭先端深度と深度の計画値との差を示す。
⑤：正面と横のアングルから見た杭の傾きの模式図
⑥：操作ボタン

図-9　杭打設ナビゲーション計測結果画面表示例

表-1　杭打設ナビゲーション計測履歴出力例

観測日時		杭深度	1点目の杭芯実測位置座標			2点目の杭芯実測位置座標			杭芯計画位置座標（計画高）			杭芯実測位置座標（計画高）			XY偏芯量		角度（実測/計画）
		(M)	(X)	(Y)	(Z)	(X)	(Y)	(Z)	(X)	(Y)	(Z)	(X)	(Y)	(Z)	(X)	(Y)	(°)
2012/08/01	08:27	1.056	1039.989	999.985	9.944	1039.995	999.992	2.969	1040.41	1000	0	1040.398	999.995	0	0.008	0.005	0.08/0.00
2012/08/01	08:40	2.551	1040.001	1000.024	8.448	1040.005	1000.004	3.223	1040.41	1000	0	1040.408	999.992	0	−0.002	0.008	0.23/0.00
2012/08/01	08:44	3.415	1040.019	999.998	7.585	1040.015	999.997	3.817	1040.41	1000	0	1040.411	999.996	0	−0.005	0.004	0.06/0.00
2012/08/01	08:54	4.770	1039.992	999.995	6.229	1039.999	999.997	3.418	1040.41	1000	0	1040.407	999.999	0	−0.001	0.001	0.14/0.00
2012/08/01	09:10	5.775	1040.003	1000.004	5.225	1040.003	1000.002	2.803	1040.41	1000	0	1040.404	999.998	0	0.002	0.002	0.07/0.00
2012/08/01	09:28	7.760	1040.006	1000.006	3.240	1040.007	1000.006	2.576	1040.41	1000	0	1040.409	1000.005	0	−0.003	−0.005	0.05/0.00

ステムとしてもメリットがある。

今後は，計測データを蓄積し分析することで，より精度の高い計測ができるシステムを目指す。さらに，実現場で作業するオペレータの意見をもとに，より使いやすいシステムとなるように改良を進める。

参考文献

1) 清田三四郎・米澤豊司・青木一二三・神田政幸・西岡英俊・出羽利行：斜杭基礎の水平抵抗特性と鉄道構造物への適用，第 54 回地盤工学シンポジウム（平成 21 年度論文集），pp.299-306，2009.
2) 佐藤正義・田地陽一・張至鎬・田蔵隆：直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性能に関する遠心振動実験，防災科学技術研究所研究報告，第 79 号，pp.1-8，2011.
3) 木村 亮・牧野洋志・大川賢紀・亀井宏之・張 鋒：斜杭を有する群杭基礎の静的水平支持力特性，土木学会論文集 No. 722/III-61，pp.97-107，2002.
4) 阿部幸夫：ジオウィング・パイルⅡ，基礎工，Vol.36，No.12，pp.90-92，2008.
5) 日本道路協会：杭基礎施工便覧，pp.65，2007.1.

11. 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

国土交通省　国土技術政策総合研究所　情報基盤研究室　○ 梶田　洋規
同上　北川　順
同上　重高　浩一

１．はじめに

国土技術政策総合研究所（国総研）では，ICT（情報通信技術）を利用した情報化施工の導入・普及に向け，CAD 技術と３次元座標の測量技術を利用した「ＴＳを用いた出来形管理」の検討を行っており，その結果，直轄工事における実用化が図られた。導入現場では，効果があったとの意見が多くある一方，課題や要望もあげられており，その１つがトータルステーション（ＴＳ）より長距離計測が可能な衛星測量技術の導入である。

衛星測位技術は，近年，公共測量にも利用され，ICT を利用した情報化施工においても，「RTK-GNSS」等が重機の位置情報取得に利用されており，基地局（固定局）が共用できることから，重機と共に出来形管理用の計測機器としても導入が望まれている。

そのため，国総研では，ＴＳに代え RTK-GNSS を用いた出来形管理の検討や現場試行を行ってきたが，RTK-GNSS は衛星の移動や気象の変化等で計測値が変動し，その変動幅が土工の出来形管理基準の「高さ」の規格値に対して無視できない値であるため，施工や検査にそのまま導入・利用することが難しいことが分かった。

そこで，本稿では，情報化施工の普及・導入に取り組んでいる河川土工や道路土工の出来形管理を念頭に，RTK-GNSS をある条件下において利用することにより，必要な計測精度の確保に資する方策について，実験フィールドにおいて取得したデータを分析・検討した内容を紹介するものである。

２．RTK-GNSS による出来形計測の現状と課題

2.1　RTK-GNSS の計測値の特徴

公共測量作業規程の基となる「作業規程の準則」では，精度が高いスタティック法は，１点当り 60 分間固定した計測が必要となるため，出来形管理での利用は難しい。片や，RTK-GNSS はスタティック法ほど高精度では無いが，「３～４級基準点測量」に利用される計測精度を持ち，１点当たり 10 秒間の計測で済むことから，出来形管理への利用が期待される計測技術である。

しかし，RTK-GNSS では，衛星が移動するために信号が取得可能な衛星数や配置が変化し，また，高度２万 km から信号が伝わる間の電離層や水蒸気などの影響を受けるため，刻々と計測値が変動する。平成 21 年度に RTK-GNSS を国総研構内の定位置に固定して３次元座標値を 12 時間連続取得した結果では，水平方向の精度は±２cm 程度，鉛直方向の精度は±３cm 程度と共に，約１～２時間周期の大きな振幅の波に小さな振幅の波が乗った形を示していることから，短時間での平均処理だけでは変動誤差を大幅に改善することは出来ないように見受けられる（**図-1**）[1)2)]。

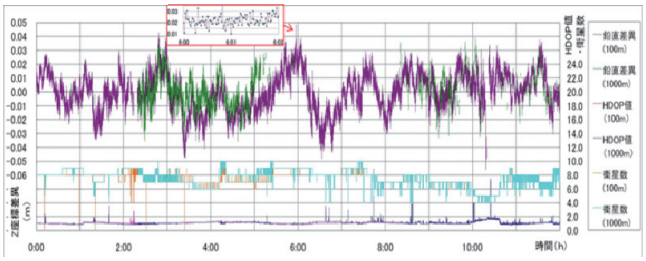


図-1　RTK-GNSSの長時間固定計測データの変動

2.2　出来形管理基準

公共土木工事においては，「土木工事施工管理基準」が定められ，工種毎に出来形管理の測定項目や規格値が決められており，監督・検査においても，その内容に沿って行われる（**図-2**）。

工種	測定項目		規格値(mm)	測定基準	測定箇所
道路土工	基準高 ▽		±50	施工延長40mにつき1箇所、延長40m以下のものは1施工箇所につき2箇所。 基準高は、道路中心線及び端部で測定。	【盛土の場合】 【掘削の場合】
	法長	L＜5m	掘削：-200 盛土：-100		
		L≧5m	掘削：法長の-4% 盛土：法長の-2%		
	幅(W1、W2)		-100		

図-2　出来形管理基準（道路土工）

利用する３次元測量機器は，この規格値の計測を行うに足る精度（規格値に対する再現性の確保）を保有している必要がある。

ＴＳの計測誤差は，実験の結果，３級ＴＳだと計測距離 100m地点で，水平方向±２cm 以内，鉛直方向±１cm 以内であり，施工誤差を考慮しても「土工」の出来形管理に利用可能な精度である。

一方，RTK-GNSS の鉛直方向の誤差は±３cm 程度であるため，精度不足の感がある。

３．精度向上方策の検討

上記の問題を解決するには，抜本的にはハードウェアや計算処理プログラムの改良による計測精度の向上が望まれるが，当面実施できることとして，運用面の工夫がある。その１つに，計測に適する（または，適さない）条件を抽出し，その条件で運用することである。

そこで，RTK-GNSS の移動局を固定し，長時間データを取得し，そのデータに何らかの処理を行うことで，精度向上の効果がありそうな運用方法につながる指標を抽出するものである。

過去の検討で，初期化後の短時間は計測値のバラツキ具合が少ない印象を得ていることから，初期化して約１時間計測することを 25 セット行い，全体で約25時間のデータを取得し、分析を行った。

3.1　取得したデータの概要

初期化して約１時間計測したデータ（鉛直差異）の一つは図-3の通りである。

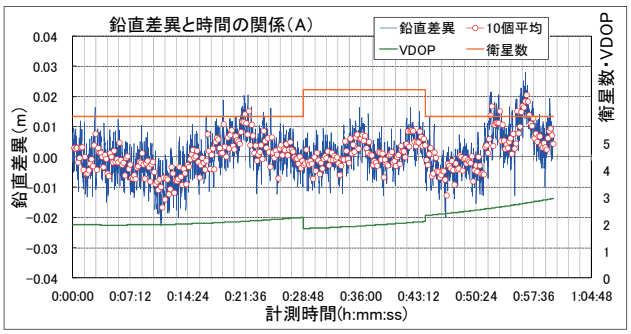


図-3　初期化後１時間連続で取得したデータの１つ

この約１時間連続データ25回分をつなぎ合わせたものを図-4に示す。計測地域や利用機器の違いか，或いは１時間毎に初期化する影響からかは不明だが，平成21年度のデータと比較して，計測のバラツキ具合が小さく，大きな振幅の波も見受けられない。

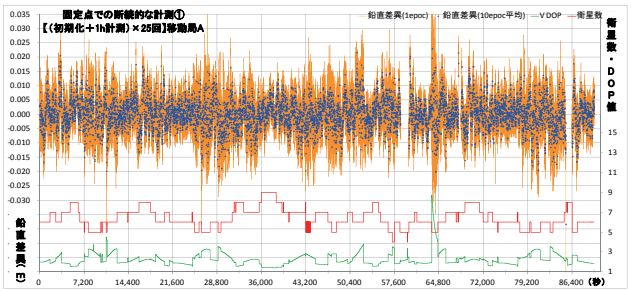


図-4　１時間取得データ25回分

なお，計測精度と相関の高いVDOP値の度数分布を見ると，一部に高い値があるものの，1.8～2.2に集中し，ほぼ3以下で良好であった(図-5)。

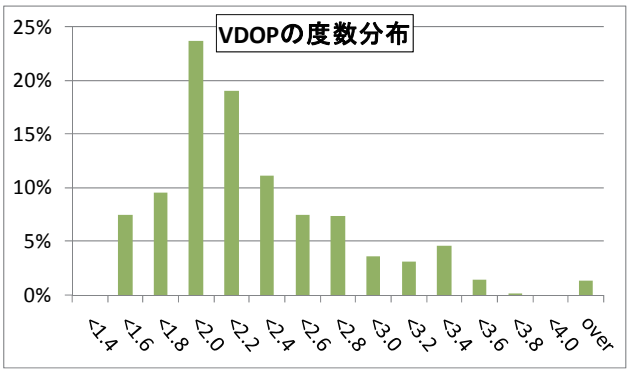


図-5　VDOPの度数分布

3.2　捕捉衛星の状況を要因とした分析

25 個の各データのグラフより，捕捉衛星が初期化時から変化した際にバラツキが大きくなっているデータが，多くあるように見受けられた。元々、捕捉していた衛星数が少ない場合，衛星数が減るとDOP 値が大きくなり計測差異のバラツキが大きくなるのは当然であるが(図-6)，衛星数が増えてDOP 値が低下した場合であっても，バラツキが若干大きくなっている場合が見受けられた(図-7)。

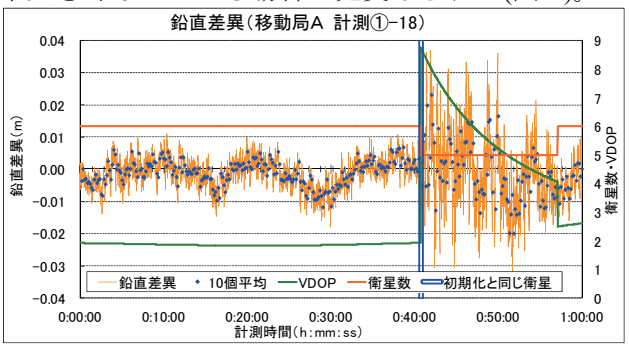


図-6　バラツキの変化（衛星数減）

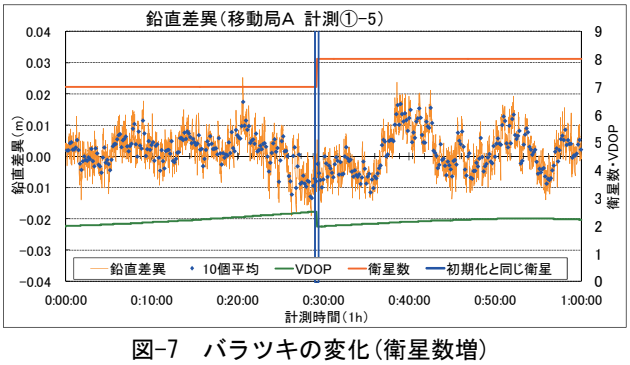


図-7　バラツキの変化（衛星数増）

過去の分析で，統計的な相関値は低いものの，初期化直後短時間のデータだけを抽出することで多少の精度向上の傾向がみられたことに通じるものがある。

そこで，初期化時と同じ衛星を捕捉しているものと，異なる衛星を捕捉しているものに分け，計測精度に違いがあるかを分析した(図-8)。

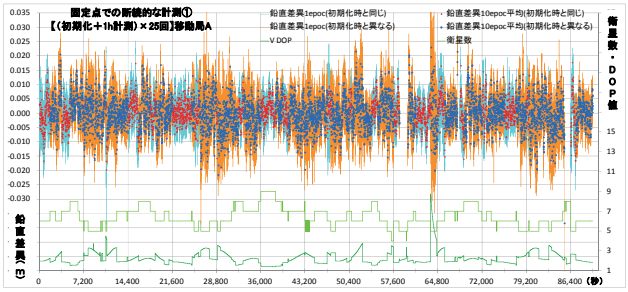


図-8　初期化時からの衛星捕捉状態の変化

鉛直差異の度数分布を見ると，初期化時と同じ衛星を捕捉している場合の方が，計測精度が向上している感はあるが，全体的な分布として，劇的な改善には至っていない（図-9，図-10）。

これは，今回取得したデータの計測精度が，比較的，良いためではないかと推察される。

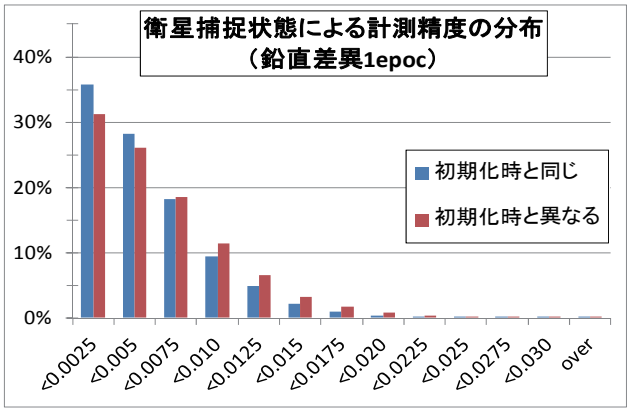


図-9　計測精度の度数分布の比較(1epoc)

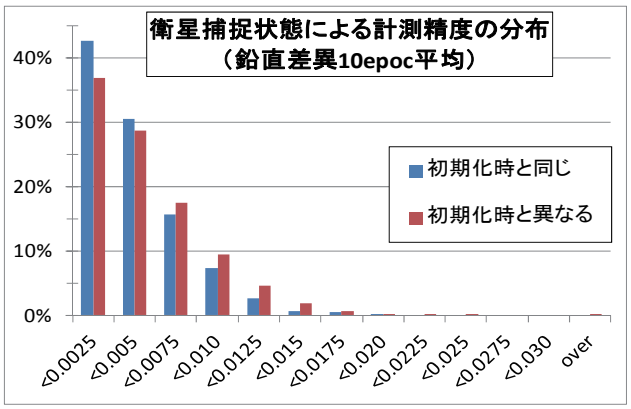


図-10　計測精度の度数分布の比較(10epoc平均)

3.2　効果の度合い

初期化時の衛星状態の維持が計測精度に与える効果の度合いとして，VDOP 値制限による計測精度の効果と比較した。

(1) VDOP と計測精度の関係

VDOP 値と精度の関係を図-11，図-12 に示す。

VDOP 値 3.0 未満に制限すると，利用可能なデータ量は 89.2%で，1epoc 時は標準偏差 6.0mm／最大値 104.3mm／差異 10mm 超過割合 9.9%，10epoc 平均時は標準偏差 1.6mm／最大値 38.4mm／差異 10mm 超過割合 5.4%となる。

VDOP 値 2.0 未満に制約すると，利用可能なデータ量は 41.3%で，1epoc 時は標準偏差 5.0mm／最大値 27.6mm／差異 10mm 超過割合 5.2%，10epoc 平均時は標準偏差 1.3mm／最大値 21.4mm／差異 10mm 超過割合 2.5%となる。

なお，VDOP 値を更に小さい 1.8 未満に制約すると，異常値は削除され最大値は小さくなるが，標準偏差はほぼ変わらず，利用可能なデータが 16.8%と非常に少なくなり，作業性は悪化する。

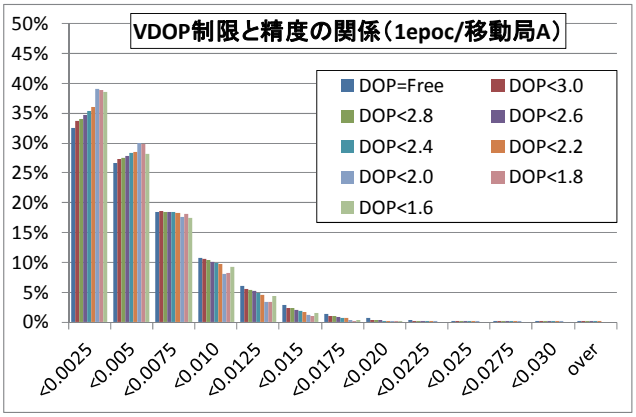


図-11　VDOPと精度の関係(1epoc)

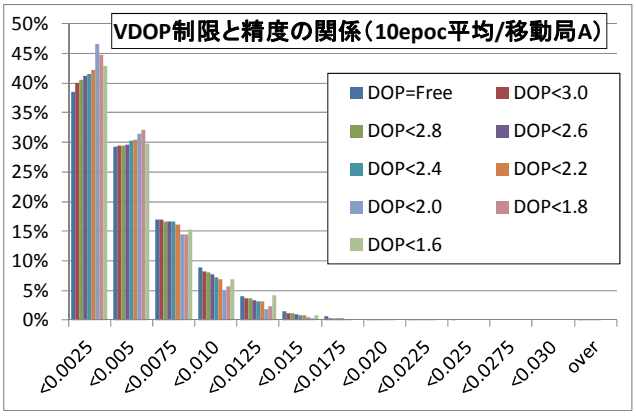


図-12　VDOPと精度の関係(10epoc平均)

(2) 初期化時衛星下の計測精度

初期化時と捕捉衛星が同じ状態での VDOP 値と精度の関係を図-13，図-14 に示す。

VDOP 値制限無しの場合，1epoc 時は標準偏差 5.7mm／最大値 38.7mm／差異 10mm 超過割合 8.4%，10epoc 平均時は標準偏差 4.7mm／最大値 19.8mm／差異 10mm 超過割合 4.0%となる。出来形管理で重要な最大値は大幅に向上し，1epoc では VDOP 値 2.0～2.2 制限辺り，10epoc 平均では DOP 値 1.8～2.0 制限辺りと同等の効果を示した。

但し，初期化時と同じ衛星捕捉状態の時間は，

25 回平均で 16.6 分であり，作業性の面では少し難がある。

VDOP 値 3.0 未満に制限すると，1epoc 時は標準偏差 3.0mm／最大値 26.9mm／差異 10mm 超過割合 7.6%，10epoc 平均時は標準偏差 0.8mm／最大値 17.7mm／差異 10mm 超過割合 3.5%となる。最大値は，1epoc では VDOP 値 2.0 制限と同等，10epoc 平均では DOP 値 1.8～2.0 制限辺りと同等の効果を示した。VDOP 値の有無で，出来形管理に重要な最大値への効果はあまり無いが，標準偏差には大きな向上が見られる。

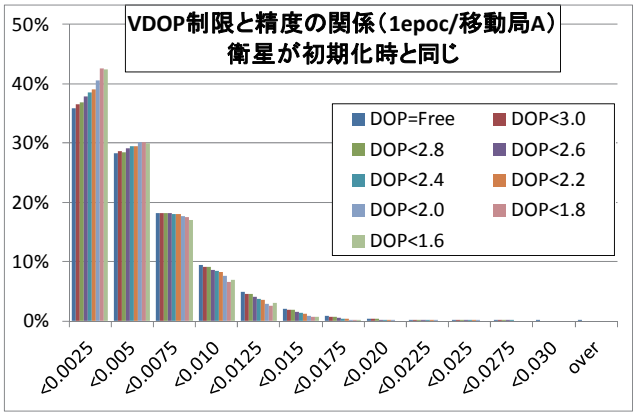


図-13　初期化時衛星下でのVDOPと精度の関係（1epoc）

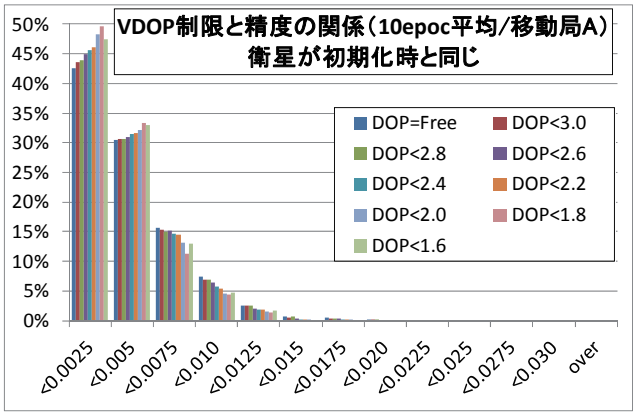


図-14　初期化時衛星下のVDOPと精度の関係（10epoc平均）

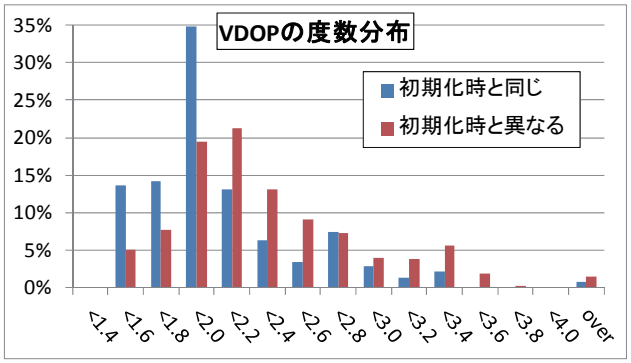


図-15　捕捉衛星とVDOPの関係

(3) 捕捉衛星の変化の有無と VDOP の関係

捕捉衛星の初期化時からの変化の有無と VDOP の度数分布の関係を見ると，２分割の傾向はあるが明確に２分割される訳では無いので，相関関係はあっても一致する方策では無い(図-15)。

４．精度向上方策の考察

従来の DOP 値制限による精度確保を図る方法は，衛星の飛行軌跡の予測ソフトウェアを利用し，予め，計測に適した DOP 値が低い時間帯を把握することになるが，設定が甘いのか，実験において実態と合わない場面が何度かあった。

データ数が少ないため今後の検証が必要であるが，「初期化直後と同じ衛星の捕捉状態」の間に計測を行い，捕捉衛星が変化する毎に初期化を行うことで，出来形管理に重要な最大誤差を大きく低減できる可能性があることから，DOP 値管理に代わる精度向上方策となる可能性がある。

この場合，代替手法としてでは無く、「初期化直後と同じ衛星の捕捉状態」と主で利用し，大まかな DOP 値制限を併用することで，より精度が高いデータを得ることが考えられる。

上記の仮説が成り立つのであれば，みちびきや GLONASS 等も含め，多くの衛星を受信可能な環境下では，直ぐ受信状況が変化する衛星からは受信しないことで，今回の実験で 16.6 分であった計測時間を，より長時間にすることも可能となる。

ただし，本手法が確立できたとしても，土工の出来形管理の検査に利用するには，計測精度が不足する場合が発生する可能性があり，検査はレベルで行う等の対応が必要と考える。

５．おわりに

今回は 25 時間分のデータで検討を行ったが，一時期一箇所でのデータ取得のため，RTK-GNSS の検討にはデータが少なく，検証すべき仮説が立てられたに過ぎない。今後も，機会があればデータを収集し，これまでの検討結果を踏まえ，更なる検証を行いたい。また，計測精度向上とは別に，現在の計測精度で利用可能な方策について検討していきたい。

参考文献

1) 梶田ら: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，第53巻-第5号，pp.18～21，2011.05

2) 梶田ら：衛星測位技術「RTK-GNSS」の施工管理への適用に関する検討，建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，pp.59～62，2011.11

3) 国土交通省　国土技術政策総合研究所「TSを用いた出来形管理　情報提供サイト」
http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/ts/，　2012.8現在

12. 小型締固め機械に搭載された加速度応答システムの適用性

（砂質土・礫質土においての実験結果）

(独)土木研究所　○ 橋本　毅
(独)土木研究所　藤野　健一
鹿島道路(株)　山口　達也

１．はじめに

振動ローラの振動挙動が接する地盤剛性の影響を受けることを利用し、機械に搭載した加速度計の挙動を解析して地盤剛性を推定する手法が、これまで大型の振動ローラなどで研究・実用化されている。このシステムを利用した締固め管理手法は、締固め品質を面的にリアルタイムで確認できるため、新しい施工管理技術として注目されており、近年では、狭隘部などの締固めに用いる小型締固め機械の一つである前後進コンパクタにも搭載されてきている。しかし、この前後進コンパクタ用システムは開発からまだ日が浅く、管理指標との相関性などの検証が未だ十分に行われていないため、実現場への適用条件などが明らかになっていない。

そこで本研究では、この前後進コンパクタ用加速度応答システムの現場への適用条件を明確にすることを目的として、システムの表示値と密度・地盤剛性との相関性に関する基礎データの収集のための実験を行った。

実験は、同じ前後進コンパクタを用い、砂質土、礫質土の 2 種類で行った。砂質土を用いた実際の施工では種々の含水比が想定されることから、砂質土においては 4 種類の含水比、また礫質土での施工では大きな含水比の変動がないことから 1 種類の含水比にてデータ収集を行った。

２．使用機械（加速度応答システム）

現在、加速度応答システムを搭載した前後進コンパクタは、海外メーカで 3 社、国内メーカで 1 社から市販化されている。本実験では、国内で最初に販売された機械として、BOMAG 社の BPR45/55D+ECONOMIZER を使用した。本システムは、前後進コンパクタに加速度計と演算モジュールを兼ねた表示パネルを搭載しており、表示パネルは 10 個の LED にて構成されている。この LED の点灯個数により、演算モジュールにて解析された地盤剛性値を表示している（点灯個数が多いほど剛性が高い）。**表-1** に機械仕様を、**図-1** にシステムの概略を示す。

表-1　機械仕様

機械質量(kg)	396
振動起振力（kN）	45
振動振動数（Hz）	70
締固め幅(mm)	550

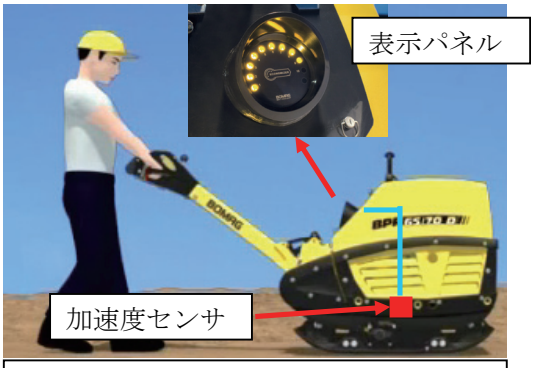


図-1　BOMAG ECONOMIZER 概略

３．実験１（砂質土）

3.1　実験土質

本実験で使用した土の粒径加積曲線を**図-2** に、物理特性を**表-2** に示す。

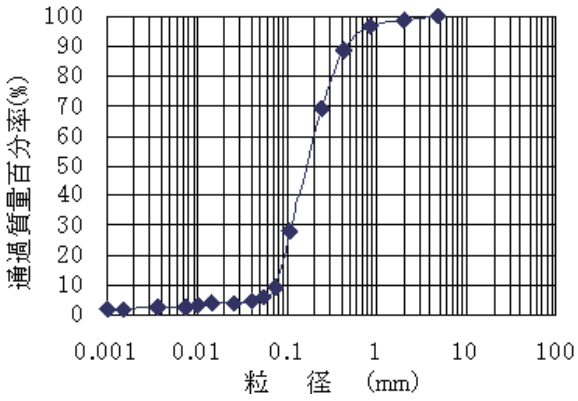


図-2　粒径加積曲線（砂質土）

表-2 材料の物理特性（砂質土）

実験項目	実験地盤
土粒子密度 ρ_s（g/cm^3）	2.675
細粒分含有率 F_c(%)	15.3
最大乾燥密度 ρ_{dmax}（g/cm^3）	1.674
最適含水比 w_{opt}(%)	16.0

実験含水比は、乾燥側 11%、最適近傍（乾燥側）15%、最適 16%、湿潤側 18%の 4 パターンとした。

3.2 実験フィールド

実験は土木研究所構内の土工実験棟実験ピットにて行った。まず十分に締固めた実験地盤をピット内に製作し、その片側の壁を構造物に見立て、壁際を幅 600mm、深さ 300mm、長さ 25m にわたり掘削し、そこへ仕上がり厚さ 300mm 相当の実験材料を盛り立て、実験フィールドを製作した。（**写真-1**）

写真-1 実験フィールド（砂質土）

また、初期締固め状態（締固め 0 回）は、材料盛り立て後、0.1m^3 クラス油圧ショベル（2.7ton）にて締固めを 2 回（往復）行った状態とした。

3.3 計測項目

上記実験フィールド上を、2.で示した前後進コンパクタにて 16 回締固めを行い（8 往復）、その際の密度、地盤剛性、加速度応答値を計測した。以下、各計測項目について説明する。

(1) 密度（コアサンプリング）

密度の測定は、円筒形コアサンプラーを用い、0,2,4,6,8,12,16 の各締固め回数時にそれぞれ 3 点ずつ測定した。

(2) 地盤剛性（K_{30} 換算値）

地盤剛性の測定点は、0,2,4,6,8,12,16 の各締固め回数時にそれぞれ 3 点ずつ設定した。測定は土木研究所で開発された超小型動的平板載荷試験装置（アプライドリサーチ社製）[1]にて測定した。

(3) 加速度応答値（LED 点灯個数）

実験では 1～16 の各締固め回数時に LED 点灯状況をビデオ撮影し、点灯個数にその点灯秒数をかけた点灯個数の総和をレーン走行時間（秒）にて除して、刻々の点灯個数を走行延長にて平均化した「平均 LED 点灯個数」を算出した。

3.4 実験結果

各含水比における締固め回数と、平均 LED 点灯個数、締固め度（300mm 平均）、地盤剛性値（K_{30} 換算値）の関係を**図-3～6** に示す。各値の相関を見

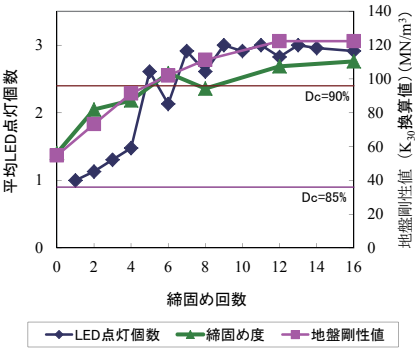


図-3 締固め回数との関係（砂質土・含水比 11%）

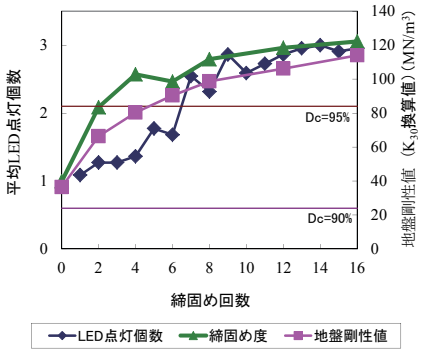


図-4 締固め回数との関係（砂質土・含水比 15%）

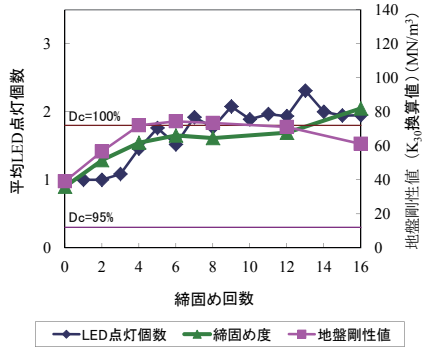


図-5 締固め回数との関係（砂質土・含水比 16%）

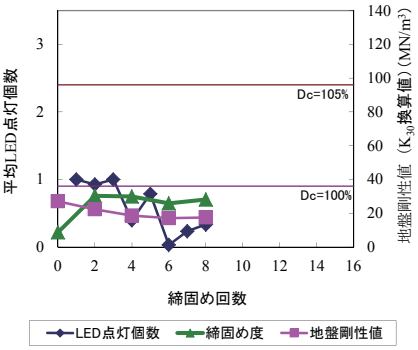


図-6 締固め回数との関係（砂質土・含水比 18%）

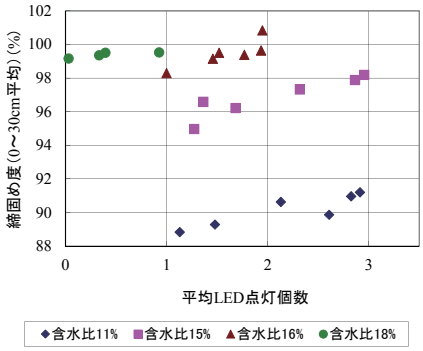


図-7 LED 点灯個数－締固め度（砂質土）

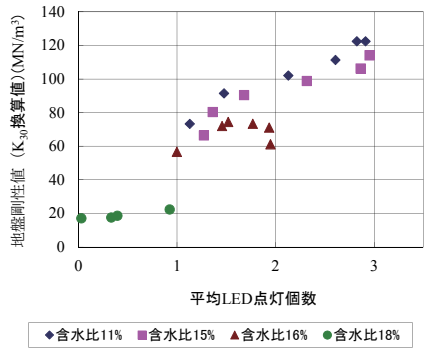


図-8 LED 点灯個数－地盤剛性値（砂質土）

るため締固め度の値はグラフが重なるよう図示している。また、LED 点灯個数と締固め度との関係を図-7 に、LED 点灯個数と地盤剛性値（K_{30} 換算値）との関係を**図-8** に示す。なお、含水比 18%において締固め回数 8 回を越えると、前後進コンパクタは走行不能となり、データの取得はできなかった。

図-3～6 によると、LED 点灯個数と締固め度、および地盤剛性値との関係は、各含水比においてそれぞれ比較的良好な関係があることがわかる。特に最適含水比より乾燥側（11、15%）にて良好な関係がある。しかしながら**図-7** によると、LED 点灯個数と締固め度の関係は含水比によって大きく異なっており、両者は一意的な関係になっていない。一方、**図-8** によると LED 点灯個数と地盤剛性値の関係は、含水比の変化に対してもほぼ一意的な関係を示している。

４．実験２（礫質土）

4.1　実験土質

本実験では、道路用砕石の C-40 を使用した。粒径加積曲線を**図-9** に、物理特性を**表-3** に示す。実験含水比は、最適含水比である 5.2%として実験を行った。

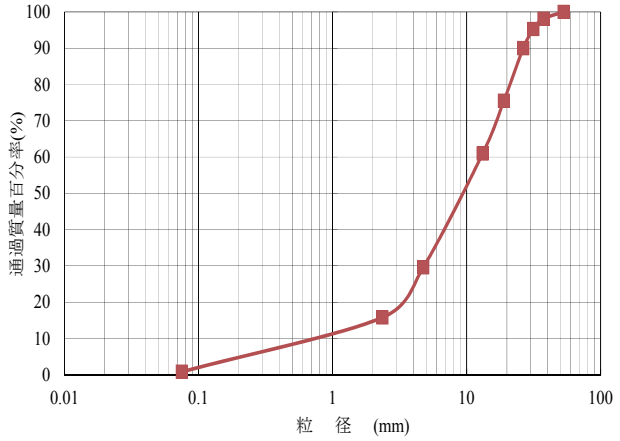


図-9　粒径加積曲線（礫質土）

表-3 材料の物理特性（**礫質土**）

実験項目	実験地盤
細粒分含有率 F_c(%)	0.8
最大乾燥密度 ρ_{dmax}（g/cm^3）	2.295
最適含水比 w_{opt}(%)	5.2

4.2　実験フィールド

実験は鹿島道路（株）機械センターにて行った。まず十分に締固めた基礎地盤上に、C-40 を仕上がり厚さ 150mm になるよう敷きならし、その上に幅 1.5m（500mm×3 レーン）長さ 7m の実験フィールドを製作した。（**写真-2**）

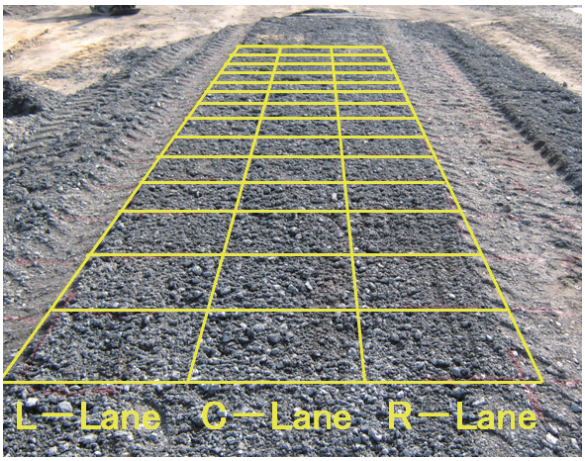


写真-2　実験フィールド（礫質土）

4.3　計測項目

上記実験フィールド上を、2.で示した前後進コンパクタにて 6 回締固めを行い（3 往復）、その際の密度、地盤剛性、加速度応答値を計測した。その際、上記 3 レーンを 21m の 1 レーン相当に見立て、折り返し運転を行った。以下、各計測項目について説明する。

(1) 密度（砂置換法）

密度の測定は砂置換法を用い、1,2,4,6 の各締固め回数時にそれぞれ 3 点ずつ測定した。

(2) 地盤剛性（K_{30} 換算値）

地盤剛性の測定点は、1,2,4,6 の各締固め回数時にそれぞれ 6 点ずつ設定した。測定は小型 FWD 試験器を用いて行った。小型 FWD は（株）東京測器研究所製の「FWD-Light」を使用し、計測・データ処理方法は、「（株）東京測器研究所，FWD-Light による小型 FWD 試験方法（地盤偏）」[2]に従い行った。

(3) 加速度応答値（LED 点灯個数）

加速度応答値（LED 点灯個数）は 1,2,4,6 の各締固め回数時に実験フィールド上の測定点（500mm ピッチ、計 45 点）を通過する時の LED 点灯個数を記録者が記録し、それの平均値を算出して「平均 LED 点灯個数」とした。

4.4　実験結果

締固め回数と、平均 LED 点灯個数、締固め度（150mm 平均）、地盤剛性値（K_{30} 換算値）の関係を**図-10** に示す。また、LED 点灯個数と締固め度との関係を**図-11** に、LED 点灯個数と地盤剛性値（K_{30} 換算値）との関係を**図-12** に示す。

図-10～12 によると、LED 点灯個数と締固め度との関係は、正の相関はあるものの良好な関係とは言い難い。これに対して LED 点灯個数と地盤剛性値との関係は、良好な関係があることがわかる。

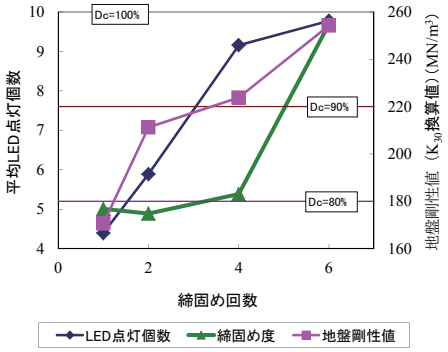


図-10　締固め回数との関係（礫質土）

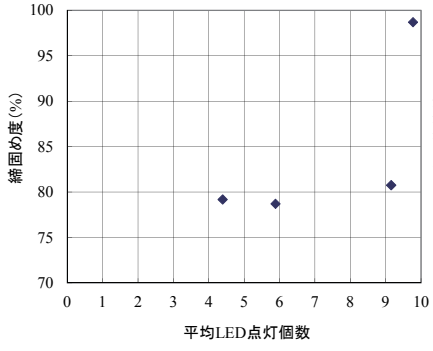


図-11　LED 点灯個数－締固め度（礫質土）

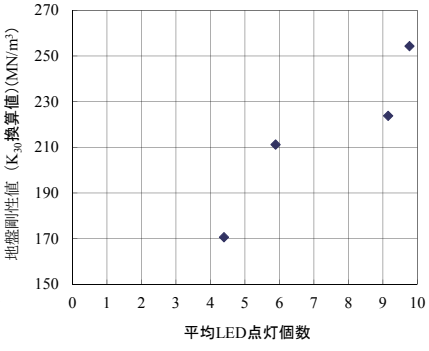


図-12　LED 点灯個数－地盤剛性値（礫質土）

５．まとめ

3 章の砂質土および 4 章の礫質土における、LED 点灯個数－締固め度、LED 点灯個数－地盤剛性値の関係をそれぞれ一つのグラフにまとめたものを、図-13、14 に示す。

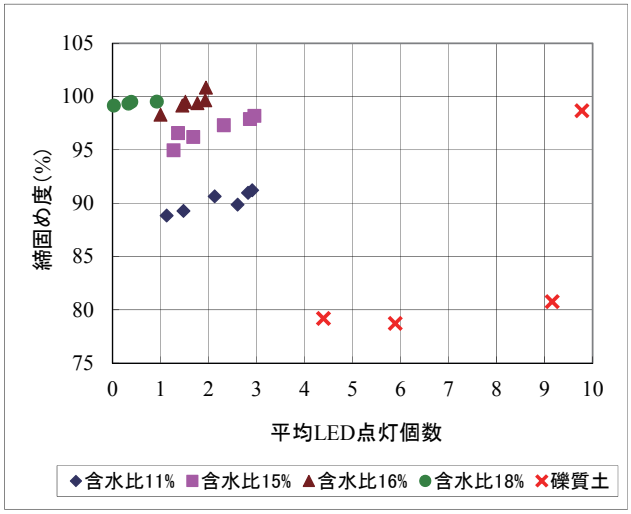


図-13　　LED 点灯個数－締固め度

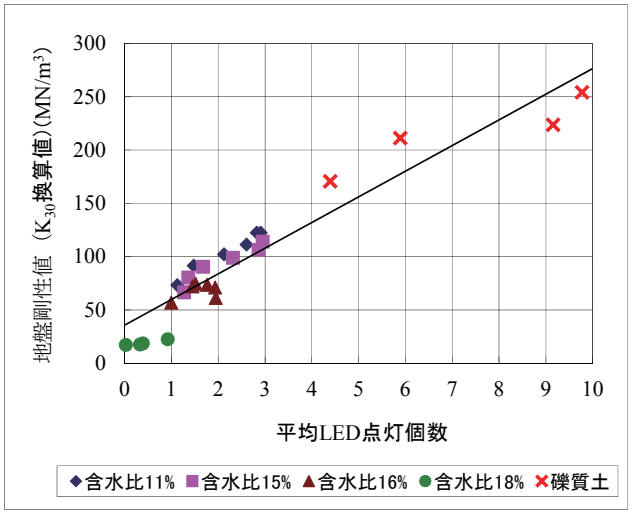


図-14　LED 点灯個数－地盤剛性値

図-13、14 より以下のことがわかった。

① 加速度応答システム表示値（LED 点灯個数）と締固め度の関係は、各含水比および土質においてそれぞれ正の相関があり、特に砂質土における最適含水比より乾燥側にて良好な関係がある。しかしその関係は、各含水比、土質によって大きく異なっており、LED 点灯個数を締固め度の代替指標にするには、施工中の土質、含水比を一定に保ち、かつその条件における両者の関係を求めておく必要がある。

② 加速度応答システム表示値（LED 点灯個数）と地盤剛性値の関係は、各含水比および土質においてそれぞれ正の相関があり、特に砂質土における最適含水比より乾燥側、および礫質土にて良好な関係がある。またその関係は、各含水比、土質によらずほぼ一意的であり、LED 点灯個数を地盤剛性値の代替指標にすることは可能であると言える。

前後進コンパクタは、特に構造物近傍の裏込め部や地中埋設物の埋め戻し工などにおいて使用されるが、それらの場所は、構造物や既存地盤との接合部であり、締固め不足により段差が生じやすい傾向がある。そのためそれらの場所での締固め品質管理手法の高度化・合理化は非常に重要である。加速度応答システムは、その要求に対する一つの提案であり、その適用性に関する情報は、実施工おいて使用する際に必要不可欠である。

今後は、様々な施工条件および他の加速度システムについてもさらなる実験を行いデータの充実を図り、施工現場においての加速度システムの適用性等について整理を進めたい。

参考文献

1) 境、極檀：重錘落下による地盤反力係数の測定、第 41 回地盤工学研究発表会論文集、pp975-976、2006

2)（株）東京測器研究所：FWD-Light による小型 FWD 試験方法（地盤偏）

13. 舗装工の施工管理における効率的ＩＣＴ活用について

国土交通省関東地方整備局　　二瓶　正康
坂本　鋼三
○　小川　拓人

１．はじめに

国土交通省は，位置情報技術，通信技術，情報処理技術等の技術革新の状況を踏まえ，ICT（情報通信技術）を建設施工に適用することで「施工及び施工管理の効率化」，「施工の精度向上」等の実現が期待できる情報化施工の導入を促進してきた。平成 20 年 2 月には，産学官それぞれの分野の有識者による「情報化施工推進会議」を設置し，情報化施工の戦略的な普及方策について検討を進め，平成 20 年 7 月に「情報化施工推進戦略」としてとりまとめた。これを受け，平成 22 年 8 月には，より具体的な方針を提示すべく，情報化施工技術の普及状況を踏まえ，「情報化施工技術の一般化・実用化の推進について」を新たな普及方針としてとりまとめた。そして，現在，この普及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いるところである。

モータグレーダのマシンコントロール技術（以下，「MC グレーダ」という）を用いた試行工事の実施は，通常の施工方法を前提とした施工管理基準等に則り実施していることから，情報化施工技術の機能を十分活かした施工管理手法とはなっていないのが現状であり，受発注者共に課題として認識しているところである。

そこで，本稿では，MC グレーダの施工特性と出来形管理用トータルステーション（以下，「TS」という）の計測機能に着目し，舗装工における施工の効率化を目的に新たな施工管理手法を検討したので報告する。

２．舗装工に活用する情報化施工技術

2.1 MC グレーダ

MC グレーダ（図-1）は，路盤などの敷均しに用いられる情報化施工技術であり，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，進行方向や排土板の傾き等の情報を取得し、あらかじめ入力した設計値（目標高さや傾斜）に対する差分をリアルタイムに計算し，排土板を目標値に自動制御できる施工技術である。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施工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施工効率が向上する。
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。
④オペレータは走行に集中できるため安全性が向上する。

図-1　MC グレーダ施工状況

2.2 TS

TS（図-2）は，「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 3 次元空間座標（x,y,z）が取得できる。また，設計値と出来形計測値との差を算出できる機能や 2 点間の測点データより 2 点間距離を算出する機能を有している。

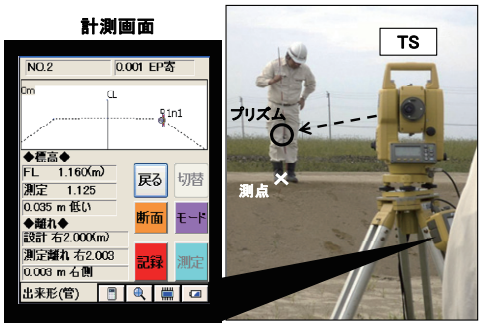


図-2　TS 出来形計測状況

TS の導入メリットとしては以下のものがある。

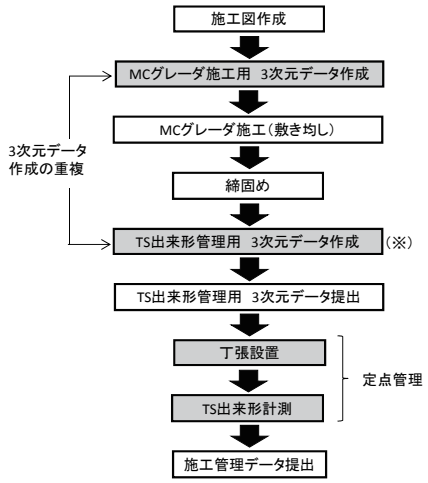
①計測は２名で行える（自動追尾機能搭載機種ならば 1 名で計測可能）ので、従来のレベル，巻き尺での計測より、手間・人数が減る。
②計測時、即座に設計値と計測値との差を確認できる。
③帳票の自動作成機能により内業が省力化する。

また、転記による記載ミスが解消する。

一般的なトータルステーションによる計測方法には，計測点に測量用プリズムを設置して計測するプリズム方式と測量用プリズムを用いないノンプリズム方式がある。現在、出来形管理においては、プリズム方式を使用することを原則としている。

３．現状の課題

図-3 に情報化施工技術を用いた一般的な舗装工（路盤工）に関する施工フローについて示す。



（※）MCグレーダ施工用 3次元データ作成の前に作成しても問題ない

図-3　情報化施工技術を用いた路盤工の施工フロー

従来の管理手法を準用した際に課題として考えられものを以下に示す。

3.1　定点管理

出来形計測については，現行の「土木工事施工管理基準及び規格値」に準じて 40m 毎に設定される管理断面において基準高，幅等を計測している。MC グレーダ施工では，施工範囲全面にわたり高精度の施工を実現できるにも関わらず，施工後の成果物に対しては，定められた測点に関する部分的な出来形計測での確認になっており，管理断面における測点での計測値が規格値内に入っていれば上合格となる。よって，図-4 に示す２つの施工面は同じ評価になってしまい，優れた施工技術に対して定量的に優位な評価ができない。その結果，施工業者においては，高精度の施工を実施する意欲の低下が危惧される。

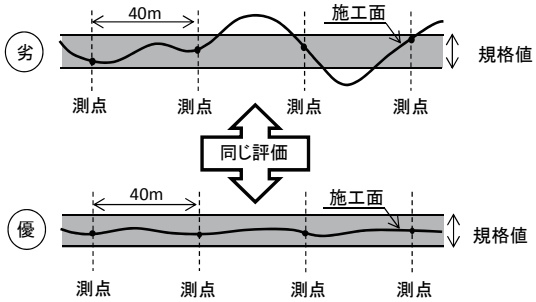


図-4　定点管理による施工精度の評価

また，MC グレーダ施工では，丁張の設置が不要になるにも関わらず，施工完了後に管理断面毎の出来形計測を行うための位置を示す丁張設置の必要が生じる。

3.2　3 次元データ作成の重複

MC グレーダ施工後に TS 出来形計測をする場合，同一目的物に対して、機器によって「MC グレーダ施工用の 3 次元データ（以下,「施工用データ」という)」と「TS 出来形管理用の 3 次元データ（以下,「出来形管理用データ」という)」の 2 つの 3 次元データを作成する必要があり、この似て非なるデータの作成は、施工業者にとって負担になる。

４．新たな施工管理手法

前項で挙げた現状の課題を踏まえて，新たな施工管理手法を提案する。

4.1　多点管理

現行の 40m 毎の管理断面における出来形計測よりも計測頻度を高くして「多点出来形計測」を行うようにする。計測ピッチに関しては，関東地方整備局　関東技術事務所において「H23 盛土の面的な管理手法の検討業務」[1]で検討した結果（表-1）を用いるものとする。この計測ピッチ 8m は，以下の条件を考慮して 1m から 10mの中から決定した値である。

表-1　従来施工管理手法と新たな施工の管理手法の計測ピッチの違い

管理対象工種	従来測定基準		新たな測定基準	
	測定項目	計測ピッチ	測定項目	計測ピッチ
・下層路盤 ・上層路盤	層厚	1000m2に1箇所 （掘起しによる）	基準高 （※1）	8m毎に1箇所の割合で道路中心、左右端部の任意点を計測
	基準高	管理断面40m毎に1箇所		
	幅員	管理断面80m毎に1箇所	幅員 （※2）	管理断面付近の任意断面で、延長約80m毎に1断面計測 （メジャによる）

（※1）：厚さ管理は廃止し、代わりに基準高管理を管理する。基準高の規格値は、従来の厚さの規格値と同等の品質担保の確実性を有する値を設定。

（※2）：幅員の計測ピッチ、規格値は、従来通りとする。

・従来の定点管理（丁張設置、管理断面における出来形計測）以下の作業時間であること

・計測ピッチ 0.5m で計測した結果と平均値、標準偏差が同等になること

厳密に 8m ピッチで出来形計測しようとすると測点へのプリズム誘導に時間が掛かるため「おおよそ 8m」と幅を持たせるようにする。なお、完成検査時は、従来の検査手法（レベル，水糸下がり）により出来形計測を実施するものとする。

従来管理手法（定点管理）と新たな管理手法（多点管理）の違いのイメージを図-5 に示す。

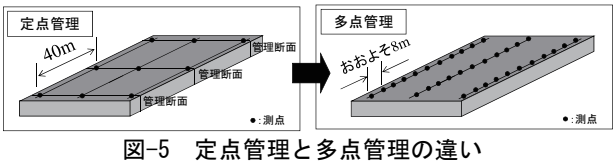


図-5　定点管理と多点管理の違い

(1)期待される効果

多点出来形計測の実施により高精度な施工に対する評価が可能になる。

多点出来形計測では，おおよそ 8m 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としているため，出来形計測をするための位置を示す丁張設置が不要になり，計測作業の効率化が図れる。

(2)導入に向けての課題

①表-1 の計測ピッチは，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性は確認していない。

②おおよそ 8m と幅を持たせる管理をしていくことを考えているが、その幅の許容範囲が決まっていない。

③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れば合格にするのか，あるいは，閾値を設けて計測点の内の何%以上が規格値に入っていれば合格にするのか，という合格基準が決まっていない。

(3)導入課題解決に向けた取り組み

①実現場において，表-1 に沿った多点出来形管理を行い，現場での適用性の検証を行うとともに、計測ピッチのおおよそ 8m の許容範囲についても検討する。

②計測点の合格基準について検討する。合格基準は、MCグレーダ施工の施工精度の実態を考慮して過剰管理にならないよう検討する。

4.2　施工用データの流用

MC グレーダ施工時に位置管理で使用していた TS へ施工用データを搭載し，3 次元座標の測量ができることがわかっている。自主管理手法としてこの測量により出来形管理を実施している施工業者もある。このことより，MC グレーダ施工にて使用する施工用データを TS 出来形管理へ流用し，出来形計測を行うようにする。従来管理手法と新たな管理手法の違いを図-6 に示す。

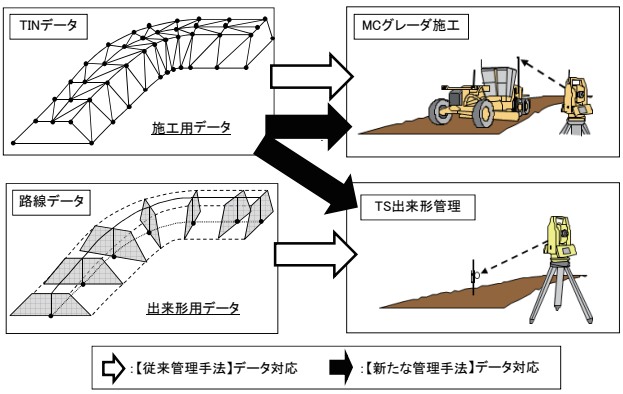


図-6　従来施工管理手法と新たな施工管理手法とのデータ対応の違い

(1)期待される効果

施工用データと出来形管理用データの２つの 3 次元データを作成していたが，出来形管理用データの作成が不要になるため業務の省力化が図れる。

(2)導入に向けての課題

①現在「TS を用いた出来形管理要領」において，出来形管理用データが設計図書（平面図，縦断図，横断図等）を基に正しく作成されていることを施工業者が確認し，その結果を発注者指定様式であるチェックシートにまとめ，監督職員へ提出することになっている。一方，施工用データは任意施工の範疇であるため，監督職員への提出を求めるようになっていない。

②TS 出来形計測後は，その結果をまとめた施工管理データを提出することになっている。この施工管理データは，「出来形管理用トータルステーション機能要求仕様書」により出力形式が決まっているが，施工用データを用いた出来形管理では，帳票の出力を想定しておらず、規定の出力形式に合致しない。

(3) 導入課題解決に向けた取り組み

①施工用データを出来形計測に使用することになるため，現在実施している出来形管理用データの整合性確認と同程度に、施工用データと設計図書等との整合性確認ができるようなチェックシートの項目を検討する。

②施工管理データの提出は，施工用データを用いた計測結果の出力形式が明確ではないので、その現状を踏まえて検討する。

以上，新たな出来形管理手法を踏まえた舗装工（路盤工）の施工フローについて図-7に示す。この結果、「出来形管理用データ作成」、「丁張設置」が省略でき、多点出来形管理により、出来形計測時間も短縮でき、施工全体の効率化につながると考える。

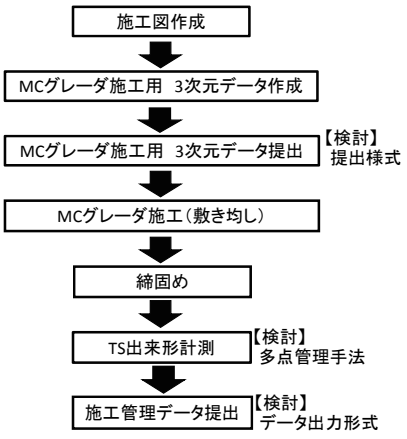


図-7　新たな管理手法における路盤工の施工フロー

５．今後の方針

今後は，前項の検討事項の検討を進め，最終的には管理要領を策定し、本格運用を目指す。

また，さらなる検討として以下の項目についても検討していく必要があると考える。

5.1　ノンプリズム TS の活用

多点出来形管理により出来形計測の効率化の実現が期待できるが，さらなる効率化を目指し，ノンプリズム TS を用いた出来形管理を検討する。ノンプリズム TS の計測概要を図-8 に示す。

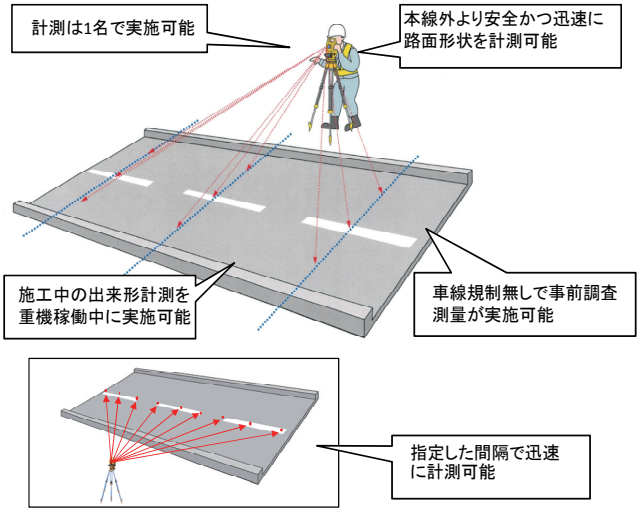


図-8　ノンプリズム TS の計測概要

ノンプリズム TS を舗装工で使用する際，以下のメリットが考えられているため本格導入が期待されている。

①測点にプリズムを設置する作業員が不要となり，計測時に作業員が本線へ入る必要がなくなるため安全性が高い。

②車線規制無しで計測できるため作業効率が良い。

③指定した間隔で自動計測が可能なため計測時間が短縮する。

現状として、ノンプリズム TS の適用範囲が試験フィールドでの検証にて解ってきたところである。今後は，実現場にてその妥当性を検証し，運用方法の検討をしていく予定である。

ノンプリズム TS の自動計測機能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り、施工範囲全面にわたる「面的出来形計測」が実現できる。

面的出来形計測は、厳密な施工評価ができるとともに、図-9 のように路盤の平坦性を表す計測手法になり得ると考える。

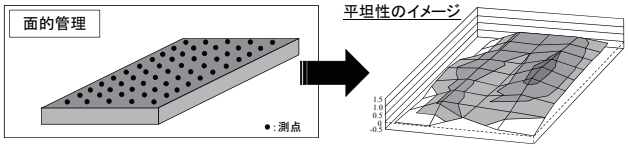


図-9　面的出来形計測及び平坦性のイメージ

5.2　平坦性評価

前項でも記述したとおり，多点出来形管理を実施することにより高精度な施工に対する評価ができるようになると考えられる。このことより図-10 のフローの実現が考えられる。図-10 の（※）において，一般的に高品質の構造物ならば長寿命になると考えられるが，舗装において，平坦性の高い路盤と舗装の寿命の関係が明確になっていないのが現状である。舗装の寿命に影響を与える要因として、舗装材料及び路盤材の材質、路盤材の密度分布、施工時の温度管理等の様々な要因が考えられるが、関東地方整備局では、路盤の平坦性の影響について検討していく予定である。

今後は，路盤の平坦性と舗装の寿命の関係を明確にできるような平坦性評価方法を検討していく。この関係性の明確化により、さらなる多点出来形管理の重要性が提示できると考えている。

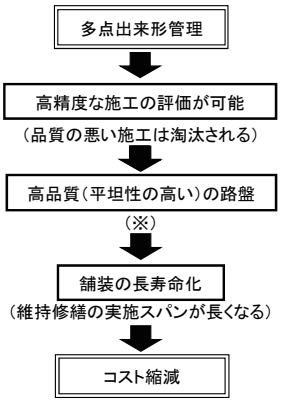


図-10　多点出来形管理による将来ビジョン

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が，未だ一般的施工技術として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，導入しやすいような環境整備をしていくことが重要と考える。本稿では，その一歩として，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，この提案を基に現場試行による実績を積み重ね，本格運用として実現することを期待したい。

参考文献

1)関東技術事務所, H23盛土の面的な管理手法の検討業務，pp.6-20～6-22，2012.3

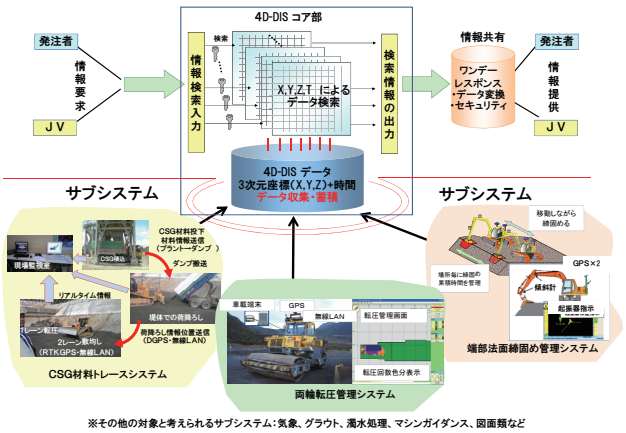
14. 億首ダム本体建設工事における
ダムＩＣＴ施工総合管理システムの適用

大成建設㈱　技術センター　○江田　正敏
大成建設㈱　技術センター　　松本　三千緒
大成建設㈱　技術センター　　片山　三郎

1. はじめに

沖縄県において施工した世界初の本格的台形ＣＳＧダムである億首ダム（2013.11完成）では，ダムＩＣＴ施工総合管理システムを開発し運用した。このシステムでは４Ｄ-ＤＩＳ（４Dimensions－Dam Information Service）と呼ぶデータベースを中心に，ＧＰＳを搭載したブルドーザや振動ローラ，バックホウ，ダンプなどの建設機械により3次元位置や時間情報を把握し，施工データをエレメント（一辺500㎜の立方体など）単位で，４次元（X,Y,Z,T）管理することで，施工の効率化と品質保証を可能としている。

本システムは，図-1に示すように４Ｄ-ＤＩＳコア部（データベース）を中心に転圧管理システムやＣＳＧ材料トレースシステムなどの各サブシステムで構成される。[1)]



※その他の対象と考えられるサブシステム：気象、グラウト、濁水処理、マシンガイダンス、図面類など

図-1　システム全体概要 [1)]

2. ４Ｄ-ＤＩＳデータベース（コア部）

４Ｄ-ＤＩＳコア部にはリレーショナルデータベースマネージメントシステム（ＲＤＢＭＳ：MySＱＬ）を採用した。本コア部の特徴は，蓄積データを座標と時間（X,Y,Z,T）の４次元で管理する点にあり，図-2に示すように構造物の中を一定の領域（エレメント単位）で扱うようになっている。

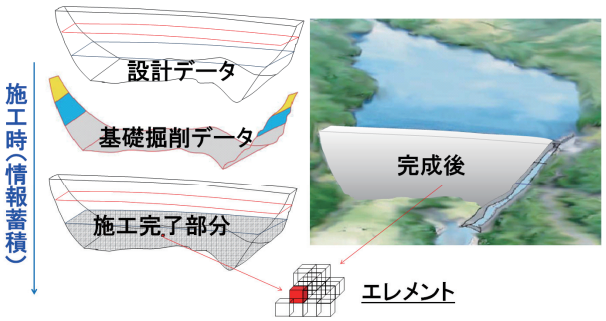


図-2　データ管理の考え方

エレメント（またはエレメント範囲）を指定するとその部分の材料配合や製造日時，施工方法，施工結果などの関連する一連の情報が検索・抽出されるようになっている。図-3に示すように指定する項目としては，

・検索対象範囲（サブシステムやデータを指定，すべてを対象とする事も可能）
・場所・範囲の指定（X1～X2，Y1～Y2，Z1～Z2）
・日時・範囲の指定（T1～T2）

などがあり，必要に応じて検索条件を追加する機能も持たせている。

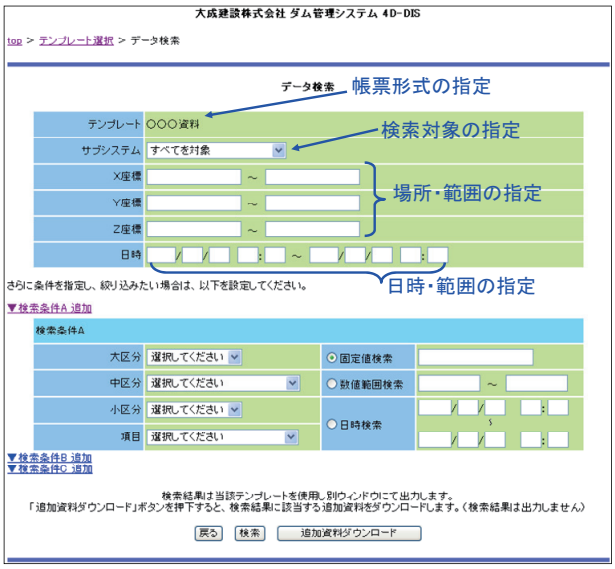


図-3　データ検索画面

3. 億首ダムに適用したサブシステム

本システムを適用した億首ダムは，

・型　式：台形ＣＳＧダム
・ダム高：39.0m
・堤頂長：400m
・堤体積：339,000 m^3
・総貯水容量：8,560,000m^3
・湛水面積：0.61km^2
・集水面積：14.6km^2

であり，その概要を写真-1，表-1 に示す。

表-1　億首ダムの用途

洪水調節	・億首ダムの建設される地点（ダム地点）において計画高水流量 300 m^3/s のうち，190m^3/s の洪水調節を行う。
流水の正常な機能の維持	・ダム地点下流の億首川沿川の既得用水の安定化と河川環境の保全等のための流量の確保（流水の正常な機能の維持）を図る。
水道用水	・沖縄県に対し，ダム地点で新たに 10，300m^3/日の水道用水の供給を行う。 ※約２万８千人分に相当。
かんがい用水	・億首川沿川の約 70ha の農地に対し，新たにかんがい用水の供給を行う。

写真-1　億首ダム施工状況

ＣＳＧの施工管理にあたっては，段階確認などの立会検査，目視による施工状況の把握によるほか，以下の項目についてICTによる定量的確認を実施している。

・敷均し厚（1層25ｃｍ×3層）
・締固め
　一般部の転圧回数（無振動2回＋有振動6回）
　端部法面部の締固め時間（30秒）
・ＣＳＧ材施工時間管理
　材料製造から転圧開始までの制限時間(6時間以内)

適用したサブシステムとしてはローラー転圧管理システム，端部法面締固め管理システム，締固め完了時間管理システムなどがあげられるが，データ蓄積の観点からはバッチャープラント，ウェザーステーション（気象情報）なども サブシステムの一つとして捉えることができる。ここでは主要なサブシステムとして，

・締固め管理(ローラー転圧，端部法面締固め)
・締固め完了時間管理(ＣＳＧトレースシステム)
・ＣＳＧ材料敷均し厚さ管理

をとりあげ，現場での活用状況について報告する。

3.1　締固め管理(ローラ転圧，端部法面締固め)[2)]

ＧＰＳや無線ＬＡＮ，車載パソコンを転圧ローラに搭載することにより，施工場所のどこを何回転圧したかをエレメント単位でカウントし，記録するシステム（写真-2）であり，発注者事務所・ＪＶ事務所にてリアルタイムに情報共有をおこなった。

メッシュ毎の転圧回数は運転席のモニターに色別表示されるため，オペレータはこの情報に基づいて全メッシュが規定回数に達するまで走行操作をおこなう。なお，転圧ローラが複数台であっても各メッシュには累積転圧回数が示されるため無駄のない施工が実施できる。図-6，7に転圧表示画面の例を示す。

写真-2　転圧ローラ

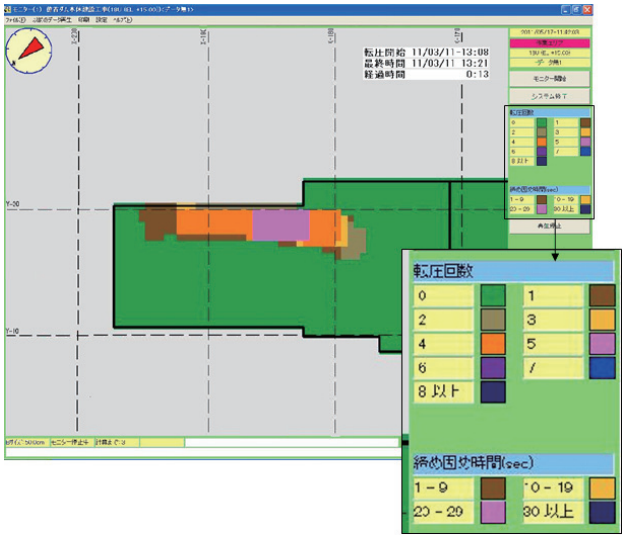


図-4　転圧表示情報共有画面例1

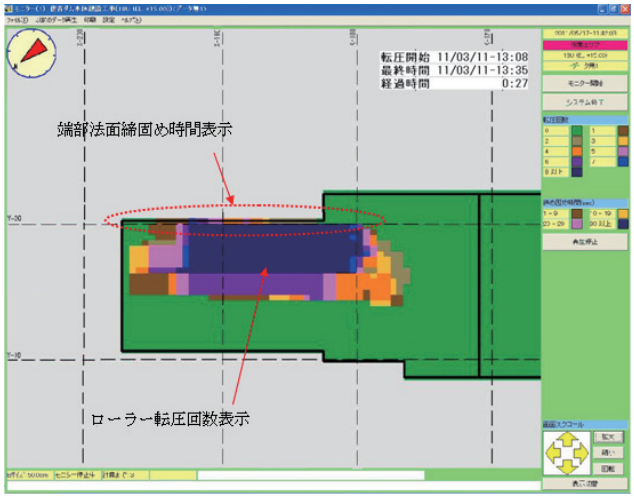


図-5　転圧表示情報共有画面例2

ローラによる転圧回数の表示画面では転圧していないエリアが緑色，1回転圧で茶，2回で薄茶，3回で黄色，4回で朱色，5回で桃色，6回で紫色，7回で青色，8回以上は紺色で表示している。オペレータはこの色を見ながら所定回数の転圧をおこなう。

次に，端部法面部での締固めイメージを図-8，

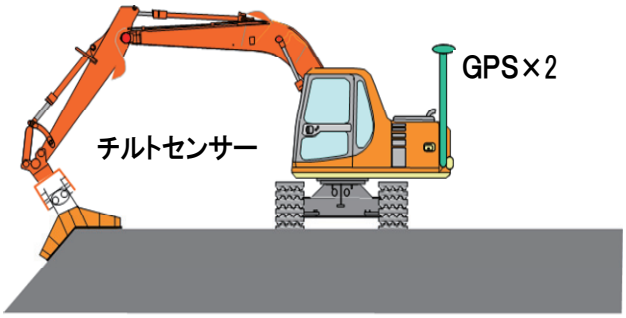


図-6　端部法面締固めイメージ（横断方向）

写真-3　端部法面締固め実施状況

写真-3に示す。端部法面部は起振器を装置した専用機械により締固めをおこなっている。端部法面部では，ローラによる転圧とは異なり締固め位置と締固め時間により管理しており，ある位置に対しての締固め累積時間が所定の秒数（30秒等）になるまで締固めをおこなう。

その理由は，一ヶ所を連続的に締固めると端部法面部に段差等が生じる恐れがあるため，場所を移動させながら繰り返し締固めをおこなう方法をとっている。

そして，各位置の締固め累積時間が所定の時間（30秒等）になった事が分るような表示をおこなっている。この時間は，1～9秒で茶色，10～19秒で黄色，20～29 秒で桃色，30秒以上は紺色で表示する。この端部法面締固めの状況は，ローラ転圧の画面（図-4, 5）に一緒に表示されるため，オペレータはこの表示と起振器の位置誘導画面（図-7）を見ながら締固め作業をおこなう。

両施工機械のオペレータは，この表示を運転席モニターで見ながら作業を行うため締固め不足を防止することが出来る。また，これらの情報は蓄積・保存されるため，過去に遡って連続再生表示することも可能になっており，発注者事務所・ＪＶ事務所の双方で活用した。

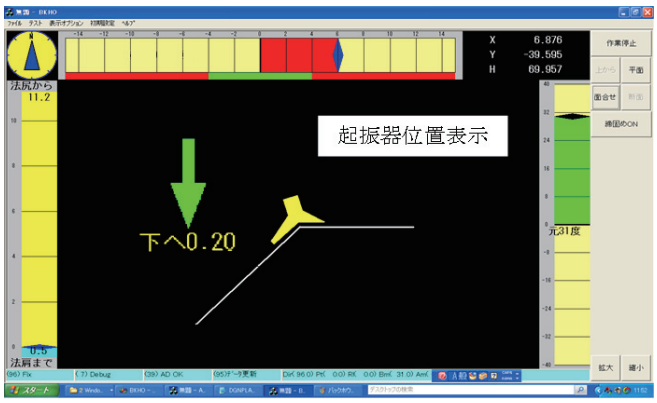


図-7　端部法面締固め画面

3.2　締固め完了時間管理（CSG トレースシステム）

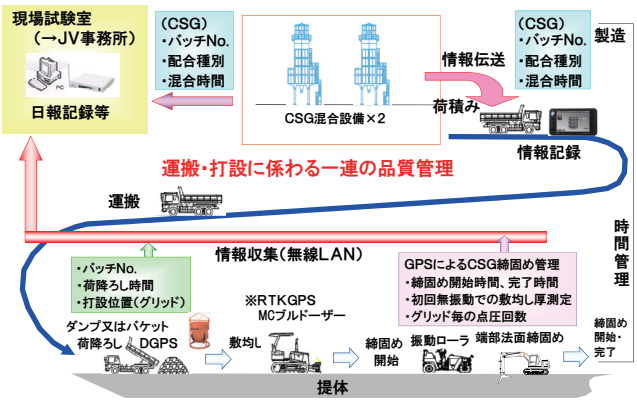


図-8　ＣＳＧ材料トレースシステム[3)]

プラントでのＣＳＧ製造から材料搬送，敷き均し，ローラ等による転圧開始時間（ＣＳＧ製造からの制限時間６時間）および転圧完了時間を管理するシステムであり，

・ＣＳＧプラントでのＣＳＧ製造情報車両伝送
・車両での打設位置計測と情報伝送
・ＣＳＧ締固め開始・完了時間の表示

で構成される（図-8）。これらも発注者事務所・ＪＶ事務所間で情報共有をおこなった。

まず，ＣＳＧ混合装置（プラント）で製造されたＣＳＧ材料をダンプトラックに投入する時に，材料のバッチ情報（バッチ番号，配合種別，製造時間など）もダンプに搭載したパソコンに伝送する。このダンプにはＤＧＰＳ（ディファレンシャルＧＰＳ：精度 50 ㎝）を搭載しているため，現場まで運搬し材料を荷降ろした位置を知ることができる。

そこで，荷降ろし位置とバッチ情報の両方を無線ＬＡＮにより現場の監視室へ伝送する。[3)] 次に，ブルドーザによる敷均しがおこなわれ，ローラによる転圧（端部法面締固めを含む）がおこなわれる段階で，どの位置の材料が製造から何時間たっているか分るため，ローラ（端

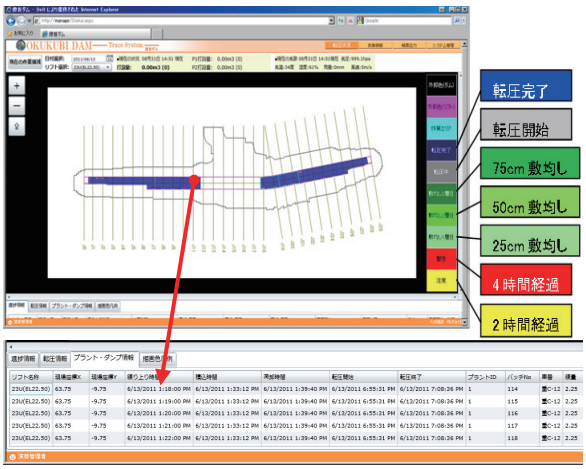


図-9　締固め時間管理情報共有画面

図-10　締固め時間管理再生画面例

部法面も同様）のオペレータは優先して転圧する場所を知ることができる。

また，打設場や発注者事務所・ＪＶ事務所では，任意点での作業状況を画面をクリックすることにより時系列データで確認出来るものとした。この時の時間管理画面を図-9 に示す。

材料が製造から何時間経過しているかは，画面上に色別で表示される。この変化状況を図-10に示す。

図-11　トレースシステムの運用サイクル

図-12　ＭＣブルドーザ

敷均しがおこなわれていない場所は白色で示されており，1層目の敷均し後は薄緑色，2層目は緑色，3層目は濃緑食で表示される。また，材料が製造から2時間を経過したものは黄色で表示され，4時間を経過すると赤色に変化する。そこで，転圧や端部法面締固めのオペレータはこの表示を見ながら優先すべきエリアを転圧・締固めする。転圧や締固めがおこなわれたエリアは灰色に変わり，転圧・締固め完了時には紺色で表示される。

なお，この締固め完了時間管理（ＣＳＧ材料トレースシステム）もデータを蓄積・保存しているため，発注者事務所やＪＶ事務所などで過去に遡って再生表示することが可能になっている。図-11にトレースシステムの運用サイクルを示す。

3.3　ＣＳＧ材料敷均し厚さ管理

当初，敷均し厚さの管理は回転レーザーレベルによる方法を予定していたが，施工性および走行軌跡の記録を考慮し，マシンコントロール機能を搭載したブルドーザ（以下，ＭＣブルドーザ）による施工方法を採用する事とした。

ＭＣブルドーザはＧＰＳを利用しブルドーザの排土板を自動制御をすることで，設計高さの敷均しを可能にするものである（図-12）。図-13は，敷均し作業時のＭＣブルドーザの排土板最下部の高さ軌跡を時系列に出力したものであり，施工レーンの一層毎に約25㎝で敷均されていることを示したものである。

この時，施工時のＧＰＳデータは内部メモリーに記憶されるため，施工後にその情報を電子データとして利用することが可能である。

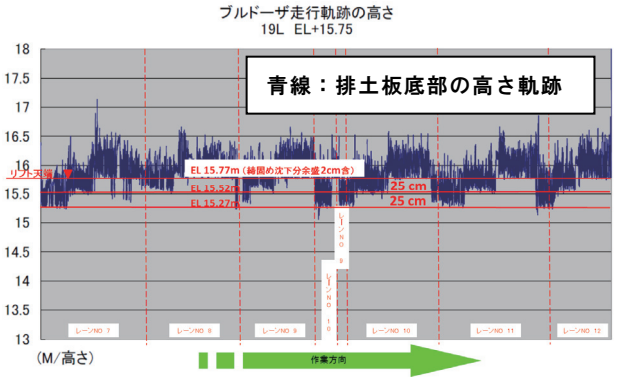


図-13　ﾌﾞﾙﾄﾞｰｻﾞ排土板高さ軌跡の出力例

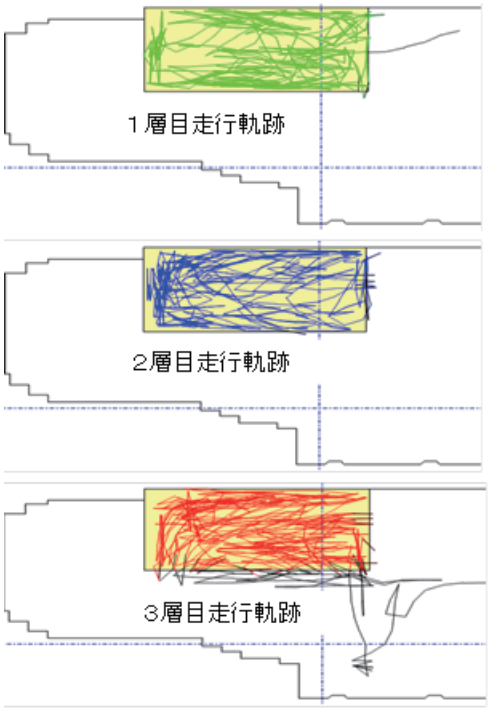


図-14　走行軌跡

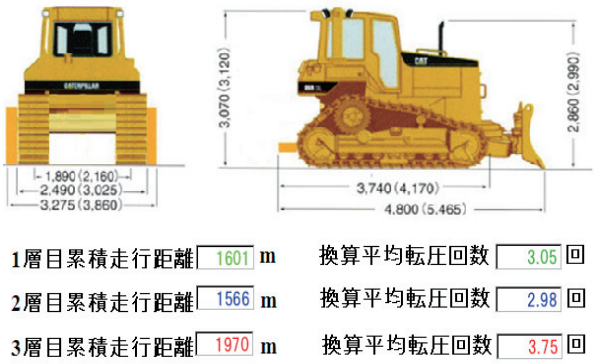


図-15　平均転圧回数への換算

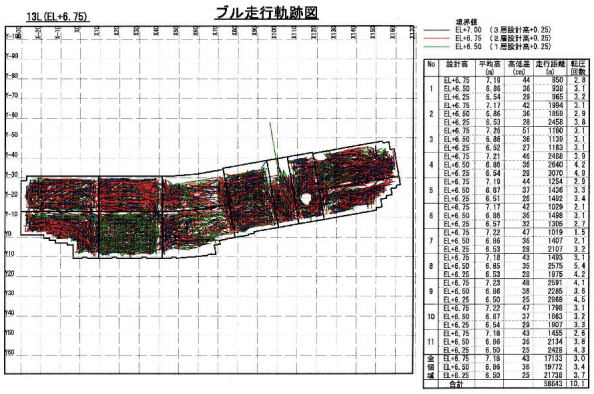


図-16　走行軌跡出力帳票の例

このデータを利用してＭＣブルドーザの各層における走行軌跡を表示させた例を図-14に示す。これは，枠内（レーン）での走行軌跡を表示したものであり，レーン外に出た部分は対象外としてカウントしていない。

また，キャタピラの幅を60cm（両側で1.2ｍ）とし，これにレーン内での各層での走行距離を掛ける事によりレーン内の平均転圧回数に換算する解析もおこなっている（図-15）。これらの走行軌跡出力帳票の例を図-16に示す。

4. おわりに

４Ｄ-ＤＩＳデータベース（コア部），ICタグによる母材運搬・仮置き管理，締固め管理（ローラー転圧，端部法面締固め），締固め完了時間管理（ＣＳＧ材料トレースシステム），ＣＳＧ材料敷均し厚さ管理の各システムを億首ダムに適用し，品質保証や施工履歴の蓄積，これらの情報の共有に活用することができた。

ダムＩＣＴ施工総合管理システム「４Ｄ-ＤＩＳ」はＣＳＧ材料以外にも応用可能であるため，今後はこの技術を応用・発展させ，道路や造成工事などを対象に品質向上に役立てていく予定である。

謝辞

最後に，このシステムの適用にご協力頂いた内閣府沖縄総合事務局北部ダム事務所に対し，心より感謝を申し上げます。

参考文献

1) 岡田敏，鬼塚真，小林伸幸，小西史和：高速 ORDBMS Lite Object の設計と実装，情報処理学会第 56 回全国大会前期(3)，pp.274-275，1998.3.17 .
2) 中島修：嘉瀬川ダム副ダムのＣＳＧ工法，社団法人　九州地方計画協会，九州技報 第 46 号，2010.01.
3) 阪田史郎，山田曉飯，塚宏之，伊藤哲也：無線ＬＡＮメッシュネットワークの技術動向，電子情報通信学会誌　Vol.92，No.10，pp.841-846，2009.10.

15. 情報化施工における準天頂衛星（みちびき）を用いた RTK 測位の精度検証について

㈱間組　技術研究所　　○ 黒台　昌弘

１．はじめに

平成 19 年に施行された「地理空間情報活用推進基本法」に基づき平成 20 年に閣議決定された「地理空間情報活用推進基本計画」は、地理空間情報の総合的かつ計画的な施策の推進のための政府の基本的な計画である。

衛星測位の利用が国民生活の中に幅広く浸透している状況に鑑み、本計画の第一段として、我が国で初めて衛星測位を目的とする準天頂衛星「みちびき」が平成 22 年 9 月 11 日に(独)宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)により打ち上げられた。

準天頂衛星は日本のほぼ天頂を通る軌道を持つ衛星を複数機組み合わせた衛星で、常に 1 機の衛星を日本上空に配置することができる。衛星がほぼ真上に位置することで、山間部や都心部の高層ビル街など、測位を行うために必要な GNSS 衛星数が確保できない場所や時間帯においても、準天頂衛星の信号を加えることで高精度な測位を可能にするもので、米国が運用管理する GNSS 衛星の１つとして機能する「補完機能」と測位精度の向上を図る「補強機能」を具備している。

「みちびき」の打ち上げ成功を受けて、平成 23 年 1 月から(財)衛星測位利用推進センター(以下、SPAC)がとりまとめ機関となって、「みちびき」から送信される信号を用いた利用実証実験がスタートした。

この実験では、GNSS 補強信号と称される L1-SAIF 信号及び LEX 信号を用いた測位実験が実施される。L1-SAIF 信号は高速移動体向け信号であり、サブメーター級の測位精度が実現可能とされている。一方、LEX 信号はセンチメータ級の測位演算が可能で、測量等高精度測位が必要な分野への展開が期待されている。

利用実証実験では、JAXA/SPAC 間の協定の下で、SPAC が補強情報を生成し、JAXA がみちびきから L1-SAIF 信号及び LEX 信号を送信してユーザーが専用の受信機で受信し、測位補強の効果を利用面から確認することとなっている。

以上を踏まえ、日本建設機械施工協会（以下、JCMA)においても、LEX 信号を利用したセンチメータ級測位補強信号の情報化施工への活用可能性を検証するため、JCMA 情報化施工委員会の下に、「みちびき利用実証ワーキンググループ」を設置して実証実験に参画したので、ワーキンググループを代表して筆者が本稿にて紹介する[1) 2) 3)]。

なお、本稿に記載の内容（精度評価など）については、実証実験（平成 23 年 2 月）の結果を基にしたものであることを注記しておく。

また、本実験後の準天頂衛星に関する主な動きは次のようなものである。

宇宙基本法（平成 20 年）に基づき設置された宇宙開発戦略本部において議論された「実用準天頂衛星システム事業の推進の基本的な考え方」（平成 23 年 9 月 30 日閣議決定）においては、

①実用準天頂衛星システムの整備に可及的速やかに取り組む

②2010 年代後半を目途にまず 4 機体制を整備し、将来的には持続測位が可能となる 7 機体制を目指す

③実用準天頂衛星システムの開発・整備・運用は、準天頂衛星初号機みちびきの成果を活用する

といったことが示されている。

さらには、先頃公表された「日本再生戦略」（平成 24 年 7 月 31 日閣議決定）においても、上記の考え方が明記されており、準天頂衛星「みちびき」を取り巻く環境は、これを活用する方向に変革がなされ、今後さらなる技術開発への期待が高まっている。

２．実証実験の概要

2.1　みちびきを用いた RTK 測位について

情報化施工では、センチメータ級の高精度な位置情報に基づく RTK（リアルタイムキネマテック）測位が導入されている。この RTK 測位には、施工ヤード近傍にユーザーが独自に RTK 基準局を設置して地上系無線により位置補正データを配信するローカルな RTK 測位（以下、ローカル RTK）や、携帯電話網を活用して位置情報を配信するネットワーク型 RTK 測位がある。

準天頂衛星「みちびき」から送信される LEX 信号を用いたセンチメートル級の RTK 測位（以下、みちびき RTK）は、簡潔に言えば、ローカル RTK

における地上系無線やネットワーク型RTKの携帯電話網に対して、位置補正データの通信手段を衛星放送とした測位手法であるということができる。

みちびき RTK のシステム構成を図-1 に示す[4]。電子基準点観測データ収集ネットワーク、補強情報を生成するセンタシステム、準天頂衛星システム及びRTK演算を行うユーザーシステムで構成される。なお、LEX 信号は、GNSS 測位信号と同じ周波数（L 帯）であることから、信号受信アンテナを一体化できるというメリットがある。測位に必要な装置数が減じられることは作業の機動性において有利といえる。

また、前出の「考え方」に示されている準天頂衛星の複数機体制により、

- 高精度測位値の安定的な取得
- 測位結果の信頼性向上
- 高精度測位が可能となる範囲の拡大

などが実現できるものと考えられる。

2.2 実証実験の目的

みちびき RTK の出現により、ユーザー側では、情報化施工における MC（マシンコントロール）や出来形測量などにおいて、RTK 測位手法の選択肢が増えることとなる。

ローカルRTKのような独自基準局の設置が不要となり、システムの簡素化に伴うコストダウンの可能性が考えられるとともにより高い精度が確保されれば、出来形管理への活用などにより建設工事での利用範囲が広がっていくものと予想される。

そこで、本ワーキンググループは、SPAC が主催する利用実証実験に参加し、国土交通省が進めている情報化施工への、みちびき RTK の適用可能性を実証確認することとした。具体的には次の２点である。

①みちびき RTK とローカル RTK との比較検証
定点において、みちびき RTK とローカル RTK によるデータを取得し、そのデータ(X,Y,Z)の分布傾向を把握する。

②情報化施工機器（建設機械）による精度検証と GNSS 出来形管理における管理精度の検証
ローカル RTK とみちびき RTK の各々を用いてブルドーザによる盛土の敷均しを行い、施工中の両者の RTK 測位データを比較するとともにトータルステーションによる敷均し出来形データと対比して、みちびき RTK の精度を確認する。

なお、RTK 処理においては、位置補正データと建設機械側で受信した GNSS データ間の、時刻同期やデータ出力周波数の問題を明確にしておく必要がある。

2.3 実験の諸元

(1) 日時

平成 23 年 2 月 7 日（月）～10 日（木）
準 備 実 測：7 日 13:00～9 日 12:00
実 証 試 験：9 日 13:00～15:00
24 時間観測：9 日 16:00～10 日 16:00

(2) 場所

日本建設機械施工協会施工技術総合研究所
（静岡県富士市）

(3) 基準点等配置図（図-2、写真-1、-2、-3 参照）

施工技術総合研究所内の実験ヤードのうち、図下方のコース２と３つの基準点を用いた。

(4) システム構成

①LEX 信号受信アンテナ及び受信機（写真-4）
みちびきからの補強信号を受信する。
（SPAC から貸与）

②低速移動体端末（写真-5）
LEX-R と操作用（処理用）PC からなり、みちびき補強信号と GNSS 測位信号から位置データを算出し、モニター表示等を行うものである。（SPAC から貸与）

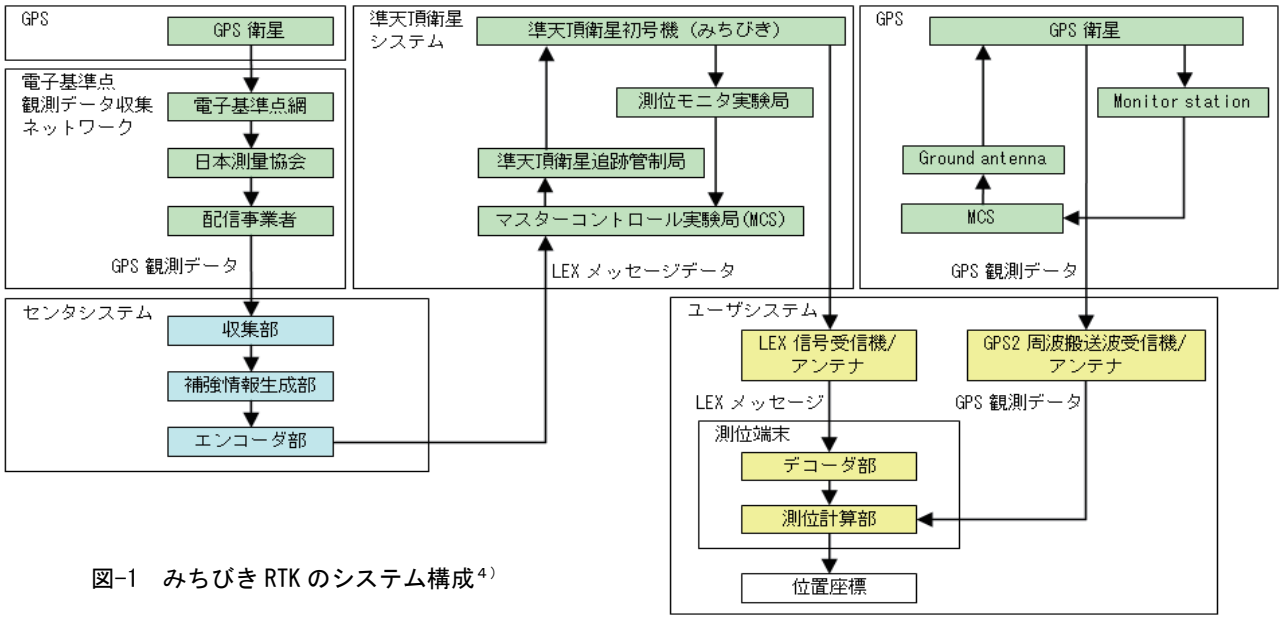


図-1 みちびき RTK のシステム構成[4]

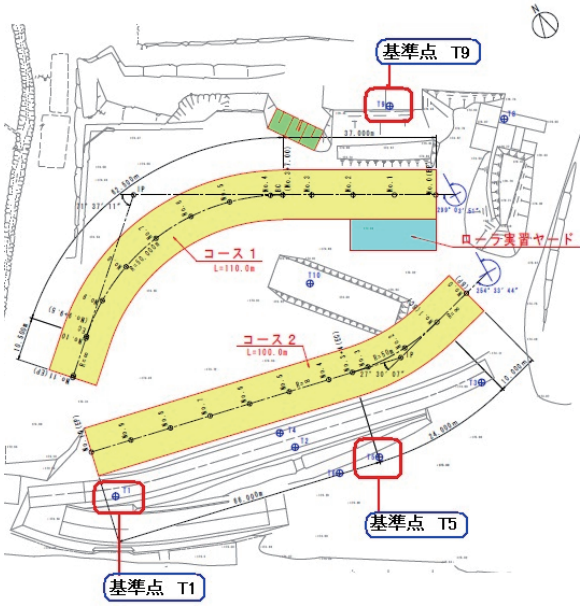


図-2　実験ヤード（基準点配置）

写真-1　実験ヤード（T5 から T9 方向を望む）

③制御データ変換システム（写真-6）
算出された位置データを、建設機械のコントロールボックスに入力可能なデータに変換するためのシステムである。
（実証実験用として開発）

３．実証実験の結果

3.1　みちびき RTK とローカル RTK との比較検証

みちびき RTK について、RTK 演算の同期モード（1Hz）と非同期モード（5Hz）における位置データの傾向を確認した。

座標既知点である T1 と T9 におけるデータを図-3、図-4 に示す（図は FIX 解のみを表示）。非同期モードとした T1 では、X,Y 座標の標準偏差は 10mm を超える数値を示している。同期モードとした T9 では、Y 座標の標準偏差が 5mm と良好である一方で、X 座標は 14mm となっている。また、図は割愛するが、T1、T9 ともに Z 座標は X,Y 座標よりも標準偏差は悪く、20～35mm を示している[2)]。

このことから、測位位置が変わっても、定点観測(静止観測)における精度に大差はないものと判断できる。

なお、図-3、図-4 において、各図基準点座標とみちびき RTK による座標値に差が認められるが、これは次の理由による。「みちびき」からの補強信号はネットワーク型 RTK のように電子基準点成果値やそのデータが基準となって生成されている（ｾﾐ･ﾀﾞｲﾅﾐｸｽ補正等も関連する）。これに対して、実験ヤード内に配置された基準点は電子基準点に基づく測量がなされていないため、この相違が座標差として表れている。

図-5、図-6 には、建設機械を停止させた状態で、同時間帯にみちびき RTK とローカル RTK を実施した際のデータ分布を示す（図は FIX 解のみを表示）。みちびき RTK では、X、Y 座標で 10mm 程度の標準偏差となっている。これに対して、ローカル RTK では、X、Y 座標で 5mm 以下の標準偏差となっている。

写真-2　基準点Ｔ９（左：LEX ｱﾝﾃﾅ、右：GNSS ｱﾝﾃﾅ）

写真-3　LEX 受信機等を搭載したブルドーザ
（左：排土板上：GNSS ｱﾝﾃﾅ、右：キャビン上：LEX ｱﾝﾃﾅ）

写真-4　LEX 受信機

写真-5　低速移動体端末

写真-6　制御ﾃﾞｰﾀ変換ｼｽﾃﾑ(右側の PC)

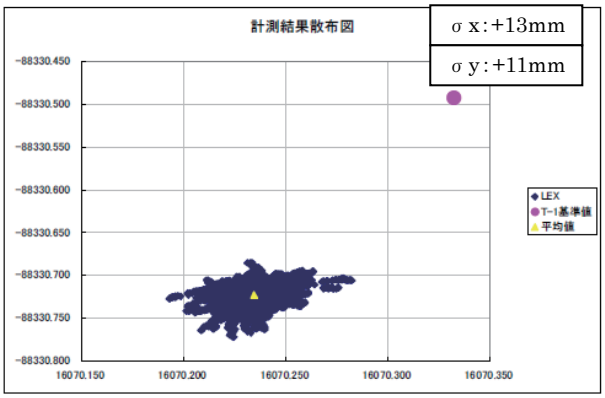


図-3　T1 におけるみちびき RTK の結果(非同期、5Hz)

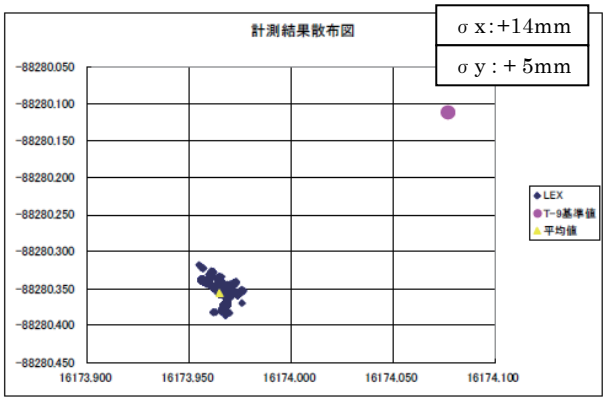


図-4　T9 におけるみちびき RTK の結果(同期、1Hz)

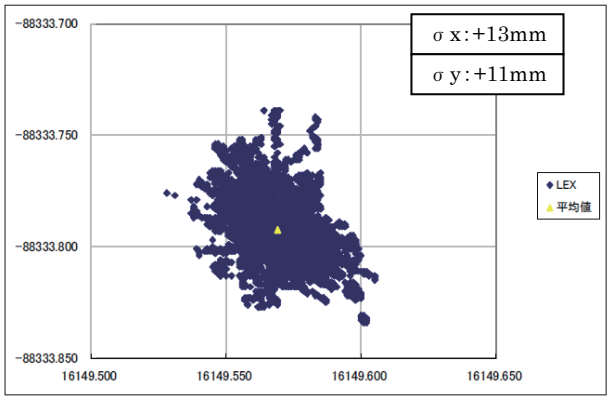


図-5　重機上でのみちびき RTK の結果(非同期、5Hz)

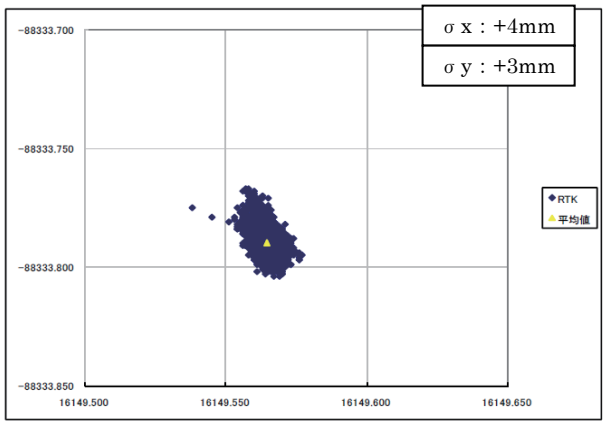


図-6　重機上でのﾛｰｶﾙ RTK の結果(非同期、10Hz)

ローカル RTK については、本実験では非常に良好な数値を示しており、みちびき RTK においても一般的な RTK 測位の精度であり、大きな問題点は見当たらない結果となっている。図は割愛したが、Z 座標についても同様な傾向であることを確認している[2)]。

図-7 に、連続約 24 時間、定点観測をした結果を示す。75%の割合で FIX 解が取得できていることが分かる。次に、データ推移の一部を図-8 に示す。

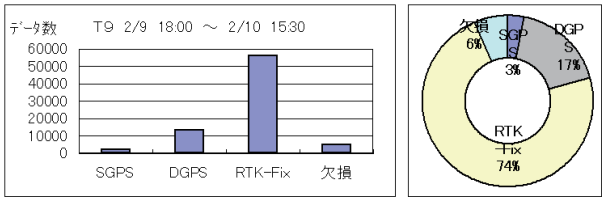


図-7　約 24 時間の観測におけるみちびき RTK の測位モードの割合

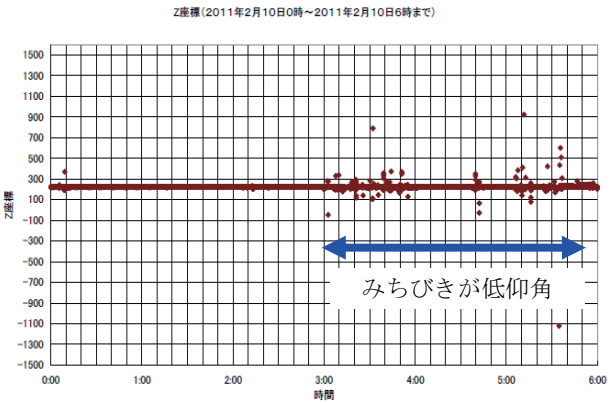


図-8　約 24 時間の観測のうち、早朝（みちびきが低高度）におけるみちびき RTK（Z 座標の推移）

みちびきの衛星高度（仰角）が低くなっても、LEX 信号を受信できている限りは、RTK 演算を実行していることが分かった。しかし、低仰角においてはデータのバラツキが顕著であり、正確な数値を示していないものと考えられる。一方で高仰角～天頂にかけては、低仰角である時間帯に比してデータのばらつきが少ないことが確認できたが、FIX 解が取得できない時間帯も存在している。

3.2　建設機械による精度検証と出来形管理精度の検証

本実験では、みちびき RTK とローカル RTK の各装置をブルドーザに搭載し、MC による道路盛土の敷均し作業を実際に行い、MC による作業後の盛土形状を TS 測量結果と比較する出来形精度検証を行った。MC に登録した３次元設計データでは、縦断勾配と横断勾配はともに０％と、平坦面での敷均し施工とした。

情報化施工に求められる施工精度や出来形管理精度については、国土交通省が取りまとめている「TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領(平成 24 年 3 月)」の記載が参考になる。ここにはセット間較差で、

水平（ｘ、ｙ）　±20mm
垂直（ｚ）　±30mm

と記されている。

写真-7 にみちびき RTK による敷均し状況を示す。定性的な評価となるが、特段凸凹になっている場所もなく、これまで同様の性能で敷均しができていることがわかる。

表-1 と表-2 には、TS 出来形測量結果との Z 座標の対比を示す。0.072m や 0.316m といった特異値を除けば出来形の較差は 15～25mm となり、上記要領に記載の規定値を満足していることが分かる。このことから、出来形管理の実用上、問題のない数値が得られているものと判断できる。

図-9 には、ブルドーザ走行中のみちびき RTK で取得できた出来形データのうち、30 分間の Z 座標と測位フラグの推移を示している。図-9 の上段が Z 座標の推移、下段が測位フラグの変化である。ローカル RTK の FIX 率が 100％であった[2]こと（図は割愛）に対して、みちびき RTK は 64％に留まっている。みちびき RTK では FIX であるにも関わらず、設計高を満足できない時間帯(10:25 付近)もあり、RTK 解の信頼性についての検証はさらに必要であると思われる。

４．実証実験結果のまとめと課題

4.1　まとめ

本実証実験の結果は以下のとおりである。

①みちびき RTK での定点観測は、FIX 解が得られている場合、(X,Y,Z)の標準偏差はローカル RTK と比較しても遜色のない精度が得られた。また、「TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領(平成 24 年 3 月)」に示された水平精度を満足している。

②同期モード（１Hz）と非同期モード（５Hz）に大きな差は認められず、優劣の評価は難しい。

③みちびき RTK では、安定して FIX 解が得られない状況が散見された。LEX 信号の品質の劣化、電波受信障害、RTK 演算ミスなど想定されるが、この原因は実験期間中には特定できなかった。

④24 時間定点観測では FIX 解データが 75％占めているが、ノイズが少ないと思われる天頂付近からの補強信号を受信した場合においても RTK データのばらつきがみられる時間帯が存在している。逆に、準天頂衛星が比較的低仰角に位置する場合でも、FIX 解データが得られる場合がある。

⑤GNSS による出来形管理においては、ブルドーザ走行時の RTK データと TS 成果の比較から、みちびき RTK を導入しても、補強信号を受信できていれば精度上の問題はないと考えられる。また、「TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領(平成 24 年 3 月)」に示された垂直精度を満足している。

表-1　ﾌﾞﾚｰﾄﾞｵﾌｾｯﾄ - 5mm における MC（みちびき RTK）と TS 出来形比較

設計高 (m)	オフセット (m)	測定ポイント	設計−オフセット高さ A(m)	TS−Z (m)	差 A−Z(m)
175.000	-0.005	1	174.995	175.012	-0.017
		2	174.995	175.008	-0.013
		3	174.995	174.998	-0.003
		4	174.995	175.008	-0.013
		5	174.995	174.991	0.004
		6	174.995	174.679	0.316

表-2　ﾌﾞﾚｰﾄﾞｵﾌｾｯﾄ - 25mm における MC（みちびき RTK）と TS 出来形比較

設計高 (m)	オフセット (m)	測定ポイント	設計−オフセット高さ A(m)	TS−Z (m)	差 A−Z(m)
175.000	-0.025	1	174.975	174.997	-0.022
		2	174.975	175.000	-0.025
		3	174.975	175.047	-0.072
		4	174.975	174.998	-0.023

写真-7　みちびき RTK による敷均し状況

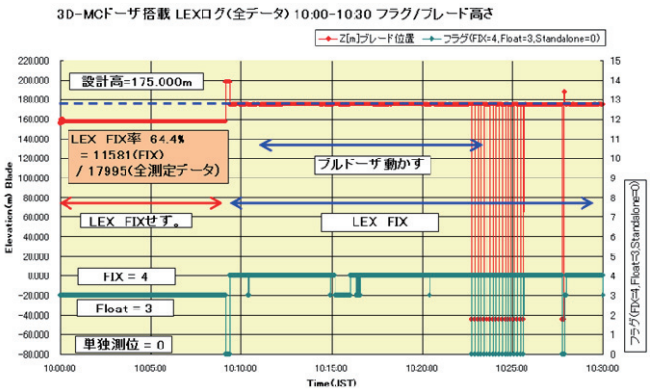


図-9　ブルドーザ走行時の Z 座標と測位フラグの推移
（みちびき RTK）

4.2　課題

本実験で確認できた課題は以下のとおりである。

(1) 精度的な課題

①みちびき RTK データの周波数

ローカル RTK 方式の MC で使用している測位データの出力周波数は一般的には 10Hz である。みちびき RTK を利用する場合は本実験で利用した装置は 1Hz であり、高い周波数側に合わせる必要がある。準天頂衛星の補強信号の送信出力周波数にも関連するものであり、今後のシステム開発や装置改良に期待したい。

②みちびき RTK データの品質

情報化施工において建設機械の位置を連続的に計測する場合、安定した補強信号の受信とともに RTK 演算の正確性が重要である。そのためにも 4.1③項に示した補強信号の品質劣化を防止し、安定的に高品質な補強信号を衛星から送信できる仕組みへの改善を強く要望したい。

(2) コスト的な課題

①装置構成

準天頂衛星からの補強信号と GNSS 衛星からの測位信号は同じ周波数帯での送信となっているので、受信アンテナの一体化が実現できる。また、本実験で使用した補強信号受信に関わる装置群は試験用ということもあり、サイズも大きく重いものであった。今後、これらのコンパクト化や軽量化さらには、GNSS 受信機との一体化といった装置改良にも期待したい。

②通信料金体系

実用化段階における LEX 信号の利用料金体系が現時点では不確定であるが、ローカル RTK 方式においては、RTK 基準局と地上系無線の設置費用との対比が、ネットワーク型 RTK においては、配信事業者から課金される補正データサービス料と通信費用との対比が今後詳細に実施される必要がある。

５．おわりに

準天頂衛星「みちびき」の信号を受信して施工機械を実際に制御したのは、本実験がおそらく初めてではないだろうか。そのため、施工関係者の関心は高く、実験期間中に開催した見学会には多くの参加者が集合した。

「みちびき」の打ち上げから約２年が経過し、SPACホームページなどに公表されている様々な分野での利用実証実験の結果も良好なようである。将来の準天頂衛星の構想も明確な工程表として示されることとなり、みちびきRTKの実用化への期待は高まるところである。

今回の実証実験により、いくつかの課題が浮き彫りになったがこれらの課題解決は十分可能であろう。エンドユーザーたる施工関係者からもきちんとニーズを声高に叫び、来るべき「みちびき」主導の測位の時代に向けて、情報化施工システムにも改良を重ねていきたいと考える。

最後に、衛星運用を担うJAXA殿や実験を統括するSPAC殿には実験実施の支援をいただいた。また、今回の実験にあたり、多くの関係者の皆様にもご協力をいただいた。この場をお借りして謝意を表します。

参考文献

1) 白鳥昭浩：準天頂衛星初号機みちびきの情報化施工への活用可能性に関する実証実験報告,建設の施工企画, No.737,pp.79-81,2011
2) 実験報告書：ＪＣＭＡ公式サイトより http://www.jcmanet.or.jp/new/2011/20110610.pdf
3) 黒台昌弘：準天頂衛星（みちびき）の民間利用実証実験報告 情報化施工機器による精度検証およびGNSS出来形管理精度検証について，JACIC 情報，Vol.27,No.2,pp.60-65,2012
4) 齋藤ら：「みちびき」を利用したセンチメータ級測位補強システムの開発,第54回宇宙科学技術連合講演会講演集,2010

JCMAワーキンググループメンバー（順不同）

白鳥昭浩　(独)土木研究所（元(社)日本建設機械化協会）
増田　稔　測位衛星技術㈱（元東亜建設工業㈱）
神田俊彦　㈱小松製作所
村本英一　㈱小松製作所
馬込亨志　㈱小松製作所
神庭浩二　西尾レントオール㈱
小薬賢一　西尾レントオール㈱
竹内幸弘　㈱トプコン
神崎政之　日立造船㈱
神山浩司　㈱ジャストプランニングシステム
浅川健太郎　㈲キットコーポレーション
黒台昌弘　㈱間組技術研究所

16. 情報化施工技術を活用した工事の成績評定結果の分析

国土交通省　国土技術政策総合研究所　○ 渡辺　健一
〃　塚原　隆夫
〃　市村　靖光

１．はじめに

情報化施工は ICT（情報通信技術）の活用により調査，設計等のプロセスから得られる電子情報を活用して高効率・高精度な施工を実現し，さらに施工で得られる電子情報を維持管理等の他のプロセスへ活用することによって，建設生産プロセス全体における生産性の向上や品質の確保を図ることを目的としたシステムである。

国土交通省では，平成 20 年 7 月に「情報化施工推進戦略」を策定して，建設分野での情報化施工技術の普及促進に取り組んでいる。その中でも特に工事目的物の品質確保，施工の省力化によるコスト縮減等の効果の期待が高い「トータルステーション（TS）による出来形管理技術」及び「マシンコントロール（MC）技術［モータグレーダ］」の二つの情報化施工技術については，平成 25 年度一般化に向けて実用化の推進を図っており，その他の情報化施工技術についても，実用化に向けて対応・検討を進めている。このような取組の一環として，直轄事業において，情報化施工技術を活用した試験施工を実施している。

また，国土交通省の直轄事業に係る請負工事では，技術検査において，受注者の工事実施状況や工事目的物の出来形・品質を確認し，受注者に対して**表-1** に示す考査項目について工事成績評定を実施している。工事成績評定は受注者の技術力や目的物の品質を評価する重要な指標であることから，本稿では，情報化施工技術の活用効果や課題を把握するうえで，試験施工を実施した工事の成績評定結果に着目し，その評価結果の傾向について報告するものである。

２．工事成績評定結果の分析

国土交通省北海道開発局，各地方整備局及び内閣府沖縄総合事務局における平成 21 年度及び 22 年度に完成した土木工事（港湾・空港事業を含まない）を対象として，情報化施工技術を活用した工事（以下「活用工事」という。）と活用していない工事（以下「通常工事」という。）に分類し，工事成績評定結果から集計・整理した評定点（平均値）を比較することにより分析した。

なお，本稿で報告する分析結果は，情報化施工技術の活用有無だけに着目したものであり，他の要素は考慮していない。

３．分析結果

3.1　活用工事件数

平成 21 年度及び 22 年度に完成した工事における工事種別毎の活用工事件数を**図-1** に，活用工事累計件数の内訳を**図-2** に示す。

活用工事件数は年々増加しており，累計実績は 302 件で，そのうち「一般土木」は約 7 割，「アスファルト舗装」は約 3 割となっている。

表-1　工事成績評定要領における評価内容

考査項目	細別	評価内容	評定点内訳
1　施工体制	Ⅰ　施工体制一般	施工計画書及び施工体制の履行状況を評価	3.3点
	Ⅱ　配置技術者	現場代理人、主任（監理）技術者等の職務執行状況を評価	4.1点
2　施工状況	Ⅰ　施工管理	施工管理の実施状況を評価	13.0点
	Ⅱ　工程管理	工程管理の実施状況を評価	8.1点
	Ⅲ　安全対策	安全管理上の措置の実施状況を評価	8.8点
	Ⅳ　対外関係	関係機関や工事関係者等との調整状況を評価	3.7点
3　出来形及び出来ばえ	Ⅰ　出来形	目的物の位置、出来形寸法の適合状況を評価	14.9点
	Ⅱ　品質	目的物の使用材料品質、施工品質の適合状況を評価	17.4点
	Ⅲ　出来ばえ	目的物の仕上がり状況を評価	8.5点
4　工事特性	Ⅰ　施工条件等への対応	特殊な工事内容や現場作業条件への対応状況を評価	7.3点
5　創意工夫	Ⅰ　創意工夫	工事に際して工夫した内容や新技術活用等の実施状況を評価	5.7点
6　社会性等	Ⅰ　地域への貢献等	周辺環境への配慮や住民とのコミュニケーション等の取組状況を評価	5.2点
7　法令遵守等	※適用する場合のみ評価	施工に起因した事故の発生や不誠実な行為等が判明した場合に適用	減点
評定点　合　計			100点

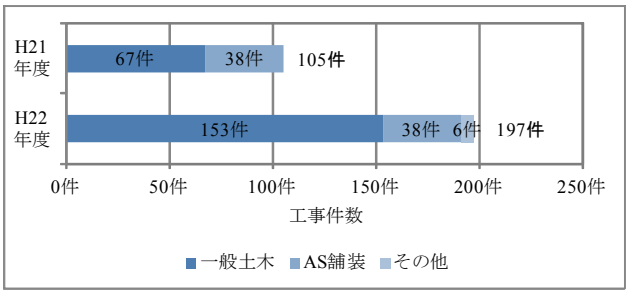


図-1　完成年度別活用工事件数

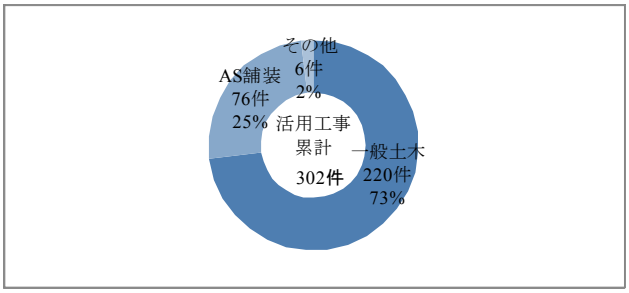


図-2　活用工事累計件数内訳

3.2　情報化施工技術別活用状況

活用した情報化施工技術毎に分類し，活用件数と評定点について集計した結果を**図-3** に示す。

活用件数では，各年度ともに「TS による出来形管理技術（土工）」「TS/GNSS による締固め管理技術」が多く活用されていた。評定点では，平成 21 年度は「TS/GNSS による締固め管理技術」，平成 22 年度は「MC 技術（グレーダ以外）」で最も高い点数を獲得している。

なお，1 件の工事の中で複数の情報化施工技術を活用しているケースがあるため，活用件数の合計は**図-1，2** に示す活用工事件数とは一致しない。また，「その他」には IC タグ，アスファルト温度管理等活用件数の少ない各種技術を集計しており参考値として掲載している。

3.3　情報化施工活用有無による比較

ここでは，主たる工事内容毎に情報化施工活用有無を比較するため，平成 21 年度及び 22 年度に完成した工事を工事技術的難易度評価の工事区分で分類し，活用工事件数の多かった「土工」（工事区分の分類のうち河川堤防，道路切土，道路盛土を含む）と「アスファルト舗装」を抽出して比較することとし，その分析対象となる工事件数の内訳を**表-2** に示す。

表-2　工事区分別分析対象工事件数内訳

年度	区分	主たる工事区分				
		土工	河川堤防	道路切土	道路盛土	ｱｽﾌｧﾙﾄ舗装
H21年度	活用工事	40件	26件	3件	11件	37件
	通常工事	1,217件	557件	286件	374件	1,080件
H22年度	活用工事	98件	38件	35件	25件	36件
	通常工事	931件	410件	245件	276件	679件

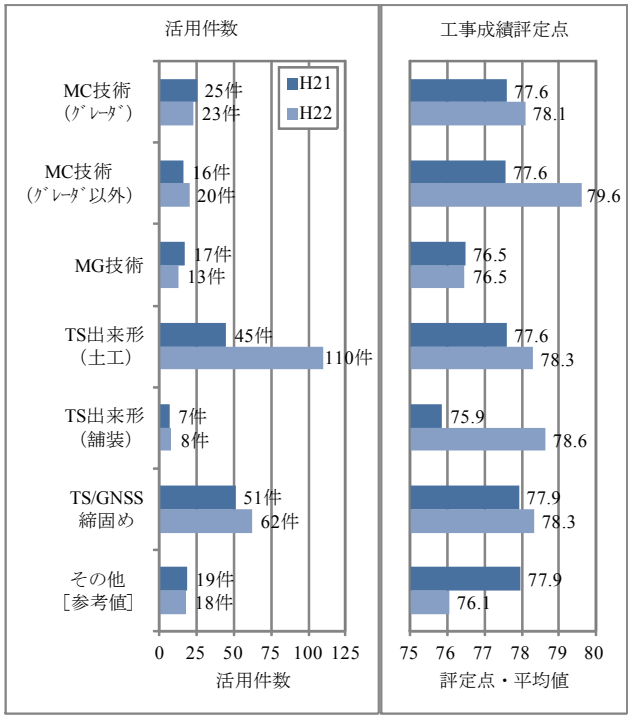


図-3　情報化施工技術別活用件数と工事成績評定点

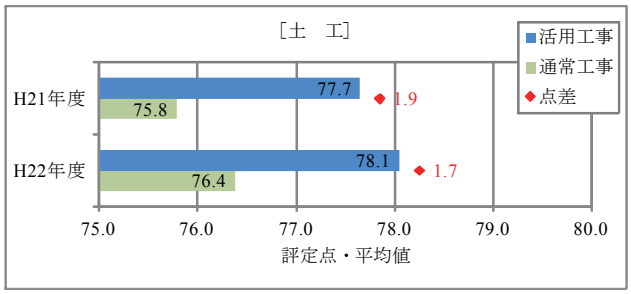


図-4　「土工」年度別工事成績評定点

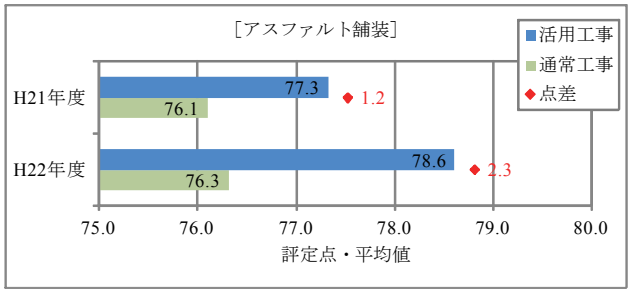


図-5　「アスファルト舗装」年度別工事成績評定点

(1) 工事成績評定点

各年度の工事成績評定点について活用工事と通常工事の分類により比較した結果を**図-4，5** に示す。

「土工」では，通常工事に比べ活用工事の点数が 1.7～1.9 点高く，また，「アスファルト舗装」では，通常工事に比べ活用工事の点数が 1.2～2.3 点高いことから，いずれの工事区分，年度においても活用工事の評定点は通常工事に比べて高い傾向がみられた。

(2) 工事成績評定点分布状況

工事成績評定点の分布状況について比較した結果を**図-6，7** に示す。

件数割合が最も高い点数区分は，「土工」では通常工事で 74 点超～76 点以下，活用工事で 76 点超～78 点，また，「アスファルト舗装」では通常工事で 74 点超～76 点以下，活用工事で 76 点超～78 点以下（平成 21 年度）及び 78 点超～80 点以下（平成 22 年度）となっており、いずれの工事区分，年度においても活用工事の評定点は通常工事に比べて高得点に分布している傾向がみられた。

(3) 活用工事における評価の傾向

ここまで活用工事と通常工事の工事成績評定点を比較した結果より，活用工事の評価は通常工事に比べて高いことが確認されたことから，ここでは，活用工事で評価が高くなる工事成績評定の考査項目を検証することとした。考査項目細別毎に次式により得点割合を算出して比較した結果を**図-8～11** に示す。

$$\text{得点割合}=\frac{\text{評定点（平均値）}}{\text{満点}}\times 100\ [\%]$$

土工では「配置技術者」「品質」「創意工夫」，アスファルト舗装では「配置技術者」「出来形」「品質」「創意工夫」「社会性等」の考査項目細別において活用工事と通常工事の得点割合の差が表れる傾向がみられた。

さらには，得点割合の差が表れた考査項目細別では活用工事においてどのような点が評価されているかについて，関東地方整備局における平成 22 年度工事成績評定結果の考査項目別運用表を用いて確認した結果を以下に示す。

「配置技術者」では，設計図書や適用すべき諸基準を理解して施工へ反映されている点や適切な品質管理行われていることが，特に評価されている傾向がみられた。

「品質」「出来形」では，条件を満足した品質の確保や出来形管理の工夫について特に評価されている傾向がみられた。また，試験施工に関わった受発注者に対するアンケート調査結果 [2]にて，情報化施工技術の活用によって従来と比べて施工品質（精度）の向上や施工品質の均一化に寄与するとの回答が大半を占めていたことからも，情報化施工の効果が発揮されたことで評価へつながったと推察される。

「創意工夫」は，情報化施工を推進するための措置として，情報化施工を活用した工事に対して加点評価するとしたインセンティブを与えていることが大きな要因であった。

「社会性等」については，地域とのコミュニケーション等が特に評価されている傾向がみられたが，情報化施工技術の活用による明確な有意差は確認されなかった。

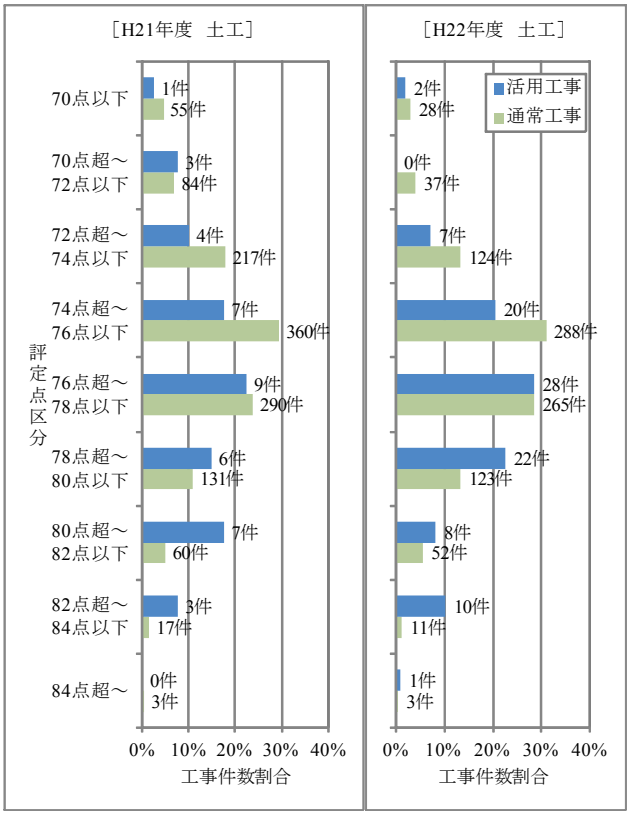


図-6　「土工」工事成績評定点の分布

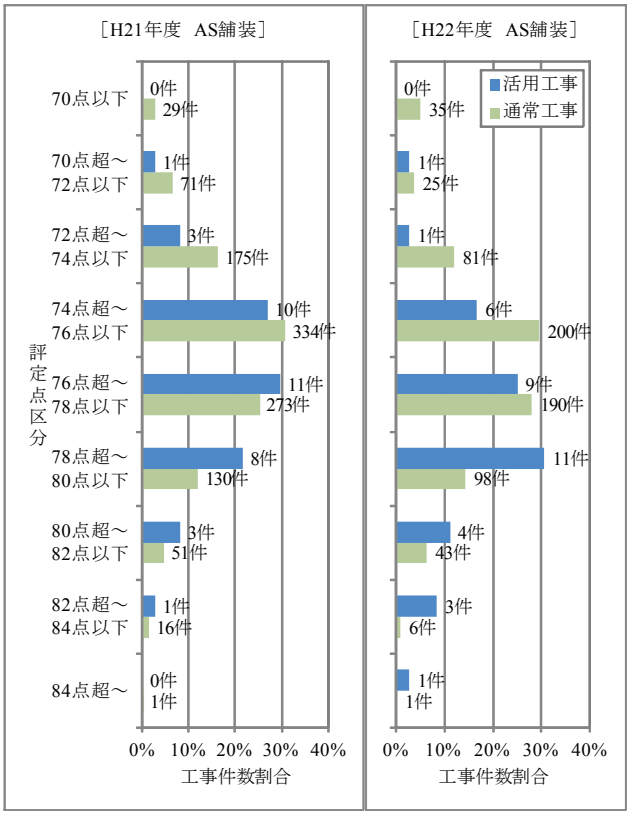


図-7　「アスファルト舗装」工事成績評定点の分布

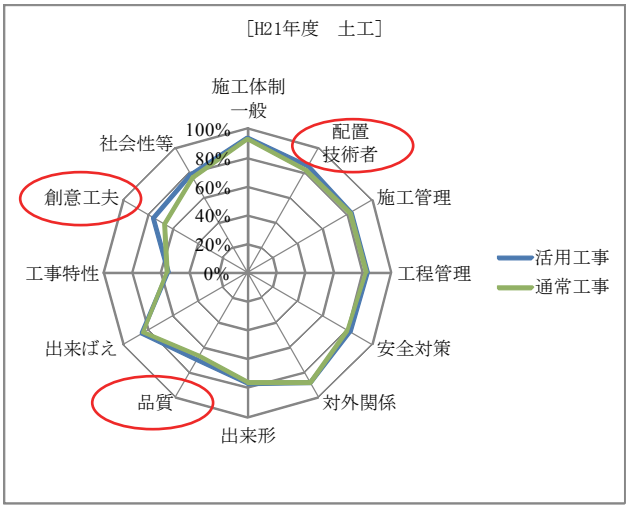


図-8　「H21 年度・土工」考査項目細別得点割合

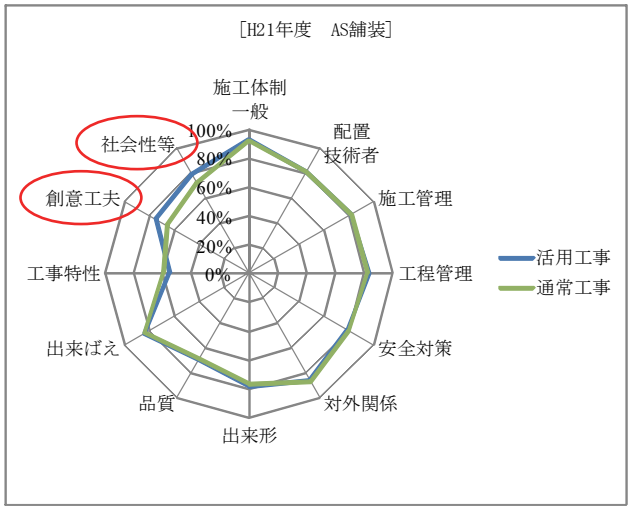


図-10　「H21 年度・ＡＳ舗装」考査項目細別得点割合

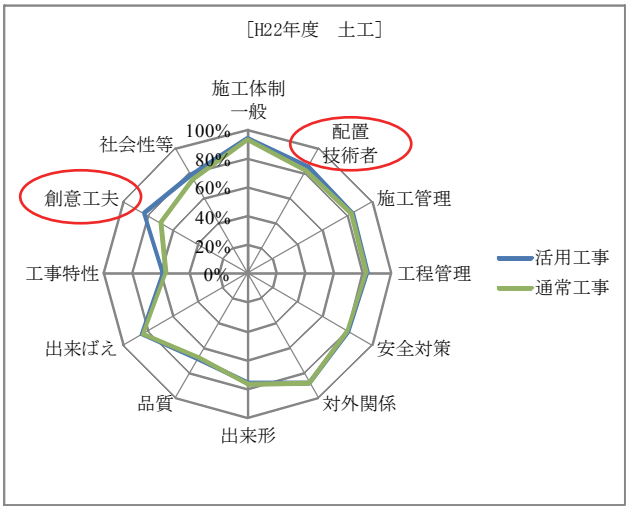


図-9　「H22 年度・土工」考査項目細別得点割合

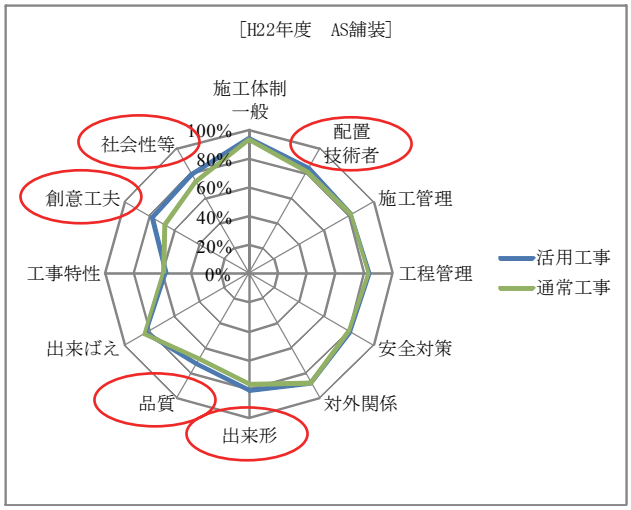


図-11　「H22 年度・ＡＳ舗装」考査項目細別得点割合

４．まとめ

本稿では，平成 21 年度及び 22 年度に完成した情報化施工技術を活用した工事の成績評定結果の傾向について報告した。

情報化施工技術の活用有無だけに着目した分析の結果，活用工事の成績評定結果においては，通常工事と比較して評定点が高く，その内訳である考査項目については「配置技術者」「出来形」「品質」「創意工夫」「社会性等」でより高く評価される傾向にあることがわかった。

情報化施工技術を活用した工事件数は年々増加しており，これまでに得られた知見により，情報化施工技術に対応した施工管理要領や監督・検査要領等が見直しされるなど，一般化に向けて各種の取組も本格的に動き出している。活用工事における成績評定結果データの蓄積と分析を継続的に行い，工事成績評定結果から見た情報化施工技術の活用による効果や課題について検証し，その結果を，施工技術の改善や監督・検査及び施工管理の手法の確立に役立ててまいりたい。

参考文献

1) 情報化施工推進会議：情報化施工推進戦略，2008年7月31日
2) 情報化施工推進会議：第9回会議配付資料，2012年2月1日
3) 国土交通省：請負工事成績評定要領の運用の一部改正について，2009年3月24日
4) 工藤匡貴・宮武一郎・坂本俊英：情報化施工技術を活用した工事の総合評価方式における技術評価と工事成績の分析，平成23年度建設施工と建設機械シンポジウム発表論文，2011年

17. シールドトンネルのプロダクトモデルの開発と応用

大阪大学　○ 矢吹　信喜
株式会社コンポート　有賀　貴志
株式会社大林組　古屋　弘

１．はじめに

2008 年より国土交通省が推進している情報化施工では,3 次元モデルと GPS や種々のセンサー類のデータに基づいて，施工機械を半自動的にコントロールする AMC，オペレータの操作を支援する AMG および効率的な出来形管理などが実施されている。さらに，建築分野で進められてきている BIM（Building Information Modeling）の土木版である CIM（Construction Information Modeling）を国土交通省では進めようとしている。

こうした技術の中核に位置するのが 3 次元モデルであるが，特定のアプリケーションソフトウェアに依存するとデータの互換性がなく，異なるソフトウェア間でデータの効率的な交換や共有ができない。そこで，ISO（International Organization for Standardization）では，オブジェクト指向技術に基づいた 3 次元プロダクトモデルの標準化を推進している。機械分野では，ISO 10303（略称 STEP：Standard for the Exchange of Product model data）として，かなり規定化されている。一方，建築分野では，buildingSMART International（元 IAI：International Alliance for Interoperability）が建物のプロダクトモデル IFC（Industry Foundation Classes）を開発し，ISO の国際基準にすべく活動している。最近 BIM モデルと言われるのはこの IFC を指すことがほとんどである。

土木分野では，道路については LandXML が世界各国で既に使用されているが最近は更新されていない。国土交通省では道路中心線形のデータモデルを公開している。橋梁については日仏の協力により IFC-Bridge[1)]を開発し，IFC へ取り込まれることを狙ったがまだ実現していない。シールドトンネルについては，日本はその施工実績について延長で世界の約 2 分の 1 を占めていることもあり，今後の国際展開等を考慮して，プロダクトモデル IFC-ShieldTunnel を以前開発した[2)3)]が，あまり利用されなかった。その主な理由は，CAD 等のソフトウェアベンダーが新しいプロダクトモデルとの互換性を持つデータ変換プログラムを開発しないからである。ベンダーは，ISO や国で新しいプロダクトモデルを標準として扱おうとするまで待っているため，何もしなければ互換性のあるソフトウェアは作られない。そこで，我々は，以前開発した IFC-ShieldTunnel を精査し，改善すべき点は修正し，より汎用性があり使いやすいものにすることとした。さらに，構築し直した IFC-ShieldTunnel を実際のシールドトンネル工事に適用するために，データ交換において工夫を凝らし，対象とした施工現場で検証を実施することとした。

２．プロダクトモデル

プロダクトモデルは，CAD をはじめ，計画，解析や設計計算，積算，施工計画，施工管理，点検，維持管理などライフサイクルで使用される異なるソフトウェア間で構造物の形状，属性，関係などの種々のデータを共有したり，交換するために開発されたオブジェクト指向技術に基づいた汎用的なデータモデルである。プロダクトモデルを開発する上で，各部材の名称や範囲，お互いの関係を明確にすることが重要である。プロダクトモデルの構築では，構造物や部材などのオブジェクトをエンティティと呼び，エンティティをいくつかの部分に階層的に分割していく方法（part-of の関係）と似ているが異なるものをいくつかの種類に分類していく方法（is-a の関係）の２つの方法で全体を構成する。さらに，これら２つの関係以外の関係，すなわち，「支持される」や「接している」などを加える。また，エンティティの寸法や材質，仕様などの属性を定義する。当初は，部材等の物体のみをエンティティとして定義していたが，製造や施工などのプロセスもプロダクトと関連付けて定義したり，設計，施工，利用者などの人間などもプロダクトモデルの一部として定義されるようになっている。

従って，プロダクトモデルを構築する際，目的，範囲や詳細度を決めないと，際限なくなってしまい，膨大で完成が不可能となる。また，専門，国，地域などによって，エンティティのとらえ方が異

なるため，全員の完全な合意を得ることも困難である。さらに，技術開発によって，新しい種類の構造や機械，部品などが開発されれば，モデルの更新が必要になる。そのため，国際的な標準化を実施するためには，辛抱強く話し合いと試験を行っていくことが肝要である。

３．シールドトンネルの概念的プロダクトモデル

3.1　シールドトンネル

シールドトンネルは、土砂地盤中を掘削する機械であるシールド（シールドマシン）で地山の崩壊を防ぎながら、掘削、推進を行い、シールドのテール部で覆工することによりトンネルを構築するシールド工法で築造されたトンネルをいう。シールドトンネル [4]は主に都市部で開削工事が不向きな箇所にある道路トンネル，鉄道トンネル，地下河川，下水道等に採用され，シールド工法で建設が行われる。シールド工法には多くの種類があるが，シールドマシンによって掘削された土砂を泥土に変換し，泥土圧でシールドマシンの前面（カッターヘッド）の安定管理を行う土圧シールド工法が主流を占めている。掘削土砂を泥土に変換できるため，砂礫層，シルト粘土層，シラス層など広範囲の土質に適応が可能となっている。

3.2　概念的プロダクトモデルの構築

我々が2005年にシールドトンネルのプロダクトモデルの開発に着手した際，そうしたモデルは世界中探しても見当たらなかった。そこで，モデル化の範囲や詳細度などを決めるために概念的なモデルを，5W1H（いつ，誰が，どこで，何を，何故，どのように）を意識しながら，分割と分類の方法を用いて階層化や関係化により作成した。階層の頂上はRoot（根）といい，そこからProduct, Process, Organization，調査計測データ，知識の5つのモデルに分類し，Productの下には，地盤，シールドトンネル，仮設備，その他人工物の4つのエンティティに分類し，さらに，各エンティティを細かく分類していった。シールドトンネルの下の階層には，空洞，一次覆工，二次覆工，付帯設備，到達覆工，発進部覆工，その他を置き，例えば，一次覆工の下には，セグメント，シール材，ボルトなどを置いた。セグメントはさらに，普通とテーパーセグメントに分け，各々，鋼製とコンクリート系セグメントに分類し，さらに各々，A型，B型，K型といった形状でも分類した。その他，仮設備やその下のシールドマシン，あるいは付帯設備や到達覆工などについても部材単位までモデル化した。Product以外のProcess，Organization，調査計測データのモデルについても同様に分類した。但し，知識モデルについては当初，シールドトンネルに関する設計、施工、維持管理等を遂行するためのノウハウを想定したが、これらのノウハウは技術者や組織の経験に基づく形のない情報そのものであり、実体化した資料や書籍等をモデル化し，ノウハウ等は今後の課題としている。尚，モデル化に当たっては，用語の使用法が極めて重要であることから，辞典[4]，標準示方書[5]など参考にしながら，シールドトンネルの専門技術者数名に作業に参加してもらった。詳細については，文献[2)3)]を参照されたい。

４．IFC-ShieldTunnelの開発

概念的なプロダクトモデルはあくまで概念的であるから，コンピュータに実装して処理できるようにするためには，エンティティ間に存在するより多くの関係や属性などを詳細に定義しコード化する必要がある。コード化されたプロダクトモデルをゼロから開発したのでは膨大な時間がかかる。我々は橋梁のプロダクトモデルを開発する際，既にモデル化や実装がかなり進んでいた建築のIFCを拡張することにより，IFCが保有している豊富な情報資源を利用して，短期間でプロトタイプを作成することができた[1)]。そこで，シールドトンネルにおいても同様のアプローチを取った。尚，IFCには開発時期により様々なバージョンが存在するが，我々は当時の最新版であったIFC2x3を利用した。

IFC2x3には４つの構成要素，すなわち，１）ドメイン要素：建設業界のライフサイクルに携わる様々な業種での使用に特化したクラス，２）相互運用要素：構造物を構成する部材のように，形状及び属性を有するクラスの定義が行われている，３）コア要素：オブジェクトを定義するクラス，４）リソース要素：オブジェクトを定義するために用いられる形状表現のためのクラス（線や点，面など）や，オブジェクトが有する属性（材料，重量など）を定義するクラス，により構成されている。

Ifc2x3においては，コア要素の中にIfcRootのサブクラスとして3種の基本構造クラスIfcObjectDefinition，IfcRelationship，およびIfcPropertyDefinitionが存在し，それぞれ，要素，要素の関連付け，要素の属性情報を表現し，そのまたサブクラスとして各種のオブジェクトが定義されている。要素は空間要素がIfcSpatialElement，物理要素がIfcElementで定義され，属性情報については，クラス内のAttributeあるいは別にクラスとして設けたIfcPropertySetで定義する。オブジェクトの形状や位置表現に関しては，リソース要素であるIfcRepresentationItemというクラスを用いて行う。

モデル化に当たっては，なるべくIFCの基本的な構造やクラスを使えるものはそのまま用いたが，

建築のプロダクトモデルである IFC では土木分野に適用する際，不足するクラスがあることから，IFC に存在しないクラスを新たに定義した。IFC では，クラスなどの名称の先頭に“Ifc”を付ける規則がある。IfcObjectDefinition の下の階層に IfcObject があり，その下に IfcElement があり，さらにその下に建築用部材と並んで，土木用部材のエレメントとして IfcCivilElement を置いた。シールドトンネル独特のクラスについては，その下に IfcStElement を設け（St は Shield Tunnel の略），その下の階層に IfcStShaftElement, IfcStTunnelElement, IfcStJointStructureElement，IfcStTemporaryFacility, IfcStShieldMachineElement 等のクラスを，概念的プロダクトモデルに基づいて付加した。**図-1** に IFC-ShieldTunnel のスキーマの一部を示す。角に丸みがあるエンティティはその上か下に他のエンティティが接続しており略していることを示している。シールドトンネルの A，B，K セグメントおよびセグメント間のジョイント，二次覆工等のエンティティを**図-2** に示す。

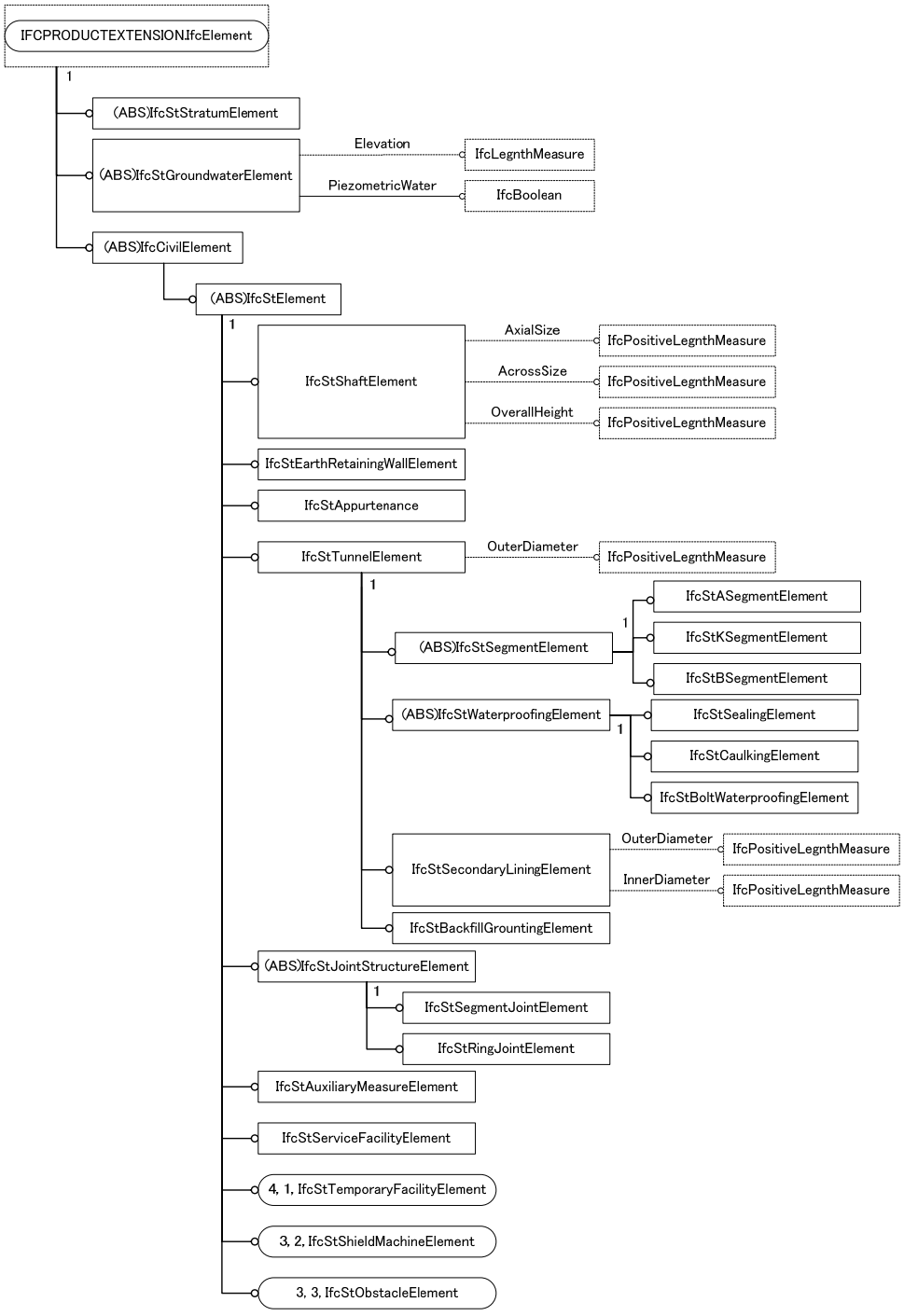
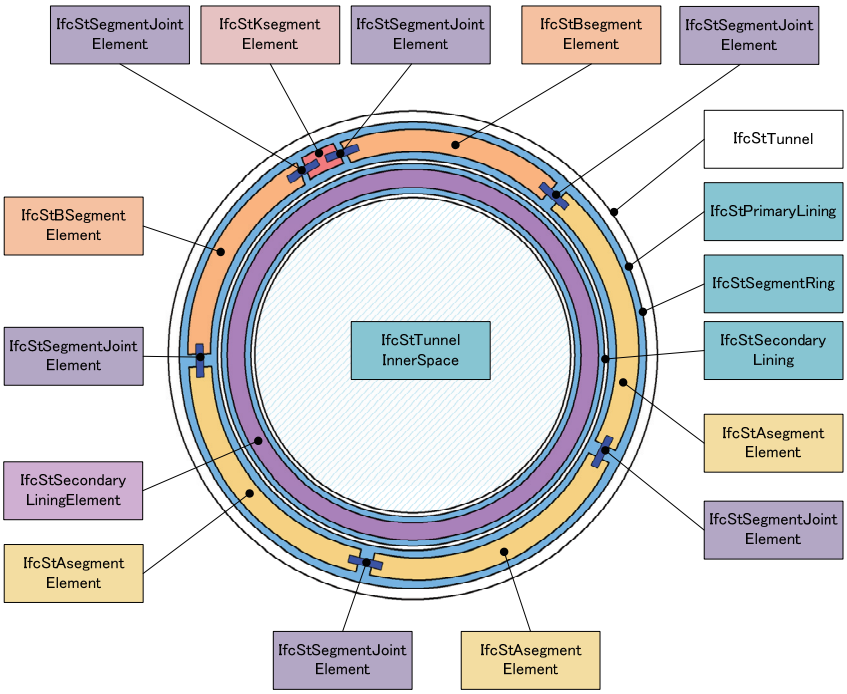
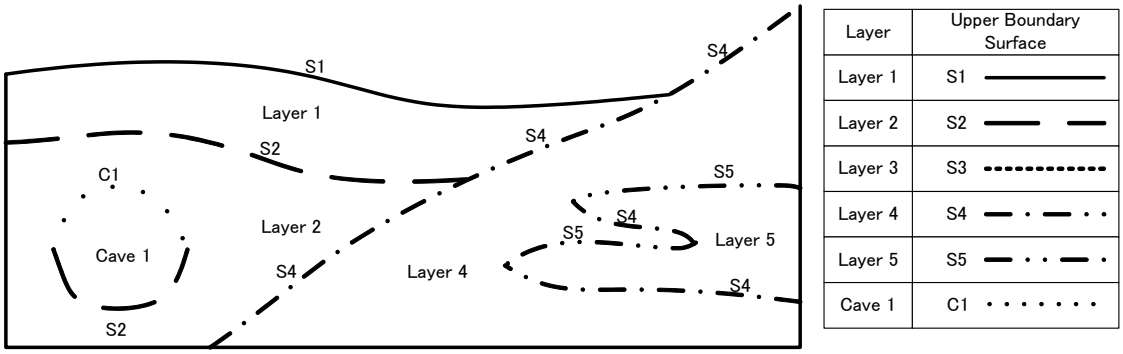


図-1　開発した IFC-ShieldTunnel のスキーマ図の一部





地盤については，地層の境界面に名称を付け，TIN（不整三角網）などを用いて面を表現し，地層名については地層内の任意の点から鉛直に直ぐ上部の境界面の名称の番号に Layer を先頭に付けるという方法を用いている（**図-3**）。地層は，IfcElement のすぐ下にある IfcStStratumElement によってモデリングされる。また，地下水についても IfcStGroundwaterElement によって表現される。一方，トンネルは地盤に空洞をもうけるため，中身が詰まった地層からソリッドな部分を取り除く必要がある。本研究では，空洞を Cave として挿入し，Cave 内部の全ての点で，IfcStVoidElement と名付けられた空洞であるようにモデリングした。また，Cave の上面には空洞の境界面，下面には地層の境界面を設けることとした。

IFC-ShieldTunnel のスキーマは，ISO-STEP に従い EXPRESS 言語で記述した。さらに，コンピュータで処理しやすいように IfcXML でも記述した。IfcXML で適当な寸法のセグメントのインスタンスファイルを記述し，市販の AutoCAD でファイルを読んで画面上にモデリングできるコンバータプログラムを Visual Basic for Application を用いて開発した。詳細については，文献[2)3)]を参照されたい。

５．施工現場への適用事例

IFC-ShieldTunnel は 2007 年にひとまず完成したが，前述のように実務で利用されなかった。しかし，2010 年 8 月から約 1 年間にわたり，実現場で適用実験を行うことができた。対象現場は，東京都品川区の中央環状品川線大井地区の大井ジャンクションから大橋ジャンクションまでの延長約 9.4km のトンネル工事である。その中で**図-4** に示す上りの大橋方面（延長 550m）と下りの大井方面（延長 336m）のトンネルに適用した。

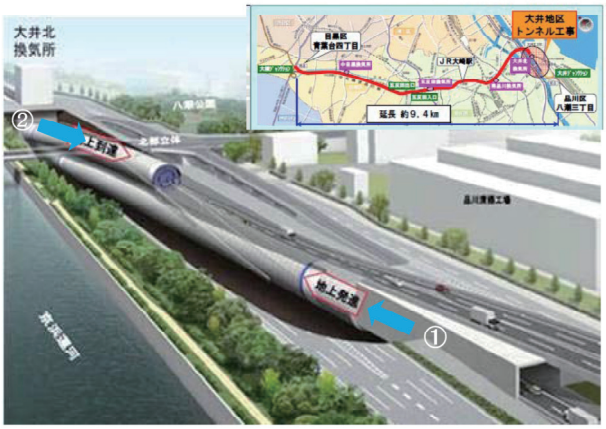


図-4　シールドトンネル工事現場の概要図

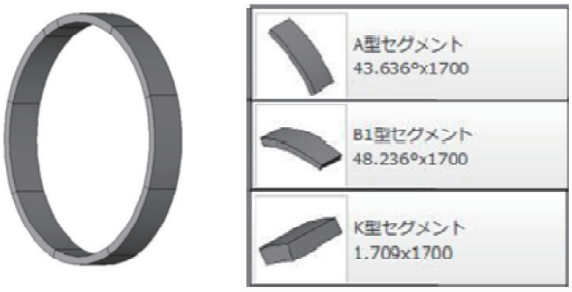


図-5　セグメントの 3 次元モデル

本研究では，トンネルを構成する部材であるセグメントに着目し，検証を行った。モデリングには Autodesk 社の Revit Structure 2011 を主に用い，線形構造物の配置のために一部で Civil 3D も利用した。**図-5** に，図面をもとに作成したセグメントの 3 次元モデルを示す。対象現場のトンネルセグメントは円筒形で，A 型セグメント，B 型セグメント，K 型セグメントの 3 種類で構成されている。それぞれのセグメントは形状の異なる 2 種類が存在し，計 6 種類のセグメントを中心線形を利用して配置し，この 3 次元モデルを利用してプロパティのカスタマイズや IFC の入出力を行った。

次に，**図-6** に示すように，Revit Structure を用いてセグメントモデルにプロパティを与えた。横幅 H や曲率 A のパラメータを定義し，モデルをパラメトリックにデザインできるようにすれば，任意の値をパラメータに入力することで 3 次元モデルに反映させることができる。さらに，識別情報として，製造元や価格などのパラメータを定義した。シールドトンネルのセグメントは，建築部材ではないため IFC ではサポートされていない。従って，Revit Structure で作成したモデルを IFC ファイルに出力する際には，既存の建築用の IFC スキーマを代用することになる。その際には，**図-6**，**図-7** に

Parameter	Value
Dimensions	
H	1700.0
A	48.236°
Identity Data	
Keynote	トンネル部材
Model	B1型セグメント
Manufacturer	○○○工業
Type Comments	構造コンクリート
URL	http://www.○○○.co.jp/
Description	シールドトンネル用部材
Assembly Description	
Assembly Code	
Type Mark	
Cost	¥○○○○○
OmniClass Number	23.25.30.21.14
OmniClass Title	Trussed Beams and Joists

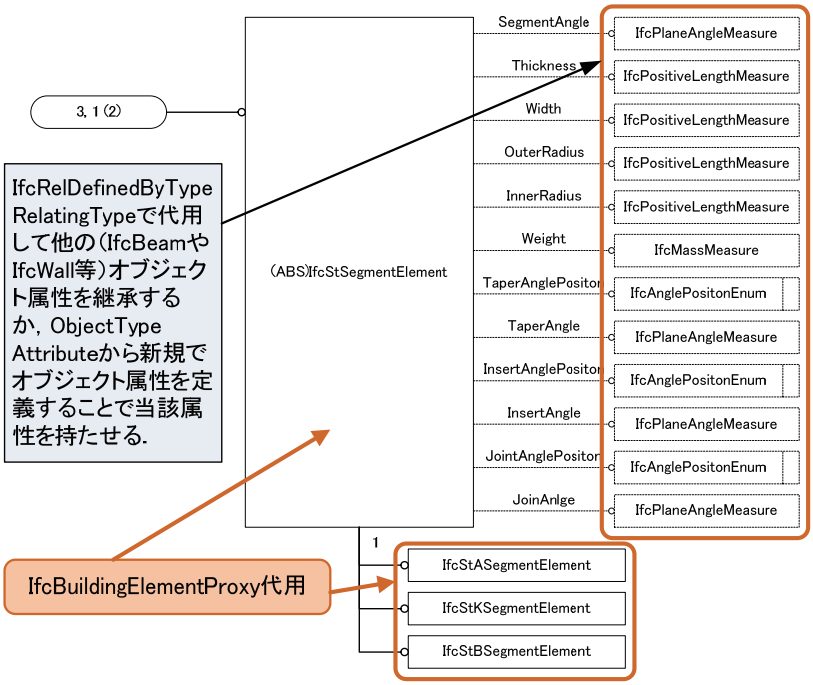
図-6　セグメントのプロパティ

```
# Revit Export Layers
# Maps Categories and Subcategories to layer names and color numbers
# Category <tab> Subcategory <tab> Layer name <tab> Color number <tab>
# Cut layer name <tab> Cut color number
# Do not remove the colon (:) after certain category names.
# ---------------------------------------------------------
Air Terminals           IfcAirTerminal
Area Polylines          Not Exported
Area Tags               Not Exported
Areas           IfcSpace
Cable Tray Fittings             IFCCableTrayFitting
Cable Trays             IFCCableTraySegment
Callouts                Not Exported
Casework                IfcFurniture
Casework Tags           Not Exported
Ceiling Tags            Not Exported
Ceilings                IfcCovering
Ceilings        Surface Pattern IfcCovering
Color Fill              Not Exported
Color Fill Legends              Not Exported
Columns         IfcColumn
Communication Devices           IfcBuildingElementProxy
Conduit Fittings                IFCConduitFitting
Conduits                IFCConduitSegment
Constraints             Not Exported
Contour Labels          Not Exported
Curtain Panel Tags              Not Exported
```

図-7　セグメントのマッピングファイル

示すような IAI 標準に基づいた新しいマッピングファイルを作成する必要がある。**図-7** の左列はモデルカテゴリを表している。**図-8** は IFC-ShieldTunnel のマッピングファイルを示す。コメント行の下に記載された右列が IFC クラス名を表わしている。規定の IAI 標準に基づいたマッピングファイルを使用して IFC 形式に書き出した場合に，自動マッピングされていない要素は IFC クラス名に Not Exported と表示される。

そこで，IfcBuildingElementProxy と呼ばれる IFC のクラスを代用することとした。このクラスは，構造物を構成する全ての要素に対して共通の属性を定義するクラスであり，これを用いて概念的プロダクトモデルの当該属性を代用する。これは，オブジェクトタイプが不明である場合の IFC の汎用データとして用いられる要素である（**図-7**）。



現場への適用に当たっては，施工現場の技術者へのヒアリングも実施し，IFC-ShieldTunnel についての意見を聴取した。その結果，プロダクトモデルでは，裏込め注入が立坑やトンネルと同じ階層に定義されているが，これは高すぎて，実際は一次覆工の下の階層に移動すべきだと判断された。セグメントリングについての変更点はなかったが，概念的プロダクトモデルに表記されている内容に沿って，幅や角度，重量を定義するだけなく，コストや座標情報を定義した方が良い，という要望が挙がった。

この他に，IFC-ShieldTunnel を用いて Revit Structure と Google SketchUp との間でセグメントリングの 3 次元モデルのデータ交換を成功させた。また，Revit Structure で工程シミュレーションデータを作成し，IFC-ShieldTunnel を介して，進捗状況を EXCEL で工程チャートに変換し，コストも併記させることも実施した。自動化するために，Revit Structure の Visual Basic for Application（VBA）を用いてプログラムを作成した。これは，IFC-ShieldTunnel が 3 次元に時間軸を加えた 4 次元 CAD，さらにコスト軸を加えた 5 次元 CAD に資することを示唆している。

６．おわりに

2005 年から開発を開始したシールドトンネルのプロダクトモデル IFC-ShieldTunnel は，途中何回かの改善を図りながら，2010 年に一旦完成した。しかし，我々は，シールドトンネルに続いて，開削トンネルのプロダクトモデル IFC-Cut&CoverTunnel を 2011 年に開発し，さらには山岳トンネルのプロダクトモデル IFC-MountainTunnel を 2012 年に開発した。現在，これら 3 つのプロダクトモデルを統合化して，IFC-Tunnel とする作業を実施している。

本論では，シールドトンネルのプロダクトモデルについて，その意義や開発のプロセスを含めて紹介し，実現場への一部適用によって得られた知見について述べた。今後は，改良を施し，統合化した IFC-MountainTunnel を，実際のシールドトンネル工事へ適用し，種々のソフトウェアとの間でデータの共有や交換を行い，広範なシミュレーションを行うことによって，作業の効率化，品質の向上，コストの削減に貢献することを示していきたいと考えている。さらに，適切なプロダクトモデルの開発，維持管理およびソフトウェアベンダーの協力により，CIM を推進していきたい。

参考文献

1) 矢吹信喜，志谷倫章：PC橋梁の３次元プロダクトモデルの開発と応用，土木学会論文集，No.784/VI-66, pp.171-187, 2005.
2) 矢吹信喜，東谷雄一朗，秋山実，河内康，宮亨：シールドトンネルのプロダクトモデルの開発に関する基礎的研究，土木情報利用技術論文集，Vol.16, pp.264-268, 2007.
3) Nobuyoshi Yabuki: Representation of caves in a shield tunnel product model, Proc. of the 7th European Conference on Product and Process Modelling, pp.545-550, 2008.
4) 土木学会：土木用語大辞典，1999.
5) 土木学会：2006年制定トンネル標準示方書［シールド工法］・同解説，2006.

18.　ＩＣＴを用いた盛土の新たな施工管理手法について

国土交通省関東地方整備局　関東技術事務所　○島田　光之

１．はじめに

近年，大規模な建設現場を中心にICT（Information and Communication Technology：情報通信技術）を活用した情報化施工が積極的に導入され，実績も増えつつある。情報化施工とは，ICT を建設施工に活用し，作業効率の向上，施工品質の確保といった建設施工における合理化を図るための施工システムの総称であり，国土交通省ではこの情報化施工の普及・促進を図るため様々な取り組みを行っているところである。

情報化施工の代表例として，３次元マシンコントロール（3D-MC）システムが挙げられる。土工の現場においてブルドーザやモータグレーダによる 3D-MC 施工を採用した場合，あらかじめ入力した設計データと実際の施工計測データをリアルタイムで比較しながら排土板を自動制御できるため，効率的で高精度な施工が可能となり，従来の丁張り等の計測作業を低減できるメリットがある。

一方，ICT を活用した施工における現行の管理要領としては，「TS を用いた出来形管理要領（土工編）H24.3　国土交通省」があるが、従前の丁張り等による施工管理基準に準じた管理断面毎での定点管理であることから，ICT 活用の導入メリットが活かされず，施工業者による自主的な出来形管理の効率化など一部の導入効果しか得られていないのが実情である。

したがって，情報化施工を円滑に導入するためには，ICT 活用の特性にあった施工管理手法の整備が急務となっている。

本報告では、図－１に示すように従来からの定点での計測管理に代え，トータルステーション（TS）を用いて任意の面を計測管理する新たな面的管理手法について提案し，その有効性について試行工事の結果を踏まえ報告するものである。

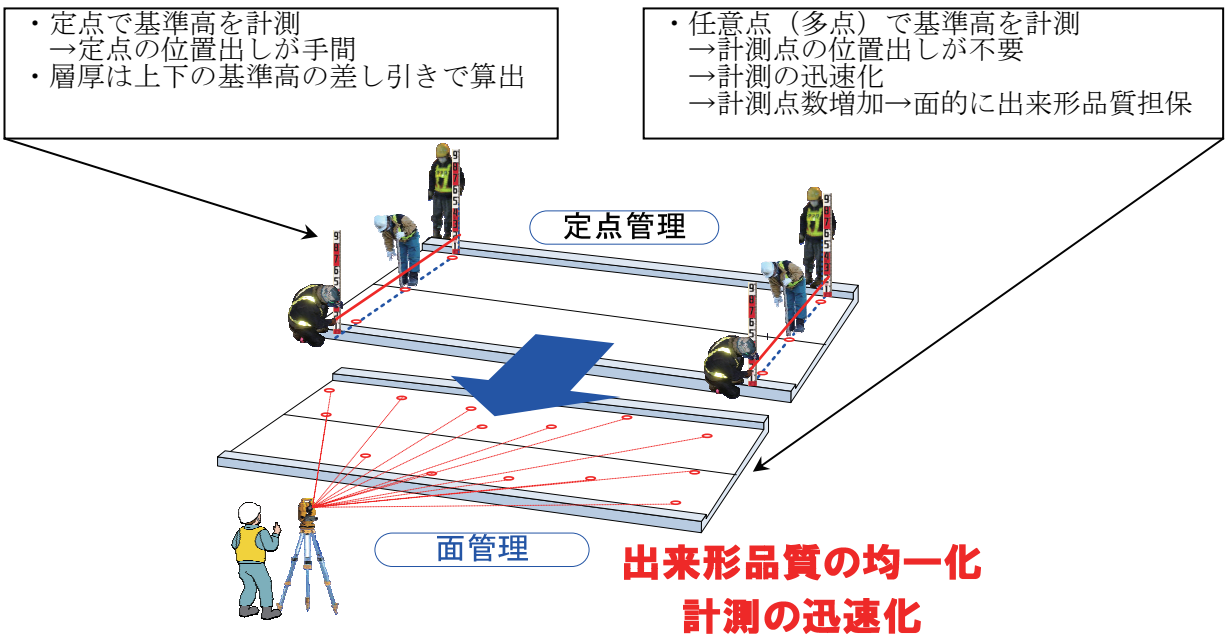


図-１　新たな施工管理（面的な管理）

２．試行工事の実施概要

２．１　試行工事の概要と目的

3D-MC 施工並びに面的管理手法の有効性を確認するため，「出来形管理要領（面的管理）」の試行案を策定し，図－２の作業フローに基づき試行工事を行った。

２．２　施工概要

試行工事の概要を表－１に示す。対象工種は情報化施工の導入事例はまだ少ないが，3D-MC 施工のメリットが得られやすいと考えられる盛土工を選定し，従来施工と情報化施工の施工品質並びに出来形管理の作業時間を比較した。

３　出来形管理要領（試行案）の概要

図－３，図－４に現行基準と試行案の比較を示す。3D-MC 施工と面的管理の導入メリットを活かすためには，現行の施工管理基準の見直しを行う必要があり，得られる施工品質は同等レベルのものが求められる。

盛土工の巻出し厚については，「写真管理基準」で規定があり，従来の標尺等による方法では，管理対象は巻出し時の標高である。試行案ではこれを面的管理（TS による多点標高管理＝基準高）に置き換えて管理することとした。

盛土工の「出来形管理基準及び規格値」では，管理断面 40m 毎における基準高の規定がある。

出来形管理要領（面的管理）の策定【試行案】
▽
施工品質を比較【従来施工と 3D-MC 施工】
▽
出来形管理の計測時間を比較【定点管理と面的管理】
▽
施工データ・出来形データの分析
▽
出来形管理要領（面的管理）の策定【素案】

図-２　作業フロー

表-１　施工概要

工　　種	盛　土　工
施工方法	ﾌﾞﾙﾄﾞｰｻﾞによる従来施工と 3D-MC 施工
MC の座標計測方式	自動追尾式 TS
出来形管理の測定方法	従来管理と 出来形管理用 TS による面管理
線　　形	直　線
幅	１０m
長　　さ	３５m
層　　厚	３０cm×３層

基準高の測定は，河川土工は各法肩，道路土工では道路中心線及び端部で測定とする事となっており，試行案でも同様の方法を採用したが，管理断面による測定ではなく，任意点での多点標高管理として面的管理を行うものとした。

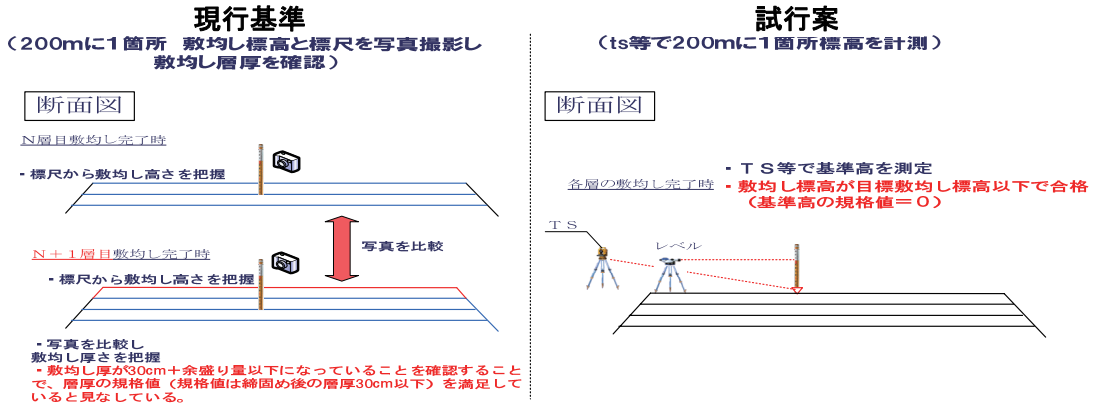


図-３　盛土工の出来形管理①　（敷均し作業時の巻出し厚を管理）

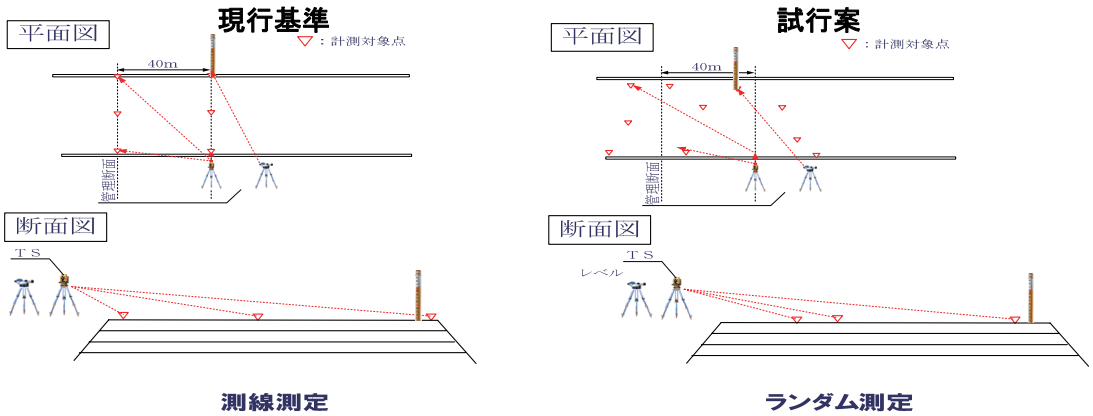
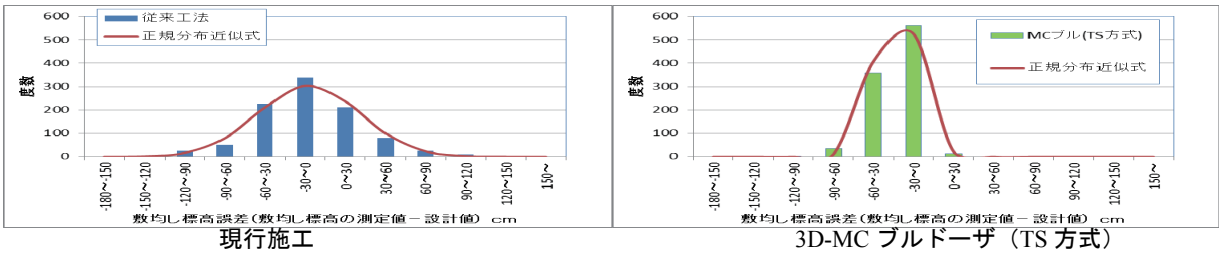


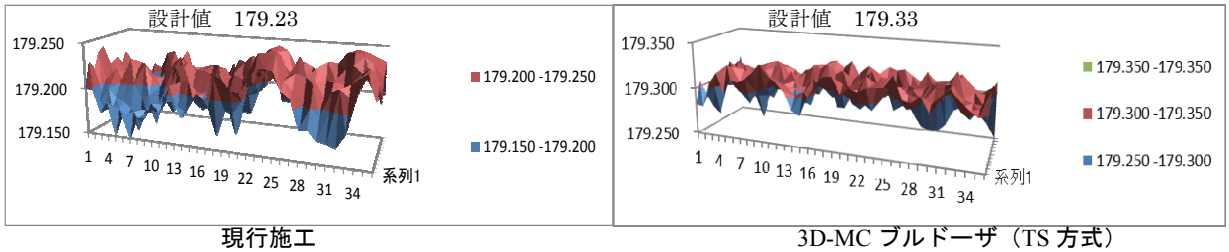
図-４　盛土工の出来形管理②　（締固め後の基準高を管理）



現行施工
設計値との平均誤差　-13.8mm　σ＝39.2

3D-MC ブルドーザ（TS 方式）
設計値との平均誤差　-27.9mm　σ＝15.4

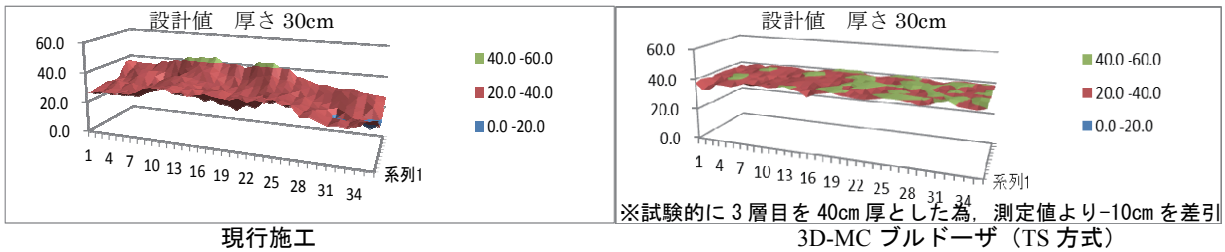
図-５　敷均し後の基準高（平均誤差）　全層分の計測データ　ｎ＝1088



現行施工
設計値との差　最大-70mm　最小 +1mm

3D-MC ブルドーザ（TS 方式）
設計値との差　最大-102mm　最小-3mm

図-６　敷均し後の出来形品質　　３層目の計測データ　ｎ＝396



※試験的に３層目を 40cm 厚とした為，測定値より-10cm を差引

現行施工
最大 38.4cm　最小 17.9cm　平均 27.6cm　　σ＝4.57

3D-MC ブルドーザ（TS 方式）
最大 32.1cm　最小 24.7cm　平均 29.4cm　σ＝1.3

図-７　締固め後の出来形品質　　３層目の計測データ　ｎ＝396

４　試行工事の結果

今回行った情報化施工の試行工事において最も着目した部分は，施工品質の確保・施工管理の省力化（出来形計測作業の短縮化）である。
以下その結果を述べる。

４．１　情報化施工による施工品質

図－５は敷均し後の基準高の分布を示したものである。現行施工の平均誤差が-13.8mm，3D-MC 施工による平均誤差は-27.9mm と現行より大きい値を示しているが，標準偏差は現行施工が 39.2 に対し，3D-MC 施工は 15.4 と半分以下となった。

3D-MC 施工による設計面との平均誤差は 0～-30mm に分布しており，施工面全体での均一性がとれている事を示す結果となった

平均誤差-30mm 前後に分布が集中した要因は，自動制御される排土板の位置が基準高の設計値になったという判定をしても，施工機械の履帯部が施工面を走行し，沈下したためである。

図－６は，敷均し作業後の出来形結果を示したものである。

3D-MC 施工は現行施工と比較すると，施工面のばらつきもなく，均一化が図られる結果となった。

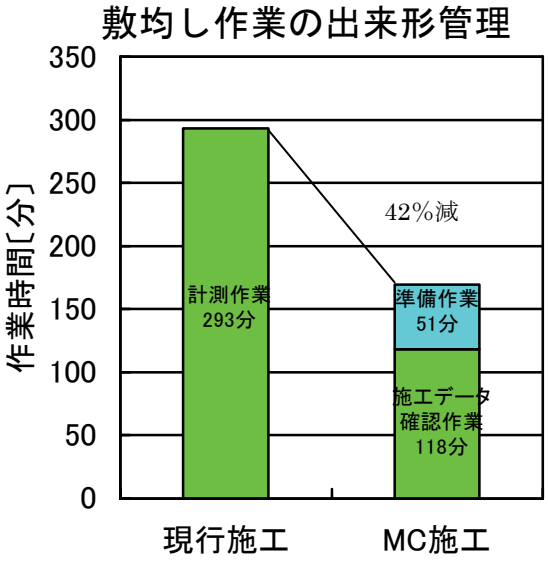
図－７に締固め後の出来形結果を示す。巻出し厚（巻出し標高）は，現行施工では目標層厚 30cm に対して最大 38.4cm，最小 17.9cm，3D-MC 施工は最大 32.1cm，最小 24.7cm，標準偏差は現行施工が 4.57 に対し，3D-MC 施工は 1.3 と層厚の精度及び均一性が現行施工より向上した結果となった。

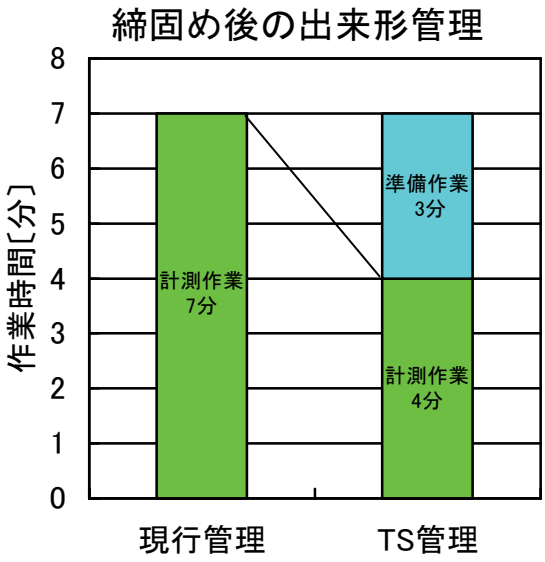
図－６で敷均し作業後に施工機械による沈下が確認されたが，締固め作業においてほぼ設計どおりの目標厚で締め固まっている。これは敷均し作業の段階で余盛りを+2cm 程度追加し，次の工程である締固め作業による沈下を考慮したためである。

盛土工では，所定の厚さで均等に敷均すことが重要である。敷均し作業において均一性が確保されなければ安定した盛土には仕上がらず，また次の工程である舗装工において材料ロスの増加を招くなどが考えられる。

以上の事から，採用事例の少ないとされる盛土工の情報化施工の導入も施工品質の観点でみれば非常に有効であるといえる。

なお，ここで行った出来形測定は施工品質を正確に把握するため，レベル測量（計測頻度 1m ピッチ）にて行った結果である。





出来形管理【敷均し作業】
現行管理：敷均し作業時（巻出し時）の基準高を管理
巻出し厚確認の標尺撮影
MC 施工　：3D-MC ﾌﾞﾙﾄﾞｰｻﾞにて行う施工データの管理
出来形管理用 TS による基準高を面的管理
TS の準備時間を含む

出来形管理【締固め後】
現行管理：管理断面の基準高をレベル計測
計測頻度は 35m ピッチ(試行工事での施工延長)
本来は 40m であるが，試行工事での延長とした。
ＴＳ管理：出来形管理用 TS にて基準高を面的管理
計測頻度は 8m ピッチ

図-８　出来形管理の作業時間

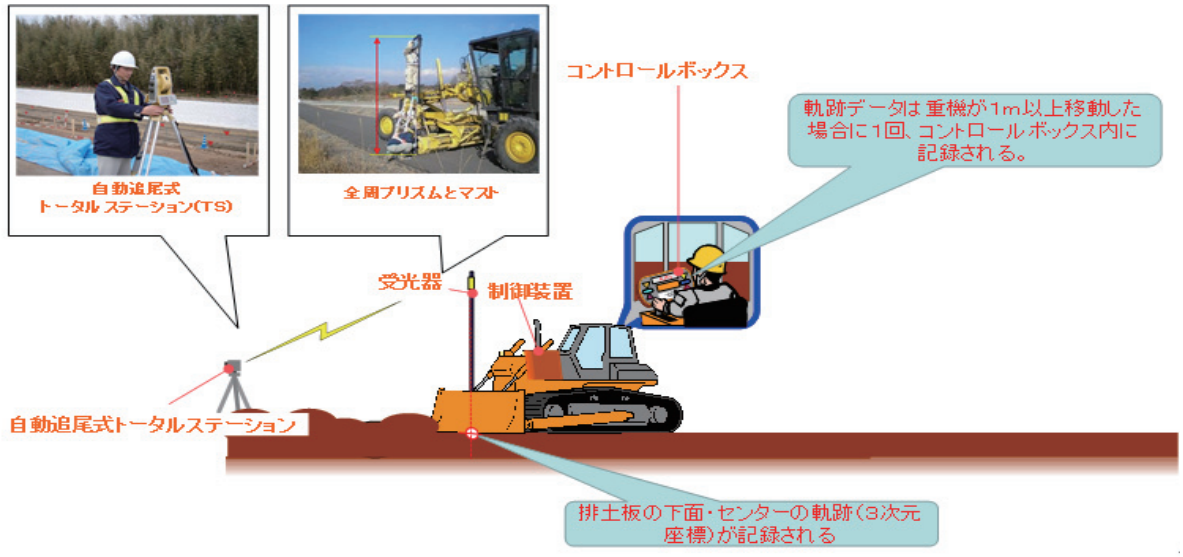


図-９　3D-MC（TS 方式）の機器構成例

４．２　情報化施工による施工管理の省力化

図－８は，敷均し作業時と締固め後の出来形管理の作業時間を示したものである。

敷均し作業時の出来形管理が 42%減となり，大幅な低減効果であった。

主な理由は 3D-MC 施工による施工管理の省力化である。

図－９に 3D-MC の機器構成例を示す。

3D-MC 施工は３次元設計データを利用することで設計面と施工面のデータをリアルタイムで比較することができ，排土板を自動制御することで，高精度に施工を行うことができるシステムである。

このため，現行の施工管理において実施していたオペレーターの目視確認や作業員による丁張り作業，水糸下がりの確認等の中断作業が低減され施工管理の短縮が図られた結果となった。

締固め後の出来形管理については，準備時間に時間が掛かっているが現行管理とほぼ同程度の労力となった。敷均し作業時の出来形管理を含めると，トータルで大きな低減効果が得られる。次に計測ピッチについて述べる。

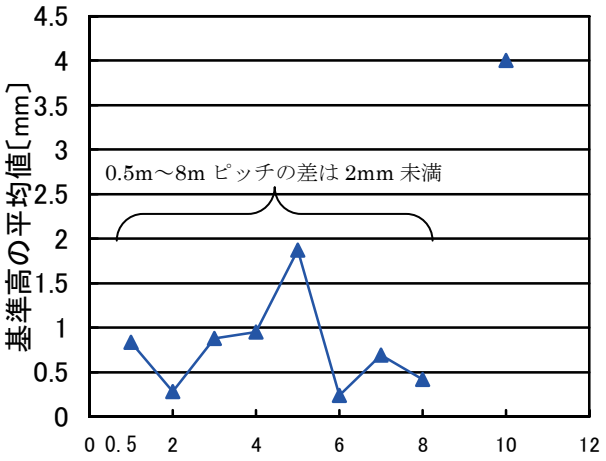


図-１０　最適な計測ピッチ

図－１０に計測ピッチの検証結果を示す。仕上がり面（基準高）の出来形管理は施工管理基準では計測頻度が施工延長 40m 毎に１箇所と規定があるが，TS による面的管理では 8m 毎とした。

これは計測ピッチを 0.5m，1m，2m、3m，4m，6m，8m，10m と変えて基準高を測定し、平均値のヒストグラムを比較した結果，最も計測ピッチが密なケース（0.5mﾋﾟｯﾁ）と同等の結果が得られたのが 8m ピッチであったためである。計測ピッチを大きくした方が作業効率がよいと考えられるが，大きくしすぎると，正確な出来形品質の確認ができない事が懸念される。

以上のことから，TS による面的管理を行うことで，施工管理の省力化が図られ，40m（現行の頻度）／8m（新たな頻度）＝５倍の出来形管理ができることとなる。

４．３　情報化施工による安全性の向上

写真－１に従来の施工管理状況，写真－２に情報化施工で用いた ICT 機器の施工管理状況を示す。

従来施工では，丁張りや標尺などの設置及び水糸下がり量の計測を行うため作業員は施工機械周辺に近接する必要があり，接触事故の危険性があった。

情報化施工では 3D-MC 施工や TS などの ICT を用いることで，出来形管理における計測作業員の現場内への立ち入り頻度が低減される。これにより作業員と施工機械の分離作業が可能となり，安全性の向上が期待できる。

丁張り・貫板設置

水糸下がりの計測

写真-１　従来管理による出来形管理

出来形管理用 TS

MC ﾃﾞｰﾀ確認用車載 PC

写真-２　ICT 機器による出来形管理

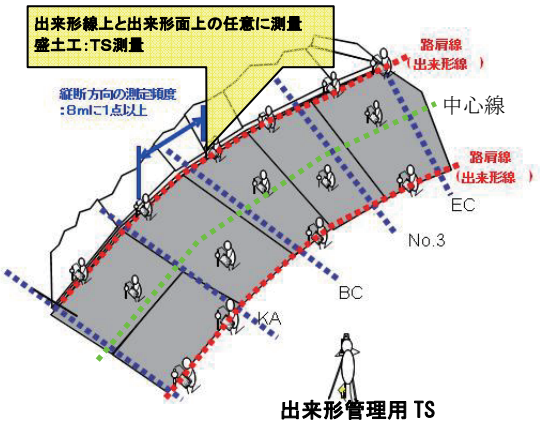


図-１１　出来形計測箇所

５　出来形管理要領（素案）の概要

図－１１は新たな施工管理手法における計測箇所を示したものである。

仕上がり面での出来形管理は，締固め作業終了後に TS を用いて，道路の中心と左右端部を通る測線上の任意箇所の３次元座標（X,Y,Z）を計測する方法を考案した。

管理対象となる項目及び測定基準の概要は下記のとおりである。

５．１　管理項目

盛土工の巻出し厚及び基準高の出来形管理について，下記のとおりとりまとめた。

① 盛土工の巻出し厚管理

測定基準は，各層の敷均し完了後，延長 200m に１箇所の割合で中心付近の基準高を測定する。

写真管理は省略する。

② 盛土工の出来形管理（基準高）

測定基準は，施工延長 8m 毎に１断面（中心線，左右の端部）以上測定する。但し、管理断面上とはせず任意位置とする。

６．情報化施工の普及・促進を図るために

盛土工について巻出し厚及び基準高に関する新たな施工管理基準の素案となる事例紹介を行ったが，これ以外の出来形管理の項目として法長，幅がある。これらは TS による３次元位置座標の計測データから求めることは可能であるが，今回の試行工事において実証するには至っておらず，今後さらなる検証が必要である。

今回行った実証実験は試験ヤード内における試行工事であるが，出来形管理の省力化により作業効率の向上に期待がもてる結果となった。

作業効率の向上は，工期短縮や確実な施工管理の実施が可能となるため，品質のよい工事目的物の提供が可能となる。

一方で，試行工事の結果から情報化施工は基本設計データの作成やシステムチェックなど，施工に入る前の準備に労力を費やすことが明らかとなった。

今後は，これらの作業を合理化する技術的なアプローチが不可欠となる。

情報化施工は初期コストが原因となり，活用効果が現れにくいケースがあるため，比較的大規模な工事において積極的に活用し，普及を図る必要がある。

施工業者は既に情報化施工のメリットを熟知している方々も多数おり，コスト面と比較しながら，現場で採用するかどうか思案しているものと思われる。発注者側としてはその懸案を取り除き，積極的な採用を後押しする責務があると考える。

その最も効果的な方法として挙げられるのが，今回紹介した新たな施工管理基準の策定である。

それ以外にも情報化施工の導入効果がコスト面からみても得られやすい発注規模の検討，適正な積算基準の策定，総合評価並びに工事成績の加点など様々な環境を整える事が不可欠である。

７．おわりに

TS を用いた出来形管理要領（土工編），同（舗装工事編）並びに TS･GNSS を用いた盛土の締固め管理要領等が公表されたことで，今後メーカー等による出来形管理用 TS の開発及び販売が促進され，情報化施工の環境整備が整い直轄工事への本格導入が進むことが期待される。

当事務所としても，今回の素案を実現場において運用実績を蓄積し，試行工事と同様の効果が得られることを検証すると共に，監督職員及び施工者を含めた修正意見の聴取及び改定を行っていく必要があると考える。

19. 情報化施工現場における問題事例の整理

(社)日本機械土工協会　　○ 技術委員会

１．はじめに

情報化施工は，舗装系と重機土工系とに大別でき，舗装系ではその有効活用が進んでいるが，重機土工系では十分な浸透と判断できる状況には至っていないと見受けられる。

重機土工事においても施工への情報化技術の有用性は明らかであるが，技術面や運用面・費用面なども含めリスクが充分に把握されているとはいえず，実務への浸透の抵抗となっているとも考えられる。

ここでは，実際に作業現場やそれを取り巻く環境において発生した問題事例を収集・列挙し，どのようなことが起こる可能性があるのか，対処は出来るのか，事前に準備出来るものは何か，情報化施工を取り巻く認識の程度などを考える資料となることを目的として取りまとめる。

２．情報化施工の問題事例

重機土工事における情報化施工は，法面や造成面の整形・整地や層厚管理において従来の測量先行の丁張りの必要な施工から，丁張りが大幅に削減された測量を待たない施工へと大きく変化できる事を特徴に見出せる。

しかし，従来の土工重機に情報化機材を追加し，３Ｄデータを作成・導入するなど追加される機材・技術およびその運用など新たなものが必要となる。また，新たに追加される情報化機材は，「在れば出来る」と勘違いされがちであるが，道具の一つであり使いこなせてその機能が発揮され事になる。ここで取り上げる問題事例は，経験不足を含め，機能に対する期待と現実のギャップが現れたものである。発注者・受注者を含め情報化施工の関係者とし，その理解や現場の実態に問題と感じたものを例として示している。

この問題事例の収集に当たっては，施工に当たり直接・間接を問わず実際に現場に関係する方々から行っている。立場によって表現が異なるものもあるが，施工者のみならず関係者から見え感じたことを表現している。

問題事例を大別に４区分するが，区分ごとに独立したものではないが，便宜上特徴で分類した。

１．情報化機器導入時の発生問題事例
２．現場使用時の発生問題事例
３．その他の発生問題事例
４．関係者間の発生問題事例

2-1 情報化機器導入時の発生問題事例

事例１．
状況：元請調達の情報化機器を専門工事会社の重機に装着しＭＣ化した
症状：マッチングせず施工不可状況が続く
対応：情報化機器不良が判るものの対処出来ず
要因：電子･電気･重機・データの専門知識を併せ持つ者がいない

事例２
状況：元請が測器会社を選定し情報化機器調達，専門工事会社の重機に装着しＭＣ化した
症状：マッチングせず動作不安定
対応：測器会社が検証したが原因不明，重機メーカーの検証でバルブ調整不足が判明
要因：情報化機器装着の受注者が力量不足

事例３
状況：専門工事会社がバックホウのＭＧ化を保有重機に実施
症状：ＧＮＳＳ仕様としたが，精度不安定，再設定を何度も繰り返す
対応：ＧＮＳＳ基準点や３Ｄデータを全て検証，データ不良が判明
要因：測器メーカーの指導不足や導入側の力量不足

事例４
状況：専門工事会社所有の情報化仕様重機を改造し異なる測器会社のＭＣ機器装着
症状：ＭＣ作動せず，バルブの不動作を測器会社が調整するも解決せず

対応：重機メーカーの全体チェックにより制御系不安定が判明
要因：測器会社によるトラブル対応の限界

事例５
状況：専門工事会社が情報化仕様機材を元請に提案し，元請が工事受注
状況：専門工事会社が重機メーカーから導入指導を受けるが熟知せず
対応：現地重機販売会社が付きっきりで対応
要因：導入会社が充分な学習をしないまま安易な購入で問題発生に対応できず

2-2 現場使用時の発生問題事例

事例６
状況：ＴＳ仕様ＭＣの施工精度が不安定
症状：施工中に精度不安定が度々発生，情報化機器，重機の点検を繰り返す
原因：ＴＳ設置場所が走行ダンプの振動により地盤変位が判明
要因：機器設定の必要要件を把握せず。
一般測量との違いの不認識

事例７
状況：ＴＳ仕様ＭＣの施工精度が不安定
症状：施工平坦性が不安定，情報化機器，重機の点検でも安定せず
対応：情報化機器の再設定，重機の電気油圧関係の点検。原因不明
対応：原因の特定が出来ないまま，再設定や点検で偶然解消
要因：不明のままで，再発を危惧
将来へのノウハウにはならなかった

事例８
状況：バックホウのバケット位置が精度不安定
症状：キャリブレーションを繰り返しても状況により測定値が変化し安定せず
対応：センサーや取付け状態の確認，作業装置の点検により，バケットピンのガタが主要因と判明
要因：情報化機器を取り付ける意義を現場・オペレータが把握出来ていない

事例９
状況：バックホウによる法面整形時に設計断面と 10cm 以上の誤差発生
症状：受信機の取付けを変更し，若干の改善はあったものの精度が出ない
対応：基地局を移動するまで改善せず
その間丁張りを用いた。
要因：一部の法面でのみ発生し，それ以外は正常の為，問題解決の糸口が見つけられなかった
正常と異常の両方出現は対応が困難
基地局の移動で解決するも原因不明。

事例 10
状況：ＭＣブルで敷均し作業の精度確認も現地と表示内容に差があり，整合せず
症状：既知点に排土板端を合わせても，車内表示で数十センチ差を表示
症状：設計計画高で排土板がＭＣ動作し，施工の自動化作業はできず
結果：原因不明で情報化対応出来ず

事例 11
状況：元請が設置の基準点座標値を利用
施工終盤で高さ 70mm 程度の差異が判明
症状：バックホウへのＭＧ装着で，作業誤差を 30mm 以内で実施するも不安定
対応：重機，情報化機器，３Ｄデータ，基準局の確認も実施するが不明
対応：終盤作業では，設計表示値に対して一定の補正オフセット量を設定し，作業実施
要因：原因不明のまま終了

2-3 その他の発生問題事例

事例 12
状況：締固めの施工管理図の自動作成
症状：6 回転圧を指定されたので，6 回以上 9 回を完了の赤表示に設定
対応：6 回転圧では未了表示となり，完了の赤表示にならなかった
要因：不用意な設定を確認出来ていない
経験不足と設定条件の思い込み

事例 13
状況：GNSS 基地局の動作不良により，情報化対応重機で施工出来ず
症状：基地局の電源を含めて確認するも原因不明
対応：夕刻突然機能は復活するも基地局の設定値が初期化されており再設定を実施
要因：原因不明なままでトラブル対応出来ず
再発の不安が残る

事例 14
状況：ＭＧコントロールボックスが終了出来ない
症状：作業終了時に終了操作を行うも動作不能状態となる

対応：電源を含め接続コード類を全て抜いた
しばらくして再接続実施，機能復活した
要因：原因不明で使用に不安が残る

事例 15
状況：稼働中のバックホウ積載コントローラーに基地局エラーが表示
対応：他の重機で情報機器を起動し確認するも基地局エラーは出てない
要因：重機作業中に現場内の基地局を移動
オペレータには知らされていなかった
要因：測器機器と重機作業の作業関連性の認識が出来ていない

事例 16
状況：元請が設置の基地局で作業
延長 600m の一部の場所でデータエラー
症状：スポット的に約 30m 範囲のみエラー
対応：原因不明，基地局の増設で解消
要因：基地局設置には電波などの知識も必要か

事例 17
状況：既存堤防の拡幅工事に，既存法面と盛土境が異なり表示上施工未了に見える
症状：既存地形と設計形状の法面の境界部分で踏み残し施工に見える場合が出現
対応：既存法面を精緻に測量し，データ修正を行わなければ起きる問題
要因：情報化施工はデータ重視となる弊害であり，現地状況の確認・入力が不可欠

事例 18
状況：GNSS 基地局と重機搭載測器とのマッチング不良
症状：基地局は共通化されているはずが，メーカーが異なると相性が悪いことがある
対応：機器の状況確認が必要だが，最終的に相性の良い基地局の増設を実施
要因：情報機器メーカー間の条件が整っていると表明されても，起こる可能性はある
相性不良はユーザーにとって不利益

2-4 関係者間の発生問題事例

（取引関係，取組姿勢，発注者の理解等）

事例 19
状況：測器会社が発注者に見積りを安く指示された
実情：その地域の１社の提出見積もりの異常なダンピングを見抜けず，他社が叩かれた
波及：正常な見積の会社担当者が呼び出されて高いとクレームを言われたので，安く出来ないと再提出を辞退
風潮：根拠無く，何でも安い方がよいとの不見識を露呈

事例 20
状況：発注者がＭＧ機器を測器会社に依頼するも，機器の脱着費用が認められない
実情：ＭＧの装着車は一般に無いので，レンタル重機などを改造する必要があり，情報化機器の費用だけでは対応できない
要因：必要な経費について認識が乏しい
受注側にしわ寄せとなる認識がない
情報化機器装着重機は市場に少ない

事例 21
状況：一般的に受注者の大半が，情報化施工を理解せず，レンタル会社に丸投げ
実情：レンタル会社にも情報化施工の専門家は非常に少数だが，営業的に丸受け
実態：レンタル会社に納入の測器会社がフォロー業務を強要される
本音：測器会社は販売時に，納入先には導入指導を行うが，それ以上のフォローは本来の業務の範囲を超えている
人的にも充足できない

事例 22
状況：一般の受注者は，情報化施工に関して，従来施工に余計な技法が入るとの「やっかい者」の意識
実情：従来工法でも施工はできるので，特段新しいことに取り組む必要を感じない
意識：社内で教育し，取り入れることは無関心
要因：情報化施工の将来性が見えず，情報化施工の必要性が認識できない

事例 23
状況：受注者に情報化技術が無く，保有機器でのGNSS基地局の設置と準備測量を測器会社に強要
実態：測器会社が指導協力をしようとしても，「やってくれ」の一点張り
実情：測器会社は機器に関する技術的な対応力はあっても施工の根幹となる業務は受けられない
要因：施工の準備に関わることは，施工の責任問題となるので関わることは出来ない
また，施工体制にも入っていない者が施工に関することはできない
この形は，レンタル会社からの場合もあ

り，受注者の力量が不十分なことが判る

事例 24
状況：受注者が情報化施工を実施し，発注者主導の見学会を開くなどに協力的に活動
実態：情報化施工見学会の準備など協力したが竣工時の加点がさほど高くない
本音：協力に関してのインセンティブ加点が期待ほどではなかった
周囲の業者からは，情報化施工はしてもしなくても加点がほとんど変わらないなら，あえて取り組む必要無しの意見
要因：情報化施工の推進に対して，受注などのメリットを施工関係者は意識している

３．問題の整理と課題の抽出

3-1 問題事例の整理と課題

問題事例に見る要因を集約し，情報化施工を進める上での課題を抽出する。

①経験不足による問題と課題

経験不足による問題は，新たな技術導入時に発生し，その結果は軽微なものから機材の破損となるような重大なものまで当初の想定を超える状況に至ることがある。従前の経験的概念による思い込みや勉強不足など初歩的ではあるが経験者がいなければ発現するリスクである。

事例では，作業中に基地局の移動やバケットピン等のがたつきの影響に気づかないなどはその典型である。

経験不足への課題は，実務に関する入門からトラブル対応も含めた教育・訓練が行えることであり，実施組織も必要である。

②情報化機材技術者不足による問題

情報化機材は普及しつつあるとはいえ，まだ十分な数が施工に用いられている状況にまでは至っていない。この段階では，全国的な拡がりに対応できる情報化機材技術者が充足せず，特に問題解決能力の在る専門性の高い技術者不足は顕在化している。技術的に自社の情報化機器については十分な技術量を持っているものの，他社の情報化機器とのマッチングや重機の油圧コントロールとのマッチングなど，組合せが多くなることからも未解決問題が発生する。

事例の中でも，重機のＭＣ化改造するも，精度が出ないなどが発生し，充分に使えず，また原因追及も出来ないなどとなっている。

対応すべき課題は，情報機材関係の技術者の養成ではあるが，測器メーカーや重機メーカー，またこれらの販売組織等が体系化され専門技術者の相互活用が行えることであり，場合によっては共同・協調の実行体制の確立である。

③理解不足による問題と課題

情報化施工を誤解する一つとして，施工の当事者でない者が「機材が在れば誰でも出来る」「出来て当たり前」のような考え方である。

例えば「コンピュータが在ればどの様な計算でも出来る」と思われていた過去と，誰もが普段に用いるようになった現在では「在ればどの様な計算でも出来る」となっていない。使いこなすには技量が必要である。

情報化施工を発注・監督する立場にある者の課題は，現場における情報化技術の内容や適応性などを理解し，情報化施工の進展に誘導的になることであろう。

3-2 経営的な課題

技術的な課題は前述したが，施工を行うことを企業活動として捉えるならば，情報化施工を進める為の重要な課題は経営的な適合性である。

問題事例の中には，トラブル対応の費用が高額に及んだものや導入機材が機能しないために投入費用が負担だけになったものなど，問題が起きると想定外の出費となり，一般的に言われる情報化施工の有用性に反する評価にも繋がっている。

現場における情報化施工は，情報機器や搭載の為の改造費用，データ作成・補正等の実費と機材運用上の修理や調整，問題対応などを含めたリスク経費が従来工法に無い情報化関係費用となる。

重機土工事における情報化施工では，従来工法から減ずることができる工種は，整形・整地における丁張り作業を含む測量作業，締固め作業の転圧回数管理である。これらに関わる費用の殆どが管理および測量関係の人件費と経費であり，情報化施工に関わる機材費用と運営経費に比べると大きくない。

情報化施工に関わる直接的な利害関係者は，受注者・専門工事会社・重機メーカー・測器メーカー・レンタル会社・重機販社・測器販社・測量会社など，いずれも民間企業であり，事業の黒字化は企業存続の必須要件である。

４．まとめ

重機土工事における情報化施工は測量先行型の従来施工法から大きく変化する要素技術であることは認識されている。しかし，施工実務上の機材やリスク経費等の費用負担が充分に理解されず，実施予算への増額がなされていない現状が在り，結果として情報化施工は負の評価となっている。

メリットばかりが特に強調された初期段階の情報化施工は過去のものとし，実務に即した費用負担を含め，継続的な使用に関わる評価が今求められていると確信する。

20. 多機能型コンクリート舗装機械の開発

シリンダフィニッシャの多機能性検討

大成ロテック株式会社　○田中　純
大成ロテック株式会社　平野　晃
大成ロテック株式会社　関口　峰

１．はじめに

我が国の道路舗装は，実用的な面でアスファルト舗装とコンクリート舗装に大別され，その内の約 95%をアスファルト舗装が占める。しかし，アスファルト舗装は，近年の原油価格高騰によるアスファルト材料単価の上昇や原油精製技術の向上に伴うアスファルト生産量減少の影響を受け，施工単価が，コンクリート舗装と均衡傾向にあり，ライフコスト等を勘案すると将来的にはコンクリート舗装の方が低コストであるとの見通しもある。国土交通省は，この様な世情を見据え，平成 24 年度道路予算概算要求においてコンクリート舗装を積極的に導入する指針[1)] を示している。

大成ロテック㈱では，現在の経済状況を考慮した道路建設のコスト縮減を踏まえ，コンクリート舗装工事における施工の効率化・合理化による工期短縮，コスト縮減，並びに多目的用途による機械稼働率の向上を目的として，コンクリート舗装施工機である米国ゴメコ社製シリンダフィニッシャをベースマシンとして，作業装置の改良及び，多機能化を実施した。

本稿では，開発した『自走式ベルトコンベア型コンクリート材料供給機』及び『自動式粗面仕上げ・養生剤散布装置』の概要を示すと共に，施工事例について紹介する。

２．シリンダフィニッシャ

2.1　シリンダフィニッシャの概要

当該ベースマシンは，米国ゴメコ社製のシリンダフィニッシャ『C650』である。

装置構成として，①走行装置②機体フレーム③敷均装置で構成され,『オーガ付きダブルドラムキャリッジ』を搭載し，コンクリート舗装の敷き均し及び，表面仕上げを行う機械である。

シリンダフィニッシャの特徴を下記に示す。

①走行装置

走行装置は，施工方法に応じて，軌道用車輪と路面走行用クローラに仕様選択が可能である。

②機体フレーム

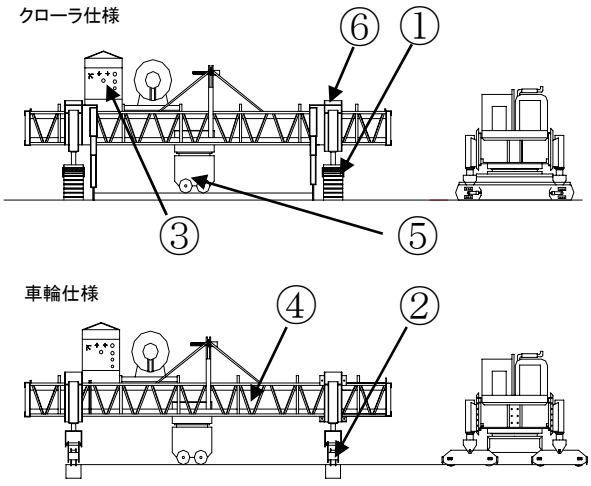
フレームは，分割式トラス機構を採用し，施工幅員に応じた機体幅員の調整が可能である。

③敷均装置

敷均装置（オーガ付きダブルドラムキャリッジ）は，トロリ機構により，機体フレーム下を施工横断方向に横行することで，舗装の敷き均し及び，舗装表面の平坦仕上げを行う。

シリンダフィニッシャの機械全景を写真-1，機構図を図-1，機械主要諸元を表-1 に示す。

写真-１　機械全景



①走行クローラ　⑤オーガ付ダブルドラムキャリッジ
②走行車輪　⑥フレーム高さ調整用シリンダ
③エンジン・油圧装置
④機体フレーム

図-1　シリンダフィニッシャ機構図

表-1　シリンダフィニッシャ主要諸元

項　目	諸　元（クローラ時）
機　体　高	2,720mm
機　体　長	3,100mm
機　体　幅	3.67～17.07m
質量（幅 7.32m時）	5,524kg
機 関 出 力	33kW

３．コンクリート舗装工法の概要

コンクリート舗装[2)]の代表的な施工法として，舗装用型枠と施工機械走行用軌道を事前に設置し，施工機械が軌道上を移動しながら打設するセットフォーム工法と型枠や軌道を必要とせずに連続的にコンクリート打設が可能なスリップフォーム工法が挙げられる。ここでは，後項にも述べるスリップフォーム工法についての概要を以下に示す。

3.1　スリップフォーム工法

スリップフォーム工法とは，①コンクリートの供給　②敷き均し　③締固め　④成型　⑤平坦仕上げの機能を備えた自走式施工機械（スリップフォームペーバ）を使用して，型枠を設置せずにコンクリート版やコンクリート構造物を連続的に打設する工法である。粗面仕上げ及び養生作業は，人力作業にて施工する。

施工フローを図-2，標準機械編成図を図-3，施工状況を写真-2 及び写真-3 に示す。

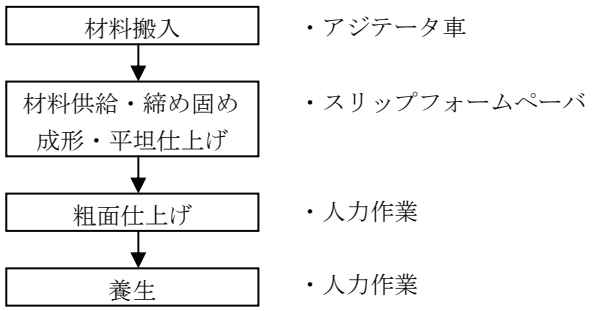


図-2　施工フロー

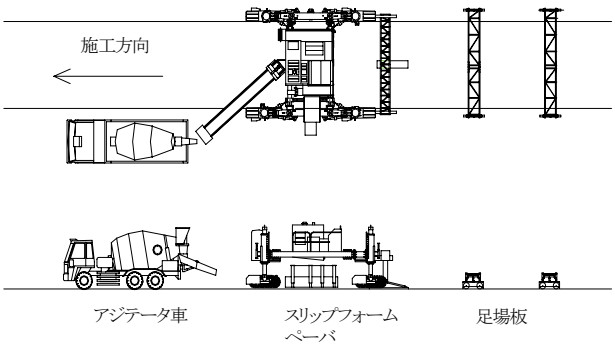


図-3　標準機械編成図

写真-2　施工状況（打設）

写真-3　施工状況（表面仕上げ）

４．自走式ベルトコンベア型コンクリート供給機

4.1 開発の経緯

一般的なスリップフォーム工法では，スリップフォームペーバに対して，アジテータ車等のコンクリート運搬車が1台ずつ材料供給（写真-2参照）するため，材料供給のサイクルタイムがコンクリート打設施工能力に大きく起因する。

特にトンネル内の車両履行が狭隘な現場等ではアジテータ車の搬入出に時間を要し，影響は顕著となる。

そこで，施工性及び施工能力向上を目的に従来の機械編成に専用材料供給機を導入し，アジテータ車等からの材料供給を2台同時に実施する施工体制を検討し，本開発に至った。

4.2　開発目標

前項で示した課題解決のため，下記に示すコンセプトにより開発を実施した。

① シリンダフィニッシャの多機能化。作業装置をアタッチメント式とし，使用用途に応じて，仕様変更が容易な構造とする。

② 当該機とスリップフォームペーバへの材料供給を同時且つ，スムーズに行えるものとする。

③ アジテータ車から排出された材料を打設箇所へ円滑且つ，均一に供給可能な構造とする。
④ 施工幅員の変更に伴う機体フレームの伸縮調整の際に，柔軟に対応可能な供給装置とする。
⑤ 単純な装置構成とし，トラブルシューティングを軽減する。
⑥ 10ｔトラック1台にて運搬可能な機体とする。

4.3　自走式ベルトコンベア型コンクリート供給機の概要

当該供給機は，シリンダフィニッシャ『C650』のオーガ付きダブルドラムキャリッジ装置を取り外し，材料搬送装置として，「油圧可倒式の材料横取り用ベルコン」と「打設箇所に材料を投入する材料振分けベルコン」を搭載することで，アジテータ車から排出された材料を上記の連動する2基のベルコンにて，所定箇所に材料を供給する機械である。

自走式ベルトコンベア型コンクリート供給機の現場配置図（横断図）を図-4，機械全景を写真-4に示す。

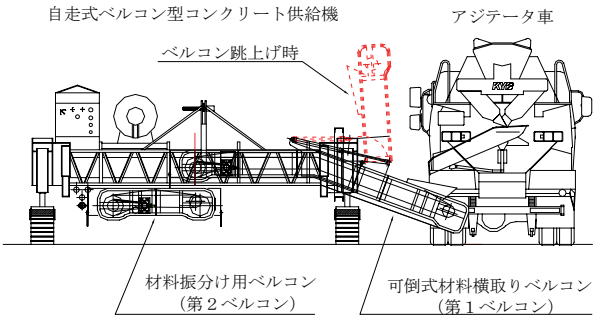


図-4　機械現場配置図

写真-4　機械全景

自走式ベルトコンベア型コンクリート供給機の特徴を以下に示す。

①可倒式材料横取りベルコン

アジテータ車による材料供給終了後に速やかにベルコンを垂直に折畳むことで，材料供給機側方の車両通行帯を確保し，車両の搬入出を可能とする。可倒式材料横取りベルコンの作業状況を写真-5，写真-6に示す。

写真-5　ベルコン材料横取り状況

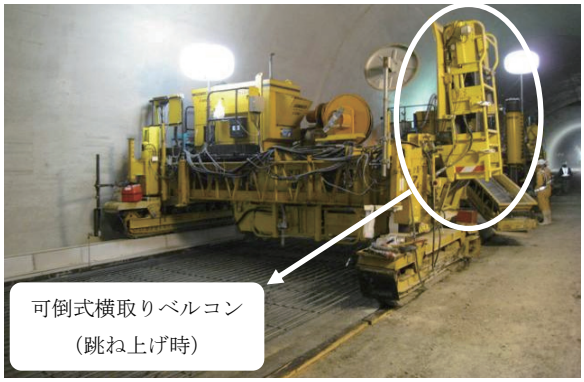


写真-6　ベルコン跳ね上げ状況

②材料振り分け用ベルコン

可倒式材料横取りベルコンから乗り継いだ材料を舗装横断方向に横行且つ，ベルコンの正逆転機能により，施工全幅に材料を供給する。各ベルコンの構成図を図-5に示す。

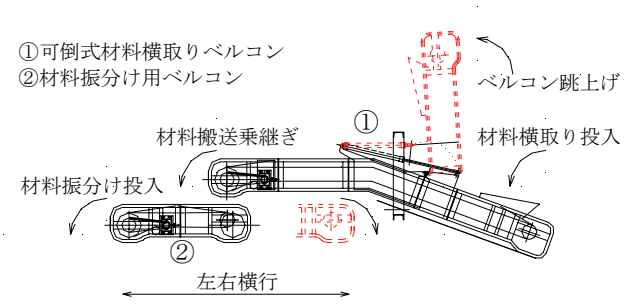


図-5　ベルコン構成図

③施工幅員変更への対応

各舗装現場の施工幅員に応じた機械本体の幅員調整（フレーム長の変更）の際にも，材料供給ベルコンを2段式にしたことで，ベルコンフレーム及び，ベルトの延長等の調整が不要であり，原寸維持での対応が可能である。

4.4　施工事例

自走式ベルトコンベア型コンクリート供給機を東北管内のトンネル舗装工事に導入し，その効果の検証を行った。

当該現場は，トンネル内のスリップフォーム工法を適用した連続鉄筋コンクリート舗装工事であり，道路全幅を半断面に分割して施工するものである。当初計画では，スリップフォームペーバ1台のみでの施工計画であったが，当該供給機導入により工期短縮を試みた。工事概要を表-2に示す。

表-2　工事概要

施工期間	平成22年11月～平成23年3月
施工場所	東北管内
工　種	連続鉄筋コンクリート舗装 （トンネル内）
施工数量	31,300㎡
施 工 厚	25cm

4.4.1　施工状況

当該供給機を，スリップフォームペーバの前方に先行する機械配置とした。スリップフォームペーバとの車間を約15m（アジテータ車1台分の全長+α）確保して，2台のアジテータ車から各々同時に材料供給を受けて，施工を実施した。

機械施工編成図を図-6，施工状況写真を写真-7に示す。

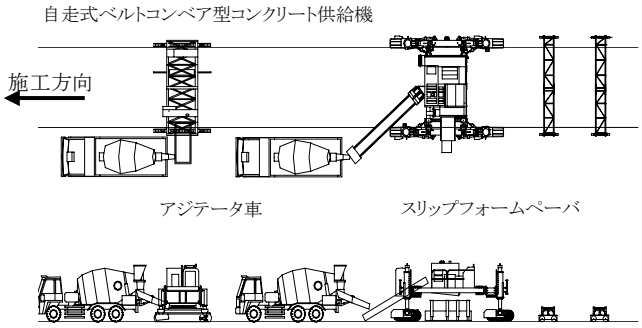


図-6　施工機械編成図

写真-7　施工状況

4.4.2　施工能力の検証

従来工法と本施工事例での施工における施工サイクルタイムを比較した結果を表-3に示す。

表-3　施工サイクルタイム比較

項目	従来工法	本施工事例
1台供給時間	6分	9分(※1)
入替時間	2分	2分
1サイクル供給量	4 ㎥	8㎥
1時間当たり施工量	30㎥	43.6㎥
施工効率	1.0	1.4

※1　1.3倍の速度で，2倍の距離を連続施工

表-3より，従来工法に対して，施工効率が1.4倍向上することが確認できた。また，材料の供給条件が，最もスムーズな場合においては，日打設数量が計画時の設計数量に対して，最大で，2倍（300m^3/日）の施工量となった。結果として，計画打設所要日数：24日に対して，実働：19日で完了し，施工工程を20%短縮することが確認できた。

4.4.3　出来型品質の検証

施工完了後におけるコンクリート舗装路の平坦性測定結果を表-4に示す。

表-4　平坦性測定結果

項目	上り線	下り線
平坦性	1.01mm	1.04mm

平坦性は，上下線ともに規格を満足した結果が得られた。

平坦性確保のためには，舗装作業時において舗装機械の発停止が少なく，また，舗装機械に過度な負荷が掛からない適量な材料の抱え込み且つ一定速度で施工することが望ましい。

今回の材料供給機の導入により，一律な材料供給が確保され，スリップフォームペーバの単時間当たりの施工距離が延長したことが平坦性の向上に寄与したと考えられる。

4.5　施工結果

自走式ベルトコンベア型コンクリート供給機をスリップフォーム工法に導入することによって得られた所見を以下に示す。

① 当該供給機を導入し，アジテータ車から2台同時に供給することにより，約20%の施工効率向上が確認できた。

② スリップフォームペーバでの連続施工が可能となり，平坦性の向上を実現した。

５．自動式粗面仕上げ･養生剤散布装置

5.1　開発の経緯

従来のコンクリート舗装では，機械施工による仕上げ成型後，人力作業による粗面仕上げ及び，コンクリート初期養生のための養生剤散布作業を実施する。上記に示す人力作業には，以下に示す課題がある。

① 粗面仕上げ作業は，作業員の技量に委ねられるため，仕上げ精度にバラツキが生じる。
② 従来の養生剤散布作業は，手動噴霧器や高圧洗浄機を利用して人力散布する場合が多く，規定散布量の確保が難しい。
③ 粗面仕上げ･養生作業は，人力作業となるため労務コストが嵩む。

以上の課題解決として，粗面仕上げ及び養生剤散布作業を機械化することで仕上げ精度の確保及び，養生剤散布量の均一化を図った。

5.2　開発目標

主な開発コンセプトを以下に示す。

① 粗面仕上げの粗さ具合（ほうき目仕上げ）をオペレータが常時調整可能な機構とする。
② 養生剤散布量の調整が可能な装置とする。
③ 施工時の現場風の影響を受けない散布ノズル装置とする。

5.3　自動式粗面仕上げ･養生剤散布装置の概要

当該装置は，シリンダフィニッシャ『C650』の『オーガ付きダブルドラムキャリッジ装置』の横行装置を利用し，上記装置と脱着交換により，コンクリート舗装面の粗面仕上げ（ほうき目仕上げ）及び養生剤散布を自動制御で行う装置である。

両装置は，連動・単動運転が可能であり，施工状況に応じて，選択可能である。

自動式粗面仕上げ・養生剤散布装置の機械全景を写真-8，作業装置を写真-9に示す。

写真-8　機械全景

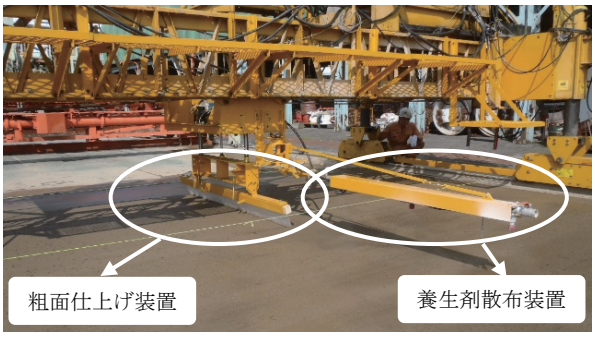


写真-9　作業装置

自走式粗面仕上げ・養生剤散布機の特徴を下記に示す。

① 粗面仕上げ装置は，スプリング慣性機構を採用し，施工端部における『ほうきのブラシ先』の過度な舗装面への突き刺さりを防止し，滑らかに舗装面に接触する機構とした。また，スプリングの強度調整により，『ほうき目』の粗さ調整が可能である。
② 粗面仕上げ装置の後方に養生剤散布装置を設置することで，粗面仕上げ作業と同時に養生剤散布が可能である。
③ 粗面仕上げ及び，養生剤散布は，施工状況に応じて，連動作業及び，単動作業での運転が可能であり，オペレータがセレクトスイッチにて切替選択が可能である。
④ 養生剤の散布インパクトを抑え、仕上げ面から散布ノズルまでの高さを低くすることで、現場風に影響を受けない散布が可能である。

5.4　試験施工

5.4.1　試験施工概要

弊社機械技術センター内において，当該装置の性能確認のため，実現場を想定した現場施工性確認試験を実施し，その性能評価を行った。

試験施工状況を写真-10に示す。

写真-10　試験施工状況

5.4.2　評価方法

コンクリート舗装面への粗面仕上げ及び，養生剤散布後，硬化状況を確認した上で，評価試験を実施した。評価試験方法を表-5に示す。

表-5　評価方法

評価項目	評価方法
作業装置の施工性	目視，養生剤散布量試験
仕上げ面の性状	CTメータによる表面性状確認試験

（1）作業装置の施工性確認結果

横断端部の仕上がり状況を写真-11に示す。

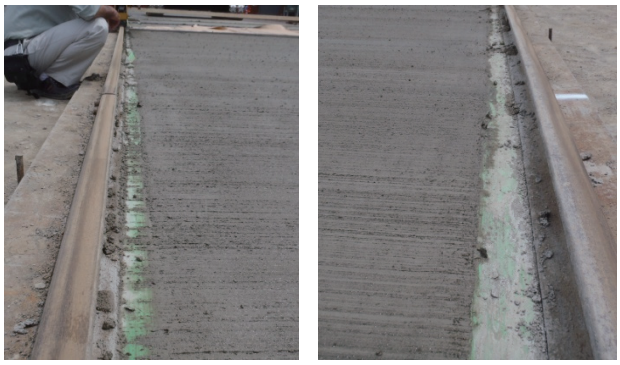


写真-11　横断端部の仕上がり状況写真
（左：終点部，右：始点部）

（2）評価試験

養生剤散布量試験及び表面性状試験結果を表-6に示す。

表-6　試験結果

試 験 項 目	測定値（平均）	目標値
養生剤散布量	0.19L/㎡	0.18-0.22L/㎡
CTM 測 定 値	0.655mm	0.4-0.8mm

表-6の試験結果より養生剤散布量，及び表面性状（CTM測定値）は，いずれも目標値を満足する結果が得られた。

また，硬化後の表面性状も確認したが，クラック等の発生もなく良好であることが確認できた。

5.5　試験施工結果

自動式粗面仕上げ及び養生剤散布機を使用した試験施工によって得られた所見を以下に示す。

① 機械化施工により一律な粗面仕上げが可能となり，精度の均一化が確認できた。
② 散布作業の自動化により規定量の散布が可能となり，所定のコンクリート品質を確保することが確認できた。
③ 粗面仕上げ及び，養生剤散布装置並びに機械本体の運転操作は，操作員1名と補助作業員1名の計2名での作業が可能であり，従来比で，50%（2名／4名）の省人化及び，労務費の削減が期待できる。

6．まとめ

シリンダフィニッシャ『C650』の多機能化によって得られた結果を下記に示す。

① 自走式ベルトコンベア型コンクリート供給機の現場導入により，1.4 倍の施工効率向上と約20%の工期短縮が図れた。また，材料の安定供給化に伴う，施工性の向上により平坦性を含む品質向上への貢献が期待できる。
② 自動式粗面仕上げ・養生剤散布装置の現場導入により，施工精度が均一化され，品質向上が期待できる。また，自動化に伴い，省人化及び労務コストの低減が期待できる。
③ 機械の多機能化により機械稼働率が向上し，効率的な機械運用が期待できる。

7．今後の課題

当該開発機の開発における今後の課題を下記に示す。

① 自走式ベルトコンベア型コンクリート供給機の運搬手段を10t トラック1台にて計画していたが，ベルトコンベア及びクローラ形状より10t トラック 2 台での運搬となった。輸送コスト縮減のため，トラック 1 台で運搬可能な仕様を検討する必要がある。
② 開発機の仕様変更に伴う，装置の組替には，現状 2 日程度の工程を要する。更なるコスト縮減を実現するため，組替作業をより簡易な構造とする必要がある。
③ 自動式粗面仕上げ・養生剤散布装置の現場導入を促進し，施工データの蓄積が必要である。

8．おわりに

コンクリート舗装機械の多機能化により，現場施工性の向上，品質の向上，省力化を期待し，その結果を確認することができた。

しかし，現場のニーズは，多種多様であり，今後も，様々な現場条件における施工性及び，品質向上等，現場のニーズに対応できる機械の開発を進めていく所存である。

参考文献

1) 国土交通省道路局：平成24年度道路関係予算概算要求概要，平成23年
2) 財団法人日本道路協会：舗装施工便覧，pp．67-70，平成18年

21. 締固め作業におけるロール振動転圧機構と平面振動締固め機構の機能特性比較

－クローラ式振動コンパクタ深層締固め機能の有効性－

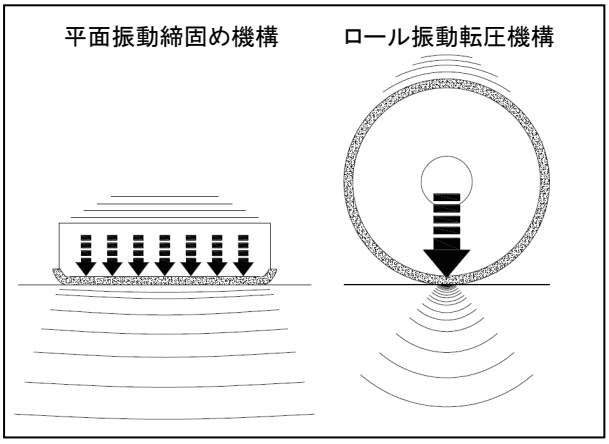
鹿島道路株式会社　○福川光男

１．はじめに

厚層締固め作業において効率の高い平面振動締固め理論に基づいて開発された「クローラ式コンパクタ」において、従来のロール振動転圧機構との特性比較を述べ、さらにこの機能を活かした主な使用実績を紹介する。

２．ロール転圧機構との特性比較

ロール振動転圧機構と平面振動締固め機構（図－１）との特性比較は過去においていくつのも論文が発表され、平面振動締固め機構が深層締固めにおいてその有効性が立証されている（図－２）。以下に接触面形状を含めた締固めエネルギ伝達特性を比較した。

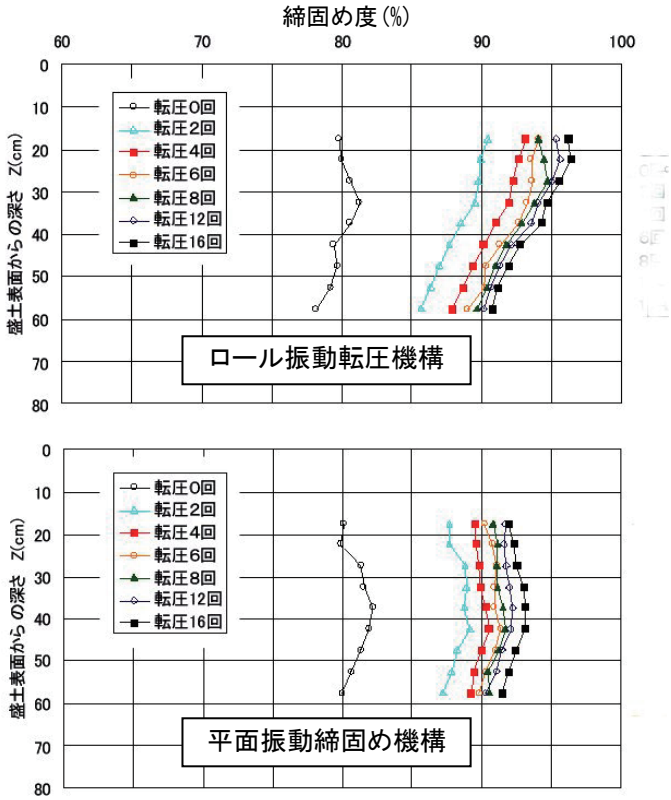


図－１ 平面振動締固め機構とロール振動転圧機構との締固めエネルギ伝達イメージ

（１）ロール振動転圧機構の特性

① 優れた移動性機能

土木工事における締固め作業において、一般的には質量のある筒状のロールを締固め対象面上で回転移動させることにより圧密面を形成させていく。文字通りロールを転がし、圧力を加える「転圧」行為となる。この機構はロールの回転方向及び回転軸の方向（方位角）を変えることによって任意に移動軌跡を描くことが可能である。従って優れた移動性機能により作業エリア間の移動も容易にできる。



図－２ 締固め機構の違いによる深さと締固め度の関係

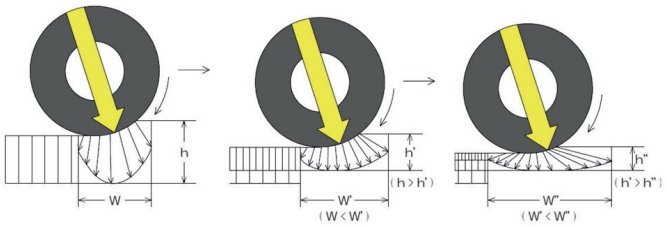
② 高い圧密特性

ロール転圧機構では締固め対象面に対してロール（バネ下）と装置本体（バネ上）重量、すなわち転圧荷重が線圧として集中する。その集中応力と回転移動する際に発生する変形応力によって圧密面を形成させていく。ロール形状（質量、直径、幅、硬度）及びエネルギ発生機構（静圧、動圧）を選択することにより、幅の広い適応性を有している。更に、円筒形状のため剛性が高く、衝撃荷重にも耐える耐変形応力性に優れている。

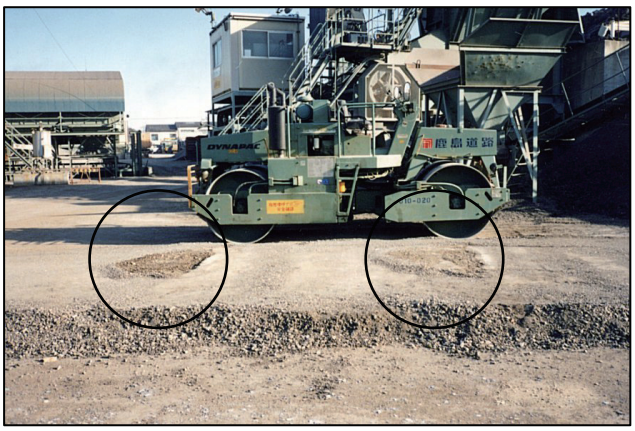
③ 下層方向への締固めエネルギ減衰要因と現象

通過回数を増すごとにロール接触下面には圧密層が形成され、ロールからの締固めエネルギは分散され下方への伝達力は減少する（図－３）。
故に、締固めエネルギを高めても、圧密層の密度を高めることになり、益々強固なエネルギ遮断層

を形成させることになる。また、過度なオーバーコンパクションは盛り土材の破砕、泥状化の発生要因となる。過去の実証実験で形成された遮断層による反射振動波によって転圧表面がルーズになる現象が報告されている（写真－１）。



図－３　転圧回数における締固め応力伝達深さと分布イメージ



写真－１　反射振動波の実例

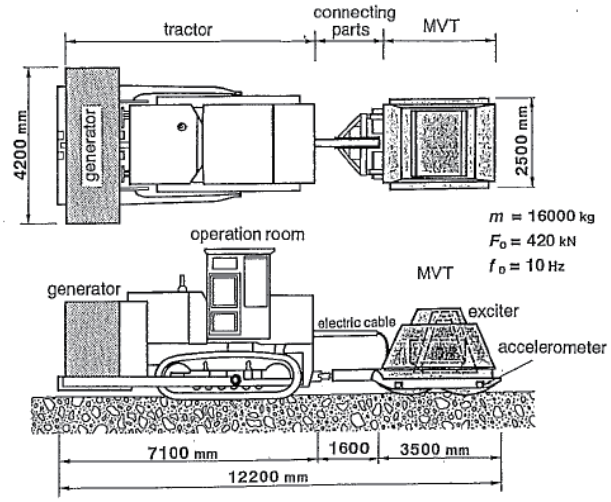
（２）平面振動締固め機構の特性

① 高い鉛直方向への締固めエネルギ伝達特性

鉛直方向への締固めエネルギの伝達特性がロール振動転圧機構に比べ優れている要因は、締固め対象面に面接触しているため、締固めエネルギのベクトルは鉛直方向に作用し、分散することなく下面に伝達されるのである。また締固めエネルギは面圧として作用するため単位面積当たりの圧力は小さく、接触面材料（盛り土材）を破砕するような高い局部的な圧力が掛かることはない。反面、上層面の高い締固め度を求めることは出来ない。

② 移動時の操向機能は備わっていない

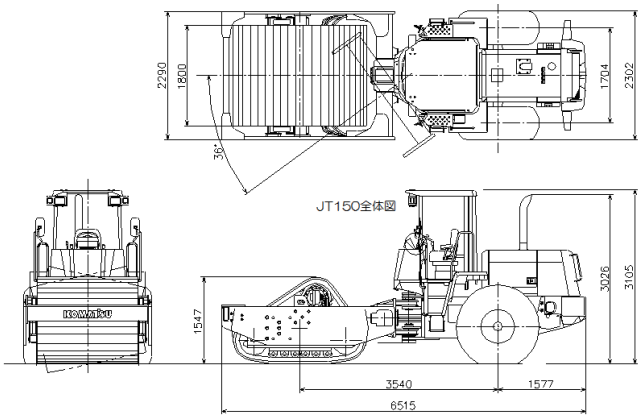
平面転圧機構は構造上移動機能が備わっていない。しかし、小型の振動コンパクタについては回転式振動機構により推進力も発生するので回転方向を変えることにより前後進ができ、人的操作が可能である。しかし、土工用の大型コンパクタにおいては質量の大きいトラクタなどで牽引することにより移動させる（図－４）。しかし、このシステムでは微妙な操向制御は困難である。



図－４ 土工用牽引式平面転圧機

３．クローラ式振動コンパクタの構造

一般的な平面締固め機構には自走機能が備わっていないため、クローラ式振動コンパクタは幅広のクローラ形状とし、内蔵された複数のトラックローラを介してトラックフレーム上に搭載した振動機構からの締め固めエネルギを対象面に伝える構造となっている。トラックフレーム上部にはトラックリンクを駆動する油圧モータが装備され、自走が可能となっている。操向機構は動力装置を搭載した駆動ホイール式トラクタ部とのアートキュレート機構によって行う（図－５）、仕様は（表－１）を、外観は（写真－２）を参照願いたい。



図－５ クローラ式振動コンパクタ外観

表－１ クローラ式振動コンパクタの仕様

起振性能	振動タイプ		垂直振動
	最大起振力	Kgf	13,800
	最大転圧力	Kgf	23,600
	振 動 数	Hz	14
質　量	運転質量	Kg	16,000
寸　法	全　長	Mm	6,520
	全　幅	Mm	2,290
	全　高	Mm	2,940
	締固め幅	Mm	1,800

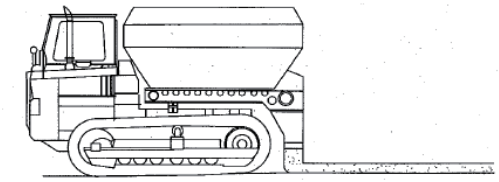
写真-2 クローラ式振動転圧機

4．施工実績と効果

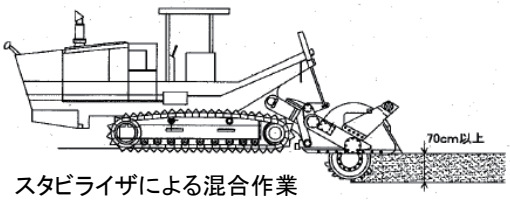
用途に応じた主な施工事例

① 深層混合（スタビライザ）後の締固め作業

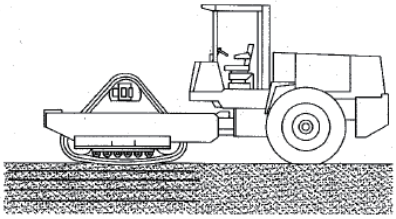
地盤土質改良工事では作業効率を高めるため撹拌装置として自走式深層スタビライザが用いられるが、混合後の締固め作業において従来の転圧機構では深層部までの締固め効果を充分に発揮することが出来ず、混合深さに限界があった。また混合直後のローラによる転圧作業のためのトラフィカビリティが確保できない場合もある。しかし、面状の締固め機構を有するクローラ式振動コンパクタは低い接地圧であるため、混合直後の締固め作業が可能である。この特性により、深層スタビライザと組合わせて、大規模な地盤改良工事を実施している（図－６）。施工例として 2005 年 7 月に完成した石川県七尾市の LP ガス備蓄基地の基盤整備工事が挙げられる（写真－３、４）。



ライムスプレッダによる添加剤散布作業



スタビライザによる混合作業



クローラ式振動コンパクタによる締固め

図－６ 地盤改良工事での施工の流れ

写真-3 深層スタビライザによる混合作業

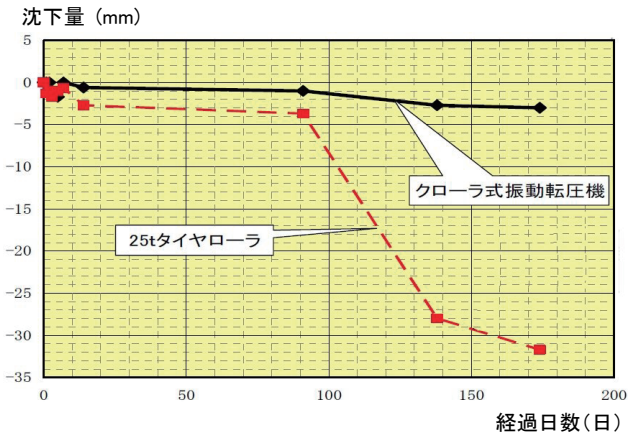
写真-4 クローラ式振動コンパクタによる締固め

② 路床部の凍上抑制効果

寒冷地での道路舗装構造は路床と下層路盤との間に凍結抑制層が設けられている。しかし、下層路盤の状態で越冬する場合には降雨雪水が路盤へ浸透し、その水分の凍結融解作用によって、凍結や不同沈下を起こす要因となる。対策として、下層路盤施工時の締固め密度を高めることによって浸透水分を減じることが必要であり、クローラ式振動コンパクタによる追加締固めによって締固め密度を高めることが出来る。2008 年旭川紋別自動車道白滝村外白滝舗装工事構造物背面転圧工事において 25 トンタイヤローラのみと、クローラ式振動コンパクタとの越年後の凍結融解による沈下状況比較を沈下板を事前に埋設して比較を実施した。その結果、沈下量を大幅に減ずることができ、凍上や不同沈下の抑制効果が確認された（図-７）。

表-2 凍上抑制層の締固め機械と転圧回数

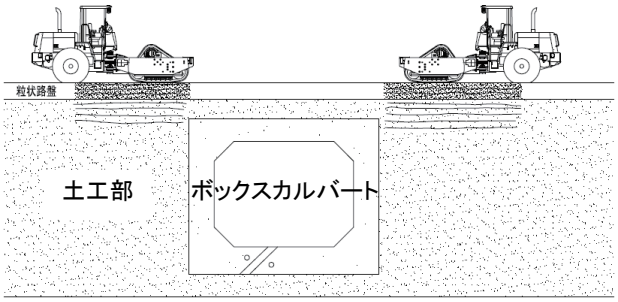
使用機械	25tタイヤローラ	クローラ式振動転圧機
試験施工層	凍上抑制層（t＝55cm） 火山灰	
	下層路盤工（t＝50cm） RC-40	
1層の厚さ	20cm	
転圧回数	10往復	4往復
沈下板埋設場所	凍上抑制層（t＝55cm） 火山灰	
沈下板埋設ピッチ	転圧境より15m，25m，35mの3箇所	



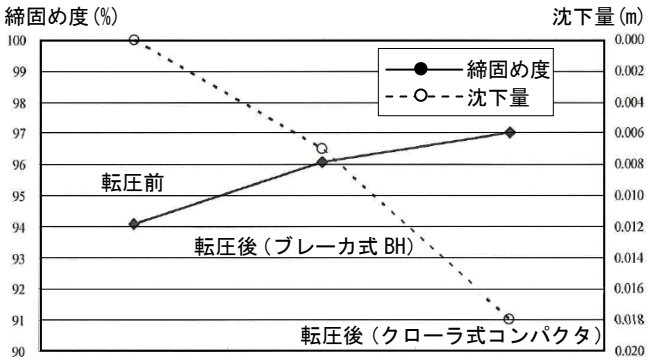
図－7 凍上抑制層沈下量の比較

③ 下層の不同沈下抑制作業

長期にわたり舗装の平坦性を確保するためには、路床面から均一な締固め度を確保することが必要である。特にボックスカルバートや橋梁部の構造物と土工部との結合箇所での不同沈下を低減させることが重要となる。最近の施工例として、北海道縦貫自動車道大沼舗装工事では従来の処理方法に加えてクローラ式振動コンパクタを使用して追加締固めを行う施工を実施し、その効果の確認作業もおこなっている（図－８）、（図－９）。この工法は深層部まで締固められることから、地震などの災害に対して補強効果も期待できることが推測される。



図－8 追加締固め箇所



図－9 沈下量と締固め度の相関

５．実用化の経緯と構造上の問題点、運用時の配慮

愛媛大学の室教授らの研究理論をもとに小松製作所が試作機を開発した。その後、鹿島道路は耐久性、操作部の制振機能を備えた実用機の製作を依頼し、適応現場での稼働を実現している。実用機の開発に当たっては強力な発生振動から伝達された締固め対象面からの振動を如何にキャビンへの伝達を減衰させるかが課題であった。これに対しては優れた制振機構の採用により搭乗性は改善された。また平面振動伝達機構であるため、締固め対象面に頑強な凸状部がある場合、クローラは集中応力を受けることになる。これに対抗出来る剛性を持たせる構造的検討がなされ、トラッククローラの配置数、クローラ形状の改善がなされた。更に、運用にあたっては路面からの過度な集中応力が掛からないような適応現場の選択が必要である。また施工にあたっては、強力な振動伝搬が発生するため適用箇所への配慮も要する。

６．まとめ

土木構造物構築作業は一般製造業のような高品質工場生産方式と異なり、現位置製造が原則となるため、プロセス毎の施工品質管理が必要になる。締固め方法においても効率的な機能特性を生かした機種選択を行う必要がある。2002 年に導入して以来、自然災害にも対応出来る強固な土木構造物の構築効果を確認しつつ、今後もクローラ振動コンパクタの活用を目指していく所存である。

参考文献

1）玉川ダム RCCP 試験施工計画書
鹿島道路　1987 年 7 月
2）振動ローラ締固め作業における反射波の影響と対策
鹿島道路　1991 年 5 月
3）高リフト厚のまき土に対する遠心加振機を
搭載したローラと履帯式車両の振動転圧効果
室達朗、他　土木学会論文集№588　1998 年 3 月
4）おむすびローラ JT150WA 締固性能試験報告書
コマツ　2002 年 9 月
5）クローラ式振動締固め機の開発と締固め特性
コマツ 土木学会第５８回年次学術講演会　2003 年 9 月
6）旭川紋別自動車道白滝村外下白滝舗装工事
転圧効果確認試験結果報告書
鹿島道路　2006 年 7 月
7）北海道縦貫自動車道大沼舗装工事
クローラ式振動転圧機を用いた追加転圧確認施工結果報告書
鹿島道路　2011 年 10 月

22. 締固め管理手法に基づく盛土のり面の品質評価とその現状

九州大学大学院　○ 安福　規之
㈱浅川組　谷山　充
福井大学大学院　小林　泰三

１．はじめに

これまでに様々な地盤の締固め技術が開発・実用化されてきているが、そのほとんどが水平面を対象としたものである。法面に対しては、平底の法面バケットを利用したバックホウによる法面造成が一般的であり、勾配等の幾何学的な法面整形（仕上げ）に主眼が置かれることが多く、十分な締固めや均質性を必ずしも保証するものとは言えないのが実情である。しかし、昨年の東日本大震災での土構造物の多くの被害事例を鑑みると、その教訓のひとつとして、締固めの重要性と適切な排水処理の大切さが指摘される。そんな中、土構造物としての盛土のり面の健全性を確保することは、盛土全体での健全性を考える上で重要な要素であると考えられるが、盛土法面がどの程度の締固め特性や均質性を有しているものなのかを把握した例は少ないと思われる。

本研究では、盛土の試験施工を通常の方法で実施し、事例的ではあるが、盛土のり面における締固め管理の現状を盛土天端（水平面）でのそれと比較しながら言及する。また、のり面の締固め手法を工夫することで、のり面の締固め度がどの程度改善されるかを現地実験の結果 [1]に基づいて考察する。加えて、筆者らの開発する非破壊の小型FWD装置を紹介し [2]、試験盛土のり面への適用例を示し、変形特性を反映した指標に基づく健全度評価結果について述べる。

２．試験盛土に関する現地および室内実験

ここでは、試験盛土の天端とのり面の施工条件および盛土材の締固め特性を示すと共に、現位置および室内での測定・試験条件をまとめる。

2.1　試験盛土の形状と特色

図-１(a)および写真-1 は、現地で行った試験盛土の幾何学的形状を示したものである。盛土は、現地発生土を一層 30cm で巻きだし、写真-2(a)に示す振動ローラを８往復して、締固めながら所定の高さとなるように整形した。最終的な、盛土のり面の高さは 2.0m、勾配は 1:1.8 であり、結果として、のり面長は約 3.6m となる。また、天端の奥行きは

写真-1　現地での試験盛土の施工状況

6m とし、盛土の幅（全長）は 25m に設定した。

後述するように盛土のり面は、写真-2(b)の掘削機のバケットの背を使って、形状を整えるのみの予備的なのり面（Slope-S と称する）およびバケットの背を使って静的に締固める方法で整形したもの（Slope-L と称する）を用意し、それぞれののり面の締固めの状態を天端のそれと比較した。なお、盛土天端は、一般に行われる振動ローラを使った動的な締固めによって整形されている。

2.2　盛土のり面の施工方法と設定条件

盛土のり面は、Slope-S と Slopes-L2,M2,N2 が準備された。まず、Slope-S は、巻きだし厚 30cm の層上を写真-2 に示す振動ローラを 8 往復することで各層ごと締固め、製作されたものである。この場合、のり面は、所定の盛土高さになった後、写真-2 の掘削機のバケットの背を使って、のり面に対して垂直に掘削機が浮き上がらない程度の力を加え、形状を整えたものである。

次に Slope-L2,M2,N2 ののり面は、Slope-S と同じ方法で整形した盛土のり面の表層を 30cm 程度はぎ取り、その部分に新たに盛土材を巻きだし、バケットを使って静的に締固めを行って作成したものである。L2,M2,N2 の違いは、締固めエネルギーの違いである。この方法を以下、「バケットタンピング法」と称する。図-1 に示すように Slope-L2,M2,N2 は、バケットで一様にそれぞれ 12 回、24 回、50 回づつタンピングすることで、整形したものであり、相対的に Slope-L2,M2,N2 の順に

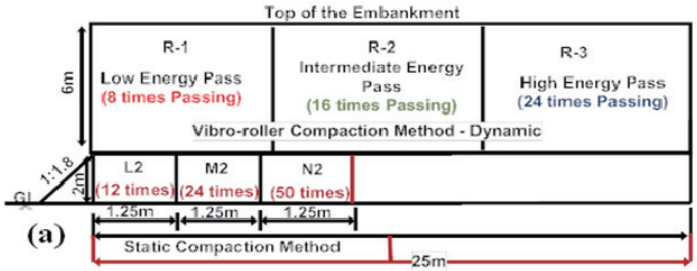


図- 1 (a) 試験盛土のスケッチと幾何学的な形状

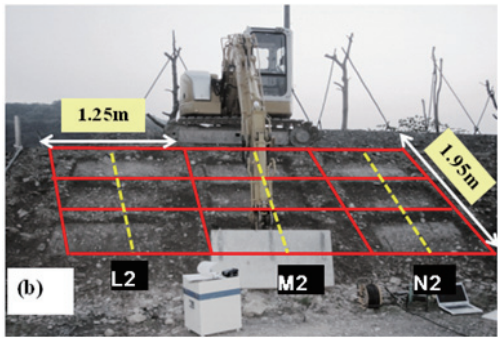


図- 1 (b)　盛土のり面の試験グリッドのイメージ

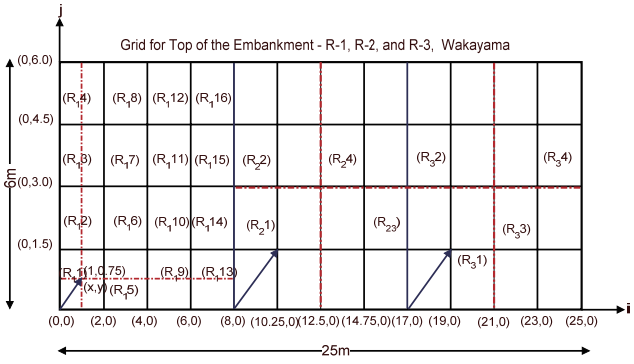


図-2　盛土天端の試験グリッドの状況

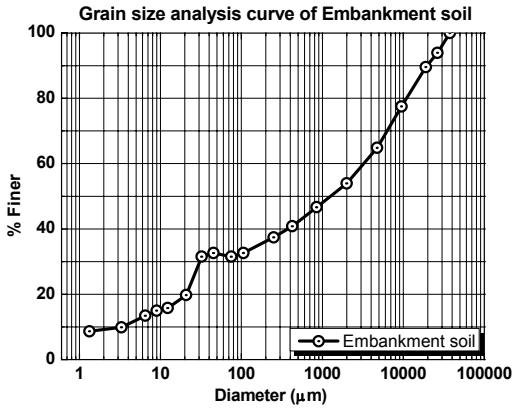


図-3　盛土材の粒度分布

良く締固められたのり面ということになる。

2.3　盛土天端の施工方法と設定条件

盛土天端の水平面もまた、図-1 に示すように振動ローラによる締固め方法によって締固めエネルギーの異なる 3 つの部分（R1,R2,R3）に分けて施工されている。盛土天端 R1 は、一般的な方法である、振動ローラーを各層ごと 8 往復させることによって施工された区域である。また、R2 区域と R3 区域はそれぞれ振動ローラを 16 回と 24 回往復させて整形されたものであり、標準的な締固めである R1 区域に比べて大きなエネルギーを加えた天端であると言える。

2.4　FWD 試験を含む現地測定の項目と方法

現地計測は、図-1(b)と図-2 に示すように測定区域をグリッドに分けて、グリッドごとで行った。用いた主な計測装置には、RI 密度測定装置（写真-3(a)）と非破壊で地盤表層の変形性の評価できる小型の FWD 装置（写真-3(b)）である。RI 密度測定装置は、その土の締固め曲線が既知であれば、土の最大密度と最適含水比を RI 装置に基礎データとして入力することで、測定地点における土の湿潤および乾燥密度に加えて締固め度が標準偏差を伴った形で求められる。計測はグリッドで区分された区域内で 3 回ずつ行った。

小型の FWD 装置（Portable light falling weight deflectometer）は九州大学で開発したもので[1)]盛土表層 15cm 程度の深さまでの盛土地盤の平均的な変形性能を表現できるとされている。図に示すよ

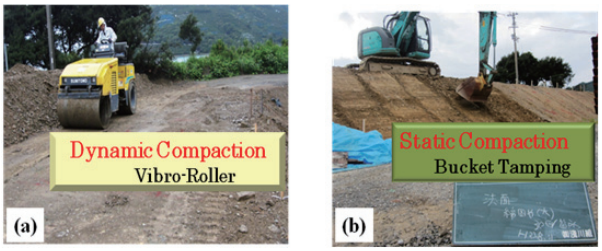


写真-2　締固めの様子 (a) 振動ローラによる締固め、(b) バケットタンピングにより締固め

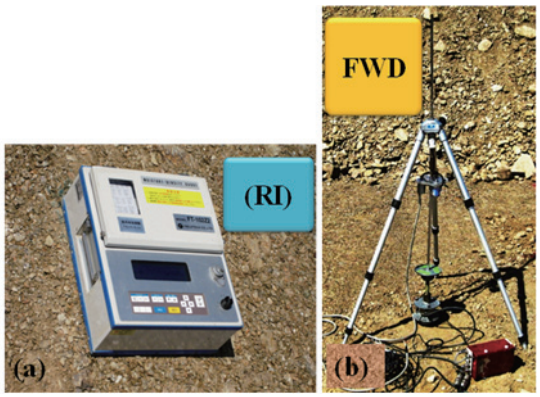


写真-3(a)　RI　装置　　写真-3(b)　試作した FWD 装置

うに重錘を自由落下させ、その際の表層地盤に作用する加速度と力を記録することで、結果的に応力と変位を算定し、最大応力と最大変位の比として FWD 係数 k_f を求めるものである。すなわち、

$$k_f = \frac{\sigma_{\max}}{u_{\max}} \quad (MN/m^3) \qquad (1)$$

FWD 係数 k_f が大きいほど、剛性の高い地盤として通常評価される。

盛土のり面および天端のグリッドで仕切られた区域ごとで、試料の採取も行った。これにより、直接的に各区域の含水状態が直接的に求められる。また、使用した盛土材の締固め特性を評価するために盛土天端からの試料のサンプリングも行った。

2.5 盛土材の締固め特性と基本的性質

盛土材には、現地発生土を用いている。図-3 は使用した盛土材の粒度分布を示している。表-1 は、その基本的性質をまとめたものであり、均等係数が 600 を超え、平均粒径が 1.3mm であり、JGS 分類では比較的 GFS に分類される。図-4 は JIS A 1210

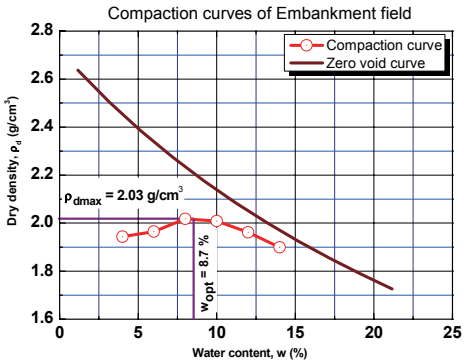


図-4 盛土材の締固め曲線

表-1 盛土材の基本的性質

JGS classification of soil		GFS
U_c		942.9
D_{50},	mm	1.3
ρ_{dmax},	g/cm^3	2.03
w_{opt},	%	8.7
Natural water content, w,	%	13.65

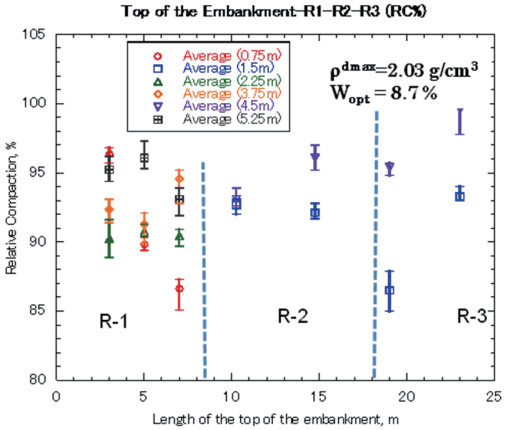


図-5 (a) 盛土天端の締固め度の空間的分布

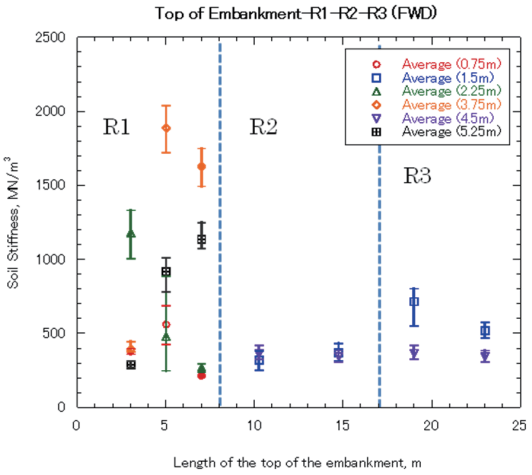


図-5 (b) 盛土天端の FWD 係数の空間的分布

（ランマー重量:4.5kg、落下高さ:45cm,ブロー回数:3 層で 1 層あたり 92 回,非繰返し法）に基づいて実施した締固め試験の結果である。これより、盛土材の最大乾燥密度と最適含水比はそれぞれ 2.03 g/cm^3 と 8.7 %であることがわかる。

3．試験盛土の締固めの現状

3.1 盛土天端での締固めの状況

図-5 は、盛土天端での締固め度と小型 FWD で得られた FWD 係数 k_f を R1,R2,R3 の測定グリッドごとで比較したものである。この結果から、締め固めを行うための振動ローラーでの往復回数が同じであっても、計測位置によって締固め度はかなり変動していることがわかる。例えば、R1 サイト

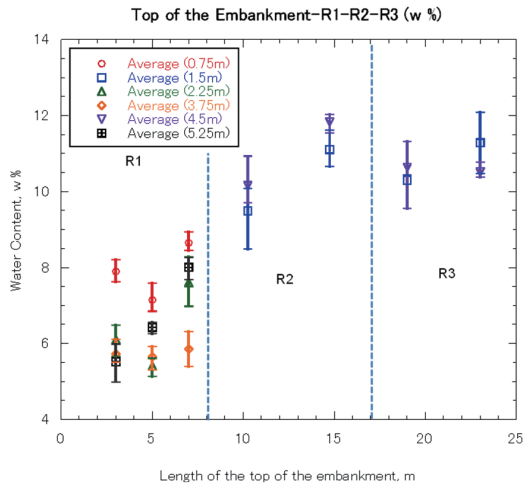


図-5 (c) 盛土天端の FWD 係数の空間的分布

では、86%程度から 95%を少し超える程度の変動

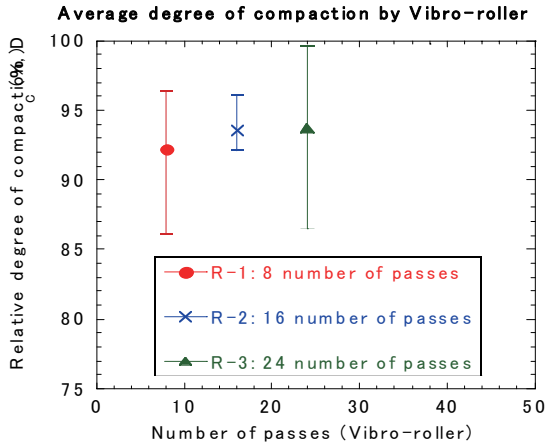


図-6 (a) 往復回数に着目した盛土天端の締固め度

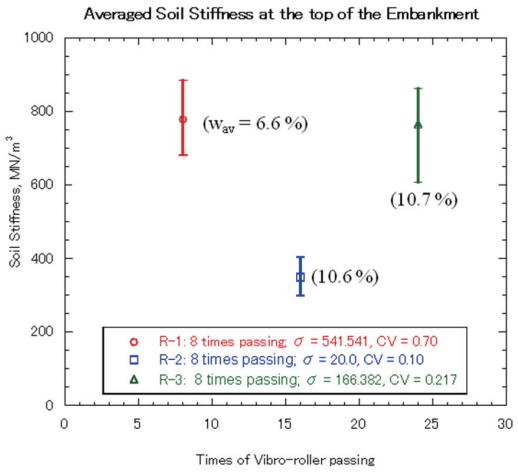


図-6 (b) 往復回数に着目した盛土天端の FWD 係数

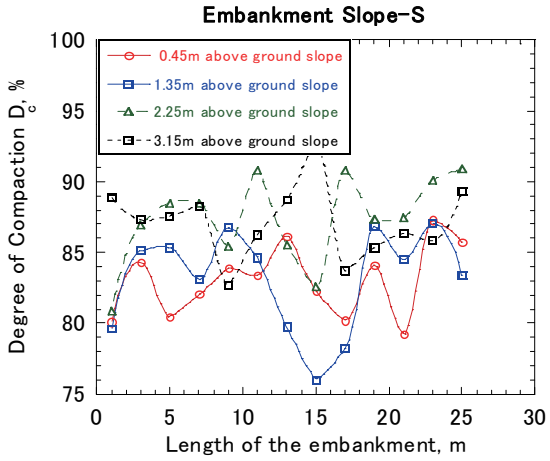


図-7 (a) 盛土のり面の締固め度の空間的な分布

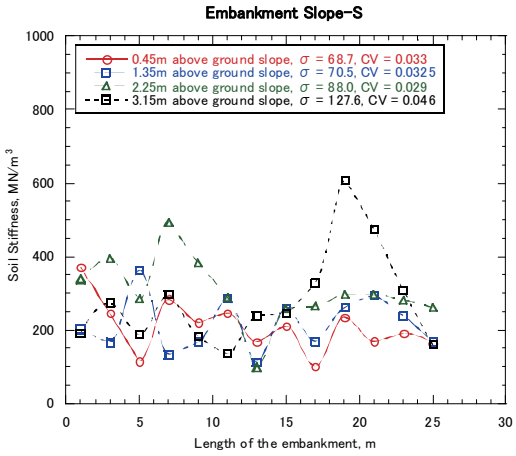


図-7 (b) 盛土のり面の FWD 係数の空間的な分布

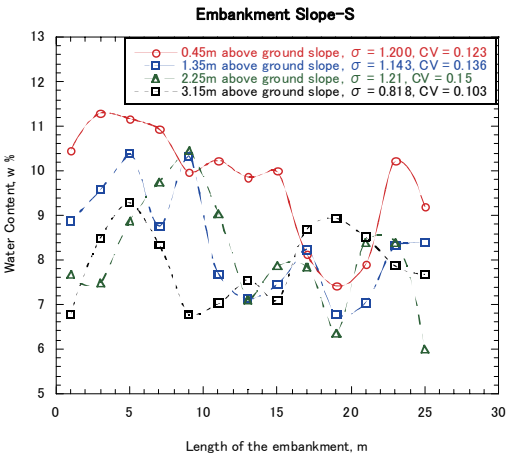


図-7 (c) 盛土のり面の初期含水比の空間的な分布

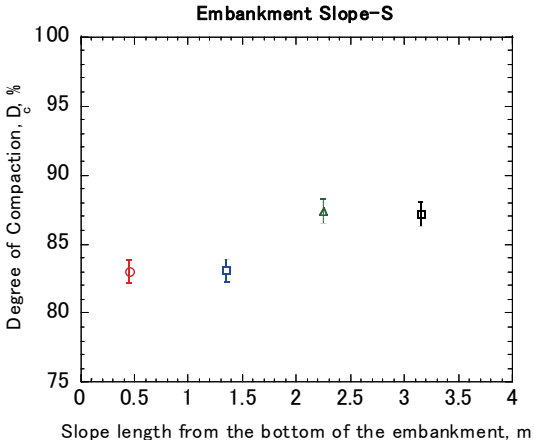


図-8 盛土のり面の締固め度と底面からの距離

幅となっており、盛土管理を行う上で、施工上この程度のばらつきはあり得ることを認識しておくことが必要であろう。図-5(b)は、測定グリッドごとで得られた k_f 値をまとめたものである。k_f 値を表層の初期剛性を表す指標であるとすると、R1 サイトのデータは、締固め度と同様かなりのばらつきを有する結果となっている。考えられる地盤工学的な要因としては、1）公称、均質な現地発生土を用いているのであるが、局所的にみると土質そのものに違いがあった可能性があること、2）

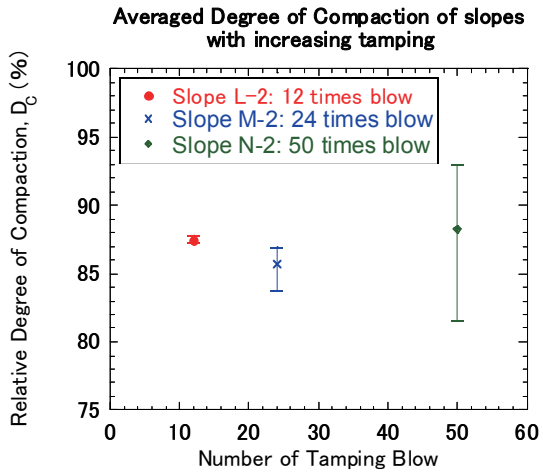


図-9 盛土のり面の締固め度に及ぼす締固め回数の影響

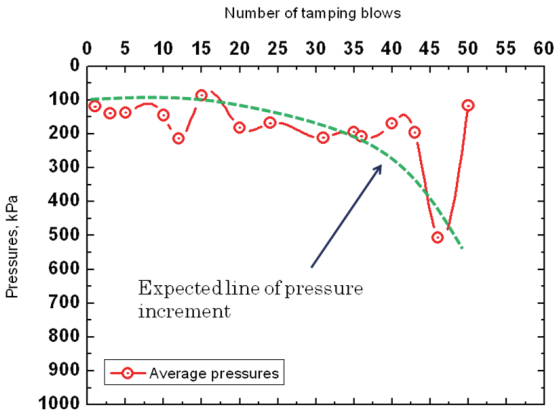


図-10 締固め回数とバケットの背面に係る土圧の変化

表-2 締固め度に着目した盛土のり面と天端の品質の比較

Embankment	Name of the Embankment	Relative Degree of Compaction, (D_c) %			Water Content (w) %		
		Average	Standard Deviation (σ)	Coefficient of Variation (CV)	Average	Standard Deviation (σ)	Coefficient of Variation (CV)
Top of the Embankment	R1	93.88	0.988	0.01	6.67	1.089	0.163
	R2	98.24	4.982	0.05	10.65	0.895	0.084
	R3	96.58	1.282	0.01	10.69	0.367	0.034
Slope of the Embankment	S	83.02	2.100	0.025	8.54	1.319	0.154
	L2	87.43	0.247	0.003	8.9	0.518	0.058
	M2	85.71	1.396	0.016	9.25	0.268	0.029
	N2	88.27	4.903	0.056	9.29	0.147	0.016

同じ土質であっても、空間的には施工時の含水比が大きくばらついていること（図-5(c)参照）が想定される。

図-6 は、振動ローラーの往復回数に着目して、締固め度と初期の剛性および含水比を整理したものであり、平均値とばらつきの幅がわかるように示されている。図-6(a)から、往復回数が 8 回、16 回、24 回と増えるとともに締固め度の平均値は、92%程度から 94%程度と増加の傾向が伺える。しかし、データの変動の幅などを考えると、標準的な往復回数をさらに増やしたとしても平均的な締固め度が著しく改善される結果とはなっておらず、8 回程度の往復回数である程度の締固め度が確保されることを示している。図-6(b)は、サイトでの k_f 値の平均値と往復回数の関係およびその変動の幅を示したものである。往復回数が増えることで表層の剛性が増加すると言った結果にはなっておらず、16 回の往復回数の場合には、k_f 値の平均値は、往復回数 8 回の場合に比べて約半分程度であり、著しい低下を示している。これは、それぞれのサイトの平均的な含水比が、6.6%と 10.6%と大きく異なっているおり、この違いが表層地盤の剛性に反映したものと考えている。

3.2 盛土のり面での締固めの状況

(1)標準的な施工によるのり面（Slope-S）の場合

図-7 は、締固め度、小型 FWD で得られ k_f 値および含水比を 25m の幅で設定した測定グリッドごとでまとめたものである。これらの結果から、1）締固め度は 75%程度から 91%程度の範囲で変動しており、天端の結果と比べて相対的に小さい締固め度となっていること、2）k_f 値は概ね 100MN/m^3 程度から 600 MN/m^3 の範囲で変動していること、3)含水比は、のり面先端からの距離に応じて 6%程度から 11%程度までの範囲で場所的な変動を示していることがわかる。図-8 は、のり面の底部からの距離ごとで平均的な締固め度および変動の幅を比較したものである。平均値で見るとのり面の締固め度は、83%程度から 87%程度の範囲にあり、天端と比べると締固め度で 7%程度低い結果となっている。また、のり面の底面に近いほど締固め

度は低くなる傾向にあることも読み取れる。

(2)締固め度に与えるバケットタンピングの効果

ここでは、バケットの背面で静的に締め固める「バケットタンピング」によって、どの程度、盛土のり面の締固め度が改善されるのかを SlopeL2, M2, N2 を使って調べた結果をまとめる。

図-9 は、平均的な締固め度および変動の範囲をタンピング回数との関係でまとめたものである。この結果から、タンピング回数が 12 回、24 回、50 回に対して締固め度の平均値は、それぞれ 87%、85%、88%であり、回数の増加に伴う締固め度の顕著な改善はこの場合見られない。なお、図-1(b)は、バケットタンピング法で盛土のり面を締固めている状況を示している。また、図-10 は、バケットの背面に小型の土圧計を複数設置し、バケットの背面に係る圧力をタンピング回数ごとに測定した結果をまとめたものである。図には、土圧の平均値を示している。締固め時、バケットには 100kPa 程度の土圧がかかっていることになり、その圧力は、タンピング回数とともに表層ののり面の剛性が高くなることによって、増加する傾向にあることが示唆される。

(3)盛土のり面と天端の品質の比較

表-2 は、今回現地実験で調べた盛土のり面と天端の締固め度および含水比の平均値、標準偏差、変動係数をまとめたものである。この結果を比較することで、盛土のり面と天端の品質が締固め度等の観点から評価できるが、現状では、盛土のり面および天端いずれも品質に空間的なばらつきがかなり存在し、またのり面の締固め度、および FWD 係数の平均値は、天端でのそれらに比べてかなり劣っていることが認識される。

4．まとめと今後の課題

本研究では、現地での試験施工を通して、締固め度と FWD 係数を指標として、盛土のり面の品質の現状を、盛土天端と比較しながら考察した。得られた主な知見をまとめる。

1）標準的な方法で施工された盛土のり面の締固め度は、振動ローラーによって締固められた盛土天端の締固め度に比べて、平均値で 7%程度小さい結果であった。

2）盛土のり面および天端の品質は、一様ではなくかなりの変動が存在することが示された。その地盤工学的な要因として、土質そのものや初期の含水比のばらつきを指摘した。

3）バケットタンピング法による盛土のり面の改善の程度について考察した。結果として、50 回程度タンピングを行ったとしても、締固め度の平均値は 90%を越えることはなかった。

したがって、今後の課題として、盛土のり面の品質を効率的に改善するための新たな取組が必要であることが示唆される[3)]。

最後に、本論文をまとめるにあたり、九州大学の Snman Manandhar 氏に献身的なサポートをいただいた。深甚の謝意を表したい。

参考文献

1) Manandhar, S., Yasufuku, N., Kobayashi, T., Omine, K., Hazarika H., Suenaga, S., & Taniyama, M. Features of static and dynamic field compaction of embankment slope; *Western Japan Society of Civil Engineers (JSCE),* 2012-03-03, Kagoshima, Kyushu, Japan, No. III-033, pp. 413-414.

2) Ninomiya, H., Yasufuku, N., Omine, K., & Kobayashi T.Characteristic and purpose of portably nondestructive evaluation device of slope soundness. *44th Annual meeting of JGS*, August 18-21, Yokohama: 69-70, 2009.

3) 小林泰三・谷山　充・安福規之：油圧ブレーカの打撃エネルギーを利用したバックホウによる法面締固め技術の開発，平成24年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集，2012（後掲論文）

23. 油圧ブレーカの打撃エネルギーを利用したバックホウによる法面締固め技術の開発

福井大学大学院　　○ 小林　泰三
㈱浅川組　　谷山　充
九州大学大学院　　安福　規之

1．はじめに

近年，道路盛土や河川堤防，宅地盛土等の崩壊が多発しており，盛土構造物の要求性能や管理基準，設計法を見直そうとする動きが見られるようになった。そのような中，盛土の品質確保に大きくかかわる土の締固めが，“古くて新しい”問題として，再び注目を浴びるようになってきている。

これまで様々な締固め機械が開発・実用化されてきたが，転圧ローラーに代表されるように，その殆どが撒き出し水平面を対象としたものである。盛土を造成する場合，転圧ローラーなどの重機は法肩に接近できず，法面付近の締固め管理は実際上看過されてしまうことが多い。盛土法面においては，バックホウによる削り取り整形か築立（土羽）整形（**図-1(a)**）を行った後，植生工等の法面保護工が施されるのが一般的である[1)]。

著者らの最近の調査によって，従来の築立（土羽）整形では，法面の十分な締固めや均質性が保証できないことが明らかになった（前掲論文[2)]）。著者らは，法面の締固めが盛土全体の高品質化に直結する課題であるとともに，法面保護工の選定（簡易化）にも繋がる重要な施工・管理ポイントであるという認識のもと，法面を効率的に締固めることのできる技術の開発に取り組んでいる。本報では，開発した締固め装置の概要と試験盛土を対象とした実証実験の結果を報告する。

2．バックホウを利用した法面締固め装置

本研究では，岩盤の掘削やコンクリートの破砕に用いられる油圧ブレーカの衝撃力に着目し，これを応用した締固め装置を開発した（**図-1(b)**）。締固め装置は，**図-2** に示すように，油圧ブレーカと剛性の締固めプレートを一体化したもので，これをバックホウに取り付けて地盤に押し付けることにより，アーム荷重と衝撃振動力がプレートを介して地盤に伝わる仕組みになっている。衝撃振動力による締固め効果の飛躍的向上とアームの自由度を活かした施工能力の拡大（任意斜度の法面や狭隘地等の締固め）を期待できる点が特徴である。なお，ブレーカの振動伝達軸（チゼル）にはひずみゲージが貼付されており，載荷荷重が計測できる（**図-2(b)**中の計測ユニットについては後述する）。

本報では，**図-2** に示す 850×850 mm の面積をもつプレートを用いた実験について報告するが，施工効率の向上を期待して更に大きな面積をもつプレートの開発研究も進めており，同様の施工性・締固め効果が期待できることを付記しておく。

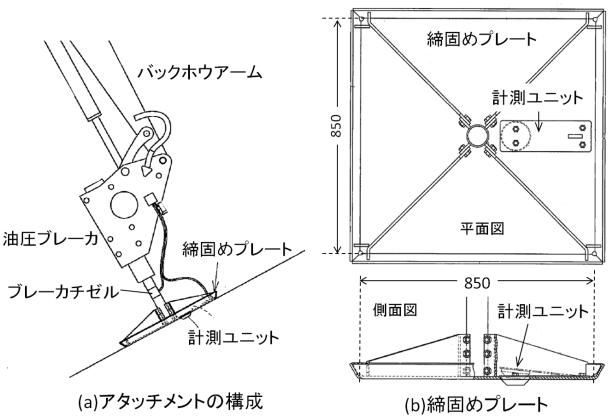
3. 試験盛土における実証実験

3.1 盛土法面を対象とした実験

本研究では，まず，**図-3** に示す試験盛土を造成し，その法面を対象に実証実験を行った。ここでは，図中に示すように，法面を合計 15 のブロック

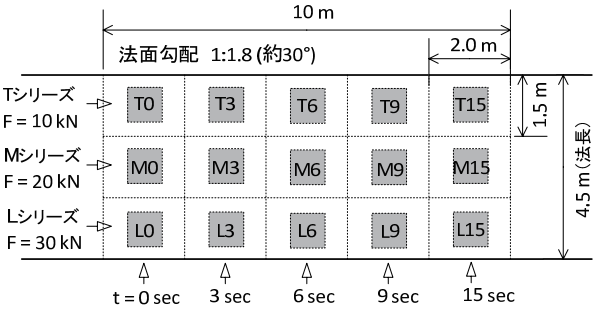
(a)法面バケットによる土羽打ち　(b)ブレーカユニットによる締固め

図-1　バックホウを利用した法面形成・締固め

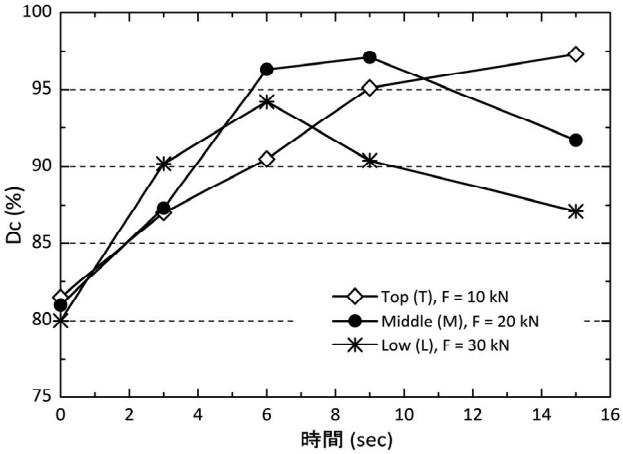


(a)アタッチメントの構成　(b)締固めプレート

図-2　油圧ブレーカを利用した締固め装置



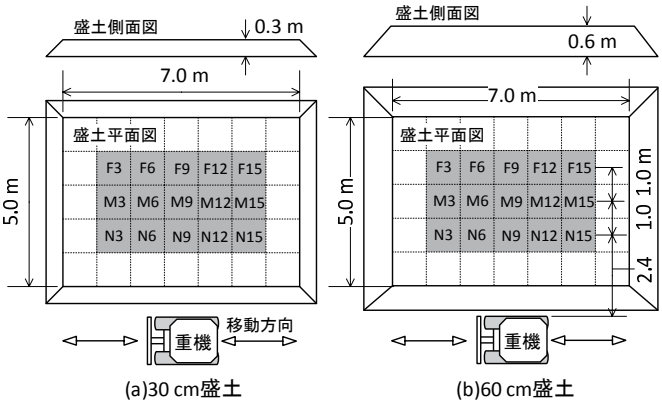
図−3 試験盛土法面における実証実験



図−4 締固め度の経時変化（法面）

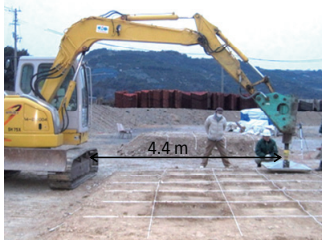
に分割し，静的初期荷重（振動を付与する直前の地盤への押付力 F）と衝撃付与時間（以降，締固め時間と呼ぶ）をパラメータとした締固めを行った。静的初期荷重については法肩から上段（Top），中段（Middle），下段（Low）を区分してそれぞれに 10，20，30 kN を載荷し，締固め時間については 3，6，9，15 秒とした。盛土を構成する土の基本的特性については，同盛土を研究対象としている前掲論文[2)]を参照されたい。

図−4 は，実験で得られた締固め時間と締固め度 Dc の関係を示したものである。なお，Dc 値は，施工後の各ブロックおいて行った RI 密度計測結果に基づいて算出したものである。この図から，提案する締固め手法は，初期荷重によらず，全てのケースにおいて振動開始後 6 秒までに Dc ＞ 90 %（道路土工などに適用される管理基準値）を達成



図−5 盛立平坦面と試験ブロック

(a)Nシリーズ（クローラから2.4 m） (b)Mシリーズ（クローラから3.4 m）



(c)Fシリーズ（クローラから4.4 m）

図−6 盛立平坦面実験におけるバックホウのアーム姿勢

していることがわかる。一方で，静的初期荷重が F = 20 kN および 30 kN のケースについては，締固め時間が長くなると逆に密度が低下するという結果となった。その原因については，土の粒子破砕や地盤の破壊による密度低下などが可能性として考えられるが，本実験においてはその特定までには至らなかった。

3.2 盛立平坦面を対象とした実験

本研究では，締固め効果をより詳細に調べるために，平坦盛土を対象とした締固め実験を行うことにした。試料をよく混合した上で，堅固な地表面上に平坦面を盛り立てることによって，含水比や初期密度の均質化が図れるとともに，撒き出し厚やバックホウのアーム姿勢の違いによる締固め効果を合理的に調べることができる。

盛土は，厚さ 30 cm と 60 cm の二面とし（**図−5**），締固め中心点がバックホウのクローラ位置から 2.4 m（Near），3.4 m（Middle），4.4 m（Far）となるアーム姿勢で実験を行った（**図−6**）。ここでも前節の実験と同様，ブロック毎に締固め時間をパラメータとした締固めを行った。ただし，本実験では，全てのブロックに対して静的初期荷重を F = 20

kN に統一した。実験に用いた土質試料は，前節の試験盛土と同じである。

図-7 に平坦盛土の実験によって得られた締固め時間と締固め度 Dc の関係を示す。30 cm 盛土の場合には，締固め時間 6 秒程度までは Dc 値が上昇し，その後は締固めが進行しないのに対して，60 cm 盛土の場合には，締固めを継続することによって多少ながらも若干の密度増大を期待できることが分かる。このことから，6 秒程度の締固め時間がひとつの目安になると言えそうである。

また，撒き出し厚に係らず，締固め装置を重機から最も離したケース（Far シリーズ）が締固め効果が高いことがわかる。アームをある程度伸ばした方が安定した押付力を確保できることを示唆するものであり，実施工時のノウハウとして留意すべき点となるだろう。

図-8 は，締固めによる層の圧縮率の変化を表わしたものである。縦軸は，締固め前後の表面高さを計測し，その差分（表面沈下量）を初期層厚で除した値（圧縮率）を示している。図中，一部信憑性の疑わしいプロット（点線囲み）が見られるものの，それを除けば，大概的には 3 秒程度経過すると，圧縮率は初期層厚に依らず同程度となることがうかがえる。このことは，60 cm 程度の厚い層に対しても締固め効果のあることを示唆するものと言える。

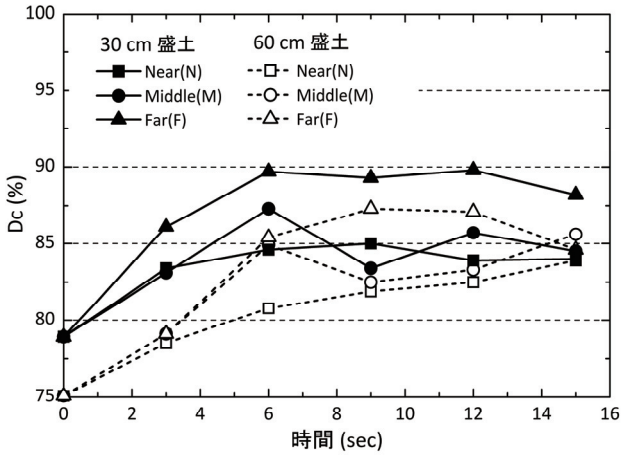


図-7 締固め度の経時変化（盛立平坦面）

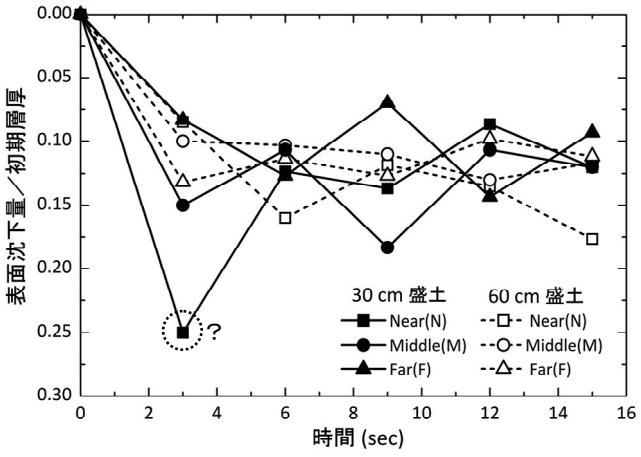


図-8 表面沈下量の経時変化（盛立平坦面）

また，**図-7** では Dc 値が収束するのに 6 秒程度の締固め時間が必要であったのに対して，**図-8** では 3 秒程度で沈下量の収束が見てとれる。**図-7** が RI 計測による表層付近のデータであるのに対して，**図-8** は層全体に対する圧縮率である。表層を十分に締固めるのに 6 秒程度を必要とする一方，層全体として見た場合，さらに短時間でもある程度の締固めが行えていることを示す結果と言える。

以上の実証実験により，提案手法には，実用化に足る施工性（装置の操作性）や締固め効果のあることが確認できた。今後は，衝撃振動の伝達特性や広範な土質条件に対するデータ蓄積を行って有用性の更なる検証を進めていきたい。

4. 締固め進行度のモニタリング手法の提案

4.1 モニタリングの原理

本研究では，上述した締固め装置に加え，締固めの進行をリアルタイムにモニタリングできる装置の開発に取り組んでいる。モニタリング装置の併用により，締固めのばらつきやオーバーコンパクションを防止するとともに，作業時間の短縮化等が可能になると考えている。

図-9 は，その原理を説明した概念図である。モニタリングのための計測ユニットは，締固めプレートの一部に開口部を設け，板バネに片持ち状態で連結された剛体をプレート下面に突出させる仕組みとなっている（**図-2**）。締固めが不十分な状態では地盤は軟らかく，突起剛体が地表面に埋没している状態になる。締固めの進行によって地盤の剛性が高まると，反力も大きくなり，板バネに連結された突起剛体に浮き上がりが生じるはずである。浮き上がり量 d と地盤反力（剛性）はフック

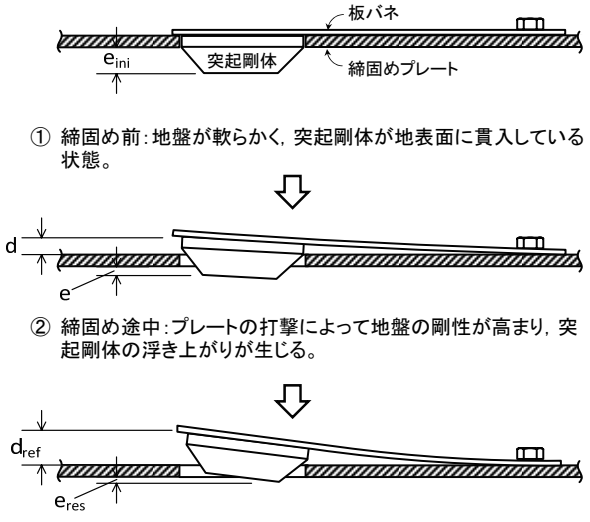


図-9 締固め進行のモニタリング原理

の法則に従うものとなるので, d を計測することによって地盤の剛性変化, 延いては Dc 変化を評価しようとするのが本手法のアイデアである。Dc 基準値をクリアする浮き上がり量 d_{ref} を予備施工によって予め求めておくことで，現場土に応じた締固め完了を示す指標を設定できるようになる。振動ローラー等のモニタリング手法として多用される加速度応答の周波数解析等の高度なデータ演算処理を必要とせず，浮き上がり量の計測だけで Dc をシンプルに評価できる点が特徴である。

4.2 実証実験とその結果

本研究では，**図-5(a)**と同様に 30 cm 盛立平坦面を造成し，板バネの枚数やバネ長を種々変化させて剛体の浮き上がり挙動を観測する実験（10 秒間の締固め）を行った。実験には，直径 50 mm と 100 mm の突起剛体（突起部長さ e_{ini} = 20 mm）を用い，浮き上がり量は板バネに貼付したひずみゲージによって計測した。

実測された浮き上がり応答の一例を**図-10** に示す。**図(a)**に示す通り，計測された生データには，締固めプレートの振動に起因するノイズが見られるが，これを移動平均処理（前後の値による平滑化）することにより突起剛体の平均的挙動を抽出することができる（**図(b)**）。この図から，締固め開始直後から剛体が浮き上がり，やがて落ち着く様子が見て取れる。また，直径 100 mm の剛体を利用した場合の浮き上がり量は直径 50 mm のそれに比べて顕著に表れることが分かる。これら突起剛体の応答と実際の締固め度の経時変化の相関性を**図-11** に示す。この図の縦軸は，**図-10(b)**における d 値ならびに**図-7** の Dc 値の最大値がそれぞれ 1 となるように正規化したものである。この図から，突起剛体の浮き上がり変化と Dc の変化は大概的に一致していることがうかがえ，このことから，浮き上がり量 d のモニタリングによって締固め度の変化を評価できる可能性のあることが分かる。さらに，先に述べたとおり，突起剛体の浮き上がり量 d は，地盤の剛性に比例するはずである。よって，板バネのバネ定数を検定しておくことで，d から地盤の剛性（反力係数）の評価も行える可能性がある。ただし，このような力学的地盤パラメータを同定しようとする場合には，突起剛体の動的な運動の影響について詳しく調べる必要があるだろう。

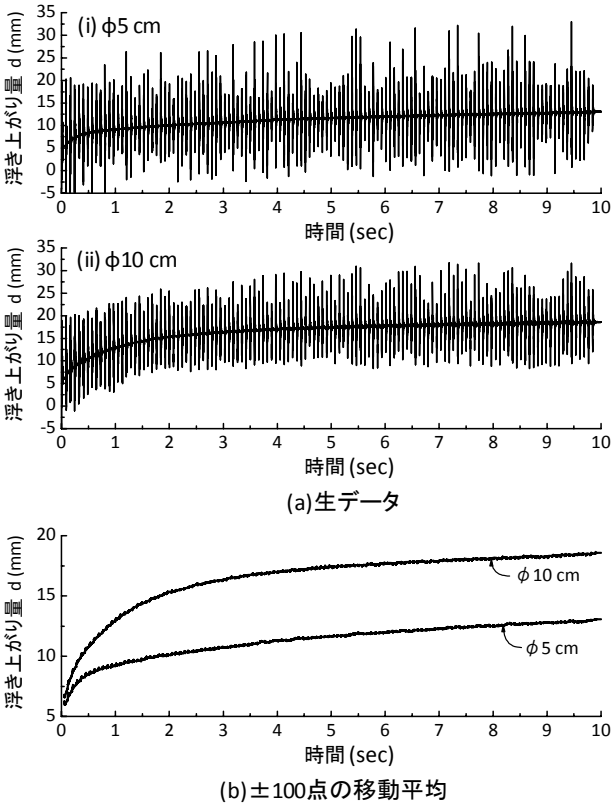


図-10 板バネの応答と移動平均処理によるノイズ除去

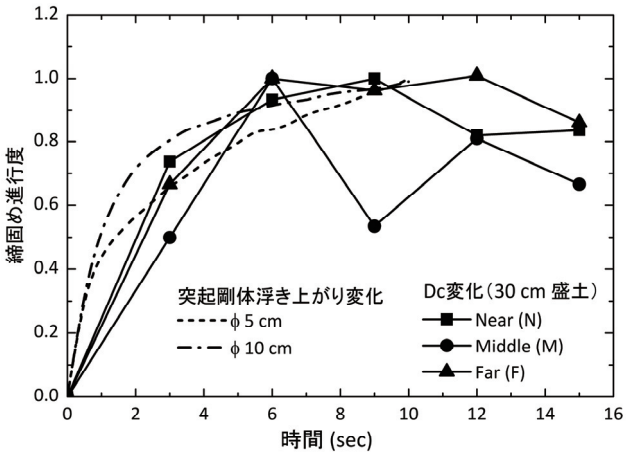


図-11 突起剛体の浮き上がりと締固め度の相関性

5. おわりに

本研究では，法面等を簡便かつ効率的に締固めることのできる技術の提案を目指して，油圧ブレーカの打撃エネルギーを利用した締固め装置および締固めの進行をリアルタイムに把握できるモニタリング装置を開発した。本実験では，任意の固定ポイントに対する実証実験を実施し，基本的な施工性や締固め効果，モニタリング手法の有用性を示すことができた。今後は，面的な連続施工の実現やモニタリング手法の IT 化など，本手法の実用化・高度化を目指した研究を進める予定である。

参考文献

1) 国土交通省HP：施工技術の動向－法面工－, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/kensetsusekou/sekou/doukou/PDF/houmen01_07a.pdf.
2) 安福規之，谷山　充，小林泰三：締固め管理手法に基づくのり面の品質評価とその現状, 平成24年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集，2012（前掲論文）

24. 打撃破壊方式による岩盤切断機（インパクトカッター）の開発

呉工業高等専門学校　　○ 重松　尚久
（株）松浦建設　　松浦　一正
（株）スターロイ　　小田　登

１．はじめに

下水道工事などの床掘り中に一枚岩が出現し、取り除く必要のある場合、現在はブレーカーを用いて小分けにする方法がとられる場合が多い。しかし、岩盤の強度が大きいと、ブレーカーでは時間・コストがかかりすぎるため、岩盤を効率的に取り除く技術の開発が望まれている。

一般に、岩石の引張り強度は、圧縮強度の十数分の一程度である。図-1 に岩盤の曲げ破壊のメカニズムを示す。この方法は、岩石は破壊形態によってその強度が著しく異なる、という物理的特性を積極的に利用したもので、多くの亀裂を発生させて岩盤の連続性を遮断し、多数の自由面を形成することで、より小さな力で破壊することができる。これまでの研究により供試体に安山岩を用いた端面掘削の実験では、平面掘削に対し掘削効率が 10 倍になる（単位掘削土量当たりの回転仕事量である比エネルギーは、1/10 に減少する）[1] という結果が得られている。このようなことを踏まえて、筆者らは、硬質岩やコンクリート供試体における岩盤剥離掘削技術の基礎的な研究 [2),3)]を行っており、本技術の有効性は実証されている。

工場などで行う岩石切断機にはダイヤモンドカッターが用いられることが多い。しかしながら、土木現場などにおいては切断対象物に作用する押しつけ力を適度な状態に維持する必要があり、切断速度に合わせた高度な操作技術が要求されるため、使用が難しく一般的に普及するに至ってない。

そこで、アスファルト切断時に用いるダイヤモンドカッターのような円盤状のカッターに削岩機のビット原理（ボタンビット（写真-1））を適用した新しい方式を提案する。本方式は、切削方式とは違い、ボタンビットと同様の打撃破壊により岩石を破砕していく方式であり、ダイヤモンドカッターと比して、耐摩耗性に優れている。また、図-2 に示すように、既存のバックホウなどに取り付けて使用でき、利便性が高い。今回提案する岩盤切断機は、削岩機のビットによる岩盤の破砕メカニズムを回転刃に応用し、岩盤などの対象物を破砕切断し、多くの自由面を増やし、引っ張り破壊により対象物をブロック状に削孔する全く新たな

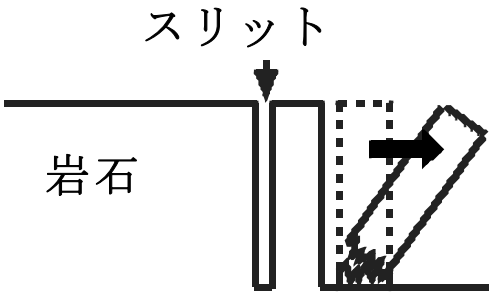


図-1　岩盤の曲げ破壊のメカニズム

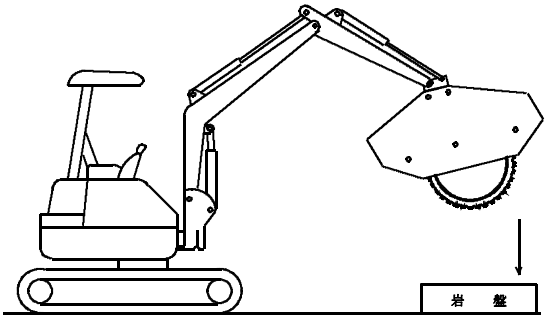


図-2　バックホウのアタッチメントとしての使用例

写真-1　ボタンビット

掘削方式となり、掘削効率が向上し、省エネ、低コストの掘削が可能となる。また、対象物をブロック状に切り出すことができるため、岩盤などは建設用材料として再資源化が可能となる。市街地におけるビル解体においては、コンクリートをブロック状に切り取り、郊外で破砕を行うことで、生活環境に与える影響を少なくできる新しい技術となり得る可能性がある。

ボタンビットを円盤の外周に配置し、回転と同時に打撃を与えることによって岩盤を破壊しながら切断していく方式を採用したアタッチメントをインパクトカッターと命名した。本論文では、本工法を用いた岩盤切削機（インパクトカッター）の性能について報告を行う。

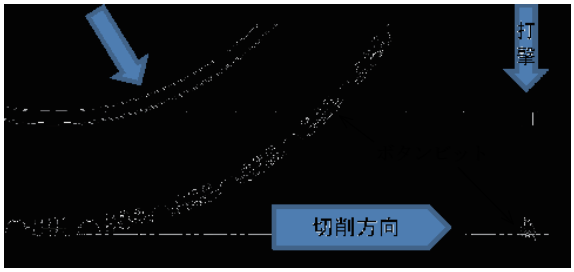


図-3　切削刃の概略図

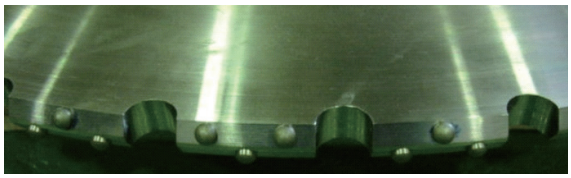


写真-1　切削刃

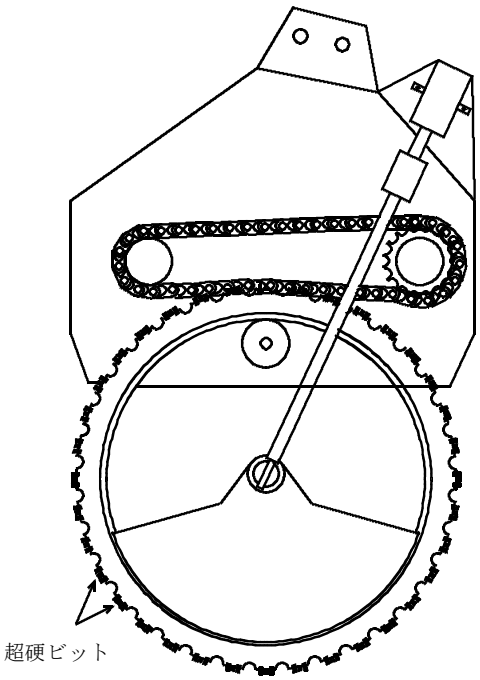


図-4　リングソー付き切削装置の概略図

２．切削装置の概略

図-3 に切削刃の概略図を、写真-1 に切削刃を示す。掘削刃は直径 1,050mm、厚さ 22mm で、超硬ビット（ボタンビット）を 1 ピースあたり 3 個配置した 36 ピースで構成される。図-4 にリングソー付き切削装置の概略図を示す。本切断装置は、このリングソーに強い振動を与えながら回転させ、岩盤、石材、コンクリート等を破砕し、破砕した部分をはじき飛ばしながら切断することにより、容易に高速切断を行うことが可能にした。この切断装置は、リングソーの支点中心が定まりにくい構造のため、リングソーが振動しやすいという特性を積極的に利用したもので、振動を防止するのではなく、衝撃振動力を積極的に付与することで切断性能の向上をはかるようにしている[4),5)]。つまり、昔から行われているノミで岩盤を削ることを連続的に行っていくことになる。

また、本装置をバックホウ等のショベル系掘削機のアタッチメントとして取り付けて使用することで、その操作を容易に行うことができる。写真-2 にインパクトカッター（試作機）の全景を示す。

３．切削実験

3.1　供試岩盤

広島県産花崗岩のブロック（一軸圧縮強度 200MPa,シュミット値 70）を供試体とし、本工法を用いた岩盤切削機（インパクトカッター）の性能評価を行った。

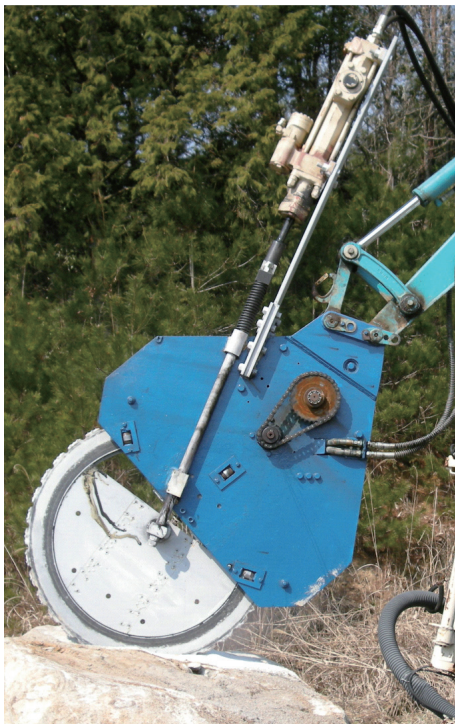


写真-2　インパクトカッター（試作機）の全景

3.2　油圧ドリフター

ヤマモトロックマシン株式会社製の油圧ドリフター（YH-55）を用いた。本油圧ドリフターの基本性能[6]は質量 140kg、全長 950mm、打撃数 3,000min^{-1}、回転トルク 200N-m、打撃用作動油圧 13.7MPa、回転用作動油圧 13.7MPa、シャンク径 40mm、打撃力 265N・m である。

3.3　実験方法

写真-3 にインパクトカッターの切削状況を示す。カッター回転数は 35 回転/min（周速（外周）112m/min）で実験を行った。また、騒音はリオン社製普通騒音計（NL-21）、振動はリオン社製騒音レベル計（VM-52A）を使用して、0, 10, 15m の地点で測定した。

写真-3　切削状況

3.4　実験結果と考察

(1)　切削性能

深さ 10cm、掘削長 1m の掘削に要した時間は 5.2min となり、切削速度は 0.19m/min となった。例えば、床掘り中に油圧ブレーカーでは切削が出来ない一軸圧縮強度 200MPa 以上の岩盤に対して、60cm の深さで 50cm 間隔のスリットを入れて、ブレーカーで折っていくと、時間あたり 3.6m^3 の切削が可能となる。さらに、対象物をブロック状に切り取ることができるために、石材などは再資源化ができ、生活環境に与える影響を少なく出来る。

表-1 各地点における騒音・振動の値

距離(m)	最大騒音(dB)	最大振動(dB)
0	126	―
10	111	75
15	106	66

表-2　岩盤掘削方法による単価比較　（1,000m^{3}当り）

			1m^{3}あたりの単価	価格(円)
火薬併用ﾘｯﾊﾟ掘削			1,842	1,842,000
	残土処理			4,554,000
		ﾀﾞﾝﾌﾟﾄﾗｯｸ運搬(10t積)	1,554	1,554,000
		発生土受入費･処分費 破砕岩(硬岩)	3,000	3,000,000
	合計			**6,396,000**
大型ブレーカ掘削			4,351	4,351,000
	残土処理			4,554,000
		ﾀﾞﾝﾌﾟﾄﾗｯｸ運搬(10t積)	1,554	1,554,000
		発生土受入費･処分費 破砕岩(硬岩)	3,000	3,000,000
	合計			**8,905,000**
割岩工法（セリ矢工法）			6,112	6,112,000
	残土処理			4,554,000
		ﾀﾞﾝﾌﾟﾄﾗｯｸ運搬(10t積)	1,554	1,554,000
		発生土受入費･処分費 破砕岩(硬岩)	3,000	3,000,000
	合計			**10,666,000**

※ダンプトラックの運搬費は距離10kmを見込んだ単価
※破砕岩の処分費は広島県内の処分場の標準的な単価
※積込費は計上していない（何れの作業にも必要）

(2)　騒音・振動

表-1に地点における騒音振動の値を示す。油圧ドリフターの騒音は126dBあるため、市街地での使用は制限される。騒音発生源に対して、防音カバーを施し騒音を低減し、工事現場より15m離れた地点で85dBを目指す必要がある。振動に関しては対象の地盤により伝わり方が異なってくるため、様々な場所で測定を行い、低振動化の対策が必要と思われる。

(3)　粉塵

写真-3の切削状況から分かるように、切削に伴う粉塵が発生している。今回の実験は乾式で行ってため、今後は何らかの粉塵防止対策が必要であると思われる。

(4)　くり粉

溝にたまったくり粉のうえを打撃しているため効率が悪い。くり粉除去の対策が必要であると思われる。

(5)　経済性

表-2に盤掘削方法による単価比較を示す。岩盤切断機（インパクトカッター）を用いて、切り出した岩石を擁壁資材として現場内利用をする場合は、現場内の輸送費を考慮して、1m^{3}あたり6,000円以下になれば火薬併用リッパー工法よりも経済的となる。

４．まとめ

超硬ビット付きリングソーと油圧ドリフターの組み合わせたアタッチメントを製作し、バックホウに取り付け、その操作を容易に行うことで、硬質岩盤などを容易に高速切断することができるリングソー付き切断装置の開発を行い、性能評価実験を行った。その結果、現在行われている他の工法よりも、作業速度と経済性の両面で、優位な工法になり得る可能性があることが分かった。

５．今後の課題と展望

現在までに削岩機理論を回転刃で実証した結果、推定できる岩盤切断機の基本性能は、切断幅22mm、切断深さ600mm、一軸圧縮強度200MPa以上の岩石も切断可能であることが判明した。

写真-4,5は現在開発中の試作機である。本報で示した基礎実験を元にスーケールアップを行った。掘削刃は直径1,180mm、幅25mmに変更し、油圧ドリフターの打撃力を約30%上昇したものに変更した。今後はこの試作機を用いて性能評価実験を行っていく予定である。

写真-4　開発中の試作機

写真-5　バックホウに取り付けた開発中の試作機

参考文献

1) 室達朗，重松尚久，河野幸一，作原陽一：変位制御型端面掘削方式による軟質岩盤に対応する深礎掘削機の性能実験,土木学会論文集Vol. 62 (2006) , No. 2, pp.285-295, 2006.
2) 重松尚久，花岡尚，室達朗：道路建設における環境に優しい硬質岩盤剥離掘削技術の開発：平成20年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集，pp.107-110,2008
3) 重松尚久，花岡尚，小田登：端面掘削方式によるバックホウのアタッチメントとしてのローラヘッダーの開発に関する基礎的研究：平成21年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集，pp.187-190，2009.
4) 特許第343887号
5) 特願第2007‐327782
6) ヤマモトロックマシンホームページ：http://www.yrm.co.jp/index2.html, 2012.8

25. 超低空頭場所打ち杭工法の開発と駅改良工事への現場導入

鉄建建設株式会社　○ 竹田　茂嗣
東日本旅客鉄道株式会社　和田　旭弘
東日本旅客鉄道株式会社　小池　明

1．はじめに

大都市圏の駅改良プロジェクトの場所打ち杭は，駅構内への進入路確保が困難なことや施工空間が狭隘であること，さらには大規模な防護工が必要であったり，線路閉鎖間合での作業が多くなるなどが工期や工費増大の一因となっている。

また，杭施工のためホーム上に仮囲いを設置するような場合は少なからずお客様の流動を阻害することがあり，さらにお客様が多い場合やホーム幅が非常に狭いなどの理由で仮囲いが設置できない場合等では，夜間のみ施工を行ったり，極小空間で人力施工をする等，非効率的な施工を行わざるを得なかった。

そこで，これらの問題点を解決するため，杭打ち機を設計から見直し，非常に小型でホーム下等でも施工可能な超低空頭場所打ち杭工法（コンパクトリバース JET-18 タイプ）を開発した。

本稿では，開発の概要と，本工法の特長である軽量・コンパクトを有効に利用した現場導入事例について，報告するものである。

なお，本開発は東日本旅客鉄道㈱・鉄建建設㈱・㈱東亜利根ボーリングの共同開発によるものである。

2．開発の概要

2.1　杭打ち機の要求性能

ホーム下のような狭隘な空間でも作業性を落とすことなく施工可能な杭打ち機を開発することで，ホーム上の仮囲いを縮小，もしくは不要とし，お客様にご迷惑をおかけすることのない，安全安心な場所打ち杭工法を提供することを目指した。要求性能を，**表-1**に示す。

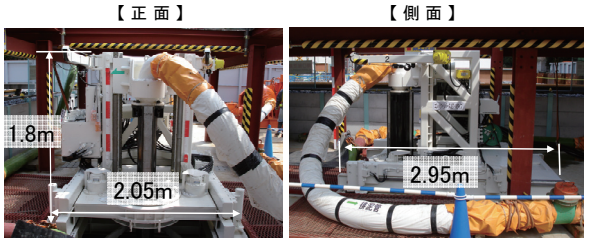
2.2　杭打ち機の仕様

(1)　杭打ち機の仕様

杭打ち機の仕様は，**図-1**に示すとおり，高さ 1.8m と超低空頭仕様となっており，加えて平面的な大きさも 2.05m×2.95m と既往工法の杭打ち機と比較して，大幅に小型化を図った。この杭打ち機をホーム下に配置した場合の想定図を**図-2** に示す。

表-1　杭打ち機の要求性能

項目	要　求　性　能
空頭	簡易な土留め等を用いてホーム下で確保できる作業空間（H=2.0m）で掘削可能であること。
杭径	大都市近郊プロジェクトで想定される最大杭径（φ3.0m）に適応可能なこと。



機械名称	コンパクトリバースJET-18タイプ
形式	ターンテーブル式リバースサキュレーションドリル
穿孔能力	深度50m，孔径800～3000mm
原動機	油圧ユニット用，30KW，4P
スピンドル回転数	LOW　7.5rpm，HIGH　15rpm
スピンドルトルク	LOW　3000kg-m　HIGH　1500kg-m
スピンドル内径	200mm(8B)
フィードストローク	1100mm
フィードロード	MAX.10000kg　（上昇，下降）
フィードスピード	0～6m/min（急速フィード機能付き）
適用ロッド	200mm(8B) x L 1000mm
質量(掘削機本体)	約4.0ton
（油圧ユニット）	約1.1ton　（作動油230Ｌ含む）

図-1　杭打ち機の仕様

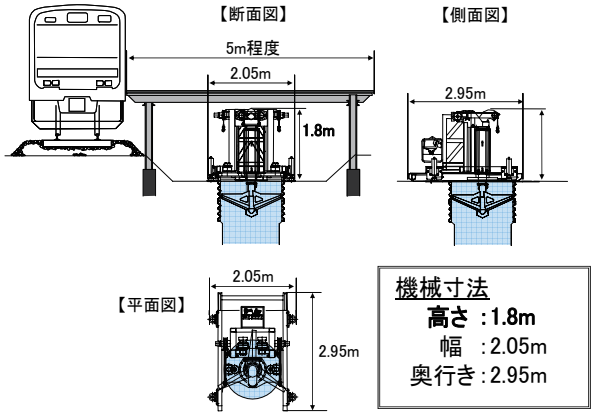


図-2　杭打ち機配置想定図

(2)　超低空頭化の詳細

本工法において，超低空頭化（機械高さ 1.8m）を実現するため，駆動方式を大きく変更した。既往工法の杭打ち機（TBH-8）では，駆動モーターをロッド上部に配置するトップドライブ方式が主流であるが，本工法においては杭打ち機ベースフレーム部に駆動部を配置したターンテーブル方式を採用，駆動モーターをロッド側部に２台配置した。（**図-3** 参照）

これにより超低空頭であってもフィードストロークを 1.1m 確保でき，また軽量小型であっても気既往工法の約 1.7 倍である 3000kg･m の掘削トルクを装備することができた。

ロッドはターンテーブルに取付けたブッシュの凹部に噛み合わせるよう全長にわたって凸部のある特殊ケリーロッドを開発した。（**図-4** 参照）なお，掘削時にはこのブッシュ部分により回転をロッドに与えながら，下方へ凸部をスライドさせる。ロッドの接続作業では，ターンテーブルと同じ高さでボルト締め込み作業が必要となり，フランジ下方よりボルトを差込むことが困難となるため，あらかじめボルトをケリーロッドに取付けた。（**図-5** 参照）

さらに，ロッド接続時には，マストを移動させる（**図-6** 参照）ことで，ストローク余裕のない状況でも，良好な作業性を確保した。

以上のような工夫により，既往工法の約 4 割程度の大きさの超低空頭機を開発することができた。（**図-7** 参照）

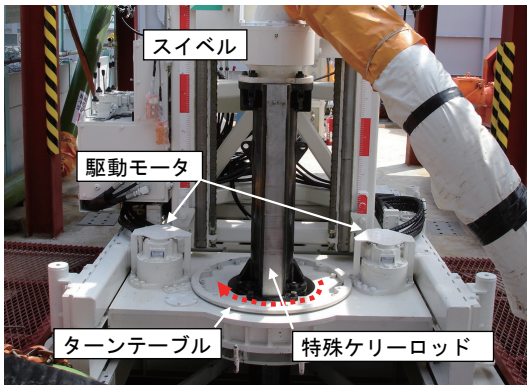


図-3　駆動方式説明図

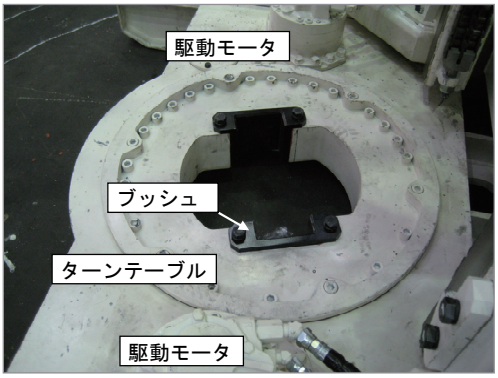


図-4　ターンテーブル詳細図

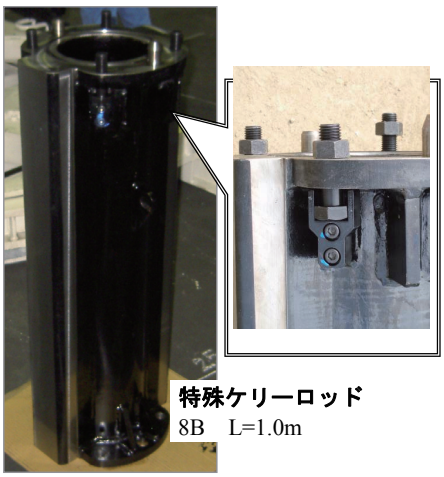


図-5　ケリーロッド詳細図

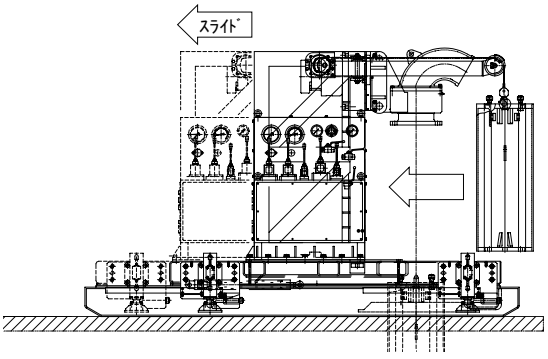


図-6　マストの移動

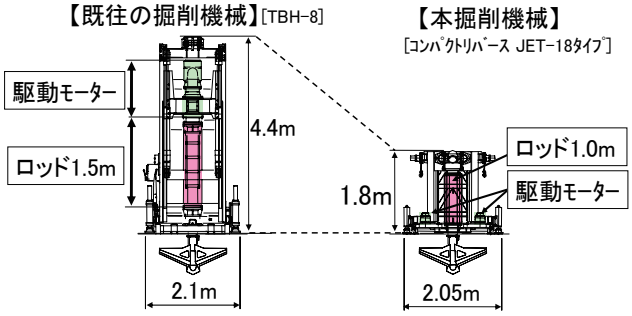


図-7　機械高さとの比較

表-2　試験施工の概要

試験施工①	
	削孔径：φ2500 削孔長：Ｌ＝17m 実機使用した公開試験。 模擬軌道･模擬ホームを設置し，ホーム下施工が可能なことを実証。
試験施工②	
	削孔径：φ3000 削孔長：Ｌ＝35.7m 盛土ホーム区間において，最小限の仮ホーム・仮囲いを再現し，その条件下で，大口径・長尺掘削が可能なことを実証。

３．試験施工

現場導入に先立ち，試験施工を**表-2** のとおり実施したが，狭隘な施工条件を再現した試験施工では，良好な掘削性能と施工性を確認できた。

４．現場導入事例

4.1　施工概要

ここでは，ＪＲ大崎駅構内の南乗換えこ線橋の拡幅工事（以下，本工事と称す）への現場導入事例について報告する。対象となるこ線橋は，埼京線・湘南新宿ラインからの降車乗客の増加に伴い，南乗換えこ線橋及びホーム上の混雑がさけられないため，こ線橋の幅員を 4m から 8m に拡幅する工事であるが，当初より本工事では，工期短縮とコストの縮減を要請されており，その対応を求められていた。そこで，「超低空頭場所打ち杭工法」を適用することで，非常に小さな作業空間で施工できることにより，仮設工事の低減によるコスト縮減と工期短縮が見込まれた。

4.2 施工条件

図-8 にこ線橋側面図，**表-3** に施工条件を示す。

掘削地盤は，有楽町層を主体とした N 値が 0～10 以下のシルト層であり，支持層は最大礫径 80mm～200mm 程度の砂礫層である。

列車の建築限界を侵すことなくホーム内で掘削作業が可能であれば，夜間に貨物列車等が通過するような線路閉鎖時間外でも杭施工可能となるため，当初計画である TBH 工法の代表的な掘削機である TBH-8 と，開発した JET-18 を比較することとなった。

表-3　施工条件

ホーム構造		W=7.6m，桁下1.2m　桁式ホーム
仮囲い寸法		W=4.6m，L=12.8m
杭の諸元		φ1.1m×9本，L=12m φ1.2m×1本，L=10m
作業時間	軌道上搬入作業	線路閉鎖間　0:35～4:30（週2.5日程度） き電停止間合　1:00～4:00（　〃　）
	ホーム内作業	終電～初電間合　0:00～5:00 （ほぼ毎日作業可能）

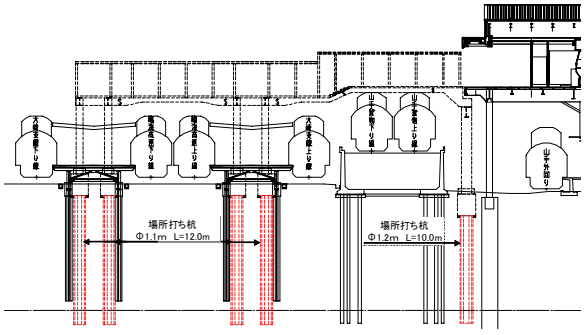


図-8　こ線橋側面図

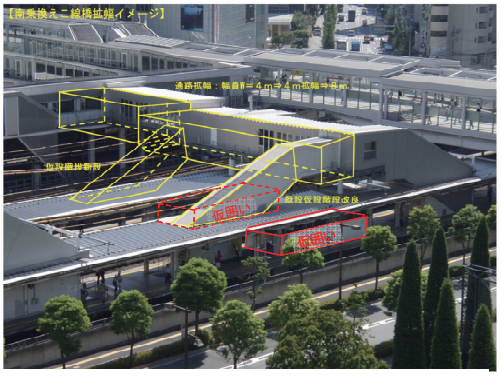


図-9 施工イメージ図

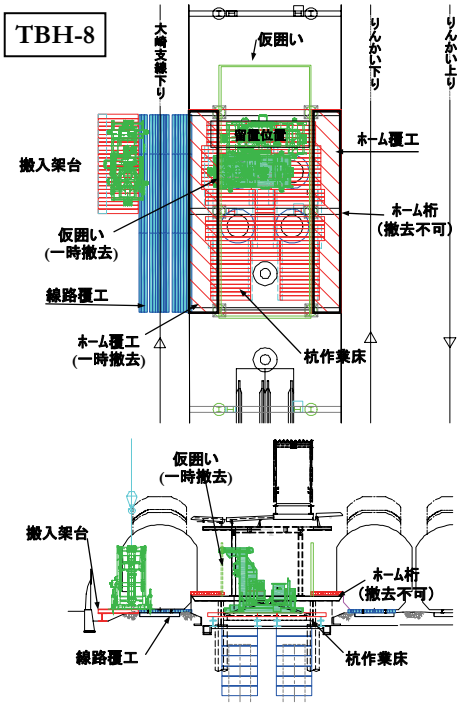


図-10　既往工法の施工図

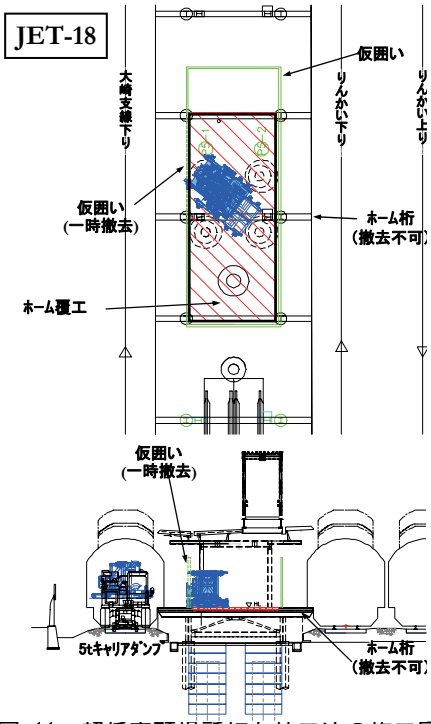


図-11　超低空頭場所打ち杭工法の施工図

4.3　工法の比較

TBH-8 と超低空頭場所打ち杭工法の JET-18 をそれぞれホームに配置した場合の施工図を**図-10，11** に，またその比較を**表-4** に示す。TBH-8 の場合，機械高さが高く，機械設置位置はホーム下となり，作業箇所の既存ホームを全面仮設化する必要がある。さらに，杭位置と機械位置，仮設範囲等を検討したところ，仮囲いおよび軌陸車による覆工板，受桁の撤去・復旧を杭掘削時はほぼ毎夜繰り返さなければならない。また，線路上を使用し，移動を繰り返すため，線路覆工が必要となってくる。一方，JET-18 の場合は，機械据付はホーム上で可能であり，既存ホームの仮受工は中央部の狭小面積のみとなる。また，ホーム端部や線路上作業が低減され作業時間が多く確保できることから工期短縮とコスト縮減のみならず，列車運行やお客様へのリスク低減をも可能となった。

4.4　施工の状況

ホーム上での施工状況を**図-12，13** に示す。本工事では，杭位置はホーム中心ではなく，仮囲い下に位置しているため，作業時には仮囲いの撤去・復旧作業が伴ったが，最小の手間と時間で本作業に掛ることができた。

掘削機自体がコンパクトのため，狭隘な仮囲いの施工環境の中でも十分に施工性があり，掘削中は，マシン振れ，芯振れもなく継続して安定した掘削が確認できた。また掘削後に実施した孔壁測定も所定の鉛直精度を確保することができた。（**図-14**）当初，懸念されていた短尺の特殊ケリーロッドの接続，切り離し作業がサイクルに影響することはなく，軌道への影響もなかった。

5．まとめ

超低空頭場所打ち杭工法（コンパクトリバース JET-18）は，φ3.0m までの施工能力と，狭隘・低空頭な施工環境においては，非常にコンパクトで仮設備の低減等が可能となる特長を持ち合わせていることを確認できてた。

現在進行中のプロジェクトでは，駅ホーム内ではほとんど実績のない φ3.0m の大口径の場所打ち杭を施工中であるが，杭の大口径化により，万が一孔壁のバランスが崩れた際の影響は非常に大きなものとなる。そのため同プロジェクトでは，孔壁の安定を保つため孔内水位監視システムを新たに開発，孔内水位を細やかに制御し安定を保つと共に，緊急時の発報を自動化し，安全性を向上させている。

今後も，掘削工法だけでなく，周辺技術の改良・新規開発等により，さらなる安全性向上とコストダウンを図る所存である。

参考文献

1) 和田・池本ら：超低空頭場所打ち杭工法の開発(1)，土木学会第66回年次学術講演会，Ⅳ-333，pp.665～666, 2011
2) 小野・小池ら：超低空頭場所打ち杭工法の開発(2)，土木学会第66回年次学術講演会，Ⅳ-334，pp.667～668, 2011

表-4　工法比較

	JET-18	TBH-8
仮設工	ホーム**中央部のみ撤去** 仮覆工・仮囲い	ホーム**全幅撤去** 端部仮覆工・仮囲い **場所打ち杭作業床** **軌道部木製覆工**
掘削時	終電～初電間合い作業 **（ほぼ毎日作業可能）** 仮囲い一部撤去	線路閉鎖間合い作業 **（週2.5日程度）** 仮囲い・**ホーム覆工撤去**
移動時	仮囲い内移動 （ホーム間移動は線閉作業）	**線路閉鎖間合い作業** **仮囲い・ホーム覆工撤去** **必要に応じて木製覆工上移動**
評価	**工期・コスト共に優れる**	仮設工事が多い，作業可能時間が短いなど不利

図-12　JET-18 搬入状況

図-13　杭施工状況

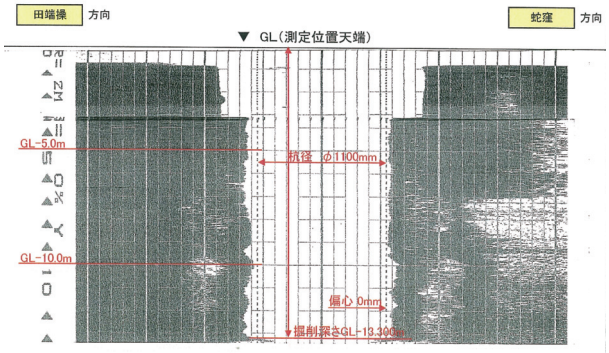


図-14　孔壁測定結果

26. 地下ダム施工における地盤評価装置の開発

大成建設株式会社 技術センター ○近藤 高弘

１．はじめに

地下ダムは，離島などの水資源確保のため地中に遮水性の壁を連続的に設けることで地下水を堰き止め貯水する工事である。南の離島では珊瑚が厚く堆積した琉球石灰層の下に不透水層の基盤として粘板岩などが存在している。地中連続壁の施工にあたり琉球石灰層の下にある不透水基盤層まで確実に到達させる必要がある。

削孔機先端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削孔機の電流値の変化などを施工経験に基づいて基盤層の判定が行われてきた。そこで削孔時に発生する掘削振動を計測し，掘削振動波形を解析して比較評価することで未経験者でも客観的に評価ができる新たな評価方法の開発と地盤評価装置の開発を行った。

２．地下ダム施工データの収集

地下ダム施工の削孔手順を図-1 に示す。施工手順はケーシング削孔→先行削孔→三軸削孔の順で削孔が行なわれる。先行削孔は１軸のオーガーで所定深度の基盤層まで削孔を行う。先行削孔機はドーナッツオーガーを使用する。新たな評価方法の開発のためのデータ収集として，先行削孔時に各種の削孔時データを収集する事にした。

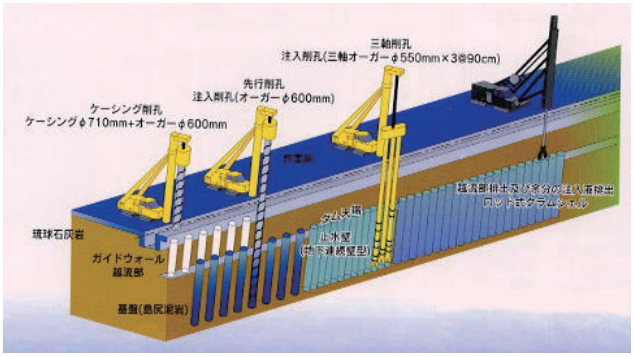


図-1　地下ダムの削孔手順の概要

当初は，何が基盤判定に有効な計測項目なのかが不明であったので，従来の削孔時の電流値を含めて，三軸振動加速度，削孔時の音，削孔ロッド回転，削孔荷重などを削孔時波形データとしてデータロガで収集した。

削孔か所は，ボーリング柱状図の調査孔２か所とその近傍の３か所の合計 5 か所の削孔データを収集した。

削孔時の振動および削孔音のセンサ設置場所として削孔機ビット先端で収集する事が理想であるが，削孔ロッドの加工や実用時のシステム導入のし易さを考慮して簡易な場所にセンサを設置して判定することを考えた。

センサ取付け位置は，掘削時の振動は削孔スクリュー・ロッドを伝搬して地上の削孔機本体に伝わって来ると考え削孔機本体の減速機フランジ部に三軸振動加速度計とマイクを図-2 に示す位置に設置した。

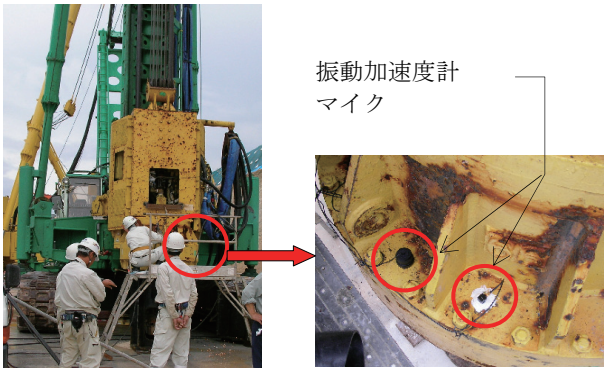


図-2　振動加速度計・マイク設置位置

削孔振動の解析周波数を 10KHz まで考慮して，サンプリングレートは 20KHz とした。

削孔データの収集は，沖縄県伊江地下ダム第二期建設工事において施工データ収集した。

図-3 に示すように，削孔時のセンサデータは 12ch 分を一旦データロガで収集した後に解析を行う事とした。収集した削孔データは約 100G の容量となった。

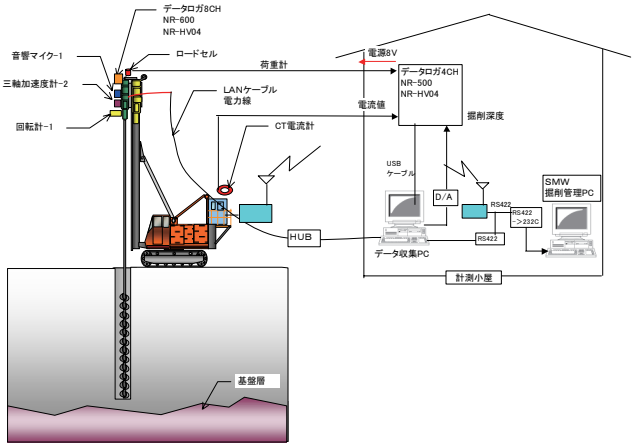


図-3　施工データ収集システム

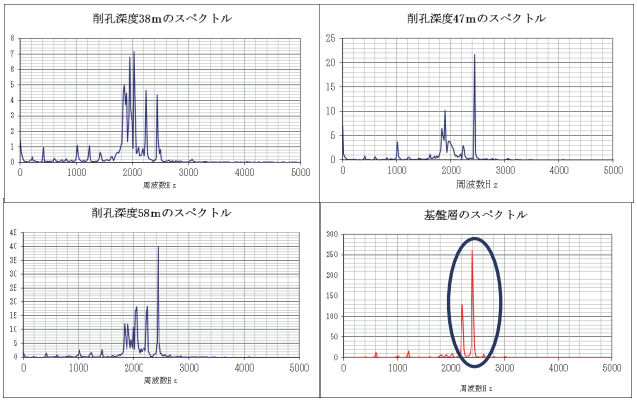


図-5　削孔深度別のスペクトルの変化

３．削孔データの分析

調査ボーリング孔のボーリング柱状図を参考にして，削孔深度毎に任意に波形データを抽出しスペクトル解析を行いその周波数の特徴を調べた。

まずは従来の判定方法による電流値の変化の特徴を把握しようと削孔ロッド回転や削孔電流値の解析を行った。その結果，基盤層到達時には回転のムラや電流値の変動などが大きくなりモータに大きな負荷が加わる事がスペクトル解析結果から理解できた。しかし波形解析からは特有のスペクトルを見つけ出す事は出来なかった。図-4 に示す。

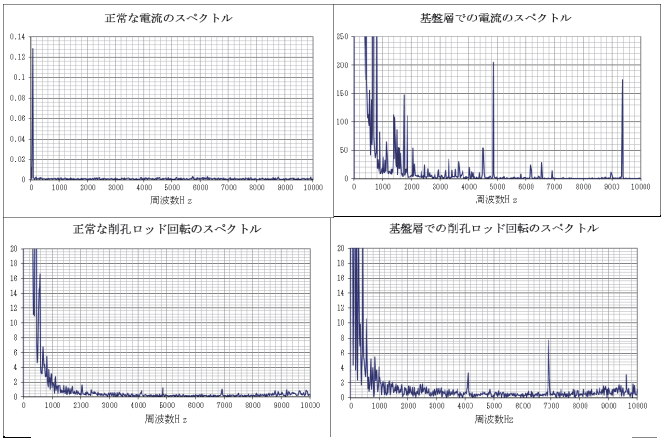


図-4　削孔電流・ロッド回転のスペクトル

振動加速度データと削孔音データは基盤層到達時に特徴的なスペクトルを示す事が波形解析結果からわかった。そこで，この基盤層削孔時の解析データを基にした教師データを作り，削孔時の波形データをスペクトル解析して教師データと比較する事で基盤層到達の判定が可能になると考えた。

しかし波形解析に必要なデータサンプリング時間はほんの数十分の一秒程の微小な時間である。実施工では１つの先行削孔には数時間を要しているので削孔深度全体のスペクトルを把握し確認する必要があった。

そこで図-6 に示す削孔完了までの全データを１秒間隔でスペクトル解析した。スペクトルは各周波数成分に対する強度を表示するもので，施工全体のスペクトルを把握する方法として，解析したスペクトルの最大値から最小値を赤～緑色の色の変化として表現する事で１本の直線上の色の変化として表現することで，全体のスペクトルを平面的に色の変化として把握する事ができた。この事により基盤層には特徴的なスペクトルが存在する事が判明した。

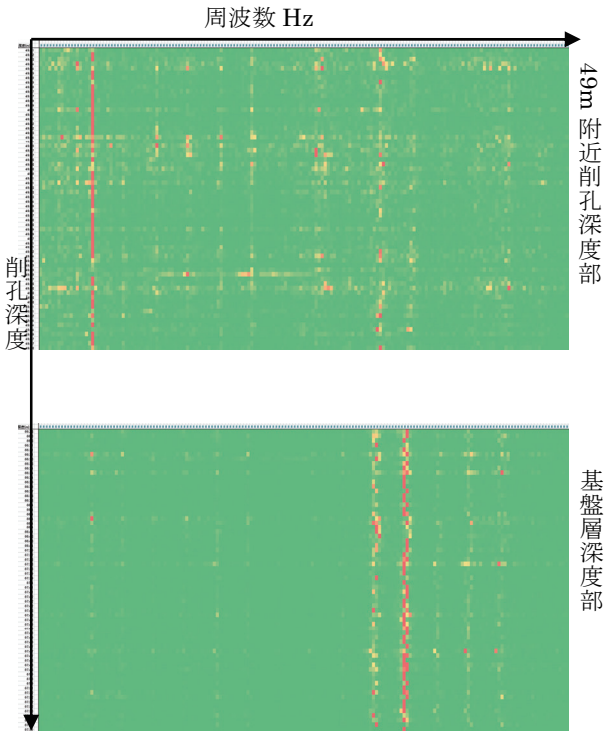


図-6　可視化した削孔深度毎のスペクトル

削孔データの比較に用いる教師データは，その判定精度を上げるためにより特徴的なスペクトルとして加工した。図-5 の基盤層のスペクトルと比較して，単純平均とせずノイズスペクトルと思われる周波数帯を意図的に削除した。

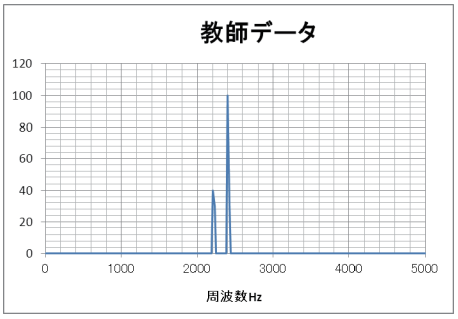


図-7　教師データのスペクトル

４．基盤層の評価方法

基盤層の判定は，削孔時波形データをリアルタイムにスペクトル解析し，教師データとの比較を行いその類似度合いを求める事で可能になる。

こ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。

今回の伊江地下ダム第二期建設工事の削孔データからは相関係数0.5以上であれば基盤層と判定される事を確認した。

相関係数は，２組の数値からなるデータ列

$$(x \quad y) = \{(x_i \quad y_i)\}(i = 1,2,3...n) \quad (1)$$

があたえられたとき，相関係数は以下のように求める。

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

ここで図-7の教師データと，現場で収集した全削孔深度の振動加速度データを1秒間隔で相関係数を求めたものを図-8に示す。この図-8では削孔深度のいたる個所で教師データと類似度の高い相関結果が表れている。瞬間的に教師データに類似する事は削孔する地層が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。

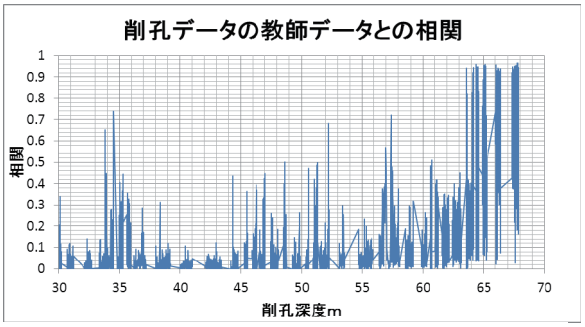


図-8　削孔深度における振動加速度の相関

そこで相関結果の移動平均処理を行い表示したものが図-9である。移動平均処理する事でより基盤層の判定が明瞭になり電流値の変化よりも明確に判断する事が可能になった。

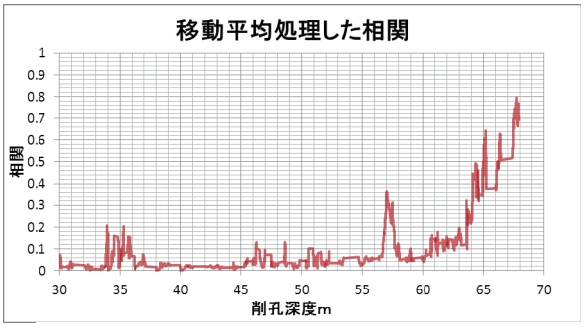


図-9　削孔深度相関の移動平均処理結果

この時の削孔機本体の電流値の変化を図-10に示す。従来は基盤層削孔時の電流変化を経験的に判断して基盤層到達を判断していた。この電流値判定では削孔機の吊荷負荷の状況により電流値が変化し電流値のしきい値からの判定が困難である。

本評価方法では吊荷負荷の影響は受けず客観的な評価が可能である。

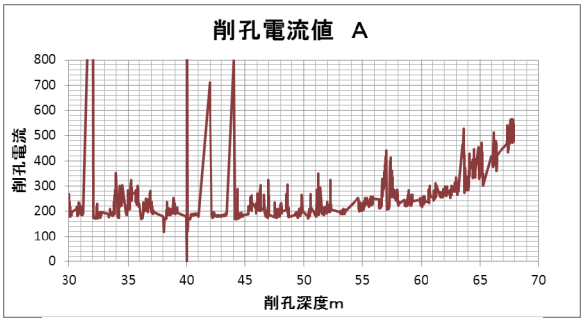


図-10　削孔機械の電流値の変化

５．地盤評価装置のシステム概要

波形解析および評価方法を実際の施工で実施する場合の具体的な手順を以下に示す。

(1).調査ボーリング孔の調査結果を参考にし，同一箇所を施工し削孔データを収集する。

(2).上記の基盤層の削孔データのスペクトル解析を行い，教師データを作成する。

(3).調査ボーリング孔または近傍で施工し削孔データをリアルタイムに波形解析し教師データと比較する。

(4).教師データと削孔スペクトル解析データの相関係数から基盤層を評価判定する。

(5).施工件数が増えた時点で再度教師データの最適化を行う。

以上の施工手順で運用する。

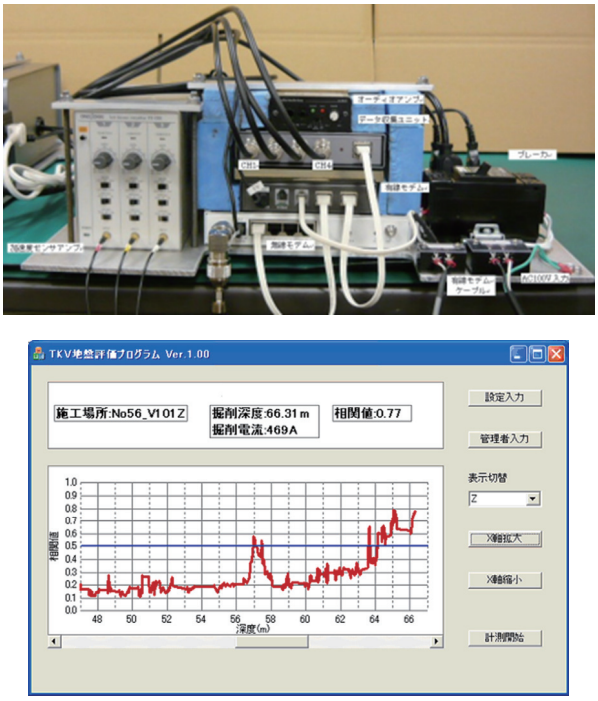


図-11　基盤評価装置と計測表示画面

開発した地盤評価装置は，三軸の振動加速度と削孔音入力のアナログ入力４ch，サンプリング周波数20KHzで波形データを計測する。地盤評価装置は削孔機本体に設置し削孔データをリアルタイムに有線で地盤評価PCに転送する。

地盤評価PCを設置する計測小屋までは，最大300ｍまで通信ケーブルを延ばす事ができ，測定データを高速転送できるベースバンドモデムを採用した。

地盤評価装置は教師データの作成や表示方法などの基本的な設定を入力すれば，後は削孔オペレータが表示画面（図-11）を確認しながら施工できる。

削孔データは地盤評価PCに保存され，再度教師データを変更した場合に新たな教師データでシミュレーションが行える。また削孔データから新たに教師データを作成する事が可能である。

６．おわりに

従来，地下ダム施工の基盤層への削孔到達の判定は，削孔時の電流値の変化を経験的に判定していた。開発した地盤評価装置は基盤層への到達をより的確に判定でき施工の信頼性を確保する技術と考える。今後，本技術の可能性として地下ダムの基盤層判定以外に一般の基礎杭施工における支持層の判定評価に利用できるように今後さらに改良や新たな解析手法を開発して行く所存である。

参考文献

1) 安部　透・石塚与志雄：ＳMW施工時の掘削音を用いた地層判別の現場試験，土木学会第55回年次学術講演会，Ⅲ-A281，平成12年

2) 沖縄総合事務局　農業農村整備ホームページ：主な工事，http://ogb.go.jp/nousui/nns/iejima/p4.htm

27. 積雪寒冷地における建設施工のﾊﾞｲｵﾃﾞｨｰｾﾞﾙ燃料適合性調査

(独)土木研究所寒地土木研究所○　平　伴斉
(独)土木研究所寒地土木研究所　片野　浩司
(独)土木研究所寒地土木研究所　山口　和哉

1．はじめに

現代社会は、18 世紀後半に始まった産業革命により発展し、物質面で豊かな生活をもたらした。これは、原油など大量な化石エネルギーの消費によって今日まで支えられてきている。

20 世紀後半に入り、大量生産などによってエネルギー需要がますます加速するなか、大量の CO_2 などの温室効果ガス排出が一因とされる地球規模での環境破壊が除々に進行し、国レベルでの対策が実施されている。

しかし近年、化石エネルギーを大量に必要とする自動車を始めとする運輸部門の温室効果ガス排出量は増加傾向にあるため、化石燃料を使用せず、CO_2 などの温室効果ガスを排出しないクリーンエネルギーや再生可能エネルギーの活用検討が必要となっている。

このような状況から、次期エネルギー候補の一つとして、バイオマスエネルギーが注目されている。バイオマスエネルギーは、カーボンニュートラルとされ、温室効果はゼロカウントであるが、積雪寒冷地におけるバイオディーゼル燃料使用時の出力や始動性などの知見が十分ではない。

そこで、本調査では、代替燃料としてのバイオディーゼル燃料について、1 台当たりの排気量の多い除雪車などの大型車両や乗用車を用いて冬期適合性調査を行い、積雪寒冷地における活用について検証した。

2．積雪寒冷地におけるバイオディーゼル燃料導入

2.1 バイオディーゼル燃料

バイオディーゼル燃料とは、植物・動物油脂を原材料と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ている。

国内のバイオディーゼル燃料は、植物油・動物油を原料とし、家庭や事業者より排出された天ぷら油などの廃油を回収し、バイオディーゼル燃料工場で精製されている。このため、一定の材料ではなく、色や材料の品質が異なっている。

精製方法は数多く存在するが、**図-１**に示す「アルカリ触媒法」が最も普及している。アルカリ触媒法とは、メタノールなどのアルコール類を触媒として反応させることによって、廃食油から流動性低下などの原因となるグリセリンを取り除き、油脂を脂肪酸メチルエステルという燃料に変換することでディーゼル機関用の燃料として使用可能となる。

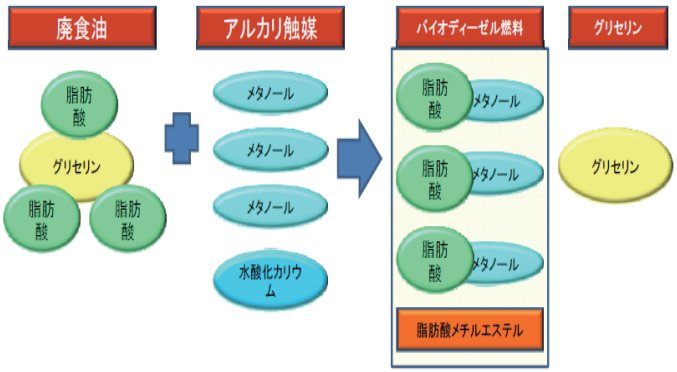


図-１　アルカリ触媒法（油脂のエステル反応）

2.2 バイオディーゼル燃料生産量

2009 年世界のバイオディーゼル燃料の生産量は 1662 万 kℓ[1] であるが、我が国の生産量は、0.86 万 kℓ[2] と少ない。

海外では、菜種・パーム・ナンヨウアブラキリなどを栽培しバイオディーゼル燃料として精製している。

しかし、日本のバイオディーゼルは、家庭や事業者より排出された天ぷら油などの廃油を回収後、バイオディーゼル燃料工場で精製されているものがほとんどである。

日本は廃油を用いるため生産量には限界がある。そのため、海外と精製量の違いが発生している。

2.3　調査方針

低温下でのバイオディーゼル燃料使用時には、流動性が悪化し、燃料フィルタなどの目詰まりに

よって、機関が始動不可能となる可能性がある。一方、除雪作業は深夜の作業がほとんどであり、低温下の始動や低温下での高負荷作業を繰り返し行うため、バイオディーゼル燃料使用時には悪条件となる。

本調査では、これらの問題に対して実際にバイオディーゼル燃料100%を除雪車などに用いた各種測定試験を行った。試験に使用した車両及びその諸元を**表-1**に示す。

表-2は、JIS軽油特3号と実際に使用したバイオディーゼル燃料を比較した結果である。

なお、JISK2390 はバイオディーゼル燃料を軽油に 5%混合することを前提したものであり、濃度混合する場合の品質を保証する規格ではない。

表-1　諸元表

	除雪トラック1	除雪トラック2	除雪ドーザ	乗用車
写真				
車両総重量	18750kg	23520kg	13660kg	2720kg
総排気量	16.99ℓ	21.20ℓ	6.48ℓ	2.83ℓ
長さ	1198cm	1000cm	780cm	461cm
幅	330cm	330cm	370cm	169cm
高さ	339cm	345cm	348cm	199cm
エンジンタイプ	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel
初年度登録	1993	1994	1991	1995
Max. Power	261kW	308kW	118kW	92kW
測定試験	・加速試験	・排出ガス計測試験 ・機関始動性試験 ・燃料消費量計測試験	・加速試験 ・牽引力試験	・出力・トルク計測試験

表-2　燃料比較表

分析項目	単位	JIS K2390	バイオディーゼル燃料	ＪＩＳ軽油特３号
エステル分	質量%	96.5以上	92.8	－
密度（１５℃）	g/cm3	0.860-0.900	0.8834	0.86以下
動粘度（４０℃）	mm2/s	3.5-5.0	4.576	1.7以上(30℃)
引火点（PMCC）	℃	120以上	163	45以上
硫黄分	質量%	0.0010以下	0.0003未満	0.001以下
残留炭素分（10%残油）	質量%	0.3以下	0.39	－
セタン価	－	51.0以上	58.8	45以上
水分	mg/kg	500以下	850	－
酸価	mgKOH/g	0.5以下	0.2	－
メタノール	質量%	0.2以下	0.01	－
モノグリセライド	質量%	0.8以下	0.412	－
ジグリセライド	質量%	0.2以下	0.136	－
トリグリセライド	質量%	0.2以下	0.058	－
遊離グリセリン	質量%	0.02以下	0.005未満	－
全グリセリン	質量%	0.25以下	0.131	－

① 動粘度は測定温度が異なるが、2.5 倍以上バイオディーゼル燃料が高い。低温時には軽油より硬くなるためエンジンの始動性が劣る

② バイオディーゼルの引火点が軽油の3.6倍高く常温で揮発しにくい

2.4　加速試験

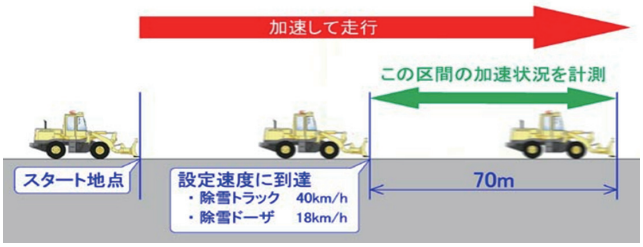
バイオディーゼル燃料を除雪車などに使用すると低出力などが原因により作業遅延が発生し、交通渋滞の原因になるおそれがある。そのため、走行時における出力特性調査として、軽油とバイオディーゼル燃料を用いた加速試験（**表-3、写真-1**）を実施し、基本特性の検証を行った。

試験方法は、**図-2** のとおり追越加速を想定し、スタート地点より加速を開始した車両が任意の設定速度に達した地点より 70m走行後地点までの速度・時間を計測し、加速度を算出した。

表-3　計測条件

車両	除雪ドーザ	除雪トラック
登録年度	H3	H5
試験日	12月16日	12月17日
気温	-1.3℃	5.6℃
路面状況	圧雪アイスバーン	ウエット
タイヤ	スパイク	スタッドレス
試験項目	時速18km～ 70m地点までの 追越し加速時間	時速40km～ 70m地点までの 追越し加速時間

写真-1　加速試験



$$a = (V - Vo) / t \qquad (1)$$

a　：加速度(m/s^2)

V　：70m 地点速度(km/h)

Vo：0m 地点速度(km/h)

t　：0m～70m に要した時間(s)

図-2　加速試験方法

図-3 から、除雪トラックの加速度は変わらないが、除雪ドーザの加速度は軽油よりも若干上回っていることを確認した。

また、除雪トラックの 70m地点速度では、軽油使用時 48.2km/h に対し、バイオディーゼル燃料は、軽油使用時とほぼ同等の速度であった。一方、除雪ドーザの 70m地点速度は、軽油使用時約 21.4km/h に対し、バイオディーゼル燃料の 70m地点速度が約 1～3km/h 上昇していることを確認した。

バイオディーゼル燃料使用時における加速性能は、軽油と比較し、同等以上であると判断できる。

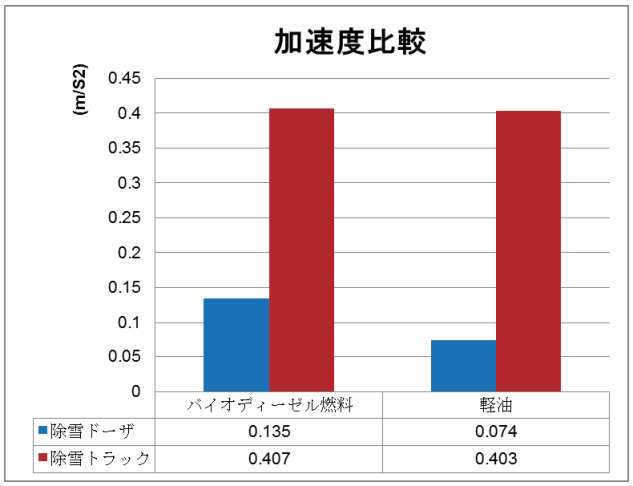


図-3　加速度比較

2.5　出力・トルク計測試験

実際の機関出力を確認するため、軽油とバイオディーゼル燃料を用いた出力・トルク計測試験を行った。機関出力は、道内に大型車対応シャシーダイナモメータがなかったため、乗用車による機関出力を計測した（**写真-2, 図-4**）。

この結果、30km/h 時における最大出力は、軽油 16.1PS（11.8kW）に対し、バイオディーゼル燃料の平均出力は、23.1PS（17.0kW）と 4 割程度高くなったことを確認した。

写真-2　出力・トルク計測

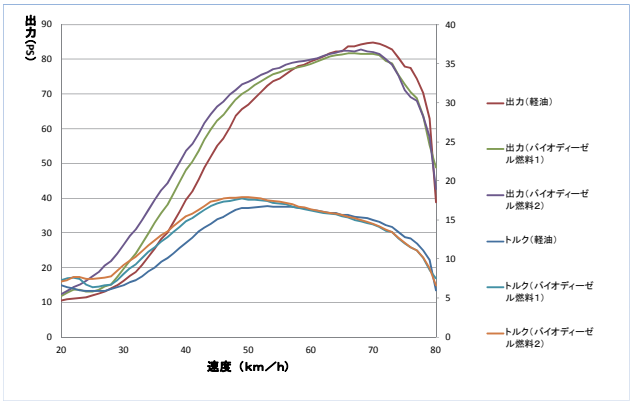


図-4　出力・トルク曲線

また、50km/h 台後半までは、バイオディーゼル燃料が軽油よりも高い値を示すが、その後の最大出力はバイオディーゼルの平均が 82.4PS（60.6kW）に対し、軽油が 84.9PS（62.4kW）と 3%下回る結果となった。

2.6　牽引力試験

除雪作業時における出力を確認するため、実際の除雪作業時における最大出力の影響について高負荷作業時を想定し、軽油とバイオディーゼル燃料を用いて牽引力試験を行った（**写真-3**）。

計測方法は、**図-5** のとおり地面に固定されたアンカーにワイヤーロープを掛け、ロードセルを介して、除雪ドーザにて牽引力計測を行った。

図-6 より、バイオディーゼル燃料は軽油に対して、牽引力が 1～2%高い数値を示した。

バイオディーゼル燃料の出力は、軽油と比較し、同等であるといえる。

写真-3　牽引力試験

図-5　牽引力試験概要図

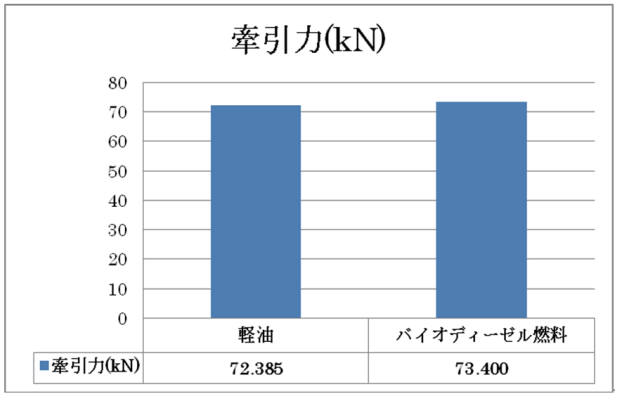


図-6　牽引力試験結果

2.7　排出ガス計測試験

除雪トラックと除雪ドーザの排出ガスが環境に及ぼす影響や機関燃焼状況を確認するため、バイオディーゼル燃料における排出ガスを計測し成分分析を行った（**写真-4**）。

その結果、軽油と比較し以下のことが分かった。

① 除雪トラック、除雪ドーザとも一酸化炭素（CO）は減少する（**図-7**）。

② 二酸化炭素（CO_2）は若干増加する（**図－8**）。

③ 酸素（O_2）は若干減少する。

④ ①～③によりバイオディーゼル燃料が軽油よりも効率良く燃焼している。

⑤ 一酸化窒素（NO）は、除雪ドーザでは若干減少するが、除雪トラックでは増加する。これは、機械の個体差が影響していることが考えられる（**図-9**）。

写真-4　排出ガス計測

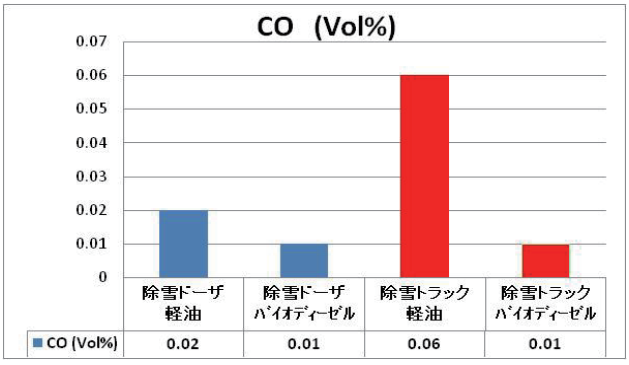


図-7　排出ガス CO 計測結果

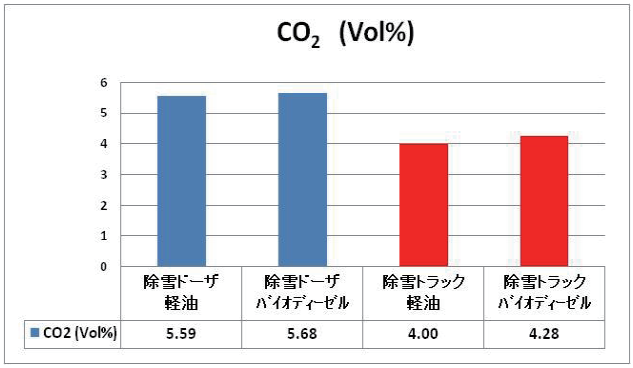


図-8　排出ガス CO_2 計測結果

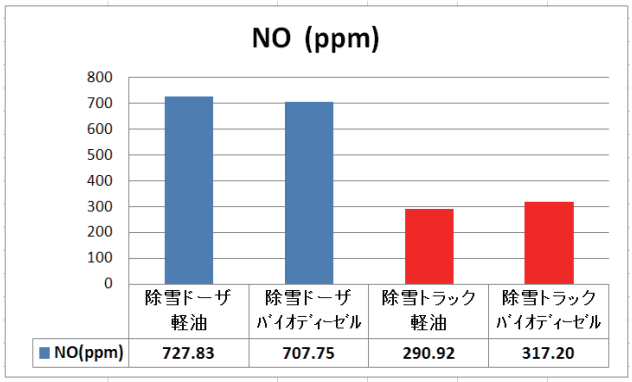


図-9　排出ガス NO 計測結果

さらに、酸性雨や光化学スモッグの原因となる粒子状物質（PM）について、どの程度影響が出るのかを調査するため、除雪トラックによる測定試験を行った（**写真-5**）。

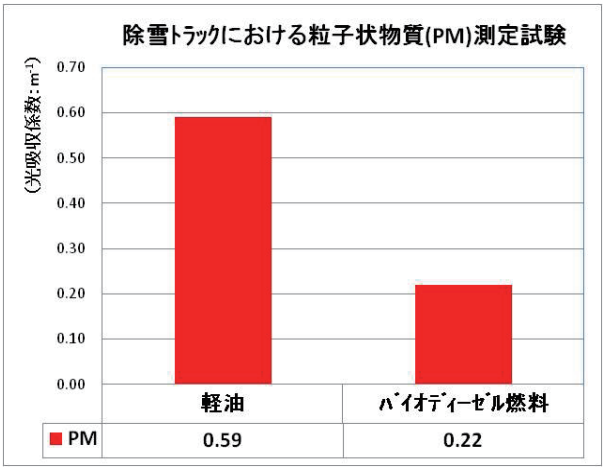


図-10　粒子状物質(PM)測定試験結果

写真－5　粒子状物質(PM)測定試験

図－10 から、除雪トラックの光吸収係数は、軽油が 0.59 m^{-1} の値を示したが、バイオディーゼル燃料は 0.22 m^{-1} であり、バイオディーゼル燃料を使用した方が軽油より 63%程度クリーンな値であることが分かった。

バイオディーゼル燃料使用時における排出ガス成分は、含酸素燃料であることから軽油よりも完全燃焼しやすいため、CO_2 の排出量は若干増加するが、バイオディーゼル燃料が動植物の廃油を原料としていることからカーボンニュートラルである。

粒子状物質(PM)も減少することからクリーンな燃料であるといえる。

2.8　機関始動性試験（低温特性）

低温下における始動性を確認するため、除雪トラックの始動時間計測を行い、軽油とバイオディーゼル燃料の評価を行った。試験方法は、セルモータ始動時より計測を開始し、機関が完全始動するまでの時間を計測した。

表-4 から、バイオディーゼル燃料は、気温が 5.4℃高い条件であったが、軽油と同等の始動性であるといえる。また、バイオディーゼル燃料は機関始動が 1 秒を切っており、-2.1℃の気温ではエンジン始動には支障がない。

しかし今回の試験では、-2.1℃以下の気温になることがなかったため、実作業における始動性は不明である。そこで厳冬期の始動性試験を実施した。

表-4　機関始動時間

油種	軽油	バイオディーゼル燃料
外気温	-7.5℃	-2.1℃
1回目(s)	0.66	0.66
2回目(s)	0.60	0.56

平成 22 年及び 23 年の冬期に機関始動が可能であるかを確認した。結果を**表-5** に示す。外気温は、0℃以下となる気温が続いていたが、バイオディーゼル燃料の温度は外気温よりも 6℃まで高くなっていた。通常の外気温は、-7～0℃にて推移していたが、平成 22 年 2 月 4 日は気温が-14.7℃となり、セルモータの回転は確認できたものの機関の始動は不可能であった。この際、燃料フィルタを車体より取り外したところ、**写真-6** のとおり燃料フィルタには、ヘドロ状の白いグリセライドが表面に付着しており、これが抵抗となって目詰まりを起こしたと想定される。

また、燃料タンク内の燃料（**写真-7 左**）を抜き取り、常温にて保存していた同燃料（**写真-7 右**）と比較した結果、透明度が低下していた。その時、燃料温度は-10℃であり、バイオディーゼル燃料内の物質が結晶化して透明度や流動性が低下することが分かった。

燃料配管は金属製であり、確認はできなかったが、バイオディーゼル燃料が燃料フィルタや燃料配管などで目詰まりを起こし、エンジン内まで到達不可能となったため、機関始動不能となったものと考えられる。これらの対策として、特に低温が見込まれる時期は車両を車庫にて保管することや、燃料タンクの加温装置などを用いて燃料をなるべく冷やさない対策が必要である。

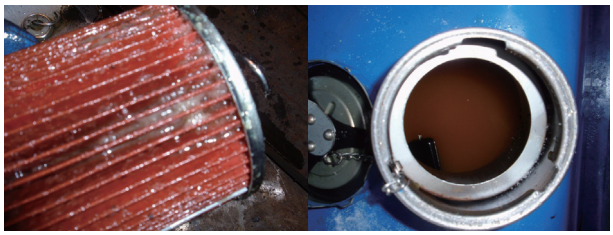


写真-6　機関始動不能時の燃料フィルタの状態

表-5　始動性（バイオディーゼル燃料）

試験日	外気温	燃料温度	始動性
平成22年			
2月1日	-3	-1	◎
2月2日	-7	-3	◎
2月4日	-14.7	-10	×
2月7日	-4	0	◎
2月8日	0	3	◎
2月13日	-5	1	◎
2月16日	-6	0	◎
2月19日	-4	0	◎
3月1日	-2	1	◎
平成23年			
1月31日	-6.4	-6.2	◎
2月1日	-5.2	-1.4	◎
2月7日	-1.5	-1.8	◎
2月10日	-2.4	-2.7	◎
3月14日	3.9	1.9	◎

写真-7　機関始動不能時の燃料の状態

2.9　長期使用時における燃料消費量計測試験

除雪作業時は、機関が高負荷運転になることが

多く、バイオディーゼル燃料は軽油よりも発熱量が低いことから、燃料消費量が増加することが考えられる。そこで、実際の除雪作業時において軽油及びバイオディーゼル燃料を使用した場合の燃料消費量について比較を行った。

試験では､除雪トラックに流量計を2個設置し、供給側と戻り側の差分量を消費量として比較した（**写真-8**）。

表-6 から、除雪作業には、降雪量や作業条件など作業負荷の違いがあるが、軽油と比較しバイオディーゼル燃料における平均燃費(km/ℓ)は､28%悪化した。その原因は、バイオディーゼル燃料特有の潤滑性向上効果によって、エンジン気筒内に軽油よりも多量の燃料が供給されたことが考えられる。また、出力を補うためにオペレータがアクセルをより多く踏み込んだことも考えられる。

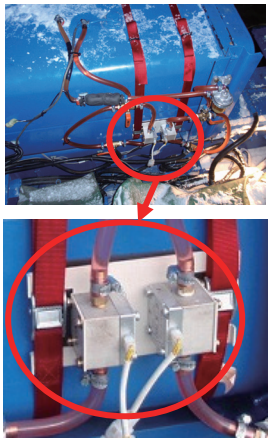


写真-8　流量計

表-6　燃料消費量

油種	走行距離(km)	消費量(ℓ)	平均燃費(km/ℓ)
軽 油	740.2	832	0.89
バイオディーゼル燃料	665.2	1,039	0.64

2.10 バイオディーゼル燃料における地域モデル

バイオディーゼル燃料の精製には、廃食油を確保することが重要である。地域生産モデル例として、A市における廃食油の生産量を**表-7** に示す。A市の人口は 35 万人であり、年間プラント生産能力は 407,700ℓ あるが、実年間生産量は、348,509ℓと約 85%程度である。理由として、廃食油の確保は、人口や飲食店などの事業者数に比例するため、プラント生産能力よりも原料である廃食油量に影響を受けるからである。バイオディーゼル燃料の精製には、このような問題があるが、地域におけるモデル事業として、学校・家庭・事業者と連携し、さらに廃食油回収など地域モデル事業に向けた取り組みが必要となる。

また、A市の国道を除雪するには45台の除雪車が必要であり、全台数をバイオディーゼル燃料にて走行するには、524,400ℓ程度が必要であるが、実年間生産量を上回ることや、保管期間の問題から全ての除雪車に使用できない。ただし、実年間生産量分の年間のCO_2削減量は、348,509ℓ×2.62(kg/ℓ CO_2)＝913,093kg≒913ｔとなる。

表-7　A市におけるバイオディーゼル燃料の生産モデル

項目	数量
A市人口　（人）	350,000
A市面積　（k㎡）	747
A市を走る除雪車両台数(必要数)	45
除雪車バイオディーゼル燃料必要数　(ℓ)	524,400
プラント生産量能力　(ℓ)	407,700
実年間生産量　(ℓ)	348,509

このような取り組みを行うことによって地球温暖化対策に貢献することが可能となり、地域に存在するエネルギーの有効活用となる。

3．まとめ

バイオディーゼル燃料を積雪寒冷地に使用した場合、以下のことが分かった。

① 加速性能は軽油と比較し同等以上である。
② 牽引力は軽油と比較し同等である。
③ 排出ガス中の粒子状物質(PM)は 60%程度減少する。
④ 使用燃料性状にもよるが、燃料温度が-10℃以上の始動には問題がない
⑤ 燃料温度が-10℃以下になるときは、燃料タンク加温装置や車庫保管など燃料を冷やさない処置が必要である。
⑥ 燃料消費量は軽油に対し 28%増加する。

導入コストなどの問題はあるが、地球環境負荷が少ないクリーンな自然エネルギーやバイオマスエネルギーなどの再生可能エネルギーの地域導入が進めば地球温暖化の一因となっている温室効果ガス削減に寄与できるものと考える。

参考文献

1）小泉　達治:第 3 部ブラジルのバイオディーゼル混合率引き上げが世界大豆・大豆製品需要に与える影響
http://www.maff.go.jp/primaff/koho/seika/project/pdf/jukyu3-17.pdf

2）バイオマスオフィス HP
http://www.asiabiomass.jp/topics/1107_02.html

3）平伴斉、国島英樹、長瀬禎：「バイオディーゼル燃料の除雪車等適応性検討」、寒地土木研究所月報　2011 年 1 月号

4）池上　詢：改訂版　バイオディーゼル・ハンドブック　日報出版（株）pp.7-8

28. 建設機械における省エネルギー化・排出ガスクリーン化の追求

次世代環境対応技術を搭載した油圧ショベルの開発

キャタピラージャパン（株）　○　梅谷　麻里香

１．はじめに

1960 年代の高度経済成長期以降，国内の建設機械は世相や現場のニーズに合わせて目覚ましい進化を遂げ，様々な産業で活躍してきた。近年では地球環境問題への意識の高まりから，作業性能以上に環境性能が求められる傾向にあり，中でも「地球温暖化」や「大気環境汚染」への対策が急務となっている。国内では，建設機械に対する排出ガス基準，及び，燃費基準が制度化されており，建設機械メーカー各社はそれらに沿って開発を進めている状況である。しかし，環境性や省エネ性を追及するあまり，マシンの作業性能を損なってしまうと，結果的な工期延長に繋がる恐れがあるため，燃料消費と生産性のバランスが十分考慮されるべきである。

当社の油圧ショベル「E シリーズ」は，オフロード法 2011 年基準，及び，2020 年燃費基準をターゲットに開発されたものである。排出ガス中の NOx の排出量を抑制させる技術や，PM 等の大気汚染物質を除去する浄化装置，燃料消費を極限まで削るエンジン・油圧システム等，様々な技術を複合的に盛り込むことで，従来機と同等の作業性能を維持しつつ，飛躍的な省エネルギー化・排出ガスクリーン化を実現している。本論文ではこれらの次世代環境対応技術について解説する。

図-1　油圧ショベル「E シリーズ」Cat 320E

２．排出ガス規制への対応

2010 年，オフロード法改正により，新たな排出ガス基準「2011 年基準」が設けられた。表 1 にエンジン定格出力 75～130kW 未満に対する基準値を示しているが，改正前に比べて NMHC，NOx，PM の基準が強化されている。NOx と PM は，二律背反の関係にあり，同時に低減することは非常に困難とされてきた。そんな中，本技術では，「NOx の発生抑制」と「発生した PM の捕捉・除去」という二つシステムを組み合わせることによって，双方の低減に成功している。油圧ショベルのエンジン排気量に応じて最適な排出ガス浄化システムを取り入れることで，表 2 に示す全 14 機種についてオフロード法 2011 年基準への適合を果たしている。

表-1　排出ガス基準値（エンジン定格出力 75～130kW 未満）

		オフロード法 改正前 2006年基準	オフロード法 改正後 2011年基準	低減率
非メタン炭化水素（NMHC）	g/kWh	0.40	0.19	53%
窒素酸化物（NOx）		3.60	3.30	8%
一酸化炭素（CO）		5.0	5.0	－
粒子状物質（PM）		0.20	0.02	90%
ディーゼル黒煙	%	25%	25%	－

表-2　オフロード法 2011 年基準適合
油圧ショベルラインナップ

機種	エンジン名称（型式）	エンジン出力帯
312E	キャタピラー WDP-C4.4	56kW～75kW未満
316EL	キャタピラー WDR-C4.4	75kW～130kW未満
320E/320EL	キャタピラー WDR-C6.6	
320ERR/320ELRR	キャタピラー WDR-C6.6	
324E/324EL	キャタピラー UDS-C7.1	130kW～560kW未満
329E/329EL	キャタピラー UDS-C7.1	
336E/336EL	キャタピラー UDS-C9.3	
349E/349EL	キャタピラー UDS-C13	

※2012 年 9 月現在

2-1　NOx リダクションシステム

通常，エンジンの燃焼室内が高温高圧になるほど NOx 生成量は増加する。そこで，燃焼後の排気の一部を冷却し，吸気と混合して再びエンジンの燃焼室に戻す，NOx リダクションシステム，いわゆる排気再循環（EGR）を採用することで燃焼温度の高温化を抑え，更に，新たに備えた燃料クーラがエンジンから燃料タンクへの戻り燃料を冷却することによっても燃焼温度の高温化を防止し，NOx の発生を抑制できるようになっている。

なお，EGR による吸排気システムでは，再循環させる排気に含まれる硫黄酸化物（SOx）や PM，エンジンオイル中の不燃物質（灰分）が，シリンダの磨耗・腐食を引き起こす恐れがあるが，燃焼効率向上による PM 低減，また，本機では低灰分エンジンオイル（JASO 規格 DH-2 対応）を採用していることにより，その懸念を払拭している。

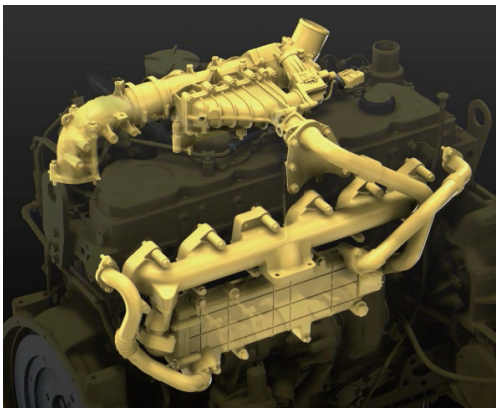


図-2　NOx リダクションシステム（イメージ図）

2-2　Cat クリーンエミッションモジュール

排出ガス中には CO，NMHC，PM 等の大気汚染物質が含まれている。それらを除去するため，ディーゼル酸化触媒（DOC）とディーゼルパーティキュレートフィルタ（DPF）の二層から成る浄化装置，Cat クリーンエミッションモジュールを搭載している（図 3）。

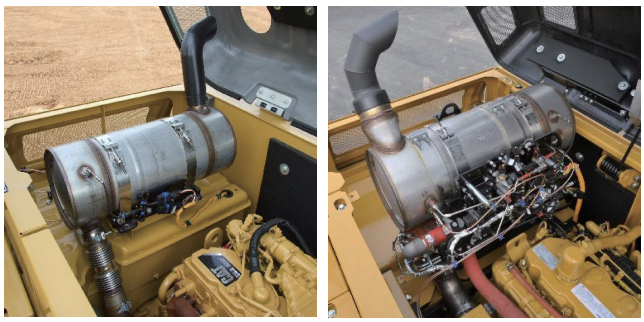


図-3　Cat クリーンエミッションモジュール
（左：320E，右：336E）

(1) DOC

一層目の DOC は白金コーティングされたセラミック製の触媒である。白金の強い酸化力によって CO，NMHC を酸化・無毒化することができる。

(2) DPF

二層目の DPF はセラミックでできたウォールフロータイプのフィルタであり，PM を含んだすすを捕捉することができる。エンジン容量に応じて異なるシステムを採用しており，C6.6 ディーゼルエンジン以下（対応機種：312E，316EL，320E(L)，320E(L)RR）と C7.1 ディーゼルエンジン以上（対応機種：324E(L)，329E(L)，336E(L)）の２種類に分かれる。それぞれの DPF の構造，及び，再生方法は以下に説明する。

①C6.6 ディーゼルエンジン以下

DPF 内に酸化触媒が含まれており，触媒の働きにより DPF 内の NO_2 濃度が高められ，更に NO_2 の持つ強力な酸化能力によってすすを酸化・除去するシステム。NO_2 生成には 250℃～300℃の高温条件が必要なため，排気熱によって DPF 内の温度が高まった状態で効率の良い DPF 再生が起こる。外部からのエネルギーの補填を必要とせず，温度条件を満たしていれば常に再生が起こる連続再生方式の DPF であり，「自動再生」のみ行う。

②C7.1 ディーゼルエンジン以上

DPF 内に触媒はなく，クリーンエミッションモジュールの手前に設置されたバーナーが作動することで DPF 内を 500℃以上の高温状態にし，すすを燃焼するシステム。アイドリング中にオペレータが DPF 再生スイッチを押して開始する「強制再生」，及び，アイドリング中・稼動中に起こる「自動再生」がある。

３．油圧ショベルの燃費低減技術

油圧ショベルの場合，単純にエンジン出力を落とすことで時間当りの燃料消費量を低減できる。しかし同時に作業能力も落ちるため，結果的には作業時間が伸び，トータルでの燃料消費量増加に繋がる可能性も高く，有効とは言えない。今回の開発で最も燃費低減に貢献しているのは“エンジン回転数の低速化”であるが，エンジン・油圧システムを統合的に制御することでエネルギー効率を高め，更に動力伝達の過程で生じるエネルギー損失を最小限に抑えることで，従来機と同等のパワー，スピードを維持している。

3.1　エンジン・油圧システム制御

従来機で行っていたエンジン回転制御方法は，無負荷時のエンジン回転数を高めに設定し，負荷がかかったときに定格回転まで抑えることで安定を図るものであった。それに対し，本技術では，無負荷・負荷によらず一定のエンジン回転数に保つよう制御している。最大出力モードにおける無負荷時の設定回転数を従来機 320D：1,980rpm に対し，新型機 320E：1,700rpm とすることで，特に軽負荷（無負荷）時の燃料消費を抑えられるようになっている。更に，不要なエンジン回転を省くシステムとして，ブーム下げでは再生回路を活用し，エンジン回転数，及び，ポンプ流量を下げている。

負荷の変動によってエンジン回転数が上下しないよう高性能コントローラによる緻密なエンジン回転制御が行われており，急な負荷がかかってもエンジン回転が落ちることがなく，優れたレスポンスを発揮できる。

3.2　アイドリング時の燃費低減

油圧ショベルを使った作業では，暖気運転やダンプ待ちのためにアイドリング状態で待機する場面も多い。数秒間の無負荷状態が続くと自動的にエンジン回転を低下させる「自動デセル機能」は従来から採用している機能であるが，表 3 に示す通り，新型機ではその設定回転数を大幅に下げている。同様に，操作レバー部のスイッチを押してアイドリング状態に移行する「ワンタッチローアイドル機能」でも，従来に比べてエンジン回転を下げており，アイドリング時の更なる燃費低減に貢献している。いずれの方法でアイドリング状態に入っていても，レバー操作を行った時点で即座にエンジン回転が元の復帰するため，操作レスポンスへの影響もなくスムーズに作業を行うことができる。

表-3　エンジン回転数設定

	新型機 320E	従来機 320D
モード	スタンダード	
ハイアイドル（無負荷）	1,700	1,980
自動デセル	970	1,300
ワンタッチローアイドル	970	1,020

※アクセルダイアル10の場合　　(rpm)

3.3　その他の省エネ機能

パワーモードとして「スタンダードモード」と「エコノミーモード」の２モードを設定している。エコノミーモードはスタンダードモードに比べて燃費を 10%以上抑えることができるため，燃費重視の現場での使用を薦めている。また，長時間のアイドリングを回避するための「オートアイドルストップ機能」を新たに取り入れており，ON/OFF 設定はもちろん，エンジン停止までの時間を 1 分単位（1～60 分）で設定可能である。

これらの機能を使って運転者が省エネ運転に取り組むことで，より一層の燃費低減（CO_2 低減）を図ることができる。

4．燃費性能の実証

本技術を搭載した油圧ショベルの燃費性能について，以下の 2 つの方法で試験した結果を示す。

4.1　トラック積込み試験

20 トンクラス（標準バケット 0.8m³）の油圧ショベルについて，従来機 320D と新型機 320E を用いて比較試験を行った結果，図 4 に示す通り，時間当り作業量は同等以上，燃料消費量は約 10%低減できることが確認された。また，エコノミーモードでは，スタンダードモードより燃料消費量を 10%以上低減できることも確認された。

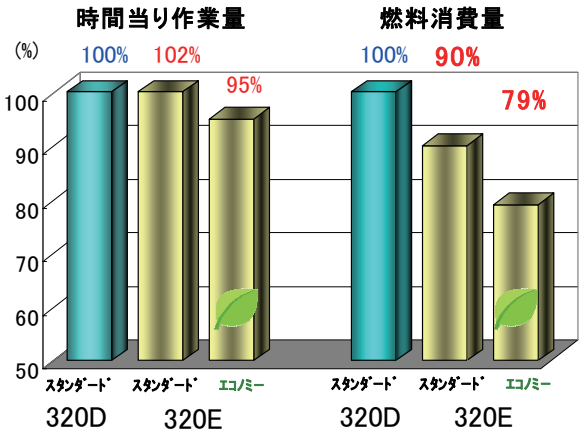


図-4　トラック積込み試験結果

4.2　JCMAS 燃費試験

（社）日本建設機械施工協会規格である油圧ショベルの燃料消費量の試験方法（JCMAS H020）[1)] に従い，燃費試験を実施した。“掘削・積込み動作試験”，“ならし動作試験”，“走行試験”，“待機（アイドリング）試験”の 4 種類の試験結果から算出された 320E の燃料消費量評価値は，10.4kg／標準動作であった（表 4）。

表-4　JCMAS 燃費試験結果

	運転質量	標準バケット山積み容量	（JCMAS H020）燃料消費量評価値
320E	20,700kg	0.8m3	10.4kg / 標準動作

尚，CO_2削減効果の高い建設機械の普及を目的として国土交通省によって導入された「2020 年燃費基準」では，この燃料消費量評価値がものさしとなる。油圧ショベルにおいては，標準山積みバケット容量でグループ分けされ，それぞれのグループのオフロード法 2006 年基準対象車の中で，最も燃費の優れたトップランナーが 2020 年燃費基準（目標）として設定され，その基準に対する達成率によって星の数（星 1 個から 3 個）が決定する [2)]（図 5）。

JCMA 燃費試験による 320E の燃料消費量評価値は 10.4kg／標準動作であり，標準山積みバケット容量 0.8m^3 クラスの燃費基準 10.8kg／標準動作に対して達成率 100%以上であることを示している。また，その他の機種についても，312E(L)，316EL，320E(L)RR，329E(L)，336E(L)は既に JCMAS 燃費試験を実施しており，達成率 100%以上であることを確認している。

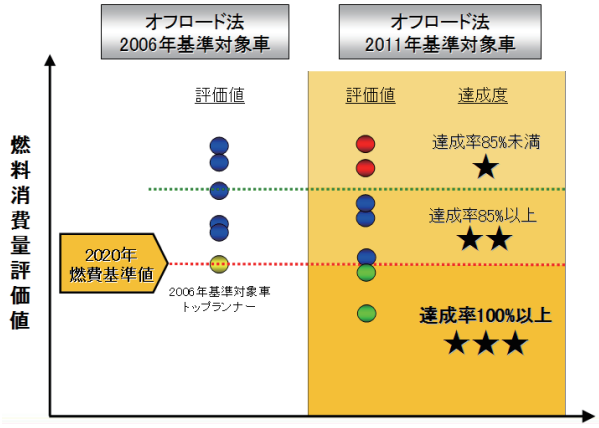


図-5 2020 年燃費基準

表-5 2020 年燃費基準 達成レベル

	標準バケット山積み容量クラス（m^3）	燃費基準値（kg/標準操作）	達成レベル
312E	0.47以上 0.55未満	6.9	☆☆☆
316EL	0.55以上 0.7未満	9.2	☆☆☆
320E(L)	0.7以上 0.9未満	10.8	☆☆☆
320E(L)RR	0.7以上 0.9未満	10.8	☆☆☆
329E(L)	1.05以上 1.3未満	13.9	☆☆☆
336E(L)	1.3以上 1.7未満	19.9	☆☆☆

※1 認証制度の開始は 2014 年基準対象車から（予定）。
2011 年基準適合車の達成レベル（★）については，カタログ掲載等が認められている。
※2 324E(L)については計測準備中。
※3 349E 以上のクラスは燃費基準が設けられていない。

5．おわりに

今回開発された油圧ショベルは，NOx，PM を低減するための技術や，燃費を抑えるための技術を組合せることで，最高の環境性能を実現している。

今後は，次期排出ガス規制（2014 年基準）対応のための技術開発はもちろん，生産性，経済性，安全性等のユーザにとって関心の高いポイントは更に磨きをかけ，環境に優しく，価値の高い製品作りに努めていく所存である。

参考文献

1) JCMAS H020 「土工機械 － 油圧ショベルのエネルギー消費量 － 試験方法」，改訂第 3 版，発行年 2010
2) 前羽：建設機械施工における地球温暖化対策，月刊建設，11-10号，pp. 39～40，発行年 2011

29. 油圧ハンマにおける打撃音低減の試み

東亜建設工業（株）　○ 田中　ゆう子
東亜建設工業（株）　宮﨑　哲史
東亜建設工業（株）　三輪　徹

1．はじめに

油圧ハンマによる杭の打設は，地盤の支持力を確保するための基礎構造として用いられるが，ハンマと杭の衝突により，大きな打撃音が発生する。このため，施工時における工事現場周辺への騒音影響が課題となっている。

これまでにも防音カバーなど[1),2)]の低減装置が開発されているが，大型のものが多く，杭の法線誘導や高さ管理に支障が生じるなど，施工性に課題を残していた。そこで当社は，施工性を確保しつつ騒音を低減する「油圧ハンマ打撃音低減装置」を開発した。

2．油圧ハンマの騒音の特徴

油圧ハンマは，図-1 の構造図に示すように筒の中をラムがアンビルに落下し，アンビルから杭へエネルギーを伝達して杭を地中に打ち込む構造となっている。

本研究では油圧ハンマによる打撃音の対策を検討するに当たり，ハンマのどの部分に着目すべきなのかを特定するため，音の大きさとその方向性を図-2 の模型を使用して把握した。音響特性の計測には，精密騒音計（NL-32，RION）および音響粒子速度計（PU プローブ，Microflown）を用いた。音を発すると思われるアンビルやパイルスリーブ周囲に多数の測点を設け，音圧レベルおよび音の伝播する速さを示す音響粒子速度を測定した。表-1 に測定結果のうちとくに音圧レベルと音響粒子速度が高かった測点 A～C の値を示す。計測する前は，杭と衝突して打撃音を発生するアンビル付近が最も高くなると予想していた。しかし，計測の結果，最も高かったのは，表-1 に示すようにパイルスリーブと杭の隙間である測点 C から発生する下向きに伝達する音であった。そこで，測点 C から発生する下向きの音を低減させる方法を次に検討した。

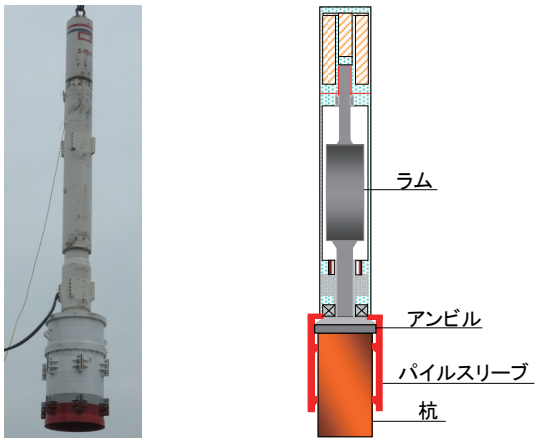
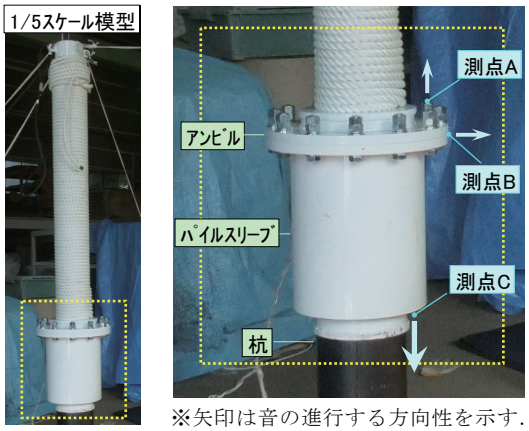


図-1　油圧ハンマの全景および構造

3．騒音低減方法の選定

騒音を低減させるために着目した点は，①打撃によるパイルスリーブの振動の抑制，②パイルスリーブ内の吸音による減音，③パイルスリーブと杭の隙間から発せられる音の反射による減音等である。 本研究では，これらの効果が期待できる各種材料を集め，図-2 の模型および実機に用いて，より騒音低減に効果的な材料の選定および材料の配置を検討した。



※矢印は音の進行する方向性を示す.

図-2　油圧ハンマの模型概要

表-1　音響特性の計測結果

測点	音圧レベル(dB)	音響粒子速度 (mV)
A	123	236
B	120	231
C	133	359

3.1　制振材による騒音の低減

制振材をパイルスリーブに貼り付け，振動エネルギーを熱エネルギーに変換することで，振動による音の発生を抑制しようと考えた。異なる素材の制振材を模型のパイルスリーブの側面に固定し，打撃に伴う騒音低減効果を比較した。しかし，制振材の効果は，質量が大きい材料ほど大きくなるため，打撃力の非常に大きな油圧ハンマでは，落下対策が併せて必要となる。効果の高い高質量の制振材の選択する場合，安全面の課題が残った。

3.2　吸音材による騒音の低減

騒音低減できる周波数帯が，吸音材によって異なるため，さまざまな素材を選定した。各種吸音材を模型のスリーブ内に配置し，吸音効果を比較した。また吸音材の厚みによっても効果に差が生じるため，厚みと効果の関係についても定量的に把握した。その結果，とくに効果の高かった吸音材を図-3 のように実機に用い，吸音材の固定方法などについても検討を重ねた。

図-3　吸音材を配置したパイルスリーブ

3.3　反射による騒音の低減

パイルスリーブと杭の隙間等から発せられる音を反射板で囲むことにより減音させる実験を模型により行った。その結果，図-2 で示した点 C を植木鉢状の反射板で覆った構造で，最も大きな低減効果が認められた。

以上の結果を踏まえ，次に現地実験を行った。

4．現地実験

横浜港南本牧地区の工事において，現地実験を行った。打撃音低減装置は，図-4 に示すように模型実験の結果を反映し，鋼板を植木鉢状に加工したもので，底面はパイルスリーブと杭との隙間を覆い，打撃音の反射を促す構造とした。とくに杭の法線誘導や高さ管理に支障が生じないよう，装置によって覆われる範囲を選定した。また，装置内側には制振材料と多孔質材料からなる吸音構造を設け，幅広い周波数帯の騒音に対応できる装置とした。さらに，本装置は施工性を考慮して専用の冶具によって簡易に脱着できるようにした。

図-5 に油圧ハンマに本低減装置を取り付けた「低減装置あり」の場合と，何も取り付けない「低減装置なし」の場合（対照）の比較を示す。計測には精密騒音計（リオン：NL-32,NA-28）を使用し，1/3 オクターブバンド分析により周波数ごとの低減効果を定量的に評価した。実験の結果，油圧ハンマの音源から 15m離れた計測地点で，125Hz～4000Hz の幅広い各周波数帯において最大で 9dB，平均で 6dB の低減を確認した。

「低騒音型・低振動型建設機械の指定（国土交通省）」によると，騒音基準値からさらに 6dB 低減できた低騒音型建設機械は「超低騒音型建設機械」と表記できる。よって，本低減装置による 6dB の低減は 1 段階高い評価に相当する効果と捉えることができた。

5．まとめ

油圧ハンマの模型を用いて打撃音の音響特性を把握し，実機における打撃音低減装置の構造を決定した。続いて行った実機による現地実験では，幅広い各周波数帯において平均 6dB の低減ができることを明らかにした。

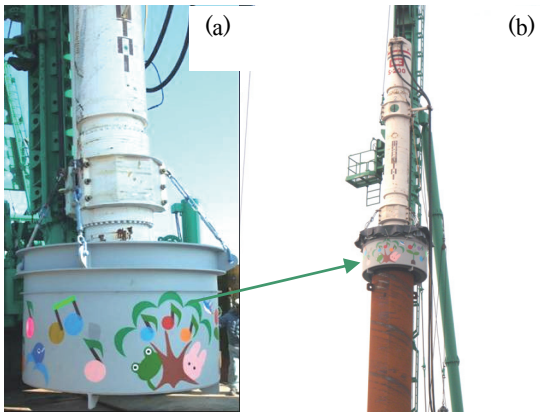


図-4　低減装置の取付け状況（a），打設状況（b）

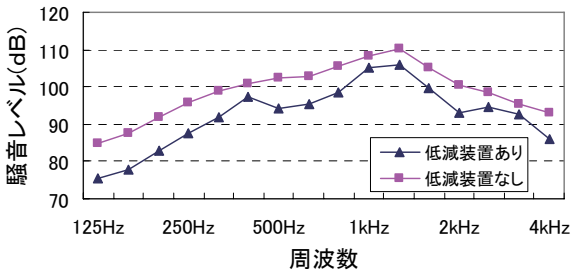


図-5　低減装置の有無と油圧ハンマ騒音の周波数特性

参考文献

1)　北川原徹，原誠，樋野親俊：杭打機械の騒音・振動対策の可能性，建築の技術，第 170 号, pp. 53-64 ,1980

2)　田中柳之助：くい打ち機用防音カバーの開発状況，基礎工，第 4 巻 9 号, pp. 50-56 , 1976

30. 連続地中壁施工時における隅角部の安定性

中央大学 研究開発機構　　○ 石井　武司
中央大学 理工学部　　齋藤　邦夫

１．はじめに

連続地中壁の施工においては，掘削壁面や周辺地盤の変形を抑制するために，泥水（安定液とも言う）を掘削溝に満たしながら所定の深さまで掘削する。その後に，鋼製連壁部材を挿入してからコンクリートを注入して泥水と置換させる。この施工は他の山留め工事や基礎工事に比べて振動や地盤変形が少ないことから，周囲に近接構造物や重要施設が密接する都市部で多く採用される。それゆえ，このような場所において溝壁が崩壊すれば周囲に多大な被害を及ぼすので，溝壁の安定確保は重要事項である。

掘削時の安定性を評価する手法としては，半円形すべり法[1)]，三次元円筒すべり法[2)]，プロトジャコノフ法[3)]，および指数関数法[4)]が我が国で従来から主に使用されてきた。これらはそれぞれ特有のすべり面形状を仮定し，極限平衡法によって安全率を算定している。そのため，すべり面形状の妥当性を含めて様々な問題点を抱えている[5)]。

山留め壁などに適用される一般的な連続地中壁の平面配列は図-1 のような矩形で，直線部分と隅角部分で構成されるのが一般的である。前述の安定性評価手法は全て直線部を対象として開発されており、隅角部を対象としたものはない。

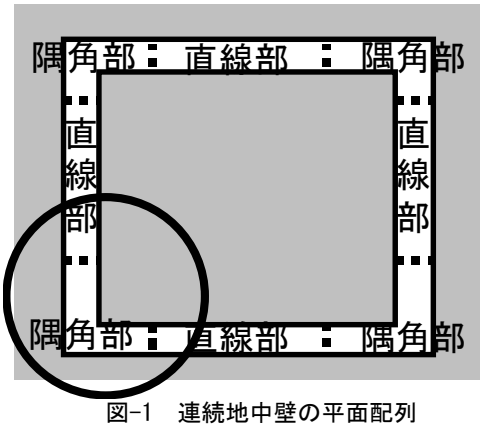


図-1　連続地中壁の平面配列

しかしながら，砂質土地盤における隅角部は崩壊しやすく，掘削は可能な限り直線にすることが望ましいと言われている[6)]。そのため，隅角部の安定性評価にあたっては，直線部を対象に開発された手法を隅角部にあてはめて評価を行う方法が提案されている[7)]。ただし，その手法に関する妥当性は明示されていない。また，隅角部のすべり面形状に関するデータもないため，その検証も難しい。このように隅角部に関しては，未解明な点が数多いため、施工に際しては技術者の経験的判断により行われてきたと考えられる。

本研究では，このように隅角部の安定性に関しては不明確な点が多いこと，それにも拘わらず施工実績が築かれてきたことから，まず，既往の施工事例を収集・分析し，施工現場における安定性の経験則を明らかにする。

また，筆者等は既存の安定性評価手法が信頼性を欠いていたことから，遠心模型実験を実施してその安定性を調べてきた[8)]。その結果，泥水掘削溝壁の安定機構は，図-2 の概念図に示すように，安定液によって溝壁面に形成された不透水性の泥膜を挟み，安定液の液圧が地盤の土圧を支えることで成立することがわかった。その結果に基づき，力学的挙動を合理的に説明できる手法として，三次元弾塑性有限要素法にせん断強度低減法を組み込んだ三次元せん断強度低減有限要素法で安全率を算定する手法を提案し[9)]，実務でも採用された[10)]。この手法は三次元の有限要素法であることから，隅角の形状を適切に扱うことが可能である。そこで，模型実験を行って，その手法の妥当性も検討する。

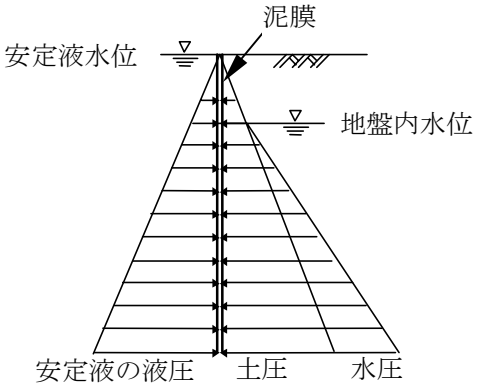


図-2　溝壁安定の概念図

２．隅角部の形状

連続地中壁の平面形状は，図-3 のように，長方形の直線部およびＬ字型，Ｔ字型，十字型，ある

いはコ字型の隅角部から構成される。

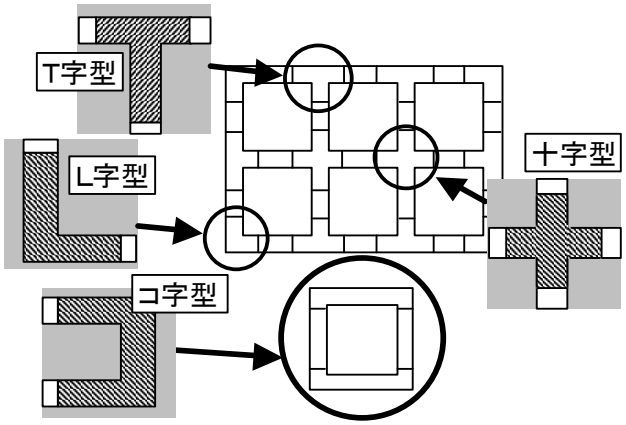


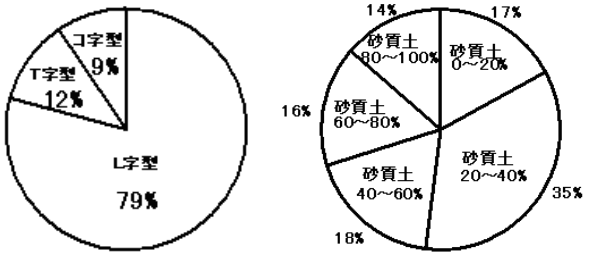
図-3　連続地中壁の平面配列における隅角部の種類

3．事例分析[11)]

「基礎工」,「土木技術」,「土木施工」の雑誌や地中連続壁実例集などから施工事例を収集した。

3.1　収集事例の特徴

収集した事例の隅角部形状をＬ字型，Ｔ字型，コ字型で分類すると，その割合は図-4(a)のようになる。Ｌ字型が全体の 79%占め，Ｔ字型とコ字型は約 10%前後である。一般に，Ｌ字型は平面形状が矩形の山留め壁や連壁基礎の四隅に適用される。Ｔ字型やコ字型は連壁基礎で多く見られる。このことから，収集した事例は山留め壁が大半である。



(a)隅角部の形状　　(b)対象土層

図-4　収集事例における隅角部形状と構成地盤の比率

連続地中壁は基盤層に根入れされることが多く，掘削溝の掘削は一般に表層から基盤層中まで及ぶ。基盤層における溝壁は地盤のせん断強度が大きいので，溝全体の崩壊につながるようなすべり破壊を生じにくい。そこで，構成地盤のうちＮ値が 50 以上の続く層を基盤層とみなし，それ以浅の地盤がすべり破壊を生じる可能性がある対象層とする。基盤層以浅で砂質土の占める割合を 0～20%，20～40%，40～60%，60～80%，80～100%の５つに分類した。その結果を図-4(b)に示す。収集事例は砂質土が 60%以上を占める砂質土主体の地盤が 30%で，過半数は砂質土が 40%以下，すなわち粘性土が 60%以上を占める粘性土地盤である。

3.2　整理方法

安定性に関与するものを大きく分けると，溝の形状，地盤条件，施工条件の 3 つとなる。それぞれの要素は次のとおりである。

溝形状　：掘削長さ，掘削深さ，掘削幅
地盤条件：土層構成，地下水位，単位体積重量，せん断強度など
施工条件：安定液の密度と水位，補助工法の採否と採用工法，上載荷重（近接構造物，施工機械など）など

ここでは整理の指標に溝形状における掘削長，掘削深さ及び掘削幅とした。隅角部の溝長さに関しては，図-5 に示すように，隅角部の掘削長を長辺掘削長L_1と短辺掘削長L_2に分けた。隅角部の形状は短辺掘削長L_2／長辺掘削長L_2の比率で特徴づけることができるので，以下ではその比率L_2/L_1を溝長さ比と称す。また直線部と隅角部の掘削長さを区別するために，直線部の掘削長を直線部掘削長Ｌとした。地盤条件に関しては，基盤層以浅の地盤を粘性土と砂質土に区分し，それぞれに対して層厚の重みで平均Ｎ値を求めた。施工条件に関しては補助工法の採否を対象とした。補助工法は溝壁の安定性を向上させるので，その採否は重要な要素である。

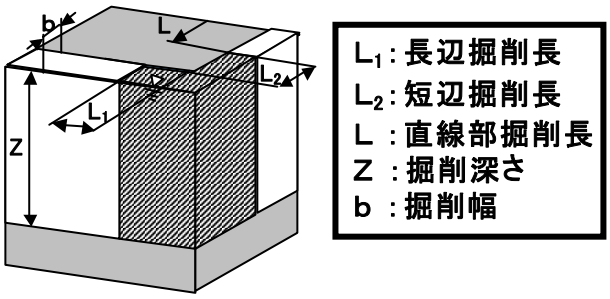


図-5　溝壁概念図

3.3　隅角部の事例分析

(1)「溝長さ比(L_2/L_1)」と平均Ｎ値の関係

隅角部の形状を特徴づける溝長さ比と平均Ｎ値の関係を図-6 に示す。隅角部形状ごとの違いは分布状況に認められない。補助工法採否に着目すると，補助工法ありとなしが溝長さ比 1/3～1 の範囲に不規則に分布する。よって、溝長さ比と平均Ｎ値との間には関係が無いと判断できる。

(2)「溝長さ比(L_2/L_1)」と総延長掘削長(L_1+L_2)の関係

溝壁の安定性は掘削溝の長さが関与することから，隅角部における 2 辺の掘削長を加えた掘削総延長（L_1+L_2)を指標にとれば，溝長さ比(L_2/L_1)との関係は図-7 のようになる。補助工法採否に関する分布は掘削総延長が 8m を境界として２つに分類さ

れる。掘削総延長が 8m以下では補助工法有無が混在する。掘削総延長が 8m以上の場合は、溝長さ比を 0.5 以下とした上に補助工も適用して慎重な施工が行われていることが指摘できる。

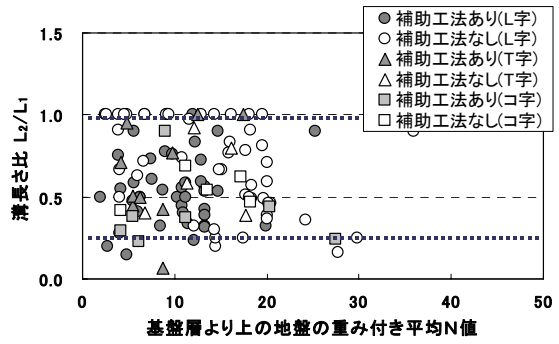


図-6　平均Ｎ値と溝長さ比の関係

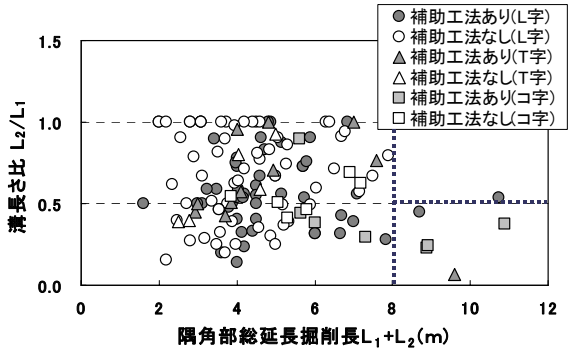


図-7　溝長さ比と総延長掘削長の関係

(3)　「溝長さ比(L_2/L_1)」と溝深さ Z の関係

溝の掘削深さと溝長さ(L_2/L_1)の関係を図-8 に示す。この関係においても，隅角部形状の分布状況に明瞭な違いが認められない。溝深さに関しては20m～50mの事例が一般的に多い。その中で溝深さ 50m以上の事例では，その多くが補助工法を用いている。溝長さ比に対する関係については明確な特徴がなく，相関性がないと判断できる。

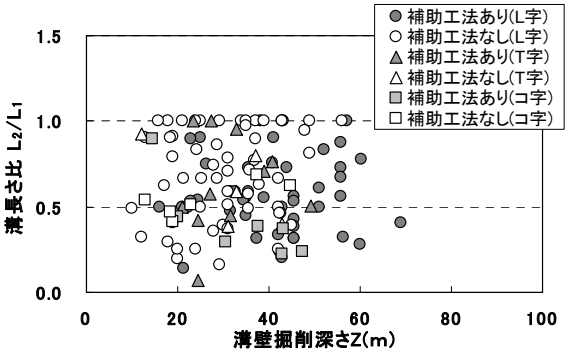


図-8　溝長さ比と溝深さの関係

3.4　隅角部と直線部の事例比較

直線部の溝に対しては安定計算手法や判定図などがあることから，直線部の溝長さはこれらに基づいて安全性が確保されていると判断できる。そこで，直線部に対する隅角部の溝長さの関係が明確になれば，設計が容易になる。そこで，隅角部の安定性を特徴づけることができる経験則の抽出を試みた。

(1)　直線部掘削長 L と総延長掘削長(L_1+L_2)の関係

直線部掘削長と掘削総延長の関係を図-9 に示す。両者の間には特徴的な関係が認められない。

(2)　直線部掘削長 L と隅角部長辺掘削長 L_1 の関係

直線部掘削長と隅角部長辺掘削長の関係を図-10 に示す。大半の施工事例は隅角部長辺掘削長が直線部掘削長よりも短い。そこで，図中に直線 L=2×L_1 を加える。補助工法の有無に拘わらず，多くの事例がその直線付近に分布する。このことから，隅角部長辺掘削長は直線部掘削長の約半分で施工されることが多いと判断できる。

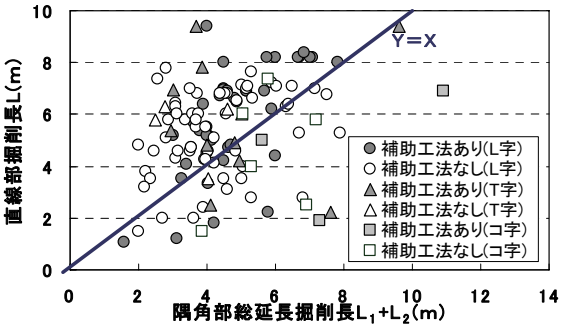


図-9　直線部掘削長と総延長掘削長の関係

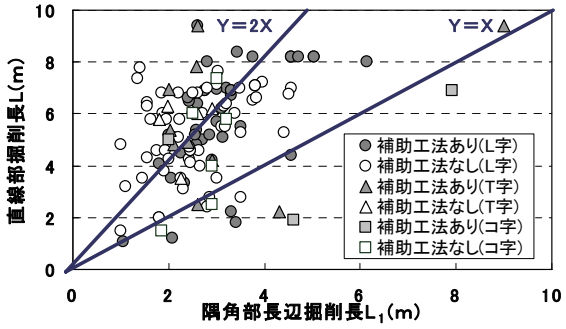


図-10　直線部掘削長と隅角部長辺掘削長の関係

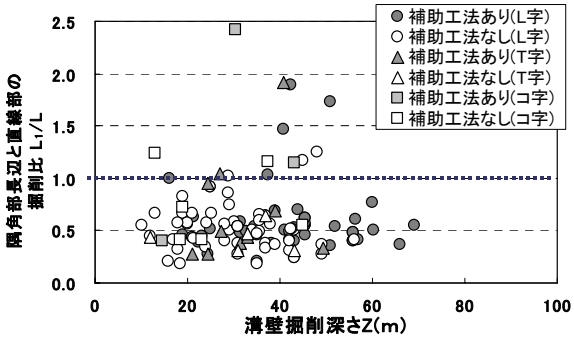


図-11　長辺掘削長/直線部掘削長と溝深さの関係

(3) 隅角部長辺掘削長/直線部(L_1/L)と掘削深さ Z の関係

図-10 から隅角部長辺掘削長/直線部掘削長の比率 L_1/L（以下，隅角部長辺と直線部の掘削長比と称す）が 0.5 前後にあることがわかった。そこで，その比率に影響を与える要因として掘削深さ Z に着目し，両者の関係を図-11 に示す。隅角部長辺と直線部の掘削長比は掘削深さに関係なく，ほぼ 0.5 付近にある。

4. 数値解析を用いた隅角部の安定性評価[11)]

事例分析により得られた隅角部の施工に関する経験則「隅角部長辺と直線部の掘削長比は概ね 0.5」の力学的背景を明らかにするために，数値計算を行った。

4.1 数値計算手法

安全率および変形を求めるために，三次元弾塑性有限要素法にせん断強度低減法を組み込んだせん断強度低減有限要素法（以下，SSRFEM）を適用した。この計算方法は，地盤を弾完全塑性体と仮定し，そのせん断強度定数の c'と ϕ'を，仮想的にそれぞれ次のようにせん断強度低減係数 Fr で c_r'と ϕ_r'に低減する。

$$c_r' = \frac{c'}{F_r}, \quad \phi_r' = \arctan\left(\frac{\tan\phi_r'}{F_r}\right) \qquad (1)$$

Fr の初期値は地盤内の応力状態がほぼ弾性体となるような小さな値とする。その後，Fr を段階的に大きくするたびに，弾塑性計算を行う。すると，ある Fr に達すると，弾塑性計算が発散する。計算の発散は地盤のすべり破壊を意味するので，この直前の Fr を系全体の安全率と定義する。すなわち，この手法は強度安全率の考え方に立脚すると言える。また，Fr=1.0 は本来の強度定数を与えるので，地盤の変位はこの低減係数の弾塑性計算結果を用いれば良い。

4.2 数値計算の条件とケース

解析の対象範囲を図-12 に示す。解析対象は，隅角部の溝壁掘削時に隣接の直線部が連続地中壁として構築されている状態とする。よって，解析モデルは図-13 のようになる。隅角部の泥水掘削部は泥水で満たされているので，溝壁に泥水圧を作用させることで泥水掘削溝をモデル化する。地盤は一様な砂地盤を想定し，地下水位は地表面下 2m とした。そこに溝深さ 12m，溝幅 1.2m の連続地中壁を想定した。溝壁掘削の際の安定液は地表面位置まで満たしていると仮定した。表-1 に地盤と安定液の物性値を示す。

計算ケースは事例の分析結果を参考にして設定した。事例分析によれば，隅角部の長編掘削長は直線部のおよそ半分で施工され，短辺掘削長と長辺掘削長の比率は 1/3～1 のものが多い。そこで，直線部掘削長 L を 12m、隅角部長辺掘削長 L_1 を 6m とし，隅角部短辺掘削長 L_2 を 3m，4.5m，6m の 3 通りを設定した。また，比較のために直線部の掘削長 L は隅角部の長辺掘削長と同じ 6m とその 2 倍の 12m とした。計算ケースを表-2 に示す。

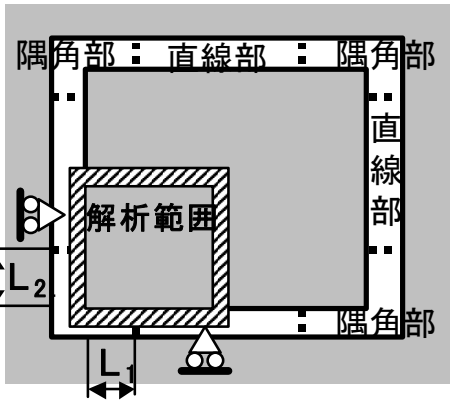


図-12 解析範囲

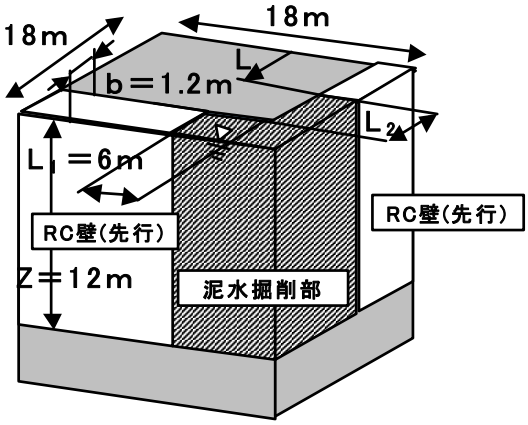


図-13 隅角部の安定解析モデル

表-1 解析に使用した地盤と安定液の物性値

材料	物性	設定値
砂地盤	単位体積重量 : γ_s	18.0kN/m^3
	ヤング係数 : E_{50}	6,7500kN/m^2
	ポアソン比 : ν	0.333
	非排水せん断強度 : S_u	0kN/m^2
	せん断抵抗角 : ϕ	35°
	ダイレイタンシー角 : ψ	35°
安定液	単位体積重量 : γ_m	10.3kN/m^3

表-2 計算ケースおよび結果

CASE	長辺掘削長 : L_1	短辺掘削長 : L_2	直線部掘削長 : L	Fs
1	6m	6m		1.25
2	6m	4.5m		1.30
3	6m	3m		1.42
4			6m	1.96
5			12m	1.51

4.3 数値実験結果

長辺掘削長 6m に対して短辺掘削長を変えた計算結果を溝長さ比 L_2/L_1 との関係で隅角部の安全率

を図-14 に示す。縦軸は，隅角部の安全率と直線部の安全率の比率である。

隅角部の安定性は，溝長さ比が大きくなると，すなわち短辺の溝が長くなると単調に低下する。このことは，直線部に対して直角方向に掘削すれば安定性が容易に損なわれることを意味する。

次に直線部の安全率と比較する。直線部掘削長 6m の場合は，隅角部の安全率は直線部より約 28～37%低下する。直線部掘削長が隅角部長辺掘削長の 2 倍の 12m では，隅角部の安全率は直線部より約 6～18%の低下である。数値解析で設定した条件下ではやや隅角部の安全率は低いものの，事例分析から得られた「隅角部長辺と直線部の掘削長比は 0.5 程度」は概ね妥当なものと判断できる。また，掘削長比が 0.5 を越える事例は，施工現場の地盤条件や地下水位条件などによって最適な掘削長比が異なる，あるいは数値解析結果のように直線部よりも安定性が低い状態で施工されていることを意味する。今後，計算条件を増やして安定性に寄与する要因を明確にしたいと考えている。

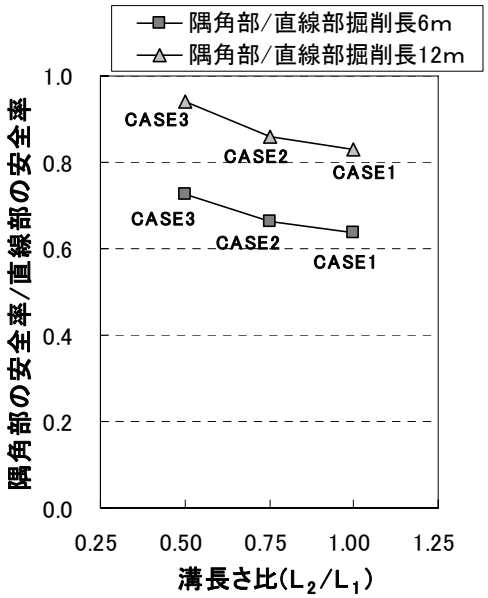


図-14　隅角部安全率に対する直線部の安全率との比較

５．模型実験 [12)]

5.1　実験の概要

模型実験の地盤材料にクロマイトサンドを用いる。砂質土地盤の安定問題に関する模型実験においては，模型の規模が小さいと，模型地盤内の残存する空気などの影響によって本来の変形挙動が現れにくい。本研究では地盤材料にクロマイトサンドを採用する。この材料は一般的な砂と類似のせん断特性を有し，さらに粒子密度が約 1.7 倍である [13)]。水中単位体積重量は約 2.5 倍に及ぶから，飽和地盤の実験では 1400㎜の土槽を用いても深さ 3250㎜ 規模の実験を実施したことに相当する。

模型実験の概要を図-15 に示す。溝形状をＬ字型とし，短辺掘削長 L_1/長辺掘削長 L_2 の比を 0.5 とする。模型地盤の作製手順は，まず泥膜を模したビニールシートを土槽内に設置した後に，空中落下法によりクロマイトサンドの地盤を作成した。次に，地盤を乱さないように微小な水頭差を保ちながら地盤の底面から水を徐々に浸透することで，模型地盤を飽和させた。泥水掘削溝の崩壊実験は，安定液を毎秒 10㎜ で低下させることで行った。その間，安定液水位と地盤内水位を水圧計で，L_1【1】，L_2【2】，交点【3】の地表面沈下量を変位計で測定した。

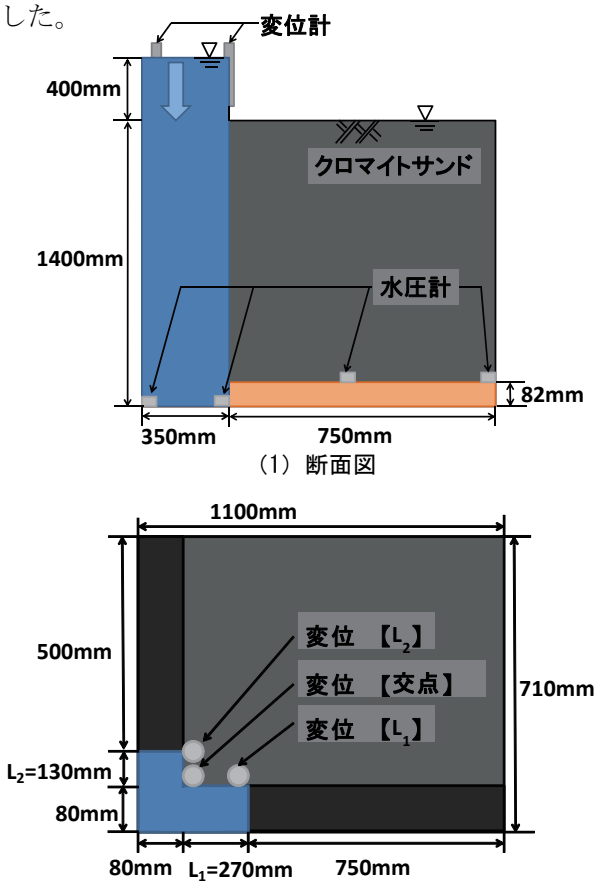


図-15 模型実験の概要図

5.2　実験結果

安定液水位と地盤内水位の差(水位差)および地表面沈下量の経時変化を図-16 に示す。地表面の沈下は，まず交点【3】から，次いで短辺 L_1【1】，長辺 L_2【2】の順序で生じる。最終的な沈下量は隅角部が最も大きく，長辺が最も小さい。隅角部は実験開始直後から明確な沈下が発生するが，短辺はそれに比べてその増加が小さい。長辺はある水位差を超えると沈下が急増し，ほぼ短辺と同じになる。実験終了後に観察された地表面の崩壊を図-17 に示す。隅角部の陥没とともに，先行壁の側面まで地盤が崩れた。地表面における崩壊範囲は先行壁と地盤の摩擦も重要な要因であると言える。

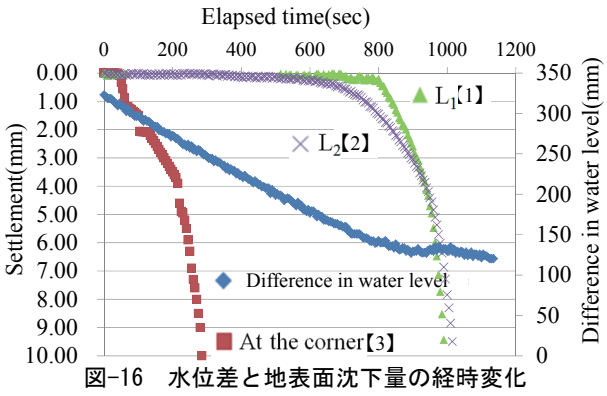


図-16　水位差と地表面沈下量の経時変化

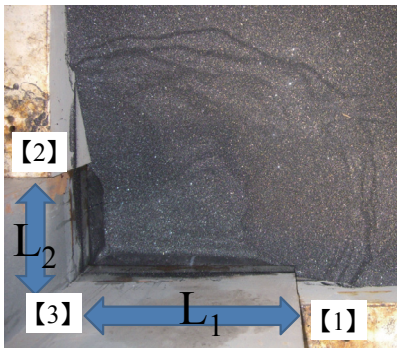


図-17 実験終了後に観察された地表面の崩壊

5.3　数値解析

安全率および変形を求めるために，三次元弾塑性有限要素法にせん断強度低減法を組み込んだせん断強度低減有限要素法（SSRFEM）を適用した。表-1 に解析に用いた地盤と安定液の物性値を示す。

解析で得られた水位差と地表面沈下量の関係を模型実験の結果と合わせて図-18 に示す。両者の差は約 10%程度である。このことから適用した数値解析手法は概ね模型実験を良く再現していると判断できる。

表-1　解析に用いた地盤と安定液の物性値

材料	物性	設定値
砂地盤	単位体積重量:γ_s	30.0kn/m^3
	ヤング係数:E_{50}	67,500kN/m^2
	ポアソン比:ν'	0.3
	せん断抵抗角:ϕ	32.1°
安定液	単位体積重量:γ_m	12.26kN/m^3

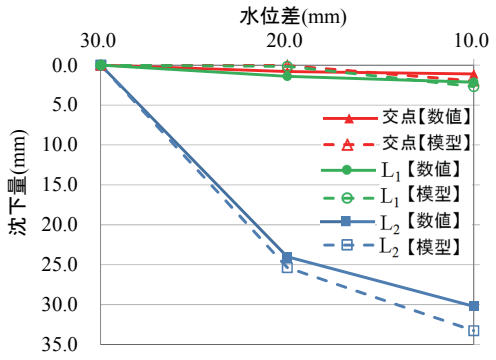


図-18模型実験と数値解析の沈下量と水位差の関係

6．まとめ

これまであまり研究されていなかった隅角部の安定機構と評価方法を検討するために，事例を収集して分析を行い，経験則を見いだした。そして，三次元弾塑性 FEM を基本とする SSRFEM の数値解析および模型実験により，経験則に対して力学的な妥当性を検討した。その成果を以下にまとめる。

① 事例の収集分析より、隅角部の安定性に関する施工現場の経験則として，「隅角部長辺と直線部の掘削長比が概ね 0.5」を見いだした。

② 数値解析の結果，「隅角部長辺と直線部の掘削長比」は隅角部の安定性を表現する指標になり得ることを確認した。

③ 数値解析手法は模型実験の結果を再現できたことから妥当な手法と判断できる。

参考文献

1) 佐藤寛・秋野矩之：泥水掘削溝壁面の安定計算法,第10回土質工学研究発表会, pp1023-1026，1975
2) 内田博・田中邦熙・水谷仁：ベントナイト泥水による掘削壁面の安定性について(その2),鹿島建設技術研究所年報, No.18, pp.95-105，1971
3) 大塚義之：吉田泰治(非粘性土地盤における掘削泥壁面の安定について)へのディスカッション,土質工学会論文報告集, Vol.26, No.4, pp.205-507，1986
4) 樋口雄一・東田淳・名倉克博・川崎宏ニ：砂地盤に築造される泥水掘削溝の新しい安定計算法,土と基礎, Vol.42, No.3, pp.7-12，1994
5) 石井武司：三次元弾塑性FEMによる泥水掘削溝壁の安定性評価に関する研究，群馬大学学位論文，2004
6) 岡原美知夫・大志万和也・多田浩彦：地中連続壁基礎工法ハンドブック-施工編-,総合土木研究所,pp56-75，1991
7) 地中連続壁基礎協会：地中連続壁工法Q&A集, pp75-76
8) 片桐雅明,石井武司,齋藤邦夫,他2名：泥水掘削溝の新しい安定検討手法の一提案, 第44回地盤工学シンポジウム平成11年度論文集，pp.305-312，1999
9) Takeshi Ishii, Kunio Saitoh, et al. : Estimation of global safety factor of slurry trenches by 3-D FEM，Proceedings of the 9th Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics，pp.2513-2518，1997
10) 東日本旅客鉄道編：地下連続壁の溝壁安定性の設計施工の手引，日本鉄道施設協会，2003
11) 本田敦久・斎藤邦夫・石井武司・永田晋介：隅角部を有する泥水掘削溝壁における安定性の検討, 第32回土木学会関東支部技術研究発表会，2005
12) 田沼憲一・金澤伸一・石井武司・齋藤邦夫：泥水掘削溝壁の隅角部安定性に関する検討, 第39回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，2012
13) 高橋彬・斎藤正幸・齋藤邦夫・石井武司：クロマイトサンドのせん断特性, 第35回土木学会関東支部技術研究発表会，2008

31. リアルタイムアラート伝達システム

安全情報のリアルタイム伝達システムの構築

東亜建設工業㈱　　○ 岡山　健次

1．はじめに

従来から気象情報を携帯電話にメール送信するサービスはあるが、作業を行っている最中に携帯電話を取り出してメール内容を確認するのは非常に危険である。また、気象情報以外のメールを受信することからメール受信に対してなれてしまい重要な情報を取り逃がすことも考えられる。

リアルタイムアラート伝達システムは、ナースコールや騒音の激しい工場等で用いられている腕時計型受信機[1)]を用いてメールで入手した気象情報（地震情報、注意報、警報等）を自動で同時に現場内の複数の人間に伝達するものである。

腕時計型受信機は、通常は腕時計として使用でき、メッセージを受信した際に振動と音でしらせるので、作業中でも簡単に確認することができる。また、気象情報以外にも任意のメッセージを伝達することが可能であり、現場内の情報共有が容易になる。

本論分では、開発したシステムの概要について紹介する。

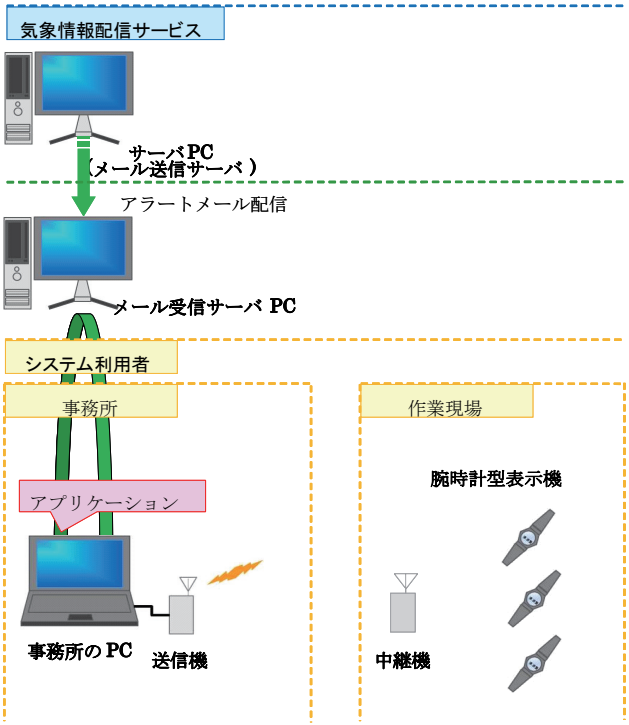


図 1　概要図

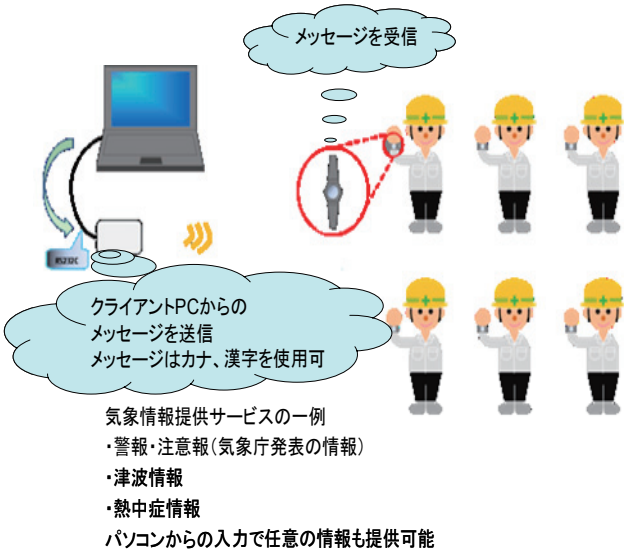


図 2　運用イメージ図

2．システム概要

本システムは、気象情報配信サービス会社からメールで配信される気象情報（地震情報、注意報、警報等）を専用アプリケーションで受信し、腕時計型受信機で表示できる文字数（10 文字）以内のメッセージを自動で作成し、即時に現場内に配信する。また、現場内に任意のメッセージを送信する機能も有しているので、現場内の情報伝達手段としても利用が可能である。本システムの概要図を図 1 に、システムの運用イメージを図 2 に示す。

3．システム設計要件

本システムの設計するにあたり、以下の点に留意し設計を行った。

① 日々変わる現場の状況に対して、柔軟に対応するために、簡単にシステム運用環境を構築できるようにする。

② 急な気象状況の変化に対して即時に情報を配信できるシステムを構築する。

③ 複数の業者が作業を行う現場において、現場情報は任意のグループを設定し、任意の人に対して送信できるようにする。

表 1　配信文字列

NO	気象情報種別	配信データ （サンプル）
1	地震速報	福島県震度 3
2	地点地震	福島県震度 3
3	津波予報	津波注意報 0.5m
4	津波到達予想時刻	津波到達予想 12:30
5	注意報警報	大雨警報 洪水警報 雷警報 大雨注意報 洪水注意報 雷注意報
6	氾濫注意情報	加古川水位危険度 1
7	東海地震情報	東海地震予知 東海地震注意 東海地震観測
8	竜巻注意情報	竜巻発生注意
9	土砂災害警戒情報	土砂災害警報
10	降雨観測	雨雲あり
11	記録的短時間大雨情報	記録的短時間大雨
12	海上警報	海上強風警報 海上うねり警報 海上着氷警報　他
13	火山情報	霧島山（火口付近規制）
14	台風発生情報	南大東島台風 8 号発生
15	台風進路情報	台風接近
16	今日明日の天気	配信なし
17	週間天気	配信なし
18	落雷監視	5km 県内雷観測
19	熱中症予報	熱中症厳重警戒

４．機器構成

本システムは、地震情報、気象警報・注意報、熱中症情報などを配信するアプリケーション、デスクトップ型パソコンまたはノート型パソコン、送信機、中継機、腕時計型受信機で構成される。

送信機、中継機は特定省電力無線で通信するため、免許・申請等は不要であり、中継機には電池を内蔵することが出来るので、電源を気にすることなく簡単に取り付け、取り外しが出来る。腕時計型受信機及び送信機を写真 1 に示す。

５．システム機能

地震情報、気象警報・注意報、熱中症情報は気象情報配信サービス会社よりメールで配信される。アプリケーションはこれらの情報を取得し、配信用文字列を作成する。さらに、作成した文字列及び作業員が入力した任意の現場情報を腕時計型受信機へ送出するデータフォーマットの変換し配信を行う。

写真 1　左：腕時計型受信機　右：送信機

5.1　配信データ作成機能

気象情報配信サービス会社のメールから配信用文字列を作成する。熱中症警報に関しては熱中症予防の評価指数であるWBGT値に対応する配信文字列を作成する。

気象情報は既存の気象情報配信サービスを利用し、システムのランニングコストを下げている。

しかし、既存のサービスはメール本文が長いため、そのまま腕時計型受信機に送ることが出来ない。そこで、メール内容を自動で解読し、必要な情報のみを抽出し、配信文章を作成するシステムを構築した。配信用文字列を表1に示す。

5.2　メール受信機能

急な気象条件の変化に即座に対応するために、気象情報配信サービス会社からのメールは常に監視を行う。ただし、作業現場のインターネット環境への負荷を考慮し、メールサーバーへのアクセス間隔を設定できる機能を有する。本システムでは新着メールの監視間隔は1～10分の間で設定できるようにした。

写真2　運用状況

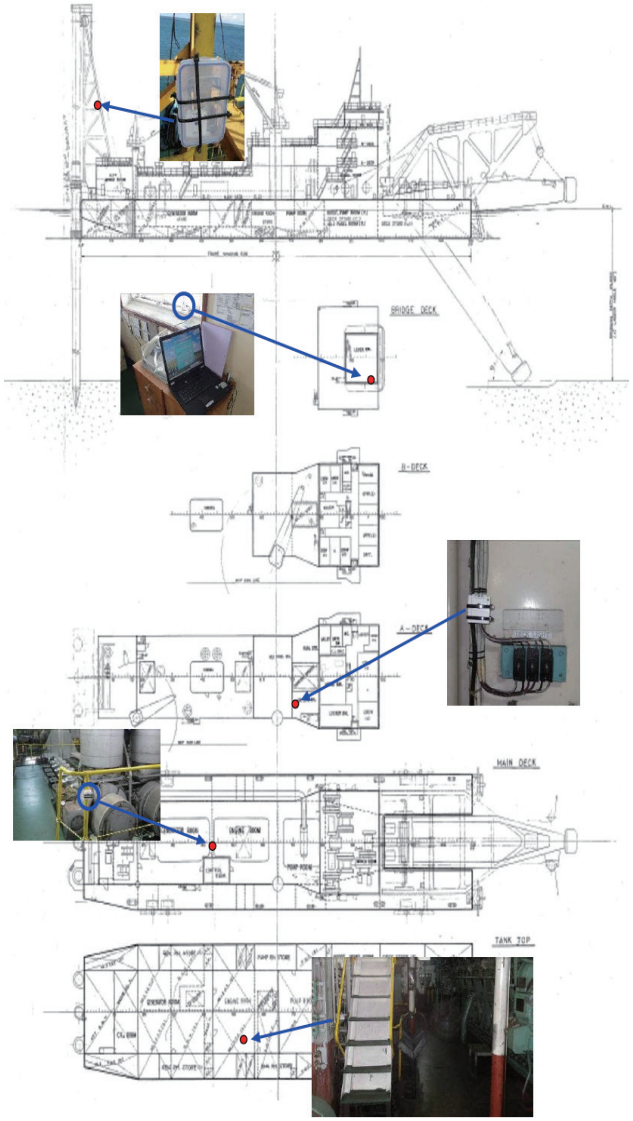


図2　送信機・中継機配置図

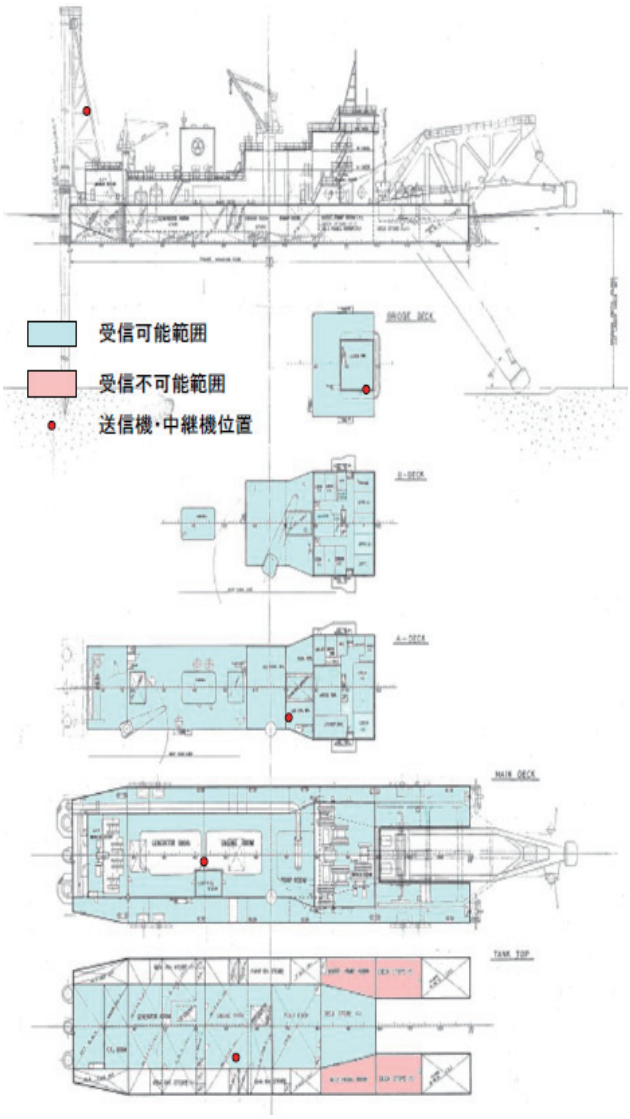


図 3 受信可能範囲

5.3　メッセージ配信先管理機能

地震情報、気象警報・注意報、熱中症情報は基本的に現場全体に対してメッセージを送るが、任意に設定できる現場情報は任意の人に対して送信できる機能を有する必要がある。メッセージ配信先管理機能では、頻繁に連絡をする集団をグループとして設定することで、メッセージの配信を効率的に行うことが出来る。無線機器の制約上データの連続送信には30秒以上間隔をあけて送信しなければならないという条件があり、一人ずつ送信すると送信完了までに時間がかかる。そのため、本システムでは腕時計型受信機上で設定できる呼び出し用IDを使い、一度の送信で複数人が受信できるグループ設定を行っている。

６．現場導入試験

開発したシステムを実際の施工現場で導入試験を行い、施工現場での電波の到達範囲や作業員に対する安全対策としての有効性を確認した。運用状況を写真2に示す。

6.1　導入試験環境

実施期間：平成23年11月～平成24年2月
実施場所：青森県八戸市
実施工種：ポンプ浚渫工

6.2　試験方法

作業船の操船室にパソコンと送信機を設置し、中継機を船内各所に設置し、作業船内の電波の受信状況を確認する。

施工終了後ヒアリング調査を行う。

6.3　試験結果

送信機 1 つと中継機 4 つを使い、船内に本システムの受信環境を構築した。送信機及び中継機の配置を図 2 に示す。また、受信可能エリアを図 3 に示す。

通信機及び中継機の配置によって船内の約 90 パーセントの場所でメッセージを受信できることを確認した。残り 10 パーセントの場所も中継機を増設すれば受信可能であることが確認できたが、受信できなかった場所は倉庫になっており、施工中

作業員が立ち入らない場所であること、普段鉄の扉が閉まっている場所であるため、通常運用時には問題なく使用することが出来た。

ヒアリング調査の結果、腕時計型受信機は騒音の激しい作業中でも確実に作業員に情報を伝達できることが確認できた。

7．終わりに

本稿では、腕時計型受信機を用いたリアルタイムアラート伝達システムの概要及び実証実験について紹介した。騒音の多い工事現場では、スピーカによるアナウンスでは情報を聞き逃す可能性がある。実証実験により、腕時計型受信機では、腕時計の振動で着信を知らせるため、情報の取り逃がしが減少することが確認できた。また、簡単にシステムを構築でき、情報の確認方法も簡単であるため、今後有効な情報伝達手段になりえると考えられる。

さらに、今後気象情報のみならず騒音や振動など様々な計測機器と組み合わせて使用することで更なる施工品質と安全性の向上が期待できる。

参考文献

1) ㈱時事通信出版局, 「J2TOP」, 7月号, pp24～25, 2012年

32. 100m 以上の超高層建物における閉鎖型解体工法「テコレップシステム」の開発および実施適用

大成建設(株)　○ 市原　英樹
同　萱嶋　誠
同　梅津　匡一

１．はじめに

近年，超高層建物の解体需要増加に伴い，近隣環境保全や安全性向上，あるいは解体工事の効率化といった観点から，新しい解体工法の開発・実用化が進んでいる。

従来の解体工法は，建物に隣接して揚重機（クローラークレーン）を設置し，大型解体重機（ブレーカー）を用いて最上階で部材を粉々に破砕し，揚重機で外部から荷下ろしを行うのが一般的である。建物の外周部に仮設足場と養生材を設置するものの，上部が解放されるため，図-1 に示す課題が発生する。工事中の騒音の影響拡大やコンクリートガラから発生する粉塵飛散が広範囲に及ぶこと。外部荷下ろしによる解体部材の飛来落下の危険性が増すこと。工事が長期化し，近隣の方々へ与える圧迫感・不安感が増すこと。更に,上空の風は通常でも地上の２倍程度となるため，台風時以外も作業不能日が増え工期が長くなり,仮設養生材の設置，撤去，盛り替えも高所危険作業となり安全対策のコストが高くなる,などが挙げられる。

筆者らも，同様の背景から，閉鎖型解体工法「テコレップシステム」（以下「本工法」）の開発を行い[1)]，高さ 100m を超える建物の解体工事としては，国内 2 事例目となる実際の建物において，実施適用と性能検証を行った。本報では，その基本計画および適用結果について報告するとともに，本工法の重要な環境配慮要素技術の一つである「荷下ろし発電」に関する性能検証結果を報告する。

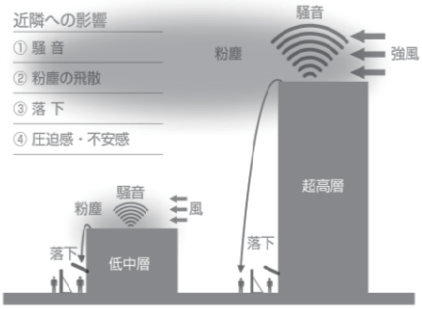


図-1　超高層建物解体における課題

２．閉鎖型解体工法の概要

本工法の概要を図-2 に示す。既存の最上階躯体を有効利用して閉鎖空間を構築し，内部で解体工事を行うことを特徴としている。内部には水平搬送機（天井走行クレーン）および垂直搬送機（テルハ）を設置し，全ての揚重作業を閉鎖空間内部で完結させることにより，飛来落下災害のリスクを無くしている。建物は最上階から 1 フロアずつ下階に向けて解体を進める。1 フロア解体後の閉鎖空間の盛り替えは，全体を支える仮設柱に組み込んだ自動降下装置を使用し，安全かつ敏速に行うことができる。

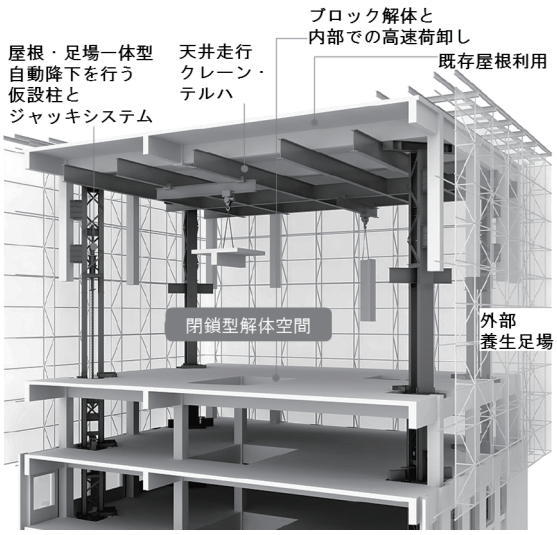


図-2　閉鎖型解体工法の閉鎖空間と主要機能

３．実施適用

3.1　建物概要

本工法における実施適用は,2011 年 2 月より 12 月まで行った。

解体建物の概要を表-１に示す。適用した建物は，鉄骨造，地上 24 階建て（塔屋１階），高さ 105m，長辺方向約 75m，短辺方向約 25m，建築面積 1,763 ㎡の建物である。外壁は金属パネルに天然石材が

貼り付けられたストーンパネルが施されている。

表-1　建物概要（及び建物外観写真）

用途	事務所・店舗・駐車場
敷地面積	3,557.8m^3（1,077.3坪）
建築面積	1,762.5m^3（533.7坪）
延面積	52,519.4m^3（15,902.9坪）
	地下：12,610.4m^2
	（3818.4坪）
	地上：39,909.0m^2
	（12084.5坪）
構造・階数	RC・S造 地下：4階
	地上：24階
	塔屋：1階
	軒高：99.95m
	最高高さ：105m
	建物深さ：GL-22.65
その他	地上解体，地下解体

3.2　構造計画の概要

建物頂部に閉鎖空間を構築するため，既存建物の屋上階部分の大梁，床スラブを屋根として活用し，外周を囲う壁として吊り足場を計画した。39本の既存柱を切断し，新たに12本配置した仮設柱で閉鎖空間の重量(1300ﾄﾝ)を支える計画とした。

また，仮設柱は解体階の下 3 層まで貫入させ，各フロアレベルで水平ガイドを用いて水平方向に固定することにより地震力，風荷重などの水平力に受ける計画とした。

仮設柱を解体階の 2 層下の既存大梁上に平面的に45度傾けて配置した梁Bで支えることにより自重を既存建物の構造フレームへ伝達させた。ジャッキ直下に位置する梁 A は，ジャッキダウンの間のみ，重量を支える役割を担う。

3.3　施工計画

本工法システムの施工計画図（断面図）を**図-3**に示す。高揚程テルハ直下の床スラブを，鉛直方向に連続して先行解体し，荷下ろし開口を２カ所設けた。既存 ELV シャフトはコンクリートガラ専用の荷下ろし開口として一部利用し，搬出のための積み込み作業も建物内で実施した。

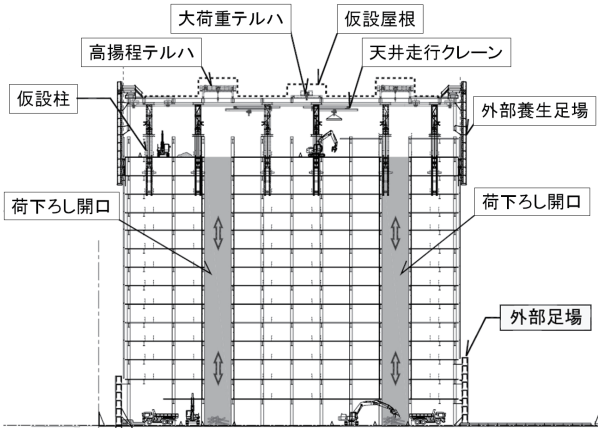


図-3　仮設計画断面図

3.4　基準階解体

基準階の解体工事は，以下の手順で実施した。まず，1～2 日目に床スラブ及び内部梁の解体を，カッターと重機圧砕工法を併用して行った。カッターによる切断は解体階で行い，重機による圧砕は，1 フロア下の階に重機を据え置いて行った。解体時に生じたガラ等は，随時専用の荷下ろし開口から搬出した。切断した大梁，小梁は高揚程テルハにて搬出を行った。2 日目の後半より外壁の撤去を開始し，3 日目までには，全ての外壁の撤去を完了した。解体材の荷下ろしは，2 基の高揚程テルハを用い，1 基を柱，梁鉄骨用，もう 1 基を外壁用とし，4 日目まで搬出を完了させた。4 日目には，ジャッキダウンの準備を開始するが，上部に吊り上げられていた梁 A 及びジャッキを次の解体階の外周大梁上に下ろし，ジャッキの点検及びジャッキ位置の微調整を行い準備完了とした。

3.5　ジャッキダウンの実施

ジャッキダウンは，計測室にてジャッキの操作・挙動を把握すると共に，仮設柱の変位および鉄骨のひずみをリアルタイムに監視しながら実施した。

解体階では常時ジャッキの可動状況を目視で監視した。解体階より 1 フロア下の階の監視については，ジャッキダウン直後の梁 B のスラブ通過完了まで監視を行い，その後，解体階より 2 フロア下の階へ移動し，梁 B が既存大梁上に着床しジャッキダウン全行程が完了するまで監視を行った。本適用物件の基準階高は 3925ｍｍである。今回使用したジャッキのシリンダーストロークは 150ｍｍであり，シリンダーが上下移動を繰り返すことにより閉鎖空間全体を１層分降下させた。

各階の解体工事完了後のジャッキダウンは，２時間程度で完了することができた。これは，全体の安全確認を行いながら作業を進める上で，適正な速度であった。写真-2 にジャッキダウン前後の内部状況を示す。全てのジャッキダウンにおいて，12 台のジャッキは同期を維持し，安全に降下することができた。

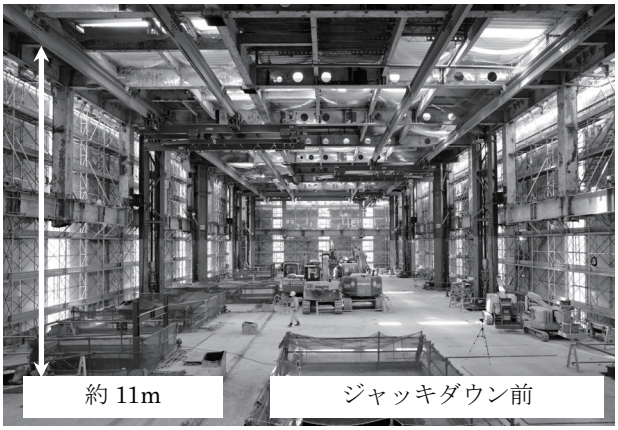


写真-2（１）　ジャッキダウン前の内部状況

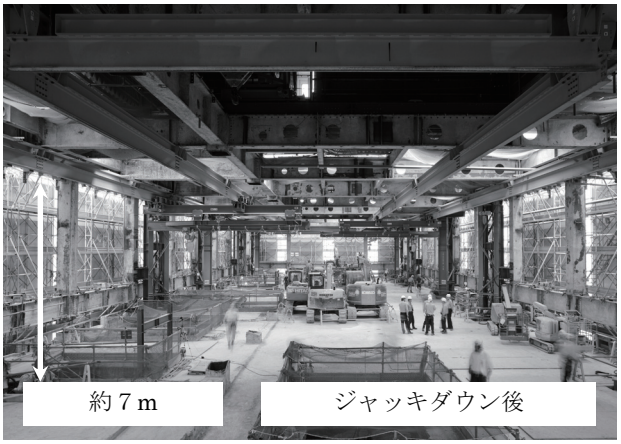


写真-2（2）　ジャッキダウン後の内部状況

3.6　解体工事の経過状況

閉鎖空間構築直後から全ての工事を完了するまでの工事進捗状況を写真-3 に示す。基準階解体は，閉鎖空間構築後 5 ヶ月間で 24 フロアの解体と 21 回のジャッキダウンにより完了し，ジャッキダウンによる下階への盛り替えが安全に行えることが実証できた。その後，外周足場を地面に自立させ，既存建物と足場のつなぎ材を撤去し，2 階立ち上がり部分の解体と閉鎖空間全体の解体を行った。解体工事期間中における悪天候による作業不能日は発生せず，工事工程を予定通り終了することができた。また，地震や強風時における閉鎖空間全体の変位および仮設柱の鉄骨ひずみも，モニタリングによりデータ採取ができ，外乱時の構造的安全性も確認できた。

4．荷下ろし発電システム適用結果

4.1　高揚程テルハ概要

本工法では，地上までの荷下ろし用として高揚程テルハ（写真-4）2 基，1 フロア下の階への重機や仮設材の荷下ろし用として低揚程テルハ 1 基，合計 3 基を配置する計画とした。図-4 にテルハ配置，表-2 に高揚程テルハの主な仕様を示す。

写真-4　テルハ外観（左）と荷下し状況（右）

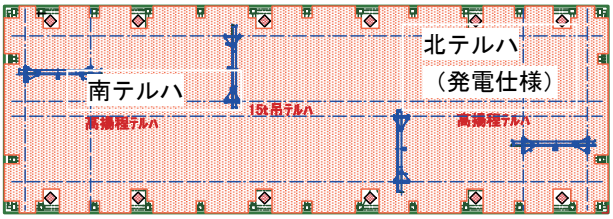


図-4　テルハ配置図

表-2 高揚程テルハの仕様

定格荷重		8.0　t
フック自重		0.3　t
速度	巻　上	0.483 m/s ～ 0.242 m/s （29.0 m/min ～ 14.5 m/min） 0.0t ～ 8.0t
	走　行	0.083 m/s （ 5.0m/min ）
電動機	巻　上	30.0 kW 4P CONT インバータ制御
	走　行	2×0.2 kW 4P CONT インバータ制御
揚　程		135m
レールスパン		4.0m
レール		30Kgレール
走行距離		9.0m
電　源		220/200V　60/50Hz
安全装置		巻過防止装置
		過負荷防止装置
		走行制限装置

荷下ろし発電システムは，2 基の高揚程テルハのうち 1 基に適用しており，システム適用効果を評価するパラメータの一つとして，それぞれの消費電力を計測・比較した。

4.2　荷下ろし発電システム概要

図-5 に発電システムの機構図を示す。

解体材の荷下ろし時に生じた回生電力は，キャパシタに一時的に蓄電される。テルハのウィンチ巻き上げ時には，キャパシタに蓄電された電力が

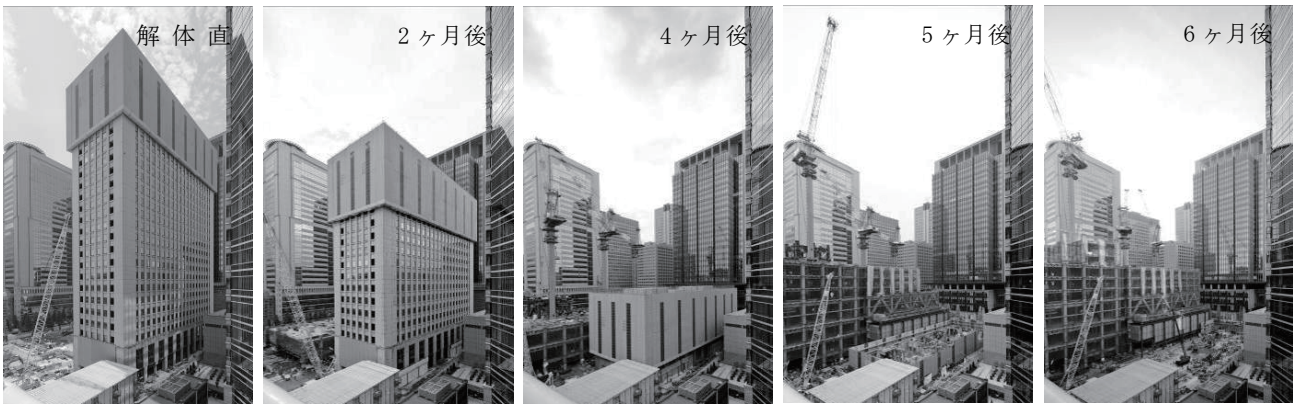


写真-3　解体工事の進捗状況外観

DC/DC コンバーターで変換された後に，ウィンチ巻き上げ用モーターの駆動力として再利用される。

また，回生電力をテルハ巻き上げ以外の用途にも有効利用するため，キャパシタから電力変換装置（CVCF）を介して給電可能な 10kW（AC200V/または AC100V）の専用電源を併せ持つ仕様とした。

ただし，長期休暇明けなどキャパシタの蓄電量が不足するケースが想定されたため，商用電源からもテルハ巻き上げおよび専用電源への給電が可能な機構とした。

更に，揚重作業時のモーター負荷，キャパシタの蓄電状況，および専用電源の使用状況を常時確認可能なモニタリングソフトを開発した（図-6）。実際の施工時には，発電システムの稼働状況を現地ないし遠隔地から随時点検した。

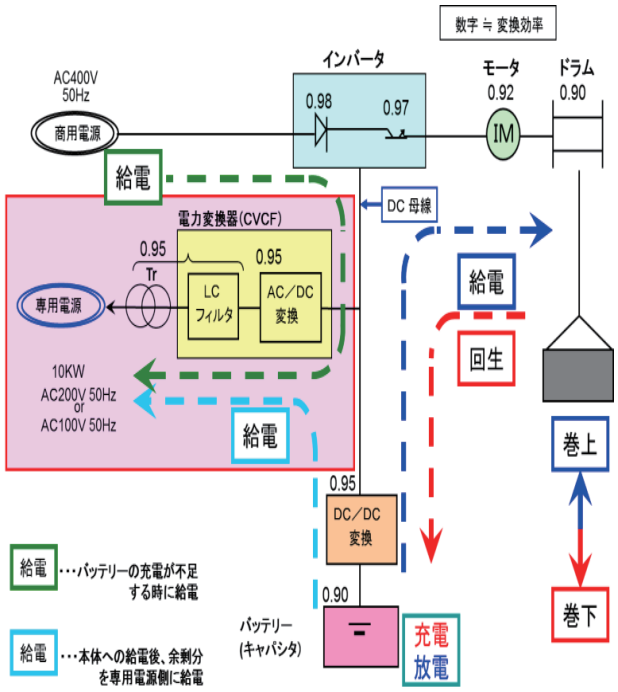


図-5 荷下ろし発電機構図

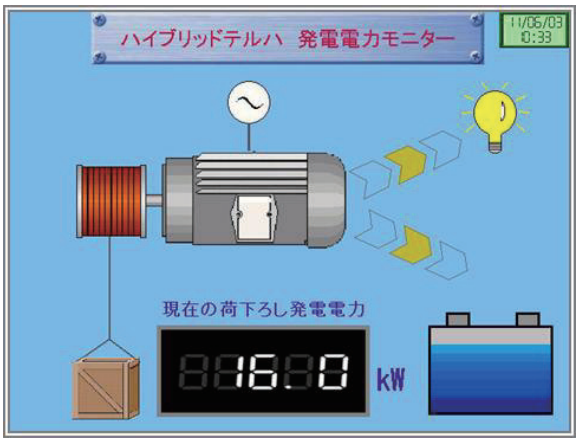


図-6 回生電力モニタリング画面

4.3 実測概要

本システムの発電性能を確認するため、基準階解体工事（21 階：揚程 83m～4 階：揚程 16m）の揚重作業時における発電量を測定した。具体的な測定項目は次の通りである。

① 総揚重量　：解体階別の荷下し部材総重量
② 揚重回数　：解体階別の往復揚重回数
③ 回生電力量　：荷下し時の総発電量
④ 消費電力量　：荷上げ時の総消費電力量

また、上記①～④の測定データをもとに理論的な回生電力量を算出し、システム設計時における仮定条件の妥当性を評価した。

4.4 揚重量実測結果

図-7 に 2 基のテルハの揚重量および揚重フック数（往復）を示す。

揚重量，フック数ともに北テルハ（発電システムあり）よりも南テルハ（発電システムなし）の方が多く，実際の使用量に偏りが見られた。これは，北テルハ側よりも南テルハ側からの方が，より多くの搬出入量を確保できたためである。発電仕様のテルハと通常のテルハを併用する場合は，仮設計画上より多くの搬出入量が確保可能な荷下ろし開口側に発電仕様のテルハを設置することが，発電効率向上の観点から望ましいと言える。

4.5 吊り荷重別回生電力測定結果

キャパシタの蓄電性能および専用電源利用効率の把握を目的に，同一揚程で異なる負荷の揚重作業を行った際の，消費電力および回生電力を測定した。図-8 に揚程 95mにおける 1 フック当たりの消費・回生エネルギー内訳を示す。

新築工事の荷揚げ作業を想定し，吊り荷重 4t の荷揚げを行い，空フック（自重 0.3t）を下ろした場合の消費電力は 4800kJ であり，空フックで 1 フック揚重を行った場合の消費電力は 1300kJ であった。

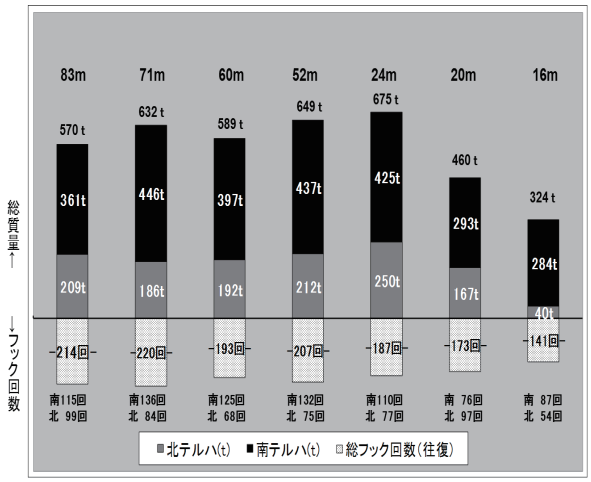


図-7 揚重量・フック数実測結果

一方，吊り荷重 2t で荷下ろしを行い，空フックを上げた場合，消費電力 1000kJ を上回る 1800KJ の回生エネルギーが生じた。また，吊り荷重 6t 以上では，3800kJ の回生電力がキャパシタに蓄電され，キャパシタの蓄電容量を上回る余剰エネルギーが，CVCF を介して専用電源に移行した。

さらに，テルハの最大定格荷重 8t では，総回生エネルギー6100kJ に対し，約 38%の 2300kJ を専用電源に活用することができた。

このことから，荷下ろし発電システムを活用するためには，キャパシタ容量を適切に考慮した揚重計画の立案が必要であると言える。

4.6　揚程別回生電力測定結果

図-9 に揚程別の回生電力量および消費電力量を示す。全測定期間における総回生電力量は 555kWh、総消費電力量は 449kWh（待機電力除く）となり、荷上げに要する電力を荷下し時の回生電力で賄うことができることを確認できた。揚程別に見ると、52m 以上の高さでは回生電力量が消費電力量を上回ることから、解体建物の高さが高くなる程、高い発電効率が期待できると言える。

4.7　回生電力試算条件の評価

荷下ろし発電システムの設計段階における，仮定条件の妥当性を評価し，今後の計画時における発電シミュレーション精度を向上させることを目的に，回生電力量の実測値と，測定データから算出した理論値を比較した。結果を図-10 に示す。理論値の算出方法は下式の通りである。

$$W = N \cdot \eta \cdot P \cdot t \quad , \quad P = \frac{M \cdot V}{6.12 \cdot d}$$

W　：回生電力量〔kWh〕
η　：充放電効率（＝0.7）
N　：揚重回数〔回／階〕
P　：モーター負荷〔kW〕
t　：揚重時間〔h〕
M　：吊り荷重〔t／回〕
V　：揚重速度〔m/min〕
d　：機械定数（＝0.85）

70m 以上の高揚程作業時には実測値が理論値を上回り，揚程 40m～60m でほぼ同等，揚程 30m 以下では実測値が理論値を下回った。揚程別の揚重回数や吊り荷重に多少のばらつきは見られたものの，理論値と実測値は概ね整合するはずである。

このことから，理論値の算出時にはキャパシタ充放電効率を一定と仮定したのに対し，実際は揚程が低くなるほど充放電効率が低くなると考えられる。

図-11 は揚重作業 1 サイクルにおけるキャパシタ電圧の推移を揚程別に示したものである。充放電時のキャパシタ電圧変化量が小さくなるほど、キャパシタの充放電効率が低くなるが，本発電システムにおいても，揚程が低くなるほど，電圧の変化量が小さくなることが確認できる。

したがって，低層階解体時には荷下し 1 回当たりの吊り荷重を増やすなど、充放電効率の変動を考慮した施工方法を検討することにより，発電効率を改善することが可能であると思われる。

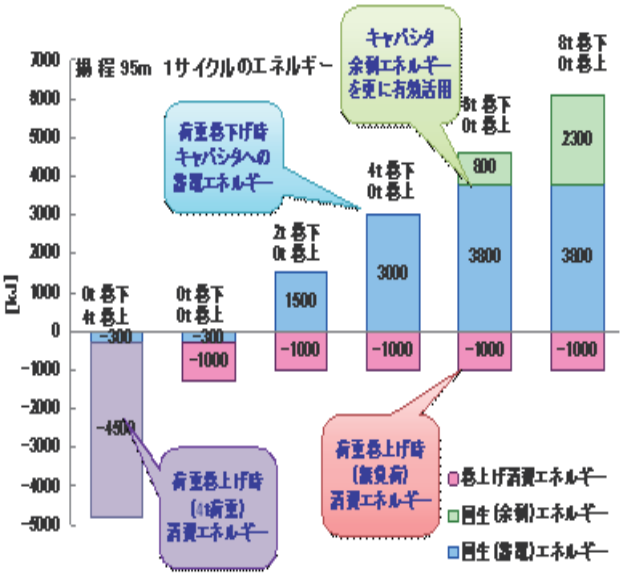


図-8 1 フック負荷別消費/回生エネルギー

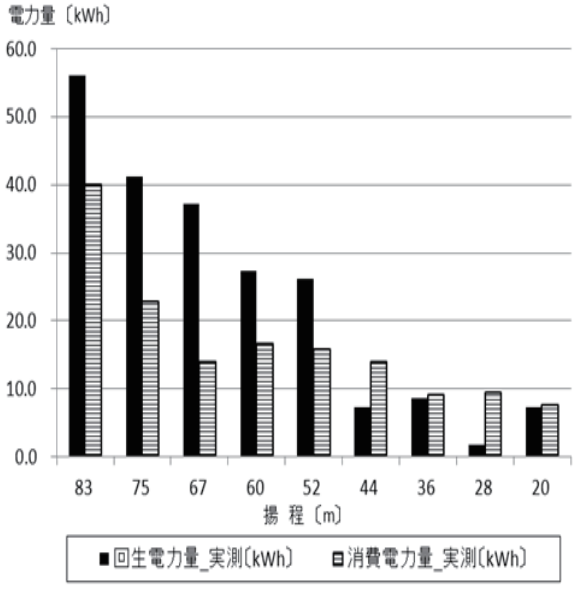


図-9 揚程別消費/回生電力

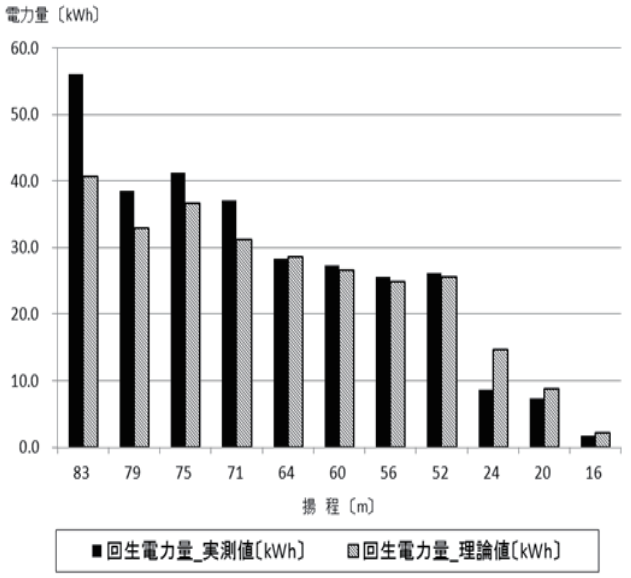


図-10 揚程別の回生電力理論値・実測値

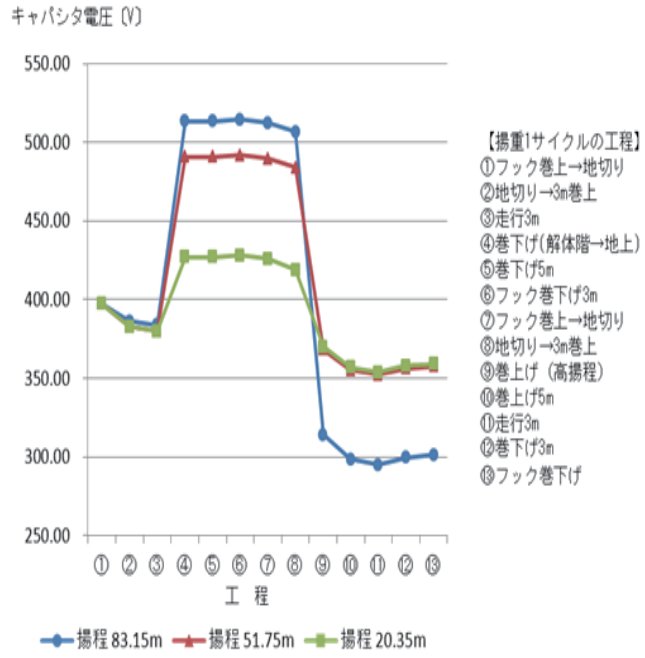


図-11 揚重 1 サイクルにおけるのキャパシタ電圧変化

4.7 まとめ

荷下ろし発電システムの実施適用により，次の知見が得られた。

① 吊荷重 6 t 以上で余剰電力発生（揚程 95m）
② 高さ約 50m以上で回生電力が消費電力以上
③ 揚程が低くなるほど充電効率が低下

これらの知見をもとに，より正確な発電効果の試算方法を構築し，揚重計画を正確に反映したシステム設計を行っていく必要がある。

今回開発した発電システムは，新築工事とは逆に荷下し量が荷上げ量よりはるかに多く，かつ高揚程であるという，超高層建物解体工事に特有の施工条件を最大限に活かしたものである。

実際の施工により基本的な性能が満たされていることを確認できたが，システム設計方法見直しやキャパシタ特性に応じた揚重方法検討等により，発電効率の改善を行うことが今後の課題である。

5．おわりに

本工法の実施適用による知見を以下にまとめる。

・本工法は，全ての作業を内部で行うことから，在来の解体工法による解体工事と比較して，工事騒音，工事粉じんの飛散，コンクリートガラ小片の飛来落下など，外部への影響を大幅に低減できた。
・閉鎖空間を構築する構造体の下階への盛り替えに，ジャッキダウン機構を採用したが，本工法での操作安定性，安全性，効率性など，その有効性が実証された。
・今回，各種のクレーンを組み合わせて作業を行った結果，在来的な解体工事と同等以上の安全性と効率性を確認できた。

参考文献

1）市原英樹他：超高層建物閉鎖型解体工法の開発（その1）工法の概要，日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集，材料施工，pp.167～168, 2012年

2）藤井裕之他：超高層建物閉鎖型解体工法の開発（その7）天井走行クレーンおよびテルハを用いた搬送システム，日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集，材料施工，pp.179～180, 2012年

謝辞

本工法は，100m以上の超高層建物において最上部の構造体を利用して閉鎖空間を構築し，その内部で全ての解体作業を行い，1 フロア解体するごとに閉鎖空間のジャッキダウンを実施した。
その結果，解体作業が安全かつ効率的におこなえること，近隣の方々が解体工事を意識することなく，順調に工事を実施できることが実証された。
最後に，開発に際し多大な御協力を頂いた関係各位に心から謝意を表します。

33. 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」

鹿島道路(株)　○　端　孝之
鹿島道路(株)　　木下　洋一

１．はじめに

分粒装置付きロードスタビライザ(当社名称クラッシングセパレータ)の原型は1989年に開発し，BOMAG製大型ロードスタビライザの撹拌装置にスクリーンを取り付け分粒機能を持たせた機械(写真-1)である。ゴルフ場造成工事で，軟岩を破砕して客土が不要で，直接芝の貼り付けを可能とした。独自の開発機械であり，現在も運動場の改良工事などに用いられている。今回，クラッシングセパレータに対し改良点を考慮し，新たに浅層改良に特化した当社名称「ストーンセパレータ」(写真-2)を開発したのでこれを報告する。

写真-1 クラッシングセパレータ

写真-2 ストーンセパレータ外観

２．背景

校庭やグラウンドなどの運動施設の表土は，長年の使用により圧密されて透水機能が低下し，不陸が発生して水溜りが多く出来るようになり，運用に支障をきたすようになる。そのように機能が低下した状態に客土し，撹拌・分粒改良を行うことで機能回復を図る事が出来る。

クラッシングセパレータは大型の機械で回送にはトレーラが必要であり，騒音も大きいものであり周辺環境に気を配る必要があった。また，施工深さは 350 ㎜程度を標準としており，それよりも浅い施工の場合は土の抱え量が減ることから分粒効率が低下する問題点があった。近年では新規にゴルフ場を造成するような市街地から離れた場所の大規模な工事が減り，都市部での比較的小規模なグラウンド等の改良工事が増加する傾向にある。

以上のことを踏まえ新たに開発したのが今回の「ストーンセパレータ」である。

３．概要

ストーンセパレータは車体後方のフード内にあるロータを回転させ，機能の低下した表土をビットで撹拌混合し改良を行う。通常のロードスタビライザと異なるのは，この時，小石や粗粒塊などは下層へ，細粒分は表層へとフード内にあるスクリーンで分離させる事が出来る事である。除礫作業が不要で土のかきほぐし，混合作業を行う事が出来る。撹拌・分粒までを 1 パスで行う事が出来るので，効率的な工法である。また，下層へ分離された石の層は排水層として役立つ。同時に補充材や改良材を添加・混合することで用途に応じたグラウンド等にリフレッシュする事が出来る。

本体の寸法と重量はセルフローダで回送できるように全幅は 2450 ㎜，重量は 13 トン以下となっている(写真-3)。トレーラを使用せずに回送できるため，回送コストの低減が出来，狭い現場内での移動のし易さなども考慮している。

写真-3 セルフローダ搭載の状況

４．性能・機能

施工深さ 100～200㎜程度の範囲に特化しており，施工速度は 4~10m/min 程度であるが，深さや土の固さによって変動する。折り返しの移動なども含み，1 日(8 時間)で約 1000～2000 ㎡程度の施工を行う事が可能である。車体は扱いやすさを重視し，上面が平坦になっており左右・前方の視界を確保している。使用場所としては一度整備済みであるグラウンド等を想定しており，浅い層の改良に特化する事で機械全体を従来のロードスタビライザより小型化している。

分粒は，フード内にスクリーンを組み入れ，粗粒分はスクリーンに当たることで前方へ落とし，細粒分は網を通過し後方へ落とすことにより行っている(写真-4)。スクリーンは複数の種類が有り，土質によって目の細かさを変える事が出来る。また，角度調整が可能であり，含水比等状況に応じて分粒に最適な角度に調整する事が出来る。
（特許出願中）

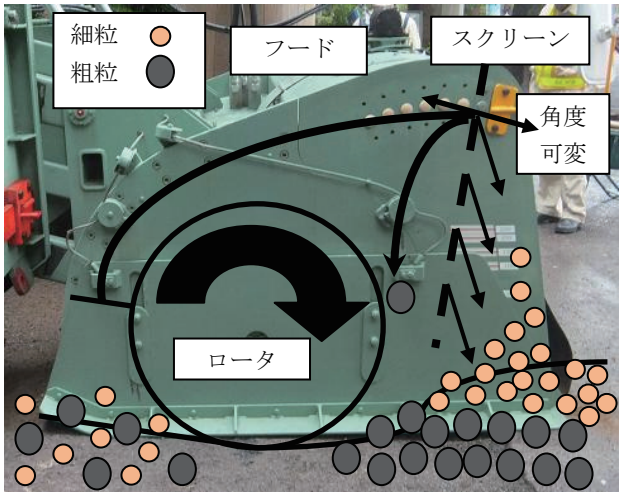


写真-4 分粒のイメージ

また，スクリーン部分(写真-5)にはゴムインシュレータとバイブレータが付いており，土等の付着による目詰まりを防止している。

写真-5 フード内スクリーン

５．現場事例

2012 年 2 月に本機完成後，現場での施工を行った。

5．１　神社・参道の施工

東京都内にある神社の参道の改良施工を行った。総延長約 500m，深さ 150 ㎜程度で参道の両側を通行帯とし中央付近約 6m幅の撹拌を行った。この現場では，モータグレーダで表面の玉砂利を避けてからストーンセパレータで撹拌を行い，その後振動ローラ・タイヤローラで転圧，再びモータグレーダで整形し，最後に玉砂利を戻すという工程で施工を行った。

現場は非常に人通りが多い参道となっており，路面は踏み固められた状態で，自動車の通行は少ないが，轍状の変形も一部に存在しており水溜りが発生している(写真-6)。水捌けの改善と轍の解消，浮いた小石の除去がこの現場の施工目的であった。

写真-6 施工前・水溜りが発生

当初は施工にかかる歩掛りがつかみづらい状態であったが施工速度は4~5m/min程度であり3日間で約3000㎡の施工を行った。1日当たりでは8時～13時程度の施工で約1000㎡の施工面積であった。施工時間に制限があるのは，夕方までには整地を終えて解放しなければならないためである。

写真-7は左側が施工前の状態，右側は施工後撹拌・転圧済みの状態である。施工前の状態は小石が表面に目立つ状態であるが，施工後は改善され目立つ小石は表面からは無くなったことが確認できる。

写真-8はストーンセパレータが抜けた施工端部で，写真中央付近の小石はこの後ストーンセパレータが通過していく中で下層に埋まっていく事となり，写真右側のような，表面は細かい上層分が覆う状態となる。撹拌・分粒がよく機能していることが確認できる。

施工の結果としては，轍と小石の除去は全く問題なく出来ていることが確認できた。水捌けについては，施工当日に降った雨では全く水は溜まらず問題が無かった。

写真-7 左=施工前　右=撹拌・転圧後

写真-8 分粒・撹拌状況

この現場は写真-7のように幅の限られたエリア内の施工であり，左右通路の人通りも多いので施工エリア外に出られない状態であったが，コンパクトに作られた本機は，他の重機とのすれ違いなども容易に行う事が出来，スムーズに施工を進める事が出来た。このように，従来と比べ浅い施工深さを施工するに当たり，従来機では作業のしづらい状況の中でストーンセパレータの性能が良く発揮できた。

5．2　グラウンドの施工

次の現場例としては千葉県の民間企業のグラウンド予定地の施工を行った。野球場の内野・ファウルライン沿いの合計約2800㎡の施工を1日で行った(写真-9)。施工深さは埋設物の関係もあり100㎜程度と浅い部分での施工である。

この現場は空き地をグラウンドとして転用するという事で，小石の除去及び，水捌けの改善が主な目的であった。写真-9の状態はストーンセパレータでの施工準備を終えた状態で，一見すると表面には小石などは無いが，土中には小石や草木の根等が埋まっている状態である。

写真-9 施工前の現場の様子

この現場ではストーンセパレータで施工した後にブルドーザにて整形し，その後コンバインドローラで転圧，その後改めてブルドーザで整地を行っていく手順で施工した。施工深さが100㎜と浅かったが，当日の施工後は雨が降ったものの翌日に石が露出するようなこともなく分粒は問題なく行えていることが確認できた(写真-10)。写真左側の施工前の状態では，小石が目立ち，草木の根なども見受けられるが，写真右側の施工後の表面は土と砂でほとんど小石は無くなっていることが確認できる。

写真-10 左施工前　右施工後

写真-11 は内野の外周部分で，このような曲線部分の施工が出来る事も確認できた。曲線の内・外で偏りが発生したり，負荷がかかりうまく曲がれない可能性も考えられたが，問題なく施工できた。

写真-11 曲線部の施工

しかし，この現場はストーンセパレータで想定している，完成済みのグラウンド等の改良とは条件が異なり，新たに整備したグラウンドの予定地であり，ガラや大きい転石等の影響を受けた(写真-12)。施工速度はこの現場では施工深さが浅いこともあって比較的速く，最大 10m/min 程度で施工を進められる場面があったが，土の固さや転石の影響で，場所によってはあまり速度が出せない場合もあった。

写真-12 埋まっていた転石

施工後の現場全景が写真-13 である。まだ整地は終えていない状態だが，施工当日の夜間に雨が降ったが水溜りは無く，水捌けはよい状態になっていることが確認できた。今回施工しなかったグラウンドの一部分では水溜りやぬかるみが発生しており，ストーンセパレータによる改良効果を確認できた。

写真-13 施工後の現場

６．今後について

今回実際の現場で稼働した事で，一日での歩掛りや改良の効果について確認することができた。しかし，新たに制作したばかりの機械であり，条件により施工結果が変わってくる事も考えられるので，施工現場の件数を増やしつつ，施工時に判明した問題点の改善と改良を進めていく予定である。

７．おわりに

本機の概要をまとめる。

・ストーンセパレーター―とは，グラウンド等表面の改良に特化した分粒装置付きのロードスタビライザである。

・車体を小型・軽量にすることで，セルフローダでの運送が可能であり，施工エリアの限られた現場でも運用しやすい。

・1 パスの施工で混合と分粒を行う事が出来，効率的に表土の改良を進める事が出来る。

参考文献

木下洋一：新型ストーンセパレータの紹介，鹿島道路社内報　KIT，Vol.44 p.5 ，2012

34. 画像診断によるｺﾝｸﾘｰﾄの点検、劣化調査技術の開発と適用

清水建設株式会社　○ 久保　昌史
清水建設株式会社　ファン　ウォック
清水建設株式会社　前田　敏也

1．はじめに

現在，構造物の点検は，主に点検者及び診断者による目視・打音調査に頼っている。しかし，この方法では点検者及び診断者の能力の違いにより診断結果にばらつきが生じたり，構造物の大きさによっては大掛かりな足場が必要となり効率が低下する，データ整理やその図化が煩雑になるといった課題がある。

こうした課題を解決するため，筆者らは対象となるコンクリート構造物に対して赤外線熱画像と可視画像を連続的に同時撮影し，その画像を接合して画像解析することにより，構造物のひび割れや浮き・はく離などの表面劣化を効率的に抽出する画像診断システムを開発した。本報では，本技術の概要および適用事例について報告する。

2．開発した技術の概要 [1)]

2.1　概要

本技術は，従来の目視・打音調査の代替となる画像解析を用いたコンクリート構造物の調査診断システムである。

撮影架台に固定した高感度赤外線サーモグラフィ（以下，赤外線カメラ）とデジタルカメラを用いて，赤外線熱画像と可視画像を同じ画角で同時に撮影し，これらの画像を重畳（それぞれの画像の座標を一致させ重ね合わせること）して画像解析することにより，構造物のひび割れや浮き・はく離などの変状を抽出する。

変状の抽出にあたっては，赤外線法（パッシブ法）と可視画像法の測定原理を用いる。ここで，赤外線法（パッシブ法）とは，測定対象物の表面温度を強制的な加熱や冷却をせずに自然の状態で測定し，熱画像として表示することでその温度差から異常部の検出を行う手法である。

また，可視画像法とはデジタルカメラで撮影した可視画像から，ひび割れ，浮きや内部空洞を除くはく離，豆板，鉄筋露出，遊離石灰および漏水などのコンクリート表面の変状を検出する手法である。

抽出可能な具体的な変状は，赤外線熱画像により，浮き・はく離，表層部の内部空洞および漏水など，可視画像により，ひび割れ，豆板，鉄筋露出および遊離石灰などである。

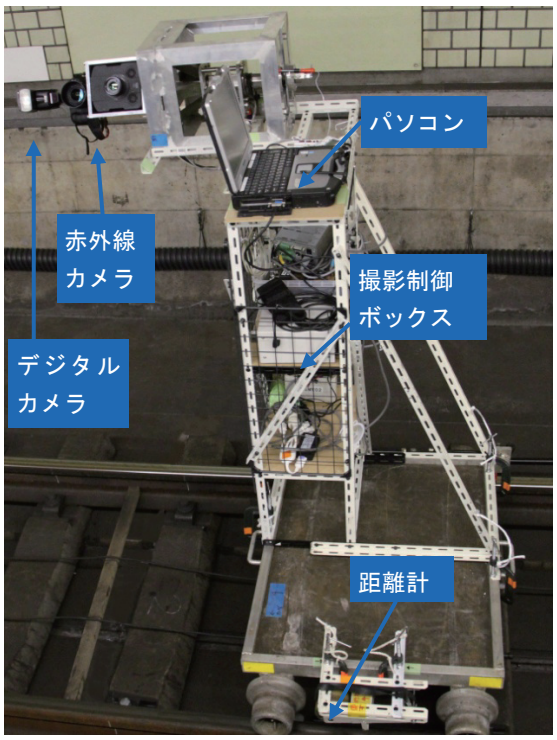


写真-1　撮影装置

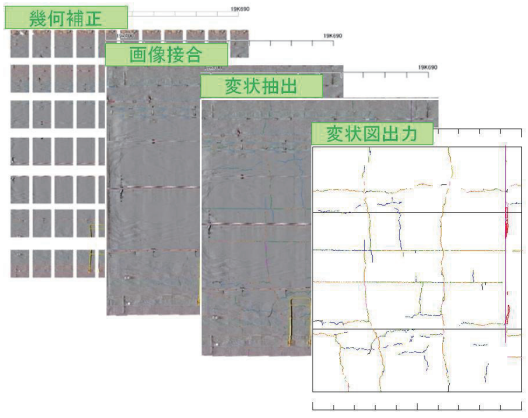


図-1　画像解析のイメージ

写真-1 に撮影状況を，**図-1** に画像解析のイメージを示す。

本システムの特長を，以下に示す。

① 人力により機材の搬入・搬出および運搬ができ，短時間で装置の組立てが可能でコンパクトな撮影装置を用いているため，現地での作業が省力化できる。
② 赤外線カメラによる熱画像とデジタルカメラによる可視画像を同じ画角で連続撮影し，重畳，画像補正，縮尺補正，画像接合および画像処理を行い，コンクリートの表層部に生じているひび割れや浮き・はく離などの変状を効率的に抽出し図化できる。
③ 非接触のため足場が不要であり，現地作業時間が短く構造物の供用に影響が少ない。

2.2 測定方法

(1) 現地撮影

初期の開発段階において実施した試験により，移動速度が精度に及ぼす影響が大きいことが明らかとなったため，本技術において，撮影は静止画像により行うこととしている。

現地撮影は，移動式架台に搭載した赤外線カメラとデジタルカメラにより行う。移動式架台には移動距離を測定するためのロータリーエンコーダ（回転式距離計），撮影の制御・記録を行うためのパソコンなどを搭載する。

これらの装備は，分割して人力で運搬できるため，調査する構造物を選ばない。

撮影対象となる構造物に対し，撮影範囲を同画角に調整した赤外線カメラとデジタルカメラで静止して撮影する。撮影後，一定間隔の距離移動を繰り返し所定の範囲を全面撮影する。その際，隣り合う画像が重なるように前回の撮影範囲と 20%以上ラップさせる。連続撮影することによって必要範囲の画像を撮影する。また，矩形変形の情報として，最初の画像を撮影する際に，位置合わせのための目印を画像中に写しこむ。

(2)画像接合および画像解析

現地で撮影した赤外線熱画像と可視画像を接合し， 画像解析を行って変状を抽出する。

まず，撮影した赤外線熱画像と可視画像のひずみを除去し，赤外線熱画像と可視画像の重畳を行う。その後可視画像から対象物に正対した形の平面展開図となるように画像の幾何補正（あおり補正，たる型補正など）を行い，撮影画像の接合を行う。

この際，現地での撮影距離や画角および方向などの条件が画像毎に異なると，それぞれの画像に対して異なった幾何補正が必要になり非効率となる。また，赤外線熱画像のみでは温度差を生じた特徴点が画像毎に少なく接合に時間を要する。これに対して，本システムでは，撮影条件が現地での撮影範囲内で同一となっているため，最初の赤外線熱画像と可視画像を重畳後，幾何補正さえ行えば，それ以降は同様の処理でよい。また，重畳された特徴点の多い可視画像を用いて接合を行う事により，赤外線熱画像の接合を効率的に行うことが可能である。

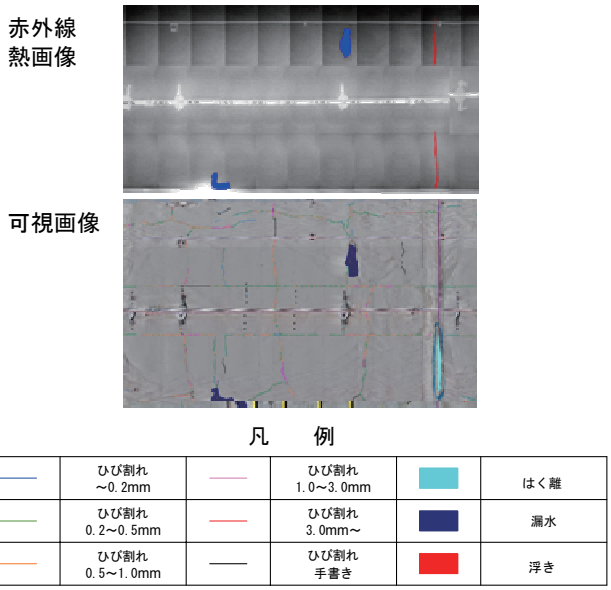


図-2　画像解析による変状抽出の例

このようにして複数の画像を効率的に接合し，赤外線熱画像および可視画像からなる 1 枚のハイブリッド画像とする。その後，劣化抽出結果のばらつきを抑えるために画像の濃淡補正を行い，画像解析ソフトを使用して，浮き・はく離およびひび割れなどの変状を自動抽出する。ここで，赤外線熱画像から，対象画像内の平均的な温度からある温度差を超える部分を浮き・はく離として抽出し，可視画像からひび割れ長さと幅を抽出する。

なお，その他の変状（漏水，豆板，鉄筋露出，遊離石灰など）については点検者及び診断者が撮影した画像を見て判定する。図-2 に画像解析による変状抽出の例を示す。

３．適用事例

3.1 鉄道トンネル

(1) 概要

シールド工法で施工された鉄道トンネルの二次覆工コンクリートを対象として調査を実施した。

この調査は，トンネル直上での鋼管杭打設および地盤改良工事による近接施工の影響の有無を確認したもので，工事の進捗に合わせて，平成 22 年 7 月~平成 24 年 6 月にかけて合計 6 回実施した。

調査の結果，工事によるひび割れ発生は見られなかったものの，東日本大震災後の調査では地震の影響によるものと考えられる新たなひび割れの発生や，工事着手前より生じていたひび割れの進展を適切に抽出できた。

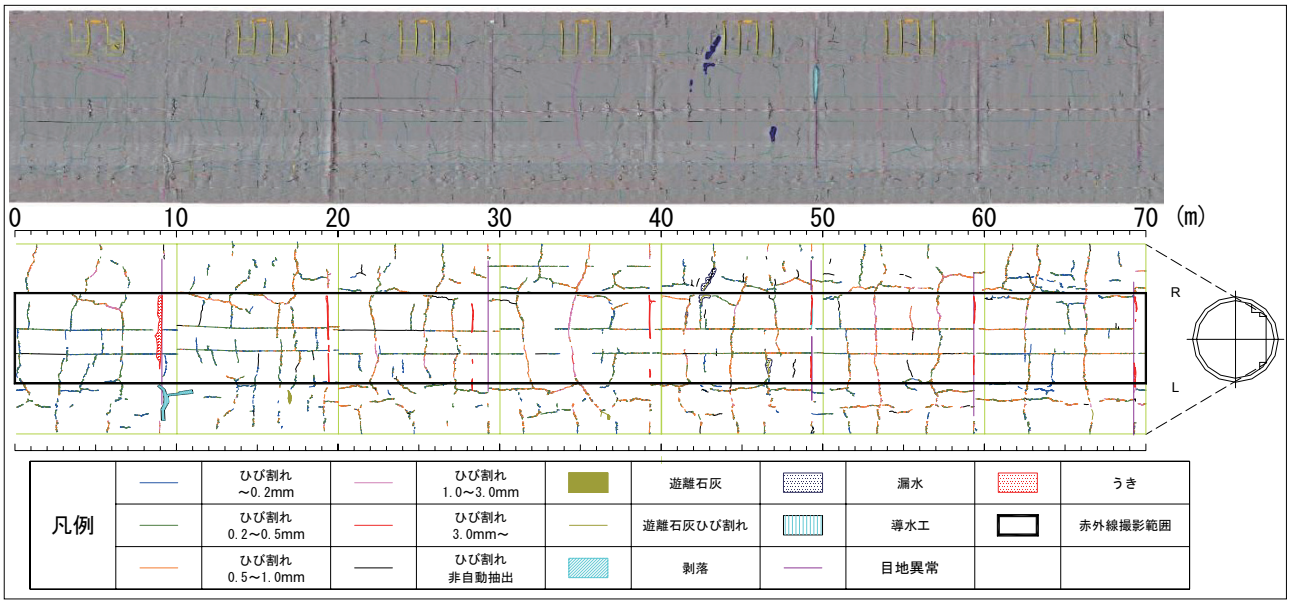


図-3　変状抽出接合画像と変状展開図

(2) 撮影

撮影は，内径φ4,800mm の覆工コンクリートのうち，コンクリートのはく落により鉄道運行に支障が生じる恐れがある上面約 90° の範囲については赤外線熱画像と可視画像を，その他の範囲は可視画像のみを撮影した。また，撮影延長は工事の影響がある 70m 区間とした。**表-1** に調査実施時期と工事状況を示す。

現地での作業時間は，最終電車出発後から始発電車到着 1 時間前までの約 3.5 時間であったが，機材搬入，組立て，搬出を含め時間内にすべての撮影を完了することができた。なお，トンネル内の温度変化を測定した結果，1 日の温度差は 4.8℃と小さかった。また，浮き部と健全部との温度差は最も低い箇所で 0.08℃であった。**写真-2～3** に撮影状況を示す。

(3) 画像解析

図-3 に変状抽出接合画像と変状展開図を示す。また，**表-2** にひび割れ浮き集計結果を示す。ただし，これらの結果は 1 回目のものである。

可視画像からは，ひび割れ，エフロレッセンスおよび，はく離などが抽出された。また，赤外線熱画像からは，コンクリートの浮きが抽出できた。このことより，温度変化の小さいトンネル内においても本システムが適用可能であることが実証された。

(4) 近接施工影響調査

図-4 に調査延長 10m 毎のひび割れ長さおよび全体の平均ひび割れ幅の変化を示す。ここで，東日本大震災は 3 回目の調査後に発生している。

1~3 回目の期間は，ひび割れ長さに大きな変化は見られていない。

また，ひび割れ幅は，2~3 回目にかけて大きく

写真-2　撮影装置の組立て

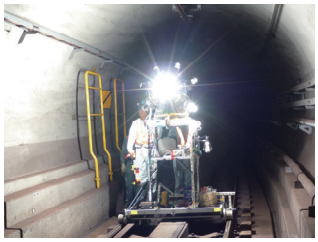


写真-3 撮影状況

表-1　調査実施時期と工事状況

	調査実施日	坑内温度	工事進捗
1 回目	H22.07.13	28℃	着手前
2 回目	H22.10.15	28℃	鋼管杭打設
3 回目	H23.03.03	22℃	
4 回目	H23.06.03	25℃	地盤改良（高圧噴射工法）
5 回目	H23.08.05	29℃	
6 回目	H24.06.07	25℃	施工完了

表-2　ひび割れ浮き集計結果

ひび割れ	延長(m)
幅 0.2mm 未満	86.39
幅 0.2mm 以上 0.5mm 未満	227.08
幅 0.5mm 以上 1.0mm 未満	181.99
幅 1.0mm 以上 3.0mm 未満	43.30
幅 3.0mm 以上	4.80
非自動抽出※	32.66
エフロレッセンスを伴う	3.45
合計	579.68
浮き	総面積(m^2)
	1.74

※非自動抽出：ひび割れの明確な濃淡特性が生じなかったため画像解析ソフトでは抽出できなかったが，調査員が画像を確認することで抽出したひび割れ

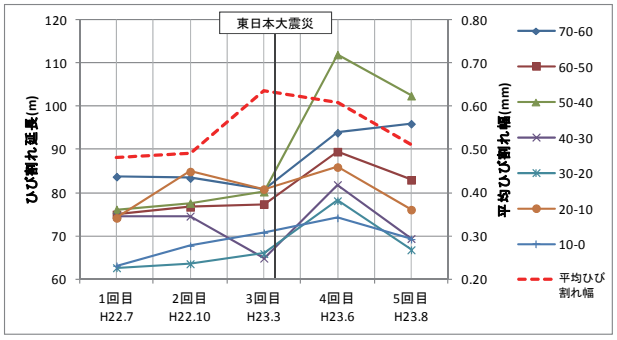


図-4　ひび割れ長さおよびひび割れ幅の変化

なっている。コンクリートは温度により伸縮しその熱膨張係数は 10×10^{-6}/℃程度である。測定時の坑内温度は前 2 回と比較して約 6℃低下した。

覆工コンクリートは 1 スパン 10m で，線路直角方向のひび割れは 1 スパンに平均 4 本程度発生しているため平均ひび割れ間隔は 2.0m となる。コンクリートの収縮はスパン内で均等に生じると仮定するとひび割れ間隔 2.0m では，約 0.12mm 収縮する（2,000mm×6℃×10×10^{-6}/℃=0.12mm）。これは計測値の約 0.15mm（0.63-0.48mm）にも近い値である。よって，ひび割れ幅の増加は，温度低下によるコンクリートの収縮が原因と考えられる。

3~4 回目の期間はすべての範囲でひび割れ長さが増加している。**写真-4** にこの期間に新たに見つかったひび割れの例を示す。ひび割れ幅は，坑内温度が 3℃上昇していることから，計算上コンクリートの膨張により約 0.06mm 小さくなるはずであるが，計測値は約 0.03mm でここまで小さくなっていない。温度変化が原因であれば，ひび割れ長さが短くなり，幅も小さくなるがこの期間では，そういった傾向はみられなかった。

4~5 回目の期間は，全体的にひび割れ長さが短くなり，かつひび割れ幅も小さくなっている。坑内温度が 4℃上昇していたため，温度変化の影響が原因として考えられる。

3~5 回目の期間は同一工事（地盤改良）が行われたにもかかわらず，3~4 回目は温度変化で説明できないようなひび割れ長さの増加が生じ，4~5 回目では温度変化によるひび割れの減少が生じている。これらを勘案するとひび割れ長さの増加は，東日本大震災の影響があったと推定することが妥当と考えられる。

3.2　コンクリート壁

(1) 概要

平面形状は 1 辺長さ 100m の正方形，高さ約 8m のコンクリート壁に対して，西面全面 100m と南面の一部 15m，合計約 900m^2 を対象として調査を実施した。この調査では，別途，点検者による近接目視および打音調査も行い，調査時間および調査

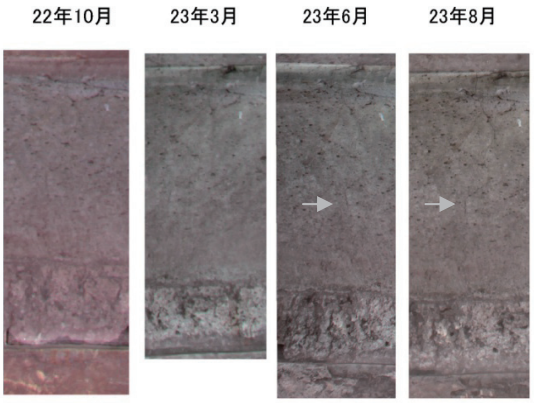


写真-4　新たに見つかったひび割れ

写真-5　撮影状況

費用の比較を行った。その結果，本技術は点検者による調査と比較して，現地調査に要する時間は 1/8，調査全体の費用は同等であることを確認した。

(2) 撮影

写真-5～6 に撮影状況を示す。撮影は，撮影機材を搭載した台車を用いて，長さ方向に 2m 間隔で移動しながら行った。高さ方向については，1 回で撮影できる高さが壁面高さの 1/3 程度であったため，上，中，下に分割して行った。撮影に要した時間は合計 80 分程度であった。

撮影当日の天候は晴れ時々曇り，日較差は 4.1℃で，撮影時間帯のコンクリート表面温度は上昇傾向にあり 1～2℃/hr 程度の温度勾配がみられた。

(3) 画像解析

写真-6～7 に可視画像と赤外線熱画像の接合画像（画像解析後）を，**図-5** に変状図をそれぞれ示す。また，**表-3** に抽出されたひび割れ浮き集計結果を示す。ひび割れは水平および鉛直方向ともに微細なものが多く見られ，ひび割れ密度は 0.81m/m^2 であった。また，浮きは，大きさ 5cm 以上のものが鉄筋露出箇所やその周辺に多く，それ以下の小さな浮きはセパレータ頭部の後埋めモルタル部に多く見られた。なお，これ以外に，ジャンカやエフロレッセンス等も見られた。

(4) 目視・打音調査との比較

本調査では，別途，4 面全てに対して点検者による目視・打音調査を実施した。目視・打音調査は，

写真-6　可視画像

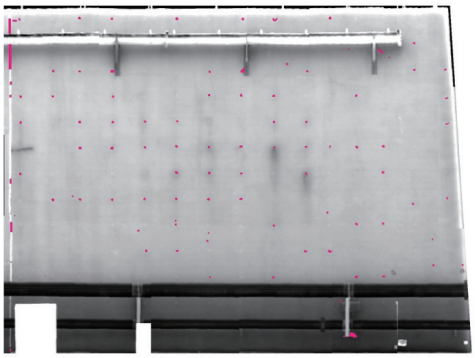


写真-7　赤外線熱画像

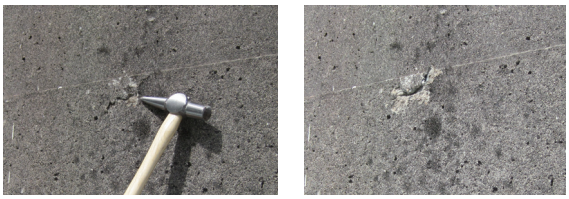


写真-8　本技術で判明した浮き箇所の確認状況

1 パーティ（点検員 4 名）で行った。
本技術を実施した範囲において，調査結果を比較したところ，変状の抽出結果はほぼ一致しており本手法の妥当性が確認された。さらに，浮きに関して打音調査では検出されなかった変状を本手法で抽出できた箇所（**写真-8**）もあり，本手法の精度の高さを実証できた。

現地調査時間について，西面を対象として比較を行った。本技術では約 1 時間，目視・打音調査では約 8 時間を要した。現地調査に要する時間は 1/8 であった。

また，調査にかかった費用は同等であった。今回の調査では交通規制などは不要であったが，これらが必要な箇所で調査を行う場合は，現地調査時間が短いため，間接的なコストを削減できる可能性が高い。

現地では足場や高所作業車等が不要なため，安全面でも優れており，構造物の変状箇所にチョークで印を付ける必要もないため，美観上も問題が生じないと考えられる。

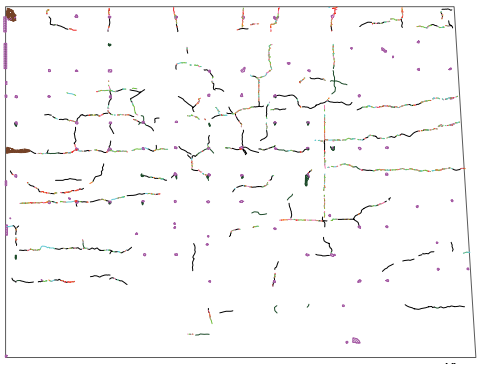


図-5　変状図

表-3　ひび割れ浮き集計結果

ひび割れ	延長(m)
幅 0.2mm 未満	6.17
幅 0.2mm 以上 0.3mm 未満	9.28
幅 0.3mm 以上 0.4mm 未満	5.79
幅 0.4mm 以上 0.5mm 未満	3.01
幅 0.5mm 以上	2.78
非自動抽出	33.57
補修されたひび割れ	4.42
ひび割れ長さ合計	65.01
抽出面積	80
ひび割れ密度（m/m^2）	0.81
浮き	総面積(m^2)
	0.26

3.3　コンクリートスラブ

(1) 概要

浄水場のコンクリートスラブ（約 52×75m）を対象として調査を実施した。

調査の結果，撮影方法に課題が生じたものの，本技術は，線状構造物だけでなく，平面的に広い形状でも適用可能であることを確認した。

(2) 撮影

撮影は，クローラー式垂直昇降型高所作業車を使用して，地上 6m の高さからスラブ面を連続撮影した。撮影機材は，撮影架台に搭載した 2 台のデジタルカメラと 1 台の赤外線カメラ，パソコン，コントロールボックス，バッテリーなどで，撮影架台は固定バンドを用いて作業床に固定した。ひび割れ幅 0.2mm を抽出するために必要な画角は 6.0×5.0m であったため，ラップする範囲を考慮して 1 回の撮影範囲は長辺方向に 5.0m，短辺方向に 4.0m とした。撮影は，スラブの長辺方向に設定し

写真-9　カメラ設置状況

写真-10　撮影状況

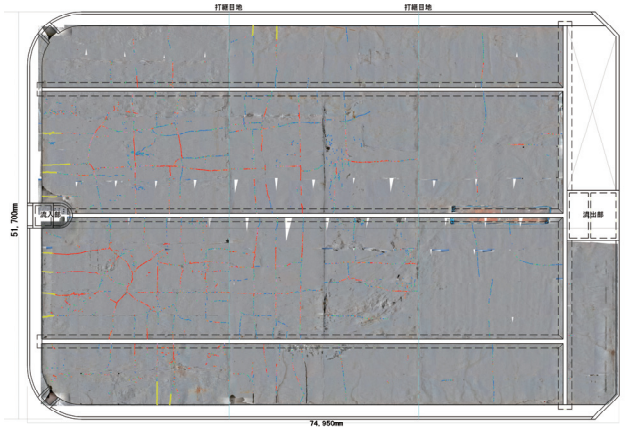
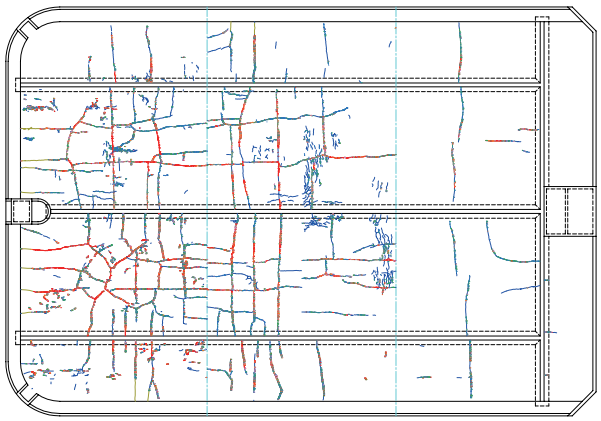


写真-11　可視画像



凡例

	0.2mm未満のひび割れ		0.5mm以上のひび割れ
	0.2～0.3mmのひび割れ		幅情報の無いひび割れ
	0.3～0.4mmのひび割れ		補修済みのひび割れ
	0.4～0.5mmのひび割れ		

図-6　変状図

表-4　ひび割れ集計結果

ひび割れ	延長(m)
幅 0.2mm 未満	147.7
幅 0.2mm 以上 0.3mm 未満	145.9
幅 0.3mm 以上 0.4mm 未満	104.9
幅 0.4mm 以上 0.5mm 未満	64.0
幅 0.5mm 以上	120.9
非自動抽出※	438.7
補修されたひび割れ	10.5
ひび割れ長さ合計	1022.1
抽出面積	3177.4
ひび割れ密度 (m/m^2)	0.32

た測線毎に連続して行った。この測線は 4m 間隔で全 12 測線とした。高所作業車を測線の始端部に移動させ，測線に沿って 5m 間隔で移動・作業床上昇・撮影・作業床降下の作業を繰り返した。測線の終端部まで撮影し，隣の測線に移動し同様の手順を全測線で行い，スラブ全面を撮影した。

写真-9にカメラ設置状況を，**写真-10**に撮影状況をそれぞれ示す。

(3) 画像解析

画像解析の結果，本コンクリートスラブには，ひび割れ以外の変状は見られなかった。**写真-11** に可視画像の接合画像（画像解析後）を，**図-6** に変状図をそれぞれ示す。可視画像には，色の濃い部分が見られるがこれは汚れや打継ぎ目が画像処理上強調されたもので損傷ではない。赤外線熱画像から，浮きやはく離などの変状がみられなかった。**表-4** に抽出されたひび割れ集計結果を示す。

ひび割れは長辺方向，短辺方向ともに見られるが，短辺方向により多い傾向があった。スラブ全体のひび割れ密度は 0.32m/m^2 であった。

５．おわりに

本技術は，点検箇所を画像化して解析し記録に残すため，診断結果のばらつきがほとんどなく，特に複数回の点検を実施する場合は，撮影したすべての箇所において前後の比較ができるため変状の進展や変化が把握しやすい。

また，今回紹介した構造物だけでなく，建築構造物のタイルの浮き，ダム堤体のような近づきにくい構造物などにも適用できる。

今後は，様々なコンクリート構造物の点検・診断に対して本技術の適用を積極的に提案していきたいと考えている。

参考文献

1) 久保，天野，中山，ファン：赤外線画像と可視画像を併用した画像診断技術の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1847～1852，2011

35. ＴＳを用いた出来形管理を活用した埋設物管理手法の検討

情報化施工で取得した３次元情報の維持管理における利用

国土交通省　国土技術政策総合研究所　情報基盤研究室　○ 北川　順
同　梶田　洋規
同　重高　浩一

１．はじめに

近年，土工や舗装工を中心に情報化施工の普及が急速に進んでいる．国土交通省の直轄工事における情報化施工活用工事件数は，平成 20 年度に 75 工事であったものが平成 23 年度には 568 工事[1]となり，わずか 4 年間で 7.6 倍にまで増加している．このように情報化施工は多くの現場で活用されはじめ，施工の効率化や施工精度の向上といった施工段階における効果が得られている．そこで，国土技術政策総合研究所情報基盤研究室（以下，当研究室）では，情報化施工推進戦略[2]に示されたイメージの実現を目指し，情報化施工で作成・取得した情報を活用し，維持管理や，さらにその先の調査・計画を効率化・高度化する手法について検討を進めている．

本稿では情報化施工技術の一種である「TS（トータルステーション）を用いた出来形管理」を「地下埋設物」に適用することで，施工時に 3 次元情報及びその属性情報を施工で取得し，維持管理及び次の計画・設計へと流通・活用していく手法（以下，本手法）にについて提案し，これまでの検討内容と解決すべき課題について述べる．

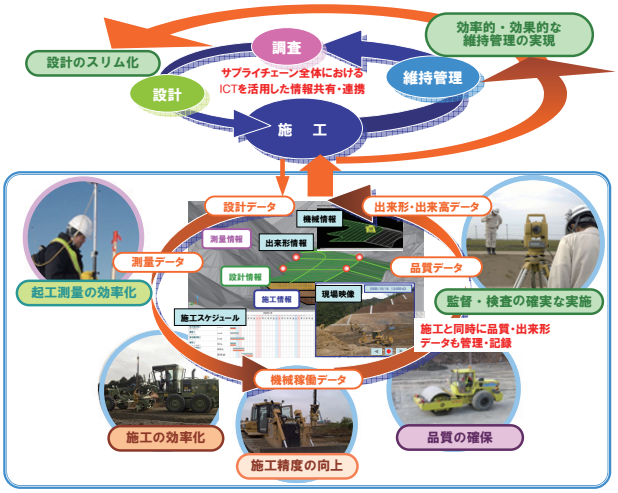


図-1　情報化施工の実現イメージ

２．ＴＳを用いた出来形管理

TS を用いた出来形管理は，完成形状の 3 次元情報を TS に取り込むことで，出来形管理作業において，①計測位置への誘導，②計測と同時に設計値との差を表示，③計測データを用いた帳票の自動作成，等の効果がある（図-2）．この技術で用いる 3 次元の電子データは，当研究室にて定める「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）[3]」に基づく XML 形式のデータ（以下，施工管理データ）となっており，「TS を用いた出来形管理要領[4]」において，施工後のデータを工事完成図書として電子納品することが定められている．このように，TS を用いた出来形管理では，施工後に発注者がデータを活用するための，データの標準化及びデータの回収方法について，環境が整えられている．

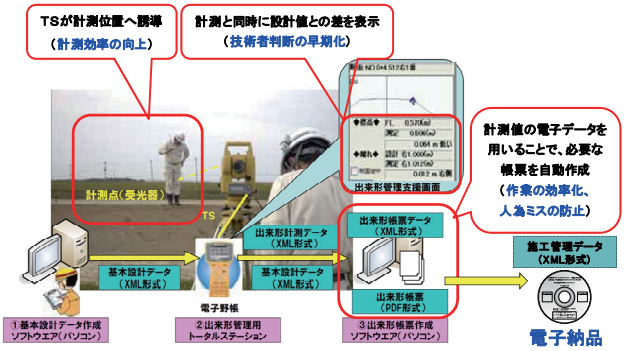


図-2　ＴＳ出来形管理技術の特徴

この施工管理データは，平成 20 年 3 月に「ver.2.0」を策定しているが，平成 23 年度 9 月 30 日に「ver.4.0」へ改訂を行った[5]．これまでの「ver.2.0」は，工種は土工を対象とし，計測機器に 3 級 TS を用いて，出来形管理を効率化させることを前提としたデータ仕様となっていたが，今回改訂した「ver.4.0」では，対象工種の拡大，利用できる計測機器の追加，維持管理での活用等を考慮し，情報項目の追加等を行った．具体的には，出来形管理項目として，「法長」，「幅」，「基準高」に「深さ」，「延長」，「厚さ」，「面積」を追加することで，舗装工や地下埋設物工等への工種拡大に対応し，さらに，維持管理で重要な情報である計測日時の取得等の改良を加えている．

３．現状の埋設物管理における課題

国土交通省では，道路や河川といった公共構造物を管理しているが．地下には多くの占用物件が埋設されており，その管理には多くの課題がある．

3.1　埋設物事故に係わる課題

道路や堤防の地下には，電線や光ケーブル等の重要な社会インフラが埋設されているが，周辺の施工時に切断等の損傷事故が発生している．このような事故は，近隣の住民に電気や水が一時的に供給されなくなってしまう等，社会的影響が非常に大きい．関東地方整備局における事故事例報告[6]によると，このような事故の原因として，①埋設物件の調査を怠った，②埋設箇所が図面と違っていた，③作業員まで情報が伝わっていなかった．等，埋設物の位置情報に関する原因が多く挙げられている．

写真-1　水道管損傷事故

3.2　施工範囲内の埋設物調査における課題

埋設物工事等，掘削を伴う工事を行う場合には，周辺の埋設物の切断事故を防止するため，事前に施工範囲内の既設の埋設物の有無を調査する必要がある．現在は，各占用事業者が紙で整備している「占用台帳」を用いて調査しているが，この台帳は占用事業者毎に紙で整備されているため，決まった範囲内の占用物件を調査するためには，全占用者分の台帳を別々に確認する必要がある．また，占用台帳は，平面図に占用物件を手書きで記載されている場合が多く，物件の有無とおおよその位置は把握できるが，埋設深さや詳細な平面位置を確認することができない．そのため，施工者は占用事業者に対して，施工当時の図面等，詳細な位置がわかる資料を個別に収集している．過年度にヒアリング調査を実施した延長 310m の電線共同工工事では，資料の収集に**表-1** のような時間を要しており，施工前に膨大な時間をかけて埋設物件の調査を行っている実態が判明した．

3.3　現場での埋設位置確認における課題

施工者は，図面等の資料を収集した後，埋設物件の位置を現地で確認する．埋設物工事では，地下の状況や，現地で発見された既設の埋設物等により，計画通りの位置に施工されないことも多い．また，側溝や縁石等の地上にある構造物からのオフセットで管理されている（**図-3**）為に，拡幅工事等により地上の状況が変化すると，埋設物の位置特定が困難となる．その為，施工者は実際に掘削を開始する前に多くの時間と手間をかけて試掘を実施して，埋設物の位置を確認している．過年度にヒアリング調査を実施した電線共同工工事では，**表-2** の程度の試掘を実施している．試掘の実施には，交通規制を伴う場合が多いため，施工者への負担となるだけでなく，渋滞の発生等，社会的な影響も大きい．

占用物件	移動時間	移動回数	依頼から収集までに要した期間
上水道	30分	5回（依頼、受取、現地説明）	1ヶ月
光ケーブル	30分	4回（依頼、受取）	4日
下水道	30分	2回（依頼、受取）	4日
下水道	25分	2回（依頼、受取）	5日
電話線	30分	2回（依頼、受取）	1週間
電線	20分	2回（依頼、受取）	1日
ガス	30分	4回（依頼、受取）	1週間
電線	50分	2回（依頼、受取）	1日
電線	30分	2回（依頼、受取）	1日
電線	30分	2回（依頼、受取）	1日
電線	30分	2回（依頼・受取）	2週間

表-1　占用物件の情報収集に要した時間（1 工事分）

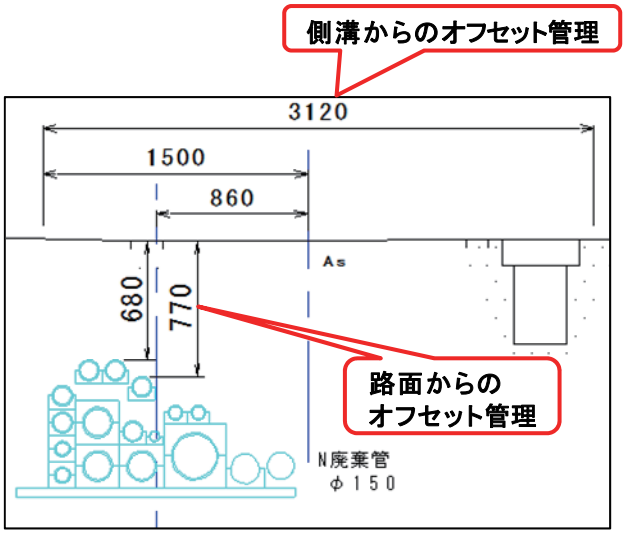


図-3　埋設物工事の図面例

工事名	施工延長	試掘箇所数	所要日数	作業員数
A工事	310m	31カ所	11日	4人
B工事	292m	15カ所	8日	4人

表-2　試掘に要した工数

４．ＴＳを用いた出来形管理を活用した埋設物管理手法の提案

前章で述べた課題を解決するため，TS を用いた出来形管理を活用した埋設物管理手法を提案する．この手法の全体イメージを図-4 に示す．

4.1　ＴＳを用いた埋設物の出来形管理

地下埋設物は，第 3 章で述べた通り，計画通りに埋設されない場合がある．しかし，出来形管理は「出来た物を計測する」行為であることから，地下埋設物の出来形管理を，TS を用いた出来形管理で行うことにより，出来形管理と同時に実際に埋設した位置の 3 次元座標を取得することが可能となり，情報の信頼性が非常に高くなる．過年度に行った電線共同工の現場試行では，作業効率は従来手法に劣るものの，埋設物工事は一般的に日当たりの施工延長が短い為，大きな負担増にはならないものと考えられる．

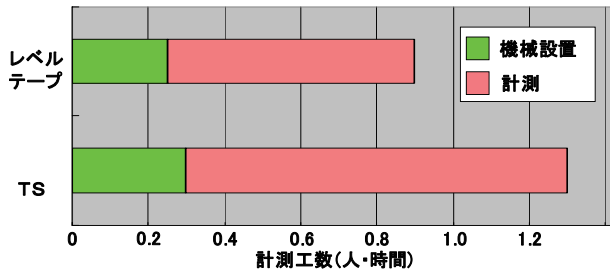


表-3　１日の出来形計測工数（人・時間）の比較

4.2　システム連携による属性情報の付加

TS を用いた出来形管理では，第 2 章で述べた通り，施工管理データが電子納品されることとなっていることから，この仕組みを利用して，埋設物の情報を収集可能である．しかし，施工管理データは，3 次元の座標や計測時間等の限られた情報しか保有できない．そこで，工事完成図書には図面や工事写真，占用申請書には，占用者，名称，管径，占用期間等の情報が含まれることから，電子納品保管管理システム及び占用申請システムと連携することで，施工管理データにこれらの属性情報を付加することが可能である．

4.3　取得した情報の表示・活用

施工管理データは，世界測地系で位置を保持していることから，GIS との親和性が高い．また，電子データであることから，集約したデータを重ねて表示することも容易であり，施工範囲内の埋設物件を一枚の図面上にすべて表示することで，3.1 で述べたよう課題が解決できると考えられる．また，ポップアップ等を活用して連携したシステムが保有する情報を表現することで，関連する属性情報等を容易に取得することが可能となる．施工管理データは 3 次元座標を保有することから，地下空間の 3 次元表現が可能である．これを活用

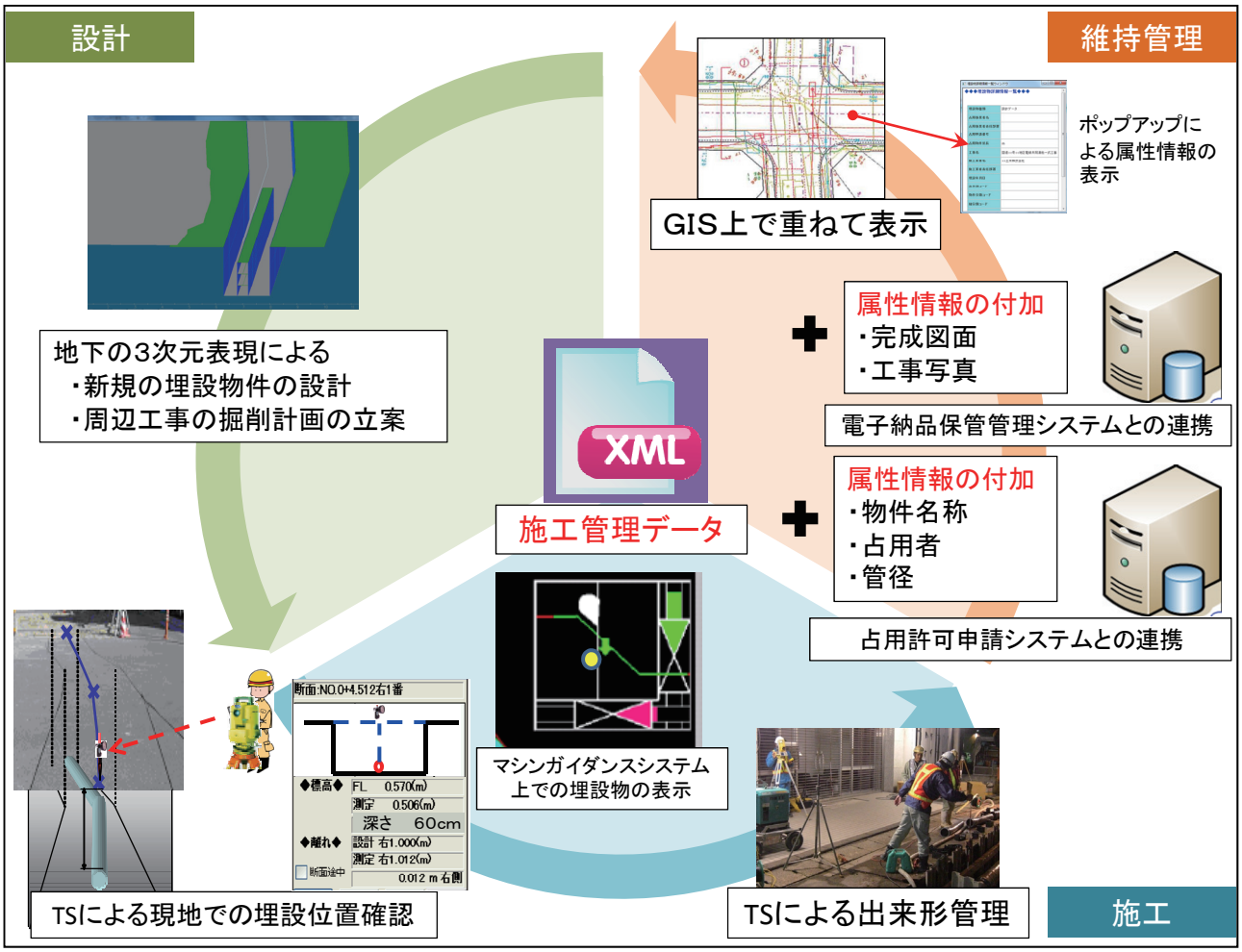


図-4　ＴＳを用いた出来形管理を活用した埋設物管理のコンセプト

することで，新たな埋設物や，近傍での掘削工事において，埋設位置や施工計画の立案への活用が期待できる．

4.4　施工時における情報の活用

従来は，現場での既設埋設物件の位置確認時には，図面から位置を計算していた．しかし，システムから施工管理データを出力し，TS に搭載することで，プリズムを誘導し，現地で埋設物の位置を確認することが可能である．また，現在対応するシステムは存在しないが，技術開発が進めば，マシンガイダンスシステムが施工管理データを読み込むことで，画面上で埋設物の位置を表示し，重機による埋設物の切断事故を防止する仕組みも考えられる．

５．システムの開発

当研究室では，第 4 章で述べたコンセプトを実現するため，一部の機能を備えたプロトタイプのシステムを開発した（**図-5**）．このシステムは，電子納品された CD を登録することで，施工管理データを抽出して GIS 上に埋設物の位置を表示し，さらに GIS 上で埋設物データを選択することで，工事完成図書や，別途 CSV 形式で登録した属性情報，3 次元ビュー等をポップアップ表示することが可能である．今後このシステムを活用した試行を実施し，本手法の課題を抽出し，必要な基準の整備や見直し，システムの改良等を行っていく予定である．

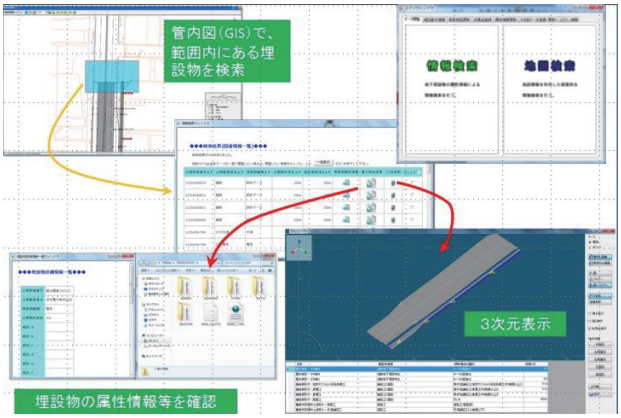


図-5　試作したシステム

６．解決すべき課題

本手法を実現するためには，解決すべき課題が多くあるが，主な課題について述べる．

6.1　埋設物の３次元情報の収集方法

本手法を実現するためには，埋設物工事が行われた場合に，確実に施工管理データを収集する必要がある．しかし，小規模な占用工事の場合には，施工者の技術力や，機器のコストの面でTSを用いた出来形管理を実施させることが困難であることが予想される．そのため，費用や技術に対する支援や，管理者による計測等，正確な情報を確実に取得するための制度設計が必要である．

6.2　既設物件の情報収集について

新設の埋設物の場合は，これから情報を取得可能であるが，既設の埋設物の場合，これから位置情報を取得することが困難である．本手法では，データが完全であることで効果が発揮されることから，TSで取得した正確なデータとは区別した形で暫定的に紙の台帳からデータを仮登録し，埋設物の更新時にデータも更新するといったような既設物件の情報を収集する取り組みが必要である．

6.3　出来形計測について

現在の出来形管理基準では，埋設物の出来形管理は200mに1カ所，深さと延長を計測することとなっている．しかし，切断事故を防止するためには，正確な埋設位置情報が必要であり，埋設管経路の変化点等，出来形管理箇所以外にも計測が必要となる．よって，出来形計測の頻度や箇所については，正確な位置を取得するために，基準類の見直しが必要がある．

７．終わりに

本検討では，埋設物管理における現状の整理と，その解決手法の提案及び解決すべき課題について述べた．本手法を実現するためには，まだ技術面だけでなく，制度面でも多くの課題がある．また，本手法は，埋設管のような占用物件だけでなく，属性情報を追加することで，重金属を含んだ材料による盛土等，施工時に出来形管理が行われるものについては，応用が可能であり，今後も検討を進めていきたい．

謝辞：本検討にあたっては，現場試行や意見交換会等で関係者に多大な協力を賜った．ここに記して感謝の意を表す．

参考文献

1) 情報化施工推進会議：第10回情報化施工推進会議資料，H24.8.7
2) 情報施工推進会議：情報化施工推進戦略，H20.7.31
3) 国土技術政策総合研究所　情報基盤研究室：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），http://www.nilim.go.jp/ts/download/120329tsdataexchangev4.pdf，H23.9
4) 国土交通省:TSを用いた出来形管理要領(土工編)，H24.9
5) 北川ら：TS出来形管理の適用拡大に向けたデータ交換標準に関する検討，土木情報利用技術講演集　vol.36，pp17-20，H23.9
6) 国土交通省　関東地方整備局:関東地方整備局発注工事で発生した事故事例（速報値），http://www.ktr.mlit.go.jp/gijyutu/gijyutu00000014.html　，H24.8時点

36. 河川ポンプ設備における状態監視技術に関する研究

(独)土木研究所　　○ 上野　仁士
藤野　健一
竹田　英之

１．はじめに

河川ポンプ設備は、洪水被害防止を目的とした極めて重要な社会基盤施設であり、豪雨や異常出水時には確実に稼働することが要求される。

そのためには設備の万全な整備が不可欠であり、管理者は、定期的に整備する「時間計画保全」という考え方で維持管理をしている場合が多い。この手法は、日常的な点検で内部の詳細な劣化状況を把握しきれない、大型かつ重要な主ポンプ設備や駆動設備（主原動機、減速機）では、確実な整備が行えるという点でメリットが大きいが、内部劣化の有無によらずに定期的に整備を行うため、経済性で不利な場合がある。

河川用ポンプ設備においては、今後１０年で約４０％が設置後５０年超となり、老朽化の進行による故障頻度上昇の懸念がある反面、整備予算は年々削減されている現状にあり、この相反する状況下でいかに効率的で的確な設備維持管理を行うかが課題となっている。

民間工場等の常用系設備では、設備状態の監視により劣化兆候を確認・診断し、それにより整備時期を判断する「状態監視保全」という考え方を導入するケースがあり、これにより保全費用の５％削減を可能とした例もある1)。

したがって、河川ポンプ設備の維持管理においても状態監視保全を導入することはきわめて有効と考えられるが、高い信頼性が求められる待機系設備の状態監視技術は民間ではニーズは低く技術が確立していない。

よって、河川ポンプ設備の維持管理に適した状態監視保全（劣化予測）技術を確立し、不測の重大故障を回避し、無駄のない予防保全の実現を図る必要がある。

本研究は、常用系設備を対象として普及しつつある振動解析技術を参考に、河川ポンプ設備における振動計測、解析技術の開発と確立を図るものである。

当チームでは、平成22年度より河川ポンプ設備の振動解析に着手した。本報告は、渦電流式変位計、超音波式振動計による計測方法の提案と適用性についてまとめたものである。

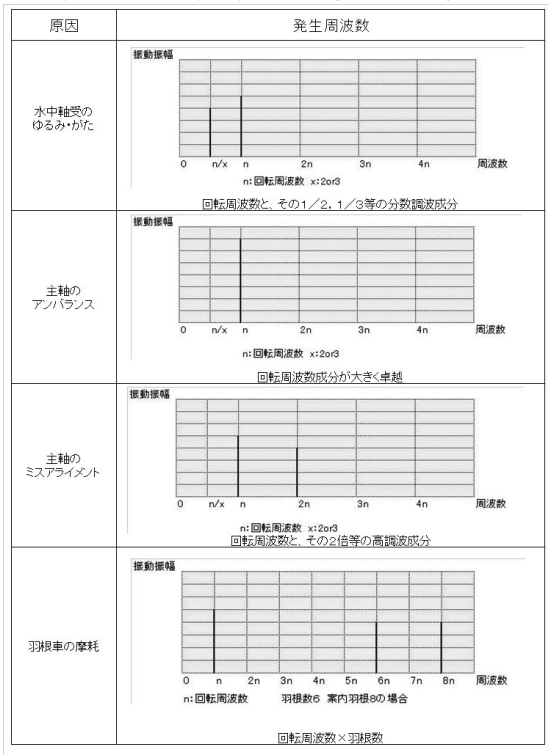
２．振動による設備診断技術

回転機械において、主軸がどこの断面でも同径の完全な真円で、完全に均質で重心も中央にあり、軸心が直線であるならば、主軸に振動は生じない。しかし、これらの微妙な変位や、羽根車の摩耗、継手のずれや軸受、歯車の状態によって様々な振動が発生する。

振動を利用した精密診断では、振動波形、振幅に加え周波数分布を解析することで、劣化傾向を診断し、さらにその部位を特定することが可能である。

発生周波数分布と異状部位の関係は表-1 に示す通りであり、常用系設備においてはこれに基づいて診断が行われている。

表-1　発生周波数と発生原因（主軸関係）



計測した振動波形から周波数分布を解析する手法としては高速フーリエ変換（ＦＦＴ）があり、ＦＦＴアナライザやソフトウェアを用いて行われる。

３．振動計測手法の検討

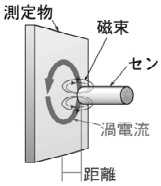
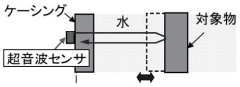
河川ポンプ設備ではこれまで、加速度センサにより主ポンプ等のケーシング振幅(P-P)を計測してきた。しかしこれは、故障状態で大きな値を示すことを利用した「運転支援」として活用しているもので、劣化傾向を把握することは難しい。また、本研究で対象としているポンプ設備は主軸回転周波数が 2～5Hz の低速回転機械であり、本来加速度センサの適用が困難な領域である。

そこで、ポンプ主軸の振動に着目し、回転による変位を直接計測することがポンプ設備診断には有効であると考える。

その手法として、①大型回転機械の主軸振動解析で実績のある「渦電流式変位計」と、②ポンプ内部の主軸振動を計測するために近年開発された「超音波式振動計」の２方式を採用した。

それぞれの方式の原理と、長所、短所を、表-2 に示す。

表-2　変位計の比較

	渦電流式変位計	超音波式振動計
原理	センサ内のコイルに高周波電流を流すことにより、高周波磁束が発生する。 この磁界内に測定対象物（金属）を置くと、対象物表面に渦電流が発生する。 この渦電流が、コイルと測定対象物との距離が近いほど大きくなる性質を利用して変位を計測する[1)2)]。 	超音波を、ケーシング内で回転する主軸に向けて発信し、戻り時間を計測することで、センサと主軸との距離を計測する。連続的に計測することで、軸のふれ回りやその周波数が把握できる[3)]。 
長所	・構造が簡単で堅牢、特性が安定しているため信頼性が高い	・ケーシング内の軸の動きを、分解せずに計測可能。 ・設備運転前の校正作業が不要なので、準備時間が渦電流式に比して短い。
短所	・移設する毎に、設備運転前に校正作業を行う必要があるため、準備時間を要する（30分程度）。 ・主軸周りが狭隘だとセンサの取り付けが困難。	・主軸に保護管等があると、超音波の減衰が大きくなり計測できない事例が多い。 ・管内が完全に充水されていなければ計測できないため、横軸ポンプでは計測できない事例が多い。

双方の方式は、その計測原理の違いから、計測位置も自ずと異なる。渦電流式変位計での計測は、主軸が露出している箇所で行う。センサの固定はマグネットスタンドで行う。このとき、２つのセンサを用いて、主軸に対して９０度向きの異なる２方向から計測することにより、軸の振れ周りを確認することができる。

超音波式振動計は、管内の主軸に垂直に超音波を照射できるケーシング外部にセンサを密着させて計測する。

それぞれの方式の計測位置、設置状況を図-1 および写真-1、写真-2 に示す。

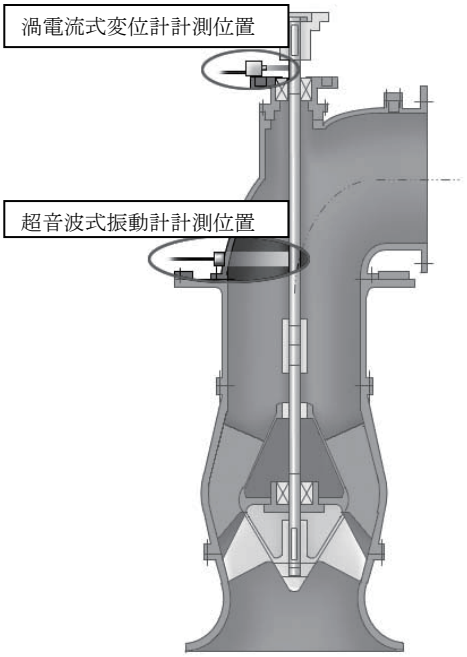


図-1　変位計計測位置

写真-1　渦電流式変位計

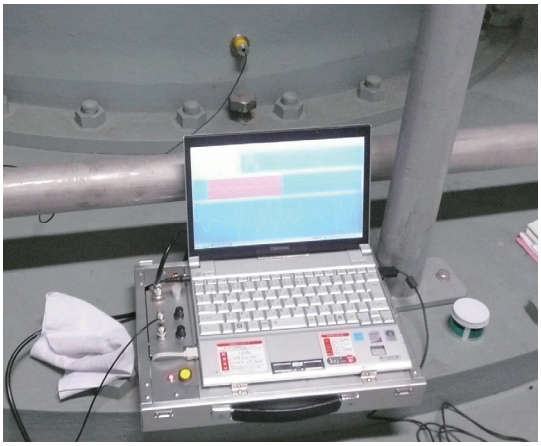


写真-2　超音波式振動計

渦電流式変位計は確実に計測できるが、軸封部で主軸の変位が抑制され、振れ回り量が小さく計測されると考えられる。また、超音波式振動計は管内が完全に充水されていなかったり主軸に保護管がある場合には、超音波が伝搬されず計測できないことがある。解析に当たっては、以上の点を十分考慮する必要がある。

なお、これらの計測の際には、主軸の回転に起因しない、原動機や減速機から発生する振動が伝搬して検出されることが考えられる。そのため、随時加速度センサにより、減速機及び原動機の振動計測を行うこととした。

解析においては、各々の計測波形の振幅及びRMS値より主ポンプ設備各部の劣化度を推測し、周波数分布よりその原因を特定する手法をとった。

4．計測結果ならびに考察

本研究では、全国の排水機場のうち、時間計画保全による定期整備を予定している、のべ４２機場１０３台のポンプ設備について調査を行ったが、ここでは振動計測の結果、特徴的な傾向が見られた３例について述べる。

この３例の設備要目を、表-4に示す。

表-4　対象設備　要目

	形式	口径 (mm)	回転数 (rpm)	羽根数
A排水機場	立軸斜流	1350	225	5
B排水機場	横軸斜流	1500	126.7	4
C排水機場	立軸軸流	2600	115	4

4.1 A排水機場

渦電流式変位計ならびに超音波式振動計で振動計測を行った。計測した振動の波形ならびに周波数解析結果を図-2～5に示す。

この結果から、当該設備の状態は以下の通り推定される。

- 渦電流式変位計と超音波式振動計の波形、周波数分布は類似しており、振動の傾向はどちらも同様に把握できる。波高は超音波式の方が明らかに大きい。
- 振動波形は、低周期の振動に高周波の振動がのこぎり状に乗る形であり、高調波成分が発生している事を示す。
- 周波数解析より、回転数成分が突出しており、羽根車や主軸にアンバランスがあると考えられる。
- 同様に、羽根車成分(5N)がやや大きく、摩耗等で羽根車の摩耗が生じている事が懸念される。波形で見られた高調波成分は、この成分と思われる。

いずれの振動測定においても、回転数成分以下の周波数がほとんど検出されていないので、水中軸受の摩耗は起きていないと考えられる。

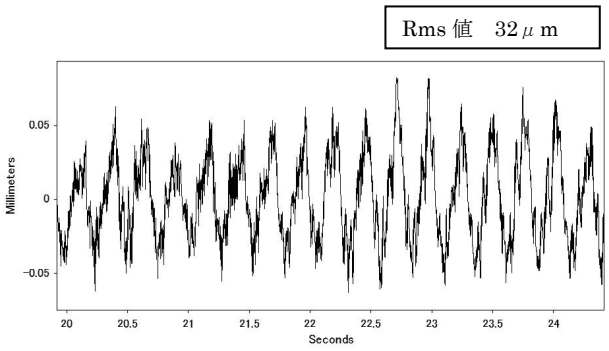


図-2　渦電流式変位計による振動波形

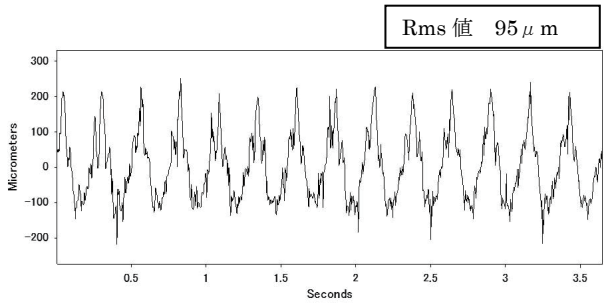


図-3　超音波式振動計による振動波形

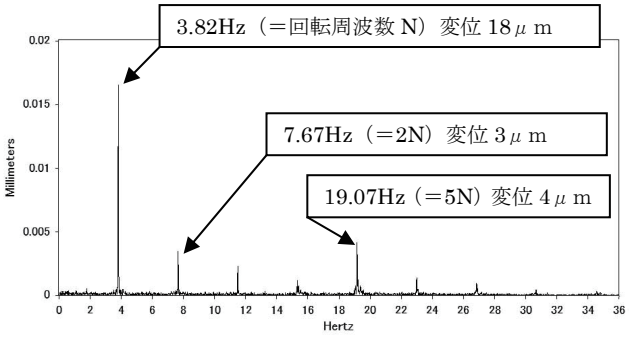


図-4　渦電流式変位計による振動解析結果

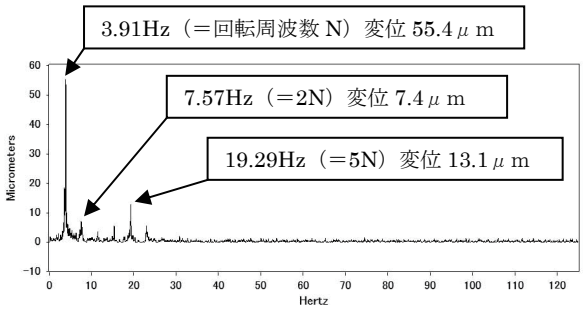
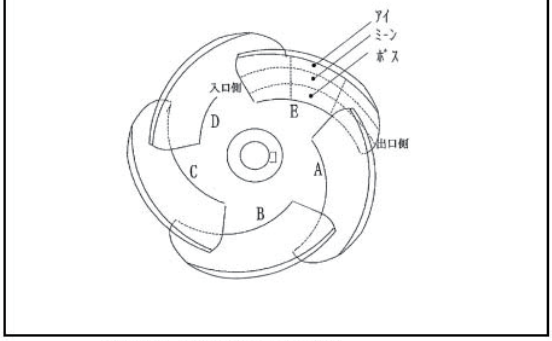


図-5　超音波式振動計による振動解析結果

当該ポンプ設備はこの計測の後に分解整備を行った。その際に行った羽根車の摩耗量計測結果を表-5に示す。

表-5　羽根車摩耗量計測結果

羽根	測定箇所	ボス部 設計値 27mm	ミーン部 設計値 22mm	アイ部 設計値 17mm
A	入口側	**24**-28	25-31	**0**-23
	中央	29-29	25-28	21-25
	出口側	27-28	**20**-26	24-26
B	入口側	**22**-30	24-27	17-24
	中央	27-28	24-27	22-23
	出口側	**23**-30	25-26	21-23
C	入口側	**23**-25	**18**-24	**16**-24
	中央	**25**-28	24-25	24-26
	出口側	**25**-28	22-26	**16**-24
D	入口側	**24**-29	**18**-26	**14**-21
	中央	**26**-29	24-26	17-23
	出口側	27-30	25-27	22-24
E	入口側	**22**-29	**19**-25	**12**-21
	中央	27-30	25-26	19-20
	出口側	27-30	24-27	19-20



＊太字は、設計肉厚不足を示す

これにより、診断の通り羽根車の摩耗が大きく、また、羽根１枚に穴が貫通していた事が確認された。

その状況を、写真-3に示す。

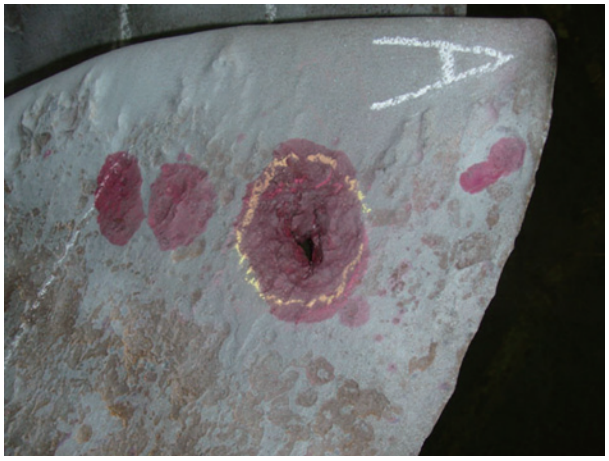


写真-3　羽根車の状況

以上より、本整備結果は、前述の診断との因果関係が明確であることを示していると考える。

渦電流式変位計の振幅値は超音波式振動計より小さく、やはり軸封部に変位が抑制されていると判断できる。渦電流式変位計のみで異常を判断する場合は、この変位の振幅の大きさや周波数変化を推定するため、データの蓄積により相関関係の調査を行う必要がある。

また、本設備においては、この分解整備後においても、再度振動計測を行っている。その結果を図-6～9に示す。

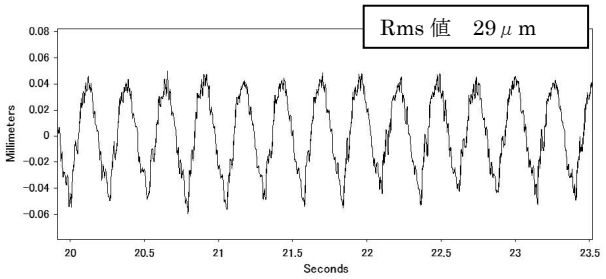


図-6　渦電流式変位計による振動波形（整備後）

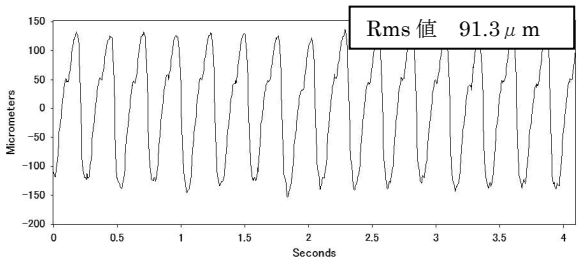


図-7　超音波式振動計による振動波形（整備後）

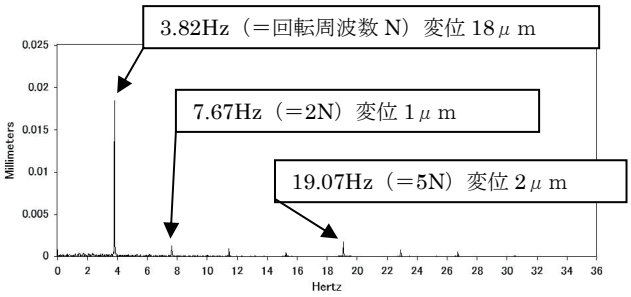


図-8　渦電流式変位計による振動解析結果（整備後）

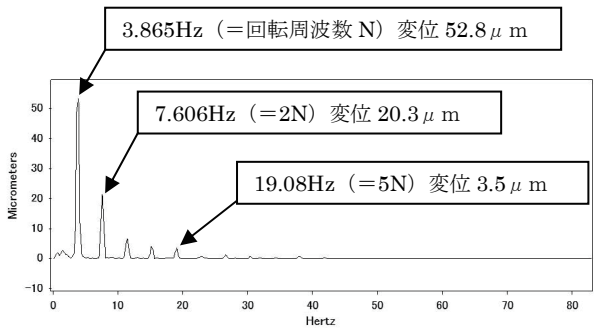


図-9　超音波式振動計による振動解析結果（整備後）

渦電流式変位計、超音波式振動計の双方ともに波形がなめらかになり、羽根車の腐食修正により、周波数解析においても羽根車成分が見られなくなったと推定される。

ただし、超音波式振動計では、典型的な軸心ずれの波形を示し、周波数解析においても回転成分の２倍周波数が以前より顕著に見られるようになっている。これは整備による組立時に、水中軸受の軸心が若干ずれた可能性を示している。

4.2 B排水機場

渦電流式変位計ならびに超音波式振動計で振動計測を行った。計測した振動と周波数解析結果を図-10、図-11に示す。

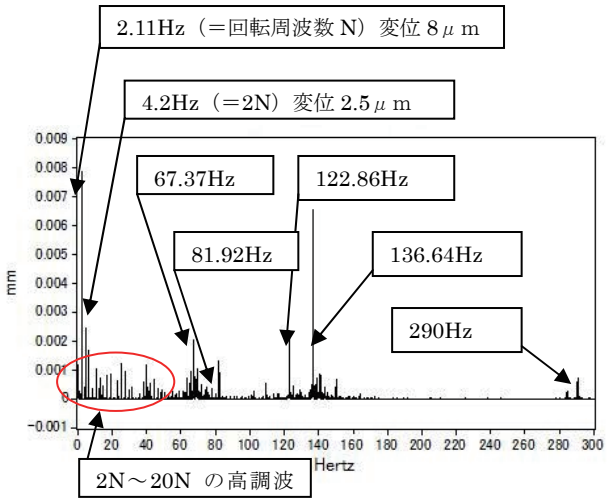


図-10　渦電流式変位計による振動解析結果

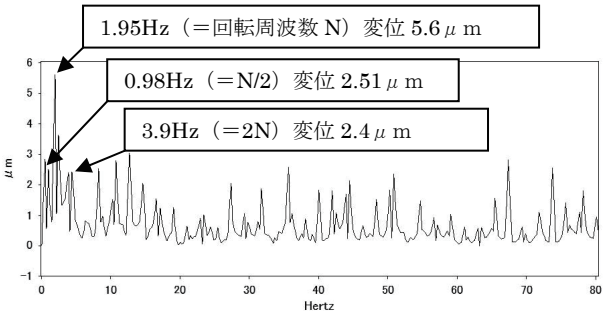


図-11　超音波式振動計による振動解析結果

この結果から、当該設備の状態は以下の通り推定される。

- 回転数成分が高く検出されているので、回転系のアンバランスがある可能性が高い。
- ２Ｎ成分及び２０Ｎ間での高調波が現れており、芯ずれが疑われる。
- 超音波式振動計による計測結果より、回転数成分以下のスペクトルが見られるため、水中軸受の摩耗が始まっている可能性がある。ただし、渦電流式変位計では兆候が確認できない。

このポンプ設備においても、振動計測後に分解整備を行った。

その際に水中軸受の摩耗量計測を行ったので、その結果を表-6に示す。

この整備結果より、水中軸受の摩耗が確認され、超音波式振動計でその兆候を捉えることができた事例であると考える。

表-6　水中軸受摩耗量計測結果

		プロペラ側	中心部	反プロペラ側	メーカ基準値
メタルすきま	測定値(mm)	0.26	0.25	0.21	0.145～0.249
	判定	やや広い	やや広い	適正	
水中メタルの振れ	測定値(mm)	−0.14	−0.08	−0.03	0.123以内
	判定	やや大きい	適正	適正	

しかし、その摩耗量はメーカ基準値を若干下回った程度であり、ポンプの性能確保の面では整備を延伸できたのではないかと考える。

このことから、状態監視技術の実用化に向けては、異常兆候を捉えるだけではなく、整備要否の判断を行う診断技術の整理が求められる。その診断においては、計測された波高や周波数分布と、その設備状態との関連性を十分に把握して判断する必要がある。

また、このような特性は設備毎に異なる傾向を示すと考えられる。

そのため、今後は「絶対値」ではなく「経時による変化量」に着眼したデータの蓄積を行い、判断基準をとりまとめていきたい。

また、渦電流式変位計では水中軸受の異常兆候が見られないことについて、今後の調査においても同様の事例が見られるようならば、超音波式振動計の適用が困難な設備については従来通りの時間計画保全で整備を行うこととなると考える。

4.3 C排水機場

渦電流式変位計で振動計測を行った。計測した振動と周波数解析結果を図-12、図-13　に示す

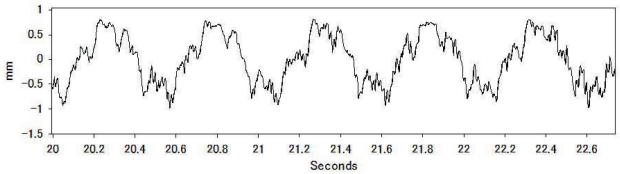


図-12　渦電流式変位計による振動波形

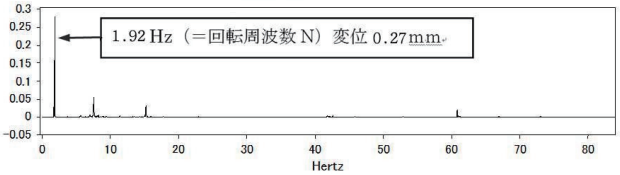


図-13　渦電流式変位計による振動解析結果

この結果から、当該設備の状態は以下の通り推定される。

- 計測波形のp-p値が1.82㎜と著しく高く、周波数成分Ｎが突出しているので、主軸のふれ回りが大きく発生している可能性がある。

このポンプ設備においては、この振動計測結果を

受け、後に分解整備を行った。その際に、軸曲がりの計測を行っているので、その結果を図-14に示す。

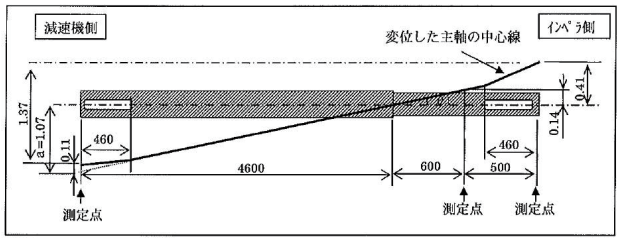


図-14　主軸変位

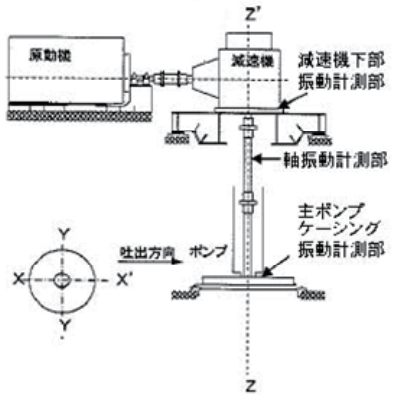
このことより、主軸の芯が1.37㎜ずれていることがわかり、本計測整備結果は、A排水機場の事例と同様、診断との因果関係が明確であることを示していると考える。

また、分解整備にあたり、その前後に減速機下部とケーシングの振動計測と、再度軸の振れ回りを計測している。その結果を表-7に示す。

表-7　振動計測結果

計測部位	計測条件	X方向	Y方向	Z方向
減速機下部	整備前	6	11	20
	整備後	5	10	15
主ポンプ ケーシング	整備前	5	6	18
	整備後	4	2	15
軸振動	整備前	600		
	整備後	100		

単位：μm(p-p)



振動計測位置

このことから、減速機下部とケーシングの整備前後の振動はわずかな差しかなく、この計測方法では軸の振れ回りを捉えられるとは言い難い事がわかる。

対して軸変位の計測では整備前後では大きく異なるので、軸のふれ回りの把握には、軸変位の直接計測が有効である事が示されている。

５．まとめ

今回実施した振動解析から得られた各機場の知見をまとめると、以下の通りである。

・Ａ排水機場は、羽根車の腐食進行を捉えることができる事が示された。

・Ｂ排水機場においては、超音波式振動計では水中軸受の異常兆候の把握が可能である反面、課題として整備要否の的確な判断を可能とする技術のとりまとめの必要性と、計測方法による適用範囲の設定の必要性があることが示された。

・Ｃ排水機場は、軸の振れ回りについて、ケーシングの振動計測では捉えることができないが渦電流式変位計では捉えることができた事を示しており、本研究で採用した計測方法の有効性が示された。

以上より、振動計測・解析により河川ポンプ設備の状態を診断できることが確認され、有効性が認められたと考える。

しかし、河川ポンプ設備の構造は多様であることから、状態監視技術の適応性向上・実用化のためには、今後より多くの事例の調査を行い、劣化兆候と実際の設備状態との因果関係を把握し、技術資料・指針としてとりまとめる必要がある。

謝辞：本研究にあたり、調査対象設備の施設管理事務所には、資料提供や現地調査に当たり、多大な御協力を頂きました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 振動技術研究会：ISO 基準に基づく機械設備の状態監視と診断（振動　カテゴリーⅡ）第 2.3 版.pp49,2010 年

2)株式会社キーエンス：まるごとわかるsensor.co.jp
(URL　http://www.sensor.co.jp)

3) 株式会社東芝：機械設備の振動による状態監視の動向,2009 年

37. 電磁誘導加熱による鋼橋の塗膜剥離工法に関する研究

日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所　○ 小野　秀一
首都高メンテナンス東東京株式会社　吉川　博
首都高メンテナンス東東京株式会社　岡部　次美

１．はじめに

鋼橋の塗装塗替えにおける塗膜除去工法についてはグラインダー等を用いた３種ケレンが一般的であるが、再塗装後の耐久性を考慮するとより高いグレードのケレンが求められる。従来から用いられる高いグレードのケレン方法としては、研削材を塗装面に叩き付けるブラスト工法や、インバイロワン工法に代表される塗膜剥離剤を用いた方法が挙げられるが、これらの工法は粉じんの発生や作業時間、廃材処理、騒音などの課題がある。

このような背景から、本研究では、北欧で大型船舶の塗膜剥離に用いられている電磁誘導加熱（ＩＨ）を応用した塗膜除去工法（以下、「ＩＨ塗膜除去工法」）の鋼橋への適用を検討している。この工法を適用することにより、他工法に比べて、作業時間や廃材処理、騒音の問題などの課題について解決されることが期待されている。

一方で、比較的薄板で構成される鋼橋への適用にあたっては、薄板であるが故に、加熱による鋼材の機械的性質や裏面の塗膜への熱影響による劣化等が懸念される。

本稿は、ＩＨ塗膜除去工法の実橋への適用性を検討するために、実橋の仕様で塗装された鋼板を試験体として、ＩＨ塗膜除去工法の基礎的な塗膜除去性能および加熱による鋼材への影響、裏面の塗膜への影響について検討するために実施した試験施工の結果を報告するものである。

２．ＩＨ塗膜除去工法の概要

ＩＨ塗膜除去工法とは、写真-1 に示すＩＨ加熱装置の加熱ヘッドにより鋼材表面を加熱することで、塗膜と鋼板を剥離させ、その後スクレーパなどを用いて塗膜を除去する工法である。今回使用したＩＨ加熱装置はＲＰＲテクノロジー社のものであり、我が国においては、大型船舶の塗膜除去に用いられているものである。また、このＩＨ加熱装置による加熱温度は、装置のカタログによると、200℃前後であり、加熱深さは鋼材表面から0.3mm 程度とされている。

３．試験要領

ＩＨ塗膜除去試験では、事前に既存塗膜の膜厚や付着強度、錆の発生状況等を調査しておき、所定の位置で塗膜剥離の試験施工を行った。試験施工後、塗膜の剥離性能（残存塗膜の有無とその量）を確認するとともに、施工速度、鋼板や塗膜の温度を熱電対によって計測した。また、付着強度試験によって再塗装への影響や裏面の塗膜への影響についても調査した。

3.1　試験体

試験体は、図-1 に示す実橋から撤去された鋼製橋脚のウェブ面を試験体とした。板厚は t=12mm、t=21mm および 27mm である。またこれとは別に、ジンクリッチペイントが塗布された板厚 9mm の別の鋼板試験体（温度計測のみ）も使用した。

試験体とした鋼製橋脚は、しゅん功が昭和 55 年

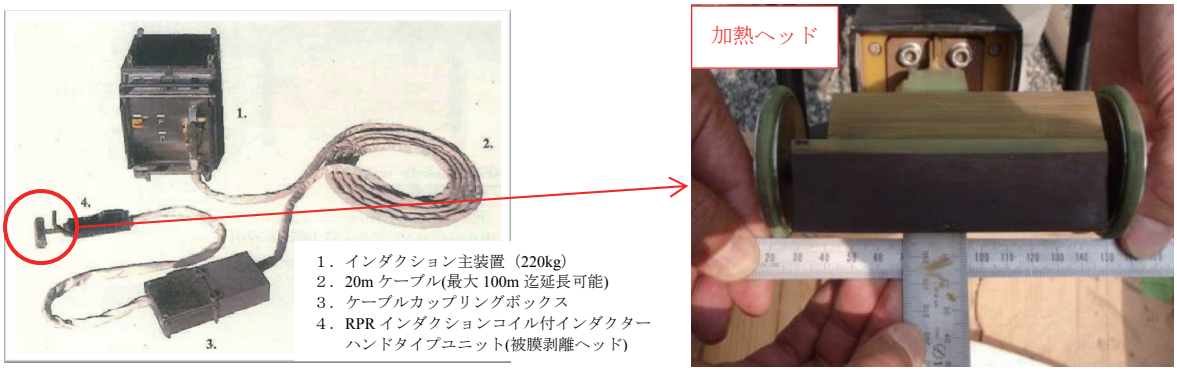


写真-1　IH(誘導加熱)式被膜除去装置

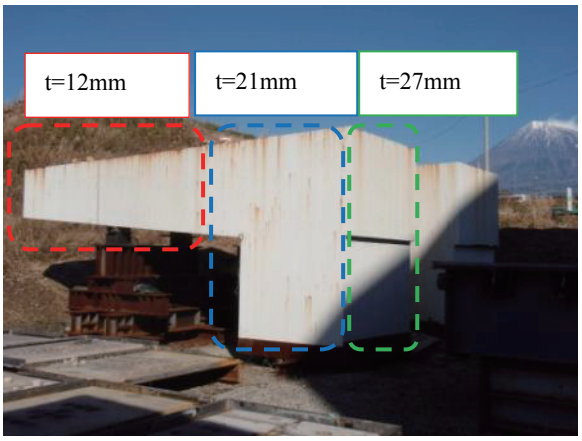


図-1　試験体（鋼製橋脚）の板厚

であり、表-1 に示す、首都高速道路の「昭和 46 年塗装設計施工基準」に示される「R-A」または「R-B」と考えられる。写真-2 には塗膜の一部を削った写真を示すが、塗膜は 8 層あり、標準 6 層に 2 層が上塗りされたものと考えられるが、詳細は不明である。また裏面はタールエポキシ樹脂塗装である。

鋼製橋脚の既存塗膜の膜厚は、表面がおよそ 330 μm で、裏面はおよそ 360 μm であった。また建研式引張試験による塗膜の引張付着強度は、加熱面側が最小 4.6N/mm^2、裏面側で最小 3.9N/mm^2 であり、基準となる 2N/mm^2 以上であった。また、塗膜面に錆が浮いたような痕はみられず、塗膜は健全な状態であったと考えられる。

3.2　加熱装置の設定

加熱装置は、加熱ヘッドの移動速度に応じて出力電圧が自動で加減されるプログラムが組み込まれており、数十パターンあるプログラムの中から選ぶこととなっている。ここではまず、板厚 27mm で確実に塗膜剥離が行える条件として A2 を設定し、それより加熱の強い A1、M1 を選定した。さらに、これらでは薄板の場合には過加熱になる懸念があったことから、板厚 12mm では出力を小さくした A3、計 4 条件で塗膜除去試験を行った。

各条件の加熱ヘッドの移動速度と加熱出力との関係を図-2 に示し、各加熱条件を以下に示す。

①条件 A1
　最小出力 70%（速度 0m/min 時）→最大出力 100%（速度 2m/min 以上）
②条件 A2
　最小出力 70%（速度 0m/min 時）→最大出力 100%（速度 4m/min 以上）
③条件 M1
　出力は常時 100%（速度に関係なく出力は一定）
④条件 A3
　最小出力 35%（速度 0m/min 時）→最大出力 80%（速度 1.38m/min 以上）

表-1　昭和 46 年　塗装設計施工基準（鋼製橋脚）

名称及び使用箇所	塗装工程	塗料名称	使用量 g/m^2	合計 g/m^2	膜厚 μ	合計 μ
R-A 一般 市街地	工場	長暴形ウォッシュプライマー	130		15	
		鉛丹錆止めペイント１種	250		40	
		鉛丹錆止めペイント２種	220		35	
	現場	鉛丹錆止めペイント２種	180		35	
		超長油性フタル酸樹脂	120		30	
		長油性フタル酸樹脂	110	1,010	25	180
R-B 工業地帯 海岸など 腐食環境	工場	長暴形ウォッシュプライマー	130		15	
		鉛系錆止めペイント１種	170		35	
		鉛系錆止めペイント１種	170		35	
	現場	鉛系錆止めペイント１種	140		35	
		超長油性フタル酸樹脂	120		30	
		長油性フタル酸樹脂	110	840	25	175
R-C 工業地帯 強汚染地帯	工場	ジンクリッチプライマー	200		15	
		塩化ゴム系塗料	250		45	
		塩化ゴム系塗料	250		45	
	現場	塩化ゴム系塗料	170		35	
		塩化ゴム系塗料	150	1,020	30	170

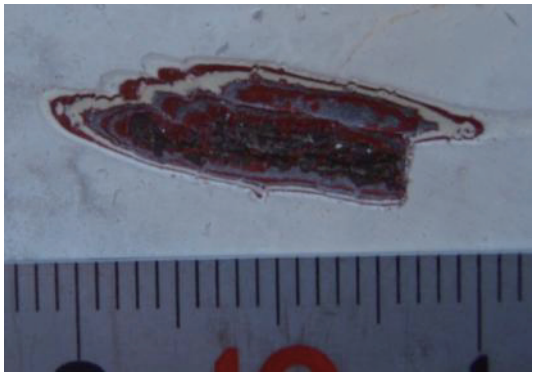


写真-2　鋼製橋脚の既存塗膜

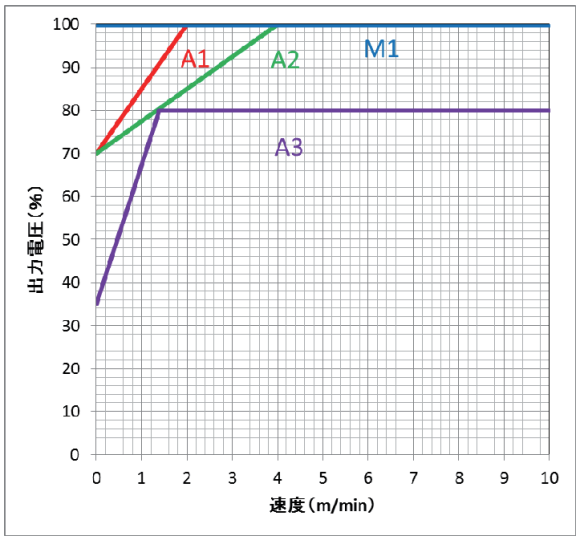


図-2　塗膜除去装置の条件設定

4．塗膜除去試験結果

4.1　塗膜除去性能

塗膜除去試験時の状況を写真-3 に示す。加熱後、スクレーパによって塗膜が板状に剥離されていることが確認される。

塗膜剥離後の鋼板表面の状況を写真-4 に示す。塗膜剥離後の鋼材表面は赤茶色となっていることから、僅かに塗膜が残存していることが確認される。残存塗膜の膜厚は、板厚や加熱条件によらず 30～40μm であったことから、スクレーパの先端形状が鋭利ではなかったために、下塗り材が残存し

てしまったものと考えられる。その後、先端が鋭利な刃物で残存塗膜部を削ったところ、簡単に地鉄が現れたことから、塗膜は加熱によって完全に剥離できていたものと考えられる。

4.2　温度測定結果

赤外線カメラによる塗膜除去試験時の塗膜表面の温度分布を写真-5 に示す。加熱範囲は局所的であり、加熱ヘッドの直下のみが加熱されている様子が見て取れる。

熱電対によって計測した鋼板表面の最高温度と板厚との関係を図-3 に示す。ここで設定条件 A1,A2 での結果を示す。図に示すように、鋼板温度は板厚に関係なく一定、あるいは僅かに板厚が大きくなるにしたがって低下する傾向が見られる。

図-4 には加熱速度と鋼板温度の関係を示す。加熱装置の出力電圧が施工速度に比例して上昇する間は、鋼板最高温度は概ね一定となる傾向が見られる（設定条件 A1,A2）。また出力電圧が施工速度に関わらず一定である場合のうち条件設定 A1、A3 については、バラツキは大きいものの施工速度の増加とともに鋼板温度は低下する傾向が見られた。すなわち、出力電圧が一定の条件では、施工速度が増加すると加熱不足となる可能性が考えられる。

加熱時の鋼板の最高温度は、条件 A3、板厚 12mm で、加熱面 289℃、鋼板裏面は 78℃であった。

4.3　再塗装および加熱裏面側の塗膜への影響

塗膜除去後の再塗装を行い、塗膜の付着強度試験を行った。その結果、付着強度は 8.8N/mm^2 であり、除去した後の再塗装には問題はない。

加熱後の裏面側の塗膜付着強度は、板厚 12mm のケースで、未加熱時 11.7N/mm^2 であった箇所が加熱後 4.6N/mm^2 と約 4 割に低下した。また一部では写真-6 に示すように塗膜が気泡状になる損傷が認められ、加熱条件の設定によっては裏面の塗膜に悪影響を与える恐れがあることが確認された。

4.4　加熱による鋼材への影響

鋼板（板厚12mm）で最高温度となった箇所において、コアを抜いて断面マクロ調査による組織調査、およびビッカース硬さ調査を行った。その結果、鋼材には何ら変化は認められなかった。

一般的に溶接部では、200～300℃の加熱でひずみ時効脆化が懸念されるが、加熱時間が短時間（2秒程度）であること、表面のごく僅かな範囲の加熱であることから、鋼材への影響は無視できるほど小さかったものと考えられる。

５．まとめ

ＩＨ塗膜除去工法を鋼橋に適用した場合を想定した試験施工により、概ね実橋への適用が可能な工法であると考えている。以下に、本試験で得られた結果をまとめる。

①今回の試験施工では、ＩＨ塗膜除去工法により３種ケレン相当の塗膜除去性能であったが、塗膜を除去する工具を工夫することで２種ケレン相当

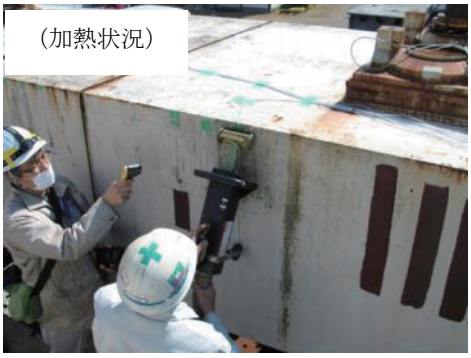


写真-3　塗膜除去試験状況

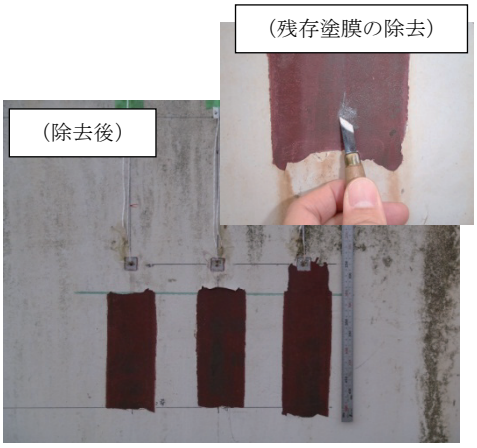


写真-4　塗膜切削後の状況

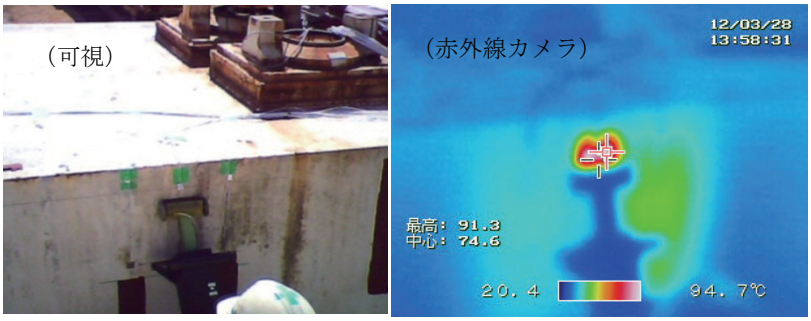


写真-5　温度分布（t=12mm）

が可能と考えられる。
②加熱による鋼板表面の最高温度は、289℃であった。鋼材の組織や硬さに変化は見られなかったことから、加熱時間が短時間であること、原理的にも加熱が表面のみであることから、鋼材への影響は極めて小さいと考えられる。
③板厚が薄い場合（t=12mm）、裏面側の塗膜に損傷が見られたため、板厚が薄い場合には加熱条件の設定には注意が必要である。

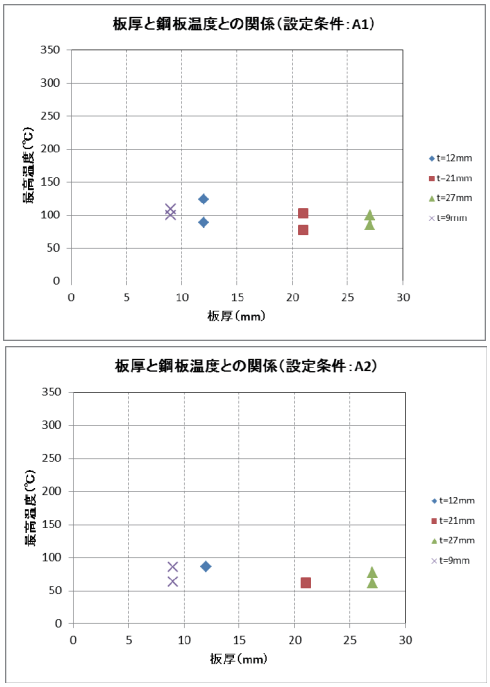


図-3　板厚と鋼板表面温度の関係

④塗膜剥離作業前後の裏面側塗膜の付着強度試験結果より、作業前の付着強度が11N/mm^{2}前後であるのに対して作業後は4.6N/mm^{2}と約4割程度に低下した。基準値である2N/mm^{2}以上を満たしているが、耐久性については要検討と言える。
⑤塗膜剥離作業後の再塗装箇所における塗膜の付着強度は8.8N/mm^{2}であり、ＩＨ塗膜除去工法を適用しても再塗装に及ぼす影響はない。

６．おわりに

本研究は、筆者らの他に株式会社ナプコ、望月工業株式会社も加わった共同研究として実施した。ここに感謝の意を表する。

今後も、環境に優しく効率的な塗膜除去工法の実橋への適用を目指し、さらなる研究開発を進めていきたいと考えている。

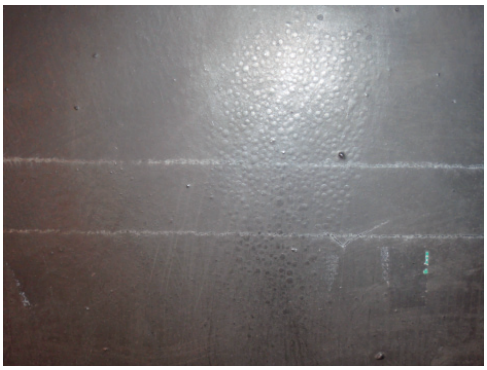


写真-6　裏面の塗膜損傷(t12mm)

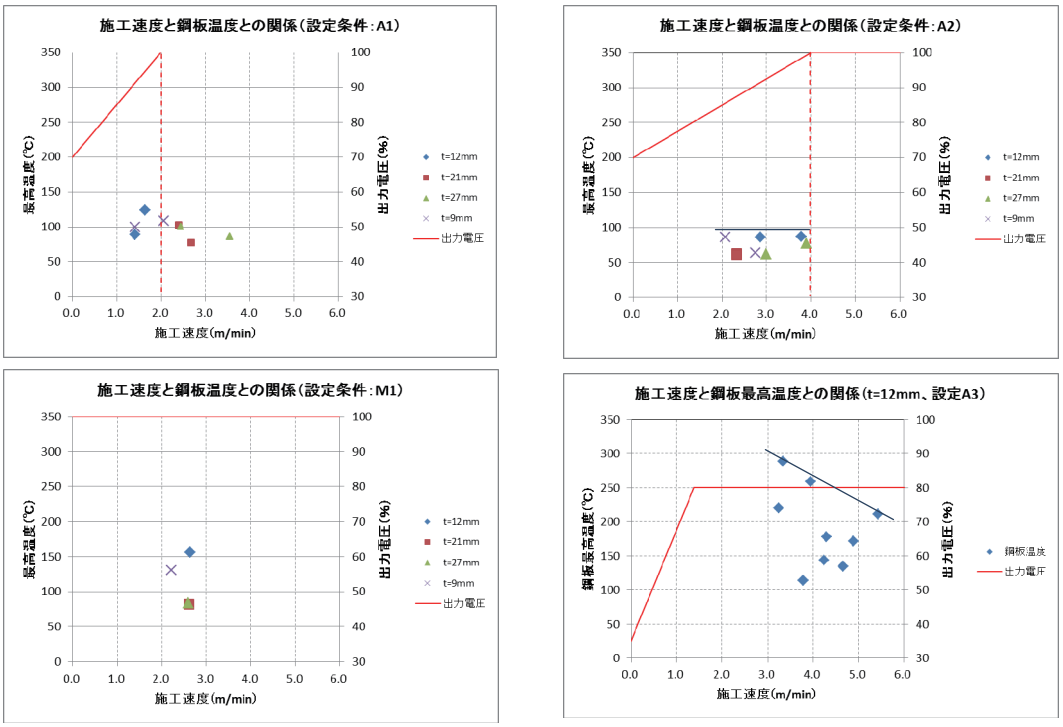


図-4　加熱速度と鋼板温度の関係

38. 車載型移動体 3 次元計測データを用いた道路維持管理手法の検討について

立命館大学　○　横山　隆明
(株)アスコ　番上　勝久
立命館大学　建山　和由

１．はじめに

効率的で高精度な道路施設の位置把握手法として,三次元レーザスキャナーと GPS 等を搭載した車両の走行による車載型移動体三次元測量技術が注目されている[1)]。この手法は,高精度で高密度のデータを供用中の道路において車両走行の規制などを行わず測量が可能であるなど多くの利点を持つ。三次元レーザスキャナーでは水準測量と同程度の精度で路面の性状から道路周囲の建物などの構造物及び植栽の状況,案内板の設置位置などの情報を得られる事ができるため今後様々な活用がされるものと期待されている。

前報[2)]では,この三次元レーザスキャナーで得られた路面の三次元測量結果を用いて道路の平坦性を評価するための世界共通指標として導入されつつある国際ラフネス指数（IRI）の算出方法について報告した。レーザによる三次元測量結果は水準測量と同程度の精度を持つため,IRI 算定において規定されているクラス I と同等のレベルとみなすことができ,極めて信頼性が高い IRI 値を簡便で廉価に得ることが可能になる。本報では 10km の区間に渡り取得したレーザによる三次元測量結果を用い算出した IRI 値の妥当性の検証,IRI 値を道路維持管理に利用するために,広く用いられている道路維持管理指標である MCI（Maintenance Control Index）値との比較について報告する。そして IRI 値を利用した新しい道路維持管理手法の提案を行う。

２．三次元計測データからの IRI 値算定結果

実際に路面を走行して取得された三次元計測データからの IRI 値算定を行った。算定に用いたのは阪神高速 7 号線北神戸線の長坂山トンネル付近からから唐櫃トンネル付近までの約 10 キロである。走行速度は 60～80km であった。

図-1 に得られた IRI 値を示す。IRI は合計 3 回走行し得られた測量結果を用い前述した方法を用いて 100m 毎に算出た平均値を用いている。図中に示す IRI 値平均値は 2.8m/km であった。

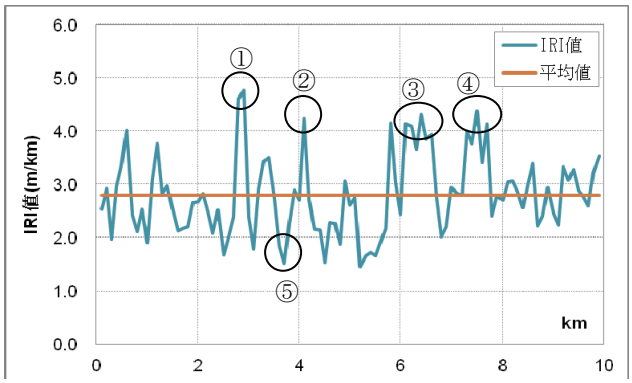


図-1　北神戸線：計測区間における IRI 値

図-1 からは IRI 平均値から大きく離れている箇所がいくつか存在する（図中の①～⑤）。以下レーザ計測と同時に取得した画像からその原因について検討すると以下の点が明らかになった。

①：白線の切削による規則正しい凹み

図 10 の①に相当する箇所は緩やかな下り坂となっており,おそらく速度超過を喚起するための白線が存在していたと思われる跡が多数存在していた。現在はその白線を撤去した跡の影響で 2m 間隔で凹が連続する区間となっていた。この 2m 間隔の凹みが IRI 値に影響していたと考えられる。

②補修箇所が多数存在。

この区間は走行路面上に補修箇所が多数存在していた。このため,路面に凸凹が生じ IRI 値が高めに出たと考えられる。

③ジョイント部が連続する区間

阪神高速 7 号北神戸線は,兵庫県神戸市西区の第二神明道路,伊川谷 JCT から兵庫県西宮市の中国自動車道（西宮山口 JCT）へ至る路線で途中急峻な地形の中をぬうように走る区間が存在する。そのためトンネルや橋梁が連続する区間があり,この区間は橋梁が連続するため橋梁の連続部分が多く存在し IRI 値が高い結果になったと考えられる。図-2 にその状況を示す。

図-2　③：橋梁ジョイント部の連続

④路面の荒れ

④に相当する区間については路面が荒れている部分が多く,このため IRI 値が高めの値になったと考えられる。

⑤非常に良い路面

この区間は補修箇所,ジョイント,路面の荒れなどがほとんど見当たらず路面の状況が非常に良い。このため IRI 値は 1.5 と良好な値が得られていると考えられる。図-3 にその状況を示す。

図 3　⑤：非常に状況の良い区間

このように路面の状況と照らし合わせてみると IRI 値は路面の状況を反映しており,ほぼ妥当な値が得られていると考えられる。

3．MCI 値と IRI 値の比較

日本の国道における路面性状の維持管理指数として MCI 値(Maintenance Control Index)が広く用いられている。MCI 値は,わだち掘れ量,ひびわれ率,縦断凹凸量 3 つの指標で構成されており,舗装の破損程度を 10 点満点で総合評価した指数である。MCI 値による路面の維持管理は長年の実績も有り非常に有効な調査・評価方法として知られているが,以下のような問題も指摘されている。

1. 舗装道路の損傷に重点を置いた指標で,直接的な乗り心地評価との関連が付けづらい。
2. 補修の必要な箇所が必ずしも調査結果と合致しない。
3. 特にひび割れ調査の結果を整理・解析する手間とコストが多大であるため,調査自体がコスト高になる。

上記のなかでもコストの問題は深刻であり,特に地方自治体においては MCI 調査を実施しているところは非常に少ないのが現状である。その点,IRI による調査は計測車両による路面走行だけで計測が可能で MCI 調査に比べ低コストでの調査・解析が可能であるのは大きな利点として挙げられる。低コストであることは,道路は今後次々と更新時期を迎えると考えられる社会資本の 1 つであり,維持・補修のための予算的優先順位を作成する際の資料として,乗り心地を評価できる IRI 値を利用することができれば,事業の透明性を確保する点からも好ましいと考えられる。

従って,まずは従来の道路維持管理の指標である MCI 値と IRI 値がどの程度の類似性を示すのか検討するため,前述した阪神高速 7 号北神戸線で MCI 調査を行った。図 4 に MCI 値と IRI 値の比較を示す。

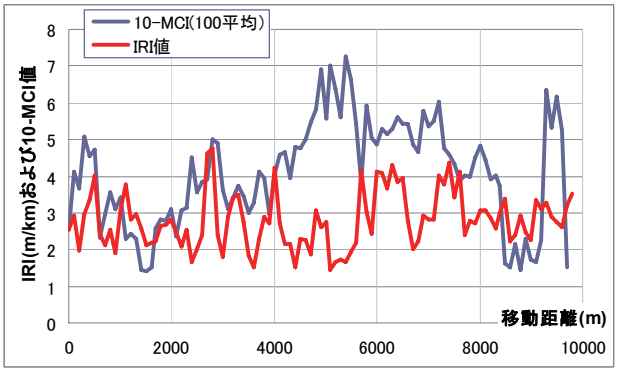


図 4　MCI 値と IRI 値の比較

MCI 値には 4 つの評価式があるが,図-4 で用いたのは MCI①式と言われる以下の式である。

式：$MCI=10-1.48C^{0.3}-0.29D^{0.7}-0.47\sigma^{0.2}$

C：クラック率(%),D：わだち掘れ(cm),σ：平坦性(mm)

また,減点法である MCI 値との比較を行うために,MCI 値は 10-MCI 値に変換して示し,MCI 値と IRI 値については共に 100m 毎の平均値で比較を行った。図-4 から,IRI 値と MCI 値はそれほど良い一致を示していないことが分かるが,理由としては MCI 値が道路の補修を目的とした指標であるのに対し,IRI 値は乗り心地を数値化するための指標であることが考えられる。図-5 に MCI①式における MCI=3,4,5 時の MCI を構成する各指標との対応図を示す。MCI が 3 より小さい場合には早期の補修が必要であるとされているが図-5 からその主な支配要因はひび割れ率である事がわかる。従って

MCI 値とは乗り心地というユーザ視点とは少し異なる値であると示唆される。

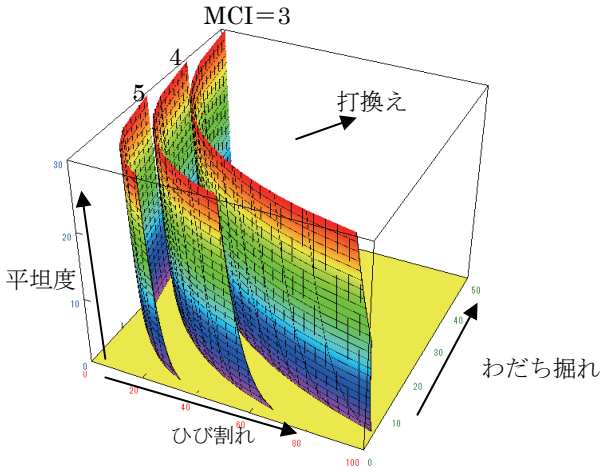


図 5　MCI 値①式と各構成値との関係図

次に,図-6 に MCI 値と IRI 値との相関を示す。

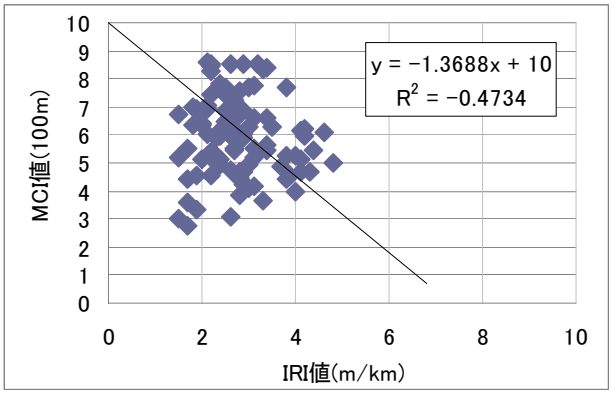


図-6　MCI 値と IRI 値との関係図

図-6 から MCI 値と IRI 値の相関においては決定係数 R2=-0.473（相関係数=0.688）となり両者には中程度の相関を示すのみという結果となった。

図-7 に MCI 値の構成値の一つであるわだち掘れ量と IRI の相関図を示す。図-7 からわだち掘れ量と IRI 値の相関においては決定係数 R2=-0.6958（相関係数=0.834）で両者に高い相関があった。

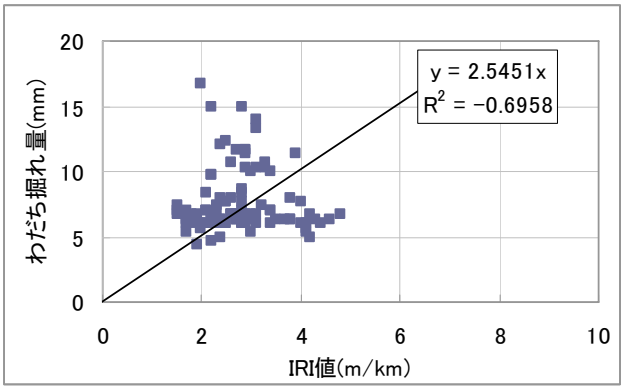


図-7　わだち掘れ量と IRI 値との関係図

以上の結果から MCI 値は主にひび割れ率に大きく影響を受けるため IRI 値は中程度の相関を示すのみだが,IRI とわだち掘れ量の間には高い相関があることが分かった。従ってわだち掘れ量と IRI 値を組み合わせる事で道路維持管理の指標とすることを検討した。

4．IRI 値を利用した道路維持管理指標の検討

今までの検討から IRI 値とわだち掘れ量を組み合わせた道路の維持管理指標について検討した。

まず,レーザによる三次元測量結果からわだち掘れ量の算定を行った。わだち掘れ量は計測を行った路面を幅員方向に各車線幅,進行方向に 1 mの 1 ブロックごとに分け,左右わだち量D 1 またはD 2 の内,最大のものをDmax として検出するプログラムを作成し全区間に渡り自動検出した。

図-8 に模式図を示す。

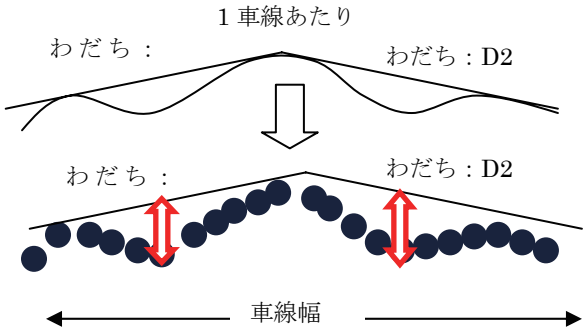


図-8　わだち掘れ量の算出

そして全車線に渡って算定したわだち掘れ量を 10,20,30,40,50mm 未満の 5 段階に分類し,IRI 値も同じように IRI 値 2 未満から 8 以上までの 5 段階に分け図 10 に示すマトリックス上に示し,路面全体を A：望ましい管理基準内に維持されている路面,B：修繕が必要な路面,C：早急な修繕が必要な路面,の 3 段階で評価することとした。以上の方法を実際に三次元測量した路面に適用しその合理性について検討を行った。

IRI ＼ わだち掘れ量	10mm 未満	20m 未満	30mm 未満	40mm 未満	40mm 以上
2未満	A	A	A	B	C
2以上 4未満	A	A	B	B	C
4以上 6未満	A	A	B	B	C
6以上 8未満	A	B	B	B	C
8以上	B	B	C	C	C

図 9　IRI 値とわだち掘れ量を用いた道路維持管理指標

検討を行ったのは，三重県四日市の子酉八王子線、県道 6 号線の大井の川町交差点から県道 8 号線八王子町交差点までの約 6km である。計測沿線東側には工業地帯があり国道 1 号線,国道 23 号線

と交差し大型輸送車両などの交通量が多いが,逆に西側は住宅地域となっており交通量はそれほど多くない。以下に代表的な 3 地点について IRI 値とわだち掘れ量による道路管理指標の適用性の検討を行う。

①国道 23 号線交差点付近（図-10）:

この部分は主要国道である国道 23 号線と交差している地域で大型トラックなどの輸送車両の通行も多い地域である。地点 I 部分は国道のわだち掘れの影響が強く主に IRI 値によって B 評価となっている。地点Ⅱ部分については国道への停車線付近であり STOP&GO によるわだち掘れの影響が大きく A 評価の部分が多い。地点Ⅲについては路面にジョイントが多く IRI 値の値が良くない事が影響し B 評価部分が多い結果となっている。

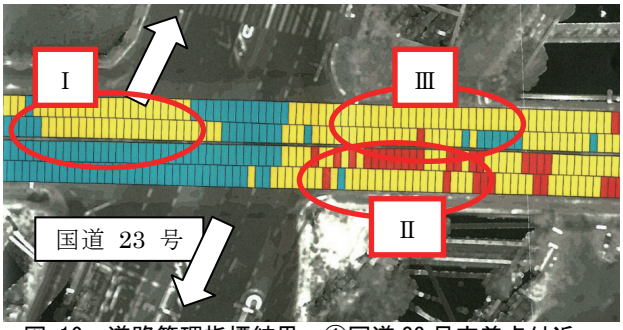


図-10　道路管理指標結果：①国道 23 号交差点付近

②国道 1 号線交差点付近（図-11）:

この部分も①と同じように主要国道であり交通量の多い地点である。地点 I の交差点内は同じように国道 1 号線のわだちによって IRI 値の評価が悪い部分が点在している。地点Ⅱは①と同じように国道に面する停車線付近であるため STOP&GO によるわだち掘れが発生している。この部分は IRI 値はそれほど悪くないがわだち掘れの影響の方が顕著に表れている。

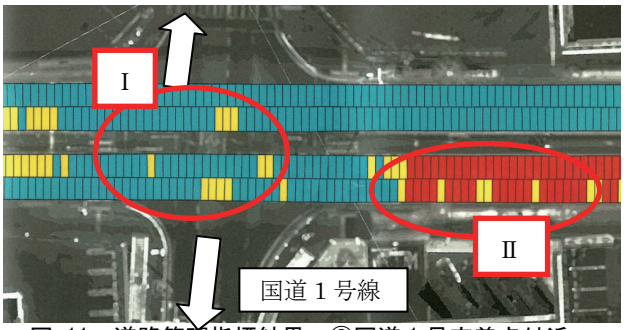


図-11　道路管理指標結果：②国道 1 号交差点付近

③笹川小学校付近（図-12）

この部分は①②と異なり計測地域の西部に広がる住宅地域に面した部分であり大型輸送車両等の走行は少なくなっている地域である。また最近補修された部分も多く路面状況は良好である。そのため IRI,わだち掘れ量共に良い値を示し,多くの区間で A 評価という結果となった。

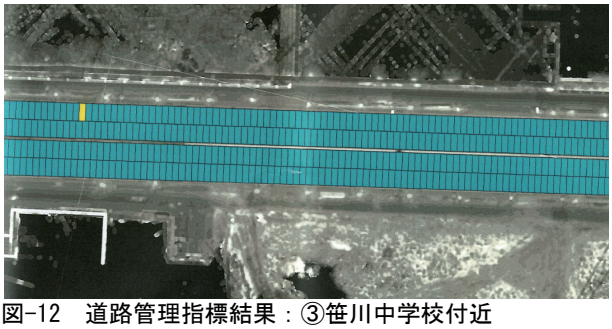


図-12　道路管理指標結果：③笹川中学校付近

また,これらデータを用いることで補修修繕の計画立案が可能になる。図-13 に①国道 23 号線付近交差点での IRI およびわだち掘れによる道路管理指標を用いた路面修繕案を示す。

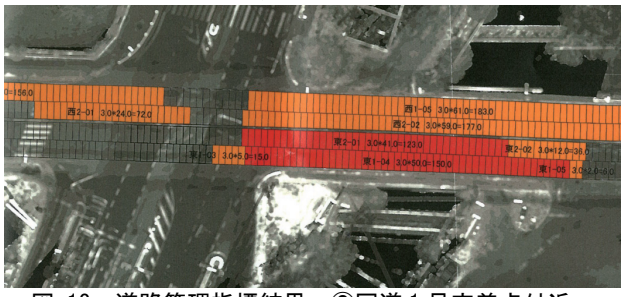


図-13　道路管理指標結果：②国道 1 号交差点付近
（赤：早急な修繕, オレンジ：早めの修繕）

図-13 に示すように ABC の 3 段階に分類した道路管理指標を元に優先順位を付けて路面修繕計画を立てることができ,また面積も容易に算出できるため予算規模も同時に示すことが可能となる。

５．まとめ

実際の路面を走行し IRI 値を測定した。同時に取得した画像の検証から, IRI 値は路面の性状をよく表していると考えられた。同路面の MCI 値と比較すると中程度の相関を示すのみであったが, MCI の構成要素のであるわだち掘れ量とは高い相関を示すことが分かった。そこで IRI 値とわだち掘れ量を用いた新しい道路管理指標提案し路面の評価を行った結果, 乗り心地と路面補修の両面から妥当な値を得ることが可能になった。この新しい道路管理指標を用いれば, 優先順位を付けた道路管理計画を容易に策定することが可能である。

参考文献

1) 番上勝久・西野克明：道路施設の位置情報把握における車載型移動体3次元計測技術の適用,日本写真測量学会学術講演発表講演集,巻2010,pp.29～32, 2010年10月
2) 横山隆明・番上勝久・建山和由：道車載型移動体3次元計測データを用いたIRI値の算定について,平成２４年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集

Ⅱ　梗概集

Ⅱ－１　ポスターセッション要旨

１．自走式洗浄ロボットによる循環式除染洗浄システム

ウォータージェット洗浄と凝集沈殿による汚染物質回収

○日進工業株式会社　　中光真史
丸三機械建設株式会社　新野富夫
ＮＰＯ法人　　再生舎

１．はじめに

甚大な被害のあった東日本大震災震災後、放射性物質による汚染や塩分による汚染の問題が深刻化している。それらを除染するために多種の方法が実施されているが、本グループでは対象物に応じた水圧のウォータージェットを利用し除染を行い、その洗浄水を回収し、凝集沈殿による汚染水浄化を行った後 、洗浄水としてリサイクルする「循環型」の洗浄システムを提案している。

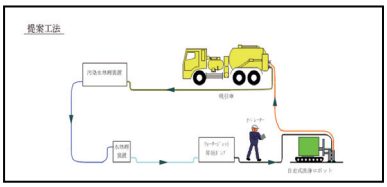
２．特徴

大きな特徴は次の通りである。

①対象物に応じて 15MPa～280MPa の水圧、流量を選定し、効果的な洗浄を行う。(洗浄から表面ハツリまでを行う事が可能)

②洗浄作業員の２次汚染を防止し、洗浄効率を向上させるためにオリジナルの装置、先端治具を開発している。(回転吸引式先端ノズルや自走遠隔操作式洗浄ロボットなど)

③ＮＰＯ法人再生舎が東京工業大学と開発したイオンリアクションを用いた凝集沈殿による浄化システムと技術コラボレーションを行い、回収した洗浄水は効率よく除染、浄化し、新たな洗浄水としてリサイクルを行っている。



３．自走式洗浄ロボット

アタッチメントを取り替えることで超高圧、高圧のウォータージェットに対応している。そのため洗浄から表面ハツリまでを１台で対応することが出来る。

自走式ロボットはプログラムによる走行やラジコンによる遠隔操作が可能で、先端アームを床面、壁面、天面等、セットした先端治具を様々な向きでの洗浄に対応させることが出来る。

先端治具は、揺動式、回転式のノズル稼働を選択可能で、いずれも強力吸引ポンプと組み合わせることで洗浄排水の回収、洗浄時の飛散防止を行い、2 次汚染を防止できる。

４．洗浄排水浄化システム

イオンリアクションを使用した凝集沈殿により洗浄排水を浄化、します。

イオンリアクションは微粉化状の無機の粘土鉱物に数種類の添加剤を加えることで、汚染物質の還元沈殿とイオン交換、吸着を行います。そのため pH に左右されることが無く効果が得られます。例えば放射性セシウムの場合はフェロシアン化鉄を配合することにより浄化が可能になります。

「平成 23 年度除染技術実証試験事業」として採択され本宮市の小学校で実証試験を行った結果、事業報告会にて除染効果が「高」の評価をいただきました。

２．次世代環境技術を搭載した油圧ショベル

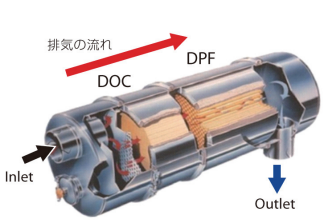
所　属　　キャタピラージャパン株式会社
〇桑田 和扶

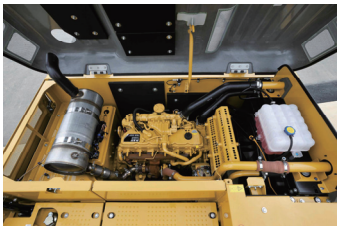
新型油圧ショベルの開発

ディーゼルエンジンを搭載した建設機械を１９３１年に発表したキャタピラー社は世界トップクラスのエンジンメーカーとして、オフロード法２０１１年基準に対応した油圧ショベル「３２０Ｅ」を世界同時に発売した。クリーンな排出ガスと燃料消費量低減を両立したＣａｔ®Ｃ６．６ディーゼルエンジンを搭載し、アイソクロナス制御による低燃費・低騒音化、ＮＲＳ（NOx Reduction System）、最新のアフタートリートメント技術の採用で、より高い環境性能を実現している。

地球にやさしい環境性能

高い排出ガス浄化能力を発揮するアフタートリートメント技術「Ｃａｔクリーンエミッションモジュール」は、排出ガス中の大気汚染物質を除去するため、ディーゼル酸化触媒（ＤＯＣ）とディーゼルパーティキュレートフィルタ（ＤＰＦ）の二層構造の浄化装置となっている。一層目のＤＯＣは白金でコーティングされたセラミックでできており、白金の強い酸化力によってＣＯ、ＮＭＨＣを酸化・除去することができる。二層目のＤＰＦはウォールフロータイプのセラミックフィルタで、すすを含んだＰＭを捕捉することが可能。ＤＰＦ再生は自動で行われる。また、現場周辺環境に配慮し、超低騒音の指定を受けている。





燃費低減型エンジン・油圧システム搭載

ブーム下げ操作時は油圧エネルギー再生に加え、エンジン回転数とポンプ流量を下げることで燃費の低減を図っている。無負荷・負荷によらず一定のエンジン回転数に保つよう制御し、最大出力モードにおける無負荷時の設定回転数を従来機３２０Ｄ：1,980rpm に対し，新型機３２０Ｅ：1,700rpm とすることで、特に軽負荷（無負荷）時の燃料消費を抑えられるようになっている。また、一定時間アイドリング状態が続くと自動的にエンジンが停止する「オートアイドルストップ機能」により、燃費・CO_2の排出量を低減する（エンジン停止までの時間は１分単位の設定が可能）。これにより、スタンダードモードの燃料消費量は当社従来機比で約１０％低減、エコノミーモードでは３２０Ｅスタンダードモード比で約１２％低減している。

ＮＥＴＩＳ登録と★★★達成

「燃費低減型エンジン・油圧システム搭載油圧ショベル」でＮＥＴＩＳに登録。また、CO_2削減効果の高い建設機械を積極的に導入・推進を目的に、燃費改善が図られた建設機械に対する認証制度「２０２０年燃費基準」で達成率１００％以上となる３つ星を獲得している。環境性能に優れ、地球にやさしい建設機械として本製品が広く建設工事で活用されることにより、環境負荷の低減が達成されると考える。

（弊社イメージ）

３．河道閉塞災害への「呼び水サイフォン排水装置」の提案

起動力は「水の力」！

〇㈱山辰組　営業部　馬渕　剛
日鐵住金建材㈱　岩佐　直人
岐阜大学　応用生物科学部　平松　研

１・はじめに

地震，豪雨により河道閉塞が発生し，二次災害が想定される場合は緊急的に仮排水路を構築する必要がある。仮排水路構築までの間は天然ダムの水位抑制対策が必要であり，その１つとして国土交通省では「大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方（提言）」において，ほとんど動力を必要とせず排水作業が可能となるサイフォン排水装置の開発の重要性が提言され，多摩川でΦ400㎜の送水装置のモデル実験が行われ結果が報告されている。サイフォンの起動には真空ポンプで充水しているが効率的に排水するためには200ｖ，数ｋｗ程度の動力を要するものと思われる。

弊社は平成９年に水中ポンプで起動しサイフォンで稼働する「エコポンプ」を開発し実用化した。しかし，重量の関係で取扱いに重機と200ｖの電源を要することは共通の課題であると考えた。

２・「呼び水」によるサイフォンの起動の考案とその実験

排水の際の起動に際して、「呼び水」を利用する排水装置を考案し、課題が解決できるのではないかと考えた。そして、実験に際しては比較的小規模な天然ダム対策の排水装置としての利用を想定し、砂防えん堤での実験を行った。

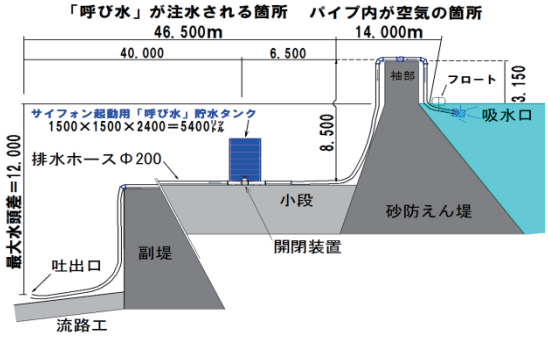


図-1　「呼び水サイフォン排水装置」実験設備図

全体図を図－１に表す。φ200㎜のサクションホースを用いて砂防えん堤の上流側から袖部をまたいで副堤の下流の流路工へと排水を行う。上流側のホース先端に「雑物吸入防止網」を備えた吸水口を水深2mで浮遊させるフロートを取付け砂防えん堤貯水池に投入する。排水ホースはダム袖部を乗越えてダム下流の小段に至り，さらに下流方向へ進んで副ダムの下流部の流路工底部で吐出し口を上向けて設置する。小段上において仮設の貯水タンク（図-2）から排水ホースへ「呼び水」を注水するための注水パイプが「開閉装置を備えた注水口合流部材（図-3）」を通して側面から合流している。

図-2　型枠用部材で組上げた仮設タンク

図-3　「開閉装置を備えた注水口合流部材」

「呼び水サイフォン排水装置」とは，サイフォン作用を起動する「呼び水」を排水ホースの中・下流部分へ総延長の 2/3 以上の範囲に注水する際に動力を使用

するか否かを問わず，「呼び水」が流下するエネルギーでサイフォン作用を起動するシステムにより「呼び水サイフォン排水装置」と命名した。

３・呼び水サイフォン起動実験

前述したがΦ200 ㎜排水ホース内全体を満水状態にすることなく「呼び水」によりサイフォンを起動できるかが実験の主目的である。

以下の手順で実験を行った。

① 仮設の貯水タンクに水を溜める方法として，(**図-2**)の手前に送水パイプが見えるように２インチのエコポンプを使用してタンクに給水した。

② 給水が完了した後，貯水タンクと連結してある注水口合流部材に備えた開閉装置（**図-3**）を開いて排水ホースへ一気に「呼び水」を注水する。

③ 注水当初は排水ホース下流側吐出し口には白い空気混じりの水が出てくるが(**図-6**)，1 分程度で透明になるので、そのタイミングで（**図-3**）の開閉装置を素早く閉じる。

④ 開閉装置を閉じると，流下する水と排水ホース内の空気と綱引き状態となるため数秒間は「止まったか」と思うほど流下が減少する。

⑤ ダム貯水地の水を呼び込んでサイフォン作用で流れ始めると流量は8.74 ㎥/min となりΦ200 ㎜の水中ポンプの２倍の排水能力となる（**図-7**)。

図-6　「呼び水」で排水ホースを満水にする

図-7　サイフォンによる排水状況

４．水頭差の変化に伴う排水量確認実験

この排水設備で下流部吐出し口の高さを上下に段階的に変化させて，上流部の貯水池の水面との各水頭差毎の排水量の測定を超音波流量計（ポータフローX）を使用し実施した。各水頭差毎の測定回数 3 回の平均値を（**表-1**）に表す。排水量は○水頭差 1.0m で 2.18 ㎥／min となりΦ150 ㎜水中ポンプの排水量 2 ㎥/min と同等以上となった。

○水頭差 3.0m で 4.01 ㎥／min となりΦ200 ㎜の水中ポンプの排水量 4.0 ㎥／min となった。

○水頭差 11.0m で 8.38 ㎥／min となり 10 吋水中ポンプ（8 ㎥／min）と同等以上の排水作業を行う水頭差として確認できた。

表-1　水頭差とサイフォン排水量

水頭差(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
流速(m/s)	1.13	1.60	2.07	2.44	2.79	3.15	3.47	3.75	3.89	4.05	4.32	4.50
流量(㎥/min)	2.18	3.12	4.01	4.75	5.42	6.12	6.74	7.26	7.55	7.91	8.38	8.74
	Φ150㎜(2㎥/min)		Φ200㎜(4㎥/min)以上の排水機能								Φ250㎜(8㎥/min)	
理論流量（㎥/min)	2.83	4.01	4.92	5.68	6.35	6.95	7.51	8.03	8.51	8.97	9.41	9.83
理論値と実測値の比率（%）	77.2	77.6	81.6	83.6	85.4	88.1	89.8	90.4	88.6	88.2	89.1	88.9
									平均値		85.8 %	

５・おわりに

砂防えん堤での「呼び水」方式のサイフォン排水実験は成功したものの，天然ダムの排水作業に使用するためには多様な災害現地の状況把握と安全を優先した現地施工の可否判断など専門家の支援を多く必要とするためご指導を願いたい。

謝辞：本実験に関して，国土交通省中部地方整備局越美山系砂防事務所，岐阜県，揖斐川町，地元諸家地区，(株)BMI など関係者の皆様のご理解とご協力ご指導を賜りましたことに対して心より感謝の意を表します。

４．重機災害撲滅のために開発したシステムのご紹介

尊い命を守るため、安全作業の取り組み

㈱アクティオ　　稲葉　誠一
㈱アクティオ　　〇吉川　晃

道路機械安全商品のご紹介

日頃より、当社機械をご利用頂、誠にありがとうございます。当社では、現場での安全に重点を置き取り組んでおります。
今回は、重機災害で多く見られるバックホーによる事故防止、ローラーでの巻き込まれ防止装置及び
ローラーでの死角部分を照らすLEDライトシステムを発表させて頂きます。

ローラー用巻込まれ防止柵

ローラーでの転圧作業中に、しゃがみ込んでいる作業員をひいてしまう死亡事故があり、お客様より対策を考えて欲しいとの要望から生まれた装置です。
エンジンをスタートさせた時点で自動的にオンになり、ロール、タイヤに接触しなければ死亡事故にはならないと考え、ロール、タイヤ前に防止柵を設け接触したと同時にエンジンをストップさせるシステムを考え、実機に取り付け、効果を発揮しております。

バックしないバックホー

現在、重機災害の中でバックホーの移動時に作業員やガードマンがひかれてしまう事故が多発しております。バックセンサーやバックモニターなどの対策を講じておりますが、減少する事無く悲惨な事故が続いております。そこで、当社では物理的にバックさせない、オペレーターが視認出来ない方向には走行できない機構のバックホーを開発致しました。これによりオペレーターの死角には走行できません。後方移動時は旋回し、オペレーターが走行方向の安全を確認し、移動を行います。

エレクトリックローラ

夜間工事の際、ローラーでの転圧作業時、定置式のライトで現場を照らしておりますが、満遍なくライトが置かれておらず、光量不足からオペレーターの死角が発生し、近くにいた作業員や構造物に接触してしまう事故事例がありました。
そこで、ローラーの側面に帯状にLEDライトを配置したものをマグネットにて取り付け、死角を照らすライトを作成し、現場にて好評を得ております。

５．現況地形３Ｄモデルと設計３Ｄモデルのデータ活用事例

＝設計照査と用地境界確認の御提案＝

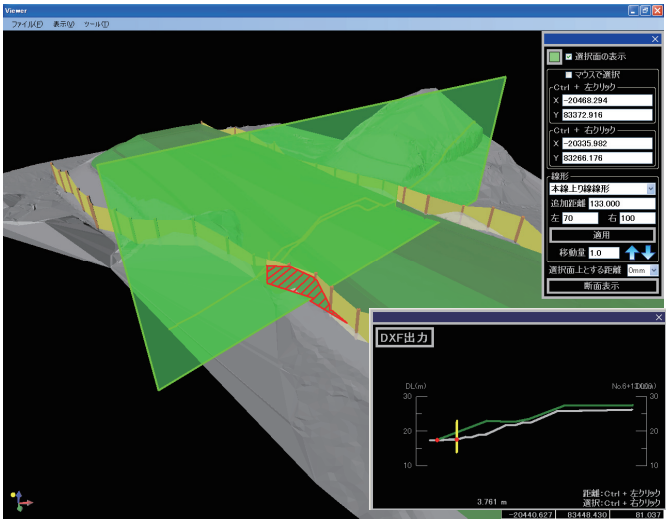
株式会社　コイシ　　〇白石　さやか
株式会社　コイシ　　加藤　望

はじめに

今回は、施工時に時折発生していた用地境界を侵すという事例について、３Ｄデータの活用法をご紹介させていただきます。

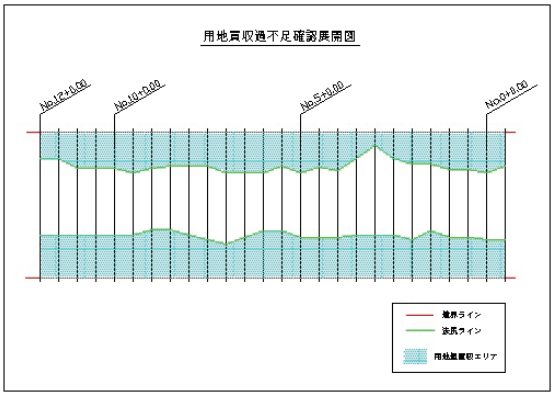
今までは２次元的に用地境界を管理していた為、施工時に法面が用地境界を出てしまうという事が度々起こっていましたが、それでは施工中に用地の協議が発生すると約１ヶ月程度工事を止める事になってしまいます。

これを防ぐ為に、着工前の段階で詳細な現況地形を計測し、設計モデルを組み合わせることで法面が用地を侵す箇所などがわかり、施工前に協議でき工事を中断することはなくなっていきます。



≪現況データに用地境界・設計を合成したモデル≫

KOISHI-Eye では、横断図を抽出できますのでどの程度用地境界を侵しているのか把握できます。



≪用地境界侵食箇所の展開図≫

用地買収のありかた

設計時に、２０ｍピッチの用地を仮用地買収とし、工事着工前の伐採後にレーザースキャナで詳細地形を計測し、その現況３Ｄと計画３Ｄを重ね合わせ、最終用地買収が確定できます。

このような流れになれば無駄なく用地買収が出来るのではと考えております。

また、工事サイドとして用地幅を展開図的に見ると有効活用の発想も生まれてくる気がします。

まとめ

弊社が３Ｄレーザースキャナを建設現場に使用している特徴の一つとして設計図面を３次元化して、現況の３Ｄモデルに重ね合わせるということです。

詳細に計測できた現況地形と、設計図面から作成した計画３Ｄモデルを合成することで、実際の現場に合ったシミュレーションをする事が出来ます。

しかし、その際に一度図面照査を行った上で３次元化を行っています。

今後も価値のある３Ｄデータの活用を意識して施工に役立つ３Ｄを目指してまいります。

６．小型簡易支持力試験機（エレフット）の建設工事現場への適用

「品質の向上」と「施工の効率化」

○ランデックス工業株式会社　中山　憲士
株式会社四国総合研究所　岩原　廣彦

はじめに

構造物を構築する際、基礎地盤の支持力を確認する方法に、地盤工学会が定めている「地盤の平板載荷試験（JGS1521）」がある。しかしこの平板載荷試験は、「費用が高い」、「時間がかかる」、「専門的知識が必要」、「大掛かりな反力が必要となる」などの課題がある。これらの課題を解決し、安価で簡便に地盤支持力の測定が可能な試験機の研究・開発を行った。

写真-1　小型簡易支持力試験機エレフット

試験機の概要

簡易支持力試験機「エレフット」（以下、エレフット）は、高さ 49.8cm、最大幅 67.0cm、約 8.0kg と小型・軽量であるために簡単に持運びができる試験機である（写真-1）。試験方法は、載荷板を介して荷重を載荷する直接載荷試験であり、荷重制御方式の段階式載荷を採用している。試験より得られる「載荷圧力-沈下量」曲線から、設計で考慮している極限支持力度の有無を判定する。また、エレフットの特徴を、従来技術としての平板載荷試験と比較すると、表-1 のようになる。特に試験費用では 92%の縮減、工程（試験時間）の比較では 74%の縮減となる。ただし、本試験機は、平板載荷試験に用いられる直径 30cm の載荷板よりも小型の載荷板（直径 1.6cm～5.0cm）を用いており、地盤に含まれる粒径の大きなレキなどの影響を受けやすいと考えられることから、適用地盤を粘性土～砂質土地盤としている。また、同様の理由から、１試験箇所当たりにつき、10 ポイントの試験を行なって得たデータをもとに判定を実施することで、精度が高い地盤の支持力を計測できると考えている。（図-1）

表-1　エレフットと平板載荷試験との比較

	平板載荷試験	エレフット
反　力	大 (重機等10～20ｔ)	小 (人の体重程度)
載荷板径	大 (直径300mm)	小 (直径16～50mm)
分析 (判定)	専門的 (グラフ判定)	汎用的 (パソコン判定)
計測時間	6時間程度	30分程度
電源	必要 (電動装置あり)	不要 (すべて手動)
試験費用	165,000円(円/箇所) (『建設物価』)	12,515(円/箇所) (自社歩掛)
計測数	1データ	10データ

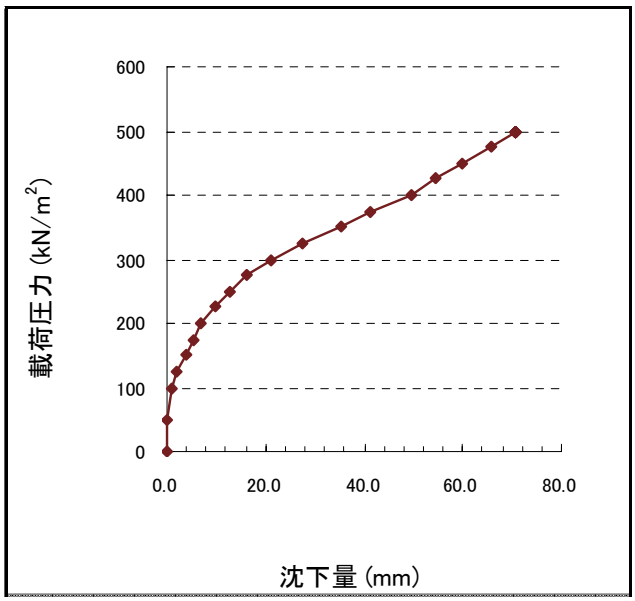


図-1　エレフット試験による圧力沈下量曲線

比較試験

エレフットの支持力試験の性能を確認するため、平成17年6月に、平板載荷試験等の現地試験とともに同じ試験箇所で試験を行なった(写真-2)。この比較試験は、香川大学工学部長谷川・山中研究室を共同研究者とし、高松市や多くの企業等の協力を得て実施できたものである。試験地盤の土質は、主に粘性土であった。試験結果の概略を下表にまとめた。表-2に示すように、他の簡易試験で測定した支持力や、一軸圧縮試験による推定支持力よりも、平板載荷試験により近い結果が得られた。

表-2　極限支持力度結果比較表

試験名	極限支持力度(kN/m2)		
	試験No.1	試験No.2	試験No.3
平板載荷試験	300	255	400
エレフット試験	276(8.0)	257(0.8)	450(12.5)
キャスポル試験	247(17.7)	213(16.5)	446(11.5)
一軸圧縮試験	―	258(1.8)	318(20.5)

( ) 内は平板載荷試験による支持力度に対する誤差 (%)

写真-3　香川大学らとの共同研究の実施状況

適用事例

ここで、実地試験の事例を示す。工事概要は以下の通りである。

（1）発注者　香川県中讃土木事務所
（2）施工者　株式会社村上組
（3）試験実施日　平成19年2月9日・13日
（4）工事場所　香川県仲多度郡多度津町東港町
（5）試験目的　JIS1521「地盤の平板載荷試験」による試験を補完するための簡易支持力試験
（6）試験箇所　7箇所 (2箇所は平板載荷と同箇所)
（7）設計荷重　極限支持力度 273N/m^2

工事施工範囲は、平面的に広く、地盤の平板載荷試験を広範囲で実施することが困難であった。そのため2箇所の平板載荷試験を補完する目的で、7箇所（各10ポイント測定）においてエレフットを使用した。その結果、平板載荷試験を実施した2箇所およびエレフットを使用した7箇所の全計測箇所において、設計で考慮した極限支持力度以上の支持力が確認できた。またエレフットにおける全7箇所の計測時間は、準備開始から片付けまでを含めて4時間程度の短時間で終了した。

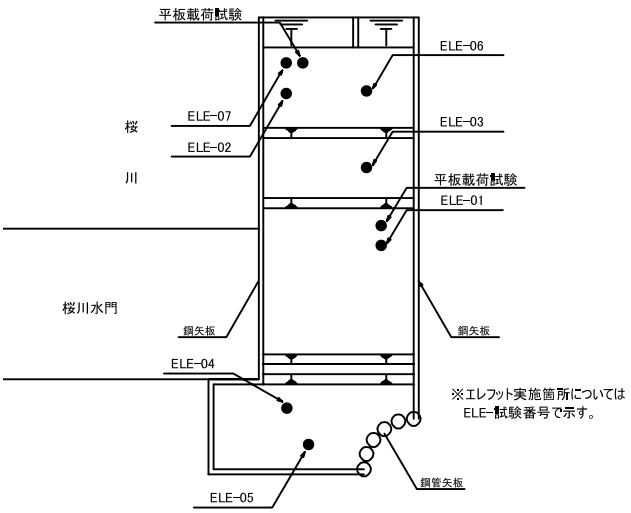


図-2　試験箇所概略図

おわりに

本試験機は、施工関係者らに経済性や操作の簡便性が評価され全国へ普及しており、認知が高まってきている。また、国土交通省の新技術情報提供システム(NETIS)においては、所轄工事での活用実績に基づく事後評価の結果「平成23年度活用促進技術」として指定を受けたほか、地盤工学会四国支部からは、「平成23年度技術開発賞」を受賞した。このように本試験機は、建設工事現場の「品質の向上」、「施工の効率化」に貢献する技術として官および学会で高い評価を受けたことにより、さらなる普及が期待される。

7．津波堆積物と廃木材チップを用いた機能性地盤材料の開発

東北大学大学院環境科学研究科
○栗原弘樹，里見知昭，高橋弘

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の影響により，場所によっては波高 10m 以上の津波が発生し，沿岸部に大きな被害をもたらした．この地震と津波被害により発生したがれきの量は，宮城県，岩手県，福島県の 3 県合計で約 2500 万トンと推定され，これと同程度の津波堆積物が生じているといわれている．現在，がれきに関しては，可燃物は焼却処分し，金属類は分別してリサイクルするなどの処理が進んでいるが，津波堆積物に関しては処理がほとんど行われていない．また，約 2500 万トンと推定される津波堆積物をすべて埋立処分することは不可能であり，津波堆積物の積極的な再利用が期待される．一方，震災で発生した廃木材は終末処分場でチップ化され，再資源化するために製紙工場に搬送されている．そこでふるい分けを行い，規定値より細くなったチップに関しては，用途がないため再び終末処分場に戻されているのが現状である．津波堆積物を基礎とし，さらに多少でも廃木材チップを混合して地盤材料として再資源化できれば，被災地の復旧・復興に大いに貢献できると考えられる．

ところで，高含水比泥土の再資源化に対して既に多くの実績を挙げている工法に繊維質固化処理土工法がある．本工法は高含水比泥土に古紙破砕物およびセメント系固化材を混合することにより，破壊強度および破壊ひずみが大きく，乾湿繰り返し・凍結融解に対して高い耐久性を有し，動的強度の高い改良土を生成する工法である．本工法により高含水比泥土の早期再資源化が可能となり，循環型社会の構築の一役を担っている．そこで，本研究では津波堆積物と廃木材チップを使用した繊維質固化処理土を作製し，地盤材料としての利用可能性を実験的に検討すること目的とした．

2. 津波堆積物を用いた廃木材チップ入り繊維質固化処理土の強度特性に関する実験的検討

津波堆積物と廃木材チップを使用してチップ入り繊維質固化処理土を作製し，一軸圧縮試験により強度特性に関して検討を行った．津波堆積物は仙台市若林区藤塚で採取した砂質系の堆積物と粘土系の堆積物の 2 種類を使用し，廃木材チップは気仙沼市の終末処分場より頂いたものを使用した．結果を図-1 および図-2 に示す．砂質系の津波堆積物はチップの添加量を増やすと破壊ひずみは増加するが破壊強度は減少すると傾向を示した．一方，粘土系の津波堆積物はチップの添加量を増やすと破壊強度および破壊ひずみともに増加する傾向を示した．2 種類の津波堆積物が異なる強度特性を示すのは，粒度分布の違いにより，土粒子とチップや古紙などの繊維質物質とのなじみ具合に差があるためであると推察される．

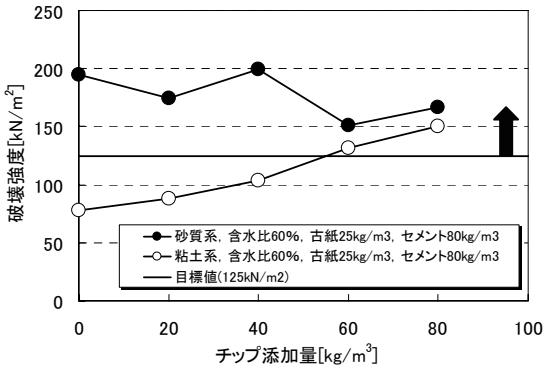


図-1　チップ添加量と破壊強度の関係

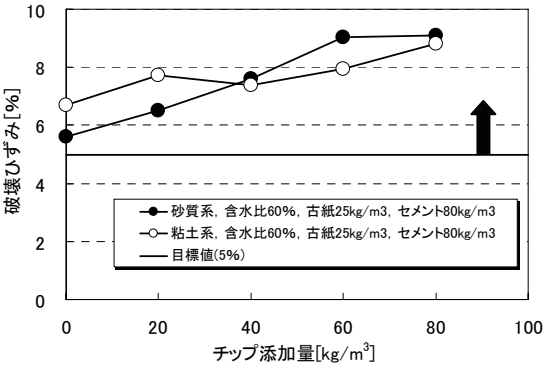


図-2　チップ添加量と破壊ひずみの関係

3. 津波堆積物を用いた繊維質固化処理土の乾湿繰り返し試験による耐久性に関する実験的検討

試験方法を表－1 に示す．40℃炉乾燥 2 日，20℃水浸 1 日の合計 3 日間を 1 サイクルとし，各サイクルの乾燥後と水浸後に供試体の状況観察・写真撮影を行うとともに，所定サイクル終了後に一軸圧縮試験を行い，サイクル数の増加に伴う一軸圧縮強度の変化を調べた．状況観察としては供試体の健全度を A～H のランクで

評価した．試料は砂質系の津波堆積物，粘土系の津波堆積物，砂質系と粘土系の堆積物を 1：1 で混合した Mix の 3 種類を使用した．それぞれセメントのみの固化処理土，それに古紙を加えた繊維質固化処理土，それにチップを加えたチップ入り繊維質固化処理土を作製し，計 9 条件で試験を行った．その結果を図-3 に示す．すべての条件でサイクル数の増加に伴う破壊強度の増加がみられた．これは試験中にセメントの水和反応が進んだためであると考えられる． 固化処理土(粘土系)はサイクル数に伴う供試体の劣化がみられたが，固化処理土(砂質系)は劣化がみられなかった．繊維質固化処理土およびチップ入り繊維質固化処理土はサイクル数が増加しても劣化せず，乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すことが分かった．

表-1　乾湿繰り返し試験方法

供試体	乾湿1サイクル	確認項目
Φ5×10 [cm]	40[℃]炉乾燥2日 20[℃]水浸1日 の合計3日	・所定サイクル終了後、一軸圧縮試験 ・各サイクルの乾燥後、水浸後に供試体の状況観察、写真撮影

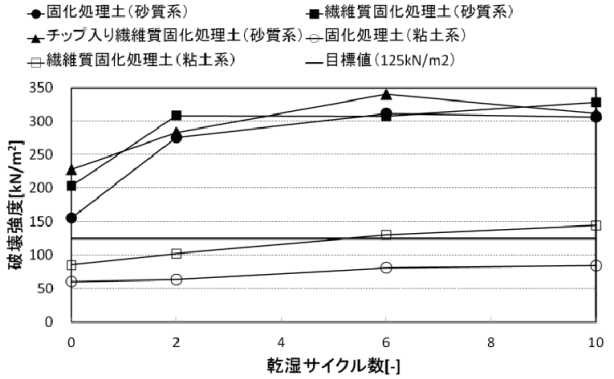


図-3　乾湿サイクル数と破壊強度の関係

4. 繊維質固化処理土の覆土材としての利用

福島県では除染作業の 1 つとして放射性物質が降り積もった土壌の地表面を剥ぎ取る掘削作業が行われているが，掘削土壌の処分先は未だ決まっておらず，しばらくの間，仮置きせざるを得ない状況にある．覆土は空間線量を下げる効果的な方法であるが，単に汚染土壌を通常土で覆うだけでは耐久性の観点から不十分である．津波堆積物を用いて高機能性(高耐久性，高耐侵食性，難透水性，高耐震性)を有する地盤材料を生成することができれば，津波堆積物の再資源化が進むとともに汚染掘削土壌の安心・安全保管が可能となる．そこで，津波堆積物を用いて高機能性地盤材料を生成し，これを覆土材として用いるための研究を実施している．ここでは，粘土系津波堆積物を使った場合の改良土に対する透水性の試験結果の一部を報告する．なお，津波堆積物を用いた改良土の難透水性の評価は，環境省が示した「8,000 Bq/kg を超え 100,000 Bq/kg 以下の焼却灰等の処分方法に関する方針」を参考にした．具体的には，雨水浸入を防止するための隔離層として，厚さ 30 cm 程度以上の土壌の層で，透水係数の低いベントナイト等の土壌（透水係数 1.0×10^{-6} cm/s 以下）を目指した．

ところで，一般に土の締固め特性は土の含水状態の影響を受ける．そこで，改良土の作製時における加水条件を変えた場合の透水性について検討することも重要であると考え，含水比を 40 %，60 %となるように加水調整した粘土系津波堆積物で改良土を作製した．古紙破砕物の添加量は 20 kg/m³ と一定とし，セメント系固化材の添加量の違いについて検討した．

図-4 に透水試験結果(透水係数 k_{15}(水温 15 ℃に補正)，間隙率 n) を示す．図-4 より，含水比が 60 %から 40%に減ると締固め特性は改善するために間隙率は小さくなり，透水係数も小さくなっている．また，含水比 60 %ではセメントを添加するほどセメントの水和反応が進んで透水係数は低下しているが，含水比 40 %ではセメントの水和反応の限界が影響して透水係数の変化は小さくなっている．図-4 からも分かるように，含水比 40%でセメント系固化材の添加量が 100 kg/m³ の場合では目標値以下であった．つまり，粘土系津波堆積物に適切な水を加えて改良土を作製すれば，目標透水係数に対応した覆土材を作ることができることを確認できた．

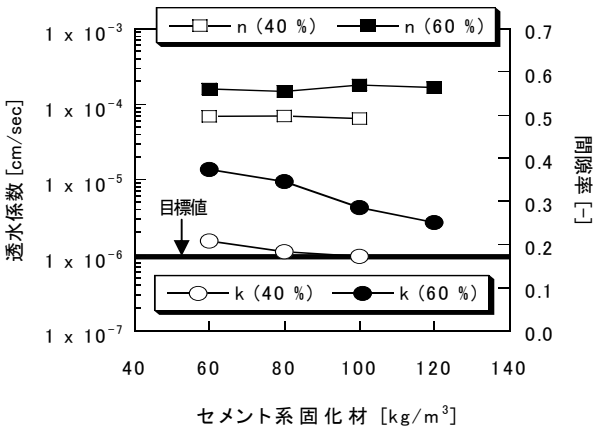


図-4　透水試験結果

謝辞

強度試験は三井物産環境基金「東日本大震災復興活動助成」を受けて実施したこと，また透水性試験は環境省「平成 24 年度環境研究総合推進費補助金」により実施したことを付記し，謝意を表する．

８．情報化施工（３D-MC）最新機器の紹介

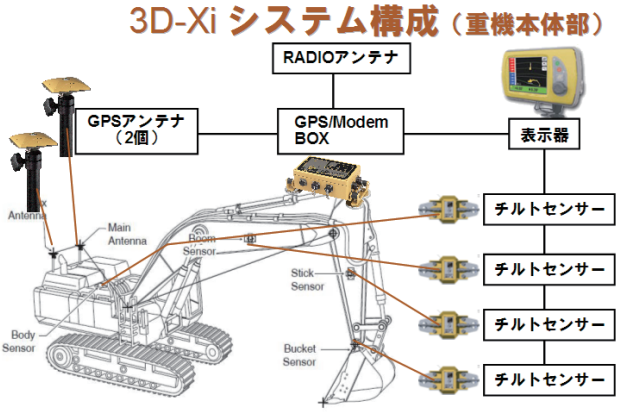
㈱トプコン　　竹内　幸弘
〇木村　徳宏

1. はじめに

近年、高精度施工を要求される舗装業界において、大手舗装会社を中心に、情報化施工の普及が進み、モーターグレーダ、アスファルトフィニッシャーなど舗装道路用機械において、3D－MC（3次元マシンコントロール）の採用が進んでいる状況である。また、土木施工の分野においても東日本大震災の復興など除染作業への情報化施工の活用による、除染作業の効率化、施工スピードアップによる工期短縮、品質と施工精度向上が行われている。今回は最新の情報化施工機器の紹介を行う。

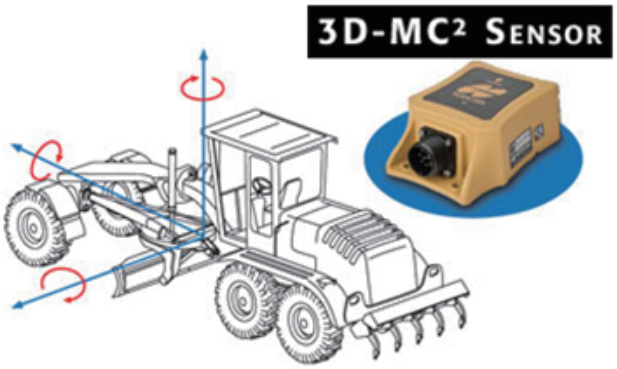
2. 3Dxi 油圧ショベル　ガイダンスシステム

GPS 2 台の測位と4つのチルトセンサを利用した計測により、常時バケット刃先の位置をモニタし、設計データに対する施工状況（切／盛）を視覚的にガイダンスする。

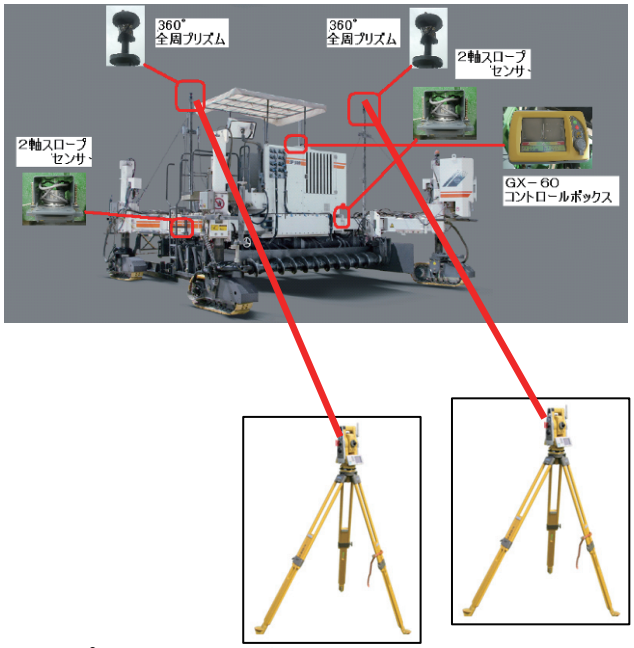


3. 3D-MC2 グレーダー

3D－MC^2（スクウェア）は、新開発のMC^{2}センサーから得られた「加速度と機体回転率」とGNSS測位データを結合させ、重機のブレードを高速・高精度で制御を行うシステムである。従来の3D－MCグレーダーよりも各段に速い速度における施工を可能にし、かつ従来以上の滑らかさを実現する。



4. 3D-MC　スリップフォームペーバーシステム



スリップフォームペーバーの位置を測定するセンサーとして、2台の自動追尾トータルステーションを使用し、全周プリズム位置を測定し、無線により、重機側に測定データ（X, Y, Z）を送信する。次に左右に配置した2軸スロープセンサーにより、スリップフォームペーバーの傾斜を測定する。上記データより、スリップフォームペー

バーの施工面のスクリードのコントロールポイント位置を計算する。3次元設計データより、高さ、縦断方向の傾斜および、ステアリングの制御データを重機本体側に送り、施工高さ、縦断傾斜、およびステアリングの自動制御を行うことで自動制御を行う。なお、2台の自動追尾トータルステーションを制御に使用するが、さらに別の2台の自動追尾トータルステーションと切り替えを行い、連続的な施工が可能である。

5. まとめ

建設生産プロセスにおける高効率・高精度な施工の実現を図る情報化施工の推進のために今後も新たな機械の自動制御化や新たなる制御システムを構築し、より安全により効率的な提供を通じて貢献していきます。

以上

９．カメラ式舗装高さ自動制御システムの開発

［　カメラアイシステム　］

（株）ＮＩＰＰＯ　生産技術機械部　○大西　秀樹
同　高橋　幸男
同　西舘　愛

１．はじめに

橋梁床版は、材料搬入車両と舗装機械等の重量変化により、常に不均一にたわむ状況下にある。

このためアスファルト舗装の敷きならし高さの制御には、橋梁のたわみに沿って敷きならし高さの基準線が追従する必要がある。したがって、現在でも敷きならし高さの制御方法は、路面にマーキングした厚さでの手動操作、および橋梁面上に設置したアングルやセンサーロープを基準とした接触式敷きならし高さ制御装置（グレードコントローラ）による自動制御が一般的である。

しかし、問題点として複数車線の隣り合ったレーンの敷きならしを行う際、橋梁面上のアングル設置は材料搬入車両の通行の妨げとなる（写真－１参照）。

また、手動操作においてもマーキングポイント以外での敷きならし高さ管理に関しては、十分な精度を得るのが難しい。

上記の問題解決と、コスト削減を可能とするカメラの映像解析による敷きならし高さ自動制御装置「カメラアイシステム（以下、本システムとする）」を開発したので、その機能と有用性について紹介する。

写真－１　アングルによる複数レーンの施工状況

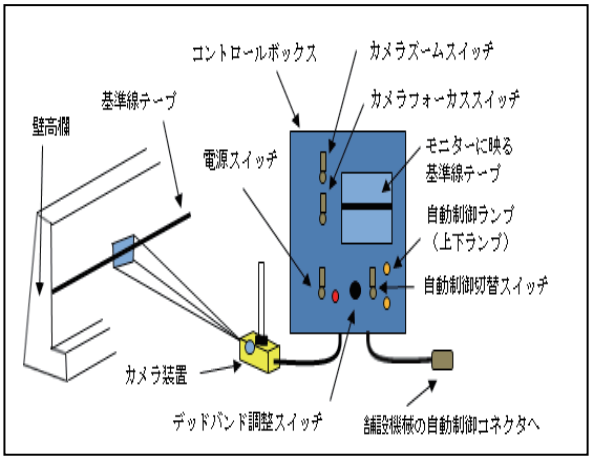
２．カメラアイシステムの開発経緯

過去に壁高欄側面に貼り付けた専用ケーブルを基準とした敷きならし高さを制御する NEI システム（NETIS 登録：KT－090061－A）を当社で開発している。このシステムは、検出距離が短く橋梁の壁高欄側での制御が基本となる。壁高欄の反対側が、供用車線である場合は従来工法（アングル等）に頼っていた。よって、壁高欄側での作業安全性や作業労力の削減に貢献できていたが、供用車線側は課題が残されていた。

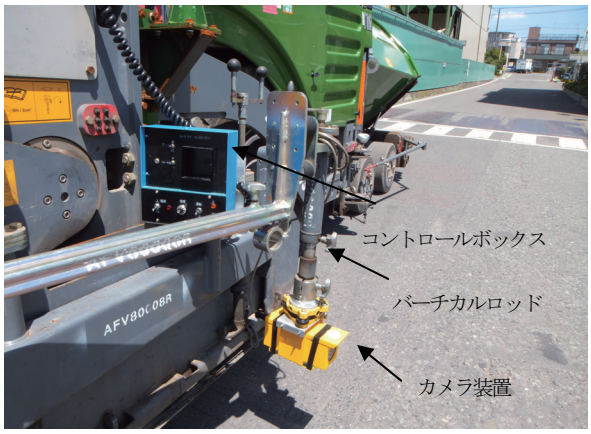
供用車線側の制御方法を検討した結果、カメラの映像解析による制御方法が、遠距離の制御に有効であると考えられた。これにより、壁高欄側を NEI システムで、供用車線側を新システムで制御する方式として開発を進めた。

３．カメラアイシステムの概要

本システムは、カメラ装置と映像モニタによる舗装高さ自動制御システムが一体となったコントロールボックスで構成され（図－１参照）、アスファルトフィニッシャに付属するバーチカルロッドにカメラ装置を調整ネジで水平に固定される（写真－２参照）。



図－１　カメラアイシステムの概要



写真－２　カメラアイシステムの取り付け状況

本システムの自動制御方法は、以下のとおりである。

(1)　壁高欄側面に水準測量より求めた敷きならし設計高さの基準線を、舗装仕上がり高さに見立て、カメラの映像解析に用いる基準線テープを貼り付ける。

(2)　モニタに映る基準線テープの映像と、壁高欄の映像コントラスト（明暗）をコントロールボックスで解析し、映像の暗色部である基準線テープがモニタ中心部に位置するよう、アスファルトフィニッシャのピボット高さを自動で制御する。

本システムの特徴は、以下のとおりである。

(1)　カメラと基準線テープの検出距離は、カメラズームの精度により 2～6m の範囲となる。

(2)　基準線テープは、壁高欄と基準線テープとの明暗を分けるため、10mm 程度の幅で黒色のビニールテープもしくは布テープが利用できる。

(3)　アスファルトフィニッシャは、自動制御コネクタを備えた汎用機で対応可能である。

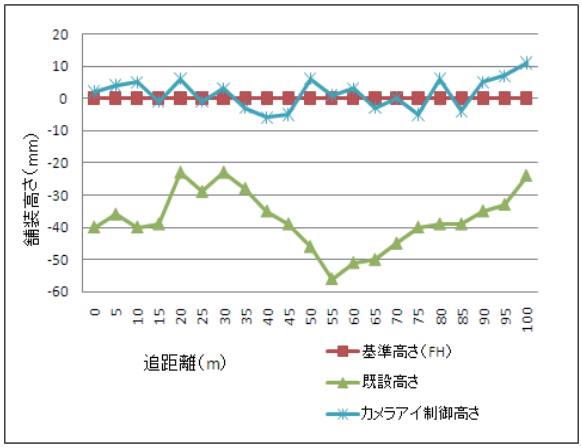
(4)　映像内に障害物（人や車両）が写り込むときは、自動的に制御を停止する仕組みとなっている。

４．カメラアイシステムの施工精度

構内試験で機能と性能を確認後、橋面舗装修繕工事で実用性を確認した。

橋面舗装のレベリング工における、レベリング計画高さに対するローラ転圧前の敷きならし高さと、既設床版の高さの差を図－２に示す。

敷きならし厚さの誤差はおおむね±5mm に収まり、良好な結果が確認できた。



図－２　計画高さと敷きならし高さの差

５．まとめ

本システムの採用は、試験結果から施工精度の向上とともに、供用車線側で実施していた従来工法（アングル等）の事前設置が解消され、コスト削減に繋がる結果が確認できた。概算ではあるが、NEI システムの採用で、従来工法より約 62%、NEI システムとカメラアイシステムの併用で約 40%のコスト削減が見込まれる（表－１参照）。

表－１　従来工法との費用比較

施工場所		作業人員			人件費（円）	機材価格（円）	合計（円）	従来工法との比較
壁高欄	供用車線部	準備	施工時	撤去				
従来工法	従来工法	4	2	4	140,000	5,250	145,250	100%
NEIｼｽﾃﾑ	従来工法	2	2	2	84,000	6,250	90,250	62%
NEIｼｽﾃﾑ	ｶﾒﾗｱｲｼｽﾃﾑ	2	0	2	56,000	2,000	58,000	40%

機材レンタル価格
従来装置（グレードコントローラ）：¥5,250／日
NEIシステム：¥1,000／日
カメラアイシステム（価格未定のためNEIシステムと同額とする）
人件費は¥14,000／日とする

さらに、アングル設置が不要なことから、材料運搬車両の供用車線への入退出が容易に行えることが確認できた。

課題として、本システムはカメラ映像を用いるため、夜間使用が不可能であることが挙げられる。

６．おわりに

今後さらに検証を重ね、前述の課題を解消することで、橋梁舗装における本システムの活用につなげてゆきたい。

10. 力仕事のパートナーとしてのコンパクト油圧式ロボット台車の提案

立命館大学理工学部　〇玄相昊
立命館大学理工学部　鈴木裕太
立命館大学理工学部　末若大輔

１．はじめに

本研究では、土木建設や荷役等のあらゆる力仕事の現場において、自らバランスをとって大きな力を発生しながら人と協調して働くことで、作業員の肉体的負担を軽減し、作業効率を大幅に向上する、コンパクトな油圧式ロボット台車を提案する。最も重要なポイントは、専門事業者でなくても、一般の人々が必要とするときにすぐに倉庫から引っ張り出して使える便利な道具とすべき、という点である。

提案する機械は外部の油圧源によって駆動されるため、小型軽量でありながら、大きな力を発生できる。また、俊敏な自律バランス能力と不整地移動能力を備える。ショベルやクレーンなどの大型建設機械の子機として作業現場にスピーディに展開され、作業員の直観的な操作インターフェースのもとで運用される。様々な機器やアタッチメントを搭載することで、災害対応等の特殊な用途にも利用できる汎用的なプラットフォームとなる可能性がある。

２．ロボット台車

上記の目的のもと、ロボットの最も重要な「足回り」を試作することである。足回りとは具体的に、車輪と油圧で駆動する能動的な脚を４本有するロボット台車（以下、ロボットと呼ぶ）であり、次のような運用形態を想定している。

１）油圧源を搭載した建設機械やトレーラーで複数台のロボットを現地に一度に輸送
２）油圧ホースを複数台のロボットに分岐し、不整地や狭い現場にすばやく展開
３）直観的なインターフェースで作業員が複数台のロボットを操作しながら協調作業。

本ロボットの特徴と新規性は次の３点に集約される。

（1）安定性：　不整地や屋内の複雑な床面で縦横無尽に動作する作業用台車は脚式以外に考えられない。本ロボットは車輪の他に能動的な脚を４本備え、ロボットの上に作業員が乗って高所作業を行ったり、様々な作業用アタッチメントを搭載して遠隔操作を行ったりする場合でも、バランスをダイナミックに維持することが可能である。

（2）軽量・コンパクト・ハイパワー：　油圧源を外に置くことで、屈強な人夫と同程度のサイズと重量を実現できるため、木造家屋の上階においてもハイパワー・ハイスピードな重作業が可能である。排気ガスに悩まされることもない。危険な現場での力作業を想定した移動ロボットとしては、極限作業ロボットプロジェクトにおける脚車輪型ロボット[1]や、東工大の広瀬らの様々な４脚ロボットシリーズ、軍用では米国 Boston Dynamics 社の BigDog があるが、上記のようなコンパクトな油圧式作業移動ロボットは存在しない。

（3）安全性：　力制御アルゴリズムを実装することで、外から加わる力に対して柔軟に対応することができるため、衝突に対して安全である[2]。また、ロボット本体の自重は 100kg 未満人夫と同程度であるため、仮に事故が起きたとしても、重機の場合ように深刻な重大事故を引き起こす可能性は極めて低い。

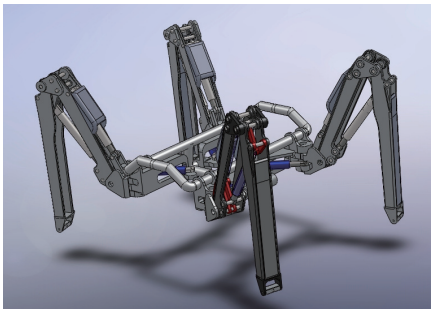


図１　４脚ロボットの CAD モデル

３．仕　様

ロボット全体の大きさは学習机程度である。前後左右対称の構造を有し、最小で800㎜角または円内に収まるものとする。中央に車輪を有し、前後左右に同一構造の脚部を有する。

自重は80kg以下とし､油圧部品を含めた機構部分の質量は脚部を40kg（1本10kg)、ベースは30kg、残り10kgに電子回路やその他付帯部品重量とする。パワーOFF時でも台車と同様に２名で簡単に運べるが、車輪がついているため、平地では一人でも楽に移動が可能である。なお、当初は図１のような自重200kgの試作機を検討していたが、実験の扱いやすさや安全性を考慮し、上記の仕様に変更した。

可搬重量はアタッチメント分も含めて200kgと設定した。

駆動力は外部設置の油圧ポンプから得るが、コストと効率をアップするために、サーボ弁を用いない油圧システムを構築することも重要である。油圧システムについては別報で報告する。

４．動力学シミュレーション

２で挙げた特徴を調査するために、動力学シミュレータを構築し、出力解析を行っている。シミュレータ兼コントロールパネルの外観を図２に示す。ここに著者らが過去に行ってきたように[5]､実際に用いる油圧系のダイナミクスを統合すれば、精密なシミュレータが完成する。シミュレーションタスクとしては、基本的に、重心をある目標軌道に追従するようなタスクである。目標重心位置を支持多角形の中心におけば、バランス制御となる。

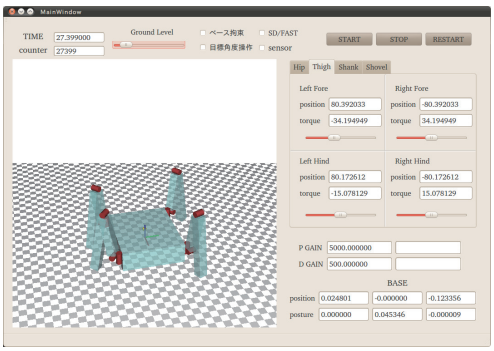


図２　動力学シミュレータ

アルゴリズムとしては、等身大の油圧駆動ヒューマノイドロボット研究で実績がある、シンプルで実用的なアルゴリズムをそのまま応用するだけである[2]。よって、路面形状を測定することなく、いかなる不整地であってもしなやかに倣うことができる。さらに、力制御の特徴を活かし、作業員の操作力に従いながら高度な運動を学習することが可能である[3]。

難易度の高い２足歩行から４脚歩行にダウンサイズすることは極めて容易であり、既にシミュレーション自体は問題なく成功している。シミュレーション結果のグラフ等は省略するが、２足歩行ロボットを用いたシミュレーション結果は文献[4]を参照されたい。

なお、最も基本的な動的姿勢制御に成功しているため、車輪を併用した場合の歩行制御は極めて容易であり、拡張はほとんど自明である。

５．実験

２軸の簡単なテストモデルを製作し、サーボ弁を用いたオーソドックスな油圧駆動システムを用いた基本的な力制御実験に成功した。紙面の都合上、グラフ等は省略する。

参考文献

[1] 大道武生, 穂坂重孝, 井辺智吉, 沖野晃久, 中山淳二, 脚車輪型移動装置の制御方法, 第２回日本ロボット学会学術講演会, pp. 235-236, 1984.

[2] 玄相昊, 複数の接地部分と冗長関節を有するヒューマノイドロボットの受動性に基づく最適接触力制御, 日本ロボット学会誌, vol. 27, no. 2, pp. 178-187, 2009.

[3] S. Hyon, J. Morimoto, G. Cheng, Hierarchical motor learning and synthesis with passivity-based controller and phase oscillator, IEEE ICRA, pp. 2705-2710, 2008.

[4] S. Hyon, G. Cheng, Passivity-based full-Body force control for humanoids and application to dynamic balancing and locomotion, IEEE/RSJ IROS, pp. 4915-4922, 2006..

[5] S. Hyon, T. Emura, T. Mita, Dynamics-based control of one-legged hopping robot, Journal of Systems and Control Engineering, vol. 217, no. 2, pp. 83-98, 2003.

Ⅱ－２　施工技術総合研究所研究発表

Ｓ１．蛇腹式防水シート工の開発

一般社団法人　日本建設機械施工協会　施工技術総合研究所　　○鈴木　健之
藤森工業　株式会社　　高橋　俊昭
岐阜工業　株式会社　　稲川　雪久

１．防水工の現状および課題

1.1　防水工の現状

吹付けコンクリートやロックボルトなどの支保部材を主体とする山岳トンネル工法では,トンネル内への漏水を防止するために適切な防水工を施工する必要がある。防水工とは,トンネル周辺の地下水を覆工背面に滞溜させることなく排水し,過大な地下水圧や覆工背面からの漏水を生じさせないために,吹付けコンクリートと覆工コンクリートとの間に遮水層を形成し,横断排水管,中央排水管を介して,坑外に排水するものである(図-1, 図-2 参照)。

防水工の方法としては,合成樹脂の防水シートを張り付けるシート系とゴムやアスファルトなどを吹付ける吹付け系の 2 つの工法に大別されるが,一般的には工場製品であり品質のばらつきが少なく,施工が簡単であるなどの理由から,シート系の方が多用されている。

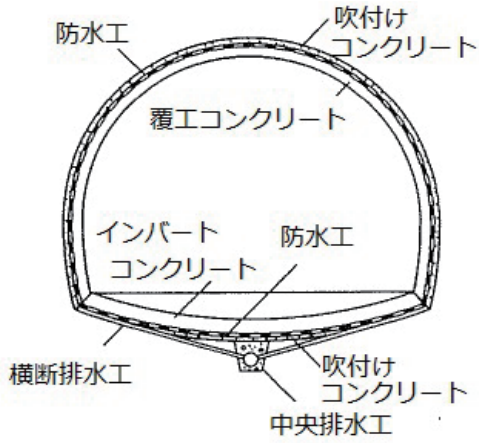


図-1　山岳トンネルにおける防水工

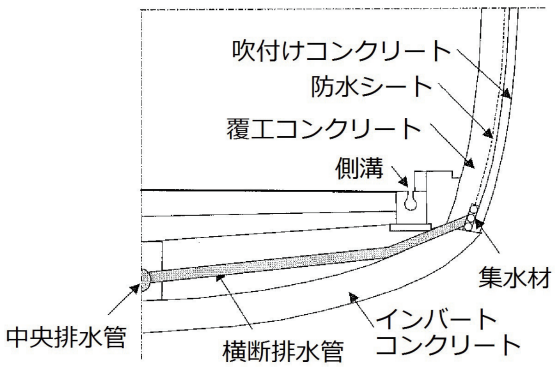


図-2　山岳トンネルにおける防水工（拡大図）

1.2　防水シートにおける課題

防水シートには,覆工への漏水を防止するという防水機能が期待されているが,施工上,以下に示す要因により,防水シートの防水機能が損なわれる可能性がある。

- 下地面に極端な凹凸がある場合,シート同士の溶着が困難となり,防水シートの溶着性が悪くなるとともに,覆工打設時に背面空洞が発生し,防水シート破損の要因となる。
- 吹付け面の下地処理やロックボルトの頭部等の突起物処理が不十分な場合,シートが破損する要因となる。
- 防水シートの単位施工延長が短いため,溶着箇所が多く,溶着不良が発生する要因となる。

２．防水シート開発の目的

本防水シート工の開発では, 上記課題のうち, 溶着不良によるトンネル坑内への漏水を防止することを目的として, 藤森工業(株), フジモリ産業(株)および岐阜工業（株）とともに現場での溶着作業を出来る限り省略可能な防水シートの施工方法の検討・開発を進めてきた。

本報告では, 通常 2.0m 幅である防水シートの単位施工延長を工場にて防水シートを溶着することで, 約 12mに延長した防水シートの開発やその施工方法の検討をについて報告するものである。

３．蛇腹式防水シート工

3.1　一般的な防水シート工の施工

一般的な防水シートの施工手順を図-3 および下記に示す。

① 防水シートの施工および覆工コンクリートの打設に支障をきたさないように,湧水処理および下地処理を行う。
② シート展張を行った後には,隣接する防水シート間でトンネル横断方向の現場溶着を行う。
③ シート台車を移動し,次のスパンの防水シートの展張を行う。
④ これをトンネル全区間行った後,端末部および横断配水管との接続箇所において排水を円滑にできるよう処理を行い,最後に点検を行って防水工の施工が完了となる。

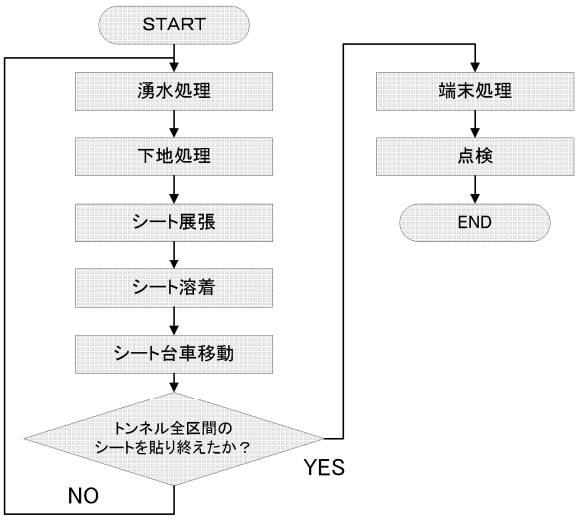


図-3　通常の防水シート施工の流れ

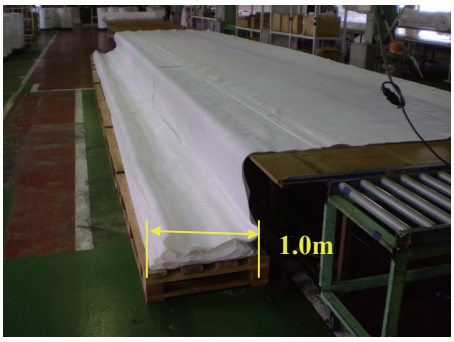


写真-1　蛇腹式防水シート

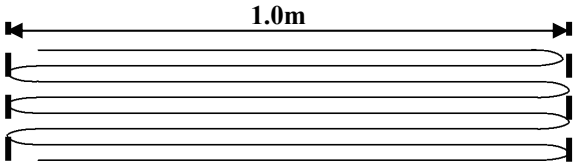


図-4　防水シート形状

3.2　蛇腹式防水シート工の開発

前述したように，一般的な防水シートの単位施工長は 2.0m である。そのため，トンネル延長 1.0km の場合には，500 回程度の現場溶着作業が必要となり，溶着不良が起こる可能性が高くなる。

蛇腹式防水シート工は，防水シート溶着部の品質を確保するために，工場にてあらかじめ幅 2.0m の防水シートを溶着し，単位施工延長を 12.0m に延長することで，現場での溶着作業を可能な限り低減する方法である。

この工法の利点としては，単位施工延長を延ばし，現場での溶着作業回数を低減することによる防水シートの品質確保が挙げられる。

一方，この工法の課題としては，通常のシートより重量とボリュームがあるため，下記の事項が挙げられる。

- 防水シートの展張方法
- 防水シートの現場への搬入方法
- シート台車への防水シートの設置方法

4．蛇腹式防水シート工の課題への対応

以下に前述の課題に対するそれぞれの検討成果を記す。

4.1　防水シートの展張方法

通常の防水シートの幅より 6 倍あるシートを施工するに当たっては，防水シートの展張（防水シートをどのように貼るか）を検討する必要があった。展張方法については，蛇腹式防水シート工という名前が示す通り，防水シートを写真-1 および図-4 に示すように，幅 1.0m程度の蛇腹折りにした。

蛇腹折りにした防水シートをシート台車に設置した後，図-5 に示すように，シート端部をすでに展張してある防水シートと溶着し（展張している防水シートがない場合には，トンネル壁面に固定），シート台車を移動することにより蛇腹折りの部分が広がることで展張する方法とした。

しかし，この展張方法の問題点として，リフターと防水シートの摩擦力が小さい場合，シート台車が移動する際に，防水シートがシート台車に追従して移動せずに，リフターから落ちてしまうことも考えられた。そのため，シート台車が移動する際，防水シートがリフター上にとどまっているかを試験により確認した。

この試験では，シート台車の代わりにセントルを用い，その上に防水シートを設置し，防水シートをセントルの反対側の 5 箇所から人力にて引き寄せることで，シート台車の移動を模擬した（図-6 参照）。試験の準備状況および試験状況を写真-2 に示す。

試験を実施した結果，防水シートを引き寄せても，防水シートは一気に引き寄せられることはなく，順に拡がっていき，セントル一面に防水シートを広げることができた（写真-3 参照）。このことから，シート台車が移動することにより，順次防水シートが引き出されることが確認できた。

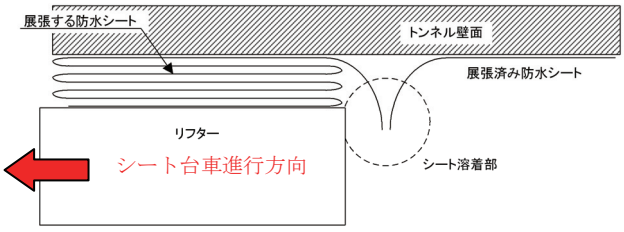


図-5　シート溶着部拡大イメージ図

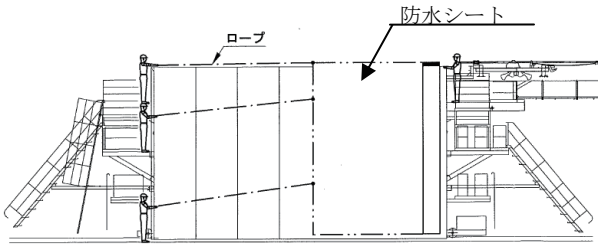


図-6　試験概要

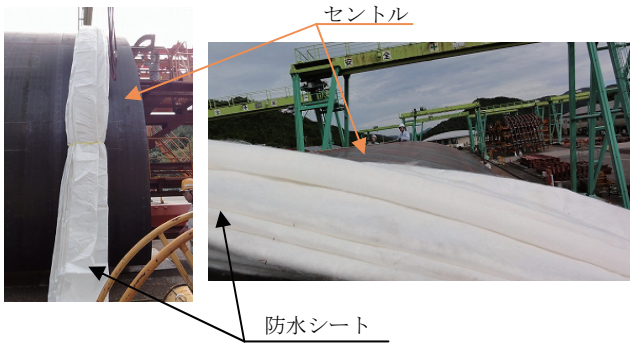


写真-2　模擬試験状況

写真-3　模擬試験後の防水シート展張状況

4.2　防水シートの搬入方法

工場で溶着した防水シートは，現場への搬入が し易いように，幅1.0m程度の蛇腹折りにした後，ロール状に巻き，運搬がし易いようにロールの中央部に単管パイプ（写真-4 赤枠内）を通して，現場へ搬入することとした。

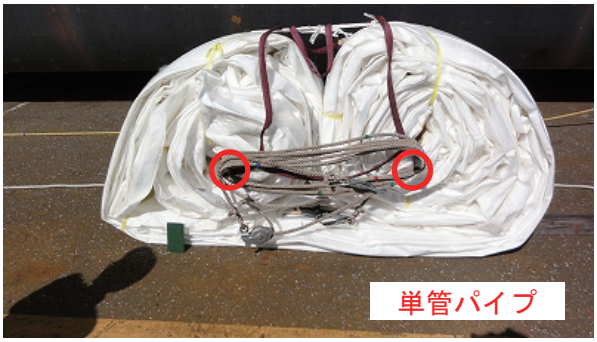


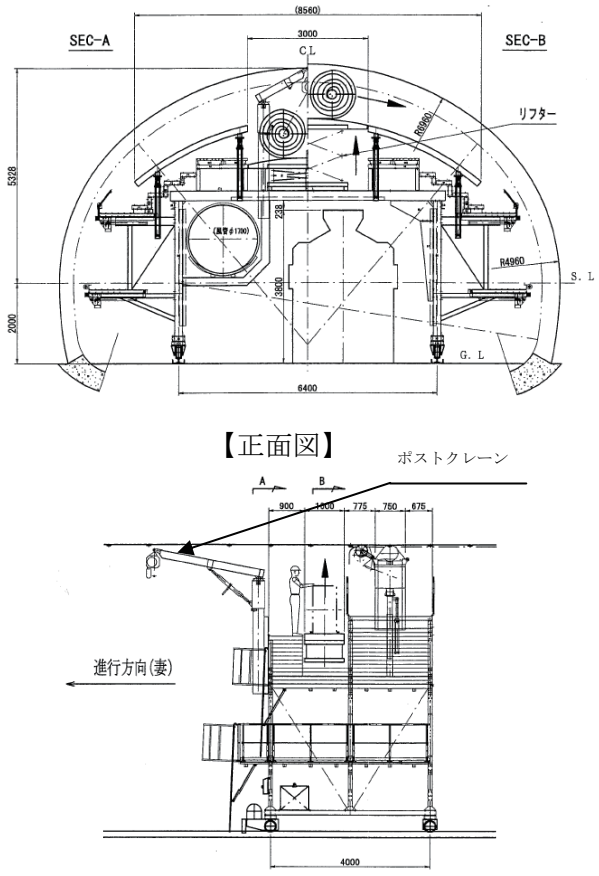
写真-4　防水シート搬入時の形状

4.3　シート台車への防水シートの設置方法

蛇腹式防水シート工の防水シートは，通常の防水シートを事前に溶着するため，施工単位当りのシートの重量が重く，人力でのシートの設置が困難である。そのため，通常のシート台車にシートを設置するための検討を行う必要があった。

当初，図-7 に示すシート台車のポストクレーンにて前掲写真-4 に示す状態の防水シートを台車上に吊り上げ,防水シートをリフターに設置し,リフターを上げながらロール状の防水シートを左右に広げることで,シート台車上に防水シートを設置する方法を検討していた。

しかし,この方法は,通常のシート台車にリフターを追加する等の専用のシート台車を製作しなければならないので,通常のシート台車よりかなり高価なものになるといった課題があった。



【正面図】

【側面図】

図-7　蛇腹式防水シート工のシート台車（当初）

そこで，通常のシート台車に追加する設備を必要最低限とし，できる限り経済的に防水シートを展張できるようなシート台車および防水シートの展張方法を検討した。

蛇腹式防水シートは非常に重いため，シート台車上に移動するなどのシートの移動作業を行うためには，当初検討したシート台車のようにクレーンやリフターなどの設備が必要となる。そのため，

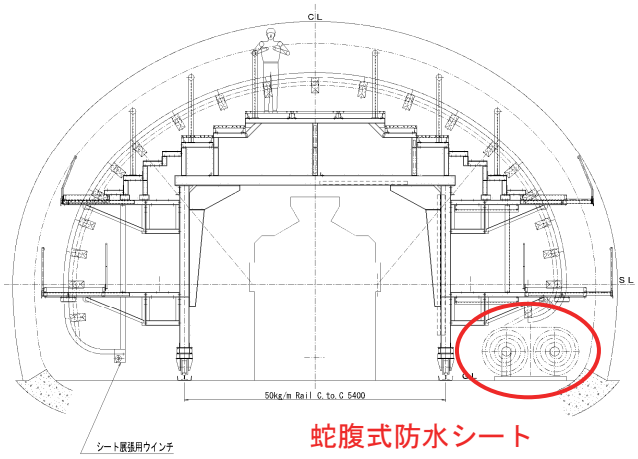
可能な限り防水シートを移動しなくて済むシート台車および展張方法を検討した。シート台車は，図-8 に示すように片側に防水シートを広げるためのウィンチとコンベアローラーおよび簡易なガイドを通常のシート台車の取り付けるだけにして費用を極力抑えるようにした。

また，防水シートの設置方法と展張方法を以下に示す。

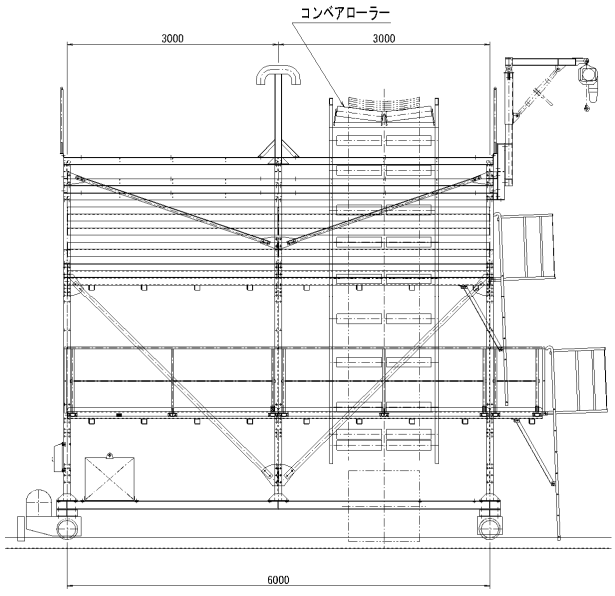
① 防水シートを地面に置き，台車を移動することで，シート台車の所定の位置に防水シートを設置する（図-9 参照）。

② 防水シートのロールをウィンチで引張り，作業台車に防水シートを円周方向に設置する（図-10 参照）。

③ 台車を走行させることにより円周方向に設置した防水シートを縦断方向に展張する（図-11 参照）。



【正面図】



【側面図】

図-8　蛇腹式防水シート工のシート台車

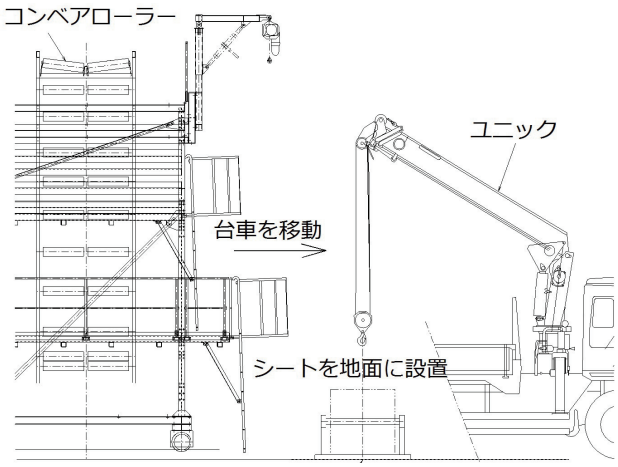


図-9　蛇腹式防水シートの展張手順（手順①）

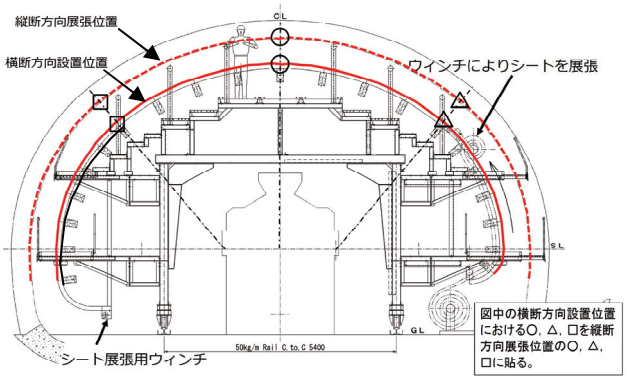
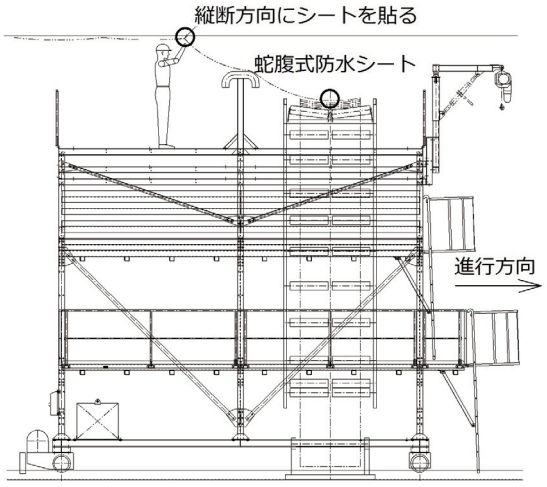


図-10　蛇腹式防水シートの展張手順（手順②）



図－11　蛇腹式防水シートの展張手順（手順③）

5．今後の課題

施工性と経済性を考慮して，蛇腹式防水シート工の検討を行ったが，前掲図-10 および図-11 に示すように，手順②では，縦断方向の展張位置よりも一回り小さい円弧状にシートを円周方向に展張するので，防水シートを貼る位置がずれるとシートにたるみが生じる可能性が高くなるという課題がある。この課題に対しては，今後，当研究所の模擬トンネルを用い，実物大試験を行うことにより施工性を確認する予定である。

Ｓ２．橋梁のコンクリート床版防水システムに関する研究

(一社)日本建設機械施工協会 ○ 榎園　正義
(一社)日本建設機械施工協会　谷倉　泉
(一社)日本建設機械施工協会　三浦　康治

１．はじめに

道路橋の RC 床版の疲労損傷には水の影響が大きいことが，松井らの研究[1)]で明らかになっている。すなわち，RC と床版上面に水を張って疲労試験を行った場合，床版の疲労寿命は 1/100 以下になることが示されている。また，積雪寒冷地では凍害や凍結防止剤（塩化ナトリウム）散布による塩害の影響で，床版の上側鉄筋が腐食し，コンクリートの層状はく離が発生している。このように，道路橋の RC 床版の耐久性には水の存在が深く関わっている。このことから，床版防水の必要性が認識され，床版防水層が施工されるようになってきた。しかし，紫桃らの調査[2)]によると，シート防水は施工後 5 年程度で防水機能がなくなることや，瀝青塗布防水は施工初期に防水機能がなくなるものがあることなどが報告されている。

日本の防水層の規準は，昭和 62 年に「道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計･施工資料」[3)]が道路協会から出版されて以降，長く改訂されてこなかったが，平成 14 年の道路橋示方書[4)]の改訂で，全てのアスファルト舗装の橋梁には防水層等を設けることになり，平成 19 年 3 月に「道路橋床版防水便覧」[5)]が制定された。この便覧では，防水層の種類とその説明，および要求性能を照査する方法が示されている。適切な要求性能を設定し，それを適切な試験法で照査すれば，防水層の性能はある程度保証できるという考えである。しかし，防水は防水層のみで機能するものではなく，床版上面の下地処理，防水層，舗装を含めた全体システムとして始めて機能するものである。このことから，厳密な防水システムを導入しているドイツ，イギリス，スイス等の事例も参考にして，土木学会鋼構造委員会において床版防水システムのあるべき姿が検討され，「道路橋床版防水システムガイドライン（案）（2012 年 6 月）」が刊行された。

本稿では，このガイドラインの概要を紹介するすると共に，施工技術総合研究所の防水システムへの取り組みについて紹介するものである。

２．防水層の種類

我が国における床版防水材料は，シート系床版防水層（流し貼り型，加熱溶着型，常温粘着型），塗膜系床版防水層（アスファルト加熱型，ゴム溶剤型，反応樹脂型等）等，様々な種類の防水材料が存在しており，床版防水便覧では，現在の防水材料を下記のとおり分類している（**図-1**参照）。各々の防水層に応じて，その構成や特性も異なるたるため，あらかじめ施工方法，施工手順，施工条件などを勘案した上で材料の選定を行う必要がある。

一般に，床版防水システムの断面構成は，**図-2** のように①コンクリート床版，②プライマー層，③床版と防水材との接着層，④防水材，⑤防水材と舗装との接着層，⑥舗装に区分される。材料の種類によっては，各層を兼ねる材料も存在する。

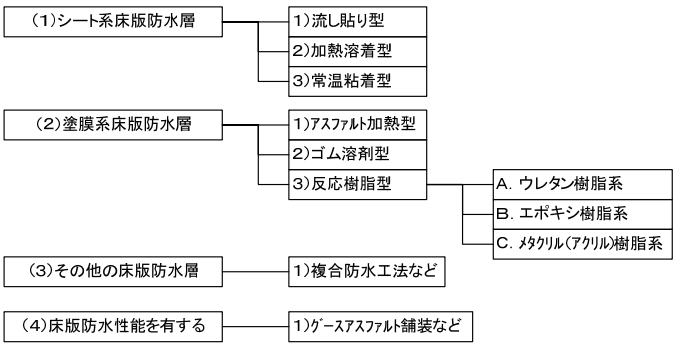


図-1　床版防水材料の分類

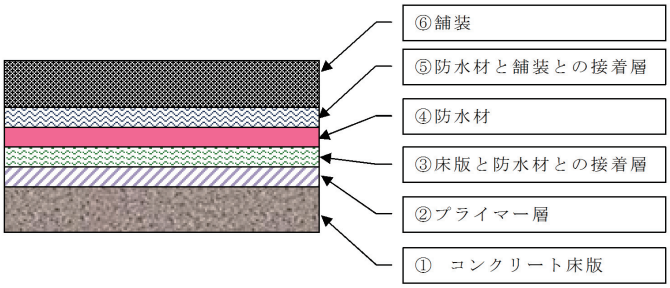


図-2　床版防水システムの一般的な断面構成

３．床版防水システムの要求性能

道路橋床版防水システムの要求性能と性能照査に関しては，“性能照査型設計法”を基本とした。要求性能を設定するにあたっては，欧州道路橋床版防水システム調査，および我が国の現状を参考にした。要求性能は，**表-1** に示すように材料性能，初期性能，耐久性能，排水性および維持管理性に大別されている。

表-1　床版防水システムの要求性能一覧

性能種別	性能が要求される段階・時期	要求性能
防水材料の材料性能	材料の製造・運搬	① 防水材料の品質安定性
	材料の製造から供用終了までの期間	② 防水材料の環境安全性
床版防水層の初期性能	床版防水層の施工直後（初期性能１）	③ 下地と防水層の接着性
		④ 施工性
		⑤ 膨れ抵抗性
		⑥ はがれ抵抗性
		⑦ 局部変形性
	アスファルト舗装の施工後（初期性能２）	⑧ 舗装後の防水性
		⑨ 舗装後の接着性・せん断抵抗性
		⑩ 水浸後の接着性
床版防水層の耐久性能	供用中	⑪ 温度変化および薬品負荷抵抗性
		⑫ 輪荷重繰返し負荷抵抗性
		⑬ ひび割れ開閉負荷抵抗性
		⑭ 凍結融解負荷抵抗性
		⑮ 繰返しせん断負荷抵抗性
排水性	供用中	⑯ 排水性
維持管理性	供用中	⑰ 維持管理性（復旧性）

3.1　材料性能

床版防水システムを構成する各材料（床版防水層および排水設備に用いる各材料）は，製造されてから施工されるまでの間に，貯蔵時の温度変化や移送時の振動などによって材料が変質しない①品質安定性，ならびに製造・施工から長年月を経た場合でも，人体や環境に対して十分な②環境安全性を備えている必要があり，これらの性能が確認される。

3.2　初期性能

初期性能は，供用開始前の床版防水層に求められる性能で，さまざまな下地条件や環境条件下で床版防水層が施工された場合でも，所定の性能を保持することが求められる．初期性能は，床版防水層が施工された直後に求められる性能（初期性能１）と，工事用機械の走行に伴う負荷や，加熱アスファルト混合物の熱影響，および骨材の押込み等の影響を受けるアスファルト舗設直後に求められる性能（初期性能２）に分けられる。

これら初期性能の各項目は，接着性，施工性，膨れ抵抗性，はがれ抵抗性，局部変形性，防水性，せん断抵抗性などである。

3.3　耐久性能

供用中の床版防水は，交通荷重，環境条件等の影響を受けた場合でも，所定の耐久性能を有していることが必要となる．このうち，床版防水層の耐久性能としては，**表-1** に示すように，輪荷重繰返し負荷抵抗性や外気温，コンクリートの強アルカリに対する抵抗性およびひび割れ開閉負荷抵抗性が重要である。

3.4　排水性

供用中の床版防水システムには，コンクリート床版や床版防水層，舗装に悪影響を与える滞水が生じないように適切に排水できる排水設備を設置し，これらの排水設備が良好に機能することが求められる。これらの排水設備は，橋梁の縦断勾配や横断勾配，ならびに曲率半径によっても，その効果には大きな差が生じるため，排水設備の選定は，これらの条件を十分に考慮することが重要である。さらに，防水層上面の境界面からの排水についても，十分配慮した構造であることが必要である。

3.5　維持管理性

床版防水システムは,計画供用期間にわたり,良好にその機能を維持管理する必要があり，そのためには適切な復旧を行いながら，所定の防水性能を維持できる性能を有する必要がある。特に重視されるのは，供用中に床版防水層の一部に劣化・損傷が見つかった場合，部分補修等による対応が容易な施工性能である。

４．床版防水システムの性能照査

4.1　材料性能の照査

ガイドラインでは，防水材料の①品質安定性は製造業者が発行する製品品質証明書を，②環境安全性は製品安全データシート（MSDS; Material Safety Data Sheet）を，それぞれ確認することにより照査することとしている。なお，将来は我が国でも欧州のように，製品品質証明書に関して，第三者機関による認証（試験）されるケースも考えられる。

4.2　初期性能の照査

標準温度（23℃）における③下地と防水層の接着性は**写真-1** に示すような建研式引張試験機を，⑨舗装後の防水層と舗装の接着性は**写真-2** のような荷重制御が可能な万能試験機を用いて試験を行い，接着強度は 0.6N/mm^2 以上が求められる。④施工性については，施工要領書の確認，および試験施工による検証を推奨している。⑤膨れ抵抗性は，負荷後に，気泡やブリスタリングの有無を目視確認するとともに**写真-3**に示すような赤外線画像でも確認する。⑥はがれ抵抗性に関して，本ガイドラインでは,“舗装の接着層までを施工した試験体”を用いて，**写真-4** に示すように防水層の上にゴム板および鋼板を載せ，載荷荷重 20kN で 1 分間保持したのち，ゴム板と鋼板を撤去した際に，防水層がはがれないことを照査する。⑦局部変形性は,通行車両等により防水層上に骨材が押し込まれても，耐荷性が損なわれないことを確認するも

のであり，円盤治具を防水材に載せて 24 時間静置したのち，**写真-5** に示すように，へこみ部と負荷のかかっていない健全部に漏斗を立てて透水量を 7 日間計測する。照査は平均吸水量の差で行う。

さらに，⑧舗装後の防水性は，基層アスファルト混合物打設時の骨材の押込みや，アスファルト混合物の熱による抵抗性を照査するもので，舗設温度（締固め温度）は 140℃を標準とし，**写真-6** に示すような防水性試験機を用いる。⑨舗装後のせん断抵抗性も舗設温度は 140℃とし，試験体温度 23℃におけるせん断強度は 0.15N/mm^2 以上を求めており，**写真-7** に示すような変位制御可能な万能試験機を用いる。⑩水浸後の接着性については，防水層内部に水が溜まった状態でも，引張接着強度をある程度保持できる性能を確認することとなっている。

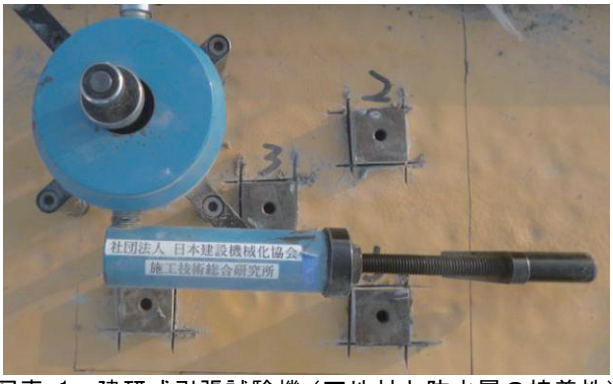


写真-1　建研式引張試験機（下地材と防水層の接着性）

写真-2　荷重制御可能な万能試験機（舗装後の接着性）

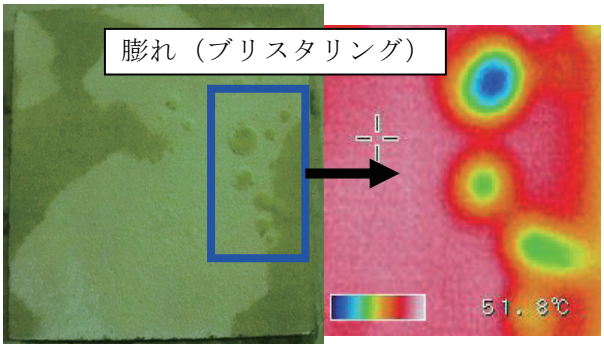


写真-3　膨れ負荷試験（赤外線カメラ画像による確認）

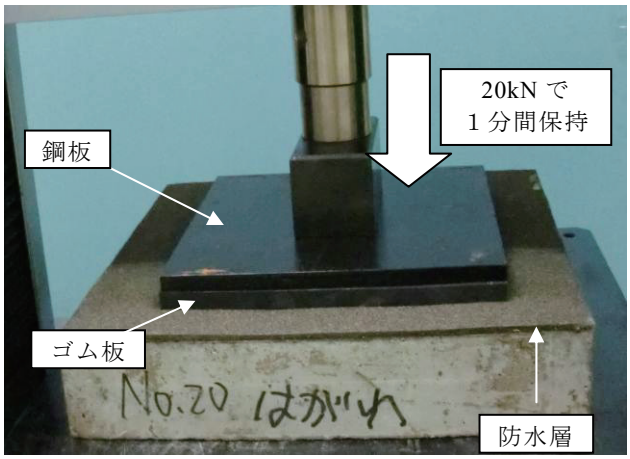


写真-4　はがれ負荷試験

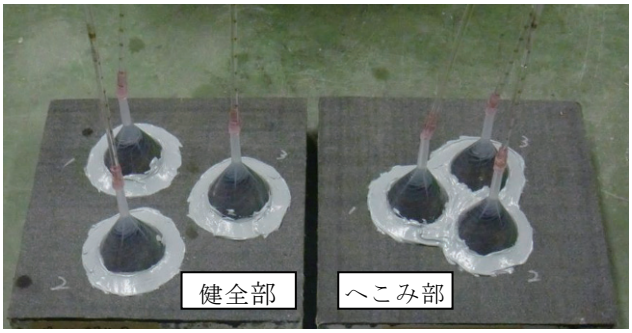


写真-5　局部変形性試験状況

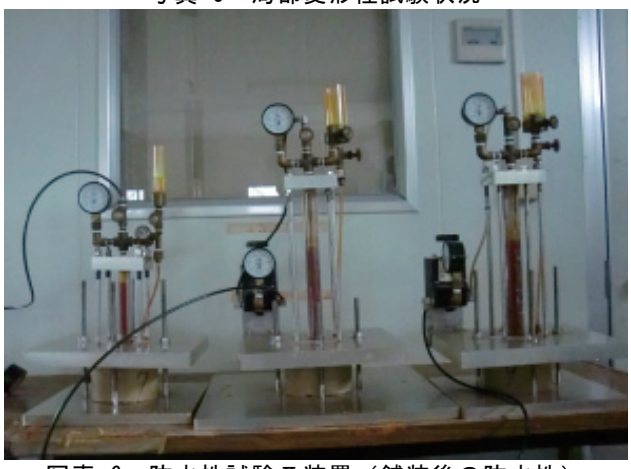


写真-6　防水性試験Ⅱ装置（舗装後の防水性）

写真-7　変位制御可能な万能試験機（舗装後のせん断抵抗性）

4.3　耐久性能の照査

表-1 中に示す⑪温度変化および薬品負荷に対する抵抗性は，飽和水酸化カルシウム溶液に16 時間浸漬後，－10℃（寒冷地では－20℃）から 50℃の温度変化を 30 回繰り返し，抵抗性を確認する。⑫輪荷重繰返し負荷抵抗性は，**写真-8**に示すような60℃の恒温槽で120分のホイールトラッキング負荷試験によっている。⑬ひび割れ開閉負荷抵抗性は，欧州で最も重要な性能とみられており，性能レベルは低温のレベルで決まる。施工技術総合研究所でも写真-9 に示すような試験機を用いて，－10℃（寒冷地では－20℃）の試験が始まっている。⑭凍結融解負荷抵抗性については，試験方法についての研究が進められている段階である。⑮繰返しせん断負荷抵抗性は，防水層の接着性能の良し悪しに関係することが確認されており，**写真-10** に示すような試験機が開発されている。

写真-8　ホイールトラッキング負荷試験状況

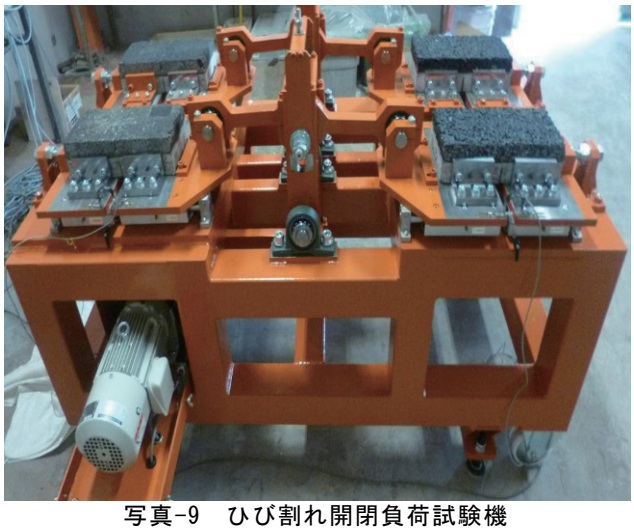


写真-9　ひび割れ開閉負荷試験機

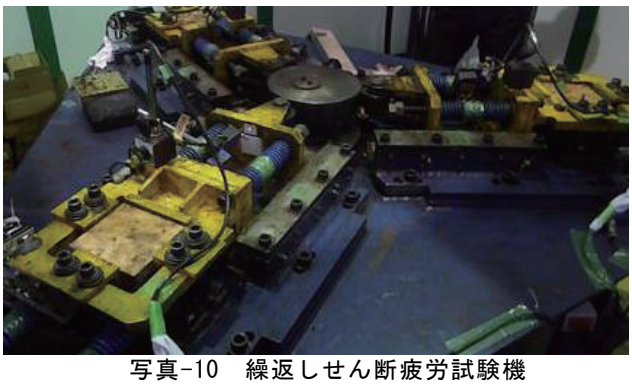


写真-10　繰返しせん断疲労試験機

５．床版防水システムの設計

5.1　床版防水システムの選定

床版防水システムの設計では，個々の橋梁の供用環境や維持管理性などの特性に応じて，床版防水へ求める性能を設定した上で，**表-1** の要求性能一覧に適合する適切な材料を選択する。ただし，一般的な環境下では**表-2** に示すカテゴリー1～5 のように，要求される性能に応じたグループ分けが行われている。

ここで，重交通路線は概ね計画交通量 4,000 台/日以上，もしくは大型車 500 台/日以上（2 方向）の道路としている。また，寒冷地とは道路橋示方書Ⅰ共通編で言う寒冷な地方（北海道，東北地方など）を指し，凍結防止剤を散布する路線も寒冷地に含められる。

表-2　一般的な環境下の床版防水層の区分

区分	床版防水層に要求される性能
カテゴリー１	材料性能，初期性能に加え，寒冷地および重交通路線に対応する耐久性
カテゴリー２	材料性能，初期性能に加え，重交通路線に対応する耐久性
カテゴリー３	材料性能，初期性能に加え，寒冷地に対応する耐久性
カテゴリー４	材料性能，初期性能に加え，一般的な路線に対応する耐久性
カテゴリー５	材料性能，初期性能

高速道路や都市部の橋梁では，補修工事を実施した時に道路利用者が受ける経済損失が大きいため，耐久性に優れたカテゴリー２（寒冷地ではカテゴリー１）に適合する床版防水層が要求されることが一般的である。また，地方道の場合には，一般的な耐久性能を求めたカテゴリー４（寒冷地ではカテゴリー３）に適合する床版防水層を使うのがよいとされている。

5.2　床版防水システムの計画

床版防水の計画においては，床版全面および端部において，床版(端部)防水層を設ける必要がある。これは，床版部分のみならず，壁高欄や地覆などの端部からの漏水を防ぐためである。また，舗装の端部においては，舗装と地覆などの境界面から漏水することから，**図-3** に示すように目地材を用いて止水することが有効である。なお，端部防水層は路面より少し上まで伸ばすのが効果的である。

排水設備は，雨水などの滞留による舗装の劣化を抑制するだけでなく，万が一，防水層が防水性能を保持できなくなった場合にも，雨水などを速やかに排水することにより，コンクリート床版の劣化を極力遅らせるために設置するものである。床版上面の排水計画については，構造物の計画段階より，床版の勾配および水の流れ，排水設備などについて計画することとしている。

排水枡周辺部については，排水枡側面と床版との間から漏水することが懸念されている。このため，排水枡周辺部は特に水の浸透を防止するような配慮が必要であり，排水受け枡と床版の継ぎ目は確実に防水する必要がある。また，排水枡は，**図-4** に示すように上枡と受け枡に分離した高さ調整のできる 2 層構造タイプを用いることが望ましく，受け枡の据付け高さは床版面以下に施工する必要がある。

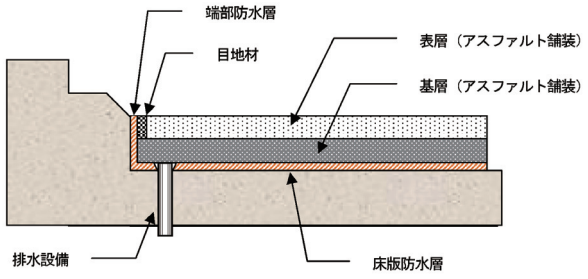


図-3　床版防水システムの標準的な構成例

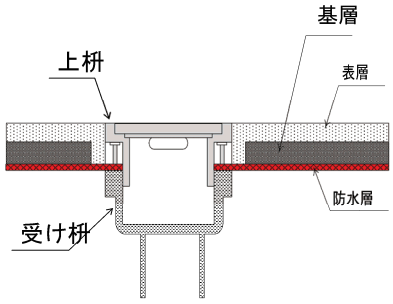


図-4　排水枡部の処理例

６．床版防水システムの施工

床版防水システムの施工では，床版面の下地処理→床版防水システムの施工→アスファルト混合物の舗設が行われる。つまり，良好な防水システムを構築するためには，床版の下地処理，防水層，アスファルト混合物が三位一体となり，それぞれの施工が適切に行われることが重要である。そのためには，下記に留意する必要がある。

(1)床版防水層が施工面全面で均質であり，所要の品質となるように入念に行い，長期に渡って所要の機能が発揮できるように十分配慮する。

(2)現場には，床版防水システムの施工に関する十分な知識を有する技術者を配置する。

(3)施工計画書は，工事開始前に事前調査を行い，材料の特性が記載された施工要領書に基づいて作成する。

(4)施工計画書は現場に常備し，その計画書にしたがって工事を進める。工事終了後は，施工が適切に実施されたことや維持管理のために必要な事項を工事記録として記録する。

(5)下地処理は，良好な防水システムを構築する上で最も重要である。そのため，下地処理を適切に行うためには，特に以下の点に留意することが必要である。

・コンクリート床版面は，床版防水層の施工前に適切に処理をしておく。

・コンクリート床版面のレイタンスや接着を阻害する膜養生剤などの付着は，床版と床版防水層との接着性に悪影響を及ぼすため，これらの有害物を確実に除去する。

・コンクリート床版面にひび割れ，段差，ジャンカ，補修跡がある場合は，適切に処理する。

・コンクリート床版の保有水分量は，適切な値に管理する。

また，維持修繕工事では床版の疲労耐久性，耐荷力の低下を抑止するため，舗装の切削については，**写真-11** に示すような大型切削機や**写真-12** に示すような中型切削機（ファインミリング等）やバックホウ等を用いて行い，床版を痛めないように注意する必要がある。なお，床版切削後の表面処理には，**写真-13** に示すようなスチールショットブラストを用いる場合が多い。

(6)排水設備については，

・排水計画を十分に把握し，施工前に現場条件の確認を行う。

・排水設備を設置する際には，橋梁構造や縦断・横断勾配，施工条件等に十分留意して計画する必要がある。

(7)防水層の施工は，各工法の施工要領書および各現場の状況に対応して作成された施工計画書に従って行われる。施工は，防水工事の専門知識を持つ施工管理者の責任のもとで行われる必要がある。特に維持管理工事においては，舗装が切削されるまで床版の損傷・劣化状況やその規模等の情報が得ることが困難なため，状況に応じた対応が求められる。

(8)アスファルト混合物の舗設については，下記が重要である。

・地域，気象条件，交通量条件等に応じ，水密性に配慮した適切なアスファルト混合物を使用する。
・施工前に，仕上り高さ，実施工程等について事前に確認する。
・防水層の上に施す舗装は，各防水層が求める条件を満足するよう配慮して施工する。
・寒冷期（外気温 5℃以下）において舗設する場合には，特に防水層との付着性の確保および所定の締固め度が得られるように注意して施工を行う。
・アスファルト舗装と既設構造物との界面については，防水性を考慮した目地の設置を行う。

写真-11　大型切削機

写真-12　中型切削機（ファインミリング）

写真-13　スチールショットブラストによる表面処理

7．研究所の取り組み

施工技術総合研究所では，大阪大学，大阪工業大学，ＮＥＸＣＯ総合技術研究所をはじめとして，土木学会，寒地土木研究所，材料メーカーと共に平成 11 年より現在に至るまで，床版防水の性能評価手法の提案と実験的検証を行ってきた。今後も，これまでと同様に床版防水システムの性能試験の実施に加え，試験フィールドや現場での試験施工を通じ，よりよい床版防水システムの構築に向けて努力していきたいと考えている。

参考文献

1) 松井ら：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, 1987
2) 紫桃ら：床版防水の性能向上に関する検討，日本道路公団試験研究所報告 Vol.39, 2002.11
3) 道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計･施工資料，（社）日本道路協会, 1987.1
4) 道路橋示方書･同解説, (社)日本道路協会, 2002.3
5) 道路橋床版防水便覧, (社)日本道路協会, 2007.3

Ｓ３．ICT 搭載型無人化施工機械の施工性検証試験結果について

一般社団法人　日本建設機械施工協会　施工技術総合研究所　　鈴木　勇治

１．はじめに

集中豪雨や地震による地滑り等で、河道閉塞（以下、天然ダム）が発生し、越水による天然ダムの決壊の恐れがある場合には、緊急排水路の掘削というような応急復旧[1)]が実施される。このような復旧対策には、二次災害防止のために無人化施工が広く採用されることが望まれる。我が国における無人化施工には 30 年もの歴史があり[2)]、雲仙普賢岳の復興工事等の様々な災害現場で採用されてきた。しかし、無人化施工の作業効率は搭乗操作よりも低いため、特に緊急的な対応を求められる応急復旧工事では、更なる作業効率の向上が求められている。

施工技術総合研究所では、国土交通省東北地方整備局および東北技術事務所の委託により、災害復旧現場で特に緊急的な対応が必要な応急復旧工事を想定し、無人化施工で広く用いられる無人化施工機械（遠隔操縦式建設機械）に ICT（情報通信技術）を活用した最適な操作支援システムの構成を検討し、施工効率の向上、安全性の確保を目指す手法として取りまとめると共に、ICT 搭載型無人化施工機械を利用した施工性検証試験を実施し、この試験施工の結果から災害復旧工における迅速性の確保に主眼を置いた活用手法をとりまとめた。

本報は、無人化施工に適用する情報化施工技術と、それを用いた災害復旧対策を実現するための検討結果および試験施工結果について述べる。

２．目的

2.1　災害復旧現場における無人化施工のニーズ

無人化施工が、応急復旧工事に適用された代表的な事例として、平成 20 年に発生した岩手・宮城内陸地震での天然ダム対策がある。この災害では多くの天然ダムが確認されたため、全国から遠隔操縦式油圧ショベルが集められ、現地で地元の施工業者が操作技術を習得して復旧工や対策工に臨んだ。しかし、遠隔操縦に慣れることができずに、搭乗施工に切り替えて実施された例や、無人化施工技術に精通した技術者や操作者が現場に存在しなかったために通常の施工が実施された等の報告がある。被災地の地元で災害協定を結んでいる施工業者が自ら操作した無人化施工は、ほとんどの現場で確実に稼働できずに遠隔操縦熟練者を要請したのが現実であった（表-1 参照）。

表-1　岩手・宮城内陸地震での無人化施工

実施現場	A現場	B現場	C現場	D現場
対象工種	水路掘削	堰堤ポケット掘削	除石工	倒木作業
遠隔操作者	地元の施工業者	地方の熟練者	地方の熟練者	地元の施工業者
無人化施工実施期間	1 週間程度	10 日程度	数日	10 日程度
作業現場での問題点等	走行、姿勢安定に苦労した 熟練者が手配されなかった	重機足元整地に手間を要した	オペレータ要請に日数を要した	操作訓練を受けた4人の内2人は適応できなかった

これらの事例から、応急復旧工事における現状の無人化施工の問題点を整理すると、表-2 の通りとなる。

表-2　応急復旧工事での無人化施工の問題点

問題点と詳細
①無人化施工に習熟したオペレータが少ない。 ・モニタを通じた現場状況の確認に手間を要する。 ・遠隔操縦装置での操作に慣れない。
②危険区域内では丁張等の目標物を設置できず、施工の精度が確保できない。 ・掘削等での切り出し位置が特定できない。 ・施工形状を確認できない。

以上から、災害現場で復旧工として求められる現場ニーズをまとめると以下のように区分される。これらの現場ニーズに対応することで確実で効率的な災害復旧工が実現されると考える。

① 安全性に対するニーズ

操作者の二次災害を防ぐために、立ち入り禁止区域内で行う工種や作業を遠隔操縦式油圧ショベルで実施できること。

② 操作性に対するニーズ

遠隔操縦式油圧ショベルの操作が、迅速に、且

つ確実に行えること。
③ 施工性に対するニーズ
立ち入り禁止区域内での作業が、極力短期間で完了すること。また、応急復旧工に求められる品質・出来形が確保できること。

2.2 施工性検証試験の目的

無人化施工は、通常施工（操作員搭乗）と比べ生産性に劣るとされている[3)]。災害復旧現場における遠隔操縦式油圧ショベルによる無人化施工の特徴と施工効率への影響を表-3 に示す。この表より、「施工状況の把握」、「施工の判断」、「機体転倒の危険性の判断」についての支援を行うことが施工効率の向上を図るための課題であると言える。これら課題に対して、安全・確実で効率的な災害復旧工を実現することを目的として、無人化施工機械に ICT を搭載した操作支援方式の検討と施工性検証試験を実施した。

表-3 無人化施工の特徴と施工効率への影響

無人化施工の特徴	施工効率への影響
中継モニタや車載モニタを通じて現場や施工箇所の視認を行う。	距離感をつかみにくく、施工状況の把握に時間がかかり、施工効率が低下する。
一般に現場内に人が立ち入ることができず、丁張等による施工の目標物となるものを設置できない。	所定の形状・大きさの掘削や盛土を行うのに、勘や推量に基づいて判断することになり、施工効率が低下する。
機体の傾斜度合いを体感できない。	機体の転倒を防ぐために慎重な操作を強いられ、施工の効率が低下する。

3. ICT 搭載型無人化施工機械

施工の品質や出来形の確保と施工効率の向上のために、油圧ショベルに搭載する情報化施工技術としては、三次元マシンガイダンス（以下、MG）が考えられる。この技術は、RTK-GNSS や自動追尾 TS による測位情報を基に、油圧ショベルの自己位置を特定し、目標とする設計面および油圧ショベルのバケットの位置関係をモニタ表示するシステムである。モニタには平面表示や断面表示が可能であり、施工の場面に応じた設計面を表示できる（図-1、図-2 参照）。

この MG 技術を利用することで、現場ニーズに対して以下のような効果が期待できる。
① 安全性のニーズに対する効果
現場での丁張の設置が不要となる。また、MG 情報を利用することで地形の三次元データが取得できるので現場内での測量等の有人作業が必要なくなる。
② 操作性のニーズに対する効果
MG に現況情報や目標位置情報を与えることで、油圧ショベルの目標位置への誘導が確実にできる。また、機体の姿勢（傾斜）も明らかとなるため、安全な操縦が可能となる。
③ 施工性のニーズに対する効果
施工対象物の三次元設計情報を MG に搭載することで、施工開始直後から施工目標に合わせた施工が可能であるため、施工時間の短縮化が期待できるとともに、施工目標と油圧ショベルバケットとの位置関係がモニタ上で確認できるため、確実な施工が実現できる。

災害時の応急復旧対策工を実施することを想定した遠隔操縦式油圧ショベルの操作支援システムは、RTK-GNSS 測位システムを基本とすることが一般的である（図-3 参照）。

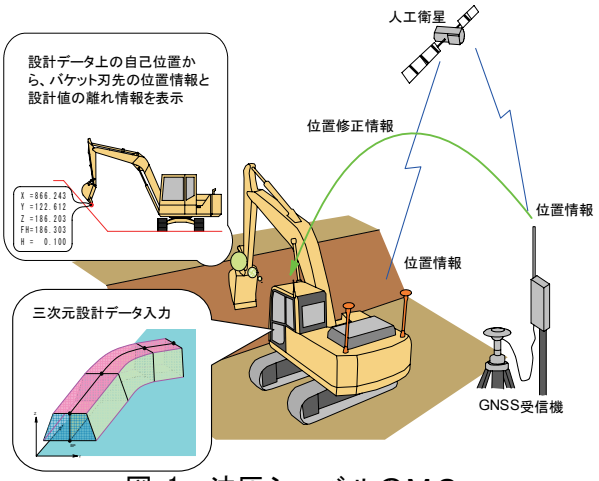
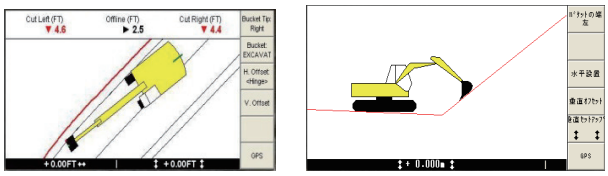


図-1 油圧ショベルのＭＧ


（平面表示） （断面表示）
図-2 ＭＧのモニタ表示例

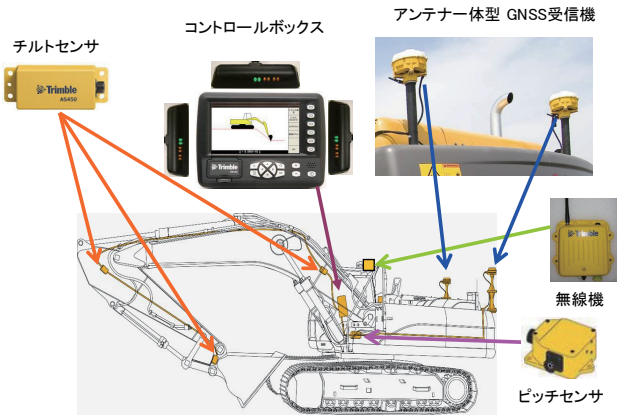


図-3 RTK-GNSS 測位ＭＧの機器構成（移動局側）

RTK-GNSS 測位を精度良く行うには、上空に５基以上の衛星が適切な位置に配置されていることが必要となるため、山間部での現場や周囲に高い

構造物がある現場など上空の視界が妨げられる場所では測位解析が成立せず、システムが稼働しないことになる。

このような GNSS 測位が適用できない場合には、自動追尾 TS による測位（図-4 参照）を利用して三次元 MG を実施するか、機体に設置したセンサから機体の姿勢を求めて、基準位置からの高さと前後方向のみをガイダンスする二次元 MG（図-5、図-6 参照）を利用する方法がある。

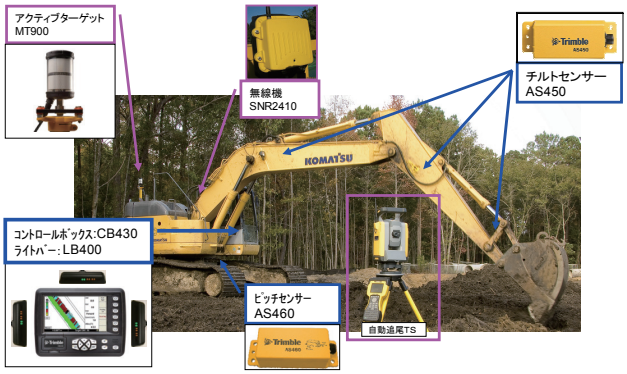
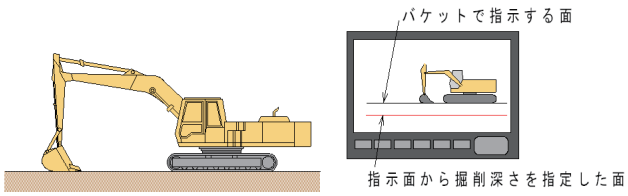
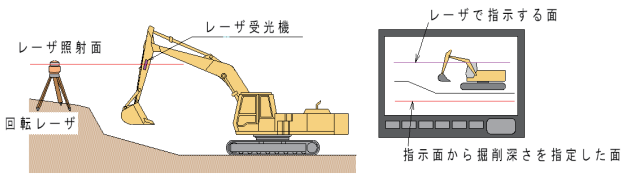


図-4　自動追尾ＴＳ測位の三次元ＭＧ

図-5　二次元ＭＧの機器構成



（設定したバケット位置を基準とする二次元ＭＧ）



（回転レーザを基準とする二次元ＭＧ）

図-6　二次元ＭＧの概要

また、遠隔操縦を効率的に且つ確実に実施するためには、油圧ショベルに車載カメラを搭載し、更に、機体と現場との位置関係が確認できるようにする遠隔操縦式カメラ台車を利用する。車載カメラとして一般的に利用されているものは、キャビン上に１機、あるいは２機のカメラを搭載して、バケット位置の施工状況が把握できるようにしているが、機体の走行の安全性を向上するため、油圧ショベル本体前方の左右端に前方確認用のカメラを設置することが考えられる（図-7 参照）。

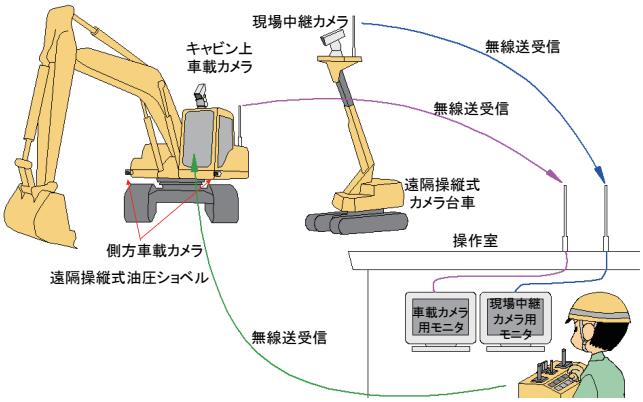


図-7　現場中継用カメラ

４．施工性検証試験

試験施工では、MG 搭載型無人化施工の施工効率検証の他に、①MG に必要となる三次元設計データの簡易的な作成手法、②設計データ作成に必要となる地形データの取得手法、③安全で確実な重機走行の確認、④施工現場での周囲の安全確認を実現するための車載カメラ配置、等を確認した。

本報では、施工効率の確認として、進入路造成試験、排水路掘削試験と、重機の姿勢を確認する安全性検証試験について報告する。

4.1　進入路造成試験

進入路造成試験は、図-8 に示す様に上り勾配の走路を幅 4m で造成を行った。なお、造成時の操作方式として、①モニタ確認による遠隔操作、②モニタ確認による遠隔操作＋MG 操作　の 2 通りの方式で実施し、この作業に係わる作業時間と出来形形状の精度を計測して施工効率と施工精度を検証した。

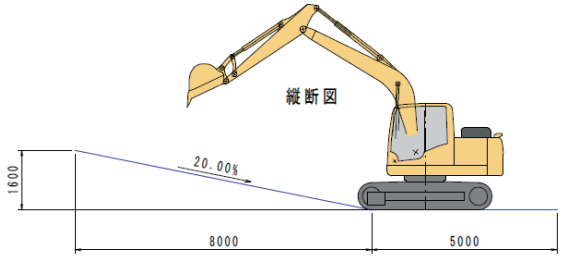


図-8　進入路造成試験モデル断面図

4.2　排水路掘削試験

排水路掘削試験は、図-9 に示す様に、溝幅 1.5m、深さ 1m の排水路を掘削すると共に、幅 1m の築堤の盛土造成を延長 2.5m にて実施した。

試験施工は、①モニタ確認遠隔操縦＋MG 操作、②モニタ確認遠隔操縦、③目視確認遠隔操縦、④登場操縦　の 4 通りの操作方法で実施し、オペ A（遠隔操縦のベテランであるが MG 操作未経験者）とオペ B（MG 操作に慣れているが遠隔操縦の未経験者）の二人のオペレータにより、4 通りの操作を各 3 ケースずつ実施し、この作業に係わる作業時間と出来形形状の精度を計測して施工効率と施工精度を検証した。

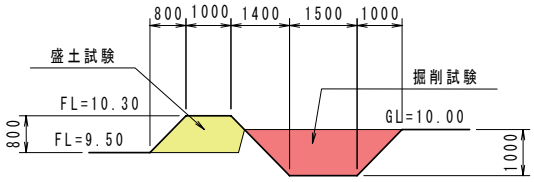


図-9　排水路造成試験モデル断面図

4.3　試験機械

(1) 遠隔操縦式バックホウ

施工性検証試験に使用した油圧ショベルは、国土交通省東北地方整備局岩手河川国道が所有する遠隔操縦式バックホウ（0.45m3 級）を借用し、このバックホウに MG 機器を取り付けて実施した（写真-1 参照）。

写真-1　遠隔操縦式バックホウ

(2) ＭＧ機器

MG機器は、選定の主な条件として、コントロールモニタ上に設計データと合わせて二次元 CAD 背景図の取込みが可能な機器で、RTK-GNSS 測位の他に、自動追尾 TS 測位が可能な機器を選定した。

二次元 CAD 背景図読み込みが可能な機器の選定理由は、三次元設計データを搭載しない場合でも二次元 CAD 背景図を取り込むことで、目標位置への誘導（走行）が可能であること、また、自動追尾 TS 測位が可能な機器は、衛星測位が不可能な場合、あるいは測位精度が低下した場合の使用を考慮したことによる（写真-2 参照）。

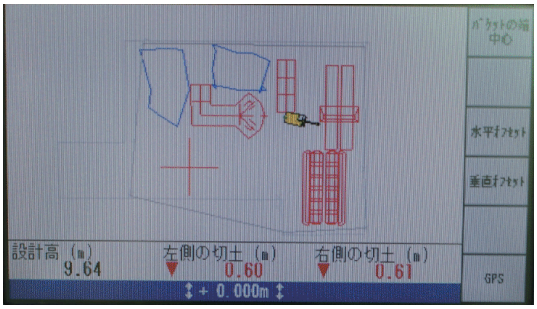


写真-2　ＭＧモニタ表示（CAD 背景）

(3) 試験ヤード

試験ヤードは、国土交通省東北地方整備局東北技術事務所の構内とした。写真-3 に試験ヤードの航空写真を示し、図-10 に試験配置図を示す。

写真-3　試験ヤード

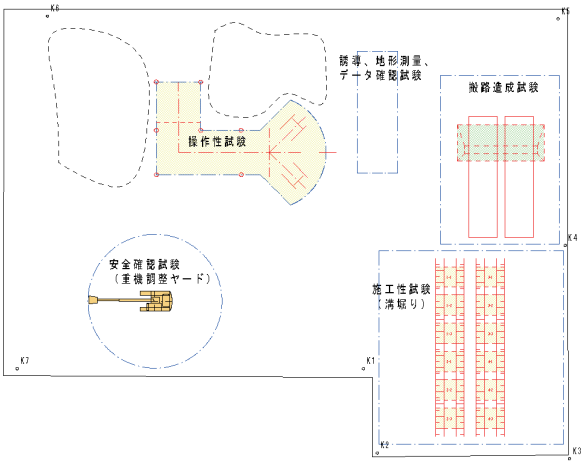


図-10　試験配置図

5．試験結果

施工性検証試験では、ＭＧ併用の遠隔操縦は、通常の遠隔操縦と比べ施工効率や施工精度で同等以上となり、MG による操作支援の効果が示された。

5.1　進入路造成試験

進入路造成試験については、MG を使用したケースの施工効率がモニタ確認遠隔操縦と比べて約 1.4 倍となる結果が確認された。このことは、MG のコントロールモニタに施工目標が明確に表示さ

れているため、大まかな造成の後に整形していく繰り返し施工をする必要がなく、部分的に仕上げていく施工が可能となることで、繰り返しの施工数が減少していることにある。

また、施工精度については、施工目標と出来形形状との差分面積により求めた結果、精度が向上していることが確認された。

図-11 に出来形形状図を、表-4 に試験結果を示し、写真-4 に試験実施状況写真を示す。

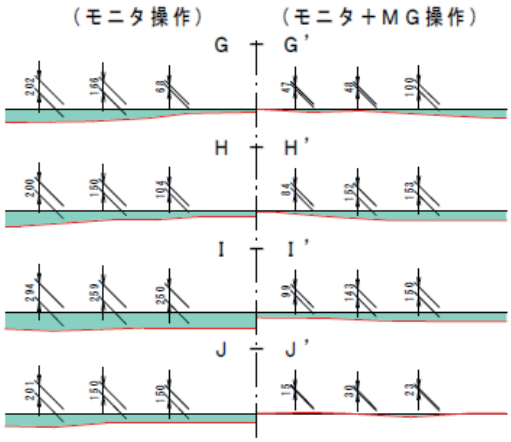


図-11　進入路造成試験出来形図

表-4　進入路造成試験結果

施工内容	ケース	施工効率*1 (時間当り施工量)	施工精度*2 (差分面積)
進入路造成	モニタ操作	5.08m/h	2.95 m²
	MG 併用	7.10m/h	1.31 m²

*1：時間当り進入路長さの施工量
*2：構築物の設計面と実際の出来形面との差を面積として表したもの

写真-4　進入路造成試験実施状況

5.2　排水路掘削試験

排水路掘削試験については、MG を使用したケースはモニタ確認操縦のみのケースと比較して、施工効率はほぼ同等であった。このことは、施工範囲が狭かったことで、粗掘削や粗盛土の段階がほとんどなく施工開始から繊細な操作を必要としたことにあると考えられる。表-5 に排水路掘削試験結果を示す。

また、出来形精度では、MG を使用したケースは、モニタ確認遠隔操縦よりも向上していることが確認された。このことは、施工目標が明確に示されることで精度の向上が求められることは当然である判断できる。

表-5　排水路掘削試験結果

施工内容	ケース		施工効率*1 (時間当り施工量)	施工精度*2 (差分面積)
排水路掘削・築堤	ｵﾍﾟA	ﾓﾆﾀ操作	19.1m3/h	0.78 m2
		MG 併用	17.1m3/h	0.34 m2
	ｵﾍﾟB	ﾓﾆﾀ操作	15.9m3/h	1.03 m2
		MG 併用	18.0m3/h	0.46 m2

*1：時間当りの掘削・盛土量で評価
*2：構築物の設計面と実際の出来形面との差を面積として表したもの
ｵﾍﾟA：遠隔操縦のベテランであるが MG 操作未経験者
ｵﾍﾟB：MG 操作に慣れているが遠隔操縦の未経験者

ここで、施工精度（施工目標面と出来形形状との差分面積）と時間当たり施工量との関係を図-12 に示す。このグラフより、例えば施工精度の余裕幅をある程度持たせて精度を気にせず施工を実施したとすれば、MG を使用するケースは、モニタ確認遠隔操縦と比較して約 1.3 倍の施工効率の向上が期待できる。

写真-5 に試験実施状況を、図-13 に出来形形状図を示す。

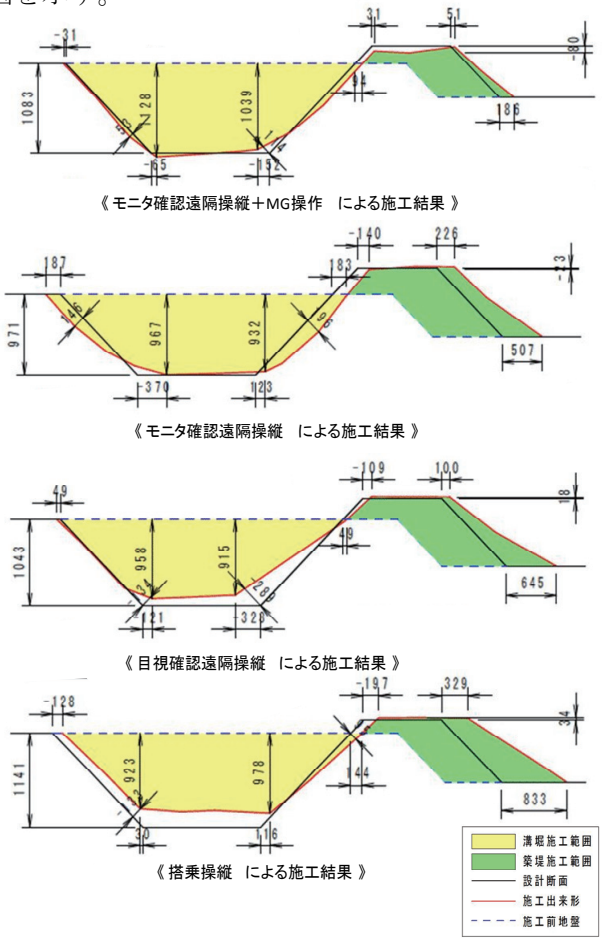


図-12　排水路掘削試験出来形図

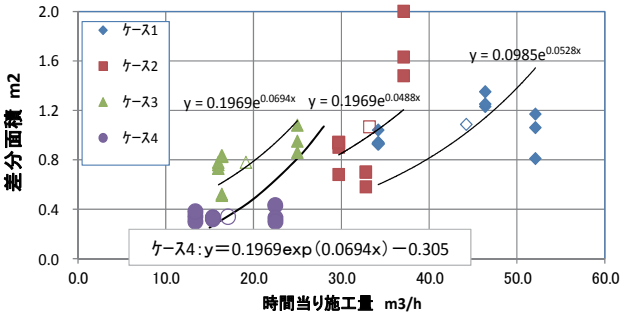


図-13　時間当たり施工量と誤差の関係

写真-5　排水路掘削試験験実施状況（掘削完了時）

5.3　安全性検証試験

安全性検証試験については、MG コントローラの重機傾斜表示（図-14 参照）を確認しながら傾斜路を走行し、操作者がこの傾斜情報を見ることで確実な走行ができることを確認した。

また、機体前方左右に取り付けた側方車載カメラからの中継映像を確認することで、前方の情報が把握しやすくなることと、傾斜の情報が風景から判断できることが確認できた。なお、前方確認用の側方カメラには、写真-6 に示す様にクローラがフレーム内に映っていることが重要である。

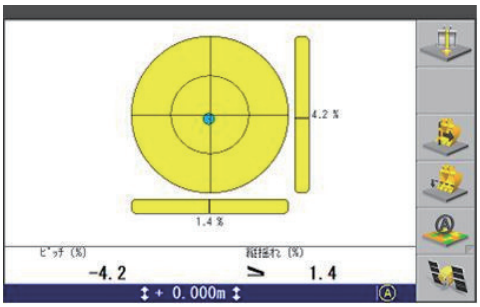


図-14　電子気泡による機体の傾斜表示例

写真-6　前方確認用側方カメラの中継映像

6．まとめ

遠隔操縦式油圧ショベルの施工および情報化施工技術は、最近では急速に普及しつつあるが、現時点ではまだ経験者が少なく、技術に関する知識を有している技術者も少ない状況である。

遠隔操縦技術については、ある程度の油圧ショベル操作経験がある操作者であれば、遠隔操縦のレクチャを数時間受けるだけで操作が可能となるが、実施工で技術を生かす場合は、例えば、ベテランオペレータにおいても、空間認知の才能が優れていない場合には遠隔操作は困難であると言われているように、操作の慣れや本質的な才能が要求される。

また、MG 技術については、最近の情報化施工の普及で経験者は増えてきているが、技術的なサポートを機器メーカに頼っているのが現状である。そのため設計データの作成、管理や簡易なトラブルについて対応できる技術者が殆どいないのが現状である。

緊急的な災害復旧においては、遠隔操作式油圧ショベル技術と MG 技術をある程度理解して現場経験を積んだ技術者が望まれる。そのためには、設計データ作成技術、遠隔操縦技術、MG 施工技術の 3 技術に重点をおいた技術者を育成するとともに、継続的な教育を実施することが望まれる。

7．おわりに

本検討および試験施工の実施に当たりご理解とご協力を頂きました建設無人化施工協会の皆様と、本論文の執筆、発表に関しまして、国土交通省東北地方整備局東北技術事務所関係者様のご理解を頂きましたことをここに記し、謝意を表します。

参考文献

1) 天然ダム対策工事研究会：天然ダム対策工事マニュアル，2010.11
2) 古澤正紀：無人化施工に見る技術開発の歴史～情報化施工技術・ICT の先駆けとなった各種の取組み～，NETIS プラス第２号，pp.16～23，2011
3) 山元弘：建設工事における無人化施工，建設マネジメント技術，pp.17～22，2007.6

Ｓ４．地盤振動の伝搬経路対策と振動低減効果

(一社)日本建設機械施工協会　○齋藤　聡輔
(一社)日本建設機械施工協会　　佐野　昌伴
(一社)日本建設機械施工協会　　設楽　和久
(一社)日本建設機械施工協会　　谷倉　　泉

1. はじめに

建設工事，道路供用等により発生する地盤振動は，付近の建物に物理的被害を及ぼし，周辺住民に精神的影響を与える場合があり，工事の種別によっては問題となるケースも多い。

ここで振動低減対策の対象とした市街地における高架橋工事は，住宅や学校，病院など人口密集地区に対する地盤振動を低減することが求められている。そのため，施工現場では，工事および道路供用後の振動低減対策が必要である。この現場では，ジョイントを減らした多径間連続橋を採用するほか，新技術である回転杭施工による回転圧入鋼管杭基礎を用いるなど，沿道に対する振動発生量の低減に努めている。しかし，施工現場の近くに住宅があることや橋梁架設位置で厚層 50m の沖積粘性土層の軟弱地盤が分布していることから，さらなる，振動低減対策が必要になった。

本稿では，地盤振動の伝搬経路における振動低減対策として，入手が容易で様々な用途に用いられる鋼矢板や EPS(発泡スチロール)を振動伝搬経路の地中に設置して防振壁とした場合と，これら防振壁と空溝を組み合わせた場合の振動低減効果についてとりまとめたものである。また，その結果をもとに，施工現場における振動低減効果を予測した事例について報告する。

2. 振動低減対策の概要

防振壁の基本材料として，土止めや水止めに用いられる鋼矢板（Ⅲ型，水平方向延長 20.4m，深さ方向延長 10m）を使用した。さらに，振動低減効果を高めるために鋼矢板に沿って EPS（水平方向 12m，幅 0.5m，深さ 1m）か空溝(水平方向延長 20m,深さ 1m または 2m)の設置を行った。地盤振動を比較した振動低減対策の内容と測定位置を図-1 に示す。なお，各対策の比較のため，測定は同一地盤にて行った。

<測定における振動低減対策の内容>
(対策1) 鋼矢板のみ設置した状態
(対策2) 鋼矢板に沿って EPS を設置した状態
(対策3) 空溝の設置のみの状態
(対策4) 鋼矢板に沿って空溝を設置した状態

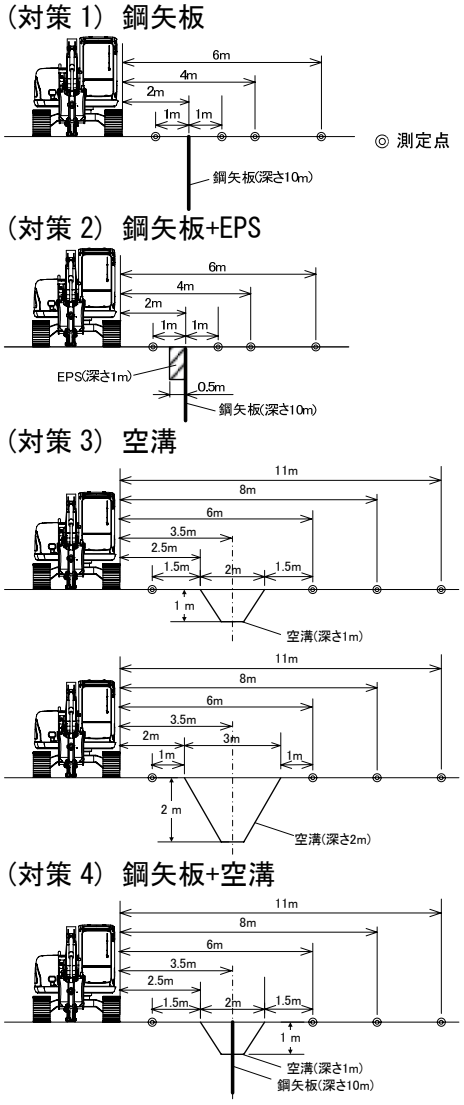


図-1　振動低減対策の内容と測定位置

3. 現地振動測定の概要

振動測定では振動源として 0.7m^3 級のバックホウを使用し，その走行時の振動を測定した。走行は，バックホウ機体側面が振動低減対策箇所の近傍の測定点から 1m 離れた位置に来るようにし，約 6m の走行範囲を前後進するものとした。バックホウの走行範囲と振動低減対策，測定点の位置を図-2 に示す。

測定点は，振動源のバックホウの機体側面より 1m の位置に 1 点，防振壁を挟んで反対側に 3 点を設置した。振動測定は，バックホウの前後進 1 往復を 1 サイクルとする連続した 3 サイクルを 1 回の測定とし，各振動低減対策について 3 回の測定を実施した。

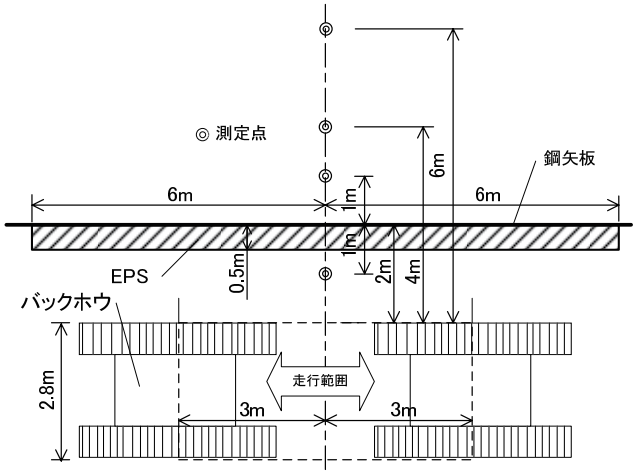


図-2　振動測定の位置（鋼矢板+EPS）

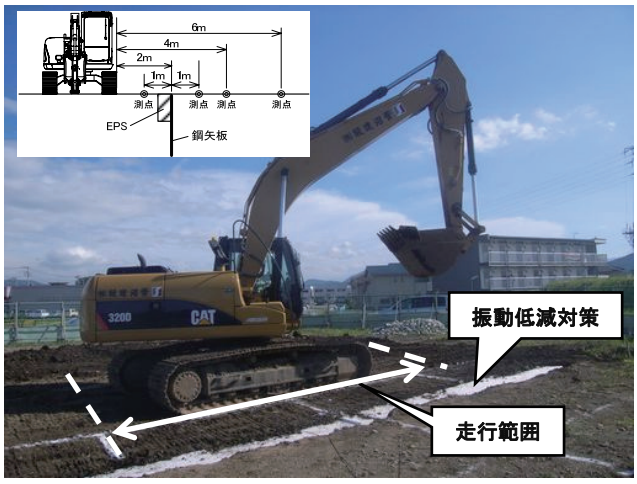


写真-1　振動測定の状況（鋼矢板+EPS）

4. 測定結果

各振動低減対策について比較した結果は次のとおりである。

4.1 鋼矢板と EPS の振動低減効果（対策 1, 対策 2）

対策 1，対策 2 の各測定点における振動レベル L_{10} の低減量を図-3 に示す。同図は，バックホウの機体側面より 1m の位置の測定点を基準として，振動レベルの低減量を取りまとめたものである。この図より，対策を行った場合に振動低減量が増加していることから，対策による低減効果が確認された。対策 1 は鋼矢板から 1～4m 離れた位置で無対策の場合と比べて 3～5dB 低減していた。さらに鋼矢板に EPS を付加した対策 2 の場合では，振動低減効果はさらに 5dB 程度の向上が確認された。

4.2 空溝による振動低減効果（対策 3）

対策 3 の空溝の深さが，1m と 2m の各測定点における振動レベル L_{10} の低減量を図-4 に示す。同図より，空溝の中心から 2.5m～7.5m 離れた位置の振動低減量は，深さ 1m（地表面の開口幅 2m）の場合で無対策の場合と比べて約 5dB であった。さらに空溝を深さ 2m（地表面との開口幅 3m）とした場合は，深さ 1m の場合と比べてさらに約 3dB の振動低減効果が向上することが確認された。

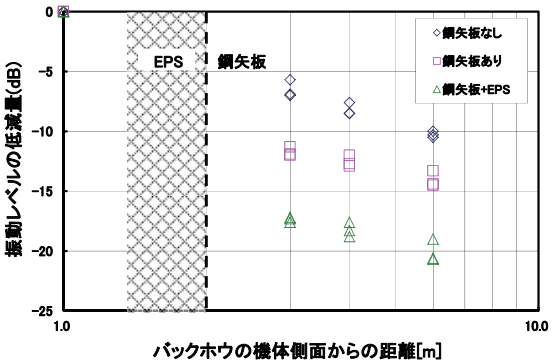


図-3　地盤振動の距離減衰の比較（対策 1, 対策 2）

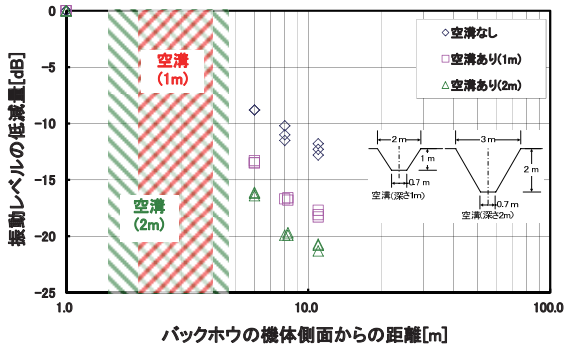


図-4　地盤振動の距離減衰の比較（対策 3）

4.3 空溝と鋼矢板による振動低減効果(対策 4)

対策 4 の振動レベル L_{10} の低減量を図-5 に示す。同図より,鋼矢板(空溝中心)から 2.5m 離れた位置では,3～4dB の振動低減効果が確認された。しかし,鋼矢板からの距離が 4m を超える位置では,対策の効果はあまりなく振動低減量はほぼ同じ結果となった。これは,振動低減対策の端部を回折した振動の影響を受けたものと考えられる。

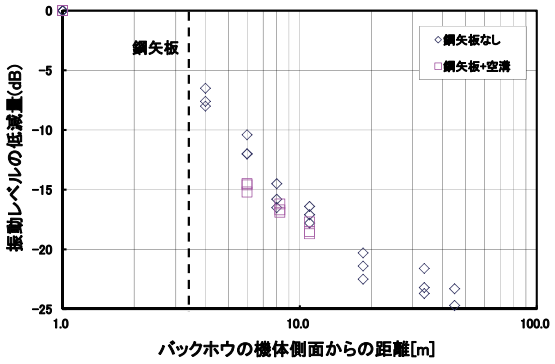


図-5　地盤振動の距離減衰の比較(対策 4)

5.　検証･考察

現地振動測定の結果から,振動伝搬経路における振動低減効果の検証を行った。

5.1 周波数分析による振動低減効果

振動低減対策がない場合の各測定点の地盤振動の周波数特性を図-6 に示す。同図より,振動源としたバックホウの走行による振動加速度レベルは,5Hz および 31.5Hz の周波数が卓越しており,振動源より離れた測定点も周波数特性に変化はみられない。なお,各振動低減対策の比較では,測定下限値の 30dB を下回る 3.15Hz 以下の周波数帯域を除いた。

(1)鋼矢板と EPS の振動低減効果の特性

振動低減対策箇所を挟む測定点間の各周波数の振動加速度レベルの低減量について,対策 1 と対策 2 の低減効果を図-7 に示す。同図の振動低減効果は,無対策の場合における各周波数の振動加速度レベルに対する低減量を比較したものである。

対策 1 の場合は,63Hz における低減効果はみられないものの,その他の周波数では低減効果が確認でき,その中でも 20～40Hz で効果が大きく,他の周波数と比べて 5dB 程優れている。さらに対策 2 の場合は,80Hz を除く周波数で,鋼矢板の場合と比べて約 5dB の振動低減効果の向上がみられた。

(2)空溝の振動低減効果の特性

対策 3 の空溝の深さが 1m と 2m の場合の各周波数における振動加速度レベルの低減量を図-8 に示す。深さ 1m の空溝では,25～80Hz が主に低減しており,その中でも 40Hz の振動低減効果が優れている。深さ 2m の場合も同様に 40Hz の低減効果は大きく,深さ 1m の場合と比べてほぼ全ての周波数帯域で約 3dB の振動低減効果の向上がみられた。

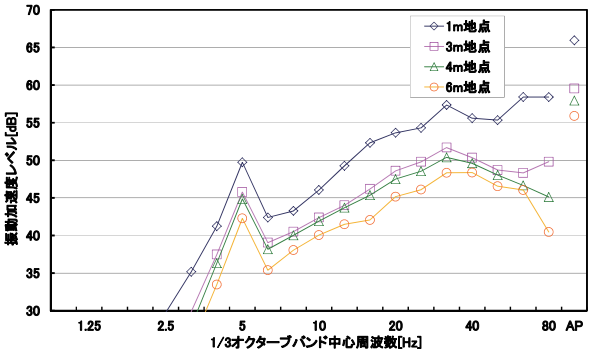


図-6　周波数特性(無対策)

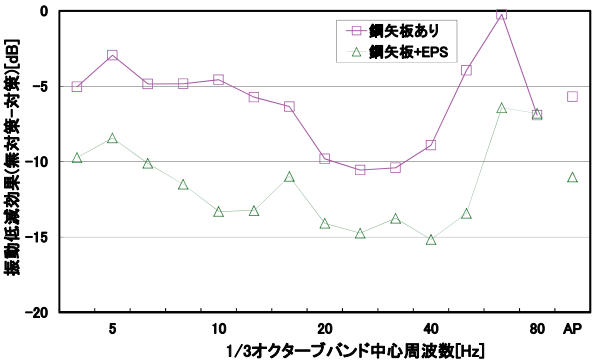


図-7　周波数による比較(対策 1, 対策 2)

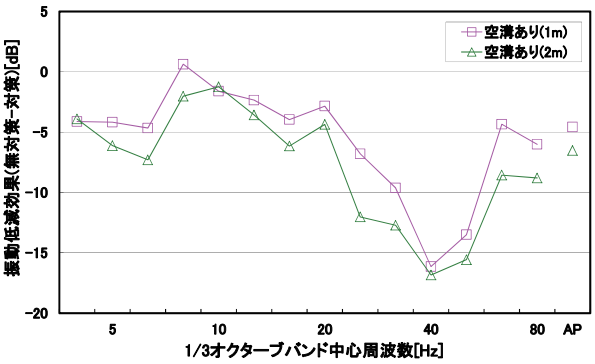


図-8　周波数による比較(対策 3)

5.2 鋼矢板延長による振動低減効果の予測

民家など振動低減対策の対象となる場所や方向に対して,防振壁の設置により地盤振動の低減を図るには,防振壁の端部を回折する振動を考慮した対策を選定しなければならない。

本測定を実施した施工現場で,回転杭施工時における地盤振動の低減対策を検討するため,敷地境界における鋼矢板の設置について振動予測を行った。振動予測は,地表面を回折する振動をより低減するために必要な鋼矢板の延長距離について行った。予測地点における振動予測は,道路環境影響評価の技術手法における標準予測手法である距離減衰式 [1]を基本とした。振動源からの距離 r(m)における振動レベル L(dB)を導くための距離減衰式の基本式は式(1)で示される。

$$L = L_0 - 15\log_{10}\left(\frac{r}{r_0}\right) - 8.68\alpha(r - r_0) \cdots\cdots (1)$$

ここで，L_0は基準点における振動レベル，r_0は振動源から基準点までの距離(5m)，αは内部減衰係数である。予測は，予測地点が振動源から離れるほど内部減衰係数の影響が大きくなり振動低減効果が有利になると判断して，内部減衰係数を無視するものとした。振動の距離減衰は，図-3, 図-4の測定結果より導いた近似式の係数を用いるものとした。回転杭施工時の振動の大きさは，オールケーシング工法における文献値 [2]を参考として，基準点における振動レベルをL_0=65dB とした。

上記条件による地盤振動に対して，民家における振動低減対策として，鋼矢板を 60m設置した場合の振動低減効果を予測したコンター図を図-9に示す。振動源より 15m 離れた位置に鋼矢板を設置することで振動低減の対象となる民家付近では，約 5dB の低減効果が予測される。

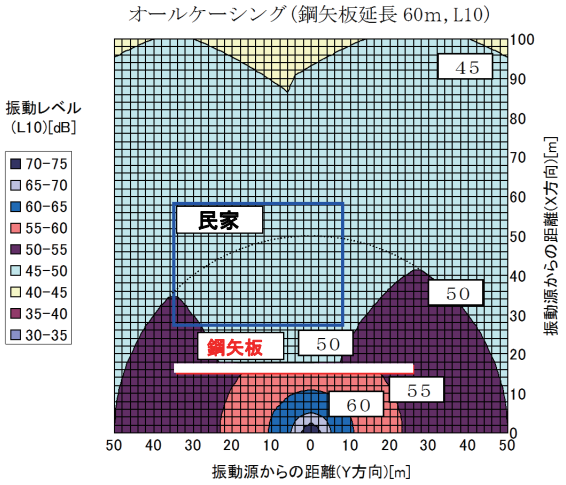


図-9　振動低減効果の予測

5.3 現場での振動低減対策とその効果

図-9 では，鋼矢板を 60m より更に延長することで，鋼矢板の端部から地表面を回折する振動が更に低減することが予測される。しかし，振動低減対象場所で地中を回折した振動の影響が大きくなり，振動低減効果には限界がある。

本測定を実施した施工現場では，振動源となる掘削機械の周囲に設置コストが安い空溝を設けることで振動低減対策を図り，また，重点箇所に対しては，敷地境界に鋼矢板，振動源に近い位置に表層部深さ 1m の空溝を設けた。このように工事中に振動低減対策を施すことにより，施工現場周辺に対する環境対策を図ることができた。

6. まとめ

本稿において，鋼矢板，EPS，空溝を組み合わせた振動低減対策の現場振動試験の効果を検証した。その結果，以下のことが明らかとなった。

(1) 鋼矢板を振動低減対策とした場合(対策 1)，振動レベルL_{10}の振動低減効果は 3～5dB であり，EPS を付加した場合(対策 2)では，さらに 5dB 低減した。周波数特性は，対策 1，対策 2 ともに 20Hz～40Hz に対して優れた低減効果がみられた。

(2) 空溝を振動低減対策とした場合(対策 3)，空溝の深さ 1m の振動レベル L_{10} の振動低減効果は約 5dB であり，空溝の深さ 2m では振動低減効果が約 3dB 向上した。周波数特性は 40Hz で優れた低減効果がみられた。

(3) 振動低減対策の設置長さが十分でない場合，防振壁の端部を回折する振動の影響が大きくなり，低減効果が低下する。振動源に対する囲い込みや設置長さを延長することにより，振動の回り込み距離を大きくすることで距離減衰による振動低減効果の向上が期待される。

7. おわりに

本稿の現地振動測定により，空溝，鋼矢板による振動低減対策が高い低減効果を発揮することがわかった。この結果が，住宅密集地など地盤振動低減が求められる建設工事および道路供用における振動低減対策の参考になればと考える次第である。

参考文献

1) 財団法人道路環境研究所：道路環境影響評価の技術手法 2007改定版,第2巻,pp. 330～338, 2007年

2) 社団法人日本建設機械化協会:建設工事に伴う騒音振動対策ハンドブック(第3版),pp.138～141, 2001年

電磁界を利用した高張力ボルトの緩み検査センサの開発

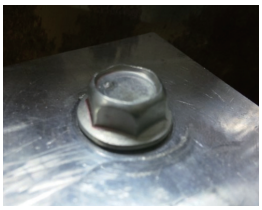
大分大学　工学部
機械・エネルギーシステム工学科
後藤　雄治

OITA UNIVERSITY

本研究の背景

高張力ボルトは大型機械や構造物、自動車等多くの場所で使用されている。

- それらのボルトに振動や繰り返し荷重が掛かり緩みが発生する。
- 緩みが進行することにより、脱落が起これば大事故につながる。



ボルトの締め付け力を管理することは大変重要である。

現在の検査法

現在、ボルトの緩み検査法としては、打音検査法や超音波法が一般的

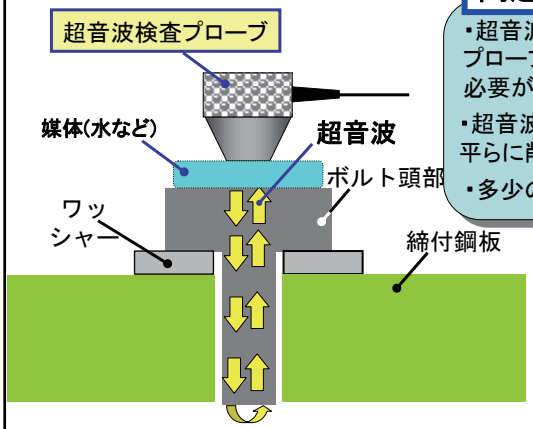
- 打音検査法は長年の熟練を必要とし、且つ定量的評価が難しい
- 超音波法は、ボルトの錆やペンキ等のコーティングが存在する場合や、刻印などによる凹凸の激しいボルトの検査への適応が難しく、測定に時間がかかる。

ボルトの緩みを高速且つ、簡便に評価が行える検査手法の開発が必要

ボルトの締付け力に伴って、ボルト頭部が圧縮され、電磁気特性が変化する

電磁現象を利用してボルトにおける緩みを検査する手法について提案

超音波を使用したボルトの緩み検査法の概要



問題点

- 超音波の伝達速度を均一化するため、検査プローブとボルト間を水等の媒体で埋める必要がある。
- 超音波を均一に入射するため、ボルト頭部を平らに削る必要がある。
- 多少の検査時間を必要とする。

ボルトの伸び率を超音波で計測

電磁気特性測定

Table 1 磁気特性測定条件

試験片	SCM435 and SS400
検出コイル	20 ターン 直径 = 0.1mm
SCM435(ボルト)への荷重条件	0~400MPa
SS400(締め付け鋼板)への荷重条件	0~200MPa

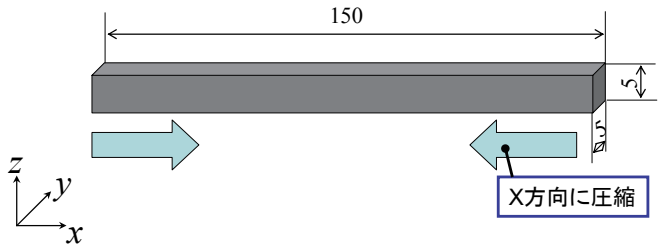


Fig. B-H曲線及び、導電率測定用試験片

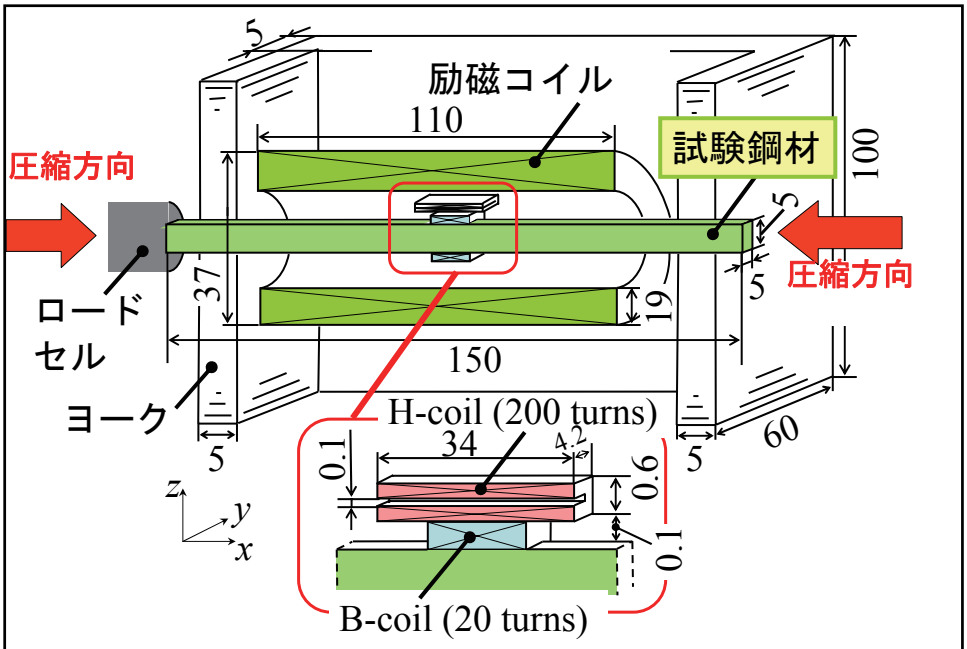


Fig. 圧縮応力に伴う磁化曲線測定装置概要図(1/2領域、0.5Hz)

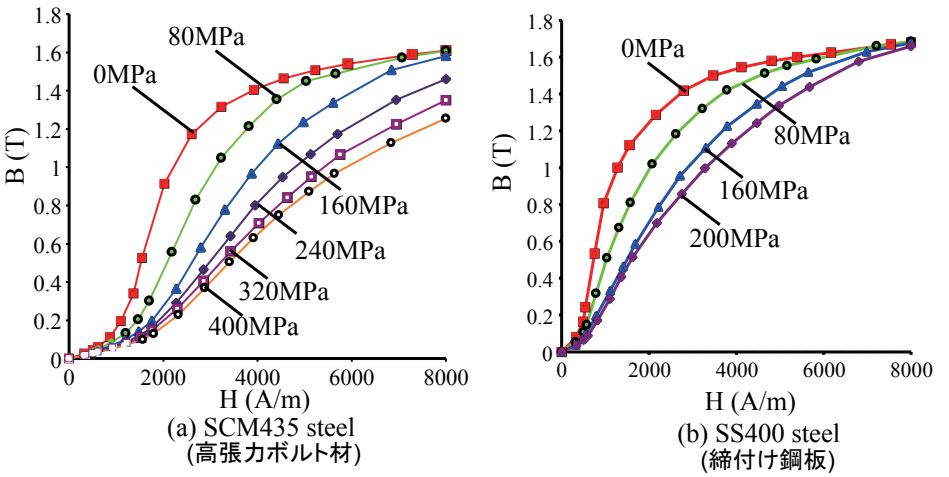


Fig. 各圧縮応力におけるB–H 曲線

導電率は、圧縮応力による変化は無く、SCM435材は3.7×10^6 S/m、SS400材は5.4×10^6 S/m一定

圧縮応力によって透磁率が低下する要因の考察

磁気ひずみエネルギー(E_σ)

$E_\sigma=-3/2\ \lambda s\ \sigma\cos^2\theta$

- λs : 磁気ひずみ飽和値($\lambda s > 0$)
- σ : 応力
- θ : 磁化Mと応力σの間の角度

応力σ、磁歪λsと磁区内の磁化の関係

応力σ →

磁界H →

磁化M

$\sigma < 0$(圧縮) の時、θ=90 deg.でE_σは最小

↓

磁化の向きは応力の向きと垂直

↓

圧縮応力方向のMも透磁率μも減少

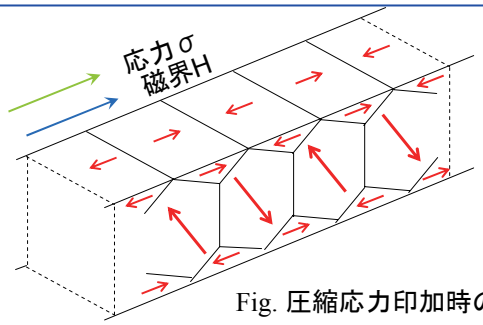


Fig. 圧縮応力印加時の磁区パターンの例

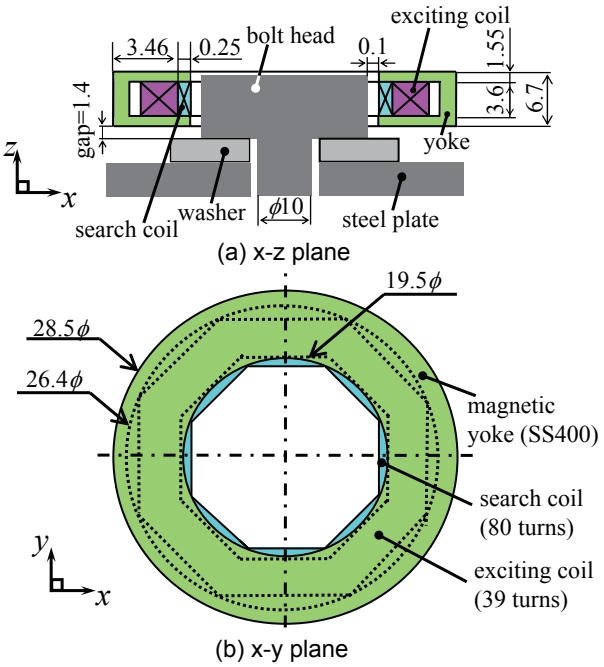


Fig. 提案電磁気センサ (1kHz, 19.5AT).

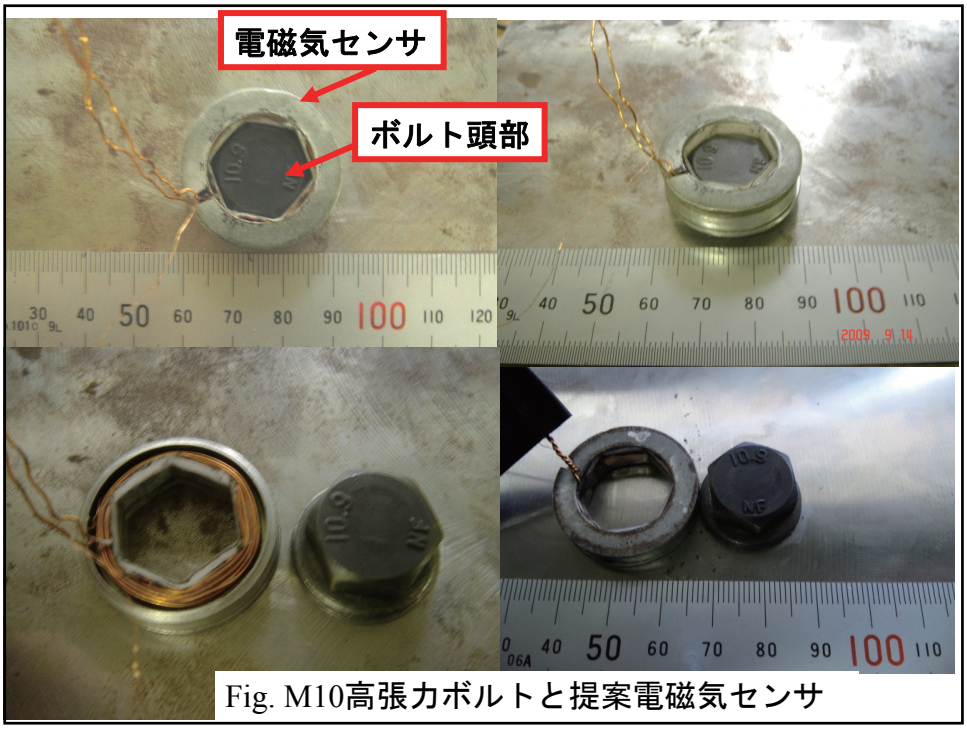
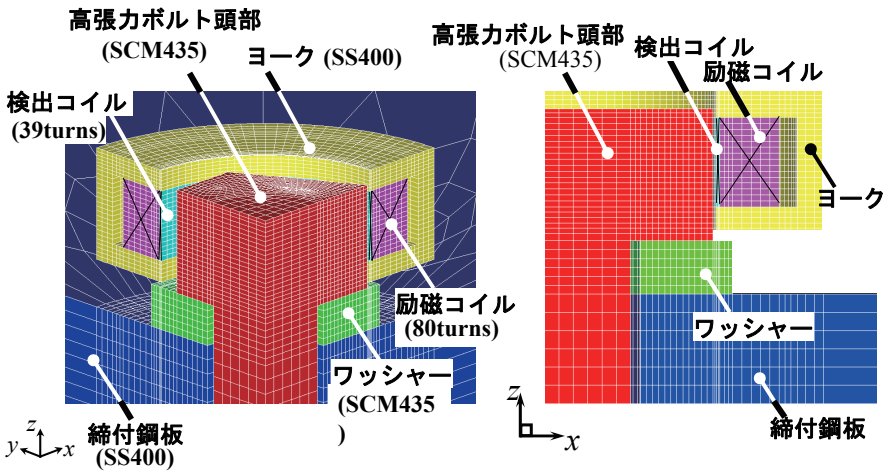


Fig. M10高張力ボルトと提案電磁気センサ



(a) 鳥瞰図　　(b) *x*-*z* 平面

Fig. 提案するボルトの緩み検査用の電磁気センサモデル (1/4 領域).

解析モデル

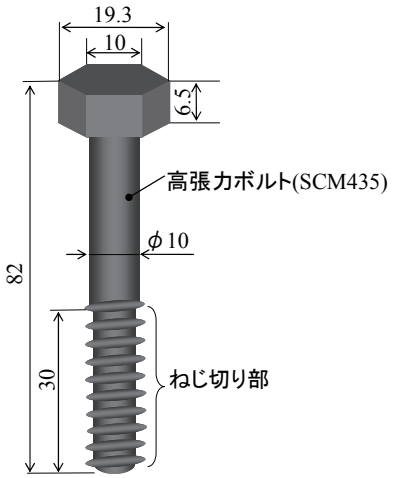


Fig. 高張力ボルト (SCM435、M10型).

- 材料:SCM435
- M10六角ボルトの軸直径:10mm
- 全長82mm,ねじ切り部30mm

応力分布を考慮した非線形電磁界解析の流れ

三次元応力解析

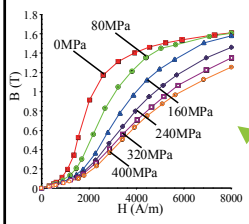


Fig. 初期磁化曲線

ボルトの応力分布を計算

各応力に対応した初期磁化曲線を線形補間を用いて算出

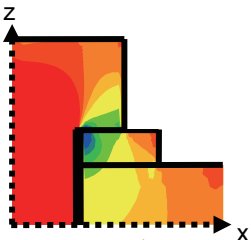


Fig. 応力分布

三次元交流非線形電磁界解析

各軸力における検出コイルに鎖交する磁束密度変化を計算

解析モデル

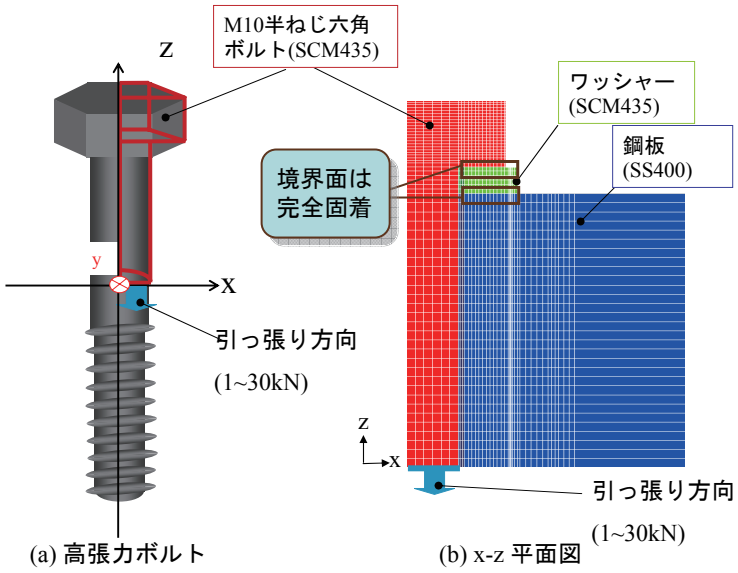


Fig. 軸力の与え方（1/4領域）

三次元応力解析

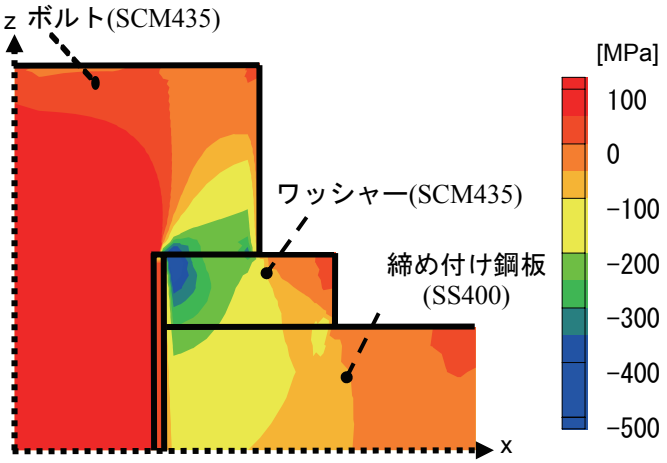


Fig. 応力分布 （σ_z, 30kN）

応力分布を考慮した非線形電磁界解析

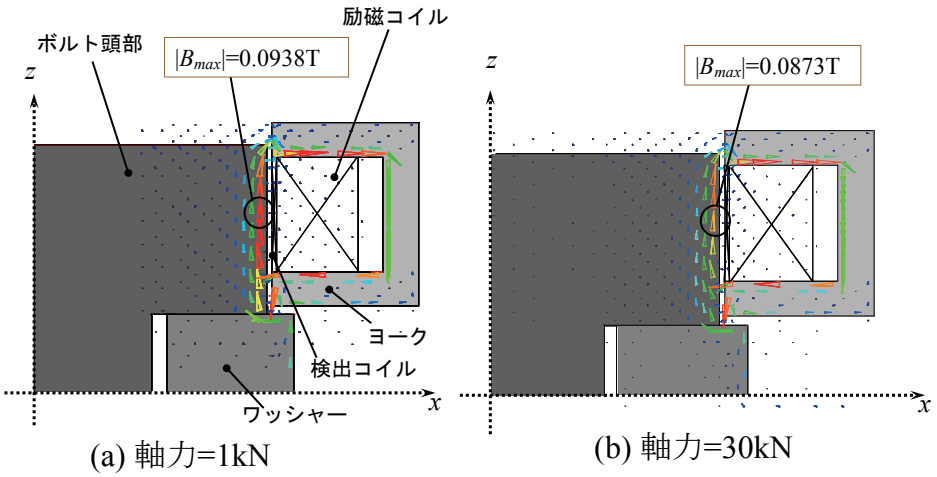


Fig. 磁束密度ベクトル分布(1kHz, 0.5A)

磁束はボルト頭部側面へ多く分布している。また、軸力が増加するにつれて磁束密度は低下しており、B_{max}は6.5×10^{-3}T程度低下している。

検証実験

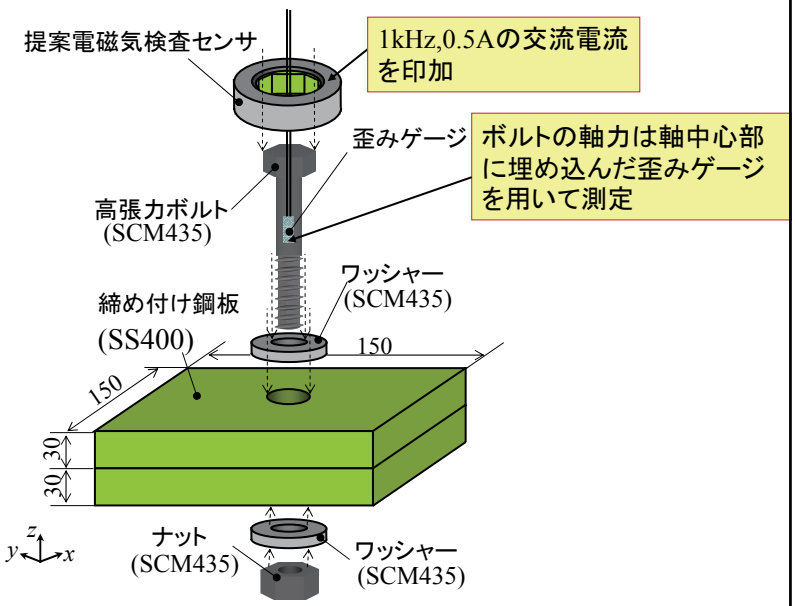


Fig. 検証実験のための単一ボルトモデル

検証実験

$$\Delta B_z = \frac{|B_Z|(\text{each axial force}) - |B_Z|(\text{axial force} = 1\text{kN})}{|B_Z|(\text{axial force} = 1\text{kN})} \times 100\ (\%)$$

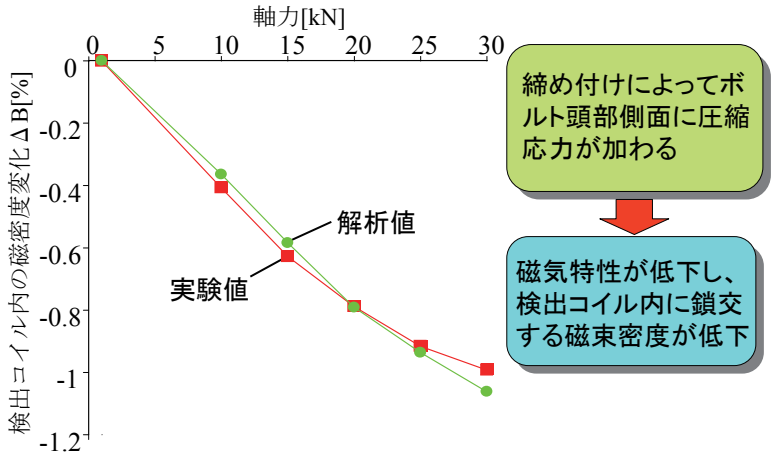
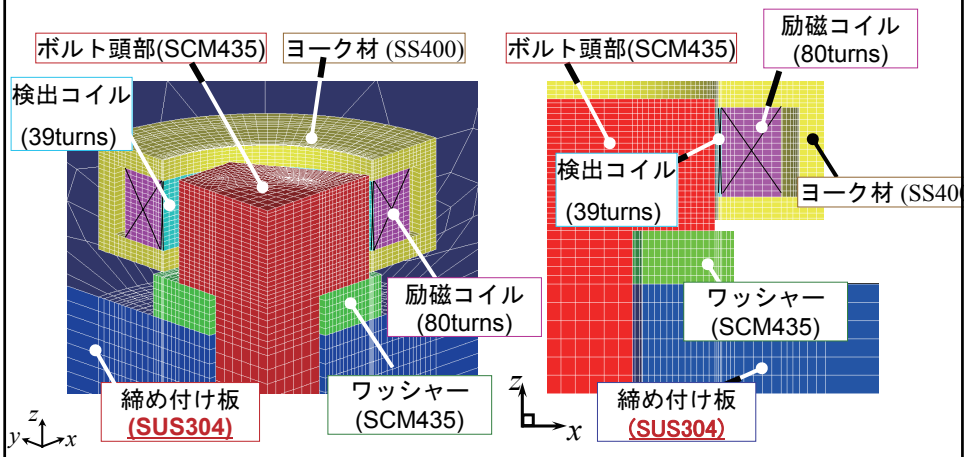


Fig. 実験値と解析値の比較(1kHz, 0.5A一定)

締め付け平板の材料が非磁性体の場合



(a) 鳥瞰図　　(b) *x-z* 平面

Fig. 磁界解析用メッシュ分割モデル（1/4 領域）

締め付け平板の材料が非磁性体の場合

$$\Delta B_z = \frac{|B_Z|(\text{each axial force}) - |B_Z|(\text{axial force} = 1\text{kN})}{|B_Z|(\text{axial force} = 1\text{kN})} \times 100\ (\%)$$

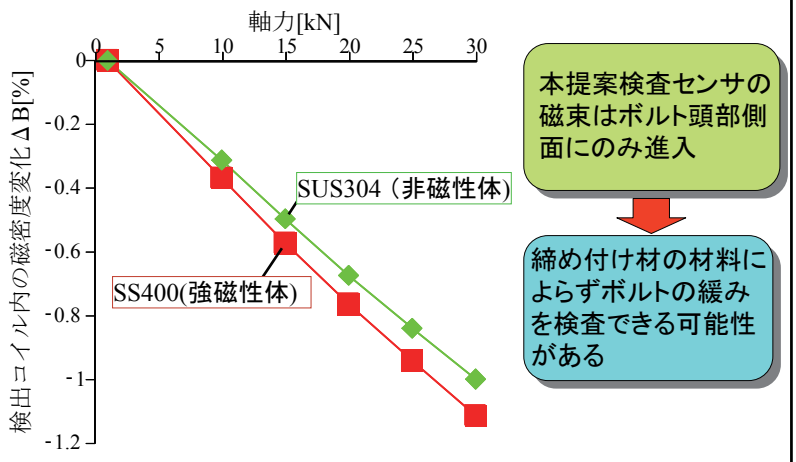


Fig. 鋼板の材料が検出信号に及ぼす影響(1kHz, 0.5A一定)

まとめ

●高張力ボルトに多く使用されている鋼材は、圧縮応力を受けると磁気特性が低下する。しかし、導電率は変化しない。

●高張力ボルトの軸力が増加すると、ボルト頭部側面の透磁率が減少するため、その変化分を電磁気センサで検出することで、高張力ボルトの緩みを非破壊的に検査出来ることを確かめた。

●本提案電磁気センサは、高張力ボルト頭部側面のみの、締め付けに伴う磁気特性変化を検出する。そのため、締め付け材が非磁性体でも強磁性体でも緩み検査が可能である。

今後の課題

●高張力ボルトの大きさや形状変化による検討

●高張力ボルトの腐食状態による検討

●実現場に適用できる検査手法の確立

謝　辞

一般社団法人　日本建設機械施工協会(日本建設機械化協会)の研究開発助成制度により本研究開発を実施できましたこと心より感謝致します。

柔軟な力制御による ミニショベル掘削作業の 知能化に関する調査研究

「平成24年度建設施工と建設機械シンポジウム」発表
2012年11月7日

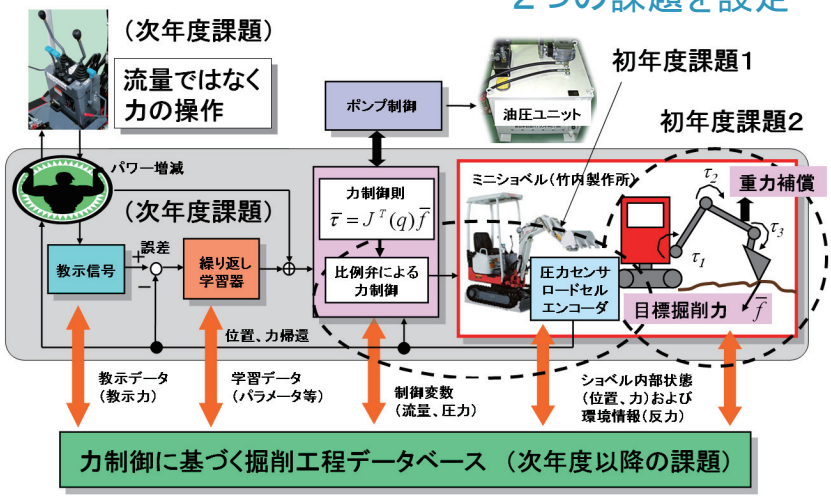
研究代表者： 立命館大学　玄 相昊
共同研究者：(株)竹内製作所　粂内健吾

はじめに

- 背景
  - ショベルは広く普及した万能作業機械
  - 高度化の効果は絶大
- 着目点
  - 力仕事には力の直接制御が有効だが、オペレータの手動操作では困難
  - 従来のロボット制御技術は産業用も含め、そのほとんどが「高精度位置決め」に注力
- 研究目的
  - 油圧ロボット制御技術の適用可能性の調査
  - 従来システムに力制御を融合する方法の調査
  - 力制御の特徴を活かした技能教示方法の調査

全体計画と助成期間中の課題

2つの課題を設定



提案のベースとなる成果

- **油圧ヒューマノイドロボットの力制御**
  - 玄, 日本ロボット学会誌 vol.27, no.2, pp.178-187, 2009
- **同、不整地バランス制御**
  - Hyon, IEEE TRO, vol.25, no.1, pp. 171-178, 2009
- **同、転倒回避制御**
  - Hyon, et al, IEEE ICRA, 2009
- **同、運動教示・学習**
  - Hyon, IEEE/ASME Mechatronics, vol.14, issue 6, pp.677-688, 2009
  - Hyon, et al, IEEE ICRA, 2008

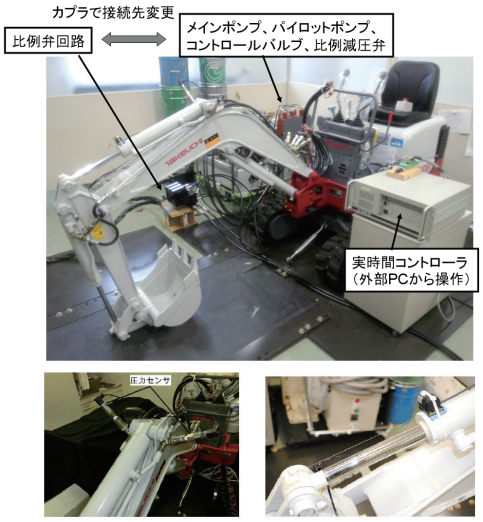
変化する未知路面に適用しつつバランスをとる油圧ヒューマノイド（JST-ICORP「計算脳プロジェクト」における研究成果）

成果報告の内容

1. 実験環境の構築
2. 力制御と実験結果
3. オペレター操作との融合方法の提案

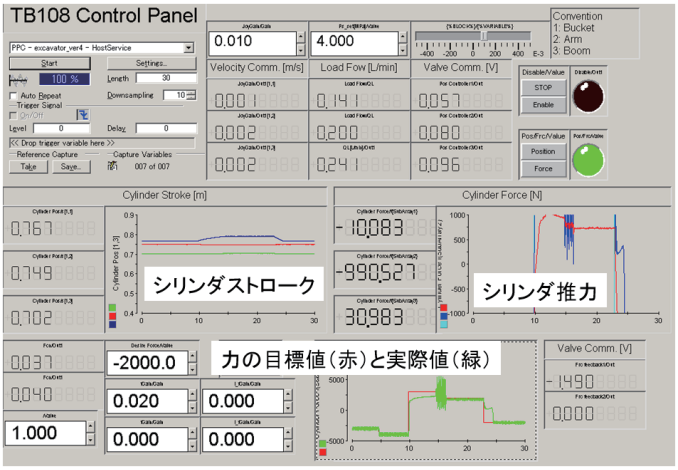
実験環境の構築

- **ショベル本体**
  - 竹内製作所TB108
  - フロントのみ利用
- **外部油圧ポンプ**
  - 出力：5.5 kW
  - 最高圧力：14 MPa
- **バルブ**
  - 比例弁×3
- **センサ**
  - ポテンショメータ×3
  - 圧力センサ×6
- **コントローラ**
  - dSPACE社コントローラ

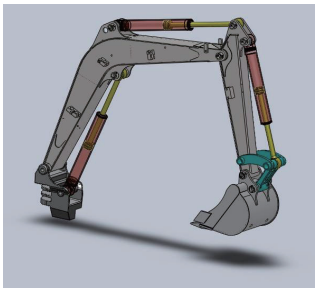


6

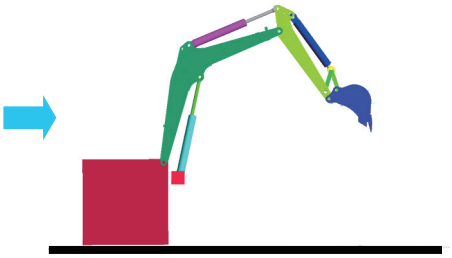
操作GUI



動力学シミュレータ



CADモデル

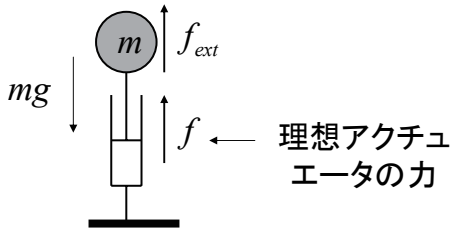


シミュレーションモデル

力制御について

■ 簡単な例

$$m\ddot{r} = f - mg + f_{ext}$$



■ 目標する挙動

$m\ddot{r} = f_{ext}$ or $\bar{m}\ddot{r} = f_{ext}$

外部環境との自然な相互作用が可能

■ そのための発生力

$f = mg$ or $f = (m/\bar{m} - 1) f_{ext} + mg$

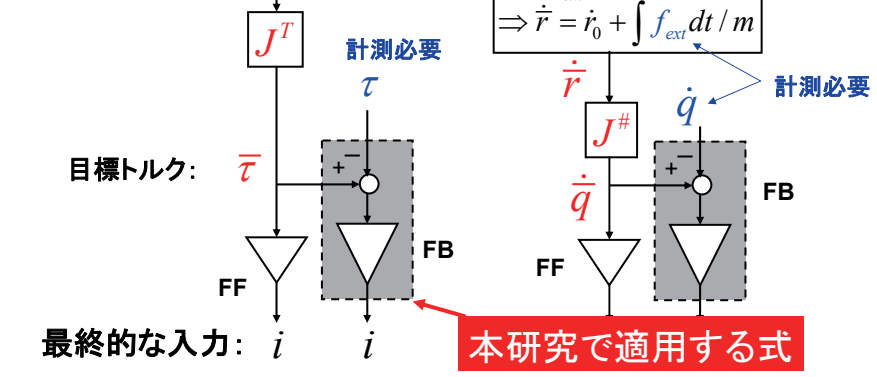
力の計測が必要

2つの実装方法

目標とする発生力 $\bar{f} = mg$

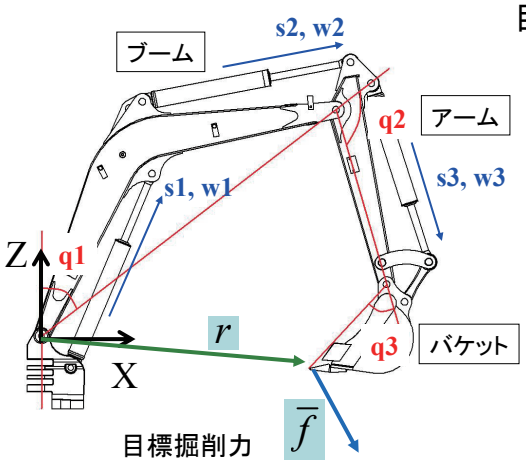
速度指令型

トルク指令型



力制御の制御則

■座標系



■制御則

目標関節トルク:

$$\bar{\tau} = G + J^T \bar{f}$$

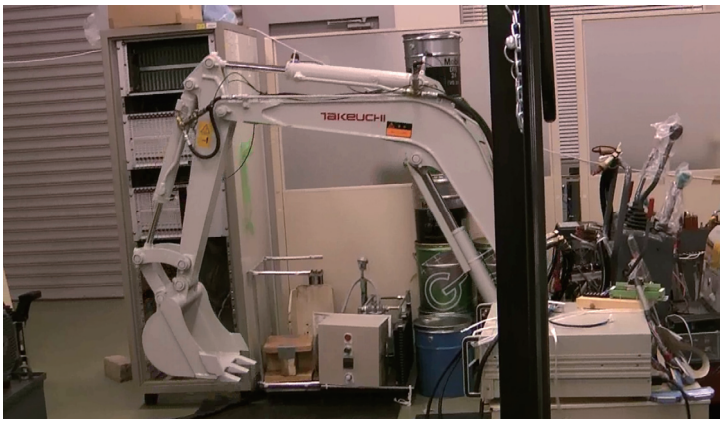
ここで

G:重力トルク

$J = \dfrac{\partial r}{\partial q}$:手先ヤコビ行列

前頁の実装方法で実現
（トルクは圧力から推定）

重力補償実験の結果



圧力は4MPa固定

自重を補償することで外力にしなやかに追従

研究目標の追加

■ 当初の目標
- シリンダの力制御
- 重力補償
- バケット先端の力制御

} 達成

■ 追加目標
- 上記に加え、操縦者の指令にできるだけ追従

■ 方策
- 力制御はコンピュータが担当
- 力制御と干渉しない空間に操縦者の入力を射影

解決方法（一例）

ロボティクスで良く知られた「冗長ロボット」の制御方法

$$\overline{\tau} = J^T \overline{f} + \mathrm{N}(J^T)\tau_u$$

τ_u：任意のユーザー指定トルク

ただし、N(·)は零化行列、#は擬似逆行列操作

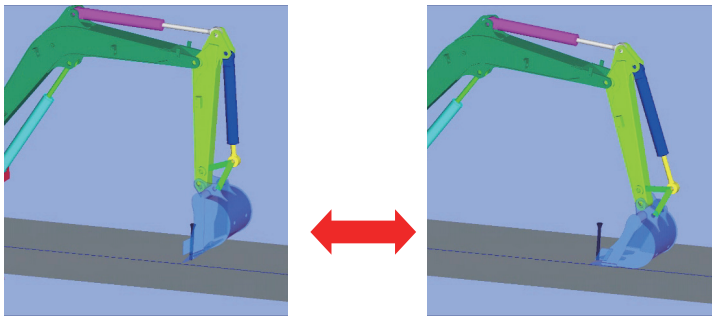
（参考）
速度制御の場合：$\overline{\omega} = -J^{\#}\dot{\overline{r}} + \mathrm{N}(J^{\#})\omega_u$

ω_u：任意のユーザー指定角速度

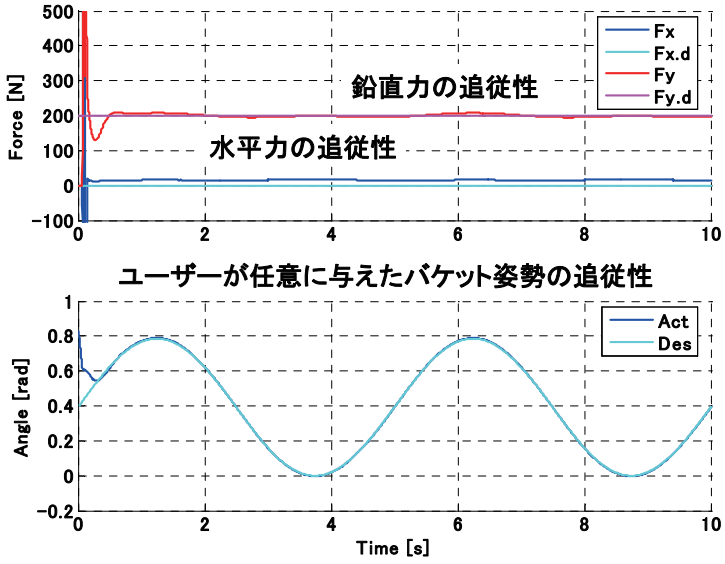
シミュレーション課題

■ 課題
- バケット爪から鉛直真下に200Nの目標作用力
- ユーザーがバケットの姿勢を入力（SIN波とする）

■ シミュレーション条件
- 1msのルンゲクッタ法
- ヘルツの接触力モデル
- 実機で関節トルク制御可能と仮定



シミュレーション結果



ユーザーが任意に与えたバケット姿勢の追従性

まとめ

■得られた成果
- ショベル高度化研究の環境を構築
- 圧力センサを用いた力制御を実装
- 重力補償と掘削力制御に成功
- オペレータ操作との融合方法を提案

■今後の課題
- 力制御を援用したショベル高度化のための アルゴリズム開発と実証実験
- 安価なシステムへのダウンサイジング
- 不整地重作業支援ロボットへの応用

謝 辞

本研究は日本建設機械施工協会の助成を受けて行われた研究です。深く感謝いたします。

また、研究にご協力いただきました
株式会社竹内製作所様、
ダイキン工業株式会社油機事業部様
に深く感謝いたします。

平成２４年度　シンポジウム実行委員会　名簿

（委員五十音順・敬称略）

	委員名	機関名	所属・役職
委員長	建山和由	立命館大学	理工学部　環境システム工学科　教授 工学博士
副委員長	高橋　弘	東北大学	大学院環境科学研究科環境科学専攻 教授　工学博士
委員	稲垣　孝	国土交通省	関東地方整備局　企画部施工企画課長
委員	小薬賢一	西尾レントオール(株)	東京支店　アドバイザー
委員	小室　洋	キャタピラージャパン(株)	販売促進部長
委員	斉藤秀企	コマツ	開発本部　商品企画室　ﾌﾟﾛﾀﾞｸﾄ･ﾏﾈｰｼﾞｬｰ
委員	竹内幸弘	(株)ﾄﾌﾟｺﾝｿｷｱﾎﾟｼﾞｼｮﾆﾝｸﾞｼﾞｬﾊﾟﾝ	テクニカルサポート部課長
委員	竹之内博行	(一社)日本建設機械施工協会	施工技術総合研究所　技師長
委員	田中利昌	日立建機㈱	建設システム事業部　技術部　部長
委員	玉石修介	(一社)日本機械土工協会	技術委員長　工学博士
委員	中島嘉幸	(株)アクティオ	取締役　東京支店長
委員	行川恒弘	(株)前田道路	工事事業本部工務部部長　機械センター長
委員	西脇徹郎	(一社)日本建設機械施工協会	標準部長
委員	藤野健一	(独)土木研究所	技術推進本部先端技術チーム　主席研究員
委員	前原信之	(一社)日本建設機械施工協会	技術部長
委員	増子文典	(株)大成建設	土木本部　機械部長
委員	溝口孝遠	コベルコ建機(株)	顧問　工学博士
委員	宮武一郎	国土交通省	総合政策局公共事業企画調整課　企画専門官

(一社)：一般社団法人

建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集（平成24年度版）

平成 24 年 10 月 26 日　　印刷
平成 24 年 10 月 26 日　　発行

編　集
発行所　一般社団法人　日本建設機械施工協会
〒105-0011　東京都港区芝公園３－５－８
（機械振興会館内）
ＴＥＬ　(03)3433-１５０１
ＦＡＸ　(03)3432-０２８９

複製厳禁

印刷所　(株)アクセス