

平成26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26年11月26日～11月27日

東京・機械振興会館

一般社団法人 日本建設機械施工協会

平成26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26年11月26日～11月27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、日刊工業新聞社、日刊建設工業新聞社、日刊建設
通信新聞社、日刊建設産業新聞社（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
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
委員	稲垣 孝	国土交通省	総合政策局公共事業企画調整課企画専門官
委員	小澤 学	日立建機（株）	戦略企画本部戦略企画室開発戦略部部長
委員	北山 孝	西尾レントオール（株）	取締役 通信測機営業部部長
委員	木下洋一	鹿島道路（株）	生産技術本部機械部次長
委員	小林真人	コベルコ建機（株）	技師長 企画管理部
委員	小室 洋	キャタピラー・ジャパン（株）	執行役員 販売促進部部長
委員	斉藤秀企	コマツ	開発本部 商品企画室 プロダクト・マネージャー
委員	須田幸彦	国土交通省	関東地方整備局 企画部施工企画課長
委員	竹内幸弘	(株)トプコンキアポジション・ジャパン	開発営業部テクニカルサポートグループ 課長
委員	鈴木嘉昌	西松建設（株）	土木事業本部 機材部長
委員	玉石修介	(一社)日本機械土工協会	技術委員長
委員	隼 直毅	(株) レンタルのニッケン	執行役員 広域統括事業部部長 関東支社長
委員	行川恒弘	(株)前田道路	工事事業本部 機械センター所長
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	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	西脇徹郎	(一社)日本建設機械施工協会	標準部長
委員	前原信之	(一社)日本建設機械施工協会	技術部長

(独)：独立行政法人、(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

目 次

○印 口述発表者

I 論文集

1. 放射線環境下における建設機械の自動運転システム	.....	1
鹿島建設 (株)	○三浦 悟、黒沼 出、浜本研一	
2. 無人化施工における俯瞰映像システムの開発	.....	5
(株) フジタ	○野末 晃、三村洋一、小幡克実	
3. セメント系地盤改良における排泥処理システムの開発		
ー無機系特殊固化剤を用いた排泥の安定処理技術ー	.....	1 1
東亜建設工業 (株)	○大野康年、泉 信也、今尾佳貞 東北大学 高橋 弘 (株) 森環境技術研究所 森 雅人 (有) カワセツ 江草清行	
4. 既設戸建住宅に適用可能な高圧噴射攪拌工法の開発		
ー楕円状コラムの築造を可能とする Miny マルチ工法ー	.....	1 3
前田建設工業 (株)	○川西敦士、山内崇寛 (株) ミヤマ工業 宮 朗	
5. 圧入工法による災害復旧・復興工事についてー旧北上川護岸工事ー	.....	1 7
(株) 技研製作所	○木村育正	
6. 自動追尾式トータルステーションによる地盤改良機誘導管理システム	.....	2 1
(株) 大本組	○坪田裕之、小野寺顕彰、西倉威弘	
7. 振動ローラの自律転圧走行の実証ー次世代無人化施工システムの開発ー	.....	2 5
大成建設 (株)	○青木浩章、宮崎裕道、片山三郎	
8. 重機遠隔操作における 3D スキャナーの活用	.....	2 9
清水建設 (株)	○藤吉卓也	
9. TS を用いた出来形管理の護岸工への適用に向けた検討ーブロック張		
護岸での計測手法立案及び現場試行による省力化効果等の検証ー	.....	3 3
国土技術政策総合研究所	○近藤弘嗣、長山真一 (一社) 日本建設機械施工協会 椎葉祐士	
10. シームレス補正機能を備えた転圧管理システム		
ーGNSS 情報遮断時の慣性/TS 補正切り替えシステムの開発ー	.....	3 7
鹿島道路 (株)	○伊藤圭祐 (株) トライテック 梶原泰樹	
12. MC 施工を前提とした出来形計測 (計測許容範囲拡大) 手法の効果検証	.....	4 1
国土交通省関東地方整備局	○山本啓介、二瓶正康 (一社) 日本建設機械施工協会 竹本憲充	
13. 効果的な除雪を行うための除雪車位置情報を活用した除雪施工の検証	.....	4 7
(独) 土木研究所 寒地土木研究所	○小宮山一重、大槻敏行、佐藤信吾	
14. 3D-CAD を用いた簡易な土工事施工支援システム	.....	5 1
西松建設 (株)	○原 久純、佐藤靖彦、田中 勉	

15. センタータワー方式によるアルミドーム屋根の組立架設			
－昇降ロボットジャッキ「FCF」を用いた構築システムを開発－	・・・・・・・・	5	5
(株) フジタ	○本多 茂、三村洋一、池内俊裕		
16. 6 6 時間型枠存置が可能な新型テレスコピックセントルの開発	・・・・・・・・	5	9
鹿島建設 (株)	○重永晃洋、西岡和則、手塚康成		
17. 広幅断面バケット式掘削機の開発と実施工への適用			
－高崎線桶川・北本間二ツ家こ道橋新設工事 HEP&JES 工法－	・・・・・・・・	6	5
鉄建建設 (株)	○泉 宏和		
東日本旅客鉄道 (株)	中山泰成		
(株) ジェイテック	鈴木英之		
18. 真空条件下におけるレゴリスシミュラントと金属材料の摺動接触	・・・・・・・・	6	9
明石工業高等専門学校	○松本和彦、江口忠臣		
19. 舗装工の追加転圧における振動タイヤローラの適用			
－25ton タイヤローラと 9ton 振動タイヤローラの比較－	・・・・・・・・	7	3
酒井重工業 (株)	○眞壁 淳、内山恵一		
(株) 高速道路総合技術研究所	加藤 亮		
20. 配筋自動判定システムの開発	・・・・・・・・	7	7
(株) 大林組	○池田雄一、坂上 肇、浜田耕史		
21. 端面掘削方式を用いた多段型掘削機の掘削効率に関する研究	・・・・・・・・	8	3
呉工業高等専門学校	○重松尚久		
愛媛大学	室 達朗		
(株) スターロイ	小田 登		
22. 振動締固め機械に搭載された加速度応答システムの適用性	・・・・・・・・	8	7
(独) 土木研究所	○橋本 毅、茂木正晴、藤野健一		
23. シールドマシンにおけるビットの再利用技術	・・・・・・・・	9	1
大成建設 (株)	○高倉克彦		
(株) 丸和技研	佐々木誠		
有明工業高等専門学校	岩本達也		
24. シールド機二重回転カッター構造に関する実験結果の報告			
－大断面シールド機における高速施工と省エネの技術開発－	・・・・・・・・	9	5
前田建設工業 (株)	○安光立也、篠原慶二		
早稲田大学	小泉 淳		
25. 鶴見川多目的遊水地における PCB 廃棄物の現地無害化处理			
－ジオスチーム TM 法による都市部での施工事例－	・・・・・・・・	10	1
(株) 鴻池組	○縁田正美、柏熊伸治、橘 敏明		
26. バイオディーゼル燃料を使用した場合の排出ガス計測について			
－車載型排出ガス計測装置を使用した計測事例－	・・・・・・・・	10	7
(独) 土木研究所	○杉谷康弘、藤野健一、橋本 毅		
27. ドラグ・ショベルの斜面降下走行に関する基礎的検討	・・・・・・・・	11	1
(独) 労働安全衛生総合研究所	○堀 智仁、玉手 聡		
28. 大型建設機械等の設置における簡易な現場地耐力試験の提案	・・・・・・・・	11	5
(独) 労働安全衛生総合研究所	○玉手 聡、堀 智仁		
(株) 竹中工務店	錦古里洋介		

29. インバートストラット施工における無人化機械の開発 119
清水建設(株) ○藤内 隆、鈴木正憲
エフティーエス(株) 徳川順一
30. タワークレーン用制震装置の開発 123
(株)竹中工務店 ○竹内誠一、菅田昌宏
31. RFID(非接触型自動認識技術)を利用したバッテリーロコのトリプル
セーフティの導入及び総合運行管理—トンネル坑内の安全を目指して— 129
清水建設(株) ○吉澤尚志
新トモエ電機工業(株) 瀬戸啓助
協立電機(株) 平口進也
32. カメラを搭載した小型無人飛行船による高所の目視検査 133
足利工業大学 ○仁田佳宏、石田正美
戸田建設(株) 渡壁守正
33. コンクリート構造物非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法 137
桐蔭横浜大学大学院 ○杉本恒美
佐藤工業(株) 歌川紀之
明篤技研 片倉景義
34. 傷んだアスファルト舗装を簡易に補修する工法機械の開発 143
大成ロテック(株) ○越村聡介、平野 晃、田中 純
35. 冬期路面对策における防滑材の定着性向上を目的とした加熱水混合散布手法 149
(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○中村隆一、住田則行、切石 亮
36. 積雪寒冷地の冬期歩道における雪氷路面処理技術について 153
(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○三浦 豪、牧野正敏、井谷雅司
37. 解析を援用した弾性波法による接着系あと施工アンカー固着部の
接着剤充填状況の非破壊評価手法 157
立命館大学 ○内田慎哉
大阪大学大学院 鎌田敏郎
西日本高速道路(株) 宮田弘和
38. 河川ポンプ設備における状態監視技術に関する研究
—潤滑油分析による診断— 163
(独)土木研究所 ○上野仁士、藤野健一、山尾 昭

II 梗概集

II-1 ポスターセッション要旨

1. 音響探査法を用いたコンクリート構造物の検査 169
佐藤工業 (株) ○歌川紀之
桐蔭横浜大学 上地 樹、杉本恒美
2. 橋梁点検における機械施工の効率化の提案ー危険作業の軽減と
点検時間の短縮で現場作業革新する高性能遠隔橋梁点検車「橋竜」ー 171
(株) カナモト ○友野洋平、澤 幸男
(株) 帝国設計事務所 若山昌信
3. クレーン仕様バックホウの安全対策ーバックホウ横転事故の撲滅ー 173
(株) アクティオ ○今関政美、稲葉誠一
4. 狭隘地での施工を可能とした液状化対策工法の紹介
ー砂圧入式静的締固め工法：SAVE-SP 工法ー 175
(株) 不動テトラ ○深田 久
5. 既設戸建住宅に適用可能な高圧噴射攪拌工法の開発
ー楕円状コラムの築造を可能とする Miny マルチ工法ー 177
前田建設工業 (株) ○川西敦士、山内崇寛
(株) ミヤマ工業 宮 朗
6. 油圧ショベル双腕仕様機による災害対応 179
日立建機 (株) ○小俣貴之、江川栄治
7. ジェットポンプ式サンドバイパス工法
ー海岸の堆砂・侵食問題を効率的に解決するー 181
五洋建設 (株) ○岡田英明
8. 防潮堤法面用護岸ブロック専用吊具の開発
ーより安全で、スムーズな法面護岸ブロックの据付作業 183
玉石重機 (株) ○濱山裕司、片岡廣志、山口勇治
9. 微細藻の破碎効率化のための超音波照射方法の検討 185
東京工業大学大学院 ○蜂谷修平、松本秀行
10. 高速施工・大径化を可能とした高圧噴射攪拌工法の紹介
ーFTJ (エフツインジェット) 工法ー 187
(株) 不動テトラ ○深田 久

II-2 研究開発助成成果報告

1. 掘削バケット前方埋設物の地中レーダ監視システムの開発	.....	189
群馬大学大学院 教授		三輪空司
2. 超広帯域通信 I C タグと 3 次元モデルを用いた建設施工管理システム	.....	198
大阪大学大学院 教授		矢吹信喜
3. 無人化施工の効率・安全を高める映像注目支援に関する調査研究	.....	221
早稲田大学創造理工学部 教授		亀崎允啓
4. 動電式加振器のコンクリート構造物地震時損傷評価への応用	.....	223
東北大学大学院 教授		鈴木基行 内藤英樹

I 論文集

1. 放射線環境下における建設機械の自動運転システム

鹿島建設(株) ○ 三浦 悟
黒沼 出
浜本 研一

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の原子炉建屋解体・がれき撤去工事で発生する高線量がれきの構内保管施設への搬送作業は、これまで遠隔操作型や放射線遮蔽型の建設機械を導入することで、搬送作業時の被ばく線量低減が行われてきた。しかし、現地での作業環境は依然厳しく、より一層の被ばく低減と作業効率の向上、遠隔操縦等で問題となるオペレータの誤操作を無くすための改善は常に追い求めて行かなければならない課題であった。これに対し搬送作業に用いられるクローラダンプおよびフォークリフトの走行機能を自動化する検討を進めた結果、最新の計測技術、制御技術を適用して、障害物や経路を自律的に認識、判断しながら既設走路上を自動で走行するシステムを開発し、実作業に適用するに至った¹⁾。

2. 搬送作業について

高線量がれきの構内保管施設への搬送作業は、建屋解体場所で高線量がれきを鋼製コンテナに積み込み、構内保管施設まで運び、保管施設のコンテナ貯蔵場所に荷下ろしを行う(図-1)。この搬送作業は、2種類の建設機械を用いて行われており、そのうちの各機械の走行を対象に自動化を検討した。

a. クローラダンプ

原子炉建屋から構内保管施設まで鋼製コンテナを屋外搬送する(図-1 上側、走行距離は約1km)。

b. フォークリフト

構内保管施設の外で鋼製コンテナを受け取り、施設内地下に格納する(図-1 下側、走行距離約800m)

3. クローラダンプ自律走行システム

3.1 導入目的

従来の屋外搬送は、図-2の配置で、オペレータが先導車の後部に遠隔操作型クローラダンプ(車両重量16.4t、最大積載荷重11t、車両全長6.0m、車両全幅3.5m)と対面するように後ろ向きに搭乗し、遠隔操作によって運転していた。作業中の被ばく線量を抑えるために、クローラダンプからできるだけ離れた位置から操作してするのだが、狭隘な場所では機体の周囲状況などを目視で確認す

るため、クローラダンプに近づいて操作しなければならない状況も生じていた。そこで、被ばく線量低減のために一定以上の距離を保つとともに、作業効率の向上、オペレータによる誤操作防止を目的に、自律走行システムの開発を行った。

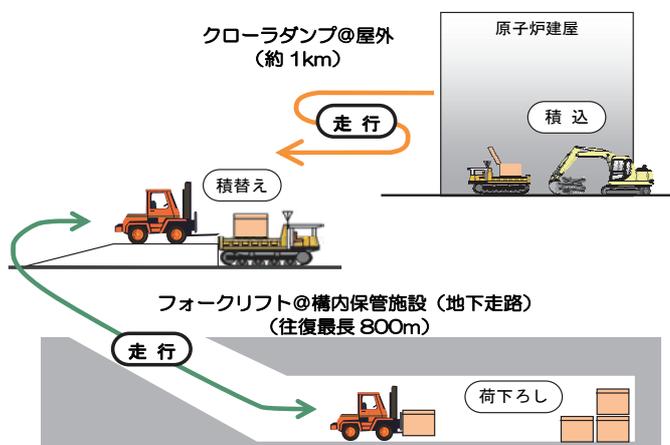


図-1 搬送システムの概要



図-2 従来のクローラダンプによる搬送作業

3.2 システム概要

図-3に自律走行に必要な各種センサ、制御機器、及び通信機器を設置したクローラダンプの外観を記す。主な機器の種類と用途は以下の通りである。

- ・センサ機器
 - ー RTK-GPS：機体位置計測
 - ー GPS 方位計：機体方位計測
 - ー ジャイロ・加速度センサ：機体位置と機体姿勢計測の補間
 - ー レーザスキャナ(2箇所)：前方、側部の障害物検知、安全監視
 - ー 車載カメラ(5箇所)：周囲状況・安全確認
- ・制御機器：自律走行制御用コンピュータ
- ・通信機器：RTK-GPS 補正データ通信用無線、センサ・システムのモニタ用無線 LAN



図-3 クローラダンプ外観



図-4 監視・指示システム（先導車内）

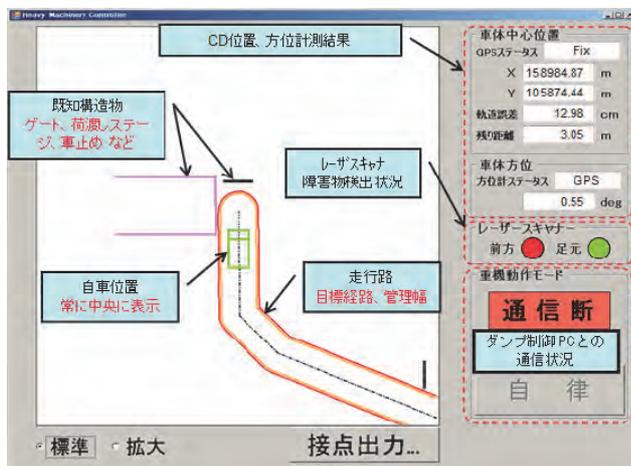


図-5 自動運転状況のモニタ画面

なお、RTK-GPS 並びに GPS 方位計を用いているため、機体の絶対位置、絶対方位の計測頻度は 10Hz であった。本システムでは、自律走行時の安全性・安定性を確保するため、これらのデータをジャイロ・加速度センサによって補間し、高速 (100Hz) で出力できるように改良して用いている。

クローラダンプは先導車のオペレータからの指示により、後述する走行制御ステップに従って自律走行を開始する。目標経路に対する機体の位置、

方位、障害物検出状況、及び車載カメラの映像は、無線 LAN を通じてリアルタイムに先導車に送信され、モニタや PC 画面上へ表示される (図-4, 5)。自律走行中は計測データや映像を監視するだけとなりオペレータが機体に接近する必要はなくなる。

3.3 走行制御方法

クローラダンプが目標経路に追従して走行するための制御方法について図-6 を用いて説明する。予め現地測量により目標経路を設定する (目標経路の折れ点部を中継点、最終端を最終目標点と呼ぶ)。また、機体位置と目標経路からの離隔 (追従誤差と呼ぶ) に対し、走路の状況・幅に応じた各区間の管理幅及び限界幅を設定する。事前準備をした後、次の制御ステップで走行制御を行う。

Step 1) 目標経路上に設定したクローラダンプの前方直近にある中継点を目標点として設定する

Step 2) 目標点の方向に機体の向きを合わせる

Step 3) 直進走行する。走行中に、

Case1: 追従誤差が管理幅に達した ⇒ Step 2 へ

Case2: 追従誤差が管理幅を超えた or 障害物を検知、接触可能性あり ⇒ 非常停止し、カメラ等で確認 ⇒ 遠隔操作に切替えて運転する

Case3: 中継点に到達した ⇒ 次の中継点を目標点に設定し、Step 2 へ

Case4: 最終目標点に到達した ⇒ 停止

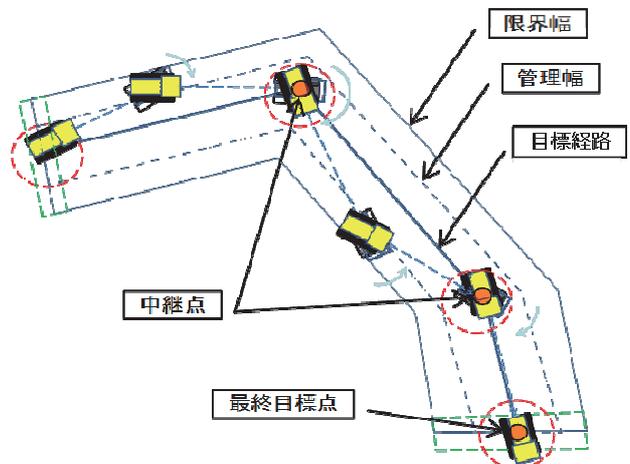


図-6 走行制御のイメージ

3.4 導入効果

自律走行中は、オペレータは計測データモニタ・車載カメラ監視により、クローラダンプの走行状況を直接目視で確認することが不要となり、従来は 30m 弱だった離隔距離を 100m 程度まで離すことができ、オペレータの被ばく線量を大幅に低減させることができた。さらに誤操作の恐れもなく、運転熟練度の違いによる作業時間のバラツキを抑制することが可能となった。

4. フォークリフト自律走行システム

4.1 導入目的

高線量がれきが搭載された鋼製コンテナを構内保管施設に搬送、定置する作業には、遠隔操作型フォークリフト（図-7：車両重量 16.4t，定格荷重 8.5t，車両全長 6.3m，車両全幅 2.4m，最少巡回半径 4.1m）が採用されたが、狭い屋内通路での搬送作業のため、オペレータの誤操作及び作業効率の低さが懸念されていた。そこで安全性を確保しつつ、搬送作業の目標サイクルタイムを確保する対策として、自律走行システムを開発した。



図-7 フォークリフト全景

4.2 システムの特徴

本システムの特徴として、GPS が使えない屋内での車体位置計測にレーザスキャナによる自己位置認識技術を採用したことがある。製造工場等で実績のある電磁誘導方式では走行路に誘導線を埋設する工事が必要であり、走行ルートにも制限があるため、本件への適用は困難であった。そこで、事前工事が不要かつ走行路の変更に伴う構造物や機械等への工事・改造が不要であるレーザスキャナによる位置・姿勢角計測方法を開発し適用した。

4.3 システム概要

クローラダンプで運んだ鋼製コンテナをフォークリフトに積替え、構内保管施設内に定置する作業の内、コンテナの積替え・定置はオペレータが遠隔操作で行い、それ以外の斜路の上り下り、直線・切返し部の走行を自動化した。なお、保管施設の走路は、壁面設備を考慮するとフォークリフト車両幅に対し左右約 1.0m の余裕幅であった。

保管施設には有線及び無線による LAN を構築し、運転操作は施設から約 500m 離れた建物内の遠隔オペレータ室から行うことができる（図-8）。遠隔操作システムと自律走行システムの構成を図-9 に示す。図-9 の左側に遠隔オペレータ室内に設置している機器の機能を、図-9 の右側にフォークリフトの車体キャビン内に設置している機器の機能を示している。それぞれの機器は LAN を通じて通信している。また図-9 の下側を破線で囲んだ部分が遠隔操作システムであり、図-9 の上側が開発し



図-8 遠隔オペレータ室

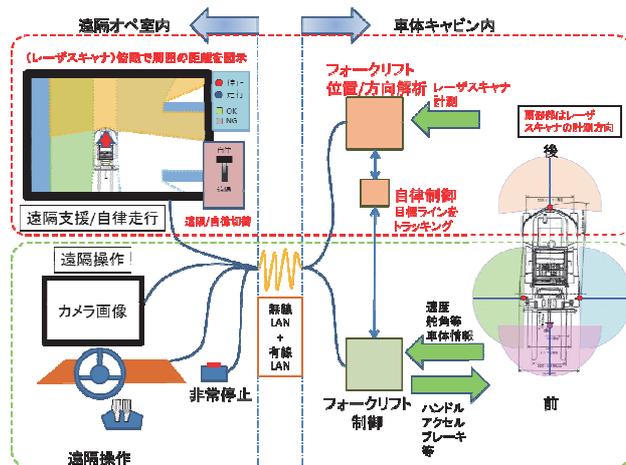


図-9 遠隔操作・自律走行システムの構成

た自律走行システムである。

4.4 レーザスキャナによる位置・姿勢角計測方法

レーザスキャナにはSICK社製LMS111を採用した。本センサは270度（正面より左右135度）の範囲を0.5度毎に25Hzのサンプリング周期で計測することができる（図-10）。

本システムでは、パーティクル・フィルタを用いてフォークリフトの施設内での相対位置や姿勢角を推定している²⁾。まず、フォークリフトのステアリング角度及び速度データを基に車両の確率的な運動モデルを用いて各パーティクルの推定位置・姿勢角及びその推定確率を求める。得られた推定位置・姿勢角に対し、レーザスキャナ計測データ（図-11左）を施設内の壁に反射して得られたものと考え、CAD図面などの事前に得られた構造物形状から作成した2次元地図データとの照合確率を求める。位置・姿勢角の推定確率とレーザスキャナ計測データの照合確率から各パーティクルの適合確率を求め、フォークリフトの施設内での相対位置・姿勢角を全パーティクルの期待値として推定している（図-11右）。

相対位置・姿勢角を推定するサイクルタイムは0.05秒以内であり、フォークリフトの動特性に対して、十分リアルタイムな推定をすることができ

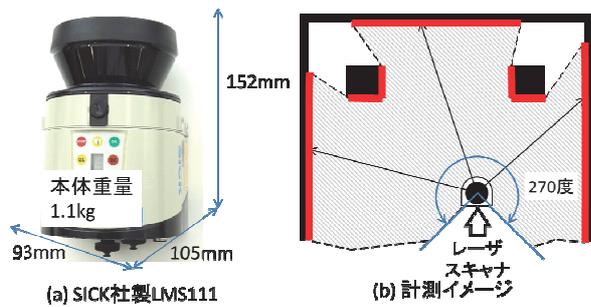


図-10 レーザスキャナ諸元と計測イメージ

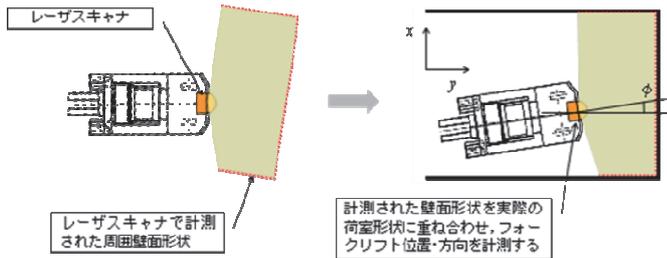


図-11 相対位置・姿勢角の推定

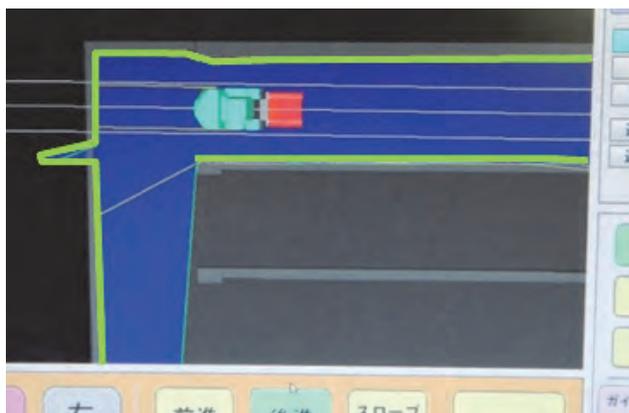


図-12 施設内走路内のCG画面

る。本システムではレーザスキャナを機体の前後左右の4か所に配置し、位置・姿勢角計測及び障害物の検知を行っている。

図-12は施設内通路を走行している機体を、レーザスキャナデータから推定した位置・姿勢角計測結果を基に描いたCG画面を示す。灰色の濃淡は施設の床と壁を表し、青色領域はレーザスキャナの計測範囲で、緑線は計測された形状である。事前に施設の床と壁を地図化して与え、パーティクル・フィルタで得られた位置・姿勢角を基に機体とレーザスキャナ計測データを描いているが、レーザスキャナ計測データと施設内の壁の位置が一致しており、相対位置・姿勢角を正しく推定していることが分かる。

4.5 走行制御方法

制御サイクルタイムは、位置・姿勢角計測のサイクルタイムから約0.05秒である。ハンドル角指

令値は、フォークリフトの相対位置・姿勢角を計測後、予め定めた目標ラインからの誤差変位および誤差方向を求め、フォークリフトが追従するようにPI制御を用いて計算している(図-13)。走行速度はスロープ部上り・下り、直線部及び切返し部のそれぞれに対して速度指令値を設定し、指令値を切換えて制御している(作業サイクルタイム等から平均走行速度は約2km/hである)。

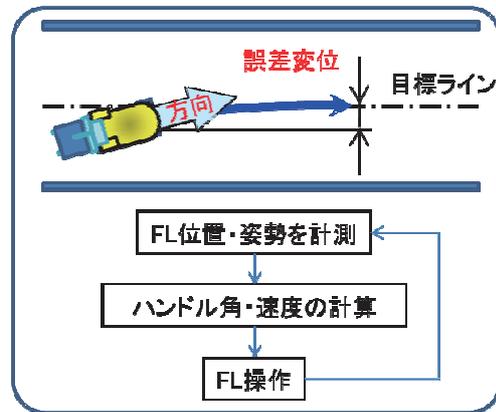


図-13 走行制御概要

4.6 導入効果

高線量がれきを抱えた状態での狭隘部の走行、方向変換を遠隔操縦で行うことは、オペレータにとって緊張感を維持させなければならない過酷な作業であったが、それを自動化したことで、クローラダンプ自律走行システムと同様に、本システム導入の結果、オペレータの熟練度に関係なく一定時間で搬送作業工程を完了できるようになったとともに、コンテナの積替え・定置に専念することが出来るようになり、負担低減が図れた。

5. おわりに

本報告では、東電福島での高線量がれき搬送システムにおいて開発したクローラダンプ自律走行システムとフォークリフト自律走行システムの目的、構成機器及び導入した自律走行機能について概説した。本開発システムは、被ばく線量低減だけでなく、緊迫した状況下での遠隔操作におけるオペレータの心理的疲労を軽減し、誤操作を無くし安全性を高めることを目指して導入した。本システム適用の効果については現在搬送作業を進める中で確認していく予定である。

参考文献

- [1] 三浦悟, 日比康生: 放射線環境下における搬送作業の自動化, 土木施工, Vol. 54, No.1, pp.52-55, 2013
- [2] S. Thompson et.al: Constrained 6DOF Localization for Autonomous Navigation of a Golf Cart, ロボティクス・メカトロニクス講演会2013講演論文集, pp.1A2-103 (1) - (4), 茨城県つくば市, May, 2013

2. 無人化施工における俯瞰映像システムの開発

株式会社フジタ ○野末 晃
三村 洋一
小幡 克実

1. はじめに

2011年の東日本大震災をはじめとし、わが国では土砂災害や火山噴火などの自然災害が多数発生している。自然災害への迅速な対応は重要な事柄であるが、その一方で災害区域での有人作業には二次災害の危険性が指摘されている。この観点から、現在ではオペレータが遠隔地から建設機械を操作する無人化施工の技術導入が盛んに進められている。

しかし、無人化施工は遠隔操作での作業となるため、有人作業と比べて作業効率が低くなる問題がある。その要因として視覚の問題が29%と最も高く、その中でもカメラ位置の問題が44%であり最も高いとされている¹⁾。よって、無人化施工での作業効率を高めるためには視覚の問題解決が極めて重要である。

現在の無人化施工は、安全な区域にある遠隔操作室から危険区域にある建設機械を搭載カメラと移動カメラ車や固定カメラの映像を見ながら遠隔操作している。

本論文ではこの移動カメラ車や固定カメラの映像の代わりに魚眼レンズカメラによる俯瞰映像を利用した新たな試みを提案し、俯瞰映像の特性評価を報告するものである。なお魚眼レンズカメラを用いた俯瞰映像提示システムは、東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻の浅間研究室で研究開発しているもので、建設機械への搭載実験を当社と共同研究している。

2. 魚眼レンズカメラによる俯瞰映像

2.1 開発の目的

従来の遠隔操作のための映像提供は車載カメラ1～2台と外部環境としての固定カメラ2～3台、移動カメラ2台の組み合わせが主流である。本格的な復旧工事であれば工期も予算も豊富で良いが緊急対応工事には適さない。そこで外部環境用映像の代替手段として最近自動車の駐車誘導ツールとして開発されたアラウンドビューモニターの原理を利用して、建設機械に簡易に取り付けが可能な俯瞰映像提示システムを開発した。

2.2 魚眼レンズカメラによる俯瞰映像の概要

固定カメラや移動カメラの代わりに建設機械の前後左右4方向に取り付けた魚眼レンズカメラの映像を合成し、擬似的に建設機械を上から眺めた映像を生成し遠隔操作者に提示する。また搭載カメラの映像も正面に取り付けた魚眼レンズカメラの映像から正射影に投影した映像を作成して提示する。

さらに通常搭載カメラが2台ある場合は、掘削箇所とブーム全景の映像と足元やバケットのズーム映像の組み合わせとなる。これを魚眼レンズカメラ1台の映像でカメラの画角や方向を画像処理により自由に変更することが出来る。当然、カメラを切り替えることも不要で同時に複数の映像を表示することが可能である。

図-1に俯瞰映像提示システムのイメージを示す。

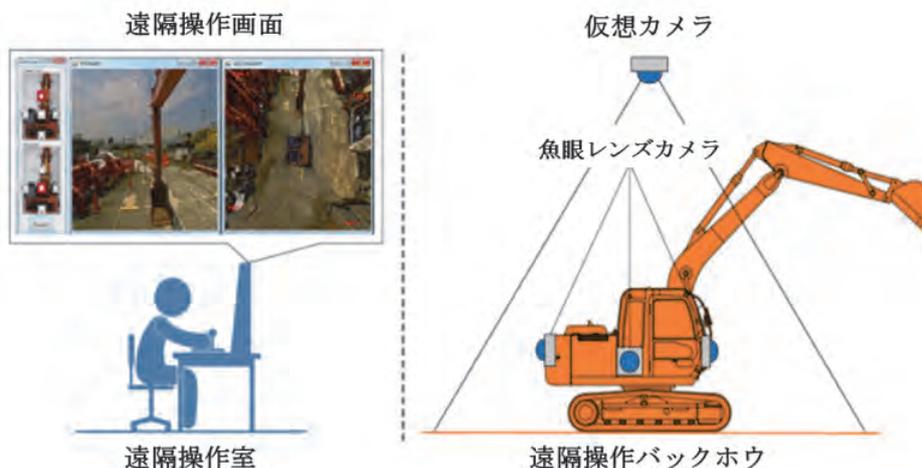


図-1 俯瞰システムの概念

図-2 に魚眼レンズカメラのオリジナル画像と合成後の俯瞰画像を示す。

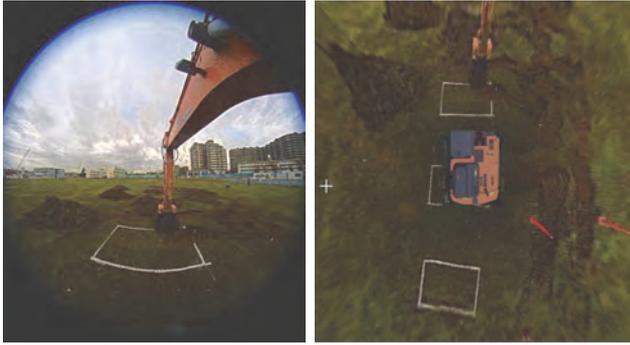


図-2 魚眼レンズカメラ俯瞰映像

2.3 俯瞰映像の生成フロー

俯瞰映像生成のフローを図-3 に示す。

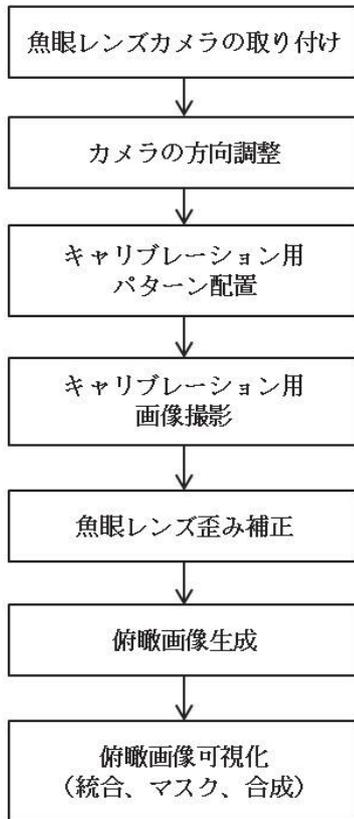


図-3 俯瞰映像生成フロー

今回採用している魚眼レンズの仕様を表-1 に示す。

表-1 魚眼レンズカメラの仕様

インターフェース	USB1.1	映像素子	CMOSセンサー
画像圧縮方式	JPEG	画素数	170万画素
解像度	640×480	最大フレームレ	最大15fps
	1536×1536	視野角	180°
焦点距離	10mm~∞	動作環境	温度0℃~40℃, 湿度20%~80%

キャリブレーション作業は魚眼レンズカメラを

建機の前左右に取り付けた後の方向調整が合成精度に関わる重要な作業である。図-4 に魚眼レンズカメラの取り付け、図-5 に方向調整用画面と調整作業状況を示す。



図-4 魚眼レンズカメラの取り付け



図-5 方向調整用画面と調整作業

実験当初はキャリブレーション作業のために地面に格子枠線を引いていたが作業時間も多大で実験の度に線を引きなおす手間が課題であった。(図-6 参照) 現在は、図-7 のようにパターン標識板を作成し、ある条件下の元で任意の場所に置く方法に改良した。

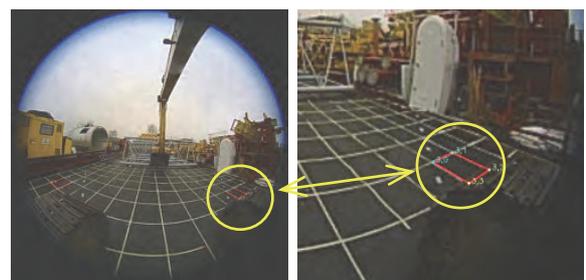


図-6 キャリブレーション用格子枠線

図-7に各方向のキャリブレーション用画像を示している。建機の四隅に正方形のパターン標識板を置き、図-5の方向調整用モニターで2枚ずつ標識板が写るように位置を調整してから撮影する。撮影した各画像を図-3のフローに従いキャリブレーションを行う。レンズの歪み補正後にホモグラフィ行列による射影変換を行い4画像に統合する。これら各変換式のパラメータを建機のPCに投入することで、リアルタイムに俯瞰画像が生成されモニタに表示される。

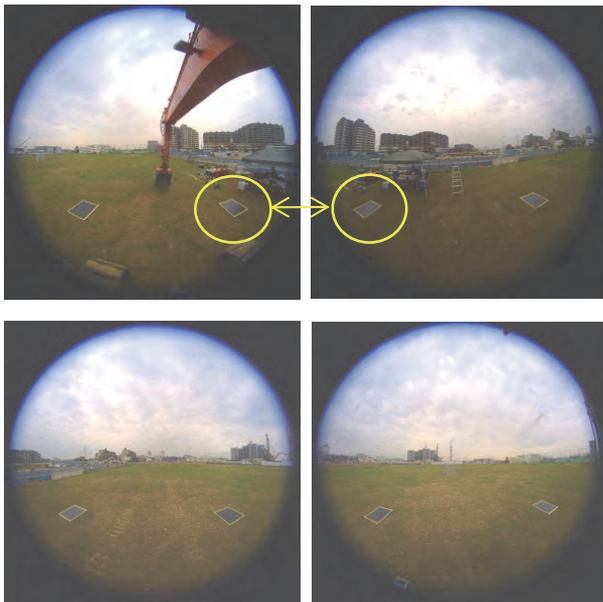


図-7 キャリブレーション用画像

掘削作業用に追加した前方の魚眼レンズカメラ画像を正射影変換した画像と完成した俯瞰画像を図-8に示す。なお俯瞰画像生成の詳細は文献³⁾に記載されている。



図-8 掘削用前方画像と完成後の俯瞰画像

2.4 俯瞰映像の特性調査

俯瞰映像を用いた油圧ショベルの遠隔操作の評価実験は、工場敷地内において基礎実験（2013年5月）と造成現場において障害物走行・掘削作業実証実験（2013年11月）をおこなっている。これらは文献³⁾で詳細に報告されているので、ここでは当初から懸念事項であった項目の調査結果を報告

する。

2.4.1 基礎実験での特性調査

以下の5つの懸念事項に関して調査実験を行った。図-9に実験状況を示す。

- ① 地盤の傾斜に対する認識
- ② 地盤の段差に対する認識
- ③ 車体の傾きに対する認識
- ④ 車体の振動に対する認識
- ⑤ 遠隔操作が可能な表示遅延量か

調査実験の結果、以下のことが判明した。

- ① 車体から遠いほど高さが誇張されるが傾斜していることは認識できる。
- ② 地面から80cmの高さの場合、約長さ2倍、面積4倍に誇張されることが判明した（図-10の左図参照）。これは遠近感としては過大表示になる傾向である。
- ③ 認識は可能である。
- ④ 認識は十分可能である。
- ⑤ 1,100msの遅れがある。ビデオコンバータと無線LANの遅れが350msとして俯瞰映像生成処理遅延は750msと推定される。文献⁴⁾によると映像伝送の遅れは1.5秒が限界とされていることから1.1秒は評価できる値である。

なお、評価方法は①から④については各条件のもと俯瞰映像の画面を録画し、それを再生して定性的に評価した。⑤表示遅れの測定方法は文献²⁾と同じ測定方法で測定した。PC-Tの画面に時間とフレーム番号を表示させて、魚眼レンズカメラで撮影したビデオ信号を俯瞰画像生成サーバPCに取り込み、生成した俯瞰映像をクライアントPCに伝送する。クライアントPCが俯瞰映像を表示している画面とPC-Tの画面が両方映るようにビデオカメラで撮影し録画する。録画した映像を1コマずつ再生してフレーム番号の差を記録することで測定した。PC-Tの表示間隔が60Hzとビデオ録画を60fpsに合わせれば1コマ16.7msの分解能で計ることができる。（図-11, 12参照）



図-9 俯瞰映像の特性調査実験



図-10 俯瞰映像の段差認識

2.4.2 走行・掘削実験での特性調査

走行・掘削実験においても懸念事項の調査実験を行った。基礎実験から6ヵ月経過しているためソフトの改良とビデオコンバータの開発により良い結果が得られた。改良点は、俯瞰映像生成と映像の圧縮・伸張処理の処理速度向上である。

①～④に関しては俯瞰映像の採用する範囲を約2倍に拡大したため高低差の誇張が緩和された。これにより視野が拡張されリスクの認識が速まり安全性も向上した。(図-10の右図参照)

また、俯瞰画像の表示遅延は700ms程度となり400msの短縮が実現した。この内訳は、ソフト改良：60ms、高速PCの置換え：140ms、新規ビデオコンバータ：200msである。ソフト改良の効果が少ないのは魚眼レンズカメラのインターフェースが低速のUSB1.1であるためである。フレームレートが15fpsと低いのはインターフェースが原因と思われる。

図-12に走行・掘削実験の環境を再現した表示遅延量測定状況を示す。また、今回開発したビデオコンバータの仕様を表-2に記す。図-11に遅延量計測で50msを達成した状況を示す。

表-2 ビデオ変換機の詳細

インターフェース	HDMI
画像圧縮方式	H.264
解像度	1360×768
最大フレームレ	30fps
遅延量	50～100ms



図-11 ビデオ変換機の遅延測定

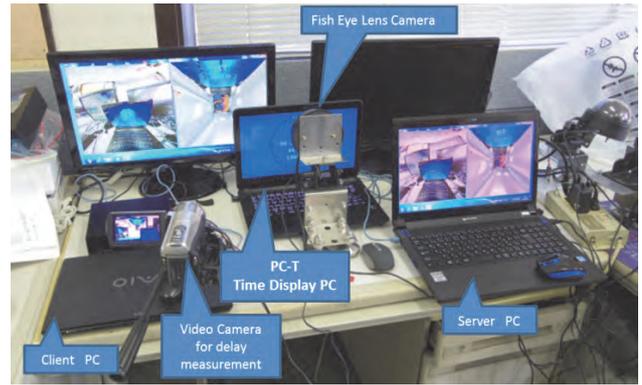


図-12 俯瞰映像の遅れ測定

2.6 特性評価のまとめ

俯瞰映像が遠隔操作で作業ができるかは文献²⁾で時間と精度で検証され、障害物走行に有効であるとしている。今回はその実証実験での課題や俯瞰映像特有の懸念事項について調査実験をおこなった。地山の状況の把握や車体の傾きの認識に関しては、問題が無いことが分かり、俯瞰映像の遅延量が700msであることから遠隔操作作業が可能であると判断した。

遅延量の減少を阻害している魚眼レンズカメラを高速版に換えることで遅延量減少とフレーム数(fps)が向上する可能性を見出した。

3. 俯瞰映像提示システムの高速化

3.1 表示遅延の要因調査

さらに遅延時間を減少させるためには、俯瞰映像の表示遅延の要因調査を行うことに効果があると考えた。図-13に遅延の要因毎に分けた構造図を示す。但し屋内試験のため有線で実施したので、無線伝送とH.264の伝送装置の遅延は含まれない。

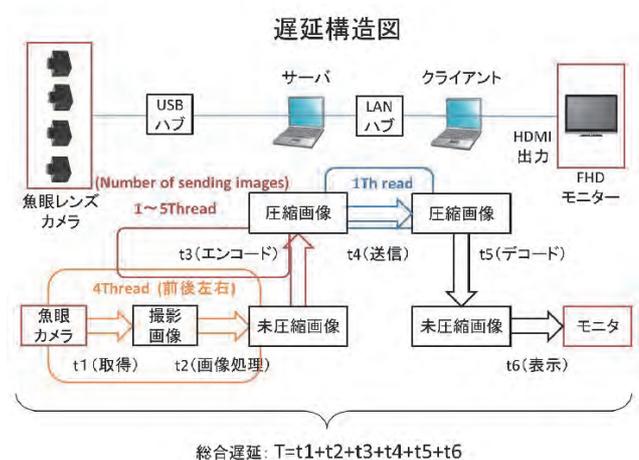


図-13 遅延構造図

以下の 6 要素の測定を行った結果、推測どおり魚眼レンズカメラの画像取得の処理時間が多いことが判明した。

- | | |
|----------|------------|
| 1) 画像取得 | t1 = 150ms |
| 2) 画像処理 | t2 = 70ms |
| 3) エンコード | t3 = 65ms |
| 4) 送受信 | t4 = 10ms |
| 5) デコード | t5 = 40ms |
| 6) 画像表示 | t6 = 40ms |

総合遅延 $T=t1+t2+t3+t4+t5+t6 = 375ms$

3.2 魚眼レンズカメラの変更

画像取得処理時間を短縮するために魚眼レンズカメラを USB3.0 のインターフェースの製品に変更することにした。また魚眼レンズもカメラに適合するレンズに変更した。表-3 にカメラとレンズの仕様を示す。図-14 にレンズとカメラの組立状況を示す。

表-3 レンズとカメラの仕様

レンズ仕様		カメラ仕様	
焦点距離	1.4mm	インターフェース	USB3.0
絞り範囲	F1.4~F16	映像素子	CMOSセンサー
フォーカス	固定	画素数	130万画素
アイリス	手動	解像度	1280×1024ピクセル
画角	185° (φ4.6mm)	最大フレームレート	最大60fps
使用温度	-10℃~+50℃	使用温度	0℃~45℃



図-14 USB3.0 魚眼レンズカメラ

4. テレビ会議用 2 眼合成カメラ映像の取り組み

最近、テレビ会議用に販売された 2 つのカメラレンズを合成して歪みの少ない 180°画角を実現した WEB カメラを利用して遠隔操作に与える効果を検討した。

4.1 カメラの仕様とソフト開発ツール

今回採用した WEB カメラの仕様を表-4 に記す。インターフェースとして UVC (Universal Serial Bus Device Class) に対応しているため開発ツール【Microsoft Visual C++ 2010 Express Edition OpenCV2.4.8(画像処理ライブラリ)】で簡易に取り込み表示ソフトを開発することができた。

表-4 カメラの仕様

インターフェース	USB2.0	映像素子	CMOSセンサー
動画フォーマット	MJPEG, YUY2	画素数	60万画素
解像度	1280×480ピクセル	最大フレームレート	最大30fps
フォーカス	固定	視野角	180°
焦点距離	70cm~∞	動作環境	温度5℃~40℃、湿度20%~80%

また、縦置きに設置した場合の 90°回転も数行のプログラム変更で可能である。

4.2 横に 2 台並べた方法

掘削作業用の映像と走行時の足元を映すための映像を上下 2 段に配置した状況を図-15 に示す。上段の映像は歪みも少なく 180°見渡せる。下段の映像は下向きに取り付けたためやや違和感がある。左右の映像の合わせ目はほとんどわからない。なお上下の画像は特に処理をしていないためずれている。



図-15 2 眼合成カメラレイアウト 1

図-15 ではブームが映らないのでブーム全体が映るように向きと位置を調整したのが図-16 の映像である。この映像は自然で違和感がない。



図-16 2 眼合成カメラレイアウト 2

4.3 縦横に 1 台ずつ取り付ける方法

1 台はブーム全体を映すために縦向きに取り付けてみた。(図-17 参照) 1 台のディスプレイに同時の表示したため、縦長の映像が小さくなってしまい解像度もすくない。2 台のディスプレイに分け

て表示してみないと評価できない。

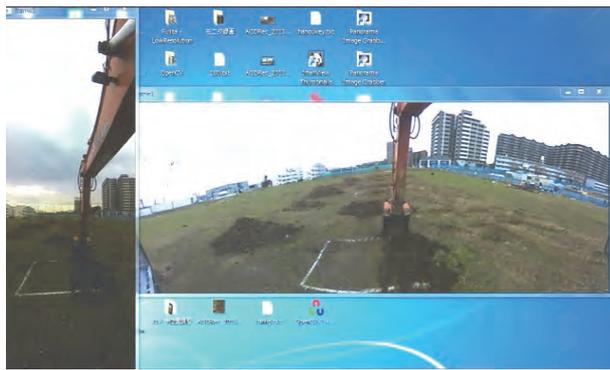


図-17 2眼合成カメラレイアウト3

4.4 横に2台並べるが1台は運転席内に取り付け

1台はオペレータの目線を確保するため運転席に取り付け、もう1台は足元のキャタピラ部が映る下向きに取り付けたのが図-18である。意外とオペレータには乗車している感覚があり好評であった。下の映像の縦の幅が広くなればよさそうである。



図-18 2眼合成カメラレイアウト4

4.5 本検討のまとめ

テレビ会議用2眼合成カメラの遠隔操作の採用とカメラの配置や向きについて検討した。取扱いや開発の容易さからかなり期待が持てる。今回はレイアウト検討だけであるが俯瞰映像と合わせて可能性を十分感じた。また、HDMI出力機能の画角170°のカメラも検討していく予定である。

5. おわりに

今回の特性評価実験は汎用油圧ショベルに外付け式の簡易遠隔操縦装置（九州地方整備局技術事務所と当社の共同開発）を搭載して行った。この装置との組み合わせで遠隔操縦専用機が無くても無人化施工が可能で、固定カメラや移動カメラ車等の設備が不要になることから早期工事の着手が

可能となるのが最大の強みである。すなわち魚眼レンズカメラによる俯瞰映像を利用した遠隔操作は、簡易遠隔操縦装置との組み合わせで緊急対応における復旧工事に有効であることが確認された。

今後は、魚眼レンズカメラの高速版に変更して遅延量を500ms以下に短縮することを目標に開発を続けていく予定である。また、掘削用の前方映像の画角や方向を画像処理技術の利用で自由に変更できる機能を追加する予定である。この機能があれば、掘削作業中は掘削箇所を、走行中は足元を、ダンプへの積み込み時は荷台の上方へと3台のカメラを1台のカメラで賄うことができるようになる。これらの開発後に今年の12月に雲仙普賢岳で実地検証する予定である。

2011年3月の東日本大震災以降、災害対策に関する研究開発の公募が急に増えているので、今後様々な技術開発が進むであろう。本稿が参考になれば幸いである。

本稿を作成するにあたり、東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻の浅間先生、山下先生及び研究室の方々とライテックス岡本氏、テレパワー鈴木氏、(株)フジタ東京支店津田沼区画整理作業所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) 山口崇, 吉田正, 石松豊, “遠隔操作におけるマンマシンインターフェースに関する実態調査”, 土木学会第59回年次学術講演会概要集, Vol. 59, pp. 373-374, 2004
- 2) 野末晃, 三鬼尚臣, 三村洋一, 藤岡晃, 組田良則: “携帯電話通信による超長距離遠隔操作の可用性検証について”, 第13回建設ロボットシンポジウム論文集, Vol. 13, pp. 75-84, 2012
- 3) 佐藤貴亮, Alessandro Moro, 藤井浩光, 杉本和也, 野末晃, 三村洋一, 小幡克実, 山下淳, 浅間一 “無人化施工における擬似俯瞰映像提示システムの開発”, 第19回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 346-352, 2014
- 4) 新田恭士, 松尾修, 北原成郎, 黒田昇, 田村圭司, 下田孝徳: “超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察”, 第13回建設ロボットシンポジウム論文集, Vol. 13, pp. 41-50, 2011
- 5) 三村洋一, 三鬼尚臣, 野末晃, 小幡克実: “無人化施工における映像と通信の関係について”, 第14回建設ロボットシンポジウム論文集, Vol. 14, pp. 29-38, 2014

3. セメント系地盤改良における排泥処理システムの開発

—無機系特殊固化剤を用いた排泥の安定処理技術—

東亜建設工業株式会社
東北大学大学院環境科学研究科
株式会社森環境技術研究所
有限会社カワセツ

○大野 康年 泉 信也 今尾 佳貞
高橋 弘
森 雅人
江草 清行

1. はじめに

高圧噴射攪拌工法等のセメント系の地盤改良では、地盤を高圧水等で切削し、セメント固化剤を噴射し攪拌混合することで地盤を固結させる(図-1)。このような改良原理より、同種工法では、造成される固結体の体積以上の大量のセメント混じりの排泥が発生する。発生した排泥は、多くは産業廃棄物として取り扱われ、環境に大きな負荷を与えるだけでなく、処分費用によるコスト高等、同種工法における課題であった。

著者らは、セメント系地盤改良にて発生した排泥に無機系の特殊固化剤を添加混合することで排泥を改質することを目的とした安定処理システムの開発に取り組んでいる。

本報告では、その第1報として、無機系特殊固化剤による室内配合試験結果について報告する。

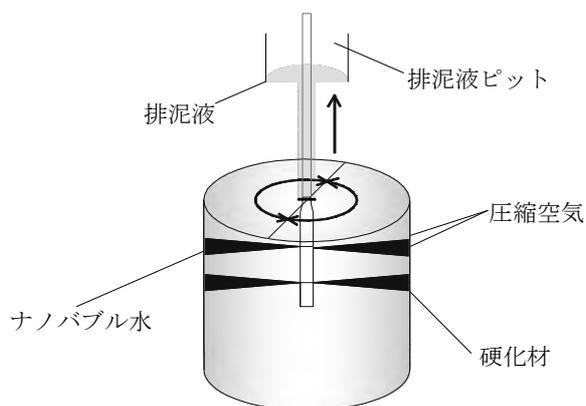


図-1 高圧噴射攪拌工法の概要¹⁾

2. 排泥安定処理システムの概要

2.1 無機系特殊固化剤の概要

本システムに使用する無機系特殊固化剤は、活性シリカ、木質系焼却灰、凝集剤およびゼオライトから構成される。同固化剤は、含水比20～600%の範囲の泥土(セメント混合土含)、残土および有機質土と攪拌混合処理することにて、処理土は固化し、強度発現する。また、重金属を含まない環

境配慮型の固化剤である。

同固化剤の特徴を以下の(1)～(3)に示す。

[特徴]

- (1) 混合攪拌により固化熱は発生しない。
- (2) 処理土からのアルカリ溶出はない。
- (3) 泥土等の対象土と混合攪拌処理後、微量の遊離水が分離する。

2.2 処理装置の概要

同固化剤と泥土を攪拌混合する処理装置の例を写真-1に示す。攪拌方法は、バックホウに取り付けたミキシングバケットにて混合するが、同固化剤の攪拌性能を考慮した攪拌速度を設定している。



写真-1 処理装置の例

3. 室内試験

無機系固化剤の泥土処理性能を確認するためセメント排泥を模擬した現地砂と普通ポルトランドセメントを混合し作製した泥土(セメント混合土)に同固化剤を混合処理し、処理土についてモルタルフロー試験、ブリージング試験、一軸圧縮試験を実施した。

3.1 使用泥土

本試験で使用した泥土は、現地砂と普通ポルト

ランドセメントを配合し、作製したものである。現地砂は、千葉県南袖で採取した現地理立て土砂で、土粒子密度 $\rho_s=2.68\text{g/cm}^3$ 、平均粒径 $D_{50}=0.16\text{mm}$ 、細粒分含有率 $F_c=10\%$ である。図-2に同埋立て土砂（南袖砂）の粒径加積曲線を示す。

表-2に泥土の配合を示す。泥土は、含水比40,50%の二種類について試験を実施した。

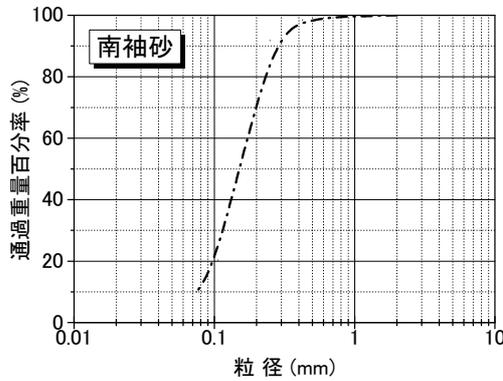


図-2 現地理立て土砂の粒径加積曲線

表-2 使用泥土の配合

泥土含水比 (%)	40	50
普通セメント (kg)	0.5	0.5
混和剤 (kg)	0.0075	0.0075
水 (kg)	0.904	1.132
南袖砂 (kg)	1.78	1.78

3.2 試験方法

試験は、表-2に示す泥土に対して無機系特殊固化剤の添加量を変えて混合直後の処理土についてモルタルフロー試験を実施した。泥土と同固化剤の混合はハンドミキサーを使用した。同試験は、吸水性樹脂による軟弱土改良システムにおけるモルタルフロー試験方法に準拠し、50回落下時のフロー値を測定した。また、同フロー値が150mm以内であれば処理土の運搬が可能であること²⁾から、150mm以内となる無機系特殊固化剤の配合処理土について一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮試験時の材令は、2日と7日である。表-3に試験ケースを示す。

3.3 試験結果

図-3にフロー値と無機系固化剤添加量の関係を示す。フロー値が150cm以下となる固化剤添加量は、含水比40%泥土および50%泥土に対して、 20kg/m^3 および 35kg/m^3 であった。図-4に処理土の一軸圧縮強さと材令の関係を示す。処理土の一軸圧縮強さは、材令2日にて $q_u=250\sim 700\text{kPa}$ 、材令7日にて $q_u=700\sim 1200\text{kPa}$ であった。

表-3 試験ケース

ケース	泥土含水比 (%)	無機系固化剤添加量 (kg/m^3)
1	40	15
2		20
3		25
4	50	20
5		25
6		30
7		35

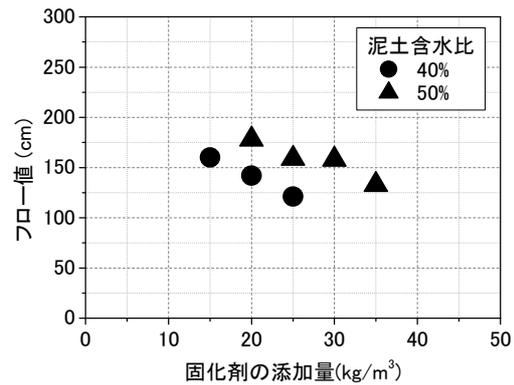


図-3 フロー値～添加量関係

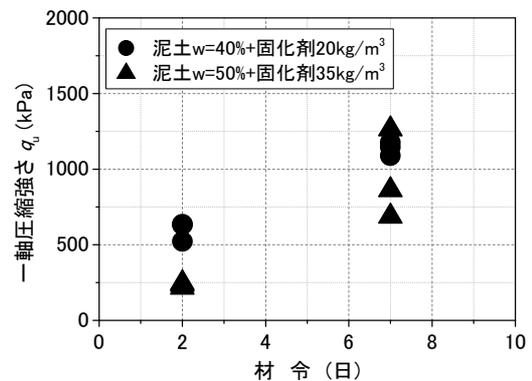


図-4 処理土の一軸圧縮強さ～材令関係

4. まとめ

無機系特殊固化剤を用いた排泥の安定処理技術に関する開発の第1報として、室内配合試験結果について報告した。今後は、現地セメント排泥による適用結果および浚渫土砂への適用も検討したいと考えている。

最後に本試験にご協力いただいた(株)ワイビーエム 柳本氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 東亜建設工業株式会社；マグナムジェット工法技術資料 2013。
- 2) ボンテラン工法研究会；ボンテラン工法技術資料

4. 既設戸建住宅に適用可能な高圧噴射攪拌工法の開発

楕円状コラムの築造を可能とする Miny マルチ工法

前田建設工業株式会社
前田建設工業株式会社
株式会社ミヤマ工業

○ 川西 敦士
山内 崇寛
宮 朗

1. はじめに

東日本大震災以降、既設戸建住宅の液状化対策として、周辺道路を含めた既設戸建住宅との一体事業である市街地液状化対策事業が進められている。市街地液状化対策工法の有効な工法の1つに格子状地中壁工法¹⁾がある。格子状地中壁は深層混合処理工法（機械攪拌工法・高圧噴射攪拌工法）を用いて、既設戸建住宅の敷地境界部分と周辺道路を格子状に地中壁を築造し、地震時の地盤のせん断変形を軽減することで格子内地盤の液状化を抑制するものである。

既設戸建住宅の敷地内で格子状地中壁を築造するには、比較的施工機械がコンパクトな高圧噴射攪拌工法が不可欠である。しかし、従来工法では既設戸建住宅の狭隘な敷地内への対応は十分とは言えず、また改良体の品質が土質性状や強度に影響を受けやすいという課題もある。さらに、工事費の一部を所有者が負担する本事業では、事業成立に必要な合意を形成するために、従来工法に対して大幅なコストダウンが求められている。

このような背景を踏まえ、既設戸建住宅の敷地内で施工を可能とし、一定以上の品質を安定的に供給可能で、経済的かつ効果的な格子状地中壁工法を築造することを目的に「Miny マルチ工法」を開発・実用化した。本報では、本工法の概要、および性能確認試験について報告する。

2. 工法の特徴

本工法の主な特徴は下記の3点である。以降、各特徴の詳細について述べる。

- ① 既設戸建住宅の敷地境界の狭隘地に対応
- ② 楕円状コラムで経済的かつ効果的な格子状地中壁の築造が可能
- ③ 一定以上の品質の安定的な供給が可能

2.1 既設戸建住宅の敷地境界の狭隘地に対応

本工法は、既設戸建住宅の敷地内で施工を可能とするため、幅1m×高さ2m程度の狭隘空間で施工可能な、超小型専用マシン（本体：W60cm×D75×H163cm、重量400kg）を開発した（図-1、写真-1）。

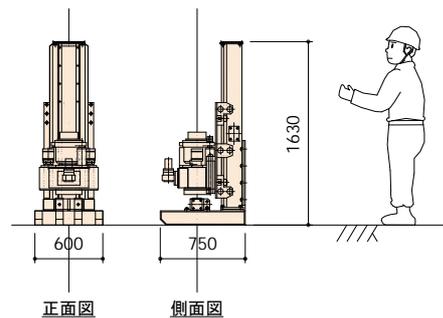


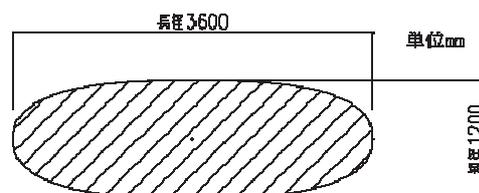
図-1 超小型施工機械



写真-1 施工のイメージ

2.2 楕円状コラムで経済的かつ効果的な格子状地中壁の築造が可能

経済的かつ効果的な格子状地中壁を構築するため、独自開発のロッド回転制御の採用により、図-2に示す新しい改良形状となる楕円状コラム改良体の築造を可能とした。



$$\text{設計後の方程式 (2.5mmの棒間)} \quad \left(\frac{x}{1800}\right)^{2.5} + \left(\frac{y}{600}\right)^{2.5} = 1$$

図-2 楕円状コラムの形状

図-3 に□-13m×13m の有効壁厚 85cm 以上、最小壁厚 60cm 以上の格子状地中壁に対し、従来の高圧噴射攪拌工法（直径 1.5m の円柱状改良を想定）との対比を示す。楕円状コラムでは施工本数を 60% 削減でき、改良体積を 20% 削減することで、大幅な工期短縮とコストダウンを可能とした。

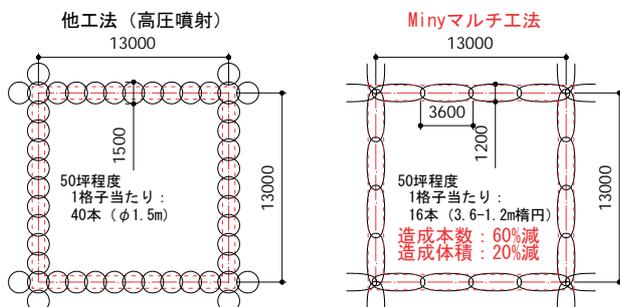


図-3 従来工法との対比

2.3 一定以上の品質の安定的な供給が可能

従来、噴射攪拌式深層混合処理工法は、改良径を造成仕様で設定されるが、水平噴射による地盤切削では、切削距離が土質性状や強度に影響を受けやすく、一定以上の改良体品質の安定的な供給について課題がある。

そこで、一定以上の改良体品質を安定的に供給するため、以下の事項を取入れた施工・品質管理を行なうことで、一定以上の改良体品質を安定的に供給することを可能とした。

(1) リアルタイム管理装置

改良体の品質確保には、専用ロッドの引上速度・揺動角度・回転速度、硬化材の流量・圧力・空気が所定の管理値を下回ることなく削孔・造成することが重要である。そこで、本工法ではリアルタイム管理装置を開発し標準装備している。リアルタイム管理装置では、造成時の上記施工管理項目をリアルタイムで表示（データ保存）および制御し、専用管理装置の画面にて一元管理することができる(図-4)。



- ①: 削孔深度、造成深度の制御および引上げ速度の制御
- ②: 圧縮空気量測定
- ③: 揺動角度、回転速度の制御
- ④: 噴射方向の計測

図-4 リアルタイム管理装置画面

(2) 独自開発のリアルタイム品質確認方法

本工法では、独自開発のリアルタイム品質確認方法²⁾を社内基準で品質管理に取り入れた管理を行なうことを標準としている。コラムの出来形に関しては光ファイバー温度計による出来形確認、強度に関しては排泥を利用した塩酸溶解熱法による 28 日強度予測である。

3. 性能確認試験

3.1 基礎試験

(1) 試験目的

改良体の改良距離とジェット噴流の水平方向での回転速度は密接な関係がある。ここで、楕円状コラムの築造を行うために、噴射回転速度と改良距離の関係を確認するため現場試験を行った。

(2) 試験場所および土質条件

本実験は茨城県つくば市安食で実施した。試験場所の土質柱状図および改良範囲を図-5 に示す。

(3) 造成仕様および試験ケース

表-1 に造成仕様を示す。コラムは、ジェット噴流を両側に噴射し、ロッドを 180 度揺動することでコラムを築造し、図-6 に示す回転速度の概念のように回転速度を可変させ、表-2 に示す実験ケースでコラムの築造を行った。

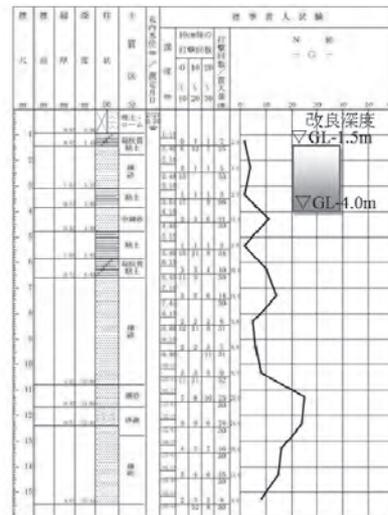


図-5 土質柱状図および改良範囲

表-1 造成仕様

項目	造成仕様
硬化材配合	配合 1 (W/C=137%)
噴射方向	両側
1 方向当りの噴射量	95ℓ/min
噴射圧力	40MPa
圧縮空気圧	0.7MPa
圧縮空気量	5.0Nm ³ /min
揺動角度	180 度*
切削回数	2 回
S T E P 高	2.5cm
m 当たりの STEP 数	40 回
回転速度	各ケースで設定 (表-2)

*両側噴射で 180 度揺動により 360 度のコラムを築造

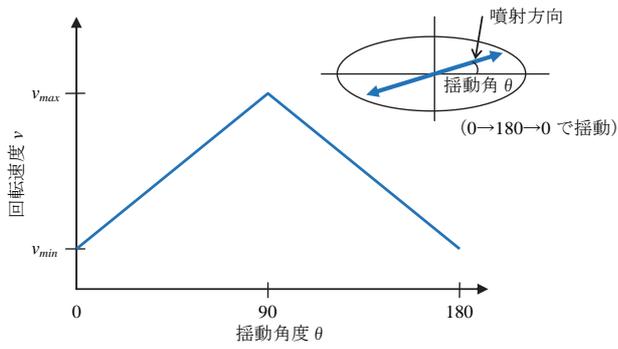


図-6 回転速度の概念図

表-2 試験ケース

ケース	最小回転速度 V_{min} (rpm)	最大回転速度 V_{max} (rpm)
CASE1	3.0	5.0
CASE2	1.5	2.5
CASE3	2.0	10.0
CASE4	3.0	10.0
CASE5	1.0	5.0
CASE6	1.5	20.0

(4) 試験結果

築造したコラムを掘起し、コラム頭部の形状測量を行った。試験結果を図-7、コラムの掘起し状況を写真-2に示す。

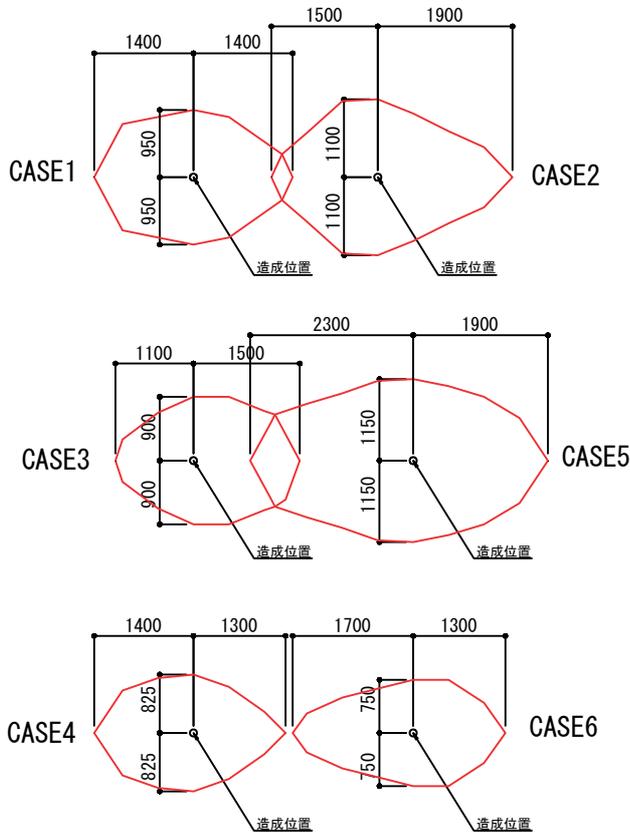


図-7 コラム頭部の形状測量結果



写真-2 コラムの掘起し状況

コラム頭部の形状測量結果を基に、図-8に示すように各ケースの造成した回転速度と改良距離で整理した。ある程度のバラつきはあるが、回転速度と改良距離に相関性があることを確認した。

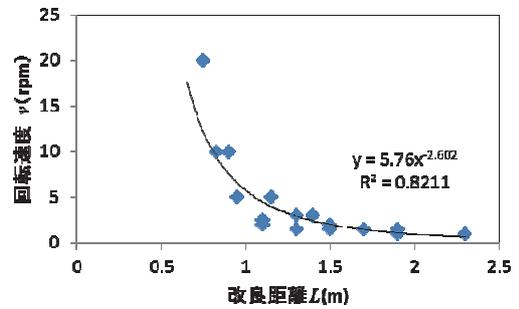


図-8 回転速度と改良距離の関係

本工法の設計とする楕円形状は図-2に示す楕円の式で、角度 θ のとき距離 L とすれば $x=L\cos\theta$, $y=L\sin\theta$ となり式(1)のとおりとなる。式(1)を図-8に示す近似式に代入して、図-9に示す楕円状コラムの築造に必要な必要回転速度と揺動角度の関係を得ることができる。つまり、コラムの出来形に関わる施工管理は、各揺動角度に対して図-9に示す必要回転速度以下で管理することで、所定の出来形に関する品質を確保できると考えられる。

$$L = \left(\left(\frac{\cos\theta}{1800} \right)^{2.5} + \left(\frac{\sin\theta}{600} \right)^{2.5} \right)^{\frac{1}{2.5}} \quad (1)$$

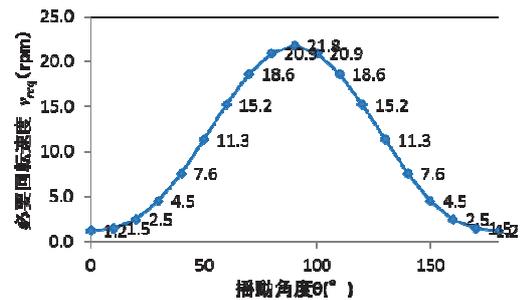


図-9 楕円状コラム築造に必要な揺動角度と回転速度の関係

3.2 性能確認試験

(1) 試験目的

本工法で築造されるコラムの性能を確認することを目的に性能確認試験を実施した。性能確認試験の実施現場一覧を表-3に示す。

表-3 性能確認試験の実施現場一覧

所在地	主な土質	N値	改良深度
茨城県つくば市	細砂	5~10	GL-1.5~15.0m
新潟県新潟市	砂	5~15	GL-1.5~4.0m
千葉県浦安市	シルト	0~3	GL-1.5~4.0m
千葉県千葉市	シルト	0~3	GL-1.5~4.0m
茨城県鹿島市	細砂	5~10	GL-1.5~4.0m

(2) 目標性能および確認方法

砂質土（細粒分含有率 $F_c \leq 50\%$ ）において、 $2,500\text{kN/m}^2$ の設計基準強度を確保する事が可能であることを目標性能とした。表-4に試験項目と確認事項を示す。

表-4 試験項目と確認事項

試験項目	試験方法	確認事項
① 抜取コア試験	コア採取率 一軸圧縮試験	コア採取率の確認、抜取コアによる変動係数の確認、抜取コアによる設計基準強度の設定
② 出来形確認試験	出来形計測	設計径の確認

(3) 抜取コア試験結果

コラム強度の安定性を確認するため、コアボーリングによりコアを採取し、コア採取率と一軸圧縮強さによる変動係数を各現場で確認した。その結果、5現場において、全長コア採取率が96.7%~97.7%、1m当たりコア採取率の最小値が95.7~96.4%であり、建築センター指針³⁾に示される全長コア採取率95%以上、1m当たりコア採取率90%以上を満足する結果であった。

抜取コアによる一軸圧縮試験で、茨城県つくば市の水平方向の抜取コアによる試験結果を図-10に示す。

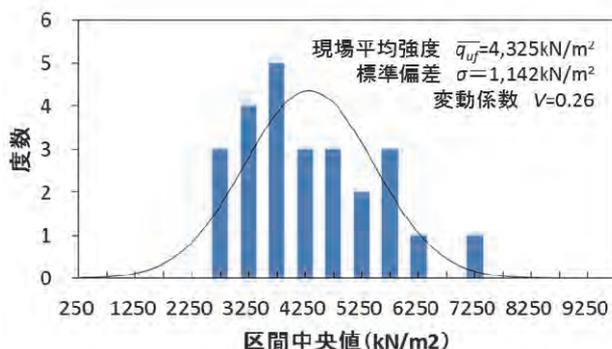


図-10 水平方向の変動係数（茨城県つくば市）

5現場において水平・深度方向の抜取コアによる一軸圧縮強度は変動係数が22~27%であり、日本建築センター指針⁴⁾に示される正規分布の適合判定（有意水準5%の χ^2 分布による判定）、および変動係数の信頼性確認（有意水準1%のF検定）の結果、設計及び検査に使用する変動係数の値として30%、設計基準強度 F_c として $2,500\text{kN/m}^2$ を採用できることを確認した。

(4) 出来形確認試験結果

千葉県浦安市の現場で掘起したコラム出来形、および設計径と実測値の比較を図-11に示す。5現場において図-2に示す設計径を満足することを確認できた。

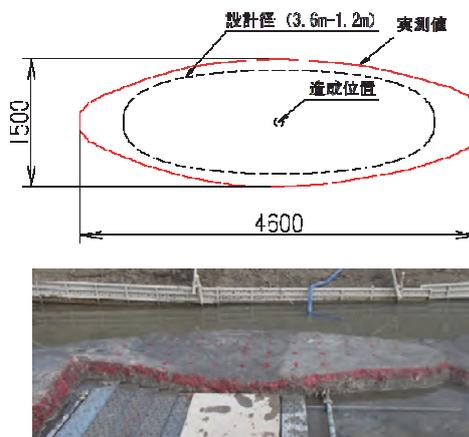


図-11 コラムの出来形および設計径と実測の対比

4. おわりに

Miny マルチ法は、基礎試験および複数の現場における性能確認試験を行い、既設戸建住宅の敷地内で施工できる工法として実用化した。今後平成27年度より市街地液状化対策事業の着工を予定している浦安市をはじめとした各市町村において、本工法の活用により低コストで安心・安全な国土を提供できるよう貢献していきたいと考える。また、実施工によりデータを蓄積し、さらなる安定的な品質確保に向けて信頼性を高めていく所存である。

参考文献

- 1) 浦安市，液状化対策実現可能性検討委員会入手先<<http://www.city.urayasu.chiba.jp/dd.aspx?menuid=12095>>（参照2014.6.30）
- 2) 手塚広明・山内崇寛・川西敦士：高圧噴射攪拌工法で改良された地盤の品質管理手法，地盤工学ジャーナル Vol.8 No.2, pp.251~263, 2013
- 3) 建築物のための地盤改良の設計及び品質管理指針，日本建築センター，pp.184~188, 2002.11
- 4) 建築物のための地盤改良の設計及び品質管理指針，日本建築センター，pp.420~427, 2002.11

5. 圧入工法による災害復旧・復興工事について

ー旧北上川護岸工事ー

㈱技研製作所

木村 育正

1. はじめに

東日本大震災のつめ跡はあらためて、災害の悲惨さを浮き彫りにした。我が国は世界でも有数の災害多発国であるため、災害との付き合い方に多分に慣れている国民性のはずではあるが、過去の災害の教訓を活かしきれていない側面が存在する。

過去に被災した先人の苦労を無駄にしないためにも災害復旧・復興を積極的に推し進めるとともに、今後30年以内に発生する確率が70%と言われる首都直下地震や南海トラフ巨大地震に対しても尊い人命を損なわないようにしっかりとした事前防災対策に取り組むことが必要である。

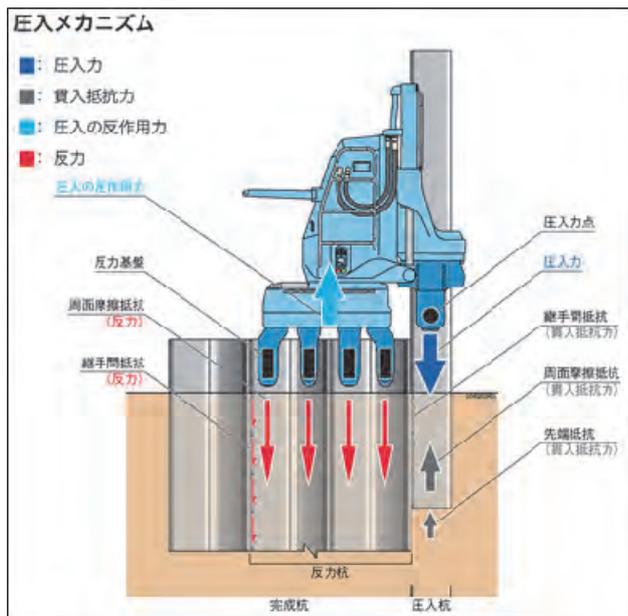


図-1 圧入メカニズム

ここで説明する圧入工法とは公害対処という社会の要請を先取りして考案された、無振動・無騒音による杭打ち用建設機械、圧入機「サイレントパイラー」の発明によって生み出された施工法である。圧入工法のメカニズムを図-1に示すが、既に打込まれた杭をつかんで、その杭の引抜抵抗を反力とし、静的荷重で次の杭を地中に押し込む「圧入原理」を有しており、地球と一体化した反力杭をつかんでいる圧入機に転倒の危険性は無く、安全かつ迅速な災害復旧工事を可能とする。開発第1号機から、70MPaという超高压かつ大流量の油圧を採用しており、小さい機体から大きな施工能

力を発揮できるため、いずれの杭材に対しても必要最小限の機体寸法であり、コンパクトな形状となっている。災害復旧や事前防災対策では近隣に民家が存在することが多く、施工スペースの制限等から圧入工法が選択されるケースは多い。以降に圧入工法で実施した災害復旧工事の事例を記す。

2. 旧北上川護岸工事

旧北上川の河口部は河川堤防がない無堤区間であったため、沿川に広がる市街地全体が津波に呑み込まれ、甚大な被害が生じた。写真-1~3に津波の襲来前と襲来時、襲来後の状況を示す。護岸構造物自体は津波の影響を受けても倒壊には至らなかったものの地震による広域沈降で約70cm地盤沈下したため、浸水被害が生じた。



写真-1 旧北上川中州地区の被災前状況 (2010年9月)¹⁾



写真-2 津波被災時の状況 (2011年3月)¹⁾



写真-3 被災後の状況 (2011年3月)¹⁾

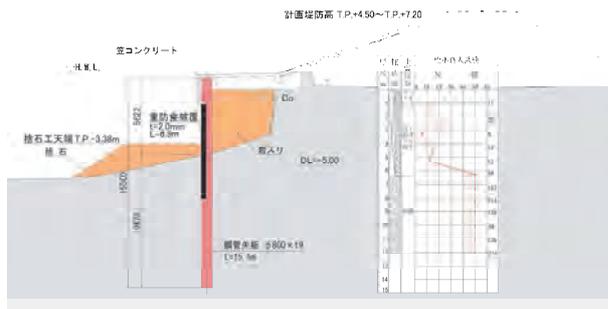


図-2 護岸構造断面図

緊急復旧により浸水被害対策を講じたものの、復興に向けては新たに堤防も含めた護岸構造物を再構築することになった。

再構築となる築堤護岸延長は左岸側が約 8.6km、右岸側は約 9.3 km となっている。

護岸構造は既設護岸の前面に広幅鋼矢板または鋼管矢板を打込み、既設護岸との間を埋め戻し、その背面に堤防を構築し、高潮や津波等に対抗する形式となっている。鋼管矢板を用いる代表的な堤防形式の断面を図-2 に示す。地盤条件は比較的硬質な地盤であるため、広幅鋼矢板はオーガ併用圧入の「硬質地盤クリア工法」(NETIS No: CB-980118-V) により施工している。

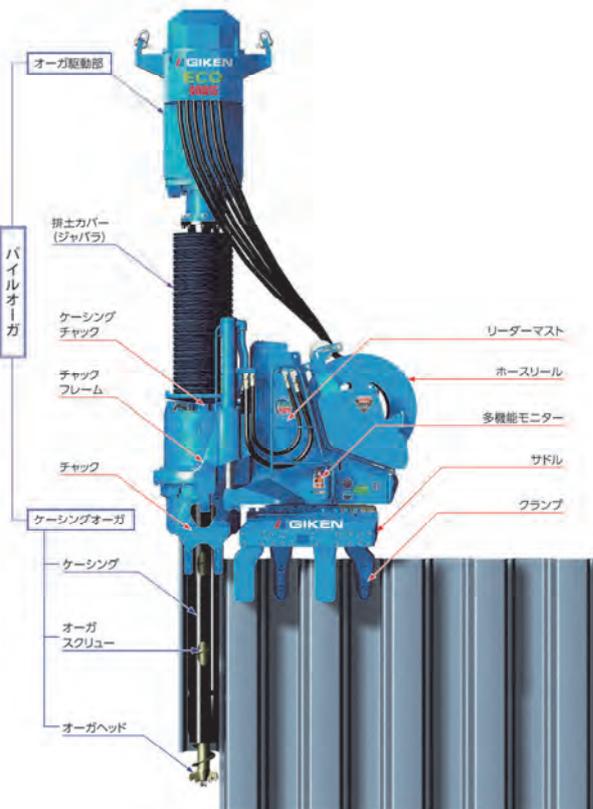


図-3 硬質地盤クリア工法用圧入機

硬質地盤クリア工法は国土交通省土木工事積算基準の中で N 値および換算 N 値の範囲を $50 < N \leq 180$ 、で記載され運用されている。ただし、換算

N 値が 180 を超える実績も多数存在することから、全国圧入協会が実績をまとめ、換算 N 値が 180 以上の地盤も積算基準で運用できるように準備しているところである。

一方、鋼管矢板の施工は以下の理由により打撃や振動を伴う施工は採用できなかった。

- ① 工事箇所近傍の建物は全て津波被害を受けているが倒壊せずに残っているため、工事による振動等により、建物にそれ以上のダメージを与えたくなかった。
- ② 津波被災直後はほとんどの住民が避難生活を送っていたが、時間が経つにつれ自宅での生活に戻る住民が増加し、工事の騒音、振動等による迷惑をかけられない。

そのため、施工法としては「鋼管矢板圧入工法」(NETIS No: CB-980119-V) が選定された。

冒頭述べているとおり、地盤は比較的硬質であるため鋼管矢板の圧入工事に際しては、ウォータージェットの流量を 2,000 リットル/分以上 (全国圧入協会編積算資料) に設定する必要があった。ただし、新たなボーリングデータの結果から、当現場の換算 N 値の最大値が 200 を超えること、さらに写真-4 に示す転石が確認できたことなどから、「鋼管矢板圧入工法」での適用範囲外との判断のもとに、鋼管杭の先端にビットを付けて回転圧入させる「ジャイロプレス工法」(NETIS No: KT-060020-A) が選定された。



写真-4 転石の状況

「ジャイロプレス工法」とは従来の圧入工法の動作に加えて、回転力を与えることによって鋼管杭の先端に取り付けたビットにより切削力を付加したことで、玉石層や岩盤など硬質地盤はもとより、既設鉄筋コンクリート構造物などの地中障害物を切削貫通しながら、目的の深度まで鋼管杭を圧入することができる工法である。図-4 にジャイロプレス工法のメカニズムを示す。

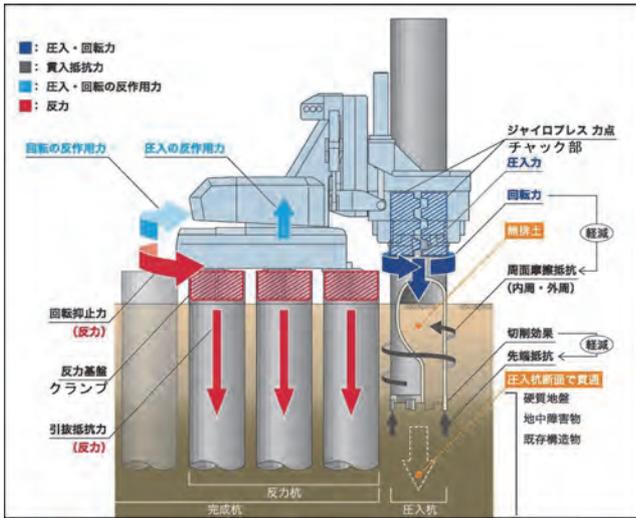


図-4 ジャイロプレスメカニズム

一般的にはオールケーシング工法のようにケーシングチューブ等により先行削孔により障害物を除去し、砂やコンクリート等に置換する施工法は以前から存在していたが、これらの施工法は全てケーシング内の掘削を伴っていた。このジャイロプレス工法は硬質な地盤や障害物等があっても、鋼管内の掘削を行わず所定の位置まで杭を打込む施工法である。掘削を伴わないため、杭の打込み作業と管内掘削の重複作業とならないため、従来の施工法と比べると施工スピードが速いのが特徴である。

障害物や硬質地盤の硬さの程度（岩盤等）によってはジャイロプレス工法でも先行削孔を実施するケースがある。その理由は障害物が地表面近くに存在することが多いため、先行削孔杭により障害物のみを先行削孔杭で打ち抜き、引抜いてその後本設用の鋼管杭で打込んでいくことにより、使用するビットの個数を減少させることで工事費の削減を図るためである。ただし、このような場合でも管内の掘削はおこなわない。



写真-5 先行削孔用ビット



写真-6 砂礫地盤対応用ビット

現場の条件によっては鋼管杭を引く抜くことができないケースもあるが、そのような場合にはビットの個数を増やして打込めばよい。写真-5は先行削孔杭の先端部である。ビットの消耗度合いによって取替えが可能なビット形状とホルダーを取り付けている。写真-6はN値が50程度の砂礫地盤対応の先端仕様である。ビットは鋼管杭と溶接で固定している。

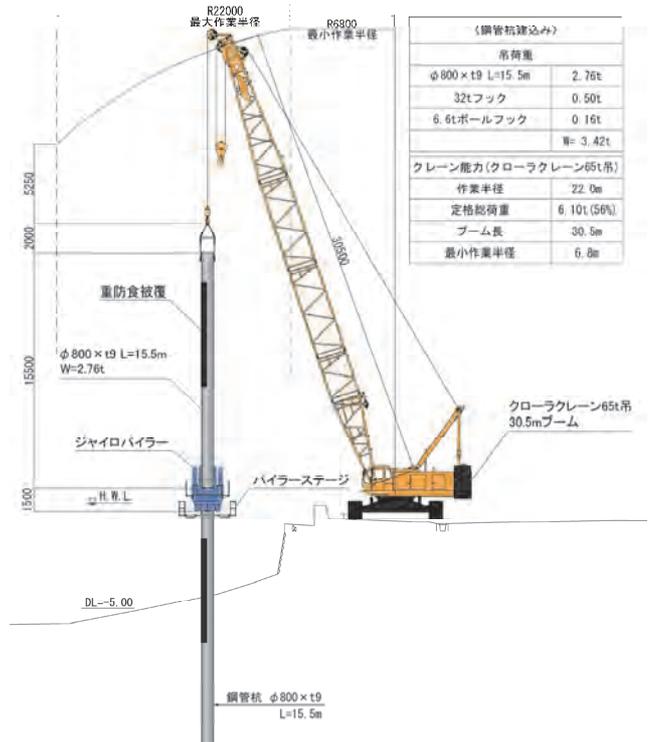


図-5 施工時横断面図

当工事における標準的な施工時の横断面図を図-5に示す。鋼管杭の法線が旧護岸から10m程度しか離れていないため、クローラークレーンにより杭材の建てこみをおこなった。クレーンの最大作業半径を越えるようなケースでは鋼管杭の上を自走するクランプクレーン等を用いる「ノンステーキング工法」を用いることになる。施工中の状況を写真-7に示す。日進量は障害となる捨石の有無やその深さ方向への範囲により異なるが、平

均すると3本/日程度であった。

鋼管杭の打設後は旧護岸との間を岩ズリで埋め戻すことになる。現在は埋め戻し作業自体に着手していないが、施工時はドライな状態にする必要がある。



写真-7 鋼管杭施工状況

鋼管杭を回転圧入しているため、一般的な鋼管矢板のように継手が無いために締切りするには相応の工夫が必要となる。締切り方法を図-6に示す。鋼管杭間距離が180mmありその隙間に等辺山形鋼を前面側と背面側の双方に打込む。等辺山形鋼の打込みを写真-8に示すが、ジャイロパイラーにアタッチメントを取り付けることで等辺山形鋼の打込みも可能となっている。

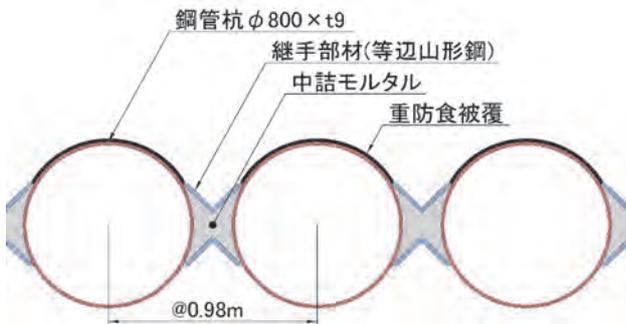


図-6 締切り方法



写真-8 等辺山形鋼施工状況

等辺山形鋼の打込み後はウォータージェット等を用いて等辺山形鋼間の隙間を洗浄し、モルタルを充填する。

さらに当工事では重防食塗装の鋼管杭を用いたため回転圧入させる際にこの塗装面を傷めないように防護しながら回転圧入作業を実施した。防護状況を写真-9に示す。圧入機が鋼管杭をチャッキングする爪と重防食塗装面の間に鋼板を差し込むことで防護をおこなった。他にもゴム材等を用いることもあるが、いずれにしても慎重な施工が必要となる。



写真-9 重防食塗装面の防護状況

3. おわりに

ジャイロプレス工法は都市河川の護岸改修で多用されるようになり、徐々に実績を増やし現時点で120件の施工実績がある。特に硬質な岩盤や捨石マウンド等への鋼管杭の打込みで用いられることが増加する傾向にあり、施工効率を上げるための開発に注力しているところである。

本論では災害復旧工事の事例を紹介したが、津波で被災した現場では想像もつかないような障害物が漂流し堆積しているケースが多い。東日本の沿岸部で復興工事に取り組んでいる多くの建設技術者も同様な苦労を経験されているものと想像する。本論が類似工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局 HP : <http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00037/k00290/river-hp/kasen/shinsaikanren/data/01higai/3kakou.pdf#search='%E6%97%A7%E5%8C%97%E4%B8%8A%E5%B7%9D+%E8%A2%AB%E7%81%BD>
- 2) 木村育正: ジャイロプレス工法について, 建設物価, 2010・2月号, pp.記事28～記事33, 2010年

6. 自動追尾式トータルステーションによる 地盤改良機誘導管理システム

株式会社 大本組 東京本社 ○坪田 裕之
株式会社 大本組 東北支店 小野寺 顕彰
株式会社 大本組 東北支店 西倉 威弘

1. はじめに

構造物の基礎地盤の地耐力を安定（支持力増加や沈下抑制）させる地盤改良において、連続した均質な地盤改良体を確認することを目的に「自動追尾式トータルステーション（以下、自動追尾式 TS）による地盤改良機誘導管理システム」を開発した。本報告では、開発したシステムの構成および施工事例を紹介する。

2. システム概要

本システムは、自動追尾式 TS によるマシンガイダンスシステムを地盤改良機に搭載し、改良機本体の平面位置と機械高さを誘導画面でオペレータに指示するシステムである。

改良位置と既改良エリアとのラップ状態、必要改良深度の一元管理により、施工精度が向上し、堤体基礎の安定性が確保できる。

3. システム構成

本マシンガイダンスシステムは、自動追尾式 TS、管理モニター、全反射プリズム、無線機等で構成する。システム構成を図-1、図-2、表-1 に示す。

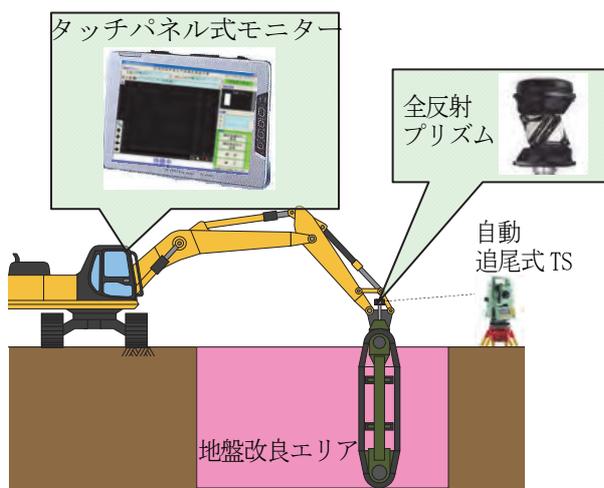


図-1 システム概念図

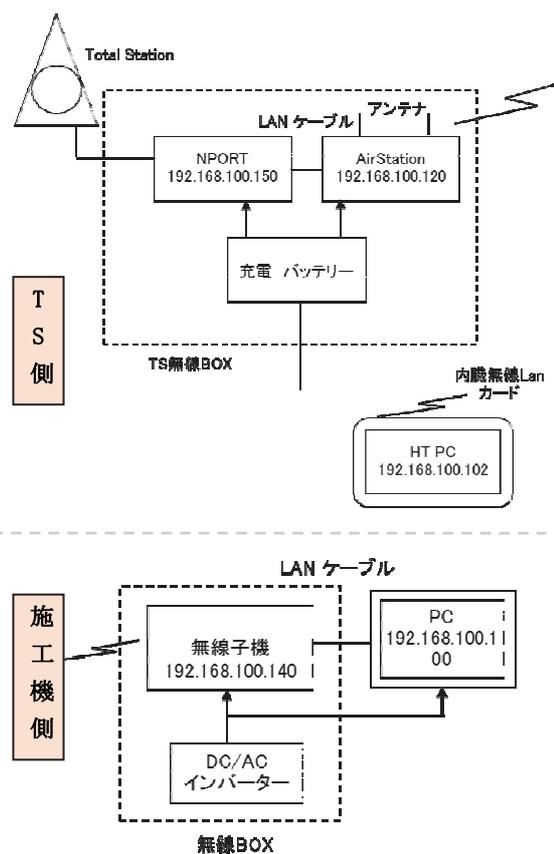


図-2 システム構成

表-1 システム構成機器

No.	機器名称	メーカー	型式	摘要
1	Total Station	Leica	TPS1105	追尾機能
2	シリアル・デバイス	MOXA	NPORT5110	
3	Air Station	Buffalo	WZR-HP-G301NH	11n対応
4	無線子機	Buffalo	WLI-TX4-AG300N	11n対応
5	PC	Panasonic	CF-18	耐衝撃
6	HT PC	Mouse COM	luvPad WN70-H	遠隔

4. 誘導管理方法

4.1 施工手順

施工時における施工手順を図-3 に示す。

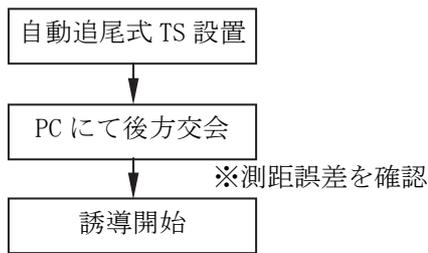


図-3 施工手順

4.2 施工管理

自動追尾式 TS を用いて、地盤改良機の位置、掘削深さを測量し、運転席のコンピュータに表示する。オペレータは、モニターを確認しながら改良する。予め施工範囲を管理ブロック（区割）に分割し、その区割に改良機の位置座標をあてはめ、改良機が区割内で設定深度まで改良されたと判定した場合は黄色（任意設定）、未改良区間であった場合は赤色（任意設定）と色分表示する。

- ・改良位置および深度まで視覚（数値）で誘導
- ・改良済は黄色、未改良は赤色で区分け表示

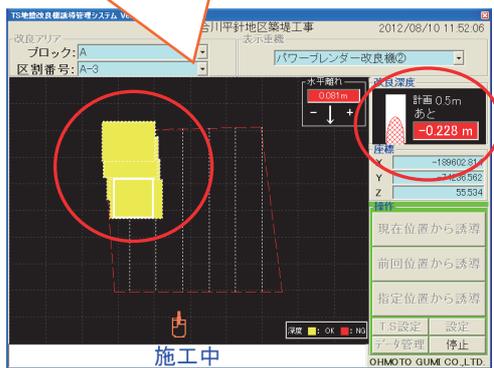


図-4 施工管理モニター

4.3 設定および操作

(1) キャリブレーション

トレンチャー幅、全反射プリズム等のキャリブレーションを実施する。

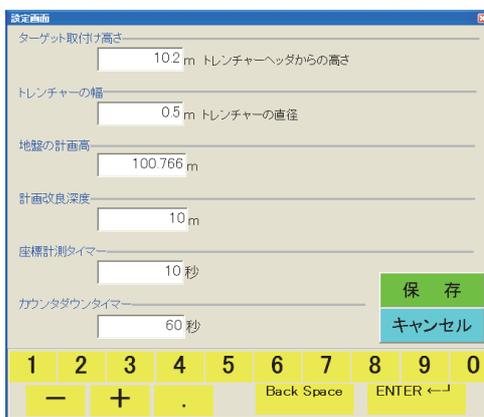


図-5 キャリブレーション

(2) 区割りの事前登録

事前に区割計画を行い、区割座標を事前に登録する。区割座標は4点の座標で管理する。

改良機表示名称	トレンチャー幅(m)	ターゲット高さ(m)	X(移動方向)	Y
① パワーブレンダー改良機①	1	9.5	0.283	-0.661
② パワーブレンダー改良機②	1	10	0	0
③ パワーブレンダー改良機③	1	10	0	0

区割番号	地表距離	改良深度	XA	YA	XB	YB	XC	YD	判定
E-013	13.14	8.5	922.594	1750.041	921.754	1739.97	925.697	925.697	1
E-014	13.14	8.5	926.537	1734.614	925.697	1739.543	929.64	929.64	1
E-015	13.14	8.5	930.481	1739.286	929.94	1740.215	933.583	933.583	1
E-016	13.14	8.5	934.424	1733.959	933.583	1740.888	937.526	937.526	1
E-017	13.14	8.5	938.367	1728.632	937.526	1741.561	941.469	941.469	1
E-018	13.14	8.5	942.31	1723.304	941.469	1742.233	945.412	945.412	1
E-019	13.14	8.5	946.253	1717.976	945.412	1742.906	949.355	949.355	1

座標(区割)登録

図-6 区割 TABLE

(3) オペレータによる設定（施工時）

① 事前登録した区割一覧より施工箇所を選択する



図-7 施工位置（区割）の選択

② 区割方向に対する施工機械の位置関係を施工開始前に確認し変更する。（トレンチャー中心は、追尾する全反射プリズム位置からオフセットした距離としている）

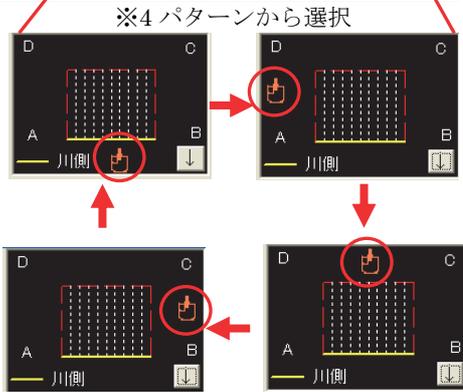
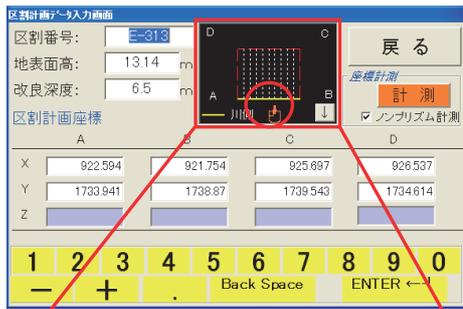


図-8 施工位置設定

③施工開始および停止



図-9 操作モニター

(4) 適用状況

写真-1は、マシンガイダンスシステムによる地盤改良機の施工管理状況である。写真-2は、地盤改良機キャビン内においてオペレータがモニタリングする監視システム設置状況である。

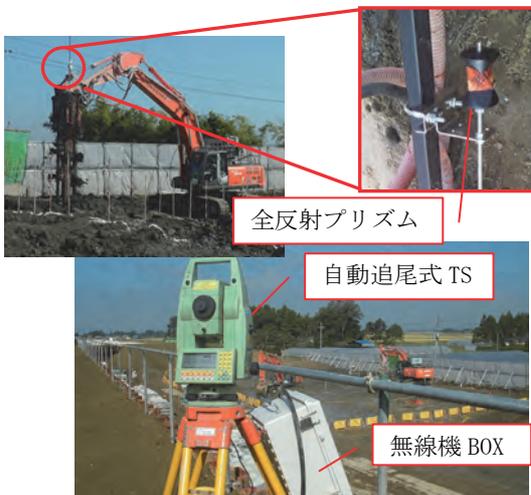


写真-1 自動追尾式 TS と施工機械

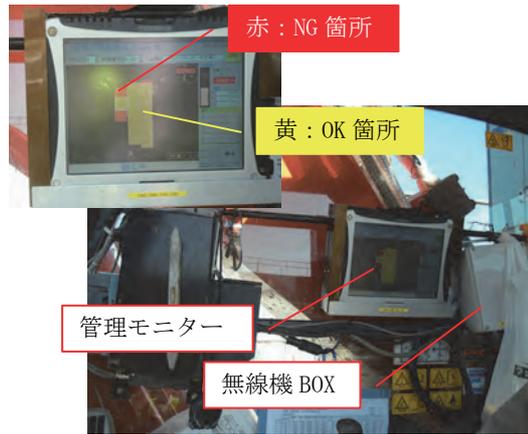


写真-2 キャビン内管理システム

5. 出来形管理・帳票作成システム

出来形管理を以下に示す。トレンチャー中心座標・深度を管理し、10秒毎に施工データを取得する。図-10に示すよう、区割毎に軌跡・平面位置(偏差)・深度データをグラフ化する。また、それらデータベースを集約し図-11に示す作業日報としてエクセルファイル帳票を作成する。

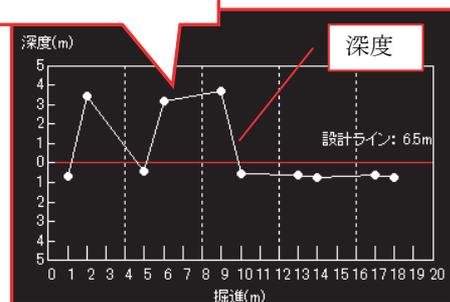
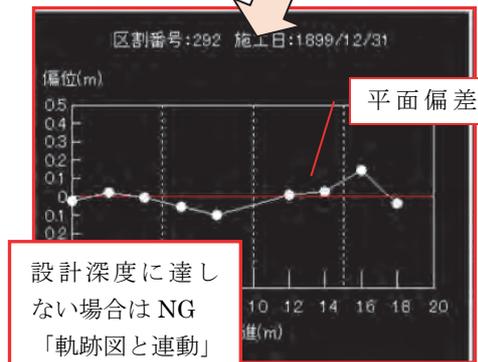


図-10 出来形管理 (軌跡・平面偏差・深度)

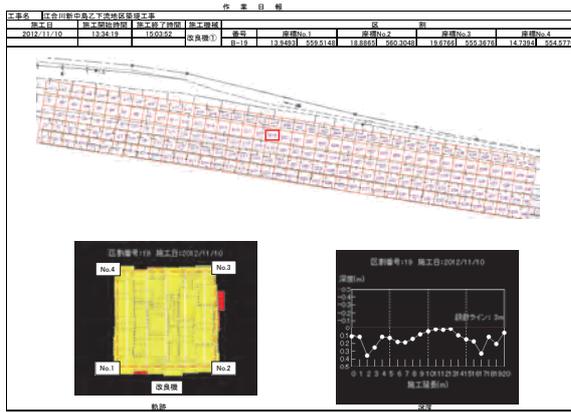


図-11 作業日報 (区割毎)

6. 施工時における問題点および対策

以下に、本システムの現場適用に当たって確認された問題点と対応策を示す。

(1) 問題点

- ①自動追尾式 TS のバッテリーが 2～3 時間程度しか保持できない。
- ②通信不能により追尾が不能となる。
- ③施工中に自動追尾が解除される。

(2) 対策「下記番号は上記番号と符号」

- ①商用電力、発電機等から電力を供給できるよう電源部を改良した。
- ②通信不能の原因として、自動追尾式 TS と通信ケーブル接続の不具合であると確認されたため、無線 BOX 内の各種機器の配置を変更し対応した。
- ③発生原因は、改良機の動作が大きくなることにより、プリズムが振幅して追尾・測距の一連動作が追従できなかったことによる。追尾・測距するリトライ回数を調整することにより、エラー発生率を低減したが、今後振幅を低減できるようプリズム設置方法を改善する予定である。

7. マシンガイダンスシステム適用による効果

(1) 施工性

従来、改良機誘導は、写真-3 に示すように区割毎に測量し、トレンチャー幅毎にポール等を設置する。オペレータは、ポールを見通すことによりトレンチャーを誘導し施工する。また、改良深度はオートレベルにて測定していた。

本マシンガイダンスシステムの適用により、人力による目通しポールの設置および区割測量等の事前準備を省略でき、施工性の向上が図られるとともに経済性が向上する。

※事前準備時間：区割の測量および目通しポールの設置等で約 30 分要す。

また、施工中はリアルタイムにトレンチャーの軌跡を視認でき、蛇行等による未改良範囲が発生した場合でも再改良等の対応が即座に可能となる。

(2) 施工精度

自動追尾式 TS を使用したマシンガイダンスにより効率的に所定位置へ精度よく誘導できた。水平精度±3mm、高さ精度±3mm 以内を確保できる。

(3) オペレータの負荷低減

視覚的に誘導できるため、オペレータの負荷が低減できる。また、オペレータの技量によらない均一な施工が可能となる。

(4) 安全性

地盤改良機付近に作業員、誘導員等が必要なく、接触事故が回避されるため安全性が向上する。



写真-3 従来の誘導方法

8. 適用条件

地盤改良機および杭打機による施工等に適用可能である。但し、下記においては適用範囲外となる。

- (1) 自動追尾式 TS と全反射プリズム間に障害物があり視認できない場合
- (2) 自動追尾式 TS と全反射プリズム間距離が 500m 以上となる場合

9. おわりに

今回開発したマシンガイダンスシステムにより、地盤改良機を効率よく目標位置へ誘導でき、高精度な施工が可能であることを確認した。

従来、施工管理は、トレンチャーの鉛直性、チェーン速度、チェーン累積移動距離、改良深度等を運転席にてモニタリングしながらトレンチャーを操作し施工管理している。

今後、開発したマシンガイダンスシステムと従来の施工管理を融合し、より高品質で施工精度の高い施工管理システムの構築を行いたい。

7. 振動ローラの自律転圧走行の実証

次世代無人化施工システムの開発

大成建設株式会社技術センター 宮崎 裕道
〇青木 浩章
片山 三郎

1. はじめに

無人化施工は、雲仙普賢岳(長崎県)や有珠山(北海道)といった火山関連の災害復旧や、全国各地の台風・豪雨後の土砂災害復旧工事等の自然災害復旧等に適用されている。

弊社では、90年代中盤より前記の雲仙普賢岳や有珠山等で無人化施工を行っており、施工面はもちろん、技術面・経済面・安全面等の様々な場面を経験しているが、この無人化施工技術が災害復旧等に対して盤石な技術と言い切れるかというところに疑問を持っている。例えば、東日本大震災によって被災した東京電力(株)福島第一原子力発電所にも一番早く着手させて頂いたが、無人化施工技術が100%目的を果たしたかという(自然災害と原子力災害では同じレベルでないのは差し引いても)、被災から三年以上経過した今の原子力発電所の状況を見ても、決してそうではないと言わざるを得ない。

また、雲仙普賢岳等では所期の目的を果たしているが、将来(次世代)に向けて更なる劣悪環境に対応する無人化施工技術が必要であるという思いから、国土交通省の建設技術研究開発助成制度を活用し、「次世代無人化施工システムの開発」を課題に、社会へ有効に還元される事を目標に取り組んでいる。

2. 研究の背景

2.1 無人化施工の概要

無人化施工は、ラジコンで建設機械を操作する無線操縦システムと、オペレータが建設機械を操作して作業するのに必要な現場周辺の画像を伝送する画像伝送システムの2つを組み合わせ、安全な場所から建設機械を遠隔操作して作業を行うことである(図-1)。1994年の雲仙普賢岳の噴火災害復旧工事では、どちらのシステムも確立された技術ではなかったため、雲仙普賢岳の復旧と共に様々な技術を考案し、問題を解決しながら、無人化施工技術として確立してきた¹⁾。



図-1 無人化施工のイメージ

2.2 現在の無人化施工の問題点と自律型制御

現在の無人化施工は、現場から送られてくる建設機械の作業状況の映像を複数のモニタ画面を見ながら遠隔操作を行うため、オペレータは作業箇所周囲の状況を直接五感で感じながら操作する事が出来ない。したがって、有人施工とは違った運転技術が必要となり、オペレータの技量によって作業の出来が大きく異なることもあるため、緊急な現場や複雑な操作を必要とする状況下では対応力に懸念がある。また、複数の画像取得のための装置と通信環境が必要といった点も無人化施工適用の障害となっている。さらに、こういった技術を継承する現場自体も少ないのが現状で、このままでは今後の自然災害等の対応を、無人化施工にて対応する事が厳しくなると目される(図-2)。

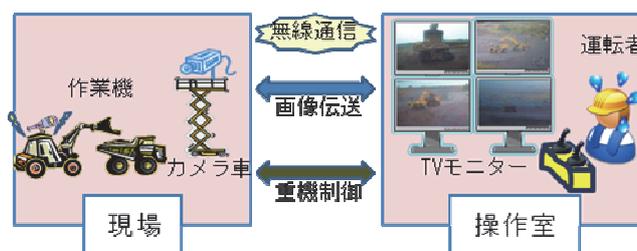


図-2 従来型無人化施工(モニター方式)

そこで、前述の問題を解決するために、作業機械に人間の五感に代わるセンサ類を搭載し、作業

開始命令を与えれば自ら判断して作業を行う「自律制御技術」を適用した次世代型の無人化施工システムの開発を行った（図-3）。

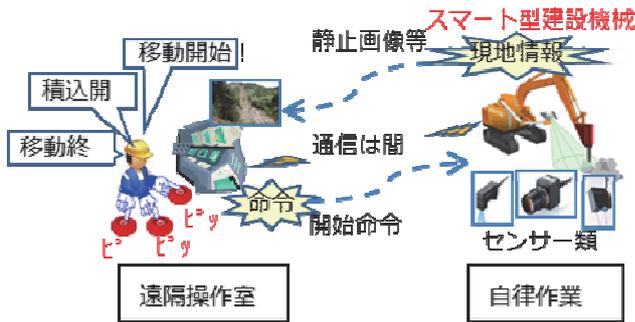


図-3 次世代型無人化施工

これにより、機械が自ら判断して作業を行うため常時操作が不要となり、オペレータの技量に大きく依存することなく操作が可能となる。また、多角的な映像が不要となりカメラ車といった支援機器が削減されるため、通信量も削減できる。本編は、平成25年度に実証した振動ローラの自律走行について述べるものである。

3. 振動ローラの構造と走行アルゴリズム

3.1 構造上の特徴

振動ローラ固有の特徴として、鉄輪を振動させて地面を転圧する点が挙げられる。そのため、振動を考慮したセンサや、設置機器には耐振動・耐衝撃性が必要となる。また、ステアリングがアーティキュレート機構のため、ステアリングが変化した際に、前後輪が変化するため機体の方向はステアリング角度に向かず、地面と鉄輪との間の摩擦を無視した場合、ステアリング角度の1/2の方向となる。これは、転動時に前後輪が同一軌跡を通るようにするためである²⁾（図-4）。

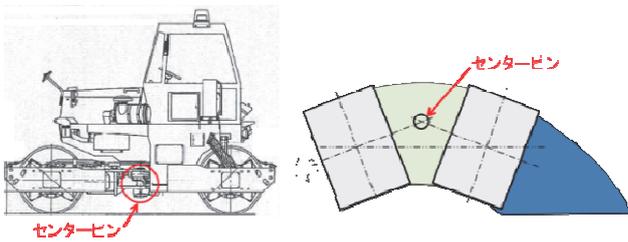


図-4 アーティキュレート型

3.2 走行アルゴリズム

振動ローラの施工中の走行は、図-5に示すように進入路走行、転圧路（1レーン）走行、車線変更に分類することができる。今回は、これらの走行経路の種類を個別にアルゴリズム化した。

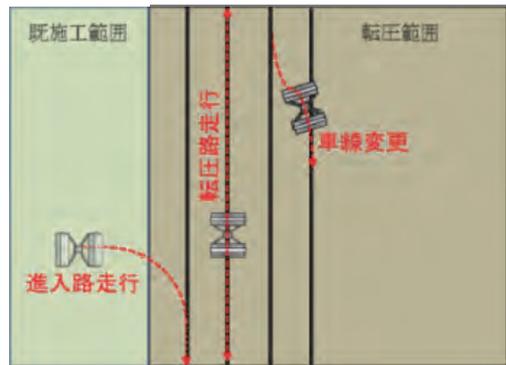


図-5 振動ローラの走行経路の種類

3.2.1 進入路走行

振動ローラが施工場所に進入した際に、機体の方向と1レーン目の転圧路の方向は一致することが望ましい。よって、進入経路は振動ローラの現在地の方向線と、1レーン目の転圧路に内接する円を用いて算出する方法とした（図-6）。

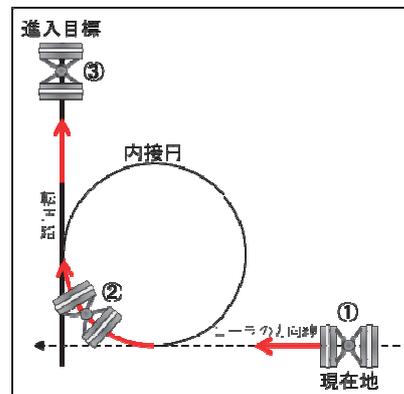


図-6 内接円を用いた進入路走行

3.2.2 転圧路走行

同一レーン転圧走行作業において、基本的には始点～終点の単純往復になるが、路面の斜度や状態等で計画路を逸する場合がある。これを修正できるように、レーン内に通過目標点として数点分割点を設け、進路を修正することとした（図-7）。

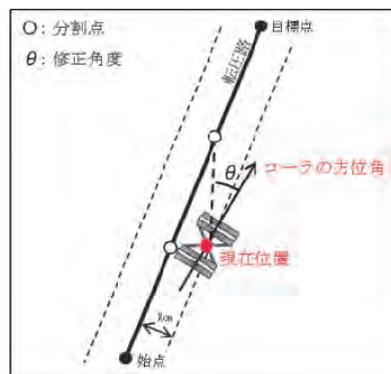


図-7 転圧路走行の制御

3.2.3 車線変更

次レーンへの車線変更は進入路走行と同様、機体の方向が次レーンの方向と一致する事が望ましい。よって、相応の曲率と曲線長を持ったS字カーブを描きながら車線変更を行う事とした。図-8は車線変更幅 400・600・800・1000mm の走行軌跡である。

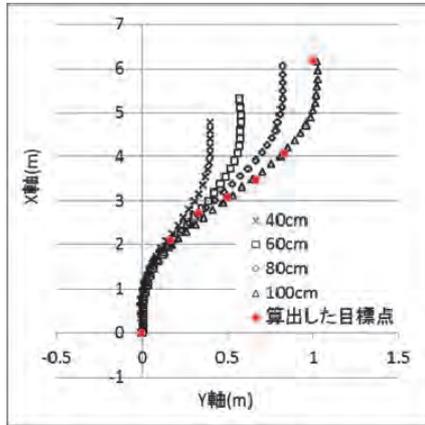


図-8 走行軌跡と計算値

4. 振動ローラの自律走行システム

本研究では、開発したアルゴリズムを以下のシステムに実装した。また、振動ローラの自律化を行うためにはセンサが必要であり、選定したセンサおよび選定基準を以下に記す。

4.1 システム概要

本システムの構成を図-9 に示す。トータルステーション (以下 TS と記)、振動ローラ (11t 級)、ホスト PC で構成されており、機器間は Wi-Fi で通信を行う。TS はジャイロ補正情報取得のため、常時測距を行いホスト PC 側に位置情報を送信している。一方、振動ローラでは自律制御用 CPU にて、取得したセンサ情報をもとに駆動部の制御量の演算を行い、更にホスト PC から送信されてくる情報を元にジャイロ補正を演算し、振動ローラを目標へ自己誘導を行う「慣性航法」にて走行～転圧作業を行う。

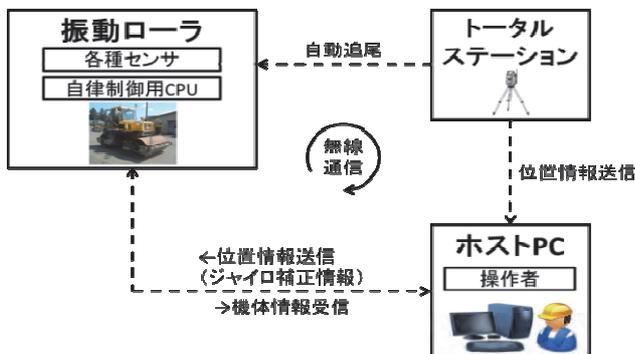


図-9 システム構成図

図-10 にホスト PC に表示される画面を示す。ホスト PC の表示画面では、振動ローラによる転圧回数における施工状況および振動ローラの機体情報を表示する。また、画面上のボタンにて、振動ローラに自律制御開始命令を送信することができる。

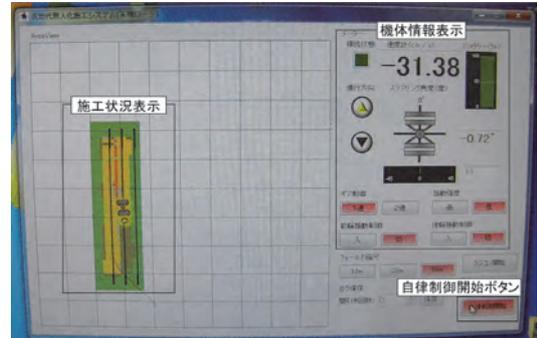


図-10 ホスト PC 表示画面

4.2 センサの選定

今回実証に使った振動ローラには、人間の五感に代わる以下のセンサ等の機器を搭載した。(図-11) 実機は、これらセンサ情報等を簡単に制御に反映できるよう、油圧弁制御が電子制御型となっている機体として、雲仙普賢岳等で実際に使用している遠隔操作仕様の 11t 級の振動ローラを使用した。



図-11 振動ローラと搭載センサ

以下に、振動ローラ (11t 級) に搭載したセンサを示す。

①搭載センサ

- 姿勢検出センサ (MEMS 型ジャイロ)
: 姿勢検出角度は $\pm 30^\circ$ 以上とする。
- 速度検出センサ (ロータリーエンコーダ)
: 検出速度は 3km/h 以上とする。
- ステア角度検出センサ (ポテンショメータ)
: 検出角度は $\pm 60^\circ$ (絶対角) 以上とする。
- 前方探査センサ (2D スキャナ)
: 検出範囲は前方および後方 3m とする。
- 車載カメラ (ネットワークカメラ)
: 設置条件として雲台無しでも可能なものとする。

- ・全周プリズム（トータルステーション）
：測定距離として自動追尾が 30m 以上可能なものとする。

5. 振動ローラの自律走行の実証

5.1 検証実験

本システムの自律走行精度を検証するための実験を行った。以下に設定した施工条件を示す。また、図-12 に実証実験の様子を示す。

- ・転圧回数：有振動 2 回/レーン
- ・レーン長：25m
- ・転圧路：3 レーン
- ・施工ラップ幅：0mm
- ・走行速度：1km/h



図-12 実証実験の様子

5.2 実験結果

有振動と無振動の自律作業を比較した結果、走行精度に大差はなく、搭載センサ類の耐振動性も十分であった。また、アーティキュレート機構の機械制御においては、車体中央が屈曲する際に前

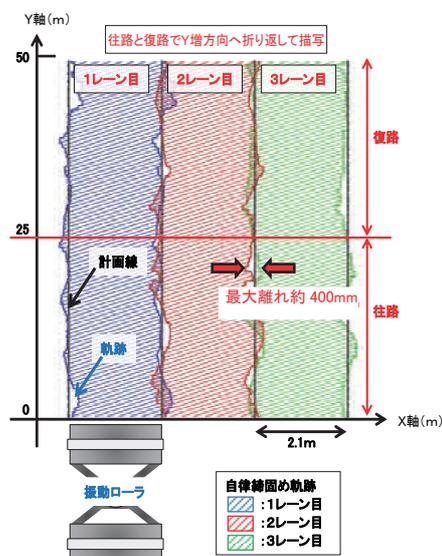


図-13 走行軌跡

後輪間で発生する不規則な挙動を、演算を工夫することで制御を行うことができた。

さらに、図-13 に示すように、隣り合う二つのレーン間の最大離れ（未転圧幅の最大値）は、約 400mm であった。そのため、現在の無人化施工にローラの施工重複幅の基準が 500mm（雲仙普賢岳周辺砂防ダム等特記仕様書等より）であることから、本システムを導入すれば現行の施工重複幅を 20% 程度減らすことが可能である。その結果、走行レーン数が減るため施工効率が向上すると考えられる。図-14 に施工効率向上のイメージ図を示す。

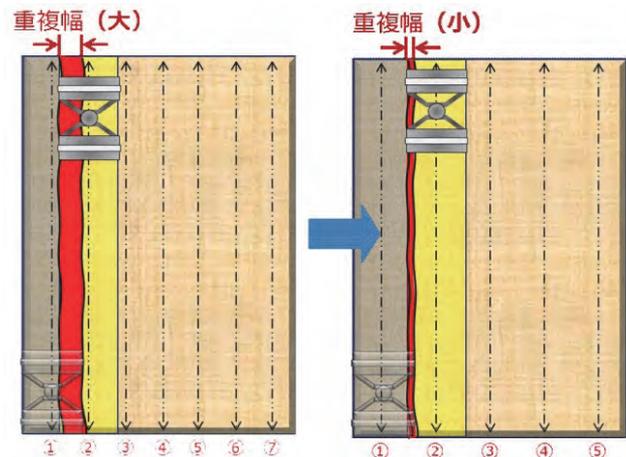


図-14 施工効率向上のイメージ

6. まとめ

今回の実証で、アーティキュレート機構の建設機械において、安価な MEMS ジャイロを使用した場合でも、独自の自律制御アルゴリズムを用いることによって遠隔操作時と同等以上の走行ができる事を確認した。ただし、今回は無人化施工仕様の振動ローラを使ったため、油圧制御が単純な ON-OFF 制御となっていた。理想的にはステアリングの油圧シリンダに比例制御を採用すれば、走行精度の更なる向上が期待できる。

謝辞

本技術開発にあたり技術的な支援を頂いております産官学委員会メンバーに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 近藤高弘・青木浩章・宮崎裕道：建設業における無人化施工の現状と将来，大成建設技術センター報，第44号，P.19～P.20，2011.
- 2) 栗原 庸聡・宮崎 裕道・青木 浩章・片山 三郎：振動ローラの自律走行の実証，大成建設技術センター報，第47号，P.19～P.20，2014.

8. 重機遠隔操作における3Dスキャナーの活用

清水建設(株)土木技術本部

○藤吉 卓也

1. はじめに

自然災害の調査・復旧、特殊環境下での作業等、無人化施工はその適用範囲の拡大ならび高度化に向けて、さらなる技術開発が求められている。無人化施工では、遠隔操作に必要な画像伝送、無線通信、情報化施工において、建設業界がその多くを担っている。これらの技術においては、カメラやセンサー、無線通信設備等を活用して、作業装置の操作判断に必要な情報を取得し、オペレーターに提供することが重要である。

2. 本技術の概要

2.1 開発の背景

無人化施工とは、災害復旧等の危険区域内での作業において、安全な場所からリモコンにより重機の遠隔操作を行うことにより、オペレーターの安全を確保しながら施工を行うものである。運転手はおもに作業重機に取り付けたカメラからの映像情報（写真-1）を頼りに周囲状況を把握し、作業対象の位置を判断する。しかし、通常のカメラ映像は平面的であり、作業重機に搭載したカメラから取得する映像だけでは、作業対象に対して奥行き方向の距離情報を把握することは困難である。よって奥行き情報を補完するカメラ映像が別途必要となり、従来は図-1に示すように作業用重機以外に、カメラ専用車両を別途操作し、他視点から映像を取得していた。しかし、カメラ専用車両の運用においては、いくつかの問題点がある。

① コストアップ

直接実作業を行う重機以外に別途、作業に従事しないカメラ専用車両や、カメラ専用車両にも遠隔操作技術に長けた特別なオペレーターが必要であり、コストアップが必須となる。

② 置位置の制約

カメラ専用車両自体の大きさにより、狭隘箇所では最適なアングル確保が困難である。

③ 電波干渉

カメラ専用車両も無線での操作となるために回線数が倍増し、電波干渉の可能性が高くなる。

④ オペレーターのストレス

カメラ専用車両の操作者は重機操作者と異なるので、操作に必要な映像指示（視点変更操作）

のやり取りがうまくいかない場合がある。

解決の方策として、“奥行き情報をオペレーターに伝える”という、従来カメラ専用車両が担ってきた役割を、リアルタイム性に優れた3Dスキャナーで代替するシステムを提案し、開発を行った。



写真-1 重機搭載カメラからの映像

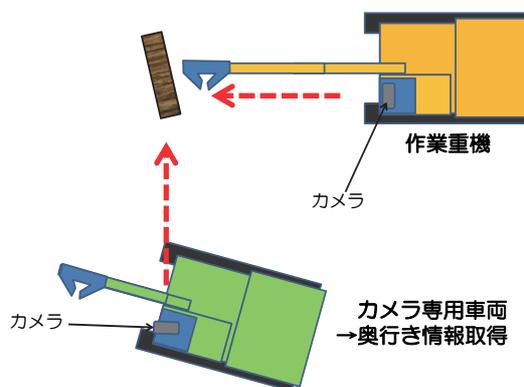


図-1 カメラ専用車両による奥行き情報取得

2.2 技術の概要

建設業界での3Dスキャナーの活用方法は主に測量である。高精度の点群座標データを大量に取得できる反面、計測時間が長く、計測中は定置することが必要であった。しかし重機操作において必要な距離情報は、精度よりもリアルタイム性が重視される。そこで、一般的な3Dスキャナーの活用方法から発想の転換を行い、高い計測精度よ

り、リアルタイム性の高さを重視した。

調査・検討の結果、本システムの実証実験に用いる3DスキャナーはASUS社のXtion PRO LIVEを選定した。選定機種の特徴は、視認性に優れているという点である。計測範囲内の点群座標データ、RGB色情報を高速(最大60fps)で取得・映像化でき、その映像は鮮明である。

本システムの概要を以下に述べる。従来は、操作に関する映像情報の取得のために、作業用重機からの映像に加え、カメラ専用車両を別途配置していた。対して、本システムは作業重機に、3Dスキャナーを搭載し、重機搭載カメラ(通常運転手視点)の2次元映像と並行して、3Dスキャナーから3次元映像(写真-2)を取得するものである。ここで本稿での3次元映像とは、3次元画像化された点群座標データが、カメラ画像とほぼ同調し更新されていくことにより得られる映像とする。この3次元映像を用いて、カメラ専用車両が取得していた奥行き方向のカメラ映像を代替する。一方、カメラ映像は画像の鮮明さ、視界の広さ、リアルタイム性に優れており、周囲の状況把握や、奥行き情報を要しない大まかな操作に適している。そこで本システムでは、各々の優位性を組み合わせて、通常オペレーター視点のカメラ映像を用いて大半の操作を行うものとし、カメラ映像のみでは得られにくい奥行き方向の情報が必



写真-2 3Dスキャナーからの3次元映像

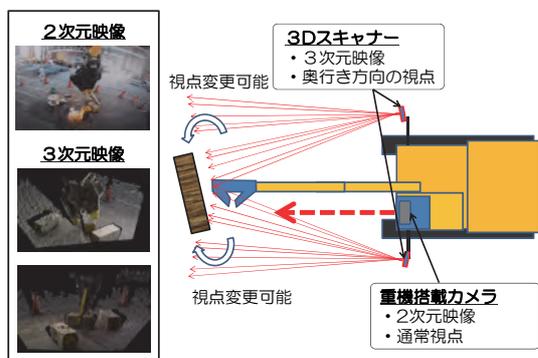


図-2 本システムにおける映像取得方式

要な操作は、3次元映像を用いて行うものとした(図-2)。3次元映像の特徴は、視点を変更することにより、重機操作には必要な奥行き情報を、あらゆる角度の視点から自由に取得できることである。本システムはこれらの特性を活かして、奥行き情報を取得するため配置していたカメラ専用車両を不要とした、無人化施工支援システムである。

3. システム実証実験報告

3.1 実験概要

本システムの有用性の確認および課題抽出を行うため実証実験を行った。重機は無人化施工現場にて稼働しているものを用いた。また重機操作では解体重機運転に習熟したオペレーターに依頼し、遠隔操作に慣れてもらうための操作練習を1日実施したのち実験を開始した。

3.2 実験設備

実験時の主な設備について解説する。実験時の操作全般において、オペレーターは直接重機が見えないという作業条件を設定した。遠隔操作席は、パーティションで3方を覆い、運転手は正面に設置したモニターに映し出される映像情報を頼りに、リモコンで重機の遠隔操作を行った。



図-3 従来システムの実験配置



写真-3 従来システムでの操作状況

(a)従来システムの構成

図-3 に実験時の従来システムを模擬した試験設備構成を示す。実験時は重機搭載カメラに加えて、奥行き方向の映像情報を得るため、通常カメラ専用車両が配置される位置に固定カメラを設置した。オペレーターは、これらのカメラから映し出される2つのモニター映像で状況を確認しながら操作を行った(写真-3)。

(b) 3D無人化施工支援システムの構成

実験時の本システムの設備構成を図-5 に示す。重機搭載カメラは、従来システムと同位置に配置し、機体の左右に1台ずつ、計2台の3Dスキャナーを搭載した。2台の3Dスキャナーから得られた3次元映像は、それぞれ遠隔操作席に設置したパソコン画面に出力するものとして(写真-4)、視点変更は2台が独立して操作可能なものとした。

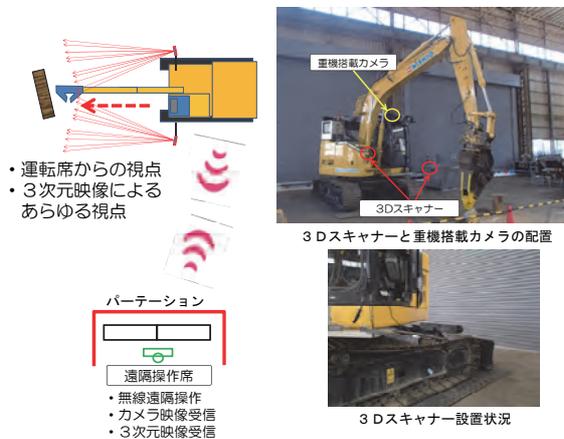


図-4 3D無人化施工支援システムの実験配置



写真-4 3次元映像出力状況

3.3 機能実証実験

(a) 3次元映像の特性確認

実験的に得られた点群座標データの計測誤差は、3m離れた対象物において30~40mm(約1%)程度であり、通常の重機操作に支障はないとしていた。しかし形状、大きさ、光の反射特性といった対象物の条件、また配置条件(傾き、重なり等)によって3次元映像の視認性に差がでることも想定していた。よって遠隔操作に対しての特性を予

め検証する必要があった。方法として様々な大きさ・形状の作業対象物に対して把持動作を行い、その基本データを取得した(写真-5)。



写真-5 特性確認試験状況

(b) 映像遅延時間の測定

3次元映像のリアルタイム性は、映像遅延時間がカメラ映像と同程度で、両映像がほぼ同調する程度とした。評価方法としてカメラ映像と3次元映像の実動作に対する映像遅延時間について測定を行った。

測定方法は、重機の実動作、重機搭載カメラ映像および3次元映像をビデオで同時撮影し、得られた映像から、実動作からの遅延時間を後日算出した(表-1)。

表-1 映像遅延時間測定結果

試験No	鉄骨カッター動作	重機動作に対する遅延時間(sec)	
		重機搭載カメラ	3Dスキャナー
1	閉じ始め	0.33	0.57
2	開き始め	0.47	0.77
3	閉じ始め	0.27	0.33
4	開き始め	0.40	0.43
5	閉じ始め	0.30	0.57
6	開き始め	0.43	0.27
7	閉じ始め	0.33	0.97
8	開き始め	0.40	0.93
9	閉じ始め	0.30	0.70
10	開き始め	0.50	0.47
11	閉じ始め	0.30	0.27
12	開き始め	0.50	1.03
13	閉じ始め	0.30	0.47
14	開き始め	0.50	1.10
15	閉じ始め	0.30	0.37
16	開き始め	0.30	0.70
17	閉じ始め	0.30	0.17
18	開き始め	0.37	0.33
19	閉じ始め	0.30	0.40
	平均遅延時間	0.36	0.57

(c)奥行き情報取得機能

3Dスキャナーによる3次元映像によって、従来のカメラ専用車両と同様に奥行き情報を取得できる機能が重要である。

機能確認の評価手法として、作業対象の正確な奥行き情報を必要とする角材を積み上げる作業

(写真-6)や、それらをベッセル内への投入する作業を行った。

結果、従来の無人化施工と同等の機能を有し、かつ特有の視点変更機能を活用することにより、上方視点からのベッセルへの投入位置確認といった、積み込み作業において有効な機能(図-5)を確認できた。

3.4 性能評価実験

性能(作業効率)について評価を行うため、図-6に示す作業A、B、Cについて所要時間を計測した。作業A、B、Cいずれにおいても、最も作業時間が短かったのは、本システムによるものであり、平均時間においても作業時間が短縮した。今回実験においては、従来方式に対して同等以上の性能が確認できた。



写真-6 ドラムに角材等を積上げる作業

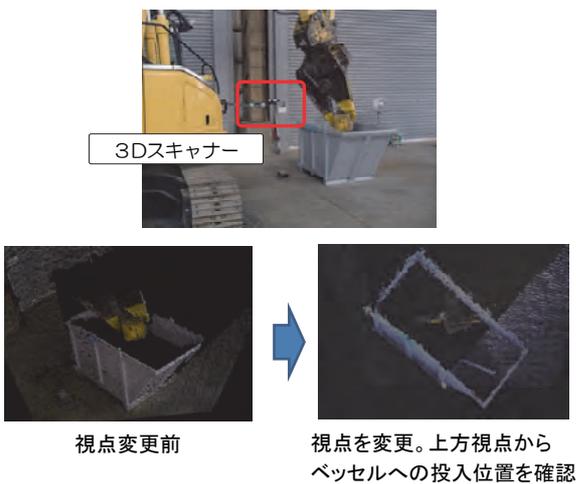


図-5 視点変更機能の活用



	作業順序	条件他
作業A	①尺角を把持 ②ベッセル内へ投入	・尺角一つに対して
作業B	①尺角を把持 ②ケーブルドラムに積上げ	・尺角一つに対して ・ケーブルドラム径550mm
作業C	①尺角を把持 ②ベッセル内へ投入	・尺角三つに対して ・三つの投入順序は任意

図-6 性能評価実験の作業内容

(5)今後の課題

実証実験を通じて3Dスキャナーを用いた本システムが無人化施工において有用であることを確認した。実用化に向けての今後の課題を3つ挙げる。

① 3次元映像の高度化

システムの適用範囲を広げるために、さらに高精度で適用範囲の広い機器を用いた評価試験を行う。また、視認性を高めるためのソフト開発の方向性を検討する。

② 無線通信設備の最適化

施工条件に応じた情報通信方式のカスタマイズや無線通信設備と情報処理機器の最適な構成を整理する。

③ 耐久性の向上

防水・防塵、耐振動性といった、ハード面における耐久性の向上を図り、実用性を高める。

4. おわりに

無人化施工技術は災害対応だけでなく、老朽化が進行する社会インフラにおける点検作業においても実用性の高い応用技術としてのニーズが高まっている。本システムの実用化により、無人化施工の高度化とともに、建設業の抱えるさまざまな課題解決に貢献できるよう、今後とも取り組んでいきたいと考える。

参考文献

- 1) 藤吉卓也：重機遠隔操作における3Dスキャナーの活用，建設機械施工，pp.53～58，2014.4

9. TS を用いた出来形管理の護岸工への適用に向けた検討

ブロック張護岸での計測手法立案及び現場試行による省力化効果等の検証

国土交通省

国土技術政策総合研究所 ○ 近藤 弘嗣
 国土技術政策総合研究所 長山 真一
 (一社)日本建設機械施工協会 椎葉 祐士

1. はじめに

国土交通省が定めた第二期情報化施工推進戦略のプログラムの一つに、「トータルステーション (TS) を用いた出来形管理」の適用工種の拡大が定められている。既に実用化されている土工・舗装工におけるTSを用いた出来形管理を周辺工種に拡大することで、効率面で従来は適用が難しかった小規模工事においてもトータルでの省力化が期待できる。本稿では護岸工の出来形管理にTSを導入することを想定し、TSによる計測方法の立案、築堤工事現場における試行、計測精度の検証、及び効率面での効果確認を行ったので紹介する。

2. 計測方法の立案

2.1 対象とする施工管理基準

本稿で検討の対象とする施工管理基準 (出来形管理) は護岸工のコンクリートブロック張 (図-1) である。

コンクリートブロック張の測定項目は、基準高、法長、コンクリートブロック厚さ、裏込厚さ、延長となっている¹⁾。

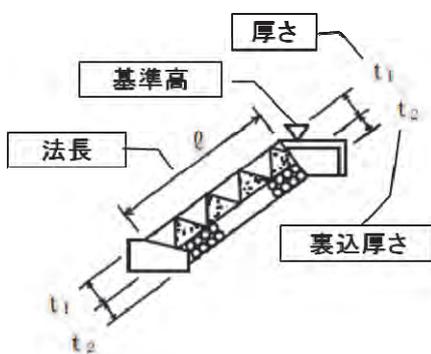


図-1 ブロック張護岸の出来形管理項目

2.2 計測点及び算出方法

TSにより上記の出来形計測項目の測定を行う

場合、図-2 のとおり計測点①～③の3か所を計測したうえで、基準高については計測点②の標高値、法長については計測点②から③の斜距離を算出することになる。これは従前の施工管理データ交換標準(案) Ver.4.1 (以下、データ交換標準) でも対応している。しかし厚さ計測の場合、データ交換標準で対応している2点間の標高値の差異での算出では護岸工の水平でない厚みは表現できない。そこで次に示す式(1)、式(2)により、法面と直交方向の厚さ t を算出することにした。なお、 w 、 x は計測点の座標間水平距離、 y は計測点の座標間標高差、 z は計測点の座標間斜距離で算出できる。

$$t = z \sin C \dots\dots\dots(1)$$

$$C = 90^\circ - (A + B)$$

$$= 90^\circ - (\tan^{-1} \frac{x}{y} + \tan^{-1} \frac{v}{w}) \dots\dots\dots(2)$$

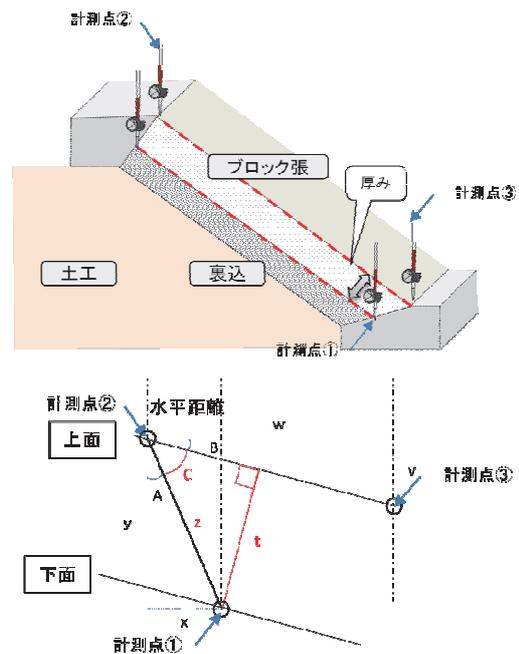


図-2 護岸工出来形計測点及び厚さ算出方法

3. 築堤工事現場における試行

河川土工と護岸工の一連の工事を対象に、TSを用いた出来形管理を導入した場合の計測精度及び時間短縮効果を検証するため、コンクリートブロック張を含む2つの護岸工事で現場試行を実施した。

3.1 工事概要及び試行条件

- ① 工事の概要は表-1のとおり
- ② TSを用いた出来形管理に係る作業及び従来施工の現地作業は共同研究者が実施
- ③ 護岸工に対応した出来形管理用TSソフトウェアは存在しないため、エクセルで別途算出(作業時間については、ソフトウェアが存在するものと仮定)
- ④ 施工延長によらず3測点分の延べ作業時間(人・分)で比較(TSでの測定も3測点)

表-1 試行工事の概要

工事名	工事概要	備考
平成25年度庄内川大留護岸工事(庄内川河川事務所)	施工延長:190m 工期:H25.5.18~H26.3.20	施工管理の有無 河川土工:無 護岸工:有
平成24年度庄内川中志段味舟場護岸工事(庄内川河川事務所)	施工延長:811m 工期:H25.2.21~H26.3.20	施工管理の有無 河川土工:有 護岸工:有

3.2 時間短縮効果の検証

(1) 検証する作業項目について

河川土工及び護岸工における内業から出来形計測に要する作業時間・人員を記録する。すべてを従来手法で行った場合とすべてをTSを用いた出来形管理を適用した場合で比較した。比較対象とする作業の流れの詳細は図-3のとおりである。

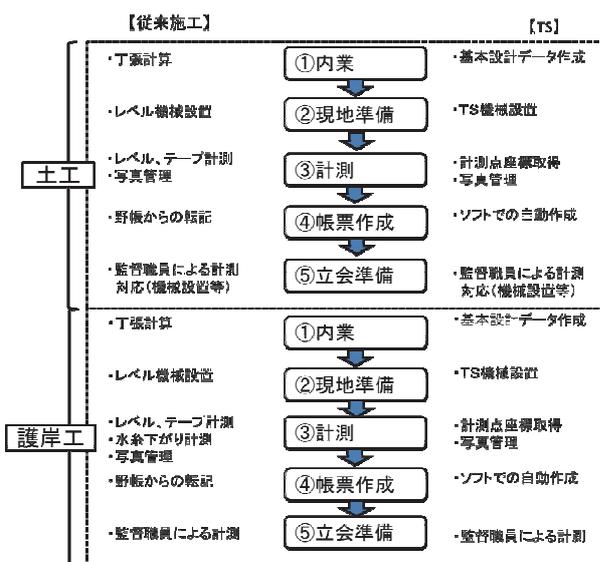


図-3 作業時間を比較する作業項目

このうち、TSの場合は⑤・⑩を除いて現地で実際に作業を実施して作業時間を測定した。従来施工の場合は、①・④・⑤・⑥・⑨・⑩を除いて、現地作業の作業時間の実測結果に基づくものである。作業時間の実測をしていないものは、施工者に対する作業時間のヒアリング調査から算出した。(2) 作業時間の比較結果

従来施工とTSによる作業時間の比較結果は、大留護岸工事が図-4、中志段味舟場護岸工事が図-5のとおりである。なお、大留護岸工事については、本来河川土工に関する出来形管理を行わない工事であるが、比較のため、護岸工の計測に係る作業時間(②・③)の現地実測結果から河川土工での作業時間を推定した。結果としては、両工事ともトータルの作業時間が縮減するという結果が得られ、特に中志段味舟場護岸工事では、379(人・分)が327(人・分)と約1.4割作業時間が縮減した。

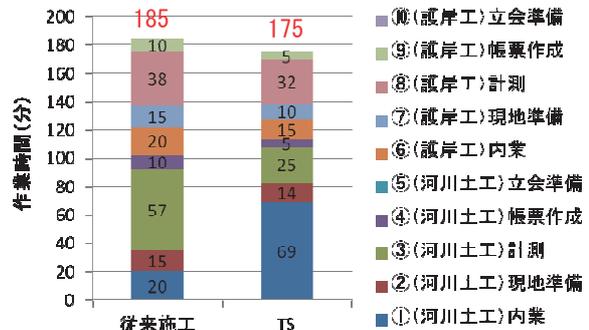


図-4 大留護岸工事における作業時間比較

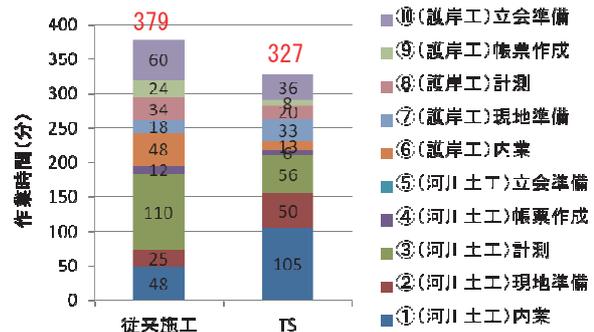


図-5 中志段味舟場護岸工事における作業時間比較

この理由として考えられるのは、⑥に相当する基本設計データ作成作業の効率化である。護岸工単独でTSを用いた出来形管理を行う場合に入力が必要となる「平面線形」、「縦断線形」の情報について、河川土工で入力したデータをそのまま流用できるためである。実際に今回の試行でも、流用が可能であることが確認できた。

両工事とも、河川土工だけではTSを用いた出

来形管理の方が時間を要しているが、これはわずか3断面での比較結果であるためと考えられる。逆に言えば、管理断面の少ない小規模な現場の場合でも、TSを用いた出来形管理を護岸工と導入すればトータルでの効率化が期待できることの証左とも言える。

3.3 計測精度の検証

(1) 検証する測定項目について

基準高と法長については、土工のTS出来形管理で従来手法と同程度の精度は確立している²⁾、厚さについて検証の対象とした。TSによる厚みの算出結果を従来の厚さの測定手法である水系下がり計測結果と比較することとした。TSでの計測箇所は、大留護岸工事では法枠ブロック表面の法尻側(写真-1左)、及び法肩側を計測点とし、中志段味舟場護岸工事では、調整コンクリート表面の法尻側(写真-1右)、及び法肩側を計測点とした。また、土工面の高さを算出するため、同じ箇所を施工前にも計測した。



写真-1 TSによる計測点（法尻側）

(2) 計測結果の比較

TSによる厚みの算出結果を、従来の厚さの測定手法である水系下がり計測結果と比較したのが以下の図-6である。

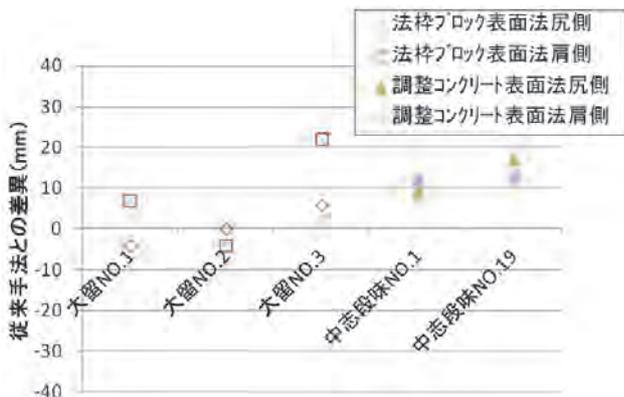


図-6 計測結果比較

TSそのものの計測誤差が5mm程度であるので、2面間の距離で算出する厚さの誤差は10mm程度に収まることが望ましい。しかし、結果としては概ね10mm以内に収まるものの最大22mmの差異も見受けられた。

(3) 誤差要因の考察

TSと従来手法の計測結果の差異が最大22mmとなった大留護岸工事の測点No.3について、その要因を考察する。大留護岸工事における従来施工の厚み計測結果について設計値との比較を行ったものが図-7であり、設計値よりも厚めに施工されていることがわかる。なお、基準高を計測したものが図-8であるが概ね+5mm程度に収まっている。そこで推察出来るのは、特に下がり計測をした箇所について、図-9のように土工面の仕上がりが低かったということである。

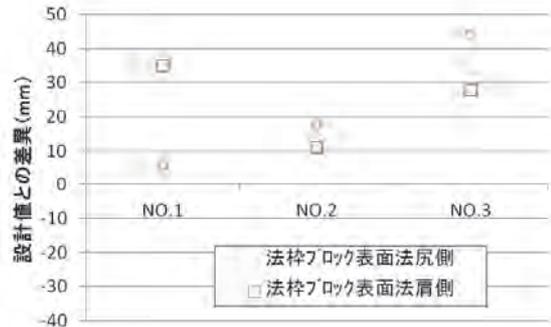


図-7 従来手法の厚み計測結果と設計値の比較



図-8 基準高と設計値の比較

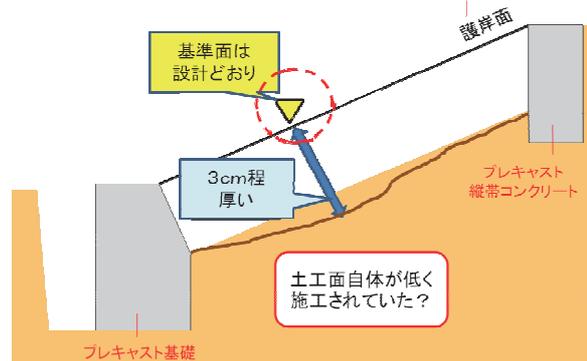


図-9 大留護岸工事測点No.3の横断模式図

本試行では、TSの計測点と下がり計測の箇所を必ずしも一致させていなかったため、計測箇所間の土工面の高さの差が、TSによる計測と従来手法による計測の差にそのまま表れたことが推察される。

4. 基本設計データの作成手法

TSを用いた出来形管理では、設計形状を3次元データ化した「基本設計データ」を作成する必要があり、護岸工への適用にあたって3次元データの作成手法を考案した。

4.1 標準的なデータ作成の流れ

護岸工の基本設計データ作成にあたっては、中心線形は、河川土工で作成する築堤法線や測量法線の線形データを活用し、横断形状は、河川土工の横断形状を活用する。護岸工で追加される基本設計データは、図-10のとおり、土工面上の裏込表面、すなわち護岸の下面の横断形状、護岸上面の横断形状となり、それらを順次作成する。

築堤工事では、土工面の沈下による影響を考慮し、実際の出来形を反映した基本設計データの作成も考えられる。しかし、施工者へのヒアリングによると、従来の護岸工の丁張計算では当初の設計の高さを用い、施工で沈下分を高め盛土することで対応していることから、護岸工のデータ作成においても土工と同様に、設計値をもとに作成する。

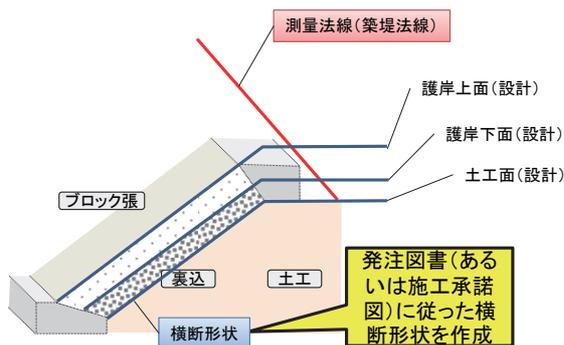


図-10 護岸工の基本設計データの標準的な作成方法

4.2 厚みを高さで管理する手法の提案

丁張計算を当初設計どおりに行っているのであれば、各層の厚さではなく表面の絶対的な高さを管理項目としても、施工の手法上ほとんど違いはなく、その上、厚さ確認のための水系下がりによる計測や写真管理が省略でき、現場計測がより効率化することが期待される。

本手法では計測作業性を考慮し、計測点は設計として作成した護岸上面あるいは裏込上面の任意位置とする。出来形計測点と対応する基本設計データの面の標高の差分により出来形を評価することになる。

この場合、施工管理基準として新たに高さの規格値を定める必要がある。従来手法の管理基準では、法面に垂直な方向の厚さの規格値が-50mm以上であるので¹⁾、高さで同じ値を採用すると過剰に薄くなる危険があるため、図-11のとおり勾配を考

慮した規格値とすることが必要である。

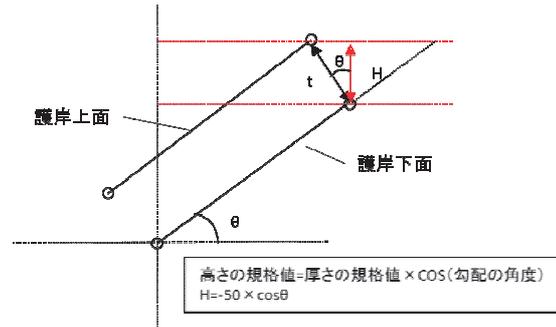
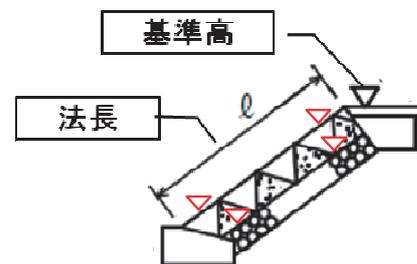


図-11 勾配を考慮した高さの規格値の考え方

以上より、厚みを高さで管理する場合の規格値について以下の図-12のとおりとすることを提案したい。



測定項目		規格値
基準高		± 50
法長	L < 3m	-50
法長	L ≥ 3m	-100
高さ(ブロック張)		-50 × cosθ
高さ(裏込)		± 50 × cosθ
延長		-200

図-12 高さで管理する場合の測定箇所と規格値

5. おわりに

本稿では、TSを用いた出来形管理の護岸工への適応拡大の可能性とそれによる省力化の可能性について論じた。今回試行の対象としたのは、ブロック張護岸と一部工種に留まる。国土技術総合研究所では、さらなる現場試行を通じて、同じ護岸工の別工種への適用拡大や、道路土工に係わる類似工種（土留・擁壁工）への適用拡大についてもその可能性を明らかにした上で、順次実用化につなげていきたいと考える。

参考文献

- 1) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値（案）平成23年
- 2) 国土交通省：TSを用いた出来形管理要領（土工編）平成24年

10. シームレス補正機能を備えた転圧管理システム

「GNSS 情報遮断時の慣性/TS 補正切り替えシステムの開発」

鹿島道路(株)機械部 ○ 伊藤 圭祐
(株) トライテック 梶原 泰樹

1. はじめに

転圧管理システムとは、トータルステーション（以下 TS）あるいは全地球測位システム（以下 GNSS）を用いて締固め機械の位置情報をリアルタイムに記録し、舗装体の品質を締固め回数で面的管理することで、舗装品質の均一化を図るシステムである。

従来の当社転圧管理システムは、GNSS のみを用いた仕様であった。通常、GNSS 転圧管理システムを天空に遮蔽物のある現場条件のもと（高架下やカルバート等）で使用すると、遮蔽物付近にて精度を確保するための十分な衛星数が捕捉出来ないため、衛星の配置状況が 1 方向に偏ってしまう等の不具合が生じる。精度確保に必要な衛星数が捕捉出来ない状態であれば、転圧情報が記録されず、1 方向に偏っている状態であれば、データに誤差が発生してしまう事が懸念される。そのため、転圧管理システムを使用するには、衛星からの信号を受信できる条件下である必要があり、天空が開けていない場所では使用できなかった。また、高層ビル等、周囲に反射物がある場合、衛星からの信号を反射させてしまい、信号が届くまでの時間差で位置情報がズレてしまうマルチパスという現象が起こってしまう。

本報は上記の不具合を解消するために開発したシームレス補正機能を備えた転圧管理システムについて紹介するものである。

2. 転圧管理システムによる品質管理

転圧管理システムとは、従来の砂置換法や RI 計測法による代表点の管理に代えて、あらかじめ締固め回数と密度の相関を調査した上で、TS や GNSS から得られる締固め機械の位置情報をリアルタイムに表示・記録し面的管理する手法である（図-1）。締固め機械の軌跡や転圧回数が色分けし

てモニタ画面に表示され、リアルタイムに転圧状況を確認できるため、オペレータの作業負担や転圧ムラの軽減が期待できる。当社転圧管理システムの表示画面例を写真 1 に示す。

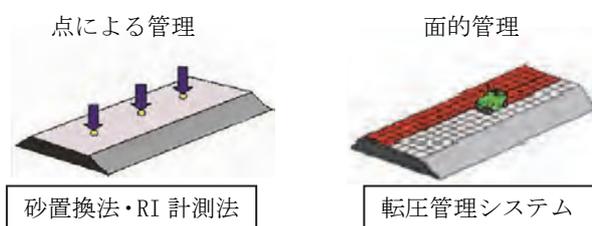


図-1 品質管理手法

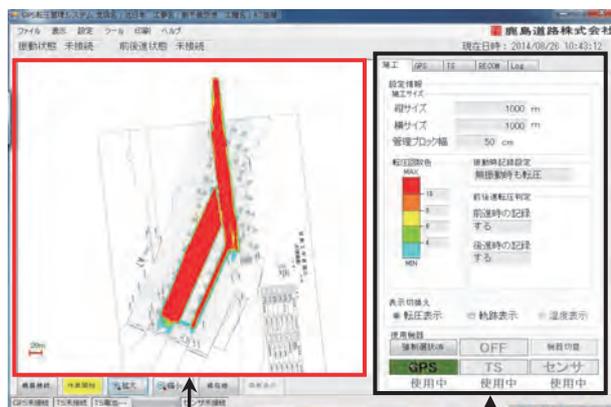


写真-1 転圧管理記録表示画面

3. GNSS 転圧管理システムの機器構成

転圧管理システムに GNSS を用いる場合は測位精度を確保するために、RTK-GNSS（干渉測位方式）と VRS-RTK（仮想基準点方式）の 2 つの衛星測位方式の何れかを採用しており、現場状況に応じて使い分けが可能である。

3.1 RTK-GNSS

RTK-GNSS は測位の対象となる移動局（締固め機械）の近くで、座標位置のわかった場所に基地局を設置する。そして、GNSS 衛星からの信号を移動局と基地局とで同時に受信し、基地局から移

動局へ補正データを無線で送信することにより、移動局の測位精度を向上させるシステムである（水平誤差約±15mm）。

RTK-GNSS の当社転圧管理システム機器構成を写真 2 に示す。移動局は、転圧状況を表示・記録するための車載 PC、レーザユニット（GNSS 受信機及び、基地局からの補正データを受信するための無線受信器）、GNSS アンテナで構成される。基地局は GNSS 受信機、補正データを送信する無線送信機、GNSS アンテナで構成される。移動局と基地局との最大距離は使用する無線出力の到達距離に左右される。また、基地局からの無線出力範囲内であれば、複数台の移動局の同時稼働が可能である。

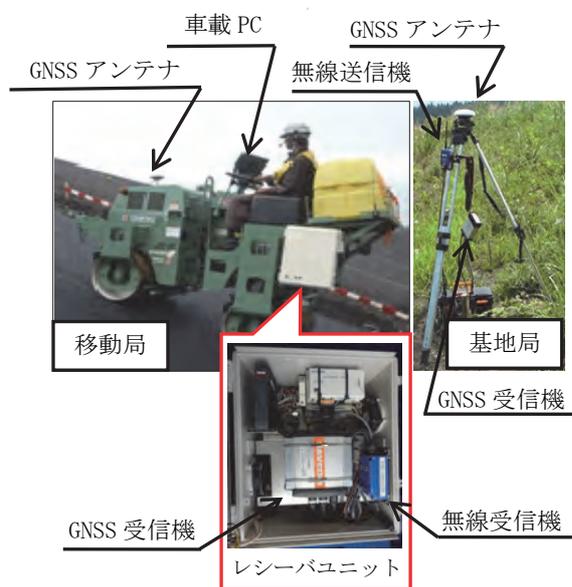


写真-2 RTK-GNSS 機器構成

3.2 VRS-RTK

VRS-RTK は無線受信機の代わりに、仮想基準点補正データを受信するための携帯通信端末が組み込まれており、現場内に基地局を設置する必要がない。

図 2 に示すように、まず移動局で単独測位を行い、携帯通信端末を介して位置情報を配信局へと送信する。同時に電子基準点（国土地理院が日本全国に設置しているもので 1,300 点ほどある）データを配信局で受信し整理を行う。配信局は送られてきた位置情報と 3 点以上の電子基準点観測データを元に移動局付近に仮想基準点（仮想の基地局）を構築する。これによって、あたかも移動局の近くに仮想の基地局があるかのように補正デ

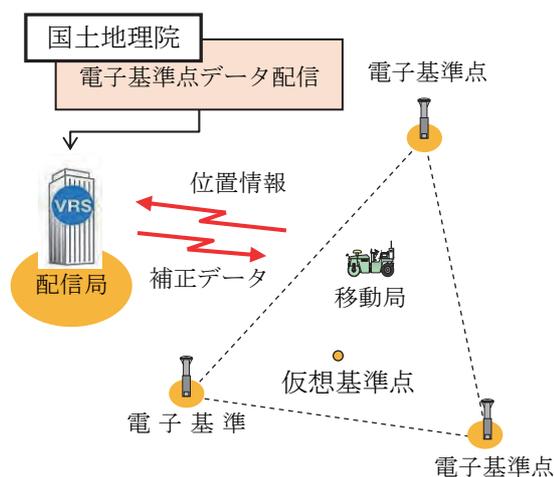


図-2 VRS-RTK 概念図

ータを取得できる。VRS-RTK の当社転圧管理システム機器構成を写真 3 に示す。

VRS-RTK は、基地局の設置が必要ないため現場装置の簡略化ができるうえに、RTK-GNSS と同等の精度を得られることから利用される機会が増えている。なお、携帯通信端末を用いて配信局のデータを入手するため、携帯電話通信費と配信データ費が発生する。また、携帯電話の通信エリア内であればデータを取得することができないので利用するには注意が必要である。



写真-3 VRS-RTK 機器構成

4. 現場事例

ここで紹介するのはシームレス補正機能を備えていない転圧管理システムを適用した現場であり、シームレス補正機能を備えた転圧管理システムを開発する背景となったため、ここに紹介する。

4.1 ダム・ため池舗装工事

写真 4 はダム・ため池舗装工事に RTK-GNSS 転圧管理システムを用いた際のものである。施工現場は携帯電話の受信が安定しないエリアであった

ため、RTK-GNSS 方式を採用した。通常、ダム・ため池舗装工事の品質管理において砂置換法のようなコア抜きを行う方法では水漏れなどの恐れがあるため、工法規定方式に基づいて品質管理を行う。工法規定方式とは盛土の締固めに関する規定方式の一つで、事前の試験施工により決められた回数を転圧し品質管理を行うものである。転圧管理システムは広大なフィールドにおいて、転圧回数管理・記録に大いに役立った。



写真-4 ダム・ため池舗装工事例

4.2 高速道路ジャンクション舗装工事

写真 5 は高速道路ジャンクション舗装工事に VRS-RTK 転圧管理システムを用いた際のものである。図 3 は実際に現場で記録した転圧管理シ



写真-5 高速道路ジャンクション工事例



図-3 転圧管理状況画面

ステムの表示画面である。○印で囲んだ部分ではカルバートの転圧作業のため、衛星からの信号が遮断され、実際の締固め機械の軌道から大きく逸脱した転圧記録結果となった。これは衛星を用いるシステムでは避けることのできない問題であり、現場状況をあらかじめ把握しておく必要がある。

5. 追加機能

従来の当社転圧管理システムは GNSS のみの対応であったため、現場条件によっては使用可能範囲が制限されてしまう場合もあった。そこで、新たに TS と慣性センサをシステムに追加し従来の不具合を解消した転圧管理システムを開発した。

5.1 TS 転圧管理システム

TS を用いて締固め機械の位置情報を取得することにより、記録、表示、管理するシステムが TS 転圧管理システムである。TS 転圧管理システムの概要を以下に示す。

現場内に設置された自動追尾式 TS は既知点を視準する事によって、現場のローカル座標系を認識する。この状態で締固め機械に取り付けたプリズムを自動追尾し、プリズム座標を取得する。移動局は、TS から現在の座標を無線データ通信により連続的に受信し、転圧軌跡を記録するという機構である。TS の設置位置は使用する場所の選定と現場内の構造物等で追尾が遮られない位置を確認する必要がある。また、GNSS 転圧管理システムは複数台の同時使用が可能だが、TS 転圧管理システムは TS1 台に対し、移動局 1 台の組み合わせとなる。TS 転圧管理システムの機器構成は、従来の転圧管理機器に加え、TS からの位置情報を受け取るための無線機、TS が移動局の位置を補足するためのプリズムで構成される。機器の構成を写真 6 に示す。

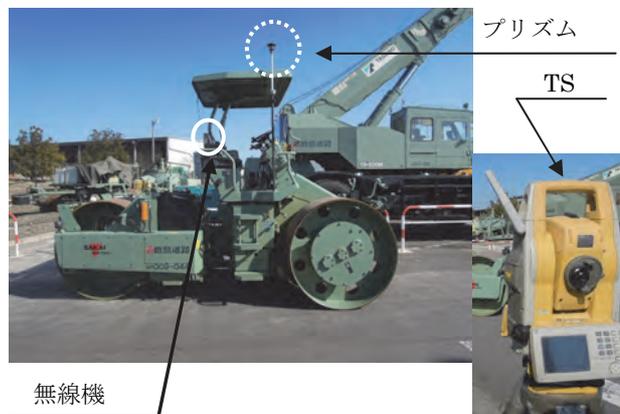


写真-6 TS 転圧管理システム機器構成

5.2 慣性センサ

慣性センサを追加した転圧管理システムは GNSS や TS での転圧管理を行う際の補助的な物であり、慣性センサのみで全施工区間を管理するものではない。慣性センサは 1 台の締固め機械に対して 2 種類必要となる。1 つ目は、締固め機械の移動距離を計測するものである。2 つ目は締固め機械の推進角を計測しシステム上で進行方向を定めるものである。慣性センサの取り付け例を写真 7、写真 8 に示す。

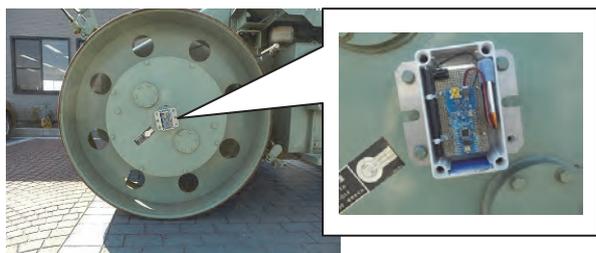


写真-7 慣性センサ機器構成

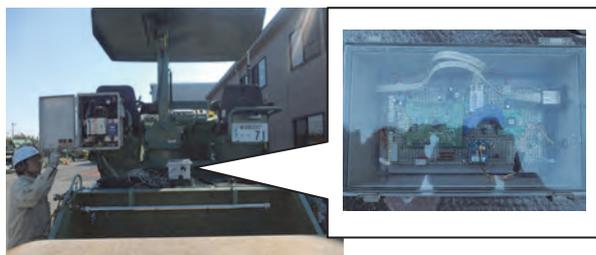


写真-8 慣性センサ機器構成

6. シームレス補正機能とは

シームレスとは「継ぎ目の無い」という意味である。ここで挙げるシームレス補正機能とは、複数の測位技術（相対測位技術を含む）を組み合わせることにより締固め機械の位置情報を途切れることなく捕捉、記録することが出来る機能のことである。本機能と従来の GNSS 転圧管理システムを組み合わせることで、より多くの現場での活用を目指した。選択可能なシステムの組み合わせを以下に示す。

- | | |
|----------------|-----------|
| ①GNSS+TS+慣性センサ | ②GNSS+TS |
| ③GNSS+慣性センサ | ④TS+慣性センサ |
| ⑤GNSS 単体使用 | ⑥TS 単体使用 |

①の GNSS+TS+慣性センサを例に説明をすると、通常時は GNSS にて締固め機械の位置情報の取得を行い、トンネルへの進入等の現場条件により GNSS からの測位精度レベルが低下した時点で、自動的に TS による計測に切り替わる。仮に、GNSS からの測位精度レベルが低下した状態で、かつ、TS の追尾が他の重機などに遮られる等により、何

れの位置情報とも取得できなかった場合は、慣性センサからのデータに自動的に切り替わる。トンネルを抜けて再度 GNSS の測位精度レベルが確保された時点で GNSS に自動的に切り替わり位置情報の測定が継続的に行われる。これにより、シームレスな転圧軌跡や転圧回数の記録が可能となる。現場条件により①～⑥の組み合わせを選択する。以下の図 4 にシステムのイメージ図を、写真 9 に試験状況をあげる。

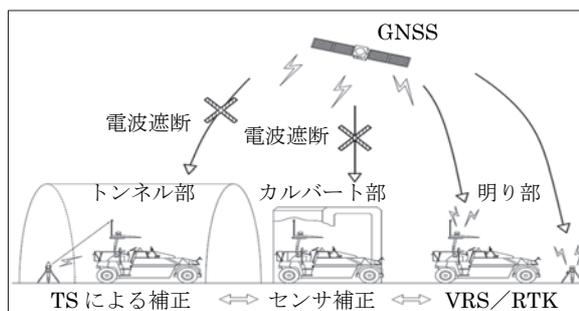


図-4 システムイメージ図



写真-9 試験状況写真

7. おわりに

本報では、GNSS の他に TS、慣性センサを使用して「シームレス補正機能」を盛り込んだ転圧管理システムの紹介を行った。現場で GNSS 転圧管理を行う上で問題となっていたカルバートや切土等の地形に対応した機器の調整やソフトウェアの改善などを図ってきた。それにより、様々な現場条件に対応できるシステムになったと確信している。今後は新システムの普及に努めると共に、使いやすいシステムにしていきたいと思う。

参考文献

- (1) 国土交通省情報化施工推進戦略 (2008 年 7 月) : <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/kensetsusekou/kondankai/IC Tsekou/sennryaku.pdf> (2012 年 10 月時点)
- (2) 株式会社ジェノバ: カタログ「JENOBA 方式によるネットワーク型 RTK-GPS 配信サービス」
- (3) 鹿島道路(株)大竹元志: 「折返し指示機構を搭載した GNSS 転圧管理システム」, 舗装 (2012 年 9 月)

12. MC施工を前提とした出来形計測（計測許容範囲拡大）

手法の効果検証

国土交通省関東地方整備局 ○山本 啓介
 国土交通省関東地方整備局 二瓶 正康
 （一社）日本建設機械施工協会 竹本 憲充

1. はじめに

国土交通省では、建設施工の生産性向上、品質確保、安全性向上、熟練労働者不足への対応など、建設施工が直面している諸課題に対応するICT施工技術（情報化施工）の普及を進めているところである。

関東地方整備局では、情報化施工の一つであるトータルステーション（以下、TS という。）の活用拡大として舗装工事への導入及び普及を図るため、地整版の要領策定に取組み平成21年8月「施工管理データを搭載したトータルステーション(TS)を用いた出来形管理要領（案）」【舗装工事編】を公表した、平成24年には同要領を元に本省より「TSを用いた出来形管理要領（舗装工事編）」が通知されるなど情報化施工技術の活用拡大に向けた取組を推進しているところである。

近年の舗装工事において情報化施工の普及は進み、モータグレーダ等の施工機械のマシンコントロール（以下、「MC」）による施工も普及してきている。

しかし、ICTを活用した施工においても、既存の施工管理基準に準じ、丁張り等による管理断面毎での定点管理を行っていることから、ICTの導入

メリットが活かしきれていないのが現状である。

本稿では、MC等の施工特性と出来形管理用TSの機能に着目し、MC等を導入した現場における従来の出来形管理手法の簡素化・省力化を目的とした新たな出来形管理手法の効果を検証した結果について報告する。

2. 情報化施工の活用状況

平成25年度までの全国での情報化施工活用件数を図-1に示す。

平成25年度の情報化施工技術別の活用回数は、TS出来形が789回となっている。TS出来形のうち、使用原則化となったTS出来形(10,000m³以上の土工)の活用回数は552回と伸びているが、それ以外の一般化推進技術等については、MC技術(モータグレーダ)が121回、MC/MG技術(ブルドーザ(3D))が56回、MG技術(ブルドーザ(2D))が15回、MG技術(バックホウ(3D))が78回、MG技術(バックホウ(2D))が36回、TS・GNSS締固めが140回といまだに活用が少ない状況であり、本稿ではその対応として活用の環境整備に着目している。

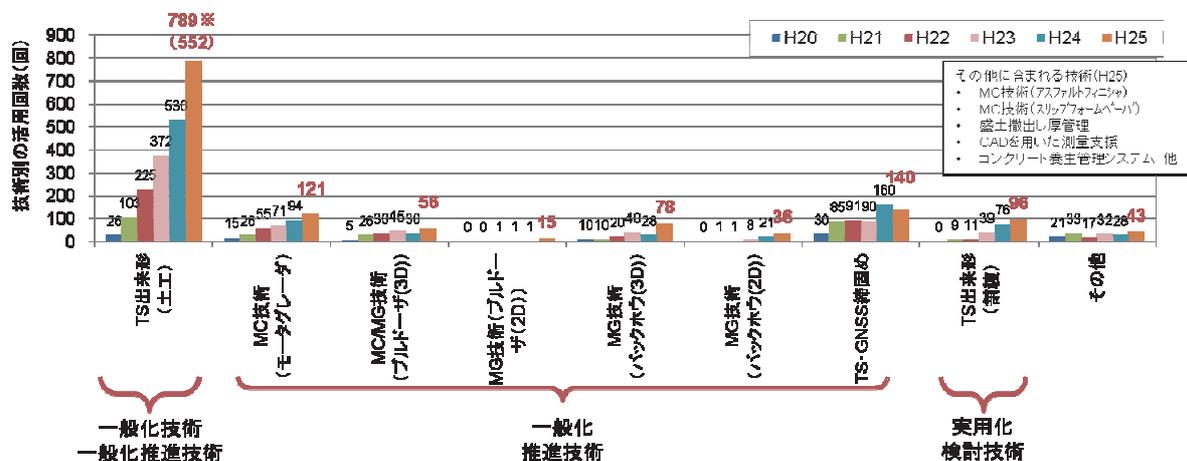


図-1 情報化施工技術の活用件数

3. 新たな出来形管理手法の検討

3.1 出来形管理手法の効率化（案）

MCでは、施工中の排土板の位置・標高をリアルタイムに取得するとともに、施工用データ（設計データ）との差分を算出し、これに基づき排土板を設計形状に沿うように自動制御する。MCを使用した場合、管理断面以外の区間においても管理断面と同等の出来形品質を実現することができる。

また、出来形管理用 TS では任意箇所でも出来形の座標を取得することができ、これらの技術を併用する場合、出来形管理箇所を管理断面上に定めなくても設計と出来形との差を適切に確認することが可能と考えられる。

◇現状の課題

土木工事施工管理基準及び規格値に示される土工、路盤工の出来形管理基準では、道路延長方向に40m毎に定められた管理断面上で、法肩・法尻・道路中心の基準高、幅、及び法長（土工のみ）を計測、管理することが求められている。そのため、出来形管理時に管理断面を示す丁張りの設置が必要となっている。MCによる施工では、丁張り設置箇所数を大幅に低減できるにもかかわらず、施工後の出来形管理や監督検査のためだけに丁張りが設置されるという非効率が生じている。

◇普及に向けた環境整備

出来形計測の効率化に向けて、施工管理、出来形計測の効率化（出来形管理箇所数の低減、出来形計測手間の減少）に向け検討を行った。

なお、図-2 に新たな出来形管理運用(案)の①近傍点管理、②代表点管理のイメージを示す。

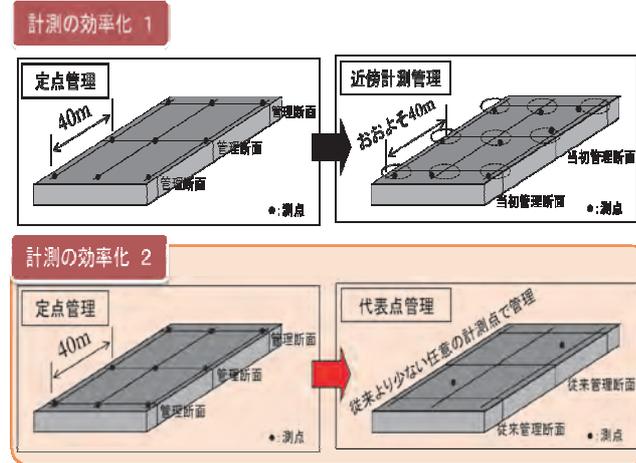


図-2 MC 施工を前提とした施工管理効率化のイメージ

① 現行手法に対し、管理断面上の位置からズレを許容する方法（近傍点管理）

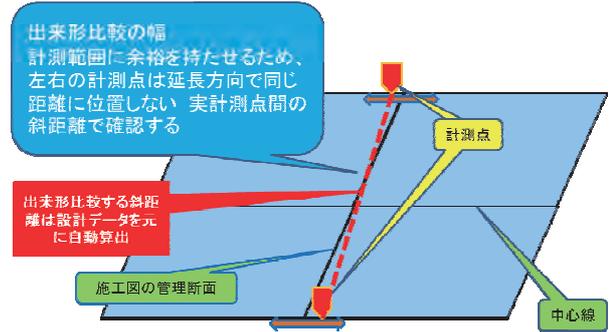
◇概要

管理断面に対して延長方向に一定距離の計測範囲を認めるもので、道路であれば中心点近傍、左右端部の3次元座標を計測し、その計測点に対応

した設計上の座標値を用い基準高を管理する、併せてこの計測座標値を用いて、道路左右端部の2カ所の点間距離から幅を算出する。

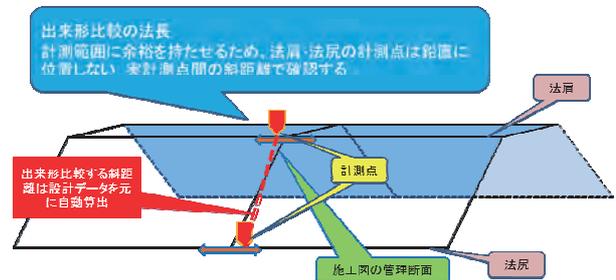
出来形比較の対象寸法は計測点に対応した設計上の点を用いて算出した数値となり、管理断面の数値とは異なってくる。また同様に法肩・法尻でも計測範囲認め取得した座標の点間距離から法長を算出、管理する手法である。

図-3、図-4 に幅および法長についての、近傍点計測のイメージを示す。同図に示すように、管理断面から一定距離の範囲内（道路左右端点）で計測した3次元座標を用いて計算した斜距離を幅として管理する。



計測点と管理断面は一致していない
・設計図書で示された数値を用いて施工全面のモデルと計測比較
※ 従来と異なり斜距離での出来形比較となる

図-3 近傍点管理による幅の計測イメージ



計測点と管理断面は一致していない
・設計図書で示された数値を用いて施工全面のモデルと計測比較
※ 従来と異なり斜距離での出来形比較となる

図-4 近傍点管理による法長の計測イメージ

◇メリット

・現行の定点管理と比較して、計測点のずれが大幅に許容されるため、逆打ち等による計測点の位置出し作業時間が短縮される。丁張り管理も軽減され出来形計測の準備作業が大幅に軽減される。

現行の「土木工事施工管理基準および規格値(国土交通省各地方整備局)」(以下、現行基準という。)を変更するのではないため計測時の運用通知により実現が可能である。

◆デメリット

・現行の出来形管理用 TS のフィールドソフトは幅・法長において斜距離算出に対応していない他、

帳票も従来と若干異なるため、ソフトウェアの改良や仕様変更が必要となる。

②管理断面位置にかかわらず、任意の点で三次元座標を計測し出来形管理する方法（代表点管理）

◇概要

出来形管理点を管理断面上または管理断面付近に定めるのではなく、まったく任意の位置で計測・管理する手法である。

MC等により施工した現場においては、活用区間全面において施工用の機械位置データを計測している。

また、施工全面で管理断面と同等の出来形品質を有することが可能であるから、施工機械の位置データや制御記録等を品質保証のデータとして提出することで、出来形管理を任意の箇所において設定し、また現行よりも計測頻度を軽減することが可能と考えられる。

図-5に代表点管理のイメージを示す。幅や法長等の形状数値ではなく、計測した座標値とその計測点に対応した設計上の座標値との離れで出来形管理をするものであり、現行基準とは異なる。

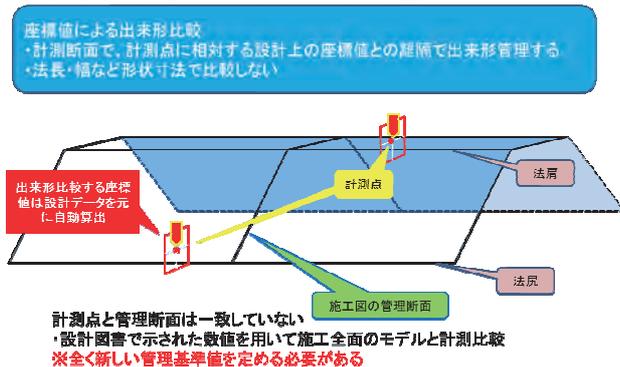


図-5 代表点管理による計測イメージ

◇メリット

- ・出来形計測時に、管理断面の逆打ち・位置出しが不要になるため、出来形計測の準備作業が大幅に軽減される。
- ・出来形計測点数が削減されるため、出来形計測時間が大幅に短縮する。
- ・監督職員が決めた任意の箇所で出来形を実測・確認できこれまで出来形比較出来なかった箇所で出来形の良否を確認出来る。

◆デメリット

- ・出来形管理用 TS のフィールドソフトの変更開発（計測・記録・帳票作成等）が必要となる。
- ・現行基準には、座標値を用いた出来形管理が存在しないため、全く新しい基準として計測頻度・規格値等を設定する必要がある。
- ・施工時の機械位置データ等を施工保証として提出いただく場合、システム上そもそもデータが保存されているか、提出が可能であるのか、そのフ

ォーマット・データ構造の標準化を求めるのか対応調整に一定の期間が必要と想定される。

3.2 近傍点管理、代表点管理の取組実施上の課題

近傍点管理は、計測頻度、出来形管理項目、規格値が現行と同じであるから、現行基準の変更を必要としないため、TS 出来形管理の運用ルールの拡張として比較的容易に導入が可能である。これに対し、代表点管理は民間企業の任意施工ツールである MC 等のシステムへの修正対応が想定される。また施工機械位置データの評価、有効性の検討を踏まえ提出に関わるルールの策定と座標値を用いた出来形管理基準・規格値として現行基準の変更が必要となるため、変更の妥当性については十分な検討が必要である。

以上の整理結果から、代表点管理は継続的に検討し、まず近傍点手法による試行実証を行い、効果の確認を行うこととした。

3.3 MC (又は MG) 施工における出来形管理運用 (試行案) の概要

(1) 適用工種

適用工種は下記の 2 工種とし、「TS を用いた出来形管理要領 (土工編)」、「同 (舗装工事編)」を使用する工事に適用することとした。

① 土工 (掘削工、盛土工)

- ・管理項目は、基準高、法長、幅とする。
- ・延長方向の測定基準で示される測定間隔は「概ね」とし、管理断面から前後 1m 程度の測定許容範囲を設ける。
- ・施工起終点においては、許容範囲を設けないこととし、測定頻度は通常の測定間隔で実施する場合と同数以上を測定する。

② 舗装工

- ・管理項目は、基準高、厚さ・幅 (活用する場合) とする。
- ・延長方向の測定基準で示される測定間隔は「概ね」とし、施工延長方向に管理断面から前後 1m 程度の測定許容範囲を設ける。
- ・道路中心線上での測定においては、中心線直上に拘わらず中心線に対して横断方向で概ね 1m の測定許容範囲を設ける。
- ・施工起終点においては、許容範囲を設けないこととし、測定頻度は通常の測定間隔で実施する場合と同数以上を測定する。

(2) 規格値

近傍点管理では、基準高、幅、法長ともに管理項目に変更が無いことから、管理規格値についても現行基準どおりとした。

4. 試行工事における効果の検証

試行工事における効果検証に向けての作業フローは以下のとおりとした。

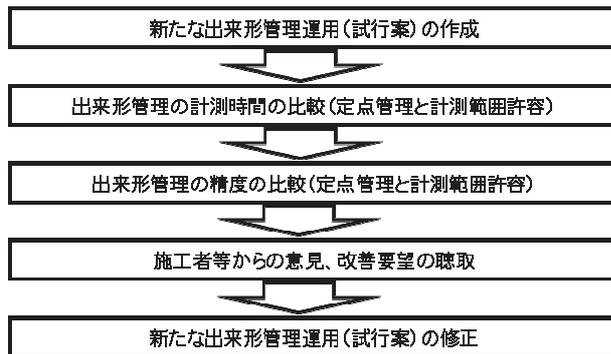


図-7 作業フロー

4.1 試行現場概要

近傍点管理の効果検証を実現現場において実施した。対象工事の概要を以下に示し、工事範囲、施工状況を図-8、図-9、図-10に示す。

- ・ 工事名 新4号古河地区道路改良(その3)工事
- ・ 場所 茨城県古河市高野地先～葛生地先
- ・ 工期 H25. 4. 28～H26. 3. 31
- ・ 発注者 国土交通省関東地方整備局
宇都宮国道事務所
- ・ 工事内容
 - 工事延長 L=250m(No. 449～485)
 - 土工 掘削約 16,000m³、路体盛土約 17,000m³、
路床盛土約 12,000m³
 - 舗装工 約 4,000m²
- ・ 施工手段として使用した情報化施工技術
【道路土工】
 - 1) 路体盛土の敷均し・締固め
→締固め作業に「GNSS を用いた締固め回数管理システムを使用」
 - 2) 路床盛土の敷均し・締固め
→締固め作業に「GNSS を用いた締固め回数管理システムを使用」
 - 3) 路体・路床の法面整形
→法面整形作業に「MG バックホウ」を使用
- 【路盤工】
 - 1) グレーダを用いた路床整正
→路床整正作業に「MC グレーダ」を使用
 - 2) グレーダを用いた上層路盤・下層路盤の敷均し・締固め
→敷均し作業に「MC グレーダ」を使用
→締固め作業に「GNSS を用いた締固め回数管理システム」を使用
- ・ 試行箇所
 - 試行実施日 H25. 11. 8(路床)、29(下層路盤)
 - 試行区間 No. 466～470 の5断面

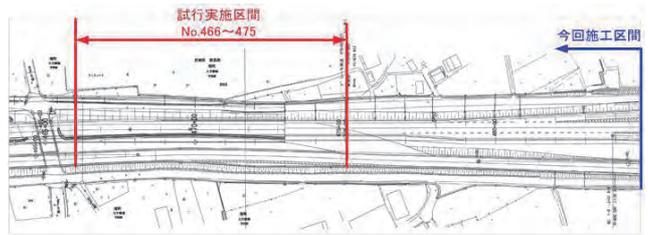


図-8 工事範囲、計測箇所等の概要図



図-9 施工状況



図-10 下層路盤の敷均し状況(MC グレーダ)

4.2 検証結果

試行工事における効果の検証の項目として着目した、施工管理の省力化(出来形管理手法の簡素化・省力化)について以下に述べる。



図-11 下層路盤の出来形計測状況

(1) 出来形計測作業の検証

出来形計測点(定点)からのズレの許容値を10cmから1.5mまで変化させた場合の出来形計測にかかる作業時間を比較した結果を図-12に示す。

路床6断面、下層路盤6断面の計12断面(各断面3点、計36点)の出来形計測作業にかかる作業時間を平均したもので、現行の出来形管理点(定点)の1cm以内と比べ1m以内のズレを許容した場合は、約50%の出来形計測時間の低減が図られた。

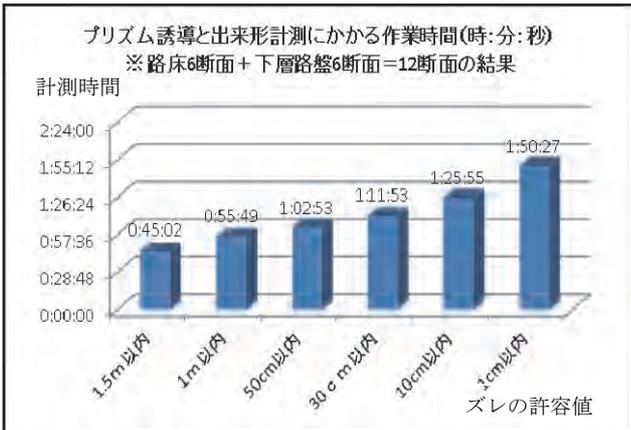


図-12 出来形計測点の平面位置のズレの許容値と計測時間

(2) 出来形計測精度の検証

出来形計測点(定点)からのズレを許容した際の出来形計測結果の差異について、検証結果を図-13、14、15、16に示す。

① 基準高さ

図-13は、出来形管理点(定点)での設計高さを用いて基準高を算出したものである。

定点付近では±0.03mの範囲にあるが、平面位置でのズレの許容を大きくすると、±0.05mとバラツキが大きくなる。

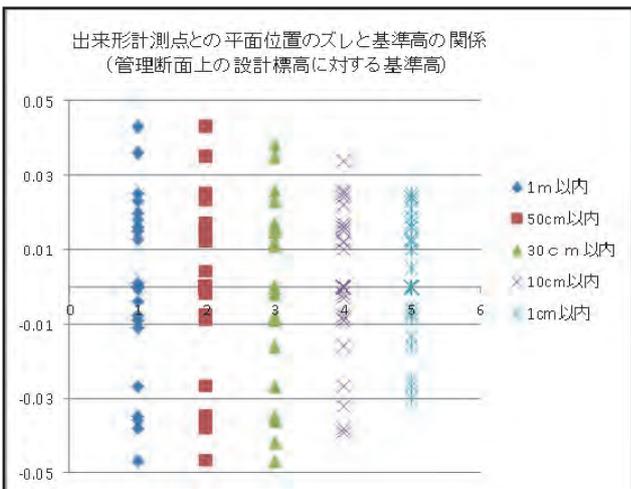


図-13 出来形計測点との平面位置のズレと基準高との関係(管理断面上の設計標高に対する基準高)

図-14は、実際に出来形計測を行った点の位置(x, y)における設計高さを三次元設計データから求め、対する基準高を算出したものである。

1m程度まで許容値が大きい場合でも出来形管理点(定点)の場合とバラツキは変わらない。

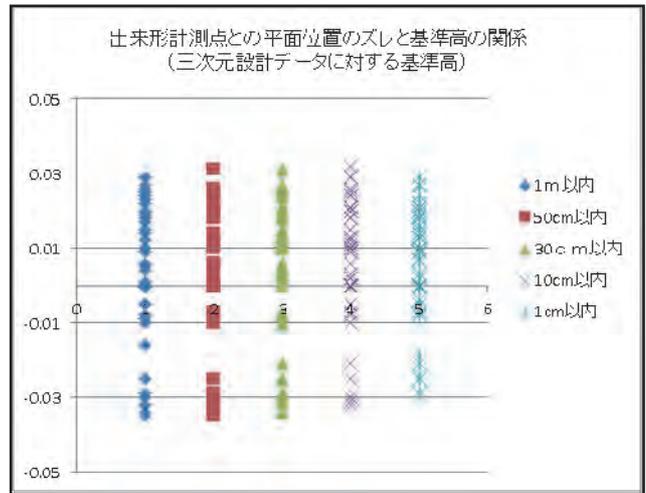


図-14 出来形計測点との平面位置のズレと基準高との関係(実際の計測点での比較)

図-15は、管理断面上と1m以内のズレを許容した断面で基準高について計測した結果を比較したものである。

最大で3.5cmの差異が生じたが、その他の断面での誤差は2cm以下であった。基準高については、出来形計測点(定点)からのズレを1m許容しても、現行管理とほぼ同等の結果を得た。

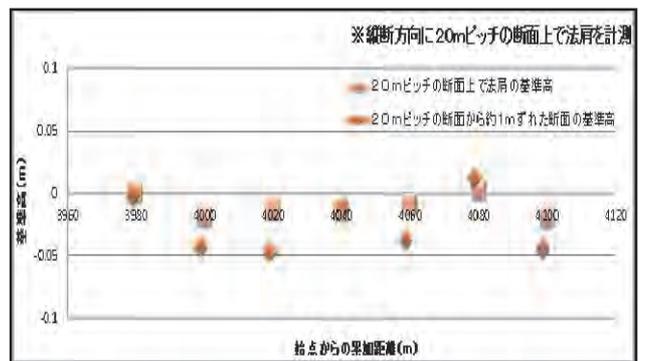


図-15 管理断面上と管理断面+1mの断面で計測した基準高の比較

② 幅

図-16は、管理断面上と1m以内のズレを許容した断面で幅について計測した結果を比較したものである。最大で9cmの差異が生じたが、その他の断面での誤差は4cm以下であった。現行の幅の規格値が-100cm(土工の場合)であることを考えると、この差は僅かであると見なせる。

よって、幅についても出来形計測点（定点）からのズレを 1m 許容しても、現行管理とほぼ同等の結果を得た。

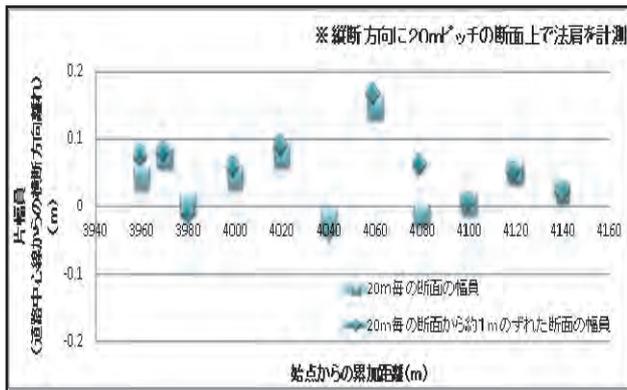


図-16 管理断面上と管理断面+1mの断面で計測した幅の比較

5. まとめ

今回の検証も含めた MC 施工を前提とした出来形計測（計測許容範囲拡大）手法の効果を以下に示す。

- ① 出来形管理に必要な管理断面位置を示す丁張り設置が不要。
- ② 出来形計測箇所を管理断面の近傍±1m の範囲に許容することで、基準高、幅の出来形作業が約 50% 低減。
- ③ 出来形計測精度については、従来手法と同等。

6. 今後の方針

(1) 今後の運用（案）のスケジュール

今回の検証は 1 工事の結果ではあるが、出来形管理の簡素化、省力化が向上する結果が見えた。

今年度は、運用（案）に基づき実施する複数の試行工事において、本報告と同様の効果が得られることを検証するとともに、監督職員、施工者等の幅広い意見聴取を行っていく。

今後は、他地整での試行工事での検証や、運用（案）に適合する「TS を用いた出来形管理用ソフトウェア」について提供の協力を頂きながら、運用（案）を全国で活用を図っていく。

(2) TS 出来形管理ソフト（試行版）

近傍点管理については、現行の出来形管理用 TS の機能を別ソフトウェアにて補間することで、出来形管理が可能となる。

現在、関係者とソフトウェアの対応について協議中であり、試行結果を踏まえて近傍点管理のために必要となる付加機能を精査し、出来形管理様 TS の機能要求仕様書に反映していくことを検討する必要がある。

(3) 厚さ算出への取組

道路工事において、新設工事では TS を用いた出

来形管理が適用外となっている。これは密度確認のための掘り起こしやコア抜きが無くならないため、計測手間の効率化が期待できないことによるものである。しかし、近年では非破壊での密度計測技術も存在し今後新たな品質確認の技術として定着していくことも想定される。

現在、TS を用いた厚さ計測の活用増大に備えた近傍計測の座標値を用いた厚さ管理手法も準備しており、今後検証を行っていく予定である。

7. 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たところであるが、MC等については活用が伸びていない状況である。

その中で、平成25年3月29日に策定された、新たな「情報化施工推進戦略」においては、平成25年度からの5年間に大きな柱として推進する目標とその達成に向けて取り組む項目として、5つの重点目標と10の取り組みが設定され、その取組は、情報化施工を「活かす」ための目標や取組みを設けている。

重点目標の一つである、「情報化施工に関連するデータの利活用」は、情報化施工の効果がより一層得られるよう情報化施工の特性を踏まえた、従来の手法に代わる施工管理、監督・検査の実現と設計や維持管理に関する技術基準の見直しを目指すことが明示され、本検討についても、従来の管理基準にとらわれず、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として本格運用として実現することにより、活用拡大が進むことを期待したい。

参考文献

- 1) 坂本鋼三：「MC 施工を前提とした情報化施工技術の新たな施工管理への展開」, 平成 25 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.107~110, 2013
- 2) 竹本憲充：「MC 等の施工現場を対象としたトータルステーションを用いた出来形管理」, 建設機械施工, Vol.66, pp.79~81, 2014.4

13. 効果的な除雪を行うための除雪車位置情報を活用した

除雪施工の検証

(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○小宮山 一重
(独)土木研究所 寒地土木研究所 大槻 敏行
(独)土木研究所 寒地土木研究所 佐藤 信吾

1. はじめに

日本は国土の約 50%(24 道府県 532 市町村)が豪雪地帯及び特別豪雪地帯に指定されている¹⁾。これらの地域において、道路の降雪は日常的であり、雪の影響により渋滞が発生する等、道路交通への影響が大きい。また、鉄道の廃止により生活が 100%自動車輸送に依存している地域では、道路交通は重要な生命線となっている。このことから、良好な路面管理及び異常気象時における迅速な除雪に対する住民ニーズは高い。

除雪を効果的に行うためには、実施された除雪の施工状況を検証し、改善点等を見だし、除雪計画へ反映する必要がある。

区間と連携して除雪を行うことで除雪作業時間が短縮され、除雪作業の遅延による道路交通への影響を抑えられる可能性があることを確認した。

2. 除雪作業の背景

道路の除雪は、道路管理者が管轄路線を分割して工区を設定(以下、除雪工区)し、除雪工区毎に除雪工事受注業者(以下、除雪業者)を割り当てて除雪作業を行っている。また、それぞれの除雪工区に配置されている除雪車は、主に数台の車両で梯団(ていだん)を編成し、雁行体制で除雪作業を行なっている(図-2)。

図表 1-1-67 豪雪地帯及び特別豪雪地帯指定地域



出典：内閣府資料

図-1 豪雪地帯及び特別豪雪地帯指定地域¹⁾

近年、ICT の発展に伴い車両の位置情報は様々な用途に活用されており、除雪事業においても地図上での除雪車位置の把握や作業時間の管理等に活用されている事例がある。

本稿では、除雪の施工状況を検証するため、除雪車の位置情報を活用し、時間経過に伴う除雪車の動態を可視化した。そして、隣接する除雪区間の除雪作業において、一方の除雪区間で除雪作業が遅延し、道路交通へ影響を与えていた可能性があるケースを抽出して検証した。その結果、隣接

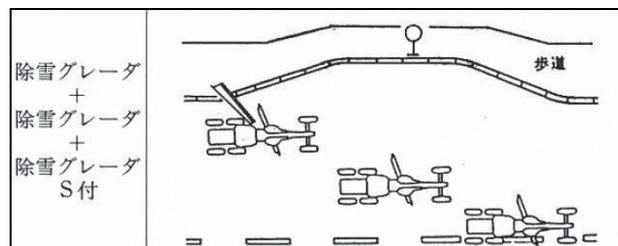


図-2 新雪除雪の組みあわせ施工形態の例²⁾

除雪作業は、降雪状況に応じた最適なタイミングで除雪車が出動し、最適な梯団編成、除雪ルートで実施する必要がある。しかし、これらの判断は主に道路管理者や除雪業者の経験を頼りに行われており、作業実態も定量的には把握されていない。また、除雪事業においては、オペレータの確保や育成について懸念されていることが、除雪業者からのアンケート調査で報告されている³⁾。

このことから、除雪作業を経験のみに拠らずに定量的に把握し、効果的な除雪施工の実施に反映させるための検証が必要である。

3. 除雪機械等情報管理システム

北海道の国道を管理する国土交通省北海道開発局(以下、開発局)では、約 6,700km の冬期道路を管理(除雪、排雪、凍結路面对策)するため、除雪車を約 1,000 台保有している。また、除雪車の位置情報

等の各種データ(表-1)を収集・管理するため、除雪機械等情報管理システム⁴⁾(以下、システム)を導入している。

寒地土木研究所では、開発局と連携して、除雪車の到着時刻を予測するなど、除雪車の運用をマネジメントするための機能を開発し、開発局のシステムに提供している。

システムによる除雪作業履歴の確認例を図-3に示す。

表-1 除雪機械等情報管理システムのデータ

所属情報等	所属管轄, 機械種別, 管理番号
作業情報等	時刻, 作業内容(回送/待機/除雪), 作業装置の ON/OFF, 作業地点(緯度・経度), 作業箇所(路線), 作業箇所(KP ^{※1}) ^{※2} , 作業速度, 進行方位(16方位), 凍結防止剤散布情報(散布位置, 散布量等) ^{※1} KP(キロポスト):道路距離標 ^{※2} 作業箇所(KP):緯度・経度情報を基にシステムが演算

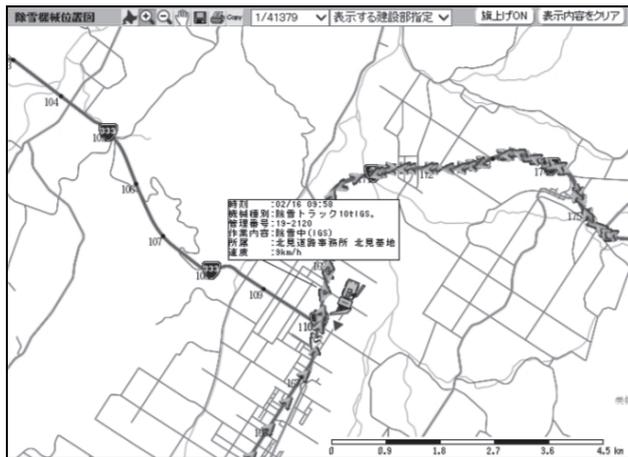


図-3 除雪機械等情報管理システムを用いた除雪作業履歴の確認例

4. 除雪施工状況の可視化

除雪施工を検証するためには、梯団編成や除雪ルート等の変化を詳細に確認する必要がある。そこで、開発局のシステムに蓄積されている除雪車の作業箇所(KP)データを用いて、X軸を除雪作業時刻、Y軸を作業箇所(KP)としたグラフ(以下、除雪作業グラフ)にプロットし、除雪車の動態を可視化した。

除雪作業グラフには、除雪ステーション(以下、ST)、車線数、中央分離帯区間及び除雪車の転回頻度が高い地点(CP: Control Point)を表す水平線を描画した。さらに、作業速度の目安となる時速20kmの斜線を描画した。

除雪車1台の動きを1本の線で表わすことで、時間経過に伴う梯団編成や除雪ルートの変化等、除雪施工状況を視覚的に把握することが可能となる。除雪作業グラフ作成例を図-4に示す。

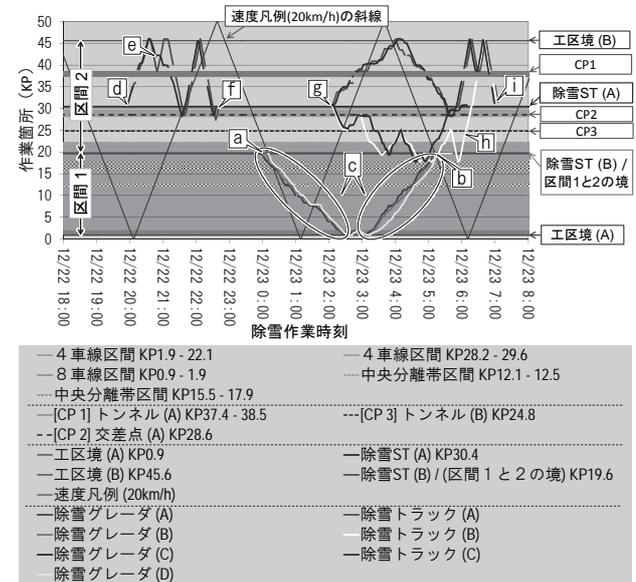


図-4 除雪作業グラフの作成例

図-4に示した除雪作業グラフの作成例から確認できる除雪作業状況は以下のとおりである。

[区間1の除雪作業状況]

- ・12月23日0時頃、区間1を除雪するため、除雪ST(B)から3台の除雪グレーダ(A,B,D)が梯団で出動している(図-4のa)。
- ・出動後は、区間1内の除雪を行い、5時頃に除雪ST(B)に帰着している(図-4のb)。
- ・この時の除雪作業速度は、速度凡例の斜線と比較すると傾きが緩いため、ほとんどの区間で時速20km以下で施工されたことが確認できる(図-4のc)。

[区間2の除雪作業状況]

- ・12月22日20時頃、区間2を除雪するため、除雪ST(A)から2台の除雪トラック(A,C)が出動している(図-4のd)。
- ・除雪トラック(A,C)の梯団は途中で分かれて別々に作業している(図-4のe)。その後は、再び合流して作業を行っている。
- ・22時40分頃、除雪トラック(A,C)は、除雪ST(A)に帰着している(図-4のf)。
- ・12月23日2時頃、区間2を除雪するため、再び除雪ST(A)から除雪車が出動している。この時は、除雪トラック(A,C)が上方向に、除雪トラック(B)と除雪グレーダ(C)が下方向に、2台ずつの梯団に分かれている(図-4のg)。
- ・6時頃、除雪トラック(B)が区間2の応援に向い、区間2の梯団と合流し、3台の梯団で除雪している(図-4のh)。

・7時頃、除雪トラック(A, C)と合流した除雪トラック(B)は、除雪ST(A)に到着している(図-4のi)。
 このように、除雪車の位置情報を可視化することで、除雪車の梯団編成や除雪ルートの変化を容易に確認することが可能である。

5. 除雪施工の検証

除雪作業は通常、担当工区(区間)内のみを実施する。このため、局所的な大雪などの異常気象時には、隣接する除雪工区(区間)で除雪終了時刻に差が生じることがある。一つの路線として捉えると、除雪作業が遅延している区間は、道路交通へ影響を及ぼす恐れがあるため、除雪作業の遅延を防止する必要がある。

除雪作業の遅延を防止する対策の一つとして、隣接する除雪工区と連携して、除雪業者が担当する工区の境を変更する方法(工区シフト)がある。しかし、工区シフトを実施した効果の定量的な把握はできていない。

工区シフト実施の効果を定量的に示すため、大雪時に行われた除雪作業において、隣接除雪区間の除雪終了時刻に差があった事例について、工区シフト実施効果をシミュレーションによって検証した。

5.1 工区概要

検証した除雪工区は、一般国道 234 号で高速道

路(道央自動車道)の岩見沢 IC と接続しており、岩見沢市内へアクセスする主要路線である。この工区の延長は 37.3km(KP0 ~ KP37.3) あり、KP17.1(CP1)を境として担当除雪工区を区間1と区間2に分けて除雪作業を行っている。

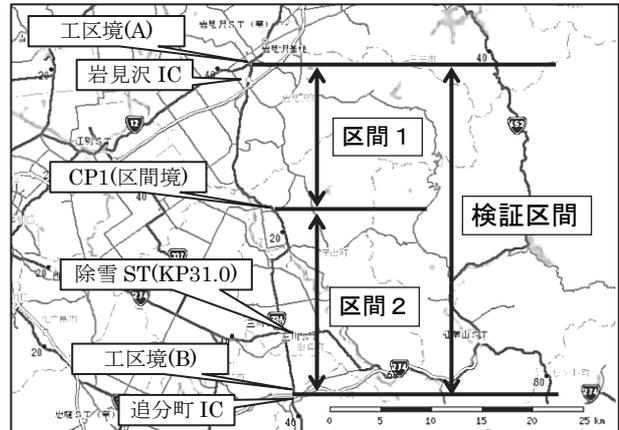


図-5 除雪工区概要図

5.2 除雪作業状況

検証した日の除雪作業グラフを図-6 の上図に、区間1と区間2の除雪作業終了時刻の差を表-2に示す。なお、この時の直前の除雪作業終了後から当該除雪作業終了までの降雪量は37cmであった。

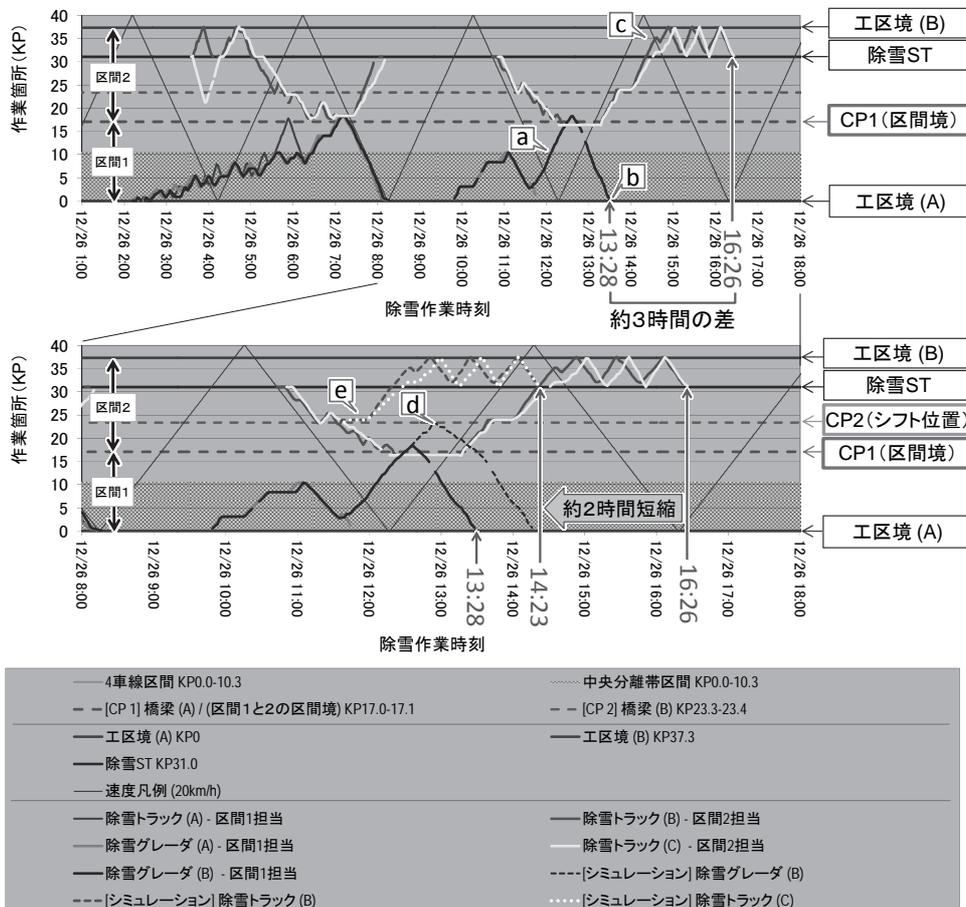


図-6 大雪時の除雪作業グラフ (上図：除雪施工状況, 下図：工区シフトシミュレーション)

表-2 除雪作業終了時刻の差

出動	区間	開始時刻	終了時刻	両区間の時間差
1回目	1	2時11分	8時16分	6分
	2	3時35分	8時10分	
2回目	1	9時49分	13時28分	2時間58分
	2	10時43分	16時26分	

検証した日は降雪が多く、1日に2回除雪作業に出動している。

1回目の除雪は、区間1及び区間2共にほぼ同時の8時頃に終了している。

2回目の除雪では区間1が13時28分に終了している。しかし、区間2では16時26分に終了しており、両区間の除雪作業終了時刻に、約3時間の差が生じていた。

両区間の除雪作業状況を除雪作業グラフで確認すると、区間1の除雪は11時40分頃以降、除雪グレーダ(B)が1台で除雪作業を行っている(図-6のa)。

除雪グレーダ(B)は、13時28分に除雪を終えて、その後は再出動していない(図-6のb)。

一方、区間2の除雪作業は、除雪トラック(B, C)が2台編成の梯団で、KP31.0～KP37.3の区間を繰り返し除雪しているため、道路状況は悪かったと推測される(図-6のc)。

両区間の除雪状況から、区間1を担当する除雪車が、区間2の除雪作業の一部を応援することが可能だったと想定する。そこで、2回目の除雪作業における工区連携効果を確認するため、除雪工区境をシフトした場合のシミュレーションを行った。

5.3 工区シフト効果の検証

通常降雪時の区間境であるCP1(KP17.1)の位置を、CP2(KP23.4)の位置まで約6kmシフトした場合のシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図-6の下図に示す。

区間境をCP2にシフトしたことにより、CP1からCP2の区間の除雪は、区間1を担当する除雪グレーダ(B)が行うこととなる。これにより、区間2を担当する除雪トラック(B, C)はCP2で折り返すことができ、早期に道路状況が悪かったと推測される区間(KP31～KP37.3)の作業に向かうことができる(図-6のe)。

5.4 検証結果

検証の結果、除雪作業終了時刻は、区間1では約45分延びてしまうが、区間2では約2時間短縮できる結果となった。

検証した除雪施工状況と同様の降雪状況(降雪範囲、降雪量)が想定される場合、工区境をCP2にシフトして隣接区間と連携することで、その効果が期待できると考える。

6. まとめ

通常の除雪作業では、除雪業者が担当する除雪工区の区間のみ除雪が行われる。このため、局所的な大雪が発生した時等、除雪作業が遅延し隣接除雪工区との連携が必要になる場合がある。

過去の様々な降雪状況時の除雪施工状況を検証することで、作業の効率性、除雪工区の連携による効果等について検証することができる。また、検証結果を除雪施工計画に反映することで、効果的な除雪施工が可能となり、除雪作業の遅れに起因する旅行速度低下の抑制、渋滞損失額の低減等に寄与できる。

今後は、除雪施工の検証を容易に行うことができるシステムの機能を開発して、道路管理者に提供するなど、効率的な除雪作業の実施に寄与していく所存である。

参考文献

- 1) 内閣府ホームページ(http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h26/honbun/1b_1s_04_05.html)：平成26年度防災白書，第1部第1章第4節4-5雪害対策
- 2) 一般社団法人日本建設機械化協会：機械除雪施工マニュアル(案)，p54，平成5年11月
- 3) 一般社団法人日本建設機械施工協会北海道支部ホームページ(http://www.jcmahs.jp/html/17_questionnaire.html)：除雪機械施工に関するアンケート調査結果
- 4) 岸寛人，牧野正敏，佐々木憲弘：GPSを活用した除雪機械運用支援システムの開発，平成22年度建設施工と建設機械シンポジウム，2010年11月

14. 3D-CAD を用いた簡易な土工事施工支援システム

西松建設株式会社 技術研究所 ○ 原 久純
 西松建設株式会社 技術研究所 佐藤 靖彦
 西松建設株式会社 技術研究所 田中 勉

1. はじめに

土工事において設計や施工支援に 3D-CAD を活用した事例¹⁾が近年増えてきている。従来の 2D-CAD データの場合は、平面図、縦断図、横断図を組み合わせて、これらを現場と照らし合わせ施工していた。図面のある決められた断面（側線）での管理は容易であるが、測線から離れた任意の位置に対して丁張り（位置出し）や施工管理は容易でない。これに対して、3D-CAD は形状データを一元的に管理でき、任意位置の断面図をすぐ作成できるなどの利点がある。しかし、3D-CAD の場合、2D-CAD に比べ操作が複雑であり、習熟にかなりの時間と経験を要する。

そこで筆者らは、簡単な操作で対応できるような 3D-CAD を利用した土工事施工支援・管理用システム「3D 土工事施工支援システム」を開発した。本システムは、既往 3D-CAD ソフト (Civil 3D) に、現場作業で必要となる測量支援、出来形管理、出来高（土量）管理の機能を集約、アドオンしたソフトである。設計・測量の 3 次元データを容易に取り込み、盛土・切土形状の 3 次元化が簡単にできるとともに、土量計算から帳票出力までの操作が簡易化できるため、現場管理作業の効率化につながるものと考えられる。

本稿では、開発したシステムの概要と機能、特徴を概説するとともに、現場での適用例について報告する。

2. 3D 土工事施工支援システムの概要

本開発システムは、Autodesk 社の Civil 3D²⁾を根幹とするアドオンソフトであり、土工事における施工計画、設計、施工を管理・支援するシステムである。

2.1 本システムの構成

開発したシステム構成を図-1 に示す。本システムは次の 3 つで構成されている。

- ① 測量支援機能
- ② 出来高管理（土量計算）機能
- ③ 出来形管理機能

本システムでは、3D 設計データから丁張りした点の座標を算出・出力するとともに、測量データから 3 次元モデルを作成し、日々の測量データを 3D-CAD で一元管理する。3 次元測量モデルから土量を算出して帳票出力する作業を簡易化し、効率的に出来高管理ができるようにした。また TS による出来形管理の機能も付加した。

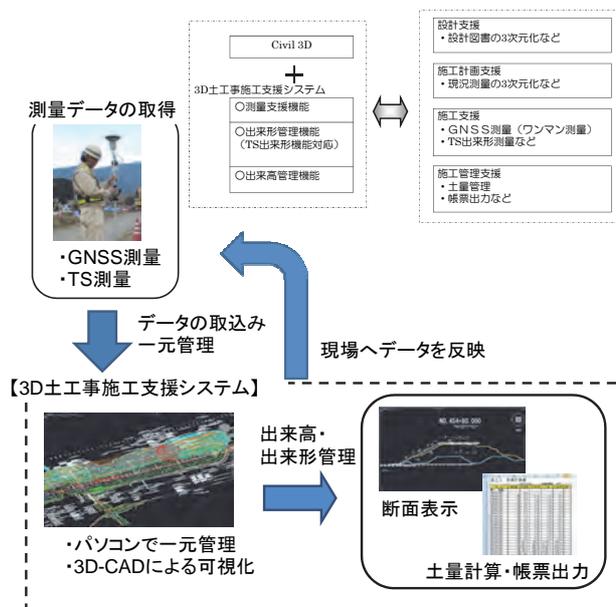


図-1 3D 土工事施工支援システムの構成

本システムの特徴は次の通りである。

- ・盛土工事の管理に必要な機能を一つの画面に集約し、3D-CAD で簡単に操作できる。
- ・施工の進捗状況を 3 次元的に把握できるため、視覚的に状況が分かりやすく、次ステップの施工計画に反映できる。
- ・平均断面法により土量計算し、帳票出力までの一連の作業が簡易に行える。
- ・国交省のデータ交換基準に対応しているため、市販の TS 出来形管理システムとのデータ交換が容易である。

2.2 本システムの開発目的

まず既往の3D-CADを用いて測量、土量管理業務等を行う場合の問題点について述べる。既往3D-CADソフトでは、以下の機能を使用して、測量・土量計算業務に活用することも可能である。

- ・現況測量等の測量データの取り込み、表示
- ・丁張り点の座標計算
- ・断面図の作成、表示
- ・点データ、線データの編集
- ・数量計算機能
- ・座標データの出力 (LandXML形式)

しかし、Civil 3Dにおいてこれらの機能は各タブ内に散在しているため、測量座標の登録、編集や土量計算を行う際に3D-CADの操作方法を十分把握する必要があり、その操作・作業が困難であることが課題であった。

そこで本システムは、3D-CADに含まれている現場管理作業に必要な各機能を図-2のように「ベースユニット」と称する一つのタブに機能を集約・ユニット化することで、操作を簡易化し、3次元表示や出来高管理などの作業が効率的に行えるようにした。図2のように、本アドオン部分の操作のみで、必要なデータ処理や計算が可能になるため、3D-CAD機能の熟知や作業時間・手間が少なくなることが本システムの特徴である。

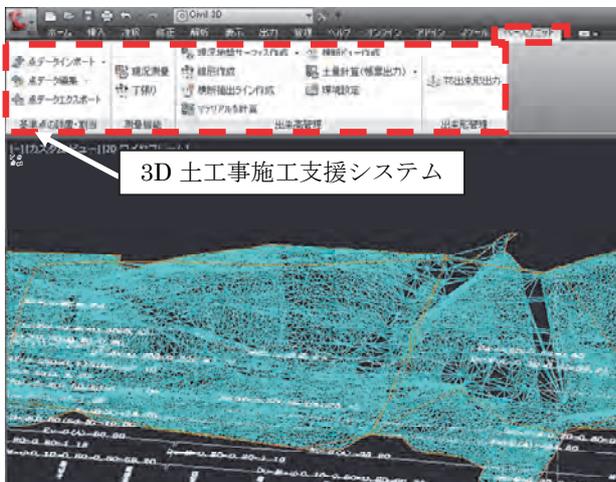


図-2 3D 施工支援システムの表示画面

2.3 本システムの保有機能

本開発システムは以下の機能を有する。

- (1) 基準点の設置、割当て支援機能
基準点を定義・登録し、基準点のx,y,z座標を入力・出力(点データインポート, エクスポート)および編集ができる。
- (2) 測量支援機能
現況測量で計測した各点の座標データを取り込む。測量データは、SIMA, CSV, LandXMLの各形式に対応する。

また、3次元設計データから丁張りなど現場で設置したい測量杭地点の座標(x,y,z座標)を算出し外部端末へデータの変換・出力が可能である。ポケット端末に表示することで、丁張りの位置出しが容易に行える。

(3) 出来高管理機能

計測した測量データから、サーフェスデータを作成することで、現施工面(切土・盛土面)の土量を計算し帳票出力する。また、施工時の管理断面(横断面)図を図-3のように表示することで、施工の進捗が把握できる。

なお、土量計算方法として、既往Civil 3Dにも土量計算機能はあるが、トータル土量のみが計算されるだけで計算帳票の作成機能はない。本システムでは、平均断面法による土量計算をして出来高帳票を出力できる。

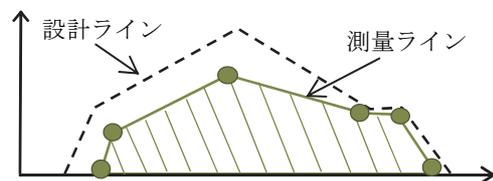


図-3 管理断面図の表示例

(4) 出来形管理機能

市販のTS出来形管理ソフトとデータ交換が容易にできる。現場では、ポケット端末を利用して、設計データの修正や帳票出力が可能である。

2.4 本システムによる出来高管理(土量計算)

従来の出来高管理の手順を図-4に示す。従来の管理では、測量データの取込み、図面への反映、帳票出力までの手順をステップごとに2D-CADやexcelなど別々のソフトで編集・管理する必要があり、データの取込みや反映などに時間が掛かる。

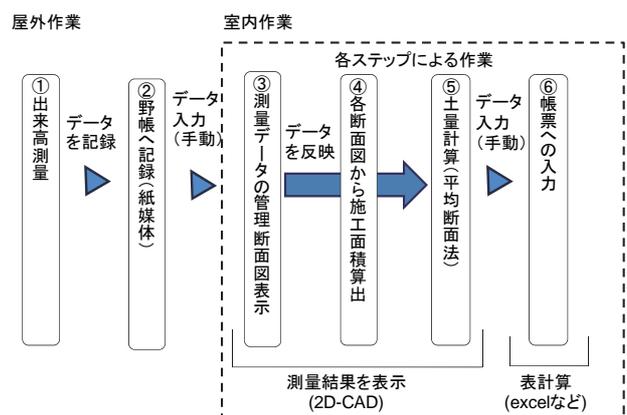


図-4 従来の出来高管理

本システムを利用した出来高管理では、図-5のように1つのソフト・タグで編集・管理ができるため、次の利点が挙げられる。

- ・1つのソフトで管理するため、取扱うデータファイル数が少なくなる。
- ・土量計算、帳票出力を一連で行うことができ、帳票作成までが効率的になる。

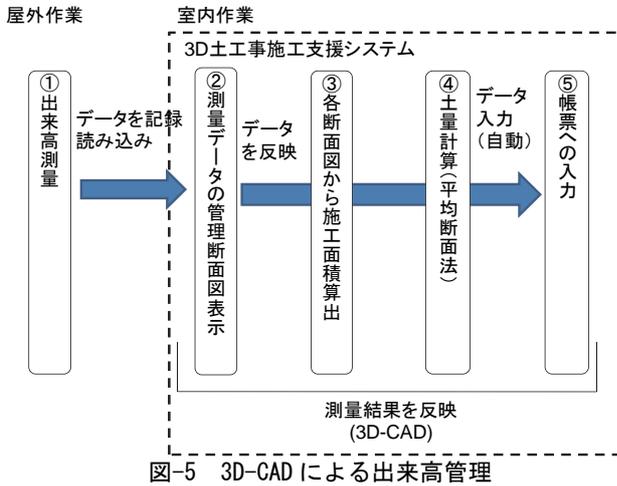


図-5 3D-CADによる出来高管理

3. 現場での適用例

次に、大規模盛土工事に適用したシステムの運用手順と運用における効果について紹介する。施工現場におけるシステム運用フローを図-6に示す。

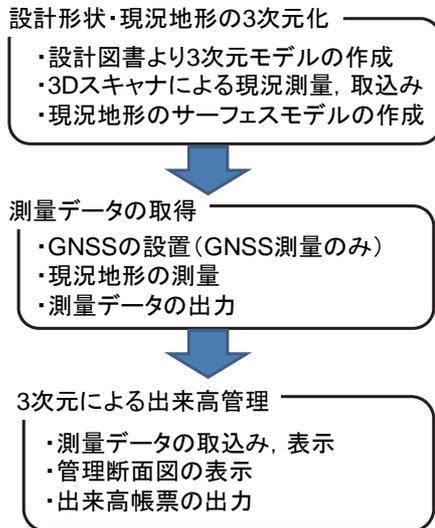


図-6 システム運用フロー

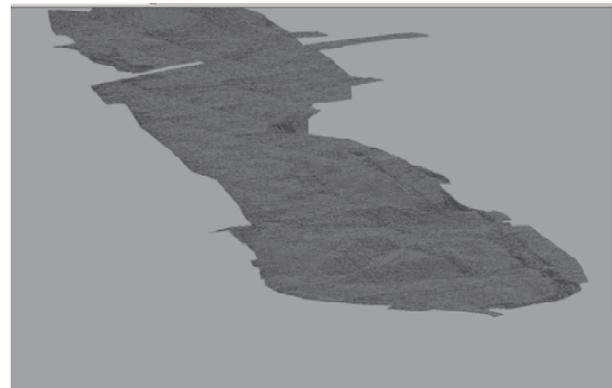
3.1 現場におけるシステム適用

(1) 設計形状・現況地形の3次元化

3次元設計データは、設計図書の2次元データから作成する。現況地形のモデル化は、図-7のように、3Dスキャナによる測量点群データを本システムに取り込み3D-CAD上で現況地形モデル(サーフェスモデル)を作成する。



3D スキャナによる測量点群データ



現況地形のサーフェスモデル

図-7 測量点群データによる現況地形の3次元モデル

(2) 測量データの取得

施工現場では、図-8に示すGNSSやTSにより出来高測量を行い、日々の測量データを3D-CADに取り込むことで、施工状況を3D-CADで管理できる。なおGNSSによるワンマン測量を導入することで、測量人員や負担が軽減でき、3次元による管理をより効率的に行える。



図-8 施工現場におけるGNSS測量

(3) 3次元による出来高管理

現況測量したデータから、3D-CAD で表示した平成 24 年 5 月の現況地形を図-9、平成 26 年 7 月の測量データを図-10、設計データと測量データを比較表示したものを図-11 に示す。これらの図のように測量データ、設計形状を 3 次元俯瞰表示すると、盛土全体の施工状況を容易に把握でき、進捗確認や次施工の施工計画に参考となる。

出来高管理に関して、3次元表示の図-11 における測線(A-A)の断面図を図-12 に示すことで、施工状況を平面的に把握し、断面毎で進捗状況をより明確に管理できる。表-1 には、現況地形と測量データから算出した盛土量の出来高帳票を示す。表-1 のように、帳票を出力することで、測線区間毎の出来高が容易に確認できる。また、月別で帳票化すれば出来高、工程管理にも反映できる。

3.2 運用における効果

本システムを盛土工事現場へ運用することで、次の効果が得られた。

- ①測量データの取込みから帳票出力までの手順を一括化することで、作業時間を短縮できた。
- ②ワンマン測量を導入することで、測量人員や手間を省力化した。従来と比較して、作業時間を短縮できた。
- ③3次元モデルで表示することで、全体の施工状況の把握が容易になった。

4. おわりに

本稿では、3D 土工事施工支援システムを紹介した。3D-CAD の機能を拡張し、設計データや測量データを 3 次元化することで、出来高・出来形や作業時間の効率的な管理を可能とした。ただし、本システムにおいて次のような課題がある。

例えば、測量データだけでは形状の十分な再現が難しく、境界線や小段ラインの設定を追加して入力する必要がある。今後は、より操作性が高いシステムを構築するようにしたい。

また、今回開発したシステムは、盛土工事だけでなく、工種に応じて機能を追加することができるため、基礎工事や地盤改良工事などへの活用にも有効と考えられる。

最後に、本システムの開発にあたり、御協力頂いたアイサンテクノロジー株式会社をはじめ、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 緒方正剛, 飯塚元輔, 村井重雄, 吉田貴: 土工統合管理システムの開発と実証実験, 第28回土木情報利用技術講演集, pp.51~54,2003
- 2) Autodesk 株式会社 HP : <http://www.autodesk.co.jp>

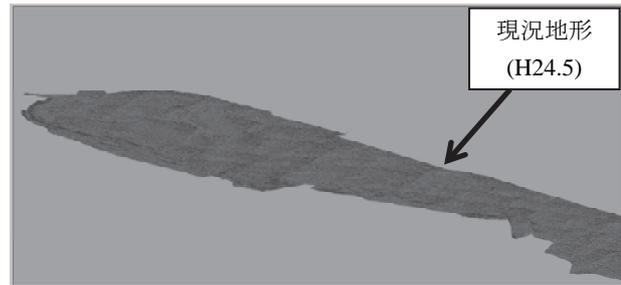


図-9 現況地形の 3 次元表示例 (平成 24 年 5 月)

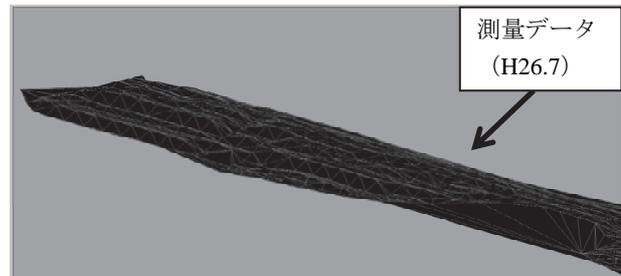


図-10 測量データの 3 次元表示例 (平成 26 年 7 月)

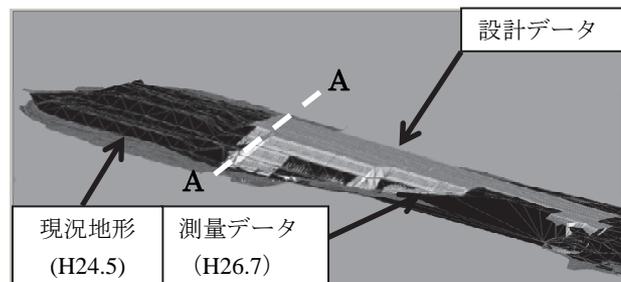


図-11 3次元による出来形管理の表示例

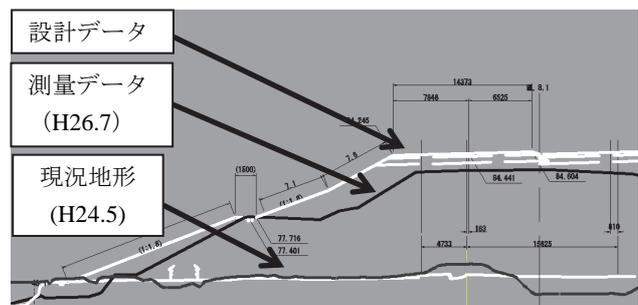


図-12 断面図による出来高管理の表示例 (A-A 断面)

表-1 出来高帳票の表示例

測点	単距離	断面積	平均断面	土量	出来高	備考
単一 本線						
452+00.320	0	636.6	637.29	203.8	203.8	
452+20.000	20	719.6	678.10	13,345.2	13345.1	
452+40.000	20	854.7	787.12	15,742.3	15742.3	
452+60.000	20	863.4	859.05	17,181.1	17181.1	
452+80.000	20	907.9	885.65	17,713.1	17713.0	
453+00.000	20	1038.6	973.22	19,464.4	19464.4	
453+20.000	20	1184.4	1111.49	22,229.8	22229.8	
453+40.000	20	1271.7	1228.07	24,561.4	24561.4	
453+60.000	20	1307.9	1289.79	25,795.7	25795.7	
453+80.000	20	1224.2	1266.01	25,320.2	25320.2	
454+00.000	20	1258.9	1241.53	24,830.6	24830.5	
454+20.000	20	1195.5	1227.20	24,543.9	24543.9	

15. センタータワー方式によるアルミドーム屋根の組立架設

昇降ロボットジャッキ「FCF」を用いた構築システムを開発

株式会社フジタ 設計部 ○ 本多 茂
 株式会社フジタ 機械部 三村 洋一
 株式会社フジタ 高之峯 FP(作) 池内 俊裕

1. はじめに

アルミドーム屋根は、外周より中心に向けて組み立てるのが一般的である。しかし、大半の作業が墜落転落災害の危険性を伴う移動式足場上での高所作業であり、施工方法の改善を行う必要があった。また、外周からの組み立ては、タンク内部の止水工事と施工時期が重なり内部足場解体後でないと施工が行えなかった。

そこで、アルミドーム屋根の中心リングから外周部に向けて逆方向に地組みすることで、組立工程と吊り上げ架設工程の並行作業を可能にする、新しい構築システム「昇降ロボットジャッキシステム(以降 FCF システム)」を組み込んだセンタータワー方式によるアルミドーム屋根組立架設工法を開発し、高之峯ファームポンド工事(九州農政局発注、鹿児島県曾於市)に適用し、有効性を確認した。

2. 高之峯ファームポンドの工事概要

2.1 工事概要

当該工事は、曾於北部で実施する国営畑かん事業の一環として、水源の谷川内ダムから高之峯揚水機場を経由し、農業用水を貯留・配水するファームポンド築造工事である。

工事名：曾於北部(二期)農業水利事業 高之峯ファームポンド建設工事

工期：平成 24 年 10 月 17 日～平成 26 年 3 月 20 日 (520 日)

施工場所：鹿児島県曾於市財部町南俣地内他

発注者：農林水産省 九州農政局(曾於北部農業水利事業所)

請負者：株式会社フジタ 九州支店(単独)

主要工種：PC タンク工 (D=34.0m, H=11.9m, 有効水深 He=11.4m, 有効貯水量 V=10,275m³)

土工(敷地造成) 14,200m³ 法面緑化工 944m² 基礎杭(φ700) 91 本

本体コンクリート 1,302m³、管水路工、場内舗装、付帯施設、アルミ屋根一式

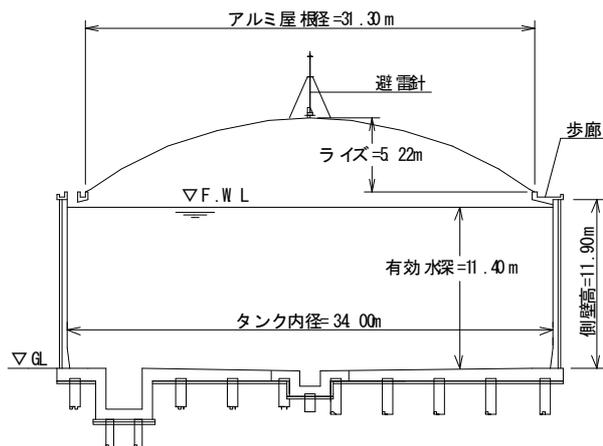


図-1 高之峯ファームポンド断面図

2.2 アルミドーム屋根とは

本件のアルミドーム屋根は、アルミニウム合金製の骨組材(ストラット)を連続三角形でドーム状に組み立て、三角形のアルミパネルで開口部を閉塞するユニット式で構築するもので(図-2)、ストラットと円盤状接合プレート(ガセットプレート)を嵌合型ボルト(ハックボルト)と呼ばれる特殊ボルトとで接合することで、風などの振動による緩みを防ぐ構造となっている(写真-1)。

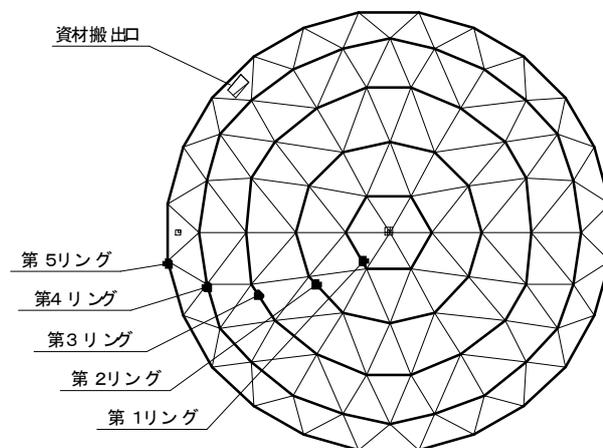


図-2 高之峯ファームポンド アルミドーム屋根伏図

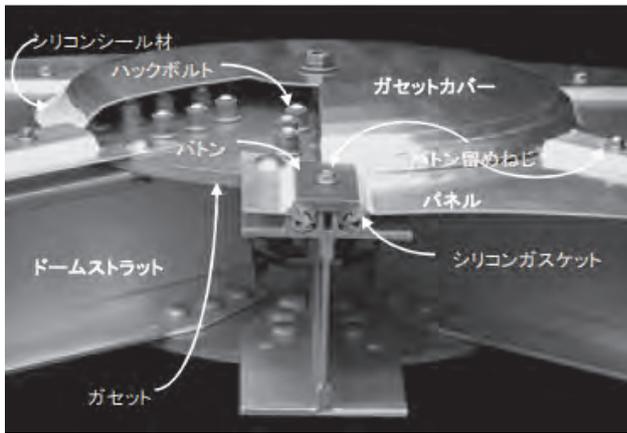


写真-1 ストラッド接合断面

3. 従来工法の概要と課題

3.1 従来工法の構築工程

従来の構築工程は、ドーム屋根を組み立てる組立工程と組み立てられたドーム屋根を所定の位置に設置する吊り上げ架設工程に大別される。これまでの組立工程では、タンク内外の組立ヤードで移動式足場や高所作業車等を用いてドーム屋根の外周部から中心に向かって順次組み上げていく方法が採られてきた(図-3、写真-2)。また吊り上げ架設工程では、屋根の規模や作業環境条件に応じて、タンク外に配置したクレーンによる一括架設(小規模)やタンクの側壁上部に配置した複数の巻き上げウインチによるリフトアップ架設が一般的に行われてきた(図-4)。

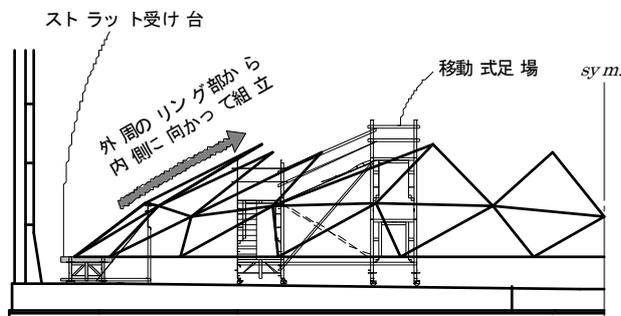


図-3 従来の構築イメージ図



写真-2 従来工法での組立状況

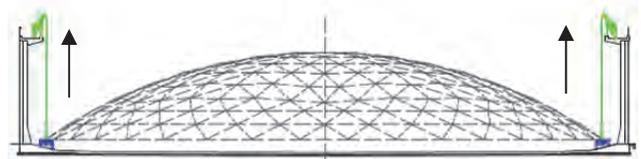


図-4 巻き上げウインチによるリフトアップ架設

3.2 従来工法の課題

施工条件や規模による違いはあるものの、従来工法の改善すべき共通した課題点を以下に示す。

- ① 高所作業が多いため、作業員の墜落転落災害の危険性が高い。(安全)
- ② 真円保持のため、高精度な組立架台とテンションリングの位置出しが必要。(品質)
- ③ 内足場解体後でなければ、アルミドーム屋根の組立が出来ない。(工程、価格)
- ④ 足場の移動や作業できる箇所が制限され施工時間を要する(工程)

これら課題を改善することを目的とし、センタータワー方式による昇降ロボットジャッキシステム(以降 FCF システム)によるアルミドーム屋根の組立架設工法の開発採用に至った。

4. システムの構成

4.1 センタータワー方式

センタータワー方式とは、タンク中央部に設置したタワーと吊上げ装置を用いて、アルミ屋根のリング中央部から順次外側に向かって組立を進める工法である。組立て中の屋根全体を段階的に必要量ずつ吊上げ、組立と吊上げを繰り返しながら、作業者は常に床版上で作業を行う。

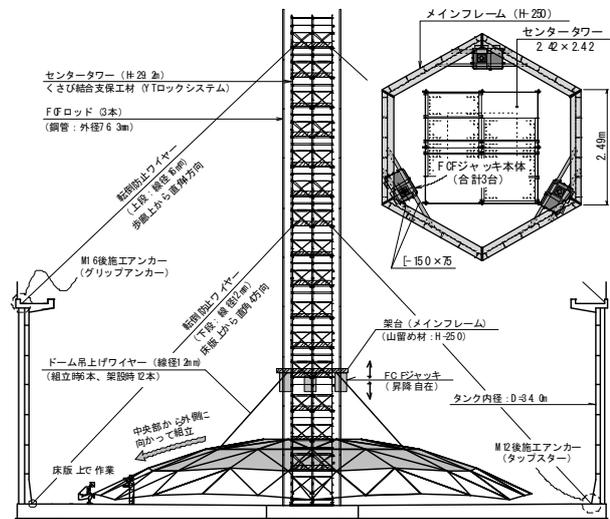


図-5 センタータワー構造図

屋根を吊り上げるメインフレーム架台は、H-250の山留め材で製作。アルミドーム屋根の構造計算上、吊り箇所が指定されたためメインフレーム・センタータワー・屋根形状を踏まえ吊り上げワイヤーを決定した。メインフレームの下部に配置された3台の FCF ジャッキは、センタータワーが貫通するアルミ屋根中央部の開口部形状に合わせ、六角形に制作した。FCF ジャッキ1台の吊上げ能力は約15tなので、屋根の総重量9.6tに対して十分な作業能力である。

センタータワー本体には、くさび結合式足場材「YT ロックシステム」を採用した。各ジョイントはロック機構を設けており、縦2層の大吊りに対応できるほか、振動に対しても安全である。

転倒防止ワイヤーおよび吊り上げ用ワイヤーは、クレーン則に従い安全係数6を確保した。

4.2 FCF システムの概要と特徴

吊り上げ装置には、塔状コンクリート建造物の施工方法として、大型型枠工法とスライディングフォーム工法の長所を取り入れて開発された、フジタ保有技術である FCF システムを採用した。

FCF システムは、足場や型枠と一体化した作業ステージを複数の油圧ジャッキにより鋼管ロッドを楔機構で把持して昇降を行う。

また、複数の油圧ジャッキには制御装置とレベルセンサーが組み込まれ、中央制御盤によって常に水平に保ちながら上昇・下降するように制御され安全性を確保している。

高之峯ファームポンドでは、塔状コンクリート建造物の代わりとして前述した足場材を利用したセンタータワーに鋼管ロッドを固定設置し、それを反力に FCF システムを取り付けた吊り具兼架台となるメインフレームを、コンピュータ制御により複数の昇降油圧ジャッキを用いて水平に保ちながら昇降を行う(図-6)。

FCF とは Fast Failsafe Climbing Form の略

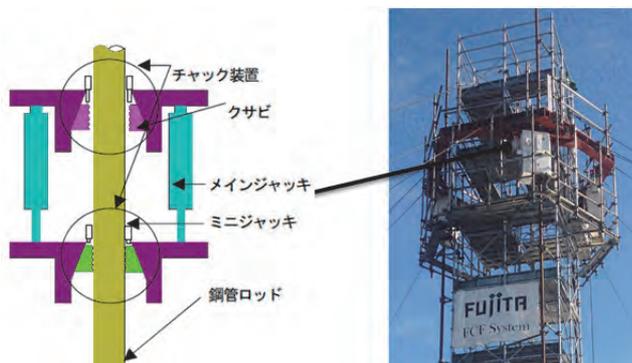


図-6 昇降ジャッキ基本構造図と外観

5 アルミドーム屋根の組み立て

5.1 アルミドーム屋根の組み立てステップ

図-7 に、アルミドーム屋根の全体の組み立てステップ図を示す。

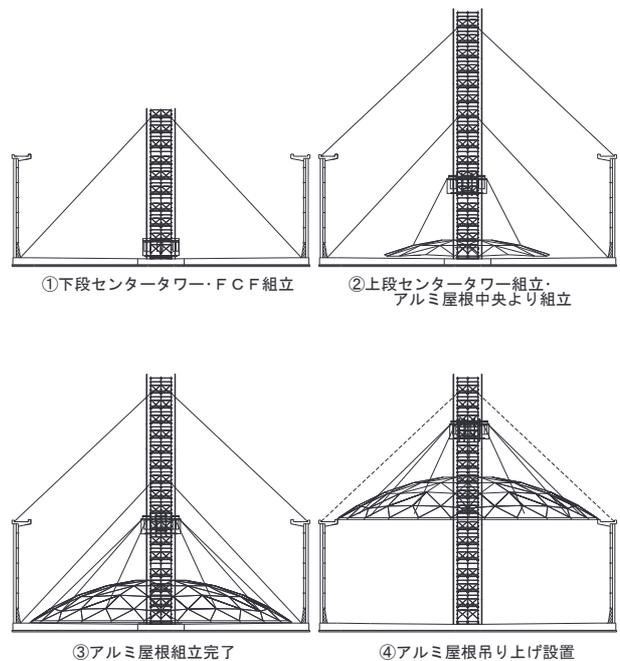


図-7 アルミドーム屋根組み立てステップ図

5.2 組み立て工程

- ① 下段のセンタータワーを組み立てる。
- ② 枠組み足場上でメインフレームと FCF 装置を組み立て、鋼管ロッドを FCF ジャッキ内に挿入設置する。
- ③ 中段部のセンタータワーと鋼管ロッド延伸し、センタータワーの転倒防止用控えワイヤーを対角方向に設置する。
- ④ アルミドーム屋根を第1リングから第3リングに向けて底版上で地組する。



写真-3 中心からの組み立て状況

- ⑤ 吊り上げ用のワイヤーを設置する。
- ⑥ 最上段部までのセンタータワーと鋼管ロッドを延伸し、完了後2段目の控えワイヤーを設置する。
- ⑦ FCF システムによる上昇→4 リング組み立て→上昇→5 リング組み立てを行う。
- ⑧ アルミドーム屋根を架設するため、干渉する1段目の控えワイヤーを取り外し、吊りワイヤーの盛り替えを行う。

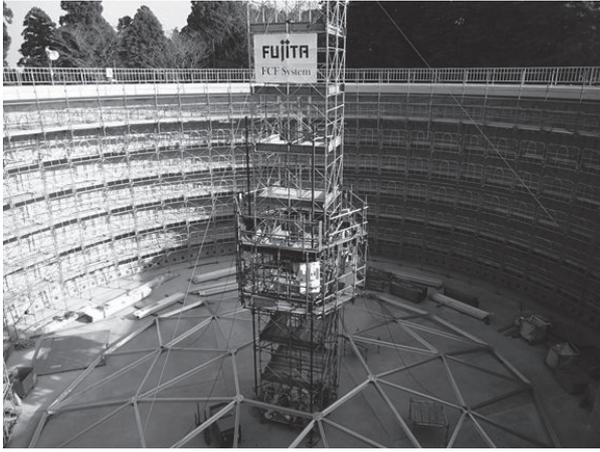


写真-4 止水工事と並行したリング組み立て状況

5.3 吊り上げ架設工程

- ① FCF システムで躯体上部の所定の高さまで吊り上げ固定する。

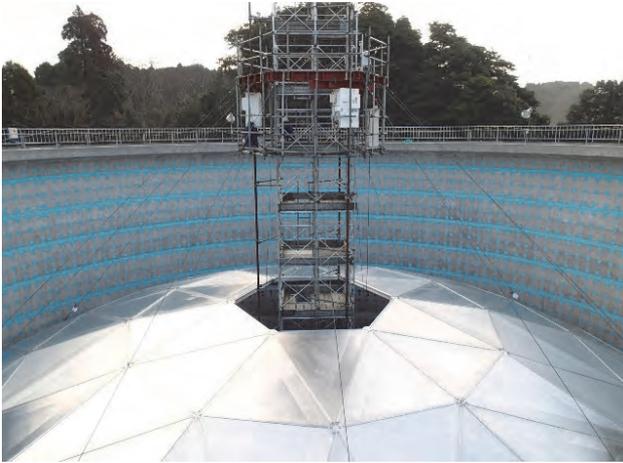


写真-5 吊り上げ状況

- ② 吊りワイヤーを外し、FCF システムを降下させ底版上で解体し、開口部よりタンク外に搬出する。
- ③ 屋根より上部をクレーンで撤去する。
- ④ センタータワーを利用し、ドーム屋根の中央部を組み立てる。
- ⑤ 残りのセンタータワーや資材を順次解体、開口部よりタンク外に搬出し、搬出完了後に開口部を閉塞して架設工程完了。

6 本工法の効果と課題

6.1 効果

本工法による効果について以下に示す。

- ・大半の作業が底版上での地組み作業となるため、資材の運搬や人の移動が効率的となり施工性が向上し、墜落・転落災害の危険性のある高所作業を大幅に削減でき安全性が向上した。
- ・組立工程と作業高さを調整する吊り上げ工程を繰り返しながら順次構築するために、組立て時に発生する局部的なひずみが吊り上げ時に開放されることで、ボルト締結作業が容易となり締

結の品質がより向上した。

- ・中心部から施工により、作業が残るタンク側壁部の施工とのラップ作業が可能となり、2週間程度の短縮が図れた。
- ・ほとんどの組立工程が床上の作業となることで、屋根資材の運搬や組立作業が効率化された。また、架設工程が自動化されることで必要作業員の省力化が図れるため、規模の大きいタンクにおいて経済効果が向上すると思われる。

6.2 課題

本工法による課題について以下に示す。

- ・今回は、センタータワーに YT ロック足場を使用し3本のFCF ジャッキシステムで施工をしたが、施工条件に応じた部材やジャッキの本数の最適化を検討しておく必要である。
- ・規模が大きくなると高層で強度を有するセンタータワーが必要となり、緻密な計画が必要となる(31m以上のタワーになると建設工事計画届けが必要)。

7 考察

今回、国内初の事例としてセンタータワー方式によるアルミドーム屋根の組立架設を行った。その結果、従来工法に望まれるコストの低減をはかりつつも安全性と作業効率、施工性の向上には大きな効果があった。アルミドーム屋根の径が大きくなればよりそのメリットも顕著になるものと思われる。ただ、施工中に大きなトラブルはなかったが、吊上げ時には風の影響を受けるため、気象条件を十分把握し、振れ止め対策についても留意しなければならない。

今後は、大規模なタンクに適したセンタータワーの構造形式や構築方法の改善を図り、更なる効率化と安全性を高めた工法として完成度を上げていく。



写真-6 FCF システムによる吊り上げ完了

参考文献

- 1) 池内俊裕:センタータワー方式によるアルミ屋根の組立架設～国内初工法へのチャレンジ, (株)フジタ 第65回土木施工技術研究発表会論文集, p.43～48, 2014年発行

16. 66時間型枠存置が可能な新型テレスコピックセントルの開発

鹿島建設（株）機械部 ○重永晃洋
鹿島建設（株）土木管理本部 西岡和則
鹿島建設（株）土木管理本部 手塚康成

1. はじめに

近年、社会的要請を背景にトンネルの覆工コンクリートの品質向上に対する要求が高まっている。トンネルの覆工コンクリートは、通常のコンクリート構造物と比較した場合、部材厚が薄いうえに、トンネル内が遮光、恒温、多湿であり養生環境が屋外とは異なることから、自重に対する支持強度が十分発現すれば脱型することが許容されており、一般的な2車線道路トンネル断面では2日に1回の打設により平均18時間程度で脱型することが通例となっている。

このため、覆工コンクリートの品質をさらに向上させるには、打設工程に影響を与えることなく型枠存置期間を長く取ることで、脱型時に発生するコンクリート内部の収縮ひずみを軽減するとともに、コンクリート表面の緻密化を図る必要があった。

この度、2日に1回という打設サイクルを変え、66時間の型枠存置が可能な新型テレスコピックセントルを開発し、その効果を検証したので報告する。

2. 現状の問題点と開発方針

現場で実際に打設した覆工コンクリートの内部温度を測定した結果を図-1に示す。

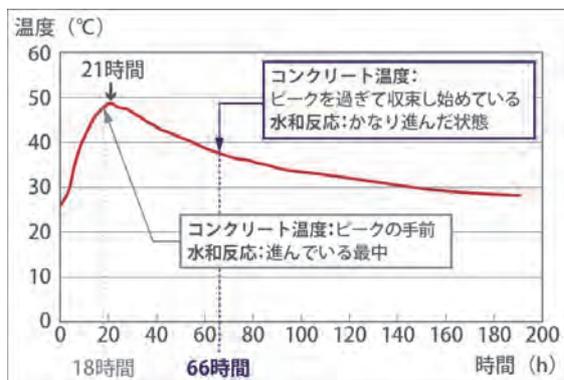


図-1 覆工コンクリート内部温度の経時変化の例

このグラフによると、コンクリートの内部温度のピーク(最もセメントの水和反応が活発な時期)は、打設完了後約21時間であり、18時間の時点では、水和反応はピークの手前であることがわかる。

すなわち、18時間で脱型すると、覆工表面は水和反応に必要な水分まで蒸発し、コンクリートの強度増進が妨げられ、コンクリート表面の緻密化が進まないことになり、水や気体の浸透劣化の観点から、覆工コンクリートの長期耐久性に悪影響を及ぼす。

通常、型枠の存置期間を延長するためには、
①工程を調整して、1台のセントルを長時間存置
②セントルを2台用意して交互に打設
が考えられる。

しかし、①の場合、標準的なトンネル覆工の打設サイクルは、打設6時間+養生18時間+脱型～移動セット8時間+夜間休止16時間=48時間で計画されており、打設工程の遅延が避けられない。

また②の場合、トンネル全長を2区間に割って、2台のセントルで個々に分割施工するケースと、1台を歯抜けで先行させて、2台目はその間を打設しながら併進するケースが考えられる。このとき、前者の場合は、比較的施工延長の長いトンネルへの適用に限定され、打設場所が分散されるため、作業管理が非常に煩雑になる。一方、後者の場合は、先行部は常に両妻枠となり、天端の充填圧力を十分に確保することが困難になる。また、後行部は充填不良の可能性がある両側ラップの打設になり、いずれも天端の充填性確保のうえで問題が大きい。

そこで、打設サイクルを変えずに型枠存置期間を長く取るため、フォーム(型枠)を2台用意し、1台目のフォームはガントリーで支持された状態でコンクリートを打設し、その間、先行打設した2台目のフォームを存置可能とするテレスコピック構造のセントルを開発することにした。

これによって、18時間+48時間=66時間の型枠存



図-2 透気試験結果（模擬試験）

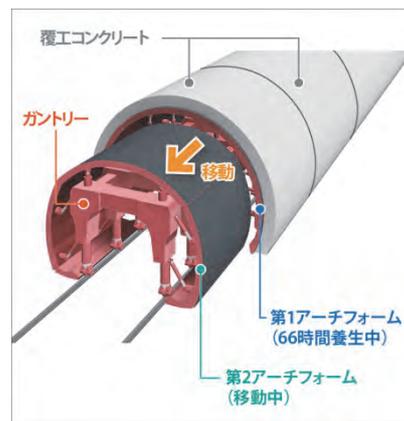


図-3 新型セントル施工概念図

置期間の確保が可能となる。図-1でも明らかなように、66時間ではコンクリート温度が低下しており、水和反応がかなり進んだ状況であるため、この時点で脱型したほうがコンクリートの品質が向上することは自明である。

この効果について、実施工に先立ち模擬試験において、コンクリートの表層品質を評価する指標のひとつである4週後の透気係数を比較することにより検証した¹⁾。

図-2にその結果を示す。従来の18時間後脱型では約 $2.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ に対して、66時間後脱型では約 $0.2 \times 10^{-16} \text{m}^2$ とほぼ1/10に低下しており、7日間型枠を存置して養生した場合と概ね同等の効果が得られることがわかった。

つまり、新型テレスコピックセントルによって66時間型枠を存置することで、材齢初期の型枠養生効果が十分に発揮されることが確認できた。

3. 新型テレスコピックセントルの開発

3.1 設計における課題と解決策

一般的なセントルは、剛性の高いアーチフォームとジャッキ、ガントリーによって打設時及び養生時の荷重を受ける構造となっている。また、ア

ーチフォームとガントリーは複数のジャッキとターンバックルによって接合されており、施工中にこれらを完全に切り離すことはない。

一方で、テレスコピック構造の新型セントルを開発するにあたっては、以下の課題を解決する必要があった。

- ① 存置されたアーチフォームの内部をもう一方のアーチフォームがくぐり抜けられること。また、セントル内に重機走行や仮設備（風管、連続ベルコン等）のスペースが適切に配置できること。
- ② アーチフォームとガントリーの接合・切り離し作業が容易で、打設のサイクルタイムに影響を与えないこと。
- ③ 存置するアーチフォームが自立できること。

これらに対して、従来のセントル構造を適用すると、特に①②について、

- ・剛性の高い厚みのあるアーチフォームでは、存置されたアーチフォーム内をくぐり抜ける十分なクリアランスが確保できず、加えて仮設備の配置が困難となる。
 - ・多くのジャッキやターンバックルを都度脱着しなければならず、作業効率が著しく低下する。
- 等の課題が生ずるため、新たな発想で設計する必

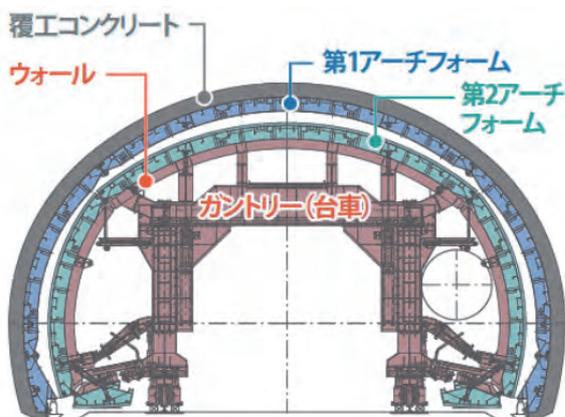


図-4 新型セントル構造図



写真-1 新型セントル全景

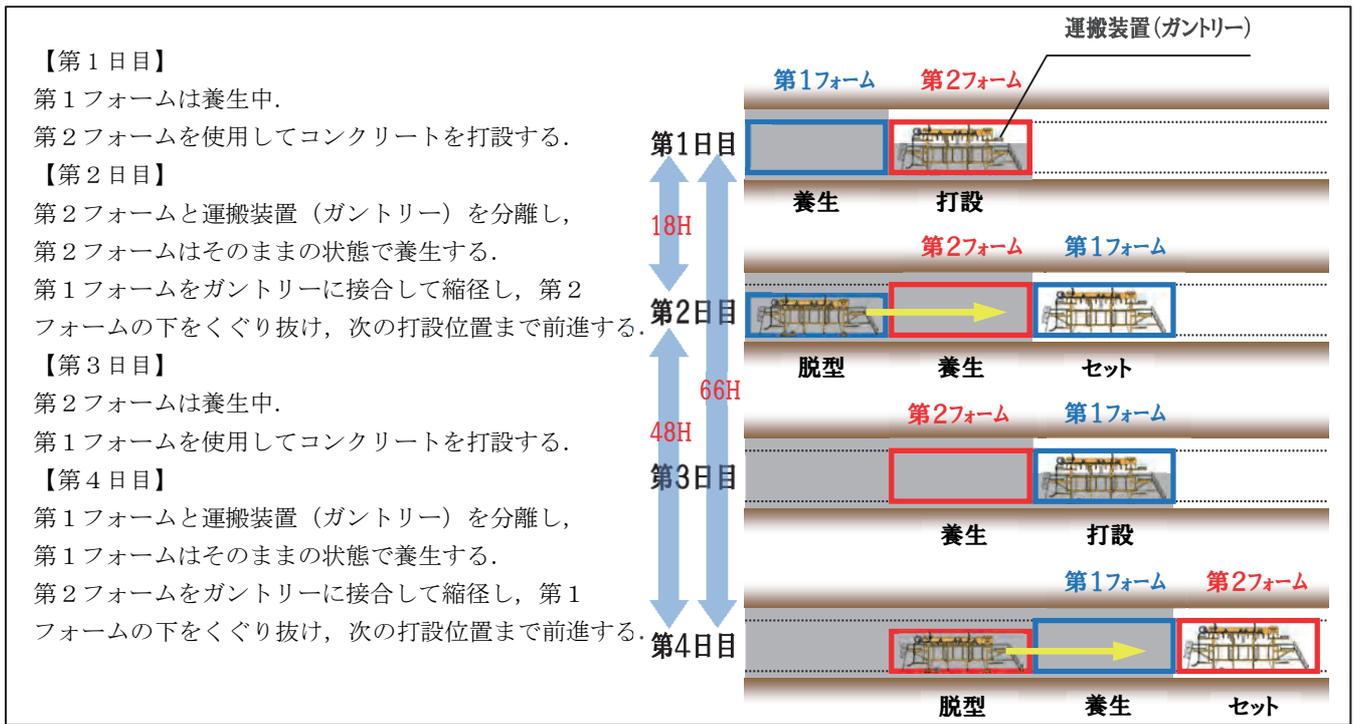


図-5 施工手順

要があった。

これらの課題を解決するため、次に示すような構造の新型セントルを設計した。

- ① 存置するアーチフォームの厚みを抑えながらも、打設時とコンクリートの強度が発現するまでの初期養生時に受ける荷重を十分に支持できるように、アーチフォームを受けるガントリー側の接合部を、剛性の高いウォール構造とする。
- ② ウォール全体によってアーチフォームを受ける構造とすることで、ジャッキやターンバックルの脱着箇所を必要最小限とする。
- ③ 存置させるアーチフォームは、単体で自立できる構造とする。

今回開発した新型セントルの概念図を図-3に、構造図を図-4に、全景を写真-1に示す。

3.2 施工手順

新型セントルを適用した場合の施工手順を図-5に示す。同図のように、1台のガントリーが2台のアーチフォーム間を往来することで、交互に連続した打設が可能となる。また、養生完了部のアーチフォームは、ガントリーと接合後に縮径し、存置されたアーチフォームの内側をくぐり抜ける構造になっている。

4. 現場での施工事例

4.1 岩古谷トンネル（新型セントル1号機）の適用例（普通コンクリート）²⁾

岩古谷トンネルは2車線道路トンネルで、トンネ

ル延長1,287mの全線に亘って新型セントルを適用した。なお、使用したコンクリートは21-15-40BB(無筋区間)である。

新型セントルの重要な工程となる、くぐり抜けについては、計画上は離隔を確保しているものの、実際の現場における不確定要素があるなかでスムーズに移動することができるか懸念されていた。しかし、レールの芯出しを正確に行い、セントル間のクリアランスを確認しながら慎重に行えば、計画どおり問題なく移動することができた。

図-6に計画上でのくぐり抜け時のフォーム離隔を示す。また、移動は打設サイクルに影響を及ぼすことなく、2日に1回の打設サイクルで66時間後脱型を実施することができた。



写真-2 施工状況（岩古谷トンネル）

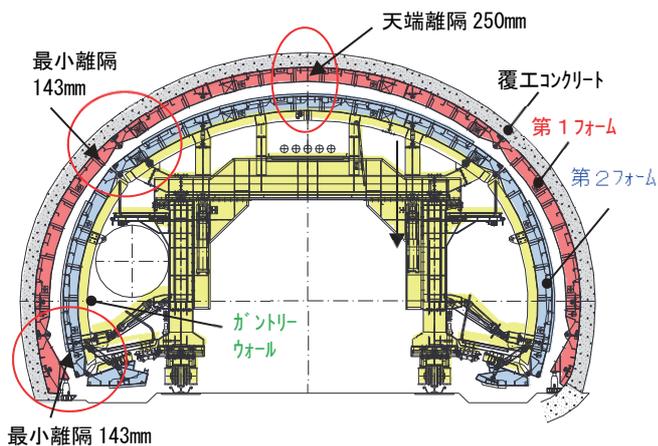


図-6 計画時のくぐり抜け状況（岩古谷トンネル）

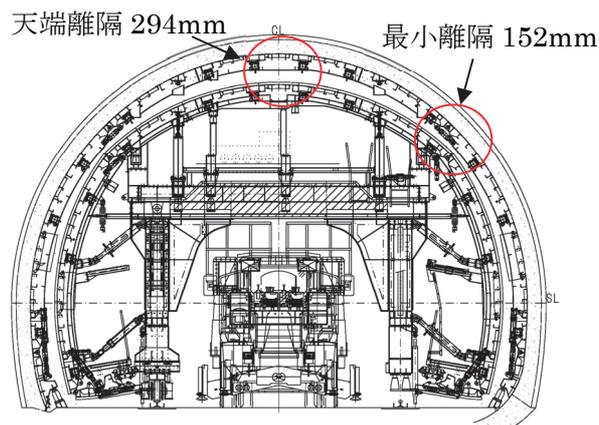


図-7 計画時のくぐり抜け状況（徳定トンネル）

4.2 徳定トンネル（新型セトル2号機）の適用例（中流動コンクリート）³⁾

徳定トンネルは新東名高速道路トンネルで、トンネル延長1,172m（上り線582m，下り線590m）の全線に亘って新型セトルを適用した。使用したコンクリートは単位セメント量が $350\text{kg}/\text{m}^3$ の特殊混和材系中流動コンクリートである。

中流動コンクリートに2号機を適用するにあたり、1号機の普通コンクリートに比べて、側圧が増加することによって各部材が厚くなるのが予想されたため、アーチフォームのくぐり抜け時のクリアランスを十分に確保すべく、1号機の実績を反映した構造の一部変更と、設計条件の精査による部材厚の低減を図った。アーチフォーム移動時の断面を図-7に示すが、この改造によって、側圧が増加しても天端部で約300mm，肩部で約150mmの離隔が確保できた。

さらに、大口径の風管や連続ベルコンなど仮設備の通過スペースを容易に確保できる設計が可能となった（図-8参照）。

部材厚の低減にあたっては、施工時に各種計測

器をセトルに設置して、コンクリートの側圧やフォーム応力および支持ジャッキの軸力を測定した。その結果、フォームに作用した側圧は設計荷重以下に収まっており、中流動コンクリートに対しても、構造上問題がないことを確認した。

表-1に標準的な施工サイクルを示すが、従来と同人数の施工体制で、確実に2日に1回の打設サイクルで66時間後脱型を実施できた。

5. 適用効果の検証

岩古谷トンネル、徳定トンネルでは、適用効果を検証するために様々なデータを取得した。以下にその結果例を示す。

5.1 覆工コンクリートの収縮ひずみ測定結果²⁾

岩古谷トンネルで、天端部のコンクリート内部に、ひずみ計を覆工表面から10cmの位置（内側）と20cm（外側）の位置2ヶ所に埋設し、養生時間の差によって生じる覆工内部のひずみの変化量を測定した。図-9に従来の方法により18時間で脱型した場合と、新型セトルにより18時間でガントリーを外し、66時間で脱型した場合のひずみの

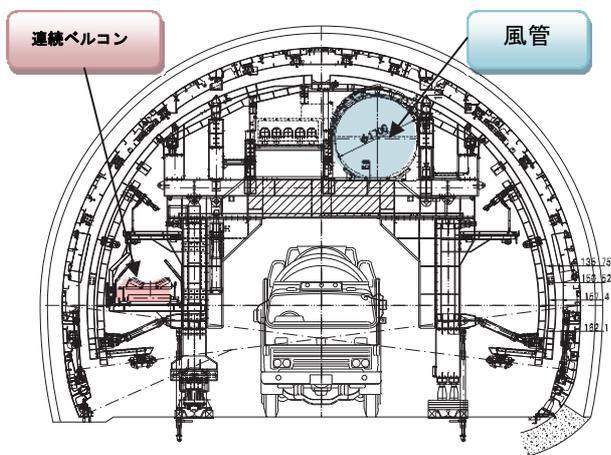


図-8 仮設備配置例

表-1 標準施工サイクル

セット日	打設日	
朝礼・KYK	朝礼・KYK	
複型枠解体・ジャッキ解体	ポンプ車セット・配管	
ガントリーダウン・移動	コンクリート打設	
フォームキャッチ・ダウン・移動		
ケレン		
セット	コンバターン 10.52m/BL 100m ²	
昼休み	先行均しCON打設	
ジャッキ固定 複型枠・差板組立		
片付け		打設片付け
		レール移動 片付け

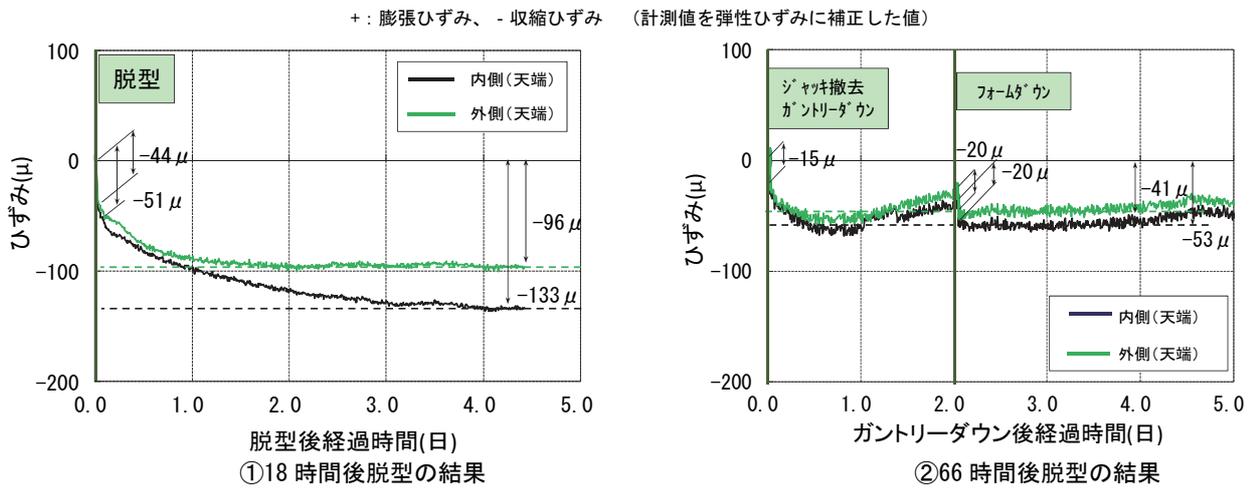


図-9 天端部におけるひずみ増分の測定結果

変化量を示す。これよると、18 時間で脱型した場合は、脱型直後に発生した収縮ひずみは外側で約 44μ 、内側で約 51μ 、ひずみが収束に至るまでに外側で約 96μ 、内側で約 133μ の収縮ひずみが発生した。一方で、66 時間で脱型した場合、ガントリーダウン時に両側に約 15μ 、フォームダウン時に約 20μ 、収束時に外側で約 41μ 、内側で約 53μ の収縮ひずみが発生した。

両者を比較した場合、66 時間で脱型した場合のトータルのひずみ量は、18 時間で脱型した場合の約 40% に止まっており、今回開発した新型セントルは、脱型による覆工内部の収縮ひずみを抑制していることが確認できた。特に 18 時間で脱型した場合、自重によるひずみに表面からの水分の蒸発による乾燥収縮ひずみ加わり、内側が漸増傾向を示しているものと推察されるが、66 時間で脱型した場合は、この傾向が見受けられない。すなわち、66 時間型枠を存置することにより、自重の他、温度変化や乾燥に伴う覆工表面の収縮ひずみの発生も抑制されている。

5.2 覆工表面の透気係数測定結果(表層品質改良効果)³⁾

徳定トンネルでは、図-10に示すように断面方向ではアーチ天端とアーチ肩の上部・下部とS.L.部の4箇所、トンネル軸方向では既設側部・中間部・棲側部の3箇所の計12箇所について、18時間脱型ブロックと、同時期打設の66時間脱型ブロックでトレント法により透気係数を測定し比較した。その結果を図-11に示すが、打設時期に係らず、18時間脱型ブロックの透気係数は $0.10 \sim 3.00 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ とばらつきが大きく、対数平均値が $0.80 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 程度になっている。一方、66時間脱型ブロックは、 $0.05 \sim 0.20 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ とばらつきが小さく、対数平均値は $0.09 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 程度となった。

また、岩古谷トンネルでも同様の測定結果が得られており、普通コンクリート、中流動コンクリートのいずれにおいても、従来の工法により18時間で脱型した場合に対して、新型セントルにより66時間型枠を存置して脱型した場合、透気係数は1オーダー小さい値になり、ばらつきも小さく

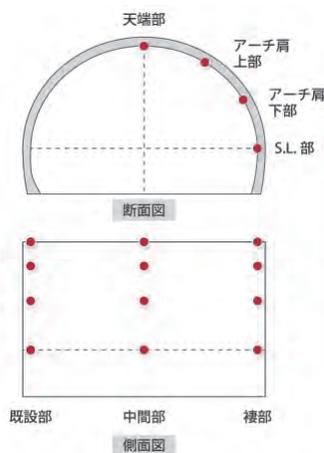


図-10 透気係数測定位置

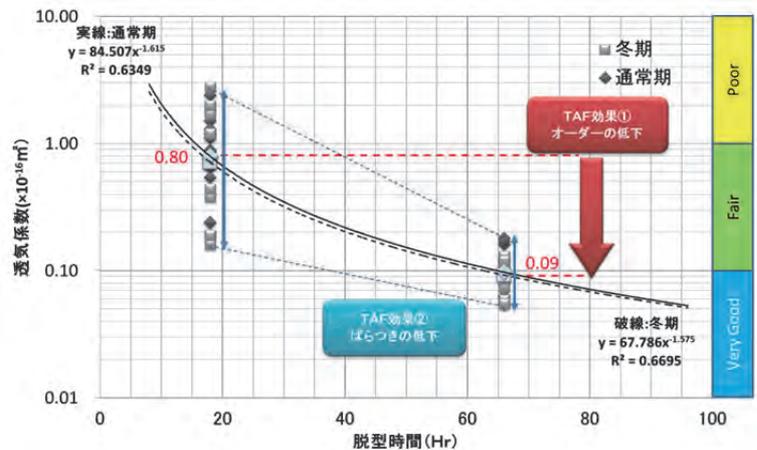


図-11 透気係数測定結果(徳定トンネル:打設4週間後)

なることから、覆工表面全体が均等に緻密化されることが確認できた⁴⁾。

5.3 ひび割れ低減効果

表-2 および図-12 に弊社施工の既往のトンネルとのひび割れ発生率の比較を示す。これによると、従来工法による場合は、竣工時に施工ブロック全体の20～35%に亘ってひび割れが発生しているが、岩古谷トンネルや徳定トンネルでは2～6%に止まっており、新型セントルによるひび割れ低減効果が明確に表れている⁵⁾。

表-2 ひび割れ発生率の比較

トンネル名	竣工時期	施工BL数	ひび割れ発生BL数	発生率(%)
Sトンネル(従来)	2007.03	134	48	36
Tトンネル(従来)	2011.03	120	25	21
岩古谷トンネル	2014.03	126	7	6
徳定トンネル	施工中	53	1	2

※徳定トンネルのインバート拘束ひび割れは除く

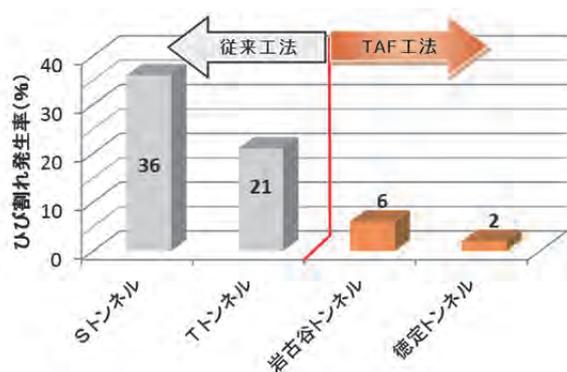


図-12 ひび割れ発生率の比較図

5.4 新型テレスコピックセントルの効果

これまでに新型セントルが適用された2工事での施工実績の一部を上記に述べたが、得られた知見から適用効果をまとめると以下のとおりである。

水和反応のピークが過ぎた後まで型枠による養生期間が確保できることにより、

- ①材齢初期の収縮ひずみ量が40%程度に抑制される。
- ②使用するコンクリートの種別にかかわらず覆工表面の緻密化が図られる。
- ③初期のひび割れ発生率は1/5～1/10程度まで低減される。

これらによって覆工コンクリートの長期耐久性

が向上する。

6. 今後の展開

今回開発した新型テレスコピックセントルの施工実績を検証した結果、従来と同人数の施工体制と2日に1回の打設サイクルを変えることなく、66時間型枠を存置して養生時間を確保することにより、覆工コンクリートの品質が格段に向上することが確認された。

今後、岩古谷トンネル及び徳定トンネルでのひび割れの追跡調査と併せて、徳定トンネルにおけるひずみ測定結果に基づき解析的な検討も実施し、ひび割れ低減効果と長期耐久性向上効果の検証を継続して実施していく予定である。

なお、新型テレスコピックセントルの3号機と4号機を本年度中に次工事に導入する予定である。連続バルコンとの組み合わせとなる初めての現場として作業性、施工性についても検証を行い、より適用性を拡大していく所存である。さらに、今後、適用現場が増加するに伴って、コスト低減が可能となるため、積極的に展開を図っていきたいと考える。

参考文献

- 1) 近藤啓二・西岡和則・坂井吾郎・安齋勝：土木学会 第68回年次学術講演会，VI-424，土木学会，2013
- 2) 竹市篤史・日野博之・西岡和則・手塚康成：JTA 第73回施工体験発表会(山岳)，2014
- 3) 間井博行・橋爪智・居川圭太・金子恵一：トンネルと地下 投稿中 土木工学社，2014
- 4) 金子恵一・川崎雄太・坂井吾郎・佐藤崇洋：土木学会 第69回年次学術講演会，VI-065，土木学会，2014
- 5) 西岡和則・手塚康成：臨床トンネル工学 平成26年度最新トンネル技術講演会 投稿中 NPO法人臨床トンネル工学研究所，2014

17. 広幅断面バケット式掘削機の開発と実施工への適用

高崎線桶川・北本間二ツ家こ道橋新設工事 HEP&JES 工法

鉄建建設(株)
東日本旅客鉄道(株)
ジェイテック

○ 泉 宏和
中山 泰成
鈴木 英之

1. はじめに

線路下を横断する道路や水路などの構造物を施工する場合、列車運行に支障を与えないために、軌道変状を抑えることが必要である。このような中、軌道影響を抑制した線路下横断工法として、HEP&JES 工法¹⁾を開発し、多くの施工実績を積み重ねてきた。HEP 工法 (Highspeed Element Pull method) とは、到達側に設置したけん引装置で、エレメントとその先端に直結した掘削装置を PC 鋼より線にて到達側に引き込む工法である。JES 工法 (Jointed Element Structure method) とは、軸直角方向に力の伝達可能な継手を有する鋼製エレメントを嵌合させ本体利用することで、線路下横断構造物を短期間に安全に構築する工法である。工法概要図を図-1 に示す。

これまで、施工速度向上、コスト低減を目的とし、施工機械の開発を行い、実施工に導入してきた。写真-1, 2 にオーガー式掘削機、従来のバケット式掘削機を示す。この度、機械化施工による掘進のさらなる高速化および無人化掘削による作業環境の改善を図ることを目的とし、広幅断面バケット式掘削機を開発した。

本稿では、広幅断面バケット式掘削機 (以下、本掘削機という。) の概要と実施工への適用事例について報告する。

2. 広幅断面バケット式掘削機の概要

2.1 開発の要点

本掘削機の開発要点は以下の3点である。

- ① バケット式掘削機の広幅断面への対応
- ② 掘削機構と排土機構の分離および並行処理による施工速度の向上
- ③ 掘削機の姿勢管理・制御方法

本掘削機イメージを図-2 に示し、特徴を以下に記述する。

2.2 仕様

本掘削機の仕様を表-1 に示す。なお、地盤条件は他掘削機の適用範囲を除外した範囲である。

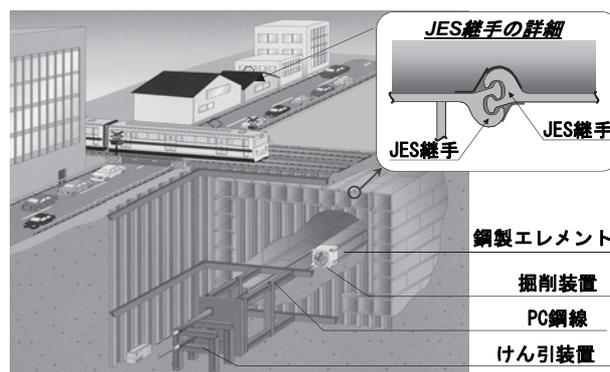


図-1 HEP&JES 工法の概要図

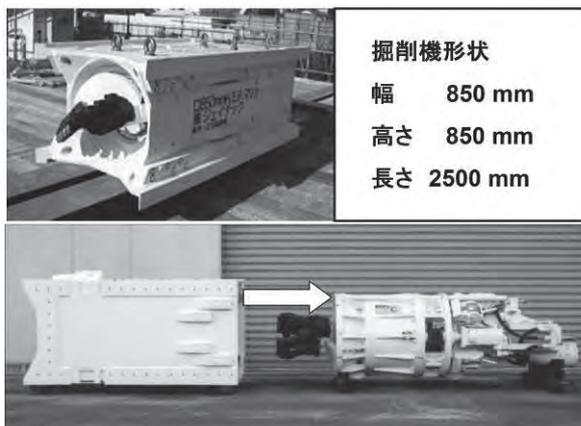


写真-1 オーガー式掘削機

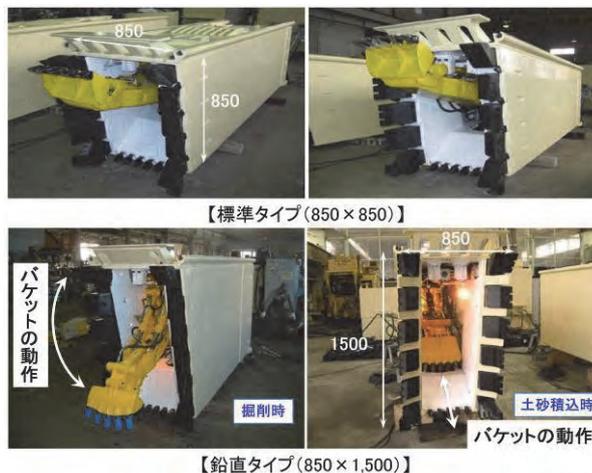


写真-2 従来のバケット式掘削機

表-1 機械仕様

名称	広幅断面バケット式掘削機
仕様	油圧バケット式
寸法	W 2030 mm×L 4650 mm×H 850 mm
能力	ギャザリング排土機構 11.7 m ³ /h
本体重量	5.85 tf
適用地盤	<ul style="list-style-type: none"> ・玉石混じり地盤 玉石径 200 mm以上 ・N値≧20 砂質土 ・N値≧8 粘性土 ※本掘削機を選定する際の地盤条件

2.2 鋼製エレメント形状

本掘削機でけん引・設置する鋼製エレメントは、標準エレメント (1,035mm) 2本分の幅を有する広幅エレメント (1,035mm×2 = 2,070mm) を基本とする (図-3)。従来のバケット式掘削機は標準エレメントを使用していたが、広幅エレメントを用いることで、エレメント施工本数を減らすことが可能となり、工期短縮およびコスト低減を可能としている。

2.3 掘削機構と排土機構

従来のバケット式掘削機は、バケットで掘削した土砂を直接後方のベルトコンベアへ積み込む構造であり、掘削と排土を分離していた。本掘削機は、バケットで掘削した土砂を集積し、ギャザリング装置がベルトコンベアに積み込む作業を分担するように改良を加えた。この改良により、掘削と排土を並行して処理することで、施工速度の向上を図っている (図-4)。

広幅断面に対応して、バケットは、スイングおよび旋回機構を搭載し、可動範囲を広くした。また、ギャザリング装置は、油圧モータによる回転運動をリンク機構で、大きな半円状の爪の動きを実現している。そして、バケットとギャザリングの干渉防止として、ギャザリングの自動停止および運転再開ラインを設定することを可能としている (図-5)。

2.4 掘進時の姿勢制御機構

本掘削機は、幅が広いいため、掘進に伴い継手が嵌合していない側が沈む (ローリング) ことが懸念された。このため、既往の開発である刃口姿勢制御手法²⁾を採用した。具体的にはアウトケーシングの下面にテーパを設け (図-6)、下面の掘削量の調整を行うことにより姿勢制御を行う。本掘削機の高さ、ローリングは電子レベル、ピッチングは傾斜計により常時計測およびモニタリングを行う。電子レベルは背面の立坑内に設置し、受光部 (電子スタッフ) を本掘削機内に設置することで、高さを計測する (図-7)。

2.5 掘削範囲制御機構

本掘削機では、バケット可動範囲を制御することにより、掘削範囲を制限することができる。また、掘削バケットツースの本掘削機端部からの出代は、全範囲 (上下左右) 遠隔制御が可能であり、切羽の地山状況により中央管理室の制御盤にて変

更することができる。バケットの最大可動範囲を図-8に示す。

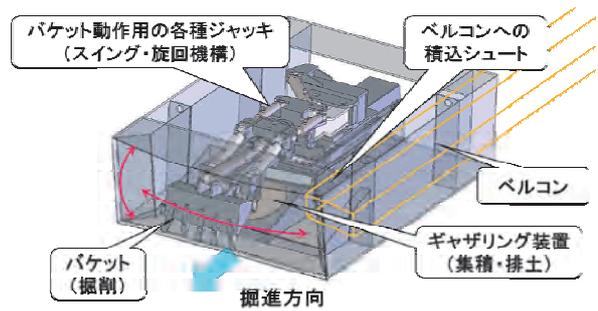


図-2 広幅断面バケット式掘削機の概要図

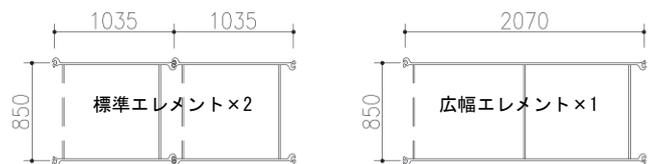


図-3 鋼製エレメント断面図

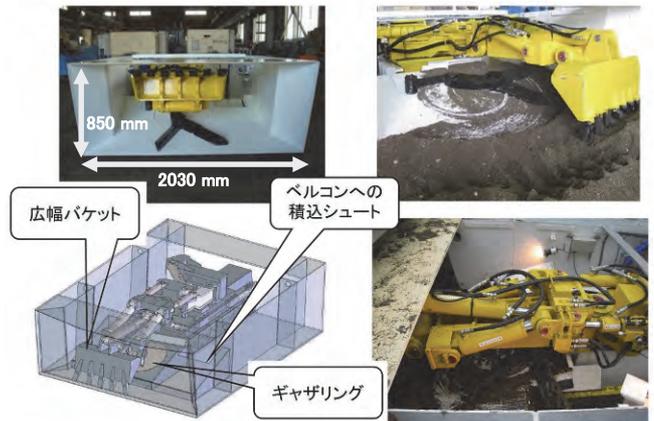


図-4 広幅断面バケット式掘削機

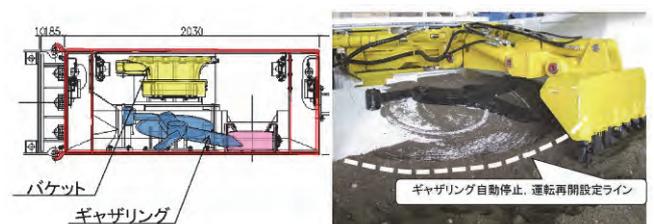


図-5 バケットとギャザリングの干渉防止

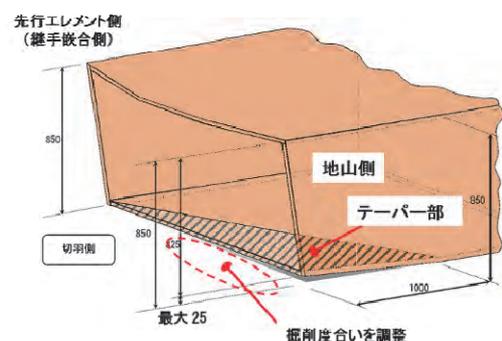


図-6 下面テーパ形状イメージ図

切羽全面の土質状況及び掘削状況は刃口先端に配置した監視カメラ4台(LED照明付)にて中央管理室のテレビモニターで管理する。監視カメラ配置図を図-9に示す。死角の無い配置により切羽全域の監視を行う。

2.6 掘進管理

本掘削機およびエレメントけん引装置の操作は、作業ヤード内に設置する中央管理室にて行う。中央管理室内の状況を写真-3に示す。全体管理PCでは、けん引距離、けん引速度、けん引力、補助推進力、ピッチング、ローリング等のデータを監視する。

2.7 けん引および補助推進

エレメント掘進は、継手を嵌合させる側3本のPC鋼より線によるけん引、および継手がフリーとなっている地山側の補助推進を行っている。けん引設備は到達立坑に設置する。補助推進は、発進立坑の反力設備を設置しジャッキにて行う。

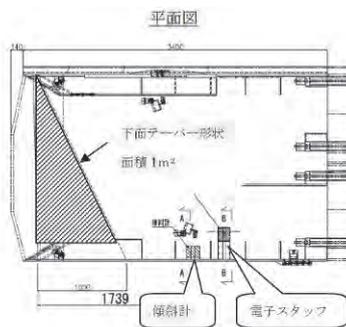


図-7 刃口計測機器配置図

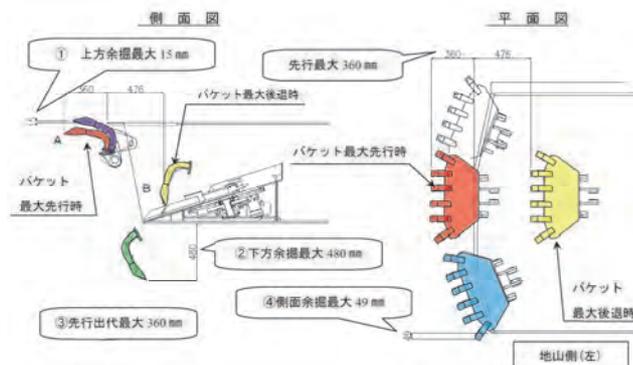


図-8 バケット最大可動範囲

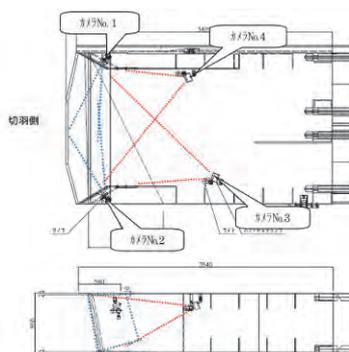


図-9 切羽監視カメラ配置図



写真-3 中央管理室内状況



図-10 施工位置図

3. 実施工への適用事例

3.1 工事概要

本掘削機を採用した高崎線桶川・北本間二ツ家こ道橋新設工事³⁾(以下、二ツ家Bvという。)は、JR高崎線と一般国道468号線首都圏中央連絡自動車道(圏央道)および、主要地方道東松山桶川線(県道)の立体交差工事であり、JR高崎線下に1層4径間のボックスカルバート(幅49m、高さ8.9m、延長14m)を構築するものである(図-10~12)。試験ヤードにおける施工試験を経て、二ツ家Bvの下床エレメントの施工(8エレメント:図-11に①~⑧と記載)を本掘削機にて行った。

3.2 土質条件

対象地盤は、設計時の土質柱状図ではシルトが介在する砂層(N値6~20)と想定されていた。そのため、掘削機は、オーガー式を採用する計画であった。しかし、下床エレメント施工地盤は、立坑掘削時にN値30以上の硬質砂質土であることを確認したため、N値20以上の地盤に適用可能な本掘削機を採用することとなった。

3.3 施工結果

① 施工精度

本掘削機による下床8エレメントの施工順序を図-11に示す。二ツ家Bvは4径間の割付であり、径間毎に施工誤差を吸収する調整エレメントを施工して閉合する。そのため、施工目標高は、先行して施工した調整エレメントの隣のエレメントの

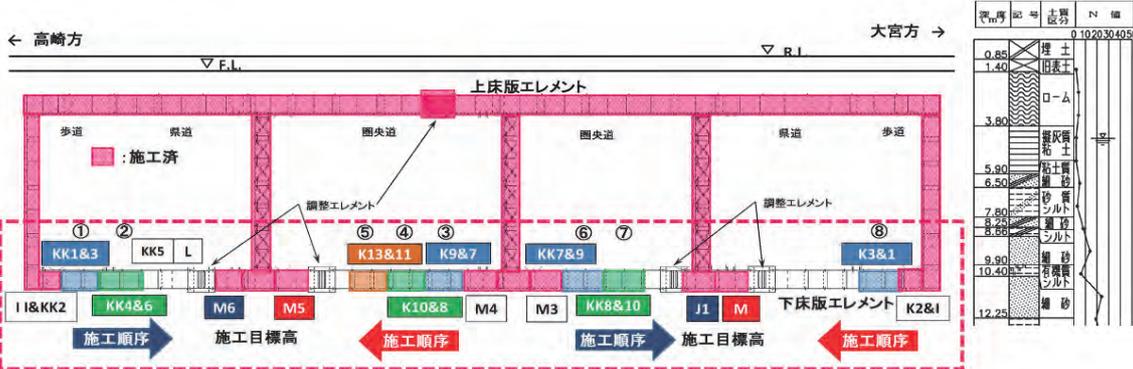


図-11 横断面図 (ニツ家 Bv)

高さに向けて徐々に近づけることとした。例えば、高崎方 1 径間では、①KK1&3, ②KK4&6, KK5, L の 4 エレメントの施工で施工済の M6 に徐々に近づけるようエレメント毎に施工目標高を設定した。その際の掘進完了後のエレメント高さを図-13 に示す。施工目標高に向けて、徐々に近づけることができおり、姿勢制御および掘進管理により、所定の施工精度内でエレメント掘進が完了した。他の径間についても同様な結果であった。

② 掘進速度

掘進速度については、本掘削機による 1 方 (作業時間 420 分) の最大掘進量は 4.4m/方であり、1 エレメント (14m) を 3 日程度で掘進した。同時期に施工した人力掘削では、標準サイズエレメントの最大掘進量が 3.7m/方であったことから、エレメントサイズが広幅になり、1 回のけん引で標準エレメント 2 本分の掘削が可能となることから、本掘削機の適用は非常に有効であったと言える。なお、施工体制は、人力施工の 1 班 6 人に対し、機械施工により 1 班 4 人で実施した。

③ けん引力

図-14 に①KK1&3, ②KK4&6 のけん引力管理図を示す。縦軸は PC 鋼より線 3 本のけん引力および後方からの補助推進力の和を表している。掘削機高さを修正するため、姿勢制御を実施した②KK4&6 は二次管理値付近と高い値であったが、けん引力と補助推進力の和は、全エレメントにおいて所定の管理値内であった。

4. まとめ

広幅断面バケット式掘削機を開発し、試験ヤードでの施工試験を経て、実施工へ適用した。実施工により、本掘削機が N 値 30 以上の硬質砂質土に対して有効であることを確認した。本掘削機の採用により、従来のバケット掘削機や人力掘削と比較して、施工速度の向上による工程短縮、および作業人員削減によるコスト縮減に繋がると考える。定量的な評価については、今後、同様のプロジェクトへの展開を図り、施工実績を積み重ねて整理していく。

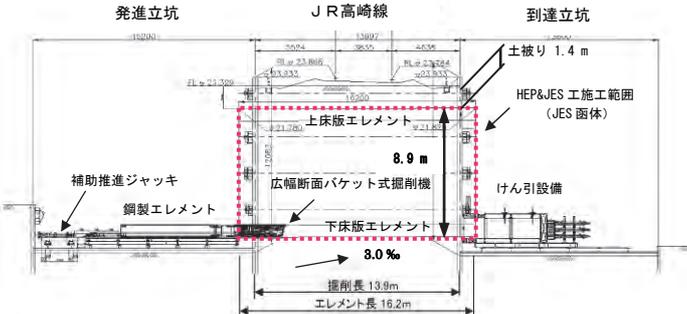


図-12 縦断面図 (ニツ家 Bv)

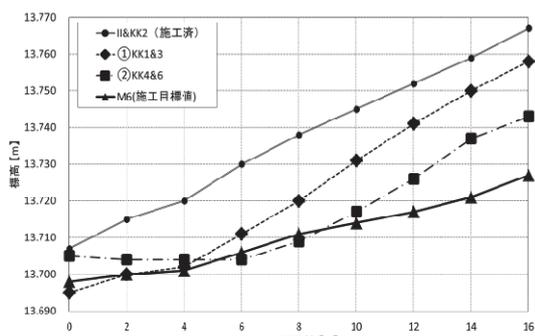


図-13 施工目標高とエレメント高さ

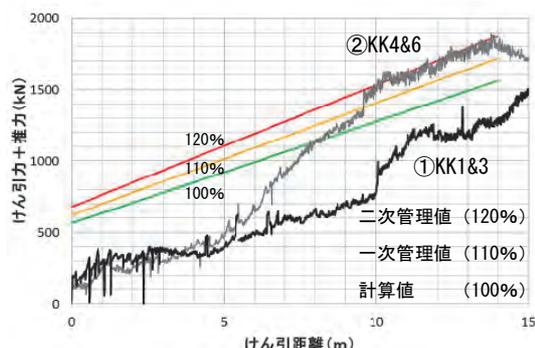


図-14 けん引力管理図

参考文献

- 1) (財) 先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明 報告書 HEP&JES 工法 (更新), 2005.11
- 2) 泉宏和, 岩瀬隆, 中井寛, 齋藤貴, 藤本幸夫：地盤切削 JES 工法における刃口姿勢制御手法の施工確認試験, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.1489-1490, 2013
- 3) 西村知晃, 中山泰成, 尾関聡司：地盤切削 JES 工法による立体交差工事—高崎線桶川・北本間ニツ家こ道橋新設工事—, 土木施工, vol.54, No.8, pp.32-35, 2013.8

18. 真空条件下における レゴリスシミュラントと金属材料の摺動接触

明石工業高等専門学校 ○松本 和彦
明石工業高等専門学校 江口 忠臣

1. 背景

近年、宇宙開発が注目されている。2010年に帰還した小惑星探査機「はやぶさ」や、2013年に打ち上げが成功した固体燃料ロケット「イプシロン」など、人類の宇宙進出が進んでいる。そして、月探査計画（SELENE計画）も進行中である。これは、月周回衛星「かぐや」による月面の地形、組成そして重力場などを計測するもので、将来の月資源利用のための基礎データを収集した。さらに、SELENE-2の計画も進められており、これは月に着陸しその内部を詳しく調査するものである。

月を目指す動機のひとつに月資源利用がある。これは、月にある物資や環境を利用して人類の活動に役立てようとするものであり、月の資源利用には以下の2つの意味がある¹⁾。1つは、月で採取された資源を地球に輸送して利用するというものである。地球と月の往復の輸送コストを上回る価値のある物資が月には存在する。

もう1つは、月で採取された資源を月面上もしくは宇宙で利用するというものである。これは、近年の人類の宇宙進出によって新たに生み出された価値である。地球外に進出する際に必要となる物資や消耗品などの輸送にはコストがかかる。したがって、地球からの輸送にだけ依存しながら活動領域を拡大するのは得策ではない。現地で生産、製造が可能になれば活動の自由度が大きく広がる。ゆえに、月に実際に存在しているもので利用可能な物質が新たな資源としての意味合いを持つのである。

より経済的に月資源を利用するためには、以下の3点を考慮に入れなくてはならない。

- ・材料の入手性（存在量と収集のしやすさ）
- ・加工の技術的難易度
- ・生成物の重要性（有人活動に向けての必要性）

過去のSELENE計画やアポロ計画などによって月面に存在する物質に関してある程度の情報は得られている。比較的容易に月の資源から加工抽出できることが明らかになっており、重要度の高い目的物質はH₂O、O₂、Fe、Ti、Siである¹⁾。

これらの物質を製造するための技術を確立するためには、1) 月面において資源材料となる物質を検出するためのセンシング技術（見つける技術）、2) 検出された資源を掘削、運搬するハンドリング技術（調達する技術）、3) 材料から目的物質を製造するプロセッシング技術（製造する技術）が求められる。

月で人間が活動を行うためには、新たに月環境に適応したシステムを構築しなければならない。表-1に月と地球の環境の相違を示す。重力、大気、日照、温度などの環境条件が異なる。施工技術の分野においては、これらの環境を考慮したハンドリング技術、すなわち採取、掘削、運搬の技術開発が行われなければならない。

表-1 月と地球の環境の相違

	月	地球
重力	1/6G	1G
大気	高真空	21%O ₂ , 79%N ₂
1日の長さ	23.53日	1日
平均温度	107°C, -153°C	15°C
極地温度	-230°C	-20°C

2. 目的

本研究では、月の資源を調達する際に行われる掘削、運搬作業に伴う作業部の摺動場面における土砂との摩耗の問題を取り扱う。地球上では工学的に培われた経験則が通用するが、月面環境、とくに高真空雰囲気であること、月土壌がレゴリスと呼ばれる特殊な土砂であることが、金属と土砂との接触にどのような影響を及ぼすかが十分に検証されておらず解明すべき点が多い。

本研究では、月土壌であるレゴリスを人工的に地球上の鉱物で再現した月面模擬土（レゴリスシミュラント）と金属材料を真空中で摺動接触させる実験を行った。これによって、月面での摺動接触特性を見出し、ハンドリング技術開発のための基礎データを得ることが目的である。

3. 摺動接触実験方法

3.1 使用材料

(1) レゴリス及びレゴリスシミュラント

レゴリスとは月の表層面に堆積している土砂で、粒径の中央値が $70\mu\text{m}$ 、最大値が 2mm 程度の粒の集合体である。その組成はアポロ 11 号などが持ち帰った試料から明らかにされている。その成分は表-2 に示す通りである。地球上の鉱物に比べ、酸化鉄、酸化カルシウム、酸化マグネシウムそして酸化チタンが多く存在する²⁾。

レゴリスシミュラント（月面模擬土）とは、月面の土壌であるレゴリスの組成をもとにして地球上の鉱物資源で人工的に作った模擬土のことである。100 倍に拡大したレゴリスシミュラントを図-1 に示す。その成分は、レゴリスには含まれない酸化鉄Ⅲ (Fe_2O_3) を 5%弱含んでいる（表-2）。

レゴリス及びレゴリスシミュラント共に、地球の砂と比較して非常に細かく粒も尖っているため、摺動接触に与える影響も大きいと考えられる。

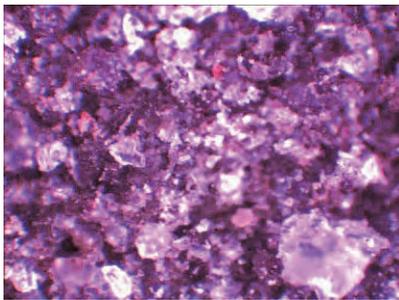


図-1 レゴリスシミュラント

表-2 レゴリス及びシミュラントの組成

成分	Apollo 11	シミュラント
SiO_2	42.20	49.14
TiO_2	7.80	1.91
Al_2O_3	13.60	16.23
Cr_2O_3	0.30	0.00
FeO	15.30	7.50
Fe_2O_3	—	4.77
MnO	0.20	0.19
MgO	7.80	3.84
CaO	11.90	9.13
Na_2O	0.47	2.75
K_2O	0.16	1.01
P_2O_5	0.05	0.44
S	0.12	0.00
H_2O	0.00	0.43
Total	99.90	98.14

(2) 金属試料

建設機械の作業部に用いられる金属試料は、地球上では通常タングステンカーバイトなどの超硬金属が用いられている。しかし、初期段階における月面での掘削においては、岩の削岩ではなくレゴリス収集のための掘削が想定されるため、表面の耐摩耗性が保たれるのであれば、超硬金属である必要はないと考えられる。実際に行われている月面掘削関連の既往研究^{3) 4) 5)}において、アルミニウムとステンレスが用いられているため、本研究においてもこれを用いることとした。

① アルミニウム (A1050)

アルミニウムは、日常使う身近な製品にも多く使われている。1つの特徴は比重の軽さである。アルミニウムの使用によって、他の金属を使うよりも重量を抑えることが出来る。同時に十分な強度も得ることが可能である。また、耐食性にも優れ、低温特性も備えている。液体窒素 (-196°C) や液体酸素 (-183°C) 中でも脆性破壊を起こさず靱性が大きい。そのため、夜の平均気温が -150°C にもなる月面上での使用にも耐えうることが期待できる。

本研究では、アルミニウムを 99.5%以上含む、純度と強度とを適度に備えた A1050 のアルミニウムを用いた。用いた試料のビッカース硬度は $H_V=25.6$ である。

② ステンレス (SUS430)

ステンレスは、強度や耐摩耗性に優れており、地球上の建設機械のバケットの部分にもよく使われる材料である。

また、掘削の前段階でセンシングを行う必要があるが、探査の段階では各種の鉱物や揮発性物質を観測するため、観測対象となるアルミニウムやチタン、鉄などを含む材料の使用ができない場合がある。このような場合、アルミニウム以外の金属の使用を検討する場合、ステンレス使用の必要性が出てくる。ただし、ステンレスは鉄 (Fe) をベースにクロム (Cr) やニッケル (Ni) を加えて作られた合金であることに注意を要する。

本研究では、ステンレスとして一般的な SUS304 ではなく、これよりも安価だが耐食性が劣る SUS430 を使用した。月面環境では、酸素がないため耐食性はあまり意味を成さない可能性がある。また、SUS430 は熱膨張率が小さいという利点があるので、温度変化の大きい月面では有利であると考えられる。さらに、センシング技術のことも含めると、なるべく少ない元素からなる材料を用いることが重要であるため、ニッケルを含まない SUS430 は適しているといえる。用いた試料のビッカース硬度は $H_V=104.4$ である。

(3) 標準砂

レゴリスシミュラントとの比較のために標準砂も実験試料として用いた。

本研究では、JIS A 1214 に規定されている砂置換法による土の密度試験に用いる砂、豊浦標準砂を使用した。主な化学物質の割合を示すと、 SiO_2 : 92.6%, Al_2O_3 : 3.7%, Fe_2O_3 : 0.7%, CaO : 0.5%, MgO : 0.2% である。

3.2 試験機器

(1) 摺動装置

摺動接触とは、物体同士を滑らせることにより接触させ、摩耗発生を促すものである。本実験ではスライダークランク機構を用いて再現する。スライダークランク機構とは、図-2 に示すように、回転運動を直線運動に変える機構である。モーターによって右の円盤が回転し、単棒で接続された金属試料が左右に移動する仕組みになっている。

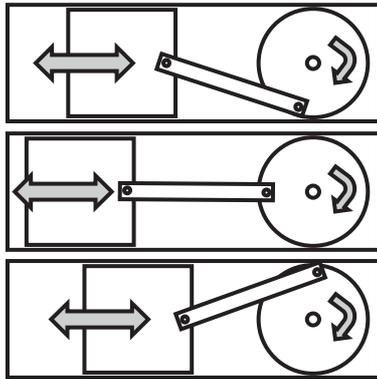


図-2 スライダークランク機構

(2) 真空チャンバ

月面環境の再現の上で重要なのが、真空雰囲気である。この真空中での挙動を調べることが重要になるが、これを真空チャンバ(図-3)の中に再現する。摺動装置を真空チャンバ内に設置し、コンプレッサーによって空気抜きを行い、1/3600 気圧まで減圧する。以下、この状態を真空状態として試験を行った。

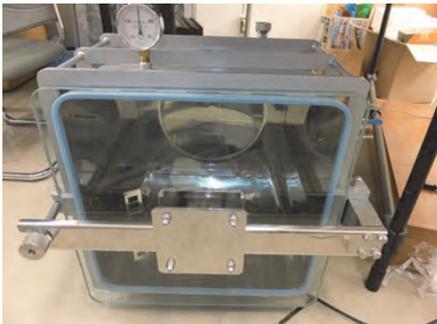


図-3 真空チャンバ

3.3 試験条件

試験は、雰囲気条件、金属試料、接触土砂の3種類を変更し、それぞれの組み合わせについて試験を行った。雰囲気条件は大気中及び真空中、金属試料はアルミニウム及びステンレス、接触土砂はレゴリスシミュラント及び標準砂である。

測定するデータは、金属試料の摺動前後の質量差とした。この質量の減少量をもとの金属試料の質量に対する百分率で表したものを摩耗量とした。質量を測定する電子天秤の感量は 10^{-4}g である。また、金属反射顕微鏡によって、金属試料の表面の様子も観察した。

摺動時間は、真空中で連続的に10分、20分、30分、40分、50分、60分、120分間摺動させる。これにより、質量測定の際に大気に触れる影響を除外し、各時間摺動接触した後の摩耗量を計測することができる。ただし、試験が終了し質量を測定する際には大気に触れることを避けられない。

4. 結果及び考察

本実験の真空中での試験結果を以下の図-4及び図-5に示す。

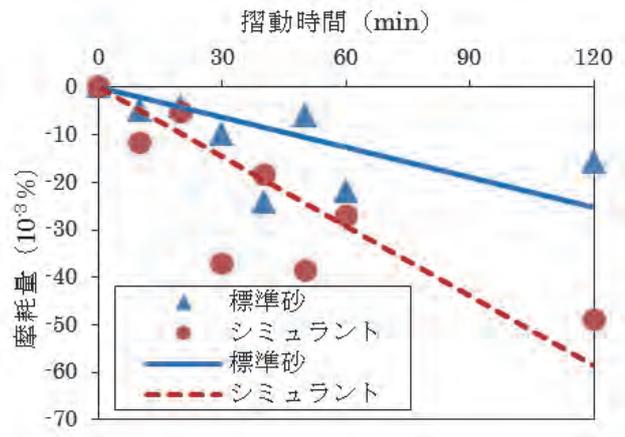


図-4 アルミニウムの結果

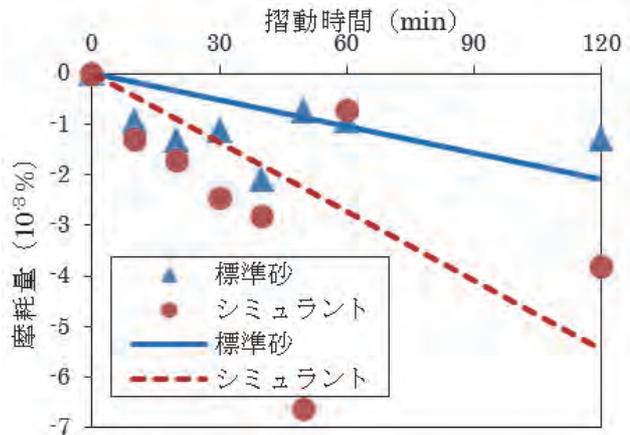


図-5 ステンレスの結果

横軸に摺動時間を、縦軸に摩耗量をとっており、プロット点1つに対して1つの供試体に対応する。この2つの結果はいずれも摩耗量がマイナスになっている。これはつまり、質量が見かけ上増加したことを示している。アルミニウムでは質量比 $48.8 \times 10^{-3}\%$ 、正味質量で $9.7 \times 10^{-3}g$ の増加、ステンレスでは質量比 $6.6 \times 10^{-3}\%$ 、正味質量で $2.0 \times 10^{-3}g$ の増加となっている。

土砂と金属を摺動させて摩耗現象を再現しているにも関わらず、見かけ上質量が増加している。これは、金属試料の表面に土砂が付着していると考えられることで説明できる。

図-6は雰囲気条件が真空中のアルミニウムの30分間摺動後の金属表面であり、図-7は同条件でのステンレスの40分間摺動後の金属表面である(倍率は共に100倍)。白くなっている部分が金属もとの表面であり、黒くなった部分が摩耗の生じた部分である。両金属ともに、この黒くなった部分にレゴリスシミュラントの付着が確認された。

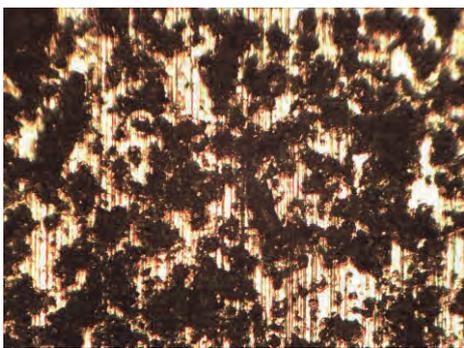


図-6 真空中アルミニウム 30分摺動後

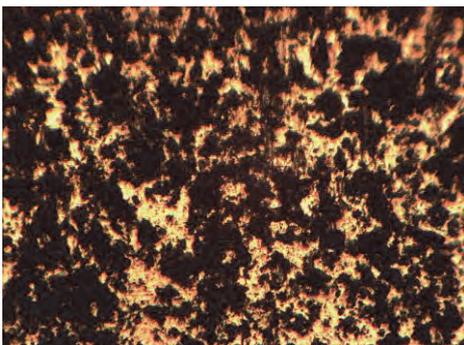


図-7 真空中ステンレス 40分摺動後

試験終了後、金属試料を摺動装置から取り外し、表面の土砂払拭を行っているが、この除去作業では取り除けない付着が発生しているといえる。

アルミニウムとステンレスを比較すると、アルミニウムの方が見かけ質量の増加量が多い。表面硬度は、ビッカース硬度でステンレスがアルミニウムの約4倍硬い。つまり、表面硬度が硬いほ

ど、質量の増加量は少なくなっている。また、アルミニウム及びステンレス共に、標準砂よりもレゴリスシミュラントの方が見かけ質量の増加が大きい。このことから、表面の硬さと粒の大きさや形状が摺動接触時の付着に影響する要因であり、表面が柔らかいほど、土砂の粒が小さいほど付着が発生しやすいと考えられる。

さらに、両金属ともに摺動時間が長くなれば、測定質量の予測が困難になっていく可能性がある。摺動接触によって金属試料表面で摩耗や付着が複雑に発生しているためと考えられ、摩耗量や付着量の計測はその質量によっては測定できないと考えられる。

本研究で行った摺動接触は、金属試料の自重のみで生じる圧力での接触である。この圧力は両金属とも100Pa以下で、摺動条件としてはかなり小さい圧力である。

5. 結論

レゴリスシミュラントと金属材料の真空中摺動場面の実験から、以下の結論を得た。

- ① 雰囲気条件が真空で、土砂がレゴリスシミュラントの条件で、かつ接触圧が小さい場合には金属に土砂が付着する可能性がある。
- ② 真空中であっても、表面硬度や土砂の形状が摺動接触に影響を及ぼす要因になりうる。
- ③ 摩耗量を質量で判定する場合、付着による見かけ質量の増加の影響があることに留意しなければならない。

本実験では、レゴリスシミュラントを用いたが、実際のレゴリスには含まれない Fe_2O_3 が含まれていることに留意する必要がある。

今後、摩耗を卓越させるために大きな接触圧力の条件下で摺動接触を行った場合、付着と摩耗の関係を検討しなければならない。

参考文献

- 1) 月資源利用研究会：月資源利用ワークショップ--技術の現状と可能性--，2006
- 2) H.Kanamori, K.Matsui, A.Miyahara, and S.Aoki : Development of New Lunar Soil Simulants in Japan,2006
- 3) 安田進, 小松敬治：D3 反力トルクを使用したレゴリス掘削機構の研究, 日本機械学会第18回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集 pp.75-79, 2010
- 4) 矢田剛之, 大森隼人, 中村太郎：月面での地震計設置のための蠕動運動型掘削ロボットの開発, JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2008
- 5) 居相政史：リップによる月レゴリス掘削の効率化, 日本機械学会第19回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集, 2010

19. 舗装工の追加転圧における振動タイヤローラの適用

—25ton タイヤローラと 9ton 振動タイヤローラの比較—

酒井重工業(株) 技術開発部 ○眞壁 淳
酒井重工業(株) 技術開発部 内山 恵一
(株)高速道路総合技術研究所 舗装研究室 加藤 亮

1. はじめに

東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、および西日本高速道路(株)の『土木工事共通仕様書』¹⁾に記載されている舗装工において、路盤準備工および粒状路盤工の追加転圧に使用する機械は、質量 25ton 以上のタイヤローラ（以下、「25t タイヤ」）と定められている。しかしながら、近年、稼働可能な 25t タイヤは市場から減少しつつあり、施工現場では調達困難な状況となっている。

9t 級振動タイヤローラ（以下、「9t 振動タイヤ」）は、加熱アスファルト混合物や粒状路盤材を用いた締固め試験において 25t タイヤと比較された結果、同等の締固め効果が報告されている²⁾。このことから、筆者らは舗装工の追加転圧にも 9t 振動タイヤが適用可能と考えた。

本論文では、舗装工の追加転圧において、9t 振動タイヤが 25t タイヤと同等かそれ以上の締固め効果を有し、かつ、品質管理基準を満足することが可能であるか確認することを目的に、実施方法を参考にして実施した室内および現場締固め試験の結果について記述する。

2. 締固め試験方法

2.1 室内試験の概要

コンクリートピットと試験の概要を図-1 に示す。コンクリートピットは、全長 20m、試験区間 15m、幅 3m、深さ 95cm である。はじめに、たわみ測定用荷重車の進入を考慮し、上部路床 1、2 層（仕上り厚 15cm×2）を構築した際の全層厚が 95cm になるよう、砂質ロームを用いた厚さ 65cm の下部路床を構築した。下部路床は、十分な地盤剛性となる

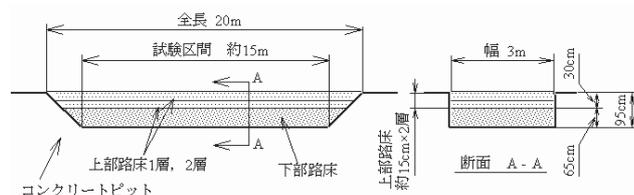


図-1 室内締固め試験概要

よう、1 層の仕上がり厚さを 9~10cm として 4t 級振動ローラで締固め、NEXCO が定める品質管理基準（以下、「品質管理基準」）である締固め度 90% 以上³⁾、加えて現場 CBR60±5% で管理した。次に、上部路床 1、2 層は、現場の施工方法を参考に、12t 級土工用振動ローラ（以下、「12t 振動ローラ」）で締固め、文献 3) の品質管理基準である締固め度 95% 以上およびタンデム車によるたわみ量 5mm 以下で管理した。この後、『土木工事共通仕様書』に記載された 2 種類の追加転圧方法、すなわち 10cm かき起こしの有無について 25t タイヤおよび 9t 振動タイヤを用いた追加転圧に関する比較試験を実施した。

2.1.1 室内試験用土の性状

土質は、「細粒分質礫質砂 (SGF)」に分類された茨城県笠間産山砂（以下、山砂）で、文献 3) の「盛土工の材料基準」に適合している。表-1 に、室内試験用土の土質試験結果を示す。試験時の含水比は、上部路床 1、2 層を構築する際は 12t 振動ローラの締固めエネルギーを考慮して、最適含水比より乾燥側の 8% を、10cm かき起こしの際は 25t タイヤおよび 9t 振動タイヤの締固めエネルギーを考慮して、かき起こした 10cm 分の室内試験用土を最適含水比より湿潤側の 10% を目標に調整した。

2.1.2 締固め機械仕様

試験に用いた 12t 振動ローラ、25t タイヤおよび 9t 振動タイヤの概略仕様を表-2 に示す。

2.1.3 締固め条件

10cm かき起こし無しの場合、上部路床 2 層目を構築後、追加転圧として 25t タイヤおよび 9t 振動タイヤで 4 回（2 往復）締固めた。

10cm かき起こし有りの場合、かき起こし無しの試験終了後、締固め面から深さ 10cm をかき起こし、追加転圧として 25t タイヤおよび 9t 振動タイヤで 16 回（8 往復）締固めた。締固め速度は、各締固め機械ともに約 2km/h である。

2.1.4 評価および測定項目

品質管理基準は、文献 4) の突砂法による締固め度 95% 以上およびタンデム車によるたわみ量 5mm

表-1 室内試験用土の土質試験結果

試験用土	山砂
最適含水比 (E 法) [%]	9.0
最大乾燥密度 (E 法) [g/cm ³]	2.032
土粒子密度 [g/cm ³]	2.647
最大粒径 [mm]	9.5

表-3 現場試験用土の土質試験結果

試験用土	切込砕石
最適含水比 (E 法) [%]	5.9
最大乾燥密度 (E 法) [g/cm ³]	2.207
土粒子密度 [g/cm ³]	2.690
最大粒径 [mm]	53.0

表-2 締固め機械仕様概略 (室内締固め試験)

機種	12t 振動ローラ	25t タイヤ	9t 振動タイヤ
運転質量 [kg]	12,610	25,050	9,000
前軸質量 [kg]	7,070	10,620	3,860
後軸質量 [kg]	5,540	14,430	5,140
締固め幅 [mm]	2,130	2,085	1,950
軸距 [mm]	2,970	4,100	3,000
起振力 [kN]	255	-	前:45.1 後:58.4
振動数 [vpm]	1,700	-	2,400
タイヤ[本] 径×幅[mm]	-	前:3, 後:4 1,110×314	前:3, 後:4 970×370
空気圧 [kPa]	-	539	441

表-4 締固め機械仕様概略 (現場締固め試験)

締固め機械	9t マカダム
運転質量 [kg]	8,770
前軸質量 [kg]	4,460
後軸質量 [kg]	4,310
締固め幅 [mm]	2,100
軸距 [mm]	3,300

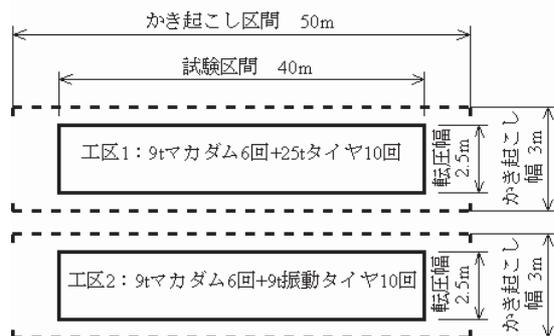


図-2 現場締固め試験概要

以下である。その他、締固め効果を総合的に判断するため、現場 CBR および小型 FWD による $K_{P,FWD}$ も同時に測定した。なお、 $K_{P,FWD}$ は、載荷板直径 30cm 相当に補正した K 値 (支持力係数) である。

2.2 現場試験の概要

試験工区と現場試験の概要を図-2 に示す。現場締固め試験では、路床工事が完了した区間の一部に二つの試験工区を設け、文献 1) に記された 10cm かき起こし有りの場合について、25t タイヤおよび 9t 振動タイヤを用いた追加転圧に関する比較試験を実施した。

2.2.1 現場試験用土の性状

土質は、「砂質礫 (GS)」に分類された切込砕石で、文献 3) の「盛土工の材料基準」に適合している。表-3 に、現場試験用土の土質試験結果を示す。含水比条件は、現場試験用土が乾燥状態にあったことから、かき起こした後に試験工区へ散水を行った。

2.2.2 締固め機械仕様

試験に用いた 9t 級マカダムローラ (以下、「9t マカダム」) の概略仕様を表-4 に示す。25t タイヤと 9t 振動タイヤは、室内試験と同様である。

2.2.3 締固め条件

締固め方法は、現場の施工方法に従い、10cm かき起こし後に 9t マカダムを用いて 6 回 (3 往復)、次に、25t タイヤおよび 9t 振動タイヤを用いて 10 回 (5 往復) 締固めた。締固め速度は、9t マカダムで約 3km/h、25t タイヤおよび 9t 振動タイヤで約 4km/h であった。

2.2.4 評価および測定項目

品質管理基準は、室内試験と同様に締固め度およびたわみ量である。その他、小型 FWD による $K_{P,FWD}$ を同時に測定した。

3. 締固め試験結果と考察

3.1 室内締固め試験

図-3 に 10cm かき起こし無しの場合の締固め回数と締固め度の関係を示す。図中の P2' は、試験用土撒き出し後の初期状態を一定にする目的で、4t 級ローラで無振動 2 回の締固めを示す。12t 振動ローラで 12 回締固め後 (P12) の締固め度が 102.1% であったのに対し、25t タイヤで 4 回の追加転圧後 (P16) は 102.5%、9t 振動タイヤで 4 回の追加転圧後 (P16) は 102.3% であり、追加転圧による変化はなかった。これは、25t タイヤおよび 9t 振動タイヤの締固めエネルギーが 12t 振動ローラに対して小さいためと考える。表-5 は、たわみ量の測定結果を示す。25t タイヤと 9t 振動タイヤの差は 0.1mm 未満で、同等の結果であった。図-4 および図-5 は、締固め回数と現場 CBR および $K_{P,FWD}$ の関係を示す。図-4 では、12t 振動ローラで 12 回締固め後 (P12) の現場 CBR が 71.0% であったのに対し、25t タイヤで 4 回の追加転圧後 (P16) は 83.5%、9t 振動タイヤで 4 回の追加転圧後 (P16) は 79.3%

に増加した。また、図-5においても、12t 振動ローラで 12 回締固め後 (P12) の $K_{P,FWD}$ が 330MN/m^3 であったのに対し、25t タイヤで 4 回の追加転圧後 (P16) は 413MN/m^3 、9t 振動タイヤで 4 回の追加転圧後 (P16) は 407MN/m^3 に増加した。このことは、横田らによって 25t タイヤについて報告されており⁵⁾、追加転圧後の現場 CBR および $K_{P,FWD}$ が 25t タイヤと 9t 振動タイヤで同等であることから、9t 振動タイヤにも 25t タイヤと同等に地盤剛性を増加させる効果があると、今回新たに確認された。

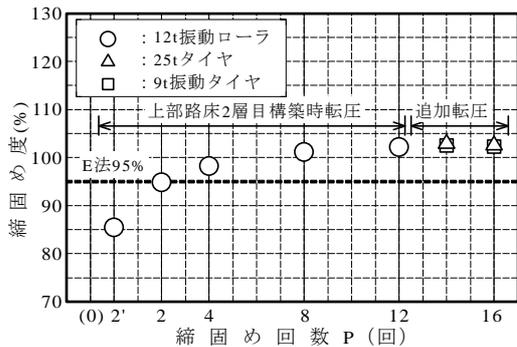


図-3 山砂における締固め回数と締固め度の関係 (10cm かき起こし無し, 平均含水比 7.7%)

表-5 山砂におけるたわみ量測定結果 (10cm かき起こし無し, 平均含水比 7.7%)

締固め回数	12		16	
締固め機械	12t 振動ローラ	25t タイヤ	9t 振動タイヤ	
たわみ量[mm]	1.10	0.96	1.03	

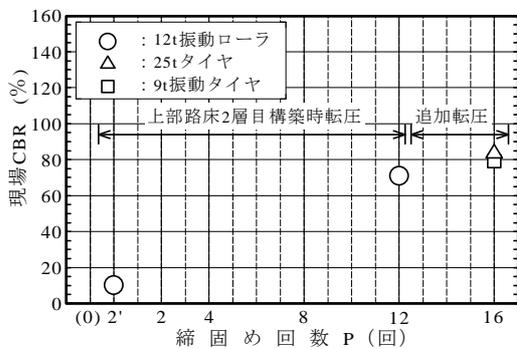


図-4 山砂における締固め回数と現場 CBR の関係 (10cm かき起こし無し, 平均含水比 7.7%)

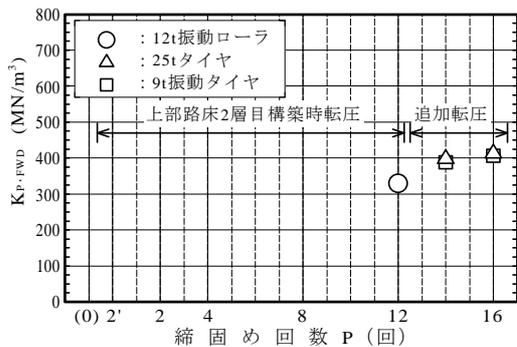


図-5 山砂における締固め回数と $K_{P,FWD}$ の関係 (10cm かき起こし無し, 平均含水比 7.7%)

図-6 に 10cm かき起こし有りの場合の締固め回数と締固め度の関係を示す。25t タイヤで 16 回締固め後 (P16) の締固め度は 94.8%, 9t 振動タイヤで 16 回締固め後 (P16) は 97.0%であり、2~8 回締固め後 (P2~8) の結果と併せても 9t 振動タイヤは 25t タイヤと同等で、かつ品質管理基準である 95%以上を満足することが確認された。表-6 は、たわみ量の測定結果を示す。25t タイヤと 9t 振動タイヤは品質管理基準である 5mm 以下を十分に満足しており、両締固め機械の差も 0.1mm 未満で

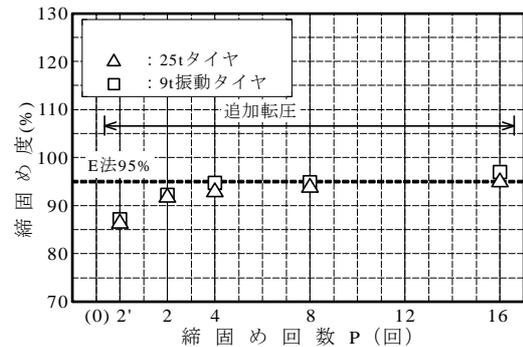


図-6 山砂における締固め回数と締固め度の関係 (10cm かき起こし有り, 平均含水比 8.9%)

表-6 山砂におけるたわみ量測定結果 (10cm かき起こし有り, 平均含水比 8.9%)

締固め回数	16	
締固め機械	25t タイヤ	9t 振動タイヤ
たわみ量[mm]	1.17	1.26

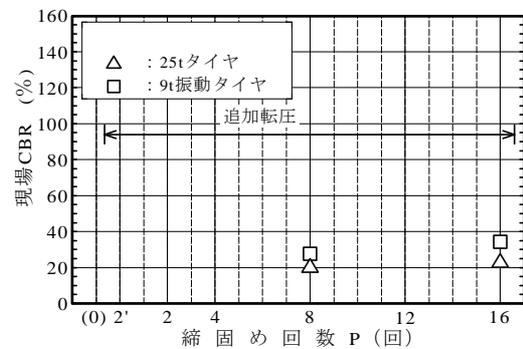


図-7 山砂における締固め回数と現場 CBR の関係 (10cm かき起こし有り, 平均含水比 8.9%)

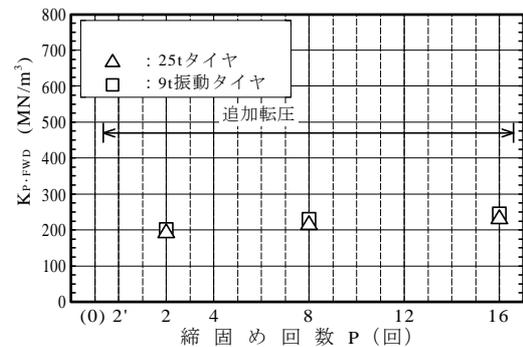


図-8 山砂における締固め回数と $K_{P,FWD}$ の関係 (10cm かき起こし有り, 平均含水比 8.9%)

同等の結果であった。図-7 および図-8 は、締固め回数と現場 CBR および $K_{P,FWD}$ の関係を示す。図-7 において、25t タイヤで 16 回締固め後 (P16) の現場 CBR は 22.6%、9t 振動タイヤで 16 回締固め後 (P16) は 34.4% であり、8 回締固め後 (P8) の結果と併せて 9t 振動タイヤが約 10% 高い結果となった。図-8 においては、25t タイヤで 16 回締固め後 (P16) の $K_{P,FWD}$ は 231MN/m^3 、9t 振動タイヤで 16 回締固め後 (P16) は 245MN/m^3 であり、2~8 回締固め後 (P2~8) の結果と併せても 9t 振動タイヤは 25t タイヤと同等であった。これらの結果から、室内試験では、9t 振動タイヤの締固め効果は、25t タイヤと同等かそれ以上であることが確認された。

3.2 現場締固め試験

図-9 は、締固め回数と締固め度の関係を示す。工区 1 では、9t マカダムで 6 回締固め後 (P6) の締固め度が 94.5% であったのに対し、25t タイヤで 10 回締固め後 (P16) は 96.2% となった。また、工区 2 では、9t マカダムで 6 回締固め後 (P6) の締固め度が 92.2% であったのに対し、9t 振動タイヤで 10 回締固め後 (P16) は 96.8% となった。25t タ

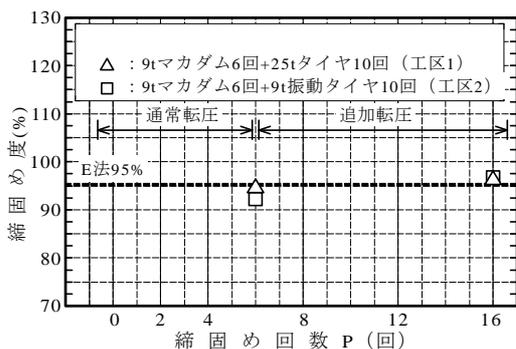


図-9 切込砕石における締固め回数と締固め度の関係 (10cm かき起こし有り, 平均含水比 2.2~2.9%)

表-7 切込砕石におけるたわみ量測定結果 (10cm かき起こし有り, 平均含水比 2.2~2.9%)

締固め回数	16	
工区	1	2
締固め機械	25t タイヤ	9t 振動タイヤ
たわみ量[mm]	1.45	1.09



図-10 切込砕石における締固め回数と $K_{P,FWD}$ の関係 (10cm かき起こし有り, 平均含水比 2.2~2.9%)

イヤおよび 9t 振動タイヤは、10 回の締固め後 (P16) に品質管理基準を満足し、その差は締固め度 1% 未満で同等の結果であった。表-7 に、たわみ量の測定結果を示す。締固め度と同様に、両締固め機械ともに品質管理基準は十分に満たしているが、25t タイヤで締固め後のたわみ量が 1.45mm であるのに対し、9t 振動タイヤで締固め後は 1.09mm であり、9t 振動タイヤの方が良好な結果となった。

図-10 に、締固め回数と $K_{P,FWD}$ の関係を示す。25t タイヤで 10 回締固め後 (P16) の $K_{P,FWD}$ は 379MN/m^3 、9t 振動タイヤで 10 回締固め後 (P16) は 509MN/m^3 であり、9t 振動タイヤの方が大きい結果となった。しかし、9t マカダムで 6 回締固め後 (P6) の工区 1 および 2 で同様の差が生じていることから、締固め以前の初期状態が異なっていたと考えられる。その要因には、かき起こし厚、含水比および施工完了時点の地盤剛性の違いが挙げられる。現場試験では、9t 振動タイヤが 25t タイヤと同様に、締固め度およびたわみ量の品質管理基準を満たすことが確認された。

4. まとめ

舗装工の追加転圧において、9t 振動タイヤが 25t タイヤと同等かそれ以上の締固め効果を有し、かつ、品質管理基準を満足することが可能であるかを確認することを目的に室内および現場締固め試験を実施した。これらの試験から得られた結論は、以下の通りである。

- ① 舗装工の追加転圧において、9t 振動タイヤは、25t タイヤと比較して同等かそれ以上の締固め効果があり、品質管理基準を満足することが可能である。
- ② 9t 振動タイヤは、12t 振動ローラで締固め後の追加転圧に用いることで、25t タイヤと同等にたわみ量ならびに地盤剛性を増加させる効果がある。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社：土木工事共通仕様書，pp.13-2~13-6, 2012
- 2) Y. Nose・Y. Kanamori・K. Uchiyama・J. Makabe・K. Shioyama・K. Doi：Vibratory Pneumatic Tire Roller, Proceeding of the 15th International Conference of the ISTVS, September 25 to 29, 3B01, 2005
- 3) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：土工施工管理要領，pp.2-3~2-10, pp.2-42~2-43, 2012
- 4) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：舗装施工管理要領，pp.22~24.2013
- 5) 横田聖哉・益村公人・石黒健・藤山哲雄：道路路床における施工管理の合理化に関する考察- (その2) タイヤローラによる追加転圧効果-，第37回地盤工学研究発表会，pp.1325~1326, 2002

20. 配筋自動判定システムの開発

株式会社大林組

○ 池田 雄一
坂上 肇
浜田 耕史

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の主要構造部材である鉄筋に関する施工ミスや検査ミスが後を絶たない。その結果、発注者から配筋検査体制の強化が求められ、施工者側は配筋検査の全箇所全数記録化などで対応している。しかし、部位(柱、梁、スラブ、壁ほか)や場所、方向、階によって配筋はすべて異なるため、配筋検査の全箇所全数記録化は多くの手間が掛かる。そこで、配筋検査の報告書作成や配筋写真の整理などの業務を効率良く行うため、配筋検査を支援するシステムが開発された。その結果、配筋検査の業務効率は大幅に向上し、記録ミスなどを低減できた¹⁾。

さらに、配筋状態(鉄筋本数、径、ピッチなど)を自動計測および判定できるシステムを開発した。本システムは、市販のデジタルカメラで撮影した配筋写真に画像処理技術を適用すると配筋状態を自動的に計測および判定できる。

本報では、開発したシステムの内容、建築現場での検証実験について報告する。

2. 現状の配筋検査の課題

建築工事の配筋検査時に撮影される配筋写真の一例を図-1に示す。同図は2方向の柱筋を1方向から撮影した配筋写真である。検査対象の主筋とせん断補強筋を径ごとに異なる色のカラーチューブで巻き、配筋ピッチを確認しやすくするため検測用ロッドやリボンロッドをセットして、検査場所や配筋要領を書き込んだ黒板を含めて配筋写真を撮影している。通常、柱1本あたり1~2枚、梁1本あたり3枚(端部2枚、中央1枚)、スラブや壁は代表的な箇所を1枚、開口補強や端部定着部などの特別な箇所は各1枚撮影する。検査終了後、事務所へ戻り、膨大な数量の配筋写真を検査箇所ごとに振り分け、写真帳にまとめて監理者へ提出する。プロジェクトごとに提出書類や配筋写真の内容に差異はあるが、配筋検査は多くの手間を要する管理業務である。躯体工事期間中の管理業務の比率を工種別にヒアリング調査し

た結果、鉄筋工事に関する業務が約1/4を占めていたという報告もあり、その内訳の半分以上が品質管理業務だった。

全箇所全数記録の配筋検査は、検査箇所が非常に多く、配筋要領が場所ごとにすべて異なる。その結果、万が一の確率で起こる可能性のある施工ミスの見落としや検査場所そのものを間違えるといったヒューマンエラーが生じる可能性を秘めている。

3. 配筋自動判定システムの基本設計

3.1 開発コンセプト

配筋検査時に鉄筋工事の施工ミスを確実に検出し、検査精度を大幅に向上させるため、配筋状態を正確に計測し、合否を判定できるシステムの開発に着手した。開発コンセプトを以下に示す。

- ①現状の配筋検査スタイルの踏襲・維持
- ②ハンズフリーとなるシンプルな機器構成
- ③鉄筋径を正確に判別するミリ単位の精度
- ④計測結果がその場でわかるリアルタイム性

3.2 計測手法の選定

計測用機器として、現状の配筋検査で利用しているデジタルカメラの他、カメラレンズを2つ持つステレオカメラと製造業で利用されている小型の3次元スキャナーの諸性能を比較検証した。



図-1 配筋検査写真例

比較結果を表-1に示す。

ステレオカメラは、左右の画像の視差から奥行き方向を含めた3次元情報を得ることができ、自動車の衝突防止機能を含む運転支援システム等に組み込まれている。撮影面内の計測精度は画素数(解像度)に依存し、奥行き方向の計測精度はカメラレンズ間距離(基線長)に依存する。最近、図-2左に示すような小型ステレオカメラが市販されているが、基線長は100mm以下と短いため、奥行き精度はセンチ単位以上となってしまふ。ミリ単位の精度を要求するとステレオカメラの基線長は2mを超え、装置が大型化して工事現場内で携帯するには非現実的な大きさとなる。

図-2右に示す3次元スキャナーは、製造業のリバースエンジニアリング向けに開発されたハンディ式である²⁾。3次元スキャナーでは、得られた3次元点群データから鉄筋のみを抽出し、各種計測作業が事務所での後処理となること、赤外線を使用するタイプであると屋外で安定して使用できないこと、配筋検査用の写真を別に撮影しなければならないことなどの理由から、運用は困難であると判断した。以上の結果、携帯性・計測精度・リアルタイム性などを重視して計測用機器にデジタルカメラを選定した。

3.3 課題の抽出

デジタルカメラによる配筋検査写真に対して画像処理技術を活用して寸法を計測する場合、以下の課題を解決する必要がある。

- ①屋外環境下での画像処理技術の適用
- ②鉄筋径の実測結果からの径の特定方法
- ③確実に鉄筋のみを抽出するための補助策

(1) 屋外環境下での画像処理技術の適用

画像処理技術は、製造業における工場内の生産ラインに設置する視覚センサーとして利用が進展してきた。屋内では、高速にコンベア上を移動する部品を瞬時に判別できる。屋外での利用については、道路のセンターラインの把握、車のナンバー認識といった平面的で定型的なものに限られている。立体的な形状を有する異形鉄筋を屋外で精密に計測するには多くの課題があった。

(2) 鉄筋径の実測結果からの径の特定方法

異形鉄筋では配筋された鉄筋の向きによって、画像処理の計測結果が異なる。異形鉄筋の中で最も主流である竹ふし鉄筋の正面写真を図-3に示す。同図(a)のようにリブが左右端にある状態(以下、リブがち)と同図(b)のようにリブが左右端以外にある状態(以下、ふしがち)では、同じ径の鉄筋でも計測結果が大きく異なる。上記から鉄筋の向きによって、径を正しく特定できない可能性がある。また、竹ふし鉄筋の次に利用が多いねじふし鉄筋の形状を図-4に示す。同図から、二方向のねじ部をカットした楕円形状をしている

ことがわかる。したがって、ねじふし鉄筋も撮影する方向によって大きく断面形状が異なるため、径を正しく特定できない可能性がある。

4. 画像処理による計測と課題の解決

4.1 画像処理による鉄筋の計測

画像処理を適用した計測は、対象(鉄筋)の抽出と抽出された対象の面積や長さの計測の大きく2つの内容に分かれる。計測対象の抽出には、通常、各画素の輝度値に応じた2値化が利用される。計測対象の面積や長さの計測では、写真の画素数をカウントし、実空間上の寸法に変換する。画像処理による計測概要を図-5に示す。

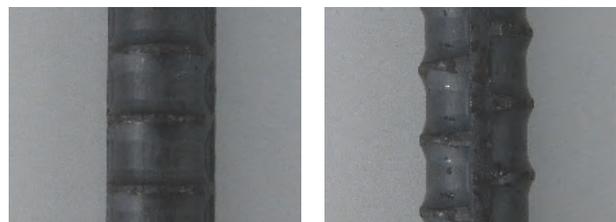
デジタルカメラは単眼であり、奥行き方向の距離情報が得られないため、径の自明な丸形マーカを利用してカメラからの距離を算出した。丸形マーカーはデジタルカメラと正対しなくと

表-1 計測手法の比較結果

	デジタルカメラ	ステレオカメラ	3次元スキャナー
コスト	◎	◎~△	◎~×
大きさ・携帯性	◎	◎~△	○or△
簡便性	◎	◎~△	○or△
計測精度	◎or○	◎~△	○or△
リアルタイム性	◎	○	△
3次元モデル化	△	○	◎
総合評価	◎	○	△

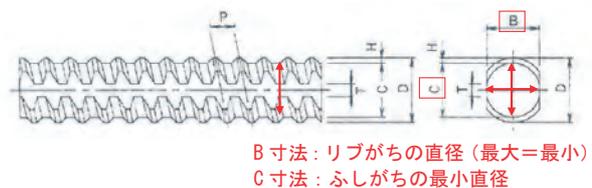


図-2 ステレオカメラと3次元スキャナー



(a) リブがち (b) ふしがち

図-3 竹ふし鉄筋の向きによる径の違い



B寸法: リブがちの直径(最大=最小)
C寸法: ふしがちの最小直径

図-4 ねじふし鉄筋の形状

も、画像上で見掛けの最大径（楕円の長径）を算出できる。配筋写真から計測対象の鉄筋のみを確実に抽出するため、鉄筋背後に白色帯状の背景をセットした。マーカーを背景上に2個セットすると、デジタルカメラマーカー間 (L_1 , L_2) とマーカー-マーカー間 (L_3) を3辺とする三角形から、デジタルカメラ位置に対する鉄筋位置の3次元座標が求められる。鉄筋径はデジタルカメラとの距離およびマーカーとの大きさの比から、ピッチは隣同士の鉄筋の位置座標値から、それぞれ求められる。

4.2 屋外での画像処理による鉄筋抽出

屋外環境下でも鉄筋を正確に抽出するために、各種の鉄筋抽出アルゴリズムについて検証した結果を図-6に示す。まず、設定した小領域内で算出された相対的な閾値で入力画像 i を2値化する手法(局所2値化)によって抽出を試みたが、同図 ii のように影を鉄筋と誤認識した。そこで、影の影響を低減するため、ストロボ撮影をしたところ、同図 iii のような2値化画像を得た。そこで、輝度値がほぼ一定の領域に分割し、その領域ごとに3つの領域(背景、影、鉄筋)に区分するアルゴリズムを考案し、検証した。その結果、同図 iv のように鉄筋(赤色部分)と影を明確に区別することができた。この画像処理アルゴリズムをシステムに実装した。

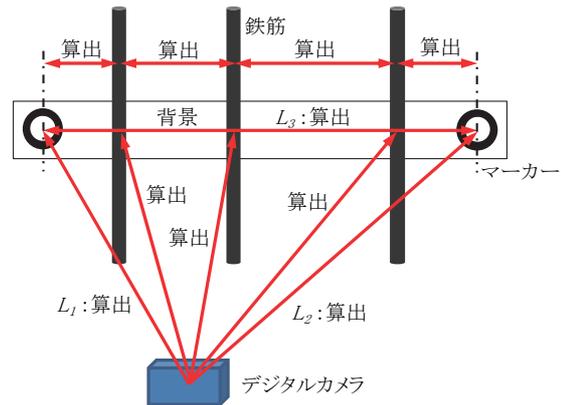
4.3 鉄筋径の補正

撮影場所と撮影対象の配筋の位置関係から、斜めからの撮影を余儀なくされるケースがある。また、撮影対象の幅が広い場合、端部の鉄筋は必然的に斜めからの撮影と同等の撮影角度になる。この場合、図-7のように背景への投影幅が本来の鉄筋径より拡大される。この現象は、端部の鉄筋において顕著であり、特に太径鉄筋では、まれに鉄筋径を誤判定するケースが生じた。そこで、斜めに撮影された鉄筋に対して、正面からの撮影と同様の計測値となるような補正を行った。

4.4 鉄筋径判定手法の考案

竹ふし鉄筋では、各径のすべての向きで実測した鉄筋径の範囲と画像処理で算出した鉄筋径の軸方向分布における最大値(以下、最大直径)とを比較して、鉄筋径を特定する手法を考案した。ただし、実測した鉄筋径の範囲は、上位と下位の径で重複する領域(以下、重複領域)が生じるため、鉄筋径の軸方向分布における最小値(以下、最小直径)を算出し、最大直径との差分(=ふしの高さ)を計算した。差分がふしの高さと同じ場合は、ふしがちと判断して上位の径と特定する。等しくない場合は、下位の径と特定する。なお、各鉄筋径の実測値は鉄筋メーカー3社製の鉄筋から、ふしの高さの範囲はJIS G 3112:2010(鉄筋コンクリート用棒鋼)から得た。

近年、柱・梁の主筋(特に太径)を中心に機械式継手が採用され、それに伴いねじふし鉄筋の利用が増えてきた。ねじふし鉄筋は竹ふし鉄筋と形状がまったく異なり、竹ふし鉄筋の鉄筋径判定フローではその径を特定できない。ねじふし鉄筋の断面の特徴に着目し、最小直径から径を判定する専用のフローを考案した。鉄筋メーカー3社製のねじふし鉄筋を実測したところ、各径の実測値の範囲は重複しないことがわかった。本フローにより一意にねじふし鉄筋の径が特定可能である。



- ・マーカー径 M_r mmは既知
- ・マーカーの画像上での最大径は M_p pixel
- ・マーカーまでの距離 L_1 mm, 計測対象の鉄筋までの距離 L_t mm
- ・計測対象の画像上の鉄筋径 T_p pixel
- ・実際の鉄筋径 $T_r = T_p \times M_r \times L_t / (M_p \times L_1)$

図-5 画像処理の計測概要

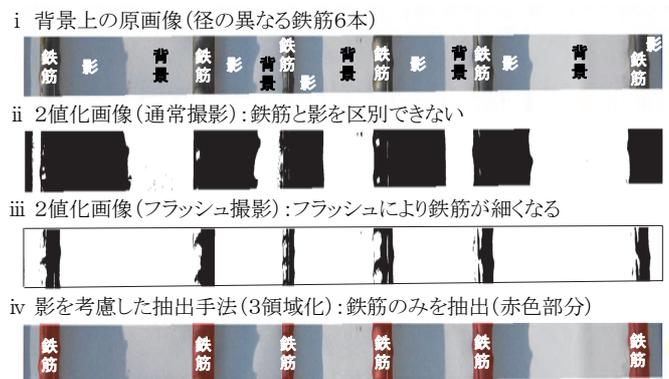


図-6 鉄筋を抽出する画像処理手法の比較

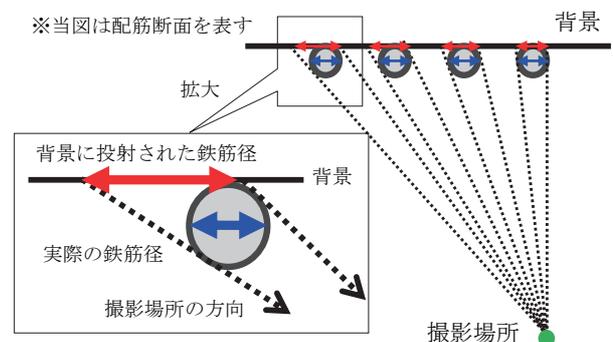


図-7 端部の鉄筋径の補正概念

5. システム開発と現場検証実験

5.1 システムの概要

(1) システムの機器構成

機器構成を図-8 に示す。鉄筋を計測するには画像処理プログラムを実行するパソコン（以下、PC）が必要である。工事現場での使用に耐えうる堅牢・防水型のPCを選択し、肩掛けや首掛けを可能にし、ハンズフリーが可能なスタイルとした。デジタルカメラで撮影した画像は、無線LAN機能内蔵型メモリーカードを利用してPCへ自動転送する。その後、画像処理プログラムを実行して鉄筋を計測し、鉄筋径を特定して判定結果をPC画面に表示する。

(2) システム画面

システム画面を図-9 に示す。工事現場で使用することを考慮して、ペンまたは指だけですべての操作ができるように設計した。システム利用の流れは、まず、マーカーと背景を検査対象の鉄筋背後にセットし、配筋写真を撮影する。PCへ自動転送された撮影画像を選択し、撮影場所を入力する。計測前に設計情報を入力すると、計測結果を自動判定する。計測結果として、縦筋と横筋の鉄筋本数、径、ピッチがそれぞれ得られるが、表示が不要な情報（例えば、主筋のピッチ）は個別に非表示にできる。最後に、計測結果が表示された配筋写真の画像をPCに保存する。

(3) 背景器具の開発

試作時の背景は、アクリル板で製作し、その裏面に磁石を貼付して鉄筋と固定した。鉄筋の背後に挿入しやすくするため、300～400mmの長さで分割した。この背景を利用して各種実験を行っていたところ、磁力で付着した鉄粉等によって背景が汚れる、または、鉄筋との固定を阻害する場合があった。この結果、背景をセットする時間が長引く、背景が真っ直ぐにセットできない、という不具合が生じた。そこで、磁力のみに頼らない鉄筋への固定方法を検討し、端部の固定具とロール状の背景を組み合わせた背景器具を開発した。開発した背景器具を図-10 に示す。ロール状の背景には、耐久性・耐水性・防汚性の優れた材料を選定した。なお、端部の固定具は、100～200mmの配筋ピッチに適応し、鉄筋へ確実に固定できる。

5.2 屋内検証実験

まず、システムの精度確認を目的として、日射や影の影響のない屋内で検証実験を行った。建築工事で通常使用されるD10～D41を対象鉄筋とした。鉄筋の向きは、リブがち、ふしがち、および、これらの遷移状態とした。これら3つの向きの判定結果を図-11 に示す。同図の上段はリブがち、中段はふしがち、下段はリブがちからふしがちの遷移状態の判定結果である。径の判定結果は、鉄筋の向きによらず正確であった。

配筋写真(マーカーと背景をセット)



図-8 システムの機器構成



図-9 システム画面例



図-10 背景器具

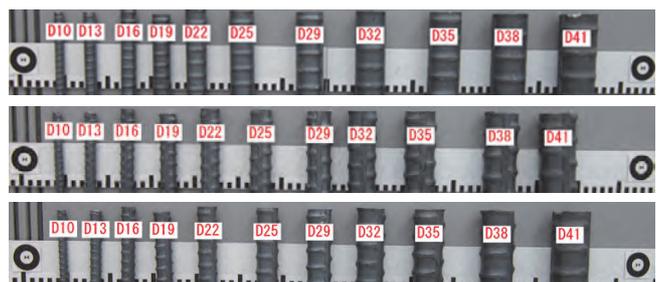


図-11 屋内実験における判定結果

5.3 現場検証実験

システムの適用効果を確認するため現場検証実験を行った。本検証実験は、民間中層板状集合住宅、民間高層タワー型集合住宅、公共病院施設および民間学校施設の計4現場で実施した。

(1) 柱筋

柱筋への適用状況を図-12 および図-13 に示す。まず、図-12 の撮影対象は、主筋：5-D29（竹ふし鉄筋）、補強筋：D13@100であった。同図では、補強筋のピッチをすべて表示した。主筋は多少発錆していたが、径の判定には影響なく、正確にD29と判定できた。次に、図-13の撮影対象は、主筋：5-D29（ねじふし鉄筋）、補強筋：D13@100であった。同図では、補強筋のピッチは平均値のみを表示した。また、撮影場所の背後の制約により、斜め方向から撮影したが、鉄筋径の補正機能によって、正確に配筋状態を判定できた。

(2) 壁筋およびスラブ筋

まず、壁筋への適用状況を図-14 に示す。同図の撮影対象は、主方向：D13@200、直行方向：D10D13@200であった。また、補強筋のピッチをすべて表示した。太陽高度の低い冬季の撮影であったが、撮影方向を調整し、太陽光を撮影範囲から

外すことで配筋状態を正確に判定できた。次に、スラブ筋への適用状況を図-15 に示す。同図の撮影対象は、主方向：D13@200、直行方向：D10@200であった。補強筋のピッチは平均値のみを表示した。撮影対象に製造間もない鉄筋が含まれており、日射によって鉄筋が金属面のように強く全体が輝くように白っぽく見えたが、正確に配筋状態を判定できた。

5.4 検証結果に対する考察および評価

検証実験の結果から、検査時間、判定結果の正答率、黒板の簡素化について考察・評価した。

(1) 検査時間

従来の配筋検査では、対象の鉄筋にカラーチューブやカラー磁石を本数分取付け、配筋ピッチをわかりやすくするため、検査ロッドを配筋に固定した。さらに、黒板へ必要事項を記入し、配筋の邪魔にならない見やすい箇所に置く必要があった。一方、本システムを適用した検査では、黒板への記入やセットは共通作業となるが、システムが鉄筋と認識した部分を自動的に着色するため、カラーチューブを取付ける作業が省略できる。背景には検査ロッドの代わりに目盛を印刷したため、背景とマーカーをセットすれば、検査ロッド



図-12 柱筋への適用



図-14 壁筋への適用



図-13 柱筋への適用

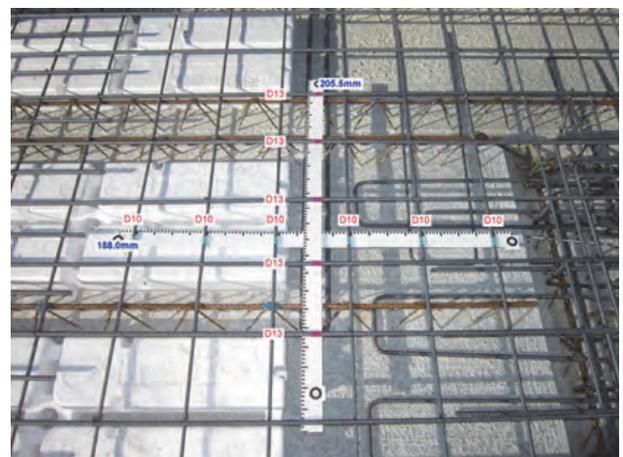


図-15 スラブ筋への適用

のセットを省略できるため、背景とマーカーのセットは負担にならない。検証実験の結果から、従来のカラーチューブを巻く場合と比較すると、1箇所あたりの検査時間を30%以上短縮できることを確認した。検査時に持回る道具類として、従来の検査では必須の検査ロッドが不要になるため、道具類をよりコンパクトにまとめられ、検査手間を大きく軽減できることが明らかになった。

(2) 撮影時の配慮と判定結果の正答率

配筋写真に太陽光が入ると画像処理機能が乱される場合があるため、太陽光が入らないよう撮影方向を調節する必要がある。撮影方向が斜めになっても、鉄筋径を補正する機能を付加したため、判定結果には影響しない。また、雨天時の実験結果より、水滴が付着して鉄筋の色合いが多少変化しても、画像処理結果には影響しないことを確認した。これらのことから、判定結果の正答率は天候の影響を受けず、95%以上の正答率を得ることができた。今後、正答できなかった場合の詳細原因の追究とその場合の検査フロー（鉄筋径の確認を追加など）を確立する予定である。

(3) 黒板の簡素化

民間工事の配筋検査における共通の課題として、黒板の省略、または、簡素化の要求がある。民間工事では、監理者の承認が得られれば、黒板の省略や簡素化が可能である。簡素化の一手法として期待されている電子黒板機能と共存させることでさらに検査効率が向上することが見込まれるため、早急に対応する予定である。

6. まとめ

本報では、画像処理技術を応用した配筋自動判定システムを開発し、工事現場で検証実験を行った。その結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 撮影画像の輝度に応じて3領域に区分する鉄筋抽出アルゴリズムによって、影の影響を受けずに鉄筋のみを抽出できた
- 2) 竹ふし鉄筋では最大直径とふしの高さから径を特定する手法、ねじふし鉄筋では最小直径から径を特定する手法を考案し、システムへ実装した
- 3) システムが認識した鉄筋を着色することで、配筋検査前に行うカラーチューブやカラー磁石の取付けを省略でき、検査時間は約30%以上短縮できることを確認した
- 4) 検証実験では、柱筋、壁筋、スラブ筋にシステムを適用し、判定結果の正答率は95%以上であった

今後、社内既存システム（配筋検査支援システム、工事黒板カメラ）へ組み込み、実用化を推進する。さらに、デジタルカメラによる撮影画像を利用して高い精度で計測できる技術の他分野への展開も進めていく予定である。

参考文献

- 1) 金子智弥他：全数検査記録に対応した配筋検査支援システム，大林組技術研究所報，No.74，2010年
- 2) <http://www.datadesign.co.jp/artec3d/>
- 3) 池田雄一・坂上肇・浜田耕史：配筋自動判定システムの開発，建設物価，No.1121，pp.18～21，2012年

21. 端面掘削方式を用いた多段型掘削機の掘削効率に関する研究

呉工業高等専門学校
愛媛大学
(株) スターロイ

○ 重松 尚久
室 達朗
小田 登

1. はじめに

現在、日本では高度経済成長期に作られた多くの構造物が老朽化し、解体の必要性があるものも多数存在する。解体の際、現在使われている主な工法である油圧ブレイカー等での打撃工法等では、都市部などにおいて、騒音や振動の問題により使用が制限される場合も少なくない。そこで、環境に配慮した新しい解体工法の開発が必要とされている。本研究では、油圧アームの先のアタッチメントを取り替えることにより、多様な作業を行うことができる機械であるバックホウに着目した。このバックホウのアタッチメントとして使用できる掘削装置を開発することで既存の建設機械を使用することができ、経済性のよい掘削機械となることが考えられる。そこで、バックホウの先端に取り付けるアタッチメントに適した掘削方式として端面掘削方式を用いた多段型端面掘削機の開発を考案した。2自由面を有する岩石の端部を掘削する端面掘削方式では、平面掘削方式との比較実験により比エネルギーが約 1/10 に減少する¹⁾ことが明らかになっている。

本研究は、段階的に端面掘削を行える形状のモデル掘削機を製作し、実験を行うことでバックホウの先端に取り付ける端面掘削方式を用いたコンクリート掘削機を設計する際の指針を提供することを目的とする。過去の実験でモデル掘削機を使用した実験を行ったが、水平面を垂直に掘削する実験であったため、掘削土が供試体中に残り、効率的な掘削土の排出が出来なかった。そのため、排出されなかった掘削土が実験結果に大きく影響した可能性が高い^{2),3)}。本研究では掘削土の排出効率を改善するために、モデル掘削機の改良に加え、実験機を 90°横に倒して垂直面を水平に掘削するし、実験を行った。実験により各掘削段階におけるモデル掘削機に作用する垂直力 F_v 、回転トルク T 、掘削深さ z の測定を行い、比エネルギー E_s を求め掘削効率などの検討を行った。また、掘削土の排出効率の改善を行っていない実験データとの比較を行った。

2. 実験概要

2.1 モデル掘削機

図-1 にモデル掘削機の断面図を示す。この掘削機は 1 段目である先端部に $\phi 12\text{mm}$ 、長さ 28mm のポイントアタックビットが 2 本ついており、このビットで先行掘削することによってディスクカッタビットで端面掘削を行うための先進孔を掘削する。なお、ポイントアタックビットで掘削を行う際中心に残るモルタルが掘削の妨げとなってしまうため、そのモルタルを壊すためのフィッシュテールをモデル掘削機の中心部に設置する。2 段目は、ポイントアタックビットから 30mm 広がったところに刃が当たるように 2 枚のディスクカッタビットを設置する。3 段目は、2 段目から 30mm 広がった位置に刃が当たるように 2 枚のディスクカッタビットを設置する。このような構造によりに段階的に端面掘削を行っていく。なお、このディスクカッタビットは $\phi 60\text{mm}$ であり、周面摩擦を低減させるためモデル掘削機に 10 度の角度をつけて配置してある。過去の実験では掘削土の排出に対する対策をしておらず、掘削土の排出が不十分であったため、今回のモデル掘削機はモデル掘削機先端部に $\phi 17\text{mm}$ の吸い込み口を設け、掘削土の吸引を行い、さらにモデル掘削機の 2 段目の角を取ることで掘削土の排出の改善を行った。

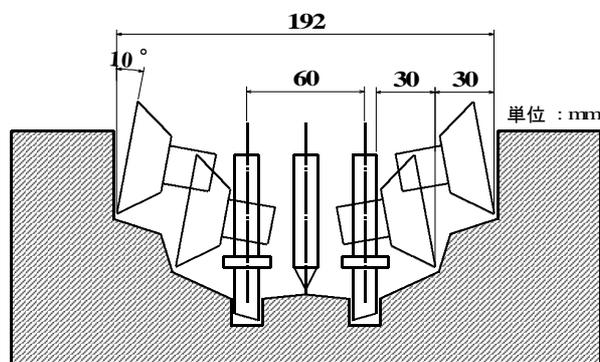


図-1 モデル掘削機断面図

2.2 実験装置

図-2 にモデル掘削機を取り付けた実験装置の概略図を示す。実験装置は高さ 1,750mm、幅 700mm、奥行き 700mm である。ターンテーブル、供試体、下部に設置したターンテーブルを回転させるためのモータと駆動伝達装置、上部フレームに設置した応力制御用油圧シリンダ、および推進力とトルクを測定するロードセル、モデル掘削機の掘削深さを測定する変位計、掘削土の排出のために実験装置を倒す排土改善用油圧シリンダで構成される。ターンテーブルは、下部に設置した電動モータにより 2r.p.m. で回転させる。上部フレームには応力制御用油圧シリンダを設置し、油圧モータで荷重を制御する。なお、実験装置は幅 1,370mm、奥行き 1,100mm の鋼板の上に乗っており、側面に設置されている排土改善用油圧シリンダを伸縮させることによって実験装置を横転させることが可能である。

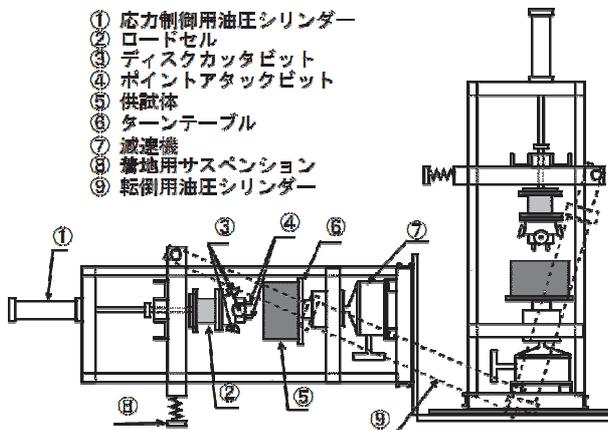


図-2 実験機概略図

2.3 供試体

本実験には水セメント比 $W/C=50\%$ のモルタル供試体を使用した。供試体の形状は外形 270mm、高さ 183mm の円柱状で、周りを鋼製型枠で覆っている。供試体は一軸圧縮強度 40N/mm^2 以上を目標とした配合設計により製作した。

2.4 実験方法

モデル掘削機に作用する垂直力 F_z を一定に制御して掘削を行う荷重制御による実験を行った。今回の実験では、掘削土をスムーズに排出するため実験機を 90° 倒し、鉛直面を掘削するようにして掘削土の排出を容易にした。さらに、吸塵機を用いることで吸い込み口より掘削土を吸引できるようにした。供試体をターンテーブルに乗せ四隅をボルトで固定して 2r.p.m. で回転させ、設定した垂直力でモデル掘削機を押し当てて掘削を行い、垂直力 F_z 、トルク T 、掘削深さ z を測定した。モデル掘削機は全部で 3 段の構成となっており、各段階に応じた垂直力を設定した。過去の変位制御実

験で供試体に作用した垂直力⁴⁾を参考にして、各掘削段階で 3 つの垂直力を設定した。ポイントアタックビットのみで掘削を行う 1 段目は 7.5kN、8.5kN、10kN の 3 種類、ポイントアタックビットとディスクカッタービット 1 段目で掘削を行う 2 段目は 20kN、22.5kN、25kN の 3 種類、全ビットで掘削を行った 3 段目は 30kN、35kN、40kN の 3 種類の垂直力で、各々に対し 2 回ずつ実験を行った。なお、設定垂直力の変更は次の段階のビットが当たり始めた直後に一度掘削を止めてから行った。

4. 実験結果

4.1 掘削時間 t と垂直力 F_z の関係

一例として、図-3 に 3 段目を設定垂直力 30kN で掘削した際の掘削時間 t と垂直力 F_z の関係を示す。垂直力 F_z は設定垂直力を中心に増減を繰り返していることがわかる。これは、掘削面に存在する凹凸により、実際に作用している油圧の値と制御している油圧の値との間に時間差が生じることに起因すると考えられる。また、全ての実験において垂直力 F_z が設定垂直力を中心に増減を繰り返していた。段数が増えるとともに垂直力 F_z の振れ幅が大きくなる傾向が見られた。これは、段数増加に伴うビットの接触面積の増加によるものと考えられる。今回の実験では垂直力 F_z が増減を繰り返す結果となったが、実際の掘削機で油圧を用いて掘削する際にも同様の傾向が見られるものと考えられる。

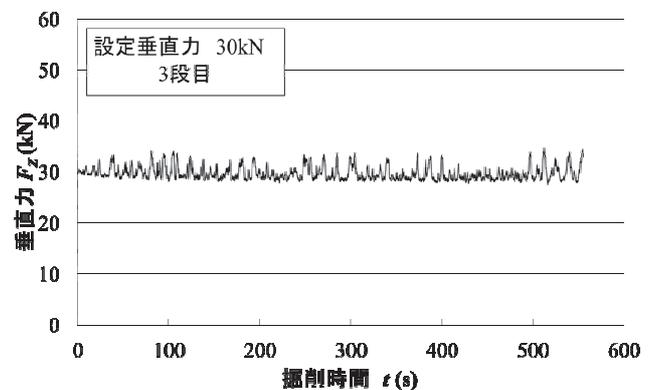


図-3 掘削時間 t と垂直力 F_z

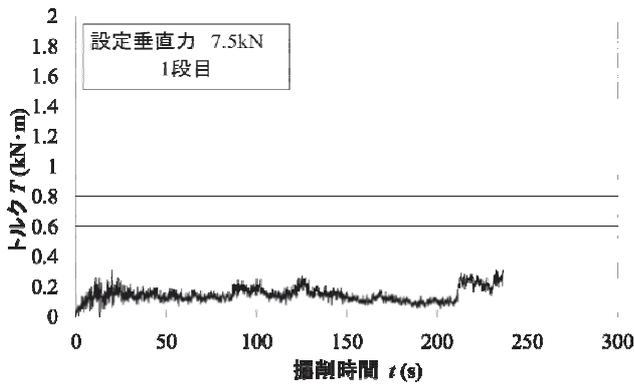
4.1 掘削時間 t とトルク T の関係

図-4(a)に 1 段目を設定垂直力 7.5kN、(b)に 2 段目を設定垂直力 20kN、3 段目を設定垂直力 30kN で掘削した際の掘削時間 t とトルク T の関係を示す。一段目は、最初はトルク T が小さな値を示しながら掘削が進んでいる。これは、モルタル上面部の強度が内部の強度に比べて低い事が原因であると考えられる。その後、トルク T はある値を中心にほぼ一定のふれ幅で掘削が進行している。一時的にトルク T の値が不安定なところも見られる

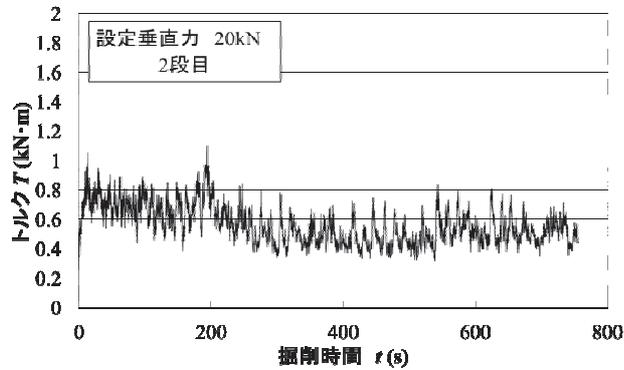
が、これはモルタルの掘削面の凹凸にビットが引っかかることが原因であると考えられる。また、掘削段階が進行するとともにトルク T のふれ幅は大きくなっていった。これは、段数増加に伴う垂直力 F_z の振幅の増大と、ビットの接触面積の増加の二つの要因によるものと考えられる。すべての実験においてトルク T は、1 段目の初期を除いてある値を中心に一定のふれ幅で推移する傾向が見られた。

4.2 掘削時間 t と掘削深さ z の関係

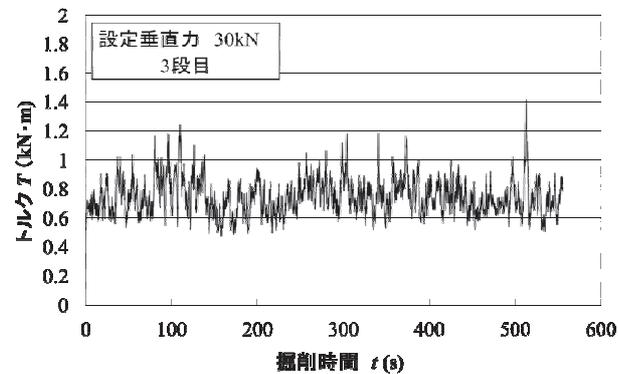
一例として、図-5 に 1 段目を設定垂直力 7.5kN で掘削した際の掘削時間 t と掘削深さ z の関係を示す。掘削深さ z は、掘削時間が 30 秒あたりまでは急激



(a) 1 段目



(b) 2 段目



(c) 3 段目

図-3 掘削時間 t とトルク T

に増加し、その後一定の割合で増加している。これはモルタル上面部の強度が内部の強度に比べて低い事が原因であると考えられる。そして、その後はほぼ一定の傾きで掘削が進行している。また、掘削深さ z は増減を繰り返しながら掘削が進んでいるが、これは掘削面に凹凸があることが原因であると考えられる。また、2 段目、3 段目で掘削した際は、ほぼ一定の傾きで掘削が進行していた。すべての実験において、1 段目の最初の部分を除き、すべての掘削段階で掘削時間 t と掘削深さ z は比例しており、掘削深さ z の傾きを掘削速度 V とした。

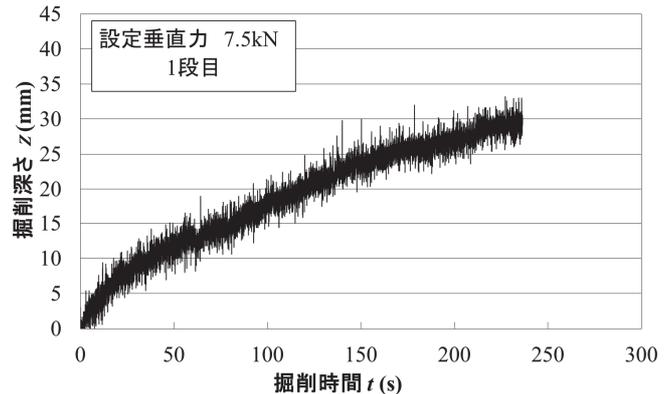


図-4 掘削時間 t と掘削深さ z

4.3 過去の研究^{2),3)}との比較

(1) トルク T

図-5 に各掘削段階におけるトルク T の比較を示す。参考のため、掘削土の排出改善を行っていない実験結果も同時に示す。各掘削段階でそれぞれ垂直力 F_z とトルク T が比例していることがわかる。また、全ての掘削段階を通してみても垂直力 F_z とトルク T が比例する傾向があることがわかる。垂直力 F_z とトルク T に相関が見られるため、実際の掘削機でも垂直力 F_z を制御することにより掘削機に作用するトルク T を把握できると考えられる。次に、掘削土排出の改良前と比較すると、掘削土の堆積しにくい 1 段目は大きな差は見られなかつ

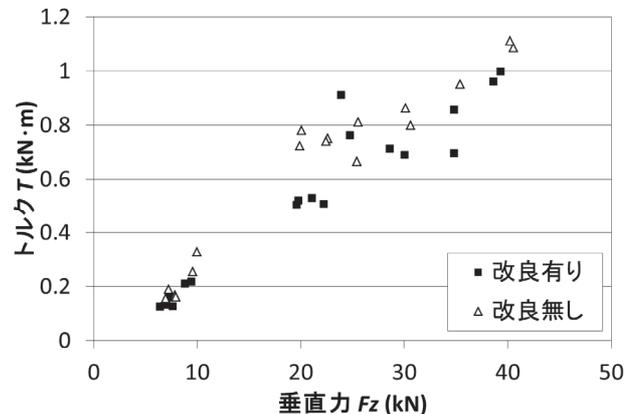


図-5 各掘削段階におけるトルク T の比較

たが、2 段目と 3 段目では掘削時に作用するトルク T が低減されていることがわかる。掘削土の今回の改良により、トルク T が減少していることから、掘削土の排出の効率が掘削機に作用するトルク T に影響を与えていると考えられる。

(2) 掘削速度 V

図-6 に垂直力 F_z と掘削速度 V のグラフを示す。参考のため、掘削土の排出改善を行っていない実験結果も同時に示す。全ての掘削段階で、垂直力 F_z に比例して掘削速度 V が増加する傾向が見られた。また、段数が増加するに従い、掘削速度 V の傾きが緩やかになる傾向が見られた。以上のことから、実際の掘削機械で端面掘削を行った際にも垂直力 F_z による掘削速度 V の推測が可能であると考えられる。次に、掘削土排出の改良前と比較すると、掘削土の堆積しにくい 1 段目は大きな差は見られなかったが、2 段目と 3 段目では掘削速度 V が増加していることがわかる。今回の改良により、掘削速度 V が上昇することから、掘削土の排出効率が掘削速度 V に影響を与えていると考えられる。

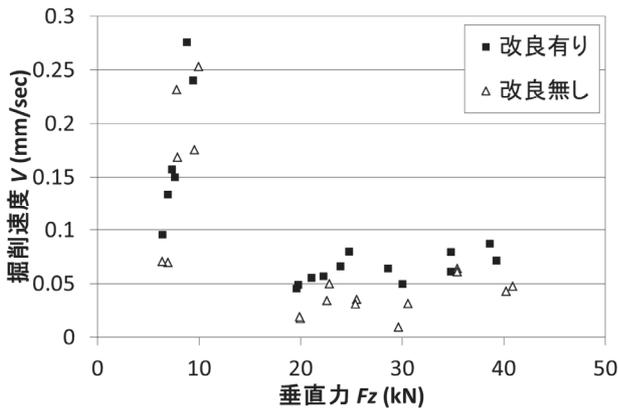


図-6 各掘削段階における掘削速度 V の比較

図-7 に各掘削段階における比エネルギー E_s のグラフを示す。参考のため、掘削土の排出改善を行っていない実験結果も同時に示す。比エネルギー E_s は掘削に必要なエネルギーを掘削土量で除したもので、小さいほど効率が良いことを意味する⁵⁾。1 段目は比エネルギー E_s が小さく、掘削効率がよい。これは供試体上面部の強度が低いことと、掘削機中心部に近い位置にポイントアタックビットがあることで、トルク T が小さくなったことが原因だと考えられる。2 段目は 1 段目と比較すると比エネルギーが増加している。2 段目から 3 段目については比エネルギー E_s が大きく減少している。ディスクカッタービットが 2 枚から 4 枚に増え、掘削土量も増えたため、掘削効率が上昇したものと考えられる。段数を増加させることにより、掘削効率を上昇させることができると推測される。次

に、掘削土排出の改良前と比較すると、改良した実験の方が、比エネルギー E_s が減少しており、掘削効率が飛躍的に向上していることがわかる。

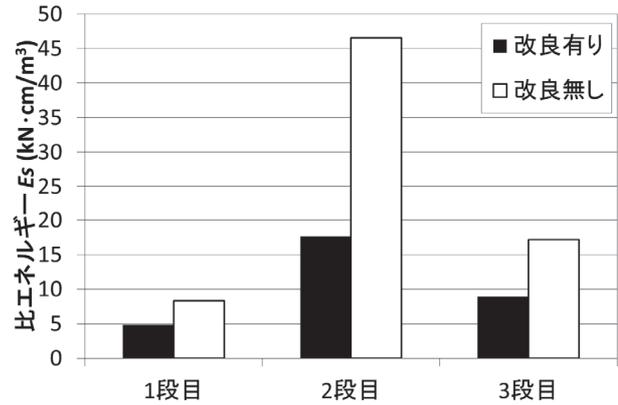


図-7 各掘削段階における比エネルギー E_s の比較

4. 結論

- (1) 実際の掘削機において、垂直力 F_z を測定することで、トルク T と掘削速度 V を予測できると考えられる。
- (2) 実際の掘削機において端面掘削を行う際には、段数を増加させることで掘削効率が上昇すると推測される。
- (3) 掘削土の排出を効率よく行うことによって掘削速度 V の上昇、トルク T の減少、掘削効率の大幅な上昇が見られたので、実際の掘削機を設計する際にも掘削土排出の効率を考慮して設計する必要がある。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C) 26420446 の補助を受けて行われた。

参考文献

- 1) 室達郎, 土屋清, 河野幸一, 若林俊介: ディスクカッタービットによるモルタル端面の定常端面特性に関する実験的考察, 土木学会論文集, No.687/III-56, pp.37-47, 2001.
- 2) 北岡一成, 重松尚久, 小田登: 多段型端面掘削方式を用いたモデル掘削機の応力制御実験, 平成22年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.61-64, 2010.
- 3) 重松尚久, 北岡一成, 室達郎, 小田登, 河村進一: 多段型端面掘削方式を用いた深礎掘削機の性能に関する室内実験, 土木学会論文集F1 (トンネル工学) Vol. 69(2013) No. 2, pp.121-128, 2013.
- 4) 花岡尚, 重松尚久, 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ー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.
- 5) Snowdon, R.A. Ryley, M.D. and Temporal, J. A study of disc cutting in selected British rock. Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstrs., 19, pp.107-121, 1982.

22. 振動締固め機械に搭載された加速度応答システムの適用性

(独) 土木研究所
 (独) 土木研究所
 (独) 土木研究所

○ 橋本 毅
 茂木 正晴
 藤野 健一

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や小型の前後進コンパクトなどで研究・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いる。

土木研究所では民間企業 10 社と共同で「盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する共同研究」を実施し、その中で複数の加速度応答システム、振動ローラ、前後進コンパクト、土質条件を用いて加速度応答システム表示値と密度・地盤剛性との関係を調査してきた。本報ではその実験結果をまとめて報告する。

2. 実験概要

2.1 使用システム・締固め機械

本実験で使用した加速度応答システムの詳細情報を表-1,2 に示す。

表-1 振動ローラ用加速度応答システム

システム名	α	CCV	Evib
メーカー	α システム研究会	酒井重工	BOMAG
出力値	乱れ率	CCV 値	Evib 値
登載可能ローラ	SV512 BW141 (後付)	SV512 BW141 (後付)	BW141 (メーカーにて据付)

表-2 前後進コンパクト用加速度応答システム

システム名	COMPASS	ECONOMIZER
メーカー	三笠産業	BOMAG
出力値	LED 点灯個数	LED 点灯個数
登載可能前後進コンパクト	MVH-306 MVH-406 (メーカーにて据付)	BPR45/55D (メーカーにて据付)

加速度応答システムは、振動ローラ用、前後進コンパクト用共に締固め機械の振動部に加速度計を取り付け、その信号を車載の計算モジュールに

て各メーカー独自の手法で解析し、結果をリアルタイムで表示部に表示するものである。振動ローラ用システムでは車載 PC にて結果を記録することができ、GNSS などによる位置情報と組み合わせることも可能である。これに対し前後進コンパクト用のシステムは、解析結果を表示部に登載された複数の LED 点灯個数により表示している（点灯個数が多いほど剛性が高い）。図-1 に前後進コンパクト用システムの概略を示す。



図-1 前後進コンパクト用加速度応答システム 概略

表-3,4 に本実験で使用した加速度応答システム登載締固め機械の仕様を示す。

表-3 振動ローラ仕様

メーカー	酒井	BOMAG
型式	SV512D	BW141AD-4AM
総質量 (kg)	11050	8700
振動輪荷重(kg)	5700	4550
起振力 (kN)	226	144
振動数 (Hz)	27.5	45
締固め幅 (m)	2.13	1.5
登載加速度応答システム	α CCV	α CCV Evib

表-4 前後進コンパクタ仕様

メーカー	三笠	三笠	BOMAG
型式	MVH-306 DSC-PAS	MVH-406 DSC-PAS	BPR45/55D
総質量 (kg)	330	410	396
起振力 (kN)	45	50	45
振動数 (Hz)	73	73	70
締固め幅 (m)	0.445	0.5	0.55
登載加速度応答システム	COMPASS	COMPASS	ECONOMIZER

2.2 実験土質

本実験で使用した土の物理特性を表-5 に、粒径加積曲線を図-2 に示す。

表-5 材料の物理特性

呼称	土質 (1)	土質 (2)	土質 (3)	土質 (4)	土質 (5)
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.647	2.666	2.675	2.681	2.665
最大粒径 D_{max} (mm)	9.5	9.5	9.5	19.0	4.75
細粒分含有率 F_c (%)	4.3	14.8	15.3	33.4	57.1
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.571	1.625	1.674	1.666	1.531
最適含水比 w_{opt} (%)	18.2	17.8	16.0	18.8	24.9

JIS A 1210 A-c 法による

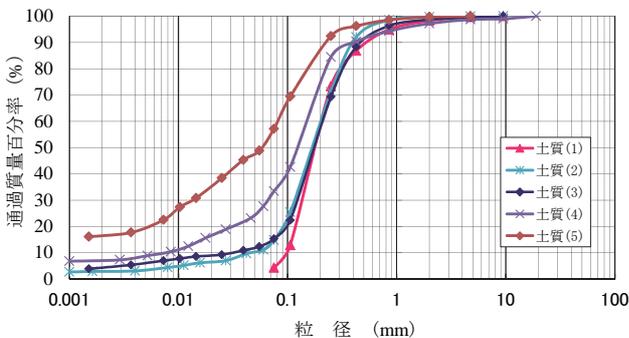


図-2 粒径加積曲線

2.3 実施した実験パターン

実施した実験パターンを表-6 に示す。

表-6 実験パターン表

土質	土質(1)	土質(2)		土質(3)			土質(4)	土質(5)
目標実験時含水比(%)	16.0 付近	16.0 付近	17.0 付近	10.5 付近	15.0 付近	16.0 付近	18.0 付近	28.0 付近
SV512		○	○	○	○	○	○	○
BW141	○	○	○			○	○	○
MVH-306	○		○				○	○
MVH-406	○						○	○
BPR45/55D				○	○	○		

2.4 実験フィールド

実験は土木研究所土工実験施設内の実験ピット (幅 5m, 長さ 44.8m, 深さ 4m) を使用した。振動ローラの場合、山砂を用いてピット底面より高さ 2.8m まで十分に締固められた基礎地盤をピット内に製作し、その上に表-5 に示す実験材料を仕上がり厚さ 300mm になるよう盛り立てて実験フィールドを製作した。前後進コンパクタの場合、基礎地盤を高さ 3.0m まで作成し、その基礎地盤の壁際に、各締固め機械の接地幅に応じて設定された溝幅×長さ 25 m×深さ 0.3 m の溝を掘削し、そこへ表-5 に示す実験材料を仕上がり厚さ 300mm になるよう盛り立てて実験フィールドを製作した。

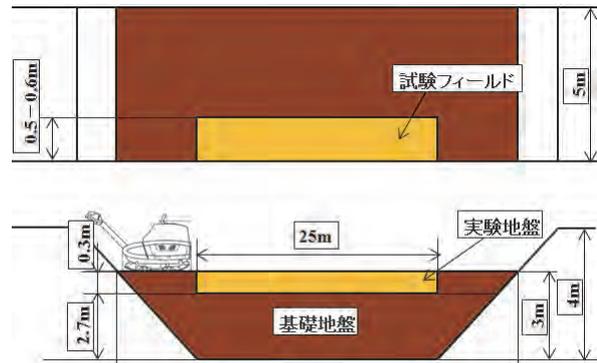


図-3 実験フィールド (前後進コンパクタ)

2.5 データ計測方法

上記実験フィールド上を、締固め機械にて 16 回締固めを行い (8 往復)、0,2,4,6,8,12,16 の各締固め回数時の密度、地盤剛性加速度応答システム表示値を測定した。密度測定は内径 0.1m, 高さ 0.1m のコアサンプラーを用い、地表面~0.3m の深さにおける密度を測定した。測定点は実験フィールド区間内の 3 点で行い平均値を採用することとした。

地盤剛性は超小型動的平板載荷試験装置 (アプライドリサーチ社製: IST03) にて測定した。この装置は平板載加装置と同様の地盤反力係数 K_{30} 値を測定することができる。測定点は実験フィールド区間内の上記密度測定点と重複しない地点 3 点で行い平均値を採用することとした。

加速度応答システム値は、振動ローラは車載 PC にて各締固め回数時の値を記録し、平均値を算出

した。前後進コンパクタは各締固め回数時の LED 点灯状況をビデオ撮影し、点灯個数にその点灯秒数を乗じ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. 実験結果

実験結果の一例として、MVH-306 における「平均 LED 点灯個数」と地盤剛性との関係を図-4 に示す。

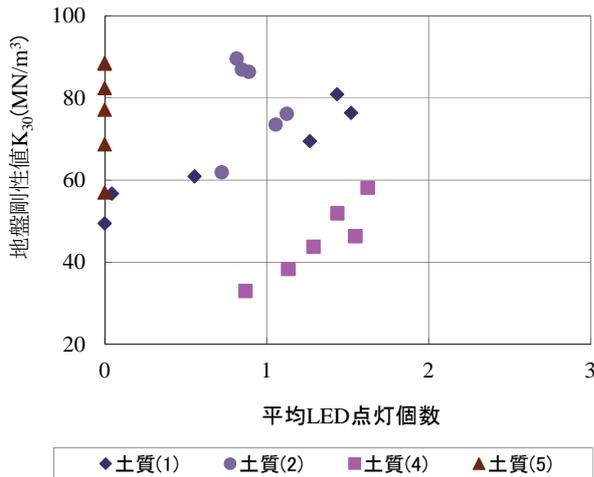


図-4 平均 LED 点灯個数－地盤剛性 (MVH-306)

図-4 より、本条件では、土質(1)および(4)で平均 LED 点灯個数と締固め度との間に良好な相関があり、土質(2)および(5)では、良好な相関はないといえる。

次に、加速度システムの適用範囲を検討するため、各実験結果より平均 LED 点灯個数に対する締固め度および地盤剛性の相関係数を算出すると、

表-7～11 のようになる。なお、表には実験時含水比および最適含水比と実験時含水比との差（負値ならば最適含水比より乾燥側）、また 16 回締固め後の飽和度 (0～30cm 平均) も併せて示している。

表-7 平均 LED 点灯個数との相関係数 (MVH-306)

土質 w_{opt} (%)	実験時 w (w_{opt} との差) (%)	16 回後飽和度 (%)	平均 LED 点灯個数との相関係数	
			締固め度	地盤剛性
土質(1) 18.2	15.8 (opt-2.4)	59.8	0.963	0.936
土質(2) 17.8	16.8 (opt-1.0)	74.9	0.259	0.017
土質(4) 18.8	18.1 (opt-0.7)	58.1	0.903	0.956
土質(5) 24.9	27.5 (opt+2.6)	67.5	0※	0※

※ 土質(5)では LED は点灯しなかったため 0 とした。

表-8 平均 LED 点灯個数との相関係数 (MVH-406)

土質 w_{opt} (%)	実験時 w (w_{opt} との差) (%)	16 回後飽和度 (%)	平均 LED 点灯個数との相関係数	
			締固め度	地盤剛性
土質(1) 18.2	15.4 (opt-2.8)	55.8	0.969	0.963
土質(4) 18.8	18.5 (opt-0.3)	64.8	-0.625	-0.483
土質(5) 24.9	25.6 (opt+0.7)	68.5	0.717	0.873

表-9 平均 LED 点灯個数との相関係数 (BPR45/55)

土質 w_{opt} (%)	実験時 w (w_{opt} との差) (%)	16 回後飽和度 (%)	平均 LED 点灯個数との相関係数	
			締固め度	地盤剛性
土質(3) 16.0	10.8 (opt-5.2)	38.4	0.890	0.983
土質(3) 16.0	14.9 (opt-1.1)	63.7	0.917	0.951
土質(3) 16.0	16.3 (opt+0.3)	74.8	0.854	0.397

表-10 平均 LED 点灯個数との相関係数 (SV512)

土質 (w_{opt} %)	実験時 w (w_{opt} との差) (%)	16 回後飽和度 (%)	平均 LED 点灯個数との相関係数			
			締固め度		地盤剛性	
			α	CCV	α	CCV
土質(2):(17.8)	16.2(opt-1.6)	67.5	0.989	0.944	0.470	0.994
	17.0(opt-0.8)	82.1	0.855	0.591	-0.879	0.155
土質(3):(16.0)	10.1(opt-5.9)	39.4	0.954	0.905	0.970	0.976
	14.7(opt-1.3)	73.2	0.877	0.889	0.901	1.000
	15.9(opt-0.1)	82.0	0.926	0.942	0.304	0.363
土質(4):(18.8)	18.3(opt-0.5)	80.8	0.984	0.983	0.319	0.301
土質(5):(24.9)	28.2(opt+3.3)	92.0	0.570	0.719	-0.281	-0.769

表-11 平均 LED 点灯個数との相関係数 (BW141AD-4AM)

土質 (w_{opt} %)	実験時 w (w_{opt} との差) (%)	16 回後飽和度 (%)	平均 LED 点灯個数との相関係数					
			締固め度			地盤剛性		
			α	CCV	Evib	α	CCV	Evib
土質(1):(18.2)	16.3(opt-1.9)	61.7	0.893	0.798	0.915	0.926	0.634	0.969
	16.3(opt-1.5)	76.8	0.963	0.987	0.976	0.860	0.864	0.864
土質(2):(17.8)	17.3(opt-0.5)	80.5	0.933	0.951	0.907	-0.457	-0.713	-0.655
	15.8(opt-0.2)	83.0	0.821	0.686	0.884	-0.035	-0.892	-0.058
土質(4):(18.8)	18.2(opt-0.6)	76.5	0.654	0.879	0.901	0.284	0.634	0.638

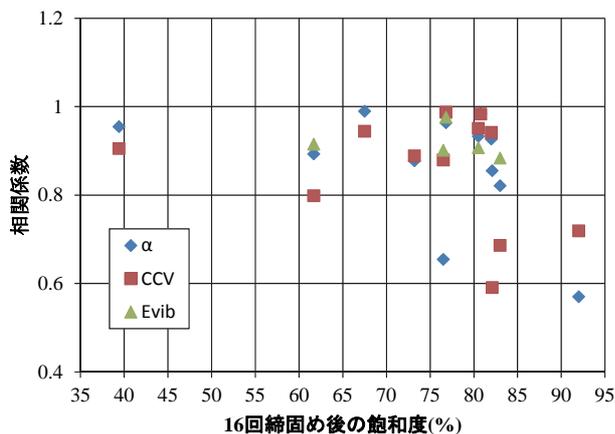


図-5 平均 LED 点灯個数と締固め度の相関係数 (振動ローラ)

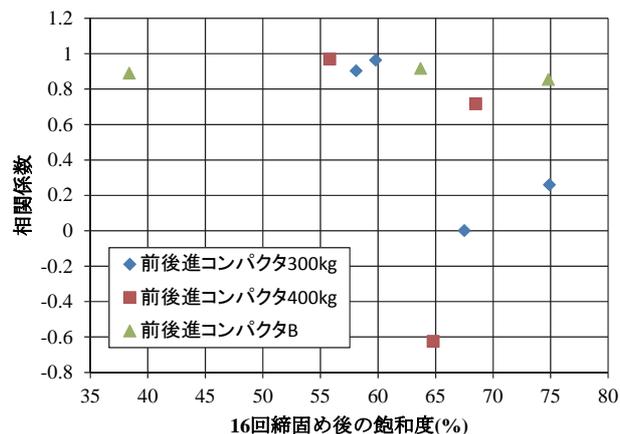


図-7 平均 LED 点灯個数と締固め度の相関係数 (前後進コンパクト)

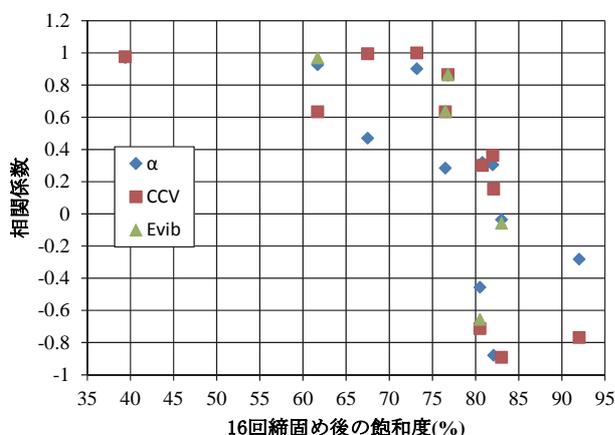


図-6 平均 LED 点灯個数と地盤剛性の相関係数 (振動ローラ)

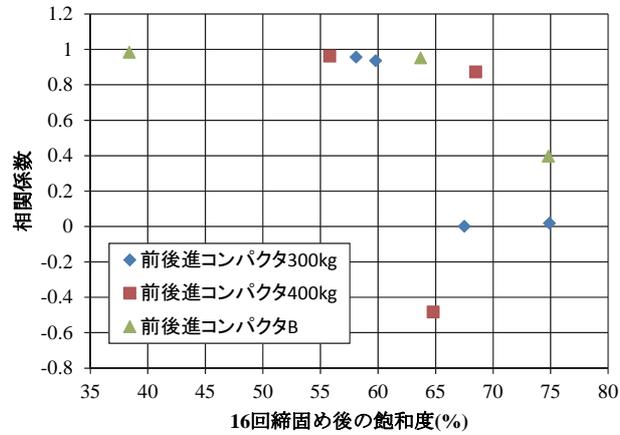


図-8 平均 LED 点灯個数と地盤剛性の相関係数 (前後進コンパクト)

各相関係数を 16 回締固め後の飽和度で整理すると図 5~8 のようになる。

図 5~8 より、加速度応答システム (LED 点灯個数) と締固め度 (密度) および地盤剛性値とは、16 回締固め後の飽和度が、振動ローラならば約 80%、前後進コンパクトならば約 65%より乾燥側であれば高い相関性を保持することができ、加速度応答システムを用いて締固め度および地盤剛性値を推定することが可能であるといえる。

また、16 回締固め後の飽和度と実験時含水比と最適含水比との差との関係を図 9 に示す。

図 9 より、飽和度を上記の範囲に維持するためには、振動ローラ・前後進コンパクト共に施工時含水比を最適含水比より約 1%以上乾燥側に設定すればよいといえる。

5. まとめ

以上の結果、以下のことがわかった。

本実験条件の範囲内において、施工時含水比を最適含水比より約 1%以上乾燥側にし、施工途中で含水状態が変化しないよう注意すれば、加速度応

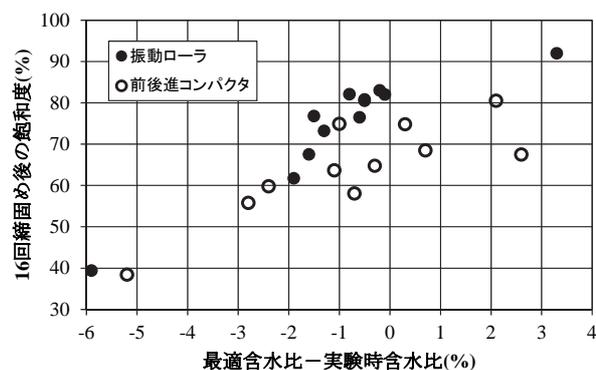


図-9 w_{opt} と実験時含水比の差-16 回締固め後の飽和度

答システムを用いて締固め度および地盤剛性値を推定することが十分可能であるといえる。

今後は、砂礫系や粘性土など幅広い密度と含水比を持った材料にて実験を行い、加速度応答システムと従来手法との相関について引き続き調査を行いたい。

23. シールドマシンにおけるビットの再利用技術

大成建設株式会社
株式会社丸和技研
有明工業高等専門学校

○ 高倉 克彦
佐々木 誠
岩本 達也

1. はじめに

シールドマシンのカッタービット（以下、ビットと略す）の先端部にはレアメタルであるタングステンカーバイドやコバルトを主成分とする超硬合金（以下、超硬チップと呼ぶ）が配置されているが、掘進を終えたシールドマシンのうち、ビットを含むカッターヘッド（写真-1 参照）などはスクラップ処分されるのが一般的である。

しかし、掘進を終えたビットの目視観察では、超硬チップに割れや欠けがなく、摩耗量が少ないものも多く、再利用に供することが十分可能と考えられる。また、使用済みビットの再利用が可能になれば、レアメタルの有効利用及びCO₂排出量の削減に寄与できると考えられる。

そこで、使用済みビットの健全性を評価する技術を開発した。以下にその概要を示す。

2. ビットの構造

図-1 にビットの標準的な構造図を示す。カッターヘッドに直接溶接やボルト締結によって取り付けられる部位は母材と呼ばれ、SS材やSKC材などの鋼材が用いられる。この母材の先端部に超硬チップは配置されており、母材と超硬チップの接合には、銀ろうを用いたろう付がなされている。

超硬チップの厚みは2cm程度、幅は10cmから20cm程度、長さは当該工事の条件によって予め予測される摩耗量と根入れ長から決定され、4cmから10cm程度である。

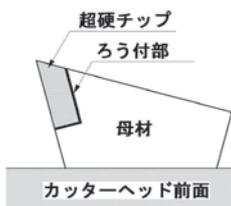


図-1 ビット側面図

3. ビットの健全性評価方法

図-2 に示す使用済みビットの健全性評価フローに沿って、概要を説明する。

3.1 外観検査

回収した使用済みビットに対して、まず、目視による外観検査を行う。超硬チップに割れあるいは欠けが認められるものについては、超硬チップ



写真-1 カッターヘッド例

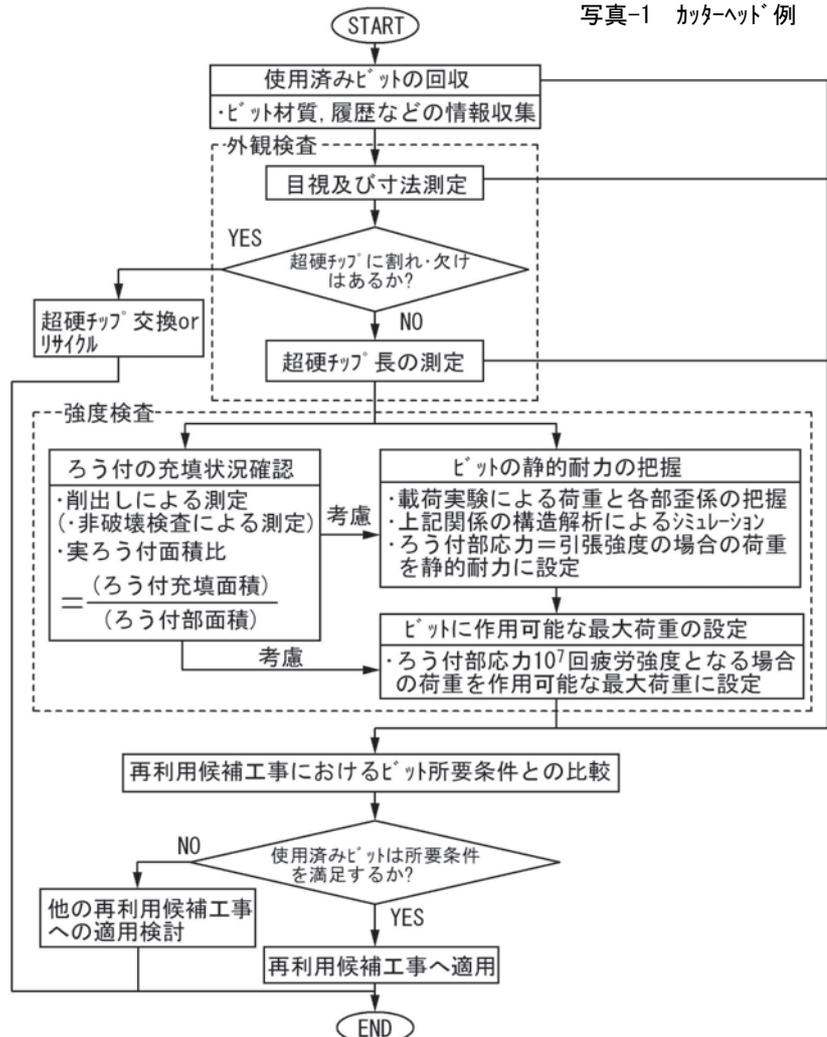


図-2 使用済みビットの健全度評価フロー

の付け替えによる補修対象などとする。なお、母材の摩耗については、肉盛りを比較的容易に行うことができることから、再利用の候補に残す。

試験的に回収したビットの外観検査では約25%のビットが手直しを行わずに再利用可能と判定された。次に、再利用候補のビットについて超硬チップの残存長を測定し、再利用対象工事にて必要とされる超硬チップ長との比較評価項目とする。

3.2 強度検査

超硬チップの強度は母材ならびにろう付の強度に比べて非常に大きく、割れ・欠けが認められなければ強度的に母材ならびにろう付に比べて健全度は高いと考えられる。

地盤切削時に超硬チップが受ける力が次に伝達されるのは超硬チップと母材を接合しているろう付部であり、強度面ではろう付部の健全性を評価項目とする。掘進を終えたビットの損傷状況を見ると、超硬チップの母材からの脱落も見られ、この状況は掘進機能を大きく阻害する要因となる。

ここで、ビットが地盤の掘進中に受ける作用荷重は、繰返し荷重と考えられることから、ろう付部の強度の評価は疲労強度について行う。また、ろう付部に関しては、ろう付の際の溶融したろうの接合面への充填性を踏まえた評価を行う。

なお、新品のビットに対する強度は、メーカーが保障するものとなっており、メーカーによっては100kN程度の静的荷重を行っている場合もある。

(1) ろう付部疲労強度の推定

ろう付部の疲労強度を把握するために疲労試験を実施した。疲労試験では、20Hz サイン波を引張側片振りの荷重制御にて荷重した。「鋼道路橋の疲労設計指針」（日本道路協会）では、繰返し回数 2×10^6 回における応力を基本としていることから、ここでは未破断設定回数を 1×10^7 回として試験を行い、繰返し回数 1×10^7 回における疲労強度をろう付部の疲労強度として用いることとした。図-3 に S-N 線図を示す。

ろう付の繰返し回数 1×10^7 回における疲労強度は 239 N/mm^2 となり、引張強度の約 44% となっている。なお、超硬チップの繰返し回数 1×10^7 回にお

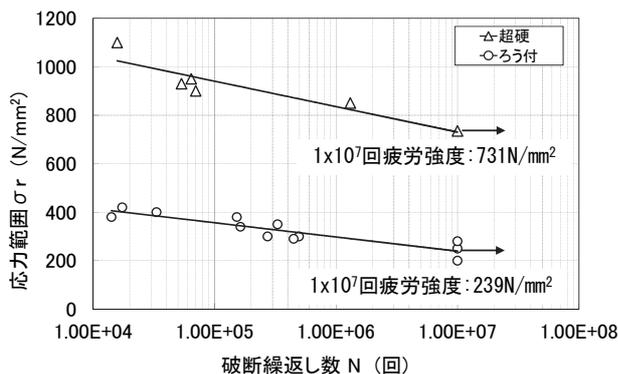


図-3 S-N線図

ける疲労強度はろう付の約3.1倍となっている。

(2) ビットに作用可能な最大荷重の推定

ビット強度の確認項目としてろう付強度を取り上げているが、再利用候補の工事の情報において、ビットに作用する荷重は地盤を切削するために必要な力であり、地盤強度に相当すると考えられる。

ビットに作用する荷重によってろう付部に発生する応力の関係を求めれば、地盤強度とろう付部の強度を間接的に比較することが可能となる。

1) ビット載荷試験及びFEM解析

使用済みビットの静的荷重載荷試験を行い、ろう付部付近の歪の測定を行った例を以下に示す。荷重方向については、ビットの切削方向（主分力方向）とシールドマシンの掘進方向（背分力方向）とした。

また、構造解析によって上記の載荷実験における荷重と歪の関係を把握した。解析モデル図を図-4に、解析条件を表-1に示す。



図-4 解析モデル図

表-1 解析条件

項目	単位	母材	超硬チップ ^o
		SKC24	E5
弾性係数	N/mm ²	210,000	560,000
ホ ^o アソソ比	—	0.28	0.22
密度	kg/m ³	7,800	14,400

図-5に、荷重と各部の歪の関係について計測値と解析値の比較図例を示す。解析値は計測値を良好な精度で再現していると考えられる。

2) ろう付部の状況に対する対処

FEM解析によってろう付部の応力状態を推定し、その値がろう付の 1×10^7 回疲労強度となる荷重をそのビットに作用可能な最大荷重とするが、ろう付部には、写真-2に示すような空隙が存在することから、ろう付部応力の解析値を、実ろう付面積比(=ろう付充填部面積/ろう付部面積)で補正する。

載荷試験を行ったビットについて、ろう付部の

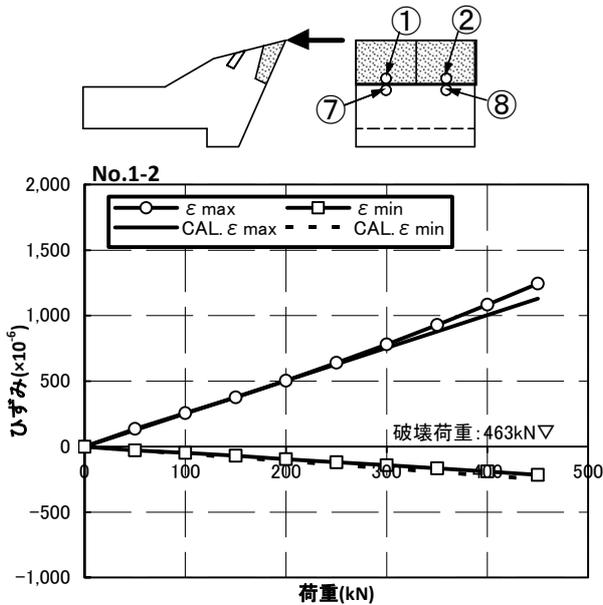


図-5.1 切削方向荷重-歪関係 (①②平均値)

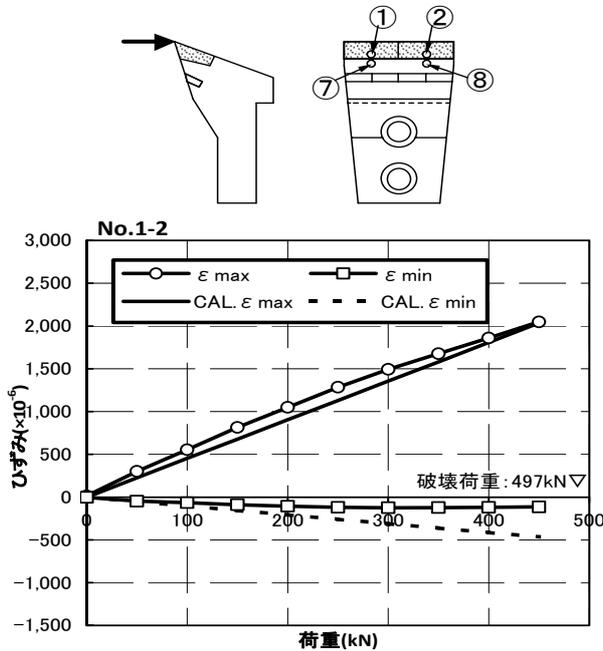
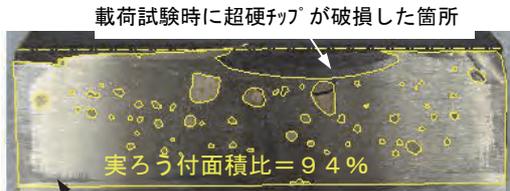
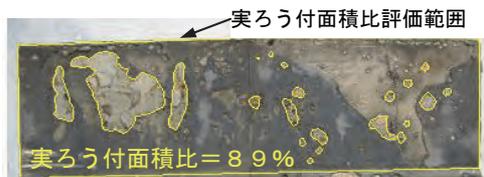


図-5.2 掘進方向荷重-歪関係 (①②平均値)



実ろう付面積比評価範囲

写真-2.1 ろう付部の空隙箇所 (切削方向)



※載荷試験時にろう付面にて破壊したため、母材側と超硬チップ側の状況から空隙箇所を判断
写真-2.2 ろう付部の空隙箇所 (掘進方向)

応力が 1×10^7 回疲労強度となる最小荷重は、掘進方向に対する 174kN となり、このときの実ろう付面積比は 89%であった。

例えば、実ろう付面積比が 50%の場合にはそのビットに作用可能な最大荷重を $98\text{kN} (=174\text{kN} \times (50\%/89\%))$ に設定する。

ここで、再利用対象工事の掘進土層の一軸圧縮強度が土丹相当の 5N/mm^2 の場合を想定する。一軸圧縮強度分の力を与えることで、地盤の切削が可能とすれば、ビット幅 100mm、ビットと地盤の接触幅を 10mm とすると、作用荷重は $5\text{kN} (=5\text{N/mm}^2 \times 100\text{mm} \times 10\text{mm})$ となる。

この荷重がビット先端に載荷試験と同様に作用するものとして、前述のビットの作用可能最大荷重との比較を行うと、実ろう付面積比が 50%の場合のビットの持つ安全率 F_s は $F_s = 98\text{kN}/5\text{kN} = 19$ となる。

このように、ビットの持つ安全率は非常に大きいと考えられる。これは、ビットにおける超硬チップが耐摩耗の観点から設計されていることによるものと考えられる。

4. ろう付部の非破壊検査方法

ろう付部の空隙の状況はろう付時の状況によって、ビット毎に異なると考えられることから、ビットを再利用するには個々のビットのろう付部の状況を推定しておく必要がある。そこで、超音波探傷による非破壊検査方法の適用を考えた。

図-6 に測定原理を示す。探触子から送信された超音波はろう付部内にある空隙部の境界面ではほぼ 100%反射し(伝播経路②)、その音圧(エコー高さ)は超合金とろう付部の界面での反射波(伝播経路①)と比べて強い値となる。

図-7 に示すビットをモデル化した供試体に対して超音波探傷を行った結果とろう付部を削出した状況写真を図-8 に示す。音圧の評価をろう付面全体に対して一様に行うことが重要であることから、超硬チップの厚さが変化する場合には、図-8 より焦点距離ならびに減衰に対する補正を行っている。推定された空隙と実際のろう付面における空隙部の大きさや形状が良く一致していることが確認できる。

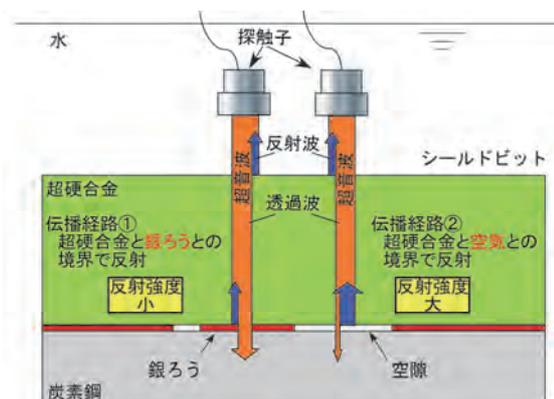


図-6 超音波探傷の測定原理

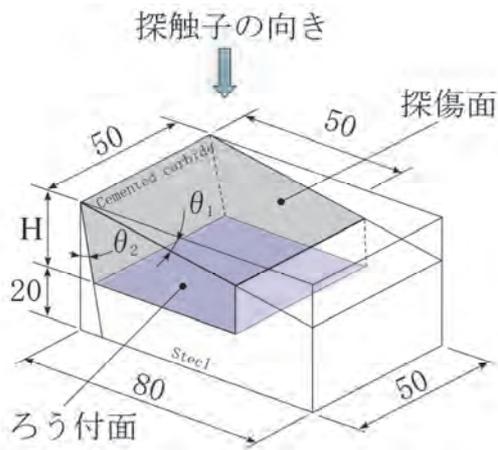
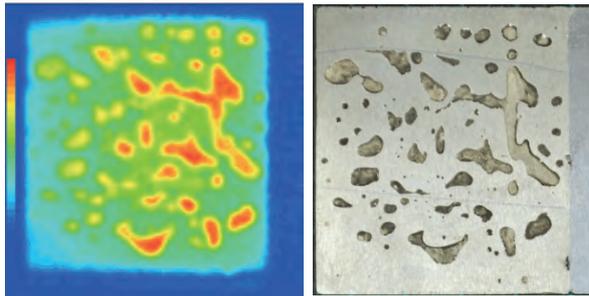


図-7 供試体概要図



(a) 探傷画像 (b) ろう付面

図-8 測定結果 ($\theta_1=10^\circ$)



写真-3 再利用ビット取付状況

5. 実機搭載掘進後の再利用ビットの状況

工事名称は大井有明付近連系管路新設工事（発注者：東京電力株式会社殿）であり、土丹層及び砂礫層中を掘削外径4.12mで約1,400m掘進する工事であった。

写真-3に再利用ビット取付状況、写真-4に掘進前のシールドマシン面板状況、写真-5に掘進完了後のビット状況ならびに写真-6に掘進後のシールドマシン面板状況を示す。

掘進完了後の再利用ビットとマシンメーカー製作ビットの比較を行ったが、双方とも欠損等は同様な状況だった。

6. おわりに

本技術は、CO₂排出量削減、再利用によるレアメタルの使用量削減に寄与することを目的として開発したものであり、今後実績を積み重ねて普及させていきたいと考えている。

なお、本技術は、福岡県リサイクル総合研究センター（現 福岡県リサイクル総合研究事業化センター）のレアメタルの3Rに関する助成により、大成建設㈱、㈱丸和技研、福岡県工業技術センターならびに有明工業高等専門学校と共同で開発したものであり、関係各位に謹んで御礼申し上げます。



写真-5 掘進完了後のビット状況

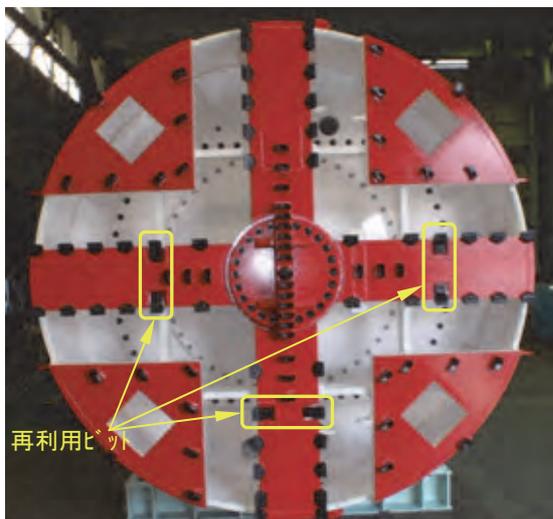


写真-4 シールドマシン面板(掘進前)

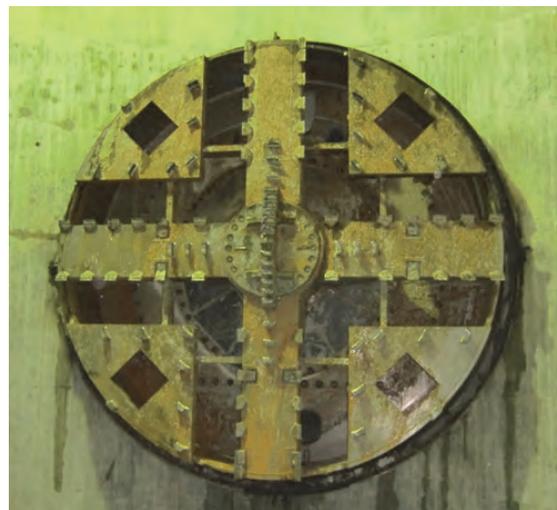


写真-6 シールドマシン面板(掘進後)

24. シールド機二重回転カッター構造に関する実験結果の報告

大断面シールド機における高速施工と省エネの技術開発

前田建設工業株式会社
早稲田大学
前田建設工業株式会社

○ 安光 立也
小泉 淳
篠原 慶二

1. はじめに

近年は、道路や鉄道などのトンネルにおいて大断面シールドの工事が増加しており、用地の制約等から大深度化や超長距離化の傾向がある。これに伴い、施工効率の向上や工期短縮などの高速施工技術と共に省エネが求められている。高速施工と省エネを可能にする技術としては、セグメント組立とそれに係るシールド坑内から立坑および坑外における搬送設備の効率化が含まれるが、セグメント組立時間等の効率化はすでに限界に達しており、今回はシールド機の掘進効率を向上する技術に着目した。

大深度では硬質地盤となりカッター切削抵抗やジャッキ推力の増大が想定される。とくに大断面シールドでは、カッター外周側の周速度に対してカッター内周側の周速度は小さくなるので、カッター内周側の切削効率の低下と取込土砂の攪拌効率の低下が掘進効率に影響する。したがって、カッター内周側の切削効率と攪拌効率を上げることが、シールド機の掘進効率を向上させることになる。そのためには、カッターを外周と内周の二重構造として内カッターを高速で回転させる方法が有効となるが、その切削効率や攪拌効率に関して実験による検討はなされていない。

筆者らは、2012年から二重回転カッター構造を持つシールド機の模型を作製し、大深度の地盤を想定した模擬地盤を用いた掘進実験を行ってきた。ここに、その結果を報告する。

2. 実験装置

以下に、実験機と供試体について説明する。

2.1 実験機

本実験に用いた二重回転カッターの実験機（土圧式）を図-1および写真-1～2に示す。実験機は二重カッターの「掘削装置」と地盤を模擬した供試体（模擬地盤）の「押し出し装置」で構成されている。掘削装置は外径がφ800mmで、外カッターと内カッターそれぞれに電動モーターを持ち個別に回転を

制御できる構造となっている。掘削装置には推進機構は付いていないが、模擬地盤を押し出し装置で押し出すことで相対的に掘進と同じ状態を作り出す。押し出し装置は圧力を同調した4本のジャッキで供試体の四隅を押す構造となっている。

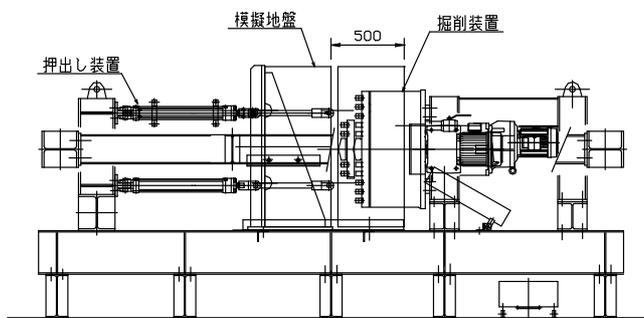


図-1 二重カッター実験機側面図



写真-1 二重カッター実験機全景



写真-2 二重カッターフェース(左)内外比=1:2, (右)内外比=1:3

実験機は外径が小さいので外カッターの駆動モーターをシールド機よりも外側に配置したが、外カッターは中間支持方式、内カッターをセンターシャフト方式とすることによりカッター駆動部の複雑化を解消した。

計測する項目は、掘進時の負荷の代表値であるジャッキ推力とカッタートルクとした(以下、推力とトルクとする)。推力は押し出し装置のジャッキ油圧から算定される。トルクは内カッターと外カッターのモーター負荷を各々計測した。約0.5秒ごとにデータロガーに記録した。

シールド機の推力には、カッターが地山に切り込む際の負荷と、チャンバー内に充満した掘削土砂による切羽圧の負荷が含まれている。また、トルクには切り込みに要する負荷と、チャンバー内の掘削土砂を攪拌するための負荷が含まれている。実験機のチャンバーの下部には蓋がついており、これを開いた状態で実験を行えば、チャンバー内に掘削土砂が溜まらず、切り込みに要する推力およびトルクを計測できる。一方、蓋を閉じてチャンバー内を掘削土砂で充満すれば、実際の土圧式シールド機に近い負荷の状況を確認することができる。

チャンバー内を掘削土砂で充満した場合の排土は、掘進装置の後方の排土口からチャンバー内の圧力により自然に押し出す方法とした。実際の土圧式シールド機のような、スクリーコンベアーによる強制的な排土は行わなかった。

2.2 供試体

供試体は大深度における固結した粘性土地盤を想定した模擬土として、北多摩層等のデータ等を参考に、一軸圧縮強度を 1.0N/mm^2 程度と設定した。この値は土とモルタルの間であることから、模擬土材料には流動化処理土を選んだ。写真-3 に示すような鋼製型枠に流動化処理土を打設して硬化養生した。大きさは、縦 $1\text{m} \times$ 横 $1\text{m} \times$ 厚さ 0.4m とした。この鋼製型枠を実験ケース数に合わせて16基用意して供試体を作成した。

流動化処理土の強度は、打設時に作製したテストピースの一軸圧縮強度試験により確認し、28日ではほぼ 1.0N/mm^2 であった。供試体がテストピースと大きな違いがないことを確かめるため、写真-4 に示すように、岩盤等で使用される針貫入試験を供試体に対して行った。この方法は細かい値まではわからないが、何度か繰り返し行った結果、ほぼ 2N/mm^2 となった。よってテストピースによる一軸圧縮試験で得られた結果と大きく乖離していないことが確認できた。



写真-3 供試体作製 (左: 流動化処理土打設、右: 硬化養生後)



写真-4 針貫入試験による強度確認

3. 実験ケースと実験状況

3.1 実験ケース

代表的な実験ケースを表-1 に示す¹⁾。切削のみの負荷となるチャンバーが空の状態と、チャンバー内の掘削土による負荷も含むチャンバーが充満した状態を着目点とし、外カッターの回転数は全ケースとも共通で、 0.8 回/分とした。内カッターは回転方向を正転(外カッターと同方向)、反転(外カッターと逆方向)させた場合、および回転速度を外カッターに対して1倍速、2倍速、3倍速にした場合の実験を行った。内カッター及び外カッターは直径比で内:外=1:2 および 1:3 となる組合せを用意した。内:外=1:2 の場合は、外カッター直径 $\phi 800\text{mm}$ に対して内カッター直径 $\phi 400\text{mm}$ 、内:外=1:3 の場合は内カッター直径 $\phi 267\text{mm}$ である。

表-1 代表的な実験ケース

着目点	Case No.	内外比	内カッターの回転方法		チャンバー内の状態	掘進速度	内カッター前出し
			正転, 反転	回転速度			
(1)切削のみの負荷	A-1	1:2	正転	1倍速	空	15 mm/分	0mm
	A-2			2倍速			
	A-3			3倍速			
	A-4		反転	1倍速			
	A-5			2倍速			
	A-6			3倍速			
B-1~6	1:3	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	0mm	
(2)切削による負荷とチャンバー内の掘削土砂による負荷	C-1~6	1:2	Aと同様の6ケース		空	5 mm/分	0mm
	D-1~6	1:2	Aと同様の6ケース		充満	5 mm/分	0mm
	E-1~6	1:2	Aと同様の6ケース		充満	15 mm/分	0mm
	F-1~6*	1:2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	0mm
(3)芯抜き効果	G-1~6	1:2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	50mm
	H-1~6	1:2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	100mm

*: A1-6 と同じ

写真-5 にビット取付状況、図-2 にビットの形状・寸法を示す。ビットは加工時に精度を確保できることを重視し、実験機の外径に合わせてスケールダウンしたビットは用いなかった。カッタースポークが小さいので先行ビットとティースビットを分けて配置できないため、地山側が先行ビットでスポーク側がティースビットになる一体型の形状とした。このビットに対して適度な切り込み量になるように掘進速度を設定し、掘進速度は 5 mm/分、切り込み量は $5 \text{ mm/分} \div 0.8 \text{ 回/分} = 6.25 \text{ mm/回}$ を基本とした。しかし、初期のデータから掘進速度 15 mm/分の場合にトルクと推力の変化が顕著だったことから、そちらのケースを多用した。



写真-5 ビット取付状況

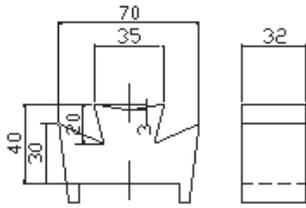


図-2 ビット形状・寸法

3.2 実験状況

実験状況を写真-6および写真-7に示す。掘進初期は模擬地盤の表面が薄板状に剥落する様子が観察されたことから、表層ではなく、100mm程度掘進したところからデータを採取した。計測された推力とトルクのデータの平均値をとり、各々のケースでの代表値とした。



写真-6 供試体設置状況



写真-7 実験状況全景

4. 実験結果

内カッターが外カッターに対して正転1倍速の場合は、従来のシールド機と同様の単円での回転方法となる。ここでは、その正転1倍速を基準として各ケースとの比較を行った。

4.1 切削のみの負荷 (Case NO. A, B)

写真-8に示すようにチャンバー下部の蓋を開け、掘削土砂がチャンバー内に溜まらないようにして切削のみの推力やトルクを測定した。その結果、以下のことがわかった。



写真-8 チャンバー下部開放状況

(1) 内カッターのトルク¹⁾

図-3に内カッターの回転方向（正転，反転），速度（1倍速，2倍速，3倍速）による内カッターのトルクの比較を示す。カッター切り込み量 (mm/回)は、掘進速度(mm/分) \div 回転速度(回/分)で表されるので、回転速度が大きくなると、カッター切り込み量が小さくなる。掘進速度は一定のため、回転速度を速くすることにより、切り込み量が小さくなり掘削に要するトルクも小さくなったと考えられる。内外比 1:2 よりも内外比 1:3 が全体的に小さいのは、カッターの面板が小さいこと、取り付けているビットの本数が少ないことなどの理由によるものと考えられる。表-2に正転と反転の各1倍速の値に対する比率を示す。内カッタートルクは内外比 1:2 では2倍速で66%、3倍速で45%に低減した。内外比 1:3 では2倍速で66%、3倍速で61%に低減した。切り込み量は2倍速で1/2 (50%)、3倍速で1/3 (33%)に対して単純な比例とはならなかったが、回転速度が大きいほどトルクが小さくなる傾向は明らかとなった。

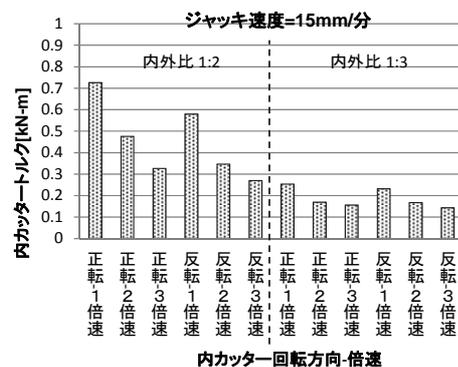


図-3 内カッタートルクの比較

表-2 内カッタートルクの比率

比の取り方	内外比	
	1:2	1:3
正転1倍速/正転1倍速	100%	100%
正転2倍速/ "	66%	66%
正転3倍速/ "	45%	61%
反転1倍速/反転1倍速	100%	100%
反転2倍速/ "	60%	72%
反転3倍速/ "	46%	62%

(2) ジャッキ推力¹⁾

図-4に推力の比較、表-3に推力の比率を示す。内外比1:2では2倍速で87~96%、3倍速で82~86%に低減した。内外比1:3では2倍速で91~92%、3倍速で86~92%に低減した。

回転速度が速いほど、カッターの切り込み量は小さくなることから、掘進に要する推力も小さくなったと考えられる。

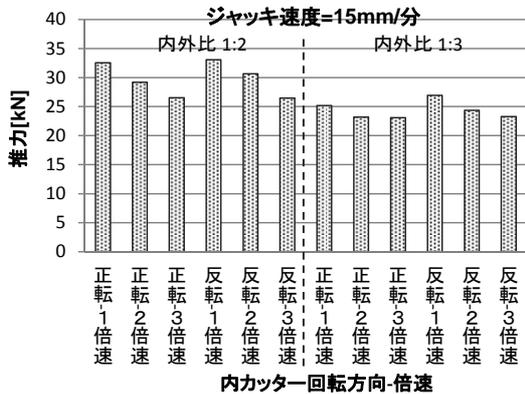


図-4 ジャッキ推力の比較

表-3 ジャッキ推力の比率

比の取り方	内外比	
	1:2	1:3
正転1倍速/正転1倍速	100%	100%
正転2倍速/ "	87%	92%
正転3倍速/ "	82%	92%
反転1倍速/反転1倍速	100%	100%
反転2倍速/ "	96%	91%
反転3倍速/ "	86%	86%

(3) 掘進速度の向上¹⁾

内カッターの回転速度を上げることにより推力が低減したことから、同じ推力であればどれだけ掘進速度が向上できるかを試算し、定量的に評価した。図-5に、横軸に掘進速度、縦軸に推力をとったグラフを示す。このときの実験は掘進速度を5, 6, 7, 8, 9, 10, 15 mm/分と細かく変えて行った。その結果、推力は掘進速度に対してほぼ直線的に上昇する関係が見られた。

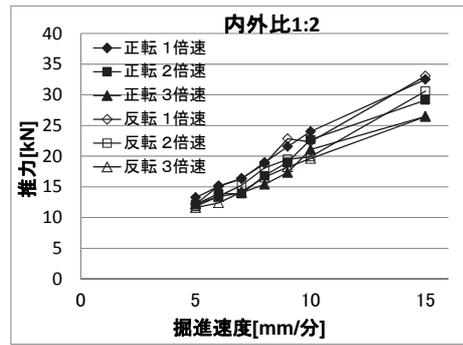


図-5 掘進速度と推力の関係

回転方法が正転1倍速（従来の単円での回転）の時に推力最大、反転3倍速の時に推力最小であったので、正転1倍速と反転3倍速を比較対象とした掘進速度と推力の近似直線を求めた。これを図-6に示す。

正転1倍速で掘進速度が5 mm/分、10 mm/分、15 mm/分の場合に、同じ荷重で反転3倍速ではどのくらい掘進速度が向上できるかを、この近似直線の式にもとづき試算した。その結果を表-4に示す。多少ばらつきはあるものの、全体的に20%以上掘進速度が向上できるものと考えられる。図-6中の点線は掘進速度10 mm/分のときの求め方を例示している。

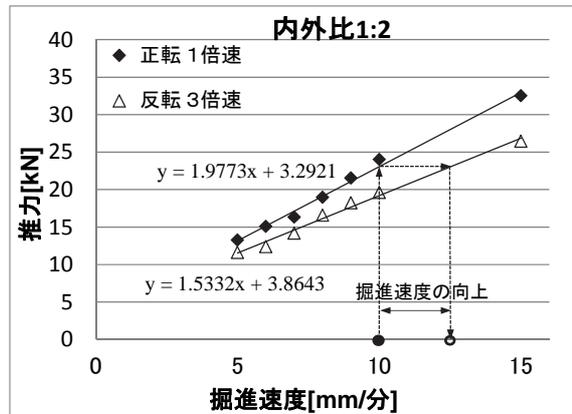


図-6 掘進速度と推力の近似直線

表-4 回転方法による掘進速度の向上率

正転1倍速	推力	反転3倍速	上昇率
5 mm/分	13.2 kN	6.1 mm/分	+22%
10 mm/分	23.1 kN	12.5 mm/分	+25%
15 mm/分	33.0 kN	19.0 mm/分	+26%

4.2 切削のみの負荷とチャンバー内掘削土砂による負荷 (Case NO. D, E)

チャンバー下部の蓋を閉め、掘削土砂をチャンバー内に溜めて実験を行った。チャンバー内が充滿し、排土口から一定量で排土が行われる安定した状態になったことを確認してから推力やトルクを測定した。

図-7に内外比1:2で掘進速度5 mm/分と15 mm/分の推力とトルク(内外合計)の関係を示す。図には掘進速度5 mm/分でチャンバーが空の場合 (Case No.C) も併記した。チャンバーが空の場合 (図中の●○) と比べて充填している場合 (図中の■□) には、推力は切羽圧の分上昇し、トルクは攪拌に要する負荷により上昇したため、グラフは右上にシフトした位置になった。

チャンバーが空の場合 (図中の●○) は内カッターの回転方法の違いではトルクが大きくは変わらなかったことから打点が横長の群になった。チャンバーが充填の場合 (図中の■□) は内カッターを速く回すと、チャンバー内の掘削土砂が攪拌され塑性流動性が向上することからトルクと推力が低下するので打点が左下がりの群になった。推力は、4.1(2)で示した切り込み量低下による負荷低減に加え、攪拌効果による塑性流動性の向上に伴う負荷低減が表れたと考えられる。

掘進速度15 mm/分の場合 (図中の▲△) は、1倍速よりも2倍速、2倍速よりも3倍速のほうが負荷は低減した。掘進速度が大きいことからチャンバー内に取り込まれる掘削土砂の量が多いので、回転速度が攪拌に与える影響が大きく、推力の低減が大きくなったものと考えられる。一方、掘進速度5 mm/分の場合 (図中の■□) は、内カッターを速く回すほど負荷が低減したが、2倍速と3倍速の違いは顕著ではなかった。これは取り込まれる掘削土砂の量が少なく、2倍速ですでにチャンバー内が十分に攪拌され塑性流動化していたので、負荷の変化が小さかったためと考えられる。

また掘進速度15 mm/分の場合 (図中の▲△) は、回転方向による推力の差は小さいが、正転に対して反転の方がトルクが大きかった。この原因は、反転の場合は内外のカッターの相対速度が大きいのでチャンバー内の掘削土砂のせん断抵抗力も大きくなり、トルクの増加につながったものと推測される。掘進速度5 mm/分 (図中の■□) では、正転も反転も同程度の負荷となった。掘進速度が遅い場合は、チャンバー内が十分に攪拌され塑性流動化した状態になると考えられることから、せん断抵抗力の影響が小さくトルクの差も小さかったと推測される。以上のことから、負荷の低減は掘進速度が大きいほど顕著であることがわかった。

低減効果を算定すると、掘進速度15 mm/分では、正転1倍速に対して正転3倍速の場合に最大でトルクが20%低減、推力が35%低減した。

また実験機本体の電力消費量に占めるカッターモーターとジャッキパワーユニットの電力消費量の割合はそれぞれ約60%と約10%であることから、トルクと推力の低減による電力消費量の低減率 α を試算すると以下ようになる。

電力消費量の低減率 α

$$\alpha = 60\% \times 20\% + 10\% \times 35\% = 15.5\%$$

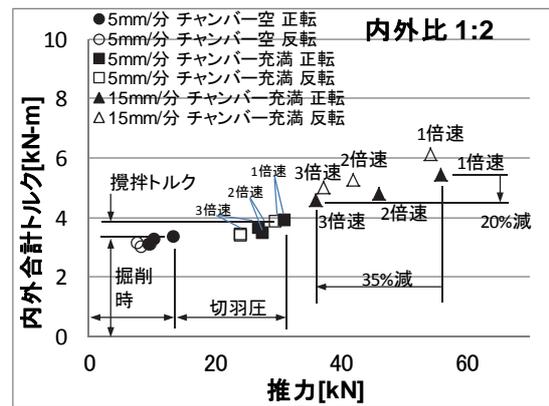


図-7 回転方法による掘進負荷

4.3 芯抜き効果

山岳トンネルでは、地山に自由面を設けて掘削負荷を低減する芯抜き効果を利用した工法が用いられている。芯抜き効果の原理は、地山に自由面を設けることで、掘削する際に亀裂を生じやすくさせることである。二重回転カッター構造では、内カッターを前に出すことで芯抜き効果を得られる可能性があると考えられる。これを明らかにするために、図-8、写真-9に示す内カッターを前に突出させたカッター面板にて切削実験を行った。具体的には内カッターのセンターシャフトの長さを変えて、外カッターに対して50mm、100mm前出しし、前出し0mmの平面のケースと比較した。

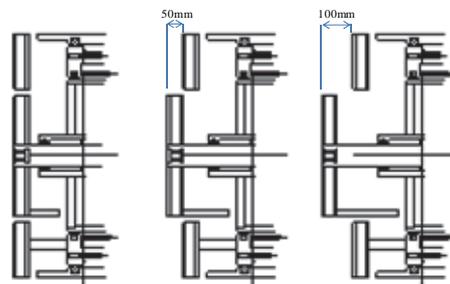


図-8 内カッター前出し (0/50/100mm)



写真-9 内カッター前出し (100mm)

芯抜き効果は掘削における負荷低減であることから、4.1と同様の実験方法を採用し、切削のみの負荷を計測した。

図-9は内カッターのトルクの比較である。前出しを50mm/100mmした方が、前出ししていない場合(前出し0mm)よりも全体的にトルクが増加した。これは、前出し0mmでは一面だけの掘削であったのに対して、前出しするとカッター外周リングの抵抗も付加されることが原因と考えられる。ただし、50mmと100mmの大小関係はまちまちであり、 $0\text{mm} < 50\text{mm} < 100\text{mm}$ の順番になる一様な傾向は見られなかった。

図-10は外カッターのトルクの比較である。0mmのときよりも50mm/100mmのほうがトルクは若干減る傾向があった。これは、内カッターで芯抜きした自由面へ切削土が流れることにより、外カッターの負担が低減したものと考えられる。しかし、50mmと100mmの差は顕著ではなかった。

図-11は推力の比較である。各ケースで1倍速よりも2倍速、2倍速よりも3倍速のほうが推力は小さくなる傾向は見られた。これは切り込み量の低下によるものと考えられる。0mmに対して前出しした場合の推力は、大きい場合と小さい場合が入り混じっており、前出しによる推力の変化傾向は見られなかった。これらのことから、推力の大小は切り込み量の大小が支配的であると想定される。

以上を総括すると、芯抜き効果は外カッタートルクにおいて若干確認されたが、ジャッキ推力には顕著な効果は見られなかった。写真-10は掘削後の供試体の状態である。中央部に内カッターを前出しした形状が完全に残っており、芯抜きした部分が自由面となって崩れやすくなった様子は観察されなかった。今回のような固結粘性土地盤では、内カッターを先行しても芯抜き効果はあまり期待できないと考えられる。砂層地盤などで、前出しした内カッターの周辺が緩んでくるような状態であれば芯抜き効果が期待できる可能性がある。

5. 結論

5.1 チャンバーが空の場合

- (1) 内カッターのトルクは、内カッター回転速度により約30~50%程度低減する。
- (2) 推力は、内カッター回転速度により約10%程度低減する。
- (3) 内カッターを速く回すと、同一推力で掘進速度が約20%程度向上する。

5.2 チャンバーが充満の場合

- (4) トルクも推力も、内カッターを速く回すことにより、トルクは最大約20%程度、推力は最大約35%程度低減する。
- (5) トルクと推力の低減により、シールド機本体の電力消費量は15%以上低減すると試算される。

以上のことから、二重回転カッター構造を持つシールド機の切削性能および攪拌性能の向上が確認されたので、大深度における硬質地盤での大断面シールドに関する高速施工への適用と省エネが期待される。今後は実用化に向けた詳細な機械設計と、さらなる負荷低減と効率的な掘進方法を検討する予定である。

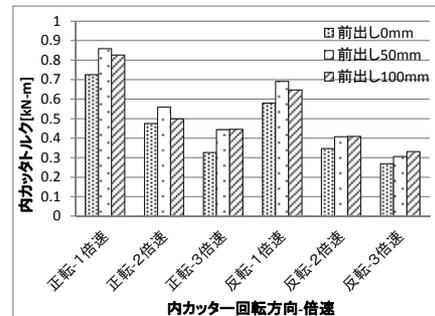


図-9 内カッタートルク (前出し 0/50/100mm)

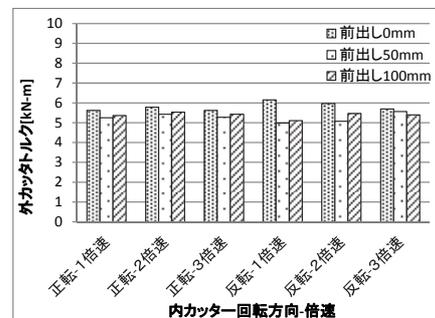


図-10 外カッタートルク (前出し 0/50/100mm)

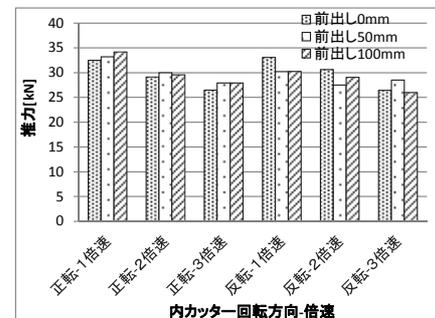


図-11 ジャッキ推力 (前出し 0/50/100mm)



写真-10 前出し実験後の供試体

参考文献

- 1) 安光・宮澤・野本・森・篠原・小泉：二重カッター方式による大断面シールドの高速施工技術の開発，前田技術研究所報，VOL.55.2014

25. 鶴見川多目的遊水地における PCB 廃棄物の現地無害化処理

－ ジオスチーム™法による都市部での施工事例 －

株式会社鴻池組
株式会社鴻池組
株式会社鴻池組

○ 縁田 正美
柏熊 伸治
橘 敏明

1. はじめに

ポリ塩化ビフェニル(PCB)やダイオキシン類(DXNs)等の難分解性物質による土壌や底質・汚泥等の汚染問題が近年顕在化してきている。これらの無害化処理は、その毒性とともに残留性や難分解性が問題となるなど外部搬出が難しい場合があり、現位置処理が有効な手段となりうる。

鶴見川多目的遊水地は、一級河川鶴見川の下流域の洪水対策を目的とした施設で、平成6年より工事が行われ、平成15年より一部運用が始まっている。この遊水地建設工事の過程で、PCBなどの特定有害物質および異物（木材、プラスチック、がれき類など）を含む土壌（以下、異物混入土と記す）が確認され、神奈川県横浜市港北区にある鶴見川多目的遊水地のうち、鶴見川および鳥山川合流部付近に一時保管されていた。

国土交通省「鶴見川多目的遊水地土壌無害化処理事業」は、鶴見川多目的遊水地の遊水地機能を確保することを目的に、これら異物混入土のうち、PCBなどの濃度が比較的高いPCB廃棄物について現地無害化処理（PCB特別管理産業廃棄物の現地処理）を行った上で外部搬出処分する事業であり、鴻池組は、本事業に係る施設・設備の実施設計、横浜市条例に基づく環境影響評価、PCB廃棄物処理施設の設置、「異物混入土」の掘削、PCB廃棄物処理施設の運転、施設の解体などを担当した。なお、処理対象物がPCB廃棄物であることから廃棄物処理法の認定を受けた技術で行う必要があり、還元熱化学分解方式の処理技術であるジオスチーム™法により行った。「ジオスチーム」は(株)東芝が商標登録した名称

本報文では、国内で初めて市街地においてPCB廃棄物の現地無害化処理を行った工事の状況について報告する。

2. 工事概要

工事名：鶴見川遊水地土壌改良工事
発注者：国土交通省関東地方整備局

受注者：(株)鴻池組横浜支店

工期：平成21年2月28日～平成25年10月31日

実処理：平成24年2月20日～平成25年6月15日

工事種類：PCB廃棄物処理施設の設置およびPCB廃棄物の現地処理（国土交通省および横浜市の自ら処理）

工事位置：横浜市港北区小机町および鳥山町地先（鶴見川多目的遊水地内）

工事規模：事業実施区域 約40,000m²
敷地面積 約10,000m²
建築面積 約3,300m²

処理対象：異物混入土のうち、PCBなどの濃度が比較的高い一時保管土A（PCB産業廃棄物） 5,828m³

3. 現地の状況と処理対象

3.1 現地の状況

事業実施区域は、鶴見川多目的遊水地の下流部で鶴見川と鳥山川が合流する付近（写真-1、図-1）であり、異物混入土はこの範囲の遮水構造の施設内に保管されていた。



写真-1 鶴見川多目的遊水地および事業実施区域

異物混入土のうち、無害化処理対象の一時保管土 A 約 5,800m³は、図-2 に示すように、一時保管土 B 約 95,000m³（濃度の低い異物混入土：PCB≦10mg/kg[底質の除去基準]，ダイオキシン類≦1,000pg-TEQ/g）の内側に保管されていた。



図-1 異物混入土の一時保管状況

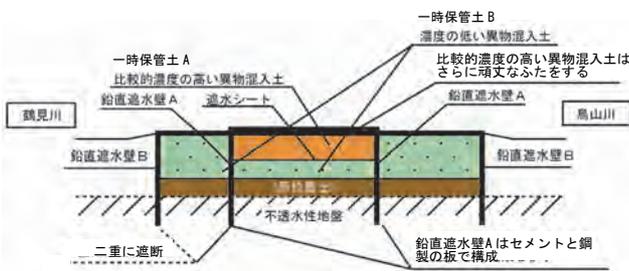


図-2 異物混入土の保管状況 (A-A' 断面)

平成 14 年度実施調査では、一時保管土 A の水分（平均）は 46.7%，固形分（平均）は 53.3%であり、固形分の内訳（平均）は、土壌 56.4%，不燃物 36.1%，可燃物 7.6%であった。一時保管土 A の成分組成を表-1 に示す。

表-1 一時保管土 A の成分組成（平成 14 年度実施）

項目 \ 検体	No.1	No.2	No.3	No.4	平均		
異物（可燃物）	紙類	1.9	1.3	0.5	0.2	1.0	
	厨芥類	0.9	1.0	0.4	0.7	0.8	
	繊維類	0.8	0.2	0.8	1.1	0.7	
	木竹類	4.4	6.2	3.9	6.0	5.1	
	可燃物計	8.1	8.7	5.5	7.9	7.6	
	異物（不燃物）	プラスチック類	7.2	4.5	4.4	11.4	6.9
		ゴム・皮革類	2.4	1.1	0.1	2.5	1.5
		がれき類	14.5	18.9	17.1	9.7	15.1
		金属類	3.1	4.2	3.3	0.9	2.9
		ガラス類	9.1	3.5	4.7	3.5	5.2
陶器類		2.6	1.3	5.4	8.6	4.5	
不燃物計		38.9	33.5	35.1	36.7	36.1	
土	礫(粒径20mm以上)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	土壌(2~20mm)	13.9	17.4	14.3	16.8	15.6	
	土壌(2mm未満)	39.2	40.4	45.1	38.7	40.9	
	土壌計	53.1	57.8	59.4	55.4	56.4	

4. 無害化処理

4.1 設備配置

本工事の主要設備（建屋）の配置を図-3 に示す。掘削ヤード建屋は B=32m、L=40m の移動式で、工事期間中に 2 回移設（3 位置で掘削）した。無害化処理施設は一時保管土 B の上に、遮水構造を保

ったまま設置した。

一時保管土 A の掘削から浄化物の外部処分までの全体フローを図-4 に、また、ジオスチーム™法の概要を次頁に示す。

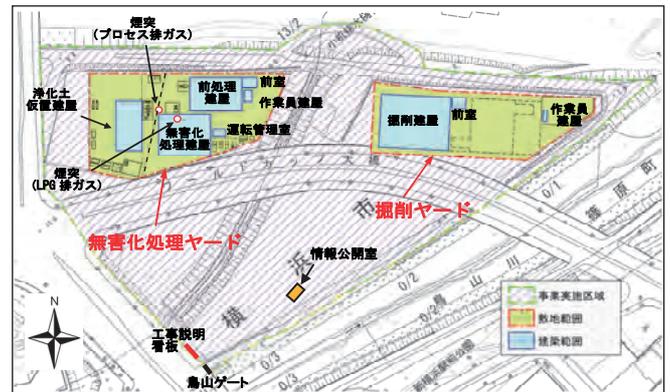


図-3 主要設備（建屋）の配置

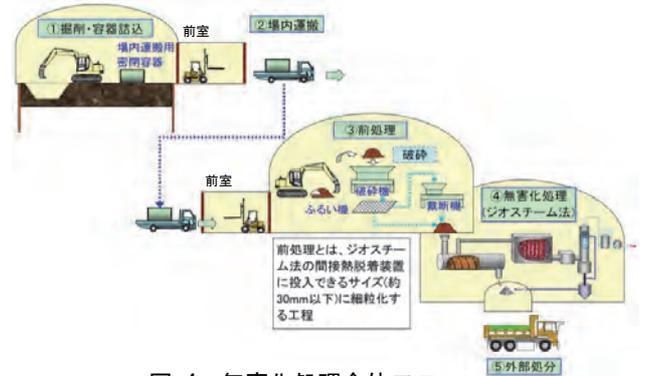


図-4 無害化処理全体フロー

一時保管土 A の掘削は、負圧管理された掘削建屋内で行い、建屋からの排気は活性炭および HEPA フィルタ付き集塵機を通して浄化した。掘削した一時保管土 A は、掘削建屋内で専用の鋼製運搬容器(1m³)に詰めて密閉した。



写真-2 掘削建屋内での掘削状況

掘削建屋前室より屋外専用のフォークリフトで輸送用トラックに運搬容器を積み込み、積載したトラックは事業敷地内を通過して無害化処理ヤードに移動、前処理建屋内に容器を搬入し、一時保管土 A を展開ヤードで検査した後、二軸破碎機および裁断機により粒度調整と攪拌混合して均質化した。

4.2 ジオスチーム™法の概要

ジオスチーム™法は、(株)東芝、東芝環境ソリューション(株) (旧社名：(株)テルム)、(株)鴻池組により開発された技術であり、PCB等処理技術調査検討委員会の技術評価を取得している。ジオスチーム法の処理フローを図-6に示す。

(1) 間接熱脱着プロセス

間接熱脱着プロセスではPCB廃棄物を間接加熱して、廃棄物中の汚染物質をガス化して分離する。

間接熱脱着装置に投入した廃棄物は、気密性を保持できる間接熱脱着装置のチャンバー内に投入される。チャンバー内ではスクリーオーガーにより投入部より中央部を経て排出口側に1時間程度で搬送される。チャンバー外面はバーナーにより加熱されて、内部の廃棄物はチャンバー内面から伝熱される熱により温度が400℃～700℃に上昇し、水分及びPCBやダイオキシン類等の汚染物質をガス化して分離することで浄化される。浄化された廃棄物は、気密性を保ちながら排出され、水処理後の処理水を加えて湿潤状態の浄化物となる。

(2) 水蒸気分解プロセス

水蒸気分解プロセスでは、間接熱脱着プロセスで分離したガス状の汚染物質を分解する。間接熱脱着プロセスで廃棄物から分離した汚染物質や水分は、ガス体のまま水蒸気分解プロセスに導入される。このガスは、水蒸気分解装置内に設置された間接加熱式ヒーターにより約1,100℃まで加熱・3秒以上保持されることで水蒸気と有機物が反応し、PCBやダイオキシン類等の有機塩素化合物は一酸化炭素、二酸化炭素、メタン、水素、塩化水素などに分解される。

(3) 排ガス処理プロセス

排ガス処理プロセスでは水蒸気分解後のガス中

に含まれる微量の汚染物質を除去するとともに、低分子の可燃性ガスを処理する。

水蒸気分解プロセスを通過したガスには一酸化炭素やメタン、水素などの可燃性ガスが含まれる。これらのガスは、温度を約1,000℃に保ったまま空気を添加することで酸化処理し、水蒸気及び二酸化炭素とする。酸化処理後のガスはクエンチャー内で冷却水を噴霧して急速冷却し、ガス中の水蒸気を水として回収する。また、ガスに含まれる塩化水素などの酸性ガスも冷却水中に捕捉する。冷却後のガスは、HEPAフィルタ及び活性炭を通して大気へ放出する。

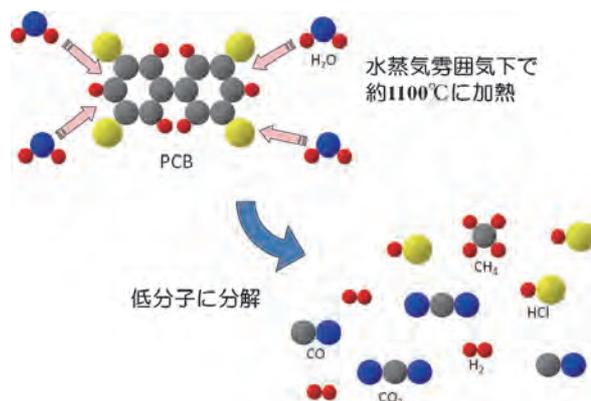


図-5 水蒸気分解プロセスにおける反応模式図

これらの処理は、ガスの流れの上流端である間接熱脱着プロセスのチャンバー内が負圧に保たれるように排ガス処理装置の終末に設置したブロワの吸引により負圧管理しながら行われる。このため、処理経路全域が負圧となっており、処理の途中で装置外に漏洩することはない。

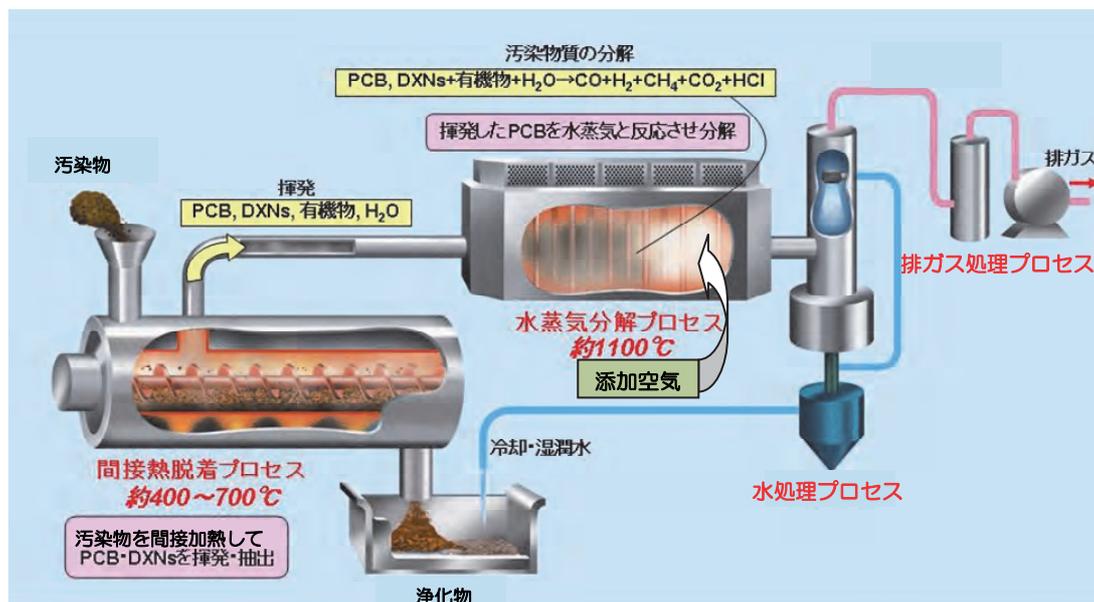


図-6 ジオスチーム™法の処理フロー

(4) 水処理プロセス

水処理プロセスではガス処理装置で回収し、余剰となった水分を浄化する。

間接熱脱着プロセスで汚染物から蒸発・分離した水分は排ガス処理プロセスのクエンチャーで冷却され、冷却水の一部として回収されて余剰水として排出される。この余剰水には、間接熱脱着プロセスで発生した土壌由来のSS分が含まれ、また、汚染物に水銀などの揮発性の重金属が含まれている場合にはそれらも水中に存在することがある。

このため、水処理プロセスでは、水中のSS分や水銀などの有害物質を除去する。処理水は浄化土壌の加湿水として再利用できる。

4.3 処理実績

(1) 処理対象物の汚染状況と処理目標

本工事の処理対象物「一時保管土A」の汚染状況を表-2に、処理目標を表-3に示す。

表-2 一時保管土Aの汚染状況

項目	分析値	基準値	基準値根拠
PCB	含有量試験で最大 19.2mg/kg (処理中の最大 25mg/kg)	10mg/kg	底質の暫定除去基準
	溶出試験では不検出	不検出	S48.総令第5号
ダイオキシン類	最大 2,300pg-TEQ/g	1,000 pg-TEQ/g	土壌環境基準
全水銀	溶出試験で最大 0.0087mg/L	0.005 mg/L	S48.総令第5号
油分	油膜あり	油膜の有無	—
全シアン	溶出試験で最大 0.5mg/L	不検出	土壌環境基準
鉛	溶出試験で最大 0.29mg/L	0.1mg/L	S48.総令第5号
ふっ素	溶出試験で最大 17mg/L	15mg/L	S48.総令第5号
ヒ素	溶出試験で最大 0.074mg/L	0.01mg/L	土壌環境基準

注) 一時保管対策前の調査結果のうち、基準値を超過した項目のみを表示 (PCBは処理中の分析値のうち最大値を併記)

表-3 一時保管土Aの処理目標

処理対象	処理目標 (工事の特記仕様書)
PCB含有量	0.1mg/kg 以下
PCB溶出量	0.003mg/L 以下
ダイオキシン類	150pg-TEQ/g 以下
重金属類	産業廃棄物に係る判定基準を満たすこと

(2) 全体工程

全体工程を表-4に示す。工期は、平成21年2月28日から平成25年10月31日までの4年8ヶ月であった。

施設設置に係る着工関係法令手続きと機械設計・製作に約2年7ヶ月を要し、現地着工後は、機械設置4ヶ月、完成検査1ヶ月、無害化処理16ヶ月、解体撤去・原状回復を4ヶ月で実施した。

表-4 全体工程

	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
	1~3/4~6/7~9/10~12	1~3/4~6/7~9/10~12	1~3/4~6/7~9/10~12	1~3/4~6/7~9/10~12	1~3/4~6/7~9/10~12
関係法令手続き					
環境影響評価	方法書・申請書・評価書	一部変更・報告書	許可/15	事後調査報告書	
廃棄物処理施設設置許可申請			5/10 許可申請	11/11 許可届出	
許可申請書(仮設建築物等)			5/10 申請	11/11 建築検査	
土壌汚染対策法			5/10 申請	11/11 建築検査	
特定施設設置届書			5/10 申請	11/11 建築検査	
指定所事業所設置届書			5/10 申請	11/11 建築検査	
鶴見川治水地土壌改良工事					
機械設計					
機械製作					
準備工・設備設置					
試運転(清浄土)					
実処理(保管土A:5,800m ³)					
解体撤去					
地元説明会					
工事説明会					

本施設は、横浜市より PCB 廃棄物の自ら処理施設の設置許可を受けて、平成24年2月20日試運転(第1クール※)を開始し、平成25年6月15日まで16ヶ月間の無害化処理供用運転(全31クール)を実施した。なお、無害化設備の処理能力は、機械仕様と処理対象物の性状より 1.2t/時(28.8t/日)として申請した。

※:1クールは14日間で、設備昇温0.5日+10.25日連続処理+設備冷却0.5日+メンテナンス1.25日+休日1.5日を標準。



写真-3 無害化処理施設全景

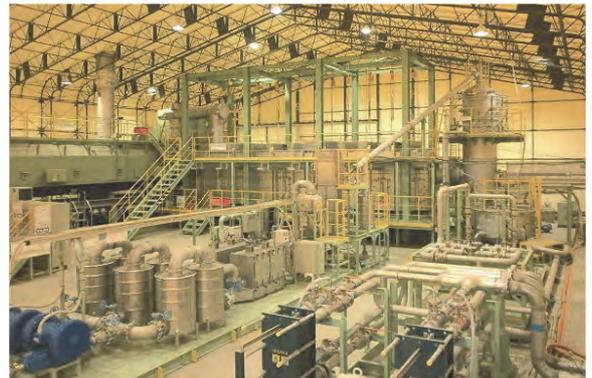


写真-4 無害化処理建屋内

(3) 外部処分

処理後の異物混入土は、浄化土建屋内のピットに保管し、分析により PCB 廃棄物の卒業基準を満足することを確認するとともに、ダイオキシン類などが処理基準値を下回ることを確認した後、通常の産業廃棄物として外部処分した。



写真-5 浄化土建屋内での浄化物積み込み状況

処理実施時の状況については、環境影響評価における事後調査計画に基づき実施した。

第1クールは異物混入土（一時保管土 A）を用いた試運転と位置づけて処理運転を行なった。試料採取箇所を図-7 に、試運転時の測定結果を表-5～表-8 に示す。

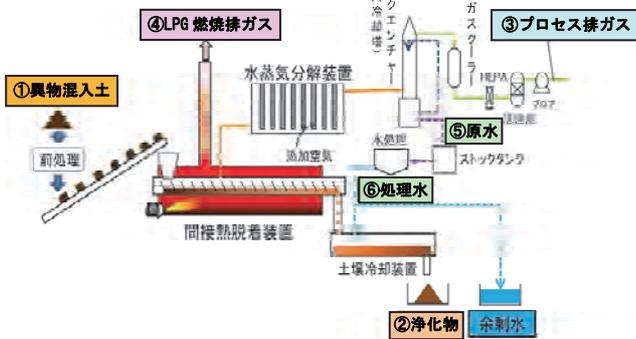


図-7 処理フローと試料採取箇所

第1クールでは、投入対象物（PCB 廃棄物）の性状、浄化物の分析結果、排ガス性状、冷却水（クエンチャー水）および処理水分析結果に着目した。その結果、規制値や基準値を越えた項目はなく、全ての装置が正常に機能し、確実な処理が行われたことを確認して処理運転に移行した。

表-5 投入土壌の性状（試運転）

対象物質 (試料名称)	分析項目	単位	分析結果		測定値の 規制値、基準値等
			1-1	1-2	
① （異物混入土）	PCB(含有)	mg/kg	4.4	2.6	処理のためのデータ収集 (規制値、基準値等はなし)
	ダイオキシン類	pg-TEQ/g	140	130	
	ガドミウム(含有)	mg/kg	<10	<10	
	シアン(含有)	mg/kg	<10	<10	
	鉛(含有)	mg/kg	250	220	
	六価クロム(含有)	mg/kg	<10	<10	
	砒素(含有)	mg/kg	<10	10	
	水銀(含有)	mg/kg	<10	<10	
	セレン(含有)	mg/kg	<10	<10	
	ふっ素(含有)	mg/kg	120	80	
	ほう素(含有)	mg/kg	40	40	

表-6 浄化物分析結果（試運転）

対象物質 (試料名称)	分析項目	単位	分析結果		測定値の規制値、基準値等
			1-1	1-2	
② （処理後）	ダイオキシン類	pg-TEQ/g	6.2	7.2	150 環境基準(産質)
	PCB(溶出)	mg/L	<0.0005	<0.0005	0.003 特記仕様書
	PCB(含有)	mg/kg	<0.1	<0.1	0.1 特記仕様書
	ガドミウム(溶出)	mg/L	<0.005	<0.005	0.3 産廃判定基準 ¹⁾
	シアン(溶出)	mg/L	<0.1	<0.1	1 特記仕様書
	鉛(溶出)	mg/L	<0.005	0.007	0.3 特記仕様書
	六価クロム(溶出)	mg/L	<0.04	<0.04	1.5 産廃判定基準 ¹⁾
	砒素(溶出)	mg/L	0.007	0.012	0.3 特記仕様書
	水銀(溶出)	mg/L	<0.0005	<0.0005	0.005 特記仕様書
	セレン(溶出)	mg/L	0.005	<10	0.3 産廃判定基準 ¹⁾
	ふっ素(溶出)	mg/L	1.1	0.77	-
	ほう素(溶出)	mg/L	0.2	0.2	-

注1) 産廃判定基準は「金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令」の基準値を示す。

供用中の処理後浄化物の分析結果を表-9 に示す。処理後の異物混入土は、浄化土建屋内のピットに保管し、分析により PCB とダイオキシン類が処理基準値を下回ることを確認した後、産業廃棄物（汚泥）としてセメント工場へ再資源化原料として搬出リサイクルした。

表-7 排ガス分析結果（試運転）

監視対象 (試料名称)	分析項目	単位	分析結果		測定値の規制値、 基準値等
			1-1	1-2	
③ （大気放出ガス）	ダイオキシン類	ng-TEQ/m ³	0.000017	0.000017	0.1 特記仕様書
	PCB	mg/m ³	0.000022	0.000039	0.01 特記仕様書
	ばいじん (12%O ₂)	g/m ³	<0.001	<0.001	0.01 特記仕様書
	硫酸酸化物	ppm	<0.1	<0.1	5 特記仕様書
	窒素酸化物 (12%O ₂)	ppm	56	47	250 大防法
	ふっ素	mg/m ³	<0.2	<0.2	2.5 市条例
	シアン	mg/m ³	<0.08	<0.08	11.6 市条例
	塩化水素 (12%O ₂)	mg/m ³	<1	<1	50 市条例
	鉛	mg/m ³	<0.3	<0.3	10 市条例
	水銀	mg/m ³	<0.01	<0.01	0.05 特記仕様書
	④ （焼ガス）	硫酸酸化物	ppm	0.1	0.1	5 特記仕様書
窒素酸化物 (12%O ₂)		ppm	59	55	250 大防法
塩化水素 (12%O ₂)		ppm	<1	<1	50 市条例
ばいじん (12%O ₂)		g/m ³	<0.001	<0.001	0.01 特記仕様書

表-8 冷却水および処理水分析結果（試運転）

対象物質 (試料名称)	分析項目	単位	分析結果(1クール)			測定値の規制値、 基準値 (下水放流基準)
			原水(1-1) 2/22採取	処理水(1-1) 2/22採取	処理水(1-2) 2/28採取	
⑤ （原水 クエンチャー水 処理水）	PCB	mg/L	検出されず	検出されず	検出されず	0.003
	ダイオキシン類	pg-TEQ/L	1.6	0.00036	0.00013	10
	水銀	mg/L	0.18	0.0011	<0.0005	0.005
	シアン	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	1
	鉛	mg/L	0.69	<0.005	<0.005	0.1
	ふっ素	mg/L	8.4	3.7	5.7	8
	砒素	mg/L	0.40	検出されず	検出されず	0.1
	pH	-	8.5(20℃)	8.0(20℃)	8.2(21℃)	5~9
	SS	mg/L	11000	3	<1	600
	温度	℃	13	-	-	45℃以下
	ガドミウム	mg/L	0.055	<0.005	<0.005	0.1
	六価クロム	mg/L	<0.04	<0.04	<0.04	0.5
	セレン	mg/L	0.10	<0.005	0.005	0.1
	ほう素	mg/L	0.7	<0.1	0.5	10
	有機リン	mg/L	<0.1	<0.1	-	0.2
	アルキル水銀	mg/L	検出されず	検出されず	-	検出されないこと

表-9 浄化物分析結果（供用中）

分析項目	単位	7クール					測定値の 規制値、基準値等
		7クール	13クール	19クール	25クール	31クール	
ダイオキシン類	含有量 pg-TEQ/g	6.6	0.0020	3.7	0.018	0.0033	150 環境基準(産質)
PCB	含有量 mg/kg	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1 特記仕様書
	溶出量 mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.003 特記仕様書
鉛	含有量 mg/kg	410	280	470	760	560	1500 汚入基準 ¹⁾
	溶出量 mg/L	0.008	<0.005	0.037	<0.005	<0.005	0.3 特記仕様書
ガドミウム	含有量 mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	-
	溶出量 mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.3 産廃判定基準
シアン	含有量 mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	-
	溶出量 mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1 特記仕様書
六価クロム	含有量 mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	-
	溶出量 mg/L	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	1.5 産廃判定基準
砒素	含有量 mg/kg	30	20	<10	20	20	-
	溶出量 mg/L	<0.005	<0.005	0.008	0.007	0.009	0.3 特記仕様書
水銀	含有量 mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	-
	溶出量 mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.005 特記仕様書
セレン	含有量 mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	-
	溶出量 mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.3 産廃判定基準
ふっ素	含有量 mg/kg	<10	80	40	30	70	-
	溶出量 mg/L	1.7	1.8	1.9	2.1	1.0	-
ほう素	含有量 mg/kg	<10	60	40	50	50	-
	溶出量 mg/L	1.4	1.1	0.9	0.7	0.2	-

注1) 汚入基準は、セメント原料としての工場の受入基準を示す。

その発生量は、処理設備で異物混入土中の水分が揮発し、また有機物の一部がガス化するため、無害化処理設備へ投入した重量（9,248.1t）に対して、7,601.3tと約82%に減量した。

供用中の周辺環境調査結果を表-10 に示す。全ての分析項目で環境基準値等を下回った。また、供用中の排ガス分析結果についても大気汚染防止法及び横浜市条例の基準を下回った。

無害化処理に伴い発生する余剰水は、廃水処理設備で処理した後、公共下水道に放流した。処理水は、何れの分析値も下水の水質基準などを下回る数値であった。

表-10 周辺環境調査結果（供用中）

分析項目	単位	摘要	調査結果		環境基準等
			H24.3.7~13	H25.2.20~26	
二酸化硫黄	ppm	日平均値	0.001~0.003	0.002~0.003	0.02 ¹⁾
		期間平均値	0.002	0.002	
		1時間最大値	0.008	0.008	0.1
二酸化窒素	ppm	日平均値	0.019~0.034	0.014~0.033	0.06
		期間平均値	0.026	0.024	
		1時間最大値	0.048	0.049	0.2
浮遊粒子状物質	mg/m ³	日平均値	0.004~0.035	0.005~0.020	0.1
		期間平均値	0.015	0.013	
		1時間最大値	0.090	0.032	0.2
ダイオキシン類	pg-TEQ/m ³	期間平均値	0.037	0.0069	0.6
塩化水素	ppm	日平均値	<0.0002~0.0011	<0.0002~0.0004	0.02
水 銀	μg/m ³	日平均値	<0.0003~0.0019	0.0010~0.0028	0.04
PCB	μg/m ³	期間平均値	0.000082	0.000102	0.5

注1)横浜市環境目標達成のための指針を示す。

敷地周辺におよぼす騒音、振動、低周波音については、騒音および低周波音調査位置が道路交差点付近であり、自動車騒音（暗騒音）の影響を受けた数値となったが、施設の稼働にともなう騒音レベルを推計した結果、全ての時間帯で規制基準を下回った。

5. 安全対策

本工事の着工準備期間中であった平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災を受け、無害化処理施設の運転に関する安全対策の強化を図った。特に設備に深刻な被害が想定される運転中の地震などによる「電源喪失」を想定した緊急時対応訓練を期間中に 6 ヶ月以内毎に 3 回実施したほか、台風などの強風や大雨などの自然災害、火災や運搬中の汚染物転倒漏洩対応などの訓練を実施し万全を期した。



写真-6 無害化処理設備の解体状況

6. おわりに

鶴見川多目的遊水地土壌無害化処理事業は平成 11 年に PCB などを含む異物混入土が発見されて以来、14 年を要してようやく比較的濃度の高い一時保管土 A の無害化処理および搬出処分の工事を完了した。

工事の実施に当たり、学識経験者や横浜市、周辺住民の方および国土交通省から構成される無害化処理技術評価委員会などの指導を受けながら、市街地において国内初の PCB 廃棄物現地無害化処理を無事終えることができた。

工事中は工所用ゲート部に周辺住民への工事概要や進捗状況の説明看板を設置するとともに、情報公開室を設置して常時無害化処理状況の情報発信を積極的に行った。また横浜市 HP に、廃棄物処理施設の設置許可に関する情報や環境影響評価に関する最新情報を公開しながら工事を実施した。

本工事は、国内で初めての市街地における PCB 廃棄物現地無害化処理工事であったが、大きなトラブルを生じることなく、今回工事の処理対象物の一時保管土 A 全量を処理することができた。

今後も本工事における経験を活かし、安全確実に周辺環境への影響を最小限に抑ながら PCB やダイオキシン類などの難分解性物質に汚染された環境の回復に貢献したいと考える。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局・横浜市：鶴見川多目的遊水地土壌無害化処理事業 環境影響評価書，2010.11
- 2) 轟木朋浩ほか：間接熱脱着＋水蒸気分解法によるダイオキシン類汚染土壌浄化技術，土壤環境センター技術ニュース，No.9，pp.24-29，2004.11
- 3) 中島卓夫ほか：水蒸気分解法の大規模設備による PCB 汚染土壌の浄化，第 15 回地下水・土壌汚染とその防止に関する研究集会論文集，pp.368-373，2009.6
- 4) 国土交通省関東地方整備局・横浜市：鶴見川多目的遊水地土壌無害化処理事業に係る環境影響評価 事後調査結果報告書，2013.12
- 5) 縁田正美ほか：鶴見川多目的遊水地における PCB 廃棄物の現地無害化処理工事，鴻池組技術研究報告 Vol.24，pp.1-8，2014.7

26. バイオディーゼル燃料を使用した場合の排出ガス計測について

車載型排出ガス計測装置を使用した計測事例

(独)土木研究所
(独)土木研究所
(独)土木研究所

○ 杉谷 康弘
藤野 健一
橋本 毅

1. はじめに

建設機械の排出ガス規制では、一律に規定された運転条件での排出ガス値で適合の可否が決定されるため、その値と、実際の稼働時における運転条件での排出ガス値とは、必ずしも一致しない。実際の運転条件によっては、規制値を上回ることもあり得る。そのため、筆者の所属する土木研究所では、建設機械排出ガスの排出実態を調査する方法として、車載型排出ガス計測装置を使用した方法を行ってきている。¹⁾この方法では、建設機械の実際の稼働状態での排出ガス値を計測することが出来るため、実際の現場における様々な条件での排出実態を把握することが可能である。

本論文では、車載型排出ガス計測装置を使用して、燃料にバイオディーゼル燃料を使用した場合の排出ガス値について計測した結果を報告する。

バイオディーゼル燃料は、温室効果ガス低減に資する燃料として、工事現場での使用が見受けられるようになってきているものである。一方、軽油を使用する場合と比較して幾つかの問題点が指摘されている。例えば、エンジン系統に発生する不具合の問題、実際に排出される排出ガスの問題、供給価格や供給量に関する問題等である。その中で、不具合や供給に関する問題については、燃料を使用するユーザ側に影響する問題であるが、排出ガスの問題については、生活環境、従って一般の住民の方々にも影響の及ぶ問題である。そのため、少なくとも排出ガスについては、軽油と比較しての増減の程度を確認しておく必要があると考える。なお、排出ガスの評価をするに当たっては、軽油と異なる点として、次の2点を課題として考慮した。1つ目は、工事現場で使用されているバイオディーゼル燃料が廃食用油を原料にしたものあり、生産者により、その品質が異なる。そのため、排出ガスもそれぞれの燃料で異なる可能性があること。2つ目は、軽油と成分が異なることから、排出ガス規制で指定されている物質以外にも、有害な物質が排出される可能性があることである。

2. 計測方法

2.1 計測の概要

計測対象とするバイオディーゼル燃料は、廃食用油を原料とする生産者の異なる5種類を用意した。また、排出ガス計測装置は、車載型のFTIR方式のものを使用した。この計測装置は、排出ガス規制物質だけでなく、様々な物質についての計測が可能であるという特徴を有している。計測は、排出ガス規制物質、PRTR制度(化学物質排出移動量届出制度)対象物質、温室効果ガスの17種類について行った。なお、計測用の建設機械には不整地運搬車を使用した。以下、計測における各条件等についての詳細を記載する。

2.2 バイオディーゼル燃料

日本国内では、軽油との混合を行わないでバイオディーゼル燃料100%で使用する場合(通常B100と呼ばれる。)の強制規格は定められていない。そのため市場には様々な品質のバイオディーゼル燃料が存在している。計測する燃料の選定に当たっては、建設機械に不具合が生じた場合の損失を考えると、燃料使用者が低品質の燃料を使用することは考えにくいことから、生産者にヒアリングを行い、ある程度の使用実績があり、大きな不具合が発生していないことを確認したものを選定した。また、原料となる廃食用油の回収や販売先への輸送費の観点から地産地消の傾向が強い。そのため、生産者の地域については一部に固まらないように、5つの地方整備局の管内からそれぞれ1つを選定した。表-1に各燃料の品質検査(試験は一般社団法人日本海事検定協会理化学分析センターに委託。)をした一部を示す。表中の協議会規格欄は、民間組織である全国バイオディーゼル燃料利用推進協議会が作成した「バイオディーゼル燃料の製造・利用に係るガイドライン」において規定されている規格値である。強制力は無いが、B100で使用する場合の品質の目安とされている。

2.3 車載型排出ガス計測装置

排出ガス計測装置は岩田電業株式会社の車載型FTIR排出ガス分析装置(機種名FAST-2200)を使

用した。自動車等に搭載することを前提に設計されているものであり、比較的コンパクトかつ堅牢になっている。計測時の振動や衝撃対策として、設置する際には、専用の緩衝バネを持つ取付台を使用する。装置の構成は、筐体 2 個（サンプリングユニット、検出ユニット）、パソコン 2 台、窒素ガスボンベからなっている。電源は、直流電源（DC24V,100Ah）または交流電源（AC100V,15A）で駆動する。同時に 15 種類の成分を 5Hz で連続計測することが可能であり、計測した値は、パソコンの画面でその場でモニターすることができる。また、計測後にサンプルスペクトルを再解析することで、排出ガスに含まれる 240 種類以上の成分を分析することが可能である。表-2 に計測装置の主な仕様を示す。

表-1 バイオディーゼル燃料の品質

項目	単位	5種類のバイオディーゼル燃料					協議会規格
		F1	F2	F3	F4	F5	
エステル分	質量%	94.8	94.7	97.4	97.1	99.4	96.5以上
動粘度(40℃)	mm ² /s	4.291	5.271	4.541	4.555	4.254	3.50以上 5.00以下
水分	mg/kg	1339	350	70	377	413	500以下
メタノール	質量%	0.01 未満	0.03	0.04	0.01 未満	0.02	0.20以下
トリグリセライド	質量%	0.49	0.61	0.75	0.85	0.1 未満	0.20以下
遊離グリセリン	質量%	0.01 未満	0.01 未満	0.01 未満	0.01 未満	0.01 未満	0.02以下
流動点	℃	-2.5	-12.5	-12.5	-7.5	-5.0	気候による
目詰点	℃	-5	-3	-6	-8	-7	気候による

表-2 車載型排出ガス計測装置の主要仕様

項目	仕様	項目	仕様
サンプリングユニット		検出ユニット	
サンプルガスライン	1ライン	測定赤外線波長	400cm ⁻¹ ~7000cm ⁻¹
サンプル流量	5~15L/min	分解能	0.5cm ⁻¹
サンプルライン温度	150℃, 191℃	サンプリング周期	5Hz以下の任意周期
外形寸法(W×D×H)	455×450×365mm	ガスセル容量/温度	200mL/150℃,191℃
重量	48kg	測定光路波長	5.11m
応答速度(T ₀₋₉₀)	2.5秒以内	外形寸法	483×645×311mm
再現性	フルスケールの±1%	重量	50kg
検出濃度限度	表-3を参照	推奨設置環境	5℃~35℃ 相対湿度80%以下

表-3 排出ガス計測成分

項目	排出ガス成分	検出濃度限度目安	項目	排出ガス成分	検出濃度限度目安
排出ガス規制物質	窒素酸化物(NOx)	7 ppm	P R T R 制度対象物質	アクリロイン	13 ppm
	一酸化炭素(CO)	4 ppm		アセトアルデヒド	13 ppm
	炭化水素(HC)	-		エチルベンゼン	6 ppm
	ディーゼル黒煙	(オパシメータ)		キシレン	9 ppm
温室効果ガス	二酸化炭素(CO ₂)	0.30 %		スチレン	7 ppm
	メタン(CH ₄)	2 ppm		1,3,5-トリメチルベンゼン	5 ppm
	亜酸化窒素(N ₂ O)	1 ppm		トルエン	8 ppm
				1,3-ブタジエン	3 ppm
				ベンズアルデヒド	10 ppm
				ベンゼン	30 ppm
			ホルムアルデヒド	2 ppm	

2.4 排出ガス計測成分

サンプルスペクトルの再解析を含めて、表-3 の排出ガス成分について計測を行った。表-3 の右欄の数字は、今回使用した車載型排出ガス計測装置の各成分に対する検出濃度限度の目安（値は目安であり、混合するガス種と濃度により上下する場合がある。）を示している。なお、ディーゼル黒煙については、別途、オパシメータ（光透過式スモークメータ）（株式会社堀場製作所 MEXA-600SW）を使用して計測した。

2.5 不整地運搬車

計測には、ヤンマー建機株式会社ゴムクローラキャリア（機種名 C30R）を使用した。搭載エンジンは、平成 18 年排出ガス規制対応の定格出力 25.4kW/3000min⁻¹、自然吸気 3 気筒直噴型（名称 3TNV88-BDFW）のもので、コモンレールや EGR、酸化触媒、DPF 等は装備していない。

2.6 その他の計測機器等

車載型排出ガス計測装置の他に、排出ガス流量計（株式会社堀場製作所 OBS-1000 のピトー管式排出ガス流量計測機能を利用。）、燃料流量計（株式会社小野測器 MF-3200）、エンジン回転計（株式会社小野測器 GE-2500）を搭載した。また、これらの電源としてインバータ発電機（定格出力 2.0kVA）を搭載した。不整地運搬車の荷台に計測機器等を搭載した状況を写真-1 に示す。



写真-1 計測装置の不整地運搬車への搭載状況

2.6 運転方法

排出ガスの計測は、不整地運搬車を平坦なアスファルト舗装の上を走行させて行った。今回使用した不整地運搬車では、操作条件が変わる要因として、アクセルペダルによるエンジン回転数の変更と、レバーの切り替えによる中立（ニュートラル）・低速走行モード・高速走行モードの変更がある。これらを組み合わせた不整地運搬車の運転条件（エンジンの運転条件）を表-4 に示す。それらの運転条件を順番に一通り行い、最後の運転条件

が終わったら、再度最初の運転条件から繰り返すことで、それぞれの運転条件に付き 3 回分のデータが得られるようにした。

なお、一つの燃料の計測が終了後、別の燃料に入れ替える作業は次のとおり行った。燃料タンク、ウォーターセパレータ、燃料ホース、燃料流量計内に残っている分については、可能な限り燃料を除去した。また、燃料フィルタは燃料毎に交換を行った。新しい燃料を入れた後、しばらくエンジンを運転し、エンジンからリターンしてくる分を燃料タンクに戻さずに破棄した。その後、ホースを通常の配管に戻し、十分に運転を行ってから新しい燃料の計測を行った。

表-4 不整地運搬車の運転条件

運転条件	運転条件の記号	エンジン回転数	走行操作レバー
エンジン低回転でのアイドリング	LI	低	中立
エンジン中回転でのアイドリング	MI	中	中立
エンジン中回転での低速走行	MS	中	低速
エンジン中回転での高速走行	MF	中	高速
エンジン高回転でのアイドリング	HI	高	中立
エンジン高回転での低速走行	HS	高	低速
エンジン高回転での高速走行	HF	高	高速

3. 測定結果

3.1 排出ガス規制物質

窒素酸化物、一酸化炭素、炭化水素の排出ガス濃度を図-1～図-3 に示す。横軸の各記号は表-4 の運転条件の記号である。各プロットは燃料毎の値を示しており、凡例の FK は軽油を、F1～F5 は表-1 の各バイオディーゼル燃料である。なお、軽油との比較をわかりやすくするため、軽油については各プロットを線で結んでいる。

ディーゼル黒煙の値（光吸収係数）を図-4 に示す。横軸の各記号は各燃料を示す。なお、光吸収係数は、値が大きいほどディーゼル黒煙濃度が高いことを意味する。

3.2 PRTR 制度対象物質

ホルムアルデヒドの排出ガス濃度を図-5 に示す。表の見方は窒素酸化物等と同様である。また、各燃料に含まれるメタノールの濃度に対するホルムアルデヒドの濃度を図-6 に示す。凡例に示す運転条件毎に近似直線を記入しているが、直線が右肩上がりならば、メタノール濃度とホルムアルデヒド濃度に正の相関があることを意味する。

なお、ホルムアルデヒド以外の PRTR 制度対象物質については、今回使用した計測装置の検出濃度限度を超えた値は計測されなかった。

3.3 温室効果ガス

二酸化炭素及びメタンの排出ガス濃度を図-7 に示す。亜酸化窒素は検出濃度限度以下であった。

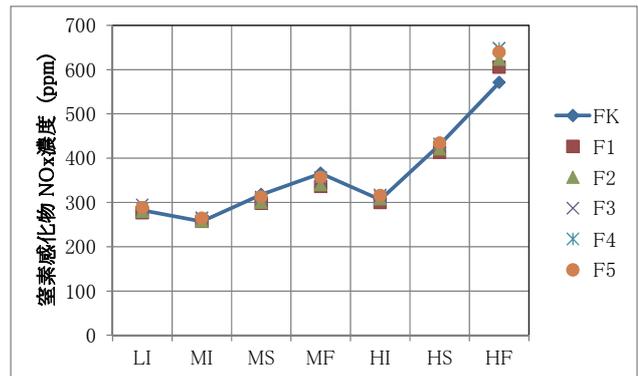


図-1 窒素酸化物濃度

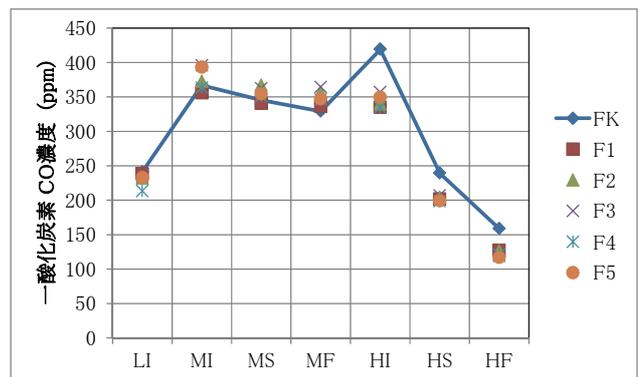


図-2 一酸化炭素濃度

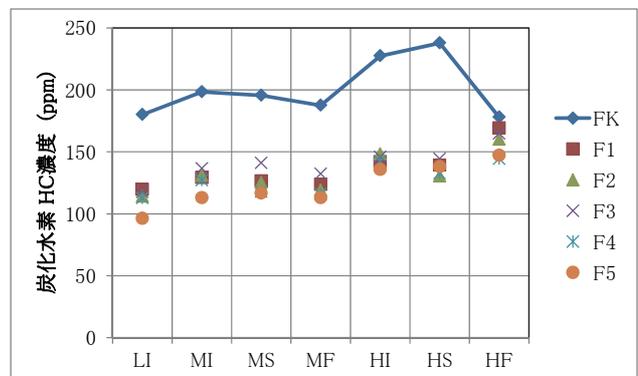


図-3 炭化水素濃度

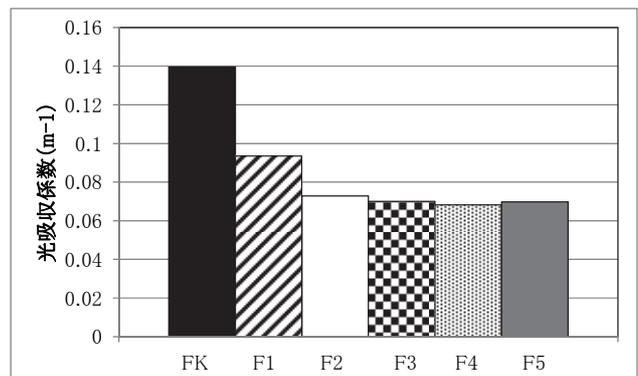


図-4 ディーゼル黒煙濃度

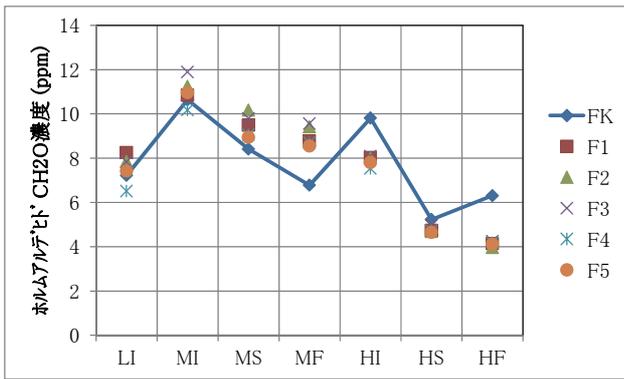


図-5 ホルムアルデヒド濃度

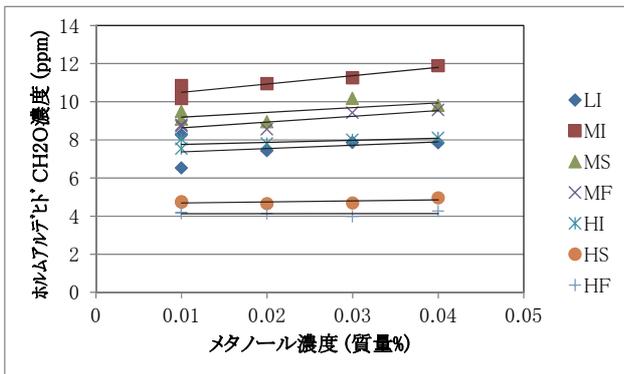


図-6 メタノール濃度とホルムアルデヒド濃度の相関

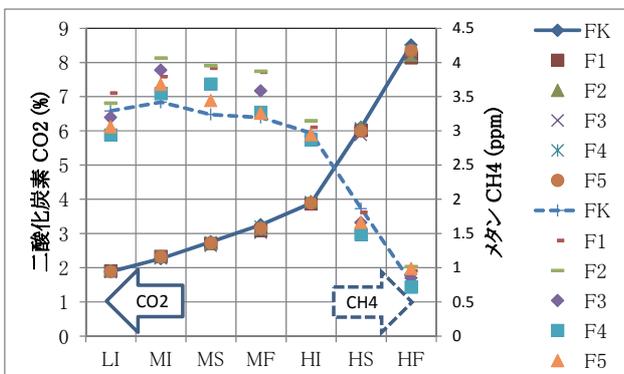


図-7 二酸化炭素濃度・メタン濃度

4. 考察

異なる5つのバイオディーゼル燃料の排出ガスについて、次のことを確認することができた。

まず排出ガス規制物質であるが、窒素酸化物については、5つの燃料とも同様の傾向を示し、軽油とも同様の傾向であった。ただし、負荷を大きくかけた場合（今回は高速走行時）に軽油よりも高い濃度値を示し、最も高くなる燃料では約14%高くなった。それ以外の運転条件では同程度の濃度である。一酸化炭素についても、5つの燃料とも同様の傾向を示し、軽油とも同様の傾向であった。ただし、窒素酸化物とはむしろ逆で高速走行時を含むエンジンが高回転の運転条件で軽油より

も濃度が低くなった。炭化水素については、5つの燃料とも同様の傾向を示すが、高速走行時に軽油では濃度が下がるが、バイオディーゼル燃料では逆に上がるという、逆の傾向が見られた。なお、どの運転条件でも軽油よりも濃度は低かった。ディーゼル黒煙については、5つの燃料とも軽油よりも濃度が低くなるという同一の傾向であった。

次にPRTR制度対象物質についてであるが、ホルムアルデヒドについては、5つの燃料とも同様の傾向を示した。軽油との比較では運転条件により濃度が高い場合と低い場合があり、全体としてどちらかが高いかは判断しづらい程度の差であった。また、5つの燃料ではメタノールの濃度に差があるが、その差によるホルムアルデヒドの増加量は僅かであった。その他の成分については、検出濃度限界以下であったため、今回は評価することができなかった。

また、温室効果ガスについては、二酸化炭素、メタンとも5つの燃料で同様の傾向を示した。亜酸化窒素については検出濃度限界である1ppm以下であった。軽油との比較では二酸化炭素が同等で、メタンでは軽油よりも1ppm弱高い濃度を示した。メタン、亜酸化窒素の地球温暖化係数はそれぞれ二酸化炭素の21倍、310倍であるが、二酸化炭素濃度が%オーダーであるため、温室効果ガス全体としては同等と判断される。

全体として、今回計測に使用した5つのバイオディーゼル燃料については、特に異なる排出ガス特性を示すものは無く、軽油と比較して際立って濃度の高い排出ガス成分も計測されなかった。今回の計測結果で全ての燃料について照明されたわけではないが、バイオディーゼル燃料の品質が今回使用した燃料程度のものであれば、同様の結果が得られるものと予想される。ただし、不整地運搬車以外の建設機械、またコモンレールやEGRを装備したエンジンを搭載した建設機械での評価も必要であると思われる。

4. おわりに

今回はバイオディーゼル燃料に関する計測を行ったが、建設機械排出ガスに関する課題はまだ残っている。例えば、酸価触媒の使用による窒素酸化物に占める二酸化窒素割合の増加や、尿素SCRの使用によるアンモニアや亜酸化窒素の排出等が懸念されている。土木研究所においては、これらの実態把握を引き続き行い、大気環境の改善に貢献したいと考えている。

参考文献

- 1) 杉谷・藤野・西山：車載型排出ガス測定装置の有効性について、建設機械, Vol.50 No.8, pp.14~18, 2014

27. ドラグ・ショベルの斜面降下走行に関する基礎的検討

(独)労働安全衛生総合研究所 ○堀 智仁
(独)労働安全衛生総合研究所 玉手 聡

1. はじめに

建設機械等による死亡災害は年間約80人であり、労働災害の約1割を占める。建設機械の中でも、ドラグ・ショベルに代表される掘削用機械による災害が最も多い。過去に発生した、同種機械による労働災害の分析結果より、事故の型別で比較すると「はさまれ、巻き込まれ」による災害が最も多く、次いで、「激突され」、「墜落、転落」の順となっている。「墜落、転落」災害では、斜面から機械とともに転落する災害が最も多く、機械の安定度（限界傾斜角）よりも緩い斜面を走行中に転落する事例も見受けられた。このような、機械の転倒メカニズムについては明らかになっていないのが現状である。そこで、本研究では、掘削用機械の斜面走行時における転倒災害の防止を目的に、ドラグ・ショベルの小型モデルを作製して、遠心模型実験を実施している。本稿では、斜面降下実験の結果について報告する。

2. 遠心実験用小型モデルの製作

ドラグ・ショベルによる転倒・転落災害の調査結果¹⁾から、バケット容量0.2m³未満の小型の機械による災害が大部分を占めていることがわかった。そこで、本研究では、小型の機種²⁾のモデルを作製することとした。

10Gの遠心場で走行実験を行うことを想定し、実機の約1/10スケールで製作した。なお、モデルの重心位置が実機と等しくなるよう、バッテリーや

モータ、減速機等を配置した。

図-1に製作した模型を示し、表-1に実機と模型の諸元の比較を示す。両者を比較すると、実機の前方安定度が42.2度であるのに対して、模型の前方安定度が49.4度であった。実機に比べ、模型の安定度がやや高くなっている。すなわち、実機に比べ模型はより安定性が高い。一方、接地圧については、遠心力下での接地圧はほぼ等しくなっている。

図-2に模型の概要を示す。小型モータを2個搭載し、左右の履帯を独立して駆動させることが可能である。モータ軸にはピニオンギアが備わり、減速機に備え付けたスパーギアと接続する。モータの回転数は、モータに備わる回転センサーの情報³⁾を制御して、走行速度および模型が直線的に走行するための制御を行っている。

制御ボックスには、前述のモータ回転数を制御するための電子回路と、模型をワイヤレス操作するための命令信号を送受信する電子回路が備わる。

3. 実験の概要

本実験では労働安全衛生総合研究所が有する遠心模型実験装置 NIIS Mark-II Centrifuge（最大遠心加速度100G、有効半径2.3m）を使用した。図-3に遠心模型実験の概要を示す。模型の操作は無線通信により操作する。模型を操作する送信機はコ

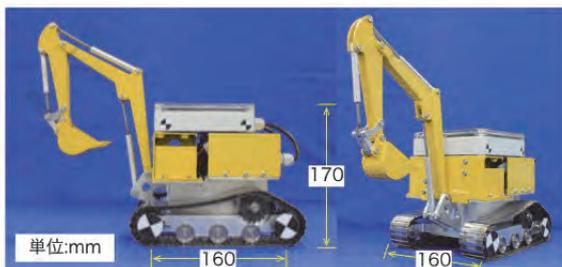


図-1 ドラグ・ショベル模型

表-1 実機と模型による主要諸元の比較

	実機		模型	
	水平 x(m)	鉛直 y(m)	水平 x(m)	鉛直 y(m)
重視距離	0.24	0.81	0.01	0.06
合計重量	46.16kN		38.56N (10G場では385.76N)	
平均接地圧	40.4kPa		40.2kPa(10G場)	
安定度	前方	後方	前方	後方
	42.2度	57.3度	49.4度	56.3度

※水平方向の重心位置は旋回中心を基準にして前方を(+)で示している。

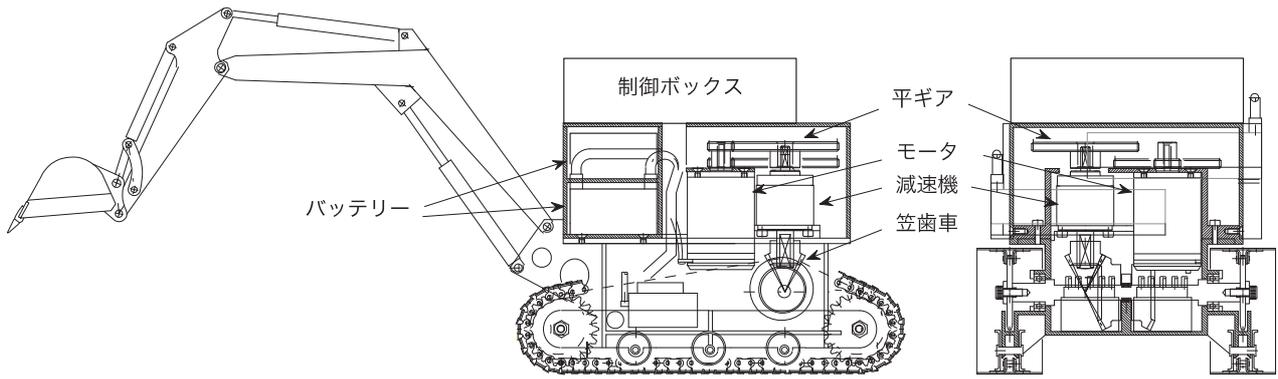


図-2 ドラグ・ショベル模型の概要

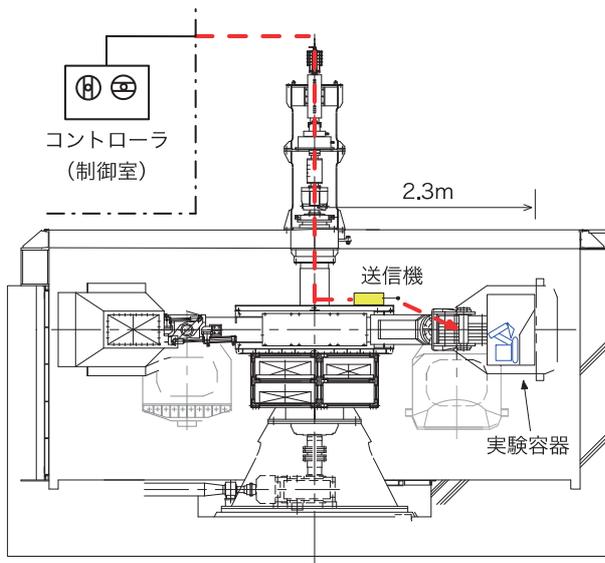


図-3 遠心模型実験装置の概要

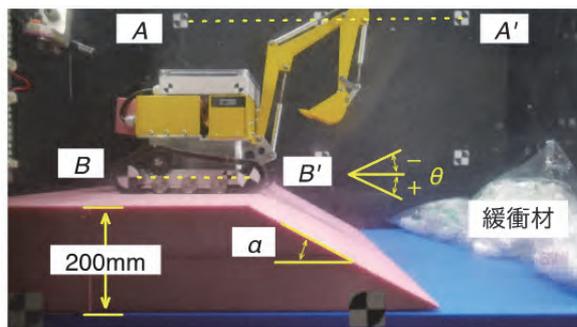


図-4 斜面降下実験の概要

ントローラと分離した構造となっている。このコントローラと送信機はスリッピングを介して接続されている。

図-4 に実験の概要を示す。斜面降下実験では、斜面の天端より模型を走行させて斜面を降下させた。斜面の傾斜は4種類 ($\alpha=15, 20, 25, 30$ 度) とし、高さは200mm (実大換算 2m) である。走行速度 V は 0.03m/s (実大換算 0.108km/h) および 0.09m/s (実大換算 0.324km/h) とした。さらに、進

行方向の違いによる影響を調べるため、 $\alpha=30$ 度において、後進により斜面を降下する実験も行った。

模型地盤の作製には、強度の異なる2種類の発泡ポリエチレン (Expanded Poly-Ethylene) を用いた。本研究では、強度の高い方を EPE-1(極限支持力 $P_u=100\text{kPa}$) と定義し、強度の低い方を EPE-2($P_u=33\text{kPa}$) と定義した。EPE は均質な材料であるため、実験の再現性を確保する目的で使用した。

計測については、走行挙動を高速度カメラ (nac 社製) とデジタルカメラ (Panasonic 社製) で撮影し、動画を解析して模型の揺動を求めた。解析では、実験容器の壁面に設置した2つのターゲットマーカを結ぶ測線 A-A' と、模型の車軸部分に設置した2つのマーカを結ぶ測線 B-B' とのなす角 θ を求めた。なお、高速度カメラの撮影速度は 500 フレーム/秒 (解像度 512×512) であり、デジタルカメラは 60 フレーム/秒 (解像度 1920×1080) である。

4. 実験結果

4.1 高速度カメラとデジタルカメラの比較

図-5 に高速度カメラとデジタルカメラで撮影した動画の解析結果の比較を示す。図中に示した実験条件は、EPE-1 における $\alpha=25$ 度である。また、図中のデータは実大スケールに換算した値で示している。極性については機体が前方に傾斜する方向を+ (プラス) とした。

高速度カメラとデジタルカメラの結果はほぼ一致しており、デジタルカメラによる収録 (60fps) でも解析可能であることが確認された。このことから、本研究では解析精度向上を見込めるデジタルカメラのデータを解析することとした。

4.2 実験結果の一例

図-6 に機体傾斜角 θ および角速度 ω の時刻歴を示す。天端走行中 ($t_e=0 \sim 38\text{sec}$) は機体傾斜角 θ の変動はほぼゼロである。模型が法肩を通過して

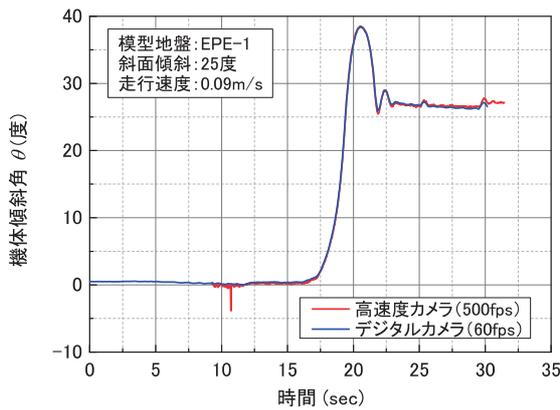


図-5 解析結果の比較

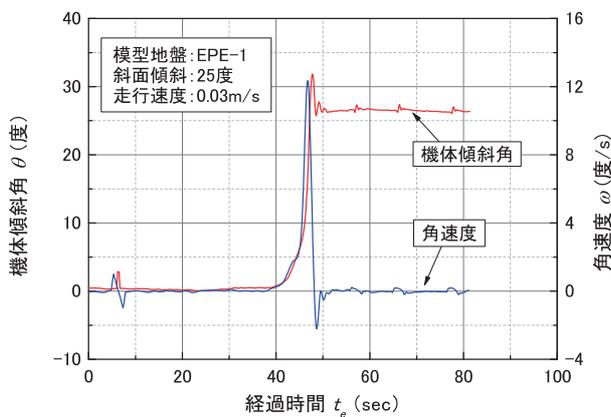


図-6 実験結果の一例

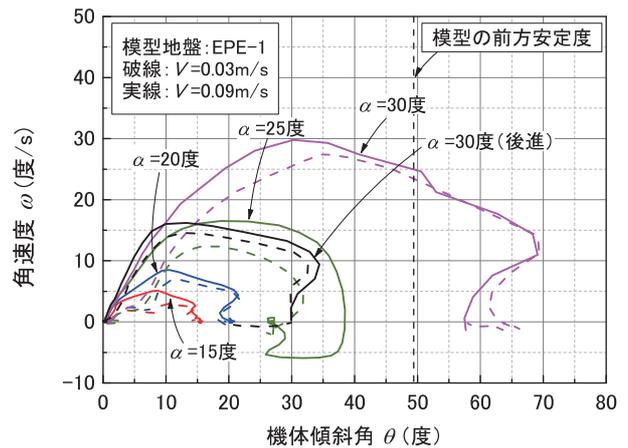
斜面上を走行した際 ($t_e=39\text{sec}$) には、 θ および ω は大きく変動している。その後、斜面上の走行 ($t_e=50\text{sec}$) では、 ω はほぼゼロとなり、 θ も変動が少ない。

4.3 機体傾斜角と角速度の関係

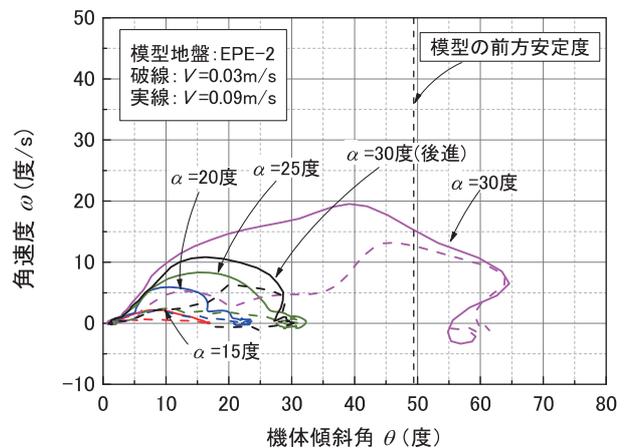
図-7 に各実験条件での機体傾斜角 θ と角速度 ω の関係を示す。図中の破線は $V=0.03\text{m/s}$ の結果であり、実線は $V=0.09\text{m/s}$ の結果をそれぞれ示している。

斜面傾斜 $\alpha=30$ 度では、前進により斜面を降下した場合、地盤条件の違いにかかわらず θ は模型の前方安定度 (49.4 度) を上回り、模型は転倒した。このことから、機械の安定度より緩い斜面においても転倒することが確認された。一方、後進により斜面を降下した場合、転倒することなく斜面を降下することが可能であった。前進で降下した場合の結果と比較すると、後進による θ および ω ともに前進のそれに比べ小さくなっている。前後方向で安定度は異なるものの、進行方向の違いにより安全性に大きな差があることが確認された。

速度の違いによる比較をすると、すべての条件において、実線で示した $V=0.09\text{m/s}$ の角速度の最



(a) EPE-1



(b) EPE-2

図-7 機体傾斜角 θ と角速度 ω の関係

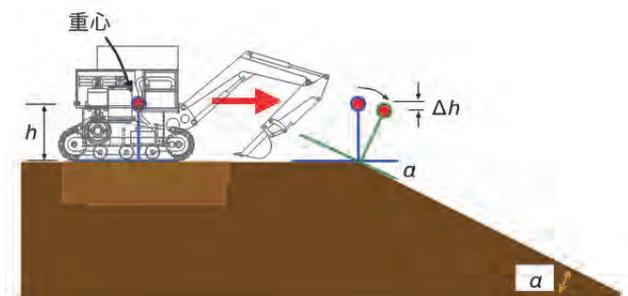


図-8 斜面降下時の重心位置の移動

大値 ω_{\max} が大きくなっている。すなわち、斜面を降下する際、速度が速いと機械がより不安定化することを意味している。

また、 ω_{\max} は、斜面傾斜 α の増加に伴って大きくなっている。ドラグ・ショベルのような履帯式の走行装置を有する機械が斜面を降下する場合、重心が法肩を通過した直後に機体が傾き始め、自由落下を伴うような急激な機体傾斜 θ が発生する。そのため、 α の増加に伴って、 ω が大きくなったと考えられる。

表-1 斜面傾斜と Δh および角速度 ω_{cal} の関係

斜面傾斜 α	Δh (cm)	角速度 ω_{cal} (度/s)
15	2.04	60.47
20	3.62	80.45
25	5.62	100.27
30	8.04	119.90

図-8に斜面降下時の重心位置の移動を示す。斜面降下時の重心の高さ方向の移動量 Δh は次式によって求めることができる。

$$\Delta h = h - h \cos \alpha \quad (1)$$

ここで、 h は履帯底面から重心位置までの距離である。

傾斜により、位置エネルギー Δh が角速度 ω の運動エネルギーに保存されるためその関係式は次式のとおり表される²⁾。

$$M \cdot g \cdot \Delta h = \frac{1}{2} \cdot M \cdot h^2 \cdot \omega^2 \quad (2)$$

ここで、 M は模型の質量、 g は重力加速度、 h は回転半径である。

式(2)から、角速度 ω_{cal} は次式によって求めることができる。

$$\omega_{cal} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\Delta h}{h^2}} \quad (3)$$

表-1に、斜面傾斜角 α と Δh および ω_{cal} を示す。本研究では、実験で計測した最大角速度 ω_{max} と Δh から算出した角加速度 ω_{cal} の比を角速度比 R_ω と定義した。 R_ω は次式で表される。

$$R_\omega = \frac{\omega_{max}}{\omega_{cal}} \quad (4)$$

図-9に斜面傾斜 α と角速度比 R_ω の関係を示す。強度の低いEPE-2については、 $\alpha=15\sim 25$ で R_ω は1以下となっており、 ω_{max} は ω_{cal} より小さくなっている。これは、地盤の支持力($p_u=33\text{kPa}$)に比べて模型の接地圧($p=40.2\text{kPa}$)が高く、法肩部に模型が位置した際に、履帯直下に沈下が生じる。それにより実際の Δh は小さくなるため、 ω_{max} が ω_{cal} より小さくなったと考えられる。一方、強度の強いEPE-1の R_ω は1に近い値であり、 ω_{max} と ω_{cal} はよく対応している。

$\alpha=25$ 度における $V=0.09\text{m/s}$ の R_ω は約1.7と大き

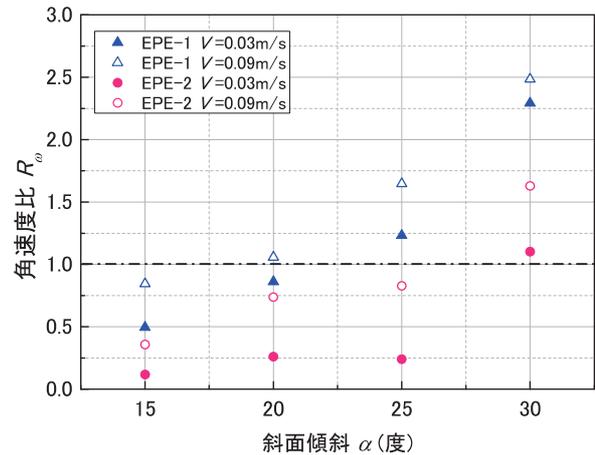


図-9 斜面傾斜と角速度比 R_ω の関係

い値を示している。図-7(a)に示した結果から、当該条件では部分的に $\alpha < \theta$ となっており、かつ、 ω の一部がマイナスとなっている。これは、履帯後部が浮き上がった後に復原力で元の状態に戻ったことを意味しており、転倒の危険性が高かったことを意味している。このことから、 R_ω が大きくなったと考えられる。なお、転倒した $\alpha=30$ 度では、すべての結果において、 R_ω は1より大きな値となっていた。

5. まとめ

ドラグ・ショベルの小型模型を作製し、遠心場において斜面を降下する実験を行った。実験により得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 機械の安定度よりも緩い斜面で、機械が転倒することが確認された。
- 2) 斜面降下時には、なるべく速度を低下させる必要がある。
- 3) 斜面を降下する場合、前進により斜面を降下するよりも、後進により斜面を降下する方が安全であることが確認された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、日立建機株式会社生田正治氏にご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉川直孝・伊藤和也・堀智仁・清水尚憲・梅崎重夫・濱島京子：ドラグ・ショベルに係る死亡災害の調査分析，安全工学シンポジウム2013年講演予稿集，pp.396～399，2013。
- 2) 前田豊・井上威恭：動的転倒に対する検討，安全工学，Vol.12，No.3，pp.198～202，1973。

28. 大型建設機械等の設置における簡易な現場地耐力試験の提案

(独)労働安全衛生総合研究所 ○玉手 聡
同 上 堀 智仁
(株)竹中工務店東京本店 錦古里洋介

1 はじめに

移動式クレーンを含めた大型の建設機械の転倒防止には支持地盤の安定確保が不可欠である。しかしながら、作業現場の地耐力は目視や踏査によって経験的に判断される場合も多く、その判断を誤ったことによる写真-1のような転倒事故がたびたび発生している¹⁾。本研究ではこのような転倒災害の防止を目的に、作業現場において簡易に実施可能な地耐力試験の方法を検討した。その方法をここでは現場地耐力試験²⁾と呼び、以下では、BCTと略して言う。BCTはドラグ・ショベルなどの建設機械の自重を反力とし、載荷板を介して荷重を静的に載荷する試験であり、試験時間が10分から20分程度の短時間で終了することを特徴とする。本研究では、BCTの適用性を調査することを目的に、地盤条件が異なる5カ所の現場で試験を行った。この試験では平板載荷試験の結果との比較を行うとともに、BCTの載荷速度の違いが結果に与える影響も調査した。本論文では、一連の試験から得られた結果を示し、その結果に基づいてBCTによる簡易な地耐力確認の実施を提案する。

2 現場地耐力試験の概要

2.1 試験方法の検討

表-1は平板載荷試験²⁾(以下、PLTと言う)と現場CBR試験²⁾とBCTの比較を示す。PLTはJISと地盤工学会で標準化されている試験法であり、地盤の支持特性を直接的に調査するものである。PLTは、直径300mmの載荷板から作用する載荷圧力 q と変位量 S の関係から地盤の支持特性や変形特性を求分割して行う載荷試験である。しかしながら、各段階では荷重を30分保持する必要があるため、実施には少なくとも2.5から4時間を要することとなる。そのため、建設機械等を設置する度毎にこれを実施することは、現実的には困難という問題があった。

現場CBR試験(以下、CBRと呼ぶ)では、直径50mmの載荷板を1mm/分の一定速度で貫入させ、貫入量が2.5mmと5.0mmの時の載荷圧力を記録する。したがって、試験に要する時間は5分と短



写真-1 移動式クレーンの転倒事故

く、効率性が高い。しかしながら、載荷板が小さいために評価範囲はPLTよりも狭く限定されるという問題があった。そのためCBRは通常、道路施工における路床と路盤の品質管理に用いられている。

今回の地耐力確認ではPLTに準じた性能を目標としたことからBCTでは、載荷板の形状と大きさをPLTと同じ直径300mmのものとした。ただし、試験時間を短縮するために、載荷方法はCBRの変位制御を参考とし、BCTでは変位速度の標準値を5mm/分に設定した。この値はCBRの1mm/分に対して、BCTとCBRの載荷板の直径比が6倍であることなどを考慮したものである。これによって、BCTの試験時間は10分から20分程度となり、PLTに比べて大幅な時間短縮が可能となった。以上のように、BCTはPLTとCBRを応用した方法であり、地耐力評価の基本的な部分についてはPLTに準じている。

2.2 試験装置と試験方法

図-1は試作したBCT装置を示す。詳細は既報³⁾に譲り、ここではその概要を述べる。本装置には載荷と計測の両機能が車輪付きの架台にユニット化して搭載されており、手押しで現場内を自在に移動できるようになっている。載荷ジャッキは電動モーターで動作する仕組みである。ジャッキはシリンダーAとシリンダーCがそれぞれ上下に伸張する構造であり、上昇した反力板はドラグ・ショベルなどの建設機械の下部走行体に接合する。これによって、載荷板にはその自重を反力とした荷重が

表-1 平板載荷試験と現場 CBR 試験と現場地耐力試験の比較

	平板載荷試験(PLT) JGS 1521:2012	現場 CBR 試験(CBR) JIS 1222:2013	現場地耐力試験(BCT) <今回提案>
載荷板	直径 300mm の円形	直径 50mm の円形	直径 300mm の円形
載荷方法	荷重制御 (計画最大荷重を 5 から 8 段階で載荷)	変位制御 (1mm/min)	変位制御 (5mm/min)
反力装置	実荷重又はアンカー	実荷重(ダンプトラックなど)	実荷重(建設機械)
沈下量	基準よりから載荷板上の 4 点の沈下を計測	架台に対する貫入ピストンの変位を 2 点で計測	載荷ジャッキの伸張量から建設機械の浮き上がり量を補正して計算
所要時間 (1箇所)	2.5 時間～4 時間	5 分	10 から 20 分

作用する。この荷重を載荷板の面積で除した値が載荷圧力 q である。

BCT 装置は、図-2 に示すように建設機械の後部(カウントウエイト側)から手押しで挿入して設置できるようになっており、PLT で行われる建設機械下部における装置の組み立て作業は不要である。ジャッキのストローク量 s_c は変位計で直接測定するが、載荷板の沈下量 S については図 3 に示すように、反力として用いるドラグ・ショベルの浮き上がり s_R を差し引く補正が必要である³⁾。

3 現場試験

3.1 試験の概要と地盤条件

現場試験を行った BCT と PLT の実施条件とデータ名称の一覧を表-2 に示す。各試験は 5 つの現場(GB1 から GB5)で実施したが、この中の GB1 と GB2 では、表面での載荷と約 0.5m 掘削した底面での載荷の両方を実施した。また、PLT については、GB1 を除く全ての現場で実施し、BCT の結果と比較した。さらに、GB1 から GB3 の BCT では、ジャッキの変位速度 v_c を標準値の 5mm/分に加えて 1mm/分でも実施した。これは、BCT の結果に与える v_c の影響を PLT も含めて比較するためであった。地盤の N 値と土質分布を図-3 に示す。GB1 と GB2 は同一運動グラウンド内の約 100m 離れた場所であり、両地盤の N 値と土質は類似している。GB1 と GB2 は元の地山の上部に砂が約 0.3m 厚で盛土されており、その表面には芝が植えられていた。この砂層下の地山は、礫混じりの粘土と砂であった。地下水位については、深さ 9.6m の低い位置に存在したが、試験への影響は無視できるものであった。次に、GB3 は軟弱なシルト質の地盤であり、地下水位も深さ 1.3m と浅い。さらに載荷面は-0.5m の掘削した面であったことから、水位までの距離は 0.8m に接近していた。一般的にシルトの透水係数は 10^{-3} から 10^{-7} cm/秒程度⁴⁾ と言われ、その透水性は低い。したがって、GB3 では水の影響を調査する条件の試験であった。GB4 と GB5 については図に示さないが、GB4 は地表面から深さ約 4m

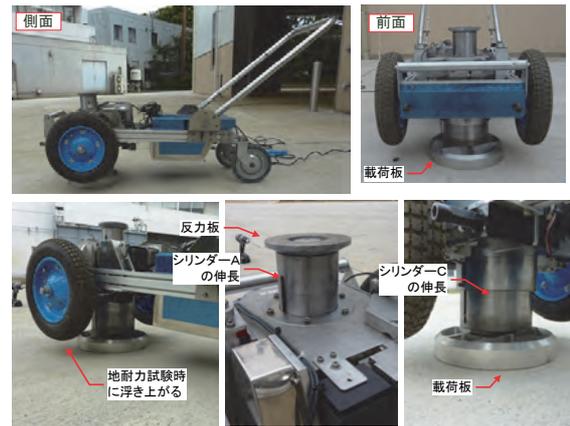


図-1 現場支持力試験(BCT)装置の概要

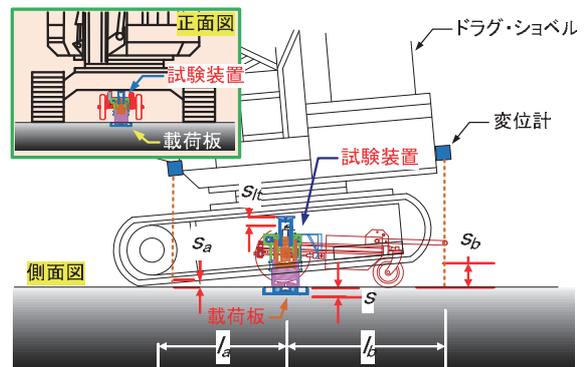


図-2 機体の浮き上がり補正の方法

までがコンクリート層やガレキ混じりの砂質土であり、その N 値は 3 から 11 であった。その下部には N 値が 5 程度の粘土層が 5m 分布し、地下水位は地表から 4.7m の深さに存在した。この現場ではその後、表層 0.5m から 1m までの部分がセメント安定処理(N 値不明)されており、後述する BCT と PLT はこの処理後に実施したものである。GB5 は、表面から深さ約 4m までの部分がコンクリートガラやがれき、ならびに碎石が砂と混合した埋め戻し土であった。この土はよく締め固まった強固な地盤であり、N 値は 10 から 20 であった。その下部層は N 値が 2 程度の軟弱なシルトが厚く堆積しており、地下水位は地表から 1.3m の深さにあった。

表-2 現場地耐力試験(BCT)と平板载荷試験(PLT)の実施条件とデータ名称

現場名	GB1		GB2		GB3	GB4	GB5	
載荷面	表面	-0.5m 面	表面	-0.5m 面	-0.5m 面	表面	表面	
面の状態	芝	玉石混じり	芝	玉石混じり	軟弱シルト	セメント安定処理	表層埋戻し	
BCT	5mm/分	BCT1_a	BCT1_c	BCT2_a	BCT2_c	BCT3_a	BCT4	BCT5
	1mm/分	BCT1_b	BCT1_d	BCT2_b	BCT2_d	BCT3_b		
PLT(段階载荷)			PLT2_a	PLT2_b	PLT3	PLT4	PLT5	

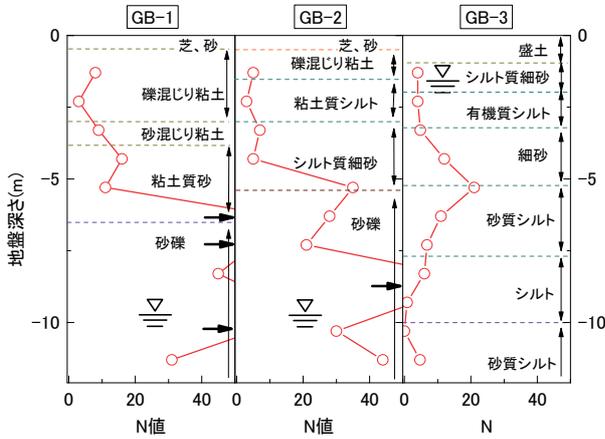


図-3 試験地盤のN値と土質(GB1からGB3)

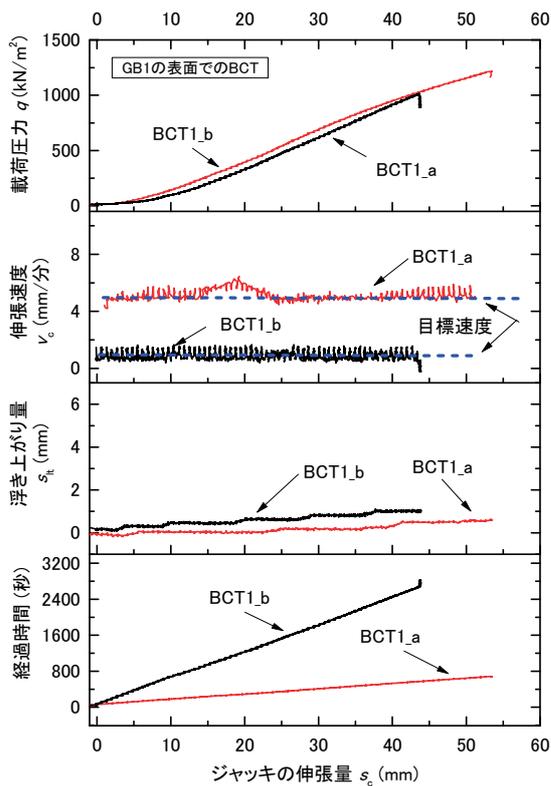
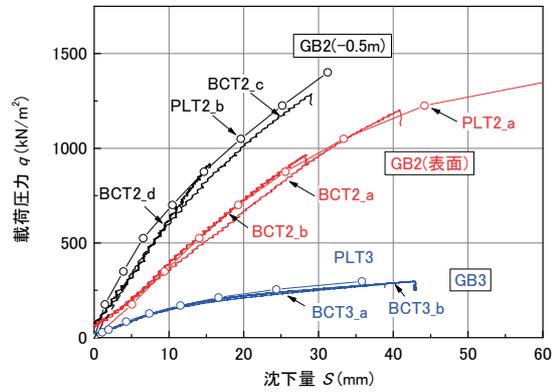


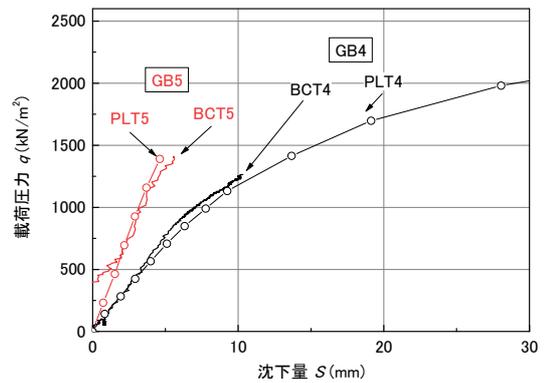
図-4 BCT1_aとBCT1_bでのジャッキの伸張量に対する各反応の比較

3.2 現場地耐力試験における载荷の状況

図-4はGB_1におけるBCT1_aとBCT1_bについて、ジャッキの伸張に対する各反応を示す。s_cの増加に対するqの増加では曲線がほぼ一致している。経過時間とs_cの関係を見るとほぼ直線となっ



a) GB2とGB3の結果



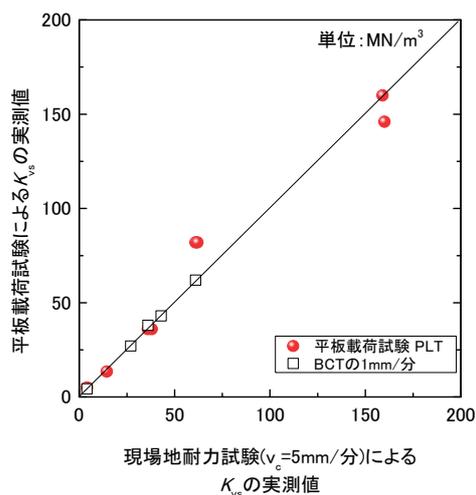
b) GB4とGB5の結果

図-5 現場地耐力試験と平板载荷試験のq-S関係の比較

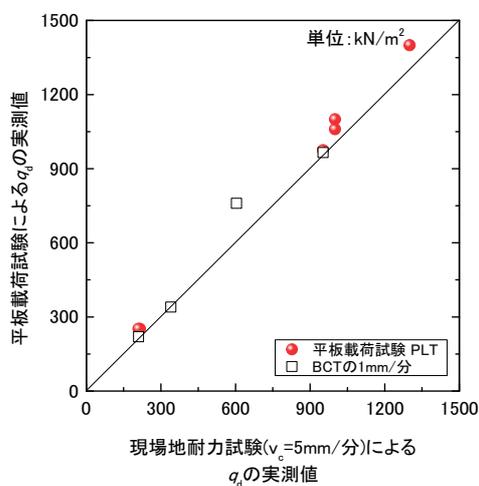
ており、異なる速度で一定した伸張が行われたことがわかる。BCT1_aとBCT1_bの両試験ではv_cの目標速度をそれぞれ5mm/分と1mm/分に設定したが、実測値は目標値とほぼ一致している。s_cの増加に伴ってs_{ft}も増加しているがその最大値は1mm程度と小さい。これは、今回用いたドラグ・ショベルの重量が大きかったために、機体の浮き上がりは少なくなったためと思われる。

3.3 現場地耐力試験と平板载荷試験の結果比較

図-5はBCTとPLTから得られた载荷圧力qと沈下量Sの関係を示す。BCTについては先に述べたとおりジャッキの伸張速度v_cが5mm/分と1mm/分で異なる場合の結果も示している。図-5a)に示した曲線は地盤種類の違いに応じて3つのグループに曲線群は分かれている。したがって、支持力が異なる地盤で得られたBCTとPLTの結果は、各グループ内でほぼ一致しており、試験方法は異なっ



a) 極限支持力 q_d の比較



b) 地盤反力係数 K_{vs} の比較

図-6 BCTとPLTによる K_{vs} と q_d の比較

でも同じ結果が得られたことがわかる。特に、GB3では載荷面の約0.8m下に水位が存在する条件であったが、比較した v_c の範囲で3つの曲線はほぼ重なっている。先にも述べたとおり、飽和したシルト地盤では v_c の差によって土の排水条件にも違いを生じ、 q - S 曲線は異なって現れることを当初予想したが、実際の結果はほぼ同じであった。したがって、シルトのように透水係数が低い軟弱な地盤においても $v_c=5\text{mm/分}$ の条件では、土の排水条件に顕著な差は生じず、PLTと同様な結果が得られることがわかった。図-5b)は表層をセメント安定処理したGB4と、コンクリート屑とともに表土を埋め戻したGB5の結果を示す。先の図-5a)に比べて支持力が高い地盤での比較であるが、BCTとPLTの結果は同様に一致している。以上のように、BCTとPLTでは試験時間に大きな差があっても、載荷速度も大きく異なる条件であったが、得られた q - S 関係は調査した条件の範囲ではほぼ一致することが明らかとなった。

図-6はBCTとPLTによる地盤反力係数 K_{vs} と極限支持力 q_d の比較を示す。この K_{vs} と q_d の値は地盤工学会基準に示された方法にしたがって求めた。図-6a)の K_{vs} を見るとBCT($v_c=5\text{mm/分}$)とPLTの値は45度の直線付近に分布しており、両試験の結果はほぼ1:1の関係にある。また、BCTの v_c が1mm/分の結果についても同様であり、値は45度の直線付近に分布している。また、図-6b)の q_d についても同様な結果が現れており、載荷速度をCBRと同レベルに早めて行ったBCTの結果はPLTのそれとほぼ一致することがわかった。以上より、BCTの試験時間は、 $v_c=5\text{mm/分}$ の場合では10分から20分であり、これはPLTの2.5時間~4時間に比べて2/15以下の短時間である。したがって、BCTは大型建設機械等の設置に際して実施可能な、地耐力確認の方法であると考えられる。

4 まとめ

本研究では、平板載荷試験(以下、PLTと言う)をスピードアップして行う現場地耐力試験(以下、BCTと言う)を考案し、さらにその準備と計測を簡単なものとする装置についても検討した。この方法と装置の適用性を確認するために現場試験を行ったところ、まず、コンクリート屑やガレキ混じりの表層を締固めた地盤とこれをセメント安定処理した地盤では、BCTとPLTの結果がほぼ一致した。次に、最も不利と思われた地下水位が載荷面近くに存在したシルト地盤でもBCTとPLTの結果は一致し、さらに、地盤の一様性が高い運動グラウンドでも同様の結果が得られた。以上より、作業現場の地耐力をBCTによって確認することは安全上有効なことがわかり、本論文ではその利用を提案した。地耐力を確認することによって、アウトリガー等の沈下による転倒の危険は減少するはずである。なお、現場地盤には様々な条件が存在するため、今後も引き続きBCTの現場試験を継続し、データの蓄積を図りたいと考えている。また、特に大型機械の設置では基礎サイズも大きくなることから、深い部分の確認も不可欠である。工事前に行った地盤調査のデータ(深い部分)も参考にしつつ、設置条件に応じた確認を行うことが必要かと思われる。

参考文献

- 1) 玉手聡, 堀智仁: 大型建設機械の不安定性と転倒防止のための安全要件, 労働安全衛生総合研究所安全資料, JNIOH-SD-NO.28(2010), pp.5-18, 2011.
- 2) (公社)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 第8編載荷試験第3章平板載荷試験, pp.697-731, 2013.
- 3) 玉手聡, 堀智仁: 地盤の支持力調査における簡易試験法の適用に関する実験的考察, 日本建設機械化協会, 平成23年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.137-140, 2011.
- 4) 石原研而: 土質力学, 丸善, pp.635-106, 1995.

29. インバートストラット施工における無人化機械の開発

清水建設(株)土木技術本部機械技術部 ○藤内 隆
清水建設(株)土木技術本部機械技術部 鈴木 正憲
エフティエース(株)技術部 徳川 順一

1. はじめに

トンネル掘削における内空変位変状対策において早期閉合は有効な対策となるため、切羽を掘削した後、速やかにインバートを掘削して吹付閉合を行うことで変状対策を行う。

変状が大きく、早期に変状がおきる場合は、インバート用の支保工（インバートストラット）の設置を行い、さらに支保剛性を高めることが必要となる。

このインバートストラットの設置作業は、切羽面から深部を掘削するため、崩壊の恐れがあり危険な作業となっている。

本開発では、このインバートストラットの設置を人が立ち入ることなく施工できる機械を開発した。

本稿では、機械の開発経緯及び開発技術の特徴、実証実験について報告する。

2. 開発技術の概要

(1) 開発の背景

インバートの設置作業では、2分割したインバートストラットをバックホウで揚重し、下半支保工と接合する。(写真-1)



写真-1 インバートストラットと
下半支保工接合作業状況

この作業では、揚重した支保工を下半支保工と接合する際に、人力で接合面を調整するため非常に労力のいる作業となっている。

また、揚重機の揚重能力の関係から作業半径を小さくする必要がある。

その結果、深く掘削したインバート部近傍の地盤の不安定な場所に揚重機を設置しなければならず、地山の崩壊や揚重機の転倒の恐れがあり危険な作業となっている。

インバートストラットと下半支保工を接合した後、分割したインバートストラットをほぼ中央で接合する。(写真-2)



写真-2 インバートストラット接合状況

この設置作業では、深く掘削したインバート部に人が立入り接合作業を行うため、切羽崩壊の恐れのある危険な作業となっている。

(2) 技術の概要

本技術開発では、地上で2分割したインバートストラットを地上で組立し、一括化するシステムとした。

そしてエレクターのブームで一括化したインバートストラットを把持しインバート底部にセットする。その後、下半の支保工と接合する施工するシステムを開発した。(図-1)

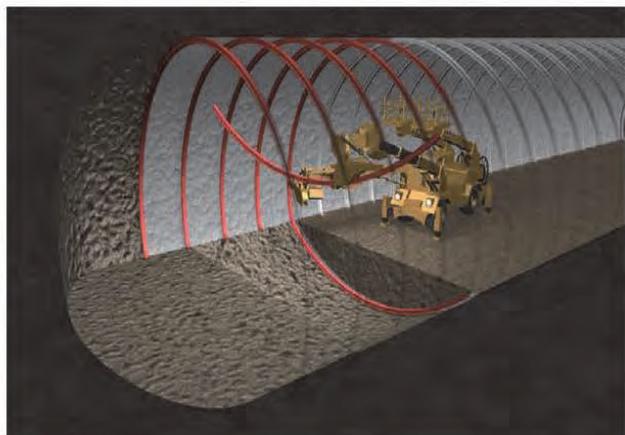


図-1 インバートストラット組立施工イメージ

この施工システムでは、地上でインバートストラットの一括化とインバート部に人が立ち入ることなくセットすることから、安全な作業が可能となる。

また、揚重機を使用せず、作業能力に余裕のある専用のエレクターでインバートストラットを把持して作業を行うため、安全かつ省力化を図ることができる。

3. 開発技術の特徴

本開発のエレクターは、上半支保工建込用の左右の2ブームとインバートストラット建込み専用の中ブームを装備した3ブーム構成となっている。(図-2)

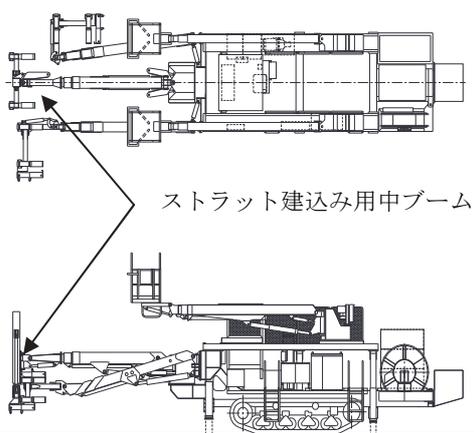


図-2 3ブームインバートストラット建込兼用エレクター

上半支保工建込み用のブームでインバートストラットの設置をするとブームが斜めに伸縮するため、ブームと地盤が干渉して建込みができない。(図-3)

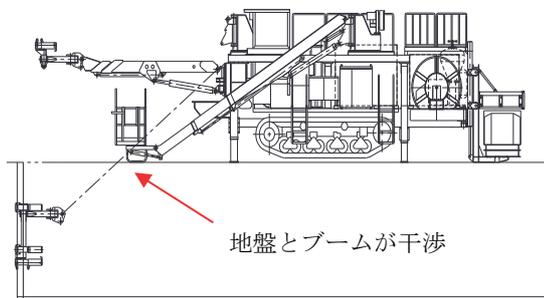


図-3 上半用ブームを使用した建込図
(ブームと地盤の干渉により建込みできない)

そこで、中ブームには垂直に伸縮する機構をもたせることにより、深さ2~4mあるインバート底部に地盤と干渉することなくブームが届くようにした。(図-4)

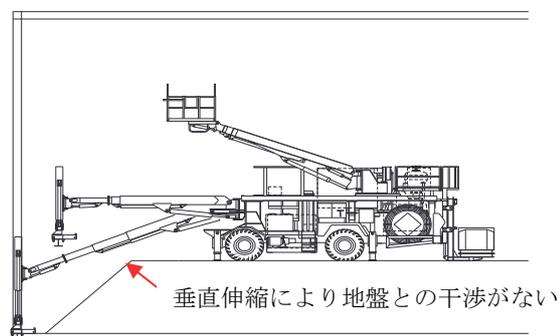


図-4 中ブーム垂直伸縮による建込図

また、垂直に伸縮することで地盤の悪いインバート掘削箇所より離れた場所にエレクターの設置を可能とした。

さらに真ん中の中ブームに把持装置を取付けて、インバートストラットの把持を容易にできるシステムとした。その把持装置は2本のツメを装備しており長く湾曲したインバートストラットの把持を確実にできる構造とした。

そして、把持装置には、インバートストラットを自由に動かせるように、左右37度、上下37度、前後37度の回転をできる構造とした。(図-5)

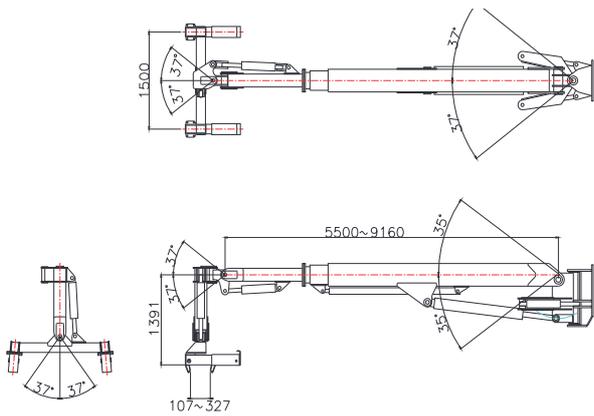


図-5 真ん中ブーム詳細図

表-1 に中ブームの仕様を示す。

表-1 中ブーム仕様

装置名称	仕様
ブームリフト角	上 35度 下 35度
ブームスイング角	右 37度 左 37度
アーム伸縮長	1200mm
アーム最長(垂直最伸長時)	2791mm
アームスイング角	上 37度 下 37度
キャッチャー スイング角	右 37度 左 37度
キャッチャー 回転角	74度
キャッチャーエクステンション	107~327mm
最大把持荷重	1000kg

4. 開発技術の課題および対策

分割したインバートストラットを地上で組立てするには、左右のブームで分割インバートストラットを各々掴み、ほぼ中央の部分でボルト連結を行う必要がある。

そのためには、インバートストラットを回転させ中央の接合面を合わせることが必要となる。

しかし、左右の上半支保工建込用ブームについているキャッチングは、下方向に回転できないため、インバートストラットの接合ができない。

そのため、分割ストラットの地上接合方法が課題となった。(図-6)

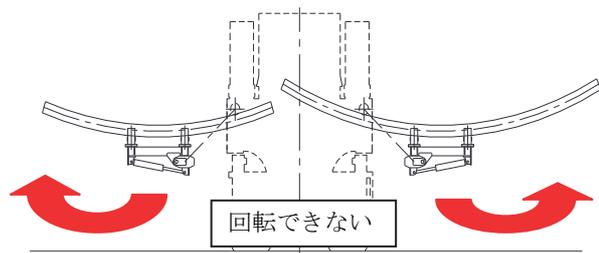


図-6 上半用キャッチング作動範囲

そこで、左右のブームにストラット把持用キャッチングを取付け、下向き回転をできる機構とし、インバートストラットの接合ができるようにした。(図-7)

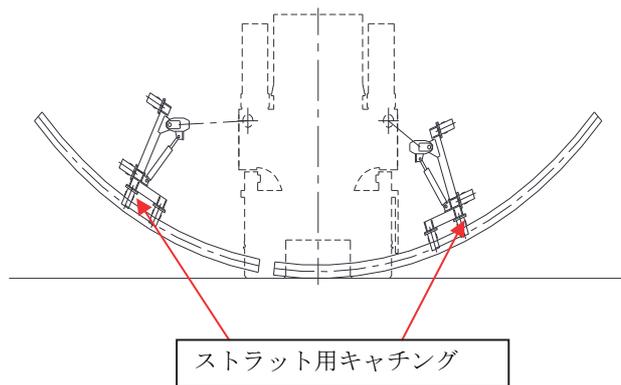


図-7 ストラット把持用キャッチングによる接合

5. 実証実験

(1)インバートストラット地上組立実験

インバートストラット組立用キャッチング装置を取り付けた左右のブームにより、分割したインバートストラットの接合実験を行った。

インバートストラットを左右のブームで各々把持させ、ブームスライドおよびキャッチングの回転、スイング機構を使用して接合を行い、地上で接合できることを確認した。(写真-3)



写真-3 インバートストラット地接合実験

(2)アーム伸縮動作実験

地上で組み立てたインバートストラットを把持した状態でブームを最大に伸ばし、アームを垂直に1.2m 降下させて、アームの動作、機体の安定性に問題ないことを確認した。(写真-4)



写真-4 アーム伸縮実験

6. おわりに

実証実験によりインバートストラットの組立てが問題なく行えることが実証された。

今後は現場導入を行い、実際のトンネルの内空断面内で組立できるか、また下半支保工とインバートストラットの接合が問題なく行えるかを確認する予定である。

この機械の使用により、人が立ち入らないことによる安全性の向上、専用の把持装置を装備したエレクターによる省力化や省人化、サイクルタイムの短縮が期待できる。

これらのデータを現場導入した際に記録および分析を行い、更なる安全性の向上や作業性の向上に努めていく所存である。

30. タワークレーン用制震装置の開発

(株)竹中工務店 大阪本店 作業所 ○竹内誠一
(株)竹中工務店 技術研究所 菅田昌宏

1. はじめに

タワークレーンは、超高層建物の建設に欠かすことのできない工事用機械である。しかし、1995年に発生した兵庫県南部地震において複数のタワークレーンが倒壊し、建物の施工中におけるタワークレーンの耐震性確保に関する問題点が高梨らによって指摘されている¹⁾。さらに、タワークレーンは比較的周期が長く柔らかい構造であるために揺れやすく、特に大地震時には建物と共振して大きな揺れが生じ、クレーン自体に損傷が生じる可能性があることが指摘されている¹⁾。

このような状況のもと、東南海・南海地震が近々発生し得ることが予見されている。しかし、大地震を想定したタワークレーン用の免震・制震装置は、十分には実用化されていない。よって、大地震時にタワークレーンが倒壊して作業所のみならず近隣等第三者にも被害を与えないようにするためのタワークレーン用免震・制震装置の実現が望まれる。

そこで、建物の固有周期とタワークレーンの固有周期が合致するような場合であっても、地震によるタワークレーンの揺れを低減して過度な損傷を防止する、マストクライミング方式のタワークレーンに有効な、油圧ダンパを利用した汎用性の高い、タワークレーン用制震装置を新たに開発した。そして、開発した装置を、建設中の作業所に設置されたタワークレーンに試適用し、実際に制震効果が得られることを確認したので、以下の報告する。

2. タワークレーンの強度

タワークレーンは、法令上定められている強度を有している。しかし、1995年の兵庫県南部地震では、実際に複数のタワークレーンが倒壊した(写真-1)。

タワークレーンの設計は、「クレーン構造規格」(労働省告示)に基づいて行われている。同規格では、「垂直静荷重の20%に相当する」水平



写真-1 倒壊したタワークレーン

荷重(静荷重)、つまり、震度5強程度の地震が発生した際に生じる水平荷重に耐え得る強度をクレーンに求めている。対してクレーンメーカーは、合理的且つ経済的に設計を行っているので、タワークレーン本体は、地震に対し過剰な余力を有していない。よって、同規格では想定していない震度5強より大きな地震の発生時には、タワークレーンが損壊して倒壊する可能性がある。また、建物上部に設置されたタワークレーンや、建物とステアー(壁つなぎ)によって連結されたタワークレーンは、建物の固有周期とタワークレーンの固有周期が合致して共振を起こし、地震の大きさに限らず大きな揺れが生じ、タワークレーン自体に損傷が生じる可能性がある。

3. 制震装置(ダンパステアー)を組み込んだ制震システムの概要

本装置を組み込んだ制震システムの構成と、制震効果が得られる仕組みを示したものが図-1である。

本システムの特徴は、制震装置(ダンパステアー)を固定式ステアー(マストクライミング方式で通常使用される固定式のステアー)とマスト脚部間(図-1の左図)、もしくは固定式ステアー間(図

-1の右図)に配置し、同部位に生じるマストの変形を利用してエネルギー吸収を行う点にある。固定式ステー部において、タワークレーンのマストと躯体とがピン接合されており、ダンパステー部では図-2に示すような油圧ダンパが配置されたダンパステーによって、マストと躯体(柱)とがピン接合されている。固定式ステーによる適度な拘束により、ダンパステー部分に生じる変位量が適切に抑制されるため、ダンパに極端に大きなストロークを必要としないことが特徴である。

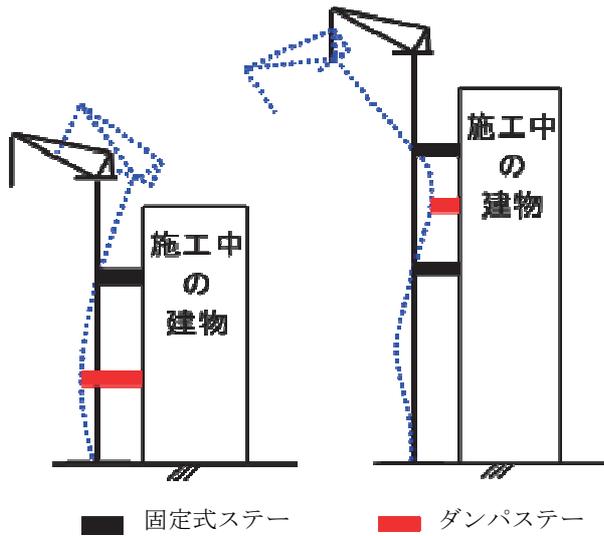


図-1 制震システム概要

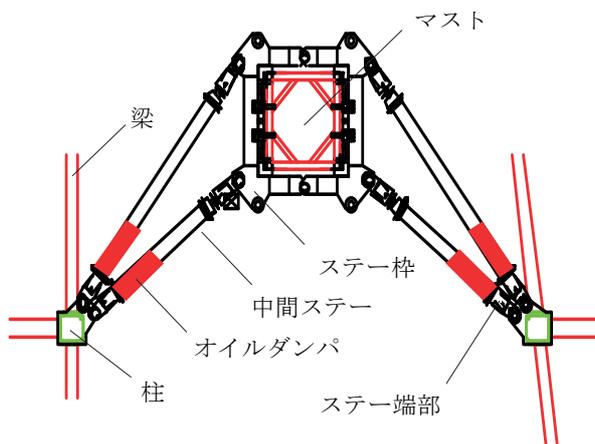


図-2 ダンパステー概要(平面)

4. 制震装置(ダンパステー)の概要

制震装置(ダンパステー)のダンパ周りの詳細を、図-3に示す。ダンパステーは、固定式ステーの中間ステー(鋼管部)端部にオイルダンパを設置したものである。使用したオイルダンパは、カヤバシステムマシナリー製の汎用品で

ある。その主な仕様は、最大減衰力500kN(30カイン)、ストローク±100mmである。

固定式ステーとダンパステーの全景を、写真-2及び写真-3に示す。ダンパステーは、固定式ステーの軸部の一部を油圧ダンパに置き換えた仕様とし、固定式ステーと完全に互換できるものとしている。そのため、ダンパステーを設置するために特別な取り合いを考える必要はなく、ダンパステーの汎用性は非常に高く、如何なるタイプのマストクライミング型タワークレーンにも適用可能である。

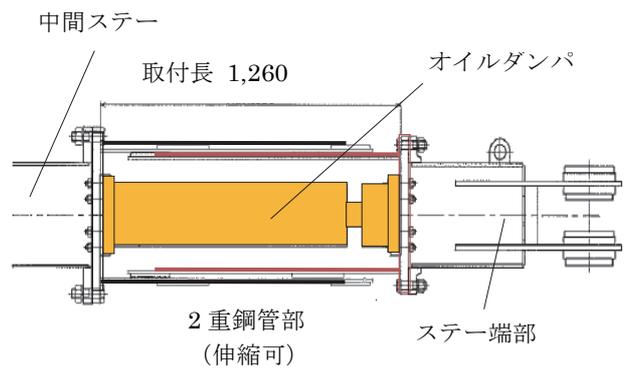


図-3 ダンパ周り詳細



写真-2 固定式ステー



写真-3 ダンパステー

5. 検討対象の建物の概要

本装置を試適用した建物は、大阪市に位置する最高高さ 300m、地上 60 階建ての超高層ビルである（写真-4）。



写真-4 検討対象の建物

6. 検討対象のタワークレーンの概要

検討の対象となるダンパステーを試適用したタワークレーン（写真-4 矢印部）は、38 階にその基礎を持ち、マストクライミング方式によって 38 階よりも上層階の躯体施工を行うために設置されたものである。また、38 階よりも上の階では建物内部に吹き抜け空間があり、当該タワークレーンはこの吹き抜け部に配置されている。さらに、施工の進捗度に応じて図-4 に示すように、固定式ステーを必要としない自立時から 2 箇所の固定式ステーを必要とする第 5 回目のクライミングまで、合計 6 つの状態を取るよう計画がなされている。最大マスト高さは 105m である。本体頂部が躯体構築に伴って上昇し、マスト部分は、固定式ステーによって躯体と連結されている（写真-2）。タワークレーンのマスト

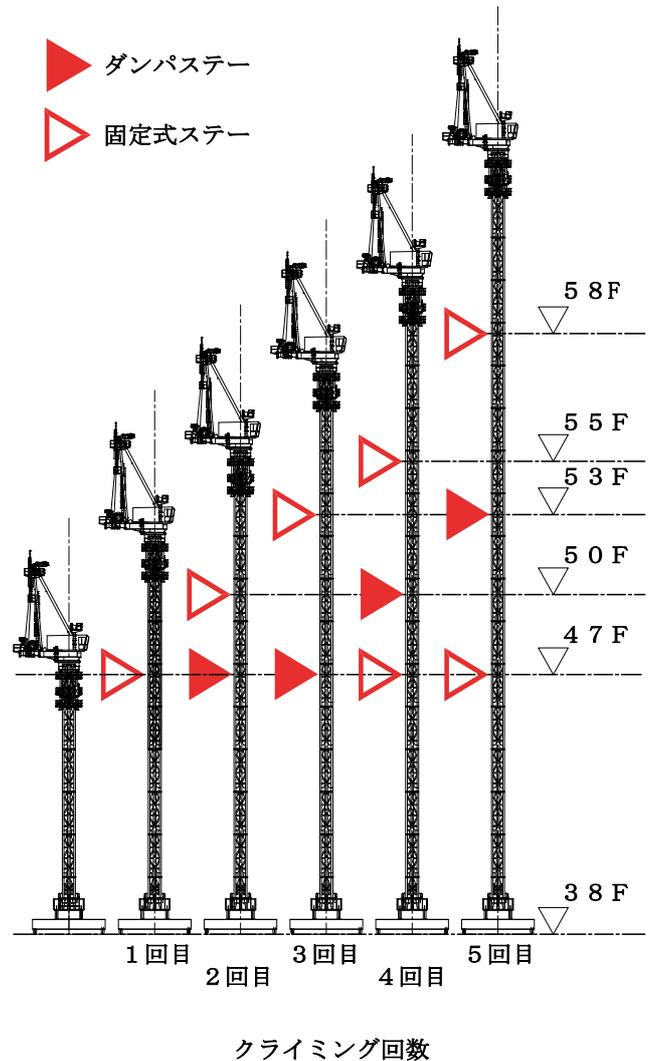


図-4 クライミング計画図

は高さが 3m ないしは 6m で、これらを高力ボルトを用いたフランジ接合によって緊結している。

表-1 に、各クライミング時のマスト高さ、固定式ステー及びダンパステーの設置階、及びタワークレーンをモデル化する際の質点数と重量を示す。ダンパステーは、2 回目から 5 回目までの各クライミングにつき 1 箇所配置した。表-2 に、使用したマストの断面性能等の諸元をまとめて示す。なお、ステー位置ならびにマストの強度計算は、一般的な検討手法である「クレーン構造規格」に基づいて行い、その安全性を確認している。図-5 は検討対象のタワークレーンおよびステーと躯体との位置関係を示したもので、ステーは建物の主軸（X、Y 方向）に対して角度を有して柱とタワークレーンに緊結されている。

表-1 タワークレーンのモデル化

クライミング回数	躯体完了階数	マスト全高さ	タワークレーンモデル		固定式ステータ取付階		ガンバ取付階
			質点数	総重量	上段	下段	
2回目	53F	63m	2	1180kN	50F	無	47F
3回目	56F	75m	2	1270kN	53F	無	47F
4回目	59F	87m	3	1610kN	55F	47F	50F
5回目	P1F	105m	3	1700kN	58F	47F	53F

表-2 マストの断面性能および適用位置

マストタイプ	A(mm ²)	I(mm ⁴)	Z(mm ³)	Z _p (mm ³)	W(t)	L	σ _y
M2000H	1.2 × 10 ⁵	9.0 × 10 ¹⁰	9.5 × 10 ⁷	1.0 × 10 ⁸	7	3.0	390
M2000	1.0 × 10 ⁵	7.3 × 10 ¹⁰	7.7 × 10 ⁷	8.4 × 10 ⁷	9.7	6.0	
M1600	8.2 × 10 ⁴	6.1 × 10 ¹⁰	6.5 × 10 ⁷	7.1 × 10 ⁷	8.9	6.0	
M1300	6.5 × 10 ⁴	5.0 × 10 ¹⁰	5.3 × 10 ⁷	5.8 × 10 ⁷	8.5	6.0	

A:断面積, I:断面2次モーメント, Z:断面係数, Z_p:全塑性断面係数

W:重量, L:マスト高さ(m), σ_y:材料の規格降伏強度(N/mm²)

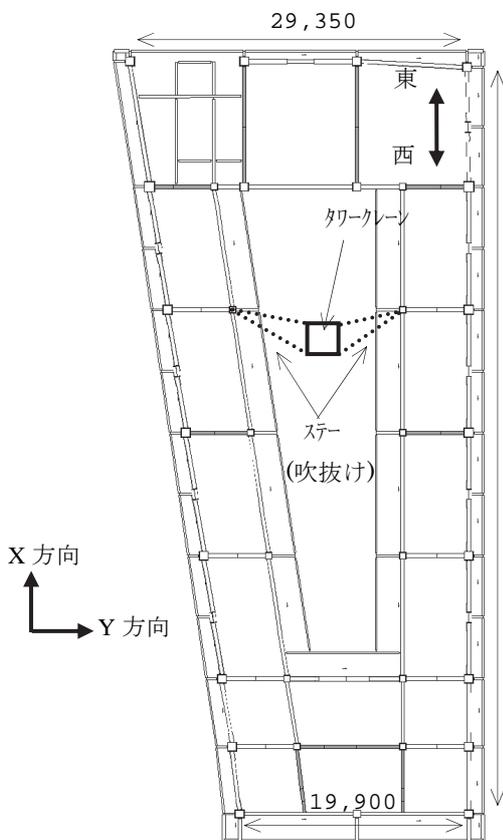


図-5 タワークレーンの平面配置

7. 解析モデル

解析モデルの例を、図-6 に示す。これは、建物構造設計時の地震応答解析用に作成された建物の質点系モデルを基に、表-1 に示した各クライミング時の施工段階に対応した建物モデルとタワークレーンの質点系モデル(2もしくは3質点)を組み合わせたものである。但し躯体の質量は、施工時の状況を再現するため、設計で使用した値に対して37階以下については70% (躯体+仕上・設備分を考慮)に、38階以上で躯体が完成している部分については65% (躯体分のみを考慮)に軽減した。

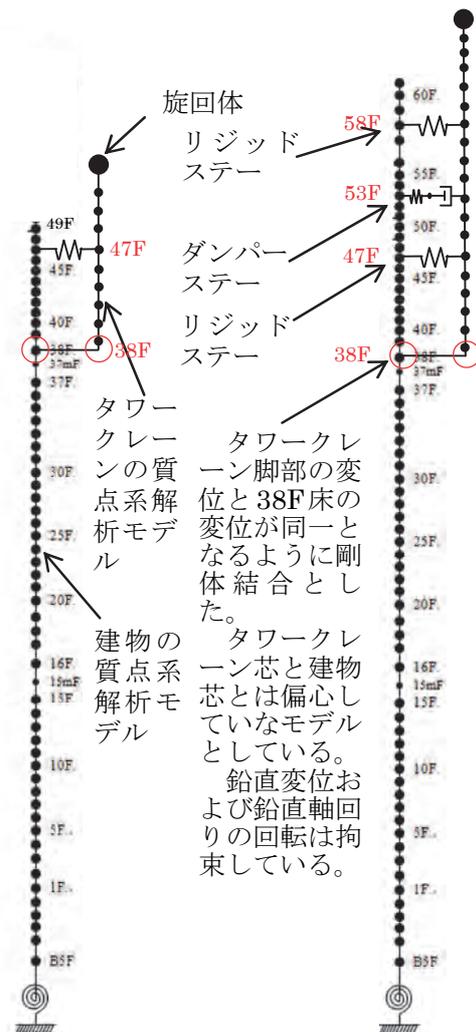


図-6 解析モデル例

タワークレーンマストは、1本ずつモデル化した表-2 に示す断面性能を有する曲げせん断棒によって連結している。マスト重量は、マストの頂部に集中していると仮定してモデル化した。なお本検討では、タワークレーンは無負荷で、かつ作業半径 22.4m で静止した状態を対象としている。この状態でタワークレーン頭部(旋回体)の質量重心は、タワーマストの重心にほぼ一致

するので旋回体質量のマストに対する偏心は考慮しおらず、ジブに関してもその質量のみを考慮している。また、タワークレーン頂部（旋回体）の重心位置は、マスト頂部位置よりも高い位置（マスト頂部+6.26m）にあるため、マスト頂部と旋回体重心位置（質量質点）を剛体連結している。粘性減衰は建物およびタワークレーンの双方ともに2%とした。

前述したように、固定式ステーは建物主軸に対して角度を有しているが、解析モデルでは各主軸方向に集約した軸剛性および耐力を用いることとした。表-3 に、解析で使用した固定式ステーの軸バネ定数および耐力をまとめて示す。ここで、固定式ステーの耐力は軸部鋼管のオイル一屈によって定まる値である。

表-3 固定ステーの軸剛性および座屈耐力

対象階	X 方向		Y 方向	
	剛性 (kN/mm)	座屈耐力 (kN)	剛性 (kN/mm)	座屈耐力 (kN)
58	363	2896	532	3728
47-55	274	2579	465	2927

表-4 油圧ダンパの特性（各階同じ）

方向	粘性減衰定数 (N・sec/mm)	最大減衰力 (kN)	内部剛性 (kN/mm)
X 方向	3.7	1109	307
Y 方向	5.3	1596	441

ダンパステーに使用した油圧ダンパは、ダッシュポットと内部剛性バネを直列に繋いだモデルとした。同ダンパは、最大減衰力 $F=500\text{kN}$ が速度 $v=30$ カインで発揮される線形タイプで、粘性減衰係数 C_d は $1.6\text{kN} \cdot \text{sec}/\text{mm}$ 、内部剛性は $135\text{kN}/\text{mm}$ である ($F=C_d \cdot v$)。ダンパも上述した固定式ステーと同様、表-4 にまとめて示すように各主軸に集約した数値を解析に使用した。ダンパは、減衰要素と内部剛性バネを直列に接続したモデルとし、その両端を躯体柱とマストにピン固定している。

実施した地震応答解析はニューマーク $\beta(=0.25)$ 法を用い、躯体およびタワークレーンともに部材降伏を考慮した非線形解析である。ここでマストは、正規バイリニア履歴とし、降伏後剛性は初期剛性の $1/200$ とした。またステーは、便宜的にマストと同様の履歴モデルとするが、ステーの降伏が生じた時点で、ステーの座屈によってタワークレーンが損壊するという判断を行うこととした。

8. 入力地震動

解析に使用した入力地震動の一覧を、表-5 に示す。これらの地震動は、建物の構造設計時の地震応答解析に使用したもので、当該敷地の条件に合わせて作成されている。

表-5 入力地震動一覧

レベル	地震動名称	最大速度 (mm/s)	最大加速度 (mm/s ²)
L3	東南海・南海 NS	268	1213
	東南海・南海 EW	419	1067
L2	南海 NS	210	863
	南海 EW	275	987

9. 解析結果

表-6 は、解析結果から求めたタワークレーン頂部における応答加速度の低減率を示したものである。低減率 α は(1)式によって求めた値である。

$$\alpha = (a_0 - a) / a_0 \times 100 [\%] \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 a_0 はダンパ無しの場合の頂部応答加速度、 a はダンパを効かせた場合の頂部応答加速度である。同表によると、ダンパの効果により、大きくは62%の低減率を達成できた。

また表-7 に、表-5 に示した入力地震動における、ダンパ無しの場合とダンパを効かせた場合の解析結果から得られたタワークレーン各部の強度検討結果を示す。これより、ダンパステー無しの場合に強度不足となった部位が、ダンパステーを効かせれば応答加速度が低減され、作用応力が許容応力内におさまることが判明した。

表-6 応答加速度の低減率 α
(タワークレーン頂部)

レベル	方向	地震動名称	クライミング回数			
			2回目	3回目	4回目	5回目
L3	X	東南海南海NS	5 0 %	5 6 %	1 0 %	2 3 %
		東南海南海EW	6 1 %	4 7 %	1 1 %	5 8 %
	Y	東南海南海NS	5 7 %	4 8 %	2 0 %	3 5 %
		東南海南海EW	6 2 %	5 %	8 %	4 2 %
L2	X	南海NS	5 3 %	4 3 %	1 1 %	8 %
		南海EW	5 4 %	3 8 %	2 3 %	5 1 %
	Y	南海NS	4 6 %	4 1 %	- 3 %	2 4 %
		南海EW	6 1 %	2 4 %	9 %	2 5 %

表-7 解析結果
(タワークレーン各部の強度検討結果)

	地震動名称	タワークレーン各部強度判定					
		ダンパステータ無し		ダンパステータ有り			
		ステータ	マスタ	ステータ	マスタ		
クライミング回数	設置時	X方向 東南海・南海NS					
		Y方向 東南海・南海EW					
	1回目	X方向 東南海・南海NS	OK	OK			
		Y方向 東南海・南海EW					
	2回目	X方向 東南海・南海NS	NG 座屈	NG 曲げ	全てOK	全てOK	
		Y方向 東南海・南海EW					
	3回目	X方向 東南海・南海NS	NG 座屈	NG 曲げ			
		Y方向 東南海・南海EW					
	4回目	X方向 東南海・南海NS	OK	NG 曲げ			
		Y方向 東南海・南海EW					
	5回目	X方向 東南海・南海NS	NG 座屈	NG 曲げ			
		Y方向 東南海・南海EW	OK	NG 曲げ			
	各クライミング段階	L2	南海NS				
			X方向 南海EW	全てOK	全てOK	全てOK	全てOK
			Y方向 南海NS				
			南海EW				

10. 実機における効果の検証

2回目のクライミング時に、試験錘の揚重による加振実験を行った。結果、図-7に示すように、タワークレーン頂部の応答加速度は、ダンパステータの働きによってより早く定常状態になることがわかった。つまり、ダンパステータにより制震効果が得られることを確認した。

また、ダンパステータを効かせた場合のタワークレーン頂部付近にある運転室内における揺れの収まり具合は、タワークレーンオペレータが驚くほどであった。つまり今回開発した制震装置は、地震時の揺れ（応答加速度）を低減するだけでなく、通常の運転操作時の揺れも低減するので、運転操作のやり易さを向上させ、オペレータのストレス低減にも貢献することが分かった。

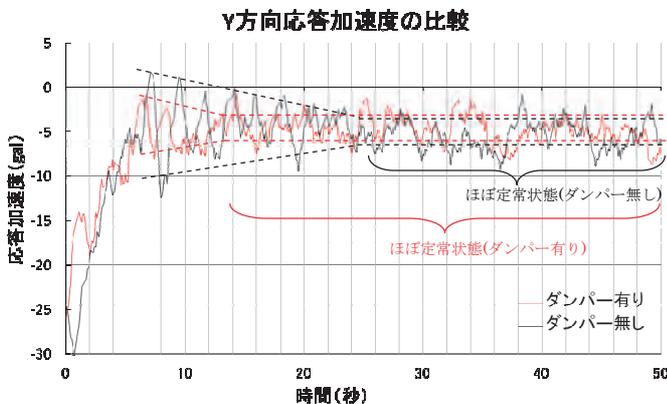


図-7 ダンパ効果の実測
(タワークレーン頂部の応答加速度)

11. まとめ

大地震を想定した画期的なマストクライミング型タワークレーン用制震装置を開発し、建設中の作業所に設置されたタワークレーンに試適用し、解析及び実機による実験から制震効果が得られることを確認した。本装置は汎用性が非常に高いことが特徴である。また、今回開発した制震システムについては、特許を出願済みである。

参考文献

- 1) 高梨成次, 安達洋, 中西三和: 建築用タワークレーンの耐震性能に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 13巻26号, pp.415~420, 2007年12月

31. RFID（非接触型自動認識技術）を利用した バッテリーロコのトリプルセーフティの導入及び総合運行管理

～トンネル坑内の安全を目指して～

清水建設株式会社
新トモエ電機工業株式会社
協立電機株式会社

○ 吉澤 尚志
瀬戸 啓助
平口 進也

1. はじめに

筆者らはバッテリーロコを用いたトンネル工事における安全性の向上を目指し、軌条設備における事故の防止を目的として本システムを開発した。現在に至るまで、軌条設備による事故は絶えない。その理由として以下の2点が考えられる。

- ①小口径トンネルでは安全通路と軌条設備を分離出来ないことにより、バッテリーロコと人との接触を防ぐことが難しい。
- ②安全設備を搭載したバッテリーロコを使用しているにもかかわらず、確実にその設備の機能を発揮させるためにはかなりの経験と知識が求められ、運転者のスキルが追い付かない状況である。

軌条設備における事故は大事故に繋がりやすい性質があり、安全設備や安全システムをバッテリーロコに追加していけば事故の減少に寄与するものと筆者らは考えている。

2. 現場概要

当システムを開発したシールド現場の概要を表-1に示す。

表-1 現場概要

現場位置	福井県福井市高屋町地内
発注者	農林水産省 北陸農政局 九頭竜川下流農業水利事業所
用途	農業用水路
工事内容	発進立坑1箇所、到達立坑2箇所、 ϕ 2,580mm シールドトンネル×2本（L1=2,824.8m、 L2=2,265.5m、セグメント外径 ϕ 2,452mm）

本工事には以下の特徴がある。

- ①1つの発進立坑から2本のシールドトンネルを同時に築造する。
- ②河川横断時期による工程遅延の防止を図るために、高速施工が要求される。このため、バ

- ッテリーロコの坑内運行速度を10km/hとする。
- ③セグメント内径 ϕ 2,144mmとトンネル坑内が狭いため特殊枕木を採用し、工事関係者が坑内を通常の姿勢で歩行できるようにする。坑内標準断面図を図-1に、坑内写真を写真-1にそれぞれ示す。

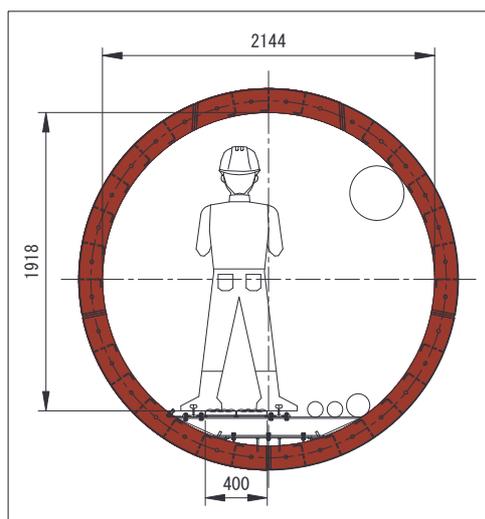


図-1 坑内標準断面図



写真-1 トンネル坑内状況

3. 開発経緯

当工事では坑内に入り出している工事関係者が坑内のどこに位置しているかを確認するために、トンネルに入出坑する人には必ず非接触記憶媒体（以降、RFID タグと呼ぶ）を携帯させ、入坑管理を行っている。

また、当工事では高速施工を行わなくてはならないため、セグメント搬送が施工サイクルに大きく影響を与えることからバッテリーロコの坑内走行速度を 10km/h としたため、バッテリーロコの接触事故のリスクは大きい。

以上より、入坑管理で使用している RFID タグを利用してバッテリーロコとの接触事故を防止する新たな安全システムの構築を考えた。

なお、筆者らは前項の③で記載したように狭ければ狭くなるほど事故のリスクを抱える事になると考えており、当工事がシステム開発をするにあたって適切な現場であると考えた。

3.1 トリプルセーフティの概要

トリプルセーフティ（3 段階安全システム）は「RFID を利用した近接認識システム」、「赤外線センサを利用した近接認識システム」、「接触バンパーを利用した接触式非常停止システム」で構成されている。

そのうち「赤外線センサを利用した近接認識システム」及び「接触バンパーを利用した接触式非常停止システム」は既存の技術である。

今回は「RFID を利用した近接認識システム」を新たに開発し、これら 3 つのシステムを関連付けることによりトリプルセーフティとして安全システムの高度化を図った。

RFID を利用した近接認識システムで 30m 以内に人を認識した際に坑内走行速度である 10km/h から 3km/h まで自動で減速させる。

さらに接近し、15m 以内になった時は赤外線を利用した近接認識システムにより 3km/h から 1km/h に減速させる。

最後に人がバンパーに接触した時には非常停止スイッチが作動し、バッテリーロコを非常停止させる。

このように仮にヒューマンエラーがあったとしても安全にバッテリーロコを動作させることにより事故を防止するシステムとしている。

本システムの特徴として以下が挙げられる。

- ①システムが動作した場合、自動的にスピードが減速することにより、軌条内に人や物があることを運転手本人に伝える事が出来る。
- ②運転手本人に意識の喪失等の何かあった場合でも自動的に停止までするため、暴走を回避し停止する。
- ③入出坑システムと兼用する事ができ、費用面

でも安価に抑えることが可能である。

3.2 各システムについての説明

(1) RFID を利用した近接認識システム

RFID とは Radio Frequency Identification の略称で RFID タグと呼ばれる媒体に記憶された人や物の個別情報を、無線通信にて読み書き（データの呼び出し・登録・削除・更新など）を行う自動認識システムである。

RFID タグを読み取り機にかざす（アンテナの読み取り範囲にタグを近接させる）ことにより情報（製造年月日・流通過程・検査情報等）が表示機器に表され、さらに新しい情報を書き込む（リライトする）ことで、製品の流れや人の入退場、物や人の位置検知などが一元管理できるシステムである。

今回の開発では指向性アンテナを設置し、トンネル延長方向に約 30m の範囲内にある RFID タグを認識できるようにした。

(2) 赤外線センサによる近接認識システム

赤外線センサは赤外領域の光（赤外線）を受光し、電気信号に変換して必要な情報を取り出して応用する技術である。

今回の開発ではバッテリーロコが運行している軌条内に物体が存在した場合に、赤外線センサでその物体から発せられている赤外線を読み取り軌条内に運行を阻害する物があると判断して減速するシステムとした。

(3) 接触式バンパー停止システム

接触式バンパー停止システムはバンパーが押されることによりリミットスイッチの通電が遮断され、バッテリーロコを緊急停止させるシステムである。

停止信号（接触時）発生から停止までの制動距離を計算すると 166mm を必要とすることからバンパーの稼働範囲を 200mm とし、万一本バッテリーロコに接触したとしても人体に問題がないように改良した。

3.3 使用機器について

本開発に使用した機器を表-2 に示す。

表-2 使用機器一覧表

機器名	仕様
バッテリーロコ	2t サーボロコ
赤外線センサ	認識距離 20m
RFID 受信機	
指向性アンテナ	認識距離 50m

3.4 使用機器写真

使用機器写真を写真-2 から写真-6 に示す。



写真-2 指向性アンテナ



写真 - 3 RFID タグ



写真 - 4 RFID リーダー

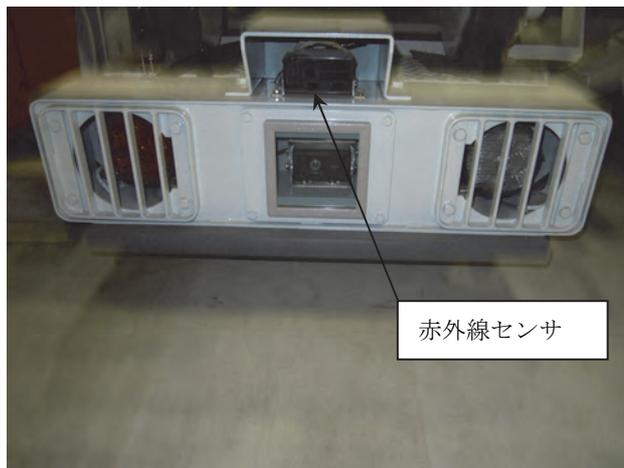


写真-5 赤外線センサ



写真-6 接触式バンパー

3.5 システムの使用状況のイメージ

システムの使用状況のイメージを図-2 に示す。

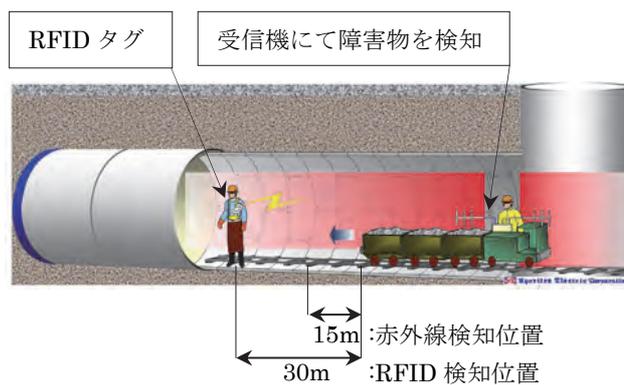


図-2 システム使用状況イメージ

4. 実施前の検証

現場へ導入する前にどのような周波数帯でどのようなアンテナを採用すべきか現場導入前に試験を行った。

試験では各周波数帯での認識距離の確認とアンテナを変える事による認識距離の違い等、現場条

件に応じて一番感度がよく、離間があっても認識できることを満足する、周波数 300MHz 帯の運用とその指向性のアンテナを採用した。

各周波数帯の特徴等を表-2 に示す

実施前の試験で再現が難しい事象として以下の事項が挙げられた。

- ①狭隘なトンネル内にアンテナを設置しても、無線が乱反射してしまい RFID タグを受信機が認識出来ない可能性がある。
- ②曲線部（最小曲線半径 R=30m）においてアンテナを使用した場合、受信機が RFID タグを認識できない可能性がある。
- ③システム作動の管理距離は計算上の制動距離により設定しているが、実際のシステム作動距離はバッテリーロコの計算上の制動距離を大きく越えてしまう懸念がある。（軌条が湿潤していることで錆びが浮いている場合に予期しない制動距離になってしまう可能性がある）

上記事項については現場にて本システムを導入した後に確認をし、問題が発生した場合にはその問題について再検討・対応をすることとした。

表-2 各周波数帯の特徴

周波数帯	特徴
130～135kHz	・水分の影響を受けにくい
13.56MHz	・水分の影響を受けにくい
300MHz	・通信距離が長い(50m 程度) ・障害物の影響を受けにくい
433MHz	・通信距離が長い (100m 程度) ・障害物の影響を受けにくい
900MHz	・通信距離が長い ・通信速度が早い
2.4GHz	・通信距離が長い (100m 程度) ・読取範囲を調整しやすい

5. 実施結果

本システムを現場に適用し、システムの運用・作動などを確認した結果、4章で懸念していたようなトラブルは発生せず、問題なく本システムは作動した。

さらに指向性アンテナの感知距離性能についても狭隘なセグメント坑内でも工場での試験結果と同等の性能を有する事を確認した。

これに関しては採用した周波数帯 (300MHz) が指向性および感知距離についていずれも最適であったと確認できた。

6. その他に採用した軌条設備の安全システム

さらに他の軌条設備の安全システムを導入し、

安全性の確保の高度化を図った。

導入した設備、システムを以下に述べる。

6.1 自動速度制限システム

本工事は急曲線（最小曲線半径 R=30m）を含んでおり、通常より早い 10km/h の走行速度をバッテリーロコに適用すれば様々な安全上の懸念が想定された。

そこで光電センサーと反射板を利用し、急曲線（曲線半径 R=200m 以下）区間の走行ではバッテリーロコの速度に自動で速度上限が作動するように対応し、バッテリーロコの走行の安全確保に努めた。

自動速度制限システムの概要を図-3 に示す。

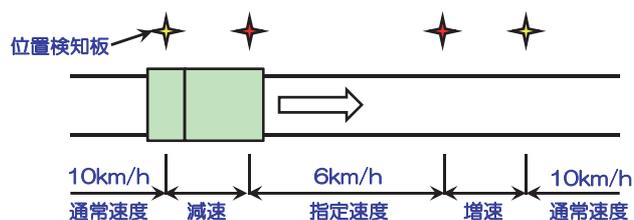


図-3 自動速度制限システム概要

6.2 負作動ブレーキの採用

連結車両間は牽引棒とチェーンで連結している。牽引する先頭車両には負作動ブレーキを採用することにより、万一台車が逸走した場合は負作動ブレーキ解除用のケーブルを断線する。

負作動ブレーキは電氣的に解除しているため、ケーブルの断線により電源が遮断された場合はブレーキが作動し、逸走防止となる。

7. 最後に

今回のシステムを採用しその有効性が確認できたことにより、軌道設備における安全性の向上が図れた。

また、システムの開発を現場で行ったことにより、工事関係者の安全に対する意識の向上も見られた。

今後は入坑管理システムと合わせて積極的に採用されるよう小断面図トンネルに水平展開を図り、これにより一つでも多くの事故が防止できることを望んでいる。

また、小断面のトンネルだけでなく中断面・大断面での適応が可能かを検証し、その都度改良を加えていきたい。

さらに、今回の知見を活かし自動搬送システムなどの安全システムの高度化を図りたい。

最後に今回の開発に携わって頂いた協力会社の皆様方及び現場にて協力して頂いた方々に御礼を申し上げます。

32. カメラを搭載した小型無人飛行船による高所の目視検査

足利工業大学
戸田建設（株）
足利工業大学

○ 仁田 佳宏
渡壁 守正
石田 正美

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災時には、多くの体育館やホール、工場、鉄道の駅および空港で天井板が落下しており、東京都内や宮城県内などでは死傷者も生じている^{1),2)}。2012年12月には、支持部の老朽化により、中央自動車道笹子トンネル内で天井崩落事故が発生し、多くの死傷者が生じている^{3),4)}。2013年7月には、幸いなことに人的な被害は生じなかったものの、屋内プールの天井が、老朽化により落下する事故も発生している。また、体育館などの照明機材についても、老朽化による落下事故が多発している。天井部材や天井に付随する設備の落下が相次いでいることを受け、文部科学省は「地震による落下物や転倒物から子どもたちを守るために～学校施設の非構造部材の耐震化ガイドブック」を取り纏め、天井部分の点検や耐震化を推奨している⁵⁾。一方で、体育館や屋内プールなどの屋内運動施設やホール、工場などの天井部分は、天井高が高く、大規模空間となるため、立入るには大規模な足場などを設置する必要などがあり、技術者による安全検査を行い難い箇所となっている。また、建築構造物の照明器具や天井板については、設備機器や非構造部材の扱いであり、構造部材ではないため、目視検査が中心である上、点検頻度が少ないか損傷が視認できる場合を除き行われなことが多いのが現状である。

東日本大震災を契機として、無人化施工技術や無人機（UAV）による被災調査技術などが注目を集めており、建築・土木分野においても様々なロボット技術が活用され始めている^{6)・13)}。このような状況のもと、国土交通省は、トンネルや橋梁など技術者が直接検査を行うことが困難な箇所を対象として、ロボット技術を活用した実証実験の公募を行い、2014年10月頃に採択技術の現場検証を行うことを予定している¹⁴⁾。合わせて、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構も「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロ

ジェクト」を公募し、採択課題を選定している。

本研究では、屋内運動施設やホール、工場の天井部分など高所の安全点検を効率よく簡便に行うことを目的として、Wi-Fiカメラ搭載小型無人飛行船による近接目視検査手法を提案し、Wi-Fiカメラ搭載小型無人飛行船も試作する。また、小型無人飛行船の特性や性能を、高所の目視点検を対象とした開発事例が増えつつあるマルチローター機と比較検討する。試作したWi-Fiカメラ搭載小型無人飛行船の有用性は、大学構内の実験棟の天井を対象とする目視検査により確認する。

2. Wi-Fiカメラ搭載小型無人飛行船

高所の安全点検を効率よく行うために、Wi-Fiカメラ搭載小型無人飛行船による目視検査を提案する。提案する目視検査では、図-1に示すように係留索を備えたWi-Fiカメラ搭載小型無人飛行船をオペレーターが操船し、点検員がWi-Fiカメラの映像をタブレットで確認し安全点検を行う。係留索は、操縦不能時など異常時に安全に小型無人飛行船を回収するために用いる。

本研究で試作したWi-Fiカメラ搭載小型無人飛行船の寸法は、幅600mm、船体長さ850mm、高さ800mmで、重量は約250gである。試作したWi-Fiカメラ搭載小型無人飛行船を図-2に示す。小型無人飛行船は、省電力性を考慮して、BluetoothデバイスおよびArduinoを搭載しており、PCもしくはAndroid端末を用いて操作を行う。操作は、マニュアル操作であり、図-3に示すようにArduino内のUART機能とデジタル入出力機能により、受信したコマンドに応じて、操船を行う。具体的には、2機のプロペラ付のモーターの正回転と逆回転を制御することで前後進および旋回方向の操船を行い、プロペラを設置したサーボの位置制御により上下方向の操船を行う。また、試作した小型無人飛行船の制御可能範囲は、Bluetoothデバイスの通信可能距離の制約から約20mであり、駆動可能時間は、3.7Vのリチウム充電電池を用いて、約1時間

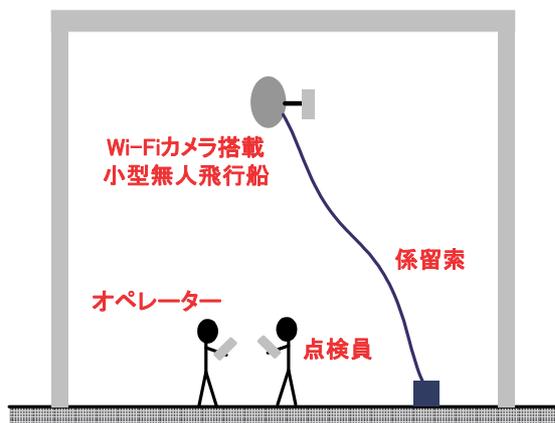
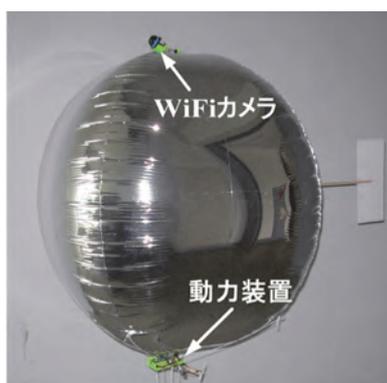
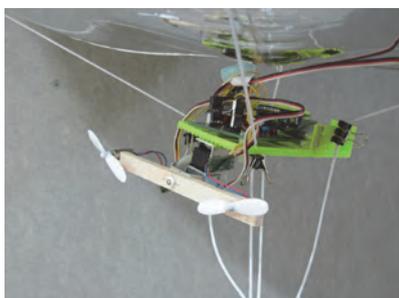


図-1 目視検査の模式図



(a) 小型無人飛行船



(b) 動力装置の詳細

図-2 Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船

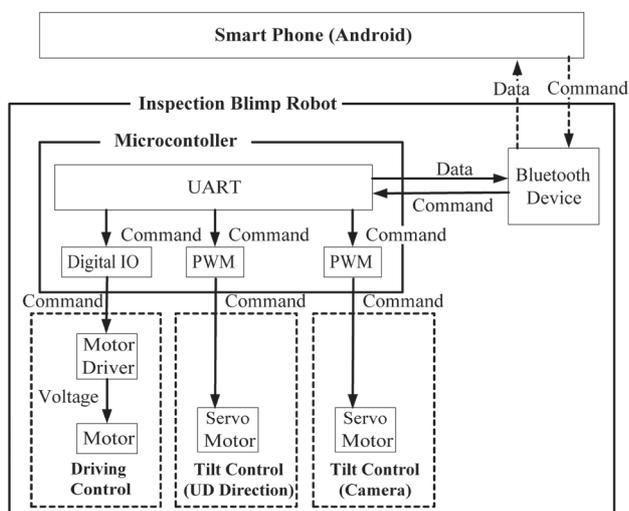


図-3 Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船の制御フロー程度である。

搭載する Wi-Fi カメラは、利便性を考慮して、専用機器を必要とせずかつ野外でも簡便に使用できるように Android 端末などから画像を確認できるネットワークカメラタイプの 30 万画素の Wi-Fi カメラを採用する。採用した Wi-Fi カメラは小型軽量であるため、カメラ自体にはズーム機能およびチルトパン機能は備わっていない。そこで、ズーム機能については、小型無人飛行船を検査対象に近接することで、パン機能については飛行船の旋回性能で、チルト機能については Wi-Fi カメラが設置されたサーボを制御することで代用する。また、暗所でも鮮明な画像を撮影できるように高輝度 LED も装備している。試作した Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船の材料費は、Wi-Fi カメラを含めて約 3 万 5 千円程度である。

3. マルチローター機との比較

近年、橋梁やプラントなどの高所の目視検査を目的として開発事例が増えつつあるマルチローター機^{10) - 13)}と試作した Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船の特性や性能を比較する。比較は、①積載可能重量、②飛行継続時間、③操作性、④耐風性、⑤落下時の安全性、⑥機体コストの 6 項目について行う。

① 積載可能重量

積載可能重量は、カメラなどの撮影機器や照明機器を積載することを考慮して、可能な限り大きいことが望ましい。マルチローター機は機体により幅はあるものの、大型のものでは最大 10kg 程度まで積載可能である。一方で飛行船は、ヘリウムガスの浮力に依るところが大きく、試作飛行船では約 50g 程度の積載重量が限界であることから、マルチローター機の方が高い性能を示す。

② 飛行継続時間

小型無人飛行船はヘリウムガスの浮力を用いているため、Bluetooth デバイスによる無線通信の電力消費が主であり、飛行継続時間は約 1 時間程度である。一方で、マルチローター機は、モーターの電力消費が大きく、多くの機体で約 15 分から 20 分程度である。

③ 操作性

ジャイロやマイコンなどを搭載することで、マルチローター機は、自動操縦も可能となつてはきているが、近接目視を行うためには、マニュアル操縦が必要である。このマニュアル操縦については、事前に訓練をする必要があり、マニュアル操縦の操作性は高くはない。小型無人飛行船は、マニユ

アル操縦を基本としてはいるが、飛行船自体に浮

表-1 試作飛行船とマルチローター機との比較

	試作飛行船	マルチローター機
積載可能重量	×	◎
飛行継続時間	○	×
操作性	○	△
耐風性	×	○
落下時の安全性	◎	×
機体コスト	○	△

力があることもあり、初心者でも操縦できるほど、操作性は簡易である。

④ 耐風性

飛行船は、一般的に風の影響を受け易く、耐風性はほとんどないのに等しい。飛行船に対し、マルチローター機は機体特性にもよるが、風速 5m/s 程度までの風であれば安定して飛行できるものが多く、耐風性能は飛行船よりも高い。

⑤ 落下時の安全性

マルチローター機は、機体重量が 1kg を超えるものが多く、操縦不能時やローターに損傷が生じた際には、急落下する危険性があるため、落下時の安全性については、事前に考慮する必要がある。落下時の安全性を考慮する必要があるマルチローター機に対して、小型無人飛行船は Wi-Fi カメラを含んだ全重量が約 250g 程度と軽量であるうえ、浮力をヘリウムガスに依っているため、操縦不能時や飛行船部分に損傷が生じた際も、急落下することはほとんどなく、落下時の安全性は高いと考えられる。

⑥ 機体コスト

試作した小型無人飛行船の材料コストが Wi-Fi カメラを含めて約 3 万 5 千円程度であるのに対し、マルチローター機は機体の販売価格のみで安いものでも 10 万円程度であることから、機体コストについては、飛行船の方がはるかに安価である。

以上、試作した小型無人飛行船とマルチローター機の特長、性能を比較検討した結果を表-1 に示す。表-1 より、機体コストが安価であること、落下時の安全性が高いことから、小型無人飛行船を用いることで、マルチローター機を用いるよりも安価にかつ簡便に高所の近接目視検査を行うことが出来ると考えられる。しかし、積載重量が大きく、高性能な撮影機材が使用可能であることや耐風性が高いことから、屋外を対象とするものや詳細な目視検査については、マルチローター機を用

いた方が有用であると考えている。



図-4 小型無人飛行船の飛行の様子

4. 実建物への適用

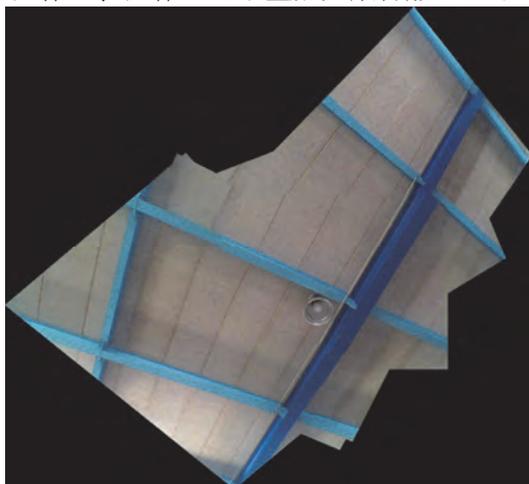
Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船による目視検査の有用性を確認する目的で、大学構内の実験棟の天井部分の目視検査を行った。目視検査は、無風状態で行い、対象とした実験棟の床から天井部分までの階高は約 10m である。ただし、実験棟の天井に老朽化や損傷は生じていない。実験棟内での Wi-Fi 小型無人飛行船の飛行の様子を図-4 に示す。老朽化部位や損傷部位の検知は、Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船が撮影した画像をリアルタイムもしくは動画として視認することで確認する。動画による確認においては、撮影した動画よりパノラマ画像を作成することで、天井の全体像の把握を行う。パノラマ画像の作成には、フリーソフトの Microsoft Image Composite Editor¹⁵⁾ を用いる。約 20 秒間の動画より作成したパノラマ画像の例を図-5(a)に示す。本適用では、Wi-Fi 搭載小型無人飛行船を一定高度で飛行させていないため、パノラマ画像に歪んでいる部分はあるものの、図-5(a)により天井の全体像の把握が可能であることが確認できる。接合部については、近接画像により目視検査を行う。水平ブレースの接合部の近接画像を示した図-5(b)より、接合部の詳細が把握可能であることが確認できる。

以上の結果から、Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船により撮影した動画をもとに、パノラマ画像の作成と近接画像の抽出を行うことで、足場などを必要とすること無しに、簡便に天井などの高所の目視検査が可能となることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、屋内運動施設やホール、工場の天井部分など高所の安全点検を効率よく簡便に行うことを目的として、Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行

船を試作し、試作した小型無人飛行船による近接



(a) パノラマ画像



(b) 近接画像

図-5 Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船による目視画像

目視検査を提案した。提案した検査の有用性は、大学構内の実験棟の天井を対象とした目視検査を行い確認した。提案した Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船による目視検査は、足場などを組むことなく、高所の近接目視が可能となることから、実用性は高いと考えられる。また、屋内環境においては、既往研究で多くの実績のあるマルチローター機と比較しても、試作した Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船は、安価、軽量であり、落下時の安全性も高いことから、有用性はあると考えている。今後の研究課題として、次の2点を考えている。

(1) 位置情報把握について

目視点検する際には、自動で老朽化や損傷の位置を把握できることが望ましい。しかし、屋内では、GPS の使用は難しいため、点検時のみ機器を設置するような簡便な位置情報把握システムの開発が必要と考えている。

(2) 画像処理について

提案した目視検査では、技術者が映像を視認することで、老朽化や損傷を検知しているが、実

用性を考慮すると、画像処理を用いて自動的に検知できると利便性が高いと考えている。従って、画像処理による老朽化や損傷の自動判別手法の開発も必要である。

参考文献

- 1) 日経アーキテクチュア(編集): 東日本大震災の教訓 都市・建築編 覆る建築の常識, 日経BP社, 2011
- 2) 川口健一・大場康史・中楚洋介: 2011年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下及び天井衝撃力の推定, 日本建築学会技術報告集, Vol.39, pp.789-793, 2012
- 3) 国土交通省: 中央自動車笹子トンネル天井板落下事故関連情報, http://www.mlit.go.jp/road/road_tkl_000033.html, 2012
- 4) 国土交通省: 報道発表資料 トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会 報告書について, http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000363.html, 2013
- 5) 文部科学省: 地震による落下物や転倒物から子供たちを守るために, ~学校施設の非構造部材の耐震化ガイドブック, 2010
- 6) 森山和道: 東日本大震災・福島原子力災害に対するロボット, ロボコンマガジン2011年7月号, pp.19-21, 2011
- 7) 井上猛雄: 災害とロボット, オーム社, 2012
- 8) 田中幸悦: What's New モニタリングロボット, 建築設備士, Vol. 43, No.2, pp.44-46, 2013
- 9) 仁田佳宏・西谷章・渡壁守正・稲井慎介・岩崎充実: ワイヤレスカメラを用いた天井ふところ内の損傷目視検査, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.7, pp.733-735, 2013
- 10) (株) 0: プラシレスジンバル【1.0Kgクラス】屋内プール撮影サンプル(照明無し), <http://www.youtube.com/watch?v=Suaw11aJqKM>, 2013
- 11) 久保竜志・木村信隆・五十嵐祐貴: 高速道路のさらなる「安全・安心」確保に向けた取組み スマートメンテナンスハイウェイ(SHM)構想一, 土木施工, Vol.55, No.8, pp.145-149, 2014
- 12) 西山章彦・茂木正晴・藤野健一: 小型カメラを搭載したUAVの橋梁点検に関する適応性検証について, 第13回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.331-336, 2012
- 13) 井上公・内山庄一郎・鈴木比奈子: 自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術一, 防災科学技術研究所研究報告, Vol.81, pp.61-98, 2014
- 14) 国土交通省: 次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム(公募), https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000023.htm, 2014
- 15) Microsoft Research: Microsoft Image Composite Editor, <http://research.microsoft.com/en-us/um/redmond/groups/ivm/ICE/>, 2011

33. コンクリート構造物非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法

桐蔭横浜大学大学院
佐藤工業(株)技術研究所
明篤技研

○ 杉本 恒美
歌川 紀之
片倉 景義

1. はじめに

現在、トンネルや橋などのコンクリート表層部欠陥の検査手法として打音検査が主流である。しかし、この方法ではハンマーを用いて直接コンクリートに打撃を加える必要があるため、人の手の届かないような場所の検査は困難である。そのため、高出力指向性音源による空中放射音波を用いた全く新しい遠距離非接触音響探査法の検討を行ってきた¹⁻³⁾。本手法は、通常の打音法と同じたわみ共振を利用した手法であるため、将来的には打音検査を置き換える手法となる可能性が非常に高い。ここでは円形モデル供試体を用いた検出可能な欠陥の平面規模および深さ、剥離試験体を用いた剥離欠陥の検出および実際のコンクリート構造物における探査結果等について紹介する。

2. 遠距離非接触音響探査法の計測原理

2.1 非接触音響探査法の概要

非接触音響探査法の概要図を図1に示す。音源から発した平面波音波により測定対象壁面を励振し、励振時の壁面上の振動速度をLDV (Laser Doppler Vibrometer) により光学的に計測する。もし、壁面内部に水平方向のひび割れなど空隙欠陥が存在していたとすると、その欠陥部上は健全部に比べ曲げ剛性が低下するため、たわみ振動が生じやすくなっている。例えば欠陥部分の形状を円形と想定した場合、単純支持した円板と近似できる。そのときの一次固有振動数は下式で表される⁴⁾。

$$f = \frac{4.98}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

ここで、 a は半径、 h は板の厚み、 E はヤング率、 ρ は密度、 ν はポアソン比である。(1)式からわかるように、欠陥部のたわみ振動の固有振動数は板の厚みに比例し、半径の二乗に反比例する。

本研究ではLDVとしてはスキャニング機構を備えたスキャニング振動計 (SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer: Polytec Corp., PSV400-H4) を、音源としては通常のラウドスピーカと異なり100dB以上の音圧を10メートル以上離れた場所で

も発生できる長距離音響発生装置(LRAD; Long Range Acoustic Device, LRAD Corp., LRAD-300X)を用いる。

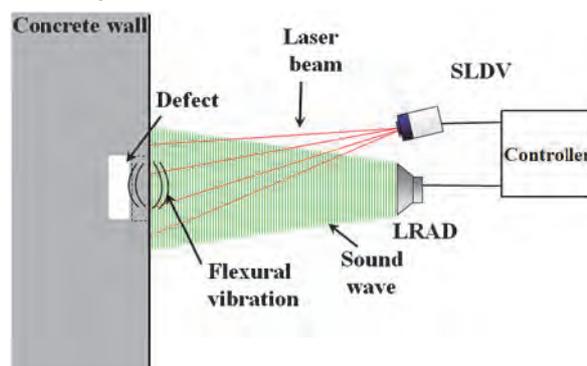


図1. 非接触音響探査法の基本構成図

2.2 トーンバースト波を用いたS/N比改善

欠陥部を励振させるための加振用音波として、持続時間の長いチャープ信号(例: 持続時間 2s、500-5000 Hz の広帯域の Linear up chirp 波)を用いると、壁面からの反射波の影響で計測用のレーザーヘッドが振動し、それがS/N比に悪影響をもたらすことが明らかになっている。しかしながら加振用の音波と計測用のレーザー光の伝搬速度の差を利用して、対象壁面からの反射波がレーザーヘッドに到達する前に計測を終了させることにより、上記の問題を回避してS/N比を改善することが可能となる。そのため、本研究では図2に示すように異なる中心周波数帯をもつ短いパルス波を逐次送信することで、チャープ波と同等の広帯域の周波数成分を得ることができる広帯域トーンバースト波を送信波として採用することにした。

壁型コンクリート供試体(1.5×2.0×0.3 m³)内の深さ75mmに埋設された欠陥(発泡スチロール板(300×300×25 mm)を用いて、トーンバースト波の検証実験を行った。計測に使用した広帯域トーンバースト波は各パルス幅3 ms (Bandwidth: 330 Hz)で、パルス間インターバルは100 msである。各パルスの中心周波数は500-5100 Hzの範囲で200 Hzずつ変調し、全体で170-5430 Hz程度の周波数成分を有している。音源から対象面およびレーザーヘッドか

ら対象面までの距離は 5 m および 5.4 m である。計測点は欠陥部の中心部の 1 点のみである。計測された欠陥部上の時間ゲート適応後の振動速度スペクトル例を図 3 に示す。従来の加振用音波としてチャープ波を用いると光学系の振動ノイズが取り除くことができなかつたため、S/N 比 4 dB であるのに対し、今回の提案手法では 19 dB と、従来法に比べ 15dB の改善が行われたことがわかる。

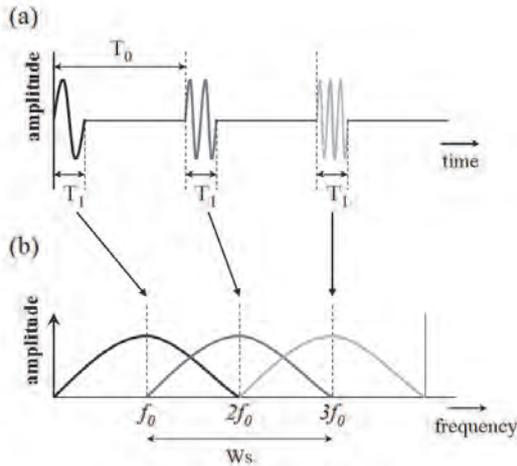


図 2. 広帯域トーンバースト波の概要図
(a)時間波形、(b)振動速度スペクトル

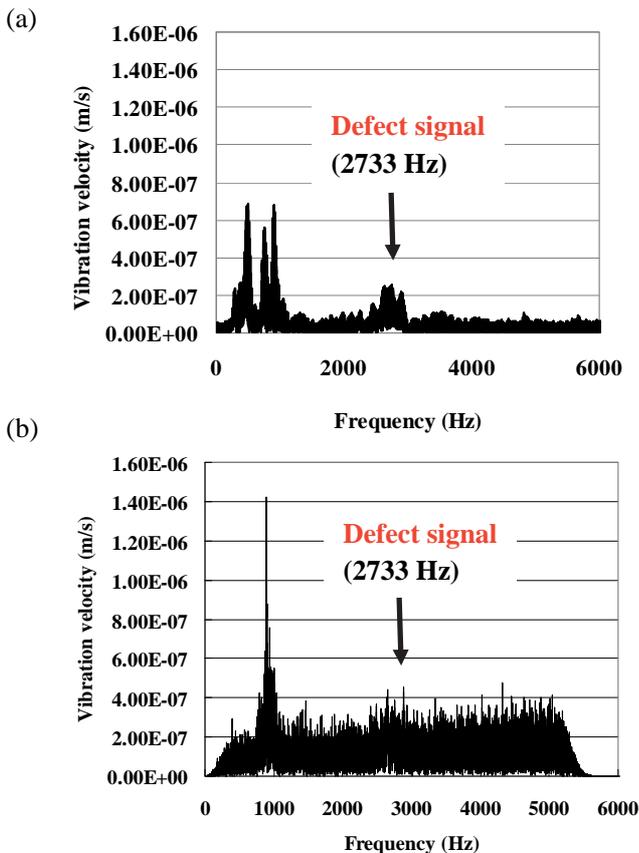


図 3. 欠陥部上の振動速度スペクトルの例
(a) トーンバースト波+ゲート処理後
(b) チャープ波

3. 遠距離からの欠陥検出実験

SLDV と LRAD を組み合わせることにより、手法が実際に 5m 以上の離隔で探査が行えることを確認するために実証実験を行った。音源とコンクリート供試体間は 10 m に設定した。音源である LRAD は供試体に正対して設置し、SLDV はそのやや斜め後方の位置から計測を行った。実験に用いたコンクリート供試体の大きさは $150 \times 200 \times 30 \text{ cm}^3$ である。供試体には深さ 5 cm の位置に $30 \times 30 \times 2.5 \text{ cm}^3$ の発泡スチロール板が埋設されている。音源としては米 LRAD 社の LRAD 300X を、SLDV としては独 Polytec 社の PSV400-H4 を使用した。また、探査用の送振波形としては広い周波数帯域を持ったチャープ波を用いた。実験時の出力音圧はコンクリート表面付近で約 110 dB である。

図 4 に欠陥部の応答周波数帯の輝度映像結果(周波数スペクトルの最大値で規格化したスペクトル表示)を示す。探査用のリニアアップチャープ(500-4200 Hz, 1800-2400 Hz)を送振した結果、2 kHz 周辺で明瞭なスペクトルピークを存在することがわかる。帯域を絞ったチャープ(1800-2400 Hz)を送振した場合の SLDV の振動速度分布の映像化例を図 4 (映像化周波数は 1998Hz) に示す。図中の大きな白四角が埋設物の位置と大きさを示しており、その他の細白線の交点はスキャンポイント位置を示している。スキャン領域は $60 \times 70 \text{ cm}^2$ の大きさで、計測ポイント数は 195 (13×15) ポイントである。この映像から埋設物中心での振動が見てとれる。この結果から、10 m の離隔であっても、本手法による欠陥検出が可能であることを確認した。

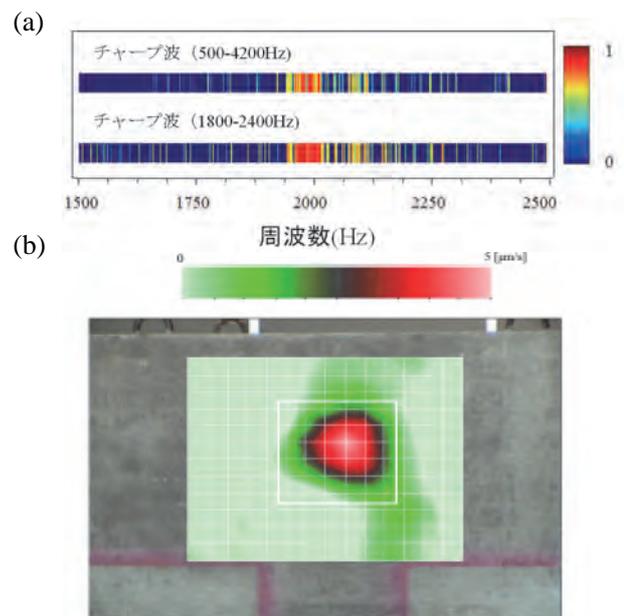


図 4. 10m の離隔での探査結果例
(a) 振動速度スペクトルの輝度表示例、
(b) 振動速度分布(1998Hz)

4. 検出可能な欠陥の大きさ及び深さについて⁵⁾

4.1 円形欠陥モデル

検出可能な空洞の大きさ及び深さについて検討するために、埋設深さと直径を変化させた円形欠陥モデル（発泡スチロール 25mm 厚）を埋設したコンクリート供試体（2×1.5×0.3m³）を製作した（図 5 参照）。円形発泡スチロールの直径および深さは直径 50mm のものが深さ 10, 20, 40 及び 60mm に、直径 100mm のものが深さ 20, 40, 60, 80mm に直径 150, 200 および 300mm のものが深さ 40, 60, 80, 100mm の位置に埋設されている。



図 5. 円形欠陥モデルを埋設したコンクリート供試体(発泡スチロール 25 mm厚を埋設)

4.2 実験セットアップ

実験セットアップ図を図 6 に示す。LRAD は欠陥部に正対させ、SLDV は LRAD のやや後方に配置した。コンクリート供試体からの離隔はそれぞれ 5m、5.4m である。

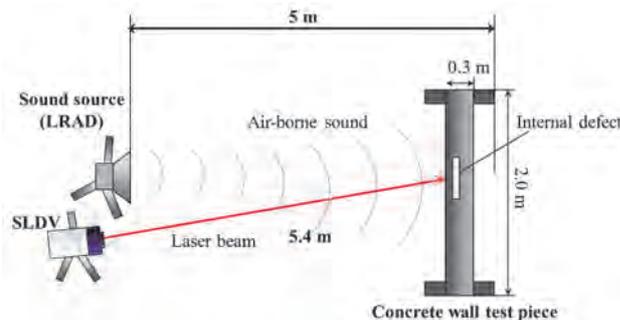


図 6. 実験セットアップ

4.3 円形欠陥モデルの実験結果

5m の離隔からの探査結果を表 1 に示す。上段は岩検ハンマーを用いた叩き点検法による検出の可否(3名でブライントテストを行い、○は検出可能, Δは判定が分かれるもの, ×: 検出不可), 下段は本手法による検出の可否 (○は検出可能, かつ SLDV の共振ピーク以上の共振ピークを検出した場合でその共振周波数を表示, Δは SLDV の共振ピークと同程度以下のピークを検出した場合, ×: 検出不可を示す) を示している。岩検ハンマーを用いた叩き点検では、打音検査のプロではない素人の方に自

に叩いて判定をしてもらった場合の結果である。両手法ともに加振方法に違いがあるにも関わらず、同様な探査性能を示していることがわかる。

表 1 円形欠陥モデルの検出結果

(上段：岩検ハンマーによる叩き点検結果)
(下段：非接触音響探査法による検出結果)

(mm)	深さ100	深さ80	深さ60	深さ40	深さ20	深さ10
直径 50	—	—	Δ	Δ	×	×
直径 100	—	×	×	×	Δ ○5430Hz	—
直径 150	×	×	Δ ○4958Hz	Δ ○4449Hz	—	—
直径 200	×	×	○ Δ4557Hz	○ Δ4389Hz	—	—
直径 300	○ Δ3155Hz	○ Δ2734Hz	○ ○3733Hz	○ ○2762Hz	—	—
			○ ○2106Hz	○ ○1449Hz	—	—

5. 剥離試験体での検出結果

前節の検討では空洞欠陥を模擬するために 25 mm 厚の発泡スチロールを用いた。しかしながら、実際のコンクリート内部の欠陥としては大きな空洞欠陥よりも、鉄筋部が錆びて膨張することにより生じる剥離欠陥の方が現実的であると思われる。一方で、非接触音響探査の探査原理は、コンクリート表層部のたわみ共振によるものであるため、表層部にわずかな空気層があれば板振動を生じさせることが可能である。そのため、欠陥の検出精度はその間隙幅には依存しないということが想定される。そこで、剥離欠陥を模擬した供試体を製作して探査可能かどうかの検討を行った。

5.1 剥離欠陥モデルの作成方法

剥離欠陥モデルは壁型供試体(150×200×30 cm³)にひび割れを有した小型供試体(以下ひび割れモデル)を埋設することで再現した。ひび割れモデルの製作手順を以下に示す。

- ① 円柱状コンクリートピース(φ100×200 mm)を割裂引張強度試験により 2 つに割裂させる。
- ② 測定面側をフラットにするため、割裂させたテストピースのうち一つを半分にカットする。
- ③ 割裂させた二つの供試体間に金属スペーサを挿入することで間幅を調整。
- ④ エポキシ接着剤を亀裂部周囲に塗布。供試体の固定とともに、後に流し込むコンクリートの侵入を防ぐ。

埋設したひび割れモデルは 4 種類で、内 3 種類それぞれ間隙幅が異なる。この時調整した間隙幅は 1.0 mm、0.5 mm および 0 mm である。0 mm のものは割裂後にスペーサなどを挿入せずに再度固定し

たものである。残りの1つは空洞の代わりとして厚さ25mmの発泡スチロールを挿入したものである。埋設後の各試料のひび割れの深さは25mm程度、欠陥寸法は100×200mm²となる。加えてφ150×300mmの円柱状テストピースを用いて製作したはく離モデルもそれぞれ4種類上記の手順により用意した。この試料のひび割れ深さは50mm、欠陥寸法は150×300mm²である。これらの試料を埋設したコンクリート供試体(200×150×30cm³)を製作して実験に使用した(図7参照)。実験セットアップ自体は前節と同じである。

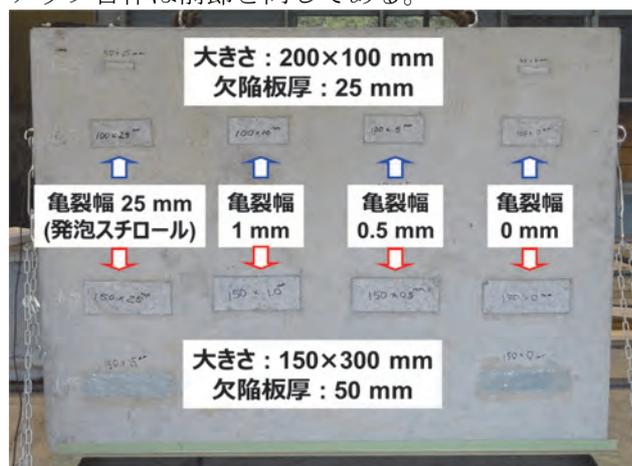


図7. 剥離欠陥モデルを埋設したコンクリート供試体

5.2 剥離欠陥モデルの実験結果

欠陥部(埋設位置の中心)と、その周辺の健全部上の振動速度スペクトルを比較したものを図8に示す。図8(a)は深さ25mm、欠陥寸法100×200mm²のものである。図中の発泡スチロールおよび間隙幅1.0mmでは3.5kHz周辺で明確な応答が見られる。0.5mmと0mmにおいてもピークが確認出来るが、発泡スチロールと間隙幅1.0mmのものに比べると振幅が小さい。これは設定間隙幅が狭くなったため、割裂したテストピース間の接触面積が増加していることが影響していると考えられる。図8(b)は深さ50mm、欠陥寸法は150×300mm²の結果である。図8(a)と比べると欠陥自体が深いため、全体的な振幅は小さいが、図8(a)と同様に間隙幅0mmのものであってもピークを確認することが出来る。これらの結果から、ここで示すはく離欠陥の広さと深さであれば、間隙幅が0mmであっても、欠陥の有無については探査できることが分かった。なお、両グラフともに1kHzで見られるピークはSLDVレーザヘッド自体の共振周波数である。また、図9に間隙幅0mm、深さ50mm、欠陥寸法150×300mm²の割裂試験体に対する非接触音響探査法による探査結果例を示す。図より間隙幅0mmであってもわずかな空気層があれば本手法により検出可能であることがわかる。

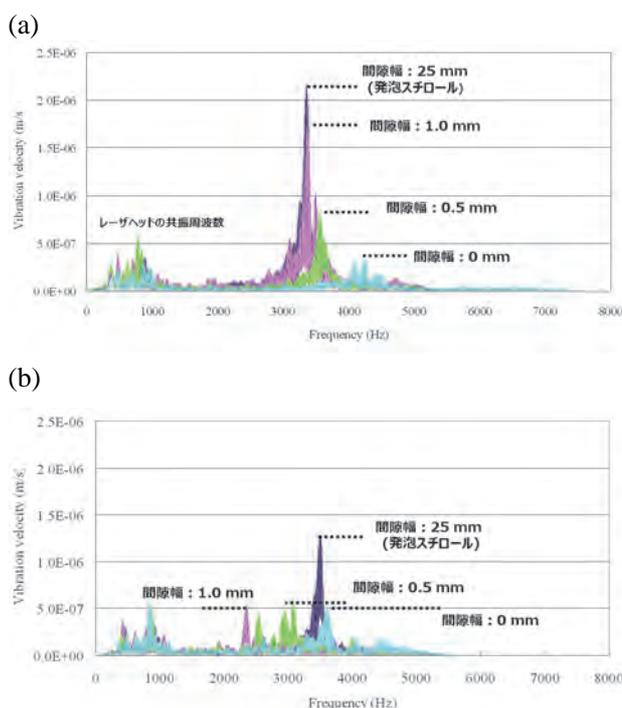


図8. 各欠陥試料上での振動速度スペクトル
(a) 深さ25mm, 欠陥寸法100×200mm²,
(b) 深さ50mm, 欠陥寸法150×300mm²

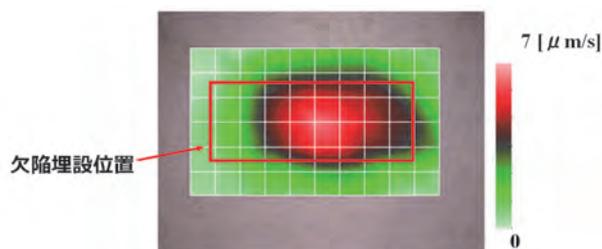


図9. 間隙幅0mmの振動速度分布図
映像化周波数:3572 Hz,
スキャンポイント数77(7x11)

6. 振動エネルギー比を用いた欠陥検出

6.1 振動エネルギー比の定義

実際のコンクリート構造物に見られる欠陥の形状は深さや大きさも一様ではなく複雑であるため、したがって検出される振動速度スペクトルも、前節の剥離欠陥モデルの試験結果同様に複数のピークをもつことが考えられる。そのため、欠陥検出アルゴリズムとして単一のピークを検出するというだけでは不十分である。しかしながら、欠陥部が振動した場合には健全部に比べて振動エネルギーが大きくなることが考えられるため、ここでは健全部を基準とした振動エネルギー比を用いた欠陥検出を考える。ある周波数範囲での振動速度のパワースペクトルの和を振動エネルギーに対応する値であると考えて、振動エネルギー比を(2)式のように定義する。

$$VER = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (X_{defective_part}(\omega))^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (X_{health_part}(\omega))^2 d\omega} \quad (2)$$

6.2 振動エネルギー比による欠陥検出の検討

実際に昨年度の円形欠陥モデル供試体の場合に、振動エネルギー比を適用した結果を図 10 (a)に示す（現状では 1 kHz 以下に存在する SLDV の共振周波数のノイズが完全に切り切ることが出来ないため、ここでは f_1 を 1.35 Hz、 f_2 を 8 kHz としている）。図より半径がそれなりの大きさ(200φ~300φ)であれば、広い範囲(40mm~100mm)で、振動エネルギー比と欠陥深さが反比例していることがわかる。この事実は振動エネルギー比により欠陥深さが推定できる可能性があることを示している。図 10 (b)に健全部同士の振動エネルギー比を示す。健全部同士のエネルギー比の計算は、昨年度製作した円形欠陥モデル供試体中の 8 点で計測された健全部のデータのすべての組み合わせで行った。これら健全部同士の振動エネルギー比のばらつきの上限と下限である ± 3.6 dB を欠陥判定の閾値とすると、φ200 mm では 80 mm 程度の深さまで検出可能であることがわかる（図 10 (a)の点線が閾値である 3.6dB を示す）。

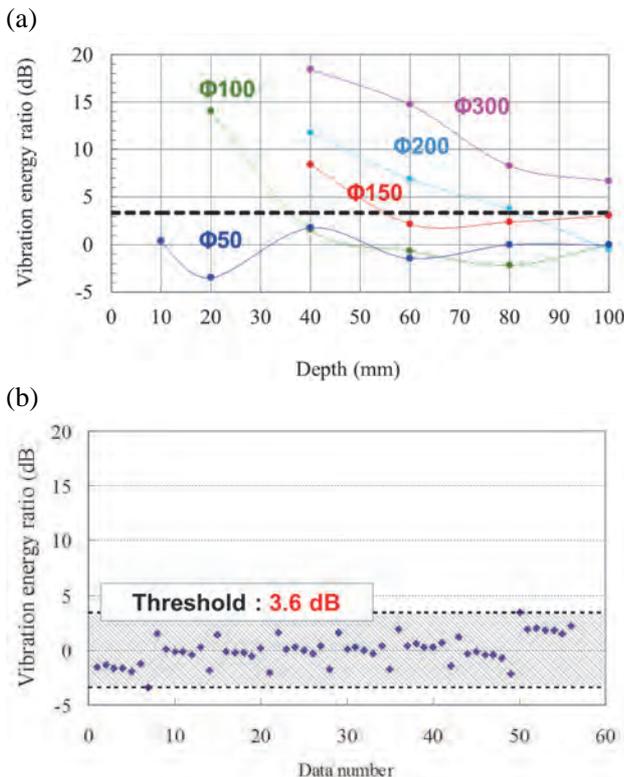


図 10. 振動エネルギー比の計算結果
(a)円形欠陥部上、(b)健全部同士

7. 実コンクリート構造物での検出結果例

7.1 ボックスカルバート

探査対象とした北陸自動車道のボックスカルバートを図 11 に示す。探査対象としたのは塩害が特に進展していると思われる海側側壁である。



図 11. ボックスカルバートでの実験風景

叩き点検結果および非接触音響探査法による振動エネルギー比の映像結果を図 12 に示す。図中に示された地表面から高さ 1.7 m の赤枠のエリアを対象とした。1 回の測定規模は 1.0×1.0 cm 程度とし、4 エリアに分け測定した。1 エリアのスキャンポイント数は 5×5 ポイントである。音源から対象面までの距離は 4 m 程度である。床および天井面反射による干渉を抑えるため、床面から音源の高さは 2 m と設定した。SLDV のレーザヘッド位置も同様な距離、高さに設定し、良好な受光感度を得るため、各測定エリアに対し正対させている。送信波形は広帯域トーンバースト波である（持続時間 3ms、変調インターバル 200Hz、パルス間インターバル 50ms、開始—終了周波数 1500-6500Hz、コンクリート表面での音圧は 100 dB 程度）。加算平均回数は 1 点につき 10 回とした。

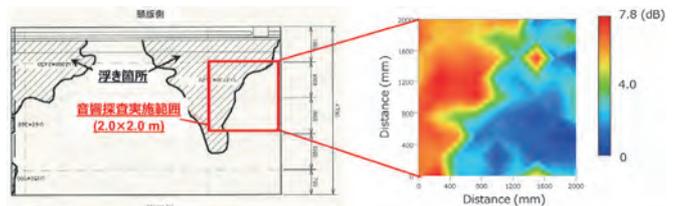


図 12. 叩き点検(右)および非接触音響探査法(左)による調査結果(斜線部:浮き)

振動エネルギー比の基準となる健全部のデータは、今回測定された全スキャンデータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を用いた。図から、海側に比べ、陸側の側壁の方が高いエネルギー比を示している。健全部とのエネルギー比 4 dB を欠陥判定の閾値とすると、図中の左半分はほぼ欠陥部と判定される。叩き点検において浮きと判定された部位と音響探査法によりエネルギー比率が高く

判定された部位は非常に近く、音響探査法の探査精度は叩き点検と近い性能を有している事が確認出来る。

7.2 RC床版

探査対象とした RC 床版のある橋梁の外観を図 13 に示す。実験日は特に車両規制等はなく、トラック等が走行している状態で行った。探査対象としたのは塩害が特に進展していると思われる海側の RC 床版(図 13 (a) 中奥側)で、床版は図 13 (b)に示すよう下面側から計測した。1 回の測定規模は 60×60 cm 程度とし、これを延長方向に繰り返し、合計 9 エリア測定を行った。1 エリアのスキャンポイント数は 6×5 ポイントである。音源から対象面までの距離および SLDV から対象面までの距離は 2 m および 2.2 m である。送信波形は広帯域トーンバースト波である(持続時間 3ms、変調インターバル 200Hz、パルス間インターバル 50ms、開始—終了周波数 500-5500Hz、コンクリート表面での音圧は 100 dB 程度)。点数が多いため、測定速度の効率を考慮しパルス間インターバルは 50 ms と通常の半分に設定した。出力時の音圧は 100 dB 程度である。加算平均回数は 1 点につき 10 回とした。対象面までは 3 m と、簡便な足場があれば手の届く高さであったため、この時マイクロホンを用いた打音法による計測も比較用に実施した。

図 14 に探査結果を示す。非接触音響探査法の結果は振動エネルギー比による評価を行った。基準となる健全部のデータは、今回測定された全スキャンデータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を用いた。図 14 (a) は音響探査法によるエネルギー比分布、図 14 (b) は打音法による厚さ分布である。図 14 (a) 中のエネルギー比の高い位置と図 14 (b) の薄く判定された位置を比較すると、概ね位置関係が合致している事がわかる。

8. まとめと今後の課題

5m 以上の遠隔からでもコンクリート構造物の非破壊検査が可能な非接触音響探査法の基本原理、コンクリート供試体および実コンクリート構造物を用いた検討を行った。最初に円形欠陥モデルを用いた実験結果より、5m の離隔でも打音法と同様な探査性能を示していることが明らかになった。次にはく離モデルを用いた実験結果より、割裂幅 0 mm のひび割れであっても検出可能であることも明確になった。さらに主に実コンクリート構造物を用いた実験結果から、本手法がたたき点検法と同程度の精度で欠陥検出を実施可能であることが明らかになった。

以上より、本手法は打音法と同じたわみ共振現象を利用していることから、将来的には打音法に置き換わる標準的なコンクリート構造物の遠距離

非破壊検査法として期待できると思われる。

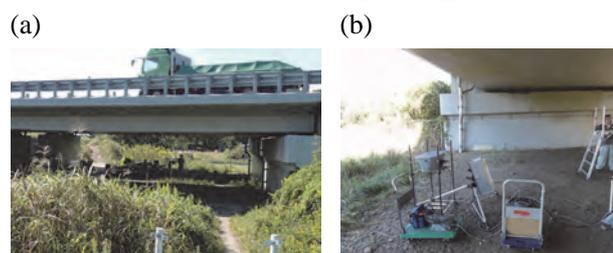


図 13 実験風景 (a) 橋梁外観 (b) セットアップ

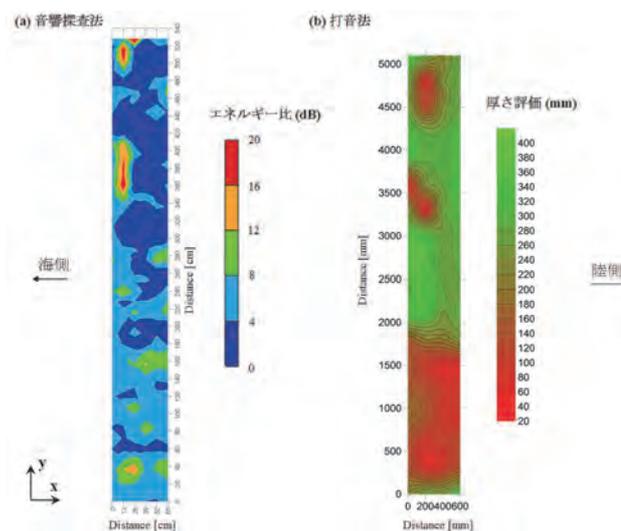


図 14 RC 床版の探査結果例 (a)音響探査法 振動エネルギー比分布, (b)打音法 厚さ評価分布

謝辞

本研究は平成 22-25 年度の国土交通省、委託研究「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) Tsuneyoshi Sugimoto, Ryo Akamatsu, Noriyuki Utagawa and Syuichi Tsujino : Non Contact Long Distance Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD, J. Acoust. Soc. Am, 131 (4): p.3462, 2012
- 2) 赤松亮、杉本恒美、歌川紀之、辻野修一：長距離音響発生装置を用いた非接触欠陥検出法の検討、コンクリート構造物の非破壊検査、Vol.4, pp.31-36, 2012
- 3) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, and K.Katakura : Proposal of Non-Contact Inspection Method for Concrete Structures, Using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.52, 07HC12, 2013
- 4) 日本機械学会編：機械実用便覧(改訂第6版), 丸善株, 東京, 2006.9
- 5) K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto, and N.Utagawa : Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, 07KC15, 2014

34. 傷んだアスファルト舗装を簡易に補修する工法機械の開発

大成ロテック株式会社
大成ロテック株式会社
大成ロテック株式会社

○ 越村 聡介
平野 晃
田中 純

1. はじめに

近年、建設業界は、公共事業の復調や2020年の東京五輪を見据えたインフラ整備等に伴い、政府の建設投資額は増加傾向にあり、回復基調を示しているが、その一方で、労務費や資材費の高騰が業界の懸念材料となっている。そのような状況の中で、道路建設工事においては、工事コスト縮減や、地球環境への配慮等、社会的要求事項への対応も求められている。

このような状況下において、今後、将来的には新設道路の建設は減少し、維持修繕工事が増加することが予測されることから、効果的かつ効率的な維持修繕技術が求められている。

大成ロテック㈱では、その解決策として、従来の路上表層再生技術（サーフェイスリサイクリング工法）を更に簡素化し、既設舗装路面を再生する低コスト路面維持工法である『ヒートリフレッシュ工法』を提案し、専用の施工機械を開発した。本稿では、ヒートリフレッシュ工法の概要および専用機の特徴を示すと共に、その導入事例について報告する。

2. ヒートリフレッシュ工法の概要

ヒートリフレッシュ工法は、パッチングや段差、老朽化で傷んだアスファルト舗装面を簡易的に修繕する工法で、専用施工機を使用し、既設舗装路面を加熱、深さ10mm程度掻きほぐし、厚さ20mm程度の新規アスファルト混合物を路面表層部にリペーブする薄層オーバーレイ工法である。施工イメージを図-1に示す。

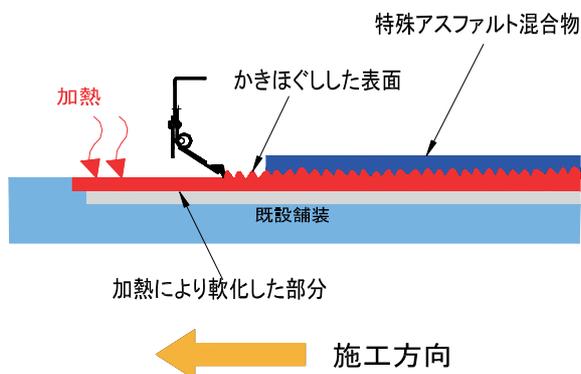


図-1 施工イメージ

ヒートリフレッシュ工法の特徴を下記に示す。

1) 品質の確保

加熱して掻きほぐした既設路面と新規混合物を一体化させることで、接着剤（タックコート）を使用せずに切削オーバーレイ工法と同等以上の接着強度を持った舗装路面を再生することが可能である。

図-2に引張り強度、図-3にせん断強度試験の結果例を示す。

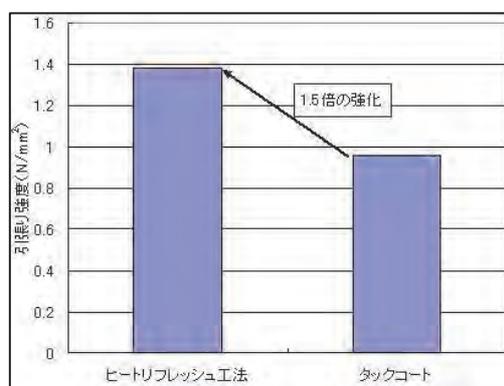


図-2 引張り強度試験結果例

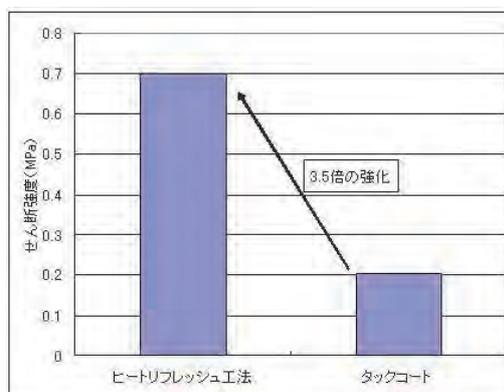


図-3 せん断強度試験結果例

2) 工期短縮

接着剤散布工等の作業工程が省略され、工期の短縮及び、早期交通開放が期待できる。

3) 機械編成の簡素化

切削オーバーレイ工法及び、ヒートリフレッシュ工法の施工機械編成比較を図-4に示す。専用施工機を使用することで、①既設路面の加熱、②掻きほぐし、③アスファルトフィニッシャーへの新規合材の供給を1台で行うことで、切削オーバーレイ工法と比較して、施工機械編成の簡素化できる。

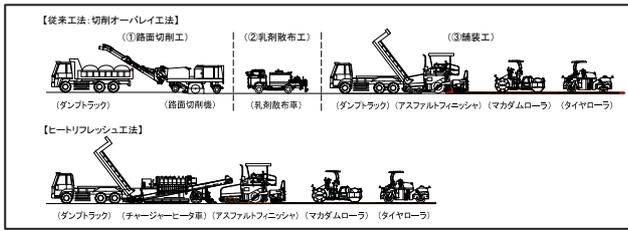


図-4 機械施工編成図比較

4) 施工コスト縮減

施工コストの試算結果を図-5に示す。施工コストは、施工場所を関東とし、1日のみの施工で、日施工量を2,000m²として試算した。前述した作業工程の短縮や機械編成の簡素化による燃料費、回送費等がコストダウンされ、施工コストは、従来の30mmの切削オーバーレイとの比で約30%、40mmの切削オーバーレイでは、約45%縮減できる。

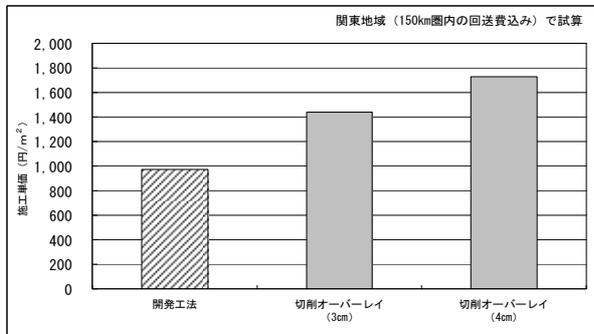


図-5 施工コストの試算結果

5) 環境負荷低減効果

当該工法では、切削機による路面切削を伴わないため、切削廃材が発生しない。また、路面切削に伴う廃材運搬車両から排出されるCO₂も削減される。

CO₂排出量の試算結果を図-6に示す。試算条件は、幅員3.25m、2車線、延長200m、面積1,300m²で、結果は、100m²あたりのCO₂排出量とした。当該工法のCO₂排出量は、従来の30mmの切削オーバーレイとの比で約20%、40mmの切削オーバーレイでは、約35%の低減効果が見込まれる。

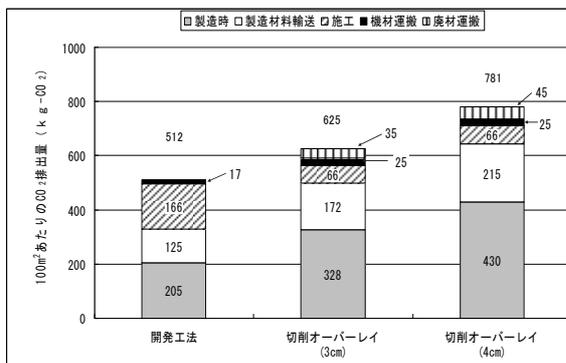


図-6 CO₂排出量試算結果

3. 専用機の開発

3.1 機械概要

ヒートリフレッシュ工法の専用施工機として、従来、路上表層再生工法で使用していたチャージャータ車をベースマシンとして開発を行った。

チャージャータ車は、『ダンプトラックから表層用アスファルト混合物を受け、後方のアスファルトフィニッシャに供給する機能』と『路面を加熱する機能』および『加熱路面を掻きほぐす機能』の3つの機能を有する機械である。機械の主要諸元を表-1に、機械全景を写真-1に示す。

表-1 主要諸元

寸法	全長	10,449mm
	全幅	2,480~4,000mm
	全高	2,648mm
車両重量	21,790kg	
施工幅員	2,480~4,000mm	
加熱装置	加熱方式	赤外線輻射方式
	加熱能力	5,986 MJ/h
	加熱燃料	LPG

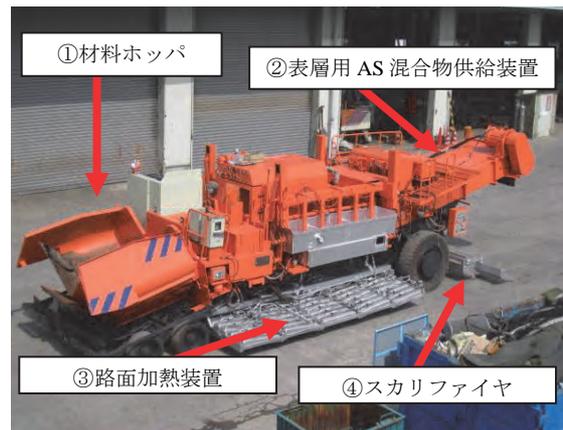


写真-1 チャージャータ車全景

- 1) 表層用アスファルト混合物供給装置
ダンプトラックで運搬された混合物を、専用施工機で材料ホッパーで受け、後方に配置したアスファルトフィニッシャに材料供給する。
- 2) 路面加熱装置
LPG式赤外線ヒータをパネル状に配列し、最大約6,000MJ/hの加熱能力を有する。ヒータパネルの昇降機能及び、燃焼制御によって、最適な路面加熱を確保する。又、ヒータパネルの増設により、最大幅員4.0mまで対応可能である。
- 3) 掻きほぐし装置 (スカリファイヤ)
切削機用超硬ビットを水平方向に50mm等間隔で配列し、各々のビットがスプリングの反発機能によって独立して路面に作用する。スプリングの反発力によって、ビットを路面に食い込ませることで、路面形状に追従して一定の掻き

ほぐしが確保され、また、路面の既設マンホール等も、ビットが跳ねのけることで、ビットを損傷させること無く、連続的掻きほぐしが実施可能である。スカリファイヤの施工状況を写真-2に、マンホール部の施工状況を写真-3に示す。



写真-2 スカリファイヤ施工状況



写真-3 マンホール部施工状況

3.2 施工事例

平成23年度から、現場にて供用を開始し、当該機による総施工面積は、約8,000m²である。

下記に、施工事例を紹介する。

3.2.1 工事概要

工事概要を表-2に示す。

表-2 工事概要

場所	静岡県湖西市(国道)
施工月	平成23年6月
規模	400m ² (幅員3.3m×延長60m×2車線)
上層混合物	5mmTop改質II型混合物(t=20mm)
交通量区分	N5交通

既設舗装の路面状況を表-3に、路面状況の一例を写真-4に示す。

工事対象となる路面のFWDによる調査結果は、D₀たわみ量=max414(μm)、わだち掘れ量=max23(mm)。また、ひび割れ率=20.3(%)であった。

表-3 既設舗装の路面状況

	平坦性(mm)	わだち掘れ量最大(mm)	FWDによるD ₀ たわみ量最大(μm)	ひび割れ率(%)
上り車線	3.99	23	414	20.3
下り車線	2.14	14	392	1.1



写真-4 路面状況

3.2.2 施工

施工は、当該機で、路面加熱・掻きほぐしを行い、アスファルトフィニッシャにて新規アスファルト混合物を20mm敷き均し後、マカダムローラ及びタイヤローラにより転圧を行った。施工状況を写真-5に示す。



写真-5 施工状況

3.2.3 施工結果

施工前後の路面状況を写真-6に示す。



写真-6 施工前後の路面比較

表-4 に、修繕後の路面性状結果を示す。
既設舗装は、経年劣化による路面の荒れや、ひび割れ及び、わだち掘れが発生していたが、施工後の平坦性は、 $\sigma = 1.5$ (mm)、わだち掘れ量は、1.8 (mm) に修復され、舗装体として機能復元及び、走行性の回復を図ることができた。

表-4 修繕後の路面性状結果

平坦性 (mm)	わだち掘れ量 最大(mm)	すべり抵抗 (BPN)
1.48	1.6	62
1.54	1.9	64

4. 新型専用施工機の開発

4.1 開発経緯

3 項までに記述した様に、ヒートリフレッシュ工法は、加熱掻きほぐした既設路面に逸早く、新規アスファルト混合物をオーバーレイすることが、新旧の材料接合性を強靱とし、品質確保の上で、重要な要素となる。特に冬季施工や寒冷地での施工に際しては、路面の加熱掻きほぐし後にタイムラグ無く、直近で新規アスファルト混合物を敷き均すことがより理想的な施工法となる。この点に着目し、初期型の専用施工機にアスファルト混合物の敷均し機能（以下、スクリーン装置と記す）を装備した新型専用施工機（2号機）の開発製作を実施した。

4.2 機械概要

新型機の開発コンセプトは、不稼働機械を流用し、開発に関わる初期投資額を抑え、機械使用料を安価とすることで施工コストに反映することを目的とした。また、路面の加熱・掻きほぐし～アスファルト混合物の敷均しまでの作業工程を一台の機械にオールイン化することで、施工に関わる機械経費を低減させた。

新型機は、路上表層再生工法で使用していたリミキサ車をベースマシンとして開発を実施した。

当該機は、①材料ホッパ、②材料搬送装置、③路面加熱用ヒータ装置、④路面掻きほぐし装置（スカリファイヤ）、⑤材料敷均し装置（スクリーン）を備える。当該機の主要諸元を表-5 に、新型専用施工機の全景を写真-7 に示す。

表-5 主要諸元

寸法	全長	9,781mm
	全幅	2,490～3,990mm
	全高	2,807mm
車両重量	21,800kg	
施工幅員	2,500～4,000mm	
加熱装置	加熱方式	近赤外線輻射方式
	加熱能力	5,567 MJ/h
	加熱燃料	LPG



写真-7 新型専用施工機の全景

4.3 機械装置概要(特徴)

1) 路面加熱用ヒータ装置

ハイカロリータイプのLPG式赤外線ヒータ（従来比の2倍相当の熱量）を採用して、装置の収納スペースをコンパクト化すると共に、加熱性能を向上させた。また、火気取扱の安全確保及び、操作性向上を目的として、小型無線リモコンでの遠隔操作による自動ヒータ制御方式（自動着火・燃焼量制御）を採用した。

2) スカリファイヤ

初期型機と同様の、加圧スプリング式掻きほぐし装置を採用した。

3) スクリーン装置

汎用のアスファルトフィニッシャーで実績のある伸縮式のタンパ・バイブレータ型スクリーン（伸縮式TVスクリーン）を採用し、舗装幅員W=2.5～4.0mの舗装が可能である。

4.4 新型専用施工機械の導入効果

新型専用施工機の現場導入効果を下記に示す。

1) 安全性の向上

新型機の導入により、『新規混合物の受入れ搬送・路面の加熱掻きほぐし・新規混合物の敷均し』の一連作業が、1台で完了するので、更に機械編成が簡素化され、重機同士及び、作業員との接触事故（挟まれ）等の危険リスクが大幅に低減し、安全性の向上が期待できる。

2) 品質の確保

当該機を使用した掻きほぐし及び、敷均し状況を写真-8 に示す。路面の加熱掻きほぐし及び、材料敷均しまでの作業工程を一元化することで、路面の加熱掻きほぐし後、車両が停止しない限り、1分間程度で材料敷均し（転圧作業を除く）が完了する。このため、温度低下を最小限に止めた状態での材料接合が可能となり、熱放出が速い薄層舗装体であっても、既設舗装体との一体化が確保される。

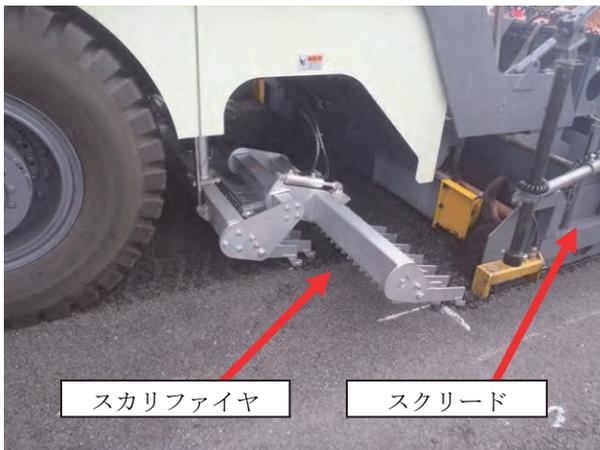


写真-8 掻きほぐし・敷均し状況

3) 機械編成の簡素化

図-7 に施工機械編成図を示す。

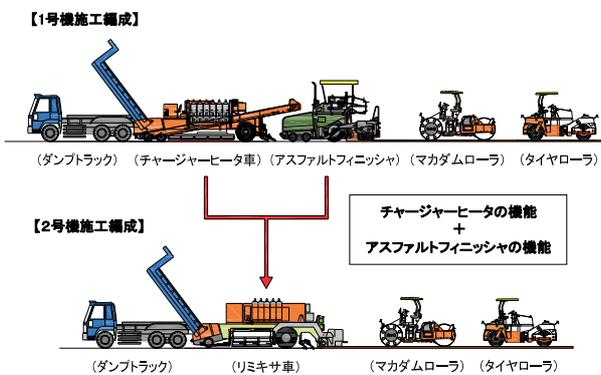


図-7 機械編成図

4) 更なる施工コスト削減

施工コストは、アスファルトフィニッシャーに関わる輸送費、燃料費、機械使用料が削減され、低施工コストでの工事を提供できる。

4.5 施工事例

埼玉県鴻巣市の市道において、新型機による道路修繕工事を実施した。以下に施工事例を示す。

4.5.1 工事概要

工事概要を表-6 に示す。

表-6 工事概要

場所	埼玉県鴻巣市(市道)
施工月	平成25年11月
規模	1,250㎡(幅員2.6m×延長240m×2車線)
上層混合物	5mm Top改質 II 型混合物(t=20mm)

既設舗装の路面状況を表-7 に、路面状況の一例を写真-9 に示す。平坦性は乗り心地を評価する IRI で測定を行った。既設舗装は亀甲状ひび割れの他、度重なる部分補修(パッチング)、複数のポットホ

ールもあり、舗装表層部の損傷が著しく進行している路線であった。

表-7 既設舗装の路面状況

	平坦性 (mm/m)	わだち掘れ量 平均(mm)	ひび割れ率 (%)
上り車線	2.73	6.7	45.5
下り車線	3.90	11.9	24.6



写真-9 路面状況(修繕前)

4.5.2 施工

当該施工では、冬季施工であったことや、バス路線のため交通規制に大幅な制約があったことから、施工時間の短縮及び機械編成のコンパクト化を図るため、新型施工機を選定し、施工を実施した。施工状況を写真-10 に示す。



写真-10 施工状況写真

4.5.3 施工結果

修繕後の舗装路面性状を表-8 に、施工後の状況を写真-11 に示す。

表-8 修繕後の路面性状結果

	平坦性 (mm)	わだち掘れ量 最大(mm)
上り車線	1.68	2.6
下り車線	1.62	2.7



写真-11 路面状況（修繕後）

修繕後の平坦性測定結果（IRI） $\sigma = 1.6(\text{mm/m})$ 、わだち掘れ量 $= 2.6(\text{mm})$ に修繕され、舗装体として機能復元及び、走行性の回復を図ることができた。

その後の追跡調査の結果として、現在に至るまで、ひび割れ等の発生もなく健全な道路として供用している。

5. まとめ

本稿では、簡易な舗装修繕工法として、ヒートリフレッシュ工法を提言し、専用施工機の開発及び、現場導入並びに施工結果に至るまでを報告した。実績として得られた結果を以下にまとめる。

- ① ヒートリフレッシュ工法の適用により、加熱して掻きほぐした既設路面と新規混合物を一体化させることで、接着剤（タックコート）を使用せずに切削オーバーレイ工法と同等以上の接着強度を持った舗装路面を再生することが可能である。また、新型機を使用した場合、路面加熱と新規混合物の敷き均しまでの間隔が短くなることで、加熱部の温度低下が減少し、更に確実な付着強度を確保することが可能となった。
- ② 施工コストの試算結果として、関東地域での施工1日を想定した工事において、従来の切削オーバーレイ工（厚さ 30mm）との比較で約 30%、切削オーバーレイ工（厚さ 40mm）では、約 45%の施工コスト縮減が期待できる。また、新型機を導入した場合には、更に 10%の施工コスト縮減が可能となる。
- ③ CO_2 排出量の試算結果として、従来の切削オーバーレイ工（厚さ 30mm）との比較で約 20%、切削オーバーレイ工（厚さ 40mm）では、約 35%の低減効果が期待できる。また、新型機を導入した場合には、更に約 20%削減が可能となる。

- ④ ヒートリフレッシュ工法を適用することで、低コストで、傷んだ道路の舗装機能の復元及び、走行性の回復を図ることが可能となる。また、道路の損傷程度が軽い時期に当該工法を適用することで、高コストな大規模維持修繕工事を適用せずとも予防保全に寄与し、道路延命が期待される。
- ⑤ 新型施工機の開発導入により、当該工法に適用する施工機械が省力化され、それに伴う、機械経費（使用料・回送費・燃料費等）・運転員の人件費が削減となり、更なる施工コストの低減が期待できる。

6. 今後の課題

今後の課題を以下に示す。

- 1) 施工データの蓄積
特に新型機に関しては、導入事例が少なく、今後も積極的な現場への導入を図り、施工データの蓄積が必要である。
- 2) 冬期施工時の施工方法の確立
冬期の施工時は、路面加熱後の著しい温度低下が予想される。施工規模やコストを勘案し、予備加熱の実施等の施工方法を検討する必要がある。
- 3) 機械の大型化による安全対策
複数の機構を装備したため、機械が大型化した。そのため、死角となる部分が多く、作業の安全性を確保するための対策が必要である。

7. おわりに

傷んだアスファルト舗装を簡易に補修するヒートリフレッシュ工法は、廉価で CO_2 排出量も少なく、切削による廃材等の発生もない、環境に優しい工法である。

当該工法が、今後の維持修繕等、道路管理業務の一助となるよう、普及活動に努めていくと共に、今後も、地球環境へ配慮した技術・機械の開発に注力していく所存である。

参考文献

- 1) 紺野 路登・水野 孝浩・中塚 将志・関口 峰：簡易な路上再生機を用いた補修工法の開発と効果の検証，第 17回舗装に関する懸賞論文，pp.50～56，2011

35. 冬期路面対策における 防滑材の定着性向上を目的とした加熱水混合散布手法

(独) 土木研究所寒地土木研究所 ○中村 隆一
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 住田 則行
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 切石 亮

1. はじめに

積雪寒冷地の厳寒期には、冬期道路の凍結路面対策として、すべり止め効果を期待して砂や碎石等の防滑材が散布されているが、通行車両の走行などによって、時間経過とともに走行路外へ飛散しその効果が低下する場合がある。

そこで、防滑材の路面への定着性向上を目的とした新たな散布技術として、防滑材と加熱水の混合散布（以下、「加熱水混合散布」という。）手法について検討し、この手法に対応する凍結防止剤散布車の試作と試作機による実道での試験施工を行った。

2. 既往研究

2.1 海外事例

防滑材の加熱水混合散布は、1997年からノルウェー公共道路庁が実施した「Winter Friction Project in Norway」の研究成果として開発された¹⁾。

加熱水混合散布に対応した機械を写真-1、ノルウェーにおける加熱水混合散布の主要仕様を表-1に示す。この手法は、従来の焼砂を乾式散布する手法に比べ、すべり抵抗値の改善効果が高く、その散布効果は10～20倍持続し、防滑材の使用量が40～50%削減できる可能性があると報告された。散布効果の概念図を図-1に示す。

また、カナダのオンタリオ州においても加熱水混合散布の試験が行われ、少なくとも1日は散布効果が持続することが確認された²⁾。写真-2に加熱水混合散布に対応した機械を示す。



写真-1 ノルウェーにおける加熱水混合散布に対応した機械の一例

表-1 ノルウェーにおける加熱水混合散布の主要仕様

防滑材の粒度	0～4mm
加熱水の温度	90～95℃
加熱水の混合割合	重量比30%
散布量	200g/m ²

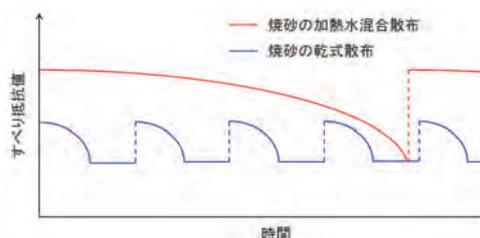


図-1 散布効果の概念図



写真-2 カナダにおける加熱水混合散布に対応した機械の一例

2.2 国内における既往研究

我が国における加熱水混合散布の適応性を確認するため、佐藤らは、低温実験室において氷板供試体に対する加熱水混合散布について防滑材（焼砂・7号碎石）の定着率に関する基礎試験を行った³⁾。

その結果、室温-8℃と-20℃において、加熱水の混合割合が7号碎石で20%、焼砂で40%であれば、加熱水温度20℃以上で定着率は90%以上となった。このことから、加熱水混合散布の防滑材は7号碎石が効率的であることを確認したが、走行車両の影響等を考慮する必要があると課題を示した。

さらに、切石らは、佐藤らの試験結果を基に、2011～2013年の3ヶ年にかけて苫小牧寒地試験道路に氷膜路面を作製して、国土交通省北海道開発局で防滑材として主に使用されている写真-3の7号碎石を用いた加熱水混合散布試験を行った^{4),5)}。

試験は、すべり抵抗値と散布効果の持続性を他の散布手法と比較検証するため、図-2 に示すような無散布（散布なし）・乾式散布（7号碎石のみ）・湿式散布（7号碎石+CaCl₂水溶液）・加熱水混合散布（7号碎石+加熱水）の4種類の散布手法に加え、加熱水混合散布は、加熱水温度が20℃・40℃・60℃及び混合割合が20%・30%の条件を設定して行った。写真-4 のように凍結防止剤散布車により上述の条件で散布施工後、一般交通を模擬した車両を走行させ、散布前・散布直後・車両50台走行後～300台走行後まで50台走行毎に、写真-5の連続路面すべり抵抗値測定装置⁶⁾を用いてすべり抵抗値を計測した。写真-6 に散布施工直後の路面の一例を示す。

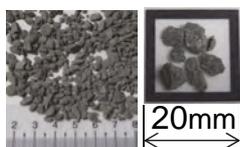


写真-3 7号碎石

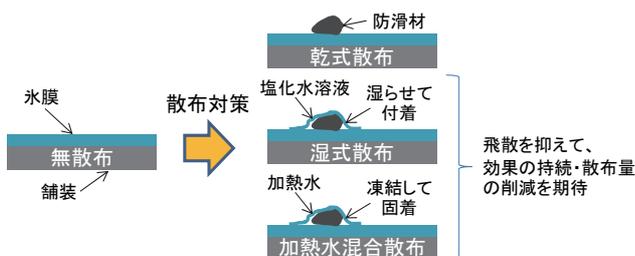


図-2 防滑材散布の概念図



写真-5 連続路面すべり抵抗値測定装置



写真-6 水膜路面における加熱水混合散布施工路面の一例

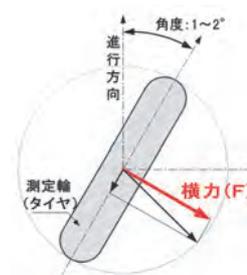


図-3 測定輪の概念図



写真-4 凍結防止剤散布車による散布状況

連続路面すべり抵抗値測定装置とは、車両後部に取り付けた測定輪に、図-3 に示すように車両進行方向に対して1~2°程度の角度を与え、測定輪が回転する際に発生する横力から、すべり抵抗値を測定する装置である。すべり抵抗値は、装置の開発者が独自に設定したHFN値（Halliday Friction Number, 0~100の範囲）で表され、すべり難いほど高い値を示す。HFN値と路面状態の関係は、図-4 に示すように0~44は雪氷路面、45~59は断続的な雪氷路面、60~100は乾燥舗装路面に概ね対応する。

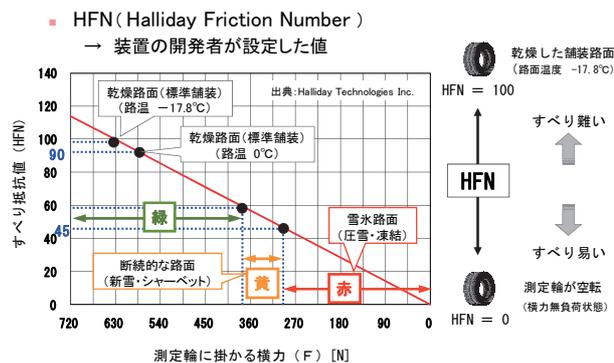


図-4 すべり抵抗値と横力

すべり抵抗値を計測した結果、加熱水温度20℃では、走行車両のタイヤ摩擦や走行風などの影響により防滑材が飛散し、散布効果が低下したことから当該手法による効果は得られなかった。加熱水温度40℃以上では、防滑材の定着性が高い状態で維持できることを確認したが、加熱水温度が40℃と60℃では各計測毎のHFNの平均値は1.2~4.9であり、明確な差は確認できなかった。また、加熱水の混合割合は、20%より30%の方が各計測

毎の HFN の平均値が 5.2~9.6 高いすべり抵抗値を維持し、効果の差が現れた。氷膜路面におけるすべり抵抗値の検証結果の一例を図-5 に示す。

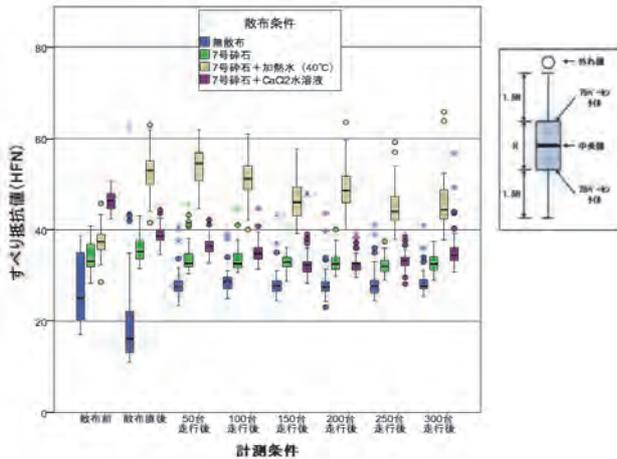


図-5 氷膜路面におけるすべり抵抗値検証の一例
(2013/01/17:加熱水混合散布,加熱水 40℃,混合割合 20%)

3. 加熱水混合散布に対応する凍結防止剤散布車の試作

我が国において市販されている凍結防止剤散布車には水溶液を加熱する機構は装備されていないため、加熱水を作製する機構を検討した。

新たな機械を開発することは、購入費が高額となり、導入に向けて支障となることから、市販の凍結防止剤散布車を改造する方法を採用した。改造の基本条件は、車検取得等の各種法令、法規を準拠した設計とし、加熱水温度は散布直前の散布円盤において 40℃以上とした。

試作機は、国土交通省北海道開発局で多く使用されている機種に製作した加熱機構を車載した。試作機の外観を写真-7、水溶液散布の系統図を図-6 に示す。

加熱機構は、直列系統の加熱機器 2 台に熱交換器 1 台を介して、水溶液タンク内の水を循環させて加熱する予熱方式とし、制御部を含めてシステム化した。水循環回路は、加熱機器と熱交換器間は不凍液を、水溶液タンクと熱交換器間は水を循環させ、熱交換器で冷却された不凍液は再び加熱機器へ、熱交換器で加熱された水は水溶液タンクへ循環し、水溶液タンク内の水を加熱する。

また、不凍液の循環時の排熱を利用して、凍結しやすい水溶液ポンプ、ストレーナを含む水循環回路を凍結から保護するため、それらを覆う保温カバーを設けた。

なお、加熱機器の電源は、試作機の車両には電気容量の余裕がなかったため、可搬型の発電機から確保した。そのため、加熱水の作製は、車両走行前の条件となり、試験施工中の温度低下を見越した加熱水温度の設定が必要であった。

加熱水混合散布後の水循環回路の凍結対策は、水溶液タンクから散布円盤までの散布回路及び熱交換器間の予熱循環回路の水抜き後、それらの回路に凍結を防止するための水溶液を循環させることで完了できる。



写真-7 試作した加熱水混合散布に対応した機械

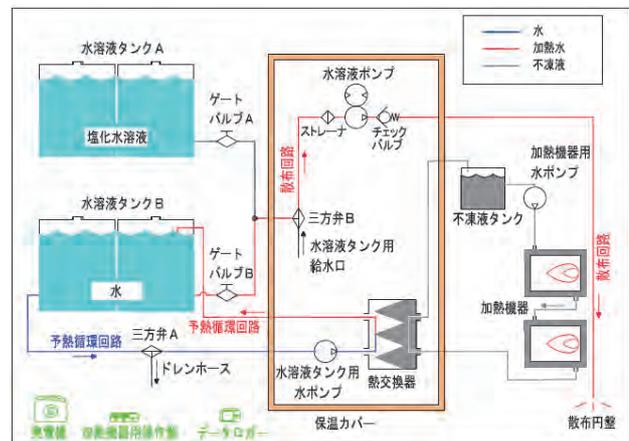


図-6 試作機の水溶液散布の系統図

4. 実道での試験施工

平成 26 年 2 月 5 日、北海道樺戸郡新十津川町の一般国道 451 号で加熱水混合散布と湿式散布、無散布路面のすべり抵抗値を比較し、散布効果を検証する試験施工を行った。天候は晴れ、路面はほぼ圧雪状態、交通量は 10 台/h 程度だった。写真-8 のように試作機により加熱水混合散布した防滑材の路面上での状態は、写真-9 に示すように加熱水が防滑材を覆うように凍結し固着していた。すべり抵抗値は、連続路面すべり抵抗値測定装置で測定した。

すべり抵抗値の測定結果の一例を図-7 に示す。この区間では、加熱水混合散布を 4:45 頃、湿式散布を 5:30 頃実施した。散布効果は、散布前 (3 時台)、散布後 (6 時台、8 時台、10 時台) の計 4 回検証した。その結果、加熱水混合散布は、現行の湿式散布と比較して、散布直後のすべり抵抗値及びその持続性に向上が見られた。

また、試験施工中における試作機の水循環回路の主要部の温度を測定した。その結果、外気温

-20℃～0℃程度の条件では、図-8 に示すとおり、散布円盤の加熱水温度は、いずれも散布開始から数秒で水溶液タンク内の温度に推移した。なお、試作機は加熱機器を停止しないと走行できないが、その場合、水溶液タンク内の温度が1時間当たり10℃～20℃程度低下することを確認した。



写真-8 試作機による散布状況



写真-9 雪氷路面における加熱水混合散布施工路面の一例

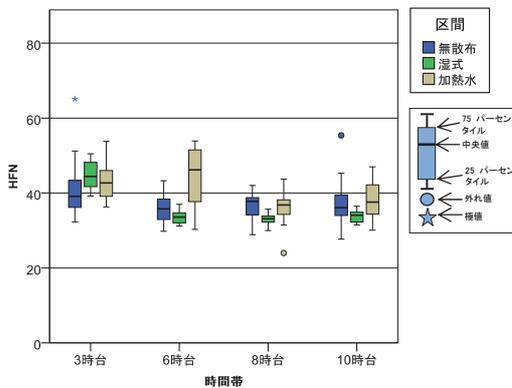


図-7 雪氷路面におけるすべり抵抗値検証の一例

(2014/02/05:加熱水混合散布,加熱水40℃,混合割合20%)

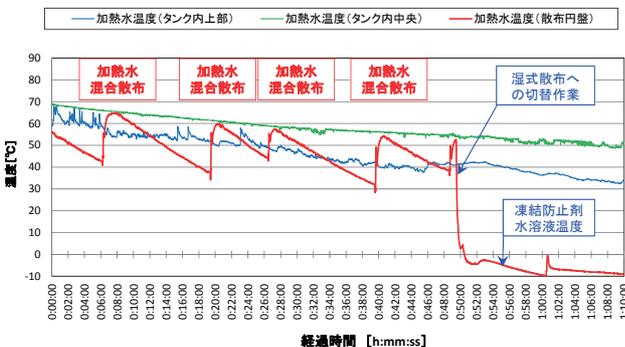


図-8 試作機の水溶液経路における加熱水温度の一例

5. まとめと今後の課題

実道の雪氷路面における加熱水混合散布の試験施工では、湿式散布に比べ同等以上のすべり抵抗値を示したが、試験道路に作製した氷膜路面で得られたような明確なすべり抵抗値の向上は確認できなかった。しかし、実道でのすべり抵抗値は、1日分しか取得できていないため、今後は実道の試験施工データを多く取得し、加熱水混合散布の効果を検証していきたい。

また、加熱水混合散布に対応する機械として、現行の凍結防止剤散布車の改造により試作機を製作し、試験施工を通して実用の目処が付いた。

加熱水混合散布による防滑材の定着性向上には、加熱水温度と混合割合が重要な要素であるが、その改造コストが高額になると、導入が難しくなるため、加熱機構の検討と厳寒地における適切な加熱水の温度や混合割合等の検討を並行して行い、最適な加熱水混合散布手法の確立を目指したい。

さらに、加熱水混合散布と湿式散布の工事費の比較、機械の改造費等の試算を行い、道路管理者へ新たな散布手法の提案をしていきたい。

最後に本試験にあたり、試験フィールドの提供等にご協力頂いた国土交通省北海道開発局の担当者へ、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Torgeir Vaa : Implementation of New Sanding Method in Norway, Sixth International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, TRB Electronic Circular 63, pp.473～486, 2004
- 2) Max Perchanok・Liping Fu・Feng Feng・Taimur Usman・Heather McClintock・Jim Young・Kevin Fleming : Sustainable Winter Sanding with Pre-wetting, 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 2010
- 3) 佐藤圭洋・秋元清寿・宮本修司・徳永ロベルト : 防滑材の飛散対策に関する基礎的研究, 寒地土木研究所月報, No.675, pp.35～41, 2009
- 4) 切石亮・大日向昭彦・徳永ロベルト・高橋尚人・中村隆一 : 冬期路面管理における防滑材の定着性向上に関する研究, 北海道の雪氷, No.30, pp.51～54, 2011
- 5) 切石亮・川端優一・徳永ロベルト・高橋尚人・中村隆一 : 効果的・効率的な防滑材の加熱水混合散布手法に関する研究, 北海道の雪氷, No.32, pp.88～91, 2013
- 6) 舟橋誠・徳永ロベルト・浅野基樹 : 連続路面すべり抵抗値測定装置 (RT3) の導入について, 寒地土木研究所月報, No.651, pp.40～47, 2007

36. 積雪寒冷地の冬期歩道における雪氷路面処理技術について

(独) 土木研究所寒地土木研究所
(独) 土木研究所寒地土木研究所
(独) 土木研究所寒地土木研究所

○ 三浦 豪
牧野 正敏
井谷 雅司

1. はじめに

積雪寒冷地の冬期歩道路面(写真-1)では、積雪や路面の凍結により歩行者転倒事故が多発しており、特に高齢者が除雪の不十分な歩道を避けて車道を歩くことによる交通事故の危険性や、冬期の外出を控えがちになる等の問題も発生している。

特にバリアフリーの観点からも高齢者・移動制約者等に対して歩道空間を改善する路面管理手法及び対策が求められている。

歩道のすべりやすい雪氷路面(つるつる路面)対策として、すべり止め材が使用されているが、散布効果が定量的に把握された例は少なく、また、大量の散布は、春先の堆積土処理量増加の要因にもなる。



写真-1 歩道に形成されたすべりやすい雪氷路面

2. 冬期歩道の雪氷路面処理技術の検討

道路利用者が安全に安心して歩ける快適な歩行空間を確保するため、冬期の雪氷路面对策については様々な取り組みが行われている。

佐藤、工藤¹⁾は小形除雪車に粗面形成装置(レーキタイプ)を取り付け、歩道で調査を実施した。その結果、粗面形成装置で雪氷路面に溝を付けて、すべり抵抗を増加させることで、雪氷路面のすべり止

め効果における装置の有効性を明らかにした。

この粗面形成装置は、雪氷路面の表面に粗面を形成することが可能であるが、形成された粗面は降雪や融解等により長時間のすべり止め効果の持続が困難である。

そこで、寒地土木研究所では、冬期歩道の雪氷路面処理方法として機械的処理に着目し、構造が単純で特別な動力を必要とせず、雪氷破碎により、すべり止め効果の持続が期待できる装置を試作して、冬期歩道部における当該技術の適応性について試験を行った。

3. 雪氷路面処理装置の概要

雪氷路面処理装置(以下、「装置」という)は北海道の歩道除雪で使用している小形除雪車に装着し(写真-2)、歩道部に形成された雪氷路面を破碎処理するもので、破碎部と排雪部で構成される(図-1)。

装置は平成23年度から試験を行い、これまで2度の改良を行っている。

なお、装置の寸法は作業幅を考慮し、小形除雪車の全幅に近い1.52mとした。



写真-2 装置の全景(小形除雪車装着)

3.1 破碎部

先端を斜めに切断した丸鋼をドラム状の回転体の表面に装着し、装置の自重(約1,300kg)により路

面に押し付け、車両の走行により自然回転させることで雪氷路面の破碎を行う(写真-3)。

破碎部を回転させるための油圧等の動力が不要であることが特徴である。

3.2 排雪部

破碎部によって発生した破碎雪氷片を歩行路面の左右に排除する(写真-4)。

当初は車両の後部へ装着していたが、過年度の試験で、破碎部近傍での排雪作業が、不陸追従性や機械の操向性の向上に効果があることを確認したため、排雪部を破碎部近傍に装着し、リンク機構で路面への追従を可能とした。なお、押し付けは排雪部の自重により行う。

また、不陸追従性を維持しつつ、排雪施工により発生する破碎雪氷片を左右へ流すため、進行方向に対して推進角 90° の高さ 80mm の網状の鋼板と中心から左右に各 74° の推進角を付けたブレードを組み合わせた。

網状の鋼板は線圧を大きくして施工後の路面に傷をつけ、すべり止め効果を高める目的で装着した。

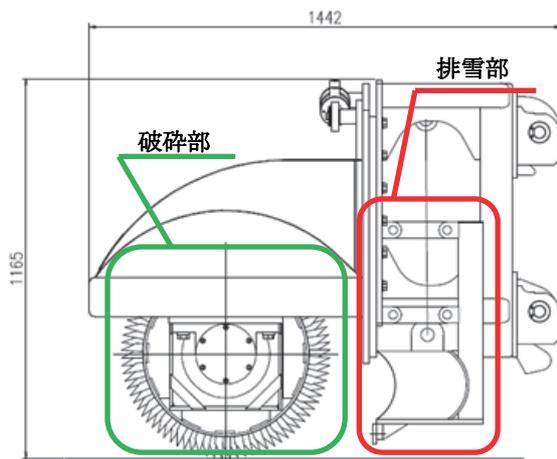


図-1 雪氷路面処理装置の全体図

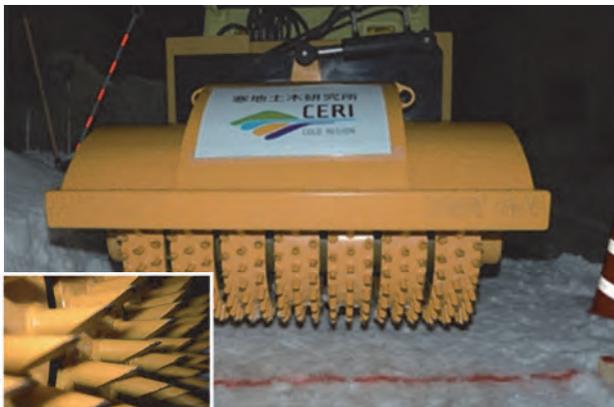


写真-3 雪氷路面処理装置の破碎部



写真-4 雪氷路面処理装置の排雪部

4. 調査試験

装置の能力や特性、及び現場適応性について把握するため、現道歩道及び作製した雪氷路面で試験を行った。

4.1 現道歩道施工試験

北海道開発局札幌開発建設部札幌道路事務所管轄の国道 274 号(札幌市厚別区上野幌)の歩道で試験を行った(写真-5)。

試験では気温、路面温度、雪氷の密度及び硬度の計測を行い、装置の施工性、路面追従性、路面処理能力及び施工後の路面状況を確認した。

また、すべり止め対策効果の差異を検証するため、装置及び3種類のすべり止め対策条件(無対策、塩化ナトリウム、碎石:最大粒径 2.5~5.0mm)による被験者の主観評価を行った。

散布量は道路管理者による実際の散布量を参考に、碎石(30, 60, 100g/m²)、塩化ナトリウム(10, 20, 30g/m²)とし、靴の違いによる影響を排除するために同一の靴(写真-6)を装着した健常者 20 名(男女)が歩行を行った。また、高齢者による歩行を再現するための高齢者疑似ツールを使用した歩行も行った。

なお、試験路面の基礎データを表-1 に示す。



写真-5 現道歩道の施工状況



写真-6 試験に使用した靴

表-1 現道歩道路面基礎データ

試験月日	気温平均 (°C)	路温平均 (°C)	雪氷路面			路面 状態	装置 試験	歩行 試験
			硬度(kg/cm ²)	密度(kg/m ³)	厚さ(mm)			
2月6日	-13.7	-14.3	20.6~157.7	540~730	75~97	圧雪	○	○
2月12日	-10.0	-10.0	24.9~124.6	600~690	64~133	圧雪	○	-

試験の結果、現道歩道での雪氷破碎が可能であり、排雪部についても自重により破碎部とは独立して可動することで不陸路面に追従し、破碎雪氷片の取りこぼしもほとんどなく排雪できることを確認した。

また、破碎雪氷片を推進角のついたブレードで左右に排雪することで、施工時の負荷が少なく、施工中の車両運転に支障がないことをオペレータからの聞き取り調査で確認した。

被験者による主観評価は、乾燥路面を10点とした場合の「歩きやすさ」「すべりにくさ」「総合評価」として実施した。

結果、すべり止め材(砕石、塩化ナトリウム)の散布量が増すごとに評価値が増加する傾向であり(図-2)、高齢者疑似についても数値の差はあるが、同様の結果であった。また、装置施工後の路面凹凸により「すべりにくさ」に対し高い評価が得られた。

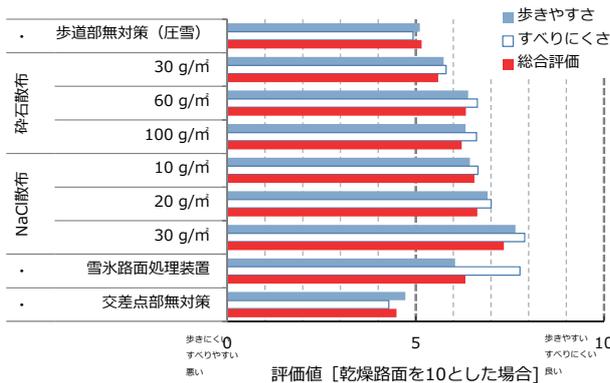


図-2 各種対策の評価値

4.2 雪氷路面施工試験

寒地土木研究所構内に装置施工用雪氷路面(35m×2m)及び横断勾配2%(道路構造令に準拠)、縦断勾配0%、5%の被験者用雪氷路面(10m×1m)を作製し、試験を行った。

装置施工用雪氷路面については、氷板(密度750kg/m³以上、硬度90~300kg/cm²)²⁾を目標に作製した(写真-7)。

雪氷路面施工試験についても現道歩道施工試験と同様に気温、路面温度、雪氷の密度及び硬度の計測を行い、装置の施工性、路面追従性、路面処理能力及び施工後の路面状況を確認した。

また、被験者による主観評価についても、現道歩道施工試験と同様の方法で行った(写真-9)。

なお、試験路面の基礎データを表-2に示す。



写真-7 作製した装置施工用雪氷路面(氷板)



写真-8 雪氷路面での施工状況



写真-9 高齢模擬者による勾配部の歩行状況

表-2 試験コース路面基礎データ

試験月日	気温平均(°C)	路温平均(°C)	雪氷路面			路面状態	装置試験	歩行試験
			硬度(kg/cm ²)	密度(kg/m ³)	厚さ(mm)			
2月20日	-5.6	-5.7	41.6~82.5	600~750	128~153	圧雪	○	-
2月21日	-4.4	-0.6	65.8~186.7	590~760	117~143	圧雪	○	-
2月24日	-3.3	-3.7	59.1~167.5	650~870	87~140	圧雪 ~氷板	○	-
2月25日	1.4	-0.1	70.8~156.5	620~960	129~163	圧雪	○	○
2月28日	-2.0	-1.4	55.8~196.7	670~840	126~167	圧雪	○	-
3月4日	-4.0	-2.9	133.0~270.1	490~830	120~165	圧雪 ~氷板	○	-

試験の結果、現道歩道と同様、装置による雪氷破砕及び排雪が可能であった。しかし、平均雪氷硬度が 200kg/cm² 程度以上の硬い氷板の場合は、1回の施工では表面のすべりやすい平面部が残ることがわかり、合計 4 回の施工を行った結果、すべりにくい路面状態にするには 2 回以上の施工が必要であることを確認した(写真-10, 11)。



写真-10 残ったすべりやすい平面部(1回施工)

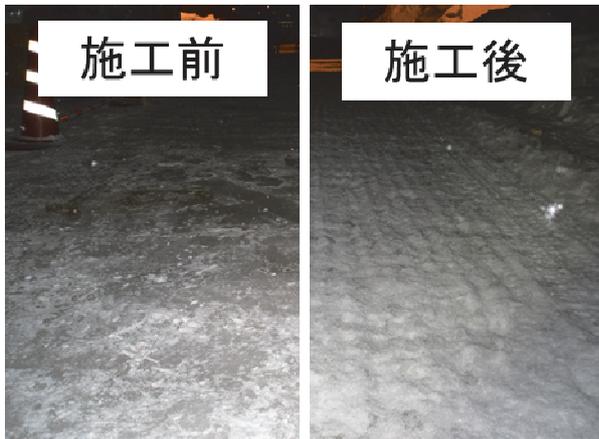


写真-11 施工前と施工後の雪氷路面

被験者の高齢者疑似による主観評価について、縦断勾配の違いによる歩行実験の結果を図-3、横断勾配 2%(平坦部)の結果を図-4 に示す。

縦断勾配 0%, 5%では、高齢者疑似においては、歩行に関する差異はみられなかった。

また、横断勾配 2%(平坦部)では、碎石散布および塩化ナトリウム散布により、評価値は改善し、散布量が増すほど、評価値が大きくなる傾向であ

る。また、雪氷路面処理装置についても評価値がすべり止め材と同程度に改善することがわかった。

このことより、雪氷路面処理装置による処理の有効性を確認した。ただし、これらの評価値は対策直後のものであり、長期的な効果の持続性についてはさらなる検証が必要と考える。

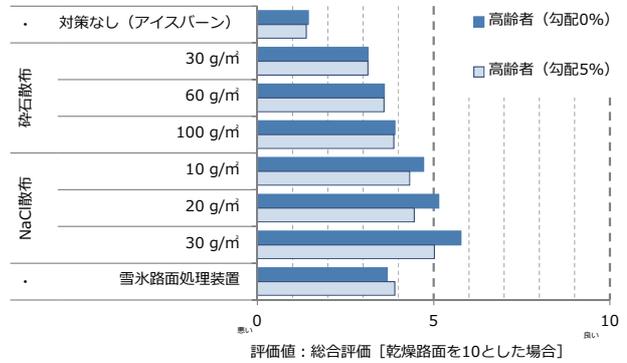


図-3 縦断勾配の違いと評価値の関係

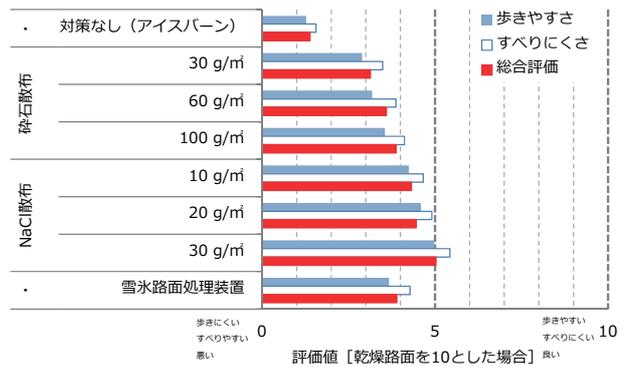


図-4 各種対策の評価値(高齢者疑似)

5. まとめ

本装置の施工により、破砕部が歩道部に形成された雪氷路面を破砕処理し、排雪部で破砕雪氷片を除去できるが、硬い氷板路面においては複数回の施工が必要であることを確認した。

また、被験者の主観評価により、碎石や塩化ナトリウムと同等もしくはそれ以上の対策効果が得られることがわかった。

今後、雪氷の硬度や厚さなど路面状態の違いによる必要性能の検証、及び効果の持続性の検証などを行っていく予定である。

参考文献

- 1) 佐藤健一・工藤秀一：凍結路面对策用粗面形成装置の開発、北海道開発局建設機械工作所機械技術管理業務報告書、pp182~184, 1997
- 2) (社)日本建設機械課協会・(社)雪センター：2004:2005 除雪・防雪ハンドブック(防雪編)、pp.33, 2004

37. 解析を援用した弾性波法による接着系あと施工アンカー 固着部の接着剤充填状況の非破壊評価手法

立命館大学
大阪大学大学院
西日本高速道路株式会社

○ 内田 慎哉
鎌田 敏郎
宮田 弘和

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理においては、構造物の状態を適確に把握し、現状を踏まえた上で劣化予測を行い、適切な対策を講じることが重要である。構造物の現状把握のための点検では、コンクリートの品質、コンクリート内部のひび割れの状況や空隙あるいは内部鉄筋の損傷の状態など、構造物表面からの目視では把握が困難なコンクリートの内部欠陥を、非破壊で評価する手法の確立が求められている。コンクリートの非破壊評価手法のうち、弾性波を利用した方法（弾性波法）は、コンクリート中での波の減衰が小さいため、特に実構造物での調査において活躍が期待されている。しかしながら、実際の現場においては、測定対象物の条件（形状・材質等）が様々であるため、非破壊評価結果と削孔などにより調査した実態とは

必ずしも一致しないケースもあり、測定対象物ごとに試行錯誤で評価する 경우가少なくない。

このような背景から、著者らは、コンクリート構造物の内部欠陥を効率よく適確に評価するため、対象構造物での計測を実施する前に弾性波動シミュレーションを行い、コンクリート中での弾性波の伝搬挙動を把握した上で、予め、対象とする構造物および内部欠陥に応じた「評価に適した弾性波の入力や受信の条件（計測条件）を決定」、「評価パラメータを選定」および「検出性能（適用範囲）」を把握した後に計測に移行する形の「解析を援用した弾性波法（図-1 参照）」に関する研究に着手し始めている¹⁾。

そこで本研究では、上記アイデアの有効性を検証するためのファーストステップとして、接着系あと施工アンカーにおける接着剤の充填状況を

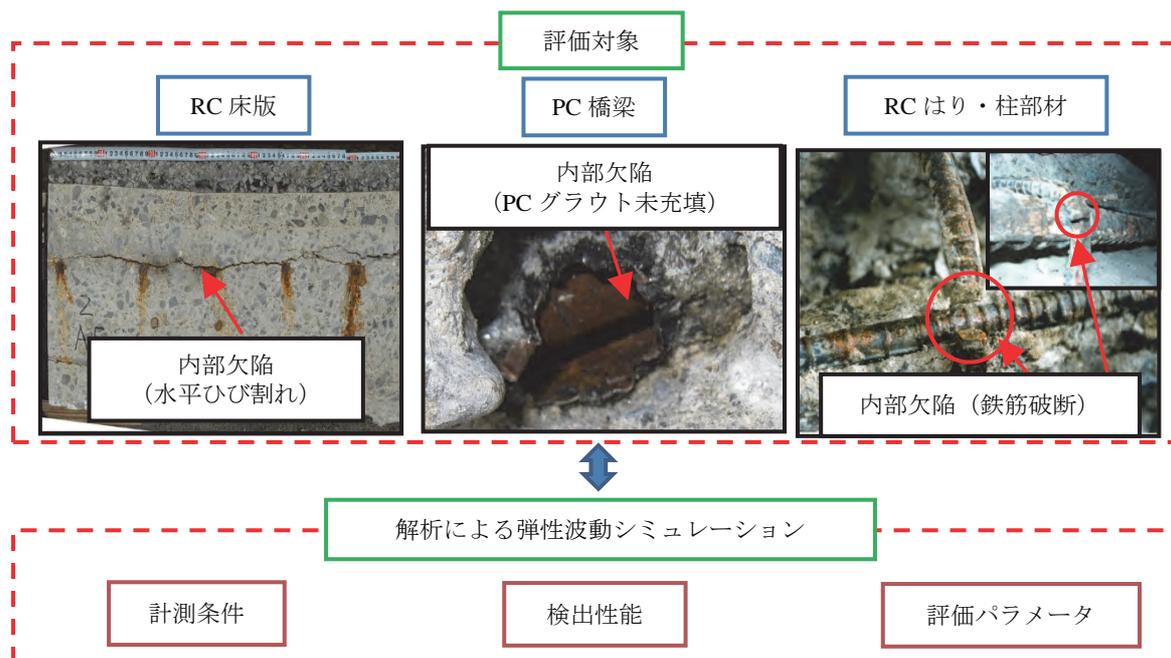


図-1 解析を援用した弾性波法の概要

対象として、弾性波法（電磁パルス法）により定量的に非破壊でこれを評価するための「計測条件」および「評価パラメータ」を、衝撃応答解析により決定した。また、解析で得られた結果の妥当性を検証するため、あと施工アンカーを模擬したコンクリート供試体に対して接着剤の充填状況の電磁パルス法による非破壊評価を試みた。

2. 電磁パルス法の概要²⁾

電磁パルス法の概要を図-2に示す。電磁パルス法では、電磁鋼板（鉄心）にマグネットワイヤを巻き付けた励磁コイルにパルス状の電流を流すことによりコイル周辺に瞬間的に磁界を発生させ、これにより生じる電磁力により、コンクリート内部に存在する鉄筋、あるいはアンカーボルトなどの磁性体を非接触で振動させる。この方法では、対象部材の表面に設置した振動センサにて磁性体の振動にともなう弾性波を捉え、これを波形分析することにより、強磁性体界面の欠陥や付着状態を非破壊で評価することができる。

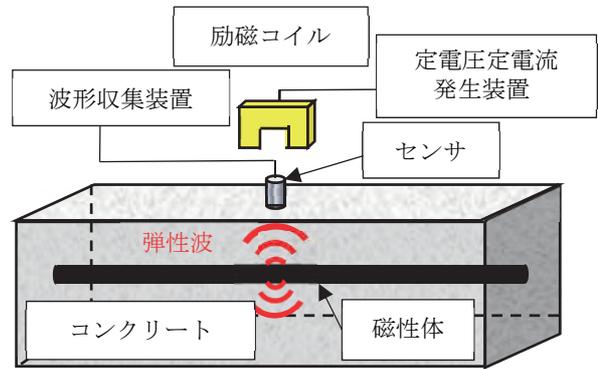
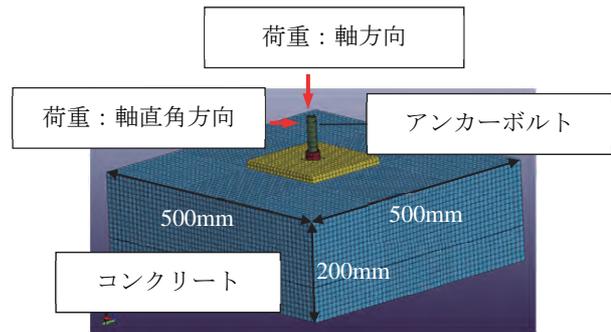
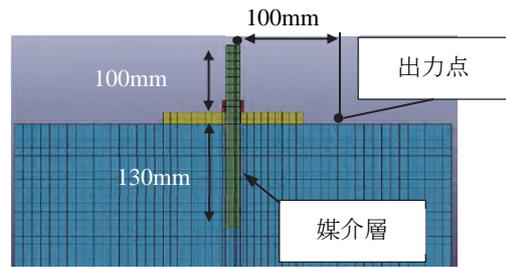


図-2 電磁パルス法の概要



(a) 全体図



(b) 拡大図

図-3 解析モデルの概要

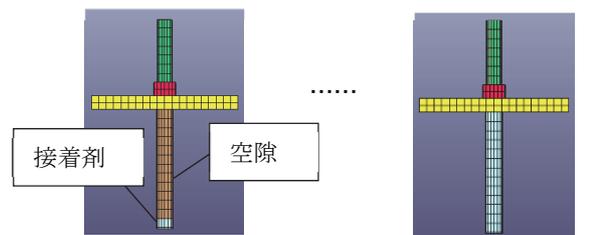
3. 衝撃応答解析による計測条件および評価パラメータの決定

3.1 解析概要

図-3に解析モデルを示す。モデルはトンネルの天井板を固定する接着系あと施工アンカーを想定し、縦500mm×横500mm×高さ200mmのコンクリート直方体に、直径16mm、長さ250mmのアンカーボルトを模擬した鋼棒をコンクリート表面から130mmの深さとなるまで埋め込んだ。コンクリートとアンカーボルトの間には、接着剤の有無を模擬するための媒介層を設けた。解析モデルにおける各構成材料の物性値を表-1に示す。各構成材料の要素は、いずれも8節点6面体ソリッドとし、要素の代表長さは約10mmとした。境界条件としては、コンクリート部分の全側面（500mm×200mmの面を4面）は無反射条件とした。一方、プレートとボルトとは非接触とし、プレートはコンクリート表面に固定した。電磁パルス法による弾性波入力には、図-3(a)に示すように、ボルト軸方向に荷重を与える場合およびボルト軸直角方向の場合の2ケースを設定した。いずれのケースも、波形出力位置は、図-3(b)に示すコンクリート表面の1節点とした。接着剤の充填状況の違いが弾性波挙動に与える影響を把握するために、媒介層（長さ130mm）をボルト長さ方向に13等分して接着剤の有無を模擬した。媒介層全要素に接着剤の物性値を設定したものを「健全度レベル13」とし、アンカーボルト最下部の要素のみを接着剤、それ以外を空気として設定したものを「健全度レベル1」とした（図-4参照）。さらに

表-1 解析モデルの物性値

物質	弾性係数 (GPa)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比
コンクリート	30	2.3	0.2
プレート	200	7.9	0.3
ボルト	200	7.9	0.3
接着剤	2	1.2	0.4
空気	1.6E-20	2.2E-13	2.0E-20



(a) 健全度レベル1

(b) 健全度レベル13

図-4 健全度レベルの一例

接着剤の充填状況にバリエーションを持たせるため、ボルト長さ方向に接着剤要素を段階的に増やし、健全度レベルを全 13 段階に設定した。

3.2 解析結果および考察

(1) ボルト軸方向入力

図-5 に解析により得られた速度波形の一例として、ボルト軸方向に弾性波を入力した場合の健全度レベル 1 およびレベル 13 をそれぞれ示す。健全度レベル 13 では、波形の振幅が健全度レベル 1 よりも明らかに大きいことがわかる。健全度レベル 13 では、アンカーボルト上端で入力した弾性波がボルトの深さ方向に伝搬し、これがコンクリート部分に到達すると、接着剤を介してコンクリート部分にも伝搬することになる（図-6 (b) 参照）。一方、健全度レベル 1 では、媒介層では接着剤よりも空隙が占める割合が大きいいため、コンクリート部へ伝搬する弾性波の成分が少なくなる（図-6 (a) 参照）。これにより、コンクリートで出力した波形に差異が生じたものと考察できる。

速度波形の振幅の大きさを定量的に表現するため、波形における各振幅を 2 乗した後これを総和したものを「波形エネルギー」と定義し、次式により算出することとした。

$$E = \sum_{i=0}^n y_i^2 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 E ：波形エネルギー(mm²/s²)、 y_i ：速度波形における各振幅(mm/s)、 n ：振幅の数 ($n=1000$ ：0~1000μs) である。図-7 に波形エネルギーと健全度レベルとの関係を示す。図に示す波形エネルギー比とは、健全度レベル 13 で算出した値に対する各健全度レベルでの値の比である。図より、健全度レベルが大きくなるにしたがって、波形エネルギーが増加していく傾向が見られる。

(2) ボルト軸直角方向入力

ボルト軸直角方向入力における波形エネルギーと健全度レベルとの関係を図-8 に示す。健全度レベルと波形エネルギーとの間に相関関係は確認できない。このような傾向になった理由としては、波の入力方向と伝搬方向とが異なっているため、弾性波が伝搬する際に干渉し、複雑な形態となって各媒質中を伝搬したことが挙げられる。

4. 解析により決定した手法の妥当性の検証

4.1 実験概要

図-9 に供試体の概要を示す。コンクリート部分の寸法は、縦 1000mm×横 1000mm×厚さ 350mm とした。コンクリート部分には、まず、直径 24mm、深さ 130mm の穴を開けた。続いて、孔内に長さ 240mm のアンカーボルト (M16, SS400 相当材) をコンクリート表面から 110mm 突出するように設

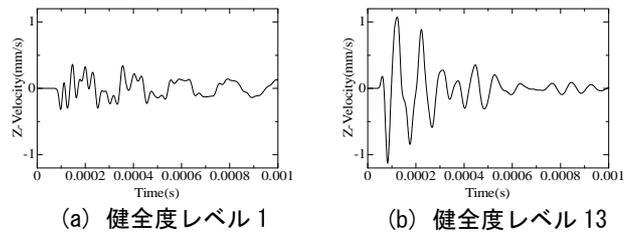


図-5 ボルト軸方向入力によりコンクリートで出力した速度波形の一例

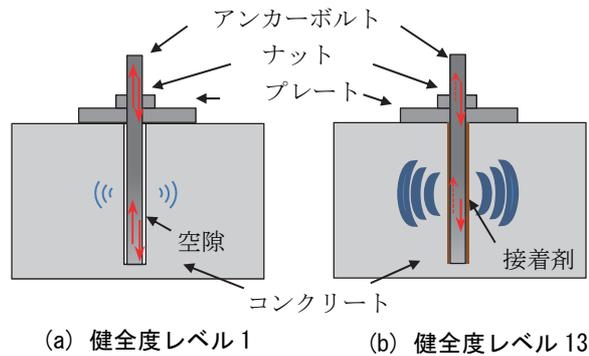


図-6 弾性伝搬挙動のイメージ

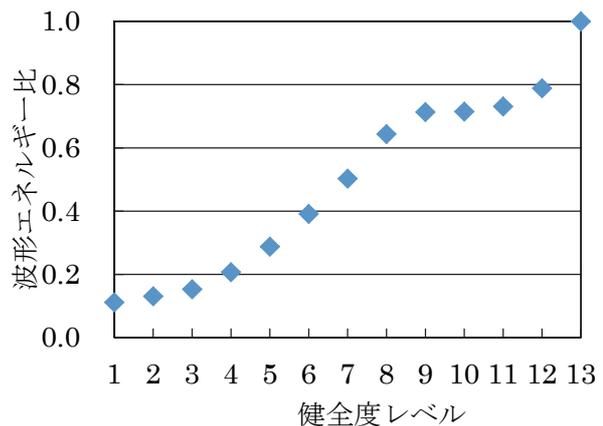


図-7 ボルト軸方向入力により算出した波形エネルギー

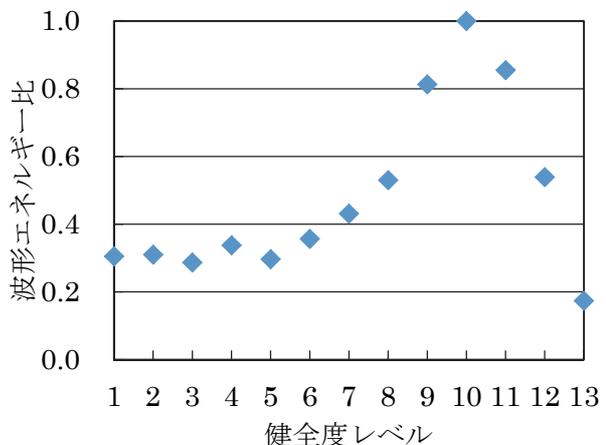


図-8 ボルト軸直角方向入力により算出した波形エネルギー

置した後、接着剤（エポキシ樹脂）を流し込むことでボルトを固定した。接着材の充填パターンを図-10に示す。本研究では、接着材の充填率として4水準（25, 50, 75, 100%）を設けた。ここでいう充填率とは、孔内の全高（削孔深さ）130mmに対する硬化後の接着剤高さの百分率である。具体的には、例えば充填率が25%のパターンでは孔内の底から高さ32.5mmとなるまで接着剤を注入している。以上の方法により、接着剤の充填率が異なるアンカーボルトを供試体1体に対して4本設置した（図-9参照）。なお、コンクリートの設計基準強度は $f_c=24\text{N/mm}^2$ とし、供試体内部にはアンカーボルト以外の強磁性体（鉄筋）を設置していない。いずれのアンカーボルトにおいても100mm×100mm×厚さ9mmの鋼製プレートを設置し、ナット2個によりプレートを固定できるようにした。

写真-1に計測概要を示す。励磁コイルは外径35mm、内径31mmの円筒形状となっており、コイル中央の空心部にアンカーボルトを貫通させ、コイル上端とボルト上端が一致するように設置した。このリング形状の励磁コイルに瞬間的に大電流（約3200A）を流し、動磁場を発生させることによりアンカーボルトを振動させた。ボルトの振動に伴って生じた弾性波は、ボルト中心から100mm離れたコンクリート表面に貼り付けた振動センサにより受信した（写真-1参照）。センサで受信した信号は、サンプリング周波数2MHzでデジタル化した後、波形収集装置で記録した。記録した波形に対して、波形エネルギー（振幅の2乗総和）を

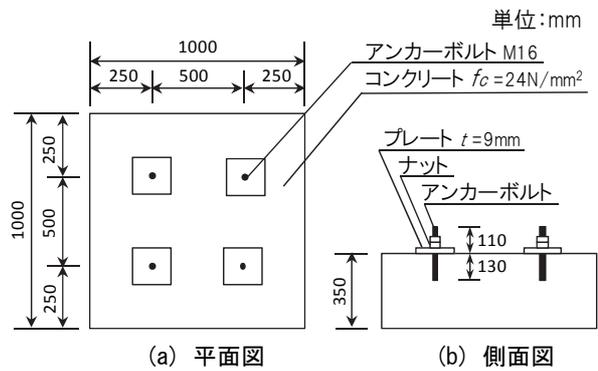


図-9 供試体概要

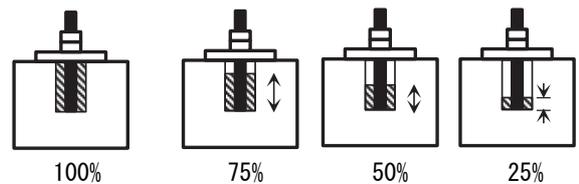


図-10 接着剤の充填パターン

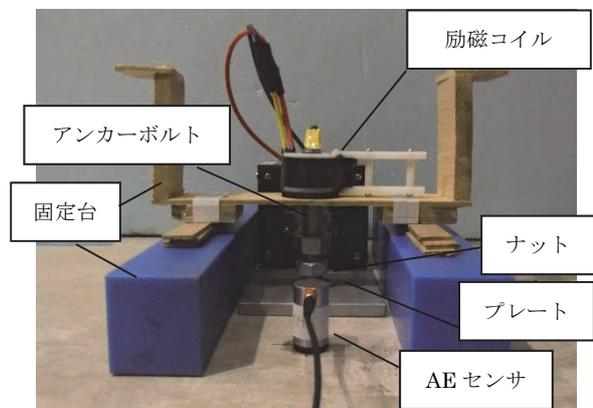
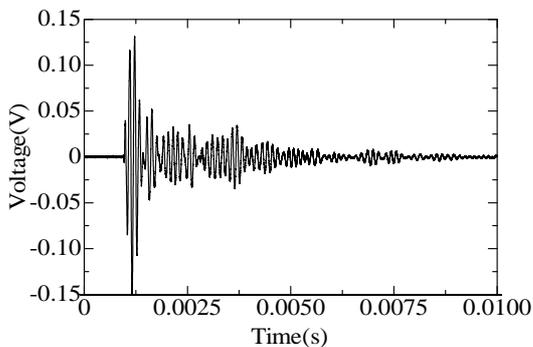
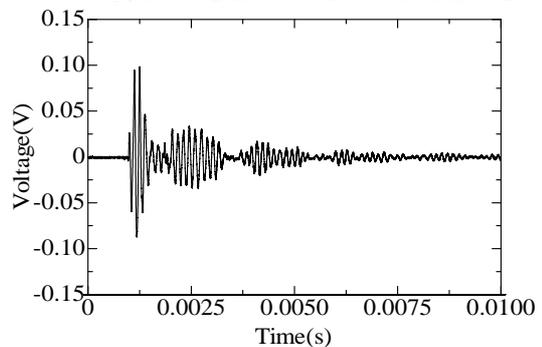


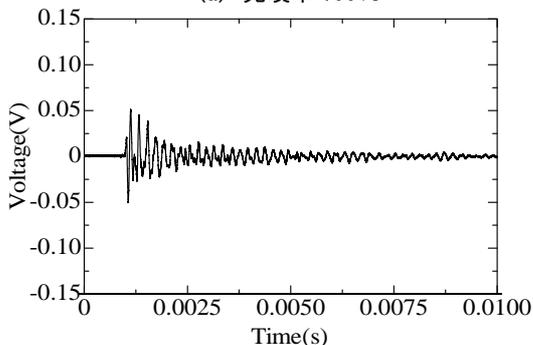
写真-1 電磁パルス法による測定状況



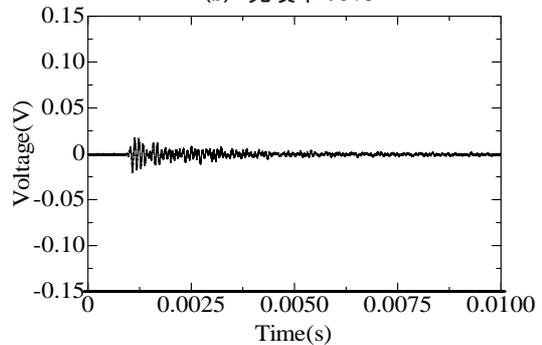
(a) 充填率 100%



(b) 充填率 75%



(c) 充填率 50%



(d) 充填率 25%

図-11 受信波形の一例（ナットが緩んだ状態）

算出した。使用した振動センサは、15kHz～100kHzの間に応答感度を有し、特に 25kHz～80kHz の間では感度特性が比較的フラットなものである。

計測においては、いずれの充填率のパターンにおいても、測定回数を 10 回とし、評価パラメータのばらつきを把握することとした。また、いずれの充填率においても、ボルトの基本的な振動特性を把握するためにナットとプレートを設置しない場合と、両者を設置した上でトルクレンチにより 80N・m でボルトを締め付けた場合の 2 ケースを設定した。

4.2 実験結果および考察

(1) ナットが緩んだ状態での測定結果

図-11に、ナットが緩んだ状態で測定を行った場合における接着剤の各充填率で得られた受信波形の一例をそれぞれ示す。この図より、波形の振幅が接着剤の充填率によって異なることが確認でき、充填率が小さくなるに従って波形の最大振幅値が小さくなる傾向を示した。このような傾向は、解析結果と一致している（図-5参照）。

図-12に、ナットが緩んだ状態で測定を行った場合の波形エネルギーと接着剤の充填率との関係を示す。図に示す波形エネルギー比は、接着剤の充填率 100%で算出した値に対する各充填率での値の比である。また、いずれの充填率においても、測定値の平均、最大、最小の範囲を同図に示している。この図より、充填率が大きくなると波形エネルギーも大きくなる傾向がみられた。これは図-6に示すように、空隙部分の大きさの変化に伴い弾性波がアンカーボルトからコンクリート中へ伝搬する際の減衰に差異が生じたためと考えられる。

(2) ナットで締め付けた状態での測定結果

図-13に、ナットで締め付けた状態で計測した場合における波形エネルギーと接着剤の充填率との関係を示す。充填率の増加に伴い、波形エネルギーが大きくなることが確認できる。しかしながら、充填率 75%と 100%の波形エネルギー比は大小が逆転しており、充填率が高い場合には波形エネルギーから充填率の違いを判別することは困難であることがわかった。これは、ナットで締め付けることによってプレートとコンクリートが接する面の圧力が大きくなることから、ボルトを伝搬する弾性波がプレートからコンクリート表層へと伝搬しやすくなることに起因すると考えられる（図-14参照）。

上記の考察を踏まえ、コンクリートに埋め込まれたアンカーボルト部分に振幅の大きな弾性波を伝搬させることが充填状況の評価のためには重要であると考えられることから、与える磁場の強さをより大きくする工夫をした上で計測を行うこととした。具体的には、アンカーボルト頭部にネオ

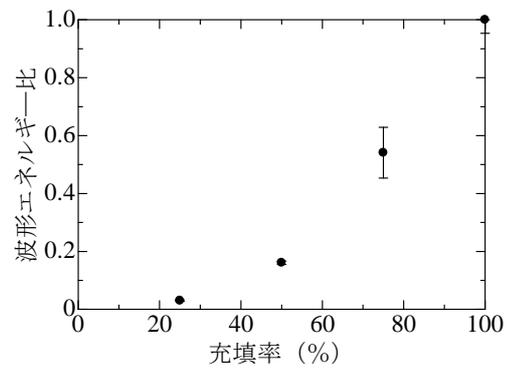


図-12 波形エネルギー（ナットが緩んだ状態）

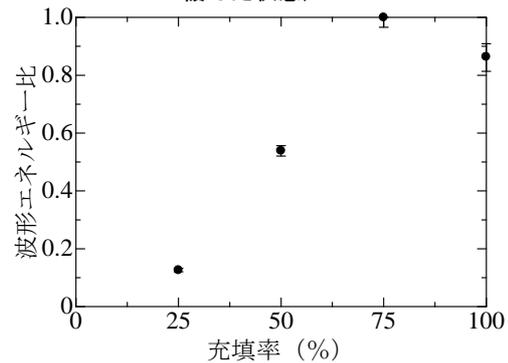


図-13 波形エネルギー（ナットを 80N・m で締め付けた状態）

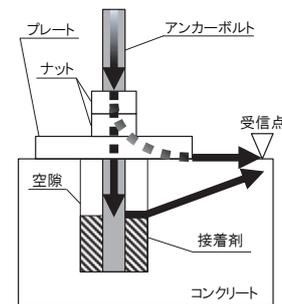


図-14 弾性波伝搬経路のイメージ

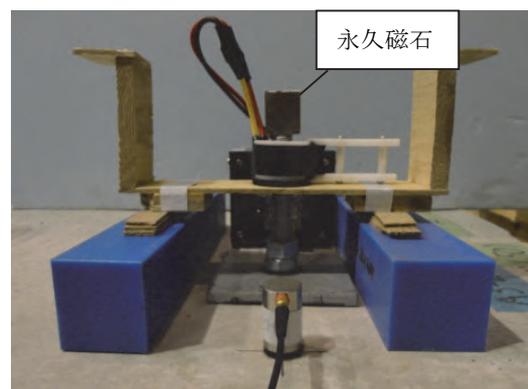


写真-2 永久磁石を併用した電磁パルス発生状況

ジム磁石（永久磁石）を設置し静磁場を付与した状態で励磁コイルにより動磁場を発生させて、ボルト内部に弾性波を伝搬させる方法である。測定状況を写真-2に示す。なお、この測定条件については、永久磁石を用いることを除けば、4.1と全て

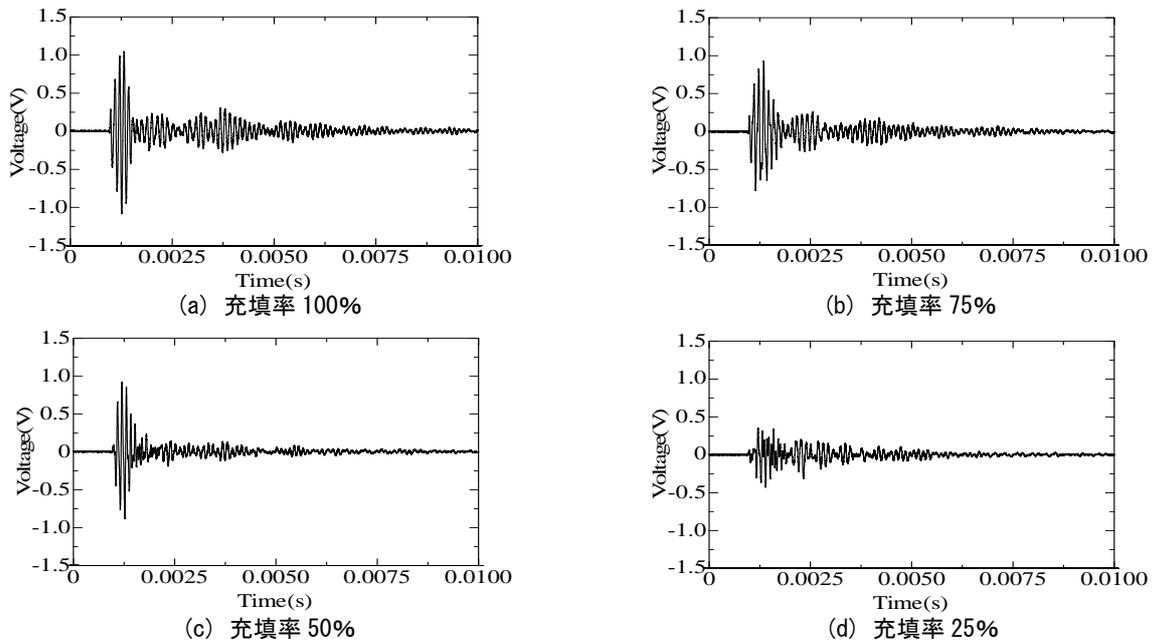


図-15 受信波形の一例（締め付けあり，永久磁石を併用）

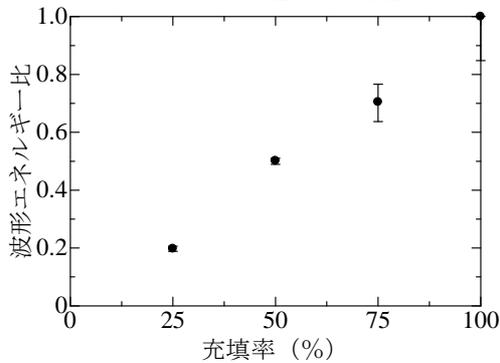


図-16 波形エネルギー（締め付けあり，永久磁石併用）

同じである。得られた受信波形の一例を図-15に示す。この図より、いずれの充填率の場合においても図-11に示す波形よりも10倍程度大きな振幅が得られていることがわかる。また、この測定方法により得られた波形エネルギー比を図-16に示す。ナットで締め付けた状態においても、充填状況に応じて波形エネルギーが一定の割合で大きくなることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

衝撃応答解析の結果：

- (1) ボルト軸方向に弾性波を入力し、ボルト近傍のコンクリート表面において受信される弾性波の波形エネルギーに着目することで、接着系あと施工アンカー固着部の接着剤の充填状況を評価できることが明らかとなった。

解析結果に基づき、供試体を対象とした電磁パルス法による測定を行った結果：

- (2) ボルトにプレートが設置され、ナットが緩んだ状態では、受信した波形エネルギーと接着

剤の充填率との間に相関があり、これにより充填程度を評価できることがわかった。

- (3) ボルトがナットにより締め付けられた状態においては、充填状況の違いを明確に把握することが困難であった。
- (4) しかしながら、永久磁石（静磁場）を併用した磁場の強さを高める方法を用いれば、波形エネルギーからアンカーボルト固着部の充填率の違いを的確に評価できる可能性があることを明らかにした。

上記(1)から(4)の結果：

- (5) 「解析を援用した弾性波法」は、接着系あと施工アンカーにおける接着剤の充填状況を評価する上で、有効な手法であることが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（B）25289132）の援助を受けて行なったものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) S. Uchida, T. Kamada, T. Iwasaki and H. Tsunoda: Non-Destructive Evaluation for Horizontal Cracks in RC Slabs of Highway Bridges Based on Analysis-Aided Impact Elastic-Wave Methods, *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, pp.827-834, 2013.
- 2) K. Munakata, T. Kamada, S. Uchida, H. Mae and H. Minezawa: Nondestructive Evaluation of Deterioration around Rebar Based on Elastic Waves Generated by Electromagnetic Force, *Proceedings of the 7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering, NDTCE'09*, pp.107-112, 2009.

38. 河川ポンプ設備における状態監視技術に関する研究

(潤滑油分析による診断)

(独)土木研究所

○ 上野 仁士
藤野 健一
山尾 昭

1. はじめに

排水機場などの河川ポンプ設備は、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することが困難な、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。内部劣化の有無によらずに定期的に整備を行うため、経済的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。

そこで独立行政法人土木研究所では、平成22年度より、排水機場ポンプ設備の原動機に関しては潤滑油分析、主ポンプについては振動法、減速機については両方式の併用による状態監視保全技術の確立について検討を重ねてきた。本稿では潤滑

油分析による排水機場ポンプ設備の状態監視保全技術の検討結果について報告する。

2. 潤滑油による設備診断技術

常用系の設備診断では、潤滑油分析のほか、振動法、音響、温度によるものがある。そのなかでも潤滑油分析は、図-1に示すように異常の早期発見に有効であるとされている。

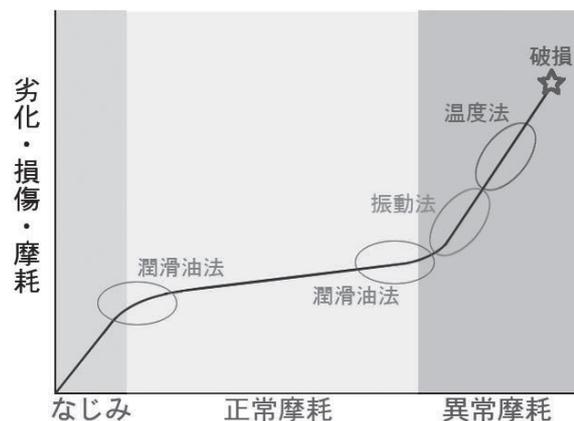


図-1 摩耗進行曲線と診断技術²⁾

潤滑油による診断技術は、混入している摩耗粉の状態から設備の状態を把握するもので、SOAP法とフェログラフィ法がある。

SOAP法は、元素毎に発光スペクトルが異なることを利用した分析法である。高周波誘導コイルによる電場によりプラズマ化したアルゴンガス中に、霧状に噴霧された試料（この場合は分析用に処理をした潤滑油）が熱エネルギーを受けて発光するので、それを分光分析することによって試料内に含有される金属元素成分とその濃度を測定して摩耗損傷箇所を推定する方法である。概念図を図-2に、摩耗損傷が想定される機器の材質、元素を表-1に示す。

この手法は10 μ m以下の小摩耗粒子の測定に適しており、ppm単位での検出が可能であることから極めて早い段階からの摩耗状態を検知できるが、

大摩耗粒子に対しては、それを発光させるほどのエネルギーを与えることは困難なので不向きとされている。

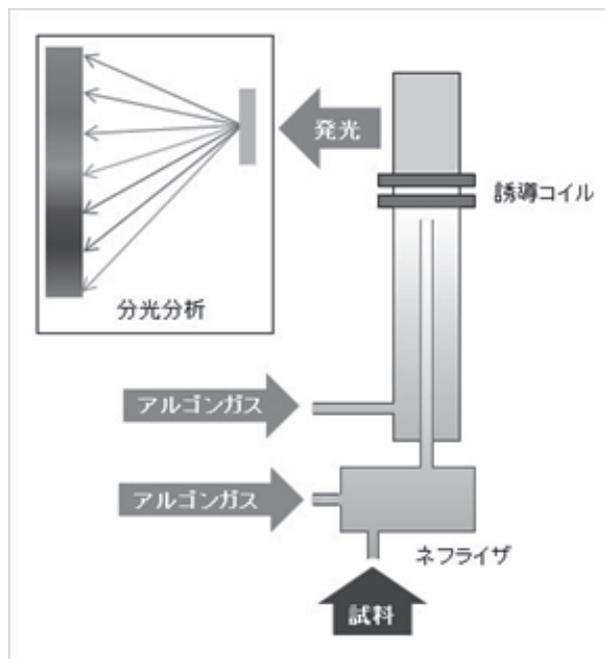


図-2 SOAP法 概念図

表-1 各部品と材料・成分

機器	部品	材料	成分
原動機	スリーブ	特殊铸铁	Fe Ni Cr
	ピストンリング	特殊铸铁	Fe Ni Cr
	ピストンピン	ステンレス鋼	Fe Ni Cr
	クランクピン	炭素鋼	Fe
	ピストンピンメタル	クロムモリブデン鋼	Fe Ni Mo
	クランクピンメタル	ホワイトメタル層	Sn Pb
減速機	歯車	ニッケル層	Ni
		ケルメット層	Cu
	軸受	クロムモリブデン鋼	Fe Ni Mo
		高炭素クロム軸受鋼	Fe Cr Mo
		アルミ合金	Al
		高力黄銅鑄物	Cu Zn

フェログラフィ法は、金属摩耗分が含まれた潤滑油を、磁石を下に敷いたスライドガラス上または沈着チューブ内に流し、油中の摩耗粉を捕捉分離することで摩耗分を分析する方法で、分析フェログラフィと定量フェログラフィがある。それぞれの概念図を図-3,4 に、分析フェログラフィで見られる摩耗粉と主な発生原因を表-2 に示す。

定量フェログラフィは、沈着チューブ内に残留した大粒子（5μm以上）と小粒子（2μm以下）の各濃度を調べ、摩耗過酷度指数を算出することにより機械の診断を行う。

分析フェログラフィは、スライドガラスに定着した潤滑油中の粒子を顕微鏡で観察し、その色や形状により、機械設備の内部摩耗状態を診断する。

この技法は SOAP 法とは逆に、磁力による摩耗粉捕捉と目視が主体なので大摩耗粒子の分析に適している。

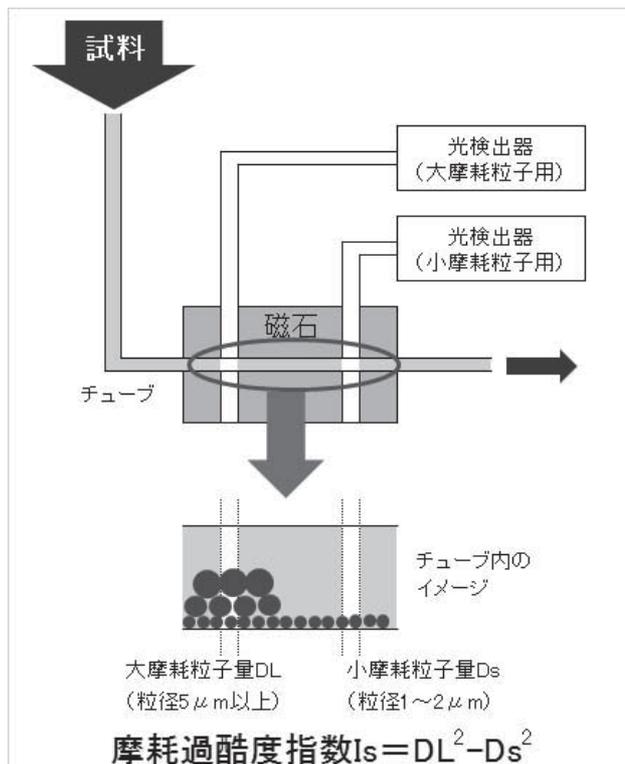


図-3 定量フェログラフィ 概念図

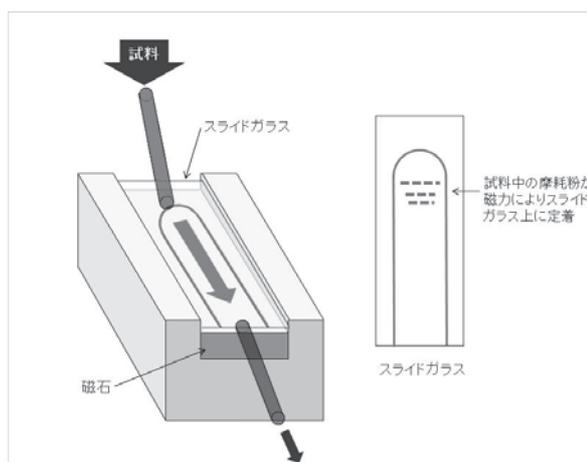


図-4 分析フェログラフィ 概念図

3. SOAP 法、フェログラフィ法の適用性³⁾

排水機場ポンプ設備は、駆動用動力源としてディーゼルエンジンまたはガスタービンエンジンが使用されている。また、ポンプへの動力伝達には、ポンプ形式が立軸の場合は直交軸歯車を、横軸の場合は遊星歯車もしくは平行軸歯車を用いた減速機が用いられている。排水機場ポンプ設備の、潤滑油分析による診断は、これらを対象に行う。横軸ポンプを写真-1 に、立軸ポンプを写真-2 に示す。

表-2 代表的な摩耗粒子

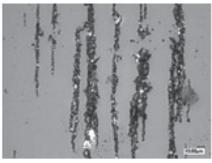
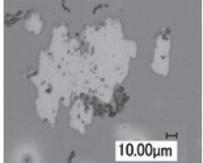
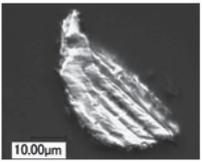
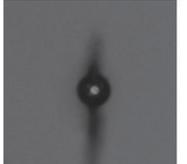
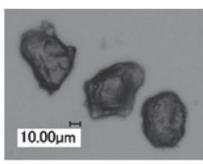
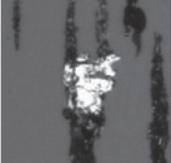
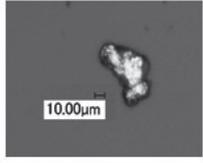
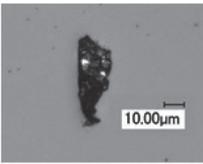
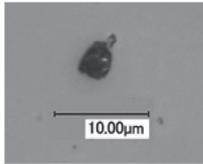
形状による分類	 <p>正常摩耗粒子 10 μm以下の粒子が磁束線に沿って配列</p>	 <p>切削摩耗粒子 発生原因: 突起、異物による部材の切削</p>
	 <p>平板状摩耗粒子 発生原因: 転がり軸受の疲労摩耗</p>	 <p>シビア摩耗粒子 発生原因: 過剰応力による部材の損傷</p>
	 <p>球状摩耗粒子 発生原因: 軸受の疲労</p>	 <p>砂 発生原因: 異物の混入</p>
	 <p>非鉄粒子(ホワイトメタル) 発生原因: すべり軸受の摩耗・損傷</p>	 <p>非鉄粒子(銅合金) 発生原因: 軸受の摩耗・損傷</p>
色・材質等による分類	 <p>黒錆 発生原因: 摩擦面の過熱・潤滑不良</p>	 <p>赤錆 発生原因: 水分の混入による腐食</p>



写真-2 立軸ポンプ

潤滑油による設備診断技術については前述の通りであるが、排水機場は、平時は停止しており潤滑油が機械内を循環していないため、これらの手法で的確に診断できるかについては未知数であり、ここが大きな課題となっている。

そこで、排水機場機械設備でも常用機械設備と同様に、これらの手法で設備内部の摩耗傾向が把握可能かどうかの調査を行った。

なお、潤滑油サンプリングは、排水機場の運転中または潤滑油が設備内を十分に循環した運転の停止直後が望ましいが、天候に左右される実排水運転は定期的がないため、設備の機能維持や異常の発見、運転操作員の習熟度向上を目的としておおむね月1回、ポンプ1台当たり30分程度行っている管理運転時に行うこととした。

3.1 同一仕様原動機での比較 (SOAP 法)

SOAP 法については、同一排水機場・同一仕様で、直近の分解整備年次のみ異なるディーゼル原動機2台(整備後4年経過の1号ポンプと14年未整備状態の3号ポンプ)について比較を行った。

その結果、図-5に示すように、鉄や銅のような摩耗すると増大する成分は、より長期にわたり継続使用している3号機の方が多く検出されている事が確認され、排水機場ポンプ設備でも、含有元素の変化を見て設備状態を予測する事が可能であることが示されている。

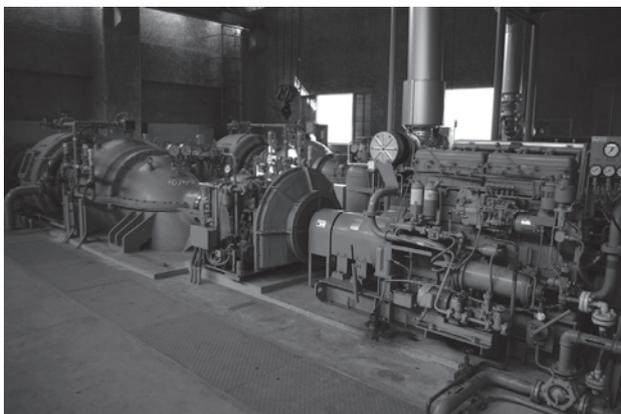


写真-1 横軸ポンプ

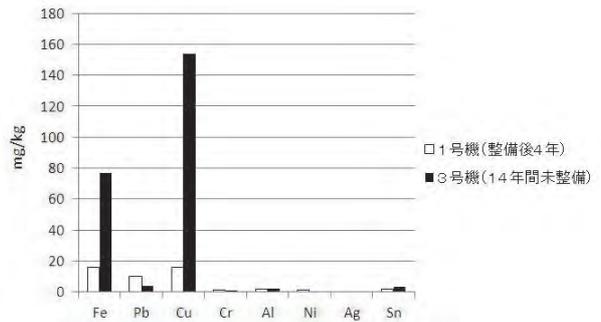


図-5 SOAP法の比較

3.2 同一仕様原動機での比較（フェログラフィ法）³⁾

定量フェログラフィでも、同一機場、同一仕様のディーゼル原動機2台を同時に分解整備した際の部品の摩耗量と摩耗過酷度指数の比較を行ったところ、表-3 に示すように、部品の摩耗量が大きいと推測できる原動機では、摩耗過酷度指数も高くなり、摩耗兆候は捉えることが可能と確認できた。

表-3 定量フェログラフィ 結果比較

	1号機	2号機	備考
シリンダライナ摩耗量(mm)	0.038	0.082	各気筒の摩耗量平均値の合計
大摩耗粒子量DL(%/mL)	40	45	
小摩耗粒子量DS(%/mL)	30	20	
摩耗過酷度指数	700	1625	DL ² -DS ² で算出

分析フェログラフィについても、実際にスライドガラスを確認したところ、特徴的な摩耗粉を捉えることが可能であることが確認された。前述の表-2 に示した写真は、実際の排水機場ポンプ設備の原動機、減速機で見られた摩耗粉である。

3.3 実際の劣化設備と分析結果の比較

以上より、排水機場ポンプ設備においても、常用設備と同様に特徴的な傾向が把握可能であることが確認された。

そこで今度は、実際の分析結果が設備状態を的確に反映しているかの確認を行った。

写真-3,4 に示すのは、それぞれ分解した別個の原動機のクランクピンメタルで、写真-3 のH排水機場のものはケルメット層まで露出しており、写真-4 のN排水機場のものはほとんど摩耗していない。

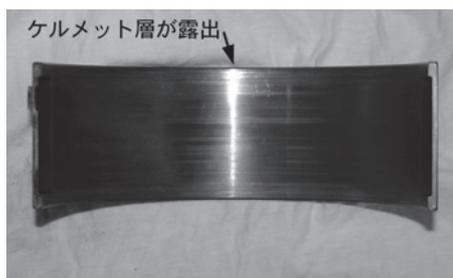


写真-3 H排水機場原動機 クランクピンメタル



写真-3 N排水機場原動機 クランクピンメタル

これらの原動機の潤滑油分析結果を図-6,7、写真-5,6 に示す。

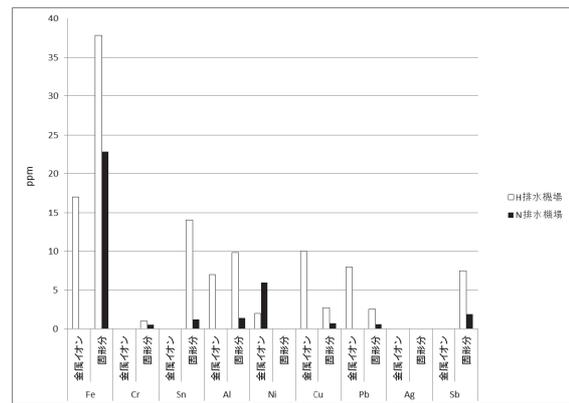


図-6 SOAP法による比較

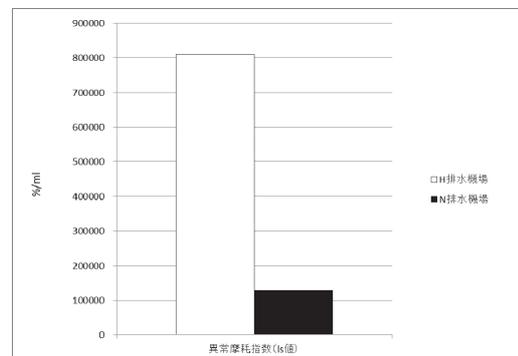


図-7 定量フェログラフィ法による比較

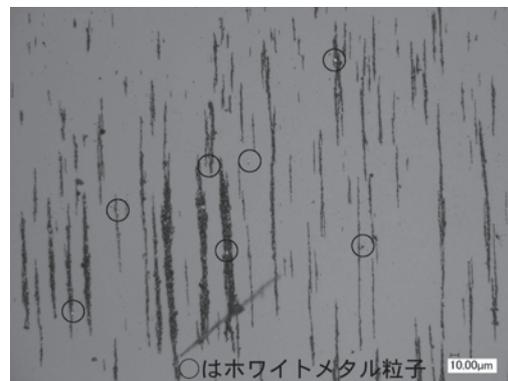


写真-5 H排水機場 分析フェログラフィ



写真-6 N排水機場 分析フェログラフィ

数値で示される SOAP 法、定量フェログラフィ法では、摩耗劣化が進行しているH排水機場の方が明らかに大きな数字が示されている。

また、分析フェログラフィでは、やはりH排水機場の方が摩耗粉量が多く、ホワイトメタルなども目立っている。

このことから、潤滑油分析による設備の摩耗劣化程度の診断も十分可能であると考ええる。

4. 傾向管理手法の検討

4.1 複数分析者間の分析結果比較

状態監視保全においては、定期的に分析し、その数値の変化傾向を確認する「傾向管理」が不可欠である。傾向管理の実施には、結果のばらつきの要因を可能な限り排除するため、可能な限り同一の条件による分析が求められる。

潤滑油分析は専門業者に依頼することになるが、河川管理者である国や地方自治体では契約制度上、同一の分析者で継続して実施することは難しい。

そこで、同一潤滑油サンプルを、複数の分析者で分析・設備診断結果を比較した。

その結果、設備診断結果（設備状態の良否）は同一の傾向を示すが、分析技術個々の結果、特に SOAP 法や定量フェログラフィ法など数値で示される分析結果については分析者毎に数値が異なっている。ある原動機における、SOAP 法での比較例を図-8 に、定量フェログラフィの例を図-9 に示す。

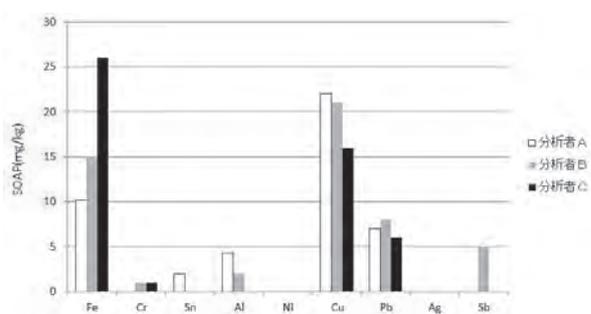


図-8 SOAP 法の分析者毎の比較

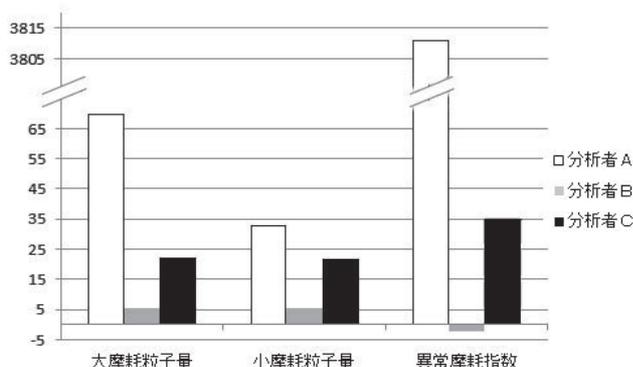


図-9 定量フェログラフィの分析者毎の比較

このような結果となったのは、分析者毎に有する知見等により分析・診断手法が異なるためと考えられる。分析者にとって各分析手法は設備診断をするためのツールでしかなく、そのツールによって示された数値を独自の知見と技術を用いて診断をする。そのツール自身も、それぞれの技術に適したものが用いられている。重要なのは診断結果であって、ツール個々の比較は意味をなさない。

したがって、異なる分析業者間の分析結果を横断した傾向管理は、困難と言わざるを得ない。

4.2 鉄粉濃度計の活用

このような結果となったが、前述したとおり、実際の設備維持管理には傾向管理が不可欠である。

そこで、一般の設備で傾向管理に用いられている鉄粉濃度計の活用が、排水機場ポンプ設備でも活用可能か否かを試みた。

鉄粉濃度計は電磁誘導法を利用したもので、鉄分を含んだ潤滑油を励磁コイルに挿入することにより変化する磁気抵抗率を検出することで鉄分濃度を測定するものである。10ppm 程度の測定誤差があるため、1度の測定値による診断ではなく、傾向管理に用いることが望ましいとされている。

これは、管理者自らが用意し計測することができるので、有用であれば傾向管理に大いに役立つものと考ええる。

鉄粉濃度計での実際の計測結果であるが、ディーゼルエンジンならびに減速機の潤滑油中の鉄粉濃度と SOAP 法での鉄濃度との関係を、それぞれ図-10,11 に示す（いずれも横軸はサンプル番号であり、すべて異なる設備である）。

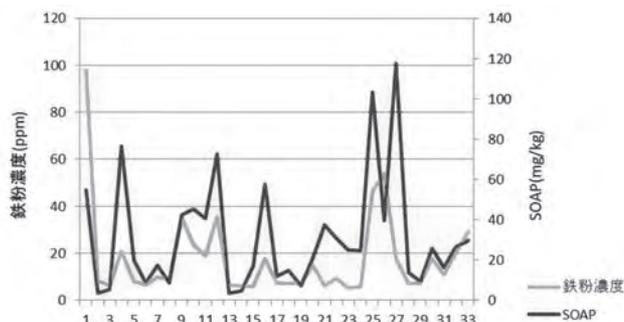


図-10 SOAP 法と鉄粉濃度計結果比較（原動機）

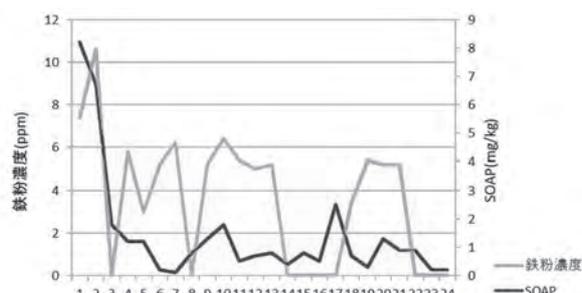


図-11 SOAP 法と鉄粉濃度計結果比較（減速機）

原動機では、一部に例外があるが、おおむね、

SOAP 法で高い数値のものは鉄粉濃度も高めに出る傾向にある。

減速機は、SOAP 法の結果に対して鉄粉濃度計の変動が激しい。しかし鉄粉濃度計の計測結果は誤差範囲である 10ppm 以内に集中しているため、このデータをもって一概に相関がないとはいえない。したがって、このレベルでは誤差の影響で傾向管理は困難ではあるが、原動機での結果を考慮すると、著しい摩耗が発生した場合にはその早期発見が期待できるものと考えられる。

また、先述したH排水機場とN排水機場での鉄粉濃度計計測結果を図-12に示す。

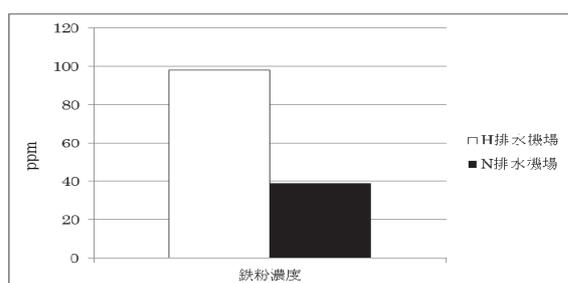


図-12 H排水機場とN排水機場 鉄粉濃度計結果比較

ここでも、摩耗進行しているH排水機場の方が大きな数値を示していることが確認された。

以上より、厳密性に欠けるが、傾向管理として鉄粉濃度計活用は有用と思われる。今後、同一設備の継続的な傾向ならびに減速機での異常兆候発生事例を調査し、さらなる適用性を確認したい。

5. サンプルング時の運転時間について³⁾

分析用潤滑油のサンプルングは管理運転時に行う、と先述したが、分析結果はサンプルング前の運転時間に影響される可能性がある。そこで、1台の原動機について、運転方法や運転時間を変えてサンプルングし、鉄粉濃度、SOAP 法による分析を行った。その結果を図-12に示す。なお、原動機は運転各日の17時～翌8時の間は停止している。

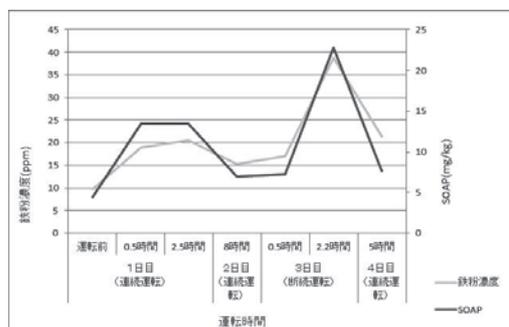


図-12 SOAP 法と鉄粉濃度計結果比較 (運転方法毎)

ここでは、鉄粉濃度と SOAP 法の大小は同一の

傾向にある事が示されており、ここでも鉄粉濃度計の有用性が示されていると考える。

運転1日目では、運転0.5時間と2.5時間の差はあまり無いが、2日目の運転8時間の結果が前日の運転2.5時間より低くなっている。

同じ運転0.5時間でも、1日目と3日目では結果は異なる (ただし鉄粉濃度は誤差範囲)。

これらから、分析結果は直近の運転状態により左右されるのではないかと考えられる。

また、3日目の運転2.2時間の結果が著しく高い。これは、直近で短時間に7回の起動停止の断続運転としたので、それが分析結果に影響したのではないかと考えられる。

この調査に用いた原動機はこの直後に分解し内部状態を確認したが、ほとんど摩耗劣化していなかったため、残念ながらどのような運転条件下でのサンプルングが設備状態をより反映しているのかは不明であるが、少なくとも、傾向管理のためには可能な限り同一条件での管理運転後にサンプルングすること、管理運転の直前に運転があった場合は結果に影響が出る可能性があることに注意する、ということが言えると考えられる。

6. まとめ

「非」常用系である排水機場ポンプ設備においても、常用設備と同様に、潤滑油分析による状態監視保全技術による設備劣化傾向の把握が可能であることが、これまでの調査で示された。

しかし現段階では、時間計画保全により設備の劣化兆候が現れる前に整備が行われているため、本技術による設備の異常兆候の把握を実際に行った事例に乏しく、今後は状態監視技術の適応性向上のため、より多くの事例の調査を行い、診断精度向上を図る予定である。

このように、排水機場ポンプ設備の状態監視保全技術は現段階では発展途上の技術であるが、今後の排水機場ポンプ設備の効果的、効率的な維持管理に貢献しうる技術となりうるものと確信するものである。

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
- 2) 社団法人日本トライボロジー学会：ISO18436-4準拠 トライボロジーに基づくメンテナンス カテゴリーI
- 3) 藤野健一・山尾 昭・上野仁士：排水機場設備の状態監視保全技術，月刊潤滑経済，pp.40～43，2014年6月号

II 梗概集

Ⅱ－１ ポスターセッション要旨

1. 音響探査法を用いたコンクリート構造物の検査

佐藤工業(株)技術研究所 ○歌川紀之
桐蔭横浜大学 上地 樹、杉本恒美

1. はじめに

音響探査法は、叩き点検と同じたわみ共振現象をもちいて遠距離非接触でも叩き点検と同等な点検を可能にする技術である。以下に本手法の探査原理について、図-1 を用い説明する。

- ① ハンマーで叩く（点加振・衝撃波）代わりに、LRAD (Long Range Acoustic Device) というスピーカーで、コンクリート面に音圧（面加振・トーンバースト波）を与え、振動を発生させる。
- ② 浮きやはく離が生じている位置では、コンクリート表面と浮きの間が薄い板となっているために、たわみ振動が発生し、一方、健全部では、厚さがある板のため、たわみ振動は発生しにくい。
- ③ 叩き点検では、そのたわみ振動により発生する音を耳で聞くことにより、欠陥部であることを認識する。一方、音響探査法では、励起したたわみ振動を SLDV(Scanning Laser Doppler Vibrometer) というレーザドプラ振動計で、面的な面外の振動速度を測定・分析することにより認識する。

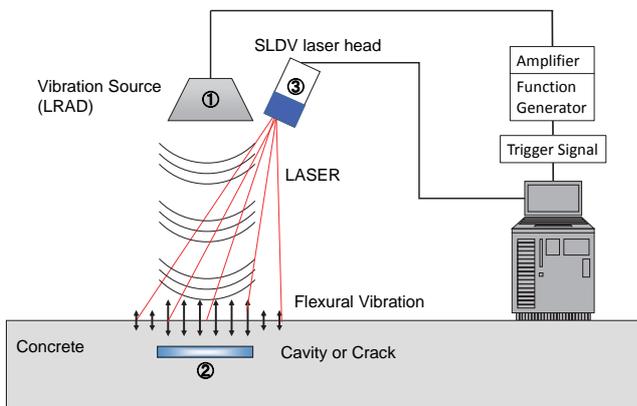


図-1 音響探査法のセットアップ図

手法の詳細については、文献¹⁾に示す。本手法により、トンネル天端の覆工コンクリートの叩き点検

が、従来は高所作業車や足場の上から実施されていたのが、路面上から実施できることになる。そのため、点検者の危険かつ苦渋作業がなくなり、また、点検者の経験による判定も、客観性のある判定になり、探査精度も向上することになる。

本ポスターセッションでは、昨年度に実施した、音響探査法を橋梁のRC床版下面に適用した事例やボックスカルバートの天井部や壁部に適用した事例を示す。これらの結果については、文献¹⁾に示されているので、本概要では、はく離試験体に適用した結果を打音法や電磁波法で探査した結果と比較した事例を示す。

2. はく離試験体への音響探査法の適用

実構造物のはく離では、生じたはく離面が、再度接触しているケースも考えられ、間隙幅が非常に小さいことが予想される。そこで、円柱試験体を割裂させ、その割裂面にモルタルが入らないように加工し、それを壁型試験体に埋設させる方法で、はく離を模擬した試験体を作成した。また、比較のため、25mm厚の発泡スチロールを同じ壁型試験体に埋設させる方法で空洞を模擬した試験体を作成した。ここでは平面規模100mm×200mm、はく離位置（空洞天端深さ）25mmの音響探査法による探査結果を示す。振動エネルギー比を用いた結果を図-2(a)に示す。測定は欠陥を含む、150mm×350mmの領域を50mm間隔で測定した。どちらも振動エネルギー比が大きい箇所で、たわみ振動が大きくなっており、音響探査法でははく離および空洞箇所ともに探査可能であることが分かった。

3. 他の手法との比較

同じ試験体を用い、打音法および電磁波法による探査を行った。

打音法では、筆者らが開発した振幅値比からコンクリート厚さを評価する方法²⁾を用い、音響探査法

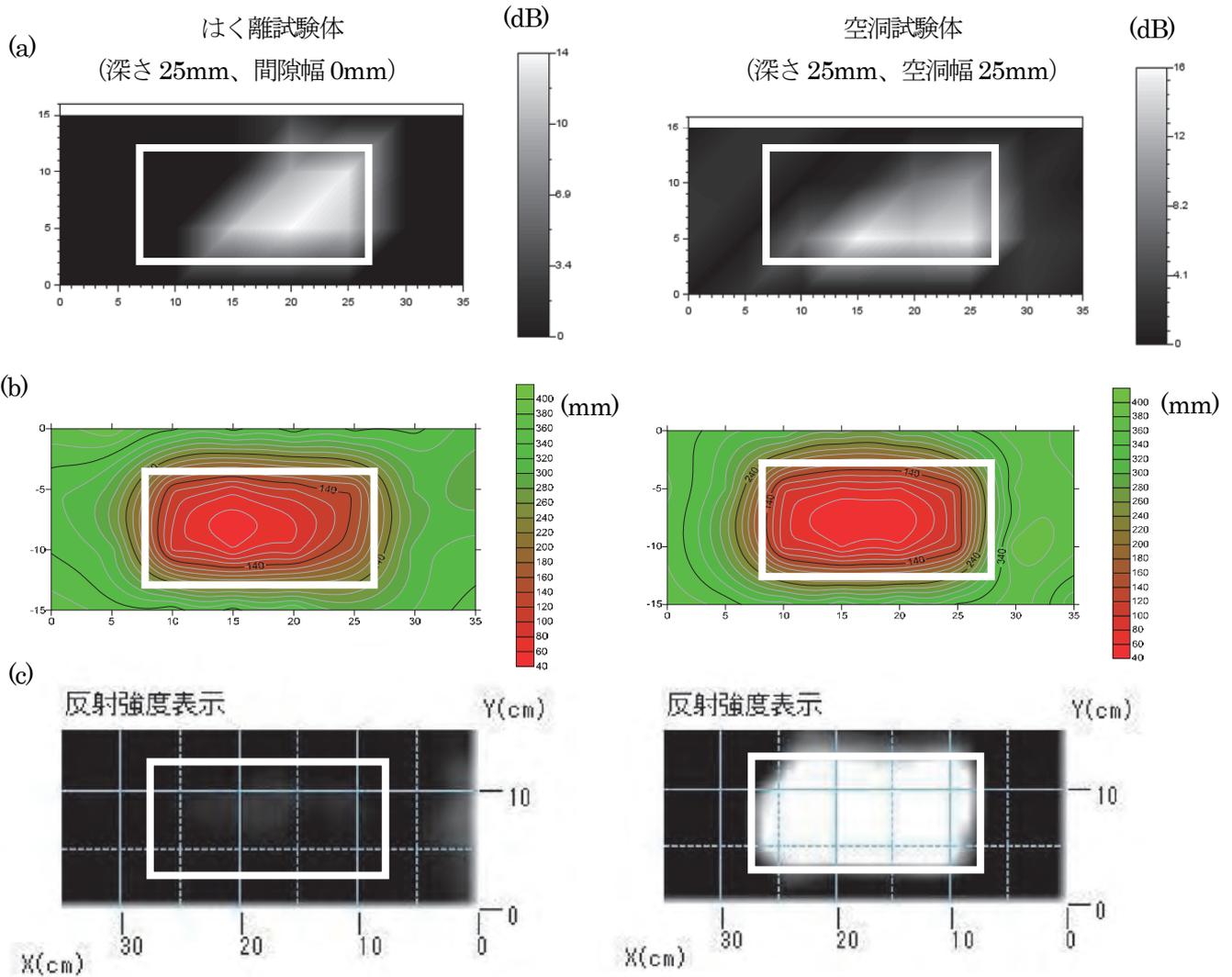


図-2 各種手法の結果 (a)音響探査法 (振動エネルギー比)、(b)打音法 (厚さ評価)、 (c)電磁波法 (反射強度)

と同じ領域、間隔で測定を行った。厚さ評価結果を図-2(b)に示す。欠陥位置で、厚さが小さいっており、欠陥があることが分かる。ただし、周辺境界の拘束やはく離面での拘束の影響で、実際の厚さ(25mm)にはなっていない。空洞試験体についても同様である。

電磁波法については、10cm 深さまでの反射波の強さの分布で表した。用いたレーダーは、日本無線社製ハンディサーチ NJJ-105 で、三次元可視化工具を用い、平面的な表示を行った。測定間隔は50mmで、縦方向8測線、横方向4測線の測定を行った。

図-2(c)から、空洞については探査可能であるが、はく離面(間隔 0mm)の探査が難しいことが分かった。

4. まとめ

はく離(間隔幅が小さい)については、音響探査法を含め弾性波法では、加力により振動が生じるため、探査は可能であるが、電磁波法では、狭い間隔を認識させることが難しいことが分かった。一方、空洞(間隔幅が大きい)については、3つの方法で探査できることが分かった。

参考文献

- 1) 杉本恒美,歌川紀之,片倉景義:コンクリート構造物非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法,平成26年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集,2014.
- 2) 伴 享, 歌川紀之, 市野大輔, 北川真也, 森濱和正: 打音法のRC構造物への適用について, 佐藤工業技術研究所報, No.30, 2004

2. 橋梁点検における機械施工の効率化の提案

危険作業の軽減と点検時間の短縮で現場作業革新する

高性能遠隔橋梁点検車「橋竜」

株式会社 カナモト ○友野 洋平

澤 幸男

株式会社 帝国設計事務所 若山 昌信

1. はじめに

今後のインフラ整備の中で維持管理の上で橋梁点検作業を行う場合に橋梁や橋梁下面等に添架された構造物の点検作業が見込まれる中で効率化が求められている。従来は、足場工設置やバケットタイプの橋梁点検車を使用し目視点検にて行われているが、次の様な課題がある。

- ① 点検に掛るコストが高く費用対効果が見えにくく定期点検の実施が難しい。
- ② 橋桁細部の目視点検と時間や安全性への配慮等課題があります。

本報告は、これらの課題を解決する新しい技術であり維持管理の分野においても今後、電子データとしての活用の促進する高性能遠隔橋梁点検車を提案するものです。

2. 高性能遠隔橋梁点検車「橋竜」

高性能遠隔橋梁点検「橋竜」は、人の代わりにアーム先端の点検用カメラが点検を行い橋梁上部から遠隔操作で橋梁下部をTVモニターで目視確認しながら点検が出来る為、従来のアーム先端に人が乗るタイプの橋梁点検車に比べ安全でさらにアームが多関節に伸縮可能で狭い箇所に潜り混むことが出来る。また、カメラにて撮影したデータは、運転席内で3D化した橋梁点検箇所をリアルタイムに確認することが出来る。さらに、点検データに関しては、電子データとして記録し次回以降、同じ位置で点検が可能になる。

この為、これまで難しかった定点での経年変化の観測や補修工事後の確認など、様々な調査に活用出来ます。(写真-1)



(写真-1)

3. 高性能遠隔橋梁点検車「橋竜」の効果 (安全)

・運転席より多関節伸縮アームを遠隔操作にて操作することが出来る為、人が直接橋梁下部等へ入ることがなく転落災害等を未然に防ぐことが可能である。(写真-2)



(写真-2)

(品質)

点検時にその場で電子データとして管理することで点検後の事務所内作業の損傷図作成と写真帳票が半自動化される為、電子データとして報告書作成の包括管理が可能となる。(写真-3)



(写真-3)

(作業効率)

本システムでは、3次元CG描画システム等が搭載されており、アーム操作や点検支援が可能で現地点検作業時間短縮が可能。また、点検写真位置は、その場で電子化されており、事務所内での写真整理や損傷図作成支援ソフトとリンクさせることで作業時間短縮も可能である。(写真-4)



(写真-4)

4. 使用上のポイント

遠隔操作で安全性が高い点検が可能であり点検調査位置や画像点検情報の電子化が可能となることで橋梁点検における経年劣化の追跡調査や橋梁下部の添架管等の調査では、管理者データベースとの関連づけによりデータの有効利用が継続的に可能になる。

5. ★特許取得とNETIS登録達成★

2006年06月に特許申請を取得。また、通常の点検作業に比べ点検の為のツールがすべて車両に搭載されており施工中もデータの管理についても常時可能であり台帳作成が容易であり点検作業ニーズへの提案として開発したラス橋等の複雑な構造の橋梁に対しても使用可能な高性能遠隔橋梁点検車として2009年08月にNETIS登録も完了。

特許登録番号 第5002756号

NETIS登録番号 HK-090007-A

6. おわりに

今後の橋梁等のインフラ整備に対する建設業界の技術上の課題は、多種多様な多くの橋梁への対応、点検内容構造への対応、環境条件に対する配慮等が考えられる。しかし、本点検装置の更なる改良を行い、適合性の高い橋梁点検ツールとしての活用を図る必要があると考えられる。また、電子データ化出来る情報を活かし情報化施工などのICT技術やCIM等の連携についても検討を行い使い分けることで点検業務の安全や品質・効率化がさらに進むものと考えられる。

3. クレーン仕様バックホウの安全対策

バックホウ横転事故の撲滅

株式会社アクティオ 稲葉誠一

株式会社アクティオ ○今関政美

はじめに

都市部などの狭い場所で施工する道路工事や管工事では、クレーン付きトラックやラフタークレーンなどの揚重機が進入・設置出来ないことが多い。バックホウのバケットに溶接したフックを使用した吊荷作業は重大災害に繋がるため、用途外使用として禁止されている。近年では掘削作業と吊荷作業を1台で行うことが可能なクレーン仕様のバックホウが主流となっており、広く活用されている。

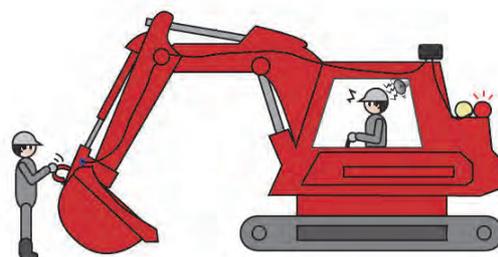
現状の問題点

クレーン仕様バックホウは掘削モードとクレーンモードを適時切り替えて使用するものである。しかし、吊荷作業の際にクレーンモードへの切り替えを忘れていたり、あるいは作業スピードを重視するあまり、掘削モードのまま吊荷作業を行い、重機が横転するなどの重大災害に繋がるケースが少なくない。狭い場所での施工において横転事故が発生すると、重機オペレータが投げ出され、周辺作業員を巻き込むだけでなく、近隣の住宅や歩行者・通行車両までも巻き込んだ大災害に繋がる可能性がある。

本製品の特長

クレーン仕様バックホウにてクレーンモードにせず掘削モードの状況で格納されているクレーンフックを取り出すと、クレーンフックに装着されたセンサーが検知して、赤色回転灯が点灯し周囲に異常を知らせるとともに、音声によりオペレータに警告を発する。

この時点で掘削モードからクレーンモードに入れば赤色回転灯が消え、音声による警告も終了し、安全な吊荷作業が行える。



クレーンフックを取出す。



クレーンモードにスイッチを押し忘れ。

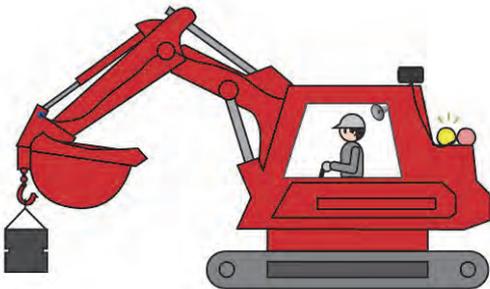
クレーンフックを格納せずに掘削作業を行うと、フックがバケットに干渉しフックの破損に繋がるが、この装置によりフックの破損防止及び固定ピンの紛失防止に寄与する。



不安全なクレーン作業開始後
設定時間に動作停止

そのまま警告を無視し、掘削モードで吊荷作業を続けると、停止を予告する音声が流れ続け、事前に設定した時間が経過すると動作を停止する。

クレーンモードスイッチを押せば、安全な吊荷作業を再開することが可能となる。

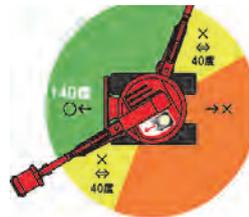


安全なクレーン作業

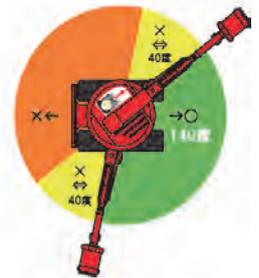
バックしないバックホウ

バックホウは後退時（死角方向へ走行した時）に作業員との接触事故が発生する。この事故を防ぐためにバックしないバックホウを既に開発している。この機械は、死角方向へ走行レバーを操作しても一切走行しないものであり、旋回し視界が確保できれば走行可能となるバックホウである。

標準姿勢時



逆姿勢時



標準姿勢時は

操作レバーを 前に倒すと動く

操作レバーを 手前に引いても動かない
(バックしない)

逆姿勢時は

操作レバーを 手前に引くと動く

操作レバーを 前に倒しても動かない
(バックしない)

融合機

上記のバックしないバックホウに安全クレーン装置を装着した融合機は、更に安全なバックホウへと進化し、施工会社様の評価を得ている。

今後も建設現場が安全に作業出来るようなシステムを開発していく所存である。

4. 狭隘地での施工を可能とした液状化対策工法の紹介

砂圧入式静的締固め工法：SAVE-SP工法

株式会社不動テトラ ○ 深田 久

1. はじめに

1964年の新潟地震において液状化現象が認識されて以来、地震が発生する度に、各地で液状化の被害が確認されている。今後予想される東南海地震や南海地震及び首都圏直下型地震等に備えるために、海岸堤防や河川堤防・港湾施設等の既設構造物の耐震化や補強が必要とされている。

既設構造物の液状化対策を実施する場合には、狭隘地にて施工可能な工法が必要とされている。近年、このような狭隘な施工条件下の液状化対策として、小型の施工機械により施工可能な薬液注入工法や圧入式静的締固め工法が採用されることが増加している。

こうしたニーズに応えるために、砂をポンプで圧送可能な状態として地盤に圧入する、新しいタイプの砂圧入式静的締固め工法（以下、SAVE-SP工法と略す）を開発したので、この概要を紹介する。

2. SAVE-SP工法の概要

SAVE-SP工法は、材料となる砂を専用プラントにて流動化剤と混練し、ポンプ圧送可能な状態とし、超小型施工機のロッドを通じて地盤中に圧入することで、周囲の地盤を締固める工法である。圧入された砂は、排出時の脱水および添加された遅効性塑性化剤の作用で流動性を消失し、最終的に良好な地盤を形成する。SAVE-SP工法の特長を以下に示す。

①超小型施工機を使用

超小型施工機械で施工するため、狭隘地や栈橋上での施工が可能である。また、移動が容易なので空港などでの緊急退避にも対応できる。

②既設構造物直下への適用が可能

斜め施工や硬質障害物層等への貫入に対応できる。既設の舗装・岸壁や埋設物に対してφ150mm程度の小さな孔だけで施工できるので、修復も容易である。



図-1 施工システム 全景

③無振動・低騒音

振動式サンドコンパクションパイル（SCP）のようにバイブロハンマを使用しないので、静かに地盤を締固めることが可能である。

④優れた経済性

従来の狭隘地や既設構造物直下の液状化対策に比べて、非常に経済的である。

⑤環境負荷低減工法

超小型施工機や自然材料（砂）を使用することで、環境に優しく地盤になじみやすい工法である。

3. システム構成

SAVE-SP工法のシステム構成を図-1・2に示す。

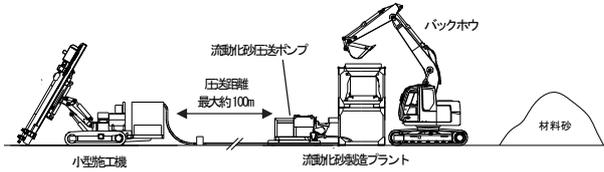
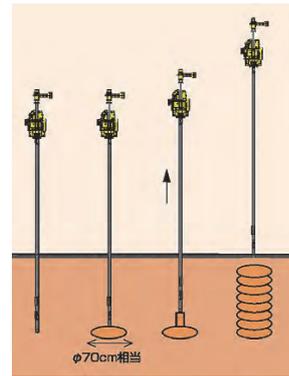


図-2 SAVE-SP工法の施工システム



① ②③ ④ ⑤
図-3 施工手順



図-4 掘起しの状態

4. 施工手順

SAVE-SP工法の施工手順を以下に示す。

① ロッド貫入

② 流動化砂の製造と圧送

専用プラントで砂を流動化剤、遅効性塑性化剤、水と混練し、流動化された砂をポンプで圧送する。

③ 流動化砂の排出・圧入

φ70cm程度の流動化砂をロッド先端から排出・圧入し、周囲の地盤を締固める。圧入と同時に流動化砂は脱水され締まった砂になる。

④ ロッドの引き上げ

⑤ 所定深度までこのステップを繰り返す、対象地盤を締固める。

掘り起こしの状態を図-4に示す。また、流動化砂の状態の変化を図-5に示す。

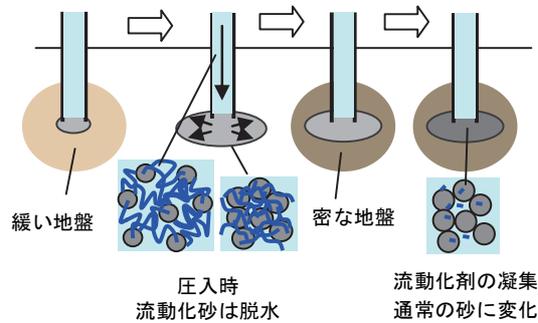


図-5 流動化砂の状態の変化

5. 改良効果

SAVE-SP工法の改良効果の一例を図-6に示す。現場は徳島県の海岸堤防であり、改良後のN値が増加していることが確認されている。

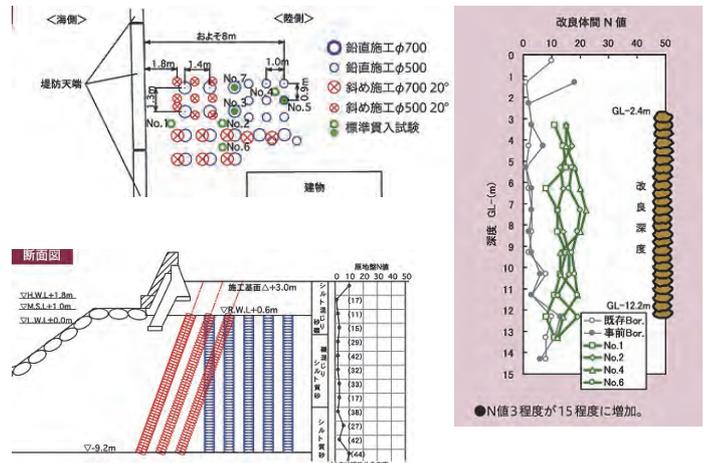


図-6 改良効果の一例

5. 既設戸建住宅に適用可能な高圧噴射攪拌工法の開発

楕円状コラムの築造を可能とする Miny マルチ工法

前田建設工業株式会社 ○川西敦士

前田建設工業株式会社 山内崇寛

株式会社ミヤマ工業 宮 朗

1. 工法概要

Miny マルチ工法は、硬化材スラリーを超高圧 (30~40MPa) かつ高速 (約 300m/s) で噴射し、噴流エネルギーを利用して原地盤を切削し、原地盤と硬化材スラリーを攪拌混合することで改良体を造成するスラリー系噴射攪拌式深層混合処理工法 (高圧噴射攪拌工法) である。既設戸建住宅の敷地境界地で施工が可能で、独自開発のロッド回転制御による楕円状コラムにより、液状化対策工法の1つである格子状地中壁工法の合理的な築造を可能とした工法である。

2. 工法の特徴

(1) 既設戸建住宅地の敷地境界の狭隘地に対応

専用の超小型専用マシン (W60cm×D75cm×H163cm、重量 400kg) を開発し、施工幅 1m×施工高 2m 程度の空間で施工を可能とした (図1)。

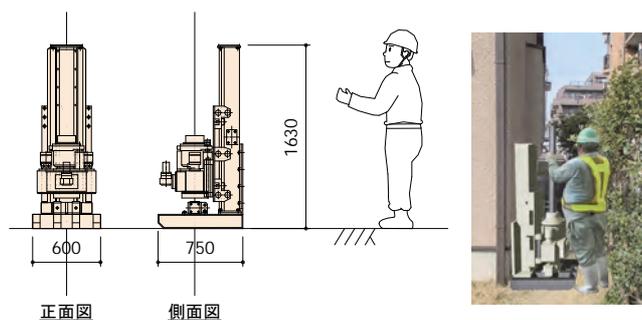


図1 超小型施工機械

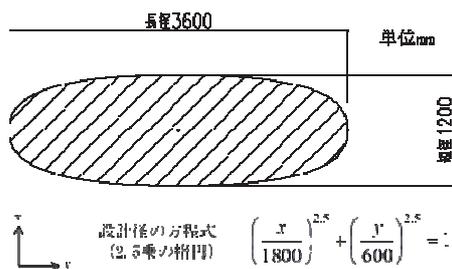


図2 楕円状コラムの形状

(2) 楕円状コラムの改良形状

経済的かつ効果的な格子状地中壁工法を構築するため、独自開発のロッド回転制御の採用により、図2に示す新しい楕円状コラム改良体の築造を可能とした。

(3) 品質の安定的な供給が可能

品質の安定的な供給を行うため、専用のリアルタイム管理装置を開発し、品質に影響を与える重要な造成仕様をリアルタイムで一元管理できることを可能とした。また、独自開発のリアルタイム品質確認方法 (出来形・強度) を施工管理に取り入れ、品質の安定的な供給を実現した。

3. 技術の効果

図3に□-13m×13mの有効壁厚85cm以上、最小壁厚60cm以上の格子状地中壁に対し、従来の高圧噴射攪拌工法 (直径1.5mの円柱状改良を想定) との対比を示す。楕円状コラムでは施工本数を60%削減でき、改良体積を20%削減することで、大幅な工期短縮とコストダウンを期待できる。

4. 今後の予定

性能確認試験として5現場の実験した。今後は、工法の信頼性を確保するため、建築系審査証明 (日本建築センター) の取得を予定している。

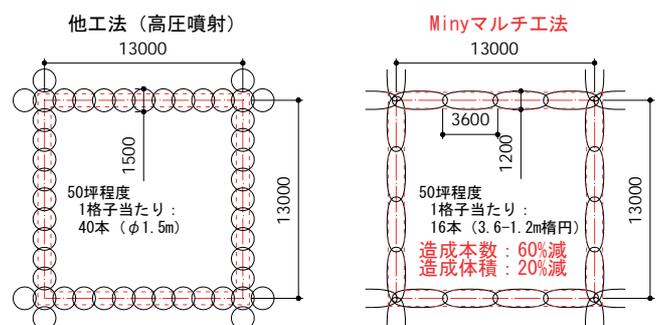


図3 従来工法との対比

6. 油圧ショベル双腕仕様機による災害対応

日立建機(株) 江川 栄治

日立建機(株) ○小俣 貴之

はじめに

油圧ショベルはもともと掘削機として発展してきたが、その汎用性、信頼性が高く評価され、多くの用途に使われている。双腕仕様機は、油圧ショベルの複雑な作業への対応能力をさらに向上させる手段として、人間と同様に二つの腕を持たせることに着目し、開発したものである。

本稿では双腕仕様機について、各機種の特徴と災害対応事例を紹介する。

7 トン級 ASTACO

7 トン級油圧ショベルをベースに、「一人で二つの腕を同時に動かす」機能を追及して開発した双腕仕様機である。(写真1)

レバーの動きと作業フロントの動きが概略一致する直感的な操作レバーで、右手で右フロントを、左手で左フロントを各々操作可能である。

また、三次元的にフロント姿勢を演算することで、フロント同士の接触を回避する干渉防止機能を備えている。

2008年10月に災害現場におけるレスキュー用として消防機関に試験導入され、2011年3月に専用装備を備えた後継機2台が正式採用されている。



写真1. 7 トン級双腕仕様機 ASTACO

13 トン級 ASTACO NEO

解体・スクラップ処理現場への適用を目的に(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受け開発した13 トン級双腕仕様機である。(写真2)

重量物把持やコンクリート破砕など大出力作業を行う主腕と、対象物を支える、細かなものを引き剥がすなど補助作業を行う副腕とを組み合わせた構成となっている。



写真2. 13 トン級双腕仕様機 ASTACO NEO

本機は、建物解体やスクラップ処理現場のほか、2011年3月に発生した東日本大震災被災地のガレキ撤去などの復旧現場でも稼働した。(写真3)



写真3. 東日本震災現場での稼働

原子力災害対応用 ASTACO SoRa

現在、福島第一原子力発電所では、高い放射線環境下において遠隔操作での環境調査・測定などを行う各種ロボットが適用されている。

ASTACO-SoRa は、原発建屋内でのガレキ撤去、遮へい体の設置等、比較的重量物を扱う作業を目的に、日立建機(株)と(株)日立パワーソリューションズが共同開発した遠隔操作式の小型双腕重機型ロボットである。

本体部分は、他の双腕仕様機と同様に信頼性の高い油圧ショベルをベースに開発したもので、幅 980 mm のコンパクトなボディに、狭所作業に適応した作業フロントを2本搭載し、建屋内での自由度の高い作業を実現している。(写真4)

左右のフロントは高さ約 2.5m まで到達し、油圧駆動により1本当たり 150kg、両アームで合計 300kg の重量物を扱うことが可能である。また、建設機械で多用される油圧カップリングを適用することで、先端ツールは遠隔操作での交換が可能となっている。

なお、本体部の開発にあたっては、2006 年～2010 年度のNEDO 委託事業「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」により培われた技術的なノウハウも活かされている。

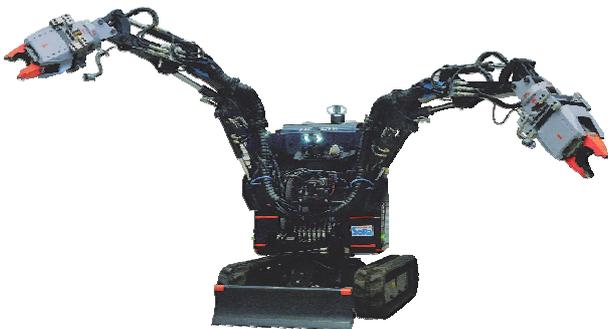


写真4. ASTACO SoRa 本体部

遠隔操作盤は、ロボット本体に搭載した6台のカメラ映像を切り替えながら、同時に5つのモニタに表示可能である。(写真6)

カメラには、それぞれLED 照明を搭載しており、暗闇となる原子炉建屋内での作業に対応している。本体にはカメラのほか放射線線量計、温度・湿度計、酸素・水素濃度計、および赤外線カメラを搭載しており、

これらの情報は、遠隔操作盤への表示とハードディスクへの記録が可能で、本体周辺の建屋内環境モニタリングに活用できる。



写真5. ASTACO SoRa 遠隔操作盤

ASTACO-SoRa は、2013 年7月から2014 年3月にかけて、原子炉建屋内で稼働した。ケーブル類、鋼材、ダクト類など、建屋内に残された多種多様なガレキ撤去に活用され、予定の作業を無事終了している。



写真6. 原子炉建屋内での稼働⁽¹⁾

おわりに

双腕仕様機の普及にあたり、その機能を生かした災害対応は、大きな意義を持つものである。今後は情報化施工技術などの制御技術を取り入れ、さらに高度化した災害対応ロボットとしての展開も期待される。

文献

(1) 東京電力(株)ホームページ

http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2013/images/handouts_130726_05-j.pdf

7. ジェットポンプ式サンドバイパス工法

海岸の堆砂・侵食問題を効率的に解決する

五洋建設株式会社 岡田英明

1. はじめに

海岸には入射波と呼ばれる波浪の働きで、河川から流れた砂を海岸に沿って移動させる沿岸漂砂が発生します。しかし、防波堤や護岸の構造物が造られると砂の移動の連続性が断たれ、流れの上手側では砂が堆積し、下手側では砂の供給不足により侵食されます。

五洋建設では、こうした海洋構造物による堆砂・侵食という課題を解決するジェットポンプ式サンドバイパス工法（J-SB工法、特許取得済）を提案いたします。

本工法は、堆砂海岸域の砂を固定式のジェットポンプで吸い揚げることによって堆砂を抑制し、侵食海岸域までスラリー輸送することによって砂浜を復元します。輸送された砂は波や沿岸流などの自然の力によって広げられます。

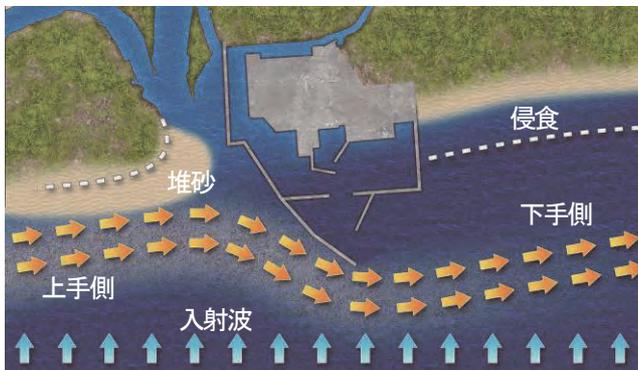


図-1 堆砂と侵食

2. 工法概要

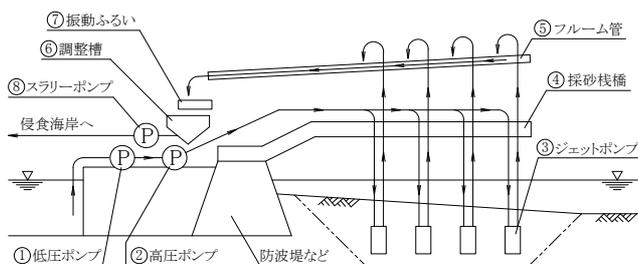


図-2 全体概要図

①低圧ポンプで海水を取り込みます。その海水を②高圧ポンプで昇圧し、海底地盤（堆砂）中に設置された③ジェットポンプへと送ります。ジェットポンプで堆砂をスラリーとして吸い揚げ、④採砂栈橋上に設置された傾斜のつけられた⑤フルーム管へ送ります。

スラリーはフルーム管で大気開放され、自然流下によって⑥調整槽へと送られます。調整槽の上部には⑦振動ふるいが設置され、ゴミなどの異物はここで取り除かれます。調整槽で濃度を調整したのち、⑧スラリーポンプで侵食海岸へと輸送します。

3. ジェットポンプ概要

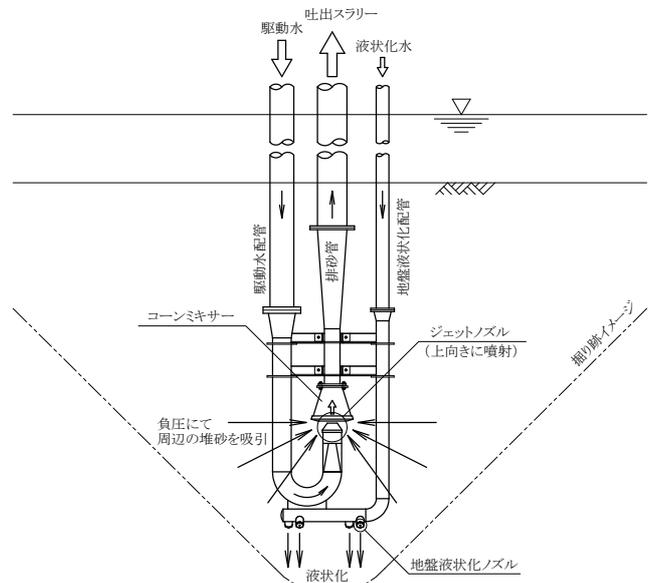


図-3 ジェットポンプ概要図

高圧ポンプによって昇圧された海水は、駆動水と液状化水の2系統に分岐され、海底地盤（堆砂）中に設置されたジェットポンプへと送られます。

液状化水はジェットポンプ下部に設置された4つのノズルから噴射され、海底地盤（堆砂）を液状化します。

駆動水はジェットノズルを通してコーンミキサーに向かって上向きに噴射されます。このときにノズル周辺に発生する負圧によって、周辺の土砂をコーンミキサー内に吸い込みます。吸い込まれた土砂は、ジェットノズルから噴射された海水と共に排砂管を通して上部のフルーム管まで揚げられます。



写真-1 ジェットポンプ気中試運転

4. 管理システム

本工法の運転は、コントロールルームにて一括制御方式となっています。本管理システムはオペレーターが制御用パソコン上の運転開始ボタンをクリックするだけで、システム全体が全自動で運転されます。制御用パソコン画面には、各種ポンプの運転状況、ジェットポンプの運転状況、調整槽内のスラリー量や濃度、浚渫土量、使用電気量などが表示されます。

また、栈橋、ポンプ室、電気室、吐出口などには監視カメラが設置されており、同様にコントロールルームから監視することができ、安全が確保されています。



写真-2 コントロールルーム

5. 工法の特長

①作業が簡単

- ・ボタン一つで運転が可能
- ・日常運転に専門技術者が不要

②安全性の向上

- ・海上作業を必要としない
- ・土砂運搬時に工事車両を必要としない
- ・船舶の航行に影響しない

③環境に優しい

- ・海底地盤中で砂を取り込むため、濁りが少ない
- ・重機、車両を使用しないので、騒音、排気ガスが発生しない

④効率・経済性の向上

- ・通常のポンプに比べ、取り込む砂の含有濃度が高く効率的
- ・長期運用の場合、浚渫・運搬工事より安価



写真-3 静岡県の事例

8. 防潮堤法面用護岸ブロック専用吊具の開発

より安全で、スムーズな法面護岸ブロックの据付作業

玉石重機株式会社 ○濱山祐司

玉石重機株式会社 片岡廣志

玉石重機株式会社 山口勇治

1 はじめに

平成23年に東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波により東北地方から関東地方にかけての太平洋沿岸部一帯に壊滅的な被害が発生した。

平成24年には仙台湾南部海岸での本格的な復旧事業が開始され、当社も事業に参加し、海岸堤防の構築を手がけた。

2 開発の背景

仙台湾南部海岸の復旧工事では、再築堤した堤防の法面部に護岸ブロック（重量2t）を据え付ける作業があり、対象物となる護岸ブロックを斜吊りし、調整しながら据え付けるという不安定な作業である。

<主な吊り荷作業>

- ・車両からの荷卸しあるいは荷積み時の重量物水平吊り作業（仮置き作業時など）
- ・2割勾配の法面へ据付時の重量物斜吊りによる据付作業（ブロック据付作業）

<従来の護岸ブロックの吊り荷作業>

- ・製作ブロック時では玉掛け用の治具（埋込吊り金具4点）を設け、ワイヤロープで吊り上げる。
- ・吊り金具の無い2次製品等では、胴巻き用具を用いた吊り上げ作業となる。

2次製品の吊り荷は胴巻き用具および吊りワイヤロープの掛け、取り外しに手間が掛かり、作業の短時間化が困難である。

この作業のスムーズな流れと容易性を高める検討を行う。

3 専用吊具の開発

<一般手法の問題点>

- ・胴巻き用具、吊りワイヤロープの掛け、外しに手間

がかかり、挟まれ等の危険性もある。

- ・吊り作業で胴巻き用具の不十分な掛かりによる荷すべりの危険性がある。

- ・据付作業時の位置合わせの不安定さ、挟まれ等の危険性がある。

- ・埋込吊り金具を取り付ける場合は、製作コストの上昇が発生する。

<開発吊具による改善点>

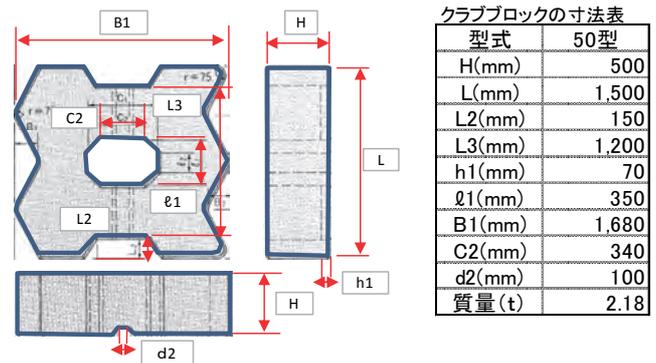
- ・玉掛けにかかる手間が容易で作業性が向上し、挟まれ等の危険性が軽減される。

- ・斜吊りによる据付作業は、開発吊具と吊り荷をロックロッドで固定することにより安定する。

- ・吊り具の脱着が容易である。

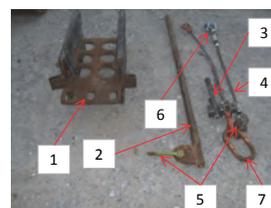
<吊り荷対象物>

クラブロック50型
クラブロックの形状寸法図



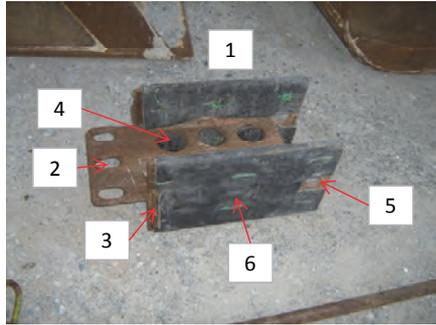
<開発吊具>

今回開発（クラブロック50型（2t）専用吊具一式）の吊具・玉掛け用具を示す。



- (今回開発)
- 1.H-300×300 L-700
 - 2.超硬φ38 L-1300 ロックロッド（玉掛け用具）
 - 3.レバーロック1.6t用
 - 4.ワイヤ（16mm 1.0m 両シプル付）
 - 5.HTジャックル（3t用）2個
 - 6.ダルマジャックル（3t用）1個
 - 7.〇環（3t用）1個

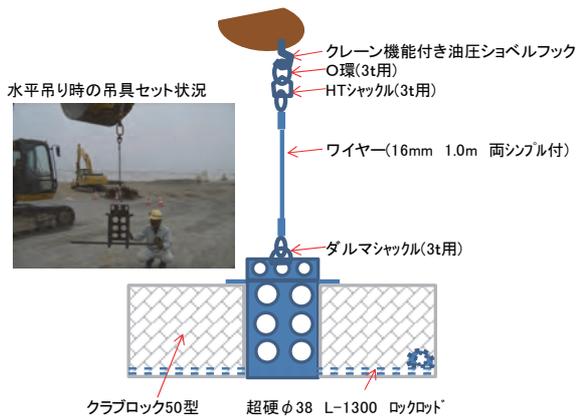
<クラブブロック 50型専用吊具>



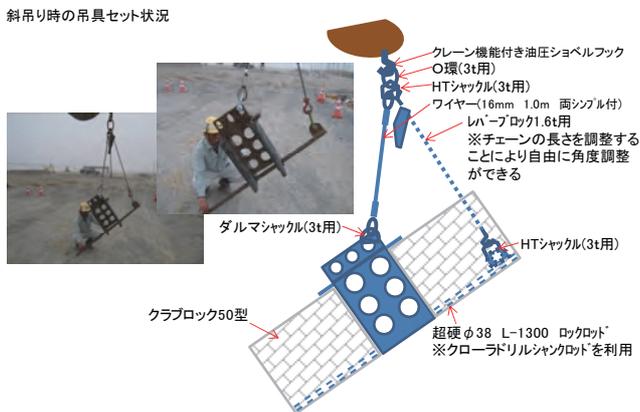
(開発の特徴)

1. H鋼300を加工して作成
2. 上部には吊具取付用の孔を3箇設け、目的に応じて取付位置を変える
3. ブロックに差し込んだ時、ズレ防止用のストッパー
4. 側面部の孔抜きによる軽量化
5. ロックロッド差込用の孔
6. ブロック傷付け防止用のゴム
7. 玉掛け用の治具を加工したロックロッド
8. 吊り上げ時、製品の自重でロックされ吊り荷が安定

<開発吊具の水平吊り作業>



<開発吊具の斜吊り作業>



4 施工状況

今回、開発した吊具は津波により被災した仙台南部海岸防潮堤の復旧工事で活用した。

<水平吊りによる仮置き状況>

据付箇所への仮置き状況(水平吊り)



ブロックの荷吊り状況(水平吊り)



<斜吊りによる据付状況>

2割の法面に位置付けられたブロックを高さ・勾配・位置の微調整をしながら据え付けていく(斜吊り)



<据付完了>

竣工(堤防全景・終点側上空より)



竣工(表法・海側起点より)



5 まとめ

平成23年の東北地方太平洋沖地震津波により被害を受けた海岸堤防および河川への津波遡上により被害を受けた河川堤防の復旧事業は今後も進められるが、それに伴う被覆用ブロックによる緩傾斜護岸の保護工もあることから、本工法による作業上の安全性・施工性の向上・コストダウン・作業時間の短縮等が活用できると期待している。

9. 微細藻の破碎効率化のための超音波照射方法の検討

東京工業大学大学院理工学研究科化学工学専攻 松本 秀行

東京工業大学大学院理工学研究科化学工学専攻 ○蜂谷 修平

1. 緒論

近年、食料と競合する従来のバイオマス燃料と異なり、食料と競合しない微細藻類を用いたバイオディーゼル燃料(BDF)が注目されている。加えて微細藻類のオイル生産の作付面積効率は、従来の穀物及び植物油から成るバイオ燃料よりも良いことが知られている。しかし、微細藻類によって生産されたオイルを抽出するためには微細藻類の細胞壁を破碎する必要がある、破碎工程がBDF生産プロセスシステム全体の効率に及ぼす影響は無視できないと考えられる。例えば、破碎を促進する薬剤を使用する場合、破碎後に薬剤を分離するエネルギーが必要となり、薬剤の使用を軽減できる手法が望まれる。

そこで本研究では、細胞壁の破碎方法として、キャビテーションのエネルギーの利用方法に着目した。高エネルギーを発生しうる超音波照射法について、その出力及び周波数が微細藻の破碎挙動に及ぼす影響を明らかにし、超音波照射条件が破碎後の固液分離効率に及ぼす影響も検討する。

2. 微細藻の破碎・分離プロセス

培養液中の微細藻類の乾燥重量は0.1%程度で、乾燥重量の1000倍程度の水が存在するため、微細藻をそのまま燃料として利用することができない。そこで、微細藻のオイル抽出技術として dry extraction と wet extraction の二つの方式(図1)が考案されている。

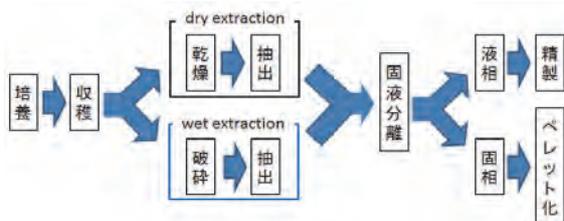


図1 微細藻オイル生産のプロセスフロー

dry extraction の特徴は、スプレードライヤーによる乾燥操作を行い水の分離を行うことである。これに対し、wet extraction は乾燥操作をせずに細胞膜を湿式破碎で粉碎することが特徴である。図2に示したように、dry extraction は得られるエネルギー量よりも投入エネルギーが大きく上回り、エネルギー収支がマイナスになることが報告されている^[1]。乾燥操作の使用エネルギーが大きいことより、wet extractionの方がエネルギー収支を改善できる可能性が高いと考えられている。

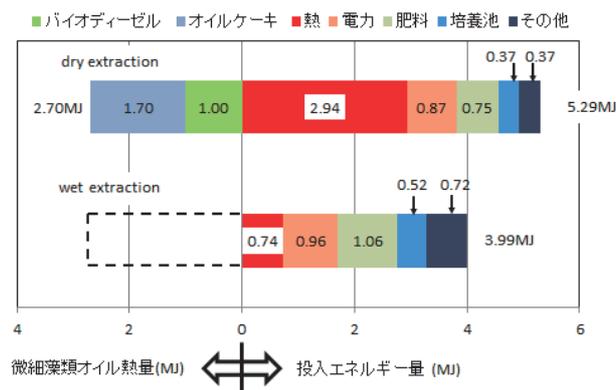


図2 extraction プロセスのエネルギー収支予測^[1]

また湿式破碎の手法としてビーズミル、キャビテーション、マイクロ波などが検討されている。本研究では、温度上昇が少なく、溶剤を軽減できるとされているキャビテーションに着目した。本研究で用いる超音波キャビテーションは周波数・出力によって破碎効率が変ることが報告されているが、後工程の固液分離への影響を考察している研究はほとんどない。そこで図3に示されるように、上層が燃料層、下層が水層で中間層が燃料・水混合層であるセトラモデル^[2]に基づいて、微細藻の破碎挙動が後段の分離操作の効率に与える影響について検討する。

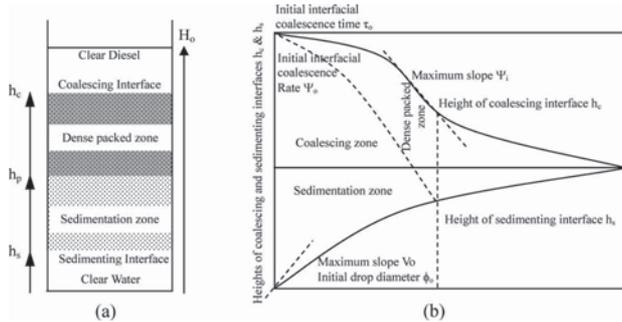


図3 ディーゼル-水系セトラモデル^[2]

3、超音波照射法の検討

・実験方法

ガラス製円筒容器に純水 25 mL とヤエヤマクロレラの粉末 0.01 g を入れ、超音波を間接照射した (図4)。破碎実験においては、超音波照射時間を 90 min、照射出力を 40 W、水浴温度は 24 ± 1 °C とし、周波数 f [kHz]、容器高さ h [cm] を変化させた。

照射終了後、顕微鏡 (KEYENCE 社 VW-9000) と細胞計数盤を用いて図5のように観察される黒点のカウント数 N [mL^{-1}] を測定した。また、サンプル溶液を遠心分離操作した後、分光光度計を用いて上澄み液の吸光スペクトルを測定した。

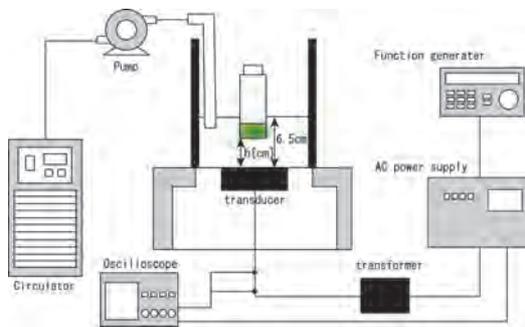


図4 実験装置概略図

・結果と考察

容器高さ h が黒点のカウント数 N と吸光度 I に及ぼす影響を検討した。 $f = 23$ kHz、 $h = 2$ cm の場合、 $N = 5 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$ であった一方、 $h = 1$ cm と $h = 3$ cm の場合、それぞれ $N = 3 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$ であった。図5に照射前と $f = 23$ kHz、 $h = 2$ cm の条件下で照射した後の観察画像を示す。照射前に見られた大きな黒点が照射後にほとんど見られなかったことと N の増加より、超音波を照射することで大きな黒点が小さく分割されていったと考

えられた。

図6に $f = 23$ kHz において、 h を変えた場合の吸光スペクトルの変化を示す。 $h = 2$ cm の場合は、 $h = 1$ cm と $h = 3$ cm の場合よりもクロフィルの吸収波長である 680 nm 前後での吸光度のピークが顕著に見られ、振動子と容器の位置関係が微細藻の破碎挙動に影響を及ぼす設計変数であるという知見が得られた。

また、OH ラジカル生成量が多いといわれている周波数 $f = 500$ kHz の超音波を照射した場合には、680 nm 付近のピークがほとんど見られず、細胞壁へのキャビテーション作用が 23 kHz の場合と異なると考えられた。今後は、所要エネルギー量を削減するために、異なる周波数を組み合わせる重畳超音波照射法の適用を検討する。

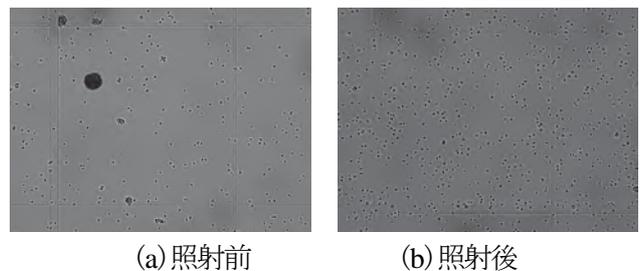


図5 細胞計数盤上溶液の観察画像

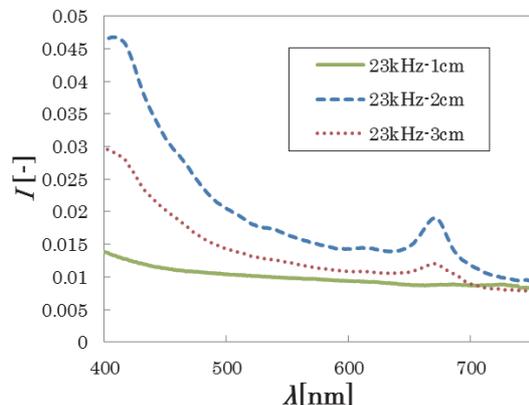


図6 23 kHz 照射の場合の各容器高さにおける吸光スペクトル

<引用文献>

[1] L.Landon et al. : *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 6475-6481 (2009)
 [2] G. M. Madhu et al. : *J. Disper. Sci. Technol.*, **28**, 1123-1131 (2007)

10. 高速施工・大径化を可能とした高圧噴射攪拌工法の紹介

FTJ（エフツインジェット）工法

株式会社不動テトラ ○ 深田 久

1. はじめに

近年、掘削山留めや既設構造物の耐震補強等で、構造物と地盤改良を組み合わせた構造形式が増えてきた。ここでいう構造物には、鋼矢板をはじめとする山留め壁やコンクリート壁体等があり、地盤改良工法としては、機械式攪拌翼を用いる深層混合処理工法がある。

機械式攪拌翼では、既設構造物と密着して改良することができないので、間詰めとして単管式高圧噴射工法等を併用する手法が用いられてきた。近年では、機械攪拌翼と高圧噴射工法を併用した工法が開発されてきているが、攪拌軸またはロッドに一箇所のノズルが取り付けられており、1流線で地盤を切削混合して施工が行われている。

FTJ（エフツインジェット）工法は、攪拌翼またはロッドの先端に取り付けられたノズルを2箇所とし、2流線で地盤を切削混合することで、大径・高速化施工を実現したので、この概要を紹介する。



写真-1 FTJ施工機



写真-2 2流線の噴射状況

2. FTJ工法の概要

2流線式セメントスラリー噴射攪拌工法「FTJ（エフツインジェット）工法」は、機械攪拌翼またはロッドの先端に取り付けたノズルから、セメントスラリーを高圧噴射し原位置で攪拌する深層混合処理工法の一つである。FTJ工法の特長を以下に示す。

①大径・高速化施工

写真-1、2および図-1に示すように、2流線で地盤を切削混合するので、1流線の場合に比べて高圧噴射密度を保持したまま、2倍速で施工できる。このため、従来に比べて大径・高速化施工が可能となった。

②確実な施工管理

改良体の造成を確実にを行うため、深度と噴射流量をシステム管理装置にて管理を行う。

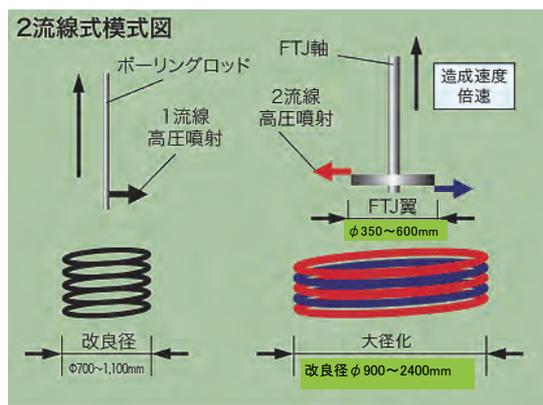


図-1 2流線の模式図

③幅広い用途と目的

山留め壁などの構造物と地盤改良体との間詰め対応や通常の地盤改良としての適用等、幅広い用途や改良目的に適用可能である。

④幅広い適用地盤

地盤改良の対象となる緩い砂地盤、軟弱な粘性土地盤への適用が可能である。

3. FTJ工法の適用範囲

FTJ工法の適用範囲を以下に示す。

(1) 施工対象地盤

- ・ N値 30 以下の砂地盤
- ・ 粘着力 $c = 70\text{kN/m}^2$ 以下の粘性地盤

(2) 改良体強度

機械式攪拌工法と同様、改良目的に応じ、標準的な設計基準強度は $q_{uck} = 0.2 \sim 1.0 \text{ MN/m}^2$ の範囲で選定可能である。

(3) 施工可能深度

施工可能深度と施工機概要を表-1、図-2に示す。

表-1 施工可能深度

標準施工機	軸数	標準施工深度	最大施工深度 (軸継ぎ足し)
S型施工機	1	20m	
N型施工機 DHJ12(12t)	1	10m	18m
N型施工機 DHJ25(25t)	1	17m	24m
L型施工機 (60t)	1~2	27m	45m

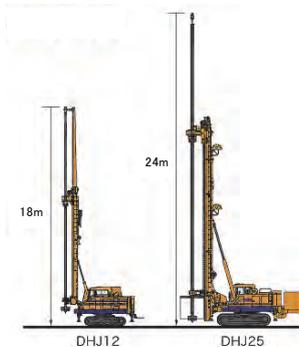


図-2 施工機概要図

(4) 改良仕様

FTJ (エフツインジェット) 工法の標準的な改良仕様は、低変位対応を含め、施工機・施工方法により、表-2に示すように幅広く選択が可能である。

4. 改良効果

FTJ工法の現場強度 q_{uf} と室内配合試験の強度 q_{ul} との比率を図-3に示す。 $q_{uf}/q_{ul} = 1/1 \sim 1/2$ と良好な強度の発現が見られている。

表-2 改良仕様

タイプ	L型	N型	S型
模式図			
改良径(mm)	エア無し 1,700~2,400	エア無し 1,500, 1,600 エア有り 2,000	エア無し 900~1,400 エア有り 2,000
最大切削距離(mm)	エア無し 250~600	エア無し 575, 625 (攪拌翼350mmの場合) エア有り 825	エア無し 450~700 エア有り 1,000
標準施工機	L型施工機	N型施工機	S型施工機
吐出方式	引抜吐出	引抜吐出	引抜吐出
施工速度	2.0(分/m)	4.0(分/m)以上	4.0(分/m)以上

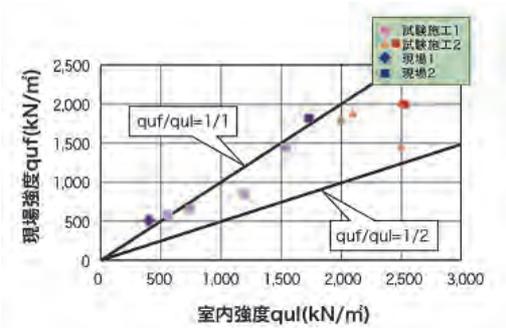


図-3 現場と室内の強度比

5. 密着施工

FTJ工法は写真-3に示すように、高圧噴射によって鋼矢板などの既設構造物と確実な密着施工が可能である。



写真-3 鋼矢板との密着状況

Ⅱ－２ 研究開発助成成果報告

平成26年11月27日

平成26年度建設施工と建設機械シンポジウム

平成24年度研究開発助成成果報告

助成研究名：

「掘削バケット前方埋設物の地中レーダ監視システムの開発」

群馬大学 理工学府 電子情報部門 三輪空司

研究背景

近年、パワーショベル等の**建設機械を使用した工事**において電話線、光ケーブル、ガス管、水道管等を破損する**地下埋設物損傷事故**が後を絶たず、事故現場付近の住民へ重大な被害が及んでいる。



従来法

①埋設図面の利用

地下に埋設されているケーブルや配管の位置を図面で表した埋設図面を利用し、予め埋設物の位置を把握することが可能である。

⇒ **予め位置推定が可能**

⇒ **図面に記載されていない埋設物が存在**



②探査機による事前の調査

地中レーダ探査や電磁誘導探査等の地表面上からの探査をおこなう。

⇒ **予め位置推定が可能**

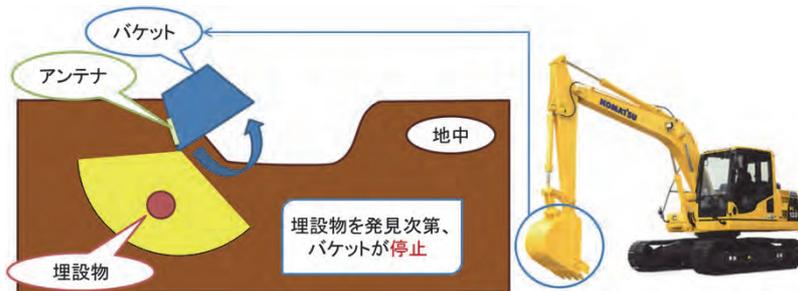
⇒ **位置推定の精度が不十分、多額の費用が必要**



研究目的

従来法では位置推定精度が悪く、作業員の不注意や操作ミスによる事故も多い。そこで、本研究では「掘削時前方探査のためのバケット一体型地中レーダシステム」を提案する。

本システムでは、バケットの鋼板上に地中探査用アンテナを一体化させ、掘り進める際、地中を対象にリアルタイム計測を行う。



レーダシステム概要図

研究項目と実施状況

	シミュレーション	ソフト開発	ハード開発	実験
指向性アンテナの開発	八木宇田スロットアンテナ		簡易アンテナの試作	地中内アンテナ特性計測
アンテナの一体化	バケットの影響検討		市販バケットの改造	地中内でのバケット一体アンテナの特性計測
レーダシステムの開発		ドップラ法によるターゲット検出法	リアルタイム計測可能なFMCWレーダの開発	既設埋設管のあるフィールドでの探査実験

H25年度実施済み
H26年度実施中
H26年度実施予定

バケット一体型アンテナの検討

アンテナ要件

①平面アンテナである

⇒バケットとアンテナを一体化する際、バケットの強度を保ちながらバケット面上にアンテナを配置するため、形状としては**薄型で平面状である必要**がある。

②指向性を有する

⇒計測中、最も不均一の大きい場所はバケットの動きにより大きく状況の変化するバケットのアーム側である。よって、**バケット前方に指向性を向ける必要**がある。

③広帯域である

⇒レーダとして使用するには**広帯域性が必要**となる。具体的には、比誘電率を約25とすると、50cm先までを約10cmの分解能で見える場合、帯域幅としては約**250MHz**程度必要となる。

目的

シミュレーション及び実験を通して上記の3つの条件を満たす地中探査用アンテナを開発する。

設計アンテナの特徴

スロットアンテナ

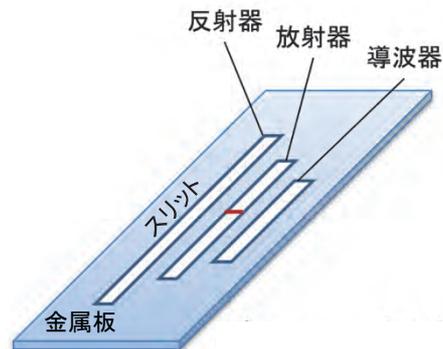
- 比較的**広帯域**
- **薄型平面**アンテナ作成に向く
- **構造的に強い**
- 磁気ダイポール
- 底面方向の放射を抑制する
キャビティを設置

八木・宇田アンテナ

- 素子配列方向に**指向性を得やすい**
- **狭帯域**



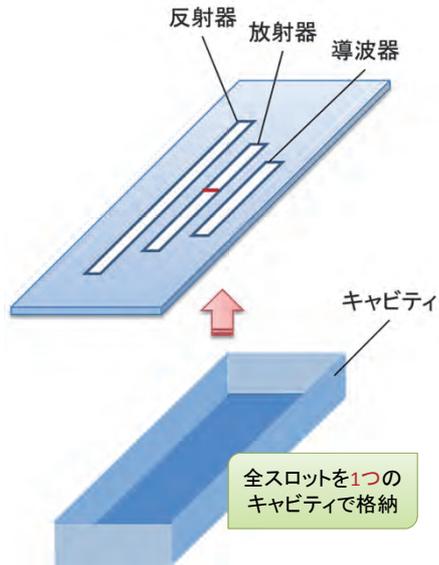
2つのアンテナを
組み合わせた



八木・宇田スロットアンテナ

八木・宇田スロットアンテナを採用

キャビティの概要



地板の大きさが無限のスロットアンテナはアンテナ表、裏に電波を放射するが、地板が有限のため地板端部電流がキャンセルされ、アンテナ効率が悪化するため、裏面の電流を抑えるためにキャビティでフタをする

シミュレーションによる最適化

- マクスウエルの方程式を時間、空間で差分化
- 時間領域でアンテナの放射による電磁界を計算
- 3000通りのアンテナ形状について遠方界を評価した

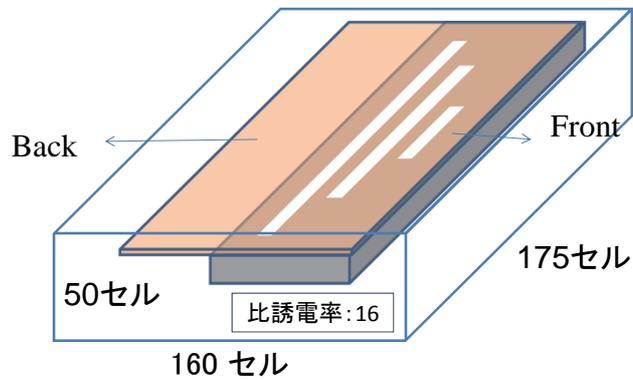
最適化する際の基準

- ① 帯域幅
- ② 前後比の大きさ
- ③ キャビティの厚み
- ④ 前方方向の指向性

変化させたパラメータ

地板サイズ	300 × 124mm
キャビティのサイズ	280 × 44mm
放射器	200mm
導波器	40 ~ 192mm
反射器	208 ~ 280mm
スロット間隔	4 ~ 16mm
キャビティの深さ	8 ~ 40mm
給電間距離	48 ~ 144mm

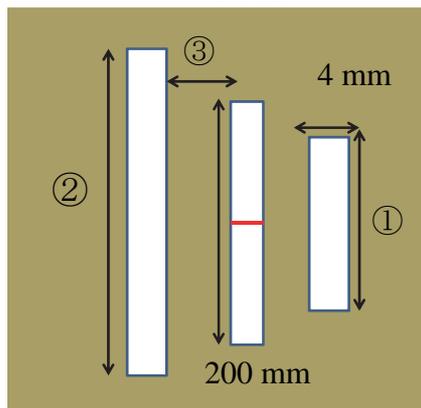
FDTD法におけるモデリング



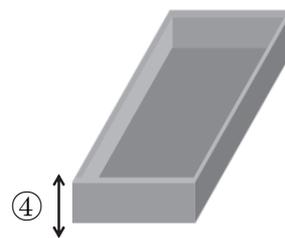
- ・6層のPML吸収境界条件
- ・地中の比誘電率15、導電率は0
- ・その媒質中にアンテナが置かれているものとして、遠方界を計算

最適なアンテナパラメータ

スロット部

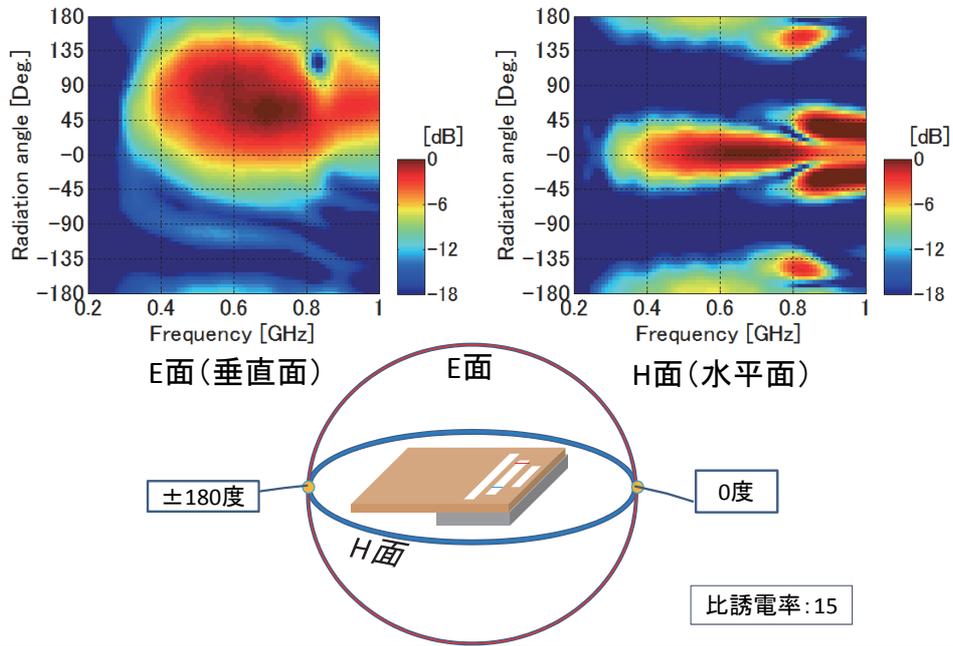


キャビティ部

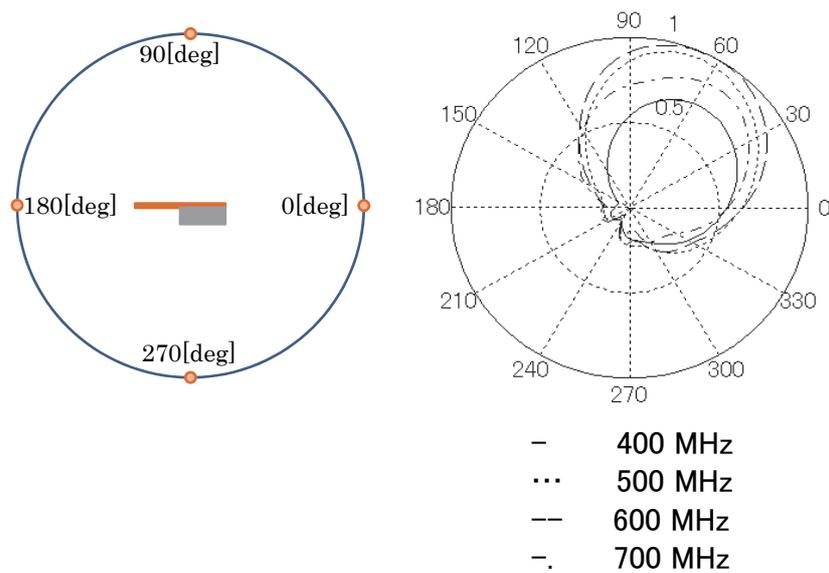


- | | | |
|---|----------|--------|
| ① | 導波器の長さ | 40 mm |
| ② | 反射器の長さ | 208 mm |
| ③ | スロット間隔 | 8 mm |
| ④ | キャビティの厚み | 16 mm |

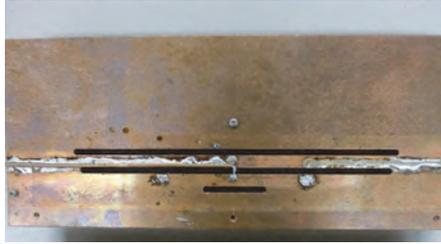
最適化されたアンテナの特性



E面指向性特性



試作アンテナ



地板サイズ・・・300×124mm
 導波器・・・40mm
 放射器・・・200mm
 反射器・・・208mm
 給電点間の距離・・・96mm



材質:アルミ
 キャビティ内部・・・280×44mm
 キャビティの厚み・・・16mm



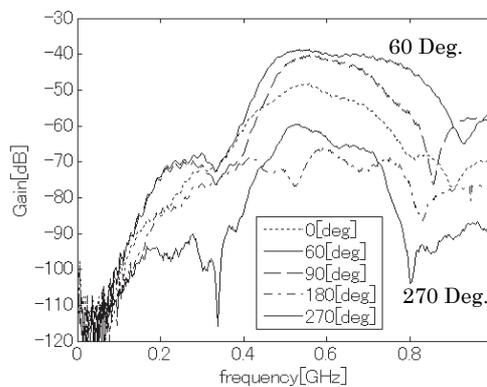
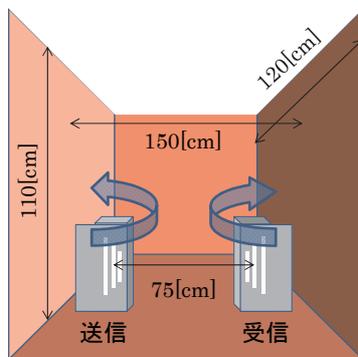
全体図

地中内での指向性の測定

- 地中内にアンテナを0, 60, 90, 180, 270度に傾けて配置して埋め戻し、それぞれの角度におけるアンテナ伝達特性を測定した。



アンテナアナライザー
 ZVH8(ROHDE&SCHWARZ)

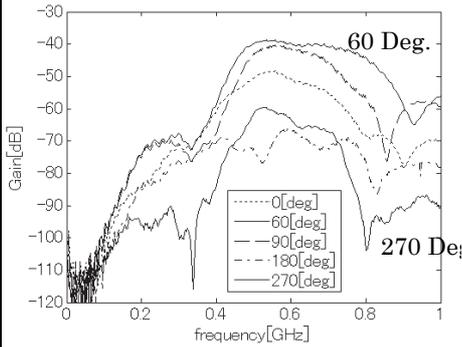


シミュレーションとの比較

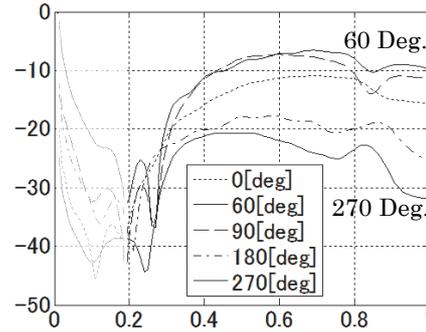
- 測定結果とシミュレーション結果を比較すると、測定結果には地中の水分による減衰の影響が見られるが、傾向は概ね一致している

給電点間距離・・・75cm
地中の比誘電率・・・15

比誘電率・・・15



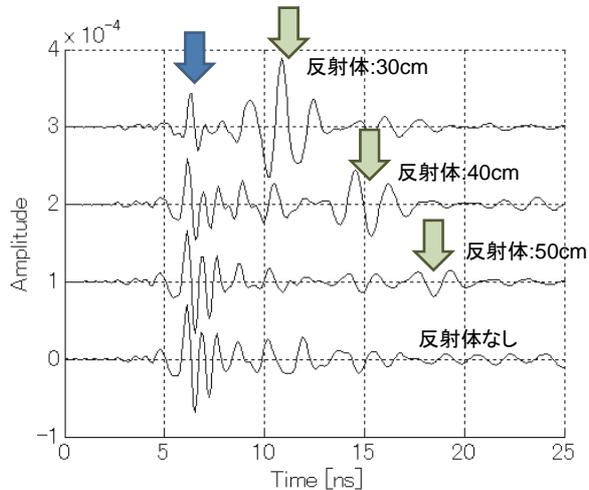
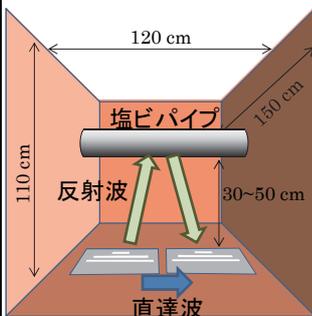
測定結果



シミュレーション結果

地中内での反射特性計測

- 直径10cmの中空塩ビ管を反射体
- 送受信アンテナを平行に地中に配置し、反射体までの距離を変化



まとめ・今後の課題

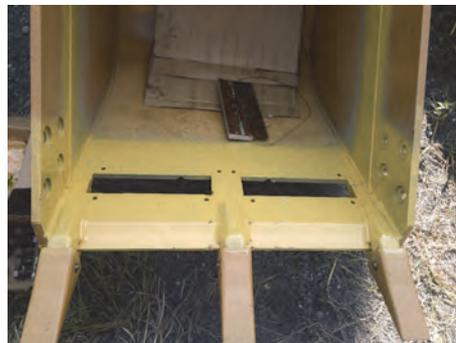
- 遠方界を用いた八木宇田スロットアンテナの最適化を行った
- 試作アンテナによる土壌内透過計測実験
シミュレーション結果と実験結果の比がほぼ一致
400～700MHzの広帯域(帯域幅300MHz程度)で利用可能
- 試作アンテナによる土壌内反射計測
アンテナ間の直達波が小さい
50cm離れた直径10cmの塩ビ管からの反射波を計測可
八木宇田スロットアンテナはバケット一体型アンテナとして
利用可能

今後の課題

- 重機を用いた反射体計測実験
- 試作レーダシステムによるリアルタイム計測
- 砂利、礫交じり土等、実フィールドでの適用性検討

バケット一体アンテナの試作状況

三菱キャタピラ製バケット(0.5m³)にアンテナ設置用の開口部を設け、試作したアンテナを設置し、掘削中のリアルタイム計測実験を行う予定



超広帯域通信ICタグと3次元モデルを用いた情報施工管理システム

大阪大学 大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻 教授

矢吹 信喜

目次

1. 背景・目的
2. UWBを用いた屋内測位に関する基礎的実験
3. アンテナ配置最適化システム
4. 3次元表示システム
5. 自動警報システム
6. まとめ

情報化施工

建設生産プロセスのうち「施工」に注目し、ICT (Information and Communication Technology) の活用により高効率・高精度な施工の実現や施工で得られる電子情報の他のプロセスへの活用などを行う。

例) ✓ TS (Total Station) 出来高管理

✓ マシンコントロール(MC)/マシンガイダンス(MG)

✓ GNSSを利用した測位技術

- TS出来高管理: 作業の自動化・効率化を図る。
- GNSS: 衛星からの信号を受信し測位を行う。
- MC/MG: リアルタイムに自動制御し施工を行う./重機の操作をサポートする。

3

GNSSの欠点

- 閉鎖された空間において利用できない。
- RTK-GPSを用いて、高精度な測位ができるが、非常に高価で大きな機材が必要である。
- 通常のGPSを用いた測位では大きな誤差が発生する。

CIM(Construction Information Modeling)の導入

- 3次元モデルの作成とライフサイクルを通じての活用によって、生産性、品質、安全性の向上を目指す。
- 3次元モデルの活用により、従来のように文書や写真記録を残す手法からより効率的に施工を行うことができるようになると考えられる。

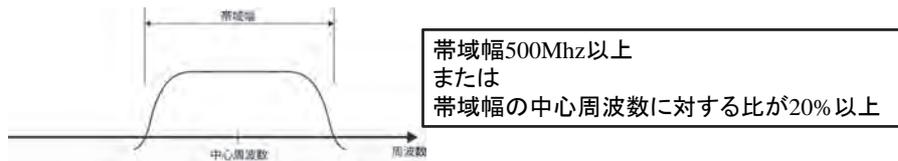
閉鎖空間においても一定以上の精度で測位を行うことのできる技術と3次元モデルを組み合わせることにより、施工プロセスの生産性や安全性を向上させることができると考えられる。

4

UWB

- 今までのICタグは、動くものの位置情報を得ることができない。
- しかし、UWB周辺に3個以上のアンテナを設置。C級の比較的高精度の測位を屋内でもリアルタイムに行うことが期待できる。
- ICタグには個体識別情報が付加され、物の位置、動きなどを把握することができるようになる。

FCC(Federal Communications Commission)による定義



- 米国: 3.1~10.6GHzの範囲で-41.3dBm/MHz以下の出力に制限されている。利用に免許は不要、屋外での利用も可能。
- 日本: 3.4~4.8GHzでは-41.3dBm/MHz以下、4.8~10.25GHzでは-70dBm/MHz以下の出力に制限されている。利用には総務省に実験局の申請及び陸上特殊無線技士3級の免許が必要、屋外利用も不可。また、UWBを利用する商品が少なく、高価、建設分野での研究が極めて少ない

5

- UWB-ICタグを活用したシステムを開発するにあたり、UWB-ICタグを用いた屋内測位の精度に関する基礎的な実験を行う。
- また、UWBの送受信を行うアンテナを現場に設置する必要があるが、どの場所からも最低3つ(三次元環境では4つ)のアンテナが電波を受信できるようにアンテナを設置する必要があるので、アンテナの設置場所の最適化を行うアルゴリズムの開発を行う。
- 建設作業員のヘルメットやバックホウ、ダンプトラック等の建設機械にUWB-ICタグを取り付けることを想定し、これら測位対象の3次元モデルをCADソフトを用いて作成し、各UWB-ICタグの位置をモデル上に表示するプログラムを作成し、遠隔の事務所で施工や安全の管理が行えるシステムを構築する。

6

- Ali Motamedi, Mohammad Mostafa Soltani, Amin Hammad : Localization of RFID-equipped assets during the operation phase of facilities, Advanced Engineering Informatics, Volume 27 Issue 4, pp.566-579, 2013
 - RFIDによる位置情報推定とBIMデータを結びつけることで施設管理を行う手法の開発

- C.Zhang, A.Hammand, M.ASCE, S.Rodriguez : Crane Pose Estimation Using UWB Real-Time Location System, J. Comput. Civ. Eng. , 26, pp.625-637, 2012
 - クレーンのアームにUWB-ICタグを取り付けリアルタイムに位置情報を取得し, 効率的なクレーン操作を計算するシステムの開発.

- Tao Cheng, Jochen Teizer, Giovanni C.Migliaccio, Umberto C.Gatti : Automated task-level activity analysis through fusion of real time location sensors and worker's thoracic posture data, Automation in Construction, Vol.29, pp.24-39, 2013
 - UWB-ICタグを通じて得られる情報を基に, 建設プロセスの分析を行う手法の開発.

- UWB-ICタグを用いた屋内測位を実際に行い, その精度を調査する.
- 測位は様々な条件下で行う.

UWBアクティブタグ

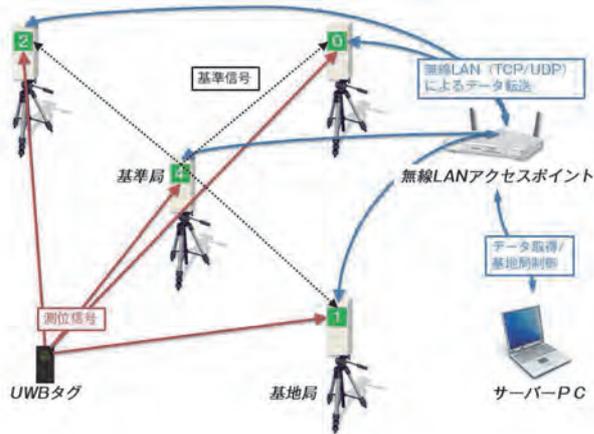


UWB-ICタグ (W27.8 × H56.5 × D15.2mm)

ハードウェア仕様

外形寸法	基盤本体	25 × 51 × 0.9mm
	筐体格納時	W27.8 × H56.5 × D15.2mm
重量	基盤本体	4g
	筐体格納時	19g
使用環境条件	0-50℃, 30-80%RH, 結露なきこと	
データ送信間隔	125ms	
電源	リチウム2次電池 (180mAh)	
充電方式	DC:5V / 1.0A, DCジャック (EIA#1)	
連続駆動時間	16時間	

UWB-ICタグから発信される測位信号と、基準局から発信される基準信号が各基地局において受信され、その到着時間の差によって各基地局からUWB-ICタグまでの距離とUWB-ICタグの相対的な位置を求める。



○測位システム仕様
(取扱説明書より作成)

通信距離：30m
通信システム：
Impulse radio UWB
周波数帯域：3.4～4.8GHz
通信レート：250kbps
測位方式：TDOA (Time
Difference of
Arrival) 方式

ユーシーテクノロジー株式会社, UWB測位システム取り扱い説明書, 2013 より引用

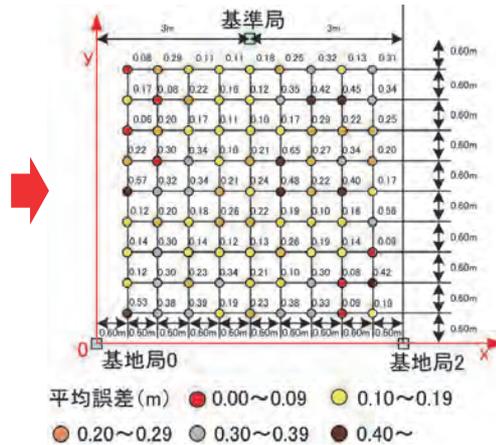
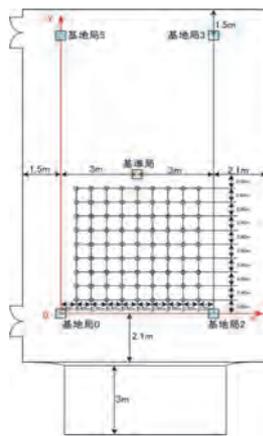
9

- 静的精度実験
- 静的アンテナ指向性実験
- 静的遮蔽影響評価実験
- 静的貼り付け影響評価実験
- 水平方向動的精度実験
- 鉛直方向動的精度実験

10

- 実験場所: 大阪大学吹田キャンパスS4-111講義室
- 使用機材: 基地局4台, 基準局1台, ICタグ1台
- 実験方法: 基地局及び基準局を固定した状態で, 各点にICタグを設置して測位を行った。

実験結果



実験結果

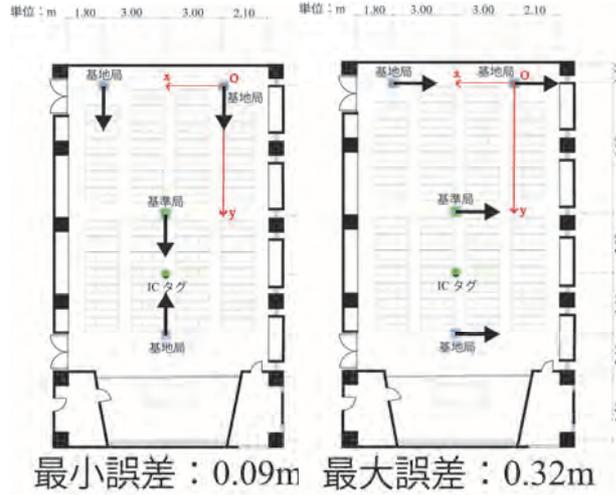
	誤差
平均	0.24m
最大	0.65m
最小	0.06m
標準偏差	0.13m

誤差計算値

誤差	計測された点の数	割合(N=81)
0.40m~	7	9.9%
0.30~0.39m	17	21.0%
0.20~0.29m	19	23.4%
0.10~0.19m	30	37.1%
0.00~0.09m	7	8.6%

誤差の大きさごとの計測された点の数

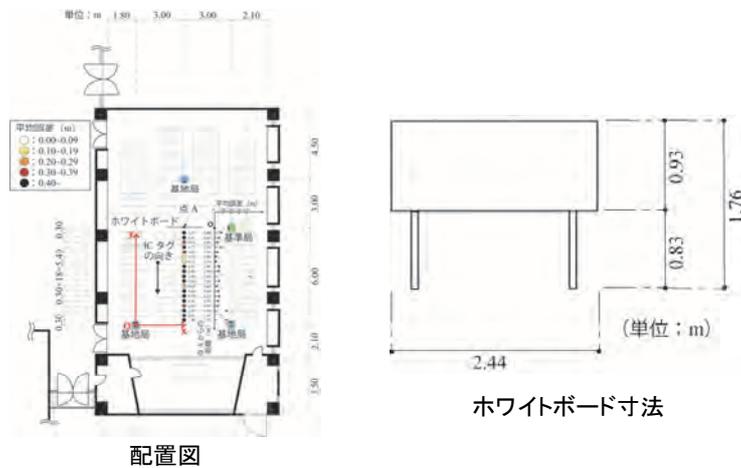
- 実験場所: 大阪大学吹田キャンパスS4-111講義室
- 使用機材: 基地局3台, 基準局1台, ICタグ1台
- 実験方法: 基地局, 基準局及びICタグの位置を固定した状態で, 基地局のアンテナの向きを変えながら測位を行い, その誤差を計測した.



- アンテナの向きによって測位精度に影響が表れることが確認された.

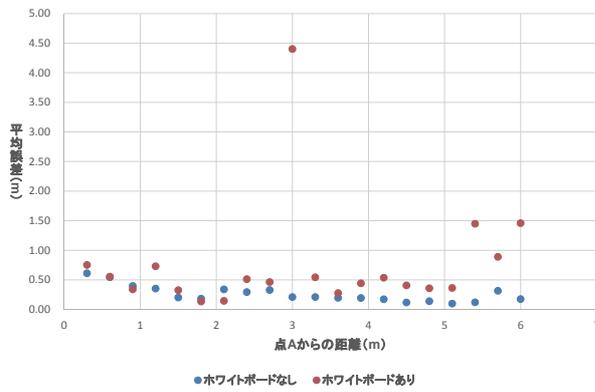
13

- 実験場所: 大阪大学吹田キャンパスS4-111講義室
- 使用機材: 基地局3台, 基準局1台, ICタグ1台
- 実験方法: 基地局及び基準局を固定, 基地局とICタグの間の点Aに遮蔽物(金属製ホワイトボード)の中央を置いた状態で, ICタグと遮蔽物の間の距離を30cmずつ変化させながら測位を行った.



14

実験結果



遮蔽影響実験結果(ホワイトボードの有無による比較)

全20点における測位結果

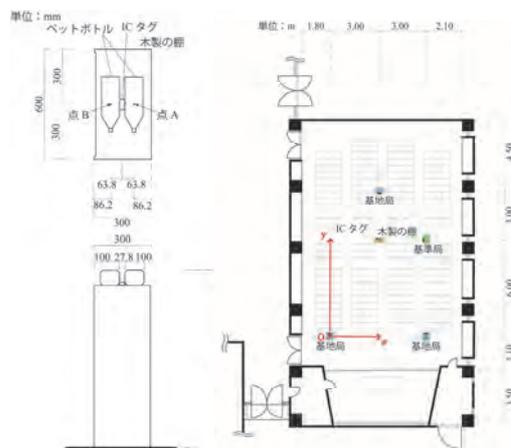
平均	0.26
最大	0.61
最小	0.10

ホワイトボードがない場合

平均	0.56
最大	1.46
最小	0.13

ホワイトボードがある場合
(誤差4.40mの点を除く)

水を入れたペットボトルで基地局とICタグの間を遮蔽した状態で測位を行い誤差を計測した。



配置図

実験結果

ペットボトルの数		測位可能かどうか
点A	点B	
1	0	可
1	1	可
2	1	可
2	2	不可
3	2	不可
3	3	不可

水の層によってUWBが遮蔽されることが確認された。

- 水で濡らした雑巾で基地局とICタグの間を遮蔽した状態でも同様に測位を行い、誤差を計測した。
- ICタグを証明用スタンドに取り付け、ビニール袋を被せた上から雑巾を被せ、輪ゴムで絞めた。

単位：m 1.80 3.00 3.00 2.10



実験結果

	平均誤差
ビニール袋のみ	0.17m
乾燥した雑巾1枚	0.11m
濡らした雑巾1枚	0.15m
濡らした雑巾2枚	0.41m
濡らした雑巾3枚	0.29m

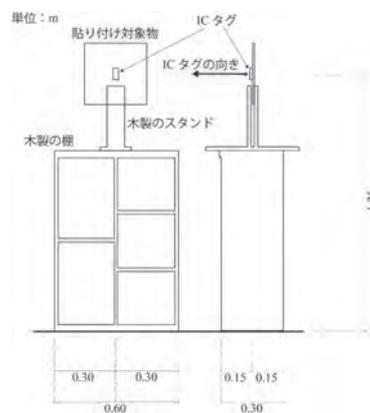
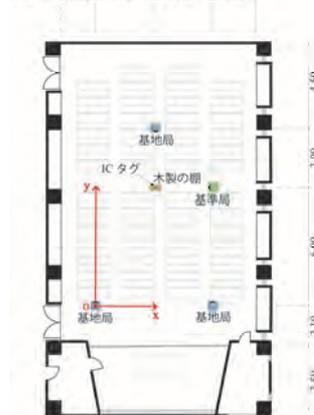
測位精度に与えるはっきりした影響は確認されなかった。

配置図

17

- 実験場所: 大阪大学吹田キャンパスS4-111講義室
- 使用機材: 基地局3台, 基準局1台, ICタグ1台
- 実験方法: 基地局及び基準局を固定, ICタグを木板や金属板に貼り付けた状態で向きを四方に変えながら測位を行った。

単位：m 1.80 3.00 3.00 2.10



配置図

18

貼り付け対象物

	寸法
木板	300×300×16mm
ステンレス板	300×150×0.3mm
発泡スチロール板	300×300×20mm
塩化ビニル板	297×210×2mm
ゴム板	300×300×20mm

実験結果

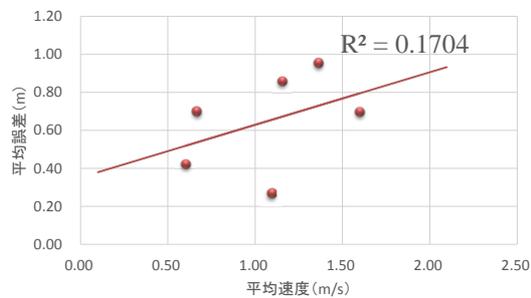
	平均誤差
木板	0.22m
ステンレス板	3.77m
発泡スチロール板	0.13m
塩化ビニル板	0.19m
ゴム板	0.23m

他の材料と比べて金属板(ステンレス板)を利用した際には大きな誤差が計測された。

- 実験場所: 大阪大学吹田キャンパスS4-111講義室
- 使用機材: 基地局4台, 基準局1台, ICタグ1台
- 実験方法: 基地局及び基準局を固定, ICタグを水平方向に移動させながら測位を行った。測定位置付近の測位データと撮影した映像で確認した実際の位置との誤差を計測した。

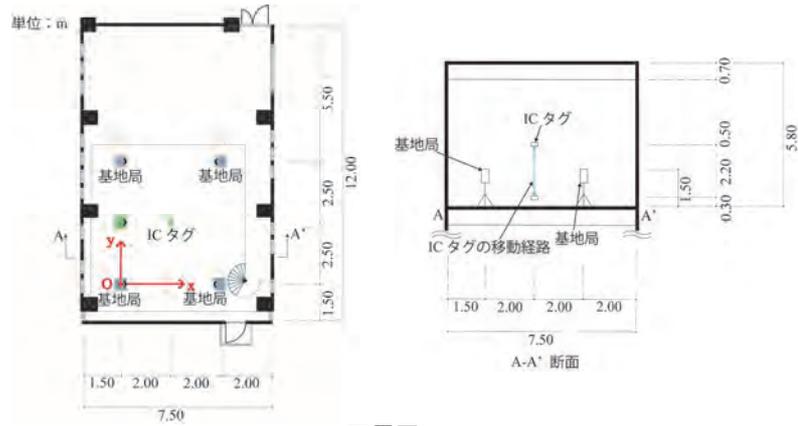


実験結果



平均速度が速いほど誤差が大きくなる傾向が見られた。

- 実験場所: 大阪大学吹田キャンパスS4-512実験室
- 使用機材: 基地局4台, 基準局1台, ICタグ1台
- 実験方法: 基地局及び基準局を固定, ICタグを鉛直方向に上下させる間の測位データを取得した.



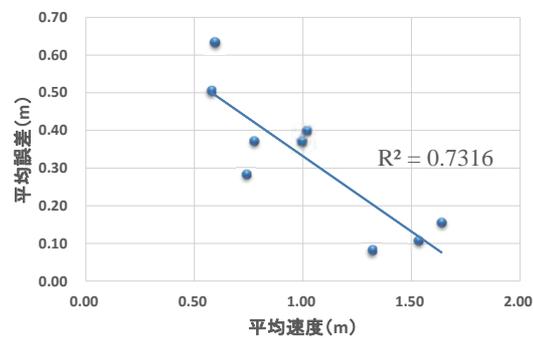
配置図

21

実験結果

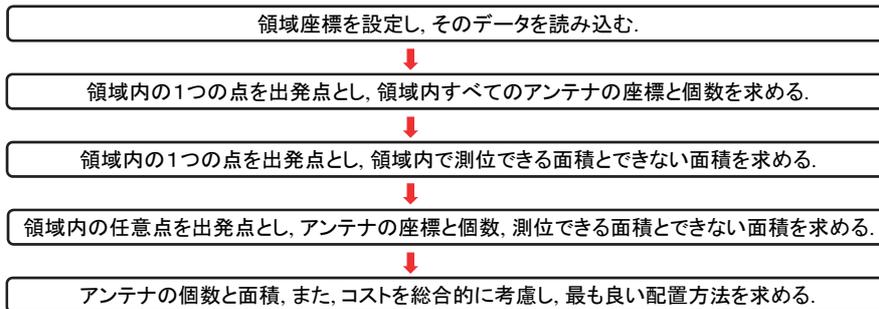
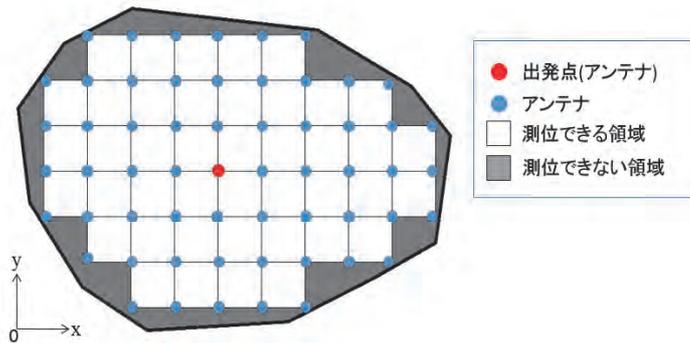


実験風景



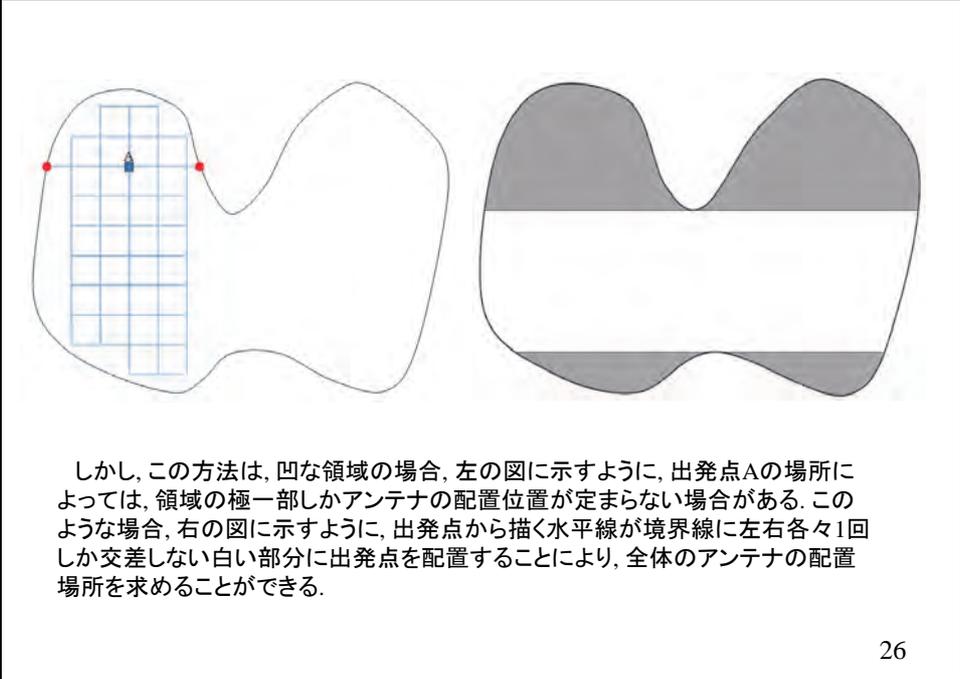
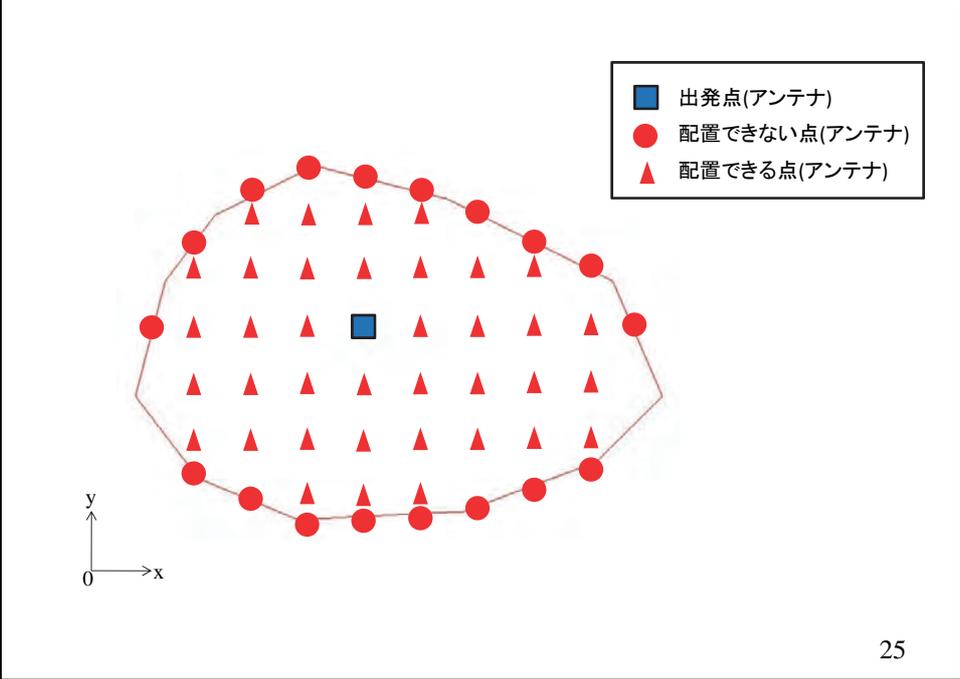
22

- 遠隔の事務所で施工や安全の管理が行えるシステムを構築するために、UWBを受信するアンテナを現場に設置する必要がある。
- そこで、3次元プロダクトモデルの中で、電波の到達範囲などを自動的に考慮し、図に示すように、一定の領域に、任意の座標点から最大通信距離までの正方形を一番効率的かつ経済的な配置することを求める。領域内測位できる面積を最大化すると同時に、アンテナの個数を最も少なくさせるアルゴリズムの開発を目指す。



システムの開発環境

項目	内容
開発言語	C++
ソフトウェア	Microsoft Visual C++ 2010 Express
補助ソフトウェア(1)	Autodesk 3ds Max Design 2010
補助ソフトウェア(2)	AutoCAD 2010



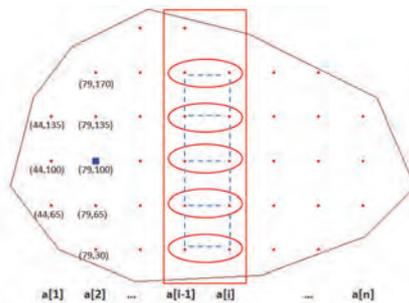
測位できる面積と測位できない面積を求めるために、領域全体の面積とアンテナで囲まれた面積を求める必要がある。

領域全体の面：領域を構成する点の座標を (x_i, y_i) と表す。ここで、 $i=1, 2, \dots, n$ とする。領域全体の面積は下の式により求められる。この式を用いると、領域が凸多角形でも凹多角形でも面積の計算ができる。

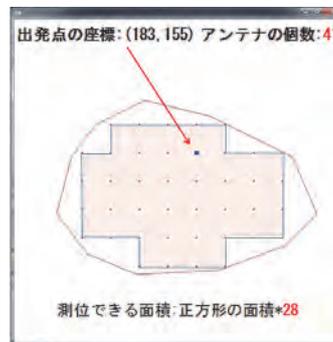
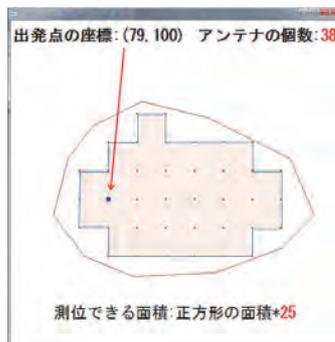
$$S = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right|$$

ここで、
 S : 領域全体の面積
 ただし、 $x_{n+1} = x_1, y_{n+1} = y_1$ とする

アンテナで囲まれた面積：アンテナで囲まれた面積を求めるために、隣接する4つのアンテナで囲まれた正方形の数を求める。下の図に示すように、アンテナの位置を点で示し、左側から縦の点列を $a[1], a[2], \dots$ のように配列としてメモリに貯える。 $a[i-1]$ と $a[i]$ において、 Y 座標が同じ点のペア数(この場合は5)から1を引いた数(この場合は4)を正方形の個数とする。このプロセスを $a[1]$ から $a[n-1]$ まで繰り返すことにより全ての正方形の個数が求められる。



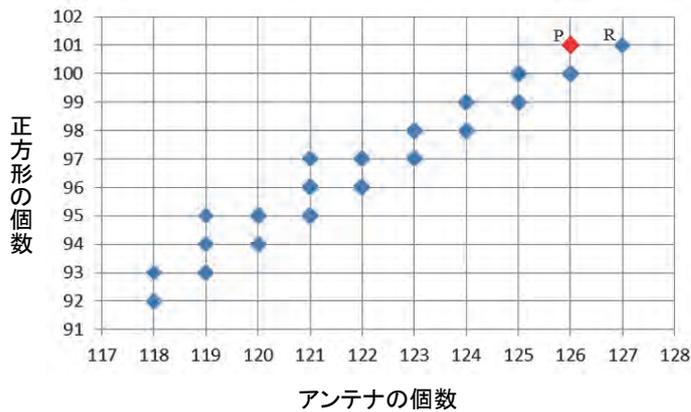
- モンテカルロ法(Monte Carlo Method)とは、乱数を用いてシミュレーションや数値計算を用いて行う手法である。ランダム法とも呼ばれる。
- 下の図に示すように、出発点が(79, 100)の場合はアンテナの個数は38で、正方形の数が25となった。一方、出発点が(185, 155)になると、アンテナの個数が41で正方形の数が28となった。このように計算で求められるアンテナの設置個数が異なる。また、測位できる面積とできない面積も異なる。
- そこで、領域内出発点を乱数で発生させて、数多くの異なる出発点のケースから、なるべく正方形の個数が多く、アンテナの個数が少ないケースを発見する必要がある。



本研究では、C++のdouble型random()関数を用いた。最大通信距離20mに設定し、計算結果をプログラムからテキストファイルに出力した結果を図に示す。

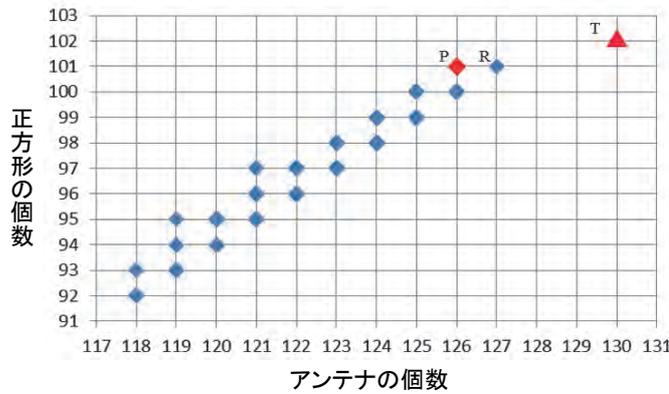
出発点の座標: (149.142, 33.6205), アンテナの数: 124, 正方形の数: 99, 測位できる面積: 39600, 測位できない面積: 9330
出発点の座標: (151.611, 30.8208), アンテナの数: 125, 正方形の数: 100, 測位できる面積: 40000, 測位できない面積: 8830
出発点の座標: (150.821, 37.2188), アンテナの数: 122, 正方形の数: 97, 測位できる面積: 38800, 測位できない面積: 10130
出発点の座標: (153.052, 31.3684), アンテナの数: 125, 正方形の数: 100, 測位できる面積: 40000, 測位できない面積: 8930
出発点の座標: (151.859, 36.3455), アンテナの数: 124, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 39200, 測位できない面積: 9730
出発点の座標: (148.805, 30.5445), アンテナの数: 124, 正方形の数: 99, 測位できる面積: 39600, 測位できない面積: 9330
出発点の座標: (156.483, 35.3283), アンテナの数: 119, 正方形の数: 93, 測位できる面積: 37200, 測位できない面積: 11730
出発点の座標: (153.617, 31.4007), アンテナの数: 125, 正方形の数: 100, 測位できる面積: 40000, 測位できない面積: 8930
出発点の座標: (151.919, 33.2188), アンテナの数: 124, 正方形の数: 99, 測位できる面積: 39600, 測位できない面積: 9330
出発点の座標: (151.873, 38.7587), アンテナの数: 122, 正方形の数: 97, 測位できる面積: 38800, 測位できない面積: 10130
出発点の座標: (149.171, 30.3807), アンテナの数: 123, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 39200, 測位できない面積: 9730
出発点の座標: (158.777, 38.0168), アンテナの数: 121, 正方形の数: 96, 測位できる面積: 38400, 測位できない面積: 10530
出発点の座標: (151.53, 31.6789), アンテナの数: 125, 正方形の数: 100, 測位できる面積: 40000, 測位できない面積: 8930
出発点の座標: (158.041, 38.7885), アンテナの数: 124, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 39200, 測位できない面積: 9730
出発点の座標: (150.730, 38.6778), アンテナの数: 122, 正方形の数: 97, 測位できる面積: 38800, 測位できない面積: 10130
出発点の座標: (156.386, 34.2931), アンテナの数: 123, 正方形の数: 97, 測位できる面積: 38800, 測位できない面積: 10130
出発点の座標: (152.183, 30.5161), アンテナの数: 124, 正方形の数: 99, 測位できる面積: 39600, 測位できない面積: 9330
出発点の座標: (150.08, 36.9671), アンテナの数: 121, 正方形の数: 96, 測位できる面積: 38400, 測位できない面積: 10530
出発点の座標: (155.033, 34.7236), アンテナの数: 123, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 39200, 測位できない面積: 9730
出発点の座標: (155.546, 38.8880), アンテナの数: 124, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 39200, 測位できない面積: 9730
出発点の座標: (149.975, 30.3564), アンテナの数: 123, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 39200, 測位できない面積: 9730
出発点の座標: (154.986, 35.1585), アンテナの数: 121, 正方形の数: 95, 測位できる面積: 39000, 測位できない面積: 10930
出発点の座標: (149.444, 35.8058), アンテナの数: 121, 正方形の数: 96, 測位できる面積: 38400, 測位できない面積: 10530
出発点の座標: (149.440, 38.8384), アンテナの数: 121, 正方形の数: 96, 測位できる面積: 38400, 測位できない面積: 10530
出発点の座標: (151.735, 35.1555), アンテナの数: 120, 正方形の数: 95, 測位できる面積: 38000, 測位できない面積: 10930
出発点の座標: (155.664, 30.3880), アンテナの数: 126, 正方形の数: 100, 測位できる面積: 40000, 測位できない面積: 8930
出発点の座標: (153.447, 38.5561), アンテナの数: 122, 正方形の数: 97, 測位できる面積: 38800, 測位できない面積: 10130
出発点の座標: (150.598, 38.1912), アンテナの数: 123, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 39200, 測位できない面積: 9730
出発点の座標: (155.101, 35.6534), アンテナの数: 121, 正方形の数: 95, 測位できる面積: 38000, 測位できない面積: 10930
出発点の座標: (152.116, 30.2495), アンテナの数: 125, 正方形の数: 99, 測位できる面積: 39600, 測位できない面積: 9330
出発点の座標: (151.104, 34.0752), アンテナの数: 125, 正方形の数: 100, 測位できる面積: 40000, 測位できない面積: 8930
出発点の座標: (155.019, 38.0088), アンテナの数: 121, 正方形の数: 95, 測位できる面積: 38000, 測位できない面積: 10930
出発点の座標: (151.987, 33.0144), アンテナの数: 124, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 38800, 測位できない面積: 9330
出発点の座標: (151.054, 36.3985), アンテナの数: 122, 正方形の数: 97, 測位できる面積: 38800, 測位できない面積: 10130
出発点の座標: (148.278, 33.0007), アンテナの数: 124, 正方形の数: 99, 測位できる面積: 39600, 測位できない面積: 9330
出発点の座標: (155.36, 33.8893), アンテナの数: 124, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 39200, 測位できない面積: 9730
出発点の座標: (158.319, 30.4329), アンテナの数: 126, 正方形の数: 100, 測位できる面積: 40000, 測位できない面積: 8930
出発点の座標: (156.429, 36.1852), アンテナの数: 125, 正方形の数: 99, 測位できる面積: 39600, 測位できない面積: 9330
出発点の座標: (153.21, 38.1002), アンテナの数: 123, 正方形の数: 98, 測位できる面積: 39200, 測位できない面積: 9730

29



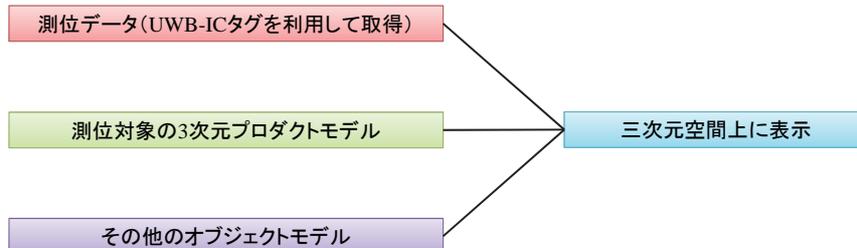
- 図に示したアンテナの数と正方形の数の散布図である。
- 図より、仮に設定した領域に、最大通信距離20mの場合では、正方形の数はアンテナの個数が126と127の場合に一番多いことが分かる。これらPとRの2つの点の内、Pの方がアンテナの個数が少ないことからPが最適な結果であることが分かる。

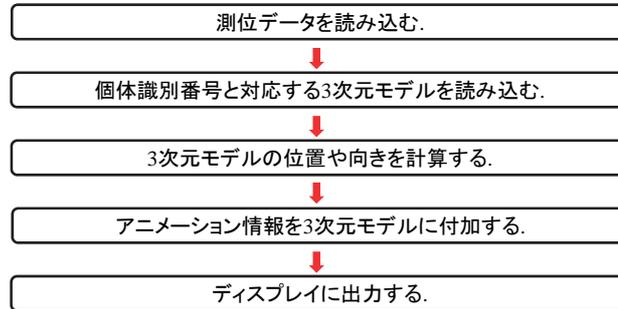
30



- ただし、上の図に示すように、点Tのようにアンテナが130個で正方形が102個のようなケースが発生したら、PとTとのいずれが経済的に優れているかを、判断するためには、別の指標が必要であろう。
- 本システムでは、アンテナの個数、測位できる面積、測位できない面積などを、算定することができる。これにより、最も経済的な配置方法を求めることができる。

- GPSの利用できないトンネル内などの閉鎖空間は、見通しが悪いことが多い。
- UWB-ICタグを用いると閉鎖空間でも位置情報を得られるので、この測位データを基に、事前に作成された各種3次元モデルを3次元空間上に表示させることで、建設施工現場の様子をコンピュータ上に再現することができる。
- 見通しの悪い現場であっても、現場や事務所の作業員が、現場全体の様子を知ることができ、適切な指示を出すことができるようになる。





開発環境

本システムの開発は、Autodesk社の3ds max シリーズの組み込みスクリプトであるMAXscriptを用いた。また、システムの動作環境として、3ds max design 2013 を用いた。

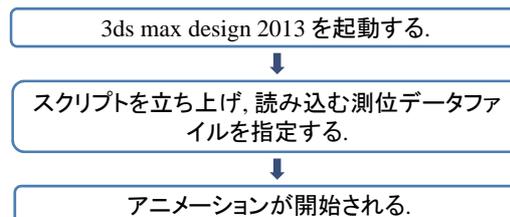
項目	内容
開発言語	MAXscript
システム動作環境	3ds max design 2013

33

システム動作に必要なもの

- PCおよびソフトウェア (3ds max design 2013)
- 3次元モデル
 - 建設機械
 - 作業員
 - 建設資材
- 測位データ (UWB-ICタグから得られる)
 - 位置情報
 - 時刻
 - 個体識別番号

システム動作の流れ



34

- 測位データとして、測位通り番号、日付・時刻、UWB-ICタグの個体識別番号、位置座標(x座標, y座標, z座標)が出力される。
- 個体識別番号を基に、対応する3次元モデルファイルを読み込む。
- これらのデータを読み込み、3次元モデルにアニメーション情報を付加する。

```

data1.txt - メモ帳
ファイル(F) 編集(E) 書式(O) 表示(V) ヘルプ(H)
26703,2013,2,6,22,39,59.91,10,25000,0,0
26704,2013,2,6,22,40,01.012,10,24000,5000,0
26705,2013,2,6,22,40,02.213,10,23500,12500,0
26706,2013,2,6,22,40,03.289,10,23500,17500,0
26707,2013,2,6,22,40,04.39,10,24000,23000,0
26708,2013,2,6,22,40,05.492,10,25000,28000,0
26709,2013,2,6,22,40,06.493,10,25000,31500,0
26710,2013,2,6,22,40,07.694,10,25000,37500,0
26711,2013,2,6,22,40,08.795,10,24500,40500,0
26712,2013,2,6,22,40,09.896,10,25000,46000,0
26713,2013,2,6,22,40,10.997,10,27000,50000,0
26714,2013,2,6,22,40,12.198,10,25000,52500,0
26715,2013,2,6,22,40,13.299,10,24000,54500,0
26716,2013,2,6,22,40,14.401,10,26000,58500,0
26717,2013,2,6,22,40,15.502,10,23500,62500,0
26718,2013,2,6,22,40,16.703,10,25000,65500,0
26719,2013,2,6,22,40,17.904,10,25500,69500,0

```

測位通り
番号

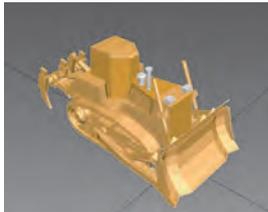
日付・時刻

UWB-ICタグの
個体識別番号

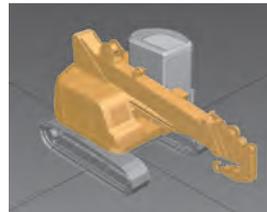
位置座標

35

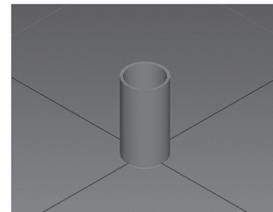
表示させる3次元モデルとして、建設機械、作業員、建設資材のモデルを用いた。



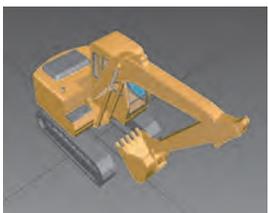
ブルドーザー



クローラクレーン



PC管



バックホウ



リシッドダンプトラック



作業員

36

3次元空間上に各種3次元モデルが表示される。

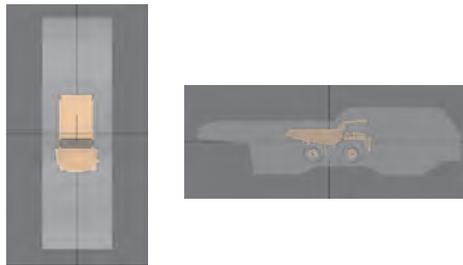


37

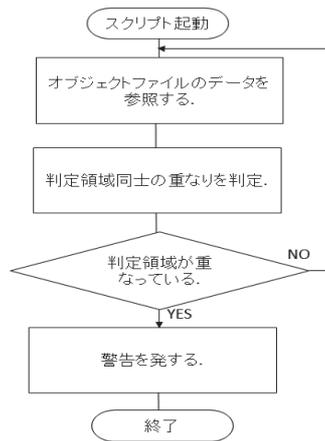
- 測位データを基に3次元空間上に3次元モデルを表示させた。
- 3次元モデルの表示の仕方や、表示するデータ等を工夫することで、より使いやすいシステムにしていきたい。
- 建設施工現場における危険が予知される場合の作業員に対する警告や、作業員や建設機械に対する指示をこの3次元空間上で行うことによって、施工プロセスにおける安全性や効率性をより向上させることができると考えられる。

38

- 作業員が建設施工現場において建設機械や建設資材と接近した場合に、危険を知らせるシステム。
- 本システムの開発により、建設施工現場における安全性を向上させることができると考えられる。
- 接近状態を判別するために、各種3次元モデルの周囲に判定領域を設置し、それらが重なりあった場合を危険状態と考え警告を行う。



リシッドダンプトラックの3次元モデルの判定領域
(前後方向に3倍, 左右方向に2倍, 上下方向に1.5倍の大きさに設定)

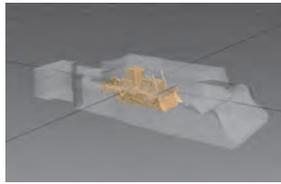


各判定領域同士の重なり判定を行い、重なりが存在が認められた場合に警告を行う。

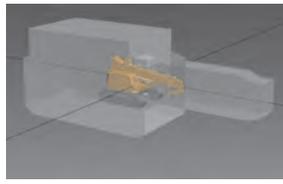
開発環境

項目	内容
開発言語	MAXscript
システム動作環境	3ds max design 2013

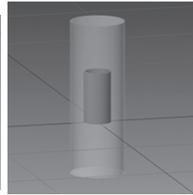
各種3次元モデルに対して、前後方向に3倍、左右方向に2倍、上下方向に1.5倍の大きさに設定した。



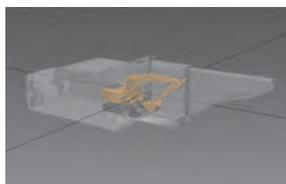
ブルドーザー



クローラクレーン



PC管



バックホウ



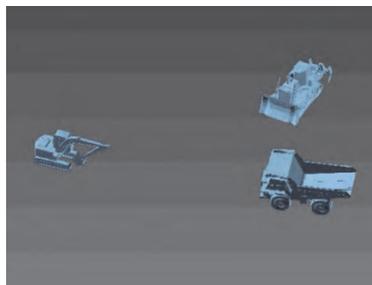
リジッドダンプトラック



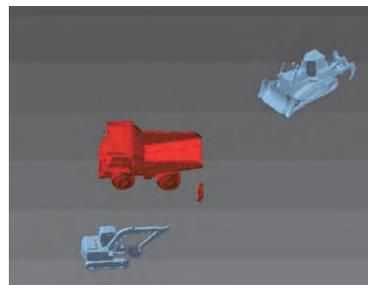
作業員

41

作業員と建設機械や建設資材が接近した場合に、3次元モデルの色を変化させることで警告を行う。



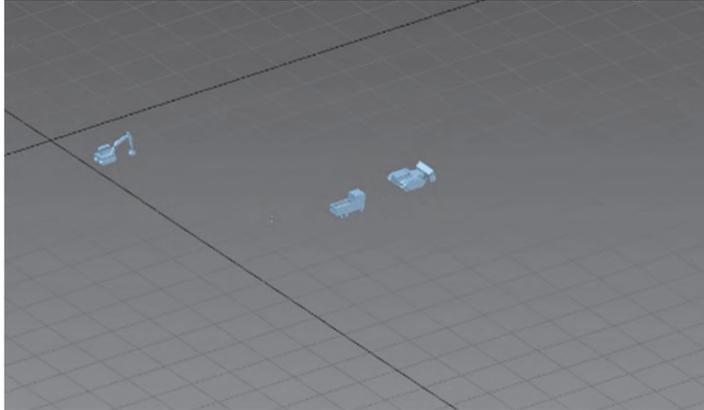
通常状態(非接近)



警告状態(接近)

42

接近状態の判断は判定領域の重なりの有無によって行う。



43

- 判定領域の設定方法
 - 警告を行う方法
 - 開発したシステムの検証
- 検討

44

- UWB-ICタグを用いた屋内測位の精度調査を行った.
- UWB測位で用いるアンテナの配置を最適化するアルゴリズムの開発を行った.
- 建設施工現場において作業員, 各種建設機械, 建設資材にUWB-ICタグを取り付けることを想定し, 位置情報を基に3次元モデルを3次元空間上に表示させ, 建設施工現場を再現するシステムの開発を行った.
- 判定領域の設定を行うことによって, 危険状態の判断を行い自動的に警告を行うシステムの開発を行った.



無人化施工の効率・安全を 高める映像注目支援に 関する調査研究

亀崎 允啓

早稲田大学 理工学術院総合研究所
(早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科)

研究背景

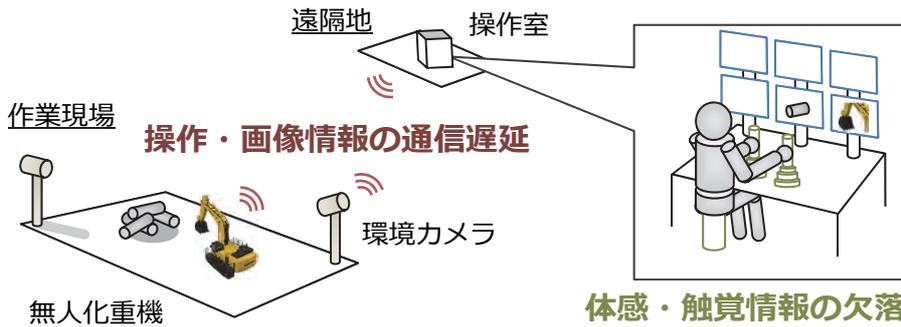
- **無人化施工**は、急斜面での土木工事や水中での河底整備作業、1人のオペレータ操縦による複数重機作業など、平時における通常利用を中心に応用展開されていた。
- 雲仙普賢岳への適用事例以降、**災害対応などの有事への適応が強く求められる**ようになっている。
- この度の大震災・大津波被害からの復旧工事や、原子力発電所事故に伴う放射線環境下での解体作業などへの適応を踏まえ、この傾向は近年さらに強くなっている。

無人化施工の主な課題

- 操縦条件や操縦環境は、根本的に搭乗時のものと異なる
 - 違和感や不慣れさによって必然的に**作業効率が低下**
 - 掘削作業における作業効率は、有人時の4-6割程度

[施工効率を低下させる主な要因]

視覚提示内容の不完全性



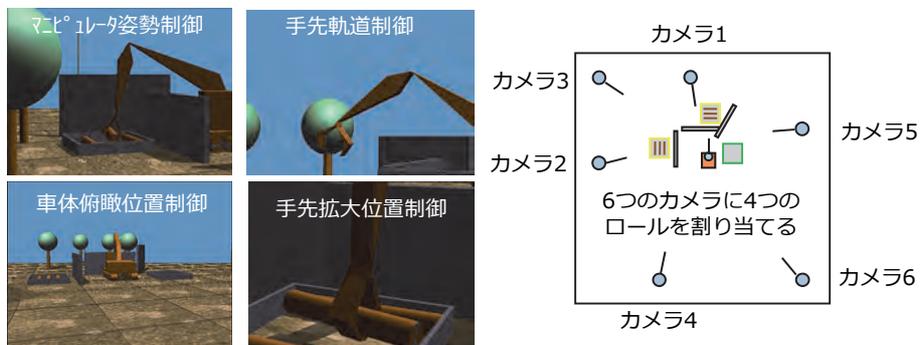
平成26年 建設施工と建設機械シンポジウム 2014年11月27日

視覚提示内容の改善

- 無人化施工の高度化には、遠隔操縦の計画や判断の基本となる**映像情報そのものへの要求が厳しくなる**と予想される

[環境カメラの半自動制御システム]

- ・ **作業状況に応じてカメラの方向・画角を自動的に制御**
- ・ **状況に適したカメラを選択して適切な制御モードを割り当て**



平成26年 建設施工と建設機械シンポジウム 2014年11月27日

映像の注目・注視支援

[2012年度：環境カメラの半自動化制御手法の開発]

→状況に応じて変わる「オペレータが望む映像」を提供できる可能性が示唆された

潜在的課題：計画や操作の判断に不可欠な基本情報(視覚情報)が多彩かつ広範に得られることは重要である一方、**オペレータの認知情報処理に関する負荷が肥大**してしまうことが懸念される



[本年度：映像の注目・注視支援]

→注目すべきカメラ映像と領域、および映像の解釈方法をシステム側から積極的に提案することで、たくさんの映像の中から、状況にあった適切な映像を探し、その映像内容を把握する**認知的負担を大幅に減らすこと**、さらには**適切な誘導が可能**になる

充実が図られる視覚提示情報をフル活用するためのインタフェース技術であり、無人化施工の高度化を担う有力なツールの1つになると考えている

研究手順

1. 注目領域の分析と半自動制御手法の改良

- 作業状況と注目映像および注目領域との関連性を分析し、注視支援を実装するための半自動制御手法の改良を行う。

2. 注目支援システムの開発

- 3段階の注目支援技術を開発する。
 - フェーズ1：作業状況に応じた映像の選択モジュール
 - フェーズ2：注目領域の抽出モジュール
 - フェーズ3：選択・抽出領域の解釈モジュール

3. VRシミュレータを用いた実証実験

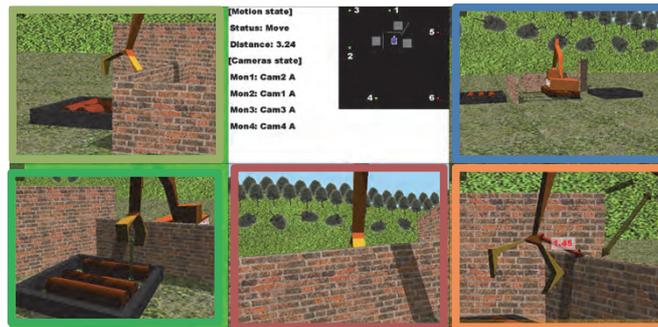
- VRシミュレータを用いて、注視支援なしとありで比較を行う。

1. 半自動制御手法の改良

注視支援の効果を高めるために、カメラロールの定義とモニタ表示位置の調整を行った。

(2)手先の拡大映像：視点A

(3)俯瞰映像



(2)手先の拡大映像：視点B

(4)危険認知用映像

(1)車載カメラ映像

平成26年 建設施工と建設機械シンポジウム 2014年11月27日

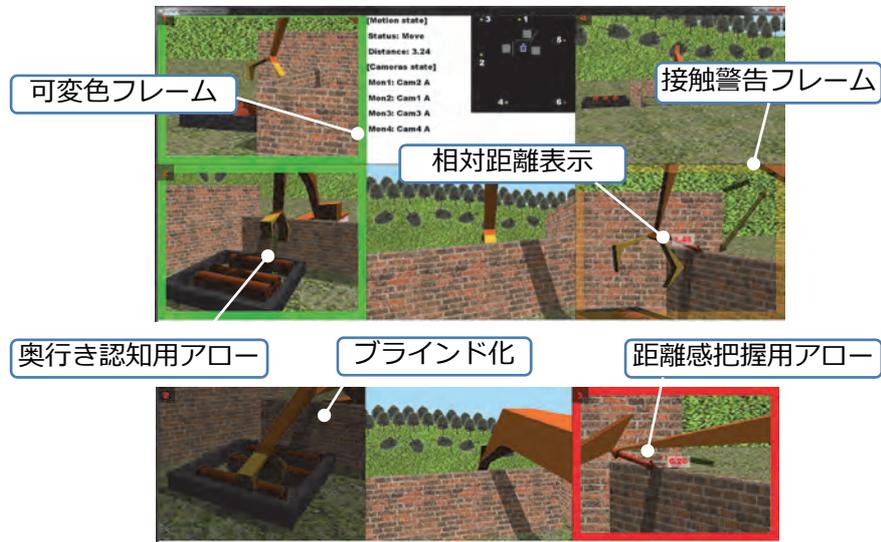
2. 注視支援のコンポーネント

	可変色モニタフレーム	手先垂直アロー	距離感把握アロー	ブラインド化
フェーズ1 状況に応じた映像選択	○	—	—	○
フェーズ2 注目領域の抽出	○	○	○	○
フェーズ3 選択・抽出領域の解釈	—	○	○	—

- **手先垂直アロー**：手先が対象物の中央に近づいたとき(3m以内)、左側の2つのモニタに出現。アローは、緑・両矢印・半透明とした。
- **距離感把握アロー**：マニピュレータが壁に近い場合(2.5m以内)、右下のモニタに出現。緑から赤へ変わっていく。距離が3.0m以下では橙、1.5m以下では赤とし、間の区間は、線形的に変化させた。最短アローには、距離の数値を出現させる。
- **可変色フレーム**：垂直アローが現れるタイミングで、左側の2つのモニタに作業支援フレーム(緑)が出現し、マニピュレータが障害物に近づく(0.8m以下)に消え、接触警告フレーム(緑)が出現する。距離が短くなるにつれて、半透明の黄色から不透明の赤へ変化する。
- **ブラインド化**：距離感把握アローが、接触警告フレームの点滅開始距離よりも小さくなった場合(0.3m以下)、左側2つのモニタが黒く半透明化する。

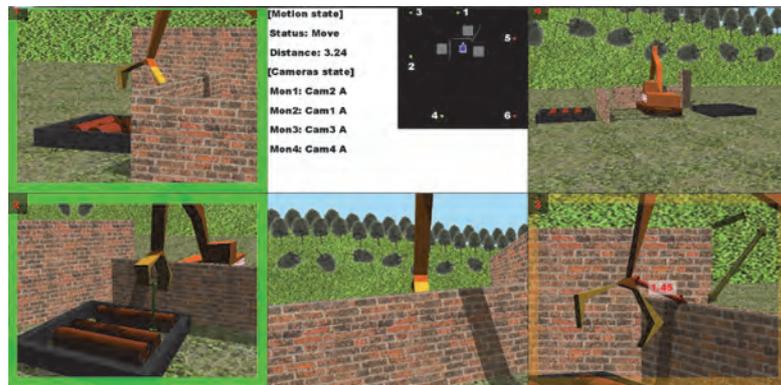
平成26年 建設施工と建設機械シンポジウム 2014年11月27日

2. 注視支援システムの開発

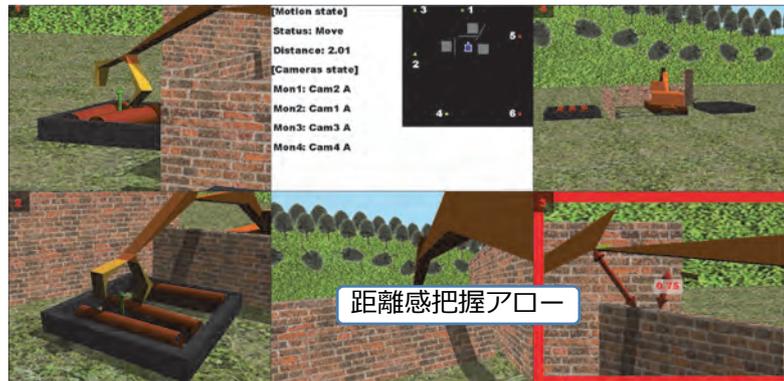


状況1：障害物と遠い場合

作業支援フレーム



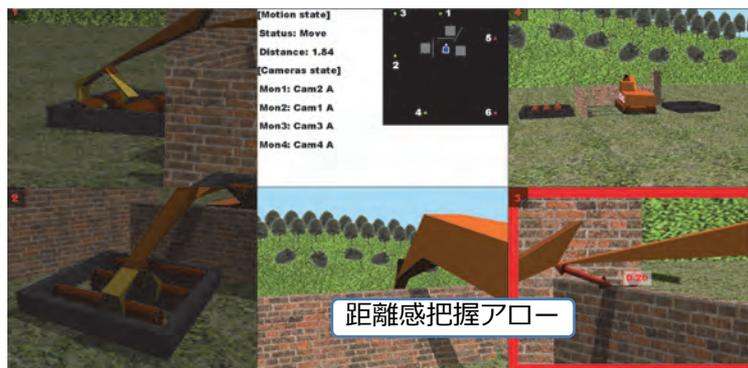
状況2：障害物に近い場合



垂直アロー

接触警告フレーム

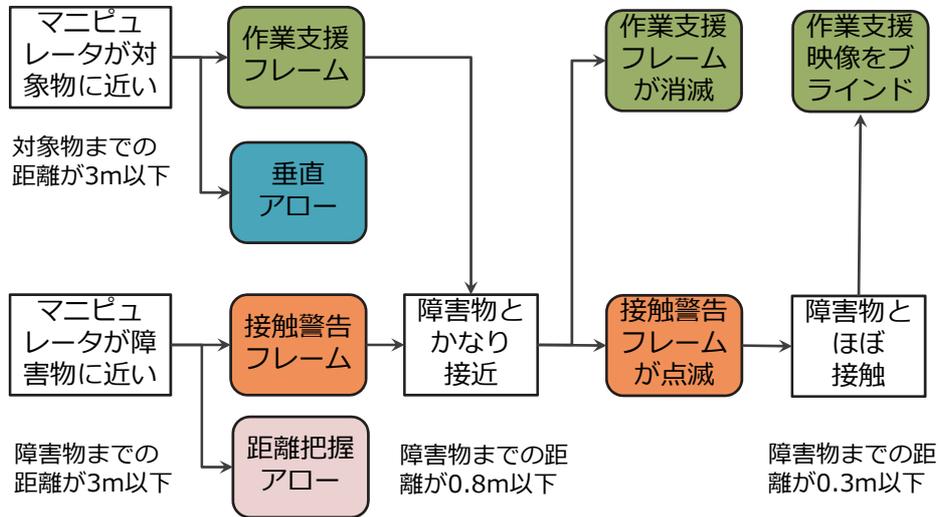
状況3：かなり接近している場合



ブラインド化

接触警告フレーム

2. 注視支援システムのフロー

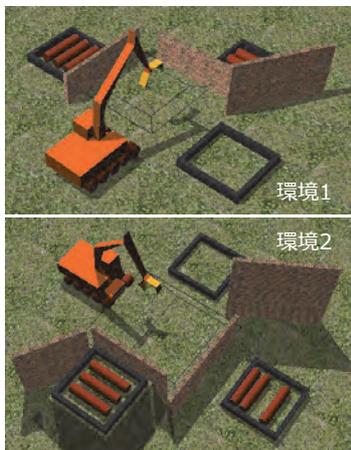


平成26年 建設施工と建設機械シンポジウム 2014年11月27日

3. 比較評価実験

■ 注視支援の有無で、時間効率、安全性、作業品質、主観的な使いやすさを評価した

実験環境



実験内容

6つの物体を素早く、物体の中心を掴んで誤接触なく回収箱まで運搬する。被験者は8人の初心者とした

比較実験

注視支援の有無を評価する(各2セット)
環境1で十分に習熟後、未知環境である環境2におけるパフォーマンスを評価する

評価指標

- A. 時間効率 : タスク時間
- B. 安全性・品質 : 誤接触回数・把持位置
- C. 主観評価 : アンケート
- D. 各注視項目の効果 : アンケート

平成26年 建設施工と建設機械シンポジウム 2014年11月27日

操作インターフェース

42インチモニタ

クローラ

前進
後退

環境カメラ

ピッチ上げ
ズームアウト
ヨー左
ズームイン
ヨー右
ピッチ下げ

マニピュレータ・旋回

アームレスト

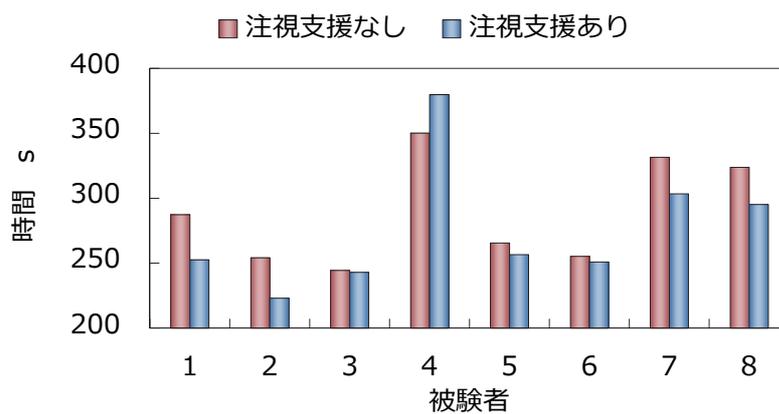
アーム押し
未使用
左旋回
アーム引き
右旋回
グラップル閉操作
バケット掘削
グラップル開操作
ブーム下げ
バケット解放
ブーム上げ

自動制御復帰レバー

状態
車載カメラ

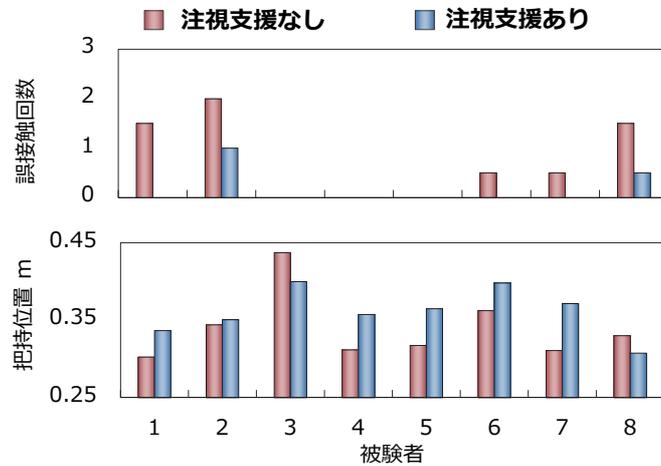
平成26年 建設施工と建設機械シンポジウム 2014年11月27日

A. 作業時間



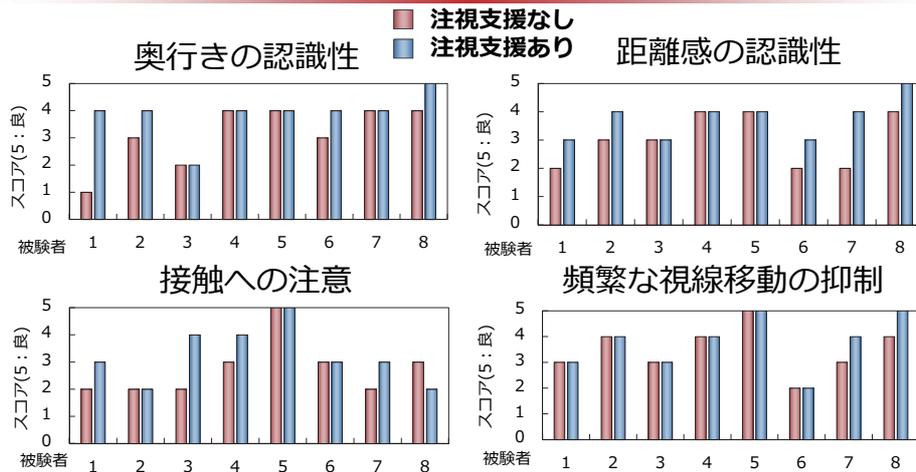
大まかな傾向としては、作業時間が短縮できる可能性が示唆された。

B. 誤接触回数・把持位置



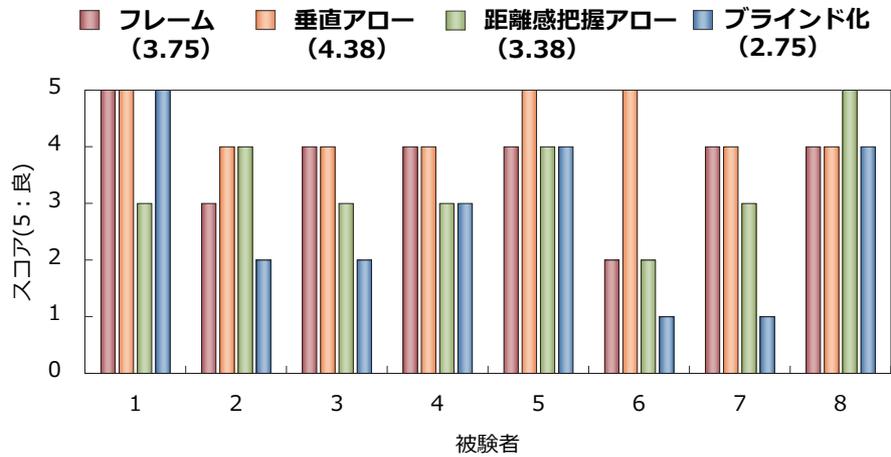
誤接触に対する効果が大きく表れることが分かった。一方で、把持位置に関しては、改善するオペレータと悪化するオペレータが確認された

C. 主観的使いやすさ



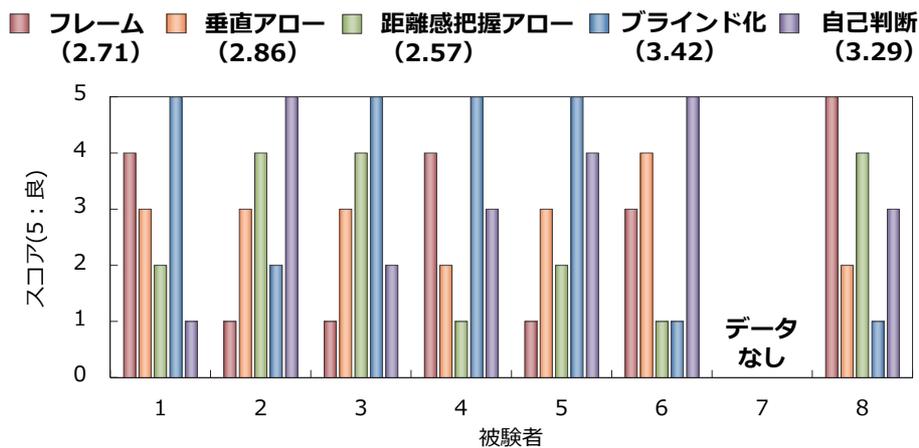
注視支援を提供することで、奥行き感の把握性や頻繁な視線移動の抑制が実現できていることがわかる

D-1. 注視支援の有用性評価



垂直アローは、奥行き認識によって有効であることが分かった。オペレータそれぞれの好みや特性によって、効果が異なることも分かった

D-2. 注視支援の利用優先順位



強制的に視点移動を促すブラインド化が、適切に利用されていたことが分かった。また、オペレータに応じて注目支援そのものの利用態度が異なる点が明らかになった。

まとめ

- 2012年度の研究により、環境カメラの半自動化制御手法により、計画や操作の判断に不可欠な視覚情報が多彩かつ広範に得られた一方で、オペレータの認知情報処理に関する負荷は肥大することが懸念される。
- 「どのカメラ映像のどの部分をどのように見ればよいか」といった映像の注目支援について検討した。本研究では、開発済みのVRシミュレータを用いた調査結果をもとに、注目支援手法の試作・実証を行った。具体的に、a.作業状況に応じた映像の選択、b.注目領域の抽出、c.選択・抽出領域の解釈モジュールを開発した。
- 実験の結果、注目支援により、作業時間はほぼ一定であるが、誤接触回数が大きく減ることが分かった。アンケートの結果、奥行き間の認識や頻繁な視点移動の減少、オペレータの認知負荷の軽減が可能となることが示唆された。
- 本研究で提案した「注視支援システム」では、必要な映像を当該状況に応じて適切に注目させることで、「オペレータの認知的負担を減らしつつ、作業パフォーマンスの向上」を実現できる可能性が示唆された。

今後の展望

- オペレータを個別に分析した結果、効果の是非およびその大小が分かること、また、注視支援の捉え方が大きく異なることが分かった。この結果をもとに、視覚支援システムのパラメータ調整を行う。
- 技術的な観点では、本年度はアングルとズーム機能を有するカメラを利用していたが、より詳細な状況把握のために、カメラの高さ方向の調整とカメラ自体の移動性も考慮することを検討している。
- カメラ制御パラメータの設定方法の確立や学習規範の導入、無人化施工における課題である(b)通信遅延対策、(c)体感情報提示に関する技術開発との融合による高度化検討、さらには、実環境での実証実験も今後必要になると考えられる。

御静聴ありがとうございました

本研究の一部は、(社)日本建設機械化協会「平成24年度研究開発助成」、
ならびに、早稲田大学理工学研究所の支援を受けて行われました。
ここに謝意を表します。

動電式加振器のコンクリート構造物 地震時損傷評価への応用

東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻

鈴木 基行
内藤 英樹

研究の背景

レベル2地震動を受けた土木構造物の状態

- ① 供用継続に支障をきたす損傷
座屈・破断・せん断破壊など
➡ 早期に復旧し、供用再開を目指す



- ② 即時には供用に支障をきたさない損傷
曲げひび割れ程度
➡ 維持管理の観点から補修補強が必要

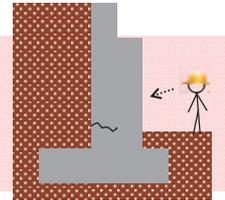


点検によって損傷状況を把握する

研究の背景

目視点検の課題

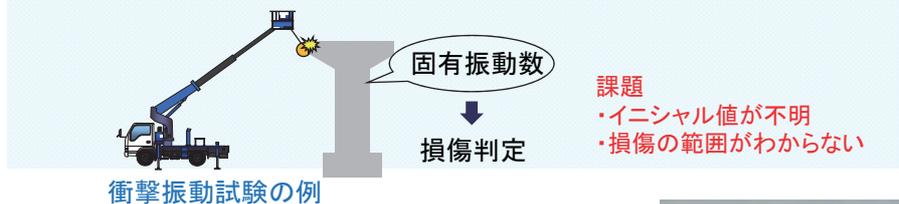
- ・橋台・擁壁・カルバートなどの背面土側
- ・杭基礎など、地中や水中構造物
- ・厚い塗装に覆われた場合
- ・鋼板巻立て、繊維シート補強



研究の目的

損傷によって構造物の固有振動数が低下する

➡ 固有振動数を指標として損傷レベルを推定する



研究の目的

加振器を用いたRC構造物の簡易点検技術を提示し、地震時損傷評価の高度化に繋げる。



提案技術のポイント

全体振動

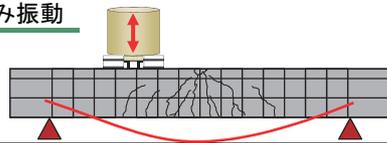
部材全体の損傷レベルを明らかにする

- 加振(sine波)の周波数を変えて共振を起こす。

軸方向の縦振動



たわみ振動

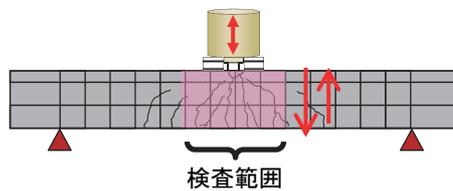


局所振動

検査範囲の損傷レベルを明らかにする

- 加振器を使うメリットはここです。
- 共振周波数=1/周期, 周期=距離/音速
- 重複反射波を定常応答にする(高精度)

断面高さ方向の縦振動

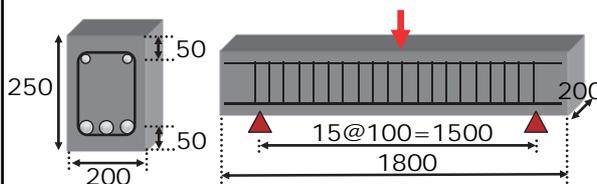


検証実験 (H25年度研究助成)



8体のRCはり供試体の曲げ載荷試験を行い、ひび割れの検知を試みた。

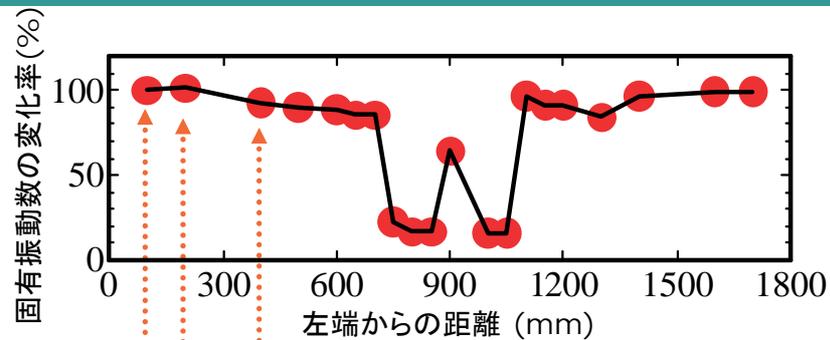
※詳細は論文をご参照ください。



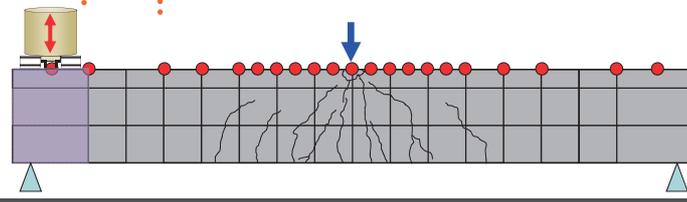
引張鉄筋 : D13
スターラップ : D6@100

(単位:mm)

検証実験 (H25年度研究助成)



※詳細は論文をご参照ください。



振動台実験の概要

3つの地震波によるRC柱の振動台実験を行う

➡ 入力レベル(10~200%)を段階的に上げる



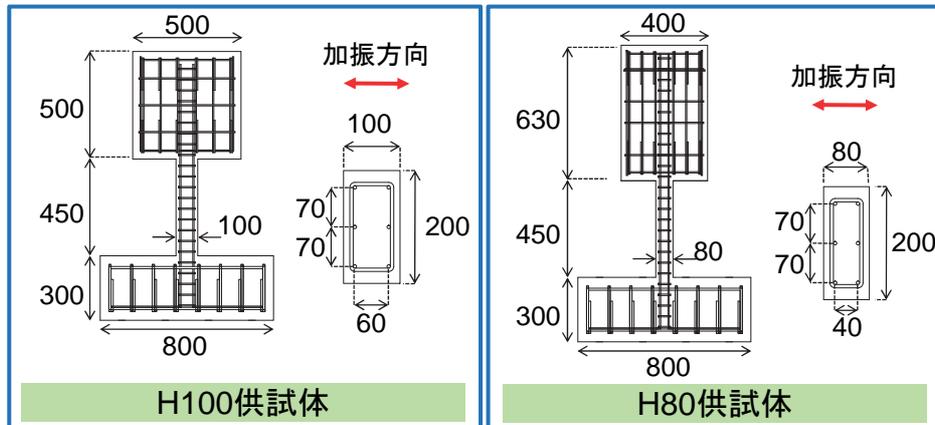
動的載荷により損傷を導入→全体の固有振動数を計測

➡ 損傷レベルの(最大応答)の推定

そして、柱上部, 中間, 基部の局所振動試験を行う

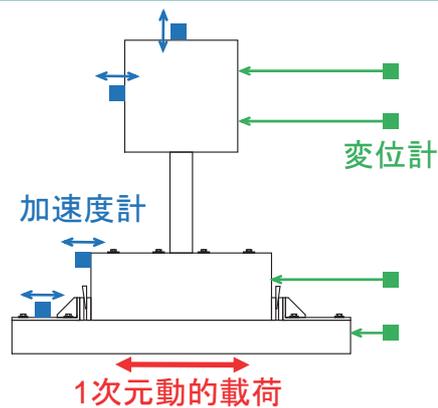
➡ 損傷位置の同定

供試体



- ・断面高さをパラメータとした.
- ・2種類の供試体×3体作製する. (3種類の入力波)

動的載荷装置



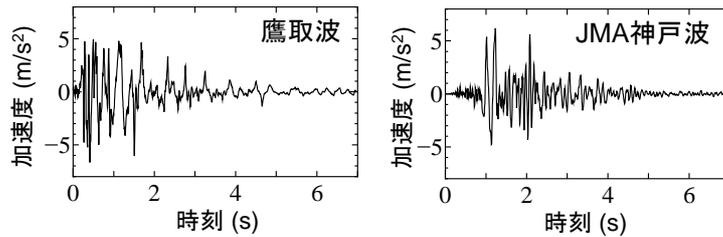
供試体を振動台に固定して、1方向の動的載荷を行い、曲げひび割れを導入する。

- 測定項目
- ・水平変位
 - ・加速度
 - ・軸方向鉄筋ひずみ

入力波

3種類の入力波を用いる.

1. sine波
2. 兵庫県南部地震 JR鷹取観測波 東西成分
3. 同 神戸海洋気象台観測波 南北成分

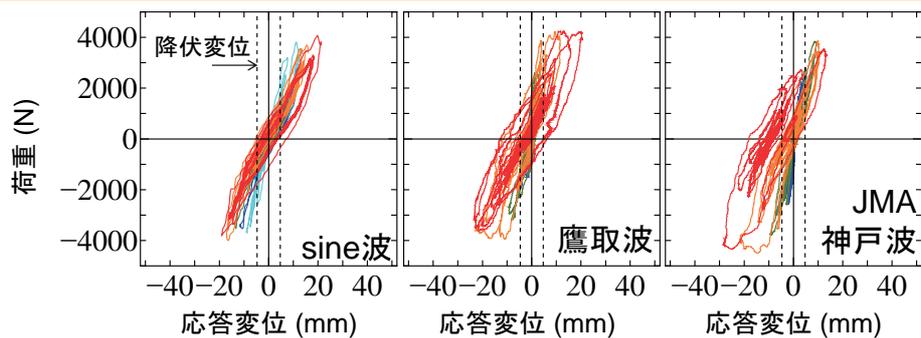


時間軸は0.25倍に圧縮

入力レベル(10~200%)を段階的に上げる

動的載荷実験の結果

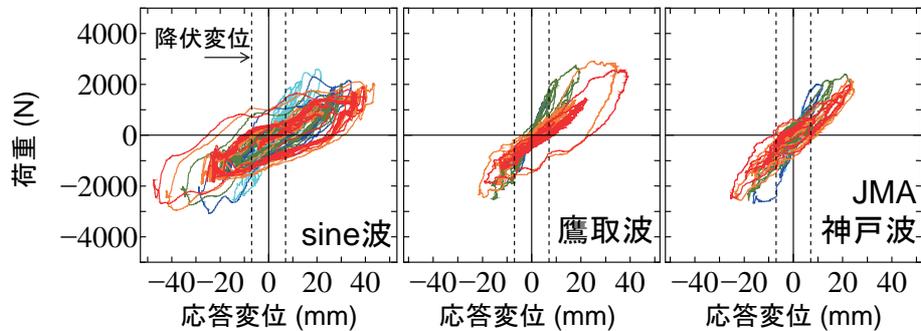
H100供試体 降伏変位:4.7mm



入力レベル(10~200%)を段階的に上げる
⇒最終的な**応答塑性率**は4~6であった.

動的載荷実験の結果

H80供試体 降伏変位:7.0mm



入力レベル(10~200%)を段階的に上げる
 ⇒最終的な**応答塑性率**は4~6であった。

動的載荷実験の結果

損傷状況

降伏変位程度の応答

- ・ 動的載荷中に微細なひび割れが柱基部に発生
- ・ 載荷終了後に閉口
目視での確認は困難

最終的な損傷状況

- ・ 柱基部のひび割れ1本が進展
- ・ ひび割れ幅は
載荷終了時には縮小している

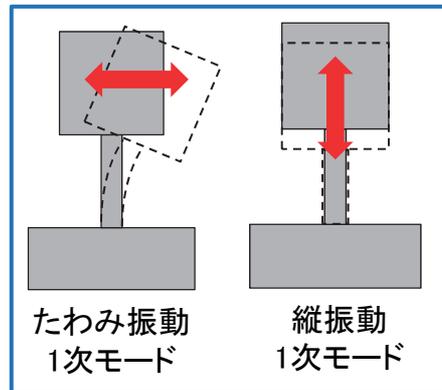


全体振動試験の概要

各載荷ステップ終了時に計測



最大応答変位と
固有振動数の関係を整理



全体振動試験の概要

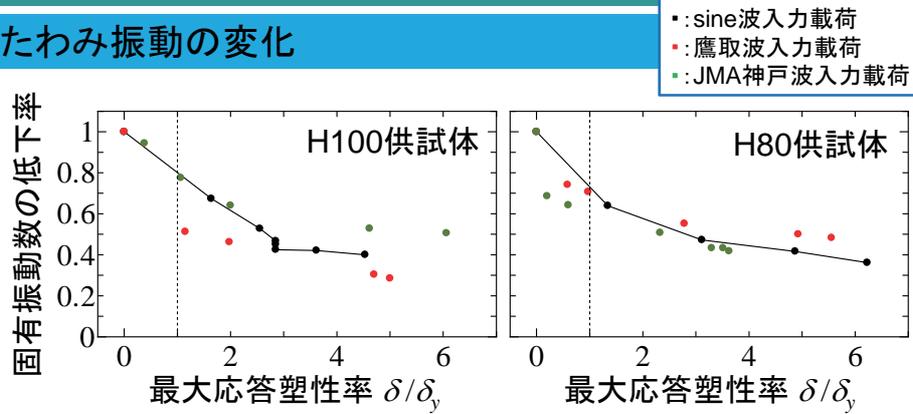
- ・ 供試体をハンマーで打撃
- ・ 応答加速度を測定



応答波形をフーリエ分析して固有振動数を算出

全体振動試験の結果

たわみ振動の変化

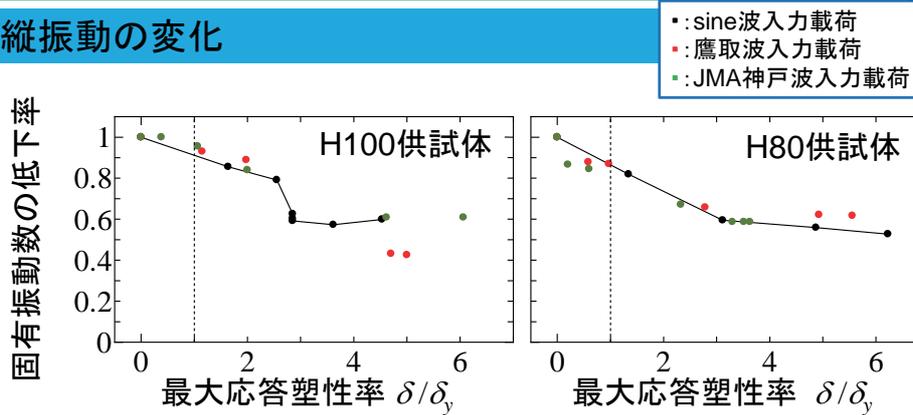


ひび割れ幅(残留変位)の影響は小さい。

入力波によらず, 最大応答変位の影響が大きい。

全体振動試験の結果

縦振動の変化

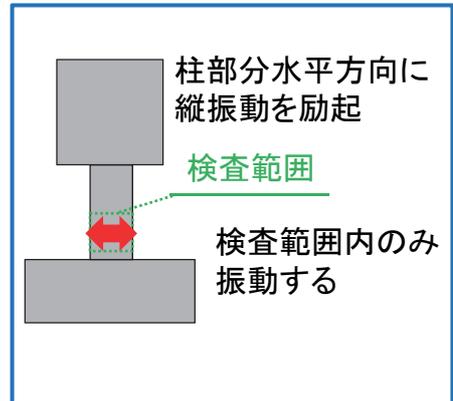


ひび割れ幅(残留変位)の影響は小さい。

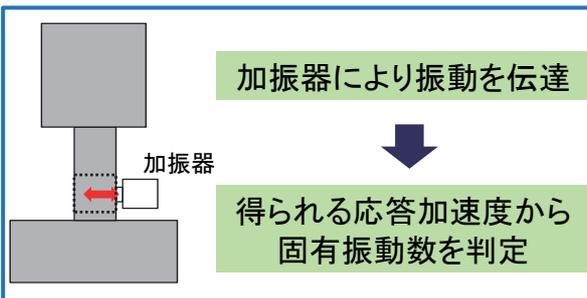
入力波によらず, 最大応答変位の影響が大きい。

局所振動試験の概要

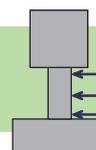
最大加振レベル終了後に
柱基部, 中間部, 上部で計測



局所振動試験の概要



柱基部・中間部・上部で計測を行う



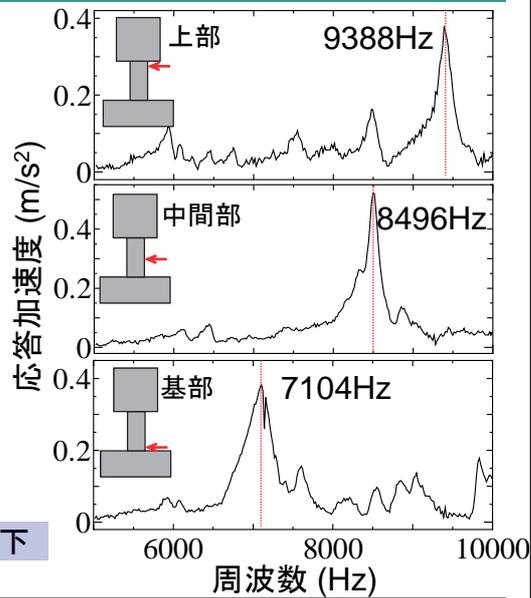
局所振動試験の結果

$$f = \frac{c}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

L : 厚さ c : 音速
 E : コンクリートの動弾性係数
 ρ : 密度

健全時の理論値
 9276Hz

基部で固有振動数が大きく低下

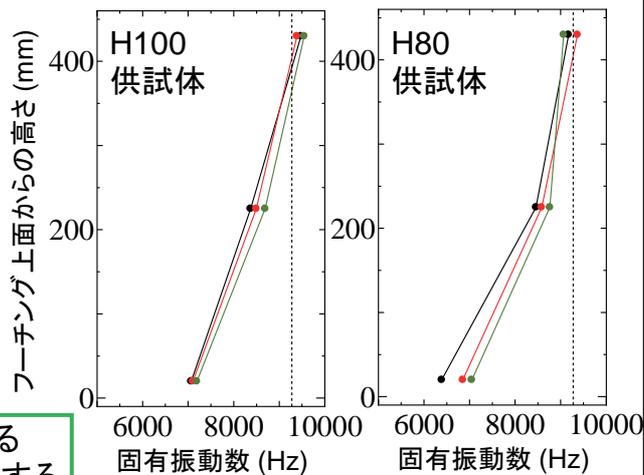


局所振動試験の結果

- : sine波入力
- : 鷹取波入力
- : JMA神戸波入力

柱基部の固有振動数が低下した

- ・ 損傷位置が同定できる
- ・ 最大応答変位が影響する
- ・ 残留変位の影響は小さい



まとめ

1. はり供試体の静的曲げ载荷試験
(H24年度, 基礎的検討)



2. 柱供試体の振動台実験
(H25年度, 地震動作用の検討)



- 加振器を用いた点検方法を提示した。
- 地震を受けたRC柱の損傷を検知できる可能性が示唆された。
- 今後, 目視困難な構造物の地震時点検への応用を図る。

平成26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
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
委員	稲垣 孝	国土交通省	総合政策局公共事業企画調整課企画専門官
委員	小澤 学	日立建機(株)	戦略企画本部戦略企画室開発戦略部部長
委員	北山 孝	西尾レントオール(株)	取締役 通信測機営業部部長
委員	木下 洋一	鹿島道路(株)	生産技術本部機械部次長
委員	小林 真人	コベルコ建機(株)	技師長 企画管理部
委員	小室 洋	キャタピラージャパン(株)	執行役員 販売促進部部長
委員	斉藤 秀企	コマツ	開発本部 商品企画室 プロダクト・マネージャー
委員	須田 幸彦	国土交通省	関東地方整備局 企画部施工企画課長
委員	竹内 幸弘	(株)トプコンキアポジションジャパン	開発営業部テクニカルサポートグループ 課長
委員	鈴木 嘉昌	西松建設(株)	土木事業本部 機材部長
委員	玉石 修介	(一社)日本機械土工協会	技術委員長
委員	隼 直毅	(株)レンタルのニッケン	執行役員 広域統括事業部部長 関東支社長
委員	行川 恒弘	(株)前田道路	工事事業本部 機械センター所長
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	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	西脇 徹郎	(一社)日本建設機械施工協会	標準部長
委員	前原 信之	(一社)日本建設機械施工協会	技術部長

(独)：独立行政法人、(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26年度版）

平成 26 年 11 月 20 日 印刷

平成 26 年 11 月 20 日 発行

編 集 一般社団法人 日本建設機械施工協会
発行所

〒105-0011 東京都港区芝公園 3 - 5 - 8
(機械振興会館内)

T E L (03)3433-1 5 0 1

F A X (03)3432-0 2 8 9

複製厳禁

印刷所 (株)アクセス