

令和 4 年度

建設施工と建設機械シンポジウム
論文集・梗概集

令和 4 年 11 月 29 日～11 月 30 日

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 (国研) 土木研究所

令和 4 年度

建設施工と建設機械シンポジウム
論文集・梗概集

令和 4 年 11 月 29 日～11 月 30 日

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 （国研）土木研究所

論文審査規定概要

1. 審査方法

論文の審査は、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シンポジウム実行委員会委員が全編を審査し、本論文については1編あたり5名の委員が審査を行う。

下記の審査基準に基づき、実行委員会にて採択を決定する。

2. 審査基準

論文の完成度、有用性、新規性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）

委員長	建山 和由	立命館大学 総合科学技術研究機構 教授
副委員長	高橋 弘	東北大学大学院 環境科学科 教授
委員	洗 光範	(株) 竹中工務店 生産本部 生産企画部 シニアフェンシニア 機械電気担当
委員	勝田 健史	国土交通省 関東地方整備局 企画部 施工企画課 課長
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	桑田 直人	鹿島道路(株) 生産技術本部 機械部 次長
委員	玉石 修介	玉石重機(株) 代表取締役社長
委員	中川 智裕	(株) 小松製作所 商品企画本部 商品企画室 主幹技師
委員	行川 恒弘	前田道路(株) 技術研究所 技術開発部 生産技術開発室 担当部長
委員	藤島 一雄	日立建機(株) 開発統括室 担当部長
委員	本田 肇	(株) トプコンポジショニングアジア ICT施工ソリューション部 シニアエキスパート
委員	増 竜郎	国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課 企画専門官
委員	黒津 仁史	コベルコ建機(株) 技術開発本部 技師長
委員	山口 崇	(国研) 土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム 上席研究員
委員	山本 茂太	キャタピラー・ジャパン(同) 販売促進部 部長
委員	渡部 純	(株) カナモト 取締役執行役員 広域特需営業部 部長
委員	伊藤 文夫	(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 標準部部長
委員	畑田 健	(一社) 日本建設機械施工協会 技術部長

「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集・梗概集

目次

○印 発表者

I 論文集

1. 電線埋設用掘削機械を活用した郊外部の無電柱化施工
電線共同溝工事への適用 1
(国研)土木研究所寒地土木研究所 ○永長 哲也 中島 淳一
2. 従来のサンドコンパクションパイル工法と異なるメカニズム
を持つ新しい液状化対策工法 5
三信建設工業(株) ○山口 洋
大成ロテック(株) 山田 敏広
大成建設(株) 廻田 貴志
成和リニューアルワークス(株) 池田 禎健
3. 建設 DX 実験フィールドにおける土工フィールドの整備と
災害対応向けショベルの活用に向けた検討と取組み 9
国土交通省 国土技術政策総合研究所 ○大槻 崇 山下 尚
(国研)土木研究所 橋本 毅
4. 港湾工事における基礎材投入施工支援システムの開発 13
東亜建設工業(株) ○宮本 憲都
5. トンネル切羽版重機搭載レーザ計測システムの開発
～ICT 技術を使ったトンネル切羽掘削面のあたり計測検証～ 17
(株)フジタ ○中島 勇気 浅沼 廉樹
ライカジオシステムズ(株) 浮田 真樹
6. i-Construction における UAV グリーンレーザ計測の適用性検証 21
安藤ハザマ ○澤城 光二郎 黒台 昌弘
7. 大型プレキャストブロック据付の自動化施工
自動運転技術を災害現場の実施工に導入 25
鹿島建設(株) ○大原 伸浩 土井原 美桜 増村 浩一
8. スタビライザの ICT 化「浅層改良管理システム」による位置精度
および生産性向上の検証 31
西尾レントオール(株) ○橋本 明広
(株)東洋スタビ 衣川 剛央
9. 建設機械施工の自動化・自律化技術の普及に向けた取組みについて 35
国土交通省 公共事業企画調整課 ○金森 宗一郎 味田 悟 加藤 和宣
10. ICT活用により作業装置を自動化した除雪トラックの試行運用について 39
国土交通省 北陸技術事務所 ○福島 徹 前原 正之
11. 橋梁下部工における3次元計測技術の出来形管理への適用性の検討 43
国土交通省 国土技術政策総合研究所 ○原 直之 山下 尚 小塚 清

12. UAV による空中写真測量を用いた土工の出来形管理に関する検討	・ ・ ・ ・ ・	47
国土交通省 国土技術政策総合研究所	○池田 和敏 山下 尚	
13. 堤防で使われる締固め機械の締固め性能について	・ ・ ・ ・ ・	51
	酒井重工業(株) ○内山 恵一	
	(国研)土木研究所 橋本 毅	
14. 締固め度自動計測システムを搭載した自動化振動ローラの現場実証	・ ・ ・ ・ ・	55
大成建設(株)技術センター	○市村 朋也 後藤 洸一 青木 浩章	
大成ロテック(株)技術研究所	城本 政一 佐々木 恵	
15. 重機エコ最適化モニタリングシステムの開発		
大規模土工現場へのシステム導入および脱炭素に向けたデータの検証	・ ・ ・ ・ ・	59
	西松建設(株) ○井上 洸也 齋藤 貴之	
16. 建設機械のドロップイン軽油代替燃料による CO ₂ 削減活動	・ ・ ・ ・ ・	63
	鹿島建設(株) ○柳 雅之	
	国土交通省 国土技術政策総合研究所 大槻 崇	
17. 「燃費基準達成建設機械認定制度」における新たな燃費基準値の策定と		
カーボンニュートラルに向けた今後の取組について	・ ・ ・ ・ ・	67
	国土交通省 公共事業企画調整課 ○守田 銀二 須山 友貴	
18. LiDAR 計測によるトンネル切羽プロジェクションマッピング	・ ・ ・ ・ ・	71
(株)大本組 小野 高伸 児玉 剛 橘 伸一 ○都川 信吾		
(株)計測リサーチコンサルタント	家村 享明	
19. 切羽直下作業機械化への試み		
2 ブームロックボルト打設専用機によるロックボルト施工	・ ・ ・ ・ ・	75
	清水建設(株) ○大矢 剛大 井手 康夫	
	古河ロックドリル(株) 宮越 征一	
20. スタッドジベルを有する鋼合成桁コンクリート床版撤去技術に関する研究	・ ・ ・ ・ ・	77
	呉工業高等専門学校 ○石川 穂乃花 重松 尚久	
	極東興和(株) 下野 聖也	
21. 道路橋床版更新工事における施工機械の開発事例		
ー 阪神高速道路 5 号湾岸線中島排出路への適用 ー	・ ・ ・ ・ ・	83
	清水建設(株) ○藤吉 卓也 安田 篤司	
	阪神高速道路(株) 長畑 友貴	
22. 幅員方向分割取替えによる床版更新工法		
ー 一車線規制化で行う床版更新工法 ー	・ ・ ・ ・ ・	87
	鹿島建設(株) 三室 恵史 村瀬 諒介 ○小柳 裕	
23. 救急排水機場ポンプの実機を用いた異常模擬試験について		
羽根車に模擬的な異常を発生させた計測試験	・ ・ ・ ・ ・	93
	(国研)土木研究所寒地土木研究所 ○小林 勇一 永長 哲也	

24. 排水機場におけるメンテナンス省力化トランスフォーメーション	
立軸斜流からコラム形水中ポンプへ	99
国土交通省 北海道開発局	○石川 真大 久保 恭伸
(株)荏原製作所	梶本 哲弘
25. マスプロダクツ型排水ポンプの取組と今後の展望について	105
国土交通省 公共事業企画調整課	○日出山 慎人 黒田 浩章
26. 水質を汚濁させない高揚程浚渫工法の開発	
ダム取水口近傍で発電を止めることなく堆砂除去	109
(株)フジタ	○稲見 悠太 服部 哲也
(株)河本組	河本 和雄
27. 排水機場におけるDX技術を用いた維持管理の効率・高度化	115
国土交通省 紀南河川国道事務所	○村木 里宇
28. 壁の増厚などの補強工事に伴う小径アンカー孔の削孔作業への自動削孔装置の適用	119
(株)奥村組	○川澄 悠馬、三澤 孝史、加藤 清孝、石井 敏之、山口 治、田島 鉄朗
29. 道路維持除雪機械等の技術開発成果活用状況について	123
国土交通省 公共事業企画調整課	和田 直也
30. 施工機械・設備のWEB点検管理システム	
重大災害撲滅と業務効率化に向けて	127
鹿島建設(株)	青野 隆 伊勢 卓矢 ○是永 明日香
31. メッシュWi-Fiによる映像の伝送に関する実証実験	133
安藤ハザマ	○紫垣 萌 藤本 直也 武石 学
32. 機体に依存しない遠隔吹付システムの開発	
NA TM吹付作業用脱着式遠隔吹付システムの開発	137
(株)熊谷組	○坂西 孝仁 尾畑 洋 宮川 克己 杉本 憲一
33. 山岳トンネル用自動ズリ積込機の開発	
～トンネルズリだし作業の省力化と安全性向上を実証～	141
(株)フジタ	○林 秀晃 浅沼 廉樹
(株)三井三池製作所	山田 照之
34. 自律飛行ドローンによるトンネル坑内自動巡視システム	
「坑内の網羅的な情報収集による巡視」と「無人切羽点検」	147
(株)フジタ	○松岡 祐仁
(株)センシンロボティクス	大畑 成史 高瀬 悠介
35. 情報開示型自律施工技術基盤の開発状況と今後の展望	153
(国研)土木研究所	○遠藤 大輔 山内 元貴 橋本 毅
36. ニューマチックケーソン工法における自動掘削システムの開発	
天井走行式掘削機の自動化および排土バケツ自動認識	159
日本工業大学	○大崎 颯成 石川 貴一郎
(株)大林組	稲川 雄宣 照井 太一 橘 伸一 都川 信吾
37. 自動化リジッドダンプの開発及び自動走行能力の検証	165
大成建設(株)	○遠藤 亮雄 青木 浩章 田村 道生 後藤 洸一

Ⅱ 梗概集

Ⅱ－１ ポスターセッション要旨

1. 油圧オートカプラによる建設施工現場の安全・環境・生産性向上革命
・ ・ ・ ・ ・ 169
(株)小松製作所 山本 宏
2. 自転式環境負荷低減高圧噴射攪拌工法
【Mole-Eco Jet®(モールエコジェット®工法)】
・ ・ ・ ・ ・ 171
(株)不動テトラ ○矢部 浩史 田中 肇一 渡辺 英次
3. 排水ポンプ設置時の安全性向上と照明車の小型化と操作の簡易化について
・ ・ ・ ・ ・ 173
ー作業員の安全と負担軽減に向けた検討ー
国土交通省 中部技術事務所 林 学 鶴飼 隆司 ○福万 敏行
4. 腕時計型ウェアラブル端末による作業員体調管理
IoT ソリューション
・ ・ ・ ・ ・ 175
西尾レントオール(株) 野瀬 健一
5. 半炭化材料を用いた小規模なバイオマスガス化発電
・ ・ ・ ・ ・ 177
鉄建建設(株) ○皆川 豊
6. 高所作業車の接触防止システム「はみ出しまセンサー」
・ ・ ・ ・ ・ 179
(株)カナモト 清水 亮
7. 現場環境一元管理システム NDX-Cloud
現場環境や計測器データを見える化し、環境管理、施工管理をリアルタイムに行えるシステム
・ ・ ・ ・ ・ 181
(株)レンタルのニッケン ○夏樹 太郎 峰咲 富士朗

I 論文集

1. 電線埋設用掘削機械を活用した郊外部の無電柱化施工

電線共同溝工事への適用

(国研) 土木研究所寒地土木研究所 ○ 永長 哲也
(国研) 土木研究所寒地土木研究所 中島 淳一

1. はじめに

無電柱化は、道路の地下空間を利用して電力線や通信線をまとめて収容する電線共同溝方式による電線類地中化などにより、道路から電線・電柱をなくす取り組みである。地震、竜巻、台風による電柱倒壊がなく、ライフラインの確保や道路の寸断防止に寄与する他、歩道空間確保による歩行者、特に高齢者や車椅子、ベビーカー利用者などの通行性の向上、交差点での見通しや交通標識の見やすさ改善による交通安全にも貢献できる。また、特に北海道にとって電柱や電線のないすっきりした景観は、地域の魅力を高め観光の活性化への効果も大いに期待できる。郊外部での無電柱化は、これまで主に進められていた都市部に比べ、電力・通信需要が少なく、機械施工条件が有利なため、電線埋設用掘削機械（以下、「トレンチャー」という）による施工が効果的である。

本稿では、過年度より取り組んできた施工フィールド試験の実績を踏まえ、トレンチャー施工による電線地中化施工を国道では初めて実施し、現場適用性や施工性について検証したので報告する。

2. トレンチャー施工による現場実証試験

2.1 電線共同溝事業の概要

国土交通省北海道開発局函館開発建設部が進める、国道5号七飯町赤松街道電線共同溝事業箇所は、函館と道央圏を結ぶ高規格道路の函館新道、北海道新幹線新函館北斗駅、「道の駅」なないろ・ななえが集まる交通の要衝に位置しており、七飯町地域防災計画において、「道の駅」が指定緊急避難場所となっている。また、沿道の赤松並木は赤松街道として「日本の道百選」にも選定され、道南の観光名所の一つとなっている。

赤松街道電線共同溝の施工現場は、国道5号七飯町字藤城から峠下までの1.6km区間で、うちトレンチャー施工区間は上り車線側の道の駅「なないろ・ななえ」駐車帯部70m及び下り車線側の歩道部60mの計130mである。図-1に施工箇所を示す。



図-1 施工箇所

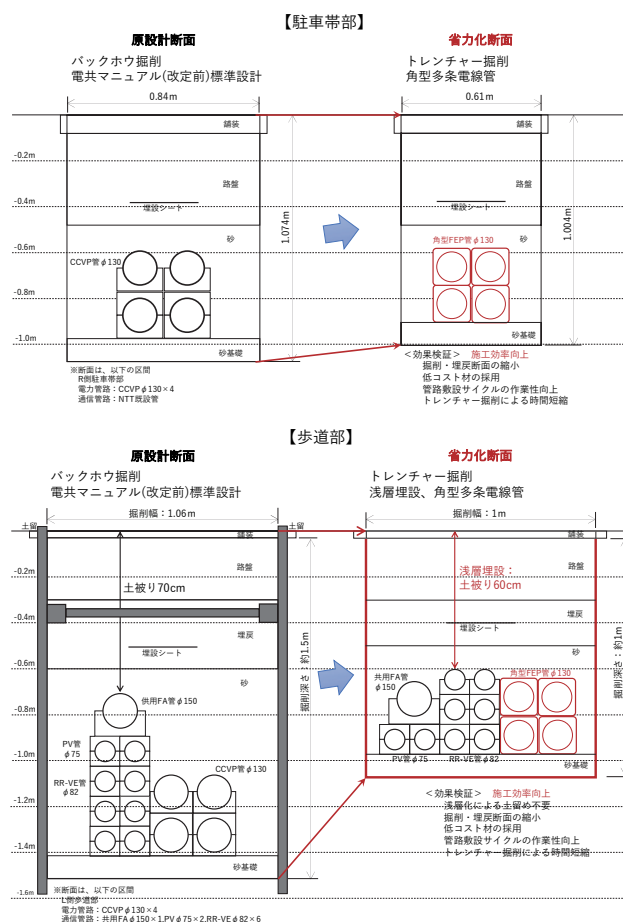


図-2 施工断面

2.2 省力化断面

施工断面は、図-2 に示すとおり、トレンチャーの掘削能力の適用範囲に収まるよう「浅く」、「小さく」する新たな設計を取り入れた。

過年度の室内及び現場試験結果を踏まえ寒冷地における浅層埋設として、土被りを 70cm から 60cm に低減した。また、埋設管の積み方を従来の縦型から横型にすることで掘削深さが 1.0m 以内になるよう底上げした。これにより土留めを不要とし、管路をトレンチャーの掘削可能断面に収めることができ、トレンチャーの適用を可能とした。

2.3 機械選定

施工断面は最大掘削幅が駐車帯部で 0.61m、歩道部 1.0m、最大掘削深はそれぞれ 1.0m となることを踏まえ、「ケーブル埋設用掘削機械（トレンチャー）」を活用した施工の手引き（案）¹⁾により使用機械を選定した。

選定した機械は最大掘削可能幅が 0.61m であるが、歩道部の掘削幅 1.0m を施工するため、Wカッティング（幅方向の重複掘削）が可能な仕様である。掘削機はチェーン式で、チェーンの外周に比較的固い地盤の掘削に適した超硬タイプの掘削刃がついており、チェーン回転により掘削及び土砂の排出を行う。更に後方に掘削した底面の整地を行うブレード状のトレンチクリーナーを装備している。トレンチクリーナーは 2 枚（掘削幅 0.61m 用及び 0.39m 用）装着しており、ボルトで連結することにより、Wカッティング（掘削幅 1.0m）に対応する。トレンチャーはバックホウのような旋回動作がないため、施工の安全性向上に寄与できる。機械諸元を表-1、掘削機詳細を写真-1 に示す。

3. トレンチャー施工による現場実証試験結果

3.1 土質

過年度より苫小牧寒地試験道路において砂質土路体におけるトレンチャー掘削試験を行ってきたが、今回、40cm の深さの路盤+路床（礫質土）でも掘削可能であることが確認できた。写真-2 にトレンチャーによる施工状況を示す。

3.2 施工速度

図-3 に示すとおり、駐車帯部における掘削区間の施工時間から算出したトレンチャーの掘削速度は、掘削のみで約 101.6m/h であった。

過年度の苫小牧寒地試験道路（路体）での試験では、掘削幅 0.61m、掘削深さ 1.0m の場合、降雨による悪条件下で約 87m/h²⁾であったことから、土質の違いによる影響は少ないといえる。

また、今回の機械はベルトコンベヤにより、掘削作業と積込作業の同時施工が可能であるが、掘削土砂の運搬に 4t ダンプトラックを使用する場合（土砂の比重 2.1、積込量 1.9m³程度）、掘削延長 3.1m

毎にダンプトラックの入替えが必要となることにより、3 分程度/回のタイムロスが発生している。この分を考慮すると施工速度は約 58.8m/h となる。

表-1 機械諸元

機関出力	74PS (55kW)
掘削機構	チェーン式
全長	8,850mm
全高	2,450mm
全幅	2,310mm
車両総質量	7,000kg
最大掘削深	1,000mm
最大掘削幅	1,000mm (610mm+390mm)
掘削機オフセット量	390mm
その他	排出コンベヤ付き

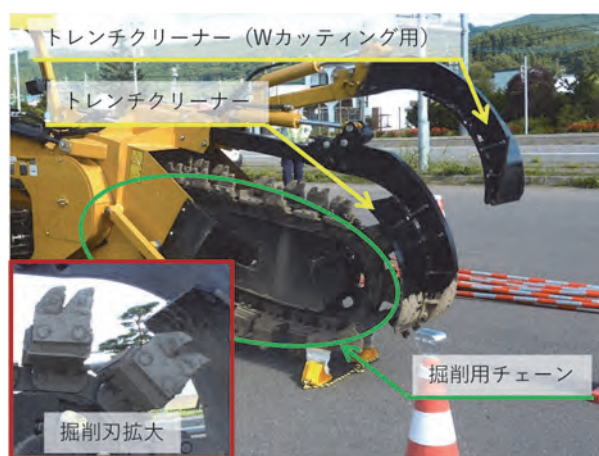


写真-1 掘削機詳細



写真-2 トレンチャーによる施工状況

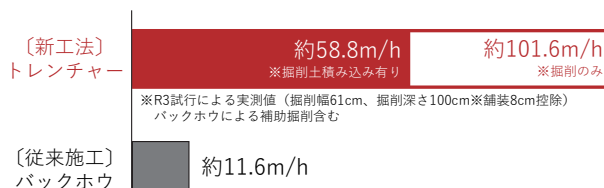


図-3 施工速度の比較（駐車帯部）

しかしながら、このタイムロスも考慮しても従来のバックホウ掘削の約 11.6m/h（土木工事標準積算基準書による試算値）に比較し、大幅なスピードアップが図られた。

3.3 掘削精度

トレンチャーによる掘削断面の出来型は、掘削区間の 2 箇所計測した結果、図-4 に示すとおりとなった。掘削幅は、各計測点において、大きくばらつかないことが確認でき、かつ、設計値を確保しており、断面が崩れるようなことはなかった。掘削深さは、掘削開始時に、チェーンを所定の深さまで下げ、保持することで、掘削深さを設定する。掘削開始後は、この設定を保ちながら進むことで一定の深さで掘削することができる。また、床均しなどの作業も不要となった。写真-3 に掘削後の仕上がり状況を示す。

3.4 土砂排出用ベルトコンベヤ

これまでの、掘削土は掘削溝の横に積み上げられ、バックホウ等により、ダンプトラックへ積み込む必要があったため非効率になっていた。供用されている道路での作業の場合、これらの作業はヤードの確保、交通への影響などの問題が大きく、効率も悪いため、今回、土砂排出用ベルトコンベヤ付き機械を採用した。この機械は、掘削と土砂積み込みが同時に行える一車線積み込みタイプであり作業効率が向上した。

3.5 施工上の課題

掘削作業中、土中に直径約 15cm 程度の玉石や転石などがあると、作業が中断することがあった。その場合はバックホウによる支援が必要となる。

玉石や転石などがあると装置内に、かき上げられ、チェーンケースやベルトコンベヤに干渉し掘削作業が停止する。

また、図-5 に示すとおり、機械の構造上、垂直には掘削できないため、施工区間の開始及び終了地点では、未施工箇所のバックホウによる掘削が必要となる。

3.6 配管敷設

掘削幅 0.61m の掘削断面は人が入って作業するには十分な大きさであり、配管敷設作業はスムーズであった。また、掘削深さ 1.0m のため土留めも不要で、上下作業への支障が少なく作業性は良好であった。

今回、採用した角形多条電線管（写真-4）は、従来管に比べ管台の設置が不要で、積み重ねも安定していた。また、接続にあたっては配管接続器具が不要で、容易であり、熟練を要しない良好な施工性を確認することができた。

4. 大断面掘削の試行

4.1 施工方法の検討

今回の試験では電力・通信の複合管路を収める大断面の掘削について、トレンチャー施工が可能かについて、2 回掘りをする施工方法（Wカッティング）について検討した。

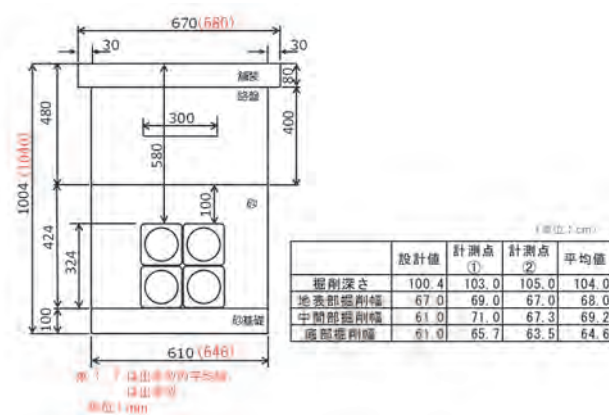


図-4 掘削断面の出来型



写真-3 掘削後の仕上がり状況

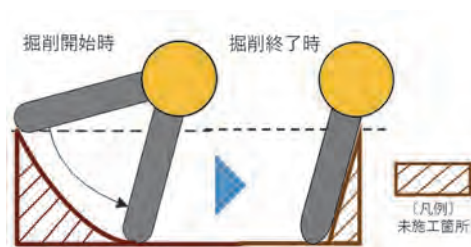


図-5 掘削開始時及び終了時のイメージ

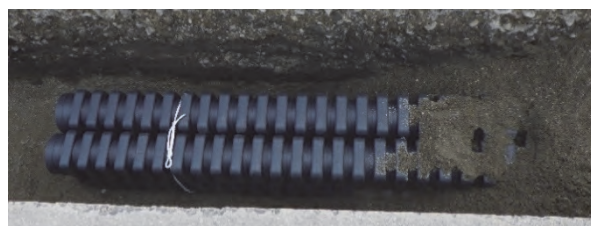


写真-4 角形多条電線管

図-6 に示すとおり、初めに掘削断面の右側（掘削機の刃分 610mm）の掘削を行い、その後、トレンチャーを掘削開始箇所まで引き戻して、掘削機部分を左側にスライドさせ、車両後方のトレンチクリーナーを連結し、設計断面の残りの部分の左側（390mm）を掘削する施工方法である。

2 回目の掘削時にトレンチャーを引き戻すため、1 回目掘削済み箇所の舗装端部を走行する際に、路盤の地耐力が弱い箇所があり、掘削壁面が崩れる恐れがあるため、敷鉄板を敷設しての施工となった。また、Wカッティング 1 回目と 2 回目の切替には、トレンチクリーナーの連結作業が必要であり、その作業に時間を要するため、今後は機械の改良及び施工方法について、更なる検討が必要である。写真-5 に Wカッティングの掘削状況を示す。

4.2 施工速度の検証

図-7 に示すとおり、歩道部における掘削区間の施工時間から算出したトレンチャーの掘削速度は、掘削のみで約 20.6m/h であった。掘削土砂の運搬に 4t ダンプトラックを使用する場合（土砂の比重 2.1、積込量 1.9m³程度）、1 回目は掘削延長 3.1m 毎に、2 回目は約 4.7m 毎にダンプトラックの入替えが必要となることにより、3 分程度/回のタイムロスがある。また、1 回目と 2 回目の掘削箇所を変更する際に機械の位置替え及びトレンチクリーナーの連結作業に 8 分程度/回のロスタイムが必要となり、この分を考慮すると施工速度は約 10.7m/h となる。駐車帯部に比較し、車道部は大断面、Wカッティング作業となるため、従来のバックホウ掘削の約 6.7m/h（土木工事標準積算基準書による試算値）に比較し、施工速度は、劣る結果となった。

5. まとめ

郊外部におけるトレンチャー施工による電線地中化施工を実施し、現場適用性及施工性について検証を行った結果、以下の知見を得た。

- ・トレンチャーの施工速度は、バックホウと比較して約 5 倍（駐車帯部）であり、掘削速度が向上した。
- ・掘削断面は、出来映えが良好で平坦に仕上がるため、床均しなどの作業が不要となる。
- ・ダンプトラックへの土砂積み込みはベルトコンベヤにより掘削と同時にできるため、施工の効率化が図れる。
- ・土中に玉石や転石等があった場合は、掘削が困難となり、バックホウの支援が必要となる。
- ・機械の構造上垂直には掘削できないので、施工区間の開始及び終了時にはバックホウによる支援が必要となる。
- ・Wカッティング（重複掘削）採用により、掘削幅

1.0mでの施工が可能となったが、トレンチクリーナーの連結作業など時間を要するため、従来のバックホウ掘削と比較して、劣る結果となった。

6. おわりに

今回の施工の結果から、トレンチャーによる掘削及び配管敷設、などの施工の効率化が確認でき、郊外部におけるトレンチャーによる電線類地中化施工は有効である。

今後は更なる全体工程の短縮に向け、付随する関連作業の効率化について、検討していきたい。

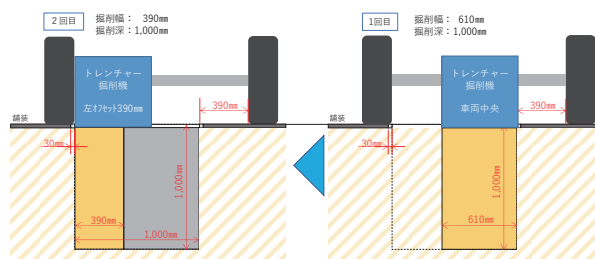


図-6 大断面掘削の施工方法検討



写真-5 トレンチャーでの掘削状況

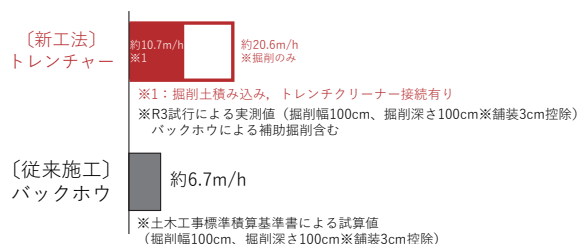


図-7 施工速度の比較（歩道部）

謝辞：本研究にあたり、現場提供頂いた国土交通省北海道開発局函館開発建設部の皆様に多大なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地機械技術チーム：ケーブル埋設用掘削機械（トレンチャー）を活用した施工の手引き（案）第 1.0 版，2021.2.

2. 従来のサンドコンパクションパイル工法と異なるメカニズム を持つ新しい液状化対策工法

大成建設株式会社
三信建設工業株式会社
大成ロテック株式会社
成和リニューアルワークス株式会社

廻田 貴志
○ 山口 洋
山田 敏広
池田 禎健

1. はじめに

密度増大系の代表的な液状化対策工法であるサンドコンパクションパイル工法は、市街地の施工においては、振動・騒音などの課題があるため、比較的高価な静的締固め砂杭工法の適用場面が増えている。筆者らは低振動・低騒音で地盤密度を増大させる新しい液状化対策工法（TS-improver 以下、本工法と称す）を開発し、従来の締固め砂杭工法より効率的に設計・施工できることを確認した。

本稿では、工法概要および本工法の特長を示すとともに、改良原理、締固め効果および地盤変位、振動・騒音の測定例について紹介する。

2. 工法概要

本工法は碎石などの中詰材を地盤に供給し、拡張しながら改良杭を造成することで周辺地盤を締固める密度増大工法である。本工法の施工状況および施工機の構成を図-1 に示す。本工法の施工は、汎用的なクローラークレーンに専用のバイブロユニットを吊り下げて行う。バイブロユニットは中詰材投入用のホッパー、中詰材を地盤に供給するサイロチューブ（ケーシング）、先端で高周波振動を発生させるバイブロフロットなどで構成される。中詰材の地盤への供給と拡張はバイブロユニットの引上げと打戻しを繰り返すことにより行う。本工法は図-2 に示す以下の手順で施工を行う。

- ① 所定の施工ポイントにバイブロユニットを据え付ける。
- ② バイブロフロットを起振し、バイブロユニットの先端からエアまたは水を噴射しながら改良杭下端深度まで貫入する。
- ③ バイブロユニット頂部のホッパーに中詰材を投入し改良杭の造成を開始する。
- ④ バイブロフロットを振動させながら所定長さの「引上げ」と「打戻し」を交互に繰り返し締固めを行う。
- ⑤ 中詰材を補給しながら所定深度まで締固めを行う。



図-1 施工状況および施工機の構成

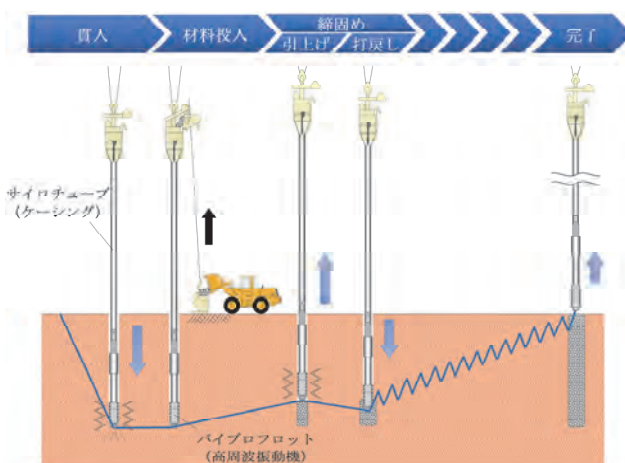


図-2 施工手順

3. 工法の特長

本工法は以下の特長を有する。

- ① 高周波振動機の振動は大きな距離減衰を持つため、低振動・低騒音の施工が可能。
- ② 打戻しの拡張効果に加えて、水平方向の振動が地盤に作用するため、従来技術に比べて高い締固め効果が発揮できる。そのため、直径φ800mmの改良杭と同等以上の改良効果が期待

できる。

- ③ クローラクレーン等の汎用性の高いベースマシンにて施工可能であり，三点支持式のサンドパイル打設機等の特殊大型機械は不要である。
- ④ 施工機の先端から中詰材を供給するボトムフィード方式を用いているため，中詰材供給量を把握でき，改良杭の品質を確保できる。
- ⑤ 施工管理計器により，改良効果確保のための適切な施工管理が可能であり，専用の帳票化システムにより出力されたデータを確認することで，適切な施工が実施できたかを迅速に判断できる^り。(図-3，図-4)
- ⑥ 標準として中詰材は調達が容易で安価な再生砕石 RC-40 を使用する。その他として RC10-40，砕石 C-40 などを使用することができる。(写真-1)



図-3 施工管理計器

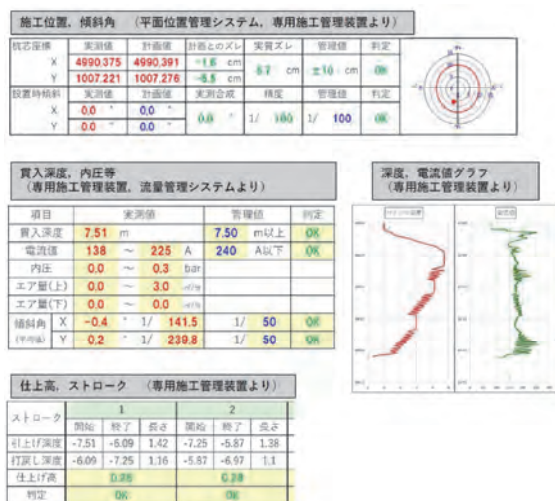


図-4 出力帳票例 (抜粋)

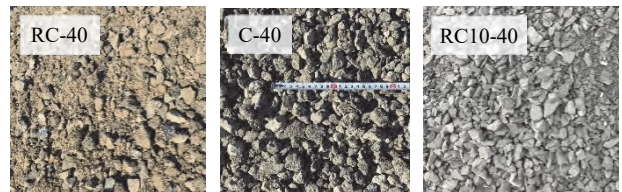


写真-1 使用中詰材

4. 改良原理と締固め効果²⁾³⁾⁴⁾

4.1 改良原理

本工法の改良原理の概念図を図-5に示す。パイプフロットの引上げで排出された中詰材は打戻しによって拡径される。周辺地盤の締固めは次の工程で行われる。

引上げ：パイプフロットの振動とサイロチューブ内の空気の加圧により，地盤内に中詰材を供給する。

打戻し：パイプフロットの振動と打戻しにより，中詰材を水平方向に押し広げながら，地盤内に中詰材を圧入する。

締固め：引上げと打戻しを繰り返しながら改良杭を造成し，周辺地盤を締固める。パイプフロットによる振動エネルギーを直接地盤に加えながら改良杭を造成する。

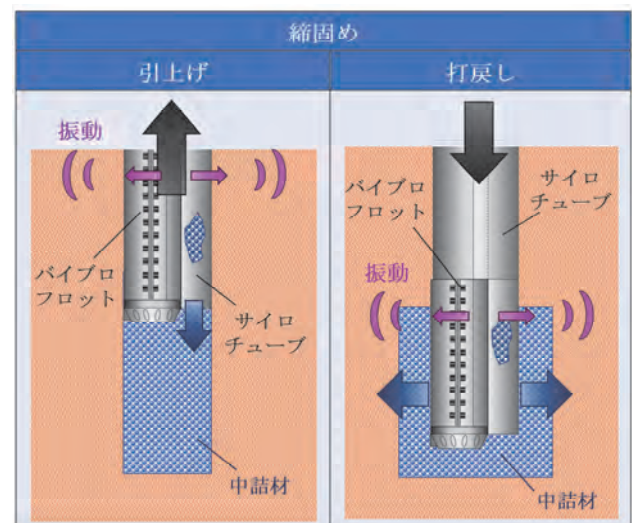


図-5 改良原理の概念図

4.2 締固め効果

前述のように，本工法の締固めのメカニズムとして振動による動的なエネルギーが地盤に伝達される効果と，中詰材の圧入による静的なエネルギーが地盤に伝達される成分が重ね合わされていると考えられる。

ここで締固め効果を整理するにあたり，締固め効果の推定法として山崎が提案する方法⁵⁾(以下， κ 法と称す)を採用した。 κ 法は N 値，相対密度および累積せん断ひずみの関係を利用し，改良後 N 値を推定する方法であり，本工法の締固めメカ

ニズムにより近いものと考えた。

本工法では、振動と中詰材の圧入それぞれの作用によって、累積せん断ひずみが増加していると考えられる。各作用による累積せん断ひずみの増分を求め、その和から本工法による累積せん断ひずみの増分を求めることが望ましいが、現状ではそれぞれの寄与度を個別に算定することは困難である。よって、 κ 法にて、圧入と振動による累積せん断ひずみの増分を、圧入のみの成分に換算した場合に、どの程度の換算径とすればよいか検討を行ったところ、等価な改良体の直径を $\phi 800\text{mm}$ 程度と推定すると改良効果としての N 値の測定結果と整合することが分かった。以上より、換算径 $\phi 800\text{mm}$ として求めた改良率 α_s から κ 法を用いて改良後推定 N 値を算定する。なお、 κ の値はSCP工法に対する提案式である式(1)を用いた。

$$\kappa = 5 \times 10^{-0.01 F_c} \dots\dots\dots (1)$$

過去の試験施工における柱状図および改良前後の実測 N 値と改良後推定 N 値の一例を図-6に示す。この事例では改良深度はGL-0.0m~7.5mであり、GL-3.0m~6.0mは細粒分含有率が比較的高く N 値の増加が得られにくいと想定された。また、GL-7.5m以深は、 N 値が20を超える地盤であるため、適用範囲外とした。改良杭の配置は正三角形配置とし改良杭の間隔は、換算の杭径 $\phi 800\text{mm}$ から、改良率が10, 15, 20%となるようにそれぞれ1.7, 2.0, 2.4mに設定した(図-7)。図-6に示すように、3ケースともに細粒分含有率20%以下のほぼ全ての深度で改良後実測 N 値は、改良後推定 N 値より高い値であった。

上記の一例を含む過去の試験施工において、改良率10~20%の範囲で実施した改良後実測 N 値と換算径 $\phi 800\text{mm}$ より算出した改良後推定 N 値の関係を図-8に示す。この相関図に示されるように、概ね推定 N 値と実測 N 値は整合しており、改良後 N 値を推定する際に用いる換算径 $\phi 800\text{mm}$ の妥当性を改めて確認することができた。

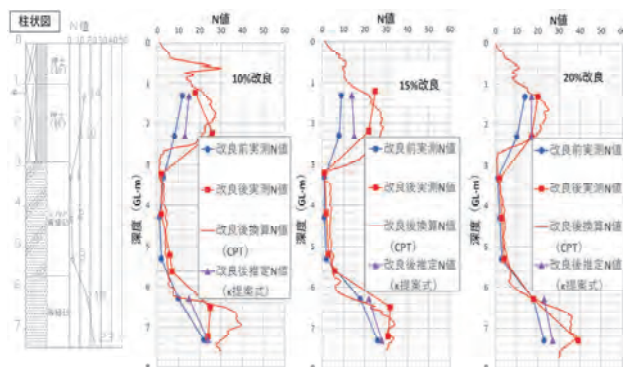


図-6 改良前後 N 値の測定結果と改良後推定

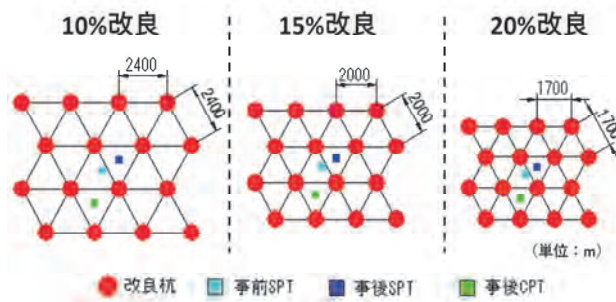


図-7 改良杭配置

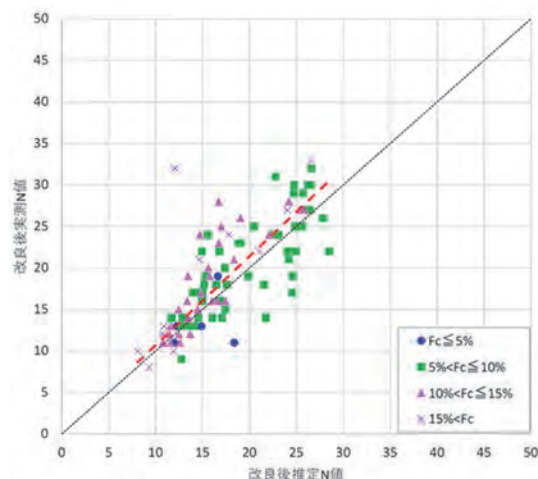


図-8 改良後推定 N 値と改良後実測 N 値の関係
(改良深度0~10mのデータ)
※ $\phi 800\text{mm}$ として推定値を算定

5. 周辺環境への影響

周辺環境への影響として、過去の試験施工における地盤変位(水平変位)および騒音・振動の測定結果について報告する。

5.1 地盤変位(水平変位)

砂地盤を対象とした水平変位の測定結果を図-9に示す。本工法の水平変位は約-5.1cm~+1.1cmの範囲であり、サンドコンパクションパイル工法と比較して低い値である。例えば、改良杭から比較的近い $\theta=10^\circ$ の位置では、本工法の水平変位は5cm程度にあるのに対して、サンドコンパクションパイル工法は20cm程度であり、7割以上低い値である。

さらに、一部のデータでは負の水平変位を示している。これは中詰材の圧入による体積が増大する効果より施工箇所周辺の地盤間隙比が減少(密度増大)する効果のほうが優勢であることを反映したものである。

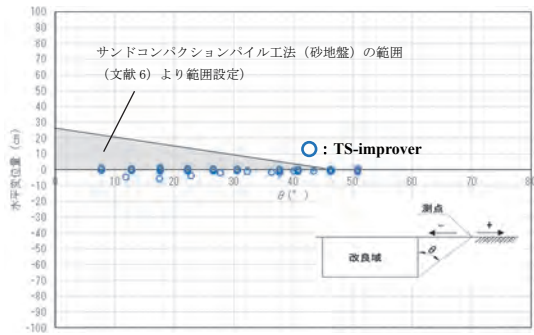
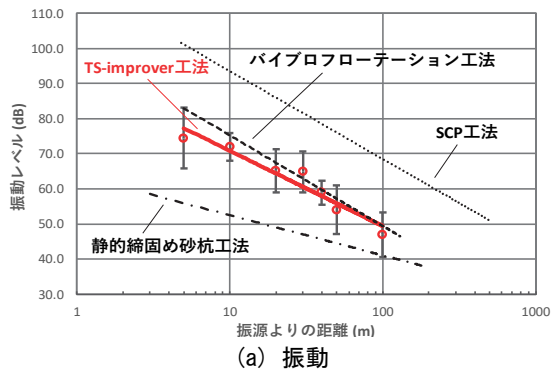


図-9 地盤変位（水平変位）の測定結果

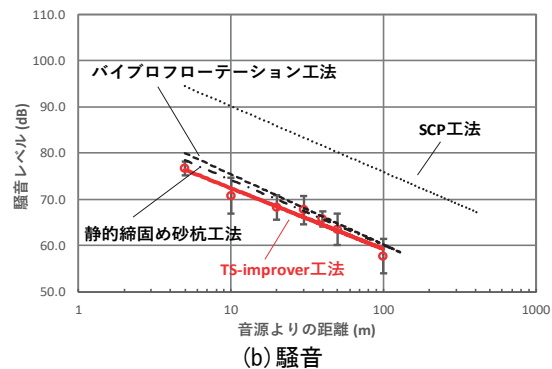
5.2 振動・騒音⁷⁾

振動・騒音レベルの測定結果を図-10に示す。振動・騒音レベルともにサンドコンパクションパイル工法よりも低い値である。例えば、改良杭から30mの位置にて近似曲線で比較した場合、本工法の振動レベルは60dB、騒音レベルは65dB程度であるのに対して、サンドコンパクションパイル工法の振動レベルは80dB、騒音レベルは85dB程度であり、ともに20dB程度低い値である。なお、騒音レベルについては、概ね静的締固め砂杭工法と近い値である。

本工法における振動源は地中にて稼働するパイプロットのみであるため、低騒音の施工が可能である。また、パイプロットの周波数は30Hz（標準）と高周波であることから、振動の距離減衰が大きく、遠くまで振動が伝搬することはないため、低振動の施工が可能である。



(a) 振動



(b) 騒音

図-10 振動・騒音の測定結果

5. まとめ

低振動・低騒音で地盤密度を増大させる新しい液状化対策工法であるTS-improverを開発した。本工法を用いた試験施工の結果などにより、中詰材の圧入による拡張と水平振動の相乗効果によって直径 ϕ 800mmの改良杭と同等以上の改良効果があることが確認された。また、周辺環境へ影響として水平変位および振動・騒音レベルの測定結果を示した。その結果として、従来の締固め砂杭工法より低い値であり、周辺環境へ影響も少ない工法であることが確認された。

参考文献

- 1) 廻田・本谷・青木・池田：低振動・低騒音の新液状化対策工法（TS-improver工法）－帳票システムを用いた施工管理について－，第77回土木学会年次学術講演会，2022（投稿中）
- 2) 村田・本谷・湯川・池田：低振動・低騒音の新液状化対策工法－改良後N値の推定方法について－，第75回土木学会年次学術講演会，p.VI-154，2020
- 3) 太田・本谷・山田・大高：低振動・低騒音の新液状化対策工法（TS-improver）－改良後N値推定方法の考察－，第76回土木学会年次学術講演会，p.VI-106，2021
- 4) 太田・本谷・山田・大高：低振動・低騒音の新液状化対策工法（TS-improver工法）－品質管理に対する考え方－，第77回土木学会年次学術講演会，2022（投稿中）
- 5) 港湾空港技術研究所：港湾空港技術研究所資料 液状化対策としての締固め工法の設計法に関する研究 No.1220，2010
- 6) 地盤工学会：地盤改良の調査・設計と施工－戸建住宅から人工島まで－，p.111，2013
- 7) 中西・山口・青木・池田：低振動・低騒音の新液状化対策工法（TS-improver）－2020年度実験 改良効果と騒音・振動について－第76回土木学会年次学術講演会，p.VI-105，2021

3. 建設 DX 実験フィールドにおける土エフィールドの整備と 災害対応向けショベルの活用に向けた検討と取組み

国土交通省国土技術政策総合研究所
国立研究開発法人土木研究所
国土交通省国土技術政策総合研究所

○大槻 崇
橋本 毅
山下 尚

1. 背景と目的

1.1 建設 DX に向けた取組み

国土交通省では、平成 28 年度より、i-Construction のトップランナー施策の 1 つとして「ICT の全面的な活用」を打ち出し、ICT 土工を皮切りに ICT 様々な工種へと年々その適用工種を広げてきた。

また、令和 2 年からは、インフラ分野の DX(デジタルトランスフォーメーション)として、各種事業のデジタル化と共に、「現場作業の遠隔化・自動化・自律化」を推進し、現場生産性の更なる向上に取り組むこととしている。



図-1 インフラ分野のDXの全体像

1.2 常設型施工実験フィールドの必要性と災害対応向けショベルの活用に向けた研究

インフラ分野における研究開発がどのように為されてきたかについて振り返るとき、実際の施工現場における研究開発に大きく依拠した実態が指摘されてきている。

図-2 のとおり、2014 年に政府で開催したロボット革命実現会議において、立命館大学の建山教授が行った説明によれば、建設分野の研究開発投資が、明示的には、製造業と比べて 10 分の 1 程度に留まり、建設ロボットへ開発予算を振り向けることの難しさから、その開発は、主に実工事プロジェクトの中での技術開発に依存することが多いと報告された。結果、実現場から真に期待される施工技術が開発される一方で、工期の関係から、継続性を持った研究開発の担保が困難と指摘された。

また実現場での研究開発は、技術の系統的な検証や試行錯誤を通じた改良が難しいことや、現場

との調整に大きな労力がかかることも制約となる。

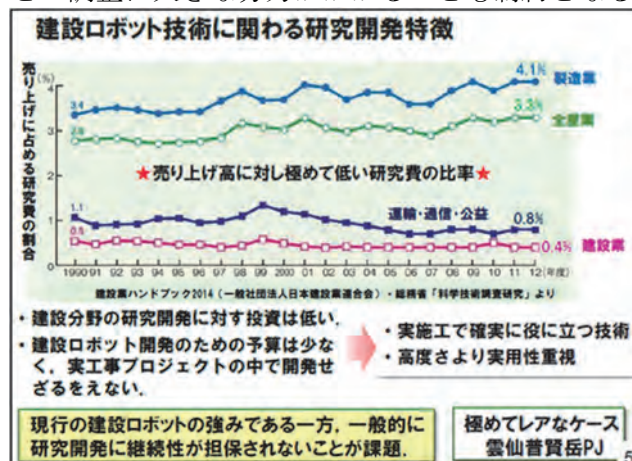


図-2 建設ロボット導入に関する提言 P5 より

そのため、現場作業の高度化に関する技術開発を進めるべく、研究開発側の検証のタイミングや実験時の現場での試行錯誤を可能とする、研究開発専用の常設型の施工実験フィールドを整備することとし、DX アクションプランとして、「現場作業の遠隔化・自動化・自律化」の推進に当たり、“3-5. 建設 DX 実験フィールドを活用した基準整備・研究開発の推進”に取り組むとした。令和 2 年度から、建設 DX 実験フィールドの整備を進め、令和 3 年度より、順次、当該フィールドの活用と機能拡張を進めてきているところである。

また、当該フィールドの整備において、研究や実験に用いる各種建設機械の整備も併せておこなっており、災害現場での活用を想定した、急傾斜・半水中型油圧ショベルを導入し、その活用に向けた研究を行っている。

本稿では、当該フィールドの整備状況と災害対応向けショベルの活用に向けた研究活動について報告し、特に災害対策向け建設機械の研究で配慮すべき事項について述べる。

2. 建設 DX 実験フィールド・土エフィールドの整備と活用

2.1 建設 DX 実験フィールドの整備概要と活用

建設 DX 実験フィールドは、インフラ DX の推進に向け、無人化施工、自動施工、ローカル 5G を

活用した遠隔操作の研究開発を行う土工フィールドと、3次元データ等を活用した計測及び検査等に関する技術開発に利用できる、各種コンクリート構造物模型（配筋模型と地下埋設構造物を含む）にて構成される研究施設である。



図-3 建設 DX 実験フィールドの全景



図-4 建設 DX 実験フィールドのユースケース例

図4に示すとおり、実物大の出来形計測模型等を使用し、実際の建設施工現場を想定した実験を行うことができる。

これらの施設は、大学や民間企業等にも、有償とはなるが利用を開放している。

表-1に、令和3年度の主な活用状況を整理した。初年度は、主に内部での利用を行う中で、既に大学や複数企業への施設貸付けを実施している。

令和4年度に入り、更に多数の民間企業からの問合せを頂いており、建設DXフィールド整備の意義を確認している。

表-1 R3年度の建設DX実験フィールドの使用状況

実験等 (主なもの)	■模型等を計測対象とした出来形計測手法、3次元モデル作成 ・8月 UAV 斜め撮影の出来形計測実験（国総研） ・10月小規模現場に適したMG,LiDAR等のICT検証（国総研、国交省 ICT 導入協議会） ・11月 橋梁下部工等の出来形計測試験（精度確認等）（国総研） ・1月（貸付）橋梁・土工構造物の SfM による点群データ生成の精度検証（大学） ・2月（貸付）AI 配筋検査システム（鉄筋径、間隔、本数の自動計測）の精度検証（複数企業） ・3月（貸付）可搬型レーザースキャナーの精度検証（複数企業） ■施工データ管理、ICT プラットフォーム ・12月 施工データの API 連携に向けた ICT プラットフォームの試行環境構築のための検証用 As-Built データ取得（国総研、本省） ■自動・自律化施工 ・6月～ 自律施工技術基盤整備のための研究開発（土木研究所） ■その他 ・1～2月 環境アセス用の工事粉じん測定の実験試験（土木研究所）
デモ	・11月 自律施工技術の一般公開デモ（油圧ショベルとクローラダンプによる掘削・積込・運搬作業） 約150名参加（土木研究所） ・9月 人事院総裁、1月 大臣、政務官 本省 DX ルームからの建機遠隔操作
視察	・9月～ 日建連や土木学会を始め、関係業団体、民間企業等に建設 DX 実験フィールドを現地にて紹介（民間貸出可能なこともあわせて広報）（延べ20回程度実施）
イベント	・11月 「土木の日」イベントに子供向け遠隔操作体験を実施

2.2 土工フィールドの概要と活動工程

盛土や切土などの土工を実作業として行える設備として、約26,000㎡の敷地を確保し、遠隔施工や自動化・自律化施工の実験も行えるよう、フィールド全体でローカル5Gや各種wifiが使用可能である。無線基地局は複数配置し、ハンズオーバーも想定した実験、検証に利用することも可能である。



図-5 土工フィールドの全景と施設や建設機械

また、遠隔操作室、機械格納庫、屋根付きのストックヤード、複数の建設機械も用意している。これらの建設機械は今後も拡充する予定であり、それらの計画は、建設 DX アクションプランにて、図 6 の通り計画している。

表-2 フィールドの施設や建設機械

①通信施設 ■基地局 2 基 : ローカル 5G 及び無線 LAN アクセスポイント	
②実験用建設機械 (国総研) ■Caterpillar320 (写真) : バケット容量 0.8 m ³ , MC・遠隔操縦対応, キャビン上部に 4K カメラ 3 台 ■急傾斜・半水中対応形油圧ショベル (M525 スパイダー) : バケット容量 0.43 m ³	
③実験用建設機械 (土木研究所) ■日立建機 ZX-120 (写真) : バケット容量 0.5 m ³ , 遠隔操縦対応, キャビン上部に 4K カメラ 3 台 ■日立建機 ZX-35U : バケット容量 0.1 m ³ , 遠隔操縦対応 ■不整地運搬車 (IHI) (写真) : 積載量 11t, 遠隔操縦対応, 半水中仕様, キャビン上に 4K カメラ 3 台 ■不整地運搬車 (ヤンマー) : 積載量 2.5t	 
④遠隔操作室 ■遠隔操作室 : 約 63 m ² , 隣に扉・窓続きで建設機械格納庫	
⑤ストックヤード ■ストックヤード : 実験用土砂 1,500 m ³ ■作業用ホイールローダ : バケット容量 1.3 m ³	



図-6 フィールドを活用した標準類整備・研究の工程表

3. 急斜面・半水中対応形油圧ショベルの導入と活用に向けた取組み

3.1 スパイダーの導入経緯

表-2 の②に記載の「急傾斜・半水中対応形油圧ショベル」として、スイスのメンチムック社の M525X, 通称スパイダーを導入した。一般の油圧ショベルは、保有台数の半数を占め、幅広く活躍する一方で、急傾斜地での土砂崩落ヤードへの侵入や作業エリアでの安定した足場確保のための整地作業が課題となっている。他方スパイダーは、独立に上下水平方向に可動する 4 脚 4 輪の足回りとテレスコピック機構を持つアームを用い、最大 45 度の傾斜面登坂、高さ 2.8m の障害の乗り越えが可能であり、災害地での走破と支点確保・維持による作業安定が期待されている。

この機械との出会いは、2017 年にブタペストで開催された国際学会に参加した土木研究所のメンバーが、フィールドロボティクスの研究で知られる東京大学永谷特任教授から紹介頂いたマルコ準教授をスイス連邦工科大学チューリッヒ校に訪問した際、ibex と名付けられた研究プロジェクトで用いられていたのを確認したのが始まりである。

本フィールドの整備に伴い、災害対応に高い潜在力を持つ施工機械の活用検討や技術開発を行える環境が整ったことから、スパイダーの導入に向け、国内状況を確認し、令和 2 年までの国内導入実績が林業向け活用を企図した 6 機程度に留まっている状況ではあるが、メーカー公認オペレータを 4 名育成した企業の存在、当該企業や販売代理店からの研究への技術的支援の可能性が確認できたため、導入を決定した。



図-7 導入した M545X (左) と国内での施工事例 (右)

3.2 急傾斜・半水中対応型油圧ショベルの想定ユースケースと技術開発項目

活用のユースケースは、中越震災でも多発した河道閉塞箇所へのオフロード域内の走破と閉塞箇所の早期掘削を想定している。水深 1.9m 流速 3m/s での渡河能力があることも後押しとなる。

また、地震後の津波発生時の道路啓開で、高い視点を活かした現場指揮車兼作業車としての活用も、近畿地方整備局職員の視察時に示唆を受けている。

いずれのユースケースにおいても、搭乗及び遠隔操縦の両方が想定されるが、いずれにおいても接地状況の把握、姿勢維持機能の検討が必要である。これらの研究開発や、現場投入の検討のために、まずは現場環境シミュレーションへの載せ込みに向け、当該機械の 3D モデル化に取り組んでいる。

表-3 土木研究所にて検討している技術開発項目

①	土木研究所開発の OPERA への連動
②	操作モードセクター装備
③	自動姿勢維持機能
④	接地状況把握及び自動接地保持機能
⑤	遠隔操作機能（※日本国内向け対応）
⑥	シミュレータキャビンからの遠隔操作

本来、これらの機能開発は、メーカーにおいて為されるべきとの指摘もよく行われるが、スイス連邦工科大学チューリッヒ校が行った ibex にて⑥の機能が開発されている事例も示すとおり、ニーズの特殊性等を考慮した、ニーズ側での開発も必要であり、特に⑤をはじめ、日本での災害現場での活用に向け、土木研究所における開発が必要である。

3.4 フェーズフリー的活用に向けた主体や災害対応関係機関との連携

災害対策機械は、平時の稼働が期待出来るユースケースがない場合、政府以外の機関では保有困難となる。こういった観点は、フェーズフリーと呼ばれているが、3.1 で記載した国内のオペ所属会社等との平時活用の意見交換を行い、3.2 の技術開発項目での連携も検討を進める。

また、災害派遣に関し、国土交通省各地方整備局



図-8 千葉県消防本部関係者の視察・意見交換

の担当者とのスキーム整理・検討を行い、派遣可能な体制を確保した。

更に、自治体消防本部及び総務省消防庁消防研究センターの方々との意見交換を行い、人命救助のユースケースへの期待を頂いている。

多岐にわたる操縦パターンに対応可能なオペレータ育成については、災害時やフェーズフリー的な平常時使用を想定した関係機関との連携を図ることを計画している。

なお、令和 4 年 10 月には、千葉県消防本部や関係者のご協力のもと、第 43 回九都県市合同防災訓練（千葉県会場）での展示等も行い、当該機械の他機関での災害派遣に向けた活動も進めている。

4. まとめ

本稿では、国土交通省が取り組む建設 DX の同行とつくばの研究機関で整備した建設 DX 実験フィールドの報告と共に、当該フィールドに導入した災害対応向けショベルの活用に向けた取り組みについて報告するとともに、そのための検討や取り組みを通じ、以下の視点や活動の必要性等を確認した。

- (1) 常設型施工実験フィールドの有用性
- (2) 新たな技術シーズの開発動向調査における、「研究機関」による日常的な「探索」活動
- (3) 災害対応向け施工機械の平常時の活用を想定したユースケースの開発といったフェーズフリーの視点
- (4) (2) 及び (3) の実施、類似ユースケースへ関心を持つ機関や担い手との連携

謝辞

本活動に当たり、(株)サナース、(株)成島建設、(一社)千葉県総技能センター、千葉県、消防庁消防大学校消防研究センターの関係者の方々からの情報提供や意見交換などのご協力を頂いた。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラ分野のDXアクションプラン、2022.3
- 2) ロボット革命実現会議：建設ロボットに関する提言、2014.11
- 3) 国土交通省：建設DX実験フィールド始動！、2021.6
http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/kisya/journal/kisya20210628_2.pdf
- 4) Nakaeグループ成島建設：土木での実用例、2022.8 <http://nakae.info/narushima.html>
- 5) 国土交通省、経済産業省：建設機械動向調査
- 6) スイス連邦工科大学チューリッヒ校：ibex、2022.8 <https://ibex.ethz.ch/#team>

4. 港湾工事における基礎材投入施工支援システムの開発

東亜建設工業株式会社

○ 宮本 憲都

1. はじめに

港湾の水域施設や係留施設を外洋の厳しい気象・海象条件から防御する防波堤や、岸壁及び物揚場などの係留施設は、港湾施設の中でもっとも基本的なものである。これらの構造物は、本体にケーソン（一般的には鉄筋コンクリート製の中空の箱体）を用いたものが多い。ケーソンは通常、海底地盤の上にあらかじめ 10～500kg/個程度の捨石（以下、基礎材）で築造された基礎マウンド上に据付けられる（図-1）。

この基礎マウンドは、

- ① 基礎地盤の不陸を補正して構造物の安定を図る。
- ② 構造物の荷重を分散して均等に地盤に伝える。
- ③ 構造物に作用する波力をマウンド内部と基礎地盤の間の摩擦力で吸収する。
- ④ 波や潮流による構造物底面における地盤の洗堀を防止する。

などの目的で築造されるものである。築造の手順は、基礎材の投入を行ったあと、潜水土や特殊機械により均し作業を行い（図-2）、台形状にマウンドを形成する。

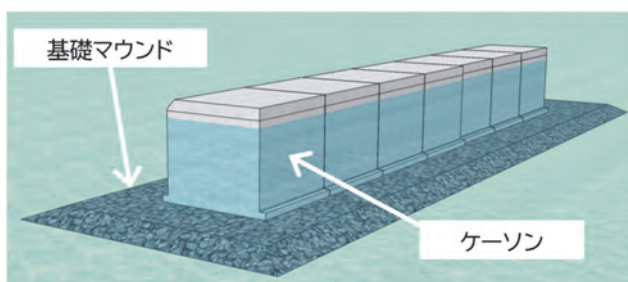


図-1 ケーソンおよび基礎マウンド



図-2 重錘を用いた基礎マウンド均し

基礎材の投入は、グラブバケット付旋回式クレーンを装備し船倉に基礎材を積み込み、現場まで運搬した後、投入を行う「ガット船」（図-3）と呼ばれる作業船を用いている。従来、基礎材を投入する位置は、目印旗を事前に設置し、投入管理者の指示のもと投入を行っており（図-4）、目印旗の設置・撤去には手間がかかるだけでなく、投入位置の指示については投入管理者の勘と経験に頼る部分があり、課題であった。また、基礎材の投入精度は、基礎マウンドの均し作業に影響を及ぼすことから、より正確に投入することが求められていた。更に使用するガット船は、固定することは難しく日々入れ替わることになるため、大掛かりな装置の取付けができないと言う課題もあった。

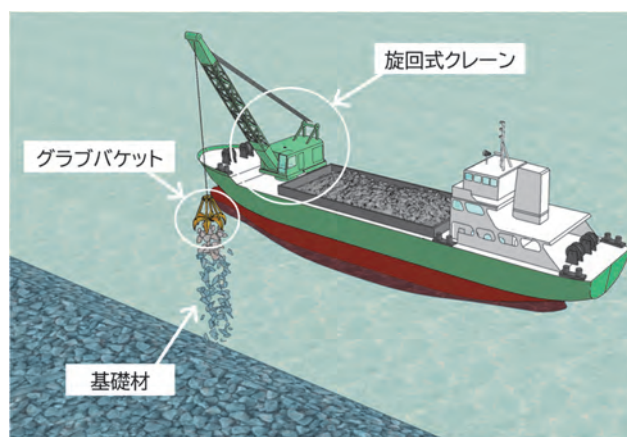


図-3 ガット船

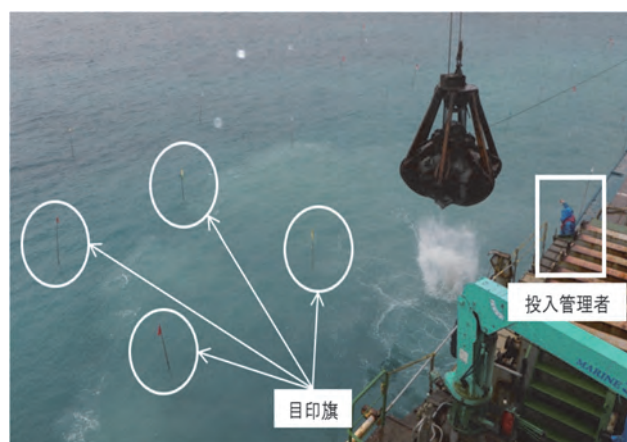


図-4 目印旗を使用した基礎材投入状況

これらの課題を解決するために、クレーンのブーム先端に GNSS アンテナ・受信機・バッテリー・無線通信機が一体となった小型の GNSS ユニット(以下、GNSS ユニット)をマグネットで取り付け、基礎材の投入位置を把握できるシステムを開発した。本システムは、カメラで撮影したグラブバケットの開閉を AI による画像認識技術を用いて検知し、投入履歴として自動で記録する機能を有しており、基礎材投入の更なる効率化が図れるようになった。

本稿では、本システムの概要及び導入効果について述べる。

2. 基礎材投入施工支援システムについて

2.1 開発概要

一般的にグラブバケットの位置を求めるため、クレーンのブームトップに GNSS アンテナを取付けることが考えられるが、GNSS アンテナとオペレーター室等に設置した機器の数 10m 間を配線する必要があり、その作業に 2 時間ほど要し、入れ替わりが多い(使用する船舶の固定化が難しい)ガット船においては施工サイクルへの影響が大きく、課題であった。また、投入するガット船が入れ替わった場合、どこまで投入しているのか分からないという課題もあった。そこで、納入された基礎材の検収作業(図-5)に要する 30 分以内にシステム機材設置作業を完了することを目標とし、投入位置及び履歴を画面上に表示することで、投入途中でガット船が入れ替わった場合においても、投入作業の進捗が一目で分かり、効率的かつ精度の高い投入を可能とするシステムの開発を目指した。



図-5 検収作業状況

2.2 システム構成

本システムを構成する主要機器は、GNSS ユニット、無線通信距離を延長するための無線中継 BOX、投入位置や進捗等を記憶・表示する PC である。

GNSS ユニットは振動に耐えることができるネオジウム磁石を使用した専用の架台(図-6)を使用することで、短時間でブーム先端への設置が可能となっている。無線中継 BOX はオペレーター室やブリッジに置かれたシステム PC と見通しのある場所に設置し、GNSS ユニットで取得した位置情報は、内蔵の無線通信機から発信され、無線中継 BOX を介してシステム PC へ伝送される。図-7 に機器配置イメージを示す。

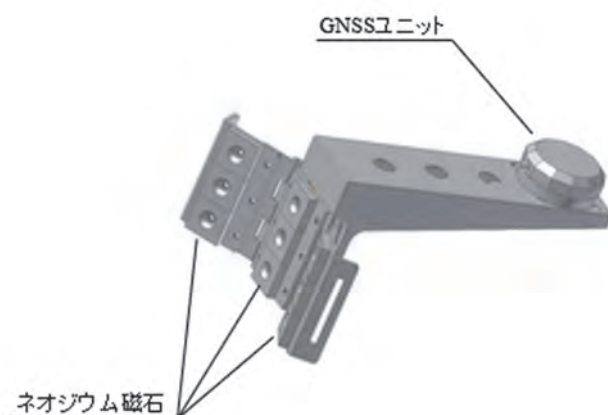


図-6 GNSS ユニット設置架台

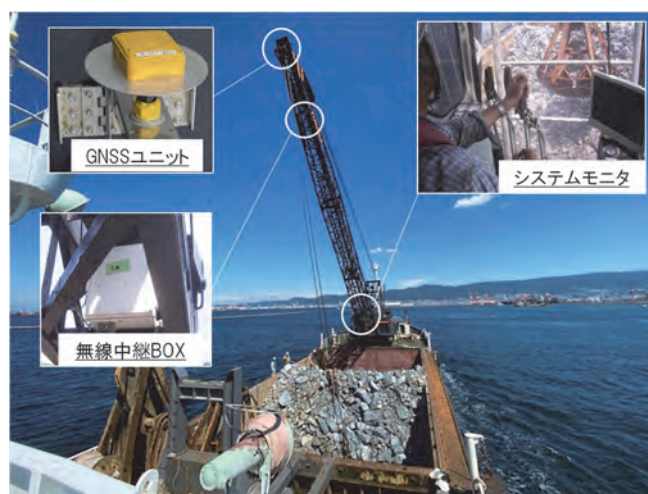


図-7 機器配置イメージ

2.3 投入位置管理

本システムの投入管理画面には、グラブバケットの現在位置と日毎の投入履歴が色分けされた状態で表示される。また、海底の 3 次元測量データを取り込み、設計値の差(不足高さ)をカラーコンタで表示可能である。カラーコンタと投入履歴を比較することで、設計値までの必要投入量(回数)を判断する目安となり、正確かつ効率的な投入が可能となる。更に、投入履歴から堆積形状を簡易的に予測する堆積形状予測機能も有している。図-8 に投入管理画面、図-9 に堆積形状予測画面を示す。

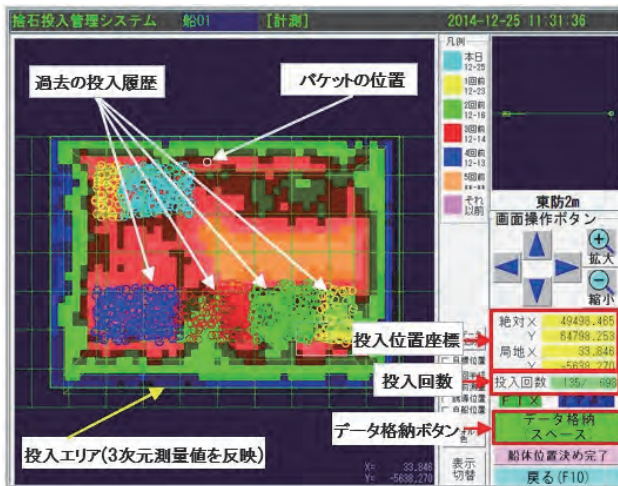


図-8 投入管理画面

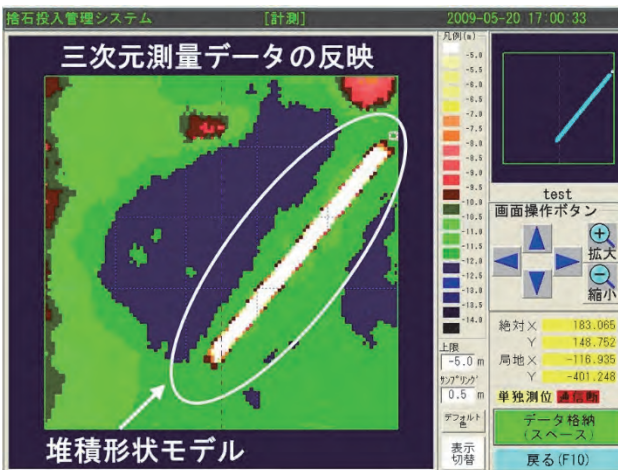


図-9 堆積形状予測画面

2.4 施工フロー

一般的な施工フローでは、目印旗の設置作業(数時間程度)が必要であり、また、荒天等により目印旗が流出した場合、再設置が必要となる。本システムを使用した場合、投入管理者および現場職員は施工エリア、投入位置および投入履歴をモニター画面で確認し、ガット船を誘導完了後即座に投入が可能であるため効率的である。図-10 に一般的な施工フローと本システムを使用した場合の施工フロー、図-11 に目印旗なしでの投入状況を示す。

2.5 システム機材設置・撤去時間

本システムは開発してから多くの現場で使用しているが、機材設置時間は2人で20分程度であり、基礎材の検収作業中に行っている。また、機材撤去は10分以内で行うことができ、ガット船の係留解除作業中に行っており、これにより施工サイクルに影響を与えず、円滑にシステムを運用できている。

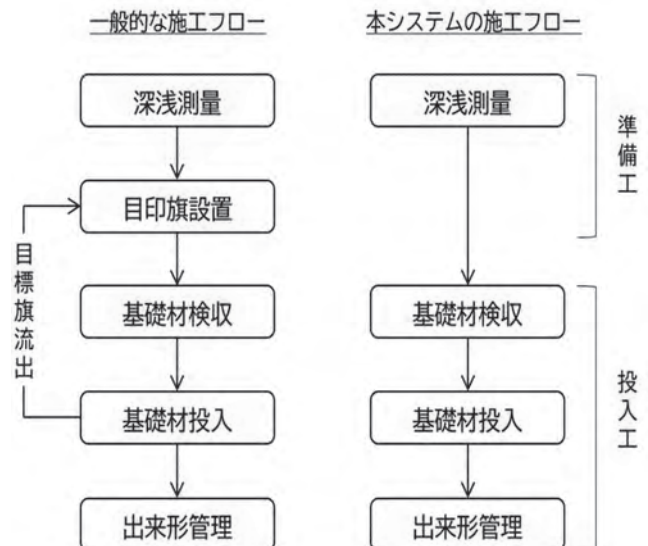


図-10 施工フロー



図-11 目印旗なしでの投入状況

2.6 AI グラブバケット開閉検知機能

本システムの開発当初は、現場職員や投入管理者が投入時にシステム PC のキー操作を行うことにより、投入位置の記録を行っていたが、キー操作を忘れて記録できないことがあった。そこで、AI 画像認識技術によってバケットの開閉検知を行い、自動で投入履歴を記録可能とした。AI でグラブバケットを認識させるための教師データには、数種類のバケットと様々な時間帯および天候での映像を用いているので、現在 95%以上の検知が可能である。実用上問題はないが、今後更なる強化学習で検知率を向上させる予定である。

なお、AI での取得したカメラ映像上でグラブバケットの開閉検知を行う範囲を設定可能であり、船倉での開閉は検知せず、投入範囲での開閉のみ検知を行うようになっている。

使用する機材は、従来システムにカメラと AI エ

ンジンを搭載した PC を投入作業が見通せる位置に設置するのみで、全てのシステム機材の設置を 30 分以内で終わることができる。「基礎材投入施工支援システム」にこの機能を付加することにより、基礎材の投入位置や投入回数の記憶、施工履歴の作成が自動化され、現場施工の更なる生産性向上を図ることができた。図-12 に人工知能 AI による投入(開閉)検知状況、図-13 に機器配置イメージを示す。



図-12 人工知能 AI による投入(開閉)検知状況

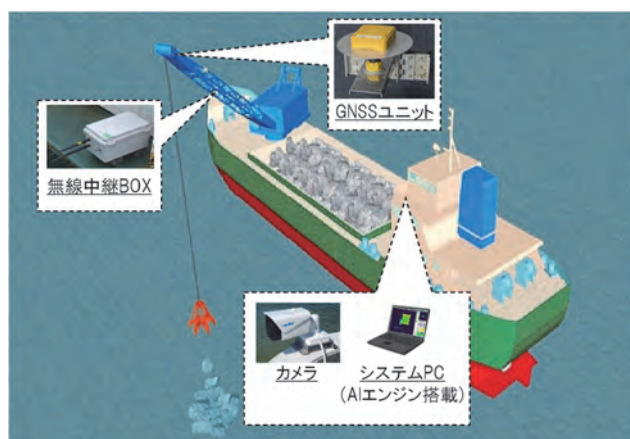


図-13 機器配置イメージ(AI 機能追加版)

3. まとめ

本システムの特長を以下に示す。

- ・準備作業(目印旗の設置)が不要となり、作業が効率化される。
- ・基礎材の投入位置および履歴が表示されるため、効率的かつ高精度に投入することができる。
- ・高精度な投入を行うことにより、基礎材の均し作業においても効率化が図れる。
- ・基礎材を検収している間にシステム機材の設置ができ、ガット船の係留解除中に撤去が可能であり、施工サイクルに影響しない。
- ・AI 画像認識技術によるバケットの開閉検知により自動で基礎材の投入位置を記録できる。

4. おわりに

当社は 2013 年に基礎材投入施工支援システムを開発し、数多くの現場に導入し、そこでの要望を踏まえ様々な改良を加えてきた。今回、AI 画像認識技術によるグラブバケット開閉検知機能を付加することにより更なる生産性向上を図ることができた。今後も様々な現場へ導入を重ね、現場の生産性向上に寄与すると共に、AI 検知精度向上、クラウド化による工事関係者間のリアルタイムなデータ共有および拡張現実(AR)を活用した投入エリア 3 次元表示などの機能拡充を行い、更なる効率化・省力化がれるシステム構築にも取り組んでいきたいと考えている。

5. トンネル切羽版重機搭載レーザ計測システムの開発

～ICT 技術を使ったトンネル切羽掘削面のあたり計測検証～

株式会社フジタ

株式会社フジタ

ライカジオシステムズ株式会社

○中島 勇気

浅沼 廉樹

浮田 真樹

1. はじめに

山岳トンネルでは掘削発破後に発生する切羽面の設計面より内側に突出した整形箇所（以下あたり箇所）について、作業員（誘導員）が切羽直下に立入り、目視にてあたり箇所を確認しあたり取り作業の指示を出していた。しかし、発破直後の切羽は大変危険であり、安全性の確保が課題となっていた。

近年では、これらの切羽作業に 3D レーザースキャナを用いた計測が行われているが、精密機器かつ操作に専門的な知識が必要なことや、盛り替えに時間を要するなどの難点があった。さらに、トンネル坑内においては GNSS（全球測位衛星システム）が使えない為、GNSS を利用した簡易な計測ができない等の制約条件があり、簡易に自己位置を計測できる技術開発が望まれていた。

切羽版重機搭載レーザ計測システム（以下切羽版重機 LS-TS）は、2 年前に開発した「重機搭載レーザ計測システム（インバート版）」を切羽計測用に改良したものである。

トンネル重機（ブレイカー）に計測ユニットを搭載して、切羽面を旋回しながらスキャンすることで、取得した点群データと設計データの差分をヒートマップで出力し、重機オペレータが作業中に単独で切羽のあたり箇所を判定を行い効率的なあたり取りが可能となるシステムである。

本論文では、この技術を国土交通省四国地方整備局発注の羽ノ浦トンネル工事の切羽面掘削工にて、検証した結果を報告する。

2. システムの概要

2.1 技術の概要

本システムは、トンネル内で運用可能なマシンガイダンス、切羽版重機 LS-TS、追尾式 TS で構成され、トンネル切羽部の 3D 計測を行う。システム構成を図-1 に示す。

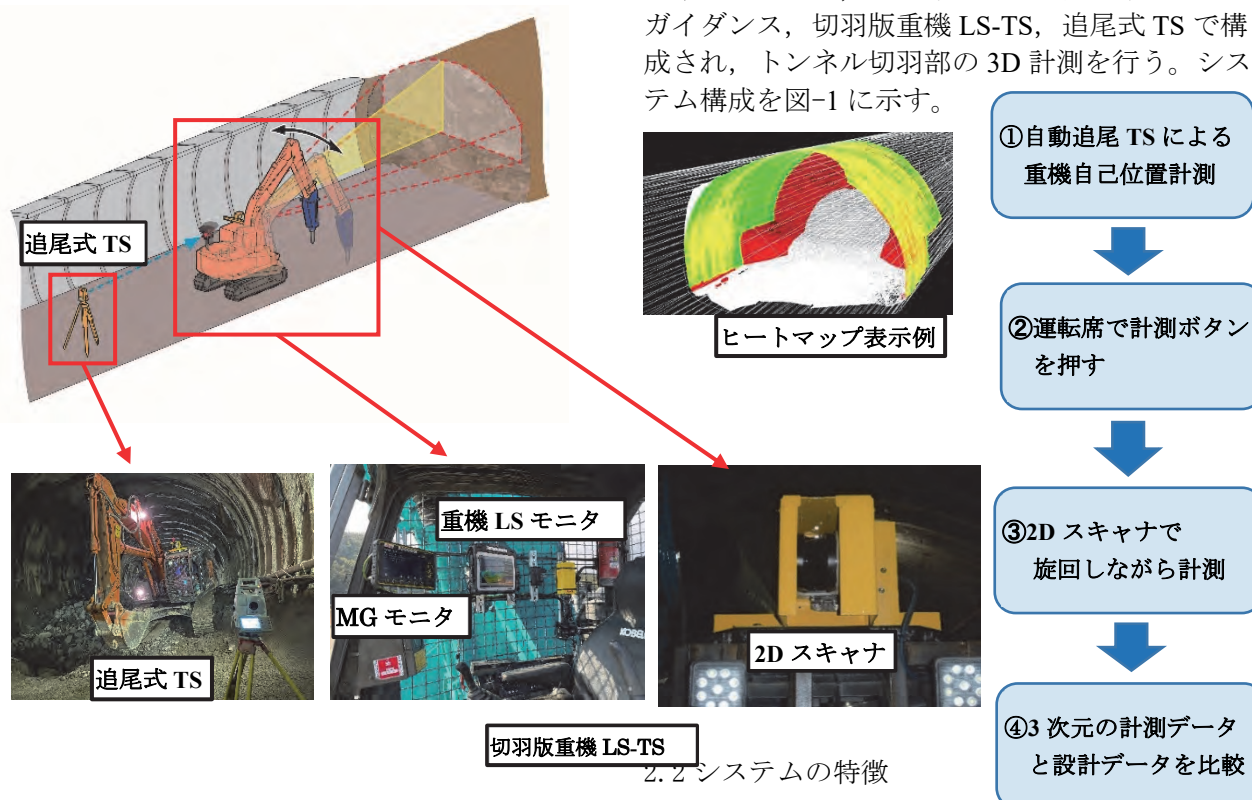


図-1 切羽版重機 LS-TS 構成及び計測フロー

本システムの特徴を以下に示す。

- GNSS が利用できないトンネル空間においても、明かり工事と同様に ICT 施工が適用可能。
- 計測器に屋外用の安価で汎用性が高い 2D のレーザースカナを用いて、重機を巡回させて計測することで容易に 3D データを取得。
- 重機に後付で搭載が可能。
- 重機が巡回スキャンする事で取得した掘削施工面の現状データを、3D 設計データと重ね合わせ、差分を色分けしたヒートマップを重機運転席の重機 LS モニタで計測結果閲覧可能。
- 計測から解析までを短時間で行い、測量作業が大幅に省力化され、生産性向上が可能。
- 切羽面への誘導員の立入が不要になり、安全性向上が可能。

3. 模擬トンネルでの実証実験

3.1 トンネル内環境対策

切羽版重機 LS-TS をトンネル坑内で運用するにあたり、あたり取りで発生するガラ飛散による各センサの損傷が考えられた。そのため、専用の架台及び防護ケースを製作し、防護措置を施した。図-2 に実際に使用した防護ケースを示す。

また、各センサがあたり取り作業の振動で破損することも考えられたため、防振措置（2D スキャナにはヘリカル防振器、傾斜計には防振ゴムを使用）を施した。

図-2 に実際に使用した防護ケース・防振措置を示す。

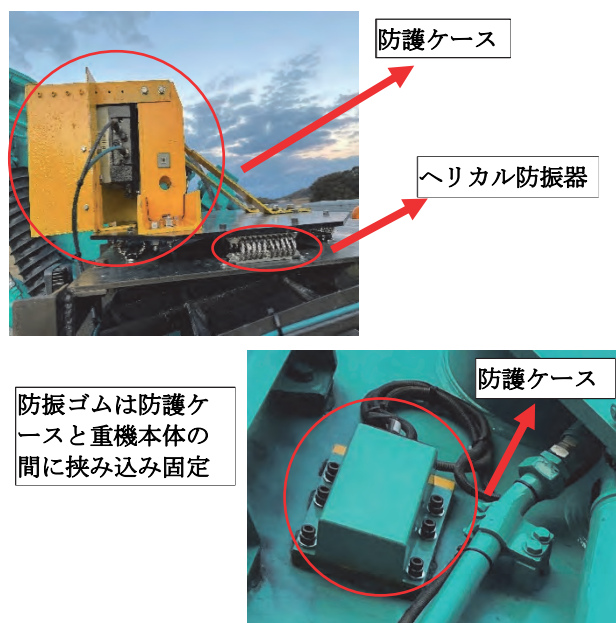


図-2 防護ケース,防振措置実施状況

3.2 模擬トンネル概要

実証実験を行う前に模擬トンネルで精度確認を行った。以下に模擬トンネルの概要を示す。

検証場所：埼玉県飯能市

株式会社フジタ 機械工場敷地内

検証期間：2021/3/2～2021/3/12

トンネル寸法：高さ 4.0[m]

幅 8.0[m]

3.3 模擬トンネルでの精度確認

精度確認試験は、「地上移動体搭載型レーザースカナを用いた出来形管理要領（土工編）（案）」（国土交通省）に準じた。模擬トンネル切羽面に 11 点の検証ターゲットを設置し、この検証点において、TS の計測値と、切羽版重機 LS-TS の計測値の差分が基準値 $\pm 50\text{mm}$ 以内であることを確認した。また重機の姿勢は逆傾斜にした条件での計測結果を表-1 に示す。



図-3 模擬トンネルにおける精度確認状況

表-1 模擬トンネルでの精度検証結果

傾斜 [度]	旋回 速度 [度/秒]	旋回 角度	旋回 方向	差分		
				ΔX	ΔY	ΔZ
逆傾斜部 [-10.9]	1未満	小	右	-0.014	-0.041	0.032
			左	-0.031	-0.040	0.031
		大	右	-0.002	-0.038	0.002
			左	-0.002	-0.034	-0.018
	1	小	右	-0.034	-0.029	-0.012
			左	-0.013	-0.010	-0.025
		大	右	-0.018	-0.041	-0.003
			左	0.010	-0.022	-0.001
	2	小	右	-0.048	-0.037	-0.030
			左	-0.001	-0.014	0.009
		大	右	-0.015	-0.047	0.001
			左	0.020	-0.022	0.008

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は ± 0.050 [m]以内)

この結果より切羽版重機 LS-TS が要求精度を満たしていることを確認した。

4 トンネル現場での実証実験

4.1 実証実験現場の概要

工事名 : 令和元-4 年度横断道
羽ノ浦トンネル工事
工事場所 : 徳島県小松島市
実施時期 : 1 回目 2022.1
2 回目 2022.4
発注者 : 国土交通省四国地方整備局

4.2 現場実証時のキャリブレーションの見直し

実証実験開始前に重機を変更した為精度確認試験を実施した。

以下に精度確認試験の条件を示す。

<条件 1>

本システムは、追尾式 TS で位置と方位, 2D スキャナで距離, 傾斜計によるピッチ, ロールの補正を行い各センサのデータを演算し 3 次元座標を求める仕組みである (図-5 参照)。計測距離が長距離にまるとレーザスポット径の拡大, 入射角が小さくなることから計測精度が低下する。要求精度の $\pm 50\text{mm}$ に対して最大計測可能距離 10.0m 以内とする。

<条件 2>

本システムは、バックホウが走行せずに旋回する事により 3 次元座標が得られる (図-4 参照)。出来形計測に必要な点群密度 (0.01m² に 1 点) に対して, 旋回速度は 4 度/秒以内とする。

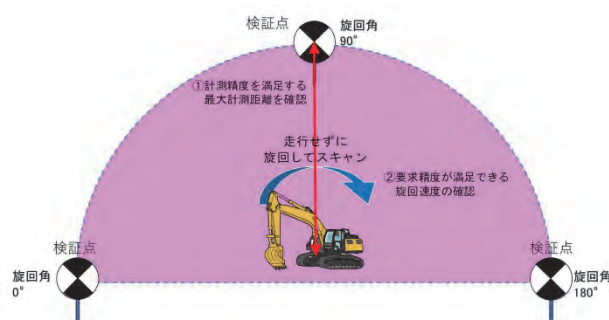


図-4 キャリブレーション確認範囲

現場実証時の精度確認において, 上記キャリブレーション確認範囲による試験を実施したところ当初は基準値を満足する精度が得られない結果となった。

この原因を調査したところ, 重機旋回時の左右区分におけるデータ数値の差異が大きいことから, 重機の位置計測を行う追尾式 TS の応答速度遅延が重機旋回の左右差で影響が発生していることが判明した (図-6 参照)。

そこでセンサ類を後付けで設置した後に行うキャリブレーション時に行うパラメータの設定に左右旋回時の個別のパラメータ数値を入力できるようアルゴリズムを修正した。本改良にもとづく精度確認試験の結果を表-3 に示す。この結果よりパラメータ設定で TS 応答速度遅延の問題が解消できることを実証した。

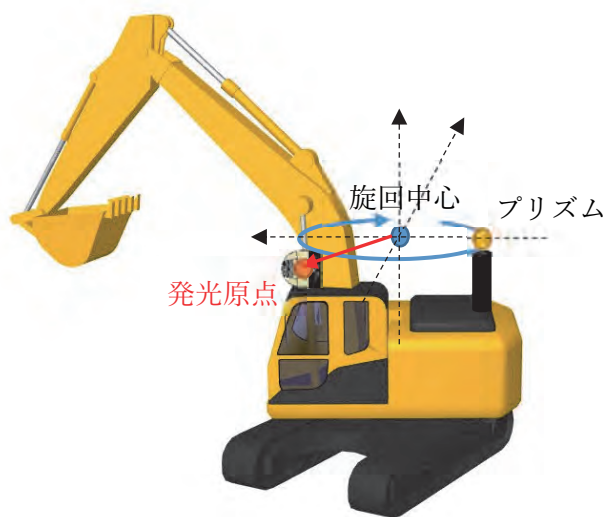


図-5 重機 LS-TS における重機姿勢の求め方

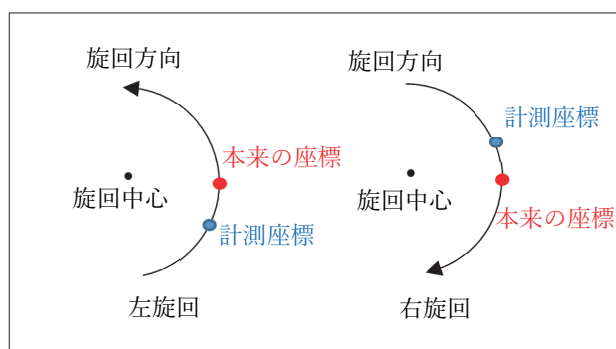


図-6 TSの応答速度の遅延

表-3 トンネル坑内坑口部での検証結果

計測位置 [度]	旋回 速度 [度/秒]	旋回 方向	差分の平均		
			ΔX	ΔY	ΔZ
坑口部 [0]	1	左	-0.019	-0.011	-0.009
		右	0.027	-0.002	0.003
	2	左	0.002	-0.009	-0.005
		右	-0.007	-0.021	0.026
	4	左	0.028	-0.002	0.014
		右	-0.008	-0.016	0.013

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は ± 0.050 [m]以内)

4.3 トンネル切羽での精度検証結果

前述キャリブレーションの見直しにより高精度が確認されたため、切羽計測での精度確認試験を実施した結果を表-4に示す。

表-4 トンネル切羽部での検証結果

計測位置 [度]	旋回 速度 [度/秒]	旋回 方向	差分の平均		
			ΔX	ΔY	ΔZ
傾斜部 [6]	1	左	-0.013	0.044	-0.018
		右	-0.040	-0.006	-0.011
	2	左	-0.025	0.039	-0.020
		右	-0.021	0.016	-0.005
	4	左	-0.045	0.014	-0.009
		右	-0.003	0.042	0.007

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は ± 0.050 [m]以内)

この結果よりすべての計測値が $\pm 50\text{mm}$ 以内に収まり切羽版重機 LS-TS の精度確認を行うことができた。

5. 作業時間の短縮化

作業員（誘導員）が切羽直下に立入り、目視にてあたり箇所を確認し作業指示を出していた従来の確認方法から、重機オペレータが自ら作業しながら出来形の良否を確認できるようになり、整形作業が約 22%短縮された（表-5 参照）。

表-5 作業時間の比較

作業内容	従来方法	切羽版重機 LS-TS
あたり取り作業[min]	30.0	30.0
余掘り確認[min]	15.0	5.0
合計時間[min]	45.0	35.0

6. 今後の課題

6.1 精度の向上

今回の実証実験では「国土交通省 地上移動体搭載型レーザスキャナを用いた出来形管理要領（土工編）（案）」に準拠して精度確認を行ったが、「地上型（定置式）レーザスキャナを用いた出来形管理」では $\pm 5\text{mm}$ の測定精度が求められるため、さらなる精度向上が必要である。そのため1例として検証点を改良する事が挙げられる。これは 2D スキャナから放たれるレーザ光が検証点に反射して、受光器に返ってくる具合が、センサ認識としての質に影響を及ぼしている可能性がある。そのため、異なる旋回方向や旋回速度でも同様に反射レーザ光を受光できる検証点の開発が必要である。

6.2 出来形帳票システム

今後はヒートマップ表示を行うソフトと連動して余掘り量数値や覆工コンクリート巻厚確認のための出来形帳票として出力できるソフトの開発も視野に入れて検証・開発を行う（図-7 参照）。

重機LS-TS 出来形表示
出来形帳票 イメージ図-1

①断面図

表示例-1

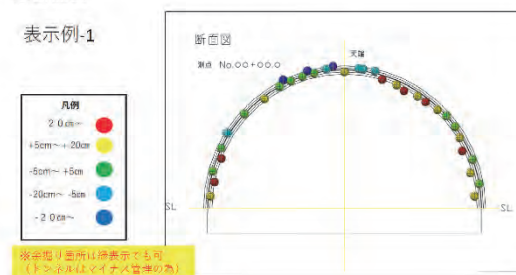


図-7 ヒートマップ表示例

7. おわりに

切羽版重機 LS-TS によるあたり箇所の 3D 計測とヒートマップ化を実現することで、従来の誘導員による目視確認と比較して誘導員が不要となるため安全性の向上を図ることが可能である。

また、あたり箇所の判定を重機オペレータ単独で行えるため省人化による生産性向上を図ることが可能である。

本技術が建設現場への ICT 導入に対する更なる普及促進につながれば幸いである。

本技術の開発と現場試行にあたり、多岐にわたりご指導を賜りました関係者各位に深く感謝を申し上げます。

6. i-Construction における UAV グリーンレーザ計測の適用性検証

安藤ハザマ ○ 澤城 光二郎
安藤ハザマ 黒台 昌弘

1. はじめに

i-Construction の取り組みの一つである「ICT の全面的な活用」では、3次元計測技術を用いた施工管理に必要な事項が出来形管理要領に¹⁾まとめられている。

レーザスキャナ(LS)による3次元計測では、地上型レーザスキャナ(TLS)や地上移動体搭載型LS、無人航空機搭載型LS(UAVレーザ)などが要領化されており、土工や舗装工、トンネル工など複数の工種で汎用的に活用されている。

一方で、これらのLSには近赤外の波長帯のレーザ光が使用されており、その特性上、水中や濡れた面などを計測できないという課題を抱えているため、河川や沿岸部に近接する工事での活用は限定的であった。

一方で、グリーンレーザスキャナ計測は図-1に示すように水中を通過する緑色の波長帯を持つレーザ光を使用することで、水域と陸域の地形データを連続的に計測することが可能な計測技術である²⁾。これまでの水域部での工事測量では、水際にはトータルステーション(TS)測量を、人が立ち入れない水深では深浅測量が多用されてきたが、UAVに搭載したグリーンレーザ(UAVグリーンレーザ)で広範囲を一度に計測することができれば、作業が効率化できると考えられる。

しかし、グリーンレーザ計測は調査測量分野における航空レーザ測深(ALB)で活用が進んでいるものの³⁾、建設分野における導入事例がほとんどなく、工事現場の起工測量や出来形測量に適用できる計測条件や精度の評価が十分に行われていない。

そこで、筆者らは、図-2に示すような陸域(護岸、護床ブロック、堰本体、干上がった河床、河川

敷など)と水域(河道、瀬部、水たまりなど)が混在する広範囲な工事現場での地形測量において、UAVグリーンレーザ計測が国土交通省の進めるi-Constructionにおける起工測量や出来形測量に適用できる精度を有するかについて検証した。

2. UAV グリーンレーザ計測に求められること

上記のような環境でUAVグリーンレーザを運用するためには、既にICT活用工事において要領化されているUAV近赤外レーザ計測を比較対象として、起工測量や出来形測量におけるUAVグリーンレーザの計測可能条件や実測精度などを明らかにしておく必要がある。

具体的には、①陸域部分において近赤外レーザ計測と同等の計測性能を保有していること、②水域部での計測が可能な水深や濁りの程度がわかっていること、③水域部においてi-Constructionの管理基準値¹⁾である $\pm 0.1\text{m}$ (起工測量)や $\pm 0.05\text{m}$ (出来形測量)を満足することなどである。本稿ではこれらの検証項目について、UAVグリーンレーザの計測性能の検証結果を報告する。

3. 実験概要

本実験では図-3に示す堰堤から上流側に50m、下流側に100mのエリアを検証範囲とし、UAVレーザで取得した3次元点群を現場の座標と整合させるための調整用基準点を4点、取得データの座標精度を確認するための精度検証点を7点設置した。各点の配置はi-Constructionの管理基準¹⁾に準拠し、調整用基準点と精度検証点はともにエリア面積に対しての必要数以上を設けた。

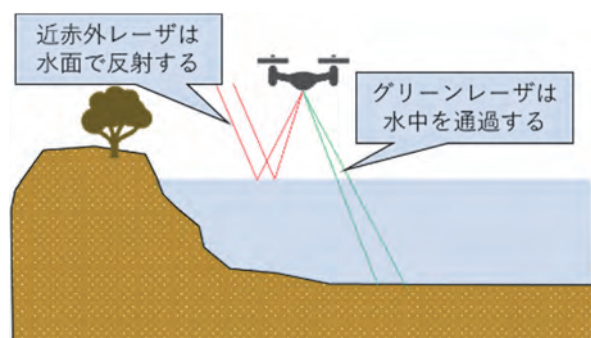


図-1 グリーンレーザ計測の特徴



図-2 実証した現場のUAV写真

3.1 使用機械と飛行条件

本実験で使用した機材の一覧を表-1 に示し、UAV グリーンレーザの外観写真を図-4 に示す。条件を等しくするため一つの UAV の機体にグリーンレーザと近赤外レーザを乗せ換えて搭載し、グリーンレーザは計 3 回、近赤外レーザは 1 回のみ飛行計測を実施した。また、調整用基準点と検証点の測量は VRS-GNSS を用いて実施した。

それぞれの飛行諸元を表-2 に示す。近赤外レーザに比べてグリーンレーザは、フットプリントが大きく有効計測角が小さい性質があるため⁴⁾、同等の点密度のデータを取得するために飛行高度を低くし、計測ライン間隔を狭くした。

本実験での計測時間は近赤外レーザが 18 分でエリア全域を計測できたのに対してグリーンレーザでは 45 分と約 2.5 倍の時間を要した。この点はグリーンレーザを活用する際に留意する事項である。



図-3 実験エリアと調整用基準点・検証点配

表-1 使用機器

使用機器			
機器	型式	メーカー	用途
UAV	MATRICE 600PRO	DJI	エリア飛行
近赤外線 レーザスキャナ	Vx-20+	YellowScan	点群計測
グリーン レーザスキャナ	EDGE LiDAR	ASTRALite	点群計測
VRS-GNSS	HiperHR	トプコン	精度検証データ
	HX-CHX600A	Harxon	精度検証データ



図-4 UAV グリーンレーザ

3.2 対象河川の計測条件

グリーンレーザ計測を行うにあたり、事前に対象河川の透明度を評価した。図-5 のように濁度の単位の一つである NTU を用いた評価を行ったところ、計測値は 0.48NTU となり、ここから算出される理論上の最大計測可能水深は 10m という結果を得た⁵⁾。今回の対象範囲は最深部でも 1.0m 程度であることから、対象河川がグリーンレーザ計測を行う上で、十分な透明度であることを確認した。

また、計測当時の現場の空撮画像と同箇所の点群データを図-6 に示す。図中の四角枠で示した箇所は堰の取水口であり流れが急であるため、水面に白波が立っている。UAV グリーンレーザ計測では、図中の丸枠箇所のように点群データが欠落するため注意が必要である。

表-2 飛行諸元

飛行諸元	近赤外レーザ	グリーンレーザ
飛行対地高度(m)	60	30
飛行速度(km/h)	11	15
サイドラップ(%)	30	30
コース間隔(m)	119	11
有効計測角(度)	55×2=110	15×2=30
有効計測幅(m)	171	16
計測点密度(cm) (進行方向/横断方向)	10.2/7.2	6.0/35.3
計測時間(分)	18	45

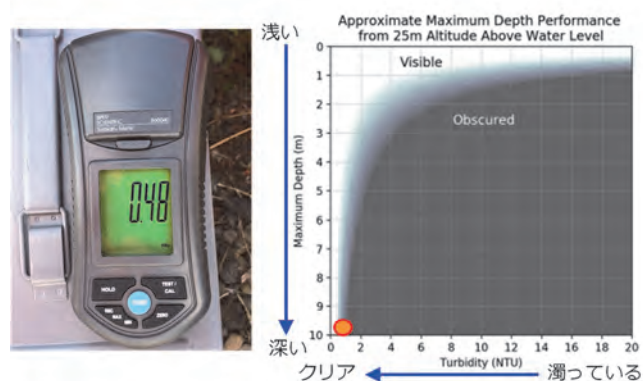


図-5 濁度計による透明度評価

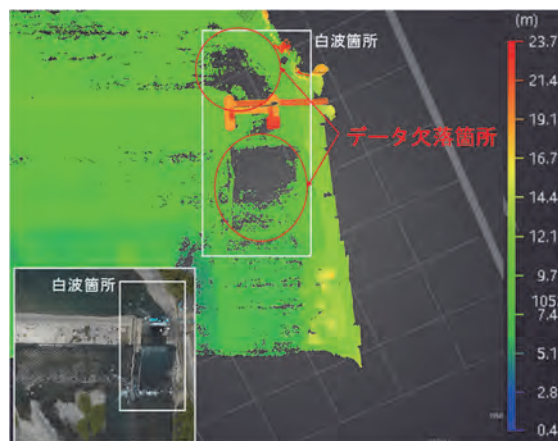


図-6 白波箇所の画像と点群データ

3.3 検証項目

1) 陸域におけるグリーンレーザ計測精度

①検証点の座標精度

GNSS 計測で取得した各検証点の座標値を基準データとし、近赤外レーザ計測、グリーンレーザ計測それぞれの3次元点群から算出した検証点座標との較差からXYZの座標精度を算出した。

②任意面の標高精度

図-7、図-8に示すように、実験エリア内の堰堤、水の干上がった川岸に長方形の検証面を設定し、5cmメッシュごとに近赤外レーザに対するグリーンレーザの標高差分を算出した。

2) 水域におけるグリーンレーザ計測精度

①グリーンレーザ点群の標高精度

UAV グリーンレーザ計測は計3回実施し各データについて検証を行った。河床におけるグリーンレーザ点群の標高精度検証の基準用データとして、VRS-GNSSによる多点計測を実施した。既設堰堤上流部・下流部それぞれで図-9のように河床にポールを立てて図-10に示す計88点の座標値を基準データとして取得した。このGNSS計測点の中心から直径15cmの領域円内に存在するグリーンレーザ点群の標高の平均値とGNSS計測値との較差を算出し標高精度を評価した。

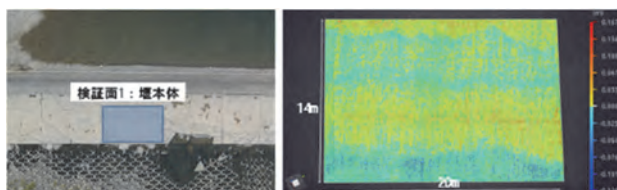


図-7 標高差分の検証面とヒートマップ(堰本体)

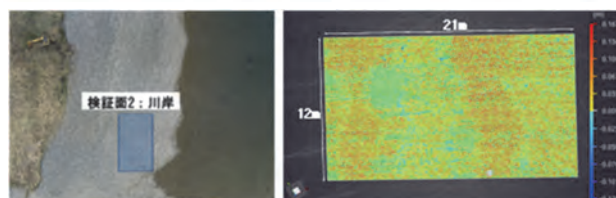


図-8 標高差分の検証面とヒートマップ(川岸)



図-9 VRS-GNSS 計測状況

②標高精度と水深の相関関係

GNSS 計測時に同地点を棒スケールで計測した水深の実測値と、①の検証で算出した標高精度の関係をプロットし、水深によってグリーンレーザ点群の精度に影響があるか検証を行った。

4. 実験結果

4.1 陸域におけるグリーンレーザ計測精度

①検証点の座標精度

検証点座標の精度検証結果を表-3に示す。グリーンレーザの座標精度は近赤外レーザと同様に i-Construction の出来形管理基準(±0.05m)を満足することを確認した。

②任意面の標高精度

各メッシュの標高較差の平均値の結果は表-4に示す通りであり、堰本体のようなコンクリートで被覆された面と、川岸の砂利で不陸がある面のいずれも出来形管理基準(±0.05m)を満足することが確認できた。

4.2 水域におけるグリーンレーザ計測精度

①グリーンレーザ点群の標高精度

計測回ごとの上流部、下流部それぞれの計測点におけるグリーンレーザ点群とGNSS計測の標高



図-10 水域の標高精度検証位置

表-3 陸域の検証点精度の結果

(m)	グリーンレーザ1回目			グリーンレーザ2回目		
	X	Y	Z	X	Y	Z
平均	0.011	0.007	0.032	0.015	0.031	0.010
標準偏差	0.010	0.005	0.019	0.011	0.017	0.011
(m)	グリーンレーザ3回目			近赤外レーザ		
	X	Y	Z	X	Y	Z
平均	0.010	0.014	0.032	0.018	0.007	0.013
標準偏差	0.009	0.010	0.011	0.014	0.007	0.012

表-4 陸域任意面の標高精度の結果

(m)	堰本体1回目	堰本体2回目	堰本体3回目
平均	-0.001	0.023	0.047
標準偏差	0.024	0.012	0.015
最大	0.167	0.187	0.113
最小	-0.126	-0.040	-0.019
(m)	川岸1回目	川岸2回目	川岸3回目
平均	0.020	0.008	-0.021
標準偏差	0.014	0.022	0.017
最大	0.078	0.143	0.050
最小	-0.062	-0.088	-0.148

較差の平均値、標準偏差、最大値、最小値を整理したものを表-5に示す。

上流部、下流部ともに標高較差の平均値は、i-Constructionの起工測量の要求精度 $\pm 0.1\text{m}$ 以内を満足する一方で、出来形測量の管理基準 $\pm 0.05\text{m}$ は一部満足しない結果となった。これは、水域での計測ではレーザ光の屈折や散乱の影響があることや、水中の物質によるノイズの増加が要因として考えられる⁶⁾。

②標高精度と水深の相関関係

計3回の計測で取得した標高較差の全計測点データとその水深の関係を図-11に示す。計測点の中で最大水深は1.1m、最小水深は0.03mであった。この範囲内において水深が増加することによる標高精度の変化については、図中の線形近似直線が示すように相関関係はみられない結果となった。

5. まとめ

本実験で実施した陸域および水域でのグリーンレーザの精度検証結果を以下にまとめる。

1) 陸域におけるグリーンレーザ計測精度

検証点の座標精度と任意面の標高精度の双方でi-Constructionの出来形測量に適用可能な精度を有することを確認した。また、砂利のような不陸のある場所であっても近赤外レーザと同様の精度で計測可能であったことから、土工事など地形データとして利用できることがわかった。

2) 水域におけるグリーンレーザ計測精度

今回のような水深1m程度の透明度の高い河川において、取得した河床点群データの標高精度が、i-Constructionの起工測量管理基準 $\pm 0.1\text{mm}$ に近い水準の精度を示したことから、UAVグリーンレーザ計測の河川工事への適用性を確認することができた。また、水深1mの範囲内であれば、標高精度に対する水深の影響を考慮する必要がないことも確認できた。

以上の結果から水深1m程度の条件において、UAVグリーンレーザ計測で取得した陸域と水域が一体となった地形データは、i-Constructionの起工測量に適用可能な精度を有することを確認した。また、白波などで荒れた状態の水面では、その直下の地形を計測できないことも確認した。

一方で今回の対象河川は水深が浅く透明度が高いという好条件な現場であったため、今後は異なる現場条件での更なる追加検証を行うとともに、河川工事やダム工事などの具体的な現場施工管理の導入へ繋げていきたい。

表-5 水域の標高精度の結果

(m)	グリーンレーザ1回目		グリーンレーザ2回目		グリーンレーザ3回目	
	上流部	下流部	上流部	下流部	上流部	下流部
平均値	-0.049	-0.038	-0.069	-0.068	-0.024	-0.054
標準偏差	0.038	0.043	0.053	0.072	0.030	0.097
最大値	0.031	0.057	0.043	0.113	0.054	0.129
最小値	-0.121	-0.174	-0.231	-0.312	-0.095	-0.387

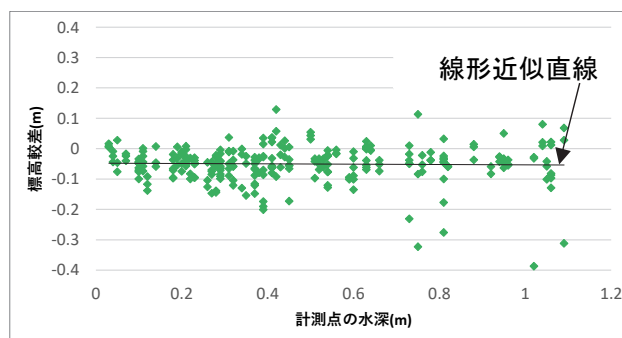


図-11 水域の標高精度と水深の関係

参考文献

- 1) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）R3.3
- 2) 国土交通省：「陸上・水中レーザドローン」現場実装へ H 31.2 <https://www.mlit.go.jp/common/001271580.pdf> (Accessed 2022.3.28)
- 3) 中村圭吾，福岡浩史，小川善史，山本一浩：グリーンレーザ（ALB）による河川測量とその活用，RIVER FRONT Vol.84，pp.16-19，2017.3
- 4) 日本測量調査技術協会ALBサブワーキング：「ALBの安全対策とフットプリントの影響について」H 30.2 https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/lp_kentoukai/dai02kai/dai02kai_siryous3.pdf (Accessed 2022.8.4)
- 5) (株) ビジュアル・システムズHP：<https://visualsystems.jp/sensing/astraliteedgelidar.html> (Accessed 2022.3.28)
- 6) 堺 浩一：UAV グリーンレーザ計測による河川管理の適用検討，岡山大学大学院環境生命科学研究科博士論文，2022.3
- 7) 黒台昌弘，澤城光二郎，荻山直将，小松良光：UAV グリーンレーザの陸域部における計測精度検証，土木学会第77回年次学術講演会 2022.9 発表予定
- 8) 澤城光二郎，黒台昌弘，荻山直将，小松良光：河川工事の水域部におけるUAVグリーンレーザ計測の精度検証，土木学会第77回年次学術講演会 2022.9 発表予定

7. 大型プレキャストブロック据付の自動化施工

自動運転技術を災害現場の実施工に導入

鹿島建設株式会社
鹿島建設株式会社
鹿島建設株式会社

○ 大原 伸浩
土井原 美桜
増村 浩一

1. はじめに

赤谷 3 号砂防堰堤工事では、斜面崩落による二次災害を防止するため、出水期の施工は遠隔操作による無人化施工を計画していた。しかし、高い精度が要求されるプレキャストブロックの据付作業は、遠隔操作による作業では難易度が非常に高く、疲労による生産性の低下や作業ミスが予想された。この課題に対し、ブロック据付作業の繰り返し動作を自動化する次世代の建設生産システムの実現を目指した。

プレキャストブロック据付作業はキャリーダンプで運搬したプレキャストブロックの荷取り動作、据付位置までの旋回動作、据付位置への据付動作からなる。キャリーダンプ上のプレキャストブロック位置や据付予定位置の計測には AR (拡張現実) 技術を応用した画像解析による測量手法「AR 測量」を用い、汎用バックホウの自動制御にはキャビン搭載型ロボットを採用した。その結果、日本で初めてプレキャストブロック据付の自動化施工を実現し、高精度な据付と生産性向上 (遠隔操作施工と比較) を達成した。自動化施工の概要と実績について紹介する。

2. 開発の概要

赤谷 3 号砂防堰堤工事は、平成 23 年に大規模土砂崩壊が発生した奈良県五條市赤谷地区の砂防事業のうち、崩落斜面直下に砂防堰堤を構築するものである (写真-1 参照)。崩落斜面は平成 23 年以降も出水期に再崩落を繰り返しており、出水期にあたる 6 月 15 日から 10 月 31 日は二次災害防止のため、施工エリアは立入禁止となり無人化施工を前提条件としている。自動運転は次のように

- ・同じ動作を繰り返す作業は得意
- ・オペレータの技能によらず一定品質を確保
- ・長時間連続して一定速度による作業が可能

といった特徴があり、本工事では作業の特性に応じて部分的に自動運転を導入することによって工期やコストの低減、生産性と品質の向上を目指した。

堰堤の断面図を図-1 に示す。3 号砂防堰堤の施工は、大きく以下の 3 作業に分けられる。

- ・下流側のプレキャストブロック据付
- ・内部材 (ソイルセメント) と土砂型枠の盛立て
- ・上流側の土砂埋め戻し

これらのうち、高い作業精度を必要とするプレキャストブロックの据付と、内部材・土砂型枠の盛立てを自動化した。ただし、走行動作は遠隔操作でも比較的容易なため、プレキャストブロックやソイルセメントを運搬するキャリーダンプの走行は遠隔操作によって行った。本報文では、プレキャストブロック据付の自動化について述べる。



写真-1 災害発生直後の状況と堰堤施工場所

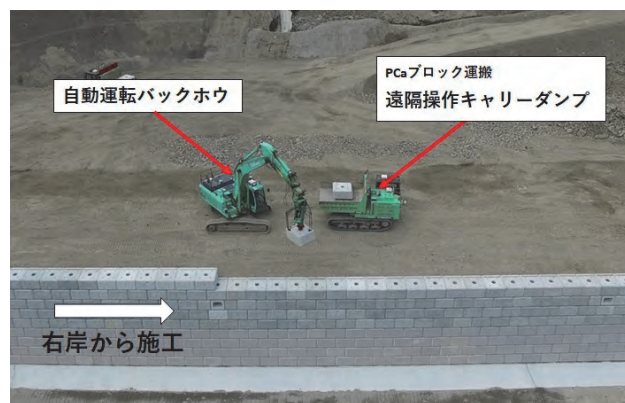


写真-2 自動化施工状況 (下流上空より)

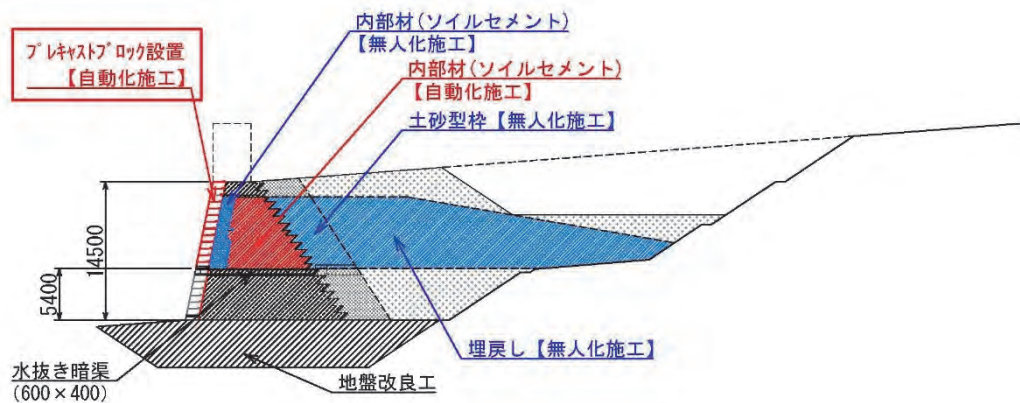


図-1 3号砂防堰堤標準断面図

3. 自動化施工の概要

プレキャストブロック(以下、ブロック)の据付は、専用アタッチメントを搭載したバックホウによる自動化施工により行った(写真-2 参照)。自動化施工の対象となるブロックは、出水期に施工する無人化施工対象の8段目から20段目の合計824個である。ブロックの据付は1段ずつ、右岸側から順に行い、ブロック1段を据え付けるごとにブロック天端まで内部材の盛り立てを行った。

3.1 自動把持動作

ブロックを据え付けるためには、キャリйдンプで搬入したブロックを把持する必要がある。把持対象ブロックの位置の計測には後述するARマーカとカメラを用いた測量手法(「AR測量」と呼称する)を導入した。ブロックの搬入は、遠隔操作のキャリйдンプをオペレータがカメラ画像を見ながら操作し、自動運転バックホウ付近の任意の場所に停止させた。

3.2 自動据付動作

据付動作の模式図を図-2に示す。自動据付は直前に据え付けた隣接ブロックの位置を計測し、その位置を基準に把持中のブロックの据付目標位置を算出した。ブロックの位置検出にも、AR測量を用いた。

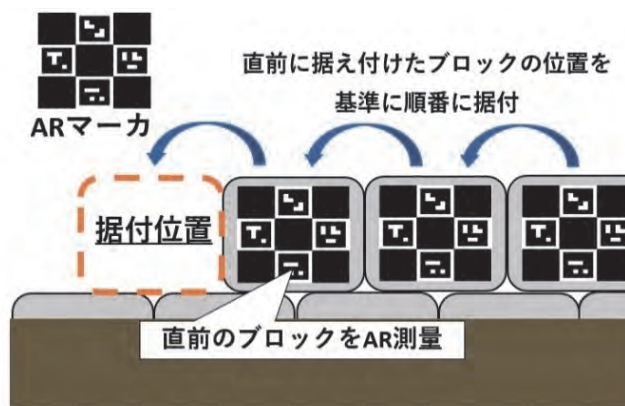


図-2 据付動作模式図

3.3 ブロックと専用アタッチメント

自動運転に最適なブロック(写真-3)と専用アタッチメント(写真-4)を製作した。ブロック寸法は、幅1,250mm×奥行1,360mm×高さ700mm、質量2,550kgである。ブロックの上部にはφ270mmのテーパ構造の把持孔を設け、アタッチメントをこの把持孔に挿入して先端を開閉することによって把持と把持開放を行った。さらに、据付精度の向上のため、ブロックの上流側にはかまぼこ型の嵌合構造を設けた。

アタッチメントは、動作の単純化のために重機のアーム先端にピン構造により取付け、常に鉛直下向きとなる構造とした。また、据付時にブロックの回転角度を調整する必要があるため、回転機能を備えた。

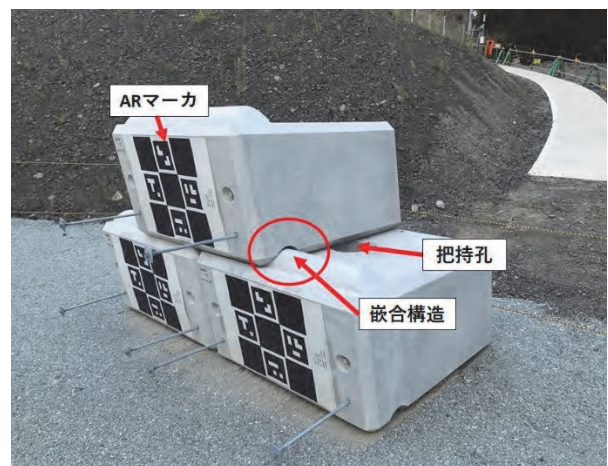


写真-3 プレキャストブロック



写真-4 専用アタッチメント

3.4 操作室

自動運転の監視・指示は、立入禁止エリア外に設けた操作室から行った。現場内には遠隔・自動化施工用に定置式カメラと移動式カメラ車を配置して、様々な角度から施工箇所を撮影できるようにし、操作室(写真-5 参照)に設置したモニターでカメラ画像を確認できるようにした。自動運転においてもカメラ映像を用いて、オペレータが重機や施工箇所を確認しながら自動運転の監視を行った。



写真-5 操作室状況

4. 自動運転要素技術

自動運転を構成する要素技術を述べる。

4.1 AR 測量

自動運転においては、把持対象ブロックの位置と据付目標位置を計測する必要があるが、合計800個以上のブロックすべてにGNSS受信機やプリズ

ム等を取付けることは現実的ではない。そこで、安価に多数のブロックを計測する方法として、紙に印刷したARマーカとカメラを用いて測量を行う手法を採用した。これを「AR測量」と呼称する。

(1) 把持AR測量の特徴

AR(拡張現実)の技術において、カメラ画像の上にCG画像を重ねる場合には、ARマーカ画像を認識して位置と向きを検出する。AR測量は、この機能を測量に応用したものである。これによりARマーカ中心の3次元座標(X,Y,Z)と面の向き(yaw, roll, pitch)を計測することができる。ARマーカの画像認識には、オープンソースソフトウェアが用意されており、今回はOpenCVを使用した。

座標・角度はカメラ固有の値による相対座標として出力されるため、任意の座標系で使用するには、キャリブレーションと座標変換を必要とする。本システムでは、重機の旋回中心を原点とする相対座標(重機座標)に変換して使用した。

また、ARマーカ面の向きの情報を活用することで、マーカ中心から離れた座標を算出することが可能である。本システムでは、自動運転の目標位置とするため、AR測量値を最終的に重機座標系上のブロック把持孔中心座標に換算した。

(2) 把持AR測量の精度

AR測量におけるマーカ認識性能は、カメラの解像度とマーカの大きさに依存する。本システムでは、想定された最大作業半径である約10m先のマーカを安定して測量できる組み合わせとして、4KカメラとA1サイズのマーカを採用し、以下の精度を確認した。

- ・撮影距離に対して誤差は約0.2%
- ・実施工における平均作業半径7.5mに対する精度は±15mm

(3) 把持画像処理速度

AR測量の画像処理は、1秒間に数回～数十回行うことができる。処理速度は、使用するPCのスペックと画像解像度によって決定される。本システムでは、ノート型PC(CPU:1.1GHz, クアッドコア, メモリ:2GB)と4K画像の組み合わせにより3.5fpsを実現した。特に据付動作でのブロックの回転角度調整では、リアルタイムでの計測を必要したが、十分な処理速度を確保することができた。

4.2 キャビン搭載型ロボット

本システムでは、キャビン搭載型ロボット(写真-6)を導入し、ロボットに汎用バックホウを操作させることにより自動運転を行った。これは、専用に開発した重機を使用する自動運転システムでは迅速な導入は難しく、今後の開発成果活用には不都合であると考えたためである。

今回使用したロボットはゴムチューブの人口筋肉をエアーによって伸縮させて重機レバーを操作することができる。バックホウに搭載したPCに

よる自動運転と操作室からのリモコン操作による遠隔運転を実施した。

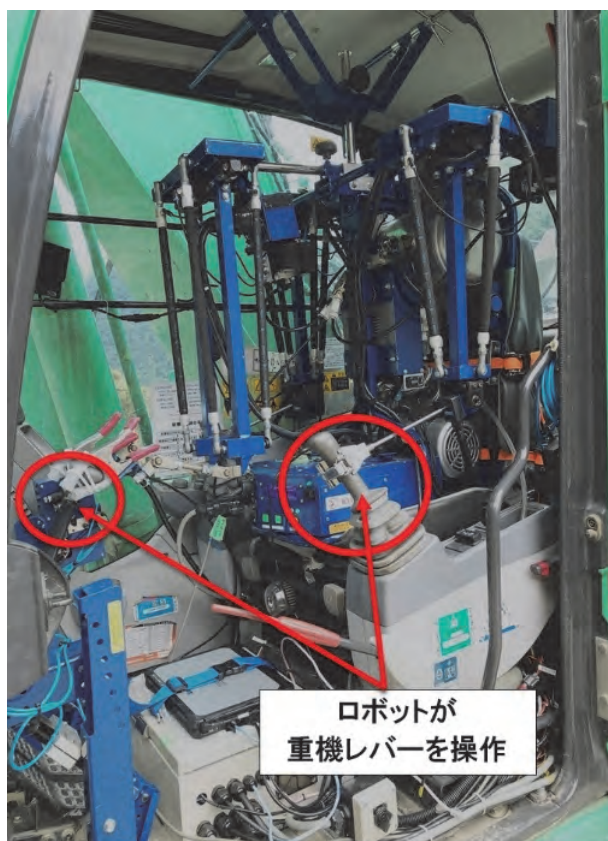


写真-6 重機キャビン内のロボット搭載状況

4.3 重機のリアルタイム姿勢計測

重機の自動運転では、重機の姿勢をリアルタイムに把握し制御を行う必要がある。そこで、本自動運転システムでは、ブームとアームの角度を計測する傾斜計と旋回角度を計測する旋回角度計（磁気スケール）を取付けた。また、アタッチメントは常に鉛直下向きとなる構造のため、路盤の不陸により重機が傾いている場合に、アタッチメント先端の算出位置を補正する機体傾斜計を取付けた。

5. 自動運転システム

5.1 自動運転システム構成

自動運転のシステム構成を図-3 に示す。自動運転の制御は下記の通り行った。

- ① バックホウのキャビン上部に取付けた4Kカメラにより、ブロックに貼り付けたARマーカを撮影
- ② カメラ画像を元に重機搭載PCにより目標ブロックの位置を計測
- ③ ②の位置を重機の自動動作の目標姿勢（ブーム角、アーム角、旋回角）に変換
- ④ ③の目標姿勢と重機姿勢計測センサ値から、ロボットへの動作指令を生成
- ⑤ ロボットは動作指令データに基づいて重機を自動操作

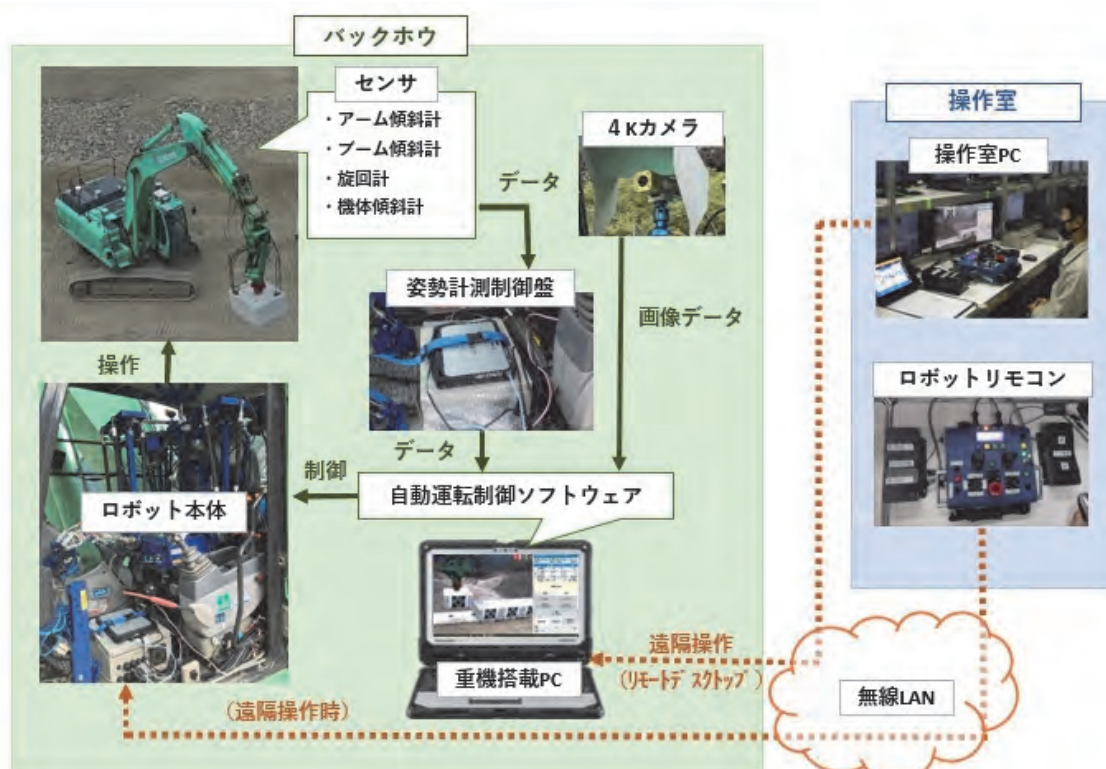


図-3 システム構成図

自動運転に関わるセンサやPC、ロボットは重機内において有線接続し、応答遅れの影響がない構成とした。操作室には操作用PCを設置し、リモートデスクトップを用いて重機搭載PCを監視、操作した。操作室と重機間の通信は無線LANとした。

自動運転のオペレータは、操作画面(写真-7,8)上で自動運転の開始や、表示される次動作の承認などをマウスのクリック操作により行った。

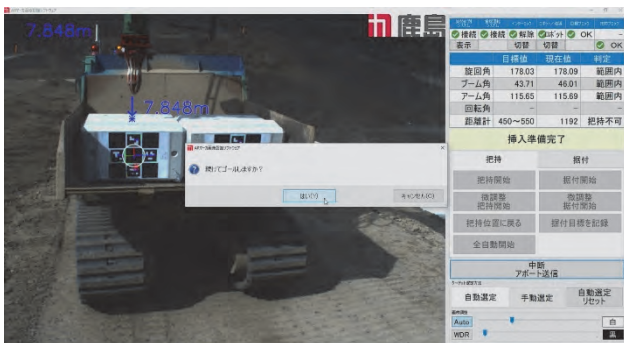


写真-7 操作画面（把持動作中）



写真-8 操作画面（据付動作中）

5.2 自動運転フロー

キャリアダンプ1台により搬入されるブロック2個を連続して据え付ける動作を1サイクルとして、自動運転を行った。図-4に自動運転のフローを示す。事前に目標位置のAR測量と記録を行うことにより、スムーズな連続動作を実現した。また、ブロックを2個据えるごとに重機を走行移動させる動作はオペレータの遠隔操作により行った。

5.3 動作の精度向上と効率化

本システムでは、把持・据付ともに自動動作に「サブゴール」という考え方を取り入れた。サブゴールは、写真-9と写真-10に示すように、把持対象ブロックまたは据付基準ブロックから約0.5m離れた位置である。これにより、以下の自動動作の精度向上と効率化を実現した。

- ・自動動作中にサブゴール位置において再測量を行い、必要に応じて自動微調整動作を行うことにより精度を向上

- ・サブゴールまでは速度重視の高速動作、サブゴール以降は精度重視の低速動作とすることによりサイクルタイムと精度を両立

加えて、把持動作、据付動作においてそれぞれ以下のような工夫を行った。

(1) 把持動作

サブゴール以降はブーム下げのみとして把持孔にアタッチメントを挿入した。単一かつ単純な動作とすることによって、サイクルタイムの短縮と精度の向上を図った。

(2) 据付動作

サブゴール位置において把持中ブロックと据付位置の基準となる既設ブロックの回転角度を合わせる動作を行い、据付精度を向上させた。回転角度の計測と制御には、専用のセンサは使用せずに

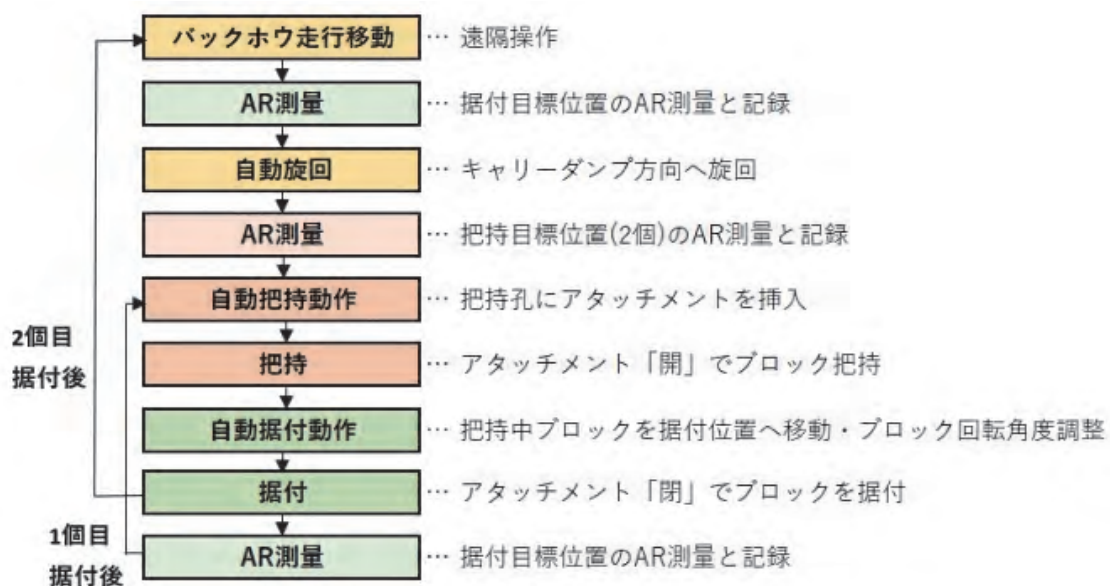


図-4 自動運転フロー

AR 測量のマーカ面角度計測機能を用いた。実施工において、1 度以下の誤差内に回転角度を計測できることを確認した。



写真-9 自動把持サブゴール位置

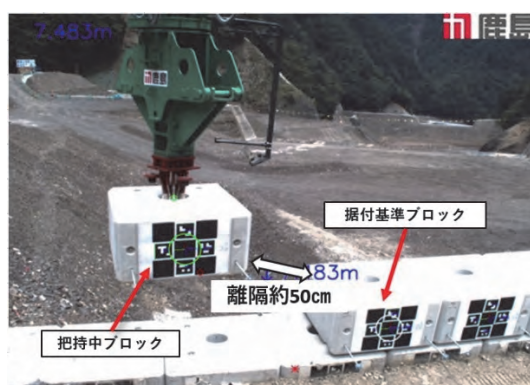


写真-10 自動据付サブゴール位置

6. 施工実績

6.1 精度

把持動作に関しては、実施工の過程において自動動作の調整を行って動作精度の向上を図り、アタッチメント挿入動作の成功率は 100%を達成した。

据付動作に関しては、据付位置の基準となる既設ブロックとの隙間を 10mm 以下として据え付けられることを確認した。把持中ブロックを既設ブロックの低い位置に軽く押し当ててから降ろすような動作としたことと、嵌合構造の働きにより高精度の据付を実現させた。

6.2 サイクルタイム

自動運転の 1 サイクル（ブロック 2 個分の把持と据付）にかかる時間は、自動運転では 7 分 13 秒、遠隔操作では 9 分 16 秒となり、自動運転により約 20%のサイクルタイム短縮を実現した。把持動作の所要時間は自動運転と遠隔操作においてほぼ同じだったが、据付動作については遠隔操作の場合に約 1 分所要時間は長くなった。把持動作ではφ 270mm の把持孔にアタッチメントを挿入するための許容誤差は大きいのにに対し、据付動作では把持中ブロックの位置と回転角度を高精度に合わせて据え付ける必要があり、遠隔操作の場合は頻繁

にやり直し動作が発生してサイクルタイムに影響した。

また、遠隔操作ではオペレータに大きな負担をかけるため、作業効率の低下や休憩を必要とするのに対して、自動運転では一定の作業効率による作業を継続できることから、1 サイクルあたりのサイクルタイム短縮実績である 20%以上の生産性向上効果を期待できる。

7. おわりに

プレキャストブロック据付の自動運転システムを開発して実施工に導入し、作業の生産性向上を実現した。

今回の施工ではオペレータ 1 名に対して自動運転重機 1 台の運用であったが、複数重機を使用して同時施工を行う場合は、オペレータ 1 名により複数重機の自動運転を監視することも可能であると考えられ、さらなる生産性向上を期待できる。

また、AR マーカとキャビン搭載型ロボットを組み合わせた自動運転は、プレキャストブロックの据付にとどまらず、多種多様な作業にも応用可能な技術であると考えられる。今後も自動化施工の拡大を目指して、応用と改良を進めていく所存である。

8. スタビライザの ICT 化「浅層改良管理システム」による位置精度および生産性向上の検証

西尾レントオール株式会社 ○ 橋本 明広
株式会社東洋スタビ 衣川 剛央

1. はじめに

令和1年度から ICT 地盤改良工（浅層・中層混合処理）が施工履歴データを用いた出来形管理要領（案）に追加され、ICT 化が進められている。

スタビライザによる浅層改良は、施工中の深度が数値化できないために、深度管理を行いながら施工するには熟練の技術が必要である。また、施工厚さの出来形管理は、規定箇所を掘り起こして確認作業を行い、その結果を待ってから施工の手戻り作業が発生する場合もある。施工範囲については、地面に直接区割り作業と施工箇所の継ぎ目となる走行レーンを示す為に目印になるポールを設置作業を行っており、生産性の向上が望まれる。

このような課題に着目し、今般弊社は（株）東洋スタビと共同でスタビライザの ICT 化として「浅層改良管理システム（NETIS/KT-210047-A）」（以下、本システム）を開発した。

本システムは、GNSS の位置情報を用いてスタビライザの位置と姿勢を計測し、施工位置のガイダンスと深度管理・施工進捗管理を行うシステムであり、深度の数値化により施工の「見える化」や生産性の向上に大きく貢献できるものである。本稿では、本システムの位置精度および品質確保・生産性向上の検証結果を報告する。

2. システムの概要

2.1 システムの構成

本システムの構成は、「GNSS システム BOX」「GNSS アンテナ」「アンテナブラケット」「傾斜計」「制御アプリ（タブレット PC）」の五つで構成されている。（写真-1）

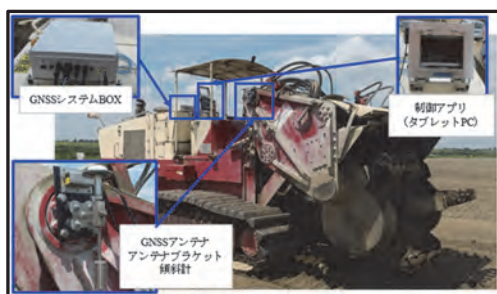


写真-1 システム構成

2.2 システムに要求される仕様

本システムは GNSS によって取得した攪拌装置の位置（座標）情報を、施工軌跡データとして履歴を残すことで、地盤改良が完了したことを表現できる機能を主な仕様とし、3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）「表層安定処理等・固結工（中層混合処理）編」¹⁾に要求される仕様を、スタビライザによる浅層改良においても ICT 活用の管理要領が満足できるように開発した。

必要な機能

- ① 攪拌判定表示機能
- ② 施工範囲の分割機能
- ③ 攪拌装置サイズ設定機能
- ④ システムの起動とデータ取得切替機能
- ⑤ 施工完了範囲の判定・表示機能
- ⑥ 出来形管理資料作成機能

「測定精度」

静止状態での作業装置位置の測定精度

水平（X，Y）：各±100mm 以内

標高（Z）：±100mm 以内

2.3 運用手順

本システムは、以下の手順で運用する。（図-1）

- ① 設計データの設定：地盤改良設計データとなる DXF データを入力する。
- ② 施工完了範囲の判定の設定：施工範囲を管理ブロックに分割する設定を行う。
- ③ スタビライザの姿勢の設定：GNSS アンテナの取り付け位置と傾斜計の設置角度の設定を行う。
- ④ 施工の開始：制御アプリ画面に入力した通りの区割り位置とスタビライザの現在位置と深度、それに伴った設計深度までのガイダンス量が表示される。そのガイダンスに従い、オペレーターは施工を行う。
- ⑤ 施工結果の確認：施工中の改良深度等の結果をリアルタイムに確認する。
- ⑥ 施工結果の出力：施工結果を帳票出力アプリで帳票出力を行う。

3. 精度検証

本システム内で算出される攪拌装置の位置座標と攪拌後の深さの精度検証を行った。

3.1 攪拌装置の位置座標精度の検証方法

本システム内に表示される攪拌装置の座標(X,Y,Z)を、測量機と比較して検証を行う。

検証する位置は攪拌機左右の中心で刃先の先端部分を測量する。(写真-2)(写真-3)

3.2 使用機材

- ① 測量機
- ② プリズム

3.3 検証結果

検証結果は、システム内で算出される位置座標と測量機の測量結果座標との差が X,Y,Z すべて 100mm 以内に収まり、GNSS と傾斜計の値から算出される値が要求される精度に収まっていることが確認できた。(表-1)

表-1 位置座標検証結果

単位：m			
	X座標	Y座標	Z座標
TS座標	22999.179	-21905.679	19.009
システム座標	22999.200	-21905.656	18.999
差	-0.021(21mm)	-0.023(23mm)	0.010(10mm)



写真-2 攪拌装置先端

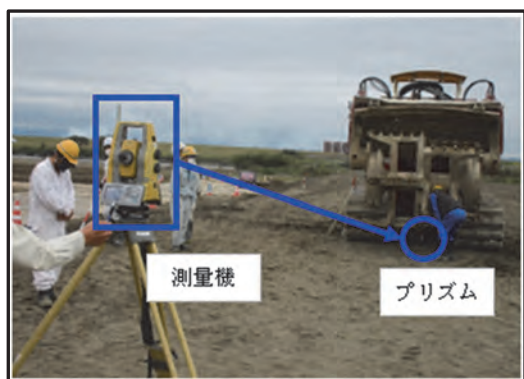


写真-3 測量機でプリズムの位置を測量

3.4 攪拌装置の攪拌深さ精度の検証方法

本システム内に表示されるガイダンスに従って攪拌を行い、攪拌後の深さを標尺の測量結果と比較して検証を行う。(写真-4)

検証の基準は、位置座標精度の高さ 100mm 以内を基準とした。

3.5 使用機材

- ① 標尺
- ② 赤白ポール

3.6 検証結果

検証結果は、1000mm のガイダンス量に従って切削を行い、標尺の測量結果との差が 100mm 以内に収まり切削時の高さ精度が要求される精度に収まっていることが確認できた。(表-2)

表-2 攪拌深さ精度検証結果

単位：mm	
	深さ結果
標尺結果	980
ガイダンスに従った深さ	1000
差	20

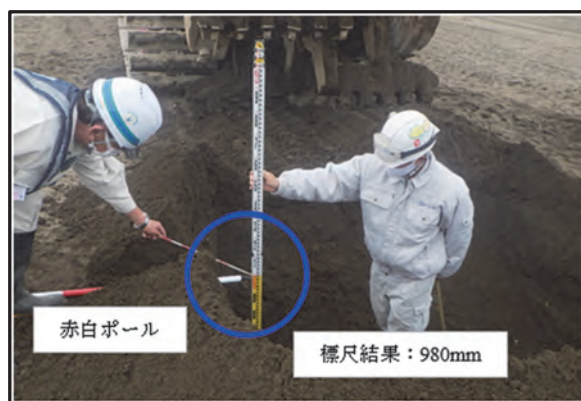


写真-4 標尺で切削深さを測量

4. 動作検証

本システムに要求される動作の検証を行った。

4.1 動作の検証方法

本システムの設定画面や、計測中の画面が要求される機能を満たしているか確認する。

4.2 検証結果

- ① 攪拌判定表示機能

施工中の画面から動作を確認できた。

⑤の施工完了範囲の判定と同様の方法で確認した。(図-2)

- ② 施工範囲の分割機能

施工対象の範囲を区割りごとに分割し、区割り内に 10cm サイズの管理ブロックを設定できることを確認した。

③ 攪拌装置サイズ設定機能

本システムでは GNSS を攪拌装置に設置する為、GNSS 設置箇所から、アンテナの設置高さ・左右のアンテナ間の距離・攪拌機の幅・攪拌機の中心までの距離・刃先の長さを設定することで、攪拌装置サイズの設定ができることが確認できた。(図-1)

④ システムの起動とデータ取得切替機能

施工中の画面内の「START・STOP」のボタン押下で動作を確認できた。(図-2)

⑤ 施工完了範囲の判定・表示機能

施工完了範囲の判定については、設計高さと攪拌機の高さをリアルタイムで計算し、残差に応じた色で判定を行う。(図-2)

色の判定は設計高さへの到達・未到達がリアルタイムで判断できることが確認できた。

⑥ 出来形管理資料作成機能

帳票出力アプリから結果帳票の出力ができることが確認できた。(図-3)



図-1 各種サイズ設定画面

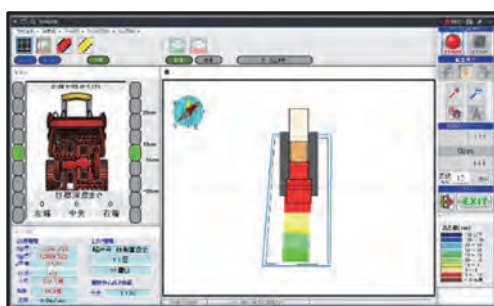


図-2 施工中画面

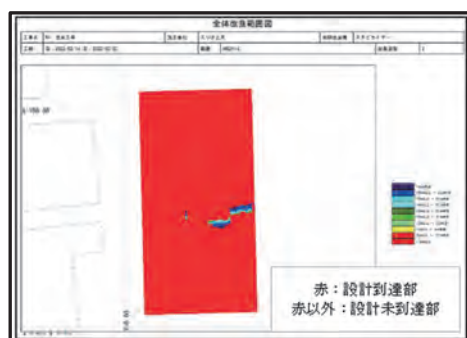


図-3 帳票出力画面

5. 品質確保・生産性向上の検証

5.1 品質確保・生産性向上の検証項目

① オペレーターの熟練度による品質確保

本システムを活用することで、未熟オペレーターが熟練オペレーターと同様の品質を確保して操作できるか検証する。

② 走行レーンの把握による生産性向上

施工中の走行レーンが「見える化」されることによって、ラップ幅のばらつきが抑制され、施工の効率が向上するか検証する。

③ 出来形確認作業の省略による生産性向上

施工履歴データにより、従来の出来形確認作業を省略する事での効果を検証する。

5.2 検証結果

① オペレーターの熟練度による品質確保

初心者オペレーターの操作が、施工機の位置が「見える化」されることによって、施工ヤードに対してまっすぐに走行することができた。

また、設計深さに対する深度の「見える化」により、攪拌深さは過不足なく一定の厚さで施工することができ、品質を確保してスタビライザを操作することができた。

本システムによりオペレーターの操作を「見える化」し、属人的な操作を誰でもできる作業へ標準化した。

② 走行レーンの把握による生産性向上

従来施工では、未改良部を残さない為に、施工箇所の継ぎ目に 20cm から 30cm のラップ幅を設ける。継ぎ目のラップ幅や走行レーンの把握には、熟練オペレーターの感覚に頼っており、未熟なオペレーターの場合は、施工箇所の継ぎ目や走行レーンを示す為に、ポールによる区分け作業を行っていた。(写真-4)

本システムにより、施工箇所と現在の施工機の位置が「見える化」され、未熟オペレーターの未改良を防止できた。また、ポールによる区分け作業が不要になり、作業員 1 名が 1 日当たり 30 分程度の作業時間を省略することができた。



写真-4 従来行っていたポール作業

さらに、目測による従来施工ではまっすぐに走行することができず、前に施工したレーンに対して斜めに走行してしまう事で、余分な未施工エリアが発生してしまっていた。

本システムにより、前に施工したレーンに対して走行している方向が認識し易くなり、斜めに走行することが抑制され、走行回数を効率よく施工することができた。(図-4)

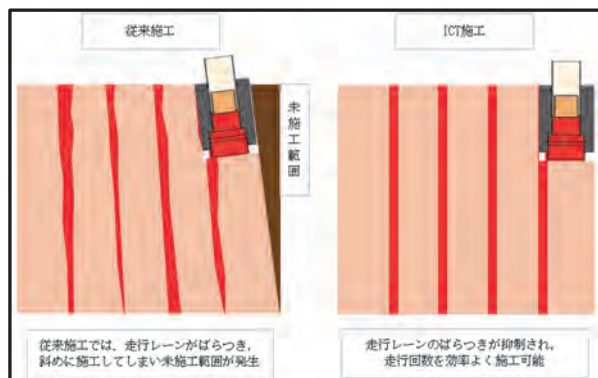


図-4 走行回数の効率化

③ 出来形確認作業の省略による生産性向上

従来の出来形管理方法は、施工後に掘り起こし作業を行い、状況写真と攪拌した厚みの確認を1日3箇所程度行っていた。(写真-5)



写真-5 従来の出来形管理方法

現状は従来の出来形管理方法を省略していないが、本システムにより、1箇所に10分程度の出来形確認作業を1日3箇所程度省略することで1日30分程度の作業時間の削減が見込める。

さらに、攪拌深さがリアルタイムに把握出来ることで施工深さの不足箇所を即座に再混合する事が可能になり、設計深度に対して均一な施工を行うことができた。

また、施工結果を出来形管理資料として出力することができ、出来形結果を分かりやすく証明可

能となり、従来の出来形確認作業による点の評価から、面での評価を表現することが可能になった。(図-5)

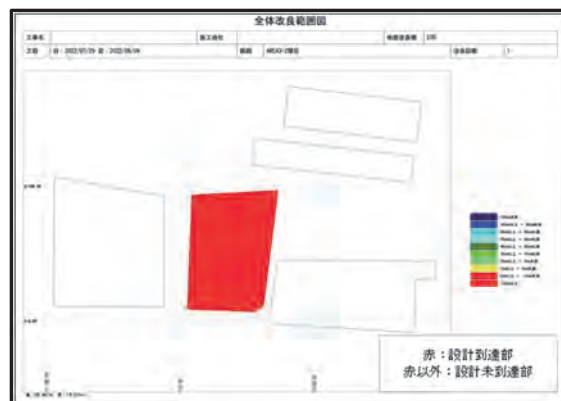


図-5 結果帳票

6 おわりに

本稿の検証結果から、本システムの精度が要求される基準を十分に満たしていると確認できた。

さらに施工位置及び施工深度が「見える化」され、浅層改良における走行操作の技術不足・施工不良等による手戻りを未然に防止した。その結果、より正確な施工管理が実現され、品質管理の合理化、生産性向上に大きく貢献できることが実証できた。

以上の ICT 施工を活用した施工管理と品質管理の合理化により、5～10%程度の生産性向上が見込める。

今後もスタビライザの ICT 施工を積極的に行っていくことで、ICT を用いた施工能力が向上し更なる機能向上や課題が挙げられていくことに期待できる。それらを改善しながら、原位置攪拌する工種において使用用途を広げていき、施工会社、レンタル会社の両面で業界への貢献を引き続き行っていく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）、令和4年3月版

9. 建設機械施工の自動化・自律化技術の普及に向けた取組みについて

国土交通省

○ 金森 宗一郎

味田 悟

加藤 和宣

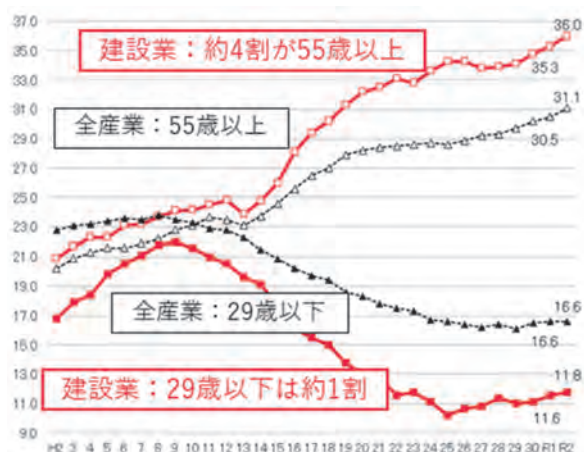
1. 緒言

我が国では少子高齢化に伴い、就業者の高齢化が進んでいる。その中でも建設業就業者の高齢化は他業種と比較して顕著である（図－1）。近い将来、建設業に従事する高齢者が大量に退職することが見込まれる。更に人口減少の影響で新たに建設業に就業する者も減少していくことが予測される。これらのことから、深刻な担い手不足により、建設業の持続性が失われることが懸念されている。

これらの課題解決に向け、現場の生産性向上に資する技術の一つとして、建設機械施工の自動化・自律化・遠隔化技術（図－2）が期待されている。この技術により、建設機械を人が搭乗することなく稼働させることができる。

建設機械施工の自動化・自律化・遠隔化技術の普及に向けては、安全をはじめとして分野横断的に検討を行うべき項目が多く存在するが、そのような議論は系統立った形では従来ほとんど行われておらず、したがって現場導入に向けた環境は整備されていなかった。

そこで、国土交通省では令和3年度に「建設機械施工の自動化・自律化協議会」（以下、「協議会」という）を設置し、多様な関係者の参画のもと、議論を開始している。本報文では、協議会の活動についてこれまでの経過と今後の展望を述べる。



図－1 全産業および建設業就業者において若年層および高齢層が占める割合

2. 取組みの体制

「建設機械施工の自動化・自律化協議会 設置規約」に記載のとおり、協議会は自動・自律・遠隔施工技術の開発及び普及の加速化を目的とする。

この目的を達成するため、本協議会には、建設施工関係の有識者、建設機械施工に関係する多くの業界団体が参画している（図－3）。

また、行政機関としては、公共工事の発注者であり、建設機械に関する技術的な指導の権能を有する国土交通省のみならず、産業振興を司る経済産業省、労働安全を司る厚生労働省が参画している。

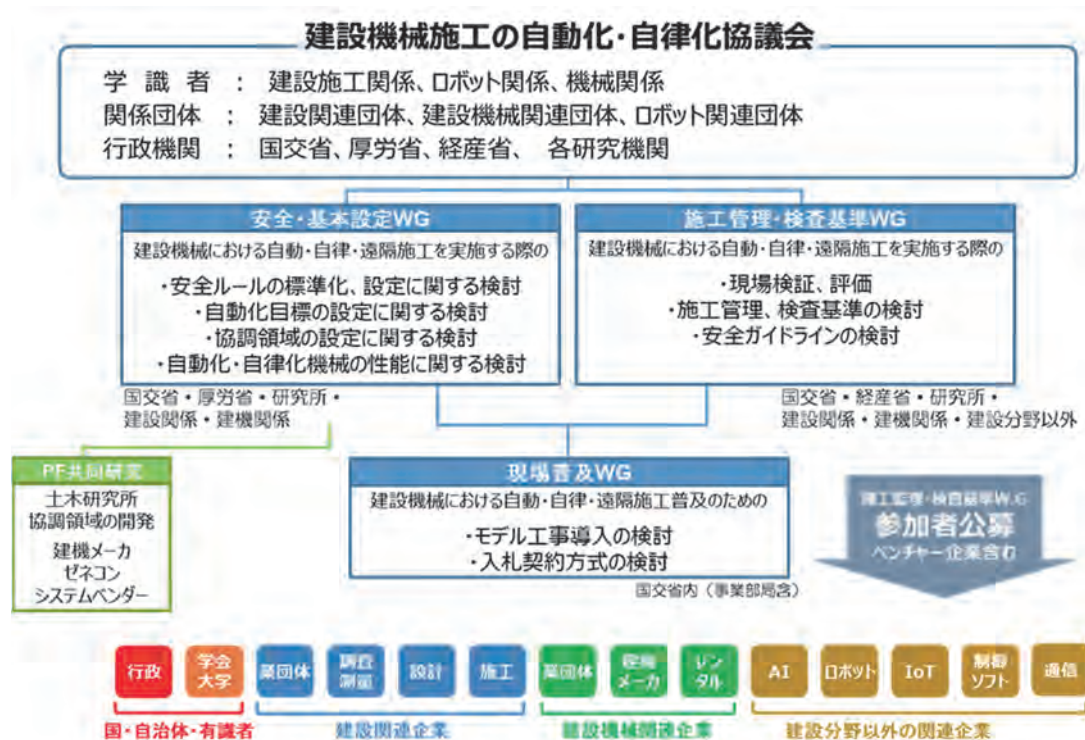
協議会では、自動・自律・遠隔施工技術の普及に向けた大局的な方針を議論する。さらに、より個別的・具体的な議題を議論するため、協議会の下部組織として3つのワーキンググループ（以下、「WG」という）を設置する。

このうち、「現場普及WG」は、モデル工事の設定や自動・自律・遠隔施工技術を想定した入札・契約のありかたを検討するものであり、自動・自律・遠隔施工技術を実工事で使用する環境がある程度整備されてから開催する計画であり、令和4年8月現在設置に至っていない。

「安全・基本設定WG」は令和4年6月に、協議会と同じ団体等を構成員として設置した。本WGは令和4年度中に「自動・自律施工の安全ルール」を策定することを当面の目的として、検討を進めている。また、技術開発における協調領域の設定についても検討を進めている。



図－2 自動・自律・遠隔施工のイメージ



図－3 建設機械施工の自動化・自律化協議会の体制

「施工管理・検査基準 WG」は令和 4 年 6 月に、協議会と同じ団体等を当初の構成員として設置した。本 WG では令和 5 年度に予定している自動・自律・遠隔施工機械等の現場検証の実施に向けた検討や、将来的には自動・自律施工における施工管理基準策定に向けた検討を行う。このような特性に鑑み、実際に自動・自律・遠隔施工技術のノウハウを有する者の意見を幅広く取り入れるため、新たに構成員を公募することを計画している。

3. 検討の方針

本項では、協議会の目的のうち令和 4 年度、令和 5 年度の重要な検討対象である安全ルールと現場実証について詳しく述べる。

3.1 安全ルールの策定方針と現状

自動・自律・遠隔施工は、現場からオペレータがいなくなるという点で従来の施工と一線を画す。この「オペレータがいらない」という特徴を考慮して整備された体系的な安全ルールは現状では存在しない。

そのため、一部の開発者が実施している現場試行においては、現場ごとにゼロから安全対策を検討する必要が生じている。さらに、どの程度の水準の対策が必要であるか判断する基準がないことから、関係者との調整に時間を要したり、現場ごとに安全対策の水準にばらつきが生じたりするといった課題がある。

また、有人の施工現場を前提とした既存のルー

ルを自動・自律・遠隔施工にそのまま準用すると、過剰な安全対策を講じなければならない懸念がある。

そこで、自動・自律・遠隔施工の特徴に即した標準的な安全ルールの策定が必要となる。令和 4 年度は、協議会及び WG での検討に基づき、全ての作業員の進入を禁止する「無人エリア(図－4)」における施工を対象とし、安全ルールを標準化する。

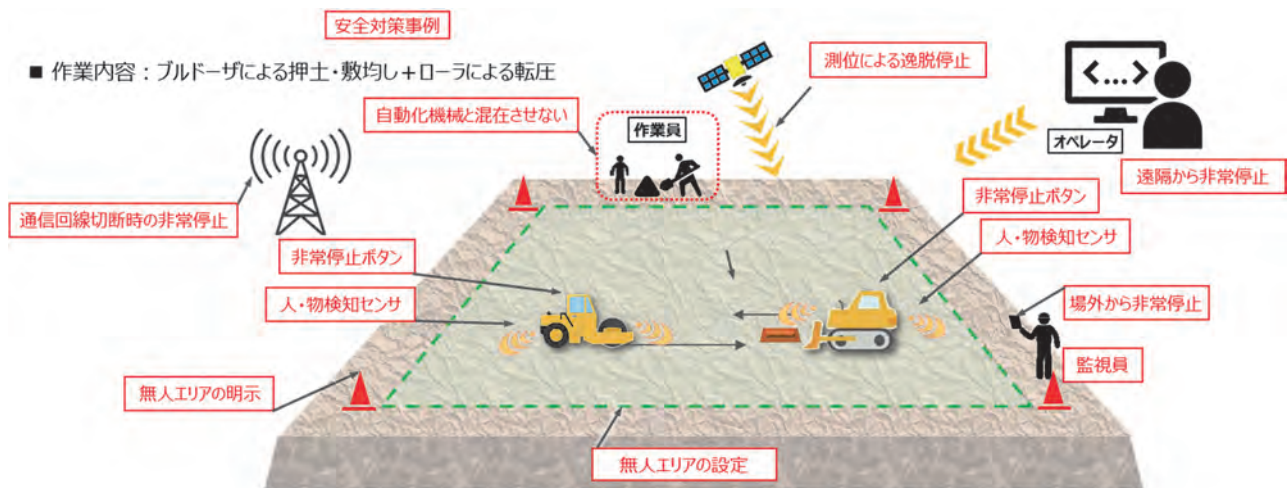
安全ルールについての現状での検討状況を述べる。

安全ルールは、「自動・自律・遠隔施工を実施する施工会社が、安全対策を検討する上で参照する資料」として位置づけられる。また、あらゆる条件の現場で講じるべき全ての安全対策を列挙することは事実上不可能であるため、土工を対象として、条件の異なる現場であっても、共通的に講じるべき安全対策を示す、ガイドラインのような性格のものとして策定する。

その内容は①用語の定義②共通的な保護方策③自動・自律・遠隔施工に特有のリスクアセスメントの項目、の 3 つを主とする。以下に①～③を策定する目的と検討方針を記す。

①用語の定義

自動・自律・遠隔施工の分野では定義が定まっていない用語が多い。例としては、「自動」と「自律」の違いは何か? 「無人化施工」は歴史的に遠隔施工を表す用語として使われることが多いが、字義通りに解釈すると自動・自律施工も含まれる



図－４ 無人エリア(緑点線の内側)の模式図と保護方策の例

べきではないか？といったことが挙げられる。

このような状況では、施工会社が安全対策を検討する際に、また関係者との調整の際にミスコミュニケーションが生じる可能性がある。

そこで、安全対策を検討する上でのミスコミュニケーションを防ぐために、用語の定義を明確化する。

安全ルールの検討にあたり最初に用語を定義することで、安全ルールについての議論を行う上でのミスコミュニケーションを防ぐ効果も期待される。

②共通的な保護方策

一般的に機械の使用にあたっては、法令や取扱説明書等において具体的に定められている共通的な保護方策に加え、使用者が実施するリスクアセスメントの結果として必要であると判断された保護方策が講じられる。

一方で自動・自律・遠隔施工においては、共通的な保護方策が体系的に整理された文書は存在しない。

そこで、土工を対象として、どのような条件の現場であっても共通的に講じるべき保護方策を策定する。

具体的には、自動・自律・遠隔施工を行う場合は、機械の周辺に作業員の進入を規制する「無人エリア」を設定すること、「無人エリア」に作業員が誤って進入するといった危険性が大きい事象が生じた場合は自動・自律・遠隔施工機械を停止させることなどが考えられる。

③自動・自律・遠隔施工に特有のリスクアセスメントの項目

従来施工におけるリスクアセスメントについてはマニュアルが発行されているほか、技術者や建設機械オペレータは何が危険につながるかを経験的に理解している。

自動・自律・遠隔施工においてはリスクアセスメントの項目が整理されたマニュアルは未整備で、施工会社もほとんど自動・自律・遠隔施工の経験がない。

このような状況では、施工会社が実施するリスクアセスメントの項目に過不足が生じる可能性が高く、必要十分な調査が実施されない可能性がある。

そこで、施工会社がリスクアセスメントを実施するに当たっての補助として活用できるよう、自動・自律・遠隔施工に特有のリスクアセスメントの項目を体系的に整理する。

また、必要な保護方策の内容や担い手が従来施工と異なることから、これまで以上に「リスクアセスメント情報を関係者間で共有すること」や「それぞれの保護対策を現場のどの担当者が担うのか明確にすること」が重要であることを明示する。

上記の内容を、令和４年度に策定するために検討を進めている。自動・自律・遠隔施工の分野においては技術が日進月歩であるため、安全ルールが陳腐化することを防ぐために策定後にフォローアップを継続する体制を構築することも重要である。

また、令和４年度に策定するのは「人と自動・自律・遠隔施工機械を完全に隔離できる条件での土工」を対象としており、あらゆる条件や工種に適用できるものではない。

そこで、令和５年度以降は、策定した安全ルールを実際に適用している現場の調査を行い、そこで得られた知見に基づいて安全ルールを改定したり、対象を拡大したりすることを計画している。

3.2 現場実証の実施方針

令和４年度に策定する安全ルールを踏まえ、安全ルールと現行の自動・自律・遠隔施工技術の適

合性を確認するための現場実証を令和 5 年度に実施する。

この現場検証の特徴として①適合性確認の双務性②施工管理・検査基準 WG 構成員の参画が挙げられる。以下に①②の詳細を記す。

①適合性確認の双務性

現場検証における適合性の確認は「安全ルールが無謬であるとの前提で、自動・自律・遠隔施工技術がルールに適合するかを確認し、適合しない場合は自動・自律・遠隔施工技術に対し是正を求める」といった片務的な性格のものではない。

むしろ、実際の自動・自律・遠隔施工技術と比較することで、安全ルールの課題を明確化し、安全ルールの改定につなげることを目的の一つとしている。

これは、以下のような理由による。

第一に、令和 4 年度に策定する安全ルールは、自動・自律・遠隔施工についてのルールを策定するという、これまでにない取り組みであるため、錯誤や考慮すべき情報の見落としを含む可能性があるためである。

第二に、自動・自律・遠隔施工技術の進展は急速であるため、策定時点では適切であっても、翌年度の技術に照らし合わせると現実に即したものになっていない可能性があるためである。

②施工管理・検査基準 WG 構成員の参画

現場実証の参加者は、施工管理・検査基準 WG 構成員であって、現場実証に参加する意思を示した者から選定する。

また、安全ルールと実際の自動・自律・遠隔施工技術に食い違いがあることが判明した場合には、「安全ルールをより現実的なものに修正する」または「自動・自律・遠隔施工技術の安全性能を高める」という 2 つの対応のどちらが適切であるか、WG で議論する。また、安全ルールの修正が適切であれば、必要な修正の内容を WG で検討する。それらの議論の結果は、安全・基本設定 WG に提案し、安全ルールの改正に反映することを計画している。

これまでに述べたとおり、令和 5 年度の現場実証では、安全ルールと自動・自律・遠隔施工技術の適合性確認を行うことを計画している。

将来的には自動・自律・遠隔施工に適応した施工管理技術に基づいた施工管理や検査の基準類の策定が必要となる。その際には、現場実証の場でそれらの策定に必要な情報収集を行っていくことを計画している。

4. 今後の展望

協議会では、本報文で述べた安全ルールの策定、現場実証の実施に加え、以下に列举する項目の検討を計画している。

- ・研究開発や安全性能等における協調領域の設定
- ・自動・自律・遠隔施工機械の機能要件
- ・公共事業におけるモデル工事の実施
- ・自動・自律・遠隔施工に適した入札契約方式

5. 結言

本報文では、自動・自律・遠隔施工技術の普及に向けて、国土交通省が設置した「建設機械施工の自動化・自律化協議会」と、その下部組織である WG の活動内容について述べた。

自動・自律・遠隔施工技術の普及は、今後の日本の社会インフラを整備・維持し、災害対応能力を保持していくためには必要不可欠であると考えられる。

自動・自律・遠隔施工技術は現場の省人化による生産性の向上をもたらすだけでなく、遠隔地のオフィスからでも建設機械を稼働させることを可能にし、高齢者・女性・障害者を含む多様な人材が建設業で働きやすくなる効果が期待できる。

また、災害発生時に地場のレンタル会社や施工会社と国土交通省が連携することにより、災害現場に自動化・自律化・遠隔化建機を迅速に投入できるようになる効果も期待できる。

国土交通省はこのような未来を見据えつつ、自動・自律・遠隔施工技術の普及に向けた取り組みを引き続き実施していく。

業務委託先の開示

本報文にて報告した検討を実施するにあたり、基礎的な情報収集及び資料整理の一部を日本建設機械施工協会に業務委託して行った。

10. ICT活用により作業装置を自動化した 除雪トラックの試行運用について

国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所施工調査・技術活用課
同

○ 福島 徹
前原 正之

1. はじめに

北陸地方整備局では、管内3県（新潟県・富山県・石川県）の直轄国道14路線、管理区間延長約1,073kmの冬期道路交通を確保するため、約500台の除雪機械を配備し、除雪作業を実施している。

除雪機械の運転は路面状況、道路構造、沿道状況等の変化に適応した操作が必要であり、経験と熟練した技能を必要とするが、昨今は、熟練技能を持つオペレータの高齢化に伴う引退や、新規入職者の減少により、担い手の確保及び技能の維持が課題となっている。

このような背景のもと、北陸技術事務所では、オペレータの負担軽減、経験の浅いオペレータの作業支援を目的として、ICT（情報通信技術）を活用し、作業装置を自動化した除雪機械の開発に取り組んでいる。

本稿では、作業装置の自動制御機能を装備した除雪トラックを実際の除雪作業で試行的に運用した概要を報告するものである。

除雪トラックのオペレータは、車両本体の運転と同時に8本のレバー、20個のスイッチにより作業装置の操作を行わなければならない熟練した技能が求められる。

（写真-1）



写真-1 作業装置の手動操作パネル

2. 作業装置の自動制御

2-1) 除雪トラック作業装置の概要

除雪トラックによる新雪除雪は、路面に降り積もった雪を路側にかき寄せるもので、作業装置としては、新雪などを除雪する「フロントプラウ」、圧雪などの路面を整正する「グレーダ装置」、交差点や沿道施設の出入り口といった、雪を置いてはいけない区間において一時的に雪を抱え込む「サイドシャッタ」で構成されている。

（図-1）

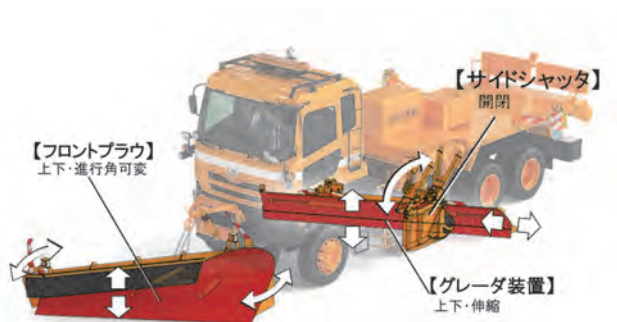


図-1 除雪トラック作業装置の概要

このため、除雪トラックの作業装置（フロントプラウ、グレーダ装置、サイドシャッタ）の操作を自動化することにより、オペレータは車両の運転に専念できるため、作業の安全性が向上する。また、オペレータの負担軽減が図られることにより、担い手の確保にも寄与するものと考えている。

2-2) 自動制御機能の概要

作業装置を自動化するための制御は、オペレータが各装置を操作した操作位置情報を反映させた“除雪作業用地図データ”を作成し、GNSS受信機（準天頂衛星システムみちびき対応型）で取得した自車位置情報とを照合し、地図データに設定した箇所、作業装置に所定の動作を行わせる仕組みとした。（図-2）（写真-2）

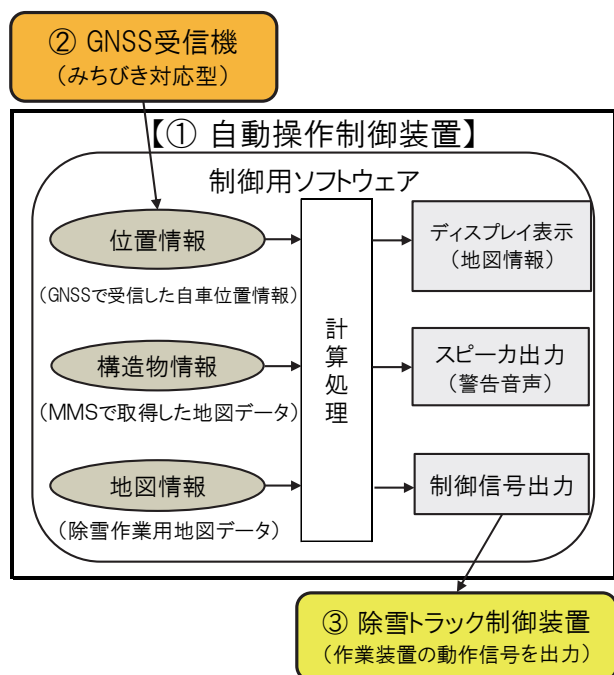


図-2 制御ユニット概念図



写真-2 自動制御装置

3-2) グレーダ装置

グレーダ装置は、装置幅の変更や上下の操作を行う。

装置幅の変更は、駐車帯などで一時的に道路の幅が変化する箇所では、装置を伸縮させて装置の幅を変更する。また、フロントプラウと同様に、橋梁ジョイント等との接触を避けるため、一時的な上下の操作を行う。(図-3)



図-3 作業装置の動作イメージ

3-3) サイドシャッター

サイドシャッターは、グレーダ装置に付随し、交差点部や道路の接続部などの雪を置いてはいけない箇所において、グレーダ装置から左側に押し出される雪の流れを止めるため閉操作を行い、通過後に開操作を行う。



写真-3 サイドシャッターの動作

3. 各作業装置の自動制御

3-1) フロントプラウ

フロントプラウは、交差点等の道路構造が変化する箇所では、進行角の変更や上下の操作を行う必要がある。

進行角の操作は、交差点部や道路の接続部などの雪を置いてはいけない箇所では、除雪車の前方にまっすぐ前送りするために行う。また、上下の操作は、橋梁ジョイント等にフロントプラウが接触するのを防ぐため、当該箇所を除雪作業を実施しながら通過する際、一時的に上下の操作を行う。(図-3)

4. 自動制御機能の精度確認

自動制御機能を装備した除雪トラックの作業装置の動作精度（縦断方向）の確認を行った。自動制御システムで設定された動作完了位置に対し、実際の動作完了位置は様々な外的要因により動作遅れが発生することから、許容できる精度と安定性を評価する必要がある。

過去の試験結果から、除雪トラックの走行速度やエンジン回転数の変動が自動制御の精度・安定性に大きな影響があることが判明している。除雪トラックの作業時の走行速度が 25km/h 程度のため、前提速度を 30km/h とし、10km/h～30km/h で評価した

手動操作の場合と同等以上の動作を目指すものとして、人間の単純なボタン操作等の単純反応時間は 0.15s が下限とされているため※その時間を指標とし、その時間に対する 30km/h の場合の移動距離が 1.25m なので、目標値を±1.25m未満と定めて、改良した自動制御装置の精度・安定性を検証した。

動作精度の確認は、試験コース上での作業データを作成し、作業装置の実際の動作地点を計測し、動作完了目標地点との差を比較した。（写真-4）



写真-4 自動制御動作精度の確認状況

動作精度の試験結果からは、装置毎に動作完了目標地点に対するずれ量にばらつきは見られるものの、±0.8m 以下で制御ができていることが確認され、目標値を満足している。（表-1）

表-1 自動制御動作精度の確認結果

	フロントブラウ		グレーダ装置		サイドシャッタ	
	進行角		伸	縮	閉	開
	32°→0°	0°→32°	0cm→50cm	50cm→0cm		
目標値	±1.25m未満					
平 均	0.2m	0.5m	-0.8m	-0.4m	-0.2m	-0.2m
誤差幅	0.3m	0.4m	0.2m	0.7m	0.5m	0.7m

5. 試験車両での試行運用状況

5-1) 試行運用の概要

自動制御機能について所定の精度が確認できたことから、試験車両を実際の除雪作業に使用し、除雪の負荷を受けても、動作試験と同様の精度で各作業装置が所定の動作を行うか確認を行った。

確認方法は、試験車両に搭載したカメラの記録映像、作業装置の動作状況を記録したロガーデータの解析と、試験車両に搭乗し除雪作業に従事した除雪機械オペレータへの意見聴取により行った。

試行運用では、安全に作業を実施する観点から、オペレータが安全に実施できると判断した場合に自動制御機能を使用して除雪作業を行うこととした。また自動制御中であってもすぐに手動に切り替えることも可能となっている。

試行運用は、国道 17 号湯沢除雪工区（長岡国道事務所湯沢維持・雪害対策出張所）内の約 13km 及び国道 49 号安田除雪工区（新潟国道事務所水原維持出張所）内の約 20km で、各除雪工区の協力のもと実施した。

5-2) 降雪期前の現道試験

降雪期前に試行運用を行う除雪担当区間において、試験車両を使用して現道試験を実施した。

現道試験では、試行運用区間の除雪作業を実際に行うオペレータの協力を得て、作業装置動作位置の設定及び確認、試行運用区間内での自動制御による無負荷の動作試験を行った。作業装置動作の位置設定では、オペレータの意見を取り入れながら、動作試験を繰り返して調整した。（写真-5）



写真-5 降雪期前の現道試験実施状況（湯沢工区）

5-3) 試行運用時の自動制御実施状況

作業装置の自動化で自動制御による除雪作業の実施状況は表-2のとおりである。自動制御の使用頻度は、湯沢工区で14.5%、安田工区で41.0%であった。（表-2）

表-2 自動制御による除雪作業の実施状況①

工区名	全除雪 出動回数	うち自動制御を 使用した出動回数	自動制御を 使用した割合
湯沢工区	138	20	14.5%
安田工区	61	25	41.0%

また、各作業装置の出動1回あたりの平均操作回数の比較では、自動制御を使用した場合は、フロントプラウの操作が30%程度低減し、サイドシャッタの操作は85%以上の低減となった。（表-3）

表-3 自動制御による除雪作業の実施状況②

工区名	フロントプラウ 出動1回あたりの平均操作回数		操作低減率
	自動操作なし	自動操作あり	
湯沢工区	100回	70回	30.0%
安田工区	20回	13回	35.0%

工区名	サイドシャッタ 出動1回あたりの平均操作回数		操作低減率
	自動操作なし	自動操作あり	
湯沢工区	44回	6回	86.4%
安田工区	74回	9回	87.8%

5-4) 試行運用で確認された課題

試行運用では、自動制御により作業装置が所定の位置で所定の動作を行うことができるかの確認を目的に実施したところであるが、一部作業装置が所定の動作とならなかったなどの課題が確認された。（表-4）

表-4 試行運用で確認された課題

対象箇所	確認した課題
制御装置の構成 制御プログラム	低速走行時に進行方向の判別が不能となる
	連続動作区間で動作の遅れ又は停止する
制御装置操作	手動から自動への復帰するための操作手順が多い
その他	積雪量に応じた調整が容易にはできない

確認された課題のうち、制御装置の機器構成や制御プログラムに要因があるものについては、構成機器の見直しやプログラムの改良を行い、課題の解消を図っていく。また、所定の動作とならない場合にも確実に除雪作業を行うために、オペレータの操作により手動へ切り替えることが出来るようになってきているが、その後に自動制御に復帰させる操作についても操作手順が多く、自動制御に復帰しにくいことが課題として挙げられており、あらためてオペレータの要望をヒアリングし、操作手順をより安全かつ簡便なものとするための検討を進めていく。さらに、手動操作では、降積雪量が多い場合に作業装置の動作角度や範囲を細かく調整して雪の量に対応しており、同じ対応が自動制御でも可能か、適用条件を整理し必要性も含め検討する必要がある。

6. まとめ

当初の目標としていた、フロントプラウの進行角可変及び上下動作、グレーダ装置の伸縮及び上下動作、サイドシャッタの開閉動作について自動化を図ることができた。ただし、実際の除雪作業の中で使用する試行運用では初めての試みであったことや、当該年度は過去5ヶ年平均の約1.5倍もの降雪量があったことも要因となり、自動制御の使用頻度が少ない結果となった。

自動制御の使用頻度を上げるために、令和3年度の試行運用で確認された課題解消のほか、降積雪量が多い場合に作業装置の動作を調整する機能や、オペレータに装置の作動状況をよりわかりやすく伝える機能など、自動制御機能を搭載した除雪トラックを安心して使用してもらうための検討が必要と考えている。



写真-6 運用状況

7. 令和4年度の計画

令和3年度で、当初の目標としていた、3つの装置・5つの動作（フロントプラウの進行角可変及び上下動作、グレーダ装置の伸縮及び上下動作、サイドシャッタの開閉動作）の自動化を図ることができた。同時に自動制御機能の問題点や、降積雪量に応じた対応など、あらたな課題が確認された。

今回、確認された課題についてさらに検討および改良を行い、オペレータの負担が小さくなるように、また経験の浅いオペレータであっても、安心して安全な除雪作業を行えるように、引き続き除雪作業装置自動化の取り組みを進めていく計画である。

※参考文献

新美 亮輔、横澤 一彦 反応時間 脳科学辞典
<https://bsd.neuroinf.jp/wiki/反応時間> (2013)

11. 橋梁下部工における3次元計測技術の 出来形管理への適用性の検討

国土交通省国土技術政策総合研究所
国土交通省国土技術政策総合研究所
国土交通省国土技術政策総合研究所

○原 直之
山下 尚
小塚 清

1. はじめに

1.1 建設就業者の現状と担い手不足

バブル経済崩壊後、建設業の公共投資額は平成4年あたりをピークに大きく減少していった。それに対し建設就業者数は公共投資額に対し比較的多く割合をしめる時代が続いた。一方、若者の建設業離れは進んだため、近年では建設業における技能労働者約340万人のうち、今後10年間で全体の1/3にもなる110万人のベテランの職人たちの離職が懸念されており、これからの建設業を担う若年層（～24歳）の割合は全体の1割程度となる見込みである。¹⁾（表-1）

表-1 建設業界の就業者の年齢構成



1.2 建設業の生産性向上を目指す

建設現場の構造物のほとんどが「屋外（特に土木）」、「一品受注生産」、「労働集約型生産」などの特徴により、製造業等で進められている「自動化・ロボット化」、「IoT技術・ICT技術」の導入が難しいとされていた。しかし、近年では「ICT技術」を活用した測量機器や建設機械の登場により、現場経験に左右されることなく「高精度」な測量や施工が可能となり、その有効性が認められてきている。

国土交通省ではそのような「ICT技術」を現場に速やかに適用することで、「人・日当たりの仕事量」を向上させる取り組みを、「i-Construction」と命名し、建設業の生産性向上を目指している。

2. 研究目的

2.1 i-Construction と出来形管理要領の策定

国土交通省では、2016年頃から、～建設現場の生産革命～を目指し、「i-Construction」を提唱してきた。i-Constructionのトップランナー政策である、ICT技術の全面的な活用²⁾の考え方から、「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）」の策定を進めてきた。これは、現場の施工管理において、3次元データや情報通信技術を適用することにより、高効率・高精度な出来形管理を実現するとともに、従来方法に比べて現場従事者のデータ管理の簡略化・書類の作成に係わる負担の軽減等を可能とする要領である。令和3年度までに、土工編やトンネル編、様々な工種の要領が策定されてきた。

令和4年度には、橋梁下部工を対象とした「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（構造物工（橋脚・橋台）編）（案）」（以下「本要領」という）が策定された。

本報告は、本要領の現場適用性の検証を、国土技術政策総合研究所内に設立された、「建設DX実験フィールド」内の実物大橋脚模型を用いて行ったものである。

2.2 TLS と UAV の計測方法の違い・特性の把握

本要領で対象となる3次元計測技術は「TS等光波方式」「空中写真測量(UAV)」「地上型レーザースキャナー(TLS)」「無人航空機搭載レーザースキャナー」の4種である。本報告では、2種類のTLSと1種類のUAVを用いて計測を行った。（図-1）



図-1 本実験で選定した機器

TLS と UAV では出来形計測方法・精度検証方法が大きく異なる。そのため、要領に従い実物大の橋脚模型を用いて、標定点の設置～点群モデル化までの一連の流れを実施することで、本要領の記載内容において説明不足な部分や、利用者に分かりにくい記載等があれば、令和4年度の要領策定時に修正を検討する。

2.3 従来方法との計測作業時間を比較

従来方法による出来形計測は、①基準高の計測、②その他測定項目の計測、③監督職員による立ち合い、大きくこの3つに分けられる。これらは基本的に「3人～4人」程度の人数を要する作業である。

3次元計測技術を用いることで、3次元ソフト上で合成された構造物（以下「点群モデル」）を作成することができる。「①基準高の計測」や「③監督職員による立ち合い」は、取得した点群モデル上で出来形計測を代替することができるので、現場での2回目の計測が不要となる。

このように、従来では「3～4人」必要であった人数を、「1～2人」に削減することで現場での拘束時間を短縮し、現場職員の負担軽減・生産性向上を確認する。

2.4 建設DX実験フィールドの活用

稼働中の現場に機器を持ち込み、データ取得等を行う場合、現場を提供いただく元請会社、担当現場監督職員に多くの負担がかかる場合が多い。建設DX実験フィールド内の実物大模型を活用することで、現場の都合に影響を受けることなく、安全で時間的に余裕のある実験を行うことができる。

3. 計測方法

3.1 3次元計測技術を用いた出来形計測の方法

本報告で取得した点群モデルは、【TLS】3データ（機種A、機種B）、【UAV】4データ（SfMソフトA、SfMソフトB）の計7データである。（表-2）

TLS では、対象構造物を囲むように八方位（東西南北＋四方位）、対象構造物から5mの距離を取って、すべて同じ条件で点群モデルの取得を行った。スキャン密度（※）の違いにより、取得できる点群モデルの密度にどれぐらいの違いが出るかを把握するため、「20mm@10m」「5mm@10m」「6mm@10m」と異なる密度で測定を実施した。（※スキャン密度：対象構造物を10mの距離からスキャンした際に取得できる点と点の間隔が○mmピッチ）

UAV では、対象物を囲むようにドーム状に高さを5段階に分けて、計測（写真撮影）を行った。取得した150枚程度の写真データを、2種類の写真測量解析ソフト（SfMソフト）を用いて点群モデルを作成した。その際、出力する解析密度を変えて、

その結果に違いがあるかを確認した。解析密度は「最高密度」「高密度」「中密度」にて、解析を行った。

表-2 選定した機器のスキャン密度・解析密度

選定機器		スキャン密度 解析密度
TLS	機種A	20mm@10m
		5mm@10m
	機種B	6mm@10m
UAV	SfMソフトA	最高
	SfMソフトB	最高
		高
		中

3.2 要求精度に関して

各管理項目における精度検証は、各側面及び天端上に設置した検証点の座標値を従来手法により取得（以下TS真値）し、合成した点群モデル上の座標値と比較して行う。要求精度には段階があり、それぞれ「3mm以下」「7mm以下」「10mm以下」「16mm以下」となっており、TS真値と点群モデル上の検証点の座標との誤差の大きさによって、計測できる管理項目が変わる。（表-3）

表-3 橋脚躯体工における計測時の要求精度

測定項目		規格値	要求精度
基準高	▽	±20	7mm 以下
厚さ	t	-20	
天端幅	w1	-20	
敷幅	w2	-50	16mm 以下
高さ	h	-50	
天端長	ℓ1	-50	
敷長	ℓ2	-50	
支間長及び中心線の変位		±50	10mm 以下
橋脚中心間距離 ℓ		±30	
支床部アンカーボルトの露出き規格値	計画高	+10～-20	+3～-7mm 以下
	平面位置	±20mm	7mm 以下

3.3 TLS 精度確認方法

TLS の精度確認は、各側面および天端に設置した検証点のTS真値と、点群モデル上の検証点の2点間距離を比較して行う。例えば、機種B(6mm@10m)のデータでは北南の検証点の2点間は「2007mm」に対し、現場で求めた北南の検証点のTS真値の2点間距離は「2006mm」である。このことから、TS真値と点群モデルの誤差は「+1mm」となり、要求精度は「3mm以下」の項目が対象となる。

精度検証に使用する検証点は、構造物を挟んで対角線となるように選定する。（図-2）

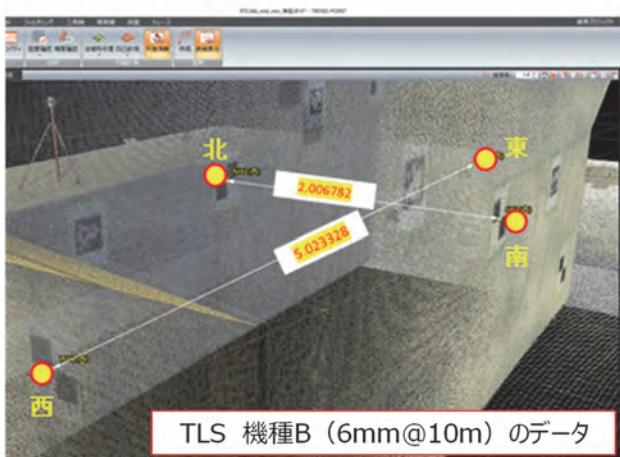
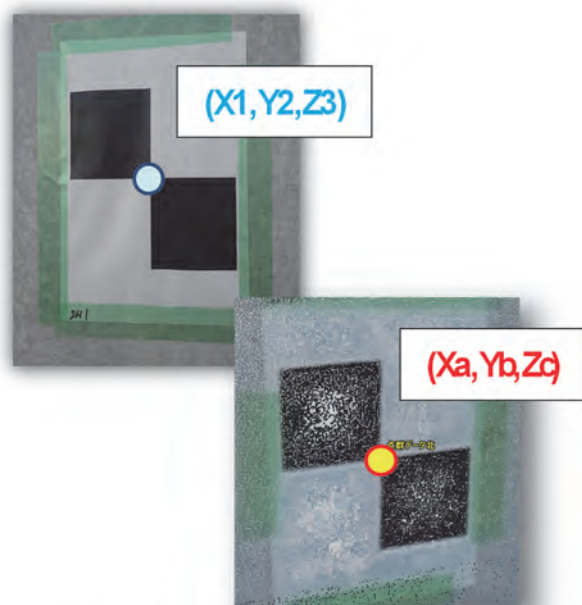


図-2 T L S精度確認状況

3.4 UAV 精度確認方法

UAV の精度確認は、現場で求めた T S 真値の座標 (X1, Y2, Z3) と点群モデル上の検証点の座標 (Xa, Yb, Zc) を直接比較し、要求精度 (Δ) = $\sqrt{(X1 - Xa)^2 + (Y2 - Yb)^2 + (Z3 - Zc)^2}$ の式によりその誤差を確認する (図-3)

要求精度は TLS 同様、それぞれ「3 mm以下」「7 mm以下」「10 mm以下」「16 mm以下」で、T S 真値と点群モデル上の検証点の座標との誤差の大きさによって、計測できる管理項目が変わる。



要求精度(Δ)=
 $\sqrt{((X1-Xa)^2+(Y2-Yb)^2+(Z3-Zc^2))}$

図-3 U A V精度確認イメージ

3.5 計測（立会）時間の比較

従来方法による出来形計測は①型枠のケレン・

清掃→②基準高の計測→③幅や厚さなどの各出来形計測→④監督検査職員による立会→⑤足場解体に大きく分けられる。本要領を適用することで、②基準高の計測、④監督職員による現場立会の作業を「作業人数1人」に削減することが可能となる。

また、従来方法では当たり前であった、ロッドやピンポールなどの計測作業も不要となり、大幅な計測時間の削減が期待できる。(図-4)

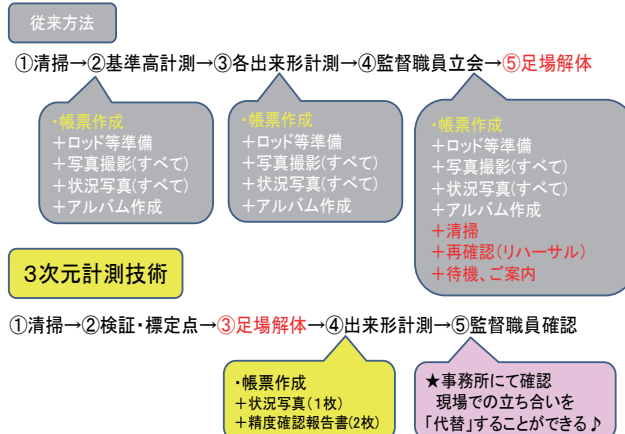


図-4 計測（立会）作業工程の比較

4. 計測結果

4.1 TLS 精度確認結果

TLS の取得データは【機種A：スキャン密度 20mm@10m、5mm@10m】【機種B：6mm@10m】の計3データの要求精度を検証した。

結果、スキャン密度「20mm@10m」のデータにおいては、「北南」で「T S 真値との差」が「13mm」「東西」で「8mm」となり、「要求精度±16 mm以下」の測定項目（敷幅(W2)、高さ(h)、天端長(ℓ1)、敷長(ℓ2)、支間長及び中心線の変位)のみが、点群モデル上で出来形計測が可能となる。

「機種A_5mm@10m」「機種B_6mm@10m」のデータに関しては「要求精度±3 mm」を満足したため、本要領のすべての測定項目で本要領の適用が可能という結果を得た。(表-4)

表-4 TLS スキャン密度別の要求精度確認結果

スキャン密度	北南	真値との差	東西	真値との差	要求精度を満足する測定項目
(TS真値)	2006	-	5026	-	-
20mm@10m	2019	13mm	5034	8mm	±16mm以下
5mm@10m	2006	0mm	5027	1mm	±3mm以下
6mm@10m	2007	1mm	5023	-3mm	±3mm以下

単位：mm

4.2 UAV 精度確認結果

UAV の取得データは「SfM ソフトA」「SfM ソフトB」の2種類のソフトを用いて、計4データの要求精度を確認した。

結果、4データすべてにおいて、要求精度が「±7mm以下」という結果となった。(表-5)

表-5 UAV 解析密度別の要求精度確認結果

	解析密度	TS真値との差				要求精度を満足する測定項目
		東	西	南	北	
SfM ソフトA	最高	3	6	4	2	±7mm以下
SfM ソフトB	最高	2	7	3	4	±7mm以下
	高	4	7	5	5	±7mm以下
	中	2	4	5	4	±7mm以下

単位：mm

4.3 従来方法との延べ計測作業時間の比較結果

従来方法、UAV、TLSの中で、最も計測（立会）作業時間が少ない結果となったのは、「TLS」を用いて計測を行った場合の「621分」であった。

理由として、UAV、TLSは「②検証点・標定点の座標取得(X,Y,Z)」という作業に時間が必要となるものの、対象構造物を点群モデル化してしまえば「基準高」「監督検査」は、点群モデル上で出来形計測を実施することができるので、大幅な計測時間の削減が可能であることが確認できた。

(表-6)

表-6 各出来形計測時間の比較結果

	基準高	出来形計測	監督検査	合計	作業人数
従来方法	155	735	380	1270	3~4名
UAV	5	631	40	676	1~2名
TLS	5	576	40	621	1~2名

単位：min

UAVとTLSを用いた場合の「出来形計測にかかった時間」に注目すると「TS真値の取得」と「対象物のスキャン」で差がある。

UAVの場合、標定点の数が1つの面で4箇所、合計24か所計測する必要がある、TSの盛り替え（計4回）が発生することから「155分」多くかかっている。また、「対象物のスキャン」に注目するとTLSの場合、標定点となるターゲットの座標取得に時間を要することから「90分」の差が生じている。(表-7)

表-7 出来形計測時間内訳

	出来形計測			作業人数
	TS真値取得	対象物スキャン	データ解析	
UAV	436	50	150	1~2名
TLS	281	140	160	1~2名

差 -155 +90 +10
単位：min

5. まとめ

5.1 結論

本報告で、「TLS（地上型レーザースキャナー）」を用いて出来形計測を行った場合、延べ計測（立会）作業時間が「621分」と従来方法と比較して、「649分」削減できることが分かった。また、スキャン密度は「5mm@10m以上」の密度でスキャンすることが望ましい。本要領を適用する場合、使用する3次元技術の持つ計測能力を十分に考慮して、対象物に対し「離しすぎない」「角度をつけすぎない」などに留意する必要がある。

5.2 今後の課題

今回の報告で、表-5で示すようにUAVを用いた際の全てのデータに関して、「要求精度を満足する測定項目」が「±7mm以下」となった。本要領で定める橋脚躯体工の「測定項目」「基準高」「厚さ(t)」「天端幅(W1)」「支承部アンカーボルトの箱抜 平面位置」等の「要求精度」が「±7mm以下」である。ことから、UAVを用いる場合は、仮設足場解体前に、上記項目の計測を従来方法で実施すべきかを受注者側で判断する必要がある。

UAVの要求精度をあげる方法として、安定したラップ率を確保するなどといった対応が考えられるが、写真撮影はUAV操縦者の熟練度によって大きく差が出る。対象構造物を自動で撮影できるUAV等を使用した場合の検討も今後していきたい。

また、TLSの出来形計測作業手順について、要領の要追記部分が判明した。TLSの場合、標定点の設置は任意であるが、それだと電子納品時に絶対座標を点群に付与することが困難なので、土工と同様に、「測定対象構造物の周りに評定点を設ける」など、文章の追記を検討する。

参考文献

- 1) 2015年（一社）日本建設業連合会「再生と進化に向けて」より作成
- 2) 国土交通省 3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）

12. UAVによる空中写真測量を用いた 土工の出来形管理に関する検討

国土交通省国土技術政策総合研究所 ○ 池田 和敏
国土交通省国土技術政策総合研究所 山下 尚

1. 背景と目的

1.1 ICT 活用工事の実現に向けた近年の取り組み

国土交通省では、平成28年度より「ICTの全面的活用」による生産性の向上に取り組み、インフラ整備の各プロセスにおいて3次元データの活用を推進するため、関連基準及び要領等を整備し、国の直轄事業としてICT活用工事を実施している。

この取り組みは、建設現場の生産性向上に向けて、建設生産プロセスの各段階において3次元データやICT等を活用する施策であり、国内に広くICTを普及させることで災害等の非常時における迅速な復旧復興作業での活用も期待されている。

図-1はICT活用工事件数¹⁾を示している。ICT活用工事は直轄、都道府県政令市のいずれにおいても実施件数に大きな伸びが見られ、全体としてICT活用工事が普及拡大している様子が伺える。

＜国土交通省の実施状況＞													単位: 件
工種	2016年度 [平成28年度]		2017年度 [平成29年度]		2018年度 [平成30年度]		2019年度 [令和元年度]		2020年度 [令和2年度]		2021年度 [令和3年度]		
	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	
土工	1,625	584	1,952	815	1,675	960	2,246	1,799	2,420	1,994	2,313	1,933	
舗装工	—	—	201	79	203	80	340	233	543	342	384	249	
浚渫工(港湾)	—	—	28	24	62	57	63	57	64	63	74	72	
浚渫工(河川)	—	—	—	—	8	8	39	34	28	28	42	41	
地盤改良工	—	—	—	—	—	—	22	9	151	123	189	162	
合計	1,625	584	2,181	918	1,948	1,105	2,710	2,132	2,942	2,396	2,685	2,264	
実施率	36%		42%		57%		79%		81%		84%		

＜都道府県・政令市の実施状況＞													単位: 件
工種	2016年度 [平成28年度]		2017年度 [平成29年度]		2018年度 [平成30年度]		2019年度 [令和元年度]		2020年度 [令和2年度]		2021年度 [令和3年度]		
	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	公告 件数	うちICT 実施	
土工	84	870	291	2,428	523	3,970	1,136	7,811	1,624	11,841	2,454		
実施率	33%		22%		29%		21%		21%		21%		

図-1 ICT 活用工事実施状況

また公共工事に用いられる工種は多種にわたること、またICTの進展が非常に早いことを踏まえ、新たなICT機器を活用し、又は既存のICT機器の活用範囲を拡大し、ICT活用工事の範囲を拡大する新たな基準類をより早く整備するため、令和元年度より「産学官連携による基準類作成の取組」を開始し、ICTを活用する立場にある関係団体から基準類に関する提案を募集している。(図-2)

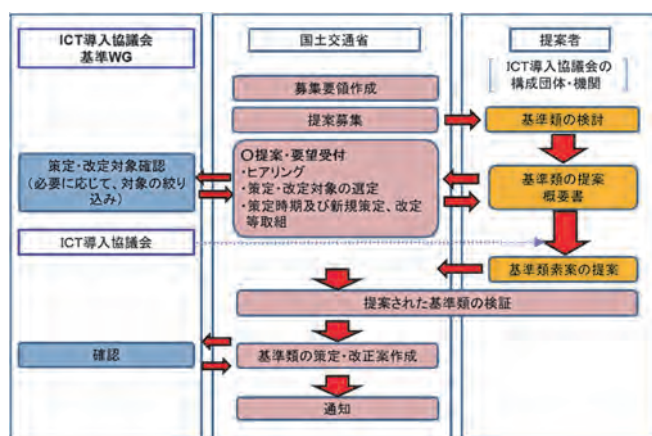


図-2 基準類民間提案のフロー

1.2 研究目的

本研究では、民間提案技術として応募された、ICT土工におけるUAVによる空中写真測量を用いた3次元計測技術に関する、既存の基準類の改訂（カイゼン）に関する以下の2提案について、検証実験を行い、既存要領への適用を検討する。

1.3 対地高度を一定とした撮影手法（等対地高度撮影）

現行規定では、同一コースは、直線かつ等高度と定められており、高低差の大きい現場においては、地上標高に合わせて複数回の飛行による計測を強いられているが、地上標高に応じて連続的に飛行高度を変更して対地高度を一定に保つことが出来れば、オーバーラップ率、地上画素寸法の変化を最小限にすることとなり、計測精度のばらつきが低減されるため1回の飛行で計測が完了できる。さらに飛行回数を減らすことで複数回の飛行による重複撮影箇所がなくなるため、撮影枚数を削減できることになり、計測や解析に要する時間の短縮も期待できる。(図-3)

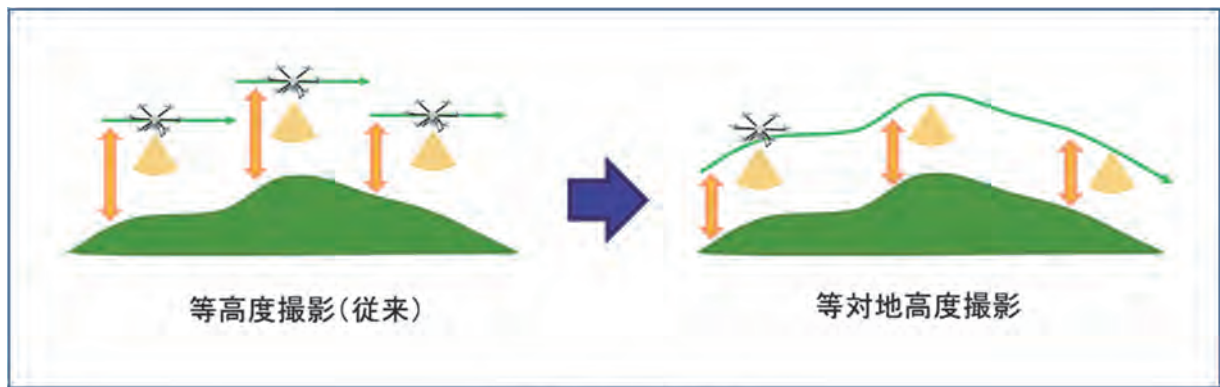


図-3 等対地高度撮影

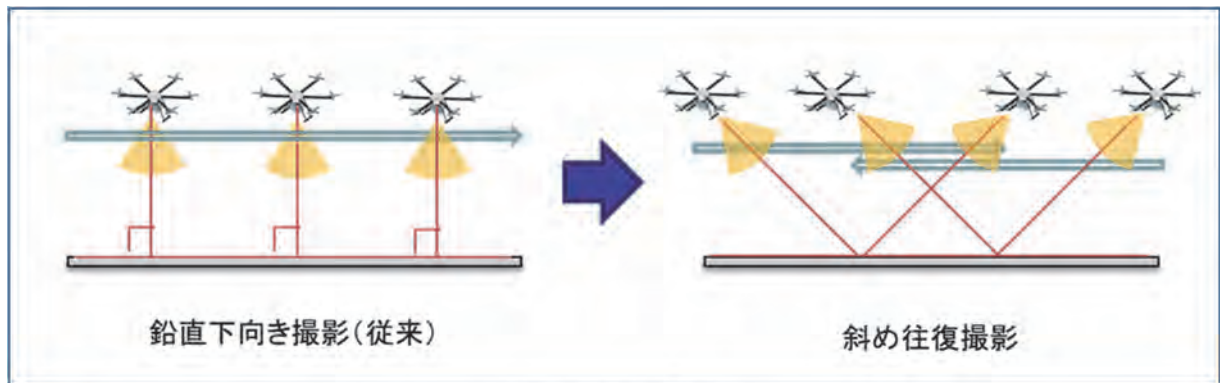


図-4 斜め往復撮影

1.4 カメラを斜めに向けた撮影手法（斜め往復撮影）

従来のカメラを鉛直下方に向けた撮影手法では、すべての画像が同一高さ、同一方向からの撮影になるため、画像解析時に投影中心から撮像面までの距離推定に複数の解が発生する場合があります。水平方向を確定できても、高さ方向に系統誤差が生じることとなり、この場合は後処理工程で標定点をを用いた座標補正を行うことで対応していた。カメラを斜め向きに置き換えて逆方向からのサイドラップを重ねる撮影手法を採用することにより、高さや方向の異なる別の視点からの画像を追加して画像解析が行えるため高さ方向のスケールが安定して推定されることとなり、計測精度の向上が期待できる。(図-4)

2. 検証方法

2.1 検証内容

本研究では、既存の「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）」で規定されている、ICT土工におけるUAVによる空中写真測量を用いた3次元出来形計測の精度確認試験実施手順に準拠した条件の下で、提案された2つの撮影手法が現行要領の規格値を満足することを検証し、さらに従来手法との比較も行う。

2.2 3次元出来形計測の精度確認試験実施手順

ICT土工におけるUAVによる空中写真測量の測定精度の確認方法は、設置した検証点における既知点の座標値（基準点あるいは、工事基準上などの既知点の座標値や、基準点及び工事基準点を用いてTSを用いて計測した座標値）と、UAVによる空中写真測量を用いて計測した結果から得られる検証点の各座標値の較差 x 、 y 、 z それぞれ $\pm 50\text{mm}$ 以内であることを確認する。

2.3 等対地高度撮影による出来形計測

高低差があり等高度での飛行では地上画素寸法に大きな変化が生じる試験場にて、オーバーラップ率や地上画素寸法が同一になるように2回に分けた従来の撮影手法と、地上標高に合わせて対地高度を一定に保ちながら飛行する撮影手法による計測を行う。また撮影条件として既存の「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）」で規定されている、ICT土工におけるUAVによる空中写真測量を用いた3次元出来形計測の測定精度に準拠し、地上画素寸法を 10mm/Pixel 、進行方向のラップ率は90%、隣接コースとのラップ率は60%に設定する。検証点を14点設置し、画像解析により生成した点群上の検証点座標と、現場内に設置された基準点を用いてTSで測量した検証点座標を比較する。(図-5～図-7)

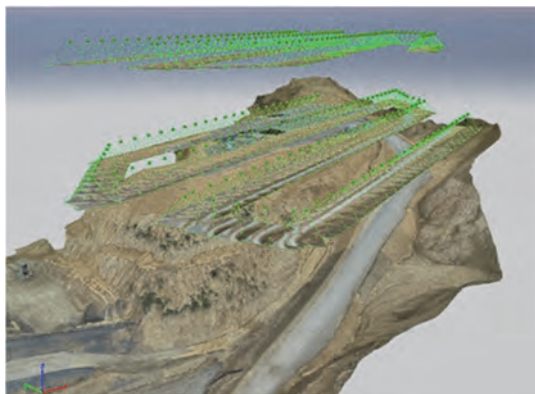


図-5 等高撮影の飛行ルート

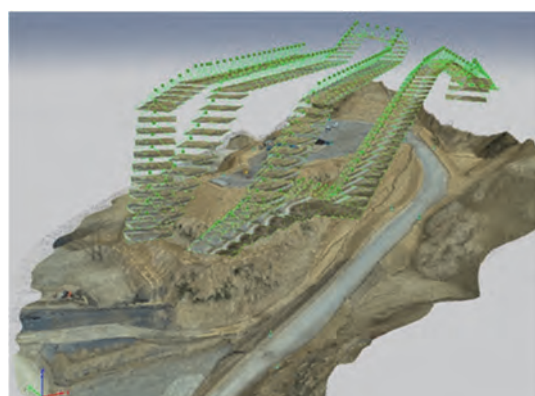


図-6 等対地高度撮影の飛行ルート



図-7 等対地高度撮影の検証点

抛し，地上画素寸法を 10mm/Pixel，進行方向のラップ率は 90%，隣接コースとのラップ率は 60%に設定する。検証点を 12 点設置し，画像解析により生成した点群上の検証点座標と，現場内に設置された基準点を用いて TS で測量した検証点座標を比較する。鉛直精度を確認するために，後処理工程の標定点を用いた座標補正を行う前の状態で計測精度を検証する。(図-8～図-10)

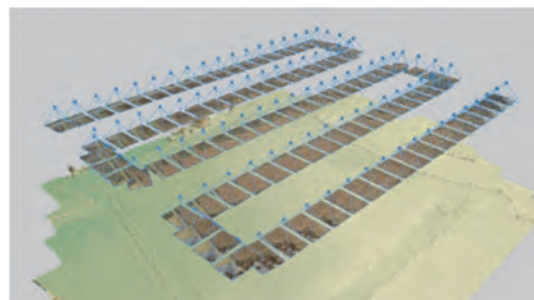


図-8 鉛直下向き撮影の飛行ルート

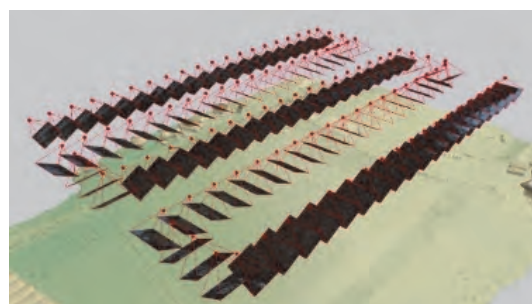


図-9 斜め往復撮影の飛行ルート

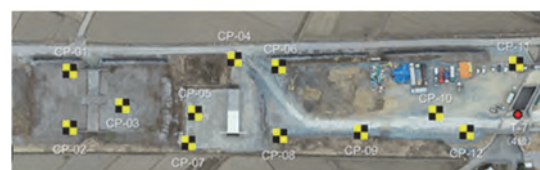


図-10 斜め往復撮影の検証点

2.4 斜め往復撮影による出来形計測

鉛直方向の誤差が生じやすい平坦な地形の試験場にて，カメラを鉛直下方に向けた従来の撮影手法と，同一コースでカメラの向きを進行方向に一定角に傾けた撮影手法による計測を行う。カメラの傾き（天底角）は 10° ， 20° ， 30° の 3 パターンの計測を行う。また撮影条件として既存の「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）」で規定されている，ICT 土工における UAV による空中写真測量を用いた 3 次元出来形計測の測定精度に準

3. 結果と考察

3.1 等対地高度撮影の精度検証結果

表-1 は TS で測量した検証点座標を真値とし，点群データの近傍点における座標較差の最大値，最小値及び平均値と標準偏差を，従来の撮影手法と等対地高度での撮影手法での計測についてそれぞれ記したものである。どちらの撮影手法も 14 点の検証点すべてにおいて前述の要求精度 $\pm 50\text{mm}$ 以内を満足した。さらに従来の撮影手法での 2 回の計測を合わせた写真枚数 257 枚，撮影時間 11 分に

対して、等対地高度による撮影手法では複数回の飛行による重複撮影箇所がなくなるため写真枚数186枚、撮影時間8分となり、それぞれ1/4程度の削減効果があった。さらに画像解析時間の短縮も図れるため、効率化に寄与する撮影手法と考察する。

3.2 斜め往復撮影の精度検証結果

表-2はTSで測量した検証点座標を真値とし、点群データの近傍点における座標較差の最大値、最小値及び平均値と標準偏差を、従来の鉛直下向き撮影と斜め往復撮影での計測についてそれぞれ記したものである。平面(XY)精度に関しては、すべての計測において大きな差は見られなかった。鉛直(Z)精度に注目すると従来の撮影手法では大きな誤差が確認されたが、斜め往復撮影の場合、いずれの天底角においても前述の要求精度を満足する±50mm以内での計測が行えており、別方向からの画像を追加して画像解析を行うことで高さ方向の誤差が低減できていることを確認できた。この場合、後処理工程の標定点を用いた座標補正が不要となるため、省力化に寄与する撮影手法と考察する。

4. 結言

提案された2件の撮影手法について、ICT土工におけるUAVによる空中写真測量を用いた3次元出来形計測の要求精度を達成できていることを確認した。施工における成果は、「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)」へ反映され、令和4年3月に改正要領が公表された。今後も各工種において検証を進め、基準類の改善を継続する予定である。

謝辞

本研究の現場検証は株式会社フジタの協力のもと、同社所有の機器を用いて実施した。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 国土交通省：ICT導入協議会（第15回）、2022
- 2) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)、令和3年3月

表-1 等対地高度撮影の精度検証結果

	等高度撮影（従来）			等対地高度撮影		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
最大値（差）	0.050	0.029	0.023	0.045	0.034	0.033
最小値（差）	0.021	0.006	-0.001	0.014	0.014	-0.009
平均値	0.030	0.020	0.010	0.025	0.026	0.012
ばらつき	0.009	0.007	0.007	0.008	0.006	0.012

単位：m N=14

表-2 斜め往復撮影の精度検証結果

	鉛直下向き（従来）			天底角 10°			天底角 20°			天底角 30°		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
最大値（差）	0.029	0.015	-0.310	0.027	0.016	0.006	0.033	0.016	0.023	0.032	0.012	0.020
最小値（差）	0.004	-0.003	-0.402	0.005	-0.002	-0.049	0.002	-0.005	-0.006	0.008	-0.006	-0.008
平均値	0.015	0.005	-0.350	0.015	0.005	-0.021	0.017	0.006	0.012	0.018	0.004	0.006
ばらつき	0.006	0.005	0.028	0.006	0.005	0.016	0.008	0.007	0.010	0.006	0.005	0.008

単位：m N=12

13. 堤防で使われる締固め機械の締固め性能について

酒井重工業株式会社

○ 内山 恵一

国立研究開発法人 土木研究所

橋本 毅

1. はじめに

2019年の記録的大雨により、全国142か所の河川堤防が決壊し甚大な被害が発生した¹⁾。堤防決壊の一原因は強度不足²⁾であるので、十分な締固めによって所要品質を確保し、強靱な堤防構築方法に関する見直しが急務である。堤防の締固め度とせん断強度や透水係数等の力学特性には一定の相関関係があることが報告されている³⁾。よって、締固め能力の高い締固め機械を選定し、所要の締固め度を確保することが不可欠である。一方、堤防の土は不透水性確保のため細粒分が多く、比較的高含水比で施工されることが多いため、作業用の締固め機械には走破性(トラフィカビリティ)が求められる。このように、堤防の締固め機械に求められる性能は、走破性と高い締固め性能である。

筆者らは、締固め機械の走破性を調べるため、供試土(細粒分まじり砂)の最適含水比(1Ec)より湿潤側において、ブルドーザ(14t)、土工用振動ローラ3機種(5t, 12t, 20t)、タイヤローラ(12t)、舗装用コンバインド振動ローラ(4t)に関する比較試験⁴⁾(以後、前回試験)を行い、走破性を示すコーン指数に加え、締固め密度と沈下量を計測した。その結果、5tと12tの土工用振動ローラが走破性と締固め性能の両面で優れていることを示した。

ただし、この試験は走破性を調べるのが主目的であったため、湿潤側のみでの試験であり、締固め性能を把握するには不十分であった。締固め性能を把握するには、突固め試験で締固め曲線を求めることと同様に、複数の含水比で試験を行うことにより締固め曲線を求め、最大乾燥密度と最適含水比を捉えることである⁵⁾。最近では、転圧ローラの締固め曲線が突固め試験(1Ec)のそれより上回っていることに着目し、施工含水比を1Ecの最適含水比よりも乾燥側を許容することで、現場での密度と飽和度を高い状態に保ち、盛土の遮水性や強度を向上させるための締固め管理方法が提案されている⁶⁾。このように、最近の締固め管理方法を適用する場合にも、締固め機械の性能を有効に使うために、機械の締固め曲線を捉えておくことが重要と考える。

そこで、筆者らは、堤防で使われる締固め機械の締固め性能を把握するために、前回試験結果⁴⁾と今

回実施した追加試験結果を用いて締固め性能を確認し検討したのでここに報告する。

2. 締固め機械とその仕様

検討した締固め機械の機種は、土工用振動ローラの3機種、運転質量12t(SV-12tと称す)、5t級(SVT-5t, SVF-5tと称す)、舗装用コンバインド振動ローラ4t級(TW-4tと称す)、及びブルドーザ14t級(D51-14tと称す)である。各機械の仕様比較を表-1に示す。土工用のSV-12t, SVT-5t, SVF-5tの起振力は舗装用のTW-4tより数倍大きい。また、高いけん引力と軟弱地盤での走行性を確保するため、前後輪駆動式で、後輪にラグ付タイヤを装備する。SV-12tとSVF-5tの前方振動輪は平滑な鉄輪、SVT-5tはパッドフット輪である。SVF-5tとSVT-5tの車両本体は共通で、SVF-5tはSVT-5tのパッドフット輪に平滑シェルを被せている(写真-1)。舗装用コンバインド振動ローラは、舗装面の仕上げと平坦性を確保するため、高振動数で低振幅である。

表-1 締固め機械の仕様

機種名	運転質量 kg	締固め幅/ 履帯幅 mm	起振力 (試験時) kN	振動数 Hz	振幅 mm
土工用振動ローラ (両輪駆動)					
SV-12t	19,980	2,130	255	26	2.18
SVF-5t	12,000	1,370	72	30	1.00
SVT-5t	4,770	1,370	72	30	1.52
コンバインド振動ローラ (両輪駆動)					
TW-4t	3,500	1,300	34.3	52	0.4
ブルドーザ					
D51-14t	13,820	710×2	—	—	—

3. 締固め試験方法

3.1 概要

本稿で検討した締固め試験(前回試験・追加試験)は、すべて同一の試験ピットで実施したものである(写真-1)。ピットは全長20m、深さ0.95mのコンクリート製(図-1)で、底部に供試土を締め固めて路床を造成した。供試土も全試験同一であり、細粒分まじり砂{SF}で、突固め試験(1Ec)による最大乾燥密度は1.947g/cm³、最適含水比は12.6%

である。



写真-1 締固め試験状況 (左: SVT-5t, 右: SVF-5T)

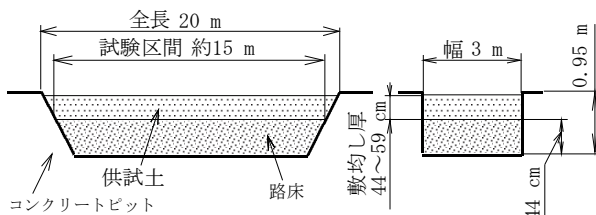


図-1 試験ピットの概要構造と各寸法

3.2 試験時の含水比

図-2に突固め試験(1Ec)の結果と、試験時の設定含水比を示す。設定含水比の文中での呼称は、7%前後ならw7と称する。

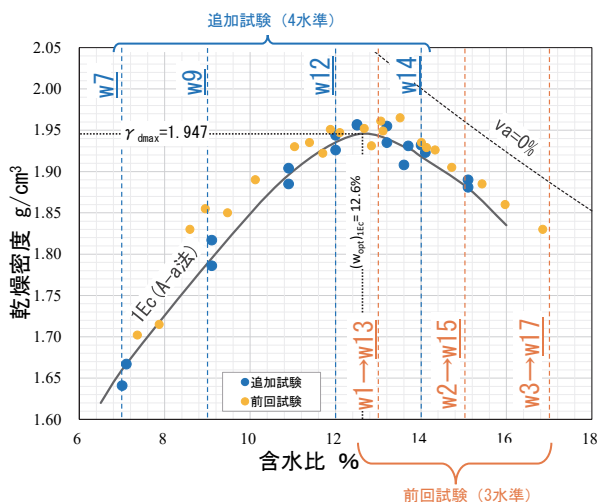


図-2 突固め試験(1Ec)と設定含水比

3.3 敷均し厚さ

試験は、異機種間の締固め性能比較を可能にするため、ピット内の供試土量をすべて同一に設定した。その結果、含水比増加に伴う初期敷均し厚さは、w7で44~45cm, w9で49~55cm, w12で53~57cm, w14で55~59cmになった。

3.4 転圧回数と測定項目

供試土の敷き均し後、静的ローラ(質量900kg, 輪径55cm, ロール幅280cm, けん引式)により予備転圧した。締固め密度、CBR及び沈下量は、予備転圧後「P0」と各転圧回数「P2, P4, P8, P16」後

に測定した(写真-2)。SVT-5tではパッドフット貫入底面で測定した。下層密度は、P16後の表面と路床の中間位置、またSVT-5tの場合、パッド底面と路床との中間位置で各々測定した。



写真-2 測定状況 (左: 砂置換法, 右: CBR)

4. 試験結果

4.1 締固め曲線

各締固め機械の締固め度(P16後の表層密度)と含水比の関係を図-3に示す。D51-14tは、w13, w15, w17が前回試験⁴⁾の結果である。SVT-5tとSVF-5tの締固め度は同等なので両方の平均値から曲線を図示した。

図-3から分かるように、各締固め機械の最大締固め度(以後、 D_{c_max})と最適含水比を含む締固め曲線が求められた。この締固め曲線を基に性能の差を見るため、締固め曲線1Ec(以後、曲線1Ec)を基準にして、各機種の曲線を比較する。SV-12TとSVT/SVF-5Tは、曲線1Ecを上回っており、 D_{c_max} は、SV-12tで109%, SVT/SVF-5Tで103.5%であった。TW-4tは、曲線1Ec最適含水比の湿潤側でのみ上回っており、 D_{c_max} は101.2%であった。D51-14tは、全ての含水比で曲線1Ecを下回っており、 D_{c_max} は95.5%であった。この結果は、締固め性能の差を示しており、各締固め曲線が、締固めエネルギーの増加に伴いゼロ空気間隙曲線($va=0\%$)に沿って斜め左上方へ移動している。

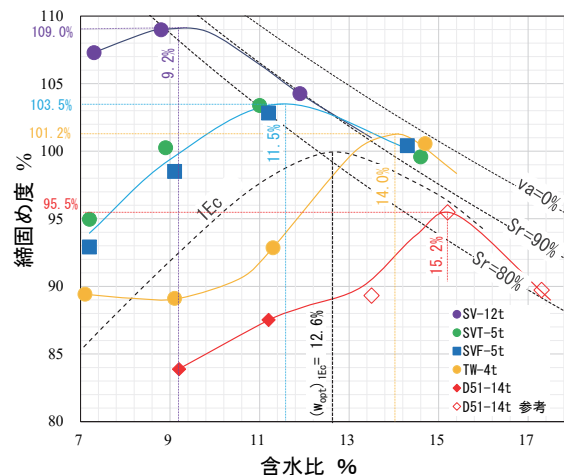


図-3 各締固め機械の締固め曲線

最近の遮水性盛土の締固めで、曲線1Ec最適含水比より乾燥側で施工している⁶⁾ことを考えると、曲線1Ecを上回るSV-12tとSVT/SVF-5tを使うことで、盛土の締固め度（密度）を上げることができ、結果として品質向上に繋がるものと考え。

4.2 締固め度と転圧回数

図-4は転圧回数と締固め度の関係で、w9とw12の結果を各図(a)と(b)に示す。ここでは、図-3に示した締固め曲線での最適含水比の乾燥側と湿潤側が、「締固め度-転圧回数」関係にどの様に影響するかを見る。

SV-12tの結果を見ると、図-3の乾燥側であるw9の場合、転圧回数増加による締固め度は漸増傾向であるのに対し、湿潤側のw12では、P2で一気に最大値へ達しその後最大値を保持している。SV-12t以外の機種は、w9・w12ともに図-3に示す締固め曲線での乾燥側にあり、転圧回数増加による締固め度は漸増傾向である。

このように、最適含水比を境に、転圧回数増加に伴う締固め度の増加傾向に違いが出てくることが分かった。

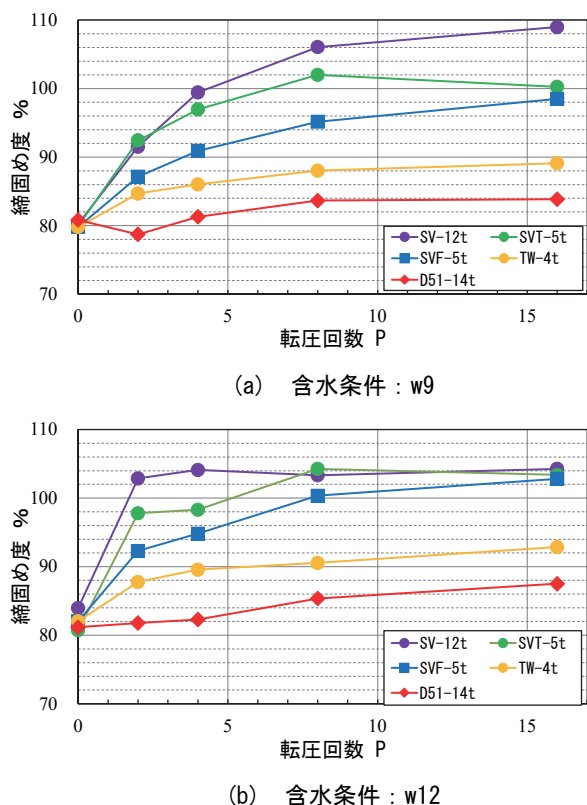


図-4 締固め度と転圧回数の関係

4.3 CBR と含水比の関係

各締固め機械のCBR (P16) と含水比の関係を図-5に示す。全機種において、含水比の増加に伴い、CBRは減少傾向である。機種間の比較では、w7・w9でCBRの差が見られるが、曲線1Ec最適含水比

(12.6%) 付近では、ほとんど差がない。

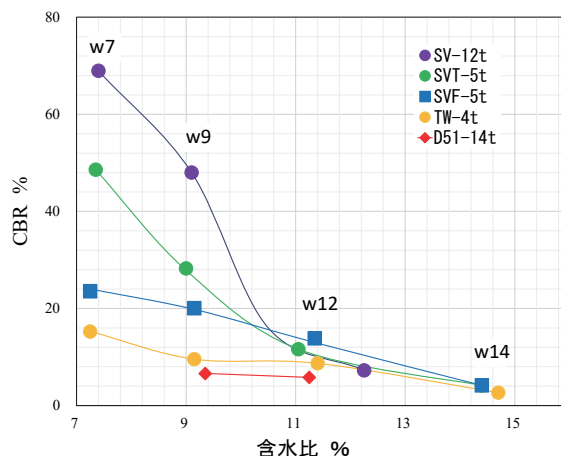


図-5 CBR と含水比の関係

4.4 供試土層の平均締固め度

w9とw12におけるP16後の表層と下層の平均締固め度を図-6に示す。供試土層の平均締固め度は、SV-12tは各々94%と103%、SVT-5tとSVF-5tは基準値(90%)に対し±1~2%の範囲に分布する。TW-4tとD51-14tは、基準値より約10%低い。本結果からも舗装用コンパインドローラ (TW-4t) とブルドーザ (D51-14t) の締固め能力は極めて低いと言える。なお、本結果には、締固め性能ばかりでなく、P0での敷き均し厚さも影響している(考察を参考)。

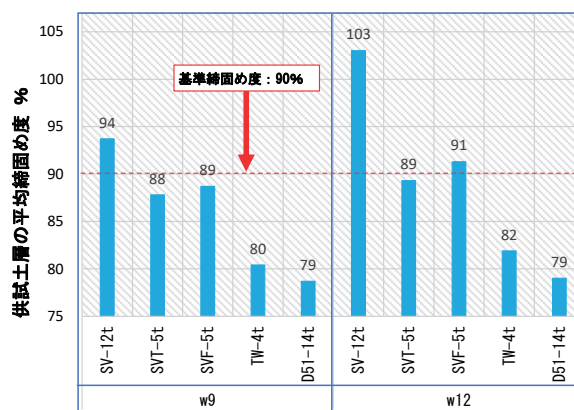


図-6 供試土層の平均締固め度

5. 考察

堤防施工で使用する締固め機械の締固め性能を把握するため、締固め曲線1Ecの最適含水比より乾燥側における締固め試験を行った。その結果、前回試験⁴⁾と同様に、5tと12tの土工用振動ローラ (SV-12t, SVT/SVF-5t) は、締固め曲線1Ecを上回ったが、舗装用コンパインド振動ローラ (TW-4t) と14tのブルドーザ (D51-14t) は、1Ecを下回り、かつ供試層内の平均締固め度は基準締固め度(90%)に達しなかった。各機種の締固め性能の差

は、機械から地盤に与える圧力の差に起因していると考えられる。転圧ローラが、自重と起振力の組合わせで締め固めるのに対し、ブルドーザは自重による履帯接地圧に依存するためである。また、転圧ローラの中でも、起振力と振幅を大きく設定している土工用振動ローラの方が、締め固め性能が高い。

次に、4.4で述べた平均締め固め度に影響するP0での敷き均し厚さについて考察する。P16後のw9とw12における供試土層の厚さを図-8に示す。SV-12tが約30cmに対し、他機種は32から43cmに分布し、15～55%も厚い。実際の土木現場では、締め固め機械の能力に応じて締め固めの仕上がり厚が30cmとなるように敷き均し厚を適宜調整するが、本試験では、異機種間の締め固め能力を比較するため、土量一定を本締め固め試験の基本条件としたため、このような違いが生じている。

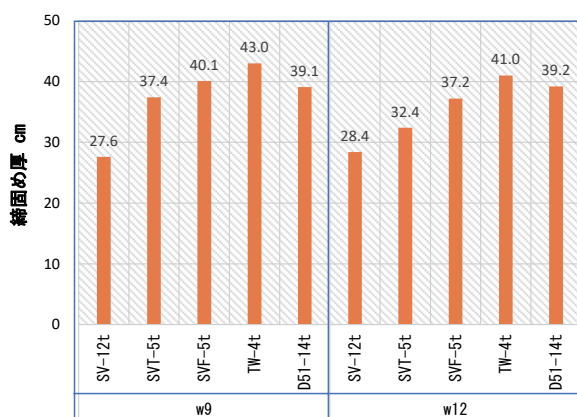


図-8 各供試機の P16 後の層厚

最後に、各現場条件に応じた最適な転圧ローラを選定するために、各機械仕様と試験結果から得られた締め固め性能の関係を紹介する。振動輪の動線圧（振動輪側の軸重量と起振力の和を締め固め幅で除した値）に着目すると、図-9のように、動線圧と締め固め度（w9, P16）との間に良好な相関関係が見いだせる。

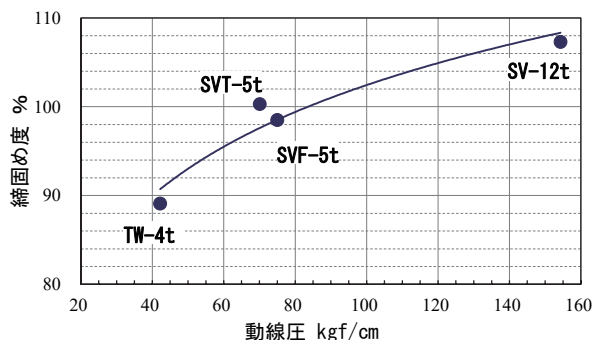


図-9 動線圧と締め固め度の関係

6. おわりに

各種転圧ローラ及びブルドーザの締め固め試験を実施した。12tと5tの土工用振動ローラの締め固め性能は最良であり、これらの機種は前報⁴⁾での走破性（コーン指数：243kN/m²）の試験結果も良好であった。

一方、ブルドーザは走破性に優れある程度の締め固め効果（いわゆるブル転）があるため、従来から、敷き均しと締め固め（ブル転）作業に兼用されてきた。しかし、追加試験の結果によると、土質、含水比、層厚等の条件によっては、締め固めの基準値（90%）を満足しない。同様の傾向は、（国研）土木研究所および民間企業9社による共同研究⁷⁾でも確認されている。

前回報文⁴⁾とともに、本稿で示した結果が、堤防の品質向上の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省 Press Release：令和元年東日本台風の発生した令和元年の水害被害額が統計開始以来最大に、2021
- 2) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会：藤沼湖の決壊原因調査、2012
- 3) 石原雅規：河川堤防の施工事例における締め固め実態と展望，基礎工 Vol.48 No.11, pp.67-70, 2020
- 4) 内山，眞壁：転圧ローラのコーン指数と締め固め性能について，建設施工と建設機械シンポジウム，No. 19, 2021
- 5) 根本，日向，井上：締め固め機械の性能，創立20周年論文集，建設機械化研究所，pp.26-47, 1984
- 6) 坂本，龍岡ら：締め固めエネルギーと飽和度を重視した遮水性盛土の締め固め管理，土木学会論文集C，Vol. 77, No. 1, pp.43-58, 2021
- 7) （国研）土木研究所：盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する共同研究報告書，（国研）土木研究所共同研究報告書第461号，2014

14. 締固め度自動計測システムを搭載した自動化振動ローラの現場実証

大成建設(株)技術センター生産技術開発部 ○ 市村 朋也, 後藤 洸一, 青木 浩章
大成ロテック(株)技術研究所先進技術研究室 城本 政一, 佐々木 恵

1. はじめに

建設業では技術者や技能者などの就業者が年々減少傾向にあり、将来、深刻な人手不足に陥ることが予想される。そのため国土交通省は i-Construction を提唱し ICT 技術を建設現場に導入し生産性を向上させる取り組みを行っている。その中で PRISM（官民研究開発投資拡大プログラム）を活用して公共土木工事において、様々な分野の知見を結集することで、デジタルデータをリアルタイムに取得し、これを活用した IoT・AI をはじめとする新技術を試行することによって建設現場の生産性を向上するための研究開発を促進する「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」を進めている。この取り組みの中で筆者らは 2020 年から 2021 年に 5 社コンソーシアムを組み「データを活用して土木工事における品質管理の高度化を図る技術」として道路舗装工事での品質管理の高度化を目指し以下の項目について現場実証した。

- ①路盤材の自動転圧、締固め度自動計測
- ②締固め度の面的管理、帳票のクラウド上共有
- ③基層・表層の面的温度管理、帳票のクラウド上共有

実施内容の概要図を図-1に示す。2021年の取組みとして東北地方整備局発注の「玉川野田地区舗装工事」において上記提案技術の実証実験を行った。本稿では①②を実施した成果について記す。

2. 工事概要

工事名：令和 2 年度 玉川野田地区舗装工事
発注者：国土交通省東北地方整備局三陸国道事務所
受注者：大成ロテック株式会社
工期：2021 年 4 月 1 日～2021 年 9 月 21 日
施工場所：岩手県九戸郡野田村大字野田第 8 地割
施工延長：本線土工部 L=960m
平面図、施工対象範囲を図-2 に示す。



図-1 プロジェクト概要

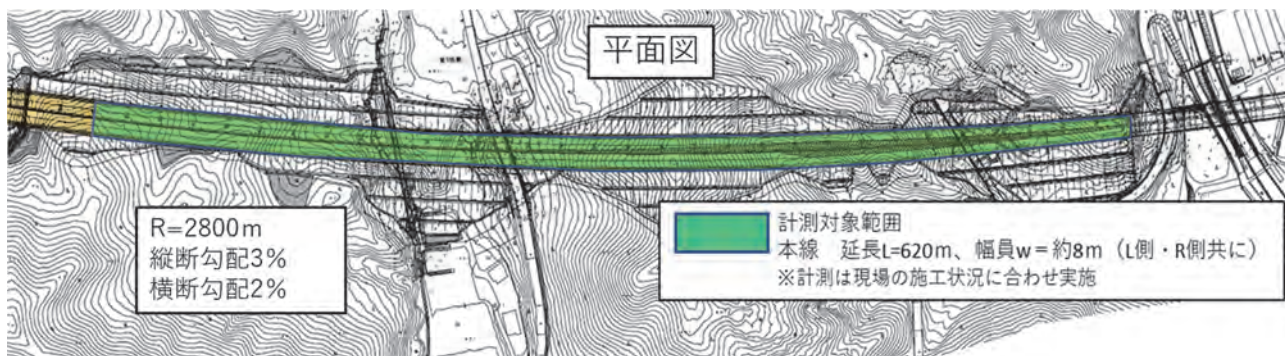


図-2 現場平面図、施工対象範囲

3. 実施概要

3.1 ①路盤材の自動転圧、締固め度自動計測

(1) 自動化振動ローラ概要

自動化振動ローラは筆者らが開発した遠隔操作と自動運転が可能な振動ローラである。各種センサー類や通信機を搭載し電子制御ができるように改造している。自動転圧走行は地盤や路盤の範囲と走行経路を指定し、転圧範囲や転圧回数等の条件及び制御関連のパラメータを設定することで行うことができる。自動走行を行うための走行計画は図-3 のように 2 通りの方法で作成することが可能である。施工箇所の四隅の座標を指定した矩形の範囲をラップ幅、往復回数を設定し直線的に走行経路を作成する方法と、道路線形的设计データである LandXML データより作成する方法がある¹⁾。前者は主に土工事や造成工事で使用してきており、直線での走行を想定している。後者の走行計画は LandXML を活用して作成した必要通過点「waypoints」の座標値を追従するように自動走行するため、曲線での走行に対応している。本取組は曲線を含む道路工事であるため後者を採用した。

(2) 実施結果

自動転圧と締固め度の自動計測は計測対象範囲のうち現場の施工状況に応じて実施可能な範囲の下層路盤工（材料：RC-40）にて実施した。走行計画は 11 区画作成し、1 区画を約 50m とした。1 区画において幅員によってレーンを 2～3 本に設定し、1 レーン毎に転圧走行 2 回、計測走行 1 回とした。振動ローラは 1 区画ごとに最端レーンの端部から自動制御を開始し、自動転圧作業と締固め度の自動計測を繰り返しながら連続施工した。振動ローラの走行速度については計測時に計器と路面の密着性を安定させる必要があることや締固め度計測時間の確保、計器の損耗を防止するため、転圧時やレーン変更時の速度は 2 km/h、計測時は速度を 1km/h と設定した。自動走行の延べ施工面積は約 6,600m²であった。

全区画で自動転圧、計測の一連の動作が正常に行われた。図-4 に 1 区画の自動走行結果を示す。

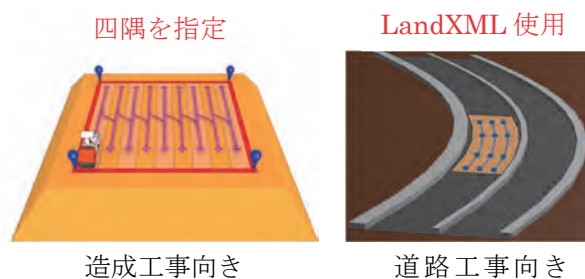


図-3 走行計画作成イメージ

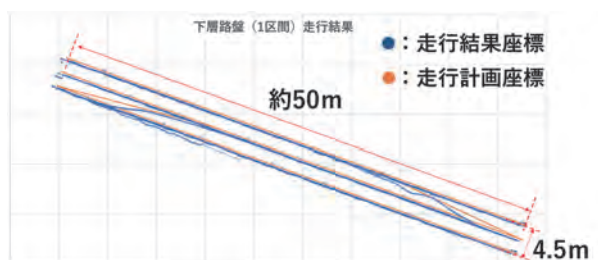


図-4 自動走行結果（1 区画）

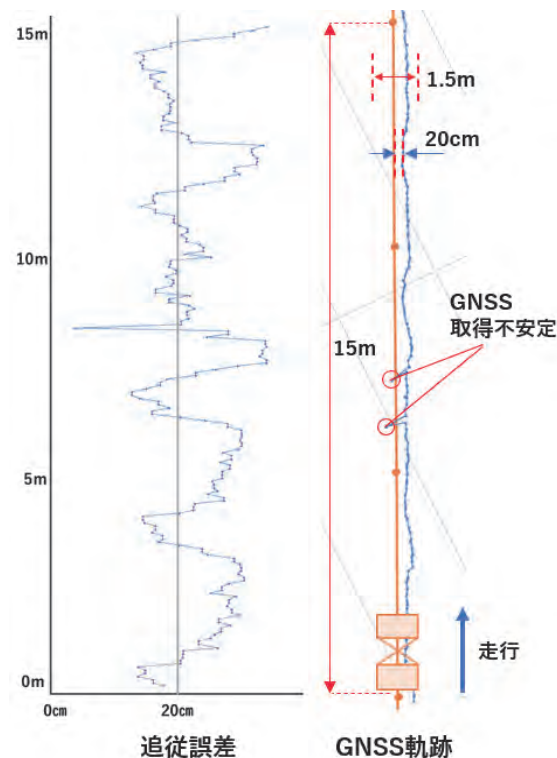


図-5 自動走行結果（拡大）

自動走行結果座標を青色、走行計画座標を橙色でプロットしている。図-5 に走行結果の拡大図と追従誤差の推移を示す。追従誤差とは設定した走行計画の waypoints 間をつないだ線と GNSS により取得した振動ローラの走行座標の距離である。追従誤差が 20cm 付近で推移しているが、急操舵による逸走と路面の損傷を防止するため、定常誤差 20cm を許容しているためである。他の 10 区画においても同様の傾向がみられた。図-4、5 の走行結果座標より数点 GNSS 座標が外れている箇所が存在するが、これは施工区間中に長大法面の区間があり、GNSS 電波が安定して取得できなかったためであると考えられる。しかし走行中振動ローラが走行計画を逸脱することはなく安定した自動走行が行えた。また全区画での追従誤差は平均で 23cm であり精度へ大きく影響しなかった。今回縦断勾配 3%、横断勾配 2%の緩やかな斜面であったが、既往の知見では勾配のない曲線を自動走行した時の追従誤差は平均 20cm であり¹⁾、勾配による極端な差は見られなかった。

3.2 ②締固め度面的管理、帳票のクラウド共有

(1) 締固め度自動計測システム概要

締固め度自動計測システムは転輪型 RI 計器を使用し、振動ローラに搭載し走行しながら計測が可能なシステムである。図-6 に装置図を示す。計器は密度計、水分計それぞれをローラ型の筐体に収納しており、振動ローラの前後輪の間に搭載している。従来の締固め度計測では砂置換法や透過型 RI 測定器を使用して計測しているが、これらの方法は締固め後の地盤を削孔する必要があるため多大な時間と労力がかかるが、本システムは測定用の削孔を行わずに非破壊での計測が可能であり、かつ対象範囲を全面的に計測することができるため品質管理の高度化や労働生産性の向上効果に期待ができる。

(2) 締固め度自動計測

本工事での締固め度の自動計測は下層路盤(RC-40)、上層路盤(再生瀝青安定処理混合物)、基層(再生粗粒度アスファルト混合物 (20))、表層(再生密粒度アスファルト混合物 20t 改質II型)で試行した。前述の通り計測時の速度は 1km/h とし、下層路盤のみ自動運転と同時に上層路盤～表層は有人運転にて実施した。計測精度検証は下層路盤では砂置換法による現場密度試験、上層路盤～表層はコアによる密度試験の結果を採用した。下層路盤における転輪型 RI 計器による計測と従来手法による計測の結果比較を図 7 に示す。縦軸が転輪型 RI 計器による計測結果、横軸が砂置換法による計測結果である。砂置換法と比較して湿潤密度が $\pm 0.1[\text{g/cm}^3]$ 、含水量が $\pm 0.05[\text{g/cm}^3]$ 以内であり、通常用いられる透過型 RI 計器と同等の計測精度である。



図-6 締固め度自動計測システム

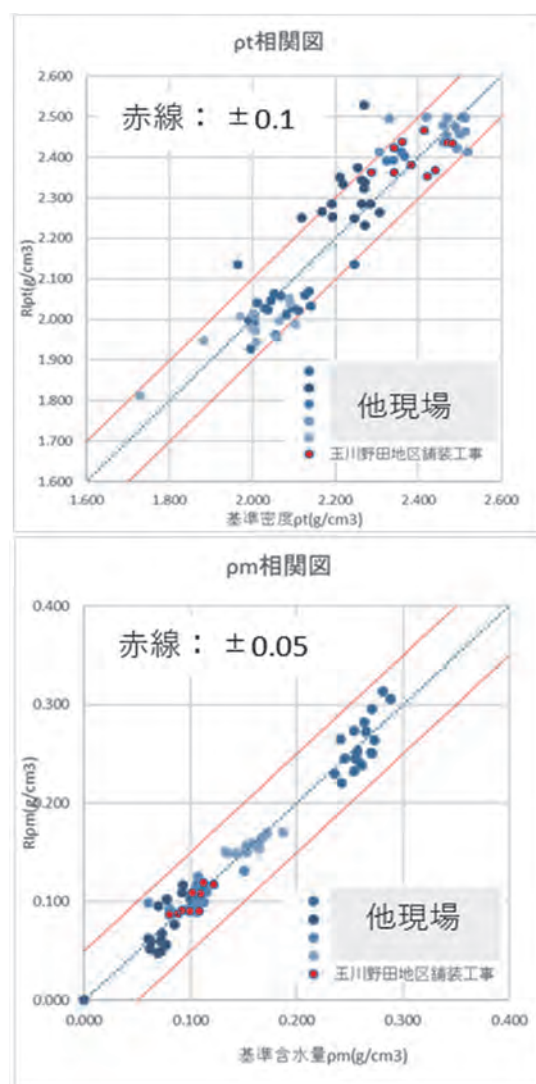


図-7 砂置換法と転輪型 RI 計器の相関図

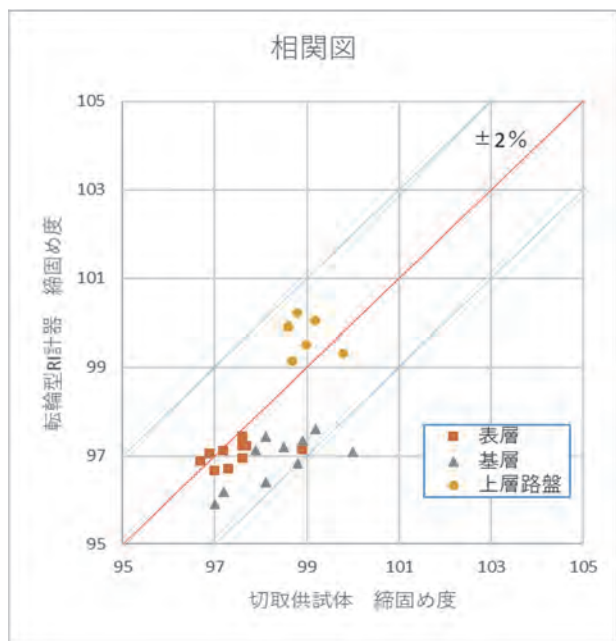


図-8 コアと転輪型 RI 計器の相関図

		下層	上層	基層	表層
平均締固め度 [%]	転輪型RI	102	102.2	99.6	99.7
	従来	97.4	99.1	98.4	97.5
計測点数	転輪型RI	659	2119	2879	1116
	従来	10	10	10	10
計測時間 [h]	転輪型RI	1.5	4.5	6	2.5
	従来	3.3	—	—	—
1点当たりの計測時間	転輪型RI	8.2秒	7.6秒	7.5秒	8.1秒
	従来	20分	—	—	—

図-9 計測能力比較

土の密度試験

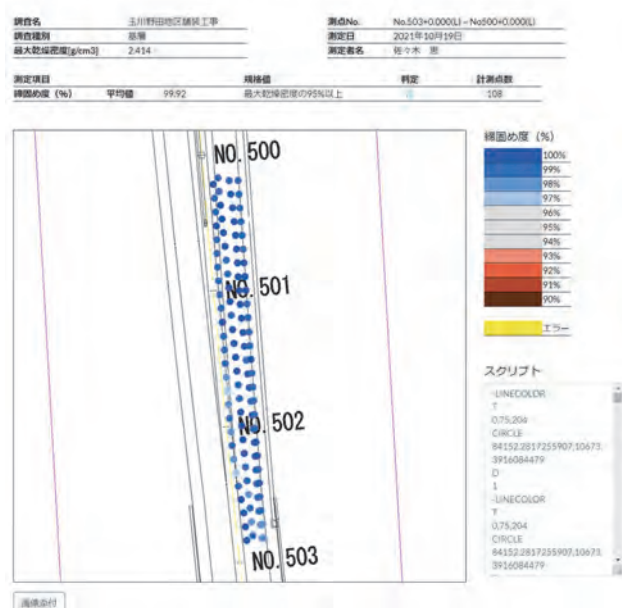


図 10 作成帳票

上層～基層はコアによる密度試験での締固め度と比較した。比較結果を図-8 に示す。どの層でも締固め度はほとんど $\pm 2\%$ 以内に収まっており、概ね基準値を満足する結果となった。転輪型 RI 計器と従来手法の締固め度の計測能力についての比較を図-9 に示す。従来方法は 1000 m²毎に 1 点、1 点当たり約 20 分の時間がかかるが、転輪型計器では 3 m²に 1 点、一点あたり約 7～8 秒と非常に効率よく計測可能であることが確認できた。

(3) 計測結果の帳票化

転輪型 RI 計器で計測した締固め度のデータは計測座標、時刻等のデータとともに CSV ファイルとして記録され、ネットワーク経由でクラウドサーバーにアップロードされる。アップロードされたデータは即時に閲覧することができ、帳票形式での表示も可能である。帳票形式には測定値以外の管理基準値や材料などの情報も併せて記述される。帳票は計測座標と締固め度がヒートマップとして表示され基準値以上を青色、未満を赤色でプロットしている。帳票の作成は web の帳票アプリケーション上で帳票化したいデータを選択するだけで行うことができ、関係者間での共有を容易に行える。このように計測結果をリアルタイムで面的に表示することで脆弱な箇所や地盤改良を必要とする箇所などの是正処置のための判断基準としての活用が可能であり、品質の向上につながると考える。図-10 に本実証での作成帳票の一例を示す。

4. まとめ

自動化振動ローラによる自動走行が実際の道路舗装工事においても可能であることを、延べ走行面積 6,600 m² の実証試験で確認した。全走行を通してこれまでに行ってきた造成工事での自動走行精度と同等であることが確認でき、施工範囲付近の構造物への接触や逸走がなかったことから安定した走行が可能であるといえる。

締固め度の自動計測については全実施面積延べ 21870 m² を行うことができアスファルト系材料の品質管理に使用できる十分な精度が得られた。これらの技術を活用することで品質管理にかかる時間や作業人員を削減することができ、効率化や高度化につながると考えられる。

参考文献

- 1) 田村道生, 青木浩章, 後藤洗一, 越村聡介: 自動走行振動ローラ「T-iROBO® Roller」曲線自動走行の開発, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-689, 2021

15. 重機エコ最適化モニタリングシステムの開発

大規模土工現場へのシステム導入および脱炭素に向けたデータの検証

西松建設株式会社

○ 井上 洸也

齋藤 貴之

1. はじめに

近年の世界情勢として、気候変動問題への取り組みが加速している。特に地球温暖化を起因とする気候変動（気温上昇や集中豪雨の増加、台風の大型化・強力化による災害発生）は我々の生活に大きな影響を及ぼす。地球温暖化の要因は温室効果ガスの濃度が上昇したことが大きく支配しており、その中で7割以上占めているのが二酸化炭素（CO₂）である。¹⁾

これらの現状を踏まえ、わが国は2050年までにカーボンニュートラルの実現を宣言しており、CO₂排出量の大幅削減に取り組んでいる。

建設業においては、再生エネルギーの導入や低燃費型の重機や車両の選択等によって、CO₂削減に取り組んでいる中、当社は重機の低燃費運転に着目し、現場で稼働する重機のエンジン稼働状況をモニタリングするシステムの開発を行った。

本論文では開発の概要とデータ取得実証実験について報告する。

2. 開発の背景

建設現場から排出されるCO₂のうち約7割は重機や車両を稼働させるために必要な軽油に起因している。（図-1）そして実際のオペレーションを見ると、出力不足を懸念し、常時フルスロットル、パワーモードでの作業や、作業間での長時間のアイドリングが散見されているのが実情である。

このような状況の中、エンジン回転数を10%低減させると燃費向上は10%以上の効果が見込まれる。²⁾そこでエンジン回転数を抑制させながら作業するための支援ツールとして本システムの開発に着手した。

一方、各メーカーでは低燃費型の重機や車両の開発が活発となっている。近年販売されている機種では状況に応じたエンジンコントロールを行っており、燃費やエンジンの稼働状況も運転席のディスプレイから閲覧が可能となっていることが多い。

しかし、これらは近年導入された機械に搭載されている機能であり、機能を搭載していない旧型

の重機が現役で稼働している現場がほとんどである上、運転席のディスプレイ上で表示される情報は瞬間もしくは短期的なデータのみしか見られない場合が多く、月単位や施工期間中のデータを統括して分析するのには適さない。

また、一つの現場で稼働する重機がすべて同じメーカーで揃える可能性は低く、燃費等の考え方や機能については各メーカーの意匠が反映されており、統括してデータを管理するのは難儀することが予想される。

そこで、本システムではエンジンの回転部から直接回転を読み取る単純な機構を採用することで、エンジンで稼働する重機や車両全てに取り付けることを可能とし、メーカーや機種、年式を問わずエンジンの稼働状況（エンジン回転数）のデータをリアルタイムで取得でき、それらのデータを一括で参照するシステムとした。

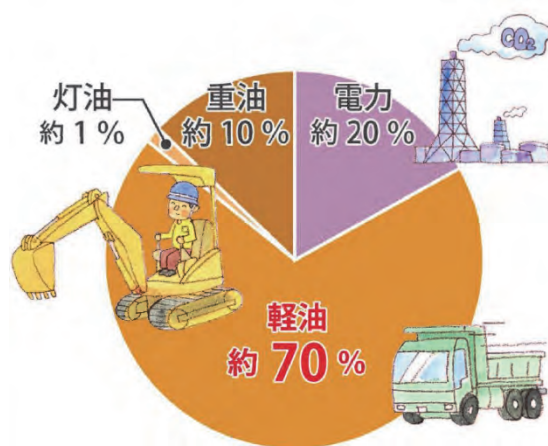


図-1 建設現場における温室効果ガス発生割合

（出典：「わたしたちにできる地球温暖化防止」日本建設業連合会，p10，2019年8月

<https://www.nikkenren.com/kankyoku/pdf/fightglobalwarming.pdf>）

3. 開発システムの構成

3.1 システムの概要

本システムの全体構成を図-2 に示す。システムはデータ取得部と可視化部に大別される。本システムを導入することにより、現場内で稼働する重機それぞれのエンジン稼働状況をモニタリングすることが可能となる。これにより、余剰な稼働や不必要な高回転での作業を把握することで、最適回転数での作業をオペレータへ意識付けさせることができ、余分なエンジン稼働を削減させ、燃費の向上、CO₂排出量の削減に寄与することができる。

3.2 データ取得システムの構成

本システムでは「エンジンの回転数」と「位置情報」をリアルタイムで取得できる。前述したとおり、メーカーや機種等によらないデータ取得を前提としたので、後付け可能かつ、重機の内部システムとは完全に切り離れたシステムとして完結するような構成とした。各データの取得方法について述べる。

(1)エンジン回転数

エンジン回転数は各重機のエンジンと連動した回転部（フライホイールやオルタネータ）に光ファイバーセンサを設置し、回転部に貼付した反射板の検知間隔の信号を取得。（写真-1）センサからの信号は PLC（Programmable Logic Controller）によって一分間当たりの回数に演算され、その数値を回転数としている。オルタネータの場合エンジンと回転比が異なるので、重機に設置されているタコメータと数値を照合し比率を変えた。データは8秒に1回取得される。

取得したデータは無線通信（Wi-Fi）を利用しデ

ータを集約する PLC へと伝送され、データを管理する専用 PC にて自動生成された csv ファイルへ書き込まれる。csv ファイルは一定期間ごとにクラウド上へアップロードされ蓄積する。

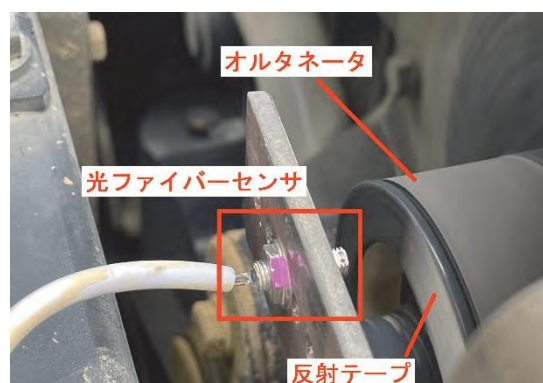


写真-1 エンジンフード内装置

(2)位置情報

位置情報は GNSS(全球測位衛星システム)から受信した緯度・経度を利用し 2 次元座標を取得する。重機キャビン内に小型アンテナを設置し衛星信号を受信する。（写真-2）位置情報を取得することによって、対象となる重機がどの箇所で作業をしているのか、また、走行する車両であればどのような軌跡で走行したのかをデータ化することが可能となる。エンジン回転数同様に csv ファイルへと書き込まれる。

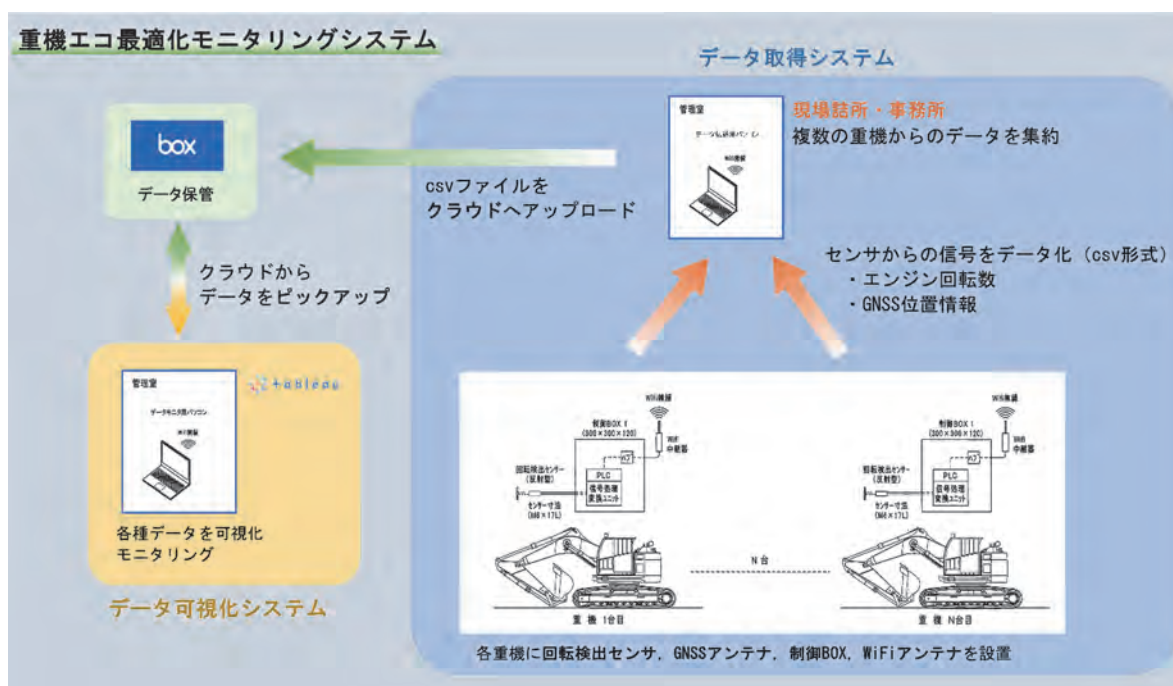


図-2 システムの構成



写真-2 重機キャビン内装置

3.3 データ可視化システムの概要

次に重機から取得したデータを可視化するシステムについて述べる。

今回重機から取得されるデータは大容量となることが予想されたことに加えて、エンジン回転数と位置情報、燃費情報等の複数の因子を単純明快に示す必要があることから、既存の BI (Business Intelligence) ツールを活用してデータの可視化のシステムとして組み込むことにした。今回は「Tableau」を利用した。「Tableau」のダッシュボード機能を利用することによって、クラウド上にアップロードされた重機より取得した膨大なデータから、必要な情報のみをピックアップして可視化し、重機の運転状況に関して多角的な分析を実現させた。

4. データ取得実証実験の概要

4.1 実証実験の概要

本開発の実証を、当社で施工中である大規模土

工現場にて行った。対象とした機械は現場内の掘削土を運搬する 40t 級重ダンプトラック 4 台とダンプトラックに積み込みを行う 4m³ 級と 2m³ 級油圧ショベル各 1 台 (写真-3, 4) の計 6 台とし、装置を取り付け、データ取得の実証および取得したデータの検証を行った。本現場は場内全域をカバーした Wi-Fi がなかったため、実証実験の実施に際して広域での通信を得意とした Wi-Fi 設備を導入し場内全域でのデータ取得を可能とした。



写真-3, 4 設置対象の重機

4.2 取得データ

取得されたデータを「Tableau」にて表示したものを図-3 に示す。1 画面にてエンジン回転数の経時変化と重機の位置情報を表示している。エンジン回転データは、ほぼ遅滞なくクラウド上へアップロードされ「Tableau」によるデータの参照が可能となる。また表示されているデータや参照する期間の切り替えは、「Tableau」上でスムーズに操作することができる。データの閲覧はアカウントを所持していれば、PC やスマートフォンからいつでもどこでも参照可能である。

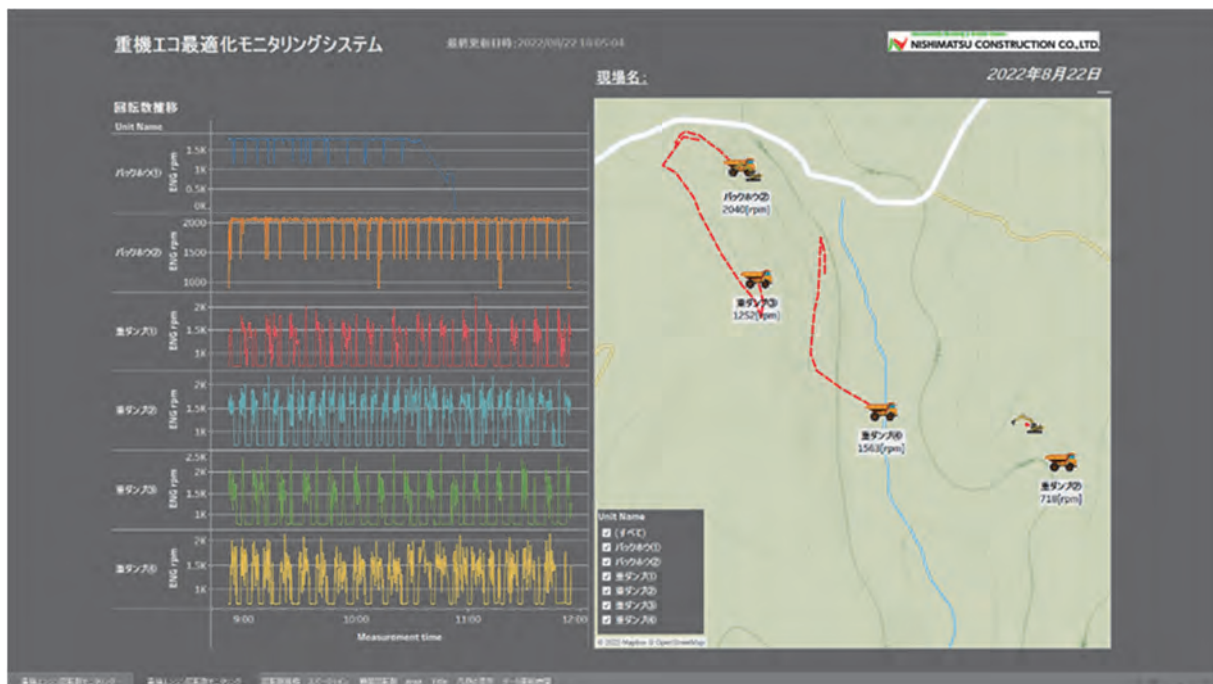


図-3 データモニタリング画面

4.3 データの検証

今回の実証実験で取得したデータについて詳しく見ていく。

(1)重ダンプトラック

重ダンプトラックは場内の掘削土を運搬する作業が主である。積込場へ土捨て場までを1日に何往復もする。走行している時間と積込中のアイドリングもしくは積込待ちの待機のアイドリング時間を読み取れる。(図-4)

さらに同型機4台に設置したことから同じルート同じ機械で複数のオペレータが走行する場面があり、それぞれでグラフの形が変わっている結果が見られた。これは燃料消費量にもかかわる結果となり、今後の分析にて燃費やCO₂排出にどのような影響が出てくるか検証していく。

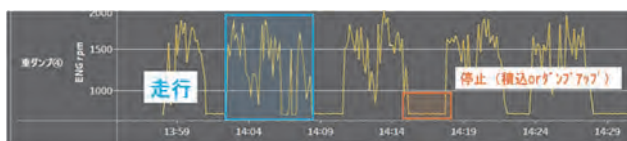


図-4 重ダンプ回転数

(2)油圧ショベル

油圧ショベルは重ダンプトラックとは異なり、出力調整はダイヤルで行うため、回転数データは比較的一定の値を示す結果となった。その中でも、一定の間隔で回転数が上下しているが、これは、掘削動作と旋回動作によって生じていると思われる。これより作業量をデータから取得できるが、同様の作業においても回転数が異なる結果もあるため、継続した分析により、より高い精度での作業判別を目指す。

今回の実験で使用した油圧ショベルにはオートアイドリング機能がついており、一定時間レバーが中立であるとエンジンは自動で回転を落とす。それらの仕様がデータとして読み取れた。今回は、オペレータには普段通りの運転を行ってもらった。常にパワーモードでの作業であったので、データを利用して、生産性を落とさずにエコモードを併用したオペレーションができないか今後検証を行う。

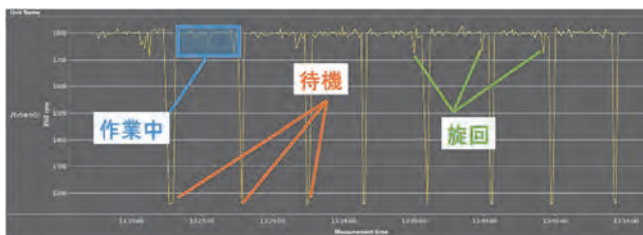


図-5 バックホウ回転数

5. 成果と課題や今後の展望

本開発で得られた成果について以下が挙げられる。

- (1)重機の機種やメーカー・形式・年式を問わず機械の稼働状況(エンジン回転数、位置情報)をリアルタイムに取得することが可能となった。
- (2)取得したデータをほぼ遅滞なく可視化しデータをモニタリングすることが可能となっただけでなく、データをクラウド上で管理し、分析で必要となる情報のみをピックアップすることを実現させた。
- (3)重機の状態(今回の検証では、ダンプは走行と停止、油圧ショベルであれば積込と旋回、待機)を判別し、各作業時間をデータとして取得し分析可能となった。

本実証実験では、データのリアルタイム取得にフォーカスした結論となっている。取得したデータのみでは、本論文序盤で述べたシステム導入や低燃費運転におけるCO₂削減への効果を評価し難い結果となった。今後、様々な条件下(機種や工種)において多種多様なデータ取得を継続し、燃料消費量や作業量を反映させることで燃費と生産性の相関を分析していく。

位置情報のデータに関しては、ダンプトラックなどの走行が主となる機械について、平面的なデータでは効率的な運転かどうかを判断できない結果となったので、3次元(標高)データを取得し、検証していく。

また、今後取得するデータの傾向をもとに不要な高回転となりうる閾値を設定する。その閾値を逸脱するようなオペレーションを行った場合のオペレータへの通知機能を付加し、低燃費運転の支援システムとしてのバージョンアップを行う。将来的には取得したデータをもとにAIによる作業判別を行い、生産性とCO₂排出量をコントロールし最適化された運転を可能とするシステムを目指していく方針である。

参考文献

- 1) IPCC第5次評価報告書, Fig.SPM.1
- 2) Token環境ホームページ「地球温暖化対策」
<https://token.or.jp/kankyoku/warming/step03.php>
(2022/8/22参照)

16. 建設機械のドロップイン軽油代替燃料による CO₂ 削減活動

鹿島建設株式会社

○ 柳 雅之

国土交通省国土技術政策総合研究所 大槻 崇

1. はじめに

(一社)日本建設業連合会(以下、日建連)では、温室効果ガスの一つである CO₂ 排出量の削減対策が重要であるとの認識のもと、1990 年代後半より「建設業の環境自主行動計画」を策定し、建設現場における使用エネルギー量の約 70%を占める軽油の使用量削減に取り組んできた。軽油使用量は、施工現場内の建設機械、発電機と運搬に関わるトラック、ダンプトラックに起因するため、効率的な建設機械および運搬車両の配備による軽油使用実績の減少、省燃費運転の励行による軽油使用量の削減など、具体的な対策を進めてきている。なかでも省燃費運転については、業界内の着実な浸透・定着をめざし、会員企業とその専門工事業者への座学講習会、実技講習会を毎年定期的で開催している(コロナ禍で直近 2 年は中止)。

これらの取組みの成果として、「建設業の環境自主行動計画 第 4 版(改訂版)」に示した 2012 年度目標の「CO₂ 排出量原単位で 1990 年度比 13%削減」は達成することができた。引き続き、政府の「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」宣言に対応するために、「建設業の環境自主行動計画 第 7 版」(2021-2025 年度)では「スコープ 1,2 排出量を 2050 年までに実質ゼロ」「2030~40 年度のできるだけ早い段階で 2013 年度比 40%削減」の目標を掲げている。この目標達成に向けて、業界全体として使用エネルギー量の約 70%を占める軽油の使用量削減に取り組んでいくためには、省燃費運転活動に加えて、B5 軽油、B100 燃料(バイオディーゼル燃料)、GTL 燃料などの軽油代替燃料の利用拡大が効果的な取組みとなってきた。

本稿では、現在使用の建設機械をそのまま活用しながら、CO₂ 削減やカーボンニュートラルを進めるドロップイン燃料活用の優位性とその活用に向けた検証状況について報告するものである。

2. 使用燃料に着目する優位性 -ドロップイン-

建設現場では建設機械の使用は避けられない。昨今の生産性向上に向けた取組みにて、自動施工といった取組みも進められているが、その前提に

は施工の機械化が前提となっている。それらの建設機械の CO₂ 排出量の削減に向けて、燃費基準達成型建機認定制度や普及補助事業による建機の改善が進められ、その先として、電動化による CN 化の実現がうたわれている。しかし、インフラをこれから整備する電源未整備地や災害現場でも活動が求められる建設機械に、どのように給電するかなどの課題を考えたとき、燃料燃焼で稼働する建設機械の優位性は高い。CO₂ 排出量がゼロカウント可能な燃料や、単位作業当たりの CO₂ 排出量の低減が期待出来る燃料の活用を検討することは、災害対応での機動性を維持しつつ、環境対策を進める上で有用である。一方で、それらの燃料の使用に関して建設機械の改修が必要となるのは、それらの燃料の利用拡大の制約となる。

これらの観点を踏まえ、建設機械の改修が不要な燃料、いわゆるドロップイン燃料の性質を持った、CO₂ 排出量削減に資する軽油代替燃料の活用検討を行うことが有益である。

3. 軽油代替燃料の特徴と注意点

既に市場流通が可能な B5 軽油、B100 燃料、GTL 燃料に注目し調査を行い、その結果を踏まえた整理表が、日建連より 2015 年発行の「建設業におけるバイオディーゼル燃料利用ガイドライン」や、2022 年 4 月改訂の「建設業における軽油代替燃料利用ガイドライン(Rev.4.0)」で整理・掲載されている(表-1)。以下、それぞれについて記載する。

3.1 B5 軽油

「揮発油等の品質の確保等に関する法律(品確法)」の改正により 2009 年 2 月 25 日から、ガソリンおよび軽油にバイオ燃料を混合する事業者には「軽油特定加工業者」の事業者登録と品質確認が義務づけられ、適正な品質のバイオ混合燃料の B5 軽油が供給されるようになった。これにより、建設機械メーカー各社は、B5 軽油も軽油と同様に取扱うことを公表した。したがって、建設機械、発電機および車両の燃料として、B5 軽油は軽油と同様のエンジンの点検・整備を行うことで使用できる。

「軽油特定加工業者」とは、法人・個人にかかわらず、反復継続して軽油と B100 燃料の混合を行う

表-1 軽油代替燃料の種類と特徴

名称	B5 軽油	B100 燃料	GTL 燃料
概要	軽油混合燃料(改正品確法で軽油とされている)	廃食用油を主原料として製造したバイオディーゼル燃料	天然ガスを原料として製造した合成燃料
CO ₂ 削減効果(軽油との比較)	▲5.0%	▲100.0%	▲8.5%
建機メーカーのスタンス	軽油と同じ扱い	メーカーの保証無し	多くのメーカーが軽油と同じ扱い
利点	・軽油扱いなので、スタンド給油した軽油と混合しても問題なし	・CO ₂ 削減効果が大きい ・軽油と比較して、PM(黒煙)などの排出量が削減 ・資源循環社会に貢献する地産地消エネルギー	・軽油と比較して、PM(黒煙)などの排出量が削減
注意点	・特になし(軽油と同様に使用できる)	・課税されている軽油, B5 軽油と混合しないこと ・製造会社に品質差があるため、日建連ガイドライン記載の会社からの調達を推奨	・課税されている軽油, B5 軽油と混合しないこと ・ナンバープレート付きの建設機械, 車両では使用しないこと

者のことである。品質確認は、B5 軽油を建設機械および自動車用燃料として販売又は自ら消費するときに、品質が品確法に規定する軽油の強制規格に適合していることを事業者自ら又は分析機関に委託して、3 カ月毎に確認・報告することである。

3.2 バイオディーゼル燃料 (B100燃料)

B100燃料は、菜種油、ひまわり油、大豆油、コーン油などの植物性の廃食用油を原材料とした、資源循環型の地産地消の燃料である。

植物性の廃食用油に、メチルアルコール(メタノール=CH₃OH)と水酸化カリウム(KOH)を混合、攪拌反応、静置沈殿させ、メチルエステルとグリセリンに分離する。分離したメチルエステルを減圧蒸留して不純物を除去し、B100燃料となる。この成分は、軽油のJIS規格にほぼ適合しているので、

B100燃料は軽油代替燃料として利用できる。ほぼ適合しているというのは、原材料に使用している廃食用油の品質にバラツキがあるためである。

(1) エンジンオイルの管理

B100燃料がエンジンオイルに混入すると、軽油と比較して、動粘度(40℃)や塩基価の変化が大きくなる性質があるため、エンジンオイルの劣化が軽油より速くなる。軽油使用時より、日常点検ではエンジンオイルの量や色などに注意し、定期点検ではエンジンオイルの交換を早めに行うことが管理のポイントになる。

エンジンオイルの交換時期の違いを確認するために、エンジンオイルの性状の変化を確認した。

測定対象の建設機械は10tonダンプで、いすゞKC-CZX81K1D、エンジンオイルはシェルリムラX15W-40である。分析項目は、動粘度(40℃)(mm²/s)、塩基値(mgKOH/s)、引火点(℃)および金属元素(鉄Fe、銅Pb、鉛Cuなど)などとした。

今回測定した10tonダンプは、造成工事の土砂運搬に使用しており、今回はエンジンオイルの入替え時から100hr毎に800hrまでサンプリングを行い、同型の2台で、軽油とB100燃料使用時の比較を行った。

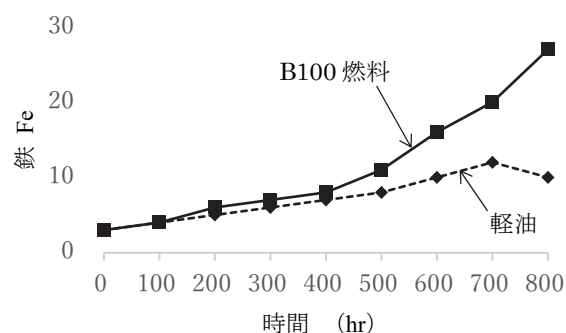


図-1 軽油とB100燃料のエンジンオイルの鉄 (Fe)

金属元素はエンジンオイルの動粘度(40℃)の劣化に伴い、ピストンとシリンダーの摩擦により多く発生する。摩擦由来の金属の鉄Feの結果(図-1)では、500hr経過した時点からB100燃料使用時の量が軽油使用時より多くなってきている。この変化は他の金属でも同様の傾向が確認できたため、エンジンオイルの交換は500hrより前が目安になると考えられる。

(2) 燃料ホースなどの管理

B100燃料はゴム製の燃料ホースを膨潤させる性質があるため、軽油と比較してゴム製の燃料ホースの劣化が早く、耐用年数は1年程度になってしまふ。その対策として、B100燃料を長期間使用する場合は、燃料ホースをゴム製からシリコン製へ交換することが有効である。

(3) 排出ガスへの影響

2002年にアメリカの環境保護庁(EPA)が、B100燃料の使用時の排出ガスについて公表している報告書がある。軽油とB100燃料を比較して、PM、CO、HCは減少し、NO_xは同等から20%程度増加のデータが示されている。

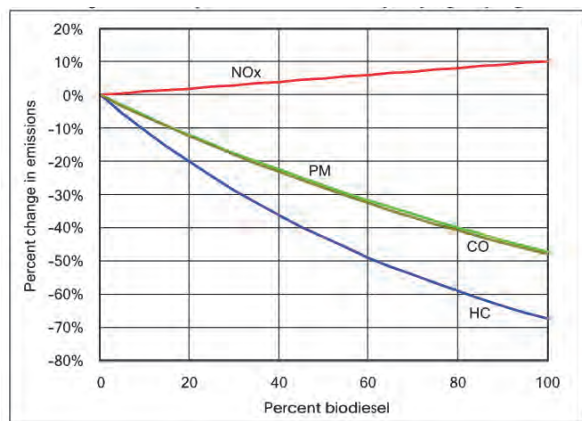


図-2 大型エンジンのB100燃料の排出ガス
アメリカの環境保護庁(EPA)報告書²⁾ ii ページより引用

3.3 GTL燃料

GTL燃料は、Gas to Liquidsの略称で、天然ガスを原料として製造した合成燃料で、硫黄分、金属分、芳香族分を含まない非毒性のパラフィン系燃料である。品質は欧州規格EN15940に適合しているため、欧州では車両、建設機械、発電機、船舶などで軽油の代替燃料として普及が始まっている。

GTL燃料は軽油と比較して、燃焼時のすすの発生が少ない、流動点が-20℃なので寒冷地でも使用できる、高セタン価なので始動性が向上するなどの特徴が示されている。品質は、軽油のJIS規格にも合致しているため、国内の多くの建設機械メーカーが軽油やB5軽油と同等に取扱うことを公表している。

ただし、建設機械、発電機以外の、公道を走る車両(ナンバープレート有)での使用は、軽油引取税の非課税扱いが適用外のため注意が必要である。

(1) 燃料ホースやエンジンオイルに関する管理

GTL燃料の品質は軽油のJIS規格に合致しているため、燃料ホース等の部材を交換することなくGTL燃料を使用できる。

エンジンオイルも軽油使用時と同じ製品を使用して、交換時期など同じ管理基準で行っても支障がないエンジンオイルの性状の変化を確認した。測定対象の建設機械はバックホウで、日立建機ZX210K-6、エンジンオイルはDH-2 10W-40である。分析項目は、動粘度(40℃)(mm²/s)、塩基値(mgKOH/s)、引火点(℃)および金属元素(鉄Fe、銅Pb、鉛Cuなど)などとした。

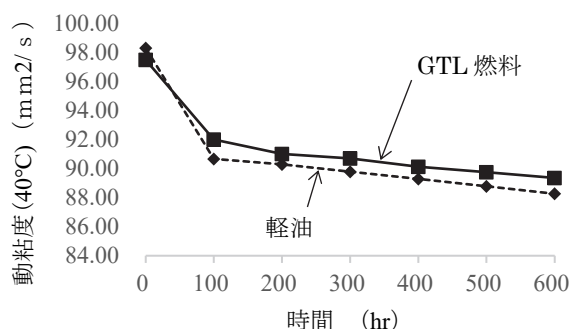


図-3 軽油とGTL燃料使用時のエンジンオイル
動粘度(40℃)の変化

今回測定したバックホウは、アスファルトプラント工場内の定型作業に使用しており、測定前までの軽油使用時は、500hr毎にエンジンオイルの交換を行っていた。今回はエンジンオイルの入替え時から100hr毎に600hrまでサンプリングを行い、同じバックホウで、軽油とGTL燃料使用時を比較した。

動粘度(40℃)の結果(図-3)では、軽油使用時とGTL燃料使用時の変化は、ほぼ同じであった。塩基価、引火点、金属元素なども同様の結果になったため、エンジンオイルの管理は軽油使用時と同様に行い、特別の注意点は不要と考える。

(2) 排出ガス低減効果

フォークリフトでの、軽油とGTL燃料使用時の排出量を測定した結果、その排出ガスの改善効果が確認されている。

トヨタ7FD15(2002年式)について、後述するオフロード法の無負荷急加速光吸収係数を、AVL社製のDISMOKE4800にて行われたものである。

使用燃料を軽油からGTL燃料に変更した後の試験を経時的に行ったところ、約1週間でその値が半減、約6カ月で85%減少する結果が得られた(図-4)。GTL燃料の使用で、旧型エンジンを搭載しているフォークリフトでも、オフロード法の最新規制値に適合できる可能性を確認した。

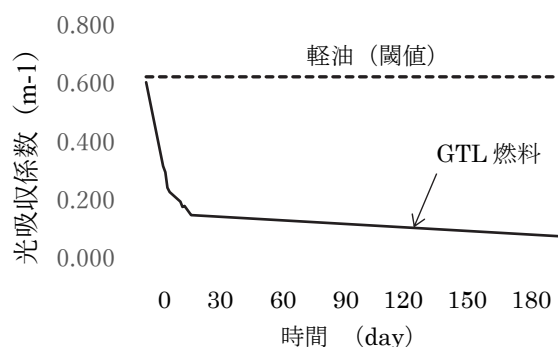


図-4 軽油とGTL燃料使用時の無負荷光吸収係数

なお、この検証に用いられたフォークリフトは自動車部品工場の倉庫で稼働していたものであったが、検証の過程にて、軽油使用時には積込み前に数時間かけて行っていた製品に付着したすすを除去するブロー作業の時間を大幅に削減でき、作業効率の向上および労働環境の改善を図るという副次的な効果を得ることができたとのことである。

4. 燃料に関連する法令

軽油代替燃料 (B5 軽油, B100 燃料, GTL 燃料) の使用では、関係法律・条令を遵守が必須である。

4.1 オフロード法

公道を走行しない特殊自動車をオフロード車と呼称し、その排出ガスについて規制対象としており、建設業での使用燃料については、排出ガスを抑制するための指針にて、メーカー推奨の軽油を使用することが定められている。この点について、表 1 に建機メーカーコメントを整理している。

また、車体にエンジンが搭載された状態における、軽油を燃料とするオフロード車は、無負荷急加速光吸収係数、もしくは、無負荷急加速黒煙試験で基準に適合していないものは、技術基準適合命令等の対象となる。

4.2 道路運送車両法

道路運送車両法の「自動車検査業務等実施要領」(昭和36年11月25日自車第880号) が一部改正され、軽油を燃料とする車両にB100燃料を使用する場合は、自動車検査証(車検証)の備考欄に「バイオディーゼル100%燃料併用」と記載することで使用できるようになっている。

自動車車検証の変更手続きは、自動車車検証を登録している陸運局(陸運支局、自動車検査登録事務所)で行う。車両の持ち込みは必要なく、自動車車検証の持参のみで良いとされているが、詳細は国土交通省各運輸支局へ確認が必要である。

4.3 消防法

GTL 燃料および B100 燃料は、消防法の第四類第三石油類(引火点 70℃以上 200℃未満)の危険物に分類され、指定数量は軽油の 2 倍である。

400 リットル未満の貯蔵・取扱いの場合は、市町村の火災予防条例の規制を受けるが、届出は不要で、400 リットル以上 2,000 リットル未満の貯蔵・取扱いについては、少量危険物貯蔵所または取扱所として所轄消防署への届出が必要である。

なお、2,000 リットル未満の貯蔵・取扱いについては、届出の有無にかかわらず各市町村による技術上の基準が定められているので、合わせて確認が必要である。消防法の指定数量である 2,000 リットル以上の貯蔵については、都道府県知事または市町村長の許可を受けた貯蔵所で貯蔵しなければならない。

5. CO₂削減活動の周知 -活動の見える化-

建設機械での B5 軽油および B100 燃料による CO₂ 削減活動を発注者、近隣住民および作業員などのステークホルダーに周知するために、エコマークを利用することが出来る。

「エコマーク」は、(公財)日本環境協会が、ISO (国際標準化機構) の国際規格に則って運営する、第三者認証による環境ラベルである。国および第三者機関による環境ラベルは 20 種類以上あるが、エコマークの認知度が最も高く、9 割を超えている。

認定基準「廃食用油を使用したバイオディーゼル燃料 Version1」が 2017 年 8 月 1 日に制定され、エコマーク認証を取得した燃料会社から B5 軽油、B100 燃料を調達すると、建設会社も仮囲いや建設機械にエコマークを表示できる。なお GTL 燃料については、認定基準の検討が現在進められている。「見えない」CO₂削減活動の「見える化」で、建設機械の環境対策への理解の普及は重要である。



図-5 エコマーク

6. おわりに

本稿作成に当たり、GTL 燃料の情報に関して伊藤忠エネクス(株)より頂いたご協力に感謝する。軽油に比べた際のコストの問題もあるが、GTL 燃料でのメリットなどの付加価値を評価して、導入検討することもある必要である。

日建連会員各社の軽油代替燃料の使用状況については「建設作業所における軽油代替燃料の使用事例集」が纏められ、日建連 HP 上で公開されている。今後の建設現場における CO₂ 排出量の削減に向け、既存の建設機械で利用できるドロップイン燃料たる軽油代替燃料(B5 軽油, B100 燃料, GTL 燃料など)の利用が拡大することを期待している。

参考文献

- 1) (一社)日本建設業連合会：建設業の環境自主行動計画, 2022
- 2) (一社)日本建設業連合会 環境委員会：建設業における軽油代替燃料利用ガイドライン (Rev.4.0) , 2022
- 3) U.S. Environmental Protection Agency : A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions Draft Technical Report, 2002

(?????.?? 受付, ????.??採用決定)

17. 「燃費基準達成建設機械認定制度」における新たな燃費基準値の策定とカーボンニュートラルに向けた今後の取組について

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課
同

○守田 銀二
須山 友貴

1. はじめに

国土交通省では、地球温暖化対策の一環として、建設施工現場における省エネルギー化の推進や低炭素型社会の構築に取り組んでいる。

平成 22 年度には、先進技術であるハイブリッド機構や電動機構等を搭載し省エネ化を達成した建設機械の普及のため、「低炭素型建設機械認定制度」を創設し、平成 25 年度には建設機械ユーザーが省エネ効果を数値的に判断できるように、統一的な燃費の測定方法と目標となる燃費基準値（最も燃費値の良い値（トップランナー値））を世界で初めて定め、「燃費基準達成建設機械認定制度」を創設した。

また、これら燃費性能の優れた建設機械等の普及を促進するため、低利融資制度等の金融支援措置を設けている。

2. 燃費基準達成建設機械認定制度の概要

(1) 制度の目的・概要

燃費基準達成建設機械への関心と理解を深め、二酸化炭素排出低減に資する燃費基準達成建設機械の普及促進を図るとともに、地球環境保全に寄与することを目的に燃費基準達成建設機械認定制度を運用している。

燃費基準達成建設機械認定制度の燃費基準値を達成した建設機械を型式認定しており、認定された建設機械はラベル表示が可能となる。

(2) これまでの取り組み

平成25年4月より油圧ショベル、ブルドーザ、ホイールローダの認定制度を開始した。その後平成30年4月よりミニショベルの認定を開始した（図-1）。以上4機種については、令和4年6月末時点で計148型式を認定している状況である。

3. 次期燃費基準策定

現行燃費基準値（2020 年基準値）においては、各クラスにおけるトップランナー値を採用した。次



図-1 燃費基準達成建設機械認定制度設定・認定の経緯

【現行燃費基準値】

トップランナー値を燃費基準値として採用

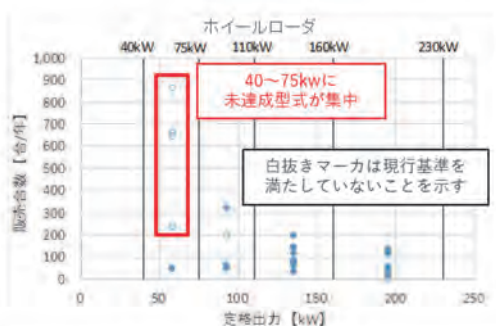
【課題】燃費性能のみに着目すると、普及する際に重要な導入コストや施工性等が考慮されない場合があり、トップランナー値がバランスが取れていない型式であると、各社が次期燃費基準値達成に向けた開発を断念する可能性

【次期燃費基準値】

建設機械単体の削減量のみを追求するのではなく、普及台数全体を考慮したトータルの削減量の最大化



図-2 現行の燃費基準値（上）と次期燃費基準値（下）の考え方の違い



定格出力と販売台数の関係

定格出力区分	
現行	次期 2区分に分割
40kW以上110kW未満	40kW以上75kW未満 75kW以上110kW未満
110kW以上230kW未満	110kW以上230kW未満

図-3 ホイールローダの出力区分

期燃費基準値（2030年基準値）においては、従前のトップランナー値を考慮しつつ、普及台数等を考慮して燃費性能が良くかつ普及しやすい、バランス（燃費性能、導入コスト、施工性等）のとれた基準値を設定した（図-2）。

（1）ホイールローダの出力区分について

現行燃費基準値では、40kW以上110kW未満の定格出力区分において、75kW未満の認定型式が少ないため燃費基準値の区分を見直した。区分を細分化することで、各出力区分に適切な燃費基準値を設定し燃費基準値の達成に向けた開発を促進する（図-3）。

（2）次期燃費基準値（案）の達成表示について

現行の2020年燃費基準値達成においては、2020年燃費基準100%達成建設機械を「☆☆☆」、85%達成建設機械を「☆☆」として表示している。次期燃費基準値（案）の85%は現行基準値を下回る区分もあることから設定せず、次期燃費基準として2030年燃費基準を「☆☆☆☆」として表示する予定である。

（3）ホイールクレーンの区分拡大について

ホイールクレーンの燃費基準達成建設機械認定制度への追加は、平成28年度の「建設施工の地球温暖化対策検討分科会」において了承されており、令和4年4月より認定開始している。

ホイールクレーンの作業燃費基準値の最大吊り

表-1 最大吊り荷加重区分別の仕様の比較

メーカー (排ガス規制年次)	最大吊り荷重 区分	最大吊り荷重	補巻許容荷重	車両総重量 (kg)	作業時出力 (kW/min-1)	作業時無負荷 最低回転速度 (min-1)	ブーム70度全伸姿勢		補巻速度 (上げ) (m/s)	ブーム上 げ速度 (度/s)	旋回速度 (度/s)	油圧ポンプ
							補巻作業半径	補巻揚程				
A 社 (2014)	50t以上 79t未満	60t	5t	36,195	256/1500	700	約12m	約40.5m	1.9	1.7	13.2	型式:C 形式:可変容量P 回転数:cccc
		70t	5t	41,295	256/1500	700	約13m	約43.3m	2.0	1.4	12.6	
A 社 (2014)	80t以上	100t	5t	41,295	256/1500	700	約14.5m	約47.0m	1.9	1.3	11.1	型式:D 形式:可変容量P 回転数:dddd
B 社 (2011)	50t以上 79t未満	75t	5t	41,035	228/1450	700	約14m	約44.2m	2.0	1.3	10.8	
B 社 (2014)	80t以上	80t	5t	41,155	228/1450	700	約14m	約44.2m	2.0	1.3	10.8	

5t : 評価値への影響が大きい仕様

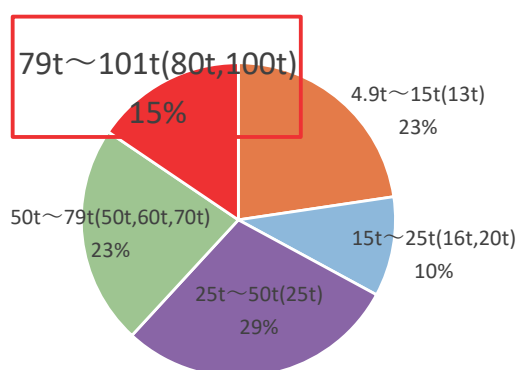


図-4 ホイールクレーンのオフロード法（2014年規制車）において認定されているホイールクレーンの販売台数比率

荷重区分は、燃費基準値策定時において最大吊り荷重 79 t 未満（2011 年規制車）ですべての型式を網羅できたため、50 t 以上 79 t 未満としていた。

しかし、ホイールクレーンのオフロード法の 2014 年規制車では、近年のビル・マンションなどの高層化や耐震構造強化に伴う建設部材の重量増加により、ブームが長く吊り上げ能力の高いクレーン需要が高まっていることを背景に、80 t 以上の型式が販売されていることから、80 t 以上のホイールクレーンについても燃費基準値の検討が必要となった（図-4）。

表-1 にあるように、50t 以上 79t 未満の範囲にある対象機種の燃費評価値は、最大吊り荷重に差があっても評価値への影響が大きい仕様が同等であり、最大吊り荷重の大型化に伴う評価値の増加はみられなかった。

また今回新たに追加検討する 80 t 以上の区分においても、評価値への影響が大きい仕様は 50t 以上 79t 未満と同等であるため、最大吊り荷加重が増加したことの評価値への影響は小さく、50t 以上 79t 未満と同様の燃費基準値とすることが適当であると判断した。

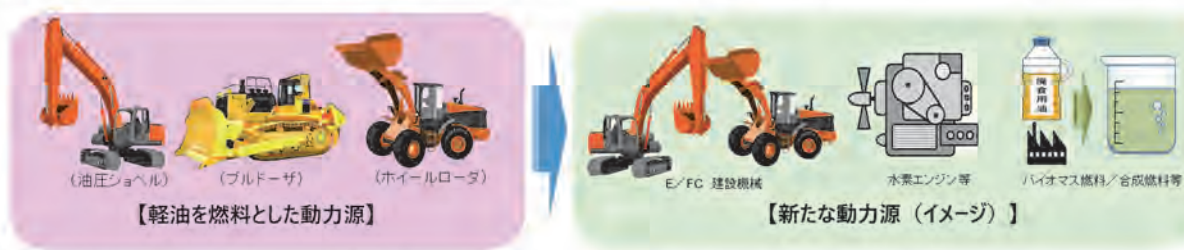
表-2 次期燃費基準値

機種	区分	燃費基準		
油圧 ショベル	標準バケット山積容量 (m^3)	2020年燃費基準値 (kg/標準動作)	2020年燃費基準値 を0.85で除した値 (kg/標準動作)	2030年燃費基準値 (kg/標準動作)
	0.085以上0.105未満	2.0	2.4	—
	0.105以上0.130未満	2.1	2.5	—
	0.130以上0.150未満	2.6	3.1	—
	0.150以上0.200未満	2.8	3.3	—
	0.200以上0.250未満	3.2	3.8	—
	0.25以上0.36未満	4.3	5.1	4.03
	0.36以上0.47未満	6.4	7.5	6.21
	0.47以上0.55未満	6.9	8.1	6.21
	0.55以上0.70未満	9.2	10.8	8.10
	0.70以上0.90未満	10.8	12.7	9.29
	0.90以上1.05未満	13.9	16.4	10.70
ブルドーザ	定格出力 [※] (kW)	2020年燃費基準値 (g/kWh)	2020年燃費基準値 を0.85で除した値 (g/kWh)	2030年燃費基準値 (g/kWh)
	19以上75未満	568	668	511
	75以上170未満	530	624	466
	170以上300未満	508	598	437
ホイール ローダ	定格出力 [※] (kW)	2020年燃費基準値 (g/t)	2020年燃費基準値 を0.85で除した値 (g/t)	2030年燃費基準値 (g/t)
	40以上75未満	21.3	25.1	23.0
	75以上110未満			18.1
	110以上230未満	27.9	32.8	23.7
ホイール クレーン	最大吊り荷重 (ton)	2020年燃費基準値 (kg/h)	2020年燃費基準値 を0.85で除した値 (kg/h)	—
	4.9以上15未満	3.05	3.59	—
	15以上25未満	4.73	5.56	—
	25以上50未満	4.73	5.56	—
	50以上150未満	8.19	9.64	—

※定格出力とは、JIS B8003(又は同等の国際規格)に規定されるネット出力をいう。

（４）認定開始までのスケジュールについて
次期燃費基準値（表-2）における認定開始は、開発期間を考慮し令和 9 年（2027 年）4 月を予定している。

- 「2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする」との目標の実現に向けて、国内産業部門におけるCO2排出量の1.4%を占める建設機械について、従前は燃費性能の向上による省CO2化を進めてきたところであるが、抜本的な機構・システムの見直しが必要。
- そのため、建設現場におけるカーボンニュートラルの実現に向け、動力源を抜本的に見直した革新的な建設機械(電動、水素、バイオマス等)の導入・普及支援策を講じる。



- 動力源を抜本的に見直した革新的な建設機械の認定制度創設を検討。
- 革新的建設機械の普及促進に向け、国交省直轄工事における認定機械使用へのインセンティブや将来的な使用原則化についても検討。

図-5 カarbonニュートラルの実現に向けた新たな取り組み

4. 今後の取り組み(カーボンニュートラルの実現に向けた革新的建設機械普及・促進事業)

国内の産業部門におけるCO2排出量の1.4%(推定値)を占める建設機械としては、地球温暖化対策としてCO2排出量削減のため、従前はディーゼルエンジンによる燃費向上を進めてきたところであるが、「2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロ(カーボンニュートラル)にする」との目標の実現に向けては、建設機械の動力源の抜本的見直しが必要である。そのため、建設現場におけるCO2排出量の実質ゼロに向け革新的な建設機械(電動・水素・バイオ等)の普及に向け、各種支援策を講じる(図-5)。

まず、従前の建設機械(ディーゼル駆動)と比較して、例えば電動バッテリー駆動の建設機械は一般的に高価であるから、革新的建設機械の導入に対しては支援が必要と考える。革新的建設機械の使用者に対しては、例えば国交省発注工事において優位に評価するなど、インセンティブを与えることなどが考えられる。国交省ではまず、支援の対象建機を明確化するため、「革新的建設機械認定制度(仮称)」の創設に向けて、現在制度設計等の検討を進めているところである。

また従来機と革新的建設機械では、現場における条件(パワー・駆動時間等)が異なることも想定されるため、国交省発注工事において革新的建設機械の現場試行を実施することの検討も行う予定である。

5. おわりに

今後はCO2削減促進のため、次期燃費基準の2027年度に認定を開始するとともに、建設施工分野の2050年カーボンニュートラル実現に向けて、革新的建設機械の普及促進に力をいれていく。

参考文献

- 1) 東山遼・北川順：建設機械から排出される温室効果ガス削減の取り組み，令和元年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，pp.119～122，2019年

18. LiDAR 計測によるトンネル切羽プロジェクションマッピング

株式会社大本組
株式会社大本組
株式会社大本組
株式会社大本組
株式会社計測リサーチコンサルタント

小野 高伸
児玉 剛
橘 伸一
○ 都川 信吾
家村 享明

1. はじめに

山岳トンネルの掘削工における鋼製支保工建込作業は、その大部分は機械化されているが、掘削後のアタリ確認や支保工建込位置の確認は熟練作業員が実施している。切羽直下の作業であるため、肌落発生時に重篤な災害へ繋がるリスクが高かった。この課題を解決するため、上記作業を作業員の目視に代え、LiDAR で計測した切羽および側面の現況と設計断面との差分をカラーコンター画像として切羽へプロジェクションマッピングする可視化システムを開発した。これにより、人員による切羽直下作業が低減され、安全性が向上するものである。

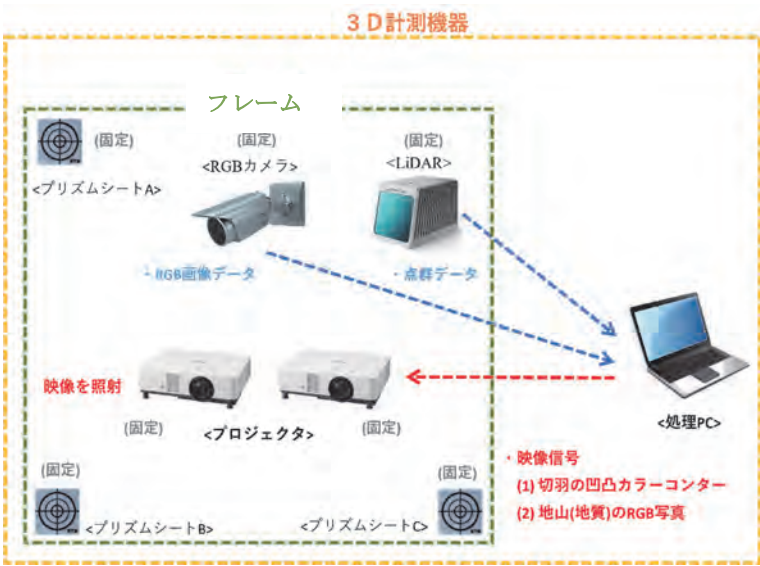
本報では「LiDAR によるトンネル切羽プロジェクションマッピング」の概要および現場実証した結果について紹介する。

2. システム概要および構成

本システムは、LiDAR 計測により掘削後の凹凸状況についてプロジェクタを介し切羽にカラーコンター画像を投影するものであり、投影方法は以下の通りである。3D 計測機器のフレームに設置したプリズムシートを 3 点測量し、3D 計測機器の自己位置・姿勢を計測する。計測結果と投影設計断面位置を処理 PC へ入力し、LiDAR と RGB カメラより切羽の 3D 点群データと画像データを取得する。取得した点群データと設計断面との差分をグラデーション化したカラーコンター画像および地山情報画像を処理 PC で生成し、切羽へ投影する。

図-1 に示すように 3D 計測機器はプロジェクタ、LiDAR、RGB カメラ、処理 PC で構成される。

写真-1 に 3D 計測機器の車両搭載状況を示す。なお、今回は照度確保のため 2 台のプロジェクタを使用した。必要な照度が得られれば、1 台でも構わない。



	機種名	主な性能
プロジェクタ	Panasonic ptvmz71	7000[ANSIルーメン] 1920 * 1200[pixel] 投写比 1.09 投影距離13m 投影画像が12m幅
LiDAR	Livox Mid70	視野角70[deg] 計測距離90[m] 繰返し精度20[mm]
RGBカメラ	panasonic WV-X1571LNJ	3840 * 2180[pixel] 有効画素数 840万画素 WebAPIで簡単に画像取得可

図-1 システム構成図



写真-1 3D計測機器車両搭載

3. プロジェクタ投影処理

3.1 カラーコンター画像生成フロー

投影するカラーコンター画像生成のデータ処理フローを図-2に示す。

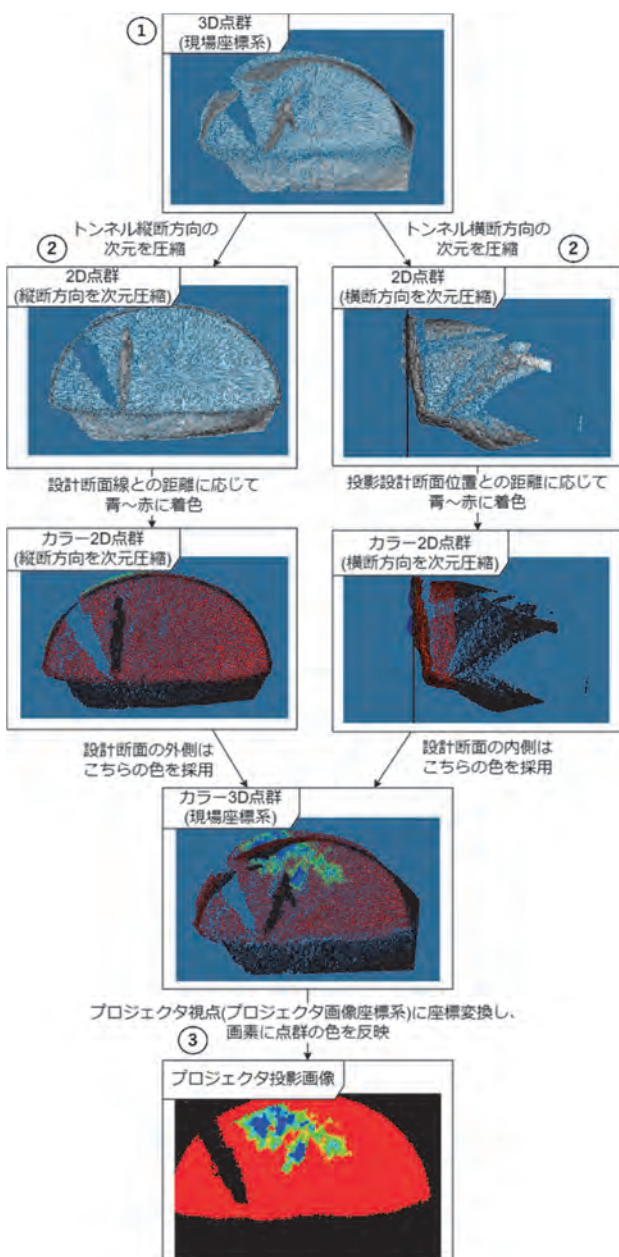


図-2 カラーコンター画像生成 処理フロー

①LiDARより取得した局所座標系の点群を3D計測機器の測量結果を用いて、現場座標系に座標変換する。

②これをトンネル縦断（横断）方向に次元圧縮した2D点群に変換し、設計断面線との距離に応じて各点を青～赤に着色する。なお、設計断面の内側にある点は、投影設計断面位置との差分に応じて青～赤に着色する。

③点群をプロジェクタ画像座標系に座標変換し、投影画像の画素に点群の色を反映させる。この投影画像生成処理を約1秒間隔で実行しており、LiDARがスキャンしている現況を数秒間のタイムラグでプロジェクションマッピングできる。

3.2 3D計測機器キャリブレーション

3D計測機器の各構成物について、内部標定および3D計測機器フレームに対する外部標定を得ることで、3次元の現場座標系と局所座標系、また2次元の画像座標系の間で相互に座標変換が可能となる。

外部標定：LiDARおよびRGBカメラとプロジェクタの位置・姿勢を計測

内部標定：プロジェクタおよびRGBカメラ毎にレンズ焦点距離、画素数を入力

プロジェクタ毎に異なる内部標定および外部標定に応じて投影画像を生成するため、複数台のプロジェクタで同時に投影しても、実空間上で像がずれることなく投影できる。

4. 実証

鋼製支保建込作業前のアタリ確認に本システムを使用して実証確認を行った。

4.1 カラーコンター画像投影フロー

実証時にカラーコンター画像を切羽に投影するまでのフローを下記に示す。

(1) 3D計測機器の設置

3D計測機器設置状況を写真-2に示す。3D計測機器を車両に搭載し、切羽全面が投影できる位置へ設置する。（切羽より約10m後方）切羽面に対し、斜めからの照射も可能である。



写真-2 3D計測機器設置

(2) 3D 計測機器の自己位置・姿勢を測量

写真-3 に示す 3D 計測機器フレームに設置したプリズムシート 3 点の座標を求め、各座標値と投影設計断面位置を処理 PC へ入力し、プロジェクタおよび RGB カメラの現場座標系の位置・姿勢を算出する。



写真-3 プリズムシート測量

(3) LiDAR より 3D 点群データを取得

取得した 3D 点群データは現場座標系に変換し、トンネル断面の設計データとの差分を着色したカラーコンター画像を処理 PC にて生成する。

(4) プロジェクタから切羽へ投影

写真-4 に示すように生成したカラーコンター画像をプロジェクタから切羽へ投影する。緑を設計面とし、青は設計面より+（過掘り）、赤は設計面より-表示（アタリ）する。なお、カラーコンター画像の精度として進行方向に対し±10 cm幅でグラデーション設定している。

同時にオペレータ用のモニタにも同様の画像が出力される。写真-5 にオペレータ用モニタ出力状況を示す。

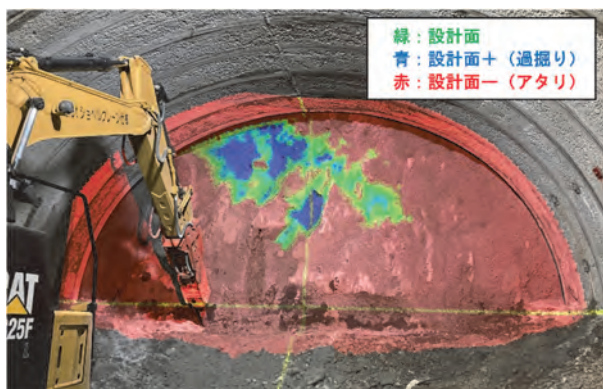


写真-4 プロジェクタ投影



写真-5 オペレータ用モニタ出力

4.2 LiDAR 精度確認

本システムに搭載している LiDAR (Livox : Mid70) と FARO3D レーザスキャナー (Focus3D X330) で切羽面の点群データを取得して精度の比較検証を行った。

SL 付近の任意点から 2 点間距離を比較した結果を表-1、図-3 に示す。差分は 15 mm であった。また、切羽より後方 2m 部分の点群データを 20 cm メッシュに変換して比較した結果を図-4 に示す。精度としては図-5 に示す通り、差分の平均値が-2mm, 標準偏差は14mmであることが確認できた。

表-1 2 点間距離比較

1	LiVOX: : Mid70 計測値	10.172m
2	FARO : Focus3D X330 計測値	10.187m
	差分	15mm

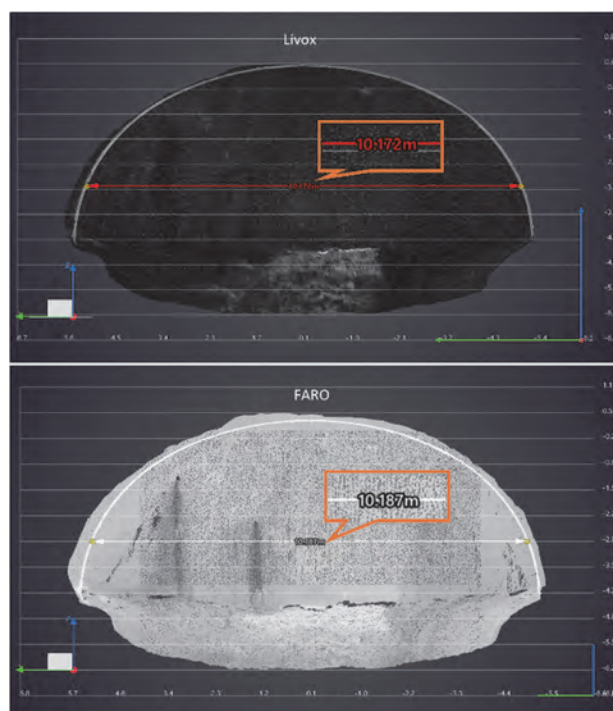


図-3 2 点間距離データ

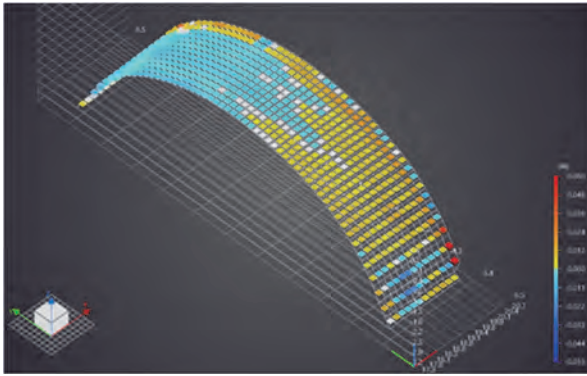


図-4 比較メッシュ

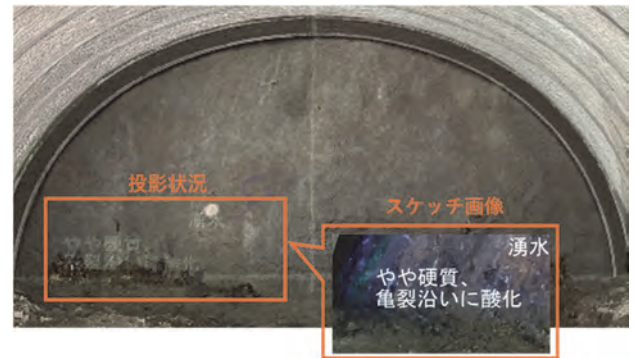


写真-6 スケッチ画像投影

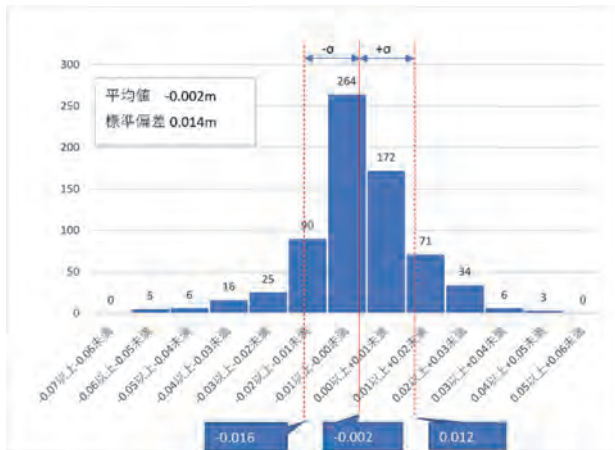


図-5 精度ヒストグラム

4.3 計測に係るサイクルタイム

表-2 に示すように 3D 計測機器設置から測量結果を処理 PC へ入力までは約 10 分を要しているが、カラーコンター画像の出力中は常時 LiDAR 計測しているため、全面を約 10 秒で最新のカラーコンター画像に更新する。これによりプロジェクションマッピングを目視確認しながら、重機オペレータはアタリ除去作業が可能となる。

表-2 計測に係るサイクルタイム

1	3D 計測機器設置	180 秒
2	トータルステーション測量	300 秒
3	測量結果を処理 PC へ入力	120 秒
4	LiDAR 計測～カラーコンター画像生成・出力	10 秒
合計		10 分 10 秒

4.4 スケッチ画像投影

写真-6 に地山写真を RGB カメラで撮影し、スケッチやコメントを入れて 1 次吹付け後の切羽面に投影した状況を示す。これにより地山の亀裂や状態等の地山情報を作業班交代時の引継ぎに利用可能となる。

4.5 期待される効果

現場実証の結果、従来の切羽確認作業においては本システムの導入により安全性の向上が見込まれる。

(1) 支保工建込前のアタリ確認作業時に熟練作業員やオペレータによる切羽直下での確認作業を必要せず、人員による切羽直下作業が削減され、肌落ち災害の危険性が低減する。

(2) 支保工建込時のプロジェクションマッピングにより、浮石などの突出した部分をグラデーション表示するため、アタリ除去時に対応可能であり、浮石等の落下災害の低減に繋がる。

5. 今後の課題

現場実装に向け、ハード部分の対策としてシステム機器のコンパクト化や防塵・防水対策の検討を要する。また、LiDAR 計測の前準備として毎回実施するトータルステーションによる測量に時間を要するため、自動計測等の時間短縮方法についても検討が必要である。

6. おわりに

従来、アタリ確認時の切羽直下作業は重篤災害に繋がるリスクがあったが、本システムの活用により、人員が切羽直下への立入りがなくなり、安全性の向上や人員の省力化が期待できる。

今後は、現場実装に向けてシステムの完成度を高めるとともに、今回のシステムを応用して山岳トンネルのインバート施工等への展開を考えている。

19. 切羽直下作業機械化への試み

2 ブームロックボルト打設専用機によるロックボルト施工

清水建設株式会社

清水建設株式会社

古河ロックドリル株式会社

○ 大矢 剛大

井手 康夫

宮越 征一

1. はじめに

山岳トンネルにおけるロックボルト打設作業は、穿孔・モルタル充填・ロックボルト挿入の一連の作業の繰返しであり、穿孔以外の作業は、依然として人力作業で行われている。その作業は、狭いマンケースの中で重量物を扱う苦渋作業であり、肌落ちによる重篤災害（6%が死亡し、42%が休業一ヶ月以上）¹⁾の発生リスクが高い切羽直下の作業である。このような背景を踏まえ、安全性と生産性向上を目的とし、上記一連の繰返し作業の機械化を実現した「2 ブームロックボルト打設専用機」（古河ロックドリル（株）製ロックボルタ）（図-1）を開発、現場導入した。

本報告では東海北陸自動車道真木トンネル工事（内空断面積 77m²、トンネル延長 1,578m）において、2 ブームロックボルト打設専用機を用いた世界初の施工を行い、有効性が確認できたので報告する。

2. 2 ブームロックボルト打設専用機の概要

本システムの特徴は以下のとおりである。①「穿孔・モルタル充填・ロックボルト挿入」の一連の作業を機械化したボルティングユニット（図-2）を2台搭載し、それぞれをキャビン内から遠隔操作することにより、切羽直下に立入ることなく作業することができる。②従来5人で行っていた作業を3人（オペレータ2人、モルタルポンプ操作者1人）で行うことが可能で省人化を実現できる。③キャビン内のコントロールパネル（図-3）で穿孔位置およびモルタル注入量を確認し、高精度ナビゲーションに従ってブーム操作やモルタル充填を確実に行うことができるので、技能労働者の熟練度によらずロックボルト施工品質の均質化と出来形精度の向上を可能にする。

本機を使用し、安全性と生産性向上を達成するとともに、2車線道路トンネル（掘削断面積 77m²）のロックボルト施工において効率的に2ブームを稼働させるため、両ブームのうち片ブームのボルティングユニットを3m用、4m用の組合せで採用



図-1 2 ブームロックボルト打設専用機

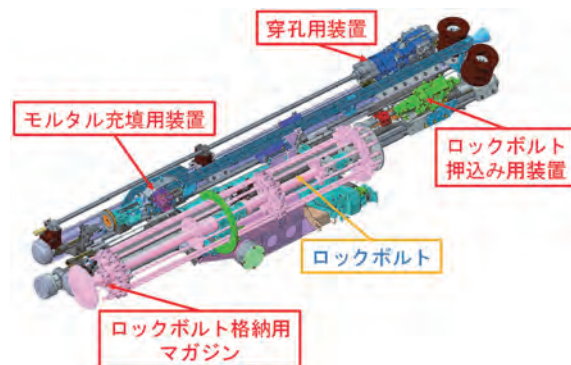


図-2 ボルティングユニット



図-3 コントロールパネル画面

した中断面仕様（3m 短尺ガイドシェル）へ改造した。また3Dシミュレーション（図-4）により打設順序の最適化を図った。

3. 現場実証結果

本機を現場導入し、高速道路会社の土木工事積算基準²⁾より算出したサイクルタイムと比較を行った。積算サイクルタイムはDIパターン（今回実証区間）でロックボルト13本打設するのに、39分である。

今回、現場実証に先立ち、2ブーム打設順序検討（図-5）を行った。これに基づいて実施工を行った結果、ロックボルト打設時間は35分となり、積算サイクルタイムに比較して10%短縮した（図-6）。また、高精度ナビゲーション機能により、事前のマーキングなどの準備作業がなくともロックボルト出来形精度【位置間隔： $\pm 20\text{mm}$ 以内、角度： $\pm 1^\circ$ 以内、穿孔深さ $+50\text{mm}$ 以内】を確保することができた。また、コントロールパネルには、モルタル注入量と打設本数が表示される。モルタルを設計注入量と比較することで確実な密充填が可能となり、デジタルエビデンスが残せる。さらに、実穿孔長がリアルタイムに表示されるため、過不足のない効率的な穿孔が可能となる。挿入するロックボルト延長以上の掘削が可能となり、確実なロックボルト打設ができる。従来施工のように人力作業が主体のロックボルト打設ではマンゲージに作業員が乗り、穿孔以外ほぼすべての施工時間が切羽直下作業であったのに対し、本機を用いることにより、切羽直下作業時間を0（プレート裏モルタル整形作業は除く）にすることができ、安全性と生産性の向上に大きく貢献できた。

図-7に今回施工箇所のロックボルト引抜き試験結果を示す。荷重-変位曲線が降伏することなく、弾性挙動を示している³⁾。これより、品質上の問題はなく、十分な定着力が確保できていることを確認した。

4. まとめ

2ブームロックボルト打設専用機を用いて、ロックボルト打設を行い、サイクルタイム確認と日常管理試験を行った。本報告で着目した安全性及び生産性向上が確認でき、さらに施工品質と出来形精度向上も実現することができた。今後は、更なる生産性の向上を目指し、運用現場での課題抽出・改善を行い、山岳トンネルの標準技術として広く展開していきたい。

参考文献

- 1) 山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策にかかわるガイドライン（平成28年12月26日基発1226第1号等、平成30年1月18日改正）pp.1
- 2) 土木工事積算基準令和2年度版 第19編 トンネル工9.爆破掘削方式（補助ベンチ付き全断面掘削工法）pp.19-12
- 3) 道路トンネル観察計測指針平成21年改訂版 p.66,pp.175-176

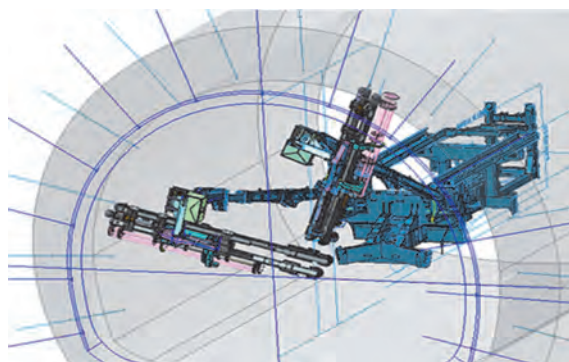


図-4 3Dシミュレーションによる打設順序検討

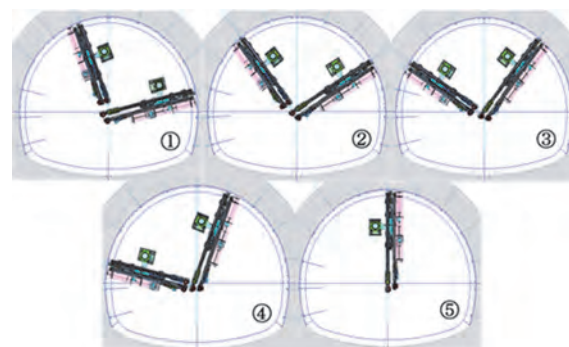


図-5 2ブーム打設順序検討

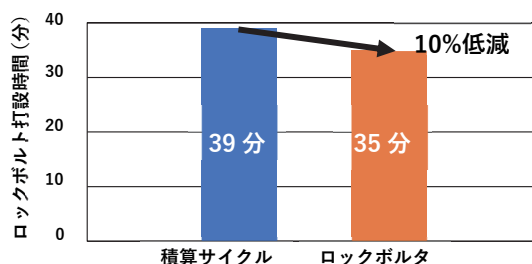


図-6 ロックボルト打設時間比較

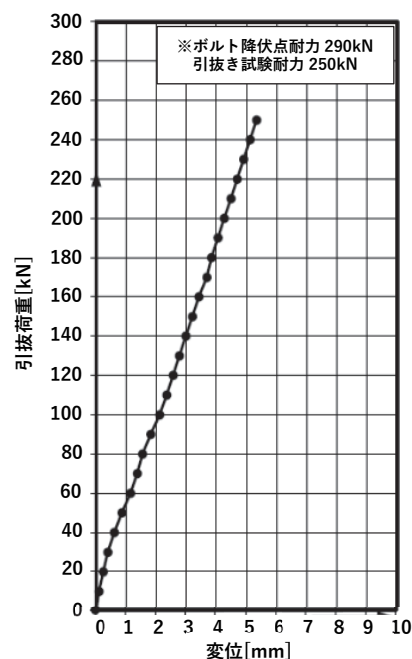


図-7 荷重-変位曲線

20. スタッドジベルを有する

鋼合成桁コンクリート床版撤去技術に関する研究

呉工業高等専門学校
呉工業高等専門学校
極東興和株式会社

○ 石川 穂乃花
重松 尚久
下野 聖也

1. はじめに

近年、高速道路リニューアルプロジェクト（大規模更新・修繕事業）の進捗に伴い、非合成桁橋と同様に合成桁橋において、損傷が進んだ鉄筋コンクリート床版をより耐久性の高いプレストレスコンクリート床版に取り替える床版取替工事が全国各地で本格化している。床版取替工事で部分更新される橋梁は、主に合成桁と非合成桁に分類される。そのうち、合成桁橋は、鉄筋コンクリート床版と鋼桁をずれ止め（スタッドジベル）で結合し、様々な荷重に対して一体となって挙動するように設計された構造である。合成桁橋には、構造上ずれ止めが密に配置されていることから、非合成桁橋と比較して既設床版の撤去作業に要する施工期間や費用を要するなどの課題がある。そこで、本研究では合成桁の橋梁の既設床版を効率的に撤去する方法を検討することを目的とし、既存床版を鋼桁から離脱させる際の大きな抵抗となるスタッドジベルに着目した。

2. 研究概要

図-1 に鋼合成桁橋におけるスタッドジベルの配置図を示す。スタッドジベルは、鋼桁上に3～4本ずつ横に並べた群を1組として配置され、配置間隔は活荷重作用時の鋼桁と床版の界面に発生する水平せん断力に依存して、決定されている。コンクリート床版を撤去する際、スタッドジベル特有の形状である先端部分の突起形状（スタッドジベル頭部）が大きな抵抗になることが推察される。

合成桁橋の既設床版撤去は、床版を複数のブロックに小分けに切断して鋼桁上の床版以外を撤去した後、鋼桁直上の床版をハンドブレイカー等により破碎し、鋼桁上に残存したスタッドジベルを切断する方法¹⁾が一般的である。また、既往の工法では、床版下からコア削孔もしくはウォールソーによりスタッドジベルを切断して鋼桁と床版を剥離撤去する工法¹⁾やワイヤーソーを用いて鋼桁直上の床版とスタッドジベルを一括で切断して撤去する工法²⁾が開発されているが、いずれの工法も床版下での作業および鋼桁直上に残存するコン

クリート撤去作業が必要となる。そこで、コンクリート床版上面からウォールソーを床版面に対して斜めに設置してスタッドジベル頭部のみを切断し、ジャッキアップによって床版を撤去する工法の開発に着手した。図-2 に本工法の床版撤去概要を示す。本工法を採用することで、床版を小分けにすることなく一括で撤去可能となり、コンクリートの破碎作業を大幅に削減することが可能となる。さらに、スタッドジベル頭部の切断作業とジャッキアップによる撤去作業を並行して実施できるため、撤去に要する時間を短縮することが可能となる。

本研究では、前述の工法の実現化に先立ち、スタッドジベル頭部を切断した場合の床版引き抜き抵抗を確認した。さらに、スタッドジベルは通常桁に対して垂直に溶接されるが、溶接作業はすべて手作業で行われるため、実際の設置状態は鋼桁に対して傾斜して溶接されている可能性もある。そこで、スタッドジベルの溶接精度が床版引き抜き時の抵抗に及ぼす影響も併せて確認した。

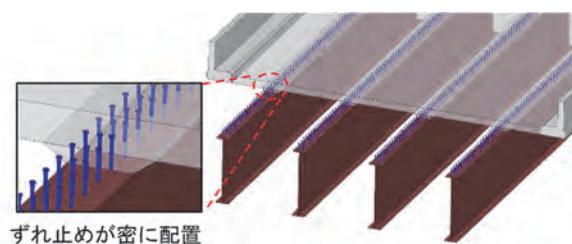


図-1 スタッドジベル配置図

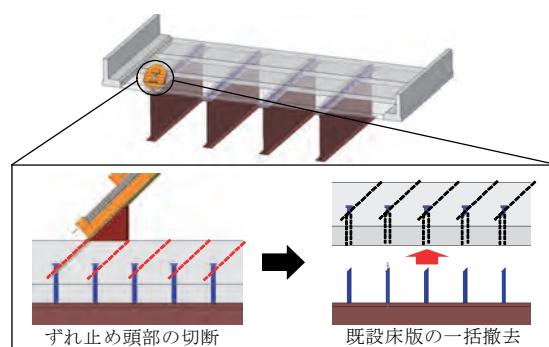


図-2 床版撤去概要図

3. スタッド頭部の有無に着目した引抜実験

ここでは、スタッドジベルを埋設した供試体 BASE01 とスタッドジベルの頭部を切断した供試体 CASE01 の実物大要素実験について述べる。

3.1 製作供試体

床版取替を実施する橋梁の建設時のコンクリート強度を想定し、 24N/mm^2 のコンクリート内にスタッドジベル（ $\phi 22\text{mm} \times 150\text{mm}$ ）を 3 本配置し、床版に見立てたコンクリート供試体（ $700\text{mm} \times 1,000\text{mm} \times 350\text{mm}$ ）を 2 基（BASE01, CASE01）製作した。埋設するスタッドジベルは鋼桁に見立てた金属に溶接し、引抜き時の挙動確認のため、溶接部 3 本の根元に表裏 2 カ所、計 6 カ所にひずみゲージを設置した。両者の供試体とも型枠内に鉄筋及びスタッドジベル、鋼棒挿入用のシースを設置後、コンクリートを打設した。表-1 にコンクリートの配合設計を示す。硬化後、CASE01 は油圧式ウォールソーを 45 度に傾けて設置し、供試体正面からスタッドジベルの頭部を切断した。写真-1 に切断時の状況を示す。

3.2 実験装置

図-3 に引抜試験の実験装置の概要図を示す。供試体はスタッドジベルを溶接した鋼板と油圧ジャッキを設置するための架台を添接板とボルトにより接合し、コンクリート表面及び鋼桁に見立てた鋼板の表面に 2 基ずつ変位計を設置した。油圧ジャッキで引張力を上昇させ、各ジャッキにスタッドジベル引抜き時に発生する引張力を測定するた

表-1 コンクリートの配合設計

水セメント比 W/C (%)		85
細骨材率 s/a (%)		52
単位量 (kg/m ³)	水	190
	早強セメント	224
	細骨材	987
	粗骨材	924

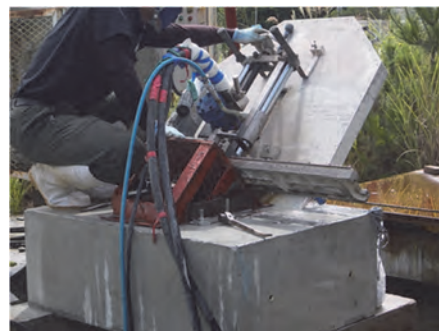


写真-1 ウォールソーによる頭部切断の様子

表-2 ひずみゲージ・変位計設置位置

項目	取付位置	設置場所
ひずみゲージ	スタッドジベル 付け根部（表・裏）	Sd-1～6
	コンクリート表面	H1,H3
変位計	スタッドジベル 溶接鋼板	H2,H4

※計測結果はそれぞれの取付位置の平均値で整理する

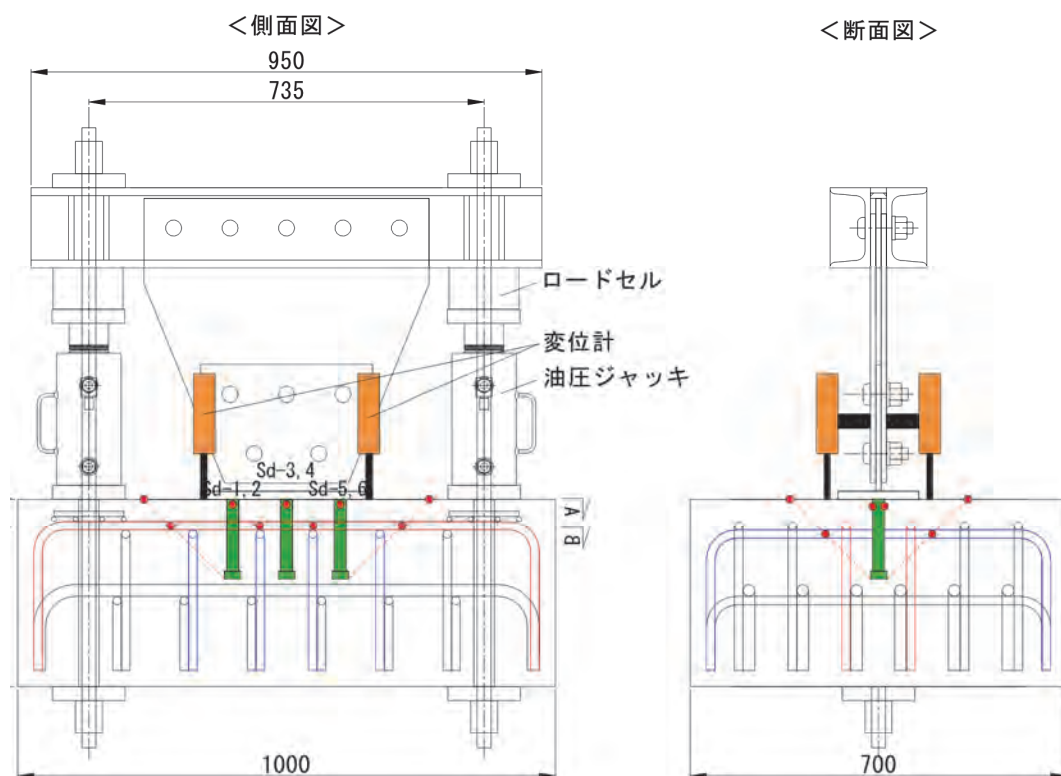


図-3 実験装置概略図

めに、ロードセルを設置した。表-2 にひずみゲージ貼付位置と変位計設置位置を示す。

3.3 実験方法

実際の床版撤去作業ではコンクリート床版を引き上げることで鋼桁から剥離させるが、実験装置の制約により今回の実験では、スタッドジベルを引き上げてコンクリートから剥離する方法を採用した。コンクリート上部に2か所設置した油圧ジャッキにより、スタッドジベルを引き上げる。油圧ジャッキによる引張力はロードセルによって計測する。コンクリート表面及びスタッドジベルを溶接した鋼板の上部に設置した変位計により、引張による両者の変位を計測する。またスタッドジベルに貼付したひずみゲージにより、スタッドジベルの挙動を測定した。なお、実験は施工現場と同様に荷重制御で行なった。

3.4 実験結果

(1) 最大引拔力

引抜試験における最大荷重を最大引拔力とした表-3 に実験結果を示す。供試体の最大引拔力は標準供試体 BASE01 が 202.4kN に対し、スタッドジベルの頭部を切断した CASE01 は 16.7kN である。BASE01 と比較すると、約 1/10 以下の引拔力でコンクリートを引抜き可能であることが分かった。これはスタッドジベルの頭部を切断することでスタッドジベルのせん断抵抗面における付着抵抗が少なくなり、コンクリートとスタッドジベルが付着切れを起こしたことが要因であると考えられる。

(2) 引拔力とスタッドジベルのひずみの関係

写真-2 に BASE01 と写真-3 に CASE01 の試験後のコンクリート供試体の様子を示す。BASE01 は供試体の表面のコンクリートが浮き上がっていることから、スタッドジベル周辺のコンクリートを巻き込みながら破壊していることが推測される。しかし、頭部を切断した CASE01 は、コンクリートの表面には大きな変化が見られない。

図-4 に BASE01 と図-5 に CASE01 の引拔力とスタッドジベルのひずみの関係を示す。ひずみの最大値が大きく異なるため、推移が分かりやすいようスケールを変えている。両者とも引抜開始後、最大引拔力に達するまで線形的にひずみが増加している。最大引拔力到達後、ひずみの推移に差異が生じ始める。BASE01 では、最大引拔力到達後、緩やかにひずみは減少していく。これは、引拔力を加えるとスタッドジベル周辺のコンクリートが破壊されるからであると考えられる。一方、CASE01 は最大引拔力到達後もひずみが増加し続けている。これは、スタッドジベルには、コンクリートとの付着抵抗のみしか発生しないため、BASE01 と異なりコンクリートや鉄筋の影響を受けずにスタッドジベルが引抜けたと考えられる。

表-3 実験結果

実験ケース	BASE01	CASE01
スタッドジベルの形状	標準	頭部切断
最大引拔力 (kN)	202.4	16.7



写真-2 引抜試験後の供試体 (BASE01)

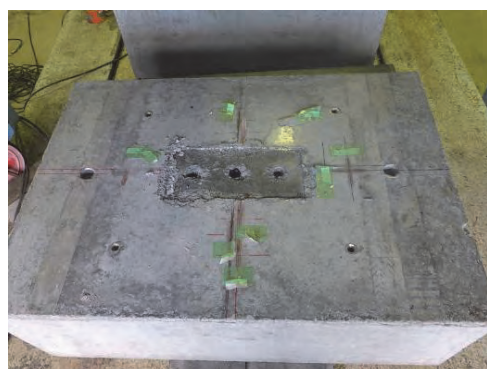


写真-3 引抜試験後の供試体 (CASE01)

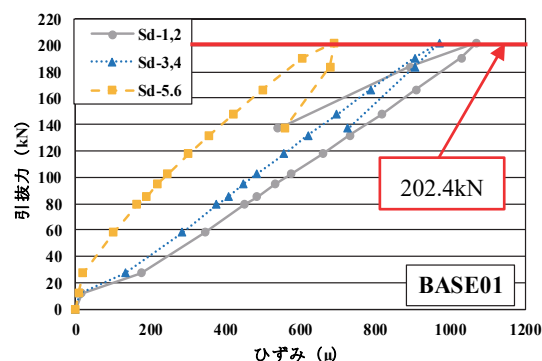


図-4 引拔力とスタッドジベルのひずみの関係 (1)

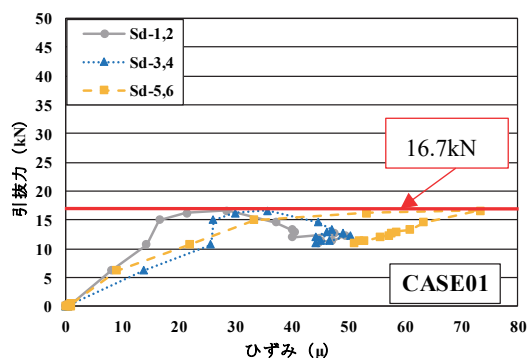


図-5 引拔力とスタッドジベルのひずみの関係 (2)

また、写真-4 に引抜試験後の頭部を切断したスタッドジベルを示す。スタッドジベルにコンクリートが付着していないことから、スタッドジベルの頭部を切断することにより、コンクリートに影響を与えることなく引抜き可能であることが確認できる。

(3) 引抜き力と変位の関係

図-6 に変位計設置位置、図-7 に引抜き力と変位の関係を示す。変位はコンクリート表面とスタッドジベルを溶接した鋼板上の対角に配置した変位計 2 基の平均値とする。コンクリート表面に設置した変位計 (H1, H3) は BASE01, CASE01 の両者とも 0.5mm 以下で推移しているため、引抜く際のコンクリート表面への影響は極めて少ないと考えられる。次に、スタッドジベルに溶接した鋼板に設置した変位計 (H2, H4) の結果に着目すると、BASE01 は最大引抜き力を超えると引抜き力が減少しながら、変位が増加している。これはスタッドジベルが抜け始めるとコンクリートが破壊し、鉄筋の影響により、スタッドジベルの挙動が制限されるからである。一方で CASE01 の変位の推移は最大引抜き力到達後、変位が急激に上昇している。これは、周辺のコンクリートの影響を受けず、スタッドジベルの付着力のみで抵抗しており、小さい引抜き力ですべて引抜けたと考えられる。

4. 溶接誤差に着目した引抜き実験

ここでは、スタッドジベル溶接の施工誤差がコンクリートの引抜きにどのような影響をあたえるかスタッドジベルの傾斜の向きと傾きの角度を変化させた供試体で実験する。

4.1 製作供試体

表-3 に本実験で用意したスタッドジベルの傾斜パターン、図-8 にスタッドジベル平面図の一例を示す。本実験では鋼桁に見立てた鋼板に丸鋼を 3 本溶接することで、スタッドジベルを既に切断したものと想定した供試体を用いた。用意したスタッドジベル ($\phi 22\text{mm} \times 150\text{mm}$) は丸鋼を鋼板に対して垂直に溶接したものを標準供試体とし、鋼板に対して同じ方向に傾かせて溶接したもの、スタッドジベルの端の 2 本を供試体正面から見て左右に傾かせて溶接したもの、端の 2 本を供試体の上面から見て前後方向に傾かせて溶接したものをそれぞれ傾き (溶接誤差) が 5mm と 10mm の計 7 つの

表-3 スタッドジベルの傾斜パターン

傾き (mm)	5	10
同じ方向に傾斜	CASE01	CASE04
両端が外側に傾斜	CASE02	CASE05
前後方向に傾斜	CASE03	CASE06

※BASE01 を標準供試体とする



写真-4 頭部を切断したスタッドジベル

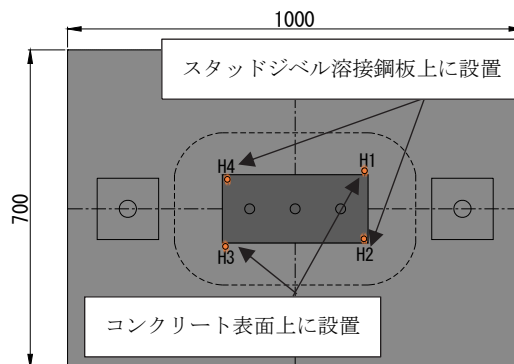


図-6 変位計設置位置

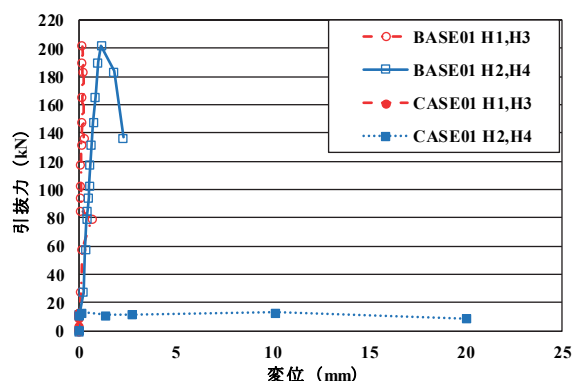


図-7 引抜き力と変位の関係

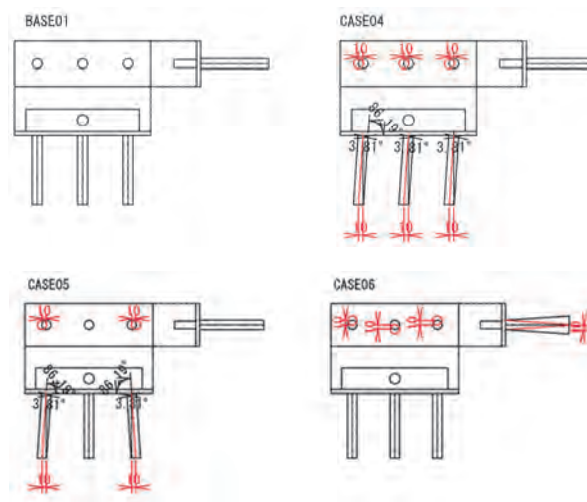


図-8 スタッドジベル平面図の一例

種類を用意した。このスタッドジベルを供試体（ $\phi 370\text{mm} \times 173\text{mm}$ ）に埋設し、硬化させた。表-4 にコンクリートの配合設計を示す。コンクリートは前述の実験と同様に 24N/mm^2 を目標強度とした。

4.2 実験装置

写真 5 に実験装置を示す。テーブル（ $\phi 700\text{mm} \times 1,750\text{mm}$ ）にスタッドジベルの突起部が上面になるよう供試体を設置し固定した。その後、スタッドジベルを溶接した鋼板に開けた穴と実験装置をシャックルで接合した。前述の実験と同様にコンクリート表面及び鋼桁に見立てた鋼板の表面に変位計を設置し、油圧ジャッキで引張力を上昇させ、引抜力測定のため、ロードセルを設置した。

4.3 実験方法

実験装置に取り付けた供試体を油圧モーターで引き上げて、ロードセルによって、引抜力を測定した。また、前述の実験と同様にコンクリート表面及びスタッドジベルを溶接した鋼板の上部に 2 基ずつ設置した変位計により、両者の変位を計測し、3 本のスタッドジベル表裏に貼付したひずみゲージにより、スタッドジベルのひずみを測定した。なお、実験は施工現場と同様に荷重制御で行なった。

4.4 実験結果

(1) 最大引抜力

最大引抜力の実験結果を示す。紙幅の都合上、傾斜パターンと傾き（溶接誤差）が異なる比較を示し、その他は割愛する。図-9 に傾斜パターンによる最大引抜力の比較を示す。傾斜がない BASE01 と傾斜が異なる CASE01, CASE02, CASE03 について最大引抜力を比較すると、CASE02, CASE03 が大きくなっている。これは、傾斜方向が異なる CASE02, CASE03 は付着が切れた後も鋭角側のコンクリートを破壊しながら引き抜かれる。傾斜方向が同じ CASE01 はこの影響が小さいため、最大引抜力が小さくなったと考えられる。

図-10 に傾きによる最大引抜力の比較を示す。傾き（溶接誤差）が異なるパターンを比較すると傾きの角度に関わらず、ほぼ同様な最大引抜力が出ると確認できる。本実験ではコンクリート強度にばらつきが生じてしまった。図-11 に圧縮強度ごとの最大引抜力の比較を示す。コンクリート強度により比較すると、コンクリート強度が大きい供試体での最大引抜力は大きくなる傾向が見られた。これは傾きや傾斜パターンにかかわらず、同様な結果が得られた。このことから、今回設計したコンクリート強度付近の供試体の最大引抜力は溶接精度にあまり関連がないが、コンクリート強度は最大引抜力に影響を与えたと考えられる。

(2) 載荷時間とスタッドジベルのひずみの関係

引抜荷重載荷プロセスにおけるひずみの関係からスタッドジベルの挙動について考察する。図-12



写真-5 実験装置

表-4 コンクリートの配合

水セメント比	W/C (%)	71
細骨材率	s/a (%)	48
単位量 (kg/m ³)	水	192
	普通セメント	270
	細骨材	848
	粗骨材	993

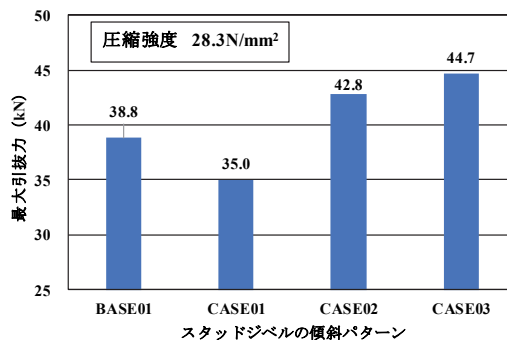


図-9 傾斜パターンによる最大引抜力の比較

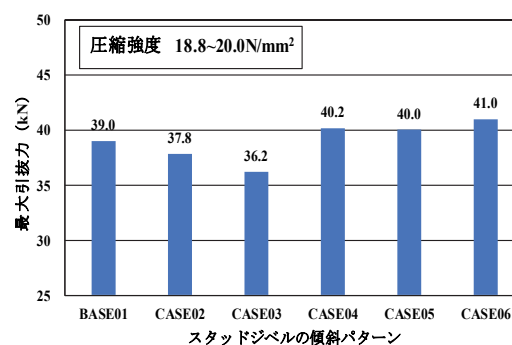


図-10 傾きによる最大引抜力の比較

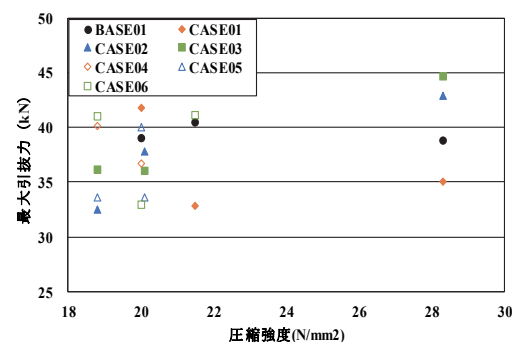


図-11 圧縮強度ごとの最大引抜力の比較

に、一例として CASE04 のスタッドジベルのひずみと荷重時間の関係を示す。まず、真ん中に位置するスタッドジベルのひずみ Sd-3,4 が増加し始め、後から両端のスタッドジベルのひずみ Sd-1,2, Sd-5,6 が増加し始めた。これは、中央に位置するスタッドジベルの真上から力を加えていったことが原因だと考えられる。荷重開始から緩やかに増加していたひずみがある点で増加量が大きくなる。これは上部のプレートがコンクリートから剥離し、スタッドジベルの付着力だけで引抜力に抵抗しているためだと考えられる。最大引抜力が近づくと、すべてのひずみの大きさが等しい値に近づき、スタッドジベルがコンクリートから抜け始めるためひずみゲージが断線し、その後測定不能になる。すべての供試体において同様な傾向を示した。

写真-5 に、一例として引抜き後の供試体の端 2 本のスタッドジベルが反対方向に傾斜している CASE05 のスタッドジベル引抜き後の供試体の断面を示す。両端のスタッドジベルの孔が供試体上面に近づくにつれ、径が大きくなっていることが確認できる。これより、スタッドジベルに傾きがあるものは付着が切れた後、スタッドジベルがコンクリートを破壊しながら抜けることが判明した。

(3) 荷重時間と変位の関係

図-13 に、一例として CASE04 の荷重時間とコンクリート表面および鋼板上部に取り付けた変位計の変位の関係を示す。スタッドジベルの抜け出しが始まるまでは、コンクリート表面と鋼板の変位の履歴はほぼ重複している。その後、荷重時間の経過とともにスタッドジベルの変位がコンクリート表面の変位をわずかに上回って推移している。これは引抜荷重の増加に伴って固定装置が変形し、供試体が加力方向へ移動したためである。最終的に、ある時点で鋼板の変位が急激に増加しスタッドが抜け出した。すべての供試体において同様な傾向を示した。

5. 結論

- (1) スタッドジベル頭部を切断することで、切断していない供試体と比較して、約 1/10 以下の小さい引抜力でコンクリートから引抜ける。
- (2) 橋梁における建設時のコンクリート強度付近のスタッドジベルを引抜く際、スタッドジベルの傾き（溶接誤差）が異なっても最大引抜力への影響は少なかった。また、スタッドジベルの傾斜方向が異なれば、最大引抜力に影響をあたえることが分かった。
- (3) コンクリート強度が設定した強度 (24.0N/mm²) より大きいものに関してはスタッドジベル周辺のコンクリートを破壊する力が増加するため、最大引抜力も大きくなる。

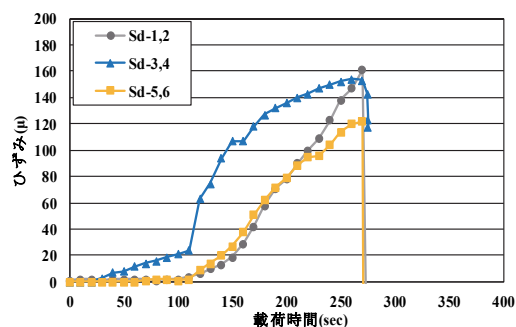


図-12 スタッドジベルのひずみと荷重時間の関係

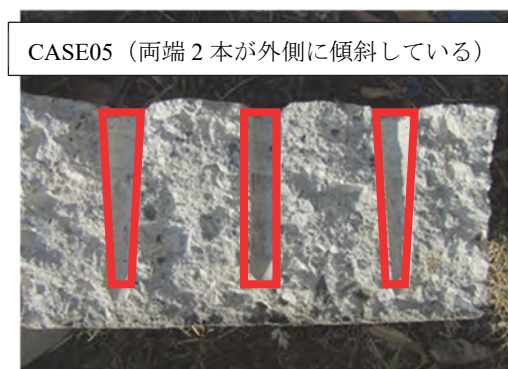


写真-5 スタッドジベル引抜き後の供試体の断面

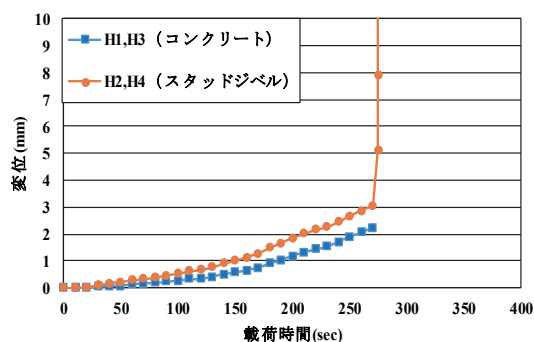


図-13 変位と荷重時間の関係

6. 今後の展望

筆者らは、本工法実用化のために実際に撤去する床版と同等規模の供試体を製作して、スタッドジベル頭部の切断から床版剥離・撤去までの一連の作業性を確認する実験を実施し、コンクリート本体が曲げ破壊することなく一括撤去可能であることを確認している。今後は、本工法をさらに効率的に実施するため、スタッドジベルの床版上面からの位置出し作業や頭部切断有無の確認の合理化に向けて検討・検証を進めていく。

参考文献

- 1) 土木学会:鋼構造シリーズ 33 鋼道路橋 RC 床版更新の設計・施工技術, pp.239-246, 2020.
- 2) 宮地エンジニアリング株式会社:M-SR システム (<https://www.miyaji-eng.co.jp/pdf/msr.pdf>)

2022 年 8 月 17 日参照

21. 道路橋床版更新工事における施工機械の開発事例

－阪神高速道路5号湾岸線中島排出路への適用－

清水建設株式会社
清水建設株式会社
阪神高速道路株式会社

○ 藤吉 卓也
安田 篤司
長畑 友貴

1. はじめに

道路橋床版更新工事におけるプレキャスト PC 床版（以下、PCa 床版という）の橋軸方向の接合構造には、場所打ちの鉄筋コンクリート構造（以下、RC という）が多く採用されている。著者らは接合構造部の耐久性向上ならび床版の急速施工を目指し、橋軸方向接合部の RC 部を省略し、床版接合部にプレストレスを導入できるジョイント（以下、PS ジョイントという）を用いた新しい PCa 床版（以下、PS ジョイント床版という）の開発に取り組んでいる。PS ジョイント床版は接合部に埋め込まれた複数のオスボルトとメスボルトを接合する構造（図-1）であるため、接合作業時にオス・メスボルトの相対的な位置合わせ（心出し）を高い精度で行う必要がある。これらの PS ジョイント床版の特性と試験工事における施工条件を考慮し、床版架設作業を効率的に行うための施工機械を開発した。本稿ではその施工機械の開発経緯と稼働実績について報告する。

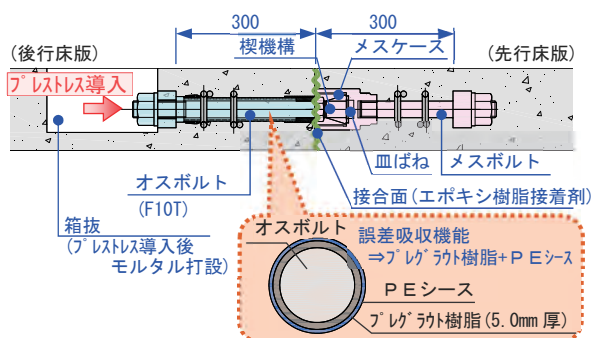


図-1 PS ジョイント床版概要図

2. 試験工事概要

試験工事の対象橋梁である中島排出路は、阪神高速5号湾岸線の中島出入口の入路橋と出路橋の間に位置する車両排出路で、橋長101.25m、有効幅員4.45mの鋼3径間連続非合成鈹桁橋である（写真-1）。平面線形は $R=\infty$ 、縦断勾配は9.5%～-0.5%に変化する縦断曲線を有し、横断勾配2%の片勾配となっている。今回は、そのうち

NP3～NP5の2径間67.5mで床版取替の試験工事を実施した。



写真-1 試験橋梁の施工前状況

3. 施工方法ならび施工機械の検討

試験工事は、開発したPSジョイント床版の実橋への適用性を確認するとともに、急速施工の効果を確認するために施工方法のさらなる効率化が求められた。そこでPSジョイント床版の施工にかかる特性に加え、中島排出路特有の施工条件より求められる課題を抽出し、要求項目を満たし、かつ急速施工を実現可能とする施工機械の開発を試みた。

3.1 施工条件

(1) PSジョイント床版の施工上の特性

PSジョイント床版接合部には複数のボルトが配置されており（写真-2）、架設作業においてはオスボルトとメスボルトの相対位置を3次元的に高い精度で合わせた（心出し）後に、PSジョイント床版同士を引寄せて接合させる必要がある。



写真-2 PS ジョイント床版接合部

(2) 試験工事における施工条件

対象橋梁は、最大縦断勾配が9.5%の急勾配であり、有効幅員が4.45mで両側を走る供用中の隣接橋との離隔がほとんどなく、橋梁側部へ大型クレーンが配置できない狭隘な条件にある。

3.2 施工機械における課題

PS ジョイント床版の架設作業を対象橋梁において実現するための施工機械として、重量物である床版を施工箇所への運搬する機械としてこれまで用いてきた移動式クレーンの代替機械が求められた。また急速施工を実現するため、既往の研究で用いてきたPS ジョイント床版架設時の位置合わせ用の仮設物を極力少なくすることが求められた。

これらの要求項目を満たす施工機械の開発が課題となった。

3.3 フォークリフトの適用検討

一般的に新設床版架設時は大型の移動式クレーンが揚重機として橋梁上に配置され、搬入した床版の荷降ろしや架設箇所への運搬を担う。しかし対象橋梁においては狭隘な条件により、大型クレーンの設置や旋回動作等が不可能であった。

そこで物流だけではなくシールド工事のセグメント運搬等、建設現場でも多く用いられているフォークリフトの適用を検討した。フォークリフトが有する優れた荷役運搬性能を利用しつつ、PS ジョイント床版架設で必要とされる高精度の位置調整機能を有する機械を別途開発し、これらを組合せることにより課題解決を試みた。

まずはフォークリフト実機の視察を行い、開発する機械との機能分担や取合いに関する構造等を検討した。結果、フォークリフトの以下の機能を主に利用することとした。

① 走行機能

フォークリフトは後輪操舵による小回りの良さと優れた登坂能力を有することが特徴であり、試験工事における厳しい運搬路条件においても問題ない走行性能を有した。

② 荷物昇降機能

新設床版を架設箇所に運搬、のちに据付高さに下ろすために用いる機能。PS ジョイント床版の設計時想定重量(約7t~10t)より最大荷重15tのフォークリフトの仕様を参考に検討を進めた。

③ フォーク左右スライド機能

本体に対してフォーク(爪)のみを左右方向にスライドできる機能。本来機体と荷物がズレて進入した場合、フォークをスライドさせることによりズレを無くし機体の切り返しを少なくするため機能である。しかし油量を絞る操作をすれば2mm/秒程度の微速動作が可能であることを現認し、床版の微小な位置合わせ機能として適用可能と判断し

た(写真-3)。



写真-3 フォーク左右スライド機能

3.4 開発機械の機能検討

PS ジョイント床版架設作業に必要な機能について、前述したフォークリフトの機能を利用しつつ、足りない機能を補うことができる機械(フォークに取付ける構造)を開発することとした。検討した結果、開発機械には以下の機能をもたせることとした。

① 床版縦横断勾配調整機能

既設のPSジョイント床版に対する新設PSジョイント床版の橋軸方向ならび橋軸直角方向の傾斜度の調整に用いる機能となる。フォークリフトのタイヤのへこみやフレームのたわみ等の予測が難しい微小な変位への対策として必要な機能と判断した。

② 床版回転機能

既設のPSジョイント床版接合面に対する新設PSジョイント床版の接合面の平行度の微調整に用いる機能となる。軌道方式では回転にかかる大きな調整は生じないが、タイヤ方式であるフォークリフトでは、ハンドル操作で停車位置まで橋軸方向に対しまっすぐ進入していくことが難しいと考え、必要な機能と判断した。

③ 引寄せ追従機能

PSジョイント床版はオスボルトとメスボルト間の位置合わせ完了後、センターホールジャッキの変位同調システムを用いて新設床版を約10cm程度引寄せ、ボルトを箆合させる作業に移行する。ボルトの箆合が終了するまでは、新設床版はフォークリフトで支持された状態にあるが、新設床版を引寄せる際に床版支持金物が取り残されていくことを防止するために、フォークリフトに設置した装置の一部が引寄せ動作に追従する機能が必要と判断した。

4. 心出し装置の開発

開発する機械の名称は、PS ジョイントのオスボルトとメスボルトの中心を合わせるという機能が

ら「心出し装置」とした。本章では心出し装置の仕様、開発における課題、そして実証実験の場となった実物大施工性確認試験での動作確認試験内容ならび試験結果からの改善項目について述べる。

4.1 心出し装置の仕様

心出し装置は、フォークリフトに取付けた状態でPS ジョイント床版を懸垂して保持する機能と縦横断方向の勾配調整($\pm 2\%$)、回転方向の調整機能($\pm 5^\circ$)、引寄せ追従機能(250mm)を有するものとして開発を行った(図-2)。左右方向と上下方向の位置合わせは、フォークリフト本体の機能を利用するものとした。

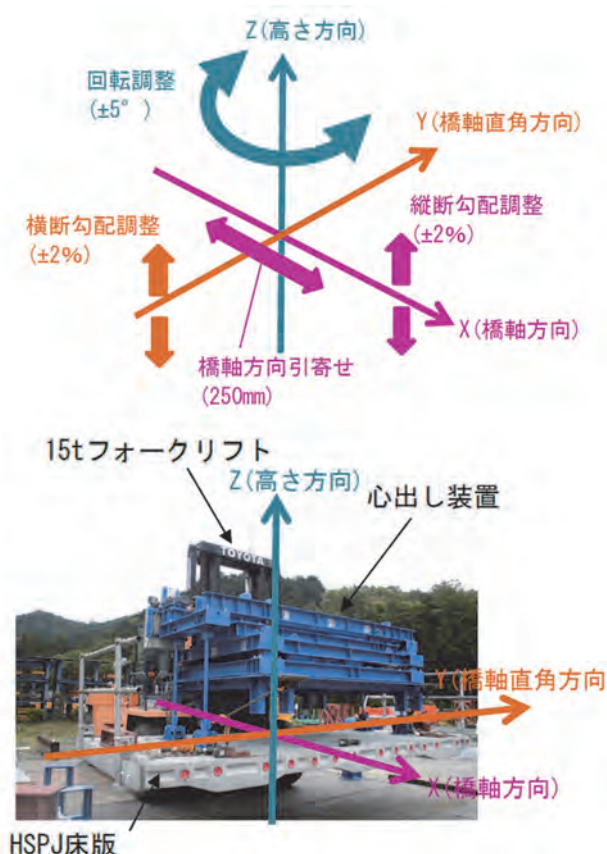


図-2 心出し装置の仕様

4.2 開発における課題

心出し装置の開発における課題は、装置の簡素化、安全の確保、さらに現場での取扱いを容易にすることである。

基本設計については、以前筆者が開発した機械を参考に橋軸方向、橋軸直角方向へ勾配調整機構をそれぞれ独立した構造とし、それらを中核に吊下げフレームのスライド機構(引寄せ)、フォークに取付ける台座フレームに対して上部機構全体が回転する機構を加えるものとした。全て油圧ジャッキによる駆動とし、それぞれのジャッキの役割を明確に分けることにより、設計を簡素化することやオペレータの装置操作理解を簡明化する狙いがあった。

安全の確保については、フォークリフトからの装置の脱落がないように、フォーク背面に鉄板を当て貫通ボルトで装置を挟みこむ構造とした。さらに装置のがたつきを抑えるために、フォーク下面から押しボルトで装置を固定した(写真-4)。床版の急な揺れを防止するために装置の動作速度についても、作業に支障ない範囲で極力遅くする方向で調整を行った。



写真-4 心出し装置のフォークへの固定方法

4.3 実物大施工性確認試験

試験工事でのPSジョイント床版施工の事前検証を目的に、試験施工対象橋梁の縦断勾配9.5%横断勾配2.0%の主桁を模した鋼製架台を構築し、実物大PSジョイント床版を用いて試験を行った(写真-5)。

(1) 動作操作確認試験

実物大施工性確認試験の項目には心出し装置を用いた床版架設作業における課題・問題点の抽出が含まれており、心出し装置を15tフォークリフトに実装着し、主に以下の項目を目的に試験を行った。

- 床版の運搬・心出し・引寄せ作業における床版の一連の挙動を確認する。
- 心出し装置の動作速度を検証し最適な速度に調整を行う。
- 配置予定作業員による心出し装置に関連する操作練習と作業手順における問題点等の抽出。

(2) 改善項目について

実施工を模擬した本試験では、多くの貴重な実験データが取得できた。主な心出し装置の改善項目について前項の試験項目ごとに整理する。

①項目aについて

- ・床版の振止め用金具の追加

②項目bについて

- ・油圧制御回路の改造(勾配調整)
- ・絞り弁の追加による油量調整(引寄せ・回転)

③項目cについて

- ・各動作の稼働範囲を明瞭にマーキングし、オペや周囲が機械の動作状態を確認しやすくする。
- ・電動工具を使いやすくするために床版取付金具を改造する。
- ・電源ケーブルの長さ調整、ケーブルフック追加等



写真-5 実物大施工性確認試験実施状況

5. 試験施工での稼働結果報告

実橋梁での試験工事では、心出し装置を用いて計37枚のPSジョイント床版の架設作業を行った。本章ではその稼働結果について報告する。

5.1 稼働結果

実物大施工性確認試験においてはフォークリフトのオペレーターに周囲の情報を伝える手段として、無線機を用いてチーム内での声でのやり取りを行った。実橋での試験施工においてはさらなる対応として5方向カメラをフォークリフトに取付けた。これによりオペレーターの視覚情報が大きく改善された。床版の振れ止めのブラッシュアップについても有効であり、大型フォークリフトによる狭隘な施工箇所への床版運搬を問題なく行うことができた(写真-6)。



写真-6 PS ジョイント床版運搬状況

架設作業においては、実物大施工性確認試験での改善項目の実施によって、準備作業をはじめ床版の位置合わせ作業をよりスムーズに行うことができた。特に回転動作速度の調整については開発当初の半分程度の速度まで落とした結果、余計な反復操作をなくすことができ、サイクルタイムの削減に大きく寄与した。試験工事の後半ではフォークリフトが停車してから床版架設を開始後、オスボルトメスボルトの心出し～PSジョイントの嵌合終了まで10分程度で行うことができた(写真-

7,8)。



写真-7 PS ジョイント床版架設開始



写真-8 心出し装置操作状況

5.2 まとめ

試験工事でPSジョイント床版が実橋梁に適用可能であることが確認できた。また大型フォークリフトと開発した心出し装置の組合せにより、急勾配かつ狭隘な施工条件においてPSジョイント床版の運搬ならび架設作業をスムーズに行うことができた。

6. おわりに

道路橋床版更新工事においては今後さらなるPCa床版の急速施工が求められる。今後は、さらなる急速施工を可能にする機械開発に取り組んでいきたいと考える。

本稿は、阪神高速道路(株)、清水建設(株)、ユニタイト(株)、住友電気工業(株)、昭和コンクリート工業(株)によるPSジョイント工法に関する共同研究成果の一部を報告したものである。

ご指導いただいた関係各位に深く謝意を示します。

参考文献

- 1) 長畑友貴・越野まやか・安田篤司: プレストレスジョイント床版を活用した道路橋床版更新の生産性向上, 建設機械施工, 通巻866号, pp.23~29, 2022.4

22. 幅員方向分割取替えによる床版更新工法

－ 一車線規制化で行う床版更新工法 －

鹿島建設（株）

三室 恵史
村瀬 諒介
○小柳 裕

1. はじめに

東・中・西日本高速道路株式会社（以下、高速道路3会社）が管理する高速道路は、昭和38年7月16日に我が国最初的高速道路として名神高速道路・栗東～尼崎が開通して以降、順次整備が進められ、2022年時点で総延長約9,600kmが供用されている。利用台数は約790万台/日（2018年）¹⁾²⁾³⁾に達し、主要路線では大型車の混入率が40%（2018年）を超える⁴⁾など、国民生活に欠かせない社会インフラとなっている。しかしながら、供用後30年以上経過した区間は2019年には約5,000kmとなる。⁵⁾また、大型車の通行量の増加や凍結防止剤の散布などにより急速に劣化が進行しており、適切な維持管理および更新は喫緊の課題となっている（図-1）。これに対し、2014年に公表された高速道路3会社の大規模更新・修繕計画（案）では、鋼橋の劣化した鉄筋コンクリート床版をプレキャストPC床版に取り替える工事は、総延長224km、事業費16,429億円⁶⁾、実施期間15年で盛り込まれており、2015年3月25日に国土交通大臣より特定更新工事として事業許可を受けている。

このような社会的要請に対処すべく、鹿島では、交通規制等によるソーシャルロス的大幅な低減を可能にした『スマート床版更新システム（SDR※1）

の開発を進めており、二車線規制下における『全断面取替』を対象とした全断面SDRシステム⁸⁾に続き、一車線規制においても幅員方向分割取替え（半断面取替）を対象とした幅員方向分割SDRシステムを開発した。

※1 Smart Deck Renewal

2. システムの概要

2.1 対象とする床版取替工事

床版取替工事は、『全断面取替』と『幅員方向分割取替え』の2タイプの取替工事がある（表-1）。

本システムは『幅員方向分割取替え』を対象としたシステムである。

2.2 システムの概要

本システムは、床版取替にかかわる4つの作業である既設床版の縁切り・撤去、主桁ケレン、高さ調整工、新設床版の搬入・架設をそれぞれ専門の作業班によって前進しながら並行して作業する、いわゆる『移動式工場』を目指した施工システムである（図-2）。①から④までの作業を順々に繰り返していく標準的な工法に対し、各作業班による同時作業を可能として、30枚/日の床版を取り替えることのできる高速施工を実現した。

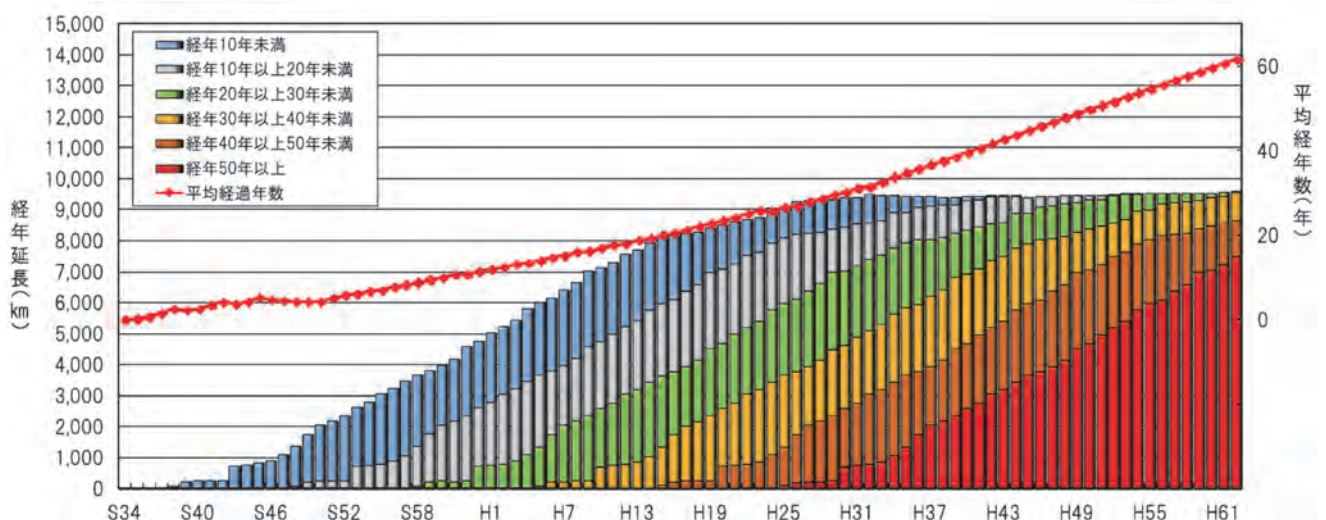
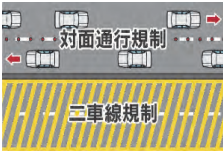
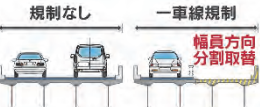


図-1 高速道路の経過年数の推移⁷⁾

表-1 適用対象となる床版取替工事

工事 タイ プ	平面図	断面図	備考
全断面取替			参考文献②
幅員方向分割取替			本報文

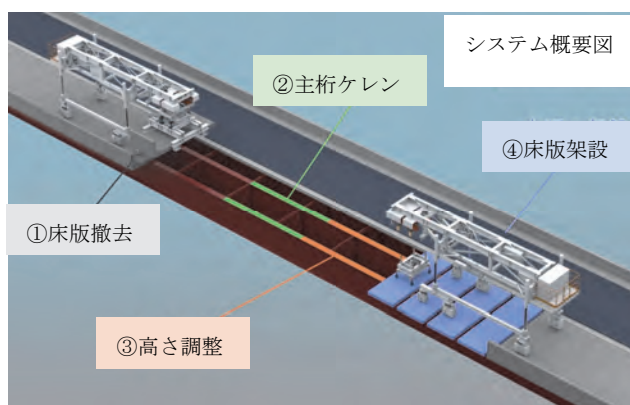


図-2 システム概要図
(本施工システムについては、特許出願中)

3. システムの構成技術

システムの主要技術である、『車載運搬型床版架設機・撤去機』、『交通振動対応仮設プレート型継手』および『ワンタッチ型SB種防護柵』について、その概要を述べる。

3.1 車載運搬型床版架設機・撤去機

一車線規制下における床版架設機・撤去機の設置・撤去作業においては、供用交通に対する安全性の担保が最重要課題とする。そこで、床版架設・撤去機を10tトラックおよび15tトレーラーにより運搬しクレーンを要さず安全かつ高速に組立・撤去可能な『車載運搬型床版架設機・撤去機』を開発した(図-3, 4)。

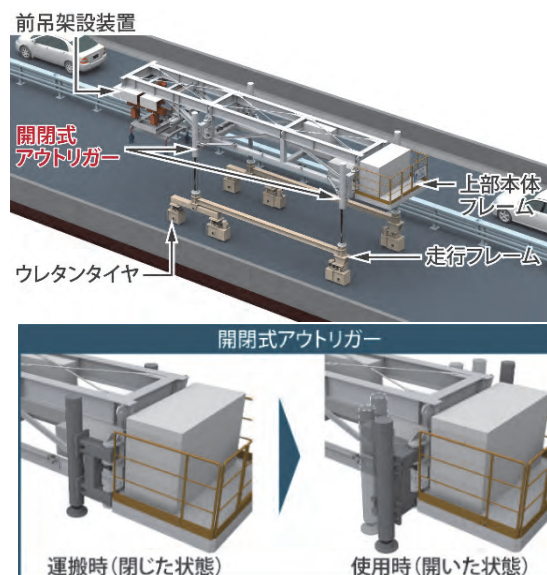


図-3 車載運搬型床版架設機・撤去機

車載運搬型床版架設機・撤去機は、走行フレームと上部本体フレームの2つのフレームから成る。走行フレームについては10tトラックにより搬入する。また上部本体フレームについては15tトレーラーによって搬入する。一車線規制としてクレーンを要さず高速組立を可能とするために、開閉式アウトリガーを採用した。

車載運搬型床版架設機・撤去機の組立・撤去作業を対象として、サイクルタイムおよび施工安全性の検証を目的とした施工性確認実験を行い、組立・撤去はそれぞれ30分程度の短時間かつ安全に施工可能であることを確認した(写真-1, 2)。

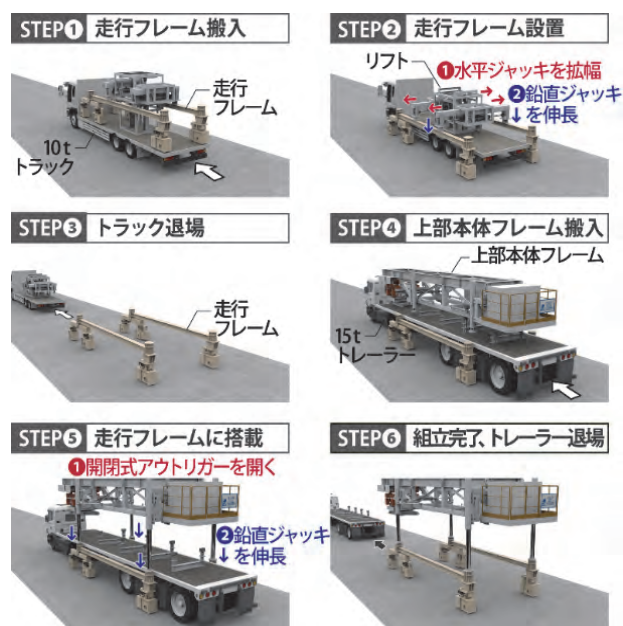


図-4 架設機組立フロー



写真-1 架設機走行フレーム運搬



写真-2 架設機上部本体フレーム運搬・組立

(1) 床版撤去機

本システムに使用する床版撤去機(写真-3)の総重量は約 22t であり、複数の車輪によって荷重を分散させるため輪荷重は約 6t となる。従って主桁へ作用する荷重は低減され、主桁の補強を不要とするか、もしくは大幅に減らすことができる。この床版撤去機は、門型構造になっており、機械の内側に搬出用トラックを誘導することができる。また、床版撤去機は、床版引き剥がし装置を吊り下げており、2 分割された床版を引き剥がし装置に取り付けられた 4 台のジャッキによって主桁から引き剥がす。その後、引き剥がし装置ごと吊り上げ、撤去機内に誘導されたトラックの荷台に既設床版を積み込んだ後、場外に搬出して撤去は完了する。

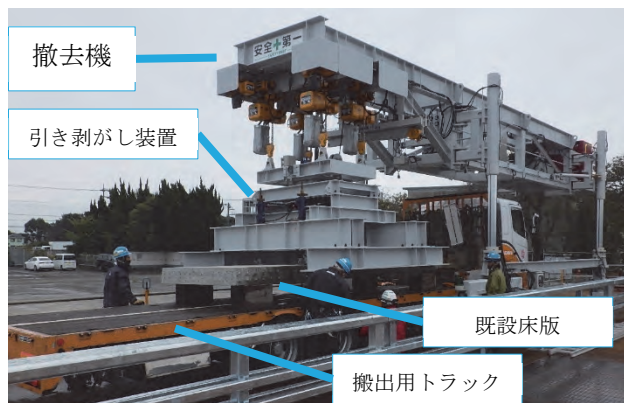


写真-3 床版撤去状況

この引き剥がし用のジャッキ(写真-4)は、現場条件に見合った能力のジャッキに容易に変更可能な構造としている。また、同調運転が可能であり、4 台のジャッキは専用のアプリを用いてタブレットから操作をするシステムである。

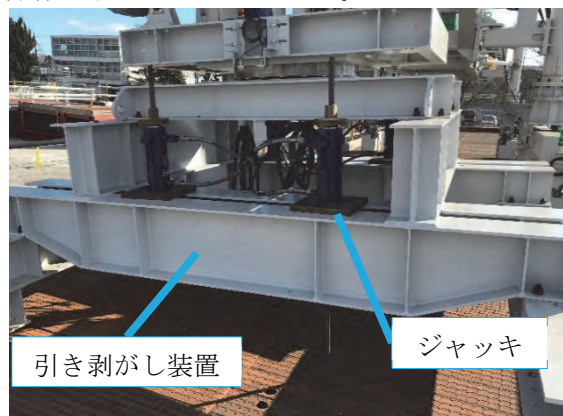


写真-4 引き剥がし装置・ジャッキ

(2) 床版架設機及び床版運搬台車

床版架設機(写真-5)と床版運搬台車(写真-6)は、主桁に荷重を伝達させるように設置したレール上を走行し、新設床版に荷重を作用させることなく施工できる。また、床版架設機の総重量は約 21t であり、輪荷重は約 6t となるため、床版撤去機と同様、主桁に作用する荷重を低減できる。

床版架設機は、床版撤去機と同様、門型構造であり、新設床版を乗せた床版運搬台車は、床版架設機の内側を通過できるようになっている。床版運搬台車により新設床版を架設場所まで移動させ、床版架設機にて揚重し、旋回装置を用いて橋軸直角



写真-5 運搬台車を用いた床版運搬状況



写真-6 床版架設機での床版架設状況

方向に旋回し架設する。

更に、床版架設機に自動開閉フック（写真-7, 8）を導入した。これにより、床版の玉掛、玉外作業を自動化することによって人は床版上に昇り降りする必要がなくなり、生産性と安全性の向上を図った。フックは吊り金具に近づいた時、マグネットにより吊り金具を引き寄せ、正しい位置にフックを閉じることによって玉掛され、床版を吊り上げることが出来る。



写真-7 自動開閉フック



写真-8 自動開閉フック詳細

3.2 交通振動対応仮設プレート型継手

幅員方向分割取替えにおける供用側床版（以下、一次床版）と規制側床版（以下、二次床版）の接合部（橋軸直角方向接合部）は、間詰材を充填する。硬化中に一次床版からの交通振動によりひび割れ

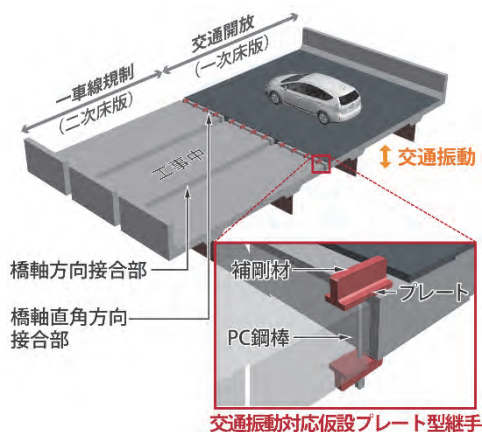
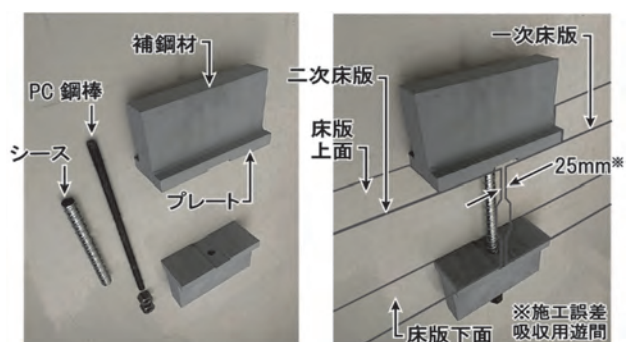


図-5 交通振動対応仮設プレート型継手

を生じさせるなど、品質の低下が課題となっている。そこで、交通振動による影響を解消し間詰材の品質を確保するために、摩擦抵抗によって一次床版と二次床版を仮接合する『交通振動対応仮設プレート型継手』（以下、プレート型継手）を開発した（図-5）。

プレート型継手は、プレート、P C鋼棒およびシースから成る。プレートについては、補鋼材により交通振動に対して必要な剛性を確保する構造としている。このプレートを一次床版と二次床版を跨ぐように床版上下面に配置し、これら上下面のプレートをP C鋼棒で締結することにより、一次床版と二次床版を摩擦力によって接合する構造である（写真-9）。



構成部材
写真-9 交通振動対応仮設プレート型継手

このプレート型継手を用いた幅員方向分割取替え施工手順は図-6 の通りである。プレート型継手を用いることによって、施工時においてはプレート型継手により一次床版と二次床版を接合・一体化する。間詰材の硬化中においては、一次床版側の交通荷重による一次床版と二次床版の相対変位を抑制できる（STEP②）。また、完成時においてはプレストレスにより一次床版と二次床版を接合・一体化し、交通荷重に対し十分な性能を有する床版

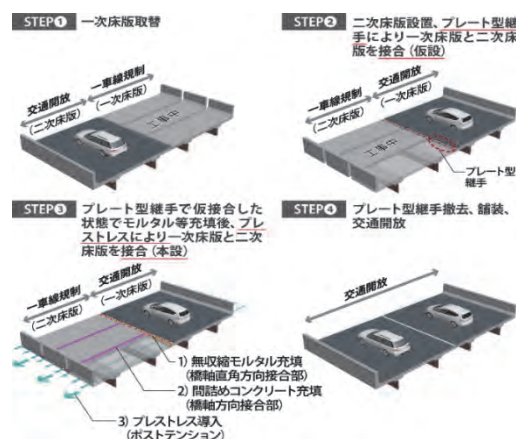


図-6 幅員方向分割取替え施工手順

とするものである（STEP③, ④）。

プレート型継手を用いて取り替えた床版を供用期間中における耐疲労性の確認を目的として、NEXCO 試験方法⁹⁾に準じ輪荷重走行試験を実施した。試験の結果、完成した床版は100年相当の交通荷重に対して十分な性能を有していることを確認した¹⁰⁾（写真-10）。

更に、施工性確認実験を実施し、プレート型継手の締結により一次床版と二次床版の間に交通荷重により生じる相対変位を安全に吸収して、確実に一体床版（交通振動による相対変位≒0）を形成することを確認した（写真-11）。



写真-10 施工ステップを追った輪荷重走行試験

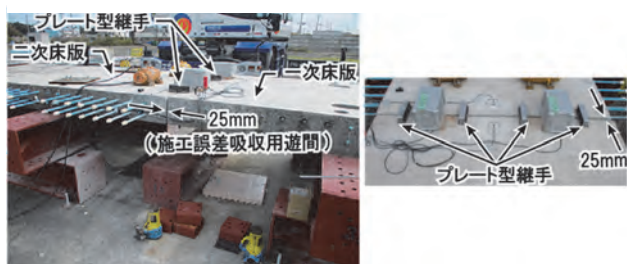


写真-11 交通振動プレート型継手施工性確認実験

3.3 SB 種防護柵

一車線規制下における床版撤去・架設作業においては、作業エリア内に誤進入してくる一般車両に対する確実な防護対策（SB 種）は安全上の最重

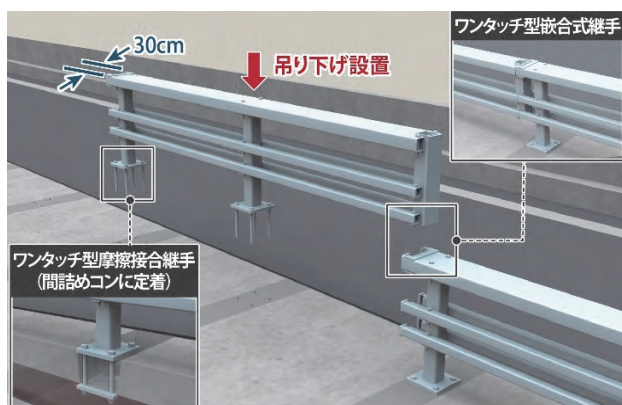


図-7 SB 種防護柵

要課題である。また、防護柵設置・撤去作業時の安全性、並びに防護柵占有による規制範囲の最小化も求められている。

そこで、幅 30 cm の占有により SB 種を担保し、ワンタッチで設置・撤去可能な『SB 種防護柵』を開発した（図-7）。

一車線規制として安全・高速な設置・撤去を可能とするために、本鋼製防護柵における横梁の継手構造は、『嵌合継手』を採用している。また、支柱の定着構造については『摩擦接合継手』を採用した。そこで、施工性確認実験を実施し、防護柵を積込んだ4tユニック車において、2分程度のサイクルにより連続設置が可能であることを確認した（写真-12、撤去も同様）。



写真-12 施工安全性、サイクルタイム確認状況

4. 実物大総合実証実験

2022 年 4 月、本システムのサイクルタイム、および施工安全性の検証を目的とした実物大総合実証実験を行い（写真-13）、床版取替工程を大幅に短縮する高速性など本システムの有用性を確認した。

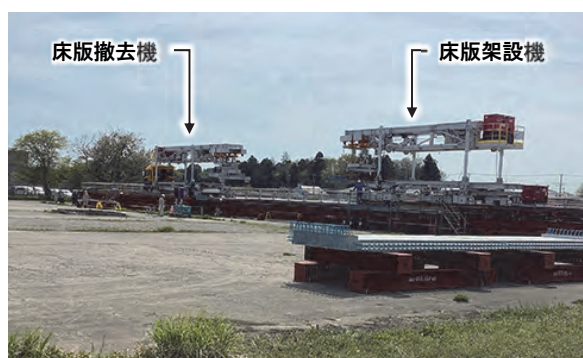


写真-13 実物大総合実証実験

5. サイトプレキャスト工場

本システムの採用に加えて、JIS 認証（JIS A 5373）を取得した PC 床版を製作するプレキャスト工

場を工事現場の近傍に設置できる場合には(図-8), 床版の製作費や運搬費の削減が見込める(写-14)。

また, 床版の車両運搬に伴う騒音振動や交通渋滞, CO₂ 排出等のソーシャルロスを削減することによって, 本システムの効果を一層高められる。更に, サイトプレキャスト工場では, 地元企業から生コンクリートを調達可能となり, 地元との協業も図ることができ, 地産地消も期待できる。

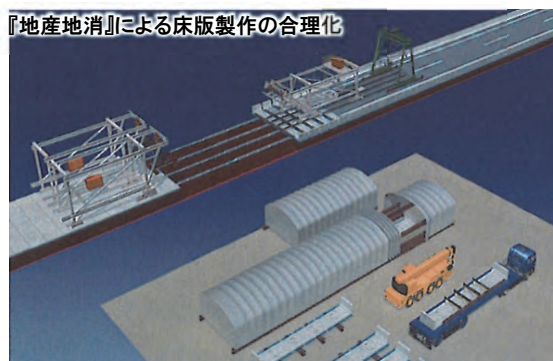


図-8 サイトプレキャスト工場



写真-14 床版製作状況

更新・大規模修繕について, 平成26年1月22日

6) 萩原 直樹 : NEXCOにおける大規模更新の現状, 第32回鋼構造基礎講座 鋼橋の大規模修繕・大規模更新—最新動向と今後の展望—, 2016年

7) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書, 平成26年1月22日

8) 山中ら : スマート床版更新(SDR)システム, 土木施工VOL. 61 No. 7pp. 66~67, 2020. 7.

9) 東日本高速道路会社/中日本高速道路会社/西日本高速道路会社 : NEXCO試験方法 第4編, 2019. 7.

10) 永井ら : 床版取替工事の幅員方向分割施工における仮設継手構造の検討(その2)—構造性能実験—, 土木学会全国大会第77回年次講演会, 投稿中。

6. 今後の展開

今般, 実物大実証実験において所期の結果を得たことから, 今後は実工事への適用に向けて, 本システムを積極的に提案すると共に, 自動化を始めとした機能向上についても研究開発を進め, 交通規制等によるソーシャルロスを最小限にとどめる道路橋床版更新工事の実現に寄与していきたい。

出典・参考文献

- 1) 東日本高速道路(株) : 会社概要
- 2) 中日本高速道路(株) : 事業エリア
- 3) 西日本高速道路(株) : 会社概要
- 4) 東・中・西日本高速道路(株) : 高速道路における大型車の利用状況, 平成31年1月30日
- 5) 東・中・西日本高速道路(株) : 東・中・西日本高速道路(株)が管理する高速道路における大規模

23. 救急排水機場ポンプの実機を用いた異常模擬試験について

羽根車に模擬的な異常を発生させた計測試験

(国研) 土木研究所寒地土木研究所 ○ 小林 勇一

(国研) 土木研究所寒地土木研究所 永長 哲也

1. はじめに

河川ポンプ施設の一つである救急排水機場では、口径 700mm、吐出量 1.0m³/s、質量約 2.0t の大型水中ポンプ（以下「コラム形水中ポンプ」という）が使用されている。このコラム形水中ポンプは、設置用のパイプ（以下「コラムパイプ」という）の内部に設置するため、稼働状態の確認が難しく、故障兆候の把握が難しいという課題がある（図-1）。

小林ら¹⁾²⁾は、コラム形水中ポンプの稼働状態を的確に把握できる技術を提案するため、誘導電動機電流微候解析（Motor Current Signature Analysis; 以下「MCSA」という）に着目し、現地計測試験及び小型水中ポンプによる異常模擬試験を実施した。その結果、コラム形水中ポンプの状態監視に MCSA を適用できる可能性が高いことがわかったが、実際に不具合が発生したコラム形水中ポンプの診断実績はまだ無いため、実機による検証が必要である。

そこで、コラム形水中ポンプに模擬的な異常を発生させ、計測試験を実施した。

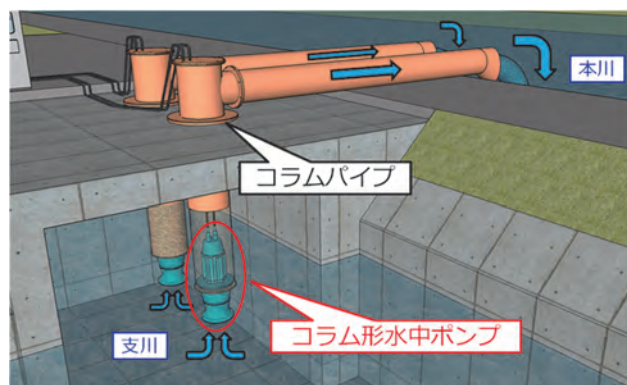


図-1 コラム形水中ポンプ設置概要図

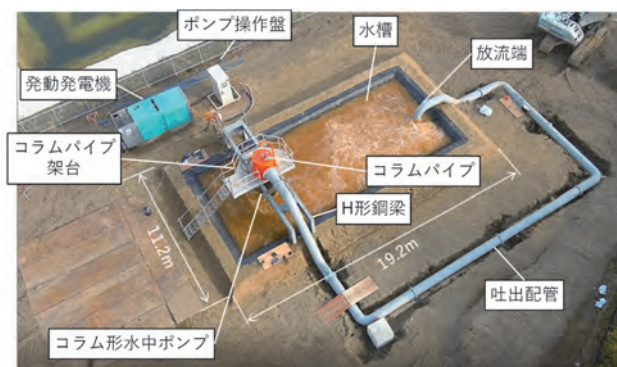


写真-1 コラム形水中ポンプ試験用設備

2. 試験概要

2.1 試験用設備

コラム形水中ポンプの計測試験を実施するため、北海道石狩市の寒地土木研究所石狩吹雪実験場に試験用設備を仮設した（写真-1）。

まず、長さ 19.2m、幅 11.2m、深さ 2.5m の水槽を造成し、コラムパイプ設置用に製作した H 型鋼梁及びコラムパイプ架台を設置のうえ、コラムパイプ、吐出配管、ポンプ操作盤及び発電発電機を設置した。コラム形水中ポンプは、ラフテレーンクレーン（25t 吊）によりコラムパイプ上部より挿入し設置した（写真-2）。

2.2 模擬異常

異常は羽根車の偏心及び欠損を想定し、羽根車に鉛のウェイトを取り付けた状態（以下「異常（ウェイト）」という）と、羽根車の先端を切断した状態（以下「異常（切断）」という）の 2 種類とした（図-2）。



写真-2 コラム形水中ポンプ設置状況

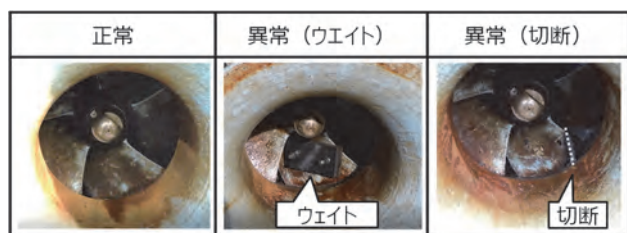


図-2 羽根車の状態

2.3 計測項目

計測項目は吐出量、電流波形及び振動加速度の3項目とした(写真-3)。吐出量は羽根車の異常がポンプ性能に与える影響を確認するため、電流波形はMCSAによる解析を行うために計測した。また、振動加速度は排水機場の原動機や減速機の診断に活用された実績があることから、今回、計測項目として追加した。なお、計測時間は、各状態で約120分とした。

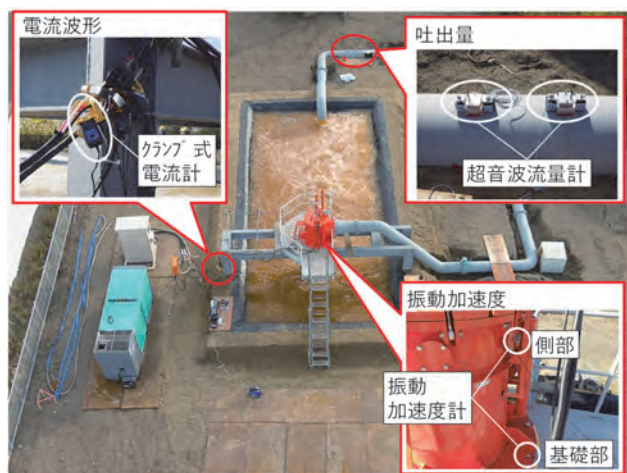


写真-3 計測状況

3. 試験結果

3.1 吐出量

吐出量の計測結果を図-3に示す。吐出量は、正常時と比較し、異常時には若干低下していることを確認した。

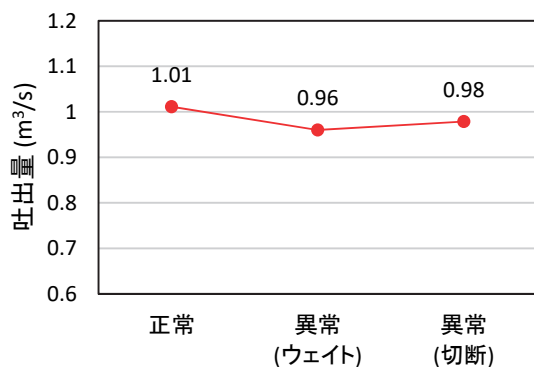


図-3 吐出量の計測結果

3.2 電流波形

MCSAでは、電流波形をFFT (Fast Fourier Transform) により周波数分析し、各異常に対応するスペクトルの大きさを確認することで、異常を検知する³⁾⁴⁾。今回、異常箇所が羽根車であることから、ポンプ主轴の回転に異常が生じると考えられるため、電動機回転子軸への異常負荷により上昇するスペクトル(以下「 L_{shaft} 」という)に着目した⁵⁾(図-4)。スペクトルの解析結果を図-5示す。横軸は周波数、縦軸はスペクトルの大きさであり、アベレージングによりノイズを除去したものである。 L_{shaft} はすべての状態で明瞭に現れた。

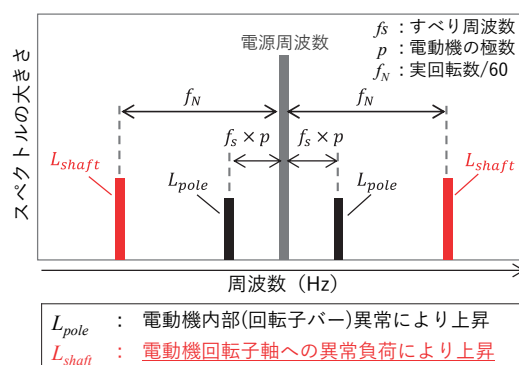


図-4 着目したスペクトル

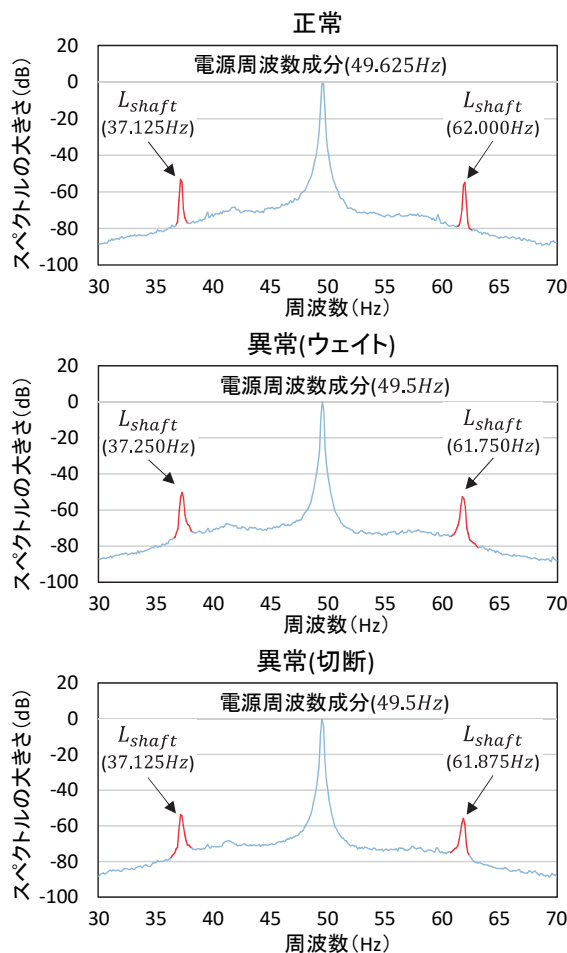


図-5 スペクトル解析結果

L_{shaft} の大きさの時間推移を図-6 示す。横軸は時間、縦軸は大きさである。なお、 L_{shaft} は電源周波数の両端に現れており、図は低周波数側のものであるが、高周波数側も同様の傾向を示している。

L_{shaft} の大きさは、正常時は約-53dB 付近で比較的安定したが、異常時は約-60dB~-40dB となり、大きさにばらつきが生じ不安定となった。

L_{shaft} の大きさのばらつき度合いを確認するため、標準偏差を確認した(図-7)。標準偏差は、正常時に比べ異常時は上昇しており、異常によりばらつきが大きくなったことがわかった。

L_{shaft} の大きさは、ばらつきが大きいと平均値では変動を捉えられないことから、最大値を確認した(図-8)。最大値は、正常時に比べ異常時は上昇しており、これは、羽根車の異常によりポンプ主軸に生じた異常負荷が原因と考えられる。

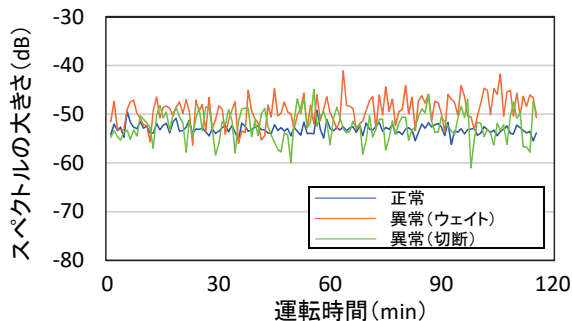


図-6 L_{shaft} の大きさ (低周波数側)

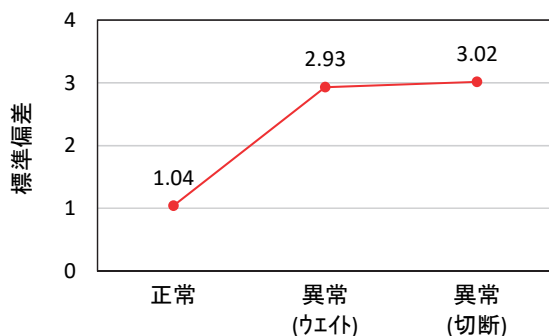


図-7 L_{shaft} の標準偏差

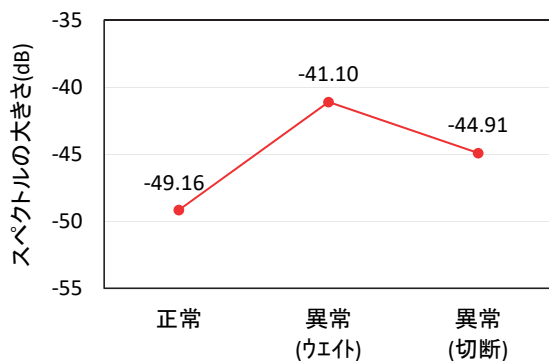


図-8 L_{shaft} の最大値

次に、 L_{shaft} が現れた周波数から、図-4 に基づき実回転数を推定した。推定のための算定式を式(1)に示す。

$$N = |f - f_{Lshaft}| \times 60 \quad \cdots (1)$$

ここで、 N : 実回転数 (rpm)

f : 電源周波数 (Hz)

f_{Lshaft} : L_{shaft} が現れた電源周波数 (Hz)

式(1)により算出した実回転数(以下「推定実回転数」という)を図-9 に示す。推定実回転数は、正常時に比べ異常時には若干低下した。これは、羽根車の異常が正常な回転を阻害したためと考えられる。

また、電流波形とあわせて計測した電流値を確認したところ、正常時に比べ異常時には若干上昇したことがわかった(図-10)。これは、羽根車の異常により、ポンプ電動機の負荷が増大したためと考えられる。

以上より、羽根車の異常により、 L_{shaft} の標準偏差、 L_{shaft} の最大値、推定実回転数及び電流値に影響が現れることがわかった。

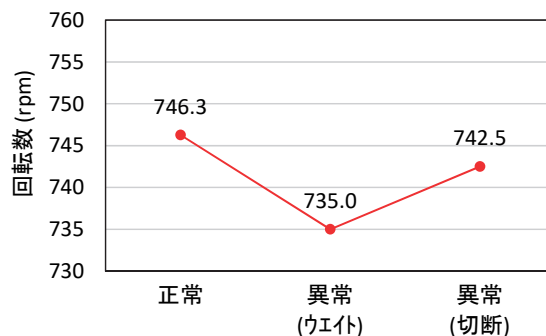


図-9 推定実回転数

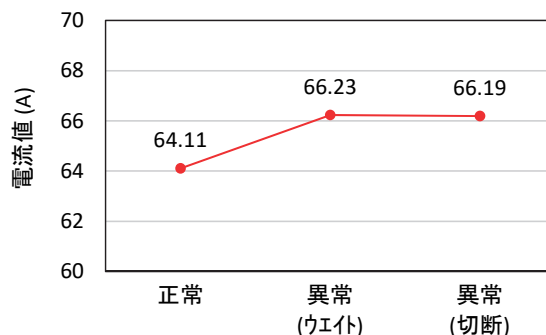


図-10 電流値

3.3 振動加速度

振動加速度計の計測結果を図-11に示す。使用した加速度計は、3軸加速度計である（写真-4）。

計測結果からは、羽根車の異常による大きな変化はみられなかった。

しかし、振動加速度を周波数分析したところ、羽根車の状態により異なる特徴が現れることがわかった（図-12）。

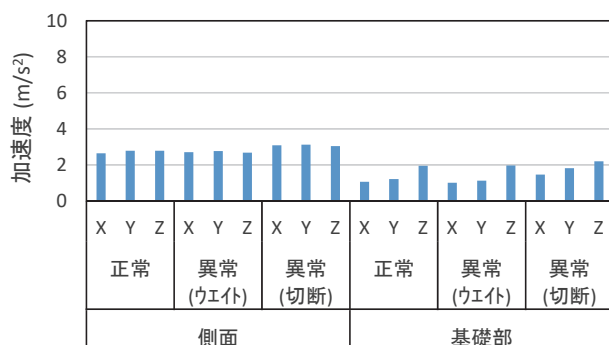


図-11 振動加速度の計測結果 (peak-to-peak 値)

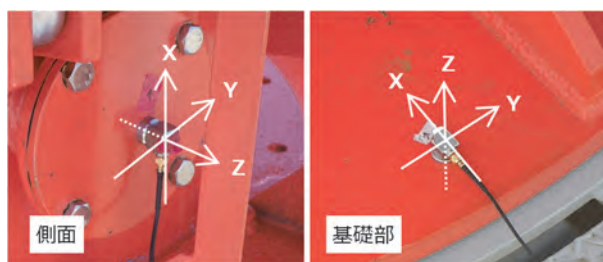


写真-4 振動加速度計の計測軸

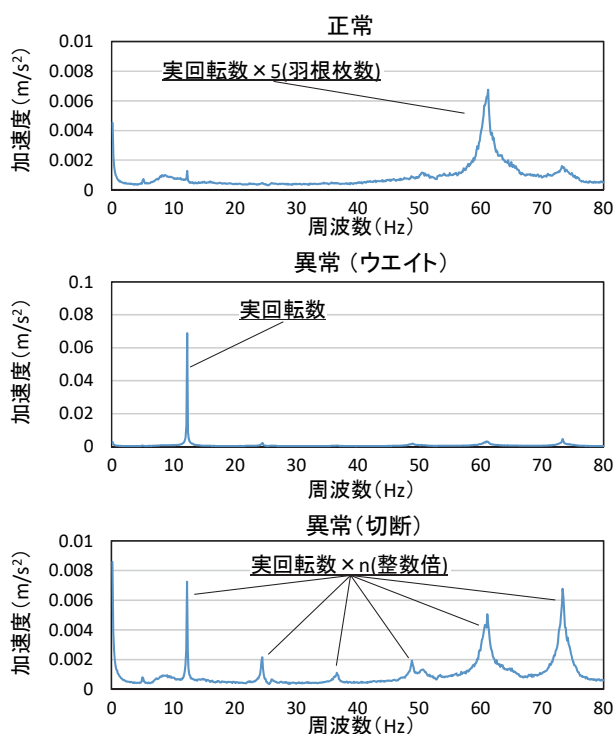


図-12 振動加速度の周波数分析結果
(アベレージングによりノイズ処理済み)

まず、正常時は、実回転数と羽根枚数の積のスペクトルが上昇した。これは、羽根車の各羽根に均等に負荷がかかったためと考えられる。

次に、異常（ウェイト）では、実回転数のスペクトルが上昇した。これは、ウェイトが付いた羽根が回転するタイミングで大きな振れ回りが発生したためと考えられる。

最後に、異常（切断）では、実回転数の等倍成分のスペクトルが上昇した。これは、羽根車のバランスが崩れたことで各羽根にかかる負荷が不均等となったためと考えられる。

以上より、羽根車の状態によって振動加速度に大きな違いはみられなかったが、振動加速度の周波数分析結果には違いが現れることがわかった。

3.4 データの変動傾向の分析

試験により得られた各解析データについて、羽根車の異常に伴う変動傾向を分析した。

正常時をベースに、各解析データの変動傾向を整理したものを表-1に示す。変動傾向は上昇、低下の2項目に分類し、上昇は赤着色、低下は青着色とした。なお、振動加速度を周波数分析して得られたスペクトルの大きさ（以下「振動周波数成分」という）は、実回転数成分及びその2倍、3倍、4倍、5倍成分を抽出した。

変動傾向は、異常（ウェイト）と異常（切断）で同じ傾向となった。この変動傾向を定量的に分析するため、ロジスティック回帰分析による分析を行った。ロジスティック回帰分析は、主に二項分類に用いられるアルゴリズムであり、出力される係数を確認することで項目毎の影響の大きさを確認することができる。

表-1 各解析データの変動傾向

項目	羽根車の状態	
	異常 (ウェイト)	異常 (切断)
電流波形		
L_{shaft} (低周波数側)	標準偏差	↗
	最大値	↗
L_{shaft} (高周波数側)	標準偏差	↗
	最大値	↗
電流値		↗
推定実回転数		↘
振動加速度		
振動周波数成分	実回転数	↗
	実回転数×2	↗
	実回転数×3	↗
	実回転数×4	↗
	実回転数×5	↘

ロジスティック回帰分析により求める係数は、式(2)による。

$$\theta^T x = \sum_{i=0}^n \theta_i x_i \quad \cdots (2)$$

ここで、 θ : 係数
 x : 入力項目
 n : 入力項目数

入力項目は表-1 と同じ 11 項目とし、入力項目と係数は表-2 のとおり対応している。

まず、正常時をベースとし、羽根車異常時の係数を算出した（図-13）。

表-2 入力項目と係数

i	入力項目	係数
0	x_0 : 1 (定数)	θ_0
1	x_1 : L_{shaft} (低周波数側) 標準偏差	θ_1
2	x_2 : L_{shaft} (低周波数側) 最大値	θ_2
3	x_3 : L_{shaft} (高周波数側) 標準偏差	θ_3
4	x_4 : L_{shaft} (高周波数側) 最大値	θ_4
5	x_5 : 電流値	θ_5
6	x_6 : 推定実回転数	θ_6
7	x_7 : 実回転数成分	θ_7
8	x_8 : 実回転数×2 倍成分	θ_8
9	x_9 : 実回転数×3 倍成分	θ_9
10	x_{10} : 実回転数×4 倍成分	θ_{10}
11	x_{11} : 実回転数×5 倍成分	θ_{11}

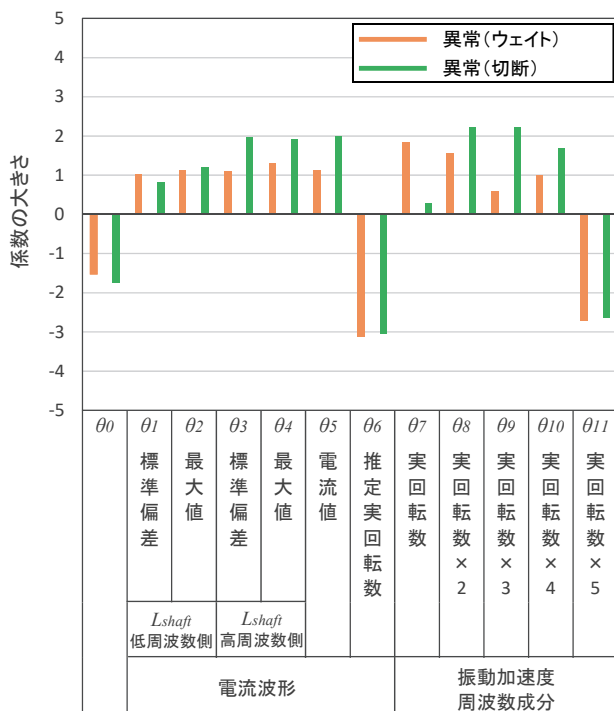


図-13 ロジスティック回帰分析による係数の算出結果（正常時ベース）

なお、各入力項目については、スケールを統一するため、式(3)による標準化を行った。

$$x_M = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad \cdots (3)$$

ここで、 x : 入力データ
 x_M : 標準化した x
 x_{min} : x の最小値
 x_{max} : x の最大値

図-13 より、係数の大きさは表-1 と同じ傾向となることを確認した。また、係数の絶対値が大きいほど、式(2)の計算結果へ与える影響が大きいことから、影響が最も大きい項目は θ_6 の推定実回転数であることがわかった。

次に、羽根車の異常毎の違いを確認するため、異常（ウェイト）をベースとし、異常（切断）の係数を算出した（図-14）。その結果、 θ_7 の実回転数成分の影響が最も大きく、 θ_6 の推定実回転数、 θ_9 の実回転数の3 倍成分及び θ_{11} の実回転数の5 倍成分の影響が大きいことがわかった。 θ_7 、 θ_9 及び θ_{11} は振動加速度の周波数成分であることから、異常毎の違いを確認するためには、振動加速度の分析が有用であると考えられる。

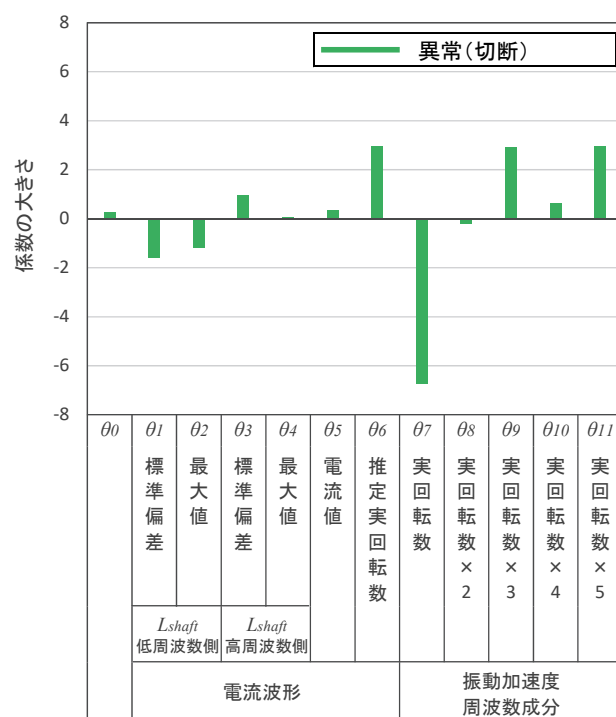


図-14 ロジスティック回帰分析による係数の算出結果（異常（ウェイト）ベース）

3. まとめ

コラム形水中ポンプの稼働状態を的確に把握できる技術を提案するため、コラム形水中ポンプの羽根車に模擬的な異常を発生させ、計測試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

(1) MCSAに基づき電流波形を分析した結果、羽根車の異常により、 L_{shaft} の標準偏差、 L_{shaft} の最大値、推定実回転数及び電流値に影響が現れることがわかった。

(2) 振動加速度の計測結果、羽根車の異常による大きな変化はみられなかった。しかし、振動加速度を周波数分析した結果、羽根車の状態により異なる特徴が現れることがわかった。

(3) 各解析データについて、ロジスティック回帰分析により変動傾向を分析した。その結果、正常時をベースに異常（ウェイト）及び異常（切断）を分析した結果、影響が最も大きい項目は推定実回転数であることがわかった。また、異常（ウェイト）をベースに異常（切断）を分析した結果から、異常毎の違いを確認するためには、振動加速度の分析が有用であると考えられる。

今後は、軸受異常について検証を実施する予定であるほか、AI 技術を活用した劣化部位の推定技術について検討を行う。

謝辞：MCSA に関してご協力いただいた株式会社高田工業所 劉信芳氏に感謝する。

参考文献

- 1) 小林勇一・永長哲也：誘導電動機電流微候解析による救急排水機場ポンプの状態監視手法について，令和3年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，pp.117～122,2022
- 2) 小林勇一・平地一典：誘導電動機電流微候解析によるコラム形水中ポンプの状態監視に向けた計測試験，日本設備管理学会誌，Vol.32，No.3，pp.55～64,2020
- 3) 豊田利夫：電流微候解析MCSAによる電動機駆動回転機の診断技術，高田技報，Vol.20，pp.3-5, 2010
- 4) 豊田利夫：電機設備診断の進め方，日本プラントメンテナンス協会，pp.130-145, 1993.12
- 5) 劉信芳：誘導電動機の電流信号による回転機械系の監視診断，第15回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集，pp.72-75, 2016.12

24. 排水機場におけるメンテナンス省力化

トランスフォーメーション

立軸斜流からコラム形水中ポンプへ

国土交通省 北海道開発局

○石川 真大

久保 恭伸

(株)荏原製作所

梶本 哲弘

1. はじめに

地域の人命・財産を守る治水施設である排水機場の機械設備は、近年地球温暖化の影響等による気候変動、環境変化への対応が求められ、経年劣化への対応、信頼性向上とともに維持管理の省力化も課題となっている。

これらの対策のうちの一つとして無水化が進められているが、その中でも既存施設の形態、条件等により様々な無水化の方法が存在する。そこで更新時期を迎えている赤平排水機場において、コスト削減・メンテナンス性向上も実現するためにポンプ型式を変更するという、新たな方法の検討を行うこととした。

2. 排水機場の無水化とその種類

排水機場の無水化とは、冬期間においても排水機場を迅速に稼働することを考慮し、これまで行われていた水抜きなどの凍結予防処置の必要が無い機械設備に更新することで、様々な方法が存在するが、代表的な次の5つの内容を簡潔に紹介する。

2.1 主原動機は無水化

主ポンプを駆動するための主原動機は、エンジン、モーター等があるが、エンジンの場合、通常、発熱するエンジン本体を冷やす冷却水（以下一次冷却水と呼ぶ）を循環させている。一冷却水は循環する中でエンジンの熱を吸収し高温となるため、これを冷却する必要がある。そこで別な系統からの冷却水（以下、二次冷却水）と熱交換させることで、冷やされた一次冷却水がまたエンジンに循環していく仕組みとなっている（代表的な冷却方式）。

この仕組みにおいては、一次冷却水に精水を使用し、二次冷却水に河川水を使用することが多い。そのため冬期間前には低温時の凍結膨張による機器破損を防ぐために、水抜き作業が必要となると同時に、冬期間に排水ポンプの稼働が急遽必要に

なったときには、冷却水の確保、機器系統への充填のため2、3日を要することとなる。そこで一次冷却水に不凍液を用い、一般的な自動車と同じ方式であるラジエーターで、一次冷却水を冷却するラジエーター式のエンジンとすることが主原動機の無水化である。写真-1 に無水化前と無水化後の主原動機を示す。上が無水化前、下が無水化後のラジエーター式主原動機である。

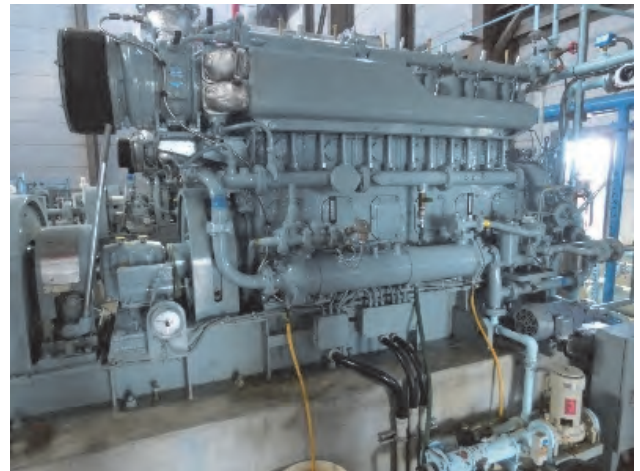


写真-1 主原動機無水化前(上)後(下)

2.2 減速機の無水化

主原動機からの回転を主ポンプインペラ（羽根車）に伝えるには回転数の違いから歯車を用いた減速機を設ける必要がある。歯車にはとても大きな力が加わるため稼働中には熱が発生する。これを冷却するために、冷却水を循環させているのが水冷式減速機である。ただし、水を使うため、前項同様に冬期の水抜きが必要であり、これを歯車軸に直結したファンにより、空冷する方式に変更するのが減速機の無水化である。写真-2 に無水化前後の減速機を示す。上が無水化前の横軸遊星歯車減速機で、冷却水を循環させ冷却している。下が横軸平行歯車減速機で白丸部分が歯車軸直結ファンである。

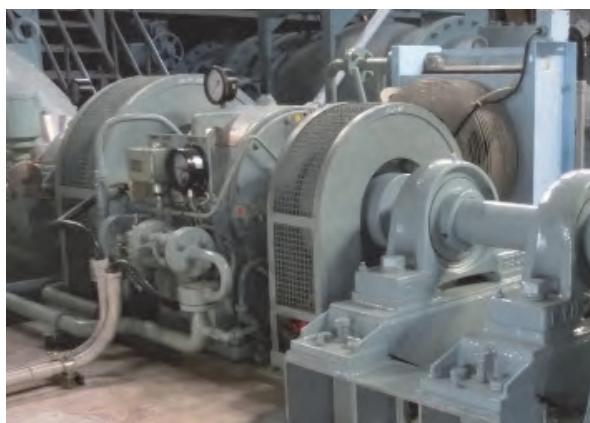


写真-2 減速機の無水化前(上)後(下)

2.3 主ポンプの軸封部の無水化

主ポンプインペラを駆動する軸は、ポンプケースを貫通し原動機から動力を伝えるが、貫通部分の空気吸い込みを防ぐのと冷却のため、注水タイプのシーリングが多く使われてきた。これを無注水式の軸受けに変更することで、メンテナンスフリーと長寿命化を狙ったのが軸封部の無水化である。

無注水式なので冬期の水抜きが不要、また稼働中における信頼性も向上する。図-1 に軸封部のシーリング方式についてイメージを示す。左側がパッキンを用いた注水タイプのシーリング、右側がメカ

ニカルシールと呼ばれるメンテナンスフリーのシーリングで、無注水式でありポンプ軸に装着され一緒に回転する回転環と固定環とのシール面で水密を行うため、ポンプ軸の摩耗を防ぐことができる。

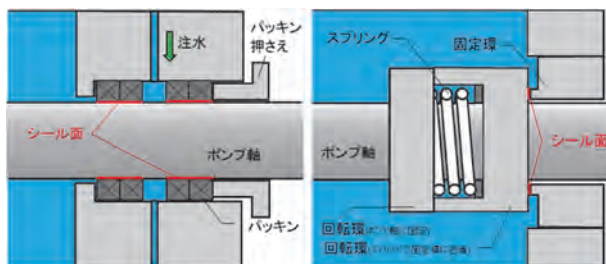


図-1 軸封部のシーリング方式

2.4 真空ポンプの無水化

主ポンプを駆動するためには、ポンプケース中のインペラが水で満たされている必要があるが、横軸ポンプの場合、排水運転水位でもインペラが水に満たされることはないのが通常であるため、ポンプケース内の空気を抜き取り、水を満たすために真空ポンプを使用する。排水機場の真空ポンプには大きく分けてポンプケース内部の水と遠心力を利用して吸気排気するものと、ポンプケース内に二つ組み込まれた、まゆ型断面のロータを回転させることで吸気排気を行うものがあり、後者は真空ポンプ内に水がないことから乾式と呼ばれ、凍結予防のための水抜きが不要である。

2.5 関連機器及び制御系統の適正化

前項までの各無水化に関連し、操作盤、制御系統、関連機器を更新することが必要となるが、これに伴い制御方式の見直し、操作機器のメンテナンス性、操作性の改善、将来的なアフターサービスにも配慮して適正化を行うことも、無水化に付随する内容の一つである。

今回、これら5つの従来からの無水化に加えて、救急排水場で使用されているコラム形水中ポンプへの変更も新しく検討要素の一つとした。コラム形水中ポンプの一般図を図-2 に、救急排水場に設置されている状況を写真-3 示す。

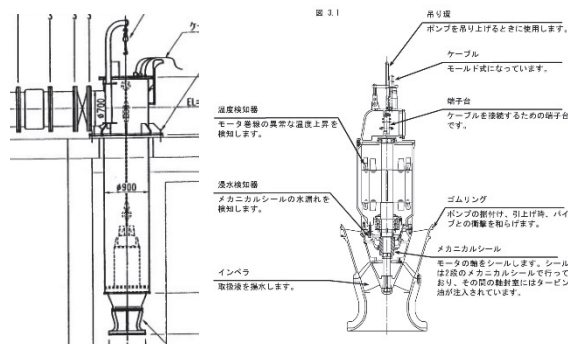


図-2 コラムパイプ(左)とコラム形水中ポンプ(右)



写真-3 吐出管とコラムパイプ(上) コラム形水中ポンプ
挿入設置状況(下)

コラム形水中ポンプは、あらかじめ設置された鋼管製のコラムパイプ内部に挿入し設置するタイプ的水中ポンプで、自家発電機から供給される電力で駆動するため、補機類が少なく、水抜きも必要がなくなることから無水化と位置づけることができる。

3. 検討対象施設について

検討対象施設は、更新時期を迎えた空知川河川事務所管内の赤平排水機場である。赤平排水機場は赤平市の中心に近い場所に位置し、立軸斜流ポンプ2台を有している。主要諸元について表-1に、機場状況を写真-4に示す。

表-1 赤平排水機場主要諸元

設備名称		赤平排水機場
完成年度		昭和59年
主ポンプ	型式	立軸斜流
	口径(mm)×台数	800×2
	1台当り吐出量(m ³ /s)	1.5
	全揚程(m)	4.4
減速機	型式	直交軸歯車
	台数	2
主原動機	型式	ディーゼル
	出力	140ps
	冷却方式	水冷(二次冷却)
	使用燃料	A重油
真空ポンプ	台数	2
		-
天井クレーン	型式	手動
	吊荷重	8t



写真-4 赤平排水機場全景(上)と機械設備(下)

既存赤平排水機場の特徴は、立軸斜流ポンプで排水作業を行う水位では、インペラが水面下にあるため、水を引き込むための真空ポンプが存在しないことである。そのため、先に示した無水化の項目の一つ、真空ポンプについては不要である。また、立軸のポンプであることから、コラム形水中ポンプの設置方向とも合致し、吐出量についても1.5m³/sと大きくないことから構造物などに大きな変更を加えなくてもコラム形水中ポンプへ変更できることが挙げられる。

4. 既存排水機場のコラム形水中ポンプ化

1章で触れたとおり、排水機場の機械設備更新に当たっては無水化を進めるとともに、コスト削減も視野に入れる必要がある。経済比較においては、更新設置時のインシヤルコスト、設置後の管理、メンテナンスなどにかかるランニングコストを考慮するが、インシヤルコストを把握するためには、まず既存排水機場からコラム形水中ポンプへの変更の際に生じる課題を解決する必要がある。

通常の無水化に比べて、ポンプ型式の変更は大規模な改造を伴うことが多いが、赤平排水機場でコラム形水中ポンプに型式変更する場合において課題となる点は次の4つが考えられた。

4.1 ポンプ取付床開口部の拡張

既存の主ポンプの揚程は4.4mで、コラム形水中ポンプの揚程は低くても6mである。機場の吐水管や吐水槽などの施設は、既存の揚程をもとに設計されており、コラム形水中ポンプの揚程を下げるために、インペラの回転数を下げる必要があった。その方法は減速機を搭載する、もしくはモーター（電動機）の極数を増やすことが考えられるが、どちらの場合もポンプ径が大きくなり、既存の開口部を拡張しなければならないことがわかった。

そこで、拡張した際の床構造への影響を確認したところ、直径1.85mまでは構造上の大きな変更を加えなくても対応可能であり、コラム形水中ポンプの直径0.8mのタイプが使用可能であることが確認された。

4.2 床荷重の増加

床にかかる荷重は、既存の立軸ポンプでは減速機、ポンプ本体、ポンプ本体に貯まる水の合計重量であり、変更後のコラム形水中ポンプでは、コラムポンプ本体、コラムパイプ、コラムパイプに貯まる水の合計重量となる。両者を比較すると、モーター分の重さやポンプの直径が大きくなることから、後者のコラム形水中ポンプの方が重くなる。そこで増加した重量で床の強度に問題がないか構造照査を行ったところ、許容範囲に収まることを確認した。なお、増加する重量を計算するときは各ポンプメーカー製品の中での最重量荷重を用いている。

4.3 自家用発電機の設置場所

モーター駆動に大きな電力を必要とするコラム形水中ポンプの場合は、既存の自家用発電機では容量が足りないため、大型の自家用発電機に更新する必要がある。また発電機は万一の故障なども考慮し2台設置が基準で定められており、既存の発電機室には収まりきらないことは明らかであった。そのため、ポンプ室内に1台を設置した場合、他の機器、設備に影響を及ぼさないか、クレーン作業に支障がないか、後述する3Dモデルを活用し配置を検討したところ、通路スペースが若干狭くはなるものの、設置可能であることを確認し、発電機室に1台、ポンプ室に1台と分けて設置することとした。

4.4 機場内天井クレーンの能力

非出水期である冬期間は、コラム形水中ポンプをクレーンでコラムパイプから抜き出し、ポンプ室に保管する。当機場の天井クレーンは、既設の立軸ポンプを吊り上げるため、8.0tの吊り荷重能力を有しており、変更後のコラム形水中ポンプも8.0t以下が条件であった。仮に8.0t以上のポンプを吊り上げようとすると、既設天井クレーンを変更する必要性が生じ、そのために機場の天井を一旦

撤去し、そこからクレーン装置の撤去、設置作業となるため、仮設費を含めた施工費だけで経済比較するまでもなくコストがかかりすぎることは明らかであった。これより各ポンプメーカーの製品について、重量を調査したところ、8.0t以下の条件を満足するものがあり、既存の天井クレーンがそのまま使用可能であることを確認した。また、あわせて吊り上げ高さを確保できるかも確認するため、ポンプ本体の全高も調べ、吊り上げ、移動、ポンプ室設置の一連動作が同天井クレーンで行えることを確認した。

5. 無水化更新の経済比較とメリット比較

無水化更新の経済比較は、従来から行われている、ポンプ型式を変更しないで主原動機や補機類を更新する代表的な無水化と、ポンプ型式をコラム形水中ポンプに変更し、関連する機器まで全て更新する無水化の二つで行った。前者については、赤平排水機場既存施設の構成から2章で説明した主原動機の無水化、減速機の無水化、関連機器及び制御系統の適正化、後者については、コラム形水中ポンプへの変更、自家用発電機の更新、関連機器及び制御系統の適正化がイニシャルコスト比較項目である。結果を表-2に示す。

表-2 経済比較（単位：百万円）

		従来方式での 無水化	コラム形 水中ポンプ化
イニシャル コスト	主原動機無水化	164.8	-
	減速機無水化	47.2	-
	コラム形水中 ポンプへの変更	-	173.6
	自家用発電機 の更新	-	191.4
	関連機器及び制御系 統の適正化	4.8	48
ランニング コスト (50年)	定期整備費・更新費	771.6	707.6
	点検費	100	37
	修繕費	34.7	2.4
トータルコスト		1123.1	1160

表-3 メリット・デメリット比較

		従来方式での 無水化	コラム形 水中ポンプ化
メリット	点検項目数の削減	×	○
	容易な操作手順	△	○
	ポンプ故障時の早期 復旧対応	×	○
	原動機の現地での 小分解整備	○	×
デメリット	冬期に係るポンプ 撤去設置	○	×
	油脂類の補給・取替	×	○
	稼働中の不具合頻度	○	△

また運用、管理面におけるメリット・デメリット比較を表-3に示す。

トータルコストでは設置時における機器費用の高さからコラム形水中ポンプ化の方がコスト高となったが、運用管理面の比較ではコラム形水中ポンプ化により構成部品が少数化されることで、点検項目数の削減や操作性の面で優位性が得られる結果となった。表-2の経済比較におけるランニングコストの点検費や修繕費でコラム形水中ポンプ化が低く抑えられているのは、まさにメンテナンスや管理面で手間がかからないことを示しており、昨今、排水機場だけでなく各河川施設を管理する現場においても人員不足、高齢化が進んでいること考えると、省力化、メンテナンス性の向上は重要な要素である。

また、コラム形水中ポンプの利点として予備のコラムポンプを準備することで、故障時にポンプを入れ替えて早期復旧を図ることができる。これにより、冗長性の確保も可能となる。

よって、本赤平排水機場の無水化では、これらのメリットが受けられるコラム形水中ポンプ化を採用し、機械設備更新工事を実施することとした。

6. 3Dモデル等を活用した施工管理

本工事は、受注者の提案により将来的にBIM・CIMに繋がる取組を実施している。現地詳細調査時において建屋内外を3Dスキャナで計測し、3Dモデルを作成することによって、更新後の各機械設備、機器の配置検討を行う際に取り回し、必要スペース等を視覚的に把握しやすくした。

この3Dモデルを用いて受発注者間だけでなく、関係機関に対しても工事概要を説明することで、説明時間の短縮、理解度の向上を図ることができ、関係先においても好評であった。写真-6,7に3Dモデルによる機器配置検討画面（排気消音器、ポンプ吊り上げイメージ）を示す。

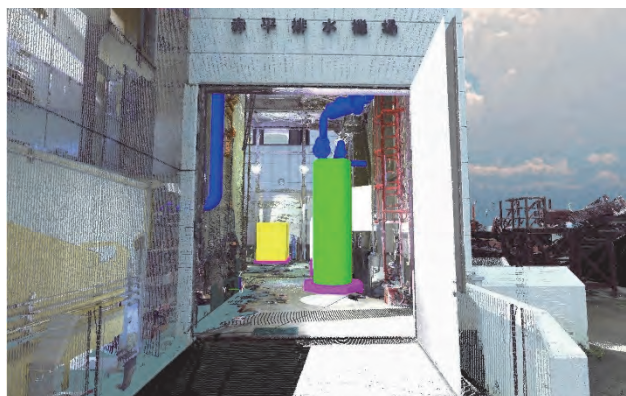


写真-6 3Dモデルによる機器配置検討（排気消音器）

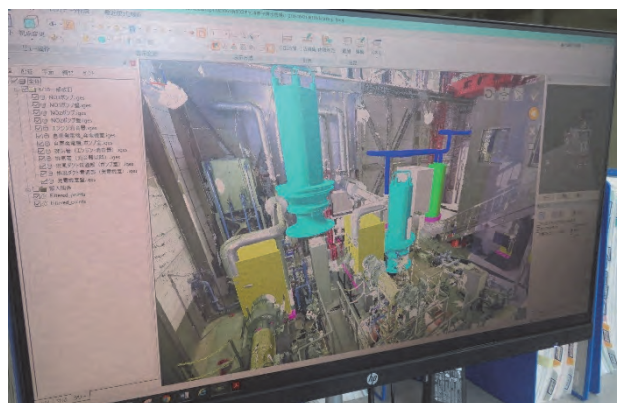


写真-7 3Dモデルによる機器配置検討
（ポンプ吊り上げイメージ）

施工上においては、従来、既設吐出管との取り合いを決める際、現合配管という仮組の管で現地にて寸法合わせを行い、一度工場に戻してから本組立を行っていたが、3Dスキャナで既設管の位置寸法を計測し、そのデータから3Dモデル、製作図作成、本組立を行うことで、現地での現合配管の作業を省くことが可能となった。これにより、約1カ月の製作期間短縮、20人ほどの省人化が可能となり、限られた工期の中で生産性が向上した。写真-8に既設吐出管3D計測状況、そこから作成した3Dモデルを示す。

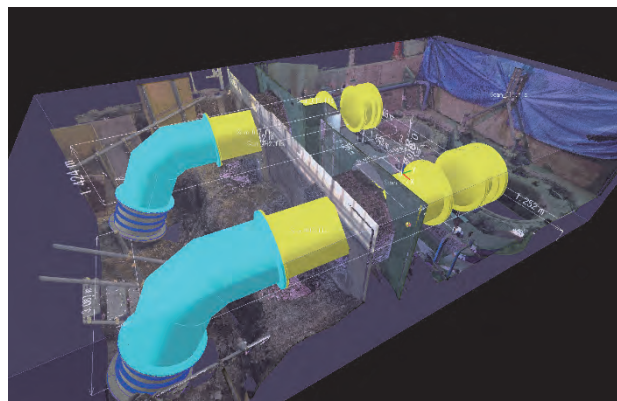


写真-8 既設吐出管 3Dレーザースキャナ計測状況（上）
と3Dモデル（下）

さらに打合せ等においては、段階確認時に工事現場で遠隔通信機器を準備して頂くことによって、現地と職場事務室もしくはテレワーク中の自宅との間で、20回以上の遠隔臨場を実施した。遠隔臨場では回線状況や電波状況により、音声映像が乱れることや現場での作業音を拾ってしまうなどの課題はあるものの、寸法確認時のスケールの見盛り、施工状況を視認するには十分であり、天候状況等で現地まで赴くことができない場合にも有効な手段であるとする。写真-9に遠隔臨場の画面、現地で使用している遠隔機器を示す。

本工事内容は、ポンプ型式の変更を伴うことから現地の詳細調査も重要で工程や管理項目も増えており、とくに機器の配置場所、配管の取り回しについては事前の検討業務成果ではわからない部分も多々あったが、3Dモデルの利用と遠隔臨場を活用することにより、工程の変更にも臨機に対応でき効率的に施工を進めることができた。

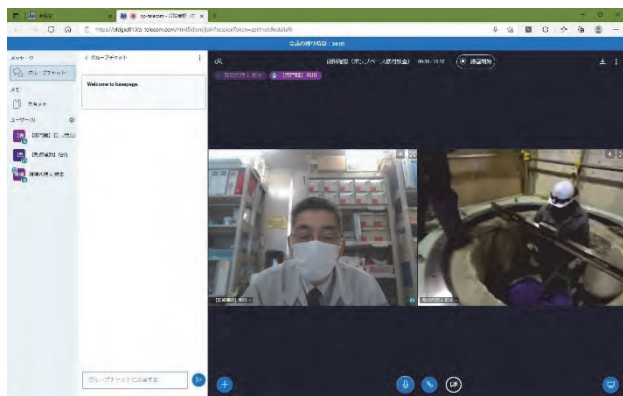


写真-9 遠隔臨場画面(上：工事情報共有システム)
と遠隔機器(下：タブレット、ルーター、マイク)

7. まとめ

更新時期を迎えた排水機場の機械設備において、冬期対策、コスト縮減、メンテナンス性向上の観点で、従来の無水化手法から新たな手法の検討を行った。対象施設の赤平排水機場では、立軸斜流ポン

プからコラム形水中ポンプへの大転換が実施可能であることが確認され、従来の無水化との経済比較やメリット・デメリット比較を行い、管理運用面における人員不足や高齢化などの課題に対して、総合的に優位性が示された。なお、他の既存排水機場のコラム形水中ポンプ化での無水化については、排水能力、排水ポンプ型式、機場の設備、運用条件などにより判断が違ってくると考えられるが、今回の赤平排水機場での検討項目や過程を参考に判断することができると思慮する。

最後に本工事の施工については3Dモデルの利用、遠隔臨場を活用することで、ポンプ型式の大転換という難易度の高い施工内容を効率的かつ確実に進めることができ、工期内で無事完了することができた。本排水機場は、本年8月中旬の前線による大雨の際に更新後初となる実稼働運転を行い、本来の排水能力を十分に発揮することを確認した。

今後は今回のような実稼働運転状況および日頃の維持管理状況の把握を行い、長期的なメンテナンス費用についても明らかにしていくことで、排水機場の機能を確実に果たしつつ、維持管理の効率化を進める手法にも役立て、関係者の負担軽減に貢献していきたいと考える。

謝辞：本論文執筆にあたり、資料提供および現場施工での調整、各種手続きに御協力頂いた空知川河川事務所、並びに赤平市関係各位に深く感謝申し上げます。

25. マスプロダクツ型排水ポンプの取組と今後の展望について

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課

○日出山 慎人

黒田 浩章

1. はじめに

河川ポンプ設備は昭和50年代をピークに高度経済成長期に整備されたものが多く、今後は整備後50年以上経過した施設の急増が見込まれている。また、河川機械設備は複数の装置が連動して機能を発揮していることから、部品交換等による長寿命化にも限界があるため、全国で老朽化した施設が一斉に更新を迎える「大更新時代」の到来が懸念されている。さらに、河川ポンプ設備は特注・受注生産であるため、扱える技術者が限定されるとともに、故障等に伴う部品供給に時間を要することから、メンテナンス性の確保もまた課題となっている。

これらを踏まえ、国土交通省では「マスプロダクツ型排水ポンプ」の開発に着手した。マスプロダクツ型排水ポンプでは、これまで特注・受注生産であったポンプ駆動用エンジンを量産品の車両用エンジンに置き換えることにより、エンジンが故障した際にも迅速な復旧が可能となることを目指している。

マスプロダクツ型排水ポンプの普及拡大に向け、令和3年度は国立研究開発法人土木研究所(以下、「土木研究所」という。)で実証試験を行い、令和4年度からは実現場での現場検証に着手した。本稿では、これら実証試験及び現場検証の取組状況と今後の展望について報告する。

2. 土木研究所での実証試験

本章では、令和3年度に土木研究所で実施したマスプロダクツ型排水ポンプ実証試験について報告する。

2.1 試験装置の計画仕様

実証試験に用いたマスプロダクツ型排水ポンプについて、ポンプの計画仕様を表-1、エンジンの計画仕様を表-2に示す。

表-1 ポンプ計画仕様

項目	横軸斜流ポンプ①	横軸斜流ポンプ②
形式	横軸斜流	横軸斜流
吸込方向	横方向	横方向
計画吐出量	1m ³ /s	1m ³ /s
計画全揚程	6m	6m
口径	600mm (吸込口は700mm)	700mm
軸動力	ポンプ計画点 83kW	ポンプ計画点 70kW
回転方向 ^(注1)	右回り	右回り
定格回転数 ^(注2)	448min ⁻¹	445min ⁻¹
質量	約1.6t	約2.3t

注1：回転方向は、取合いカップリング側から見た方向を示す。

注2：ただし減速比の計算においては、回転数を446 (min⁻¹)とする。

2.2 試験パターン

表-1に示すポンプと表-2に示すディーゼルエンジンを減速機により接続し、連続運転を行った。実証試験では、ポンプ2台を常設として場所を固定し、ディーゼルエンジン2台を着脱式として各ポンプへ順次換装することにより、機器の組合せを変更可能とした。本実証試験では、以下に示す計5通りの試験パターンを検証した。

・試験パターンⅠ：

横軸斜流ポンプ①とディーゼルエンジン①

・試験パターンⅡ：

横軸斜流ポンプ②とディーゼルエンジン②

表-2 ディーゼルエンジン計画仕様

項目	ディーゼルエンジン①	ディーゼルエンジン②	ディーゼルエンジン③
使用燃料	軽油	軽油	軽油
最高(定格)出力	130kW	107kW	125kW
最大(定格)トルク	450N・m	380N・m	520N・m
質量	230kg	180kg	350kg
回転方向 ^(注1)	左回り	左回り	左回り
回転数 ^(注2)	2,200～3,400min ⁻¹	2,750～3,500min ⁻¹	1,900～2,500min ⁻¹

注1：回転方向は、取合いカップリング側から見た方向を示す。

注2：ただし減速比の計算においては、回転数を①3,400、②3,400、③1,900 (min⁻¹)とする。



写真-1 実証試験の実施状況

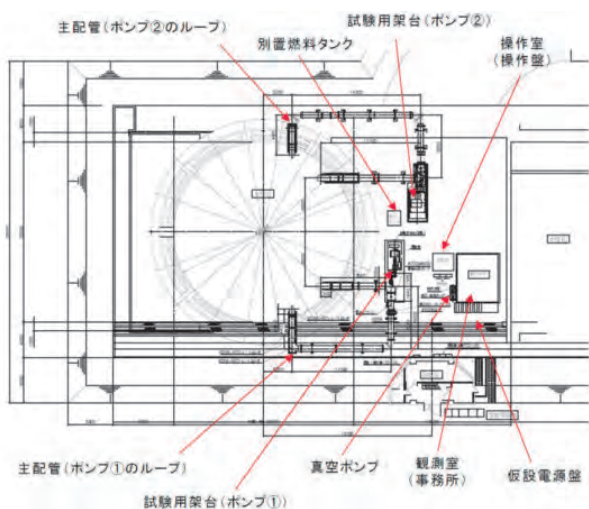


図-1 試験装置の全体図面

- ・試験パターンⅢ：
横軸斜流ポンプ①とディーゼルエンジン②
- ・試験パターンⅣ：
横軸斜流ポンプ②とディーゼルエンジン①
- ・試験パターンⅤ：
横軸斜流ポンプ①とディーゼルエンジン③

2.3 試験方法

実証試験は土木研究所構内の試験水槽を用いて実施した(写真-1)。試験装置を図-1のとおり配置の上、以下のとおり試験を行い、状態観察及び計測を実施した(写真-2及び写真-3)。

(1) 始動試験

以下の手順でポンプを始動し、クラッチ接続時にエンジンストールがなく、エンジン及びポンプが所定の回転速度になるまで異常なく運転できることを確認した。さらに、ポンプ回転速度及び振動を計測した。

① エンジン始動

- ・クラッチ断の状態でエンジンを始動。
- ・エンジンアイドリング回転速度で運転。

② ポンプ始動

- ・エンジンアイドリング状態から増速し、クラッ



写真-2 計測箇所(ディーゼルエンジン①の場合)

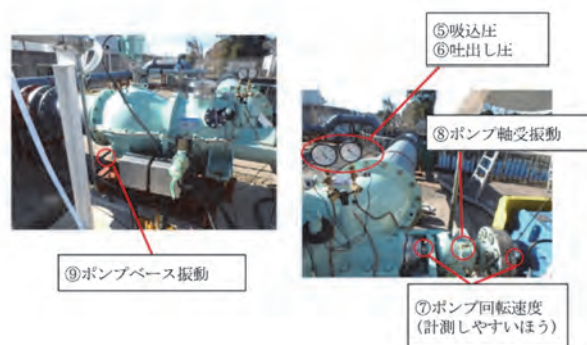


写真-3 計測箇所(横軸斜流ポンプ①の場合)

チを接続。

③ 定格回転速度運転

- ・吐出し弁全閉の状態のまま定格回転速度に増速。

(2) 負荷変動試験

吐出し弁操作によりポンプの運転点を計画揚程運転及び吐出し弁全開運転に変え、エンジンの負荷変動による回転速度の大幅な変化が発生しないこと、定格点(計画点)での運転においてポンプにキャビテーション発生兆候がないこと等を確認した。

(3) 連続運転試験

吐出し弁操作によりポンプの運転点を計画揚程として一定負荷条件のもとで2時間の連続運転を行い、ポンプ及びエンジンに異常音、異常振動が起きないことを確認した。さらに、エンジン冷却水温度を計測し、連続運転時の温度上昇を確認した。なお、試験では車両用エンジンを走行風の無い状態で運転するため、冷却不足により運転可能温度以上となる場合は、別置き送風機によりラジエータに送風した。

2.4 試験結果

(1) 始動試験結果

試験対象のすべてのポンプ、エンジン、動力伝達装置の組合せにおいて問題なく始動可能である

ことが確認された。また、今回の 5 通りの試験パターンではクラッチ接続時に異常事象の発生は確認されず、2 秒でクラッチのかん合が可能であった（図-2）。

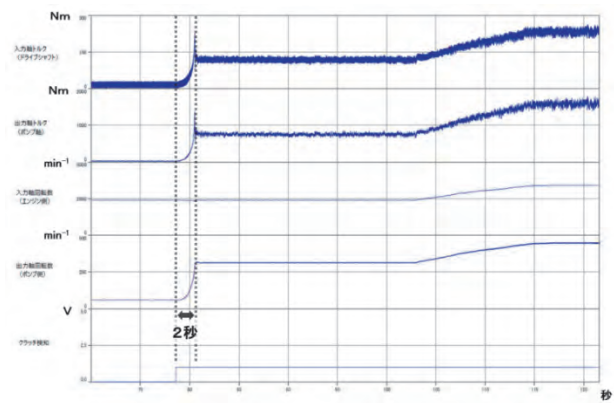


図-2 連続計測記録データ

(2) 負荷変動試験

試験対象のすべてのポンプ、エンジン、動力伝達装置の組合せにおいて、負荷状態を変えてもポンプ性能を発揮できる回転速度に制御できることが確認された。また、キャビテーション等の有害な事象発生の兆候は確認されなかった。

(3) 連続運転試験

2 時間にわたる連続運転を行った結果、ポンプ及びエンジンに異常音、異常振動は確認されなかった。騒音レベルは 90dB 程度となり、既存施設で用いられる陸用ディーゼルエンジンと同等以下であることが確認された。なお、試験装置からの騒音による周囲環境への影響については、当初想定レベル以下であった。また、エンジン冷却水温度の計測結果から異常上昇等の傾向はみられず、連続運転でのヒートバランスが確認された。（図-3）。

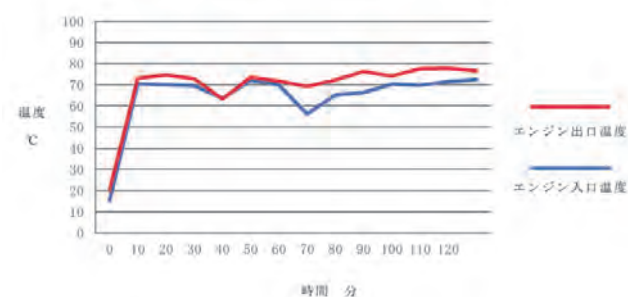


図-3 連続運転試験時のエンジン冷却水温度変化
(試験パターンⅢ)

2.5 課題整理

開発目的に適ったマスプロダクツ型排水ポンプ設備を実現するために、本実証試験から得られた主な課題について述べる。

(1) 共通ベースの一体化

今回の実証試験では共通ベースが一体化されたものと分割されたものが存在し、分割されたものではポンプ、エンジン、減速機の個々の機器が独立したベースであった。そのため、それぞれのベースを据付基準線に合わせ、水平に設置するための据付精度が要求され、据付・調整に時間を要した。

これを踏まえ、今後はポンプ、エンジン及び減速機の共通ベースを一体化したものととして、設計条件や寸法を統一し標準設計とすることにより、据付の効率化を図ることが必要であるただし、共通ベースの設計・製作に関しては十分な検討が必要である。

(2) エンジンのパッケージ化

今回の実証試験では、主原動機の構成機器であるラジエータ、燃料ポンプ、排気装置等は艀装装置として別途、艀装メーカーにより設計・製作された部分があった。

これを踏まえ、今後はエンジンをパッケージ化することで、故障時の復旧作業の効率化を検討する必要がある

(3) 技術基準の作成

今回の実証試験では技術基準による規定がなく、各社独自の技術等基準で設計・製作されており、技術水準が統一されていなかった。

そこで、今後マスプロダクツ型排水ポンプ設備に係る技術基準を作成することで、当該設備が備えるべき機能等の技術的水準を明確にする必要がある。

3. 実現場での現場実証

本章では、実現場におけるマスプロダクツ型排水ポンプの現場検証の取組状況について報告する。

3.1 現場実証の目的

2. で述べた実証試験では、マスプロダクツ型排水ポンプの実用性が確認された。しかし、今後マスプロダクツ型排水ポンプを実現場へ導入・普及拡大させるためには、実使用環境下において出水時に稼働させ、耐久性、操作性、現場適用性、維持管理性などの検証を行う必要がある。そこで、国土交通省はこれらの検証を目的とし、実現場における現場実証に着手した。

3.2 現場実証箇所の選定

まずは現場実証を実施する箇所を決定するため、国土交通省は令和 3 年 12 月に河川機械設備革新的技術実証事業に関する公募を開始し、マスプロダクツ型排水ポンプ設備の現場実証に協力可能な市区町村の公募を行った（図-3）¹⁾。

公募の結果、10 市町 13 か所からの応募があり、各自治体から提出された応募様式をもとに現場実証を実施する 6 市町を選定した（図-4）。

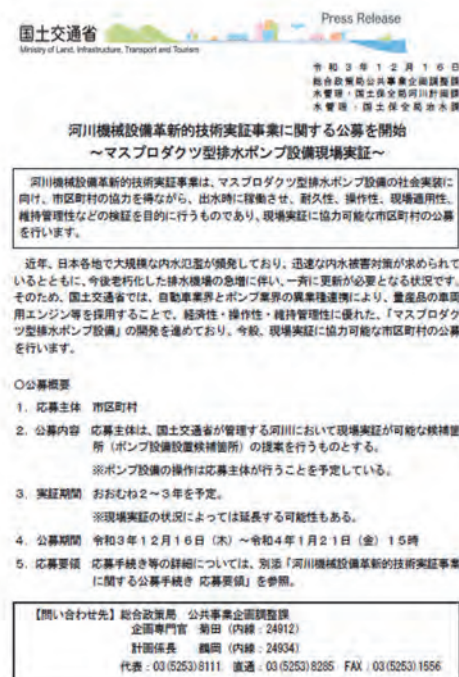


図-3 河川機械設備革新的技術実証事業に関する公募
(令和3年12月)



図-4 現場実証箇所を選定された6市町

3.3 現場実証開始に向けて

選定された6市町での現場実証開始に向け、各現場に設置するマスプロダクツ型排水ポンプの計画仕様を決定し、現在は現場実証開始に向けた準備を進めている。計画仕様は実証試験で用いたものと同様としたほか、2.4で述べた課題等を踏まえ、以下のとおり必要な機器・機能の拡充を図った。

(1) 共通架台の追加

効率的な芯出しの検証に向け、鋼板製の共通架台を利用するものとした。共通架台には、試験機器のうち主ポンプ、主原動機、動力伝達装置を設置する。

(2) エンジンのパッケージ化

エンジンが故障した際に現場で効率的かつ安全に交換するための検証に向け、エンジンのパッケージ化を行うものとした。

また、上記仕様から技術基準を作成するために必要なデータ計測については、突発的な大雨に伴う排水運転に備え、予め取付けた計測装置による自動計測により、データロガー等にデータを記録できるようにした。

4. おわりに

本取組はポンプ業界と自動車業界による全国で初めての異業種連携の試みであったにもかかわらず、令和3年度に実施した実証試験では全ての試験パターンにおいて総合的に判断基準を満たす結果となり、今後の治水対策手法としての可能性が示された。また、社会資本整備審議会河川分科会河川機械設備小委員会の答申（令和4年7月）においても「特注・受注生産品の維持管理や更新時に発生する課題を解決するためには、単に、規格・仕様を統一するだけでなく、各サブシステムについてマスプロダクツ化された製品を導入し、コストダウン、部品等のサプライチェーンの確保、技術者の確保を図ることを目指すべきである。例えば排水ポンプの場合、小規模ポンプの駆動機関にマスプロダクツの車両用ディーゼルエンジンを導入することにより、コストダウン・部品供給体制の確保・自動車整備工を活用するメンテナンス・小規模ポンプを複数台設置する小口分散化を図ることができる。これにより、小規模な機能損失の可能性は高まるが、システム全体に影響を及ぼすような機能損失に至る可能性はかなり小さくなり信頼性が向上する。」とされており²⁾、マスプロダクツ型排水ポンプの活用による総合信頼性の向上等が期待されている。

マスプロダクツ型排水ポンプの導入に向けて、国土交通省では引き続き検証に取り組む。

参考文献

- 1) 国土交通省，河川機械設備革新的技術実証事業に関する公募を開始～マスプロダクツ型排水ポンプ設備現場実証～，令和3年12月
https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000306.html
- 2) 国土交通省，社会資本整備審議会河川分科会河川機械設備小委員会答申 河川機械設備のあり方について，令和4年7月
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001493319.pdf>
- 3) 一般社団法人日本建設機械施工協会，建設機械施工，Vol.74，No.6，令和4年6月
- 4) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会，ぽんぷ，No.68，令和4年9月

26. 水質を汚濁させない高揚程浚渫工法の開発

ダム取水口近傍で発電を止めることなく堆砂除去

(株)フジタ 土木本部 土木エンジニアリングセンター 機械部 ○稲見 悠太
服部 哲也
(株)河本組 河本 和雄

1. はじめに

ダム湖の水質を汚濁させずに水深 20 m 以上、陸上揚程 10m 以上の堆砂除去が可能な浚渫工法を開発した。本工法では、強力な真空発生装置と攪拌高濃度ポンプを併用することで湖底を乱さずに高揚程での連続的な堆砂除去を実現した。水質汚濁を発生させないという特長から、従来のダム浚渫工法とは異なり、ダムの発電運転を停止させることなく、取水口近傍で連続的に堆砂除去が可能である。また、河川の渇水期に限らず施工が可能なため、要求工期への適応性が高いなどの点で有用な工法である。これまでに 4 箇所のダムでの実証試験を通しその有効性を確認した。(写真-1)



写真-1 ダム湖における試験施工

2. 開発背景

ダム堤体の寿命は、適切な設計、施工管理および維持管理がなされていれば半永久的ともいえるが、ダムとしての機能を維持するには、堆砂への対応が重要である。会計検査院の平成 26 年度の調査によると、堆砂により、本来の治水機能を発揮できない恐れのあるダムが全国で 100 か所以上ある¹⁾。(下線は引用) (図-1)。上記の会計検査の調査の対象外の国交省系以外のダムでも堆砂が利水利用の障害となっており、発電取水などの利水を止めずに取水口(取水設備)周辺の堆砂を除去する技術が望まれてきた。このようなニーズに対応するために水質汚濁を生じさせずに深い水深で適用できる

本工法を開発した。

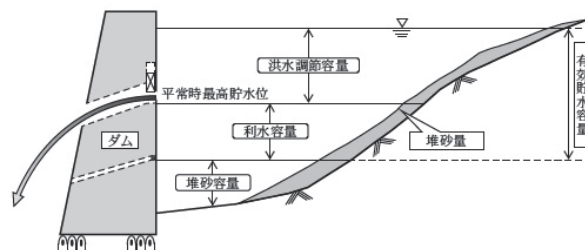


図-1 貯水池等の概念図¹⁾

3. 工法概要

3.1 工法の特長

本工法は、真空吸引による気流搬送と高濃度攪拌ポンプによるスラリー移送を併用し、ダム湖底の堆砂を回収するものである。一般的に真空吸引のみによる水の最大限界揚程は 10m である。これは、トリチェリの実験により知られている標準大気圧 (1013.25 hPa $\approx$ 10.33 tf/m²) にバランスする水柱高が約 10m に相当するからであるが本工法では、真空経路の途中に独自開発の中継ポンプユニットを接続する事でこの限界を超えた 20m 以上の高揚程を実現した。また、オーガで掘削した堆砂を真空吸引することで、掘削により生じた濁りを拡散させずに水質汚濁が発生しない堆砂除去も実現している(図-2)。

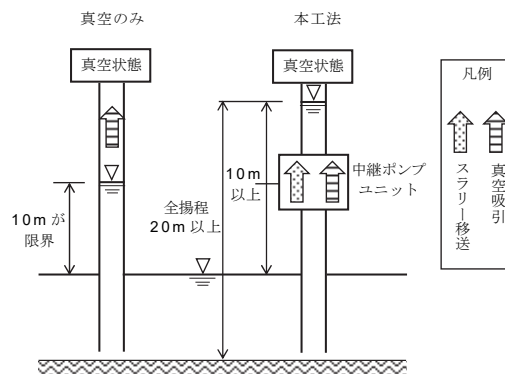


図-2 工法概要のイメージ

3.1 本工法の設備構成

本工法の設備は、ダム湖上設備と陸上設備からなり、図-3 に設備の構成図を示す。堆砂は、これらの設備により、以下の4段階のフローにより除去される。①オーガ付吸引機により湖底を掘削し、②真空発生装置で生み出された真空吸引力によってダム湖内へ拡散することなく吸引する。吸引された堆砂物は第1中継ポンプユニットへと気流搬送される。③堆砂物は、第2中継ポンプユニットを中継しスラリー移送と真空による気流搬送によって搬送され、陸上で回収される。④連続泥土回収タンクにより、真空吸引を中断させることなく堆砂物を回収し、陸上処理設備へ送る

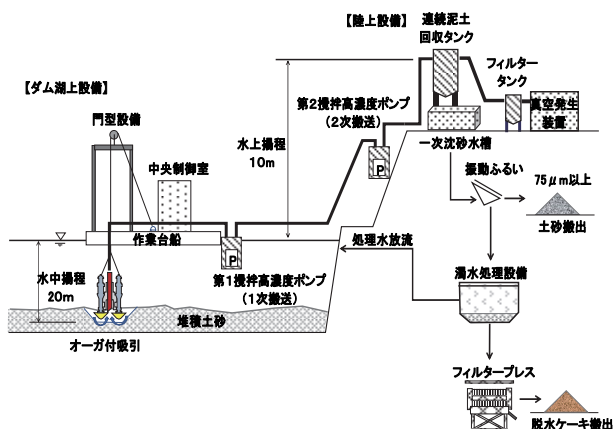


図-3 システム概要図

3.2 施工フロー

施工フロー図を図-4 に示す。水上設備では堆砂の掘削と真空吸引およびスラリー移送が行われる。堆砂を吸引するオーガ付吸引機は、ダム湖に浮かぶ台船上に設置した門型設備から吊り下げられ、ウインチ操作によって昇降する。まず、オーガ付吸引機を堆積土中へ50cm程度貫入させ、真空吸引しながらオーガを回転させて掘削する。次に、吸引された堆砂物は中継ポンプユニットを介して、湖面上に浮かべた搬送管を通り陸上の連続泥土回収タンクへ移送される。真空吸引とスラリー移送のバランス調整の役割を担う第1中継ポンプユニットは台船脇の水中に配置し、第2中継ポンプユニットは、陸上設備側に配置することで円滑な堆砂物搬送を行う。また、掘削箇所を移動する際には、台船からダム湖岸へ四方に張られたワイヤーをウインチで巻き取ることで台船を移動させる。以上の操作は台船上の中央制御室で行う。

陸上設備では真空の発生と回収した堆砂物の処理を行う。まず、堆砂物は、連続泥土回収タンクへ送られ内部の2重構造により、輸送配管の真空は保ちながらも、大気圧下の一次沈砂水槽に集積される。次に、集積された堆砂物は振動ふるい（75μ

m）により細粒分と粗粒分に分級され、細粒分は、濁水処理設備（シックナー）で沈降処理した後、フィルタープレスによって脱水ケーキとなる。一方、粗粒分は仮置きした後にダンプトラックで搬出する。

また、堆砂物の処理設備は施工条件により上記と異なる方式も選択可能である。ダム湖岸に十分な用地を確保できる条件下では、沈砂池を造成して、自然沈降させた堆砂物を曝気・乾燥する方法も実証済みである。

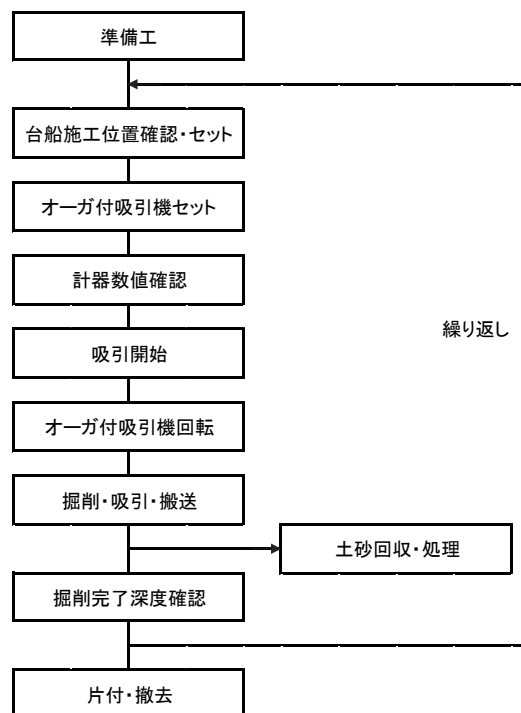


図-4 施工フロー図



写真-2 作業台船全景

3.3 施工支援システム

中央制御室ではGNSSを活用したICT施工支援システムの採用により、施工の見える化と集中管理を行っている。事前に実施したダム湖のナロ

一マルチビーム測量により作成した、3次元地形(ヒートマップ形式で表示)上に台船の現在位置を表示させるので、台船の現在位置だけでなく湖底の地形も同時に直感的に判断できるようになっている。なお、台船の測位に用いるGNSSには、VRS(ネットワーク型RTK-GPSサービス)を利用することで精度向上を図っている。また、オーガ付吸引機の水中姿勢は、傾斜計やウインチのロードセル(荷重計)等の各種センサの数値及び水中カメラの映像を基に判断できる。さらに、船底にエコー測定器を設置することでリアルタイムに水深や湖底の起伏を把握することもできる。これらの情報を基に掘削を行い、施工データには掘削深度、台船座標、掘削ポイント座標、当日のダム水位等が記録されて、日々水位が変化する湖上においても、掘削した地点の正確な深さが施工中でも把握可能である。これらの正確な現況データを活用してベンチカット方式により一定の掘削深度を保って連続的に掘削できるなど、合理的な施工が可能である。施工支援システム各種モニタを写真-3に示す。



写真-3 ICT 施工支援システム各種モニタ

4. 開発の過程

本工法の技術開発は、2015年度より調査に着手し、考案した搬送方式の比較検証のために基礎実験を繰り返し実施した。工法設備の開発後は、能力検証を目的とし陸上実験を実施し、ダム湖上における現場実証試験により各設備の連携動作や施工能力を確認しつつ改良を重ねた。次に、開発の過程を述べる。

4.1 基礎実験(陸上試験)

考案した搬送方式の比較検証を目的として基礎実験を2016年度に行った。陸上に水と砂礫を溜めたタンクを設置し、盛土を行いその上に真空吸引管を設置することでダム湖を再現した。実験当初は吸引力のみで10m毎に区切ってピストン搬送するバキューム搬送方式を試行したが十分な搬送能

力を得られなかった。また、吸引部筒先にエアーを強制注入し気泡とともに搬送するエアレーション方式や端部を大気へ開放し大風量の気流に乗せて搬送するエアリフト方式を試行した。これらの方式では筒先の形状や真空発生装置の出力増強や増設、搬送管径など様々な条件での試験を行ったが筒先の閉塞や吸引力不足により十分な成果を得ることはできなかった(図-5)。

初期搬送方法案に対する試験結果を踏まえ、真空発生装置による気流搬送と高濃度攪拌ポンプを搭載した中継ポンプユニットによるスラリー移送を併用するハイブリッド方式を提案した。2017年度から2018年度にかけて高濃度攪拌ポンプを内蔵した中継ポンプユニットと、閉塞防止と効率的な湖底の掘削のために吸引部筒先に高トルクオーガ2基を搭載したオーガ付吸引機の開発を行った(写真-4)。そして、2019年度の陸上試験では、真空限界を超えた揚程22mでの吸引において実用的な施工能力を確認した。

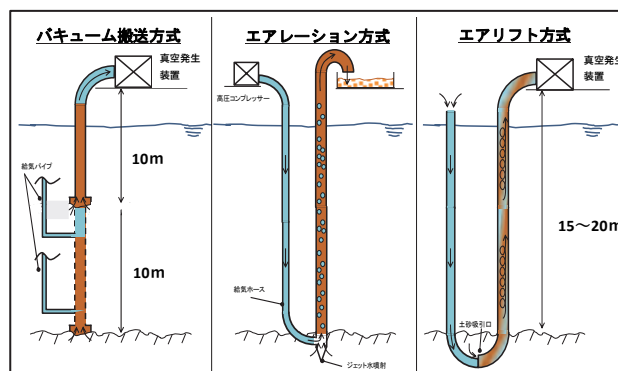


図-5 初期搬送システム案



写真-4 オーガ付吸引機と中継ポンプユニット

4.2 現場実証試験

陸上試験を経て2019年度から2021年度にかけて4箇所のダムにおいて現場実証試験を行った。表-1にその一覧表を示す。ダム湖上に作業台船を浮べ施工設備を配置し、機械性能と工法確立のた

めの様々な検証を実施した。

表-1 現場実証試験一覧

ダム名称	Aダム	Bダム
事業主体	広島県	国土交通省中国地方整備局
場所	広島県広島市	広島県安芸高田市
試験期間	2020. 1～2	2020. 5～6
成果	全体機器の有効性検証	作業能力の検証
		
ダム名称	Cダム	Dダム
事業主体	電力系ダム	電力系ダム
場所	-	-
試験期間	2020. 11～12	2022. 1～2
成果	作業能力の改善	実際の施工を想定した試験施工
		

(1) Aダムにおける試験

実際のダム湖での技術検証と各機械設備の能力検証を目的として、2019年度にAダム(広島県管理)で実証試験を行った。真空発生装置とオーガ付吸引機、その他機械の一連の動作と施工能力が確認され、水質汚濁を発生させずに施工できることと水深13.2mからの堆砂物回収ができることを確認した。含泥率は8.7%と高い値は得られなかったが、潜水土による事前の湖底堆積土砂層の調査(図-6)と施工により陸上で回収した土砂の比較から吸引物に対する堆積土砂と水の割合である含泥率と堆砂の性状との関係性などが把握できた。

また、問題点としてオーガ付吸引機の湖底への着地判断が難しいことが判明した。オーガ付吸引機の着地は、ソナーで把握した深度に対して、門型設備ウインチのロードセルの数値で判断したが、ウインチを操作すると一時的に大きな張力が掛かり、ロードセルの数値が激しく変動して着地判断と姿勢制御が困難であった。さらに、木根や枝などの固形物を吸引すると、配管内で閉塞を起こし、閉塞解除に時間を要することや真空発生装置が陸上にあることで台船上の中央制御室と連携が取りにくいことがわかった。土砂回収に伴う真空と堆砂の分離時においても、単体の回収タンクでは、分離時に一時的に真空状態を解除しなければならないので、2～3分毎の分離時に吸引の中断が生じるので掘削・吸引の連続性が著しく低く、さらに、吸引の中断が土砂の拡散に繋がり濁りの原因となるこ

ともわかった。

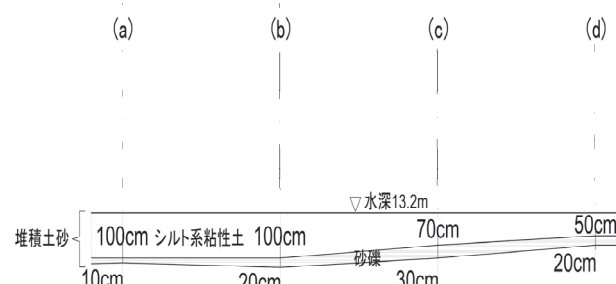


図-6 湖底堆積土砂層の調査結果

(2) Bダムにおける試験

大水深施工と土砂処理設備以外の施工設備を台船上へ設置する編成での施工検証を目的として、2020年度にBダム(国土交通省中国地方整備局管理)で実証試験を行った。前回からの改良により、①台船上への真空発生装置設置による施工性の向上、②オーガ吸引機への傾斜計設置による水中姿勢の可視化、③攪拌高濃度ポンプの大型化による移送力の向上、④ICT 施工支援システムの強化による中央管理室での一元管理の確立、⑤連続泥土回収タンクの採用による掘削・吸引の連続性向上を図った。連続泥土回収タンクは、接続された2基のタンク内部で複数の弁を電子的に制御し、2基のタンクが交互に堆砂物の排出を行うことにより、搬送配管側の真空環境を大気へ開放されることなく、堆砂物を分離できるため、吸引力を途切れさせることなく連続運転が可能になった。

試験の結果としては、水深19.1mからの堆砂物回収が確認できた。湖底堆積土砂は砂礫分が少なくシルト分が多かった為、濁りの拡散が懸念されたが、掘削で生じた濁りは拡散することなく吸引されたので水質汚濁は生じなかった。一方、問題点として、掘削・吸引の連続性が向上したことで濁水処理設備の能力が追い付かなくなったこと、連続泥土回収タンクの容量が足りないことなどが新たに判明した。

(3) Cダムにおける試験

施工連続性と新規設備の能力の検証として、2020年度にCダム(電力系)で実証試験を行った。更なる改良点は、①設置用の揚重機械や運搬機械の小型化のための真空発生装置の分割②連続泥土回収タンクの容量の大型化(0.6 m³×2基→5.0 m³×2基)による施工能力の向上(写真-6)であった。また、ダム湖の湖岸に広い仮設ヤードを確保出来たため、容量400 m³の沈砂池を2池造成し(写真-7)、連続施工で排出される多量の排泥の処理に対応できるようにしたことで1日を通しての施工サイクルが確保できた。



写真-6 大型連続泥土回収タンク



写真-7 湖岸沈砂池

(4) Dダムにおける試験

2021年度にDダム（電力系）で試験施工を行った。同ダムでは、取水口近くの堆砂除去が課題となっていたが、従来のバックホウ浚渫では対象箇所へのアクセス方法や浚渫時の濁りによる発電への影響が問題になっていた。そこで、その様な条件に適する本工法で試験施工を行うことになった。堤体直上流での施工なので、台船が接触して堤体ゲート設備等を損傷するのを避けるため台船上設備の大半を陸上に設置し、台船を従来から大幅に小型化（水上占有面積：220 m²⇒74 m²）し、取水設備近傍からの施工を可能とした（図-7）。また、陸上設備も従来はダム湖岸に設置していたが、今回は十分な広さが確保できなかったためにダム湖面から10m程高い場所に位置する市道1車線を一部分占有し、陸上ヤードとした（写真-8）。試験では、まず、ダム取水口から15m離れた位置で施工し水質汚濁が生じないことを確認した。次にダム取水口近傍の5mまで近づけて施工を行ったが、同様に施工により発電を止めることなく堆砂除去が可能であると実証できた。さらに、水上・陸上設備のコンパクト化を図れたことで、柔軟な施工計画が可能となり、様々な施工条件でも施工が可能な高い適用性が確認できた。

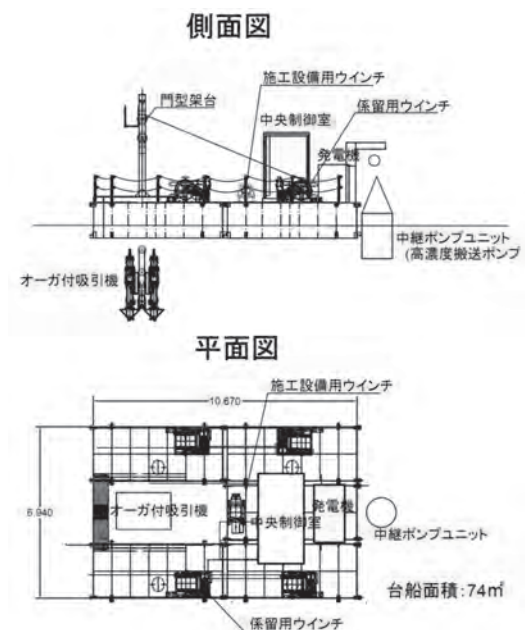


図-7 二級ダム作業台船図



写真-8 陸上ヤード 砂回収状況

5. 実証試験の成果と考察

5.1 実験データ

一連の実証試験により得られた実績データを表-2に示す。AダムとBダムでは、泥土回収タンクの問題から連続施工ができず、施工時間も総施工量も伸びなかったが、Cダムでは、大型の連続泥土回収タンクの開発と沈砂池を設けた土砂処理により処理能力、施工量が大幅に向上した。Dダムでは、現場条件から採用した機械式の土砂処理に制約され、施工能力は頭打ちになった。

一方で、施工能力は、一概に施工設備の能力により決まるではなく、堆砂の粒度分布、粘土分、シルト分、砂礫分の割合の影響も大きいことがわかった。含泥率のばらつきについても同様である。また、回収土砂量を増やすため、回収効率を示す含泥率を上げるという方法も検討したが、これは水の吸引量を減らすことになり、掘削・吸引の連続性及び濁りを含む泥水の拡散につながるため、現時点では採用しなかった。

表-2 各ダムで確認された実験データ

施工場所	Aダム	Bダム	Cダム	Dダム
総施工時間	35分	6時間55分	20時間45分	20時間5分
施工水深	13.2m	19.1m	6.3m	5.0m
水上揚程	5.0m	6.0m	8.0m	10.5m
施工方法	壺掘り	壺掘り	ベンチカット	ベンチカット
土砂処理方法	機械式 (50 t)	機械式 (100 t)	沈砂池 (400m ³ ×2)	機械式 (120 t)
総施工量	104m ³	784m ³	2164m ³	1746m ³
日換算施工量	549m ³ (※)	678m ³ (※)	626m ³	522m ³
回収土砂量	9m ³	63m ³	154m ³	126m ³
日当たり施工量	48m ³	54m ³	45m ³	38m ³
含泥率	8.7%	8.0%	8.1~32.4%	7.2~26.4%
濁り発生	なし	なし	なし	なし

※能力からの理論値

5.2 施工能力

実験データから整理した施工能力を表-3 に示す。各ダムにおける実証試験の結果を分析し、本工法の能力としてまとめたものである。施工水深の下限は、台船を水上に浮かべるために必要な喫水として 2m とした。施工能力は、日当たりの施工時間 6 時間として、除去した土砂分と水を合わせた体積数量で表現している。このうち 10~30%が土砂分である。浚渫土量は、掘削形状の実績値から算出しているがばらつきがあった。このばらつきは、堆砂の状況や設備条件によるものと考えられる。最大粒径は、中継ポンプユニットに内蔵した高濃度攪拌ポンプの仕様によるものである。

表-3 施工能力まとめ

施工水深 (m)	施工能力 (m ³ /日)	含泥率 (%)	浚渫土量 (m ³ /日)	最大粒径 (mm)
2~30	625	10~30	50~100	40

5.3 濁度の変化

ダム湖における浚渫作業において、作業時に発生する水質汚濁による河川環境や発電設備への影響には、十分な配慮が必要である。従来工法で用いられるポンプ浚渫船やグラブ浚渫船では、少なくとも 300 mg/ℓ程度以上の濁度が発生すると言われている。本工法による施工中における濁度変化の一例を図-8 に示す。測定は浸漬型の濁度計をオーガ付吸引機の直上 2m の位置に設置して行った。施工前の 8.8 mg/ℓを基準として最大で+4.8 mg/ℓ (13.6 mg/ℓ) であったことから施工中においても濁度に大きな変化はなく、ダム湖を濁さずに施工できていることがわかった。オーガ掘削機に取り付けた水中カメラ映像では、施工開始 10 分を経過した時点でも水中をクリアに映し、湖底の状況をはっきりと視認出来た。また、取水口近傍での測定も行ったが同様の結果だった。

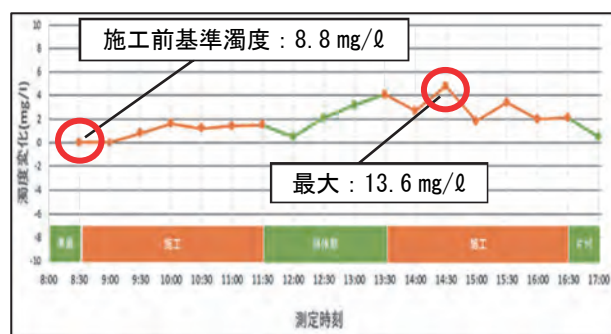


図-8 施工中における濁度の変化

6. 工法適用範囲の想定

本工法は、貯水池内に水質汚濁を拡散させないこと、水深 20m までの堆砂除去が可能であることという特長を有することから、以下のような場面での適用が考えられる。

- ・ダムのリニューアル工事で必要な局所的条件下
- ・堆砂で埋まった取水設備などの機能改善・回復
- ・貯水池の濁りが受け入れられない環境
- ・施工のための水位制限が困難な環境
- ・発電用水、農業用水等の利水取水をしながらの堆砂除去
- ・アオコ発生要因や重金属などが含まれた堆砂を貯水池に拡散させずに除去・回収

7. おわりに

本工法は、真空発生装置による気流搬送と高濃度攪拌ポンプによるスラリー移送を併用したハイブリッドシステムを採用したことで、高揚程が必要な取水口近傍において連続的堆砂除去が可能であること。また、掘削した堆砂は、発生した濁り水ごと吸引するので、濁水が拡散せず発電等の取水を止めずに堆砂除去が可能であることが従来工法には見られなかった特長である。これにより、近年、必要性が増しているダム堆砂の浚渫作業に新たな選択肢を提供することができたと考える。ただし、現状では、含泥率が、シルト質、砂質の割合などの堆砂の土質性状に影響されているので、土質性状のよらず安定的に含泥率を向上させていくことが課題ととらえている。本工法が、全国の多くのダム堆砂問題解決に役立ち、今後、ますます重要性が増す既設ダムの再生、長寿命化の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 会計検査院：平成 26 年度決算検査報告(10)ダムの維持について

27. 排水機場におけるDX技術を用いた維持管理の効率・高度化

国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所 ○村木 里宇

1. はじめに

排水機場は、水門閉鎖時の内水排除を目的とするインフラ施設であり、水災害対応における地域の生命・財産を守るインフラ施設である。

水門、樋門、樋管、堰、排水機場等の河川管理施設は直轄区間だけでも約1万施設存在し、その多くの施設が老朽化し更新期を迎えるようになっていく。今後10年で設置後40年を超過する施設の割合が約8割に増加するなど¹⁾、故障頻度の増加が懸念される。加えて、維持管理を担当する技術者が不在、若しくは不足している地方公共団体も多く存在し²⁾、さらには限られた予算の中で全国の排水機場の点検を行う為に、今後一層、効率的且つ高度な維持管理を行っていく事が要求される。さらに、2020年新型コロナウイルス感染拡大を契機として、社会全体でデジタル化が進展し、働き方を含め社会様式が大きく変化している。

国土交通省においては、建設現場における生産性の向上を図る、「ICT技術の全面的な活用」、「規格の標準化」、「施工時期の平準化」、「受発注者間のコミュニケーションによる施工の円滑化」を進めるi-Constructionの取り組みを行ってきている。

近年、データやデジタル技術の普及・拡大により、技術革新が急速に進み、デジタルトランスフォーメーション（DX：Digital Transformation）が様々な業界や業種で進展している。インフラ分野においても社会経済状況の厳しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して社会資本や公共サービス、また業務そのものや、組織、プロセス、風土、文化、働き方を変革し、安心安全で豊かな生活を実現すべく、2020年7月に「国土交通省インフラ分野のDX推進本部」を設置しインフラ分野の全体像の整理や各種施策の進捗状況を確認してきた³⁾。

このような背景を受け、本稿では、近畿地方整備局紀南河川国道事務所が新設する市田川排水機場において設置するポンプ設備（主ポンプ、原動機、減速機）に用いる振動計測技術、デジタル技術を用いた状態監視及び今後の取り組みについて報告するものである。

2. 河川用排水機場における保全方法

施設の点検は、設備の不具合が発生する前に整

備を実施する「予防保全」と不具合が発生した後に整備を行う「事後保全」に大別される。その「予防保全」からさらに分岐した計画が、設備毎に定められた時期をもって整備を行う「時間計画保全」と設備状態を監視し、故障や劣化の兆候から整備時期を決定する「状態監視保全」に分けられる。

排水機場には、主ポンプ設備等の大型機器や主原動機、減速機などの駆動設備等、分解整備等を行わなければ機械内部の詳細な劣化状況を十分に把握できない機械設備が多く存在しているため、これまでの技術では故障・予兆の検知が難しく、多くの河川管理施設の保全計画は、「時間計画保全」を採用している。しかし、「時間保全計画」では、不具合の有無に関わらず定められた時間で交換することで故障のリスクが低減する一方、余計なコストや労力が生じる可能性がある。

近年では、「時間計画保全」から「状態監視保全」に移行しつつあるが、河川用ポンプ設備において、状態監視を行う具体的な手法や適用事例は多くない。よって、河川用ポンプ設備の維持管理において適切な状態監視保全手法の具体化を、デジタル技術を用いて確立し、合理的な予防保全の実現を図る必要がある。

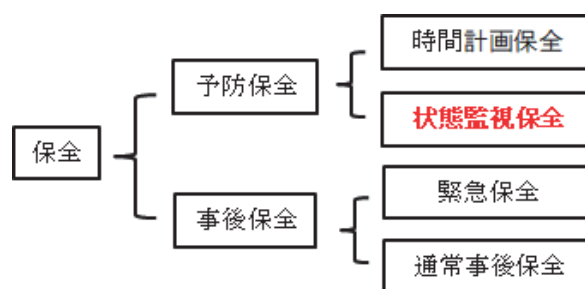


図-1 保全の分類（JISZ8115:2000）
「ディペンダビリティ（信頼性）用語」

3. 振動計測による点検

排水機場の機械設備は、ポンプやタービン、発動発電機のような回転に伴い振動する機械が多数存在する。よって、ベアリングやギア等に慢性的な大きな負荷がかかるため、設備寿命を縮める大きな要因になり得る。排水機場の機械設備のほとんどが振動する機器で構成されており、機械設備と振

動は密接な関係にあると言える。

このことから振動計測は、様々な施設の点検において用いられる事が多く、さらに計測が容易であることや回転状態がリアルタイムで確認することができ、表1の目視で確認できない多くの機器異常も振動値として現れるため、故障の原因を早期に特定し対応できるという利点がある。

これまでの河川ポンプ設備の点検は、目視点検と点検時に行う排水運転（以降、管理運転とよぶ）、さらに計測による状態監視を行い、機器の故障、劣化等を調べる。その計測は手持ち型の振動計や騒音計、温度計等を用い、管理運転と平行し診断するのが一般的である。管理運転では水位条件によって流体振動の違いによる影響を受けるため、状態の変化を比較しにくい。また、ガイドライン⁴⁾で注意値や予防保全値が設定されているが、通常の運用でその値まで振動が発生することはなく、発生してからでは遅い。

ポンプ設備は内水排除を目的とした長時間・高流量の排水運転を基に設計されているため、短時間・低流量排水である管理運転では、ポンプの振動を正しく捉えられないという課題がある。よって、管理運転のみの計測では、ポンプの正確な異常状態を捉えられない。

表-1 機器異常に対する診断法

異常原因	寸法検査	NDI法	AE法	振動法	油分析法	温度法	電流法	圧力法	五感点検
クラック・欠陥		◎	◎	○	○				○
摩耗・ガタ	◎			◎	◎				○
据付不良				◎					
変形	◎			◎					
きず・接触	◎			◎	○	◎			
圧力発生 機構異常				◎		○	○	◎	○
自動振動・共振				◎	○	◎			○
電氣的異常				◎					○

4. ポンプ流量と振動

ポンプ設備の振動要因の大部分は、機械的要因であり、その中でも「流体的振動」、「機械的振動」、「電磁的振動」に大別できる。ポンプ設備において、タービンや発動発電機などの振動機器とは異なり水の吸排水によって引き起こされる力として、ポンプの羽根車に働く流体荷重による振動がおおよそ70～80%を占めている。つまり、ポンプ設備の振動要因の大部分が流体的振動と言える。

流体的振動は、排水量によって振動の大きさが異なる。流体的振動が大半を占めるポンプ設備においては、流量と軸振動の相関性が確認されており、同一流量での振動値を比較することで、機器の状態を把握することができる。

従来の手持ち型の計測機器とは異なり、本稿で紹介する振動計測は、振動計をポンプ設備に常設し、管理運転だけでなく実排水運転を含む全ての運転の計測をできるようにすることによって、こ

れまで計測できなかった長時間・高流量の実排水運転のデータを取得できる。さらに、省力化・省人化に加えヒューマンエラーが生じる事無く、点検を定量的且つ統一的な評価で判断することが可能となる

5. 状態監視装置（振動計測機器）

振動計測機器の設置箇所と計測位置は、ガイドライン⁴⁾に示されているように、対象部位に近く、振動が直接伝わる位置且つ対象部位以外の振動の影響が受けにくい位置であることを考慮する必要がある。その他の計測機器含め、計測項目を満足する設置箇所、設置方向及び設置個数を採用した。

設置する計測機器の設置イメージを図2,3,4,5に、状態監視システム構成図を図6に、各センサと計測パラメータを表2に、データ集録装置の構成について表3に、ソフトウェアの機能について表4に示す。ここで計測方向について、Xは主ポンプ吐出方向（水平）、YはXに直交する方向（水平）、Zは鉛直方向である。

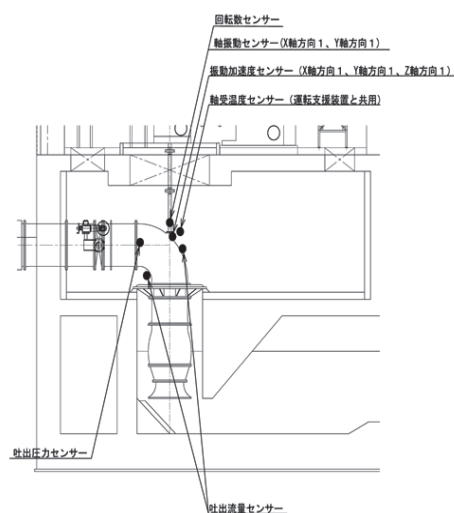


図-2 センサ設置箇所（主ポンプ：側面図）

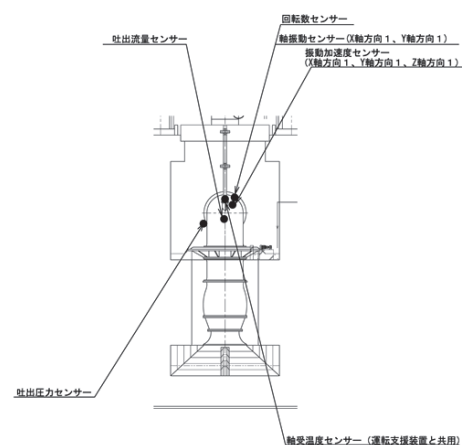


図-3 センサ設置箇所（主ポンプ：背面図）

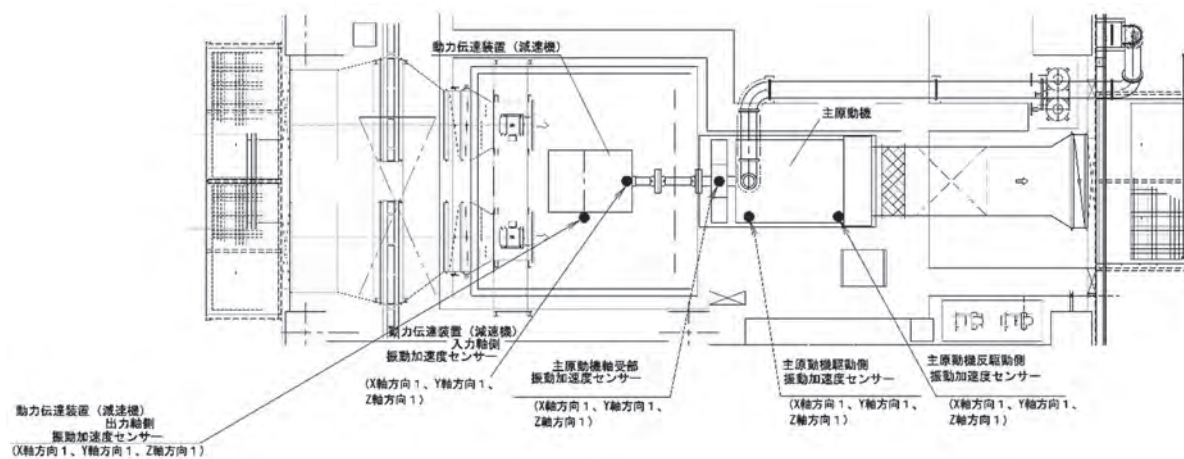


図-4 センサ設置箇所（主原動機・減速機：平面図）

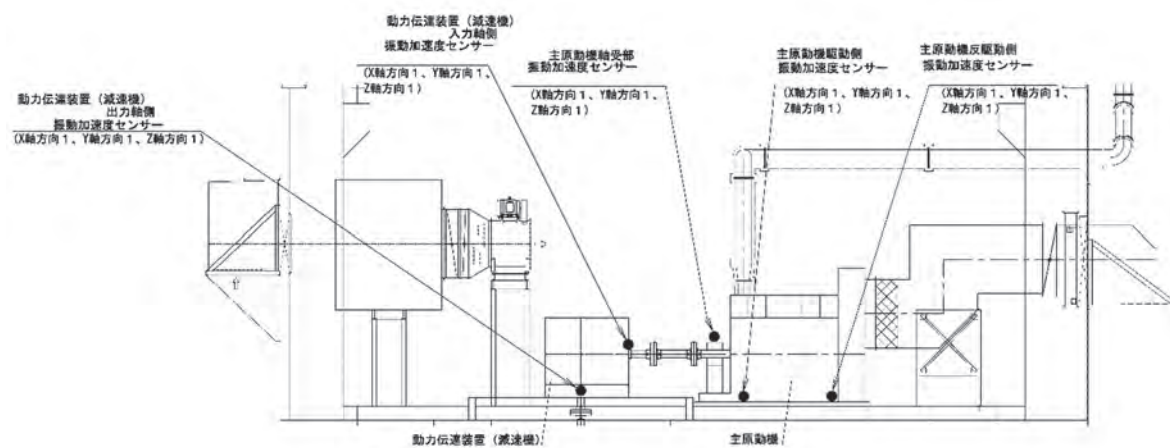


図-5 センサ設置箇所（主原動機・減速機：断面図）

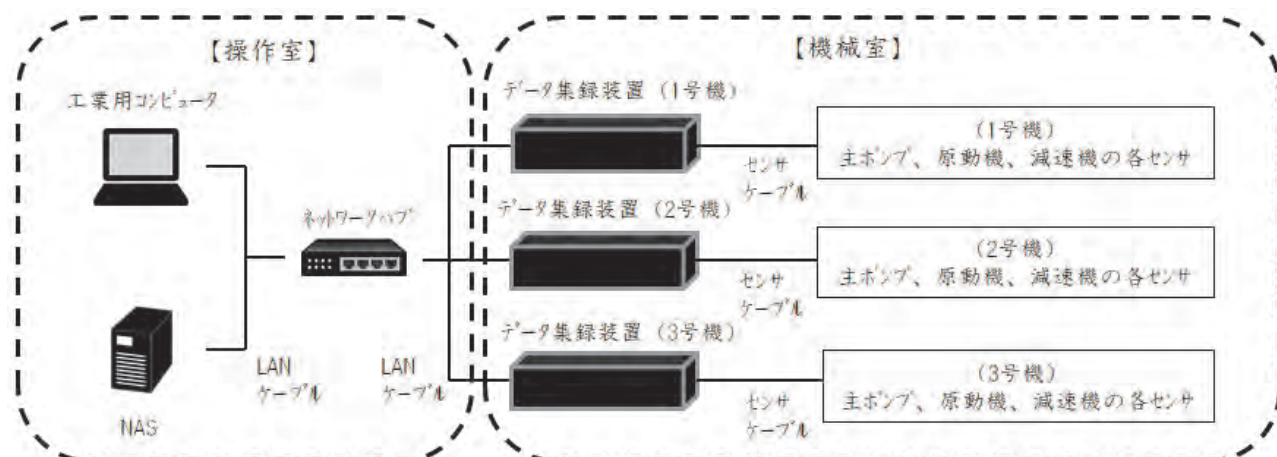


図-6 状態監視システム構成図

表-2 計測項目表

計測項目	適用センサ	計測位置		計測方向
振動加速度	アンブ内蔵型加速度センサ	主ポンプ	上部軸受箱	X
				Y
				Z
		主原動機	中間軸側（支持部）	X
				Y
				Z
			駆動側（脚部）	X
				Y
				Z
			反駆動側（脚部）	X
				Y
				Z
		減速機	入力軸側	X
				Y
				Z
			出力軸側	X
				Y
				Z
軸振動	荷電流式スペースセンサ	主ポンプ	軸封部 付近	X
回転数	光電式回転検出器	主ポンプ	軸封部 付近	Y
吐出圧力	ブリッジ式小型圧力変換器	主ポンプ	吐出管	-
吐出流量	ベンド流量計	主ポンプ	吐出管	-
軸受温度	測温抵抗体	主ポンプ	上部軸受箱	-

表-3 データ集録装置 構成表

機器名称	機能概要
コントローラ	センサ信号集録、コンピュータへのデータ送信
振動計測モジュール	振動センサ接続・計測
圧力計測モジュール	圧力センサ接続・計測
電圧計測モジュール	軸振動センサ、回転数センサ接続・計測
電流計測モジュール	吐出流量計、軸受温度計の接続・計測
接点信号入力モジュール	データ集録トリガ
フィラモジュール	空きスロット用カバー
端子交換ケーブル (振動センサ用)	振動計測モジュール用
端子交換ケーブル (圧力センサ用)	圧力計測モジュール用

表-4 ソフトウェア 機能一覧表

機能メニュー	機能概要
傾向管理グラフ	各センサの時間波形データから演算した傾向管理指標を日時系列でグラフにプロットし、その傾向を把握する。
時間波形グラフ	各センサの時間波形データをグラフ表示させ確認する。
周波数スペクトル（単独）	振動加速度、軸振動、吐出圧力、回転数の時間波形データに対して周波数分析を行う。スペクトルに現れる特徴周波数成分を抽出し、表示させる。
周波数スペクトル（ウォーターフォール）	振動加速度、軸振動、吐出圧力、回転数の時間波形データに対して周波数分析を行い、3Dグラフの奥行き方向に、周波数スペクトルを日時系列で並べることで各周波数成分の変化を把握する。
軸振動オービット	主ポンプの主軸に対して相互に90度の角度で水平に設置された軸振動センサのデータを正方形グラフに表示することで、主軸の振れ回り挙動を把握する。
軸振動ボア線図	軸振動センサ及び回転数センサのデータを用いて、軸振動ボア線図を描画する。ボア線図は、軸振動の振幅値と位相角を極座標で表現し、現在と過去のボア線図を比較することで、回転体に生じているアンバランスの変化を把握する。

6. 今後の取り組み

6.1 計測データの蓄積

計測データの判定を行うために、計測機器の設置から管理運転、実排水運転の計測データを毎年継続してモニタリングし、蓄積することが必要となる。表4のソフトウェアの機能は傾向管理、周波数分析、軸振動分析から得られた各グラフの表示までを行うもので、これらグラフを基にした主ポンプ・原動機・減速機の詳細診断や健全度評価までをシステムが自動で行うものではない。そのため、計測技術を扱う設備管理者として得られた蓄

積データから、データと設備状態の関連性と特徴を把握する。

6.2 解析と診断手法の確立

前述のとおり得られたデータを解析し、原因の追及、対策の検討を行っていく必要があるが、その取得・蓄積したデータをどのように解析・診断していくか、振動と流量を紐付けした解析・診断手法を確立する必要がある。

6.3 点検に活用

現在の点検項目と状態監視による傾向管理で点検結果の関連性を検証し、代替が可能な項目については今回の振動計測技術による代替を行うことで、点検作業の省力化や定期整備間隔の合理化などの維持管理の効率化、さらには目視による点検結果の補完による点検の信頼性向上に繋がるものとする。

7. まとめ

振動と流量に着目した計測技術を用いることで、同一流量での振動値を比較することができる。また、状態監視により交換が必要な消耗品の部品と継続の使用が可能な部品に分類することが可能となり、適正な時期での部品交換を行う判断になり、修繕費用算定の絞り込みや不可視部分の部品の信頼性が向上し、適正な時期で分解整備することができる。さらには、設備の状態を遠隔で確認できることによって、これまでの業務と比べて、時間や人手の必要が少なくなり、働き方が大きく変化すると想定できる。

得られた計測データは各グラフの表示までを行うものから、いずれはグラフから自動的に診断や健全度評価を行うなど、さらなるデジタル技術を取り込む余地は数多あると考えられる。今後のインフラ施設を支える管理者として、今後のDX技術の研鑽に励みたい。

参考文献

- 1) 大臣官房 技術調査課 電気通信室・総合政策局 公共事業企画調整課・水管理 国土保全局 河川環境課 河川保全企画室：河川構造物長寿命化及び更新マスタープラン , p.4 ,2011
- 2) 国土交通省 総合政策局：インフラ長寿命化基本計画 , p.1, 2013
- 3) 国土交通省：インフラ分野のDXアクションプラン, pp.1～12, 2022
- 4) 国土交通省：河川用ポンプ設備状態監視ガイドライン（案）, 2018
- 5) 国土交通省：河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル（案）, 2015
- 6) 近畿地方整備局：土木機械設備診断委員会会議資料, 2021

28. 壁の増厚などの補強工事に伴う

小径アンカー孔の削孔作業への自動削孔装置の適用

株式会社奥村組
株式会社奥村組
株式会社奥村組
株式会社奥村組
株式会社奥村組
株式会社奥村組

○ 川澄 悠馬
三澤 孝史
加藤 清孝
石井 敏之
山口 治
田島 鉄朗

1. はじめに

補強工事におけるあと施工せん断補強工法や壁等の増設工法では、「せん断補強筋」や既設と新設コンクリートの一体性を高める「あと施工アンカー筋」の挿入孔の削孔が行われる。挿入孔は通常、削岩機や電動ハンマードリル等を用いて人力で削孔され、数千本以上の孔数となる場合もあり、多大な労力を要する。そのため、作業の省力化や効率化が求められている。また、削孔時に発生する粉塵が作業場所に飛散することにより作業環境が悪化する場合もあり、改善も求められている。そこで、削孔作業の自動化および粉塵の飛散防止機構を備えた自動削孔装置を開発した^{1), 2)}。

自動削孔装置は、せん断補強筋を対象とする大径用（最大削孔径φ40mm程度）とずれ止めアンカー筋を対象とする小径用（最大削孔径φ25mm程度）の2種類である。これら2種類の自動削孔装置について、RC壁試験体を用いた性能確認実験を行い、人力施工と同等以上の削孔精度および粉塵飛散防止による作業環境の改善を確認した。

今回、下水道処理施設の放流渠における壁の増厚工法による補強工事において、ずれ止めアンカーの挿入孔の削孔作業に小径用の自動削孔装置を適用し³⁾、削孔精度と作業環境改善について確認した。本稿では小径用の自動削孔装置の概要および実施工における適用結果について述べる。

2. 自動削孔装置

2.1 自動削孔装置の構成

写真-1 に小径用の自動削孔装置（以下、自動削孔装置）を示す。本装置は予め設定した削孔計画（削孔数、削孔位置、削孔深さ）に従って自動で移動して連続削孔を行う。削孔機器には故障の際などに代替え機の調達などを素早く対応することができることから一般的な市販の電動ハンマードリルを用いている。

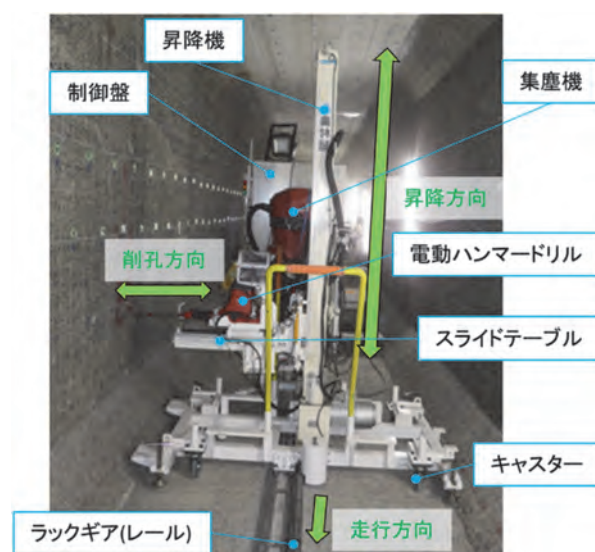


写真-1 自動削孔装置

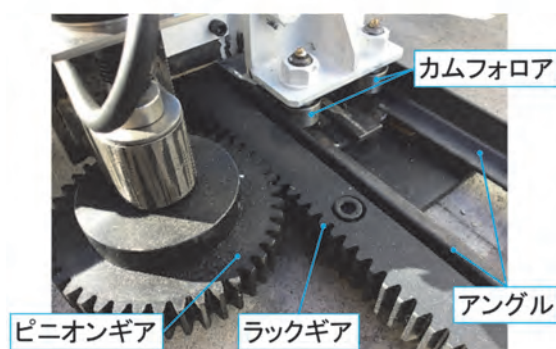


写真-2 レールと自動削孔装置

トンネル進行方向（走行方向）の移動は、写真-2 で示すようにラックギアとアングル 2 本から構成されるレールを床に固定し、装置本体に搭載した走行用モータ（ピニオンギア）を駆動源としてラックギアに沿って移動する。装置底部には、2 組のカムフォロアを装置の前後 2 か所に設け、レールを構成する 2 本のアングルをガイドとして走行す

る。走行量の計測には、ロータリエンコーダを用いている。レールは、構造物に残置させないように、撤去可能なスクリューアンカーにより床に固定した。

昇降方向はスライドテーブルに設置した電動ハンマードリルが電動モータで駆動する昇降機により移動する。削孔時には、スライドテーブルがレギュレータで調圧されたコンプレッサによる圧縮空気により削孔方向へ移動することで削孔する。昇降量および削孔方向への移動量は、レーザー距離計により計測する。

図-1 に示すように、削孔ビットには中空のホロードリルビット（ヒルティ社製）を使用し、削孔により発生する粉塵を先端の吸引穴から集塵機で吸引することで粉塵の飛散を防止する。

2.2 自動削孔装置の適用条件

現場適用の条件および装置の仕様を表-1 に示す。自動削孔装置の適用範囲は、内空幅 2,270mm 以上、高さ 2,647mm 以上の構造物である。また、走行方向に移動するために、施工延長に応じて長さ 1.5m のレールを敷設する。昇降方向のストロークは 1,500mm であり、削孔可能高さは地表から高さ約 735mm～2,235mm である。

2.3 自動削孔装置の動作フロー

自動削孔装置では削孔計画を基に自動で削孔を行う。自動削孔開始後は、図-2 に示す手順で削孔を行う。自動削孔開始後は、設定した削孔位置まで移動する。まず、削孔ビットを回転させずに壁に削孔ビットが当たるまで削孔方向へ電動ハンマードリルを搭載したスライドテーブルが移動することで壁と削孔ビット間の距離を自動計測する。これにより、削孔深さの精度向上を図っている。次に、削孔ビットを回転させ削孔を行い、次孔がある場合は、同様の手順で削孔を行う。

自動削孔中に、事前の鉄筋探査で把握できなかった鉄筋等に接触した際は、削孔速度の変化から自動でその削孔を中止し、次の孔を削孔するように制御している。これにより鉄筋の損傷を極力抑制することができる。

2.4 自動削孔装置の削孔計画

図-3 にタッチパネルの自動削孔画面を示す。削孔計画は、孔毎に昇降位置、走行位置、削孔深さを設定する。削孔計画は、自動削孔装置の制御盤のタッチパネルで作成するか PC で作成した Excel ファイルを無線（Wi-Fi）により制御盤に転送する。

図-4 に削孔計画の基準と座標の指定方法を示す。削孔計画は、施工開始位置からの相対距離を入力する。走行方向・昇降方向の 2 方向については、最初に自動削孔する位置を原点として座標を入力する。1 つの削孔計画が終了するまで同じ原点として座標値を指定する。削孔深さは、壁表面を基準と

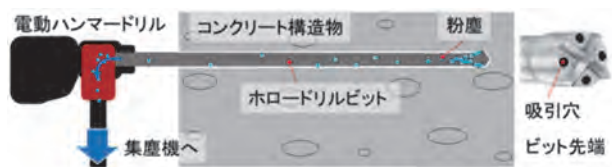


図-1 ホロードリルビットの集塵概念図

表-1 自動削孔装置の適用条件

区分	項目	制限値または施工範囲(mm)	備考
施工条件	幅	2,270 以上	削孔対象と障害物の間で作業する場合
	高さ	2,265 以上	天井のある場所で作業する場合
	奥行(施工延長)	-	現場施工計画による(レール設置が必要)
仕様	削孔深さ	0 ～ 300	スライドテーブルの稼働範囲
	高さ	735 ～ 2,235	昇降機の稼働範囲
	奥行(施工延長)	1,500×n	レール1.5m/本を施工延長に合わせて設置

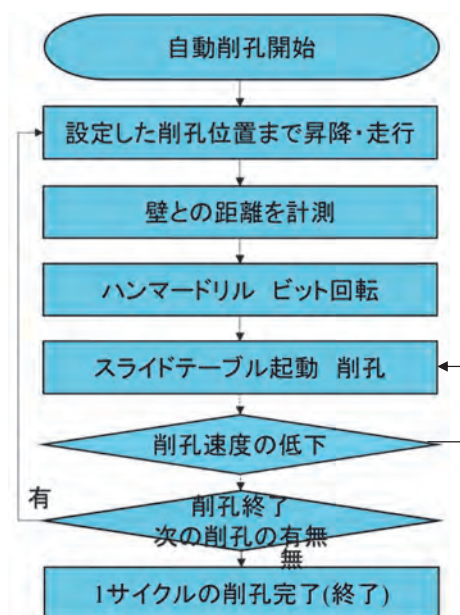


図-2 自動削孔の動作フロー

番号	昇降位置	走行位置	削孔深さ	作業状況
1	1200	160	0	未施工
2	800	160	500	未施工
3	400	160	1000	未施工
4	0	0	0	未施工
5	0	0	0	未施工
6	0	0	0	未施工
7	0	0	0	未施工
8	0	0	0	未施工
9	0	0	0	未施工
10	0	0	0	未施工
11	0	0	0	未施工
12	0	0	0	未施工
13	0	0	0	未施工
14	0	0	0	未施工
15	0	0	0	未施工
16	0	0	0	未施工
17	0	0	0	未施工
18	0	0	0	未施工
19	0	0	0	未施工
20	0	0	0	未施工
21	0	0	0	未施工
22	0	0	0	未施工
23	0	0	0	未施工
24	0	0	0	未施工
25	0	0	0	未施工

図-3 自動削孔画面

してそこからの削孔長を指定する。

施工日時、削孔長、昇降量、走行量、鉄筋接触の有無などの削孔結果は自動的に記録される。

3. 自動削孔装置の現場適用

3.1 適用現場の施工条件

自動削孔装置の適用対象は、図-5 に示す下水道処理施設の放流渠における、耐震補強工事の増厚工法に伴う、ずれ止めアンカー設置のための挿入孔の削孔作業である。内空幅 2.5m、内空高さ 3.0m の放流渠内で、延長 20m の両壁面に削孔径 $\phi 16\text{mm}$ と $\phi 25\text{mm}$ の削孔を各々計 198 孔行った。

自動削孔装置本体と機器台車を写真-3 に示す。現場適用前の自動削孔装置は、制御盤と装置本体が一体型であり、現場の内空に収まらなかった。そこで、制御盤と装置本体を分割することで小型化し、装置本体が分電盤や集塵機などの機器を搭載した機器台車をけん引する構造に改造した。

削孔深さは、事前実験での結果を考慮し、設定値を現場の設計値+10mm 程度とし、削孔径 $\phi 16\text{mm}$ が 115mm、削孔径 $\phi 25\text{mm}$ が 165mm で削孔計画を設定した。

写真-4 に施工面の状況と削孔間隔を示す。自動削孔装置を適用した放流渠内部はウォータージェットによる目荒らしを実施済みの壁面であり、粗骨材が露出している。

削孔計画における移動量は、昇降方向が 800mm、走行方向が 200mm を千鳥配置となるように設定した。走行方向の累積誤差を考慮し、1 サイクルあたり 10 孔（施工延長 1m 分）の削孔計画を 20 サイクル作成し、走行方向の基準位置をサイクル毎にリセットさせて適用した。

3.2 適用結果

写真-5 に放流渠内での自動削孔状況の適用状況を示す。隔壁が削孔径 $\phi 16\text{mm}$ で 198 孔、側壁が削孔径 $\phi 25\text{mm}$ で 198 孔を削孔した。施工時間は削孔径にかかわらず各壁を約 6 時間 30 分で施工完了した。この時の作業人員は、自動削孔装置の削孔計画の作成と周囲の安全確認で 1 名である。

鉄筋接触時には、削孔を中断して、次の削孔位置へ自動で移動しており、計画した制御通りに動作したことを確認した。

(1) 施工精度

削孔深さの施工精度を表-2 に示す。設定値に対し、ノギスにより計測した出来形（実測値）との差を確認した。削孔深さは設定値に対して絶対平均 3mm 程度であり、最小-8.3mm～最大 6.0mm の削孔深さとなった。削孔深さは、設定値よりも浅いものもいくつかあったが、事前の性能確認実験結果を考慮して、設定値に対し約 10mm 深い設定値とすることにより、設計値以下となるものはなかった。

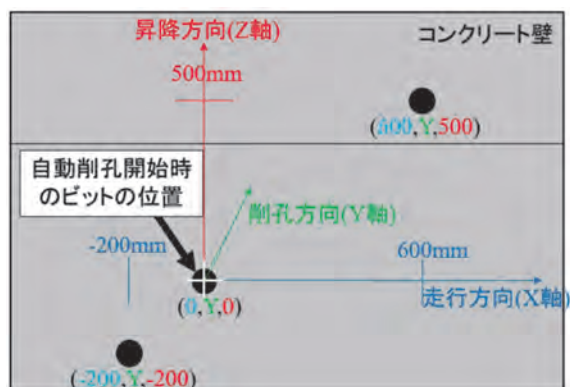


図-4 削孔計画の基準点と座標の指定方法

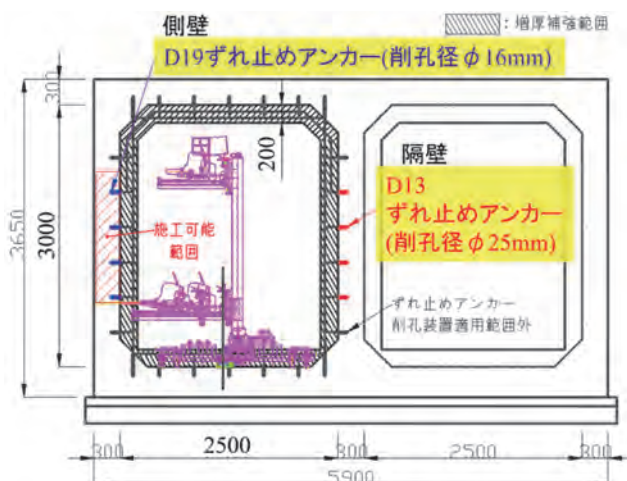


図-5 適用した放流渠の断面



写真-3 装置本体と機器台車の配置状況

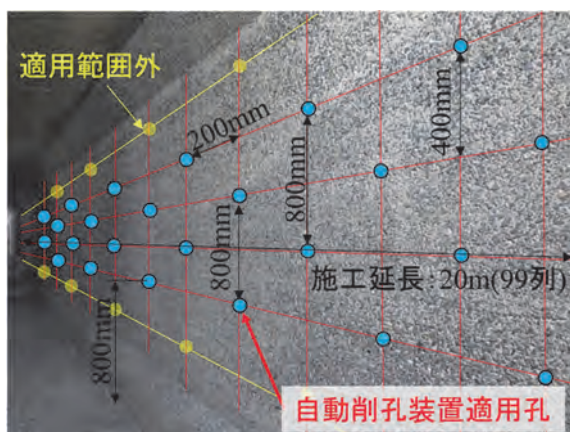


写真-4 適用壁面状況と適用箇所

表-3 に自動削孔装置の移動精度を示す。設定値に対し、トータルステーションにより計測した孔の位置から算出した昇降量および走行量との比較を行った。昇降方向は、削孔径 $\phi 16\text{mm}$ 、 $\phi 25\text{mm}$ とも設定値に対して絶対平均 5mm 程度、走行方向は設定値に対して絶対平均 11mm 程度、削孔径 $\phi 25\text{mm}$ では 7mm 程度であった。削孔径が小さく剛性が比較的低い $\phi 16\text{mm}$ の走行方向の位置精度が削孔径 $\phi 25\text{mm}$ に比べ少し低かった。これは、ホロードリルビットが削孔時に壁に接触した際に、目荒らしによりコンクリート表面に露出した粗骨材でビット先端が滑る場合が見られ、誤差が比較的大きくなった一因と思われる。

(2) 施工効率と作業環境

自動削孔装置を用いた場合の平均削孔速度は、削孔径 $\phi 16\text{mm}$ が 5.2mm/s、 $\phi 25\text{mm}$ が 4.1mm/s であった。10 孔連続削孔における移動時間も含む削孔時間は、削孔径 $\phi 16\text{mm}$ が平均 8 分 53 秒、 $\phi 25\text{mm}$ が平均 12 分 8 秒であった。

施工効率は、人力施工による削孔の場合、トンネル全断面の平均で 175.5 本/人日、自動削孔装置による施工の場合、今回の適用孔数の平均で 198 本/台日となり約 13%の施工効率の向上がみられた。ただし、自動削孔装置では事前のレール敷設作業で今回は 20m を 2 人で半日程度要した。本適用では施工延長が 20m と比較的短かったが、適用距離および適用本数が増えれば、レール敷設作業を含めても本装置により効率的に施工を行えると考ええる。また、立ち馬上の削孔作業と比較した場合は、レール設置を含めても自動削孔装置の方が人力施工に比べ効率的であった。今後は、レールの敷設作業の効率化を図っていきたい。

作業環境については、自動削孔中はホロードリルビットおよび集塵機による吸引により、粉塵の飛散はみられず、作業環境の改善がみられた。

4. おわりに

下水道処理施設の放流渠の耐震補強工事におけるずれ止めアンカーの削孔作業に小径用自動削孔装置を適用し、以下を確認した。

- ・削孔作業の労力の低減
- ・人力施工と同等以上の施工効率
- ・削孔深さ、移動精度は所要の精度で施工可能

今後も、自動削孔装置の現場適用を積極的に行い、作業の省力化、効率化を図るべく、ブラッシュアップを行いたいと考える。

本装置の開発に当たっては、奥村機械製作株式会社に多大な協力を受けた。ここに改めて謝意を表します。



写真-5 自動削孔装置の自動削孔状況

表-2 自動削孔装置の削孔深さ精度

	単位	削孔径： $\phi 16\text{mm}$	削孔径： $\phi 25\text{mm}$
絶対平均	mm	2.5	3.1
最小値	mm	-8.3	-7.2
最大値	mm	6.0	2.1

表-3 自動削孔装置の移動精度

	単位	削孔径： $\phi 16\text{mm}$		削孔径： $\phi 25\text{mm}$	
		昇降	走行	昇降	走行
絶対平均	mm	4.4	11.4	5.1	6.9
最小値	mm	-9.0	-23.0	-8.0	-16.0
最大値	mm	19.0	32.0	17.0	24.0

参考文献

- 1)川澄悠馬，三澤孝史，西山宏一，有川健，山口治，石井敏之，栗本雅裕：小径のアンカー孔を対象とする自動削孔装置の開発，土木学会・土木建設技術発表会 2020, 2021.2
- 2)有川健，三澤孝史，西山宏一，石井敏之：既設コンクリート構造物のあと施工せん断補強に伴う削孔作業に適用する自動削孔装置の開発，令和2年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，2021.12, pp.149-154
- 3)田島鉄朗，三澤孝史，加藤清孝，川澄 悠馬：小径のアンカー孔を対象とする自動削孔装置の実施工への適用，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，2022.9, VI-665

29. 道路維持除雪機械等の技術開発成果活用状況について

国土交通省 総合政策局

公共事業企画調整課 施工安全企画室

和田 直也

1. はじめに

我が国の社会インフラは「老朽化の進行」、「激甚化する風水害」、「切迫する大規模地震」に加え「人口減少・少子高齢化等による将来の技術者不足」等様々な問題に直面している。

このような問題を抱える中、除雪体制を支える除雪車オペレータ等の担い手の減少かつ高齢化は深刻な状況にある。

北海道開発局が主催する産学官が連携し技術開発を行うプラットフォーム「i-Snow」における統計では、除雪車のオペレータに義務付けている「除雪機械技術講習会」の参加者が平成17年に2,422人の参加者に対して、平成27年では1,325人の参加者となっており、平成17年当時と比べオペレータが約55%程度となっている。

さらに、講習会参加者の中で60歳以上の割合に着目すると平成17年では全体の5.7%に対して、平成27年では全体の16.3%と高い。

また、近年多く発生している線状降水帯による長期間の大雨やゲリラ豪雨により、斜面崩落・土砂災害被害が多発している。令和4年8月の大雨では北日本や北陸地方を中心に広い範囲で大雨となり、総雨量が多い所で800ミリを超えるなど各地で記録的な大雨となった。このような激甚化する風水害による被害が生じた際、早急な復旧作業が必要となるが、災害直後の被災現場は二次災害等の危険もあり、安全な復旧作業が困難を極める場面も多いという課題がある。

上記の社会的課題を受け、国土交通省では、各地方整備局等が「コスト・安全性・作業性・担い手不足・迅速な災害対応」などの技術的諸問題を解決するために様々な技術開発に取り組んでいる。

本論文では、道路維持除雪機械等における技術開発と導入事例について紹介する。

2. ロータリ除雪車の多機能化

(ロータリ除雪装置・プラウ装置・路面清掃装置)

2.1 ロータリ除雪車(多機能型)【コスト縮減】

安全かつ円滑な冬期間の道路交通を確保するために、新設除雪・路面整正には除雪トラック、拡幅除雪にはロータリ除雪車を稼働させる等、同一工区において複数の機種を配置する必要がある。

しかし、複数機種の配置には多大な機械購入費、維持管理費が必要となる。そこで、これまで専用車として導入してきた除雪トラックとロータリ除雪車について、各々の機能を兼ね備えた新型のロータリ除雪車(多機能型)の開発を北海道開発局にて実施し、導入を進めている。¹⁾

(導入例:北海道開発局12台、東北地方整備局1台、北陸地方整備局1台、中国地方整備局1台、民間事業者1台)

当該機械は、ロータリ除雪車をベースとし、ロータリ除雪装置とプラウ装置を付替えることでプラウ作業及び路面整正作業の一次除雪作業が可能となる多機能型除雪機械である。ロータリ除雪装置とプラウ装置は、オペレータ2名作業にて10分以内での簡易着脱が可能で機構を有している。(図-1)

コスト縮減効果としては、機械を15年使用した場合に既存機械2台の組み合わせと比較して購入費と整備費計で約24%のコスト縮減効果を見込むことが可能である。



図-1 ロータリ除雪車(多機能型)

2.2 ロータリ除雪車(路面清掃装置)【コスト縮減】

積雪寒冷地では、道路維持機械と除雪機械は各々半年程度しか稼働出来ない実態にある。各々の機種の配置には多大な機械購入費、維持管理費

が必要となるため、既存機械の通年利用による機械経費のコスト削減を図ることを目的に、ロータリ除雪車のアタッチメントとして路面清掃装置を北海道開発局にて開発し、導入を進めている。²⁾(図-2)

(導入例：北海道開発局 5 台)

ロータリ除雪装置と路面清掃装置を付替えることで、夏は路面清掃車(ブラシ式)として、冬はロータリ除雪車(2.2m級)として通年で活用することでコスト削減が可能となる。

コスト削減効果としては、機械を15年使用した場合に既存機械2台の組み合わせと比較して購入費と整備費計で約20%のコスト削減効果を見込むことが可能である。

【仕様概要】

○路面清掃装置

- ・型式 ブラシ式, フロントリフトダンプ式, 両ブラシ式, 散水機能付
- ・最大清掃幅 3, 000 mm
- ・ホッパ容量 1. 0 m³
- ・最大積載量 2, 400 kg
- ・水タンク容量 900 L

○ロータリ除雪装置

- ・型式 2. 2 m級, ホイール・2ステージ式



図-2 ロータリ除雪車(路面清掃装置)

3. 除雪作業ガイダンス装置・除雪作業自動化装置

除雪作業にあたっては、車両を走行させつつ、周囲の安全確認、除雪装置の操作をする必要がある。これには長年の経験により、特定の場所での操作や、除雪作業時のエンジン音、機械の挙動を感じながらの操作など熟練技術が必要となる。

しかし、近年熟練オペレータが不足している状況にあるため、その対策として、ICT 技術を用いた除雪作業ガイダンス装置を凍結防止剤散布車へ、除雪作業の自動化装置(以下、MC 化)を除雪トラック、除雪グレーダ、ロータリ除雪車、小形除雪車

に対して機種別に技術開発し、実証試験を行っている。

除雪作業においては、除雪車の「運転手」と周囲の安全確認と除雪装置の操作を行う「助手」の熟練技術者2名体制で実施しているが、除雪作業の自動化技術を取り入れることで、運転手1名体制(ワンマン化)での作業が可能となる。

本論文では一例として、凍結防止剤散布車のガイダンス装置、除雪トラックの MC 化について紹介する。

3.1 凍結防止剤散布車(除雪作業ガイダンス装置)

【作業性向上、担い手不足解消】

本ガイダンス装置は、散布の自動化を目指し、その先駆けとして技術開発を実施したガイダンス装置である。

あらかじめ登録した散布計画区間に基づき、散布車稼働の際に運転室内のタブレットへ散布計画区間の開始・終了位置、および現在の散布装置の設定(散布量、散布幅)を画面表示と警告音にてガイダンスするものである。(図-3)

散布開始位置および終了位置は GPS 測位による車両位置の把握と散布ルートから判断し、ガイダンス装置へ表示させる。

(導入例：北陸地方整備局 21 台)



図-3 凍結防止剤散布車のガイダンス装置

3.2 除雪トラック(除雪作業 MC 化)

【作業性向上、担い手不足解消】

除雪トラックには、道路脇に雪を寄せる「フロントプラウ」、路面の圧雪を削ぎ取る「グレーダ装置」、交差点などに雪を残さないように一時的に雪を抱え込む「サイドシャッタ」など各種除雪装置がある。

除雪作業には上記3つの装置レバー操作と運転を同時に行う複雑な作業が必要となる。加えて、除雪トラックの作業速度は時速25～30kmと速く、除雪オペレータは一般通行車両や沿道の住民

に最大限の注意を払いつつ、周囲の安全確認をしながら除雪作業を実施する必要がある。

これに対して、除雪作業の MC 化を図ることによりオペレータは運転に注力することが可能となる。³⁾

除雪トラックの MC 化は、フロントプラウの上下、進行角可変、グレーダ装置の上下、伸縮、サイドシャッタの開閉などを想定している。(図-4)

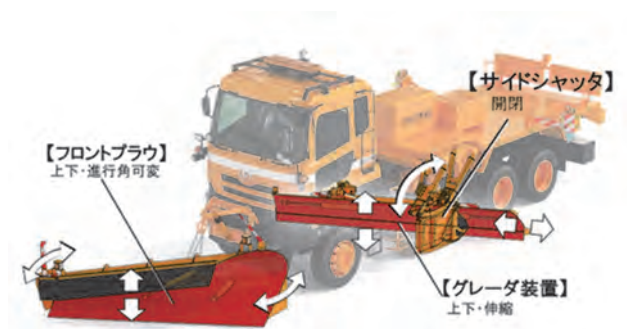


図-4 除雪トラックの MC 化

除雪作業の MC 化の例として、フロントプラウは交差点部に雪を残さないように角度を変更し雪の前送り(図-5)、グレーダ装置は付加車線など路肩が広い箇所に差し掛かった際に装置を伸ばし除雪幅を確保(図-6)、交差点部等でグレーダ装置のサイドシャッタを閉めて雪を抱え、雪の前送り(図-7)をするなどの MC 化を図っている。

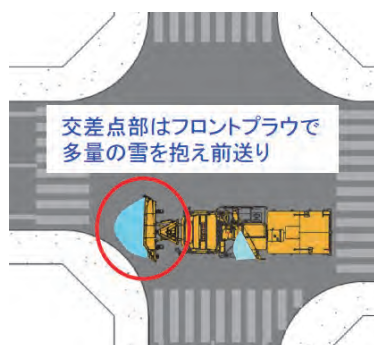


図-5 フロントプラウの MC 化



図-6 グレーダ装置の MC 化

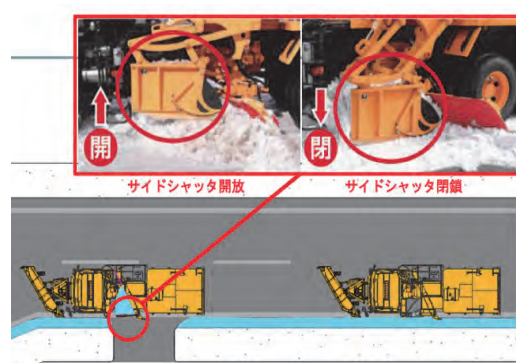


図-7 サイドシャッタの MC 化

4. バックホウへの簡易遠隔操縦装置の導入事例

九州地方整備局では2016年に汎用のバックホウへ装着可能な簡易遠隔操縦装置(以下、ロボ QS)を開発している。⁴⁾災害により斜面の崩落等が発生した場合の応急復旧作業において、二次災害等の危険性から搭乗操作による重機作業が行えない状況下で通常のバックホウにロボ QS を搭載し、遠隔操作式にすることで危険地帯の作業を実施している。(図-8, 図-9)



図-8 操縦席へのロボ QS 設置状況



図-9 ロボ QS の遠隔操作状況

ロボ QS の遠隔操作機能は汎用バックホウの走行操作とブーム、アーム、旋回を含めたバケット操作に加え、近年アタッチメントとして装着可能な巨石を砕くブレーカーや倒木を除去する破碎機も開発され高機能化が図られている。(図-10)

(導入例:北海道開発局1台、東北地方整備局1台、中国地方整備局2台、四国地方整備局1台、九州地方整備局5台)



図-10 ロボ QS のアタッチメント例

簡易遠隔操縦装置のこれまでの稼働実績を示す。
(表-1)

表-1 簡易遠隔操縦装置の稼働実績

年度	出動先	災害名等
平成12年度	大分県	朝見川緊急災害復旧
平成16年度	新潟県	新潟中越地震
平成18年度	沖縄県	中城村法面崩壊
平成19年度	鹿児島県	有村川河川閉塞除石作業
平成22年度	鹿児島県	南大隅町土石流
平成24年度	鹿児島県	国道220号土石流災害
平成28年度	熊本県	熊本地震
平成29年度	大分県	豊後大野市地すべり
平成29年度	宮崎県	国道220号斜面崩壊
平成30年度	大分県	中津市耶馬溪町山崩れ
令和元年度	鹿児島県	鹿児島市法面崩壊
令和3年度	島根県	出雲市法面崩壊
令和4年度	北海道	千歳市岩盤崩壊

また、災害時だけでなく職員向けの研修や施工者向けの遠隔操縦訓練等においてロボ QS の設営訓練、稼働訓練を実施し、実際の災害復旧作業で活用可能な体制を整えている。(図-11)



図-11 ロボ QS の設営・稼働訓練の実施状況

5. おわりに

地域の生活や安全、経済活動を支えるために社会インフラの整備・維持管理は必要不可欠である。

建設業界における担い手不足の深刻化や激甚化する自然災害、逼迫する財政状況など、社会的課題は年々変化してきている。

国土交通省では、今後の現場ニーズの変化を注視しながら、引き続きコスト縮減を意識しつつ最先端の技術開発へ取り組み、地方公共団体などの行政機関へ開発成果の PR をしながら普及促進を図り社会的課題解決に向けて努めていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省 北海道開発局 事業振興部 機械課 防災・技術センター技術課：多機能型ロータリ除雪車の開発ーロータリ除雪車と除雪トラックの兼用化ー，建設マネジメント技術 2006.1号
- 2) (株) 土木研究所寒地土木研究所 中村隆一，住田則行，国土交通省北海道開発局 佐々木憲弘：ロータリ除雪を通年活用するアタッチメント式路面清掃装置の開発，日本道路会議論文集 2011.29巻
- 3) 国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課 施工安全企画室 小野寺敬太：雪対策の課題に取り組む除雪機械の自動化ー除雪作業のDX最前線ー，ゆき 2021.6 No.123
- 4) 国土交通省 九州地方整備局 九州技術事務所 技術活用・人材育成課 施工調査係 岡島朝治：ロボ QS (簡易遠隔操縦装置) の高機能化について，公益自主事業 (九州技法) 第69号2021.09 論文

30. 施工機械・設備の WEB 点検管理システム

重大災害撲滅と業務効率化に向けて

鹿島建設株式会社

青野 隆
伊勢 卓矢
○ 是永 明日香

1. はじめに

従来、作業開始前点検は機械を運転する作業員により点検結果を紙の点検表に記入し、点検結果を記入した点検表を職長や元請職員へ提出し、回覧後にファイリングして保管する管理手法が長らく行われてきた。重大災害撲滅のためには、確実な点検の実施と結果の確認が重要である。しかしながら、確認のためだけに稼働中の建設機械を停止させて点検表を確認することは難しい面があり、元請職員による点検状況確認が不十分であるケースもあった。また、作業開始前点検は日々行われ記録が蓄積されていくものの、点検時の整備内容や部品交換等の情報を統計的に把握・分析して、機械管理レベルの向上による稼働率と生産性の向上に利用されることはなかった。

そこで、確実な点検の実施および結果の確認によって点検不備に起因する死亡災害等の重大災害の撲滅を図ること、システムによる業務効率化を図ること、機械管理レベルの向上を図ることを目的に、施工機械・設備の WEB 点検管理システム「e-Tenken®」を開発した。

2. 開発概要

2.1 開発の経緯

点検結果の入力をスマートデバイス等で Web 化した既存製品を調査したところ、主流は建設現場とは異なる製造業工場等固定設備を対象とした製品であった。建設業は製造業と異なる特有の機械使用方法があり、施工ステップ毎の機械の頻繁な入替え、それに伴う短期間の使用や、同一の機械の複数の協力会社による共用使用、さらに点検者の頻繁な変更、機械仕様による固有の点検項目など従来製品の想定条件に合致しておらず、使い勝手や機能面から建設業界では普及しなかった。そこで、建設業の使用方法に対応できる IoT 技術を利用した点検システムを新たに開発することとした。

2.2 開発のコンセプト

開発のコンセプトは下記に示す 3 つである。

(1) 形骸化防止

現地でスマートデバイスを用いて予め機械に貼り付けてある QR コード読取後に点検を開始する仕組みとし、写真や動画による記録保管機能により、確実に現地で点検を実施するように促す。

(2) 情報の共有化

点検結果をクラウドへ点検完了直後に保存し、情報の共有化を図る。職長や元請職員は現地に赴くことなく、PC やスマートデバイスにより点検結果を確認できるようにする。

(3) 未点検時の警報機能

点検結果をデジタル化し、未点検時の警報や運転開始時の元請職員による承認機能を採用することにより、従来の紙点検表では不可能であった点検漏れや未点検状態での機械や設備の稼働を確実に防止する。

2.3 開発環境の選定

システムを開発するにあたり、利用対象を鹿島社員のみならず JV 構成会社社員や協力会社職員作業員まで幅広く設定する必要があり、使用するスマートデバイスは Android、iOS、Windows タブレットに対応し、PC でも使用可能など幅広い端末で利用できることを条件とした。



図-1-1 点検システムの使用イメージ

3. 現状の課題

3.1 点検実施の確認

重大災害撲滅のためには、確実な作業開始前点検の実施と結果の確認が重要であるが、従来の紙手法では元請社員や協力会社職長が、稼働する機械や設備が点検されたか確認することは現地に行き稼働中の重機を停止して点検表を確認する、またはオペレータに電話して確認するなど作業を一時停止させて確認する必要があった。このため、毎日かつ全機械・設備の確認をすることは困難であり、点検漏れがあった場合に気が付かないケースもあった。

また、機械を実際に確認せずに点検表のみを記入することや、複数日の点検表をまとめて記入する等の不正行為を防止するため、種々の対策や指導が実施されているものの決定打とはなにくかった。

3.2 書類管理

作業開始前点検をはじめとした点検表の帳票管理は繰り返しのルーティンワークである。作業開始前点検を例にすると、月初めに機械の機種ごとに異なる一月分の点検表を印刷し、事前に配布する。点検者は日々点検した結果を点検表に記入、担当者はその結果を定期的に確認、月末に点検表を回収した後所内にて回覧し、ファイリングして保管する業務がある。

しかしながら搬出入が頻繁な機械に対して、点検表の配布忘れや、降雨等による文字の滲み、記入後の回収忘れ、紛失や破損なども発生していた。

また、提出書類の確認において提出状況、書類の不備・不足の確認、回覧状況、情報の更新が適切になされているかなど多くの確認項目があり担当者が繁忙の場合、処理の遅延や残業となり、回覧中に書類を紛失する事例も発生していた。

新たに機械が現場に搬入された際に最初に作られる帳票が、持込機械等使用届及び持込機械受理証である。従来は Excel や手書きで作成、印刷、発行がほとんどであり、持込機械等使用届に記載してある事項をもとに持込機械届受理証を作成するため、全く同じデータを重複して入力・記入することは多くあった。

また、持込機械使用届の情報を元に定期自主検査日の確認及び期日前の点検実施は機械管理で重要な業務であるが、現場規模が大きく機械台数が多くなれば機械管理業務は煩雑になり、確認に時間を要し、ミスも発生するという課題があった。対策として持込使用機械届のデータを点検期日や現場退場日を管理する機械管理一覧表を別帳票として作成して管理する現場が多いのが実状である。

4. システム導入による解決策と導入効果

4.1 点検実施の確認

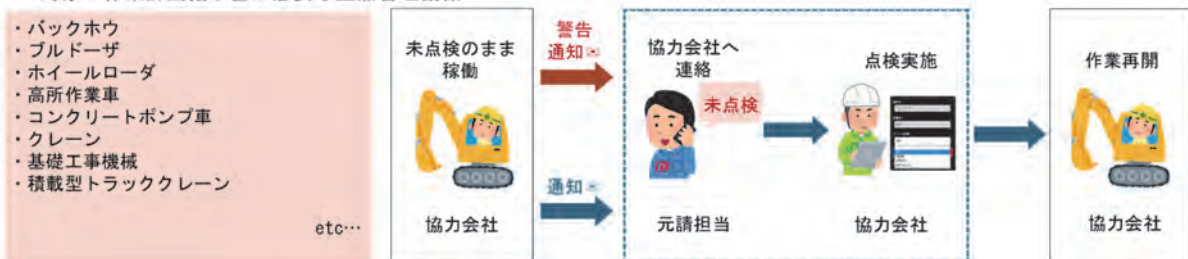
従来の紙手法では難しかった点検がされたかどうかをシステム上で自動的に確認できる機能を開発し、作業開始前点検が確実に実施される仕組みを構築した。開発の要は、図-4-1 に示す未点検の機械がある場合にメールによる警報自動通知を行う機能、あらかじめ重要と位置付けた設備や機械の点検完了を元請職員が確認しない限り稼働しない運転開始承認制の2種類である。以下に詳細を説明する。

4.1.1 未点検時警報アラート通知の仕組み

未点検時の機械運転防止を目的としており、①作業開始時間になったにも関わらず使用予定の機械が未点検の場合、②未点検のまま一定時間以上重機を稼働させている場合のいずれかが発生する

1. 未点検時警報アラート▶未点検を早期発見

対象：作業計画指示書が必要な重点管理機械



2. 運転開始承認制▶点検しないと動かせない

対象：重要設備・機械



※CSGとはCemented Sand and Gravelの略で現場発生土にセメントを混ぜた混合材

図 4-1 重大災害撲滅対策システム構成図

と職長と元請担当社員、機電安全責任者（当社にて任命している機械安全管理の責任者）等へ自動メール通知し、点検を促すものである。

なお、未点検時警報アラート通知の対象は重大災害へつながる可能性の高い作業計画指示書を必要とする機械とした。

4.1.2 運転開始承認制の仕組み

運転開始承認制とは、災害が発生した場合に死亡災害に直結する等、安全管理上重要と位置付けた設備や機械を対象にした未点検時警報アラート通知よりも更にレベルの高い未点検防止策である。重要な設備や機械の点検完了を元請職員が承認しない限り機械が稼働できない仕組みであり、未点検状態での稼働を確実に防止できる。

機械等の点検が「機械の停止状態での点検」と「機械を運転させながら行う点検」の2種類があるが、「機械の停止状態での点検」の完了を元請職員が承認しない限り稼働できない仕組みを構築した。

4.2 書類管理

点検データをシステム化して管理することにより機械管理や点検に関する帳票管理業務の効率化を図っている。持込機械等使用届・持込機械届受理証の例について説明する。持込機械等使用届作成（図-4-1、図-4-2、図-4-3）から、元請への提出、持込機械届受理証発行（図-4-4）までをシステム上において一括で行うことができる。

図-4-1 持込機械届作成画面

管理番号	名称	機種・性能	メーカー/型式	持込会社	使用会社	バックホウ	ドライブレコーダー
0121	DT21						
04-572	ラフタークレーン	QR-600N-1	クダジ	佐藤製作所	佐藤製作所	設置済み	設置済み
03-745/カ70700	クローラークレーン	70 t 吊り	コベルコ	西マルカ	高田工業	設置済み	未設置
Yam7C7K14	4.9tC	4.9 t 吊り	新島 (CC14-)	カナモト	高田建設	設置済み	
2V-47	0.25m3 (No.152296)	0.25m3, 1.27馬力	SK750A-5	2V (白)	アグリー	設置済み	対象外
2V-46	もくろく (2V) 1794	200kg積載	YUWA-100-12	2V	松本工業	対象外	対象外
2V-42	4.9tC (No.161235)	4.9 t 吊り	LC1380A-8	2V (白)	アグリー	設置済み	対象外
2V-35	フォークリフト (46-1528)	定荷重900kg	BFQ10	2V (白)	高田工業	対象外	対象外
2V-43	上置ブレーカ (243370)	フルカ290 k g	F X25	2V (白)	アグリー	対象外	対象外
2V-42	0.1m3 (No.149889)	ガンター	V500	2V (白)	アグリー	対象外	対象外
2V-41	4.1 t (No.1552200)	4.1 t 吊り	F800	2V (白)	アグリー	対象外	未設置

図-4-2 自動生成される重機管理一覧表

図-4-3 持込機械使用届

図-4-4 QRコード付き受理

定期自主検査等の定期点検は、レンタル会社やメーカー等の現場外の会社へ依頼することも多く、点検期日の管理は重要となる。当システムでは次回点検予定日を入力すると、カレンダー形式で点検日一覧を把握できるため、点検状況の確認は容易となる。また手配忘れ防止策として、点検日が近づくと担当者へメールにて自動通知される。

システム導入の効果として、すべての情報がシステム上において共有され、元請と協力会社間の書類提出等の業務は削減された。また、レンタル会社から提出される書類についてもシステム上に提出することにより、書類提出や修正に要する時間は減少し、最新書類を常に共有できる状態となつ



図-4-6 点検結果入力画面

ており、大幅な業務効率向上を達成した。

図-4-5 に従来方法との業務削減の比較例を示す。導入現場の実績によると元請職員が毎月16時間かかっていた業務が4時間となり、75%削減が可能となった。元請職員以外にも協力会社職員による書類の提出、承認後の受取、機械所有者による特定自主検査記録の提出などの業務も削減された。

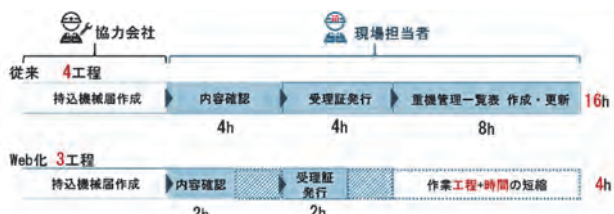


図-4-5 持込機械等使用届に関する業務削減例

4.3 作業開始前点検業務の効率化

重機に貼り付けた持込機械届受理証のQRコードを読み取ると自動的に対象機械の点検項目を表示する。点検者はQRコードを読み取り後に点検結果を入力するため、必ず現地点検が必須となり、形骸化を回避できる。また、QRコードを読み取ると、該当機械の過去の点検記録や点検の要点が図示されて点検ポイントを確認できるようになっている。各点検項目に対し、「良好」「要修理」「修理済み」と結果を入力するだけでなく、写真添付や部品交換記録も入力できるため、重機の状態を関係者へ遅滞なく、かつ周知漏れすることもなく情報共有は可能となる。(図-4-6、図-4-7)

点検項目	管理番号検索	機械名	機械・性能	確認の有無	点検結果	点検事項
点検済	CP-12	無人運搬機(CP)12	0.16t	点検済	表示する	
点検済	jeune	山形運搬機		点検済	表示する	
点検済	FC3	タワークレーン	240cm	点検済	表示する	点検済
点検済	080002	電気設備		点検済	表示する	点検済
点検済	080004	ベルトコンベヤ		点検済	表示する	点検済
点検済	080003	SF6ガス		点検済	表示する	点検済
点検済	080002	ベルトフィーダ		点検済	表示する	点検済

図-4-7 点検結果確認画面

また、月末には一月分の点検結果をまとめた帳票の出力(印刷・PDF保存)が可能であり、従来通りの回覧による運用にも対応している。システム導入の効果として、必ず現地で点検を実施し、必要に応じ点検記録として写真を残すなど点検の形骸化を防ぐことができる。点検を紙への手書きからシステム化とすることにより、点検表の回収が不要となり回覧を効率化することができる。図-4-8に示す従来方法との業務削減の比較例では、元請職員が毎月23時間かかっていた業務が、3時間となり、87%削減となった。さらに元請職員以外に協力会社職員も点検表の配布、回収、点検状況の確認等の業務は削減される。

当システムは建設業特有の機械の使用状況にも対応している。

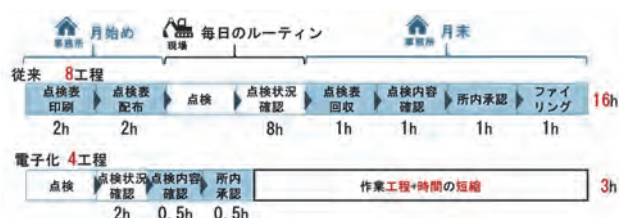


図-4-8 作業開始前点検に関する業務削減例

(1) 複数の協力会社、点検者の変更

建設業の特徴的な機械使用方法として、1台の機械を複数の協力会社にて共通で使用することがある。都度、点検者の変更となるが、異なるスマートデバイスにより点検される状況においても、当システムでは、過去の点検記録の情報が、機械毎に一元的に管理され、確実な点検管理ができる。

(2) 現場独自の点検項目の選定

点検表には、あらかじめ用意された社内統一点検表の項目に加え、標準的な機械構造と異なるタイプなど、現場独自の点検項目に変更する必要があるため、従来の紙様式と同様に、当システムでも現場にて任意に点検項目を追加や変更が可能な柔軟性の高い仕様とした。

4.4 管理部門への定期点検書類提出

当社では電気設備に関する月例点検表を現場から各地域の管理部門（支店）に提出をしている。管理部門の担当者は提出された書類の確認や管理、未提出現場への提出を促すために多くの手間と時間を要していた。そこで、点検をシステム化したことを活用し、未提出現場を自動でチェック後、未提出の場合は自動で催促メールを送る機能を追加した。また、管理部門にて別途作成していた各現場の提出データをまとめた帳票も自動作成可能である。

電気設備を対象に点検結果を提出、点検結果一覧表を自動生成、月例点検および受変電設備の日常巡視点検結果、期日までに支店へ未提出の場合の催促メールによる自動通知を行うことで現場のみならず支店管理者が行っていた業務を自動化することによって大幅な業務効率化を図った。

4.5 その他の機能

当システムにより構築した元請と協力会社で情報を共有できる仕組みを利用し、点検以外の業務に対しても業務効率を向上させるアプリケーションを開発している。以下に 3 つのアプリケーションの機能について説明する。

4.5.1 クレーン予約管理

社外から調達する移動式クレーンの予約は電話やメール等で行われており、工程変更などによる予定の変更などは突然発生することも多く、元請職員やクレーン会社社員はかなりの時間を費やし、業務多忙となる一因になっていた。また、連絡がうまく伝わらずに予約ミスを発生させることも稀に発生しており、発生した場合は工程に及ぼす影響は無視できないものとなる。そこで点検システムにおいて構築した情報を協力会社と元請で共有できる仕組みを利用し、クレーンの予約管理システムを開発した。

PC やスマートフォンを利用し元請社員がシステム上でクレーン予約情報を入力すると、自動でメールがクレーン会社へ送信され、配車担当者は予約内容を確認し、配車情報を入力する。予約中、予約確定やキャンセルなどに関する情報はカレンダー上に色分けされ一目で確認することができる（図-4-9）。入力された情報は元請やクレーン会社の全員に見える化することにより、クレーン予約忘れ防止や重複予約の回避が成された。日々の打合せや週間工程会議等でクレーンの予約を確認し、作業調整はしやすくなっている。現場の導入効果として、元請担当者のクレーン予約管理に掛かる業務が毎月 4 時間かかっていたものが 1.5 時間、クレーン会社の担当者の業務が毎月 5 時間かかっていたものが 3 時間となり、50%削減が可能となった。

日	月	火	水	木	金	土	日
1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	

図-4-9 クレーン予約確認画面

4.5.2 ヒヤリハット報告

ヒヤリハットは発生すると協力会社職員が報告書を作成し、元請へ提出し、朝礼や昼の打合せで報告書を配布し周知するという対応を行ってきた。問題点として、情報共有されるまでに時間がかかり、配布資料はその後の活用しにくい状況があった。また、スマートデバイス上でチャットツール等を用いて現場内に早期にヒヤリハット情報を共有・展開する方法も行われているが、迅速性は高いものの、情報の件数が多いと情報整理や傾向分析はしにくく、是正状況を管理しにくい面があった。

点検システムで構築した情報を協力会社と元請で共有できる仕組みを利用したヒヤリハット報告アプリを開発した。

報告者はスマートデバイスを用いて現場状況写真をその場で撮影し、ヒヤリハット状況を報告する。報告されたヒヤリハット状況は、現場内の元請職員や協力会社でリアルタイムに報告内容を確認することができ、元請担当者は是正が必要なヒヤリハット事例に対し、対応の指示コメントをすぐさま入力することができる。報告されたデータから同じようなタイプのヒヤリハットの分類や、発生日や発生場所、報告者別等の集計が自動的にグラフ化されて表示される（図-4-10）。

導入の効果として、

- ①写真付きのヒヤリハット情報が提出と同時に遅延なく元請と協力会社で共有されるため周知がタイムリーに行われる。
- ②報告を元にした是正の指示や、その進捗状況を全員が確認でき、他の作業場所においても同様の懸念が無いかな等の確認ができる。
- ③発生日、発生場所、ヒヤリハットのタイプなどの自動集計、グラフ化ができるため、安全教育や注意喚起への利用が容易である。例えば協力会社が検索機能を用いて同種工事でのヒヤリハット抽出し、自社の安全教育等に活用することや自社と他社の傾向の違い等を把握するなど、ヒヤリハットのデータベースとしての活用が上げられる。

導入した現場の一事例では、協力会社も簡単に素早くヒヤリハット報告ができるため、ヒヤリハットの提出件数自体が飛躍的に増加(約3倍)し、従来は報告されなかった軽妙な日々の気づきについても報告がなされるようになった結果、現場の安全管理活動やコミュニケーションを活性化した。



図-4-10 ヒヤリハット集計画面

4.5.3 設備や機械の停止要因分析ツール

機械設備やプラントなどの停止要因を分析して施工方法や設備の改善を行い、稼働率を向上させる試みは従来から行われてきたが、日報からデータの集計作業や分析作業に多大な労力を必要とし、改善活動のために統計的にデータを整理して、改善活動につなげるのは難しかった。このため、経験豊富な職長や職員の感覚的な判断に基づく改善活動となり易く、判断は個人の能力に左右される傾向にあった。

本ツールでは、オペレータが停止した原因を PC やタブレットに直接入力することにより日報を自動的に作成し、入力されたデータを自動的に停止要因毎の停止時間や回数の傾向分析しグラフ表示を行うことができる。これによりリアルタイムで改善活動につなげることが可能となり、改善活動の進捗を早め、改善による効果を定量的に把握することができる(図-4-11、図-4-12)。

当ツールを導入した現場では、当ツール使用前は冬季の施工休止期間に前年度の状況进行分析し、次シーズンからの施工に反映していたため、改善に反映されるまでに時間がかかっていたが、当ツールを使用することで施工しながら改善活動を並行して行い、また、改善による稼働率の変化を見える化されることにより、稼働率を早く改善させることができている。

図-4-11 停止要因入力画面

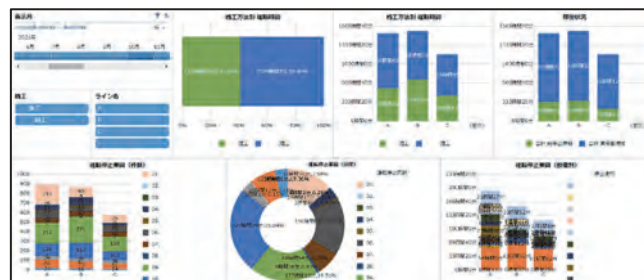


図-4-12 集計グラフ画面

5. まとめ

点検業務は長らく改善されにくかった分野であったが、施工設備や機械の点検業務等を従来の紙による記入から、スマートデバイスを用いて電子化することにより、デジタルデータとして取り扱うことができた。この点検業務等のデジタルデータは情報のリアルタイム共有や二次的な利用を簡単に行うことができるようになったため、点検の確実性や信頼性をシステムの機能により高めて、点検不備に起因する機械や設備の重大災害を減らすことを期待している。

新たな課題として高齢者も多い建設作業従事者のスマートデバイス取扱いスキルの向上や、スマートデバイスの調達方法などがあるが、建設業界においてもスマートデバイス等の IT ツールの利用が急速に浸透していくものと考えている。

また、当システムのベースとなるプラットフォームは自由度の高いクラウドサービスを用いており、管理したい内容を簡単にシステム化し情報を共有化できることから、作業開始前点検以外でも様々な利用方法を提案し業務効率化を図っている。さらに、クラウドサービスを用いてシステム上で共有することにより、現場だけではなく管理部門を含めた様々な業務を効率よく行うことができるため、メニューや機能の拡充を図り、元請職員や協力会社職員の更なる業務効率化も目指している。

将来的に点検表を始めとする帳票の電子化をさらに発展させて、関連する安全書類も含めた完全ペーパーレス化を目指すとともに、最新デジタル技術により収集・蓄積した点検データ、整備データや機械の稼働データを活用して、安全性や生産性をさらに向上させる新たな設備や機械の管理手法を構築していきたい。

31. メッシュ Wi-Fi による映像の伝送に関する実証実験

安藤ハザマ

○ 紫垣 萌
藤本 直也
武石 学

1. はじめに

近年の光学・通信技術の普及に伴い、高解像度な映像を取得する 4K カメラや、広範囲で安定した無線通信環境を構築するメッシュ Wi-Fi 等の通信機器の入手が容易になってきている。

このこともあり、建設現場の施工管理において、定点カメラで施工状況をモニタリングし現場事務所等の遠隔地から現場の様子を確認する事例が増加している。また、現場におけるカメラおよび通信機器のさらなる活用例として、4K 定点カメラ映像を用いて現場の進捗管理を効率的に行うシステム¹⁾も開発されている。

そこで著者らは、定点カメラ映像およびメッシュ Wi-Fi を建設現場へ導入する際の留意点を整理するため、当社技術研究所内に現場を模擬した無線通信環境を構築し、4K カメラ映像を伝送する際の伝送距離や、伝送するデータ量等が映像の閲覧性に与える影響を確認した。

2. システムの概要

構築した通信環境とカメラの配置を図-1 に示す。実験場所の技術研究所は敷地面積約 70,000 m²、鉄筋コンクリート造の施設 8 棟と約 19,000 m²の屋外実験ヤードを有するものである。本実験では約 40m～200m 離れた 5 棟に定点カメラと無線アクセスポイント (AP) を設置することで、3 棟の屋内実験場および屋外ヤードの映像を取得し、現場事務所を模擬した敷地南端の棟 (以下 A 棟) にて一括で記録・閲覧できる環境を構築した。なお、映像の記録には NAS (ネットワーク HDD) を用い、閲覧には IP ビデオ監視システムを用いて別の Wi-Fi ネットワークからの閲覧を可能とした。

3. カメラの選定

3.1 カメラの配置

敷地中央に位置する棟 (以下 B 棟) および敷地北端の棟 (以下 F 棟) には屋外ヤードまでの距離が最大で 100m 近くあることから 4K 解像度の映像

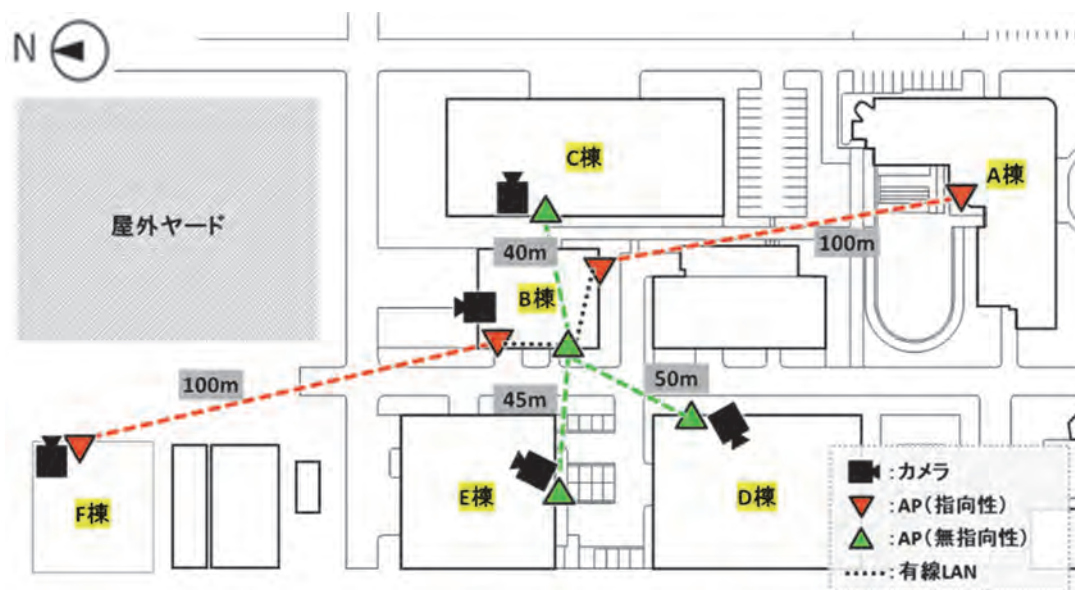


図-1 構築した通信環境とカメラの配置

が取得可能なカメラを設置し、屋外ヤードを2方向から撮影することとした。屋内の映像を取得する3棟（以下C、D、E棟）には、2K解像度の映像を取得するカメラを設置した。使用したカメラの諸元を表-1に、設置状況を写真-1に示す。

3.2 映像の質と使用するデータ量

カメラから伝送される映像のデータ量は、映像の質に伴って増減する²⁾。映像の質に関わるパラメータは複数あり²⁾、本実験では解像度、フレームレート、ビットレートに着目した。

解像度は、画像を表現する画素の密度の値である。イメージを図-2に示す。ある画像を表現するために用いる画素数が多いほど、より精細な表現が可能になる。そのため、解像度が高いほど映像の質は高く、使用するデータ量は多くなる。

フレームレートは、映像1秒間あたりの画像の枚数の値である。ある動きを表現するために用いる画像の枚数が多いほど、動きの滑らかな映像となり、使用するデータ量は多くなる。

ビットレートは1秒間あたりのデータ通信量の値である。通信するデータ量が多いほど、精細さや滑らかさを維持したまま映像を伝送することができる。すなわち同じカメラから伝送された映像でも、ビットレートの大きなものの方が映像の質は良いといえる。4Kカメラにおけるビットレートに伴う画質の変化を図-3に示す。

以上のことから、本実験では5台のカメラのビットレートおよびフレームレートの値と、それを伝送した際の閲覧可否を確認することとした。

4. ネットワークの構築

4.1 Wi-Fi アンテナについて

本実験では5台分のカメラ映像を伝送する無線通信環境を構築した。各APには伝送距離に合わせ、指向性と無指向性の2種類の無線通信アンテナを有するAPを用いた。指向性アンテナは電波を送受する方向が限定されるが、より遠くまで電波が届く。無指向性アンテナは伝送距離が指向性アンテナに劣るが、より広範囲の電波を送受できる。

図-1より、E棟からA棟までの伝送距離が最大



2Mbps



4Mbps



8Mbps

図-3 ビットレートによる画質の変化

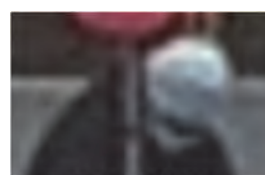
約200mと遠いため、指向性アンテナを有するAPを用いてB棟を中継し伝送することとした。またC、D、E棟で取得した映像は無指向性アンテナを有するAPを用いてメッシュWi-FiでB棟に集約し、E棟の映像と合わせて無指向性アンテナでA棟へ伝送することとした。

表-1 カメラの諸元

カメラ① JVC VN-U178WPR	
圧縮方式	H.264, Motion JPEG
解像度	3840×2160～320×240
フレームレート	最高30fps
カメラ② AXIS P3245-LV	
圧縮方式	H.264, H.265, Motion JPEG
解像度	1920×1080～160×90
フレームレート	(WDRオン) 25/30フレーム/秒 (WDRオフ) 50/60フレーム/秒



写真-1 カメラ設置状況(左:E棟, 右:F棟)



2K解像度



4K解像度

図-2 解像度による画質の変化

4.2 メッシュ Wi-Fi について

メッシュ Wi-Fi とは、複数の AP どうしが網目状に接続され、任意の AP から AP へ情報を伝送できる技術で構成された Wi-Fi 環境である。メッシュ Wi-Fi では電波の中継が容易になるため、コンクリート壁等の障害物を迂回して接続できる等、通信網を簡便に構築できる。

本実験でメッシュ Wi-Fi を用いた B, C, D, E 棟の離隔は最大約 50m となっており、D 棟の AP は窓ガラスを隔てた屋内に設置した。メッシュ Wi-Fi のアンテナ設置状況を写真-2 に示す。

4.3 屋内での映像閲覧環境の整備

集約された映像は、A 棟内の 2 部屋で閲覧できるようにした。いずれの部屋も、AP のアンテナの設置場所とは廊下や壁、扉を隔てた別室であり、うち 1 部屋は階層も異なる。なお、A 棟 AP のアンテナは屋内に設置しており、遮光フィルムを貼付した窓ガラスを隔てて通信を行っていた。

4.4 Wi-Fi のチャンネル設定について

各区間で設定した Wi-Fi のチャンネルを表-2 に示す。A 棟 B 棟間の Wi-Fi 通信はすべての画像データが集約されるため、2.4GHz 帯よりも通信容量が大きい 5GHz 帯のチャンネル³⁾を設定した。また B, C, D, E 棟のメッシュ Wi-Fi についても 5GHz 帯のチャンネルを設定した。

表-2 各区間のチャンネル設定

区間	チャンネル
AB	104,108
BC	116
BD	116
BE	116
BF	11



写真-2
アンテナ設置状況
(B 棟)

合がある」を○、「移動物体の映像が頻繁に不連続となる」を△とした 3 段階で評価した。

5.2 実験結果と考察

(1) 伝送するデータ量と映像の閲覧可否

映像の閲覧状況の実験結果を表-3 に示す。目標ビットレートが 8Mbps を超えると、4K カメラで移動物体の映像が一瞬不連続となる現象が発生した。一方で、フレームレートが 1fps であれば、目標ビットレートが 8Mbps を超えても問題なく閲覧できる結果となった。また、目標ビットレートが 12Mbps に達すると、4K カメラでは移動物体の映像が頻繁に不連続となり、2K カメラでは一瞬不連続となる現象が発生した。カメラに設定した合計のビットレートに対し、実測したビットレートの合計の関係を図-4 に示す。設定したビットレートに比例して実測のビットレートが増加していない理由は、2K カメラが設定した値までビットレートを上げきれていないことが原因であると考えられる。

表-3 実験結果

カメラ設定		観測結果				
フレームレート (fps)	目標ビットレート (Mbps)	4Kカメラ		2Kカメラ		
		B棟	F棟	C棟	D棟	E棟
1	1	◎	◎	◎	◎	◎
	8	◎	◎	◎	◎	◎
10	1	◎	◎	◎	◎	◎
	8	○	○	◎	◎	◎
24	1	◎	◎	◎	◎	◎
	2	◎	◎	◎	◎	◎
	4	◎	◎	◎	◎	◎
	8	○	○	◎	◎	◎
	12	△	△	◎	○	○

◎：良好に閲覧できる

○：移動物体の映像が一瞬不連続となる場合がある

△：移動物体の映像が頻繁に不連続となる

5. 映像伝送の実証実験と現場導入時の留意点

5.1 実験概要

伝送するデータ量と映像の閲覧性との関係を確認するため、屋外に設置した B, F 棟の 4K カメラのビットレート設定値を段階的に変化させた。あわせて、全カメラのフレームレート設定値を段階的に変化させ、その映像を伝送した際の A 棟での閲覧状況及び実際に流れる映像のビットレートを確認した。なお、画像圧縮方式は圧縮率が高い H.264 方式²⁾とし、ビットレート固定モード⁴⁾で実験を行った。

閲覧可否の評価は A 棟内に設けた AP に接続したタブレット端末を用いて行い、「良好に閲覧できる」を◎、「移動物体の映像が一瞬不連続となる場

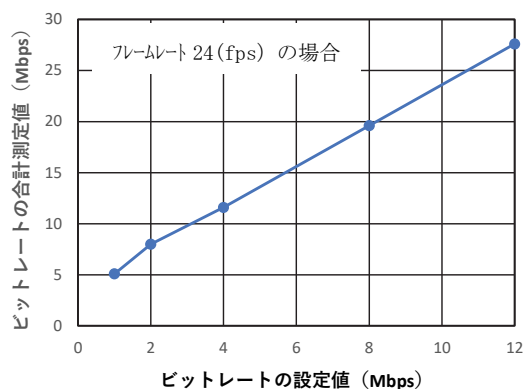


図-4 合計ビットレート設定値と測定結果

(2) 映像の質と建設現場への活用法

1fps であれば、カメラ 5 台分の精細な映像を事務所から一括で閲覧できることが分かった。現場の施工状況を 1fps でとらえた場合、その映像からは建機や作業員の数や位置、動静、移動方向、移動速度等を読み取ることができる。現場のこのような様子を遠隔で確認可能になることで、現場に出向くことなく複数の作業状況を一括して確認でき、進捗管理の効率化につながると考える。また、職員と建機の接近等が確認できることから、作業員の安全管理をより効率的かつ網羅的に行えると考える。

一方 10fps や 24fps の滑らかな映像からは、建機の詳細な動きや作業員の手の作業内容等を読み取ることが可能になる。このような映像が取得できれば、職員が目視で映像を確認するにとどまらず、熟練者の手の動きを AI 等を用いてデータ化し、初心者への教材とする等、より幅広く活用することが可能と考える。ただし実験結果より、今回構築したシステムではカメラのビットレート設定が 8Mbps を超えると映像に乱れが生じることが分かったため、設置するカメラの台数を減らす等の工夫が必要である。

(3) 屋内での映像閲覧環境の整備

本実験で整備した A 棟屋内での映像閲覧環境のモデルを図-5 に示す。アンテナから各部屋に設けた AP の間に中継機を 1 機設置し、映像伝送の安定化を図った。その結果、アンテナと設置階層の異なる部屋においても映像の受信を確認できた。

このことから、現場事務所のある場所で受信した映像を、離れた自席や別室の会議室、協力業者の控室等至るところで閲覧可能となり、より自由度の高い施工管理が可能になると考える。

5.3 実用上の留意点

(1) 近隣との干渉

近隣の施設から電波が発されている場合、その影響で現場の映像伝送が乱れることが考えられるため、事前に調査を行い使用するチャンネルをずらす必要がある。本実験では周囲に無線通信を行う高層建築があったものの、実験に影響の及ぶものではないことを確認していたため、干渉は起きていない。

(2) 気象レーダとの干渉

5GHz 帯の Wi-Fi は気象レーダ波を検知した場合、他のチャンネルへ変更を行う DFS (dynamic frequency selection) 機能⁵⁾の搭載が義務付けられており、画像に影響を受ける場合があるが、本実験場所と同じつくば市内にある気象レーダは、本実験で使用した Wi-Fi の周波数とは異なることを総務省のホームページ⁶⁾にて確認したため、干渉は起きていない。

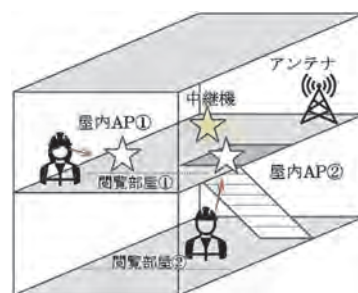


図-5 屋内での映像閲覧環境

6. まとめ

現場への実装を想定して構築した無線通信環境にて、カメラ映像の伝送データ量と閲覧性の関係を確認し、定点カメラおよびメッシュ Wi-Fi を建設現場へ導入する際の留意点を整理した。

今後は本実験の結果から、実際の現場で無線通信環境の構築および運用を試行し、安定した映像伝送のための条件をより詳細に把握したい。また映像を用いた安全・品質管理をより普及させるため、より鮮明な映像を安定して送受信できる強固な通信設備や電波干渉に強い無線環境の構築方法等の開発を期待したい。

謝辞：本実験を行うにあたり、日本マルチメディア・イクイップメントの花坂様には多大なるご協力を賜りました。この場をお借りし、深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 早川健太郎ほか：4K定点カメラ映像による工事進捗管理システムの開発および試行結果（その1）、土木学会年次学術講演会、VI-990、2020。
- 2) 富士通株式会社：画像圧縮技術、<https://www.fujitsu.com/jp/about/research/techguide/list/image-compression/>、2016.(2022-04-18)
- 3) 一般財団法人日本ネットワークインフォメーションセンター：無線LANの基礎と最新動向、<https://www.nic.ad.jp/ja/newsletter/No61/0800.html>、2015.(2022-04-11)
- 4) Axis Communications：IPビデオのビットレート制御、2021.https://www.axis.com/files/sales/white_paper_bitrate_control_for_ip_video_ja_2109.pdf.(2022-06-13)
- 5) 河村聡ほか：802.11高速無線LAN教科書、株式会社インプレスR&D、2008。
- 6) 総務省：無線局等情報検索、<https://www.tele.soumu.go.jp/musen/SearchServlet?pageID=1>.(2022-04-14)

32. 機体に依存しない遠隔吹付システムの開発

NATM吹付作業用脱着式遠隔吹付システムの開発

株式会社熊谷組
株式会社熊谷組
株式会社熊谷組
株式会社熊谷組

○ 坂西 孝仁
尾畑 洋
宮川 克己
杉本 憲一

1. はじめに

NATM 山岳トンネル工事においてコンクリート吹付作業はトンネルの支保という点から非常に重要であるが、吹付粉じん下の劣悪な環境は作業員への負担が大きいものである。厚生労働省も令和2年7月20日に「ずい道等建設における粉じん対策に関するガイドライン」を改正し、粉じん濃度目標レベルは $2\text{mg}/\text{m}^3$ になるなど規制を強化しているのが現状である。

これに対して施工業者は液体急結剤の使用、吸引捕集方式の換気方式の採用等、粉じんを抑えつつ影響を最小限にするなどして作業環境改善に努めているが、その中で遠隔操作によるコンクリート吹付作業をすることは作業環境の大幅な改善という点で一つの解決策であり、この取り組みの一環として遠隔吹付システム開発を進めてきた。その過程の実験を通して発生した課題から、「機体に依存しない遠隔吹付システム」というフレーズで脱着を基本としたシステムの開発を進めているので、これまでの開発経緯と合わせて報告する。

2. 開発の経緯

開発背景と経緯について述べる。

2.1 開発背景

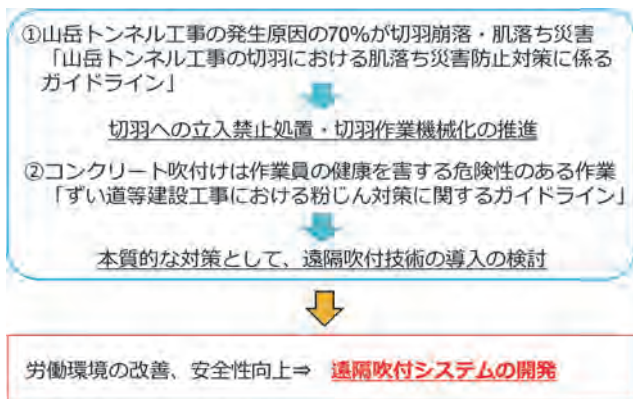


図-1 遠隔吹付システム開発背景

山岳トンネル工事切羽災害の発生原因の70%が切羽崩落・肌落ち災害切羽作業であり、厚生労働省

「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」からは、切羽への立入禁止処置・切羽作業機械化が求められている。

また厚生労働省「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」から換気、呼吸器用保護具に加えて、粉じん発生源に係る措置としての本質的な対策に遠隔吹付技術の導入を検討することが明記されている(図-1)。

これより労働環境の改善と安全性向上を目指して遠隔吹付システムの開発を開始した。

2.2 システム概要

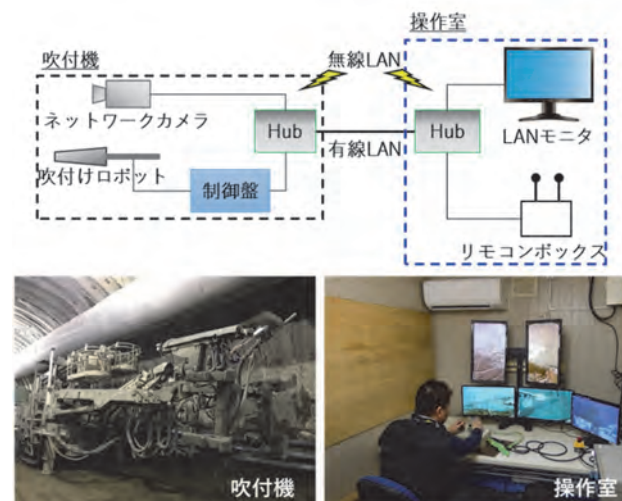


図-2 遠隔吹付システム概要図

通常は吹付作業員が切羽周辺で吹付ロボットコントローラにより吹付ロボットを操作するが、遠隔吹付では粉塵に影響のない範囲に設置される操作室で、吹付機に取り付けられた操作用カメラからの映像を吹付作業員がモニターで視認しながら吹付ロボットコントローラで遠隔操作を行うものである。(図-2)

①吹付機操作システム

吹付機の動作は吹付機に搭載した PLC 制御盤と遠隔操作室の PLC 制御ボックス間を有線または無線 LAN で接続され、操作室から吹付ロボットコントローラボックスで吹付機を遠隔操作する。

②操作用映像システム

遠隔操作に使用する操作用映像カメラは吹付機エレクトアーアーム部に左右 2 か所、全体俯瞰用として車体中央部に 1 か所設置した。また操作室には通常の無人化施工と同様にディスプレイを 4 台設置した。

2.3 基本的システムの確立

2016 年より A トンネル現場において遠隔吹付システムの実験を開始した。当トンネルは全線鋼製支保工を使用するトンネルパターンで初期段階の遠隔吹付の実験現場としては理想的であった。

まずは操作用カメラ、無線機の選定を行い、使用機器の基礎実験を実施した。ネットワークカメラを数種類選定して動作確認後、取付位置を吹付作業員も含めて検討して決定した。カメラ雲台の自作も行い理想的なパン・チルト方向動作を追求した。また無線 LAN に関しては 5GHz 帯の他、2.4GHz、25GHz 等色々と実験して、トンネルにおける吹付機と操作室の離隔がどの程度まで可能か確認をした。

その後実作業で数度にわたり実験を実施したが、(写真-1) 無線機の距離制約、映像の遅延等も抱えながらも吹付作業員は 2-3 回の練習で、基本的吹付作業を遠隔操作で行い、システム有用性の確認ができた。



写真-1 遠隔吹付風景

2.4 新規課題への対応

2017 年より実験場所を B トンネル現場に移して、技術開発を進めることになった。

(1) 新規課題について

解決しなければならない課題は以下の通りであった。

①吹付作業員の吹付コントローラ操作速度と操作用映像遅延

吹付機の動作信号は ON、OFF のみなので吹付作業員は吹付ロボットのノズルワーク回転方向の操作では、コントローラを正逆方向に 50ms のスピードで動作させて微妙な動きを操作していることがビデオ解析で確認できた。しかし吹付機に搭載さ

れた操作用ネットワークカメラ映像は遠隔操作室でモニター視認すると映像のエンコード、デコード時間により HD720P 映像においても 200-300ms の遅延が発生していることが実験で明らかになり、同様の操作は遠隔吹付では難しいことが確認できた。

②奥行き感の差異と操作の違和感

雲仙普賢岳や阿蘇大橋等で実施された無人化施工¹⁾では、掘削機の車載カメラの他に、無人化作業外エリアに建設車両に対して 4 方向から視認できる操作用カメラが多く設置され、遠隔操作作業員は適切なカメラを切り替えて、作業の際に必要な奥行き感を補填している。しかしトンネル内では吹付機にカメラを取り付けられても、トンネル土平等に取り付けることは現実的でなく、奥行き感の把握が難しいことが認識できた。



写真-2 奥行き感の差異

写真-2 より、操作用カメラが斜め方向から対角で吹付ノズルを撮影していることからノズル前後方向の奥行き感が視認し辛く、実際は 2m 以上離れていてもモニター映像では 1m 未満に見えることがわかる。これによりノズル操作で思った以上に動作が大きく動き、適切な吹付箇所への誘導が難しくなっていた。

③無支保工区間の対応

当初現場は鋼製支保工が入る支保パターンであったが、途中より無支保工区間になった。通常の有人吹付の場合は後方 100m 程度の天井に取り付けられているレーザーマーキングシステムで教示される吹付限界を視認しながら吹付可能であるが、無人化施工で操作室の映像モニターによるレーザーマーキングの視認が難しく、遠隔操作では無支保工区間の施工が難しいことが実験でわかった。

(2) 課題の解決方法検討と結果

あがった諸課題に対して以下の対策により解決を目指した。

① ノズルワーク自動システムの開発

吹付作業員が常時ノズルワークする動作はノズル回転、ノズル前後、アームスライド前後の 3 動作である(図-3)。この動作スピード、動作範囲を調整可能にして自動的に動作させ、必要に応じて手

動介入が出来れば動作の低減が可能と考えた。この3動作の自動化実験で顕著な効果があったのは、前述した 50ms のスピードで微妙な操作していたノズル回転の動作であった。

ノズル回転の自動化のみでも吹付作業員の負担改善が顕著であることが確認できた。

①ノズルの回転

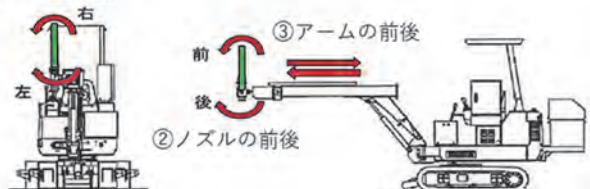


図-3 ノズルワークの3動作図

またこれにより操作カメラ映像遅延の影響も大きく受けずに作業員の負担軽減が可能になった。

②吹付ガイダンスシステムの開発

奥行き感確保と無支保工区間の対策にはバックホウ、ブルドーザ等に搭載されているマシンガイダンスシステムと同様の吹付機用ガイダンスシステム開発が効果的と考えたが、屋外で使用するガイダンスシステムとは違い GNSS が使用できないトンネルの環境下でどのようなシステムにするかが課題であった。



図-4 緑点照射カメラ追尾式ガイダンスシステム図

検討した結果、ノズル筒先部に取り付けた緑色レーザーポインタが照射する点とノズル根元に設置される赤点照明をステレオカメラで距離認識をしてノズル位置と方位を認識する緑点照射カメラ追尾式ガイダンスシステムを採用した。(図-4)

この方式では以下の表示が可能になった。

a. ノズル位置表示ガイダンス

緑色レーザーポインタの壁面照射点と赤色ノズル位置認識灯の三次元位置をステレオカメラで認識して、ノズル筒先の位置と方向をガイダンス用PCで算出して表示する。

b. 吹付厚巻推定表示

レーザーポインタ三次元位置の蓄積により、マーキングシステムから取り込んだ設計断面と比較して、どの程度の吹付余裕があるのか表示する。

緑点位置の画像データの解析は、ステレオカメラに内蔵されているミニコンが 30fps で行っていたが、振動の影響や吹付ロボット位置で認識可能なカメラ台数の変動に連動して位置精度値も変動し、表示位置が大きく変化するなど、システム改良の余地が多くあることがわかった。また毎回レーザーマーキングシステムの照射点を使用してステレオカメラ 8 台の自己位置、方位を計測する必要があるが、精度を出そうとすると当初予想していた点数より多くの計測が必要になり毎回十数分かかってしまった。

2.5 Bトンネル実験結果

(1) 実験後の課題

①配線等の破損



写真-3 配管配線状況

当初からノズルワーク自動、ガイダンスシステムを想定しておらず、後付けでシステム追加した結果、LAN、センサー、粉塵対策用エア管、電源線を敷設したことにより多くの配線、配管になり、吹付粉塵、油圧の交換、日常の稼働によるシステム維持が容易でなかった(写真-3)。開発サイクルが長期となる場面では、ほぼ配線、配管のやり直しを余儀なくされ、実験効率の低下、費用の増大を招いた。

②発破の影響

前述した配管、配線にも影響があったが、特に操作室での発破衝撃の影響は甚大であった。4t 平トラックにユニットハウスを搭載したが、室内のディスプレイ、エアコン、空気清浄機等も発破の影響で破損した。

③専用機による高額な開発費

後付けで操作カメラ、センサーや配線配管もあったが、当初から専用の PLC 制御盤、比例電磁弁が搭載されており、システムの維持も含めて多くの費用がかかった。

(2) 得られた成果

①映像による遠隔操作

どこの現場でも吹付作業員は 2,3 日の練習で映

像による遠隔操作に対応して基本吹付程度は容易にこなしていた。

② ノズルワーク自動

ノズルワーク自動は前述したノズル回転のみでも遠隔吹付では顕著な改善効果があった。吹付作業員は遠隔操作当初は、ノズルワーク自動をあまり使用したがらないが、しばらくして遠隔操作に慣れてくると必ず使用を始めて、「負担が減る良いシステム」という意見であった。

③無線機、粉塵対策

トンネル内でも安定した伝送可能な無線 LAN の選定や、カメラの粉塵対策システムを確立できた。これにより 200m 程度離れた範囲であれば安定して遠隔操作が可能になった。

3. 新規開発目標

これまでの課題経緯から「機体に依存しない遠隔吹付システムの開発」という目標で脱着式遠隔吹付ユニットの開発を進めることにした。

まずは導入予定現場を決めて以下のシステムを開発することにした。

3.1 後付け遠隔操作用コントローラ制御装置

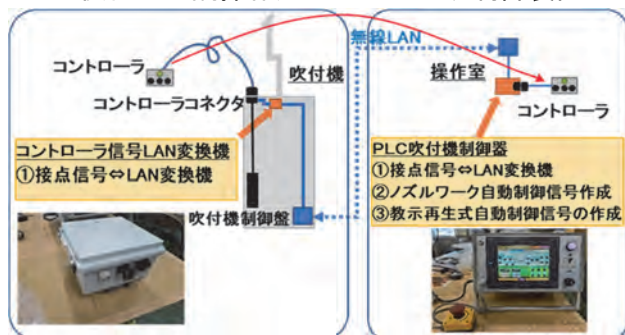


図-5 後付け遠隔操作用コントローラシステム図

有人吹付の場合は吹付コントローラをコントローラコネクタに接続して使用するがここに後付けでコントローラ信号 LAN 変換機を接続する。

操作室側 PLC 吹付機制御器と無線 LAN で接続することにより、操作室へ吹付コントローラを移設すれば遠隔操作が可能になる。

また操作室側の PLC 吹付機制御器から回転ノズルワーク自動制御信号や教示再生式自動信号を作成して送れば、吹付機側の吹付機制御盤の制御することが可能になる。これにより吹付機を改造することなく操作室側 PLC 吹付機制御器により簡単な遠隔制御が可能になる。また無線 LAN 等の設置は必要であるが容易に機体からの脱着が可能になる。(図-5)

まずは導入予定現場に合わせた吹付機メーカーと制御信号仕様に関して確認後、PLC 吹付機制御器側で対応できる仕様とした。

3.2 脱着式低遅延高精細映像伝送システム

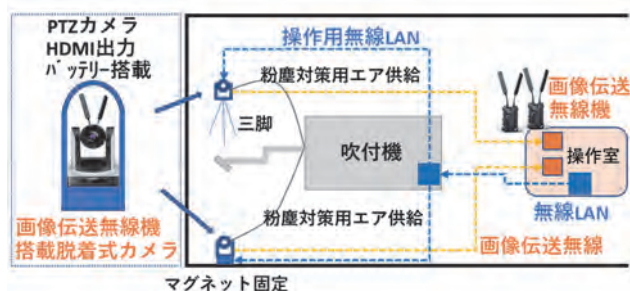


図-6 脱着式低遅延高精細映像伝送システム図

映像無線・バッテリー搭載 PTZ カメラユニットを製作して、吹付毎に所定の箇所に設置する移動式にする。作業終了時は取り外して充電とメンテナンス作業を行う。また PTZ カメラは屋内用汎用カメラを使用してコスト低減に努めた。HDMI 出力を搭載した PTZ カメラを使用して映像無線機に HDMI 入力で直接映像伝送をする。映像無線機は 5GHz 帯を使用しているが帯域が広いので、一度に使用できる台数は 4 台であるが今回の吹付機のケースでは十分な仕様である。また操作室へフル HD 映像が遅延なく伝送が可能で屋外トンネル実験において 400m 程度の伝送において遅延なく伝送が可能であった。

カメラ操作は RS485 出力を無線 LAN に変換して操作室から PTZ の制御が可能になる。(図-6)

しかしながら粉塵対策用エアは吹付機本体から供給とするので脱着可能なエアコネクタとエアリールを装備する予定である。

3.3 小型移動操作室の製作

従来は機器スペースや居住性を考慮してユニットハウスを車載する方式であったが操作室全体が大きくなり、トンネル内の旋回はぎりぎりまで退避がしづらかった。そこでワンボックスカーをベースにした小型の遠隔操作室にして、発破の際は影響のない範囲まで退避を容易にすることにした。

4. 今後について

今回の技術開発はターゲット現場に導入を目指して開発を進めており、年内には試験運用から実作業を目指している。ただし今回の現場は鋼製支保工が全線に入る支保パターンであるので上記の開発で十分であるが、今後の無支保工パターンの現場に合わせて脱着式のガイダンスシステムの開発も同時に進めている。その内容はまた別の機会 で発表をしたい。

参考文献

- 1) 飛鳥馬翼, 中出剛, 北原成郎, 天下井哲生, “阿蘇大橋 地区崩壊斜面の応急対策から恒久対策までの取組み”, 土木施工, Vol. 62, No. 6, pp. 104-107, 2021

33. 山岳トンネル用自動ズリ積込機の開発

～トンネルズリだし作業の省力化と安全性向上を実証～

(株)フジタ
(株)フジタ
(株)三井三池製作所

○林 秀晃
浅沼 廉樹
山田 照之

1. はじめに

2020 年度から始動した国土交通省インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション(インフラ DX)テーマの 1 つにロボットや人工知能(AI)の活用がある。この目的としては、施工の自動化や人の作業の代替を行い、危険作業・苦渋作業を減少すること 1)と熟練技能の効率的な伝承の実現などが挙げられている。トンネル工事においては、ドローンで撮影された画像や、センサから取得した計測値を用いて健全性の診断を行っている 2)。今後、効率化を進めるために AI 技術などを活用した点検のデジタル化を推進するとしており、建設現場の生産性を向上させる技術開発が急務となっている。

そこでフジタでは、インフラ分野の DX 推進の一部としている AI 技術を活用して、山岳トンネルの掘削ズリだし作業の省力・省人化を目指した。

本論文では、AI 技術搭載の「山岳トンネル用自動ズリ積込機※以下 ai ロックローダ」(株式会社三井三池製作所と共同開発)の概要と現場での実証実験・運用結果について報告する。

2. 開発の経緯

山岳トンネルの施工は、「①発破、②ズリだし(積み込み・運搬)、③支保工」が基本的なサイクルとなっており、近年におけるトンネル工事の技術開発は、トンネル近傍での発破準備作業や支保工組立作業が主流になっている。一方、ズリだし作業は、施工現場の制約(重ダンプの台数や坑内外の運行サイクルなど)から、支保工作業までのサイクル時間が長くなることや、ホイールローダやバックホウといった積み込み機械運転手の長時間拘束も問題であった。この対策として、ダンプでの移動が長くなる長距離トンネルの場合は、連続ベルトコンベヤの採用などが行われていたが、大幅な所要時間の改善はされず、施工方法の再検討が必要であった。

ai ロックローダは、発破により発生したズリを切羽後方に設置した ai ロックローダの前に仮置きした後、重ダンプに積み込むことで、切羽作業面の早

期解放を可能とするものである。

3. ai ロックローダの概要

3.1 ai ロックローダの概要と構成

ai ロックローダは、切羽後方に仮置きしたズリを掻き寄せるための掘削ブームとダンプに積み込むための排土ベルトコンベヤで構成される。

また、ai ロックローダの仕様を表-1 に、本体全景を写真-1 に示す。センシングは、ai ロックローダの中ほどにある GPU 盤と前方にあるセンサ機器で行う。

表-1 ai ロックローダ本体仕様

全長	18.5	m	総重量	50	t
全幅	3.0	m	電圧	AC400V	
全高	6.1	m	搬送能力	510	m ³ /h

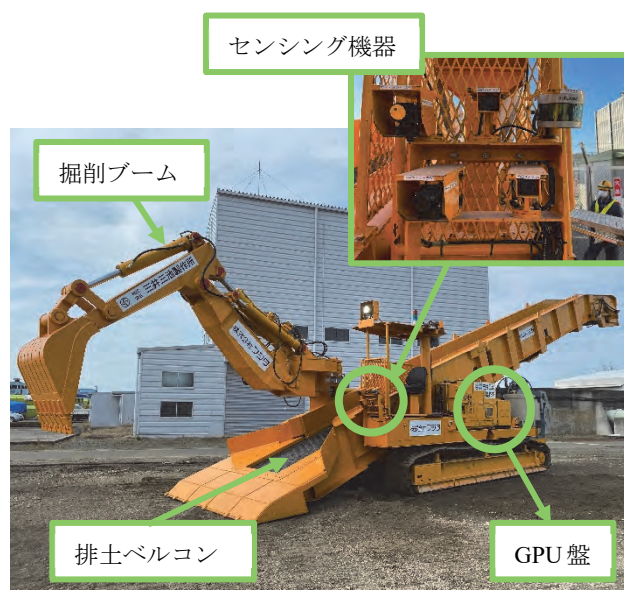


写真-1 ai ロックローダ全体図

3.2 システム構成

- ・計測を行うセンシング機器
- ・GPU 盤(AI 自動運転盤)
- ・制御盤

ai ロックローダは上記の 3 点でシステム構成される。

表-2 センサとセンシング機器

種別	メーカー	型番
ズリ計測用3次元点群センサ	Velodyne	VPL-16
LiDAR		
ズリ認識用可視光カメラ	Leopard	AR0231-GMSL
車載カメラ		
ズリ認識用赤外線カメラ	FLIR	BOSON ADK-VGA
サーマルカメラ		
傾斜・姿勢検出	多摩川精機	TAG265
IMU		

ai ロックローダは、GPU 盤とセンサ類(LiDAR: 三次元点群センサや超音波センサ、ストロークセンサ)で自動運転を可能とし、安全対策も施されている。自動運転のみならず、手動運転にも対応しており、緊急時や ai ロックローダ配置場所までの移動など、人の判断で操作を行うことも可能である。

搭載したセンシング機器を、表-2 に示す。実験では、これらのセンサを運転レベル毎に使い分けて使用する。

自動運転の際、LiDAR にてズリの形状を読み取り、カメラで得た映像を画像認識することにより、仮置きしたズリ山のズリを判別する。人も検知可能なため、安全性が向上する。また、ai ロックローダ後方にある超音波センサにより、ダンプの停止位置をセンシングし、停止場所になればダンプ運転手に警報ブザーにより知らせるシステムとなっている。これは、ダンプと ai ロックローダの衝突防止対策とズリ積込み位置誘導を行うためである。

4. 実証実験に向けた準備

4.1 自動運転(AI)教師データ取得

自動運転を行うためには、多くの写真データ(教師データ)の取得が必要なため、トンネル 2 現場にて、カメラからトンネル坑内画像やズリ画像を約 1700 枚取得した。その後、学習データにのみ過剰に反応し、未知のデータに対応できない“過学習”に注意しながら、学習を行った。AI での学習後の動作結果を写真-2, 3 に示す。



写真-2 データ取得後の認識結果 1



写真-3 データ取得後の認識結果 2

写真-2 については、切羽面を側壁と一部誤認識しているが、その他は正確に検知していることが確認できる。写真-3 については、重機と作業員を誤認識なく検知していることが分かる。これらより、ズリを掻き込む作業と、安全性については問題ないといえる。

4.2 実証実験条件(自動運転レベルについて)

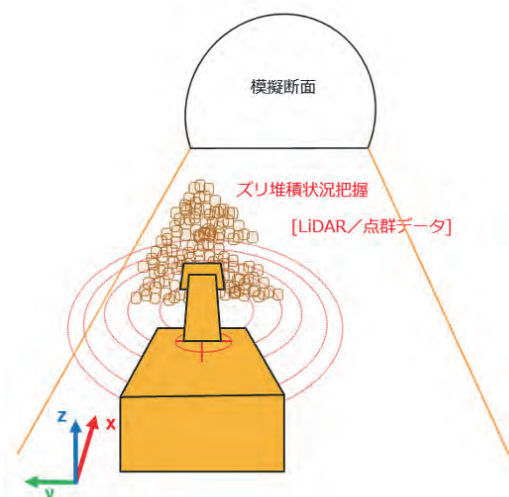


図-1 自動運転レベル 1 (L1)

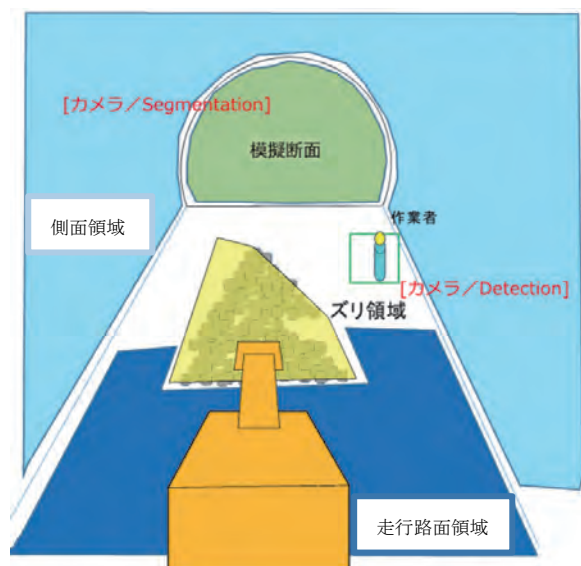


図-2 自動運転レベル 2 (L2)

自動運転レベルを下記の 3 段階に区分し、これらのレベルを組み合わせる動作検証・実証実験を行った。

- ・自動運転レベル 0 (L0)
バケットの動作を固定し、決められた動作を自動的に繰り返すことでズリ積込みを行う。
- ・自動運転レベル 1 (L1) (図-1)
ai ロックローダに取り付けた三次元点群計測センサ(LiDAR)から得られる点群データを基にバケットの移動先(ズリ位置)を動的に判断し、自動積込みを行う。
- ・自動運転レベル 2 (L2) (図-2)
ai ロックローダに設置したカメラ映像から、AI 技術を用いた画像認識機能により、ズリやトンネル壁面、現場作業者などの対象物を認識し、レベル 1 の結果と組合せ、ズリの有無に基づく自動運転制御を行う。

4.3 模擬トンネルでの検証

自動運転試験として、各種センシングシステム毎の動作検証(センシング結果に基づいて油圧制御が連動して動作するかの確認)を行った。本検証は、高さ 6m、幅 12m の模擬トンネルで実施した。

検証内容は、

- ① 自動運転レベル 0 相当の動作検証
設定したストロークセンサの値によってバケツの動きが意図したものかを検証
- ② 自動運転レベル 1 相当の動作検証
LiDAR センサでの計測結果を基にズリ山位置計測を行い、より確度の高いズリ山にバケツを移動できるかを検証

- ③ 自動運転レベル2相当の動作検証
カメラ画像のAI認識結果を基にズリ山の領域の認識と周辺対象物(ズリや側壁、作業員など)の把握が可能かを検証
とした。写真-4に使用した模擬トンネルを示す。



写真-4 模擬トンネル

4.4 模擬トンネルでの検証結果

各自動運転による効率比較を表-3 に示す。効率の比較については、ai ロックローダを運転手が手動で動かした際、ダンプ 1 台分の所要時間を 100% とした。また、自動運転では、ズリ掻き込みの優先度を ai ロックローダから遠距離としていたが、ズリをうまく掻けなかったため、近距離優先とした。実験状況については、写真-5 に示す。

表-3 作業効率比較表

操作方法	作業効率		備考
手動	100	%	降車位置で操作
レベル0	90	%	
レベル1	41	%	近距離優先
レベル2	検知のみ確認		



写真-5 模擬トンネル実験状況

検証の結果、

- ・L0 動作に関しては、固定動作での掻き込みとなる為、手動と同等の効率となるが取りこぼし量も多く見受けられた。また、動作がほとんど手動動作と同様なため、効率比較の差は10%のみとなった。
- ・L1 動作に関しては、掻き込み動作毎に機械動作を止めてセンシングを行う為、待機時間が長く感じられたが1回当たりの掻き込み量は多く、取りこぼし量も少なく感じられた。
- ・L2 動作に関しては、掻き込み動作を試みたが掘削ズリと路盤との判断が難しく、掘削ズリの認識確認のみとなった。

5. 実証実験の概要

5.1 実証実験実施現場の概要

工事名 : 令和元-4 年度横断道
羽ノ浦トンネル工事
工事場所 : 徳島県小松島市
工期 : 2020/2/26～2023/1/31
発注者 : 国土交通省四国地方整備局

5.2 坑外ズリピットでの実証実験

実験の様子を写真-6 に、使用したズリ山を写真-7 に示す。



写真-6 ズリピットでの実験

4.3 で実施した模擬トンネルでの検証と比較し、大きさや色も違う実際のズリでも模擬トンネル検証時と同等の結果が得られるかを確認するために、坑外ズリピットで実証実験を行った。

自動運転は、自動運転レベル 0 と 2 を組み合わせて実施した。操作条件は、手動操作と自動運転（自動運転レベル 0+1 と 1+2）にて実施した。本実験のズリ山は、直径 100mm～300mm 程度の碎石と栗石を採用した。

※本実験では、自動運転の運用方法として、制御を複合することで作業効率の向上を図った。



写真-7 使用ズリ山

5.3 坑外ズリピットでの実証実験結果

坑外ズリピットでの実証実験結果を表-4 に示す。効率の比較については ai ロックローダを運転手が手動で動かした際、ダンプ 1 台分の所要時間を 100%とした。

表-4 ズリピットでの作業効率の比較

操作方法	作業効率		備考
手動	100	%	乗車にて操作
レベル0+2	78	%	
レベル1+2	44	%	

実証実験結果

- ・模擬トンネルでの検証時と同様、自動運転レベル 1 と 2 共に、基本動作には問題なく、ズリ山を掻けることを確認できた。
- ・バケットのスタックなどが原因で自動運転の停止が見られたので改善が必要。
- ・模擬トンネル検証結果と比較し、レベル 0+2 の作業効率については、自動運転（＝レベル 2 の画像認識）が付加されたため下がった。
- ・センサを用いた完全自動であるレベル 1+2 での作業効率は、模擬トンネルでの検証から改善され、上昇した。
- ・模擬トンネルとは異なり、大きい岩でも、ズリの掻き寄せやコンベヤ搬送には問題がなく、工事現場でも動作すると考えられる。

5.4 現場運用

全体の俯瞰図を図-3 に示す。

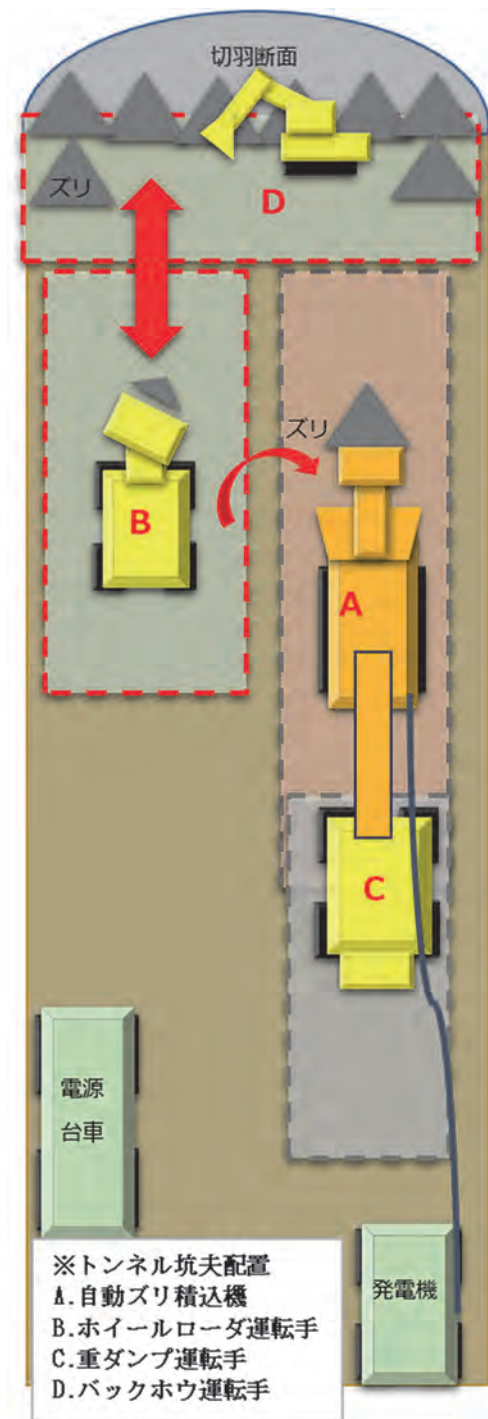


図-3 坑内実験時全体俯瞰図

模擬トンネルでのシステム調整と新たな学習用教師データの取得作業が終了した後、運用検証を現場坑内で行った。

運用内容は、動作確認として手動操作と自動運転レベル 0～2 を実施した。また、手動操作と自動運転のデータの比較を行った。自動運転については、自動運転レベル 1 と 2 を組み合わせた条件で行った。

ai ロックローダは切羽より約 30m 手前にセット。切羽直前にズリ寄せのバックホウ 1 台、ズリ山もりのためのホイールローダ 1 台、ai ロックローダ後方にズリ搬送のための 25t 重ダンプ 1 台を配置した。

5.5 現場運用結果

手動・自動ともに動作は正常なことを確認した。

表-5 坑内運用検証での作業効率の比較

操作方法	作業効率		備考
手動	100	%	乗車にて操作
レベル0+2	79	%	
レベル1+2	67	%	

坑内での実証実験結果を表-5 に、実験状況を写真-8, 9 に示す。効率の比較については ai ロックローダを運転手が手動で動かした際、ダンプ 1 台分の所要時間を 100%とした。



写真-8 トンネル坑内運用状況(後方)



写真-9 トンネル坑内運用状況(前方)

運用結果

- ・坑外ズリピットでの検証時、発生したバケットのスタックはシステム改良により、動作の自動復旧が確認できた。
- ・各自動運転レベルにおいての作業効率は、ズリピットでの検証時と比較し、上昇した。
- ・ズリの有無についても、センシング画像と現場目視確認にて、しっかりズリが掻き込めることが分かった。また、センシングも問題なく動作していることを確認できた。
- ・バケットのスタック対策(キャンセル動作)の導入により待機時間が減少したため、ズリピット実験時に比べ、効率が向上したと考えられる。
- ・ズリピットでの実験時に取得したズリ山のデータで学習を行ったことでスムーズにしっかりズリを掻き込めたと考えられる。

6. まとめ

ai ロックローダは、切羽でのズリ運搬作業の待ち時間が減少することでトンネル工事による施工サイクルタイムが速くなる機械である。

ここで、ai ロックローダの特徴を5点まとめる。

- ① 後方にズリを仮置きすることで切羽の早期解放が可能となり、生産性が向上
- ② AI による自動運転が可能である
- ③ 自動運転により、約 20%の省人化が可能
- ④ 手動でも操作可能
- ⑤ 人の検知が可能で安全性向上

切羽の早期解放時の運用状況を写真-10 に示す。



写真-10 切羽の早期解放状況

エレクターを切羽に移動することができ、ズリ搬出作業と支保工作業を同時にすることが可能となった。

7. おわりに

今回の運用・検証では、回数を重ねるにつれて各自動運転レベルの作業効率は上昇した。今後も写真データの収集を継続し、AI による学習を行い、ダンプ運搬方式(図-4)の安全性向上や生産性向上など、自動運転の発展に努めていく。また、今回とはズリ運搬方法が異なる、連続ベルトコンベヤ運搬(図-5, 6)採用のトンネル工事への導入も進めていく所存である。

※図-5, 6 はイメージ図

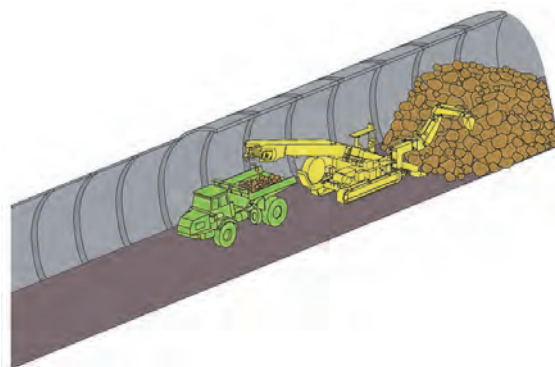


図-4 ダンプ運搬方式

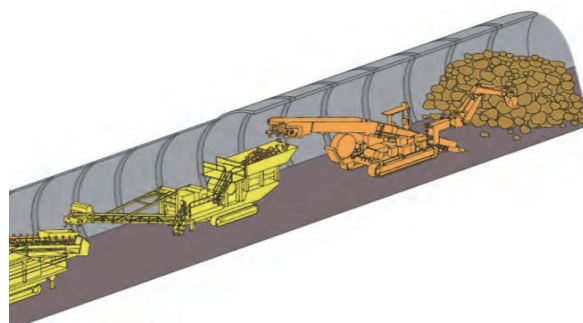


図-5 連続ベルトコンベヤ運搬方式

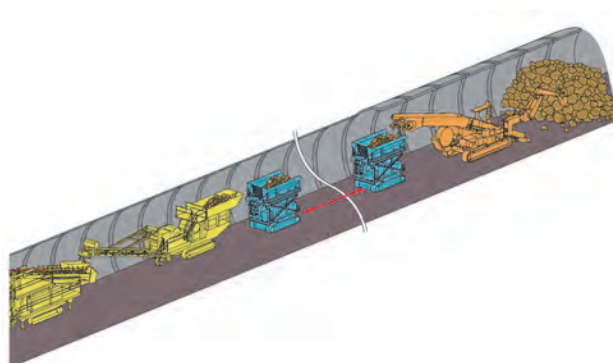


図-6 運搬機付き連続ベルトコンベヤ運搬方式

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション(DX), p.1, p.3, 令和3年2月9日
- 2) 国土交通省：資料 3 インフラ分野のDXに向けた取組紹介, p19, 令和2年7月29日

34. 自律飛行ドローンによるトンネル坑内自動巡視システム

「坑内の網羅的な情報収集による巡視」と「無人切羽点検」

株式会社フジタ ○ 松岡 祐仁
株式会社センシンロボティクス 大畑 成史
株式会社センシンロボティクス 高瀬 悠介

1. はじめに

建設現場では、国土交通省が推進する「i-Construction」の3本柱の一つである「ICT技術の全面的な活用」により、土工を皮切りに主に測量分野においてドローンを活用した取り組みが広く行われている。一方、近年の建設業界を取り巻く環境、社会経済情勢の変化から、ロボットやAI等を活用して業務プロセスを変革し、建設現場の生産性を飛躍的に向上させる社会的要請への対応として更なる技術開発が求められている。

著者らは、これまで建設現場において、ドローンを活用して人的作業を代替することによる効率化や生産性向上に着目し、「全自動ドローンシステム」¹⁾によるAIを組み合わせた巡視・点検や測量作業の自動化、非接触での検査・確認を行う遠隔臨場にドローンのリアルタイム映像を提供する「遠隔臨場ドローンシステム」²⁾の開発を行ってきた。

2. 非GNSS環境下におけるドローン活用の課題

建設現場におけるドローンの活用は、機体やペイロードの高機能化、高精度GNSS測位による測量精度の向上や飛行制御の高度化、通信機能の統合とともに発展してきた。しかし、GNSSの電波を受信できない環境では、予め設定されたルートで自動 / 自律飛行できず、飛行が不安定になることから、高度な操作技術を有するドローンオペレーターが必須となる。このため、ドローンによる効率性・生産性向上に最も寄与する自動 / 自律飛行の活用は、主にGNSSが受信可能な環境に限定されていた。

今回、ドローンによる巡視・点検対象とした山岳トンネル工事においては、一般に、掘削（削孔/装薬/発破）、ずり出し、コンクリート吹付け、支保工建込み、ロックボルト打設というサイクルが昼夜繰り返され掘削が

進む。測量や計測等の施工管理や巡視・点検は、サイクル間の限られた時間内に職員により行われている。また、掘削前線である切羽においては、発破後や作業間に残薬、浮石、支保工裏面の状況を確認するため、目視点検が行われているが、肌落ち、崩落等のリスクが存在し、安全かつ効率的な巡視・点検技術が求められている。また、トンネル坑内は、非GNSS環境であることは元より、屋外に比べて暗所であり、機械設備など障害物が多く、大型重機が稼働していることから、ドローンの飛行にとって厳しい環境である。

本稿では、トンネル坑内のドローンによる巡視・点検システム開発についての取り組みについて報告する。

3. トンネル坑内自律飛行システムの開発

トンネル坑内での管理ツールとしてドローン活用を推進するためにも、高度な操縦技術を有する専門オペレーターではなく、一般職員が日常かつタイムリーに運用できる自律飛行機能が望まれる。しかし、坑内は、非GNSS環境であるため、GNSSに基づいた自己位置情報を用いた自律飛行は不可能である。そのため、追加のセンサーなどを搭載することでGNSSに依存しない自律飛行システムを構築する必要があった。

この問題への対処として、暗所でも精度良く周囲環境との距離を計測できる3D-LiDARを追加センサーとして採用することとした。3D-LiDARを使用した自己位置推定では、事前に作成した点群地図とリアルタイムに取得したスキャン点群との位置合わせによる手法が多く採用されている。しかし、トンネルのように一部を切り取った際の形状の変化に乏しい環境ではLiDAR SLAMなどにより事前地図を精度よく生成することが難しい。また、自己位置推定自体も困難であることが想定される。

このため、トンネル断面に着目した場合、一定の形状が連続するトンネルの特性から、後述するテンプレート点群とリアルタイムスキャンを比較することでドローンの移動方向を算出し、それをもとに自律飛行を行う手法を採用した。

3.1 ハードウェア構成

トンネル坑内の自律飛行で用いたドローンを図-1に示す。ドローン本体は、DJI MATRICE™ 300 RTK（以下、MATRICE 300）を用いた。機体単体では、機体に搭載された複数のカメラ、IMUを組み合わせたビジュアルオドメトリにより、自己位置・姿勢推定が行われる。また、上下に搭載されたライトが、暗所でもビジュアルオドメトリを実現する際の補助となる。

追加センサーの3D-LiDARは、Ouster® OS 0®-64を採用した。64レイヤーのレーザーが出力され、画角は90度、計測距離は最大50m、重量475gである。

加えて、追加の自律飛行システムを動作させるドローン搭載型コンピュータとしてManifold™ 2を搭載し、3D-LiDAR、MATRICE 300と接続して必要な情報を送受信可能となっている。さらに、Manifold 2にはWi-Fiレシーバーが搭載されており、オペレーターが持つPCと無線通信を行い、自律飛行開始指示の受け取りや周辺環境の情報をノートパソコンに送信することが可能となっている。また、ドローン本体に付属する送信機からの特定操作により、自律飛行とマニュアル飛行の切り替えが可能になっている。

以上の機器をMATRICE 300上部に艀装し、自律飛行のための機器（1.2kg）と後述する360度カメラ、ハイブリッドカメラ搭載時の合計重量は2.6kg（最大積載重量2.7kg）となった。



図-1 坑内自律飛行ドローン

3.2 ソフトウェア構成

本検証で用いた自律飛行システムは、

Robot Operating System(ROS)ベースのシステムとなっており、図-2に示す機能ごとに実装したモジュールが双方に情報をやり取りすることでシステム全体が動作する。

主要な機能モジュールは、トンネル移動方向推定、制御値フィルター、障害物検知の機能となる。LiDARによるスキャン点群は、Ouster DriverからROSシステムに取り込まれ、トンネル移動方向推定モジュールと障害物検知モジュールに入力される。トンネル移動方向推定モジュールは、トンネル内移動に適した目標位置をドローンの姿勢に応じて推定し出力する。求めた目標位置は、制御値フィルターに入力され、滑らかに移動が可能となる目標速度を決定する。また、障害物を検知した際は、障害物検知モジュールから停止信号が制御値フィルターに送られ目標速度を0にする。最終的に、制御値フィルターによる目標速度をMATRICE 300に入力することで目標速度を達成する制御をドローンが行い移動を行う。

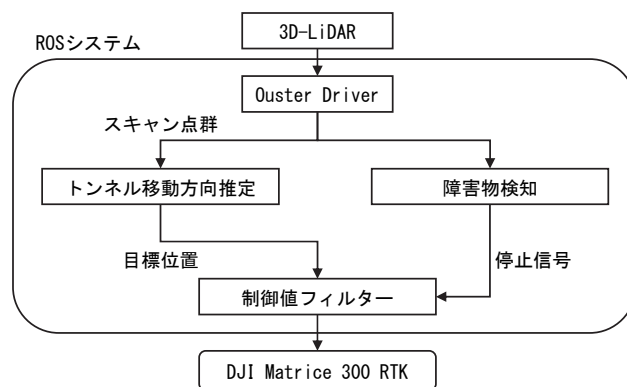


図-2 坑内自律飛行システムソフトウェア構成

(1) トンネル移動方向推定

トンネル坑内で自律飛行を行うためには、まずドローンがどの方向に進めば良いのか確定する必要があるが、本開発では、トンネル形状のテンプレート点群を用いて進行方向を得る手法を用いた。

トンネルは、平面的、縦断的に線形が変化するが、パターンにより多少の違いはあるものの、線形を軸とした断面の連なりで表現される。今回対象とした道路として供される断面の大きなトンネルでは、線形（＝ドローンの進行方向）に沿って一部を切り取ると馬蹄形状になる。このトンネルの設計形状を簡易化して、半径、高さ、密度、長さの4つのパラメータから表現されるテンプレート点群をプログラムにより自動生成することとした（図-3）。

トンネル形状のテンプレート点群を生成した後、センサーから得られる点群とテンプレート点群を比較して位置合わせを行う。この際、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを用いて二つの点群の位置合わせを行う。

テンプレート点群，トンネル内でセンシングした点群両方ともトンネル中心線方向の変化に乏しい形状をしているため，前後方向の位置関係や，差分を位置合わせにより推定することは非常に困難となる。そのため横方向，高さ方向，向き(y, z, yaw)は，ICP により推定を行うが，進行方向位置(x)の推定値は使用しないこととした。

このような点群同士の位置合わせを新たなスキャンが得られるたびに行うことで，テンプレート点群座標中におけるドローン横・高さ方向位置・トンネルに沿った向きをリアルタイムに推定可能する（図-4）。

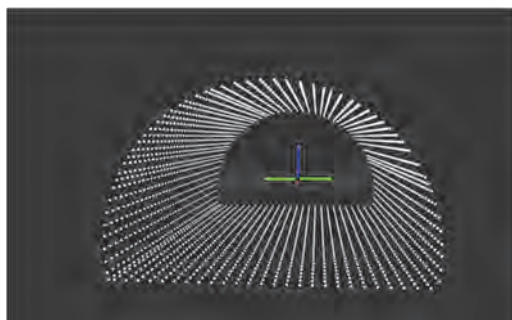


図-3 テンプレート点群

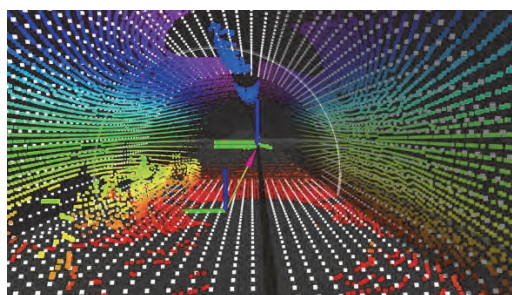


図-4 テンプレート点群とスキャン点群の重畳

(2) 制御値フィルター

飛行制御は，目標地点と現在地点の差から目標速度を決定することで行う。

現在地点は，テンプレート点群との位置合わせにより得た位置を用いる。一方，目標地点は，生成したテンプレート点群の床面を高さ 0，テンプレート点群中心が $(x, y) = (0, 0)$ とし，ドローンを飛行させたい高さ，中心からの横方向距離を事前にパラメータとして設定する。

目標地点，現在地点の差分から，目標速度，

V_y , V_z , V_{yaw} を定める際，点群同士の位置合わせには一定のノイズなどが含まれるため，得た推定値をそのまま使えば不安定な挙動を引き起こす制御値を得てしまう。そこで急制動が起らないよう，加速度や速度に制限をかけるフィルターを導入し，滑らかに安定した制御を実現した。

フィルターは， V_x , V_y , V_z 成分に適用し， V_x のフィルター適用前の目標値は常に 1m/s とし，角速度は，最大値・最小値を定め適用した。フィルターを経て得た目標速度は，MATRICE 300 に指令値として与えられ，MATRICE 300 搭載のビジュアルオドメトリシステムにより得られる相対速度情報と与えられた目標速度情報の差分から実際の加速や停止，旋回が実行される。

(3) 障害物検知

障害物検知機能は二つの役割を持つ。一つは，ドローンがトンネル内の障害物に近接し過ぎた場合やトンネル移動方向推定に失敗した場合に，そのまま移動して障害物やトンネル壁面に衝突する事態を防止する役割である。二つ目は，切羽まで自律飛行で到達した際に，自動的にトンネル切羽手前でドローンの移動を停止させる役割となる。

飛行中に得た LiDAR 点群に対して検出範囲を設定し，範囲内に複数回連続で障害物を検出した場合は，停止信号を出す処理としている。また，停止信号が送られるとドローンへ指示する目標速度が全て 0，すなわちその場にホバリングする指令値が送られる仕様とした。

(4) その他の実装機能

前述した主なモジュールによる自律制御の他，後退飛行して機体を手元まで戻すリターン機能，飛行停止後に自律飛行を再開するリスタート機能，自律飛行と手動飛行の切り替え，障害物を自律飛行で回避するリルート機能（開発中）を実装する。

4. 自律飛行時の情報収集と遠隔での巡視点検手法

本開発では，現場の職員が日常的に行っている目視での巡視・点検時のデータ取得・整理の効率化，高度化，安全性確保を目指し，トンネル坑内を自律飛行するドローンのアプリケーションとして，次の情報収集手段を採ることとした。

4.1 現場モニタリングシステム

現場モニタリングシステムには，360 度カメラによる撮影画像より，現場内をウォークスルー可能な VR 空間を生成できる

「OpenSpace」(Open Space Labs, Inc)を採用した。

このシステムでは、スマートフォンのアプリ上で現場の平面図上のスタート地点を指定すると、アプリと接続した 360 度カメラで撮影が開始される。撮影が終わり、撮影画像をクラウド上にアップロードすると、平面図上に撮影した経路上に画像がプロットされる。この処理後に、アプリや Web ブラウザでアクセスすると、連続した 360 度画像で表現される VR 空間内を自由に動き回り、BIM/CIM モデルや過去画像と連動比較しながら現場を確認できる。

4.2 ハイブリッドカメラ

自律飛行中にトンネル施工中全線の情報を網羅的に自動収集する現場モニタリングシステムに加え、ピンポイントの詳細情報を取得、記録する手段として、追加のカメラについて検討を行った。

カメラは、ドローン飛行中に向きや倍率の変更操作を任意で行い、切羽等の点検対象を詳細に確認できるようにするため、ハイブリッドカメラ DJI Zenmuse™ H20T を採用することとした。

本カメラは、ドローンの下部に装着する。ズーム、ワイド、熱赤外線カメラを一つの筐体に内蔵し、1 回のシャッターで各カメラ画像/映像を同時記録することができる。画角、倍率の異なる 2 種類の RGB 画像に熱赤外線画像による温度情報を加えることで、色情報だけでは判別できない情報が取得できることを期待して試行活用することとした。

5. トンネル坑内自動巡視システム

5.1 現場検証

本システムを実現場で運用する際の適用性を探るため、現在施工中の令和元-4 年度横断道羽ノ浦トンネル工事(発注者:国土交通省四国地方整備局)において、2022 年 1 月、及び 6 月に現場検証を行った。

検証時点でのトンネル掘削延長約 400m (2022 年 1 月)、約 600m (同 6 月)を対象に「坑口(開始点)に静止した状態から自動離陸を行い、トンネル坑内の自律飛行を行った後、切羽(終了点)に辿り着くと自動で停止(ホバリング)する」ことを目標に飛行検証を行った。飛行速度は、低照度下で写真撮影を行うことを踏まえ、ブレ対策として 1m/s に設定した。また、坑内に照明が設置されているものの、屋外と比べて絶対的に暗く、ドローン内蔵のビジュアルオドメトリで相対速度を推定する際に不利に働く可

能性がある。加えて、坑内には、重機や機械設備が駐機・設置され、天端には風管が存在するが、それらの配置は日々変わる。また、このため、自律制御に用いるテンプレート点群との照合が行えるかも検証項目とした。

5.2 坑内の自律制御によるドローン飛行

トンネル坑内の自律飛行計画は、地面からの飛行高度 3m、トンネル断面の飛行位置は、重機や機械設備等の障害物が左側に偏っていることと日々の配置状況を踏まえて、センターから右に 0.75m、または 1.5m を適宜切り替えて設定した。障害物検知は、Matrice 300 に備わっている障害物センサーは停止し、自律飛行システムの機能を使うこととした。前方の障害物検知は、進行方向に障害物がある場合の保安距離や切羽手前での停止距離を踏まえて検知距離 20m とし、左右の検知距離は 1.5m と設定した。

検証を開始すると、前方に障害物がない状況で障害物検知が発動し、飛行が停止する状況が発生した。飛行ログを解析すると、ビジュアルオドメトリ等から得ている機体の飛行速度を 0m/s と誤認し、指定する 1m/s まで加速する際に機体が過度に傾斜、その際、水平方向の障害物の有無を確認している LiDAR が、機体の傾きとともに地面を照射し、障害物検知が発動していることが原因と推測された。施工中の坑内の地面は、照明はあるものの屋外に比べ照度が低く、照明直下と照明間では照度が一定ではない。また、地面に轍はあるものの特徴に乏しくビジュアルセンサーには不利な状況にある。このため、機体搭載の下方ライトを点灯して飛行することで、機体のビジュアルオドメトリを補助し、速度の誤認が起らないように対処した。上方ライトについては、後述する 360 度カメラに光が写り込むため、常に消灯とした。

障害物の誤検知があったものの対処後の自律飛行自体は、坑口でスタートの指示を与えた後は、事前に立てた飛行計画通りの位置を進行し、予め指定した切羽 20m 手前まで問題なく飛行することができた。坑内の自律飛行状況を図-5、切羽を認識してホバリングしている状況を図-6 に示す。テンプレート点群との照合の障害となる重機、機械設備等で飛行環境に変化がある場合でも、誤作動を起こすことはなく、安定した飛行が確認できた。また、万が一に備えて、自律飛行中のオペレーターによるマニュアル操作による介入を確認したが、制御を問題なく切り替えることができた。



図-5 坑内の自律飛行状況



図-6 切羽認識による自律飛行停止

5.3 坑内の網羅的な情報収集と共有

坑内全線の情報収集は、自律飛行するドローンから 360 度カメラにより行う。坑内は、照明とその陰で明暗差が大きく、移動するドローンから撮影することため、画像にブレや白飛び・黒潰れが発生する恐れがある。このため、360 度カメラは、センサーサイズが 1 型と大きく暗所耐性が高い RICOH THETA Z1 を採用し、ドローン上部に艤装した。

360 度カメラは、現場モニタリングシステム OpenSpace と連携する目的で使用しており、自律飛行開始前にスマートフォンのアプリにより遠隔から指示を出すことで撮影が開始される。撮影は、0.5 秒間隔で行われ、自律飛行速度 1m/s 設定時は、1m 毎に 2 枚、飛行距離 400m の場合、800 枚の 360 度画像が取得される。撮影時間に要する時間は、ドローンの自律飛行時間と同じで、約 7 分程度で完了した。この枚数を人の手で整理することは不可能であるが、OpenSpace は AI による自動処理で図面上にプロット・整理し、飛行経路上を任意の視点でフライスルー可能な VR 空間を生成する。通常、人による撮影では、シャッターを切る着目点のみの画像が残るが、本撮影方法であれば、飛行経路上の状況を網羅性のある形で記録することができる。また、地上からの撮影と異な

り、空中からの撮影のため、人の目線からは死角になる箇所や目の届きにくい天端付近の状況も記録することができる。

OpenSpace での処理は、撮影画像をサーバーにアップロードすることで始まり、初期の処理には半日程度かかる。しかし、数回分処理を行うことで AI により処理が最適化される。本検証では、最終的に 10 分程度に処理時間が短縮され、結果の迅速な確認が可能となった。

生成された現場の VR 空間上では、当日の撮影画像はもちろん、過去画像や BIM/CIM モデルと並べて連動した比較ができる。過去画像との比較では、経時変化の確認やトンネル工事の進捗に伴い施工される覆工等により不可視になる部分の施工管理記録としての活用ができる(図-7)。また、BIM/CIM モデルと比較することにより、施工進捗や設計との差異の確認が可能となる(図-8)。

この結果は、遠隔地であっても Web ブラウザを使ってシステムにログインすることで確認することができる。空間上にコメントやデータ等を追加できるため、遠隔地からの点検、検査や、受発注者間においてにおいても非接触での情報共有を迅速に行うことが可能となる。



図-7 OpenSpace 時系列連動比較

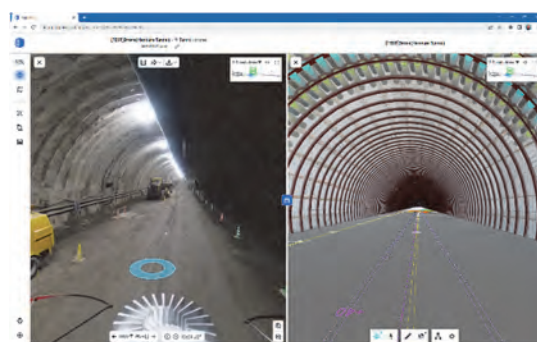


図-8 OpenSpace BIM/CIMモデル連動比較

5.4 切羽の無人点検

現場モニタリングシステムでは、坑内の網羅的な情報収集が可能な反面、切羽面等対象を絞った詳細な情報収集は難しい。そこで、ドローンに搭載したハイブリッドカメラにより、人が切羽に近づくことなく、情報収集が可能であるか検証を行った。

情報収集は、自律飛行で切羽に到達してホバリング状態にあるドローンをマニュアルに切り替え、カメラの向きやズームを操作して切羽の任意箇所の画像/映像の取得を行う。この時、ハイブリッドカメラは、ズーム、ワイド、熱赤外線画像/映像を1回のシャッターで同時記録することができる（図-9）。ワイド画像で全体、その中心部の詳細をズーム画像、全体の温度情報を熱赤外線画像で記録でき、動画も同様に記録可能である。坑内では、カメラセンサーにとって照度が不足する場面もあるが、ドローン搭載のジンバルでのカメラ制御により、ブレのない鮮明な画像を取得することができた。

通常、ワイドやズームの画像単体では、色情報からしか状況を判別することができない。これに同時撮影した熱赤外線画像の温度情報を組み合わせることで、水の滲出状況の検出が確認できた。検証期間中は、切羽面からの水の滲出はなかったが、切羽面亀裂や鏡吹付け裏面から水が滲出していた場合は、次サイクルの施工時に留意すべき情報として活用できるものとする。

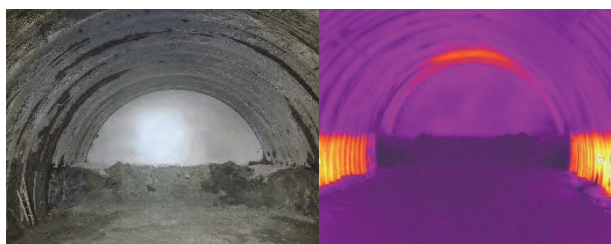


図-9 ハイブリッドカメラによるワイド画像（左）/熱赤外線画像（右）

これらの記録情報は、ドローン送信機のモニター上で随時確認することができる。通常であれば、ドローン操縦者のみが確認できる情報であるが、リアルタイムに坑外や事務所等の遠隔拠点にいる作業員、職員、発注者等に映像を共有できれば、安全性確保や迅速な情報共有の面から情報の価値が向上すると考え、遠隔臨場ドローンシステム²⁾を活用することとした。本システムは、ドローンから送られてくる映像情報を送信機から坑内Wi-Fiを通して、クラウドサーバ

ー上にアップロードし、遠隔地のPCやタブレットのWebブラウザから、クラウドサーバにアクセスすると、リアルタイムで現地の情報を閲覧できる技術である。映像遅延は、ネットワークの品質に左右されるが、検証期間中は、3～5秒程度の遅延があったものの鮮明な映像で坑内の状況をほぼリアルタイムで確認することができた（図-10）。



図-10 PCによる坑内ドローン点検リアルタイム確認

6. おわりに

トンネル坑内自動巡視システムは、ドローンの自律飛行に現場モニタリングデータ処理の自動化を組み合わせ、現場職員が日常的に行っている巡視のデータ取得・整理の効率化、高度化を図ったものである。併せて、ハイブリッドカメラによる詳細な情報取得とその情報のリアルタイム配信を組み合わせることにより、発破直後や作業間に、自律飛行で切羽監視を行うことができ、現場職員、作業員が切羽に近接することなく遠隔地でも的確に状況を把握可能となった。

現在、本システムは、自律飛行制御の高度化に加え、搭載機器の防塵性向上、操作UI（User Interface）の改善等を行い、熟練のオペレーター不要で現場職員が坑内を手軽かつ安全に飛行させて活用できることを目標に現場実装に取り組んでいる。

今後は、開発と併せて、現場での運用を進め、他現場への水平展開を図る計画である。本稿が、現場の施工管理の生産性向上、安全管理の高度化に資する技術として参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 上原広行，松岡祐仁，長尾健：「全自動ドローン」で測量と安全巡視を無人化，建設施工と建設機械シンポジウム，2021。
- 2) 松岡祐仁，林秀晃，吉井太郎：遠隔臨場ドローンシステムの開発，建設施工と建設機械シンポジウム，2021

35. 情報開示型自律施工技術基盤の開発状況と今後の展望

(国研) 土木研究所
(国研) 土木研究所
(国研) 土木研究所

○ 遠藤 大輔
山内 元貴
橋本 毅

1. はじめに

建設業界は深刻な人手不足に陥っており、世界規模の少子高齢化の潮流を受け、労働力不足は今後さらに加速すると見込まれる。建設現場における生産性向上のため、国土交通省は2016年度より測量・設計から施工・管理にいたる全てのプロセスにおいて、ICTの活用を前提とした「i-Construction」を推進してきた。その結果、従来（2015年度）と比較して、生産性は17%向上したと報告されている¹⁾。「i-Construction」では、情報取得・伝達手法の効率化、建設機械の操縦支援等を実現してきたが、さらなる生産性向上を目指し、一人のオペレータが複数の建機を同時に運用しながら建設工事を行う自律施工の実現が期待されている。自律施工では、建設機械やシステムが認識した周囲の環境と設計図から、動作を自動かつ適切に計画して工事を行う建設機械やシステムが必要となる。このような自律施工の実現には、高速無線通信やロボティクス、AI等の先進的な技術を有する新たな協力者を建設業界へ巻き込んでいくことがキーになると考えられる。しかし、これまで建設業界との拘わりがなかった方々にとって、建機を保有し、それを自動運転が可能となるよう改造し、開発成果物の検証の為にフィールドを確保する、といったことは容易ではなく、先述した新たな協力者の参入を困難にしている。また、これまでは自律施工の研究開発は、個社での技術開発が主であり、研究開発の重複が業界全体として生じており、費用対効果を得ることが難しい実状がある。この状況を改善するためには自律施工を実現するシステムの協調領域を明確化していくことが重要である旨報告されている²⁾。

このような社会的ニーズに対し、土木研究所先端技術チームでは、効率的に自律施工技術を開発し、広く普及することを目的として、情報開示型の自律施工技術基盤の整備を進めている。OPERA（Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy）と名付けられた、このオープンなプラットフォームを活用することで、開発成果物の再利用性を高めることに加え、研究・投資の重複回避や先進的な技術を有する大学やベンチャー企業等の新規参入が容易になると期待される。本稿では、OPERAの



図-1 OPERA システム構成

開発状況と今後の開発方針や展望について記す。

2. 情報開示型自律施工技術基盤 OPERA

OPERAは、共通制御信号、ミドルウェア、シミュレータ、建設機械および実験フィールドを含む実証試験環境により構成されており、自律施工や遠隔操縦等の新技術開発において、シミュレータをベースにしたソフトウェア開発が可能であることに加え、その開発物を修正せずに実機に接続して検証することが可能である。図-1にOPERAのシステム構成を模式的に示す。以降の小節では、各構成要素について詳細を記す。

2.1 共通制御信号

開発するシステムの再利用性を確保することは、開発の費用対効果を向上するために重要である。加えて、自律施工を推し進めるためには、異なるメーカーの異なる機種を横断的に制御できることが望ましい。土木研究所では、図-2に示す通り、異なるハードウェアでも同様に制御が可能となるようハードウェアを抽象化し、機械間相互の連携性を向上させる建設機械の共通制御信号を提案する。提案する共通制御信号の範囲および内容については、建設工事におけるデータ交換標準に関する国際規格であるISO15143³⁾をベースとして、車両機械の制御特性への依存性の観点から、図-3に示す通り機能ブロックを設定し、油圧ショベルを対象とした制御信号がど

のようにあるべきか検討した。

まず機能ブロックの一つとして、建設機械には油圧制御コントローラ（=油圧アクチュエータを制御する機器）が搭載されており、建設機械の各アクチュエータの逐次的な出力を制御するものとする。これに加え、油圧制御コントローラの上位のコントローラとして車両動作コントローラ（=車体の制御特性を隠蔽した自動運転制御インタフェースを提供し、建設機械の油圧制御コントローラへの指令値を決定する。また、車体に搭載されたセンサ情報を用いた高速なフィードバック制御も担う）が搭載されており、これは車両の質量や油圧系といった制御特性に強く依存するコントローラとした。

以上をまとめて、ISO15143 Part1 に規定されるシステムアーキテクチャにおける『建設機械』に相当すると、ここでは便宜上みなす。車両動作コントローラは、ISO15143 Part1 に規定される上位システムである『オペレーションシステム』に相当する機能ブロック中の動作計画プランナ（=施工管理システムが決定する作業タスクに応じ、建設機械の動作を計画し、車両動作コントローラへ指令を与える）と通信し、動作計画プランナが出力する車両動作指令に従った建設機械の制御を行いながら、車体センサ情報を伝達する。動作計画プランナは、同じオペレーションシステム内の上位システムである施工管理システム（=例えば、3D 図面から、対象エリアの掘削範囲、深さを計画するソフトウェア）と通信をする。動作計画プランナは、車両の制御特性への依存性が小さい機能ブロックである。図-3 中において、一般的に非公開又は非設定となっている動作計画プランナ、車両動作コントローラ、油圧制御コントローラ間の通信（C1、C2、D1、D2）を対象として、共通制御信号の検討結果を ISO15143 Part2 に規定されるデータ辞書に相当する一覧表にまとめた。なお、ここでは便宜上、車両動作コントローラと動作計画プランナを、それぞれ『建設機械』『オペレーションシステム』の境界として記述しているが、自律施工システムの実装上は、車両動作コントローラが建設機械上に存在することは要件ではなく、逆に動作計画プランナの実体が建設機械の中にあっても良い、ということをごとわておく。

ここでは、例として表-1 に共通制御信号の一部を示す。共通制御信号の詳細は、土木研究所先端技術チーム HP⁴⁾にて公開している。

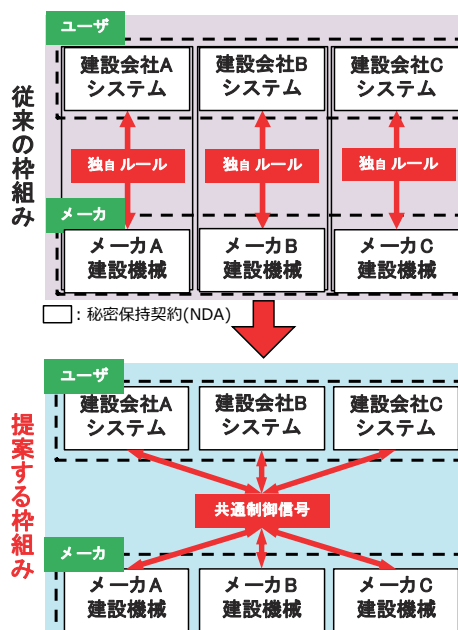


図-2 提案する制御信号共通化による期待

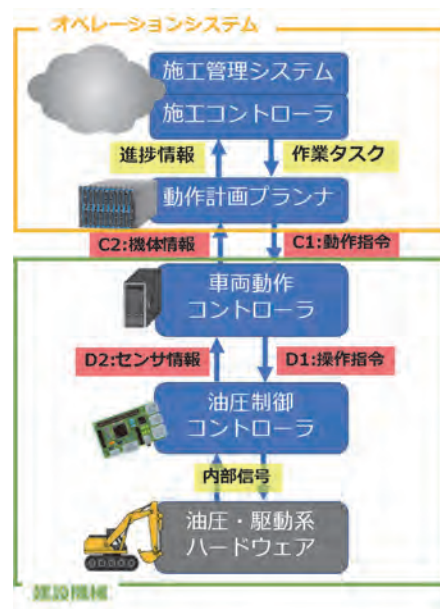


図-3 自律施工のための機能ブロック図⁴⁾

表-1 共通制御信号（原案）の一部

区分	動作指令名	制御パラメータ名	内容
C1	刃先制御目標	目標位置	バケット刃先位置(X,Y,Z)
		目標姿勢	バケット刃先姿勢 (Quaternion)
		移動速度	刃先目標位置・姿勢への 移動速度
C2	機械稼働状態	燃料残量	燃料容積残量
		原動機回転速度	原動機の回転速度
D1	操作レバー入力	ブーム	ブームレバー入力
		ブーム動作方向	ブームの動作方向入力
D2	センサ情報	車体姿勢ロール	上部旋回体のロール角度
		車体姿勢ピッチ	上部旋回体のピッチ角度

2.2 ミドルウェア

自律施工を実現するためのソフトウェアの機能単位であるプロセス間の通信をサポートするミドルウェアに、ROS(Robot Operating System)⁹⁾を採用することとした。これにより、ハードウェアの抽象化、および自律分散系のシステムインテグレーションが容易となるため、開発成果物の再利用性を確保し易い。また、自律ロボット用に多数の実績がある既存ライブラリ群を、自律施工用に効率的に転用していくことが可能になると期待できる。

2.3 シミュレータ

自律施工ソフトウェアの開発を行う上で、実機や実環境と並行してシミュレータでの開発を行うことにより、研究開発の効率化が期待できる。OPERAでは実機と同様に、共通制御信号に対応したシミュレータを提供する。シミュレータ上で開発された自律制御ソフトウェアは、ソースコードを変更することなく実機上で動作・検証が可能である。

提供するシミュレータは、ゲーム開発に広く利用される Unity⁶⁾上に、Nvidia PhysX⁷⁾(図-4。以下、PhysX 版)および AGX Dynamics⁸⁾(図-5。以下、AGX 版)の2種類の物理エンジンを用いて、以下の機能を実現している。

- (1) 建設機械の諸々の物理パラメータを設定ファイルから読み込み、建設機械の物理的な挙動をシミュレータ内で計算
- (2) 土砂の物理的な挙動をシミュレータ内で計算
- (3) 汎用の PC にて、実時間で計算
- (4) 実機用に開発したソフトウェアをソースコードの変更せずに、シミュレータ上で動作
- (5) 上記(1)~(4)の結果を視覚的に提示

AGX 版には土砂モデル(土の挙動を再現する計算モデル)や土砂と建機との力学的な相互作用を演算するライブラリがある一方で、PhysX 版にはそのような機能は存在しないため、公開されている土砂モデル⁹⁾を参考として、独自に簡易的な実装を施している。PhysX 版は Unity のライセンスさえ有していれば、追加費用は発生しない。他方、AGX Dynamics は有償のソフトウェアである。シミュレータの利用者が土砂モデルの正確性、計算の高速性といった必要となる性能面と費用面から検討し、PhysX 版と AGX 版のどちらを用いるか選択できるようにしている。

2022 年 8 月時点では、Unity 上に建設 DX 実験フィールドの簡素な地形モデル、および油圧ショベルとクローラダンプのシミュレーション用のモデルを作成し、GitHub 上に Unity プロジェクト一式を公開している¹⁰⁾(図-6)。各建設機械のモデルは、走行系の並進速度と旋回速度、作業機各軸の角度指令、および荷台の角度指令をミドルウェアから受信し、その物理挙動をシミュレータ上で計算した上で、掘削

による地形(土砂)の変形や粒子化、粒子化した土砂の運搬、粒子化した土砂の地形への一体化といった一連の現象を視覚的にユーザーへ 3D 表示することが可能である。



図-4 シミュレータ (PhysX 版) と ROS との連携



図-5 シミュレータ (AGX 版) と ROS との連携

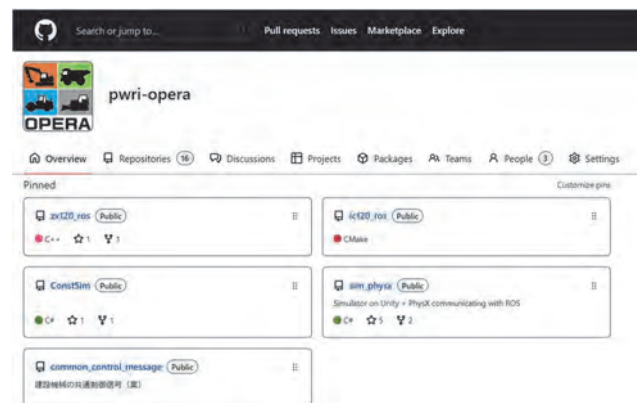


図-6 OPERA の公開パッケージ¹⁰⁾

2.4 実証試験環境

前述した共通制御信号およびミドルウェアに基づいて作成した機能モジュールおよびアプリケーションの実証試験を行うためのツールとして、OPERAでは実機と実環境を提供する。本節ではこれらについて、2022 年 8 月末時点の整備状況を記す。

OPERA が提供する建設機械の実機として、油圧ショベル(12t 級)とクローラダンプトラック(11t 積)をそれぞれ 1 台、土木研究所にて保有している。図-7にこれらの概観とシステム構成の略図を示す。各建設機械共に、RTK-GNSS コンパスが搭載されており、緯度・経度・高度に加え、方位情報を計測できる。これに加え、油圧ショベルには旋回部と作業機(ブーム軸、アーム軸、バケット軸)の各軸にアブソリュート

エンコーダを取り付けてあり、角度を取得できる。また、キャビンの側方には 6 軸 IMU が搭載されており、車体の姿勢を計測できる。なお、油圧ショベルについては、各クローラの回転数を取得するセンサは未実装である。一方でクローラダンプには、左右のクローラそれぞれにロータリエンコーダを取り付けており、クローラの回転量を計測できる。また、6 軸 IMU が荷台およびキャビンに取り付けられており、荷台の傾きや車体の姿勢を計測できる。

各建設機械には動作計画プランナから出力された信号を受け取り、建設機械の動作を制御するコントローラが車載 PC 上に実装されている。この PC が図-3 における「車両動作コントローラ」に相当し、外部制御インターフェースを介して「油圧制御コントローラ」と通信を行い、建設機械の各アクチュエータを制御する。加えて、各建設機械にはメッシュ WiFi 型のアクセスポイントが搭載されており、各車載 PC は、メッシュ WiFi 経由で他の車載 PC や管制室と通信する。なお、このメッシュ WiFi とは独立した特小無線通信経路で、可搬式の操作盤を用いて遠隔操縦や非常時の緊急停止が両建設機械ともに可能である。

さらに OPERA では、茨城県つくば市の土木研究所および国土技術政策総合研究所内に整備した建設 DX 実験フィールドの土工フィールド(図-8)を試験場として提供する。土工フィールドは、約 2.6 万 m² の敷地面積があり、併設するヤード内にある約 1500 m³ の土砂材料を用いて、試験施工が可能である。また、土工フィールド内には、遠隔操縦や自律施工の管制用の建屋があり、実験用の電源や PC、インターネット回線や RTK-GNSS の基準局といったインフラ設備を有している。さらに土工フィールド全体をカバーする、3 台のメッシュ WiFi および 2 台のローカル 5G の基地局アンテナが常設されている。

3. OPERA の今後の開発方針

前章では、OPERA の各構成要素の 2022 年 8 月時点での現状を記した。本章では、各構成要素の今後の開発方針を示す。

3.1 共通制御信号の改善

公開中の原案を基に、建機メーカーをはじめとした関連企業との共同研究を通じて、原案やスコープそのものの改定を必要に応じて行う予定である。このような建設機械制御信号の共通化は、国土交通省が設立した「建設機械施工の自動化・自律化協議会」のスキーム(図-9)における安全・基本設定 WG の検討項目である「協調領域の設定に関する検討」¹¹⁾の一部に相当するため、今後は上記共同研究で改定した原案を同 WG へ提出し、WG にて審議・検討していくとともに、本共通制御信号の規格化について、同 WG より提言される見込みである。

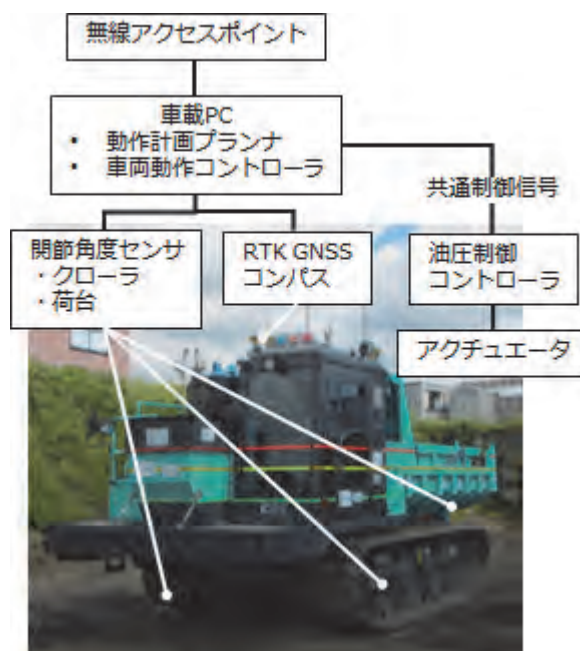


図-7 OPERA が公開する建設機械



図-8 土工フィールド

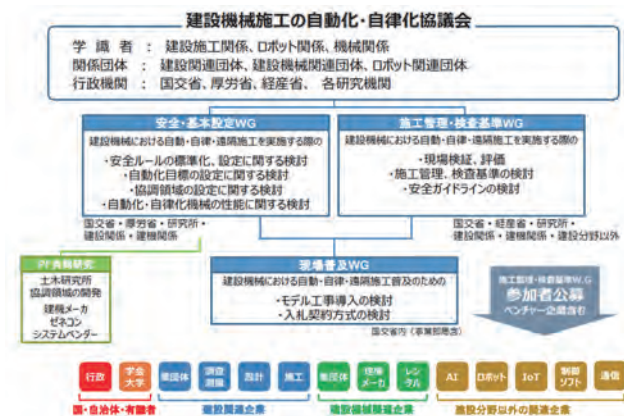


図-9 建設機械施工の自動化・自律化協議会⁸⁾

3.2 ミドルウェアの変更

2.2 節に記したように、OPERA のミドルウェアには ROS を採用しているが、ROS は現行の最新版である Noetic Ninjemys をもって開発を終了し、2025 年 5 月に保守サポートを終了することが、開発元である Open Robotics より公表されている。ROS の後継として、ROS2¹²⁾が公開されており、当面はメジャーアップデートを伴いながら開発・保守が継続される見込み（表-2）であるため、OPERA のミドルウェアについても今後は基本的に ROS2 を採用していく計画である。

表-2 ROS/ROS2 のディストリビューション

ROS			ROS2		
Distribution	Release	EOL	Distribution	Release	EOL
Jade Turtle	2015.5	2017.5	Dashing Diademata	2019.5	2021.5
Kinetic Kame	2016.5	2021.4	Eloquent Elusor	2019.11	2020.11
Lunar Loggerhead	2017.5	2019.5	Foxy Fitzroy	2020.6	2023.5
Melodic Morenia	2018.5	2023.5	Galactic Geochelone	2021.5	2022.11
Noetic Ninjemys	2020.5	2025.5	Humble Hawksbill	2022.5	2027.5
備考: Noetic Ninjemys にて開発を終了			備考: Humble Hawksbill 以降も開発を継続		

3.3 シミュレータの拡張

3.2 節に記したように、今後はミドルウェアに ROS2 を採用するが、ROS2 ではプロセス間通信の仕組みが根本的に変更されるため、シミュレータもこれに対応させていく方針である。

また、3.4 節に後述するように、OPERA が提供する建機についても拡充していく計画であるため、シミュレータが提供する各種の建機モデルについても同様に拡充する。

加えて、現在のシミュレータは単一の PC 上で動作させる前提で設計しており、リアルタイムで動作可能な建機の台数は1~2台程度が限界であることが判っている。一方で実際の工事現場は、より台数が多いケースが大半であることを考慮すると、こういったユースケースに対応できることが望ましい。そこで、大規模な工事現場をシミュレート可能となるよう、シミュレータのスケーラビリティを向上することを目指し、ハードウェア/ソフトウェアの両面から、アーキテクチャレベルの再設

計と効果の検証をしていく計画である。

3.4 実証試験環境の拡充

対応建機については、2.4 節に記した2機に加え、油圧ショベル（20t級）、ブルドーザ(9t級)、振動ローラ（機種クラス未定）を順次追加する計画である。これにより、従来可能であった掘削積込み・運搬に加え、敷均し・締固めの機械土工の自律化技術開発が可能となる。

土工フィールドについては、各種のインフラ整備を進める。具体的には、以下のようなものを増設していく計画である。

- ① メッシュWiFiの無線機の増設
- ② 建機の給油施設
- ③ ネットワーク監視カメラの整備
- ④ 場内アナウンス用のスピーカの設置
- ⑤ 外部ネットワークからのアクセシビリティ

必要なものについて補足すると、上記の①は、メッシュWiFiの通信可能エリアを拡大することに加え、無線通信品質のさらなる安定化を狙ったものである。また、⑤は本土工フィールドおよび建機のネットワーク設備へ、土木研究所の外部からもアクセス可能な手段を確保する。これにより、各建機の遠隔操縦をインターネット経由で行うことや、あるいは外部のクラウドシステムを活用することも可能としていく予定である。ただし、本稿執筆時点では、十分なレベルのセキュリティを担保できる具体的なネットワーク構成は確定しておらず、セキュリティポリシーの見直しを含め、関係各所と継続的な協議が要る状況であることを付記させていただく。

4 おわりに

本稿では、開発成果物の再利用性を高めることに加え、研究・投資の重複回避や先進的な技術を有する大学やベンチャー企業等の新規参入を促すことを目的として、土木研究所先端技術チームで整備を進める自律施工技術基盤 OPERA について、現状と今後の開発方針を紹介した。OPERA のミドルウェアおよびシミュレータについては、GitHub にて公開している。OPERA は誰でも利用が可能であり、構成要素の全て又は一部を、利用者の目的に合わせて活用いただける。実際に利用した方からのフィードバックは大変貴重であると捉えており、OPERA に対する質問や改善要望は、GitHub の issue やメール等を通じて土木研究所 先端技術チームへご連絡いただければ幸甚である。これらに応える形で、OPERA の利便性向上のための継続的なサイクルを実現していくことが、今後の取組みの主幹となる。

参考文献

- 1) i-Construction推進コンソーシアム 第7回企画委員会資料
「i-Constructionの取組状況について」
https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/06.7_kikaku_siryoku6.pdf (2022/8/18参照)
- 2) 一般社団法人日本建設業連合会 土木工事技術委員会
土木情報技術部会 情報利用技術専門部会:建設業のためのロボットに関する調査, 建設マネジメント技術, pp47-51, 2020 年 11 月号
- 3) ISO 15143-1:2010, Earth-moving machinery and mobile road construction machinery -- Worksite data exchange -- Part 1: System architecture
- 4) 国立研究開発法人土木研究所技術推進本部先端技術チーム HP : 建設機械の共通制御信号 (案),
<https://www.pwri.go.jp/team/advanced/papers.html>
(参照2022-8-18)
- 5) Open Source Robotics Foundation: ROS, <https://www.ros.org/>,
(参照 2022-8-18)
- 6) Unity:リアルタイムコンテンツ制作を担う世界をリードするプラットフォーム, <https://unity.com/ja> (参照2022-8-29)
- 7) NVIDIA.DEVELOPER:PhysX,
<https://developer.nvidia.com/physx-sdk> (参照2022-8-29)
- 8) Algorix: AGX Dynamics, <https://www.algoryx.se/agx-dynamics/> (参照2022-8-29)
- 9) Daniel, H., et al:“Real-Time Mud Simulation for Virtual Environments”, ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, i3D 2018
- 10) GitHub: pwri-opera, <https://github.com/pwri-opera> (参照 2022-8-29)
- 11) 国土交通省HP : 建設機械施工の自動化・自律化技術,
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000049.html (参照2022-8-19)
- 12) ROS2 Documentation: Humble,
<https://docs.ros.org/en/humble/>, (参照 2022-8-18)

36. ニューマチックケーソン工法における自動掘削システムの開発

天井走行式掘削機の自動化および排土バケツ自動認識

日本工業大学
日本工業大学
株式会社大林組
株式会社大林組
株式会社大本組
株式会社大本組

○ 大崎 颯成
石川 貴一朗
稲川 雄宣
照井 太一
橘 伸一
都川 信吾

1. はじめに

ニューマチックケーソン工法(以下、ケーソン工法)では、ケーソン下部に設置された作業室内の天井に取り付けられた天井走行式掘削機(以下、掘削機)により、掘削作業を行う。この作業は、高気圧環境下にて行うため、地上の遠隔作業室から遠隔操作により掘削作業が行われてきた。この掘削作業は、作業員の経験によって施工される部分が多く、作業の効率性は、各々の作業員の熟練度に依存している。一方で、近年の少子高齢化、若手作業員の減少により、人手不足や、技術継承が課題となっており、AI やロボット技術を取り入れた掘削作業の自動化が望まれており、自動化に向けた研究が行われている¹⁾など。

このような背景のもと、著者らはこれまでに、オペレータの負担軽減および省力化を目的として自動掘削に向けた掘削機の自律制御システムの構築および実機による自動掘削の検証を行ってきた。²⁾³⁾ 本論文では、この自動掘削システムの概要に加えて、新たに開発した LiDAR 点群からの排土バケツ認識手法と、自動認識を組み入れた掘削からバケツへの排土動作の検証試験について述べる。

2. 自動掘削システムの概要

システムの構成図を図 1 に示す。本システムは作業室内の天井走行式掘削機、環境計測用 3D LiDAR、および遠隔管理室に設置した遠隔制御 PC、状態管理 PC、制御パラメータ計算 PC から構成される。それぞれのシステムは LAN により接続されている。

掘削機の概略図を図2に示す。掘削機は、作業室天井に固定されたレールから吊り下げられており、レール上を走行することで移動する。また、走行、旋回、ブーム上下・伸縮、バケット上下・回転の合計6軸で構成されており、走行、旋回、バケット回

転部にはロータリーエンコーダ、ブーム上下・伸縮、バケット上下には、シリンダー部にポテンショメータが取り付けられている。また、掘削機はもともと遠隔操縦用にPLC(Programmable Logic Controller)が搭載されており、PLCに遠隔操縦PCとレバー入力装置(操作盤)が接続されている。自動操縦時に操作盤を操作した場合には、操作盤での動作が優先される。

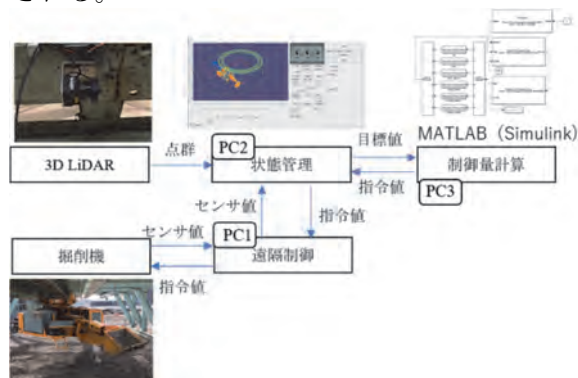


図-1 システム構成図

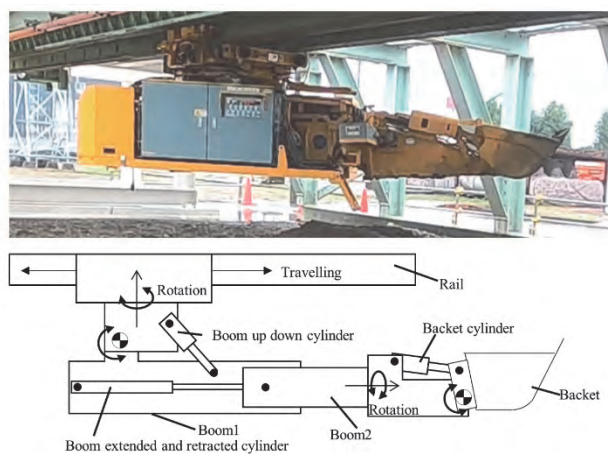


図-2 掘削機概略図

自動掘削は、状態管理ソフトからの指令により

行われる。状態管理ソフトは LiDAR から得た点群により掘削位置や排土位置を自動決定し、掘削機の目標位置や姿勢と、掘削機に取り付けられたセンサ値を制御パラメータ計算 PC に送信する。制御パラメータ PC は、目標値とセンサ値との差分から制御量(レーバー入力値)を自動決定し、状態管理ソフトを通して遠隔制御 PC に送信する。遠隔制御 PC は、制御量に基づいて、掘削機の PLC に指令値を送信する。

3. 掘削機のモデル化と制御

3.1 掘削機のシステム同定

掘削機の制御パラメータを決定するためには、掘削機の各駆動軸について、入出力関係を表す数学モデルを求める必要がある。モデル化は、運動方程式などの理論式から求める方法や、実際の入出力関係に着目して理論式を当てはめるシステム同定などがあるが、理論式から求める場合、掘削機の油圧系統や、機械的な摩擦、各構造物の質量、慣性力など様々なパラメータの情報が必要となり、正確な理論式を求めることは極めて困難である。そのため、本研究では、実験により入出力関係を求めることでシステム同定を行った。システム同定においては、システムの次数を決める必要があるが、一般的に油圧システムの伝達関数は2次遅れ系として近似できることが知られているため⁴⁾、システムの伝達関数を式(1)で表される標準2次遅れ系と仮定して、各パラメータの同定を行った。

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

入出力関係は、軸ごとに遠隔操縦装置からステップ入力を加えたときのセンサ値を計測することで求めた。

導出した伝達関数は、実機の応答とモデル式により算出した応答を比較することで評価した。図3に走行の応答結果の比較例を示す。定性的に細部で多少の誤差が見られるが、ほぼ一致していることが見て取れる。

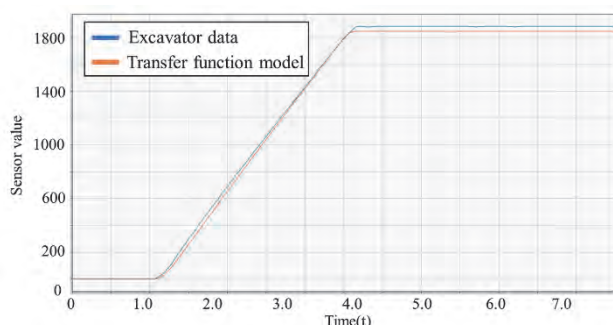


図-3 システム同定結果の評価例(走行軸)

3.2 PIDコントローラ的设计

本システムでは、各軸の制御に、PID制御を用いている。使用した制御システムのブロック線図を図4に示す。本システムでは、各軸とも、速度制御ループと位置制御ループを組み合わせることで、位置や角度の制御を行っている。目標値には、バケット先端位置から求めた各軸の角度や移動距離を与えている。各軸のセンサは、角度ではなくシリンダー長を計測しているため、それぞれの角度は、機構の幾何学的位置関係から、油圧シリンダー長に変換して目標値としている。また各軸のセンサは、位置を計測できるが、速度は計測できないため、計測周期で微分することで、速度に変換している。

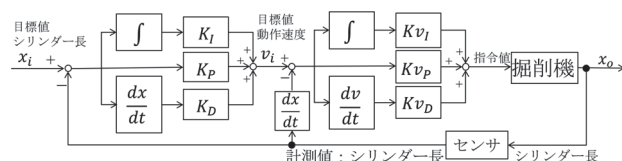


図-4 PID制御ブロック線図

各軸のPIDパラメータは、目標の制御性能を決めMATLABのオートチューニング機能を利用して値の概算を求めた後、実機実験により、軸ごとに各パラメータを微調整し決定した。

3.3 掘削機の位置・姿勢の決定方法

掘削機の自動化を行うためには、掘削機の各軸の位置姿勢を自動で決定する必要がある。掘削動作や排土動作において、重要となるのは、バケット先端位置であると考えられることから、本システムでは、バケット先端位置から、各軸の位置姿勢を逆算により求めている。掘削位置については、3D LiDARで計測した点群の中から、地表点を抽出し、0.1mグリッドに分け、各グリッドの平均高さが最も高いグリッドの中心を掘削開始位置として算出する。排土位置は後述する排土バケツ認識結果により求めた排土バケツ中心を排土位置とする。

次に、掘削・排土位置から、掘削機の位置を求めるが、ケーソン工法で主に使われるレールには、直線レールおよび円形のレールがあるため、それぞれについて、個別に算出方法を説明する。

・直線レールの場合

図5のように、バケット先端位置から、旋回中心までの距離Rを半径とした円を描き、直線レールの中心線との交点を掘削機の移動位置として計算する。

この時、距離Rは、ブームは水平で縮んだ状態とし、バケットも先端位置が水平になっている状態の時のバケット先端から旋回中心までの距離である。また、旋回角度は、バケット先端位置と旋回中

心を結ぶ直線とレール中心線とのなす角として計算することができる。バケット先端がレールから距離 R よりも遠い場合は、その距離まで、ブームを伸ばしたとして計算を行う。

・円形レールの場合

図6のように、レール中心の円とバケット先端位置を中心とした半径 R の円との交点2点のうち、現在位置に近い点、または移動可能な点を掘削機の位置として計算する。旋回角は、レール円の接線と、直線とがなす角として計算する。また、バケット先端位置によっては、交点が存在しない。この場合、バケット先端位置から最も遠いレール上の点で掘削機が移動可能な範囲を移動位置とする。

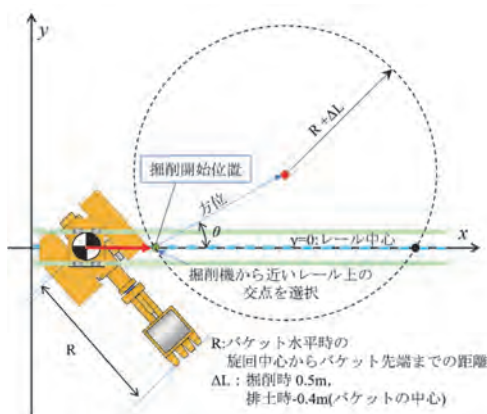


図-5 位置姿勢決定方法(直線レールの場合)

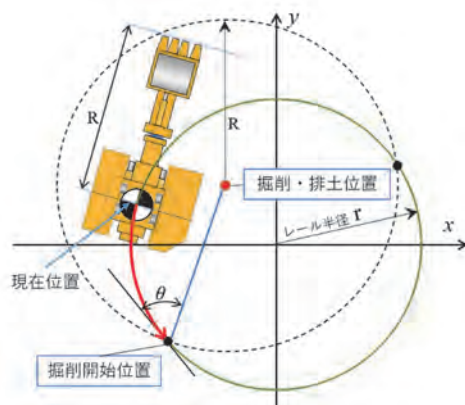


図-6 位置姿勢決定方法(円形レールの場合)

3.4 掘削動作パターン

掘削動作は、熟練オペレータによる掘削操作時の各軸の位置を連続的に時間とともに記録し、その値を各時刻における連続的な目標値とすることで生成した。掘削動作はバケット先端を土に入れ込みブームを伸ばしながらバケットを上げることで掘削する通常の掘削パターンと、バケットを任意の高さまで掘り込みながらバケットの軌跡が水平となるように移動させながらすくい上げて掘削する水平掘りのパターンを作成した。またそれぞれのパターンに対して、天井から地表までの距離

をパラメータとし、2.3mを中心として、0.25mおきに、5段階のパターンを作成した。

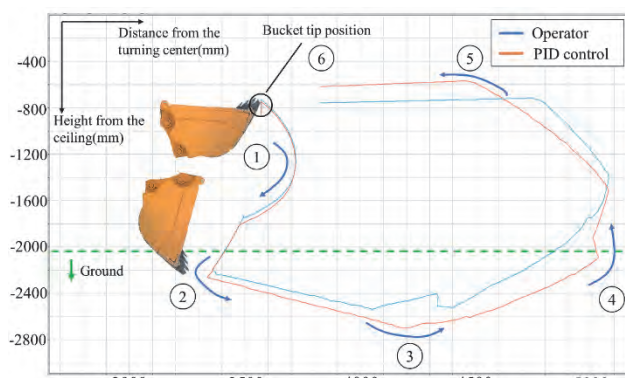


図-7 掘削動作(バケット先端位置の比較 2.05m)

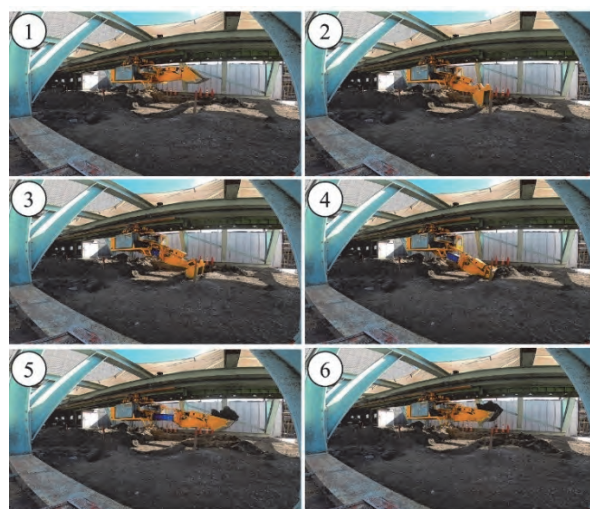


図-8 PID制御による掘削動作

図7は天井から地表まで2.05mの時の掘削パターンのバケット先端の軌跡を表示したものである。また図8は、図7の時の掘削機のPID制御時の動作写真を示す。

青色の線は、熟練オペレータによる掘削軌跡、橙色の線は、青色の軌跡を目標値としたときのPID制御によるバケット先端の軌跡である。それぞれの軌跡に違いが見られるが、これは、目標値が図7の①の位置から⑥の位置まで、10Hzで連続的に変化していくことと、操作指令から動作まで油圧に起因する遅れ時間があるため、PID制御による修正動作に入る前に、次の目標値に変化していくことが要因であると考えられる。目標値に対して精密に動かす場合は、時間により目標値を変更せずに、各軸が目標値の一定範囲内に入ったことがセンサに検知され次第、次の目標値に変更する方法があるが、この場合、地質の影響などにより、必ずしも一定範囲内にバケット先端位置を制御できないことがあること、目標値近傍に近づくまで時間がかか

り、動作が遅くなることが予想されるため、本手法のように熟練オペレータの軌跡を同一の時間で追う手法とした。また、図9に示すように、熟練オペレータとPID制御の掘削形状を計測し比較すると、ほぼ同様の形状で掘削できており、十分な掘削性能を有していると考えられる。

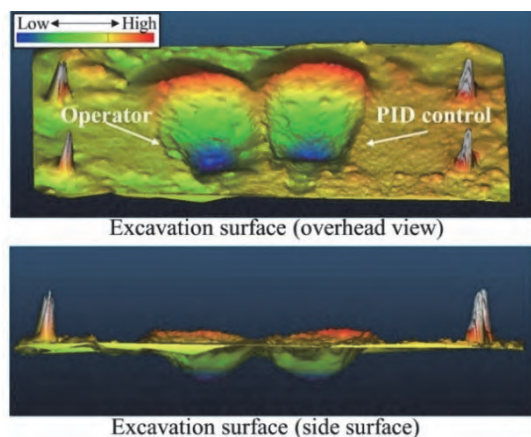


図-9 掘削結果比較

3.5 排土バケツ認識

ケーソン工法では、作業室内で発生した掘削土をケーソン外へ排土する必要がある。ケーソン上部のマテリアルシャフトから、クレーン等によりワイヤーで吊り下げた排土バケツを作業室まで下ろし、排土を行っている。掘削の自動化のためには、この排土バケツの位置を排土位置とし、ワイヤーに衝突しないように排土する必要がある。そこで我々のグループでは、作業室内天井部に取り付けた3D LiDARで取得した点群の中から、排土バケツとワイヤー位置を認識する手法を構築した。作業室内の点群は図10に示すように、排土バケツ以外にも掘削機本体やレール、作業室壁面、地表面が計測されている。排土バケツが設置される地面は、必ずしも平坦ではないため、毎回異なった位置、姿勢で設置される。また、ワイヤーを取り付けている吊り手の倒れる方向も定まっていないため、ワイヤー位置も不定である。

本節では、点群からの排土バケツとワイヤー位置の認識手法について述べる。認識は以下のプロセスで行う。

① マテリアルシャフト直下の点群の抽出

排土バケツはマテリアルシャフトより、作業室内に下ろすため、原則としてマテリアルシャフト直下付近に設置される。そこで、計算に必要な点群数を減らすため、図11右側のように、まずマテリアルシャフト直下の近傍点群のみを入力点群として抽出する。

② 点群を高さ方向で層分け

図11-a)に示すように、点群を最下点から天井点

まで一定の高さ間隔でスライスし、層分けを行う。本研究では、0.1m間隔とした。図11-b)は一層分の点群を水平面に投影表示したものである。

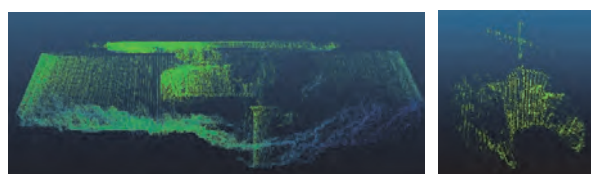
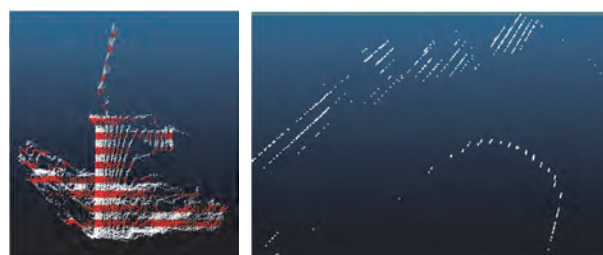
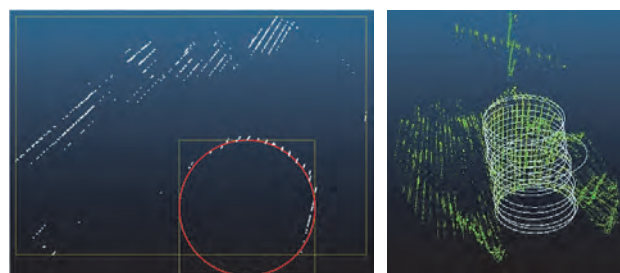


図-10 作業室内点群と排土バケツ近傍点



a) 点群の層分け例 b) 1層分の点群

図-11 高さ方向での点群の層分け



a) 一層分の結果 b) 全体の結果

図-12 円フィッティング結果

③ 各層の点群ごとに円フィッティング

各層に含まれる点群に対してRANSAC⁵⁾法(Random Sample Consensus)を用いて円フィッティングを行う。

RANSAC法はロバスト推定アルゴリズムの一つで、データからランダムに要素をサンプルしモデルを複数生成。そのモデルとデータを比較し、最も条件が当てはまるモデルを採用する手法である。

本手法では、各層の点群からランダムに3点を選び、3点を通る円を計算する。次に、計算した円のうち、排土バケツの半径から一定範囲内にある円を候補円として選択する。次に候補円の円周上の一定範囲内に含まれる点群数を比較し、最も点の数が多い円をフィッティング円として決定する。今回は、LiDARの計測誤差 $\pm 5\text{cm}$ を範囲として点群数をカウントした。

図12はフィッティング結果を示している。図12-a)は一層分の結果、図12-b)は全ての層の結果を点群上に重ねて表示した結果である。ほとんどの円は、バケツ上にフィッティングしているが、一部の円が、バケツから大きくずれていることが分かる。

これは、近傍の地表点に含まれる点群密度が高かったことが要因である。

④ 各層の円中心を結ぶ直線の導出

各層でフィッティングした円の中心点(図13-a))を結ぶ直線を求める。③の工程において、外れ値も含まれることがあるため、外れ値に強いRANSACを用いて直線フィッティングを行った。直線計算ではランダムに2点を選び、2点を通る直線を計算した上で③と同様に点の数を比較して中心線を求めた。図13-b)の赤点は中心線状の代表点をプロットした結果である。図13-a)中に含まれる外れ値の影響を受けずに、計算できていることが分かる。

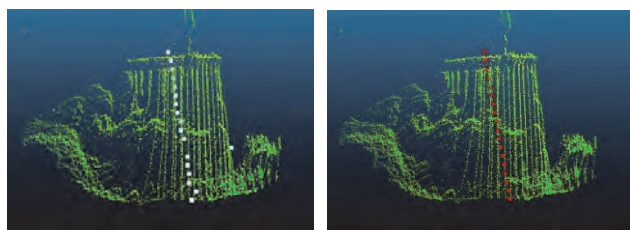
⑤ ワイヤ点群候補の抽出と直線の導出

排土バケツの上部には、天井の点またはワイヤーのみが含まれる。そのため、ここまでの処理で円が抽出されなかった層よりも、高い位置にあり、かつ天井近傍にない層の点群は、ワイヤー点であると仮定することができる。

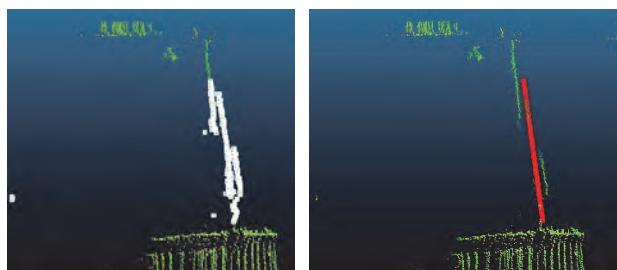
図14-a)はワイヤー候補点を示している。ワイヤー候補点についても、これまでと同様にRANSACにより、直線を求める。通常ワイヤーなどの形状はカタナリー曲線となるが、厳密な形状は必要ではないため、計算の簡略化のために直線に近似している。図14-b)はワイヤーの近似結果を示している。

以上の手順により抽出した排土バケツ中心線とワイヤー線を抽出した結果を図15に示す。

また、排土バケツが存在しない場合もあるが、この場合は、中心線の長さや、点群の高さ方向の分散により判定する。



a) 中心候補点 b) 中心線近似結果
図-13 排土バケツ中心線の抽出



a) ワイヤー候補点 b) ワイヤー近似結果
図-14 ワイヤー直線近似

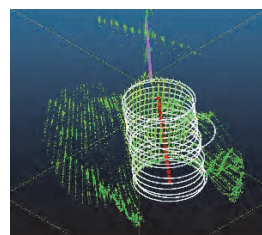


図-15 排土バケツ、ワイヤー認識結果

4. 自動掘削・排土動作管理

自動掘削では3章に挙げたそれぞれのプロセスを図16の状態遷移図に応じて切り替えることで実行する。それぞれのプロセスが終了した段階の状況に応じて、状態を選択し実行する。掘削パターンは、掘削箇所の点群の平均高さからパターンを選択し、実行する。また、地質によっては、掘削動作終了後に、バケツが土から引き抜けないことがあるため、掘削動作終了時のブーム角度、バケツ角度などから、掘削動作が正常に完了していないことを検知し、必要に応じて引き抜き動作を行う。

排土バケツが無い、または認識できない場合はあらかじめ設定した排土仮置き場に排土を行う。また掘削の終了の判定は、自動掘削開始前に状態管理ソフト上で設定した掘削対象エリア内の点群の高さが、すべて指定した高さ以下になった段階、または、あらかじめ指定した掘削回数で終了する。

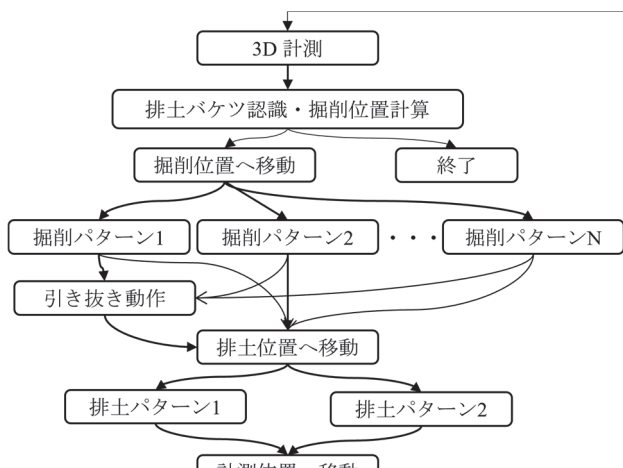


図-16 状態遷移図

5. 評価試験

5.1 試験概要

開発した自動掘削排土システムの性能を評価するため、ここまでの機能を組み合わせた総合試験を試験場において実施した。

試験場は15m×10mの長方形で、レールは直線レールが設置されている。試験場内に、3D LiDARを1台、内径1050 mm深さ600mmの排土バケツ1つを3D LiDARから5m以内に設置した。また半径1060mmの掘削範囲をあらかじめ設定した。使用し

た掘削機のバケット容量は0.25m³である。

自動掘削では、3D LiDARにより計測した点群から、掘削範囲内の最も高い点を掘削目標点とし、掘削範囲全体が指定した高さになるまで掘削を繰り返す。また、排土位置は、計測点群の中から排土バケツを自動認識させ、バケツの開口部の中心点を目標値として排土動作を行わせた。

5.2 試験結果

排土バケツが満杯になるまでの5回の計測すべてでバケツ、ワイヤーは正しく認識された。評価試験時の自動掘削から排土までの一連の動作の様子を図17に示す。バケツ先端が排土バケツ上部で、正しく排土できていることが見て取れる。図18に、排土バケツが満杯になるまでの、3D LiDARの計測結果を示す。①は掘削開始前の状態であり、計4回の掘削で排土バケツがほぼ満杯になった。左下の排土バケツを見ると⑤で排土バケツ上部まで土が到達していることが分かる。1回の排土までの時間は、毎回異なるが、計測時間も含めておよそ120秒であった。3D LiDARの計測には20秒弱かかっている。掘削前に必ず計測を行うため、熟練オペレータよりも1連の動作に時間はかかるが、掘削から排土までの作業を自動で行うことができることから、実用的な時間であると考ええる。

6. まとめと今後の課題

ケーソン工法の自動化を目的として、天井走行式掘削機による掘削から排土バケツへの排土動作までの自動化システムを開発し、実験により有効性を確認した。今後は、複数の掘削機の協調作業の実現や、より精密な動作が求められるケーソン刃口の自動掘削の実現などの課題が挙げられる。

参考文献

- 1) Naoto NEGISHI・Toshitaka TSUNEKI・Koki KIKUCHI・Toshihiro KONDO・Tetsuya KOYO・Akira KAMEI and Keigo HAYAKAWA: A Study on Autonomous Operation System of Caisson Shovels in High Air Pressure and Narrow Underground Space (Demonstration of Trajectory Tracking Control), The 4th International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2017
- 2) 角田敦史・別井雄介・照井太一・稲川雄宣・中村清志・尾形恒夫・藤澤秀行・橘伸一・都川信吾・石川貴一郎: 天井走行式掘削機の自動化に関する研究(第2報) -LiDARを利用した掘削排土作業の自動化と評価-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
- 3) 照井太一・伊藤良二・藤澤秀行・橘伸一・石川貴一郎・角田敦史・南部泰範: ニューマチックケーソン工法の自動運転に関する試験施工報告-, 土木学会 令和4

年度全国大会第77 回年次学術講演会

- 4) 西海孝夫・一柳隆義・加藤博司・小波倭文朗: 自励振動法を用いた油圧サーボアクチュエータ系の実時間パラメータ推定, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 第36巻・第1号, 2005年1月
- 5) Robert C Bolles・Martin A.Fischler: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM, Volume 24・Issue 6, pp 381~395, June 1981

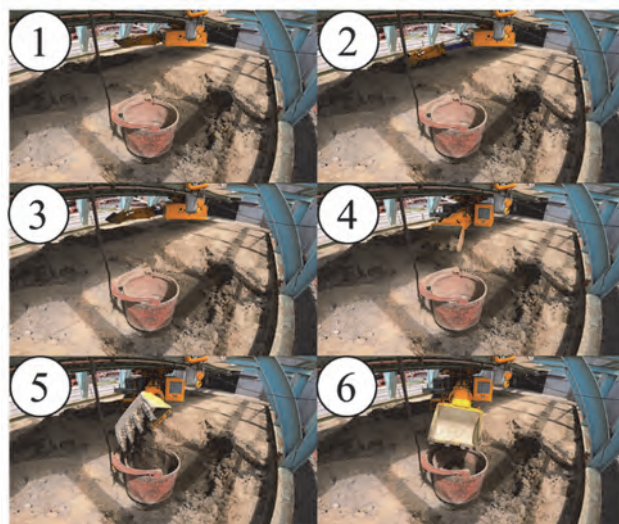


図-17 自動掘削排土動作

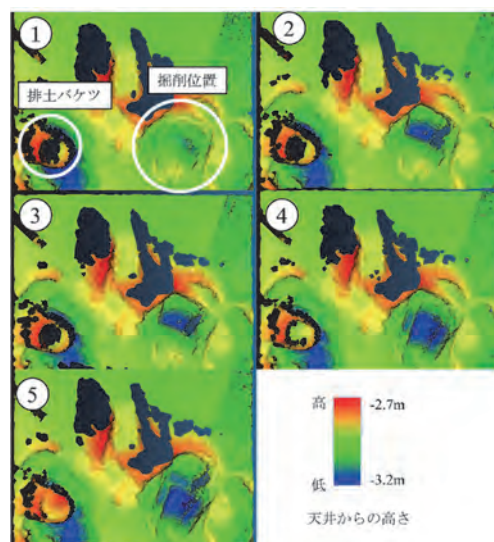


図-18 掘削排土計測結果

37. 自動化リジッドダンプの開発及び自動走行能力の検証

大成建設株式会社 ○遠藤 亮雄, 青木 浩章
田村 道生, 後藤 洸一

1. はじめに

高齢化による生産労働人口の減少が社会問題となる中、建設業界においても3K(きつい, 汚い, 危険)に代表される負のイメージによる若者離れ, さらに近い将来に高齢者の大量離職が見込まれており, 将来の担い手不足が深刻な問題となっている。これに対して国土交通省は建設業界のイメージ向上に向けて, 新3K(給与, 休暇, 希望)の実現を目指している。新3Kの「希望」を実現する取組みとしてはICT技術の活用により生産性の向上を目指す「i-Construction」を提唱しており, データの利活用により建設現場をスマート化する技術が活発に開発されている。そうした技術の1つであるロボット技術を駆使した建設機械の自動化は, 省人化による生産性の向上だけでなく, 無人化による安全性の向上も期待できるため, 多くの自動化建機が開発され, 実際に施工現場で使用され始めている。

こうした中, 筆者らは建設現場で多くの台数が稼働し, 自動化によって高い効果が見込めると思われるダンプトラックに対して自動運転システムの開発を実施してきた。そしてその開発過程において, 不整地運搬車である10t級クローラ式キャリアダンプの自動化を実現した¹⁾。今回はクローラダンプに比べて高速走行が可能な55t級リジッドフレーム式ダンプトラック(以下, リジッドダンプと称す)の自動化開発を行った。本稿では開発した自動運転システムの概要および能力検証結果について報告する。

2. 自動運転システムの概要

2.1 使用機械及び設置機器

今回自動化を行ったリジッドダンプの外観を図-1に示す。ベースマシンには小松製作所製HD465を使用し, 電気仕掛けで動作が可能なように電制化改造を行った。主な改造箇所としてはステアリングの油圧を制御する電磁制御弁や車体情報を測定するための各種センサの増設を行った。また, 自動運転モードとマニュアルモードに切替えるための切替スイッチを取付けており, マニュアルモードに切替えることで通常のダンプトラックと同等

に手動での操作が可能となっている。自動運転モードとマニュアルモードのどちらになっているかを判別するために, 後方と前方の左右の3箇所²⁾に3色パトライト灯を設置した。自動運転モードの場合は黄色, マニュアルモードの場合は緑色, そして異常が発生した場合は赤色が点灯する。

さらに, 周囲の状況を把握するためのLiDARセンサや車載カメラ, 遠隔から車体へとアクセスするための無線機及び非常停止信号の受信機, 自己位置を取得するためのRTK-GNSS方位計を設置した。設置場所を図-2に示す。



図-1 自動化リジッドダンプ及び改造箇所



図-2 機器設置状況

2.2 システム構成

図-3 に今回開発した自動運転システムの構成を示す。車載された制御 PC に自動運転のソフトウェアがインストールされており、リジッドダンプの動作はこの制御 PC からの指示によって行われる。制御 PC からの制御信号は I/O ボードを通して各種コントローラに伝達され、電磁制御弁を制御することでリジッドダンプが動作する。稼働時の車速や操舵角等の車両情報は各種センサにより測定され、同様に I/O ボードを通して制御 PC へと伝達される。位置情報を取得する GNSS や周囲の点群情報を取得する LiDAR センサは直接制御 PC へと繋がっている。車両情報を常時取得し、目標値に対する誤差に対してフィードバック制御を行うことで自動運転の制御を行っている。制御 PC へは無線ネットワークを用いて遠隔からアクセスすることができ、各種設定や自動運転開始・停止の指令を出すことができる。また、遠隔操作モードに切替えることで、コントローラを使って前進や後退等を行うこともできる。

2.3 自動運転の仕組み

土運搬作業は一般的に①積込機械への接近走行、②積込み待機、③土砂運搬、④排土場所への接近走

行、⑤排土動作、⑥積込み場への走行といったタスクに分けられる。本自動運転システムでは、これらのタスクの 1 つ 1 つをブロックで表現している。そして、図-4 に示すように自動運転の操作画面でそれぞれのタスクのブロックを積み重ねることで実施する作業シナリオを作成する仕組みとなっている。このとき、走行に関するブロックには、決まったルートを走行する「経路走行」と指定した座標へ経路を自動生成して低速で接近する「接近走行」の 2 種類とした。基本的には「経路走行」で土砂運搬を行い、積込位置や排土場所への接近は受取った積込機械や敷均し機械の位置情報へと経路を作成する「接近走行」を用いることで、作業の進捗に伴う積込・排土場所の変化に対応できるようにした。「経路走行」の走行経路や走行速度は事前に有人で走行して記録したデータを使用し、操作画面で選択すると地図上に走路が表示されて視覚的に確認することができる。また、「経路走行」は最高速度 30 km/h での走行が可能となっている。作成した作業シナリオを選択して自動運転を開始すると、上から順番にタスクが実行されて土運搬作業の一連動作が自動で実施される仕組みとなっている。

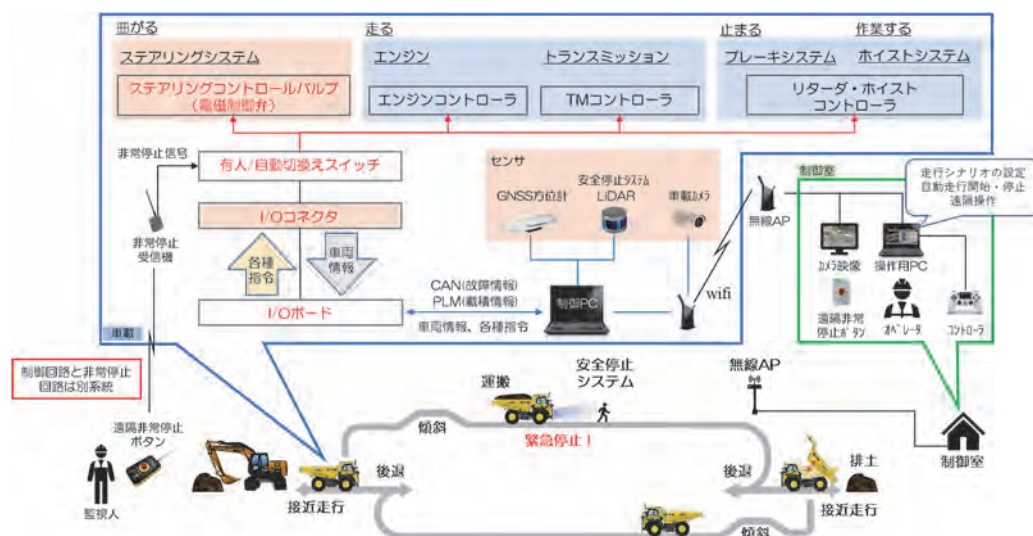


図-3 自動運転システム構成



図-4 操作画面

2.4 安全対策

安全に対する機能も実装した。1つは自動運転中に懸念される人や障害物への接触に対する安全機能である。検知システムの模式図を図-5に示す。前後に取付けられたLiDARセンサにより走行路上の障害物を検出し、設定されたエリア内と判定された場合に自動で減速・停止を行う機能となっている。減速エリアは走行速度で進行方向に対する距離を調整しており、高速での走行時にはより遠くから減速するように設定している。これにより、30 km/hでの走行時においても障害物に接触することなく停止することを確認している。自動走行停止後に障害物が撤去され、走行に支障が無い事が確認された場合は自動で運転が再開される。

もう1つは走行経路からの逸走に対する安全機能である。もとより走行経路から機体が逸走した際は自動で停止する機能が自動走行プログラムに組み込まれているが、万が一に暴走した場合の対策として遠隔非常停止装置も実装しており、携帯型の非常停止ボタンを押すことで強制的に走行を停止させることができる。この非常時の無線信号は自動運転の指令を送る信号とは異なる周波数帯を使用しており、UI(ユーザインターフェース)上から停止信号を送れない状況にも対応可能としている。さらに、非常停止装置の発信機と受信機は常に接続確認を行い、接続されていない場合は自動運転が停止する仕組みとすることで、無線が繋がらなくて非常停止することが出来ないといった事態を防げるようになっている。

3. 自動運転システムの能力検証

開発した自動運転システムの能力検証として、走行精度及び作業サイクルタイムの確認を行った。検証場所は三重県桑名市にある実験場にて行い、いずれも気象条件は晴れの環境で実験を行った。

3.1 走行精度の確認

3.1.1 走行精度の計測

図-7に自動運転システムの走行精度検証を行った実験コースを示す。斜度13%を含む総延長が約1500mのコースとなっており、土運搬作業の1サイクルを模擬して積込場と排土場を配置している。機体の自動運転は予め有人走行で記録した経路に対して経路走行を行い、積込場・排土場への走行は自動で経路を生成する接近走行で行った。積込場から土砂を積込んだ状態で自動運転を開始し、排土場で排土した後に再び積込場へと戻ってくるまでの目標走行経路に対する走行誤差及び積込場や排土場への停止位置誤差を計測した。5回計測を実施した際の最大誤差及び走行誤差の標準偏差の算出を行った。図8に誤差の算出方法を示す。走行誤差は自己位置と近い目標経路2点との垂直距離、



図-5 障害物検知システム

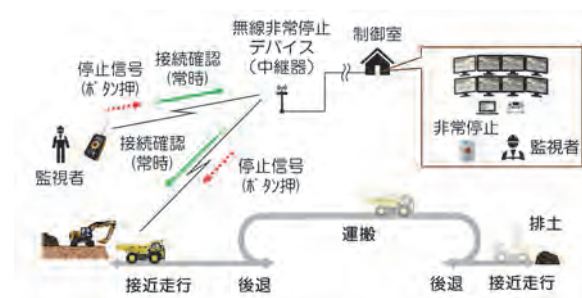


図-6 非常停止システム構成

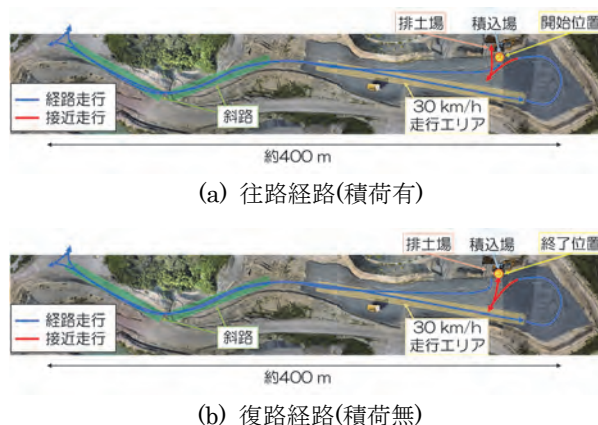


図-7 走行精度検証実験コース

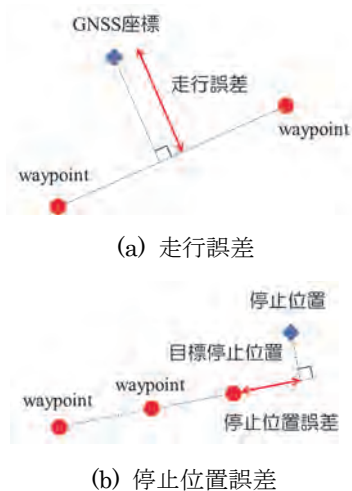


図-8 誤差算出方法

停止位置誤差は実際に停止した位置と目標停止位置との間の進行方向に対する距離とした。

3.1.2 走行誤差

表-1 に積載有り/無し時の計測結果を示す。走行誤差及び停止位置誤差は、未積載時よりも土砂を積込んで走行した時の誤差が大きかった。また積載時の最大走行誤差は約 1.67 m であり、30 km/h で直線走行した箇所が生じていた。さらに積載時の最大停止位置誤差は約 0.37 m で標準偏差は約 0.28 m であったことから、問題ない精度で自動運転走行が可能であることが確認できた。

3.2 作業効率の確認

3.2.1 サイクルタイムの測定及び走行経路

今回開発を行った自動運転システムの作業サイクルタイムと有人操作時との比較を行った。図-9 に走行経路を示す。積込場所から走行を開始し、排土場所まで走行したところで排土動作を行う。その後、積込場所へと戻るまでの 1 サイクルを行うのに必要な作業時間の計測を行った。コースの総延長は約 500 m となっている。

始めに走行経路や速度を記録させながら有人でコースを走行させた時のサイクルタイムの取得を行った。このとき、最高速度が 30 km/h を超えないように走行させている。その後、取得したデータから作業シナリオを作成して自動での走行を行った。積込場・排土場への走行は接近走行で行った。

3.2.2 サイクルタイムの比較

表-2 に有人操作時及び自動運転時において、それぞれのタスクを実施するための経過時間を示す。経路走行に関しては有人操作の方が速く、有人操作に対して自動運転は往路で約 97 %、復路で約 98 % の効率であった。逆に接近走行は自動運転の方が速い結果となった。これは、有人操作の場合は物理的にシフトの切替えを行う必要があるのに対して、自動運転は瞬時に切替えが可能のため、動き出しまでの時間の差が原因であると考えられる。また、排土動作に要した時間は同等となっており、全体のサイクルタイムに関してもほとんど変わらない結果となった。今回開発した自動運転システムは有人操作と遜色のない動作が可能であると考えられる。

4. まとめ

55t 級リジッドダンプを用いて自動で土運搬作業の一連動作を行うことができる自動運転システムを開発し、模擬の土運搬作業を想定した実験コースにて自動運転時の走行精度及び作業効率の検証を行った。その結果、問題ない精度で走行が可能であることが確認できた。速度 30 km/h での自動走行においては一定の走行誤差はあるものの、運用上走路幅を考慮して走行計画を立てることで十

分実用に耐えうる精度であると考えている。また、作業効率に関しても有人操作時と遜色のない動作が可能であることが確認できた。

今後は自動化されたリジッドダンプを複数台管理し、離合箇所では速度制限や停止させる等のシステム開発を考えている。その際にも、今回得られた走行誤差を基に減速度合いを決めるなど、施工効率をできる限り低下させないようなシステムを構築して現場適用を目指す。

参考文献

- 1) 片山三郎, 青木浩章, 若山真則: 10t 級クローラダンプを用いた自動走行システムの開発, 土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-354, 2019

表-1 走行誤差及び停止位置誤差

走行誤差 [m]				停止位置誤差 [m]	
積載有り		積載無し		積載有り	積載無し
最大値	標準偏差	最大値	標準偏差		
1.67	0.28	0.83	0.17	0.37	0.19



(a) 往路経路



(b) 復路経路

図-9 サイクルタイム計測コース

表-2 走行誤差及び停止位置誤差

	有人走行 [s]	自動走行 [s]
排土場へ経路走行	96	99
排土場へ接近走行	27	24
排土動作	28	28
積込場へ経路走行	97	99
積込場へ接近走行	19	16
サイクルタイム	267	266

II 梗概集

● ポスターセッション要旨

1. 油圧オートカプラによる

建設施工現場の安全・環境・生産性向上革命

株式会社小松製作所 山本 宏

1. 油圧オートカプラとは

油圧オートカプラは建設施工現場の安全・環境課題解決と生産性の向上を目的として開発した技術であり、現場で作業者がアタッチメントに触れず安全に、油圧ホース着脱も必要とせず油圧アタッチメント交換が可能になる。

カプラを使用せずに油圧ショベルに油圧アタッチメントを直接取り付ける場合、油圧ショベルのバケット取付ピンの着脱を大ハンマー打撃で行い、油圧ホース着脱も工具を使用し手作業で行っている。オペレータ1名と作業員2名の共同作業で行う交換作業時間は約60分を要す。油圧オートカプラの採用により、作業者が油圧アタッチメントに近づかず、オペレータ1名による油圧ショベル操作で、油圧アタッチメント着脱、油圧ホース着脱を約1分で完了。安全性・生産性・環境性を大幅に向上した。



2. 電気配線接続（新機能）

上記の技術に加え、電気配線も同時に着脱ができる機能を追加し、油圧アタッチメントに使用される電気信号や稼働電流の通電を可能にした。例えば、電磁弁搭載グラブプル・バケットソー・ハーベスタなどの林業アタッチメントや、電磁石付き小割具にも対応でき、様々な業種での採用拡大が可能になった。



【カプラ内油圧バルブ】

3. 油圧オートカプラ使用実績と検証

1) RC 4階建てビル解体現場

1日約4～5回油圧アタッチメントを交換しながら解体施工。最適なアタッチメントを使用することにより、本体・アタッチメントに無理な負荷がかからず、期待以上に安全で効率的な施工が行えた。

2) 鉄骨RC造レストラン解体現場

施工計画は油圧ショベル3台であったが、本技術の採用により2台で工事完了することができた。狭所現場で懸念していた重機同士の接触が回避でき、工事期間も計画より約2週間短縮となった。

上記現場で安全性と生産性の向上が検証できた。

4. 油圧オートカプラの展望

本技術の品揃えを拡充し、解体・林業にとどまらず土木・その他業種でも使用できるアタッチメントを開発していく。また、お客様現場の進化に対応し、遠隔操作、自動運転などにも対応していく。



2. 自転式環境負荷低減高圧噴射攪拌工法

【Mole-Eco Jet[®] (モールエコジェット[®]工法)】

株式会社不動テトラ ○矢部 浩史

株式会社不動テトラ 田中 肇一

株式会社不動テトラ 渡辺 英次

1. 新発想の回転機構と工法の概要

「Mole-Eco Jet[®]工法」は、新発想の回転機構を実装した高圧噴射攪拌工法である。新発想の回転機構とは、図1に示す様な、同一直線上にない噴射口（ノズル）から噴射した流体エネルギーの偶力により先端のみが自ら回転する機構である。この機構により、従来工法のような回転駆動用のモーターが不要となり、施工機械の大幅な小型化が実現した。また人が持ち運べるサイズまで小型/軽量化した施工機械のため施工補助のクレーンも不要となり、地下駐車場や建屋内といった厳しい施工条件においても地盤改良が可能となった。

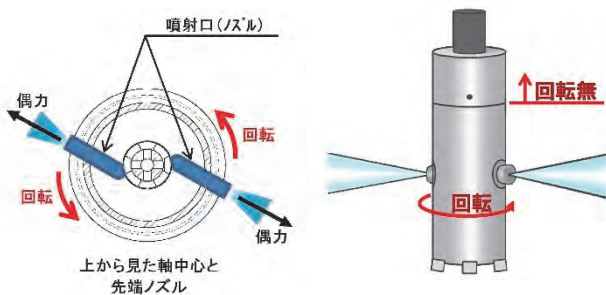


図-1 新発想の独自回転機構

2. Mole-Eco Jet[®]工法の特徴

① 人力運搬可能な施工機械

建物やパイプライン間の狭い場所や建屋の内部など、従来の施工機械が搬入できない場所でも図-2 の様に人が機械を持ち運び施工することが可能である（入口が狭くても、幅 80cm 以上あれば人が押して機材を搬入できる）。



図-2 施工機の人力運搬状況

② 高さ制限下での施工

建物内やパイプラインの下などで上空に制限のある施工条件でも、クレーンを使用することなく、人が1m ロッドを継ぎ足すことで施工が可能である（2.1m 程度の高さ制限まで対応可能）。

③ 環境負荷低減（SDGs）

クレーンを使用することなく、また施工機の周囲には発電機などの機器を配置しないため、排ガスの発生のないクリーンな環境での施工が可能となった。また施工マシンの省エネ化によって、施工場所での二酸化炭素の排出量は当社の従来工法に比較して30%削減につながる。

④ 施工管理装置（施工の見える化、情報化施工）

施工段階毎の写真管理により施工管理を行う従来工法に比べて、地中で行われる施工情報を確認しながら操作を行い、施工1本毎に打設結果表として記録を残せるだけでなく、回転数や引抜造成時のステップアップを自動制御することが可能である。

3. 適用市場

近年、既にある建物の維持補修や耐震化などの地盤改良工事、供用中の工場内での土壌浄化工事といった多様なニーズが生じており、従来工



図-3 建屋内高さ制限下での施工

法では適用困難となるケースも増えてきた。今回開発した工法は、このような建物内部や構造物の地下空間、配管が密集した工場施設などの施工条件においても地盤改良が可能となり、今後このような市場に挑戦することで、国土強靱化や社会貢献に努めたい。

3. 排水ポンプ設置時の安全性向上と

照明車の小型化と操作の簡易化について

－作業員の安全と負担軽減に向けた検討－

国土交通省中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課長

林 学

国土交通省中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課保全技術係長

鵜飼 隆司

国土交通省中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課専門職

○福万 敏行

1. はじめに

現在、国土交通省では、多様な災害対策用機械等を各種保有しており、中部地方整備局では約 100 台の機械を保有している。その中でも稼働数の出動回数の多い、河川や津波等の浸水発生時に排水作業を行う排水ポンプ車、夜間での作業現場で照明作業を行う照明車の2種類で機械の約7割以上を占めている。

排水ポンプ車による排水作業は、雨天時などの厳しい気象条件や滑りやすい斜面など厳しい作業条件のもとで複数の作業員が連携し、合わせて重量50kg以上の排水ポンプ、電源ケーブル等のセット複数台準備して人力で浸水箇所に運搬、投入するため作業員の作業負担が大きく危険を伴う作業となっている。

また、照明車においては、10m級及び20m級などの様々なタイプがあり、アウトリガー、ブームや照明装置等の操作方法がそれぞれことになっており、全ての操作方法習熟するのは困難になっている。また、狭小な現場への車両進入も課題になっている。

その対策として、作業員の安全と負担軽減に向けて検討を行った。



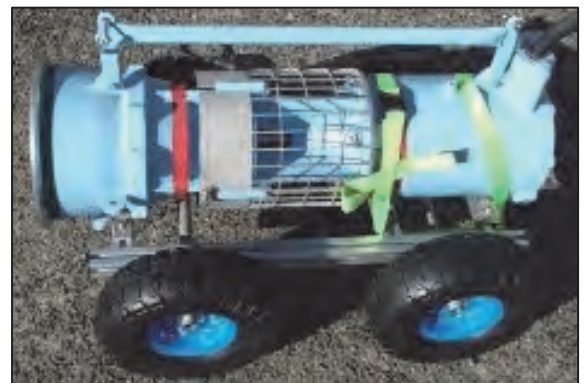
写真一1 排水ポンプ投入現場

2. 排水ポンプ車のポンプ運搬・投入対応

排水ポンプ車の運搬・投入対策として下記について検討した。

(1) 台車にポンプを固定して台車ごと投入。

投入斜面にもコンクリートや草の生い茂った場所があり、どの場所にも対応したものを検討中である。



写真一2 台車とポンプを固定

(2) ドローンでポンプを運搬

実際に排水ポンプにホースを取り付けた状態でドローンによる釣り上げ、その状態で横移動も行いドローンによる運搬が可能と確認された。

今後の検討は、フロートを付けた状態で目的のポンプ設置箇所に設置可能かどうかの検証を予定している。



写真—3 ドローンによる運搬

(3) PAS (パワーアシストスーツ) を着用したポンプ運搬

種類の違うPASを揃え、各種実際に着用してポンプの運搬等を行った。

着用者の意見を聞いたところ、全体的に疲労の軽減効果があったとの意見であった。

今後の検討は、連続使用やカッパを着た状態での使用を検証していく予定である。



写真—4 PASによるポンプ運搬

3. 照明車の小型化・自動化・遠隔化

(1) 小型化の検討

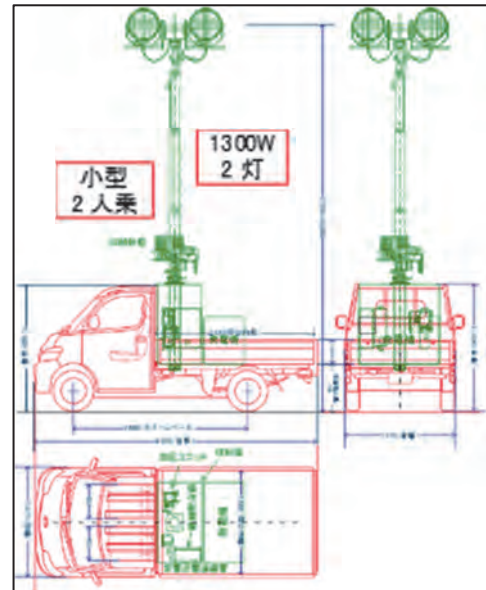
既存の照明車を調査すると消防や警察関係等各種有るが照明装置の高さや明るさが国土交通省の保有の物より低いジャッキがない利点があった。

また、普通運転免許での運転が可能であった。

(2) 照度試験

既存の照明車で高さや灯数を変えて光源から2.5m離れ幅5.0m×奥行き1.5mの範囲で測定した。その結果より排水ポンプ車における照明要件を15lxとし、最低照度と照度要件を比較し必要照明性能を決定した。

各種利便性を踏まえた検討より小型車のイメージ及び性能を以下の通りとした。



図—1 小型照明車イメージ図

必要性能

- ・1300w×2等
- ・点灯高さ 5m以上
- ・油圧ジャッキ無し
- ・遠隔操作は既存技術を使用
- ・普通免許で運転可能

4. まとめ

排水ポンプ投入方法について台車にポンプを固定する案で安全性が、PASの着用で作業負担の軽減について、有効性が確認出来たので、実用化に向けた検討を行う。

照明車の機能性向上に向けて検討を行った結果、小型化及び操作の簡易化に必要な性能の整理が出来たので実機的设计検討を行う。

今後も災害対策用機械の作業負担軽減や機能向上に向けて更なる検討を行って行く予定である。

4. 腕時計型ウェアラブル端末による作業員体調管理 IoT ソリューション

西尾レントオール株式会社 野瀬 健一

1. はじめに

熱中症による死亡災害件数は、屋外での作業も多いことから全産業のなかで建設業が最も多くなっており、さまざまな対策が行われている。冷房を完備した休憩所の設置や、空調服、ミスト扇風機、製氷機などの対策用品の充実、暑さ指数 WBGT 値測定による作業時間管理や注意喚起なども定着が進んでいる。

最近では、騒音・振動等の環境測定や、施工機械の状態管理等、現場内のさまざまな情報を IoT 機器の活用により集中管理する技術が提案されている。

熱中症対策においても、体調変化は自分で気づかないうちに進むことも多く、一人ひとりの状態をリアルタイムに客観的に把握できれば有効であると考え、今回弊社では IoT 技術を活用したシステムの開発に取り組んだ。

2. 課題

一人ひとりの作業員がセンサ端末を装着し、個人別の健康データをクラウドサーバーに送り集約管理するシステムは、5年ほど前から登場してきた。センサ端末の種類も腕時計型やヘルメット装着型など数種類が展開されている。

センサ端末の価格は下がってきたが、建設現場への普及には、通信手段の利便性も欠かせない。センサ端末のデータをサーバーへ送信するためには、センサ端末のデータを受信しインターネットを経由しサーバーへ送信する通信機器が必須となる。一般的なセンサ端末の通信方式は、BLE (Bluetooth Low Energy) を採用しており、専用のゲートウェイ機器と組合せる方式か、専用アプリを入れたスマートフォンと組合せる方式に二分される。専用ゲートウェイは1台で複数のセンサ端末のデータを受信できるが、建設現場内の各所に設置する必要があり、その設置費用や工程に合わせた盛

替えの手間、費用が課題となる。スマートフォンも1人1台に配布する費用が課題となる。

3. システム概要

「腕時計型ウェアラブル端末による作業員体調管理 IoT ソリューション」(以下、本システム)は、作業員が腕時計型の端末(写真-1)を装着することで、パルス(脈拍)などの体調データと転倒検知情報、位置情報を、リアルタイムにクラウドアプリケーション(写真-3)により、インターネット経由でPCやスマートフォンから閲覧可能なシステムである。

ウェアラブル端末に内蔵される加速度センサ、気圧センサ、脈波センサのデータは、センサからのデータを受信しクラウドサーバーに送信する機能と、BLE 通信機能を組込んだ多機能型無線アクセスポイント(写真-2)を経由してクラウドサーバーに送信される。

普及の条件と考える通信手段の利便性の課題解決のため、多機能型無線アクセスポイント通信方式を採用したことで、専用のゲートウェイ機器やスマートフォンを不要とした。

多機能型無線アクセスポイントは、メッシュ無線 LAN に対応しており、アクセスポイント同士が無線接続可能なため、建設現場内一体に WiFi 環境を提供する目的としても活用しやすく、図面や検査記録のクラウド共有や、遠隔臨場などのニーズの拡大に伴い、これらと共用できるメリットがあると考えます。



写真-1 ウェアラブル端末



写真-2 多機能型無線アクセスポイント

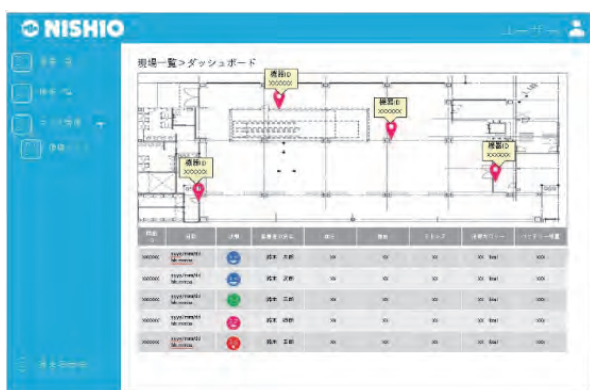


写真-3 クラウドアプリ 画面イメージ

4. 運用

本システムでは、気圧センサと加速度センサによる転倒や昏倒の検知と、パルス（脈拍）やパルスを元に計算されたストレス値に上限値や下限値を設定し、値を超えた際にアラートとして管理者へ通知する機能により、万一の際の早期発見や作業員の体調異変に対し早い対応を取ることが可能となり熱中症等の防止に活用できると考える。

アラートの通知機能については、電子メールのほか、チャットや SNS など、順次対応を拡げ、利便性の向上を図っていく計画である。

5. 機能向上・局所環境の計測

建設現場内の熱中症対策として、朝礼会場などで熱中症指標（WBGT）を計測し注意喚起を行う場面が増えているが、同じ建設現場内でも、作業箇所により間仕切りや空気の流れなどの諸条件が異なるため、作業箇所それぞれの環境を局所的に計測できることが理想である。その課題解決のために開発した装置が「ポータブル型作業環境計測」（写真-4）である。

ハンディ型サイズに、温度、湿度、風速、熱中症指標（WBGT）のセンサと、緊急通知ボタンを組み込み、オプションで粉塵、気圧、ガスなどのセンサも脱着式により追加可能とした装置である。電源は内蔵バッテリーと AC 給電の 2 電源方式である。通信は WiFi 方式により、前述の多機能型無線アクセスポイントを経由してクラウドサーバーへデータ送信が可能となっている。

作業箇所の局所的な環境をリアルタイムに把握することで、例えば温度上昇を確認したらスポットクーラ

ーを設置するなど、作業員の体調に影響が出る前に早期の対策が取れると考える。

それぞれの建設現場の、環境やニーズに応じて腕時計型ウェアラブル端末を使用するか、ポータブル型作業環境計測を使用するか、あるいは両方を併用するといった選択が可能となる。



写真-4 ポータブル型作業環境計測

6. 今後の展開

IoT 端末やそれらに使われるセンサ機器等は、進化が早く毎年のように新しい計測技術や機能を組込んだ製品が登場する。今回開発したシステムは、「作業員体調管理 IoT ソリューション」として、前述の腕時計型ウェアラブル端末に限らず、様々な使用条件にマッチングした端末を提供できるシステムをコンセプトとして開発している。

皮膚に極小の板状センサを貼付け体表温を常時計測するセンサや、ヘルメットに取付けヘルメット内部温度を計測するセンサ、腕時計のように装着し発汗量を計測するセンサなどがその一例であり準備を進めているところである。

建設現場への普及のため、本システムに適応できるセンサ端末や通信手段の、バリエーションを増やすなどのバージョンアップを順次進めていく計画である。

5. 半炭化材料を用いた小規模なバイオマスガス化発電

鉄建建設株式会社 ○皆川 豊

背景

木質バイオマスガス化発電方式は、バイオマス燃料材を化学反応（熱分解や酸化還元）により可燃ガス化し、ガスタービン等を回して発電するため、小規模な発電所でも効率的に発電することが可能で、市町村単位などでの電力供給や非常用電源として活用が図られています。

良質なチップやペレットを利用する必要がある従来のガス化発電方式は、安定的にガスを発生させるためには使用できる燃料材の条件が限定され、森林間伐材の枝葉や根などの利用は進んでいませんでした。当社とDOWA サーモテック社は、このような間伐材や果樹剪定枝等、幅広い原料の活用をめざして半炭化技術に着目し、2018 年度から東京工業大学との共同研究により、様々な木質系・草木系バイオマス素材を半炭化しガス化する試験を行ってきました。その結果、半炭化により安定的なガスを得られることが確認できたため、実用化に向け、昨年度から半炭化装置および定格出力200kW 規模のガス化発電装置の製作を進めてきました。



システムの概要

本システムは、木材を直接燃焼させるのではなく、過熱蒸気発生装置で発生させた過熱蒸気(300-350℃)を使用して半炭化したうえで、ガス化して発電機を稼働させます。

半炭化のプロセスを経ることで、一般的に木質バイオマス発電燃料として使用される木質チップの他にも、樹木・果樹の剪定枝や、河川・ダム流木を発電燃料として活用することができます。

またガス化のプロセスを経ることで、小規模の発電を効率良く実施することが可能になり、地産地消の地域比較的狭いエリア内で集められる木質系バイオマス素材で、発電に必要な量をまかなうことが可能です。



今後の展開

千葉県東金市内において、2022 年度は上半期に、半炭化装置およびガス化発電装置の実証試験機を使用して連続運転試験等を実施する予定です。また、下半期には発電事業への展開の準備や、更なる効率化をめざして機器の改良を実施する予定です。

6. 高所作業車の接触防止システム「はみ出しまセンサー」

(株) カナモト 清水 亮

1. 初めに

建築や土木の工事現場、また構造物のメンテナンス作業等でよく使われる高所作業車。昨今、多様な場所で多様な種類の車両が活用しております。しかし、使用台数が増えるにつれて使用中の事故も増えております。弊社においても、バケットと構造物に挟まれる事故を未然に防ぐ高所挟まれ防止システム「挟まれまセンサー」や「挟まれまセンサーLiDAR」や、屋内型高所作業車の階段などの段差による転倒を未然に防ぐ転倒防止システム「バックダンサ」などの安全対策システムの開発を行ってきました。

2. 開発の経緯



写真1

高所作業車の道路上現場では、車線規制を行い規制エリア内での作業が多く、規制外の車線では通常の交通状態（写真1）となっています。特に高速道路上ではその構造上の理由から、工事による一車線規制を行い、その隣を乗用車や大型車が速い速度で走っています。その状況下で、作業中に規制エリア外にバケットがはみ出し、はみ出したデッキが走行中の車両と接触する事故が多発しています。また、高所作

業車を利用する顧客などから高所作業車の更なる安全対策システムの要望が多数あり、中でも特定の位置よりバケットがはみ出さないシステムの要望が多かったため、開発に着手しました。

3. LiDAR センサーの応用

LiDAR とは、パルス状に発光したレーザー照射の反射した光を測定し、遠距離にある対象までの距離を測定、検知するセンサーです。以前よりこの機能に着目し、挟まれ防止システムの「挟まれまセンサー」の進化版「挟まれまセンサーLiDAR」を開発しました。バケットの上にセンサーを取付、感知エリアを設定することにより、バケットの上に構造物が検知されると自動的にバケットが停止するシステムです。その機能を応用して今回開発したのが「はみ出しまセンサー」になります。

4. はみ出しまセンサー

「はみ出しまセンサー」は、どこにでも置けるように LiDAR センサーとコントロール部・ブザー・警告灯・バッテリーを一体化させ、ラバーコーンの先端に設置し運用します。（図1）



図1

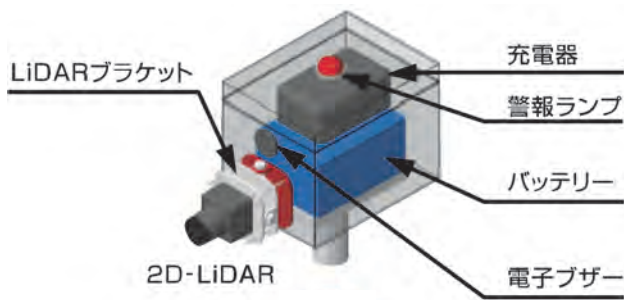


図2 内部構造



写真2 充電状況

また、本システムはバッテリーと充電器を一体型ケースに内蔵しているので、充電時には別途充電器を差すのではなく AC100V のコンセントにプラグを差し込むだけで、充電が行われ、空の状態から約 3.5 時間で充電が終了します。(図2・写真2) 使用方法は、システムのついたラバーコーンを、バケットのはみ出しを防ぎたい境界線上に設置します。バッテリーをつなげば、自動的に LiDAR センサーが起動し、境界線上に感知エリアを作り出します。(図3・図4) バケットがその感知エリアに接触すると警告灯が点滅しブザーが鳴り、周囲の監視員やバケット上の作業員に、注意喚起します。LiDAR センサーの感知エリアは、あらかじめ LiDAR センサーと PC を繋ぎ、PC 上のソフトウェアにて設定を行います。今回開発したプロトタイプは、感知エリアが LiDAR センサーを中心とした半径 5m のタイプを使用しております。感知エリアは、別なセンサーを使えばさらに広域をカバーすることが可能となっております。

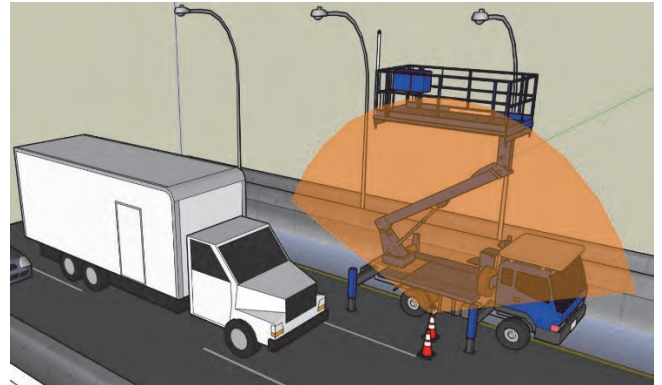


図3 現場運用想定図

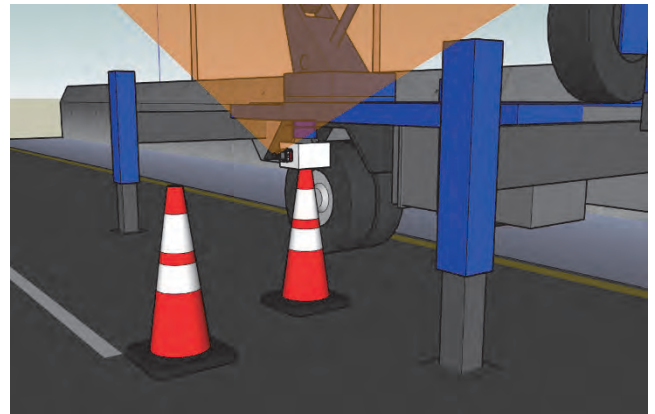


図4 現場運用想定図(拡大図)

前述の「挟まれまセンサーLiDAR」のように、バケットの自動停止はついておりません。危険な状態で停止してしまうと、かえって事故を誘発する可能性もあるため、オペレータへの音と光による警告にとどめ、すぐにバケットを元の位置に戻すことを促します。

5. 終わりに

このシステムは、オペレータの判断を補助し、事故被害の軽減を目的として開発いたしました。ただし、あらゆる状況での衝突を回避するものではありません。作業時・機械操縦時には常に周囲を確認し事故の無いように保安距離を保ち、安全作業を心がけてください。

最後に弊社は、今後の建設現場の技術の向上と普及に期待し、最新の ICT 技術を用いた最良の機材の提供し、現場作業の安全を切に願うとともに、現場環境の向上や更なる安全の向上に貢献していきたいと考えております。

7. 現場環境一元管理システム NDX-Cloud

現場環境や計測器データを見える化し、環境管理、施工管理をリアルタイムに行えるシステム

株式会社レンタルのニッケン 広域営業部 ○夏樹 太郎
技術開発部 峰咲 富士朗

はじめに

災害大国日本において、様々な自然災害から人命、財産を守る建設業への期待は大きくなっている。その一方、最前線で作業する建設業の仕事は過酷であり、様々な課題と直面しているのが実態である。現場環境を改善し、安全な環境を作っていくには、ICT化や DX といった様々な新技術を実装し、最前線の現場環境を改善する取組みが重要である。

NDX-Cloud を使用したリアルタイムな一元管理

建設現場は、風や雨など、自然の影響を大きく受ける。また、重機と人が一緒に作業する事もあり、安全確保の状況把握に加え、騒音や振動など現場近隣への影響も考慮しなければならない。

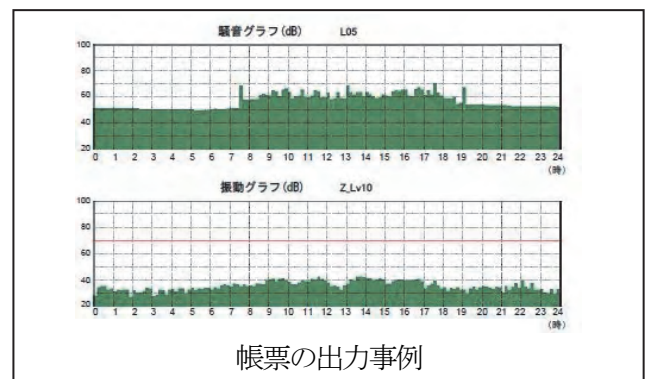
本システムを活用すると、現場にある様々な計測器やカメラ等と連動し、現場の状態をリアルタイムに把握する事が可能となる。さらに、計測器の危険異常が判明した際には、メールで緊急案内を担当者へ伝達、画面で目視していなくてもリアルタイムに危険を知らせることができる。これまで様々な問題を管理するためには、人員を増やし対応するのが一般的であったが、システムの活用により省人化が期待できる。



現場の一元管理画面

計測器管理における生産性の向上

各計測器が取得したデータは、クラウド上で閲覧と帳票化が可能となる。これにより、個々の計測器でのデータ取得作業と操作が不要となる。



移動機械管理における業務の効率化

オンラインレンタルとの連携により、パソコンやスマートフォンから、現場で借り受けしている機材の稼働管理・使用者管理が可能となる。仕様確認や発注・返却依頼もオンラインで行うことができる。職員でこれらの情報共有が可能となるため、誤手配防止など管理業務の正確性や効率化に繋げることができる。



オンラインレンタルの画面

今後の展開

既存サービスとして展開している作業員の所在とバイタル管理や車両運行管理、現場用サイネージシステムとの連携を行っていく。

令和４年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集

令和４年 11 月 29 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)
TEL (03)3433-1501
FAX (03)3432-0289

複製厳禁

発行補助 (株)アクセス