

令和 6 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 6 年 11 月 27 日～11 月 28 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 6 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 6 年 11 月 27 日～11 月 28 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 名	所 属
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 特任教授
委 員 小 澤 直 樹	国土交通省 関東地方整備局 企画部 施工企画課
委 員 北 山 孝	西尾レントオール（株） 常務取締役
委 員 桑 田 直 人	鹿島道路（株）生産技術本部 DX推進部
委 員 玉 石 修 介	玉石重機（株）代表取締役社長
委 員 丹 治 雅 人	コベルコ建機（株）マーケティング事業本部
委 員 中 川 智 裕	（株）小松製作所 商品企画部 商品企画室
委 員 行 川 恒 弘	前田道路（株）技術本部 技術研究所 技術開発部 生産技術開発室
委 員 藤 島 一 雄	日立建機（株）開発統括室
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
委 員 坂 下 誠	前田建設工業（株）土木事業本部 機械部
委 員 矢 野 公 久	国土交通省 大臣官房 参事官(イノベーション)グループ 施工企画室
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
委 員 山 本 茂 太	キャタピラーファイナンス（株）営業部
委 員 渡 部 純	（株）カナモト 取締役執行役員 広域特需営業部
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
委 員 畑 田 健	（一社）日本建設機械施工協会 技術部
委 員 正 田 明 平	（一社）日本建設機械施工協会 標準部

「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. 積雪期における堤防変状の検知に向けた取組	・・・・・・・・・・	1
(国研)土木研究所 寒地土木研究所	○吉田 智 山崎 貴志 飯田 美喜	
2. 郊外部の無電柱化施工のためのトレンチャーによる掘削試験とその評価	・・・・・・・・・・	5
(国研)土木研究所 寒地土木研究所	○永長 哲也 中島 淳一	
3. 建設プロジェクトにおけるボクセルモデルの適用可能性に関する一考察	・・・・・・・・・・	9
前田建設工業(株)	○長田 将吾 川西 敦士 大阪経済大学 中村 健二 流通科学大学 寺口 敏生 法政大学 今井 龍一	
4. 3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)における計測技術の整理	・・・・・・・・・・	13
国交省 国土技術政策総合研究所	○池田 誠 杉谷 康弘	
5. 国土交通省による官民連携した長時間飛行ドローンの実証試験について	・・・・・・・・・・	15
国交省 大臣官房 参事官(イノベーション)グループ	遠藤 天生	
6. AI技術を含む先進技術を活用したコンクリート打設管理のシステム開発と現場検証報告	・・・・・・・・・・	19
西尾レントオール(株)	○片山 伸也 橋本 明広 川崎 浩人	
7. 人工知能技術による土質推定に基づく埋立管理システム	・・・・・・・・・・	23
五洋建設(株)	○熊谷 隆宏 白 可	

8. AI 画像認識技術による船舶航行監視システムの開発	東亜建設工業(株)	○宮本 憲都 藤山 映 那須野陽平 水木 啓陽	29
9. 排水機場ポンプ設備の電動化に向けた検討	(国研)土木研究所 寒地土木研究所	○中島 淳一 永長 哲也 岸 寛人	33
10. トンネル覆工コンクリートの全自動打設システムの開発	鹿島建設(株)	○松本 修治 手塚 康成 坂井 吾郎	39
11. 山岳トンネルのインバート掘削に関する 出来形管理システムと現場検証結果	(株)奥村組	○藤沼 花奈 松田 顕伍 川澄 悠馬	45
12. 特殊機械設備を駆使した長大アーチ橋の合理化施工 新東名高速道路 河内川橋 (仮称)	鹿島建設(株)	石松 大輔 横山 由宏 ○金丸 拓樹	49
13. 模擬地盤供試体を用いた切削実験による シールドマシン用カッタビットの材種選定に関する研究	呉工業高等専門学校	○森田 和也 重松 尚久	55
	大成建設(株)	森田 泰司	
	(株)丸和技研	佐々木 誠 中濱 和久 嘉屋 文康	
14. 鉄骨プラズマ切断装置を用いた環境配慮型超高層建物解体工法	清水建設(株)	○谷 卓 西村 淳 佐藤 良史	59
15. 施工のオートメーション化に向けた取り組み ～建設機械施工の自動化・遠隔化技術の普及に向けて～	国交省 大臣官房 参事官 (イノベーション) グループ	○大野 慎也 中根 亨	63

16. ICT 施工 stageⅡ	ICT 施工 stageⅡ の取組について	・ ・ ・ ・ ・	67
	国交省 大臣官房 参事官（イノベーション）グループ	○櫻木 翔平	
17. 舗装工事の品質管理高度化に資する転圧管理システムについて		・ ・ ・ ・ ・	71
	酒井重工業(株)	○内山 恵一 眞壁 淳	
18. 3次元点群データを活用した土工事における			
	法面損傷リスクの予測と事前対策効果の実証	・ ・ ・ ・ ・	75
	上武建設(株)	○前田 真司 山田 祐也	
	(株)EARTHBRAIN	岩崎 智朗 谷口 亮 番上 勝久	
19. 土砂掘削で発生する粉じんの散水による抑制効果の構内試験		・ ・ ・ ・ ・	79
	(国研)土木研究所	○山口 武志 吉永 弘志 山口 崇	
20. 水素内燃機関活用による重量車等脱炭素化実証事業			
	水素専焼エンジン油圧ショベル及び水素供給事業実証プロジェクト（第2報）		
	水素専焼エンジンの油圧ショベルへの適応性と交換式水素カードルを含めた		
	機体の安全性の確認	・ ・ ・ ・ ・	85
	(株)フラットフィールド	○山浦 卓也	
	環境省 水・大気環境局 モビリティ環境対策課 脱炭素モビリティ事業室	須山 友貴	
21. 建設機械分野の脱炭素化に向けた政府の取組について		・ ・ ・ ・ ・	89
	環境省 水・大気環境局 モビリティ環境対策課 脱炭素モビリティ事業室	○植竹 康朋 須山 友貴	
22. ディーゼルエンジン用水素アシスト技術の評価に関する研究			
	エンジンベンチ試験による燃費向上及びCO ₂ 排出削減効果の検証	・ ・ ・ ・ ・	93
	西松建設(株)	○戸田 泰彰 石渡 寛之	
	久留米工業高等専門学校	坂田 瑠琉 中武 靖仁	
	(株)アクティオ	山口 利治	
23. 湯気や土埃が発生する実施工現場において安全性を向上させる			
	高精度検知システムを搭載した緊急ブレーキ装置の開発	・ ・ ・ ・ ・	97
	酒井重工業(株)	○遠藤 涼平	
24. 指向性スピーカを使用した施工現場の騒音低減システムの開発		・ ・ ・ ・ ・	101
	鹿島道路(株)	○内山 智史 阪田 正弘	

25. 建設機械設置地盤の地耐力調査に関する実験的考察	・ ・ ・ ・ ・	105
(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所	○堀 智仁 玉手 聡	
26. 振動加速度レベルによる除雪トラックフレームに作用する 作業種別毎の負荷傾向について	・ ・ ・ ・ ・	109
(国研)土木研究所 寒地土木研究所	○植野 英睦 山田 充	
27. マスプロダクツ型排水ポンプの現場実証と新たな研究開発について	・ ・ ・ ・ ・	113
国交省 大臣官房 参事官 (イノベーション) グループ	○吉崎 雄一 林 朋幸	
28. 砂質土における油圧ショベルの掘削動作による 地盤強度推定に向けた実験的検討	・ ・ ・ ・ ・	117
コベルコ建機(株)	○島津 泰彦 関塚 良太 小岩井一茂	
(国研)土木研究所	遠藤 大輔 橋本 毅	
29. 建設現場におけるマニピュレータ型鉄骨溶接ロボットの開発	・ ・ ・ ・ ・	123
鹿島建設(株)	水谷 亮 横山 太郎 ○菊地 望	
30. 道路橋床版更新工事における床版架設機の開発 ー阪神高速3号神戸線(京橋～摩耶間) リニューアル工事における床版更新ー	・ ・ ・ ・ ・	129
清水建設(株)	○藤吉 卓也 安田 篤司	
阪神高速道路(株)	富田涼太郎	
31. 円形高層建築建物解体への自動昇降足場の適用 F C F 工法 円形建築建物解体への挑戦	・ ・ ・ ・ ・	133
(株)フジタ	○中鉢 和敏 野正 裕介 大谷 愛斗	
32. CSG ダムにおける自動ダンプトラックを用いた材料運搬システム	・ ・ ・ ・ ・	139
鹿島建設(株) 技術研究所	○石川 貴大 高木 優	
鹿島建設(株)	服部 良彦 福原 正晃 矢富 孝治 伊勢 卓矢	

33. 施工システムからの指示に基づいて動作する自律型油圧ショベル	・・・・・・・・	145
	日立建機(株) ○井村 進也	
	伊東 勝道	
	石井 宏紀	
34. 盛土施工現場における自動施工の評価	・・・・・・・・	149
	(株)熊谷組 ○飛鳥馬 翼	
	北原 成郎	
	竹下 嘉人	

Ⅱ 梗概集

Ⅱ－１ ポスターセッション要旨

１．アクティオカーシェアスポット「アクスポ」

無人でレンタカーの貸出・返却ができる新サービス	・・・・・・・・	153
(株)アクティオ	○深沢 拓	

２．環境負荷を大きく低減する地盤改良工法

リソイル Pro 工法	・・・・・・・・	155
(株)不動テトラ	○永石 雅大	
	高田 英典	
	富田 晃弘	

３．BIM/CIM を活用した土工事の自動施工『自動施工計画・管理システム』

前田建設工業(株)	○秋田 剛	157
日立建機(株)	井村 進也	
(株)イクシス	山崎 文敬	

４．チルトローテータを遠隔操作することによる、飛躍的な生産性向上

小規模土工での省人化 3 割を目指して	・・・・・・・・	159
梅田土建(株)	山田 潤	
Steelwrist Japan(株)	五十嵐卓次郎	
(株)カナモト	庄野 和隆	

５．柵っとバリケード

クレーン旋回範囲・立入禁止エリアを簡単設置	・・・・・・・・	161
(株)レンタルのニッケン	梶川 太郎	

６．デジタルツイン技術を活用した

面環境に適応する建設機械実現のための研究開発	・・・・・・・・	163
コマツ	○菊池 直彦	
	杉村 俊輔	
	宮井慎一郎	

７．ICT 建機のための現況計測用カメラシステム

(株)トプコン	○重田 将宏	165
	深谷 暢之	
	榎山 誉	

８．発注・管理者の業務効率化とステイクホルダー

満足度向上への大規模言語モデルを用いた AI システム開発	・・・・・・・・	167
立命館大学 経営学部	○善本 哲夫	
立命館大学 総合科学技術振興機構	福原 大祐	
滋賀県庁 土木交通部	西村 智寛	

9. 建設機械の遠隔運転シミュレータ

トンネル切羽ブレーカーはつり作業の遠隔運転をサイバー空間で練習する 169

西松建設(株)技術研究所 ○平野 享
高原 裕介
辻岡 高志

10. 建設業向けA I 安全帯不使用者検知システム「KAKERU」 171

西尾レントオール(株) 通信測機機材部 阪下 晃則

11. オペレータトレーニングシステムの開発 173

(株)小松製作所 車両第一開発センタ ○三本 喬之
浅井 康介
(株)小松製作所 試験センタ 平林 憲

I 論文集

1. 積雪期における堤防変状の検知に向けた取組

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○吉田 智
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 山崎 貴志
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 飯田 美喜

1. はじめに

昨今、日本国内では大規模な地震が発生し、これらの災害により家屋への被災だけではなく、道路の陥没や河川堤防（以降、「堤防」という。）の天端にクラックが生じるなど、土木施設においても多大な被害を受けている。また、近年、気候変動が懸念される中、2024 年 2 月に北海道の上空 1,500m には、5 月中旬並みの暖かい空気が流れ込み 2 月の最高気温を更新した。そのため北海道のような積雪寒冷地においても、冬期の降雨により河川水位の上昇が懸念される。国土の約 6 割以上が積雪寒冷地域に指定されている日本²⁾において冬期に大規模な地震災害が発生した場合、積雪により河川敷地に立ち入っての目視点検は困難となるため、広範囲にわたる堤防の被害状況を効率的かつ迅速に検知する手法の構築は重要となる。

本稿では、積雪下の堤防変状を検知するためのセンサ機器を調査したほか、UAV を用いて広範囲

にわたる堤防を調査する手法について検討を行った。また、市販の UAV に搭載されている光学カメラと LiDAR を用い、雪で作製した試験体の変状を認識できるか検証するための模擬試験を行った。

2. 堤防変状検知手法の調査検討

2.1 堤防変状検知センサ機器調査

積雪下の堤防の変状を検知するためには、積雪を透過して堤防の状態を計測できるセンサ機器が適するが、そのようなセンサ機器は一般的ではなく、その存在の有無についても不明である。そのため、積雪を透過して計測できる可能性のあるセンサ機器について調査を行い、それぞれの概要を整理した（表-1）。調査の結果、積雪を透過して積雪下の堤防の変状を計測できるセンサ機器については確認できなかった。なお、傾斜センサやケーブルセンサなどの機器を堤防に直接設置して変状を検知することも考えられたが、機器を設置した

表-1 積雪下の堤防変状を検知するためのセンサ機器の概要

機器種類	機器例	概要（積雪状態の堤防における運用）	運用方法	地形把握	懸念点
電波	マイクロ波レーザ ミリ波レーザ 合成開口レーザ	航空機や人工衛星から地表に向けてマイクロ波（ミリ波）を照射し、反射した電波から地形データを形成	移動体観測	○	●装置が大型・高価 ●透過可能な積雪の量は不明
	GPSビーコン	GPSビーコンを積雪前の堤防上に設置、衛星測位によりGPSビーコンの位置を把握	堤防設置	△	●センサを設置した地点のデータしか取れない ●GPSの測位精度（堤防変状を把握可能か） ●取得データの送信に工夫が必要（電波が雪を透過しない可能性）
	RFID	無線通信内蔵ICチップとアンテナで構成されたRFIDタグを積雪前の堤防上に設置、リーダーとの無線通信により、RFIDタグとリーダー間の距離を計測	堤防設置	△	●通信距離は長くなり、積雪により減衰が見込まれる ●センサを設置した地点のデータしか取れない ●透過可能な積雪の量は不明
	雪崩ビーコン	雪崩ビーコンを積雪前の堤防上に設置、雪崩ビーコンから発する電波を受信器により受信し、おおまかな距離と方角を検知	堤防設置	△	●おおまかな距離と方角しか分からず、有効距離は50m程度 ●センサを設置した地点のデータしか取れない ●計測機ではない為データの取得は不可
光	3Dスキャナ LiDAR	UAV等に搭載または地上定点に計測機器を設置、堤防の積雪表面を計測	移動体観測 堤防設置	○	●雪を透過しないため、積雪表面の計測となる ●データの活用には高度な情報処理が必要（リアルタイム性が低い）
	レーザ距離計	UAV等に搭載し、飛行しながら連続的に堤防の積雪表面までの距離を計測、線的な積雪表面形状を得る	移動体観測	△	●雪を透過しないため、積雪表面の計測となる ●データ量が少なく面的な地形把握が困難
	光学カメラ (写真測量)	光学カメラで撮影した複数枚の画像から、専用ソフトウェアによる地形の3Dモデル化（フォトグラメトリ）	移動体観測 堤防設置	○	●雪を透過しないため、積雪表面の計測となる ●積雪表面には濃淡や特徴点が乏しいため、計測が難しい ●データの活用には高度な情報処理が必要（リアルタイム性が低い）
	光学カメラ (画像解析)	光学カメラで撮影した画像の解析（AI 認識等）により変状の特徴点などを検出	移動体観測 堤防設置	△	●雪を透過しないため、積雪表面の観測となる ●画像として表現されるものの検出であるため、積雪表面形状の把握は困難
	トータルステーション	堤防上にプリズムやターゲットを設置し、トータルステーションによる測距によりプリズム等の位置を把握	堤防設置	△	●プリズム等を設置した地点のデータしか取れない ●プリズム等が積雪に埋まらないように設置する必要がある
超音波	超音波距離計	超音波距離計をUAV等に搭載し、飛行しながら連続的に堤防の積雪表面までの距離を計測、線的な積雪表面形状を得る	移動体観測	△	●雪を透過しないため、積雪表面の計測となる ●データ量が少なく面的な地形把握が困難
物理 センサ	傾斜センサ 加速度センサ	センサを積雪前の堤防上に設置、堤防変状による傾斜角変化や加速度変化を検知（加速度から移動距離も取得可能）	堤防設置	△	●センサを設置した地点のデータしか取れない ●取得データの送信に工夫が必要（電波が雪を透過しない可能性）
ケーブル センサ	電気式ケーブル 光ファイバ	ケーブルセンサを積雪前の堤防に埋設または敷設、堤防変状により生じるケーブル変形等の位置を測定器により検知	堤防設置	△	●センサケーブルを設置した区間のデータしか取れない ●取得データの送信に工夫が必要（電波が雪を透過しない可能性）

【地形把握】 ○：地形または積雪表面形状を面的に把握できる。 △：地形または積雪表面形状の部分的な把握しかできない。

地点の変状しか検知できず、広範囲にわたる堤防すべてを検知できるようにセンサ機器を設置することは現実的ではない。

2.2 UAVにおける調査手法の検討

積雪下の堤防変状を把握するには、広範囲にわたる堤防の調査を行う必要があるため、センサ機器を搭載して広範囲を飛行できる無人航空機（以後、「UAV」という。）が有用である。なお、UAVの機体形状には、回転翼型、固定翼型、VTOL（Vertical Take-Off and Landing, 垂直離着陸）型に分類される。回転翼型は、狭い場所で離着陸が可能で、空中に静止できるという特性を生かして、可視光や赤外線カメラを搭載し、写真や動画を撮影する用途に多く用いられている。また、固定翼型は、回転翼型に比べ速く飛べるほか、エネルギー効率の面でも回転翼型に比べ優れている。そのため長距離の飛行や、長時間滞空することができることから広範囲の測量や調査といった用途に使用されている。しかし、離着陸には回転翼型に比べ広いスペースが必要となる。近年では、長距離・長時間の飛行が可能な固定翼型と、狭い場所で離着陸が可能で、空中に静止できる回転翼型の良さを合わせ持った VTOL 型も登場している。

UAV の飛行形態にはレベル 1～4 の飛行形態があり、レベル 1 は目視内での操縦飛行、レベル 2 は目視内での自動・自律飛行、レベル 3 は無人地帯における目視外飛行、及びレベル 4 は有人地帯における目視外飛行となっている。積雪状態にある堤防上の移動は容易ではないため、変状を調査するには、地上の 1 地点から操作できることが重要である。そのため広範囲にわたる堤防を調査するには、目視外飛行（レベル 3 以上）が必要である。一般的に UAV の遠隔制御は送信機と機体の間での直接通信を行うものであり、その通信可能距離は長くても数キロメートル程度であることから、広範囲に及ぶ堤防の調査には、レベル 3 で操作地点を随時移動しての多地点操作が考えられる（図-1）。モバイル機器用の通信規格である LTE を利用した制御方式の UAV もあり、LTE 通信網の範囲内であれば、飛行距離の制限がほぼなくなり一地点からの操作が可能となるが（図-2）、バッテリー容量などによる飛行距離の制限が生じる。

2.3 堤防変状要因の検討

堤防に変状を生じさせる要因の一つとして地震災害が考えられたことから、過去の地震による堤防の被害状況について文献調査を行った。しかし、地震による積雪下での堤防変状を記録した文献や資料を確認することはできなかった。そこで堤防の被害 31 件が一覧表としてまとめられていた 1983 年日本海中部地震震害調査報告書³⁾を参考として整理したところ、全 31 件の被害において堤防に縦断亀裂が発生し、22 件（71%）で堤防天端の



図-1 レベル3飛行（LTEなし）のイメージ



図-2 レベル3飛行（LTEあり）のイメージ

沈下が発生していた。なお、沈下が発生した22件の最大沈下量の平均値は0.49 mであった。

このような変状が堤防に発生した場合、積雪量や雪質にもよるが、堤防に亀裂が発生すれば堤防の積雪にも同様の亀裂が発生するほか、堤防天端が数十センチメートル沈下すれば、積雪の表面も同様に沈下することが想定される。しかし、どの程度の堤防変状であれば積雪表面に影響が表れるかの知見がないため、今後、積雪表面に影響が出る条件（変状規模、積雪量、雪質など）について検討が必要である。

2.4 堤防変状検知センサ機器検討

2.1 で堤防の変状を計測するためのセンサ機器について調査したが、堤防の亀裂や沈下などの変状を上空から俯瞰的に計測でき、UAVに搭載可能なセンサ機器として光学カメラ、LiDAR、ミリ波レーダ、レーザ距離計、超音波距離計などが挙げられる。これらのセンサ機器においてレーザ距離計と超音波距離計については、UAVへの搭載実績を確認できなかったため、UAVへの搭載可否や方法の検討が必要である。また、ミリ波レーダは、UAVの障害物回避を目的としたものであるため、積雪表面計測への適用性の検討が必要である。よって、UAVへの搭載実績があり、面的に地形を把握することができる光学カメラとLiDARを用いて

模擬試験を行った。

3. 堤防変状検知手法の検証

3.1 堤防変状検知手法の模擬試験

地震災害発生後、広範囲におよぶ河川堤防を迅速に点検するには、UAVで上空から俯瞰的に点検するのが効率的である。そこで長距離を高速で飛行でき、狭い場所でも離着陸が可能なVTOL型のUAV(Trinity F90+, Quantum-Systems 社)に搭載されている光学カメラ(RX1 RII, SONY 社)やLiDAR(Qube240)が、積雪上に発生する変状を認識できるか検証する模擬試験を行った。模擬試験は、寒地土木研究所構内の実験棟横に堤防を模した試験体を雪で作製し、その表面に大きさの異なる3種類の変状を作り、台座の上に固定したUAVを実験棟の窓から屋外に張り出して模擬試験を実施した(図-3, 4)。使用したUAV及び計測機器の仕様を表-2~4に示す。なお、河川堤防を模した試験体に変状を作る際、変状の大きさや方向を判別するため試験体を図-5のようにエリア分けした。



図-3 模擬試験で使用した試験体

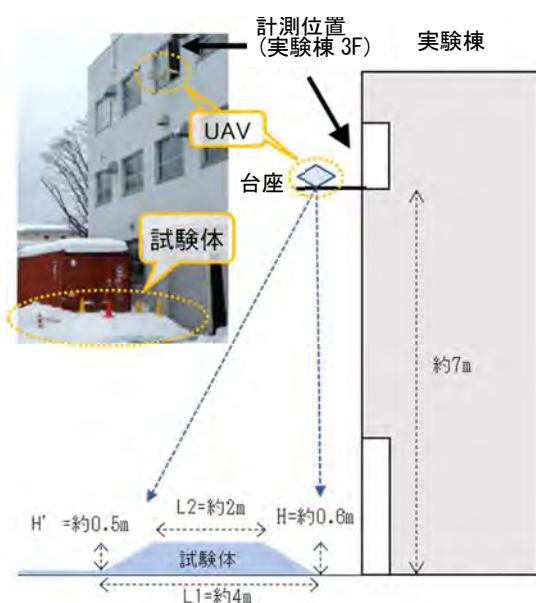


図-4 模擬試験イメージ

3.2 堤防変状検知手法の模擬試験結果

光学カメラは、どのエリアにおいても変状の有無をおおよそ認識することができたが、エリア C は他のエリアと比較して変状の視認性が低かった(写真-1)。これは、斜面の角度と太陽光の入射の関係で、変状の陰影ができなかったことが要因と考えられる。

LiDARは、機器の計測範囲(スキャナ視野角 70°)の影響で取得できた点群データは計測位置の真下に位置するA, C, D-1, D-2に限られた(図-6)。3種類の変状において、小さな変状(10mm×60mm)をLiDARで認識することは困難であった。しかし、中程度(50mm×120mm)及び

表-2 VTOL 型 UAV の仕様

項 目	仕 様
最大離陸重量	5.0kg
寸法(翼幅)	2.394m
最適巡航速度	17m/s
最大飛行高度	4,500m
最大飛行時間	90分
コントロール距離	5~7.5km
最大ペイロード	700g
動作温度範囲	-12℃~50℃

表-3 光学カメラの仕様

項 目	仕 様
有効画素数	約4,240万画素(7,952×5,304px)
F値	F2~F22
焦点距離	35mm
画角(35mm判相当)	63°

表-4 LiDAR の仕様

項 目	仕 様
波長	905nm
最大飛行高度	140m AGL
推奨飛行高度	100m AGL
精度	1.8~2.5cm
正確度	<3cm
スキャナ視野角	70°
点密度(飛行高度100m)	50~100点/m ²
動作温度	-20℃~40℃

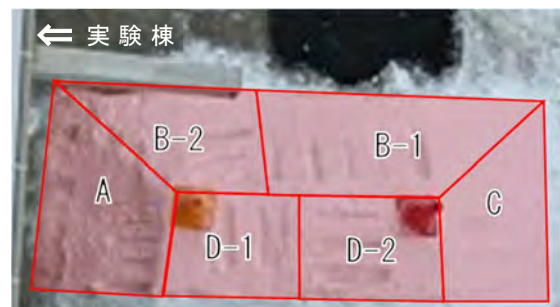


図-5 試験体のエリアについて
(試験体の上から撮影)

大きい（100mm×180mm）変状については、試験体の上から計測した点群からも変状の有無の判別は可能であった（図-7，8）。なお、積雪面の変状を明瞭にするため、これらの図に示している点群の各点の表示は大きく設定している。また、大きい変状の深さについて点群処理ソフトの Cloud



写真-5 光学カメラによる変状の撮影状況
（試験体の上から撮影）

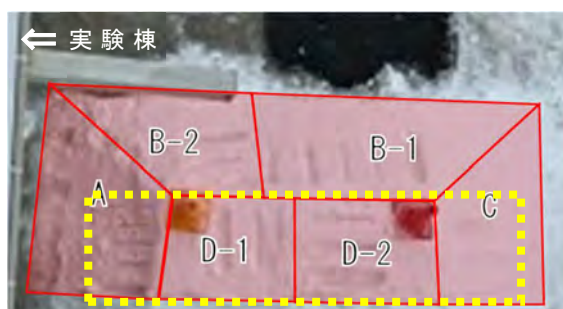


図-6 LiDAR で計測できたエリア
（黄色破線で囲った部分）

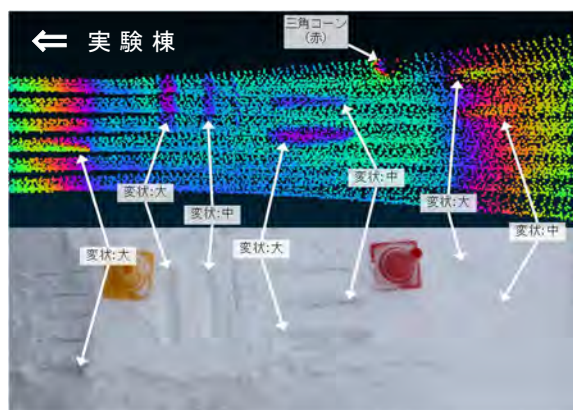


図-7 LiDAR での計測結果

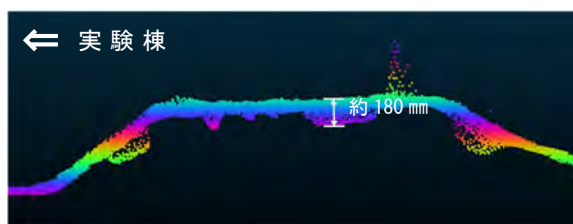


図-8 LiDAR での計測結果（断面方向）

Compare で計測したところ、約 180mm という値であった（図-8）。LiDAR は、光学カメラの撮影で視認性が低かったエリア C でも、他のエリアと変わらずに認識できていたことから、斜面の角度や太陽光の入射角の影響を受けにくいことを確認した。

今回の模擬試験は、実験棟 3 階の窓より UAV を外に張り出し、静止した状態で試験体を LiDAR 計測したが、実際の VTOL 型の UAV における LiDAR 計測は、一定の速度で飛行した状態で積雪表面の点群を取得するため、今回の模擬試験のように UAV を静止した状態での計測は、点群に厚みが発生し、本来の精度で計測ができていない可能性がある。そのため、今後は積雪に覆われた雪面上を実際に飛行させ、光学カメラや LiDAR を用いて変状を計測する必要がある。

4. まとめ

積雪下の堤防の変状を検知する手法として、市販の UAV に搭載されている光学カメラと LiDAR を用い、雪で作製した試験体の変状を認識できるか検証を行った。その結果、光学カメラで変状を認識することは可能であったが、太陽光の入射角の関係で場所により視認性が低いところもあった。また、LiDAR では中程度（50mm×120mm）以上の変状でなければ認識できなかったが、太陽光等の影響を受けないことを確認した。

今後は、積雪に覆われた雪面上を実際に飛行させ、光学カメラや LiDAR を用いて変状を計測する予定である。

参考文献

- 1) 日本気象協会（tenki.jp）：北海道の記録室2024年2月編 2月統計史上1位を更新する最高気温，
<https://tenki.jp/forecaster/kamanyan/2024/02/27/27668.htm>
1（2024.7.12確認）
- 2) 日本建設機械化協会：2005除雪・防雪ハンドブック（除雪編），p.112，2004.
- 3) 土木学会日本海中部地震震害調査委員会：1983年日本海中部地震震害調査報告書，pp.538-542，1986.

2. 郊外部の無電柱化施工のためのトレンチャーによる掘削試験とその評価

(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、防災対策・交通安全・景観改善などを目的に進められ、推進に向けては低コスト技術の普及が重要である。寒地土木研究所では、電線類地中化における機械施工技術の確立に向けてトレンチャーによる掘削施工試験を行っている。これまでに郊外部の道路など電力・通信の需要密度が低く整備延長の長い区間では、トレンチャー活用の有効性を確認しており、近年では、直轄国道¹⁾や高速道路²⁾(写真-1)など実現場への導入もなされている。今回、掘削深さは1200mm、掘削幅は進行方向に対し、左右2回に分けて1000mmの掘削により、従来より掘削深さ、掘削幅を拡大し、試験施工を行った。また、埋戻しなど後工程を効率的に行うために、浅層埋設方式や管路の余幅を極力減らし、コンパクトな掘削断面による複数管路敷設試験を行った。これら試験施工によるトレンチャーの掘削速度、掘削精度、及び管路敷設の作業性について評価したので報告する。

2. トレンチャーの概要

トレンチャーとは一定の幅と深さで高速で連続掘削が可能な機械の総称である³⁾。今回、施工試験に使用した機械は、掘削幅は掘削刃の取付位置の変更により、200mmから最大610mmまで可変可能であるが、進行方向に重複して掘削が可能なWカッティング(2回掘削)ができる機種であり、最大1000mm幅の掘削が可能である。また、掘削深さは、チェーンブームの交換により最大1200mmまでの掘削が可能である。なお、チェーンブームには、掘削深さにより、標準掘削深さ用の1000mm、浅い溝用の700mm、深い溝用の1200mmの3種類が用意されている。機械の諸元を表-1に示す。

トレンチャーの掘削チェーンには、路盤材など固い地盤の掘削に適した超硬ビット型と比較的柔らかい地盤用の土砂排出性の高いカップ型があり、現場条件に併せて掘削刃を選定することが可能である。トレンチャーには、掘削土砂を排出するためのベルトコンベヤが付いており、掘削作業と同時に4tまたは10tダンプトラックへの積込作業が可

能である。更に後方には掘削した底面の整地を行うためのブレード状のトレンチクリーナーを2枚装備しており、それぞれをボルトで連結することでWカッティングに対応する。チェーンの外側には、舗装上にこぼれた土砂を掘削溝へ誘導するドラッグプレートを装備している。写真-2に機械外観、写真-3に700mm用ブーム及び掘削刃を示す。

なお、トレンチャーは施工範囲内に支障物がなく、施工作業幅が十分で、沿道利用が少ない、連続掘削が可能な郊外部での施工に適している。



写真-1 掘削状況（高速道路での施工）

表-1 機械主要諸元

機械名	トレンチャー（専用タイプ）
機関出力（本体用）	55.2kW（74PS）軽油
機関出力（コンベヤ用）	19.8kW（26.5PS）ガソリン
掘削機構	チェーン式
全長	10,600mm
全幅	2,520mm
全高	2,470mm
車両総質量	7,400kg
最大掘削深	700/1000/1200mm
最大掘削幅	200(最小)~610+390mm
掘削機オフセット量	400mm
その他	排出コンベヤ付き



写真-2 機械外観（1200 mm用ブーム装着）



写真-3 700 mm用ブーム及び掘削刃

3. 施工試験

試験は北海道石狩市の寒地土木研究所石狩吹雪実験場構内で令和6年6月に行った。図-1に試験箇所を示す。

掘削試験は、新たに掘削幅 610 mm、掘削深 1200 mmで行い、限られた断面で、管路敷設が可能か試験を行った。また、複数管路条数に対応するため、掘削幅を拡大した 1000 mm、掘削深さ 1000 mmについて、掘削試験を行った。表-2に試験概要を示す。

3.1 掘削幅 610 mm × 掘削深 1200 mmの掘削試験及び管路敷設試験

トレンチャーの掘削幅は 610 mm、掘削深が従来より深い 1200 mmで掘削試験を行った。また、その掘削断面において、作業時に敷設管と掘削壁面の余裕幅がない条件で施工が可能か管路敷設試験を行った。施工断面を図-2に示す。

試験の結果、トレンチャーの施工速度は図-3に示すとおり、掘削のみで約 56.4m/h であった。掘削土砂の運搬に 10 t ダンプトラックを使用した場合（土砂の比重 2.1、積込み量 4.7m³ 程度）、断面積から（掘削延長が 6.9m 毎）ダンプトラックの入替も含めると、入替に約 1 分 30 秒として、約 46.8m/h



図-1 試験箇所

表-2 試験概要

試験項目	試験条件
掘削試験	W = 610mm, DP = 1200mm
管路敷設試験	W = 610mm, DP = 1200mm 角型FEP管φ130×4条 角型FEP管φ100×4条 RR-VE管φ54×8条
掘削試験 (広幅員)	W = 1000mm (610 + 390mm) DP = 1000mm

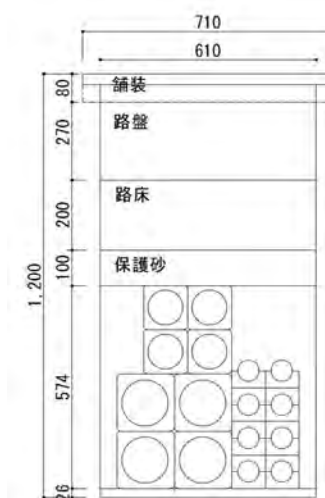


図-2 掘削深さ 1200 mm施工断面



図-3 施工速度（掘削深さ 1200 mm）

の施工速度となるが、従来のバックホウ掘削約 9.5m/h（土木工事標準積算基準書による試算値）と比較しても十分な施工速度であることを確認した。

次に、掘削幅 610 mm、掘削深さが 1200 mmと狭くて深い中で、管路敷設が可能か試験を行った。深さはこの管路条数であれば、浅層埋設の土被りを考慮しても掘削深さは 1000 mm程度だが、狭くて深い状態でも作業が可能か確認するため、トレンチャーの最大掘削深さで管路敷設試験を行った。

管種は電力用として角型多条電線管（以下「角型 FEP 管」という）φ130 を 4 条、電力引込用として角型 FEP 管 φ100 を 4 条、通信用として RR-VE 管 φ54 を 8 条と、郊外部を想定して敷設した。

施工手順として、基礎砂を敷設した後、角型 FEP 管 φ130、RR-VE 管、最後に角型 FEP 管 φ100 を施工した。

掘削幅 610 mmの掘削断面は作業員が入って作業するには十分な幅である。今回、掘削深さは 1200 mmと深い掘削溝内で作業することは可能であった。しかし、管と掘削壁の余幅が片側 48 mm程度と小さく、厳しい施工条件ではあったが、使用した管が角型 FEP 管と RR-VE 管も φ54 とそれぞれ軽量で可撓性があったため、狭隘な断面下でも管路敷設は可能であった。また、角型 FEP 管の敷設状況を写真-4 に、敷設後を写真-5 に示す。



写真-4 敷設状況（角型 FEP 管の接続）



写真-5 敷設状況

3.2 広幅員断面の掘削試験

トレンチャーは標準仕様の掘削幅（最大 610 mm）内で、掘削するのが効率的であるが、管路条数の多条化に対応するため、2 回掘り工法（Wカッティング⁴⁾）で施工試験を行った。

Wカッティングは図-4 に示すとおり、初めに掘削断面の右側（掘削機の刃幅分 610 mm）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を左側にスライドさせ、残り 390 mm を掘削する工法である。

試験の結果、図-5 のとおり、掘削のみの施工速度は約 36.6m/h、先ほどと同じく入替時間、更に機械引き戻し、トレンチャークリーナーの接続などを考慮すると約 26.1m/h となるが、バックホウ掘削約 7.1m/h よりも早い施工が可能であることが確認できた。

ただし、写真-6 のように舗装にクラックがあるような地盤の弱い箇所においては、トレンチャーの自重による掘削肩部での車輪のスタックが見られるため（写真-7）、施工箇所の選定に当たっては、十分な検討が必要である。

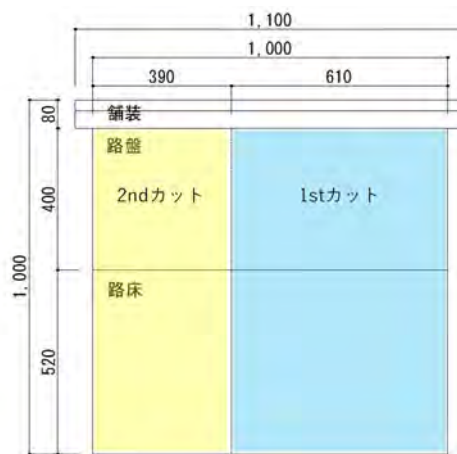


図-4 広幅員掘削の施工断面

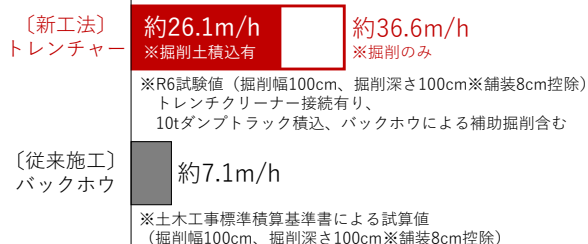


図-5 掘削速度



写真-6 舗装上のクラック



写真-8 掘削状況



写真-7 掘削肩部での車輪のスタック

4. まとめ

郊外部におけるトレンチャー施工による電線類地中化を推進するために、新たな施工断面での掘削試験、また狭隘断面下での管路敷設試験を行い、その評価を行った。

その結果、掘削幅 610mm、掘削深さ 1200 mmの掘削試験は、掘削のみで約 56.4m/h、ダンプトラックへの積込、入替を含めた場合でも約 46.8m/h となり、従来のバックホウ掘削（約 9.5m/h）と比較しても、効率的であり、掘削深さが深くなっても、掘削作業の時間短縮に寄与していることを確認した。

また、同じ断面での管路敷設も、1200 mmと深く、管と掘削壁の余幅が小さい狭隘な断面でも、角型 FEP 管および RR-VE 管が軽量で可撓性があるため施工が可能であった。

広幅員掘削においては、掘削のみの施工速度は約 36.6m/h、ダンプトラックの入替時間を考慮しても約 26.1m/h となり、従来のバックホウ掘削（約 7.1m/h）と比較して、圧倒的に効率的な施工が可能であった。標準仕様の掘削幅 610 mm以上にも対応可能なため管路の多条化にも適応できる。

しかし、舗装にクラックがあるなど、地盤が弱い箇所ではトレンチャーの自重により車輪のスタックが発生するリスクが確認された。施工に当たっては、十分な検討が必要である。

今回、従来の機種より、広くて、浅い断面に対応可能なトレンチャーについて試験を行ったが、施工断面に関しては、今後も、極力浅く、狭くコンパクトにしていくことが効率化の上では重要である。

今回も含めてこれらの試験結果が、今後のトレンチャー施工の導入に向けての参考になれば幸いである。

今後は、更に全体工程の短縮を目指して、関連作業の効率化について検討していく。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：令和4年度第1回無電柱化推進のあり方検討委員会，資料6無電柱化推進に関する最近の話題について
- 2) 永長哲也，大部裕次，飯塚大起：道央自動車道通信管路工事でのトレンチャーの適用，第67回（令和5年度）北海道開発局技術研究発表会，2024.2
- 3) 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），2021.2
- 4) 永長哲也，中島淳一：トレンチャーを活用した電線類地中化施工，寒地土木研究所月報，No835，pp.41-46，2022.9

3. 建設プロジェクトにおけるボクセルモデルの 適用可能性に関する一考察

前田建設工業株式会社
前田建設工業株式会社
大阪経済大学
流通科学大学
法政大学

○ 長田 將吾
川西 敦士
中村 健二
寺口 敏生
今井 龍一

1. はじめに

建設の公共事業では、令和 6 年度より受発注者間が一連の建設生産・管理システムの効率化・高度化を図るため、BIM/CIM の原則適用¹⁾が本格的に開始された。令和 5 年度に改正された国土形成計画²⁾においても、産業界の力を最大限発揮できるデジタルの徹底活用が掲げられており、民間企業の活躍がより一層期待されている。

日本の人口減少は他国に比べて顕著であり、2070 年には 8,700 万人になると推計されている³⁾。将来、経済力を保持できる中心的な都市へ人口が流出することを見据えると、サービスの提供や範囲に格差が広がり、地方の社会インフラが一層弱体化することは明らかである。この課題を解決するため、オムロン社の SINIC 理論⁴⁾が提唱する自律社会の実現を視野に入れ、人と調和するデジタル環境への再編を図ることで、どの地域でも同水準のサービスを受けられるようにすべきである。そのために、実社会を克明に表現したデジタルツインを用いて多様なユースケースを創出していくことが、喫緊に解決すべき足許の課題と言える。

その一策として著者らは、デジタルツイン環境の構築にボクセルモデルを活用することに着目した。ボクセルモデルは、図-1 に示すとおり、実空間を立体的に分割して表現するため、形状表現の柔軟性や拡張性が高い特長を持つ。

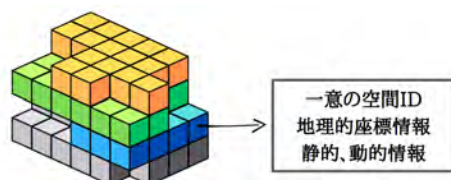


図-1 ボクセルモデルの概略図

さらに、ボクセルモデルに一意の空間 ID⁵⁾を割り当てることで、地理的座標情報に加えて、静的・動的情報を付加することが可能である。空間

ID とは、ドローン運航のナビゲーションや自動運転などの実現を加速させる、三次元空間の標準規格として注目されている。この技術を踏まえ、建設プロジェクトの調査、設計、施工に対応した形状表現や、三次元空間の統一規格化を見据えたデータ管理および情報連携が期待される。建設プロジェクトの各段階で生成されるデータがボクセルモデルを通じて維持管理に活用できることが明らかになれば、実空間を写像したデジタルツインの構築に可能性を見出すことができるだろう。

本論文では、既存の 3DCAD とボクセルモデルの形状表現やデータ構造等の特長を比較し、ボクセルモデルの具体的なユースケースを考察する。そして、施工段階を含む建設プロジェクト全体へのボクセルモデルの適用可能性を明らかにすることを目的とする。

2. 3DCAD とボクセルモデル

2.1 ボクセルモデルの特長と 3DCAD との違い

3DCAD は、建設業界において広く利用されているツールであり、詳細な形状や構造を三次元空間で精密に表現することができる。一方、ボクセルモデルは、立方体単位のボクセルの集合で空間を構成し、形状や情報を三次元的に表現することができる。以下に、ボクセルモデルの特長を詳述する。

(1) 柔軟性

ボクセルモデルは、空間を細かく分割して一意の ID を割り当てることで、詳細な形状や構造を表現できる。リアルタイムでのデータの追加、削除、変更にも適しており、迅速な変更管理に対応できる。さらに、付加した属性情報を基に統合することも容易であるため、異種データ形式の管理にも適用しやすい。

(2) 拡張性

ボクセルモデルは、その構造をモジュール

化できるため、部分的に他のプロジェクトに再利用できる。再利用の際には、空間の分割規模を自由に変更できるため、大規模都市モデルなど幅広く対応できる。多様な分野への応用を前提とした多目的利用も可能だ。

2.2 3DCAD とボクセルモデルの比較

3DCAD でよく使われるソリッドモデルとサーフェスモデル、そしてボクセルモデルの特徴を整理した結果を表-1 に示す。ボクセルモデルは、3DCAD で一般的なソリッドモデルやサーフェスモデルと異なり、立方体の集合による形状や必要なデータ粒度に対応した内部構造を、柔軟に表現することができる。さらに、品質管理や出来形管理などの異なる内容を各管理レベルに合わせて解像度を調整できるため、効率的な運用が期待できる。

表-1 モデルの特徴別比較表

特徴	ソリッドモデル	サーフェスモデル	ボクセルモデル
形状表現	高精度な形状表現	高精度な表面表現	柔軟な構造表現
データ量	多い	多い	少ない
管理の容易さ	煩雑	煩雑	容易
即時性	困難	困難	容易
内部構造表現	困難	不可能	可能
異種データ統合	困難	困難	容易
モジュール化と再利用	可能	可能	容易
多目的利用	建設、自動車等の製造	デザイン、可視化	都市計画等、多目的

3. 建設プロジェクトとボクセルモデル

建設プロジェクトは、計画段階から設計、施工、そして維持管理までの一連のプロセスを経て進行する。本稿は、現場施工段階のユースケースを考察しながら業務プロセスを整理する。そして、施工段階におけるデータ管理と利活用が、維持管理段階の活用寄予するかを考察する。

3.1 建設プロジェクトのフロー

本稿では道路工を対象とした。その理由は、維持管理データベースの中でも比較的整備されている道路台帳との親和性が高く、ユースケースの検討が容易であると判断したためである。

(1) 事前調査

建設プロジェクトが着工する前に、事前調査として、地盤調査や埋設物調査、近隣家屋調査を実施する。

(2) 起工測量

工事施工前に行う測量で、工事現場形状や工事施工量を確認する。

(3) 施工計画の立案と施工計画書の提出

建設プロジェクトの全体計画を示す書類で、発注者に提出し承認を得る必要がある。

(4) 大工程、中工程レベルの工程表作成

建設プロジェクトの工程管理書類で、大工程では着工から竣工までの見通しを立て、中工程では人的・物的管理に利用される。

(5) 施工

施工計画に基づき、安全を最優先しながら計画通りに作業を進める。都度、工程管理の見直しを図り、工期に間に合わせる。

(6) 工事帳票の作成と提出

設計図書で指定された材料の使用承諾願いの作成と提出、そして設計図書に示された施工段階又は監督職員の指示した施工途中段階において、監督職員に出来形、品質、規格、数値等を確認してもらう。

(7) 工事打合せ簿の作成と提出

品質管理書類、出来形管理書類の作成と提出、そして工事履行報告書を提出する。

(8) 工事完成図の作成と提出

工事完成図（竣工図）を作成して、納める。

3.2 ボクセルモデルの考察対象範囲の整理

施工段階の各段階でボクセルモデルがどのように活用できるか、表-2 に整理した。

表-2 要素別ボクセルモデルの検討対象項目

施工段階の各要素	ボクセルモデルの活用想定
地盤調査	ボーリング箇所の明示とデータ登録
埋設物調査	埋設位置の可視部と不可視部の明示と健全度データ登録
起工測量	設計図に起工測量結果を反映させた 3D モデルを作成後、ボクセルに変換
大工程	工種情報を抽出
中工程	工種・細別情報を抽出
使用材料	使用材料情報を登録
品質管理	検査位置に品質管理情報を登録
出来形管理	出来形検査情報を登録
履行報告書	履行完了を可視化してボクセルをロックする
工事完成図	竣工図の 3D モデルを作成後、ボクセルに変換

まずは、検討対象項目が、維持管理段階に寄与すると判断した理由について説明する。

地盤調査や埋設物調査では、空間内の詳細な位置情報や地質・地盤特性の把握が重要である。ボーリング調査では、地質情報が深さによって変わることをボクセルモデルで表現しなければなら

ない。同様に、埋設物調査でも、地中に埋設された構造物や配管の位置を把握し、可視化することで、施工の安全性と効率の向上が期待できる。

起工測量は、工事の進行に先立ち、現場の形状や施工量を正確に把握するために必要なプロセスである。起工測量のデータを用いてボクセルモデルを更新することで、より精度の高い施工計画を策定できる。精度面に関しては、例えば、路体部は層厚 30 cm 毎、路床部は層厚 20cm 毎の盛土品質管理が要求される。また、舗装は基層と表層で約 5cm のコア厚の検測が求められる。他に、要求基準がない空間は、50 cm 程度の精度でも充足する。従って、モジュール別に 5cm～50 cm の範囲で形状表現できればよい。さらに、更新したボクセルモデルにプロジェクト進行管理の要素となる大工程と中工程の工種情報を登録することで、データ管理も容易になるメリットがある。

工事竣工時には、工事完成図を基にボクセルモデルを更新することで、最終的な形状と情報を維持管理に引き渡すことが可能となる。

次に、検討対象項目の対象外とした項目と、その理由を説明する。

近隣家屋調査は、家屋の現状や影響範囲を把握するために実施するが、プライバシー情報の取扱いが発生することから、ボクセルモデルの適用対象から除外した。また、施工計画書は、緻密な空間データより、安全を最優先にした工法選択の妥当性が重視されるため、維持管理段階に寄与する価値は低い情報と判断した。

4. ボクセルモデルの活用の考察

本章では、前章で対象とした要素に対して、ボクセルモデルをどのように生成して、データを入力するか。そして、必要に応じて形状を変更して、その後データを共有するかを論じる。その結果、ボクセルモデルが施工段階のデータ管理と活用にとどのように寄与するかを具体的に示す。

4.1 ボクセルの生成

ボクセルモデルは、施工段階で得られた初期データを基に生成する。この初期生成段階では、以下の手順が重要である。

(1) 設計図データの3DCAD化

最初のステップは、従来の二次元設計図を三次元データに変換する。設計図には、線形や構造物の形状、配置、寸法などが含まれているが、これらを 3DCAD にすることで、高精度に形状を表現する。

(2) 起工測量データの3DCAD化

次に、起工測量データを三次元化する。起工測量では、現場の地形や地盤状態を把握するため、ドローン測量技術等も併用することが多い。取得した点群データ等を処理して

3DCAD化することで、設計図データに不足している情報を付加し、更新する。

(3) ボクセルモデルの変換

3DCADを細かい立方体のボクセルに分割する。ボクセルの大きさや分割数は、建設プロジェクトに求められる精度要件に応じて調整する。例えば、ICTによる出来形管理は10cmグリッドで管理することが標準⁶⁾とされていたり、路体部の盛土は30cm巻き出しで管理されていたり、工種によって管理要件が多様である。ここでは、各精度要件の担保を前提に、できる限り抽象化して取扱いの容易さやデータ量の最小化を図ることが重要である。

(4) 一意のID付与

各ボクセルに一意の空間IDを付与する。開発企業によって仕様・規格が異なると、活用・普及が進まない恐れがあるため、著者らも空間IDの活用统一到統一することとしている。

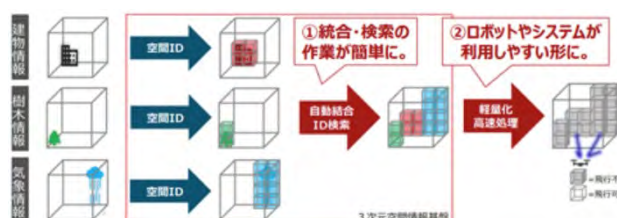


図-2 空間 ID の活用概要（引用：経済産業省掲出資料⁵⁾）

4.2 ボクセルへのデータ入力

ボクセルモデルの生成が完了したら、次は各ボクセルに必要なデータを入力していく。このプロセスを経て、単なる形状表現から統合管理できるデジタル環境に進化する。

(1) 地盤・埋設物調査データの入力

ボーリング調査で得られた地質情報を各ボクセルに入力することで、地盤の詳細な状態を三次元空間で管理できる。地盤の深度別に土質や岩質、N 値等の情報を格納する。

埋設物調査で得られた配管や構造物の位置や材質に関する情報をボクセルに格納する。これらのデータの格納は、内部構造表現が可能なボクセルモデルなので実現できる。性質別の色分けや断面表示により施工効率化も期待できる。

(2) 大工程・中工程の工種情報の入力

大工程および中工程の工種情報は、プロジェクト管理において重要な識別データである。しかし、ここでは進行管理に着目するのではなく、あくまで施工中に管理して維持管理に引き渡していくことを前提に、品質管理・出来形管理・材料管理に関連する工種のみを抽出すべきである。なぜなら、工種によるモジュール化が実現できると、ボクセルモデル

の再利用につながるため、より幅広いユーザーに適用できる可能性がある。

(3) 使用材料

各工事に使用される材料（鉄筋、コンクリートなど）の属性情報をボクセルに入力する。ここでは、材料の種類、製造日、使用日、製造会社を取り扱うことで、トレーサビリティの確保と予防保全の強化が期待できる。

(4) 品質管理

施工中に実施される様々な試験結果や解析結果が含まれる。例えば、コンクリート圧縮強度試験や平板載荷試験の結果、さらにコンクリート温度応力ひび割れ解析結果と実際の温度測定結果の比較データ等、多岐にわたる。これらの品質管理データをボクセルモデルに統合することで、異常が発生した場合の迅速かつ的確な保全活動につながるため、長期的な品質管理が期待できる。

(5) 出来形管理

出来形管理とは、実際の設計どおりに施工されているかを確認する行為である。従来の出来形管理は、一定数量毎に数カ所の抜取検査を行い、それがどの地点のものか、写真を添付して保存する。これが、ボクセルモデルで実現できるようになれば、検査結果のみをボクセルモデルに格納するだけで、工種情報と位置情報の識別も可能になるため、生産性向上効果もありながら、不具合の早期発見も期待できる。

4.3 ボクセルの形状変更

ボクセルモデルの形状変更は、施工中に設計変更事案が発生した場合を想定する。設計変更が発生する理由は、設計図書に示された条件と異なるためであり、計画どおりに施工を進めることが困難になる。このような場合、発注者と協議を行い、設計変更が必要と判断された場合、正式な指示書を受領する。受け取った指示書に基づき、ボクセルモデルの形状を変更する。

ボクセルの形状変更が完了したら、一意のIDを更新することで、最新の設計に適応したモデルを構築する。

4.4 ボクセルデータの受発注者間共有

ボクセルモデルによるデータ共有は、建設プロジェクトの全体的な効率化と情報の透明性向上に不可欠である。

(1) 多目的利用による利便性の向上

ボクセルモデルは、都市計画、インフラ管理、設計など、多様な目的に利用できる汎用性を持つ。施工段階で作成されたボクセルモデルは、完成後の維持管理や将来の改修計画にも利用可能であり、計画変更に対応しやす

い。また、ボクセルモデルを基に環境やインフラの影響を評価することで、発注者の効率的な維持管理方針に沿った判断も可能となる。

(2) 異種データ統合による一元管理

ボクセルモデルは、異なるデータ形式や異種データを統合し、ひとつのモデル内で管理することが可能である。空間IDを基にしたプロジェクト横断の管理を徹底できれば、プロジェクト別の情報の断片化を防ぐことが期待できる。

(3) 管理の容易さとリアルタイム更新

ボクセルモデルの管理は、従来の3DCADに比べてシンプルであり、各ボクセルに付与された一意のIDから、データの検索や更新、変更が容易である。受発注者間の連携が確立すると、余計な書類の授受が不要であることに加えて、意思決定速度の向上も期待できる。

5. おわりに

本論文では、建設プロセスにおけるボクセルモデルのユースケースを具体的に考察し、その適用可能性を明らかにした。施工段階でのデータ管理から形状変更、データの共有に至るまで、ボクセルモデルがどのように効果的に活用できるかを示した結果、著者らは、ボクセルモデルは建設プロジェクトのデータを高精度かつ一元的に管理できる非常に強力なデジタル環境になり得ると結論づけた。

さらに加えると、ボクセルモデルは、従来の電子納品の仕組みを変える可能性があるだろう。従来の断片的なデータ提出や管理の方式を刷新し、より柔軟かつ効率的な電子納品を実現することで、人口減少の影響を受ける建設業界の先進的なインフラ整備・管理の実現が期待できる。

本論文の考察が今後のボクセルモデルの実用化と、進歩したデジタルツインの構築の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省大臣官房・技術調査課：直轄土木業務・工事におけるBIM/CIM適用に関する実施方針，2024.3
- 2) 国土交通省：国土形成計画（全国計画） 閣議決定，pp.2，2023.7
- 3) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口令和5年推計，人口問題研究資料，第347号，2023.8
- 4) オムロン社，立石一真ら：未来接近へのSINIC理論，UDC 001.89:65.012.1/2，pp.5-6，1970
- 5) 経済産業省／デジタルアーキテクチャ・デザインセンター：3次元空間情報基盤アーキテクチャ設計報告書，pp.12～14，2022.7
- 6) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案），pp.13-18～13-20，2024.3

4. 3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）における 計測技術の整理

国土交通省国土技術政策総合研究所 ○池田 誠
国土交通省国土技術政策総合研究所 杉谷 康弘

1. 背景

国土交通省の i-Construction において、ICT の全面的な活用を推進するため、3次元計測技術に対応した各種要領が整備されている。「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）¹⁾」（以下、出来形管理要領）では、TS 等光波方式をはじめ、地上型レーザースキャナー（以下、TLS）や、GNSS 等の多くの計測技術が定められている。また、国土交通省では令和元年度より新たな ICT 計測技術の活用範囲を拡大するため、民間からの提案を出来形管理要領に反映する取り組み（以下、民間提案）を実施しており、これにより適用可能な工種及び計測技術が年々増加している。近年では、一般的に TLS よりも事前準備が簡易なことや器械本体が小さいといったことから手軽に点群取得できる技術として、地上移動体搭載型レーザースキャナーの出来形管理機器の構成例の一つであるバックパック型レーザースキャナーといった技術も民間提案を通じて要領化されている。

2. 研究目的

バックパック型レーザースキャナーと機器構成が同一であるハンディ型レーザースキャナー（以下、ハンディ型 LS）には、GNSS 等のセンサにより、本体のみで座標の標定が可能な機種と、GNSS を搭載せずに周辺環境の情報から自己位置を推定する SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) ²⁾処理のみで点群生成が可能な機種がある。後者のような機種では、さらに安価かつ手軽に計測ができるため、3次元点群データの計測技術として要領化を期待する声が挙がっているが、SLAM 処理による点群生成は、現行の出来形管理要領において定められていない。

そこで本研究では、SLAM 処理により点群を生成する GNSS 非搭載ハンディ型 LS と、現行の出来形管理要領において定められた計測技術である TLS との比較検証を通じて、SLAM 処理による点

群生成における今後の出来形管理要領への導入可能性を検討した。

3. 研究方法

本研究の検証方法は次の通りである。

まず、現場に設置した 6 点の白黒チェッカーターゲットの中心座標を TS のノンプリズム計測機能にて計測し、本検証における真値座標とした。次に、ハンディ型 LS 及び TLS で現場の点群計測を実施した。6 点の白黒チェッカーターゲットの中心座標のうち 4 点の座標を標定点とし、各レーザースキャナー観測座標を TS 観測座標へと座標標定した。残る 2 点の座標を検証点とし、検証点における真値となる TS 観測座標と各レーザースキャナー観測座標の座標較差を検証結果とした。

なお、本研究は特定の機器の性能を検証するものではないため、検証に使用したハンディ型 LS 及び TLS の機種については示さないこととする。

その他の条件は以下の通りである。

- 座標取得及び点群操作：

ハンディ型 LS 及び TLS の計測点群における白黒チェッカーターゲットの中心座標の検出及び取得は、点群処理ソフトウェアの自動検出機能を使用した。また、点群データの表示及び座標変換等の操作には、点群処理ソフトウェアの Cloud Compare³⁾ (Open-source) を使用した。

- 現場環境：

実際の使用環境を想定して、二つのパターンの現場環境で検証を実施し、それぞれ図- 1、図- 2 のように配置した白黒チェッカーターゲットを標定点及び検証点とした。パターン A では、法面を含む高低差のある現場環境とし、パターン B では、平面地形で背の高い草木に囲まれた現場環境とした。

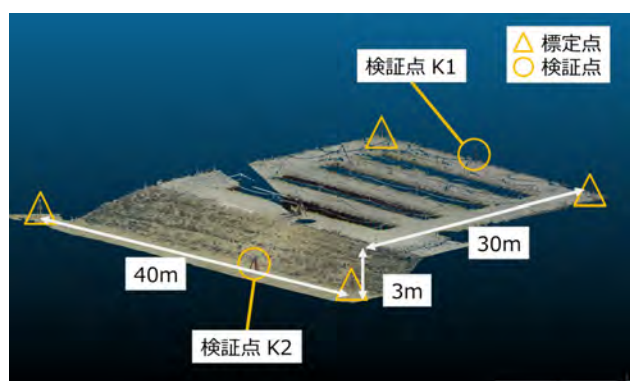


図-1 現場環境 (パターン A)

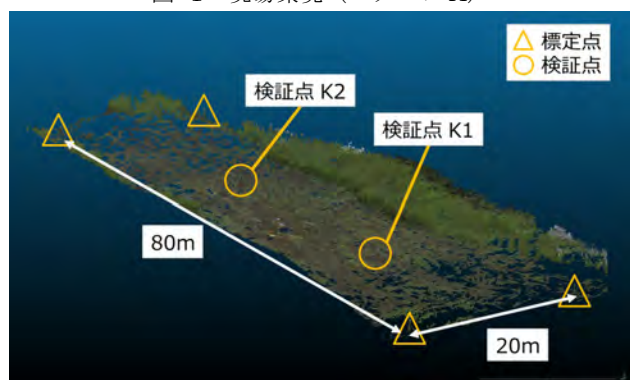


図-2 現場環境 (パターン B)

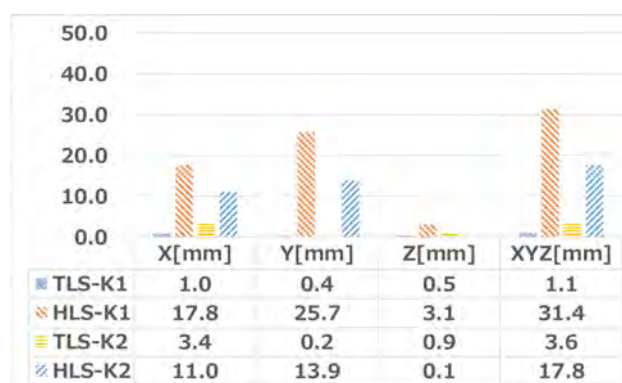


図-3 検証結果 (パターン A)

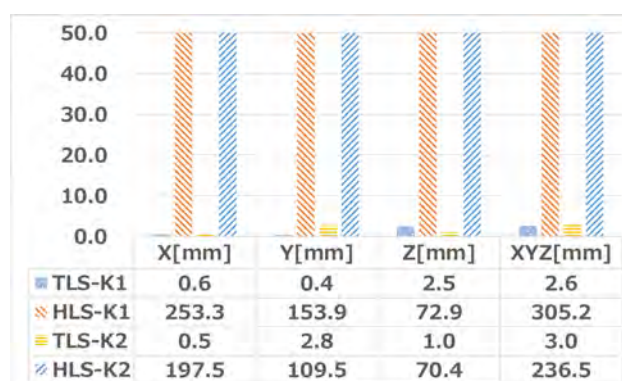


図-4 検証結果 (パターン B)

4. 結果と考察

検証結果を図-3, 図-4に示す。TLSの検証結果から、現場環境パターンA, Bともに座標精度が4mm以下という結果となった。ハンディ型LSの検証結果から、パターンAでは、座標精度が最大30mm程度であり、出来形管理要領中で定める土工の出来形管理の要求精度50mm以内を満たしたのに対して、パターンBでは、座標精度が最大300mm程度となり、この要求精度を大幅に超過した。パターンAにおいては、法面の地形形状がSLAM処理による点群生成に有利であった一方で、パターンBのように平面かつ背の高い草木に囲まれた現場環境では、SLAM処理による点群生成に不利であったと考えられる。これは周囲の特徴的な箇所を参考に点群生成するSLAM処理のような技術の特性が現れた結果といえる。このことからSLAM処理による点群生成では、計測する現場の形状や周囲環境によって測定精度の変動があるということが明らかとなった。

また本検証での計測の際には、点群生成に十分な点群密度を確保するために、計測中の歩行速度や方向転換時の計測に配慮する必要がある。このことから作業や歩行ルートによっても得られる結果が変動する可能性を示した。

5. 結論

本研究では、SLAM処理による点群生成について、計測する現場の形状や周囲環境によって測定精度の変動があるということが明らかになり、今後の出来形管理要領への導入可能性を検討することができた。

今後の展望として、実際の使用環境を想定した他のパターンについての検証及び、計測における歩行速度や経路についての検証を行い、さらに特徴を洗い出すことで、SLAM処理により点群を生成する計測機器の活用ケースが拡大することを期待する。

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6年3月
- 2) Takafumi Taketomi, Hideaki Uchiyama and Sei Ikeda : “Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016“
- 3) Cloud Compare : <https://www.danielgm.net/cc/>

5. 国土交通省による官民連携した 長時間飛行ドローンの実証試験について

国土交通省 大臣官房 参事官（イノベーション）グループ 施工企画室 遠藤 天生

1. はじめに

現在、国土交通省の現場では、災害時の被災状況調査、建設現場での測量、インフラ施設の点検等でドローンを利活用している。その中で、飛行時間・耐候性・高重量の輸送・通信環境等、行政ニーズに対する課題もある。このうち飛行時間は、作業の効率化・生産性の向上に広く影響する要素であると考ええる。

国土交通省では、「行政ニーズに対応した汎用性の高いドローンの利活用等に係る技術検討会」での議論を踏まえ、官民で連携しながら、耐候性・長時間飛行等にも対応した汎用性の高いドローンの現場実装に向けた取り組みを進めている。令和5年度には、国土交通省所管施設の点検・測量に利活用できる長時間飛行ドローンの実装化を目的に、参画する企業を公募した上で2度の実証試験を行った。

2. 主な要求技術仕様

公募で要求した主な技術仕様は、下記のとおりである。

- ・映像を通信装置で伝送／画像を撮影しデータを記録しながら（以下、軽ペイロード）、連続6時間以上の自律飛行が可能であること。
- ・レーザー測量しながら（以下、高ペイロード）、連続2時間以上の自律飛行が可能であること。
- ・IMU/GNSS 等による自動自律飛行が可能であること。
- ・FPV（First Person View）に対応したカメラが搭載されていること。
- ・エンジン停止時の安全性が保たれていること。
- ・セキュリティリスクやサプライチェーンリスクがクリアできていること。
- ・その他

本稿では、作業の効率化・生産性の向上に広く影響する要素である連続飛行時間に焦点を当て、実証試験の内容と結果を紹介する。

3. 第1回実証試験

3.1 試験内容

(1) 実施年月日

令和5年5月20～21日

(2) 参加企業

株式会社アミューズワンセルフ、小川精機株式会社、ソフトバンク株式会社、株式会社パスコ、株式会社フジタ、岡山大学、岐阜大学JV（以下、アミューズワンセルフJV）



図-1 実施機体（第1回実証試験）



図-2 実施場所（荒川第二調整池予定地工事エリア）

(3) 実施機体

マルチコプター型ドローン

(4) 実施場所

国土交通省 関東地方整備局 荒川調整池工事事務所管内 荒川第二調整池予定地(埼玉県埼玉市桜区下大久保地先) 工事エリア内

3.2 軽ペイロード

機体に搭載されている標準カメラで、撮影データのリアルタイム伝送を行いながら4時間程度の連続飛行を実施する。着陸後の燃料タンクに残った燃料から推定飛行可能時間を算出することで、6時間以上の連続飛行が可能であるかを判断する。なお、当日の条件から、連続飛行時間を約3時間に短縮した。

(1) 飛行速度

3m/s

(2) 飛行コース

約70m四方の周回(飛行予定時間内に強風の予報が出ていたため、安全を考慮して飛行ルートを片道約2.4kmの周回から、離発着場所近傍約70m四方の周回に変更した。)

(3) 飛行距離

約33km

(4) 天候

晴れ

(5) 気温

平均28.7℃

(6) 風速

平均1.3m/s (最小0.0～最大4.6m/s)



図-3 軽ペイロードの状態(第1回実証試験)

結果、自律飛行、撮影データのリアルタイム伝送の安定性を確認できた。当日の条件から、連続飛行時間を3時間に短縮し、実連続飛行時間は182分を記録した。着陸後の燃料タンクに残った燃料から推定飛行可能時間を算出したところ、目標としていた6時間以上の連続飛行が可能であると判断できた。

3.3 高ペイロード

機体にレーザー測量機器を搭載し、レーザー測量を行いながら1時間以上の連続飛行を実施する。着陸後の燃料タンクに残った燃料から推定飛行可能時間を算出することで、2時間以上の連続飛行が可能であるかを判断する。

(1) 飛行速度

3m/s

(2) 飛行コース

片道約2.4kmを周回

(3) 飛行距離

約9.6km

(4) 点群

点密度100点/m²以上

(5) 天候

晴れ

(6) 気温

平均22.8℃

(7) 風速

平均1.3m/s (最小0.0～最大2.8m/s)



図-4 高ペイロードの状態(第1回実証試験)

結果、自律飛行、取得点群データのリアルタイム伝送の安定性、十分な測量精度を確認できた。実連続飛行時間は63分を記録した。着陸後の燃料タンクに残った燃料から推定飛行可能時間を算出したところ、目標としていた2時間以上の連続飛行が可能であると判断できた。

4. 第2回実証試験

4.1 試験内容

(1) 実施年月日

令和6年2月28～29日

- (2) 参加企業
株式会社エアロジーラボ
- (3) 実施機体
マルチコプター型ドローン
- (4) 実施場所
福島県ロボットテストフィールド浪江町滑走路(福島県双葉郡浪江町大字棚塩字東赤坂89番浪江町棚塩産業団地内) 周辺地域



図-5 実施機体 (第2回実証試験)



図-6 実施場所 (福島県ロボットテストフィールド)

4.2 軽ペイロード

機体に搭載されている標準カメラで、撮影データのリアルタイム伝送を行いながら4時間程度の連続飛行を実施する。着陸後の燃料タンクに残った燃料から推定飛行可能時間を算出することで、6時間以上の連続飛行が可能であるかを判断する。

- (1) 飛行速度
12.5m/s
- (2) 飛行コース
片道約2kmの海岸線を周回+滑走路内を周回

- (3) 飛行距離
約69.5km
- (4) 天候
晴れ
- (5) 気温
海岸線 平均9.6℃
滑走路 平均11.9℃
- (6) 風速
海岸線 平均5.0m/s (最小4.0~最大5.8m/s)
滑走路 平均3.0m/s (最小1.2~最大4.0m/s)



図-7 軽ペイロードの状態 (第2回実証試験)

結果、自律飛行、リアルタイム伝送の安定性を確認できた。当日、機体トラブルにより、実連続飛行時間は105分の記録に留まった。そのため、目標としていた6時間以上の連続飛行が可能であるかを判断することはできなかった。

4.3 高ペイロード

当日の測量機器については、使用を予定していたレーザー測量機器が調達できなかったため、より重量が重い代替レーザー測量機器を機体に搭載した上で、滑走路(5分程度で測量可能)のレーザー測量を行いながら連続飛行し、取得点群データのリアルタイム伝送の安定性、測量精度が十分であるかを確認する。併せて、当初使用を予定していたレーザー測量機器と同重量のウェイトを機体に搭載し、2時間以上の連続飛行が可能であるかを確認する。

- (1) 飛行速度
3.5m/s
- (2) 飛行コース
滑走路内を周回
- (3) 飛行距離
約21.5km
- (4) 点群
点密度100点/m²以上
- (5) 天候
晴れ

(6) 気温

平均8.2℃

(7) 風速

平均4.2m/s（最小1.5～最大9.0m/s）



図-8 高ペイロードの状態（第2回実証試験）

結果、滑走路でのレーザー測量において、取得点群データのリアルタイム伝送の安定性、十分な測量精度を確認できた。併せて、当初使用を予定していた測量機器と同重量のウェイトを機体に搭載した連続飛行において、安定した自律飛行で、実連続飛行時間は約121分を記録した。これらの結果から、レーザー測量を実施しながら、連続2時間以上の自律飛行が可能であると判断できた。

5. おわりに

本実証試験の公募開始時点（令和4年12月）では、要求技術仕様を満たす水準の連続飛行が可能な日本製ドローンは市場に流通しておらず、本実証試験を実施したことで、前述した実施機体2機種の社会実装を支援できたと考える。

国土交通省では、ドローンに関する取り組みを複数進めており、一例としては、中小企業イノベーション創出推進事業（SBIR フェーズ3 基金事業）に係る補助対象事業の1つとして、ドローンに関する技術の社会実装化に取り組んでいる。これらの取り組みにより、作業の効率化・生産性の向上を図り、行政ニーズに対応したドローンの社会実装の支援を引き続き進めていく。

参考文献

- 1) 林朋幸：国土交通省初となるドローンの長時間連続飛行の実証実験について、建設機械（2024年6月1日発行）第60巻第6号（通巻712号）

6. AI 技術を含む先進技術を活用したコンクリート打設管理の システム開発と現場検証報告

西尾レントオール株式会社

○ 片山 伸也
橋本 明広
川崎 浩人

1. はじめに

建設業界において、コンクリート打設は建物や構造物の品質と耐久性を左右する極めて重要なプロセスである。しかし、従来のコンクリート打設管理は、経験に基づく判断や人力による監視に依存しており、コンクリート打設プロセスにおいて、ミキサー車の車両番号、配送時間、現場入退場時間、打設開始・終了時間を記録する作業に作業員がかかりきりで対応している。今の労働事情を踏まえればこの作業に人員を配分するのは厳しい状況と考えられ、コンクリートの品質管理作業の生産性向上が望まれている。また、現場作業終了後、納品書情報を含めた打設管理表の作成作業は、手入力で行われており時間的負担や入力ミスなどの課題についても効率化が求められている。これらの課題を解決するため、エッジ AI カメラを活用し、打設の開始・終了時間や運搬車番号を自動でリアルタイムに認識しクラウドサーバーと連携させて打設管理表の作成を支援する打設管理アプリを開発した。(以下本開発)

本論文では、先進技術を活用したコンクリート打設管理システム(以下本システム)の概要と構成を説明し、現場での実証結果を基に得られたデータからシステムの有効性と課題を考察した結果を報告する。最後に、今後の展望とさらなる改良点について述べ結論とする。

2. 活用した先進技術について

本システムは図-1 のように、「エッジ AI カメラ」「クラウドサーバー」「WEB アプリケーション」「OCR 技術」「データ閲覧用端末」から構成されている。検知プロセスとして、カメラにフレームインした「コンクリートミキサー車」「ナンバープレート」「車両番号」「シューター部」を AI で画像解析を行い、エッジ処理された各情報がリアルタイムにクラウドサーバーにアップロードされる。そのアップロードされたデータは WEB アプリケーションでリアルタイムに確認することが可能である。



図-1 システムの構成図

2.1 エッジ AI カメラについて

図-2 のフロー図のように、カメラからの画像をグリッドに分割することにより画像内のオブジェクトを検出する。次にグリッドの各セクションは、それが検出したオブジェクトを検出する。各ボックスには、その位置、サイズ及びオブジェクトが含まれている可能性についての情報が含まれている。また、各ボックスの中に入っている物体の種類(人、車、犬など)も予測し、今回対象となる物体であるミキサー車が入っている可能性が最も高いボックスだけを残し、他を破棄する。最後に検出された物体の周りにフレームを描き、検出された物体の種類をラベル付けする。(図-3) これらの工程においてエッジ処理を行い結果だけをクラウドサーバーへリアルタイムにアップロードしている。

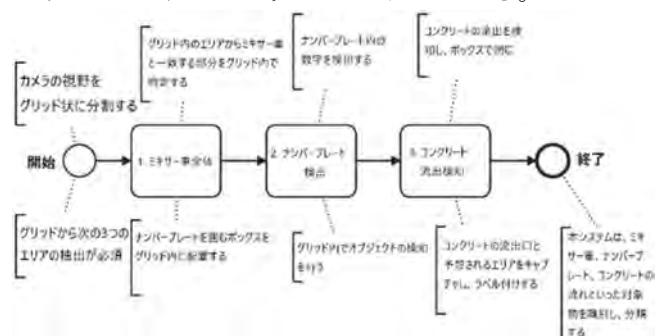


図-2 AI システムのフロー図



図-3 ラベル付けされた AI 検知画面

エッジデータを活用するメリットは、遅延が少なくリアルタイムでの応答が可能になり、ネットワーク負荷の軽減が見込める。

2.2 クラウド技術について

本システムでは、カメラからの画像をエッジ AI にてリアルタイムに処理・解析データがクラウドサーバーへアップロードされる。パブリッククラウドを活用しており、運用管理面でも負担が軽減される。

2.3 WEB アプリケーションについて

専用の WEB アプリケーションを独自で構築した。管理者サイドでは、端末稼働状況を含めた全ての情報を管理できる。一方ユーザーサイドでは、ユーザーの工事名や打設箇所の入力、稼働状況の確認などが操作可能で打設開始から終了までの詳細な履歴などがリアルタイムに確認可能である。

2.4 OCR 技術について

OCR (Optical Character Recognition, 光学文字認識) 技術は、画像や書類に含まれる文字をデジタルデータに変換する技術で、基本的な仕組みとしてスキャナーやカメラで取り込んだ画像から文字を認識し、編集可能なテキストデータに変換する。本システムではミキサー車のオペレーターが持参する納品書を打設作業終了後、事務所にて PDF などへのデータに変換し、WEB アプリケーションで取り込みを行う。WEB アプリケーションではプログラ

ムにて予め設定した文字領域である「出発時間」「運搬車番号」「納入容積」のデータを取り込み、打設管理表へ自動転記を可能とした。地域により納入書のフォーマットが異なるので、随時フォーマットを登録することで対応と可能となる。

2.5 オリジナルハードウェアの構成について

本開発でのオリジナルハードウェアは「カメラ BOX」「主装置 BOX」「設置用三脚及び電動雲台付きアーム」から構成されている。各コンポーネントについての詳細を以下で説明する。

(1) カメラ BOX

カメラ BOX はミキサー車がポンプ車の後部に到着してからコンクリート打設が終了して、ポンプ車後部を退場するまでの状況をリアルタイムで監視するために、高解像度カメラを AI 検知用と録画用で 2 台を内蔵している。この BOX は防水・防塵仕様となっており、過酷な現場環境でも問題なく使用可能である。

(2) 主装置 BOX

主装置 BOX はカメラ BOX から送信される映像 データを受信し、AI 解析を行うためのコンピューターユニットと LTE 回線の SIM カードが入った無線ルーター、カメラ映像を確認できるモニターを組み込んでおり、リアルタイムにデータの処理を行い、そのデータをクラウドサーバーへアップロードする。ミキサー車の位置や検知状況を目視で確認することが可能である。

(3) 設置用三脚及び電動雲台付き張出アーム

設置用三脚および電動雲台付き張出アームはカメラ BOX と主装置 BOX を適切な位置に固定するための装置である。

3. 設置について

本開発はカメラ画像がいかにミキサー車を画角に収めるかがポイントとなる。その設置方法について具体的に説明する。

3.1 設置位置について

(1) 機材の設置

三脚はポンプ車の運転席側に設置し、主装置 BOX を付属させる。次にカメラ BOX を電動雲台付き張出アーム先端に取り付け、ミキサー車の全体像を画角に収める高さである約 3m まで上昇させる。カメラ BOX をポンプ車の中央部からややポンプ車の運転席よりカメラ BOX を張出す。最後に初めのポンプ車到着時に電動雲台

を地上からリモコンで操作することでカメラ BOX の角度調整することが可能である。これにより、最適なカメラ視点でコンクリート打設の状況を監視することが可能となる。

(2) 接続と電源

カメラ BOX と主装置 BOX は LAN ケーブルで接続される。LAN ケーブルは AI 検知用と録画用の 2 本を接続する必要がある。LAN ケーブルでの接続で安定したデータ通信を実現ができる。また、システム全体の電源供給には AC100V が必要で、現場の電源環境に応じて適切な電源ケーブルや延長コードを使用して接続する必要がある。

4. 現場検証とその結果

すさみ串本道路田子川橋 P2 橋脚工事現場において、これら先進技術を活用したコンクリート打設管理システムの現場検証を実施した。具体的には、P2 橋脚工事において開発した機材を設置し、コンクリート打設の時間管理の検証を行った。検証方法としては、以下の手順で行った。

4.1 検証方法

(1) 機材の設置

「カメラ BOX」「主装置 BOX」「設置用三脚及び電動雲台付きアーム」をポンプ車の運転席側後方（図-4）に設置し、カメラの画角がミキサー車の全体像を捉え到着、打設開始、打設終了、退場の各時間やその車両のナンバープレート 4 桁、運搬車番号がリアルタイムに監視できる位置、角度を主装置 BOX のモニターを確認しながら調整し設置した。

(2) データの収集・解析

ミキサー車の到着、打設開始、打設終了、退場の各時間やその車両のナンバープレート 4 桁、運搬車番号は自動的に記録され、且つ同時にクラウドにアップロードされる。そのデータは WEB アプリケーションから確認でき、正常に AI が起動しているかを確認することで評価を行った。

(3) 結果の比較

本開発で得られた結果と作業者によるチェック結果と比較し、精度や効率を評価する。

4.2 検証結果

現場検証の結果、AI 技術を活用したコンクリート打設管理システムは、作業者によるチェックと比較しても大差なく、良好な結果が得られた。具体的には、以下の点で優れた成果が確認できた。



図-4 現場検証時設置状況

(1) 精度について

最も重要視される練混ぜ開始時間（プラント出発時間）から打設終了時間までに要した時間について、作業者によるチェックと比較した。21 台中 5 台が誤差なし、10 台が 1 分の誤差、3 台が 2 分の誤差、1 台が 3 分の誤差、1 台が 4 分の誤差、1 台が 8 分の誤差となった。8 分誤差の車両について、WEB アプリから退出時画像と記録された時間を確認し、相違ないことを確認した。作業者によるチェックは、他の作業が時折発生していた経緯から時間チェックに誤差が生じた事も推察される。この結果から本システムで作成された打設管理表の精度は評価できる。



図-5 作業者によるチェックで作成した記録表

◎ 主 要 工 作 日 記 研 究 成 果 表 (續)									
工 作 日		今日主要活動與工作時間分配表					備 註		
活動時間表		活動時間表					備 註		
工 作 日		活動時間表					備 註		
工 作 日		活動時間表					備 註		
No.	日期	時間	活動時間	活動時間	活動時間	活動時間	備 註	備 註	備 註
1	4/22	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
2	4/23	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
3	4/24	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
4	4/25	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
5	4/26	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
6	4/27	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
7	4/28	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
8	4/29	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
9	4/30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
10	5/1	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
11	5/2	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
12	5/3	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
13	5/4	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
14	5/5	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
15	5/6	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
16	5/7	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
17	5/8	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
18	5/9	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
19	5/10	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
20	5/11	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
21	5/12	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
22	5/13	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
23	5/14	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
24	5/15	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
25	5/16	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
26	5/17	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
27	5/18	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
28	5/19	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
29	5/20	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
30	5/21	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
31	5/22	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
32	5/23	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
33	5/24	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
34	5/25	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
35	5/26	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
36	5/27	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
37	5/28	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
38	5/29	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
39	5/30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
40	5/31	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
41	6/1	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
42	6/2	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
43	6/3	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
44	6/4	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
45	6/5	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
46	6/6	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
47	6/7	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
48	6/8	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
49	6/9	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
50	6/10	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
51	6/11	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
52	6/12	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
53	6/13	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
54	6/14	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
55	6/15	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
56	6/16	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
57	6/17	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
58	6/18	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
59	6/19	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
60	6/20	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
61	6/21	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
62	6/22	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
63	6/23	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
64	6/24	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
65	6/25	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
66	6/26	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
67	6/27	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
68	6/28	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
69	6/29	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
70	6/30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
71	7/1	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
72	7/2	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
73	7/3	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
74	7/4	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
75	7/5	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
76	7/6	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
77	7/7	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
78	7/8	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
79	7/9	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
80	7/10	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
81	7/11	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
82	7/12	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
83	7/13	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
84	7/14	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
85	7/15	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
86	7/16	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
87	7/17	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
88	7/18	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
89	7/19	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
90	7/20	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
91	7/21	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
92	7/22	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
93	7/23	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
94	7/24	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
95	7/25	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
96	7/26	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
97	7/27	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
98	7/28	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
99	7/29	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
100	7/30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
101	7/31	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
102	8/1	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
103	8/2	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
104	8/3	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
105	8/4	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
106	8/5	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
107	8/6	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
108	8/7	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
109	8/8	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
110	8/9	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
111	8/10	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
112	8/11	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
113	8/12	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
114	8/13	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
115	8/14	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
116	8/15	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
117	8/16	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
118	8/17	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
119	8/18	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
120	8/19	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
121	8/20	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30	08:30
122	8/21	08:30	08:3						

図-6 本システムで作成した記録表

(2) 効率について

現状、作業員が打設作業中かかりきりでミキサー車の各時間を記録している。この労力は昨今の労働環境において効率化すべき作業である。また、打設作業終了後の事務所での記録表作成作業も手入力で行われており時間的負担や入力ミスなども課題となっている。それに対して、上段の結果から本システムを使用することで、打設作業時間約 3 時間/日は人による介在が不要となり、労働力削減、コスト削減に繋がるものと考えられる。

また、撮影している動画は主装置 BOX 内に保存しており、検知結果の根拠としても確実なデータを得ることができる。

5. まとめ

本論文では AI 技術を含む先進技術を活用したコンクリート打設管理システムの開発プロセスと、その現場での実証結果について報告とし、以下に、本開発の主要な成果と今後の展望についてまとめるものとする。

5.1 主要な成果

(1) システムの有効性

・「エッジ AI カメラ」「クラウドサーバー」「WEB アプリケーション」「OCR 技術」「データ閲覧用端末」を組み合わせた本システムにより、コンクリート打設の各プロセスをリアルタイムで監視・管理することが可能となった。

・現場検証の結果, 本システムは作業者によるチェックと比較しても大差なく, 精度と効率の両面で優れた成果を示すことができた。

(2) 効率の向上

- ・打設作業中の作業員の負担を軽減し、記録作業の自動化により、作業効率が向上できた。

・打設作業終了後の記録表作成作業も自動化され、時間的負担や入力ミスを削減できた。

5.2 今後の展望

本システムの現場検証により、その有効性が確認されたが、更なる改良点も確認でき、今後の展望として、以下の点が挙げられる。

(1) システムの拡張とハード面の改良

- ・追加の機能として、納入書のリアルタイム検知を導入することにより、コンクリートの品質管理へのアプローチを視野に改良を検討する。

・AI 検知用と録画用の 2 つのカメラがあるが、これにより LAN ケーブルも 2 本必要となる。設置時の煩雑さ解消を目的にカメラの統一化を図る。LAN ケーブルも 1 本にし、よりシンプルなハードウェア構築を目指す。

(2) ユーザーフィードバックの活用

- ・スランプ値の入力により作業者の経験則から判断している部分を数値化し品質管理に活かせるよう改良を検討する。

(3) AI アルゴリズムの改善

- ・AI アルゴリズムの精度向上を図り, 特に打設開始の検知について, 更に高精度な検知能力向上の実現を目指す。

- ・継続的な学習とデータの蓄積により、システムの向上を目指す。

5.3 結論

本研究を通じて、AI 技術を含む先進技術を活用したコンクリート打設管理システムが、コンクリート打設現場における時間管理と作業効率の向上に大きく貢献することを示すことができた。今後、レンタル会社の立場から建設業界の生産性向上に寄与することを目指し、改善改良に注力する。

7. 人工知能技術による土質推定に基づく埋立管理システム

五洋建設(株)
五洋建設(株)

○ 熊谷 隆宏
白 可

1. はじめに

海域の埋立により港湾や空港を建設する場合、材料として一般に砂が用いられるが、社会の持続的発展の観点からは、航路や泊地の維持浚渫で発生する粘性土や建設発生土を有効利用することが望ましい。一方、軟弱な粘性土を用いて埋立を行う場合、建設中のすべり破壊に対する安定性や将来の圧密沈下が懸念される。これらを検討するためには、用いた粘性土の圧密特性や強度特性を把握する必要があるが、埋立によって形成された地盤に対する詳細な原位置調査や、投入前の土に対する各種土質試験を実施することは現実的でない。

近年、判断や評価の高度化や迅速化、また作業の省力化や自動化を目的として、様々な分野で人工知能（AI）技術の活用が図られている。本研究では、画像認識分野で広く適用されている畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network: CNN）¹⁾の手法を用いて、土源情報、湿潤密度、撮影画像等の情報に基づき、埋立を行う土運船上の粘性土の土質定数を効率的に推定する AI モデルを構築した。この土質推定 AI モデルと、土運船から投入した粘性土の堆積形状解析技術および圧密沈下解析技術を統合し、将来沈下の予測が可能な埋立管理システムを提案する。埋立の最適な設計・施工管理の実現に資する管理システムについて、実工事への適用結果を含めて報告する。

2. 埋立管理システムの概要

浚渫粘土や建設発生土等の粘性土の埋立方法として、図-1 に示すような土運船と押船（または引船）を用いて海中に投入する方法が一般的である。船倉に土を積み込み、目標地点まで運搬した後、船倉底部を開いて海中に土を投入する手順となる。

提案する埋立管理システムは、土運船上の粘性土の土質定数を AI で推定した上で、粘性土の投入によって形成された地盤の堆積形状および地盤内部の層構成を解析し、埋立地盤の将来の圧密沈下を解析する予測機能を有している。図-2 は、管理システムにおける一連の解析のフローチャートである。第 1 ステップとして、土運船から投入される粘性土の圧密定数や非排水せん断強度などの土質特性を AI モデルにより推定する。次に、推定さ

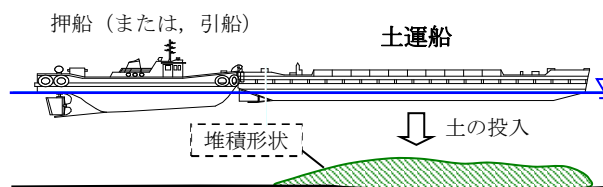


図-1 土運船による埋立方法の概念図

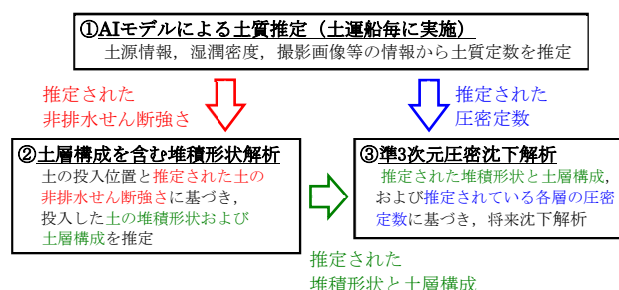


図-2 埋立管理システムにおける解析のフロー

れた土のせん断強度を用いて、海底面での土の堆積形状と内部の層構成を解析し、最終ステップで、推定された土質定数や、堆積形状、地盤内部の層構成に基づいて圧密沈下予測解析を行う。

2.1 土質推定 AI モデル

CNN の手法を用いた AI モデルの構造の概念を図-3 に示す。用いる粘性土の土源情報、湿潤密度、撮影画像および触感による硬軟情報を入力データ（説明変数）とし、圧縮指数、膨潤指数、圧密係数、液性限界等の土質定数を出力データ（目的変数）として、入出力の相関を機械学習させたモデルである。前半部の処理として、画像データから特徴量を抽出し、その他のスカラー情報と結合した後、後半部では、ディープラーニングにより目的変数の推定を行うフローとしている。前半部の画像データの処理に関しては、画像から有効な特徴量を抽出する処理が重要であり、本研究では、巨大なデータセットを用いて学習済みの既存の VGG16 モデル²⁾を導入する転移学習¹⁾の手法を用いた。

AI モデルは、教師データを用いて、推定誤差を最小化するように各パラメータ値を最適化して構築される。構築したモデルに、対象とする粘土の画像や湿潤密度等の情報を入力すると、土質定数の推定値が目的変数として出力される。

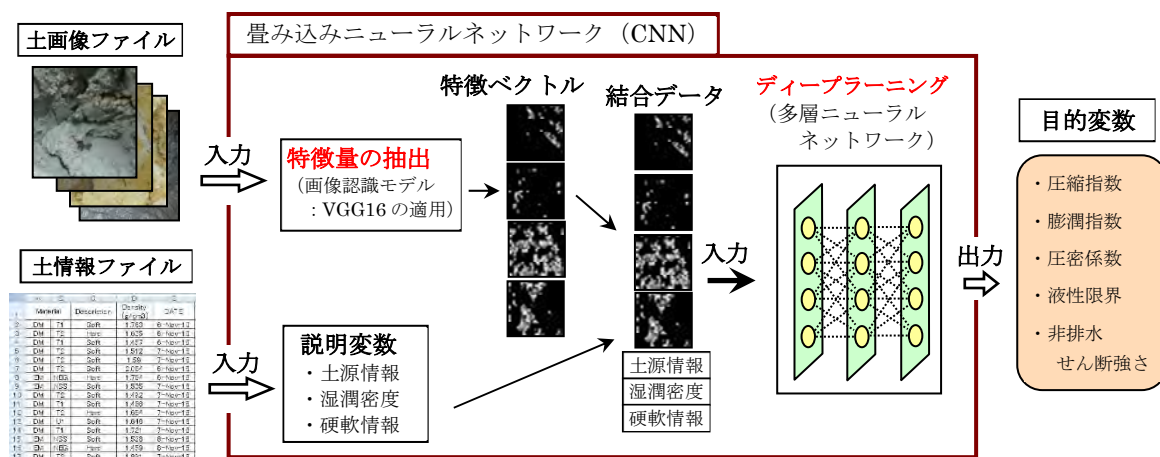


図-3 土質推定 AI のモデル構造

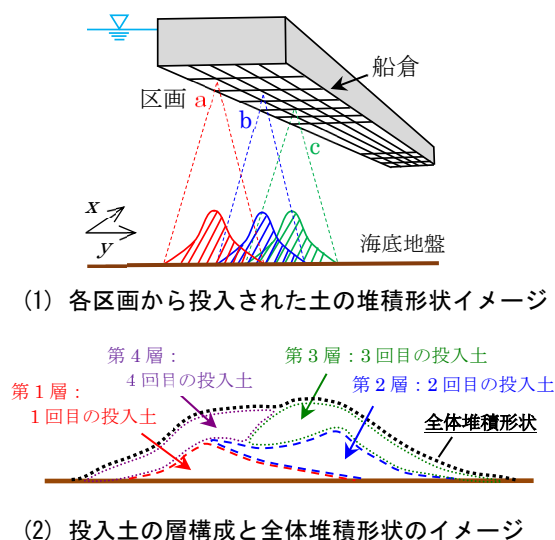


図-4 堆積形状解析の概念図

2.2 堆積形状解析モデル

投入された粘性土の堆積形状の解析については、投入した土が正規確率分布に従って広がることを仮定する松見・岸口³⁾の手法を導入する。この手法では、土運船の船倉を小区画に分割した後、式(1)の確率密度関数 $f(x,y)$ を用いて、各区画から投入された土の分布（堆積形状）を評価する。そして、投入された土の全体堆積形状は、各区画から投入された土の堆積形状の総和で表現される（図-4）。

$$f(x,y) = \exp \left[-(x^2 + y^2) / (2\sigma^2) \right] / (2\pi\sigma^2) \quad (1)$$

ここに、 σ は標準偏差（拡散係数）である。

砂質土や石材に適用されていた従来の手法に関し、分布形状を規定する標準偏差が粘性土の非排水せん断強さに依存する考え方を新たに導入し、粘性土にも適用できるよう拡張させた。すなわち、AIにより推定された非排水せん断強さの値から、入力パラメータである標準偏差（拡散係数）を評価し、堆積形状解析を実施する流れとなる。

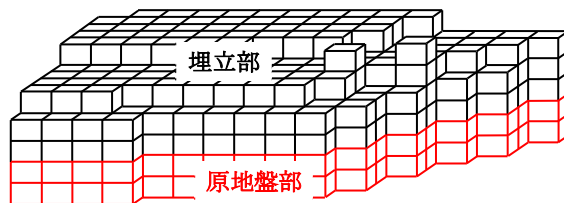


図-5 沈下解析における地盤の3次元要素分割イメージ

2.3 準3次元圧密沈下解析モデル

図-5のように地盤を3次元要素に分割した後、Boussinesqの弾性理論式を用いて各要素に作用する応力を求め、設計で用いられる計算手法（ c_c 法）に基づく準三次元解析手法を提案する。

以下の方法により、圧密沈下挙動を解析する。

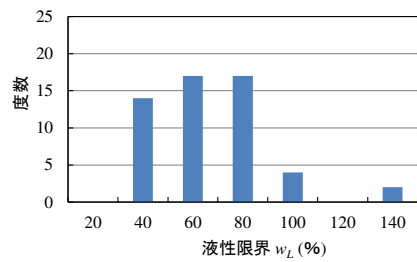
- ① 地盤を3次元要素に分割した後、要素ごとに独立に沈下量を計算する。地表面の沈下量は、各要素の沈下量の総和により評価される。
- ② 各要素に作用する応力は、地盤を弾性体と仮定した Boussinesq 式を用いて求め、各要素の最終沈下量は、 c_c 法により計算する。
- ③ 多層地盤における圧密度は、ドレーンが無い場合は換算層厚法、ドレーンが打設されている場合は Barron の近似式を用いて評価する。

堆積形状解析によって埋立地盤内部の層構成を含む堆積形状を解析した後、原地盤と埋立地盤を3次元要素に分割し、前記の AI により推定されている各要素の圧密定数を入力することにより、圧密沈下解析を実施する流れとなる。

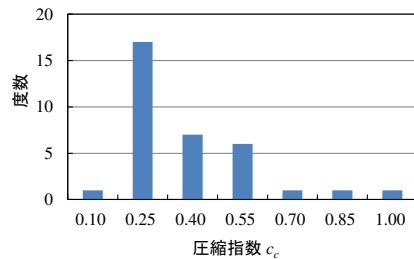
3. 各構成モデルの構築

3.1 土質推定 AI モデル

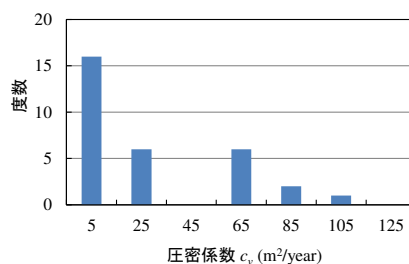
AIモデルの構築に際し、機械学習用の教師データを取得するために各種土質試験（標準圧密試験 40 ケース、液性限界・塑性限界試験 60 ケース、また、液性限界・塑性限界試験のケースに対応して強度の情報を得るためのベーンせん断試験）を実施した。なお、対象の港湾建設の埋立工事では浚渫



(1) 液性限界



(2) 圧縮係数



(3) 圧密係数 (拘束圧 150kN/m²時)

図-6 試験で得られた土質定数の度数分布

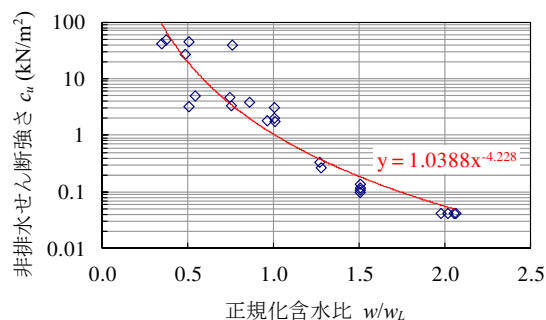


図-7 正規化含水比と非排水せん断強さの関係

粘土と陸上の掘削粘土が用いられるため、試験の試料として、浚渫粘土、陸上掘削粘土の2種類を選定している。

図-6は、各試験で得られたコンシステンシーと圧密に関する土質定数の度数分布を示す。また、図-7は、含水比 w を液性限界 w_L で除した正規化含水比 w/w_L と、ペーンせん断試験で得られた非排水せん断強さ c_u の関係を示す。これらの定数の間には式(2)のような相関が得られており、粘性土の液性限界の値が得られれば、湿潤密度から含水比を算出し、正規化含水比を用いて非排水せん断強さを評価することが可能である。

$$c_u = 1.039 (w/w_L)^{-4.228} \quad (2)$$



(1) 浚渫粘土



(2) 陸上掘削粘土

図-8 機械学習に用いた粘土の画像データの例

表-1 ニューラルネットワークのハイパーパラメータ

パラメータ名	設定値
データのスケール変換手法 ¹⁾	最大・最小値による正規化
中間層の階層数	4
中間層のニューロン数	200
活性化関数 ¹⁾	ReLU 関数
最適化問題の解法 ¹⁾	Adam
Dropout 率 ¹⁾	0.1

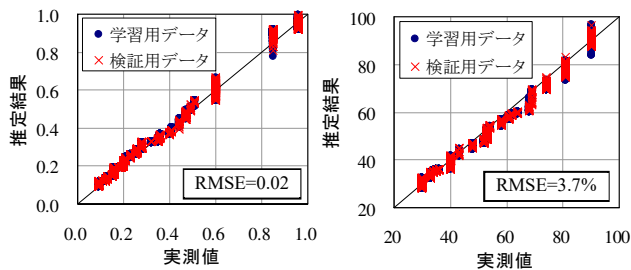
また、機械学習の画像データとして、1,000万画素程度程度の一般的なデジタルカメラにより50cm程度の距離から撮影した画像を用いた(図-8)。

AIの構築に向けて機械学習を行うにあたっては、教師データ数の確保が重要であるため、データ数の拡張を図った。画像に関しては、トリミング箇所の複数化、回転、上下・左右反転、彩度・明度調整、コントラスト調整、ぼかし、シャープ化等により画像数を増加させた。また、画像に紐付けられる湿潤密度や土質試験結果の数値データに対しては、ノイズを加えることによりデータ数の増加を図った。数値データに対するノイズの加え方として、試験で得られた真値を平均値に設定し、変動係数を0.1に設定した正規分布に従うように、ばらつきを与える手法を用いた。

上記の加工処理によりデータ数を400倍の16,000に増加させた後、土源情報、湿潤密度、画像、および触感による硬軟情報を入力データに設定し、圧縮指数、膨潤指数、圧密係数、液性限界を出力データに設定して、機械学習を行った。

最適値として決定したニューラルネットワークのハイパーパラメータの一覧を表-1に示す。機械学習にあたっては、教師データのうちのランダムに抽出した80%をパラメータ最適化のための学習用、残りの20%をモデルの検証用に用いた。

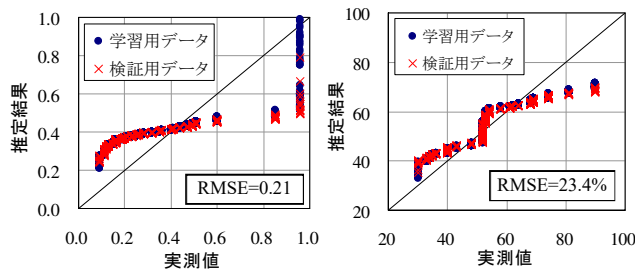
代表的な土質定数として圧縮指数と液性限界に着目したAIの推定結果と真値の比較を図-9に示すように、AIが高い精度で土質定数を推定できることが分かる。図中、RMSEは二乗平均平方根誤差で



(1) 圧縮指数

(2) 液性限界

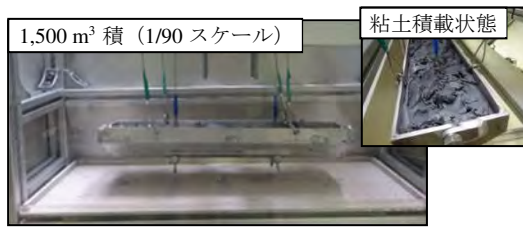
図-9 土質推定 AI による推定結果と真値の比較例



(1) 圧縮指数

(2) 液性限界

図-10 画像を使用しないモデルの推定結果と真値の比較



(1) 使用した土運船模型



(2) 粘土投入後の堆積状況

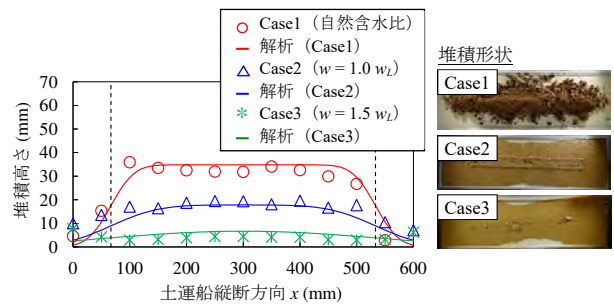
図-11 遠心模型実験実施状況

あり、推定誤差の大きさの指標である。また、画像を使用せず、土源情報や潤滑密度等の変数のみで学習したモデルの推定結果例を図-10に示す。画像を使用しないモデルでは推定精度は低く、画像情報が推定精度に大きく影響することが分かる。

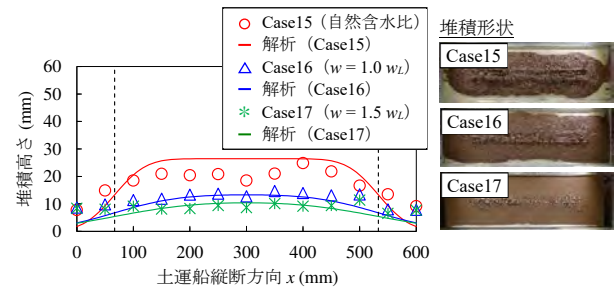
3.2 堆積形状解析モデル

堆積形状解析モデルの構築のために、土運船から投入した粘性土の堆積形状を調べる遠心模型実験を実施した。実験の実施状況を図-11に示す。積載量 1,500 m³ を想定した土運船の 1/90 模型に 90G の遠心加速度を与えることにより、実施工を模擬した実験である。また、粘性土の投入を模擬するため、土運船の底部を開閉できる装置を用いた。

実験条件として、浚渫粘土 2 種類、陸上掘削粘土 2 種類の計 4 種類の粘土を用い、3 ケースの含水比条件と 2 ケースの投入高さ条件を与えた。



(1) 試料 A (陸上掘削粘土)



(2) 試料 B (浚渫粘土)

図-12 実験で得られた堆積形状に対する再現解析結果

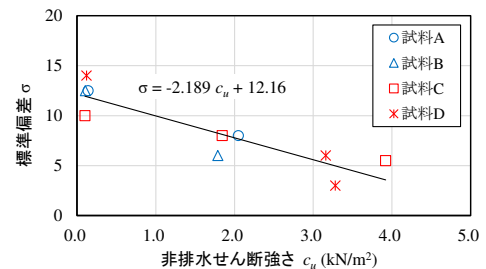


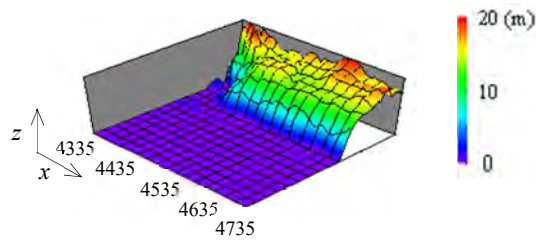
図-13 非排水せん断強さと標準偏差の関係

実験後、レーザー変位計を使用して土運船の横断方向及び縦断方向の堆積高さを計測することにより、粘土の堆積形状を評価した。実験の結果、堆積形状は、粘土の含水比（非排水せん断強さ）に大きく依存するが、投入高さはほとんど依存しないことが分かった。すなわち、粘土を投入した場合、海底での堆積形状は、自重による土圧と粘土の強度により概ね定まることを明らかにした。

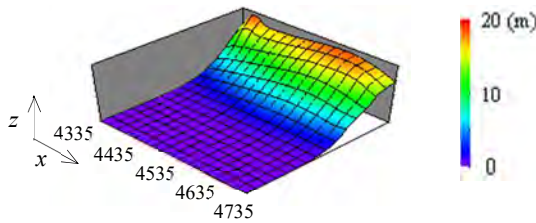
解析において、堆積の広がり程度を規定する標準偏差がパラメータであるため、実験で得られた堆積形状を解析で再現できる標準偏差の値を検討した。標準偏差を適切に設定することにより、図-12のように実験で得られた堆積形状を解析で再現できることが分かった。また、標準偏差の値は、図-13 から得られる式(3)により、非排水せん断強さから推定可能であることが分かった。

$$\sigma = -2.189 c_u + 12.16 \quad (3)$$

含水比と液性限界の比に基づき粘土の非排水せん断強さを推定した後に、標準偏差の値を評価して、堆積形状解析を実施することができる。



(1) 深浅測量結果（実測値）



(2) 解析結果

図-14 堆積形状に関する解析結果と実測値の比較

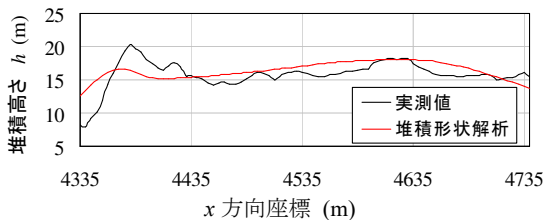


図-15 堆積高さに関する解析結果と実測値の比較

4. 埋立管理システムの現場適用性の検証

提案するシステムを港湾建設の埋立工事に導入し、工事で得られる深浅測量結果（粘性土の堆積形状）、地盤調査結果、沈下計測結果を検証データとして、システムの妥当性を検証する。浚渫や陸上での掘削に由来する様々な粘性土が用いられ、工事を再現する解析の結果と現地調査結果の比較により、各構成モデルの精度を評価する。

4.1 堆積形状

浚渫粘土 50 万 m^3 と陸上掘削粘土 75 万 m^3 の計 125 万 m^3 を用いた埋立を再現する堆積形状解析を行う。埋立においては、積載量 1,000 m^3 と 1,500 m^3 の土運船による 1,000 回の土の投入が行われた。投入管理として、投入時の船の位置座標と船首方向、土源、土の画像、計測された湿潤密度、触感による硬軟の情報が記録される。これらの情報に基づき、用いる粘性土の液性限界の値が AI により推定され、得られた正規化含水比より非排水せん断強さが評価される。解析の入力パラメータである標準偏差を式(3)により設定し、解析を行う。

埋立開始後 6 ヶ月経過した時点の測量結果と解析結果の比較を図-14 に示す。図-15 は、最大堆積高さ位置での分布を示す。解析により、実際の堆積形状を精度良く再現できることが分かる。

4.2 土質定数および圧密沈下挙動

堆積形状解析は、土運船からの土の投入毎に行

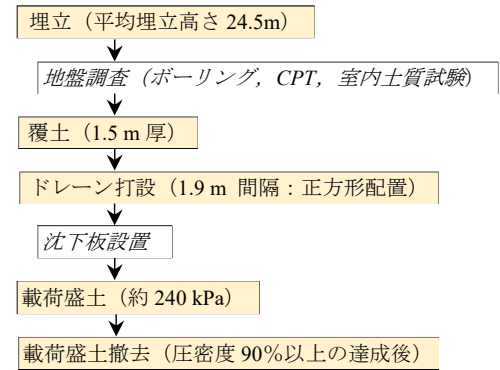


図-16 埋立および地盤改良の施工手順

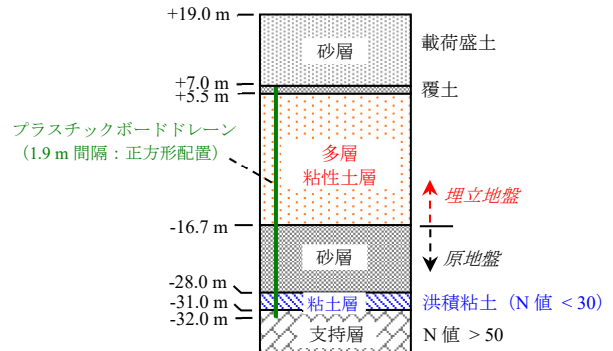


図-17 载荷盛土完成時の土層断面

われ、それぞれに ID 番号が付与されるため、図-4(2)に示すような層構成を把握できる。また、各投入土に関して、AI によって推定された含水比、液性限界、圧縮・膨潤指数、圧密係数、非排水せん断強さの属性情報が堆積形状解析結果に紐付けられ、3 次元座標で記録される。その後、図-5 のように地盤を 3 次元要素に分割し、想定荷重に対して準 3 次元圧密沈下解析を行うことができる。

図-16 に埋立および地盤改良の施工手順、図-17 に载荷盛土完成時の土層断面をそれぞれ示す。約 10,000 m^2 のモニタリング区画において、埋立完了後の圧密沈下を計測するために SP-01～SP-06 の 6 箇所に沈下板を設置した。また、地盤改良前の埋立地盤内の土質定数を調べるために、SP-03 の位置で、ボーリング調査、および深度 5m 間隔で試料をサンプリングして標準圧密試験を実施した。

図-18 は、解析結果とサンプリング試料の試験結果の比較例を示す。圧縮指数と圧密係数に代表される圧密定数について、解析結果は試験結果に概ね一致することが確認され、AI による土質推定と堆積形状解析の妥当性が検証された。

なお、埋立地盤における圧密降伏応力は、自重圧密の影響を受ける。地盤改良前のサンプリング試料の圧密試験結果より、埋立地盤は自重圧密により正規圧密状態になっていることが確認されたため、圧密沈下解析の入力パラメータである圧密降伏応力は、正規圧密状態の値を設定した。

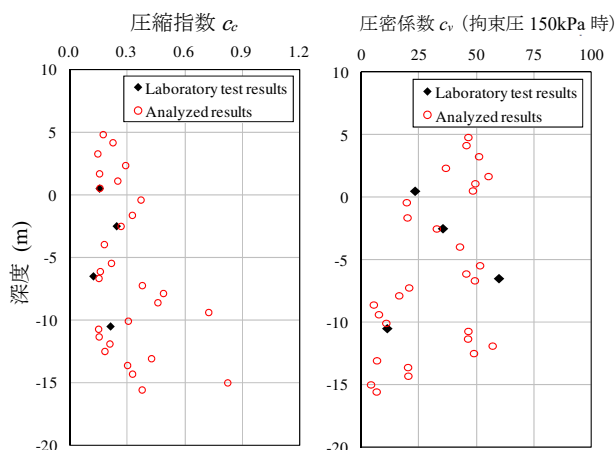


図-18 土質定数に関する試験結果と解析結果の比較例

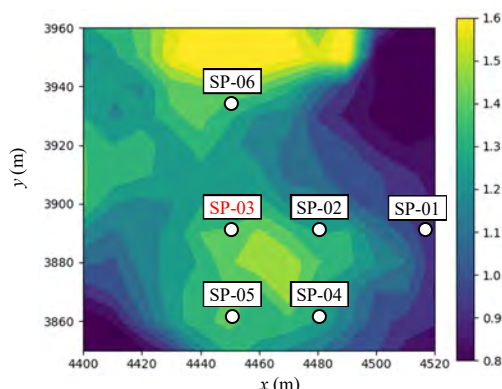


図-19 最終沈下量分布の解析結果

最終沈下量の平面分布の解析結果を図-19に示すように、様々な粘性土が投入された埋立地盤では沈下量のばらつきが大きいことが分かる。また、土質定数に関して試験結果と解析結果を比較したSP-03地点を含め、実測と解析の沈下曲線の比較例を図-20に示す。実測に比べて解析は圧密の進行が若干遅い傾向があるが、これはAIによる圧密係数の推定値が若干小さいことが原因と考えられる。ただし、実測と解析結果は概ね一致しており、一連の解析の妥当性が確認された。

5. おわりに

社会の持続的発展の観点から、港湾建設のために粘性土を有効利用して埋立を行うことを想定し、用いる粘性土の土質定数を迅速に推定する人工知能技術を導入するとともに、投入された粘性土の堆積形状解析と準3次元圧密沈下解析を統合した埋立管理システムを構築した。港湾建設の埋立工事に本システムを適用し、実測データと各構成モデルの解析結果を比較することにより、解析の精度と妥当性を検証した。

従来の原位置地盤調査方法としてはコーン貫入試験（CPT）が一般的であるが、調査に要する日数やコストのため、特定の箇所での離散的調査に

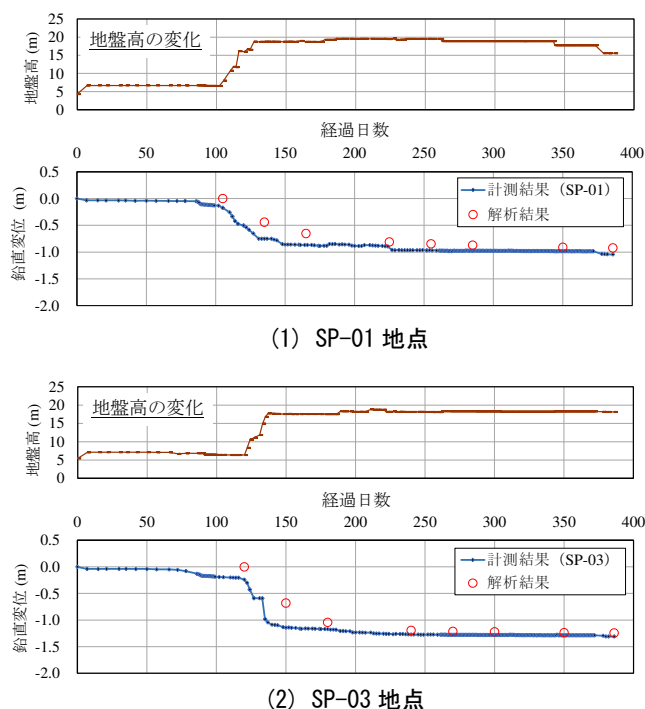


図-20 圧密沈下挙動に関する実測値と解析結果の比較例

なる点や、先端抵抗値や周面摩擦値等から土質定数に換算する経験式の精度に依存する点で課題がある。特に、調査速度は日あたり深度30～45m程度⁴⁾であり、調査箇所数に応じて日数がかかる。

構築した本システムにより、詳細な原位置地盤調査や室内土質試験を行うことなく、施工と並行して迅速かつ高精度に土質定数の3次元分布を密に評価できるため、埋立品質および生産性の向上を期待できる。特に、任意のタイミングで圧密沈下解析を実施できるため、地盤調査結果を待たずに、投入する粘土の適地選定、最適な埋立仕上げ高や地盤改良等の検討を行うことができる。今後は、建設中のすべり破壊に関する安定解析もシステムに統合して、より高度な設計・施工管理を実現できるよう、システムの改良を図る所存である。

参考文献

- 1) 斎藤康毅：ゼロから作るディープラーニング—Pythonで学ぶディープラーニングの理論と実装—, pp.165-273, オライリー・ジャパン, 2016
- 2) Simonyan, K. and Zisserman, A. : Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition, In 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015), pp.1-14, 2015
- 3) 松見吉晴, 岸口孝文：捨石マウンド築造時のバースの配船位置について, 海岸工学論文集, 37巻, pp.769-773, 1990
- 4) CPT技術協会：コーン貫入試験（カタログ）, 2016

8. AI 画像認識技術による船舶航行監視システムの開発

東亜建設工業株式会社
東亜建設工業株式会社
東亜建設工業株式会社
東亜建設工業株式会社

○ 宮 本 憲都
藤 山 映
那須野 陽平
水 木 啓陽

1. 開発背景

多くの一般船舶が行き交う海上で工事を行う際には、工事用船舶の運航状況や周辺を航行する一般船舶の動静を注視し、安全航行に努めることが重要である。当社は操船者の安全確認の補助や周辺船舶の見落とし防止を目的として、GNSS により自船の位置情報、AIS により大型船の位置情報、船舶レーダーにより小型船の位置情報を取得し、自船および他船の動静確認を補助する船舶航行監視システムを独自に開発、運用してきた。しかし、船舶レーダーは航行安全上、特に必要な500m以内の近距離における船舶を検知しにくく、波や構造物と船舶の区別ができないことや、船舶を検知したとしても、追尾が外れてしまうことなどの課題があった。これらの課題を解決するため、カメラ映像上の船舶をAI画像認識技術により検知し、位置推定を行うことで、近距離における周辺船舶監視の強化を図った。図-1にAI画像認識技術による船舶検知領域を示す。



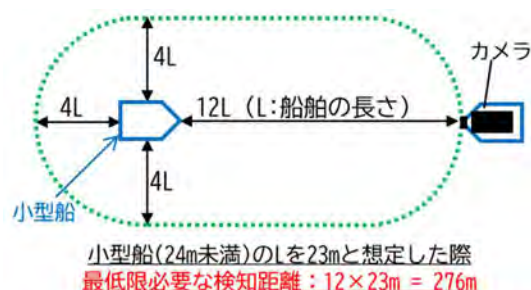
図-1 AI 画像認識技術による船舶検知領域

2. システム開発

(1) 開発のコンセプト

本システムの開発においては、「カメラで取得した映像からAIによって船舶を検知し、その位置情報をシステム画面に表示させることにより、操船者による一般船舶の見落としを予防し、安全な航行支援を行うこと」を基本コンセプトとした。特

に、船舶レーダーの苦手分野である近距離の船舶検知を実現するため、国際海上交通ルールにおける『安全航行が可能な距離の目安』¹⁾に基づき、船舶の最低限必要な検知距離を300mと設定した。針路方向における安全航行可能距離のイメージを図-2に示す。



小型船(24m未満)のLを23mと想定した場合
最低限必要な検知距離： $12 \times 23m = 276m$

図-2 安全航行可能距離イメージ

(2) システム概要

本システムは、GNSS や AIS、船舶レーダーに加え、カメラで撮影した映像から、AI 画像認識技術によって船舶を自動検知するとともに、検知した船舶を自動追尾し、その位置座標をリアルタイムに取得することで、近距離の監視を強化したシステムである。システム画面には、自船を中心として AIS 船や工事用船舶に加え、カメラ映像から AI が検知した船舶が表示される。これらの情報は、クラウドサーバーで管理され、事務所や遠隔端末等に配信することにより、工事関係者間で情報を共有することが可能である。取得した船舶の位置や動静情報をシステム画面上にリアルタイムに表示することで、操船者は他船舶の動向を正確に把握することが可能となる。また、教師データには実際の港湾工事で撮影した船舶の映像を用いているため、高い検知率で船舶を識別することも可能である。さらに、使用するカメラを光学カメラから赤外線カメラに変更することにより、夜間でも船舶を検知し、位置情報を取得することもできる。従来と比較して、近距離における船舶の検知精度が向上したため、本技術を活用することにより、操船者による船舶の見落としを予防し、海

上作業時の運航管理の安全性向上および監視業務の省力化が期待できる。システム構成イメージを図-3、システム画面イメージを図-4 に示す。



図-3 システム構成イメージ

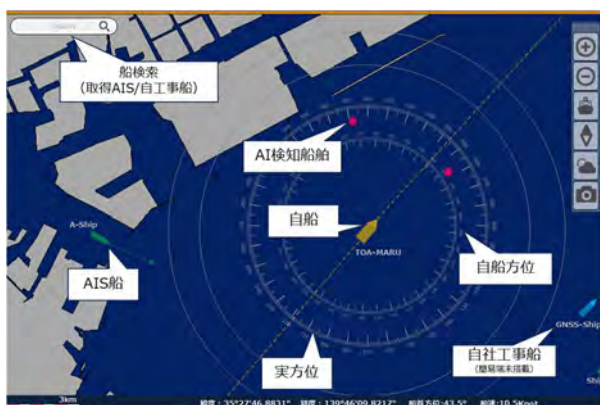


図-4 システム画面イメージ

(3) 検知した船舶の位置検出技術

一般的に、カメラ等の映像は手前にあるほど大きく映り、遠くなるほど小さく映る。本システムでは、カメラの映像に座標を持たせるため、「透視投影法」という手法を用いている。本手法の概念図を図-5 に示す。

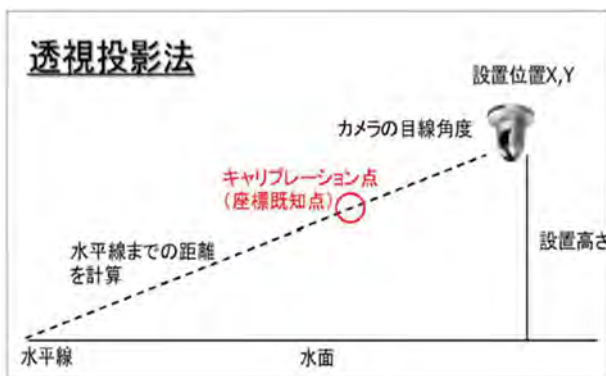


図-5 位置検出概念図

水面からカメラまでの高さや設置位置、カメラの角度を計測したうえで、座標が分かっている任

意の2点の情報をシステムに与える「キャリブレーション」を行うことにより、カメラの位置と実際の位置との距離感を認識させることができ、カメラ映像上に位置情報を持たせることができる(写真-1)。



写真-1 キャリブレーション状況

3. 実証試験

本システムの性能を検証するため、現場海域において実証試験を実施した。本試験では、一般航行船舶および現場に就役している交通船を対象とし、船舶の検知率を確認すると共に、2章で述べた安全航行可能な距離が確保できるだけの検知距離および精度であるかを確認した。

(1) 一般航行船舶を対象とした検知率の検証

土運船を運搬する押船にGNSS、カメラ、AISを設置し、現場周辺海域を航行している一般船舶を撮影した(図-6、写真-2)。撮影した映像を基に、AI画像認識技術を用いて船舶を検知させ、AI制御用PCに表示させるとともに、船舶を検知している状況を動画として保存した。この動画を解析することにより、船舶の検知率を確認した。本試験における検知率の定義は、以下のとおりである。

$$\text{検知率}[\%] = \frac{\text{検知船舶数}}{\text{映像中の船舶の総隻数}} \times 100$$

試験結果を表-1 に示す。映像中の全172隻のうち、本システムが検知した隻数は156隻であり、90.7%という高い検知率を示した。しかし、船舶を検知しないケースや、船舶ではないものを船舶と認識してしまうケースが一定数あることも確認できた。これは、船舶の向きや形状、背景との同化、日照条件など、様々な要因によって非検知や誤検知が発生したものと推察される。条件を変えて撮影した教師データを用い、追加学習を重ねることにより、検知率を向上させることができると考えられる。

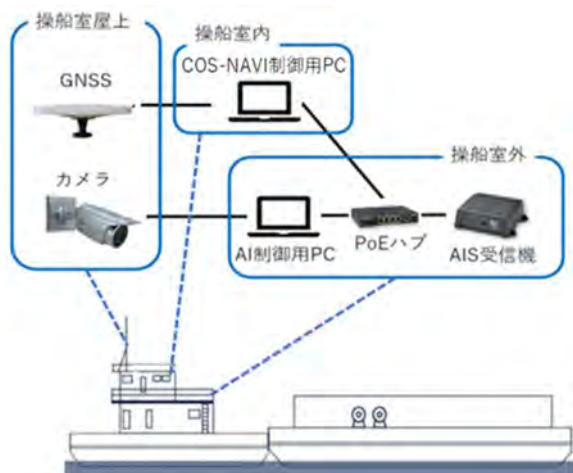


図-6 押船への機材設置状況



写真-2 押船への機材設置状況

表-1 試験結果（一般航行船舶の検知率）

項目	総船舶数 [隻]	検知数 [隻]	非検知数 [隻]	誤検知数 [隻]	検知率 [%]
結果	172	156	14	2	90.7

(2) 交通船を対象とした検知率および検知距離・精度の検証

クレーン船にGNSS、カメラ、AISを設置し、現場に就役している交通船にRTK-GNSSを設置した状態で、交通船をカメラの向きに任意航行させて映像を撮影した。撮影した映像を基に、AI画像認識技術を用いて船舶を検知させ、AI制御用PCに表示させるとともに、船舶を検知している状況を動画として保存した。この動画を解析することにより、船舶の検知率を確認した。また、交通船に搭載したRTK-GNSSの位置座標を基準とし、AIで検知した位置座標と比較することで、検知精度の検証も併せて行った。本試験における検知率の定義は、以下のとおりである。

$$\text{検知率}[\%] = \frac{\text{船舶であると検知したサンプル数}}{\text{映像から1秒間隔で切り出した画像の総サンプル数}} \times 100$$

試験結果を表-2に示す。本試験で交通船が検知できた距離は500m程度までであり、本システムの開発目標として設定した最低検知距離（300m）を満足することが示された。この範囲内で撮影された映像から切り出した全264サンプルのうち、本システムが交通船を検知した数は240サンプルであり、90.9%という高い検知率を示した。なお、本試験においても、一般航行船舶を対象として実施した検証試験と同様、非検知となるケースが一定数あることも確認された。

船舶の最低検知距離である300m地点において、RTK-GNSSを正としたAIによる船舶検知位置は、約12mの誤差を有することが確認できた。この誤差を考慮すると、実際には300m-12m=288m地点にいた可能性が示唆されるが、安全航行が可能な距離の目安である276mと比較した場合、10m強の安全マージンを確保できていることから、操船者に対する注意喚起は可能であり、本システムの運用に支障を来すことはないと言える。

実証試験における交通船の検知状況を写真-3に、検知距離に対する誤差の推移を図-7に示す。

表-2 試験結果（交通船の検知率）

項目	総船舶数 [隻]	検知数 [隻]	非検知数 [隻]	誤検知数 [隻]	検知率 [%]
結果	264	240	24	0	90.9



写真-3 交通船の検知状況

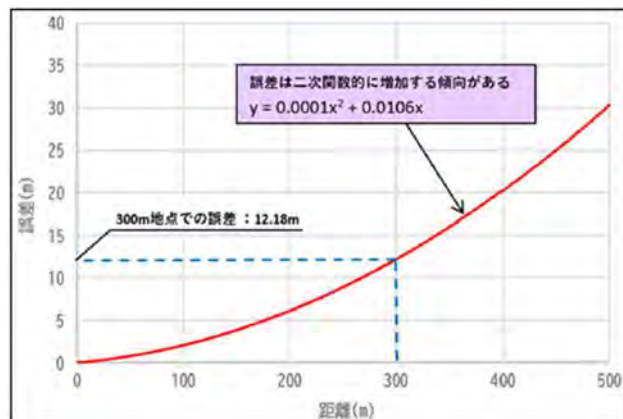


図-7 検知距離に対する誤差の推移

(3) 夜間の船舶検知検証

本試験では、光学カメラから赤外線カメラに変更することにより、夜間でも船舶を検知し、位置情報を取得することができるか検証を行った。岸壁上に赤外線カメラを設置し、その直上に GNSS を取り付けることで、赤外線カメラの位置と方位を検出できるようにした。使用機材の設置状況を写真-4 に示す。

試験の結果、赤外線カメラを使用することで、夜間でも船舶を AI で検知することが可能であることが確認できた（写真-5）。また、GNSS で取得した船舶の位置情報を基に、本システムの画面に表示できることも確認できた（図-8）。その一方で、赤外線カメラで撮影した教師データは、光学カメラで撮影した教師データの数と比較して少なく、検知率および位置誤差の検証については実施に至っていない。今後、赤外線カメラの教師データで追加学習を重ね、検証を行っていく予定である。



写真-4 機材設置状況

本試験を通じ、赤外線カメラは通常の光学カメラと比較して、画角が非常に狭いという点が顕在化した。夜間航行時、操船者の目の代わりとして機能する赤外線カメラについて、その画角の狭さは、一般航行船舶の早期発見・検知に影響を及ぼす要因となり得る。現場で運用する際には、赤外線カメラを複数台設置する、あるいは、旋回機能付きの回転台に赤外線カメラを設置するなど、画角を確保する対策が必要である。

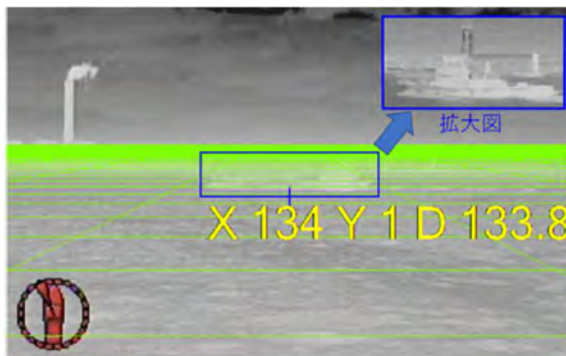


写真-5 赤外線映像での検知状況

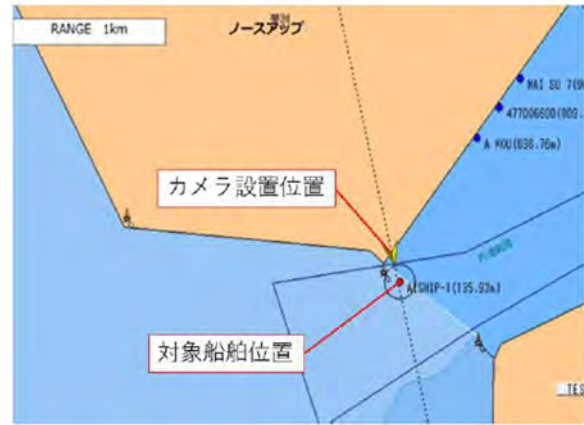


図-8 船舶位置の取り込み

4. おわりに

本稿では、AI による画像認識技術を用いて、カメラの映像から船舶を自動検知するとともに、検知した船舶を自動追尾し、その位置座標をリアルタイムに取得する船舶航行監視システムについて紹介した。船舶レーダーの代わりにカメラを使用することにより、従来と比較して、近距離における船舶の検知率が向上し、船舶レーダーの苦手領域を補完することが可能となった。また、本システムの性能を検証する実証試験を現場海域で実施し、自船から 500m 以内の近距離において、90% を超える高い検知率で船舶が検知可能であることを確認した。検知距離が遠くなるほど、AI が船舶を検知する位置誤差は増大する傾向にあるが、安全航行が可能な距離の目安から 10m 程度、安全マージンを確保できることも確認されており、現場で支障なく運用することができる。本システムの活用により、操船者による船舶の見落としの予防と、海上作業時の運航管理の安全性・生産性の向上が期待できる。

本システムは、2024 年 6 月に NETIS に登録された（登録番号：KTK-240003-A）。また、2023 年 11 月には特許も出願済みである。今後は、港湾工事を中心に様々な現場への導入を通じて追加学習を行い、夜間を含めた船舶検知率を向上させるとともに、高性能なカメラを使用して画質を高めることで、検知距離の向上を図っていきたい。また、船舶の動揺補正やスタビライザーの活用により、検知精度の向上にも取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 藤本昌志：図解 海上衝突予防法，p. 23-26，成山堂，2008。

9. 排水機場ポンプ設備の電動化に向けた検討

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 ○ 中島 淳一
永長 哲也
岸 寛人

1. はじめに

河川用排水機場ポンプ設備は、内水被害から国民の生命と財産を守る重要な社会基盤設備である。本設備は豪雨等による出水時には確実な運転が求められるため、昨今の設備老朽化の進行による故障懸念や線状降水帯など降雨の激化による運転機会の増加により、施設管理者、点検技術者等は設備の維持管理に多くの労力と時間を要しており、その負担は大きい。一方、設備の管理を担う技術者、担い手不足への対応が喫緊の課題となっており、本設備の維持管理の省力化、効率化による生産性向上が求められている。

以上の背景から、本報告では排水機場ポンプ設備の主原動機をディーゼル機関から電動機に構造転換することで、点検の省力化と故障の低減効果が期待できること、及び停電時でもポンプ運転が可能な電動機への電源確保技術を選定、評価した上で、電源確保技術を構成する電源設備の1台当たりの電源容量と設置台数バリエーション案から、ポンプ運転の信頼性、冗長性を評価できることを提言する。

2. 排水機場ポンプ設備構造と維持管理の概要

本設備の主要機器は、ポンプを駆動するための主原動機（ディーゼル機関、ガスタービン機関等）、動力を適正なトルクと回転数でポンプに伝達する減速機（平歯車又は遊星歯車減速機等）、羽根構造で回転力により吸水を行う主ポンプ（横軸斜流又は立軸斜流等）で構成され、その他の機器は、原動機の運転に必要な系統機器やポンプの運転停止を指令する操作制御設備、停電時でも運転に必要な設備内電源を確保できる自家発電設備などで構成される（図-1）。ポンプ型式や性能、規模は現場条件等により様々である。ポンプは通常、冗長性の観点から複数台設置されており、大雨等により内水氾濫の恐れがある場合に運転（本運転）される。一方、緊急時の確実な運転に万全を期するため、施設管理者は常日頃からポンプ設備の運転状態及び機器の調子を確認する必要があるが、その一環として操作員や点検技術者に管理運転による月点検や年点検を委託している。なお、故障の際には、速や

かな復旧対応が求められる。

3. 主原動機の維持管理性に関する分析評価

3.1 国土交通省における主原動機の設置状況

国土交通省における昭和57年から令和2年における排水機場ポンプ設備の装置別故障割合は図-2¹⁾のとおりであり、主原動機の故障割合が最も高いことから、この装置に着目した改善検討が維持管理性のレベルアップに大いに貢献できると考えられる。

また、国土交通省における主原動機の機関別設置割合は図-3に示すとおりであり、ディーゼル機

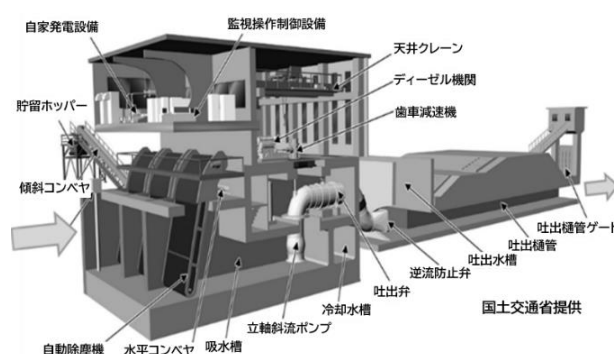


図-1 排水機場ポンプ設備の機器構成事例

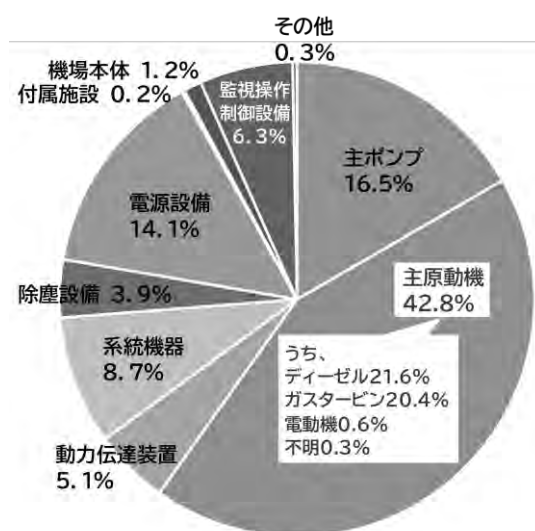


図-2 排水機場ポンプ設備の装置別故障割合（S57～R2）

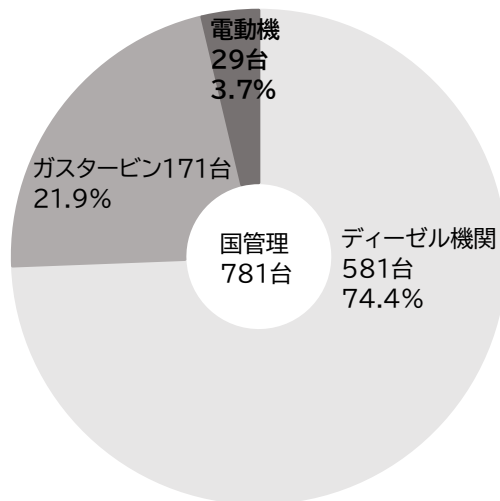


図-3 主原動機の機関別設置割合

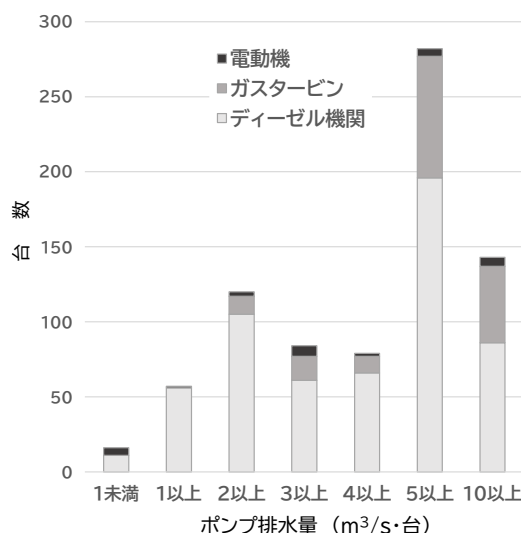


図-4 主原動機の排水量別設置台数

関が 74.4%と大半を占めるほか、ガスタービンが 21.9%、電動機はわずか 3.7%となっている。一方、図-4 に示すとおり排水量別の機関別設置割合では、いずれの排水量もディーゼル機関が大半を占めているほか、5m³/s・台以上の大規模機場ではガスタービンの割合が高くなっている。

3.2 主原動機の年点検に関する維持管理性の分析

ディーゼル機関と電動機の点検項目数を比較するため、河川ポンプ設備点検・整備標準要領（案）（H28.3版）²⁾に基づき集計した結果を図-5に示す。集計の結果、電動機はディーゼル機関に比較し、点検項目数を 83%低減できる。その理由として電動機はディーゼル機関に比較し、構造がシンプルなのに対し、ディーゼル機関は構造が複雑かつ始動、冷却、潤滑など補機類の装備が影響していることによる。また、主原動機の年点検における標準工数に占める割合は国土交通省機械設備工事積算基準（令和 5 年度版）³⁾によると、ディーゼル機関では

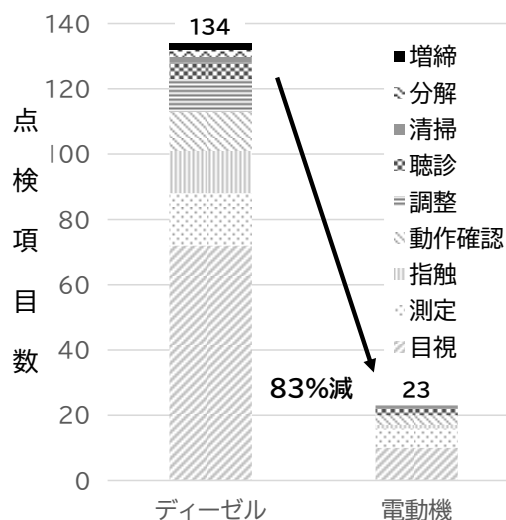


図-5 主原動機の年点検項目数の比較

全体工数の約 3 割なのに対し、電動機では約 1 割に収まることから維持管理性の向上への貢献が期待できる

3.3 主原動機の故障に関する分析

図-2 の排水機場ポンプ設備の装置別故障割合において、主原動機の故障割合が約 43%を占めることは前述のとおりであるが、その内訳はディーゼル機関が 21.6%、ガスタービン機関が 20.4%、電動機が 0.6%となっている。この割合を図-3 に示す設置台数当りに換算すると図-6 に示すようにディーゼル機関が 12.4%、ガスタービン機関が 39.8%、電動機は 6.9%となり、ガスタービンの故障率が最も高く、電動機はディーゼルに比較し、半分程度の故障率となっている。

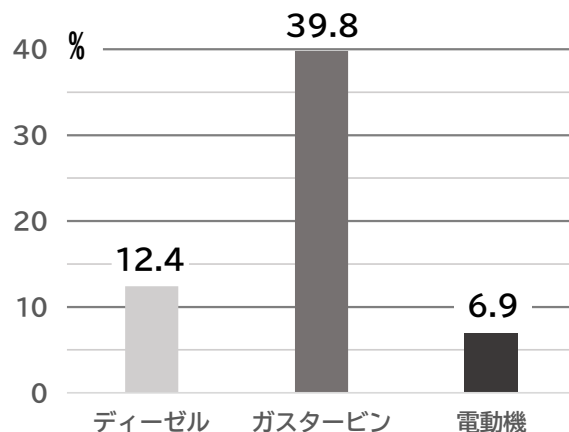


図-6 主原動機故障率の比較（件数／総台数）

3.4 主原動機の維持管理性に関する評価

これまでの分析結果も踏まえ、既設の主流であるディーゼル機関、ガスタービン機関、電動機について、維持管理性の観点からの評価結果を図-7 に示す。評価は◎、○、△での 3 段階相対評価とし、8 つの評価項目をレーダーチャート化した、3 種

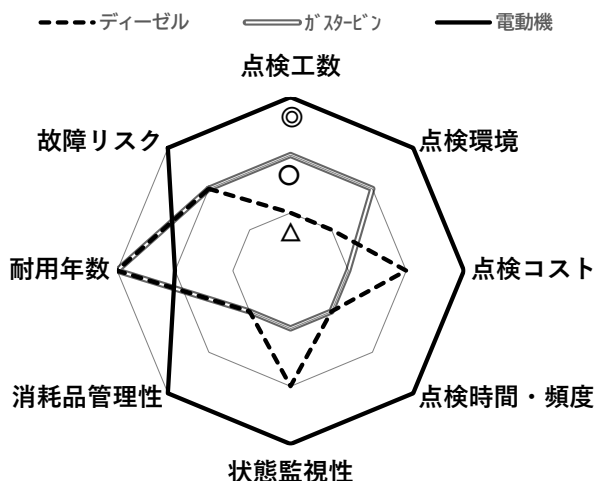


図-7 主原動機の維持管理性評価

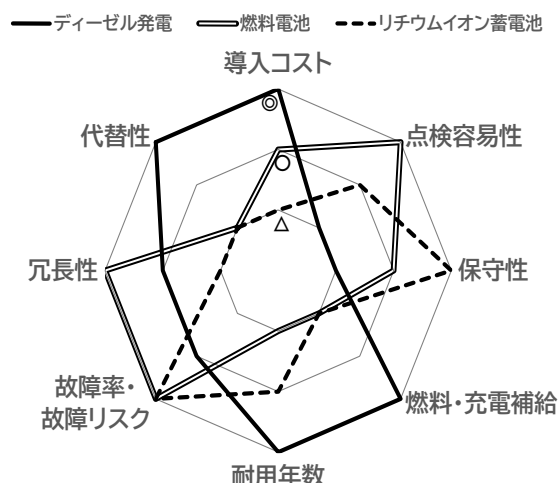


図-8 電源確保技術に関する導入評価

の原動機のうち、電動機の維持管理性が総合的に最も優れていると言える。主な評価項目として、点検環境では運転騒音や熱の発生が少ない電動機が最も優れているほか、状態監視性では電動機は、最近の電流情報診断技術の進歩により電動機の負荷電流のみの計測で、本体及びポンプ等接続機器の異常が一定程度把握できるようになっている。消耗品管理性では、消耗品点数や交換頻度の面で、電動機の消耗品は軸受程度であり、運転も非常時のみであることから、損耗もあまり生じない。

4. 主原動機電動化に伴う電源設備の評価

主原動機をディーゼル機関から電動機とすることで、多くの点で維持管理性が向上することは前述したとおりである。そのためには停電時においても確実な電源確保が必要なことから、本章では他分野の電源確保技術なども参考に既に実用レベルのもののみならず、将来性も含め幅広く調査し、総合的に評価した上で、相応しい電源確保技術を提案するものである。

電動化機場の条件を、電動化が進めやすくかつコスト的にも有利で実運用の支障が少ない総排水量 $5\text{m}^3/\text{s}$ 以下で 48 時間連続運転が可能な小規模排水機場とすると、既設機場規模としては $2.5\text{m}^3/\text{s}$ ポンプ 2 台、200kW 動力用ディーゼル 2 台、100kW 自家発電用ディーゼル 1 台、同様の予備自家発電用ディーゼル 1 台となる。電池方式の場合、動作の確実性の観点から予備用の自家発電機 1 台分は省略可能であるとして、燃料電池方式での電源換算で 500kW、蓄電池方式では 24MWh の電力量相当の確保が必要となる。

4.1 電源確保技術の導入評価

有力な電源確保候補技術として定置式ディーゼル発電機、定置式燃料電池、リチウムイオン蓄電池を抽出し、導入に当たっての総合評価をした上で、採用すべき電源確保技術の選定を行った。上述の 3

技術に関しての導入評価結果を図-8 に示す。評価は◎、○、△での 3 段階相互相対評価とし、8 つの評価項目をレーダーチャート化しているが、3 技術のうち、ディーゼル発電機が導入技術として最も優れていると言える。

主な評価項目として、導入コストについてはディーゼル発電機が概算で 1.6 億円、燃料電池が 5 億円、リチウムイオン電池が 24 億円であり電池方式は現時点においては膨大なコスト増が見込まれる。

一方、点検容易性の観点では、ディーゼル発電が 135 項目の年点検と月点検が必要であるのに対し、燃料電池では液化水素が高压ガス保安法による年 1 回の法定点検のみであり、圧縮水素なら不要となる。リチウムイオン蓄電池は 50 項目程度の年点検と半年に 1 回の機器点検が必要となる。

保守性は主に消耗品管理の観点に着目しており、ディーゼル発電機では定期整備時の対象交換消耗品点数は 24 点ほどであり、1、5、10 年毎に状況に応じた交換が必要になるのに対し、燃料電池は常用の場合、フィルターや水処理樹脂の年 1 回の交換が必要となるが、非常用の場合は、点検による都度判断となる。リチウムイオン蓄電池は基本的にメンテナンスフリーである。

燃料・充電補給はディーゼル発電機ではポンプ運転後は、タンクローリーによる重油の補給で済み、燃料電池も蓄圧器への水素充填が可能である。但し、現時点では水素供給インフラが普及しておらず、排水機場が設置されている地方部では特に厳しい状況となっている。リチウムイオン蓄電池では、充電のため 500kW 規模の商用電源契約と 2 日間の充電時間が必要となり、非常用設備としての再運転におけるタイムラグは致命的となる。

耐用年数ではディーゼル発電機が約 33 年、燃料電池が約 10 年、リチウムイオン蓄電池は約 15 年とされている。

故障率・故障リスクについては、ディーゼル発電

機は前述の図-2 で示したようにポンプ駆動用ディーゼルに比較し、約 65%の故障率となっており、同じディーゼル機関でも負荷特性などの違いからディーゼル発電機の故障リスクは低い状況となっている。蓄電池に関しては長期使用のデータが少ないことから十分な評価は難しいが、燃料電池に関しての一例として鉄道総合研究所における 10 年間の高サイクル試験⁴⁾ (起動停止の反復使用) において列車が走行不可となる状況は生じていないという実績がある。また、リチウムイオン蓄電池は発熱、発火のリスクはあるものの、BMS (バッテリーマネジメントシステム) と言われる安全制御システムが設置されており、その安全性は高まっている。

冗長性については、ポンプの機能停止を回避できる可能性を指標としており、ディーゼル機関ではコスト面の影響を考慮する必要はあるものの、所要の電力確保を条件とした小規模分散型や大規模集約型等のバリエーションを検討することで、発電機の故障によるポンプ運転への影響を少なくできる可能性がある。燃料電池はユニット化されており、100kW 単位での予備の増設は十分可能であるが 1 億円規模のコスト増が課題となる。リチウムイオン蓄電池も更なるコスト増となる他、大規模な敷地の確保 (東芝西仙台変電所の事例⁵⁾ を参考にすると 20MWh で約 6,000m² であり、300m²/MWh) が必要となる。

代替性については、既設の主流である駆動用ディーゼル機関の更新導入を想定した場合、ディーゼル発電では、駆動用ディーゼルの一連の補機を含む撤去スペースに電動機並びにディーゼル発電機を設置することとなるが、電動機はコンパクトかつディーゼル発電機はレイアウトの自由度が高いので、撤去空きスペース内に設置できる可能性は十分あり、設置が難しい場合でもディーゼル発電機は屋外の敷地内への設置が可能と思われる。一方、燃料電池については 500kW 級の燃料セルユニット並びに蓄圧器を含め約 400m² 程度のまとまった設置スペースが必要となるため、敷地の確保や機場の外への設置となる場合は、機場までの送電設備が必要となる。

4.2 既設機場の電動化に伴うディーゼル発電機設置の検討

電源確保技術の導入評価の結果、3 つの候補技術のうちディーゼル発電機の評価が最も高かったことから、本技術を既設機場に設置する方法について検討した。検討に先立ち、対象とする既設機場の基本となる機器設置の概略平面図事例を図-9 に示す。本概略図は主要機器のみを反映している。対象機場は 2.5m³/s ポンプ 2 基で、200kW 級の駆動用ディーゼルにより運転され、停電時でもポンプの運転に必要な機場内の電源を確保できる 100kW 級ディーゼル発電機が予備を含め 2 基設置される。

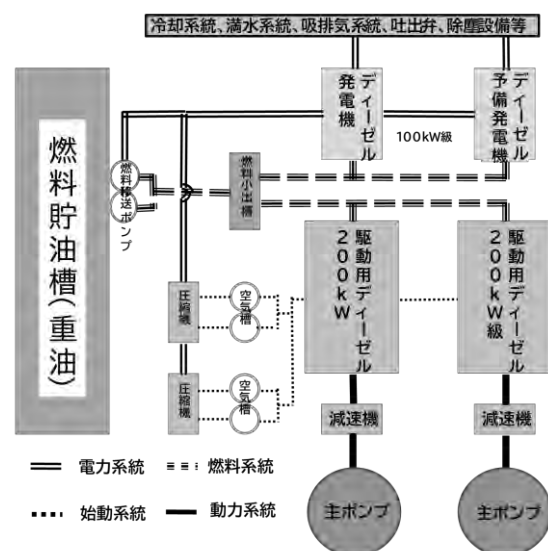


図-9 既設機場の機器設置概略平面図事例

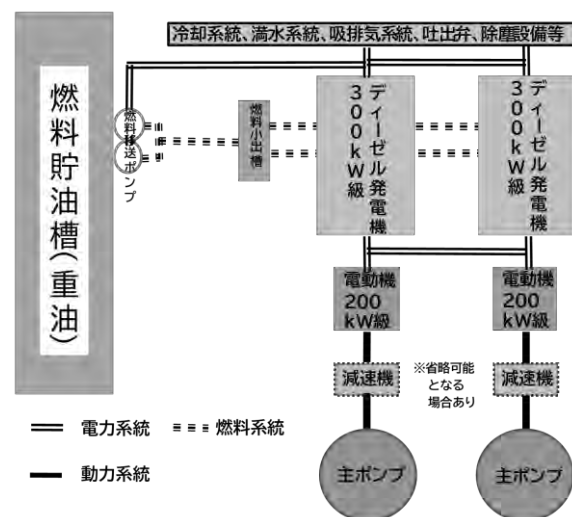


図-10 電動化機場の機器設置概略平面図事例

駆動用のディーゼル発電機の始動には始動機 (エアモーター方式) が必要となり、圧縮機 2 基と空気を貯める空気槽が予備を含め各 2 基構成となる。また、駆動用、発電用ディーゼルの燃料は重油が一般的であり、敷地内の燃料貯油槽から 2 対の燃料移送ポンプにより燃料小出槽に燃料が送られ、各機関に供給される。

一方、前述の対象既設機場を電動化した場合の機器設置概略平面図事例を図-10 に示す。駆動用ディーゼル機関を電動機に転換することで、本体のコンパクト化と始動機 (圧縮機、空気槽、配管等) が不要となり、多くの空きスペースが生まれる。その空きスペース等を利用し、300kW 級のディーゼル発電機 2 基の設置が可能となる。非常用ディーゼル発電機はパッケージ内に始動用バッテリーを装備しており、始動機は不要である。なお、電動機の場合、所要のポンプ回転数と整合が図れるケースでは減速機の設置が不要となり、その場合には

その分の空きスペースが生まれる他、コスト面や維持管理面の負担が軽減できる。

4.3 ディーゼル発電機の設置バリエーション案評価法の検討

排水機場ポンプ設備は非常用設備であり、停電時においても確実な運転を確保する必要があることから、ポンプの電動化に向けては商用電源に依らない自家用電源設備として、これまでの導入評価の結果からディーゼル発電機を選定している。排水機場ポンプ設備に求められる最重要な機能は確実な運転確保であり、そのためにはポンプ運転の信頼性、冗長性（以下、「信頼性等」という。）をより高める必要がある。そこで、まず、信頼性等を検討するに当たり、設備を構成する主要機器の故障件数を推定総運転時間で除した値を%指標に換算した、故障割合の試算例を図-11に示す。なお、本故障割合は国土交通省の直轄排水機場のデータに基づき試算しており、後述するポンプ運転における信頼性等評価のベースとなる指標として使用する。揚排水ポンプ設備技術基準では自家用発電設備⁹⁾は、機場が停電となった場合の非常用電源として主に機場内のポンプ設備補機類の動作や場内換気、照明など運転時の維持管理に供する設備であることから、予備機を設置することとなっており、この発電容量も踏まえた自家用発電機の各種設置バリエーションについて、ポンプ運転における信頼性等の評価を実施した。

対象とする電動化機場想定規模を電動機出力200kW級、2基、機場内非常用電源設備200kVA(うち

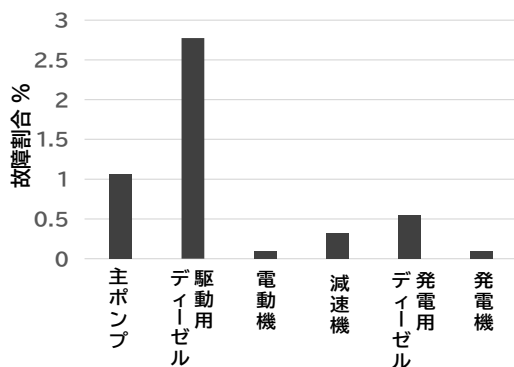


図-11 主要機器故障割合の試算例

表-1 自家用ディーゼル発電機設置信頼性等検討ケース

検討案	電源容量 (kVA)	台数	略 称
従来案	100	2	従来型
案1	200	2	標準型
案2	100	2	標準型
案3	300	2	2台集約型
案4	600	1	1台完結型
案5	300	3	3台分散型
案6	100	6	6台分散型

案1の上段はポンプ駆動用、下段は維持管理用

予備機100kVAを含む)とした場合の自家用ディーゼル発電機の信頼性等検討ケースを表-1に示す。表中の従来案は、電動化との比較のため同規模のディーゼル駆動による標準例であり、略称を従来型としている。電動化案として、案1は従来のディーゼル駆動を踏襲した標準型、案2は案1の自家用発電機を各1台にまとめた2台集約型、案3は1台の自家用発電機で主ポンプ2台運転を可能とした2台余裕型、案4は案3を1台とした1台完結型、案5は案4を分散した3台分散型、案6は案5を更に大幅に分散した6台分散型としている。

ポンプ運転における信頼性等評価は、前述の故障割合と逆の概念となる信頼率(=1-故障割合)という指標により実施する。ポンプ運転のトータルの信頼率はポンプ運転に係る個別機器の各信頼率の積であり、従来型のポンプ駆動系(自家用発電設備を除く)の一部算定事例を表-2に示す。表-2に示すように故障等により、各機器が作動しないケース毎の信頼率を算定し、2台運転、1台運転、0台運転(停止)の条件別に集計することで、各条件におけるポンプ運転の信頼率が算定できる。また、1台片側運転の信頼率の算定は、表-2に示す2号機の故障ケースを1号機にも適用する必要があるため、表-2の1台分の信頼率の全ての和の2乗となる。なお、0台運転の信頼率は1から1台運転と2台運転の信頼率を除いた値となる。以上の考え方を前述の自家用発電機設置信頼性等検討案に適用した結果を図-12に示す。図-12から、ポンプ2台運転の信頼性は2台余裕型が最も高く、0台運転(運転停止)となるリスクは6台分散型が最も低い。自家用発電機信頼性等設置検討案について

表-2 ポンプ駆動系信頼率算定事例(従来型)

信頼率							ポンプ 運転 台数
1号機			2号機			トータル	
ディーゼル	減速機	ポンプ	ディーゼル	減速機	ポンプ		
0.9723	0.9968	0.9894	0.9723	0.9968	0.9894	0.9194	2
0.9723	0.9968	0.9894	0.9723	0.9968	0.0706	0.0098	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.9723	0.0033	0.9894	0.0030	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.0278	0.9968	0.9894	0.0262	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.9723	0.0033	0.0706	3×10 ⁻⁵	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.0278	0.9968	0.0706	0.0003	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.0278	0.0033	0.9894	0.0001	1
0.9723	0.9968	0.9894	0.0278	0.0033	0.0706	9×10 ⁻⁷	1

運転台数信頼率:2台/0.9194 1台/0.0789 0台/0.0017

標準体文字:正常時の信頼率 斜体文字:故障時の信頼率

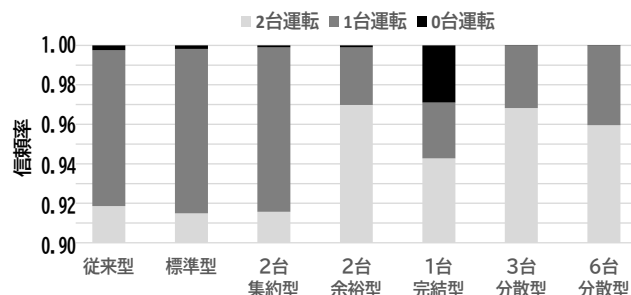


図-12 ポンプ運転の信頼率

表-3 主要機器の概算導入費事例

	規 模	機器費 (百万円)	台 数						
			従来型	標準型	2台 集約型	2台 余裕型	1台 完結型	3台 分散型	6台 分散型
ポンプ	2.5m ³ /s	80	2	2	2	2	2	2	
減速機	200kW	40	2	2	2	2	2	2	
駆動用ディーゼル	200kW	100	2						
電動機	200kW	16		2	2	2	2	2	
自家発電機	100kW	20	2	2				6	
	200kW	40		2					
	300kW	50			2		3		
	600kW	130				2	1		
合計(億円)			4.80	3.92	3.72	5.32	4.02	4.22	3.92

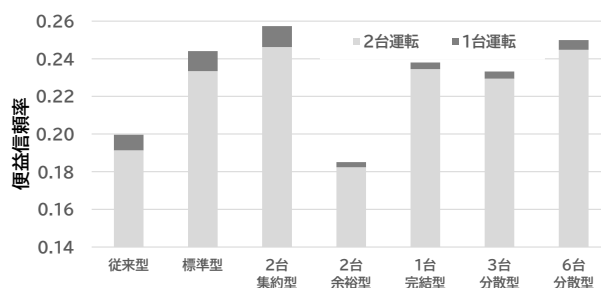


図-13 ポンプ運転の便益信頼率

ポンプ運転の信頼率による比較評価を行い、ポンプ運転の信頼性等に関する設置バリエーション案の優劣の判定が可能である。

以降では更に、実用性の観点から信頼率をベースとする費用対効果の評価を実施した。評価に当たっては、機器導入費を主体に行うものとし、現場条件により異なる現場据付費は対象外とする。主要機器の概算導入費事例を表-3に示す。表-3より、導入費の比較ではディーゼル駆動である従来型に比較し、電動化により2台余裕型を除きコストメリットが見込まれる。

次に、ポンプ運転の信頼性等に関する費用対効果の評価として、先に算定した各案の信頼率を機器費で割り戻すことにより各案における費用対効果の相対的な評価が可能となるが、算定に当たっては2台運転を100%効果、1台運転を50%効果、0台運転を0%効果として計上している。以上の考え方にに基づき得られる数値を便益信頼率とし、その算定結果を図-13に示す。図-13より費用対効果を踏まえたポンプ運転の信頼性等が最も高いのは2台集約型で、次いで6台分散型や標準型が追随している。また、電動化の何れの案も2台余裕型を除き従来型を上回る結果となっている。

5. まとめ

本報告では主原動機の電動化による維持管理性の評価分析並びにポンプ運転の信頼性等に着目した電源設備設置の評価法についての検討を実施した。維持管理性の評価分析では電動化により、従来のディーゼル機関に比較し、年点検項目数を83%、故障率を50%近く低減できる可能性があることを提示した。また、非常用設備である排水機場の電動

化には停電時でもポンプ運転が可能な自家用電源設備の確保が重要であることから、リチウムイオン蓄電池や水素型燃料電池を有力候補として検討したが、実用化に向けてはコスト面、電源設備設置敷地の確保面、再運転時の再充電や最充填に時間を要するなど現時点では多くの課題があり、時期尚早となった。そこで、当面はわずかであるが現行排水機場での実績もある定置式ディーゼル発電が実用として現実的であるとの判断に至った。また、ディーゼル発電機による電動化は、機器導入費としては従来のディーゼル駆動に比較し、コストメリットが見込める他、ディーゼル発電機は駆動用ディーゼルの65%の故障率とのデータもあり、維持管理面での効果も期待できる。更に、ポンプ運転の信頼性、冗長性を優先した電源設備配置の在り方として、費用対効果も踏まえたディーゼル発電機の1台当たりの発電容量と設置台数のバリエーション案を示した上で、ポンプ運転の信頼性等の優劣評価法を新たに提案した。

本報告のベースとなっている研究は、排水機場の将来ビジョンを示す側面もあることから、電動化機場の標準化に向けた揚排水ポンプ設備技術基準への反映のほか将来的なカーボンニュートラルをも見据えた水素型燃料電池などによる電源確保技術は有望かつ日進月歩であり、近い将来、実用化導入の可能性も十分考えられることから、引き続き、この分野の技術の進展にも絶えず注視しながら研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 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 第2回：配布資料 資料4 中間報告(案)説明資料, P12, 2021.5.21
- 2) 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：河川ポンプ設備点検・整備標準要領(案), pp.41-45, pp.51-53, 2016.3
- 3) 一般財団法人建設物価調査会：令和5年度版国土交通省機械設備工事積算基準, pp.423-425, 2023.5
- 4) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道総研における燃料電池鉄道車両の取組みについて, p.36, 2018.2
- 5) 橋本竜弥, 川俣智幸, 島田和義：東北電力(株)仙台変電所大型蓄電池システムの運転開始, 東芝レビュー Vol.70 No.9(2015), p.45, 2015
- 6) 一般財団法人河川ポンプ施設技術協会：揚排水ポンプ設備技術基準・同解説, pp.8-1-8-4, 2016.3

10. トンネル覆工コンクリートの全自動打設システムの開発

鹿島建設株式会社

○ 松本 修治
手塚 康成
坂井 吾郎

1. はじめに

近年、我が国では少子高齢化に伴う技能者不足が深刻化している。特に、建設業界においては、他産業と比べ若年入職者の減少や熟練技能者の高齢化が進んでおり、より技能者不足の問題が顕在化している。さらに、2024 年から適用されている時間外労働時間の上限規制も相まって、省人化、省力化などによる生産性の向上が求められている。これらに対応するためには、専門スキルのない新規入職者などがすぐに活躍できるように、誰でも品質を確保しつつ少人数で効率的に施工ができる技術を開発する必要がある。

国土交通省では、それらを目指して i-Construction¹⁾ の取り組みなど、多方面で生産性向上技術や機械化、自動化技術の開発が進められている。山岳トンネルの分野においても、各作業工程の自動化が進められており、筆者らは、トンネル覆工コンクリートの施工の自動化技術の開発を進めている。

従来からトンネル覆工コンクリートの施工は、スランプ 15cm 程度のコンクリートを検査窓から自由落下させながら打ち込み、移動式型枠内の狭隘な空間において入念な締固めや配管の切替えを行うなど苦渋を伴う人力作業が多い。それゆえに、良好とは言い難い作業環境の下、品質は技能者の技量に依存しており、美観不良および品質不良を生じるリスクが高い。そのため、近年では、型枠面板に取り付けた型枠バイブレータのみで締固めを行える充填性の高い中流動覆工コンクリート²⁾ が普及している。これにより、窮屈な姿勢での苦渋となる入念な締固め作業は必要なくなり、省力化されるとともに美観向上および品質向上が図られている。しかしながら、箱抜き部においては、下面などに未充填が生じやすい問題があるため、中流動覆工コンクリートにおいても型枠バイブレータの手動操作に加え、棒状バイブレータによる人力での締固め補助が必須となっている。さらに、図-1 に示す従来工法の打設配管を有する移動式型枠では、打設口を切り替えるごとに配管の取り外しから配管管内に残ったコンクリートの廃棄、管内清掃など

の苦渋作業が必要であることから、生産性向上の観点では課題が残されていた。そこで、筆者らは、省人化および省力化を実現するために、締固めを不要とする高流動覆工コンクリートの技術と全自動打設システムを開発した。

本稿では、覆工用高流動コンクリートの技術と全自動打設システムの概要、開発時の課題と対策および開発成果と実績について述べる。

2. 全自動打設システム

図-2 に示す全自動打設システムは、新しい打設配管装置を主とした各種装置を備えた移動式型枠を用いるものである。このシステムにより、高流動覆工コンクリート³⁾を用いて、ポンプによる圧送、打設口の切替え、型枠バイブレータの操作、打ち込みまでを自動制御で行うことができる。以降に、高流動覆工コンクリートの技術と各種装置について詳述する。

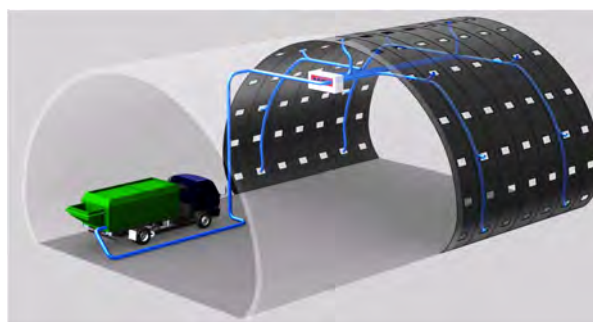


図-1 従来工法の打設配管

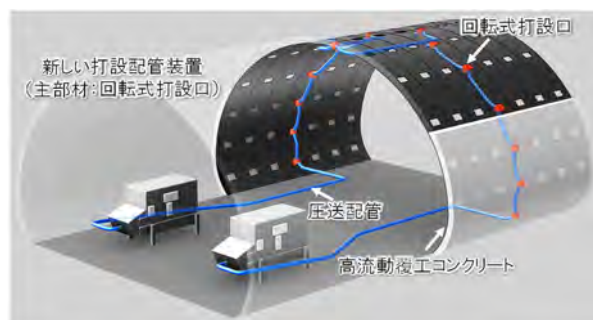


図-2 全自動打設システム

2.1 高流動覆工コンクリートの技術

山岳トンネルの覆工は、地山と型枠に閉鎖された空間に限られた打設口からスランプ 15cm 程度の覆工コンクリートを流し込みながら打ち込むものである。また、2 日に 1 回のサイクルで打設するために材齢 18 時間程度で脱型されている。

高流動覆工コンクリートは、山岳トンネルの覆工コンクリートを対象として、スランプフロー 500～600mm で締固め不要を実現する流動性の高いコンクリートである。

前述のような覆工特有の施工条件を踏まえて新規の増粘剤含有高性能 AE 減水剤⁴⁾を適用しており、ブリーディング量を一般的な覆工コンクリートの半分程度にまで低減しつつ、高流動覆工コンクリートの適切なフレッシュ性状の確保を実現している。また、一般的な覆工コンクリートと同様に、材齢 18 時間で脱型に必要な強度を確保できる⁴⁾。

2.2 各種装置

(1) 新しい打設配管装置（回転式打設口）

図-3 に示す新しい打設配管装置は、打設口および圧送配管と移動式型枠とが一体になり、写真-1 に示す回転式打設口を主部材とするものである。圧送配管は、回転式打設口を介して左右それぞれで連続的に接続されている。回転式打設口は、後述する打設制御装置と連動しており、打込み時には打設口が型枠内部に突出し、当該打設口の打込み完了を検知すると、回転して型枠表面で接続口の蓋が閉まる。それと同時に、次の打設口への配管ルートが形成される構造となっている。これらにより、次の打設口への切替を容易かつ即座に完了させることができる。さらに、打設完了した打設口への配管ルート内に残留するコンクリートの発生を防ぎ、打設中における人力による回収や配管清掃が不要となる。また、回転式打設口からの打込みは、吹上げとすることで、自由落下を防ぎ、品質確保にも配慮した。

(2) 型枠バイブレータの完全自動制御装置

高流動覆工コンクリートは、締固めが不要であるものの、天端部の美観向上を目的として、事前に面板に取り付けた型枠バイブレータを使用している。その型枠バイブレータの稼働においても人による操作をなくすために、型枠バイブレータの完全自動制御装置を実装している。本装置は、後述する打設制御装置の表示画面内で稼働のタイミングや振動時間をパターン化して設定することで、コンクリートの打上がり高さに応じて自動で型枠バイブレータを稼働させることができる。

(3) 打設制御装置

高流動覆工コンクリートは普通コンクリートに比べて流動性が高く型枠に作用する圧力が大きくなるため、左右の打上がり高さを均等にして打ち

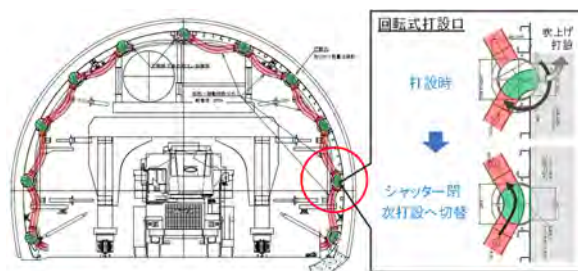
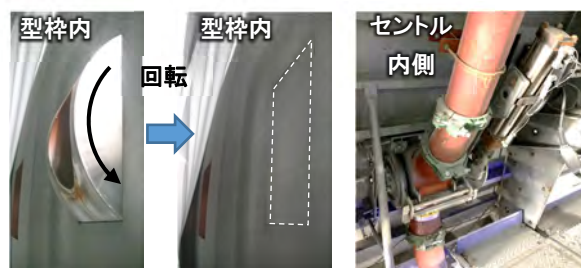


図-3 新しい打設配管装置



a) 打設中 b) 打設完了 c) 装置全景
写真-1 回転式打設口



図-4 打設制御装置のシステム画面

込むことが重要な管理項目となる。そこで、型枠表面に設置した複数の高さ検知センサでコンクリートの打上がり高さを検知し、図-4 に示すようなシステム画面で打設状況を見える化しつつ、各ポンプの吐出量を自動で調整し、左右の打上がり高さを制御することができる装置を実装している。なお、システム画面には、トンネル覆工断面と移動式型枠の展開図を表示させており打設口の切替えタイミング、打設速度および天端圧力制御値を入力して打設を開始すると自動で打設が進捗し打設完了箇所を順次青色に表示することができる。

また、本装置は、打設履歴データを記憶媒体に自動で記録し、打設状況の画面をネットワークで配信することができる。これにより、CIM との連携、遠隔地での打設監視や遠隔臨場が可能で、覆工コンクリートの仕上がり改善活動等にも活用できる。

3. 要素技術の開発経緯

本章では、前述の高流動覆工コンクリートと全

自動打設システムの各種要素技術を開発するにあたり解決した技術的課題やその解決経緯について紹介する。

3.1 高流動覆工コンクリートの技術

高流動覆工コンクリートの技術的課題は、前述の覆工特有の施工条件を踏まえた配合設計技術⁵⁾⁶⁾に加え、所定の流動性を確保した上で、ひび割れや局所的な強度低下などの原因となるブリーディングや材料分離を抑制すること、可使時間の確保と所定の強度発現性を両立することであった。そこで、これらを実現するため、新しい混和剤の開発を開始した。室内試し練りから覆工側壁を模擬した打込み実験を行い、改良を重ねることで、新規の増粘剤含有高性能 AE 減水剤⁴⁾の開発に至った。

3.2 各種装置

(1) 新しい打設配管装置（回転式打設口）

新しい打設配管装置の技術的課題は、打設口を切り替えるごとに配管の取外しから配管内に残ったコンクリートの廃棄を不要化することであった。移動式型枠のメーカーとブレーストローミングを行い、従来の打設配管を刷新させた図-3 に示す新しい打設配管装置を考案し、要素毎に問題点を洗い出し、検証しながら導入を図った。

まずは、考案した装置の主要部材である回転式打設口の試設計から製作を行い、稼働を確認するために簡易実験を実施し、必要となる油圧ジャッキの仕様や回転部分のクリアランスを確認しつつ改良を行った。次に、移動式型枠と一体化した回転式打設口による装置仕様および美観向上が図れるような打込み方法の検討などを行うために写真-2 に示すような高さ 4.25m、覆工厚 0.3m、延長 5.5m の覆工側壁を模擬した中規模の打込み実験を 8 回、写真-3 に示すトンネル断面が内空幅 10m、内空高 8m、覆工厚 0.3m、1BL の延長 10.5m となる実規模の打込み実験³⁾を 4 回実施する過程で、回転式打設口を 3cm 吐出するような形とし、コンクリートの吹上げ高さを 1m 程度に抑えることで美観向上が図れること、回転式打設口の内部に残存したコンクリートの固着が稼働の問題になることが明らかになった。これは、打込み実験で用いた回転式打設口が写真-4 に示すように完全クローズタイプで装置が鋼板同士で溶接加工され一部のみボルトで密閉されており、容易に清掃といったメンテナンスが行えなかったことが原因であった。そこで、回転式打設口の清掃をしやすくするために写真-5 に示すような開閉式とし、装置のクリアランスにペーストが漏れて固着しないように給脂配管の増設を行うといった改良を行った。また、玉送り清掃時に型枠内へのエアブローアウトが懸念されたので、シール性能試験も実施して 1MPa 以上の気密性が確保されていることを確認した。それらの改良は、



写真-2 中規模の打込み実験

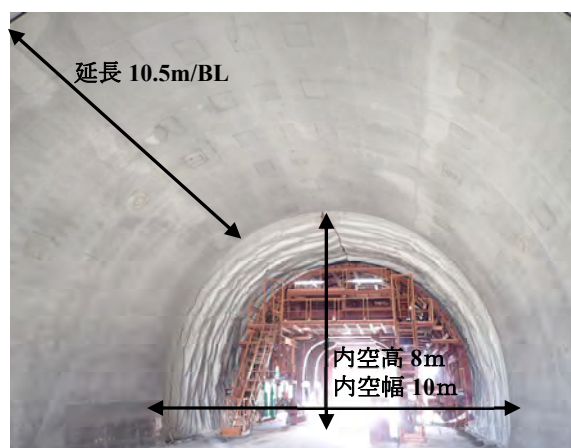


写真-3 実規模の打込み実験

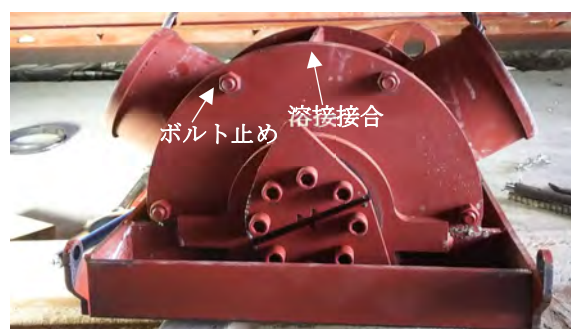


写真-4 回転式打設口の構造



写真-5 改良版の回転式打設口

最終の実規模の打込み実験に導入し、実現性を確認した。その後、回転式打設口の回転部の稼働に対する耐久性試験を実施した結果、実施工より厳し

表-1 高流動覆工コンクリートの配合

種類	SF (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gvol (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)					PP Vol. %
						W	C	S	G	VSP	
高流動覆工 コンクリート	600±50	4.5	41.7	50.0	323	175	420	836	872	6.30	0.3

W:地下水, C:普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm³, S:砕砂・海砂の混合砂 表乾密度 2.58g/cm³, G:砕石 2005 表乾密度 2.66g/cm³, VSP:特殊高性能 AE 減水剤, PP:ポリプロピレン繊維 密度 0.91 g/cm³ 繊維長 47mm, SF:スランブフロー

い条件となるコンクリートが満管の状態では 454 回稼働させることで、回転部と面板が接触する部分で面板がめくり上がり、回転軸の部材が曲がる現象が生じた。1 回の打設で 2 回稼働させるものとして、227 回の打設分となり、スパン長 10.5m とすると、耐久打設施工距離として 2km 相当が確認できた。さらなる性能向上を目指して、油圧ジャッキを適切なものに変えるとともに、回転部と面板との離隔を大きく調整した。さらには回転時の負荷を小さくするために、回転軸をボールベアリング機構とし、油圧ジャッキの稼働時の反力を受ける構造の改良を行った。

(2) 型枠パイプの完全自動制御装置

高流動覆工コンクリートは締固め不要であるため、コンクリートを締め固める目的での型枠パイプは不要であったものの、実規模の打込み実験を行う中で、天端部の美観向上策が必要であった。そこで、型枠パイプを用いることとし、その自動制御装置の開発を行った。

(3) 打設制御装置

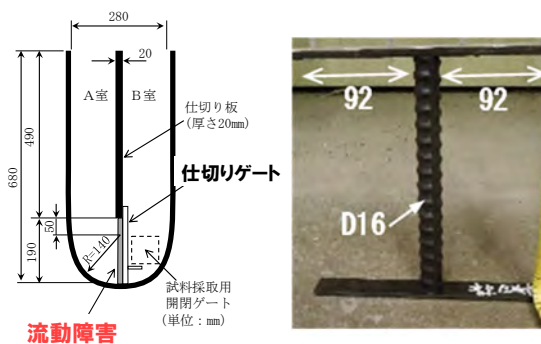
実規模の打込み実験では、コンクリートポンプ 1 台までを新しい打設配管装置および各種センサを連携して自動制御するものであった。打設制御装置の技術的課題は、コンクリートポンプ 2 台の同時制御機能の構築であり、これにより大断面トンネルへの適用および高速かつ大量打設を図る必要があった。その他、コンクリートポンプにレーザ検知計を取り付け、それによるトラックミキサの台数管理機能、型枠パイプの完全自動制御装置の設定機能を付与する形で各種実験的検討を進めることで完成に至った。

4. 開発成果と実績

4.1 適用現場の概要

新名神高速道路宇治田原トンネル西工事に全自動打設システムを導入した。導入現場は、3車線道路の大断面トンネル（内空幅約15m、内空高約9m）である。施工開始時から中流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムによる施工を行っており、スランブ15cm程度のコンクリートを人力で打ち込み、締固めを行う従来工法と比べ、生産性の向上が確認されていた。

道路トンネルでは、非常用電話機などを設置するスペースとして、トンネル延長50～200mごとに



a) U 形容器 b) 流動障害 (障害 R2.75)
図-5 充填装置の形状および流動障害

箱抜きを設ける必要があり、本トンネルにも、大型の箱抜きが存在する。箱抜き箇所では、中流動覆工コンクリートは棒状パイプによる人力での締固めや型枠パイプの手動操作が必要であった。そこで、更なる生産性向上策として、箱抜き箇所の締固め作業を不要とするため、高流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムを適用した。

4.2 高流動覆工コンクリートの配合

表-1 に高流動覆工コンクリートの配合を示す。高流動覆工コンクリートは、剥落防止を目的とした繊維（ポリプロピレン製、長さ 47mm）を混入する仕様であり、繊維混入後の目標スランブフローを 600±50mm、空気量を 4.5±1.5%とした。その配合は、土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」⁸⁾を参考にすると、繊維に対する材料分離抵抗性を確保するうえでも、単位セメント量が 450kg/m³ 以上になることが想定された。しかし、前述した覆工コンクリートの施工条件に適するように開発した増粘剤含有高性能 AE 減水剤によって想定よりも 30 kg/m³ 少ない 420kg/m³ で材料分離抵抗性を確保することができた。自己充填性のランクの設定は、高流動コンクリートの配合設計・施工指針に則った場合、本工事の覆工厚 500mm、単鉄筋（主筋 D19@300mm、配力筋 D16@200mm）の条件から、ランク 3 に相当する。これは、図-5 a) に示す U 形容器を用いた高流動コンクリートの充填試験方法（案）では流動障害なしでの評価となる。ただし、繊維を混入することから、鉄筋と繊維の干渉による充填性の低下に対して、安全側の評価を行うため、本トンネルの配筋条件を模擬した新た

な充填性の指標である鉄筋あき 92mm のランク 2.75 を考案し、図-5 b) に示す障害 R2.75 を配した U 形容器を用いた高流動コンクリートの充填試験方法(案)で評価するものとした。

4.3 施工実績

(1) 施工方法

一般的な覆工コンクリートの打込み実績である時間当りの打上がり速度 1.5~2.0m/h 程度となるように、打込み速度は、ポンプ 1 台あたり 15~25m³/h に設定した。また、高流動覆工コンクリートは締固めが不要であるものの、天端の美観向上を目的として、予め天端の型枠にトンネル軸方向 1.5m、周方向 1m 程度の間隔で全 28 台設置した型枠パイプレータを、打込み完了後に自動制御で合計 20 秒間稼働させた。

(2) フレッシュコンクリートの品質

高流動覆工コンクリートのスランプフローおよび空気量は、安定しており、全てのコンクリートが目標とするフレッシュ性状に対する管理範囲内であった。

写真-6 に高流動覆工コンクリートの充填状況を示す。材料分離することなく妻板まで流動し、人力による流動補助を一切必要とせず隅々までほぼ水平に充填されていく状況が確認された。

図-6 に覆工コンクリートの側圧を示す。高流動覆工コンクリートの側圧実績に加え、比較として、同材料で製造した中流動覆工コンクリートの側圧を青色、トンネルの内空高さ 9m における中流動覆工コンクリートの施工実績における液圧を破線で示した。いずれも打上がり開始から 1 時間程度までは液圧になっているものの、2 時間以降の時点では液圧以下に減少した。しかし、中流動覆工コンクリートの側圧は、変動が大きく、瞬間的に液圧相当に上昇する時点が存在している。これは、型枠パイプレータの稼働等により、中流動覆工コンクリートが瞬間的に液状化しているためと考えられる。一方、高流動覆工コンクリートは、変動が小さく最大 68 kPa (約 3m 相当の自重) と想定より小さい結果であった。これは、型枠パイプレータによる振動を与えないことが影響したものと考えられる。

(3) 硬化コンクリートの品質

写真-7 に高流動覆工コンクリートの仕上がりを示す。全区画において、SL 下部に発生しやすい表面気泡や天端部に発生しやすいコンクリートの流動跡などは少なく綺麗な仕上がりとなった。表面気泡の減少は、吹上げ打設を行ったことで、打込み時のエントラップトエアが低減されるとともに、できる限り連続的に打込んでいることの効果によるものと考えられた。また、天端部の流動跡の低減は、天端部全面が平坦に打ち上がるため、吹上げ口の圧力が上がらず分離しにくくなったためと考え

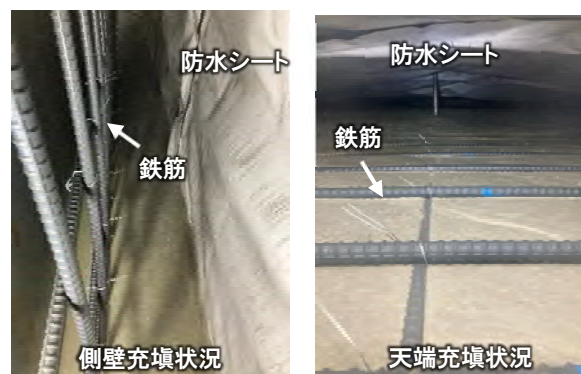


写真-6 高流動覆工コンクリートの充填状況

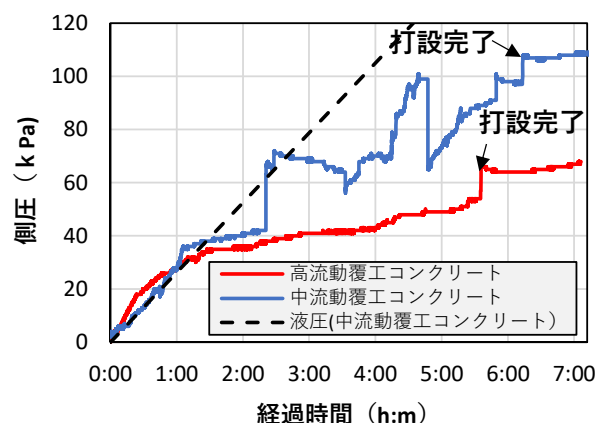


図-6 覆工コンクリートの側圧



写真-7 高流動覆工コンクリートの仕上がり

られる。

写真-8 に箱抜き箇所を示す。高流動覆工コンクリートと全自動打設システムを用いることで、締固め作業を行わずに自動で隅々まで充填されることが確認された。この仕上がりは、中流動覆工コンクリートを用いて棒状パイプレータを使った人力による締固めを行った場合と同等以上であることを確認した。

(4) 生産性向上効果

図-7 に歩掛りの比較を示す。従来工法では、ポンプ操作員2人、締固め作業を主とする打設作業員が4人、妻枠監視・清掃として2人、配管清掃に1人の

合計9人必要であることが想定された。一方、全自動打設システムでは、ポンプ操作員および打設作業員が0人、妻枠監視2人で、全自動打設システムの制御盤操作が1人、打設完了後の配管清掃が1人の合計4人に低減できることが分かった。特に、狭隘な作業環境下での人力作業を完全に排除でき省力化および省人化を実現できた。それに加え、回転式打設口によって即座に打設口を切り替えることができたことなどで従来工法に比べ打設時間を2時間短縮できた。その他、打設履歴は記憶媒体に記録されるため、脱型後の表面の仕上がりとの関連付け、現場での覆工コンクリートの品質向上に向けたPDCA活動を容易にした。さらに、写真-9に示すイメージで打設状況をネットワーク配信しており、遠隔地での打設監視としても活用している。これらのことから、本全自動打設システムの有効性を確認できた。

5. おわりに

高流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムを開発し実現場に初導入した。実現場への導入前に数多くの実験的検討を繰り返すことで多く課題を事前に抽出し改善を図ることで、全ての装置がトラブルなく順調に稼働することができ、省人化、省力化および施工時間の短縮による生産性向上を図ることができた。深刻化している技能者不足への対応や働き方改革の残業規制に関する法律にも対応できるほか、人の手をかけずに1日の打設量を増やすことが可能となるため、1ブロック割りのスパン長を長くすることで覆工工事の工程短縮を図ることもできる。今後、他のトンネル工事においても高流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムの導入を推進し、さらなる合理化施工を検証していく。

[謝辞] 岐阜工業株式会社の方々には、本開発に関して、多大なご協力を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堂山修治, 竹下正一, 堤 英彰, 城澤道正: i-Construction (建設現場の生産性革命) の推進と建設現場の安全性の向上に向けて, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.73, No.2, I_1-I_6, 2017.
- 2) 株式会社高速道路総合技術研究所: NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ, 2011.
- 3) 松本修治, 手塚康成, 日野博之, 青柳隆浩: トンネル覆工コンクリートの自動打設システムの開発, 土木建設技術発表会 2020, II-11, 土木学会, 2020.
- 4) 作榮二郎, 亀島健太, 松本修治, 坂井吾郎: ブリーディング低減成分を含有した増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用した覆工用高流動コンクリートの基本特性,



写真-8 箱抜き箇所の充填状態

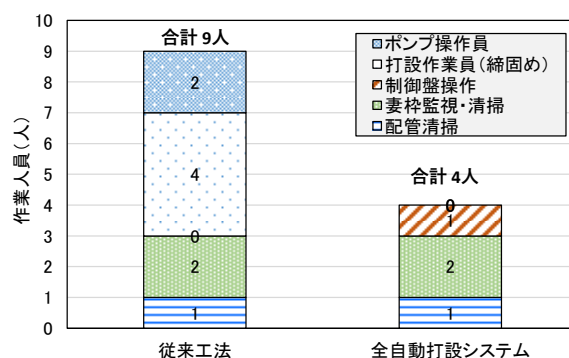


図-7 歩掛比較

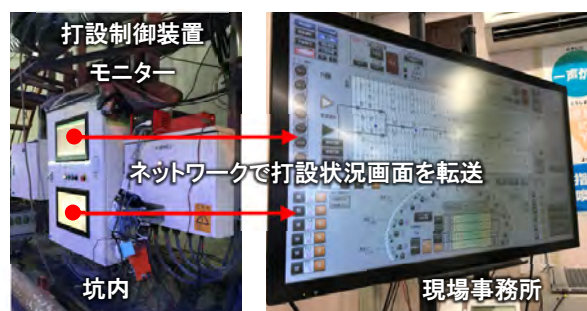


写真-9 打設状況のネットワーク配信

第 75 回年次学術講演会, V-434, 土木学会, 2020.

- 5) 小山広光, 大野誠彦, 西岡和則, 坂井吾郎, 松本修治: 凝結促進剤を添加した中流動および高流動覆工コンクリートの各種性状について, 土木学会 第 70 回年次学術講演会, VI-640, 土木学会, 2015
- 6) 松本修治, 坂井吾郎, 林大介, 坂田昇: 締めめを必要としないトンネル二次覆工コンクリートに関する基礎的検討, VI-649, 土木学会, 2015
- 7) 松本修治, 佐藤崇洋, 北村義宜, 坂井吾郎: 覆工用高流動コンクリートの実施工における移動式型枠の発生応力および作用する側圧を含む各種検証結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1185~1190, 2018
- 8) 土木学会: 高流動コンクリートの配合設計・施工指針, 2012.6.

11. 山岳トンネルのインバート掘削に関する 出来形管理システムと現場検証結果

株式会社奥村組

○ 藤沼 花奈
松田 顕伍
川澄 悠馬

1. はじめに

我が国は、高齢者の大量退職や、少子化による若年層の減少によって、就労人口が減少することが想定されている。

特に、建設業は全産業と比較して、就労人口における 55 歳以上の人口割合が高い実態がある。労働人口不足が見込まれることから、生産性向上への対策として、ICT やロボット化の開発や現場導入を積極的に実施している。

山岳トンネル工事の出来形管理においては、ICT 施工の導入は増加傾向であるが、従来手法における管理が一般的である。インバート工の掘削工においては、掘削作業を中断してスタッフ等の測定器具を用いて、基準線からの下がりやを都度確認している。そのため、計測箇所が限定的となり、20 分程度の作業中断と計測人員が必要とされている。また、計測結果をエクセル等で取り纏める作業が別途発生するため、多くの時間を要している。

そこで計測時間の軽減、計測人員削減を目的とした「差分計測システム」(以下、本システム)を開発した。本稿では、本システムの概要と、上信越道高岩山トンネル(下り線)補強工事において、性能を検証するために、インバート掘削出来形管理に試験導入した結果を報告する。

2. システム概要

2.1 システム概要

本システムは、上下に首振りを行う回転機構を有した 2D-LiDAR により得られる、3 次元計測データ(以下、計測データ)と出来形設計データ(以下、設計データ)の差分を算出し、モニタ画面に図示するシステムである。

本システムを油圧ショベルに取り付けた場合の機器構成を写真-1 に示す。油圧ショベルのキャビンの上に 2D-LiDAR を設置した。油圧ショベルの振動を軽減するため、回転装置の下部にショックアブソーバを実装している。また、キャビン内部に、計測機器を制御する PC(以下、制御 PC)と計

測結果評価画面を表示するモニタを設置した。制御 PC 内部は、本システムのソフトウェアや計測記録を保存するためのストレージを装備している。これらの電源は油圧ショベルより給電する。



写真-1 機器構成

計測データはローカルな 2D-LiDAR 座標系での値であるため、設計データのワールド座標系に変換する必要があります。そのため、両者の座標を関連付ける基準としてリフレクタを使用する。リフレクタとは、2D-LiDAR のレーザーを反射するための反射板(□200 mm)を取り付けたものである。リフレクタと設置イメージを図-1 に示す。

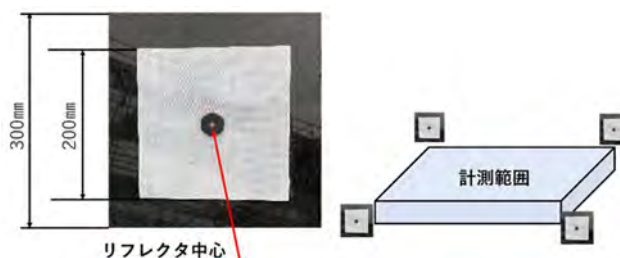


図-1 リフレクタと設置イメージ

2.2 システムフロー

本システムのフロー図を図-1 に示す。

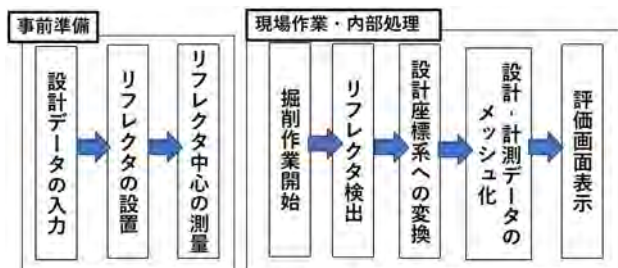


図-2 システムフロー図

事前準備として、ワールド座標系における、施工断面の形状を入力した設計データをシステムに取り込む。次に計測範囲の周辺を囲うようにリフレクタを設置する。ワールド座標系におけるリフレクタ中心の座標値をトータルステーション(以下、TS)で測量し、座標値をシステムへ入力する。

掘削作業は従来通り行い、出来高を確認する任意のタイミングで、本システムによる計測を開始する。計測では 2D-LiDAR により計測範囲のリフレクタが自動で認識される。認識したリフレクタのローカル座標値と、事前に入力したワールド座標値が自動で関連付けされる。関連付けた座標値から、座標変換を行い設計データと計測データの差分値を計算して、評価画面をモニタに表示する。評価画面は 2D-LiDAR で取得した点群データと設計データの差分がヒートマップとして表示される。図-3 に計測時のヒートマップの表示例を示す。画面はカラーで表示され、①暖色範囲(赤・桃色)は設計値未満、②中間色範囲(黄色、緑)は設計許容値内、③寒色範囲(水色、青)範囲は設計超過を意味する。何らかの原因で点群データを取得できなかった部分に関しては、黒色で表示される。施工条件に合わせ、メッシュサイズや、掘削深さを表す色の種類やスケールも変更することが可能である。

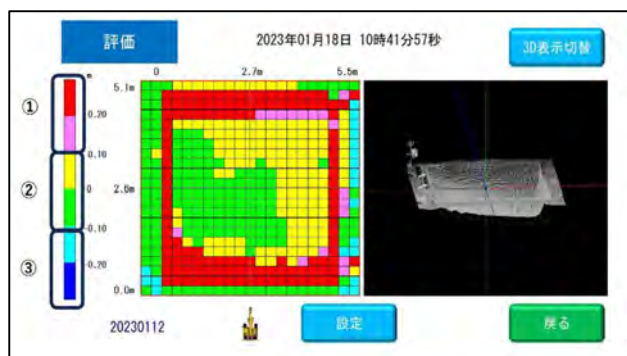


図-3 計測後の評価画面

3. システムの事前実験

3.1 事前実験概要

現場での試験導入前に事前実験として、本システムの動作確認および、3D スキャナ測量との精

度比較を行った。掘削範囲は、写真-2 に示す、岩盤を模擬した無筋コンクリートの試験体 (W4.0m × L4.5m × H1.0m) を設定した。掘削作業には 0.45m³ 油圧ショベル(キャタピラー製、型式: CAT315)を使用し、多軸継手であるチルトロータータおよびドラムカッターを装備した。予めインバート形状を設計データとして、システムに取り込み、本システムを用いて掘削の出来形管理を行った。今回は、3D スキャナ測量結果を真値とした。

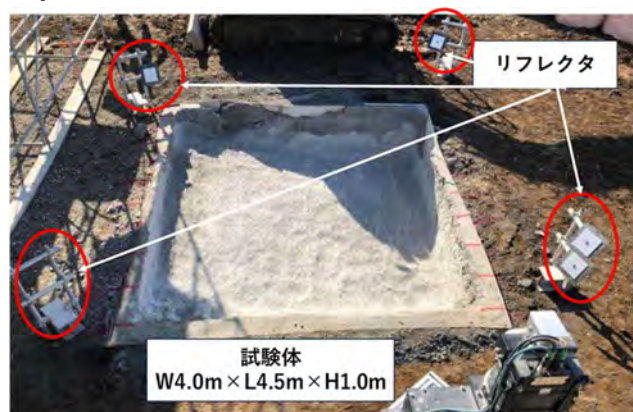


写真-2 予備実験試験体

3.1 事前実験結果

写真-3 に予備実験状況を、図-4 に、予備実験の結果の評価画面を示す。



写真-3 事前実験状況

図-5 に本システムの結果と 3D スキャナ測量との比較を示す。縦軸に高さ(Z 軸)、横軸に X 軸方向のメッシュ番号とした。なお、メッシュ間距離は 0.1m、Z 座標は点群 50 点を単純平均した。図-5 より、3D スキャナ測量に対して、平均で約 60 mm 高くなった。原因としては、設計データとの位置合わせを行う際に、測定したリフレクタの位置に誤差が生じ、全体的に高くなったと考えられる。

また、一部点群データが取れていない箇所があった。データが取れなかった原因としては、掘削端部であったため、日陰になり照度が足りなかったと思われる。

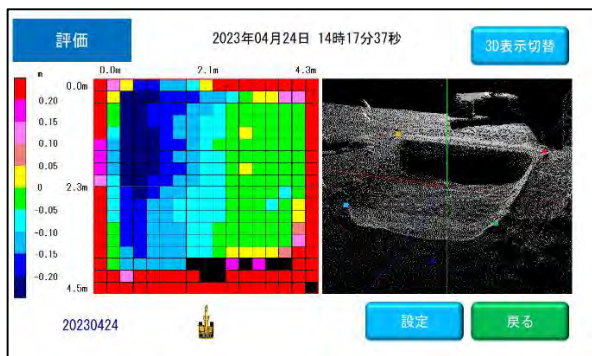


図-4 予備実験評価画面

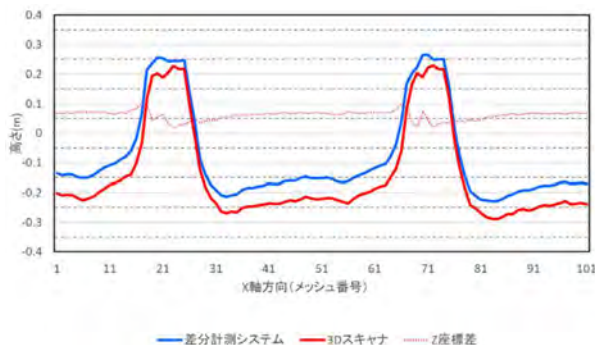


図-5 3D スキャナ測量との比較

以上の予備実験の結果より、本システムが正常に動くことを確認することができた。現場検証実験では、リフレクタの測量誤差に注意することと、十分な照度を確保することが課題である。

4. 本システムの現場検証概要

4.1 現場の概要

本システムを検証する上信越道高岩山トンネル(下り線)は、トンネルの盤ぶくれの影響により路面の隆起が発生している箇所において、インバートを構築する工事である。すでに供用されている区間であるため、2車線のうち1車線を規制しながら施工を行うため、車両の入替も容易ではない。また、週末には規制を解除する必要があるため、インバートコンクリート打設から舗装復旧を考えると、インバート掘削に要する時間は20時間に限定されるため、出来形管理だけでなく、都度発生する機械配置など、効率的な施工管理が求められる。

現場のインバート出来形管理値として、覆工受台端部からの床付け面までの深さを設計値として管理している。現場での出来形管理方法は、栈木に床付け面までの深さをチェーンで示し、覆工受台端部に栈木を合わせて、設計値以上であるかを事前に確認してから、レベル測量にて出来形を管理している。通常の測量状況を写真-4に示す。



写真-4 通常の出来形管理状況

4.2 現場検証実験の概要

本検証の目的として、本システムの出来形の計測精度の確認と現場での有用性を確認することを目的とした。

今回の検証実験において、インバート掘削出来形はTSによる測定結果を真値とし、TS測点近傍における点群データの平均を本システムの測定結果とし、計測精度の比較を行った。

掘削作業には0.45m³油圧ショベル(キャタピラー製、型式:CAT315)を使用し、多軸継手であるチルトローテータおよびドラムカッターを装備した。また、ドラムカッターの駆動用として、0.25m³油圧ブレーカー(ヤンマーホールディングス製、型式:ViO10-2D)を使用した。現場検証実験の位置図を図-6に示す。

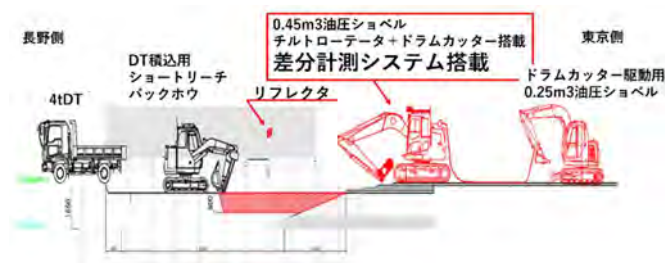


図-6 検証実験位置図

4.2 計測精度の比較結果

現場検証状況を写真-5に示す。



写真-5 現場検証状況

出来形測量の TS の測量点を図-5 に示す。油圧ショベルから見て、横断方向を X 軸、縦断方向を Y 軸、掘削深さを Z 軸とした。TS の測量結果と本システムの測量結果の Z 軸の絶対値の差分比較を表 1 に示す。

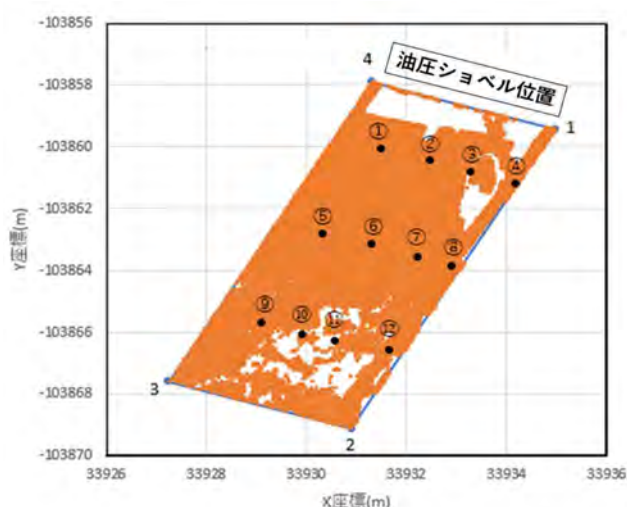


図-5 TS 測量点

表 1 測量結果比較

測定位置	差分 (m)	LID測定値Z (m)	TS測定値Z (m)
①	3.997	749.12	745.12
②	0.053	745.26	745.21
③	0.074	745.39	745.32
④	0.038	745.61	745.58
⑤	0.058	745.27	745.22
⑥	0.083	745.35	745.26
⑦	0.055	745.43	745.38
⑧	0.081	745.62	745.54
⑨	0.100	745.33	745.23
⑩	0.034	745.30	745.27
⑪	0.212	745.53	745.31
⑫	0.152	745.72	745.57
平均	0.411	測定①～⑫平均	
平均	0.085	測定②～⑫平均	

結果としては今回の検証実験では約 0.4m の差が出た。比較した測点が少なく、ドラムカッターでの掘削を行ったため仕上がり面が局所的に凹凸であることが影響したと思われる。しかし、局所的な凹凸があったと思われる測定位置①を除くと、差分の平均値は 0.085 m となった。この結果より、評価画面でのスケールを 0.1m 以下の小さい値に設定することで、評価画面にて設計値以下で掘削するようにオペレータが管理を

行えば、誤差範囲 0.085m 内で掘削できるので、現場管理値の条件を満たした出来形でインバート掘削をすることができる。しかし設計値以下 0.1m で管理すると、余掘り量が増え、掘削土およびコンクリート打設量が増加する。今後、本システムをより合理的なシステムにすることが求められる。

また、通常の施工では、途中で掘削深さを確かめるために、人員を用いて深さを確認する必要があるが、本システムでは、途中の掘削深さの確認をオペレータ 1 名で行うことができた。そのため、施工時の出来形管理要員を少なくすることができ、人員削減に有効であるといえる。

5. まとめ

開発した本システムについて、まだ課題は残るが、今回の実証実験で現場での有用性を確認することができた。

今後の展望として、計測精度を向上させて掘削余掘り量を少なくできるよう改善していく。さらに、計測結果の帳票化や、立ち合い検査時への出来形確認時にも使用できるよう、現場での有用性を高めるよう取り組んでいきたいと考える。

参考文献

- 1) 松田顕伍・松本清志・川澄悠馬・今泉克彦：供用中トンネルにおける ICT を活用したインバート掘削出来形管理システムの構築，第 78 回年次学術講演会講演概要集（令和 5 年度土木学会全国大会），VI - 117, 2023 年

12. 特殊機械設備を駆使した長大アーチ橋の合理化施工

新東名高速道路 河内川橋（仮称）

鹿島建設株式会社
鹿島建設株式会社
鹿島建設株式会社

石松 大輔
横山 由宏
○金丸 拓樹

1. はじめに

河内川（こうちがわ）橋工事は、新東名高速道路の未開通区間である新秦野 IC～新御殿場 IC 間に位置する大規模橋梁工事である。本工事では作業安全性や生産性の向上を目的として、数々の機械設備を活用した合理化施工を進めている。

本稿では、過去に前例のない規模かつ難度の高いアーチリブ構築において、超大型可変式アーチリブ移動作業車と斜吊材緊張ジャッキ運搬台車による張出し施工の合理化を図ったので、その計画と実績を報告する。

2. 工事概要

本工事は、河内川及び県道 76 号線の上空を横断する急峻地形に計画した橋梁を上下部一体詳細設計付きで施工する工事である。橋梁構造は、鋼・コンクリート複合バランスドアーチ橋であり、最大支間長 220m、河内川水位からの最大高低差 120m を誇る新東名のなかでも最もシンボリックかつ大規模なものである。

主要工事数量を表-1、橋梁一般図を図-1 に示す。

3. 機械設備概要

本橋は P1～P4 間がアーチ部となっており、最大傾斜は P2 上り線で 38° である。P2、P3 上下線の橋脚を起点として計 8 基の超大型可変式アーチリブ移動作業車（以下、作業車）を新規製作し、アー



写真-1 河内川橋工事状況（下流側から望む）

表-1 主要工事数量

橋梁 上部工	鋼・コンクリート 複合バランスドアーチ橋 (上り線 771m, 下り線692m)
	P R C ポータルラーメン橋 (橋長22.5m)
橋 脚	13基 (H=13.0～88.1m)
橋 台	6基 (H=7.0～13.0m)
基礎工	大口径深礎13本他
工事用 道路	インクライン 1 基 (90t), 工事用トンネル他
付帯工	調整池、管理用道路、町道拡幅
詳細設計	橋梁上下部の本体工の詳細設計一式

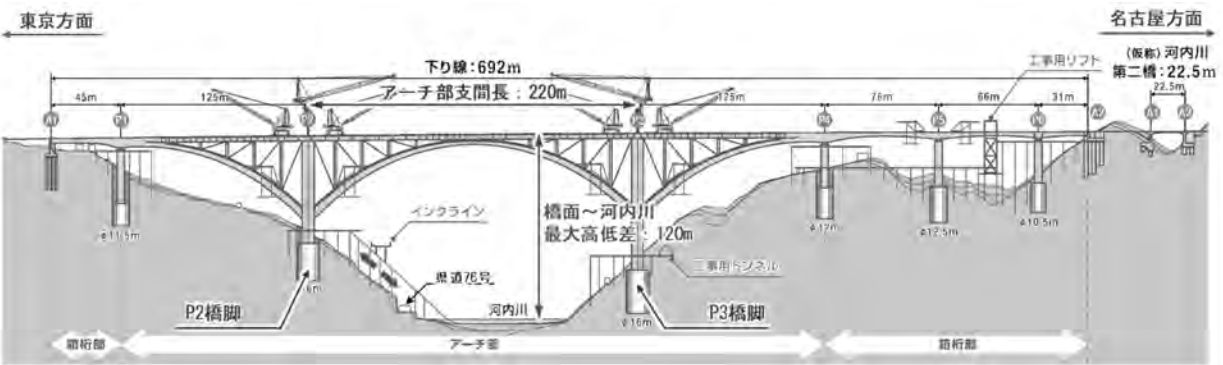


図-1 橋梁一般図（下り線）

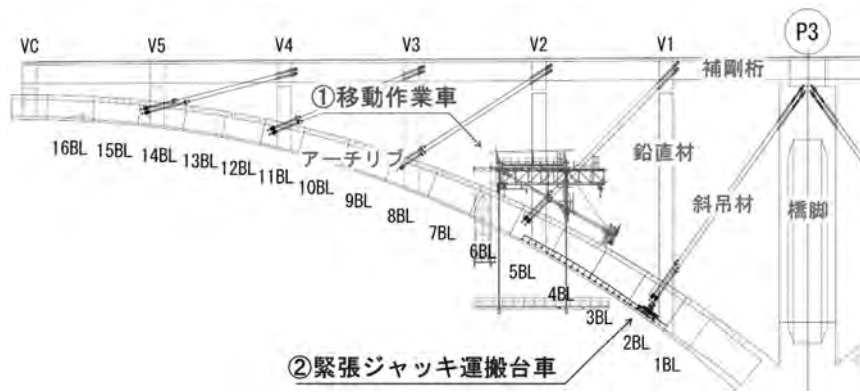


図-2 張出し部拡大，機械設備配置図（下り線 P3 中央径間）



図-3 斜吊材緊張位置

チリブを構築する。

P3 下り線中央径間側の拡大図を図-2 に示す。作業車でアーチリブを先行して施工したのち、鉛直材と補剛桁を架設、斜吊材を設置し、トラスを形成しながら張出し施工を行う。斜吊材はアーチリブの箱桁内からセンターホールジャッキ（3,000kN）を使用して緊張する（図-3）。クレーンが使用できない狭隘かつ急傾斜の箱桁内で質量約 800kg の緊張ジャッキを運搬し、上向きにセットするため、緊張ジャッキ運搬台車を新たに開発、製作した。

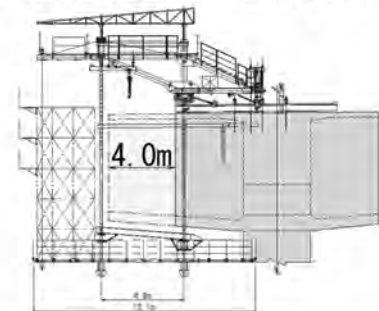
4. アーチリブ移動作業車

アーチリブ構築の工程短縮を図るためには、張出し施工 1 ブロックあたりの施工長の延長（大ブロック化）により、施工ブロック数を削減することが最も効果的である。基本設計では、最大ブロック長は 4.5m、ブロック数は 23 ブロックであったが、詳細設計において最大ブロック長 6.5m、ブロック数 16 ブロックに変更することを提案し、採用された¹⁾。当社の一般型移動作業車との比較図（図-4）に示す通り、アーチリブの急傾斜に対応した特殊な形状の上、躯体の大ブロック化に伴い超大型の構造となった。

4.1 構造概要

図-5 に作業車の全体図、表-2 に主仕様をそれぞれ示す。主構トラスから作業足場を設置する下段ステージ、型枠を保持する底

<一般型移動作業車>
フレーム容量：3,000kN・m（2フレーム）



<超大型特殊可変式移動作業車>
フレーム容量：12,000kN・m（2フレーム）

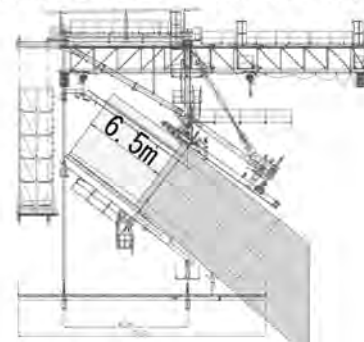


図-4 当社一般型移動作業車と本橋の作業車の比較

表-2 作業車主仕様

種別	超大型特殊可変式
フレーム容量	12,000kN・m
全装備重量	340t
主部材材質	SM490
最大ブロック長	6.5m
最大ブロック重量	250t
最大登坂角度	40°
メインジャッキ	4,000kN × 250st × 2台
アンカージャッキ	2,500kN × 250st × 2台
引張ジャッキ	2,300kN × 2,300st × 2台
後方車輪ジャッキ	1,000kN × 250st × 2台
推進ジャッキ	800kN × 500st × 4台

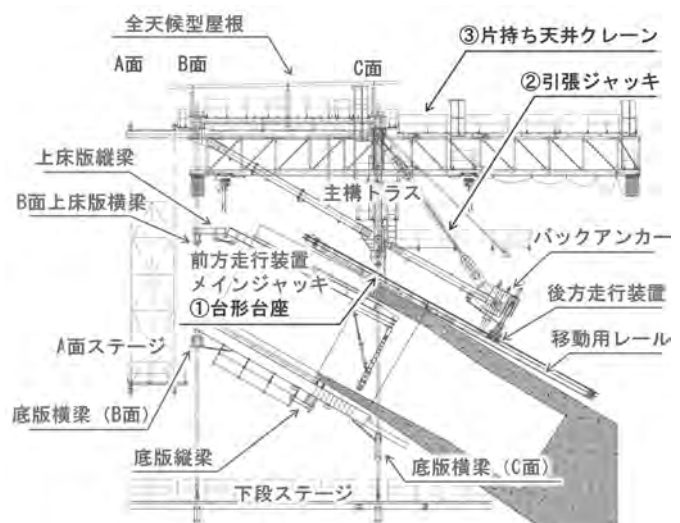


図-5 作業車の全体図



図-6 台形台座



写真-2 载荷試験状況



写真-3 引張りジャッキと固定鋼棒

版・上床版梁を吊り下げる基本構造は従来と同様である。作業車の前後支点は、メインジャッキ及びバックアンカーで既設躯体と緊結される。メインジャッキ容量は4,000kNであるが、打設荷重を受けるロックナット耐力は不均等荷重等を考慮し5,000kNとした。アーチリブ特有の施工条件に対応するため、今回の作業車は当社初の試みとなる、(1) 台形台座、(2) 主構トラス引張りジャッキ、(3) 片持ち天井クレーンといった特徴的な設備を有している。以下に、各設備の詳細を述べる。

(1) 台形台座

作業車の全荷重は、前方支点となるメインジャッキを介して鉛直下向きに作用する。このため、躯体角度に応じて数パターンの台形台座とテーパプレートを組み合わせることで、ジャッキの下面に水平な面を形成した。台形台座は箱抜きした躯体にシアーピンを挿入することで固定する(図-6)。メインジャッキにかかる荷重の角度分力をシアーピンのせん断で受けるため、最大傾斜角度を再現した実物大モックアップによる载荷試験(写真-2)にて、シアーピン及びコンクリートの健全性を確認した。

(2) 主構トラス引張りジャッキ

本橋のアーチリブは、1ブロックごとに約2度の角折れをすることで、近似的にアーチを形成する。そのため、作業車が施工ブロックの躯体角度に追従できるよう、主構トラスの後方斜材に引張りジ

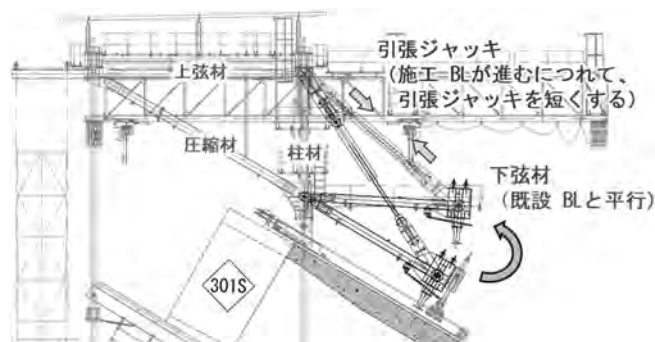


図-7 作業車の姿勢調整機構

ヤッキ(2,300kN)を組み込み、次ブロックへの移動時に容易に姿勢調整できる機構とした(図-7)。引張りジャッキは移動後の角度調整のみに使用し、それ以降は引張りジャッキ両脇に配置した固定鋼棒(写真-3)で荷重を負担する。

(3) 片持ち天井クレーン

通常の桁橋では作業車後方の既設橋面を資材ヤードとして利用でき、栈橋上のクレーンで直接資材機材を施工ブロックへ投入できるケースが多い。一方、アーチリブでは躯体が傾斜しているため、作業車と一体にした後方ステージを設け、図-8に示すルートで鉄筋等の資材を供給する計画とした。施工の進捗により、後方ステージにトラベラークレーン(能力650t・m)が届かないタイミングが発生するため、作業車のさらに後方に設けた仮設ステージからも資材を取り込めるよう、張出し長13.8mの片持ちとした(写真-4)。写真-5に移動作

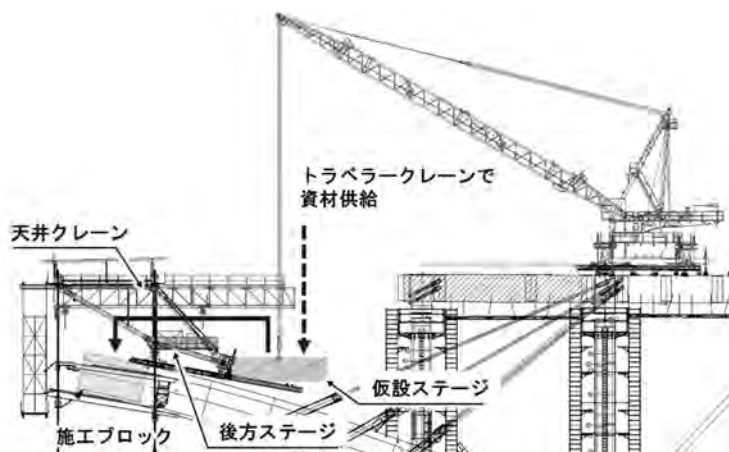


図-8 資材供給ルートと天井クレーンの関係



写真-4 片持ち天井クレーン



写真-5 移動作業車とトラベラークレーンの位置関係

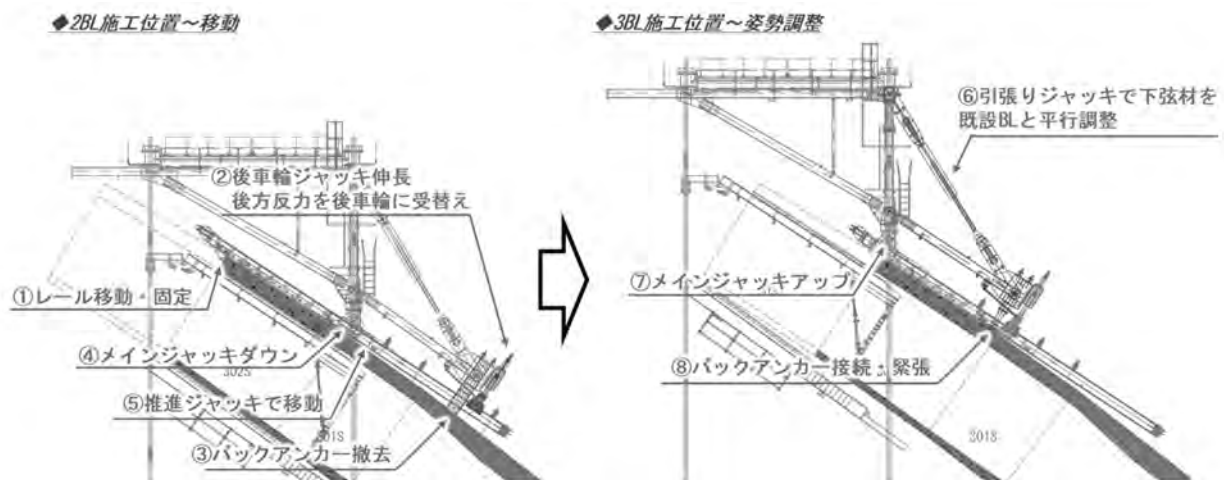


図-9 作業車移動手順

業車とトラベラークレーンの位置関係を示す。

4.2 移動作業車前進移動

(1) 移動手順

移動作業車は施工の進捗に合わせ、次ブロック施工位置へ前進移動する。図-9に作業車の移動手順を示す。コンクリート打設後、前進移動の準備が完了した後（①～④）、容量800kN、ストローク500mmの推進ジャッキ4台で反力ナットを盛り替えながら最大6.5mを移動する（⑤）。

走行装置は、図-10に示す略図のとおり、移動機構に滑り板（ルーロン板）を採用し、レール上面にステンレスを貼った上、界面活性剤（液体洗剤）を塗布して摩擦係数低減を図った。

次ブロックへの移動後、前述の引張りジャッキで、下弦材が既設ブロックと平行になるように姿勢調整する（⑥～⑦）。バックアンカーの緊張時（⑧）は、最も厳しい荷重条件での最大反力に対し1.1倍以上の緊張力（片側2,160kN（220tf））を導入することで、打設荷重によるアンカーの伸びを抑える。

(2) 移動実績

実績工程を表-3、移動状況を写真-6に示す。推進ジャッキの伸縮を繰り返し、1ブロック（6.5m）の前進移動と、作業車の姿勢調整までを約8時間（490

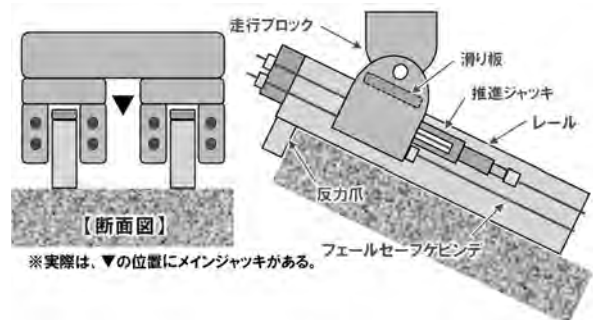


図-10 走行装置略図

表-3 作業車移動実績工程

移動手順	実績(min)
①レール移動・固定	120
②後方反力を後車輪に盛替え	10
③バックアンカー撤去	10
④メインジャッキダウン	50
⑤推進ジャッキで前進	190
⑥下弦材平行調整	50
⑦メインジャッキアップ	50
⑧バックアンカー接続・緊張	10
合計(約8hr)	490

分)で完了した。主構トラス引張りジャッキの採用で姿勢調整が容易になったことに加え、繰り返しの作業の中で作業手順を最適化したことで当初工程では2日を想定していた移動作業を1日で完了でき、サイクル工程短縮に大きく寄与した。

5. 緊張ジャッキ運搬台車

斜吊材の緊張作業では、緊張ジャッキを斜吊材の引込み反力をとる定着突起に、精度よくセットする必要がある。通常はチェンブロック等による人力でジャッキセットを行うが、本工事では質量約800kgの緊張ジャッキ(付属品含む)を急勾配かつ狭隘な箱桁内で安全、効率的に運搬・セットするため、3次元的にハンドリングが可能な新型機械を開発した。

5.1 構造概要

緊張ジャッキ運搬台車は、図-11に示すとおり、①スライド台車及び固定架台、②モノレール台車で構成される。スライド台車に固定された緊張ジャッキは、モノレール台車に搭載され、桁内橋軸方向を電動モノレールで運搬する。緊張箇所到達すると、予め設置した固定架台に、スライド台車を横引きして乗り移らせ、スライド台車の油圧操作

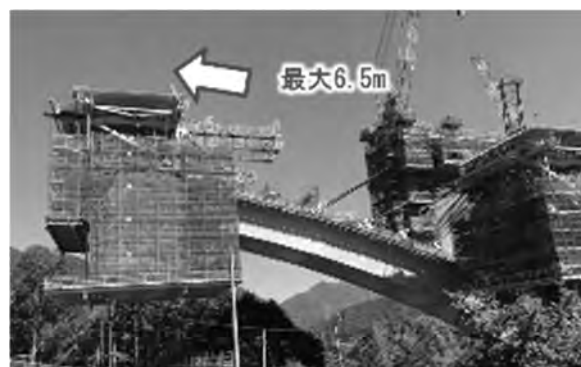


写真-6 移動作業車の移動状況

で定着突起にセットする。

モノレール動線の最狭部である横桁の遊間は、わずか800mmしかないため、モノレール及び台車の設計に苦慮した。以下に、各設備の詳細を示す。

(1) スライド台車及び固定架台

スライド台車及び固定架台は、動作ごとにモジュール化された5階建てのフレームで構成される(図-12)。各モジュールは、横引き→前後スライド→ピッチ回転→上下スライドの動作を担い、斜吊材の角度に容易に追従させることができる。横引きは人力で無理なく動作し、ピッチ回転と前後・上

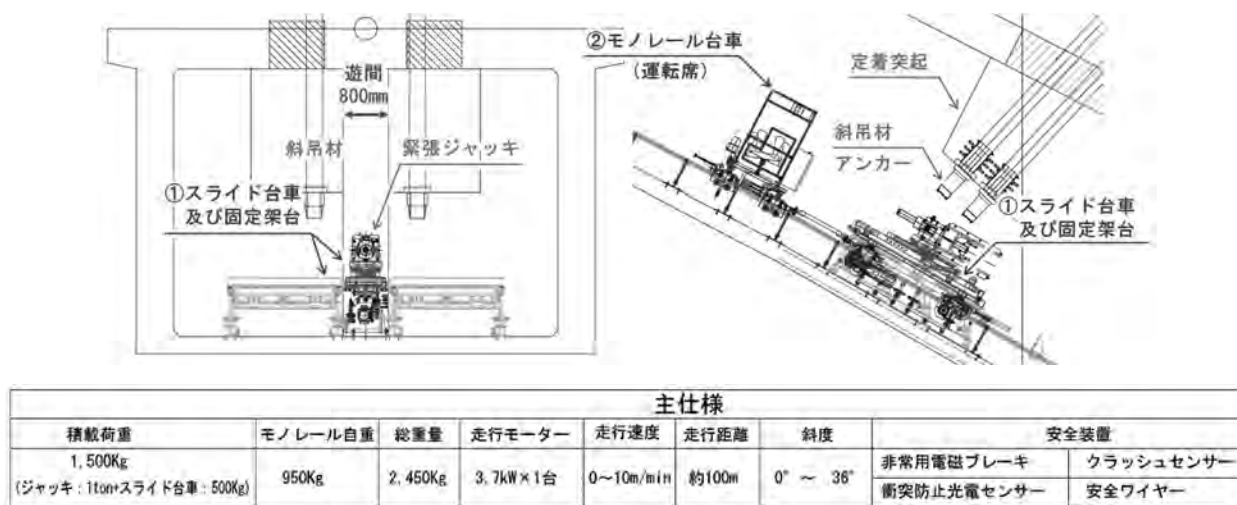


図-11 緊張ジャッキ運搬台車概要

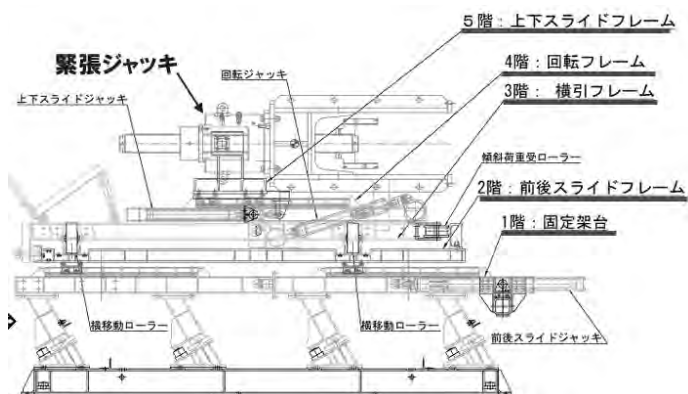
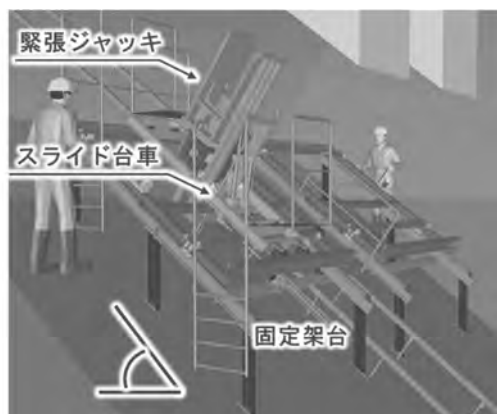


図-12 スライド台車及び固定架台のモジュール構成



写真-7 モノレール台車



写真-8 斜吊材緊張状況

表-4 緊張ジャッキ運搬台車導入による削減効果

項目	人力による従来工法 *	緊張ジャッキ運搬台車	削減効果
所要時間	3日	2日	▲30%
必要人工	8人	4人	▲50%

*過去類似条件の緊張作業による実績ベース(チェンブロックによる吊上げセット)

下のスライドには油圧シリンダを用いている。

(2) モノレール台車

モノレール台車(写真-7)は、桁内空間で運行するため、電動モノレールを採用した。レールに沿って配線したトロリー線から給電され、ラックピニオンとモータ駆動により、最大傾斜36°の桁内を走行する。往復運搬できるよう、運転席を回転させてバック走行も可能で、カメラとバックモニタで死角をカバーする。その他、安全面に配慮し、人、モノへの接触防止用光電センサや、駆動モータとは別系統の非常ブレーキを装備した。

5.2 斜吊材緊張実績

(1) 斜吊材緊張手順

斜吊材の緊張状況を写真-8に示す。手順は、①モノレール台車で緊張箇所へ到着、②スライド台車を固定架台位置まで横引き後、前後方向へスライドし、③回転フレームで斜吊材と緊張ジャッキを平行に合わせ、上下スライドで定着突起へ近づけ、緊張作業を行う。

(2) 斜吊材緊張実績

運搬・セット・緊張まで一連の作業における、緊張ジャッキ運搬台車を導入したことによる省力化の効果を表-4に示す。チェンブロック等を使用

して人力でジャッキを操作した過去の類似作業と比較して所要時間を30%、必要人工を50%削減できた。また、人力作業を削減したことにより、作業員が緊張ジャッキ周辺に立ち入る場面を減らすことができ、安全性も向上した。

6. まとめ

本稿では国内最大規模の鋼・コンクリートバランスドアーチ橋である河内川橋において、新規開発した超大型可変式アーチリブ移動作業車と緊張ジャッキ運搬台車の構造及び作業実績を報告した。アーチリブの構築は順調に推移しており、大ブロック化に伴うメリットを最大限に生かした移動作業車により施工の合理化を実現している。また、緊張ジャッキ運搬台車の導入により重量物を扱う人力作業を減らし、省力化と合わせて安全性の向上にも貢献した。本稿が今後の同種工事を行う際の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 山崎啓治ほか: 鋼・コンクリート複合バランスドアーチ橋の設計, プレストレストコンクリート, Vol.65, No.1, p.9~16, 2023.1

13. 模擬地盤供試体を用いた切削実験による シールドマシン用カッタビットの材種選定に関する研究

呉工業高等専門学校

大成建設株式会社

株式会社丸和技研

○森田 和也，重松 尚久

森田 泰司

佐々木 誠，中濱 和久，嘉屋 文康

1. はじめに

シールド工法に使用されるシールドマシンには、カッタビット（以後、ビットと呼ぶ）が前面部に配置されており、それが地盤を掘削している。現在、シールド工法は長距離掘削や転石・礫混じり地盤および岩盤層での施工例が増大しており、そのような施工環境下においては、施工中に地盤内の礫や転石との接触によって、ビット先端に付いている超硬チップ（以後、チップと呼ぶ）が破損し、掘削能力の低下を引き起こす¹⁾。シールド工法で主に用いられているチップの材種は、JIS M3916（2013 年廃止）の「鉋山工具用超硬チップ」の規格で、主に E5（HRA 86.0・抗折力 2.0GPa）と呼ばれる材種を使用している。しかし、このチップの規格は削岩機に使用するチップの規格であり、チップに作用する外力特性はシールドマシンのビットと大きく異なる。そのため、転石等によってチップに損傷が起こるメカニズムを解明し、新しいチップの規格を定めていく必要がある。

本来、チップの硬さによる耐摩耗性と破壊靱性は相反する関係にある。そこで、理想の材料として、掘削による摩耗量が少なく、チップに割れや欠けが起きづらいチップの材料選定を進めている。本研究では、超硬メーカーが規定しているチップの中から、硬さの値が異なる 5 つの材種を抽出し、各種実験を行ってきた^{2), 3), 4)}。今回の実験ではトンネル掘削時の地盤内の状況を再現した供試体をビットによって切削し、その際に各ビットに作用する垂直力・トルク・ひずみを測定し、欠損特性評価を行った。

2. シールドマシン用ビットの問題点

掘削中におけるビットの損傷には礫や転石との接触によるチップの欠損と、掘削によるビットの摩耗の 2 つがある。これらがビットの掘削能力の低下を引き起こし、工期の長期化や工事費用の増加につながる事が問題となっている。

写真-1 に礫層地盤・砂層地盤掘削後のビットの

例を示す。礫層での掘削では、地盤内の転石などに接触する回数が多く、チップの先が割れるようにして破損している。このように、チップに欠損が起きると掘削能力が大きく低下し、掘削不能となる。対して、砂層では礫層の掘削時と異なり、チップに大きな欠損は見られないが、チップの中央部と母材が摩耗し、削られている。これは、ビットが施工中に砂層での掘削を行ったことで、掘削した直後の砂がビット背面に接触し、すり減る背面摩耗と呼ばれる現象が起き、チップと母材が摩耗してこのような状態となった。このようなチップの欠損と摩耗はシールドマシンの掘削能力に大きく関与するため、欠損と摩耗の両方に強いチップが求められている。

3. 実験詳細

3.1 実験用ビット

表-1 に実験で用いた CASE ごとのチップの硬さを示す。硬さの値が大きい CASE ほどチップは硬く、



写真-1 地盤掘削後のビット例

表-1 実験用チップの硬さ

	硬さ（HRA）	備考
CASE1	91.5	
CASE2	90.0	
CASE3	88.0	E3
CASE4	86.5	E5
CASE5	83.0	

掘削中の耐摩耗性に優れる。しかし、衝撃に弱くチップに欠損が起きやすいと考えられている。実験用ビットは硬さの異なる5種類のチップを用いた。なお、CASE4がE5、CASE3がE3規格の材種である。実験数は各6個、そのうち2個ずつひずみ計測を実施した。図-1に実験で使用したビットの形状とひずみゲージ貼付位置を示す。SS400を用いた母材の先端にチップをろう付けしたビットを使用した。ビットの形状は高さ60mm、幅50mm、奥行き65mmであり、ビットに付けたチップの体積は24,293.7mm³である。また、切削実験中のビットとチップ表面の挙動を測定するために、1軸ひずみゲージを母材下面に1枚貼付し、2軸ひずみゲージをチップ前面に2枚貼付した。

3.2 実験装置と供試体

図-2に実験装置概要図を示す。実験装置の寸法は高さ1,750mm、幅700mm、奥行き700mmである。実験装置には直径400mm、厚さ10mmの鋼製円盤のターンテーブルと回転を行うためのモーター、垂直力とトルクを測定するロードセル（許容垂直力50kN、許容トルク2kN・m）と荷重を制御できる油圧シリンダが付いている。また、ビットとロードセルの間にはビット取付治具を設置し、ボルトによって固定した。

供試体は、全体の1/8の大きさの花崗岩を入れた型枠にモルタルを打設することで、礫を含む地盤内を切削するビットに近い状況を再現した。モルタルを同じ配合設計で2回に分けて打設し、4週間圧縮強度は49.1N/mm²と43.2N/mm²となった。また、花崗岩の圧縮強度は177.0N/mm²である。

3.3 実験方法

図-3に実験イメージ図を示す。実験では油圧シリンダによって荷重を25.0kNに設定し、ターンテーブルによって2rpmの速度で回転させた供試体にビット中心と供試体中心の距離が50mmとなる位置のモルタル上にビットを押し付けた。切削範囲はモルタル上から花崗岩へ乗り上げ、通過するまでとし、実験中に生じた垂直力・トルク・ひずみを測定した。また、今回の実験では、ビットの割れを再現するために花崗岩を供試体から取り外し、花崗岩の下に鉄板を入れてモルタルに対し5mmの段差を作った状態で切削を行った。

4. 結果と考察

4.1 各 CASE の欠損

表-2に各 CASE の欠損が起きたビットと起きていないビットの個数及び欠損の起きた確率を示す。最も硬いCASE1、そしてCASE3は実験によってチップに欠損が起きた回数が最も多く、欠損確率は80%を超えた。その他のCASEではCASE2、CASE4、CASE5の順に欠損が起こる確率が低くな

り、特にCASE5は欠損が起きづらかった。このことから、チップが軟らかいほど欠損の起こる確率は低くなる傾向にあると言える。

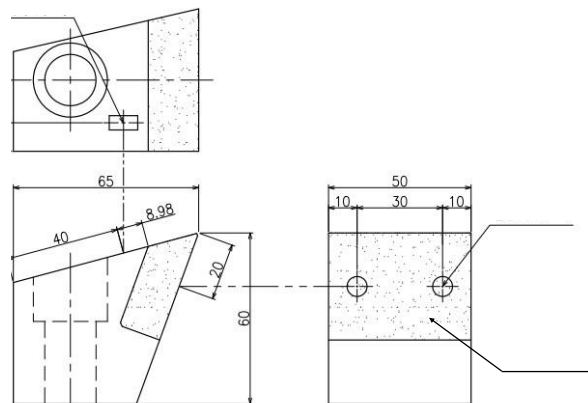


図-1 実験用ビット寸法とひずみゲージ貼付位置

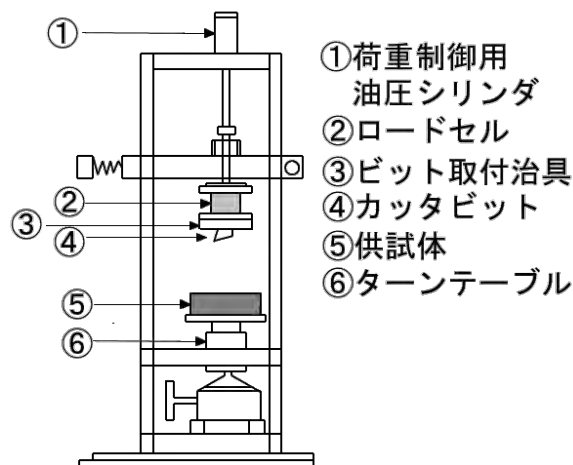


図-2 実験装置概要図

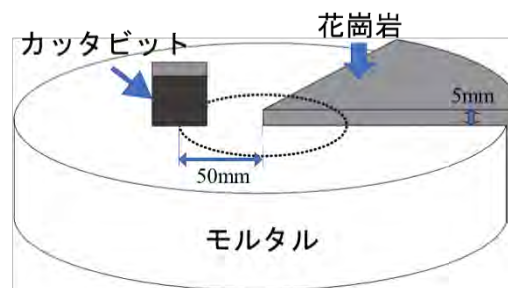


図-3 実験イメージ図

表-2 各 CASE の欠損確率

	欠損あり	欠損無し	欠損確率(%)
CASE1	5	1	83
CASE2	4	2	67
CASE3	5	1	83
CASE4	3	3	50
CASE5	1	5	17

表-3 にチップに起きた欠損が最大・最小となったビットを CASE ごとに示す。なお、CASE5 は 1 体しか欠損が起きなかったため、欠損が最大のもののみとなっている。欠損が小さかったチップを CASE ごとに比較すると、CASE1 はチップの割れが最も大きく、チップ右側（外側）が根元まで欠損し、その他の CASE ではチップ右上のみが小さく割れた。割れの大きかったチップを CASE ごとに比較すると、CASE1 のビットはチップ前面のほとんどが破損しており、他の CASE に比べてチップの欠損の度合いが激しいことが分かる。

図-4 に欠損体積率と硬さの関係を各 CASE の平均値で示す。なお、欠損体積率は欠損が起きたチップの体積と元のチップの体積との比とする。CASE1 は欠損体積率の平均値が約 50%であり、他の CASE に比べ 4 倍以上の大きさであった。また、チップ全体の 70%以上が欠けたビットもあった。CASE2, CASE3, CASE4 の欠損体積率は CASE1 と違い、どれも 10%前後であり、欠損体積率の差はあまり見られなかった。CASE5 は 1 個のビットしか欠損が起きていないが、その欠損体積率は他の CASE の平均値を下回った。

これらの結果より、最も硬い CASE1 は欠損が起きる確率が高く、欠損の度合いも激しくなる傾向にあり、対して最も軟らかい CASE5 は欠損が起きる確率が低く、欠損の度合いも小さい傾向にあることが分かる。また、CASE2, CASE3, CASE4 は欠損の起きる確率に多少の違いはあるが、欠損体積率はほぼ同等なため、硬さの違いによる欠損体積率の差は CASE2~CASE4 の間にほぼ無いと言える。

4.2 時間ごとの垂直力・トルク

一例として、図-5 に CASE2 における時間と垂直力の関係を欠損の有無で分けて示す。垂直力は実験装置によって制御しており、常に一定の荷重をかけているが、供試体上に作った段差によって切削中にロードセルにかかる負担が増減し、値が時間ごとに変化した。時間における垂直力の値は、どの CASE も欠損の有無に関わらず同様の変化を示した。まず、垂直力はビットを供試体へ押し付けた瞬間に大きく増加したが、その後のモルタル上での切削では 25kN 前後に収束した。ビットが花崗岩を切削し、花崗岩上に乗り上げると垂直力は急激に増加して実験中最大の値となり、その後の花崗岩上の切削中に生じた垂直力はモルタル上よりも大きいものとなった。ビットが花崗岩に乗り上げて垂直力が最大の値となった約 3 秒後に垂直力は急激に減少しているが、これはビットが花崗岩を通り過ぎてモルタル上に移った瞬間に計測された値であり、花崗岩とモルタルの間にある段差をビットが落ちる際にロードセルにかかる負荷が一時的に消えたため、垂直力は一時的に大きく減少

表-3 各 CASE の欠損の大きさの比較

	欠損最大	欠損最小
CASE1		
CASE2		
CASE3		
CASE4		
CASE5		

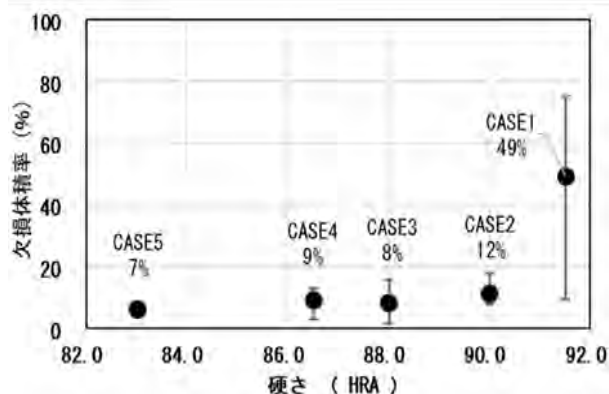


図-4 各 CASE の欠損体積率

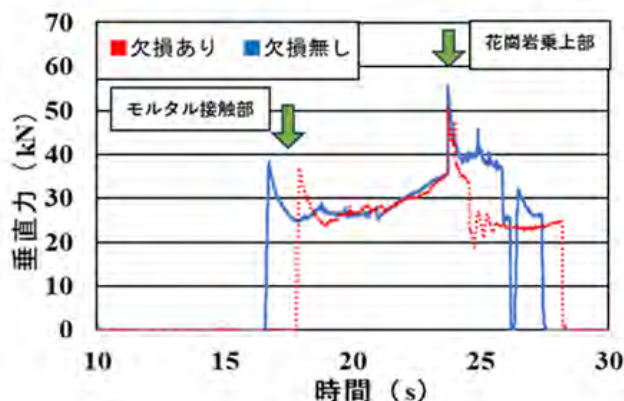


図-5 計測時間における垂直力値 (CASE2)

したと考えられる。すべての CASE でモルタル上での切削は垂直力が 25kN 前後に収束したため、実験装置によって全てのビットに同等の荷重で実験を行うことができていたと言える。

図-6 に CASE2 における時間とトルクの関係を示す。トルクは花崗岩に接触した瞬間から徐々に増加し、花崗岩切削時に最大となった。トルクも垂直力と同様に、時間による値の変化にビットの欠損の有無による差は見られず、供試体上でのビットによる切削量によって変化した。また、花崗岩上ではモルタル上よりもトルクの値が大きくなり、値の増減も激しくなる傾向があったが、これは花崗岩上に乗り上げ垂直力が増加したことによって、ビットによる花崗岩の切削量が増えたからだと考えられる。

4.3 各 CASE の最大トルク

図-7 に各 CASE の最大トルクとその平均値を示す。各 CASE の平均値を見ると、チップが軟らかくなるにつれて最大トルクは増加傾向にあった。また、CASE1 から CASE3 においては、最大トルクが $2500\text{N} \cdot \text{m}$ を超えると必ず欠損が起きたが、チップの靱性が大きい CASE4 と CASE5 は最大トルクが $2500\text{N} \cdot \text{m}$ を超えても欠損が起きていないものが存在した。このことから、チップが軟らかいほどトルクによる負荷に耐えることができると考えられる。

4.4 チップに生じたひずみ

図-8 に花崗岩切削時のチップ内側・外側における鉛直方向のひずみの増加率を示す。花崗岩切削時にひずみは増加し、その増加率は欠損が起きたチップ外側が大きくなる傾向にあったため、チップの欠損はひずみの急激な増加によって起きたと考えられる。また、他の CASE と違い、チップ前面が大きく欠損した CASE1 は、内側のひずみの値も大きく増加した。このことから、増加率が 200% を超えると欠損が生じる可能性が高くなる傾向にあると言える。

5. まとめ

- 1) チップが軟らかいほど、欠損の起こる確率は低くなる傾向にある。
- 2) CASE1 は欠損が起きた場合の欠損体積率が他の CASE よりも 4 倍以上大きく、CASE5 は最も小さくなった。しかし、CASE2 から CASE4 に欠損体積率の違いがあまり見られなかった。
- 3) 軟らかいチップほど大きいトルクに耐えられる傾向にある
- 4) ひずみの急増がチップの割れを引き起こした。

また、今回は実験数が各 6 個であったため、今後追加実験を行い実験結果の精度を向上させる必要がある。

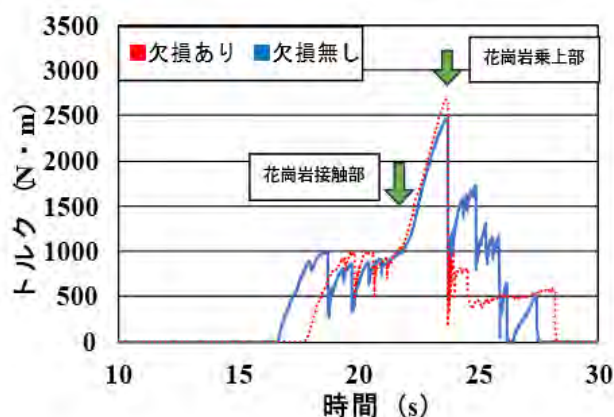


図-6 計測時間におけるトルク値 (CASE2)

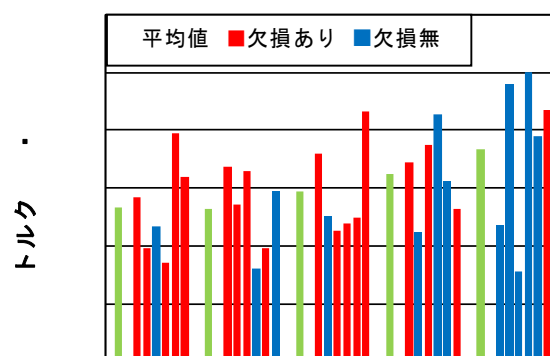


図-7 CASE ごとの最大トルク

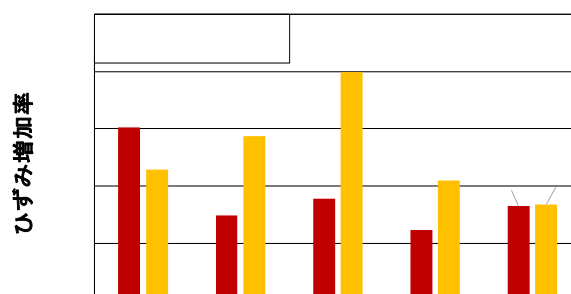


図-8 ひずみの増加率

参考文献

- 1) 佐々木誠, 嘉屋文康, 森田泰司: シールドマシン用ビットの最適超硬チップ選定の検討, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, VI-379, 2021.
- 2) 森田泰司, 佐々木誠, 嘉屋文康: 実工事で使用した多層チップの効果の検証, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, VI-988, 2020.
- 3) 森田泰司, 佐々木誠, 嘉屋文康, 磯部 将吾: 切削実験によるシールドマシン用ビットの最適超硬チップ選定の検討, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, VI-754, 2022.
- 4) 森田和也, 重松尚久, 佐々木誠, 嘉屋文康, 森田泰司: シールドマシン用カットビットの摩耗特性評価に関する研究, 第 35 回日本道路会議, 6013, 2023.

14. 鉄骨プラズマ切断装置を用いた環境配慮型超高層建物解体工法

清水建設株式会社
清水建設株式会社
清水建設株式会社

○ 谷 卓
西村 淳
佐藤 良史

1. はじめに

近年、高度成長期後半から建造された超高層建物が更新期を迎えており、超高層建物を解体する事例が増えている。建物の解体方法は図-1 に示す建物の最上階に解体重機を乗せて解体する階上解体工法と、図-2 に示すブロック状に切断した躯体をタワークレーンで吊り降ろすブロック解体工法に大別される。階上解体工法は解体材の飛来・落下リスクや、荷降ろしが煩雑になるなどの課題があるため、超高層建物の解体工事ではブロック解体工法が主に採用される。超高層建物のブロック解体工事では、柱や梁の鉄骨切断量が多く、図-3 や図-4 に示す鉄骨のガス切断作業に時間を要することから、工事の長期化やコストの増加が課題であった。ガス切断工の逼迫もこの課題をより大きくしている。また、ガス切断は切断用ガスボンベを大量に使用し、輸送や搬出入の作業が発生することも課題であった。更に、切断ガスボンベの輸送でCO₂を排出するだけでなく、アセチレンやプロパンといった切断ガスの燃焼によってCO₂を排出することも課題であった。この課題解決に対し、鉄骨をプラズマ切断する方法が挙げられ、鉄骨切断の高速化やCO₂排出量削減といったメリットがあり¹⁾、ブロック解体工法の効率化や環境負荷低減が期待できる。一方でプラズマ切断は、切断状況に合わせた切断速度の調整や、切断トーチと切断部材との距離を一定に保つことが必要であることから、人による切断作業では扱いづらいことが課題となっている²⁾。そのため人による作業割合が高い建設現場では使用される事例が少ない。既往の文献において、ブロック解体工法の適用事例が報告されているが³⁾⁴⁾、プラズマ切断による鉄骨切断の報告はない。

本報では、超高層建物の解体工事の効率化に向け、人による作業の割合が高い建設現場で使用しやすい鉄骨プラズマ切断方法について検討し、従来のブロック解体工法に対する生産性向上と環境負荷低減の効果を検証した。



図-1 階上解体工法



図-2 ブロック解体工法

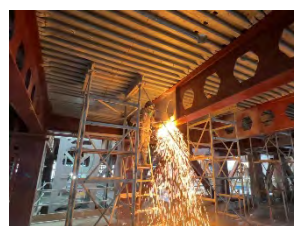


図-3 梁のガス切断



図-4 柱のガス切断

2. 鉄骨プラズマ切断方法の検討

2.1 切断条件と切断方法の検討

プラズマ切断をブロック解体工事に適用する上で、人による切断作業では扱いづらい特徴を鑑みて、切断作業を自動化した装置として適用する方法を採用した。機械装置をブロック解体に適用するには、他の作業との混在によって作業効率が低下することが予想されたので、占用の作業階で切断装置を使用するものとした。この作業階は、躯体ブロックを吊り取る最上階は作業が混在するため、下層階への設定を想定した。そのためこの鉄骨先行切断では、作業階より上階の荷重を支えられるだけ鉄骨を切り残すようにした。

2.2 梁鉄骨の切断装置の検討

上記条件を満たす梁鉄骨の切断装置として、図-5 に示す切断ユニットを考案し、図-6 に示す装置を設計製作して切断実験を実施した。機器構成を図-7 に示す。装置は切断ユニットと制御ユニットで構成し、切断ユニットは固定部と切断部から構成した。切断ユニットはフォークリフトによるハ

ンドリングが可能で、固定部に設置した空気式クランプによって梁鉄骨の下フランジに固定できる。切断部は1次元のレーザ距離センサによって梁鉄骨の位置を認識し、3つのモータ駆動軸によってプラズマ切断トーチを動作させ、下フランジとウェブを切断する。切断トーチは鉄骨との距離を一定に保つ必要があるため、トーチ部にガイドローラとバネ等の押し付け機構を搭載し、鉄骨から一定の距離を保ってトーチを動作させた。切断トーチの動作は切断する梁鉄骨の形状によって変化させる必要があるため、鉄骨の形状毎に位置や速度の動作パラメータを設定した。パラメータは代表的な梁鉄骨の形状で実験を行い、近似することで決定した。固定部と切断部は回転可能に結合し、梁鉄骨の切断角度が手動で変更できる。制御ユニットには、制御装置、プラズマ切断機、プラズマ切断用のエアコンプレッサを配置している。駆動部の制御は制御装置によって行い、制御装置にWi-Fiによって無線接続されたタブレット端末から操作できる。プラズマ切断機はPanasonic製YP080PF3、コンプレッサはアネスト岩田製TFP22CF-10を採用した。

2.3 柱鉄骨の切断装置の検討

鉄骨プラズマ切断装置は、切断ユニットを柱切断架台に接続することで、柱の先行切断も可能とした。柱切断時の切断ユニットを図-8に、実際に製作した装置を図-9に示す。切断ユニットの切断部を手動で直角に傾け、1台の柱切断架台に2台の切断ユニットを接続すると、切断トーチを柱全周に移動できる。柱切断架台もフォークリフトによるハンドリングが可能で、柱に設置して切断を行う。切断動作は、梁と同様に1次元のレーザセンサによって柱鉄骨の位置を認識し、3つのモータ駆動軸によってプラズマ切断トーチを動作させ、ガイドローラとバネ等の押し付け機構によって鉄骨から一定の距離を保ってトーチを動作させることで、鉄骨柱角部をL字型に切断する。鉄骨の形状毎に位置や速度の動作パラメータを持つことや、制御ユニットに無線接続されたタブレット端末か

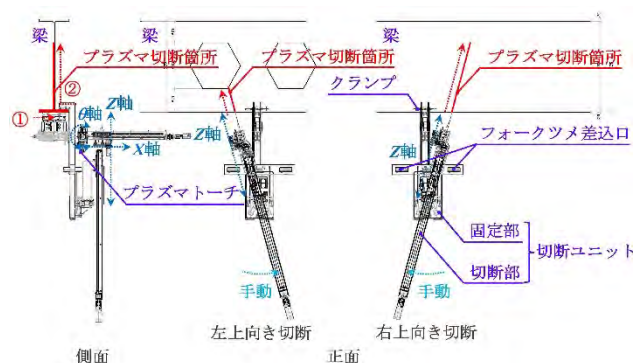


図-5 プラズマ切断装置の切断ユニット概略図(梁切断)



図-6 プラズマ切断装置の切断実験(梁切断)

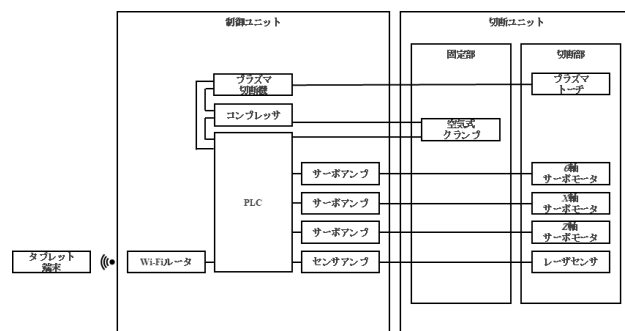


図-7 機器構成

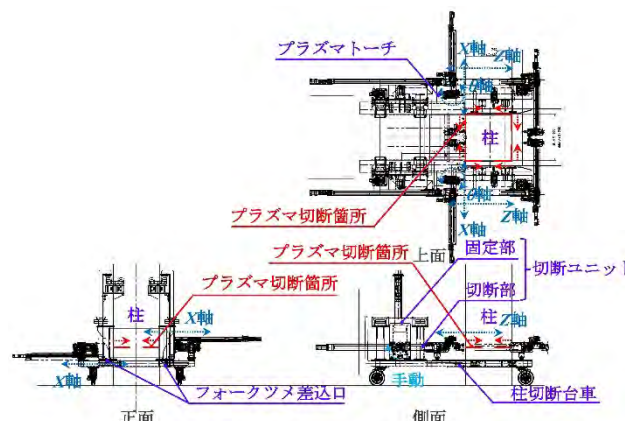


図-8 プラズマ切断装置の切断ユニット概略図(柱切断)



図-9 プラズマ切断装置の切断実験(柱切断)

ら操作することも梁切断と同様である。各動作パラメータも梁と同様に代表実験とその近似によって決定した。

3. 現場適用

3.1 現場適用の目的と概要

鉄骨プラズマ切断装置の効果を検証するため、高さ 142.2m の超高層建物の解体現場に適用した。適用した建物の概要を表 1 の通りである。本建物は都市部の人口密集地域にあり、大型幹線道路に面することから、周辺環境への配慮と安全性の向上を図る必要があった。

そこで、ブロック解体工法を採用し、鉄骨プラズマ切断装置を使用することで、その生産性向上と環境負荷低減の効果を検証した。各階の作業内容を図-10 に示す。切断した躯体ブロックを吊り取る最上階を N 階とする。N-6 階以下で、躯体切断位置の墨出しを墨出しロボットによって行った。N-5 階は鉄骨プラズマ切断装置を適用し、柱や梁の鉄骨先行切断を行った。前述の通り、他の作業と混在しないことで作業を効率化させた。切断位置の確認はタブレット端末を用いて AR で実施した。N-4 階では切断した躯体を支える支保工を設置した。N-3 階では外装のガラスとアルミカーテンウォールの取り外しを行った。N-2 階はロードカッターで床の切断を行った。またこの階には盛替可能な外周養生の架台を設置した。N-1 階は鉄骨の切り残しをガス切断し、N 階で躯体ブロックをタワークレーンで吊り取った。500t・m タワークレーンを 2 機設置し、20t 弱の大型躯体ブロックの揚重を可能にした。

3.2 現場適用効果

プラズマ切断装置は、フォークリフトによるハンドリングを考慮して、設置しにくい部材を除く 31 階から 3 階の梁 1,789 箇所、柱 338 箇所に適用した。切断装置の適用状況を図-11 と図-12 に示す。適用実績より、プラズマ切断装置による切断は、ガス切断に比べて約 30% 高速であることが分かった。また、ガス切断する場合に使用予定だった 50kg プロパンボンベを 23 本、40L 酸素ボンベを 869 本削減した。ガスボンベの削減は、その搬出入作業や盛替作業を削減するため、作業の歩掛り向上にも寄与した。さらに、タブレット端末を用いた AR で切断位置を可視化して作業指示を行い、ペーパーレスで作業を完了した。AR による作業指示も、切断位置の確認が効率化されるため、歩掛り向上に寄与した。AR による切断箇所可視化状況を図-13 に示す。これらの効果を合算した結果として、各階のプラズマ切断に掛かった作業人工を図-14 に、同じ切断箇所をガス切断した場合に掛かる各階の作業人工を図-15 に示す。これはガスボンベの搬出入作

表-1 解体建物の概要

竣工時期	1981年1月(解体着工時築41年)
用途	事務所、店舗、ホール、駐車場
最高高さ	142.2m
階数	地上32階、地下4階、塔屋2階
構造	地上S造、地下SRC造
延床面積	134,974㎡

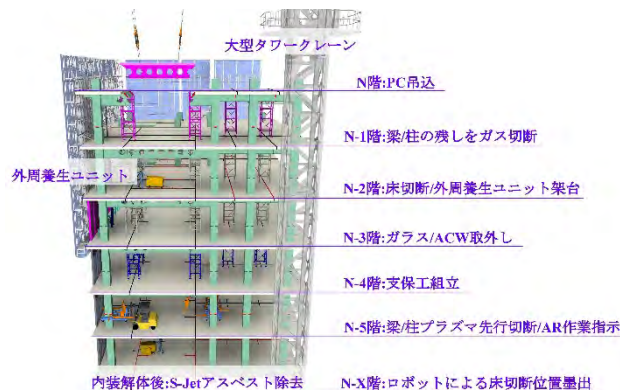


図-10 各階の解体作業

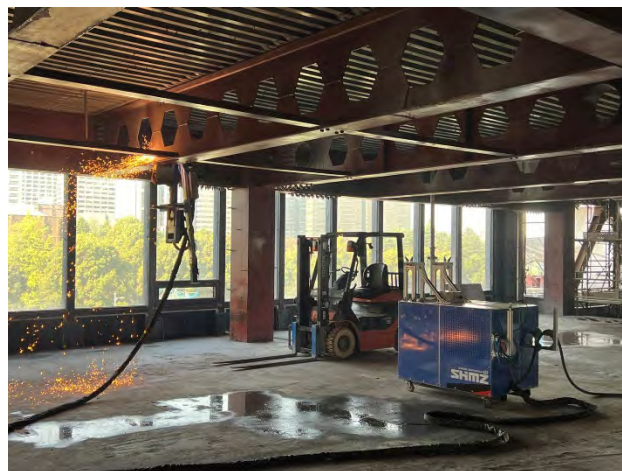


図-11 プラズマ切断装置の現場適用(梁切断)

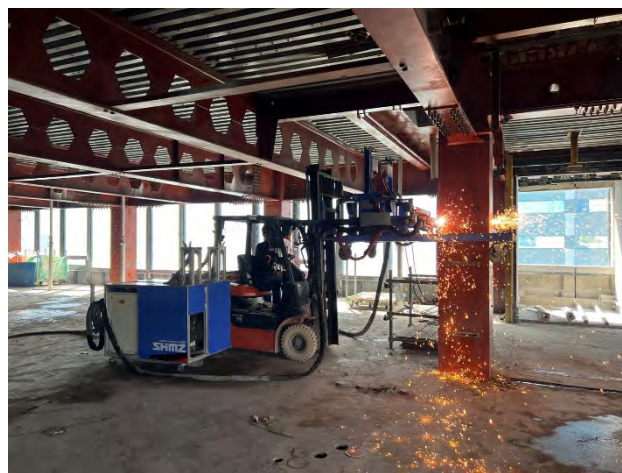


図-12 プラズマ切断装置の現場適用(柱切断)

業や盛替作業も含んでいる。プラズマ切断箇所をガス切断した場合に掛かった作業人工とプラズマ切断に掛かった作業人工の差から、図-16 に示すとおり、プラズマ切断による省人化効果を算出し、329 人工分のガス切断作業を 105 人工でプラズマ切断して省人化率は 68%であった。更に、ガス切断工の逼迫もあり、切断作業の高速化と省人化によって、21 日の工程短縮も実現した。これらの生産性向上効果と工程短縮効果をコスト換算し、プラズマ切断装置製造コストを差し引いた結果、対象工事において約 30%のコスト削減効果があることを確認した。

CO₂ 排出量は、炭酸ガス燃焼削減によって 3.6t、ガスボンベの搬出入作業削減によって1.9t 減少し、プラズマ切断の電気使用によって 1.4t 増加した。合わせて 4.1t 削減となり、削減率は約 75%であった。

4. おわりに

超高層建物解体工事の効率化と環境負荷低減に向け、人による作業の割合が高い建設現場で使用しやすい鉄骨プラズマ切断方法を確立することを目的として、建設現場の鉄骨先行切断専用装置を開発し、その仕様を示した。本装置を超高層建物解体工事に適用し、鉄骨プラズマ切断装置を用いたブロック解体工法の有用性を確認し、従来のブロック解体工法に対する生産性向上と環境負荷低減の効果を検証した。

参考文献

- 1) 古城昭・神田晋ほか：造船の最新切断技術動向，溶接学会誌，86巻2号，pp. 85～89，2017年
- 2) 古城昭：プラズマ切断技術の最近の動向，溶接学会誌，66巻7号，pp. 519～523，1997年
- 3) 建築コスト管理システム研究所 新技術調査検討会：高層ビル解体工法について，建築コスト研究，Vol. 77. No. 4，pp. 46～54，2012年
- 4) 奥山信博：シミズ・リバー・コンストラクション工法，建設機械，578. Vol. 49. No. 4，pp. 27～33，2013年



図-13 タブレット端末のARによる鉄骨先行切断位置の可視化

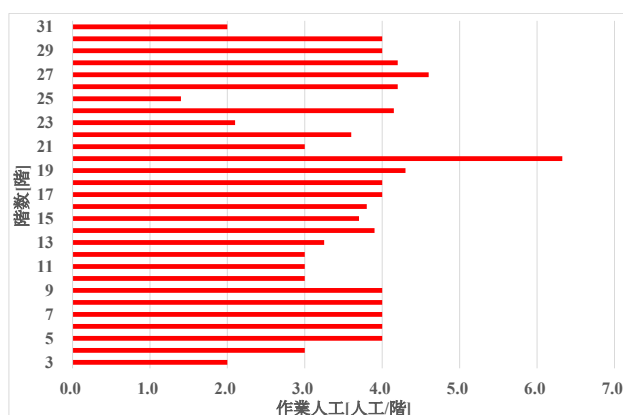


図-14 プラズマ切断の作業人工

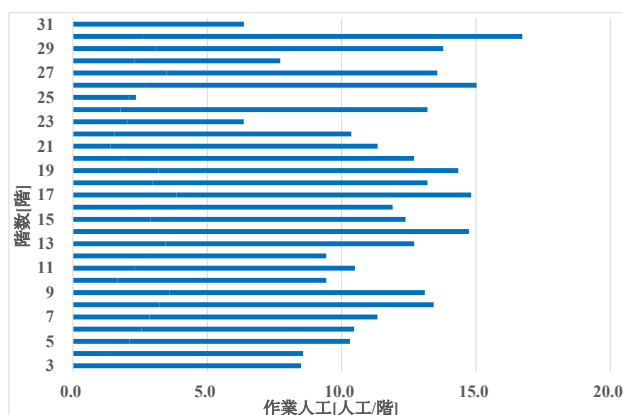


図-15 プラズマ切断箇所をガス切断した場合の作業人工

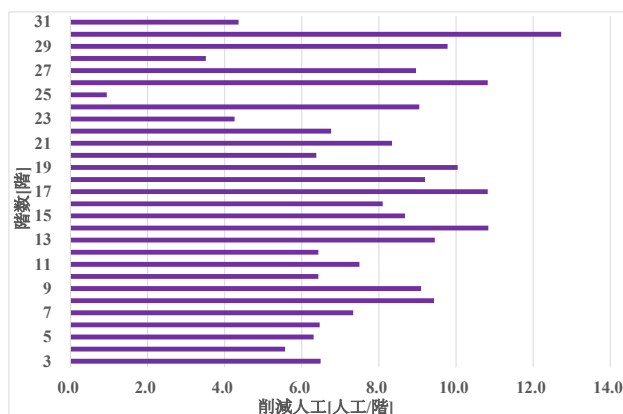


図-16 プラズマ切断による省人化効果

15. 施工のオートメーション化に向けた取り組み

～建設機械施工の自動化・遠隔化技術の普及に向けて～

国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）グループ施工企画室 ○ 大野 慎也
中根 亨

1. はじめに

国土交通省では、2016年に建設現場の生産性向上の取り組みとして、ICT施工や、設計・施工におけるデジタル技術の積極的活用など、¹⁾i-Constructionを進めてきた。2024年には²⁾i-Construction2.0を掲げ、より少ない人数で、生産性の高い建設現場を実現するべく、取組を一層推進していくこととしている。（図-1）i-Construction2.0の取組では、i-Constructionの取組を深化させ、「施工のオートメーション化」「データ連携のオートメーション化」「施工管理のオートメーション化」の3つを柱としている。中でも「施工のオートメーション化」では、一人当たりの生産能力を向上するため、各種センサにより現場の情報を取得し、AIなどを活用して自動的に作成された施工計画に基づき、一人のオペレータが複数の建設機械の動作を管理することを目指している。「施工のオートメーション化」を推進するための最もコアな技術の一つとして、建設機械施工の自動化・遠隔化技術が期待されている。この技術により、人が搭乗していない建設機械があらかじめ最適化された施工計画に基づき自動的・自律的に稼働することで、より安全に、少ない人数で工事を進めることが可能となる。

建設機械施工の自動化技術の現状として、自動化施工の実施者が各々で検討したルールに基づいて実施している。これらの新しい技術に対しては、安全や開発面での統一的な基準がなく、分野横断的に検討すべき項目が多く存在するが、そのような議論は従来ほとんど行われておらず、現場導入に向けた環境も求められている。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、関係する業界、行政機関及び有識者の参画のもと、議論を進めてきた。（図-2）本稿では、協議会における自動施工の安全ルールの策定に加え、国土交通省における建設機械施工の自動化・遠隔化技術の普及についてこれまでの経過と今後の展望を述べる。



図-1 i-Construction2.0の全体像



図-3 建設機械施工の自動化・自律化協議会の体制

2. 自動施工における安全ルールの策定

自動施工の現場適用においては、現場毎にゼロから安全対策を検討する必要が生じており、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ため、関係者との調整に時間を要する他、現場毎に安全対策の水準にばらつきが生じたりする等の課題がある。また、有人の施工現場を前提とした既存のルールを自動・遠隔施工の現場にそのまま

準用すると、過剰な安全対策を講じなければならなくなる懸念がある。

上記を踏まえ、自動・遠隔施工の普及促進を図るためには、この特徴に即した標準的な安全ルールを策定することが必要である。

安全ルールは、「自動・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ものとしている。

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ことから、条件の異なる現場においても共通的に講じるべき安全対策を示す性質のものとして策定した。策定にあたっては、標準的な安全ルールや現場適用に向けた効果と課題を検証するための現場検証を実施した。

検証技術は、自動・遠隔施工に必要となる機能や性能を追加装備する技術を対象としており、既存の各種センサ類の組合せに加え、専用ソフトや制御システム等、多種多様な要素技術を含む（例：安全技術、動作・操作関連技術、周辺環境認知技術、通信技術等）。（図-3）



図-3 自動施工における安全ルール Ver.1.0

2.1 エリア分けについて

安全ルールでは、自動施工を行う区域を「エリア」とし、人や立ち入り制限を目的に「エリア」を次の3つの区域で構成されることとした。

「無人エリア」：自動施工を行うため、原則として作業員、建設機械オペレータ、有人建設機械などが立ち入らないエリア

「立入制限エリア」：自動建設機械が予期しない動作を行った場合においても、自動建設機械がその範囲を逸脱せず、原則として人が立ち入らないエリア

「有人エリア」：人が搭乗した建設機械が施工を行い、原則として自動建設機械及び遠隔建設機械が立ち入らない

有人ダンプトラックによる土砂の積み下ろしなど、有人建設機械が一時的に立ち入ることを考慮し、有人エリア、立入制限エリア、無人エリアの境界に「中継区域」を設定する。本区域は、建設機械に登場しない作業員は立ち入らないものとし、また、オペレータは有人建設機械から降車しないものとする。

2.2 その他の安全ルール

必要な保護方策の内容や担い手が従来の有人施工と異なることから、自動・遠隔施工の担当者を「製造者等」・「販売者等」・「施工者等」・「使用者等」と定義し、それぞれがどのような保護方策を担うかを整理している。

そして、自動・遠隔施工における安全方策を、自動施工中の安全を確保するための安全方策（「自動施工における安全方策」）と使用する自動建設機械や設備に求める安全方策（「自動建設機械や設備に求める安全方策に必要な機能」）に分け示した。

「自動施工における安全方策」：施工者等は、「無人エリア」「有人エリア」「立入制限エリア」を必要に応じて設定しなければならないとし、各エリア内の安全管理と運用について示している。

「自動建設機械や設備に求める安全方策に必要な機能」：主に自動施工実施者が、自動施工の実施にあたり、使用する自動建設機械や設備に求める安全方策に必要な機能を示している。

主に、非常停止システム・自動停止などのイレギュラーな事態が発生した場合に停止する機能を自動施工実施者は具備することとし、その他、表示灯等で示す情報の具備や人・障害物検知機能の仕様、無線通信網についても整理した。

2.3 「安全ルール」の改良と、「機能要件」の策定

技術の発展に伴い安全ルールが陳腐化することを防ぐため、安全ルール策定後も安全・基本設定WGにてフォローアップを継続していく。そのため、実際に適用している施工現場の調査・ヒアリング等を行い、そこで得られた知見に基づき、安全ルールの改定や対象の拡大を図っていく。

安全ルールでは、「自動建設機械や設備に求める安全方策に必要な機能」として、自動施工の実施にあたり、使用する自動建設機械や設備に求める安全方策に必要な機能を示している。これらの機能を基準値的に詳細に既定するのが望ましいかの調査・検討を含め、自動施工における機能要件のあり方を議論していく。（図-4）

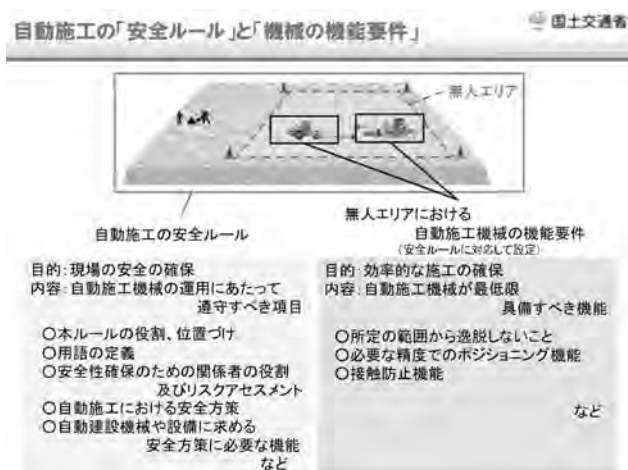


図-4 自動施工の「安全ルール」と「機械の機能要件」

2.4 自動化・遠隔化技術の現場検証の実施方針

令和6年度は、安全ルールの妥当性の確認と先述の自動施工における機能要件策定についての検討材料とするため「建設機械施工の自動化・遠隔化技術の現場検証」を実施する。

検証の流れは下記のとおり規定している。

- ①検証の参加者は、事前に具体的な実施内容を記載した検証計画書を作成。
- ②建設DX実験フィールド、参加者保有のヤード、施工中の現場等で検証を実施。
- ③検証結果を報告書として参加者がとりまとめ、WGに共有。
- ④解決が必要な課題についてはWGの知見を活用し、議論を通じて安全ルールの形成。
- ⑤次のステップに進み、検証と解決をスパイラルアップ。

3. 自動施工コーディネーターの育成

自動化技術は、技術開発の途上にあり、中小建設業者には技術そのものや導入のノウハウが無いことから、国内外を含め実現場への適用事例はごく限られている。一方、国内外の建設機械メーカ、大手建設企業だけでなく、スタートアップを含むソフトウェアベンダーなど建設分野以外の企業が参入するなど、新たな市場が形成され始めている。

通常の施工では、施工に際して施工計画や資機材手配などの調整・調達・監督・運用を工程に沿ってそれぞれの専門性を持った関係者と調整しながら工事を進めることが一般的である。一方、自動施工の導入においても基本的な工事の進め方は同様であるが、自動施工においては自動化建機や自動化システムに精通した専門家との調整も自動化施工においては重要となる。これらの自動化技術について熟知し、さらに施工についても知識のある人材は限られているのが現状である。自動化技術の市場が形成されつつある現状において、自動化

技術およびその専門家と工事現場の橋渡し役を担い、自動化技術による施工現場の生産性向上のキーマンとなる人材を「自動施工コーディネーター」とし、育成していく。(図-5)



図-5 自動施工コーディネーターの育成

3.1 育成プログラムの検討

施工・自動建設機械・システム・通信設備等の知識・情報を持ち、各関係者との調整を担うことが可能な人材を「自動施工コーディネーター」として育成し、これまで自動施工の導入に踏み切れなかった中小の建設企業への普及促進を図る。

具体的には、自動施工に必要な知識・技能を技術の最新動向を踏まえながら網羅的に調査・整理するとともに、関係企業が社内で人材育成を可能とするための講習等に使用する人材育成プログラムを作成する。

3.2 自動施工導入シミュレータの開発の検討

自動施工の導入にあたっては、初期コストやシステム等の運用コスト等の一時的な負担増が避けられない一方、施工の効率化や現場の省人化等の効果があるため、トータルで導入の可否を判断することが必要であるが、自社で技術や機材を所有していない中小建設会社にとってはハードルが高い。

自動施工を導入した場合のコストや効果を試算可能な「自動施工導入シミュレータ」を開発し施工業者に提供することにより、これまで自動施工の導入に踏み切れなかった中小の建設企業への普及促進を図る。

3.3 自動施工導入データベースの構築の検討

自動施工の普及に向けた自動施工コーディネーターの育成や自動施工導入シミュレータの開発にあたっては、自動建設機械やその管理・運用システム、また自動施工を含む施工履歴データ等の情報を集積・蓄積し、利用可能な環境が必要である。

施工・自動建設機械・システム・通信設備等の情報を一元的に集約し、施工者や開発者等、誰もが容易に情報を取得可能なデータベースを構築する。

4. 遠隔施工の取組

遠隔施工においては、i-Construction2.0 の中の「施工のオートメーション化」において、短期的には「砂防現場における活用拡大」をビジョンとして示している。これまで遠隔施工技術は災害現場等の二次災害のリスクが懸念される現場にて導入が進められてきており、災害現場での使用や、一部の工事現場において個別かつ試験的な導入にとどまっている。遠隔化技術は、安全で快適な場所からの建設機械の操作を可能にすることから、女性や高齢者でも働きやすい環境の整備が期待されている。この遠隔施工技術を一般建設現場における実装を推進していく。基準類の策定や砂防現場における試行等を実施していく。

5. 今後の自動施工の進め方

自動施工においては、i-Construction2.0 の中の「施工のオートメーション化」において大規模現場での自動施工の実現を目指し、短期的には「安全ルール、施工管理要領等の技術基準類の策定」や「ダム施工現場等での導入拡大」をビジョンとして示している。自動施工技術の普及については、自社開発等により先進的な取組を実施し現場での導入の拡大を目指す「リーダー」と技術面や開発資金面に課題があるが、自動施工に関心があり現場に導入したいと考えている「フォロワー」の対応を検討している。「リーダー」向けでは、現状自動施工における統一的な基準等がないことから各施工者は手探り状態で現場での施工を進めている。安全ルールや技術基準を整備し自動化技術を積極的に導入する施工者の後押しをする。また「フォロワー」向けでは、自動施工機器の普及によって、自動化技術を現場に導入しやすくする。これらの機器については市場が形成されつつあるが、これをさらに加速させるために建設機械の制御信号を共通化し、これら機器の開発ハードルを下げ、機器の市場導入が活性化されることを期待している。

6. おわりに

本稿では、自動化施工の安全ルールの策定、自動施工を担う人材育成、遠隔施工における取組について紹介した。自動化・遠隔化技術の普及は、生産年齢人口減少下においても将来にわたって社会資本の整備・維持管理を持続するために必要な施工能力の確保に不可欠である。これらの技術は建設業における諸問題を自動化・遠隔化技術によって解決を目指し、先進的な取組を行う技術者により「試行」段階から「実現場適用」への移行段階にある。これを建設生産プロセスの変革期と捉え、自動施工における社会実装と技術開発を推進していく。今後も、i-Construction2.0 が目指す目標で

ある 2040 年までに、建設現場の省人化の省人化 3 割、すなわち生産性 1.5 倍向上を目指して、自動化・遠隔化技術の普及を進めていく。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction～建設現場の生産性革命～2016.
<https://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>
- 2) 国土交通省：i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～2024.
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>

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及び先端建設技術センターに業務委託して行った。

16. ICT 施工 stage II

ICT 施工 stage II の取組について

国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）

グループ施工企画室

○ 櫻木 翔平

1. はじめに

人口減少社会を迎え、担い手不足が深刻化している中で、2016 年 9 月に開催された未来投資会議において建設現場の生産性を 2025 年度までに 2 割向上することを目指して国土交通省では i-Construction の取組を開始した。取組を進めるにあたり 3 つの施策をトップランナー施策として推進することとした。具体的には、「1. 建設現場における調査・測量、設計、施工、検査等の建設生産プロセスにおいて ICT を活用」「2. 一連の生産工程や維持管理を含めたプロセスの全体の最適化が図れるよう、全体最適の考え方を導入し、サプライチェーンの効率化を目指す」「3. 年度末に集中する工事量を平準化する」という、建設現場の生産性向上を目的としたトップランナー施策である。

i-Construction の取組以降、3 次元データや ICT 建設機械の活用などデジタル技術の活用が一般化した。i-Construction の取組を加速させ、一人あたりの労働生産性を高め、抜本的な省人化対策を進めていくよう、i-Construction 委員会の提言に掲げられた「建設現場を最先端の工場へ」、「建設現場へ最先端のサプライチェーンマネジメントを導入」及び「建設現場の 2 つの「キセイ」の打破と継続的な「カイゼン」」の視点を踏まえ、「施工のオートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」を 3 本の柱とし、少ない人数で、安全に、快適な環境で働く生産性の高い建設現場の実現を目指す。

本文では、i-Construction のトップランナー施策の一つ ICT 施工から、次の段階の ICT 施工 stage II への取組に着目し報告する。

2. ICT 施工の取組について

i-Construction のトップランナー施策の一つ ICT 施工は、起工測量から設計データ作成、施工、出来形管理、納品に至る 5 つのプロセスで 3 次元データを活用し施工を行う取組になる。UAV を活用し現場の測量を行い、発注図面から作成した 3 次元設計データと重ね合わせることで、土量などの施工数量を算出するとともに、設計データを建設機械の取り込み、作業装置を自動または半自動的に動かすマシンコントロールや、ナビゲーション

的に作業装置を誘導するマシンガイダンスといった ICT 建設機械を活用することで、作業の目印となる丁張りをかける必要もなく、水糸を張り手元作業員が確認していた作業も必要なくなり、施工の効率化と併せて作業人員の削減を図ることができた。

直轄土木工事の ICT 施工の実施率は年々増加してきており、2023 年度は公告件数の 87% で実施している。都道府県・政令市における ICT 土工の公告件数・実施件数ともに増加している結果が得られた（表-1）。

表-1 土木工事における ICT 施工の実施状況

＜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）	2022年度 （令和4年度）	2023年度 （令和5年度）	公告 件数	5次元CT 件数	公告 件数	5次元CT 件数	公告 件数	公告 件数	5次元CT 件数
土工	1,922	2,884	1,982	615	1,675	960	2,246	1,799	2,420	1,934	2,312	1,932	2,072	1,790	1,929
舗装工	—	—	201	79	203	80	340	333	343	342	384	349	357	226	402
道路土工（掘削）	—	—	28	24	82	57	63	87	84	83	74	72	56	50	80
道路土工（埋戻）	—	—	—	—	8	9	39	34	26	29	42	41	23	22	23
地盤改良工	—	—	—	—	—	—	32	9	151	733	186	162	206	110	226
合計	1,922	2,884	2,175	612	1,967	1,104	2,357	1,880	2,942	2,398	2,754	2,318	2,584	2,209	2,614
実施率	38%	42%	42%	79%	81%	84%	87%	87%							

＜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）	2022年度 （令和4年度）	2023年度 （令和5年度）	公告 件数	5次元CT 件数	公告 件数	5次元CT 件数	公告 件数	公告 件数	5次元CT 件数
土工	84	875	981	2,428	2,875	1,126	2,811	1,624	11,841	2,454	13,425	2,022	14,132	2,332	2,332
実施率	33%	32%	32%	39%	31%	21%	21%	21%							

また、国発注の土木工事における、労務費の割合を調査した結果が、円グラフ（図-1）である。

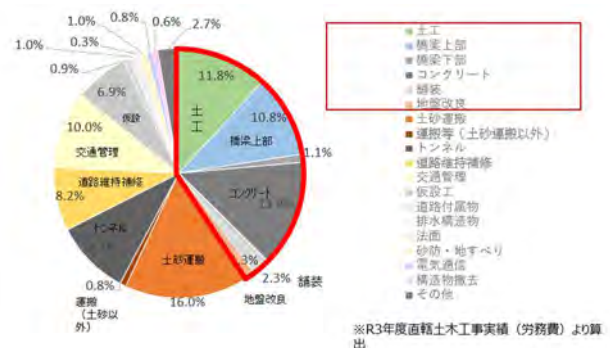


図-1 土木工事における発注工事種別の割合

i-Construction の取組により土工や橋梁、舗装、地盤改良工等多くの工種で ICT 施工を取組み、コ

ンクリート工ではプレキャストの積極的活用等規格の標準化の取組を進めてきており、直近では ICT 施工によるコンクリート堰堤工の基準類も整備（2024 年 4 月）したところである。

ICT 施工を実施したことによる効果がどの程度あったのかという調査を実施した（図－2）。延べ作業時間の縮減について調査を行った結果、起工測量から出来形管理に至るまでの一連のプロセスで土工では約 3 割の縮減効果が見られた。しかし、近年この縮減効果は毎年約 3 割程度と横ばいであり、大きな割合を占める施工の部分においては起工測量など他の段階に比べ縮減効果が小さいという調査結果が得られた。そのため、新たな取組により施工の更なる効率化が必要となった。

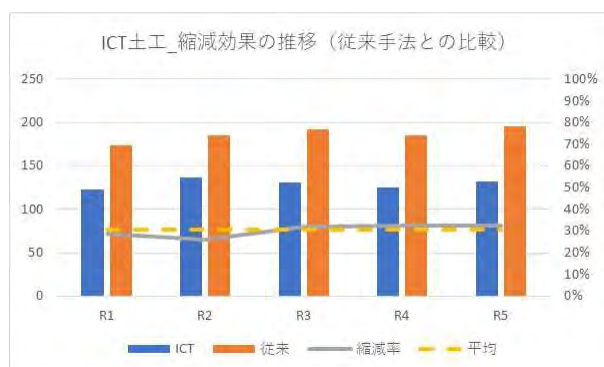


図-2 土木工事における ICT 施工の効果

3. ICT 施工 stage II について

今までの ICT 施工は、Stage I に示すように、UAV や ICT 建設機械・機器類を活用し、バックホウでの掘削や法面成型であったり、ブルドーザーでの敷ならしなど、部分毎の作業を効率化した取組であった。

次の段階の ICT 施工 stage II では、機械の位置情報や稼働状況等の様々な施工データを分析し、機械の台数や配置を換えるなど施工現場全体を効率化する取組になる。ICT 施工の活用率が高くなったとはいえ、あくまでも国発注工事の比較的規模が大きい工事の割合であるため、中小建設業の普及拡大のためにも Stage I の取組は継続しつつ、すでに先駆的に実施している企業は次の Stage の取組を進めることでさらなる建設現場の効率化を図る（図－3）。



図-3 各 stage の取組内容

即ち、ICT 施工 stage II の施策とは、「作業の効率化」から「施工現場全体の効率化」の取組を進めることである。例えば、建設機械の稼働データを基に、ボトルネックとなっている作業を把握し、施工計画を見直すことで全体の効率化を実現。作業を ICT に単に置き換えるだけでなく、施工の最適化への取組が重要となる。そして将来は、Stage III（最適化された現場で施工の遠隔化・自動化）を目指していく予定である。なお、ICT 施工 stage II の施策は、i-Construction2.0 における建設現場のオートメーション化に向けたトップランナー施策「1. 施工のオートメーション化」の「施工データ集約・活用のための基盤整備」に該当しており、2024 年度は、ICT 施工 stage II の取組の普及促進を目的に、施工データ活用による作業待ち防止や工程調整、最適な要員配置による効果の検証及び施工データプラットフォームの構築に向けた必要データ確認のための試行工事として。まずは、国土交通省直轄 12 工事を対象として実施し、今後、試行工事の件数を増やしていく（表－2）。

表-2 国土交通省直轄 12 試行工事一覧（R6. 7. 31）

整備局等	事務所	工事名
北海道	札幌開発建設部千歳川河川事務所	石狩川改修工事の内 柏木川右岸築堤盛土工事
		石狩川改修工事の内 島松川右岸築堤盛土工事
	札幌開発建設部札幌道路事務所	道央圏連絡道路 長沼町 南長沼ランプ改良工事
関東	常総国道事務所	R5 東関東清水地区改良工事
	常総国道事務所	R5 東関東清水石神地区改良工事
	常総国道事務所	R5 東関東築地地区改良工事
中国	岡山国道事務所	令和5年度玉島笠岡道路浜中地区中工区改良工事
		令和5年度玉島笠岡道路浜中地区西工区改良工事
		令和5年度玉島笠岡道路浜中地区東工区改良工事
	浜田河川国道事務所	令和5年度福光・浅利道路福光地区第4改良工事
	山陰西部国道事務所	令和5年度木与防災宇田地区第6改良工事
九州	八代河川国道事務所	鹿児島3号出水北IC13工区改良工事

4. データ活用による現場マネジメントに関する実施要領（案）について

ICT 施工 stageⅡの取組を進めるにあたり、実施項目について例示したものを要領としてとりまとめている。この要領では、大きく次の4項目に分類し、各項目いくつかの事例を示しており、ICT 施工 stageⅡ相当工事については本要領を基本とすることとしている。

○要領：「データ活用による現場マネジメントに関する 実施要領（案）」

①施工段取りの最適化

建設機械やダンプトラックの位置情報見える化

②ボトルネック把握・改善

建設機械やダンプトラックの日当り施工量・稼働時間・稼働率・待機時間の見える化

③進捗状況等把握による予実管理

建設機械やダンプトラックの運搬回数や日当り施工量の見える化

④ その他（注意喚起・教育等）

ダンプトラックの運行情報、現場状況の見える化

なお、この要領は完成ではなく、新たな技術や効率的な手法などが生まれた場合は、項目を追加していくことを考えている。更に、上記4項目の具体的な取組内容を次のとおり報告する。

4.1 施工段取りの最適化

ダンプトラックの位置情報を把握することにより施工段取りの最適化を目指す。これまでは、ダンプの正確な到着時間がわからないため、ダンプの到着待ちのための待ち時間や、ダンプが早期に到着したことによるロス（準備が間に合わない）が生じていた。

そこで、建設機械やダンプトラックに位置情報を取得するためのスマートフォン等のGNSS端末を設置し、ダンプトラックの位置情報やダンプトラックが接近してきたときに通知を行うアプリケーションを重機に搭載することで、到着に合わせた準備をしたり、まだダンプトラックが遠くにいるからその間に少し別の場所で敷ならしといった別の作業を行おうという判断ができるようになる。これによって、待機時間を有効に活用することができる（図－4）。

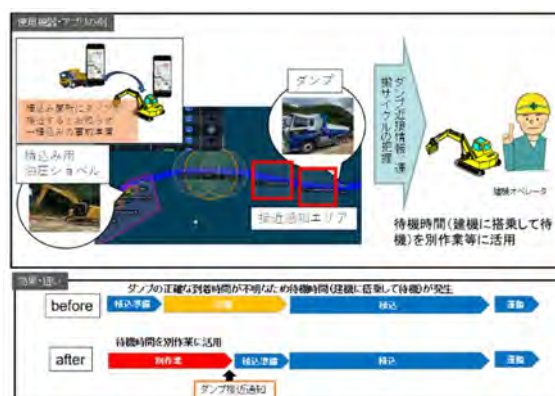


図-4 施工段取りの最適化（隣接工程の見える化）

4.2 ボトルネック把握・改善化

建設機械やダンプトラックの稼働時間、稼働率、待機時間の見える化を図ることにより、掘削・積込・運搬・敷均しの一連作業の工程上のボトルネックの把握し、分析・改善することで 各機械が有する最大能力を発揮した作業を目指す。これまでは、機械配置は現場労働者の経験に基づき行っているため、現場条件などによる変化に対応できず、掘削進捗と盛土進捗が不整合であったり、ダンプトラック台数が掘削作用の施工能力に不足し、掘削作業に待ちが生じる場合があった。

そこで、建設機械やダンプトラックにGNSS端末や稼働時間、稼働率、待機時間などのデータを収集・提示を行うアプリケーションを設置し、建機毎の状況を見える化することにより、ボトルネックがどこにあるのかを把握し、改善につなげていく。例えば掘削作業の待ち時間が多いのであれば、ダンプトラック台数を増やしたり、敷ならしの能力が不足している場合は、ブルドーザーの能力を7tから15tにあげるなどの対応により、工事全体の施工効率を改善していく（図－5）。



図-5 ボトルネック把握・改善化（資材調達等）

4.3 進捗状況等把握による予実管理

各作業の進捗を把握し、計画に対する実績の差をリアルタイムで監視することにより、工程遅延の早期発見と対策を実施する。これまでは、月間や

週間単位での工程把握を行っているため、工程遅延の発見が遅れる場合があったり、実作業工程に応じた必要最低限の資機材手配が困難なため資機材に余裕を持たせる必要があった。

そこで、ダンプトラックの運搬回数や、ICT 建設機械の施工履歴データであったり、ドローン、モバイル端末などの 3 次元計測技術を活用して施工現場の 3 次元点群データを日々取得するなどにより、日当り施工量の把握を行い、予定に対して実績が遅延している場合は原因を確認し対処することが容易になる。

これは、施工業者の話だけではなく、複数の現場を監督する発注者（監督職員）にも関連することであり、例えば複数の現場で掘削と盛土を実施する場合、仮置き場に運搬してから掘削する場合も多くあるが、これまでは仮置き場の土量をリアルタイムで把握することができなかった。施工量の見える化を図ることにより、監督職員や施工業者は、異なる別の現場に運搬を指示するなど土量配分計画の見直しが可能となる。このように、施工者だけでなく発注者も一緒になって取り組むことで、綿密な予実管理が可能となる（図-6）。

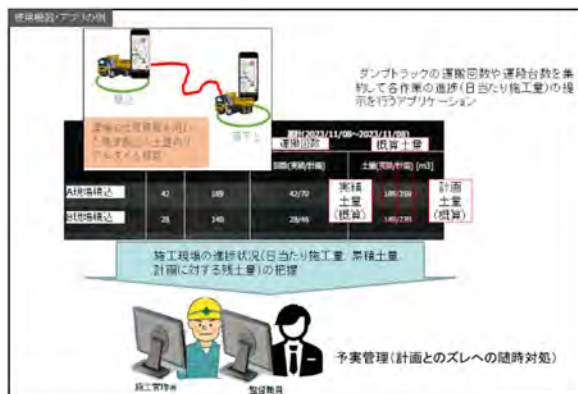


図-6 予実管理（計画との乖離に対する対処）

4.4 その他（注意喚起・教育等）

4.1～4.3 で活用してきた機器を安全教育や事実確認に活用することを想定している。ダンプトラックのリアルタイム位置情報により、予定していた運行経路との対比であったり、運行速度を把握することで、法令順守を徹底する取組である。これまでは、運転手からの聞き取りや申告等にて走行経路、速度の確認を行っているため、問題発生時の事実確認に時間を要するなど、対策の実施にも遅延が生じていた。

そこで、正確な位置情報をリアルタイムに把握することで、運転手も見られているという意識が働くため、安全運転に努めることになる。

また、地域住民からの苦情に対して、これまでは、運転手からの聞き取りや申告等にて走行経路、速度の確認を行っていたため、事実確認に時間を要

していた。リアルタイムのデータを取得することで、問題発生要因の確認が容易となり、対応策も立てやすくなる。

また、工事事後が発生した場合、これまでは聞き取りや図面による説明などを実施していたため、事実確認に時間がかかったが、現場設置の AI カメラ等の状態を示す映像データ取得により、事故発生要因が明確になり、対策を立てやすくなる（図-7）。



図-7 その他（事実確認や安全教育等）

他にも、工事現場内の建設機械やダンプトラック、作業員のリアルタイムな現場データにより、作業内容や各種位置関係、状態を把握し、ヒヤリハット情報の収集による事故リスク低減の措置の指示や万が一の事故発生時の要因分析と再発防止策検討が可能となる。

5. 考察

現在、様々な建設機械から得られる施工データは、各社様々な状況であり、施工データを集約し、共通データとして活用できる場の確立及び施工データを統一的に把握・活用するための共通ルールが確立されていない。他にも、一つの現場で複数社が施工する工事において、共通データを活用する場が確立されていないことが課題である。

そこで、2026 年度より共通データ環境（施工データ・プラットフォーム）を整備できるよう、まずは、国土交通省直轄 12 工事において、試行工事を実施し、施工データ活用による作業待ち防止や工程調整、最適な要員配置による効果の検証及び施工データプラットフォームの構築に向けた必要データ確認する。得られたデータを検証し、将来は自動化施工につなげていく所存である。なお、試行工事に関する詳細な検証等については、今後報告したい。

参考文献

なし

17. 舗装工事の品質管理高度化に資する転圧管理システムについて

酒井重工業株式会社

○ 内山 惠一

11

眞壁 淳

1. はじめに

現行の道路舗装における路盤工とアスファルト舗装（以下、As 舗装）において、ローラ締固め後の品質管理には、密度、プルーフローリング、平板載荷試験、温度測定が適用されている¹⁾。これらの試験方法は、施工現場の一部を抽出して計測することから、測定結果は現場の代表値として管理される。しかし、この代表値管理は、現場全面の品質を担保することはできないため、全面管理が可能で、かつ現行の品質管理と相関性のある管理方法が望まれている。

国土交通省では、ICT 導入による舗装の生産性と信頼性向上を目的に「舗装工事の品質管理を高度化する技術」について公募している。この公募に対し、筆者らはローラ転圧作業中リアルタイムでデータを取得し、転圧面全面の管理が可能な転圧管理システムが有効と考え応募した。この転圧管理システムは、①GNSS 転圧回数、②加速度応答法による地盤剛性値、③アスファルトの表面温度を管理することができる。なお、加速度応答法は、振動ローラに取り付けた加速度計を用いて転圧時の地盤の剛性を評価する計測方法である²⁾。

筆者らが考える上記 3 つの管理項目と現行管理方法との関係について述べる。現行の路盤・As 舗装での密度管理に対しては、GNSS 転圧回数管理が有効と考えている。GNSS 転圧回数管理は間接的に密度管理を行う方法で、試験施工によって転圧回数と密度の関係を明確化し、実施工では試験施工で定めた転圧回数を確保することで、目標とする密度を達成する方法である³⁾。次に、路盤でのブルーフローリングと平板載荷試験管理に対しては、加速度応答法による地盤剛性値管理が有効と考えている。過去の試験結果から、加速度応答法で計測された結果は、ブルーフローリング時に計測するベンケルマンビームでのたわみ量や、平板載荷試験結果との間に相関関係があり⁴⁾⁵⁾、これを利用するものである。最後に As 舗装での温度管理に対しては、アスファルトの表面を赤外線式放射温度計で計測する方法である。本来の温度管理は、As 舗装の内部を計測すべきだが、ローラ転圧中に計測可能な表面温度とした。

ここでは、上記の筆者らが提案する管理方法の

舗装現場への適用性を検討するために、実証試験を行ったのでその結果について述べる。

2. 転圧管理システム

転圧管理システムは、計測データの記録・表示用のディスプレイを中心に、GNSSアンテナ、加速度応答法の機器（以下、CCV）、温度計から構成される（図-1）。CCVセンサは振動ローラの振動輪に固定され、ローラの加速度を計測し、CCVコントローラで周波数解析処理されCCV値を出力する。As舗装時に使用する温度計は、ローラ前部のフレームに固定し、転圧開始前のアスファルト表面温度を計測する。オペレータへの結果表示と帳票化のために、転圧回数、CCV値、温度データは、GNSSで取得した位置情報と組み合わせて管理される。また、位置情報とセットになった転圧管理データは、通信機器を通じてクラウドサーバへアップロードされ、現場管理者のパソコンで品質確認や帳票作成（図-2）ができる。



図-1 転圧管理システムの構成

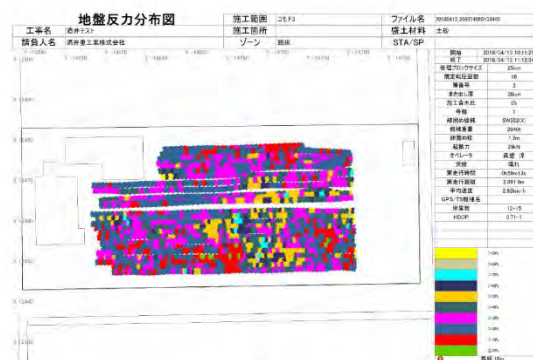


図-2 転圧管理システムから出力された帳票例

3. 実証試験

3.1 試験概要

(1) 路盤工

試験ヤードの概観を図-3 に示す。十分に締め固められた基盤の上に、下層路盤として切り込み砕石 40 (C-40) を築造し、この上に上層路盤として粒調砕石 30 (C-30) を築造した。試験エリアは、転圧回数と各計測値との関係を捉えるため、転圧回数が $2 \cdot 4 \cdot 8$ (P2, P4, P8) の3つのエリアを設けた。また、人工的に不良箇所を設けるために、試験エリア中央に位置する基盤部に、弱部として15cm の深さで粘土を設置した (写真-1)。なお、この基盤を小型 FWD で計測したところ、健全部で 1027MN/m^3 (12 箇所平均)、弱部で 17MN/m^3 (6 箇所平均) であった。

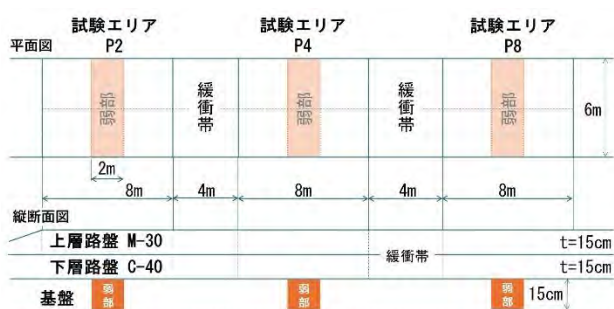


図-3 試験ヤード (路盤工)



写真-1 基盤への弱部設置状況



写真-2 7t 振動タンデムローラ

転圧には、運転質量 7t の振動タンデムローラを使用し、約 4km/h の速度で振動転圧した (写真-2)。

計測は、転圧中に転圧管理システムでの転圧回数と CCV、転圧後に砂置換法密度 (文献 6, [4]-265)、ベンケルマンビームたわみ量 (文献 6, [1]-284)、平板載荷試験 (文献 6, [1]-266) を実施した。砂置換法での密度測定、ベンケルマンビームによるたわみ量の測定、平板載荷試験の状況をそれぞれ写真-3, 4, 5 に示す。



写真-3 砂置換法での密度測定



写真-4 ベンケルマンビームたわみ量測定



写真-5 平板載荷試験

(2) As 舗装工

As 舗装工では、転圧回数と密度の関係と、転圧開始前 As 表面温度と密度の関係を捉える必要がある。そこで、図-4 に示すように、転圧回数 P3・P5・P7 の試験エリア (以下、転圧回数レーン) と、As 温度が高温・中温・低温のレーン (以下、温度レーン) を設けた。転圧回数レーンでは、運転質量 10t マカダムローラと、7t 振動タンデムローラの2機種を使用し、約 4km/h の速度で

転圧した。なお、振動タンデムローラでは、全ての転圧回数において振動転圧した。温度レーンの転圧は、振動タンデムで転圧され、As の内部温度を棒温度計で計測後、目標温度（140、110、80℃）まで下がったことを確認し転圧を開始した。この温度レーンでの転圧回数は5回とした。アスファルト混合物の敷き均し状況を写真-6 に示す。

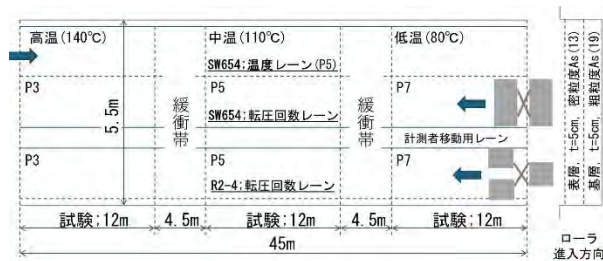


図-4 試験ヤード (As 舗装工)



写真-6 アスファルト混合物の敷きならし

使用したローラは、運転質量 7t の振動タンデムローラと、10t のマカダムローラを使用した。

計測は、転圧中に転圧管理システムでの転圧回数と As 表面温度、転圧後にコア密度を計測した。

3.2 試験結果と考察

(1) 路盤工

転圧回数と乾燥密度の関係を図-5に示す。下層・上層路盤ともに、転圧回数の増加とともに乾燥密度も増加している。このように、密度が増加傾向であれば、転圧回数を管理しておけば、密度を間接的に管理することが可能と考える。

CCVとたわみ量（ベンケルマンビーム計測）の関係を図-6に示す。両者は、バラツキがあるものの右下がりの相関関係にある。また、この図から、下層・上層ともに2つのプロット領域に分かれており、基盤に設けた健全部と弱部の影響を受けている。このことから、CCVとたわみ量は、基盤の健全部と弱部を検知していると言える。一方、図-6の健全部領域に目を向けると、近似線から逸脱しており、両者の傾向に違いがある。

CCVと K_{30} （平板載荷試験）との関係を図-7に示

す。両者は、下層において相関係数が0.9以上と非常に高く、上層においても近似線から離れている1点を除けば、良好な相関関係にある。また、図-6のたわみ量の結果と比較すると、両者の値は近似線上に分布しており、相関性の高いことが分かる。

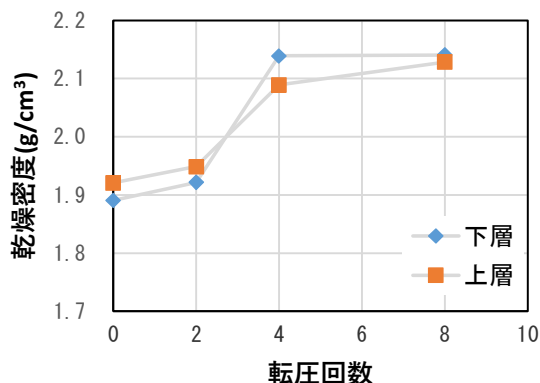


図-5 転圧回数と乾燥密度の関係

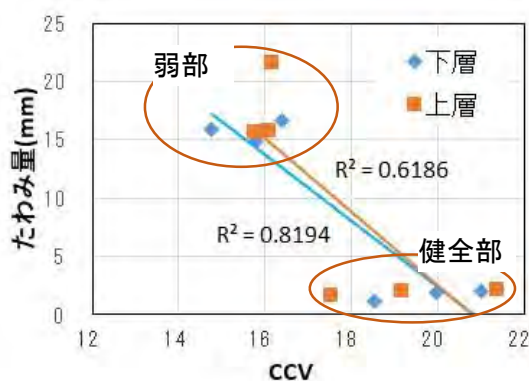


図-6 CCVとたわみ量の関係

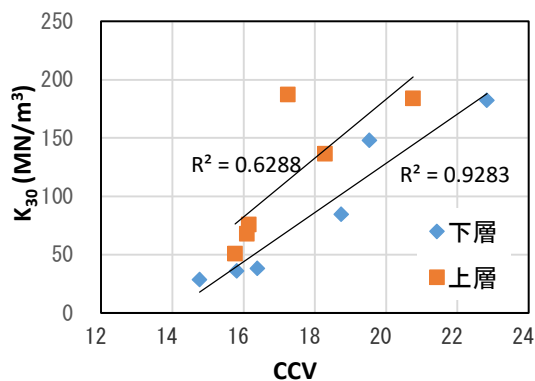


図-7 CCVと K_{30} の関係

(2) As 舗装工

転圧回数レーンにおける、転圧開始前のAs表面温度を表-1に示す。全てのエリアにおいて、規定りの110℃以上で転圧が行われた。

転圧回数とコア密度の関係を図-8に示す。上図が基層、下図が表層の結果である。路盤工の結果と同様に転圧回数の増加に伴い、コア密度も増加していることから、転圧回数管理は、密度を間接的に管理することが可能と考える。

温度レーンにおける、転圧開始直前の初期As表面温度（以下、初期温度）とコア密度の関係を図-9に示す。この図から、初期温度とコア密度には良好な相関関係にあり、初期温度管理は密度の間接的管理に有効であることが分かる。また、初期温度が高い状態で転圧を開始すれば高い密度が得られ、As舗装での初期温度を管理する重要性が認められる。

表-1 転圧開始前のAs表面温度

基層 (°C)			
	P3エリア	P5エリア	P7エリア
振動タンDEM	123.9	122.0	126.3
マカダム	124.7	127.0	132.5

表層 (°C)			
	P3エリア	P5エリア	P7エリア
振動タンDEM	128.1	119.4	133.8
マカダム	124.7	128.1	135.6

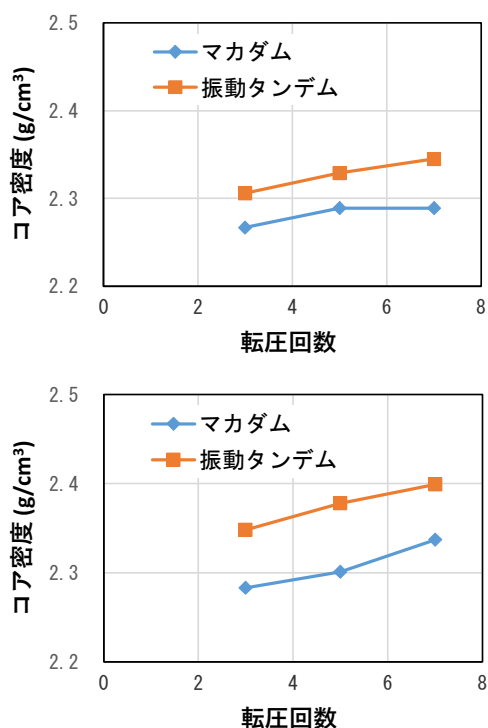


図-8 転圧回数とコア密度の関係
(上：基層，下：表層)

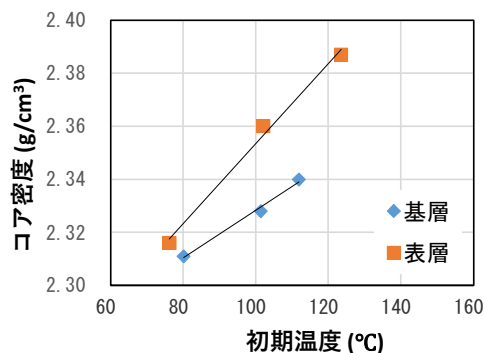


図-9 As 表面初期温度とコア密度の関係

4. まとめ

(1) 転圧回数管理（路盤工，As舗装工）

路盤工，As舗装工ともに、転圧回数を管理すれば、密度を間接的に管理することが可能であることが分かった。

(2) 加速度応答法 CCV管理（路盤工）

CCVとベンケルマンビーム測定でのたわみ量との間には、バラツキがあるものの相関関係にある。また、平板載荷試験で得られる K_{30} との間には良好な相関関係にある。これらのことから、CCV管理は路盤の剛性管理に有効と考える。

(3) As表面温度管理（As舗装）

転圧開始直前のAs表面温度と密度の間には、良好な相関関係にあり、密度の間接的管理に有効と考える。

参考文献

- 1) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値，2023
- 2) 小葉，眞壁，上野：情報化施工における転圧管理システムCISの適用事例について，建設施工と建設機械シンポジウム，2009
- 3) TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領，2020
- 4) 北村，藤岡，内山ら：ローラ加速度応答法を用いた道路路床の品質管理に関する研究（その2），第39回地盤工学研究発表会，2004
- 5) 中村：ローラ加速度応答法による盛土品質管理，建設機械施工，Vol.65 No.9，2013.9
- 6) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（平成31年版），2019

18. 3次元点群データを活用した土工事における 法面損傷リスクの予測と事前対策効果の実証

上武建設株式会社
上武建設株式会社
株式会社 EARTHBRAIN
株式会社 EARTHBRAIN
株式会社 EARTHBRAIN

○ 前田 真司
山田 祐也
岩崎 智朗
谷口 亮
番上 勝久

1. はじめに

日本の建設業界では、人口減少と技能者の高齢化に伴い、生産性向上が求められている。老朽化したインフラの維持管理や新たな都市・地域開発のニーズが高まる中、効率的な施工を実現するためには、より手戻りの少ない施工方法の立案が必要である。国土交通省が推進する i-Construction や BIM/CIM の原則適用により、3次元データの活用が進んでいる。

土木工事の中でも、特に多量の土砂の移動を伴う土工事では、地形が日々変化するため、施工土量の進捗把握が重要である。近年、UAV（ドローン）を用いた3次元測量で取得された点群データや3次元設計データを使用した土量算出技術の利用が一般化している。

施工現場において、雨水の適切な排水管理は環境事故防止、第三者公衆災害防止、さらには施工品質の維持において重要な課題である。しかし実際は、対策箇所や内容の判断は多くの場合、現場担当者の経験に依存しており、想定外の豪雨や、長期的な降雨により排水設備のオーバーフローや施工現場外への雨水流出、完成地形の崩壊のリスクが存在する。こうした被害が発生した際には、復旧工事が必要となり、施工コストの増大（利益減）に繋がる可能性がある。中でも一度完成した法面が降雨により損傷することによる手直しは多くの現場で発生していることから、法面損傷の恐れがある箇所を事前に発見し対策することが望ましい。

そこで本研究では、施工進捗把握のために定期的に取得される3次元点群データに着目し、筆者らが従前に考案した雨水表層流解析を活用することで効率的かつ効果的な雨水対策が可能となることを示す。特に完成した法面の損傷リスクに注目し、雨水表層流解析の予測精度を確認する。予測結果に基づき当該箇所に事前対策を行い、法面損傷が予防可能か検証する。

2. 本研究の位置づけ

既往研究では、広域的な流域把握を基にした災害対策が数多く提案されてきた一方で、施工現場のような局所的な雨水対策に関する研究は限定的である。例えば、大窪ほか(2013)や谷口ほか(2023)の研究では、デジタル標高モデル（DEM）や3次元点群データを用いて雨水の集水状況を可視化する手法が提案されている。

大窪ほか(2013)は、デジタル標高モデル（DEM）を用いて豪雨時の雨水の流れを解析し、高速道路への集水状況を可視化する手法を提案している¹⁾。本手法は、主に地表面の水流を追跡し、リスク箇所の可視化に役立つものの、具体的な防災対策の立案方法や効果については言及していない。解析結果を使用した具体的な対策手段の提案やその効果検証については、さらなる検証が必要であると考えられる。

谷口ほか(2023)の研究では、土木施工現場における3次元点群データを活用した雨水の集水状況に関する地理情報解析手法が提示され、施工現場の雨水管理の利便性向上を志向している²⁾。具体的には、3次元点群データをDEMに変換し、現場内の仮設排水地点も考慮した流向解析や累積流量解析を行い、雨水の流路や集水域を解析する手法である。しかし、これらの解析手法の精度検証や有効性評価は行われていない。

本研究は、谷口ほか(2023)の研究で提示された解析手法を使用し、降雨前後の地形との比較を通じて、法面損傷に関するリスク予測精度の確認を行う。加えて、リスク予測箇所に対する事前対策の効果についても検証し、その結果を現場作業者に迅速かつ効率的に情報伝達する方法についても言及する。

本研究の成果は、施工現場での雨水管理の効率化と安全性の向上に寄与し、土木施工における実務的なリスク管理手法の改善とその普及を目指す。

3. 解析の手順

3.1 対象地

検証を行った土木工事現場（図-1）は企業施設用地（開発面積 48.7ha）であり、傾斜地にあるため起伏にとんだ地形である。造成工事としては終盤を迎えており、完成した法面が多数みられることから、雨水が法面に及ぼす影響の把握や、対策した結果の検証が可能である。

3.2 データ収集

UAV（ドローン）を用いて、対象地の 3 次元点群データを定期的に取得した。本解析で利用した点群は水平、鉛直精度ともに±10cm を担保しており、点群密度は約 25cm 間隔の 16 point/m²の密度である。

本点群データは高解像度であり、地形の詳細な情報を提供し、3 次元点群ビューワー等による施工進捗のモニタリングが可能となるほか、取得した地形における雨水の流れの予測が可能となる。

3.3 雨水表層流解析の方法

Esri 製の ArcGIS Pro 3.1.2 と 3D Analyst を使用し、取得した 3 次元点群データを TIN データに変換したのち、20cm グリッドの DEM（ラスタ形式）を生成した。続いて、Spatial Analyst を使用し雨水の流路、集水域を解析し、可視化を行った（図-2）。

なお、本解析は地表面の形状を解析対象としており、地下水等の影響や地下への浸透等の考慮はしていない。

4. 法面損傷の予測精度検証

4.1 精度検証の方法

降雨前の解析結果と、実際の降雨後の地形データと比較することで、法面損傷の予測精度を確認した。具体的には、降雨前の 2024 年 2 月 19 日に計測した点群を解析し、リスク箇所を目視確認により特定した。法面部分の流路と集水域の形状に着目し、法面法肩部分の集水域が平場の方まで延伸しており、流路が法面上に可視化されているケースを法面損傷リスクがある地点と判別した（図-3）。場所によっては集水域の表示がないケースもあるが、その場合は流路のみで判断した。その後、降雨後に法面損傷箇所を調査し、解析結果と損傷箇所の一致度を目視確認することで解析精度の評価を行った。

降雨前に計測した 3 次元点群データ対して行った雨水表層流解析の結果によると、法面損傷リスク箇所として 11 件抽出することができた（図-4）。

続いて、降雨後の 2 月 29 日に UAV を用いて計測し、法面損傷のリスク箇所が実際に損傷を受けたかどうかを確認した。



図-1 検証現場の航空写真



図-2 雨水表層流解析の結果（2024 年 2 月 19 日地形）

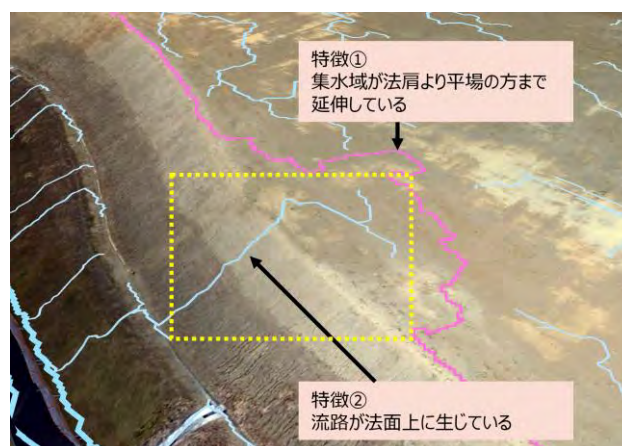


図-3 法面損傷リスクの特徴

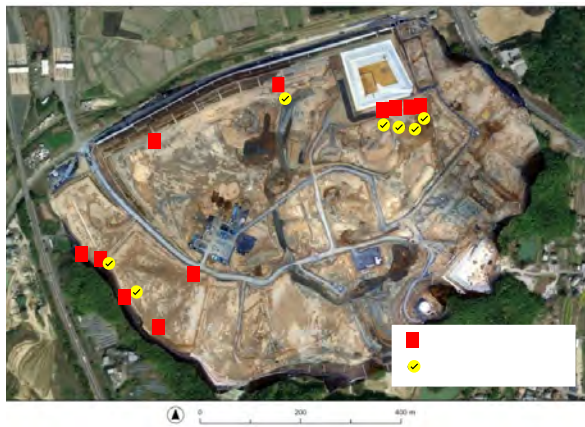


図-4 法面損傷リスクと損傷箇所（2月29日地形）



図-5 モデルエリアの設定（2月29日地形）

4.2 精度検証の結果

雨水表層流解析を行った地形で合計7日間（2月19～27日）、計45mm程度降雨を観測した。

降雨後に補修が必要となる法面損傷は7件発生していた。解析結果と比較したところ実際の損傷箇所はすべて事前の解析結果に含まれていることが確認できた（図-4）。なお、解析によって損傷リスクありと示された箇所のうち、4箇所は降雨後に損傷が生じなかった。

5. 法面損傷の予防効果検証

5.1 解析結果を活用した予防検証の方法

本検証では2月29日に計測した点群データに対して解析を行い、法面損傷リスク箇所の抽出を行った。続いてリスク箇所が隣接するエリアをモデルエリアとして設定し（図-5）、その片方のみに対して、法肩部分の法面方向の微小な傾斜部に対して盛土し、堰堤を施工した。これは法面への雨水流出を防ぐことによる、法面損傷の予防が目的である（図-6）。その後再度解析を行い、事前対策を実施した箇所に法面損傷リスクの特徴が存在しないことを確認した（図-7）。対策効果を評価するため、事前対策を講じた箇所と講じていない箇所を比較し、法面損傷の有無を確認した。

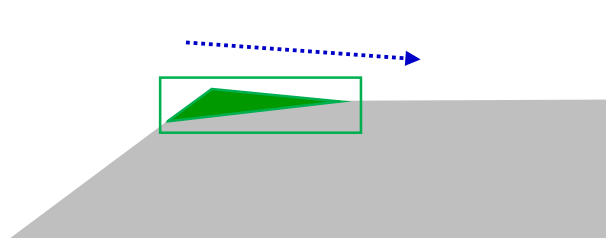


図-6 法面損傷の事前対策方法

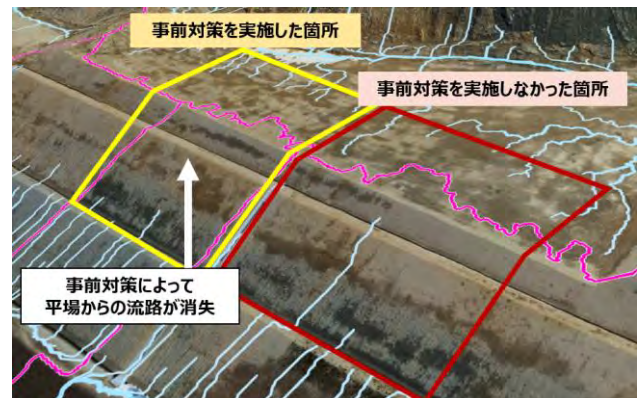


図-7 モデルエリア事前対策後の解析結果
（3月22日地形）



図-8 モデルエリア降雨後の法面損傷状況
（4月22日地形）

5.2 予防検証の結果

設定したモデルエリアに対して、降雨後の4月22日の地形を目視により対策の有無による法面の状態を確認した。モデルエリアのうち、事前対策を講じた箇所においては法面損傷が確認できなかったが、事前対策を講じなかった箇所では法面の損傷の確認ができた（図-8）。

この結果から、法面損傷リスクを予測し、特定の箇所に対して事前対策を講じることによる予防効果を確認できた。さらに、雨水表層流解析による事前対策が施工現場における損傷リスクの大幅な低減に寄与することを示した。事前対策が行われたエリアでは、損傷が一切発生しなかったことから、データに基づいた対策の重要性が明確となった。

6. データ解析による雨水対策の実践

6.1 現場全体のリスク箇所の情報伝達の方法

(株)EARTHBRAINの3Dビューアアプリケーション内の注釈機能を活用し、法面損傷リスク箇所に対してマーキングを行った。このマーキングを基に、対策が必要となる可能性がある箇所のマップ(図-9)を作成し作業員に渡すことで、迅速かつ効率的に建設機械による対策作業を開始できることを確認した。この方法により、現場監督と作業員の間でのコミュニケーションが円滑に行われ、リスク箇所への迅速な対応が可能となった。

従来の雨水対策としては現場監督と作業員が一緒に現場巡回をくまなく行い、現地を目視判断によってリスクの評価を行っていた。雨水表層流解析結果を活用し、リスク箇所をマーキングしたマップを作業員に渡すことで、作業員のみで巡回作業を開始することができた。雨水表層流解析によってリスク箇所が可視化されたことで、監督の経験のみに頼らず、現場関係者全員が共通認識を持って対策要否の判断が可能となった。

また仕上がり高さに近づくにつれて、現場の高低差が小さくなり、目視では雨水の流下方向が把握しづらくなったが、本解析により目視では気づかなかったリスク箇所の特定が可能となった。

従来の紙ベースの管理方法と比較して、デジタルツールの導入は作業効率の向上に大きく寄与している。特に、確実な情報共有が可能となることでヒューマンエラーの減少が期待され、現場における手戻りの削減にもつながると考えられる。

さらに、リスク箇所をあらかじめ特定し、周知することで、作業員のみでの降雨前の事前対策作業開始が可能となり、現場監督の負担が軽減された。

6.2 時間削減効果の試算

事前対策による手戻り削減時間の推定においては、令和3年度版国土交通省土木標準積算基準書<共通編>を基に算出した値を使用した。

具体的には、法面損傷の補修作業には、法面整形工の日当たり標準作業量を適用し120分/箇所(4分/㎡、30㎡/箇所を想定)とした。再度法面損傷が発生することを防ぐため、法肩に堰堤の構築を行う必要があった。この作業時間を路体盛土工の日当たり標準作業量を準用し6.3分/箇所(0.9分/㎡、7㎡/箇所を想定)とした。降雨後の2月19日時点の地形においては7箇所法面損傷が発生したことから、計884.1分補修作業に要した。

一方、降雨前にリスクの高い11箇所すべてに対して法肩に堰堤を設ける事前対策を講じると、計69.3分となると推定された。このことから補修作業に要する時間を事前対策に置き換えることで、約92.2%の時間削減が見込まれると分かった。

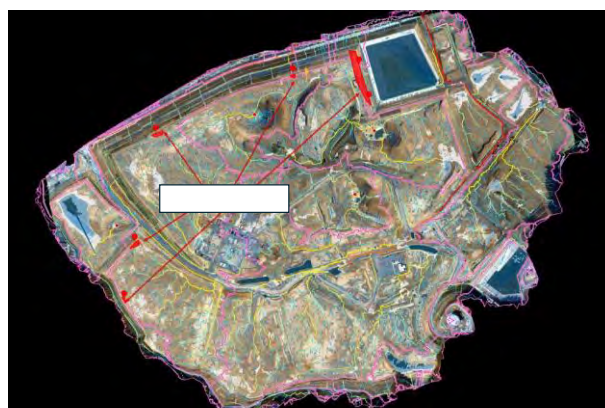


図-9 デジタル上での作業指示

7. まとめ

本研究は、3次元点群データと地理情報解析を用いた雨水リスクの予測および事前対策手法の有効性を実証したものである。主な成果として、以下の点が挙げられる。まず、雨水表層流解析により法面損傷リスクのある箇所を予測した結果、降雨後の法面損傷箇所と多くが一致することを確認した。これにより、解析手法の信頼性が実証され、施工現場における法面損傷のリスク予測手法として有用であることを示した。

さらに、解析結果を基に当該箇所の法肩部分に堰堤を設ける事前対策を講じた結果、法面損傷が予防可能であることを実証し、事前対策により補修作業時間が92.2%削減されることが推定できた。これは、3次元データにより適切に事前リスクを予測し、予測結果に基づき予防保全的に対策する施工管理手法の経済合理性を示すことができたと言える。本研究の成果は、土木施工現場における雨水リスク管理の根本的な改善に寄与するものであり、法面を有する施工現場において、同様の効果が得られるだろう。

今後は、モバイル端末を活用した情報伝達の迅速化と精度向上、さらなるデジタルツールの導入、他の現場での適用事例の蓄積を通じて、解析手法と事前対策の精度と効率をさらに向上させることが重要である。また、雨水管理だけでなく、他の防災管理にも応用可能な技術として、広範な利用が期待される。

参考文献

- 1) 大窪克己・里優・濱田政則：雨水の流線追跡解析による豪雨時の高速道路への集水状況の可視化に関する研究、土木学会論文集F5(土木技術者実践)、69巻・2号、pp.27～35、2013
- 2) 谷口亮・番上勝久・前田真司・山田祐也：土木施工現場における雨水の防災管理に向けた3次元点群データの活用、地理情報システム学会講演論文集、E8-04、2023

19. 土砂掘削で発生する粉じんの散水による抑制効果の構内試験

(国研) 土木研究所 ○ 山口 武志
(国研) 土木研究所 吉永 弘志
(現：国土交通省国土技術政策総合研究所)
(国研) 土木研究所 山口 崇

1. はじめに

自治体等によせられる大気環境（騒音，振動，排出ガス，粉じん等）の苦情件数は，事業者別では建設業がシェア 52%でワースト 1 位となっている¹⁾。土砂掘削の粉じんについては，散水，防塵ネット等で抑制できるが，環境影響評価において定量的な予測ができないことが懸案となっている。

土木研究所では，散水等の粉じん対策の効果の定量的な評価を可能にすることで，定量的な環境影響評価や適切な環境保全措置の検討に資することを目指して，土砂掘削で発生する粉じんの散水による抑制効果について調査した^{2), 3)}。

本稿では既報^{2), 3)}の抜粋と構内試験の詳細を報告する。

2. 土砂掘削で発生する粉じんの散水による抑制量の調査

構内試験を実施する前に，予備調査として現地調査や文献調査を行った。

2.1 予備調査^{2), 3)}

道路事業の環境影響評価において，降下ばいじん量の予測には国土技術政策総合研究所資料⁴⁾が用いられている。具体的には，式(1)，式(2)を基本式とし，発生源の形状，および風向頻度・風速から降下ばいじん量を予測している。式(1)，式(2)では微小領域から発生した粉じんが風下方向に逆二乗則で拡散する値を発生源の面積，工事日数等で積算している。

$$R_{ds} = N_u N_d \int_{\frac{\pi}{16}}^{\frac{15\pi}{16}} \int_{x_1}^{x_2} C_d(x) x dx d\theta / A \quad \cdots \text{式(1)}$$

$$C_d(x) = a(u_s/u_0)^{-b}(x/x_0)^{-c} \quad \cdots \text{式(2)}$$

R_{ds} : 風向別降下ばいじん量 (t/km²/月) . 添え字 s は風向 (16 方位), N_u : ユニット^{*1}数, N_d : 季節別の平均月間工事日数 (日/月), x_1 : 予測地点から季節別の施工範囲の手前側の敷地境界線までの距離 (m), x_2 : 予測地点から季節別の施工範囲の奥側の敷地境界線までの距離 (m) ($x_1, x_2 < 1$ m の場合は $x_1, x_2 = 1$ m とする.), A : 季節別の施工範囲の面積 (m²), $C_d(x)$: 1 ユニットから発生し拡散する粉じん等のうち発生源からの距離 x m の地上

1.5m に堆積する 1 日当たりの降下ばいじん量 (t/km²/日/ユニット), a : 基準降下ばいじん量 (t/km²/日/ユニット), u : 平均風速 (m/s), u_s : 季節別風向別平均風速 (m/s) ($u_s < 1$ m/s の場合は $u_s = 1$ m/s とする.), u_0 : 基準風速 ($u_0 = 1$ m/s), b : 風速の影響を表す係数 ($b = 1$), x : 風向に沿った風下距離 (m), x_0 : 基準距離 (m) ($x_0 = 1$ m), c : 降下ばいじんの拡散を表す係数 ($c = 2$).

*1: ユニットとは，工事の種別等での作業単位を考慮した建設機械の組み合わせ

国土技術政策総合研究所資料⁴⁾には，硬岩掘削において，散水を講じることで粉じんの発生量が約 27% (約 73%減) となる例が記載されている(表-1)。

表-1 基準降下ばいじん量 a 及び降下ばいじんの拡散を表す係数 c

ユニット	a	c	備考
土砂掘削	17,000	2.0	文献 ⁴⁾
硬岩掘削	110,000	2.0	文献 ⁴⁾
硬岩掘削 (散水)	30,000	2.0	文献 ⁴⁾

予備調査では，現地調査として複数の現場を調査した。土木工事とは異なり，常時粉じん対策を講じている採石場での現地調査では，土砂はシルト分が 27%程度と多い細粒分質砂であった。粉じん発生量は多く，散水車で絶え間なく散水していた(図-1)。また，構内の道路工事の現場においてヒアリングを行ったところ，工事用に搬入した土砂による粉じんの発生は，細粒分質砂(シルト分が 30%程度)で多く，細粒分まじり砂(シルト分が 10%程



図-1 砕石場での散水による粉じん対策

度)の改質土では少ないとのことであった。パイパスの道路工事において、粉じん測定を実施したが、細粒分まじり砂(シルト分が4~7%程度)の土砂掘削(無散水)では、測定した3日間とも粉じんの舞い上がり等はみうけられず、バットで捕捉した降下ばいじんの質量は分析天秤の測定誤差程度のごく微量(10mg以下)であった。

また、web site、過年度の調査、および有識者の講演で得た知見も踏まえて、粒径分布と飛砂・粉じん等の関係を俯瞰した(図-2)。粒径が大きいと固結せず乾燥しやすいが飛びにくく、火山噴火や強風時に飛来する。砂丘では200~500 μm で粒がそろっているとよく飛ぶとの知見があり、地形・風等の条件も影響するようである。粒径が小さいと国境を超えて遠方まで飛来するが、粘土は乾燥しにくく固結しやすい。土木工事の粉じんは、シルト分と関連づけた論文が多かった(例 文献^{5),6)})。

降下ばいじん量の予測について、国内外の他の文献も調査したが、環境影響評価の予測に参考となる文献は見当たらなかった。

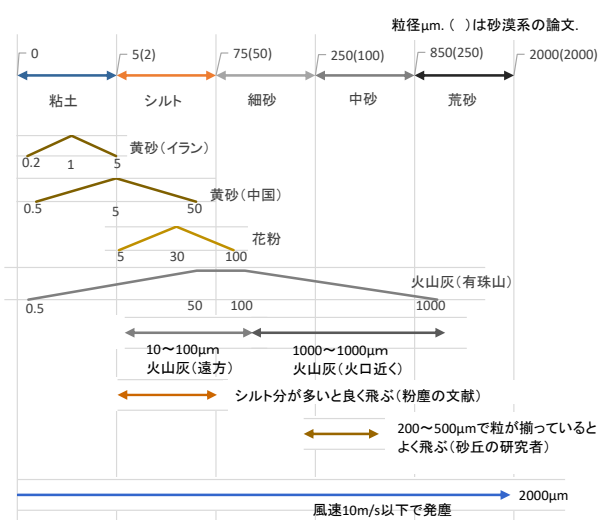


図-2 土砂の粒径分布と飛砂・粉じん等

2.2 構内試験

降下ばいじんの測定値はばらつきが多いため、散水による抑制効果については複数の測定の平均的な値で示すこととし、測定回数を増やすことを容易にするため、測定の簡素化を検討した。測定の簡素化は、測定地点を減じる検討および風向風速の測定高さを1.5mとする検討を行った。

現場での測定については、適する実工事現場において適する日に出向くこと、施工に影響しない位置かつ風下で測定すること、散水を行うことの全ての条件を満たす現場を選定することが困難であることを予備調査で把握したため、研究所の構内で測定することとした。

2.2.1 測定地点を減じる検討³⁾

文献^{7),8)}の測定では、降下ばいじんの拡散を表す係数 c を把握することを目的として測定点を多数設置していたが、文献⁸⁾では複数の工種を解析して考察した結果に基づいて $c=2$ に統一した。 $c=2$ は逆二乗則を意味し、結果的に点発生源の騒音・振動と同程度の減衰となる。ここでは $c=2$ として測定点数を減じて解析した a の影響を考察した。文献⁷⁾の中から粉じん発生量が多い土砂掘削1回、軟岩掘削2回、路床安定処理3回、および現場内運搬2回の合計8回の測定値を選択し、測定地点を減じた場合の誤差を評価した。評価量は、全測定点で解析した場合の解析した a を真値 T と見なし、発生源に近い測定点のみで解析した場合の解析値 a を P とし誤差率 $e = [P - T]/T \cdot 100$ とした(表-2)。誤差率 e の平均、標準偏差ともに10%程度であった。降下ばいじんの測定値は桁違いにばらついており、測定点を3点以下に減じることによる10%程度の誤差率は、相対的には精度に支障はない値と考えた。

表-2 粉じんの原単位を解析する際に使用するデータ数を減らした場合の誤差率

	平均	標準偏差
発生源に最も近い1点	10%	12%
発生源近傍の3点	16%	10%

2.2.2 風向風速の測定を高さ1.5mとする検討

気象庁の風向風速の測定方法に準じて文献^{7),8)}の原単位も高さ10mの風向風速の測定値で解析している。一方、実測定において高さ10mでの風向風速の測定が制約になりうる場合もあるため、異なる高さに変更する検討が行われたことがある⁹⁾。高さ10mと1.5mの風速比が1.4になるとの解析結果や風向の一致の程度にかかる知見が得られていたが、解析値 a の評価は未着手であった。ここでは解析値 a について試行的に土砂掘削1回、軟岩掘削1回、路床安定処理4回、および現場内運搬4回の合計10回の測定値を選択し、高さ10mの風向風速での解析値 a_{10m} と高さ1.5mの風向風速での解析値 $a_{1.5m}$ を比較した。近似誤差(残差平方和)の平均は表-3に示すように大きく異なることはなく、増加は $(0.51 - 0.44)/0.44 = 16\%$ であった。 a_{10m} と $a_{1.5m}$ の比の平均が1.2となったので $a_{10m} = 1.2a_{1.5m}$ で換算することとした。

表-3 粉じんの原単位を解析する際に使用する風向風速の測定高さと近似誤差

風向風速の測定高さ	10m	1.5m
10回の測定の近似誤差 ^{*2} の平均	0.44 10/km ² /8h	0.51 10/km ² /8h

^{*2}: 解析したパラメータでの計算値と測定値の残差平方和

2.2.3 測定

構内試験における測定の概要を表-4、図-3～7に示す。国土技術政策総合研究所の構内に50m×50mの作業エリアを設定し(図-3)、13.5tの油圧ショベルを使用して山積みの搬入土を掘削し、90度回転して放土する模擬作業(図-4)を連続して行った。試験は晴天が続いた乾燥した冬場に周囲が開けた場所で行ったので、測定条件は良好であったと考えている。模擬作業は3種類(粘性土1、粘性土2、碎石C40)の土砂の無散水、および散水の2条件で行った。降下ばいじんの測定点数は、風下側での4点とバックグラウンドの1点の合計5点とし、簡素化した。また、風向風速の測定は高さ1.5mでのみ行い、高さ10mでの測定は省略した(図-5、6)。主な測定機器は微風風向風速計(気象検定付)、デジタル粉じん計、降下ばいじん測定用バット(幅220mm×長さ280mm×高さ40mm)とした。降下ばいじん測定用バットには蒸留水をはり、測定終了時に回収して蒸留水を揮発させることで、降下ばいじんの質量を測定した。構内試験における土砂、模擬作業の状況を図-7に示す。

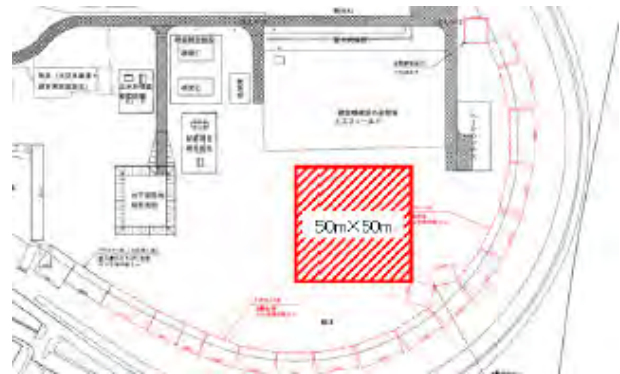


図-3 測定箇所(50m×50mのエリア)

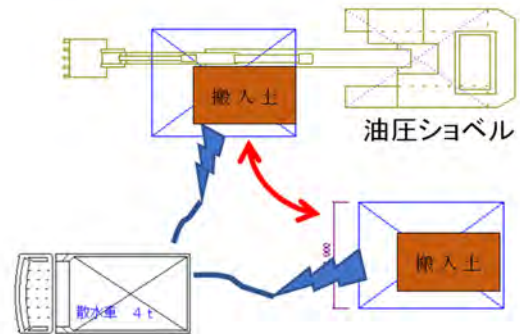


図-4 模擬作業の概略図

表-4 構内試験での測定概要	
日時と場所	2022年1月31日～2月5日の9:00～16:00. 国土技術政策総合研究所構内(茨城県つくば市)
気象条件	全日晴れ。気温2～12℃、風速1～8m、湿度20～60%(つくば市館野気象庁公表値)
主な測定機器	微風風向風速計(気象検定付)1台、デジタル粉じん計3台、降下ばいじん測定用バット(幅220mm×長さ280mm×高さ40mm)5個
土砂	3種類(粘性土1、粘性土2、碎石C40)の土砂の無散水、および散水の2条件。
施工機械	油圧ショベル(0.5m ³ 、13.5t)
模擬作業	山積みの搬入土を油圧ショベルで掘削し、90度回転し放土の繰返し作業。作業時間は各2時間。散水は、作業前に実施。



図-5 測定状況

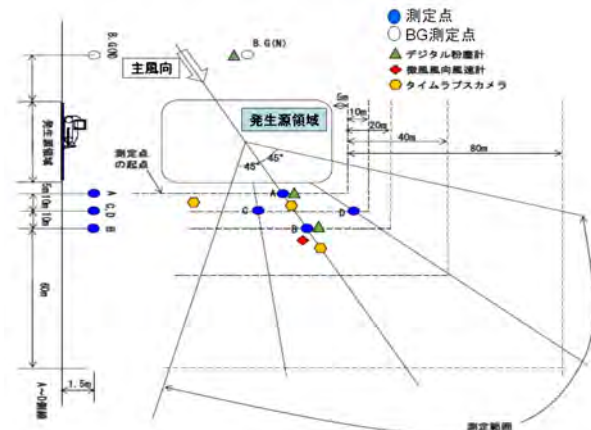


図-6 測定点の配置(模式図)

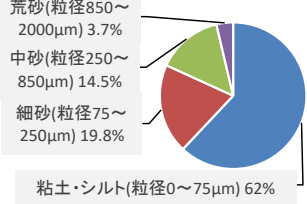
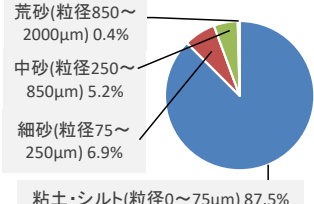
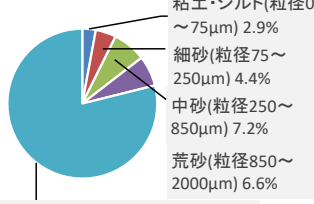
	粘性土 1	粘性土 2	碎石 C40
無散水の土砂	 含水比 24.8% (2月1日)	 含水比 52% (2月2日) (含水比が意外に大きい！)	 含水比 2.3% (2月4日)
散水した土砂	 含水比 34.6% (2月1日)	 含水比 60% (2月2日)	 含水比 5.2% (2月4日) (含水比が意外に小さい！)
粒径分布	 荒砂(粒径850～2000μm) 3.7% 中砂(粒径250～850μm) 14.5% 細砂(粒径75～250μm) 19.8% 粘土・シルト(粒径0～75μm) 62%	 荒砂(粒径850～2000μm) 0.4% 中砂(粒径250～850μm) 5.2% 細砂(粒径75～250μm) 6.9% 粘土・シルト(粒径0～75μm) 87.5%	 粘土・シルト(粒径0～75μm) 2.9% 細砂(粒径75～250μm) 4.4% 中砂(粒径250～850μm) 7.2% 荒砂(粒径850～2000μm) 6.6% レキ(粒径2000～μm) 78.9%
無散水での模擬掘削	 (放土の周囲に浮遊粉じん！)	 (放土の周囲に浮遊粉じん！)	
散水後の模擬掘削			

図-7 測定対象とした土砂と測定状況

ここで、この実験について考察したことを図-7で述べる。無散水の粘性土 1, 粘性土 2 では油圧ショベルのバケットから落下する土砂から粉じんが舞っていることが写真で把握できる。一方、散水の粘性土 1, 粘性土 2 では浮遊粉じんが抑えられ、碎石 C40 では、散水、無散水ともに写真で確認でき

る程度の粉じんが発生していない。油圧ショベルのバケット近傍で粉じん計やカメラで粉じんを観測してミスト散布すれば少ない水の量で効果的に粉じんが抑制できると推測される。また、粘土・シルト分の多い粘性土 2 では無散水でも含水比が高く(例では 52%), 粘土・シルト分が少ない碎石 C40

では散水していても含水比が低い(例では 5.2%)。このことは、粉じん発生量を定量評価したり、粉じんを抑制するための散水量を管理するための指標としては含水比に加え、土質も考慮する必要があることがあらためて確認できた。

2.2.4 解析結果

基準降下ばいじん量 a を解析した結果を図-8 に示す。想定に反して散水で含水比を上げたにもかかわらず、発生量が増える場合があった。散水した粘性土で増えた原因として、無散水より散水の測定時の方が強風であったため、あるいは空気の乾燥と強風により構内試験での模擬工事のエリア外で、粉じんが発生していたことが考えられる。また砕石 C40 では図-7 に示すようにシルト分が少なく粉じんがわずかしかなかったため、測定のパラツキの影響の方が散水の有無による影響より

大きかったと考えられる。よって、バックグラウンドの測定値が $4.1 \text{ t/km}^2/8\text{h}$ となり、他の日(最大 $0.9 \text{ t/km}^2/8\text{h}$, 平均 $0.5 \text{ t/km}^2/8\text{h}$)を超えて特に大きかった1月31日の測定値は除外することにした。基準降下ばいじん量 a について、無散水での5回の測定、および散水での5回の測定で平均した値を、国土技術政策総合研究所資料⁴⁾に記載されている「硬岩掘削」と「コンクリート構造物取壊し」の無散水・散水の値、および過年度に調査した現場測定値の解析値²⁾と併記して図-9 に示す。平均値では散水により降下ばいじん量が1/10程度に抑制されるとの結果となり、他の測定の間程度程度の抑制効果となった。今回の散水の条件での測定では模擬作業中に散水しなかったが、粉じんが懸案となる場合には施工中に追加で散水できるため1/10以下に抑制できると考えられる。

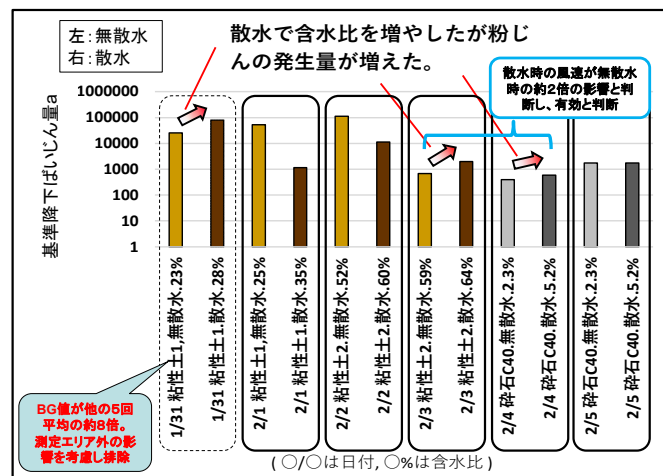
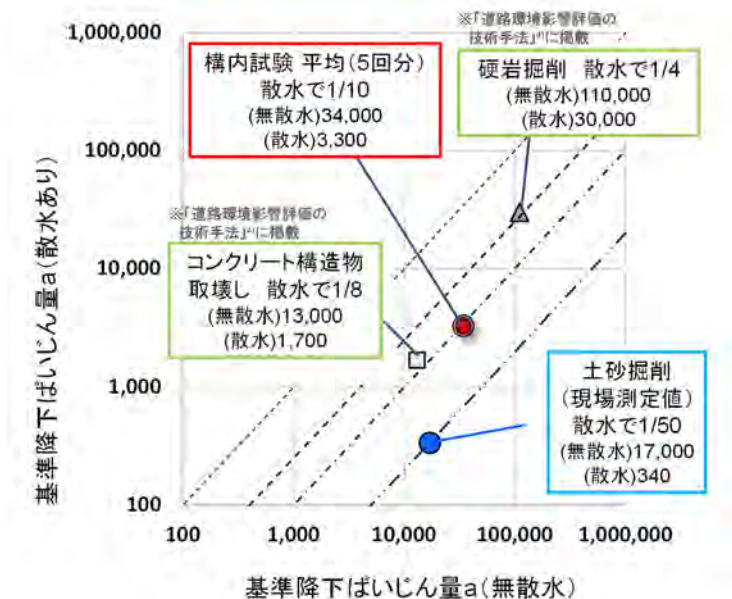


図-8 構内試験での測定値から求めた土砂掘削での散水・無散水の基準降下ばいじん量 a



(注) 構内試験値は実工事の換算をしていない。「硬岩掘削」と「コンクリート構造物取壊し」は文献⁴⁾から、「土砂掘削(現場測定値)」は文献²⁾から

図-9 構内試験での測定値(平均)と他の測定値

なお、一般的な土砂掘削では建設機械は移動や待機をするが、ここでの構内試験は図-5、図-6、および図-7 に示すように固定した位置で掘削作業を連続させる条件としたため、粉じんの発生量の係数 a が表-1 より大きめの値となっていた。構内試験値を実工事に換算するためには建設機械の移動や待機を考慮する必要がある。

また、測定ではデジタル粉じん計でも参考までに計測したが、計測値と降下ばいじん量との相関については、更なる検討が必要であると考えている。

3. まとめ

土砂掘削で発生する粉じんの散水による抑制効果を明らかにすることを目的とし、文献、ヒヤリング等で予備調査を行ってから構内試験を行った。本調査で明らかになったことをまとめると以下となる。

- ・粉じんは土砂のシルト分（粒径 $5\sim 75\ \mu\text{m}$ ）が多いと多く発生することを文献、現場のヒヤリング、各種の現場測定、および構内試験で確認した。
- ・土砂掘削に由来する降下ばいじんが散水で抑制される割合は、構内試験で $1/10$ となった。この割合は硬岩掘削の $1/4$ 、コンクリート構造物取壊しの $1/8$ より抑制効果があると解することができる値であった。

本調査では散水による粉じんの抑制効果に関するおおむねの傾向を構内試験で把握した。しかし、予測手法の確立には、より多くの測定を行い、粉じん発生の要因を解明することが必要であると考えている。

参考文献

- 1) 令和3年度「公害苦情調査」：総務省公害等調整委員会
- 2) 須山友貴，山内元貴，吉永弘志，大城温：土砂掘削の粉じんを散水で抑制する効果を予測する手法01，第48回土木学会関東支部技術研究発表会，VII-13，2021.
- 3) 山口武志・山口崇：土砂掘削で発生する粉じんの散水による抑制量の調査，土木技術資料，第65巻・第10号，pp.8～11，2023
- 4) 道路環境影響評価の技術手法（平成24年度版），国土技術政策総合研究所資料第714号，2013.
- 5) Lee CH, Tang LW, Chang, CT: Modeling of Fugitive Dust Emission for Construction Sand and Gravel Processing Plant, Environ. Sci. Technol. Vol.35, pp.2073-2077, 2001.
- 6) 栗原正美，上野孝之，西林清茂：土工事における濁水・粉塵発生防止法の研究開発，大林組技術研究所報，No.55，pp.59～62，1997.
- 7) 建設工事騒音・振動・大気質の予測に関する研究（第1報），土木研究所資料第3681号，2000.
- 8) 建設工事騒音・振動・大気質の予測に関する研究（第3

報），土木研究所資料第4010号，2006.

- 9) 工事の実施による大気環境に係わる環境影響評価に関する研究，
<https://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h15giken/pdf/0407.pdf>

20. 水素内燃機関活用による重量車等脱炭素化実証事業

水素専焼エンジン油圧ショベル及び水素供給事業実証プロジェクト（第2報）

水素専焼エンジンの油圧ショベルへの適応性と交換式水素カードルを含めた機体の安全性の確認

株式会社フラットフィールド

環境省 水・大気環境局

脱炭素モビリティ事業室

○山浦 卓也

モビリティ環境対策課

須山 友貴

1. 背景と目的

1.1 課題と目的

我が国では 2030 年度に 2013 年比 38%の CO₂ 排出量削減、2050 年にはゼロカーボン達成することを目標として掲げており、脱炭素化に向けた取組の推進が喫緊の課題となっている。我が国の産業部門からの温室効果ガス排出量のうち、建設機械からの CO₂ 排出量は 2.4%の割合を占め、その大部分が化石燃料を使用して稼働する重機から排出される。このような現状を受け、脱炭素社会の実現に向けて、国内外における複数の自動車・油圧ショベルメーカーでは重機の電動化や燃料電池、水素エンジン等の開発が進められている。水素エンジンは、燃料電池等と比較してコスト優位性が高く、本実証の水素供給方式(カードル式)であれば燃料供給も容易で(高压ガス保安法を順守しつつも必要且つ大幅な設備投資をすることなく、十分な量の水素供給が可能である)あることから、費用対効果及び導入可能性が高いと考えられる。このことから、水素専焼エンジン重機の技術開発をすることを目的とし、環境省の令和 4 年度から水素内燃機関活用による重量車等脱炭素化実証事業（水素専焼エンジン油圧ショベル及び水素供給事業実証プロジェクト）として、CO₂ を排出しない水素専焼エンジン油圧ショベルの開発・製作し実証試験を開始したのでここに報告する。

2. 水素エンジンの出力特性を油圧ショベルに適応させる為の制御方法の構築

油圧ショベルに求められる出力特性に対応し、目標値及び性能が妥当であるかを実証試験において確認する。図 2-1 は開発した水素エンジン油圧ショベルのレイアウトイメージである。

(1)出力・定格回転数の設定

目標定格出力は、操作に違和感を及ぼさないことを目標としてベースエンジン出力の 90%の 108 kW（ベースエンジン：119.3kW/1,800min⁻¹）を目標とした。図 2-2 は開発した水素エンジンの外観である。また定格回転数は増加したフライホイー

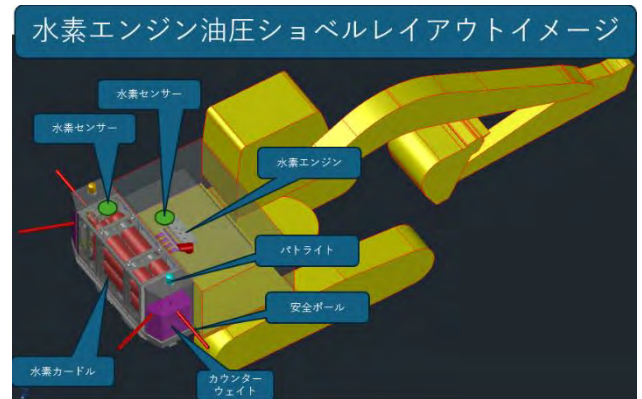


図 2-1 水素エンジン油圧ショベルのレイアウトイメージ

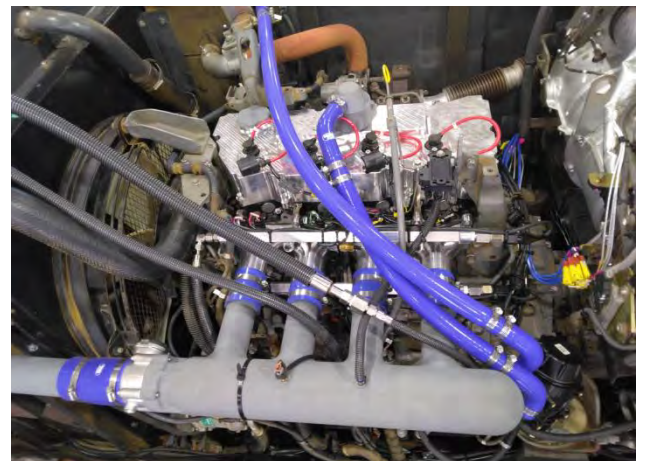


図 2-2 開発したエンジンの外観

ルの慣性力を有効に活用する事と排気エネルギーの確保の為、油圧ポンプの回転範囲を考慮した上で標準機の 1,500-1,800rpm よりも高い 2,000rpm としたが、微細な動作をさせたい時にポンプの油量を下げたい場面もありアイドルと定格以外に 1,200rpm 位の中速運転のモードも設定する事にした。

(2)水素エンジンの負荷入力増減に対する応答性

水素エンジンの特性に合わせる為、実証試験用のポンプ容積制御機を用いて可変容積式ポンプの制御を行う。これによりポンプ容積の増加速度を変化させる事で、エンジンにかかる負荷の増加を緩やかにする事が可能となり、実証試験の中で水

素エンジンに適したポンプ容積の変化速度を導出する。

ポンプの容積制御とエンジン回転数制御を併用し、エンジン回転数安定性向上を目指す。ポンプの容積制御を水素エンジン特有のトルク特性、応答性に対応させることで、オペレーターのディーゼル機に対する違和感を最小限にすることを試みる。

(3)水素エンジンのトルク特性とエンジン回転速度制御の関係

定格運転時に無負荷状態から急激に高負荷をかけると出力の増加に時間がかかり回転数が不足する。その程度によってはトルクカーブの値が低いところにかかる事があり、更にはその時点での排気エネルギーが低下する事で過給遅れも伴い出力の増加に対して不利な状況となる。その為出来るだけ回転数が不足するのを防止する目的でフライホイールの慣性重量を増加して対策した。

増強ウェイトを付けた場合のウェイトメントは純正フライホイールの約 1.6 倍となる。

図 2-3 は製作したウェイトをフライホイールに組付けた状態である。



図 2-3 フライホイールウェイトの取付状態

(4)スロットルバルブの開閉によるエンジン回転数制御

目標回転数に製定する為にエンジン回転速度制御を行う。(以降回転数制御とする) 回転数制御はスロットルバルブを制御する事でエンジン回転数を一定の回転数に制御するものである。回転数の差に応じたエンジン出力の制御を行う必要があり、負荷>エンジン出力の状況ではエンジン回転数が下がり、目標との差に比例しスロットルバルブを開きエンジン回転数を復帰させる制御を行うが、ターボラグの特性も相まって出力増加が間に合わない状況では回転数が瞬時に上昇せず、更にトルクが低い回転数まで下がった時は速やかに回転数が上昇せず、回転数制御は差分に比例しスロットルバルブを大きく開く。その後過給圧が上昇

し回転数が復帰し始める時には急激にトルクが上昇し、負荷<エンジン出力となる為、目標回転数よりも上昇してしまうが過給の勢いが強い為スロットルバルブを閉じてトルクの減少が間に合わず過回転になる。この場合油圧ポンプへの影響もある為過回転を防止しなければならず、スロットルバルブによる回転数制御とは別に燃料噴射量制御等の出力制御を併用する事で過回転を防止する制御を行う必要がある。エンジン回転数の低下量を小さくするために更なるエンジンの低速トルクの増強を課題としてVGターボの制御調整等を行う予定である。また当初のエンジン回転数変動幅目標は $\pm 200\text{rpm}$ 以内とした。

(5) 空燃比制御によるエンジン回転数制御

過回転を防止するにあたりスロットルバルブだけでの制御では製定しきれない状況があり、エンジン制御の回転リミッターによる制御を試みたが、回転リミッター制御は点火や燃料噴射を間欠的に停止させる制御であり、バックファイアが発生する為この制御では対応出来なかった。その為点火時期や空燃比の調整によりエンジン回転数の製定を試みた。まず点火時期の調整においてはエンジン出力を効果的に下げる事が出来ず、次に空燃比による調整を行った。燃料噴射マップ上で過回転領域に燃料噴射量を減らす調整を行ったところ、リミッター制御に対し安定した速度制御に近づける事が出来た。

3. 交換式水素カードルの製作と水素エンジン油圧ショベル運用時の安全性向上の為の対応：

(1) 交換式水素カードルの製作

稼働時間を確保する為 1 基 100m^3 の水素カードルを 3 基製作し交換しながら運用する。使用済みのカードルは水素充填所に持ち込み再充填を行い

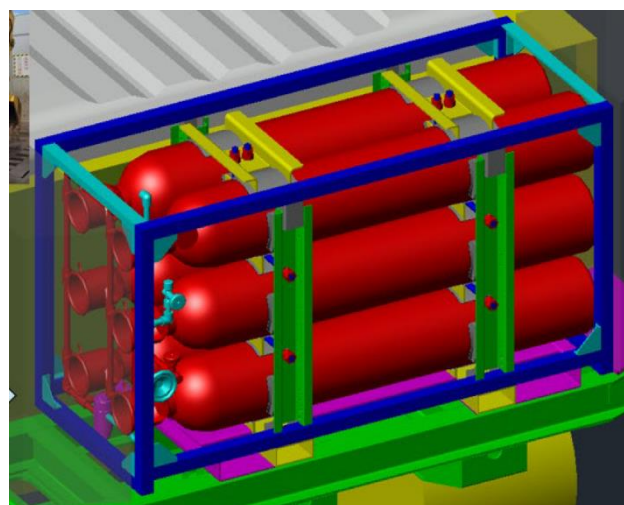


図 3-1 カードル内の水素容器のレイアウト



図 3-2 カードル 3 基が完成した状態

充填後また作業場所に配送して運用する。

図 3-1 及び 3-2 は製作したカードルのレイアウトとその完成品である。

(2) カードルの設置、固定、配管配線の接続監視インターロックの構築



図 3-3 カードル検知スイッチ

カードル下部に4か所使用

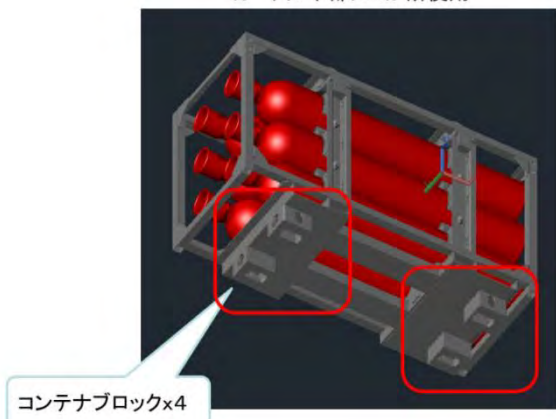


図 3-4 カードル下部コンテナブロックの取り付けイメージ

図 3-3 はカードル自体の設置状態を監視する検知スイッチである。図 3-6 のレバーロックの検知及び図 3-7 のケーブルの検知と共にインターロックとして機能し異常時はオペレーターへの警報と燃料の遮断を行う。図 3-4, 3-5 はカードルの固定具の図である

コンテナツイストロック

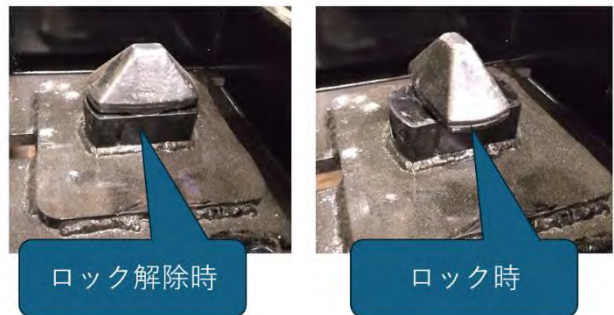


図 3-5 コンテナツイストロック

コンテナツイストロックレバーロック状態検知機構

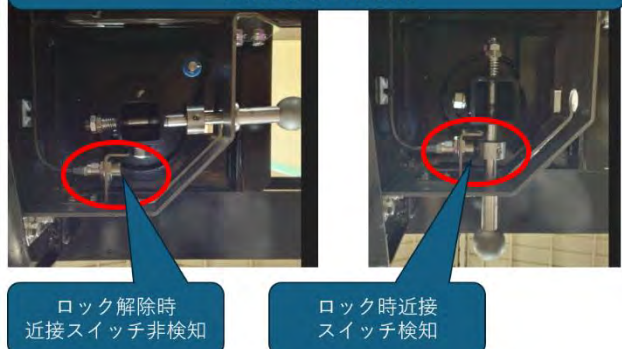


図 3-6 レバーロックの検知機構

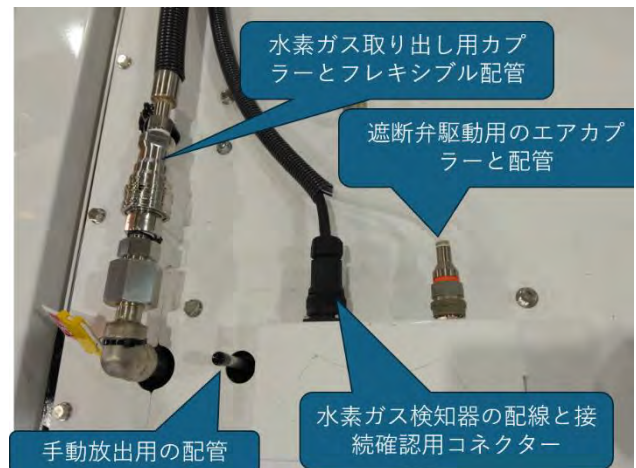


図 3-7 カードル上部配管と配線の接続状態

(3) 水素漏洩検知システムの構築：

エンジンルーム及びカードル内部に水素センサーを設置し漏洩検知時は燃料遮断と警報を発し、センサー故障時は警告表示を行う。

図 3-8 は安全装置としての水素燃料遮断弁作動条件の図である。これはエンジンに水素燃料を供給する為の条件となる。それぞれの条件においてエンジン回転中に信号はエンスト時には速やかに遮断弁を閉じ、水素漏洩の検知時は燃料の遮断が

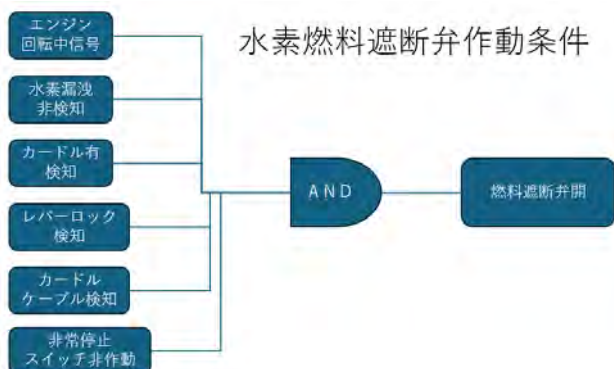


図 3-8 水素燃料遮断併作動条件

必須であり、カードルが正しく設置搭載固定されていることを監視するものとして、カードル有検知・レバーロック検知・ケーブル検知の条件がある。併せて非常停止スイッチはオペレーターが危険を感じた際に任意に水素エンジンの運転を停止し燃料を遮断できるものである。これらをすべてアンド条件として安全装置としている。

図 3-9 はオペレーターが確認できる水素エンジン関連のモニターディスプレイである。



図 3-9 水素エンジン情報ディスプレイ

ディスプレイのレイアウトを図 3-10,3-11 に示す。

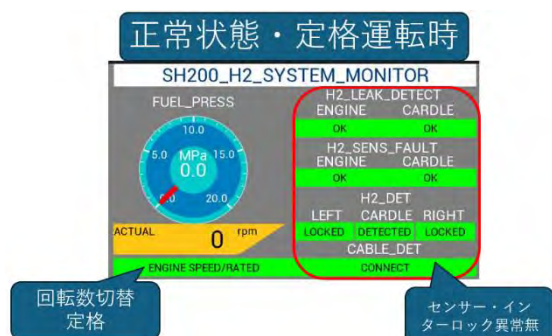


図 3-10 ディスプレイ表示（正常時）

(4) 水素エンジン油圧ショベル稼働時の周知：

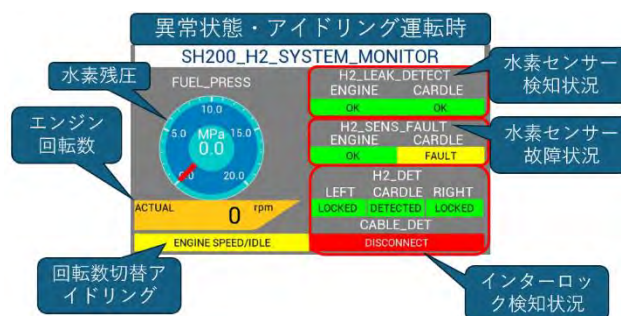


図 3-11 ディスプレイ表示（異常時）

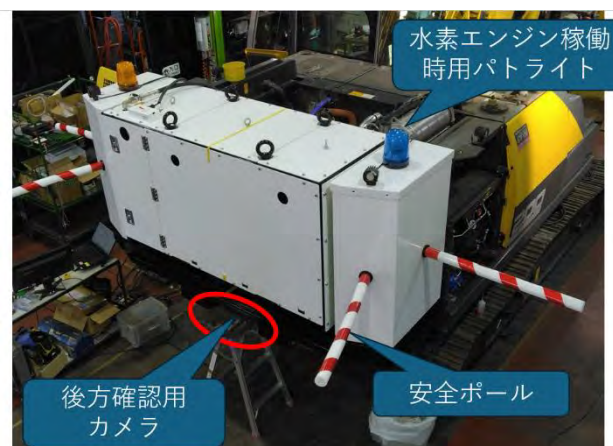


図 3-12 パトライト及び安全ボールの設置状態

まだ一般的でない水素エンジン油圧ショベルの稼働時には青色のパトライトを点滅し周囲に対し稼働を周知する。図 3-12 は実機のパトライト及び安全ボールの取り付け状態を示すものである。

後方視界用カメラについて標準機はカウンターウェイト上部に取り付けられていたが、交換式カードルへの取り付け及び交換時のカードルの移動経路に設置出来ない為カードルの下部ベースフレームに取り付けた。

4. まとめ

今年度の検討結果を踏まえ、今後の方針を以下に示す。

- (1) エンジンベンチで開発した水素エンジンを実機に搭載し実際の現場における運用時の課題の抽出と対策を実施。
- (2) 油圧ショベルの要求性能に対する水素エンジンの適用性と、油圧制御の最適化の検証を実施。
- (3) 水素エンジン油圧ショベルの環境性を評価する基準として、ディーゼルエンジン油圧ショベルの環境性の検証を実施。
- (4) 製作した交換式水素カードルの実機での運用時や交換作業時における課題の抽出や実用性の検証を実施。
- (5) 水素油圧ショベルの導入及び水素運搬によって排出されるにおける CO₂ 排出量削減効果を評価する。

21. 建設機械分野の脱炭素化に向けた政府の取組について

環境省 水・大気環境局 モビリティ対策課
脱炭素モビリティ事業室

○ 植竹 康朋
須山 友貴

1. はじめに

環境省では、国土交通省、経済産業省と連携して建設機械の電動化を促進するため、令和6年度から「産業車両等における脱炭素化促進事業（建設機械の電動化促進事業）」を開始した。

2050年カーボンニュートラルの実現に向けた脱炭素戦略が求められる中、日本のCO₂総排出量のうち約0.5%が建設機械の稼働により排出されている。これまでも作業効率や燃費性能の向上による省CO₂化を進めてきているが、カーボンニュートラルの達成には、中長期的には抜本的な動力源の見直しも含めた取組が必要である。

この事業はグローバル市場への展開も念頭におきながら、ミニ・小型ショベル等の開発・普及を促進するため、国内の需要喚起と、多様な現場における電動建機による施工のモデルケースの形成、今後の電動建機の普及拡大に向けた必要な知見の収集を行うことを目的としている。

本論文は、こうした事業の背景と課題、政府の取組について紹介し、建設機械の脱炭素化推進の一助とするべく、まとめたものである。

2. 地球温暖化対策への取組み

まず、地球温暖化対策計画と、建設機械市場について概観する。

2.1 事業背景

「2050年カーボンニュートラル（CN）宣言、2030年度46%削減目標（2013年度比）」の実現に向けて、地球温暖化対策推進法に基づく政府の総合計画が閣議決定されてから、3年近くが経過する。令和4年度（2022年度）における日本全体のCO₂排出量は、約10億3,668万トンにおよび、そのうち約34.0%が産業部門から排出されている。このうちの1.7%が建設機械の稼働によるCO₂排出で、その量は587万トンになる。これまでは国土交通省が主導して、ICT施工による作業効率の向上や建設機械の燃費性能の向上による省CO₂を進めている。しかしそれだけでは目標には届かず、CNの達成に向けて中長期的には抜本的な動力源の見直しも含めた検討が必要である。

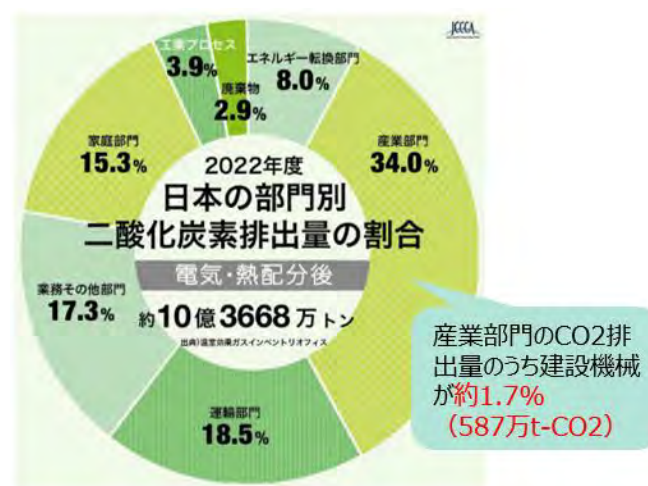


図-1 日本の部門別二酸化炭素排出量の割合（2022年度）

出典：温室効果ガスインベントリオフィス

2.2 海外における建設機械の脱炭素化

海外においては、CN化・脱炭素化に向け建設機械に特定して支援をしている事例はまだ少ない。事例として、政府レベルではスウェーデンが「気候変動対策支援金制度」、ノルウェーが「ゼロエミッション建機購入支援事業」、オランダが「クリーン・ゼロエミッション建設機械補助事業」で補助制度の導入をしている。地方自治体レベルでは、韓国の複数の自治体が電動建機の普及に向けた補助、アメリカやカナダの一部の自治体が建機以外の船舶やトラクターなども含めた支援制度が存在する。一方、ドイツやイギリス、中国などのその他の国々では、電動建機を対象とした公的支援制度は確認ができていない。

2.3 建設機械分野における日本メーカー

建設機械の市場規模（国内・輸出）は、3兆3,736億円（2023年）（（一社）日本建設機械工業会より）であり、そのうち国内向けは1兆1,307億円である。一方、輸出は2兆6,052億円と建設機械市場の7割近くを占める。このため、日本メーカーにとって国際ルールとグローバル市場への対応は必

須であり、各国の制度を先にらみし、世界市場に向けても脱炭素化を着実に実行していく必要がある。

国内建機分野において日本メーカーのシェアは7割を超える。特に油圧ショベルの国内市場シェアは、大手5社（コマツ、日立、キャタピラー、コベルコ、住友）で9割程度を占め、油圧ショベルにおいては強い競争力を有すると考えられる。

一方で、中型から超大型建機のカーボンニュートラル対応に関しては、技術動向やインフラ設備の推進状況を引き続き見極めながら、電動化、FC（水素電池）、水素内燃機関、合成燃料などから適切な方策を選択していく必要がある。

こうした状況を踏まえ電動建機の普及に向けては、まずは強い競争力を持つ油圧ショベル分野を強化することが得策である。今後10年間でミニ・小型電動建機（ショベル）の「開発」・「性能向上」・「車両導入」への投資を優先・重点的に促し、進化させることで、建設機械分野でのCN化が加速していくと考えられる。

2.4 ミニ・小型ショベルの市場

電動建機は静穏性、無排ガス、モーター特有の操作性にメリットがある。一方、バッテリー稼働時間、パワー、給電環境についての制約がある。これらの特徴を活かしたミニ・小型電動建機（ショベル）の使用現場は、都市部や小規模な施工との相性が良いと考えられる。

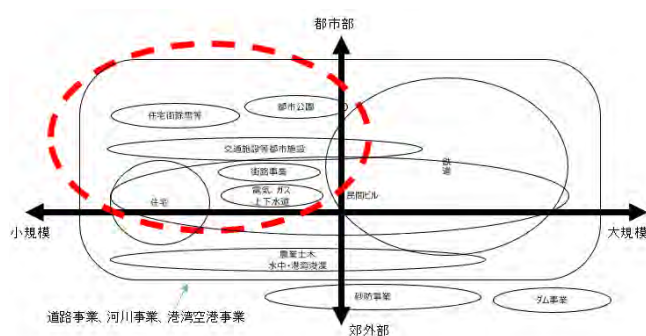


図-2 ミニ・小型ショベルが適合する現場

たとえば、住宅関連街路事業や住宅街における除雪、都市公園、交通施設等都市施設、電気ガス上下水道などの現場が適すると考えられる。また民間ビル、道路、河川、港湾空港事業においても規模と場所によって、適切な現場が多数あるものと考えられる。

このような分野から国が電動建機普及初期の導入を支援し、公共工事を中心に電動建機使用の経験を積んでもらう。CO2削減量や現場の種類、稼働日数など、使用についてフォローアップする。多様な現場で使用されることで広く普及し、民間工事へ波及させることを想定している。

3. 建設機械の電動化促進事業

このような背景を踏まえ、国土交通省、経済産業省と連携して、令和6年度から「産業車両等における脱炭素化促進事業（建設機械の電動化促進事業）」を創設した。以下、同事業の概要について説明する。

3.1 事業概要

建設機械の電動化促進事業は、GX建機（後述）を導入する事業者に対し、建設機械や充電設備の購入に係る経費の一部を補助し、多様な現場における電動建機による施工のモデルケースを形成することを目的としている。併せて、GX建機を使用する事業者等からのヒアリング、施工等に係る情報収集、CO2削減効果の確認等を行い、今後の電動建機の普及拡大に向けて必要な知見を得るものである。

2024年度の補助事業の予算規模は、約2.1億円である。補助対象は建機本体と、商用電源が届かない現場を想定した充電設備、データ収集等サポート関連の委託費用を対象としている。建設機械の補助率は、車両本体価格に対して同等仕様の従来機との差額の3分の2、充電設備については本体価格の2分の1を、民間事業者・団体などに対して補助する。

補助対象となる建機本体（GX建機）は、国土交通省が実施する「GX建設機械認定制度」（以下、「認定制度」）で認定された型式の建機である。GX建機とは、建設施工現場における電動建機の普及を促進し脱炭素化を図るため、国土交通省の創設した建設機械認定制度の認定を受けた電動建機である。公募開始の2024年5月時点では、電動油圧ショベル15機種及び電動ラフテレーンクレーンの1機種がGX建機として認定されており、今後も随時、認定が追加される見込みである。

3.2 事業で得ようとする知見

本事業では電動建機の普及のため、施工管理と電動建機の使用方法を一体で考えて、様々な現場における電動建機の現場適用性を確認する。まずエリア別の視点から、様々な地域の事業を採択することにより、寒暖や風雪など、地域の違いによるデータの取得を行う。また工事現場の種類としては、道路関係では道路の新設工事や橋梁下部の工事、維持修繕工事では河川工事のうち小規模な工事や河川構造物設置工事など、ミニ・小型ショベル等による作業が中心の現場を想定している。

建機の稼働は、同一年度内で複数の現場で使用される可能性が高いため、工事現場での稼働に加えて、保守体制等を含む実運用の観点からの建機のデータを取得することも有益と考えられる。

補助金受給機の使用に係る情報の他に集めるべきデータとしては、工事における基本作業、工事計画検討に必要な事項、CO2削減効果などの確認の検証事項を想定している。事例データや留意点をまとめ、業界団体等を通じて広く周知することを想定している。

このようにして得られた知見をもとに、経験の無いあるいは少ない中小企業や小規模自治体が、電動建機を用いた工事を受注又は発注しやすい環境を整備することを目指している。

3.3 補助事業のスキーム

建機の所有形態としては、建設会社が自社で所有する形態やリース会社を通じて購入する形態がある。また、建設機械は用途が特殊であるため、レンタル会社が所有し必要に応じてレンタルされる形態もある。本補助事業において補助を受ける対象者は電動建機の購入者としており、購入者は施工会社・リース会社およびレンタル会社を想定している。

リース会社が電動建機を購入した場合には、補助金相当分をリース料から減額することを補助要件として、利用者の負担増をカバーしてもらう。事業終了後、一定期間後に稼働率を確認し、悪かった場合には補助金返還を求めるなどにより、執行の正当性を担保する。

レンタル会社が電動建機を購入した場合も補助金の受給は可能とするが、補助金相当分をレンタル料から減額することは補助要件とはしない。これは、レンタル料の算出には様々な因子があり、確たるレンタル料算出式が無いのが実態であり、レンタル料の中で正当な補助金相当額を定義することが難しいからである。実際の工事において、レンタルを利用する割合も多いことから、実証事例を確保するため、レンタル事業者による補助金の活用も可能とするのが現実には即していると考えている。

実証事例は、公共工事に加え、民間工事も対象とする。

3.4 公募の状況

建設機械の電動化促進事業は2024年4月に補助事業者（執行団体）を決定し、5月27日から補助事業概要について執行団体を通じて公表、9月末までの公募を開始した。7月末までに受付をした申請について、第1次の採択審査を8月に実施し、計22台約58百万円の交付予定金額の採択を行った。多様な現場における電動建機による施工のモデルケースを形成するという観点では機種・メーカー別に複数の応募があり、エリアとしては東北・北陸地区以外のほぼ全国から応募があった。工事の種類は当初想定していた工事種類の半数程度ではあるが、8月末現在公募は続けられ

ており、できるだけ多様な現場に利用してもらえようという申請がなされるよう、引き続き関係先に働きかけを行っている。



図-3 令和6年度 建設機械の電動化促進事業

4. 電動建機の普及に向けた課題と施策

今後、補助事業の公募と結果によって新たな有益な知見がもたらされるであろうが、現時点で指摘されている、電動建機に特有の普及に向けた課題について考察する。

4.1 ラインナップの拡充

建設機械には油圧ショベル、ホイールローダの他にも、ブルドーザー、クレーン、ダンプなど多種類にわたる機械がある。パワーや稼働時間の観点から電動には不向きな大きさあるいは種類もあるが、工事の規模や種類による様々なニーズに対応できるよう、相当のラインナップが拡充されることが望ましい。その一方で、いたずらに機種を拡大しても、使用シーンが限定されているため量産効果が発揮されないという課題も見えている。たとえば、電動建機の充電方法によるラインナップがある。建設機械への充電には以下の3種類の方法がある。

- A. バッテリーを搭載し、商用電源から給電
- B. バッテリーを搭載し、急速充電設備から給電
- C. ケーブルにより商用電源から給電する方法。

このうちCは数十年前から、トンネル内の掘削など排気ガスを出すのが望ましくない閉鎖空間における工事などで利用されている、古くから存在する技術である。しかし、市場規模の小ささあるいは使い勝手の悪さにより、新しい建機があまり製造されていない。このため、利用したい時に機械が調達できない、あるいは古い機械に多額のメンテナンス費用をかけないと利用できないという課題が指摘されている。

4.2 企業規模による導入の違い

民間企業における電動建機の使用例は、企業規模により違いがある。投資家からの要請もあり、

体力のある大手企業は自社でリスクを取り、自主的に電動建機の使用を始めている。たとえばゼネコンによる建築工事や、レンタル業者による電動建機のラインナップなどである。一方で国内に数多く存在する中小企業の中には、電動建機の使用に関心を示しつつも、高額な電動建機の導入には踏み切れずにいる企業が存在する。

工事金額、件数と企業規模の関係は、以下のように整理している。一般的な国発注土木工事の国土交通省等級のAランク企業（7億2,000万円以上の工事を受注できる）は、全国規模の経営であり、電動建機導入に関して自社でリスクを取れる体力を持っている。しかし、Aランクの工事は件数が非常に少ない。一方、国土交通省等級のCランク企業（3億円までの工事を受注できる）は、多くが都道府県単位での経営規模の、地場の中小企業が該当する。このCランクの工事は、全体の工事件数のうち9割弱、工事金額でも国内の約半数を占めるボリュームゾーンである。これらの工事でCランク企業が電動建機を使えるようにすることが電動建機普及のカギとなる。しかしCランク企業は電動建機導入に対して自社でリスクを取ることは厳しい。このため国による支援により、電動建機導入へのハードルを下げるのが求められる。また、公共工事で使用経験を積ませることで、国内中小企業も電動建機を使いこなせる環境を整えることが必要である。

4.3 電動建機導入のインセンティブ

国土交通省においては、既に次のような取り組みを実施している。一部の地方整備局では、公共工事の中で環境対策型建設機械を用いて工事を行った受注者に対して、工事終了時の工事成績で加点する措置を実施している。加点があると、次の公共工事入札時に有利になる。この加点対象に電動建機も含めている例として、北海道開発局の公共調達におけるカーボンニュートラルがある。

道内建設業において率先してCNの取組を進めるため、北海道開発局および北海道、札幌市が発注工事において「北海道インフラゼロカーボン試行工事」を新設した。工事成績でインセンティブを付与することで、道内建設業におけるCNの意識醸成を図っている。燃費基準達成建設機械認定制度の認定型式などの「環境対策型建設機械の使用に対して」加点措置等を実施、工事終了時に発注者が工事成績におけるインセンティブを付与する。工事成績での加点は次の入札で有利になるため、よりインセンティブが大きくなるという仕組みである。

また、『認定制度』を活用した電動建機普及の枠組みも検討されている。これは、公共工事発注時の契約書内で電動建機の使用を位置づけ、電

動建機の普及促進を図るものである。公共工事で使用可能な電動建機については、「認定制度」により性能の担保を図る。普及促進の枠組みとして、契約図書での認定型式の使用の位置づけを公共工事発注者から行い、「認定制度」にて型式認定された電動建機を利用させる。このことにより公共工事を含め、日本国内の建設施工現場への電動建機の普及を推進させるものである。

これらはいずれも公共工事におけるインセンティブの例であるが、民間工事においても電動建機の利用に資する効果的なインセンティブが欲しいところである。

世界の主要国における電動建機に関する規制（使用原則など）は、排ガスに関する規制はいずれの国でも実施しているが、それ以外の規制は、北欧各国で自治体レベルでの実施が確認されるのみであり、国単位での実施は確認されていない。2024年度にわが国が国単位で行う規制措置：公共工事でGX建機を契約図書に位置づける措置（2024年度から実施予定）が、世界初の事例となる可能性がある。これにより、建設工事・土木工事における稼働実績大幅増により、市場性のある価格の早期実現から、民間工事への波及効果を期待したい。

5. 今後の方向性について

我が国では電動建機に関する検討が引き続き進んでおり、例えば、2024年6月の「経済財政運営と改革の基本方針2024」および「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画2024年改訂版」では、電動建機の導入促進について言及がされている。

引き続き、関係省庁と連携しつつ、建設機械の電動化を促進してまいりたい。

6. おわりに

日頃より、建設施工分野の関係機関、関係団体等の皆様にはご協力を頂き、感謝申し上げます。現在進行中の補助事業であり、本年度の成果をできるだけ速やかに還元してまいります。引続きより良い地球温暖化対策施策を実施するべく、ご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願いいたします。

22. ディーゼルエンジン用水素アシスト技術の評価に関する研究

エンジンベンチ試験による燃費向上及び CO₂排出削減効果の検証

西松建設株式会社
西松建設株式会社
久留米工業高等専門学校
久留米工業高等専門学校
株式会社アクティオ

○ 戸田 泰彰
石渡 寛之
坂田 瑠璃
中武 靖仁
山口 利治

1. はじめに

水素アシスト技術とは、既存のディーゼルエンジンに後付けで吸気口（エアインテーク）から燃焼室に水素を送り込み、燃料と混焼させることで、燃費向上と CO₂排出量の削減を行うものである。本技術はディーゼルエンジンを動力源とする発電機や重機といった建設機械だけでなく、バス、トラック、船舶等の輸送機械へも幅広く利用可能であり、また後付け（レトロフィット）可能で、装置取付け直後から軽油や重油の使用量を抑制し、CO₂排出量が削減できる。また吸気に水素を混ぜるため、万が一水素の供給が停止してもエンジンの異常や故障に繋がることはない安全な技術である。本技術に関する燃費向上の実験結果等が報告されているが、定量的な評価としては十分ではなく、また様々なエンジン形式（排気量、燃料噴射方式）に対する最適な水素供給量やその効果については実験、検証がなされていない。

本研究ではエンジンベンチ試験機を用いて、小型ディーゼルエンジンを対象とした負荷試験を実施する。さらに排出ガス測定により、排出ガス基準項目（CO、HC、NO_x、黒煙）と CO₂の排出量から、水素供給時のエンジンの燃焼効率を評価する。

2. 実験装置および方法

2.1 水素アシスト技術

ディーゼルエンジン用水素アシスト技術（図-1）は、水電解により水素を生成し吸気部から供給することで、燃費向上と CO₂排出削減を実現する。海外における既出の報告りでは、排気量 10000cc のディーゼルエンジンに対して 4L/min の水素を供給することで、最大で約 10%の燃料消費量が低減（燃費向上）された事例がある。さらに付随する効果として、水素供給によりエンジン内部のカーボンラッジ等の堆積物を低減させ、エンジンや排気システムの高寿命化、排気再循環バルブの交換など

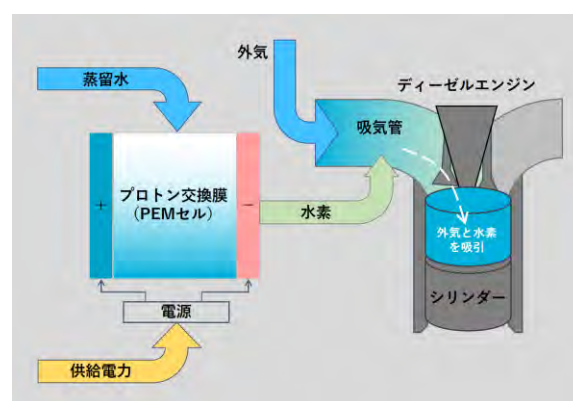


図-1 ディーゼルエンジン用水素アシスト技術

のメンテナンス頻度、コストの削減が期待される。

2.2 実験装置

実験装置（図-2）は供試機関、動力計、排ガス測定機器、電子天秤、および水素供給装置等で構成される。動力計には吸収動力 150 PS の水動力計を用いた。燃料消費量は燃料タンクの質量を電子天秤で測定した。また本実験では電気分解による水素生成・供給ではなく、水素ボンベから減圧し流量を制御して供給する方式とした。

2.3 供試機関

(1) 機械式燃料噴射方式

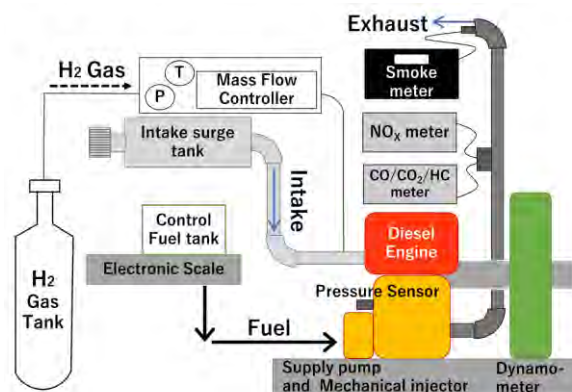


図-2 実験装置概略図

機械式の供試機関として使用した、ヤンマー社製水冷単気筒ディーゼル機関 NF-19SK（排気量：1,007cc）の外観（写真-1）を示す。

(2) コモンレール式燃料噴射方式

コモンレール式の供試機関として使用した、ヤンマー社製水冷単気筒機関 NDF150-E（排気量：760cc）の外観（写真-2）を示す。



写真-1 ヤンマーディーゼル NF19SK

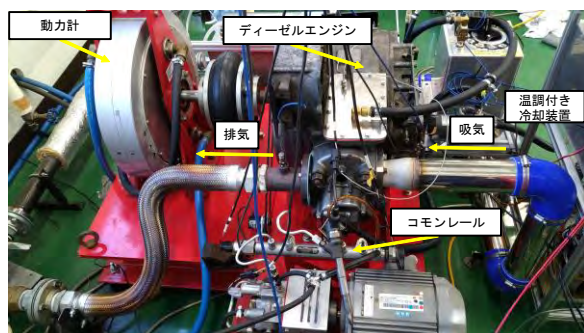


写真-2 ヤンマーディーゼル NFD150-E

2.4 実験方法

(1) 機械式燃料噴射方式

吸気管から水素を供給し、空気と水素の予混合気を用いて性能実験を行った。燃料は軽油を使用し、回転数 2,000 rpm において負荷 75% (荷重 120N)、50% (80N)、25% (40N)、12.5% (20N)、6.25% (10N) での軸出力や燃料消費量、排ガス成分量を計測した。計測データからエンジンのサイズに依存しないエンジン負荷に相当する正味平均有効圧力 P_{mec} [kPa]、燃料消費率 BSFC [g/kWh]、正味窒素化合物 BSNOx [g/kWh] を算出した。

水素供給量は供試機関の排気量 1,007cc に対して 0.4L/min を基準として、最大で 20L/min まで供給量を増加させて評価を行った。ここでエンジン吸気量に対する水素供給量（水素濃度）としては、20L/min の供給で 1.986vol% であり、水素の希薄可燃限界濃度 2.4vol% と比較して十分低い値である。

さらに本実験では、燃料にバイオディーゼル燃料（BDF）を使用して性能実験を行った。

(2) コモンレール式燃料噴射方式

前述の機械式と同様に水素を供給し、回転数

2,000rpm、燃料噴射時期 BTDC10° において負荷 87.5% (荷重 175N) から負荷 12.5% (25N) での軸出力や燃料消費量、排気ガス成分量を計測した。水素供給量は供試機関の排気量 760cc に対して 0.3L/min を基準として供給量を変動させる。

2.5 水素供給方法

吸気管への水素供給部（写真-3）を示す。水素供給装置は FC デザイン社製 GFC-KRM-2023 である。

2.6 排ガス測定装置

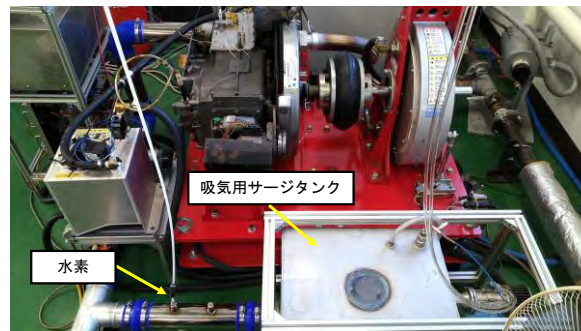


写真-3 吸気管への水素供給部

排気ガスは CO、CO₂、HC、NOx、オパシディ（光透過式黒煙）の 5 種類を測定した。CO、CO₂、HC の計測には HORIBA 製の MEXA-1170HNDIR を用いた。測定原理は非分散赤外線吸収法（加熱式）であり、測定範囲は CO : 0-1/3/6/12 vol%、CO₂ : 0-10/16/20/25 vol%、HC : 0-1000/2000/3000/5000 ppmC6（ヘキサン換算）である。

NOx の計測には HORIBA 製 MEXA-720NOx を用いた。測定原理は直挿式ジルコニアセラミックセンサであり、測定範囲は 0-3000 ppm である。

オパシディに関しては HORIBA 製オパシメータ MEXA-60SW を用いて計測した。測定原理は光透過方式（パーシャルフロー排圧式）であり、測定範囲は 0-99.9 % である。

2.7 エンジン燃焼圧計測装置

エンジン燃焼圧計測装置（YOKOGAWA 製スコープコーダ DL850E）を使用し、取得データからエンジン燃焼圧解析パッケージにより燃焼圧、平均熱発生率を算出した。

2.8 燃料

本実験では、JIS2 号軽油とバイオディーゼル燃料（BDF）の 2 種類の燃料を使用して（表-1）、水素アシスト技術に与える影響を調査した。

表-1 軽油と BDF の成分

項目	JIS2 号軽油	BDF
密度 kg/m ³ @15°C	823.2	882.8
粘度 cSt@40°C	2.68	4.4
引火点 °C	63.5	65
流動点 °C	-12.5	-7.5
低位発熱量 MJ/kg	43.1	37.01

3. 実験結果

3.1 機械式燃料噴射方式

燃焼性能の評価結果として、縦軸に正味燃料消費率 BSFC、横軸に機関の負荷を示す平均有効圧 P_{mec} のグラフ（図-3）を示す。水素供給量 0.4～1.2L/min 程では、低負荷 12.5%（平均有効圧 89.4kPa）で若干の消費燃料の低減（燃費向上）が見られるが、高負荷を含めた全域ではほとんど影響が見られない。

次に水素供給量を 10 倍の 4～12L/min に増やした結果を図-4 に示す。さらに横軸は同様とし、縦軸に正味二酸化炭素排出量 $BSCO_2$ （図-5）としたグラフを示す。この条件では負荷変化のほぼ全域で水素供給による燃費向上の効果が認められる。また図-5 からは燃費向上とともに CO_2 排出量の低減が確認できる。

燃料に BDF を使用した場合の燃焼性能を図-6 に示しており、軽油と同様に負荷変化の全域で燃費向上の効果が確認できる。

水素供給時の軽油と BDF の燃費性能の比較（図-7）を示す。縦軸に Control を基準とした燃料消費変化率、横軸を水素供給量とし、正味平均有効圧は負荷 12.5%（89.4kPa）である。この結果から水素が燃料としての役割を果たし、軽油や BDF の消費量を低減させたと考察される。また軽油と比較した場合に BDF の方が若干高い燃料消費変化率を示しており、20L/min の水素を供給した場合には、14.7%の BDF 消費量の削減効果が得られた。

次に水素の発熱量を基に、水素 1L 当たり BDF0.29g と換算して燃料消費変化率を示す（図-8）。結果として水素供給量の増加に伴って変化率も増加（損失が増加）しており、20L/min 供給時には約 25%の水素が燃焼に使われていないことを示している。これはディーゼルエンジンの特性であるバルブオーバーラップ（排気時に排気弁と吸気弁が同時に開いている状態）が関与したと考えられ、吸気で取り入れた水素と空気の予混合気の一部が排気弁から放出され、燃焼に使用される水素量が減少している可能性がある。

燃焼中の筒内燃焼圧と平均熱発生率を示す（図-9）。仮説として、燃費向上は水素混入によって燃焼温度が上昇したためと考えていた。しかしこの結果から、水素供給時には燃焼圧が低下し、燃焼温度も低下、また燃焼圧の微分である熱発生率のピーク値も低い。これにより水素はあくまで燃料を代替する役割を果たしていると考察される。

さらに燃焼温度の低下によって、 NO_x 排出量の低減も確認された。BDF 燃焼時には水素供給によって、最大 8.9%の NO_x 排出削減効果が得られた。

3.2 コモンレール式燃料噴射方式

水素供給量を 3～9L/min としたときの燃焼特性

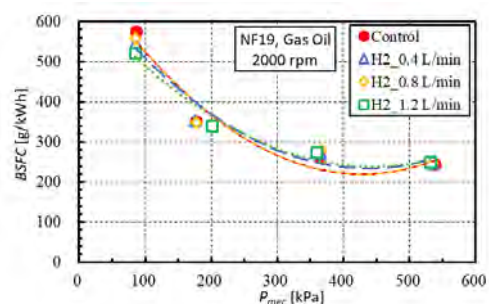


図-3 燃料消費率 BSFC（機械式，軽油）

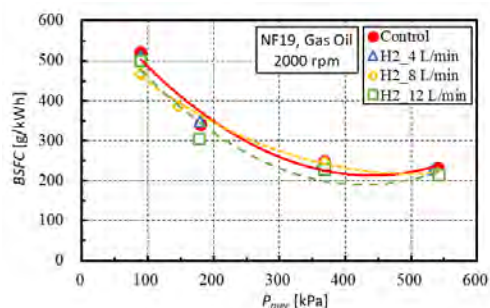


図-4 燃料消費率 BSFC（機械式，軽油）

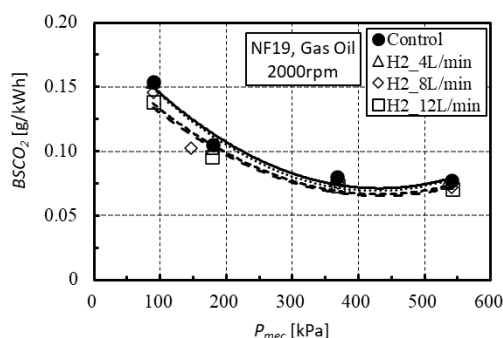


図-5 二酸化炭素排出量 $BS CO_2$ （機械式，軽油）

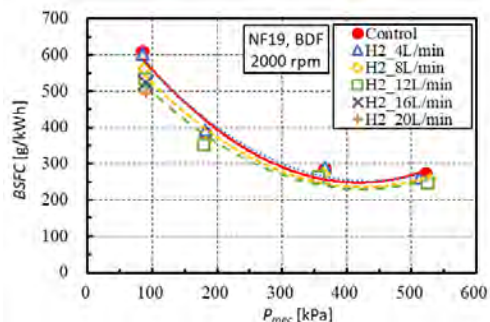


図-6 燃料消費率 BSFC（機械式，BDF）

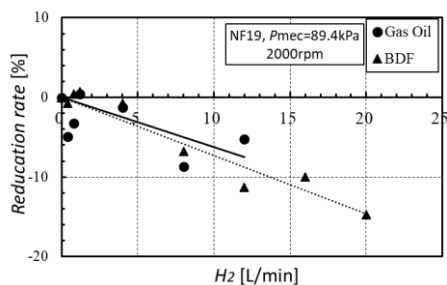


図-7 軽油/BDF の燃料消費変化率の比較（機械式）

(縦軸：正味燃料消費率 BSFC) を示す (図-10)。機械式燃料噴射方式の結果と同様に、負荷変化の全域で燃費向上の効果が確認できる。

水素供給量に対する燃料消費変化率を示す (図-11)。図-8 と同様に、水素を燃料として換算 (水素 1L 当たり軽油 0.25g) した場合の変化率を破線で示している。平均有効圧は負荷 12.5% に当たる 93kPa とした。コモンレール式においては、水素供給量 9L/min に対して燃料消費削減率が約 6% (線形近似) となり、燃費向上の効果は機械式よりも低い。また機械式と同様に、供給した水素の一部が燃焼されずに排気されていると考えられ、9L/min 供給時には約 20% の損失が生じている可能性がある。

4. まとめ

4.1 成果

本研究では、水素アシスト技術の燃費、排ガス及びエンジン燃焼圧に対する影響を調査するため、エンジンベンチ試験機による評価を実施した。

(1) 吸気に水素を供給することでディーゼルエンジンの燃費が向上する。

➤ 機械式 (1,007cc) で軽油を使用、水素供給量 12L/min のとき約 7% の燃費向上

➤ コモンレール式 (760cc) で軽油を使用、水素供給量 9L/min のとき約 5% の燃費向上

(2) 水素アシスト技術はエンジン低負荷条件の方が燃費向上の効果が高い。

(3) 水素アシスト技術により CO₂ 排出量を削減できる。一方で NO_x 排出量は増加しない。

(4) 水素アシスト技術は燃料の消費量を低減できる一方、供給した水素が未燃分として排出されている可能性がある。そのため、供給した水素の発熱量を軽油分として換算した全体としては、燃費が悪化する傾向が見られた。

4.2 建設機械等へ本技術の適用に向けた課題

建設工事における CO₂ 排出削減に向けて本技術の適用を検討する場合に、水素供給の実装上の課題が挙げられる。重機、発電機等の建設機械では 5000cc 以上の大型のディーゼルエンジンが一般的に使用され、そこで今回程度の燃費向上を狙う場合には、50L/min 程の水素供給が想定される。こういった方法 (水電解または水素ボンベ) で大量の水素供給が実現可能か、さらに全体のコストメリットを考慮した供給方法を選定する必要がある、水素サプライチェーンの整備に関わる部分は業界全体で取り組むべき重要な課題と考える。

参考文献

1) Whitaker, Richard・Rechberger, David・Jokinen, Kristian : Innovative Dual Fuel Aftermarket Emissions Solution, USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy,

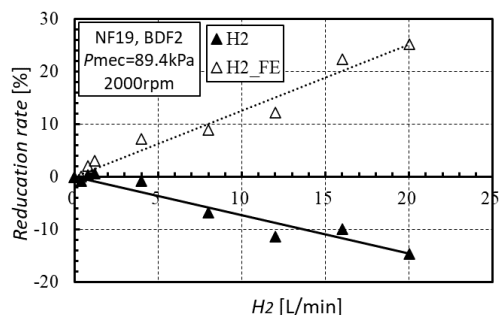


図-8 燃料消費変化率 (機械式, BDF)

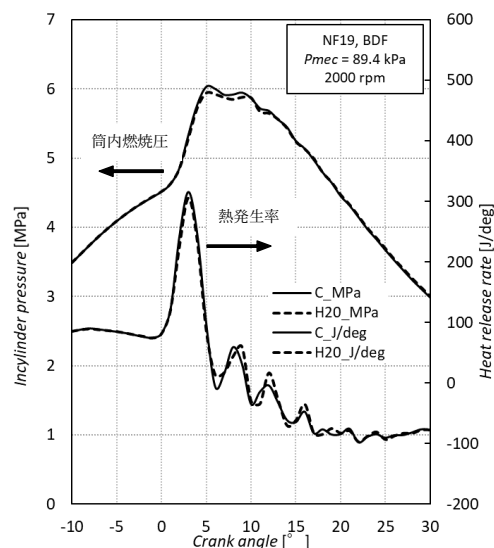


図-9 筒内燃焼圧と熱発生率 (機械式, BDF)

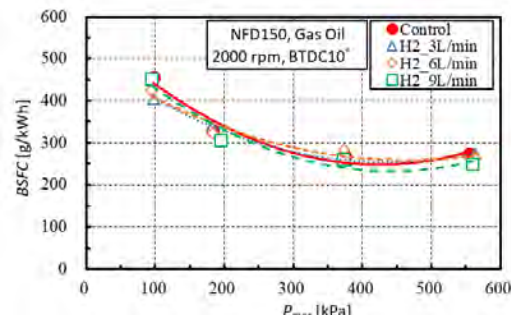


図-10 燃料消費率 BSFC (コモンレール式, 軽油)

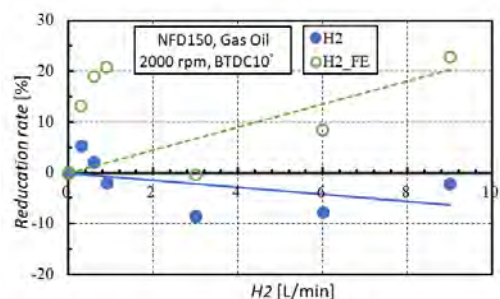


図-11 燃料消費変化率 (コモンレール式, 軽油)

EE0007800, 2019

2) 小林伴星・宮本亨・三上真人・小嶋直哉・柁島一・島崎勇一: ディーゼルエンジンにおける少量水素添加時の燃焼・排気特性, 日本機械学会講演論文集 No.085-1, 2008

23. 湯気や土埃が発生する実施工現場において安全性を向上させる 高精度検知システムを搭載した緊急ブレーキ装置の開発

酒井重工業株式会社

○ 遠藤 涼平

1. はじめに

近年、建設現場における安全性の向上がますます重要視されている。特に、ロードローラを用いた締固め作業では、オペレータが進路方向の安全確認やロール・タイヤへのアスファルト合材の付着防止、締固め路面の品質確認など、多岐にわたる項目を同時に行う必要がある。さらに、アスファルト合材の温度が下がる前に転圧作業を完了させる必要があり、オペレータには常に高い注意力と迅速な対応が求められる。このような作業環境下では、事故やトラブルのリスクが高まる。令和5年の統計によれば、締固め用機械に関連する死傷災害(休業4日以上)の件数は77件¹⁾に達し、そのうち57件¹⁾(74%)が激突や巻き込まれによる事故である。このため、締固め作業中の安全性を向上させるためのさらなる対策が求められている。

安全対策の強化には、以下の3つのアプローチが挙げられる。第一に、作業者や障害物との接触を回避、または被害を軽減するための緊急ブレーキシステムなどの安全装置の普及促進である。これにより作業時の事故リスクの低減が期待される。第二に、安全装置の機能精度をさらに向上させる必要がある。車両に安全装置が搭載されていても、実際の施工環境において十分に機能しない場合や、安全装置の導入が作業性を著しく悪化させ、その結果、現場で使用されない状況が生じる場合には、死傷災害の減少は困難となる。第三に、現場作業者の安全意識をさらに向上させていくことが重要である。これは安全装置によって従来わからなかった危険な状況をリアルタイムに注意喚起することで、作業者にさらなる危険予知(KY)活動へと結び付けることが期待できる。

安全対策に用いられる安全装置の一つである緊急ブレーキシステムは、以下の3つの要素で構成される。まず、進路上の障害物を検知する「検知部」、次に、車両の速度や周囲の状況に応じて検知した物体の危険度を判断する「判定部」、最後に判定された危険度に応じて警報や緊急ブレーキを動作させて車両を停止させる「実行部」である。

本稿では、安全装置の機能精度、特に検知部の検

知精度に焦点を当て、検知センサとして使用される3D-LiDARが抱える2つの課題に対し、ソフトウェアとハードウェア(以下、ソフト、ハードと称する)の両側面からアプローチし、改善を図った。その結果、実施工現場を想定した湯気や土埃が発生する環境下でも従来よりも高い検知精度を実現することができた。その成果について報告する。

2. 3D-LiDARの特性と2つの課題

安全装置の機能精度を向上させるためには、センサの検知精度の向上が必要不可欠である。自動車や建設機械に使用される検知センサには、光学系センサとしてLiDARやToFカメラ、電波を使用するミリ波レーダ、さらに光学系のカメラなど、多くの種類が存在し、目的、環境、コストなどに応じて選定される。表-1には、当社の試験によって比較した各センサの特徴を示す。当社では車両ごとの使用環境²⁾に合わせて大型車両のロードローラには3D-LiDARを、小型車両のロードローラには79GHz帯ミリ波レーダを搭載している。

舗装施工現場には、プレートコンパクタやランマ、ハンドガイドローラに加え他の転圧機械も進捗に応じて一時的に置かれ、障害物となる場合や、壁やガードレールなどにギリギリに寄せて施工することが多い。このような状況下では、オペレータが施工路面の品質に集中しすぎるあまり、障害物に気づかず接触してしまう可能性がある。この場合、オペレータは何に接触したかを瞬時に正しく認識することは難しく、軽度のパニック状態に陥

表-1 各種センサの比較結果(当社試験による)

各項目	3D-LiDAR	3D-ToF カメラ	79GHz帯 ミリ波レーダ	カメラ
距離精度が高い	◎	○	△	×
画素数が多い (形状認識しやすい)	○	○	×	◎
直射日光に強い	◎	△	◎	△
夜間でも使用できる	◎	◎	◎	△
湯気の影響を受けない	△	×	◎	△
低コスト	×	×	△	△

り回避行動を取ることで二次被害が発生する恐れがある。そのため、緊急ブレーキシステムによって進路上の障害物をオペレータに確実に認識させることが重要である。また、警報によって、現場全体の KY 活動にも繋げられ、万が一接触の危険がある場合には、緊急ブレーキの作動によって、安全性の向上にも寄与し、その後、施工作业を続けて行うことができる。そのため、現状のシステムでは、作業だけでなく壁などの他の対象物も検知できるセンサと検知アルゴリズムを採用している。

こうした要求を解決する上で、表-1 に示すように 3D-LiDAR は高い距離精度と解像度を有するため、非常に有効な検知手段である。一方で、一般的に検知精度は感度を上げると誤検知が増え、感度を下げると誤検知が減るトレードオフの関係がある。ロードローラの転圧作業では、湯気や土埃が発生するため、この影響による誤検知を抑制しつつ、感度を上げて検知精度を向上させる必要があった。

2.1 課題①: 検知対象物の反射強度による影響

3D-LiDAR を含む光学系センサでは、一般的に赤外線のパルス光を照射し、物体に当たって戻ってくる時間とその反射強度を測定して、照射や受光の角度と時間から物体までの距離を算出する。また、原理的に建設現場で多く発生する湯気や土埃も測距するため、ソフトによって湯気や土埃を除去し、誤検知を抑制するためのフィルタ処理が行われることが多い。一般的には、湯気や土埃の反射強度はその先にある物体の反射強度と比べて同等もしくは低い傾向にあるため、一定の閾値以上の反射強度を持つデータを採用することで、つまり感度を下げることで誤検知を抑制していることが多い。特に、作業者が着用する再帰性反射チョッキ(以下、反射チョッキと称する)のように非常に高い反射強度のみに反応させるフィルタを設定することもある。

従来の検知アルゴリズムでは、路面や外乱状況に応じてリアルタイムにフィルタを自動制御し、誤検知の抑制を行っていた。例えば、舗装施工時のホットアスファルトのような反射強度が低い黒色系の路面では、フィルタの閾値が下がり感度が上がったとしても、発生する湯気の反射強度も低い傾向にあるため、誤検知を抑制し、高い精度で障害物の検

知が可能となる。一方で、コンクリートなどの白色系の反射強度が高い路面では、フィルタの閾値が高く設定されることにより感度が低下する。その結果、誤検知の抑制効果は高まるものの、検知精度が低下してしまう。

また、検知したい対象物の色や素材、表面性状などによっても反射強度は変化するため、フィルタの強さと検知対象物の反射強度のバランスによって検知精度は変化する。そのため、安全性を向上させるためには、図-1 に示すように反射チョッキや明色系の作業着を着用することが有効であった。しかしながら、建設現場においては、汚れが目立ちにくい暗色系の作業着が多く着用される傾向があり、また、反射チョッキも着用されないことが多い。着用されても、反射面積が小さく認識しにくいこともあった。そのため、これらの状況に対応した検知精度の向上が求められていた。

2.2 課題②: 濃い湯気や土埃による影響

ロードローラの舗装転圧作業では、ローラのタイヤやロール表面に散水してアスファルト合材の付着を防止する。また、道路を早期に解放するため、転圧後にアスファルト合材の温度を下げる目的で路面に散水することがある。このような作業環境下では、特に冬季に白く濃い湯気が大量に発生する。また、路盤などの転圧作業では、乾燥している路面でロールを振動させて転圧を行うと、土が巻き上げられて土埃が発生する。特に土埃は発生すると空中に長時間滞留し、消失するまでに時間がかかることが多い。

従来搭載していた 3D-LiDAR とその検知アルゴリズム(以下、従来型と称する)では、湯気や土埃を透過した先に障害物がない路面であれば、前述したようにフィルタが機能し、誤検知の抑制が可能である。しかし、湯気や土埃の先に比較的高い反射強度を持つ障害物(例えば作業者など)が存在する場合、障害物よりも手前の湯気や土埃を検知した位置で誤検知することがある。さらに、濃い湯気や土埃が発生する環境下では、フィルタの閾値が上がるため、正確な位置での検知や誤検知もされず、反応できない状態になることがある。このため、このような環境下でも正確な位置で検知できるセンサと検知精度の向上が求められていた。



図-1 従来型 3D-LiDAR における課題

3. 改善手法と改善結果について

従来型の検知センサが抱えていた 2 つの課題に対し、ソフトとハードの両面から改善を図った。ソフトでは検知アルゴリズムを見直し、ハードでは 3D-LiDAR にマルチエコー機能を搭載した。これにより、従来型に比べて検知精度を大幅に向上させることに成功した。以下に、これら 2 つの課題に対する改善手法とその試験結果について示す。

3.1 課題①:ソフトウェアの改善と試験結果

従来型の検知アルゴリズムでは、路面の反射強度からフィルタの閾値を決定していた。これにより、湯気や土埃による誤検知の抑制を図っていたが、検知対象物の反射強度の大半が路面の反射強度よりも低い場合、フィルタによって除去されてしまう。その結果、本来検知したい暗色系の作業着を着た作業着などが検知できない場合があった。

ソフトとハードを改善した 3D-LiDAR(以下、改善型と称する)の検知アルゴリズムでは、ラベリング技術によって検知物体を分類し、従来型のフィルタを基に各物体を構成する点群のレベルを決定した。次に、その分布に基づいて、検知対象物が実像であるか、誤検知である虚像であるかの判断を行った。その結果、従来では除去していた測距データも考慮することが可能となり、暗色系の作業着を着用した作業着など、反射強度の低い検知対象物においても高い検知精度を維持することができた。これにより、改善型は従来型に比べて検知精度を大幅に向上させることができた。また、これらの検知アルゴリズムは特許出願した独自技術である。

改善型と従来型の 2 種において、同時に測定した試験結果を図-2 に、検知対象物と試験の様子を写真-1 に示す。試験条件として、検知対象物には、青色作業着と反射チョッキを着用したマネキン(高さ約 1.7m)を使用し、測定路面には反射強度がやや高い既設アスファルトを選定した。測定は、5m 以上離れた位置から検知対象物に向かって近づき、約 0.5m まで接近した時点で停止させ、その後再び 5m 以上まで離れる動的な挙動で行った。

図は、縦軸に検知対象物までの検知距離、横軸に経過時間を 5 秒分ずらして示しており、下軸に改善型の、上軸に従来型の経過時間を表示している。この試験結果から改善型が従来型に比べて検知開始距離が向上し、さらに途切れることなく検知していることが確認できる。

同様の測定条件において、作業着を濃紺、青、橙、薄灰色の 4 種類に変更し、検知対象物の反射強度の違いによる検知精度を比較した。その結果を表-2 に示す。表における「検知開始距離」は、接近時の対象物が最初に検知された距離を示しており、「検知率」は、3D-LiDAR の搭載位置から算出した仕様上の最大検知距離 4.5m から、接近して停止するまでの衝突の可能性が高い状況における検知性能を評価したものである。具体的には、3D-LiDAR の測距周期から算出される理論上の最大検知数に対する実際の検知数を基に算出した。結果として、従来型では、作業着の色によって検知開始距離と検知率が大きく変化することがわかる。特に、暗色系の作業着において検知開始距離が短く、検知率が低下する傾向が見られた。一方で、改善型では、

作業着の色に依存せず、常に長い検知開始距離と高い検知率を維持できることが確認された。改善型は従来型に比べて、検知開始距離が最大 77%、検知率が最大 40%向上しており、検知精度が大幅に改善されたことがわかった。

3.2 課題②:ハードウェアの改善と試験結果

改善型は、湯気や土埃などの透明や半透明な物体を透過してその先にある物体を測距できるマルチエコー機能を搭載した。従来型では 1st-Echo で湯気や土埃を測距してしまい、その先にいる本来検知したい作業着が測距できない状況があったが、

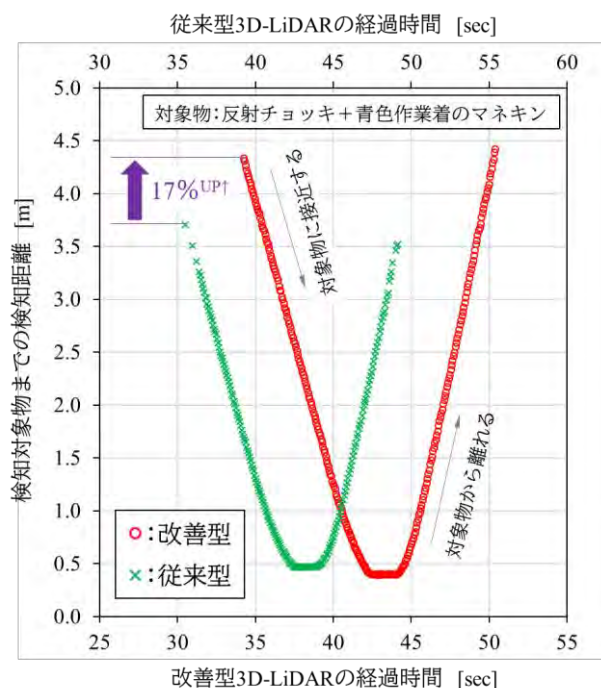


図-2 対象物に近づく際の動的な挙動による検知結果



写真-1 3D-LiDAR の搭載位置から見た試験の様子

表-2 作業着の色の違いによる検知精度の比較結果

作業着の色		反射チョッキ + 青(ブルー)	濃紺 (ネイビー)	青 (ブルー)	橙 (オレンジ)	薄灰 (ライトグレー)
検知 開始 距離	改良型	4.3 m	4.6 m	4.7 m	4.3 m	4.4 m
	従来型	3.7 m	2.6 m	3.4 m	4.4 m	4.0 m
	UP率	17 % [↑]	77 % [↑]	35 % [↑]	-2 % _↓	10 % [↑]
検知率	改良型	95.0 %	99.5 %	99.3 %	95.6 %	93.8 %
	従来型	71.4 %	59.2 %	80.3 %	96.0 %	86.0 %
	UP率	24 % [↑]	40 % [↑]	19 % [↑]	-0.4 % _↓	8 % [↑]

改善型では、システム的な制限があるものの、1st-Echo で湯気や土埃を測距しても、2nd-Echo によってこれらを透過した先にある作業者を測距することが可能になった。改善型のマルチエコーの効果を示した検知結果を図-3 に示す。なお、試験は実現場における湯気や土埃を定量的に発生させることが難しいため、スモークマシンを使用して、実際の舗装現場で発生するよりも濃く、先が見通せないレベルの湯気を疑似的に発生させて行った。図に示された 1st-Echo および 2nd-Echo、検知結果の各データは、白いほど測定距離が近く、黒いほど遠いことを示している。図より、湯気がない状態では、1st-Echo によって検知対象物が検知されているのが確認できる。一方で、湯気を発生させた場合、1st-Echo が湯気を測距し、2nd-Echo によって濃い湯気を透過して検知対象物が検知されていることが確認できた。また、土埃では湯気と比べて粒子径が大きく、2nd-Echo 以降のデータは測距し難い傾向であったが、肉眼で先を見通せるレベルの土埃であれば同じように測距できることを確認している。

図-3 の試験において、検知対象物を 2.5、3、4m の距離に設置した条件と、検知対象物がない状態で、湯気を発生させた場合の検知精度を比較した。その結果を図-4 に示す。測定は 30 秒間行い、「検知率」は 3D-LiDAR の測距周期から算出される理論上の最大検知数に対する実際の検知数から算出した。また、設置距離から ±0.25m 以上離れた測定値を「誤検知」と定義し、その数から「誤検知率」を算出した。湯気は風などの外乱条件により濃度が

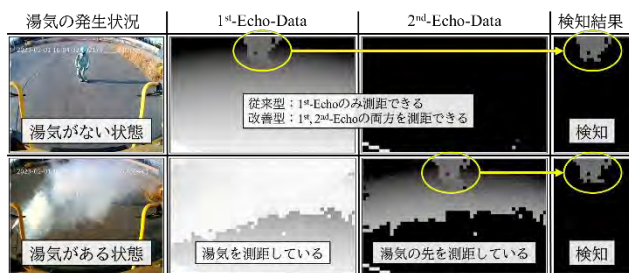


図-3 濃い湯気の存在下でのマルチエコーの効果

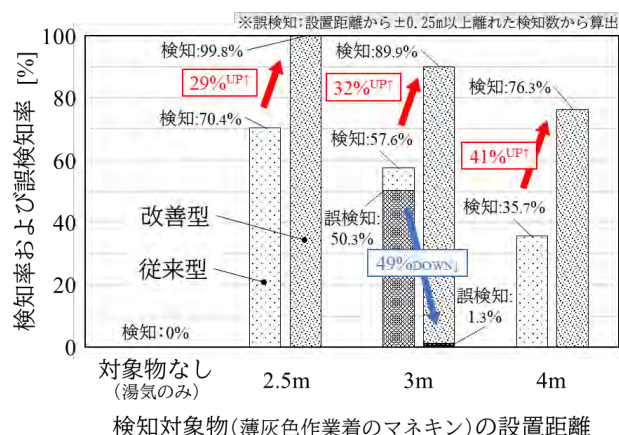


図-4 濃い湯気が発生する条件下での検知精度の比較

変化するため、同時に測定した従来型と改善型の増減割合に着目して評価した。その結果、検知対象物がない状態で湯気のみ発生させた場合、従来型と改善型のいずれも検知がなく、誤検知が抑制されていることがわかった。次に、設置距離を変化させた場合、改善型の検知率が従来型に比べて最大 41% 向上しており、また、すべての設置距離において改善が見られた。特に、3m の設置距離では、従来型の検知率に対し 87% (誤検知率/検知率) が誤検知となっているが、これは、検知対象物が手前の近い位置にある湯気の反射強度に強く影響を及ぼしたためと考えられる。一方で、同じ設置距離における改善型は、誤検知率が 1.3% と大幅に低下しており、正確な位置での検知が可能となった。このため、改善型は湯気のある環境下においても検知精度が大幅に改善されたことがわかった。

4. まとめ

ロードローラの実施工現場において安全性を向上させるためには、安全装置の普及促進、機能精度の向上、作業者の安全意識のさらなる向上という 3 つのアプローチが挙げられる。本稿では、安全装置の一つである緊急ブレーキ装置について、機能精度の向上に着目し、障害物を検知するセンサである 3D-LiDAR が有する 2 つの課題について、ソフトウェアとハードウェアの両側面から検知精度の改善を図った。その結果、検知が困難であった反射強度の低い対象物に対しても高い検知精度を維持することが可能になった。また、濃い湯気や薄い土埃が発生する環境下においても、その先にある危険な障害物をより正確に検知することが可能になった。これより、従来では非常に困難であった検知感度の向上と誤検知の抑制を両立させる新たな検知アルゴリズムを開発することに成功した。

しかしながら、周囲環境や検知対象物の状況によっては、必ずしも正確に検知できず、安全装置が十分に機能しない場合がある。そのため、安全装置を過信せず、危険予知 (KY) 活動を通じて各作業者が自身の安全意識を高めるよう心掛けていただきたい。その結果、安全性を向上させる一助となれば幸いである。また、i-Construction で推進される自動運転車両などへの応用を進めることで、現場全体の安全性と作業性の向上を図り、建設現場での事故撲滅を目指していきたい。

参考文献

- 1) 厚生労働省：職場のあんぜんサイト、労働災害統計、令和 5 年死傷災害統計確定値
- 2) 遠藤涼平・森岡則雄：緊急ブレーキ装置搭載コンバインド型振動ローラの開発、建設機械施工, Vol.73, pp.50~55, 2021

24. 指向性スピーカを使用した施工現場の騒音低減システムの開発

鹿島道路株式会社 機械部

○内山 智史

阪田 正弘

1. はじめに

工事現場では、重機や作業員の接触事故防止のため、AIカメラや超音波を用いた注意喚起装置を重機に取り付け、事前に設定したエリア内に作業員が入った際に警告音を発するように対策する方法や、重機が動く際にクラクションを鳴らして重機周辺の作業員に注意喚起を行う方法が広く使われている。しかしこれらの警告音は、注意喚起すべきエリア以外にまで届くため、警告音に対する意識の低下や近隣住民に対する騒音となるなどの課題を抱えていた。

そこで当社では、指向性スピーカを活用し、必要な方向にのみ注意喚起することが可能なシステムを開発した。本稿ではシステムの概要および性能検証結果について報告する。

2. 現状の警報装置

工事現場にはローラやダンプトラックといった重機や車両が混在する状況が多い。ダンプトラックの荷台に資材を積み込むときなど、重機と車両が連携する作業も多く、このような場面では合図を送る手段としてクラクションがよく用いられる。また、車両が後進する際には運転手は目視にて後方の安全確認を行うが、人や重機・車両に対し接触および巻き込み事故を防止する注意喚起として周囲に警報音を発信するバックブザーを備えているものが多い。しかし、これらのクラクションやバックブザーは同心円状に音が広がっていくため、警報の対象となる車両や作業員のみならず、周囲全体に音が聞こえるよう大音量に設定されている。そのため作業現場の周辺の住宅などにまで音が届き、生活環境に影響を及ぼすことがある（図-1）。

3. 指向性スピーカによる警報システムの開発

3.1 開発経緯

これらの問題点を解決するため、指向性スピーカを活用した注意喚起装置の現場適用を検討した。

指向性スピーカとは、全方位に様に音が拡散する一般的なスピーカと異なり、音が拡散せずに直線的に進む指向性という性質を持つ（図-2）。そのため、特定の方向にいる人にピンポイントで音

を届けることができることから、商業施設や美術館などの音声案内などですでに利用されている。これを舗装工事現場に応用することで、近隣住民に対してクラクションやバックブザーによる騒音が抑えられると考え、開発するに至った。

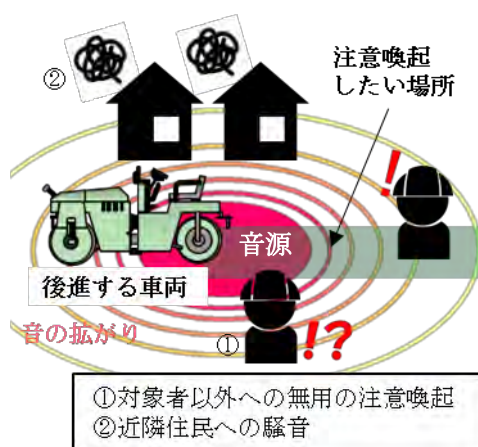


図-1 バックブザーの拡散イメージ

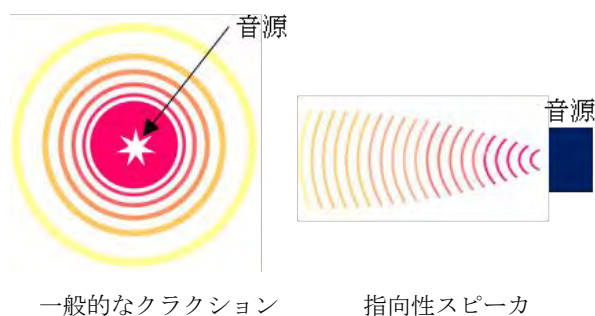


図-2 音の拡散イメージ

3.2 仕様決定

システムを開発するにあたり、1ユニットあたり50個の超音波発振子で構成される市販の指向性スピーカユニットを使用し、指向性の確認、発することができる最大音量の確認、音声を発した際の聞こえ方など各種検証を行う予備検証機を製作した（写真-1）。音の拡がり、音量の比較対象として、重機に用いられている汎用のクラクションを用いた。（写真-2）

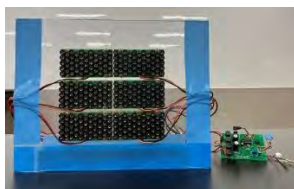


写真-1 予備検証機



写真-2 クラクション

3.3 予備検証

予備検証は、図-3 で示すように延長方向へ 30m、横方向に 10m のエリアを設け、延長方向は 5m ピッチ、横方向は 0, 3, 5, 10m の地点において、普通騒音計を用いて A 特性音圧レベルの測定を行った。音源は予備検証機（写真-1）とクラクション（写真-2）とし、音源の設置高さは 1.2m、測定高さは 1.2m とした。なお予備検証機からは録音したクラクション音を発した。

予備検証の結果、音源の延長方向では距離によらず 80~90dB 程度の音圧レベルが測定され、十分な音量を発生されることを確認できた（図-4）。また、音源から横方向に 10m 離れた線上において、クラクションは延長方向と同等の音圧レベルだったのに対し、指向性スピーカは 50dB 程度であった（図-5）。以上より、指向性スピーカから発する音の直進性を確認することができ、特定の人だけに音を届けるという目的達成に有効であることを確認することができた。

また、使用する超音波発振子の個数を変えて 50, 100, 300 個の条件でそれぞれ音圧レベルを測定した結果、個数が多いほうが高い音圧レベルとなる傾向を得られた（図-6）。

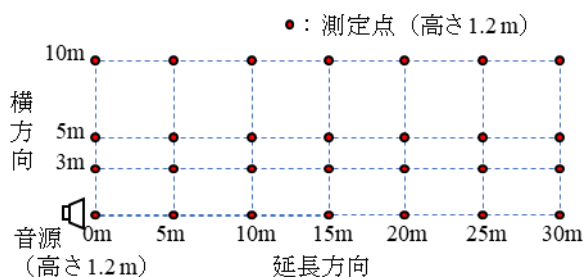


図-3 音圧レベルの測定点

4. 試作機における検証

4.1 試作機の概要

予備検証機をもとに試作機を製作した（写真-3）。超音波発振子の個数を 300 個とし、雨への対策としてホーンを新たに設けたほか、複数の音声データを記録した操作ボックスを製作し、ボタン操作で発する音を切り替えられるようにした。この試作機を用いて予備検証と同様の検証を行った結果、予備検証機と同様の音量・音の拡がりが発せられることを確認できた。

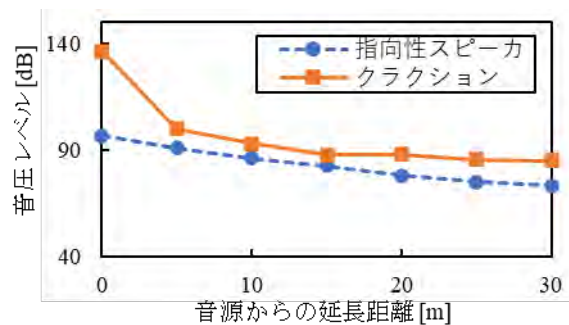


図-4 延長方向におけるクラクションと指向性スピーカの音圧レベル比較

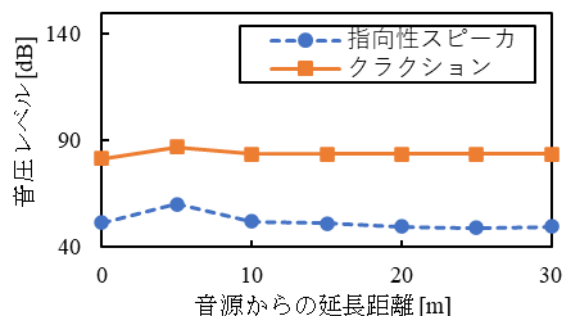


図-5 横方向10mにおけるクラクションと指向性スピーカの音圧レベル比較

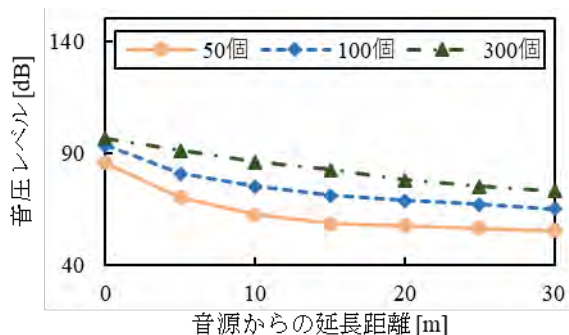


図-6 延長方向における超音波発振子の個数による音圧レベル比較

表-1 音圧レベルの目安¹⁾

音圧レベル	騒音の目安
90dB	パチンコ店内
80dB	ゲームセンター店内 航空機の機内
70dB	主要幹線道路周辺（昼間） 鉄道の車内
60dB	一般道路周辺（夜間） ファミリーレストランの店内
50dB	役場の窓口周辺 書店の店内

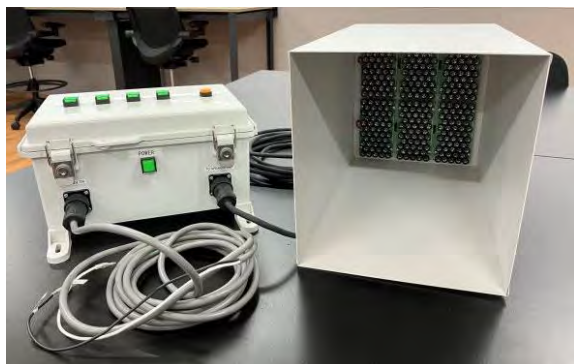


写真-3 試作機外観

4.2 前方車両への注記喚起の検証

スピーカの前方にいる車両の運転手に合図を送ることを想定した検証を行った。写真-4に検証測定状況を示す。試作機をダンプトラックの運転席高さ相当の2.4mに設置し、大型自動車を試作機の前方10, 15, 20mの地点にアイドリング状態で停車させ、キャビンの外、窓を開けた状態の運転席、窓を閉めた状態の運転席の3条件にて、それぞれの距離における音圧レベルの測定を行った（図-7）。

検証の結果、キャビンの外と比較して運転席では音圧レベルが低くなることがわかった（図-8）。実際に聞いた感覚としては、キャビンの外ではよく聞こえる、運転席・窓開けでは問題なく聞こえるレベルであったのに対し、窓を閉めた状態では注意深くしないと音を聞き取ることが難しかった。この原因は、運転席は荷台や窓で遮られたことで音が伝わりにくくなったからと考えられる。以上の結果から、前方車両の運転手に音を伝えるときは、運転手に窓を開けた状態にしてもらうなどの条件が必要であることがわかった。

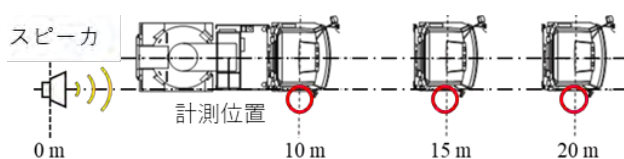


図-7 前方車両の音圧レベル計測位置



写真-4 前方車両への注意喚起検証

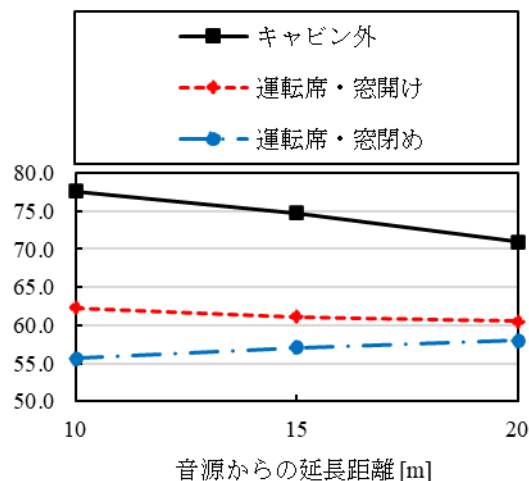


図-8 前方車両における音圧レベル

5. 試作機の改良

5.1 改良に向けた検証

前方車両への注記喚起とは別に、車両後進時における作業員に対して注意喚起する装置を製作した。車両へ搭載するため、装置を小型化し、さらに降雨時の耐久性を考慮した改良を加えた。この改良装置を用いて性能検証を行った。検証エリアは図-3のうち延長方向15mまでのエリアとした。検討内容を以下に示す。

① ホーン長さ

長さ300mmの試作機のほかに、予備検証機に100mmと200mmの2種類の長さのホーンを取り付けて発音し、音圧レベルを比較した。

② メッシュのサイズ

スピーカユニットの浸水対策としてホーン開口部にメッシュを取り付けることを検討した。ホーン先端に18, 20, 24, 30メッシュ（写真-5）のカバーを取り付けた状態で発音し、音圧レベルに与える影響について検証した。

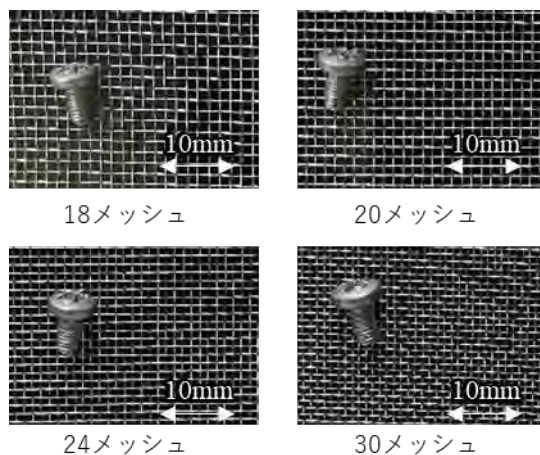


写真-5 メッシュのサイズ

表-2, 表-3に音源の延長方向における音圧レベルの比較を示す。測定時の条件としてホーン長さを変更して(メッシュは無し)それぞれ比較したところ、検証を行った条件内では、ホーンの長短による音圧レベルへの影響はほとんどなく、改良に向けてサイズを小さくできると判断した。

表-3で示すとおり、30メッシュのカバーを装着したところ、メッシュなしと比較して音圧レベルの低下はみられるものの15m離れた位置でも70dB以上であり、必要な音圧レベルは得られている。したがって浸水対策に優れた細かいメッシュを採用しても性能上問題ないと判断した。

表-2 ホーン長さによる音圧レベル変化

ホーン長さ		音源からの延長距離			
		0m	5m	10m	15m
300mm	音圧レベル	93dB	87dB	79dB	75dB
	低下率	-	-	-	-
200mm	音圧レベル	94dB	87dB	81dB	77dB
	低下率	+1%	±0%	+2%	+2%
100mm	音圧レベル	92dB	87dB	80dB	76dB
	低下率	-1%	±0%	+1%	+1%

表-3 メッシュのサイズによる音圧レベル変化

メッシュのサイズ		音源からの延長距離			
		0m	5m	10m	15m
メッシュなし	音圧レベル	94dB	88dB	81dB	77dB
	低下率	-	-	-	-
18メッシュ	音圧レベル	94dB	87dB	80dB	76dB
	低下率	±0%	-1%	-1%	-1%
20メッシュ	音圧レベル	94dB	85dB	78dB	75dB
	低下率	±0%	-3%	-4%	-3%
24メッシュ	音圧レベル	94dB	84dB	78dB	74dB
	低下率	±0%	-4%	-4%	-4%
30メッシュ	音圧レベル	93dB	83dB	77dB	74dB
	低下率	-1%	-5%	-5%	-4%

5.2 実用機

写真-6, 写真-7に実用機の外観を示す。実用機は超音波発振子の数を200個とし、操作ボックスの内部に切替スイッチを設け、動作する超音波発振子の個数を100個または200個に切り替えられるようにした。これにより試験機からサイズの縮小をしつつ現場ごとに最適な超音波発振子数で音を発せ

られるようにした。また、ホーンの長さは100mmとし、ホーン先端に30メッシュの金網を設け、スピーカユニットへの浸水対策を施した。このほか、操作ボックス内部にUSBメモリ差し込み口を新たに設け、最大10秒程度の任意の音声データをUSBメモリから内部記憶装置に書き込むことにより、人の声などを再生できるようにソフトウェアの変更を行った。



写真-6 実用機外観



写真-7 実用機操作部

6. まとめ

指向性スピーカの有効性を確認し、重機後方にいる特定の作業員への注意喚起システムを開発した。今後、実用機を使用し現場で稼働する重機に取り付けて性能確認を行う。また、重機のオペレータが発した肉声をリアルタイムで発音できるようにするなど機能向上も検討している。

本システムの開発を通して、現場の安全性向上と騒音低減の両立につなげていきたい。

参考文献

- 1) 全国環境研協議会 騒音調査小委員会：全国環境研会誌 Vol.34 No.4(2009)「騒音の目安」作成調査結果について

25. 建設機械設置地盤の地耐力調査に関する実験的考察

(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 ○堀 智仁
(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 玉手 聡

1. はじめに

移動式クレーンや大型建設機械の転倒を防ぐためには、事前に地盤の支持力を把握することが重要である。しかし、現場の支持力はしばしば目視や踏査などの経験的な判断に依存し、これが原因で支持力不足による転倒災害が発生している。地盤の支持力を直接調査する方法として「平板載荷試験」があるが、計測に長時間要するため、機械の安定性評価にはあまり利用されていないのが現状である。本研究では、平板載荷試験と同様に重機を反力として用い、短時間で支持力調査が可能な「現場地耐力試験」による計測を推奨している。

一方、支持力を間接的に求める方法として、ランマーの落下の衝撃を利用した試験がある。この試験は1箇所の計測に要する時間は1分程度であり、簡易な試験方法から大型建設機械の安定性評価に利用されている事例が多く見受けられる。そこで本論文では、現場地耐力試験のような「載荷試験」による方法と、簡易支持力測定器のような「衝撃試験」による方法で地盤調査をおこない、両試験から得られた結果を比較した。

2. 試験の概要

2.1 現場地耐力試験(BCT)の概要

現場地耐力試験(BCT)は、平板載荷試験(PLT)と基本的に同様の手法であるが荷重の載荷方法が変位制御である点で異なる。PLTは計画最大荷重を5～8段階に分割して段階的に荷重を分割して段階的に荷重を載荷するのに対し、BCTでは載荷速

度を一定として荷重を載荷する。これにより、PLTが1箇所の計測に5～8時間要するのに対し、BCTは変位速度を5mm/分とした場合、試験時間を約10分程度に短縮することが可能となる。この速度は現場CBR試験のそれを載荷板の直径比で換算したものである。図-1に試験の概要を示す。これまでの研究から両試験の結果はほぼ一致することが確認されている¹⁾。さらに、BCTは載荷圧力 q と沈下量 s の連続データを取得することができ $q-s$ 関係の弾性域や曲線の屈曲の程度などを詳細に把握することが可能である。なお、試験の詳細については、既報を参照されたい²⁾。

2.2 簡易支持力測定器による試験の概要

簡易支持力測定器(以下、CASという)は、地盤の支持力を迅速に評価するための装置である。ランマー(質量44.1N、直径50mm)を一定の高さから地盤に自由落下させ、その際に発生するインパクト値(I_a)を測定する。このインパクト値から、CBR値、 K_{30} 値、 q_c 値、 c 値、 ϕ 値などの地盤定数を換算して求める試験である。図-2に簡易支持力測定器による試験の様子を示す。

CASの最大の特徴は、重機などの反力を必要としないため、重機の搬入が困難な狭隘な現場でも実施できることである。このため、都市部の狭い道

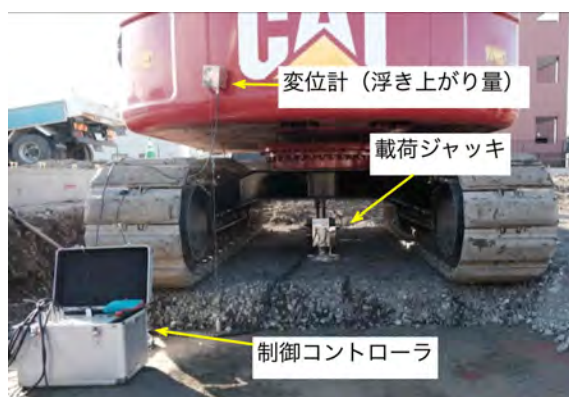


図-1 現場地耐力試験(BCT)の概要



図-2 簡易支持力測定器による試験の様子

路や建設現場、山間部などアクセスが限られた場所でも活用されている。また、試験に要する時間が非常に短く、1箇所あたり約1分程度で完了するため、短時間で多地点の調査が可能である。そのため、CASは、その簡便さと迅速性から、小規模な土木工事や建築物の初期地盤調査に広く利用されている。

2.3 試験現場の地盤条件

試験は地域の異なる4箇所で行った。本試験では、それぞれをNo.1～No.4と呼ぶことにする。現場内から採取した土試料の物理特性を表-1に示す。

表-1 各調査地点における土の物理特性

計測点	ρ_s (g/cm ³)	$\rho_{d \text{ in-situ}}$ (g/cm ³)	W (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	W_{opt} (%)	D_{max} (mm)	地盤材料の分類名
No.1	2.601	1.192	32.5	1.400	29.8	125.0	細粒分質砂質礫 (GFS-R)
No.2	2.642	1.602	13.92	1.778	14.5	37.5	細粒分質礫質砂 (SFG)
No.3	2.652	1.691	18.52	1.756	15.0	190.0	礫まじり細粒分質砂 (SF-G)
No.4	2.733	1.170	38.99	1.275	23.0	2.0	シルト (MH)

物理試験の結果から、No.1～No.3は礫および砂質土、No.4はシルトであった。

BCTについては各地点で複数箇所実施し、CASはBCTの試験箇所を取り囲むよう各点5回実施した。なお、No.3およびNo.4においては、平板载荷試験（以下、PLTという）も実施した。

3. 試験結果

3.1 BCT試験の結果

図-3～図-6にBCT結果を示す。図中には試験の位置関係も示している。No.1の結果を示した図-3

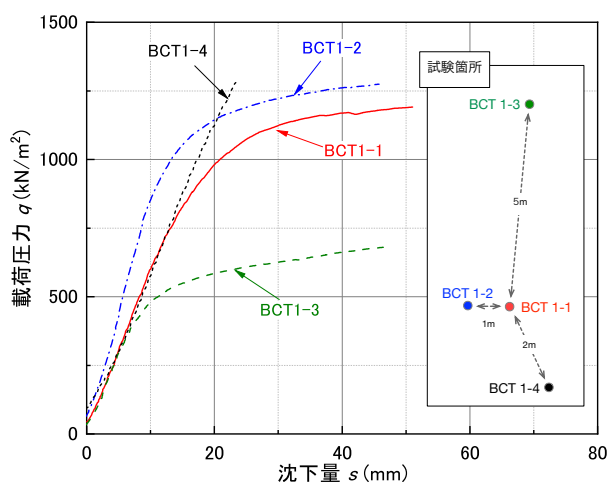


図-3 BCT試験結果 (No.1)

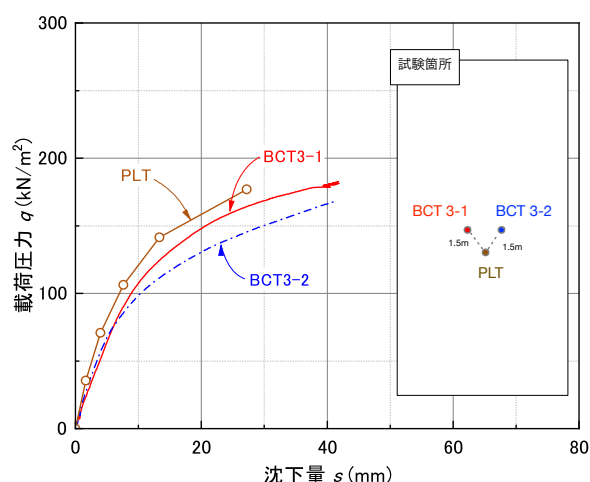


図-5 BCT試験結果 (No.3)

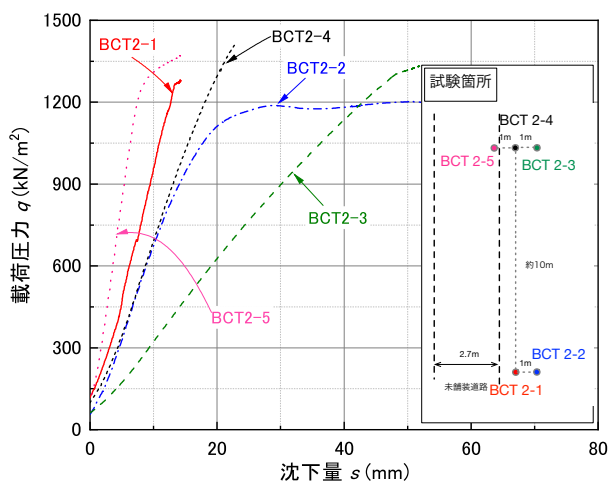


図-4 BCT試験結果 (No.2)

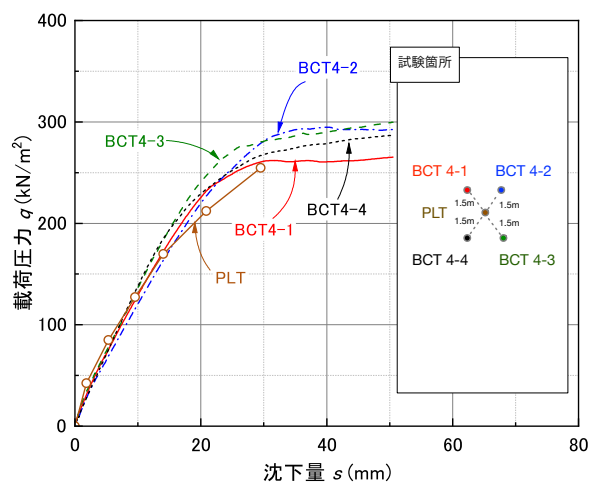


図-6 BCT試験結果 (No.4)

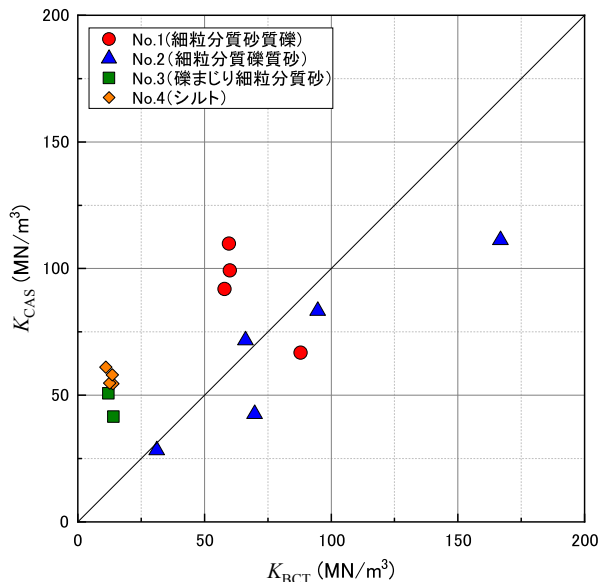


図-7 地盤反力係数 K の比較

では、試験箇所の比較的近い BCT1-1 および BCT1-2 の載荷圧力 q と沈下量 s の関係は、概ね $s < 100\text{mm}$ の弾性域での傾きに差が見られるものの、 q の最大値は同様の値であり、 $q-s$ 関係も類似している。それに対して、BCT1-1 から 2m 離れた地点で実施した BCT1-4 は弾性域の傾きは BCT1-1 とほぼ等しいが、 $q-s$ 関係に明確な屈曲が見られず、BCT1-4 の最大 q は未計測であり、その値は BCT1-1 に比べ非常に高いと推定できる。一方、BCT1-3 から 5m 離れた地点で実施した BCT1-3 は弾性域の傾きは他の結果と同じであるが、最大 q は約 1/2 であった。この結果から、同一現場内においても最大 q の値に差が見られた。

No.2 の結果を示した図-4 においても $q-s$ 関係に差が見られる。調査地点の近い BCT2-1 と BCT2-2 を比較すると、BCT2-1 は、 s の増加とともに q も増加し続けており $q-s$ 関係にピークが確認できない。それに対して、BCT2-2 では、 $q-s$ 関係に明確なピークが見られ、弾性域での傾きもやや小さい結果であった。一方、BCT2-3～2-5 を比較すると、いずれも明確なピークが確認できないことは共通しているが、 $q-s$ 関係の傾きに差が見られる。特に BCT2-3 については、最大 q は高いものの発生する沈下量も大きい。

図-5 に No.3 の結果を示す。No.3 については先の結果と異なり、BCT3-1 と BCT3-2 の差はわずかである。また、平板載荷試験 (PLT) の結果を見ると BCT に比べやや高い値であるが、両試験結果はほぼ一致している。BCT の試験時間は 10 分程度であるのに対して、PLT は 5 段階で載荷しているため試験時間は 150 分 (30 分×5 段階) である。そのため、両試験の載荷速度は大きく異なる。一般的

に載荷速度が速い場合、強度が高くなる傾向にあるが、PLT の結果は BCT よりもわずかに強度が高いことから、変位速度の違いによる影響がないと考える。

図-6 に No.4 の結果を示す。No.4 についても BCT のバラツキは少なく、BCT と PLT に良好な一致が確認できる。

以上の結果から、No.1 と No.2 に共通して同じ現場内であっても $q-s$ 曲線には差が見られた。これは現場地盤が平面的にバラツキを有したためと考えられる。一方、No.3 および No.4 の $q-s$ 曲線はほぼ一致しており、現場内のバラツキが小さい地盤では BCT の結果に再現性があることがわかった。

3.2 地盤反力係数の比較

BCT および CAS の結果から地盤反力係数 K を求めて比較する。ここで、地盤反力係数 K とは載荷圧力の変化に対する載荷板の変位の割合である。本研究では、BCT の $q-s$ 関係の弾性域における傾きを K とした。一方、CAS については、得られたインパクト値 I_a を式 (1) に示す換算式に代入して K を求めた。なお、BCT から求めた K を K_{BCT} 、CAS から求めた K を K_{CAS} と定義した。

$$K_{\text{CAS}} = -37.58 + 8.554 \times I_a \quad (1)$$

図-7 に BCT および CAS から求めた K の比較を示す。両試験から求めた K を比較すると No.1 の結果 (●印) は K_{BCT} と K_{CAS} の間に明確な相関関係が確認できない。一方、No.2 の結果 (▲印) には、良好な相関関係が確認できる。また、No.3 の結果 (■印) および No.4 の結果 (◆印) については、ラインよりも上側に位置している。No.1 の結果も一部ラインの上側に位置していることから、CAS から求めた K は過大評価となることを示している。

3.3 許容支持力 q_a の比較

次に、CAS で得られた I_a から内部摩擦係数 ϕ 等の地盤定数を求め、式 (2) および式 (3) に示す、国土交通省告示第 1113 号の短期に生ずる力に対する地盤の許容応力 q_a を算出した³⁾。

$$q_{\text{CAS}} = \frac{2}{3} \times \beta \times \gamma_1 \times B \times N_\gamma \quad (\text{砂質土}) \quad (2)$$

$$q_{\text{CAS}} = \frac{2}{3} \times \alpha \times c \times N_c \quad (\text{粘性土}) \quad (3)$$

ここで、 B は基礎幅 (=0.3m) である。形状係数 α および β は正方形であるため $\alpha=1.2$ 、 $\beta=0.3$ である。 γ_1 は地盤の単位体積重量である。 N_γ および N_c は支持力係数である。

図-8 に BCT から求めた極限支持力 q_u を短期の安全率 $F_s=1.5$ で除して求めた許容応力 q_{BCT} と CAS から求めた許容応力 q_{CAS} の比較を示す。

物理試験の結果から、No.1～No.3 は「砂質土」である。砂質土の結果はラインよりも下に位置し

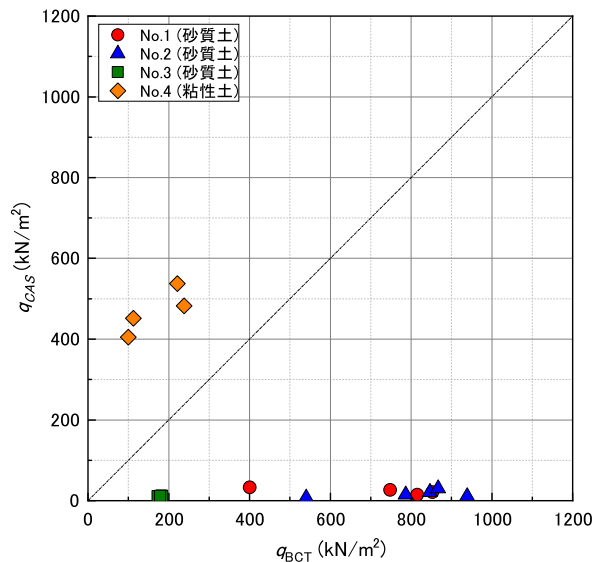


図-8 BCT と CAS の許容支持力の比較

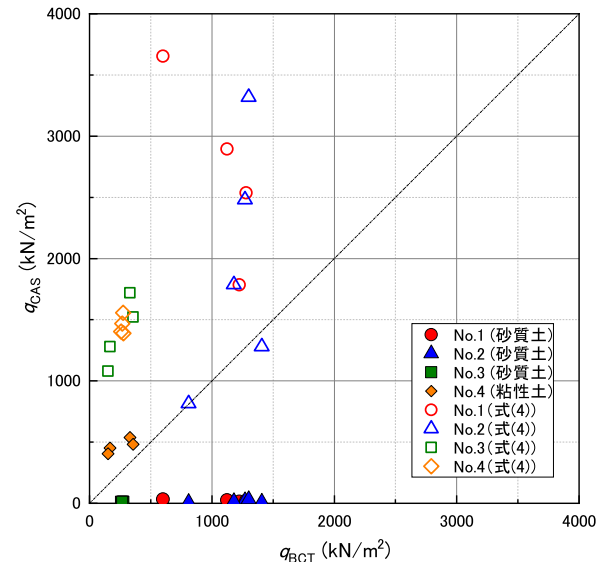


図-9 支持力公式から求めた許容支持力との比較

ており、 q_{BCT} に比べ、 q_{CAS} の値が著しく小さい。この結果から、CAS で求めた支持力は安全側の評価となることがわかる。一方、粘性土である No.4 の結果はラインより上に位置しているため、 q_{BCT} に比べ、 q_{CAS} の値の方が 2～4 倍高い結果であった。すなわち、 q_{CAS} の値は砂質土においては過小評価、粘性土では過大評価となることがわかった。

許容支持力 q_{CAS} は前述した方法以外に、現場の密度 γ_1 が既知である場合、 I_a から粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を求めて、式 (4) に代入して q_{CAS} を算出することができる。

$$q_{CAS} = \frac{2}{3} \times (\alpha \times c \times N_c + \beta \times \gamma_1 \times B \times N_\gamma + \gamma_2 \times D_f \times N_q) \quad (4)$$

式 (4) から求めた q_{CAS} と q_{BCT} の比較を図-9 に示す。式 (4) から求めた結果 (白抜き) は、一部を除いてラインの上側に分布しており、 q_{BCT} に比べ全体的に非常に高い値であった。

以上の結果から、CAS は簡便な試験であるが、結果の解釈を誤ると著しく危険側の評価となる。そのため、利用手引き³⁾に従った方法で支持力を評価する必要がある。

4. まとめ

地盤の支持力を直接的に求める現場地耐力試験 (BCT) と間接的に求める簡易支持力測定器 (CAS) を 4 現場で実施し、地盤反力係数 K および許容支持力 q_a の結果を比較した。その結果、 K については、一部 BCT と CAS の間に正の相関関係が認められたが、4 現場のうち 3 現場の結果は有意な関係が認められず、かつ結果が過大に評価されることがわかった。

一方、 q_a については CAS により求めた q_{CAS} と、BCT により求めた q_{BCT} を比較した結果、砂質土では q_{CAS} は q_{BCT} に比べ著しく小さく、粘性土では反対に q_{CAS} は q_{BCT} よりも大きな値であった。

I_a から粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を求めて支持力公式から q_{CAS} を算出した場合、 q_{BCT} よりも著しく大きく、危険側の評価となることがわかった。簡易支持力測定器の利用手引きでは q_{CAS} 算出に際して土質が砂質土か粘性土を分類する必要がある。しかしながら、設置地盤には砂質土や粘性土に分類しにくい「中間土」も多く、技術者が判断を誤ると危険な可能性があり、注意が必要と考える。

近年、自然災害の頻発・激甚化により、災害復旧現場では一刻も早く建設機械を投入せざるを得ない状況も考えられる。しかしながら、機械を安全に使用するためには PLT や BCT 等の載荷試験を実施して地盤の支持力を確認することが必要不可欠と考えられる。

参考文献

- 1) 玉手聡・堀智仁：作業現場における地耐力確認の方法、労働安全性総合研究所技術資料、JNIOSSH-TDNO.3, pp.39～62, 2015
- 2) 堀智仁・玉手聡・田中直斗：クレーン敷板への偏心設置と降伏強度の関係に関する基礎的検討、令和 5 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.139～142, 2023
- 3) 近畿地方整備局 近畿技術事務所：簡易支持力測定器 (キャスポル) 利用手引き、https://www.kkr.mlit.go.jp/kingi/kensetsu/gijutusien/bcu0ke000002ixc-att/caspol_guide.pdf, 2005

26. 振動加速度レベルによる除雪トラックフレームに作用する 作業種別毎の負荷傾向について

(国研)土木研究所寒地土木研究所
(国研)土木研究所寒地土木研究所

○植野 英睦
山田 充

1. はじめに

積雪寒冷地における冬期の円滑な道路交通の確保は、地域住民の生活にとって必要不可欠であり、確実な道路除雪体制が求められている。

一方で近年、購入・整備予算の逼迫により、除雪機械の更新が遅れ、老朽化した機械が増加し、除雪トラック(写真-1)のフレームの破断(写真-2)などによる突発的な作業不能、ひいては廃車となるケースが見られるなど、除雪作業の停止日数も増加傾向にあり、道路除雪体制への影響が懸念される。そのため、限られた予算の中、除雪機械の効果的かつ効率的な維持管理手法が求められている。

寒地土木研究所では、この維持管理手法の提案に向け、指標となる除雪機械の劣化に対する定量的評価手法や、車両を構成している部位部品の劣化度診断手法などの構築に取り組んでいる。

その一つとして、破断時即廃車となる危険性の高い除雪トラックフレームの診断手法について、フレームにかかる外力などによる負荷を振動加速度レベルで検証している。

本報は、除雪作業種別による除雪トラックフレームの負荷について、新たに振動加速度レベルを追加検証したので報告する。



写真-1 除雪トラック²⁾

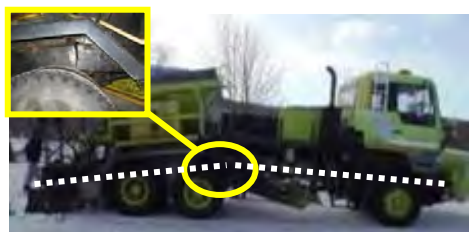


写真-2 除雪トラックフレーム破断イメージ

2. 振動加速度レベルの測定

除雪トラックのフレームは破断時、即時廃車となる場合もあるなど、重要構成部品の一つである。

寒地土木研究所では、その除雪トラックフレームの劣化度診断手法の構築について検討しており、まず、除雪トラックのフレームに掛かる負荷傾向について、振動加速度レベルでの把握を検証した。

2.1 振動加速度レベル

振動加速度レベルは、加速度ピックアップを設置して測定が可能で、振動の物理的なエネルギーの大きさをデシベル(dB)で表わしたもので、建設作業振動や工場振動、道路交通振動等の計測で広く活用されている。

振動加速度レベルは、次式で定義される。

$$La = 20 \log (a/a_0)$$

La : 振動加速度レベル (dB)

a : 振動の振動加速度 (m/s^2)

a_0 : 基準となる振動加速度 ($10^{-5}m/s^2$)

数値は運動エネルギーの大きさを示すため、フレームの振動加速度レベルの数値が大きいほどフレームに作用する外力などによる負荷が大きいと考えられる。その数値の大きさの目安として、気象庁震度階級の解説内「気象庁震度階級表」³⁾より算出した振動加速度レベルと震度階級の関係を表-1に示す。

また、加速度ピックアップをフレームの複数箇所に設置することで、箇所毎、作業種別毎の比較による負荷傾向の把握が期待できる。

2.2 振動加速度レベルの測定内容

測定は、北海道石狩市の浜益区、厚田区等の北部にて、実際に除雪作業をしている除雪トラック(10t級 6×6, ワンウェイブラウ, 路面整正装置)にて行った。

表-1 震度と振動加速度レベル (dB)

震度階級	7	6強	6弱	5強	5弱	4	3	2	1
振動加速度レベル (dB)	~115	~110	~105	~100	~95	~85	~75	~65	~55

除雪トラックのフレームの底面 8 箇所に加速度ピックアップを設置し、回送も含め一連の除雪作業における、3 方向 (X, Y, Z) の振動加速度レベルを 3 箇年 10 回にわたり計 1,671 分間測定した (図-1、表-2)。

加速度ピックアップの設置は、まずフレームにアルミテープを貼り、その上に瞬間接着剤で固定、飛散する雪氷からの保護のため、シールパテを盛り、再度アルミテープにて据え付けた。配線もコルゲートチューブにて保護をした (図-2)。

作業種別毎の測定時間を表-3 に、除雪作業の作業種別と内容を表-4、写真-4 に示す。測定は 100ms 間隔の連続データで行っているが、本報は表記の簡素化のため、主に平均値の結果を示す。

3. 測定結果と検証

測定結果の例として、4 回目 6:00~7:00 におけ

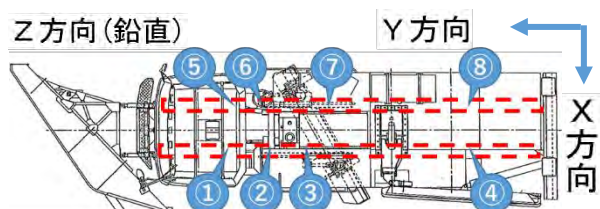


図-1 フレーム測点と方向

表-2 測定日時

測定回	年目	月日	時 間
1 回目	1	12/15	14:02 ~ 17:24
2 回目	1	12/16	2:51 ~ 6:41
3 回目	1	12/16	14:01 ~ 15:59
4 回目	1	12/17	2:56 ~ 7:13
5 回目	2	12/16	17:33 ~ 18:48
6 回目	2	12/17	8:32 ~ 9:23
7 回目	2	12/18	3:02 ~ 6:38
8 回目	3	12/19	13:29 ~ 17:14
9 回目	3	12/20	2:59 ~ 6:12
10 回目	3	12/20	14:00 ~ 16:24



図-2 加速度ピックアップ設置状況

表-3 作業種別毎の測定時間(分)

除雪 (I, G)	除雪 (I)	除雪 (G)	回送	待機	合計
721	24	256	187	483	1,671

る作業種別と測点⑤Z 方向で測定した平均値 (1 分毎) のグラフを図-3 に示す。この結果から、作業種別や雪質の違いによる負荷傾向について検証した。

3.1 3 方向の傾向

X 方向と Z 方向は Y 方向に比べて振動加速度レベルが大きく、①～⑧の全測点で同様の傾向を示していた。測点⑤の例を図-4 に示す。

表-4 作業種別と作業内容

作業種別	作業内容
待 機	格納庫等にて待機（停止）中
回 送	作業をせず路面を走行している状態
除雪 (I)	前方のブラウで新雪等を路外へよける作業
除雪 (G)	車体下のブレードで、踏む固められ凸凹になった雪等を平坦にする路面整正作業
除雪 (I, G)	除雪 (I) と除雪 (G) を同時に行う作業



写真-4 除雪 (I) と除雪 (G) の作業イメージ

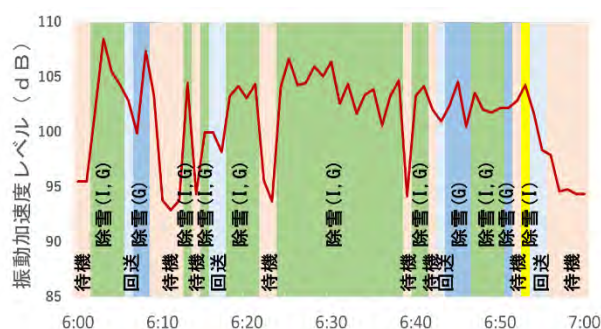


図-3 測点⑤Z 方向 4 回目 6:00~7:00 時の計測結果 (平均値 [1 分毎])

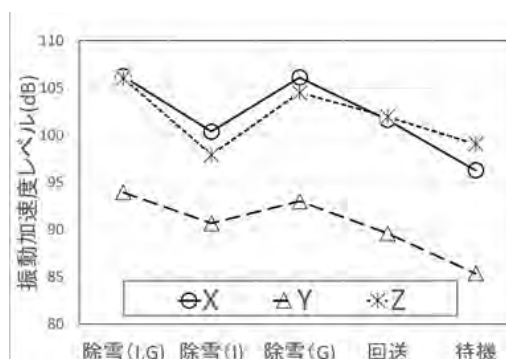


図-4 測点⑤ 全方向 (全作業種別)

3.2 フレーム測点毎の傾向

フレーム測点毎の傾向としては、車両右側前方の測点⑤が、作業種別によらず大きい傾向を示した。作業種別毎、全測点の X 方向の例を図-5 に、全測点の X 方向、除雪(I,G)の例を図-6 に示す。

測点毎、作業種別毎に一樣な関係がみてとれるため、数値の大きい測点⑤を基に、測点毎の振動加速度レベルの相関関係について整理した。除雪(I,G)の例を表-5 に示す。測点⑤と各測点の相関係数が 0.7 以上と高く、測点毎にある程度一定の負荷傾向が確認できた。これにより測点⑤を測定することで全測点の負荷量の把握も期待できることがわかった。

3.3 作業種別毎の傾向

測点毎のトータルの負荷を把握するため 3 方向の振動加速度レベルを合成した結果を図-7 に示す。車体下のブレードを路面に押しつけて作業をする除雪(I,G)と除雪(G)が、フレームに作用する負荷が大きい傾向や、さらに除雪作業全般で、車体の前方及び進行方向に向かって右側の負荷が大きい傾向

も確認できた。

前方のプラウを接地させることで作業をする除雪(I)と、ブレードを押しつけて作業する除雪(I,G)及び除雪(G)との振動加速度レベルの差は大きく、除雪(G)に除雪(I)が加わる除雪(I,G)の負荷は除雪(G)よりやや大きい傾向もわかった。

また、稼働中にフレームがうける負荷の総量を、振動加速度レベルの累積により試算した例を表-6 に示す。

単年度ではあるが、測定車両と同一規格で、似たような稼働実績の除雪トラック A, B について図-7 の作業種別毎の 3 方向合成した振動加速度レベルの全測点計に作業稼働時間を乗じ累積振動加速度レベルとして比較した。稼働の実績値は近いが、フレームが受けた累積された負荷の総量は除雪トラック A の方が大きいと推察できた。

作業種別毎の振動加速度レベルに作業稼働時間を乗じ総和をとることで、稼働距離や稼働時間以外のフレームにかかる負荷量把握の 1 指標として

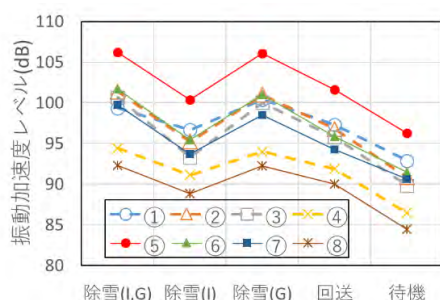


図-5 全測点 X 方向（全作業種別）

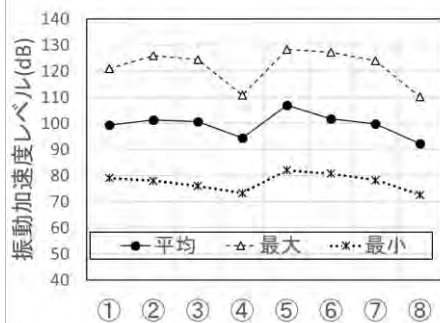


図-6 除雪 (I,G) X 方向（全測点）

表-5 各測点、方向毎の相関係数（除雪 (I,G)）

測定箇所	⑤に対する相関係数		
	X方向	Y方向	Z方向
①	0.84	0.97	0.92
②	0.93	0.98	0.96
③	0.91	0.97	0.94
④	0.79	0.92	0.73
⑥	0.92	0.99	0.95
⑦	0.89	0.98	0.94
⑧	0.77	0.98	0.79

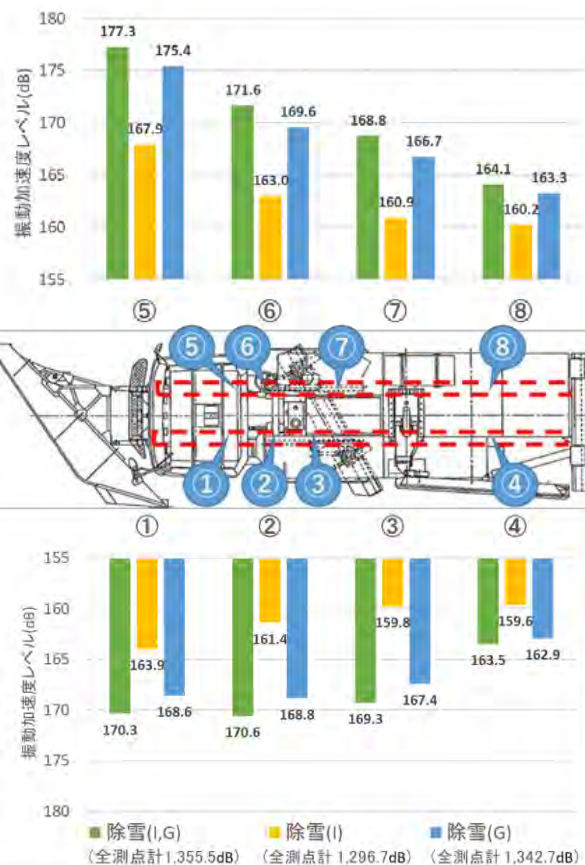


図-7 3 方向合成した振動加速度レベル（作業種別毎）

表-6 累積振動加速度レベル比較 例

車両	稼働時間 (H)	稼働距離 (km)	稼働日数	作業稼働時間 (H)			累積振動加速度レベル (dB)
				除雪(I,G) (1,355.5dB)	除雪(I) (1,296.7dB)	除雪(G) (1,342.7dB)	
A	552:20	7763.3	109	381:20	4:40	5:40	22,107
B	559:20	7420.1	107	306:50	4:20	48:30	20,277

の可能性を確認できた。

今後、複数の工区や除雪トラックで測定を継続し、フレームの劣化診断手法構築のため、振動加速度レベルによる作業種別毎の負荷の定量化や、測定箇所の集約化について検証していきたい。

3.4 雪質による作業負荷の傾向

雪質の違いによる作業負荷への影響についても振動加速度レベルにて検証した。

測定した除雪トラックは、積雪 10cm で出動することになっているため、測定回毎に積雪量に大きな差異はなく、雪質の違いを降水量にて比較した。

降水量は、降った雪を解かし水量として換算するので、同じ積雪量であれば、降水量が少ないと軽い雪となり、多いと重く湿った雪となる。

降水量の数値は、作業工区に最も近い石狩市浜益区のアメダスデータを使用し、前回除雪した後から道路上に積雪されている分の降水量を累積降水量として整理した。測定回毎の累積降水量を表-7 に示す。累積降水量 0.0mm は、降雪があっても 1 時間あたりの降水量が 0.5mm 以下の場合 0.0mm と記録されるため、そのまま累積降水量も 0.0mm とした。

累積降水量毎に振動加速度レベルを整理した結果を表-8 に示す。

累積降水量は、より傾向が掴めるように降水量の多い 15mm と 5mm の 2 つと、降水量が少ないものは 0~0.5mm と 1~1.5mm の 2 つでまとめ、計 4 つの区分で整理した。作業種別は、除雪(I)の測定時

間が計 24 分で各回 0~4 分程度しかないため、ある程度まとまった測定時間があった除雪(I,G)、除雪(G)で整理した。振動加速度レベルは最も負荷の高い測点⑤の 3 方向合成した振動加速度レベルにて算出した。

その結果、作業の平均速度の差異も少なく、累積降水量の差における振動加速度レベルの明確な差は確認できなかった。特に 7 回目の降水量 15mm は、除雪されていない道路では、乗用車は通常走行が困難な程の重い雪質であったが、特に負荷が大きい結果とはならなかった。除雪トラックの牽引力、駆動力に比べ、雪の質量はそれほど大きな負荷ではなく、かつしっかりブレードを押しつけての作業のため、積雪 10cm 程度の作業では、差が出なかったと思われる。

4. まとめ

除雪トラックのフレームの劣化度診断手法の構築に向け、除雪作業種別毎にかかる負荷を振動加速度レベルにて検証した。

その結果、以下について確認できた。

- (1) ブレードを押しつけて作業をする除雪(I,G)、除雪(G)の負荷が大きいことが確認できた。
- (2) フレームが受ける累積される負荷量把握の 1 指標としての活用の可能性を確認した。
- (3) 測定した機種の除雪トラックにおいて、積雪 10cm 程度での作業では、雪質の違いによる負荷への影響は確認できなかった。

今後、測定を継続し、振動加速度レベルによる作業種別毎の負荷の定量化や、測定箇所の集約化についても検証していきたい。

参考文献

- 1) 植野英睦、山田充：振動加速度レベルによる除雪トラックフレームの負荷傾向把握について、令和5年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集pp.79~83、2023年
- 2) 国土交通省北海道開発局網走開発建設部HP：
https://www.hkd.mlit.jp/ab/douro_seibi/v6dkjr0000002r7c.html(一部加工)
- 3) 気象庁HP：気象庁震度階級の解説（平成21年3月）（参考5）「気象庁震度階級表」の気象庁告示（抜粋）p.17
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/jma-shindo-kaisetsu-pub.pdf>

表-7 測定回毎の累積降水量

測定回	累積 降水量 (mm)	測定回	累積 降水量 (mm)
1 回目	1.5	6 回目	1.5
2 回目	0.5	7 回目	15.0
3 回目	1.0	8 回目	0.0
4 回目	5.0	9 回目	0.5
5 回目	0.0	10 回目	0.5

表-8 測定回毎の累積降水量

作業 種別	累積 降水量 (mm)	測定回	作業 時間 (分)	平均 速度 (km/h)	振動 加速度 レベル (dB)
除雪(I,G)	0~0.5	2,5,8,9,10	359	24.1	177.7
	1~1.5	1,3,6	232	23.3	176.1
	5	4	119	24.7	179.1
	15	7	11	23.5	176.2
除雪(G)	0~0.5	2,5,8,9,10	91	19.8	174.7
	1~1.5	1,3,6	32	20.1	175.1
	5	4	8	20.4	175.7
	15	7	125	21.2	176.4

27. マスプロダクツ型排水ポンプの現場実証と新たな研究開発について

国土交通省 大臣官房 参事官（イノベーション）グループ 施工企画室 ○吉崎 雄一
林 朋幸

1. はじめに

河川ポンプ設備は高度経済成長期に整備されたものが多く、設置後 50 年以上経過する施設の急増が見込まれている。また、河川ポンプ設備は複数の機器がシステムとして一体となり機能を発揮するプラント設備であることから、老朽化が進行すると、部品・機器等の部分交換も限界となり、システム全体の更新が必要となる。よって、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。加えて、河川ポンプ設備を構成する機器は特注・受注生産品であるため、扱える技術者が限定されるとともに、故障時の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課題となっている。

そこで国土交通省では、経済性、操作性、維持管理性の向上を目的とし、個別設計・一品生産品から部品の規格化・量産品の活用へ転換を図る「マスプロダクツ型排水ポンプ」の開発に着手した。

令和 3 年度、主原動機に 100kW 級の量産品エンジンを使用した、排水量 1m³/s のマスプロダクツ型排水ポンプ（以下、「100kW 級マスプロポンプ」という。）の実証試験を国立研究開発法人土木研究所の水中環境実験施設で行い、技術の成立性について確認した。また、社会実装に向けて、令和 4 年度から令和 5 年度末までに、秋田県大仙市、京都府福知山市、広島県三次市、高知県四万十市、福岡県みやま市及び福智町の 6 箇所に 100kW 級マスプロポンプの実証設備を設置し、現場実証を行っているところである。

さらに、マスプロダクツ型排水ポンプの適用範囲拡大を目指し、主原動機に 200kW 級の量産品エンジンを使用した、排水量 2m³/s のマスプロダクツ型排水ポンプ（以下、「高出力型マスプロポンプ」という。）の研究開発を令和 4 年度末から進めているところである。

本稿は、100kW 級マスプロポンプの現場実証と、高出力型マスプロポンプの研究開発について経過報告するものである。

2. 100kW 級マスプロポンプの現場実証

ここでは、令和 4 年度より進めている 100kW 級マスプロポンプの現場実証について報告する。

2.1 現場実証の目的

100kW 級マスプロポンプは、主に地方公共団体が管理する小規模排水機場への導入を想定している。今後の社会実装に向けて、実際に使用が想定される環境下に設備を設置し、出水時の排水運転等により、耐久性、操作性、維持管理性などを確認することが現場実証の目的である。

2.2 現場実証の内容

現場実証では、出水時の排水運転による操作性や耐久性の確認、点検やエンジン交換試験により点検や交換保全の容易性等の維持管理性の確認を行うものである。

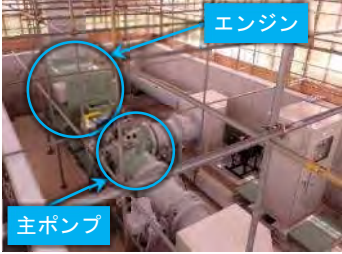
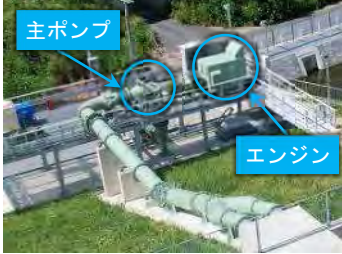
2.3 実証設備の設置状況

6 箇所の実証設備の主要諸元は表-1、設置状況は表-2 のとおりである。

表-1 実証設備の主要諸元（100kW 級マスプロポンプ）

項目		秋田県大仙市	京都府福知山市	広島県三次市	高知県四万十市	福岡県みやま市	福岡県福智町
ポンプ	メーカー	電業社 機械製作所	西島製作所	クボタ	荏原製作所	日立インダストリアル プロダクツ	鶴見製作所
	仕様	φ 700mm 横軸斜流ポンプ（1m ³ /s×6m）					
エンジン	メーカー	三菱ふそう トラック・バス	三菱ふそう トラック・バス	三菱自動車	豊田自動織機	豊田自動織機	三菱自動車
	定格出力	98kW	98kW	107kW	105kW	100kW	109kW
	最大トルク	520N・m	520N・m	360N・m	450N・m	450N・m	360N・m
	定格回転数	1,900min ⁻¹	1,900min ⁻¹	3,400min ⁻¹	3,400min ⁻¹	3,400min ⁻¹	3,400min ⁻¹

表-2 実証設備^シの設置状況

実証箇所	秋田県大仙市	京都府福知山市	広島県三次市
設置場所	雄物川水系丸子川左岸 1.0k 付近 (大曲浜町地先)	由良川水系蓼原川左岸 25.5k 付近 (大江町河守地先)	江の川水系江の川 149.4k 付近 (秋町亀甲地先)
設置時期	令和 5 年 12 月	令和 5 年 7 月	令和 6 年 3 月
写 真			
実証箇所	高知県四万十市	福岡県みやま市	福岡県福智町
設置箇所	渡川水系中筋川左岸 8.4k 付近 (楠島地先)	矢部川水系矢部川左岸 12.5k 付近 (瀬高町本郷地先)	遠賀川水系彦山川左岸 3.6k 付近 (草場地先)
設置時期	令和 5 年 5 月	令和 5 年 12 月	令和 5 年 5 月
写 真			

2.4 現場実証の状況

(1) 秋田県大仙市

令和 6 年 7 月 9～10 日、25～26 日の 4 日間で延べ約 16 時間の実排水運転が行われた (写真-1)。



写真-1 排水運転状況 (R6.7 大仙市実証設備)

運転中の異常等は特に無く、正常に機能することを確認した。

(2) 京都府福知山市

福知山市の実証設備は、バイパス管を使用した管理運転が可能であり、令和 6 年 5 月に管理運転を実施した。管理運転時の排水量 (計算値)、エン

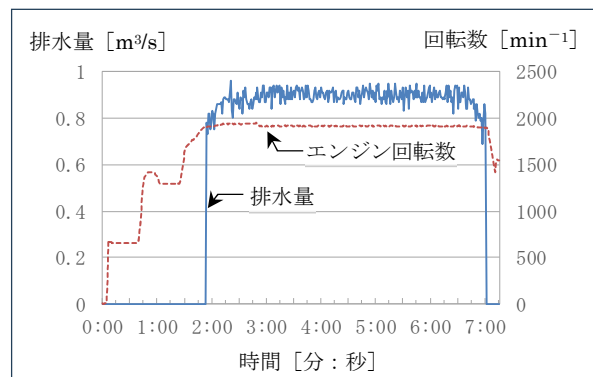


図-1 管理運転データ (R6.5 福知山市実証設備)

ン回転数を図-1 に示す。運転中の排水量、エンジン回転数とも安定して推移している。

(3) 広島県三次市

完成後、まだ実排水運転を行っていないが、今後行われる実排水運転で確認予定である。

(4) 高知県四万十市

令和 5 年 6 月の台風 2 号に伴う出水時に約 20 時間の実排水運転が行われ (写真-2)、運転中に大きく 2 つの異常が生じた。1 つは落水検知によ



写真-2 排水運転状況 (R5.6 四万十市実証設備)

る運転停止、もう1つはエンジンの冷却水温上昇による運転停止である。落水検知は2回発生したが、いずれも主ポンプを一旦停止して再度運転することで故障復帰した。これにより、実際に落水現象が発生したのではなく、配管内の空気溜まりを誤検知したと推測される。エンジン冷却水温度の上昇については、エンジンの熱を放出するため、応急的な対応としてエンジンパッケージの扉を解放して運転を継続できた。この事象を踏まえ、パッケージには新たに給排気ファンを追加する対策を実施した。

(5) 福岡県みやま市

令和6年7月の出水時に約4時間の実排水運転が行われた。運転中にポンプが「主原動機重故障」により複数回停止する事象が発生した。運転時の排水量（計算値）、エンジン回転数を図-2に示す。エンジン回転数は安定して推移しているが、排水量が $2\text{m}^3/\text{s}$ を示す等不安定である事を確認した。原因については現在調査中である。

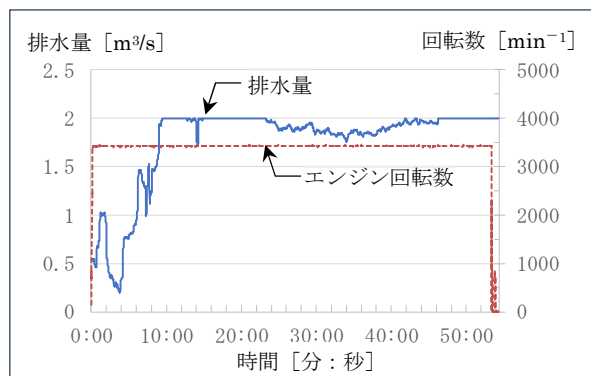


図-2 実排水運転データ (R6.7 みやま市実証設備)

(6) 福岡県福智町

令和5年7月の出水時に約3時間の実排水運転が行われた（写真-3）。運転時に大きな異常等は確認されなかった。



写真-3 排水運転状況 (R5.7 福智町実証設備)

6箇所の実証設備について、本年度も引き続き現場実証を行っていく予定であり、現場実証で確認した課題等についてとりまとめる予定である。

3. 高出力型マスプロポンプの研究開発

続いて、令和4年度末より着手した高出力型マスプロポンプの研究開発について経過報告する。

3.1 研究開発の目的

高出力型マスプロポンプは、主に直轄排水機場への導入を想定しており、本研究開発では、主原動機に量産品エンジンを使用した、排水量 $2\text{m}^3/\text{s}$ の立軸斜流ポンプの開発を目的として、実証設備の製作、据付及び試験を実施する。なお、エンジンについては交換が容易となるよう、100kW級マスプロポンプと同様にパッケージ化する。

実証現場は、過去の排水実績や設置スペースを考慮し、近畿地方整備局淀川河川事務所が管理する針ノ木排水機場を予定している。針ノ木排水機場は計画排水量 $6.0\text{m}^3/\text{s}$ のうち、現在の必要排水量 $3.0\text{m}^3/\text{s}$ の主ポンプ1台が昭和51年度に設置され、現在まで運用されている。将来の主ポンプ設置予定箇所を利用して実証試験を行う予定である（写真-4）。

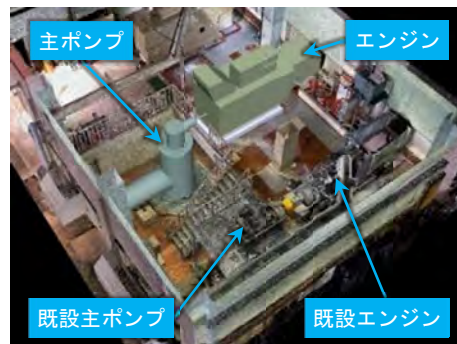


写真-4 高出力マスプロポンプ実証設備設置イメージ

3.2 今年度の実施内容

昨年度に設計・製作が完了した実証設備について、今年度は実証現場への据付のほか、排水性能試験、エンジン交換試験を行う予定である。

(1) 排水性能試験

針ノ木排水機場は自然流下ゲート利用循環方式による管理運転が可能である。これを活用し、始動試験、負荷変動試験、連続運転試験を実施し、排水性能の確認を行う。なお、後述するエンジン交換試験後も含めて2台のエンジンについて、軸受温度や振動値等の傾向を確認し分析を行う。

(2) エンジン交換試験

異なるメーカーのエンジンパッケージの交換試験を行い、互換性等について確認する。また、交換後の芯出しの管理基準値について、従来の機械工事施工管理基準(案)の管理基準値による据付(以下、「通常据付」という。)と、交換作業の容易性のために許容値を大きくした据付(以下、「簡易据付」という。)のそれぞれについて行い、排水性能試験で、軸受温度や振動値等の傾向を確認し分析を行う。

3.3 実証設備の概要

実証設備の主要諸元を表-3に示す。なお、エンジンは前述の交換試験のため、予備機を含めて異なるメーカーの2台を使用する。エンジンは、量産品の発電機用ディーゼルエンジンを採用した。発電機用エンジンは一定負荷状態において一定回転数で連続運転するもので、使用条件が類似していること、自動車用エンジンでは必要だったエンジン制御装置との信号調整が不要であることから、主ポンプ駆動用エンジンへの適合性が期待できる。

表-3 実証設備の主要諸元(高出力型マスプロポンプ)

項目		諸元	
ポンプ	メーカー	荏原製作所	
	仕様	φ1000mm 立軸斜流ポンプ (2m ³ /s×6m)	
エンジン	メーカー	ヤンマーエネルギーシステム	コマツ
	定格出力	200kW	275kW
	定格回転数	1500min ⁻¹	1500min ⁻¹

また、エンジンと減速機を接続する中間軸継手は、着脱の容易性やミスアライメントの許容範囲の広さを考慮したカップリングを採用した。これによりエンジンの交換作業が迅速化されるかを今後のエンジン交換試験で検証する予定である。

3.4 現在の進捗と今後の予定

令和6年8月末現在、実証設備の製作が進められており(写真-5)、出水期明けに据付を行う予定で、令和7年1月下旬から2月末まで排水性能試験、エンジン交換試験を予定している。

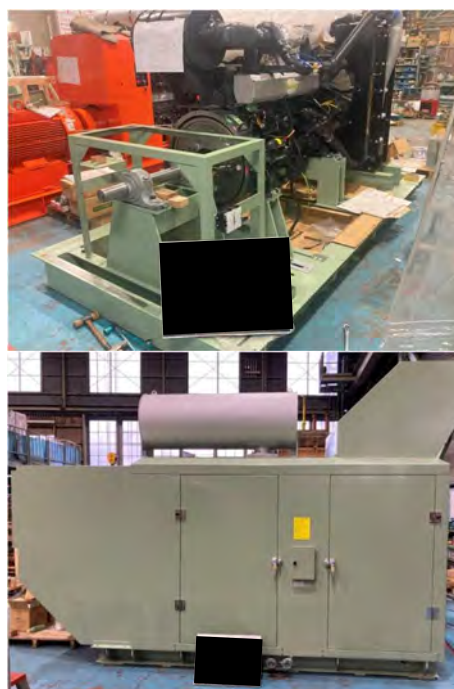


写真-5 200kW級エンジンパッケージ製作状況

来年度以降についても、エンジン交換試験、排水性能試験や維持管理性の検証等を実施し、2台のエンジンパッケージそれぞれについて200時間以上の運転を目指し、実証試験を行う予定である。

4. おわりに

マスプロダクツ型排水ポンプは、全国の河川機械設備の「大更新時代」到来が懸念されているなかで、個別設計・一品生産品から部品の規格化・量産品の活用という発想の転換により生み出され、ポンプ業界と自動車業界の異業種連携の試みで開発が始まった。

マスプロダクツ型排水ポンプは、これまでの実証試験等の検証結果から、今後の治水対策手法の1つの選択肢としての可能性が示されている。

国土交通省では、引き続きマスプロダクツ型排水ポンプの実証試験を行い、そこで得られた知見を集積し、技術指針(案)を取りまとめて導入促進を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会, ぽんぷ, No. 70, 令和5年9月

28. 砂質土における油圧ショベルの掘削動作による 地盤強度推定に向けた実験的検討

コベルコ建機株式会社	○ 島津 泰彦
コベルコ建機株式会社	関塚 良太
コベルコ建機株式会社	小岩井 一茂
国立研究開発法人土木研究所	遠藤 大輔
国立研究開発法人土木研究所	橋本 毅

1. はじめに

国土交通省が策定した「i-Construction 2.0」¹⁾では、建設現場の省人化対策として「施工のオートメーション化」に取り組む方針としている。

現在、油圧ショベルの掘削動作では、オペレータが地盤のかたさに応じて、レバーを適切に操作することで仕事量の効率を高めている。通常、現場で実施される土質試験はサンプリング数が少ないため、ショベルの作動範囲を網羅することは難しい。また、天候や地下水位などの影響も受けるため、作業中の土質をあらかじめ把握するのは難しいと考えられる。そのため、油圧ショベルの作業の自動化を実現するためには、作業対象物である地盤の性状を機械が動作中に検知し、その状態に合わせて機械の動作計画や作業中の動作修正を行うことが必要になると考えられる。

筆者らはこれまで、砂質土地盤を対象に、掘削作業における油圧ショベルのバケットに作用する掘削抵抗と地盤挙動との関係性を明らかにしてきた²⁾。具体的には、油圧ショベルの作業装置に取り付けた各種センサの計測データから算出したバケットに加わる掘削抵抗値が、McKyes と Ali³⁾の提案する 3 次元地盤変形を考量した土圧式による理論値と同等の値になること、地盤の破壊形態やすべり線の発生の仕方が、実験と理論で同様になることを示した。

本発表では、含水比や締固め条件により、かたさを変えた複数の実験用地盤を対象に、油圧ショベルの掘削動作で地盤性状を検知することが可能か否かについて、検知方法の検討と実機実験による検証を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用機械

実験には 20 t 級油圧ショベルを用いた。0.8 m³ バケットを装着しており、バケット口幅はサイドカ

ッタを含まず 1060 mm である。

本実験用にブーム、アーム、バケットを動かすための各油圧シリンダの変位量およびヘッド側圧力、ロッド側圧力並びにバケット進行方向に対する車体の傾斜角を計測するためのセンサを取り付けている。

また、本機械には 2D マシンコントロール(以降、MC と省略する)機能が搭載されており、バケット爪先の掘削軌道を制御することができる。また、計測用に 2D マシンガイダンスシステムも追加搭載した。

2.2 実験地盤

実験は屋内実験施設で行った。原地盤を掘削し、幅 10 m、長さ 8 m、深さ 0.8 m のピットを作成した後、図-1 に示すように、幅方向を 3 分割する仕切り板を設置した。各レーンには 2.3 章に示す条件の地盤を準備し、各レーンで 1 回または 2 回の掘削実験を行った。

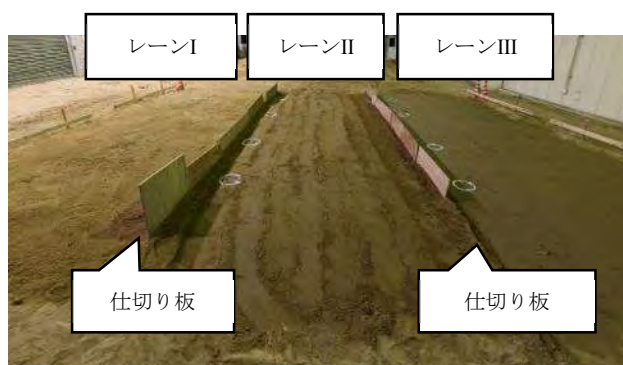


図-1 実験地盤

2.3 地盤条件

供試材料は山砂と、締固まりやすくするために細粒分を多く含むロームを山砂に混ぜた混合土の 2 種類を使用した。混合土は作成した時期の違いに

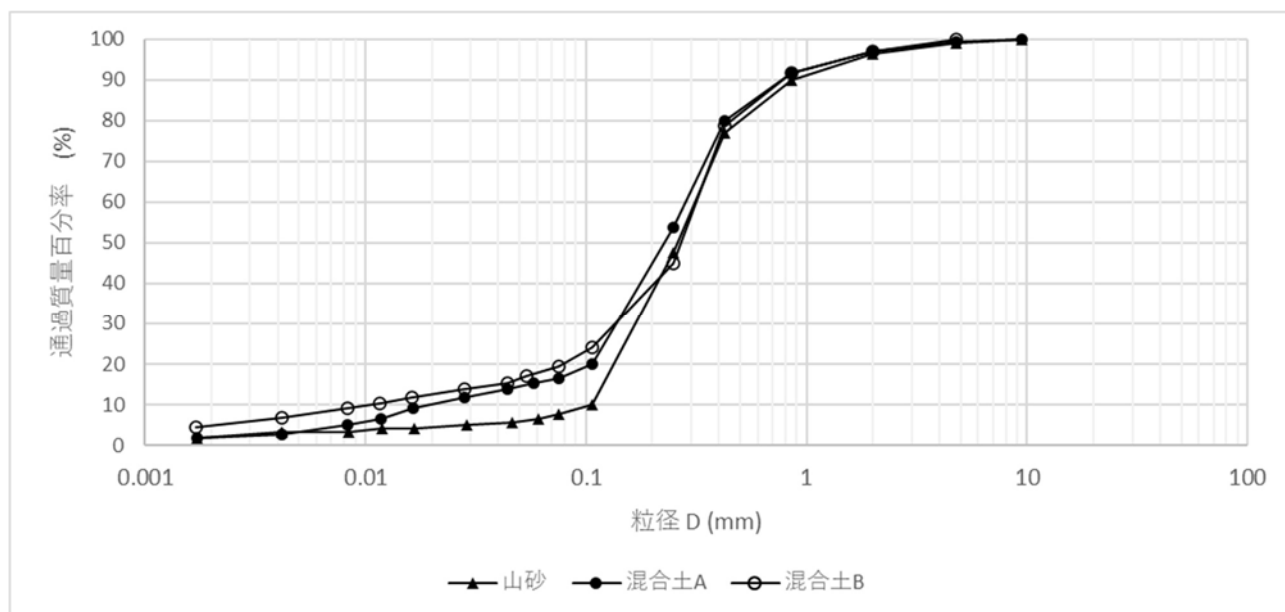


図-2 粒径加積曲線

表-1 材料の物理特性

呼称	土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	最適含水比 w_{opt} (%)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)
山砂	2.694	16.6	1.681
関東ローム	2.723	—	—
混合土 A	—	19.9	1.558
混合土 B	—	20.3	1.570

表-2 地盤条件と物性値

条件	供試材料	締固め条件	含水比 w (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	内部摩擦角 ϕ_u (°)	粘着力 c_u (kN/m^2)
1	山砂	緩詰め	8.8	1.395	1.282	25.6	0.0
2	混合土 A	転圧 0.5 往復	19.8	1.642	1.371	27.0	24.8
3	混合土 A	転圧 7 往復	20.3	1.796	1.492	28.3	23.4
4	混合土 A	転圧 7 往復	17.9	1.694	1.436	29.6	27.8
5	混合土 B	転圧 2 往復	12.9	1.480	1.312	31.8	14.3
6	混合土 B	転圧 2 往復	20.9	1.740	1.439	22.9	24.1
7	混合土 B	転圧 2 往復	22.3	1.875	1.534	23.4	31.1

より、配合の近い 2 種類がある。各材料の粒径加積曲線を図-2 に、物理特性を表-1 に示す。

上記 2 種類の材料を用いて、次の影響確認を行うため、表-2 に示す計 7 条件で実験を行った。

(1) 締固めによる影響

含水比を最適含水比相当に調整し、ピットに材料を投入後、締固めを行った。

緩詰めは土砂を締め固まらないようにレーン内に投入した後、地表面を均した。

締固めは、各層の締固め後厚さが約 20 cm にな

るように一定深さごとに行い、極力深さ方向の締固め状態のばらつきが発生しないようにした。土砂を投入後、その上を 3 t 級ミニショベルで 1 往復走行し、軽く締固めを行う。その後、機械質量 300 kg の前後進コンパクタで、走行回数により締固めエネルギーを変えて、かたさの異なる条件 2~4 の地盤を作成した。

(2) 含水比による影響

前記締固め条件は同じとし、含水比が異なる条件である条件 5~7 を作成した。

2.4 土質試験

実験前に対象地盤の一部を内径 0.1 m、高さ 0.1 m のコアサンプラーを用いて採取し、JGS1613-2003 「コアカッターによる土の密度試験方法」に基づいて、表-2 に示す各条件の密度および含水比を計測した。

対象地盤の土の強度定数である内部摩擦角 ϕ_u (°)と粘着力 c_u (kN/m²)は、前記の計測値をもとに供試体を作成し、JGS0521 土の三軸圧縮試験に基づき計測した。その際側圧は 50, 100, 200 kPa の 3 条件とし、掘削という短時間における現象であることから、非圧密非排水 (UU) 条件とした。

2.5 原位置試験

作成した実験地盤の原位置試験として、軽量動的コーン貫入試験と簡易支持力測定器による試験を実施した。計測はともに各レーンで 4 か所ずつ計測を行い、その平均値で評価を行った。

軽量動的コーン貫入試験の装置概要を図-3 に示す。ハンマーによる打撃でロッドと 2 cm² の先端コーンを地盤に打ち込みながら、打撃毎の貫入抵抗値と貫入深さを計測することで、浅い地盤の硬軟や締め固め状況の確認を行うことができる。今回は深さが 0.8 m になるまで計測した。詳細な使用方法などは参考文献 4), 5)を確認されたい。

簡易支持力測定器(キャスポル)を用いて、地盤剛性を地盤反力係数 K_{30} で計測した。ただし、条

件 1 の地盤に関しては計測器設置時に自重で沈み込み、計測できなかったことより、ゼロとみなした。

2.6 実験方法

図-4 に油圧ショベルの初期姿勢を、図-5 に掘削動作の模式図を示す。クローラがバケット進行方向と平行になるように機体を掘削レーン後方に設置する。バケット爪先が地表面に接地し、バケット底面が鉛直、アームシリンダ最縮となる状態を初期姿勢とする。その際の爪先位置を起点として、水平面に対して 20 度の傾きをもつ直線を MC 機能での掘削軌道として設定する。これによりオペレータのマニュアル操作によるばらつきを抑え、動作の再現性を持たせている。

オペレータは、計測を開始し、MC 機能を有効にした上で、初期姿勢からアーム引きレバー操作を行う。MC 機能によりバケット爪先が目標軌道に沿うようにブーム上げ操作が自動で行われる。

掘削開始後、バケットが移動するにつれて、掘削深さおよびバケットで抱えこむ土量が多くなり、掘削抵抗は増大していき、機械が出力可能な掘削力と掘削抵抗がつり合うことで、ショベルの動作は停止する。その後、10 秒程度レバー操作を継続した後、計測を終了する。

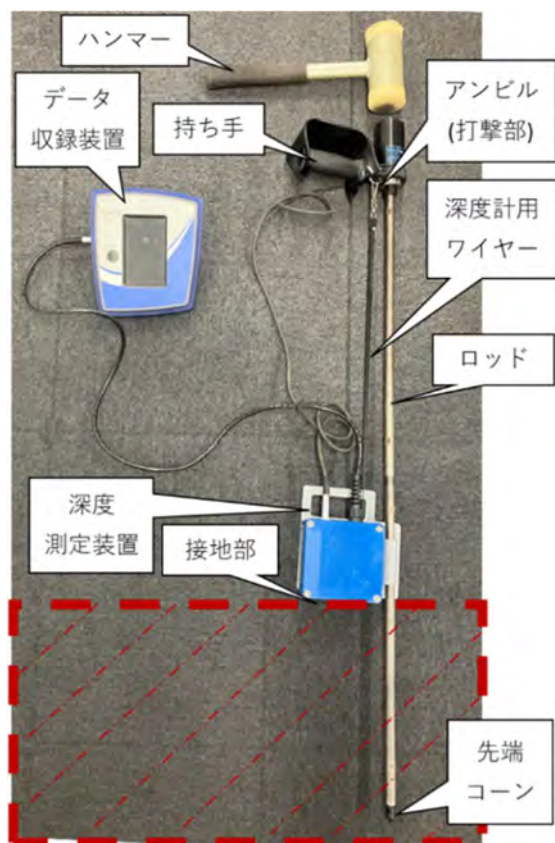


図-3 軽量動的コーン貫入試験機



図-4 掘削時初期姿勢

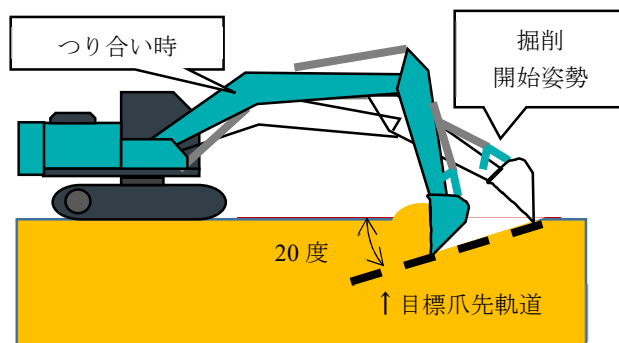


図-5 掘削動作模式図

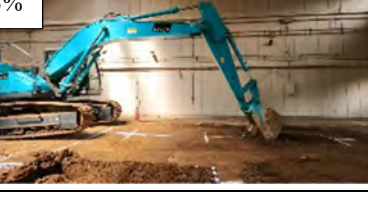
条件	実験状況	バケット周辺の地表面形状	
1 w=8.8%			
2 w=19.8%			
3 w=20.3%			
4 w=17.9%			
5 w=12.9%			
6 w=20.9%			
7 w=22.3%			

図-6 掘削後停止状態での実験状況

表-3 バケット爪先の水平方向移動距離および掘削深さ

条件	1	2	3	4	5	6	7
掘削深さ(cm)	90	70	49	52	60	54	45
水平方向移動距離(cm)	314	261	216	255	247	249	220

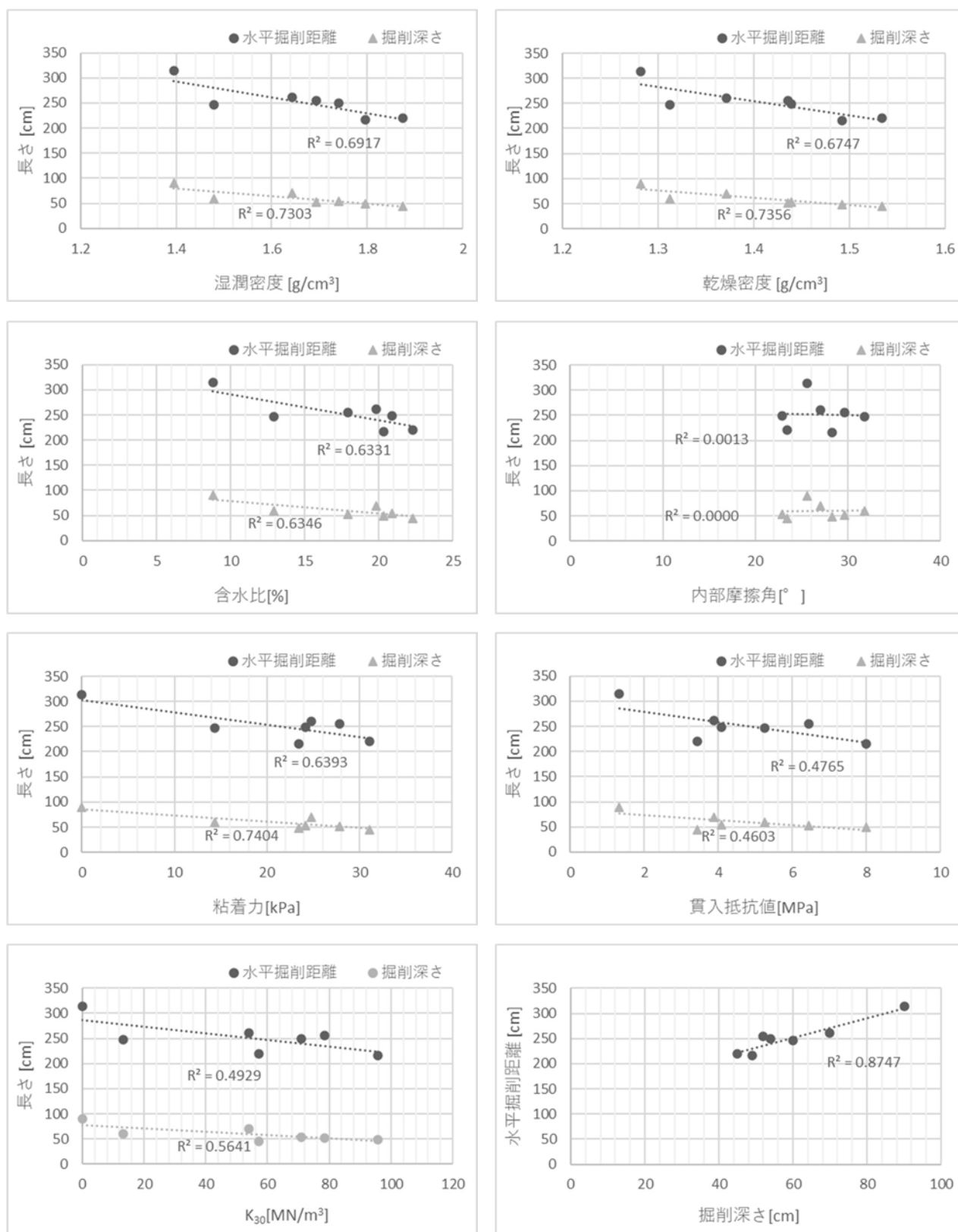


図-7 各種土質定数と水平掘削距離，掘削深さの関係

表-4 貫入抵抗および地盤反力係数

条件	1	2	3	4	5	6	7
貫入抵抗値(MPa)	1.32	3.88	8.00	6.45	5.24	4.07	3.44
地盤反力係数 K_{30} (MN/m ³)	0	54.0	95.6	78.6	13.2	70.8	57.2

3. 実験結果

図-6 に各条件での、掘削後停止状態での実験状況およびバケット周辺の地表面形状を示す。

含水比が低い場合は、掘削後地表面に細かなせん断線が発生し、バケット内に多くの土砂が堆積している。一方で、含水比が多い場合は、掘削中地表面の土塊がせん断線に沿って、分断されて移動する様子が確認された。また、せん断破壊された土塊の大きさも含水比の増加につれて、大きくなっていることが掘削後の写真からも分かり、掘削後の土砂堆積量が少ない。

掘削開始点を基準として、2D マシンガイダンスシステムで計測した各条件での掘削停止時のバケット爪先の水平方向移動距離および掘削深さを表-3 に、各条件の貫入抵抗値と地盤反力係数を表-4 に、土質定数等と水平方向移動距離、掘削深さの関係を図-7 に示す。湿潤密度、乾燥密度、含水比、粘着力は水平掘削距離または掘削深さと決定係数でおよそ 0.64 以上、相関係数で-0.8 から-1.0 であり、強い負の相関があることが分かった。また、貫入抵抗および地盤反力係数 K_{30} は同様に相関係数が約 -0.7 程度であり、負の相関がみられた。

4. 考察

筆者らは先行研究²⁾にて平坦な砂質土地盤を油圧ショベルのバケットで掘削する際、McKyes と Ali が提案する 3 次元地盤変形³⁾が発生し、その理論から算出される掘削抵抗値と、機体のセンサ値と作業装置部のリンク機構の力学モデルから算出される油圧ショベルのバケットに加わる掘削抵抗値が同等の値になることを確認した。その際、切削刃に加わる水平方向の抵抗 P_H は、土の密度 γ 、土の粘着力 c 、载荷重 q 、掘削深さ d 、壁体幅 b とすると、式(1)のように表される。

$$P_H = (\gamma d^2 N_r + cdN_c + qdN_q)b \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで N_r 、 N_c 、 N_q はそれぞれ土の自重、粘着力、上載圧に関する切削抵抗力係数である。詳細に関しては参考文献を確認いただきたい。

今回の実験では、機械が出力可能な掘削力と掘削抵抗がつり合うまで掘削を行っている。そのため、式(1)の抵抗値は各条件で一定になっていると考えられる。式(1)において、係数を除くと、第1項では湿潤密度と掘削深さ、第2項では粘着力と掘削深さの積で構成されている。そのため、掘削深さと各土質定数が強い負の相関を示したと考えられる。また、貫入抵抗および地盤反力係数は密度と関連があるため、同様に負の相関を示したと考えられる。

今回の実験では、水平面に対して 20 度傾いた掘削軌道となるように MC 機能により掘削操作の制御を行っている。そのため、水平掘削距離と掘削深さは図-7 に示すとおり、正の強い相関を示している。これより、水平掘削距離も各土質定数と強い負の相関を示したと考えられるが、式(1)には掘削深さが変数として含まれているため、水平掘削距離よりも強い負の相関を示したと考えられる。

各土質定数の決定係数に着目すると、湿潤密度や乾燥密度に対して、含水比が低い値となっている。これは、含水比では締固めによる体積変化が考慮されないためと考えられる。

5. まとめ

砂質土をベースとした同一材料において、含水比と締固め状態が異なる地盤を用意し、油圧ショベルを規定の動作で掘削操作すると、土質定数と掘削距離および掘削深さに強い負の相関があることが分かった。

すなわち、上記の関係性があらかじめ分かっていたら、同手法において機械で計測可能な掘削深さや掘削距離をセンシングすることで土質の変化を把握出来る可能性があることが分かった。

今後は、土の材料による影響やショベルの操作を実作業に近づけての検証が必要と考えられる。

最後に、本研究は、国立研究開発法人土木研究所との共同研究「土工・舗装工における施工工程データ等を活用した生産性向上技術に関する研究」において実施したものである。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～、<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>, 2024.8.23
- 2) 島津泰彦・関塚良太・小岩井一茂・遠藤大輔・橋本毅・山口崇：砂質土における油圧ショベルのバケットに作用する掘削抵抗と地盤挙動に関する実験的検討，テラメカニクス，第44号，pp.45～50，2024
- 3) E.McKyes・O.S.Ali：The cutting of soil by narrow blades，Journal of Terramechanics, Vol. 14, No. 2, pp. 43-58, 1977
- 4) Takashi Tsuchida・A.M.R.G. Athapaththu・Seiji Kano・Kazuki Suga：Estimation of in-situ shear strength parameters of weathered granitic (Masado) slopes using lightweight dynamic cone penetrometer, Soils and Foundations, 51 巻 3 号, pp.497-512, 2011
- 5) 貞宗太郎：新しい簡易動的貫入試験手法(PANDA2)の装置と特性，全地連「技術e-フォーラム2008」高知，2008

29. 建設現場におけるマニピュレータ型鉄骨溶接ロボットの開発

鹿島建設株式会社

水谷 亮
横山 太郎
○ 菊地 望

1. はじめに

近年、建設就労者の高齢化と若年層の入職者不足に伴い、高度な技能を有する熟練溶接工の減少が懸念されている。一方で大型超高層ビルは多数計画されており、鉄骨溶接作業量の増加が見込まれている。そこで、溶接量が多い大型柱を対象として、全自動で高品質に現場溶接を行う「マニピュレータ型鉄骨溶接ロボット」を開発し、実用段階に至った（写真-1）。以下にその内容について示す。

2. システム概要

柱1本の溶接を全自動化することで溶接作業員を溶接場所から解放し、他業務との並行作業や多数のロボットの並行運用が可能となる。これにより溶接作業員の生産性向上が図れ、熟練溶接工不足の対応に貢献できる。

当ロボットは、小型軽量の6軸マニピュレータを使用し、柱周囲に設置したレール上で移動と溶接を繰り返して柱全周を自動で溶接するシステムである。マニピュレータに設置したセンサで接合部（開先形状）を計測して部位ごとに溶接条件を算出するため、鉄骨建て方の誤差を考慮でき、現場での全自動溶接を実現している。

図-1にロボット溶接のフローを示す。溶接に伴う一連の付帯作業もすべて自動化しているため、溶接作業員はロボットから離れて別の作業ができる。

図-2に当ロボットの運用の一例を示す。溶接作業員2名で溶接完了までに4日かかる超大型柱では、同じく2名が5セットのロボットを運用すると出来高は4日/1本から1日/1本と4倍になり、溶接作業員の生産性を大幅に向上できる。さらに昼休みや夜間もロボットに溶接させれば工期短縮にもつながる。



写真-1 マニピュレータ型鉄骨溶接ロボット

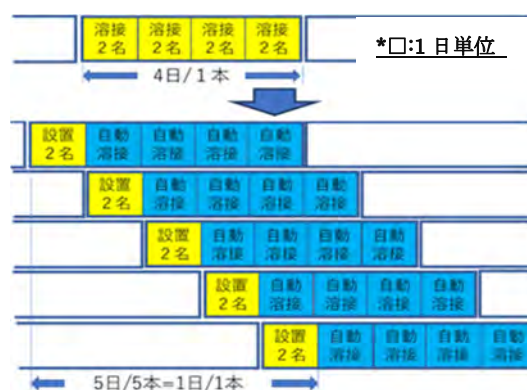


図-2 ロボット複数の運用パターン

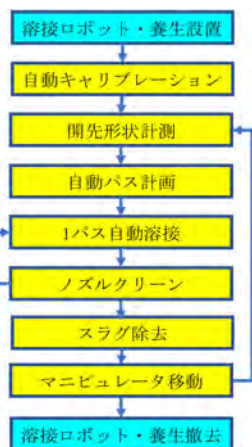


図-1 自動フロー

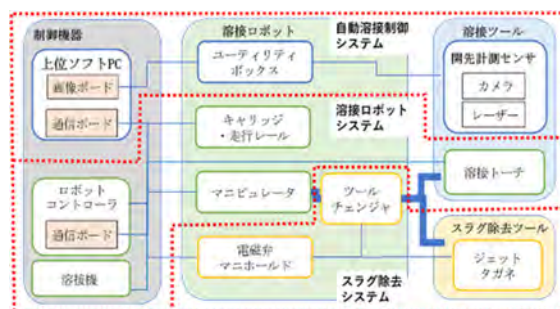


図-3 システム構成

図-3にシステムの構成を示す。当ロボットは「溶接ロボットシステム」、「自動溶接制御システム」、「スラッグ除去システム」の3つのサブシステム、及びシステム養生・移設運搬設備から構成される。次章以降、これらについて説明する。

3. 溶接ロボットシステム

現場溶接ロボットで一般的な小型可搬式ロボットでは4面ボックス柱の角部の連続溶接は難しく、エンドタブや継部処理に溶接作業員の手作業が生じる。マニピュレータ型のロボットを使用することで角部でのトーチ姿勢変更のための複雑な動作ができ、4面ボックス柱角部の連続溶接が可能になるため、手作業がなくなり、全自動化を図れる。

当ロボットはレール上をマニピュレータが移動、柱全周を8ブロックに分けて溶接と移動を繰り返すことで、柱1本の多層盛り溶接を全自動で行う(写真-2、図-4)。

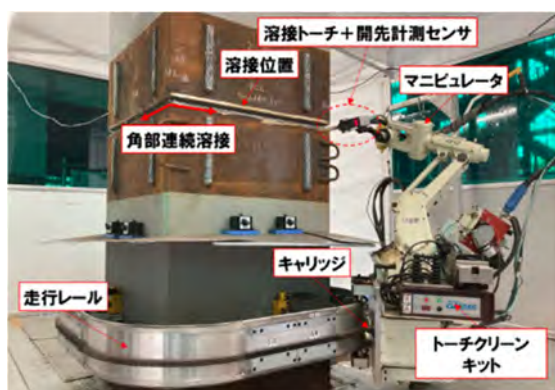


写真-2 溶接ロボットシステム外観

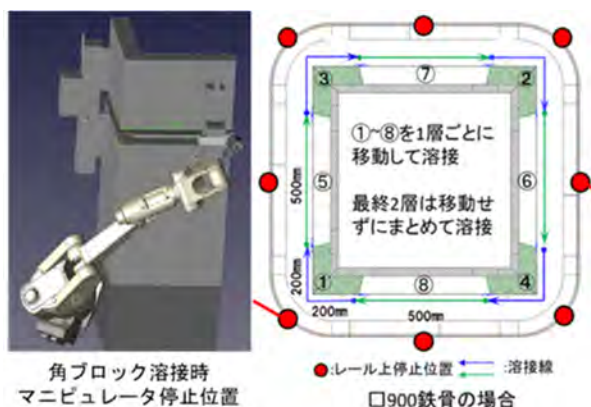


図-4 溶接区間とマニピュレータ停止位置

3.1 マニピュレータ

レール上を移動させることでマニピュレータを小型化、約 30 kg と軽量なためデッキプレート上での取り回しも良好である。一方で可搬重量は 3kg と小さいため、トーチやセンサ、ツールチェンジャなどのエンドエフェクタは軽量化に努めた。

3.2 走行レール

マニピュレータはレールに沿って設置されたラックとキャリッジ内部のピニオンギアにより移動する。走行レール(写真-3)は角丸型で、4つのコーナーピースと直線ピースで構成している。直線ピースの長さや数を変更することで異なる大きさの鉄骨柱に対応できる(図-5)。マニピュレータで

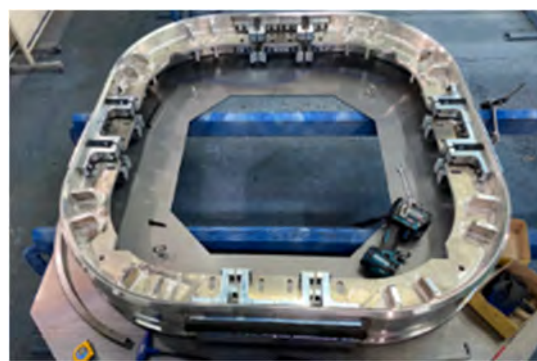


写真-3 角丸レール本体

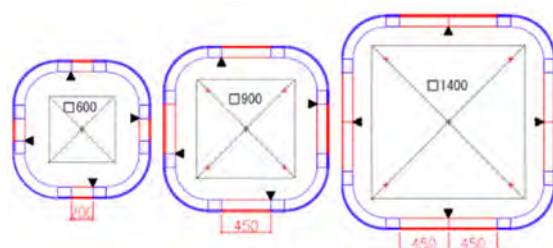


図-5 異なる鉄骨サイズへの対応

溶接するため、1種類のコーナーピースで角部が立った4面ボックス柱でも角部にRがついたコラム柱でも対応できる。

レールはアルミ製で1ピース 10kg 程度のため人力での組立も容易である。レール受け材の上にレールを載せて固定する。レールの位置決め調整作業をなくすよう、ボルトを入れて締めこむだけで組立精度を確保できるような工夫をしている。

3.3 キャリッジ

角丸レールの走行時は曲線と直線を通るため、レールの曲率が変わってもギアの噛込みやバックラッシュが発生せず、高精度に位置決めができるキャリッジを開発した。図-6に示すように、直線部の走行時はキャリッジとレールは平行だが、曲線部の走行時は斜めになりピニオンギアとガイドの間を広くする必要がある。そこで、ピニオンギア支持フレームを揺動させてレール外側方向に変位できる機構とした。ピニオンギアをコイルバネでラックに押し当ててバックラッシュをなくすことでマニピュレータの位置決め精度を向上し、溶接ワイヤ先端の狙い精度を確保している。



図-6 ギャップ調整機構

4. 自動溶接制御システム

一般の工場溶接ではティーチングプレイバックで溶接が可能だが、現場溶接の場合は建て方誤差を含むため、開先形状が一定ではない（図-7）。当システムでは、このような各鉄骨の施工状況（鉄骨の目違いや傾きなど）に対して、各々の開先形状に合わせたパスや溶接条件で溶接することで、建築現場での全自動溶接を実現している。

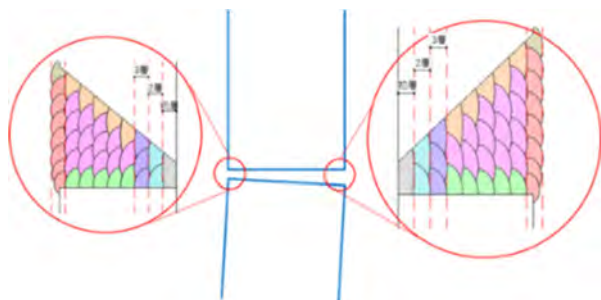


図-7 施工状況によって異なる開先形状

制御フローを図-8に示す。ロボットを設置して位置決めを行った後から、レール移動、開先計測、溶接、溶接条件算出、層、ブロック毎溶接、1パス溶接、トーチクリーンをおよびスラグ除去を自動で実行する。

ハードウェアは制御用PCと開先センサなどで構成されており、実際の開先形状を開先センサで計測して積層計画及び溶接条件の算出を自動で行い、算出した溶接条件等を基にロボットに溶接を実行させる。

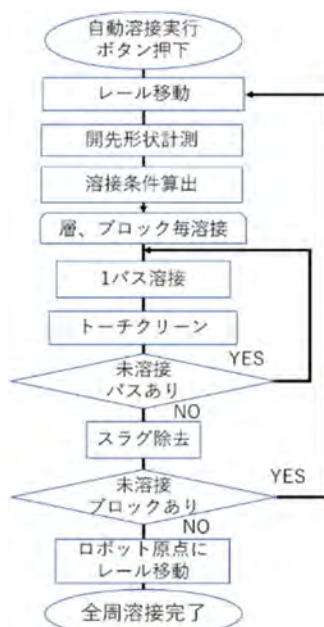


図-8 制御フロー

4.1 開先センシング

マニピュレータに設置した開先センサを使って開先形状を取得し、特徴点を抽出することで開先形状をデータ化する（写真-4）。溶接品質を確保するため狙い位置は 1mm 以下の位置決めを要求され、光切断法によりその精度を確保している。

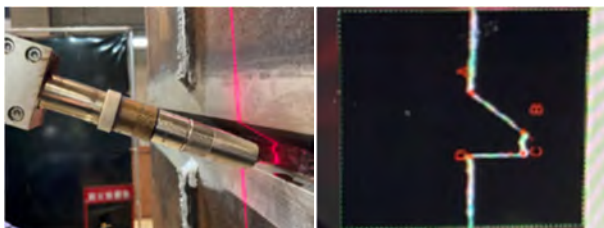


写真-4 計測状況

4.2 溶接条件算出アルゴリズム

熟練溶接工のノウハウに基づいて溶接条件などを算出するアルゴリズムを開発した。当アルゴリズムでは、センサで取得した開先形状からパス計画と溶接条件計画を行う。

パス計画では、計測した開先形状から積層数および各層でのパス数、及び各パスの狙い位置を決定する（図-9、写真-5）。

溶接条件計画では、各パスの断面積を元に溶接電流、電圧、溶接速度等を算出する。なお開先の目違いや開き方などによって 1 パス中でもパス断面積は異なるため、複数区間に分割して溶接条件を生成している。

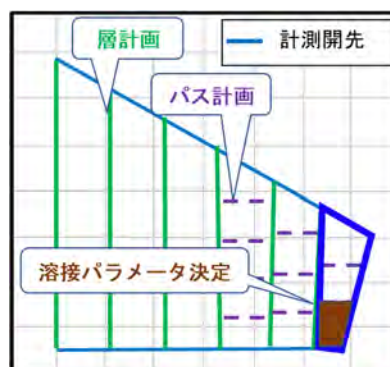


図-9 パス計画アルゴリズム

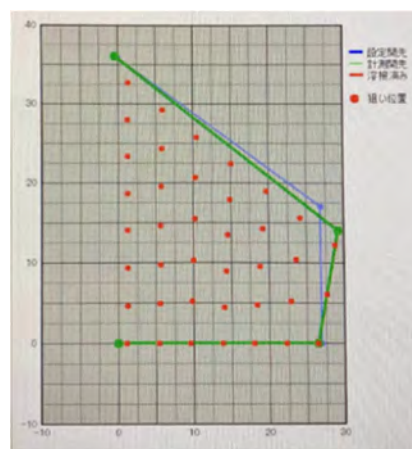


写真-5 狙い位置計画

4.3 溶接パラメータの調整

上記のアルゴリズムを元に、溶接品質を確保するためのパラメータの調整を行った。特に溶接継ぎ目には融合不良などの溶接欠陥が発生しやすく、また鉄骨角部では余盛不足やビード垂れ、アンダーカットが発生しやすい。

パラメータ調整を行うにあたっては定量的に形状を把握できる 3D ハンディスキャナを使用した。従来からの、溶接外観が「痩せている」「太っている」といった定性的評価や、溶接ゲージによるピンポイント計測では、定量的で的確な対策を決める

ことは難しい。3D スキャナで各層ごとの形状を取得して積層状況を定量的に把握し、これを超音波探傷（UT）や溶接条件と照らし合わせて分析することで、欠陥の位置や原因を特定して効果的な対策を打つことができた（図-10、11）。

このように、溶接パラメータ調整と UT や外観検査、機械試験に加え、3D スキャナによって積層経過を把握することで、当ロボットの溶接品質のエビデンスを確保している。

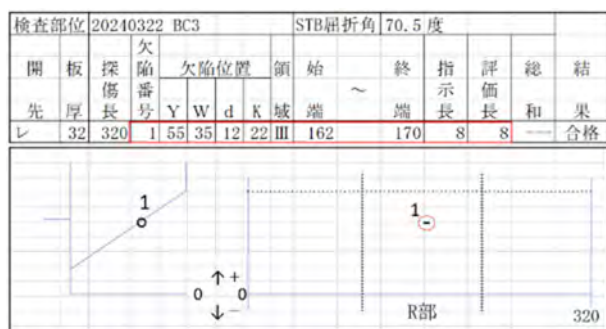


図-10 超音波探傷検査 (UT)

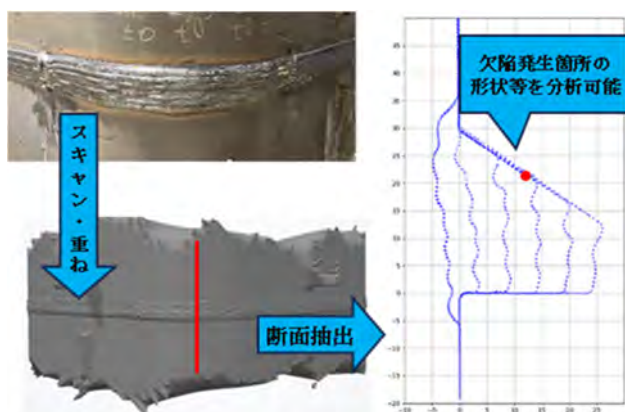


図-11 積層状況の分析

5. スラグ除去システム

当ロボットは溶接コストの面から通常の鉄骨溶接と同じくソリッドワイヤと CO2 ガスを使用して、溶接欠陥を防ぐため各層ごとにスラグを除去する必要がある。今回、当スラグ除去システムを開発・実装したことで前述のフロー（図-1）の全自動化を実現し、溶接作業員が溶接場所から離れられることとなった。

今回、ツールチェンジャを用いて溶接トーチとスラグ除去装置（ジェットタガネ）を持ち替え、マニピュレータでスラグを自動除去する構成とすることで装置をコンパクトにしている。スラグ除去時のタガネ動作は溶接パスより生成しており、溶接ビードに沿ってタガネ先端を接触させながら移動することで、ビード上のスラグを効率的に除去する。

5.1 基本設計、構想

スラグ除去を自動化するにあたり、レール上に

別の装置を設ける方法を検討したが、現場設置作業に時間がかかることやコストが高くなることから不採用とし、前述のツールチェンジ方式を採用した（写真-6）。なお、当方式の実現には以下2点の課題があった。

- ・マニピュレータに取付けるツールチェンジャとスラグ除去装置や溶接トーチ+センサを合わせて可搬重量 3 kgに収めなければならない
- ・マニピュレータの破損及び過負荷によるエラーを防ぐため、スラグ除去時の振動・衝撃を抑えなければならない

これらの課題を解決するため、以下の部品選定や PoC、振動・衝撃吸収機構の開発を行った。

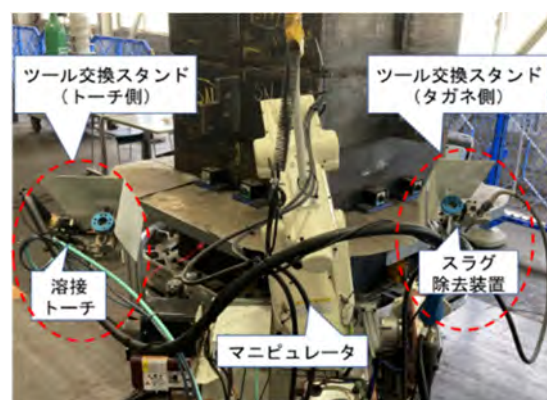


写真-6 スラグ除去システム概観

5.2 ツールチェンジャ

市販のツールチェンジャを比較・検討し、軽量（0.24 kg）ながら可搬重量 10 kgのツールチェンジャを採用した（写真-7）。キャリアッジに電磁弁マニホールドを設置し、ロボットコントローラからの信号により自動でツール交換及びタガネの作動・停止をしている。自動ツール交換は繰り返し試験を行っており、連結不良などの不具合は発生せず、良好にツール交換ができることを確認している。



写真-7 ツールチェンジャ

5.3 振動・衝撃吸収機構

タガネの振動・衝撃を吸収してマニピュレータの破損や異常停止を防止しなが



写真-8 振動・衝撃吸収機構

ら、常にタガネを溶接ビードに軽く接触させておく機構を開発した（写真-8）。ゴムでタガネ支持ブロックをマウントしてピッチ・ヨー方向の衝撃、荷重を吸収し、バネ機構によってスラグ剥離時のタガネ前後方向の振動・衝撃を吸収する。

5.4 スラグ除去性能の実証

スラグの剥離性を確認したうえで当スラグ除去システムをロボットシステムに実装。一連の自動溶接フローを動作させて、システムの動作と除去性能の実証を行った（写真-9、写真-10）。表-1 に実証条件の一例を示す。ビードの隙間には一部スラグが残存したが、続く層の自動溶接においてもスラグ巻き込み等の欠陥は発生せず、剥離性が十分であることを確認した。

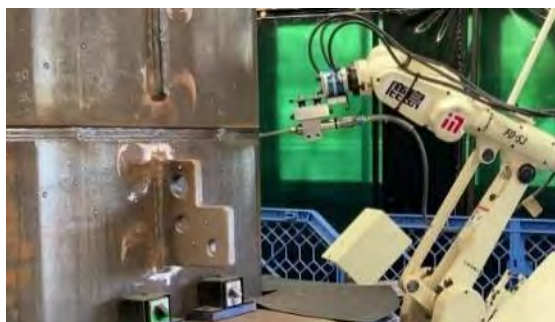


写真-9 スラグ除去状況



写真-10 スラグ除去後外観

表-1 スラグ除去条件一例

	最上段パス	中段パス	最下段パス
タガネ移動速度 (cm/min)	120	120	120
タガネ角度 (°)	0	10	10

6. システム養生・移設運搬設備

以上のように全自動溶接は完成しても、ロボットの準備や移設に時間が掛かったり、風の影響による欠陥で補修が発生したりすると、実運用は難しい。そのため、今回はロボット開発と並行して実運用のための付帯設備の開発も行っている。

6.1 システム養生

当マニピュレータは産業用ロボットに該当するため、ロボットを囲う安全柵やインターロックが必要になる。一方、全自動溶接では監視人無しでも最終層まで安定した品質で溶接できることが重要で、風をシャットアウトしてブローホールなど

の欠陥を未然に防ぐ必要がある。これに雨からロボットを守る要求も加えて、現場溶接用のシステム養生を開発した。

しかし、養生システムの設置撤去、移設はクリティカルとなるため現場運用上の大きな弱点であり、短時間でできる必要がある。そこで、これらを満たすテン

ト式システム養生を開発した（図-12、写真-11）。折畳み式骨組み、天幕、はめ込み式の側壁パネルやシートなどで構成され、作業員2名で簡単に設置できる。図-12の左右2分割のユニットをそのまま運搬して隣接柱に移設することで、約30分で盛替えをすることができた。

6.2 ロボット移設台車

ロボットの設置・撤去についてもクリティカルになるため短時間で行う必要がある。コーナーレールとロボットを一体で移設することで、作業の簡素化を図っている（写真-12）。

またロボット移

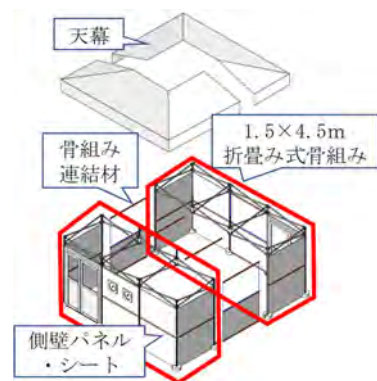


図-12 システム養生



写真-11 システム養生



写真-12 盛替え状況

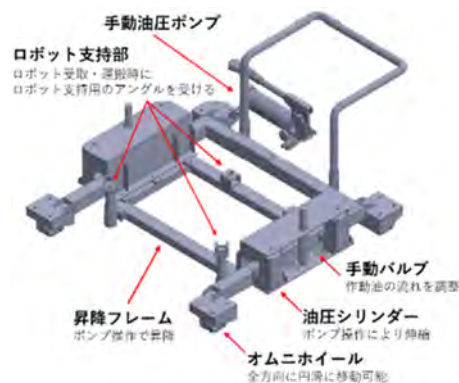


図-13 ロボット移設台車

設時はデッキプレート上を移動する必要があり、専用の台車を開発した（図-13）。オムニホイールで全方位へ水平移動ができるため設置時のロボットの位置調整が容易で、ロボットの設置や移設をスムーズに行うことができる。

7. 施工実績

グループ会社による施工体制を構築し、2020年から現在までに順次機能を追加しながら4現場で実施に適用した。これまでに適用した柱の仕様を表-2、図-14に示す。角の立った4面ボックス柱だけでなく、角部がR形状のコラム柱にも適用してきた。コラム柱は板厚ごとにRが異なるが、自動溶接制御システムによる自動パス計画とマンピュレータの複雑な動きにより、いずれも良好な結果を得ている。

表-2 適用した柱のスペック

断面形状	4面ボックス柱	コラム柱
柱サイズ(mm)	□800, □900	□700, □800
板厚(mm)	25, 28, 40	28, 36

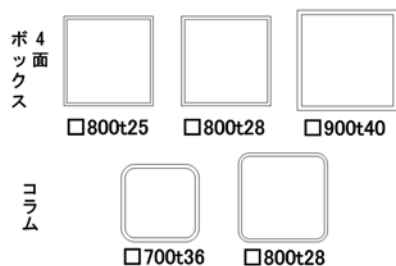


図-14 柱断面図

図-15は□800mm、板厚36mmの柱を溶接した際の積層計画の例である。1溶接ブロック全体の開先形状を基に計画するため、同じ板厚でも施工状況等によってパス数は異なる。

自動溶接中の状況を写真-13、溶接外観を写真-14に示す。計測、溶

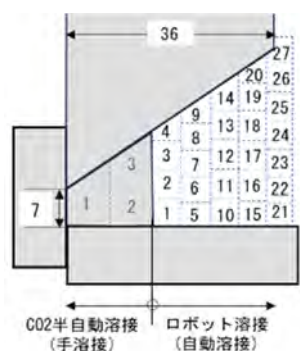


図-15 積層計画図



写真-13 自動溶接中の状況



写真-14 溶接外観



図-16 ロボット適用対象の柱

接、スラグ除去などの付帯作業を含めた一連のフローを繰り返し、現場における柱全周を自動で溶接している。自動溶接の品質においても、UTや外観検査とともに全て合格し、熟練溶接技能者と同水準の品質を確保できることを確認した。

なお、図-16の現場適用では、当ロボット1セットを溶接作業員2名で運用した。システム養生とロボットシステムを水平移動で移設し、ロボットによる自動溶接をする。これを繰り返して、実現場の建て方工程の中でも複数の柱の連続施工が十分できることを実証した。

8. まとめ

建て方誤差を伴う現場の開先形状に対応でき、スラグ除去まで自動化した柱1本を全自動で溶接するロボットを開発した。また当ロボットを効果的に使用するための養生システムや移設機器なども同時に開発した。施工体制を構築して4現場の実施工に当ロボットを適用、各種の柱仕様で熟練溶接工と同等の品質であることを確認した。

今後はt80mm以上の厚板や超大型柱、狭開先などでの実証・評価を行って当ロボットの適用拡大を図っていく予定である。また、当ロボットはビル建築の現場溶接のみでなく、その他の現場溶接を要する工事、サイトプレファブなどの鉄骨加工などへの展開も期待できると考えている。

引き続き、システムの改良と現場適用を進めて生産性向上を図り、熟練溶接工不足への対応に貢献していきたい。

30. 道路橋床版更新工事における床版架設機の開発

ー阪神高速3号神戸線（京橋～摩耶間）リニューアル工事における床版更新ー

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
富田 涼太郎

1. はじめに

道路橋床版更新工事のさらなる品質向上ならびに急速施工という課題に向け、筆者らは橋軸方向継手の場所打ち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を用いた新しいPCa床版（以下、PS 接合床版）を開発し（図-1）、2021 年に行われた阪神高速 5 号湾岸線中島排出路の試験工事にて有用性を実証した。後に 2023 年に実施された 3 号神戸線リニューアル工事の床版更新において PS 接合床版を初めて適用した工事（以下、本工事）を実施し、併せて現地の条件ならびに PS 接合床版の施工特性を踏まえ床版架設機を新たに開発した。本稿では床版架設機の開発プロセスと本工事での稼働結果について報告する。

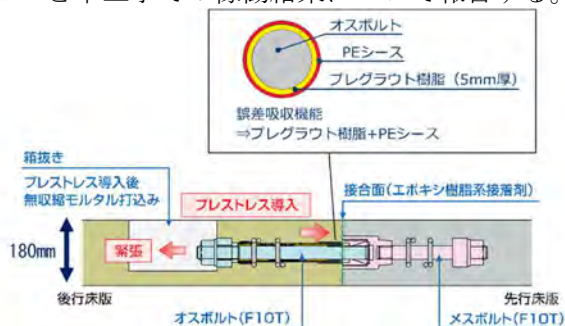


図-1 PS 接合床版概要図

2. 工事概要

阪神高速 3 号神戸線は、大阪市の阿波座 JCT から神戸市の第二神明道路（月見山）へ至る延長約 40km の高速道路の重要交通区間となっており、今回の工事場所は神戸市中心部に位置する。

3 号神戸線の京橋～摩耶間は 1968 年の供用開始から 50 年以上が経過し、交通量の大幅な増加や通行車両の大型化などの影響でコンクリート床版・舗装・伸縮装置等の損傷が顕在化している。そこで 2023 年 5 月 19 日から 6 月 7 日までの 19 日間、終日通行止めによるリニューアル工事が実施されることとなった（図-2）。

本工事はそのうち「神戸線 S391 下り」において床版更新を実施したもので、対象橋梁は橋長

21m、幅員 9.5m の活荷重合成鋼桁橋であり、周囲には住宅やビルが多く存在している。

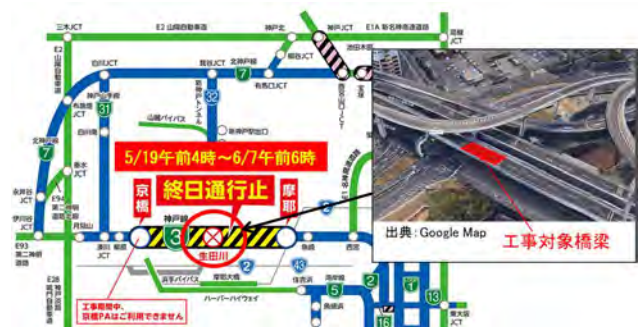


図-2 リニューアル工事概要

3. 施工方法の検討

現地の条件より施工方法の検討を行った。工事対象橋梁は合成桁であり強度的に床版架設用の大型クレーンの重量を橋梁上に載荷できず、また対象橋梁の京橋方上空はランプ橋と交差しているため（写真-1）、クレーン作業ができない。これにより摩耶方の隣接橋梁上に大型クレーンを配置することになるが、クレーンを大型化するとアウトリガー反力に対して既設橋が耐力不足となる。このように床版更新工事において一般的に使用される施工機械である大型クレーンについて厳しい制約条件があった（図-3）。



写真-1 工事対象橋梁京橋方状況

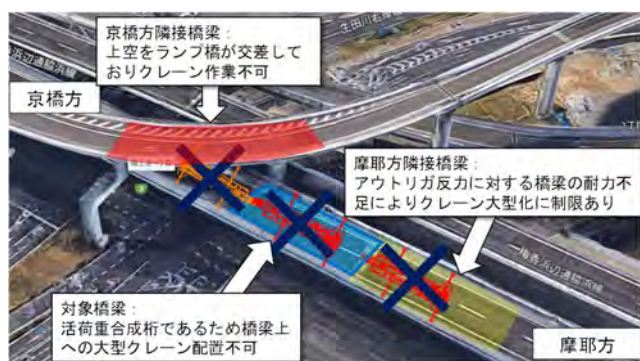


図-3 大型クレーンの制約条件

その他の施工条件を含め検討した結果、以下の施工方法を計画した。

- ① 新設床版 (10 枚) は既設床版を撤去された状態から摩耶方から京橋方に向かって順に架設する。クレーンは摩耶方既設橋に耐力上限の 60t 吊ラフタークレーンを配置する。
- ② 2 枚目の床版までは、60t 吊ラフタークレーン作業半径内であるためクレーンで直接架設する。
- ③ 3 枚目から 10 枚目の床版架設作業については、新設床版と鋼主桁の上面を自走して新設床版を運搬することが可能な床版架設機を新たに開発するものとする。60t 吊ラフタークレーンの作業半径内に仮置きした新設床版を、床版架設機にて京橋方の作業半径外所定箇所に順次運搬し架設作業を行う。

なお開発する床版架設機においては、既設床版が撤去された後、床版との合成効果がなくなった鋼主桁上を走行するため、開発にあたっては機体重量の軽量化が重要課題となった。

4. 床版架設機の開発

4.1 開発の概要

床版架設機の開発においては、PS 接合床版架設作業時の施工特性を考慮した機構の実装が必要であった。PS 接合床版の接合部には複数のボルトが配置されており、床版架設時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後に、PS 接合床版同士を引寄せて接合させる必要がある (写真-2)。

中島排出路での試験工事では PS 接合部の軸中心を合わせる作業を「心出し」と称し、PS 接合床版の架設作業を行う専用機械「心出し装置」を開発した。心出し装置は 15t フォークリフトの爪部に後付けするもので、床版架設作業時に床版の縦横断方向の勾配調整、回転方向の調整、橋軸方

向の引寄せを行うことが可能である (図-4)。さらに床版の昇降と橋軸直角方向の位置調整はフォークリフトの機能を使用し、床版架設作業時に高い精度で PS 接合床版の位置調整を行うことを可能とした。

これらの施工機械を用いて試験工事では計 37 枚の PS 接合床版の架設を行った。



写真-2 PS 接合床版の接合作業状況



図-4 心出し装置の概要

床版架設にかかる機構については心出し装置の機構や取得した実績データをもとに開発を進めるものとしたが、本工事では 15t フォークリフト (車両重量 22t) の採用は対象橋梁の桁補強工事が甚大となるという理由で断念した。

これにより今回の機械開発の主題は、フォークリフトの代替となる走行機構ならびにその附帯設備の開発となった。

4.2 床版架設機の仕様検討

床版架設機の基本設計段階では初めに構造について検討を行った。重量物である約 10t の PS 接合床版の運搬に対して、フォークリフトのように床版を機械前方で持ち上げる構造では転倒防止のために必要なカウンターウェイトの重量が非常に大きくなるため、床版を抱え込むように吊り上げる形状のラーメン構造を採用した。

つぎに走行機構について検討を行った。対象橋梁の縦断勾配は約 0.6% であるので、床版運搬時に高い登坂性能は必要なかった。したがって駆動装置は門型クレーンの走行モータとして用いられている電動モータのうち小型のものを採用した。

また橋軸直角方向には1.5%の横断勾配がついているため走行時の横滑りが懸念された。検討した結果、機械自体に方向修正のための操舵機構を持たせるのではなく床版および鋼桁上に軌道を設置してその上を走行するものとした。また施工上新設床版を設置場所に運搬する際には、進行方向側の支持脚が既設床版上から低い位置にある鋼桁上に載り替わる必要が生じる。これは機械の最前方に伸縮脚を配置し、それを伸長させて鋼桁上の軌道に受け替えるものとした（図-5）。

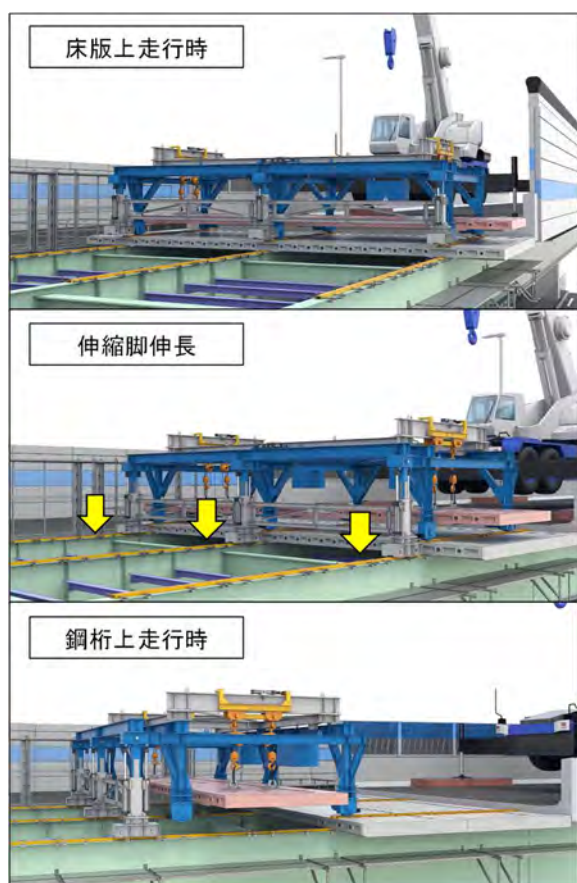


図-5 走行機構の概要

床版架設にかかる機構については次のように設計した。PS 接合床版の昇降は手動チェンブロック（4基）を用いて人力で行い、併せて床版設置時の勾配調整もチェンブロックを用いて行うものとした。PS 接合床版特有の床版引寄せについては手動チェンブロックの支持フレームを橋軸方向にスライドする機構を持たせた。また左右2組の支持フレームを独立して動作させることで床版の回転方向の調整を行うものとした。これらの機構は走行フレームの上部に載る構造としたうえで、全体が橋軸直角方向にスライドする機構とした。

電気配線と油圧配管については現場での組立作業や施工時の取り回しを簡素にするため、油圧ユニット、電気制御機器類は機体に搭載するものと

して電源は3相200Vを移動式ケーブル1本で供給するものとした。

4.3 実物大施工性確認試験

本工事に先立ち工事対象橋梁の主桁を模した鋼製架台を構築し実物大PS接合床版を用いて施工性確認試験を行った（写真-3）。

開発途中である床版架設機においては、本工事を想定しながら、現地への輸送計画から作業者の動き方、使用機材のハンドリングなどを関連作業全般について確認を行うことにより、潜在する課題の洗い出しを行った。



写真-3 実物大施工性確認試験

(1) 搬入組立作業の妥当性確認

床版架設機は最大約2200mmの幅のPS接合床版を抱え込むように吊り上げる構造であるため、組みあがった状態ではトラックの荷台に収まらず分解した状態でトラックにて運搬し現地で組立作業が必要となる。

本工事での組立ヤードは工事対象橋梁の摩耶方隣接橋梁上、通行止め的高速道路本線上となる。狭隘かつ制約が多いヤードでの組立作業をできるだけ短時間で行えるように、最適な分解形状や組立方法を十分に検討した上で分解輸送計画・組立計画を立て、試験時にその妥当性を確認した。

(2) 適切な軌道設備の検討

既設床版ならび鋼桁上に敷設する軌道設備を試作し床版架設機ならびPS接合床版との相性や持ち運びや取付け取外しといった作業性について実験し最適な形状を検討した。これらを反映し本工事向け軌道設備の設計を行った（写真-4）。

(3) 床版架設機のブラッシュアップ

実物大（実重量）のPS接合床版での床版架設作業や軌道設備を用いた走行試験を行い、床版架設機自体の問題点や改善項目の抽出を行った。項目としては試験工事での実績をもとに設定した動作速度の再調整、作業視認性の改善、安全設備の追加などが挙げられた。

また塗装は錆止めのみとしていたが、試験後に挟まれ防止等の安全性向上の目的で動く部分を分かりやすくした方が良いという意見があったことから、本塗装は本体の動きのないフレームを青色、床版運搬時および架設時に動作するフレームを白色に区分し塗装を行った（写真-5）。



写真-4 試作した軌道部材



写真-5 本塗装後の床版架設機

5. 本工事での稼働報告

床版架設機に関する実績工程を以下に示す。

5月22日早朝、施工箇所付近の通行止め高速道路上に運搬車両が入場、同日の日中に機械組立を行い、夕方に動作確認試験までを完了した。

5月23日、夜勤より床版架設作業開始。計画通り2枚目までの床版はラフタークレーンにより直接架設した。

5月24日、3枚目の床版架設より床版架設機を使用開始し朝から隣接橋梁の組立架台上から床版架設機を工事対象橋梁に移動した（写真-6）。初回は主桁上の軌道の位置調整に若干時間を要したが、夕方までで4枚目の床版架設まで終了した（写真-7）。夜勤では配員の見直しを行ったことと作業者の慣れによりサイクルタイムが大幅に短縮され、夜勤のみで4枚の床版を架設し8枚目の床版架設までを終了した。

5月25日、午前中で最終の10枚目の床版架設が終了し全10枚のPS接合床版のうち8枚について床版架設機での架設を行った。午後から解体作業を行い、翌日搬出を行った。



写真-6 床版架設機投入状況



写真-7 床版架設機稼働状況

6. 開発まとめ

本開発では PS 接合床版架設にかかる仕様検討においては中島排出路の試験工事で得られた知見を有効に活用することができた。しかし都市部の床版更新工事特有の厳しい施工条件に適用できる新たな走行機構の開発が大きな課題となった。なかでも床版や鋼桁に敷設する軌道設備に関する計画に多くの時間を要した。

既設床版を撤去するまで実物を確認できない鋼桁への軌道の敷設方法、新設床版に固定する軌道固定用インサートの計画など、機械本体の開発以外の検討事項が多く、また判断が難しかった。実施工向けの機械開発においては工事や工種全般に深く踏み込むことが重要であると改めて実感した。

最期に本開発を進めるにあたりご指導頂いた阪神高速道路(株)を始めとする PS 接合床版開発関係者の皆さま、ならびに機械開発関係者の皆さまに深く謝意を示します。

参考文献

- 1) 藤吉卓也・安田篤司・岩里泰幸：道路橋床版更新工事におけるPCa床版架設機械の開発，建設機械施工，通巻874号，pp.48～53，2022.12

31. 円形高層建築建物解体への自動昇降足場の適用

F C F 工法 円形建築建物解体への挑戦

株式会社フジタ ○ 中鉢 和敏
野正 裕介
大谷 愛斗

1. はじめに

現在、日本の建築物は 300m を超す高層建築物も出現し年々その建築数は増加している一方、高度成長期に建築された高層建物の多くが老朽化や再開発事業によって解体の対象となり、解体工事が増加していくことが考えられる。

従来、建築物の解体では外周部に養生用足場を設置し、建物最上階に解体作業を行う重機を揚げ、順次地上階まで降りてくる工法が用いられている。高層建築物の解体作業現場では建物の外周部に設置する養生用足場の使用量増加とそれに伴う作業時間の増加、また作業員の高所作業に伴う飛来、落下災害の危険もあり、これらのリスクを低減することが課題である。

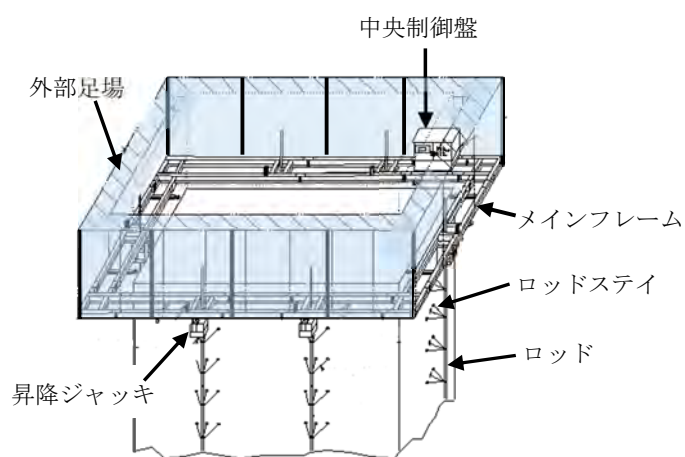
本論文で扱う解体対象の建物は、狭い敷地に位置し、ターミナル駅に近い人通りの多いエリアでの施工が求められ、工期の短縮が急務であった。このため、当社は高層建築物の解体工事に「自動昇降足場システム」（以下「F C F 工法」と称する）を採用した F C F ーリバース解体工法を導入し、上記の施工上の課題および施工条件を克服した。また、今回の対象建物は円形であり、F C F ーリバース解体工法による施工は初めての試みとなる。本論文では、F C F 工法のシステムの特性、各構成装置、施工結果について記述し、当工法の有効性について論じる。

2. 工法の構成及び概要

2.1 F C F の構造について

F C F 工法の構造に関する概要を図－1 に示す。躯体の周囲には、システムの支持構造であるメインフレームが設置され、躯体のサイズに応じて通常 4 本～8 本の鋼管ロッドを介して周囲に配置される。鋼管ロッドは、ロボットジャッキの昇降時におけるガイドとしての役割と、足場ステージ全体の鉛直荷重を支える機能を果たしている。各ロッドは、所定の間隔で座屈防止のための金具ロッドステイによって躯体に固定され、水平荷重（風荷重）

は躯体に接触したローラによって減衰される。



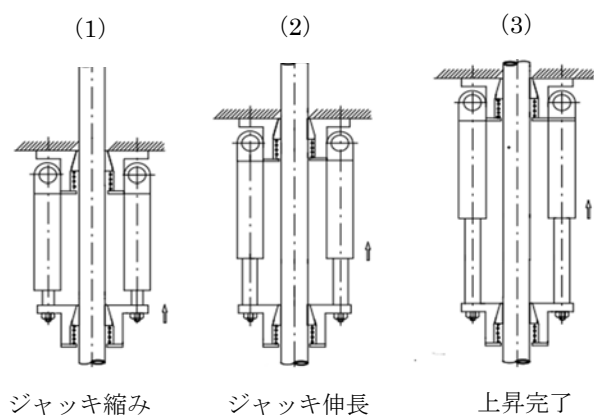
図－1 F C F 工法構造概要

2.2 F C F システムの概要

本システムは、昇降ロボットジャッキ本体、中央制御盤、レベルセンサの三つの主要な構成要素から成り立っている。昇降ロボットジャッキは、メインシリンダ、油圧制御装置、チャック装置、及び各種センサを含む構造を持ち、まず構造物の周囲にメインフレームを組み立て、その後に昇降ロボットジャッキを配置する。各ジャッキの伸縮量は、レベルセンサから得られる情報を基に中央制御盤にて制御する。

また昇降ロボットジャッキ本体中心部には、上下に配置されたチャック装置が存在し、昇降用ロッドがこれらのチャック装置を貫通している。ロッドがチャック装置によって把持されることにより、昇降を行う。上昇時の手順を図－2 に下降時の手順を図－3 に示す。

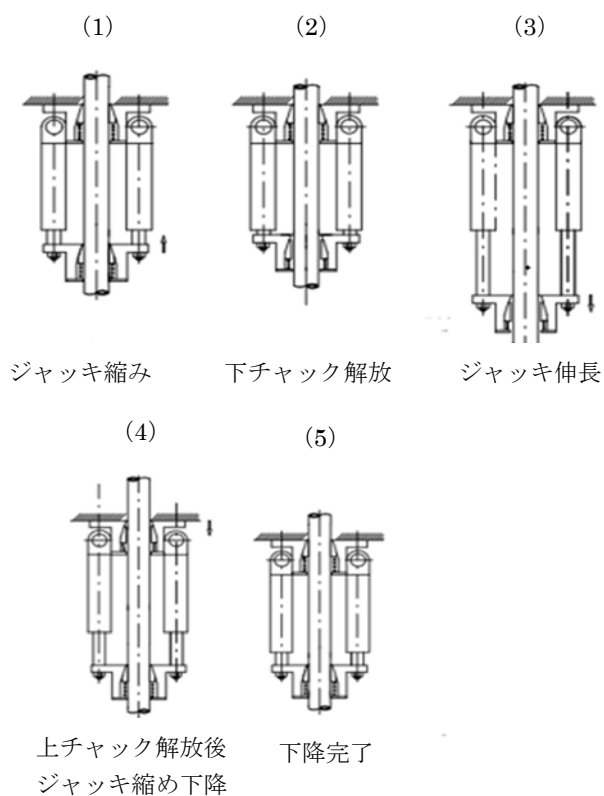
昇降ロボットジャッキの仕様を表－1、F C F 工法を用いた施工例を写真－1、昇降ロボットジャッキを写真－2 に示す。



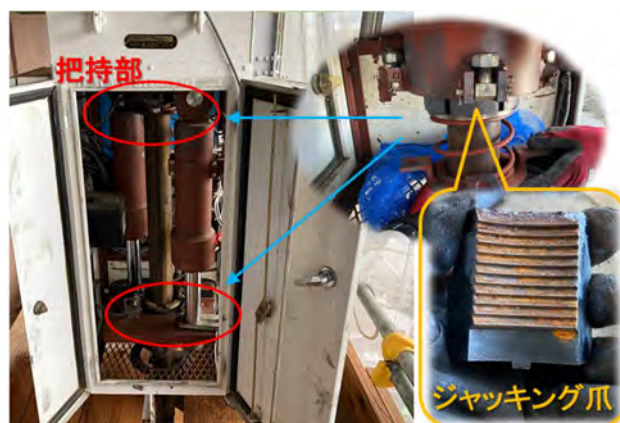
図－２ FCF ジャッキ上昇時手順



写真－１ FCF 工法



図－３ FCF ジャッキ下降時手順



写真－２ 升降ロボットジャッキ

2.3 FCFシステムのフロー

(1) レベル制御

足場フレーム上に設置した升降ロボットジャッキにレベルセンサを取付け、センサの水位の高さを計測することによりメインフレームの相対的な水平度を測定する。各升降ロボットジャッキのレベルセンサのデータと作動情報を中央制御盤に送信する。中央制御盤は、これらの情報をもとに各升降ロボットジャッキ位置の高低差を算出し、この高低差（レベル差）が設定した許容範囲内に収まるようにそれぞれの升降ジャッキを制御する。この制御データに従いそれぞれの油圧ユニット及び鋼管を把持するためのチャックを作動させることで、本システムはメインフレーム設備の許容レベル差を保って上昇あるいは下降させることができる。

ジャッキ能力	150 kN／台
油圧	13 MPa
電動機	1.5kw、3φ×200v

表－１ 升降ジャッキ仕様

(2) 上昇・下降制御

1 回の上昇・下降ストロークは 150 mm であり、この動作を繰り返し所定の高さ分の移動を行う。昇降ロボットジャッキシステムは、反力を伝えるロッド（直径 76 mm 長さ 3m）を把持し、フレーム全体を水平に維持しながら上昇あるいは下降できる。ロッドは必要に応じて継ぎ足し、一定の間隔ごとにロッドステイを用い建物と繋ぐことで座屈を防止し垂直性を担保している。設置するロボットジャッキの台数、ロッドステイの取り付け間隔は搭載するユニット足場の形状・重量、解体建物高さに応じて異なる。

(3) 中央制御盤

上昇できるだけでなく、下降もできることを最大の特徴としており、本システムの制御はフレーム上に配置された中央制御盤をホストコンピュータとし、タッチパネルディスプレイより入力されたデータを基に、各昇降ロボットジャッキ内のローカルマイコンに制御司令を送ることで行われている。タッチパネル上には、各ジャッキ位置のレベル差が表示されるとともに、各ロボットジャッキの動作状況等が表示される。中央制御盤を写真-3 に示す。

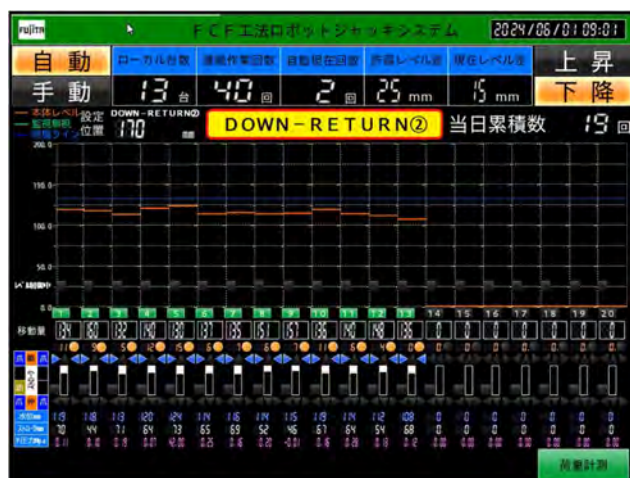


写真-3 中央制御盤

3. 解体工法の検討

現在、多くの解体現場で用いられている総足場工法による全面養生について、ビル建設の高層化が進む中でいくつかの問題点が挙げられる。

(1) 高所作業に伴うリスク

足場組立・解体作業は高所作業のため墜落災害などが起こると重大事故となる。

(2) コストの増加

総足場のため足場材等の資機材量が多く、リース費や組立解体労務費の増加が問題となる。

(3) 環境への影響

足場組立・解体作業により、騒音の発生が増加す

る。また、資機材運搬車両が交通環境に与える影響も大きくなり、騒音や振動が増加する。

これらの問題を解決すべく、解体工事实績のある保有技術 FCF-リバーズ解体工法が適用された。

本工法の有効性としては、

(1) 昇降可能なシステムであり、足場組立・解体作業が地盤面の低位置となるため高所作業を大幅に減少となる。

(2) 足場材等の資機材量が必要最小限となり、リース費・労務費のコスト削減となる。

(3) 足場組立・解体作業が各 1 回のみとなり、騒音が削減、また資機材運搬車両も減少となる。

4. 施工

4.1 施工建物概要

今回、解体工事实施した対象建物は、直径 ϕ 31 m の円形（26 面体）であり建物高さ 123 m と高層であった。またフロア高が高く飛散養生の FCF 搭載足場フレーム高さも 12 m 必要であった。施工建物を写真-4、建物概要を表-2 に示す。



写真-4 施工建物

解体建物概要	
構造	SRC+RC+S
延床面積	41,069㎡
建物高さ	123m
階数	地上30階／地下4階
直径	φ31m (26面体)

表-2 解体建物概要

4.2 導入前実証実験

今回対象建物は円形（26面体）であるため、FCF搭載足場フレームが昇降時に回転しないか、スムーズな昇降が可能か等の懸念があったので作業所導入前に実証実験を実施した。

実証実験は実験ヤード敷地広さの制限より実際の40%・直径 ϕ 12.5mの大きさの模擬足場にて実施した。実験設備の外観写真を写真－5、設備概要を表－3に示す。



写真－5 実験設備外観

足場外径	ϕ 12.5 m
足場高さ	6.4 m
昇降可能長	約 3 m
昇降部材重量	17.3 t

表－3 実験設備概要

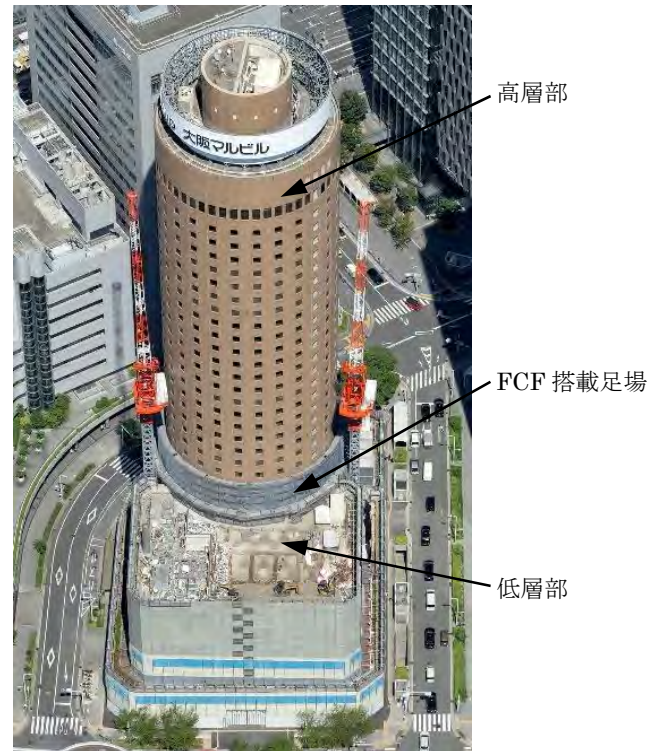
実証実験の結果、ロッドの鉛直1.5度以上倒れが発生すると自動モードでの連続したジャッキダウンが難しい傾向になることが判明した。よって実際の施工にてロッドの鉛直度を ± 1.5 度以内に収めることを管理基準とし昇降する事とした。

またFCFシステムの下記機器の改良も実施し施工に臨んだ。

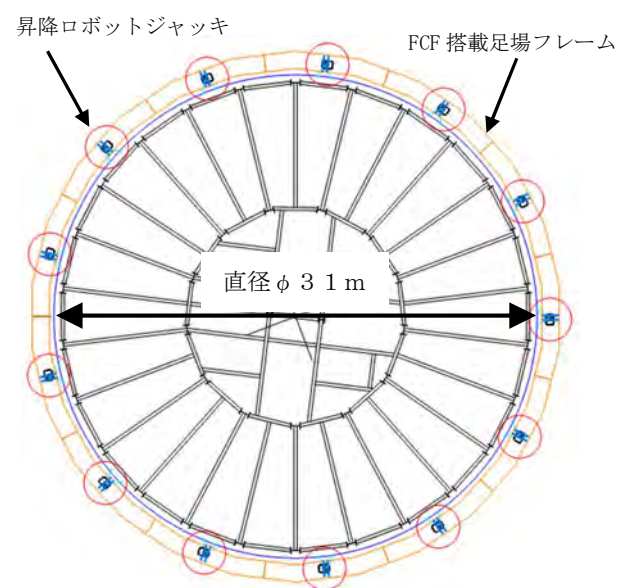
- (1) 昇降ジャッキのオーバーホールおよび油圧ニードルバルブを追加しシリンダーの同調性を向上
- (2) 制御ソフトの改良
 - ・ より水平を担保しながら昇降できるように制御改良
 - ・ レベル制御の機構、1サイクルごとダウン量を135mm→150mmに変更し下降速度改良

4.3 FCF搭載足場の設置

今回対象建物は高さ123m円形建物に高さ30m・6階の低層部が接合している建物である。FCF搭載足場フレームは低層部を超えた7階に設置とした。施工建物を写真－6に示す。昇降ジャッキは13台を等間隔に設置することで、より全体のバランスを保ちながら昇降することのできる設備とした。FCF搭載足場フレームを図－4（平面図）図－5（断面図）に示す。



写真－6 施工建物



図－4 FCF搭載足場フレーム平面図

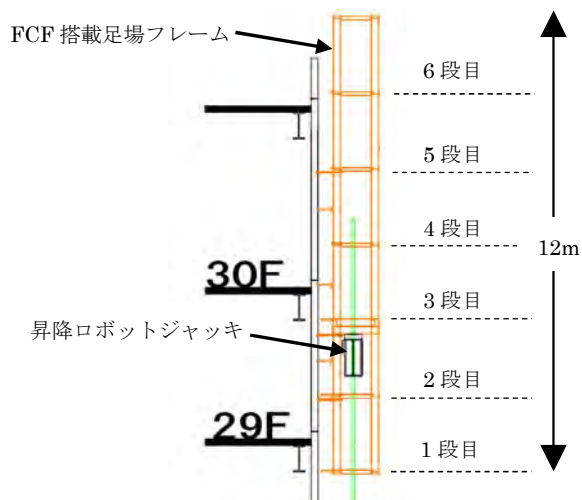


図-5 FCF 搭載足場フレーム断面図

FCF 搭載足場フレームは円周方向に13分割・縦方向に6分割されており、まず地盤面で1分解ごとに地組しクレーンにて設置階へ揚重、分割接合し設置した。FCF 足場の設置状況を写真-7に示す。



写真-7 FCF 足場の設置状況

4.4 FCF 搭載足場の上昇

FCF 搭載足場フレーム設置後、上昇作業実施した。今回ロッド支持のロッドステイは2.1mピッチであり、ロッドステイ設置毎に実証実験で得た±1.5度以下となるよう鉛直管理・調整を実施した。鉛直調整は写真-7に示すロッドステイのジャッキベースとターンバックルを伸縮させ調整実施した。FCF 搭載足場の組立後・上昇後を写真-8に示す。

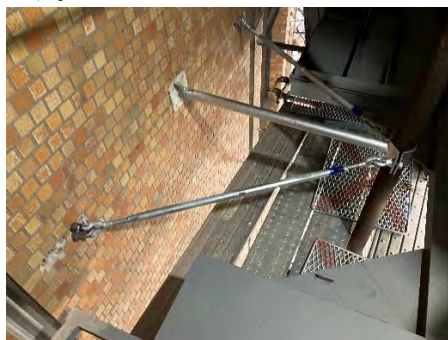


写真-7 ロッドステイ



写真-8 FCF 足場（左：組立完了 右：上昇完了）

4.5 躯体解体工事とFCF 搭載足場の下降

FCF 搭載足場フレームが上昇した後、躯体の解体作業を行った。解体は最上階より1フロアごとに実施され、その後FCF 搭載の足場を下降させた。躯体解体のサイクルについては以下に示す。

1. 最上スラブ道路カッター
2. 外壁PCコア抜き
3. コア部先行吊切り
4. スラブ吊切り
5. コア部スラブ吊切り
6. PC版吊切り
7. 外周部柱・梁切り
8. 支保工解体
9. FCF 搭載足場の下降

FCF 足場の下降状況を写真-9、躯体解体状況を写真-10に示す。



写真-9 FCF 足場（左：下降前 右：下降完了）

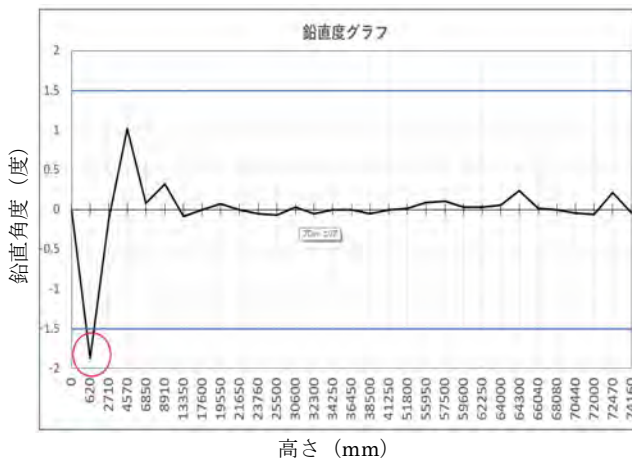


写真-10 躯体解体状況

5. 施工結果

5.1 FCF搭載足場の上昇結果

FCF搭載足場フレームの上昇量は平均約6m/日、日数12日間で74.16m最上部へ上昇させた。FCF上昇時の鉛直度結果は、初回620mm上昇時1ヶ所で許容範囲の1.5度を超え、最大で1.94度となった。グラフ-1に鉛直度結果を示す。



グラフ-1 鉛直度結果

上昇9m迄は鉛直倒れが大きかったが、それ以降は特に支障無くスムーズな上昇を続けることができた。施工前に回転について懸念されていたが、ロッドステイ2.1mピッチ設置毎に鉛直計測し倒れ修正を実施した事がスムーズな上昇へとつながった。

5.2 FCF搭載足場の下降結果

FCF搭載足場フレームの下降作業は、階高3.2mのフロアを22回実施した。各回の所要時間は約2時間であり、作業は順調に進行した。下降作業は大きなトラブルは発生せず、躯体解体工事は5日サイクルから下降9回目より4日サイクルに短縮された。その結果、当初の工程よりも19日間の短縮が実現した。順調に下降できた要因は、①上昇時に2.1mピッチ毎に鉛直計測し倒れ修正を実施した事が大きい、②昇降ジャッキのオーバーホールとニードルバルブ追加による同調性向上、③制御ソフトの改良、も総合的な要因として考えられる。

6. おわりに

FCF工法は約40年前の1970年代より高橋脚の施工を目的として開発が始まり、その後の改良を経て、近年はその特徴を活かし既存ビルの解体工事やビル改修工事へも活用されている。今回の施工により、円形高層建築建物の解体工事にも威力を発揮できる工法である事が確認できた。

最後に、本工法の特徴を以下にまとめる。

- (1) 施工高さに制約がなく、案件に応じた昇降ジャッキの台数を配置することで、大きささまざまな現場に対応可能である
- (2) 高層になるほどシステムの特徴が発揮され、工程、経済的な面で優位性が増す
- (3) 昇降が可能なため地上で組立および解体ができ、安全性が向上し省力化が可能である
- (4) 鉛直荷重を、基礎上に設置した鋼管ロッドで支持するため、躯体の強度に影響されずに昇降することができる
- (5) 操作はコンピュータにより一括制御するため特殊技能工を必要とせず省力化ができる

今後、更なる改良を実施し建設現場の生産性の向上に貢献していきたい。

32. CSG ダムにおける自動ダンプトラックを用いた材料運搬システム

鹿島建設株式会社 技術研究所
鹿島建設株式会社 機械部

○石川 貴大, 高木 優
服部 良彦, 福原 正晃, 矢富 孝治, 伊勢 卓矢

1. はじめに

建設業では近年、人手不足、高齢化に伴う熟練技能者不足や時間外労働規制による建設工事での生産性低下、及び安全性の低下が懸念されている。こうした課題に対し、生産性と安全性の向上手段として、自動化された建設機械等を用いて施工を行う自動化施工の適用が期待されており、国土交通省が建設現場のオートメーション化実現を目指す i-Construction 2.0 を策定する等、自動化施工の実現へ向けた様々な取り組みがなされている。

鹿島建設では、建設機械の自動化技術を核とする次世代建設生産システム A⁴CSEL[®]（クラウドアクセル）の研究開発を進めており、大分川ダムや小石原川ダム等での実証試験を経て、成瀬ダムの実施工へ本格適用してきた。A⁴CSEL は、現場条件に応じて立てた最適な作業計画を基に、定型作業を自動化建機で施工するシステムである。図-1 に示すように、施工領域外にいる管制員が 1 人で複数の自動化建機を稼働することができるため、生産性と安全性の向上が期待される。成瀬ダムでは、最大 98%の自動化施工率（打設リフトの施工面積に対し自動化施工を実施した面積の割合）を達成¹⁾ し、ダム工事の月間打設量国内最高記録を樹立する等、生産性の向上を実現している。

2022 年度まで成瀬ダムでは、ブルドーザと振動ローラによる自動化施工の適用を推進してきた。今般、自動化率の向上による、さらなる生産性向上を目的とし、新たに開発した自動ダンプを用いた材料運搬システムを実施工へ導入した。しかし、本システムを実施工へ導入するためには、3 つの課題が存在した。1 つ目の課題は、最適なタイミングでの積込みの実現である。製造と施工の最大能力を発揮するためには、積込み待ち時間を最小とするようダンプを運用する必要がある。2 つ目は、複数台の自動ダンプを安全に運用する方法の確立である。施工領域長と運搬量から自動ダンプの稼働台数を 7 台としており、ダンプを衝突することなく運用しなければならない。3 つ目は、GNSS に依存しない自動走行機能の確立である。材料積込み設備付近において GNSS による姿勢の計測精度が低下することが確認されたため、



図-1 A⁴CSEL による施工イメージ

GNSS を用いない自動走行が求められる。

本論文では、実施工適用へ向けた各課題を解決するために実施した、材料搬送設備と自動ダンプの開発について述べる。材料搬送設備に関しては、1 つ目の課題を解決すべく、積込み状況等を A⁴CSEL と共有し、搬送設備の積載状況等から求めた積込み可能予測時間を用いることにより、待ち時間を最小とするようダンプを誘導するシステムを構成した。自動ダンプに関しては、2 つ目と 3 つ目の課題を解決するため、予測位置等を用いた衝突防止機能及び推定値を用いた自動走行機能の開発を実施した。そして、成瀬ダムの実施工へ適用し、有用性の実証を行った。

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では、材料搬送設備と自動ダンプの概要を述べ、自動ダンプによる材料運搬システムを説明する。第 3 章では、実適用へ向け改良した自動走行制御について、実験結果とともに述べる。第 4 章で実適用結果を紹介し、第 5 章で本論文をまとめる。

2. 自動化施工システム

本章では、成瀬ダムの工事概要、材料搬送設備及び自動ダンプの概要を紹介し、自動ダンプを用いた材料運搬システムについて述べる。

2.1 成瀬ダムの工事概要

成瀬ダムは、秋田県雄勝郡東成瀬村椿川地内に建設される、洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい、水道用水の貯水、発電を目的とした多目的ダムであり、堤体積約 4,850,000m³、堤頂長



写真-1 材料搬送設備配置：製造設備から右岸天端へ



写真-3 堤体全景と材料搬送設備

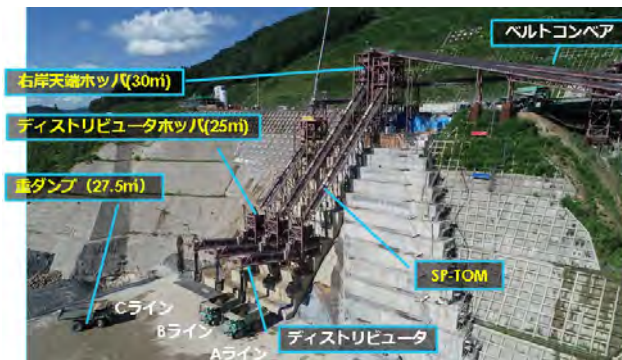


写真-2 材料搬送設備配置：右岸天端から堤体へ

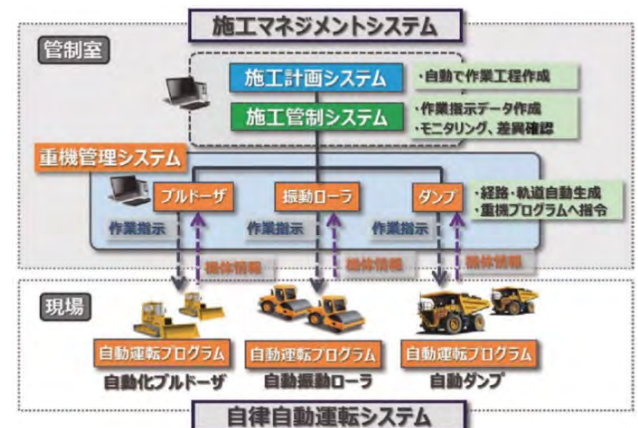


図-2 自動化施工マネジメントシステム

755.0m、堤高 114.5m の国内最大級の台形 CSG（Cemented Sand and Gravel）ダムである。2018 年から本体工事に着手しており、2026年度（執筆時点）の完成を目指し施工が進められている。成瀬ダムが位置する東成瀬村は豪雪地帯であり、冬季の堤体打設工事が困難である。そのため、大量高速施工を実現すべく A⁴CSEL が適用されている。2022 年度までは、堤体を左右岸で分断し施工していたことや材料搬送設備の設置工程等の理由から、ブルドーザと振動ローラによる自動化施工を実施し、ダンプトラックはオペレータが運転していた。

2.2 材料搬送設備

大量高速施工を実現するためには、最適なタイミングで材料をダンプへ積み込むことが必要となる。そこで、A⁴CSEL との連携を可能にすべく、製造設備と搬送設備の自動化を実施した。本節では、そのシステムについて述べる。

成瀬ダムにおける高速施工では、時間当たり約 900m³ の材料供給が必要となる。そのため、SP ミキサ²⁾ を主要製造設備とする CSG 製造プラント（1 系列当たり 300m³/h）を 3 系列構成する。

製造した CSG 材は、延長約 800m の長距離ベルトコンベア（写真-1）によって右岸天端まで搬送される。その後、写真-2 に示す SP-TOM（Special Pipe Transportation Method）³⁾ やホッパを介して右岸天端から堤体上へ搬送し、ディストリビュー

タによってダンプへの積み込みを行う。ダンプは、写真-3 に示すように、堤体上で積込んだ CSG 材をまき出し位置へ運搬する。

本システムは、ベルトコンベアの積載状況やホッパ内の残量を基に、CSG 材の積み込み可能時刻を秒単位で予測することが可能である。そのため、3 系列ある積み込み先のうち、最速で積み込み可能となる系列へダンプを誘導できる。また、自動化施工システムに対し、積み込み可能予測時刻やホッパで計測した積み込み量に基づいた積み込み完了信号を送信することにより、A⁴CSEL と連携し、最適なタイミングでの積み込みが実現可能となる。

2.3 自動化施工システムと自動ダンプ

自動化施工マネジメントシステムを図-2 に示す。本節では、このシステムのうち自動ダンプに関する内容を説明する。その他自動化建機における各システムの機能や詳細については、文献^{4,5)}を参照されたい。施工計画システムは、施工するエリア情報や作業に必要な台数等の機械情報を基に、施工計画を作成するシステムである。施工管制システムは、積み込み可能予測時刻や積み込み進捗に基づき、積み込み先及び施工計画システムで事前計画したまき出し位置へ材料を運搬する自動ダンプの割り当てを行う。また、割り当て状態や自動ブルドーザの作業進捗に応じて自動ダンプに作業指示

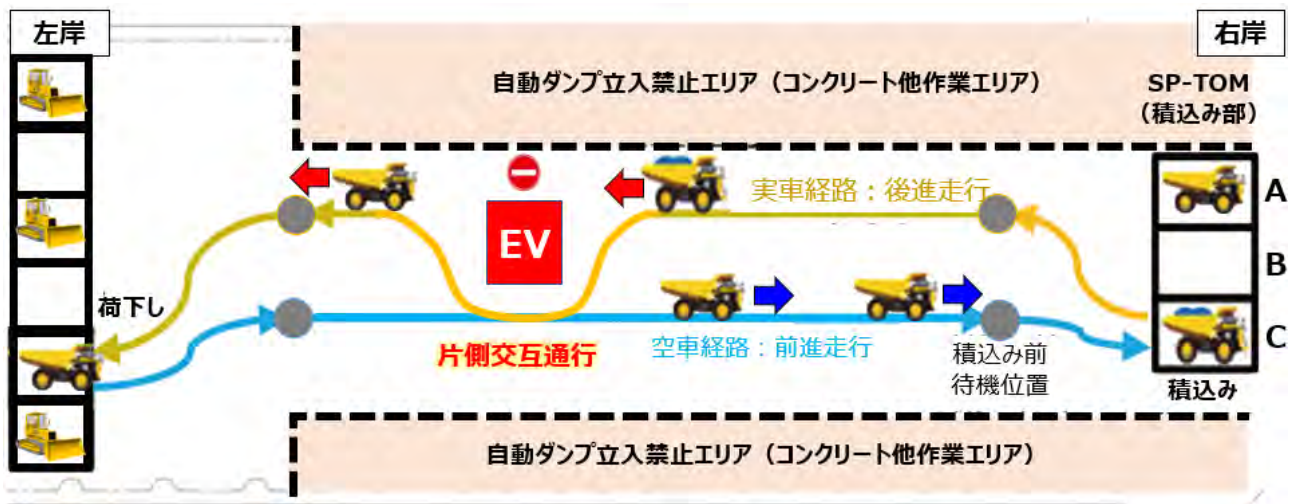


図-3 自動ダンプ走行模式図

を出す。管理システムは、目標地点まで走行する経路の生成や自動ダンプ同士の衝突防止を行いつつ、施工管制システムからの作業指示に基づき、各ダンプに対し走行や荷下ろしの指示を出す。自動運転プログラムは、ダンプに搭載した PC（インターフェース社 ECC-E211C(s)）上で動作しており、センサ値の計測及び管理システムからの作業指示に基づく電磁制御弁の操作を行う。

自動ダンプ（写真-4）は、小松製作所製の HD465（車長約 9.4m、車幅約 4.6m、車重 44.6t）をベースに、ステアリングやベッセル等の油圧回路を自動操作するための電磁制御弁を設置し、自動制御が可能となるよう改造されている。GNSS アンテナ、GNSS 受信機を搭載した方位計、ジャイロセンサ等の計測用センサ及び安全装置を取り付け、姿勢の計測や緊急時の停止を実施している。ここで、位置計測には、RTK-GNSS（Real-Time Kinematic-GNSS）を用いており、方位及び測位状況が Fix 解における位置計測精度はそれぞれ、0.3°と 2cm 以内である。また、ジャイロセンサによる角速度の計測精度は、 $\pm 0.5^\circ/\text{s} \pm 1\%$ である。

2.4 自動ダンプを用いた材料運搬

自動ダンプの走行模式図を図-3 に示す。実車は材料を積載した状態を、空車は積載していない状態を示す。実車経路は材料を積載した状態で荷下ろし位置へ走行する経路、空車経路は荷下ろし終了後に積み込み位置へ走行する経路を示しており、両経路間は、積み込み位置や荷下ろし位置付近で経路が交差する箇所を除き、すれ違い可能である。実車経路と空車経路の直線部分は、同一直線上の経路を走行する。堤体上には、管理・点検用エレベータを設置するための空間となるエレベータシャフト（EV）等の構造物が存在しており、ダンプは構造物を迂回し、迂回箇所で片側交互通行を実施する。外部コンクリート等の作業を実施して



写真-4 自動ダンプ外観

いるエリアに対しては、ダンプが進入しないよう走行領域を設定し、安全を確保する。材料の運搬及び荷下ろし手順を以下に示す。

- (手順1) ベルトコンベアと SP-TOM を用い、プラントで製造した CSG 材を堤体上へ搬送する。
 - (手順2) 3 系列の積み込み先のうち、最短で積み込み可能となる系列のディストリビュータ下へダンプが前進で自動走行する。
 - (手順3) 一定量の CSG 材をダンプへ積み込む。このとき、ホッパにて積み込み量の計測を行う。
 - (手順4) 積み込み完了信号を受けた自動ダンプは、荷下ろし位置へ後進で走行し、材料の運搬及び自動ブルドーザと連携した荷下ろしを行う。
- 自動ダンプの走行方式における特徴は、前進での走行を基本とするオペレータの運転と異なり、積み込み位置から荷下ろし位置までの最長 600m の経路を後進で走行する点である。これにより、経路途中での繰り返し動作を無くすことができ、走行時間と距離の短縮が可能となる¹⁾。

管理システムは、構造物を迂回し、積み込み位置と荷下ろし位置を結ぶ経路を動的かつリアルタイムに生成する。これにより、積み込み先と荷下ろし先を動的に割り当てることができ、時々刻々と変

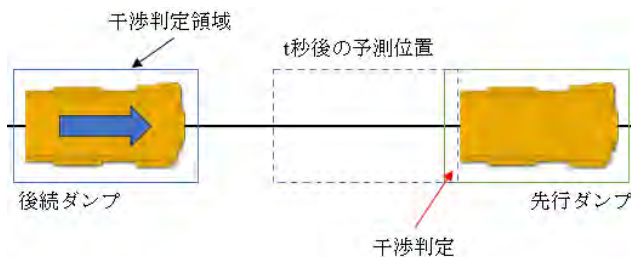


図-4 干渉回避の模式図

わりゆく施工状況への柔軟な対応が可能となる。

3. 現場適用へ向けた自動走行制御機能

現場への適用では、材料運搬を実現する機能に加え、次に示す課題を解決することが求められる。

(課題1) 最大 7 台の自動ダンプを衝突することなく、安全に運用する必要がある。

(課題2) 積込み設備付近において GNSS による姿勢の精度が低下するため、GNSS に依存しない自動走行が必要となる。

本章では、各課題を解決するために改良した自動走行制御機能について述べる。

3.1 複数台ダンプの衝突防止

成瀬ダムの自動化施工では、最大 7 台の自動ダンプが連携して走行する計画である。このとき、図-3 に示すように、実車経路と空車経路の直線部で同一経路を走行するため、先行するダンプへの衝突が懸念される。また、荷下ろし位置付近等、経路が交差し、すれ違いができない箇所での衝突を防止することも必要となる。そこで、自動ダンプ同士を衝突させず安全に運用するため、以下に説明する衝突防止機能を管理システムに実装する。

他のダンプとの干渉回避の模式図を図-4 に示す。各ダンプは、機体周囲に安全マージンを設定した干渉判定領域を有する。そして、点線で示す走行速度を用いて計算した t 秒後の予測位置と他ダンプの判定領域との重複を確認する。この領域の重複によって衝突を予測し、予測時間に応じて減速や停止指示を与えることで衝突を防止する。ここで、停止距離は、運用時の走行速度等の観点より 15m (約 1.5 車長) と設定した。この値は、現場や施工条件に応じて変化する値である。図-5 に示す荷下ろし位置付近では、実車ダンプは、実車の直線経路から荷下ろし位置へ、荷下ろしを終えた空車ダンプは、荷下ろし位置から空車の直線経路へ走行する。そのため、経路交差箇所でのすれ違いは困難である。そこで後着したダンプは停止して先着ダンプの通過を待ち、1 台ずつ順番に交差点を走行させる排他制御によって衝突を防止する。片側交互通行部や積込み位置付近も経路が交差するため、同様に排他制御を行い、衝突を防止する。

図-4 に示す干渉回避機能の実機検証結果を写真-5 に示す。写真より、約 1.5 車長の距離を保って

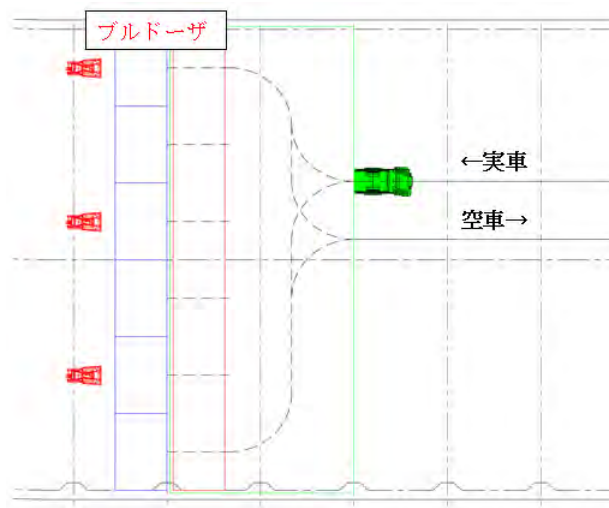


図-5 荷下ろし位置付近での経路交差箇所



写真-5 干渉回避機能での停止状況

停止していることが確認できる。経路交差箇所では、複数台が交差点に到着した状況においても 1 台ずつ順に進入していることを確認した。以上より、自動ダンプを安全に運用する機能を確立した。

3.2 推定値を用いた自動走行

成瀬ダムでの施工では、2.2 節にて述べたように、製造プラントから堤体上まで材料を搬送し、ダンプへの積込みを行う。積込み時は、写真-6 に示すように、車体前方に設置した GNSS アンテナと方位計の上空がディストリビュータによって遮蔽された状態で停止する。構造物に一部でも囲まれると GNSS 信号の遮蔽やマルチパスが発生し、位置と方位の計測精度が低下する⁶⁾ため、ここでも遮蔽による計測精度の低下が確認された。例えば、RTK-GNSS による位置計測では、通常の Fix 解 (2cm 以内) から Float 解 (30cm から 3m) まで低下し、方位計測では、5°程度のノイズや最大 30°程の値飛びが発生した。こうした状況下において連続的に自動走行を行うためには、GNSS に依存しない自動走行機能が必要となった。

この自動走行機能として、車速 v とジャイロセンサで計測されたヨー軸周りの角速度 ω から、位置 (x, y) と方位 θ を推定するオドメトリ⁷⁾を用い、非 GNSS 環境下での自動走行を実施する。ステップ t における推定値は、次式によって求められる。

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \\ \theta_{t-1} \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} \cos \theta_{t-1} & 0 \\ \sin \theta_{t-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{t-1} \\ \omega_{t-1} \end{bmatrix}$$

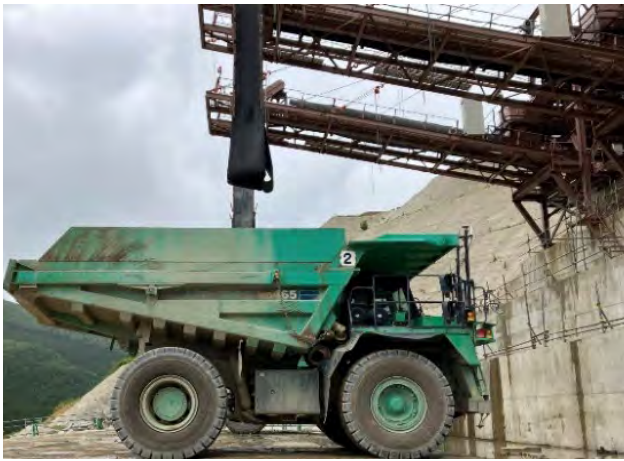


写真-6 ディストリビュータ下の停止状況

ここで、計算誤差等の観点から、オドメトリを用いた自動走行では、以下の条件を設定する。

- (条件1) 走行可能な経路は、ディストリビュータから一定距離以内の直線のみとする。
- (条件2) 切り替え直前の計測値を初期姿勢とする。
- (条件3) 対象とする動作は、ディストリビュータ下への前進進入、荷こぼれ防止を目的とし材料形状を2山にするための2m程の後進移動、及び積込み完了後の後進退出とする。
- (条件4) 方位は推定値を用いる。位置は、測位状況がFix解であればGNSSによる計測値を、それ以外であれば推定値を用いる。

目標位置に対する許容停止精度は、積込まれた材料形状の安息角より幾何的に、手前側に100cm以内、奥側に50cm以内と定めた。走行時の経路追従許容誤差は、ダンプ同士の衝突を防止するため、100cm以内とし、ディストリビュータ下での走行速度は10km/h以下とした。

実機検証結果を述べる。3系列あるディストリビュータのうち、センサ上空の遮蔽度合いが最も大きく、条件が最も厳しい中央のディストリビュータにて検証を実施した。対象とする動作のうち、GNSS測位状況がFix解からFloat解へ変化し、制御に用いる位置が計測値から推定値へ切り替わることが予想される、ディストリビュータ下への前進走行における結果を示す。自動走行時のGNSS計測位置（十字）と推定位置（三角形）を図-6に示す。原点は、積込み時の目標停止位置であり、縦軸と横軸は、左右と前後方向の位置を示す。図より、走行中に測位結果がFloat解へ低下したため、GNSSによる計測位置において、進行方向に対して横方向に約40cm程度のずれが生じている。この結果より、GNSSのみを用いた自動走行では、経路へ追従できず衝突する恐れがあることが分かる。ディストリビュータ下での自動走行の制御で用いた位置と目標経路（直線）を図-7に示す。図

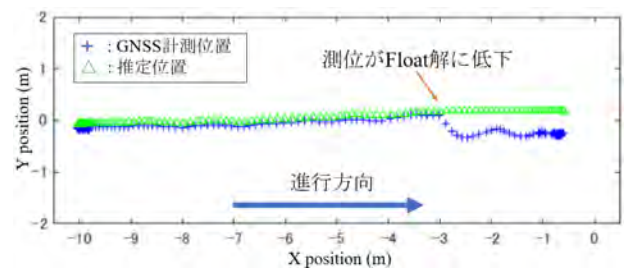


図-6 GNSS 計測位置と推定位置

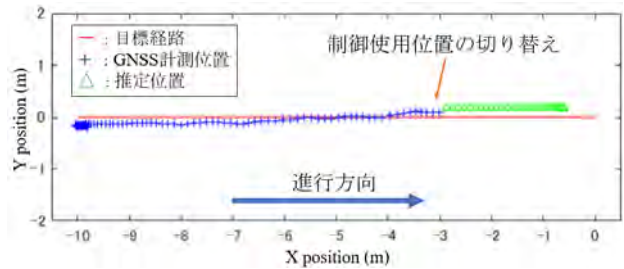


図-7 自動走行で用いた位置と目標経路

に示すように、走行中に測位結果がFloat解に低下した時、制御に使用する位置を、GNSSによる計測位置から推定位置へ切り替えていることが確認できる。推定値使用時の走行における、左右方向の経路追従誤差は約16cm、停止時の前後方向の距離は、約80cm手前側であり、要求仕様を満たしていた。また、(条件3)にて述べた、材料形状を2山にするための後進移動及び積込み完了後の退出動作も、オドメトリを用いて自動走行可能であることを検証した。以上より、位置と方位の計測精度が低下するディストリビュータ下において、GNSSに依存せず自動走行を継続する手法を開発した。これにより、荷下ろし位置から積込み位置まで、経路への追従精度を担保しつつ連続的に自動走行することが可能となった。

4. 現場適用

開発した機能を実装した自動ダンプを複数台走行させ、材料搬送設備や自動ブルドーザとの連携試験を実施した後、成瀬ダムの実施工へ適用した。

実車経路走行時における、自動ダンプの走行軌跡と目標経路への追従誤差を図-8及び図-9に、実車経路上の構造物付近での自動走行の状況を写真-7に示す。図-8と写真-7より、実車経路の直線上に存在する構造物を迂回し走行していることが確認できる。図-9に示す追従誤差の符号は、経路に対する位置関係を表しており、追従誤差は平均約6.6cm、最大約21.9cmであった。実適用時における自動ダンプの目標経路に対する平均追従誤差は約10cm、目標位置に対する荷下ろし精度は±50cm以内であり、次工程の自動ブルドーザによるまき出し作業への円滑な移行が可能な精度であった。

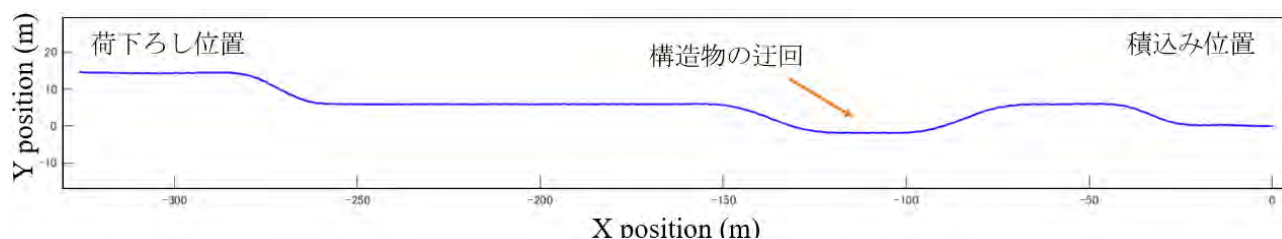


図-8 実車経路の自動走行時における走行軌跡

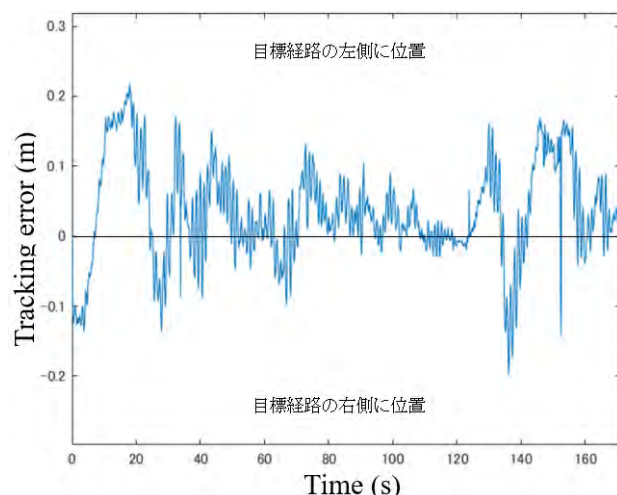


図-9 目標経路に対する追従誤差

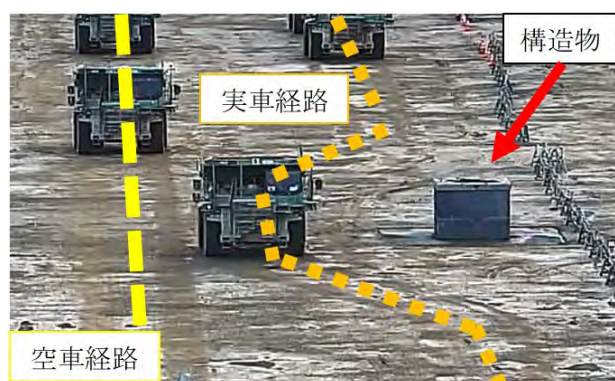


写真-7 構造物付近での自動走行

実施工での自動ダンプ運用期間は、延べ 3.5 か月間であり、1 日の最大運搬時間と運搬台数は、それぞれ約 4 時間と 47 台であった。この運用期間において、自動ダンプ同士の衝突が発生することなく、安全な運用を実施することができた。ディストリビュータ下での GNSS による姿勢の計測精度が低下した状況においても、推定した姿勢を用いることにより、経路追従精度を担保しつつ連続的な走行を実施した。さらに、A⁴CSEL と連携した最適なタイミングでの材料搬送と積み込み、及び後進を基本とする自動ダンプの走行方式による走行時間と距離の短縮により、CSG 材の連続かつ最速運搬を実現した。加えて、1 人の管制員で最大 7 台の自動ダンプを稼働することにより、これまでの成瀬ダムでの自動化施工と比較し、最大 6 人の省人化を実現した。

以上より、成瀬ダムの実施工において、自動ダンプを用いた材料運搬システムの安全な運用を継続的に実施し、その有用性を実証した。

5. おわりに

本論文では、自動ダンプを用いた材料運搬システムの概要を示し、実適用へ向けて必要となった自動走行制御の改良について、実験結果を用いて紹介した。そして、本システムを導入した自動化施工システムの成瀬ダムへの実適用結果を基に、十分な成果が得られたことを確認した。

今後、他現場、他工種への展開を目指し、勾配路等の多様な走路環境に対応した自動制御システムの確立へ向けた開発に取り組む。造成等の現場では、これまで A⁴CSEL を適用してきたダム現場の堤体等における平坦な走路上での走行と異なり、勾配路での走行が必要となる。また、つづら折り箇所等での衝突防止や離合機能等も求められるであろう。今後、これまでに開発してきた制御システムや衝突防止機能等の管理システムの機能を発展させ、さらなる生産性向上の実現を目指す。

参考文献

- 1) 菅井ら：成瀬ダムにおける完全自動化システムの実現，第79回土木学会全国大会年次学術講演会，2024
- 2) 青野ら：連続・高速・大量 CSG 製造設備の開発と合理化システム 世界初となる台形CSGダム，建設の施工企画，753巻，pp. 89-94，2012
- 3) 松本ら：SP-TOM による搬送適用範囲拡大，第77回土木学会全国大会年次学術講演会，2022
- 4) 菅井ら：自動化施工システムの台形CSGダム工事への適用，第76回土木学会全国大会年次学術講演会，2021
- 5) 浜本：自動化による建設施工の革新とその展望 一大規模システムの制御系設計論の構築を目指して，計測と制御，60巻7号，pp.504-508，2021
- 6) 塙ら：衛星測位に用いる受信機の性能評価方法の提案，土木情報学シンポジウム講演集，39巻，pp.236-240，2014
- 7) 美多：非線形制御入門—劣駆動ロボットの技能制御論”，昭晃堂，2000

33. 施工システムからの指示に基づいて動作する自律型油圧ショベル

日立建機株式会社
日立建機株式会社
日立建機株式会社

○ 井村 進也
伊東 勝道
石井 宏紀

1. 開発の背景

建設業においては、生産労働人口の減少や熟練技能者の高齢化を背景として、省人化による生産性の向上が課題となっている。その解決策のひとつとして自律型建設機械の開発に期待が寄せられている。

建設機械は様々な現場で使われており、同じ作業を繰り返す現場もあれば、工事の進展に伴って作業内容が変化する現場もある。同じ作業を繰り返す現場を対象として自律型建設機械を開発する場合、作業内容を事前に細かくプログラミングしたとしても開発工数は多くならない。しかし、工事の進展に伴って作業内容が変化する現場を対象とする場合、全ての作業内容を事前に細かくプログラミングすると開発工数が膨大になってしまう。

そこで本研究では、工事の進展に伴って人が都度、大まかな作業指示を送ることを前提にして、送られてくる作業指示から細かな動作を自律的に判断して動作することができる自律型油圧ショベルを開発した。人が作業指示を送る時に用いるシステムは、今後、様々なものが開発されることを想定し、作業指示を送るシステムと自律型油圧ショベルの間の通信には、汎用性、拡張性を考慮して、世界的に広く使われている ROS2 (Robot Operation System 2) を用いた。また、開発した自律型油圧ショベルを検証するために、前田建設工業株式会社と株式会社イクシスが共同開発した施工システムと接続し、実証試験を行った。

2. 自律型油圧ショベルの構成

図-1 に開発した自律型油圧ショベルの外観を示す。また、図-2 に自律型油圧ショベルのシステム構成を示す。自律型油圧ショベルは、施工システムから送られてくる作業指示に基づいて自律運転する。自律型油圧ショベルは、市販の（人が搭乗して操作する）油圧ショベルに、自律化システムと車体制御システムを追加して構築した。

自律化システムは、コントローラと、周囲情報

（地形や支障物などの情報）を取得するセンサなどで構成する。自律化システムは、施工システムから作業指示を受け取り、周囲情報、車体位置、車体方位、車体姿勢（ブーム角度、アーム角度、バケット角度、旋回角度、ピッチ角度、ロール角度）などに基づいて車体をどのように動かすかを決定し、車体制御システムへ角速度指令（ブーム角速度指令、アーム角速度指令、バケット角速度指令、旋回角速度指令）や速度指令（右クローラ速度指令、左クローラ速度指令）を送る。

車体制御システムは、コントローラ、車体の位置と方位を計測するシステム、車体姿勢を計測するセンサ、アクチュエータを制御する電磁弁などで構成する。車体制御システムは、自律化システムから角速度指令などを受け取り、車体姿勢などに基づいて電磁弁を制御して、車体を動作させる。



図-1 自律型油圧ショベルの外観

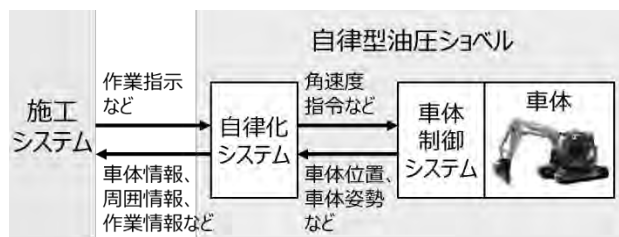


図-2 自律型油圧ショベルのシステム構成

3. 自律型油圧ショベルの機能

3.1 遠隔油圧ロック・解除機能

開発した自律型油圧ショベルは、車体が動く可能性がある時に人が車体に近づかなくても済むように、遠隔からパイロット油圧回路を遮断（以後、油圧ロックと呼ぶ）して、車体を動かなくすることができる。

車体を動かす時は、油圧ロックしたままエンジンを始動し、車体から離れてから油圧ロックを解除するようにする。車体に近づく時は、遠隔から油圧ロックした後、車体に近づくようにする。

3.2 周囲情報取得機能

自律型油圧ショベルは、複数の LiDAR (Light Detection and Ranging) を搭載し、車体から周囲の物体（地面や支障物など）までの距離を計測する。また、GNSS (Global Navigation Satellite System) を用いて車体の位置と方位を計測する。車体から周囲の物体までの距離と、車体の位置と方位から、周囲の物体の位置を計算することができ、周囲の地形や支障物などの情報を取得することができる。

取得した周囲情報は、自律型油圧ショベルから施工システムへ送信する。人は施工システムを用いて、現場の状況を確認しながら作業指示を送ることができる。

3.3 自動掘削・放土機能

人が施工システムを用いて、掘削範囲と放土範囲を指定して自動掘削・放土の実行を指令すると、自律型油圧ショベルは指定された範囲を掘削して指定された範囲に放土する。

自律型油圧ショベルは、指定された掘削範囲の中でどのように掘削すると効率良いかを判断し、その掘削動作を実現するためのブーム、アーム、バケット、旋回の目標動作を計算する。そして、指定された放土範囲に放土するためのブーム、アーム、バケット、旋回の目標動作を計算する。計算した目標動作は、自律型油圧ショベルから施工システムへ送信され、人は施工システムを用いて、目標動作を確認してから実行を指令することもできる。

自律型油圧ショベルは、目標動作で動くためのブーム、アーム、バケット、旋回の角速度を計算し、その値と車体姿勢、車体状態に基づいて電磁弁を制御する。掘削・放土の1サイクル毎に指定された範囲の掘削を終了したかどうかを判断し、掘削を終了したと判断したら施工システムへ終了を通知し、そうでなければ掘削・放土を繰り返す。

3.4 自動走行機能

人が施工システムを用いて、目標位置と目標方位を指定して自動走行の実行を指令すると、自律型油圧ショベルは目標位置で目標方位を向くよう

に走行する。

自律型油圧ショベルは、周囲の地形や支障物などの情報に基づいて、転倒したり支障物と接触したりしない目標経路を計算する。計算した目標経路は、自律型油圧ショベルから施工システムへ送信され、人は施工システムを用いて、目標経路を確認してから実行を指令することもできる。

自律型油圧ショベルは、目標経路と車体位置・方位に基づいて電磁弁を制御し、目標位置で目標方位を向いたら、施工システムへ終了を通知する。

3.5 遠隔操作機能

上述した自動掘削・放土機能と自動走行機能を組み合わせれば、工事の進展に伴って掘削・放土する場所が変化する現場にも対応できるが、掘削、放土、走行以外の動作が必要になる時や、何かしらの原因で自律運転がうまくできない時は、オペレータが遠隔から操作したり、車体に搭乗して操作したりすることもできる。

施工システムで、自律型油圧ショベルの制御モード（自律運転モード／遠隔操作モード／制御OFF）を切り替えることができ、オペレータが遠隔操作する時は遠隔操作モードに切り替え、車体に搭乗して操作する時は制御OFFに切り替える。遠隔操作モードの時は、オペレータは施工システムのコントローラを操作し、施工システムはその操作量を自律型油圧ショベルへ送信し、自律型油圧ショベルはその操作量に基づいて電磁弁を制御して動作する。

3.6 施工システム・自律型油圧ショベル間の信号

表-1に施工システムから自律型油圧ショベルへ送信する主な信号を、表-2に自律型油圧ショベルから施工システムへ送信する主な信号を示す。なお、これらの信号はROS2で通信可能なトピックの形式とした。

施工システムから自律型油圧ショベルへは、自律運転の時は、自動掘削・放土や自動走行の指令を送信し、遠隔操作の時は、遠隔操作の操作量を送信する。

自律型油圧ショベルから施工システムへは、車体位置・方位、車体姿勢、車体状態（油圧ロック状態など）、周囲情報、作業情報（自動掘削・放土や自動走行に関する情報）などを送信する。

表-1 施工システムから送信する主な信号

No.	信号内容	送信タイミング
1	制御モード 切替指令	指令時
2	自動掘削・放土 範囲	指定時
3	自動掘削・放土 実行指令	指令時
4	自動走行 目標位置・方位	指定時
5	自動走行 実行指令	指令時
6	遠隔操作 操作量	10 ms 周期

表-2 自律型油圧ショベルから送信する主な信号

No.	信号内容	送信タイミング
1	車体位置・方位	50 ms 周期
2	車体姿勢	10 ms 周期
3	車体状態	100 ms 周期
4	周囲情報	1 s 周期
5	制御モード 状態	1 s 周期
6	自動掘削・放土 目標動作	動作計算時
7	自動掘削・放土 終了通知	終了時
8	自動走行 目標経路	経路計算時
9	自動走行 終了通知	終了時

4. 実証試験

開発した自律型油圧ショベルを検証するために実証試験を行った²⁾。実証試験は、前田建設工業株式会社のICI総合センターで行った。

実証試験では、大規模造成工事や都市土木における土留め内の掘削工事など、2台の油圧ショベルが連携して同時に施工する現場を想定し、2台による土砂の受け渡し動作を検証した。自律型油圧ショベルは同じものを2台準備し、施工システムと無線で接続し、1人が施工システムを用いて2台へ作業指示を送った。2台へはそれぞれ作業指示を送る必要があるが、一度作業指示を送ったら、自律型油圧ショベルはその作業が終わるまで自律的に動作するため、2台それぞれにオペレータが搭乗する場合と比べて省人化になる。

図-3に実証試験エリアの模式図を示す。自律型油圧ショベルが無人機械動作エリアを出ないように作業指示や遠隔操作を行い、人は無人機械動作エリアと立入制限エリアに入らないようにした。そうすることで、たとえ車体が無人機械動作エリアをはみ出たとしても、はみ出たのが立入制限エリア内であれば、人とは接触しない。また、広範囲の地形を施工システムで確認できるように、LiDARを搭載したサイトセンサを4台準備して周囲に配置した。サイトセンサと施工システムは無線で接続し、サイトセンサから施工システムへ地形や支障物などの情報を送信した。

実証試験を始める時は、人が無人機械動作エリアに入って、自律型油圧ショベルを油圧ロックしたままエンジンを始動し、車体から離れて立入制限エリアの外に出て、遠隔から油圧ロックを解除した。実証試験を終える時は、遠隔から油圧ロックした後、人が無人機械動作エリアに入って自律型油圧ショベルのエンジンを停止した。

図-4に実証試験の様子を示す。また、図-5に図-4と同じ時刻における施工システムの画面を示す。図-4に示した実際の地形および自律型油圧ショベルの位置・姿勢と、図-5に示した施工システムの画面の地形および自律型油圧ショベルの位置・姿勢は同じであり、施工システムが実際の状況をリアルタイムに把握していることを確認できた。



図-3 実証試験エリアの模式図



図-4 実証試験の様子

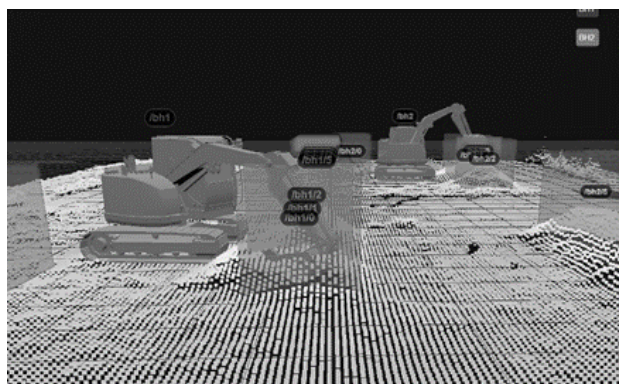


図-5 施工システムの画面

図-6に自動掘削・放土の指示を行う時の施工システムの画面を示す。人が施工システムのマウスを操作して、掘削範囲と放土範囲を指定して自動掘削・放土の実行を指令すると、自律型油圧ショベルが指定された範囲を掘削し、指定された範囲に放土する動作を繰り返し行うことを確認した。また、掘削範囲の土がなくなった時に、自律型油圧ショベルが施工システムへ、自動掘削・放土の終了を通知することを確認した。

図-7に自動走行の指示を行う時の施工システムの画面を示す。人が施工システムのマウスを操作して、目標位置と目標方位を指定して自動走行の

実行を指令すると、自律型油圧ショベルが目標位置で目標方位を向くように走行することを確認した。また、走行を終えた時に、自律型油圧ショベルが施工システムへ、自動走行の終了を通知することを確認した。

図-8 に遠隔操作の様子を示す。施工システムで自律型油圧ショベルの制御モードを遠隔操作モードに切り替えて、オペレータが施工システムのコントローラを操作すると、自律型油圧ショベルが操作通りに動作することを確認した。

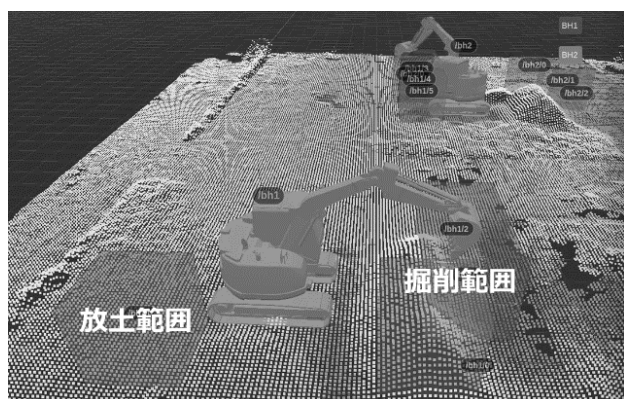


図-6 自動掘削・放土の指示

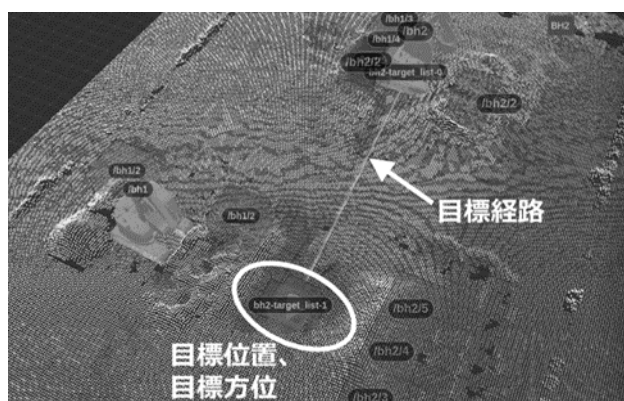


図-7 自動走行の指示



図-8 遠隔操作の様子

5. まとめ

施工システムから送られてくる作業指示に基づいて自律的に動作することができる自律型油圧ショベルを開発した。人が施工システムを用いて、掘削範囲と放土範囲を指定して自動掘削・放土の実行を指令すると、自律型油圧ショベルは指定された範囲を掘削して指定された範囲に放土する動作を繰り返し行い、掘削範囲の土がなくなった時に終了を通知する。また、目標位置と目標方位を指定して自動走行の実行を指令すると、自律型油圧ショベルは目標位置で目標方位を向くように走行し、走行を終えた時に終了を通知する。さらに、施工システムで遠隔操作モードに切り替えてコントローラを操作すると、自律型油圧ショベルは操作通りに動作する。

実証試験では、1人が2台の自律型油圧ショベルへ作業指示を送り、2台がそれぞれ自律運転を行うことを確認し、省人化の見通しを得ることができた。

参考文献

- 1) 井村進也：遠隔・自動化のためのシステムプラットフォーム，建設機械，Vol. 57，No. 10，pp. 14～17，2021
- 2) 日立建機：TP15-ZCORE 施工システムと油圧ショベルの連携による自動施工，
<https://www.youtube.com/watch?v=HcBQmzRTHFA>
(参照日2024年8月20日)

34. 盛土施工現場における自動施工の評価

株式会社熊谷組
株式会社熊谷組
株式会社熊谷組

○ 飛鳥馬 翼
北原 成郎
竹下 嘉人

1. はじめに

近年、建設業界では、生産年齢人口の減少と高齢化が顕著となり、業界全体にとって重大な課題となっている。加えて、2024年4月から働き方改革関連法が建設業界にも適用され、時間外労働や休日出勤に対する規制が強化されたことから、生産性向上および働き方改革が急務となっている。さらに、2024年4月に国土交通省が発表した「i-Construction 2.0」⁽¹⁾においては、「建設現場のオートメーション化」が掲げられ、2040年度までに省人化を少なくとも3割、すなわち生産性の1.5倍向上を目標とされている。我々施工者側も、抜本的な省人化対策を講じる必要がある。

「建設現場のオートメーション化」の一環として「施工のオートメーション化」が進められており、1人のオペレータが複数の建設機械の動作を管理することで省人化が図られている。また、2024年3月には「自動施工における安全ルール Ver.1.0」⁽²⁾が策定され、建設現場における建設機械の自動化が加速することが予想される。

筆者らは、災害復旧現場で活用されている無人化施工技術を応用し、遠隔操作式建設機械および自動制御式建設機械を複合的に活用することで、フィルダムの盛土施工に適用し、作業員1人当たりの生産性向上を図った。本稿では、実施工現場における実証実験概要とその適用効果について報告する。

2. 自動施工のコンセプト

筆者らは、自動施工のコンセプトとして、無人化施工技術の中核に据え、遠隔操作と自動制御が連携した施工システムを構築することを提案する。自動制御のベースが遠隔操作にあるため、自動制御に不具合が発生した場合でも、遠隔操作によるバックアップが可能である。また、遠隔操作をベースとすることで、建設機械の管理はすべて遠隔操作室内で完結し、リアルタイムで施工データを取得することで、施工状況の見える化⁽³⁾も容易となる。

さらに、自動施工のシステム全体の運用を簡素化することで、オペレータのみで操作可能なシステムを構築し、建設現場への導入をより容易に実現できると考える。

「1人のオペレータが複数の建設機械の動作を管理する」ことは「遠隔操作室」で「簡素なシステム」を運用することにより実現可能である。

3. 自動制御式建設機械の導入

本稿における実証実験では筆者らが開発したシステムを搭載した11t積不整地運搬車(写真-1)とCaterpillar社が開発した『Cat® Command for Compaction』⁽⁴⁾を搭載した13t級振動ローラ(写真-2)を導入した。筆者らが開発したシステムは3-1節で説明する。Caterpillar社のシステムは、転圧エリアや転圧回数等のオペレータの入力に基づいて締固め施工を自動制御し、オペレータをアシストする半自律型のシステムである。

3.1 自動制御式不整地運搬車

本技術は、単独の不整地運搬車に対する自動制御技術と、AIによる制御を組み合わせたものであり、複数台の不整地運搬車の効率的な運行と省人化を実現する。⁽⁵⁾(図-1)



写真-1 11t 積不整地運搬車



写真-2 13t 級振動ローラ

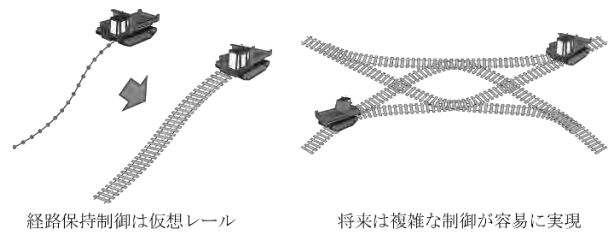


図-2 仮想レール方式

整したり、障害物を回避したりすることがティーチングデータとなり、そのデータに基づいてプレイバック制御が行われる。この方式により、センサに依存することなく安全な自動制御を実現する。また、熟練オペレータがティーチングすることによって、走行精度が向上し、生産性の向上も期待できる。

(2)自動制御と AI 制御の独立システム

本技術では、自動制御車両群を AI が制御するが、自動制御と AI 制御はそれぞれが独立したシステムとなっている。本技術では自動走行する不整地運搬車を使用しているが、同様の制御システムを持つ他の車両群でも、本技術の AI による制御を適用することが可能である。

(3)安全監視の重層化

自動制御と AI 制御の各システムによる安全監視を利用することで、いずれかの安全監視に不具合が発生した場合でも、もう一方の安全監視で確実に車両を停止させることが可能である。

4. 実証実験概要

本実験は、熊本県発注の大切畑地区県営農地等災害復旧事業第 1 号工事において実施された。工事概要を表-1 に示す。フィルダムの堤体盛土作業において、①バックホウ 1 台による積込作業、②不整地運搬車 2 台による運搬作業、③ブルドーザ 1 台による敷均作業、④振動ローラ 1 台による転圧作業の一連のサイクルを実施し、「有人施工」、「無人化施工(遠隔操作)」(以下、無人施工とする)、無人化施工+自動施工」(以下、自動施工とする)の 3 パターンにおいて歩掛を調査した。

表-1 工事概要

工事名	大切畑地区県営農地等災害復旧事業第 1 号工事
発注者	熊本県農林水産部
工事場所	熊本県阿蘇郡西原村小森地内
ダム諸元	
型式	前面遮水ゾーン型フィルダム
堤高	28.5m
堤長	237.7m
堤体積	457,000m ³
総貯水量	600,000m ³

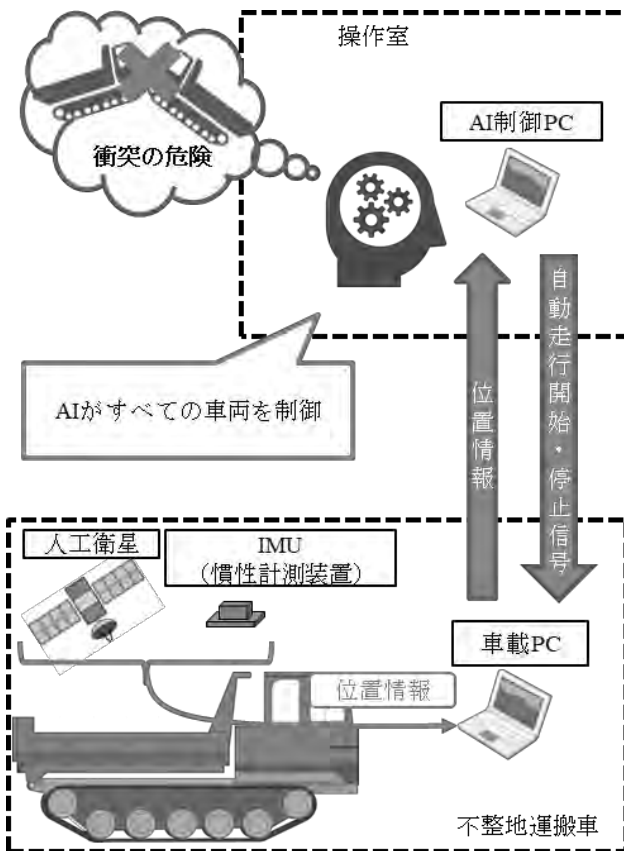


図-1 自動制御式不整地運搬車の構成

仮想レールによる運行管理を実施しており、ティーチングプレイバック方式を採用することで、オペレータが仮想レールを自由に設定することが可能である。複数の仮想レールが複雑に重なり合っている場合でも、AI が運行管理を行い、レールの切り替えも自動的に行われる。(図-2)

本技術の特長を下記に示す。

(1)ティーチングプレイバック方式の採用

本技術は、車両にティーチングさせることにより、現場環境に適応した経路生成が容易に可能である。自動制御を行う前に、走行させたい経路を遠隔操作することで、地面の凹凸に応じて速度を調



図-3 実験エリア平面図



図-4 実験エリア斜め俯瞰図

実証実験エリアの平面図と斜め俯瞰図をそれぞれ図-3、図-4に示す。図-3において不整地運搬車の走行経路延長は往復で約500mである。また、本実験は2023年10月下旬から11月上旬にかけて実施されたため、2024年3月に策定された「自動施工における安全ルール Ver.1.0」に準拠していないが、無人化施工を実施するにあたり、安全確保の観点から図-4のように無人化施工エリアを区分し、立入禁止措置を講じた上で実験を実施した。

実験の3パターンにおける作業内容と作業人員の割り当てを表-2に示す。有人施工においては、不整地運搬車の荷下ろし場所や振動ローラの転圧作業を誘導するために、誘導員が1名必要であった。一方、無人施工および自動施工では、建設機械の周囲状況把握のために、現場に複数の固定カメラを配置し、それを制御するカメラオペレータが求められる。無人施工では、敷均し作業を行うブルドーザの動きに合わせて固定カメラを制御するオペレータと、運搬作業を行う不整地運搬車の動きに合わせて固定カメラを制御するオペレータの合計2名が必要であった。これに対し、自

表-2 作業人員の割り当て

	有人施工	無人施工	自動施工
0.8m ³ 級 バックホウ 操作	1人	1人	1人
11t積 不整地運搬車 操作(2台)	2人	2人	0人(自動)
16t級 ブルドーザ 操作	1人	1人	1人
13t級 振動ローラ 操作	1人	1人	0人(自動)
誘導員	1人	0人	0人
カメラ オペレータ	0人	2人	1人
合計人員	6人	7人	3人

表-3 実験結果

実験パターン	有人施工	無人施工	自動施工
作業人員[人]	6	7	3
施工土量[m ³] ※仕上土量	278.0	133.1	120.4
施工時間[h]	7.86	5.45	5.92
歩掛[m ³ /h]	35.4	24.4	20.3
労働生産性 [m ³ /人・h]	5.9	3.5	6.8

動施工では、不整地運搬車が自動制御となるため、カメラオペレータは不要となり、ブルドーザの動きに合わせて固定カメラを制御するオペレータ1名に省人化することが可能となった。

5. 実証実験結果

5.1 労働生産性

実験結果を表-3に示す。施工土量はドローンによる空中写真測量を用いて算出した。施工時間は、バックホウが1台目の不整地運搬車に積込作業を開始してから、振動ローラが転圧作業を終了するまでの時間とした。

施工土量に着目すると、有人施工が最も多く、自動施工が最も少ない結果となった。また、歩掛に関しては、有人施工が35.4m³/h、無人施工が24.4m³/h、自動施工が20.3m³/hであった。これにより、無人施工は有人施工に対して約0.69倍、自動施工は約0.57倍となった。一般的に無人化施工の施工能力は、有人施工の算定式に無人化施工係数0.6を掛けた値で算出されることが多い。⁶⁾したがって、本実験において無人施工および自動施工の歩掛が無人

化施工係数に近い値に落ち込んでいることが確認された。

次に、労働生産性に着目すると、有人施工は5.9 m³/人・h、自動施工は6.8 m³/人・hであり、自動施工は有人施工に対して約1.15倍の生産性向上を示した。一方、無人施工の労働生産性は、作業人員が最も多く、施工土量も有人施工より少ないため、最も低い結果となった。

5.2 転圧作業の効率性

振動ローラには転圧管理システムを搭載しており、各転圧回数を色分け表示することで、転圧不足が発生しないよう管理している。本工事における規定転圧回数は6回となっており、6回以上の転圧についてはすべて同色とすることができるが、効率性の評価を目的として、6回以上の転圧回数についても色分けを行い表示した。ただし、導入している転圧管理システムの仕様により、色分けは最大9回までとし、9回以上の転圧はすべて同色で表示した。

実験パターンにおける転圧回数比率のグラフを図-5に示す。本工事における規定転圧回数が6回であることから、理想的な転圧分布としては、ラップ率を考慮すると6回転圧と12回転圧が多く含まれることが望ましい。具体的には、「6回」と「9回以上」のカラーマップが多く、「7回」や「8回」のカラーマップが少なくなることが理想である。転圧回数の分布において、「6回・9回以上」の割合は、有人施工で72%、無人施工で65%、自動施工で88%となり、自動施工は有人施工に対して約1.2倍、無人施工に対して約1.4倍の効率化が達成された。

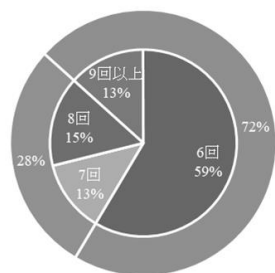
6. 本実験のまとめ

- ・フィルダムの堤体盛土工事に無人施工および自動施工を導入した。
- ・施工土量は有人施工が最も多く、自動施工が最も少ない結果となった。
- ・無人施工と自動施工の歩掛が有人施工に対して無人化施工係数に近い値に落ち込んでいることを確認できた。
- ・自動施工は有人施工に対して、約1.15倍の生産性向上となった。
- ・転圧作業に関して、自動施工は有人施工に対して、約1.2倍の効率化が達成された。

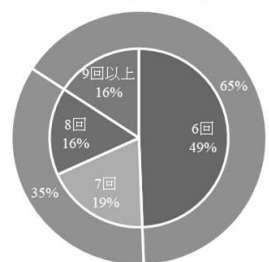
7. おわりに

本稿では、実施工現場における自動施工の適用とその効果を評価した。労働生産性については、有人施工に対して約1.15倍の向上が確認されたものの、国土交通省が目標とする1.5倍には達していない。この結果を踏まえ、今後はさらなる効率的な自

有人施工の転圧回数比率



無人施工の転圧回数比率



自動施工の転圧回数比率

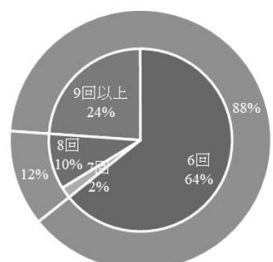


図-5 転圧回数比率

動制御システムを開発していく所存である。

最後に、現場実証をさせていただいた発注者の熊本県農林水産部、無人化施工のオペレータ支援を戴いた共栄機械工事(株)、技術支援を戴いた(株)ファテックと(同)エコボット、その他関係者の方々に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：「i-Construction 2.0」を策定しました、国土交通省HP、https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001085.html、2024年8月30日参照
- 2) 建設機械施工の自動化・自律化協議会：建設機械施工の自動化・遠隔化技術、国土交通省HP、https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/sosei_constplan_tk_000049.html、2024年8月30日参照
- 3) 飛鳥馬翼・北原成郎・天下井哲生：無人化施工の発展の歴史と今後の展望、土木施工、Vol.63, No.6, pp.118～121、2022
- 4) Caterpillar Inc.：Command for Compaction、Caterpillar Inc. HP、https://www.cat.com/en_US/products/new/technology/command/command/102740.html、2024年8月30日参照
- 5) 飛鳥馬翼・北原成郎・畑本浩伸：AI制御による不整地運搬車の自動走行技術に関する研究－AIによる運行管理システムの評価－、第20回建設ロボットシンポジウム論文集、2022
- 6) (一財)先端建設技術センター：「遠隔操縦における作業効率向上に資する技術(無線通信技術、映像処理技術)」の要求性能に対する意見募集を行います 参考資料-2、(一財)先端建設技術センターHP、https://actec.or.jp/netis_qs_thema2018/pdf/08.pdf、2024年8月30日参照

II 梗概集

●ポスターセッション要旨

1. アクティオカーシェアスポット「アクスポ」

無人でレンタカーの貸出・返却ができる新サービス

株式会社アクティオ ○深沢 拓

■概要

総合建設機械レンタルの株式会社アクティオは、無人で建設車両をレンタル可能な新サービス「アクスポ」を2024年1月18日（木）から開始いたしました。



現在、様々な業界で人手不足がさげばれており、限られたマンパワーでの業務効率化とそれに伴う労働者の就業環境改善は喫緊の課題となっています。建設業界でも、高齢化や労働人口の減少に伴う人材不足で長時間労働が常態化しており、2024年問題に対応するため、さらなる作業の効率化や省人化が求められています。

今回サービスを開始する「アクスポ」は、建設車両のレンタルを無人化することで、お客様の利便性を高め、業務の効率化や生産性の向上に貢献する事業として新たに展開をしていきます。また、土日・祝日の無人出庫対応など、全国へ「アクスポ」の無人化システムを横展開していくことで、従業員の就業環境の改善も図っていきます。

■「アクスポ」のメリット

アクスポをご利用いただいた際のお客様のメリットは下記の通りです。

① お客様の利便性の向上

貸出日、返却日ともに、365日24時間いつでも自由に利用可能

② 業務の効率化

長時間労働の削減

③ 夜間・早朝対応の無人化

従来、早朝作業では前日に車両をレンタルする必要があったが、当日にレンタルすることができるため、コスト削減が可能

アクティオのメリットは下記の通りです。

① 土日・祝日の無人出庫対応

時間外労働時間の削減

② カーシェア以外の当社保有の様々なレンタル商材の無人貸出・返却などの新たなサービスの創成

今後は、無人化システムをさらに進化させ、様々なレンタル商材の無人貸出・返却など水平展開予定



2. 環境負荷を大きく低減する地盤改良工法

リソイル Pro 工法

株式会社不動テトラ ○永石 雅大

株式会社不動テトラ 高田 英典

株式会社不動テトラ 富田 晃弘

1. 「リソイル Pro 工法」の概要

液状化対策工法として多くの実績を有するサンドコンパクションパイル（以下、SCP）工法は、地盤中によく締まった砂杭を造成することで、周辺地盤の密度を増加させる工法である。その中詰め材料には、一般的に良質な砂や碎石が使用されるが、スラグや再生碎石といったリサイクル材料を使用する機会も増加している。そして、建設現場で発生する土（以下、建設発生土）についても中詰め材料としての適用を試みてきた。静的締固め砂杭工法において、含水比および細粒分含有率が30%程度までの建設発生土を石灰で改質して使用した事例はあるが、通常の静的締固め砂杭工法に比べ、改質によるコストの増加や、施工能率が低下するといった課題があった。これらの課題を解決するために図-1 に示す施工機を改造し「新たな材料供給システム」を開発した。

本報では、建設発生土を砂杭の中詰め材料として有効活用可能とした「リソイル Pro 工法®」の特徴と、実大実験による施工検証結果について報告する。なお、本報における建設発生土とは、現場内で発生した盛り上がり土や掘削土を主な対象としている。施工現場で発生する盛り上がり土の状況例を写真-1 に示す。

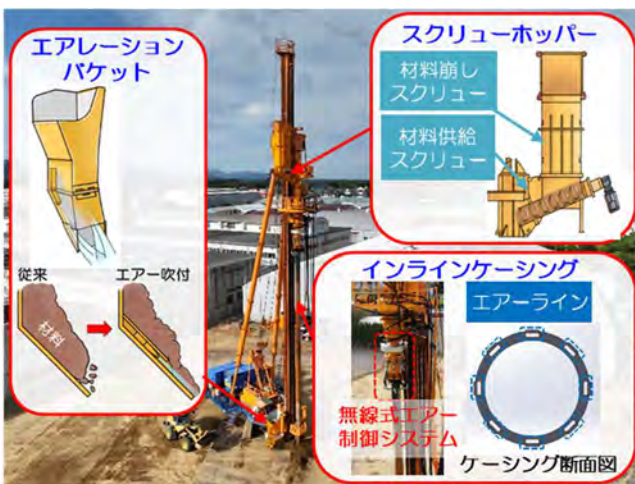


図-1 発生土利用を可能にした新たな材料供給システム

2. 「リソイル Pro 工法」の特長

(1) 新たな材料供給システム

SCP 工法における砂杭打設工程では、中詰め材料は施工機械の昇降バケットに投入され、ホッパー、ケーシングパイプを通過して地盤内へと運搬される。このとき、中詰め材料の含水比や細粒分含有率が高くなるほど通過性が悪くなり施工性の低下等に繋がる。建設発生土は含水比や細粒分含有率が高い場合が多く、中詰め材料として直接利用することが困難であった。これまで発生土を利用する場合には、図-2 の下側に示すように発生土に石灰等を混合し改質する方法や、礫材料と混合し粒度調整を行う方法で施工可能な性状に変化させ、中詰め材料として使用してきた。しかし、コストの増加や施工能率の低下といった課題があった。

これらの課題を解決するために開発された新たな材料供給システム(図-1)では、各部材での材料通過性を向上させることで、そのままでは利用できなかった材料の直接利用が可能となった。



写真-1 盛り上がり土の発生状況例

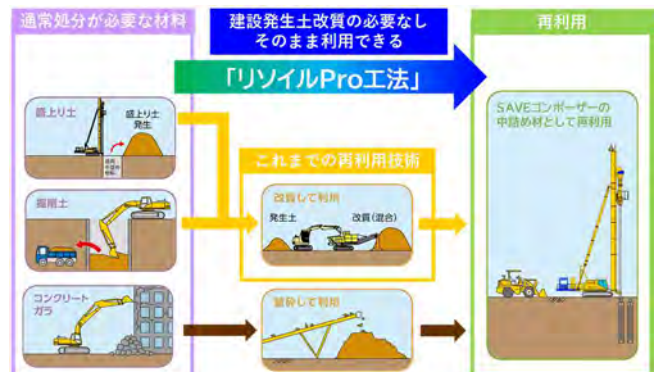


図-3 リソイル Pro 工法における建設発生土の利用方法

バケットには、ホッパーへ投入するときの閉塞を防ぐために底部からエアーを噴出させる機構を追加した。ホッパーには、ケーシングパイプへ材料を強制排出させるスクリューを追加することで材料による閉塞を防ぐようにした。ケーシングパイプは、空気配管をパイプ断面内に埋め込むことで、ケーシングパイプ内の突起物を排除し、材料が通過する抵抗を最小限とした。

(2) 建設発生土の直接利用可能な範囲

本工法では、含水比と細粒分含有率がいずれも30%以下までの発生土であれば、改質せずに、中詰め材料として直接利用することが可能となった。本工法で直接利用できない発生土でも、礫材混合による粒度調整や石灰改質によって適用でき、中詰め材料として利用可能な範囲が広がった。ただし、建設発生土を直接利用する際、75mm以上の礫や異物が混入している場合は、分級するなどの事前処理が必要となる。

(3) 環境負荷の低減 (CO₂ を最大50%削減)

従来のSCP工法では、中詰め材料を採取地で掘削し、施工箇所まで運搬する。さらに、施工で発生した盛り上がり土も建設発生土として運搬処分されており、これらの過程でCO₂排出などの環境負荷が生じていた。本工法により建設発生土を有効活用することで、搬入搬出する工事車両の台数が激減し、自然砂の採取量も減少することで環境負荷低減に期待できる。

従来の良質な砂を用いた静的締固め砂杭工法に対して、発生土を全て直接利用した場合、最大でCO₂排出量を50%削減することが可能である。

CO₂排出量の試算条件を図-3に示す。CO₂排出量は各重機の燃料使用量から算出した。

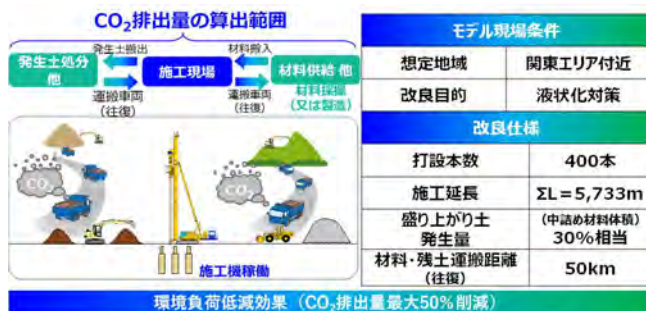


図-3 CO₂排出量の試算条件

(4) トータルコストダウンに寄与

建設発生土の使用に伴う施工サイクル低下の可能性が考えられるが、良質材料購入費と発生土処分費の削減により全体的なコストダウンが期待できる。

3. 施工性検証の確認

本工法の施工性検証の確認を目的として、実物大実験土槽で施工実験を実施した。実験で使用した材料は、従来材料(行方産山砂)、建設発生土、改質土の3種類を用いた。材料の粒度分布を図-4、含水比と細粒分含有率の関係と、従来設備または新設備の施工機での施工可能範囲を図-5に示す。

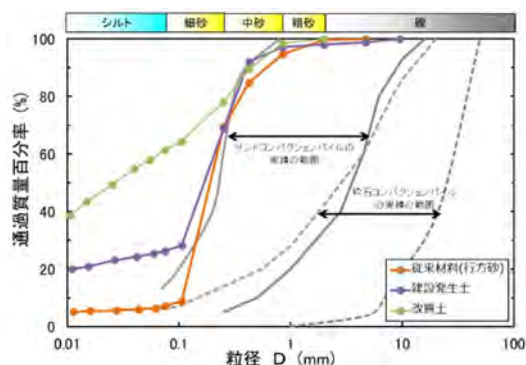


図-4 実験材料の粒度分布



図-5 実験材料のFc及び含水比w関係

従来材料は、良質な購入砂である。建設発生土は、自然土材料を数種類混合し、所定の含水比wと細粒分含有率Fcとなるように作製した。物性値はw=21.6%、Fc=27.3%である。改質土は、w=48.6%、Fc=61.4%の粘土土を50kg/m³の生石灰で改質した。いずれの材料も従来の施工機では適応外材料である。

施工性検証の結果、建設発生土は従来材料と同等の施工能率であった。改質土では、従来材料に比べ3割程度施工時間が増加したが施工自体は可能であった。

打設後の砂杭径計測結果を写真-2に示す。全ての材料で設計値であるφ700mmを満足した。

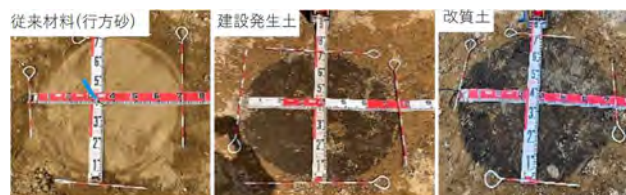


写真-2 砂杭出来形計測結果

3. BIM/CIM を活用した土工事の自動施工『自動施工計画・管理システム』

前田建設工業株式会社 〇秋田 剛
日立建機株式会社 井村 進也
株式会社イクシス 山崎 文敬

1. はじめに

一人で複数台の建設機械をオペレーションでき、省人化による生産性向上を図るとともに、同一のシステムで他の建設機械および様々な現場シーンでも利活用できる汎用性を持った仕組み（ROS2, BIM/CIM 等に対応したシステム）を構築することを目指し、前田建設工業株式会社、日立建機株式会社、株式会社イクシスの各社で開発中のシステム（第1図）を接続し、3社共同で複数台の自律型油圧ショベルを用いた自動施工技术の実証試験を行った。

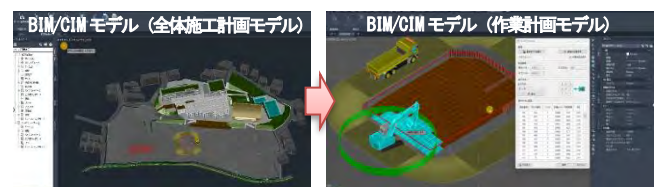
2. システム概要

油圧ショベルによる自律運転の実証試験においては、各社で開発中の①自動施工計画システム（前田建設）、②自動施工管理システム（前田建設・イクシス）、③自律型油圧ショベル（日立建機）を使用した。各システムの概要を以下に示す。

（1）自動施工計画システム

自動施工計画システム（第2図）は、施工計画段階のBIM/CIM モデルを基に、自動施工に必要な情報のみを自動で抽出・出力し、自律型油圧ショベルによる自動

施工を指示・管理するシステム「自動施工管理システム」に向けてシームレスにデータを送るシステムである。本システムにより、工事全体の施工計画情報（BIM/CIM モデル）から、油圧ショベルの作業内容や手順を具体化した「作業計画モデル」を自動に生成することができ、自動施工のための作業指示・管理に必要なデータ作成等の作業について効率化が図られる。



第2図 作業計画モデルの自動生成

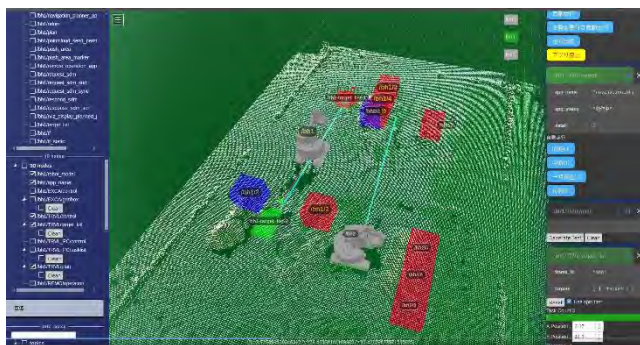
（2）自動施工管理システム

自動施工管理システム（第3図）は、自動施工計画システムより出力された「作業計画モデル」を基に、複数の自律型油圧ショベルに対して作業を指示・管理するシステムである。なお、掘削作業の進捗状況など施工管理を円滑に行えるように、計画上の仮想空間（サイバー空間）と実現場である現実空間（フィジカル空間）とが連動するデジタルツインを採用した。



第1図 システム構成（概念図）及び各社の役割分担

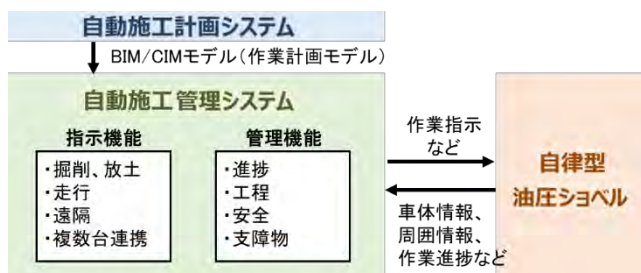
本システムにより、現場の建設機械や資機材などのオブジェクトと、掘削順序等の計画情報とが一元的かつ、リアルタイムに3次元（BIM/CIMモデルおよび点群データ）でモニタに表示され、複数台の自律型油圧ショベルへの指示や進捗等の管理を一人で円滑に行うことができる。さらに、遠隔操作機能を搭載し、現場の状況に合わせて自律運転と遠隔操作とを簡単に切り替えられるインターフェースを構築した。また、機能の拡張性を考慮し、BIM/CIMおよびROS2に対応したシステム基盤およびデータフォーマットを採用した。



第3図 自動施工管理システム

作業を指示・管理する機能として、以下を実装した。

- 1) 指示機能：掘削・放土、走行、遠隔、複数台連携
- 2) 管理機能：進捗、工程、安全、支障物

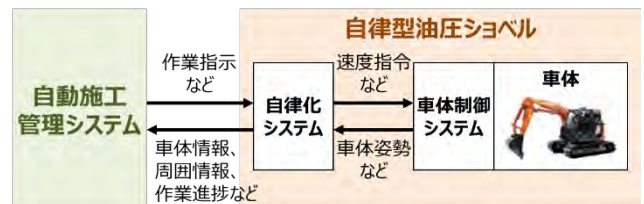


第4図 自動施工管理システムの機能

(3) 自律型油圧ショベル

自律型油圧ショベル（第5図）は、自動施工管理システムからの指示に基づいて自律運転する。自律型油圧ショベルは、市販の（人が搭乗して操作する）油圧ショベルに、自律化システムと車体制御システムを追加したものである。自律化システムは、コントローラと、車体の周囲の地形や支障物を検出するセンサなどで構成される。

自律化システムは、自動施工管理システムから作業指示を受け取り、車体姿勢、車体内部情報、周囲情報などに基づいて車体をどのように動かすかを決定し、車体制御システムに、油圧ショベルの各アクチュエータの速度指令（速度目標値）を送る。車体制御システムは、コントローラ、車体姿勢を検出するセンサ、車体を制御する電磁弁などで構成される。車体制御システムは、自律化システムから各アクチュエータの速度指令を受け取り、車体姿勢や車体内部情報に基づいて電磁弁を制御し、車体を動作させる。また、自動施工管理システムで遠隔操作が行われた場合は、遠隔操作の操作量に基づいて電磁弁を制御し、車体を動作させる。なお、自動施工管理システムと自律型油圧ショベルの間は、ROS2で通信して汎用性を持たせている。



第5図 自律型油圧ショベルのシステム構成

3. おわりに

今回の3社共同での実証試験（写真1）により、自律型油圧ショベルによる施工の計画から指示・管理、実行までの複数のシステムを接続し、ROS2、BIM/CIM、3次元点群データなどをシステム間でシームレスにデータ交換できる汎用的な機能の実用性を確認できた。これにより、他の自律型建設機械やシステムへの接続が容易になり、各社が開発中のシステムの拡張性が高まった。

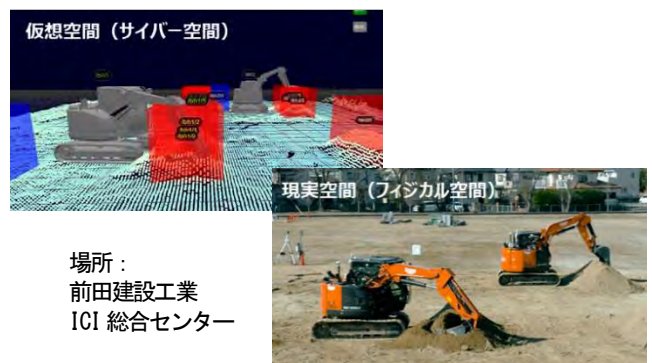


写真1 実証試験の様子（複数台連携）

4. チルトローテータを遠隔操作することによる、飛躍的な生産性向上

小規模土工での省人化3割を目指して

梅田土建株式会社 山田 潤

Steelwrist Japan 株式会社 五十嵐 卓次郎

株式会社カナモト 庄野 和隆

小規模土工での省人化3割を目指して

国土交通省は、今後の更なる人口減少への対策として「i-Construction 2.0」構想を発表し、2040年度までに建設現場の省人化を少なくとも3割を目指し、「施工のオートメーション化」を柱の一つとしてあげている。施工のオートメーション化に向け、生産性の高い自動施工に向けては、通常工事への遠隔施工技術の導入が不可欠としている。これまで、ダム工事等の大規模土工での、自動施工・遠隔施工の事例は、報告されていた。一方、工事件数では多数を占める小規模土工でも、チルトローテータとICT施工を組み合わせで、施工効率・省人化・安全性の大幅な向上が実現されている。

チルトローテータによる小規模土工 省人化 事例

チルトローテータは、油圧ショベルのアタッチメントをチルト（傾き）させたり、ローテート（回転）させたりすることが出来る機構である。この機能によりアーム正面を斜面に正対する必要がなく、これまで不可能であった狭小地で、機械化施工が可能となる。さらに、バケットだけでなく、掴む、締固め、整地、掃除などの、多種類のアタッチメント（ワークツール）を、作業員不要で、短時間で交換することに可能で、手元作業員無しで、様々な作業を行うことができる。



図-1 チルトローテータの機能

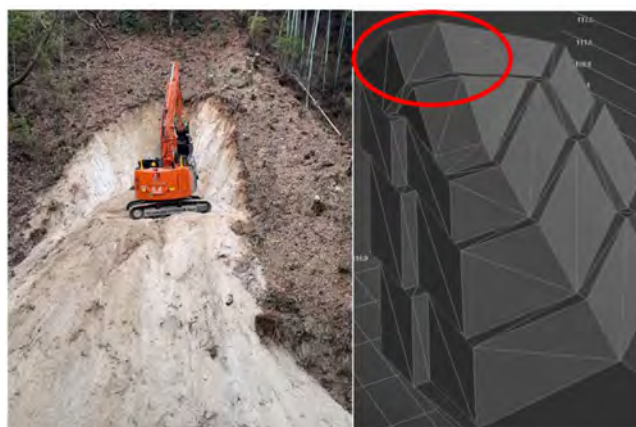


図-2 チルトローテータ 実事例 法面整形

パイロット

工法	重機規格	作業員	丁張+作業時間
従来	5t	1	8h+4h
ICT・TR	20t	0	10 min

掘削 1段

工法	重機規格	作業員	丁張+作業時間
従来	5t	1	4h + 8h
ICT・TR	20t	0	1h

表-1 法面整形 比較表

チルトローテータの遠隔操作化

チルトローテータにより、小規模土工の現場で、手元作業員無しで、油圧ショベルのみで様々な作業を完了することが可能である。このチルトローテータを遠隔操作することにより、小規模土工の現場での省人化が、大きく進むことが期待される。チルトローテータの遠隔操作化が開発されており、実現場での実証が期待される。

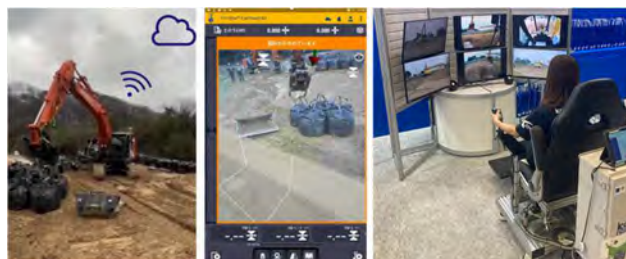


図-3 チルトローテータ遠隔操作コンセプト

5. 柵とバリケード

クレーン旋回範囲・立入禁止エリアを簡単設置

株式会社レンタルのニッケン

梶川 太郎

安全対策・労働災害・予防安全

はじめに、移動式クレーンとは大きく2種類があり、アウトリガーを支えとするラフタークレーンとクローラーを支えとするクローラークレーンが存在する。ラフタークレーンも同様に旋回範囲の立入禁止処置は必要だが、アウトリガーがある事により見た目でも危険エリアの把握がし易い。一方、クローラークレーンにおいてはアウトリガーを必要としないので、旋回体接触範囲がわかりづらい。

旋回範囲内への立入禁止の方法として(下記、図1)カラーコーンやA型バリケードを用いるのが一般的ではある。そのため走行するたびに、カラーコーンの撤去、盛替え、新設が必要となる。この移動作業においてはオペレーター自身が行う事が多く、頻繁に移動すると作業量が増加し、揚重作業が削られることになる。次に移動量の多い作業所においてはクローラーに単管を直接固定し、立入禁止処置を講じる場合もあるが、誤って可動部分に固定してしまうと、機械の破損にも繋がる事から、専門の知識が必要になる。

(図1)



柵とバリケードとはクローラー本体に、マグネットが取付けられたH型の固定治具を直接取り付け、各パイプを3本連結しクローラーとの離隔距離を確保している。また先端部には安全ポールを取付け、専用の安全ポール固定治具にはロープを固定できる構造にしている。そのためクローラークレーンの旋回範囲内への進入を防止することができる。設置したまま走行が可能のため、走行中においても立入区画が維持できる。

(柵とバリケード)



カラーコーンやA型バリケードの盛替えが不要になり、移動に伴うオペレーターの作業量が削減される事により、揚重効率の向上に貢献できると考えている。さらに、移動中においても「はさまれ・巻き込まれ・衝突」を未然に防ぐことができる。先端部には、安全ポールを取付けることにより視認性も良く、移動前に障害物の干渉を目視により確認することも可能なため、重機の衝突事故も未然に防ぐ事が可能となっている。

おわりに、本年度4月1日より時間外労働の上限が建設業においても適用され、限られた時間内で効率よく業務を進めることが求められている。柵とバリケードは簡単に設置ができ且つ、事故の抑制にも貢献できる商品として今後も展開を進めて行く。

6. デジタルツイン技術を活用した、 月面環境に適応する建設機械実現のための研究開発

コマツ 〇菊池 直彦
コマツ 杉村 俊輔
コマツ 宮井 慎一郎

1. 目的および背景

本プロジェクトは、「宇宙開発利用加速化戦略プログラム」(スターダストプログラム)の一環として、2021年7月に選定された「宇宙無人建設革新技術開発」(国交省主担当、文科省連携)の公募に応募し、選定を受けたことから始まった。

応募にあたり、地上の建設現場で喫緊の課題となっている人手不足と働き方改革への対応と生産性の向上や環境問題を解決するために実施している建設機械の電動化と自動化・自律化、建設現場のDX化の先に、月面での無人施工の実現があると考え、月面建設機械の研究開発を提案した(図1)。

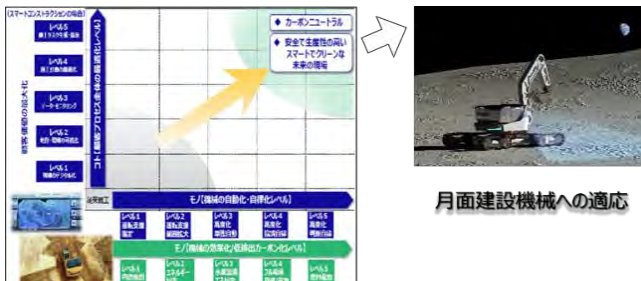


図1 未来の現場と月面建設機械

2. 掘削シミュレータ

月面建設機械の開発は地上の建機と異なり、現地での実機による試験や確認が困難なため、まずは高精度な「デジタルツイン技術」構築が必要と考えた。その可能性を検証するために、現場環境と建設機械をサイバー空間上に再現して掘削シミュレーションを実施した。本研究では、マルチボディダイナミクスと離散粒子シミュレーションの連成が可能であり、リアルタイムレベルでの高速計算が可能な市販の物理エンジンAGX Dynamics(以下、AGX)を用いて、建設機械と土のモデル化を行った。

2.1. 月面建機モデル

本研究では、月面で稼働することを想定して地上建機の3トンクラスのショベルをベースにモデル化した。作業機はブーム、アーム、バケットの3つのリンクを回転ジョイントで結合し、回転アクチュエータで駆動するモデルとした。本シミュレータでは、バケットの刃先位置と姿勢が目標に沿うように、各アクチュエータの回転角度や角速度を入力して作業機を動かした。

2.2. 月面の土モデル

本研究では、AGXの土モデルの中でもAGX Terrainモジュールを用いた。このモデルは、グリッド要素と粒子要素で構成される。グリッド要素は連続体として解くことで土の圧縮挙動を、粒子要素は個々の接触計算によって掘削時の土の不連続な挙動を表現する¹⁾。グリッド要素と粒子要素の境界は、バケット位置と土質力学に基づいて決定される。

月面環境を想定した土質パラメータは月面模擬土(FJS-1)を用いて検討した。ここでは、土を掘削する装置であるバケットへ作用する掘削抵抗力 F と、バケット周りの土挙動ならびに掘削土量について、シミュレータと実験を比較することで決定した。図2、3に土挙動、バケット掘削抵抗力について、シミュレータと掘削ベンチ試験の比較をそれぞれ示す。試験、シミュレータともに同条件で5回実施した結果の平均抵抗力として示す。掘削終了時(12秒)の F_z の値が掘削土量であり、シミュレータと試験で精度良く一致することが確認できた。掘削終了時までの掘削抵抗の変化、バケット周りの土挙動についても概ね再現できた。

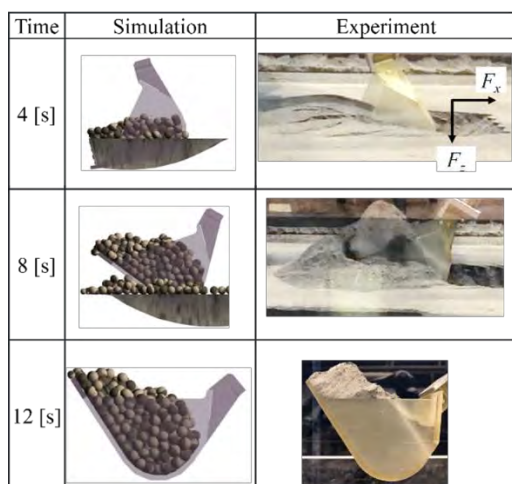


図 2 バケット周りの土挙動の比較

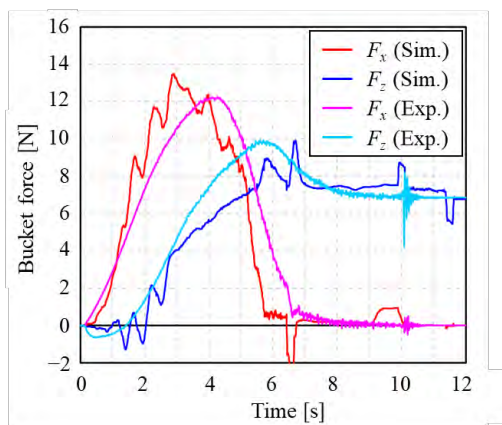


図 3 バケット掘削抵抗の比較

2.3. 月面建機モデルによる掘削シミュレーション

月面建機モデルと月面の土モデルで掘削シミュレーションを実施した(図 4)。車体と地面の接地面の長さを前方は+30%, 後方は+10%として, また作業機の動かし方の工夫を加えることで, 低重力下でも車体重量を大きくすることなく, 目標とする 1 杯 200kg 程度の掘削ができることを確認できた。また, 1 回の掘削に必要なエネルギー量は, 機械や電氣的なロスを考慮せずに, 約 8kJ であることが確認できた。

また, 月面建機を用いた施工を評価するための準備として施工シミュレータのフレームワークを作成した。施工シミュレータは, 目標土量や目標地形形状を施工指示として入力し, 複数の作業から構成される施工計画のもとで, 施工は順次実施され, 施工指示の履行を目指す。シミュレーション結果として, 各作業の作業

時間, 土量, エネルギー消費等を入力する。本フレームワークを活用し, 施工の評価を進め, 月面建機のより最適な形状や制御を探索する(図 5)。

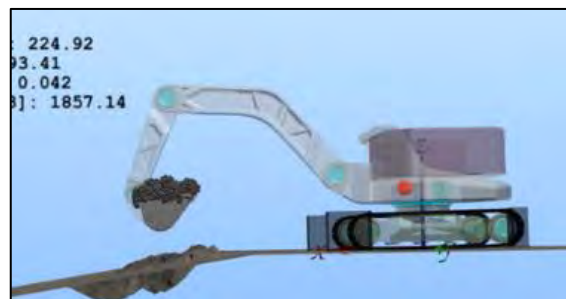


図 4 月面建機での掘削

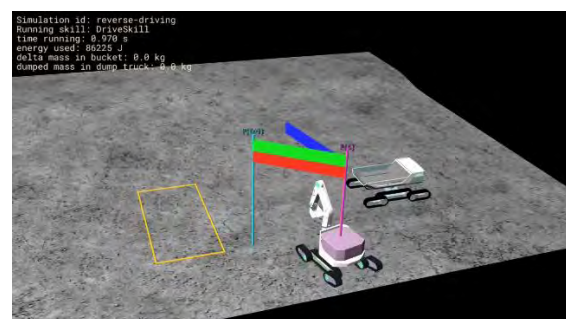


図 5 施工シミュレータの動作一例

3. 今後の計画

今後, 地上での施工の自動化の開発進捗を反映させることで月面建設機械の具体化を進め, 今後の月面建設計画に従い月面施工の実現性を検証していく。

謝辞

本研究開発は, 「宇宙開発利用加速化戦略プログラム・宇宙無人建設革新技术開発」の一環として, 国土交通省の委託を受けて実施したものである。ここに記し, 関係者に謝意を表する。

参考文献

- 1) M. Servin, T. Berglund and S. Nystedt: A multiscale model of terrain dynamics for real-time earthmoving simulation, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, Vol. 8, No. 11, pp. 1-35, 2021.

7. ICT 建機のための現況計測用カメラシステム

株式会社トプコン ○重田 将宏

株式会社トプコン 深谷 暢之

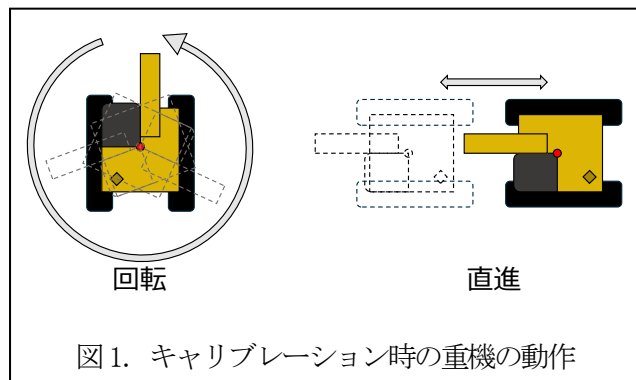
株式会社トプコン 楳山 誉

背景

当社製品の杭ナビショベルは、中小規模現場における ICT 施工に最適なマシンガイダンスのシステムであり、ワンマンで効率的に測量業務や施工業務を行うことが可能である。本発表では、重機の上にカメラを搭載し、杭ナビショベルを用いた作業と同時に出来形管理に使用可能な現況計測を行うシステムを提案する。本システムは、杭ナビショベルのアップグレード製品として導入しやすいような、取付け時の複雑なキャリブレーションが不要となるシステムを目指す。

提案手法

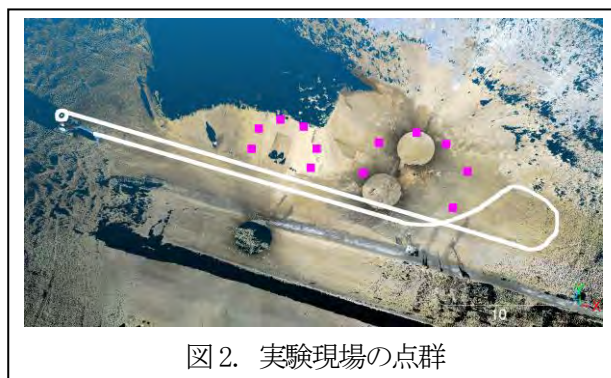
取付け時の複雑なキャリブレーションを行わない場合、画像とプリズム位置の取得時刻の同期が取れず、重機の上のカメラとプリズムの位置姿勢関係も不明という課題がある。それを解決するために簡易的なキャリブレーションを提案する。最初に図 1 のような回転・直進動作を行い、動作中に取得した画像を用いて SfM を行い、画像の位置姿勢と特徴点群を生成する。回転動作時に得た画像の位置とプリズム位置の関係から、画像取得時刻とプリズム位置取得時刻の時間ずれ量を計算する。また、直進動作時に得た画像の位置とプリズム位置の関係、及び回転動作から求めた時間ずれ量を用いて、スケール調整と座標系合わせを行う。



以上により求めた三次元情報を初期値として、プリズム位置情報を拘束条件としたバンドル調整を行い、カメラとプリズムの位置姿勢関係を推定できる。

実験・結果

提案手法の原理検証を行うために実験を行った。ミニショベルの上に PC と 4 台のカメラを設置して撮影しつつ、杭ナビショベル用に設置してあるプリズムの位置情報をトータルステーションで取得しながら走行した。実際の現場の点群と走行経路（白線）、検証点（紫点）の場所を図 2 に示す。画像は 1Hz、プリズムは 20Hz で取得した。4 台のカメラの撮影タイミングは電気信号による同期がとれており、合計で 696 枚の 1920×1200 の画像を撮影した。そのうち 48 枚が回転動作時、36 枚が直進動作時に得た画像である。提案手法を用いて計算し、高さ方向のみ手動で調整した結果、3 次元計測技術を用いた出来形管理要領の地上移動体搭載型レーザースキャナーによる出来形計測で定められた測定精度である±50mm 以内の精度を達成できた。



今後はリアルタイム化・高精度化、実際の掘削中にも使用できるような改良も行う予定である。また、撮影した画像に高さ方向の変化がなく手動で調整する必要があったため、自動で調整可能なキャリブレーションを検討する。

8. 発注・管理者の業務効率化とステイクホルダー満足度向上への大規模言語

モデルを用いた AI システム開発

立命館大学経営学部 ○善本哲夫

立命館大学総合科学技術振興機構 福原大祐

滋賀県庁土木交通部 西村智寛

背景

本発表は発注・管理者の業務効率化と地域ステイクホルダーの満足度向上の両立を達成する AI システムの概念実証を報告するものである。具体的には、大規模言語モデル(LLM)および深層学習を用い、発注・管理者側蓄積している課題等に対する解決策やノウハウ、知見を現役・次世代の発注・管理側人材へ承継する仕組みによって有効活用し、地域ステイクホルダーが抱える要望等に対するスムーズな対応の実現を目指す。

発注・管理者側では多くの業界同様に人手不足が深刻になり、一人あたりの業務工数負担が増加傾向にある。従来から現在まで、ステイクホルダーへの対応は属人的な経験に頼っている側面が強く、経験や知見に乏しい人材にとって大きな心身の負担になっている。

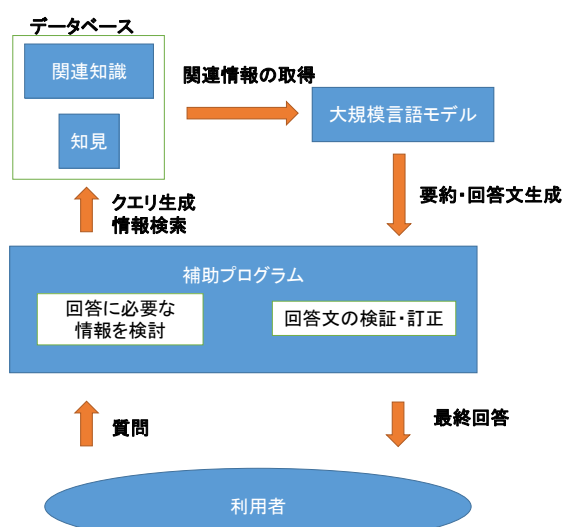


図1 AI システム処理フロー図

業務効率化による発注・管理者の心身の疲労軽減と適切な要望等対応はインフラ整備・維持・管理にとって重要な論点である。AI システムの実用化に向けて滋賀県庁土木交通部、滋賀県建設技術センター、立命館大学の3者で概念実証とプロトタイプ検証およびスーパーコンピュータによる深層学習をスタートさせた。

1. AI システム概要

本AI システムは、図1に示すように発注・管理者が電子ファイルや紙ベースで蓄積している過去の要望等の具体的対応や問題解決策、ノウハウを活用し、LLMと Retrieval-Augmented Generation (RAG) の技術を組み合わせることで、施工現場等にかかる地域ステイクホルダーからの要望等への効率的な対応と、その背景にある知識やノウハウ、論点の現役・次世代人材への承継の実現を目指す。RAG とは、LLM が外部のデータソースからリアルタイムで情報を検索し、それをもとに応答を生成する技術である。RAG を利用することで LLM 内部の知識に依存および制約されることなく、常に最新の情報を取り入れた応答を生成できるため、より豊かで多様な信頼性の高い対応が可能となる。本 AI システムは具体的には、以下の機能を有する。

1-1. 問題解決策の提案機能

要望等で対応を必要とする内容の発注・管理者の問い合わせに対して、AI が最適な解決策を提案し、リアルタイム応答を行う。これは、蓄積してきた知見やノウハウ、過去の解決策といった過去のデータや類似ケーススタディをベースに、具体的な行動案や改善策を

提案し、迅速な問題解決を支援する機能である。

また、繰り返し発生するFAQのような質問や、より複雑な問い合わせにもリアルタイムで対応可能なチャットボットを通じ、即時かつ的確な回答を提供する。これにより、ステイクホルダーとのコミュニケーションの効率化を図り、かつ経験やノウハウに裏付けられた内容を提供することができ、ステイクホルダーの満足度を向上させることが期待される。

1-2. 文書生成機能

LLM を用いて、発注・管理者がステイクホルダーとのコミュニケーションや対応に必要な文書（例えば、報告書や議事録など）を自動的に生成する。これにより、ドキュメント作成にかかる時間を削減し、正確かつ迅速な対話を可能にする。

また、管理者や発注者が多くのドキュメント確認作業を効率化することを目的に、LLM が自動的に要約を生成する。この機能は、長大なレポートや複雑な内容などを短時間で理解、評価するのに役立ち、意思決定のスピードを向上させるものである。

1-3. 知見共有機能

LLM と RAG を活用して、現役および次世代の発注・管理者が保有する知見やノウハウを自動的に分析・整理し、ナレッジデータベースとして集約する。このナレッジデータベースは、問題解決策の提案機能や文書生成機能で活用され、効率的な業務遂行と迅速な意思決定をサポートする。

この知見共有機能を基盤にすることで、LLM を通じたデータ活用がさらに強化され、一貫性を保ちながら、スムーズな問題解決と効率的な文書生成を実現する。

2. 圧縮経験環境構築の可能性

インフラにかかる地域ステイクホルダーからの要望等は多岐に渡る。また、数年に1度あるいかんいかといった低頻度の要望等は、その内容や具体的対応策などの承継が難しい。本システムは、これまで属人的であった知見やノウハウを誰もが共有することができるアシスタント機能とともに、発注・管理者による人材

育成ツールとして実装することを狙っている。言葉を変えれば、AI システムによって短時間での追体験といえる仮想の圧縮経験環境を作り出すことで、業務年数が短く、経験や知見に乏しい人材であっても、実体験での要望等対応に関する知識や業務を身につける手助けとなる可能性も考えられる。

先述の3つの機能1-3が検証を進めている機能であるが、これらを具体化するためにはLLMの学習が不可欠である。LLMは、一般的な言語パターンや幅広い知識の学習をもとに基礎的な質問には対応できるが、特定の専門領域で活用するには限界がある。そのため、インフラ整備・維持・管理業務に固有の専門用語や問題解決手法を学習させることによって、正確で一貫性のある内容を提供できるようになる。このように、業務に特化した学習プロセスは、建設業や発注・管理者業務固有の専門性に基づいた高度な応答を実現するために不可欠であり、本研究では滋賀県内土木事務所をはじめとする電子ファイル・紙ベースの情報、知識・知見を一元的に収集し、また、プロトタイプ利用者のフィードバックを通じてLLMの学習を進めている。

おわりに

要望等へのより正確で効果的な対応は、地域ステイクホルダーとの良好な関係性を考える上で極めて従業である。今後の展望として、利用者のフィードバックやスーパーコンピューター利用をもとにLLMを継続的に学習・改善させる、AIシステムの精度を向上させ、また、技術的には写真分析機能を導入し、報告書やプロジェクト文書に含まれる画像や写真から重要な情報を自動的に抽出・分析することで、データ活用の幅を広げ、より包括的な業務支援を実現する仕組みを展開する計画である。さらに、LLM活用によって大量のデータからレポートを自動生成し、分析結果を自然言語で要約する機能を強化させていく。AIシステム活用は、要望等対応への意思決定スピードやシステム全体のデータ活用効率による業務のパフォーマンス向上をもたらす、このことが地域ステイクホルダーの満足度向上に寄与すると筆者らは考えている。

9. 建設機械の遠隔運転シミュレータ

トンネル切羽ブレーカーはつり作業の遠隔運転をサイバー空間で練習する

西松建設（株）技術研究所 ○平野 享

西松建設（株）技術研究所 高原裕介

西松建設（株）技術研究所 辻岡高志

1. 開発目的

山岳トンネル切羽作業の安全と環境を抜本的に改善するには切羽の無人化が得策である。無人化を自律機械でカバーできない部分のつなぎは、建設機械の遠隔運転を充てることが有効と考えている。現在の遠隔運転の技術では、遠隔機械の操作応答にあと少しの遅延が残ること、二次元のモニター画面を頼りに運転することなどから、運転者は実搭乗と異なる特異な環境に置かれる。そこで、遠隔運転化にあたって運転者に遠隔運転の練習機会を十分与えるとともに、第三者に安全で失敗が許される練習フィールドの確保が課題となっていた。これを実地（フィジカル）空間で提供することは制約が多いため、代替に仮想（サイバー）空間で練習環境を提供できる本シミュレータを開発するに至った。

2. 本シミュレータの構成

本シミュレータは、プログラムで仮想空間に模擬現場と模擬機械を実装し、教習生に模擬機械を模擬運転席から操縦させて、模擬現場で起こる環境変化を体験学習してもらう。これはありきたりだが、模擬する環境を実搭乗でなく遠隔運転とし、それゆえ運転席も搭乗機の運転席ではなく、あえてモニター画面だけが目視できる遠隔運転席としていることが新しい（図1）。



図1 仮想再現された遠隔運転席からの視野

3. 遠隔運転シミュレータのリアリティ

フィジカル空間での遠隔運転の実状をみると、前述のような実搭乗のリアリティが欠損した環境にて、運転者は仕事をこなしている。作業精度や周囲への安全配慮が実搭乗に劣ることは否めないが、無人フィールドでの作業に限定するなど、運用面で補われている。

さて、これを仮想化する場合、模擬現場と模擬機械のリアリティ追求の面では、遠隔モニター画面の視認から判別できない情報は、シミュレータ実装で省略できると考える。実装コスト面でこれは有利である。

4. 遠隔運転シミュレータの機能

目的	モニター画面だけの目視、操作反応の遅延などの、実搭乗のリアリティが欠損した環境に慣れるための練習環境を提供
内容	①自由操作、②時間制限内に課題とする動作を完了できるかの試験
実装	シミュレータソフトを搭載する PC 1 台を、ゲームコントローラを介したサイバーの遠隔運転席に、又は、直接フィジカルの遠隔運転席に、どちらか接続する
付帯機能	①遠隔カメラ位置の変更 ②運転レコーダーとリプレイデモ

5. まとめ

山岳トンネルで遠隔運転が必要とされたので、遠隔運転の持つ特異性を踏まえて、十分な練習機会の提供ができる遠隔運転シミュレータを開発した。シミュレータ導入効果の評価について結論は得られていないが、観察では、本物の遠隔運転のベテランはシミュレータでも最初から上手であることが見られ、技能に共通性が窺える。したがって逆方向となる教習生の訓練効果は少なからずあるものと期待している。

10. 建設業向けA I 安全帯不使用者検知システム「KAKERU」

西尾レントオール株式会社 通信測機機材部 阪下 晃則

1. 背景

2023年に発生した国内建設業の労働災害は、墜落や転落によるものが最も多く、死亡者数は86人、死傷者数は4,554人に上っています。厚生労働省は、労働安全衛生法の改正を行い、2019年2月1日から、高所作業で使用する安全帯の規格はフルハーネス型を原則とし、名称を「墜落制止用器具」に改めるなど、安全基準を厳格化しました。こうした中、建設現場における墜落転落災害の撲滅に向けて、より効果的な安全対策を実現する事が求められています。

西尾レントオール株式会社(以下、西尾レントオール)では多数の安全対策商品の開発や広報誌「安全くん」の発刊など、従来より建設現場の安全対策に注力して参りました。より安全な現場環境の実現に向け、当システムをレンタルで活用いただくことで現場導入のハードルを下げ、現場の安全対策へ貢献することを目指す事に着手しました。

2. システム概要

西尾レントオールは株式会社 奥村組 (以下、奥村組) 及び株式会社 日立ソリューションズ (以下、日立ソリューションズ) と共同でハードウェアや通信確認等を行い、レンタル商品としての開発を行いました。

「KAKERU」の画像認識A I (人工知能) 技術は奥村組と日立ソリューションズが共同開発したものを活用しています。本技術は、鉄骨上作業等における墜落制止用器具 (安全帯) のフック不使用者を自動的に検知※1し、一定時間不使用の状態が続いた場合に通知を行います。奥村組の建設現場での検証において、鉄骨上作業におけるフック不使用者を90%以上の精度で認識できること※2を確認済み※3です。施工管理者は遠隔地から作業員の不安全行動を検知することができ

ます。また、不安全行動の映像はクラウド上に保管されるため、作業員への安全教育や事故の傾向分析など、墜落・転落事故の発生防止に活用することができます。

※1 特願2022-043541、特願2022-043542、特願2022-043434 (出願人 奥村組、日立ソリューションズ) 事前学習済のA Iモデルを活用し、建設現場 のカメラ映像から親綱支柱や親綱、フックを検出し、フックが親綱にかかっていない不使用状態を自動判定。

※2 カメラと対象の作業員の距離が15m以内、かつ人や物が重なっていないという条件下において検証。

※3 2022年4月21日リリース 墜落制止用器具フック不使用者を自動検知するA Iモデルを構築・検証。

<https://www.hitachi-solutions.co.jp/company/press/news/2022/0421.html>

■判定イメージ



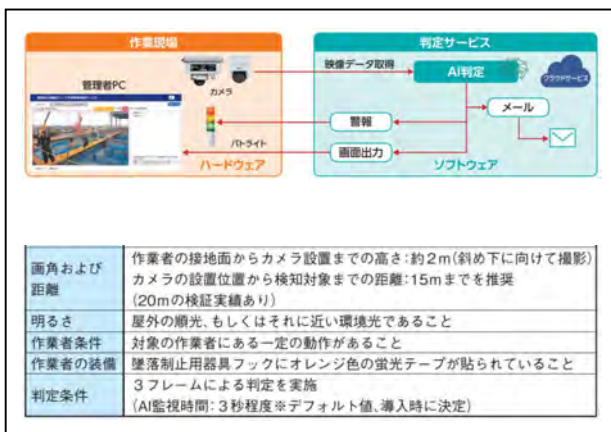
3. 導入により期待される効果

1) 画像認識A I技術の活用により、鉄骨上及び土留

め切梁作業等におけるフック不使用者を検知し、通知（または警報）を発することで、不安全行動を抑止し、事故軽減に貢献します。

- 2) 現場にいなくても、カメラ映像から作業員の不安全行動を検知するため、管理者の負荷を軽減します。
- 3) 不安全行動のデータを蓄積しておくことで、教育や傾向分析などにも活用が可能です。

■システム構成・仕様



4. 今後について

ソフト及びハードのバージョンアップを行う予定です。
その結果、より多くの工種や現場環境への対応を実現化し、安全性の向上を図っていきます。

11. オペレータトレーニングシステムの開発

株式会社 小松製作所 車両第一開発センタ ○三本 喬之
株式会社 小松製作所 車両第一開発センタ 浅井 康介
株式会社 小松製作所 試験センタ 平林 憲

1. 開発の背景

建設機械を操作するオペレータの高齢化に伴い、熟練したオペレータ不足が深刻化しており、新人オペレータの短期間での技能習熟が求められている。そのような中で新人オペレータが運転技能を学習できるツールを活用し、自立的に運転技能を習熟してゆくことが望まれる。そのツールの従来技術として燃費や掘削量の評価を提供するものはあるが、評価が悪かった場合、オペレータは具体的にどのように改善すればよいかわからないという課題があり、新人オペレータを短期間で技能習熟させることはできていない。

そこで、上記問題を解消する技術として、熟練オペレータの運転技術をデータ化して新人オペレータの問題点をデータから把握し改善を促す事で短期間での技術習熟を可能とするオペレータトレーニングシステムを開発し、新人オペレータの技能習熟効果の確認を行った。

2. オペレータトレーニングシステムについて

建設機械、特にホイールローダなどの作業機を有する機械の場合、掘削や積込など作業の種類によって最適なアクセル操作が異なる。燃費を良くしたいというニーズに対し、アクセルをあまり踏まなければ燃費は良くなる一方で作業時間は長くなり掘削量も少なくなるので作業効率が悪化してしまうという問題がある。

そこで本システムはホイールローダのVシェイプローディングを対象とし、一連作業を工程毎に分解して推奨オペレーションとの技能の違いを評価し、燃費及び作業効率の視点から、どの工程に問題があり、どのようにすれば改善できるのかをメッセージで提供する。

2-1. システム構成

本システムの構成を図1に示す。車両制御装置と表

示器が車両ネットワーク(CAN)で接続されており、逐次車両から取得したデータをもとに表示器にて計算して結果を表示する。

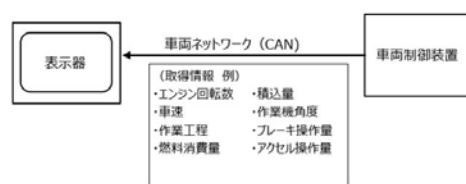


図1 システム構成

2-2. システム概要

本システムは、あらかじめ取得しておいた熟練オペレータの運転パターンを教師データとする。燃費[L/h]および作業効率[ton/L]をVシェイプローディングの作業工程(空荷前進、掘削、積荷後進、アプローチ、排土、空荷後進)ごとに計算し、教師データに対するオペレータの運転データの達成率をレーダチャートで表示する。教師データに対し未達になっている作業工程のアイコンを押すと、リコメンドメッセージを表示して改善方法を提供し、教師データ相当に到達した作業工程のアイコンを押すと賞賛メッセージを表示してモチベーションUPを図る。

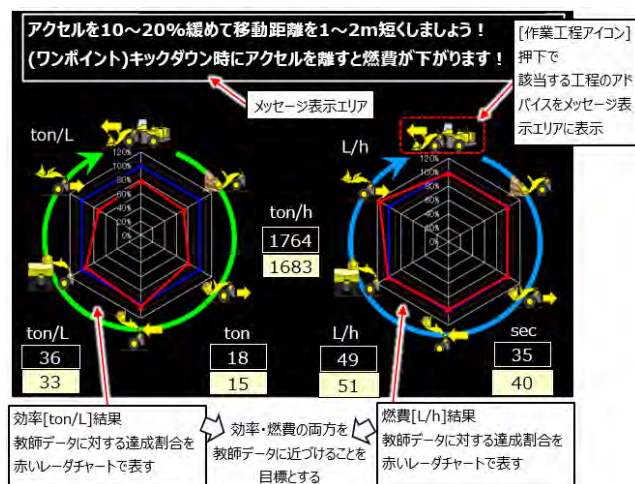


図2 トレーニング画面表示

オペレータトレーニングシステムでは、オペレータの運転データの各評価項目（エンジン回転数、アクセル開度、移動距離、所要時間、ブレーキ時間、積込量、燃料消費量）が、教師データの評価項目からどれほど外れているかでその評価項目の良し悪しを判定する。あらかじめ16回分の教師運転データを取得し、Vシェイプローディングの作業工程別に分類する。次に図3に示すように異なる2つの評価項目間における相関を計算する。

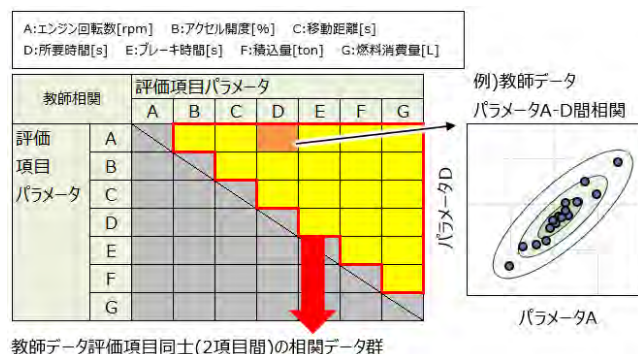


図3 教師データ相関計算

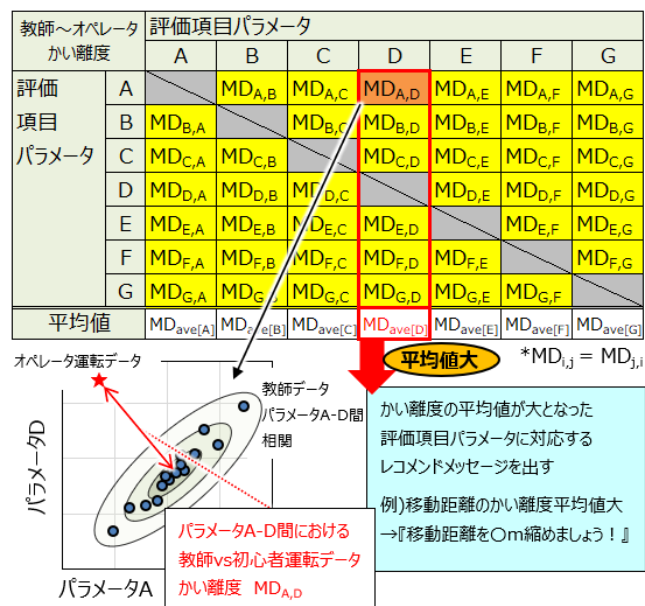


図4 オペレータ運転データ評価

オペレータ運転データの評価方法を図4に示す。作業工程ごとに各評価項目のオペレータ運転データと教師データの「かい離度」を計算し、各評価項目ごとに平均値を算出する。平均値が一定値以上の評価項目を教師データから外れた主要因(改善指摘の対象)と判定し、対応したリコメンドメッセージを表示させる。

3. トレーニング効果の確認

当社試験センタの初～中級者オペレータ(運転経験1～6年)4名を対象に、本システムを用いたトレーニング効果の確認を行った。結果を図5に示す。

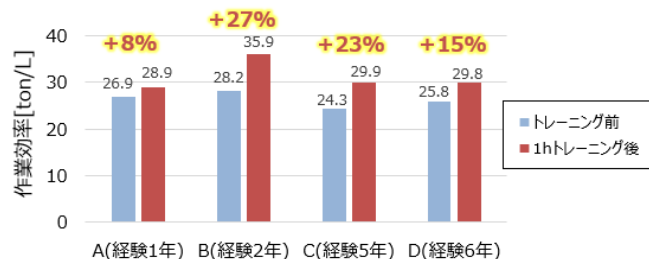


図5 トレーニング効果確認結果

本ツールのガイダンスに従って1時間程度運転を繰り返したところ、いずれのオペレータも作業効率(ton/L)の改善が見られ、最大で27%改善したことが確認できた。またオペレータの使用感に対するヒヤリング結果を下記に示すが概ね高評価を得た。

<オペレータからのヒヤリング結果>

- ・「今の動き」が「今わかる」のは良い。
- ・結果を見せるのみではなく、具体的にどうすればよくなるかを提示してくれるので良い。
- ・スコアを良くしたいというモチベーションになり、ゲーム感覚で楽しめる。
- ・高評価ではめてくれるのは嬉しい。

初心者オペレータは、自分の運転の何が悪かったのかにそもそも気づいていない場合があり、本システムにより運転を行った直後にオペレーションの問題点を指摘することで、修正すべき点が明確になり、改善につながったと考えられる。以上の結果より、オペレータトレーニングシステムが初心者オペレータの短時間での技能習熟に有効であることが確認された。

4. 今後の展望

対象となる機種種の拡張等も踏まえ、本システムの商品化に向けての開発を進めてゆく。またVシェイプローディング作業以外にも適用できるように更なる改善を進めていく。

令和 6 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 6 年 11 月 27 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