

令和元年度

建設施工と建設機械シンポジウム
論文集・梗概集

令和元年 12 月 2 日～12 月 3 日

東京都港区・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	機関名・会社名	所属
委員長 建山 和由	立命館大学 理工学部	教授
副委員長 高橋 弘	東北大学 大学院環境科学科	教授
委員 阿部 里視	コマツ 商品企画本部	商品企画室
委員 岩崎 辰志	国土交通省 関東地方整備局	企画部 施工管理課
委員 北山 孝	西尾レントオール（株）	通信測機営業部
委員 木下 洋一	鹿島道路（株）	生産技術本部機械部
委員 玉石 修介	（一社）日本機械土工協会	
委員 藤内 隆	清水建設（株）	土木技術本部 開発機械部
委員 行川 恒弘	前田道路（株）	工事事業本部 工事技術部
委員 新田 恭士	（国研）土木研究所	技術推進本部 先端技術チーム
委員 東谷 和巳	コバルコ建機（株）	技術開発本部 クレーン開発部
委員 藤島 一雄	日立建機（株）	事業戦略室 商品戦略部
委員 本田 肇	（株）トプコン	スマートインフラ事業本部 スマートインフラ営業サポート部
委員 山下 尚	国土交通省 総合政策局	公共事業企画調整課
委員 山本 茂太	キャタピラージャパン(同)	販売促進部
委員 渡部 純	（株）カナモト	レンタル事業部 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	
委員 西脇 徹郎	（一社）日本建設機械施工協会	

「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. 空輸対応型バックホウの分離・組立作業に関する改善検討について 1
国交省 四国地整 四国技術事務所 ○佐々木 力、大林 智仁
2. 無排土掘削機を用いた宅地地盤の液状化対策工法に関する基礎的研究 5
金沢大学 ○宮島 昌克、芹川 由布子
福井高専 吉田 雅穂
3. ハイブリッド・サイフォン排水装置 燃料消費を大幅に軽減し、高揚程を達成！ 11
(株)山辰組 ○馬淵 剛、馬淵 和三
4. 平成30年7月豪雨災害における災害対策用機械等による復旧活動 17
国交省 中国地整 ○岸本 孝文
5. 阿蘇大橋地区斜面对策工事にて実施した斜面对策工に特化した「のり面CIM」 21
(株)熊谷組 ○石濱 茂崇
国交省 九州地整 熊本復興事務所 江口 秀典、山上 直人
6. 無人化施工におけるモニタ画像の向上について 25
国交省 関東地整 関東技術事務所 ○稲垣 義明、加藤 浩志、宮野 博匡
7. 自然災害現場の復旧にあたる遠隔操作式建設機械の操縦性向上に関する研究 31
東京高専 ○瀧島 和則、松林 勝志、山本 晃弘
(株)熊谷組 飛鳥馬 翼、古川 敦、北原 成郎
8. 拡張現実技術を利用した多目的施工支援装置の実用化 35
汎用重機に取付可能な作業位置ガイダンスシステム
(株)不動テトラ ○今給黎 健一、鈴木 亮彦、廣畑 憲史
9. 土の締固め施工における非破壊連続計測 転輪型 RI 密度水分計の利用 37
大成建設(株) ○後藤 洸一
ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 池永 太一
大成ロテック(株) 越村 聡介
10. 中層混合処理工法における ICT 活用による施工管理の簡素化 39
WILL 工法協会 ○市坪 天士、島野 嵐、岡本 郁也
11. 室内実験における TBM センターカッタービットの配置間隔に関する基礎的研究 43
呉高専 ○河相 拓真、重松 尚久
(株)スターロイ 小田 登
12. 新幹線トンネルにおけるベルトコンベア方式採用
～「連続ベルトコンベアシステム」の開発～ 47
(株)フジタ ○石坂 仁、井上 正広、浅沼 廉樹
13. トンネルにおける施工の合理化、生産性向上の取り組み～ロックボルト打設装置の開発、
ツインアーチフォームセントルと連続ベルトコンベアの組合せ～ 53
鹿島建設(株) ○田村 広行、山岸 隆史、小林 真悟
14. ICT 工事 3次元データビューワの開発 電子成果品の利活用に向けて 59
国交省 国土技術政策総合研究所 ○佐々木 陽、森川 博邦

15. ICT 活用工事における電子納品の課題と改善の検討	6 3
国交省 国土技術政策総合研究所 ○天野 克己、森川 博邦	
16. 近畿地方整備局における「i-Construction (ICT 施工)」講習会の開催と そのフォローアップについて～i-Construction の更なる普及に向けて～	6 9
国交省 近畿地整 ○武本 昌仁	
17. ICT バックホウの施工履歴データによる出来形管理の実用有効性の検証	7 3
(株)トプコン ○高本 悠介、中村 圭佑 福井コンピュータ(株) 平 浩之	
18. ICT バックホウ施工履歴データを用いた河床掘削における出来形管理規格値の検討	7 7
国交省 国土技術政策総合研究所 ○西村 峰鷹、森川 博邦、大槻 崇	
19. 路面切削機での GNSS を用いたマシンガイダンス活用事例について	8 1
前田道路(株) ○宮内 賢徳、宇田川 健治、砂原 良太郎	
20. 重機搭載レーザー計測システムの開発～出来形計測を省人化～	8 5
(株)フジタ ○上原 広行 ジオサーフ CS (株) 浮田 真樹	
21. 舗装検測作業の省力化に向けたデジカメ測量技術の開発	8 9
(株)NIPPO ○其田 直樹、相田 尚、梶原 寛	
22. セグメント搬送用大型天井クレーンの自動化と運用実績 東京外かく環状道路本線トンネル(南行) 東名北工事報告	9 3
東京外かく環状道路本線トンネル(南行) 東名北 JV 工事(事) ○西崎 康、高橋 公城、 福井 崇史	
23. 切盛土の日々の出来形管理に簡易 UAV 測量を適用～測量、解析時間を 1/3 に短縮～	9 9
(株)フジタ ○松岡 祐仁、野末 晃、上原 広行	
24. 各種 UAV 測量機器による出来形の測量精度の比較検証について	1 0 3
(株)熊谷組 ○神崎 恵三	
25. 3次元測量技術を活用した土の締固め管理手法の提案	1 0 9
立命館大学 ○小林 泰三 国土防災技術(株) 土佐 信一 ジオサーフ(株) 西川 祐矢 ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 池永 太一	
26. MC グレーダ施工におけるスリップ防止装置の適用効果について	1 1 3
大成ロテック(株) ○高山 拓也、武岡 真一、田中 純	
27. 建設機械から排出される温室効果ガス削減の取り組み	1 1 9
国交省 総合政策局 公共事業企画調整課 ○東山 遼、北川 順	
28. 一次除雪機械の作業ガイダンス装置・マシンコントロールの検討	1 2 3
国交省 北陸地整 北陸技術事務所 ○山田 拓、橋本 隆志	
29. ラウンドアバウトにおける除雪を考慮した エプロン端部形状の一般車両乗り上げ抑制効果	1 2 9
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○久慈 直之、山口 洋士、飯田 美喜	
30. 一人乗り除雪グレーダの安全性向上の検討～近接車両検知システムの開発～	1 3 3
国交省 東北地整 東北技術事務所 ○田村 直樹、宇野 賢一	
31. 生産性および安全性の向上に向けた生体情報モニタリングシステムの開発	1 3 7
立命館大学 ○橋口 伸樹、児玉 耕太、塩澤 成弘、小林 泰三 (株)熊谷組 黒石 真一、久保田 泰史、宮崎 康弘、北原 成郎	
32. 自走中の荷振れに対するドラグ・ショベルの動的安定性	1 4 3
(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	

33. 高層建築解体へ自動昇降足場の適用 FCF 工法～安全・省力化への挑戦～	……………	147
(株)フジタ ○大谷 愛斗、三村 洋一、松尾 宗義		
34. 転圧ローラのブレーキアシストシステム開発		
ステレオカメラを用いた転圧ローラのブレーキ補助システム		
	……………	153
鹿島道路(株) ○野田 哲也、新満 伊織		
35. 安全性と施工性を両立させた緊急ブレーキ装置搭載タイヤローラの開発	……………	157
酒井重工業(株) ○遠藤 涼平、森岡 則雄、櫛田 成基		
36. 土木機械設備の状態監視保全に対する取組について	……………	159
国交省 総合政策局 公共事業企画調整課 ○小林 大輔、田村 匡弘、泰松 宏平		
37. 除雪機械の重大故障に関する分析	……………	163
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○伊藤 義和、植野 英睦、斉藤 勉		
38. 天井用車載型乾式研掃装置の自動化運転による地下鉄補修工事への適用について	……………	167
(株)奥村組 ○丸山 八大、津村 匡洋、石井 敏之		
39. 点検支援技術の定期点検への活用に向けて	……………	173
国交省 総合政策局 公共事業企画調整課 ○松村 潤、渡邊 賢一		
40. 橋梁点検画像の3次元管理に関する考察	……………	177
(国研) 土木研究所 ○下川 光治、新田 恭士、二宮 健		
国交省 関東地整 関東技術事務所 田中 洋一		
41. 次世代社会インフラ用ロボット導入に係る		
定期点検業務における変状等の自動抽出に向けた検討について		
	……………	183
国交省 総合政策局 公共事業企画調整課 ○川口 貴大、渡邊 賢一		

II 梗概集

II-1 ポスターセッション要旨

1. 簡易遠隔操縦装置（ロボ QS）の高度化について
～バックホウ用アタッチメントの操作機能追加～
国交省 九州地整 九州技術事務所 ○深町 真吾、原 堅次 187
2. 排水ポンプ車状態監視システム（DS システム）の開発
～遠隔監視による安全で効率的な排水作業の継続～
国交省 中部地整 中部技術事務所 ○渡邊 修明、鶴田 勇、大坪 晋作 189
3. ハイブリッド・サイフォン排水装置 燃料費を大幅に軽減し、高揚程を達成！ 191
(株)山辰組 ○馬淵 剛、馬淵 和三
4. カメラの視点数が映像の定量化の精度に及ぼす影響 193
立命館大学 ○藤井 翔太、横山 隆明、田坂 勇人、建山 和由
5. 施工状況のみ（見、観、看、診、視）える化を図る諸機能 195
(株)キック ○才原 勝敏、西垣 重臣
6. 生産性を向上する屋内における建設機械の位置管理、予約管理
ビーコン位置情報技術+ iPad 用アプリ 位置+プラス 197
(株)レンタルのニッケン ○湯島 一郎
7. ICT 地盤改良工の見える化を強力にサポート「中層地盤改良ガイダンスシステム」
一部改良管理計器との連動も可能にし、帳票出力もスムーズに 199
西尾レントオール(株) ○山口 秀樹
8. 20 年で 1/10 以下に減った建設機械の NO_x の測定結果 201
(国研) 土木研究所 ○吉永 宏志、新田 恭士
9. 低価格（10 万円未満）の赤外線カメラによる
熱中症・火傷・火災の危険と熱資源（100℃未満）の可視化 203
(国研) 土木研究所 ○吉永 宏志
10. 画像認識技術と人工知能を応用した建設機械自動停止装置の開発 205
(株)カナモト ○吉田 道信、角 和樹、植木 良

I 論文集

1. 空輸対応型バックホウの分解・組立作業に関する 改善検討について

国土交通省四国地方整備局四国技術事務所 ○佐々木 力
大林 智仁

1. はじめに

四国技術事務所で保有している分解組立型バックホウは、大規模災害発生時に道路が寸断された現場で使用出来るよう、ヘリコプタ等にて空輸が可能なサイズ、重量まで分解可能としたものである。

いつ発生するか判らない災害に備え、常に出勤が可能な状態を維持するため、数年に1度を目安に、分解・組立訓練を行い、機能及び分解・組立手順を確認することとしている。

今回、平成30年2月から3月にかけて機能確認を実施し、分解・組立作業が問題なく実施できる事を確認した。併せて実働に向けた改善・改良項目を抽出し、出勤時に必要な「災害時の空輸対応マニュアル(案)」等を改訂したので報告する。

2. 機械概要

四国技術事務所で保有する「分解組立型バックホウ」及び、当該機械の分解組立に必要な「ミニクローラクレーン」の仕様は以下のとおり。

分解組立型バックホウ

メーカー名	キャタピラージャパン株式会社
メーカー型式	320DL2
規格	分解組立型 遠隔操縦式 1.0m ³ 級
輸送時寸法(長×幅×高)	9520mm×2980mm×3030mm
機械質量	22.40t



写真-1 分解組立型バックホウ

ミニクローラクレーン

メーカー名	古河ユニック株式会社
メーカー型式	URW375C2
規格	自立分解仕様 2.93t吊×2.5m 分解仕様 2.93t吊×2.5m
輸送時寸法(長×幅×高)	4250mm×1300mm×1720mm
機械質量	3.82t



写真-2 ミニクローラクレーン

3. 分解・組立作業概要

場所、日程等は以下で実施した。

作業期間：平成30年2月23日～3月8日

分解場所：四国機器株式会社工場
(香川県高松市新田町)

組立場所：四国技術事務所
(香川県高松市牟礼町)



写真-3 分解状況(工場)



写真-4 組立状況（現場）

4. 「災害時の空輸対応マニュアル（案）」

災害時の出動に備え、災害時の空輸対応マニュアル（案）（以下「マニュアル」という。）及び分割・組立て要領書（以下「要領書」という。）を作成している。

マニュアルは平成 23 年度に作成し、平成 25 年度に実施した分解・組立作業の結果をフィードバックして一度改訂を行っている。

今回の訓練結果より、現場でスムーズな分解・組立作業が行えるよう現状のマニュアルへ内容の補足、加筆などを行う。

5. 作業手順

分解・組立の作業手順について概要を以下に示す。

- (1) 重機（分解組立型バックホウ・ミニクローラクレーン）の工場への運搬（分解前）



- (2) 工場での分解作業



- (3) 技術事務所への運搬（分解後）



- (4) 技術事務所での組立作業（ミニクローラクレーン）



- (5) 技術事務所での組立作業（分解組立型バックホウ）



6. 改訂箇所

今回の分解・組立作業により、マニュアル及び要領書において見直しを行った箇所は以下のとおりである。

- (1) 組立スペースについて

従来マニュアルでは、組立に必要なスペースとして 25m×25m 程度が望ましいとしている。ただし、20m×25m 程度のスペースにおいても、ミニクローラクレーンを先行して組立てる事で作業は可能と記述しているが、実証ができていなかった。

そこで今回の訓練では、実際にミニクローラクレーンを先行して組立てる事で、20m×25m 程度のスペースでもバックホウの組立作業が可能であることを確認し、その旨をマニュアルに追記した。



写真-5 組立スペースと配置図（訓練状況）

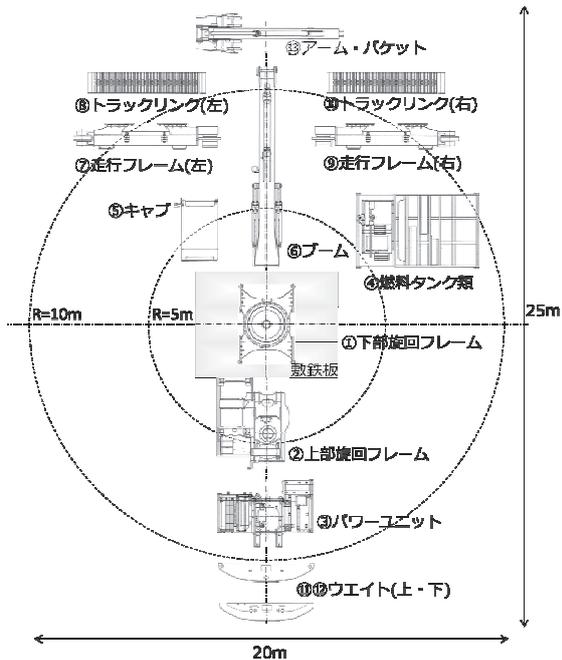


図-1 組立スペースと配置図

(2) キャビン&フロアの養生について

今回の訓練以前の平成29年11月に、高知県にて自衛隊のヘリコプタによる吊り上げ訓練を実施した。

その際、分解したバケットをヘリコプタにて実際に吊り上げたところ、ホバリング直下は砂塵が無い、吊り荷にとっては過酷な環境であることが確認された。

そのため、今回の訓練では、風圧によりドアが誤って開かないように、またキャビン&フロア部分の前面ガラス、ドアガラスの破損防止のため、周囲の養生を行った。また、断線や散逸防止のためキャビン&フロア下部にあるハーネス類の固定も行った。

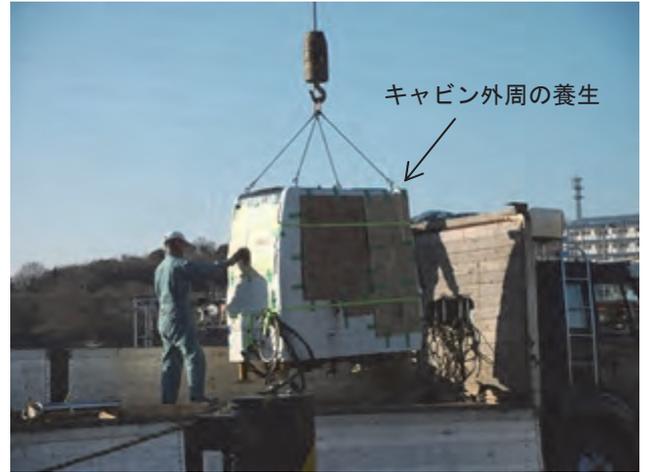


写真-6 キャビン&フロアの養生状況

(3) 搬送トラックの台数について

工場にて分解したバックホウを、空輸ポイントまで運搬するのに必要なトラックの台数を再検証した。

ミニクローラクレーンの分解方法を、空輸運搬に必要な最小限の分解に見直し、荷姿を見直した結果、13分割の場合でトラック(10t積)台数6台必要としていたが、5台で可能となり、実際の輸送においても問題ない事を確認した。

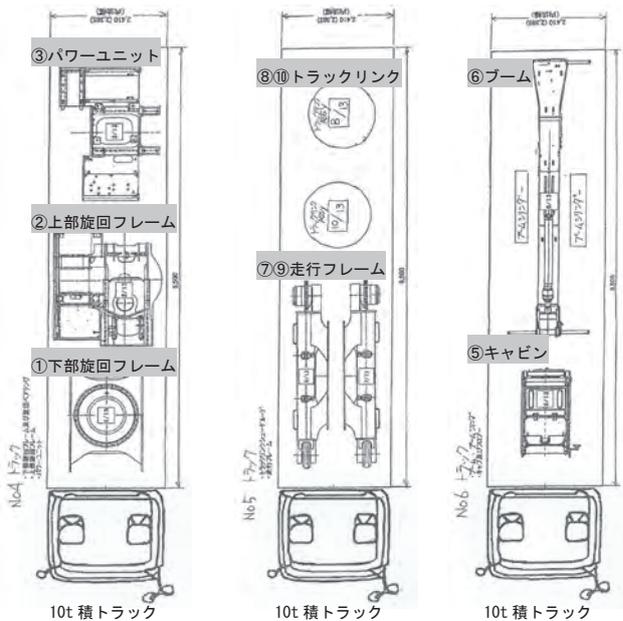


図-2-1 トラックによる運搬時の荷姿 1/2

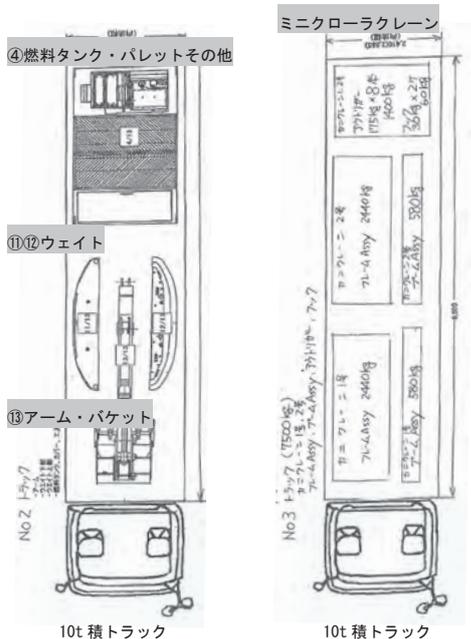


図-2-2 トラックによる運搬時の荷姿 2/2

(4) その他留意点について
 その他個別作業毎の留意点などについて確認、補足した。以下にその一部を示す。

i) ブームのシリンダ2本については、ブームと一体で空輸することも可能としていたが、吊り降ろしの衝撃等により破損する恐れがあるため、あらかじめ外すようにマニュアルを修正した。

従前：ブームと一体で運搬



今回：ブームから取り外した



写真-7 ブームシリンダを取り外した状態

ii) パワーユニットの組立時には重心が機械後方に移動するため、サポートスタンドやジャッキを使用するなど、具体的な転倒防止の方法を追記した。

iii) トラックリンクの運搬形状について、以前は伸ばした状態であったものを丸くまとめることで、荷台スペースの節約及び空輸時の安定性向上を図った。



写真-8 サポートスタンドによる転倒防止(左)
 トラックリンクの運搬形状(右)

iv) 分解及び組立時間について、工程の目安をマニュアルに記載している。

前回の工程は、平成25年度に実施した分解・組立作業をもとに作成していたが、今回の修正案などを含めた作業内容で実施した工程に見直した。

	従前	今回
分解作業：	約17時間	→約18時間
組立作業：	約22時間	→約20時間
	(※休憩等を除いた連続時間)	

7. まとめ

分解組立型バックホウは実出動がそれほど多い機械ではないため、いざ出動となった際に慌てないためにも、マニュアル及び要領書等の整備拡充は重要である。

工場の生産現場の作業効率や安全性の確保を見直す活動で「カイゼン」という言葉がある。現場の作業者が中心となって作業の効率化等を目指す手法であり、分解組立型バックホウのように出動機会が限られるものについては1回1回の作業毎に「カイゼン」を実施していくことが大切である。

今回の作業結果より、マニュアル及び要領書がより現実に即したものに改訂され、有事の際には速やかな出動態勢が取れるものと考えている。

また、今回のような分解・組立作業を定期的実施していく事に加えて、マニュアル等を継続してメンテナンスしていくことも必要である。

今年度も機器の状態確認を兼ねた分解・組立作業を実施予定であるが、過去実施している13分割だけでなく、大型ヘリコプタでの空輸が出来た場合を想定した7分割での作業も確認することで、様々な条件下での災害対応が行えるように備える予定である。

(謝辞) 今回の検討にあたりご協力いただきました関係各位には、この場をお借りして心より御礼申し上げます。

2. 無排土掘削機を用いた宅地地盤の液状化対策工法に関する基礎的研究

金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 ○ 宮島 昌克
福井工業高等専門学校環境都市工学科 吉田 雅穂
金沢大学大学院環境デザイン学専攻 芹川由布子

1. はじめに

2011年東日本大震災においては関東地域の埋立地盤で広範囲に大規模な液状化が発生し、住宅の沈下、傾斜などの深刻な被害が多数発生した。地中連続壁や地下水位低下工法など、広範囲にわたる液状化対策が地震後実施されたが、個別の住宅に対する安価で簡易な地盤への液状化対策は皆無といってよい状況にあり、来るべき巨大地震に対して開発が急務である。

近年、圧縮翼をもつ特殊スクリーにより掘削土砂を孔壁に押し込め、孔壁を自立させる、無振動・低騒音・無粉塵の小型の杭孔掘削機が実績を上げている。不連続オーガスクリーにより土砂を孔壁に押し付け地上に排出する土砂を抑えとともに、孔壁を強固な状態に改良しながら杭孔を造成していく工法であるので残土処理の必要がない。本研究では、この杭孔掘削機が小型で無振動、低騒音であることに着目し、液状化を引き起こすゆるぎの砂地盤の相対密度増加効果による液状化対策に用いることを検討するものである。

2. 無排土掘削機の概要

本研究で検討する無排土掘削機は、図-1¹⁾に示す圧縮翼付き不連続オーガスクリーを用いて地上に排出する土砂をわずかに押さえ、孔壁を強固な状態に改良しながら削孔を行うものである。従来のオーガスクリーは、シャフトの全長にわたって螺旋翼を設けているため回転削孔時に土砂は螺旋翼に沿って地上に排出される。そのため孔壁はゆるんだ状態のままである。本掘削機では、掘削時にオーガヘッドにより乱された土砂は螺旋翼によって上昇するものの、螺旋翼が不連続となるため土砂は上昇しきれずに圧縮翼で孔壁に押しつけられていく。圧縮翼と螺旋翼との間に入り込んで上昇し続ける一部の土砂も攪拌翼により乱され、次に控える圧縮翼により孔壁に押しつけられていく。更に、削孔時にオーガの正回転、逆回転、上げ下ろしを随時行うことにより、ゆるめられた土砂のほとんどが孔壁に押しつけられることとなる。

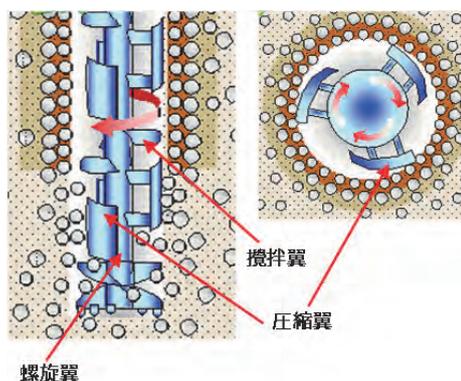


図-1 不連続オーガスクリー¹⁾

空洞を拡張するという事は間隙の少ない地盤を形成するという事になる。その結果、空洞周辺の地盤の摩擦抵抗は改善され、従来工法に比べ杭の支持力は大きく向上することが期待される。従来工法では削孔により地上に排出される土が、本工法では孔壁に押しつけられるため、残土処理が大きく軽減されることが期待される。

本研究は、これまで杭孔の掘削に用いられてきた本機械を宅地における液状化対策として活用することを目的としており、その有用性の確認のため実機を用いた現場試験と相対密度の増加効果を検証するための理論式の構築、理論式の妥当性を確認するための模型実験を行う。

3. 実機を用いた現場実験

3.1 現場実験の概要

新潟県北蒲原郡聖籠町において、不連続オーガスクリー貫入による周辺地盤の改良効果について検討を行う。特に、液状化しやすい軟弱な砂地盤で孔壁が自立するか否かに注目した。実験を行う現場から約200m離れた位置でのボーリングデータは図-2に示すとおりである。地盤は細砂・粗砂で構成されており、地下水位は4.0m前後である。

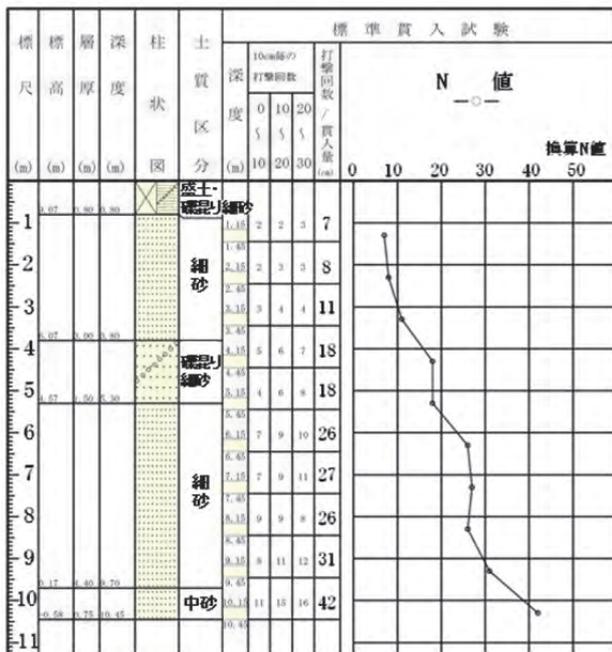


図-2 ボーリング柱状図

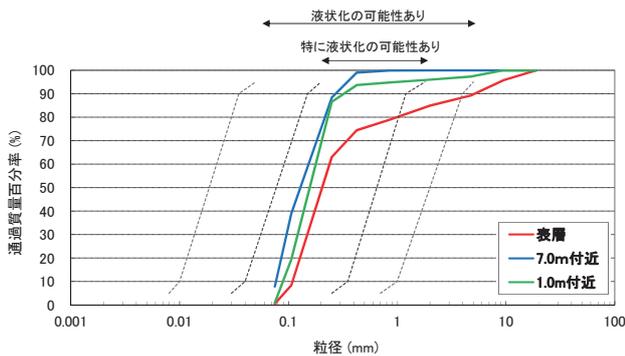


図-3 採取試料の粒径加積曲線

調査地点の表層、深さ約 1m、約 7m 付近の土を採取し粒径加積曲線を描いた(図-3)。表層付近では玉石や礫が混じっていたが、約 1m 掘削すると、粒径の揃った細砂が堆積していることがわかった。1m、7m 地点は、ともに均等係数が小さく、特に液状化しやすい地盤であることが明らかとなった。

写真-1 に不連続オーガスクリーの施工機を示す。オーガスクリーの全長は 5.0m であり、直径が 55cm (中心直径は 26.7cm) である。不連続オーガスクリー貫入による周辺地盤の相対密度の増加効果を確認するために、スウェーデンサンディング試験 (以下、SWS 試験とする) を施工前後で行い、得られた結果より換算 N 値を求める。測定は、掘削後の孔壁から 50cm、75cm、100cm の地点で行った。測定時に孔壁が崩れることを避けるため、SWS 試験はオーガスクリーを貫入させた状態で行った (写真-2)。削孔による周辺地盤の締めめ効果の評価するために、SWS 試験結果より稲田によ



写真-1 現場実験施工機

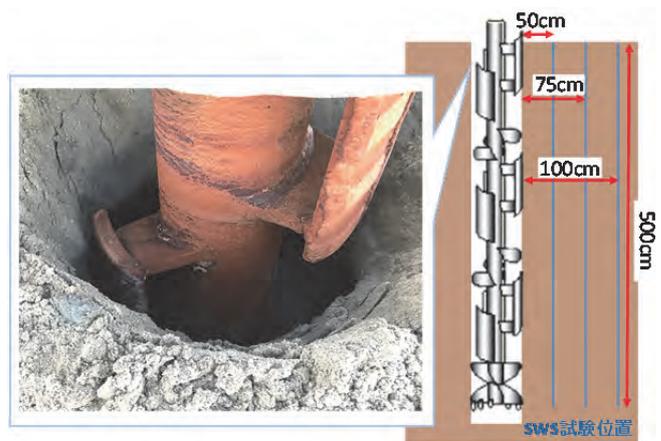


写真-2 オーガスクリー削孔と SWS 試験位置

って提案される以下の式²⁾を用いて削孔前後の換算 N 値を求める

$$\text{砂質土, 砂礫土 } N = 0.002W_{sw} + 0.067N_{sw} \quad (1)$$

$$\text{粘性土 } N = 0.003W_{sw} + 0.050N_{sw} \quad (2)$$

ここで、 W_{sw} は载荷荷重 (N)、 N_{sw} は SWS 試験における 1.0m あたりの半回転数 (回) である。これらの結果をもとに、相対密度増加効果を検討する。

3.2 現場実験結果および考察

SWS 試験の結果より算出した換算 N 値を図-4 に示す。この図に示す掘削前の換算 N 値は、掘削地点で SWS 試験を行い得られた値である。掘削前後の換算 N 値を比較すると、深さ約 3m 程度の地盤では換算 N 値が減少していることがわかる。削孔位置に近い孔壁から 50cm 地点での換算 N 値が最も減少していることから、表層地盤の孔壁付近ではオーガスクリー貫入時の攪拌により地盤が乱され、換算 N 値が減少したと考えられる。深さ約 4m では、50cm と 75cm 地点での換算 N 値が増加しているこ

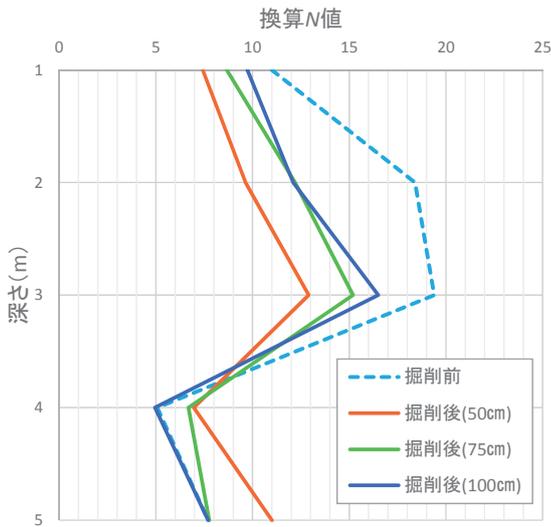


図-4 掘削前後の N 値の変化

とがわかる。深さ約 5m では 50cm 地点での換算 N 値が大きく増加しており、空洞拡張による地盤の密度増加効果が得られたと考えられる。また、写真-2 に示すように、掘削時に孔壁が崩れることなく自立することが確かめられた。

4. 1/5 スケール模型を用いた室内試験

4.1 室内試験の概要

実機試験を数多く行うことは時間、費用の面から不可能であるので、1/5 スケールの不連続オーガスクリーperを作成し、室内模型実験を行い、この実験結果と 5 章で述べる理論値との比較を行い、理論式を用いて詳細な検討を行うことを考えた。室内模型実験で用いる掘削機と土槽を写真-3 に示す。不連続オーガスクリーperは直径 150mm (中心直径は 75mm) である。底部に排水バルブを有した内径 1418mm、高さ 1200mm の鉄製土槽に、液状化の実験でよく使われる珪砂 7 号を用いて地盤を作成し、不連続オーガスクリーperで掘削をする。実機試験においては地表面付近の地盤が乱されて、相対密度の増加効果を確認することができなかつたので、外径 1370mm 内径 170mm の上載板と重りを載せ、写真-4 に示すように $0.02 \text{ (N/cm}^2\text{)}$ の上載圧をかけながら掘削する。掘削後、上載板を取り除き測定を行った。

掘削前後の地盤の地盤改良効果の測定方法として、図-5 に示すポータブルコーン貫入試験機を用いる。ポータブルコーン貫入試験はコーン貫入抵抗を求めることを目的とした試験であり、掘削後の孔壁からの距離が 2cm, 17cm, 32cm の 3 箇所それぞれ深さ 50cm まで行う。試験機は単管式と二重管式があるが、本実験における最大掘削深さは 50cm であり比較的浅いため単管式を使用する。試験で得られた結果から、コーン貫入抵抗 $q_c \text{ (kN/m}^2\text{)}$

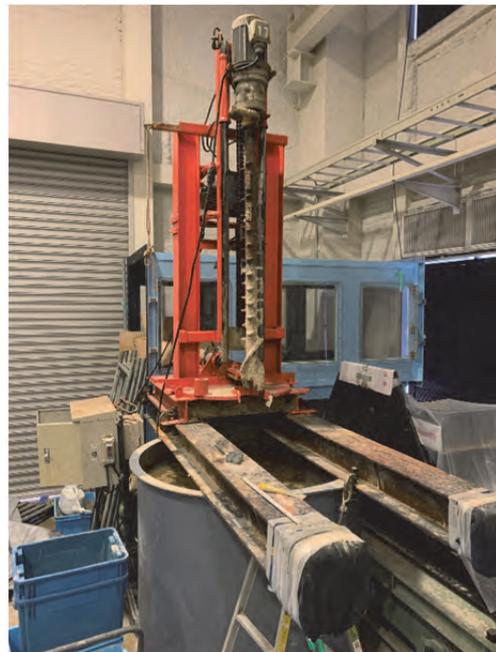


写真-3 室内試験に用いた掘削機と土槽



写真-4 上載圧を加えた室内模型実験

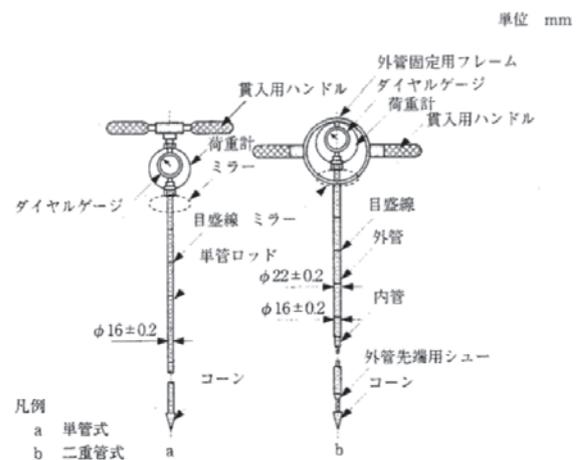


図-5 ポータブルコーン貫入試験機³⁾

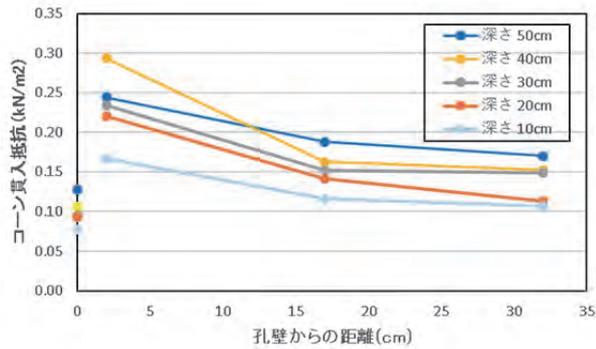


図-6 コーン貫入試験結果

を次の式で算出する。

$$q_c = Q_c/A \quad (3)$$

ここに、

$$Q_c = Q_{cd} + \frac{(m_0 + n \cdot m_1)g}{1000} \quad (4)$$

ここで、

Q_c : コーンの貫入力 (kN)

A : コーンの底面積 (m²)

Q_{cd} : 荷重計測定値 (kN)

荷重計に力計を用いた場合、 Q_{cd} は次の式で算出する。

$$Q_{cd} = KD \quad (5)$$

ここで、

K : 荷重計の校正係数 (kN/目盛)

D : 荷重計の読み値

m_0 : コーンの質量 (kg)

m_1 : ロッド1本の質量 (kg)

g : 標準重力加速度 (m/s²)

n : ロッドの使用本数 (本)

本実験では、 $A=0.00065$ (m²)、 $K=0.00459$ (kN/目盛)、 $m_0=0.12$ (kg)、 $m_1=0.76$ (kg)、 $g=9.8$ (m/s²) のパラメータを用いる。ポータブルコーン貫入試験の結果から、これらの式を用いて q_c 値を算出する³⁾。

さらに、以下に示す式から、コーン貫入抵抗 q_c を N 値に換算する⁴⁾。

$$N = q_c/400 \quad (6)$$

また、試験の際は、オーガスクリーを貫入させた状態で行う。

4.2 実験結果及び考察

実験の結果を図-6 に示す。同図における孔壁か

らの距離が 0cm の点に、掘削前のポータブルコーン貫入試験の結果を示す。深くなるほど有効上載圧が大きくなるため、掘削前のコーン貫入抵抗 q_c も深くなるほど大きくなる。しかし、掘削の際、上載圧を加えていたため地盤の表面が乱されず、深さ方向において掘削後の q_c の増加の割合の差はほとんどみられなかった。半径方向において、孔壁に近いほど q_c の増加が大きく、遠くなるほど小さくなる結果が得られた。不連続オーガスクリーによる地盤改良効果があったと判断できる。

5. 空洞拡張理論を用いた検討

5.1 空洞拡張理論の概要

本研究の対象地盤は液状化が発生しやすい地盤、すなわち、粒径がそろっていて、 N 値が低く緩い砂質地盤である。不連続オーガスクリーを用いた削孔による空洞拡張により、周辺地盤が締め固められることによって地盤中の間隙比が減少し、相対密度 D_r や N 値が増加するものと考えられる。

本研究では、以下のような仮定を設けて評価式を構築することとする。平面ひずみ条件、すなわち土粒子は半径方向のみに移動する。掘削前は、地盤は等方応力状態にある。完全排水条件、すなわち土の体積変化は生じない。土は弾塑性体とする。

半径 r_0 の削孔を r_1 まで拡張したときについて考える。空洞拡張後の体積変化に伴い、間隙比が e_0 から $e_0 - \Delta e$ に変化したとすると、変化後の相対密度 D_r' 、および N 値 (N') は以下のとおりとなる。

$$D_r' = \frac{e_{max} - (e_0 - \Delta e)}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (7)$$

$$N' = (0.7 + \sigma_v) \cdot (D_r'/21)^2 \quad (8)$$

空洞拡張により地盤の間隙比は減少するが、その度合いは孔壁に近いほど大きく、孔壁より遠くなるほど小さくなるものと考えられる。

図-7 に間隙比の減少の度合いと孔壁からの距離との関係を示す。ここでは r 方向のみを考察する 1 次元問題として考える。半径 r に比例して受圧面積が増加することと、間隙比の減少に伴い半径に比例して拡張に伴う力が小さくなることを考慮すると、間隙比の減少は半径の 2 乗に比例すると仮定できる。孔壁での間隙比の減少を Δe_0 、間隙比の減少の平均値を Δe_m とおくと、半径 r における間隙比の減少 Δe_r は次のようになる。

$$\Delta e_m = (1 + e_0) \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \quad (9)$$

$$\Delta e_r = \frac{R}{r_1} \cdot \Delta e_m \quad (10)$$

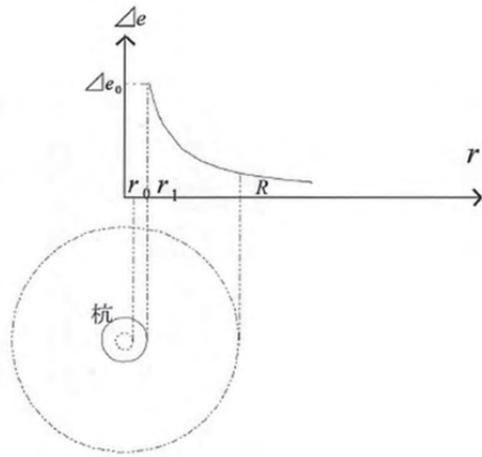


図-7 孔壁からの距離と間隙比の減少の関係

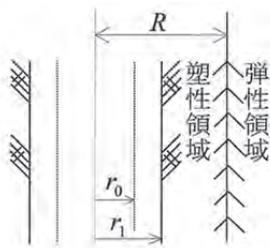


図-8 空洞拡張の影響範囲 R

$$\Delta e = \left[\frac{r_1}{r} \right]^2 \cdot \Delta e_0 \quad (11)$$

空洞拡張による塑性領域と弾性領域の影響範囲 R を図-8 のように設定する。まず、塑性領域と弾性領域の影響範囲 R を間隙比の減少割合が孔壁周辺の 10% にまで減少した所と考え、計算を行う。孔壁において、改良後の相対密度 D_r' は 100% となる。ここで、

$$e_0 - \Delta e_0 = e_{min} \quad (12)$$

が成立し、上式を解くことで孔壁での間隙比の減少を求めることが可能となる。

また、前述した Δe_0 、 Δe_m の式より、

$$\Delta e_0 = \frac{R}{r_1} \cdot (1 + e_0) \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \quad (13)$$

上式の R の 2 次方程式を解くことによって、影響範囲 R を求めることができる。この影響範囲 R を算出することによって、塑性領域の範囲についても求まる。

5.2 理論値と実験値の比較

ポータブルコーン貫入試験による N 値の実験値と空洞拡張理論による N 値と影響範囲 R を仮定して算出した理論値とで、「掘削後の N 値/掘削前の N 値」の計算を行い、掘削前後の N 値の変化倍率を比較する。ポータブルコーン貫入試験の結果から算出した N 値を用いた掘削前後の N 値の変化倍率を表-1 に示す。ここで、上載圧が最も大きい深さ 50cm における N 値の変化倍率に着目する。孔壁からの距離が 2cm のとき 1.9 倍、孔壁からの距離が 17cm のとき 1.5 倍、孔壁からの距離が 32cm のとき 1.3 倍の改良が得られたことになる。次に掘削前の地盤の N 値を 1 と仮定し、影響範囲 R を様々な値で仮定して算出した理論値による掘削前後の N 値の変化倍率を比較したものを図-9~11 に示す。

表-2 掘削前後の N 値の変化率

	深さ(cm)				
	10	20	30	40	50
変化倍率, 孔壁から2cm	2.1	2.4	2.5	2.8	1.9
変化倍率, 孔壁から17cm	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5
変化倍率, 孔壁から32cm	1.4	1.2	1.6	1.4	1.3

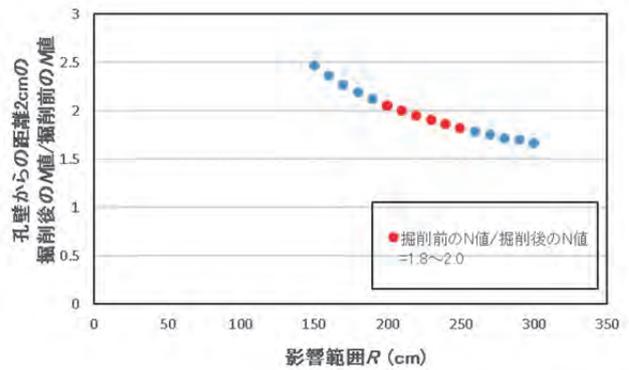


図-9 孔壁から 2 cm における掘削前後の N 値の変化率

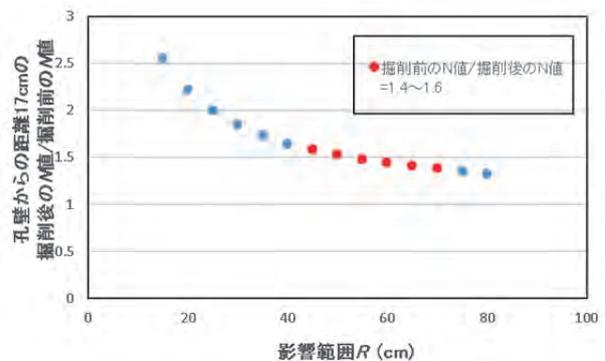


図-10 孔壁から 17 cm における掘削前後の N 値の変化率

表-2 空洞拡張理論による地盤改良効果

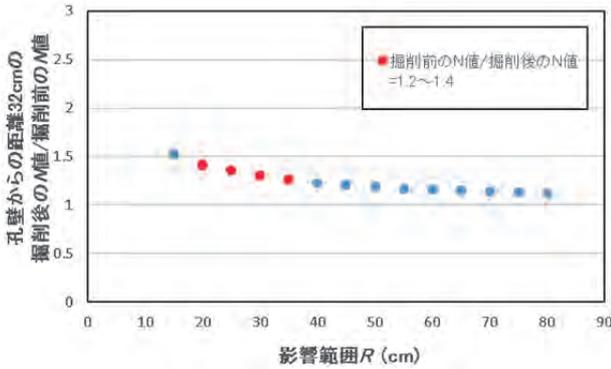


図-11 孔壁から 17 cm における掘削前後の N 値の変化率

ポータブルコーン貫入試験における掘削前後の N 値の変化倍率から、理論値においては、孔壁からの距離が 2cm のとき 1.8~2.0 倍、孔壁からの距離が 17cm のとき 1.4~1.6 倍、孔壁からの距離が 32cm のとき 1.2~1.4 倍の範囲において変化倍率が一致したと考える。図-9 のように孔壁から近い地点においては掘削の際に乱されたため、実験値と理論値の変化倍率を合わせようとする、影響範囲 R の仮定が 200cm~250cm となりあまりにも大きくなり、結果として適さないと考える。そこで、孔壁からある程度離れた 17cm、32cm の掘削前後の N 値の変化に着目する。孔壁からの距離 17cm のとき $R=45\sim70$ cm、孔壁からの距離 32cm のとき $R=20\sim35$ cm と仮定すると変化倍率が理論値と一致する。空洞拡張理論による理論値を用いた掘削前後の N 値の変化倍率は、孔壁からの距離が大きくなるほど実験で得られた影響範囲に近づくことが分かった。今回の実験において、孔壁からの距離が 17cm において空洞拡張理論を用いることができると仮定すると、地盤の N 値と影響範囲 R を仮定し不連続オーガスクリーパーで掘削することで、表-2 に示すような N 値が 10 に近い、または 10 を超える地盤改良効果を得ることが期待できることが明らかとなった。

6. 結論

本研究は、これまで杭孔の掘削に用いられてきた不連続オーガスクリーパーを宅地における液状化対策として活用することを目的とし、その有用性の確認のため、実機を用いた現場試験と、相対密度の増加効果を検証するための理論式の構築、理論式の妥当性を確認するための模型実験を行ったものである。本研究で得られた成果を要約すると以下のようなものである。

- (1) 実機を用いた現場試験により、液状化しやすい軟弱な地盤においても、掘削後の孔壁が自立す

	影響範囲 R (cm)	掘削後の N 値(孔壁からの距離 17cm)
$N=7$ の地盤に掘削	45	11.1
	50	10.7
	55	10.4
	60	10.1
	65	9.9
	70	9.7
$N=9$ の地盤に掘削	45	14.2
	50	13.8
	55	13.3
	60	13.0
	65	12.7
	70	12.4

ることが確認できた。

- (2) 掘削前後の N 値の変化を SWS 試験により確認したところ、表層から 3m までは掘削による地盤の乱れから N 値は減少していたが、5m では N 値が増加しており、相対密度増加効果が確認できた。
- (3) 空洞拡張理論による理論式との対応を検討するための 1/5 スケールの室内模型実験では、上載荷重により掘削時の地表の乱れを防ぐことによって、地表面付近でも相対密度増加効果が確認できた。
- (4) 不連続オーガスクリーパーを用いた掘削による相対密度増加効果を、空洞拡張理論を用いて評価しようとした。効果の影響範囲 R を仮定することにより、模型実験結果と理論との対応が確認できた。

今後は、より深い深さでの効果を確認するための実機試験と影響範囲 R に影響を与える要因を定量的に解明していく必要がある。

謝辞：本研究は、一般社団法人日本建設機械施工協会第 11 回研究開発助成の補助を受けて実施したものです。また、本研究を実施するにあたり、無排土孔壁工法研究会に多大な協力をして頂きました。ここに記して深謝します。

参考文献

- 1) 株式会社エムエルティールHP：工法紹介，
<http://www.mltsoil.co.jp/kouhou.html>，(2019年8月1日アクセス)。
- 2) 稲田倍徳：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について，土と基礎，Vol.18, No.1, pp.15-18, 1960。
- 3) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.337-343, 2013。
- 4) 藤田圭一，大野睦雄，三反畑勇，松本江基：qc/N 値の利用と品質評価，土木学会第 60 回年次学術講演会(平成 17 年 9 月)，pp.963-964, 2005。

3. ハイブリッド・サイフォン排水装置

燃料消費を大幅に軽減し、高揚程を達成！

株式会社山辰組

○ 馬淵 剛

馬淵 和三

1. はじめに

国土交通省の「大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方（提言）」で、「ポンプ排水に要する大量の燃料消費を軽減することが可能な手法として、大容量排水技術（サイフォン等）についても開発・検討を進め、実用化の際にはその適用範囲を明確化すべきである。」を受け、弊社で開発した「呼び水式・サイフォン排水装置」は、平成24年度の本シンポジウムにおいてポスターセッション審査委員特別賞に選考していただいた。その後も改良を重ね、多様な現場条件にも対応可能なサイフォン排水装置として大きく進化させ、平成28年3月には国土交通省次世代社会インフラ用ロボット技術に認定していただいた。その後も幾つかのサイフォン新技術を開発し進化させたのでその成果と特長について報告する。

2. 「呼び水式・サイフォン排水装置」と「水中ポンプ」の組み合わせでサイフォン新技術が誕生！

提言後に開発した「呼び水式・サイフォン排水装置（図-1）（以下、「呼び水・サイフォン」と記す）」は、起動時には貯水タンクに貯めた水の水压でサイフォン作用を起動する技術であり、電源を全く使用しなくてもΦ200mmまでのサイフォン排水作業を行える画期的な新技術として大きな特長があった。ただし、使用できる条件は、①貯水タンクを配置する位置はサイフォン配管の最高部から下流側に配置する。②そのタンクから上流側のホース延長が下流側のホース延長の2分の1以下であること。などであった。

「呼び水・サイフォン」を地形に高低差がある砂防工事の現場で使用しようとする、貯水タンクを設置する場所の制限を受ける場合がある。つまり、構築するダム本堤の上流側に釜場を設けて、ダムを迂回して排水するサイフォンホースを設置しようとした場合、構造物の下流側は高低差が大きく勾配が急なため貯水タンクを設置する場所が確保できない、また、（図-1）のように本堤の下流側に設置した場合でも、吸水口から貯水タ

ンクまでのホース延長の2倍以上の延長の排水ホースを貯水タンクから下流部へ延長する必要があった。さらに、構造物の上流側に貯水タンクを設けた場合、貯水タンクの水圧だけではダムの高さ（揚程）を乗り越えてサイフォンホース内を満水状態で流すことができないためサイフォン作用が起動しない場面が発生した。これは多様な地形条件が想定される天然ダムでの対応にも同様な場面が当てはまるのではないかと課題に突き当たったのである。

そこで、このように多様な地形条件にも対応が可能な「呼び水・サイフォン」とするため研究を重ねた。つまり、「呼び水・サイフォン」は、電源を全く使用しないことを前提に開発し、サイフォン排水ホースへ注水する方法として水中ポンプの代わりに貯水タンクの水の水圧を利用した装置であった。この貯水タンクの機能の限界、つまり「タンク内の水面より高く水を上げて圧送することはできない。」を解決するため、従来の水中ポンプを貯

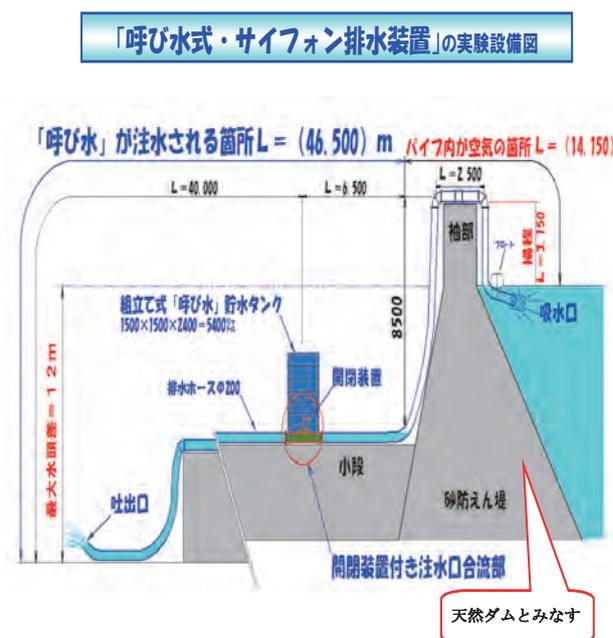


図-1 呼び水式・サイフォン排水装置の配置図



図-2 「ワイ・ガッチャン」と各種連結部材

水タンクに替えて採用することとした。

水中ポンプはサイフォン起動時に1分～2分間だけサイフォン排水ホースへの注水作業に電気を使用することとなるが、この「呼び水・サイフォン機能」と「水中ポンプ」の高揚程への送水機能との組み合わせにより、多様な地形条件にもいっそう対応可能なサイフォン排水装置として進化することができた。この2種類の送水機能を活かした新たなサイフォン排水技術を「ハイブリッド・サイフォン」排水装置と命名した。

3. 新技術：「ハイブリッド・サイフォン」排水装置について

「ハイブリッド・サイフォン排水装置（以下、「ハイブリッド・S」と記す）」のサイフォン起動方法は、応急復旧作業の際、従来の技術でサイフォン起動を行う際の大きな課題のひとつ「吸水口や吐出し口を設置した水辺や急な斜面など危険な場所での人力開閉作業」を省略することができた。具体的に従来のサイフォン起動技術では、以下の起動手順を必要とした。①上下流部の吸水口と吐出し口の開閉装置を閉じる。②サイフォンホース延長上の最高部に開口部を設け、水中ポンプなどを使用してそこからホース内へ注水する。③吸水側及び吐出し側へ徐々に注水されると水位の上昇に伴い空気は押し上げられて最高部の開口部から排気される。④ホース内が満水になったら最高部の開口部を閉じる。⑤上下流側の開閉装置を人力作業で開ける。⑥サイフォン作用が起動する。という手順をとっていた。この工程の中で、①と⑤の特に豪雨など異常気象時での作業員による危険な開閉作業を無くした。

「ハイブリッド・S」の吸水口と吐出し口の開閉作業を無くすには常時開口状態の技術とするため、サイフォン排水ホースの途中に水中ポンプ側とサイフォン吸水側の流れに任意に方向を切り替える機能を備えたY字状の注水合流部材「ワイ・ガッチ

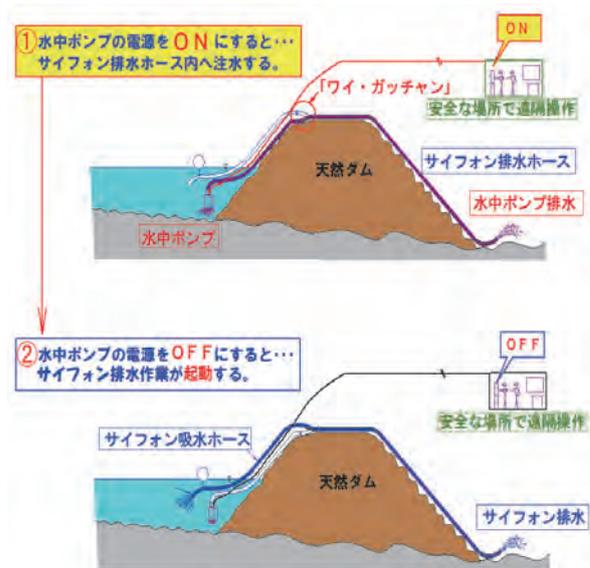


図-3 「ハイブリッド・S」の起動図

ャン」を開発して配置した。Y字状の二股（2口）側を上流（淡水池側）に向け、二股の一方にサイフォン吸水ホースを連結。他方に水中ポンプ注水ホースを連結。Y字状の1口側を下流（吐出し口側）に向けてサイフォン排水ホースを連結する（図-2）。

「ハイブリッド・S」の設置が完了したら、水中ポンプの電源のON⇔OFFの操作だけで「水中ポンプ単独送水作業」⇔「サイフォン単独排水作業」⇔「サイフォン排水作業+水中ポンプ排水作業」の切り替えが安全な場所から遠隔操作により行うことができることとなった（図-3）。

「ハイブリッド・S」のサイフォン起動方法は、①遠隔操作により電源をONにして水中ポンプを稼働して注水合流部材「ワイ・ガッチャン」を通してサイフォン排水ホース内へ注水を行う（図-3上）。②サイフォン排水ホース内の空気を吐出し口から押し出すとサイフォン排水ホース内が満水状態の流れとなった（図-3上）。③水中ポンプの電源をOFFにして注水を停止する。④サイフォン吸水ホースからの吸水作用が開始しサイフォン排水作用が始まる（図-3下）。上流側の吸水口と下流側の吐き出し口を常時開口状態としたことで、豪雨など悪天候の中で淡水池の水辺や急な斜面に配置した吸水口や吐出し口で行う人力開閉作業を不要とした。

3.1 「ハイブリッド・S」の口径と作業性について

「ハイブリッド・S」の排水ホースの口径はΦ100mm～Φ200mmとなっている。大容量排水能力のあるΦ200mmハイブリッド・Sは、各部材の重さを考慮すると人力だけでは作業効率が伸びないため、運搬や設置作業には重機の併用が作業効率を向上さ



図-4 Φ100 mm「ハイブリッド・S」の各部材は全て人力運搬が可能な部材で構成した。

せる。そのため、車両や重機が進入できる場所での大容量排水作業に適しているという特長がある。

また、**Φ100 mmハイブリッド・S**の各部材は、進入路が無い場合の、**人力運搬が可能な重さの範囲で構成することを前提として開発した**ため、河道閉塞により生じた「天然ダム」や、老朽化した「ため池」などで、車両や重機が近づけない場所であっても、**樹林を縫って人が通れるスペースさえ有れば、全ての機材を人力で運搬して排水作業を可能とした**大きな特長を備えた技術となった（図-4）。

3.2 100Vの電源で起動できる「ハイブリッド・S」ならではの「クーキオス・ボール」起動工法

排水作業に使用する従来のΦ100 mm～Φ200 mm以上の水中ポンプ（重量約90 kg～230 kg）の稼働には200Vの電源を必要とするため、大型発電機（重量200 kg以上）の搬入が可能な運搬路が確保できなければ排水作業を行うことができなかった。

「ハイブリッド・S」Φ100 mm～Φ200 mmでは、サイフォン作用の起動にあたり、Φ50 mmの水中ポンプ1台（重量約10 kg）と100Vのポータブル発電機（重量約13 kg）を使用して大口径のサイフォン作用を起動可能とするため「クーキオス・ボール」工法を新たに開発した（図-5）。

小口径の水中ポンプで大口径のサイフォン排水作用を起動する新技術「クーキオス・ボール」工法は、注水前に「ワイ・ガッチャン」の下流側のサイフォン排水ホース内に「クーキオス・ボール」を装填する。装填後にはサイフォン排水ホースの内断

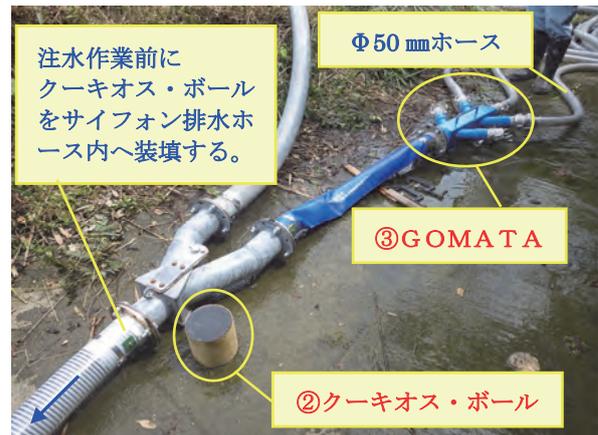


図-5 「②クーキオス・ボール」と「③GOMATA」

面一杯の大きさとなるため、Φ50 mmの水中ポンプから注水される水圧を受け止めた「クーキオス・ボール」は下流側へ押し進められる。この際、「クーキオス・ボール」の上流側は満水状態の水圧に押され、下流側は空洞部で抵抗がないため下流方向へボールが容易に移動する。

下流側の吐き出し口に至り「クーキオス・ボール」が吐き出されたとき、サイフォン排水ホース内に満水状態で充填されていた水は位置エネルギーにより吐出し口側に流下する。この現象に連動して湛水池側では湛水を吸水ホースからストローで吸うような作用でサイフォン排水ホース内へ吸い込んでサイフォン作用が起動することとなる。Φ50 mm水中ポンプ1台で「クーキオス・ボール」を使用してΦ200 mmハイブリッド・Sを稼働させることも実証済みである。

Φ100 mm以上の排水作業であっても、準備する電源は100Vのポータブル発電機1台とそれで稼働するΦ50 mm水中ポンプという画期的なサイフォン起動方法による排水技術となったのである。

ハイブリッド・Sのサイフォン起動時間を短くしたい場合は、Φ50 mmの水中ポンプを複数台合流させて注水することで解決できる。複数の流れを合流させる部材「GOMATA（ゴマタ）」を新たに開発した。Φ50 mm水中ポンプ最大5台分の流れを合流させて注水することができる。サイフォンを起動させる時間を早くするという機能を備えた。

これらの起動方法によりサイフォン作用を稼働させる場合に、「揚程7m」を境にしてその後のサイフォン稼働方法を切り替えることとなる。

3.3 サイフォン単独排水作業の「限界揚程7m」を目安とし「ハイブリッド・S」を使い分ける

サイフォンの揚程に限界の高さが理論上はあるが、サイフォン排水装置の実用性を高めるため、実際の限界揚程を求める実験を行った（図-6）。



図-6 サイフンの限界揚程確認実験

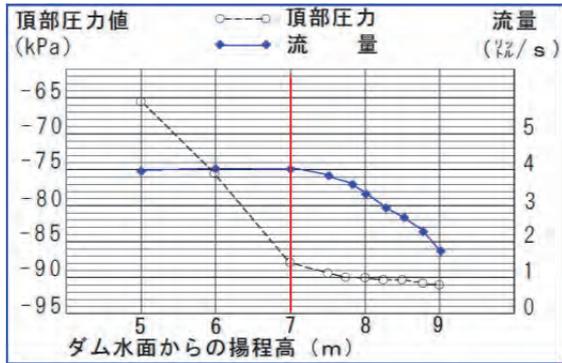


図-7 サイフォン作用の限界揚程高測定実験結果

(図-7) はその実験の結果である。流量の変化を見ると、揚程 7m までは一定で変化はないが、揚程 7m を超えると流量が減少傾向となっている。安定したサイフォン作用の範囲として「限界揚程を 7m」としてハイブリッド・S を使い分けることとした。

この実験により、ハイブリッド・S は、①「揚程 7m 以下」の場合であればサイフォン単独による排水作業を行う。②「揚程が 7m 以上」の場合は「サイフォン」と「水中ポンプによるアシスト送水作用」の 2 種類の機能を併用することとする。これにより、サイフォン単独よりも、水中ポンプ単独よりも「限界揚程」と「排水量」が大きく上回る機能が生まれ、まさにハイブリッドなサイフォン排水装置として開発することができた。

3.4 「サイフォン単独」と「水中ポンプ単独」の排水作業能力の比較実験

(表-1) に示すように、「水中ポンプ単独」と「サイフォン単独」の排水能力の比較実験を行った。Φ200 mm の水中ポンプの排水機能はメーカーの排水性能曲線を用いた。水中ポンプの場合「揚程 3m が 5.2 m³/min で最大排水量」であり、これより揚程が大きくなるにつれて排水量は減少し、限界揚程 18m で排水量 0 m³/min となっている。限界揚程 18m の半分の 9m で 4.0 m³/min となり、この数値が一般的に Φ200 mm 水中ポンプの機能として排水計画を行う際の参考数値となっている。

対して Φ200 mm サイフンの揚程を決める場合、

表-1 水中ポンプとサイフンの排水量比較表

水中ポンプの特徴		サイフンの特徴	
揚程 3m 程度が最大の排水量で、揚程が大きくなると、排水量は減少する。メーカーが公表する限界揚程の異なる水中ポンプの機種は多種ある。		限界揚程 7m でサイフォンによる排水作業は停止するが、水頭差が大きくなると排水量が増大する。	
動力送水		揚程 3m の場合	
揚程 (m)	排水量 (m ³ /min)	水頭差 (m)	排水量 (m ³ /min)
1	-	1	2.2
2	-	2	3.1
⇒ 3	5.2	3	4.0
4	5.0	4	4.7
5	4.9	⇒ 5	5.4
6	4.8	6	6.1
7	4.5	7	6.7
8	4.2	8	7.3
⇒ 9	4.0	9	7.5
10	3.8	10	7.9
11	3.5	11	8.4
12	3.0	⇒ 12	8.7
13	2.6	(当社実験値)	
14	2.2		
15	1.7		
16	1.3		
17	0.5		
18	0.0		
(市販ポンプ公表値)			

水中ポンプの最大排水量 5.2 m³/min の時の揚程が 3m であったため、揚程 3m で固定し水頭差を変化させた。水中ポンプの最大排水量に近いサイフォン排水量としては「水頭差 5m の場合の 5.4 m³/min」であった。

水中ポンプの場合、揚程が大きくなるにつれて排水量が減少するのに対して、サイフォンは水頭差が大きくなるにつれて排水量も増大する。サイフンの場合、水頭差が 12m の場合 8.7 m³/min と同じサイズの水中ポンプの一般的とされる 4.0 m³/min の 2 倍以上の排水能力があり水中ポンプには無いサイフォン機能の特長といえる。

3.5 「サイフォン」、「水中ポンプ」、「ハイブリッド・S」それぞれの排水能力の比較実験

標記それぞれの排水能力を同じ現場条件で確かめた。その結果(表-2)には以下の内容が示されている。サイフォン配管延長 280m、水頭差 11m で実験を行った。

① 【C】に示すように従来の水中ポンプ配管(吐出し口が配管の最高部となる配管)で実施した場合、揚程 12m では水中ポンプの公表値【B】3.0 m³/min に対し 2.37 m³/min と減少している。

表-2 水中ポンプとハイブリッド・S排水量実測値

計測日 平成27年12月8～10日					
揚程	サイフォン	水中ポンプ		ハイブリッド・SF	
(m)	A	B	C	D	E
起動方法	起動時にクークィオスボール使用実測値 (m ³ /min)	水中ポンプメーカー公表値 (m ³ /min)	水中ポンプ実測値 (m ³ /min)	サイフォン配管起動時に水中ポンプだけ使用実測値 (m ³ /min)	サイフォン配管起動時にクークィオスボール使用実測値 (m ³ /min)
配管条件	ホース延長 280m 水頭差 11m		ホース延長 80m 揚程高さが吐出し口	ホース延長 280m 水頭差 11m	ホース延長 280m 水頭差 11m
1	-	-	-	-	-
2	-	-	5.07	5.29	-
3	5.03	5.2	-	-	-
4	5.05	5.0	4.55	5.28	-
5	4.88	4.9	-	-	-
6	4.94	4.8	4.06	5.25	-
7	4.25	4.5	-	-	-
8	-	4.2	3.52	5.30	-
9	-	4.0	-	-	-
10	-	3.8	2.90	5.17	-
11	-	3.5	-	-	-
12	-	3.0	2.37	4.89	4.85
13	-	2.6	-	-	-
14	-	2.2	1.68	1.89	4.39
15	-	1.7	-	-	-
16	-	1.2	1.33	0.42	3.94
17	-	0.5	-	-	-
18	-	0.0	-	-	-
19	-	0.0	-	-	-
20	-	0.0	-	-	2.40

※サイフォン配管延長 280m、水頭差11m。

- ② これと比較して【D】はサイフォン配管の効果により水中ポンプで起動して4.89 m³/minと公表値【B】3.0 m³/minを1.63倍上回っている。
- ③ 揚程12mで【E】では起動時に「クークィオス・ボール」を使用して起動した場合も4.85 m³/minと公表値3.0 m³/minの1.62倍の排水量である。
- ④ その後、揚程が12mを超えて大きくなると【C】の水中ポンプ配管の場合は水中ポンプの公表値【B】以下に排水量が減少してくる。
- ⑤ サイフォン配管で起動時に「クークィオス・ボール」を使用した起動方法【E】では、揚程12mを超えると、各揚程で水中ポンプ配管の実測値【C】と水中ポンプのみの起動の排水量【D】を大きく上回った排水量が確認できる。
- ⑥ 数値が揃っている揚程16mで解析すると、【D】のサイフォン配管で水中ポンプのみの起動による場合、ホース延長が280mと長いことも一因しているかもしれないが0.42 m³/minと公表値よりかなり少ない排水量を確認した。

⑦ 同じ揚程16mでも、「クークィオス・ボール」を使用した【E】の場合は3.94 m³/minである。【D】とは配管条件も同じであるが、違いは水中ポンプ始動時に「クークィオス・ボール」を使用しているか否かであり「クークィオス・ボール」で排水ホース内の残留空気を100%近く押し出すことが、その後の揚程が12m以上に大きくなった場合に、サイフォン作用の減少が少なくして、水中ポンプと併用した排水作業を続けることが可能となるという違いに表れてくると考える。

この高揚程の各種実験結果から、【E】のように「クークィオス・ボール」を使用して起動する方法を選定した場合、【C】、【D】と同じように水中ポンプ稼働に燃料消費を伴うが、揚程16mでは【C】、【D】の3.0倍～9.4倍の排水量が確認されるなど、例えば「天然ダム」や「ため池」で揚程が7m以下でハイブリッド・Sを「クークィオス・ボール」を使用してサイフォン起動を行った場合、排水作業が進むにつれて水位が低下すると、サイフォンの限界揚程7mを超える高揚程となる。その場合、電源をONにして水中ポンプを稼働し【E】の排水工法に切り替えることとなる。水中ポンプを稼働すると、これに掛かる燃料消費量は【B】、【C】、【D】と同じであるが【E】の場合「クークィオス・ボール」を使用して起動したことで水中ポンプ1台で揚程16mの場合で水中ポンプ3.0台～9.4台分の排水量が確認できた。

「燃料消費の軽減」、「大容量排水」、「高揚程」を達成することができる排水装置及び工法となった（これら新技術は特許並びに特許申請中である）。

4. 「災害対策用排水ポンプ車」と「ハイブリッド・S」の組み合わせ工法について

国土交通省中部技術事務所所有の災害対策用排水ポンプ車に搭載してある水中ポンプを使用してサイフォン排水実験を行った(図-9)。前述した3.5の実証実験地(奈良県十津川村栗平地区天然ダム)での配管として延長280m、水頭差11mを復元して行った。



図-9 「災害対策用排水ポンプ車」と「ハイブリッド・S」の組み合わせによる実験状況

汎用のΦ200mm水中ポンプの排水量4.0 m³/minと比較しても排水ポンプ車の水中ポンプは7.5 m³/minと送水量も圧倒的に大きくサイフォン排水ホース内へ注水する速度も作業も速やかに実施できた。サイフォン起動後の排水量については、概ね前述した3.5(表-2)の実験結果に近似している。

同じく排水ポンプ車が河道閉塞により天然ダムの上流に進入できない場合を想定して、ダム下流部に配車することを想定した「ハイブリッド・逆サイフォン」の実験にも成功し、新たな使用方法が開発されるなど「災害用排水ポンプ車」と「ハイブリッド・S」の組み合わせも、本来の「ハイブリッド・S」の機能が十分に発揮できることが確認できた。

5. 「水中ポンプ」と「ハイブリッド・

サイフォン」の「燃料消費量」比率について

(表-3)に示すように、ハイブリッド・Sの場合、限界揚程7mまでは安定したサイフォン作用が継続する。燃費は1日2分間ポンプ送水するとして計算。水頭差が4m以上確保できれば、流速により空気を押し出すためポンプ送水は不要で「7」の比率は限りなく小さくなる。従来の中ポンプの稼働に掛かる燃料消費量を「10,000」の比率とすると、サイフォン作用で稼働する場合は、わずかに「7」の比率となり水中ポンプでの燃料消費量が「10,000 : 7」に軽減する。

表-3 水中ポンプとハイブリッド・Sの燃料消費量と温室効果ガス排出量の比較表

口径 = Φ150mm、各1台 24時間稼働として

機種	水中ポンプ	ハイブリッド・S
消費量	120ℓ/日	0.083ℓ/日
軽油消費量	1ヶ月	3,600 ℓ
	6ヶ月	21,600 ℓ
	12ヶ月	43,200 ℓ
ドラム缶	1ヶ月	18 本
	6ヶ月	108 本
	12ヶ月	216 本
金額	1ヶ月	450,000 円
	6ヶ月	2,700,000 円
	12ヶ月	5,400,000 円
二酸化炭素排出	排出量	2.644kg-CO ₂ /ℓ
	1ヶ月	9.500 tonに換算
	6ヶ月	57.100 tonに換算
	12ヶ月	114.200 tonに換算
比率	10,000	7

軽油単価を125円/ℓで計算。

6. 老朽化した「防災重点ため池」の「事前放流」、 「低水位管理」にも役立つ「ハイブリッド・S」

「農林水産省は6月11日、自然災害で人的被害が生じる恐れがある「防災重点ため池」を新たな基

準で再選定した結果、5月末時点で63,722カ所が対象となったと発表した。これまでの約11,000カ所から大幅に拡大し、農業用ため池の総数(166,638カ所)の4割弱を占めた。決壊を防ぐ補強や緊急連絡体制の整備といった対策を優先的に進める。

(2019.6.12付け日本経済新聞より)」とあるように、ため池の防災意識が高まっている。

「ため池を改修したいが、取水施設が老朽化して、水を放流できない。」「湛水している水を抜くためには水中ポンプや発電機が必要だが搬入する道がない。」「水中ポンプ排水では膨大な燃料費を覚悟しなければならない。」などの課題に対して「ハイブリッド・S」を検討のもと、実際に現地へΦ100mmハイブリッド・Sを人力運搬で搬入して放流した実績がある(図-4)・(図-5)・(図-10)。延長100m、水頭差11m、放流量2.2 m³/minと同口径の水中ポンプの2倍以上の成果を上げ、燃料費は起動時の1分間だけであった。今後とも、燃料消費を軽減した「ハイブリッド・S」を、排水装置として多様な現場条件に対応可能な技術として伸ばしていきたい。



謝辞：呼び水・サイフォン」から進化した「ハイブリッド・S」の技術が「災害対策用排水ポンプ車」との組み合わせにも有効であることの実証実験を実施していただき、成果を挙げられたことに対して、国土交通省中部技術事務所、越美山系砂防事務所、岐阜県など多大なご理解とご協力を賜りました関係機関の皆様にご心から謝意を表します。

4. 平成30年7月豪雨災害における災害対策用機械等による復旧活動

国土交通省中国地方整備局企画部施工企画課
○岸本 孝文

【はじめに】

平成30年7月豪雨災害では、中国地方の広範囲で国土交通省直轄管理施設、自治体施設等において多くの甚大な被害が発生している。

中国地方整備局では、7月6日に災害対策本部を非常体制として被災状況の把握を行うとともに、発災後は、災害対応を2ステージ（直轄復旧、自治体復旧）に分けて、重視する内容等の明確化、目標を定めた対応を行っている。

本報告は、中国地方整備局が行った、災害復旧活動の内、災害対策用機械、道路維持用機械等による復旧活動について報告するものである。

【被害の概要】

平成30年6月28日以降、華中から日本海を通じて北日本に停滞していた梅雨前線は、7月4日にかけて北海道付近に北上した後、7月5日に南下し、7日にかけて本州付近に停滞、この前線へ向かって暖かく湿った空気が流れ込み、前線の活発な活動が続いたため、中国地方では降り始めからの総雨量が450mmを超え、岡山県では高梁川水系の新見市新見地点で392.5mm、倉敷市倉敷地点で260.0mmという観測史上1位の降水量(48時間累加雨量)を記録する豪雨となり、7月6日(金)には中国地方で初めて広島県、岡山県、鳥取県の3県同時に大雨特別警報が発表され、国管理施設では6水系13河川23観測所で「氾濫危険水位」を超過、7水系9河川11観測所で「避難判断水位」を超過、7水系7河川14観測所で「氾濫注意水位」を超過している。このうち、5水系9河川13観測所で観測史上最高水位を記録している。

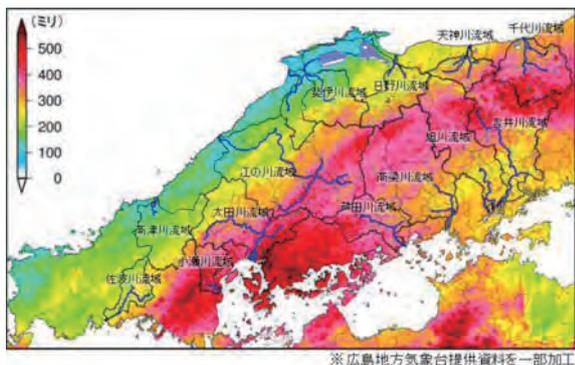


図-1 平成30年7月豪雨雨量分布図(解析雨量)

この雨により土砂災害、浸水害、河川の氾濫などが発生し、国管理施設では8水系13河川50箇所施設被害が発生、管内各地で浸水被害も発生した。特に岡山県倉敷市真備町においては、高梁川水系小田川の堤防が決壊し大規模な浸水被害が発生するなど、各地で甚大な被害が発生している。

また、県管理河川においても5県の42水系74河川で氾濫危険水位を超過しており、旭川水系砂川(岡山県)や沼田川水系梨和川(広島県)などでは堤防が決壊し、大規模な浸水被害が発生したほか、各所で溢水や内水等による浸水被害が発生している。

道路では法面崩落や土砂流出、国道沿いの河川護岸の崩落、道路冠水等により、雨量による事前通行規制を含めて、NEXCO西日本管理の高速道路では74区間、直轄道路では68箇所が通行止めとなり、その他の道路では、補助国道92箇所、県道・政令市道では673箇所と、膨大な箇所が通行止めが発生している。

■災害対策用機械の派遣

(直轄での活動)

7月5日から10日頃にかけて、直轄管理区間において、排水ポンプ車による内水排水活動を実施している。

(自治体支援)

鳥取県、島根県、岡山県、広島県内の19箇所排水ポンプ車延25台、照明車を14箇所延11台を派遣し復旧作業を行っている。

7月7日から、鳥取県、岡山県および広島県内の6市3町・18箇所(倉敷市真備町を除く)に対し、排水ポンプ車を中国地方整備局の21台のほか、東北地方整備局8台、北陸地方整備局2台、関東地方整備局1台の計32台を派遣し、排水支援を7月31日まで実施している。

また、排水作業並びに応急復旧作業は24時間体制での作業を要したことから、照明車についても中国地方整備局の6台のほか、東北地方整備局2台、北陸地方整備局2台を派遣している。

倉敷市真備町では、小田川の堤防が8箇所決壊(県管理区間含む)したことなどにより、約1,200haの浸水被害など、甚大な被害であったこ

とから、7月7日5時に倉敷市長より真備町に対する緊急排水支援の要請があり、9時に管内の排水ポンプ車等の派遣調整を行うとともに、本省 災害対策室経由で他地整のポンプ車の派遣を要請している。この結果、他への派遣とは別に、排水ポンプ車23台（中国3台、北陸4台、関東8台、中部8台）、照明車12台（中国2台、北陸2台、関東4台、中部4台）の派遣支援を実施している。



写真-1 岡山県倉敷市真備町小田川（排水活動）

緊急排水支援の作業は、捜索活動機関（自衛隊・警察・消防）と調整を行い、翌8日13時頃より排水作業を開始し、11日までに宅地・生活道路の浸水を概ね解消している。

排水作業実施場所については、堤防決壊直後、決壊箇所も多く被災状況の把握が困難であったため、7日にTEC-FORCE隊員および岡山河川事務所職員を現地へ派遣し、現地状況の把握を行い、排水作業実施場所および排水ポンプ車等の災害対策用機械の集合場所を選定しており、結果、7日18時までに高梁川右岸堤防上を中心とした排水作業場所を設定したほか、倉敷市立柳井原小学校を排水作業基地として設定している。

なお、小田川の排水作業では、捜索活動機関による捜索活動車両や応急復旧工事車両の通過が多く、排水ポンプ車の排水作業を一時中断し、ホース内の水を抜き、ホースを萎ませた状態でホース上を通過させる必要があったため、連続排水の確保が課題となっている。



写真-2 小田川での排水作業状況

■ため池の排水作業

7月豪雨災害では、ため池が破堤する恐れがあり水位を下げたいとの要請が岡山県内で2件あり、排水ポンプ車による排水支援を実施している。

記憶があるところでは、ため池の排水支援はこの災害が初めてと思われる。

支援被災場所の一つである岡山市北区の冠光寺池においては、池の法面が崩落して決壊の恐れが生じていたため、下流の住民に避難勧告が発令されており、ため池の水位を早急に下げる必要があったので、10日の岡山県知事からの要請により排水ポンプ車1台を派遣している。

小田川の排水作業完了の目途がついていたことから、11日8時40分に関東地方整備局の排水ポンプ車（高揚程型）を現地に向かわせたが、車体が大きく排水場所まで進入ができない状況となったため、確実に進入可能な車両を派遣するため、現地調査を行うこととしたが、夜間だったため翌朝に調査を実施している。

調査の結果、排水ポンプ車（30m³/min）であれば進入が可能と判断し、車両を変更し派遣をしている。

また、車両の選定にあたって、冠光寺池は遠浅であり、排水作業による水位の低下にあわせて、ポンプを池中心奥へ送り出す必要があったため、災害派遣されたポンプ車の中でケーブル延長が最も長い関東地方整備局の排水ポンプ車を選定し、24時間体制で、水位低下に追従するように排水ホースを延長しながら排水作業を実施している。

その後は、急激な水位低下による、更なる法面崩落を防止するため、岡山市の指示のもと、日々1m以内で水位を低下させる運転に切り替え、目標水位まで低下させ、作業を完了している。

なお、応急復旧作業および排水作業においては、早期の復旧が必須であったため、現場は24時間体制で作業を実施しており、夜間照明が必要であったため照明車も派遣している。



写真-3 排水作業開始時



写真-4 排水作業進捗時

■被災現場の台風への備え

被災後、多くの台風が発生したため、中国地方付近を通過する台風への備えとして、豪雨により特に被害の大きかった、岡山県倉敷市真備町、広島

県福山市, 三原市, 安芸郡坂町周辺については, 応急復旧が完了していない被災現場での大雨による二次災害を防ぐため, 排水ポンプ車を事前に待機させている。

特に7月29日から30日にかけて中国地方を横断した台風12号については, 急激に関東地方から大きく西向きに進路を変えて日本列島を横断したため, 早急な対応が必要となり, 各県からの要請を受け, 本省との調整の結果, 東北地方整備局, 北陸地方整備局から応援をいただき, 中国地方整備局保有の機械とあわせて, 排水ポンプ車(17台)と照明車(8台)を配備させている。

■雑排水としての給水支援

11日, 本省道路局より, 断水している被災地への給水支援に散水車を活用できないか照会があり, 派遣を行っている。

散水車は通常の使用において, 浄水を使用していないため, タンク等の清掃・消毒が必要となるうえ, 過去の災害時において清掃や消毒を行っても飲料水の基準を満たさなかった経験から, 飲み水としてではなく, 土砂撤去などに使用したスコップや長靴などの汚れを落とすための雑用水としての給水支援を実施している。

各自治体へ派遣したリエゾン経由でニーズの照会を行った結果, 三原市, 広島市, 坂町, 呉市, 倉敷市から要請があり, 中国地方整備局の散水車3台を派遣することで対応している。

■路面粉塵対策等支援

真備町の排水完了後, 日照りの猛暑が続いたため, 市街地へ流入した大量の土砂が乾燥し, 粉じんによる結膜炎などの二次被害が発生し, メガネやマスクなしでは生活が困難な環境となっていたため, 土砂撤去作業と並行して, 散水車・路面清掃車による粉じん対策を実施している。

実施にあたっては, 給水支援活動を行っていた散水車2台を派遣したほか, 関東, 近畿地方整備局より7台の散水車が派遣され, 7月18日から作業を実施している。

また, 大型散水車が進入できない道路では, 小型の散水車7台をリースし散水作業を実施している。

真備町以外の広島市, 三原市, 呉市, 坂町でも復旧作業が進んでいくなか, 同様の支援要請が増えたため, 中国地方整備局の散水車6台, 九州地方整備局の散水車2台および小型の散水車を2台リースし, 散水作業を行っている。



写真-5 散水車による散水作業状況



写真-6 三原市内の路面清掃作業状況

■路面清掃支援

路面清掃では, 路面に堆積した土砂が乾燥・凝り固まった状態との現地からの情報に基づき, ブラシ式の路面清掃車を派遣している。一工夫として, コスト削減等のために路肩除草作業で使用しているワイヤブラシが, より効果的に土砂を除去できたため, 派遣時にワイヤブラシを装着し現地へ派遣している。



写真-7 路面清掃作業

写真-8 ワイヤブラシ

■側溝の閉塞対策等支援

路面粉塵対策等の支援が進むなか, 路面清掃車や散水車などの復旧作業車両が減ったタイミングで, 坂町より側溝等へ流れ込んだ土砂の撤去支援要請があり, 中国地方整備局の排水管清掃車2台により作業を行っている。

なお, 狭い路地での作業が多く有ったため, 排水管清掃車と側溝清掃車が一台となった「水循環式」の清掃車がスペース的に優位と感じている。



写真-9 排水管清掃作業(水循環式)
(広島県安芸郡坂町)

■対策本部車の派遣

TEC-FORCE（被災状況調査班）の作業、打合せ等の場所として、中国地方整備局の対策本部車3台（拡幅型2台、バス型1台）を派遣している。

各被災状況調査班は対策本部車を拠点に、作業にあたっての施工者との打合せや自治体への技術的アドバイスのほか、日々の進捗報告資料の作成、Webカメラの設置撤去、自治体等との現地確認等を行っている。

当時は気温も高く、熱中症の恐れもあったため、クーラーのある対策本部車は長期間の作業で体調を崩す職員を出さず、過酷な作業を効率的に実施できる作業空間となっている。



写真-10 拡幅型 設置状況



写真-11 打合せ状況



写真-12 バス型 設置状況



写真-13 打合せ状況

■応急組立橋の派遣

7月豪雨災害では、多くの橋梁が流されていたため、応急組立橋の要請が複数寄せられた。被災状況を確認し、応急組立橋の架設の可否を確認した結果、9月20日から約2年の予定でA活荷重の応急組立橋約28mを岡山県小田郡矢掛町へ派遣している。



写真-14 岡山県小田郡矢掛町

■（一社）日本建設レンタル業協会と連携

本省総合政策局 公共事業企画調整課と（一社）

日本建設レンタル協会との間で、ミニバックホウ（小型油圧ショベル）を被災地へ100台支給することの調整がなされた。これを受け、自治体へ支援ニーズの確認を行い、中国地方整備局管内で2市3町に計18台を支援している。

■災害復旧活動要請者の確保

災害対策用機械や道路維持用機械による災害復旧活動の要請は、各事務所等が締結して災害協定に基づき行っている。

災害協定締結者は、地元の建設会社等がほとんどのため、災害発生から数日間は、膨大な土木施設等の応急復旧工事と多くの自治体等からの災害対策用機械の派遣要請が重なったこと、また、発災後に複数発生した台風への備え、さらには道路清掃や側溝清掃が長期間となったことなどにより、災害協定に基づく派遣要員の確保に苦慮したため、災害協定締結者の拡充を図ることで、災害対応へ備えるとともに、要請を受諾いただける災害協定締結者の負担軽減に繋げたいと考えている。

■まとめ

中国地方整備局では、7月豪雨災害の応急的な対応について、後世への伝達等を目的として記録誌をとりまとめている。

近年、多発・甚大化する自然災害に備え、7月豪雨災害の復旧活動を振り返り、改善すべき点は改善を行い、継承すべき点は確実に後継することが必要と考えている。

現在、中国地方整備局では、排水ポンプ車による排水作業の連続性を確保するため、新たな技術開発の検討、ホースブリッジ等の配備や排水ポンプ車の電源ケーブルの延長化などを段階的に進めていく予定である。

また、中国地方整備局職員向けの研修では、7月豪雨災害の復旧活動での課題を踏まえ、より実践的な内容での研修となるよう、取り組んでいるところである。

さらに、（一社）日本建設レンタル業協会中国支部と中国地方整備局において、意見交換を行っており、災害が発生した場合の対応が、より迅速かつ効果的な支援活動となるよう検討に着手したところである。

5. 阿蘇大橋地区斜面对策工事にて実施した 斜面对策工に特化した「のり面 CIM」

株式会社熊谷組 ○ 石濱 茂崇
九州地方整備局 江口 秀典, 山上直人

1. はじめに

現在、建設業界では、生産システムの業務効率化や高度化を目指して CIM (Construction Information Modeling/Management) の導入が活発化している。その中で、斜面对策工事においてもトンネル工事や道路工事、橋梁工事等と同様に CIM を導入し、安全性を確保するために適切な施工管理を行い、維持管理段階へ引き継ぐことが求められているものの、他工事と比較すると適用されている事例は少ない。例えば、日本建設業連合会による「2018 施工 CIM 事例集」では、トンネル 11 件、道路 5 件、橋梁 7 件に対して、斜面对策工事は 0 件となっており、2019 年版においても本工事の 1 件のみとなっている。また、国土交通省による CIM 導入ガイドライン(案)においても斜面对策工事は示されていない。斜面对策工事において CIM の適用事例が少ない理由としては、トンネルやダムと比較すると、1 工事あたりの施工規模が小さいために CIM を導入する効果が得られづらいこと、および斜面对策工事は地質と密接に関わっているものの、施工中の三次元的な地質評価が難しいことが挙げられる。

このような状況の中、阿蘇大橋地区斜面对策工事では、大規模斜面崩落であることから施工数量が多いこと、および災害直後であることから地質情報が少ない中で、施工中に得られた地質情報を整理しながら斜面对策工事を進める必要があったことから、CIM を活用しながら工事を進めることとした。

前述したように、斜面对策工事における CIM の実施の事例が乏しいことから、適応するソフトウェアは存在しない。そこで本工事では、斜面对策工事に特化した CIM のシステムを開発し、実施工に適用することとした。

2. 阿蘇大橋地区斜面对策工事の概要

阿蘇大橋地区では、平成 28 年 4 月 16 日の熊本地震(本震)により大規模な斜面崩壊が発生した。崩壊の規模は、長さ約 700m、幅約 200m、崩壊土砂量は約 500,000m³(推定)にも及び、斜面の下部に位置する国道 57 号や JR 豊肥本線が押し流され、

国道 325 号の阿蘇大橋が落橋する大災害となった(図-1)。これらの寸断された交通網は、熊本都市圏と大分・宮崎を結ぶ、生活、経済、観光を支える重要交通であることから、早期復旧を目指し、国が高度な技術力をもって崩壊斜面对策に取り組むこととなった。崩壊斜面の周辺には、開口亀裂や段差がみられ、余震や降雨の影響により崩落が拡大する恐れがあったことから、本工事に先立ち緊急対策として、「監視装置の整備」、「工事用道路の整備」、「土留盛土工の設置」、「頭部排土工」が実施された(図-2)。これらの工事では、崩壊斜面上部の不安定土塊が崩落することによる二次災害の恐れがあることから、対策前の崩壊地内は立入禁止とし、作業は無人化施工や遠隔操作にて実施された¹⁾。

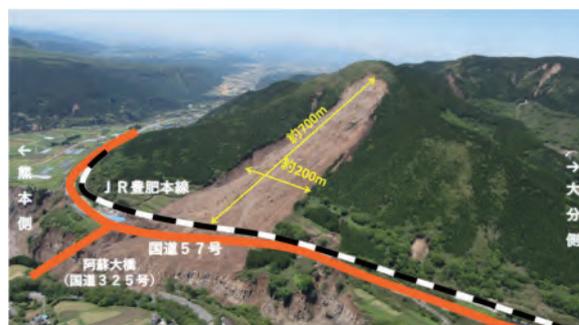


図-1 阿蘇大橋地区の被災状況

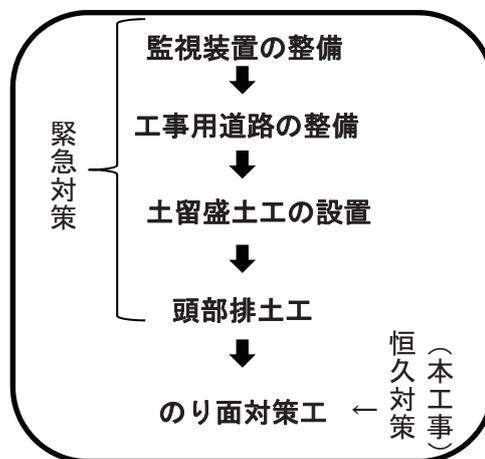


図-2 阿蘇大橋地区斜面对策の流れ

このような無人化施工による緊急対策工事の完成を受け、阿蘇大橋地区斜面对策工事として、恒久対策となる「のり面对策工」を開始し、有人作業による植生マット・ネット工等の施工を実施した。本工事の工事概要は、以下に示すとおりである。

工事名称：阿蘇大橋地区斜面对策工事
 工事場所：熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字立野
 発注者：国土交通省九州地方整備局
 受注者：株式会社熊谷組
 工期：2017年9月7日～2019年9月30日
 工事内容（主要工事，数量は当初）
 ・植生マット工 約 71,300m²
 ・密着型安定ネット工 約 51,100m²
 ・高強度ネット工 約 17,200m²
 ・鉄筋挿入工 約 8,300本

なお、前述したように崩壊地内が立入禁止であったことから、ボーリング調査等が実施されていないため、土岩境界等の地山状況が把握されていない状況で施工を進めなければならなかった。一方、密着型安定ネット工では、アンカー工の確実な施工のために、土岩境界等の地山状況の把握したうえで地山に応じた適切なアンカータイプの選定を行う必要がある。このため、本工事では、施工中に地山状況を把握する調査を全箇所で行い、その結果に基づいてアンカータイプを決定することとした。このため、得られた大量の地質データを整理し、迅速かつ効率的に施工管理を行う必要が生じた。このような状況から、本工事において CIM を導入し、効率的に斜面对策工を実施する体制を整えることとした。なお、既存のソフトウェアでは、適応するものが存在しないため、本工事において斜面对策工事に特化した専用の CIM のシステム（のり面 CIM）を開発した。

3. のり面 CIM の開発

3.1 開発したのり面 CIM の概要

のり面 CIM は、斜面对策工の施工データを集約・三次元モデル化（可視化）し、一元管理した情報を次ブロックの施工へフィードバックすることにより、施工の効率化を図るシステムである。

本システムは、斜面对策工事で実施するグラウンドアンカー工や鉄筋挿入工などに対し、設置位置やアンカー諸元、当該箇所の地質情報、施工日、試験結果などの属性情報を各アンカーに付与し、三次元空間に配置する（図-3）。配置したアンカーには、施工状況写真や試験結果のデータシート等もリンクさせて直接ファイルを閲覧できる（図-4）。

3.2 開発したのり面 CIM の特徴

本システムでは、Excel[®]等の表計算ソフトにて整理した施工実績のデータベースを読み取る仕様であり（図-5）、現場での入力作業の負担が少なくなる工夫をしている。

なお、本システムは、三次元地質解析ソフトウェア（五大開発株式会社製「Make Jiban[®]」）を基本としていることから（Make Jiban[®]のアドオン機能）、調査ボーリングの三次元空間への配置や地質構造の三次元的な解析も可能であり、すべり面の形状や定着層の位置も三次元表示できる（図-6）。特にグラウンドアンカーにおいてこの機能は有効であり、すべり面と定着層の広がりとの関係を三次元的に把握することが可能なことから、施工中に確認する定着層の異常値の発見が容易となる。さらに、斜面安定計算ソフトウェアへの連係が可能なことから、地質状況が想定と異なった場合には、早急に再計算ができる仕組みとなっている。その一方で、三次元地質解析ソフトウェアを使用したことから、グラフィックボードを搭載したある程度ハイスペックなパソコンを準備することが望ましい。

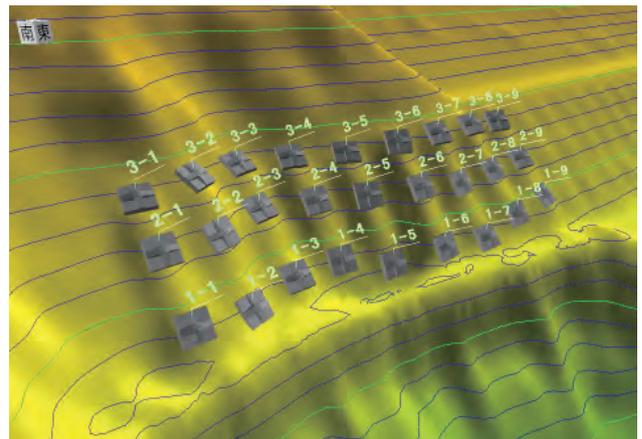


図-3 のり面 CIM 三次元空間配置表示例



図-4 属性情報および施工写真表示例

No.	種別	挿入角度(X)	挿入角度(X2)	挿入深さ	振動調査日	土質	岩判定	アンカータイプ	アンカー長さ	試験日	結果
1	土質	-17.0	-18.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
2	土質	-18.0	-19.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
3	土質	-19.0	-20.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
4	土質	-20.0	-21.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
5	土質	-21.0	-22.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
6	土質	-22.0	-23.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
7	土質	-23.0	-24.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
8	土質	-24.0	-25.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
9	土質	-25.0	-26.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
10	土質	-26.0	-27.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
11	土質	-27.0	-28.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
12	土質	-28.0	-29.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
13	土質	-29.0	-30.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
14	土質	-30.0	-31.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
15	土質	-31.0	-32.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
16	土質	-32.0	-33.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
17	土質	-33.0	-34.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
18	土質	-34.0	-35.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
19	土質	-35.0	-36.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
20	土質	-36.0	-37.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
21	土質	-37.0	-38.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
22	土質	-38.0	-39.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
23	土質	-39.0	-40.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
24	土質	-40.0	-41.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
25	土質	-41.0	-42.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
26	土質	-42.0	-43.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
27	土質	-43.0	-44.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
28	土質	-44.0	-45.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
29	土質	-45.0	-46.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK
30	土質	-46.0	-47.0	45	2017/12/9	C30	1.4	土層部用	1.0	2017/12/9	調査完了/OK

図-5 Excel®による入力画面の例



図-7 探針棒による調査状況

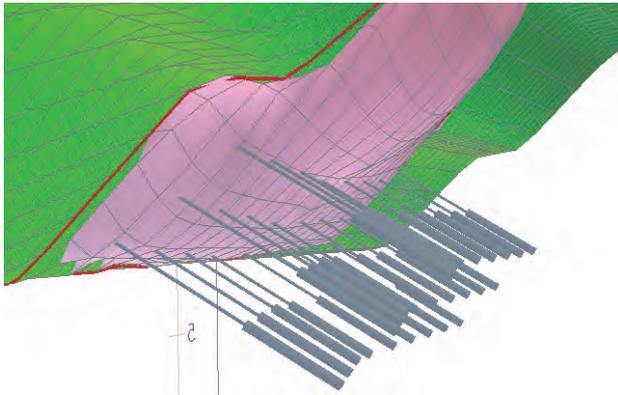


図-6 すべり面の三次元表示例

4. のり面 CIM の適用

阿蘇大橋地区斜面对策工事では、密着型アンカーネット工についてのり面 CIM を適用した。また、グラウンドアンカー工において施工後の CIM 化を実施した。

4.1 密着型アンカーネット工での事例

密着型安定ネット工は、土砂厚に応じて適切な鉄筋挿入式のアンカータイプを選定する必要があるものの、前述したように、本工事では、地山状況（土岩境界）が把握されていなかった。よって、本工事で実施するのり面 CIM においては、探針棒調査（鉄筋の土層への打ち込み）および振動センサーを使用して土砂層の厚さをアンカー施工箇所の全点（約 13,000 点）で確認する調査を施工中に実施した（図-7）。また、確認した土砂層の厚さから土砂と岩の境界を三次元モデル化し、アンカー諸元（種別、アンカー長さ）、アンカー配置、アンカー強度を CIM により一元管理して、次施工にフィードバックを行った。

本システムでは、Excel®等の表計算ソフトにて作成した施工実績のデータベースを読み取り、密着型安定ネット工のアンカーを三次元空間上に配置する（図-8）。また、読み込んだ実績データ（土砂厚）を基に 3 次元の地質境界（土岩境界）が自動生成される。さらに、アンカーの属性（諸元）を一本ごとに表示する機能を有しており、状況写真や帳票等もリンクさせることが可能である。

密着型アンカーネット工における CIM を適用した施工のフローを図-9 に示す。

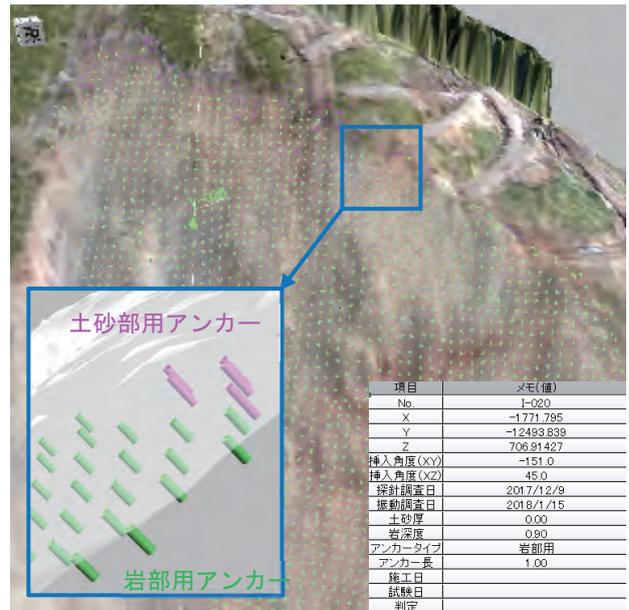


図-8 密着型アンカーネット工 CIM 適用状況



図-9 のり面 CIM 施工フロー図

4.2 グラウンドアンカー工での事例

地山状況が不明確という地質的な課題があったことから、当初、のり面 CIM の適用は崩壊地内の密着型アンカーネット工のみとした。また、時間的な制約があったことから、密着型アンカーネット工専用の CIM として開発した。このため、汎用性が低く、他工種への転用が困難であったため、グラウンドアンカー工や鉄筋挿入工等の他工種への対応可能とする改良を行った。改良したシステムについて、阿蘇大橋地区斜面対策工事で実施されたグラウンドアンカー工において、施工後であるものの試験的に CIM を適用した。

グラウンドアンカーで実施したのり面 CIM は、密着型安定ネット工にて適用したものと同様に表計算ソフトにて作成した施工実績やアンカー諸元を読み取り、アンカー（反力体および tendon）を三次元空間上に配置する（図-10）。データベースに定着層出現深度が入力されている場合には、自動的に地層境界（表層部と定着層との境界）を三次元で作成して表現することが可能となっている。作成した地質境界は、地表面やアンカー体、すべり面等と同じ三次元空間内で表示することが可能で（図-10）、直感的に定着層の形状やすべり面との関係を捉えることができる。また、任意の場所の断面図を表示することが可能となっている（図-11）。

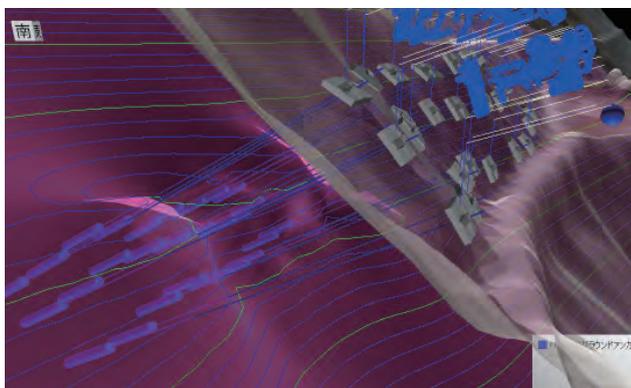


図-10 グラウンドアンカー工のり面 CIM 適用状況

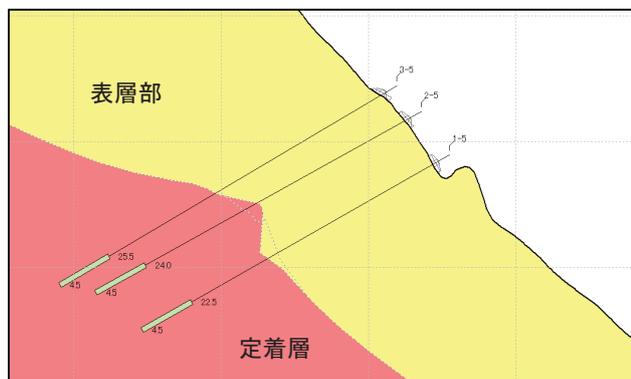


図-11 グラウンドアンカー工適用事例任意断面表示

5. のり面 CIM の効果

のり面 CIM は、施工中の調査データや施工実績を集約・三次元モデル化（可視化）し、一元管理した情報を次ブロックの施工へフィードバックすることで、施工の効率化を図った（図-12）。仮に、のり面 CIM を導入しなかった場合、未着型アンカーネット工では地盤条件が定かでない状況であったことから、少なくとも施工当初は抽象的な感覚でアンカー諸元を判断していたと考えられ、ある程度の規模の手戻りが発生していた可能性がある。施工前に想定した密着型安定ネット工の数量では、土砂部用もしくは土被り用アンカーが主体とされていたものの、実際には岩部用アンカーが主体となり、数量的には約 12,000 本の差異がみられた。このうち、1 割が手戻りとなったと仮定した場合、1,200 本のやり直しが発生したことになる。密着型安定ネット工のアンカーは、40 本/日程度が施工できることから、30 日程度の工程短縮効果があったと想定される。

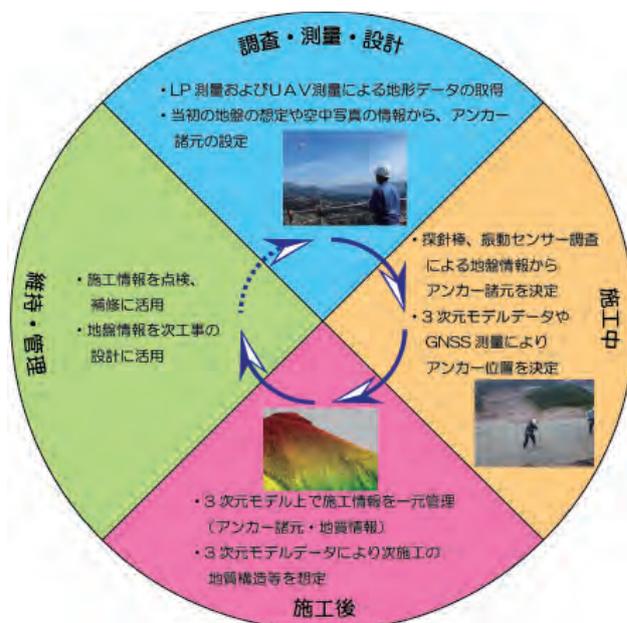


図-12 のり面 CIM 実施概念図

6. 今後の課題

のり面 CIM は、地質解析ソフトウェアをベースに開発したことから、維持・管理に引き渡す場合、専用のソフトウェアが必要となり、かつ操作に専門の知識が必要となる。このため、現在はビューワーを用いる簡便なシステムを考案中である。

参考文献

- 1) 中出 剛・北原 成郎・光武 孝弘・野村 真一：無人化施工技術を核とした i-Construction による緊急災害対応—阿蘇大橋地区斜面防災対策工事—，地盤工学会誌，Vol.66，1，pp.20-23，2018年

6. 無人化施工におけるモニタ画像の向上について

国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 ○ 稲垣 義明
国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 加藤 浩志
国土交通省 関東地方整備局 大宮国道事務所 宮野 博匡

1. はじめに

近年、地震、台風等により土砂崩れ、道路の寸断、河道閉塞など災害が多く発生している。

災害時の初期における現場での復旧作業は、主に現場への進入路の確保や障害物撤去などが考えられ、それらの作業は迅速かつ効率的に行う必要があるが、現場条件によっては二次災害防止の観点から、遠隔操作式バックホウなど無人化施工機械による復旧作業も想定される。

しかし、遠隔操作時の復旧現場への移動や現場作業については車載カメラからの映像により行っているため、オペレータ搭乗時に比べ視認性不足等により作業効率は低下する。

そのため、遠隔操縦時の作業効率の向上を目的として、平成29年度より関東技術事務所で保有している遠隔操縦式バックホウを使用し、現在実用化されている映像技術の活用による視認性の向上について、実用性の検証を実施した。

平成29年度は、施工時に必要となる「前方映像」と、走行時や周辺状況を確認するために必要となるやや上方からの広範囲な映像として上部から斜め前方を見下ろした「鳥瞰映像」や真上から見下ろした「俯瞰映像」について、カメラの画質や画角を重点に実用化されている技術について抽出し、実用性の検証を実施した。

検証は、検証ヤード上でモニタ画面のみでの遠隔操作による模擬作業を実施した。

検証結果より、ハイビジョン動画(1,920×1,080)で伝送可能な車両搭載型制御カメラを使用して、鳥瞰映像用にバックホウキャビン後方上部の左右に1台ずつ設置(以下、設置したカメラを鳥瞰カメラという)したものと、前方映像用にキャビン上部に1台設置(以下、設置したカメラをHD車載カメラという)したものを組合せた映像技術(以下、鳥瞰映像システムという)と、ハイビジョン動画(約92万画素)で伝送可能なカメラを使用して、バックホウ機体の前後左右に1台ずつ設置してそれらの映像を合成し俯瞰映像としたものと、HD車載カメラ1台を組合せた映像技術(以下、俯瞰映

像システムという)の2映像技術について視認性の向上に有効であると確認された。

本報告は、平成29年度検証(以下、過年度検証という)にて有効性が確認された2映像技術について、引き続き平成30年度に実用性の検証を実施したのでその結果について紹介する。

2. 実用性の検証

2.1 検証の概要

過年度検証では、鳥瞰映像システム及び俯瞰映像システムの有効性が確認されたが、操作オペレータは遠隔操作式バックホウの操作実績のある熟練オペレータ1名により検証を実施したため、本検証ではオペレータの熟練度の違いによる視認性及び操作性について再度検証を実施し、2映像技術の有効性について確認した。

また、併せて操作用モニタの配置の違いによる視認性及び操作性について検証を実施し、最適なモニタ配置方法を決定した。

2.2 検証の方法

(1) 検証コース走行による検証

操作用モニタを見ながら遠隔操作で検証コースを3回走行し、その走行時間による走行性により、視認性及び操作性について検証を実施した。

検証コースは、過年度検証に使用したコースと同じものを造成し、図-1、写真-1に示すとおり、直線、盛土障害物、クランク(4回)を組合せたコースとした。

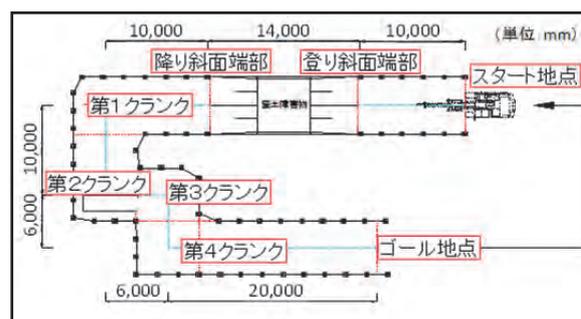


図-1 検証コース (平面図)



写真-1 検証コース（全景）

(2) ヒアリング調査による検証

検証コース走行後に、操作用モニタの見やすさについてオペレータへヒアリング調査を実施した。

ヒアリング結果については、4段階（優5点、良2点、可1点、否0点）により得点化することで評価することとした。

なお、非熟練者については、無人化施工機械の操作者として配置された場合の作業効率を考慮し、評価点について重み付けを行い、段階評価点を熟練者の2倍とした。

2.3 検証技術

(1) 鳥瞰映像システム

本システムは、上から斜め前方に見下ろす鳥瞰映像により、より広角に前方方向の視認に有効である。

しかし、バックホウ機体にカメラ用取り付け架台の設置が別途必要となるため、過年度検討においてはこの取り付け架台の設計を実施した。

各カメラの設置状況を写真-2に、モニタ表示画面を写真-3に示す。

なお、鳥瞰カメラの設置位置については、過年度検討において視認性を考慮し、最適な位置を決定しているが、今回使用したカメラは広角度性能が向上（水平画角86.5度（+22.8度の向上））した新型を使用したため、再度、設置位置を検討し、過年度検討と同等以上の画角となることを確認（写真-4）のうえ左鳥瞰カメラの位置のみ変更し、図-2に示す位置とした。



写真-2 カメラ設置状況（鳥瞰映像）



写真-3 モニタ表示画面（左から、左鳥瞰映像、HD車載映像、右鳥瞰映像）



写真-4 左鳥瞰カメラ映像（左から過年度検証時の画角、本検証時の画角）

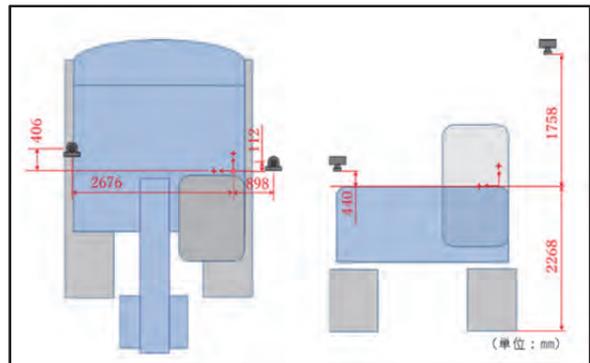


図-2 鳥瞰カメラ設置位置図

(2) 俯瞰映像システム

本システムは、機体真上から見た俯瞰映像により、機体全周方向の視認に有効である。

各カメラの設置状況を写真-5に、各カメラ映像によるモニタ表示画面を写真-6に示す。



写真-5 カメラ設置状況（俯瞰映像）



写真-6 モニタ表示画面（左から、俯瞰映像、HD車載映像）

2.4 被験者

被験者は、無人化施工機械の操作の熟練度を考慮して、熟練者3名、非熟練者3名の合計6名とした。

2.5 モニタの配置構成

モニタ配置構成については、表-1に示すとおり、鳥瞰映像システムは配置①、配置②、配置③の3種類、俯瞰映像システムは配置④、配置⑤の2種類とした。

また、モニタは図-3に示すとおり、遠隔操作を行うオペレータの視線に対し、鉛直方向に70度、水平方向に90度の範囲に配置し、安定注視野と頭部運動を考慮した配置とした。

なお、視線の高さは、オペレータの身長、座高等個人により異なるため、無段階に高さ調整ができる椅子を使用した。

表-1 モニタ配置構成一覧

映像システム	モニタ配置	モニタ配置構成	カメラ構成
鳥瞰映像	配置①	左鳥瞰映像、右鳥瞰映像 車載映像	HD車載カメラ 1台 鳥瞰映像用カメラ 2台
	配置②	車載映像 左鳥瞰映像、右鳥瞰映像	
	配置③	左鳥瞰映像、車載映像、右鳥瞰映像	
俯瞰映像	配置④	俯瞰映像、車載映像	HD車載カメラ 1台
	配置⑤	車載映像、俯瞰映像	俯瞰映像用カメラ 4台

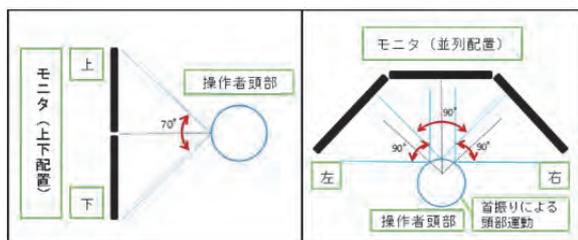


図-3 モニタ配置図（左から垂直方向、水平方向）

2.6 検証結果

(1) 鳥瞰映像システム

モニタ配置構成の配置①、配置②、配置③について、検証コースによる走行による検証及びヒアリングによる検証結果を以下に示す。

① 検証コース走行による検証

検証結果を表-2に検証状況を写真-7に示す。

表-2 検証コース走行による検証結果（鳥瞰映像）

映像システム	鳥瞰映像				
	非熟練者				
被験者区分	平均(3回)			平均(3者)	標準偏差
	A	B	C		
配置①	2分8秒	2分2秒	2分4秒	2分4秒	2秒
配置②	2分6秒	2分5秒	2分5秒	2分5秒	0秒
配置③	2分12秒	2分9秒	2分7秒	2分9秒	2秒
被験者区分	熟練者				
	平均(3回)			平均(3者)	標準偏差
検証番号	D	E	F		
配置①	1分58秒	2分4秒	1分58秒	2分0秒	3秒
配置②	1分58秒	2分8秒	1分59秒	2分2秒	4秒
配置③	1分57秒	2分8秒	2分0秒	2分1秒	5秒



写真-7 検証状況（左から配置①、配置②、配置③）

平均走行時間からは熟練者についてはいずれも差はほとんどなかったが、非熟練者については、配置①と配置②と比較して配置③に差異が見られた。

また、非熟練者と熟練者との平均走行時間については、大きな差は見られなかった。

② ヒアリング調査による検証

評価結果を表-3に示す。

配置①が非熟練者、熟練者ともに高い評価となった。

また、オペレータへのヒアリング結果を整理したものを下記に示す。

- ・モニタの大きさに対しては、大小等の意見はなかった
- ・主に左右の鳥瞰カメラによる映像を見て操作し、車載カメラによる映像はバックホウ全体の位置合せ等の補助的なものとして使用した
- ・頻繁に確認するモニタについては、下段にある方が見やすい
- ・左鳥瞰映像が盛土障害物の通過時にぶれが大きくて見づらい

表-3 ヒアリング調査による評価結果（鳥瞰映像）

映像システム	鳥瞰映像								
	非熟練者				熟練者				
	A	B	C	小計	D	E	F	小計	
検証①	10	10	4	24	2	5	2	9	33
検証②	4	4	4	12	2	2	2	6	18
検証③	2	2	10	14	2	1	5	8	22

(単位:点)

(2) 俯瞰映像システム

① 検証コース走行による検証

検証結果を表-4 に検証状況を写真-8 に示す。

表-4 検証コース走行による検証結果（俯瞰映像）

映像システム	俯瞰映像				
被験者区分	非熟練者				
検証番号	平均(3回)			平均(3者)	標準偏差
	A	B	C		
配置④	2分9秒	2分5秒	2分17秒	2分10秒	5秒
配置⑤	2分7秒	2分7秒	2分8秒	2分7秒	0秒
オペレータ区分	熟練者				
検証番号	平均(3回)			平均(3者)	標準偏差
	D	E	F		
配置④	2分7秒	2分21秒	2分3秒	2分10秒	8秒
配置⑤	2分6秒	2分19秒	2分5秒	2分10秒	6秒

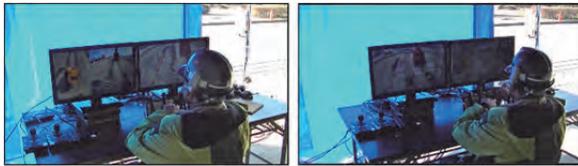


写真-8 検証状況（左から配置④, 配置⑤）

平均走行時間については、非熟練者及び熟練者において配置⑤、配置④の順となった。

非熟練者と熟練者との平均走行時間については、大きな差は見られなかった。

② ヒアリング調査による検証

評価結果を表-5 に示す。

配置④が非熟練者、熟練者ともに高い評価となった。

また、オた、オペレータからのヒアリング結果を整理したものを下記に示す。

- ・モニタの大きさに対しては、大小等の意見はなかった
- ・操作は俯瞰映像を見て操縦、車載カメラがよる映像はほとんど見ていない
- ・バックホウの周囲全体が見えるため、操作しやすい
- ・映像のブレが少なく操作しやすい

表-5 ヒアリング調査による評価結果（俯瞰映像）

(単位:点)

映像システム	俯瞰映像								
被験者区分	非熟練者				熟練者				
	A	B	C	小計	D	E	F	小計	
検証④	4	4	4	12	5	5	5	15	27
検証⑤	4	4	4	12	2	5	5	12	24

3. 考察

(1) 鳥瞰映像システム

本検証により、モニタ画像による無人化施工機械の遠隔操作時の車載映像、左鳥瞰映像及び右鳥瞰映像について、それぞれの役割が判明したので、その内容について下記に示す。

① 車載映像の役割

- ・バックホウ走行時や掘削等の作業時には、前方を視認し、障害物の有無を確認できる
- ・フロント部（ブーム、アーム、バケット）の状態を確認し、安全な走行状態であるか、異常はないかを確認できる
- ・地面とフロント部の離隔を確認できる

なお、この車載映像内で左右の履帯の先端を視認できれば安全性が確保でき、さらに有効である。

② 左鳥瞰映像の役割

- ・左方向の視野を広げ、障害物の有無やバックホウ左側の離隔を確認できる
- ・高い位置にカメラを設置しているため、キャビンの影響を受けず前方が視認できる
- ・機体から張り出した位置にカメラを設置しているため、バケットに対して、少し斜め方向からの映像となり、奥行き方向の深度認識の補完ができる



写真-9 車載映像の役割



写真-10 左鳥瞰映像の役割

③ 右鳥瞰映像の役割



写真-11 右鳥瞰映像の役割

- ・ 右方向の視野を広げ、障害物の有無を確認ができる
- ・ ステップ付近にカメラを設置しているが、キャビンの影響を受けず、前方が視認できる
- ・ オペレータがキャビン内で操作する目線の高さにカメラを設置しているため、カメラの設置位置を高くした場合に比べ、高さ方向の誤差が少なくなり、高さ方向の補完ができる

(2) 俯瞰映像システム

俯瞰映像システムは、車載映像を併用することにより、バックホウのフロント部の視認性が補完でき、画像合成による距離感是一定で、映像画質も良く、画像合成ソフトの安定性は高いと考えられる。

非熟練者及び熟練者の複数人のオペレータによる検証コース走行による検証結果においても、走行時間に大きな差や偏りは現れなかったことから、無人化施工機械の遠隔操作熟練度によらず、バックホウ走行時には実用性の高いシステムと考えられる。

掘削作業においては、高い精度を必要としない現場には実配置が可能と思われるが、バケット位置の距離感を認識するためには、鳥瞰や外部カメラ等による情報の補完が必要であると考えられる。



写真-12 俯瞰映像システム（合成映像用前方カメラ）



写真-13 俯瞰映像システム（合成映像）

また、画像合成技術により、バックホウの全周囲の状況を、継ぎ目なしに画像で確認できるので、狭隘な場所や、遠隔操作時において操作者から死角となる障害物等があるような環境下での移動ガイダンスに適していると考えられる。

(3) モニタ配置構成

① 鳥瞰映像

検証コース走行による検証では、個人差が若干見受けられるものの、無人化施工機械の遠隔操作経験の有無による顕著な差は、走行時間に現れることはなかった。

モニタの配置は3種類の配置で検証したが、配置①のモニタ配置が良い結果となった。

また、非熟練者については、配置①と配置②と比較して配置③に差異が見られたが、これは配置③は車載カメラ映像を中央に、その両側に左右の鳥瞰カメラ映像を配置したことで、鳥瞰映像を確認する際の左右の首振り動作に要する時間が影響したためと考えられる。

そのため、複数のモニタを並列に配置する場合は、首振りによる頭部運動を抑えるよう配慮することが重要であると考えられる。

各検証後にオペレータへヒアリングを実施して判明したことは、バックホウ走行時にはキャビン上部に設置した車載映像は、検証コースとの位置を把握するために補助的に使用しているだけであるのに対し、左右の鳥瞰映像からは、機体と検証コースの離隔や履帯の位置確認等、走行時に必要な情報のほとんどを得ていることがわかった。

これは走行時における移動ガイダンスとして、バックホウの両脇の離隔が認識しやすく、前方視認性、左右の履帯の視認性が優れている鳥瞰映像が有効であると考えられる。

モニタは、今回の検証では24インチのサイズ

を使用した。大ききの大小には特に過不足のない意見であった。

以上のことから、鳥瞰映像システムにおけるバックホウ走行時に最適なモニタ配置の要素として、以下に示す。

これらの事項に配慮して、モニタ配置することが重要であると考えられる。

- ・鳥瞰モニタは、なるべく近い位置の左右に配置する
- ・鳥瞰モニタを、車載映像等の他のモニタと上下に配置する場合は、下段に配置する
- ・鳥瞰モニタの他に、複数のモニタを使用する場合は、オペレータが首振りによる頭部運動をした時に、モニタと正対するように配置する
- ・各映像カメラは、バックホウの挙動による画像のブレ等の影響が少なくなるように設置する
- ・各モニタは、オペレータの水平目線に対して、鉛直方向 70 度、水平方向 90 度の安定注視野内に配置する

② 俯瞰映像

検証コース走行による検証では、個人差が若干見受けられるものの、無人化施工機械の遠隔操縦操作経験の有無による顕著な差は、走行時間に現れることはなかった。

モニタの配置は 2 種類の配置で検証したが、配置④のモニタ配置が良い結果となったが、ヒアリングによる結果からはどちらも差がなく、これはモニタ画面を車載映像と俯瞰映像の 2 台構成としたことで、視線移動が少なく、移動ガイダンスに必要な情報が速やかに得られたためではないかと考えられる。

各検証後にオペレータへヒアリングを実施して判明したことは、バックホウ走行時には機体正面の車載映像は、ほとんど見ていないのに対し、俯瞰映像からは、機体の全周囲と検証コースの離隔や履帯の位置確認等、走行時に必要な情報のほとんどを得ているのが判明した。

これは、走行時における移動ガイダンスとして、前方及び全周囲の視認性が優れていることと、左右のコースとの離隔が識別できる俯瞰映像が有効であると考えられる。

このことから、俯瞰映像システムにおける俯瞰モニタの最適配置は、車載映像等の他のモニタと配置する場合は、オペレータの正面に配置し、各モニタは、オペレータの水平目線に対して、鉛直方向 70 度、水平方向 90 度の安定注視野内に配置することが重要であると考えられる。

また、俯瞰映像からは、バックホウの移動時に必要な情報の多くを得られることから、上記で述

べた安定注視野の範囲に留意して、大型モニタを使用することも有効であると考えられる。

4. おわりに

今回の検証した鳥瞰映像システム及び俯瞰映像システムは、非熟練及び熟練の複数人のオペレータによる検証結果からも遠隔操縦操作の熟練度等の個人差はほとんどなく、汎用性の高さも実証されたため、いずれも実用レベルにあると考えられる。

鳥瞰映像システムについては、カメラの首振りやズーム機能等、作業への対応力が高く、画質も良いため、掘削・積み込み作業等のバケット・アーム・ブームを主として使用する作業に十分対応できるものと考えられる。

しかし、その機能を有効に発揮させるためには、カメラ機体の重量を考慮した取り付け用架台の製作が必要となり、設置手間や費用面での課題があるため、実用化へ向け今後のカメラの小型軽量化に期待したい。

俯瞰映像システムについては、鳥瞰映像システムに比べ、カメラ取付用架台の設置手間等を考えると簡便なことと、システムの価格も廉価なことから運用面では有効であり、今後の画質等の向上に期待したい。

今回、それぞれのシステムに組合せて使用したキャビン上部に設置した HD 車載カメラについては、前方の視認性やバケットの作業位置等作業が行う上で有効であると考えられるので、今後導入を検討していきたい。

7. 自然災害現場の復旧にあたる

遠隔操作式建設機械の操縦性向上に関する研究

東京工業高等専門学校
東京工業高等専門学校
東京工業高等専門学校
(株)熊谷組
(株)熊谷組
(株)熊谷組

○ 瀧島 和則
松林 勝志
山下 晃弘
飛鳥馬 翼
古川 敦
北原 成郎

1. はじめに

自然災害現場での無人化施工は二次災害を防ぐために極めて有効な手段である。オペレータは建設機械の運転室内からの映像と建設機械を俯瞰する映像を頼りに、遠隔操縦室で操作するが、搭乗操作と比較して実際の建設機械の傾きや振動などを把握することが困難である。そのため作業効率が50-60%に低下する¹⁾と言われている。

そこで本研究では、操縦室内にいるオペレータに、建設機械の運転室内からの視界の他、建設機械の傾きや振動・音を提供することで、安全かつ効率の高い運用を目指すことを目的とする。具体的には、東京工業高等専門学校で開発したスポーツ観戦システム、「シンクロアスリート²⁾」(写真1)を応用する。建設機械側に360度カメラとセンサを設置し、運転室内からの映像と音に加え、建設機械の動きを操縦室にリアルタイムに転送する。操縦室では、映像をVRヘッドマウントディスプレイ等に表示し、音を再生すると共に、操縦席が取り付けられたモーションベースで動きを再現する。遠隔操作でありながら、実際に搭乗した状態に近い環境をオペレータに提供することで、効率的かつ、建機を傾斜地などで運用する場合でも安全に遠隔操作できるようにする。

本稿ではシンクロアスリートを用いた遠隔操縦装置と遠隔操縦実験結果について報告する。

2. シンクロアスリートについて

2.1 基本構成

シンクロアスリートは、3自由度モーションベースとヘッドマウントディスプレイ(以下、HMD)を使用したスポーツ観戦システムである。カヌー競技に応用した場合の選手側システム構成を図-1に、観戦側システム構成を図-2に示す。

選手側では、360度カメラとスマートフォンをカヌーに取り付け、選手目線での映像と選手の動き(加速度センサ出力)を撮影・記録する。カヌーに



写真-1 シンクロアスリート

これらを取り付ける場合は、厳密には選手目線ではないが、選手と一緒に二人乗りで競技をしているのと同じ体験ができることになる。例えば、マラソンなどの競技では、頭の上などにカメラを付けることになる。この場合は、選手目線の映像と選手そのものの動きを体験できることになる。ストーリーミングサーバ(スティック PC等)は、後述するリアルタイムモードで使用する。

観戦側では、選手側で記録した360度映像をディスプレイとHMDで再生すると同時に、選手の動きデータにより、モーションベースを駆動する。モーションベースの仕様を表-1に示す。



図-1 選手側システム構成

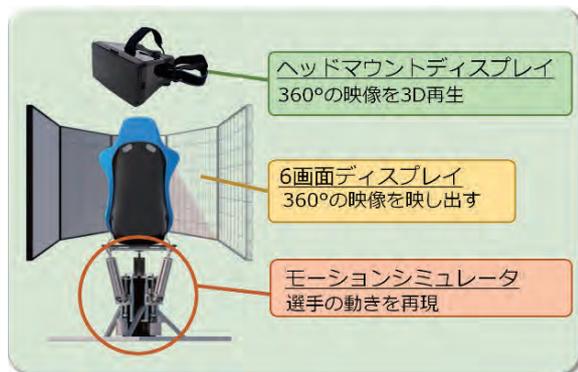


図-2 観戦側システム構成

表-1 モーションベースの仕様

項目	仕様
構造	3軸(鉛直方向並進, ロール, ピッチ) パラレルリンクモーションベース
動力	電動自転車24V300W DCブラシモーター
最大積載量	120kg(搭乗者のみ)
設置床面積	対角600mmの六角形(600mm X 720mm)
機械部のみの重量	35kg
可動域	ピッチ±19.44° ロール±16.61° ヒープ±60mm
周波数特性	制御振幅10mm(±5mm時) 2.2Hzで-6dBの振幅

2.2 リプレイモードとリアルタイムモード

シンクロアスリートはリプレイモードとリアルタイムモードの二通りの使い方がある。リプレイモードはあらかじめシンクロアスリート本体のHDDに記録した映像と動きを再生し、観戦するものであり、リアルタイムモードは、ライブで映像と動きを楽しむことができる。

360度カメラやスマートフォン等をマラソンのペースメーカーに装着し、5G等のネットワーク回線を準備すれば、観戦者はペースメーカーの動きの他、周囲にいる選手の表情や足音まで、ライブで観戦することができる。まさに選手と一体になって競技をしているかのような体験が可能である。

2.3 無人化施工システムへの応用

シンクロアスリートを建機の遠隔操縦に対応させるため、シートをボールチェアから自動車用のシートに変更した。また、操縦ができるようにア



写真-2 ジョイスティックの取り付け

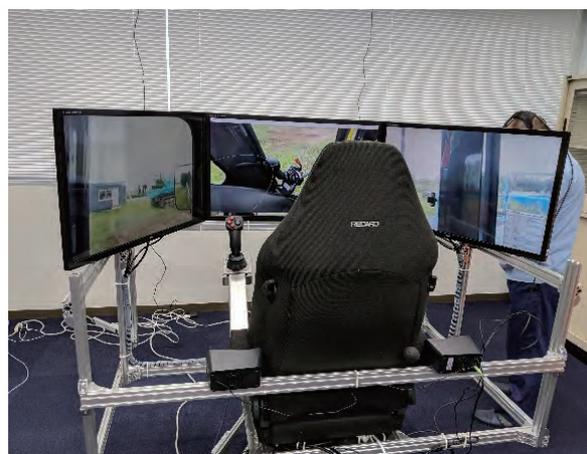


写真-3 ディスプレイの取り付け

ームレストにジョイスティックの取り付け(写真-2)を行った。シンクロアスリートではHMDを使用して映像の再生を行っているが、HMDを長時間着用すると、疲労やVR酔いが発生しやすい。そのため、HMDに加えてディスプレイでの運用もできるように、モーションベースにディスプレイの取り付けを行った(写真-3)。オペレータはディスプレイかHMDのどちらかを選択し操縦する。

(株)熊谷組にて研究・運用されているネットワーク対応無人化施工システム²⁾ではIP(インターネットプロトコル)を使用し映像の配信、建機の操縦を行っている。シンクロアスリートでもIPを使用し、LAN経由で映像と姿勢データの配信を行っているため、ネットワーク設定を調整するだけで、そのまま適用可能である。

3. リプレイモードでの再生実験

オペレータにより遠隔操縦された不整地運搬車に360度カメラとスマートフォンを取り付け、映像と姿勢データを記録し、オペレータにリプレイモードで体験していただいた。

3.1 撮影・姿勢データ収集

(株)熊谷組技術研究所内走行試験ヤードで検証に使用した不整地運搬車を写真-4 に示す。この不整地運搬車の運転席に、写真-5、写真-6 に示すようにスマートフォンと 4K 画質の 360 度カメラ (RICOH THETA V) を取り付け、映像と動きデータを記録する。ヤード内にある高さ 1m 程度の山に対して、次の 4 つの走行パターンで走行し、記録を行った。

- ① 山に正面から直進して、上って下る。その後、バックで同様に上って下り、元の位置へ戻る。
- ② 山に正面から直進して、上って下る。180 度その場で方向転換し、山を上って下りる。
- ③ 山の左側面を直進し、建機が左に傾いた状態で山を上って下りる。その後バックで、同じルートをバックして元の位置へ戻る。
- ④ 山の右側面を直進し、建機が右に傾いた状態で山を上って下りる。その後バックで、同じルートで元の位置へ戻る。

3.2 再生実験

運転席内に設置した 360 度カメラで撮影した映像を写真-7 に示す。

遠隔操縦を実際に行ったオペレータに、シンクロアスリートのリプレイモードで、映像と動きを体験していただいたところ、運転席にいるときの感覚によく似ているとの意見をいただいた。

4. リアルタイムモードでの操縦実験

ネットワーク対応無人化施工システムとシンクロアスリートのリアルタイムモードを使用して、不整地運搬車の遠隔操縦実験を行った。

4.1 システム構成

RICOH THETA V と比べ、解像度は変わらないが、撮像素子の変更でより高画質になった、RICOH THETA Z1 (以下、Z1) に 360 度カメラを変更した。

また、Z1 は加速度センサを内蔵し、ストリーミング配信も安定しているため、Z1 で映像と姿勢データを記録・配信できるソフトウェアを新たに開発した。これにより、スマートフォンとストリーミングサーバを使用せずに、映像と姿勢データをライブ配信可能になる。

写真-5 で示したカメラの取り付け治具では剛性が低く、遠隔操縦中にカメラが振動するので、取り付け治具も変更した (写真-8)。さらに、無線 LAN でしか接続できない Z1 を LAN に接続するため、アクセスポイントを不整地運搬車の運転席内に設置している。

4.2 不整地運搬車の操縦実験結果

写真-9 に遠隔操縦中の様子を示す。ジョイスティックで不整地運搬車の操縦をしている。システムの安定した稼働が確認できた。



写真-4 使用した不整地運搬車



写真-5 360度カメラの取り付け



写真-6 スマートフォンの取り付け

(株)熊谷組の社員の方 5 名に、ディスプレイでの視聴と HMD での視聴のそれぞれの場合で遠隔操縦をしていただき、次の意見や感想を得た。

- ① 360 度カメラを 2 台用意して HMD 表示の工夫ができると良い。運転席前方の映像以外に、運転席後方や定点カメラからの映像を見たい。
- ② 操作感覚は実際に操作している感覚に近いと

感じた。もう少し細かい振動もあると臨場感を感じられるのではないかと。

- ③ 画質が悪く、路面状況が認識しにくい。そのため遠隔操縦している車両の位置がわかりづらい。坂が見えづらいためどの程度傾いているのか把握しづらい。
- ④ HMD ではディスプレイよりリアルに体験でき、画質も良いように感じた。ただし、酔いを感じた。HMD を付けるとジョイスティックが見えないため倒す向きがわかりにくく、不整地運搬車をまっすぐ走らせにくく感じる。

5. 今後の改良方針

いただいた意見をもとに、次の改良を進めていく。

①に対しては、運転席内部のカメラだけでなく、定点カメラや運転席後方のカメラの映像を HMD やディスプレイで表示できるようにする。

②については、細かい振動も再現することで臨場感が増すと考えられるので、再現する揺れの大きさを変更できるようにソフトウェアを改良する。

③では、画質が問題になっている。現在はネットワーク帯域と映像遅延の理由から 2K 画質でのライブ配信を行っている。Z1 自体は 4K でのライブ配信に対応しているのでソフトウェアの改良により遅延を減らし、4K でのライブ配信を行う。

④では、HMD 着用時にジョイスティックが見えない問題があるので、HMD 内でジョイスティックを表示するなどの方法が考えられる。

今後はこれらの改良を進め、建機の遠隔操縦の効率の向上を図る。

参考文献

- 1) https://jpn.nec.com/press/201802/20180215_01.html (2019年7月30日参照)
- 2) 松林 勝志・山下 晃弘：3自由度モーションベースの制御とカヌー競技への応用，研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS)，2018-CDS-22，pp.1~7，2018
- 3) 野村真一・北原成郎・坂西孝二：最新の無人化施工技術とi-Constructionで挑んだ阿蘇大橋地区斜面災害対策工事，平成29年度「建設施工と建設機械シンポジウム」，2017



写真-7 360度カメラの映像(前方のみ切り出し)



写真-8 360度カメラの取り付け



写真-9 遠隔操縦中の様子

8. 拡張現実技術を利用した多目的施工支援装置の実用化

汎用重機に取付可能な作業位置ガイダンスシステム

株式会社不動テトラ ○ 今給黎 健一
株式会社不動テトラ 鈴木 亮彦
株式会社不動テトラ 廣畑 憲史

1. はじめに

これまで深層混合処理工法などの地盤改良の施工現場では、改良杭の打設位置を明示するために測量を行い、目印となる「目杭」を設置していた。しかし近年、国交省が推進する i-Construction により施工現場の ICT 化が進み、地盤改良機に GNSS を取り付ける位置誘導システムが利用され始め、目杭が不要となるケースも増えてきた。

ところが目杭には、地盤改良機を誘導する目印としての他にも用途がある。例えば地盤改良機は、安定性確保のために地面に鉄板が敷設された足場を移動する。その鉄板を敷き並べるためには、目印が必要となり、これまでは目杭がその役割を果たしてきた。

複数の重機が作業する施工現場では、それぞれの役割に応じて必要な情報を共有する必要がある。一部の重機が ICT 化されても、その他の重機のために測量などの作業が省けなくなるのは、i-Construction の理念を損ねることとなる。

そこで不動テトラは、鉄板を敷設するなどの補助作業を行う重機（バックホウやタイヤショベル）に搭載する、拡張現実技術を利用した多目的施工支援装置「Visios-AR」（ビジオス・エアール）を開発し、この度実用化に至ったので報告する。



写真-1 目杭設置状況

2. Visios-AR の特徴

Visios-AR は、一般的にリース可能な重機（バックホウやタイヤショベル等）に取付可能な、ガイ

ダンスシステムである。その特徴を以下に示す。

①システム構成

- ・カメラ、GNSS、傾斜計、タブレット PC によって構成され、機種ごとの取付架台を用いることで簡易に着脱可能なものである。（写真-2、3）



写真-2 システム全体図



写真-3 システム構成

②最新の AR（拡張現実）技術を採用

- ・実際の現場の風景に、打設位置や敷鉄板の位置を重ね合わせて表示できる AR（拡張現実）システムを採用することにより、オペレータが違和感なくスムーズに作業することを可能とした。（図-1）
- ・精密な位置補正技術により、AR マーカーを使用せずに正確な位置に現実画像と仮想画像を合成することを可能とした。これにより、AR マーカーの設置作業を省くことができる。

③測量及び復元作業の軽減

- ・タブレット PC に表示されるガイダンス（打設位置や鉄板敷設位置の表示）により、事前の測量作業が軽減される。
- ・目杭は、施工中の基面の乱れにより、埋もれたり、どこにあるのか分からなくなったりすることがあるが、その復旧作業にかかる、数分から数十分の時間が不要となる。復旧作業は1日に数回発生する場合もあるため、本システムの仮想線による表示により、復旧作業が大幅に軽減される。

④安全性の向上

- ・2D 画面に切替えることで地盤改良機と本体の位置関係を表示することができ、重機の接触災害を予防できる。（図-2）
- ・測量作業の軽減により作業員の立ち入りが減らせ、転倒災害や重機との接触災害を予防することができ、安全性が大幅に向上する。

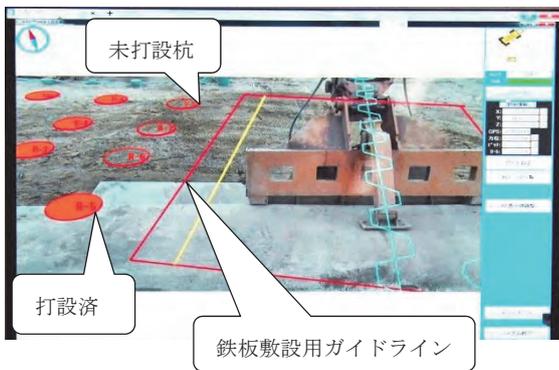


図-1 タブレット画面 (AR)

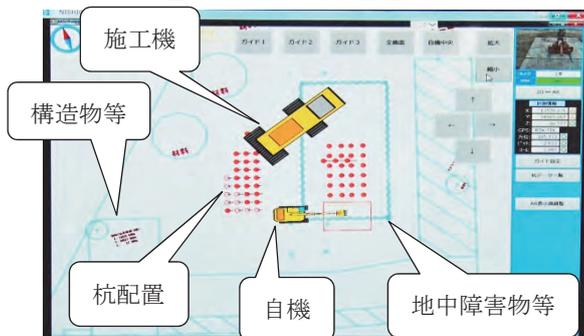


図-2 タブレット画面 (2D)

⑤任意の（障害物，打設順序等）表示が可能

- ・打設位置や敷鉄板の位置以外にも、任意のガイダンス表示が可能である。例えば、地中の埋設物の位置を表示することで、重機オペレータへの注意喚起が可能となる。また、打設順序を示すことで、スムーズな作業を促すことにつながる。

⑥サーバーを介した情報共有

- ・携帯電話回線を利用することで、サーバーを介して地盤改良機本体に搭載される、位置誘導シ

ステムとの連携が可能である。複数の現場スタッフで、打設位置・状況の共有が行える。

⑦遠隔地での状況確認

- ・専用のビューアを用い、インターネットを介して、遠隔地からでも本システムの画面を確認することができる。

3. 他の ICT 技術との連携

Visios-AR は、前述の通り、地盤改良機本体に搭載される、位置誘導システムと連携が可能である。さらに、不動産テトラの保有する ICT 技術「Visios-3D[®] (NETIS 登録番号：KK-190005-A)」を併用することで、打設状況もリアルタイムに共有できる。現場全体の情報が、各重機のオペレータ間で共有されることで、地盤改良現場全体の見える化が実現する。これにより、測量作業や誘導作業の省力化、地中構造物への配慮、改良杭の打設位置間違い防止などに高い効果が期待でき、i-Construction 理念の実現に大きく寄与できると考えている。

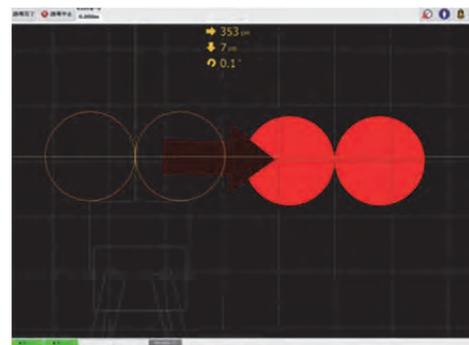


図-3 位置誘導システム画面 (例)

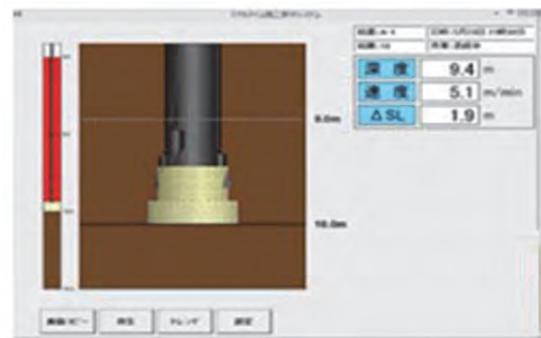


図-4 Visios-3D[®]画面 (SAVE 工法)

4. おわりに

今後、不動産テトラはより多くの地盤改良の現場に本システムの適用を目指し、「地盤改良の見える化施工」「生産性・安全性・品質の向上」を可能とする ICT 地盤改良を推進していくことで、信頼性の高い地盤改良とその確かな品質を提供していきます。

※) Visios : Visible Operation System を語源とした造語です。

※) Visios-3D[®], Visios-AR 共に、特許出願中です。

9. 土の締固め施工における非破壊連続計測

転輪型 RI 密度水分計の利用

大成建設(株)

ソイルアンドロックエンジニアリング(株)

大成ロテック(株)

○ 後藤 洸一

池永 太一

越村 聡介

1. はじめに

筆者が近年開発してきた「自律制御型振動ローラ」(図-1)は、施工条件指定と施工開始指令により、自動での転圧走行が可能である¹⁾。この技術により、転圧作業に要する人員の削減が期待できる。一方、一般に土の締固め管理としては密度や水分量の測定が行われ、これらは現在人手により行われている。この測定作業は時間を要し、また広大な施工範囲のうち限られた代表点のみで品質を判断しなければならない問題がある。

筆者らは、転圧作業のみならず計測作業をも自動化することで、一層の省力化・効率化が可能であると考えている。このため、計測作業の自動化を目指して「散乱型」RI 密度水分計による連続非破壊での密度・水分量の計測技術を開発している。散乱型 RI 計器は連続的に非破壊での計測が可能であることから、振動ローラによる締固め作業と同時に土の締固め度を計測でき、これを自動制御機械による転圧作業のサイクル内に組込むことによって一層の作業効率向上が期待できる。

開発にあたり、はじめに鉄板上に散乱型 RI 計器を積載し、測定面上を滑走する「滑走型」RI 密度水分計(図-2)を試作して、実験用に構築した盛土上で計測実験を行い、滑走中に連続的な計測が可能であることを確認した。その際、特に粒径の大きな材料において、計器の滑走により測定面が荒れることで計器の測定面への密着性が損なわれ、計測精度が低下する問題を見出した²⁾。このため、測定面を荒らさずに走行可能な構造を目指し、転輪

型の筐体内に計器を納め、転動して走行する「転輪型」RI 密度水分計(図-3)を開発した。

本稿では転輪型 RI 密度水分計の計測性能を従来型である「透過型」RI 密度水分計と比較、および転輪型 RI 密度水分計と滑走型 RI 密度水分計との計測性能の比較を行った結果を述べる。

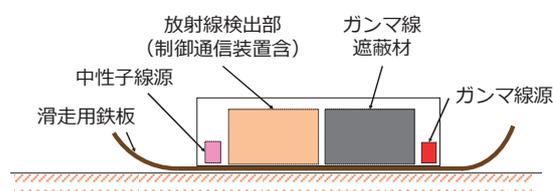


図-2 滑走型 RI 密度水分計

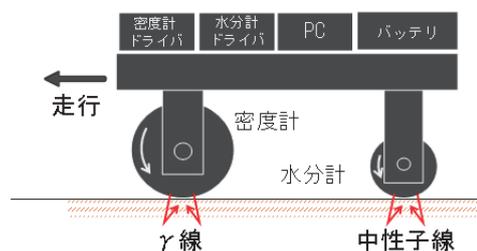


図-3 転輪型 RI 密度水分計



図-1 自立制御型振動ローラ

2. 転輪型 RI 密度水分計

図-3 の転輪型 RI 密度水分計の構造について述べる。密度計と水分計はそれぞれ独立した転輪型の筐体に構成され、それらの回転中心軸は台車フレームに固定される。各転輪型筐体内部には放射線源と検出器が収納されており、放射線源より放射した放射線が計測面上で散乱され、再び計器へ入射したものを検出器で捉えて計数を行うことにより、密度および水分量を測定する。転輪型筐体は円筒状の外殻が走行に伴い回転するが、放射線源と検出器は外殻の回転によらず常に一定方向を向くよう固定されている。台車フレーム上には、計器のドライバや PC、バッテリー等の機器を搭載し、台車を外部から牽引することで走行することができる。

3. 実験方法

実験は図-4 に示すように構築した試験盛土上で散乱型 RI 密度水分計を滑走または走行させながら湿潤密度と含水量を計測し、結果を比較した。試験盛土の材料は山砂および粒度調整碎石(M-30)を使用し、それぞれの材料について転圧回数を {2 回, 6 回, 10 回} と変化させたレーンを設けた。

以上の 2 材料×3 転圧条件=6 レーンにおいて、転輪型 RI 密度水分計の走行速度を 1.0km/h に設定し、それぞれ一定速度で走行しながら計測を行った。転輪型 RI 密度水分計での計測後に、材料条件ごとに 3 箇所ずつ砂置換法による密度計測と炉乾燥法による含水量測定を行った。

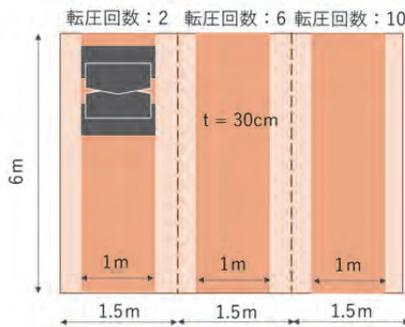


図-4 試験盛土

4. 実験結果

滑走型および転輪型 RI 密度水分計により湿潤密度と含水量を計測し、砂置換法による計測値と対比した結果を図-5 および図-6 に示す。結果の対比のため、RI 密度水分計による計測値は砂置換法による計測点の前後 20cm を計測区間とした。図中、横軸は砂置換法による計測値を示し、縦軸は滑走型および転輪型 RI 密度水分計で同じ箇所を計測した値である。45° の斜線（中立軸）に近いほど両計測値がよく一致することを表す。また、図-5 において誤差が $\pm 0.1[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、図-6 において $\pm 0.05[\text{g}/\text{cm}^3]$ を表す線を記している。これらは透過型 RI 密度水分計が有するおおよその計測誤差範囲を示す³⁾。図中、誤差の標準偏差を条件ごとに示す。

含水量は、滑走型および転輪型ともに透過型 RI 密度水分計と同等の精度で計測が可能であった。湿潤密度は、山砂ではばらつきや誤差に大きな差異は見られないが、砕石材 (M-30) では滑走型の計測値にばらつきや誤差が大きかった一方で、転輪型ではそれらが大きく低減している。以上から、転輪型により粗粒径材料における計測精度が滑走型と比較して改善されたことが確認された。

転輪型による湿潤密度の計測精度は透過型と比較して若干劣るが、これは走行速度を低下させる、或は計測区間を延長するなどして計測時間を増やすことで改善できる可能性がある。

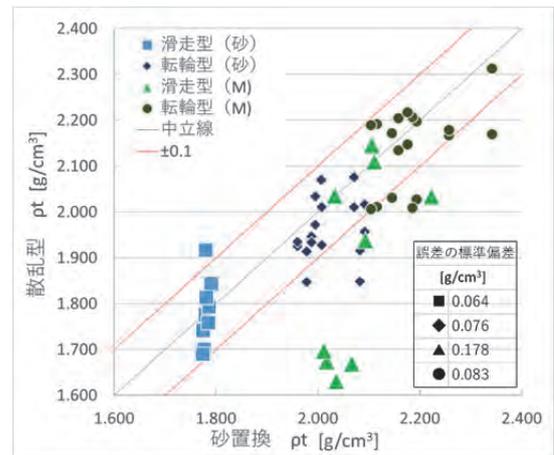


図-5 実験結果（湿潤密度）

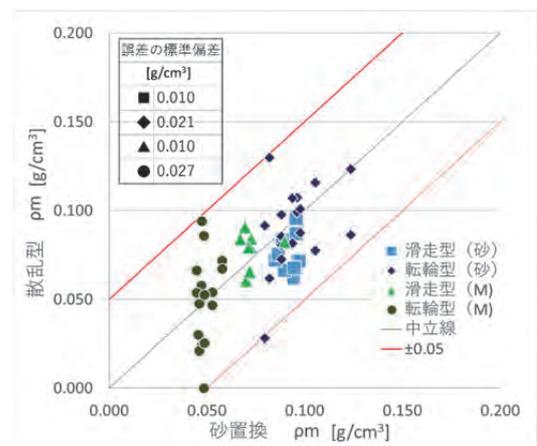


図-6 実験結果（含水量）

5. まとめ・今後の展望

実験により、滑走型と比較しての転輪型の優位性を確認した。本技術により、振動ローラが走行した部分の締固め度・含水比を連続的に、時間を掛けずに計測することが可能となる。更に、現在は限られた代表点の計測のみによっている品質管理を施工範囲全体に亘る計測により行う事ができ、品質管理の省力化と品質向上が期待できる。

著者らは転輪型 RI 密度水分計を振動ローラによる締固め作業の自動化に利用することを目指しており、引続き開発を継続する予定である。

参考文献

- 1) 青木浩章, 片山三郎, 阿部祐規: 自律制御型振動ローラ「T-iROBO Roller」の一般土工における実証, 大成建設技術センター報第50号, No.07, 2017
- 2) 青木浩章, 片山三郎, 池永太一, 越村聡介: 散乱型 RI 密度水分計による非接触計測の実験, 土木学会第 73 回 年次学術講演会, VI-698, pp. 1395-1396, 2018
- 3) 日本道路公団試験所: 「試験所技術資料第 213 号 RI 計器で土の密度・水分量をはかるしくみ」, pp. 78-79.1984.

10. 中層混合処理工法における ICT 活用による施工管理の簡素化

WILL 工法協会 技術委員長 ○市坪 天士
技術副委員長 島野 嵐
技術副委員長 岡本 郁也

1. はじめに

近年、高い機動性および経済性から、深度 13m までの軟弱地盤の地盤改良に中層混合処理工法が多く用いられている。その一種であるスラリー揺動攪拌工（以下 WILL 工法）は、砂礫地盤にも対応可能な工法として、その施工件数・施工土量はともに増加している。

その一方で、人口減少社会を迎えたわが国では、地盤改良の専門的技術を有する技術労働者の確保・育成が喫緊の課題となっている。そのため、ICT 技術活用による施工管理の簡素化に伴う省力化への期待は日々高まっている。

本稿では、GNSS の位置情報や傾斜計のデータを用いて平面誘導や施工履歴データの記録ができる新しい専用管理装置を用いて実施した地盤改良機の平面誘導実験の結果を報告する。

2. WILL 工法の概要と施工管理の現状

WILL 工法はバックホウタイプベースマシンの先端に攪拌機を取り付けた小型機械でありながら、リボンスクリュー型攪拌翼による揺動攪拌機構と特殊掘削補助装置（ブームランププレート）を組み合わせることで、粘性土から締まった砂質地盤（N 値 40 未満）まで、幅広い土質に対応可能な中層混合処理工法である（写真-1 参照）。



写真-1 WILL 工法施工機

本工法の従来型管理装置では図-1 (a) に示す画面により深度・瞬時流量・積算流量・回転速度・積算回転数・攪拌装置掘削角度をリアルタイムに管理することができた。また、管理装置画面の切り替えにより、図-1 (b) に示す改良断面の攪拌翼位置（黄色円形部）と既改良部（赤色部）・未改良部（青色部）とに色分け表示する攪拌ナビゲーションシステムにより更なる品質管理の信頼性向上を図っていた。



(a) 標準表示画面

(b) ナビゲーションシステム

図-1 WILL 専用管理装置画面

一方、従来型管理装置を用いる改良施工の前段階に行う施工範囲の区分け作業は、光波計測器や測量テープを用いて測量し、石灰による白線や水糸などで施工ブロックを明示する必要がある。



写真-2 従来の位置出しの事例

現場では降雨や改良時の盛上り土等により消えてしまった白線を再度引き直すなどの手間も発生していた。また、軟弱地盤上での作業となるため、この施工ブロックの位置出しや改良深度等の確認を複数の技術者が足場の悪い状況で実施することが少なくなかった（写真-2 参照）。

3. ICT を活用した管理装置の開発

施工ブロックの位置出し作業や改良深度などの施工サイクルの確認作業を簡素化するために、GNSS 受信機や傾斜計などの計測データを一元管理し、かつ、これらの施工履歴データを記録できる新たな管理装置（以下管理装置）を開発し、品質管理向上および施工管理の省力化を目指した。

3.1 平面誘導方法

写真-3(a) に示す基地局を遮蔽物の少ない箇所に設け、写真-3(b) に示す2機のGNSS受信機を改良機本体に設置する。このGNSSの位置データと改良機の随所に装着された傾斜計のデータを総合解析することで、攪拌翼先端部のX・Y・Z座標を把握することが可能となる。また、これらのデータは改良機の運転席に搭載したモニターにリアルタイムに表示される（写真-4 参照）。

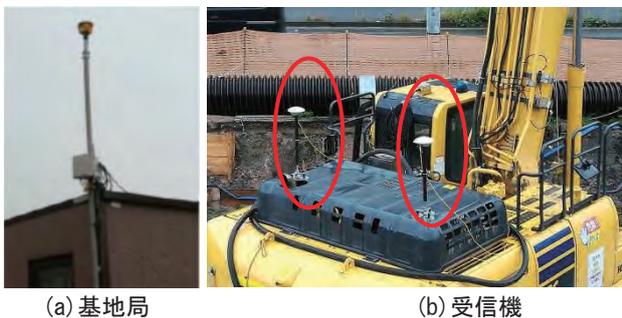


写真-3 GNSS 装着状況



写真-4 管理装置操作状況

管理装置に現場のCAD座標データを事前に入力

することで、改良エリアと改良ブロックの区割りが表示される。この表示は拡大縮小が可能であるため、オペレータは視覚による判断がしやすく、改良機を容易に施工予定ブロックに誘導させることができる。また、改良機の進行方向およびそれに直交する左右方向の2方向について攪拌翼から目標位置までの誘導距離を表示することから、攪拌翼を施工位置に正確にセットすることができる（図-2 平面誘導時表示例）。



図-2(a) 改良エリア全体表示



図-2(b) 改良ブロックの拡大表示

図-2 平面誘導時表示事例

3.2 出来形管理資料

管理装置に集積された施工データは、全体改良範囲図、施工管理図（改良天端平面図・改良下端平面図・改良断面図）および施工管理データグラフとしてアウトプット可能である。

(1) 全体改良範囲図

全体改良範囲図は現場のCAD座標データを基に、平面図内に改良予定範囲および区割り図を表示することができ、既改良ブロックや当該施工対象ブロック範囲を着色することが可能である（図-3 参照）。

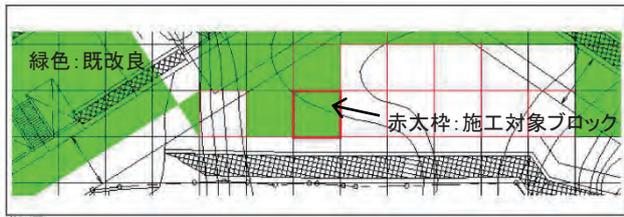


図-3 全体改良範囲図の例

(2) 施工管理図

施工管理図となる平面図および断面図は水平方向に 10 cm 間隔、深度方向に 50 cm 間隔で着色される。また、GNSS データに加えて改良機のブーム・アームおよび攪拌機に搭載した傾斜計データを一元管理できることから、深度毎の攪拌翼の三次元座標を把握できる。そのため、改良天端平面図だけでなく改良下端平面図や任意の改良断面図を表示することが可能である。さらに、所定の改良時間と攪拌翼回転数を着色規準として設定することができ、改良体品質の可視化が可能である (図-4 参照)。

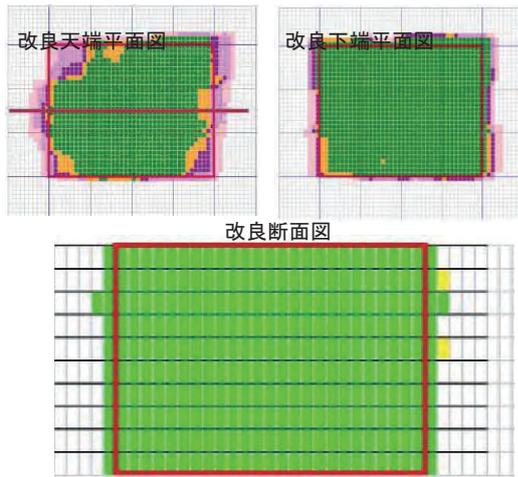


図-4 施工管理図の例

(3) 施工管理データグラフ

施工管理データグラフには、積算注水量・積算攪拌回転数をプロットした深度チャートが記録される (図-5 参照)。

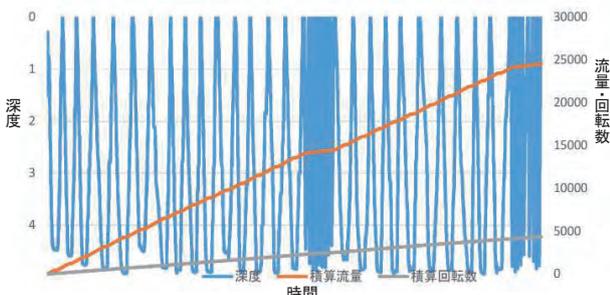
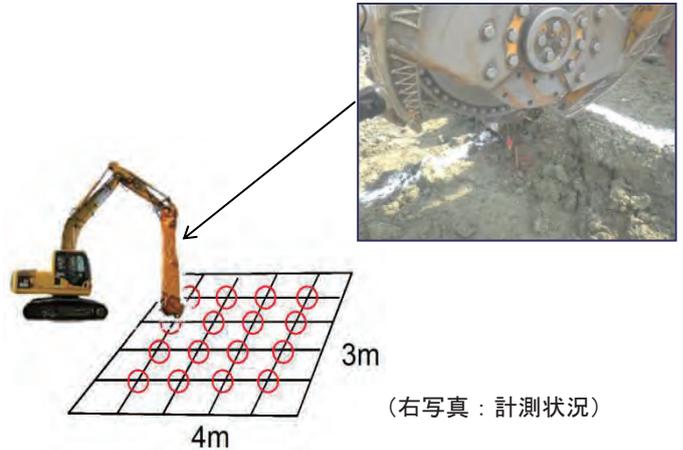


図-5 施工管理データグラフの例

4. 実大実験

4.1 計測事例 1

実際の施工現場にて、予め光波測量により図-6 に示す縦 4m×横 3m の改良ブロックを縦横 4 等分した計 16 地点の測定点を設け、その後、攪拌翼を管理装置によって誘導し、改良機の進行方向とそれに直交する左右方向とにおける光波測量の値と管理装置の表示値の誤差を計測した (写真-5 参照)。それぞれの測定結果を表-1 および図-7 に示す。



(右写真：計測状況)



写真 5 平面誘導試験状況

攪拌翼の誘導誤差は表-1 に示すように改良機進行方向に 0~4 cm、左右方向に 0~7 cm、合成値で 0~7.3 cm (平均 4.2 cm) であることが確認された。

表-1 平面誘導誤差計測結果

項目	単位	進行方向の誤差	左右方向の誤差	合成誤差
最大値	cm	4	7	7.3
最小値	cm	0	0	0
平均値	cm	2.2	2.9	4.2
標準偏差		0.97	2.25	2

これらの値は、「施工履歴データを用いた出来形管理要領 (表層安定処理工・中層地盤改良工事編) (案)」*1) に示される出来形管理規準値の±10 cm

以下の精度基準を満たしており、管理装置による平面誘導の有効性が確認された。

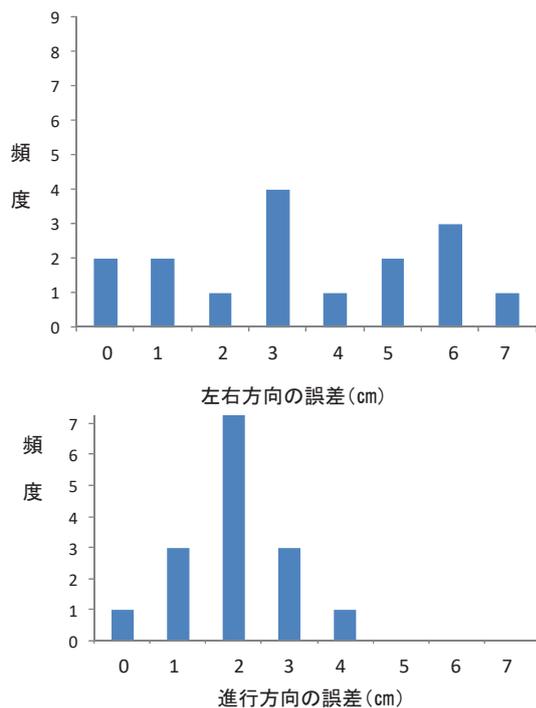


図-7 平面誘導誤差の分布

4.2 計測事例 2

実際の施工における改良機への衝撃、施工基面の傾斜および頻繁に行われる改良機の移動等により経時的に誤差が増加しないかを検証するために、施工開始から約 1.5 ヶ月の間、定期的に誘導誤差を計測した。その結果を表-2 に示す。

表-2 誘導誤差の経時変化

測定点	経過	合成誤差 (cm)	測定点	経過	合成誤差 (cm)
計測点①	施工初日	6.8	計測点⑥	26日目	5.8
計測点②	4日目	7.1	計測点⑦	31日目	3.8
計測点③	6日目	7.1	計測点⑧	40日目	5.1
計測点④	13日目	7.5	計測点⑨	47日目	7.8
計測点⑤	19日目	6.4	平均値		6.4

約 1.5 ヶ月間の施工期間における各測定値の合成誤差に経時的な増加や大きな差異は認められなかった。また、本事例においても合成誤差の最大値は 7.8 cm と ±10 cm を下回る結果が得られた。

4.3 ICT 管理装置導入による省力化の検証

事例 1 および事例 2 の実験での作業時間を参考に、作業の省力化に対する管理装置の導入効果を推測した (表-3 参照)。

表-3 平面誘導により低減される人工数

ICT施工により低減が推測される項目	低減される人工数	備考
施工箇所の位置出し・区割り作業・白線復元作業等	0.5h×2人/日	作業時間は減らせるが、日当りの人員は減らせない
改良機の誘導・設置	0.25h×1人/日	
写真管理	0.5h×3人/回	管理頻度が軽減された場合に限る

各人員の日々の作業は位置出しや誘導作業だけではないため、現段階では、表-3 に示す全ての人工数の軽減や日当りの人員を減少させること (省人化) は困難であった。しかしながら、作業員や管理者の負担軽減や改良機オペレーターの熟練度の軽減につながることは明瞭であろう。また、施工箇所の位置出しや白線の復元作業等にかかる時間を 0.5h/日程度軽減させることは可能と推測される。そのため、大規模工事においては、1 割程度の省力化・工期短縮が期待される。さらに、今後は信頼性の向上から、写真管理回数の軽減や品質確認回数の軽減および手戻り工事の減少等の効果も期待できるものと予測される。

4. まとめ

実大実験結果から、ICT 技術を活用した新しい WILL 工法専用管理装置の精度が「施工履歴データを用いた出来形管理要領 (表層安定処理工・中層地盤改良工事編) (案)」*1) の出来形管理規準を満足することを確認できた。また、施工管理を簡素化することで、地盤改良施工における 1 割程度の省力化を予測できたものと評価している。

しかしながら、今後さらに多くのデータを集積した上で管理装置の改善を進め、平面誘導精度の信頼性向上、施工管理項目の更なる簡素化とそれに伴う省力化の増大を目指す所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省：施工履歴データを用いた出来形管理要領 (表層安定処理工・中層地盤改良工事編) (案), p13.平成 31 年 3 月

11. 室内実験における TBM センターカッタビットの配置間隔に関する基礎的研究

呉工業高等専門学校
呉工業高等専門学校
(株)スターロイ

○ 河相 拓真
重松 尚久
小田 登

1. はじめに

トンネル技術の1つである TBM 工法は、岩盤などの固い地盤で用いられ側面の坑壁にグリッパを押し当て反力を得ることによって、先端部のカッタを回転させながら地山を切削する方法である。現在、TBM 工法の問題点として、センターカッタの摩耗が激しいことが挙げられる。原因の1つにディスクカッタの配置間隔が現場の経験則に基づいて決定され、数値や式などで数値的に確立されていないことがある。また、一般にセンターカッタの回転半径が小さいとねじりの力が大きくなりカッタの摩耗や破損が起こる。逆に回転半径が大きいと刃より内側の供試体が破壊されず残る現象(芯残り)が発生し、掘削効率が著しく低下する。そのため、センターカッタに作用する力を測定し、最適な配置間隔を求める必要がある。

本研究では、モデル掘削機を用い、掘削の中心からディスクカッタの刃までの距離(最小半径 r)を変化させ掘削実験を行う。実験中は、一定の垂直力 F_z をかけ、掘削時間 t に対する、垂直力 F_z 、ディスクカッタにかかる水平方向の力 F_x 、掘削深さ z 、トルク T を測定する。これらの値と実験中の映像とともに検証することによって芯取れの発生するディスクカッタの配置間隔を求めることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 モデル掘削機

本実験では、鋼製の台座に2枚のディスクカッタを取り付け、それらで供試体を掘削し TBM センターカッタビット掘削のモデルとする。図-1 にモデル掘削機の概略図を示す。ディスクカッタの取り付けは、実際の TBM と同様にサドルと呼ばれるソケットにそれぞれ固定し、これを台座に取り付けている。サドル部分にひずみゲージを付け、ひずみを測定し水平力を算出する¹⁾²⁾。カッタ1が描く円の軌跡の半径を最小半径 r とし、45,55,65,75 mm の4パターンに分け、各条件で2回ずつ測定を行

う。実際の TBM を再現するため、カッタ1(直径125mm 先端角 $\pi/2\text{rad}$)よりも25mm 外側にカッタ2(直径100mm 先端角 $\pi/2\text{rad}$)を配置している。カッタ2は、カッタ1が TBM と同様の掘削状況を再現するために TBM のエッジカッタを模して配置している。

2.2 実験装置および実験方法

実験装置は高さ1,750mm、幅700mm、奥行き700mmで、ターンテーブル、供試体、下部に設置したターンテーブルを回転させるためのモータと駆動伝達装置、荷重を制御する荷重制御用油圧シリンダ、水平力を測定するひずみゲージ、掘削深さを測定する変位計、実験装置を横転させるための油圧シリンダ、以上の装置で構成されている。図-2 に実験装置の概略図を示す。ターンテーブルは、直径400.0mm、厚さ10.0mmの鋼製円盤であり、下部に3相200V、1.5kWの電動モータ、チェーン、減速機を設置している。なお、実験装置は幅1,370mm、奥行き1,100mmの鋼板の上に乗っており、横に設置されている油圧シリンダを伸縮させることで実験装置を90°横転させることが可能で、効率的に掘削土の排出が行える。

実験では、ターンテーブルに据え付けられた供試体にモデル掘削機を $F_z=40\text{kN}$ の力で押し当て、破碎する。ターンテーブルは2r.p.mで回転し、掘

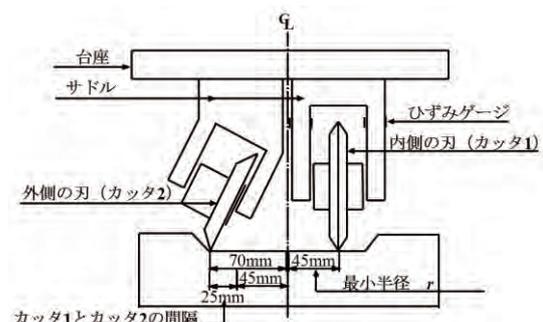


図-1 モデル掘削機 概略図

削深さ $z=20\text{mm}$ になるまで掘削した。供試体の固定については供試体を鋼製の外枠にはめ、側面をボルトで固定し、外枠とターンテーブルとをボルトで固定した。掘削時間 t に対する、垂直力 F_z 、水平力 F_x 、掘削深さ z 、トルク T を 0.02 秒で 1 点を記録するデータ収集装置によって測定した。

2.3 供試体

供試体は水結合材比 $W/B=17\%$ の高強度モルタル供試体(一軸圧縮強度 133.6N/mm^2)及び、中国産花崗岩供試体(一軸圧縮強度 139.0N/mm^2)を使用する。また、供試体寸法は高さ 100mm 、直径 365mm の円柱状供試体とする。

2.6 芯取れ・芯残りについて

図-3 に芯取れの概略図を示す。掘削を進めていくと、ディスクカッタから生じる亀裂が生じ、その亀裂が繋がることによって岩片が剥離する。この現象を芯取れと呼ぶ。次に、図-4 に芯残りの概略図、写真-1 に芯残りの写真を示す。最小半径 r が大きくなると、供試体内側で亀裂が繋がりにくくなり、芯取れが起らず刃より内側の供試体が残る現象を芯残りと呼ぶ。本研究では、芯取れの発生が考察を行う上での必須条件となっている。

3. 実験結果と考察

3.1 トルク T と掘削時間 t

一例として、図-5 に花崗岩供試体における最小半径 $r=55\text{mm}$ のトルク T と掘削時間 t の関係を示す。実験開始直後は、カッタが供試体に切り込んでいくためトルク T が増加している。掘削の進行とともに、トルク T の振れ幅が小さくなっている。これはカッタが供試体に十分切り込み、掘削面が安定したことが考えられる。230 秒あたりでトルク T が急激に増加し、その後、250 秒あたりでトルク T が急激に減少している。この時間を実験中の映像で確認したところ芯取れが確認できた。また、全ての芯取れ時で同様の傾向がみられた。

3.2 水平力 F_x と掘削時間 t

一例として、図-6 に花崗岩供試体における最小半径 $r=55\text{mm}$ の水平力 F_x と掘削時間 t の関係を示す。水平力 F_x は実験中、同程度の振れ幅で作用している。その後、230 秒あたりで水平力 F_x は急激に減少している。実験中の映像から芯取れが確認できた。また、全ての芯取れ時で同様の傾向がみられた。

3.3 芯取れ・芯残りと最小半径 r

TBM におけるディスクカッタでの掘削を進める上で芯取れの発生は必須条件である。表-1 に供試体別の芯取れと最小半径 r の関係を示す。本実験では、芯取れが発生し、芯取れより外側の破壊がない

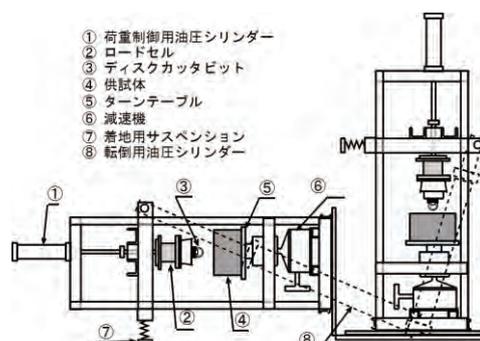


図-2 実験装置 概略図

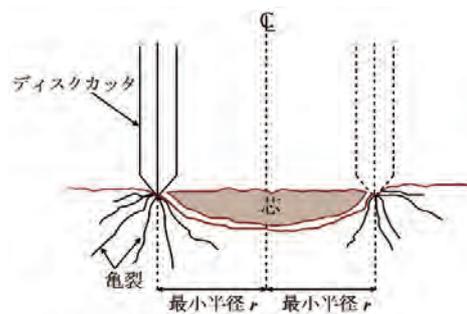


図-3 芯取れ 概略図

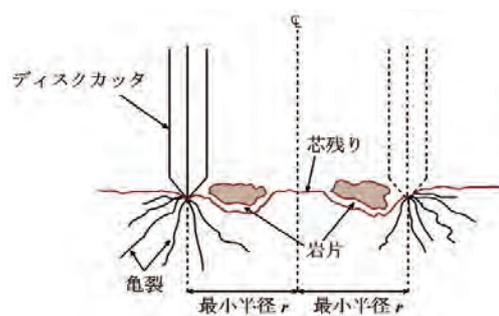


図-4 芯残り 概略図



写真-1 芯残り

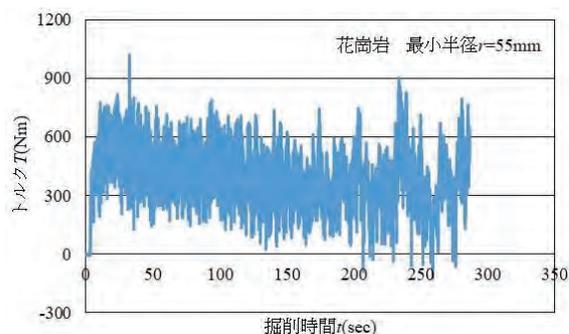


図-5 トルク T と掘削時間 t の関係

状態を破壊形態 1 とし、芯取れより外側の破壊がある状態を破壊形態 2 とする。まず、高強度モルタル供試体では最小半径 r の違いによらず、芯取れが発生している。しかし、最小半径 $r=75\text{mm}$ ではカッタ 1 より外側の破壊が先行し、破壊形態 2 となった。次に、花崗岩供試体においては、最小半径 $r=45,55\text{mm}$ で芯取れが発生している。また、芯取れ発生時は、全て破壊形態 1 であった。

3.4 最大トルク T_{max} と最小半径 r

最大トルク T_{max} の判定は、芯取れ時と芯残り時で異なる。芯取れ時は、芯取れ直前の最大値を最大トルク T_{max} としており、芯残り時は、全グラフ範囲のうち掘削面が不安定だと考えられる実験開始直後を除いた範囲での最大値を最大トルク T_{max} としている。図-7に最大トルク T_{max} と最小半径 r の関係を示す。高強度モルタル供試体では、最小半径 r の違いによらず、ほぼ同じ値となっている。これは、芯取れが起ることによってトルク T が増加しないことが考えられる。花崗岩供試体では、芯取れが起っている最小半径 $r=45,55\text{mm}$ ではほぼ同じ値となっており、芯残りの発生している最小半径 $r=65,75\text{mm}$ では増加傾向がみられる。これは、最小半径 $r=65,75\text{mm}$ では、芯取れが起りにくくなり、カッタが供試体に深く入っていくため、カッタと供試体の接地面が増加することが考えられる。

3.5 最大水平力 F_{xmax} と最小半径 r

最大水平力 F_{xmax} の判定は、芯取れ時と芯残り時で異なる。芯取れ時は、芯取れ直前の最大値を最大水平力 F_{xmax} としており、芯残り時は、全グラフ範囲のうち掘削面が不安定だと考えられる実験開始直後を除いた範囲での最大値を最大水平力 F_{xmax} としている。また、ディスクカッタを外側に広げようとする力を正としている。図-8に最大水平力 F_{xmax} と最小半径 r の関係を示す。高強度モルタル供試体では、最小半径 $r=45,55\text{mm}$ でほぼ同じ値となっており、最小半径 $r=65,75\text{mm}$ は増加傾向がみられる。これは、最小半径 r が大きくなるにつれて芯の大きさも大きくなるため、芯を取るために必要な力が大きくなることが考えられる。また、供試体外側の破壊などにより、掘削面が不安定となり、過剰な力が作用したと考えられる。花崗岩供試体では、比例的な増加傾向がみられる。しかし、最小半径 $r=65,75\text{mm}$ では芯取れが発生していない。これはカッタ 1 より外側のひび割れや破壊によって力が分散したことや芯取れより先に実験条件である掘削深さ $z=20\text{mm}$ に達したことが考えられる。

3.6 平均掘削速度 v と最小半径 r

平均掘削速度 v の算出は、カッタが供試体に接触

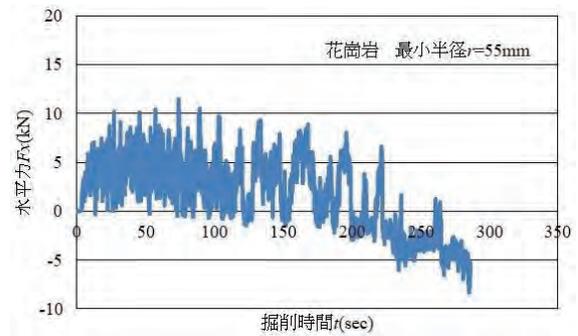


図-6 水平力 F_x と掘削時間 t の関係

表-1 芯取れと最小半径 r の関係

最小半径 (mm)	実験回数	高強度モルタル		花崗岩	
		芯取れの有無	破壊形態	芯取れの有無	破壊形態
45	1	有	1	有	1
	2	有	1	有	1
55	1	有	1	有	1
	2	有	1	有	1
65	1	有	1	無	1
	2	有	1	無	1
75	1	有	2	無	1
	2	有	2	無	1

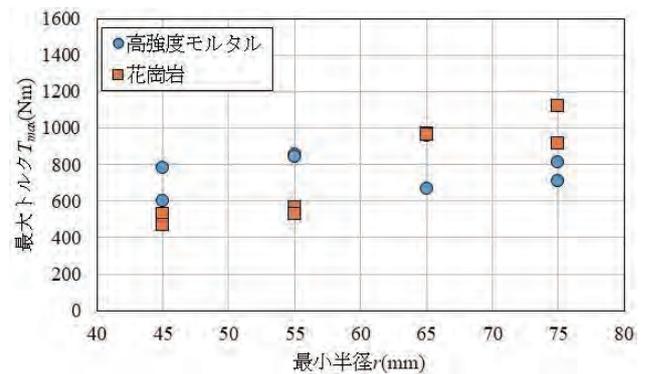


図-7 最大トルク T_{max} と最小半径 r の関係

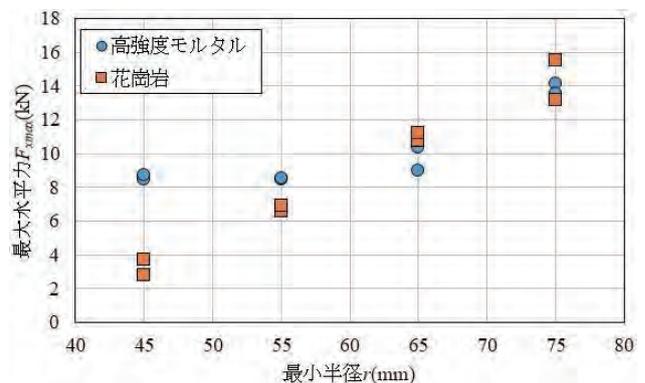


図-8 最大水平力 F_{xmax} と最小半径 r の関係

する時から掘削深さ z が 20mm に到達するまでのグラフ範囲を1次関数で近似し、傾きを求めることで平均掘削速度 v とした。図-9に平均掘削速度 v と最小半径 r の関係を示す。高強度モルタル供試体では、

最小半径 r が大きくなるにつれて平均掘削速度 v が遅くなる傾向がみられる。これは、最小半径 r が小さいほど芯取れまでの時間が短く、最小半径 r が大きくなるほど芯取れまでの時間が長くなることが考えられる。花崗岩供試体では、最小半径 r の違いや芯取れの有無によらず、ほぼ同じ値となっている。これは、花崗岩の破壊形態によるものだと考える。芯残りは発生しても、芯が完全に残っているわけではなく、芯の外側から少しずつ壊れ、カッタが供試体を掘削する際にできる溝が深くなりやすいため、掘削深さ $z=20\text{mm}$ に達するまでの時間に芯取れ時との差が出にくいことが考える。

3.7 1回転当たりの掘削量 V_{round} と最小半径 r

1回転当たりの掘削量 V_{round} の算出方法は、芯を円柱状に見立て、芯の半径を最小半径 r とし、芯取れが発生した時間の掘削深さ z を芯の高さとして体積の算出を行っている。また、掘削時間 t_s は実験開始から芯取れが発生するまでの時間とした。その時間を回転速度 2r.p.m で除すことで実験中の供試体回転数とした。芯の体積を供試体回転数で除すことで1回転当たりの掘削量 V_{round} としている。つまり、掘削量を芯の体積としているため、芯取れの発生が算出を行う上での必須条件となっている。図-10に1回転当たりの掘削量 V_{round} と最小半径 r の関係を示す。どちらの供試体においても、最小半径 r の増加に伴い、1回転当たりの掘削量 V_{round} も増加している。また、同じ最小半径 r における、供試体別の1回転当たりの掘削量 V_{round} の差は掘削速度 v や芯取れ時の深さが原因だと考えられる。

3.8 最適なカッタ間隔の検討

各結果項目や供試体の破壊形態などを考慮し、掘削効率の検討を行う。高強度モルタル供試体では最小半径 $r=45,55,65\text{mm}$ から、花崗岩供試体では、最小半径 $r=45,55\text{mm}$ から最適な最小半径 r の考察を行う。ここでの最適な最小半径 r とは、掘削効率が良く、破壊形態1となり、カッタ1から供試体中心までの間隔が最も大きいことを指す。掘削速度 v は速いほど掘削効率は良い。最大水平力 $F_{x\text{max}}$ は芯取れが起こるために必要な力であるため、小さい方がより小さい力で芯取れが起こると考えられる。そのため、最大水平力 $F_{x\text{max}}$ は小さいほど掘削効率は良い。最大トルク T_{max} は、小さいほど掘削効率は良い。1回転当たりの掘削量 V_{round} は大きいほど掘削効率は良い。

これらを踏まえた最適な最小半径 r は、高強度モルタル供試体では、最小半径 $r=55\sim 65\text{mm}$ 付近に存在し、花崗岩供試体では、最小半径 $r=55\text{mm}$ 付近に存在すると考えられる。

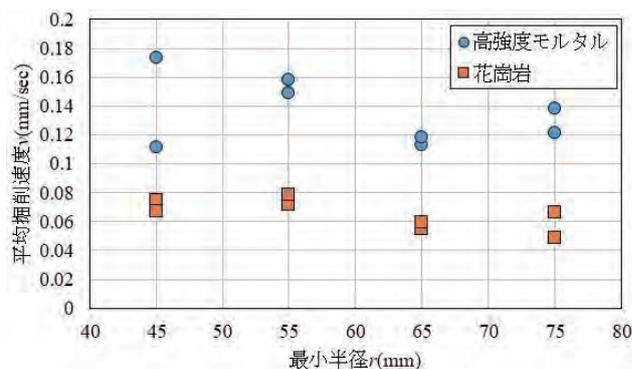


図-9 平均掘削速度 v と最小半径 r の関係

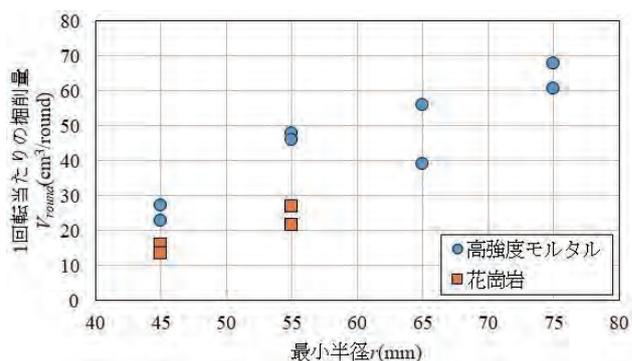


図-10 1回転当たりの掘削量 V_{round} と最小半径 r の関係

4. 結論

1. どちらの供試体においても、芯取れ時、最大トルク T_{max} はほぼ同じ値を示し、芯残り時は増加傾向がみられた。
2. 最大水平力 $F_{x\text{max}}$ は、高強度モルタル供試体では、最小半径 $r=45,55\text{mm}$ までほぼ同じ値となり、最小半径 $r=65\text{mm}$ 以上は増加傾向がみられた。花崗岩供試体では、比例的な増加傾向がみられた。
3. 平均掘削速度 v は、高強度モルタル供試体では、最小半径 r が大きくなるにつれて遅くなる傾向がみられ、花崗岩供試体では、最小半径 r の違いや芯取れの有無によらず、ほぼ同じ値となった。
4. センターカッタの芯取れが発生する掘削効率の良い半径として、高強度モルタル供試体では最小半径 $r=55\sim 65\text{mm}$ 付近に存在し、花崗岩供試体では、最小半径 $r=55\text{mm}$ 付近に存在すると考えられる。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)17K06525の補助を受けて行われた。

参考文献

- 1) 重松尚久・武本崇裕・小田 登：TBMセンターカッタビットの最適化に関する基礎的研究，テラメカニクス，第37号，テラメカニクス研究会，pp.85～88，2017.

12. 新幹線トンネルにおけるベルトコンベア方式採用

～「連続ベルトコンベアシステム」の開発～

株式会社フジタ
株式会社フジタ
株式会社フジタ

○ 石坂 仁
井上 正広
浅沼 廉樹

1. はじめに

長大トンネルにおける掘削ずりの坑外搬出は、トンネル施工延長の増加に伴いダンプトラックや重ダンプ等のダンプ方式から、切羽から坑外までを連続したベルトコンベア（以下、連続ベルコン）で搬出する連続ベルコン方式が採用されている。連続ベルコン方式の特徴は、ダンプ方式の様にダンプ運転の人員が不要で、切羽施工を当初から同じ人数で施工可能となり、省人化を実現出来る。また、後続作業（インバート工、防水工及び覆工コンクリート工等）箇所でのずり出し車両の通過が減少し、安全性が確保され、作業環境面でも排気ガス抑制等メリットは大きい。

今回、新幹線トンネル工事に連続ベルコン設備を設置するにあたり、切羽掘削作業区間での駐機スペースの確保や重機・車両の離合の課題を解決した「上越式テールピース台車」「ブラケットフレ

ーム」「カテナリーZ台車」、覆工作业区間における覆工設備移動時の連続ベルコンの解体・組立作業を無くした「テレスコピックセントルのベルコン下通過方法」、覆工コンクリート打設時の車両離合を可能にした「連続ベルコン通過型スライディングステージ」など、掘削作業区間と覆工作业区間に個々に対応可能な当社独自の「連続ベルコンシステム」を開発・運用を開始した。本論分は、その実績を報告する。

2. 従来の連続ベルコンについて

連続ベルコンは、トンネル切羽から坑外まで一本のベルトでつないだコンベアが稼働することによって、切羽から発生したズリを運搬、搬出するシステムである。（図-1）

このシステムは、トンネル切羽側から以下の設備で構成される。

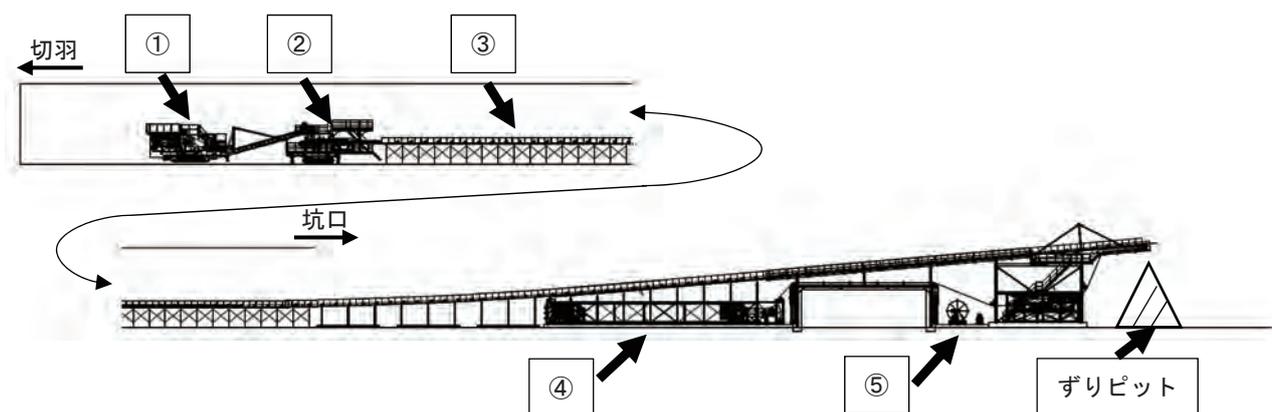


図-1 従来の連続ベルトコンシステム設備配置図

①自走式クラッシャー

掘削されたズリを均一の大きさに破碎する。

②テールピース台車

切羽側のベルト折り返し部分になり、クラッシャーで破碎されたズリを連続ベルコンにのせ搬送する。

③中間部材

全線にわたり連続ベルコンを支える部材。ビティ棒を使用する方式や、吊りチェーンを使用する方式等がある。

④ストレージカセット

延伸分のベルトを収納する。

⑤メインドライブ

連続ベルコンを駆動させる動力装置である。

これらの設備を組合せトンネルのズリ出しを可能とする。

2.1 従来の連続ベルコンシステムを新幹線トンネルへ導入する際の問題点

従来の連続ベルコンを新幹線トンネルに導入する際の問題点を下記に示す。

①切羽作業

トンネル坑内全線にわたり連続ベルコンが占有する事で、大型施工機械の駐機スペースの確保、重機・車両の離合や、転回場所の確保が困難となる。(図-2)

②覆工作业

覆工コンクリートを打設するセントルに連続ベルコンを通していていることで、セントル移動時の中間部材の組立・解体作業が必要となり、ズリ搬出中断に伴う切羽作業との作業調整による施工サイクルが低下する。(写真-1)

③坑内通行

連続ベルコンのセントル内の通過位置は、他の箇所よりトンネル中央によるため、覆工コンクリートを打設する際、坑内通行車両の離合が困難である。(覆工作业) (図-3)

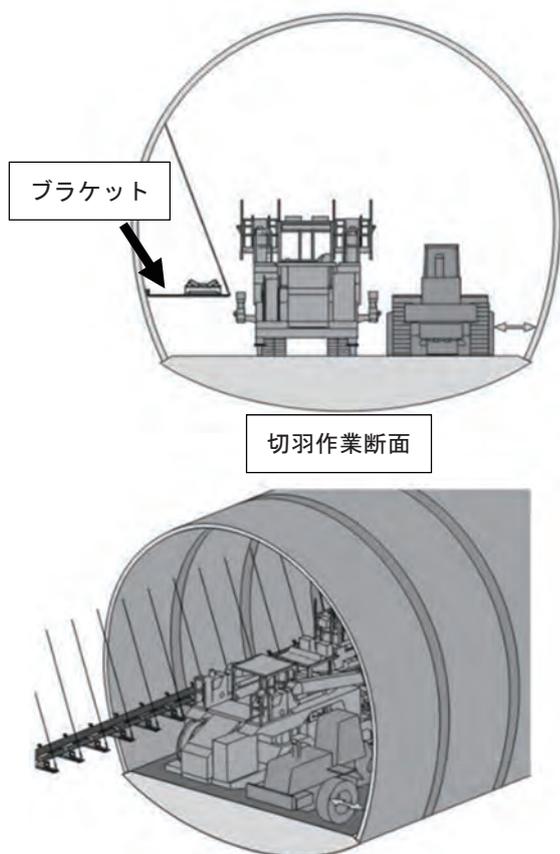


図-2 重機離合図 (切羽作業区間)



写真-1 セントル部ベルコン通過状況

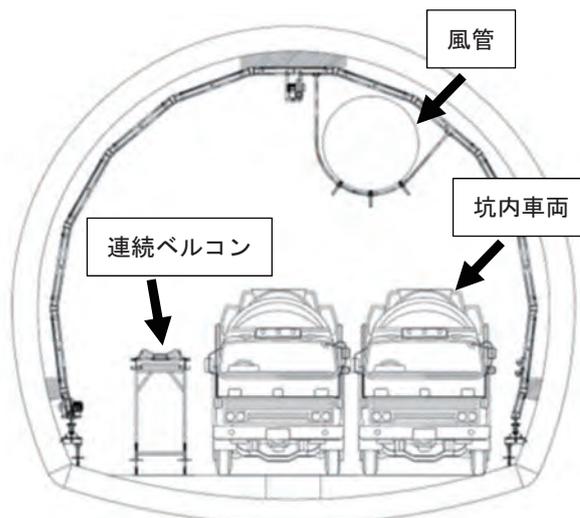


図-3 重機離合図 (覆工作业区間)

3. 新幹線断面における連続ベルコンの検討

上項での連続ベルコンの問題点を解決するため、本現場に導入した連続ベルコンシステム設備とその目的を示す。(図-4、図-5)

(切羽作業区間からインバート施工区間まで)

①上越式テールピース台車

掘削作業区間で搬送ベルトの位置を高所へ持ち上げる。

②ブラケットフレーム

高所での搬送ベルトの設置を簡便化する。

③カタナリーZ台車

インバート施工完了区間から搬送ベルトの位置を短距離で低所へ移設する。

(覆工区間)

④テレスコピックセントルのベルコン通過方法
覆工区間では連続ベルコンの高さ位置を下置きにすることで、連続ベルコン運転中にも二次覆工作业は制限無く行える。

⑤連続ベルコン通過型スライディングステージ
下置きした搬送ベルト上部をステージ部が通

過する事で、車両の離合や駐車場所を確保する。

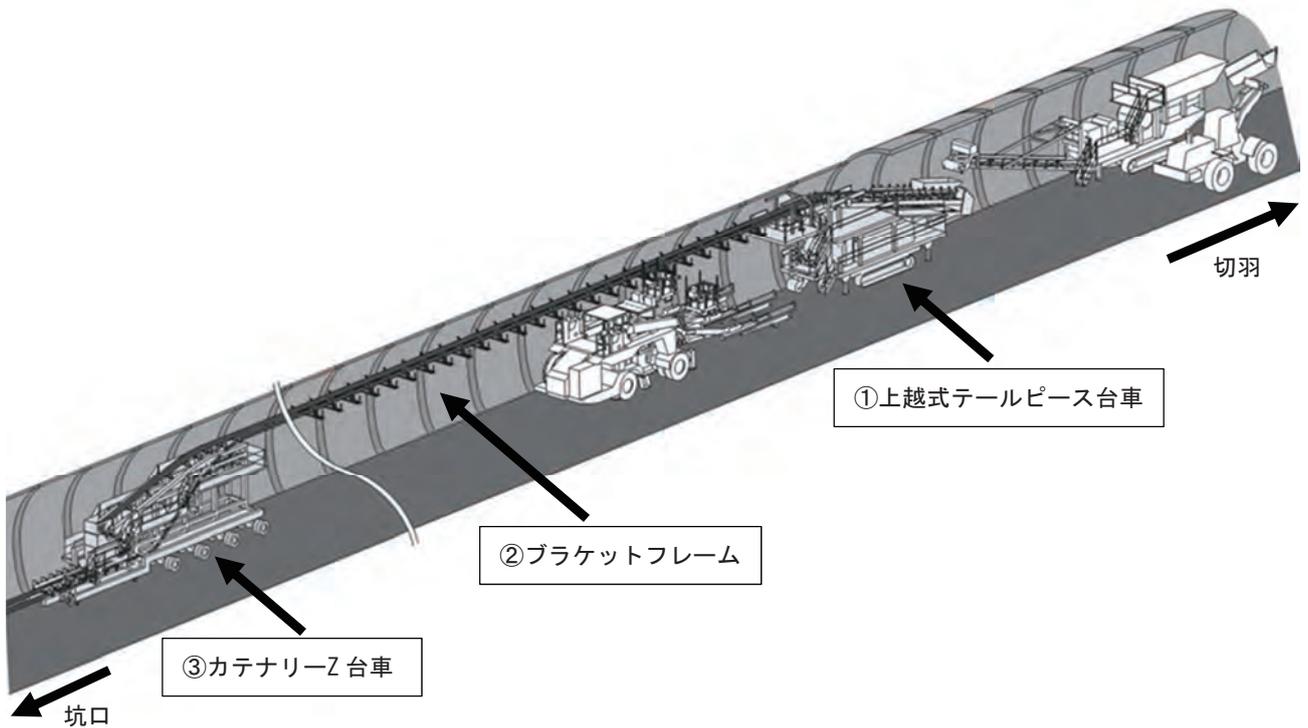


図-4 システム構成図（切羽作業区間～インバート施工区間）

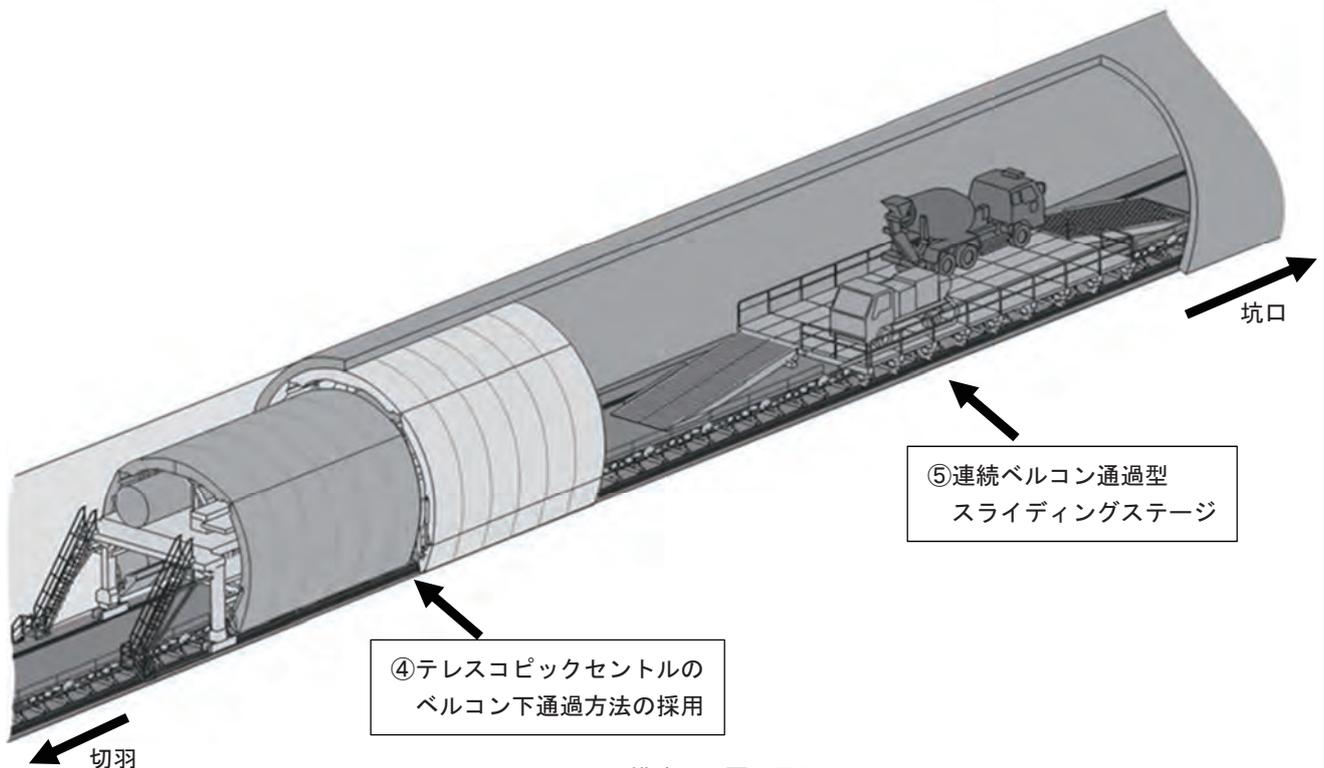


図-5 システム構成図（覆工区間）

3.1 上越式テールピース台車の開発

上越式テールピース台車は、掘削作業区間での駐機スペースの確保や重機の離合を安全に行う事を目的として、搬送ベルトを高所に持ち上げるために開発された。（写真-2）

特徴として、

①掘削したズリを破砕するクラッシャーからの乗継部分に傾斜ベルコンを採用する事で、搬送ベルトの高さを2.5mから5.5mへ変更し、駐機エリア・離合エリアを確保。

- ②上越し位置を変更する事で、台車内にカーゴスペースが確保され、電気設備を設置し切羽作業の施工機械への電源を供給する電源台車としても兼用可能。
- ③台車の3階部分に張出し足場を設ける事で、高所作業車を使用せずに、台車上でブラケットフレームを設置可能。が挙げられる。



写真-2 上越式テールピース台車

3.2 ブラケットフレームの開発

高所での搬送ベルトの設置を容易にするため、従来は中間部材上にフレーム材を継ぎ足して設置を行うが、新たな試みとして、ブラケットと中間部材を一体化した構造とするブラケットフレームを開発した。(図-6)

これにより、搬送ベルト位置を上越式テールピース台車から高所に変更した事で、連続ベルコン下の空間に切羽施工機械の駐車スペースや、重機走行路を確保でき、施工性と安全性が向上した。(図-7)

また、連続ベルコン設置後でも荷重や曲線状況に応じてブラケットフレームを追加することにより補強が可能となり、搬送ベルトの蛇行によるズリこぼれにも対応可能となった。

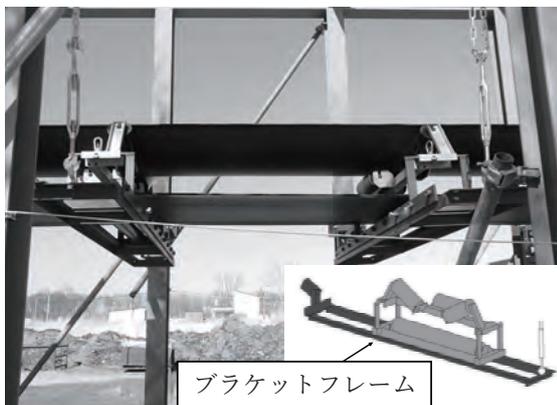


図-6 ブラケットフレーム

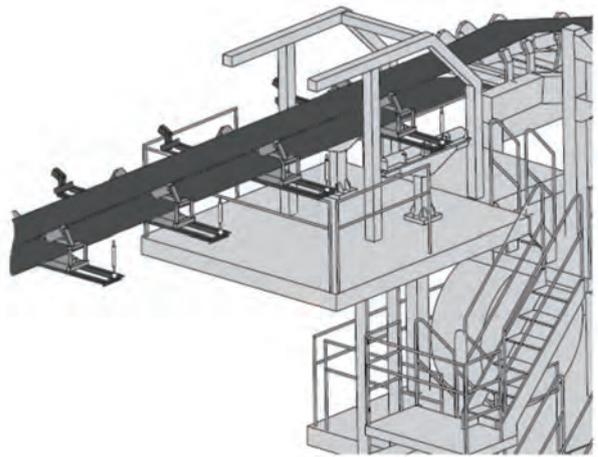


図-7 上越式テールピース台車とブラケットフレーム

3.3 カテナリーZ台車の開発

カテナリーZ台車は、搬送ベルトの高さの変更を短距離で可能にするために開発された。上越式テールピース台車により、5.5mの高さに変更した搬送ベルトを、インバート施工完了区間からの下置きまで下げるため、搬送ベルトの張力等を考慮した場合、通常機長が64m必要となることを、台車内で搬送ベルトをZ型に折り曲げる事で46m短い17.5mの機長に短縮できた。(図-8、写真-3)

これにより、連続ベルコンの高所から低所への盛替え作業が容易になった。また、連続ベルコンの延伸作業を切羽作業と別に行う事が可能となり、切羽作業のサイクルアップを実現した。

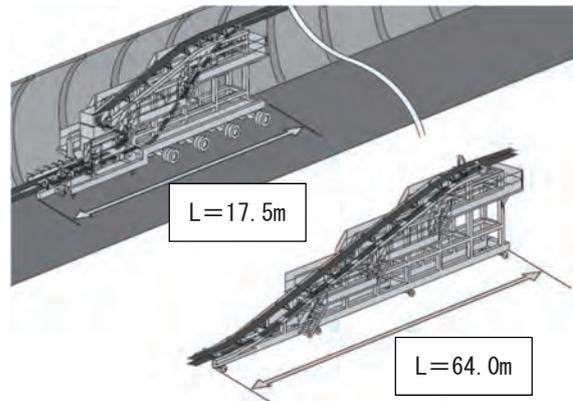


図-8 カテナリーZ台車概要図



写真-3 カテナリーZ台車

3.4 テレスコピックセントルのベルコン下通過方法の採用

一般的な連続ベルコンは、ビティ足場で組立てられた中間部材上に設置されている為、覆工設備の移動の際は、中間部材の組立・解体作業が必要となり、ズリ搬出が中断による、切羽作業との調整が必要であった。

また、本現場の二次覆工では、覆工設備として新幹線工事初のテレスコピックセントルが使用された。テレスコピックセントルは、2つのアーチフォーム(型枠)に径の縮小・拡大機能を持たせ、1台のガントリーで2つの型枠を交互に使用する為、ガントリーが前後に移動する。この為、ガントリーの移動頻度が増えるので組立・解体作業の回数が多くなり、施工サイクルが低下する問題が生じる。

この解決策として、カタナリーZ台車から坑口側の連続ベルコンの搬送ベルトを下置きにして、テレスコピックセントルのベルコン下通過方法を採用する事で、テレスコピックセントル移動時、中間部材の組立・解体作業が不要になった。ベルコン下通過方法により、切羽作業と覆工作業が分離され、切羽作業は覆工作業による制限なく作業可能となり、施工サイクルの短縮や作業効率が向上した。(写真-4)



写真-4 セントル部ベルコン下通過状況

3.5 連続ベルコン通過型スライディングステージの開発

通常、連続ベルコンを導入したトンネル工事では、連続ベルコン設備が全線にわたり占有するため、覆工コンクリート用の生コン車や資機材搬入車両の転回や離合などのスペースが坑内では十分に確保できない。これにより車両同士の接触災害の発生や施工サイクルの低下が生じることから、転回用拡幅断面の設置や連続ベルコンのルート変更が必要となっていた。

今回開発した連続ベルコン通過型スライディン

グステージでは、下置きした連続ベルコンの上部をステージ部が通過することで、今まで連続ベルコンによって占有されていたスペースが使用可能になり、坑内運行車両の離合場所を確保出来た。(図-9、写真-5)

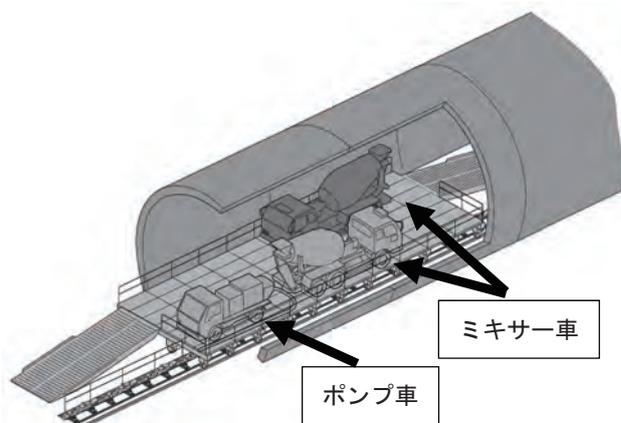


図-9 スライディングステージ設置図



写真-5 スライディングステージ設置状況

4. 現場導入でおきた問題と対策

新幹線断面における連続ベルコンシステムを導入後に発生した問題と対策を以下に示す。

(問題)

切羽が進むにつれ連続ベルコンの延伸作業を行うが、蛇行によるズリこぼれが発生した。

(原因)

設置当初はメーカー指導により、ブラケットフレームを設置していたが、設置後は作業員と現場職員で設置する為、ブラケットフレームの設置精度が悪くなっていた。

(対策)

延伸作業時、作業員への指導、蛇行がひどい箇所にはブラケットフレームを追加設置する事で蛇行を解消した。(写真-6)



写真-6 ブラケットフレーム追加状況

5. 現場導入による成果

当現場は2021年11月11日までの工期であり、現在も施工が続いているが、現段階での新幹線トンネルにおける連続ベルコンシステムを現場に導入したことによる成果を以下に示す。

- ・上越式テールピース台車とブラケットフレームにより、ベルコンラインを5.5mの高さに変更した事で、ベルコン下に切羽施工機械の駐機スペースや、重機走路が確保され、施工性と安全性が向上した。(図-10)

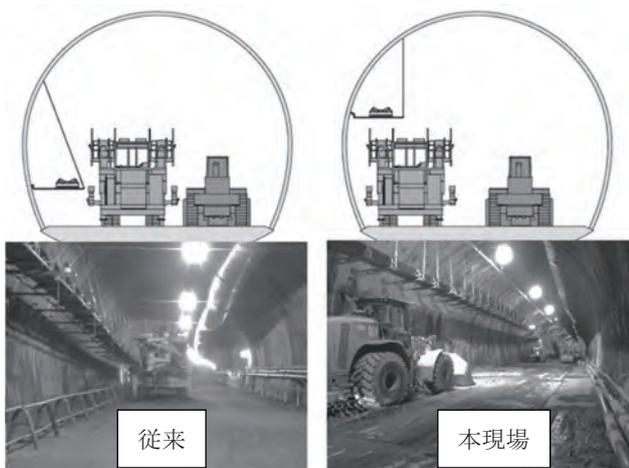


図-10 従来との比較

- ・テレスコピックセントルのベルコン下通過方法の採用により、セントル移動時の中間部材解体・組立作業が不要になり、切羽と覆工作業を独立する事で、それぞれの施工性が向上した。また、連続ベルコンが下置きになっていることにより、メンテナンス性が向上した。
- ・連続ベルコン通過型スライディングステージにより、坑内通行車両の離合間隔の改善や駐車場所の確保などで、坑内通行車両同士の接触災害がゼロになり、安全性が向上した。

6. 今後の課題

今後の課題として、切羽からインバート施工完了区間までを上越のベルコンラインとした為、インバートの掘削作業で出たズリはダンプによる搬出を行っている。その為、インバートの掘削作業が進むにつれ、ダンプの走行距離が延び、施工サイクルの低下や坑内環境が悪化する問題がでてくる。また、本現場で使用しているインバート栈橋は斜路を跳ね上げて掘削作業をするため、掘削作業中は車両運行が不可能になる。課題解決のためには、インバート掘削時のズリを上越ベルコンに乗せる垂直ベルコンの様な設備や、カテナリーZ台車でズリ積込が出来る設備等、ダンプによる搬出を無くす方法を検討中である。

7. まとめ

当現場は、長距離、中断面の新幹線トンネルであり、設計は連続ベルコンが採用されているが、設備設置に伴う駐機スペースの確保や、重機・車両の離合、施工性の向上など、多くの課題が浮上した。この課題解決を目的に「上越式テールピース台車」「ブラケットフレーム」「カテナリーZ台車」「テレスコピックセントルのベルコン下通過方法」「連続ベルコン通過型スライディングステージ」を導入する事で、掘削作業区間での駐機スペースの確保、重機・車両の離合走路の確保、覆工作業区間での施工サイクルの短縮、覆工コンクリート打設時の通行車両の離合スペースを確保出来た。

今後、工事が進み連続ベルコン設備の距離が延びるにつれ、新たな問題点がでてくると思うが積極的に改善を行い、同様な工事があつた際には、今回の施工実績が役に立てば幸いである。

工事名称：北海道新幹線、野田追トンネル（北）他
 発注者：独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
 北海道新幹線建設局
 工事場所：北海道二海郡八雲町
 工期：2014年12月12日～2021年11月11日
 施工内容：トンネル工（NATM） A=62㎡、L=4,490m
 土路盤工 L=40m

13. トンネルにおける施工の合理化、生産性向上の取組み

～ ロックボルト打設装置の開発、ツインアーチフォームセントルと連続ベルトコンベヤの組合せ ～

鹿島建設株式会社 北海道支店 山岸 隆史
小林 真悟
○田村 広行

1. はじめに

日高自動車道は、北海道苫小牧市を起点とし、厚真町、むかわ町、日高町、新冠町、新ひだか町を經由して浦河町に至る延長約 120km の一般国道の自動車専用道路である。このうち厚賀静内道路は日高厚賀 IC から静内 IC(仮称)に至る延長 16.2km の区間である。高速ネットワークの拡充による近隣都市間の連絡機能の強化、地域間交流の活性化、及び国際拠点港湾苫小牧港・拠点空港新千歳空港等への物流効率化等の支援を目的として計画されている。このうち大狩部トンネル(仮称)は日高厚賀 IC に隣接する新冠町に位置するトンネルであり、延長 2,151m(掘削延長 2,149.8m) のトンネル施工を行うものである。図一 1 に現場位置図を示す。



図一 1 現場位置図

当工事では、NATMトンネルの掘削に関するサイクルタイムの向上や、様々な施工の合理化の取組みをしている。本稿では、NATM工法で実施するロックボルト工のサイクルタイム短縮や安全性の向上を目的とした「ロックボルト打設装置」及びTAF工法(ツインアーチフォーム工法)と連続ベルトコンベヤの併用についての創意工夫について述べる。

2. 工事概要

2.1 全体工事概要

工事名：日高自動車道
新冠町 大狩部トンネル工事
発注者：北海道開発局室蘭開発建設部
施工者：鹿島・宮坂特定建設工事共同企業体
JV比率(鹿島 60：宮坂建設工業 40)
工事場所：北海道新冠郡新冠町大狩部
工期：2016(H.28).10.1～2021(R.3).3.26

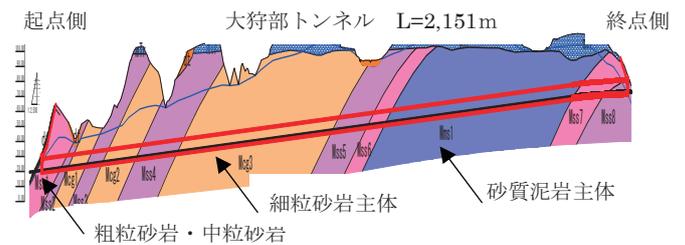
2.2 主要工事数量

掘削工	2,149.8m
覆工	2,151.0m
インバート工	2,151.0m

2.3 地盤条件

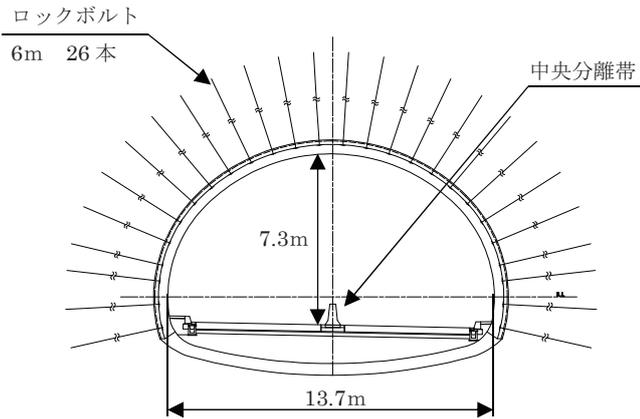
大狩部トンネルは標高 50～100m の平坦面(段丘面)を有する丘陵地に計画されている。

岩種は凝灰質泥岩互層(凝灰質泥岩、砂岩および礫岩からなる)や凝灰質塊状泥岩など多岐に渡り、非常に岩相変化が激しい地層である。図一 2 に地質縦断面図を示す。



図一 2 地質縦断面図

トンネル形状は、トンネル中央部分に中央分離帯が配置されており、扁平率 26% の大断面トンネル(掘削断面積 $A=122.5\text{m}^2$) となっている。図一 3 に標準断面図を示す。



図—3 標準断面図

2. ロックボルト打設装置

2.1 開発の背景

山岳トンネル工事では近年、高齢化に伴う熟練作業員の減少や不足が深刻な問題となっている。このような背景の中、品質・安全を確保しながら工程を確保するためには生産性の向上が望まれる。

本工事の代表パターン断面は全延長の86%を占めており、1断面内につき26本のロックボルト(L=6m)が計画されている。掘削1サイクルのうち、ロックボルトの施工に要する時間は37%を占めるため、ロックボルトの施工がサイクルタイム全体に与える影響は非常に大きい。表—1に施工サイクルタイムを示す。

そこで、依然として旧来の施工方法を行っているロックボルト工に着目し、省人化・自動化に向けた課題を抽出した。

① モルタル充填時とロックボルト挿入時の孔荒れ

ロックボルトの施工では、ドリルジャンボで地山を削孔して、削孔した孔に塩ビパイプを挿入して、モルタルを孔奥から充填する。削孔した孔が孔荒れしていると、モルタル充填時に塩ビパイプが挿入できないため、再削孔する必要が生じ、サイクルタイムを悪化させる。図—4に再削孔概要図を示す。

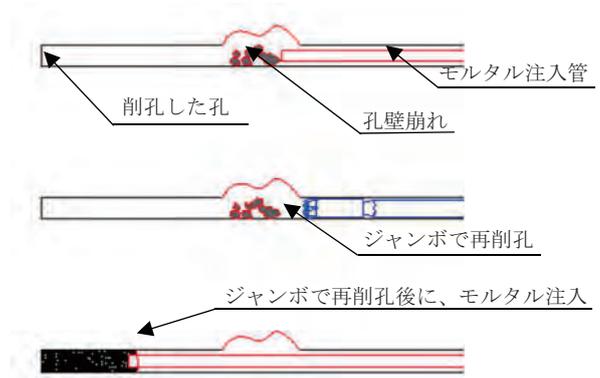
② 身体的負担となるロックボルト重量

6mのロックボルトは、1本当たりの重量が約20kgと非常に重く、人力で取り扱うのは身体的負担が大きい。作業員の高齢化に伴い、この負担は増加する一方である。

また、3mロックボルト施工に比べ、切羽直下での作業時間が長くなるため、肌落ち災害のリスクが高くなる。

表—1 施工サイクルタイム表(実績)

項目	時間(分)	割合
掘削、ズリ出し	105	39%
1次吹付、鏡吹付	15	6%
建込	20	7%
2次吹付	30	11%
ロックボルト	100	37%
合計	270	100%



図—4 再削孔概要図

2.2 施工装置の開発

施工装置の開発に当たっては、通常のロックボルト施工時に使用するドリルジャンボをベースとすることを条件とした。モルタル注入、ロックボルト挿入を機械施工するためである。ドリルジャンボは3ブームを採用し、センターブームをモルタル注入専用とする計画とした。写真—1にドリルジャンボを示す。

① モルタル注入装置

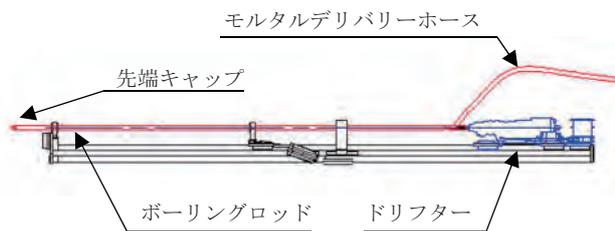
図—5にモルタル注入装置図を示す。モルタル注入装置は、ドリルジャンボのドリフター(削岩機)にモルタル注入管を設置して、ドリフターの機械操作でモルタル注入管を削孔した孔に挿入できる構造とした。

モルタル注入管にはボーリングロッドを使用することとした。モルタル供給時の閉塞を懸念し、過去の実績よりφ20mmではなく、φ25mmの中空ボーリングロッドを採用し、孔詰まり防止のため、先端には円錐型のキャップを採用した。

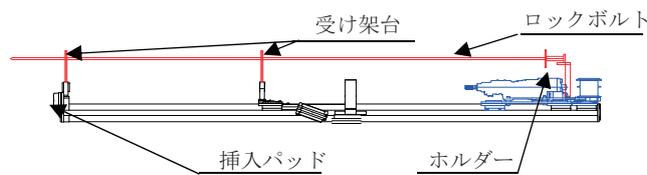
ボーリングロッドと先端キャップには焼き入れ・焼き戻し加工を行い、韌性を与え、削孔した孔に挿入困難な場合に打撃が可能な構造とした。



写真—1 ドリルジャンボ



図—5 モルタル注入装置図



図—6 ロックボルト挿入装置

② ロックボルト挿入装置

図—6にロックボルト挿入装置を、図—7にロックボルト挿入概要図を示す。ガイドセルの2箇所に受け架台を、ドリフターの後方にホルダーを装着して、ロックボルト挿入装置とした。ロックボルト挿入装置にロックボルトをセットし、ドリフターを機械操作することで、削孔した孔にロックボルトを挿入することを可能とした。

2.3 施工実績

本装置の導入により、モルタル注入、ロックボルト打設作業の機械化が可能となり、下記の効果を得た。

① サイクルタイム向上

図—8にサイクルタイムを示す。削孔とモルタル充填は装置の有無に関係なく同じ時間を要するが、削孔後に本装置を用いて速やかにモルタル充填を開始できることから、5分間のサイクル短縮になっている。(但し、クリティカルパスではない)

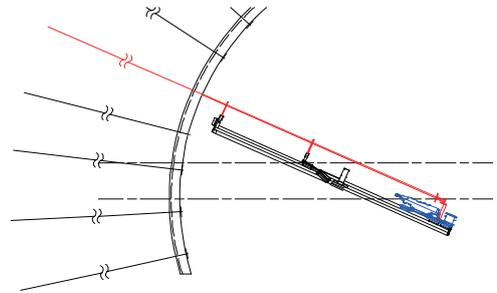
ロックボルト挿入は、本装置を用いることで作業時間そのものを31分間短縮できる。削孔が全て完了してから挿入作業を開始したとしても、全体

のサイクルタイムとしては27分間の短縮となった。

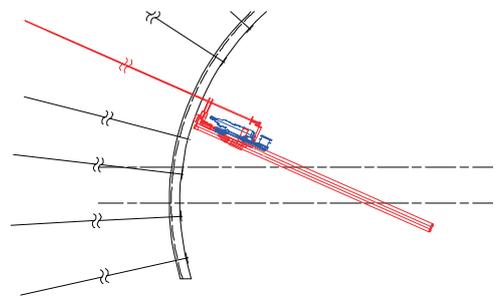
② モルタル充填時の再削孔

図—9にモルタル注入概要図を示す。また、写真—2、3にモルタル注入装置全景と先端部を示す。モルタル注入を機械化することにより、孔荒れが発生した場合にでも、モルタル注入管(ボーリングロッド)の挿入が可能である。

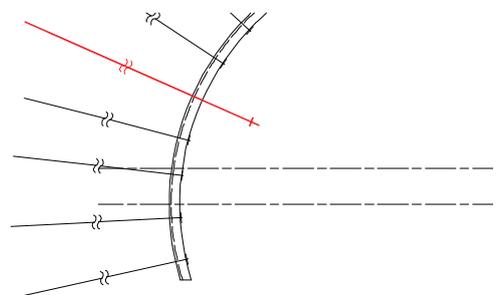
① ロックボルトの位置を合わせる



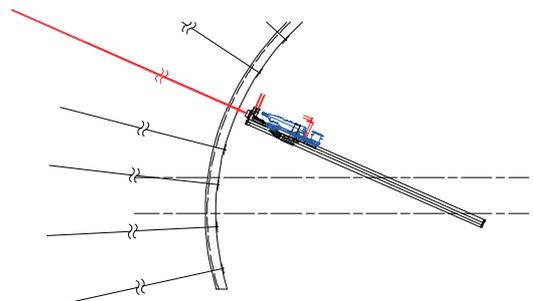
② 削岩機でロックボルトを挿入する



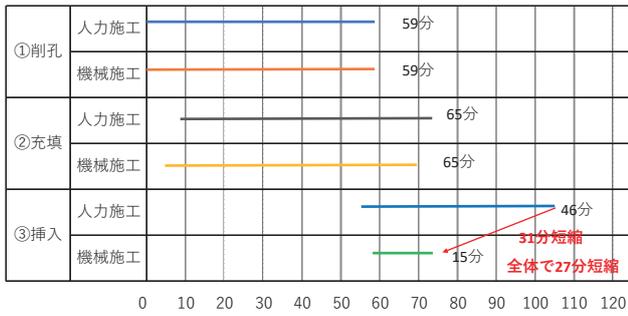
③ ロックボルトをホルダーから外す



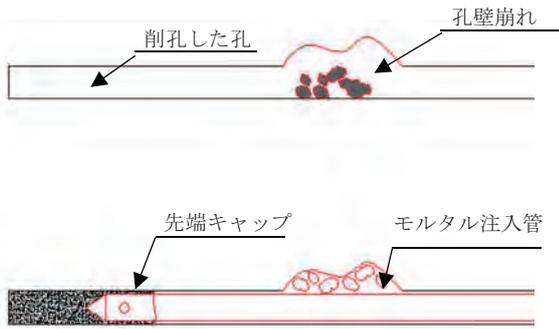
④ ロックボルトを挿入パッドで押し込む



図—7 ロックボルト挿入概要図



図—8 ロックボルト工のサイクルタイム



図—9 モルタル注入概要図



写真—2 モルタル注入装置全景



写真—3 モルタル注入装置先端

③ 作業環境の改善

モルタル注入作業とロックボルト挿入作業を機械化したことで、人力作業を削減できたため、身体的負担の低減につながった。

また、両作業の機械化に伴って、手が空いた作業員は次の作業の準備に取り掛かることができるた

め、全体のサイクルタイムの向上にも寄与している。

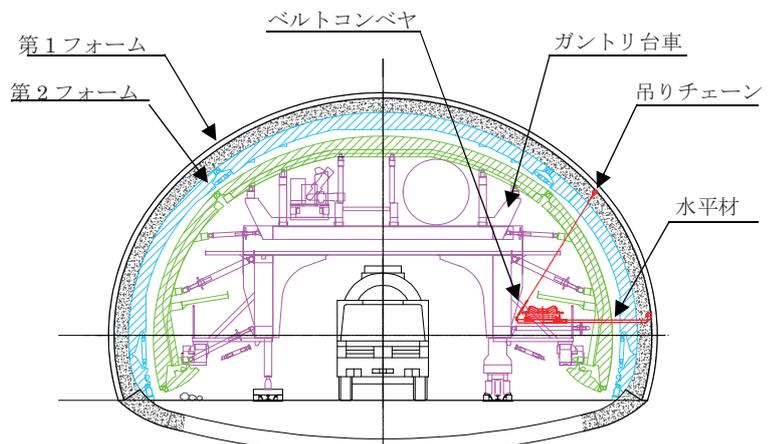
3. ツインアーチフォームセントルと連続ベルトコンベヤの組合せ

3.1 開発の背景

当工事では、覆工コンクリートの品質向上を目的に、2基のセントル型枠を使用することにより、養生時間を66時間とすることが可能なツインアーチフォーム工法「TAF工法」(以下、TAFと称す)を採用した。TAFでは、径の縮小・拡大機能を持たせた2つのアーチフォーム(型枠)を、1台のガントリー台車で交互に使用するため、通常のセントルと比較し仮設備の配置スペースが極めて少ない。このTAFと連続ベルトコンベヤズリ搬出方法を組合せた現場は過去に例がないため、連続ベルトコンベヤの通過方法検討を行った。図—10に仮設備配置図を示す。



写真—4 ロックボルト挿入状況



図—10 仮設備配置図

通常のセントルではベルコンの設置個所をセントル歩廊内部とするが、TAFはガントリー台車の移動に伴うベルコンの盛替えが頻繁になるため、非常に手間と時間が掛かり、標準打設サイクルの2日に1回の打設サイクルが困難となり施工サイクルに与える影響が大きい。図—11にガントリー台車移動概要図を示す。

TAF と連続ベルトコンベヤを組合せるためには、ガントリー台車の移動に合わせてベルトコンベヤを盛替える必要があるため、移動の支障にならない場所へ配置できないかを検討した。TAF 断面図を再検討した結果、ガントリー台車下側に空間があるので、こちらにベルトコンベヤを配置する計画とした。図-12 にベルコン配置図を示す。

その際に問題として覆工の進捗に合わせてベルトコンベヤのカテナリー変更^{※1}が必要となり検討を行った。

(※1 カテナリーとは、ロープや電線などの両端を持って垂らした時にできる曲線で、カテナリー曲線といわれている)

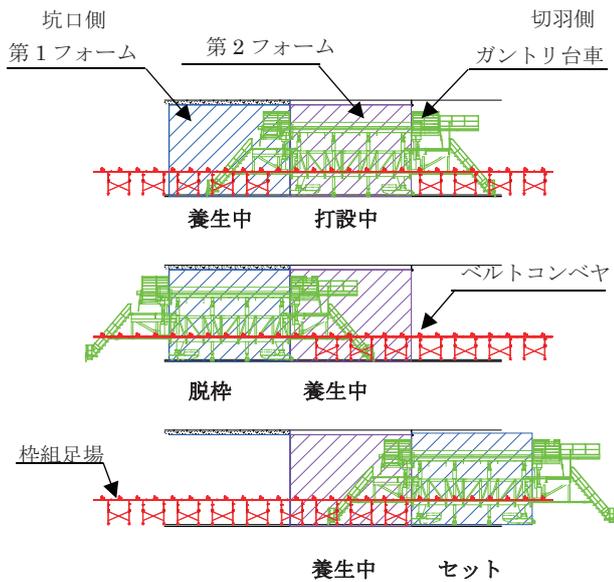


図-11 ガントリー台車移動概要図

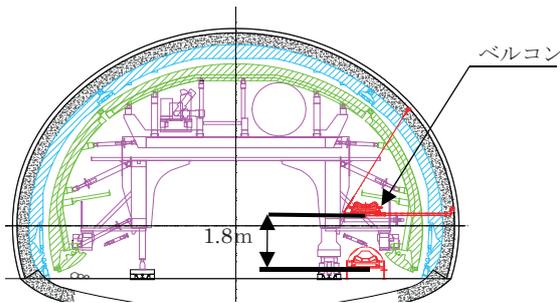


図-12 ベルコン配置図

3.3 カテナリー変更方法検討

ベルトコンベヤの位置をガントリー台車下側に配置するには、垂直高さで約 1.8m 下げる必要があり、このカテナリー変更をどのように行うかを検討した。

カテナリー変更方法には、様々な変更方法がある。下記に検討したカテナリー変更方法を示す。

① フレーム調整区間による変更

一般的な方法としては、枠組み足場と単管パイプを使い、高さ調整を行いカテナリー変更する方

法がある。図-13 に枠組足場によるカテナリー変更方法を示す。

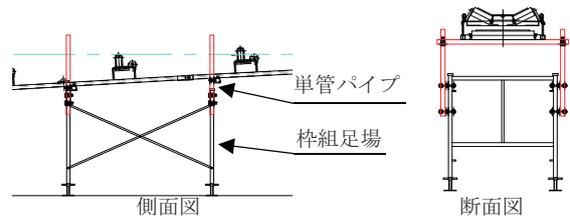


図-13 枠組足場によるカテナリー変更方法

この場合、カテナリー変更する高さにより調整区間延長が長くなり、カテナリー変更に必要な作業量が多だけでなく、蛇行調整区間も長くなり効率が悪い。当現場でこの方法を採用するとカテナリー変更区間が約 60m となり覆工の進行に合わせて移動させる必要がある。図-14 にカテナリー変更図を示す。

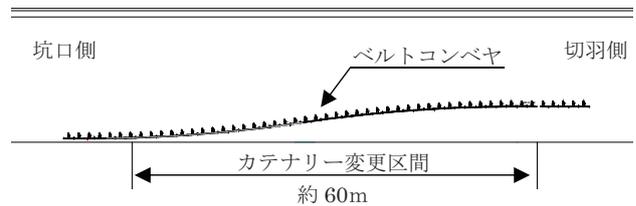


図-14 カテナリー変更図

② カテナリー変更台車による変更

カテナリー変更距離を短くする方法としては、台車を製作してカテナリーを変更する方法がある。当現場のカテナリー変更高さは垂直高さで約 1.8 m となるため、ベルトを Z 型に折り返すことによりカテナリー高さを変更する方式を検討した。図-15 にカテナリー台車を示す。

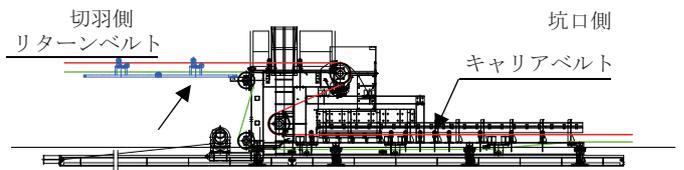


図-15 カテナリー台車

上記検討の結果、枠組み足場を使用した場合の変更区間長が約 60m 必要となり覆工の進行に合わせて移動することは困難なことから、カテナリー台車を使用したカテナリー変更方法を採用することとした。

3.4 カテナリー台車採用の課題

カテナリー台車を使用するためにはどのような問題点があるのかを検討した。

ベルトコンベヤの位置を垂直高さで 1.8m 下げると、ベルトコンベヤフレーム位置が GL+200mm

14. ICT工事3次元データビューワの開発

電子成果品の利活用に向けて

国土技術政策総合研究所 〇 佐々木 陽
 国土技術政策総合研究所 森川 博邦

1. はじめに

国土交通省ではi-Constructionのトップランナー施策として、「ICTの全面的な活用」を打ち出し、土工、舗装工、浚渫工から地盤改良工、法面工、付帯構造物設置工へとその取り組みを順次拡大し、普及に取り組んでいる。

i-Constructionは建設現場の生産性向上に向けて、建設生産プロセスの各段階において3次元データやICT等を活用する施策であり、具体的には3次元点群を用いた起工測量、3次元設計データの利用、ICT建機による施工、3次元点群を用いた出来形管理、そして成果品の電子納品が行われる。

図-1はICT活用工事件数を示している。¹⁾ICT活用工事は直轄、都道府県政令市のいずれにおいても実施件数に大きな伸びが見られ、全体としてICT活用工事が普及拡大している様子が伺える。また、平成29年11月には国土交通省より建設現場の生産性向上に向け「3次元データ利活用方針」²⁾が发出され、3次元データの利活用の基本方針が示されている。そうした状況の中、国土技術政策総合研究所にて素案を作成している種々の出来形管理要領においても図-2に示す様に電子納品仕様を規定し、ICT活用工事にて発生した様々な成果品の円滑な納品を促している。

ICT施工実施状況

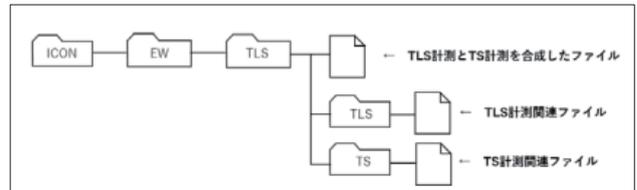
工種	平成28年度		平成29年度		平成30年度	
	公告件数	うちICT実施	公告件数	うちICT実施	公告件数	うちICT実施
土工	1,625	584	1,952	815	1,675	960
舗装工	-	-	201	79	203	80
浚渫工	-	-	28	24	62	57
浚渫工(河川)	-	-	-	-	8	8
合計	1,625	584	2,181	918	1,948	1,105
実施率	36%		42%		57%	

都道府県・政令市におけるICT施工実施状況

工種	平成28年度		平成29年度		平成30年度	
	ICT実施件数	公告件数	うちICT実施	公告件数	うちICT実施	
土工	84	870	291	2,428	523	
実施率	33%		22%			

図-1 ICT活用工実施状況

本管理要領に基づいて作成する電子成果品は、以下のとおり。
 ・3次元設計データ (LandXML等のオリジナルデータ (T I N))
 ・出来形管理資料 (出来形管理図表 (PDF) または、ビューワー付き3次元データ)
 ・T L Sによる出来形評価用データ (CSV、LandXML、LASのポイントファイル)
 ・T L Sによる出来形計測データ (LandXML等のオリジナルデータ (T I N))
 ・T L Sによる計測点群データ (CSV、LandXML、LAS等のポイントファイル)
 ・工事基準点及び標定点データ (CSV、LandXML、S I M A等のポイントファイル)
 電子成果品は、「工事完成図書電子納品等要領」で定める「ICON」フォルダに格納する。
 格納するファイル名は、T L Sを用いた出来形管理資料が特定できるように記入する。



計測機器	整理番号	図面種類	番号	改訂履歴	内容	記入例
TLS	0	DR	001~	0~Z	・3次元設計データ (LandXML等のオリジナルデータ (T I N))	TL50DR001Z.拡張子
TLS	0	GH	001~	-	・出来形管理資料 (出来形管理図表 (PDF) または、ビューワー付き3次元データ)	TL50GH001.拡張子
TLS	0	IN	001~	-	・T L Sによる出来形評価用データ (CSV、LandXML、LAS等のポイントファイル)	TL50IN001.拡張子
TLS	0	EG	001~	-	・T L Sによる起工測量計測データ (LandXML等のオリジナルデータ (T I N))	TL50EG001.拡張子
TLS	0	SO	001~	-	・T L Sによる管線計測データ (LandXML等のオリジナルデータ (T I N))	TL50SO001.拡張子
TLS	0	AS	001~	-	・T L Sによる出来形計測データ (LandXML等のオリジナルデータ (T I N))	TL50AS001.拡張子
TLS	0	GR	001~	-	・T L Sによる計測点群データ (CSV、LandXML、LAS等のポイントファイル)	TL50GR001.拡張子
TLS	0	PD	001~	-	・工事基準点及び標定点データ (CSV、LandXML、S I M A等のポイントファイル)	TL50PD001.拡張子

図-2 電子成果品の作成規定例³⁾ (納品データ、フォルダ構成例、ファイル命名規則)

2. 開発の目的

このようにICT活用工事において生成・利用された様々なデータが納品される環境・枠組みが整備されてきており、3次元データ利用拡大に向けて動き出してきているという状況がある一方、現状ではICT活用工事における3次元データの用途は、主には出来形管理のみにとどまっている。こうした実情を受けて、納品された3次元データを発注事務所等で埋没させることなく、業務や工事後プロセスで有効に活用できる「ICT工事3次元データビューワ」(以下「本ソフトウェア」という)の開発を行ったものである。

3. 開発にあたって

本研究では、既存ビューワーソフトの機能を考慮したうえで様々な用途を検討した結果、次のような環境整備を想定して開発を行った。

- 1) 多様な施工フェーズの現場状況を確認できる環境
- 2) 基準点などの他の情報を参照できる環境(国土地理院地図との連動)
- 3) 簡易な出来形確認ができる環境(複数横断面表示機能)
- 4) 現場立会等のデータを紐付け,参照出来る環境

4. 開発の成果

4.1 本ソフトウェアについて

本ソフトウェアは,点群データや面データの表示や簡易的な計測機能,特定の座標と資料を紐付け参照する機能などを有しているが,既存ベンダーが供給するソフトウェアと競合するデータ編集や面的出来形管理などの高度な機能は搭載せず,あくまでビューワとしての使用を想定したソフトウェアとしている。当面は各地方整備局,北海道開発局,沖縄総合事務局を通じて地方公共団体を含めた発注者側に無償配布を行い,3次元点群データなど電子納品成果品の利活用を促すことを目指している。なお対象 OS は 64bit 版 windows 7/8/8.1/10 である。図-3 に本ソフトウェアの画面例を示す。

ICT 活用工事における電子納品成果物は表-1 に示すとおり多岐にわたり,3次元点群データや TIN データなどこれまでの納品では一般的でないデータも含まれることから,電子納品においては成果品データに専用のビューワを添付することも可能としている。専用のビューワは専門的ソフトウェアであるため操作性や描画,機能の面で多くのメリットが有る一方,成果品毎に専用ビューワが存在するという事で管理上煩雑になる可能性もあ

る。本ソフトウェアにおいては納品された電子成果品を汎用的に閲覧可能とし,データ管理の利便性を向上するという効果も期待している。

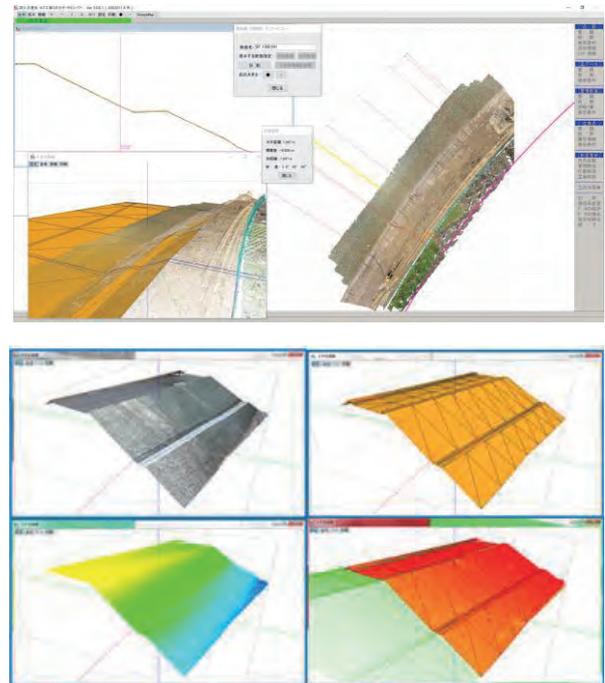


図-3 画面表示例

上図：ソフトウェア画面例

下図：3次元データ表示例

左上：RGB 点群

左下：標高色点群

右上：設計 TIN

右下：設計 TIN と単色点群

表-1 電子成果品

データ名	概要	データのイメージ
3次元設計データ	道路中心線軽又は法線(平面線形、縦断線形)、出来形横断面形状、工事基準点及び利用する座標系情報など設計図書に規定されている工事目的物の形状とともに、それらをTINなどの面データで出力したもの。(LandXML等のオリジナルデータ(TIN))	
出来形管理資料	3次元設計データと出来形評価用データを用いて、設計面と出来形評価用データの各ポイントとの離れ等の出来形管理基準上の項目計算結果(標高較差の平均値等)と出来形の良否の評価結果、及び設計面と出来形データの各ポイント離れを表した分布図を整理した帳票、もしくは3次元モデルをいう。(出来形図表(PDF)または、ビューワ付き3次元データ)	
出来形評価用データ	計測点群データから不要な点を削除し、さらに出来形管理基準を満たす点密度に調整したポイントデータ。(CSV、LandXML等のポイントデータファイル)	
出来形計測データ 起工測量計測データ※ 岩線計測データ※ ※: 数値算出に利用した場合	計測点群データから不要な点を削除し、不等三角網の面の集合として出来形地形としての面を構成したデータ。(LandXML等のオリジナルデータ(TIN))	
計測点群データ	3次元計測機器で計測した地形や地物を示す3次元座標値の点群データ。点群処理ソフトウェアなどでのデータ処理前のポイントデータ。(CSV、LandXML等のポイントデータファイル)	
工事基準点及び標定点データ	工事基準点及び標定点として使用した点の座標値。	

4.2 主な機能と想定用途

本ソフトウェアの主だった機能とそれらの利活用方法を提示する。

1) 点群/面データの読み込みとその活用

本ソフトウェアでは図-4 に示す様に点群データや設計等の面データの読み込みを複数のファイルから行えるという特徴がある。これによりデータが分割されていてもこれを統合して現場全体の把握が可能となり、また、必要に応じて過年度分を含む全体のデータを表示するなどの利用も可能となる。また、施工のフェーズ毎の点群を読み込むことで段階確認への利用も考えられる。距離計測や面積計算などの簡易的な計測機能も備えているため、読み込んだデータ上で簡易的に現況把握を行える。さらに、図-5 に示す様に本ソフトウェアは画面を分割できるため、一方は詳細拡大表示、もう一方は全体俯瞰表示として詳細表示の特定部位にカーソルを当てると全体図上でそれがどこに位置するかを容易に確認できる。

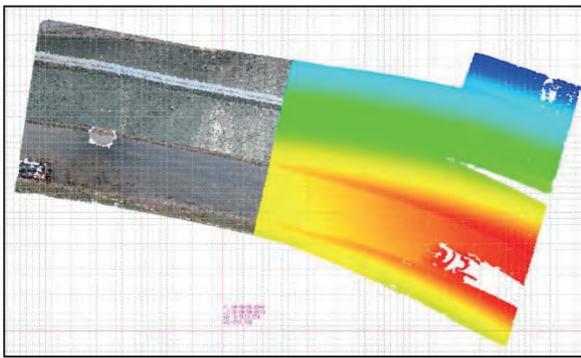


図-4 複数点群読み込み(左:RGB,右:標高)

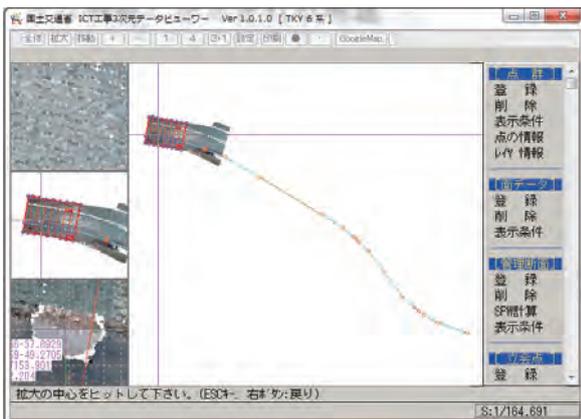


図-5 4分割画面例とクロスカーソル表示

2) 指定箇所の地図表示とその活用

点群上で指定した箇所を web 上の地図で確認できる。対応地図サイトは複数用意されているが、特に地理院地図⁴⁾は付加情報が豊富であるため、効果的な活用が期待できる。例えば図-6 に示す様に人

口集中地区 (DID) を表示することでドローン飛行計画立案時の一助となり、また、周辺の基準点を参照することも可能である。

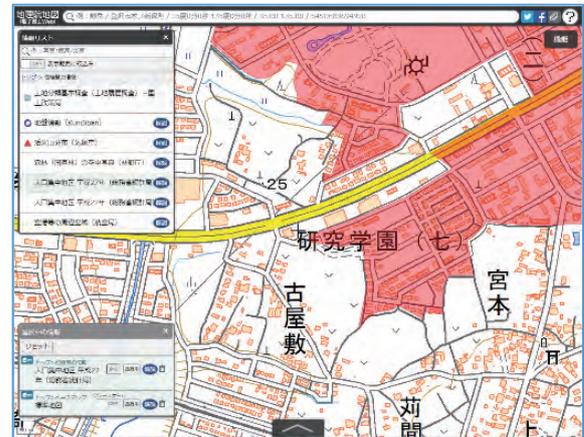


図-6 地理院地図での DID 表示

3) 断面表示/計測とその活用

図-7 に示す様な横断面表示では点群と面データを複数表示可能なため、簡易的な出来形チェックや進捗確認などに利用できる。トータルステーションによる出来形管理に用いる設計縦横断データを読み込むことで出来形管理断面の表示を行える。また点群上で任意の2点を指定し、その間の断面を表示することも可能である。また、利用の工夫のひとつとして横断面の左右反転表示を行える仕様となっている。これは、例えば河川土工では下流から上流に向かって測点番号が振られるが、管理においては上流から下流に向かって見た横断図が利用されているためである。



図-7 管理断面表示例

4) 立会点管理とその活用

立会点管理機能という特徴的な機能を搭載した。この機能により、様々なデータ(画像/動画/文書など)と座標情報を紐付けることが可能となる。例えば点検や検査の行われた場所と、その際の画像や結果の資料などを紐付ける、あるいは工事基準点や各種設備、仮置土の現況写真と場所を紐付けて管理することができる。データさえあれ

ば遠隔地や過去の現場であっても臨場感を持って現況把握を行うことができると考える。図-8に立会点管理例を示す。



図-8 立会点管理例

5. 今後の課題

現状は本ソフトウェアを各地方整備局等に配布し、研修等での利用を始めているところである。今後は実際の活用事例の収集や例示・提案などを行っていきたく考えている。また、多くのICT活用工事の電子納品データにおいて設計縦横断データは必ずしも納品されていない実態がある。図-9は2次元の平面線形、縦断線形、横断面形状データから3次元のスケルトンデータを作成し(青枠部)、それをもとに3次元設計TINデータを生成(赤枠部)している様を表している。設計縦横断データ(青枠部)は納品対象である3次元設計TINデータ(赤

枠部)を作成する際に使用されるデータであり、中間的には存在しているにもかかわらず最終的に納品されない規定となっているのが現状である。設計縦横断データがあると本ソフトウェアの管理断面表示などの機能が利用できるというメリットとともに、新たな管理手法(例えばICT舗装工事における点群からの平坦性算出など)においても有益な情報となりうる。このため、設計縦横断データが最終的に電子納品されるように、作業プロセスと納品物を明確化するような要領改定を検討している。

6. まとめ

ICT活用工事で電子納品される成果品利活用の促進を目的とした、3次元データビューを開発した。当該目的において有益と思われる各種機能を搭載しており、本ソフトウェアを足掛りとして電子納品成果物・3次元データの有益な利活用が普及拡大していくことを期待する。

参考文献

- 1) 第9回ICT導入協議会資料, 2019
- 2) 3次元データ利活用方針, 2017
- 3) 地上型レーザースキャナを用いた出来形管理要領(土工編)(案), 2018
- 4) 地理院地図webサイト (<https://maps.gsi.go.jp/>)

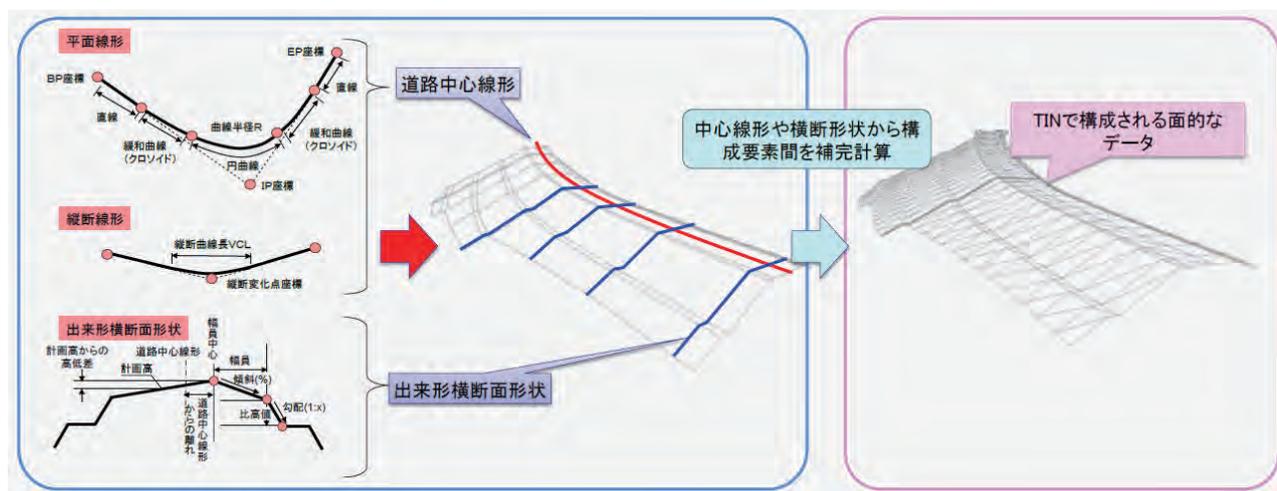


図-9 3次元設計TINデータの作成例

15. ICT活用工事における電子納品の課題と改善の検討

国土技術政策総合研究所 ○ 天野 克己
 国土技術政策総合研究所 森川 博邦

1. はじめに

国土交通省では、i-Construction (アイ・コンストラクション) の施策の一つである「ICTの全面的な活用」に向け、各工種の実施要領及び技術基準類の策定に取り組んできた。

このような取り組みでは、先進的な施工技術や高度なマシン制御技術、3次元計測技術など、先進技術への取り組みが着目されがちであるが、それらの先進技術で得られた膨大なデータを上流工程から下流工程へ、そして維持管理へ、正しく有益な情報として伝達することも重要なテーマと言える。

本稿では、「ICT活用工事」における成果の電子納品について、先の情報伝達の観点から、現在の電子納品の実態を調査し、運用上の課題とその改善方法について検討する。

2. ICT活用工事における成果の電子納品

ICT活用工事における成果の電子納品(以下、「ICT活用工事の電子納品」)では、「工事完成図書」の電子納品要領(以下、「電子納品要領」)を基本とし、フォルダ構成やファイルの命名規則等の詳細については、工種及び計測機器ごとに策定した各種の出来形管理要領(案)(以下、「各種出来形管理要領(案)」)それぞれで規定している。

図-1は各種出来形管理要領(案)の1つである、「空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)」を例にした管理体系図である。図上部の緑色の領域は、電子納品要領で規定した部分で、図下部の黄色の領域が各種出来形管理要領(案)それぞれで定めた部分である。以下にICT活用工事の電子納品の特徴について解説する。

2.1 情報管理ファイル

ICT活用工事の電子納品の最大の特徴は、電子納品要領で必須としていた「情報管理ファイル」が存在しない点である。代わって、フォルダ名称や階層構造、ファイルの命名規則を厳格に規定することで、各種成果の分類や種類を識別し、専用のプログラムを必要とせず、Windowsのエクスプローラ等で人が目で見て識別できることを目指した。

しかし、フォルダ名称の命名規則や階層構造、成

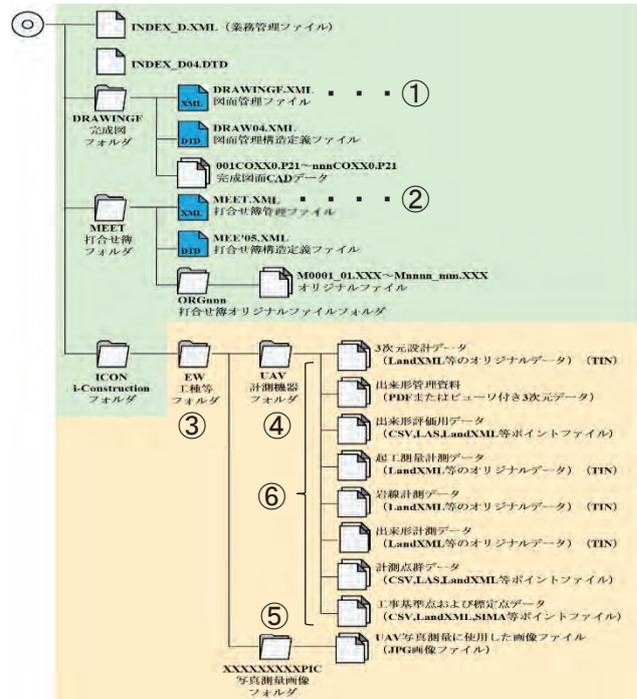


図-1 ICT活用工事の電子納品 管理体系図 (UAV写真測量を用いた土工の出来形管理例)

果ファイルの種類については、納品当時の各種出来形管理要領(案)を参照し、又は熟知して識別する必要がある。

なお、「情報管理ファイル」とは、電子成果品を管理するためのファイルで、XMLで記述する(図-1の①及び②)。電子納品要領では情報管理ファイルの作成が求められており、これにより成果の再利用時に、データの内容識別や、成果の分類・種類の情報のデジタル化等がしやすくなる。

2.2 工種等フォルダ

工種等フォルダは「ICON」フォルダの直下に置く(図-1の③)。フォルダ名称は、工種ごと(舗装工の場合は層ごと)に定めた記号に準じて命名する(表-1)。

2.3 計測機器フォルダ

計測機器フォルダは工種等フォルダの直下に置く(図-1の④)。フォルダ名称は、計測機器の種類ごとに定めた記号に準じて命名する(表-2)。また、欠測補間のため、2種類以上の計測機器で測量を行う場合は、主たる計測機器のフォルダを置き(図-

2の①), その下にそれぞれの計測機器フォルダを置く(図-2の②と③)。主たる計測機器フォルダには, それぞれの計測機器の計測データを合成したデータを格納する。

表-1 工種等フォルダを示す記号 表-2 計測機器フォルダを示す記号

工種	層	記号	計測機器	記号
土工	-	EW	空中写真測量(無人航空機)	UAV
舗装工	現況地形	ES	地上型レーザースキャナー	TLS
	不陸整正	CS	無人航空機搭載型レーザースキャナー	ULS
	下層路盤	GL	TS等光波方式	TS
	上層路盤	GU	TS(ノンプリズム方式)	TSN
	基層	PL	音響測深機器	ES
	中間層	PC	施工履歴データ	CMR
河川浚渫工	表層	PU	地上移動体搭載型レーザースキャナー	MLS
	-	DR	RTK-GNSS	GNSS

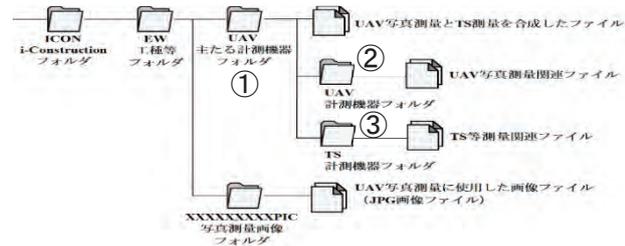


図-2 UAV写真測量を主としてTS等で欠測補完した場合のフォルダ構成の例

2.4 ファイルの命名規則

ファイル名には, 使用した計測機器の記号を冠し, データ種類ごとに定めた記号に準じて命名する(表-3)。なお, 舗装工では土工・河川浚渫工の場合と異なり, 工種等フォルダの記号も含めて命名する(表-4)。

表-3 ファイル命名規則 (UAV写真測量を用いた土工の例)

計測機器記号	整理番号	データ種類記号	番号	改訂履歴	データ種類名	ファイル名
UAV	0	DR	001~	-	3次元設計データ	UAV0DR001Z.拡張子
UAV	0	CH	001~	-	出来形管理資料	UAV0CH001.拡張子
UAV	0	IN	001~	-	出来形評価用データ	UAV0IN001.拡張子
UAV	0	EG	001~	-	起工測量計測データ	UAV0EG001.拡張子
UAV	0	SO	001~	-	岩線計測データ	UAV0SO001.拡張子
UAV	0	AS	001~	-	出来形計測データ	UAV0AS001.拡張子
UAV	0	GR	001~	-	計測点群データ	UAV0GR001.拡張子
UAV	0	PO	001~	-	工事基準点及び標定点データ	UAV0PO001.拡張子

表-4 ファイル命名規則 (レーザースキャナーを用いた舗装工の例)

計測機器記号	層	整理番号	データ種類記号	番号	データ種類名	フォルダ名	
TLS	ES~PU	0	DR	001~	0~Z	3次元設計データ	TLSPU0DR001Z.拡張子
TLS	ES~PU	0	CH	001~	-	出来形管理資料	TLSPU0CH001.拡張子
TLS	ES~PU	0	IN	001~	-	出来形評価用データ	TLSPU0IN001.拡張子
TLS	ES~PU	0	EG	001~	-	起工測量計測データ	TLSPU0EG001.拡張子
TLS	ES~PU	0	AS	001~	-	出来形計測データ	TLSPU0AS001.拡張子
TLS	ES~PU	0	GR	001~	-	計測点群データ	TLSPU0GR001.拡張子
TLS	ES~PU	0	PO	001~	-	工事基準点及び標定点データ	TLSPU0PO001.拡張子

2.5 航空写真フォルダの命名規則

計測機器に航空写真測量を用いた場合, 測定の種類ごとに定められた記号に準じて命名したフォルダ表-5を工種等フォルダの直下に置く(図-1の

⑤)。

表-5 写真測量フォルダの命名規則

計測機器記号	整理番号	データ種類記号	番号	データ種類名	フォルダ名	
UAV	0	EG	001~	PIC	起工測量の写真測量フォルダ	UAV0EG001PIC
UAV	0	SO	001~	PIC	岩線計測の写真測量フォルダ	UAV0SO001PIC
UAV	0	AS	001~	PIC	出来形計測の写真測量フォルダ	UAV0AS001PIC

3. 電子納品の実態調査

電子納品の実態調査は, はじめに述べた情報伝達の観点から, 以下の点について検証する。

- 1) 電子納品規定に準じた納品確認
- 2) 再利用に必要な情報の確認

実態調査にあたって, 平成28年度~29年度にかけ国直轄事業として発注したICT活用工事のうち, 平成30年6月までに完了した工事を対象とし, 全国地方整備局等の協力のもと, 414現場のデータを収集した。メディアの枚数は1現場平均約3枚, 最高23枚。データの総容量は3.45TBであった。データの内訳は図-3の通り。

なお, 収集データの工種は舗装工が5現場で, 他は全て土工であった。図-3の年度は工事完了年度である。完了年度が不明のデータが7現場確認されたが, これは電子納品要領で必須としている「工事管理ファイル(INDEX_C.XML)」が納品メディアに格納されていなかった。この7現場を除いた407現場を有効データとして実態調査を行うこととした。

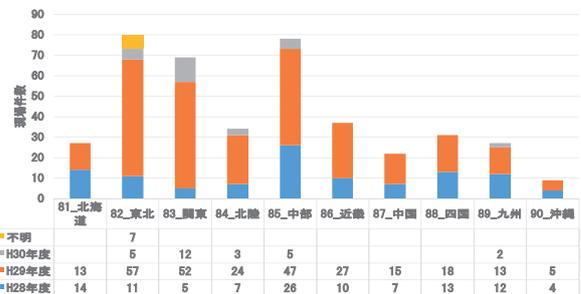


図-3 ICT活用工事の電子納品収集状況

3.1 電子納品規定に準じた納品確認

(1) ICoNフォルダ

調査の結果, 全体の8%(34件)で「ICoN」フォルダが確認できなかった。原因は表-6の通り。④は従来の断面管理を実施した現場であるが, 今回の調査目的と異なるため, 以降の調査は「ICoN」フォルダが確認された373件について行った。

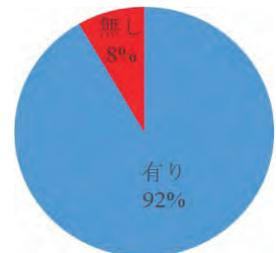


図-4 ICoNフォルダの有無

表-6 ICON フォルダの調査結果

調査結果	件数
① ICONフォルダを作成せずファイルを保管している	7
② ICONフォルダ名が全角文字	1
③ メディアに管理情報 (INDEX_C.XML) がない	3
④ 従来手法による出来形管理を実施	12
⑤ 不明 (施工計画書および打合せ簿が未納な為、確認できず)	11
総計	34

(2) 工種等フォルダ

今回の調査では、殆どのデータで工種等フォルダが確認されなかった。原因について調査した結果、工種等フォルダは平成 29 年 3 月、舗装工の工種拡大に伴い追加されたが、当時は舗装工のみ「層 (ES~PU)」フォルダを作成し格納していた。そのため土工と舗装工でフォルダ階層が異なる状態で運用されていた。その後、平成 30 年 3 月、河川浚渫工の工種拡大時に合わせて「土工(EW)」及び「河川浚渫工(DR)」フォルダを設置するよう改定したが、今回の調査データは、ちょうどその境目にあたる工期のデータだった。

表-7 工種等フォルダの納品状況

調査結果	種別名	件数
ES/GL/	舗装工 現況地形/下層路盤	1
GL/GU/PU/	舗装工 下層路盤/上層路盤/表層	1
GL/PU/	舗装工 下層路盤/表層	1
PL/PU/	舗装工 基層/表層	1
PU/	舗装工 表層	1
無し	土工	368
総計		373

(3) 計測機器フォルダ

調査の結果、全体の 11.3% (42 件) で計測機器フォルダが確認されなかった (図-5)。

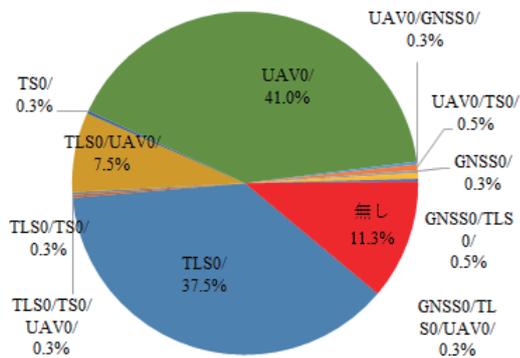


図-5 計測機器フォルダの納品状況

原因を調査した結果は (表-8) の通り。なお、TS 又は GNSS を用いた現場が全体の 2.6% (10 件) 確認されたが、うち 7 件が「TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理」の関連ファイルが、2 件が「TS による出来形管理に用いる施工管理データ交換標準 (案)」の基本設計データが格納されていた。いずれも ICT 活用工事の成果では無く、また格納場所も「OTHRs」や「MEET」フォルダが適切である。なお、10 件のうち 9 件のデータで他の計測機器デ

ータが確認され、残りの 1 件で適切なデータが存在しなかった。

また、全体の 9.7% で 2 種類以上の計測機器を用いているのが確認できたが、これは測量ごとに別々の計測機器を用いた (例えば、起工測量は UAV を、出来形計測には LS を用いた) もので、欠測補間によるものは 1 件も確認されなかった (図-5 計測機器記号の付番は階層番号)。以降の調査は計測機器フォルダが確認できなかった 42 件と適切なデータが無かった現場 1 件を除いた 330 件で行った。

表-8 計測機器フォルダの調査結果

調査結果	件数
① フォルダ名が命名規則に準じていない	30
② 計測機器フォルダが無く ICON フォルダ直下にファイルを格納している	10
③ ICON フォルダが空だった	1
④ 管理情報ファイル (INDEX_C.XML) がない	1
総計	42

(4) ファイルの命名規則

調査は各現場で命名規則に準じたデータファイルが何種類納品されているか集計した (図-6)。結果は、1 種類も納品が確認できなかった現場が全体の 4% (12 件) 確認された。原因について調査した結果を表-9 にまとめた。

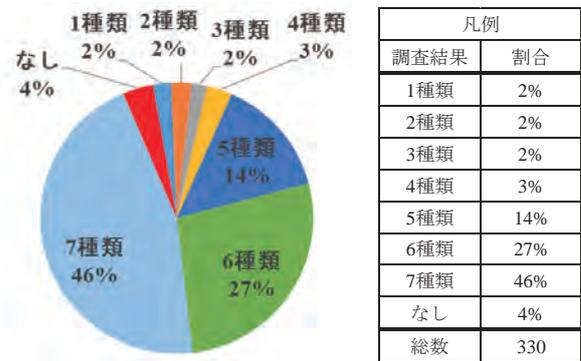


図-6 ファイル種類別の納品状況

表-9 ファイル命名規則の調査結果

調査結果	件数
① ファイル命名規則に準じていない	1
② フォルダ階層を更に細分化している	5
③ 計測機器フォルダ内に格納せず同じ階層に格納している	1
④ 計測機器記号とファイル名の整合性がとれていない	3
⑤ ファイルが無い	2
総計	12

(5) 航空写真フォルダの命名規則と納品状況

航空写真測量を実施した現場 186 件に対し、航空写真フォルダの命名規則に準じてフォルダ検出を行った。結果は図-7 の通り。このうち、データ種別が「3次元設計データ(DR)」、「出来形管理資料(CH)」、「出来形評価用データ(IN)」、「計測点群デー

タ(GR)」が数件確認されているが、これらは測量の種類では無い。航空写真フォルダは「起工測量計測データ(EG)」又は「岩線測量計測データ(SO)」もしくは、「出来形計測データ(AS)」で取り纏めるのが適切と考える。なお、航空写真フォルダが未検出となった59件について、更に原因を調査した結果は表-10の通り。

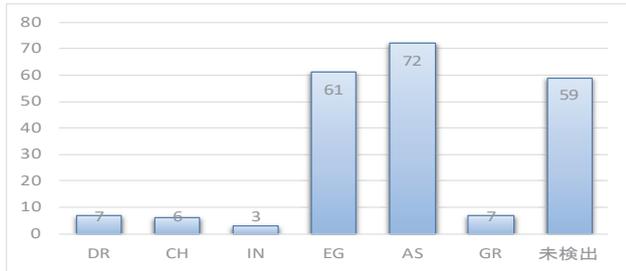


図-7 写真フォルダ検索結果

調査結果	件数
① フォルダ階層を間違えている。	22
② フォルダ名が命名規則に準じていない	5
③ UAVフォルダに格納している	11
④ 納品データが無い	21
総計	59

表-10 航空写真フォルダの未検出原因

3.2 再利用時に必要な情報の確認

データ再利用の観点から現在の電子納品データを見たとき、現状の電子納品データの記録仕様に不備はないか検証する。検証方法は、納品成果の種類ごとに利用方法に仮説を立てて確認する。

(1) 3次元設計データ(DR)

3次元設計データの再利用としては、後工事の基本設計データ(中心線・縦断・横断)としての利活用が考えられる。例えば、道路工事や河川工事などでは、基本設計データをもとに、施工計画、設計照査を行い施工する。この際、土工で作成した3次元設計データを流用し、後工程の基本設計データとして再利用できれば、新たにCADで再入力する手間が大幅に削減でき、また、再入力による人為的ミスも未然に防ぐことができる。特に工事が別々に発注される場合は、より効果的に効率化が図れる。以上の仮説からデータを検証した。

① 3次元設計データの電子納品規定について

3次元設計データの電子納品について、各種出来形管理要領(案)で、以下のように規定している。

5-3 電子成果品の作成規定
本管理要領に基づいて作成する電子成果品は、以下のとおり。
・3次元設計データ(LandXML等のオリジナルデータ(TIN))

従って、現状では3次元設計データの記録仕様として中心線や縦横断データを記録する必要はない。しかしながら、3次元設計データの作成過程において、中心線や縦横断データを作成している。下記は各種出来形管理要領(案)の3次元設計データの作成に関する記述である。

4-1 3次元設計データの作成

3) 3次元設計データの要素データ作成

3次元設計データの作成は、設計図書(平面図、縦断図、横断図)と線形計算書に示される情報から幾何形状の要素(要素の始点や終点の座標・半径・クロソイドパラメータ・縦断曲線長、横断形状等)を読み取って、作成する。

4) 3次元設計データ(TIN)の作成

入力した要素データを基に面的な3次元設計データ(TIN)を作成する。

LandXMLは、土木系のデータ交換標準フォーマットであり、中心線や縦横断データも記録可能だ。

今回の検証では、必須項目ではないが、中心線や縦横断データの記録状況を確認し、今後の各種出来形管理要領(案)改定の一助としたい。

② 納品データ形式と記録内容

3次元設計データの納品形式について図-8に集計した。9割近くがLandXMLで納品。僅であるがオリジナルデータでの納品が確認されている。

なお、オリジナルデータは、メーカー固有のフォーマットデータであるため、データの参照及び編集には、同一メーカーの系列ソフトウェアが必要となる。このためにも、作成ソフトウェアの情報を記録する管理ファイルの作成が望まれる。

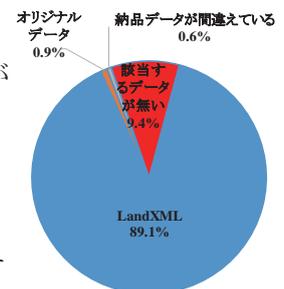


図-8 3次元設計データの納品データ形式

③ 3次元設計データの記録内容について

LandXMLで納品が確認できた3次元設計データについて、記録内容を解析した(図-9)。

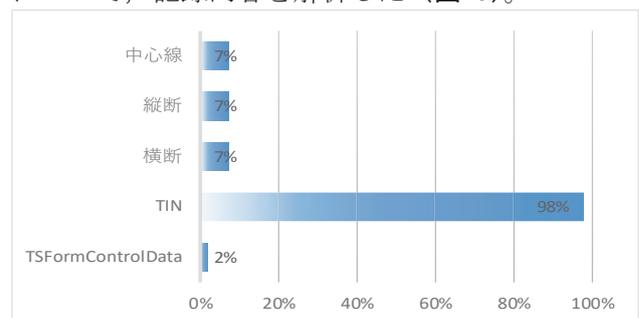


図-9 3次元設計データの記録内容

僅かではあるが、中心線や縦横断データを記録している事例が確認できた。また、使用ソフトウェアも複数メーカーが確認できた。図-10は、中心線や縦横断データが記録された3次元設計データの表示例である。

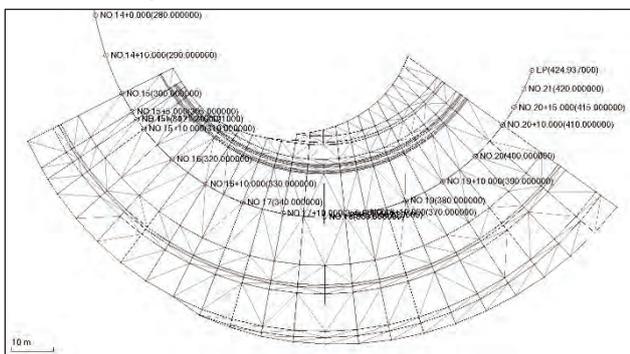


図-10 3次元設計データ
(中心線形・縦横断データが記録された例)

なお、「TSFormControlData」が2%確認されている。これは「TSによる出来形管理に用いる施工管理データ交換標準(案)」に準拠したXMLファイルでありLandXMLではない。

(2) 起工測量計測データ(EG)・岩線測量計測データ(S0)・出来形計測データ(AS)

各種計測データの利活用については、ICT土工のデータと、それ以外のICT工事のデータとで2種類の利用が考えられる。例えば、ICT土工のデータの場合、後工事の現況地形データとして再利用できれば、後工事における起工測量が不要となり、計測機器や作業員の経費や作業日程的にも大幅な効率化が期待できる。

又、ICT土工以外のデータでは、例えば舗装工や護岸工のように施設構造物の竣工データである場合があり、施設の点検・補修等の維持管理や、防災・減災などの基盤地図データとしての活用が期待できる。以上の仮説からデータを検証した。

① 後工事の現況地形データ利用について

後工事の現況地形データとして利用を考えた場合、出来形計測データがそのまま地盤データとして利用できそうだが、施工箇所のみ計測している場合が多い。舗装工であれば、それで十分だが、周辺構造物工や護岸工、法面工などへの利用を考えると、もう少し広域のデータが欲しい。そこで不足部分を補う為に起工測量計測データや岩線測量計測データと合成利用をする事を検証した。図-11は、起工測量計測データと出来形計測データを重ねた表示例である。データ合成を行うには加工可能なデータ形式であるかが重要となる。各計測データの納品状況を確認してみた(図-12)(図-13)。

概ね、LandXMLで納品しており、データの加工に問題はない。尚、データを間違えているケースが多数確認できる。これはCSV形式やTXT形式で点群データを納品している。起工測量計測データと出来形計測データの合成例を図-14に示す。

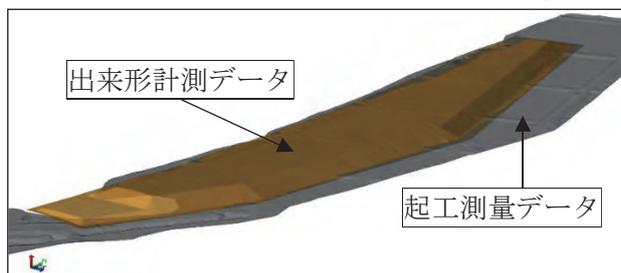


図-11 起工測量と出来形計測を重ねて表示した例

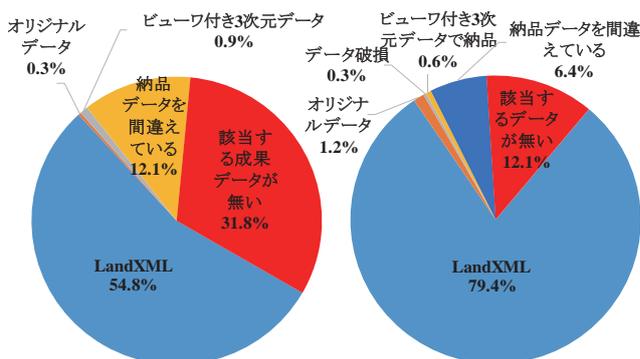


図-12 起工測量
データ(EG)

図-13 出来形計測
データ(AS)

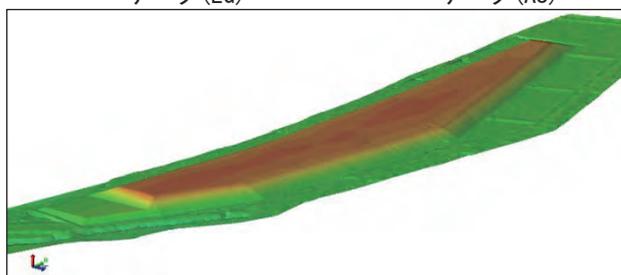


図-14 合成データの例

② 維持管理の基盤地図データ利用について

各計測データを維持管理の基盤地図データとして利用を考えた場合、目的や用途に合わせて、様々なデジタル地図データと重ねて表示する場面が多く発生する。単に「重ねて表示する」と言っても、様々な時期に、様々な目的で作成されたデジタル地図データを一元的に表示して利用するには、共通する座標参照系で表示する必要がある。

ここでは、多種多様なデジタル地図データと重ねて表示する観点から今回の電子納品データの座標参照系の登録状況について確認した(図-15)。

登録状況は予想以上に低い結果となった。座標参照系については、現場住所から想定することは可能だが、住所だけでは確定できない要素もあるため、登録して納品するのが望ましい。図-16は、地理院地図に計測データを重ねて表示した例である。

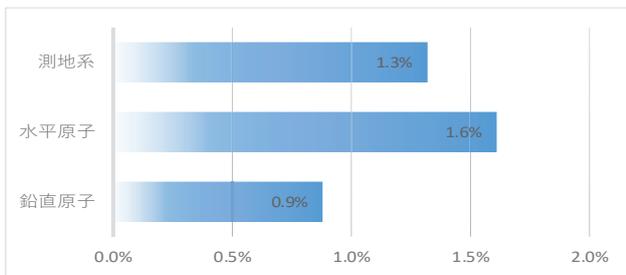


図-15 座標参照系の登録状況

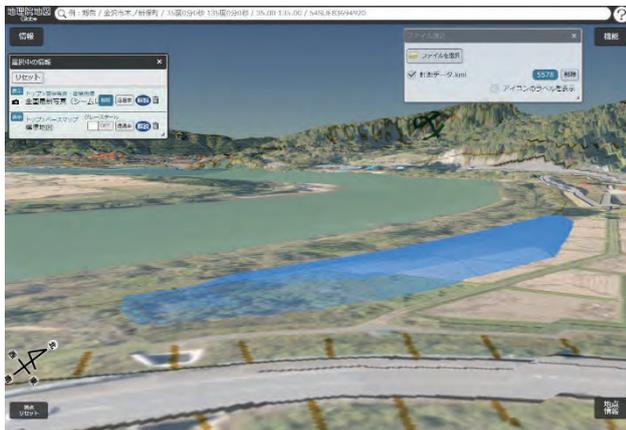


図-16 地理院地図と計測データを重ねて表示した例

(3) 計測点群データ (GR)

計測点群データについては、測定の種類（起工測量・岩線測量・出来形計測の種類）が不明であるため、再利用時には、測定の種類を確認して使用する必要がある。又、納品データ形式は CSV や TXT 形式が 8 割以上を占めるが、この形式の難点として座標参照情報が記録されない点が挙げられる。今後の課題としては、測定の種類や座標参照情報など、再利用時を考慮した各種出来形管理要領（案）の改定が望ましい。

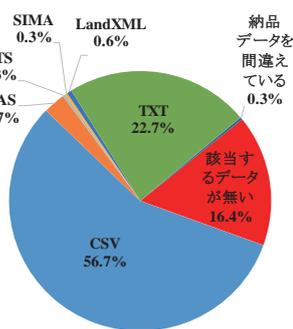


図-17 計測点群データの納品状況

(4) 写真測量画像データ (PIC)

写真測量画像データは、無人航空機によって、上空から撮影した数百枚にも上る撮影画像である（図-18）。その為、一枚一枚での利用用途は少ないが、例えば、オルソ画像へ補正変換して使用する場合、LandXML や点群データ以上に情報量が多い高度なデータに生まれ変わる。図-19 は、オルソ画像に変換した写真測量画像データと計測データを重ねて表示した例で



図-18 写真測量画像の例

ある。地理院地図との重ね表示に比べ、施工面の質感まで再現され、よりビジュアルでわかり易い、高度な基盤地図データとして活用できる。このように写真測量画像のデータをオルソフォト変換するには、撮影画像をモザイク処理（タイルの様に配置）するため、一枚一枚の画像データに撮影時の位置情報が登録されていることが望ましい。

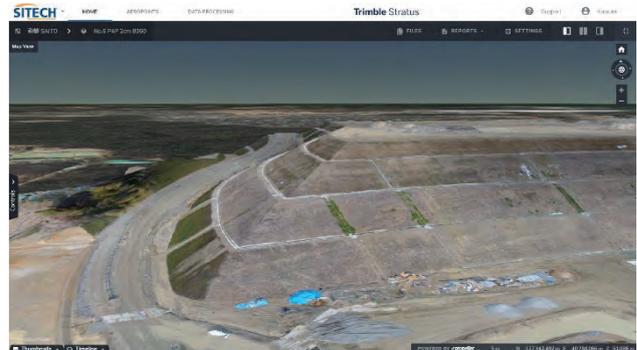


図-19 写真測量画像データと計測データを重ねて表示した例

4. まとめ

ここまで、ICT 活用工事の電子納品について、

- 1) 電子納品規定に準じた納品確認
- 2) 再利用に必要な情報の確認

について確認、検証してきた。

電子納品規定への準拠については、対象データ 407 現場のうち、最終的な航空写真測量データまで正しく納品が確認できた現場は 260 現場（64%）、残りの 147 現場（36%）で問題が確認された。主な原因として「フォルダ構成が間違えている」件が 38%と最も多く、次いで「命名規則に準じていない」件が 27%、「成果品が納品されていない」件が 16%も確認された。

改善策としては、電子納品要領等の周知・普及もあるが、それ以上に納品時の電子納品成果を自動チェックできる電子納品要領の改善及びソフトウェアの導入が必要と感じた。

また、データ再利用を想定した情報の確認、検証を行ったが、情報の必要性は、利用目的によって異なる。本稿で示した例は、電子納品データ活用のほんの一例とし参考にして頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) 工事完成図書の電子納品等要領, 2019
- 2) 空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）他, 2019
- 3) LandXML1.2に準じた3次元設計データ交換標準（案）(Ver. 1.3), 2019
- 4) TSによる出来形管理に用いる施工管理データ交換標準（案）(Ver. 4.1), 2013
- 5) TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領, 2019
- 6) 地理院地図（Globe）

16. 近畿地方整備局における「i-Construction (ICT 施工)」 講習会の開催とそのフォローアップについて

～i-Constructionの更なる普及に向けて～

国土交通省近畿地方整備局 ○ 武本 昌仁

1. はじめに

国土交通省が i-Construction の取り組みを始めてから4年目となる今年は、「貫徹の年」として位置付けられている。近畿地方整備局における ICT 活用工事（土工）の契約実績としては年々増加しており、ICT 活用工事として発注した工事のうち、約7割で ICT 施工が実施されている。

一方、建設業における公共工事全体に占める割合を見ると、国発注工事の割合は2割に過ぎず、府県・市町村発注工事が5割、残り3割は都市再生機構などの政府関連企業などとなっている。

府県においても ICT 活用工事の契約件数は年々増加傾向にあるが、ICT 施工の更なる普及については、府県及び市町村発注工事において ICT 施工が普及されることが必要不可欠であるため、その普及への取組とそのフォローアップについて報告する。

2. 平成30年度の近畿地方整備局における取組

近畿地方整備局の発注工事への取組と地方公共団体への普及に関する取組について紹介する。

2.1 近畿地方整備局発注工事における取組

ICT 活用工事の契約実績は年々増加する中、施工者からは3次元設計データを発注者から提供して欲しいとの意見も多くあることから、発注者が3次元設計データを提供し、データ作成について技術支援を受けることが出来る工事を試行している。なお、技術支援に要した費用については、変更対応している。また、ICT 活用に先進的に取り組んでいる企業に対し、近畿地方整備局発注工事でも過去1年以内に ICT 活用工事の実績がある場合に履行証明書を発行し、入札時における総合評価での加点を行う工事を試行する取組も併せて実施している。

加えて、工事発注予定情報の公表時においても ICT 活用工事の対象である旨を記載し、施工者が選択し易い取り組みも実施している。

2.2 地方公共団体への取組について

近畿地方整備局管内の府県における ICT 活用工事の契約状況は下記に示すとおりである。

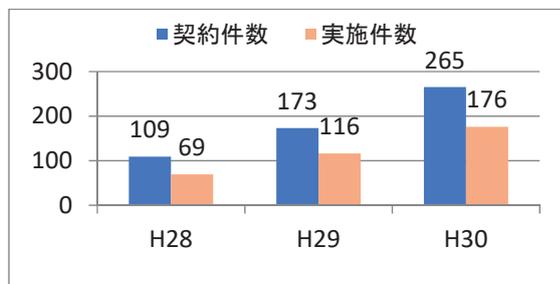


図-1 近畿地方整備局の ICT 活用工事契約実績

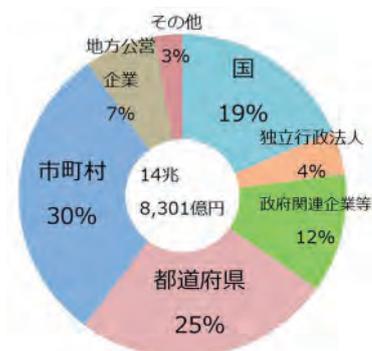


図-2 土木工事における請負契約額内訳

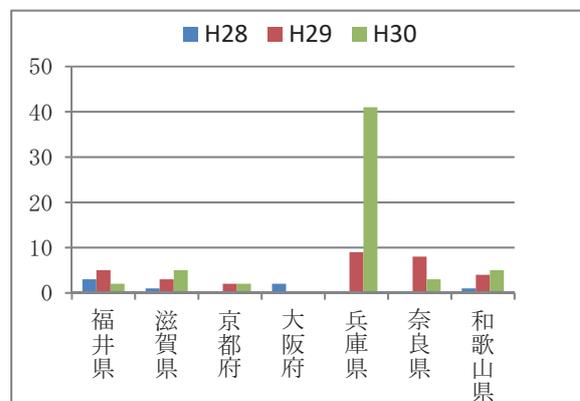


図-3 近畿地方整備局管内の府県における ICT 活用工事契約実績

都市部を多く抱える府県や事業実施状況なども異なり、発注件数が自治体における ICT 活用工事の普及状況とは一概には言えない。ただ、国土交通省本省主導で実施した「地方展開モデル事業」において支援を実施した県では、これまで i-Construction に関して関係業団体と意見交換を行う仕組みが無かったが県内の関係団体を含めた協議会を立ち上げ、県全体で ICT 施工（活用）に関して情報共有を行う仕組みを構築するきっかけになるなど、モデル事業の実施は府県における ICT 活用工事への取組を加速する一助にもなっている。

近畿地方整備局管内におけるモデル事業で支援を実施した府県としては、平成 29 年度に兵庫県、平成 30 年度は滋賀県となっている。

支援を実施した県における ICT 活用工事の発注件数をみると、兵庫県では平成 30 年度に発注者指定型での工事を発注するなど件数が急増している。今年度においても施工者希望型での発注を拡大するなどの取組が進んでいる。また滋賀県においては、国が法面工の実施要領を策定する前から法面対策工事の出来形管理において三次元測量技術を試行し計測精度の確認を行うことや令和元年度から設計業務で土工の 3 次元設計を行うなど先進的な取組を進めている。

こうした事例から見ても府県へ積極的な働きかけを行うことによって ICT 施工の普及が進むと考えられ、日常的に府県担当者との情報共有ができる「顔の見える関係での協働体制」を確立し、府県の実情に応じた支援を行うことが必要と考えている。

3. i-Construction 講習会の開催について

i-Construction の普及のためには、発注者・施工者ともに知識向上が必要である。これまでも発注者向け、施工者向けの講習会を開催してきたところではあるが、i-Construction 施策と ICT 施工の概要の説明が主体となる講習会であったため、平成 30 年度の講習会については、発注者、施工者ともに実践的な内容での講習会を開催した。

3.1 発注者向け講習会

基礎的な内容から監督検査までを一つの流れとした講習会を下記項目で実施した。

- ① ICT 活用工事の基礎知識
- ② ICT 活用工事の各段階での効果
- ③ ICT 活用工事の実施事例
- ④ ICT 活用工事の監督検査

講習会においては、今後の講習会開催の基礎資料とするため、参加者にアンケートを記入してもらっている。ここからは回収したアンケートをもとに分析した考察を記述する。

講習会に参加した発注者の内訳としては、54%が府県政令市職員であり、市町村職員が 34%、整備局職員が 12%という結果であった。

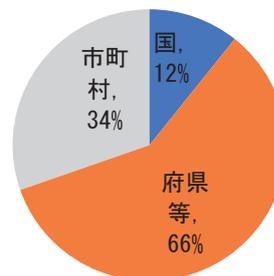


図-4 講習会における発注者内訳

講習会への参加目的としては、基礎知識の習得とメリット・デメリット、ICT 施工の適応に向けた国の取組状況を知りたいが上位を占めている。

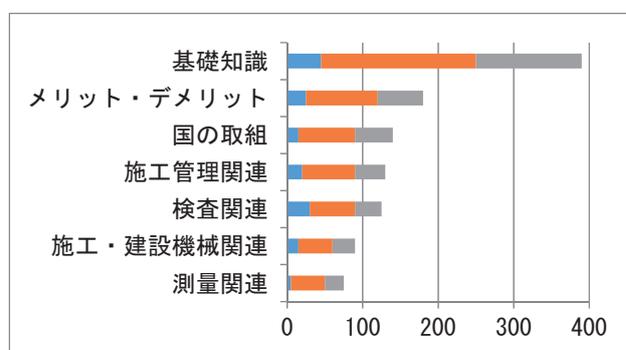


図-5 講習会参加目的（発注者）

講習会へ参加した際の満足度についても調査しており、どの発注者も i-Construction への関心は高く、知識向上を目的に講習会に参加しているが、国、府県、市町村で「有用性・有効性」に対する反応、評価が異なる結果となった。

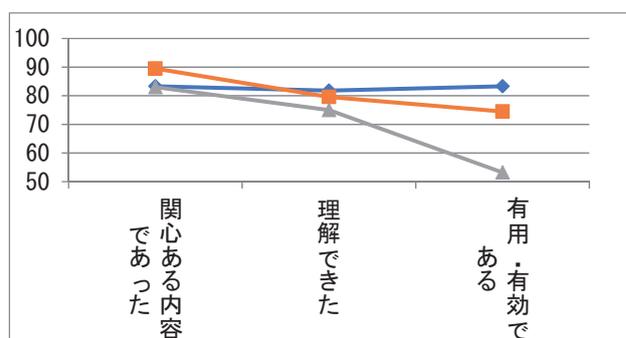


図-6 講習会満足度（発注者）

関心度：国関連、府県・政令市、市町村とも 8 割を超えている。

理解度：府県・政令市でやや低下、市町村も低下。

有用・有効か：市町村での満足度は約 5 割。

市町村職員において、有用・有効でないとの評価で満足度が5割となった理由としては、「規模感の違い」「工種の違い」が多く見られ、市町村工事では維持修繕的な工事が多く、ICTの適用について有用・有効でないとの評価に繋がっていると分析している。

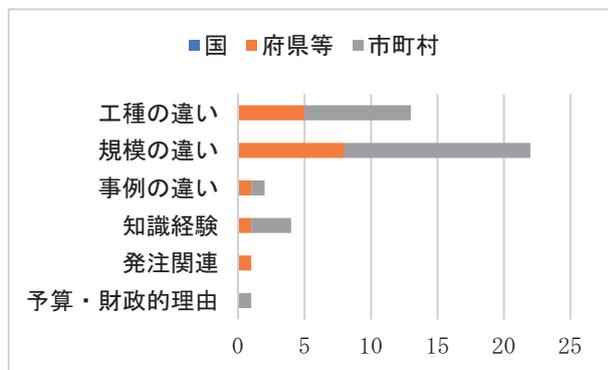


図-7 有用・有効でないと感じた点

導入に向けた課題としては、府県・市町村とも「工種・規模等」、「人材・知識経験」、「施工者側の課題」となっている。

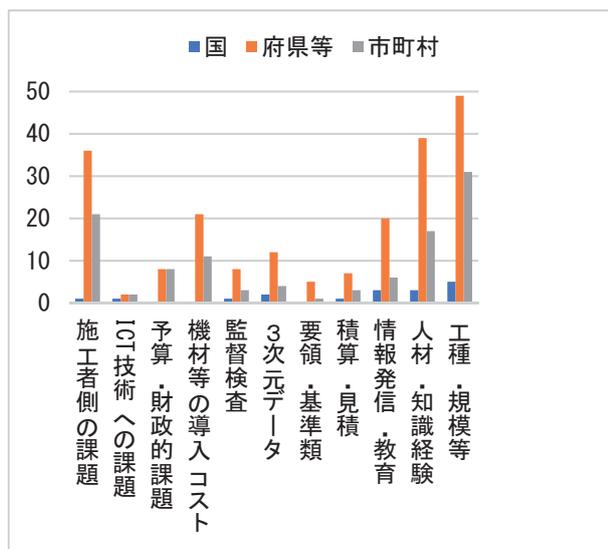


図-8 ICT活用工事の導入に向けた課題

なお、施工者側への課題として挙げられたのは、施工する側の体制、能力等がICT活用工事に対応できるかについて不安との意見であった。

また、それ以外の意見としては、「小規模工事等を含め事例の紹介」「監督・検査に関する具体的な実務講習」が寄せられた。

監督・検査については、監督員として行うことや監督検査書類の流れの説明を行ってはいるが、講習会参加者からは実際の監督・検査での臨場を求める声もあり実地での研修が必要と考えている。

今回講習会では参加者が国・府県政令市、市町村職員と幅広い受講者となったこともあり、受講者のレベル差によるばらつきが多く、今後は初級者を対象としたコースや専門コース等のレベルに応じた講習会を行う必要性も感じられた。

3.2 施工者向け講習会について

府県との情報交換を行う中で、ICT活用工事を発注しても受注に至らない事例も多く、その理由として、「ICT建設機械のリース料が高額で利益がない」、「3次元設計データ作成への不安」、「投資に見合う効果が判らない中、新しいものに手を出しにくい」など施工者からのマイナス面での意見が多く聞かれた。

そういった意見を受けて、平成30年度の施工者向けの講習会については、体験型の講習会とし、ICT建設機械を実機乗車してもらうとともに3次元設計データ作成への不安解消を目的として、PCを使った3次元設計データ作成を行う講習会を実施した。

講習会開催の周知については、整備局ホームページでの広報、各府県窓口での案内文の配布とともに各府県建設業協会などから各会員への周知を行う方法で参加者募集を実施した。

講習会に参加した施工者の内訳としては、ICT活用工事の施工実績の無い企業からの参加が約8割と多数を占め、ICT施工への関心の深さが感じられた。

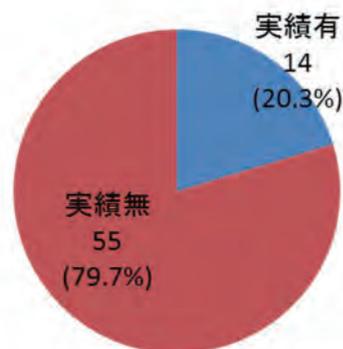


図-9 講習会参加者のICT経験の有無

講習会に参加した目的を見ると施工管理、施工・建設機械関係が多い。また、測量や検査関係の実務とともに、メリット・デメリットや国の取組について情報を得るために参加されている。

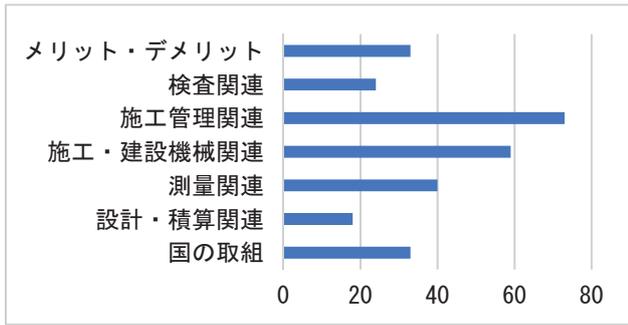


図-10 講習会参加目的 (施工者)

講習を受講した施工者の満足度としては、「関心のある内容であった」が95%であり、「理解できた」、「有用・有効である」が90%を占めていることから講習会の目的としては概ね達していると考えている。

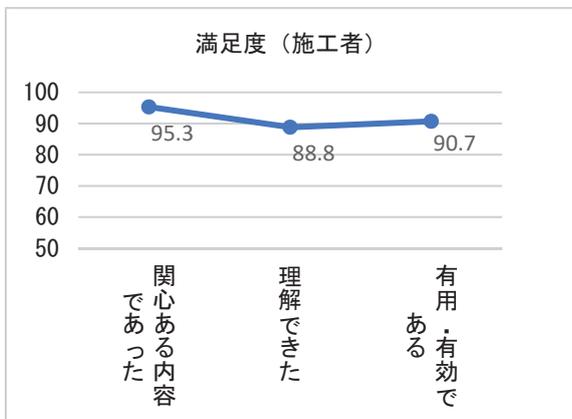


図-11 講習会満足度 (施工者)

施工者が ICT 活用工事の試行あるいは導入に向けた課題として考えているのは、以下のとおり。

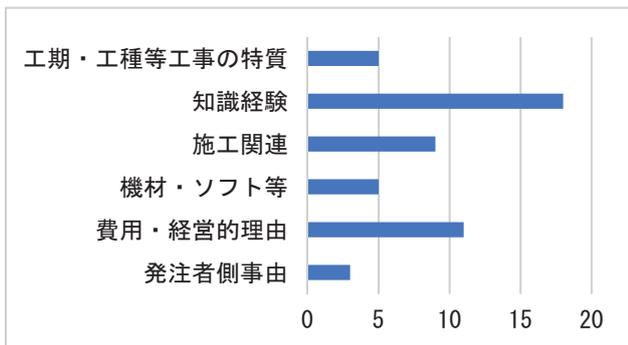


図-12 ICT 活用工事の導入に向けた課題

活用に当たって経験者がいないことや知識が不足しているとの回答が多い。また、3次元データの作成できる技術者も不足しており、導入に際しては外注となるなど人材の育成が最大の課題であると考えられる。

4. 令和元年度における取組について

昨年度の講習会アンケートにおいても、ICT 活用工事の発注が進む中、監督・検査に関する不安の声も多く寄せられていたこともあり、8月には国、地方公共団体の発注者向けの監督検査講習会を実施した。講習会には約230名が参加し、うち6割が地方公共団体職員となるなど ICT 活用工事が地方に浸透してきていると感じている。また、整備局が実施する ICT 活用工事の監督検査への臨場を行う取り組みも始めている。

平成28年度から取り組んでいる ICT 活用工事についても4年目となり、積極的に取り組んでいる施工者と未経験の施工者との2極化が進行していると考えられる。

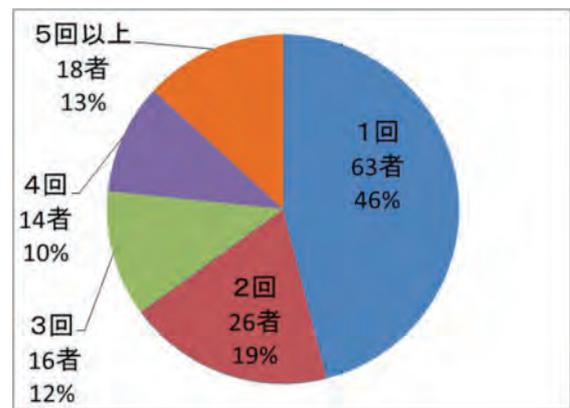


図-13 近畿地方整備局における ICT 活用工事受注者の受注回数

ICT 活用工事を経験してメリットを感じた施工者においては、受注を重ねることで ICT 活用に関し、ノウハウを蓄積している。

一方、都市部における維持修繕的な工事や市町村での小規模工事においては、発注者、施工者とも ICT 活用に消極的であることが昨年度実施した講習会アンケートの結果からも見られる。

そういった状況の中で例えばトータルステーションといった身近な ICT 機器を効果的に活用すれば、現場の生産性を向上させることも可能になると考えており、今年度は市町村発注者および施工者に向けた講習会を予定している。まずは身近な ICT 機器の活用からスタートして効率的な施工を体験し、ICT 機器への忌避感を払拭し、最終的には出来高管理へのステップアップを行うことで建設業全体の生産性向上につながることを確信している。

最後になったが、講習会の開催に際し、一般社団法人日本建設機械施工協会施工技術研究所、並びに関西支部会員のご協力について、ここに感謝致します。

17. ICT バックホウの施工履歴データによる出来形管理の実用有効性の 検証

株式会社トプコン ○ 高本 悠介
株式会社トプコン 中村 圭佑
福井コンピュータ株式会社 平 浩之

1 はじめに

従来の河川浚渫における出来形管理では、船上からのレッド測深やトータルステーションによって計測するものが主であるが、水の流れや視認の困難さにより計測に多くの時間と人を要してきた。また、従来方法は計測点数も少なく正確性にも欠ける。国土交通省により平成 30 年度より河川浚渫における新たな出来形管理要領が制定され、出来形管理の生産性向上への取り組みがはじまった。その中の 1 つである『施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）』¹⁾では ICT バックホウのバケット刃先の軌跡データから出来形を作成することが認められた。

施工履歴データを用いて出来形管理を行う方法では、視認が困難な水中や、計測するには危険な場所の出来形を作成することができる。計測点数が増えることにより面管理ができるメリットもある。また、施工後に別途出来形を測定する方法に比べて大幅な工数の削減も可能である。しかしながら、施工履歴データによって得られた出来形の精度については不確かな部分が多い。本研究では、要領に則った方法で、実現場を模した実験による検証を行った。

2 フィールド実験概要

2.1 実験内容

掘削作業による施工履歴データの精度検証を目的として、2019 年 4 月 3 日と 4 月 4 日に株式会社トプコン関東トレーニングセンタ(茨城県行方市)内で実験を行った。

5m×5m の正方形の地形において、『ICT 建設機械 精度確認要領（案）』²⁾と『施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）』に基づき精度確認試験作業及び浚渫を模した深さ約 0.55m の掘削実験を行い、地上型レーザースキャナー(以下 TLS)で計測した真値に近いと想定される出来形データと ICT 建機の施工履歴データから出

力された出来形データの形状比較、及びそれぞれのデータを用いて計算される土量数量の比較を行った。検証用に TLS を用いる必要があったため、水の無い通常の地面で実験を行った。

2.2 実験機器

ICT バックホウ

GNSS を用いたマシンガイダンスシステム
トータルステーション(以下 TS)

TLS

クラウド型施工管理システム(トプコン Sitelink3D)

点群処理ソフトウェア(トプコン MAGNET Collage)

点群処理・出来形帳票作成ソフトウェア(福井コンピュータ TREND-POINT)

2.3 クラウド型施工管理システムについて

クラウド型施工管理システムは ICT 建機の状態を携帯電話回線を用いて収集し、リアルタイムでのモニタリングや作業の管理に用いる。マシンガイダンスシステムでバックホウに装着するセンサーは図 1 のような構成であり、通信のため図 2 のようなネットワーク接続モデムを追加で装着する。本実験では ICT バックホウのバケット刃先の軌跡データを収集し、クラウド内で不要点削除、グリッドデータ化を行い TIN 法を使って出来形データとして出力する機能を用いた。本実験では 0.1m、0.2m、0.4m の格子点間隔で出来形を作成した。

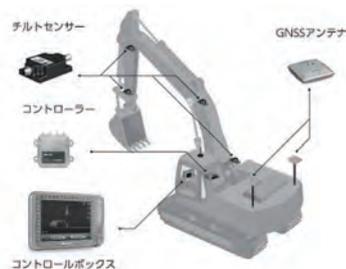


図 1 マシンガイダンスシステムの構成



図2 ネットワーク接続用モデム

3 ICT 建機の精度確認

3.1 静止状態での精度確認

平成31年新設の『ICT建設機械 精度確認要領(案)』に則り、ICTバックホウのマシンガイダンス技術から提供されるバケット刃先座標と、TSにより計測した座標との較差を算出して比較し、精度確認を行った。精度確認は7ケースの姿勢で行い、それぞれの姿勢で1回ずつ計測を行った。表1の通り、全てのケースで標高較差が基準値±50mmの範囲内に収まった。

3.2 整形テスト作業による精度確認

『施工履歴データを用いた出来形管理要領(河川浚渫工事編)(案)』に則り、5m×5mの区画を含む範囲で、地面を平坦に整形するテスト作業を行い施工履歴データを記録した。深く掘削はせず、地表にバケットを押し付けるように整形を行った。

整形作業後に、施工履歴データから求めた0.1m格子点間隔の出来形上の点をTSで16点検出した。クラウド型施工管理システムから出力した出来形上の点の標高からTSで検出した点の標高を引いた較差を算出した。較差の最大値は+43.4mm、最小値は-39.6mmとなり基準値±100mmの範囲内に収まった。



図3 整形作業前(左)と作業後(右)の現場

4 掘削作業の施工履歴による出来形・土量の精度検証

4.1 浚渫を模した施工作业

施工履歴データによる出来形の精度を検証するため、以下の手順で現況計測と掘削作業を行った。実験区画は、「3.2 整形テスト作業による精度確認」を行った範囲内の5m×5mの区画を用いた。設計データは現地の標高値を参考に、最低でも0.5mの掘削を行うように事前に作成した。掘削作業中には施工履歴データを収集するようにした。

手順

- ① TLSで掘削前の現況計測を実施。
- ② マシンガイダンスを用いて設計データに沿って掘削作業を実施。
- ③ 正確な出来形、土量を求めるためTLSで掘削後の出来形計測を実施。



図4 現場の作業の様子

4.2 施工履歴とTLSによる出来形標高の比較

施工履歴データによる出来形の標高を、真値に近いと考えられるTLSによる測定点と比較した。標高較差 Δh を、同じ平面座標における差

$$\Delta h = \text{施工履歴による出来形標高}$$

－ TLSによる出来形標高

とした。

施工履歴データによる出来形はクラウド型施工管理システムから0.1m格子点間隔で取得した。これに対し、TLSによる出来形の点群密度は不均一であるため、格子内にある点群は標高の平均化処理を行った。TLSの点群が1点も無い格子は計算に用いなかった。較差の計算に用いた施工履歴とTLSの点はそれぞれ2493点となった。

表1 静止状態の精度確認結果

試験ケース	パラメータ(目標値)					標高(m)		標高較差 ① - ② (mm)	較差確認結果 (±50mm以内)
	バケット 標高位置	バケット 角度	バックホウ 姿勢	バケット 距離	上部旋回 体向き	①ICTバツ クホウ	②精度検証 用TS		
ケース1	0m	0度	水平	近距離	正面	2.694	2.663	31	合格
ケース2	0m	60度	水平	近距離	正面	2.645	2.633	12	合格
ケース3	1.5m	0度	水平	近距離	正面	4.084	4.054	30	合格
ケース4	0m	0度	水平	遠距離	正面	2.703	2.666	37	合格
ケース5	0m	0度	7.5度	近距離	正面	2.667	2.658	9	合格
ケース6	0m	0度	水平	近距離	90度	2.627	2.607	20	合格
ケース7	0m	0度	水平	遠距離	90度	2.689	2.665	24	合格

Δh の平均値、最大値、最小値はそれぞれ-26mm、+118mm、-637mmとなった。較差 100mm を基準値とすると、 $\Delta h > +100\text{mm}$ となる点は 1 点(0.04%)、 $\Delta h < -100\text{mm}$ となる点は 206 点(8.26%)となり、91.7%は $\pm 100\text{mm}$ 以内になった。較差が-100mmを越えている点が多く見られたのは、刃先が深く地面に刺さったが土は掘られていない部分または後の操作で自然に埋め戻された部分があり、施工履歴データによる出来形の標高が実際よりも低くなったためである(図 5)。較差が+100mmを越えているものは少なく、掘削結果が実際よりも悪く評価される可能性は低い。

河川浚渫工事のような負の較差に対する規格値が緩やかな工事では施工履歴データを出来形管理に用いることは精度的にも十分可能である。規格値が厳しい場合には、マシンコントロールによってバケットの刃先が設計面を越えないようにする等の工夫が考えられる。



図 5 土は掘られていなくとも刃先が深く刺さったため出来形が低く見積もられる



図 6 施工履歴による出来形(横から) 較差-100mmを越える点は白色で表示

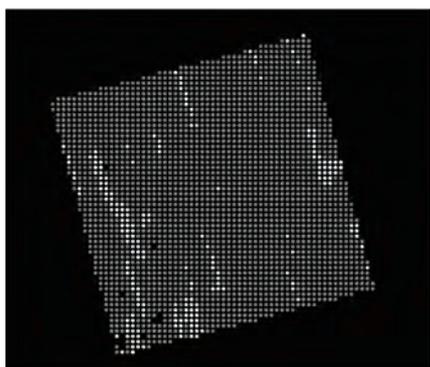


図 7 施工履歴による出来形(上から) 較差-100mmを越える点は白色で表示

4.3 土量計算

出来高算出への有効性検証のため、点群処理・出来形帳票作成ソフトウェアのメッシュ法(点高法)による土量計算機能を用いて土量の数量算出を行った。基準面は「4.1 浚渫を模した施工作业」の①

で取得した TLS による掘削前の現況を用い、比較面は②で取得した施工履歴を 0.1m の格子間隔で出力した出来形を用いたパターン(土量 A)と、③で取得した TLS による施工後の出来形を用いた真値に近いと想定されるパターン(土量 B)で算出した。

数量算出結果は、土量 A では切土量 13.97m^3 、土量 B では切土量 13.45m^3 となった。土量 B に対する土量 A の相対誤差は 3.8%であった。平均掘削深度は 0.55m であった。

「3.1 静止状態での精度確認」と「3.2 整形テスト作業による精度確認」での標高誤差の基準値はそれぞれ $\pm 50\text{mm}$ と $\pm 100\text{mm}$ である。この精度であれば 0.55m 掘削した場合の相対誤差は最大 9.1%と 18.2%となる。これらの値と比較して本実験の相対誤差は小さく、十分利用可能な精度である。

以上の算出結果は約 0.55m の掘削を行った場合での結果である。土量の体積は掘削面積×掘削深度なので、さらに深い掘削を行った場合は土量の相対誤差は小さくなり、土量の数量はより正確な値に近づく。

4.4 施工履歴データから得られた出来形評価

施工履歴データによる出来形評価と、出来形の格子点間隔の違いによる影響を調べた。

出来形は「4.1 浚渫を模した施工作业」の②で取得した施工履歴からクラウド型施工管理システムを用いて 0.1m、0.2m、0.4m 格子間隔で出力した 3 種類の出来形と、③で計測した TLS による出来形の計 4 種類を取得した。出来形評価には出来形帳票作成ソフトウェアを用いて評価区画内の最下点を抽出し、規格値は河川浚渫工に準じて平均値 0 以下、個々の計測値+400mm 以下とした³⁾。評価区画は規定の大きさである 1.0m^2 ($1.0\text{m}\times 1.0\text{m}$) で評価を行った。

出来形の格子間隔は、

- ・ 出来形の格子間隔が大きいとデータ量を減らせる。
- ・ 出来形の格子間隔が小さいと出来形の細かな形状まで表せる。

といった特徴がある。

評価パターンと結果を表 2 に示す。合否結果は、いずれの格子間隔においても規格値を満足しており、TLS 点群の評価と同じ結果となった。本実験環境においては施工履歴データは出来形管理に問題無く利用できることが示された。

パターン A、B、C を比較したとき、格子間隔が小さい場合(パターン A)は「4.2.施工履歴と TLS による出来形標高の比較」で論じたように、刃先が深く刺さったときの影響を受けて区画内の最下点の標高が大幅に低くなっていた。格子間隔が小さいからといって実際の出来形を正しく反映できてい

るとは限らないことがわかる。

パターンCのように格子間隔が大きくなると、領域端部付近で評価区画内に評価点が無く評価データ数が少なくなる場合があることや、TLS で正確に測定した標高較差(最大 3 mm パターン D)よりも最大値が大きくなってしま(最大 37mm)ことがある。しかし、データが粗くなったため、刃先が深く刺さった影響は緩和されており、最大値も適切に施工されていればデータの粗さによって規格値を越えるということはない。

以上の結果より、施工履歴データによる出来形を実際の現場に適用して評価する場合には、評価区画にデータ欠損が出ない程度に格子間隔を大きくすることがよい。

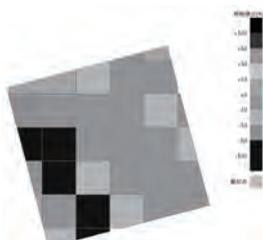


図8 パターンA
施工履歴 0.1m格子

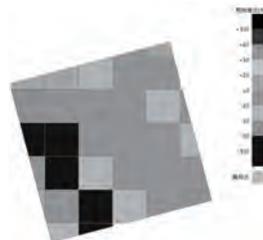


図9 パターンB
施工履歴 0.2m格子

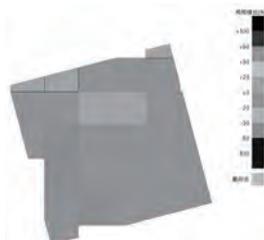


図10 パターンC
施工履歴 0.4m格子

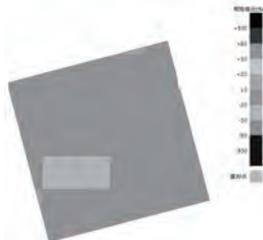


図11 パターンD
TLS 不均一な点群
密度

ては、バケットの刃先が地面に深く刺さった場合に本来より低く見積もられる。河川浚渫工事では本来合格であったはずの出来形が不合格になるということないが、他の工種に適用する場合にはマシンコントロールの活用等が考えられる。

土量は本実験の条件においては、真値との相対誤差は3.8%であった。掘削がより深くなれば誤差の割合が小さくなるため、施工履歴データにより得られた土量はより正確になる。

施工履歴より得られた出来形評価は、出来形の格子点間隔や評価密度を変えても規格値を満たしており、TLS で計測した出来形の帳票とも相違ない結果となった。施工履歴データによる出来形を実際の現場に適用して評価する場合には、評価区画にデータ欠損が出ない程度に格子間隔を大きくすることがよいことがわかった。

参考文献

- 1) 国土交通省：施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案），平成30年3月
- 2) 国土交通省：ICT建設機械 精度確認要領（案），平成31年3月
- 3) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値（案），平成30年3月
- 4) 岡島他：i-Constructionで適用する河川浚渫工の出来形の面管理に関わる基準類の策定，平成30年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文・梗概集，pp65~68

5 まとめ

本研究では、平成30年に制定された『施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）』に則った精度確認作業と河川浚渫を模した掘削作業を陸上で行い、TLSによる正確な出来形と施工履歴データによる出来形を比較し、十分実用可能であることを確認した。

施工履歴と TLS による出来形の標高較差に関し

表2 出来形評価結果

パターン	計測機器	格子点間隔	出来形評価密度	合否	設計面との標高較差			評価データ数
					平均値(mm)	最大値(mm)	最小値(mm)	
A	施工履歴	0.1m格子	1.0m ² (1.0m×1.0m)	合格	-166.9	-3	-602	34
B	施工履歴	0.2m格子	1.0m ² (1.0m×1.0m)	合格	-109.4	9	-441	33
C	施工履歴	0.4m格子	1.0m ² (1.0m×1.0m)	合格	-51.3	37	-294	29
D	TLS	不均一	1.0m ² (1.0m×1.0m)	合格	-35.9	3	-139	34

18. ICT バックホウ施工履歴データを用いた河床掘削における 出来形管理規格値の検討

国土技術政策総合研究所
国土技術政策総合研究所
国土技術政策総合研究所

○ 西村 峰鷹
森川 博邦
大槻 崇

1. はじめに

国土交通省ではi-Constructionのトップランナー施策として「ICTの全面的な活用」を打ち出し、平成28年度よりICT土工の取り組みを開始し、その後、舗装工、浚渫工へその取り組みを拡大し普及に取り組んでいる。河川工事においては、平成30年度からICT浚渫工(河川)にてバックホウ施工履歴データや音響測深機器を用いた出来形管理基準を策定して生産性向上に取り組んでいる。

2. 河川工事における課題と研究目的

しかし、河川土工のうち、河床掘削においては降雨後の河川の水位上昇により、整形が完了した範囲が施工後に冠水する場合がある。また、施工中に既に冠水しており、水面下にある箇所を掘削、整形しなければならない場合もある。したがって、一つの現場に対して土工(水面上の掘削)と河床掘削(水面下の掘削)が混在する可能性がある。その場合、UAV、TLS等の多点計測技術を使用して出来形の面管理を実施することが困難である一方で、従来手法であるTS等を用いた断面管理を実施すると生産性が向上しない。さらに、水没箇所の出来形管理は図-1に示すように直接水中に入り込み計測を実施するため危険を伴うという課題がある。

したがって、生産性及び安全性向上の観点から河床掘削の出来形管理に適用可能な技術を選定しその出来形管理基準を整備することを目的とする。

3. 河床計測技術の選定

上記課題を解決するための水中部を計測する技術の候補としては、ナローマルチビーム、グリーンレーザー、ICTバックホウ施工履歴データの3つがある。これら候補技術の概要を示す。

① ナローマルチビーム

超音波により水底を測深する技術である。船に取り付けられたソナーヘッドと呼ばれる装置から、測深ビーム(マルチビーム)を扇形に出力し測深データを収集する。



図-1 水没した河床の出来形計測の様子

② グリーンレーザー

ヘリコプター等に照射器を設置して空中から水中を透過する特性を持つ緑色のレーザーを照射し水中の地形を面的に計測する技術である。レーザー測深機とともに近赤外線レーザーと航空カメラを搭載しており、陸域から水面下までの連続した地形データと航空写真を同時に取得することが可能である。

③ ICTバックホウ施工履歴データ

3次元MGまたはMC機能を搭載したICTバックホウにより直接出来形を計測する技術である。ICTバックホウは作業装置(ICTバックホウの場合であればバケット刃先位置)の3次元座標データをリアルタイムに取得している。したがって、ICTバックホウを計測機器と見做し、バケット刃先の3次元座標データ(以下施工履歴データ)を出来形管理に用いることが可能である。

これら3つの技術を以下の観点で比較した。

- ・精度：計測精度
- ・コスト：導入に必要なコスト
- ・作業性：1日あたりの計測可能量
- ・内製化難易度：施工者による内製化難易度
- ・河床掘削への適用性：河床掘削へ適用するに当たり障壁となるもの等

表-1 水中部計測候補技術

技術名	グリーンレーザ (ヒアリング：中日本航空)	ナローマルチビームソナー (ヒアリング：アークジオサポート)	ICTバックホウ施工履歴データ
公称精度	±100cm	平均±60mm	±50mm(静止状態)
コスト	約300万円/現場 (計測・解析・図化作業含む)	200万円/日 (計測・解析・図化作業含む)	追加コストは不要
作業性	1日あたり数km ² の面積を計測 (対地高度による)	1日当り7kmの測線を計測 計測幅は水深の3倍程度 (レーザー計測角120°の場合)	施工と同時に出来形を記録可能
内製化 難易度	不可 (解析にノウハウを要する)	不可 (解析にノウハウを要する)	可能 (施工者による運用実績多い)
河床掘削 適用性	透明度が高くないと計測が困難 (河床掘削時は濁りが発生しやすい)	河床掘削は水深が数十cm程度 であり浅く計測が困難	適用可能

これら3つの技術を比較した結果を表-1に示す。コスト、施工者による内製化難易度、河床掘削への適用性の観点から施工履歴データを河床掘削出来形管理に新規に適用可能な技術として採用することとした。

4. 施工履歴データの計測精度検証

施工履歴データを河床掘削出来形管理に適用するにあたり、その精度を検証するとともに操作、設定等注意すべき事項についても検討した。

4.1 施工履歴データ計測誤差要因

ICTバックホウの施工履歴データの精度は静止状態では公称±50mmとなっているが、実際に掘削整形した出来形と施工履歴データを比較した場合、その標高較差は±50mmよりも悪化し得ることが予測される。その要因として、以下の項目が考えられる。

要因1. 姿勢角センサの応答遅れ等による誤差

ICTバックホウの作業機を早く動かした場合、作業機等に装着されている姿勢角センサが追従しきれないまたは姿勢角を計算するコントローラの演算が間に合わないためにICTバックホウが認識している自身の姿勢と真の姿勢に誤差が生じると考えられる。

要因2. 施工履歴記録ロジックによる誤差

現状ではICTバックホウの施工履歴データはバケットの刃先位置のみでしか施工履歴データを記録出来ない仕様となっている場合が多い。図-2に示すようにバケット刃先を少し浮かせた状態でバケットの底面等のバケット刃先以外の箇所では整形すると実際に整形しているバケット位置と施工履歴データとして記録しているバケット位置に差異が生じ得る。また、現状ではバケット刃先で掘削後に埋め戻しを行いバケット刃先の軌跡が最終的な出来形を必ずしもなぞらない場合も想定される。

要因3. データ取得密度による誤差

図-3に示す様に離散的に取得される施工履歴データの取得間隔が疎であるため、実際の出来形と記録点間をつないだラインが一致しないことが考えられ、データ取得頻度等のデータ取得密度の差異が

施工履歴データの計測精度に影響すると推測出来る。さらに、ICT活用工事における面的な出来形評価には1m²に1点以上の点群密度が要求されている。ICTバックホウ施工履歴データはバケット刃先位置の右端、左端、または中央等ある1点のみを履歴データとして記録する仕様である場合がある。そのような場合TLS、UAV等と比較して計測点群数が大幅に少ない。また、履歴データを取得する時間間隔、距離間隔等のデータ取得頻度も計測点群密度に影響すると考えられる。

4.2 施工履歴データ計測誤差要因検証方法

4.1で示した要因1., 要因2.及び要因3.を検証するために次に示す実験1., 実験2., 実験3.を行った。

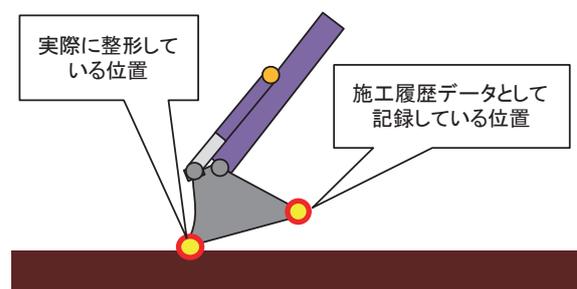


図-2 施工履歴記録ロジックによる誤差

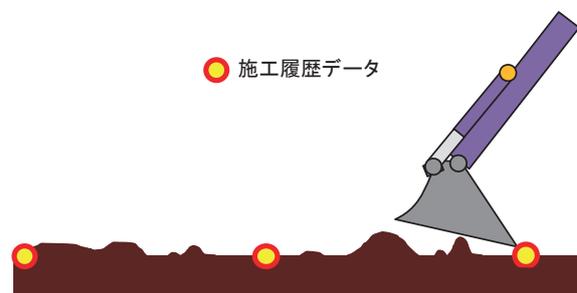


図-3 データ取得密度による誤差

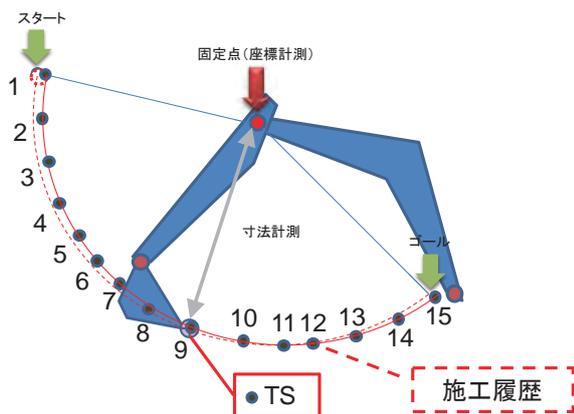


図-4 静的精度および動的精度検証方法



図-5 整形作業での精度検証方法

実験 1. 静的状態での施工履歴データの精度検証

作業機を静止させた状態で施工履歴データの精度を計測した。ICT バックホウの刃先の位置を TS により計測した値を真の値とし、図-4 に示すように固定点を回転軸としてアームのみを動かして姿勢を変化させ、15 姿勢計測した。ICT バックホウにより記録されている刃先位置の履歴データの値を記録、比較した。

実験 2. 動的状態での施工履歴データの精度検証

ブーム、アームを最も開いた状態から、アームのみを最も閉じた状態まで動作させ、施工履歴データの精度を検証した。検証の際、姿勢角センサの応答の遅れを検証するためにアームの動作速度を「高速」と「低速」の 2 パターンで実施した。ここで、「高速」とは整形ではない掘削作業時の、「低速」とは整形作業時の作業機速度を想定している。データ取得密度は最も密に取得可能である 1 秒とし

た。

実験 3. 整形作業での施工履歴データの精度検証

5m 四方の平面に対して実際に ICT バックホウにより整形作業を実施して施工履歴データと TS により計測した標高とを比較してその精度を算出した(図-5 参照)。なお、データ取得頻度パターンとしては 1 秒毎、2 秒毎、10cm 毎、50cm 毎の 4 パターンとして計測を実施した。

4.3 施工履歴データ計測誤差要因の検証結果

4.2 にて実験した結果について記す。実験 1.の結果は図-6 に示す通りとなり計測姿勢 1 ~ 15 全点が X,Y,Z 全ての軸で±40mm 以内となっていた。また、実験 2.の結果である図-7 と比較すると「高速」と「低速」とでは平均誤差に有意な差は無いと見做すことができるとわかった。したがって、要因 1.「姿勢角センサの応答遅れ等による誤差」が原因となり動的な施工履歴データが静的な施工履歴データよりも精度が悪化することは無いと考えることが出来る。

実験 3.の結果を表-2 に示す。データ取得パターンが密である 1 秒の場合と 10cm の場合は概ね同じ結果が得られ、疎である 2 秒の場合と 50cm の場合も概ね同じ結果が得られた。その一方で、データ取得パターンが密である 1 秒と 10cm の場合に対してデータ取得パターンが疎である 2 秒と 50cm の場合を比較するとデータ取得パターンが疎である場合の方が密である場合よりも標準偏差が約 25mm 大きい。これは要因 3.「データ取得密度による誤差」が影響していると推測することができる。また、図-7 と表-2 から空中で動的に計測した施工履歴データと実際に整形した施工履歴データを比較すると実際に整形した場合は平均で約+30mm の差がある。これは要因 2.「施工履歴記録ロジックによる誤差」が原因であると推測することができる。

4.4 施工履歴データの計測点群密度と公称精度

施工履歴データは、レーザスキャナーや UAV 写真測量と比較して計測点数が大幅に少ない傾向が見られる。面的出来形管理に必要な 1m² に 1 点以上の点群密度を満足するためには、10cm 刃先が移動する毎に 1 点の頻度で履歴データを記録するパターンで整形作業を実施する必要があることがわかった。したがって、この場合の施工履歴データの精度に着目すると 平均 55.1mm, 3σ≒54.9mm であり、55+55=110mm となる。しかし、要因 2.「施工履歴記録ロジックによる誤差」により生じる誤差は施工時に建機オペレータが注意することで 30mm よりも小さくすることが可能である。したがって、施工履歴データの精度公称値は±100mm とすることができると考えた。また、施工履歴データにより出来形管理を行う場合は、要因 1.の影響が無いことを確認するとともに、要因 2., 要因 3.の影響を極力排除

する旨の注記を出来形管理要領等に追記すること等を考えている。

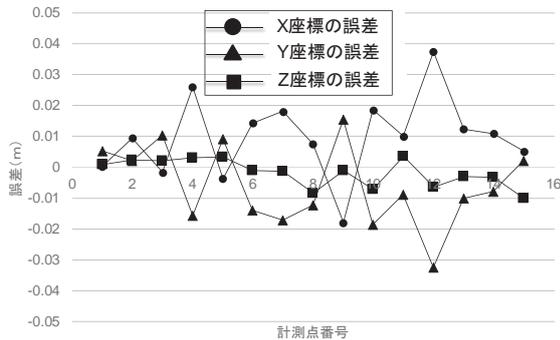


図-6 静止状態での施工履歴データ精度

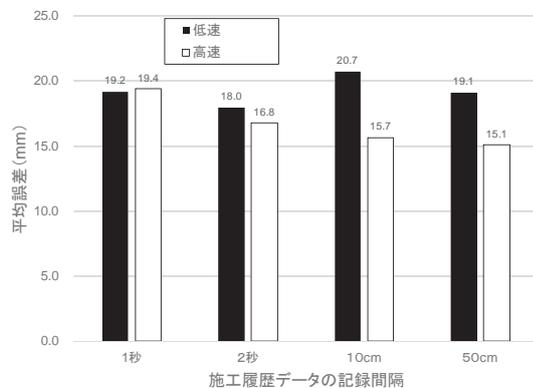


図-7 アーム動作速度による誤差

表-2 データ取得密度による誤差

データ取得パターン	1秒(密)	2秒(疎)	10cm(密)	50cm(疎)
平均(mm)	49.4	49.2	55.1	59.5
標準偏差σ(mm)	19.2	26.5	18.3	26.9
3σ(mm)	57.6	79.5	54.9	80.7

5. 出来形管理規格値の検討

施工履歴データを用いた場合の河床掘削出来形管理規格値を以下の手順で検討する。先ず実態調査として、従前の断面管理を実施している河床掘削現場において、合格となっている出来形に対して面的な出来形の真値を計測する。次に、施工履歴データで同一の出来形を面的に計測したとしても不合格とならないように、施工履歴データの計測精度を含めた規格値を設定する。

5.1 河床掘削現場の出来形実態調査

実態調査は3つの現場にて実施した。面的な出来形の真値はトータルステーションにより計測した。計測点は断面間の任意の点とし、1~5m間隔で格子状に計測した。

調査した3現場の結果を表-3に示す。表-3に示す通り、全計測値においては、平均値-3mm、標準偏差(σp)62mmにより $3\sigma p=190\text{mm}$ となった。

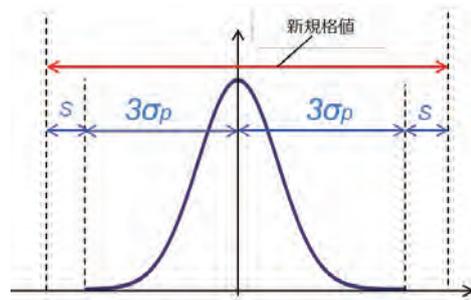


図-8 計測機器の精度を考慮した規格値

表-3 面的出来形の実態調査結果

	平均(mm)	σp(mm)	3σp(mm)
現場①	-0.005	0.063	0.189
現場②	0.053	0.116	0.348
現場③	-0.008	0.060	0.18
3現場集計	-3	62.27	187

5.2 計測精度を含めた規格値の設定

図-8に示す様に現場の施工精度(出来形)の実態を踏まえ、施工履歴データで同一の出来形を計測したとしても不良率が同一となるように規格値を設定した。4.4により計測器(施工履歴データ)の精度は $s=100\text{mm}$ 、5.1により現場の施工精度の実態($3\sigma p$)は 190mm であるため、施工履歴データを用いた出来形管理の規格値は $190+100=290\text{mm}$ とした。平均値の規格値は施工後の出来形の品質を担保するために断面管理と同じく $\pm 50\text{mm}$ とした。

6. 結論

本研究では、河川土工(河床掘削)において安全かつ生産性が高い出来形管理手法として施工履歴データを用いた出来形管理手法を提案した。ただし、基準検討の際に使用したデータは数現場の限られたものであり、全現場への適応性は実運用の中で確認していくこととなる。そのため、今後フォローアップを実施し運用上の問題があれば、速やかな「カイゼン」が必要である。

7. 提言

ICTバックホウ施工履歴データは表-1で示したように現場への導入が容易であり、施工と同時に出来形を計測できる利点がある。しかし、その一方で4.4に示したように現状では動的に出来形を計測した場合、その精度は $\pm 100\text{mm}$ 程度であり、河床掘削以外の土工一般では、面的出来形管理に用いる計測機器としての精度 $\pm 50\text{mm}$ を満足していない。施工履歴データによる動的な出来形計測の精度向上のためには、要因2、要因3に対する「カイゼン」の実装が待たれる。

19. 路面切削機での GNSS を用いたマシンガイダンス活用事例について

前田道路株式会社

〃

〃

○ 宮内 賢徳

宇田川 健治

砂原 良太朗

1. はじめに

舗装工における ICT 施工は新設工事において数多く実施されているものの、維持修繕分野である路面切削工においては路面切削機（以下、切削機）の ICT 施工は一般的でないのが現状である。

ICT 施工にはマシンコントロール（以下、MC）とマシンガイダンス（以下、MG）の方式があり、切削機の MC は機種を選定や改造、高価な MC 用システムなどが必要となる。一方、MG であれば機械の限定や改造をせずに経済的に ICT 施工できる可能性があり、既報¹⁾ではトータルステーション（以下、TS）を用いた切削機の MG について報告を行った。

しかしながら、現道で行う修繕工事は TS などの機材の設置場所に苦慮する現場が多く、また、GNSS 測量機は TS と比べて安価で比較的測位精度が良い機器も出始めている。既報²⁾では TS 式 MG の施工精度の検証を行い、GNSS 式 MG の適用性について検討したものの詳細な検証が必要であった。そこで本論文は、GNSS を用いた切削機の MG 方法について詳述するとともに施工精度の検証を行った。その結果、TS と同程度の精度が確保できることを確認した。

2. 目的と概要

2.1 目的

ICT 舗装工では事前測量として地上設置型レーザースキャナ（以下、TLS）による 3 次元測量を行う。この 3 次元現況路面データと切削面の 3 次元設計データ、および GNSS による位置情報データを組み合わせれば、GNSS も MG 方式として適用が可能になる。そこで GNSS を活用した MG の施工精度について検証を行った。

2.2 GNSS 式 MG のシステム構成

(1) GNSS 式 MG

切削機の GNSS 式 MG の概念図を図-1 に示す。GNSS 式 MG の施工に必要な機材類は以下のとおりである。なお、路面切削工は基本的に 1 回で仕上げるワンパス施工であり施工の手戻りは難しい。

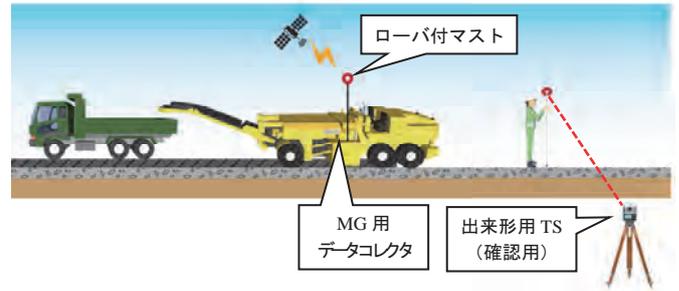


図-1 GNSS 式 MG の概念図

そのためリアルタイムに施工精度を確認するために出来形用 TS を加えている。

- ・ 切削機
- ・ VRS 方式 GNSS（ローバとデータコレクタ）
- ・ ローバ用マスト
- ・ 3次元現況路面データ
- ・ 切削面の3次元設計データ
- ・ 出来形用 TS（切削深さ確認用）

ここで VRS 方式とは仮想基準点方式のことで、GNSS ローバが測位した位置情報を複数の電子基準点より取得した補正情報を使って GNSS 受信機で演算して測位する方式であり精度の高い平面座標を得ることができる。VRS 方式による測位精度は平面方向で±2cm 程度、高さ方向で±5cm 程度であり路面切削工で要求される高さ（厚さ）精度を満足できない。高さ（厚さ）精度にミリ単位の精度が求められる切削工において、高さでなく平面座標の精度が重要となる理由は後述する。

(2) GNSS 式 MG の施工手順①（事前準備）

GNSS 式 MG の施工手順を図-2 に示す。

まず GNSS 式 MG を行うための事前準備として、TLS で計測した 3 次元の現況路面データが必要となる。

MC や TS 式 MG では現況路面の測量結果を踏まえた切削面の 3 次元設計データを作成すれば ICT 機器を稼働することができる。一方、GNSS 式 MG は測量結果を踏まえた切削面の 3 次元設計データ、および TLS で現況路面を計測した 3 次元の現況路

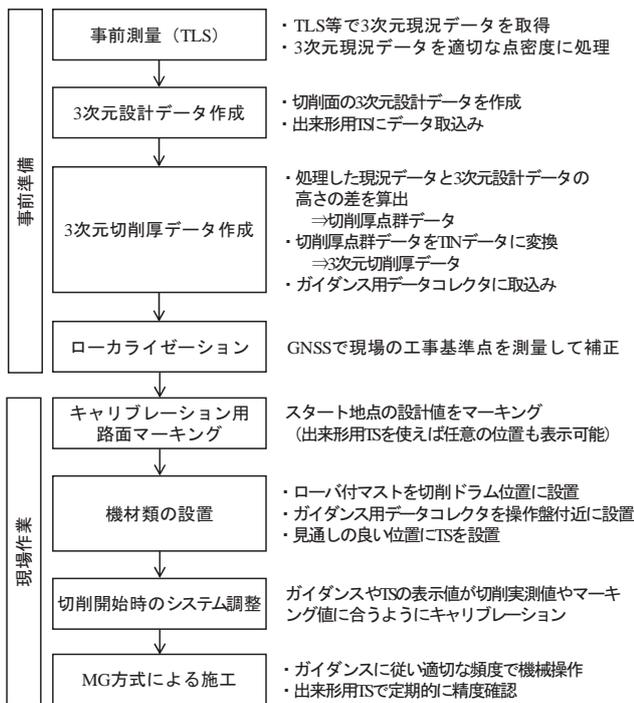


図-2 GNSS 式 MG の施工手順

面データが必要となり、これらを用いて GNSS 式 MG 用の 3 次元設計データ (3 次元切削厚データ) を作成する。

次に、GNSS を使用するにあたり緯度経度を現地座標に合わせるローカライゼーションと呼ばれる作業を行う。

(3) GNSS 式 MG の作業手順② (現場作業)

GNSS 式 MG の現場作業は、図-2 に示したように路面マーキング、機材類の設置、作業開始時のキャリブレーション、および MG の施工を行う。

MG で必要な路面マーキングは、開始時の切削厚さ確認 (キャリブレーション) のための開始地点から 20m 程度の区間と、施工中に DC に表示された計画の切削厚さ、切削機に表示された現状の切削厚さ、路面に記された計画の切削厚さの整合性を確認するための任意のポイントである。

従来の路面マーキングは縦断方向には 10m 等、横断方向には 2m 等の適切な間隔で切削厚さをマーキングしていた。一方、本技術ではオペレータは DC に表示されている数値を見ながら作業ができるので、路面の数値を見ずに施工できる。このことから路面にマーキングする作業を大幅に削減することが可能となり、施工準備段階でも生産性の向上 (省力化) に寄与できる。

次に切削機の切削ドラムの位置にマストと GNSS ローバを設置し、オペレータの操作がしやすい位置に DC を固定すれば MG による切削工を開始できる。

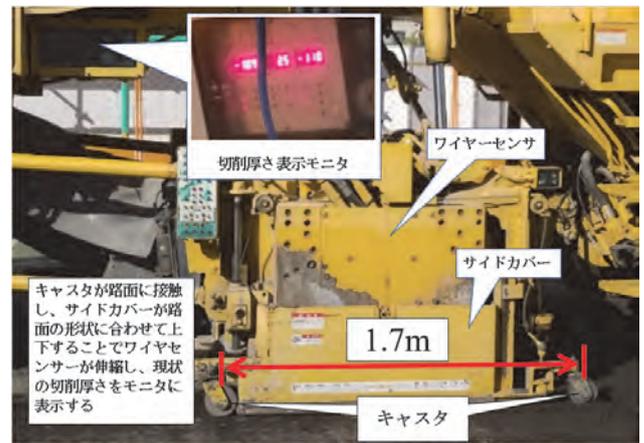


図-3 切削機の装置および厚さ表示の概念図

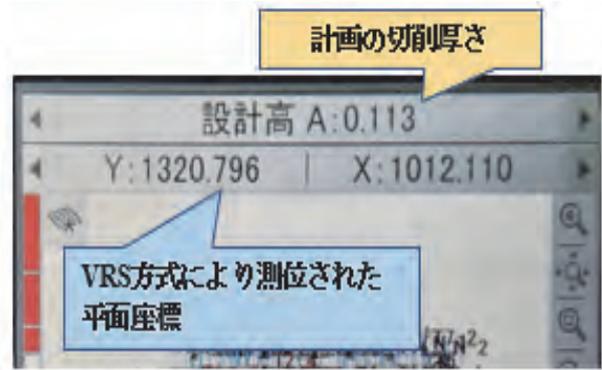


図-4 DC による計画の切削厚さ表示

3. 3次元切削厚データ作成方法

3.1 3次元切削厚データのメリット

図-3 に切削機の装置およびオペレータへの厚さ表示の概念図を示す。切削機のモニターに表示される作業時の切削厚さは、切削機のサイドカバーの前後のガイドローラ (以後、キャスト) から切削ドラムまでの距離をセンサで計測して表示される。

路面切削工の仕上がり精度は機械を操作するオペレータの技量に左右される。既報¹⁾で示した TS 式 MG はソフトウェアの都合上、計画高さとの標高差がガイダンス画面に表示される。GNSS 式 MG では現況測量データを踏まえた 3 次元設計データを作成することで、図-4 に示すようにガイダンス画面には切削厚さを表示させることができ、これらは図-3 に示した従来から機械に表示されていた数値と同じのためオペレータは感覚的に作業がしやすくなる。

3.2 3次元切削厚データの作成方法

3次元切削厚データ作成手順を図-5 に示す。

(1) TLS による事前測量

GNSS 式 MG 用の 3 次元設計データを作成する際には TLS を用いた 3 次元の現況路面データが必

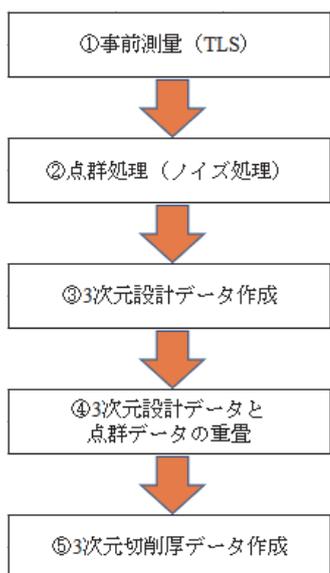


図-5 3次元設計データ作成手順

要となる。ここで、事前測量 (TLS) は国土交通省の「地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領 (舗装工事編)」で規定されている計測密度 0.25m^2 に 1 点以上を満足するデータを用いるが、切削オーバーレイ工は表基層が対象となるため測定範囲内の鉛直方向の測定精度は $\pm 4\text{mm}$ 以内になるよう計測する必要がある。

なお本手法は、TLS による現況計測後に路面形状が大きく変化すると、適切な 3 次元切削厚データでなくなるため、計測から施工までの期間や路面形状の変化には十分注意する必要がある。

(2) 3次元現況路面データの点群処理

図-3 に示した切削機は酒井重工業社製 ER552 であるが、国内で汎用的に使用されている WIRTGEN 社などの外国製および国産の大型切削機のサイドカバーの幅は約 1.7m である。そこで 3 次元切削厚データ作成に用いる 3 次元現況路面データは 1m^2 に 1 点以上を満足すれば充分と考えられるため、点群密度は 1m^2 に 1 点程度にデータ処理する。

(3) 3次元設計データの作成

事前測量結果を踏まえて従来方法 (線形データによる方法もしくは現況測量による方法) により表層面の 3 次元設計データを作成する。

(4) 3次元設計データと現況点群データの重畳

図-6 に切削面の 3 次元設計データと現況路面の点群データを重畳した概念図を示す。3 次元設計データを切削面高さにオフセット (切削面の 3 次元設計データ) し、現況路面データと重畳することで各地点における計画高さとの差 (計画の切削厚さ) を求めることができる。

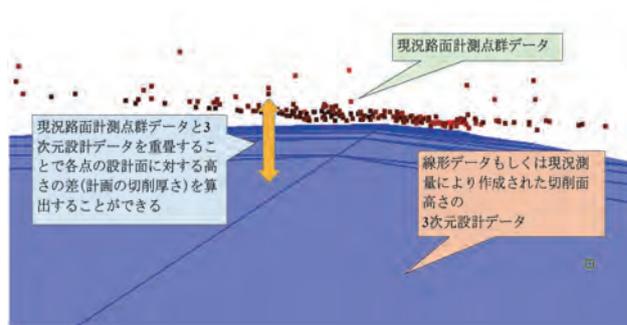


図-6 3次元設計データと現況データを重畳した概念図

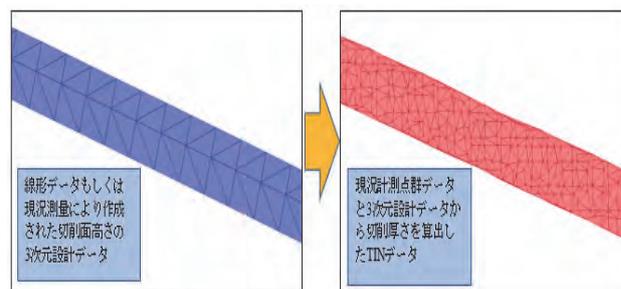


図-7 設計切削厚さの TIN データへの変換例

各地点の計画の切削厚さは 1m^2 に 1 点程度の点群データであり、これを三角メッシュの面データ (以下、TIN データ) に変換すれば切削厚さの 3 次元設計データとなる。TIN データに変換することで TIN データ内の範囲であれば任意の位置で計画の切削厚さを DC に表示できる。図-7 に計画の切削厚さに変換した TIN データの概念図を示す。

4. 各方式による仕上がり精度確認

4.1 施工精度の確認

GNSS 式 MG の施工精度の確認を目的に、表-1 に示す切削機の各制御方法の仕上がり精度について比較を行った。検証したのは 6 現場であり、現場により周辺環境や切削機のオペレータが異なるものの、全ての現場とも切削機が直線的に走行できる条件であった。なお、適用した切削機は ER552F (ホイール式、酒井重工業社製) または W200F (クローラ式、WIRTGEN 社製) である。

表-1 各方式における出来形評価結果

方式	詳細および測位システム
従来	オペレータ技能による機械制御
TS 式 MC	TS を使ったマシンコントロール (PS3D、Leica 社製)
TS 式 MG	TS を使ったマシンガイダンス (SPS620、Trimble 社製)
GNSS 式 MG	GNSS を使ったマシンガイダンス (SPS985、Trimble 社製)

4.2 切削面の出来形評価方法

各方式で施工した切削面を TLS により 0.01m² あたり 1 点以上の点密度で計測し、0.0625m² の単位で最頻値を求めて設計面との高さの比較を行った。

4.3 出来形評価結果

各方式における出来形評価結果を表-2 に示す。

なお、従来から規定されている管理測点における検測結果はすべて管理基準を満足していた。

4.4 出来形評価結果の考察

表に示した現場①は、ごく一般的な地方部の片側 1 車線の一般国道である。これまで切削面の 3 次元データ計測および面評価を行ったことがなかったが、今回検証した現場における従来方式による切削面の標準偏差は 5.9mm であった。この従来方式の標準偏差を基準として各 ICT 方式の評価を行う。

TS 式 MC 方式について、現場②は片側 2 車線の非常に交通量の多い都市部の幹線道路であったものの、標準偏差は 3.6mm と従来方式と比べて優れた精度が得られた。点群による面評価からも 3 次元マシンコントロールシステムの仕上がり精度が良いことがわかった。また、TS 式 MG についても既報²⁾ で示したように従来技術と比べてよい精度が得られている。

GNSS 式 MG の標準偏差は 3 現場の平均で 3.6mm となった。供用中の路線でなく施工条件が良い民間施設や港湾施設の結果も含まれているが、片側 3 車線の非常に多い都市部の幹線道路であった現場③においても同程度の精度が得られた。この結果から GNSS 式 MG の施工精度は TS 式 MG と同程度であり、さらに TS 式 MC に対しても遜色ない結果が得られると判断できる。

表-2 各方式における出来形評価結果

方式	現場番号	現場条件	標準偏差 (mm)	データ数
従来	①	地方部一般国道	5.9	5,133
TS 式 MC	②	都市部一般国道	3.6	7,811
TS 式 MG	①	地方部一般国道	2.7	4,195
	②	都市部一般国道	5.1	8,118
	③	都市部主要地方道	4.2	4,096
		平均	4.0	16,409
GNSS 式 MG	③	都市部主要地方道	3.5	4,016
	④	民間施設	3.8	10,361
	⑤	港湾施設	3.4	8,301
		平均	3.6	22,678

4.5 施工実績を踏まえた GNSS 式 MG の評価

修繕工事における切削機の ICT 施工に対する TS 式 MC、TS 式 MG 方式のデメリットは以下の 3 つが挙げられる。

- ① TS を狭い作業範囲内に設置しなければならない。
- ② TS 設置箇所が制約されているため、TS と切削機のプリズムのクリアランスを常に確保することができない(この間を一般車両が通行すると TS の視準が外れてしまい一時的でもシステムが停止する。)
- ③ TS 設置箇所が制約されて、切削機と TS が近過ぎると TS による測定誤差が大きくなり、施工精度が低下する。

一方、GNSS 式 MG は切削機の MC/MG 用の TS が不要なため、車両の通行や設置場所の選定に影響を受けず、安定した作業を行うことができる。そのため、機器の設置や取扱いを含めて作業が楽に行える点が現場から評価されている。

しかしながら GNSS 機器にも課題があり、高層ビル間でのマルチパス (電波の乱反射による距離測定誤差) や、橋梁下や山間部での GNSS 受信数不足、通信回線が確保できない地域での補正情報の未受信などがある。そのため、適用にあたっては事前に GNSS の作動を現場で確認することが重要となる。

今後、ICT 活用工事の適用種別拡大の方針のもと ICT 施工を行う機会は増大すると考えられるが、TS などの測量機器や MC 用システムは高価である。一方 GNSS は上述したシステムや機器と比べて安価な機器が多いため、GNSS 式 MG は初期導入やリースの費用、または外注費を抑制できる可能性がある。

5. まとめ

今回得られた結果から GNSS 式 MG は従来方式と比べて施工精度が高い方式であると判断できる。

一方で、適用条件も留意する必要があることから、TS 式 MC 方式や MC 方式を含めた施工を重ねてノウハウの蓄積を行い、現場条件に応じた ICT 施工方法を確立することで維持系 ICT 舗装工の推進に寄与したいと考えている。

参考文献

- 1) 宇田川ほか：路面切削機での情報化施工 (マシンガイドンス) 活用事例について,平成 29 年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集,pp71-74,2017
- 2) 加藤ほか：3 次元マシンガイドンスによる路面切削機の ICT 施工の検討,第 21 回 舗装技術に関する懸賞論文,2019

20. 重機搭載レーザー計測システムの開発

～出来形計測を省人化～

株式会社フジタ
ジオサーフ CS 株式会社

○ 上原 広行
浮田 真樹

1. はじめに

近年の土工事は、建設機械の ICT 化により重機運転の経験が浅いオペレータでも熟練者と同等の作業が可能になるなど目覚ましい進化を遂げている。現状の ICT 建機（マシンガイダンス）は、法面整形作業中のオペレータへ刃先位置を表示し、設計値を超えないようサポートする技術で、操作の簡便化を図ることができる。しかし、作業面全体の形状変化や設計面との差分量は判定できないため、法面整形の重機作業を中断して、巻尺やレベル・TS で出来形計測を行う必要があり効率面での技術的課題を抱えていた。そこで、土工事の出来形管理に利用する「重機搭載レーザー計測システム」（以下、「重機 LS」と称す。）を開発した。本稿では、システムの概要と PRISM(官民研究開発投資拡大プログラム)を活用した現場試行プロジェクト(国土交通省公募)における本技術の検証結果について報告する。

満足しない計測箇所を色分け表示し、出来形合否判定(表-1)が可能となる。



図-1 重機 LS の計測状況とシステム構成

2. システムの概要

2.1 技術の概要

重機 LS は、移動しながら現場内の任意の位置で面的な出来形座標を取得するシステムである。従来の地上型 LS を用いた測量は、盛り替えに時間を要するという難点があり、自己位置を高精度に測位でき、移動しながら測量できる技術の開発が望まれていた。

本システムは、2DLS と RTK-GNSS 受信機、傾斜計、解析モニタで構成される(図-1)。オペレータが運転席で計測ボタンを押し、計測範囲を重機が旋回スキャンすることで、RTK-GNSS が位置座標、LS が作業面までの距離、傾斜計が重機姿勢を各々計測し演算処理を行い、その結果を現況の点群データに変換する。このデータを 3 次元設計データと重ねあわせ、差分を色分けしたヒートマップ(図-2)で表示することで、現況と設計を比べ切土すべきか盛土すべきかの判断と出来高土量が容易に算出できる。また、点群データを専用ソフトに取り込めば、ヒートマップの応用により規格値を

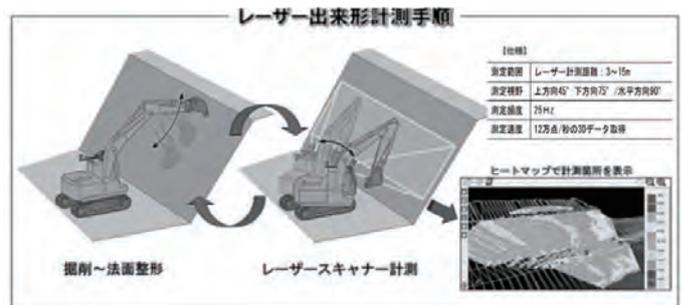


図-2 重機 LS 出来形計測手順

出来形合否判定総括表			測点		
工種	測点	種別	合否判定結果	合格	不合格
道路土工		掘削工			
測定項目	目標値	判定			
平均値	32.6mm ±70mm				
最大値(差)	137mm ±160mm				
最小値(差)	-82mm ±160mm				
データ数	119 [6/7以上 / 7/6以上]				
評価面積	96.5m ²				
検出点数	0 [0未満 / 0以上]				
平均値					
最大値(差)					
最小値(差)					
データ数					
評価面積					
検出点数					
法面のばらつき			規格値の±5%以内のデータ数	112(94.9%)	規格値の±5%以外のデータ数
掘削面のばらつき			規格値の±5%以内のデータ数	91(77.5%)	規格値の±5%以外のデータ数

表-1 法面出来形帳票(合否判定)

2.2 技術の特徴

本システムの特徴を以下に示す。

- ・屋外用の安価な 2DLS を用いて、重機を巡回させて計測することで 3D データを取得でき、高価かつ耐久面で課題のある 3DLS に比べ、汎用性と普及性が高い。
- ・法面作業の進捗に応じた出来形の LS 計測で、簡易的な出来高数量の算出が広範囲で可能。
- ・本システムは重機に後付けで容易に搭載でき、計測は運転席のタッチパネルで操作。
- ・UAV 測量のように、雨天・強風などの作業環境や地形条件の影響を受けずに安定した測量が可能。
- ・計測時間が短いため、測量作業が大幅に省力化され、土工事の生産性が向上。
- ・計測状況に応じて、計測モードの切り替えが可能。
 - ①精密計測・・・検査対応モード
 - ②簡易計測・・・日常チェックモード

2.3 従来技術との比較

法面整形工は、現状の ICT 建機（マシンガイダンス等）だけでは作業面の全体形状が把握できないため、巻尺やレベル・TS で出来形の確認をする必要があった。重機 LS を導入することで、施工中に全体形状を把握し直ちに出来形判定が可能となり、不具合箇所を直ちに修正できるため品質向上に即応可能である。

3. 現場試行プロジェクト

3.1 現場試行の概要

本技術は、国土交通省の「建設現場の生産性向上を飛躍的に向上するための革新的技術の導入活用に関するプロジェクト」に採択され、労働生産性の向上を図る技術として、実際の造成工事に重機 LS を導入し効果を検証した。重機 LS を用いた出来形計測は、作業中にオペレータが法面形状の 3D データを短時間（3分程度）かつ高精度に取得し、直ちに出来形の面的な把握が可能となることから、従来の出来形確認手間の大幅な削減と出来形計測を省略することを目標に現場試行した。試行現場の工事概要と試行業務の概要を以下に示す。

- ・試行現場：土岐口開発造成工事(1) (写真-1)
＜工事＞
- ・概要：開発面積 37.6ha の造成工事
- ・発注者：岐阜県土岐市土岐口財産区
- ・期間：2017 年 9 月～2020 年 4 月

＜試行業務＞

- ・概要：データの取得活用により労働生産性の向上を図る技術「重機 LS」の試行
- ・委託者：国土交通省中部地方整備局
- ・コンソーシアム：株式会社フジタ、ジオサーフ CS(株)
- ・期間：2018 年 11 月～2019 年 3 月

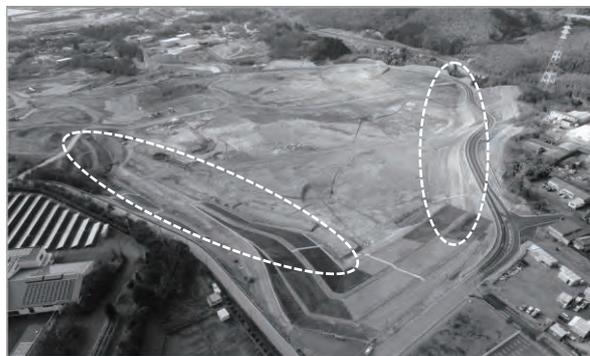


写真-1 土岐口開発造成 現場試行箇所

3.2 現場試行結果

(1) データの精度確認試験

重機 LS で適切な計測精度が確保可能かを検証するため、実際の法面整形作業にて精度確認試験を行った。現場内に 2 箇所の検査点（LS からの距離 10m 以上）を設置し、工事基準点を用い TS で測量した各検査点の座標値を真値として、重機 LS で計測した 2 点座標間の距離（10m 以上）を算出する手法と各座標値の較差を真値と比較する手法で計測精度を評価した。この結果、較差の最大値は 34mm となり、出来形計測（面管理の場合）の要求精度 $\pm 50\text{mm}$ 以内であることを確認した。また、計測時の重機姿勢が計測精度に与える影響についても検証し、ピッチング・ローリング角度が各々 ± 20 度以内の計測条件であれば精度に影響が無いことを確認した（写真-2）。



写真-2 重機 LS 傾斜時の計測試験

(2) 出来形計測の省略

従来の建機と重機 LS の活用による法面整形の作業時間比較を図-3 に、出来形管理の省略作業比較を図-4 に示す。

従来建機の法面整形作業では、丁張を用いた日常の出来形管理、すなわちオペレータが丁張に水糸を張り小段に登り目視で勾配と凹凸をチェックする作業（出来形確認）と巻尺やレベル、TS 等で法面を計測する作業（出来形計測）に時間を要していた。現場試行期間中に1日の作業単位でこの作業を集計した結果、1日当たり 1.0h（出来形確認 0.5h + 出来形計測 0.5h）を要していた（図-3）。

出来形確認の作業は、ICT 建機（マシンガイダンス）を利用すれば、丁張無しで作業可能なため、丁張チェックの省略で 0.5h の短縮を確認した。ICT 建機と重機 LS の併用では、作業中に法面形状を 3D で把握できるため、出来形計測の 0.5h も省略でき、1日当たり 1.0h の時間短縮となることを確認した（図-3, 4）。この併用で、出来形管理に要した 1.0h を省略できたため、重機稼働率がアップし法面作業量で 21%（当社計測値）向上を達成した。さらに、日常の出来形計測に関わる人工（2名×0.5h）の省力効果も見込まれる。

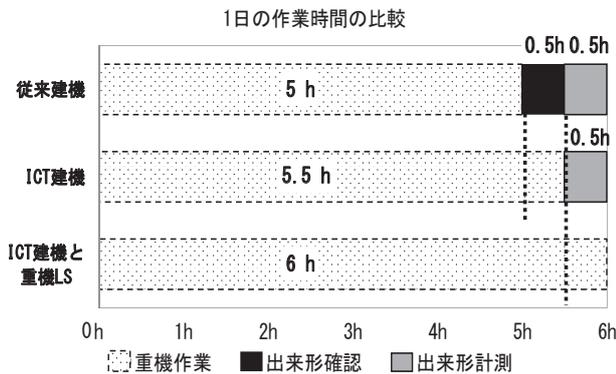


図-3 法面整形の1日単位作業時間比較

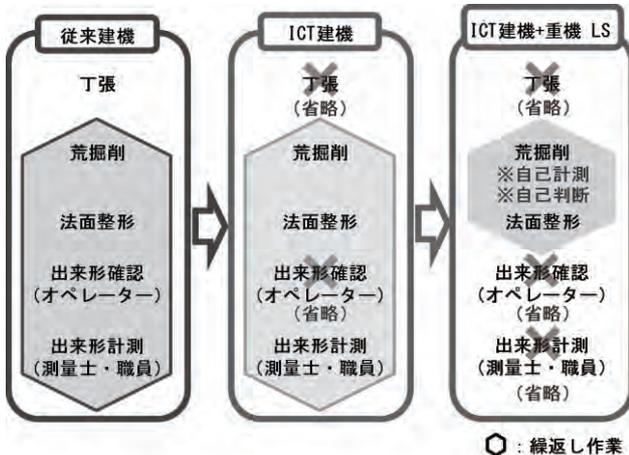


図-4 出来形管理の省略作業比較

(3) 従来の地上型 LS との比較

出来形測量にかかる時間を、類似の地上型 LS（写真-3）と重機 LS で比較した。その結果、1回の測量で地上型 LS は 25 分を要し、重機 LS を利用すると精密計測（検査対応モード）で 5 分（80%短縮）、簡易計測（日常チェックモード）で 3 分（88%短縮）となり、測量作業の大幅な時間短縮を達成した（図-5）。



写真-3 地上型 LS の計測状況

地上型LSと重機LSの計測時間比較（100m²/回）

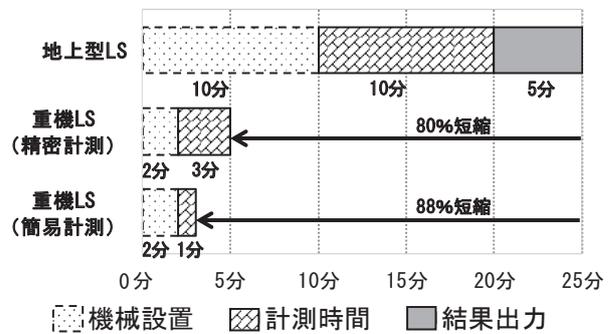


図-5 地上型 LS と重機 LS 計測時間比較

(4) 安全性の向上

従来の出来形確認と重機 LS の出来形計測の作業状況について写真-4 に示す。

実際に法面整形作業で重機 LS を活用したオペレータ（6名）のアンケートで、安全面に関して以下の効果を確認した。

- ICT 建機と同様に丁張り等が不要になり、現場作業員と重機が交錯しないため、接触事故の危険が無くなった。
- 重機オペレータが作業中に行う出来形確認作業（検尺や水糸で精度確認）が不要になり、運転席から頻繁に降りる必要がないため、転倒の危険がなく安全が確保された。

従来（目視チェック）

重機 LS（モニタチェック）



写真-4 従来と重機 LS での出来形確認状況

(5.) 検査・書類の簡素化

法面整形工の出来形実地検査（検尺，レベル，TS測量）は，従来 2 人日程度を要していたが，重機 LS でオペレータが計測した 3D データ出来形を活用した出来形帳票による合否判定で，監督員が現場に臨場して行う従来型の実地検査の方法を代替できるため，検査の大幅な簡素化が可能となる。また，検査に伴う写真や書類の削減も見込まれる。

今回の試行業務において，監督員立会のもと，従来の出来形検査と重機 LS での検査について，所要時間を比較検証した結果を写真-5，表-2 に示す。

従来の出来形検査の合計時間は 315 分であるが，重機 LS による検査の合計時間は 53 分となり，大幅な時間短縮（83%）となった。



写真-5 従来検査と重機 LS での検査状況

表-2 出来形管理検査における従来と重機 LS の比較

手順	対象者	項目	従来検査		重機LS検査	
		内容	分	人	分	人
作業中	職員	現地確認・測定 法長確認(テープ) 基準高確認(レベル)	60	2	-	-
	オペレーター	重機LS出来形計測 (施工中に出来形計測)	-	-	15	1
書類作成	職員	帳票作成(法長・基準高)	120	1	-	-
	職員	帳票作成(ヒートマップ)	-	-	30	1
検査	職員	出来形検査(事前確認) 法長確認(テープ) 基準高確認(レベル)	120	2	-	-
	職員 オペレーター	出来形検査(重機LSで計測) 計測結果を合否判定	-	-	5	2
	検査官	出来形検査(現地立会)	15	1	3	1
計			315分	6人	53分	5人

(6) 現場試行でシステムの改良・改善

現場試行を通して発生した本システムの改良点・改善点を表-3 に示す。ハード面で 1 点，ソフト面で 3 点の改良を行い，実用レベルの向上を図った。

最初に直面した課題はハード面で，RTK-GNSS 電波受信不良マルチパスの状態により，計測データの不完全な状態やデータ不良箇所が発生し，計測エラーが発生した。そのため，GNSS 基準局のエリアを十分カバーできる工区中央に移設した（表-3 の①）。

次に，オペレータへのアンケートの結果，より使いやすくするため，改善策としてモニタ内にバケット刃先表示と，計測時間 1～2 以内で測定できる簡易計測モード，最適旋回スピードの指示などの機能の追加を行い，より使いやすいシステムになるように改良を行った（表-3 の②～④）。

表-3 重機 LS システム改良点

ハード	①	症状	計測中にマルチパスなどでGNSS固定局の補正情報が取得できず，計測エラーが発生。
		改良点	
ソフト	②	症状	重機LSモニタ内部のバケット刃先の位置が不明であり，作業中に計測する機会が少なかった。
		改良点	重機LSモニタ内部にICT建機のMG同様，バケットの刃先の位置を表示できるようソフトを改良。
	③	症状	開発当初，計測後の出来形モニタ表示に5分以上必要。OPが作業中に計測するには使わずらい。
	改良点		施工途中でもOPが確認できるように簡易計測機能を追加。計測結果データを 1 分程度で表示。
	④	症状	計測作業時，適正な旋回スピードに慣れず，正常なデータが取得困難。
	改良点		最適な旋回スピードの指示ができるように，モニタ上に注意喚起表示しOPが確認。

4. おわりに

重機 LS は，作業中のリアルタイム 3D 出来形計測が可能な技術で，作業を中断することなく法面形状や出来高土量が把握できる。現場試行プロジェクトにより，作業効率の大幅な向上と，品質面でも熟練オペレータのノウハウが必要とされる法面整形が，出来形のヒートマップ可視化で未熟練者でも高精度な作業が可能となることを実証できた。

土工事だけでなくダムやトンネルの施工管理への展開も可能であり，今後は様々な応用に向けて更なる機能向上を図り，より使いやすく迅速に計測できる改良を進める所存である。本重機 LS が現場の生産性改革の一助になると幸いである。

本技術の開発と現場試行にあたり，多岐にわたりご指導ご協力をいただきました関係者各位に厚くお礼申し上げます。

21. 舗装検測作業の省力化に向けたデジカメ測量技術の開発

(株) NIPPO 総合技術部生産開発センター ○ 其田 直樹
 同 相田 尚
 同 梶原 寛

1. はじめに

わが国では、i-Construction の取組みにより、2025 年までに建設現場の生産性を 2 割向上させ、魅力ある建設現場の実現を目指すことが推進されている。中でもトップランナー施策の一つである「ICT の全面的な活用」は、施工会社にとって関係の深い施策である。「ICT の全面的な活用」とは、調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までのあらゆる建設生産プロセスにおいて、3次元データを一貫して使用する ICT を全体的に導入することであり、建設現場の抜本的な生産性の向上を図ることをその目的としている。

2017 年度から導入された ICT 舗装工では、事業フェーズや目的に応じて段階的に取組みが進められている。路盤工における MC グレーダと地上型レーザスキャナーによる出来形面管理が ICT 舗装工の第一段として導入され、施工管理の生産性向上への取組みに大きな注目が集まっている¹⁾。しかし、道路規制時間に制約を有する舗装修繕工事への適用は、データ取得や解析に費やす時間の関係上、導入には慎重にならざるを得ない。

道路舗装工事の大半を修繕工事が占める昨今において、舗装修繕工事に対応した省力化・省人化技術の導入は喫緊の課題である。本報告は、今般開発した舗装修繕工事の出来形検測作業に対応したデジカメ測量技術の概要と開発要求事項における検測結果について述べるものである。

2. 開発の背景

従来、舗装修繕工事では、工種毎の高さや幅の仕上がり確認のため、水系による下がりとメジャーによる幅の検測を実施している。この検測作業方法は数十年に渡り同様の方法を用いている。写真-1 に、水系下がり検測確認状況を示す。ここでは、水系下がり検測に必要な人員は、撮影者 1 名、手元 3 名の計 4 名であることがわかり、水系下がり検測と同時に施工幅員の検測も行っている。この検測作業を現場の決められた工事測点毎に素早く

正確に行うことが次工程への円滑な移行に繋がるものである。また、計測した測定値はメモを取り、施工担当者が事務所に戻った後、速やかにその日の出来形を帳票にしておき、このような事務所での内業も効率化が求められている。さらに、計測精度において、切削オーバーレイ工の規格値²⁾は、表-1 に示すとおりミリメートル単位であり、高精度な計測精度を要求されるため、水準測量と同程度の精度を有した計測手法が求められる。



写真-1 水系下がり検測状況

表-1 切削オーバーレイ工の規格値

		単位：mm	
工 種	測定項目	規 格 値	
		個々の測定値 (X)	平均の測定値 (X ₁₀)
切削オーバーレイ工	厚さ t (切削)	-7	-2
	厚さ t (オーバーレイ)	-9	
	幅 W	-25	

3. 技術の概要

本開発技術では、計測精度確保の観点から、フォトグラメトリ技術(デジカメ測量技術)を採用した。フォトグラメトリ技術とは、3次元の物体を複数の観測点から撮影して得た2次元画像から、視差情報を解析して寸法・形状を求める写真測量技術のことである。本開発技術の機材構成を写真-2に示す。デジタルカメラは、一般に入手可能な市販の一眼レフカメラを選定した。また、この特殊なターゲットは、表面に独自の配列を持った模様が施されており、各々の配列によって役割が付与されている。



写真-2 機材構成

4. 開発における検討事項

4.1 撮影枚数とターゲットサイズの選定

本開発技術は、フォトグラメトリ技術を採用していることから、計測対象を複数の観測点から撮影する必要がある。そのため、計測エラーを起こさない必要撮影枚数の設定とターゲット自体のサイズの屋内外の検討が必要であった。表-2に検討した計測条件と計測結果を示す。計測幅員は3.5mを想定とする。

表-2 計測条件と計測結果一覧

撮影枚数 サイズ	屋内			屋外		
	6枚	8枚	12枚	6枚	8枚	12枚
30mm	3/4	4/4	4/4	1/1	0/1	1/1
40mm	1/2	4/4	4/4	0/4	4/4	4/4
50mm	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4
60mm	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4

・表内の数値は、「計測成功回数/計測回数」とする

表-2より、撮影枚数が6枚かつターゲットサイズが30mmまたは40mmの場合、計測エラーが生じた。撮影枚数を8枚以上かつターゲットサイズ

を50mm以上とすることですべての計測に成功した。したがって、撮影枚数は8枚以上、ターゲットサイズは50mm以上を選定することにした。

4.2 計測面の不陸およびターゲットの道路直角方向設置ズレによる計測誤差の検討

写真-2に示してある通り、本開発技術は下がりや幅の計測箇所に設置するターゲットの他に、水平方向と鉛直方向を算出するターゲットを設置する必要がある。そのため、ターゲットを設置する計測面の不陸の影響や道路直角方向のターゲット設置のズレの許容を検討した。図-1に計測面不陸と道路直角方向設置ズレのシミュレーションを、表-3に変位量による計測値の影響を示す。

表-3より、鉛直方向ターゲットに20mmの不陸が生じた場合の下がり値への影響は、0.1~0.3mm程度と非常に小さい。また、水平方向ターゲットに100mmの道路直角方向のターゲット設置ズレが生じた場合の幅計測値への影響も、1mm程度となり、計測精度へは大きな影響が無い。したがって、鉛直方向ターゲット設置個所に局所的な20mm程度の不陸が生じた場合や水平方向ターゲットが道路直角方向に100mm程度のズレが生じた場合は計測結果に大きな影響は無く、許容できることを確認した。

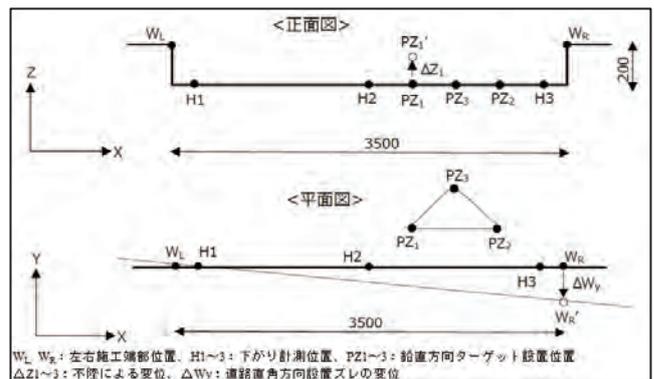


図-1 不陸と設置ズレのシミュレーション

表-3 変位量における計測値の影響

パターン	不陸やズレ量				計測値			
	ΔZ_1	ΔZ_2	ΔZ_3	ΔW_y	H1	H2	H3	W
1	0.0	0.0	0.0	0.0	200.00	200.00	200.00	3500.00
2	20.0	0.0	0.0	0.0	199.94	199.94	199.94	3500.00
3	0.0	20.0	0.0	0.0	199.94	199.94	199.94	3500.00
4	0.0	0.0	20.0	0.0	199.75	199.75	199.75	3500.00
5	0.0	0.0	0.0	100.0	200.00	200.00	200.00	3501.43

単位:mm

4.3 解析ソフトの仕様検討

工事測点毎に撮影された画像は、専用のソフトウェアを介して読み込み解析を現場内にて行う。

写真-3に専用ソフトウェア画面の一例を示す。

次工程への円滑な移行のためにも、迅速な計測結果の把握が必要になることから、画像の読み込みから解析をボタン一つで自動的に行い、数十秒で算出結果の確認ができるような仕様とした。ま



写真-3 専用ソフトウェア画面の一例

た、工種毎における設計の下がり値や厚さ、幅の数値を示す欄や計測値の合否判定も搭載した。この計測値の合否判定は、画像に映り込んだターゲット認識の確からしさや規格値による計測値の合否を判断させている。さらに、解析終了後は計測結果を自動的に帳票化させる仕様としている。写真-4に自動帳票化された画面の一例を示す。



写真-4 自動帳票化された画面の一例

5. 水系下がり比較試験

本開発技術の計測値と水系下がり計測値を水準測量と比較し、路面における精度確認を行った。計測箇所は、切削面と表層面にて実施した。表-4に路面計測精度確認試験結果を示す。

表-4 路面計測精度確認試験結果

		水系下がり		水準測量		差		開発技術		水準測量		差	
		1	2	3	幅	最大	最小	平均	偏差	1	2	3	幅
切削後	1	135	134	1		133.0	134	-1.0					
	2	137	139	-2		137.2	139	-1.8					
	3	136	133	3		134.0	133	1.0					
	幅					3496	3496	0					
表層後	1	97	94	3		94.2	94	0.2					
	2	93	91	2		92.2	91	1.2					
	3	96	96	0		95.9	96	-0.1					
	幅					3556	3560	-4					
						最大	1			最大	1		
						最小	-2			最小	-2		
						平均	0			平均	0		
						偏差	1.9			偏差	1.2		

表-4より、水系下がりと本開発技術の測定値を水準測量結果と比較すると、水系下がり平均測定値の誤差が1mm（標準偏差1.9mm）に対し、本開発技術は平均測定値が0mm（標準偏差1.2mm）であった。このことは、本開発技術が水系下がり検測と同等以上の測定精度を持つことを示している。また、切削面と表層面の施工面仕上りの違いによる計測結果の変化がないことから、舗装修繕工事における代表的な工種に対応できることが確認できた。さらに、本開発技術は、下がり計測と同時に施工幅員の計測も可能であることも確認できた。

6. 現場試用

6.1 現場での流れ

本開発技術の計測方法は、写真-2で示した各種ターゲットを工事測点の路面に配置し、計測撮影を行う。水平方向兼幅ターゲットは施工箇所の両端部に設置し、下がりターゲットを計測したい箇所を設置する。下がりターゲットは3箇所下がりと4箇所下がりのどちらにも対応できる仕様になっているため、現場毎の要領に従って対応が可能である。ターゲットを配置したのち、デジタルカメラにてターゲットを映しこむように撮影する。図-2に本開発技術と水系下がり検測の作業フロー比較を示す。

図-2より、本開発技術は事前の事務所作業から現場での計測作業まで一人で行うことができる。計測作業に作業人員を要しないため、別作業の進捗を妨げることがない。また、出来形帳票は自動作成されるため、施工管理後の事務所作業の削減にも期待できる。さらに、出来形帳票は、IoTの活用により現場内からインターネットクラウドにアップロードが可能である。

6.2 実施結果

共用車線の切削オーバーレイ工の現場にて、本開発技術を出来形検測として試用し、計測時間や

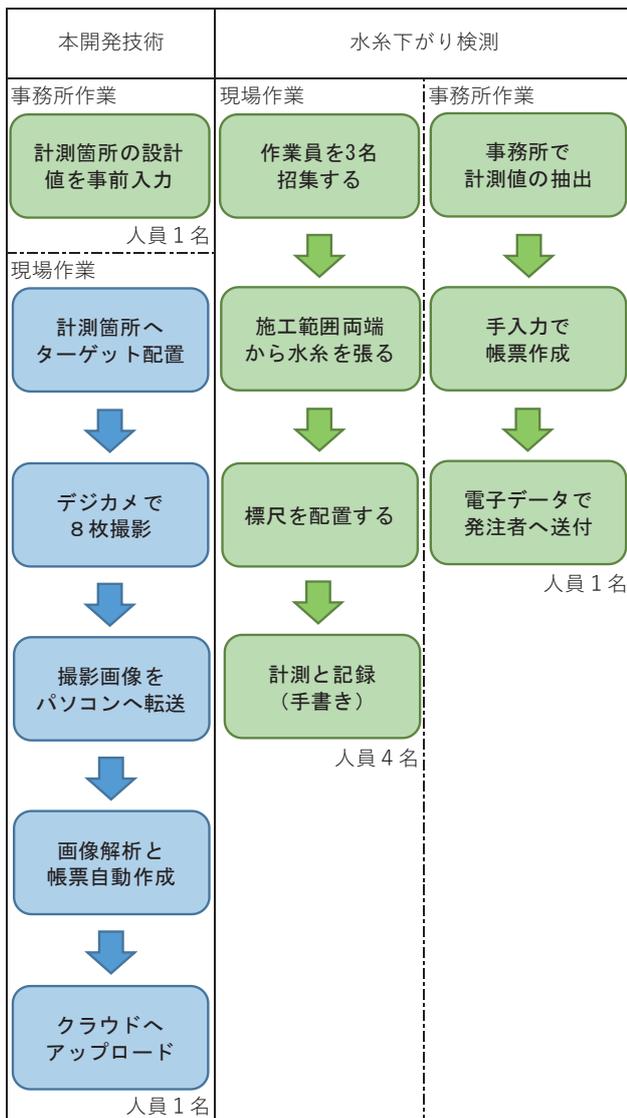


図-2 作業フローの比較



写真-5 現場試用状況 (ターゲット配置)

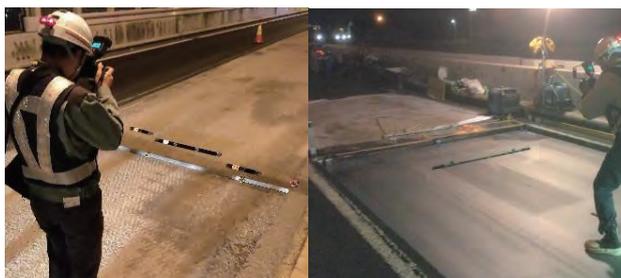


写真-6 現場試用状況 (撮影)

その場でのデータ確認等の有用性を確認した。写真-5, 6に現場試用状況を示す。

計測者1名にて、ターゲット設置1分、撮影30秒、画像読込・解析30秒、ターゲット撤去30秒、次測点への移動1分、計5分以内に実施することができ、他作業に支障を与えることなく一連の検測作業を完了した。本開発技術が切削オーバーレイ工の現場で有用であることを確認できた。

7. まとめ

本開発技術を舗装維持修繕工事で活用した場合の期待される効果を表-5に示す。

表-5 期待される効果の一覧

内容	期待される効果
一人での検測	出来形検測の省人化
(作業員不要)	施工の効率化
デジタル検測	計測精度の均一化
ソフトウェアによる一元管理	結果確認の効率化
出来形帳票の自動作成	内業の省力化
IoT活用	リアルタイムな情報共有

表-5に示す通り、出来形検測作業の省人化のみならず、検測をデジタル化することで目視による個人毎の計測数値のばらつきを抑制し、計測精度の均一化も図られる。さらに、現場内で出来形帳票の自動作成とクラウドアップロードによる情報共有により、施工担当者の事務所での内業も省力化に期待できる。

8. おわりに

道路舗装工事の大半を占める修繕工事において、本開発技術の活用により、出来形検測作業の省力化と施工の効率化、計測精度の均一化、内業の省力化に寄与できるものと考えられる。また、その場で出力した帳票はIoT活用により、発注者との情報共有の有用なツールとして活用が可能であり、舗装修繕工事の新しい施工管理手法として期待できる。施工者だけではなく発注者と連携をとった展開を図るとともに、今後さらに、本開発技術を実路面で試用し、課題抽出と改良・改善に努める所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省：ICT舗装工について、2017年3月7日
- 2) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値(案)、2018年3月

22. セグメント搬送用大型天井クレーンの自動化と運用実績

東京外かく環状道路本線トンネル（南行）東名北工事報告

東京外かく環状道路本線トンネル（南行）東名北 J V 工事(事) 高橋 公城
 東京外かく環状道路本線トンネル（南行）東名北 J V 工事(事) ○ 西崎 康
 東京外かく環状道路本線トンネル（南行）東名北 J V 工事(事) 福井 崇史

1. はじめに

本工事は、関越自動車道から東名高速道路まで延伸される東京外かく環状道路のうち、世田谷区大蔵の東名高速道路と野川の交差点から武蔵野市吉祥寺井の頭通りまでの本線トンネルを、泥土圧シールド工法により築造するものである（図-1）。工事の特徴は、大断面（外径 16.1m）かつ長距離（9 km）を高速掘進（月進 500m）で施工をすることである。

シールドトンネル本体の壁は、セグメントと呼ばれるパネルをリング状に組み立ててつくる。現場内でのセグメントの搬送はクレーンの使用を主体としており、迅速かつ正確な運転操作が求められる。しかし近年は、熟練作業員の高齢化により人材の確保が難しく、クレーン自動化は喫緊の課題となっている。そこで、本工事では、セグメントストックヤードにてセグメントの入庫・保管・出庫作業を行う 40t 大型天井クレーンの自動化について取り組んだ。本稿では、その計画と運用実績について報告する。



図-1 工事位置図

2. 工事概要

2.1 全体工事概要

工事名 : 東京外かく環状道路 本線トンネル（南行）東名北工事
 発注者 : 東日本高速道路株式会社 関東支社 東京外環工事事務所

施工者 : 鹿島・前田・三井住友・鉄建・西武特定建設工事共同企業体

工事場所 : (自) 東京都世田谷区大蔵
 (至) 東京都武蔵野市吉祥寺南町

工期 : 2014. 4. 10~2021. 3. 18

主要工事内容

- ・断面規模
 トンネル外径 ϕ 15.8m、内径 ϕ 14.5m
 シールドマシン外径 ϕ 16.1m（国内最大）
- ・掘進延長 9,155m
- ・工法 泥土圧式シールド工法
- ・平面線形 R=643m（最小）
- ・土被り 38.3m（野川河床）~55.7m
- ・縦断勾配 0.3%~1.5%
- ・横連絡坑 5カ所
- ・地中接合 1カ所

2.2 天井クレーン自動化採用経緯

セグメントの入出庫作業を自動化する設備として、多段棚式自動倉庫設備が挙げられる。実績も多く技術的に確立したものであるが、本工事のように大型セグメントを扱う工事においては、以下の点で優位性が低くなる。

- ① 大型セグメント用多段棚は、大掛かりなフレーム構造となり、それに応じた大きな支持杭が必要となるため、工期、コストが増大
- ② フレーム構造が大掛かりとなり、多段倉庫のメリットである敷地面積の縮小効果が小さい
- ③ 設備（スタッカークレーン）も重量物を扱うため、コストが増大（天井クレーンの約2.5倍）

多段棚式倉庫と同等の機能を持たせることができる設備として、3次元的に自由に移動させることができる天井クレーンがある。天井クレーンは、特別な構造物が不要のため、工期短縮及び費用縮減が図れ、同種工事への展開性も高い。よって、前例の無い試みではあるが、多段棚式自動倉庫設備に置き換わり、大型セグメントにも適用可能なセグメント自動入出庫設備として、天井クレーンの自動化に取り組むこととした。

2.3 セグメント概要

本工事では、施工する場所の目的や条件によって、材質や幅の異なるセグメントを使い分けてトンネルを構築する。トンネル全長 9,155m において全 5,676 リング、70,000 ピースを超えるセグメントを搬送する必要がある（表-1）。

表-1 セグメント概要

R C セグメント	 <p>エレクター 取付孔 セグメント間継手 リング間継手</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆鉄筋コンクリート構造 ◆剛性が大きく耐圧縮性や耐久性に優れたトンネル全体の標準部において使用 <p>リング数 : 4,247リング 分割数 : 13ピース/リング 重量 : 約10t/ピース</p>
合成 セグメント	 <p>セグメント継手板 リング間継手</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆鋼とコンクリートのハイブリッド構造 ◆大きな荷重がかかる高層ビル等が建設される可能性のある部分において使用 <p>リング数 : 628リング 分割数 : 13ピース/リング 重量 : 約11t/ピース</p>
鋼製 セグメント	 <p>セグメント継手 リング継手</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆鋼板で箱型に製造された構造 ◆開口が必要な横連絡坑部や切断撤去が必要な地中拡幅部において使用 <p>リング数 : 801リング 分割数 : 13~14ピース/リング 重量 : 約5t/ピース</p>

2.4 セグメントストックヤード概要

セグメントストックヤードでの入庫～出庫フローを図-2、図-3に示す。

セグメントストックヤードでは、トレーラーによって搬入されるセグメントを、天井クレーンを使用して荷取りし、入庫・保管する。トレーラーによるセグメント搬入は、運搬時の荷崩れを防止するために2段積みまでとした。セグメントストックヤードでのセグメントの保管は4段積みを基本とし、3列で1リング分となるようにした。

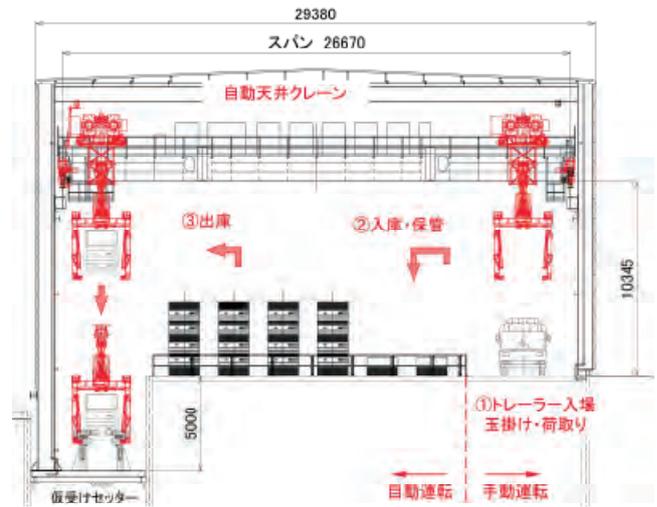


図-2 天井クレーンによる入出庫

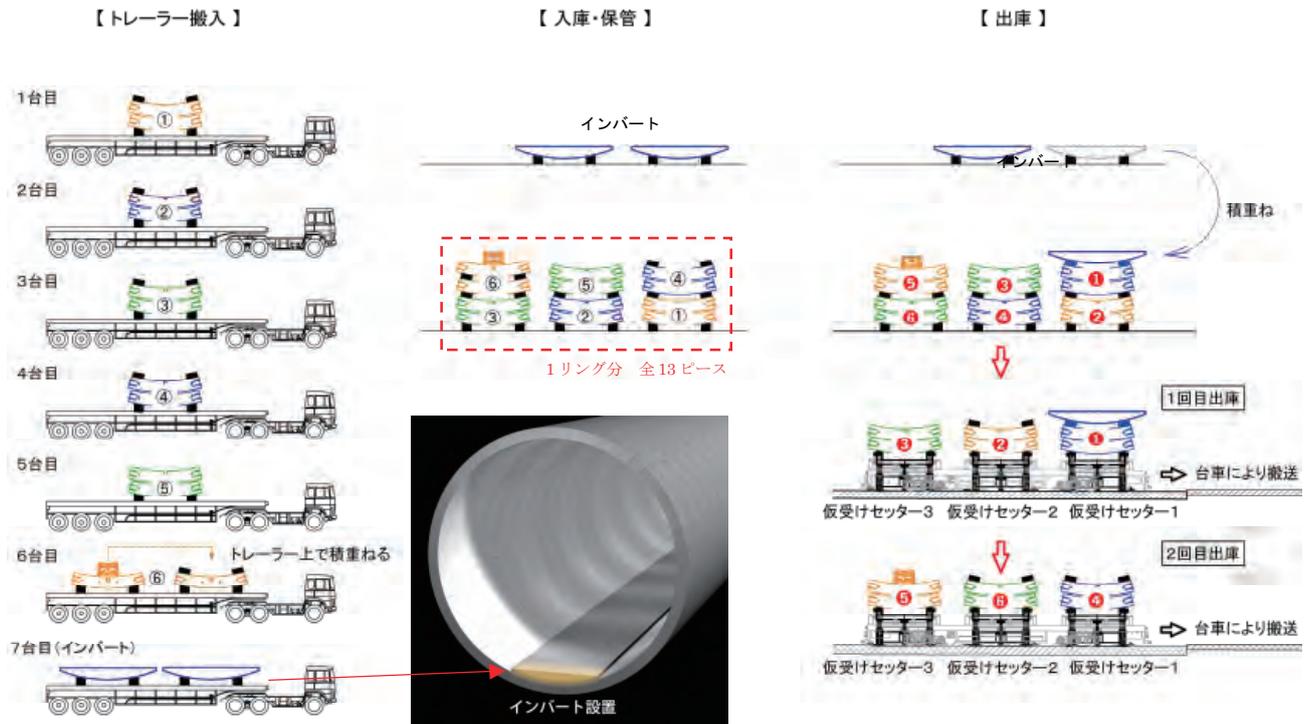


図-3 セグメントストックヤード 入出庫フロー図（1リング分）

トンネル坑内では、セグメントの組立に合わせてプレキャストインバートを設置するため、インバートについてもセグメントストックヤードに入庫・保管し、セグメントと共に在庫することが効率的な搬送となる。よって、セグメントストックヤードにはインバート保管エリアも配置し、セグメントストックヤード全体として、セグメントを10リング、インバートを8リング保管できる配置とした(図-4)。

セグメントストックヤードに保管されたセグメントは、天井クレーンを使用して荷取りし、仮受け台(以後、仮受セッター)に預けることによって出庫される。仮受セッターに預けたセグメントは、搬送台車に積替えて坑内に搬送する。セグメントストックヤードから出庫したセグメントはトンネル坑内で入れ替え作業ができないため、組立順序に従って出庫操作を行う必要がある。

天井クレーン本体の機械仕様を表-2に示す。天井クレーンは2台設置し、入庫及び出庫を交互に行うことによって、サイクルタイム短縮を図り、高速掘進に対応できる設備とした(図-5)。

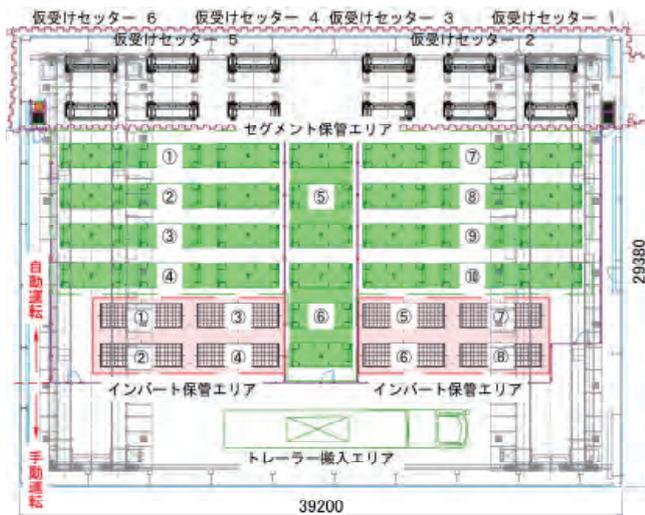


図-4 セグメントストックヤード平面図

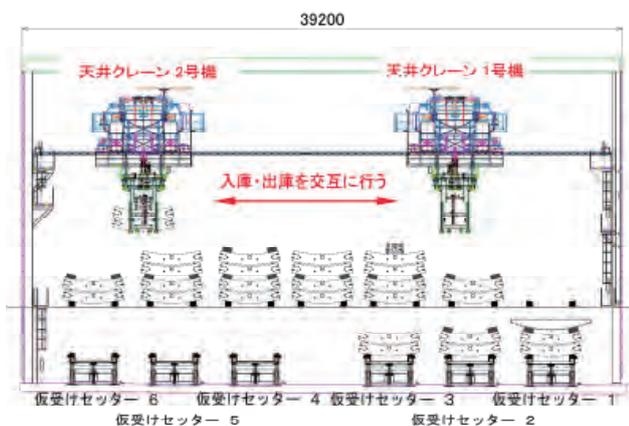


図-5 セグメントストックヤード縦断面図

表-2 40t 天井クレーン機械仕様

項目	内容	
定格	荷重	40 t
	巻上げ速度	0.172m/s
	横行速度	0.417m/s
	走行速度	0.417m/s
ワイヤーロープ		B種 IWRC 6×Fi(29) 8本掛け×20mm
構造	スパン	26.67m
	クレーンガード長さ	27.17m
	揚程	14.25m
	クレーンガード高さ	10.345m
原動機	巻上用	2×45 kW
	横行用	2×2.2 kW
	走行用	2×5.5 kW
ドラム	巻上ドラム	PCD φ 540mm
シーブ	巻上シーブ	PCD φ 558、400mm
	イコライザシーブ	PCD φ 400mm

3. 自動化設備

3.1 自動クレーン概要

(1) システム構成

自動天井クレーンのシステム構成を図-6に示す。自動化に必要な各種センサー、制御機器を搭載した天井クレーン・セグメント把持装置(セグメントグラブ)、搬送指示を出す管理システム、及び各設備からの信号を入出力する地上制御盤から構成される。

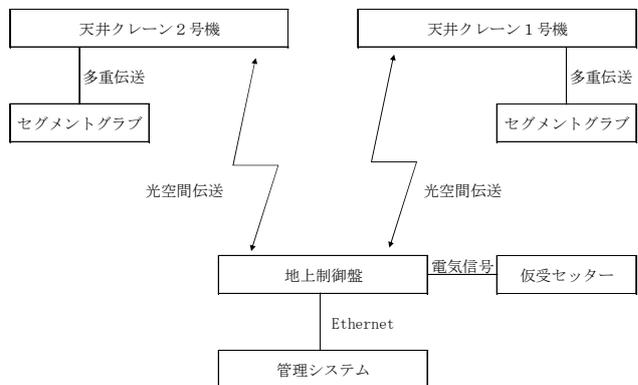


図-6 自動クレーンシステム構成図

(2) 自動化範囲

今回、トレーラーからのセグメント荷取り作業は手動とした。トレーラー及びセグメントの形状がそれぞれ異なり、位置決めが困難であること、トレーラーにより搬入されたセグメントは、損傷等がないかの検品作業が必要であり、そこに人が介在しなければならないことが理由である。

トレーラーから荷取りして保管エリアに移動後は、入庫・在庫管理・出庫を自動で行えるようにした。

セグメントグラブに搭載したセンサー配置図を図-9に示す。

掴みセンサーはセグメントをアームで挟み込んだことを検出し、在荷センサーはセグメントが爪に掛かっていることを検出する。両センサー共に、セグメントを確実に把持できていることを検出するために設置した。

懐衝突検出、下面衝突検出センサーは、位置決め異常時や予期せぬ障害物があった際に、セグメントグラブとセグメント・インバート又は障害物との接触を防止するためのものである。

開度検出器は、左右のアームのシリンダストロークを検出するために設置し、横行方向の位置決め補正に使用する(図-10)。特にトレーラーからの荷取りの手動運転時には、セグメントグラブの中心とセグメントの中心を厳密に合わせて把持することは不可能であり、左右のアームストロークに差が生じてしまう。その状態で搬送してしまうと、位置決めはセグメントグラブの中心を基準として行うため、セグメントの中心は目標位置からずれた状態となってしまう。これを防止するため、セグメント把持時の左右アームストロークを検出し、その差分だけ位置決め横行距離を補正できるようにした。

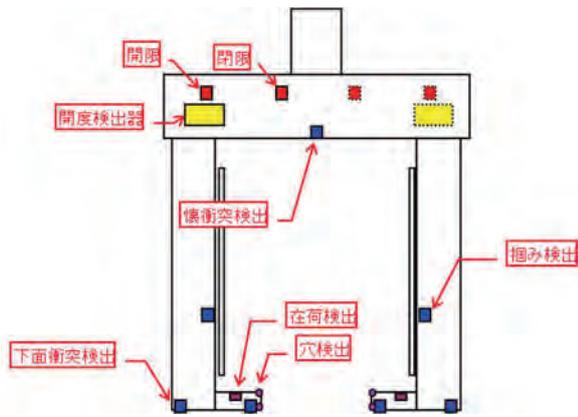


図-9 セグメントグラブセンサー配置図

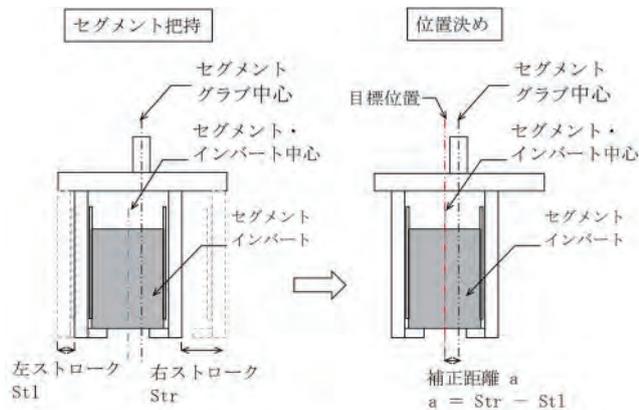


図-10 横行方向位置決め補正

3.4 管理システム

管理システム構成を図-11に示す。

測量システムは、トンネル線形の測量結果及び設計線形計画に基づいて、今後のセグメント割付計画を予想するものである。

測量システムから割付計画されたセグメントを工場に出荷注文することになるが、注文システムではセグメント工場への注文処理を行うことができると同時に、セグメント種類に応じたトレーラーへの積込順序を指定し、工場出荷時に順番通りにトレーラーへの積込みが行われたかどうかの確認ができる。

自動天井クレーンでは、トレーラー搬入されたセグメント情報とヤード内の在庫状況から、ヤード内の入庫場所を自動判断し保管する。また、割付計画に従って出庫すべきセグメントをヤード内から自動選定し、仮受セッターへ搬送する。

個々のセグメント及びインバートを識別するマーカーとして、図-12に示すカラーコードを採用した。工場にて製品種別を登録したカラーコードシールをセグメント本体側面に貼り付けておき、現場ではタブレット端末のカメラにてカラーコードを読み取り、搬入されたセグメント種類を自動天井クレーンに認識させる。カラーコードは、バーコードやQRコードと異なり、離れた位置から複数個同時に読み取りが可能であり、今回の段積みされた大型セグメントの識別には最適であった。

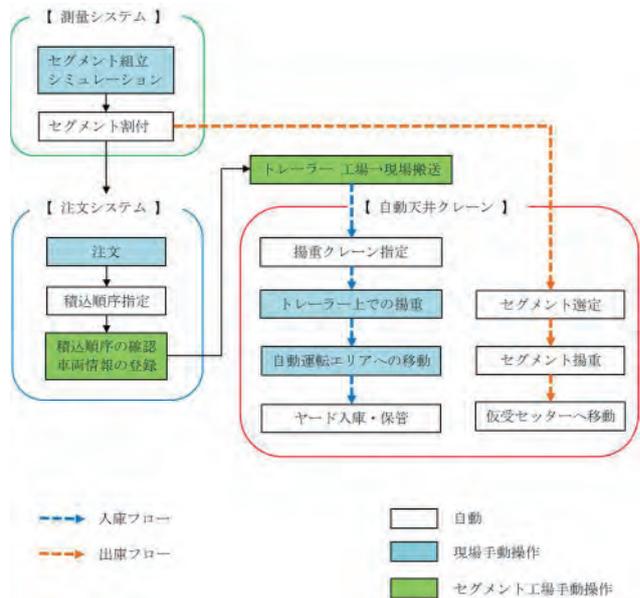


図-11 管理システム構成

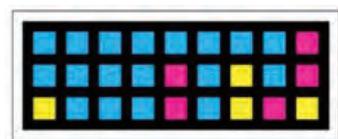


図-12 カラーコード

3.5 安全対策

人が自動運転中の天井クレーンに巻き込まれる等の事故を防止するために、自動運転エリアと手動運転エリアの境界には立入禁止柵を設けた。メンテナンス時等は自動運転エリアに人が入るため立入禁止柵の各所に開閉扉を設けたが、自動運転時の誤侵入を防ぐために扉には鍵付きの開閉検知センサーを設置した(図-13)。自動運転中に扉が開いた場合、天井クレーンの自動運転を停止する。さらに、自動運転エリアへの立入者は必ず開閉センサーの鍵を抜き、所有したまま自動運転エリアへ入る運用とすることで、立入者が自動運転エリアから退出するまでクレーンの自動運転を再開できないようにして安全性を高めた。

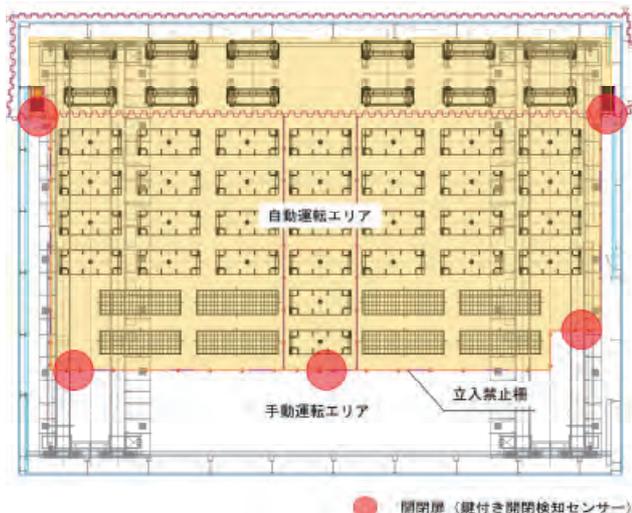


図-13 立入禁止柵及び開閉センサー付扉配置図

4. 運用実績

4.1 生産性向上

(1) 省人化と属人化の低減

自動天井クレーン導入の結果、セグメントストックヤード全体作業において人が行うのはトレーラーからセグメントを荷取りするのみであり、2人の作業員で行うことができた。自動天井クレーン未導入の場合、2台の天井クレーンにそれぞれ2人、仮受セッター部に2人、合計6人の作業員が必要であったと想定され、省人化による生産性向上を実現した。

また、入庫場所や出庫セグメント選定などの作業にかかる思考時間削減による労働時間短縮、専門知識や高度な操作技術を持たない者にも操作を担当させることができる属人化低減という部分でも生産性向上に大きく寄与している。

(2) 手戻りによるロスの削減

坑内に間違ったセグメントが運ばれてしまった場合、運搬したセグメントの入替が必要となり、その作業の間シールド掘進が停止する。それに伴い、掘進作業にかかわる人員の手待ちや材料・車両のキャンセルといったロスが発生し、本現場のよう

に規模が大きくなればその被害は甚大である。

自動天井クレーンによる出庫セグメント選定機能により、その手戻りを発生させることなく運用できている。出庫セグメント搬送ミスによる現場全体のロス削減することができた。

4.2 品質確保

±50mm以内という正確な位置決め精度を確保しつつ、各種センサーによる誤動作防止・人による誤操作防止が可能な自動搬送を実現し、これまでの運用の中でセグメントに割れや欠けといった損傷を発生させていない。品質確保の面においても大きく貢献できる設備を構築することができた。

4.3 サイクルタイム

入出庫サイクルタイムの実績を表-5に示す。

トンネル先端部でのセグメント1リングの組立時間は45minであり、セグメントストックヤードにおいても、45min/リング以内で入出庫ができるように計画をした。運用においても、計画を上回る入出庫時間を達成し、サイクルタイムについても問題ない設備とすることができた。

表-5 入出庫サイクルタイム実績

	計画	実績
1リング入庫時間 (インバート含む)	45min	40min
1リング出庫時間 (インバート含む)	31min	30min

4.4 安全性向上

自動運転作業においては、天井クレーン(機械)及びセグメント・インバート(吊荷)と人が完全に分離されているため人災の可能性が無く、安全性向上にも役立っている。

5. 今後の課題

今回はトレーラーからの荷取り作業を手動運転としたが、近年の技術進歩は著しく、AIによる画像認識技術を用いてトレーラー上のセグメント位置を認識する等により、完全自動化及びより高度な管理システムの構築が可能であると考えられる。

6. おわりに

シールド工事のセグメント入出庫作業においては初事例となる天井クレーンを使用した自動搬送を導入し、現場の生産性・安全性を向上し、品質確保にもつながる設備であることを実証できた。今回開発した自動天井クレーンは異なる幅・形状のセグメントにも対応可能であり、同種工事への適用も可能であると考えられる。

今後も少子高齢化による人材不足問題に対応すべく、建設現場作業のさらなる効率化に取り組んでいく所存である。

23. 切盛土の日々の出来形管理に簡易UAV測量を適用

～ 測量、解析時間を 1/3 に短縮 ～

株式会社フジタ

○ 松岡 祐仁
野末 晃
上原 広行

1. はじめに

国土交通省（以下、国交省と称す）が、2016年 から導入した「i-Construction」の3本柱の一つである土工への「ICTの全面的な活用」により、起工測量、及び出来形・出来高計測にレーザースキャナーや無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle：以下、UAVと称す）が活用されている。特に、UAVの高機能、及び低価格化によりUAV空中写真測量が急速に普及しており、日常出来高管理への活用も期待されている。しかし、現状では測量事前準備や飛行操作技術、データ処理の課題から専門業者に委託するケースが主であり、UAV測量による日常出来高管理を現場職員が行うまでには至っていない。

本論文では、これらの課題を改善し、現場職員でUAV測量が容易に行える当社独自の簡易UAV測量システム「デイリードローン®」（図-1）を開発した経緯、及び本システムをRTK-GNSS搭載UAVに適用した「デイリードローン®RTK」の現場検証の結果を報告する。

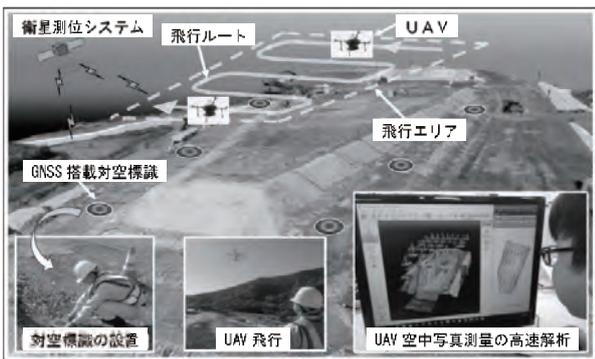


図-1 「デイリードローン®」概念図

2. デイリードローン®開発

2.1 デイリードローン®開発の経緯

UAV空中写真測量は、「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」（国交省国土地理院）、「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」（国交省）に準じて運用される。図-2に示す実施手順¹⁾の網掛けした工程は、特に労力と

時間を要するため、日常出来高管理の現場活用への阻害要因となっている。そこで、現場での数量算出（出来高土量等）利用を前提とした事前準備の改善、飛行・解析条件の最適化を図ることとした。

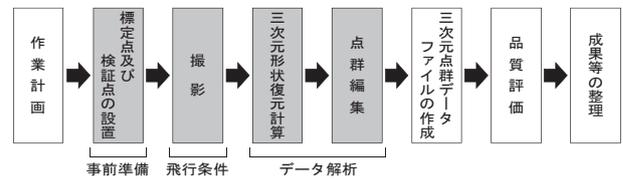


図-2 UAVによる写真測量の実施手順

2.2 対空標識

(1) 対空標識設置の課題点

「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」の規定²⁾により、図-3に示す2ha（100×200m）の範囲に対空標識を設置する場合、標定点7点以上、検証点4点以上が必要となる。この設置には、TSを用いた場合、おおよそ2人×4時間を要する。また、施工範囲内に設置する対空標識は、工事の進捗に合わせて設置・撤去の繰り返しが必要となる。

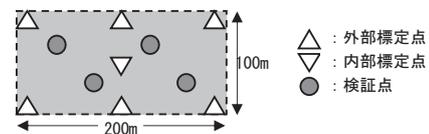


図-3 対空標識の配置例

(2) エアロボマーカー®の導入

対空標識としてGNSSスタティック測位処理機能を持つエアロボマーカー®（図-4）により、課題解決を図ることとした。当初、マーカーの測位処理は近傍の電子基準点を基準局として座標（世界測地系）を求める仕様のみであったが、我々の要望により現場基準点を基準局として処理する仕様を追加し、現場内座標と整合が取れるようにした。

表-1に示す3～4箇所のエアロボマーカー®の座標値を計6回計測した結果より、「UAVを用いた

公共測量マニュアル(案)」に基づく許容範囲(2回計測した誤差)のX・Y成分20mm, Z成分30mm³⁾を満たすことが確認できた。

エアロボマーカ[®]は、対空標識として機能し、起動後60分程度でその位置の座標を取得するため、その間にUAVの写真撮影が可能である。また、現場基準点での測位処理は、当初仕様(電子基準点)の半日から約20分に短縮される。これにより、従来4時間程度要していた対空標識設置・測量作業を1/4の1時間に低減することが可能となった。

表-1 エアロボマーカとTS測量の誤差



	誤差 (mm)		
	X	Y	Z
最大値	10.0	26.0	19.0
最小値	-18.0	-27.0	-26.0
平均値	-2.8	-7.0	-3.8
標準偏差	6.2	14.2	14.9

図-4 エアロボマーカ[®]

2.3 三次元点群データ解析時間の短縮

デイリードローン[®]では、i-Construction基準における数量算出(出来高土量等)の基準値±100mm⁴⁾を満足するとともに、画像解析時間を現行の5時間から2時間に短縮することを目標としている。目標達成のため、画像解析時間に大きく寄与する「A. 写真ラップ率」、「B. 地上画素寸法」、「C. 点群密度」、「D. 標定点の設置間隔」の4ケースについて条件を変更しながら検証した結果を表-2~5に示す。なお、UAVはPhantom 4 Advanced[®]、解析ソフトはPix4Dmapper[®]を使用した。

表-2 A. 写真ラップ率の検証(写真撮影方法)

飛行エリア5ha, 飛行高度73m, 地上画素寸法20mm

i-con基準	番号	条件		検証点精度			写真枚数(枚)	解析時間(分)
		写真ラップ率	平均二乗誤差(mm)	X	Y	Z		
	①	90%	× 60%	5.1	1.3	8.6	153	60
○	②	80%	× 60%	2.1	11.2	19.0	86	30
	③	70%	× 60%	4.6	13.4	22.0	59	20

表-3 B. 地上画素寸法の検証(写真撮影方法)

飛行エリア5ha, ラップ率80%, 60%

i-con基準	番号	条件		検証点精度			飛行高度(m)	写真枚数(枚)	解析時間(分)
		地上画素寸法(mm)	平均二乗誤差(mm)	X	Y	Z			
	①	10	-4.3	6.3	15.4	36	365	110	
○	②	20	2.1	11.2	19.0	73	86	30	
	③	30	10.7	12.8	40.3	110	37	15	

表-4 C. 点群密度の検証(解析時間への影響)

飛行エリア5ha, ラップ率80%, 60%, 地上画素寸法20mm, 写真枚数86枚

i-con基準	番号	点群密度	検証点精度			点群数(万点)	メッシュ間隔(cm)	解析時間(分)
			平均二乗誤差(mm)	X	Y			
○	①	高密度	2.1	11.2	19.0	2000	5	120
	②	中密度	2.1	11.2	19.0	350	10	60
	③	低密度	2.1	11.2	19.0	90	20	30

表-5 D. 点群密度の検証(検証点精度への影響)

飛行エリア5ha, ラップ率80%, 60%, 地上画素寸法20mm

i-con基準	番号	条件		検証点精度		
		マーカ設置間隔外縁部(m)	平均二乗誤差(mm)	X	Y	Z
○	①	100	2.1	11.2	19.0	
	②	200	64.2	18.3	118.6	

以上の検証結果から決定した「デイリードローン[®]」における当社の独自運用基準を表-6に示す。

表-6 「デイリードローン[®]」飛行解析運用基準

	i-Construction基準		デイリードローン基準
	出来形計測	数量計算	数量計算
写真ラップ率	同一コース80% 隣接コース60%	同一コース80% 隣接コース60%	同一コース80% 隣接コース60%
地上画素寸法	10mm	20mm	20mm
点密度	10cm	50cm	20~25cm
標定点間隔	外縁100m	外縁100m	外縁100m
要求精度	±50mm	±100mm	±50mm

2.4 現場検証

(1) 出来高土量の精度検証

デイリードローン[®]を用いた出来高数量の精度検証を実施した。土量算出は、起工測量と現況測量結果から作成されたTINデータより平均断面法により行った。2haの施工区域において、土量変化率を考慮したダンプ搬入土量との比較を表-7に示す。

表-7 デイリードローン[®]-ダンプ集計 出来高土量比較

		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
		10月26日	11月13日	11月14日	11月15日	11月21日	11月24日
①デイリードローン	・検証点精度 X(mm)	-4.0	3.0	-	14.0	9.0	-2.0
	Y(mm)	1.0	27.0	-	9.0	8.0	-3.0
	Z(mm)	45.6	0.0	-	15.1	-30.1	-21.5
	最大誤差(mm)	45.6	27.0	-	15.1	30.1	21.5
	・集計土量(累計)(m ³)	51,352	73,299	73,594	75,038	78,037	79,609
②ダンプ集計(累計)※(m ³)	49,699	71,321	72,110	73,026	75,804	77,221	
出来高土量比較	(①-②)(m ³)	1,653	1,978	1,484	2,012	2,233	2,388
	(①-②)/①(%)	3.2%	2.7%	2.0%	2.7%	2.9%	3.0%

※ダンプ土量は変化率を考慮

土量較差は最大で約3.2%となり、5%以内となった。検証点においても最大誤差45.6mm(Z方向)と数量計算基準±100mm⁴⁾はもとより出来形計測基準相当±50mm⁵⁾を満足する結果となった。

(2) 測量、解析に要する時間の検証

デイリードローン[®]による2.0haの測定時の事前準備~解析に要する時間の検証を実施した。作業内容、及び時間は表-8に示すとおり、従来の1/3の時間での土量算出が可能となった。

表-8 作業時間の従来比較

	適用機器、ソフト	従来測量・解析時間	デイリードローン [®] 測量・解析時間
		事前	GNSS搭載対空標識
解析	① 対空標識計測		
	② UAV写真撮影	(0.5h)	(0.5h)
	③ 標識紐付け		0.5h
	④ 点群処理		0.5h
	⑤ 点群編集		0.5h
	⑥ 三次元処理		0.5h
時間合計		9.0h	3.0h(従来の1/3)

3. RTK-GNSS 搭載 UAV の導入

2018 年末、2 周波 GNSS 搭載の Phantom 4 RTK® の発売が開始された。従来の Phantom 4 Advanced® 等と同等の取り扱い易いサイズながら、RTK、VRS、及び PPK の各 GNSS 測位方式に対応することから、写真撮影位置精度の向上が期待できる。

デイリードローン® と組み合わせると、計測精度の向上、対空標識の削減により、システムの簡略化やより多くの現場への適用可能性が広がることから、「デイリードローン® RTK」として運用を開始するとともに精度検証を実施した。

3.1 標定点削減時の精度検証

比較的平坦な造成現場に計 9 個の対空標識を設置した 100×200m の計測領域を設定し、デイリードローン® RTK の精度検証を実施した。SfM (Structure from Motion) 解析時に、標定点として設定する対空標識の配置形状、数を変更して、残りを検証点として座標誤差を確認した。

(1) 標定点レス時の精度

対空標識をすべて検証点とし、評定点を設置しない場合の精度の確認を実施した。フライトは、飛行高度 73m (地上画素寸法 20mm) で① RTK 機能を使用しない「単独 GNSS 測位」、② 「RTK-GNSS 測位」、③ 「VRS-GNSS 測位」、④ 「PPK-GNSS 測位」の計 4 ケース実施した。各ケース解析処理後の検証点座標誤差を表-9 に示す。

表-9 標定点レス時の検証点座標誤差

① 単独GNSS測位				② RTK-GNSS測位			
検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)	検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)
0	0.297	0.050	0.433	0	-0.001	0.009	-0.572
1	-	-	-	1	0.023	0.018	-0.589
2	0.432	-0.195	0.589	2	-0.015	0.020	-0.567
3	0.236	-0.166	0.145	3	0.018	-0.012	-0.577
4	0.320	0.243	0.908	4	0.020	0.003	-0.588
5	0.374	-0.421	0.408	5	0.014	-0.002	-0.542
6	0.626	-0.236	1.154	6	0.009	-0.007	-0.576
7	0.479	0.015	0.869	7	0.020	0.017	-0.567
8	0.350	-0.065	0.468	8	0.034	0.001	-0.593
平均 (m)	0.389	-0.097	0.622	平均 (m)	0.014	0.005	-0.575
標準偏差 (m)	0.114	0.190	0.308	標準偏差 (m)	0.014	0.011	0.015
平均二乗誤差 (m)	0.406	0.214	0.694	平均二乗誤差 (m)	0.019	0.012	0.575

③ VRS-GNSS測位				④ PPK-GNSS測位			
検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)	検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)
0	0.038	-0.009	-0.258	0	0.005	-0.004	-0.712
1	-	-	-	1	-	-	-
2	0.000	-0.017	-0.255	2	-0.001	-0.009	-0.708
3	0.015	-0.013	-0.244	3	-0.006	-0.032	-0.685
4	0.024	-0.001	-0.241	4	-0.030	-0.001	-0.683
5	-0.006	-0.039	-0.250	5	-0.005	-0.044	-0.706
6	-0.013	-0.015	-0.231	6	0.002	-0.001	-0.700
7	0.013	-0.011	-0.236	7	-0.006	0.017	-0.700
8	0.011	-0.015	-0.262	8	-0.011	-0.004	-0.713
平均 (m)	0.010	-0.015	-0.247	平均 (m)	-0.007	-0.010	-0.701
標準偏差 (m)	0.016	0.010	0.010	標準偏差 (m)	0.010	0.018	0.011
平均二乗誤差 (m)	0.019	0.018	0.247	平均二乗誤差 (m)	0.012	0.021	0.701

①、③、④の標定点1は欠測

①単独 GNSS 測位においてメートルオーダーの誤差が発生した。②～④の 3 ケースにおいては、水平 (X、Y 方向) 誤差が±50mm 以内に収まるのに対し、鉛直 (Z 方向) 誤差が顕著に出たが、標準偏差はいずれも 10～15mm であり、Z 方向に一定のオフセットがあるものの非常に高い精度で解析ができていたといえる。

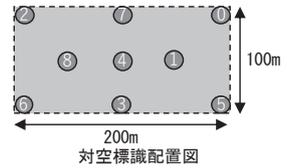
(2) 標定点設定時の精度

次にデータ通信圏外でも運用可能で解析フローも従来と同じことから、様々な現場への適用が期待できる RTK-GNSS 測位時に標定点を追加した場合の検証を実施した。代表的なケース (標定点数 1~3) 解析処理後の検証点座標誤差を表-10 に示す。

表-10 RTK-GNSS 測位 標定点設定時の検証点座標誤差

標定点数: 1 (検証点数: 8)				標定点数: 2 (検証点数: 7)				標定点数: 3 (検証点数: 6)			
検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)	検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)	検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)
0	-0.008	-0.001	0.011	0	-0.008	-0.011	0.015	0	-0.009	0.020	-0.002
1	0.008	0.011	-0.005	2	-0.033	0.024	0.031	1	0.016	0.023	-0.014
2	-0.022	0.020	0.027	3	-0.011	-0.021	0.036	3	0.018	-0.007	-0.027
3	-0.001	-0.013	0.021	4	-0.004	-0.004	0.002	4	0.019	0.002	-0.040
5	-0.001	-0.012	0.061	5	-0.006	-0.026	0.077	6	0.016	-0.001	-0.048
6	-0.004	0.001	0.015	6	-0.019	0.004	0.033	7	0.017	0.010	-0.014
7	0.007	0.013	0.022	7	0.003	0.013	0.019	8	0.038	-0.003	-0.046
8	0.019	0.001	-0.004	平均 (m)	-0.011	-0.003	0.030	平均 (m)	0.017	0.003	-0.036
平均 (m)	0.000	0.002	0.019	標準偏差 (m)	0.011	0.017	0.022	標準偏差 (m)	0.012	0.008	0.012
標準偏差 (m)	0.011	0.011	0.019	平均二乗誤差 (m)	0.016	0.017	0.037	平均二乗誤差 (m)	0.021	0.008	0.038
平均二乗誤差 (m)	0.011	0.011	0.027								

標定点数: 3 (検証点数: 6)				標定点数: 3 (検証点数: 6)			
検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)	検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)
0	-0.022	0.024	0.001	0	-0.009	0.020	-0.002
1	0.004	0.023	-0.013	1	0.016	0.023	-0.014
3	0.010	-0.009	0.000	3	0.018	-0.013	0.003
6	0.005	-0.004	-0.024	4	0.012	0.002	-0.007
7	-0.003	0.009	0.020	7	0.005	0.015	0.012
8	0.025	-0.007	-0.013	8	0.025	-0.006	-0.014
平均 (m)	0.003	0.006	-0.005	平均 (m)	0.011	0.007	-0.004
標準偏差 (m)	0.014	0.014	0.014	標準偏差 (m)	0.011	0.013	0.009
平均二乗誤差 (m)	0.014	0.015	0.015	平均二乗誤差 (m)	0.016	0.015	0.010



標定点を追加した結果、標定点数 1~3 個のいずれのケースにおいても水平、鉛直の平均二乗誤差は 40mm 以下となったが、標定点数 1、2 個のケースでは 1 点の鉛直誤差が±50mm 以上となった。3 点以上標定点を設置した場合、すべてのケースで

誤差が±50mm以下となった。

今後、より多くのデータを蓄積した上で定量的な評価が必要であるが、比較的平坦な地形上での測量では、標定点3点以上によるデイリードローン@RTKの運用が適切であるといえる。

3.2 他の測量法との出来高土量比較

TS測量、UAV測量(デイリードローン@RTK)、及び地上型LS測量(レーザースキャナー)による出来高数量(土量)の比較検証を実施した。デイリードローン@RTKは、領域の四隅と中央部に計5箇所の評定点を設定し、地上画素寸法20mmとなる飛行高度73mでの結果である。検証点9点の平均二乗誤差は、X:10mm, Y:15mm, Z:17mmとなり、個々の値も±50mm以内となった。

TS測量の10断面に合わせてUAV、地上型LSのTINに断面を設定し、それぞれの土量を平均断面法により求めた結果を表-11に示す。

表-11 異なる測量方法による土量比較(平均断面法)

断面	盛土土量 (m ³)		
	TS測量	地上型LS測量	デイリードローン@RTK
1			
2	772.6	746.6	747.5
3	12542.2	12413.8	12444.3
4	14412.2	13364.0	13465.3
5	1078.9	962.7	970.8
6	810.3	782.7	786.0
7	18058.0	18380.0	18437.5
8	12206.1	12574.9	12600.3
9	4596.5	4571.6	4569.0
10	572.3	545.1	544.2
	65049.1	64341.5	64564.7
土量較差 (m ³)	707.6	0.0	223.3
土量較差 (%)	1.10%	-	0.35%

地上型LSを基準とした場合の土量較差は、TS測量+1.10%、デイリードローン@RTK+0.35%であった。地上型LSとデイリードローン@RTKの較差は、計測面積で割り戻すと標高差で平均5mmの違いとなり非常に良い一致となった。

3.3 デイリードローン@RTK 現場適用例

出来高計測以外にデイリードローン@RTKを活用した事例を紹介する。当該地は、図-5に示す採石場跡地で全体高低差が100mに及ぶ斜面である。浮石等があるため、安全面から人が立ち入ったのTSや地上型LSでの測量は困難である。立ち入ったの測量が可能であったとしても機器の盛替え、昇降に多くの時間を要することが予想される。

計測範囲を囲む4点に評定点を設置し、デイリードローン@RTKにより、現況形状の計測を実施した。検証点6点それぞれのX, Y, Zの誤差はそれぞれ±50mm以内、全体の平均二乗誤差もX:7.3mm, Y:12.7mm, Z:16.8mmとなり、高低差のある地形でも出来形管理基準±50mm⁵相当の精度

で計測を行うことができた。得られたデータは、断面の切り出し、施工計画、協議用資料として活用した。

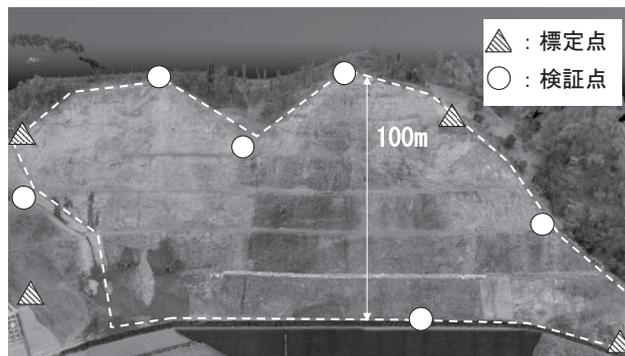


図-5 長大斜面での計測事例

4. おわりに

「デイリードローン@」は、i-Construction 出来高数量算出と同等の飛行・解析基準で、出来形計測基準精度を満足する簡易 UAV 測量システムである。その特徴を以下に示す。

- ① 対空標識にエアロボマーカー®を採用することで、設置・測量時間を1/4に低減
- ② 当社独自の飛行・解析基準の設定により、解析時間を2/5に低減
- ③ 作業時間が従来比1/3となる即日測量を実現
現在「デイリードローン@」は、造成現場等での出来高計測や土量変化率の把握による土配計画、着工前等の現況測量に活用されており、現場職員による運用拡大を進めている。

また、「デイリードローン@RTK」導入により、評定点数を削減した上で従来と同等以上の精度確保が可能となった。今後の運用とともに更なる検証を重ね評定点の配置、ラップ率等システムの最適化を図る予定である。

今後は、低コストで導入可能な「デイリードローン@」、現地条件が厳しく、精度が要求される場合の「デイリードローン@RTK」の両輪により、土木分野に加え建築分野へも適用範囲の拡大を図り、現場の生産性向上に資する技術として発展させていく所存である。

本論文の作成にあたり、ご指導、ご協力を頂いた関係各位に対し深謝するとともに、本論文が今後の現場測量の省力化と技術開発の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1), 2), 3) 国土交通省国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル(案), p.2, 23, 24, 2017.3
- 4), 5) 国土交通省：空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理基準要領(土工編)(案), pp.25~29, 33-36, 2018.3

24. 各種UAV測量機器による出来形の測量精度の比較検証について

○株式会社熊谷組 神崎 恵三

1. はじめに

UAVを用いた測量は、UAVやデジタルカメラの性能向上、SfMソフトウェアの普及により、現場での土工管理ツールとして摘要事例が増加している。現在、多くの現場で実績が増えつつある事例は、比較的低価格のUAVを使用し、写真測量から概算土量を算出して出来高管理、進捗管理を行うものである。ただ、実際の測量精度がどの程度のものかという疑問が残っているのが現状であった。今回、下記の5種類のUAV測量機器(3基は無人航空機搭載型レーザスキャナ,2基は空中写真測量(無人航空機))を使用して各種ケースで飛行させ、出来形の測量精度の比較検証を実施することとした(図-1)。

2. 実証実験目的

本実証実験の目的を以下に示す。

- I. 5種類のUAVをできるだけ均等な条件で飛行させ、任意断面における垂直較差を比較検証する。
- II. 同じUAVを異なる飛行高さで飛行させ、法面の法肩と法尻位置で計測を行い、対地高度の違いによる解像度の影響を比較検証する。
- III. 5種類のUAVを同条件で飛行させ、任意範囲における土量を算出、比較検証する。

図-1 各種UAV使用機器一覧

無人航空機搭載型レーザスキャナ			空中写真測量(無人航空機)	
①Ranger Series (RIGEL VUX-1)	②Ranger Series (RIGEL miniVUX-1)	③Alpha Series (Velodyne VLP-16)	④MATRICE600pro (Sony α 7R)	⑤Phantom4Pro (DJI製)
最大測定距離920m	最大測定距離250m	最大測定距離100m	カメラ有効画素数 約3640万画素	カメラ有効画素数 約2000万画素
最短距離 3m	最短距離 3m	最短距離 1m	シャッタースピード 1/8000~30秒	シャッタースピード 1/8000~8秒
測定精度 10mm	測定精度 15mm	測定精度 30mm	ISO感度 AUTO(100-6400)	ISO感度 AUTO(100-3200)
有効測定レート 500,000測定/秒	有効測定レート 100,000測定/秒	有効測定レート 300,000測定/秒	センサーサイズ 36mm×24mm	センサーサイズ 13.2mm×8.8mm
 	 	 	 	

3. 実証実験場所

実証実験は、処分場現場の法面 2 箇所を使用し
て実施した。法面 1 に対して断面 1 を、法面 2
に対して断面 2 を任意に設定した。法面の 4 隅に
標定点を設置し、検証に用いるデータは、この標定点
に整合させた (図-2)。

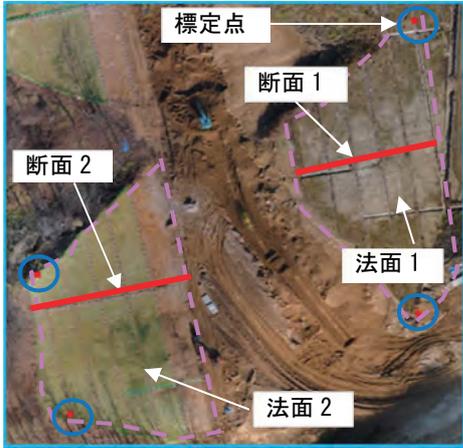


図-2 法面と断面位置図

4. 飛行パターンと比較ケース

4.1 飛行パターン

図-2 の法面 1, 2 に対して各 UAV 機器を表-1 の
飛行高度で飛行を実施した。高度は法面からの高
さで、法面に平行に飛行し、飛行ルートはオー
verラップ 90%, サイドラップ 60% とした。実証実験
は、断面 1, 2 に対し、別途 TS で測量した法面形
状を基準法面とし、それぞれの UAV 機器で取得
された LP 点群と SfM 点群から作成された断面
を法面上に重ね合わせ、比較検証した。

表-1 法面における各機材の飛行高度

使用機器	法面1・2 飛行高度	備考
①VUX-1	30m 50m 100m	計測点密度10cmに1点以下
②miniVUX-1	30m 50m 100m	"
③VLP-16	30m 50m 100m	"
④α7R	20m 30m 60m	地所解像度:1cm以下
⑤Phantom4Pro	20m 30m 60m	地所解像度:約0.5cm~1.6cm

4.2 比較ケース

比較検証ケースは、以下のとおりである。

I. 垂直較差による比較

法面 1 の断面 1, 法面 2 の断面 2 において、各 UAV 機器①~⑤を飛行高度 30m で飛行した結果を比較した (図-3)。

II. 対地高度の違いによる比較

断面 1, 2 において、各 UAV 機器①~⑤毎を飛行高度 3 ケース (30m, 50m, 100m, or 20m, 30m, 60m) で飛行して結果を比較した (図-4)。

III. 土量計算結果による比較

土量の比較は、法面 1 付近の任意エリアを設定し、各 UAV 機器①~⑤の飛行高度 30m のケースで比較した。

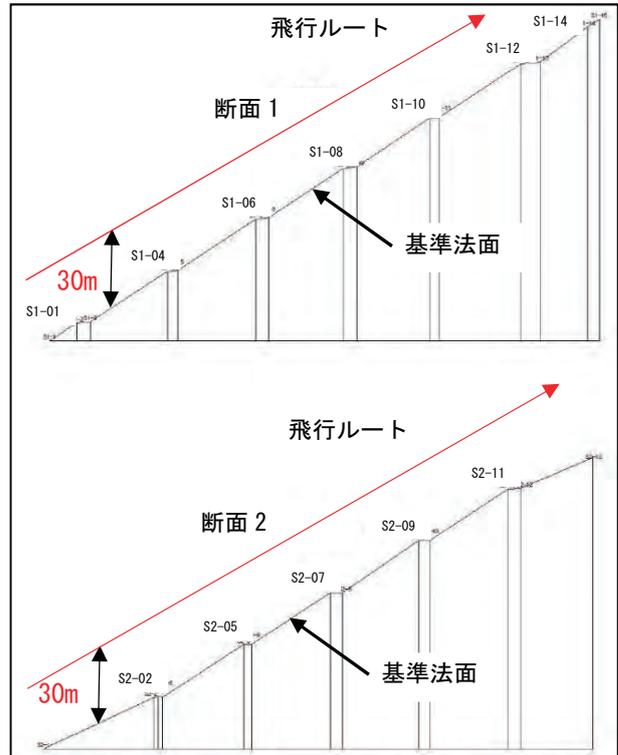


図-3 比較ケース I 飛行断面図

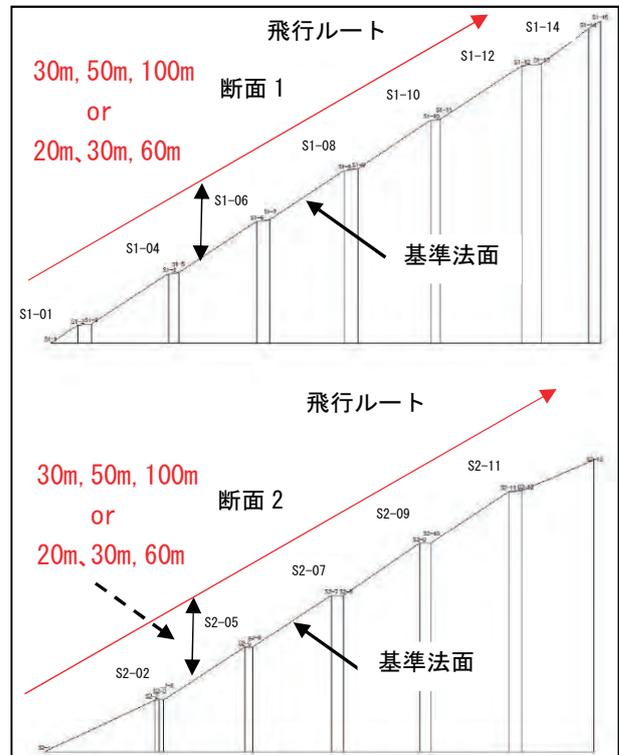


図-4 比較ケース II 飛行断面図

5. 測量精度の比較検証結果について

5.1 実測断面との垂直較差の比較（断面1）

T Sで測量した実測断面（基準法面）と、それぞれの手法で取得されたL P点群とS f M点群から作成された断面を比較検証し、断面形状の垂直較差を比較した。

L P点群はG N S Sローバーで計測した調整用基準点成果に整合させたデータを使用し、画像データについても、G C Pを使用して現地に整合させたS f M点群を使用した。

比較検証結果として、L P点群では、①V U X - 1、②m i n i V U X - 1、③V L P - 1 6となるにつれて、断面形状のばらつきが目立つ傾向にあるが、どの手法においても断面形状を捉えていることがわかる（図-5～図-7、図-10）。

S f M点群では、どちらの手法でも実測断面の形状をよく捉えていることが分かる（図-8～図-10）。

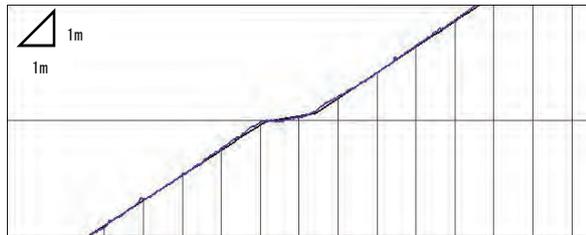


図-5 ①VUX-1対地 30m断面抜粋

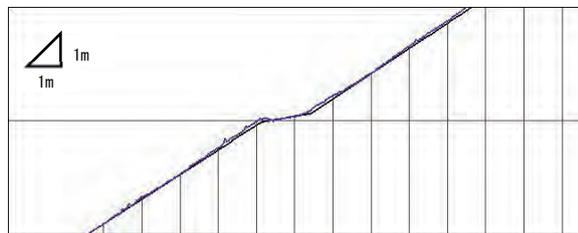


図-6 ②miniVUX-1対地 30m断面抜粋

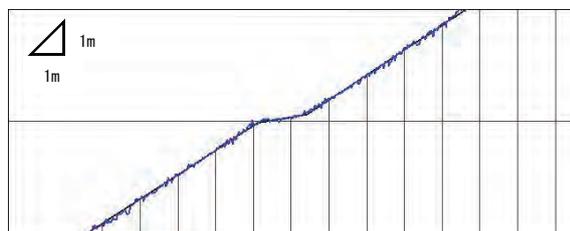


図-7 ③VLP-16対地 30m断面抜粋



図-8 ④alpha 7R対地 30m断面抜粋



図-9 ⑤Phantom4Pro 対地 30m断面抜粋

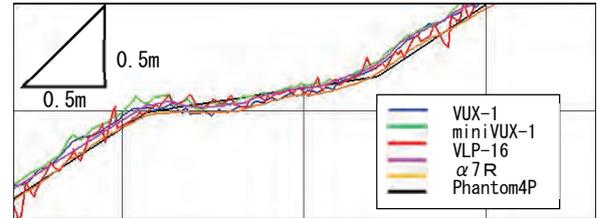


図-10 断面1の各手法統合断面

実測点とL P点群及びS f M点群から取得した近似点の標高較差を比較した。結果、図-11及び表-2に示す結果となった。比較した近似点のほとんどは実測点より高い傾向にあり、m i n i V U X - 1は平均値が0.083mと他と比べ高い値であるが、どの手法においても標準偏差が0.05m以内と高精度であることがわかった（図-11、表-2）。

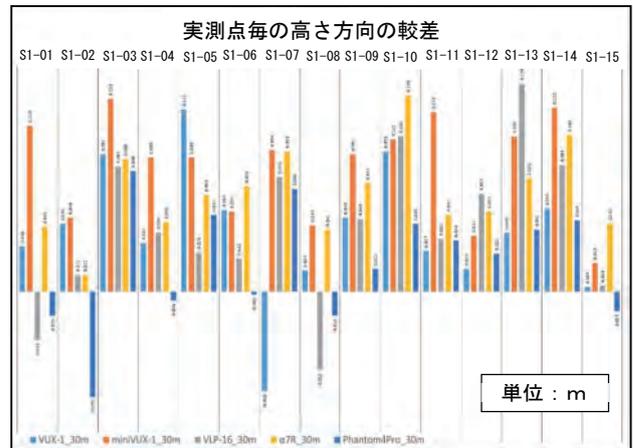


図-11 各実測点との標高差比較

表-2 各実測点の平均値と標準偏差

	単位(m)				
	VUX-1_30m	miniVUX-1_30m	VLP-16_30m	alpha 7R_30m	Phantom4Pro_30m
S1-01	0.030	0.110	-0.032	0.043	-0.016
S1-02	0.045	0.049	0.011	0.011	-0.070
S1-03	0.091	0.128	0.083	0.088	0.080
S1-04	0.032	0.089	0.039	0.046	-0.006
S1-05	0.121	0.089	0.026	0.064	0.051
S1-06	0.054	0.053	0.022	0.070	-0.002
S1-07	-0.066	0.094	0.076	0.093	0.068
S1-08	0.014	0.044	-0.052	0.041	-0.016
S1-09	0.049	0.091	0.048	0.072	0.015
S1-10	0.093	0.101	0.103	0.130	0.045
S1-11	0.027	0.119	0.035	0.051	0.034
S1-12	0.015	0.037	0.065	0.053	0.025
S1-13	0.039	0.103	0.138	0.075	0.041
S1-14	0.055	0.122	0.084	0.104	0.047
S1-15	0.003	0.019	0.004	0.045	-0.013
平均	0.040	0.083	0.043	0.066	0.019
標準偏差	0.044	0.034	0.050	0.030	0.039

5.2 対地高度の違いによる比較（断面2）

各UAV機器①～⑤を飛行高度3ケース（①～③は30m, 50m, 100m, ④と⑤は20m, 30m, 60m）で飛行して結果を比較した。

LP点群では、VUX-1の断面は、高度による影響が見られないのに対して、その他のLP点群は、高度ごとに形状が異なることがわかる。また、側溝の形状についても再現性が異なる（図-12～図-14）。

SfM点群では、形状の違いは見られず、0.05m程度の高さ方向の違いが見られるが、低高度のものは、側溝の形状が再現までできており、高高度になるにつれて側溝の再現性が難しくなり、丸みを帯びた実際の地形とは異なる結果となっている（図-15, 図-16）。

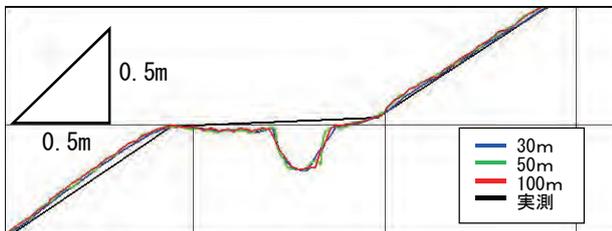


図-12 ①VUX-1対地高度別比較断面抜粋

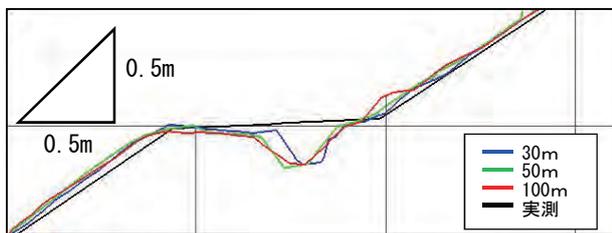


図-13 ②miniVUX-1対地高度別比較断面抜粋

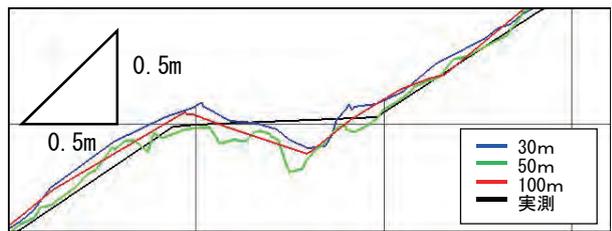


図-14 ③VLP-16対地高度別比較断面抜粋

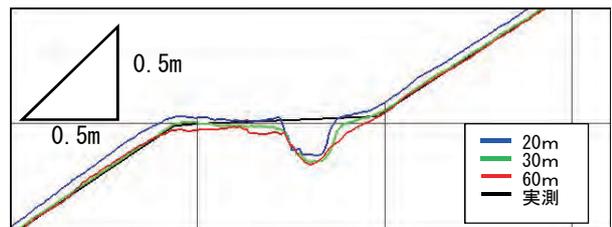


図-15 ④alpha7R対地高度別比較断面抜粋

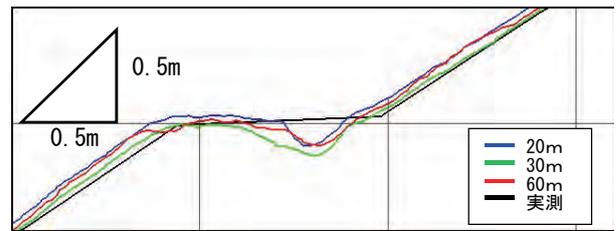


図-16 ⑤Phantom4pro 対地高度別比較断面抜粋

5.3 土量算出結果の比較

法面1の断面1付近にてエリアを設定し、土量計算の算出結果を比較した（図-17）。

算出方法は、現地で取得した断面1の実測点の上端と下端を結んだ一定勾配の斜面から仮想法面を作成し（図-18, 図-19）、作成した仮想法面と各手法の対地30m高度のLP点群, SfM点群から作成した0.1m格子間隔のグリッドデータの差分から土量を算出した。5.1の結果から、VUX-1の値が実測断面との較差が少ない事がわかったため、VUX-1で算出した土量の値を基準として土量の比較を実施した。



図-17 土量算出結果比較箇所

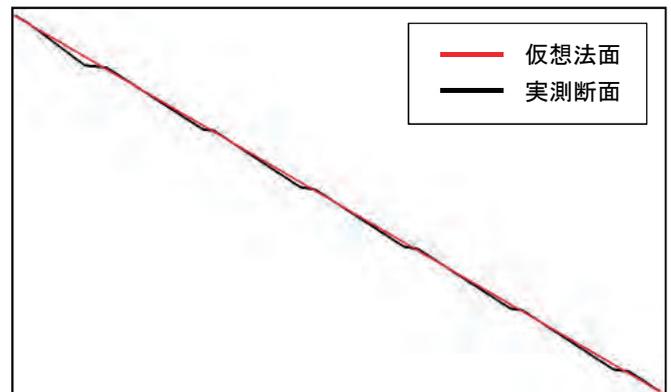


図-18 作成した一定勾配法面

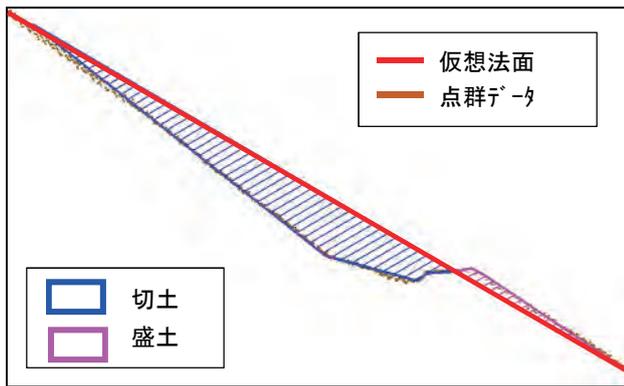


図-19 土量算出結果イメージ図

土量算出結果を表-3 にまとめる。結果より、①VUX-1の盛土と切土の体積差分が -324.8m^3 に対して、④ $\alpha 7R$ が 313.3m^3 、⑤Phantom4Proは -402.4m^3 で、VUX-1との較差は $\alpha 7R$ では約 11m^3 、Phantom4Proでは約 77m^3 となった。これは、SfM点群のばらつきが少ないことや、 $\alpha 7R$ のように、側溝の形状を再現できていないことが大きな影響を与えていると考えられ、SfM点群による土量算出においてもLP点群と同様の土量算出が可能であることがわかった。

表-3 土量算出結果一覧

	①VUX-1	②miniVUX-1	③VLP-16	④ $\alpha 7R$	⑤Phantom4Pro
比較範囲面積 (m ²)	1970.6	1970.6	1970.6	1970.6	1970.6
盛土体積 (m ³)	93.1	117.8	62.9	92.0	63.8
切土体積 (m ³)	-417.9	-362.0	-505.5	-405.3	-466.2
体積差分 (m ³)	-324.8	-244.2	-442.6	-313.3	-402.4
VUX-1との 体積の差 (m ³)	—	-80.6	117.8	-11.5	77.6

5.4 実証実験まとめ

(1) 垂直較差の比較

5.1で検証した近似点との標高較差の比較検証(法面1,法面2)から最大較差,最小較差,平均値,標準偏差をまとめた結果を表-4に示す。

表-4 垂直方向較差集計(対地30m)

単位(m)	①VUX-1	②miniVUX-1	③VLP-16	④ $\alpha 7R$	⑤Phantom4Pro
最大較差	0.121	0.128	0.138	0.13	0.084
最小較差	-0.066	0.019	-0.052	0.007	-0.085
平均	0.029	0.066	0.054	0.048	0.003
標準偏差	0.037	0.035	0.051	0.032	0.049

①VUX-1と④ $\alpha 7R$ は平均値や標準偏差の結果から,同等の精度であると考えられる。②miniVUX-1も標準偏差が近い値であるが,平均値が全ての手法の中で一番高い。しかし,全手法とも,平均較差が 0.066m 以内,標準偏差が 0.051m 以内と精度の良い結果を得られたといえる。また,SfM点群においては,標定点を4点しか設置していないことを考慮すると,標定点の数によりさらに精度向上が見込まれる。高精細なデータが必要とされる場合は,①VUX-1や④ $\alpha 7R$ といった上位機種を使用する必要があるが,そうではない場合では,その他の機材でも十分な成果が得られ,植生の影響がない現場においては,Phantom4Proでも十分対応できる結果であるといえる。

(2) 対地高度との比較

①VUX-1に関しては,高度の違いによる大きな変化はなかったが,他のレーザ及び④ $\alpha 7R$,⑤Phantom4Proに関しては,高度による影響がみられた。

施工現場においては,データの取得方法(撮影の対地高度)の決定には留意が必要となる。

(3) 土量計算結果の比較

①VUX-1の値を正しい値として比較した結果,④ $\alpha 7R$ が一番近い値となった。これは, $\alpha 7R$ のSfM点群がVUX-1同様に均一的な点群であり,側溝等を再現できていることが大きく影響すると考えられる。⑤Phantom4Proにおいても,②miniVUX-1や③VLP-16と比較して結果に大きな差はなく,施工現場での適用も十分可能であるといえる。

6. RTK-UAVの測量精度の検証について

RTK (Real Time Kinematic) 測位は固定局(基地局)と移動局という2つの受信機を使用し,リアルタイムに2点間で情報をやり取りすることで測位精度を高める手法である。RTKをUAVに搭載したRTK-UAVが開発,製品化されている。

RTK-UAVのメリットとしては,

- ・標定点の設置することなく,UAVを飛行させ正確な測量が可能
- ・飛行の安定性が増す
- ・高度測位の正確性が増す

などが挙げられる。現在の公共測量マニュアル(案)では,本機種の測量は対象外となっているものの,今後普及することが予想されるため,今回実証実験を行い,測量精度について検証することとした。

6.1 飛行条件

使用機種：Phantom4RTK（写真-1）

飛行ルート：写真-2

対地高度：30m

オーバーラップ：80%

サイドラップ：70%

対空標識 標定点：8点（外側6点、内側2点）
 検証点：7点（うち1点は観測データ
 破損により欠番のため、6点）



写真-1 Phantom4RTK



写真-2 飛行ルート

6.2 飛行ケース

測位方法として、ネットワークRTKと固定局RTK、及び単独GNSS（UAV搭載のGNSS使用のみ）の3ケースと、標定点設置と設置なしの8ケースで実証実験を行い、検証点での較差で比較した（表-4）。

表-4 飛行ケース

解析ケース	飛行ケース	測位方法（後処理）	標定点	備考
P1	1	ネットワークRTK	設置	日本GPSデータサービス
P2			全点	
P3	2	単独GNSS	設置	後処理を実施（PPK）
P4			全点	-
P5		設置	-	
P6		全点		
P7	3	固定局RTK	設置	2級基準点K-5
P8			全点	

6.3 解析結果と考察

解析結果を表-5に示す。

表-5 解析結果

解析ケース	飛行ケース	測位手法（後処理）	標定点	検証点との較差			√
				X	Y	Z	
P1	1	ネットワークRTK	設置	0.000	0.002	-0.028	0.028
P2			全点	-0.001	0.005	-0.004	0.006
P3	2	単独GNSS（PPK）	設置	-0.037	-0.020	0.096	0.105
P4			全点	0.003	0.004	-0.005	0.007
P5		単独GNSS	設置	-0.810	-0.194	-0.500	0.972
P6			全点	0.002	0.004	-0.005	0.006
P7	3	固定局RTK	設置	-0.029	0.000	-0.023	0.037
P8			全点	-0.001	0.005	-0.002	0.006

解析結果より、測位手法がネットワークRTK、固定局RTK、及び単独RTKにおいて、標定点を設置したケースはどれも測定精度が良好であることが分かった（解析ケースP2、P4、P6、P8）。また、標定点を設置しなくても、ネットワークRTK、固定局RTKの場合は、ほぼ同程度の精度が得られることが分かった（P1、P7）。

以上、今回の実証実験により、

- ・測位手法による違い（ネットワークRTKと固定局RTK）は見られない。
- ・標定点を設置した方が精度が良くなるが、ネットワークRTKと固定局RTKを測位手法とした場合は、設置しなくても精度は悪くなく、測量結果として使用できる。

といった結果を得ることができた。

7. おわりに

今回の実証実験より、定価格のPhantom4proのようなUAVでも撮影飛行高度を十分検討して測量を実施すれば、他のUAV測量機器とほぼ同程度の測量精度結果が得られることがわかった。RTK-UAVにおいても、今後普及が拡大することが想定されるため、更に実証実験を重ね、精度検証を行っていきたいと考える。

25. 3次元測量技術を活用した土の締固め管理手法の提案

立命館大学

国土防災技術株式会社

ジオサーフ株式会社

ソイルアンドロックエンジニアリング(株)

○ 小林 泰三

土佐 信一

西川 祐矢

池永 太一

1. はじめに

土の締固めは、長年、密度や含水比を計測することによって管理されてきた（品質規定方式と呼ばれる）。一方、近年では、建設現場への ICT 導入促進に伴い、締固め機械の走行回数（転圧回数）などを管理し、品質を確保しようとする手法が広がってきている（工法規定方式と呼ばれる）¹⁾。品質規定方式は、締固めた土の品質を直接評価することができるが、所定の面積を代表する点の計測である。一方、工法規定方式は、面的な管理ができるが、品質を直接評価するものではない。このように、締固めの品質管理手法には、一長一短があるのが現状といえる。BIM や CIM の普及促進が進む中、3次元データの利用拡大に向けて、品質を面的・空間的に、かつ直接評価できるような計測・管理手法の確立が期待される。本研究は、建設現場への導入が進む ICT 技術（ドローンによる写真測量技術、自動追尾型トータルステーション）を活用して、締固めの品質を面的に評価する手法を確立しようとするものである。

2. 3次元測量技術を活用した締固め管理

盛土は一般に、まき出し・敷均しの後、ローラやタンパなどによって締固めが行われるが、その際、圧縮によって地表面が沈下することになる。圧縮が鉛直一次元に生じると仮定すると、締固め前の密度 ρ_0 と締固め後の密度 ρ_c は次式で関係づけられる。

$$\rho_c = \frac{1}{1-\varepsilon} \rho_0 = \alpha \cdot \rho_0 \quad (1)$$

ここに、 ε : 圧縮ひずみ、 α : 密度増加比である。

上述したように、従来の品質規定方式では密度による管理が行われるが、式(1)は、締固めによる密度増加の度合いが、圧縮ひずみから簡単に計算できることを示している。

圧縮ひずみ ε は、評価点における圧縮沈下量をまき出し厚で除して与えられる。ここで、圧縮沈下量は、締固め前後のそれぞれの地表面の標高差で与えられ、まき出し厚は、締固め前の標高から前層締

固め後の標高の差分で与えられる。すなわち、転圧層毎に、転圧前後の地形を3次元測量し、差分解析することで、各層の圧縮ひずみ分布、延いては密度増加比分布が求められるようになる。転圧前後の地形を計測する手法として、本報では、ドローンを用いた写真測量による方法と、自動追尾トータルステーション（自動追尾 TS という）を用いた振動ローラの軌跡追跡による方法のふたつの方法を提案する。

ドローンを用いる方法（以降、ドローン法と呼ぶ）では、転圧前と転圧後にそれぞれ転圧面の空撮を行い、SfM（Structure from Motion）処理を行って3次元の数値表層モデルを得る。さらに得られたふたつの地形モデルを差分解析（標高差分）して、まき出し厚や圧縮沈下量を算出する。

自動追尾 TS を用いる方法（以上、TS 法と呼ぶ）では、振動ローラの転圧輪フレームに360°プリズムを設置し、遠方から自動追尾 TS によって振動ローラの軌跡を取得する。同一レーンを走行した2回分の軌跡データを抽出し、走行地点に応じた標高値を差分解析することによって、その2回の締固めの間に発生した圧縮沈下量を求める。

これらの手法の妥当性を検証するために、建設中の大規模盛土造成現場の一画において実証モデル実験を実施した。以下にその概要と結果を報告する。

3. 実証モデル実験の概要

実証実験では、長さ10m×幅8mの矩形ヤード（図-1）を対処に、11tクラスの振動ローラ（図-2）による締固めを行った。振動ローラの転圧輪の幅は約2mであり、幅8mに対してA～Dの4つのレーンを設け、レーン毎に転圧回数を変化させて計測を行った。ここでは、この矩形ヤードに対して、実験を2回に分けて実施した。すなわち、A～Dレーンに対して、実験1回目はそれぞれ2、4、6、8回の転圧を加え、実験2回目は10、12、14、16回の転圧を加えた。なお、転圧回数は、往路、復路に依らず1回と数える。

盛土材は、礫分（粒径2.0～75mm）:45.8%、砂

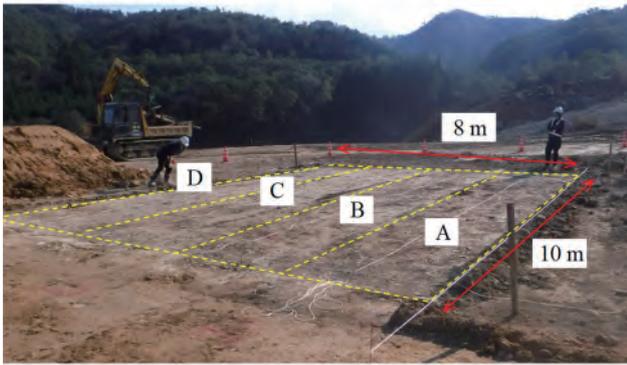


図-1 実験ヤード



図-2 実験に使用した振動ローラ

分 (0.075~2.0 mm) : 23.4%, 細粒分 (0.075 mm 未満) : 30.8% の細粒分質砂質礫 (GFS) であり, 最適含比 : 15.7% (最大乾燥密度 : 1.806 g/cm³) に対して, 12.1% の平均含水比で転圧を行った。本実験ではまき出し厚は特に管理しておらず, 30~50 cm の範囲でばらついた。

4. ドローンによる密度増加比の面的評価

図-3 は, ドローン法によって得られた密度増加

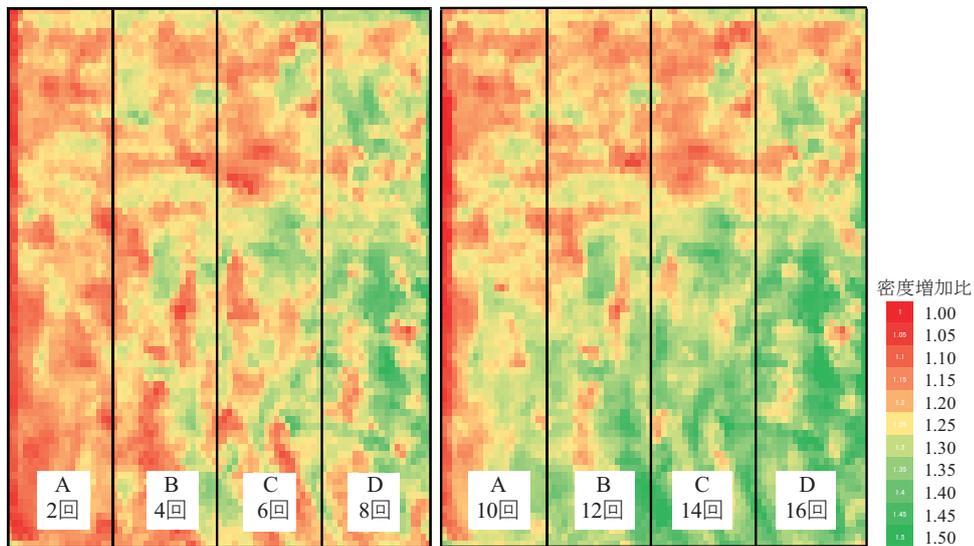


図-3 ドローン法で得られた転圧面の密度増加比分布

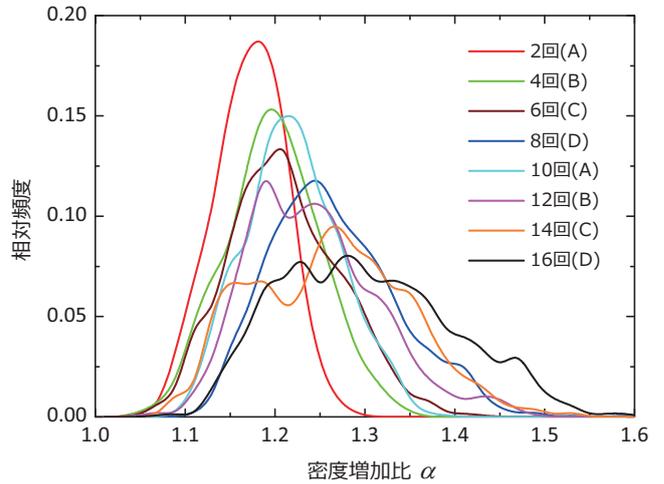


図-4 密度増加比の頻度分布

比 α の分布図である。ここに, 密度増加比 α は, 式(1)で説明したように, 転圧前に対する転圧後の密度比であり, α が大きいほど, 締固めによって大きな密度変化が生じたことを意味する。一般に, 転圧回数が増すと密度も増大するが(ただし, 所定の回数以上になると頭打ちする), この図でもその傾向が捉えられてるように見える。この図に見られる α のばらつきをレーン毎に相対頻度で表すと図-4が得られた。この図からも, 転圧回数が増えると α の平均値が増大することが分かる。ただし, 同時に α のばらつきも増大するようである。このように, 提案する手法では, 図-3のような視覚的な表現だけでなく, 面全体の平均値やばらつき(標準偏差)など, 統計的な品質管理に繋がる情報が得られるようになる。

本実験では, 各レーンにつき5点(レーン中央2m間隔)で締固め度(RI法²⁾)と地盤反力係数(簡易支持力測定器: キャスポル³⁾)の計測を行い, α との関係を調べた(図-5)。ばらつきは見られるも

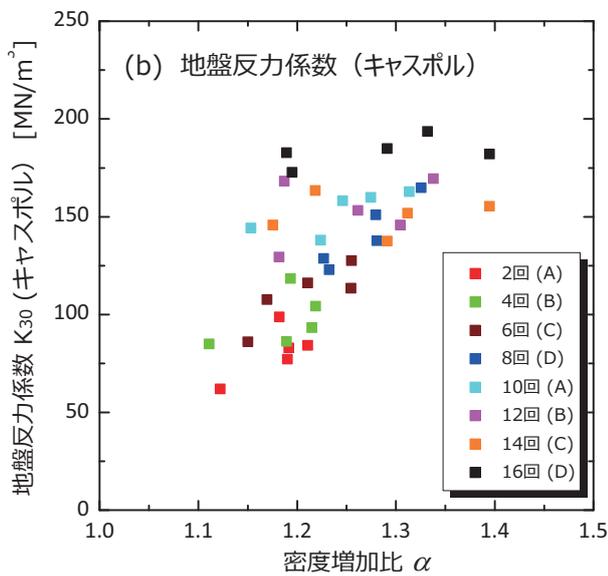
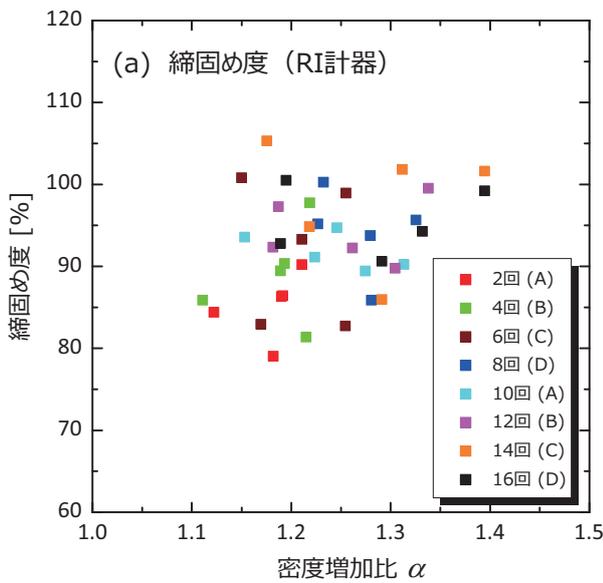


図-5 密度増加比と品質計測値の関係（ドローン法）

の、特に図(b)の地盤反力係数については、 α に対して比較的良い相関性のあることが確認できる。このことから、本手法によって得られる α が締固めの品質を示す指標となることが伺える。

5. 自動追尾 TS による圧縮沈下量の評価

TS 法では、同一レーンを走行した任意の 2 回分のデータから、その間に生じた圧縮沈下量を求めることができる。図-6 は、16 回転圧を行った D レーンに着目し、16 回に至るまでの各転圧回における圧縮沈下量増分（前回走行時との差分、レーン全体で得られた平均値）を算出したものである。なお、振動ローラは往路と復路で締固め特性が若干異なることが知られており、その影響を除くために、ここでは、往路、復路毎に差分計算を行った。つまり、例えば往路であれば、前回の往路との差分であり、その値には、その間に走行した復路 1 回分の圧縮が含まれる。この図から、復路において一部データ

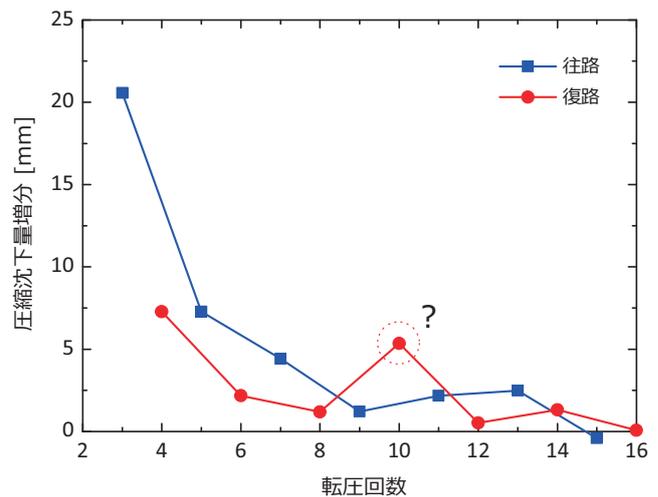


図-6 転圧回数と圧縮沈下量増分（TS 法）

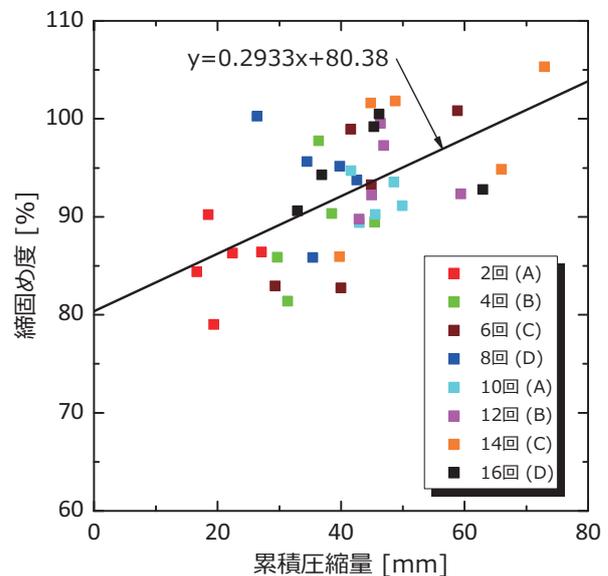


図-7 累積圧縮量と締固め度の関係（TS 法）

の乱れがあるが、往路、復路ともに転圧回数が増えると圧縮沈下量増分は小さくなり、0 に収束していくような傾向がみられる。所定の転圧回数に達すると、それ以上転圧しても地盤が圧縮されなくなること表現していると考えられる。施工中にこの圧縮沈下増分をモニタリングすることで、締固め完了の施工判断に繋げることができると考えている。

第 1 回転圧時と最終転圧時の差分から、累積圧縮沈下量を求めることもできる。RI 法で締固め度を計測した点に対応する地点の累積圧縮沈下量を抽出し、両者の関係を調べた（図-7）。ここでも α と締固め度に正の相関性が確認でき、図中に示す近似直線を得た。

この近似式を用いると、計測される累積圧縮沈下量を締固め度に変換することができるようになる。本実験結果に対して、例えば、「締固め度を 90%

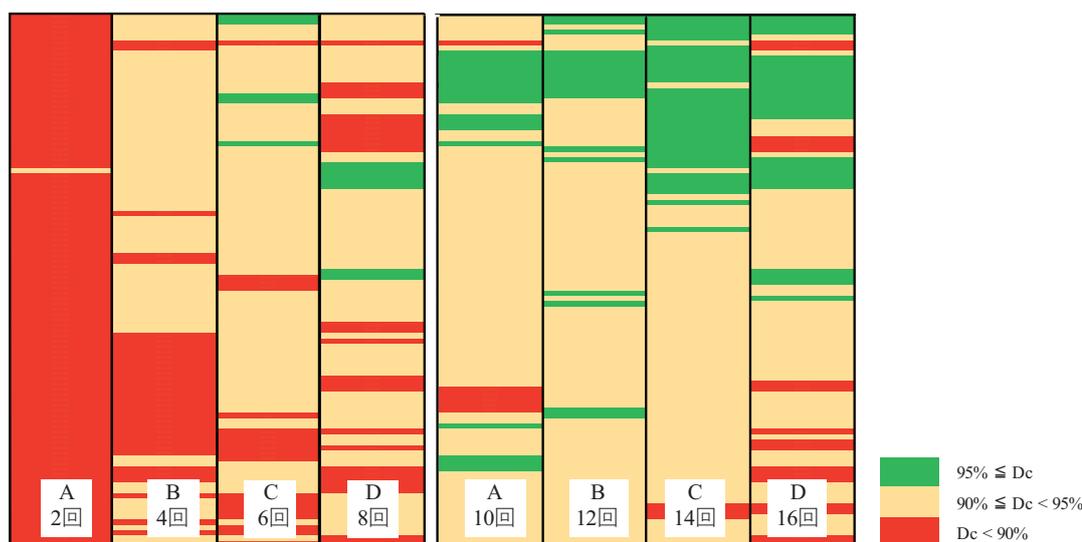


図-8 TS法で推定された締固め度の分布

未満」,「90~95%」,「95%以上」の3つに区分してデータを整理すると、図-8の締固め度分布図が得られた。

累積沈下量から間接的に得た推定値ではあるが、施工しながらデータが得られる利点があり、面的・空間的な品質のデータ管理やオペレータの施工判断支援のひとつとして応用できる可能性があると考えている。

なお、ドローン法によって得られた図-3と図-8を比較すると、全体的には両者ともに転圧回数が大きくなると締固めの度合いが高くなる傾向があるものの、10~16回転圧のレーンに着目すると、図-3の密度増加比の大きい領域と図-8の締固め度の大きい領域が逆転しているような傾向が認められる。TS法では、ドローン法とは異なり、転圧前（転圧0回）のデータを得ることができない。そのため、図-8に示す累積圧縮沈下量は、転圧を1回行った以降に発生した沈下量であり、ドローン法で得られるそれとは異なる。初回転圧時に最も大きな圧縮が発生するが、その初回沈下量を含めて解析したのが図-3（ドローン法）であり、含まないのが図-8（TS法）ということになる。現時点では推察の域を出ないが、まき出し厚や初期地盤の密度にばらつき（偏り）があり、レーン内で初回沈下量に大きな差異があったことがこの逆転現象の要因ではないかと考えている（初期地盤のばらつきの影響は、初回転圧時に影響を受けやすいと推察している）。

6. おわりに

ドローンによる写真測量技術や自動追尾TSは既に確立された技術として建設分野で普及が進んでいる。本研究は、これらの汎用技術を用い、簡単な

原理に基づいて、新しい締固め管理手法を提案しようとするものである。現時点では、実証データが不足しているため、信頼性や実用性を十分に確認できていないが、本実験から締固めによる圧縮量を計測することで締固めの品質を推定できる可能性のあることが示された。土工のCIMを深化・発展させていくためには、盛土内部の情報化が欠かせない。その一助になることを期待して、本手法の実用化に向けた更なる検討を進めていきたいと考えている。

本実証実験では、実験フィールドを提供頂いた清水建設(株)神戸支店をはじめ、福井コンピュータ(株)や五大開発(株)など、多くの関係者に協力を頂いた。末筆ながら感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 地盤工学会（土の締固め編集委員会）：地盤工学・実務シリーズ30 土の締固め、第3章 締固めに関する試験法と施工管理の考え方、pp.16-56, 2012.
- 2) 国土交通省：RI計器を用いた盛土の締固め管理要領(案), 1996.
- 3) 簡易支持力測定器使用マニュアル作成委員会：簡易支持力測定器による試験方法（第1版）、近畿地方整備局近畿技術事務所、1996.

26. MC グレーダ施工におけるスリップ防止装置の適用効果について

大成ロテック株式会社
大成ロテック株式会社
大成ロテック株式会社

○ 高山 拓也
武岡 真一
田中 純

1. はじめに

建設業界における就業者数は、慢性的な人手不足であり、東京五輪や復興により建設需要が逼迫する中、現在もなお深刻な状況が続いている。これらの問題の対応策の1つとして、数年前から導入されてきたICT技術を利用したマシンコントロール（以下、MC）技術は、現在では一般的な技術となり、幅広く活用されている。

MC技術は測量や、丁張設置作業の削減、施工精度および生産性の向上など、様々なメリットがある反面、デメリットも存在しており、すべての作業において自動制御に頼ることは難しく、手動操作による補助を必要としているのが現実で、オペレータの技量に作業効率や施工精度が左右されるケースが多い。

例えば、モータグレーダの場合、MC施工中、作業装置に大きな負荷が掛かった際、スリップが発生する。この場合、熟練のオペレータは材料の抱え量や作業装置の負荷を感じ取り、排土板上昇させてスリップを回避するが、非熟練者の場合は前者のようにいかずにスリップさせてしまうケースがある。スリップ後の路面はタイヤで大きく削られることにより、品質の低下が懸念される。スリップの発生により、施工面が削られている状況を写真-1に示す。削られた箇所は、深さを検測すると最大で50mm程度であった。なお、このような場合には、補足材料を入れ、再整正するなどの対応を現場では行っている。



写真-1 スリップ時の状況

このように、本来、オペレータの補助をするはずの自動制御が、逆にデメリットとなり、作業効率を低下させてしまうケースもある。そのため、当社では手動操作で荒均し作業まで行い、自動制御の使用は、仕上げ作業のような比較的負荷の少ない作業に留まっていた。

そこで、これらの矛盾を解決し、MC技術の利点を最大限に引き出す為、排土板にかかる負荷が過大な場合や、タイヤのスリップを検知した場合、排土板を自動上昇させ、スリップを回避する『スリップ防止装置』（以下、当該装置）を開発した。本稿では、当該装置における、基礎検証および、現場導入の結果より得られた導入効果について報告する。

2. 基礎検証

2.1 従来施工の問題点

従来施工の問題点について、以下のようにまとめる。

モータグレーダの主な作業工程は、①材料の荷下ろし、②荒均し、③仮転圧、④仕上げ作業、の流れである。荒均しの際は、作業装置にかかる負荷が大きいため、スリップが発生しやすく、必要に応じて手動により補助的に排土板上昇させる。特に、材料を多く抱えた場合や、路盤が堅固な場合には手動操作が求められ、操作が遅れた場合に、タイヤがスリップしている傾向であった。

2.2 スリップ発生要因の分析と基礎検証

施工中に発生するスリップについて、要因を分析し、スリップが発生した際の機械装置の挙動を把握するため、基礎検証を実施した。基礎検証では、各作業装置にどのような兆候が現れるか調査するために、モータグレーダにセンサ等を取り付け、誘発的にスリップを発生させ、各センサの数値変化を解析した。今回の基礎検証で取り付けたセンサ、装置について写真-2示す。



写真-2 センサ、装置取り付け状況

- ① 圧力センサ(リフトシリンダ用):排土板のリフトシリンダに接続し、圧力を測定する。
- ② 圧力センサ(チルトシリンダ用):排土板のチルトシリンダに接続し、圧力を測定する。
- ③ 車輪回転数計測装置(前後輪):スリット板と光電センサから車輪の回転状況を計測する
- ④ ボタンスイッチ:スリップを目視確認した際にスイッチを押し、信号を記録してスリップ箇所を記録する。
- ⑤ データロガー:各センサからのデータを記録する。

2.3 基礎検証の結果

基礎検証の実施状況を写真-3、計測データ結果を図-1に示す。グラフは、横軸にデータの計測時間を表し、縦軸に、シリンダにかかる圧力と前後輪の回転差を表している。図-1のスリップ発生区間は、前後輪の回転差が生じているため、スリップしている状態であると判断できる。検証結果より、スリップ発生時の直前から、リフトシリンダ及びチルトシリンダの圧力が上昇している。スリップ発生直前から、作業装置の状況を時系列で追っていくと、①作業装置に負荷が掛かる、②各シリンダの圧力が上昇する、③作業装置に掛かる反力と車体の推進力のバランスが逆転してスリップが発生する、ということが分かった。

従って、各シリンダの圧力が高い状態で施工をしていた場合、スリップが発生する可能性が高いと判断できる。また、各シリンダの圧力が超過しないように制御する事で、スリップを防止することができる。



写真-3 試験施工状況

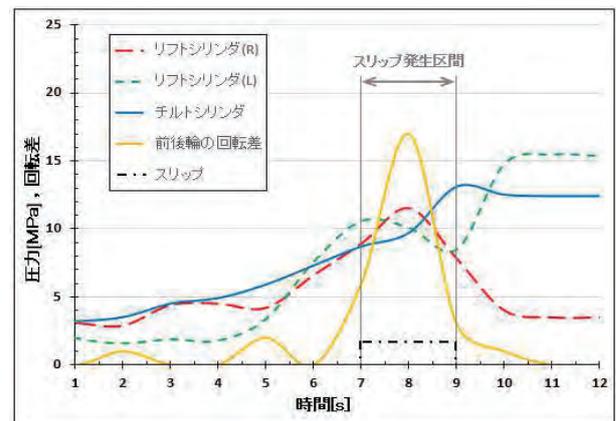


図-1 基礎検証データ結果

2.4 発生原因と各作業装置での反力の関係

2.3項の検証から作業装置に負荷が掛かると、各シリンダの圧力が上昇することが分かった。つまり2.1項で述べたスリップが頻繁に起こる傾向は以下のように推測できる。

(1) 材料の抱える量が多い場合

土圧から受ける反力により、排土板が負荷を受ける。この場合、車体の後方へ反力を受けるため、チルトシリンダの圧力が上昇する。その力とモータグレーダの駆動のバランスが逆転した時にスリップが発生する。材料の抱える量が多い場合におけるモータグレーダと反力の関係を写真-4に示す。



写真-4 材料の抱える量が多い場合の力の関係

(2) 施工面が賢固な場合

排土板を下げる際、施工面から受ける反力により、排土板が負荷を受ける。この場合、車体の上方に反力を受けるため、車体が持ち上げられる。それにより、駆動輪の接地圧が下がり、駆動とのバランスが逆転した際にスリップが発生する。施工面が賢固な場合におけるモータグレーダと反力の関係を写真-5に示す。



写真-5 施工面が賢固な場合の力の関係

3. スリップ防止システム

3.1 開発コンセプト

基礎検証をもとに、当該装置の開発コンセプトを以下に示す。

① 作業の効率化

自動制御を最大限使用し、MC制御の作業効率を上げる。

② 品質、施工精度の向上

スリップによる施工面に与える影響を最小限にし、品質および施工精度を向上させる。

③ システムの簡素化

複雑な構造とせず、誰でも簡単に操作可能な装置とする。

3.2 システム概要とシステムフロー

当該装置は、制御BOXが各シリンダの圧力、スリップ状況を監視しており、異常を検知した際に、制御信号を切替える『切替BOX』を有している。そのため、任意に設定した圧力上限値の超過や、スリップを検知した際に、MC制御から制御信号が切替わり、自動で排土板が一定時間上昇するように当該装置を構築した。また、圧力上限値やスリップを検知した場合には、警告音とともに異常をアラーム表示させる。閾値の変更には、異常を検知した際に、閾値を更新する『更新スイッチ』、または、更新せずに継続させる『継続スイッチ』を備え、状況に応じてどちらかのスイッチをオペレータが選択する方式とした。当該装置の概要を図-2に、システムフローを図-3に示す。

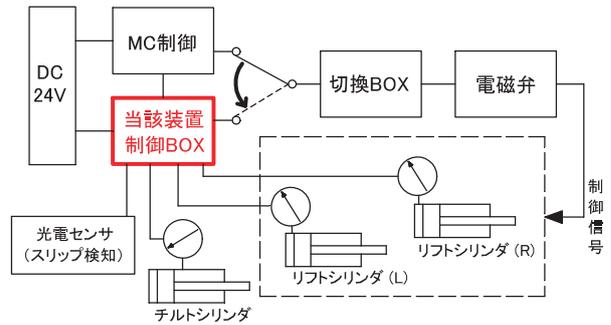


図-2 システム概要

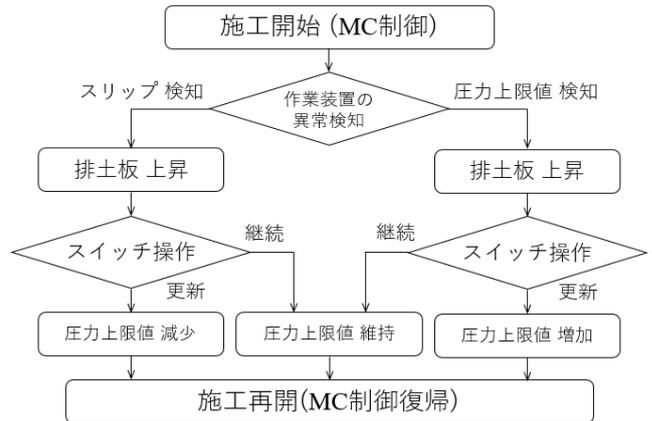


図-3 当該装置のシステムフロー

閾値の変更の例として、圧力上限値が7.5MPaに設定した場合について解説する。

閾値が7.5MPaでスリップが発生して、オペレータが『更新スイッチ』を選択した場合、閾値に係数0.90を掛けて圧力上限値を下方へ更新する。今回の施工では、閾値の更新により圧力上限値が減少し、スリップが発生しにくくなる。また、材料によって閾値は異なることから、更新に用いた係数は任意に変更できるプログラムとした。以上で述べたスリップ発生時のフロー図は図-4の破線で囲まれた通りである。また、今回、運転席に取り付けたコントロールパネルを写真-6に示す。

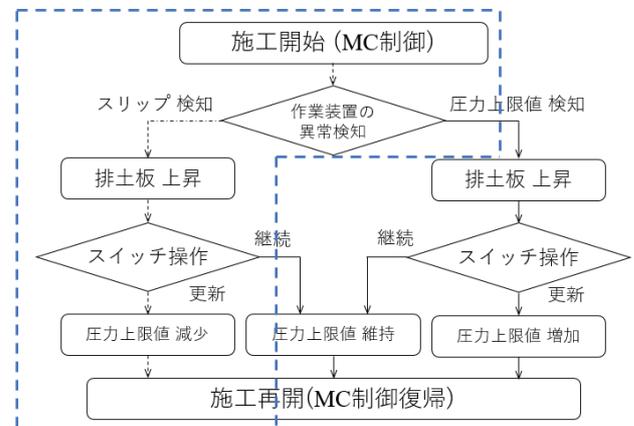


図-4 スリップ発生して圧力上限値が減少する動作のフロー

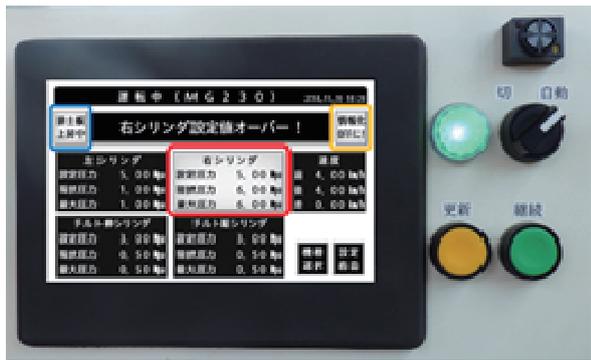


写真-6 コントロールパネル

4. 試験施工

4.1 試験施工の概要

当該装置の有効性を検証するため、下記の要領で試験施工を実施した。試験施工の概要を表-1に示す。

表-1 試験施工の概要

使用機械	モータグレーダ (MG230)
	自動追尾式トータルステーション
	スリップ防止装置
使用材料	RC-40
施工数量	施工面積 90m ² (延長 20m×幅員 4.5m), 厚さ 150mm

4.2 試験方法と評価

今回の試験施工では、熟練者(経験年数 28 年)のオペレータにモータグレーダを操作させ、路盤整正を当該装置の有、無の 2 条件で実施した。なお、当該装置の評価を確認するため、原則として自動制御中に手動操作は行わず、以下の 3 点を制約条件として敷き均しを行った。また、敷き均し試験中、タイヤがスリップした際には、前進が不可能となるため、手動操作により排土板を最低限上昇させ、荒均しを行い、敷き均し終了後、転圧して試験終了とした。

条件 1: 施工は一方向のみの走行とする。

条件 2: 走行回数は 5 回までとする。

条件 3: 補足材料の追加を行わないこととする。

仕上がり面については、路盤整正終了後、路盤上の中央、右、左の 3 測点の平均値から設計面との誤差を計算し、1mピッチでトータルステーションにより出来形を計測した。

4.3 試験施工結果

当該装置の有、無の 2 ケースにおいて路盤整正した結果を表-2、図-5、図-6 に示し、各ケースにおける試験結果および考察を以下に示す。

表-2 試験施工結果

	当該装置未使用	当該装置使用
標準偏差	9.62mm	4.23mm
誤差範囲	-24mm ~ +12mm	-8mm ~ +8mm

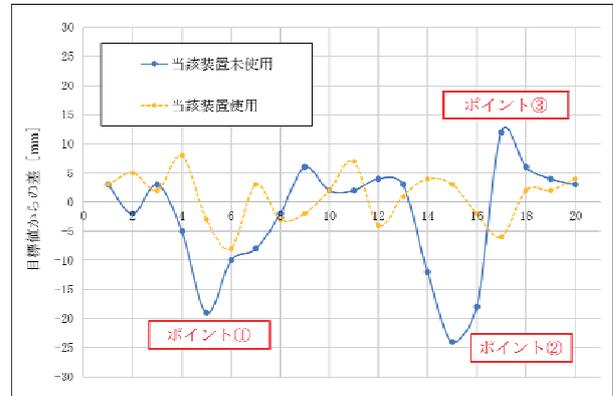


図-5 設計面との誤差

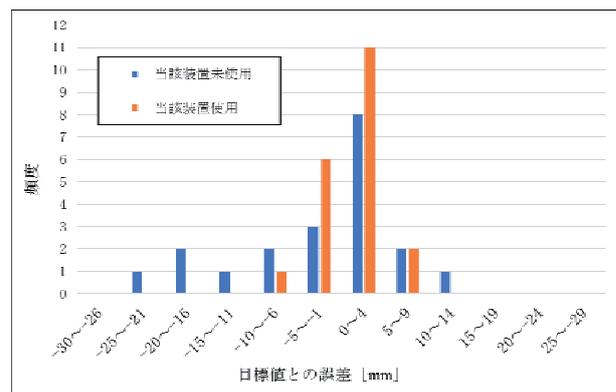


図-6 試験施工の施工精度

(1) 当該装置未使用の場合

図-5 のポイント①、ポイント②は、材料を多く抱えたことで、スリップが発生した箇所である。この箇所ではスリップが発生し、車体が沈みこみ、排土板が瞬間的に下がったことで、設計面から低く仕上がる結果となった。また、瞬間的に排土板が下がったことで、数メートルの間は制御が間に合わず、低い仕上がりとなった。

図-5 のポイント③については、施工面が低く仕上がった箇所を抜ける際に、車体が段差を乗り越えるため、車体が持ち上がり、瞬間的に排土板が上昇し、高く仕上がる結果となった。

設計面との比較を計測した結果、ポイント②の付近で、設計面から-24mm の差異が見られた。実施工では、このような場合、追加の補足材料を入れる必要があるため、施工効率についても影響を与える他、表面が荒れ、品質低下の原因にもなる。

(2) 当該装置を使用した場合

スリップ発生の直前に、当該装置が圧力上限値を検知し、排土板を上昇させるため、スリップを回避して施工が可能になる。また、大きく掘れた箇所や、表面を荒らすこともなく、高精度な施工ができた。また、補助的な手動操作もなくなることで、オペレータの負担が軽減され、当該装置の有効性を確認できた。

4.4 オペレータの技量の違いによる精度比較

4.3項で述べた試験では、熟練者のオペレータで路盤整正を行ったが、非熟練者のオペレータが当該システムを使用した場合には、どのような影響があるのかを確認するため、前項で行った試験と同様の条件でオペレータを変更して路盤整正を行った。その結果を表-3に示す。

表-3 オペレータの比較

	オペレータA		オペレータB	
経験年数	28年		3年	
装置の有無	装置無	装置有	装置無	装置有
標準偏差	9.62mm	4.23mm	11.74mm	4.44mm
誤差範囲	-24mm ～ +12mm	-8mm ～ +8mm	-28mm ～ +14mm	-10mm ～ +8mm

非熟練者のオペレータの場合でも、当該装置を使用することで、熟練者のオペレータと比較しても施工精度は大きな差異が見られないことから、懸念していたオペレータの技量による施工精度の影響を解消することができた。また、非熟練者のオペレータからは、今まではスリップする不安があったが、当該装置で不安が解消され、再整正の手間もなくなり、作業負担の軽減が期待できるとの評価を得られた。

5. 現場導入と従来施工との比較

5.1 現場導入結果

当該装置を和歌山県内の高速道路工事に導入し、装置の有効性を検証した。導入した工事現場の概要について、表-4に示す。

表-4 導入現場の概要

工事名	和歌山県内 高速道路現場
施工期間	2018年4月24日～2019年5月18日
施工場所	和歌山市寺内～吉礼
施工数量	14,836m ²

当該工事の路盤工には、荒均しにブルドーザを使用し、仕上げ整正では、スリップ防止装置を適用したMCモータグレーダを使用した。現場の特徴として、ランプ施工が多く、急勾配の箇所があり、スリップの発生しやすい施工条件であった。当該装置の圧力上限値は、試験施工結果のデータをもとに設定したが、施工条件も異なることから、試験施工の圧力上限値とは若干差異が見られた。しかし、施工開始から3日目には、閾値の調整が収束し、再整正もなく作業効率が向上した。施工初日から3日目以降の施工結果を表-5にまとめる。

表-5 導入現場の施工結果

	1日目	2日目	3日目以降 (平均値)
施工数量	1,659m ²	1,674m ²	1,823m ² /日
スリップ回数	8回	3回	0.33回/日
再整正回数	5回	1回	0.17回/日
標準偏差	5.09mm	4.62mm	4.35mm

上記の結果より、当該装置を使用することで、スリップの回数および再整正回数が減少し、作業効率の向上が期待できる。施工初日と施工3日目以降のデータを比較すると、施工数量が9.0%向上した。また、施工精度は、標準偏差において、14.5%の向上が見られた。施工全行程において、任意の点で計測した結果、標準偏差は4.48mmであった。

5.2 過去の施工実績との比較

前述したように、当該装置の導入により、生産性および施工精度の向上を確認できたが、過去の施工実績と比較して、当該装置の導入効果を評価する。導入現場の3日目以降の結果および、過去の施工実績との比較を表-6に示す。

表-6 過去の施工実績との比較

	過去の施工実績 (当該装置未使用)	導入現場実績 (当該装置使用) ※導入から3日目以降
標準偏差	4.58mm	4.35mm

当該現場の3日目以降のデータは、過去の施工実績と比較して、標準偏差が5.0%向上しており、当該装置を使用することで、スリップによる凹凸も少なく、高精度な施工が期待できる。

6. まとめ

従来の自動制御に頼る施工の場合には、スリップが発生する可能性があり、それにより再整正が必要となる場合があるなど、作業効率の低下が懸念であった。

試験施工の結果より、当該装置を使用する事で非熟練者のオペレータでも、熟練者のオペレータと同等の高精度な施工が期待できることを確認した。

現場導入の結果より、施工初日と比較してスリップの回数が減少していき、再整正回数も少なくなり、作業の効率が9.0%向上する結果が得られた。また、過去の施工実績と比較しても施工精度が5.0%向上しており、当該装置の有効性を確認できた。

以上の結果より、開発コンセプトについてもまとめらる。

① 作業の効率化

→スリップ防止することで、再整正がなくなり作業効率が9.0%向上した。

② 品質、施工精度の向上

→過去の施工実績と比較して標準偏差が4.58mmから4.35mmと5.0%向上し、スリップによる掘られた箇所もなくなり、品質も向上した。

③ システムの簡素化

→当該装置を使用した非熟練者のオペレータからは、スリップする不安がなくなり、再整正の手間がなくなり、作業効率の軽減が期待できると評価を得た。

オペレータが施工状況に応じて、スイッチを操作する必要があるが、簡単な操作のみでスリップが防止され、作業効率の向上や、品質および、施工精度の向上が期待できる。また、非熟練者のオペレータであっても高精度な施工が可能であり、当該装置の有効性を検証できたのではないかと考える。

7. 今後の課題

当該装置の評価を踏まえて、今後の課題について検討した結果を以下に示す。

(1) 施工データの蓄積

→当該装置の導入実績が1現場のデータのみであり、データの絶対数が少ない。今後とも積極的な現場への導入を図り、施工データの蓄積とオペレータの技量による比較などを評価していきたい。

(2) 操作性の改善

→当該装置は、コントロールパネルを運転席側に設置しているため、一旦前方から視線を逸らして操作する必要がある。安全面を考慮し、今後は操作レバー付近で操作できるように改善する。

(3) 装置の普及拡大

システムの詳細な仕様を再検討し、当社保有の

全てのモータグレーダに搭載していく計画である。

8. おわりに

最後に、MC モータグレーダに当該装置を導入することにより、施工品質の向上および作業効率改善に効果が期待できることが確認できた。今後も、省力化や作業効率の向上など、MC 施工の普及拡大に寄与できる装置やシステムを提供できるように努力する所存である。

27. 建設機械から排出される温室効果ガス削減の取り組み

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課
国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課

○東山 遼
北川 順

1. はじめに

近年、人為的な影響による気候変動により世界各地で異常気象が発生している。このような情勢の中で、2016年11月に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が提供する科学的知見を踏まえて、COP21でパリ協定が採択された。

パリ協定では、「世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも2℃高い水準を十分に下回るものに抑えるとともに、1.5℃高い水準までのものに制限するための努力を継続すること、このために、今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡（世界全体でのカーボンニュートラル）を達成することを目指す。」ことを定めている。

日本政府が、パリ協定に基づき策定した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（2019年6月閣議決定）では、野心的なビジョンとして、「最終到達点としての「脱炭素社会」を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指すとともに、2050年までに80%の削減に大胆に取り組む」としている。また、建設施工分野においては、「建設機械は、ゼロエミッションへの転換が難しい分野の一つである。建設施工分野において、省エネルギー性能の高い設備・機器の導入を促進する。また、ICTを活用した設備・機器の積極的な導入を推進することにより施工の効率化を図り、エネルギー消費量当たりの生産性を向上させる。」と記載されており、政府全体として建設機械における地球温暖化対策に取り組もうとしている。今回は、国土交通省における建設機械から排出される温室効果ガス削減の取り組みについて紹介する。

2. これまでの取り組み

国土交通省では、京都国際会議（1997年12月）において約束された日本の温室効果ガス削減目標として「2008年～2012年までに1990年レベルより6%削減」を鑑み、建設施工分野においても具体的かつ実行力のある対策を行うために、建設施工における建設機械・資材等の総合的な見地から地球温暖化対策に係わる技術的、専門的な内容について検討を実施し、地球温暖化対策の推進に寄与することを目的に平成11年に「地球温暖化対策検討分科会」を設置し、建設施工分野の地球温暖化対策を推進してきた。

① 建設機械指定・認定制度

建設機械のユーザーに対して、地球温暖化対策に寄与する低燃費な建設機械を明確化し、直轄工事においても積極的に活用していくこと、環境対策が不十分な建設機械の低燃費な建設機械への買い替えを促進することを目的に、平成19年11月より「低燃費型建設機械指定制度」を開始した。この制度は、動力伝達の効率化等による燃費改善が見込める省エネルギー機構を装備した建設機械を指定するものであったが、平成21年4月に指定を終了した。

その後、先進技術であるハイブリッド機構や電動機構等を搭載し省エネルギー化を達成した建設機械の普及のため、平成22年4月より「低炭素型建設機械認定制度」を開始した。この認定制度は、「特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律」（以下、「オフロード法」という）の基準に適合する（オフロード法の適用を受けない出力帯は除く）とともに、エネルギー回生機能（電気）による油圧シヨベル、エネルギー回生機能（油圧）による油圧シヨベル、電動型油圧シヨベル（バッテリー式）、電動型油圧シヨベル（有線式）、ブルドーザ（発電式）などが対象である。

また、ハイブリッド機構のような特別な機構の搭載の有無に関わらず燃費性能の優れた建設機械の認定を行い、二酸化炭素排出低減に資する建設機械の普及促進を図るとともに、建設施工に関する建設業者による自発的な活動の実施を促進し、地球環境保全に寄与することを目的として、表-2の要件と表-3、表-4、表-5、表-6 いずれかの燃費基準値を満たすものを認定する制度として、平成26年4月より「燃費基準達成建設機械認定制度」を開始した。

表-1 指定・認定制度概要

低燃費型建設機械指定制度（平成19年度創設） 特定の省エネルギー機構を装備した建設機械を指定する制度
低炭素型建設機械認定制度（平成22年度創設） ハイブリッド機構や電動機構等を搭載したCO2排出量低減が相当程度図られた建設機械を認定する制度
燃費基準達成建設機械認定制度（平成25年度創設） 2020年燃費基準値を達成した建設機械を認定する制度

表-2 燃費基準達成建設機械における認定要件

○オフロード法排出ガス 2014 年基準等の排ガス基準に適合するもの

○以下に掲げる建設機械で、燃費基準を達成するもの

油圧ショベル
(標準バケット山積容量 0.085m³ 以上 1.7m³ 未満)
ホイールローダ
(定格出力 40kW 以上 230kW 未満)
ブルドーザ
(定格出力 19kW 以上 300kW 未満)
ホイールクレーン
(最大吊り荷重 4.9ton 以上 79ton 未満)

表-3 燃費基準値 油圧ショベル

標準バケット 山積容量 (m ³)	2020 年 燃費基 準値 (kg/標 準動作)	2020 年 燃費基 準値を 0.85 で 除した 値 (kg/ 標準動 作)
0.085 以上 0.105 未満	2.0	2.4
0.105 以上 0.130 未満	2.1	2.5
0.130 以上 0.150 未満	2.6	3.1
0.150 以上 0.200 未満	2.8	3.3
0.200 以上 0.250 未満	3.2	3.8
0.25 以上 0.36 未満	4.3	5.1
0.36 以上 0.47 未満	6.4	7.5
0.47 以上 0.55 未満	6.9	8.1
0.55 以上 0.70 未満	9.2	10.8
0.70 以上 0.90 未満	10.8	12.7
0.90 以上 1.05 未満	13.9	16.4
1.05 以上 1.30 未満	13.9	16.4
1.30 以上 1.70 未満	19.9	23.4

表-4 燃費基準値 ブルドーザ

定格出力 (KW) ※	2020 年燃費 基準値 (g/kWh)	2020 年燃費 基準値を 0.85 で除し た値 (g/kWh)
19 以上 75 未満	568	668
75 以上 170 未満	530	624
170 以上 300 未満	508	598

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

表-5 燃費基準値 ホイールローダ

定格出力 (KW) ※	2020 年燃費 基準値 (g/t)	2020 年燃費 基準値を 0.85 で除し た値 (g/t)
40 以上 110 未満	21.3	25.1
110 以上 230 未満	27.9	32.8

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

表-6 燃費基準値 ホイールクレーン

最大吊り荷重 (ton)	2020 年燃費基 準値 (kg/h)	2020 年燃費基 準値を 0.85 で 除した値 (kg/h)
4.9 以上 15 未満	3.05	3.59
15 以上 25 未満	4.73	5.56
25 以上 50 未満	4.73	5.56
50 以上 79 未満	8.19	9.64

認定要件となる燃費基準値は、当時最も優れた燃費性能を持つ機械の燃料消費量 (トップランナー) を基本とし、2020 年目標として採用した。

なお、燃料消費量評価値の算定に係る試験方法は、JCMAS H020「土工機械 -エネルギー消費量試験方法-油圧ショベル」、JCMAS H021「土工機械 -燃料消費量試験方法-ブルドーザ」、JCMAS H022「土工機械 -燃料消費量試験方法-ホイールローダ」、JCMAS H023「ラフテレーンクレーン作業燃料消費量試験方法」に基づいた燃料測定方法とした。

(JCMAS とは、国家規格である JIS を補完するものとして、一般社団法人日本建設機械施工協会が定める建設機械分野における団体規格) また、測定方法の基本的な考え方は①作業量を考慮した燃費効率、②土を用いた実作業ではなく、模擬作業で行うことで、バラツキを生じないようにする、③走行やアイドリング状態も盛り込む、④ハイブリッド型油圧ショベル、電動油圧ショベルも対応、の 4 点である。

この制度では、燃費基準の達成状況に応じて、100%達成建設機械 (☆☆☆) と 85%達成建設機械 (☆☆) として認定され、ラベル (図-1) を建設機械に貼付することが可能となり、環境への貢献をアピールすることができる。なお、対象機種としては、まず CO₂ 排出寄与率の高い油圧ショベル、ブルドーザ、ホイールローダを対象として開始したが、平成 30 年 4 月より小型油圧ショベル (バケット容量 0.085m³ 以上、0.25m³ 未満) を追加しており、さらに、令和 4 年 4 月にはホイールクレーンの認定を開始する予定である。

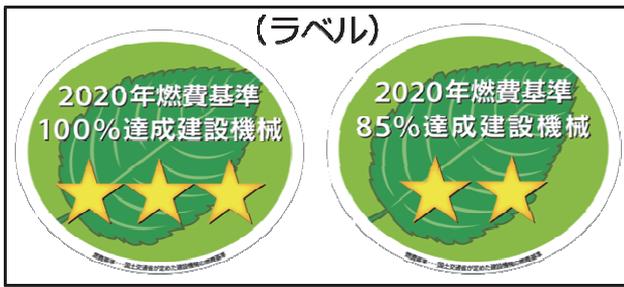


図-1 燃費基準達成建設機械認定ラベル

② 補助金制度

環境性能に優れた建設機械を普及促進するために補助金制度を他省庁と連携しながら実施してきた。まず、低炭素型建設機械認定制度による認定を受けた建設機械を新規導入する際に、通常の建設機械との差額の一部を補助する「低炭素化促進事業（H23～H26）」を環境省と共に実施した。

また、オフロード法の2011年又は2014年基準適合表示が付されたものであって、情報化施工技術等の先進的な技術を備えており、かつ国土交通省が定める燃費基準を達成していることを要件に、通常の建設機械との差額の一部を補助する「省エネルギー型建設機械導入補助金（H26～H30）」を経済産業省と共に実施した。

また、リース建設機械における補助金制度として、低炭素型建設機械として認定された建設機械をリースする際に、リース料総額の2%（ただし岩手県、宮城県、又は福島県に係るリース契約は10%）を補助する「エコリース促進事業補助金（H23～）」が実施されている。

③ 融資制度

中小企業における非化石エネルギーの導入、省エネルギーの促進、公害防止、再生資源の有効利用等により環境対策の促進を図るための必要な資金貸付けを行うことを目的に、環境負荷が小さく、性能の良い建設機械等に対して、日本政策金融公庫より、貸付利率、貸付限度等に特例を設ける融資が実施されている。

3. これまでの取り組みの成果

認定制度や支援制度等の効果もあり、令和元年8月末時点で低炭素型建設機械認定制度については49型式、燃費基準達成建設機械については99型式が認定している。

また、燃費性能の優れた建設機械（低燃費型建設機械と同等以上の燃費性能を有する建設機械）の普及率からも環境性能に優れた建設機械が大幅に普及しているのが分かる。（表-7、表-8、表-9）

なおR2年度の目標値（社会資本整備重点計画における目標値）は、①油圧ショベル：84%、②ホイールローダ：72%、③ブルドーザ：28%である。燃費性

能の優れた建設機械への買い替えられることでCO2排出量が削減されていくと考えられる。

表-7 燃費性能の優れた建設機械の普及率
①油圧ショベル

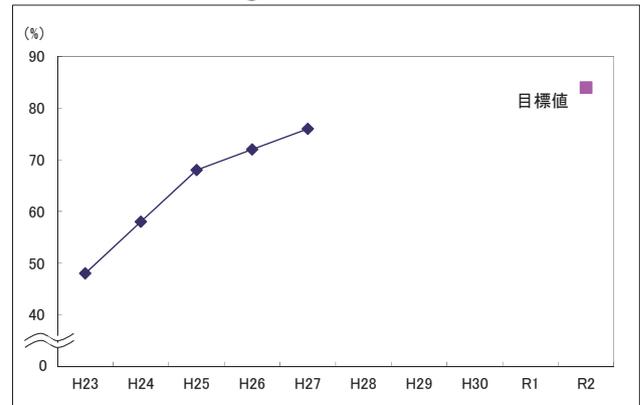


表-8 燃費性能の優れた建設機械の普及率
②ホイールローダ

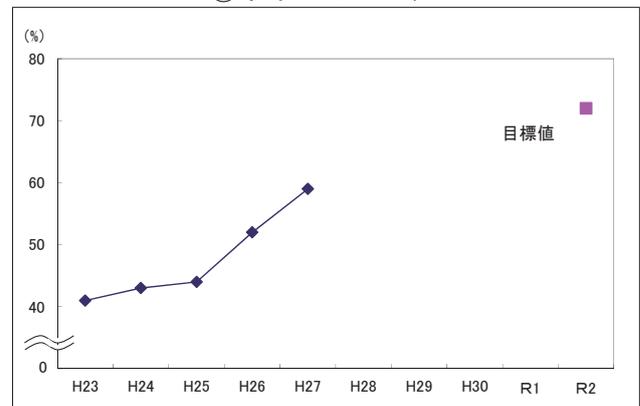
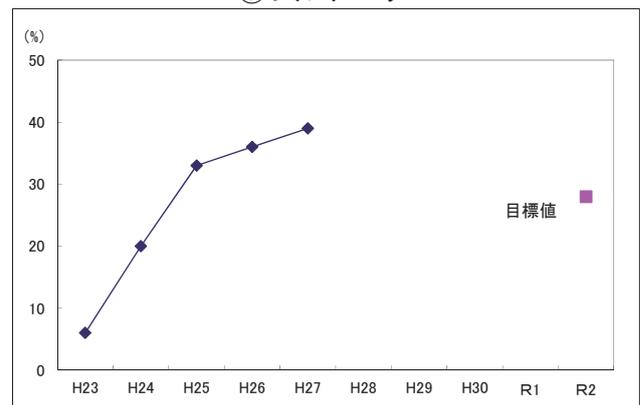


表-9 燃費性能の優れた建設機械の普及率
③ブルドーザ



4. 現在の取り組み

環境性能に優れた建設機械の更なる普及促進を図るために以下の取り組みを進めているところである。

① 次期燃費基準値の策定

燃費基準達成建設機械認定制度の2020年燃費基

準値については達成する建設機械が増加してきており、燃費基準値を大きく下回った環境性能が極めて高い建設機械も開発されている。現行の基準値のままでは、差別化が図れないと共に、現行の燃費基準値より優れた燃費性能を有した建設機械の開発に対してインセンティブを行政として与えられない。そこで、低燃費の建設機械の差別化や、メーカーによる更なる燃費性能の向上に資する技術開発の促進を図るため、新たな燃費基準値（2030年目標）の策定に向けて取り組んでいるところである。なお、燃費性能は、NOx(窒素酸化物)やPM(粒子状物質)などの排ガス対策とトレードオフの関係にあり(図-2)、中央環境審議会での排出ガス規制の検討状況を注視して決定する。また、現行の燃費基準値は、最も優れた燃費性能を持つ機械の燃料消費量(トップランナー)を基本としているが、次期燃費基準において基準値の策定方法を検討していきたい。



図-2 排出ガスと燃費性能の関係性

② 燃費基準達成建設機械認定制度の対象拡大

燃費基準達成建設機械認定制度の対象機種については、CO2 排出寄与率の高い機種から、測定方法を検討し燃費基準値を策定している。CO2 排出削減を進めるためには、対象機種を広げることが有効であり、現在対象外でCO2 排出寄与率の高い可搬型発動発電機を対象にすることを関係団体等と連携して検討を進めている。また、令和4年4月から認定を開始する予定であるホイールクレーンであるが、現在設定している燃費基準値の最大吊り荷重(4.9ton 以上 79ton 未満)を超えた機種が出てきたことから、新たに補巻許容荷重や車両総重量、作業時出力などを考慮した上で燃費基準値を検討している。

③ 新たな補助金制度創設の検討

現在、運用されている補助金制度は、「エコリース促進事業補助金(H23~)」のみであり、更なる燃費性能の優れた建設機械の普及率向上のために、環境省と連携して「ICT活用による特殊自動車の省エネルギー補助事業」を検討している。

建設事業において省エネルギー化を実現するためには、目的物の建設にあたって効率的な作業が不可欠であり、このため、建設業等の特殊自動車の使用分野において、作業の効率化が図られる表-10

の要件を満たしたICTを活用した特殊自動車の導入を支援するものである。具体的には、従来の標準的特殊自動車と比較して高額となるICT導入コストの一部を補助する。この補助金制度は、自動ブルドーザや自動油圧ショベルなどの建設機械を対象としており、標準的な建設機械とICT建設機械との差額の2分の1を補助するものである。

表-10 補助の要件(案)

ICTの導入による作業の効率化等により、省エネ効果が見込めること
燃費基準が策定されている機種の場合、燃費基準を達成していること
2014年排出ガス基準に適合していること

5. 今後の取り組み

2018年10月にIPCC総会において採択された「1.5°C特別報告書」によれば、健康、生計、食料安全保障、水供給、人間の安全保障及び経済成長に対する気候に関連するリスクは、1.5°Cの地球温暖化において増加し、2°Cにおいては更に増加すると予測されている。また、地球温暖化を1.5°Cに抑える排出経路においては、人為起源二酸化炭素排出量が2050年前後に正味ゼロに達すると予測されている。加えて、地球温暖化を1.5°Cに抑えるには、エネルギー、土地、都市及びインフラ並びに産業システムにおける、急速かつ広範囲に及ぶ移行が必要となるとしており、これだけの規模での移行は、規模の面で前例がないが、速度の面では必ずしも前例がないわけではないとしている。

そのため、建設機械においても経済活動との調和を図りつつCO2排出削減に取り組んでいかなければならない。近年では、バッテリー駆動式ミニショベルなど、今までとは動力が異なる環境に配慮した技術も出てきている。建設機械の環境性能を高める技術開発を促進していくとともに、開発された技術の普及促進に努めていきたい。

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ご協力を頂き、感謝申し上げますとともに、引き続きより良い地球温暖化対策施策を行うべく、ご指導、ご鞭撻のほどよろしくお願い致します。

28. 一次除雪機械の作業ガイダンス装置・マシンコントロールの検討

国土交通省 北陸地方整備局 ○山田 拓
北陸技術事務所 橋本 隆志

1. はじめに

北陸地方整備局では、管内（新潟県・富山県・石川県）の直轄国道管理区間14路線、合計約1,076kmの冬期道路交通を確保するため、約500台の除雪機械を配備し除雪作業を実施している。（写真-1）

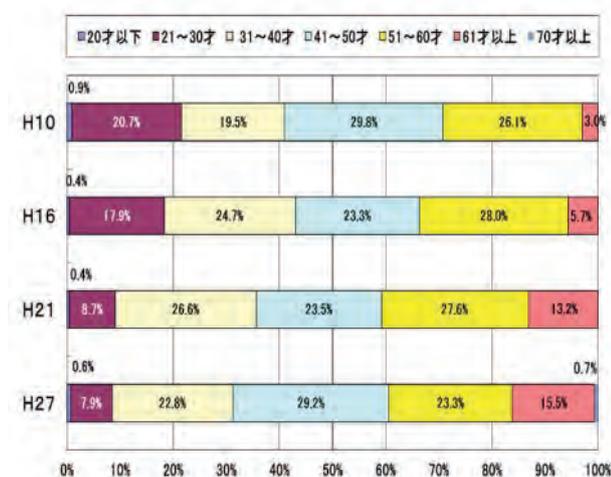


写真-1 除雪作業状況

各除雪機械の運転は、路面状況、道路構造、沿道状況等の変化に適応させた操作が必要であり、経験と熟練した技術が必要である。

昨今においては、除雪機械の熟練技能を持つオペレータの高齢化に伴う引退や新規入職者の減少により、担い手の確保が重要な課題となっている。（表-1）

表-1 除雪機械オペレータ年齢構成
（新潟、富山、石川県）直轄および地方公共団体



資料：（一社）日本建設機械施工協会 北陸支部調べ

このような背景のもと、北陸技術事務所では初心者でもベテラン並に安全で作業効率の良い除雪作業が可能となるよう、ICT（情報通信技術）を活用した「除雪機械の情報化施工技術」の検討に取り組んでいる。

2010年度から2018年度までに、凍結防止剤散布車、ロータリ除雪車、歩道除雪車、一次除雪機械（除雪トラック）の4機種の作業ガイダンス装置を開発し、順次現場への導入を進めてきた。

現在は、将来目標の除雪機械マシンコントロール化（以下「MC化」という）に向け、一次除雪機械（除雪トラック）のMC化を検討中である（表-2）。

表-2 除雪機械情報化施工技術の検討の経緯

除雪機械	年度	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	将来
凍結防止剤散布車		ガイダンス開発							ガイダンス改良		
ロータリ除雪車					ガイダンス開発				ガイダンス改良		MC化
歩道除雪車							ガイダンス開発				
一次除雪機械（除雪トラック）									ガイダンス開発 MC化検討		

本稿では、2017～2018年に実施した、一次除雪機械（除雪トラック）の作業ガイダンス装置開発及びMC化の検討について報告するものである。

2. 一次除雪機械作業ガイダンス装置の開発 2.1 機能の検討

除雪トラック作業ガイダンス装置は、過去に開発した除雪機械の作業ガイダンス装置をベースとし、除雪トラックの作業補助に必要な機能を追加、及び改良することで開発した。以下に検討した機能、及び仕様について述べる。

(1) 基本ガイダンス機能（接近警告機能）

基本的なガイダンス機能は、道路構造物への接

触事故防止，特殊な作業が必要となる区間への接近警告機能とし，進行方向、横断方向毎に設定した。

進行方向でのガイダンス対象は、橋梁ジョイント，マンホール等の障害物（写真-2）及び，家屋連単部、バス停，交差点部，ランプ等（写真-3）の作業に注意を要する区間とした。

横断方向のガイダンス対象は、作業装置と路肩端，道路中心線との離隔距離とした。（写真-4）



写真-2 進行方向のガイダンス対象 1 障害物



写真-3 進行方向のガイダンス対象 2 作業注意区間



写真-4 横断方向のガイダンス 路側端

(2) 作業装置の状態に応じた離隔基準切替

作業装置はプラウとグレーダ装置で2種類あり，グレーダ装置は助手席側に張出し、プラウは角度の変更が可能であるため，装置端部の位置が作業状況ごとに異なる。（写真-5）



写真-5 除雪トラックの作業装置

よって，プラウとグレーダ装置の状態毎に路肩端・道路中心線への離隔基準を設定し，各設定条件に応じて，接近警告ができるように作業装置の離隔基準を切替可能な仕様とした。（図-1）

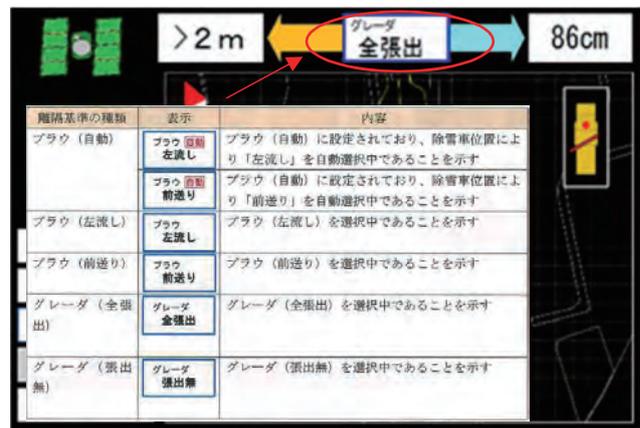


図-1 作業装置離隔基準切替機能

(3) 作業速度 (30km/h) に対応したガイダンス

除雪トラックの除雪作業速度は，約 30km/h であり，作業中にオペレータが画面を注視することが難しい。そのため，容易に確認できるような画面表示（文字+矢印）と音声により接近警告を行う仕様とした。（図-2）



図-2 画面全体での障害物への接近表示

(4) ガイダンス開始の設定値

進行方向のガイダンス開始の設定値は，一般的なカーナビを参考とし，除雪トラックと一般車両の速度差(除雪トラック 30km/h，一般車両 50km/h)で換算し設定した。（表-3）

表-3 接近警告開始の設定値

警告種類	内容（音による案内・警告も含む）
距離表示の開始 (対象物500m手前)	「あと〇〇m」の表示を開始、到達するまで継続して点滅表示
1回目の音声案内 (対象物300m手前)	障害物… 「□〇m先に障害物があります」と1回発声 注意区間… 「□〇m先に注意区間があります」と1回発声
2回目の音声案内 (対象物100m手前)	障害物… 「障害物が近づきました」と1回発声 注意区間… 「注意区間が近づきました」と1回発声
警告 (対象物50m手前)	到達するまで警告音を再生 警告画面を表示

※接近警告(表示・音声案内)開始距離は、標準値以外にも自由に設定可能

なお、ガイダンス開始の設定値は、簡易に変更可能な仕様となっている。(図-3)

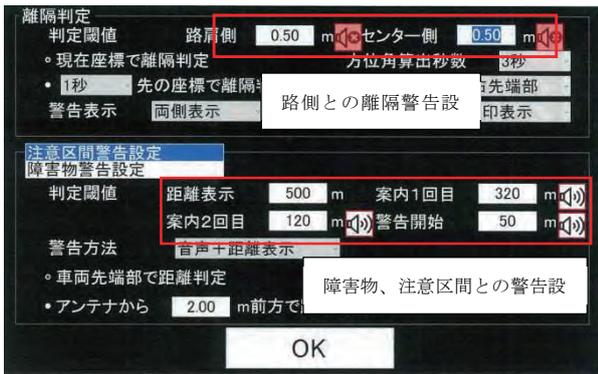


図-3 ガイダンス開始

(5) 測位方式

測位方式は、一般的なICT建機で使用実績があり、cm単位で正確な測位が可能となる、RTK-GNSS VRS方式を採用した。(表-4)

表-4 測位方式

測位方式	概要	測位誤差
VRS方式	①サービス事業者より、リアルタイムで自車位置の補正データを受信。 ②基準局を必要とせず、GPS受信機1台で高精度の測位が可能であるが、通信料が必要	水平 2~3cm 標高3~4cm

(6) 地図データ

地図データは、計測した路肩端、道路中心線データと、国土地理院の背景地図データを組み合わせ作成し、計測精度は10cm以内となるよう設定した。
また、視界不良時の位置確認、土地勘のないオペレータの作業補助のため、国土地理院の地図データをベースに距離標、交差点名を表示可能となるよう改良した。(図-4)



図-4 地図データ

2.2 作業ガイダンス装置の機器構成・仕様

完成した作業ガイダンスソフトの機器構成(図-5)・車載例(写真-6, 7), 画面構成(図-6)は、次のとおりである。



図-5 機器構成のイメージ



写真-6 アンテナ設置箇所



写真-7 ガイダンス装置本体車載例

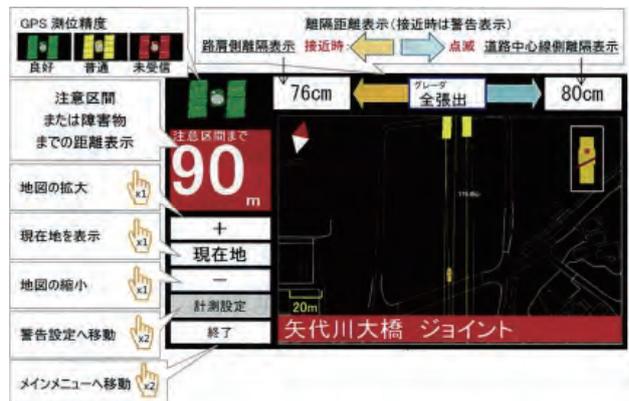


図-6 作業ガイダンスソフト画面構成

2.3 実用性の検証

今回採用した機器・地図データは、ロータリ除雪車の作業ガイダンス装置で使用実績があり、基本的な性能に問題がないことは確認済みである。

今回は、機器構成、ロータリ除雪車との作業速度の違いにより測位誤差が生じていないか検証を行った。

(1) 進行方向解析

通常の ICT 建機は位置測位を行うアンテナが2基で構成されているが、本ガイダンス装置はコスト削減のため1基で構成している。

この場合、アンテナの移動軌跡から車両の進行方向を解析する必要があり、解析完了まで正確なガイダンスを行うことが出来ない。

この解析時間が実作業ほどの程度影響を与えるか検証するため、停車状態から方向解析完了までに必要な時間と距離を計測した。

結果、平均して6秒、距離については5m～15mという結果であった。(図-7)

停車、方向転換を頻繁に繰り返す場合は、追加でセンサー又はアンテナを設置する必要もあるが、一次除雪作業は直進が主である。よって、6秒程度の解析時間であれば影響は少ないと判断し、追加設置は行わないこととした。



図-7 進行方向解析完了前のガイダンス画面

(2) 測位精度

過去に開発したロータリ除雪車(5km/h以下)と今回開発した除雪トラック(約30km/h)では、作業速度に大きな違いがある。

一時除雪作業の速度下でも、位置情報の反映が遅れることなく正確な測位を行うことが可能か、試験コースを平均速度30kmで走行し検証した。

結果、水平誤差は平均して10cm以内と各機器の公称精度内に収まっており、正常に動作することが確認できた。

2.4 導入効果

(1) 安全性・施工性向上

除雪作業に直接的な障害となる障害物をガイダンスすることにより、接触事故防止の安全性向上が見込まれる。

この他、作業注意区間(ランプ・パーキングエリア)を登録し事前ガイダンスすることにより、ミス防止による施工性向上も期待できる。

(2) 除雪作業支援効果

運転経験が浅いオペレータには安全性の向上が見込め、ベテランオペレータには、ケアレスミス防止、工区間応援で慣れない地域で作業を行う場合の支援に有効である。

3. 一次除雪機械 MC 化の検討

3.1 検討方針

除雪トラックは、フロントプラウ、グレーダ装置、サイドシャッター操作のため、多様なレバー操作が必要である。(写真-8)

この作業装置類を完全自動化することを目標に、2017年度よりMC化の検討に取り組んでいる。(写真-9)

今回は、2018年度に実施したサイドシャッター装置のMC化の検討結果について報告するものである。



写真-8 除雪トラックの作業装置操作レバー



写真-9 除雪トラックMC化イメージ

(1) 検討スケジュール

作業装置のMC化を行うためには、次の3点の技術(表-7)を組み合わせたシステムを構築していく必要がある。

表-7 MC化に必要な技術

No.	要素技術	候補技術	要素技術から得られる情報	要素技術による操作制御
1	精度の高い衛星受信機	・VRS受信機 ・準天頂衛星システム「みちびき」 ・慣性計測装置 等	自車、作業装置の位置情報の把握	車両位置情報での作業装置動作制御(誤差は数cm)
	精度の高い地図データ	・MMSデータ ・ダイナミックマップ 等		
2	センサー技術	・傾斜計 ・ストローク計 等	路面積雪量、雪抱え込み量、作業装置の状況 等 把握	雪の量に合わせた作業装置の角度、押付圧等の動作制御
3	AI技術	・画像認識技術 ・車線、障害物等認識技術	積雪の有無、障害物・人間等の感知 車線の把握 オペレータ作業履歴の蓄積 等	作業装置動作タイミングの自動化 制御 障害物・歩行者等の回避制御

このうち、高精度の自車位置情報、センサー技術については、既存技術の組み合わせで対応可能と想定される。上記2点の技術を基に、状況を判断し作業装置を自動制御するAI技術が必要となるが、既存技術では対応が難しい。

当面は作業装置毎に段階的に自動化の検討を進めていき、技術開発の動向を踏まえ、各技術を組み合わせたMC化の検討を行う予定である。(表-8)

表-8 検討スケジュール

検討年度	H29	H30	H31	R2	将来
①位置情報と合わせたマシンコントロール化					自 動 運 転 化
マシガイダンス					
サイドシャッタ操作					
ブラウ操作					
グレーダ操作					
②センサー技術と合わせたマシンコントロール化	数年後に実用化の可能性あり				
③AI技術等によるマシンコントロール化	市場の技術開発に応じて実用化を検討				

3.2 サイドシャッタ装置のMC化検討

サイドシャッタは、路面整正装置で除雪した雪を、交差点や乗入部に残さないよう、シャッタを閉めることで一時的に雪を抱え込む装置である。(写真-10)

このサイドシャッタの自動制御は、開閉操作を行う位置情報のみによる制御が可能なることから、前項で述べた3技術のうち、高精度の自車位置情報を使用したMC化に取り組んだ。



写真-10 サイドシャッタ動作状況

(1) 衛星受信機

MC化の検討では、2018年11月より正式運用された、準天頂衛星システム(みちびき)のセンチメートル級測位補強サービス(CLAS)を採用した。

移動体の公称精度は水平誤差12cm、標高誤差24cmであるが、今回新潟市内から福島県境にかけて片道68kmを試験走行した結果、誤差10cm以下が6割程度という結果であった。

トンネル等の上空遮蔽物、樹木の影響があり衛星不感地帯で大きな誤差が生じている。2019年度は、慣性測定装置(IMU)等を使用し、衛星測位の不感地帯での測位を補うシステムを検討中である。

(2) 地図データ

除雪トラックのフロントプラウ、グレーダ装置の操作は、路面の積雪・圧雪状態にあわせた複雑な操作、及び構造物を回避する操作が必要となる。

将来的なフロントプラウ、グレーダ装置の自動制御を踏まえ、MMS(モービルマッピングシステム)で取得したレーザー点群データから、除雪装置の制御に必要な道路中心線形、縁石、障害物等を抽出した地図データを作成した。(図-8、写真-11)

MMSの公称精度は、水平・標高誤差ともに±25cmであるが、今回作成した地図データは、水平誤差5cm、標高誤差6cmであった。



写真-11 MMS搭載車両

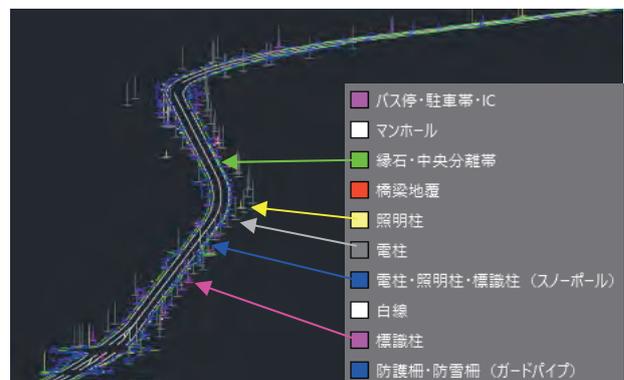


図-8 作成地図データ

(3) 制御ユニット

サイドシャッタ MC 化の制御ユニットは、タブレット PC、GPS アンテナ、除雪トラック制御装置とし、各機器を LAN 通信で交信させて制御を行う構造とした。

制御は、MMS で作成した地図データに、サイドシャッタ作動の基準点を設定し、自車位置と地図の基準点が一致した際に、サイドシャッタの制御信号出力を行う事とした。(図-9)

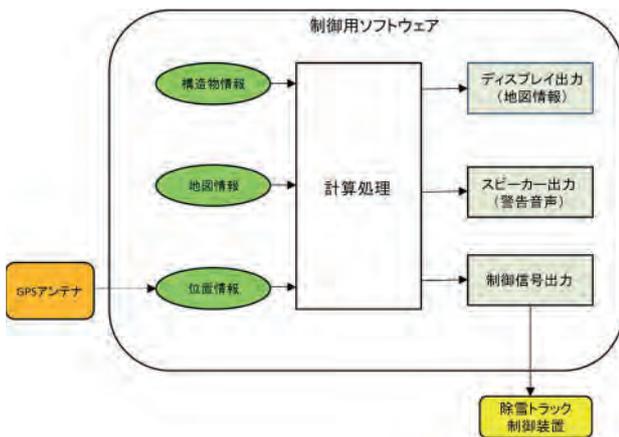


図-9 制御ユニットイメージ

(4) 動作確認試験

作成した制御ユニットにて動作確認試験を行った。

作業条件は実際の除雪作業と同等の25~30km/hとし、1kmの試験区間内に設定した、14箇所の基準点通過時の動作タイミングを計測した。

なお、基準点は確認が容易となるよう、乗り入れに設置されている視線誘導標とした(写真-12)

結果、始動誤差は平均して0.42秒、距離にして約1mであり、実用レベルであることを確認した。



写真-12 基準点

4. 終わりに

2010年度から「除雪作業の情報化施工」の取り組みとして、作業ガイダンス装置の開発を行ってきたが、今回一次除雪機械(除雪トラック)の作業ガイダンス装置の開発が完了したことにより、一通りの開発を完了することができた。

ICT(情報通信技術)は日進月歩であることから、今後は市場の技術開発動向を踏まえ、開発した各除雪機械ガイダンス装置のフォローアップを行いながら、将来目標の除雪機械自動運転化に向けた、各除雪機械の作業装置の操作自動化(マシンコントロール)の技術開発を行い、除雪作業における安全性、施工性、生産性の向上に努めていきたい。

29. ラウンドアバウトにおける除雪を考慮した エプロン端部形状の一般車両乗り上げ抑制効果

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○久慈 直之
 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 山口 洋士
 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 飯田 美喜

1. はじめに

ラウンドアバウトは、円形の平面交差点形式の一つで、環道を走行する車両が環道へ進入しようとする車両に対し優先権を持ち、環道交通流が信号機や一時停止などにより中断されない交差点制御方式である(写真-1)。一般的な無信号交差点と比較すると、車両どうしの交錯点が少なく、安全性に優れた交差点で欧米では広く普及している。

日本においても、近年、道路交通法により環状交差点の通行方法が定められたことから、徐々に普及し、今後、更なる導入が期待されている。



写真-1 ラウンドアバウト (山形県長井市)

積雪寒冷地域で、道路管理者がラウンドアバウトの導入を検討するためには、除雪に関する課題やその対応策の検討が必要である。

寒地土木研究所では、道路管理者がラウンドアバウトの導入を検討するうえでの基礎資料とするため、除雪車両を用いた走行軌跡の計測、除雪により生じる堆雪の通行車両への影響度の評価等、除雪に関する検討を行っている。

本稿では、除雪車の除雪装置接触による損傷を抑制できるすりつけ形状のエプロン端部で、段差高さ及び傾斜角度を変えた場合の通行車両の乗り上げ抑制効果について、被験者走行による車両挙動計測及び主観評価実験を行ったので報告する。

2. ラウンドアバウトのエプロン

ラウンドアバウトの幾何構造は、環道、中央島、エプロン、分離島、流入部、流出部等で構成される(図-1)。

環道は、小型自動車等の主設計車両の通行可能な幅員があり、エプロンは環道のみ幅員では通行が困難な牽引車両等の副設計車両が、環道と合わせた幅員として通行して良い部分で、環道の内側の中央島寄りに設置する。

しかし、利用者がエプロンと環道の違いを認知できなければ、小型自動車等がエプロン上を走行して交差点内を直線的に通行する状況が生じる。

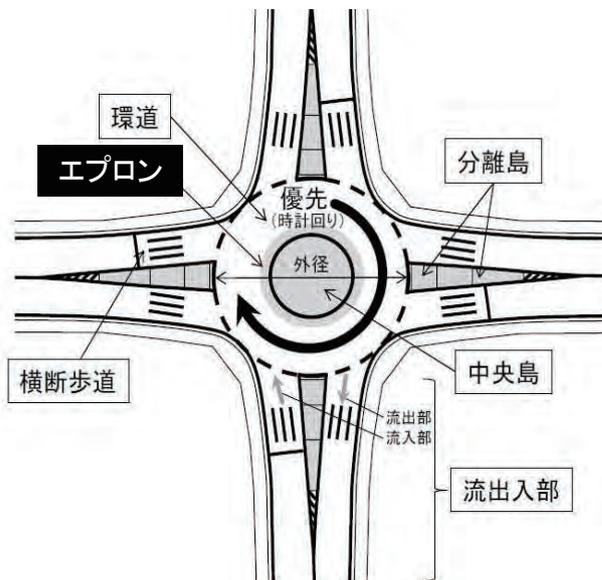


図-1 ラウンドアバウト標準図
(国土交通省道路局通知より)

この状況を抑制し、通行車両の走行位置を安定させ走行速度の抑制効果を発揮するには、環道とエプロンの境界に段差を設置することが有効とされている。しかし、エプロン端部の段差が鉛直形状の場合、除雪作業時に除雪装置の接触による損傷が想定される(写真-2上)。

過年度の試験¹⁾では、エプロン端部がすりつけ形状であれば、除雪装置の接触による損傷を抑制できることを確認した(写真-2下)。

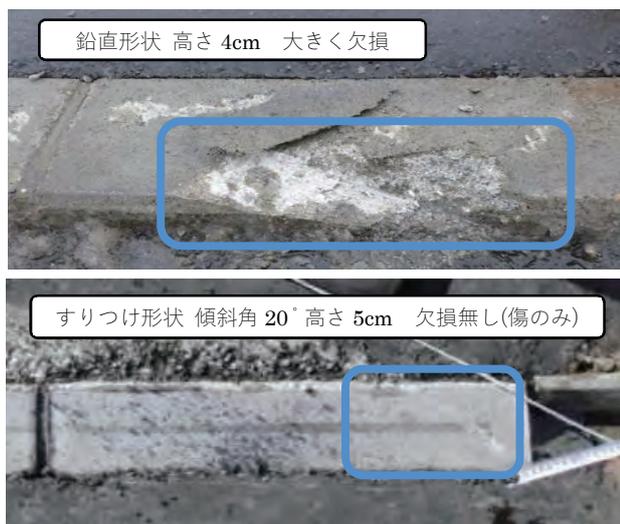


写真-2 除雪車によるエプロン端部損傷実験¹⁾

3. エプロン乗り上げ走行試験

除雪装置の接触による損傷を抑制できるすりつけ形状の段差は、車両乗り上げ抑制効果の低下が懸念される。過年度の試験¹⁾では、エプロン端部の高さが鉛直形状と同じであるすりつけ形状では、鉛直形状に比べ衝撃度は小さく、走行の支障度合いも低く、車両乗り上げ抑制効果が多少低下することを確認した。

そこで、すりつけ形状の段差高さ及び傾斜角度を変えた場合の、乗り上げ抑制効果を確認するため、被験者による走行試験を行った(写真-3)。なお、試験及びとりまとめ方法については、既往研究²⁾を参考とした。



写真-3 走行試験の様子

3.1 試験概要

走行試験は、寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路のラウンドアバウト(以下、「試験道路」という)

で実施した。試験内容は、被験者が運転する実験車両が、エプロンに乗り上げる際の車両挙動(速度、加速度)の計測と、アンケートによる乗り上げ時の衝撃に関する主観評価実験を行った。なお、被験者は実験車両に運転手又は同乗者として乗車した。

3.2 試験条件

3.2.1 エプロン

試験道路に、高さ7cmで端部がすりつけ形状のエプロンと、高さ5cmで鉛直形状のエプロンを設置した(図-2, 図-3)。すりつけ形状の傾斜角は、過年度の試験¹⁾からモータグレーダでエプロン端部の損傷が大きくなならない20°と、ホイールローダで損傷が大きくなならない30°とした。



図-2 エプロン配置図

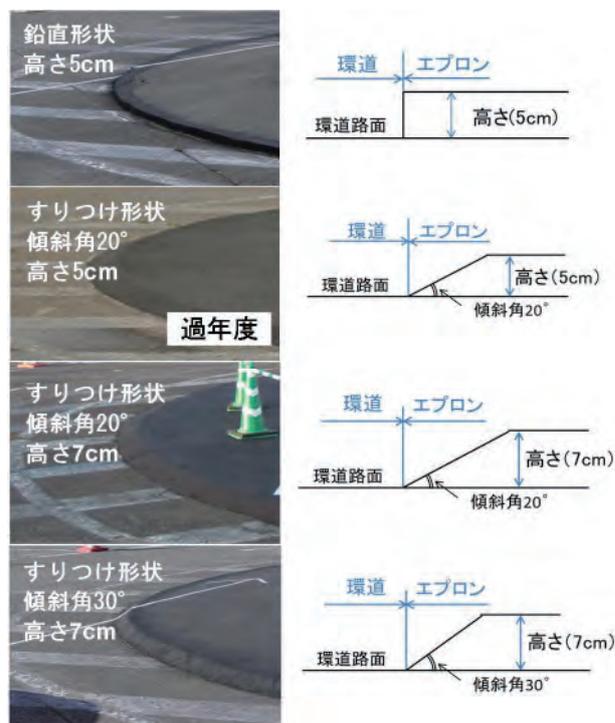


図-3 エプロン端部形状

3.2.2 実験車両

実験車両は、小型乗用車とし、過年度の実験と同形式のトヨタカローラフィールダー（全長 4.4m, 全幅 1.7m, 車両重量 1,210kg）を用いた。

3.2.3 被験者

被験者は、20歳～60歳代の一般の方、男女各5人の計10人で、このうち8人が傾斜角 20°及び 30°の両方の実験に参加した。なお、被験者には環道優先のルールなど、走行方法を事前説明し、実験の前に練習走行を行った。

3.2.4 走行方法

走行方法は、図-4のように流入部から進入して、すりつけ形状のエプロンに車両右側のタイヤを乗り上げて走行し（往路）、流出後にUターンをして再度進入し、鉛直形状のエプロンに車両右側のタイヤを乗り上げて走行した（復路）。

走行回数は2回とし、1回目は走行速度を 20km/h に指示し、2回目は速度を指示せず、自由速度とした。なお、エプロンに車両右側のタイヤだけを乗り上げるように誘導するため、写真-4に示すとおり、三角コーンを用いて乗り上げ部のエプロン幅を約 1m に制限した。



図-4 走行方法



写真-4 エプロン乗り上げ部

3.3 試験内容

3.3.1 車両挙動計測

車両挙動（速度、加速度）計測には、ドライブレコーダ（CASTRADE 製 CJ-DR450）を使用し、車両のダッシュボード中央付近に設置した。

車両挙動の評価にあたっては、エプロン乗り上げ時の速度と衝撃度を用いた。衝撃度は、エプロン乗り上げ時に、車両にかかる上下方向の加速度の最大値と最小値の差（上下加速度の振れ幅）とした（図-5）。

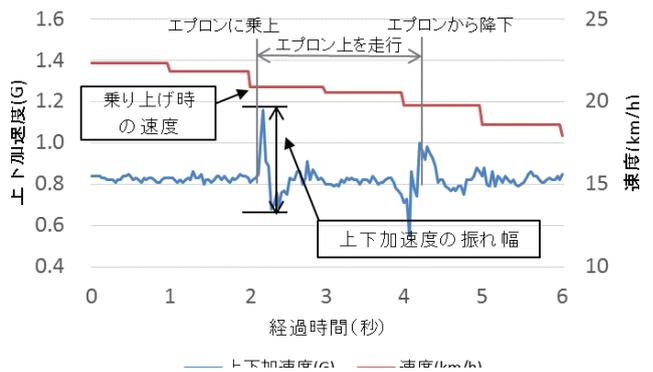


図-5 衝撃度（上下加速度の振れ幅）

3.3.2 主観評価実験

エプロン乗り上げ時の衝撃が、運転者及び同乗者に与える影響について、アンケートによる主観評価実験を行った。なお、同乗者はエプロン乗り上げの影響を受けやすい右側後部座席に乗車した。

アンケートは1回の走行終了毎に、すりつけ形状と鉛直形状、それぞれについて実施した。アンケート内容は、運転者は4項目、同乗者は2項目とし、11段階で評価した。表-1にアンケート項目と回答内容を示す。

表-1 アンケート項目と回答内容

No.	項目	段差通過時の評価	
運転者	1 走りやすさ	走りにくかった(0)	⇔ 走りやすかった(10)
	2 衝撃の大きさ	大きく感じた(0)	⇔ それほど感じなかった(10)
	3 安全性	危険を感じた(0)	⇔ 特に危険を感じなかった(10)
	4 許容性	通行したくない(0)	⇔ 通行しても良い(10)
同乗者	1 衝撃の大きさ	大きく感じた(0)	⇔ それほど感じなかった(10)
	2 許容性	通行してほしくない(0)	⇔ 通行しても良い(10)

4. 試験結果

4.1 車両挙動計測

エプロン乗り上げ時の速度と衝撃度の計測結果を図-6に、すりつけ形状の衝撃度の分布を、それぞれ過年度の結果と併せて図-7に示す。なお、速度指示の有無は区別せず、同一の条件として整理

した。

図-6の走行速度と衝撃度において、鉛直形状の回帰直線の結果は、3回とも同程度となっており、過年度も含めた3回の実験を比較することの妥当性に問題はないと考えられる。

すりつけ形状の結果については、衝撃度の低い順から、過年度の傾斜角20°高さ5cm、傾斜角20°高さ7cm、傾斜角30°高さ7cmとなった。

また、鉛直形状と比較すると、傾斜角20°高さ7cmは鉛直形状より若干低く、傾斜角30°高さ7cmは、鉛直形状よりも高くなっている。

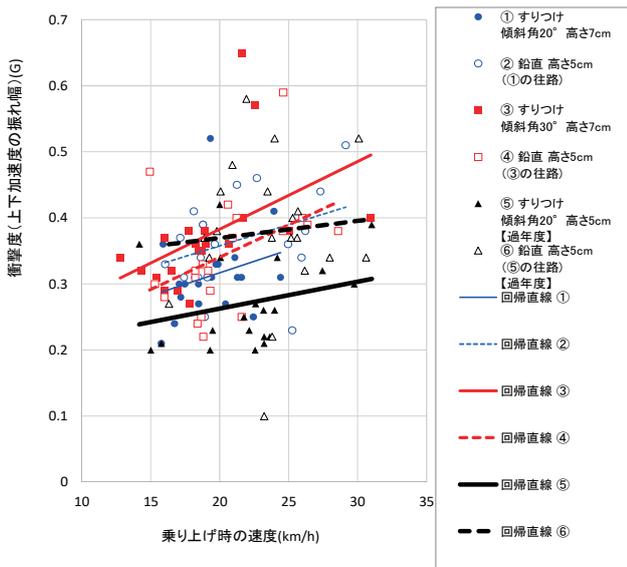


図-6 走行速度と衝撃度

4.2 主観評価実験

主観評価実験の結果について、項目別の評価点数の平均値を図-7に示す。鉛直形状については、過年度も含め3回ともほぼ同じ評価点数であった。

すりつけ形状については、傾斜角20°高さ7cmは、傾斜角20°高さ5cmよりは評価点数が低く、走行の

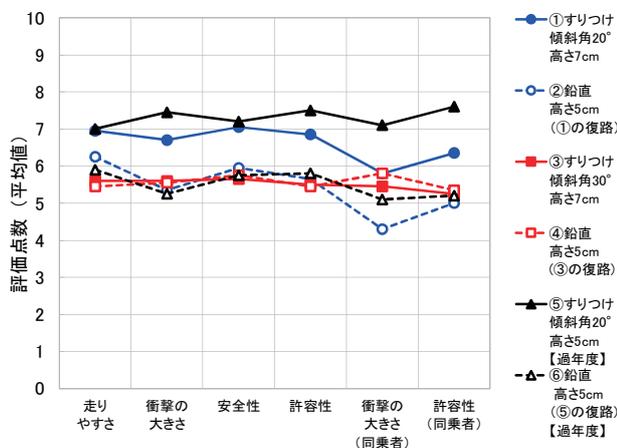


図-7 主観評価実験の結果

支障になってはいるが鉛直ほどではないという結果であった。また、傾斜角30°高さ7cmは、鉛直形状とほぼ同じ評価点数であった。

5. まとめ

車両挙動計測の結果、すりつけ形状の傾斜角20°高さ7cmは、高さ5cmの鉛直形状より衝撃度が若干低く、傾斜角30°高さ7cmは、高さ5cmの鉛直形状より衝撃度が高かった。

主観評価実験では、すりつけ形状の傾斜角20°高さ7cmは、傾斜角20°高さ5cmより走行の支障となるが、高さ5cmの鉛直形状ほどではなく、傾斜角30°高さ7cmでは、高さ5cmの鉛直形状と同程度の評価であった。

これらの結果から、エプロン端部を鉛直形状からすりつけ形状とすることによる、通行車両のエプロン乗り上げ抑制効果の低下は、エプロン高さを増すことにより補完できることを確認した。

また、その程度については、高さ5cmの鉛直形状と同程度の乗り上げ抑制効果となるすりつけ形状は、傾斜角30°高さ7cmであった。

ただし、使用する除雪機械によって、損傷を抑制できる傾斜角が異なることや、試験道路における限られた条件での検証結果であり、実道での検証結果ではないことに留意が必要である。

参考文献

- 1) 佐藤信吾・高本敏志・牧野正敏：除雪作業と乗り上げ抑制効果を考慮したラウンドアバウトのエプロン端部形状に関する検討，寒地土木研究所月報，No.774，pp.40～46,2017
- 2) 小林寛・今田勝昭・上野朋弥・高宮進：ラウンドアバウトのエプロン構造の違いによる車両走行特性に関する実験検討，土木学会土木計画学研究・講演集，Vol.51，2015

30. 1人乗り除雪グレーダの安全性向上の検討

－ 近接車両検知システムの開発 －

国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所 宇野 賢一
 国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所 ○田村 直樹

1. はじめに

道路除雪作業は、積雪寒冷地の安全で安定した冬期道交通確保において重要な役割を担っている。除雪機械の主力である除雪グレーダは、平成24年度の建設機械排出ガス4次規制に伴い、平成27年度から新たな除雪グレーダの供給が開始されているが、オペレータに加え助手が同乗できる従来の2人乗りから、オペレータのみの1人乗り仕様となった（写真1）

除雪作業は、一般通行車両との輻輳作業を伴うなど厳しい作業条件下にあり、除雪車のオペレータには「安全な車両運行」と「確実な作業装置の操作」が同時に求められる。特に除雪グレーダは作業装置の操作が頻繁であるため、助手が重要な役割を担っていたもの考えられる。

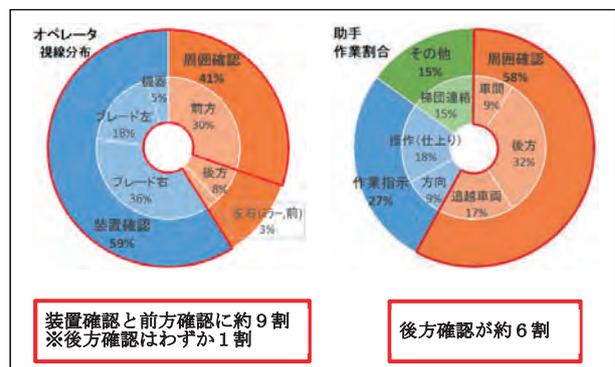
1人乗りになるといった作業環境の変化が、オペレータの負担を大きくすることは明らかであり、除雪作業への影響も懸念されたことから、2人乗り除雪グレーダにおける助手の役割を調査し、助手を欠いた作業環境を改善すべく、オペレータへの運転操作支援について検討したものである。

2. 助手の役割と操作支援すべき内容

運転操作支援を検討するにあたり、助手の役割を把握するため、ドライブレコーダにて撮影した除雪作業中の車内映像からオペレータと助手の行動分析を行い、併せてヒアリングを実施した。オペレータは作業中、車両の前方や作業装置類を多く注視しているのに対し、助手は、車両周囲の確認に作業の約6割を費やしている。その中でも後方の確認を多く行っている結果であった（図1）。



写真1 除雪グレーダの作業環境の変化



装置確認と前方確認に約9割
 ※後方確認はわずか1割

後方確認が約6割

図1 オペレータの視線分布と助手の作業割合

また、行動分析と併せて実施したヒアリングからも車両後方に係わる内容が挙げられた。

[助手からの意見]

作業中は特に、後方に接近してくる車や追越しを行う車の有無に注意している。

[オペレータからの意見]

作業中、助手からの後方接近車両や追越し車両が近づいているといった報告を受け直接確認し、その状況に応じてブレード操作や待避行動する。

上記の行動分析とヒアリング結果から、除雪作業中に確認しにくい後方から来る一般車両の有無に関する情報提供が助手の大きな役割であることから、助手が行っていた「後方近接(追越)車両の確認」、「オペレータへの報告」を支援すべき内容とし、オペレータに周囲確認を促す近接車両検知システム(以下「システム」)の検討を行った(図2)。

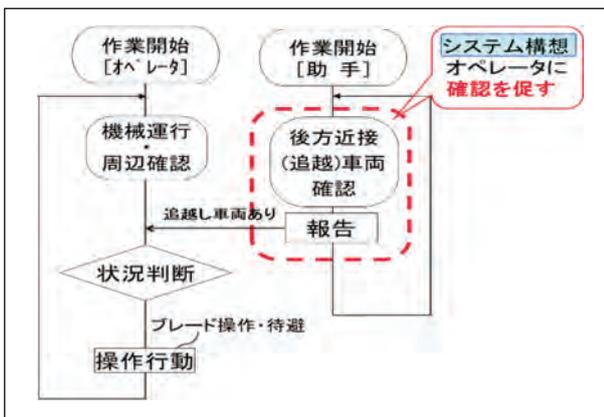


図2 2人乗り除雪グレーダ作業フロー

3. システムの概要

3. 1 機能

検知開始距離を除雪グレーダの後方約30m程度とし、検知範囲を複数とすることで、車両の「後ろ」への接近、「左後方」「右後方」からの追い越し車両を検知し、オペレータに情報提供する(図3)。

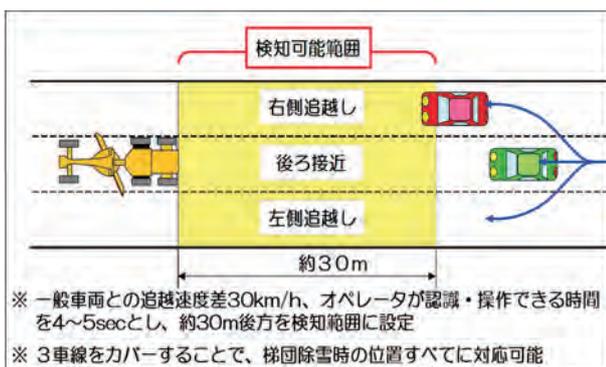


図3 機能

3. 2 検知機器

検知機器は、低温、降雪環境での使用になるため、(国研)防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの風洞装置による検証実験(共同研究)を踏まえ選定した。なお、検証実験は、赤外線方式とマイクロ

波方式の検知機器を用いている。(写真2)

共通する結果として、双方の機器とも雪の空間密度に関係なく対象物を検知可能であり風向による影響もない。ただし、検知の方式原理が違うことにより、次のような違い確認された。

赤外線式は、僅かではあるが降雪も検知してしまうこと、少量でも検知機器に着雪すると誤検知が発生する結果となった。また、機器に内蔵されているヒータ機構では、着雪を溶かすまでの能力はなかったため、利用する場合は着雪対策が必要となる。



写真2 風洞実験(マイクロ波方式の検知機)

マイクロ波式は、降雪の影響や低温による機能低下も見受けられず、機器性能を発揮する結果となった。

以上から、検知機器はマイクロ波式検知機を採用した。

3. 3 システムの構成

システムの構成を写真3、取付状況を写真4に示す。

車両接近情報の通知については、キャビン内に設置した通知装置により、ブザー音と赤色ランプ点灯で通知する。

赤色ランプは、車両を検知した車線で点灯位置が変わり、一目で車両が接近してくる方向を知ることができるものとした。

4. 実機による現地試験

4. 1 試験目的

接近車両に対するシステムの検知精度の確認と、システム有無による支援効果の比較評価を、1人乗り除雪グレーダを用いた現地試験により実施した(写真5)



写真3 システムの構成

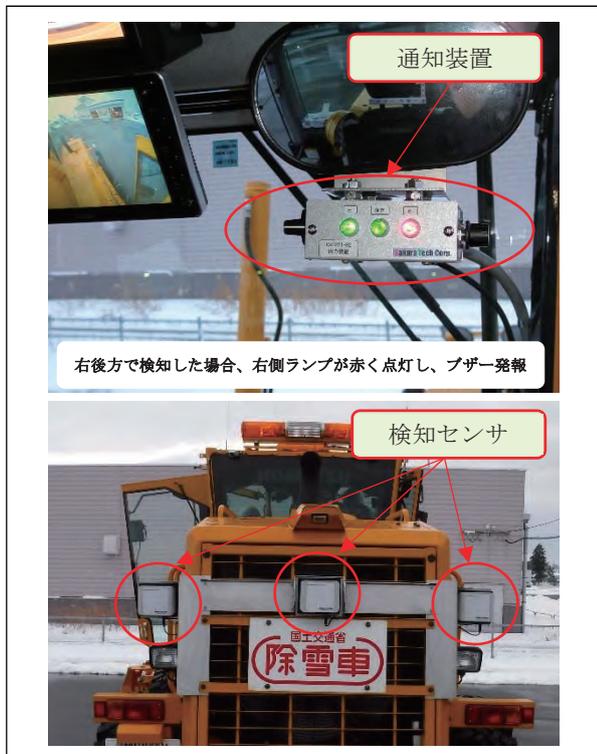


写真4 取付状況

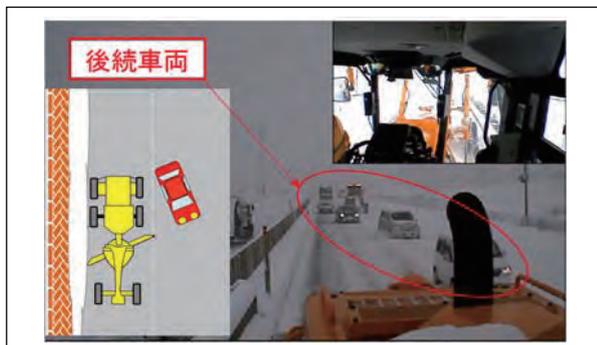


写真5 現地試験状況

4. 2 試験現場

現場試験は、次の現場条件から国道13号(湯沢河川国道事務所管内 大曲工区)にて行った。

- ・1人乗り仕様の除雪グラダが配備されている
- ・多車線区間を含む市街地である
- ・過去5年の平均積雪深60cm以上の豪雪地区。降雪、除雪回数が多い

4. 3 検知精度の確認

システムの検知精度を確認するため、後方への接近車両台数と車内に設置した通知装置の運動性をカメラによる映像から確認した。なお、試験実施は、センサの検知条件として悪い条件となる降雪の日とした。

接近車両393台のうち363台を検知し、92%の検知率となっている(表1)。

項目	1回目	2回目	3回目	4回目	計
日時	H29.2.1 2:00~6:00	H29.2.16 2:00~6:00	H29.2.16 9:00~11:00	H29.2.17 2:00~7:00	
天候	雪	雪	雪	雪	
①後続車両台数	63	119	69	142	393
②正常検知台数	57	110	60	136	363
③非検知台数	6	9	9	6	30
検知率 (②/①)	90%	92%	87%	96%	92%
非検知率 (③/①)	10%	8%	13%	4%	8%

表1 システムの検知精度

非検知車両については、後方車両が複数台連なって接近した場合、最後尾等の車両が検出できなかったものであり、「後方車両が接近している」という事象を検出できなかったものではないことから、助手が行っていた後方からの接近車両確認の補完が十分可能であると考えられる(図4)。

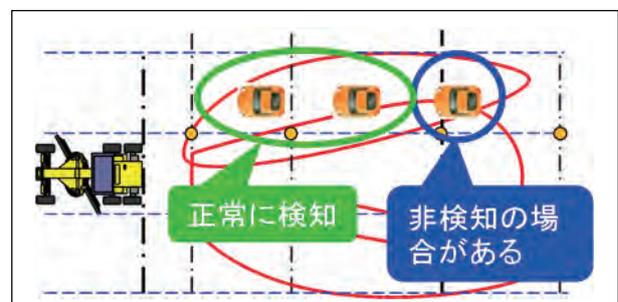


図4 非検知の事象

4. 4 システムの効果

システムの効果を検証するため、アイカメラを用いて除雪作業中におけるオペレータの視線の動きを調査した。図5は、オペレータの周囲確認割合を示したものである。

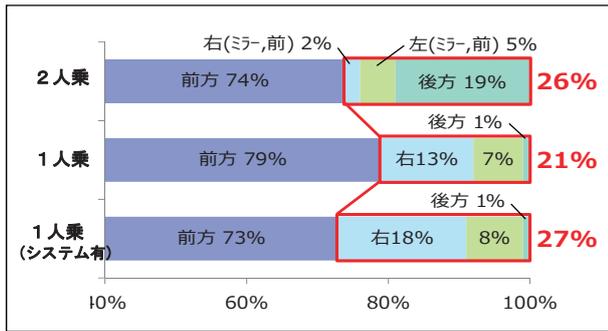


図5 オペレータの周囲確認割合

2人乗りでは、オペレータの周囲確認割合が26%であったのに対し、1人乗りでは21%に下がる結果となった。オペレータからのヒアリングでは、作業に集中することから周囲の確認ができなく、ヒヤリ・ハットの回数が増えたとの結果であり、安全性が低下している。

1人乗りシステムを導入したところ、2人乗りと同等の27%に増加した。これは、システムにより周囲確認を促すことから、助手不在により懸念される接近車両の見落としなど、作業中のヒヤリ・ハットを減らす効果を期待できる。また、周囲確認回数と接近車両を認識するための視認時間についても調査した(図6)

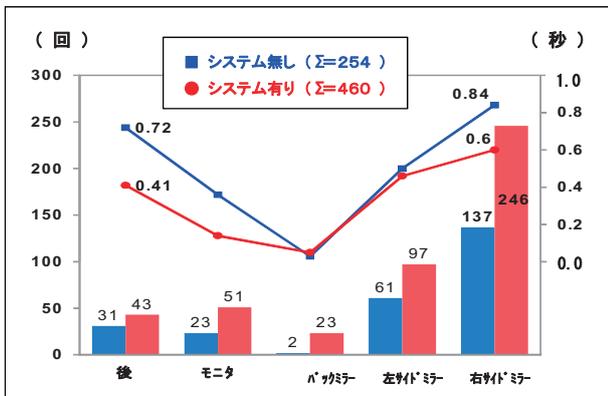


図6 1人乗り除雪グレーダの周囲確認時間と視認時間

システム無しの場合、オペレータ周囲確認回数が254回であったが、システム有りの場合460回と増加している。これは、システムが光と音によりオペレータに接近車両の確認を促す効果が現れたものであり、接近する一般車両を確実に把握できることから、安全性が向上しているものと考えられる。

オペレータからのヒアリング結果では、「システムにより接近車両を事前に掌握でき、気がついたら隣に一般車両がいたということがなくなった。」との意見もある。

視認時間の調査からは、1回の接近車両の視認

にかかる時間が減少しているのがわかる。これは、システムを使用していない場合、接近車両の存在を「探す」必要があるため1回の視認する時間が長いのに対し、システム使用時は車両が接近していることはわかっており、その存在を「確認」する時間のみであることの差と推定される。

「探す」から「確認する」に変化したことにより、作業に集中でき安全な除雪作業ができるものと考えられる。

4. 5 オペレータ等の意見

システム搭載車を使用したオペレータ等の意見は、以下のとおりである。

- ・接近する車両の気づきになり見落としが無くなることから、助手の補完として役立つ
- ・追越し車両が大型車両の場合、車幅が大きく接近しての追越しとなり、作業装置の操作や待避行動をとる必要があるため、後方車両の挙動に早く気づくことができ有効である
- ・新人の安全面の補完として検知システムがあると良い

4. 6 試験導入結果の考察

本システムの動作は従来の助手の役割と同じ接近物をオペレータに通知することで認識(確認)を促すものである。試験結果からシステム導入により2人乗り(助手同乗)に近い作業環境となり、安全性が確保できると判断される。

5. おわりに

従来、除雪グレーダでの作業は、危険察知・警告の役割を助手がオペレータを補うことで安全かつ円滑な除雪作業がなされていた。

1人乗り仕様となったことで安全性が低下することは否めないが、今回の検討により開発したシステムの導入により、作業中の安全確認を補助することで、今後配備される1人乗り除雪グレーダの安全性の向上が期待されている。

本システムは、優れた創意工夫により技術の改善向上に貢献したことが認められ、「平成30年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 創意工夫功労者賞」を受賞した。

開発したシステムは、平成30年度末時点で東北地方整備局管内配備の除雪グレーダに11台、北海道開発局及び北陸地方整備局管内に3台、合計14台導入され、今後も配備される車両についても、順次システムを導入する予定としており、今後、益々の普及が見込まれる。

31. 生産性および安全性の向上に向けた 生体情報モニタリングシステムの開発

立命館大学 ○橋口 伸樹, 児玉 耕太, 塩澤 成弘, 小林 泰三
株式会社熊谷組 黒石 真一, 久保田 泰史, 宮崎 康弘, 北原 成郎

1 はじめに

大都市圏を中心とした建設現場では、2020年開催の東京オリンピック・パラリンピックを控え、老朽化した施設の建て替えや、海外旅行者向けなどの新たな需要を見込んだ施設の建設ラッシュが続いている。しかし、労働人口および熟練作業員数の減少は各業種に見られ、とりわけ、人手不足と高齢化が続く建設・土木業界では、離職率を下げるために、その労働環境を改善することは重要な課題である¹⁾。建設工事の請負額の中に占める安全対策にかかる費用は増大しており、IoT技術などを利用し、効率的な作業と建設現場における安全管理を如何に進めていくかが注目されている²⁾。

労働集約的な建設・土木現場においては、その性質のために、多くの労働者が自身の身体能力を超え、過度な作業要求に直面している^{2),3)}。特に高温多湿などの劣悪な作業環境において、労働者は高い身体的な負荷により、慢性的な疲労の蓄積や傷害および事故が生じることで、現場生産性の停滞が懸念される。

本研究では、生体情報センサ（心拍数や移動加速度の検出センサ）を一体化した下着型シャツに、無線IoTデバイスを装着し、測定環境に設置した無線通信機器と組み合わせて、被験者の生体情報を測定するシステムを開発した。このシステムを建設現場に適用し、作業員の業務進行を妨げることなく、身体への負荷により生じる作業員の心拍数を計測し、心拍数と身体活動量の関係を確認した。計測においては、建設作業員はITリテラシーを必要とせず、夏季の屋外作業や閉鎖的な環境下で起こりやすい体調不良や、労働負荷による身体への影響を管理できるIoTシステムの開発し、安全で生産性の高い作業性を実現することを検討する。

2 本研究の特徴

労働者の安全と健康を犠牲にすることなく期待される生産性を維持するためには、建設作業員の物理的な身体負荷を可視化し、許容限界内で管理することが重要である。一方で、バイオセンサシステム（例えば、心拍センサ）を装備したウェアラブル健康機器の近年の進歩により、現場労働者

の身体的な負荷を継続的に測定するのに十分な機能を有している。

先行研究で示される、心拍予備率（%HRR）による相対的な身体負荷の測定は、心拍の個人差を正規化することによって、作業員間での身体への負荷を比較するのに有用である⁴⁾。

心拍数の測定では、多くの計測機器が存在し、被測定者の身体活動の激しさと計測時間の長さに応じ、図-1に示すような分類が行える。



図-1 身体活動と計測期間による心拍計測ツール

開発したIoTシステムでは、ウェアラブルデバイス（下着型のセンサ搭載ウェア：以下、スマートウェア）を用いて、生体情報をモニタリングし、労働者の仕事を妨げることなく継続的に心拍変動から物理的な身体負荷を測定する。労働者の安全と健康を把握し、期待される生産性を管理が可能である。被験者の身体活動量、労働時間や休憩時間といった行動パターン、および心拍数の変動などの生体情報を記録し、被験者である建設作業員ごとに分析を行なうことによって、建設現場における作業にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。

3 研究方法

3.1 データ収集システム

本システムは建設現場への適用を考え、GPSや携帯電話などの公共的な通信機能が使用できない環境下にてデータ通信を行なうことを想定した。開発したシステムの全体構成を図-2に示す。データの収集をエリアでは、7~8m間隔で複数のアクセスポイント（以下、APで称す）を設置し、スマ

ートウェアから発する Bluetooth Low Energy (BLE) の電波と生体情報を採取し、上位ネットワークとは 2.4GHz の WiFi 無線によりデータ通信を行なう。

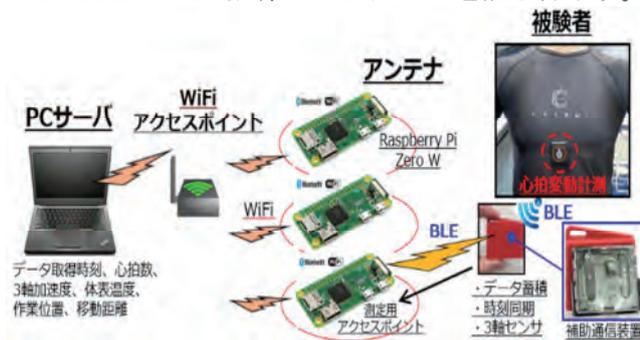


図-2 開発したIoTシステム全体構成



図-3 立命館大学と東洋紡社で開発されたスマートウェア

建設作業員はスマートウェアを着用し、バッテリー駆動の送信装置を併せて装着し、被験者の心拍変動を計測した。スマートウェアは生地に伸縮性があり、心拍を計測するための電極がウェア生地に印刷されている⁵⁾。生体情報としては、心拍数と体表温度、3軸加速度が得られ、これらデータは送補助通信機器 (Texas Instruments 社製 CS2650) から AP へ、更に PC サーバに送信され記憶される。

データ解析ではプログラミング言語 Python を用いており、ソフトウェア開発環境は Anaconda、描画や解析に使用したライブラリは scikit-learn, NumPy, SciPy, Matplotlib などを用いた。

3.2 作業員の心拍測定と労働負荷

被験者の心拍については、(1)式を用いて予備心拍率を算出して身体的な負荷を評価した。

$$\%HRR = \frac{HR_{working} - HR_{resting}}{HR_{maximum} - HR_{resting}} \times 100[\%] \dots(1)$$

ここで、 $HR_{working}$ は作業中の平均心拍数を示す。 $HR_{resting}$ は被験者の安静時の心拍数を測定するが、各被験者の休息中の最も低い心拍数を安静時の心拍数として用いる。また、 $HR_{maximum}$ は年齢から推定される当該作業員の最大心拍数で表し、 $220 - 0.7 \times \text{年齢}[\text{bpm}]$ で求める^{3),4)}。また、負荷限界の目安として以下の値から判断を行なう。

- < 30%HRR : 8 時間未満は持続できる
- 30-40%HRR : 継続監視が必要 (許容限界)
- > 40%HRR : 30-60 分間続くと注意

%HRR は連続して計算することが出来るが、労働負荷が持続できる時間を分析し、その変動を詳しく把握するために、30 分単位で %HRR を求める。

30分単位の %HRR は、30-60 分間で継続は注意すべき 40%HRR、8 時間未満持続できる 30%HRR などの目安により、身体的な負荷レベルを判別し、作業時間と休憩時間 (業務中に予定された休息) における労働負荷を比較する。

監視エリア内に複数の AP を設置し、被験者の装着する送信装置から発信する電波を利用し、作業員の行動把握を行なった。被験者の通信装置が発信する電波に対し、各ゾーンに設置した AP が受信した電波強度 RSSI[dBm] (Received Signal Strength Indicator) によって、作業員の位置を推定する。ある時刻に被験者はいずれかのゾーン近くで作業しており、作業進行により移動した各ゾーンを時刻ごとに記録した。この時系列の移動記録をもとに、各被験者の移動距離や移動時間、休憩時間を観測した。これら数値をもとに被験者の労働負荷を判断し、作業員ごとに比較が行える。

3.3 身体活動量の計測

作業行動の分析として、労働者の行動パターン (直接作業の割合、作業場所の移動、休憩、準備作業、清掃) を計測する。労働活動量の分析を行なうため、身体活動量を把握する。心拍数の変動から、直接作業、作業場所の移動、準備作業、清掃を含む、身体的な負荷と作業活動の関係をデータ採集する。身体活動量の計測は、被験者のスマートウェアに装着されたユニオンツール社製の WHS-2 に搭載された機能である 3 軸加速度計を用いて計測した。作業員の動きにおいて、左右方向: X 軸、上下方向: Y 軸、前後方向: Z 軸での各活動量が出力される。時間ごとに計測される 3 軸の各加速度に対し、作業員の身体活動量として、3 軸の移動加速度 $Moving_n$ を (2) 式で表す。

$$Moving_n[G] = \sqrt{(A_{X_n} - A_{X_{n-1}})^2 + (A_{Y_n} - A_{Y_{n-1}})^2 + (A_{Z_n} - A_{Z_{n-1}})^2} \dots(2)$$

ある観測ポイントの前後において、各軸の加速度 A_x , A_y , A_z の変化量を二乗和し、平方根を求めることで、3 軸における身体の活動量である移動加速度を求める。単位は重力加速度となり、本実験での被験者の身体活動量の単位は [mG] で表現する。

3.4 建設現場の作業エリア

実験現場の作業エリアの見取り図を図-4 に示す。作業員に装着した通信装置より発せられる生体情報を受信するために、作業エリアには、Zone 1-6 の位置 6ヶ所に AP を設定した。この作業エリア内に

において、作業員が移動しながら足場階段の鉄骨を解体し、外部へ搬送する作業が行なわれた。作業員は補助通信機器を所持し、その機器にてWHS-2のデータを受信して一旦記憶させ、作業員が作業エリアの範囲外に移動しても、データ抜けの無いことを実現している。システム全体での時刻合わせは、PCサーバと作業員が所持する補助通信装置との間で定期的に時刻同期を行ない、収集した生体情報の収集時刻の整合性を保っている。

建設現場には、作業進行の障害にならない位置にビデオ撮影機を設置し、作業員の行動を録画した。ビデオ撮影機を作業エリアにおいて対抗する位置に2台設置し、作業エリアを挟んだ両側から撮影を行なった。労働状況と作業タスク、時刻の関係を一致させるのに役立った。

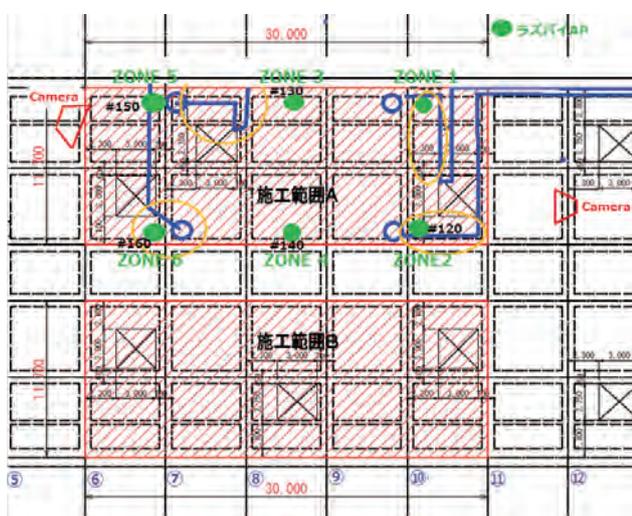


図-4 建設現場の見取り図



図-5 建設現場の足場階段

身体活動量の収取において、潜在的な課題としてはホーソン効果があるが、今回の作業エリアにおいては、我々の研究チームメンバーは被験者の行動監視は行わず、被験者の作業エリアから離れた場所に待機して実験を行なった。一般的に、肉体労働者は高負荷作業による健康上の懸念から、

日常業務の身体的な負荷にも関心がある。このため、被験者の通常の作業パターンから逸脱しないように、本実証実験に先立ち、作業員らの生産性の監視が目的ではなく、作業員の身体的な負荷を測定することを説明して実験を進めた。

4 実証実験の分析結果

4.1 被験者データの収集と分析

本システムを用いた実証実験は、2018年5月25日、6月29日、11月16日の延べ3日間で実証実験を行なった。場所は大阪市西区の建設作業所において実施した。実験対象は、足場用鉄骨材の解体作業とした。この計測において、建設現場の作業員12名（鳶職作業員が8名と作業補助員が4名）を被験者とし、心拍数および身体活動量を測定データとして収集を行なった。実験を行なった時間は、午前8時30分から午後5時までの間で、観測区間を30分間ごとと定め、被験者のデータを収集した。心拍数と身体活動量に関する情報は、建設現場において、反復作業（足場の解体および鉄骨材の搬出）を行なう鳶職作業員と、機材設置および配線敷設といった間接作業を行なう補助作業員からデータ収集した。データ収集のプロトコルや被験者のプライバシーに関する条件は、立命館大学研究倫理審査番号：BKC-人医-2017-071-1により承認を受けた。表-1に参加した被験者IDと作業日、作業内容、全観測時間[分]を示す。作業内容はデータ収集中の主な作業を記述している。作業員#1~4は、建設現場で補助的な作業を担当し、技術的な作業や管理業務は行なわない。作業員#5~11は専門技術者として高所作業が伴う足場鉄骨の解体作業を行なう。

表-1 作業員IDと作業日、作業内容

ID	年/月/日	職種	作業	観測時間
#1	2018/5/25	補助1	補助	210分
#2	2018/5/25	補助2	補助	210分
#3	2018/5/25	補助3	補助	150分
#4	2018/11/15	補助4	補助	150分
#5	2018/6/29	鳶1	足場解体	450分
#6	2018/6/29	鳶2	足場解体	300分
#7	2018/6/29	鳶3	足場解体	300分
#8	2018/6/29	鳶4	足場解体	450分
#9	2018/11/15	鳶5	足場解体	510分
#10	2018/11/15	鳶6	足場解体	510分
#11	2018/11/15	鳶7	足場解体	510分
#12	2018/11/15	鳶8	足場解体	510分

4.2 被験者データの収集と分析

各被験者の平均の心拍数と労働負荷の%HRR、身体活動量を時間帯別に収集した。予定された作業と休憩を両方含めた全観測時間帯において、30分間ごとの%HRRを求め、%HRRは30%未満の場合、30-40%の場合、40%以上の場合で分類した。

計12名の被験者の計測より、30分単位のデータセットが148セット収集され、データ収集の準備時間は除き、1作業日の観測時間は作業と休憩を含め、最短150分～最長510分であった。

全被験者の労働負荷%**HRR**は、最低1.9%～最高60.6%であった。前述のように、表-1の作業員#2および#5-12の%**HRR**は30%以上が見られた。労働負荷が大きい(%**HRR**が高い)労働者は、労働負荷以外で他の要因としては、比較的年齢が高いことや、BMIが高い被験者(表-1の作業員#2)である可能性がある。また、労働者の作業安全と健康リスクが、労働負荷(%**HRR**)とその継続期間に依存することに配慮が必要であり、今回の結果でも%**HRR**の許容限界(例えば、30%～40%**HRR**)が長く続いていた。

各作業員の%**HRR**が計算される各データ区間の時間は30分間としているが、作業員の%**HRR**の安全限界は、建設作業においては特に定義されていない。Nortonらは、有酸素運動のガイドラインとしては40%**HRR**が30-60分以上持続すると健康リスクがある⁶⁾と述べている。また、通常の8時間業務におけるガイドラインとしても、40%**HRR**は身体的に高い負荷⁷⁾とみなされる。このような指針は30-40%ほどの**HRR**を労働負荷の上限とし、継続して監視する必要があることを示唆している。

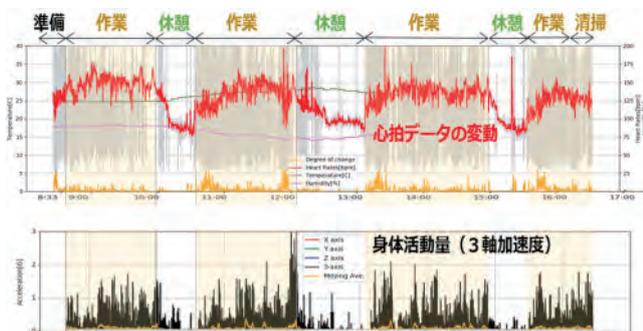


図-2 心拍数と身体活動量の終日の変化(作業員: 鷹7)

表-2 被験者別の心拍数と労働負荷

被験者	推定 最大心拍数	推定 休息時心拍数	平均 作業時心拍数	SD	全時間帯 平均心拍数	SD	全時間帯 平均% HRR	SD	全時間帯 平均活動量
補助1	178	76	93.00	4.64	90.71	5.71	14.43	5.60	96.14
補助2	170	83	114.40	9.21	108.43	13.06	29.23	15.01	109.14
補助3	193	75	93.33	4.51	89.40	6.35	12.20	5.38	159.6
補助4	161	76	91.50	6.24	90.4	5.94	16.94	6.99	74.2
鷹1	200	77	123.27	19.35	115.07	21.64	30.95	17.59	184.07
鷹2	180	79	107.00	14.22	102.00	14.60	22.77	14.45	99.27
鷹3	188	76	118.73	12.51	110.47	17.79	30.77	15.89	155.6
鷹4	179	75	109.36	7.41	102.00	14.15	25.72	13.71	176.02
鷹5	179	75	125.15	10.78	117.35	18.17	40.72	17.47	139.71
鷹6	180	72	119.62	11.67	109.47	21.40	34.69	19.81	147.41
鷹7	184	80	132.38	7.74	124.24	16.73	42.53	16.09	137.71
鷹8	198	74	122.54	12.09	111.94	16.23	33.82	13.09	102.06

鷹7の作業員を例として、実験で観測した心拍数と身体活動量の終日変動を図-2に示す。表-2には、作業員全員分の年齢から推定する最大心拍数と休息時の心拍数、全時間帯での心拍数の平均と標準偏差、全時間帯での%**HRR**の平均と標準偏差、全時間帯での平均身体活動量を示す。

作業補助員のなかで、補助2の作業員は身体活動量の高さに比べて平均%**HRR**が高く、これは補助2の作業員の年齢から推定される最大心拍数が低いことによるものと思われる。また、鷹1の作業員は全被験者のなかで、全時間帯において身体活動量が最も高かったが、作業時心拍数の平均%**HRR**はあまり高くなかった。

身体的な負荷の作業によって、安全限界を超えるデータ(30%**HRR**、および40%**HRR**)の割合を図-3に示す。各労働者のデータ総数のうち、30%**HRR**以上の負荷が全体時間の半分を超える作業員が複数いた。鷹3および鷹5-鷹8の作業員は、勤務時間の半分以上において、30%を超える高い負荷に直面しており、鷹5と鷹7の作業員は頻繁に40%**HRR**を超えており、安全性および健康上において危険である可能性がある。

鷹2は作業チームのなかで、職長と呼ばれる作業リーダーの役割を担当していた。撮影ビデオで確認すると、指示的な作業が多く、他作業員と比較して肉体的な労働を受け持っておらず、これがさほど心拍数が高くなっていない理由と思われる。

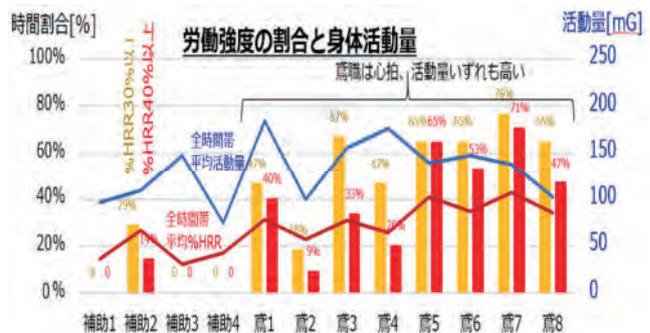


図-3 被験者別の%**HRR**の割合と活動量

鷹5-8の作業員は、身体活動量が比較的少ない割に、30%**HRR**および40%**HRR**が高い。彼らは、主に足場階段の高所で長時間の作業を担当しており、鉄骨材料の解体し、足場階段下において鉄骨材を待ち受ける他の作業員に搬送する作業を行なっていた。広い範囲を激しく歩き回る身体活動ではなかったが、鉄骨材を解体して床面へ降ろすといった作業が、心拍数の高い状態が継続された理由と思われる。

鷹7の作業員は、身体的な活動量は全作業員の中で最も活動量が高い。この作業員は足場階段下で解体された鉄骨材を受け取り、回収場所まで持ち運ぶ作業を担当していた。足場階段と鉄骨材の搬出場所との間を往復する搬送作業のため、全体的に身体活動量が高くなったと推察される。

4.3 心拍変動と身体活動量の相関関係

表3に全被験者の労働負荷を表わす%**HRR**と、身体活動量の相関係数の関係を表わす。いずれの作業員も%**HRR**と活動量の相関が高いことが分かる。

表-3 作業員別の実作業時間と相関係数

ID	被験者の職種	%HRRと活動量の相関係数 r
#1	補助1	0.885
#2	補助2	0.933
#3	補助3	0.961
#4	補助4	0.931
#5	鳶1	0.765
#6	鳶2	0.588
#7	鳶3	0.724
#8	鳶4	0.631
#9	鳶5	0.781
#10	鳶6	0.871
#11	鳶7	0.790
#12	鳶8	0.918

相関係数を求めるにあたり、時間経過とともに身体的な活動に応じて%HRRも変動しており、作業時間30分ごとの%HRRと身体活動量における相関係数を求めた。

図-4に示す労働負荷と身体活動量の関係図は、作業現場での職長（鳶2）の結果である。作業リーダーとして、自身の労働作業と他への作業指示、会議への出席のために現場から外れる時間もあった。このため、他の鳶職作業員と同レベルの労働負荷の大きさも見られたが、継続的に労働活動は行っていないことから、労働負荷と身体活動量の相関係数（ $r=0.588$ ）はやや低い。

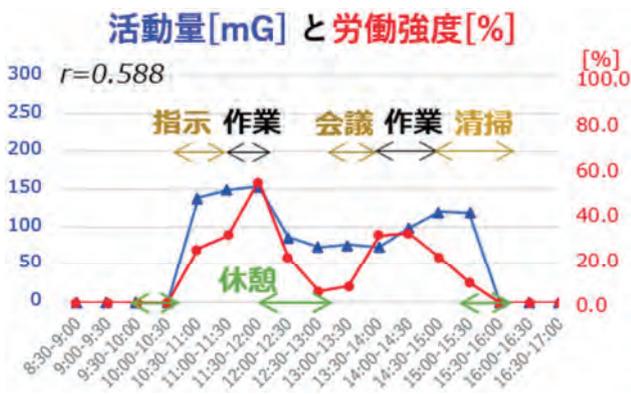


図-4 労働負荷と身体活動量の時間経過(鳶2)

図-5は鳶1、図-6は鳶7の%HRRと身体活動量の相関を示す。足場鉄骨の解体作業に関して、時間経過に応じた労働負荷と身体活動量、終日での相関を表す。図5(鳶1)の作業員の相関係数は $r=0.765$ 、図6(鳶7)の作業員の相関係数は $r=0.790$ で、いずれも%HRRと身体活動量の相関は高い。

図5の鳶1の作業員は、午前と比べて午後からの労働負荷と活動量が高くなっている。当日の現場では天候悪化が予想されており、現場監督へのインタビューにより、午後からの作業ペースを意図的に速めたことを情報聴取している。このことが、鳶1の労働負荷が午後から上昇した要因と考える。

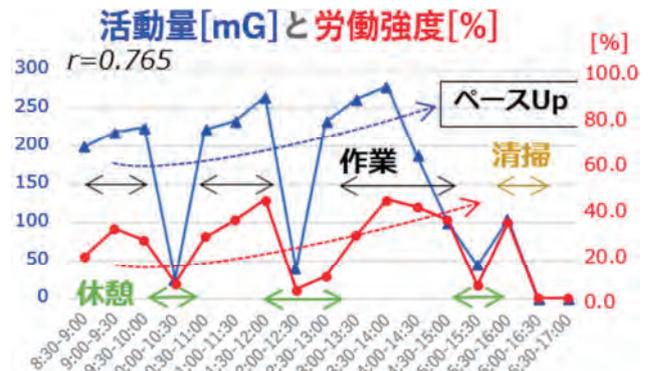


図-5 労働強度と身体活動量の時間経過(鳶1)

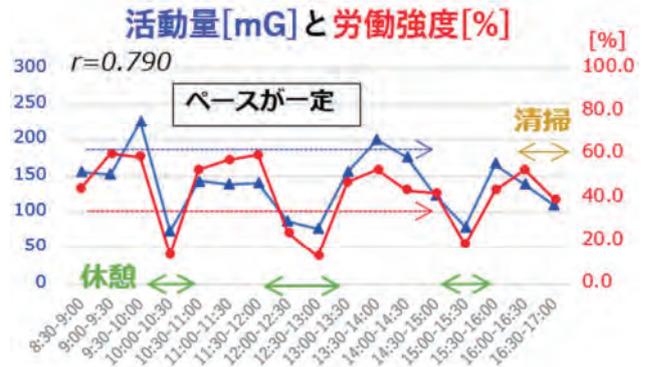


図-6 労働負荷と身体活動量の時間経過(鳶7)

図-6の関係図は、図-5とは異なる実験日と作業員の結果であるが、作業は変わらずに進行しており、作業と休憩で変化は見られるが一定のペースで作業が行われていた。他の鳶職作業員も、午前から午後にかけて、作業時間中の作業負荷と活動量は、同じ負荷の傾向が見られた。当日の現場においては、気象変動はなく、1日を通じて平均的な作業ペースが守られていた。途中での作業ペースに変化もなく、16:30過ぎまで作業が継続された。

午後の休憩後の15:30以降の作業では、%HRRと身体活動量がいずれも下がっている。これは作業終了前に清掃作業が実施されており、直接的な労働作業と比べ、%HRRと活動量が低くなっている。

5. 考察

5.1 建設作業員の心拍と身体活動量

不規則な作業進行、労働条件の変化、日々の身体的条件の変化などにより、作業中に変化する建設労働者の身体的な負荷を継続して測定できる本システムの可能性を確認した。具体的には、スマートウェアを用いて測定した身体的な負荷の変動は、作業員の年齢、労働条件による身体的な負荷として、作業員ごとに顕著な差を示した。

この実験において、労働者の身体的な負荷は仕事のパターンによって、日中に大きく変化することが示された。今回の実験において、被験者である建設作業員の労働負荷は総じて高く、先行研究の指摘⁷⁾の従うと、連続作業を避けた方がいいとされる、 $\geq 40\%$ HRRの負荷が見られた。先行研究で

は、労働者の心拍数と生産性に着目し、>33%HRRが継続することで、その生産性の低下を指摘する報告⁸⁾がある。先行研究に示されるガイドラインは、作業員の過度な身体的な負荷を抑制し、生産能力の低下を回避するために、労働負荷の管理の必要性を示唆している。

5.2 生体情報による作業員の労務管理

本実験の結果より、建設作業員の心拍数は作業における活動量に比例し、心拍数と身体活動量の間に高い相関傾向が見られた。心拍数と活動量を比較することによって、作業員の潜在的な健康障害の発生を未然に防ぎ、健康障害の予測できる機会がある。具体的には、高い労働負荷の後に適切な休憩が確実に取られていることは、作業員の心拍数および活動量の変化を見ることで確認が容易となる。また、同じ活動量や作業タスクを実行する作業員の間で、身体的な応答が異なる場合、作業現場において異常状態を引き起こす潜在的な要因を見つけられる可能性がある。さらには、高い労働負荷が継続されるが作業進捗が停滞し、予定する工程計画が満たされない場合、作業員の労働負荷を把握しながら、作業員の増員や適切な計画変更を定量的に判断してもよい。こういった知見は、過度の身体的な負荷に直面しないように、作業員間において身体的な負荷を考慮した新たな作業方法の設計につながるかもしれない。

本研究の実用的な効用として、建設業就業者の意識に関連する心拍数を観察することにより、作業員の労働負荷を定量的に把握できることである。普段から建設作業員の心拍変動をモニタリングし、建設業就業者の作業中の労働負荷および活動量を労務管理として把握し、建設作業員の作業環境の改善や労働管理に繋げることが利用できる。

これら結果に基づいた将来の研究では、身体的な負荷が建設現場においての生産性の損失や事故に対する安全性、および怪我や病気などの健康上の被害に、どのように関係しているかを判断することが可能になるかもしれない。今後、さらに詳細な生体情報の計測し、作業員の労働における身体的な負荷を測定することにより、安全性に配慮した生産性向上の検討に役立てたい。

6. まとめ

スマートウェアを使用した生体情報の測定システムを開発し、実際の建設現場において12名の建設作業員の労働負荷と身体活動量を測定し、本システムの有効性・有用性を調べた。進行中の作業のなかで、%HRRを指標として使い、作業員の身体に影響を及ぼす負荷を確認することができた。ホルター心電計や12誘導心電図による測定は、作業活動量の激しい建設現場の労働作業に適用するのは非常に困難であるが、本システムのようなス

martウェアを用いて心拍数を連続的に測定し、作業員ごとの心拍数を正規化して定量比較できることの実用的な意義は大きい。今回の実証実験では、労働者の職種や年齢、時間経過により、労働負荷がどのように変化するかを理解するための豊富な情報が収集できた。これらの検討は、労働者の過度な労働負荷や疲労を軽減し、健康への被害を回避することで、生産性を維持しながら労働者の安全性の向上に寄与すると考える。

7. 本研究における今後の課題

実験を実施した建設現場は、構造的に天井が存在し、基本的には屋内構造物であった。本システムは、無線機材および通信機器、PCサーバを用いてネットワークを構築しているが、全天候型に対応した性能は有していない。屋外作業の土木工事や造成工事を想定する場合には、各機材に対し、防水性能が必要と考える。また、梅雨や夏場の労働である場合、作業員の発汗により、何度も下着を着替えることがあり、長時間のスマートウェアの着用には課題があると予想される。

謝辞: 本研究は国土交通省平成29年度建設技術研究開発助成制度政策課題解決型「建設現場におけるスマートウェアを用いた安心・安全及び生産性向上IoTシステムの開発」の助成を受けたものである。本研究の遂行に関して協力・助言いただいた立命館大学 建山和由先生、石田修一先生（現東北大学）、東京理科大学 小林和博先生（現青山学院大学）、国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所 高津知司先生、野村正之先生に謹んで感謝する。

参考文献

- 1) 建設産業の現状と課題-国土交通省,
<http://www.mlit.go.jp/common/001149561.pdf>
- 2) 建設産業をめぐる現状と課題-国土交通省,
<https://www.mlit.go.jp/common/001221442.pdf>
- 3) Sungjoo Hwanga, et al., Wristband-type wearable health devices to measure construction workers' physical demands, *Automation in Construction*, 83, PP.330~340, 2017
- 4) U.C. Gatti, et al. An exploratory study of the relationship between construction workforce physical strain and task level productivity, *Constr. Manag. Econ.* 32 (6), PP.548~564, 2014
- 5) Naruhiko Shiozawa, et al., Measurement of Electrocardiogram in Water with the Shirt-Type Electrocardiogram Electrode, *The IEEE Conference on Biomedical and Health Informatics*, 2018
- 6) K. Norton, et al., Position statement on physical activity and exercise intensity terminology, *J. Sci. Med. Sport* 13(5), pp.496~502, 2010
- 7) J. Ilmarinen, Job design for the aged with regard to decline in their maximal aerobic capacity: part I—guidelines for the practitioner, *Int. J. Ind. Ergon.* 10 (1), PP.53~63, 1992
- 8) N. Gupta, et al., Face Validity of the Single Work Ability Item: Comparison with Objectively Measured Heart Rate Reserve over Several Days, *Int. J. Environ. P. Health*, 11, pp.5333-5348, 2014

32. 自走中の荷振れに対するドラグ・ショベルの動的安定性

(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

ドラグ・ショベルは建設機械の中でも最も災害の多い建設機械である¹⁾。近年では、クレーン機能を有する機種が広く普及しており、クレーン作業時の死亡災害も多く発生している²⁾。著者らは過去に実機を用いて走行路の地盤条件や走行速度等の違いが走り荷重変動に与える影響について調査を行った³⁾。しかしながら、既報では、機械の移動に伴う走り荷の「荷振れ」の影響については考慮していなかった。荷振れによって静止時よりも作業半径が増加するとともに転倒モーメントも増加することが考えられる。

本稿では、ドラグ・ショベルによる災害動向を整理して示すとともに、既往のデータを再度解析して、荷振れが作用半径の増加に与える影響を検討した。

2. 災害分析

2.1 ドラグ・ショベルによる死亡災害

解析に使用したデータは、厚生労働省の「職場のあんぜんサイト」に掲載されている死亡災害のうち、直近の3年（H27～H29）について詳細に分析を行った。図-1に、H22～H29の建設業およびドラグ・ショベルにおける死亡災害の推移を示す。当該期間の建設業における死亡者は2737人（平均342.1人/年）であり、H26年～H29にかけてやや減少傾向にある。一方、ドラグ・ショベルによる死亡者は263人（平均32.8人/年）であり、建設業におけるその約1割を占めている。

図-2にドラグ・ショベルにおける「事故の型」別の災害発生状況を示す。H27～H29の3年間でドラグ・ショベルによる死亡者は84人であった。

「事故の型」別の災害発生割合をみると、「激突され」が24人（28.6%）と最も多く、次いで、「墜落、転落」が23人（27.4%）、「はさまれ、巻き込まれ」が21人（25.0%）の順となっている。これら3つの事故の型で、全体の約8割を占めている。

次に、災害の多い3つの「事故の型」について詳細に分析した。図-3に分析結果を示す。

(1) 「激突され」(24人, 28.6%)

「激突され」(24人)における主な災害は、クレーン作業時に発生した災害が10人、ドラグ・ショ

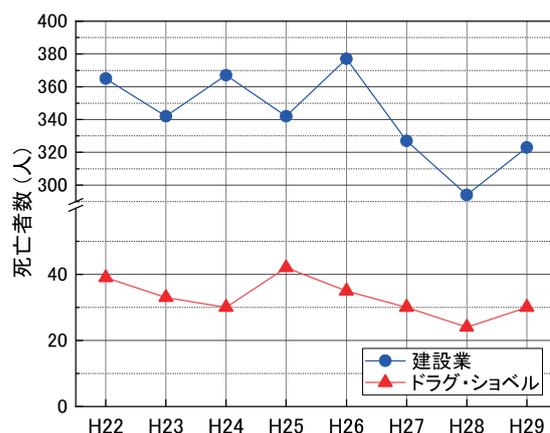


図-1 建設業およびドラグ・ショベルにおける死亡災害

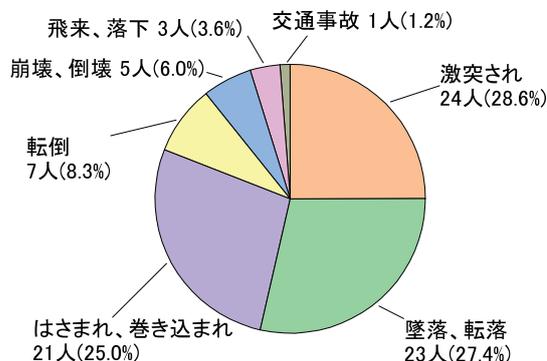


図-2 ドラグ・ショベルにおける「事故の型」別災害発生状況 (H27～H29)

ベルのバケットに激突された事例が5人、機械の走行・移動中に機械にひかれた事例が2人などであった。

(2) 「墜落、転落」(23人, 27.4%)

「墜落、転落」(23人)における主な災害は、クレーン作業時に発生した事例が8人、次いで、機械の積み込み・積み下ろし作業中に発生した事例が6人、斜面等を走行中に転落した事例が5人などであった。

(3) 「はさまれ、巻き込まれ」(21人, 25.0%)

「はさまれ、巻き込まれ」による主な災害は、機械の移動時に作業者が轢かれた事例が9人、旋回

ドラグ・ショベルによる死亡災害 (84人)

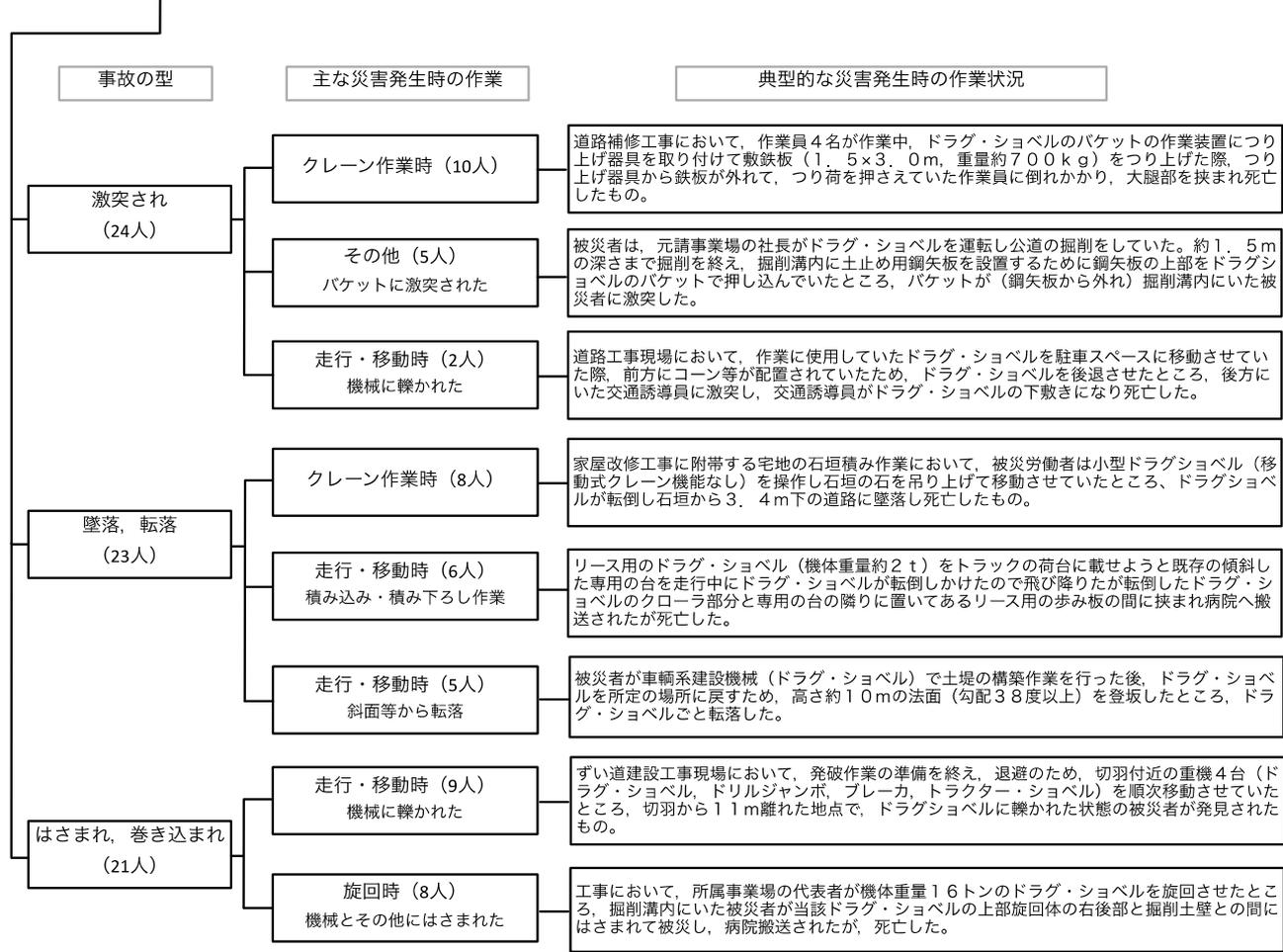


図-3 ドラグ・ショベルにおける死亡災害の詳細分析 (H27~H29)

時に機械とその他の構造物等に挟まれた事例が 8 人であった。

2.2 災害発生時の作業

災害発生時の作業別に結果をとりまとめたものを表-1 に示す。

最も死亡災害の多い作業は「クレーン作業」であり、24人(28.6%)であった。具体的には、機械が転倒した事例(9人)や、つり荷が落下して被災した事例(4人)、つり荷が激突して被災した事例(4人)などであった。

次いで災害の多い作業は、機械移動時に周辺で作業していた作業員が轢かれた事例が12人(14.3%)、旋回時に機械と構造物等にはさまれた事例が12人(11.9%)、機械の積み込み、積み下ろし作業中に登坂用具が重機運搬用トレーラーから外れて機械とともに転落した事例が8人、機械移動時に斜面等から転落した事例が8人、機械が法肩等に位置した際に地山が崩壊して機械とともに転落した事例が6人であった。

以上の結果から、ドラグ・ショベルは掘削用機械

表-1 災害発生時の作業 (H27~H29)

主な災害発生時の作業	死亡者数 (人)
クレーン作業時	24
機械移動時 (機械に轢かれた)	12
旋回時 (機械とその他に挟まれた)	10
機械の積み込み、積み下ろし作業時	8
機械移動時 (斜面等から転落した)	8
機械移動時 (地山の崩壊に伴い転落)	6
その他 (機械の誤操作)	2
その他 (バケットに激突された)	6
その他 (分類不能)	8
合計	84

でありながら、掘削作業時の災害は少なく、クレーン作業時や機械移動時に災害が多く発生していることがわかった。

3. つり荷走行時の荷振れが作業半径の増加に与える影響

つり荷走行時に機械が転倒した事例は多くない

表-2 実験条件

実験名	作業半径 R_W (m)	つり荷の重さ W_o (kN)	走行速度 v (km/h)	走行路
Cs1	3	2.5	2	理想地盤 (コンクリート)
Cs2				平坦地盤 (関東ローム)
Cs3				起伏地盤 (関東ローム)
Cs4	2.1	5.0	2	理想地盤 (コンクリート)
Cs5				平坦地盤 (関東ローム)
Cs6				起伏地盤 (関東ローム)

ものの、クレーン機能付きドラブショベル特有の災害である。著者らは過去に実機を用いて走行路の地盤条件や走行速度等の違いが、つり荷走行時の荷重変動に与える影響について調査を行ったが、機械の移動に伴うつり荷の「荷振れ」の影響については考慮していなかった³⁾。荷振れによって静止時よりも作業半径が増加し、機体が不安定化することが考えられる。そこで、既往のデータを再度解析して、荷振れが作業半径の増加に与える影響を検討した。

3.1 実験の概要

(1) 実験条件

図-4につり荷走行実験の概要を示す。本研究では、転倒災害が多く発生している小型の機種（機械総重量43.5kN、平均接地圧26kN/m²）を用いた¹⁾。表-2に実験条件を示す。作業半径 R_W は3mおよび2.1mである。また、定格荷重はそれぞれ、5kNおよび10kNであるため、つり荷の重さ W_o はその1/2とした。

走行路は、水平堅固の理想的な走行路を模擬したコンクリート床（以下、理想地盤という）と、関東ロームを盛土して作製した平坦な地盤（以下、平坦地盤という）および起伏を有する地盤（以下、起伏地盤）の3種類である。図-5に平坦地盤および起伏地盤の地表面形状を示す。なお、実験の詳細については既報を参照されたい³⁾。

(2) つり荷の揺動解析

つり荷走行時の機体およびつり荷の揺動を高速カメラで撮影して画像解析により荷の振れ角 θ_s 等を求めた。

画像解析では、図-4に示す実験場の壁面に設置したターゲットマーカーAおよびA'を結ぶ線と、ドラグ・ショベルのアームの先端に設置したマーカーBとつり荷に設置したマーカーB'を結ぶ測線とのなす角度 θ を求めた。本研究では、 θ とその平均値 θ_{ave} の差をつり荷の振れ角 θ_s と定義した。

3.2 実験結果

θ_s の結果をボックスチャートで示したものを図-6に示す。図中には、1, 25（第一四分位）、50（中央値）、75（第三四分位）、99パーセンタイルのほか、最小値および最大値、平均値を示した。 $W_o=2.5kN$ の結果（図-6(a)）をみると、理想地盤の

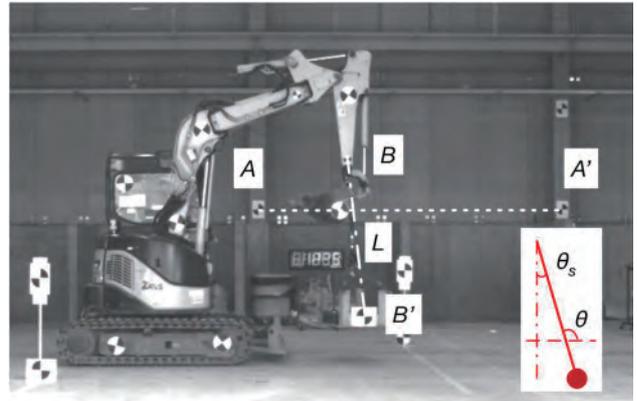
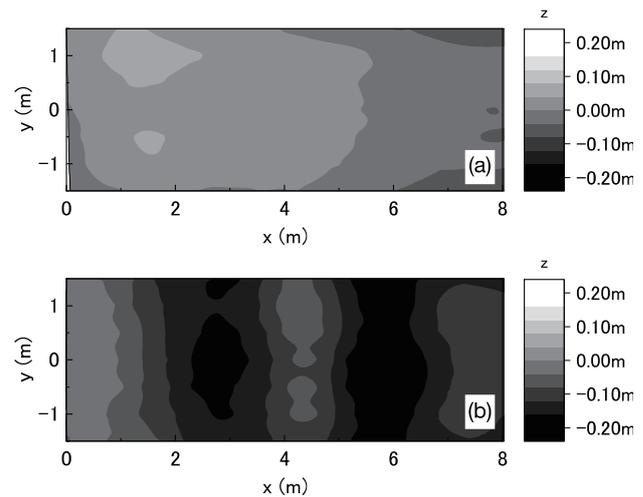


図-4 つり荷走行実験の概要³⁾

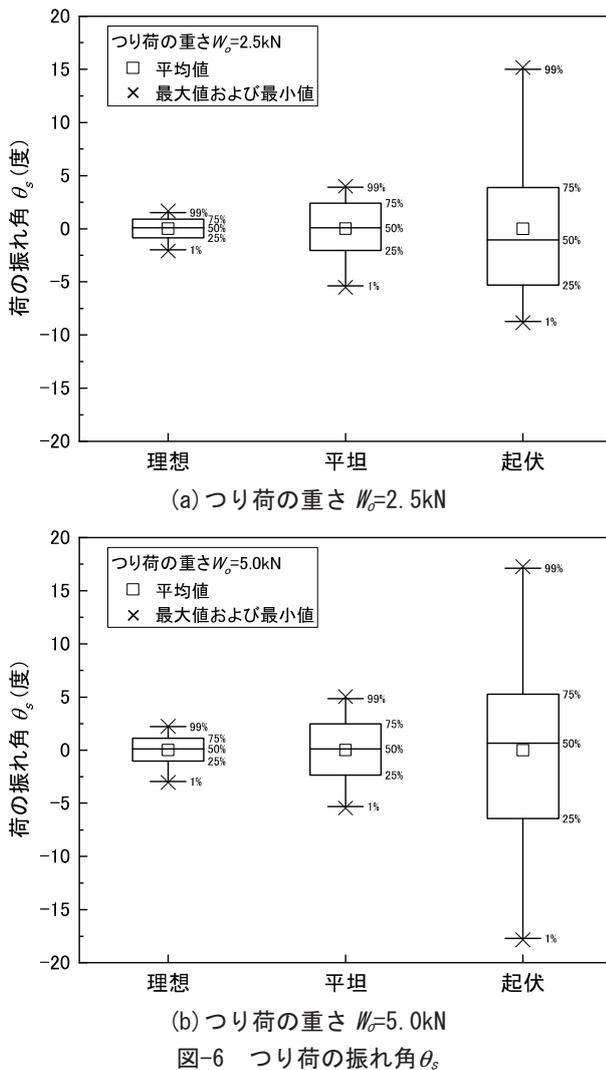


(a) 平坦地盤 (b) 起伏地盤

図-5 走行路の地表面形状³⁾

θ_s は ± 2 度付近に分布しているのに対して、平坦地盤では、 -5 度から 4 度の範囲に分布しており、理想地盤よりも θ_s が広い範囲に分布している。これは地表面の僅かな起伏や強度のバラツキに起因するものと考えられる。起伏地盤は、 -8 度から 15 度に分布しており、地表面の起伏の影響により θ_s が大きくなっている。 $W_o=5.0kN$ の結果（図-6(b)）も、 $W_o=2.5kN$ の結果と同様の傾向を示しているが、全体的に θ_s は $W_o=2.5kN$ の結果に比べ大きい。特に起伏地盤の θ_s は ± 17 度に分布しており、荷が大きく振れていた。

次に、荷振れによる作業半径の増加について検討した。 θ_s の最大値 $\theta_{s,max}$ から作業半径の増加量



ΔR_W は次式により求まる。

$$\Delta R_W = L \times \sin \theta_{s \max} \quad (1)$$

ここで、 L は図-4における $B-B'$ 間の長さである。最大作業半径 $R_{W \max}$ および作業半径の増加率 R_{Wi} は次式により求まる。

$$R_{W \max} = R_W + \Delta R_W \quad (2)$$

$$R_{Wi} = \frac{R_{W \max} - R_W}{R_W} \quad (3)$$

表-2 に最大作業半径 $R_{W \max}$ および作業半径の増加率 R_{Wi} を示す。

理想地盤における R_{Wi} は $W_o=2.5\text{kN}$ (Cs1)で 1.65%、 $W_o=5\text{kN}$ (Cs4)で 3.19%と作業半径の増加は僅かであるのに対して、平坦地盤では、 $W_o=2.5\text{kN}$ (Cs2)で 3.95%、 $W_o=5\text{kN}$ (Cs5)で 7.09%と増加した。さらに、起伏地盤においては、 $W_o=2.5\text{kN}$ (Cs3)で 14.82%、 $W_o=5\text{kN}$ (Cs6)で 23.99%と大幅に増加することがわかった。

一般的にクレーンのつり上げ能力は作業半径が

表-2 荷の振れ角から算出した作業半径の概算値

実験名	走行路	$\theta_{s \max}$ (度)	$R_{W \max}$ (m)	R_{Wi} (%)	F_r (kN)
Cs1	理想	1.67	3.05	1.65	4.93
Cs2	平坦	4.00	3.12	3.95	4.67
Cs3	起伏	15.18	3.44	14.82	3.83
Cs4	理想	2.26	2.17	3.19	9.24
Cs5	平坦	5.03	2.25	7.09	8.77
Cs6	起伏	17.26	2.6	23.99	6.77

大きくなるほど定格荷重は小さくなる。本実験で使用したドラグ・ショベルの定格荷重曲線から各 $R_{W \max}$ に対応した換算定格荷重 F_r を表-2 に示す。

$W_o=2.5\text{kN}$ では、機械静止時の定格荷重 5.0kN に対して、 F_r は平坦地盤で 4.67kN 、起伏地盤では 3.83kN まで低下する。一方、 $W_o=5.0\text{kN}$ では、静止時の定格荷重 10kN に対して、平坦地盤では 8.77kN 、起伏地盤では 6.77kN と F_r が 87%~67%と大幅に低下することがわかった。

以上の結果から、機械の自走中には荷振れによって作業半径が一時的に増加するため、見かけの定格荷重が減少する。荷振れをなるべく発生させないためにも、地盤の平坦性の確保は非常に重要である。

4. まとめ

つり荷走行中のドラグ・ショベルでは、走行路の起伏や地盤の支持力のバラツキ等によってつり荷が上下動して転倒モーメントを増加させる。これに加えて、荷が前後に振れると作業半径が増加するため転倒モーメントは増加する。したがって、荷振れによる転倒モーメントの増加を考慮して自走時の定格荷重は適宜減少させることが必要と言える。

参考文献

- 1) 吉川直孝, 伊藤和也, 堀智仁, 清水憲尚, 濱島京子, 梅崎重夫, 豊澤康男: ドラグ・ショベルに係る死亡災害の詳細分析と再発防止対策の検討, 土木学会論文集F6(安全問題), No.49, vol.2, pp.I_107~I_114, 2014.
- 2) 堀智仁: 掘削用機械による死亡災害の分析-平成22年から平成26年に発生した死亡災害-, 建設機械施工, Vol.70, No.2, pp.20~24, 2018.
- 3) 堀智仁, 玉手聡, 石野貴裕: ドラグ・ショベルのつり荷走行時における不安定要因の実験的検討. 土木学会論文集F6(安全問題), vol.69, No.2, pp.I_159~I_164, 2013.

33. 高層建築解体へ自動昇降足場の適用

FCF 工法 ～ 安全・省力化への挑戦 ～

株式会社フジタ ○大谷 愛斗・三村 洋一
松尾 宗義

1. はじめに

日本の高層建築物は1968年に竣工した霞が関ビルを発端に発展を遂げ300mを越す高層建築物も出現し年々その建築数は増加している。他方、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、高層建築物の解体では外周部に養生用足場の組立を行い大型クレーンやタワークレーンなどで建物の最上階に解体作業を行う重機や資材を揚げて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の足場の使用量の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、落下災害の危険も高まっており、これらのリスクを低減することが急務となっている。

当社はこれらの課題を解決するため、独自の技術であり多くの橋脚、煙突、ドーム屋根の施工に用いられてきた自動昇降足場システム（以下、FCF工法と称す）を用いたFCF-リバース解体工法を開発した。本論文では本工法の概要と開発経過および現場適用の結果を報告する。（写真-1）



写真-1 (左) 在来工法 (外部養生)
(右) FCF リバース解体工法

2. FCF 工法の概要

2.1 FCF の構造について

FCF 工法の構造概要を図-1 に示す。躯体の周囲にはシステムの受け架台であるメインフレームが設置され躯体の大きさにより通常4～8本の鋼管ロッドを介して躯体周囲に設置する。ここで、鋼管ロッドは昇降時のロボットジャッキのガイドと足場ステージ全体の鉛直荷重を支える役割を担っている。各ロッドは所定の間隔で座屈防止の金具で躯体に固定され、水平荷重（風荷重）は躯体に押し付けられたローラにより減衰する。

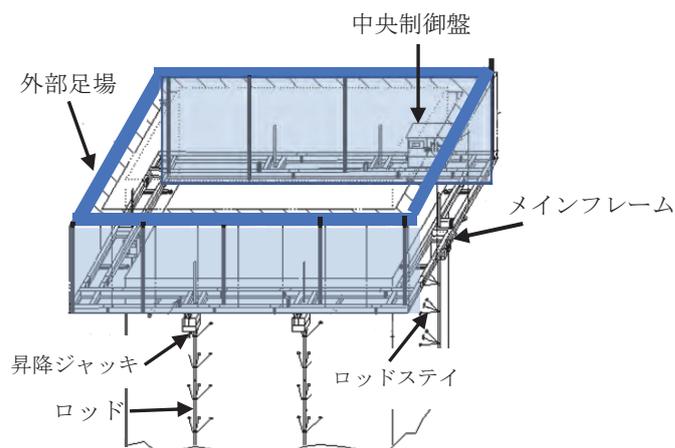


図-1 FCF工法構造概要

メインフレーム上に作業用の足場が通常5～7段（約8～12m）で生まれ、さらに大型型枠（高さ約5m）、上昇・下降を行うための昇降ロボットジャッキとシステム全体を制御する中央制御盤が組み込まれる。

2.2 FCF 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、レベルセンサより構成される。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、各種センサより構成され、構造物の周囲にメインフレームを組立てた後、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

ルセンサからの情報を基に中央制御盤で制御する。

また昇降ロボットジャッキ本体中心部には、上下2組のチャック装置があり、このチャック装置内を昇降用ロッドが貫通し、ロッドをチャック装置が把持することで昇降を行う。上昇時の手順を図-2に下降時の手順を図-3に示す。

FCF工法を用いた施工例を写真-2、昇降ロボットジャッキを写真-3、昇降ロボットジャッキの仕様を表-1に示す。

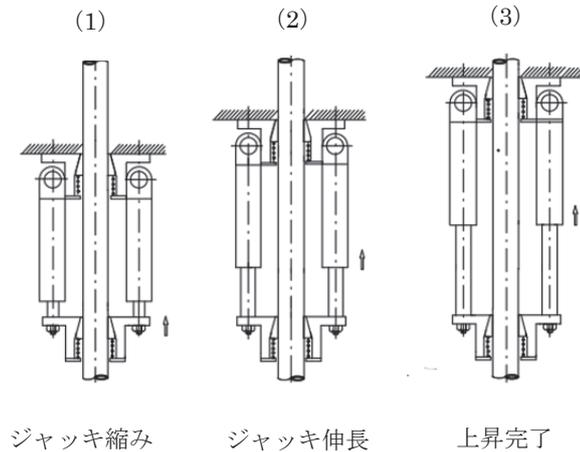


図-2 FCF ジャッキ上昇時手順

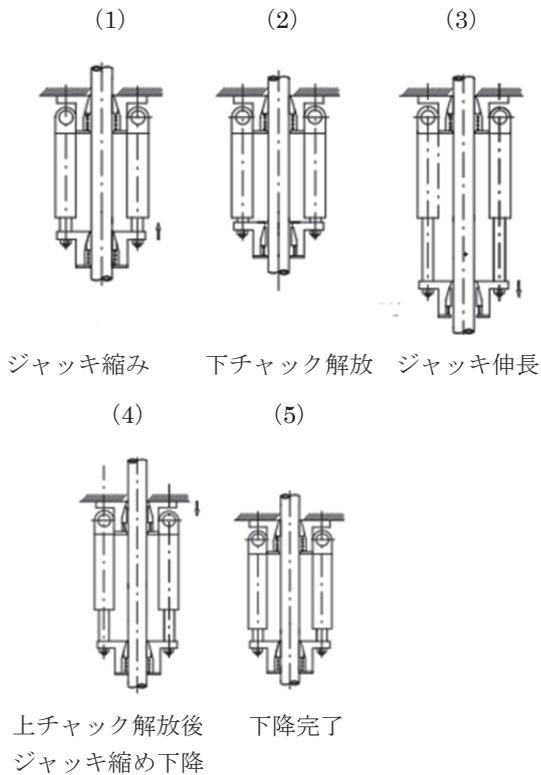


図-3 FCF ジャッキ下降時手順



写真-2 FCF 工法



写真-3 昇降ロボットジャッキ

表-1 昇降ジャッキ仕様

ジャッキ能力	150kN /台
上昇速度	150mm /m in
下降速度	75mm /m in
油圧	13M Pa
電動機	1.5kw, 3Φ × 200v

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昇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。各昇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

昇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昇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を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。

(2) 上昇・下降制御

1回の上昇ストロークは150mm、下降のストロークは135mm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76mm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-4に示す。



写真-4 中央制御盤

3. 解体工法の検討

3.1 在来工法（総足場）の問題

現在、多くの解体現場で採用されているのが総足場工法による全面養生であるが、ビルの高層化が進むにつれて次の問題点が挙げられる。

(1) 設置コストの増加

- ・足場材の使用量の増加に伴い足場材のリース代や組バラシ費用の人工増加が問題となる。

(2) 作業工程の長期化

- ・設置作業が長期になり作業スペースの占有により他種作業への影響が大きい。

(3) 安全性への懸念

- ・足場の組立・解体作業による高所作業の増加による作業者の墜落・落下災害リスク。

(4) 環境への影響

- ・組立・解体作業により騒音発生が増加する。
- ・運搬車両による交通環境への影響が大きくなり、騒音・振動も増加する。

これらを解決すべく保有技術のFCF工法を採用した昇降式足場による解体工法を検討実施した。

3.2 昇降式足場に要求される機能

施工検討を行った結果を以下に示す。

(1) 設置・解体コストの低下

使用材料の大幅な削減と組立・解体日数を低減させることで足場設置にかかる費用を低下させる。

(2) 工程への影響を低下させる

足場組立時間の短縮により占有スペースの低下と車両の搬入出時間の低減を図り交通への影響を低下させる。

(3) 安全性の追求

高所作業を大幅に減少することで作業の安全環境を確保する。また第三者への飛来災害の防止を図る。

(4) 環境

組立・解体作業により発生する騒音と振動を抑制する。

3.3 基本仕様の検討

本施工に適用するFCF工法の基本仕様を検討するにあたり、適用規則及び標準は以下の通り。

- ・規則：安全衛生規則
- ・指針：道路土工指針P125（平成11年）

これらの規則・指針を踏まえ、かつ求められる機能を満足する設計条件を次のように決定した。

- (1) ユニット式のフレームを製作し分解組立式とし高所作業を低減する
- (2) 専門的な知識のない作業員でも容易に組み立てられる。
- (3) ユニット式にすることで枠組み足場を使用したときに比べユニット重量を軽量化する。
- (4) FCFの中央制御盤を改良し1台で16台のジャッキを制御できるようにする。

上記(1)から(4)を踏まえてFCFを用いた外部養生方法の検討を行い、ユニット式フレーム養生足場の設計とFCFジャッキの配置を決定した。FCFを搭載したユニット式フレーム養生足場を解体するフロアとその下層階に設置し作業階の養生を行う。その後、上層階より部位ごとに躯体の解体を重機

とタワークレーンによる吊り取りにて行い地上にて破碎, 分別を行う。高所での作業量を低減し作業員の安全の確保と環境に配慮した高層建物の解体システムを目指した。

4. 施工

4.1 FCF 搭載足場の設置

施工建物外周部に FCF 搭載足場を設置した。施工建物は建築面積 2,650.16 m², 高さ 82.95m の鉄骨造。建物の東西方向に高低差があったため高低差を解消するように組立架台を設置し, その架台上に FCF を搭載したユニット式足場を設置した。ユニット式足場は横 45.3m, 縦 23.8m, 高さ 12.9 m, 幅 1m で製作し通常の枠組み足場を使用した場合に比べ軽量化と剛性を高めた。またユニット式足場の高さは解体建物の約 3 階分をカバーしており, 最上階を躯体解体の作業階, 中間階を緩衝階, 最下階を窓部などの撤去作業階とし設計した。足場フレーム全体で FCF ジャッキを 16 台使用し 1 ユニットごとに 1 台のジャッキを配置した。

組立の際は 32 分割したユニットをクレーンで吊り上げて接合し組立を行った。解体建物概要と足場ユニット構成を表-2 に, FCF 搭載足場フレームの平面図を図-4, フレームの断面図を図-5, 足場のユニットフレーム部を写真-5, ユニット足場の受け架台を写真-6, ユニット組立状況を写真-7 でそれぞれ示す。

表-2 解体建物概要と足場ユニット構成

解体建物概要	
延床面積	29,921m ²
建物高さ	82.95m
階数	地上19階/地下3階
足場ユニット構成	
ユニット長(横)	45.3m
ユニット長(縦)	23.8m
ユニット高さ	12.9m
ユニット総重量	約100t
搭載ジャッキ台数	16台
搭載ジャッキ推力	2400kN (150kN × 16台)
搭載ジャッキ動力	24Kw (1.5kw × 16台)

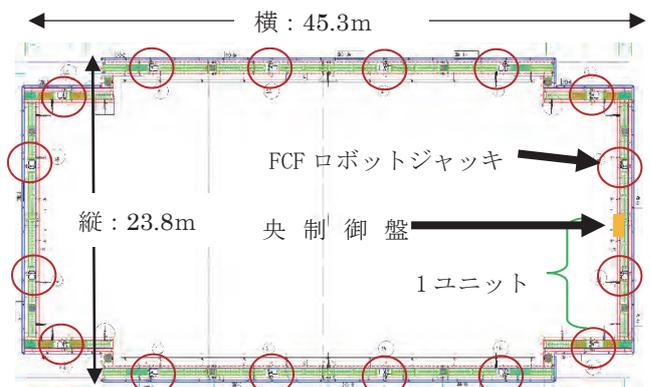


図-4 FCF 搭載足場フレーム全体図

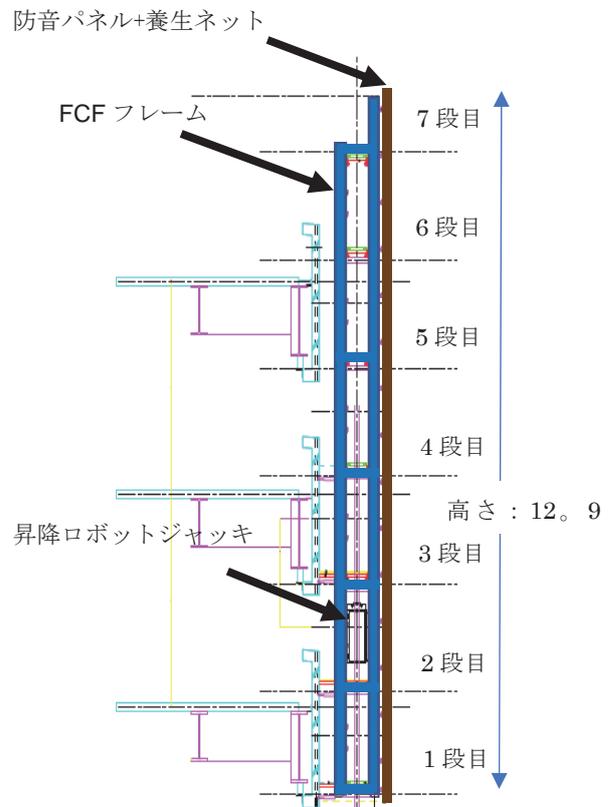


図-5 FCF 搭載足場フレーム断面図



写真-5 ユニットフレーム



写真-6 ユニットフレーム受け架台



写真-8(左) ユニット足場組立完了
写真-9(右) ユニット足場上昇完了



写真-7 ユニット組立状況

4.2 FCFの上昇

FCF 搭載足場のフレーム組立完了後に制御に必要なレベル計や各種センサの設定を行い FCF のジャッキアップ作業を行った。約 6m/日のペースで 12 日間行い、建物最上部まで上昇させた。今回は 2m ごとにロッドステイの取り付けを行い、これを 1 サイクルとして作業を進めた。

以下 上昇時の作業手順を示す。

- (1) ロッドステイ、ターンバックル間配り（壁つなぎ材）
- (2) ユニット式足場の上昇
- (3) 壁つなぎの設置
- (4) ロッドの継ぎ足し

ロッドの継ぎ足し作業は(1)間配り時に並行して実施した。また上昇時にはタワークレーンを用いあらかじめ地上でジョイントさせた複数のロッドを継ぎ足すことで作業の効率化と安全性の向上に努めた。作業時はユニット足場の最上部と最下部の東西南北に監視員を配置し躯体との接触などの監視を行いながら作業を行った。足場の組立完了時の様子を写真-8、上昇終了時の様子を写真-9でそれぞれ示す。

4.3 建物解体と FCF 搭載足場の降下

足場の上昇作業終了後、躯体の解体を開始した。1フロア 6 日の工程で解体を進めた。解体作業は階上に 0.25 の BH を 2 台と 10m 級高所作業車をタワークレーンにて揚重し行った。解体はタワークレーンを用いたブロック解体を主として行い、カッターを用いた吊り切り工法の試工も行った。両施工とも粉塵の発生が少なく、特にカッターを用いた作業ではより、粉塵と騒音が低減され、作業の優位性を確認することができた。

作業の様子を写真-10 と写真-11 にて示す。



写真-10 スラブ部吊り切り



写真-11 コア柱解体

FCF 搭載足場の降下作業は解体作業の進捗に合わせて1フロアごとに行った。安全対策として足場の層ごとに層間養生対策を行い、降下作業中は端部での作業を行わないことを徹底した。降下作業手順を次に示す。

- (1) 足場の清掃
- (2) ロッド取り外し
- (3) 壁つなぎ取り外し・撤去
- (4) 2m降下
- (5) 壁つなぎ取り外し・撤去
- (6) 2m降下
- (7) 養生対策

上記の工程で作業を進め約4時間で4m分の足場を降下させていった。作業時は躯体と足場との干渉や足場フレームと養生パネルとの干渉を防ぐため、最下層部の東西南北に配置した監視員は中央制御盤のFCFジャッキ操作者と随時、連絡を取り合い、作業を行った。降下作業のフローを図-6で示す。

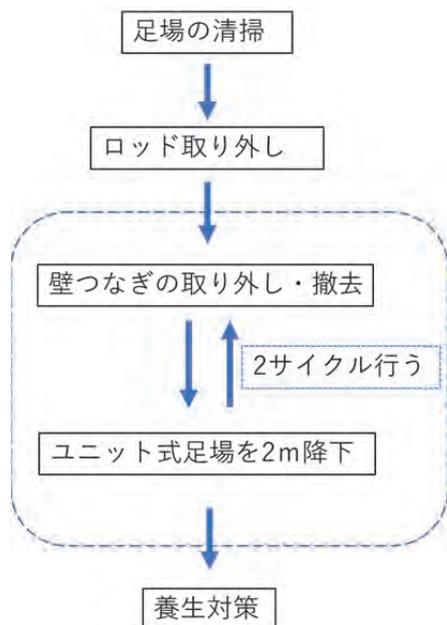


図-6 降下作業フロー

5. まとめ

FCF 工法を高層建物の解体作業に用いたことにより以下の効果が確認できた。

(1) 安全の向上

- ・ FCF 工法を用いたことにより足場組立時の高所作業が低減され墜落・転倒のリスクが大幅に低下した。
- ・ 搬入出車両も削減されたことで第三者との接触災害の発生リスクも低下された。

(2) コストの低減

- ・ 在来工法である全面養生足場を組立・解体することに比べ足場材の搬入・組立・解体費が50%以上低減した。
- ・ 組立・解体に携わる鳶工が70%の省力化を達成

し、大幅なコストの低減を実現した。

- ・ 足場の組立・解体時にクレーンを拘束する時間も大幅に低減され作業の効率化に伴うコストの低減の効果が得られた。

(3) 工程

- ・ 在来工法の全面養生足場を当現場で組立・解体施工する場合と比べて約2カ月の工程の短縮を実現することが出来た。
- ・ 鳶工の確保が難しくなっている昨今、こうした効果により人員の確保が容易になると考えられる。

(4) 環境

- ・ 全面養生足場を施工する場合に比べて足場材の搬入・搬出車両を10トントラックで約294台削減することが出来た。これによりCO₂の発生量が約0.9トン削減され環境への負担を低減するとともに足場材の搬入・組立・解体・搬出作業に伴う騒音等の低減により近隣住民への負担も削減することができた。

この他にも本工法の特徴として次の点が挙げられる。

- ・ 様々な形状の建物にフレキシブルに対応できる。
- ・ 他のユニット式足場に比べ専用部材を使うことが少なく流用性が高い。
- ・ 高層建築物になるほど工法の特徴が表れることで省力化・経済性・安全性で有効性が増す。
- ・ 足場に掛かる鉛直荷重を地上または基礎部で支持する構造となっているため、施工する躯体の強度に左右されることがない。
- ・ 施工する高さに制限がなく種々の形状の施工が可能。
- ・ 操作は中央制御盤のコンピュータで一括管理と操作が可能となっており専門的な技能を必要としない。

6. おわりに

今回 FCF 工法を高層建築解体に用いるにあたってシステムの再構築や中央制御盤の更新などを行い、本社実験ヤードでの試運転、ユニットフレームの考案など多くの準備を重ね本施工を行った。

今後、多くの高層建築物の解体需要が見込まれているなか FCF 工法を利用した本工法の有効性を確認することができた。本工法を高層建築物の解体作業でも広く展開していきたい。

最後に今回の施工に際してご協力いただいた関係者の方々に感謝の意を表します。

34. 転圧ローラのブレーキアシストシステム開発

ステレオカメラを用いた転圧ローラのブレーキ補助システム

鹿島道路(株) 機械部 開発・設計課 ○ 野田 哲也
機械部 開発・設計課 新満 伊織

1. はじめに

建設業においては、建設機械関連災害の防止に監視装置や警報装置について多くの技術が開発実用されている。しかしながら今なお重機との接触事故は根絶されていない。要因としてはヒューマンエラーによるものが主であり、特に転圧ローラにおいては後退操作時に振り返って目視により後方を確認するため無理な姿勢となり、操作の遅れや判断ミスにより事故に繋がるのが懸念される。本稿では、舗装作業に用いる転圧ローラの後退操作時の接触事故防止を目的として開発したブレーキアシストシステムを紹介する。

2. 概要

2.1 背景

建設現場で働く建設機械の安全装置は、音による警告装置が多く採用されている。しかし、音を用いる警報装置だと現場作業環境により使用できない状況が発生する。また、警報音を聞いてからの行動に移るまでのタイムラグが生じ、危機回避が間に合わない場合がある。運転員の判断に代わり重機の動きを自動的に止めて、確実な安全を確保する装置は実用化されつつあるものの、実際に現場へ導入するには信頼性の面などに課題を残している。

2.2 ブレーキアシストシステムとは

先に挙げた課題を解消するため、人と物の形状を認識するステレオカメラを採用し、油圧駆動式ローラのブレーキ回路を利用したブレーキアシストシステムを開発して社有機械に導入した。(写真-1)

既存の超音波センサと併用し、ステレオカメラの出力による制動と超音波センサによる警報という、2系統のセンサによる安全装置で運転員に危険を察知させ、回避行動をとらせるとともにローラ本体には自動で制動をかける。このシステムは、対象物が排除されても安易に自己復帰させないよう自己保持回路にて制動状態を保持できるもので、例えば途中でセンサの検知信号が途切れたとしても

確実に停止できるよう設計されている。ステレオカメラセンサの設置場所により、前後進どちらでも自動ブレーキの機能は発揮できるが、特に後進時の自動制御は有効であり、後方監視に特化した。



写真-1 タイヤローラ外観

ステレオカメラセンサの特性である物体を感知する場合と、人を感知する2段階のセンサ出力信号により、走行用油圧ポンプのサーボソレノイドを中立化することにより制動を掛ける HST(油圧)ブレーキと、ネガティブブレーキを作動させて制動を得る機械式ブレーキを各々作動させる。運転員が制動操作することなく確実かつ柔軟な制動を確保する。

これによりローラ本体や運転員にブレーキショックなどの負荷をかけず、また舗装面にブレーキ痕も残すことなくローラを確実に停止させるシステムである。

3. ブレーキアシストシステム概要

3.1 機器構成の特徴

ブレーキアシストシステムは写真-2 の3つの主要な構成要素からなる。

(1) センサヘッド

ステレオカメラで検知した状態の立体的なデータを取り込み、画像情報をエバリュエーション

ユニットに転送する。

(2) エバリュエーションユニット

センサヘッドからのデータを3次元データに変換し対象物を見分けたうえ、検知エリア内に存在する物体や人が予め設定された警報領域内で検出されたときブレーキシステムに出力する。

(3) ディスプレイインターフェース

ラウドスピーカーを備えた7インチディスプレイインターフェイスである。警報メッセージを音と光で運転者に向けて発する。



写真-2 機器構成

3.2 操作原理

検知エリアの最大範囲は図-1に示す幅4m×長さ6mで、そのエリアの中で2つの異なる検知範囲(ZONE)を設定することが可能である。即ちローラから近距離のZONE1と遠距離のZONE2を設定することができる。

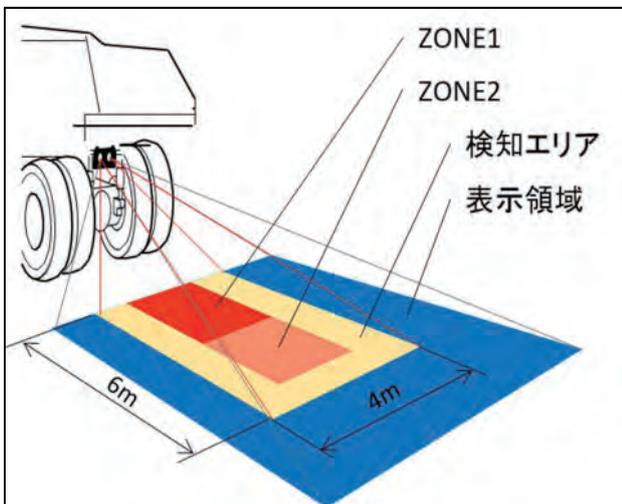


図-1 検知エリアと検知範囲例

図-1のZONE内で対象物が検出されると、ディスプレイに視覚的及び聴覚的に警報メッセージを表示させるとともにブレーキアシストシステムに出力する。検知範囲内の対象物は以下の通りクラス選別し、ZONEごとに設定することが可能である。

(1) 対象物クラス1

40 cm×80 cmを超える壁や車、その他障害物すべての対象物を検知する。

(2) 対象物クラス2

40 cm×160 cm程度の大きさのものを検知。壁などの幅の広い対象物は無視される。対象物を「人」とみなすのは対象物クラス2である。

4. 制御方法

ローラからの後進信号を用いて、後進走行時のみブレーキアシストシステムを作動させる。2系統のセンサから出力された2パターンの出力信号により、第一段階の警報装置の作動に続いて、第二段階にHSTブレーキとネガティブブレーキを作動させる。自動で作動したブレーキの解除は、走行レバーを中立に戻すことで行われ、走行レバーを戻さなければブレーキ信号が解除された状態でも制動状態を維持する機構となっている。

4.1 転圧ローラへの展開

(1) タイヤローラ

制御方法として、遠距離のZONE2で検知した時点で警報装置にて光と音で注意喚起し、同時にHSTブレーキを作動させる。近距離のZONE1で検知した場合、ZONE2で作動したHSTブレーキを自己保持した状態でネガティブブレーキを作動させる。作業速度域が広いタイヤローラは高速段の走行速度域が速く、検知エリアを制動距離が上回ることも想定されるため、高速走行時は後進信号が出力された時点で自動的に低速走行に切替る制御回路を設けた。これにより、高低速のどちらの後進時でも同じ条件での制動を可能とした。

(2) 振動タイヤ・マカダムローラ

振動タイヤローラとマカダムローラにもブレーキアシストシステムを搭載したが、前述のタイヤローラとは作業速度域が大きく異なるため、タイヤローラとはZONEごとの制御方法を変更した。振動タイヤ・マカダムローラの場合、遠距離のZONE2で検知した時点では警報装置にて光と音で注意喚起する。近距離のZONE1で検知した場合はHSTブレーキとネガティブブレーキを作動させる。但し、2系統のブレーキを同時作動させる場合はネガティブブレーキの保護を考慮し、HSTブレーキ作動後、若干の時間差を設けて作動させる条件を付加した。

4.2 マニュアル操作

道路舗装工事で用いるローラ等は、周りで作業する重機、ローラなどとの混在作業が発生する。そ

の重機、あるいは前後進を繰り返す他のローラを対象物として検知してしまう可能性も少なからず発生する。そこで、後方の安全が確認されていることを前提にブレーキアシストシステムを一時的に解除する機構を設けた。(写真-3)



写真-3 ブレーキ一時解除スイッチ

この機構は運転席横に押しボタンスイッチを設け、ボタンを押しているときのみブレーキシステムを一時的に解除状態にするものである。対象物を検知していたとしても、後方の安全が確認できていれば当該ボタンを押すことにより、後退を継続して行うことができる。端部の転圧時に壁や構造物を検知してしまい後退できない場合や、ローラ駐車位置場所の後方に対象物とみなす物があってもスムーズに駐車することを目的としたものである。これにより、ブレーキシステムのメイン電源を切ることなくブレーキを一時的に解除できるため、システムが常に有効な状態を保つことができる。

5. 制動試験

試験エリアを設定し3種のローラを用い、それぞれの速度域で制動距離を測定し、機能確認試験を実施した。(写真-4)

図-2に示すとおり、タイヤローラはどの速度域でも概ね3.5m以内の制動距離となった。振動タイヤローラ、振動マカダムローラに関してどの速度域でも3.5m以内の制動距離となり、それぞれのローラが安全に確実に停止することが確認できた。

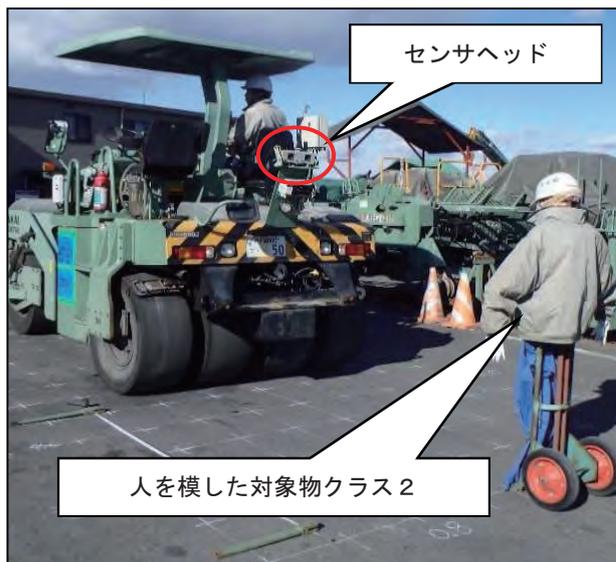


写真-4 振動タイヤローラ制動距離試験

6. リスクアセスメント

ブレーキアシストシステムは現場環境に左右されることなく確実に機能する事が求められる。そのためには誤作動が発生する要因を把握し解消することが必要である。

ブレーキアシストシステムを使用する上で誤作動の要因としてまず考えられることがステレオカメラに埃や、水滴が付着することである。それによ

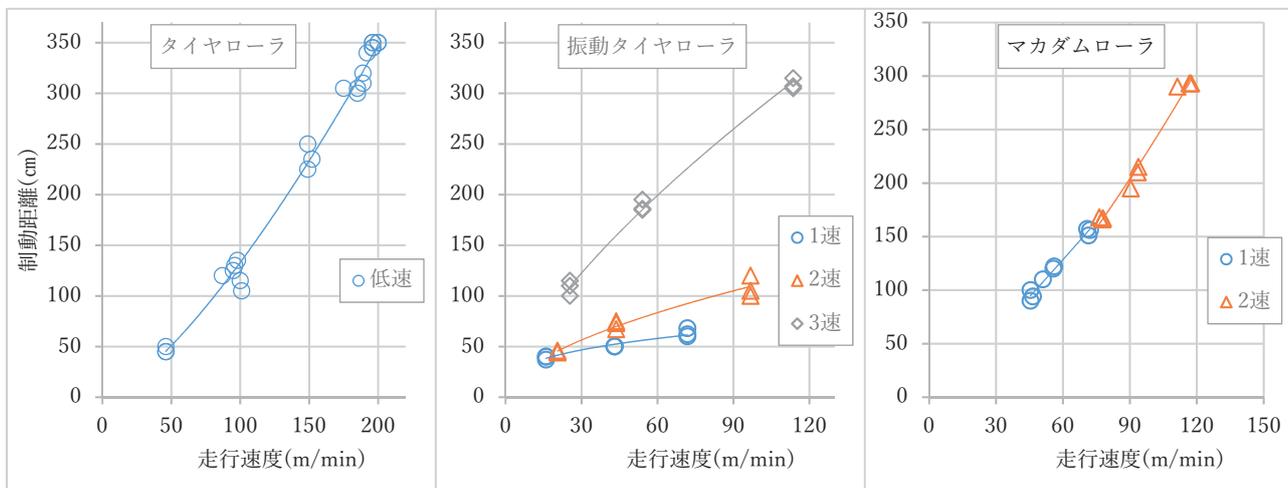


図-2 走行速度と制動距離の対比グラフ

って対象物となる人や物を検出せず、対象物としてみなさない物を誤検知して制動を仕掛けてしまうことは避けなければならない。

作業ごとにブレーキアシストシステムの点検を実施しステレオカメラの視野を確保するとともに、点検項目に追加し記録すること実行する。また、ブレーキアシストとして検知エリアごとの条件にもよるが駐車ブレーキを作動させているため、駐車ブレーキの早期の摩耗も考えられる。そのため、月例点検等で定期的な機能点検と整備を実施する事でブレーキの不具合の低減を図る。

ブレーキアシストシステムが何らかの原因で不良となった際には、ローラ本体が運転員の意図しない行動を回避するため、前後進レバー操作または停止行動をとる駐車ボタンはシステム回路に関係なく操作できる設計となっている。

このように安全装置としての信頼性を維持することは接触事故防止に繋がるが、あくまでも運転員の判断補助ということを認識し、運転員はブレーキアシストシステムに完全に頼った運転行動は避けるべきである。

7. 施工現場への適応

大規模倉庫外構工事において、ブレーキアシストシステムを搭載したタイヤローラを導入した(写真-5)。施工範囲周辺には様々な資材等が置かれた状況であった。対象物として検知する物体に対して誤作動なく作動するか確認したところ、限られた施工範囲の中でも周囲の人と他の重機を異なる対象物として検知し、誤作動なく機能した。



写真-5 外構工事転圧作業状況

また新設高速道路舗装工事における安全対策技術としてブレーキアシストシステムを、4台のローラに取り付け導入した(写真-6)。

現場状況は様々であり、直線区間の転圧作業においては、ブレーキアシストシステムが誤作動な

く機能し作業を行っていたのに対し、曲線区間の転圧作業においては、曲線外側のコンクリートブロックを対象物とみなし作動する可能性があった。現場作業環境に応じ対象物を人とみなす対象物クラス2を検知エリアの遠距離に設定し、物に対して対象物とみなさないものとするれば誤作動を防ぐことを確認した。設定を変更しても転圧作業の速度程度であれば対象物である物に対して検出してから確実に停止できることが可能であった。条件に応じて設定することでブレーキアシストシステムを有効に活用し、この現場においては人と機械の安全性向上を目的とする装置として高く評価された。



写真-6 高速道路舗装工事転圧作業状況

8. おわりに

今回開発したブレーキアシストシステムは、ローラを安全かつ柔軟なブレーキの動作で確実に停止できる装置としての機能の確認ができた。労働災害の原因には少なからずヒューマンエラーの影響が存在している。人と重機の安全性向上を目的としたシステムとして、今後その活躍の場を広げていきたいと考えている。本システムの構造はシンプルゆえ自社で保有するローラに限らず、現場でレンタルされている機械にも容易に取り付け可能という側面も備えている。まずは社有機械に標準装備し、今後もシステムの改良を進め、安全性向上、機能性を高めていきたいと考えている。また、ローラ以外の建設機械への展開も検討したい。その効果として、接触事故を原因とした災害が削減できれば幸いである。

35. 安全性と施工性を両立させた 緊急ブレーキ装置搭載タイヤローラの開発

酒井重工業（株）技術開発部 ○ 遠藤 涼平
 酒井重工業（株）技術開発部 森岡 則雄
 酒井重工業（株）技術開発部 榎田 成基

1. はじめに

転圧ローラの運転には多くの危険が伴っている。一見、ゆっくりと動いており、危険な状況や事故は少なく見えるが、道路端の締固め作業などでは、非常に精密な作業が必要となるため、転圧端面などの一点に注視して作業をすることが多く、他の作業者を巻き込んでしまう事故が後を絶たない。その為、労働安全衛生法により転圧ローラでの作業には運転特別教育の資格が必要となっている。しかしながら、タイヤローラでは転圧作業時に後輪（駆動輪）から施工路面に侵入することが多く、国土交通省による重機の動作状況別の事故割合においても後進時の事故が他の作業に比べて非常に多くなっている。¹⁾

その為、後進時の安全性向上に寄与しうる緊急ブレーキ装置を搭載したタイヤローラを開発した。開発にあたっては、安全性の向上を最重要事項とし、さらに進路上の危険な位置にいる作業者を的確に検知すること、車両を安全に停止させること、従来の施工性を失わないことという3つの課題があった。その概要と解決策について報告する。

2. 作業者を的確に検知する

本装置で使用している検知センサは、光学系の3Dセンサを使用しており、得られる測定データは対象物までの距離と反射強度である。その測定原理は、光を発射し対象物に当たって反射し、帰ってきた時間を測定することで距離を算出している。その為、光学センサの特徴として、反射しないもの（しにくいもの）、鏡面反射により光が返ってこない条件などでは測定することが出来ない。一般的に工事現場で安全のために着用されている反射シート付き安全チョッキでは、光が入ってきた方向に光を反射する再帰性反射材が使用されている。その為、光学系センサを使用することで、安全チョッキを着た作業員を的確に検知することが可能となった。また、安全チョッキを着用していない場合においても、周囲条件により検知することは

可能であるが、図-1 に示すように、作業着の色などによって検知のしやすさに差が生じるため、安全のために安全チョッキの着用を推奨している。

次に、3Dセンサはその性能上、濃い湯気や土埃なども認識して検知することが知られている為、冬季の低温時などの施工環境では、発生した湯気も対象物として検知する可能性が予測された。試験施工（写真-1）では3Dセンサは作業着（マネキン）と湯気の両方を検知して図-2 のような点群データを示した。本結果によると本来対象物として検知すべき作業着が湯気の中に埋没し、湯気を対象物として検知してしまうことで、不必要な緊急ブレーキが頻繁に作動することになる。そこで測定データを分析した結果、湯気などと作業着では、反射強度に違いがあることがわかったので、この性質を考慮し、湯気や土埃を除去した。その結果図-3 に示すような点群データとなり、不必要な緊急停止を最小限に抑制することが可能になった。



図-1 作業着の色と検知のしやすさ



写真-1 実際の試験施工

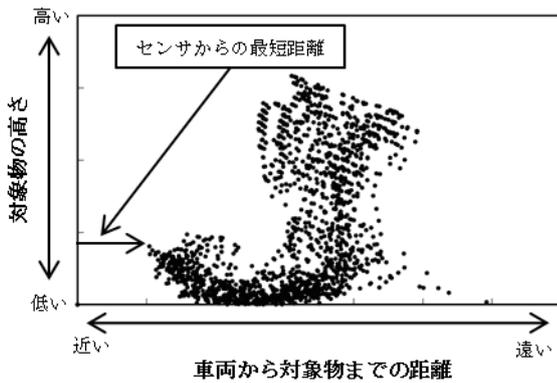


図-2 3Dセンサの検知データの例

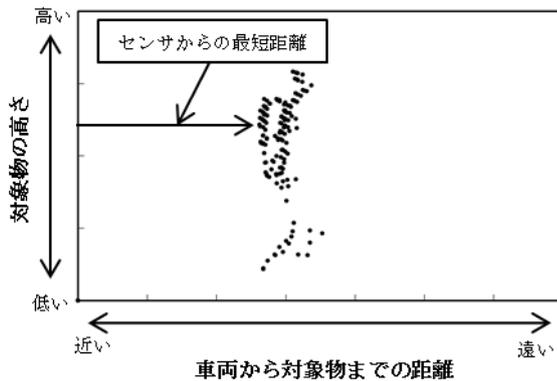


図-3 湯気的数据を除去した結果

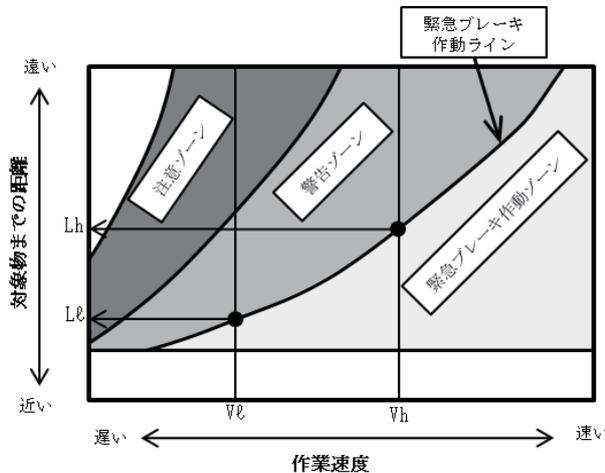


図-4 緊急ブレーキタイミング

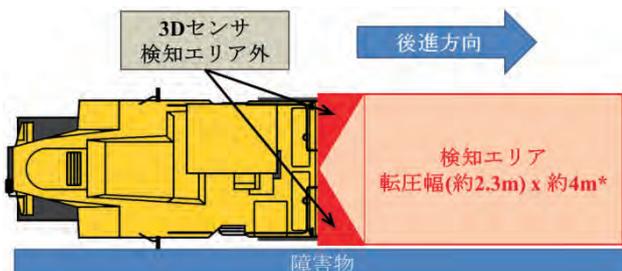


図-5 転圧幅直近の障害物沿いの転圧作業

3. 車両を安全に停止させる

緊急ブレーキが対象物に極端に離れて作動し、十分に距離がある状態で停止した場合、不必要な緊急ブレーキの頻度が多くなってしまい、施工作业に支障が生じる。その為、ローラの作業速度と対象物までの距離から、衝突時間を算出し、図-4に示すように緊急ブレーキの作動タイミングを自動的に調整させた。これにより、対象物を検知した場合、車両速度に応じて、安全かつ適切な距離で緊急ブレーキが作動し、不必要な緊急ブレーキの作動を減らすことができる。また、同じ測定距離でも車両速度に応じて緊急度が変化し、注意、警告、緊急ブレーキの作動をオペレータに知らせることで、より高い安全性を実現した。

4. 従来の施工性を維持

安全装置をつけた事により、従来の施工性が失われた場合、オペレータによっては装置をOFFにしてしまうことが懸念された。その為、安全性の向上を最重要事項とするが、可能な限り従来の施工作业性を維持する必要がある。

1つの解決策としては、前項目3. で挙げたように車両速度と対象物の距離に応じて緊急度を変化させて、状況に応じた的確な緊急ブレーキの作動を実現させた。

また、図-5に示すように3Dセンサの検知エリアは、ローラが走行する車両幅に合わせており、これにより、従来と同様に検知エリア外直近の壁や縁石沿いの転圧作業も可能となった。

5. おわりに

緊急ブレーキ装置の開発に関しては、ローラメーカーとして、可能な限り信頼性を高めるとともに従来のシステムに比べて安全性の向上を実現した。しかしながら、現在の技術において、すべての条件で100%作動する安全装置は実現できていない。その為、安全性の向上には、オペレータ、作業者の安全意識が非常に重要である。本装置によって、作業現場の安全性の向上に多少なりとも寄与できればと期待している。今後は本緊急ブレーキ装置を他機種へ適用や更なる安全性を向上させた機械の開発に取り組む所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省 大臣官房技術調査課, 平成26年の直轄工事における事故発生状況, 安全啓発リーフレット参考資料 pp.1, 2015

36. 土木機械設備の状態監視保全に対する取組について

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課 施工安全企画室 ○ 小林 大輔
 田村 匡弘
 泰松 宏平

1. はじめに

国土交通省が管理している土木機械設備のうち水門設備や揚排水ポンプ設備等の河川管理施設は平成30年3月末時点で約1万施設あり、その半数が設置から約40年を経過している。一方、近年の出水による被災状況に鑑み、各土木機械設備の重要性はさらに高まっており、厳しい財政状況の中での確かな点検・整備による機能保持が求められている。

河川構造物については、持続可能なメンテナンスの構築に向けた取組みとして状態監視型の予防保全導入により更新需要の平準化、コストの抑制を図っていく必要があるが、技術的及び運用面における課題も多い。これらの課題を解決するため、従来から実施している状態監視保全にIoT技術を活用した待機系設備への対応、点検記録の効率化などの取り組みを行っている。本論文は維持管理に関連する取り組みの紹介及び課題について報告するものである。

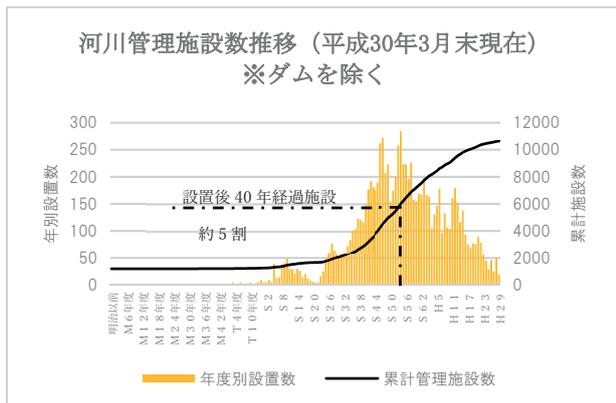


図-1 河川管理施設数推移

2. 状態監視保全

保全には設備の故障や不具合が発生してからの保全「事後保全」と、故障や不具合を未然に防ぐ「予防保全」があり、予防保全には定められた時間計画に従って保全を行う「時間計画保全」と、設備の状態、劣化傾向に基づき保全を行う「状態監視保全」

がある。



図-2 保全の分類（JIS Z 8115:2000「ディペンダビリティ（信頼性）用語」）

2.1 傾向管理

状態監視保全は、設備の劣化状態に基づく予防保全であり、計測データに基づく傾向管理が含まれる。傾向管理とは、稼働時の「振動」「温度」「圧力」などの計測データ等から管理基準値を設定し、傾向管理グラフを作成して機器等の状態判定を行うものである。河川管理施設においては年点検や月点検・管理運転点検で得られる計測データを対象としている。

2.2 管理基準値

管理基準値とは状態を把握するための値であり、点検・整備・更新マニュアルでは、「正常値」、「注意値」、「予防保全値」に区分している。管理基準値の設定にあたっては、相対値評価基準値を基本として、データ蓄積状況に応じて設定や見直しを行う。管理項目によっては絶対評価基準値が定められているものもあり、このような場合は併用するものとしている。

2.3 データの蓄積

点検・整備結果は機械設備維持管理システムに蓄積している。機械設備維持管理システムは設備の諸元や整備履歴、故障、点検記録を蓄積し、設備の状態監視保全や維持管理計画の策定支援など、維持管理の効率化を目的としたシステムである。

傾向管理の推進・高度化を図るうえで、運転時データ等の点検情報を随時蓄積している状況であるが、施設数も多くデータの入力作業は職員の負担となっていた。

2.4 状態監視保全を有効に働かせるために

現状の状態監視保全では、月・年点検のスポットデータから傾向管理を行っている。河川管理施設は待機系設備が多く含まれ、記録できる情報は稼働運転時とは異なる条件のもとに計測されたものであり、管理基準値を見直すデータとして使用するにも、データ取得時の機器の稼働条件や計測タイミングを統一出来ないなどの課題がある。また、入力作業負担軽減などの情報収集面での効率化も課題としてあげられる。

3. 課題への取組内容

3.1 機械設備維持管理システム

(1) システム入力の簡素化

システム入力様式は特別な様式では無く、点検業務の報告書として利用できるエクセル形式で作成している。この様式は取り込み時のエラーを防ぐチェック機能（マクロ）を含んでおり、取り込み作業の効率化と情報の信頼性確保が図られている。点検・整備標準要領の改定や運用面での意見をもとに随時改良を行っている。

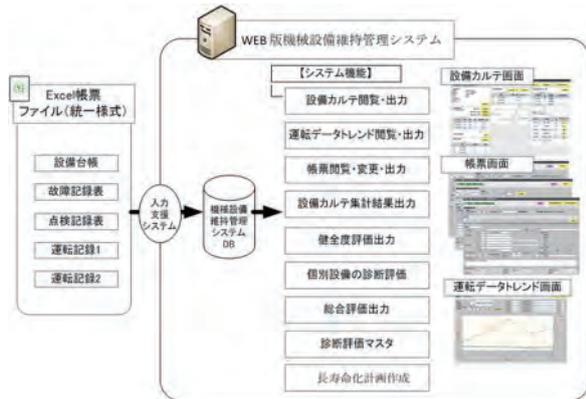


図-3 機械設備維持管理システム構成図

(2) システムサーバの変革

機械設備維持管理システムは、開発当初各地方整備局でサーバを持つクライアントサーバ（CS）形式のシステムであったが、現在は各端末のブラウザソフトを使用するWEBシステムに改良したことにより情報共有の幅が広がり、機能修正などのメンテナンス性が向上した。

■機械設備維持管理システム WEBシステム構成図

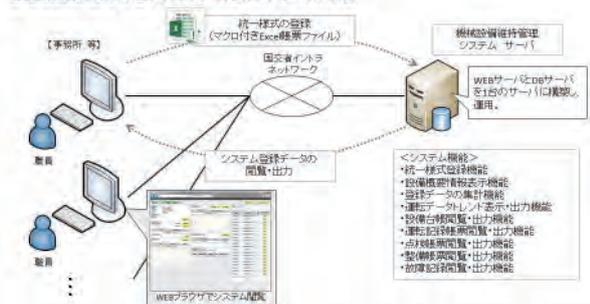


図-4 現行WEBシステム構成図

地方整備局ごとにサーバを設置し、イントラネットにおいて運用することはデータの信頼性確保の点で有利である反面、外部関係者と情報共有できないなどのデメリットもあることから、インターネット環境を介して関係者が情報を共有できる統一サーバでの運用について検討を進めている。この検討は施設点検時にタブレット端末との連携を考慮したものであり、情報入力の効率化も加速する内容となっている。

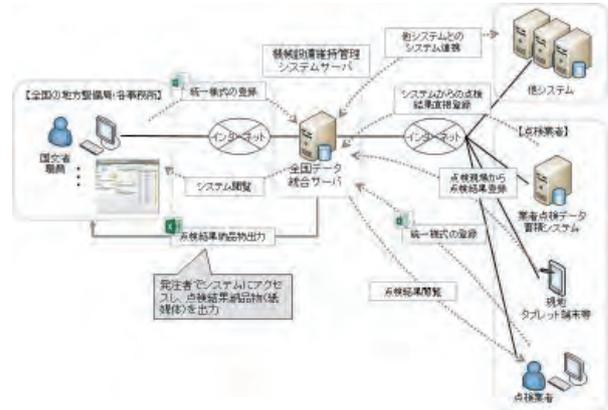


図-5 次期システム構成イメージ図

3.2 タブレット端末による施設点検

状態監視保全に欠かせないのが、点検等で得られる大量で正確な計測データであり、これを機械設備維持管理システムへ確実に蓄積することが重要である。しかし、ここに登録するデータ作成が現在の方法では手間がかかるため、この改善が課題となっている。

そこで、「現場ニーズ・技術シーズマッチング」においてこれを解決できる技術を公募したところ、点検作業にタブレット端末を導入することで省力化を実現する技術の応募があった。現在の点検は、計測値等を記録用紙に手書きし、これを報告書作成担当者が転記して報告書等を作成している。これに対し応募技術は、点検中に計測値等をタブレット端末へ入力することで、データがクラウド環境のシステムに保存され、このシステムが保存データから自動的に報告書を作成する。これにより、書類作成の時間と労力を小さくするというものである。

このマッチングでは、システムが自動作成するものを、報告書から機械設備維持管理システムの登録データに代え試行を実施した。

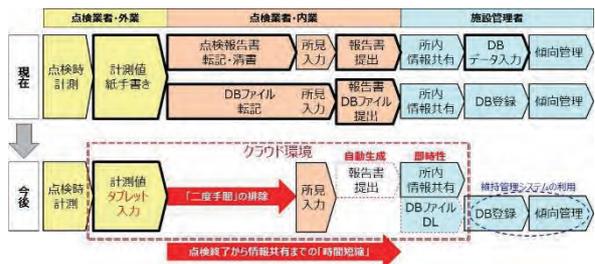


図-6 タブレット端末導入による省力化イメージ

(1) 試行実施状況

試行は、点検準備から維持管理システム登録までを3つの段階(点検準備作業段階, 点検作業段階, 報告書作成段階)に分けて実施した。点検作業段階の試行は、施設管理事務所及び点検受注者の協力により、実際の月点検作業の中で実施することが出来た。

試行の結果、機械設備維持管理システムの登録データ自動作成では、エラー防止のマクロなど技術的課題に直面したが、応募者の技術力により成功している。また、試行を通じて、タブレット端末を持ちながらの作業における安全性の確認や、応募技術の現場実装に向けた機能改善といった新たな課題も明らかになったが、試行を視察した関係者からは、点検作業のタブレット端末導入効果は高いという意見が頂けた。

(2) 今後の予定

点検の省力化を早期実現するための当該技術現場実装に向け、応募者は課題の解決を図りつつ技術の成熟に取り組んでいる。

また、国土交通省では当該技術に対する点検受注者や施設管理事務所の認知を高めながら、全国的な試行を検討する。

3.3 待機系設備のモニタリング及び精密診断技術

常用系設備で導入されているモニタリングと精密診断技術を待機系設備に導入するための研究を進めている。精密診断は点検において異常傾向が現れたときに、原因箇所の特定や劣化の程度を把握するために実施する計測及び解析である。点検時より精度の高い計測データが必要となるため、センサを用いたモニタリングが有効である。導入対象は社会的影響度の高い排水機場とし、老朽化が進行し異常発生が見込まれる比較的稼働の多い地域、機場を選定のうえ試行した。

(1) モニタリングシステム概要

モニタリングによる精密診断の対象機器は、故障発生が多い原動機、ポンプとし、設置負担の少ないセンサ構成とした。センサを設置した排水機場は次のとおり。

① 北海道 月寒排水機場

(立軸ポンプ/ディーゼル機関)

ポンプ主軸：渦電流変位計(x, y), 軸回転計

原動機基部：加速度計(x, y, z)

減速機上部：加速度計(x, y, z)

② 東北 鈴根五郎排水機場

(立軸ポンプ/ディーゼル機関)

ポンプ主軸：渦電流変位計(x, y), 軸回転計

ポンプ基部：加速度計(x, y, z)

原動機基部：加速度計(x, y, z)

③ 関東 蓮花川排水機場

(立軸ポンプ/ディーゼル機関)

ポンプ主軸：A Eセンサ, 軸回転計

ポンプ基部：加速度計(x, y, z)

原動機基部：加速度計(x, y, z), A Eセンサ

④ 関東 谷田川第一排水機場

(立軸ポンプ/ガスタービン)

ポンプ主軸：渦電流変位計(x, y), 軸回転計

ポンプ基部：加速度計(x, y, z)

原動機基部：加速度計(x, y, z)

減速機上部：加速度計(x, y, z)

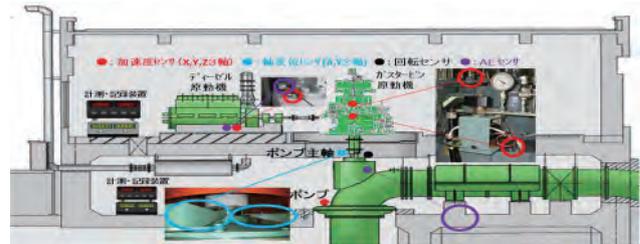


図-7 モニタリングシステム構築 センサ設置図



図-8 モニタリングシステムセンサ

センサ出力信号は、接続ケーブルにより計装盤集約後、各計測モジュールに投入される。その計測データはLANケーブルを経由し、PCソフト上で物理量に変換され、モニタ画面上にリアルタイム時系列データとして表示される。また、そのデータは同時にHDDにバイナリー形式で記録、蓄積される。

モニタリングにより得られたデータから、低速回転のポンプにおいても変位の計測が行える渦電流式変位計が有効であることが確認されている。周波数分析の結果から発生原因に当てはまらないケースもあることから引き続きデータ蓄積及び解析を実施している。

(2) モニタリング機器導入促進

モニタリングシステムは施設のレイアウトや監視操作設備に影響されることが想定され、既存設備に追加導入するためには、改造を伴うこともあ

る。状態監視自体がコスト削減の為に実施するものであることから、導入費用も安価で無ければならない。そこで既存機械設備に後付けできる簡易的なシステムを近年開発されている有用な先端技術を利用して構築することを検討している。

(3) 故障発生教師データの収集

更新対象の排水機場現場におけるディーゼル機関に異常を発生させ教師データを収集する内容である。12気筒1,000PSのディーゼル機関の1気筒または1機の過給機に典型的な以下の異常（軽微レベルと重度レベルの2段階）を発生させ、その状態監視異常データを取得し、正常データと比較した。

- ・バルブクリアランス異常（軽微、重度）
- ・燃料噴射ポンプ異常
- ・燃料噴射ノズル異常（軽微、重度）
- ・過給器異常（軽微、重度）

顕著に比較できる気筒排気温度データを下記に示す。

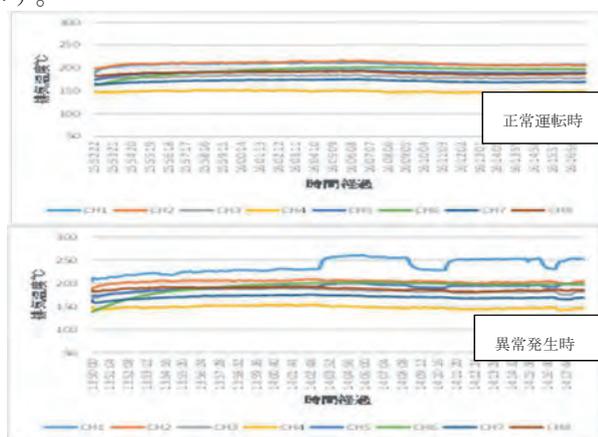


図-8 気筒排気温度データ

(4) 今後の計画

現在もデータ取得中であるが、取得したデータは管理基準値の基礎として活用する。また、将来的に導入を検討しているA I技術に反映される計画である。

3.4 健全度評価技術の確立及び判定の標準化

大規模な分解を伴う整備や更新等の工事は、傾向管理や目視・指触等の定性的な点検結果、経過年数、精密診断結果から健全度評価により実施時期を判断している。また、複数施設を管理する中で、信頼性の確保と維持管理予算の平準化を両立するために、構成機器の機能的耐用限界や機器の設置条件等も勘案して優先順位を決めていく必要がある。

河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル（案）や河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル（案）において、健全度評価の判断指標は示されているが、振動におけるI S O規格及びその

他計測値に対するJ I S規格の統計的品質管理の考え方を判断基準として適用した事例が少ないことから、各地方整備局において整備・更新が予定されている機器を対象として、これらの判断基準を統一した考え方により適用できるかを検証する。

検証は対象となる機器に関し、点検結果等に基づく健全度評価を実施したのち、整備・更新工事において把握することができる機器の劣化状態と照らし合わせるにより行う。また、健全度評価から導きだされる優先順位の考え方や維持管理計画立案についても必要に応じて見直しを図る計画である。

3.5 異常予知自己学習型A I検知

A Iは膨大なデータから特定の答えを判断出来る有用な技術である。排水機場ポンプ設備でこれまで実施してきた傾向管理や精密診断のデータを利用し異常検知が行えるかを検証し、実用可能なプロトタイプを作成する計画である。

(1) A I手法

異常検知に実績のあるA Iアルゴリズムはいくつか存在するが、排水機場で有効なA Iアルゴリズムについて取得しているデータをもとに試行、評価を行った。各計測箇所内容により結果は異なることが確認出来た。

(2) 今後の計画

評価の高いA Iアルゴリズムについてモニタリングシステムに実装し状態監視を行う。正常な運用が確認したのちプロトタイプの製作にあたる。

4. おわりに

今回紹介した取組みは、維持管理費用の削減や省力化へつながる状態監視保全を主体に紹介したものであるが、説明の流れを考慮して本来の取組内容を分割や順序を変えて記載したものである。

国土交通省では将来的に訪れる維持管理費用の増加を課題としており、今後も有効な対応を模索しなければならない。次の課題へ取り組むためにも現状の取組を早期に完成させる必要がある。乗り越えるべき課題は未だあるが、今回の紹介が同様な問題を抱える自治体等の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 平地一典・中島淳一：排水機場ポンプ設備における自動計測システムについて、寒地土研研究所月報, No.794・2019年7月, pp.54~56, 2019年
- 2) 中島淳一・新田恭士・上野仁士：排水機場ポンプ設備における状態監視システムの開発について、令和元年度土木学会 第74回年次学術講演会講演概要集, 2019年8月

37. 除雪機械の重大故障に関する分析

(国研)土木研究所寒地土木研究所 ○ 伊藤 義和
 (国研)土木研究所寒地土木研究所 植野 英睦
 (国研)土木研究所寒地土木研究所 斉藤 勉

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。

近年、購入・整備費などの予算の制約により、機械の更新が先送りされ老朽化した機械が増加している。

重大故障の発生に伴う除雪作業停止日数も年々増加しており、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、効果的かつ効率的に除雪機械の維持管理を行い、重大故障に伴う除雪作業停止日数を削減する必要がある。

その維持管理に重要な、除雪機械の劣化に対する定量的評価手法を検討するにあたり、道路管理者所有の除雪機械の故障データを用いて FTA (故障の木解析) を行い、重大故障箇所を抽出した。さらに、信頼性データ解析の一つであるワイブル型累積ハザード解析で、抽出した箇所に関する故障傾向の分析を行っている¹⁾²⁾。

本報は、その1事例として除雪グレーダ(写真-1)の分析結果を報告する。

2. FTAによる重大故障箇所の抽出

解析対象データは、国土交通省北海道開発局が保有している除雪機械の平成19～27年度に発生した故障データ約4,900件を用いた。



写真-1 除雪グレーダ³⁾

このうち、2日以上作業停止となった故障(以下、「重大故障」という)箇所を除雪機械毎に FTA (故障の木解析) で抽出した。

FTA は論理線図解析であり、論理ゲートと事象記号を用いて故障を可視化した図に展開し、因果関係の評価を進めるものである。このとき描かれる階層図が、樹木の形に展開されることから「故障の木解析」とよばれている。

この FTA は、論理線図の最上位に好ましくない故障事象を明示し、その発生要因を逐次下位の段階まで展開することによって、因果関係を掘り下げていくトップダウン型の解析手法である⁴⁾。

除雪グレーダに関する FT 図を示す(図-1)。

建設機械整備標準作業工数表(除雪機械編)⁵⁾の作業項目区分に準じて整理した結果、中項目単位で2項目、小項目単位で3項目の計5項目を抽出した。

3. 重大故障に関する分析

FTA で抽出した重大故障箇所について、ワイブル型累積ハザード解析を行い、故障傾向の分析とともに信頼度(残存確率)を算出した。

3.1 ワイブル分布について⁶⁾

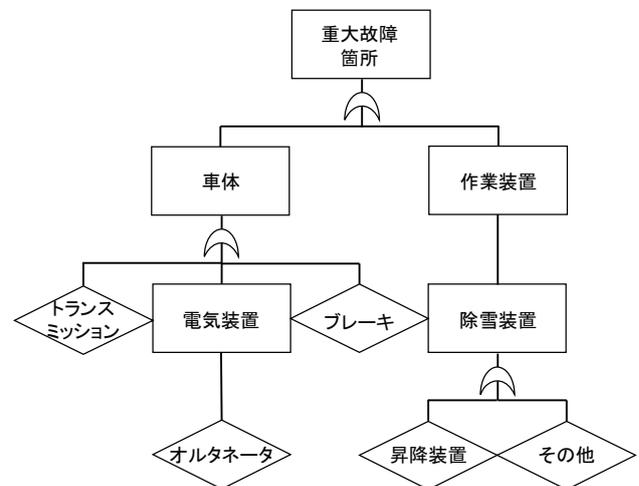


図-1 除雪グレーダ FT 図

ワイブル分布は、スウェーデンの科学者ワイブルが材料強度の研究において、材料の破損確率を表す分布関数として提唱したものである。その後、別の科学者が真空管の寿命に関しても、この分布があてはまることを示した。

ワイブル型累積ハザード解析は、この分布を用いた信頼性データ解析手法の一つである。

ワイブル分布は、次の3つのパラメータが使われる。

m : 形状パラメータ

η : 尺度パラメータ

γ : 位置パラメータ

m (形状パラメータ) の値によって、ワイブル分布の形状も変化し、 $0 < m < 1$ の場合は故障率減少型の初期故障、 $m = 1$ の場合は故障率一定型の偶発故障、 $m > 1$ の場合は故障率増加型の摩耗劣化故障を表すこととなる。

η (尺度パラメータ) は、 m の値に関係なく信頼度 (累積故障確率) $F(t) = 1 - e^{-1}$ (約 63.2%) となる観測値 t を基準化した際の寿命の尺度を表し、特性寿命ともいう。

γ (位置パラメータ) は、故障が始まる位置を表し、 $\gamma = 0$ ならば最初から故障が起こり始め、 $\gamma > 0$ は無故障期間があることを表すが、通常は $\gamma = 0$ と考える。

信頼度 (累積故障確率、累積分布関数ともいう) $F(t)$ と、信頼度 (残存確率) $R(t)$ は、次に示す式(1)、式(2)で表される。

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (1)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (2)$$

累積ハザード値 (累積ハザード関数) $H(t)$ は、次に示す式(3)で表される。

$$H(t) = -\ln R(t) = -\ln\{1 - F(t)\} = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m \quad (3)$$

この解析専用に市販されているワイブル確率紙やワイブル型累積ハザード紙、表計算ソフトウェアを使用することにより、3つのパラメータの推定ができ、上記の式に当てはめることにより、バスタブ曲線で表される故障の傾向 (初期故障、偶発故障、摩耗劣化故障) の判定や特性寿命、信頼度 (残存確率) などが算出できる。

3.2 ワイブル型累積ハザード解析について⁷⁾

複数の機器を一斉に使用または試験を開始し、すべての機器が故障するまで観測し続けた「完全データ」といわれる場合は、ワイブル確率紙を用いたワイブル解析が有効である。

しかし、除雪機械は購入年度が異なり、また、機械が更新に達しても故障に至らないこともある。そのため、故障データの解析については、より有効である累積ハザード法を用いたワイブル型累積ハザード解析を適用した。

観測値を稼働時間とした表-1の故障データ例で、ワイブル型累積ハザード紙を用いた解析手法の手順を示す。

手順1 : 解析する故障データを観測値 t が小さい方から並べ替える。同じ観測値で故障の有無がある場合は、故障のあるデータを前に、故障のないデータを後に並べる。

手順2 : 観測値 t の大きいデータから小さいデータへ向かって、1, 2, ..., 6 と逆方向の順位 (逆順位) を振る。データが n 個あれば、最も観測値の小さいデータの順位は n となる。

手順3 : 故障のあるデータに対して、逆順位の逆数を求める。この値をハザード値という。

手順4 : 手順3のハザード値を観測値 t の小さいデータから順次加えていく。この値を累積ハザード値という。

手順5 : 故障のあるデータの観測値 t 、累積ハザード値の対のデータを図-2に示すワイブル型累積ハザード紙などにプロットする。

手順6 : プロットされた点に直線Aをあてはめ、この直線と平行でハザード紙上の定点である m 推定点 (上横軸 $\ln t = 1$ 、右縦軸 $\ln H(t) = 0$ の交点) を通る直線Bを引く。

手順7 : 直線Bと、上横軸 $\ln t = 0$ との交点を求め、そこから水平線を右に伸ばして右側縦軸の目盛りを読む。読み取った値の絶対値が m (形状パラメータ) となる。 ($m \approx 1.4$)

手順8 : 直線Aと右縦軸 $\ln H(t) = 0$ との交点より下横軸へ垂線を下ろし目盛りを読む。読み取った値が η (尺度パラメータ) となる。 ($\eta \approx 7,000$)

表-1 故障データ例

手順1	手順2	手順3	手順4
観測値 t	故障の有無	逆順位	累積ハザード値 (累積ハザード関数) $H(t)$
2,000	有	6	$(1/6) = 0.166 \rightarrow 17\%$
2,000	無	5	-
3,000	無	4	-
4,000	有	3	$(1/6) + (1/3) = 0.5 \rightarrow 50\%$
8,000	無	2	-
10,000	有	1	$(1/6) + (1/3) + (1/1) = 1.5 \rightarrow 150\%$

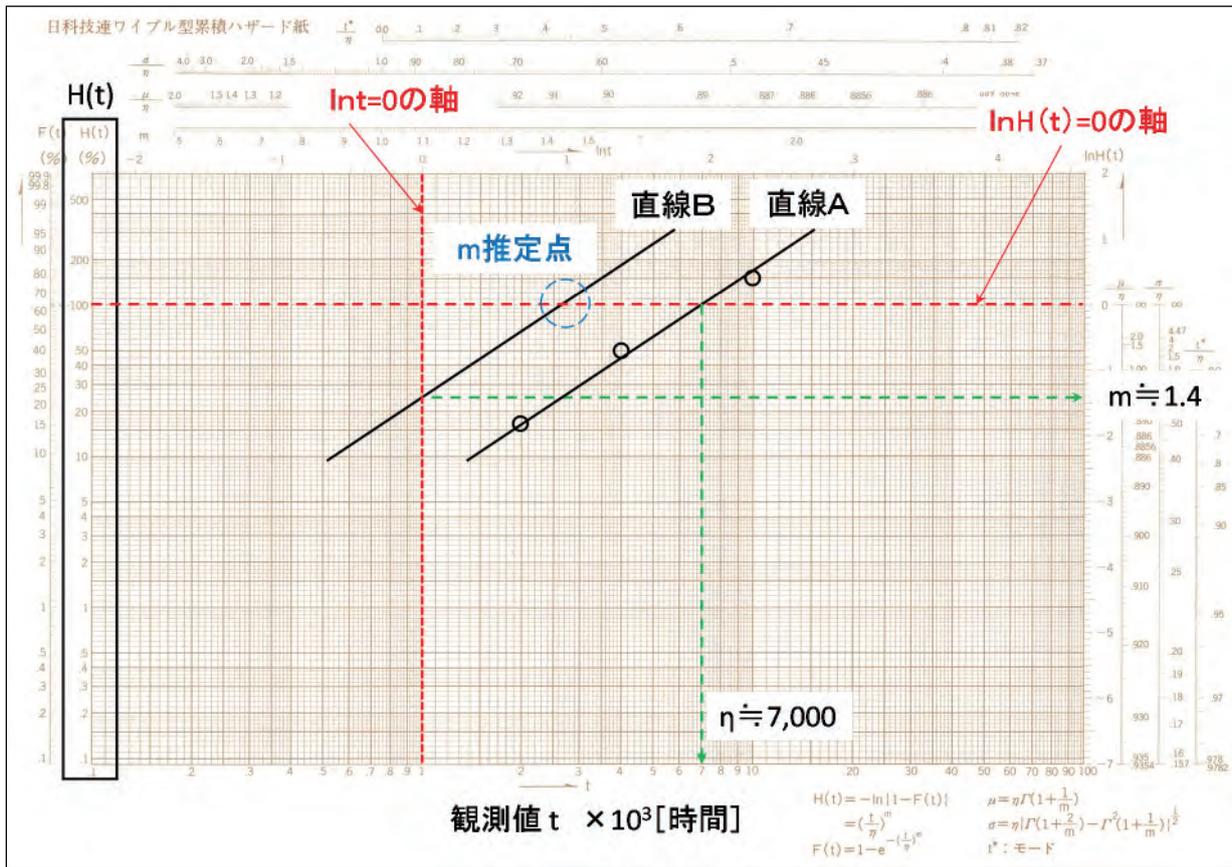


図-2 ワイブル型累積ハザード紙

以上の手順により導出したパラメータを信頼度の算出式(2)に当てはめることで、信頼度の算出が可能となる。当てはめた式を式(4)に示す。

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^m \right] = \exp \left[- \left(\frac{t}{7,000} \right)^{1.4} \right] \quad (4)$$

式(4)を用いて、観測値 t を 0~20,000 時間までの 1,000 時間ごとに算出した信頼度は表-2 となり、グラフ化すると図-3 になる。

この故障データの解析結果は、m (形状パラメータ) が 1.4 であることから故障率増加型の摩耗劣化故障である。算出された信頼度は使用開始直後から低下し、信頼度が 0.5 (残存確率が 50%) で全体の半数が故障する時間は 5,387 時間と推定できる。

3.3 除雪グレーダの分析結果について

除雪グレーダの重大故障箇所 5 項目について、ワイブル型累積ハザード解析で分析を行った。

観測値については、故障データに記載されている「走行距離」、「稼働時間」及び「使用年数」で解析を行った。【電気装置：オルタネータ】の故障を「走行距離」で確率紙にプロットした結果を図-4 に、確率紙で推定した各パラメータから算出した信頼度曲線図を図-5 に、m (形状パラメータ)、η (尺度パラメータ)、R(t) (信頼度) の算出式及び信頼度が 0.95 (残存確率 95%) における走行距離、稼働時間及び使用年数を表-3 に示す。

表-2 算出した信頼度

観測値 t	信頼度 R(t)	観測値 t	信頼度 R(t)
0	1.000		
1,000	0.937	11,000	0.152
2,000	0.841	12,000	0.119
3,000	0.737	13,000	0.093
4,000	0.633	14,000	0.071
5,000	0.536	15,000	0.055
6,000	0.447	16,000	0.042
7,000	0.368	17,000	0.031
8,000	0.300	18,000	0.023
9,000	0.241	19,000	0.017
10,000	0.193	20,000	0.013

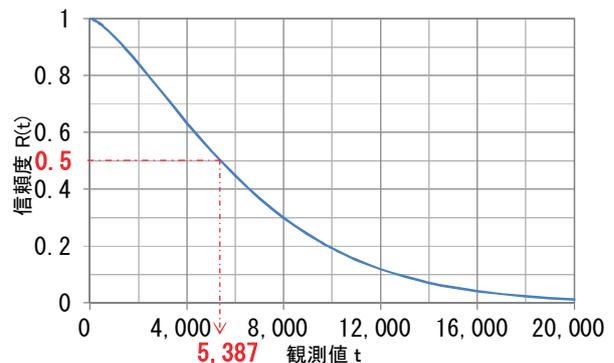


図-3 算出した信頼度 (グラフ)

確率紙にプロットした結果、 $m=3.06$ であることから、【電気装置：オルタネータ】の故障は、故障率増加型の摩耗劣化故障であることがわかる。

走行距離の信頼度曲線図は、使用開始後、約30,000kmを経過した時点で、信頼度が急に低下する曲線となった。

稼働時間及び使用年数でも $m > 1$ であることから、故障率増加型の摩耗劣化故障を示しており、信頼度が0.95（残存確率95%）になる期間は、走行距離で約34,000km、稼働時間で約3,600時間、使用年数で約14.6年となった。

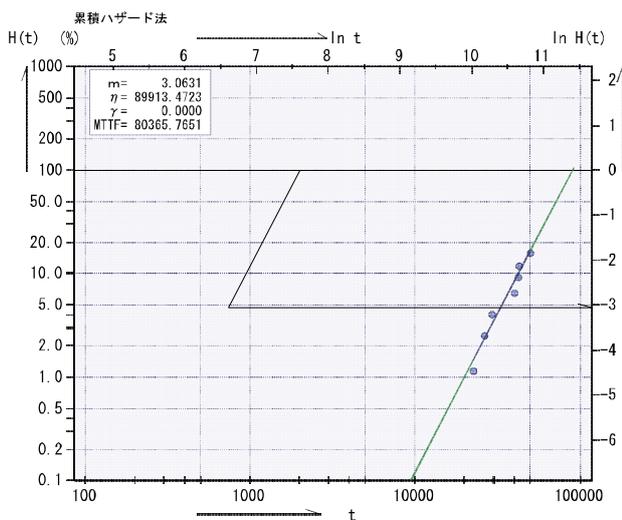


図-4 【電気装置：オルタネータ】故障の確率紙プロット結果（走行距離）

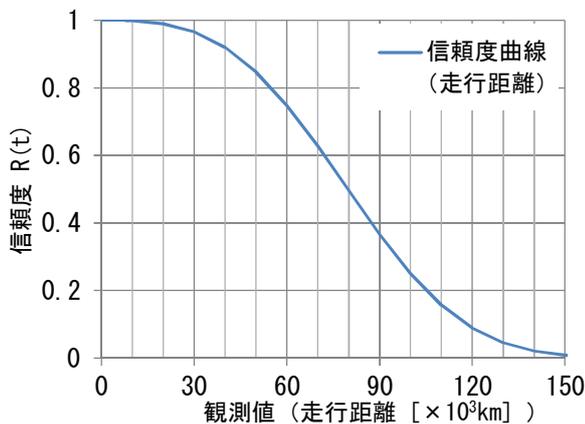


図-5 【電気装置：オルタネータ】信頼度曲線図（走行距離）

表-3 m, η, R(t)の算出式及び信頼度0.95における走行距離、稼働時間及び使用年数

	走行距離	稼働時間	使用年数
m	3.0631	3.4764	5.2880
η	89,913	8,455	25.6
R(t)	$\exp\left[-\left(\frac{t}{89,913}\right)^{3.0631}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{8,455}\right)^{3.4764}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{25.6}\right)^{5.2880}\right]$
$t_{(R(t)=0.95)}$	34,096[km]	3,598[時間]	14.6[年]

なお、信頼度が0.95（残存確率95%）というのは、保有台数を100台と仮定した場合、その5%にあたる約5台に、除雪作業停止日数2日以上以上の故障の発生が推定されることを意味している。

これらの結果から、ワイブル型累積ハザード解析により、除雪機械における故障の傾向（初期故障、偶発故障、摩耗劣化故障）を m （形状パラメータ）の値から判定でき、信頼度と観測値の関係を信頼度曲線図で可視化できることを確認した。

この信頼度を除雪機械劣化度の定量的評価の指標とし、重大故障を未然に防止できる信頼度の閾値を、整備コストや路線の重要度を考慮して設定することで、効果的で効率的な除雪機械の維持管理が可能と考える。

4. まとめ

除雪機械の劣化に対する定量的評価手法を検討するにあたり、道路管理者所有の除雪機械の故障データを用いてFTA（故障の木解析）を行い、重大故障箇所を抽出した。さらに、信頼性データ解析の一つであるワイブル型累積ハザード解析で、抽出した箇所に関する故障傾向の分析を行った。

その結果、ワイブル分布の m （形状パラメータ）の値から、故障の傾向を判定できた。また、使用継続による信頼度（残存確率）の変化を、信頼度曲線図で可視化することができた。

今後、除雪機械劣化度の定量的評価に向けた信頼度の閾値の設定方法の検討などに取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 伊藤義和・植野英睦・幸田勝：ワイブル型累積ハザード解析を用いた除雪機械の故障傾向の把握，寒地土木研究所月報，No.784，pp.29～34，2018
- 2) 伊藤義和・植野英睦・幸田勝：除雪機械の故障分析に関する検討－ワイブル型累積ハザード解析の試行－，ゆきみらい2019in新庄，2019.2，http://www.thr.mlit.go.jp/yukimirai_shinjyou/assets/doc/58.pdf（2019年7月18日確認）
- 3) 国土交通省北海道開発局網走開発建設部ホームページ掲載の写真を一部加工：維持除雪機械の紹介，https://www.hkd.mlit.go.jp/ab/douro_seibi/v6dkjr0000002gns.html（2019年7月18日確認）
- 4) 福井泰好：入門信頼性工学，pp.113，2006
- 5) 社団法人日本建設機械化協会北陸支部：建設機械整備標準作業工数表（除雪機械編）（平成22年度版），pp.68～75，2010
- 6) 益田昭彦・石田勉・横川慎二：信頼性データ解析，pp.68～75，2009
- 7) 益田昭彦・石田勉・横川慎二：信頼性データ解析，pp.129～131，2009

38. 天井用車載型乾式研掃装置の自動化運転による地下鉄補修工事への適用について

株式会社奥村組
株式会社奥村組
株式会社奥村組

○丸山 八大
津村 匡洋
石井 敏之

1. はじめに

供用中の道路トンネル等を対象とした補修・補強工事では、夜間の限られた時間および空間内で作業を完了させる必要がある。そのうちコンクリート天井面の表層脆弱部や塗膜の除去、および目荒らし等の研掃作業は、重い吸引式のディスクサンダー等を用いた上向き姿勢による人力作業となっている。そのため、作業の効率化、安全性の向上および仕上がり面の品質確保などの改善すべき課題があった。

このような状況に鑑み、地上からの操作で天井面の研掃作業を自動化運転で行え、発生した粉塵の飛散を抑止し、高効率な作業を可能とした「天井用車載型乾式研掃装置」（以下、研掃装置）を開発した（写真-1）。

用途拡充として、本研掃装置を地下鉄補修工事の駅ホーム階軌道上天井面（以下、軌道上天井面）の研掃作業に適用した。適用結果と今後の課題について報告する。



写真-1 研掃装置

2. 研掃装置の概要

研掃装置は、従来人力で行ってきた天井面の研掃作業を自動化運転できるように機械化したもので、装置本体、集塵機、発電機、コンプレッサー、制御盤等から構成されている。

装置本体の外観を図-1、仕様を表-1に示す。装置本体は、研掃を行うケレン機、ケレン機を前後左右に移動させる架台および昇降させる多段式リフ

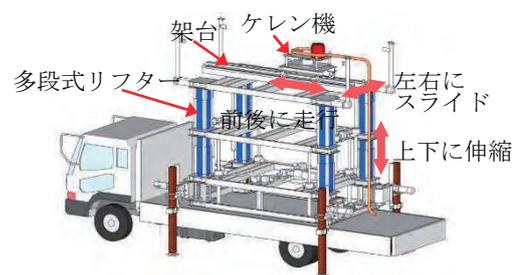


図-1 装置本体

表-1 装置本体の仕様

装置部位	項目	仕様
ケレン機	走行速度	0.5～10 m/min
	押付け力	0.2～0.9 kN
	鉛直凹凸	±40 mm
	研掃幅	250 mm
多段式リフター	昇降高さ	1,200 mm
	施工高さ	4.3～5.0 m
架台（施工範囲）	走行範囲	2.69 m
	横行範囲	1.56 m
	面積	4.2 m ²

ター等で構成されている。

ケレン機（写真-2）は、天井面を研掃する研掃ヘッド、研掃ヘッドを天井面に一定の圧力で押し付ける押付け装置、および架台上を自走させる走行装置等から構成される。研掃作業は、高速で回転する研掃ヘッドを天井面に一定圧力で押し付けながら架台上を走行させることで行う。

研掃ヘッドは、写真-3に示すように鋼製ビットを配した円盤状の研掃ディスクとその周囲に設けた二重の飛散防止枠（ブラシ型、樹脂型）からなる。

発生した粉塵については、二重の飛散防止枠と研掃ディスク内に設けた8箇所の吸引孔より集塵機で吸引し粉塵の飛散を防止する。



写真-2 ケレン機

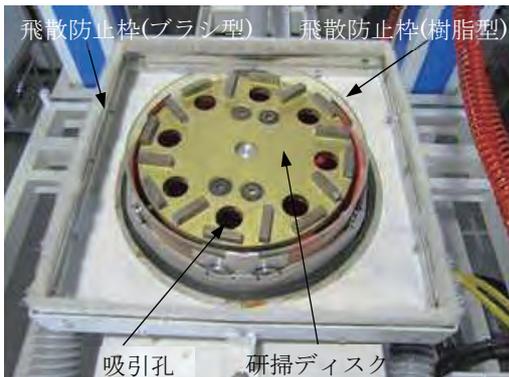


写真-3 研掃ヘッド

3. 地下鉄施設への用途拡充

3.1 適用現場の概要 (下り線)

地下鉄駅他構築補修工事での軌道上天井面の塗膜除去に研掃装置を適用した。同駅は地下3層構造になっており、地下2階が下り線、地下3階が上り線である。集電方式は第三軌条方式であり、天井面に架線が無い構造となっている。

最初の適用箇所は、写真-4に示す地下2階下り線軌道上天井面である。施工範囲は、施工延長140m、施工幅2.96mの約414m² (うち研掃装置による適用範囲は約272m²) で、軌道線形は駅進入部にR=250mのカーブがあり、それ以降直線となっている。

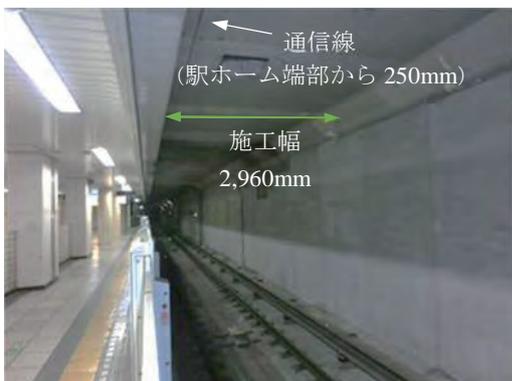


写真-4 適用箇所下り線駅ホーム階

3.2 研掃装置の変更・改造

道路トンネル用に開発した研掃装置を、地下鉄軌道上天井面の研掃作業に適用するため、以下の変更と改造を行った。

(1) 研掃装置の車両編成の変更

従来の研掃装置は、写真-1に示したように4トン車と2トン車の2台車両編成で移動・作業を行う仕様であった。今回、地下鉄軌道上で使用するため、研掃装置の車両編成は写真-5に示すように15トントロ台車2台と牽引車としてのモーターカーの3両編成に変更した。



写真-5 研掃装置の車両編成 (地下鉄)

(2) 研掃装置の改造

従来の研掃装置の横行範囲である施工幅1.56mでは、トロ台車の位置関係から、軌道上天井面の施工幅2.96mのうち両端0.7mの範囲が施工できない。この範囲を小さくするため、装置本体下端に、写真-6と図-2に示すようなスライド装置を設け、両端に0.3mずつ移動ができるようにして施工幅を1.56mから2.16mに改造した。このスライド装置は、トロ台車に固定した溝形側溝250×90 (長さL=2.3mの溝形鋼を施工幅拡幅側の車両限界まで張り出す) 上を、装置本体の下端に取りつけたチルトタンク (超低床型エンドレスローラー) で装置本体を両側にスライドさせる機構とした。

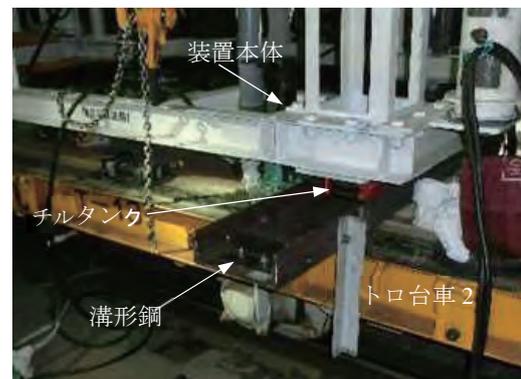


写真-6 スライド装置

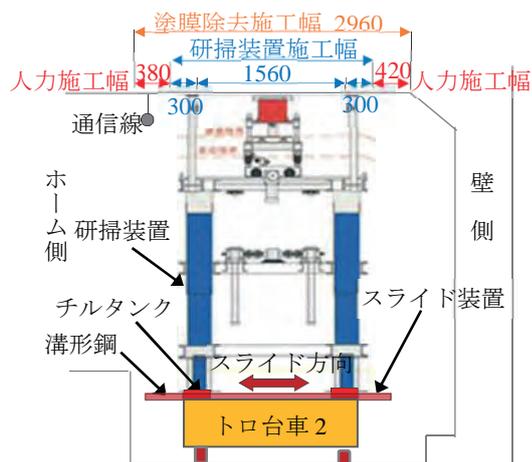


図-2 施工幅拡大方法（下り線）

これにより、研掃装置の施工幅は、ホーム側の通信線近傍から壁側のハンチ手前0.42mまでとなり、人力による施工範囲を縮小させることが可能となった。

3.3 適用結果（下り線）

(1) 適用状況

研掃装置による自動化施工と吸引式ディスクサンダーによる人力施工の状況を写真-7、8に示す。施工時間は、き電停止後の0:50から通電開始前の4:00までの約3時間であった。施工手順は以下の通りで、作業の準備・撤収に約1時間を要するため、実質の研掃作業は約2時間であった。

- ① 研掃装置を駅ホームに入線
- ② 研掃装置を設置後、装置本体をスライド
- ③ ケレン機を天井面に押し付け、走行・横行させて塗膜を除去（写真-9）
- ④ ケレン機を下降させ、次の研掃位置にモーターカーで移動後、③の繰返し
- ⑤ 研掃装置を駅ホームから退出

なお、研掃装置の塗膜除去条件は、現場での条件設定実験により、ケレン機の押付け力0.7kN、走行速度4m/min、走行回数2～4回（同じラインを走行する回数）とした。



写真-7 研掃装置による施工状況



写真-8 人力による施工状況

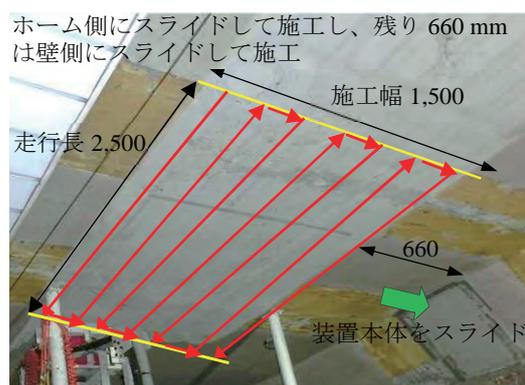


写真-9 ケレン機の施工パス

(2) 施工能力

研掃装置と人力施工による施工歩掛を表-2に示す。なお、作業員の編成としては、研掃装置を使用する場合、装置の操作者1名、集塵処理などを行う補助員1名、モーターカー運転者の1名である。人力施工では2～4人が1班編成として作業を行った。

作業の準備・撤去時間は、研掃装置が約1.0時間であるのに対し、人力施工では約1.5時間であった。これは、研掃装置では全てが車載されているため移動・設置が容易であるのに対し、人力施工では足場の組立解体や材料運搬等に加えて、粉塵対策養生が必要となり、それらの作業により多くの時間を要したことにある。その結果、研掃装置による施工では人力施工に比して実質の研掃作業時間が増加した。

人力施工は粉塵の発生を抑制することが出来ないため作業環境は悪かったが、研掃装置は発生する粉塵を吸引、抑制するため良好な環境で作業を行うことができた。

また、研掃装置は地上からの操作による作業であることから、高所作業が無くなり安全性の向上が実現した。

表-2 施工歩掛（下り線）

項目	研掃装置	人力施工
施工面積	271.2 m ²	146.6 m ²
施工日数	15 日	38 日
日平均施工面積	18.1 m ² /日	3.9 m ² /日
日作業員数	3 人	2~5 人
施工能力	6.0 m ² /人日	1.2 m ² /人日

表-2 より、日平均施工面積は研掃装置で 18.1m²/日、人力施工で 3.9m²/日であった。作業員 1 人当たりの施工能力は、研掃装置で 6.0m²/人日、人力施工で 1.2m²/人日であり、天井面の研掃作業に研掃装置を適用することによって、施工能力が 5 倍となり、研掃作業の効率化を図ることができた。

また、下り線ケレン面積の設計数量 417.8m²に対して、研掃装置の施工が 271.2 m²であったため、研掃装置による施工比率は 64.9%であった。

(3) 仕上がり面の品質（下り線）

研掃装置と人力施工による塗膜除去の仕上がり面を写真-10 に示す。目視観察によると、人力施工では仕上がり面に塗膜除去のぼらつきがみられるが、研掃装置では確実に均一に塗膜が除去されており、仕上がり面の品質が向上している。



写真-10 研掃による仕上がり面の状況（下り線）

(4) 評価

研掃装置の施工と人力施工の歩掛、安全性、品質を比較したところ、研掃装置の適用により効率よく安全に高品質な研掃作業を可能とすることが確認できた。

この結果より、研掃装置の施工範囲を拡げて人力施工の負担をできるだけ減らすことが、課題として挙げられる。この課題を次施工に反映させることでより効率のよい施工が可能と考えられる。

(5) 問題点

下り線を施工したことで発生した主な問題点を以下に示す。

①構造上、装置本体の施工範囲幅が 1.56m と決ま

っているため、装置本体をチルトタンクでスライドさせたとしても未施工範囲が両端に約 0.4m ずつ残ってしまうため、人力施工の負担が残った。②写真-11 に示すように、粉塵飛散防止枠のブラシの消耗が激しい。限られた作業時間の中での交換作業は歩掛に影響した。



写真-11 粉塵飛散防止枠（ブラシ型）損傷状況

③天井面に補修した凸部がある場合、ケレン機が凸部に近づくと反力タイヤが先に接触するため、補修面の周囲を研掃することができずに人力施工の範囲が増えた（写真-12）。



写真-12 凸部接触状況

4. 研掃装置の再改造

地下 3 階上り線軌道上天井面も施工対象となっているため、前述した問題点を改良して施工を行うこととした。

改良点を以下に示す。

①装置本体の施工幅を広げるために、写真-13 で示す張出し型拡幅用横行レールを多段リフターに取り付けた。ケレン機の片側施工幅を 240mm 拡幅できた。



写真-13 張出し型拡幅用横行レール

②粉塵飛散防止枠のブラシの形状を、四角形から交換が容易な丸形に変更した。また、ブラシの強度を上げて耐久性を向上させた。

③写真-14に示すように、反力タイヤを樹脂製ボールキャスターに変更して設置位置を研掃ヘッドに近づけることで、人力施工範囲を645mmから225mmまで縮小させた。

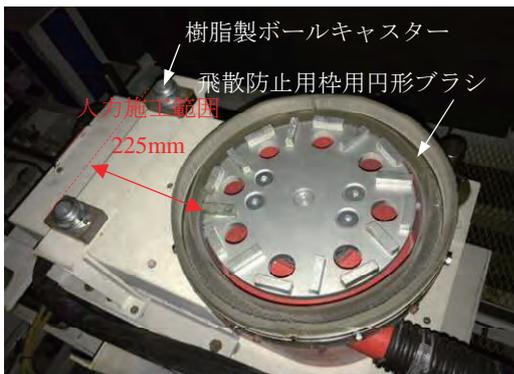


写真-14 改良後ケレン機

④ケレン機の施工幅を拡大させたことで、架台を上昇させる際に天井面との接触を感知するセンサーポールがケレン機の走行に支障する。センサーポールと架台の間に間隔拡張材を挿入してケレン機の走行に支障の無い位置に設置した(写真-15)。



写真-15 改良後接触センサーポール

⑤走行と横行のモーターが過負荷エラーにより、作動停止することが発生したため、容量を上げたモーターへ交換した。

上記の再改造によって、図-3に示すように施工範囲を拡げることができた。

なお、ホーム側に人力施工幅100mmが生じるのは、スライド装置を引っ張る作業スペースの確保がホーム側で困難なためである。

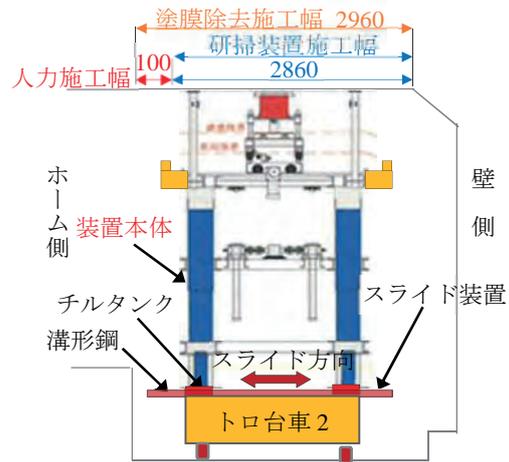


図-3 施工幅拡大方法(上り線)

5. 研掃装置改良後の地下鉄施設への再適用

5.1 適用現場の概要(上り線)

上り線は下り線の構造と同じであるため、施工範囲・条件はほぼ同様である。一部、下り線天井部に設置されていた施設物が上り線には含まれていない等の違いはある。

5.2 適用結果(上り線)

(1)適用状況

施工時間、施工手順、作業員の編成は下り線施工時と同様である。施工状況を写真-16に示す。

再改造による施工範囲の拡大で人力施工の負担を軽減させた。



写真-16 上り線施工状況

(2) 施工能力

上り線での研掃装置と人力施工による歩掛を表-3に示す。

表-3より、日平均施工面積は研掃装置で16.0m²/日、人力施工で3.3m²/日であった。作業員1人当たりの施工能力は、研掃装置で5.5m²/人日、人力施工で0.9m²/人日である。天井面の研掃作業に研掃装置を適用することによって、施工能力は約6倍となった。

また、上り線ケレン面積の設計数量369.3m²に対して、研掃装置の施工が286.9m²であったため、研掃装置による施工比率は77.7%であった。

歩掛を下り線施工時と比較すると、上り線の歩掛は低下しているが施工能力、施工比率は共に向上した。

再改造の結果が、大きく施工比率を向上させた要因となり人力施工の負担を大きく減少させた。下り線と比べて、上り線は施設物が無かった事も向上の要因の一つであった。

歩掛の低下に関しては、下り線に比べて上り線は写真-17に示すように補修面が多く存在し、研掃装置1セットに対しての研掃面積が少なくセットの盛替えが多くなったためである。しかし、過負荷による機械エラーやブラシ交換は下り線施工時より格段に減少したため、安定した施工が可能となった。

表-3 施工歩掛（上り線）

項目	研掃装置	人力施工
施工面積	286.9 m ²	82.4 m ²
施工日数	18日	25日
日平均施工面積	16.0 m ² /日	3.3 m ² /日
日作業員数	3人	3~4人
施工能力	5.3 m ² /人日	0.9 m ² /人日

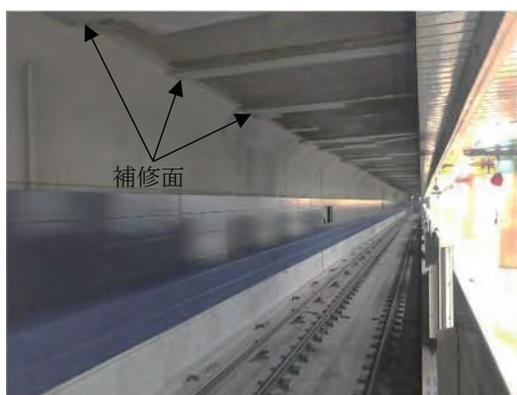


写真-17 補修面（上り線）

(3) 仕上がり面の品質（上り線）

研掃装置と人力施工による塗膜除去の仕上がり面

を写真-18に示す。下り線と比較すると、研掃装置の施工幅が拡大し、人力施工の範囲が補修面の周囲とホーム側の僅かな部分だけとなっていることが分かる。

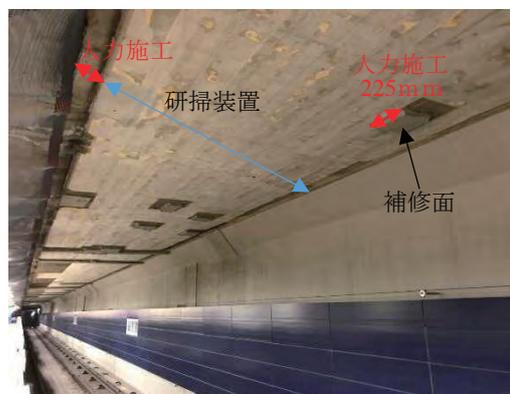


写真-18 研掃による仕上がり面の状況（上り線）

6. 今後の課題

研掃装置の再改造により、施工効率を更に上げることを実現したが、施工条件がより厳しい場合でも、安定した施工を実現させるには、次のような課題が挙げられる。

- ・補修面の凸部や施工範囲に施設物が存在する場合に対応するため、研掃範囲を障害物に近接する範囲まで拡張する必要がある。
- ・天井面の縦断方向の勾配に追従する機能に、横断方向の勾配に追従する機能を付加すると緩やかな局面にも対応できる。

このような課題を解決することにより、研掃装置の適用場面が多くなり、補修工事の省力化を図ることができると考えられる。

7. おわりに

供用中の道路トンネル等を対象とした研掃装置の改造を行い、地下鉄補修工事への適用を実現した。

施工結果から、人力による施工より約6倍の施工効率で研掃作業を行う事ができ、安全面、品質面の向上も図られることが分かった。今後は、今回の施工結果を生かして他現場へ積極的に展開していきたい。

39. 点検支援技術の定期点検への活用に向けて

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課 ○ 松村 潤
渡邊 賢一

1. はじめに

道路トンネルや道路橋等の道路構造物については、平成26年7月より健全性を診断するため、5年に1回の頻度で近接目視を基本とする点検（以下、「定期点検」いう）が実施されている。

平成30年度は、定期点検の一巡目が終了することから、国土交通省では社会資本整備審議会道路分科会道路技術小委員会において点検要領改定の議論がなされ、平成31年2月に定期点検要領が改定された¹⁾。

定期点検要領の改定では、「新技術の活用による効率的な点検」がポイントの1つとして挙げられ、近接目視による点検を基本としつつ、点検を実施する技術者が近接目視による場合と同等の健全性の診断を行うことができる場合に、新技術の活用による状態の把握が可能となり、インフラ点検用ロボット等「点検支援技術」の導入を促進することで、定期点検の効率化が期待される。

本稿では、点検支援技術の定期点検への活用に向けた環境整備、国の定期点検の現場で先行的に活用したフィールド試行について報告し、点検支援技術の更なる活用に向けた取り組みを紹介する。

2. 点検支援技術の活用環境整備

2.1 定期点検への活用に向けた経緯

国土交通省では、開発・導入を促進するインフラ点検用ロボットの現場検証及び評価を行うことを目的に、平成26年2月に「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会」を設置し、現場検証委員会での議論を踏まえてインフラ点検用ロボット技術に関する性能評価指標を策定するとともに、公募に基づく現場検証と評価を行ってきた。

平成28年度からの2か年にわたり実施した現場検証の結果を踏まえ、現時点でのインフラ点検用ロボットの技術水準で活用できる方法は、点検記録の作成支援（点検支援）に用いることにした。

点検支援技術は、写真を撮影するドローンや走行しながら画像を取得する車両等を用いて点検記録用の画像作成を行うもので、画像からひび割れ幅や長さを計測できれば、ソフトウェアを用いて机上で損傷図に転記することができることから、

現地でのチョーキングやクラックスケールによる計測が省略でき、交通規制の縮減が見込まれる。

これらを実現するため、道路管理者が要求する品質について、品質を定義する項目とその具体的な良否を規定する考え方（評価指標）と、評価指標に対して達成すべき定量的な水準（要求水準）を設定し、それぞれの点検支援技術がどの程度実現できるかについてとりまとめ、性能評価指標として公表した²⁾³⁾。

定期点検要領の改定に向けた過程で、点検支援技術は、「点検に必要な知識及び技能を有する者」が点検の対象部位・部材・範囲や使用目的を判断したうえで、定期点検に活用できる方向性が示されたことから、公表された限定的なユースケースに基づく性能評価指標だけでは、十分な対応ができなくなったため、点検技術者が目的に応じて適切な点検支援技術の選定が判断できる「カタログ」のような性能を示す資料が必要となった。

そこで、点検支援技術を円滑に活用できるように、活用に向けたプロセスを整理し、定期点検要領と合わせて活用できる参考資料として、「新技術利用のガイドライン（案）」と「点検支援技術性能カタログ（案）」をとりまとめた（図-1）。

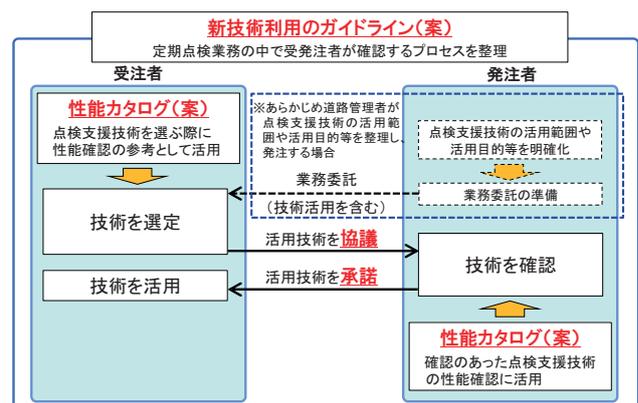


図-1 点検支援技術の活用プロセス例

2.2 新技術利用のガイドライン（案）

「新技術利用のガイドライン（案）」（以下、「ガイドライン（案）」という）は、業務委託等により定期点検を実施する際に点検支援技術を活用する場合、発注者及び受注者双方が活用する技術について

て、確認するプロセスや受注者から協議する「点検支援技術使用計画」を発注者が承諾する際の確認すべき留意点等を整理した参考資料である。

業務委託等の特記仕様書に参考図書として位置付けることで、受注者が現場条件や構造、設置状況等を十分に把握したうえで、「点検支援技術性能カタログ(案)」により使用を予定している技術の特性及び仕様を勘案し、活用範囲や活用目的、技術選定の考え方、技術の性能を示す標準項目等から、「点検支援技術使用計画」(図-2)として明示したうえで、発注者へ協議するという流れを例示したものである。

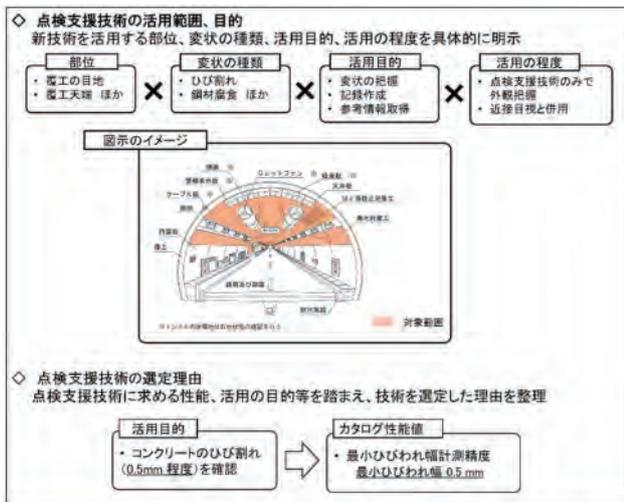


図-2 点検支援技術使用計画のイメージ(道路トンネル)

2.3 点検支援技術性能カタログ(案)

「点検支援技術性能カタログ(案)」(以下、「性能カタログ(案)」という)は、ガイドライン(案)で規定した標準項目に基づき、標準項目に対する性能値を開発者に求め、開発者から提出された性能値等をカタログ形式でとりまとめた参考資料であり(図-3)、業務委託等により定期点検を実施する場合、受発注者双方において参考とすることで、適切な技術選定を支援するものである。

国	性能カタログ標準項目	項目	定義	動作条件 環境条件	開発者
性能カタログの標準項目を規定	基本諸元	<ul style="list-style-type: none"> 外形寸法 移動・計測原理 技術が有する機能 (※物理的に一意のもの) 	各項目の説明 ※各定義を明確化するため、必要に応じて試験方法も規定	—	試験等により標準項目の性能値を整理
	運動性能	<ul style="list-style-type: none"> 構造物近傍での安定性能 狭小進入可能性能 最大可動範囲等 (※移動体としての能力を定量的に示すもの) 	カタログ性能値を発揮する条件として記載すべき項目 【動作条件】 ・被写体との距離 ・位置精度等 【環境条件】 ・風速の条件 ・天候・外気温等		
	計測性能	<ul style="list-style-type: none"> 撮影速度 最小ひび割れ幅・計測精度 位置精度 色識別性能等 (※データの質に関わる能力を示すもの) 			

図-3 性能カタログ(案)の規定項目

性能カタログ(案)は、平成31年2月時点における点検支援技術をまとめたものであるが、今後の技術開発の進展に応じて適宜見直しが行われる

予定である。

また、性能カタログ(案)に掲載のない技術についても標準項目に対する性能値を受注者に求め、活用目的に適合していることと、性能値が実現場において確保されていることを確認することで活用することが可能である。

3. フィールド試行について

3.1 フィールド試行の概要

フィールド試行は、点検支援技術を活用するスキームや性能カタログ(案)について、定期点検を実施する現場の視点から課題等がないかを確認し、前述の点検支援技術の活用環境において整備したドキュメント類の改善点について整理することを目的とした。

試行の対象とした点検支援技術は、平成29年度までに公募により現場検証を行い、性能評価結果を公表した技術(道路トンネル:4技術, 道路橋:7技術)⁴⁾について、国が実施する定期点検の現場(59施設:表-1)において近接目視による従来点検と併せて先行的に実施した。

表-1 フィールド試行を実施した施設数

区分	点検支援技術活用数		
	道路トンネル	道路橋	計
構造物			
施設数	30	29	59

フィールド試行では、実施フロー(図-4)により、点検支援技術の活用に先立ち、活用範囲や活用目的、技術選定の考え方をまとめた点検支援技術使用計画書の提出を求めるとともに、点検支援技術の活用に関するアンケート形式の調査票により、点検支援技術を活用して「良かった点」、「悪かった点」について意見等を求める定性的な調査と、点検成果品の精度検証として、点検支援技術を用いて撮影した画像から作成した損傷図と、従来手法である近接目視により作成した損傷図とを比較することとした。

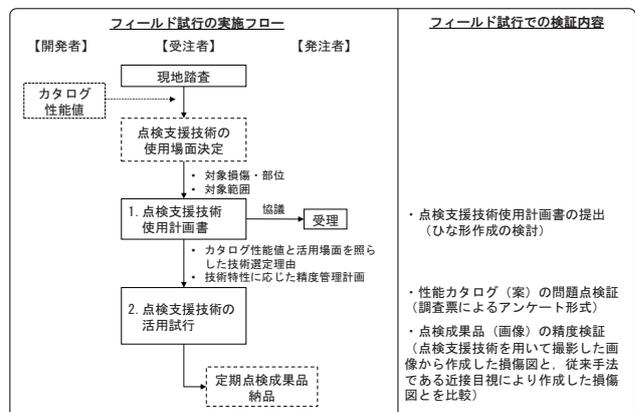


図-4 フィールド試行の実施フロー

3.2 フィールド試行の結果

(1) 調査票による意見等

回収した調査票より点検支援技術を活用してみて「悪かった点」から課題を把握し、要因別に対応案を整理した。

〈道路トンネル〉

道路トンネルでは「点検者が期待していた品質が現場で得られない」、「適用範囲などの理解不足」、「点検費用が割高になる可能性がある」といった3つの課題となった(表-2)。

表-2 調査票から抽出した意見等(道路トンネル)

調査票から抽出した課題	要因と対応案
点検者が期待していた品質が現場で得られない	
・チョーキングを画像から認識するため、近接目視点検から時間がたつと、漏水、結露およびトンネル内清掃等の影響で消えてしまうことがある。	要因A: 標準カタログ項目の不備 ・当該技術が想定する標準的なユースケース(この場合は、近接目視時のチョーキングを画像から読み取る)を性能カタログに明記。
・ロボットによる画像では、うき、はく離や変状(漏水等)の程度は確認できない。	・当該技術が想定する標準的なユースケース(この場合は、うき、剥離等の打音異状は対象外)を性能カタログに明記する。
・白黒画像であるため、漏水と漏水跡の区別および遊離石灰との区別は困難であり、画像はカラーが望ましい。	・性能カタログへの記載事項が不足。撮影画像がカラー/白黒のいずれかであるかを性能カタログに明記。
・坑口付近とトンネル中央部との覆工面の明るさの違いによって、画像の品質を確保するために繰り返し走行が必要であった。	・カタログへの記載事項が不足。坑口と内部の照度差への対応可否を示すため、カタログ項目に環境条件として、環境照度の条件を性能カタログに明記。
適用範囲などの理解不足	
・坑門工面壁、照明背面、路面は計測できない。	要因A: 標準カタログ項目の不備 ・当該技術が想定する標準的なユースケース(この場合は、死角になる範囲があること)を性能カタログに明記。
・照明やジェットファン等の死角となる箇所でのデータを取得できない。	
・画像データが大きく(1スパン30MB程度)、CADソフトでのデータのやり取りに時間がかかる。	要因A: 性能カタログの技術情報不足 ・当該技術で取得した画像データがどの程度の容量となるのか、性能カタログの技術情報を充実。
点検費用が割高になる可能性がある	
・画像撮影車の保有台数が少なく、点検工程に効率よく合わせるための事前計画が必要。	要因A: 性能カタログの技術情報不足 ・性能カタログへの記載項目が不足。各技術における保有台数及び基地の所在地を基本事項に追記し、性能カタログの技術情報を充実。
・近接目視点検の費用以外に、車両損料、運転費、画像作成費が必要。	要因B: 点検実施計画の立案不備 ・点検支援技術をどのように定期点検の現場に適応させるとコスト削減や点検の効率化につながるか、発注者や点検者が検討の上、当該技術を使用すべき。
・延長の短いトンネルを1本のみ計測する場合など、単発のトンネルで運用すると割高になる可能性がある。	

これらの課題に対する要因を「A:性能カタログ(案)の記述を工夫することで解消可能」と「B:効率的な使用方法の検討が必要」の2つに整理し、要因Aに整理した内容は、性能カタログ(案)を修正し、要因Bに整理した内容は、点検支援技術の効率化に関する検討項目とした。

〈道路橋〉

道路橋では「点検対象部位・部材を計画どおりに撮影計測できない」、「性能の再現性の担保」、「カタログの記載内容が不十分」、「膨大なデータの処理に時間を要する」といった4つの課題となった(表-3)。

表-3 調査票から抽出した意見等(道路橋)

調査票から抽出した課題	要因と対応案
点検対象部位・部材を計画どおりに撮影計測できない	
・側道規制を実施しない予定であったが、点検実施日は風がきつく側道上にドローンが飛び出る可能性があったため、側道の幅員減少規制を実施した。	要因A: 標準カタログ項目の不備 ・性能カタログの項目に運動性能として、突風等の外乱に対応する対応能力を示す「構造物近傍での安定性能」を追加。
・桁座付近に局所的な乱流に対応できなかった。	
・梁下は高さが低く、3mの離隔を確保するとほとんど浮上できないため中止。	・定期点検を実施する技術者が技術の最小進入可能寸法を正しく把握できるように性能カタログの記載を修正
性能の再現性の担保	
・当初、RC床版のひびわれをオルソ画像上で計測し、損傷図を起こす計画としていた。しかし大半のひびわれがオルソ上では確認できなかった。	要因B: 性能カタログの理解不足 ・通常、生データとオルソ画像化すると画質が劣化する。生データでは視認できてもオルソ画像で微細なひびわれが視認できない可能性があるため、性能カタログに画像形式(オルソ・RAWデータ等)を記載。
カタログの記載内容が不十分	
・ロボットの作業能率がわからないため台数、人員の計画が立てにくい。	要因A: 標準カタログ項目の不備 ・性能カタログ上で技術の性能が成立する動作条件の記載が不十分であったため、記載を修正(撮影速度を追記)
膨大なデータの処理に時間を要する	
・点検ロボットでの写真データは大量であり、損傷写真の抽出において1枚1枚確認するには多大な労力が必要である。	要因C: ニーズに対して技術が未熟 ・ロボットで撮影した大量の写真の中から、必要とする写真を短時間で抽出可能とする技術の付与が期待される。

これらの課題に対する要因を「A:性能カタログ(案)の記述を工夫することで解消可能」、「B:性能カタログ(案)を正しく理解することで解消可能」、「C:現場のニーズに対して技術的に未熟」の3つに整理し、要因Aと要因Bに整理した内容は、性能カタログ(案)を修正した。

(2) 従来手法との比較検証

従来手法との比較検証は、近接目視による点検結果を真値として、「変状数や変状位置の記録が正確であること」、「変状程度が適切に評価されていること」を主眼におき、評価方法は、公募に基づき現場検証を行い公表した「判読可能率(近接目視で検出した変状(損傷)のうち、当該技術で記録した画像にて判読可能な変状(損傷)箇所数/近接目視で検出した変状(損傷)箇所数)」により行った。

なお、判読可能率における判読可否の判定は、道路トンネルまたは道路橋に関する業務経験を有する技術者3名(「定期点検要領」に定められた点検員の資格を有する者)が、判読の可否を合議により判定した。

〈道路トンネル〉

道路トンネルにおける判読可能率の検証は、近接目視で判別が可能な「ひび割れ」、「うき・剥離」、「鋼材腐食」、「漏水等」の5変状とし、そのうち、「うき・剥離」と「鋼材腐食」は、変状を示すチョーキングを判読することとした。

評価の結果、それぞれの点検支援技術による判読可能率(表-4)は、3技術が100%、1技術が98%となり、点検支援技術による変状の把握は可能であると言える。

表-4 判読可能率検証結果（道路トンネル）

技術名	判読可能率									
	変状の種類									
	ひび割れ		うき・はく離 (デフォーミングを判読)		鋼材露出 (デフォーミングを判読)		漏水等		合計	
	坑口部	トンネル 中継区	坑口部	トンネル 中継区	坑口部	トンネル 中継区	坑口部	トンネル 中継区	坑口部	トンネル 中継区
A技術	98% (103/105)	100% (33/33)	100% (11/11)	100% (3/3)	100% (2/2)	100% (4/4)	対象変状 なし	100% (1/1)	98% (116/118)	100% (41/41)
B技術	100% (11/11)	100% (25/25)	100% (14/14)	100% (43/43)	100% (1/1)	対象変状 なし	100% (7/7)	100% (58/58)	100% (33/33)	100% (126/126)
C技術	100% (22/22)	100% (42/42)	100% (9/9)	100% (5/5)	100% (11/11)	対象変状 なし	100% (4/4)	100% (4/4)	100% (52/52)	100% (31/31)
D技術	100% (20/20)	100% (24/24)	100% (9/9)	100% (13/13)	対象変状 なし	対象変状 なし	100% (6/6)	100% (3/3)	100% (35/35)	100% (40/40)

〈道路橋〉

道路橋における判読可能率の検証は、近接目視で判別が可能な「ひびわれ」、「剥離・鉄筋露出」、「漏水」、「うき」の4損傷を対象とした。

道路橋の検証では、検証を行うために必要となる近接目視による損傷箇所が把握できるデータを入手できた2技術の検証となったことで検証方法に関する課題を残す結果となったが、評価ができた2つの点検支援技術による判読可能率（表-5）は、90%を超えており、点検支援技術による変状の把握は概ね可能であると言える。

表-5 判読可能率検証結果（道路橋）

技術名	点検部位	判読可能率				合計
		損傷の種類				
		ひびわれ	剥離・鉄筋露出	漏水	うき	
A技術		比較対象となる「近接目視で検出した損傷箇所数」のデータがなく検証不可				
B技術	床版・橋台	92% (110/119)	100% (1/1)	0% (0/2)	対象損傷 なし	91% (111/122)
C技術		比較対象となる「近接目視で検出した損傷箇所数」のデータがなく検証不可				
D技術		比較対象となる「近接目視で検出した損傷箇所数」のデータがなく検証不可				
E技術		比較対象となる「近接目視で検出した損傷箇所数」のデータがなく検証不可				
F技術	床版	92% (33/36)	100% (1/1)	100% (5/5)	対象損傷 なし	93% (39/42)
G技術		比較対象となる「近接目視で検出した損傷箇所数」のデータがなく検証不可				

4. 点検支援技術の更なる活用に向けて

定期点検要領の改定では、「新技術の活用による効率的な点検」がポイントとなっている。

効率的な点検を実施するためには、点検支援技術を含めた新技術の導入を促進することが期待されていることから、今年度は以下の内容について、取り組むこととしている。

4.1 活用に向けた効率化検討

(1) 効果検証

点検支援技術を活用した点検における作業時間や人工等を記録・分析することで、コスト構造や活用効果を明確にし、定期点検の効率化に貢献する活用ケースを検証し、とりまとめる。

(2) 好事例抽出

上記の効果検証結果を踏まえ、点検支援技術を活用する際のノウハウや、留意点等を盛り込んだ、「好事例」を整理し、点検支援技術の円滑な導入を促進するための参考資料をとりまとめる。

4.2 積算基準類の整備

現在、業務委託等により定期点検を実施する際に点検支援技術の活用に関する費用の積算は、見積による対応としている。

点検支援技術の活用を効率的かつ円滑に進めるためには、積算基準類の整備も必要となることから、点検支援技術を活用した定期点検業務の積算基準（暫定版）（以下、「点検支援技術の積算基準（暫定版）」という）の策定について検討する。

点検支援技術の積算基準（暫定版）については、国土交通省ホームページに公表済の「定期点検業務の積算基準（暫定版）」をベースに、直接人件費の構成費目に点検支援技術の活用部分を追加することを検討している（図-5）。



図-5 点検支援技術の積算基準（暫定版）の作成イメージ

5. おわりに

インフラ点検用ロボットは、道路構造物の定期点検要領の改定に伴い、点検支援技術として定期点検の現場で活用できることとなった。

点検支援技術の技術水準は年々向上しており、新たな点検支援技術が早期に定期点検の現場で活用可能となる環境整備を進めるとともに、それぞれの点検支援技術がどのような条件下において最大の効果が発揮されるかについて検証を行い、定期点検の更なる効率化に貢献して参りたい。

参考文献

- 1) 道路の老朽化対策
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>
- 2) 国土交通省 記者発表資料（道路トンネル）
平成30年7月19日 評価指標の公表
<https://www.mlit.go.jp/common/001245608.pdf>
- 3) 国土交通省 記者発表資料（道路橋）
平成30年8月24日 評価指標の公表
<https://www.mlit.go.jp/common/001250028.pdf>
- 4) 国土交通省ホームページ
(道路トンネル及び道路橋の性能評価結果)
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000028.html

40. 橋梁点検画像の3次元管理に関する考察

国立研究開発法人土木研究所 ○ 下川 光治
 国立研究開発法人土木研究所 新田 恭士
 国立研究開発法人土木研究所 二宮 建
 国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 田中 洋一

1. はじめに

日本国内には、道路橋（橋長 2m 以上）が約 72 万橋あり、その半数は高度成長期に建設されたもので、40 年以上にわたり供用されている。今や老朽化した社会インフラを効率的に維持管理することは社会的な要請となっている。

国土交通省では、橋梁定期点検要領（以降「定期点検要領」）に基づき、5 年に一回、点検技術者が橋梁の全部材を近接目視することとしている。そして確認した損傷状態などを踏まえ、健全性を診断し、適切に措置することを定めている。

実際の点検では、人の接近が困難な部位で実施する場合、点検に時間がかかることも多い。そのため、点検作業の効率化に対するニーズを受け、対応策として新技術の活用を進めている。

2. 本研究の目的

現状の橋梁点検では、人が撮影した損傷写真を平面図上で管理するため、手作業により写真の位置関係を整理している。UAV（Unmanned Aerial Vehicle）等の新技術で撮影した点検画像は、量も多く、人手で整理するには手間と時間を必要とし効率的ではない。

そこで筆者らは、市場で調達できる SfM（Structure from Motion）ソフトウェアを活用することで、点検画像の撮影位置、撮影方向の自動推定を行い、さらに 3 次元モデル上で、点検画像を管理する手法を提案する。これにより、損傷位置の記録と確認作業を大幅に効率化できると考えている。

また、橋梁の 3 次元モデルは BIM/CIM で作成したモデルも十分活用可能であるが、SfM ソフトウェアより構築した 3 次元モデルでも、画像や損傷の位置関係を示す上では十分に有効である。本稿では、実橋梁を対象として、図-1 に示したように、「検証 1：画像による 3 次元モデルの構築・精度検証」、「検証 2：画像の撮影位置・撮影方向の精度検証」、「検証 3：効率的に 3 次元モデルを構築するための UAV の撮影方法」の検証結果を報告する。

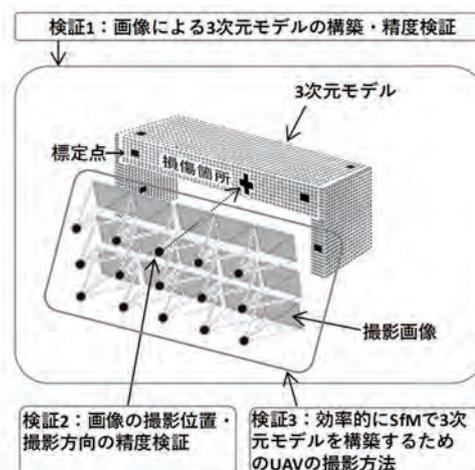


図-1: 検証内容の概要図

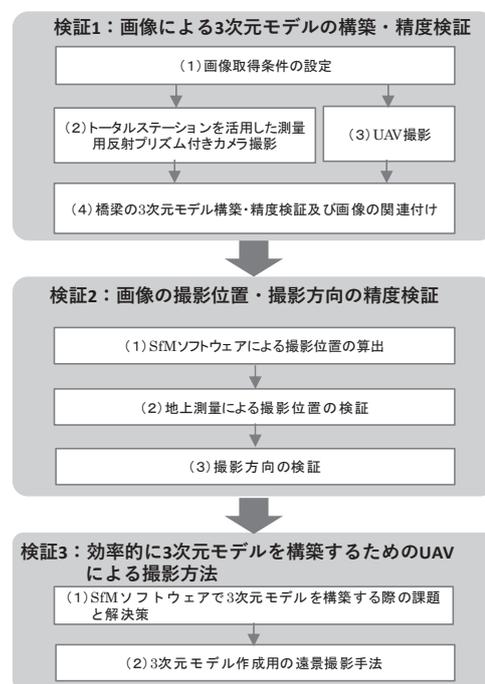


図-2: 検討フロー

3. 検討フロー

本稿における検討フローを図-2 に示した。検証 1 では、UAV とデジタルカメラを使用して撮影した画像をもとに、SfM ソフトウェアを用い

て構築した3次元モデルの精度を検証するとともに、画像の管理方法について確認した。

検証2では、損傷箇所を正確に記録するために、SfMソフトウェアにより自動推定された画像の撮影位置について評価した。また、撮影位置のずれによって発生する撮影方向の変化がもたらす画像への影響について検証し、撮影方向の重要性について整理した。

検証3では、効率的にSfMで3次元モデルを構築するために、標定点の減少を目的としたUAVでの撮影方法について検証した。

4. 検証1:画像による3次元モデルの構築・精度検証

本章では、UAV等の撮影画像より、SfMソフトウェアにて構築した3次元モデルの精度及び撮影画像の管理について検証した。

4. 1. 画像取得条件の設定

検証対象構造物は、土木研究所構内の橋梁（2径間連続鋼桁橋：橋長=40m、幅員=8m、高さ=7.5m）の橋台、鋼製桁下面、鋼製桁側面を実施した（図-3）。

4. 2. トータルステーションを活用した測量用反射プリズム付きカメラ撮影

撮影位置を現地測量により計測するために測量用反射プリズム付きカメラを作成した。

測量用反射プリズム付きカメラは、一眼レフカメラの焦点位置直上にトータルステーションの反射プリズムを設置したものであり、設置位置からカメラの焦点位置（以降、撮影位置）を算出可能としたものである（図-4）。

撮影方法は、撮影方向検証用の座標値が定まっている標定点を橋台、鋼製桁下面、鋼製桁側面に各5点設置し、カメラの画像中心が、標定点となるように撮影した（図-5、表-1）。同時に、撮影位置をトータルステーションにより計測することで、正確な撮影位置を把握した。現地測量は、公共測量作業規程に準拠して品質を確保した。

4. 3. UAV撮影

UAVによる撮影距離は、検証対象構造物にUAVが接触せず、安全に飛行するために撮影距離を3mとした。次に画像の撮影間隔は、国土交通省の「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」を参考とし、隣接写真重複率80%、コース重複率60%で行った（図-6）。

4. 4. 橋梁の3次元モデル生成・画像の関連付け

(1) SfMソフトウェアによる3次元モデルの構築

UAVで撮影した画像811枚（内訳：橋台228枚、鋼製桁下面331枚、鋼製桁側面252枚）に、



図-3:検証対象構造物

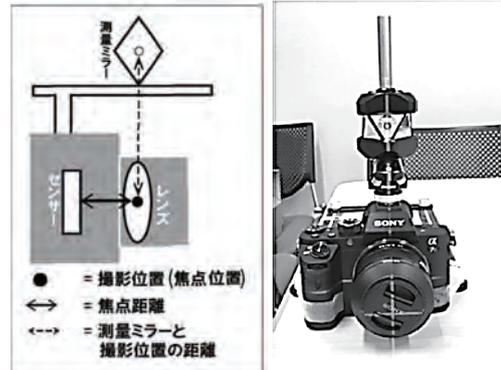


図-4:測量用反射プリズム付カメラ

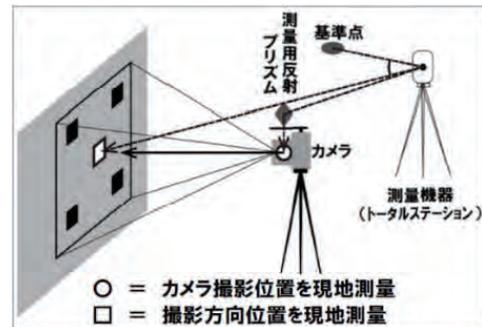


図-5:測量用反射プリズム付カメラの撮影方法

表-1:撮影条件

対象橋梁	土木研究所内橋梁 (L=40m、W=8m、H=7.5m)
使用カメラ	SONY α7 II
撮影距離	3.0m
地上画素寸法	0.40 mm/ピクセル
ひび割れ幅	0.15m 以上を確認可能
隣接写真重複率	80%
コース重複率	60%

※隣接写真重複率：最も隣接する写真との重複範囲

※撮影コース：撮影位置を結んだ経路

※コース重複率：撮影コース間で写真が重なる範囲

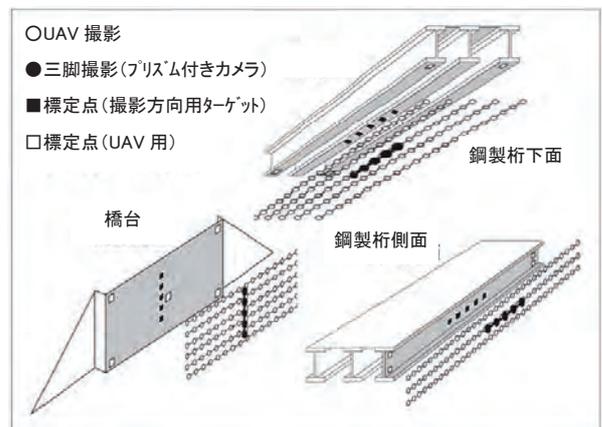


図-6:検証計画図

測量用反射プリズム付カメラで三脚撮影した画像5枚ずつ15枚を図-6のとおり加えた計826枚を基に、SfMソフトウェアで3次元モデルを構築

した。構築した3次元モデルの精度については、「空中写真測量（無人航空機）を用いた 出来形管理要領（土工編）（案）」に準じた±0.050mとして設定した。

精度検証の結果、橋台、鋼製桁下面、鋼製桁側面の標定点の位置情報について、トータルステーションによる計測値とSfMソフトウェアによる算出値のずれは、すべて±0.050m以内となっており、本研究で想定している3次元モデルの精度基準を満たしていることを確認した。（表-2）

（2）3次元モデルによる点検画像の管理

SfMソフトウェアにより構築した3次元モデルを基にする点検画像の管理について、図-7、図-8、図-9のとおり検証した。

検証の結果、従来の2次元展開図に損傷箇所を記録する方法から、撮影画像とBIM/CIMモデルを同時に表示する3次元モデルを使用した表示方法にすることで、損傷と鉄筋段落しの位置関係が直感的に把握可能となった。PC橋の場合には、PC鋼線位置の把握も可能となる。

このことから、本管理方法は、点検画像の効率的な管理方法の一つを示すだけでなく、損傷原因の推測にも寄与できると考えられる。

さらに、損傷位置を正確に記録・表示することで、過去と現在の損傷を容易に比較することができ、損傷の進行状況の把握が正確に行える。

5. 検証2:画像の撮影位置・撮影方向の精度検証

本章では、損傷箇所を正確に記録するべくSfMソフトウェアにより自動推定された画像の撮影位置を評価するとともに、撮影方向の変化がもたらす画像への影響を検証し、その重要性について整理した。

5. 1. SfMソフトウェアによる撮影位置の算出

SfMソフトウェアを用いて、撮影した画像の撮影位置を自動推定した。

5. 2. 地上測量による撮影位置の検証

4. 2にてトータルステーションで計測した画像の撮影位置情報を「測量計測値」、5. 1でSfMソフトウェアから得られた撮影位置情報を「SfM算出値」とし、比較した結果を表-3に示す。

表-3より、撮影位置の測量計測値とSfM算出値の差は最大0.034mであり、同等の精度であることを確認した。

よって、SfMソフトウェアにより自動推定した撮影位置は、実橋梁上においてもその精度については、保証できると考えられる。

表-2:3次元モデルのSfMソフトウェアによる基準点残差

	橋台			鋼製桁					
	Error X	Error Y	Error Z	下面			側面		
				Error X	Error Y	Error Z	Error X	Error Y	Error Z
最大値 (絶対値)	0.007m	0.006m	0.009m	0.007m	0.006m	0.006m	0.010m	0.009m	0.010m
標準偏差	0.005m	0.003m	0.000m	0.001m	0.002m	0.003m	0.002m	0.000m	0.001m



図-7:3次元モデルと撮影位置を表示

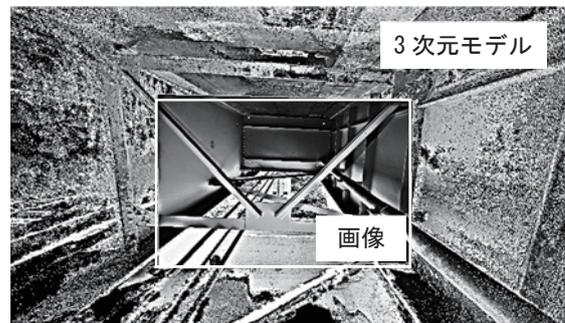


図-8:撮影画像と3次元モデルの重ね合わせ

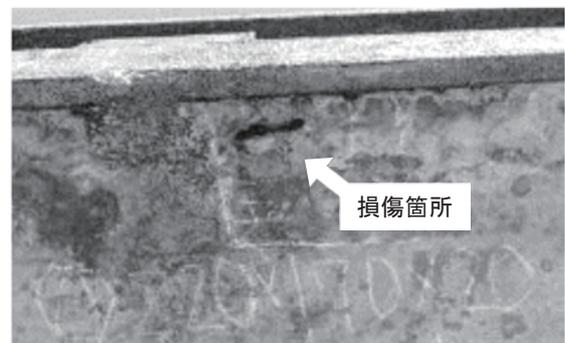


図-9:写真上に損傷箇所を記録

表-3:撮影位置の測量計測値とSfM算出値の検証結果

検証場所	橋台		鋼製桁下面		鋼製桁側面	
	水平位置	標高	水平位置	標高	水平位置	標高
最大値	0.010m	0.008m	0.005m	0.009m	0.034m	0.003m
標準偏差	0.007m	0.007m	0.004m	0.008m	0.030m	0.002m

*水平位置と標高の制限値：標準偏差=0.060m、最大値=0.120m

5. 3. 撮影方向の検証

（1）撮影方向の傾きが及ぼす画像への影響

5. 2より、撮影位置の測量計測値とSfM算出値は、同等の精度であることは確認できたが、完全一致はしておらず、多少の撮影位置のずれが発生していることも事実である。

この撮影位置のずれが及ぼす3次元モデル上の点検画像への影響を確認するために、図-10のような撮影距離、画像中心及び画像幅:Lが同一で、撮影方向が傾き： θ でずれた場合の撮影範囲:PA θ を算出した。

$$PA\theta = L/\sin(90 - \theta) = L/\cos\theta$$

θ は、撮影対象表面の垂線からの傾きを意味しているため、 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ (90° 以上は、撮影対象表面に接触または死角のため範囲外)とすると、

$$L \leq PA\theta \quad (\theta = 0^\circ \text{ の時 } PA\theta = L = PA)$$

L: 画像幅

θ : 撮影対象表面に垂直な撮影方向からの傾き

PA: 撮影対象表面に対し、撮影画像の撮影方向が垂直の場合の撮影範囲

PA θ : 撮影対象表面に対し、撮影画像の撮影方向が θ 傾いた場合の撮影範囲

つまり、撮影距離及び画像中心を固定した条件下で、撮影方向がずれて撮影した画像は、撮影対象表面を垂直に撮影した画像と比較し、広範囲を撮影しており、画像幅は一定のため圧縮表示される。

上記の算出結果より、この撮影位置の傾き： θ による撮影対象の圧縮表示の可能性は、ひび割れ幅の過小評価にもつながる要因となる。よって、撮影方向の傾き： θ の把握は重要な項目となる。

そのため、本研究では、この撮影方向の傾き： θ についても検証するために、図-11に示す撮影位置から、「現地測量による撮影方向（以降、測量方向ベクトル）」と「SfMソフトウェアにより算出された撮影方向（以降、SfM方向ベクトル）」を求めた。

(2) 測量方向ベクトルの計測

位置情報が既知のターゲットを画像中心として撮影した際のカメラ位置をトータルステーションによって計測した。

(3) SfM方向ベクトルの計測

SfMソフトウェアにて構築した3次元モデルより撮影位置を求めた。また、画像中心は、①と同様の位置情報が既知のターゲットとした。

(4) SfM方向ベクトルの傾きとその影響

表-4に測量方向ベクトルとSfM方向ベクトルを示すとともに、内積によりSfM方向ベクトルの傾き： θ を整理した。

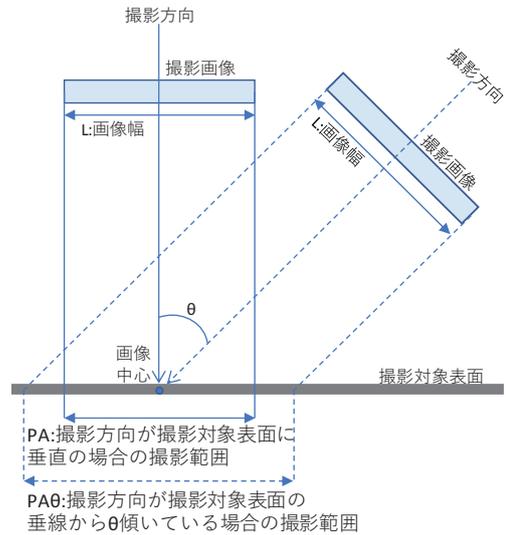


図-10: 撮影方向が傾いた場合の撮影範囲

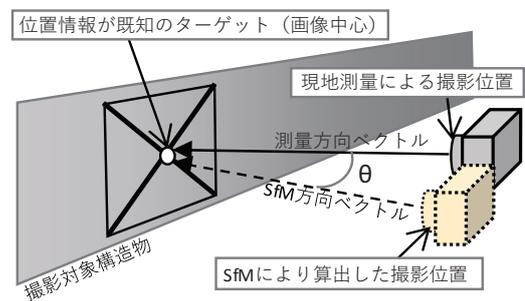


図-11: SfM方向ベクトルと測量方向ベクトル

表-4: 測量方向ベクトルとSfM方向ベクトル及び角度

ターゲット No	測量方向ベクトル			SfM方向ベクトル			角度： θ (degree)
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	-2.590	-1.495	0.007	-2.580	-1.493	-0.001	0.167
2	-2.587	-1.495	0.003	-2.578	-1.491	-0.007	0.186
3	-2.588	-1.495	0.003	-2.575	-1.490	-0.004	0.134
4	-2.591	-1.496	0.001	-2.583	-1.492	-0.003	0.084
5	-2.592	-1.495	0.002	-2.584	-1.491	-0.004	0.108

表-5: SfM方向ベクトルの傾きによるひび割れ幅の圧縮表示

ターゲット No	画像中心の ひび割れ幅 (mm)	角度： θ (degree)	圧縮率： p	SfM上の画像中心 のひび割れ幅 (mm)
1	0.2	0.167	0.986	0.197
2	0.2	0.186	0.983	0.197
3	0.2	0.134	0.991	0.198
4	0.2	0.084	0.996	0.199
5	0.2	0.108	0.994	0.199

SfM方向ベクトルの傾き： θ より、例として、画像中心に0.2mm幅のひび割れがあった場合の圧縮表示について、表-5に整理した。この0.2mm幅のひび割れは、橋梁点検時のひび割れ確認の閾値として用いられる数値である。また、測量方向ベクトルは、撮影対象表面に対して垂直であるとする。

ここで、撮影方向の傾き： θ による画像中心の圧縮率: p は、以下のように定義した。

$$p = L/(L/\cos\theta)$$

p : 撮影方向の傾きによる画像中心の圧縮率
 L : 画像幅
 θ : 撮影対象表面に垂直な撮影方向からの傾き

今回のケースでは、0.2mm 幅が SfM ソフトウェア上では、ひび割れ確認の閾値以下として圧縮表示されるため、確認対象の損傷から漏れてしまう。
 また、計測対象表面に対する垂直撮影は、難易度が高く、レンズも平面ではなく曲面であり、画像中心から離れるとゆがみも生じるため、現在の撮影したひび割れ幅は、実際よりも圧縮表示されていることが推察される。

撮影したひび割れ幅に対して、SfM ソフトウェアより推定した撮影方向の傾きのみならず、実際の撮影方向の傾き及びレンズのゆがみも考慮したひび割れ幅の割戻し係数等を考慮する必要がある。

6. 検証3:効率的に3次元モデルを構築するためのUAVの撮影方法

本章では、SfM ソフトウェアで3次元モデルを構築時する際の課題と解決策となる標定点の減少を目的とした UAV での撮影方法について検証した。

6. 1. SfM ソフトウェアで3次元モデルを構築する際の課題と解決策

(1) 3次元モデル構築時の課題

4. 4 (1) の方法で、橋梁全体を UAV で撮影した画像より、SfM ソフトウェアを用いて3次元モデルを構築した。

この際、1 画像の撮影範囲は、幅 3.2m×高さ 2.6m となり、3 次元モデルを構築するための標定点（橋梁側面や各種構成部材に設置）が 40 点必要であった。

標定点の増加は、実運用を想定した場合、「標定点の設置を目的とした橋梁点検車または高所作業車の使用頻度の増加」、「現地測量による座標確定」及び、「SfM ソフトウェア上での各種構成部材の接合」など、作業手間が増えるため効率的な橋梁点検が実施できない状況となる。

(2) 3次元モデルの効率的な作成に向けた提案

SfM ソフトウェアによる3次元モデル構築時の標定点数の減少を目的として、遠景撮影（対象物から 8m）の中に近景撮影（対象物から 3m）の一部の画像を合わせて構築した3次元モデルと、近景撮影のみで構築した3次元モデルを比較しても同等の精度が得られた（図-12）。

遠景撮影による標定点が少ないモデルをコアとすることで、近接目視点検画像を使用した3次元モデルの作成は、効率化できることが想定される。

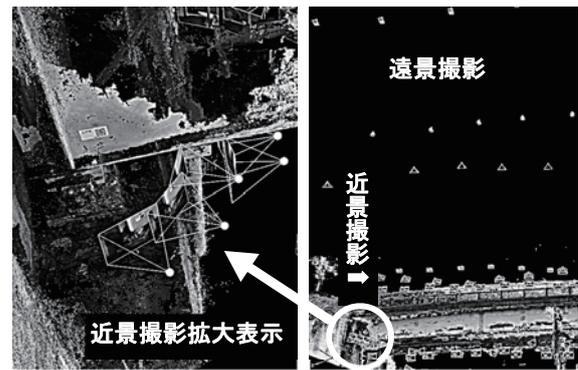


図-12:遠景及び近景撮影による3次元モデル作成検証

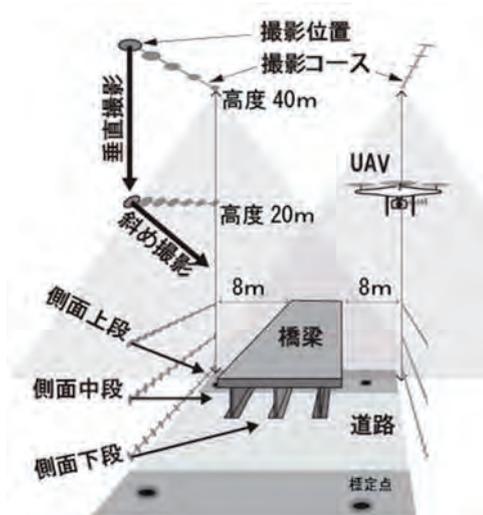


図-13:遠景撮影計画図

6. 2. 3次元モデル作成用の遠景撮影手法

(1) 遠景撮影方法に関する検討

橋梁上空での UAV の飛行は、実運用では困難なため、飛行範囲は橋梁側面より 8m 外側とし、標定点は、設置の効率性を考慮し平面部分に設置した。図-13 に撮影コース（5 コース）を示した。

垂直撮影は、橋梁全体と標定点 4 点（標定点 1 点が 3 枚以上写るよう撮影）を撮影し、位置情報の基準とした。位置精度は「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」および「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領」の $\pm 0.1\text{m}$ 以内を準拠とした。

斜め撮影は、垂直撮影と側面撮影を接続するため撮影経路間の中間とした。

側面撮影（上段、中段、下段）は、橋梁形状の把握を目的とした。

また、撮影計画に必要な橋梁範囲および標高は国土地理院地図より入手し、撮影コースの詳細計画は3次元 CAD ソフトを用いて作成した。

UAV は、計画した撮影コースを自動飛行可能な DJI Phantom4Pro を用いた。自動飛行ソフトは、DJI GS Pro を用いて、撮影方向はマニュアル調整を行った。SfM ソフトウェアは、Pix4D を使用した。

表-6:遠景撮影のSfM計算結果

標定点名	Error X	Error Y	Error Z
T1	-0.002m	0.007m	-0.004m
T2	-0.001m	-0.002m	0.005m
T3	0.006m	0.005m	-0.004m
T4	-0.003m	-0.01m	0.005m
最大値 (絶対値)	0.006m	0.01m	0.005m
標準偏差	0.004m	0.007m	0.005m

*水平位置と標高の制限値：標準偏差=0.060m

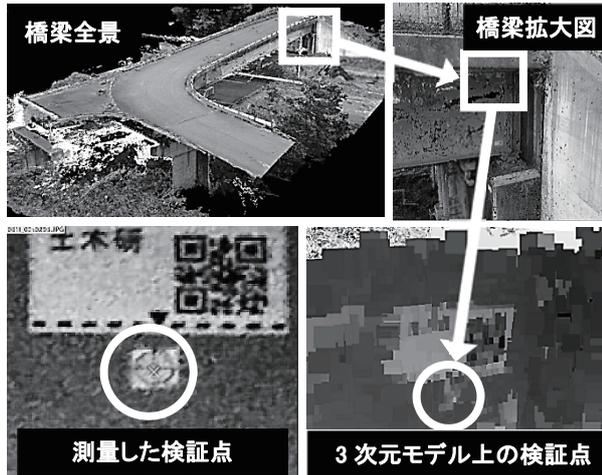


図-14:3次元モデル上の検証点計測

表-7:3次元モデル精度検証結果(検証点38点)

	Error X	Error Y	Error Z
最大値	0.025m	0.031m	0.041m
標準偏差	0.011m	0.009m	0.029m

*3次元モデルの制限値：±0.050m

(2) 遠景撮影を基にしたSfMソフトウェアによる3次元モデルの作成検証

遠景撮影の画像を基にSfMソフトウェアにより構築した3次元モデルの標定点を検証した結果、本研究で想定している3次元モデルの精度基準を満たしていることを確認した。(表-6)。

構築した3次元モデルがどの部分においても同様の精度が保たれていることを検証するために、標定点以外の検証点38点(上面、側面、橋脚、橋台各5点以上)を設定・測量し、3次元モデル上での検証点位置と比較した(図-14、表-7)。

3次元モデルの精度目標は、「空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)」に準じた±0.050mとして設定した。

表-7より、各検証点の位置ずれは、最大でX方向：0.025m、Y方向：0.031m、Z方向：0.041mであり、目標とする3次元モデルの精度を満たしていることが確認できた。

よって、遠景撮影を取り入れることで、SfMソフトウェアを用いた3次元モデルの作成に必要な

標定点数を減少させつつ、構築精度は確保できることを示せた。

また、今回対象とした鉄桁橋(2径間)の3次元モデル作成時間は、撮影計画、実飛行及び3次元モデル構築を含めて概ね1日であった。

7. まとめ

本稿では、①3次元モデル上での画像管理方法の実現性と実用性、②SfMソフトウェアを活用した画像位置の自動位置推定の精度確認及び撮影方向把握に関する提言、③効率的にSfMソフトウェアで3次元モデルを構築するためのUAVによる遠景撮影方法について報告し、UAV等によるロボット点検を実用化するにあたって、初めて3次元モデル上での精度検証を行い、今後の納品に向けて、その有効性を明らかにした。

本研究結果より、筆者らが提案する「UAV等のロボットで撮影した大量の点検画像を、SfMソフトウェアと3次元モデルの活用による撮影位置の推定及び画像管理の自動化」は、近い将来での実現性及び橋梁管理者と点検技術者に対する実用性が高いと推察する。

今後は、以下の3点について検討予定である。

- ① 本手法が橋梁定期点検の支援技術となるように、自治体や点検業者を含む各関係機関へのヒアリングも踏まえた必要機能の整理
- ② UAV等のロボットによる橋梁撮影手法の標準化を目指した遠景撮影手法の確立
- ③ ①,②を基礎とした橋梁定期点検結果の管理用プロトタイプシステムを構築し、実橋梁点検での試験導入

謝辞

本検証を実施するにあたり、株式会社イクシスより画像提供、アジア航測株式会社よりカメラ位置・撮影位置の現地測量作業の対応の助力、国土交通省国土技術政策総合研究所より種々のご意見を得た。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 社団法人 日本測量学会：解析写真測量, 52巻・2号, pp.75~83, 2013
- 2) 織田和夫:講座:バンドル法 第八回コンピュータビジョンとバンドル法,写真測量とリモートセンシング,52巻・2号, pp.75~83, 2013
- 3) 国土交通省:作業規定の準則, 国土交通省告示 第565号, pp.12~38, 平成28年3月31日
- 4) 国土交通省:UAVを用いた公共測量マニュアル(案), pp.25~26, 平成28年3月30日
- 5) 国土交通省:空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案), pp.10~64, 平成30年3月

41. 次世代社会インフラ用ロボット導入に係る 定期点検業務における変状等の自動抽出に向けた検討について

国土交通省総合政策局 公共事業企画調整課

○ 川口 貴大
渡邊 賢一

1. はじめに

我が国の社会インフラの維持管理をめぐっては、老朽化の進行、現場の担い手不足等が喫緊の課題となっている。国土交通省では、より効果的・効率的なインフラ点検・災害対応を実施するために、社会インフラ用ロボットの現場導入を推進してきた。

道路構造物に関しては、その急速な老朽化を背景に、道路法施行規則の一部を改正する省令及び道路トンネル等の健全性の診断結果の分類に関する告示が平成26年に公布、施行されたことで、道路トンネルや道路橋等の定期点検は近接目視により5年に1度の頻度で行い、その健全性を段階的に評価することとなった¹⁾。

平成30年度は、点検の一巡目が終了することで、社会資本整備審議会道路分科会道路技術小委員会において定期点検要領改定の議論がなされたところであり、平成31年2月に道路橋定期点検要領が改定され、同年3月に道路トンネル定期点検要領が改定されたところである²⁾。

その結果、インフラ点検用ロボット等「点検支援技術」の活用が可能となり、点検記録用の写真を取得する作業を支援する環境が整備された。

本稿では、点検支援技術の導入に向けた取組を整理した上で、インフラ点検業務の更なる効率化に向けた取組を紹介する。

2. 点検支援技術の活用に向けた環境整備

2.1 経緯

国土交通省及び経済産業省は、社会インフラ用ロボットの開発・導入分野を明確化する等、実用化に向けた方策を検討するため、平成25年に「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」を共同設置し、現場ニーズと技術シーズ等の検討を経て、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野」として5分野（橋梁維持管理、トンネル維持管理、水中維持管理、災害調査、応急復旧）を策定した。これを受け、国土交通省に「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会」を設置し、性能評価指標を策定するとともに、公募に基づく現場検証に取り組んできた³⁾。

平成28年度より2年間にわたり実施した現場検証の結果を踏まえて、インフラ点検用ロボット等の活用手法として、ひび割れ等の変状等を判断できる点検記録用の写真を取得するとともに、写真より損傷図を作成することによる、点検記録作成支援の実現を目指すこととした。このような活用手法により、現地でのチョーキングやクラックスケールを用いた計測を簡略化でき、人の作業を効率化するとともに、交通規制による損失時間を削減することが期待される。

これらを実現するためには、実際の現場で点検を行う技術者が、点検要領に基づき抽出すべき変状等を写真から正しく認識できることを検証し、点検支援技術に求める性能を整理する必要がある。

そこで、インフラ点検用ロボット等の品質を評価する具体的な指標を設定し、道路管理者が求める品質とされるにはその指標をどの程度達成すべきかについて、定量的な水準を設定した。そこで、平成30年度はその評価指標を公表し、技術公募を行った^{4) 5)}。

2.2 性能カタログ、ガイドラインの整備

一方、定期点検要領の見直し過程において、インフラ点検用ロボット等は「点検支援技術」（図-1）として「必要な知識及び技能を有する者」が対象部位・部材・範囲や使用の目的を判断したうえで、定期点検に活用出来るという方向性が示された。



図-1 点検支援技術の例

そのため、点検支援技術を点検業務で積極的に活用出来る環境を作るためには、その性能を総覧できる「カタログ」が必要であった。

そこで、国土交通省では上記を踏まえた点検支援技術の性能を示す標準的な性能評価項目を策定した上で、その開発者から現場検証等を通じて提出された性能値を記載した「点検支援技術 性能カタログ(案)」を整備するとともに、定期点検業務等において受発注者が点検支援技術を活用する際に、技術を選定し点検業務内で活用するまでの業務プロセス等を「新技術利用のガイドライン(案)」にとりまとめた。

3. 更なる点検業務の効率化に向けた取組

3.1 点検業務に残る課題

点検支援技術等の活用環境整備により、現場で点検記録写真を取得する作業は省力化が可能となった。その一方で、点検支援技術等を用いて取得した写真の取扱いには注意が必要である。

点検支援技術等によって得られる高精細な写真は、画角が狭く撮影場所を理解しにくく、単純に写真を蓄積していくだけでは膨大な写真の整理だけに内業の工数を要する恐れがある。また、構造物の変状等を抽出する作業は、点検写真と過去の点検成果等をもとに人手で行う必要があり、この作業の効率化には至っていない。

膨大な写真の整理手法の一つとして、点検写真から点検対象物の全体構造を示す3次元モデルを作成し、変状等の経時的な変化を把握出来るビューアを用いて管理する手法がある。

また、点検写真から構造物の変状等を抽出する作業の効率化手法として、人工知能(AI)を用いた変状等の自動抽出に関する検討を進めている。

3.2 3次元納品マニュアル(案)

点検支援技術により取得した写真を3次元モデル上に配置するために必要な、位置情報等のデータをメタデータとして付与する等の納品ルールを定めることで、3次元モデルを自動生成することが可能となれば、膨大な写真の整理にかかる作業を減らすことが期待される(図-2)。

また、同一箇所の写真を定期点検実施の度に重ね合わせていくことで、3次元モデル上で変状等の経年変化を容易に把握することができ、点検成果の品質確保や技術者の判断への貢献も期待される。



図-2 3次元成果物を用いた調査整理のイメージ

そこで、3次元モデルを作成可能な成果品の納品方法を示す「点検支援技術(画像計測技術)を用いた3次元成果品納品マニュアル(トンネル編/橋梁編)(案)」を平成30年3月に整備した。平成30年度は、本マニュアルを活用した現場実証を、性能カタログ等にとりまとめるために行った現場実証の中で行い、その結果を踏まえ平成31年3月に本マニュアルを改定した。本マニュアルで規定している納品物を表-3に、納品物と既存の点検調査との対応イメージを図-3に示す。

表-3 3次元納品マニュアルの規定(橋梁編より作成)

納品物	説明	データ形式
点検写真	ロボット取得した生写真であり、損傷が完全に把握できる精度を有するもの	TIFF, RAW等非圧縮または可逆圧縮形式を基本とするが、その他も選択可能
メタデータ	点検写真を3次元空間上へ配置するために必要な、位置・時間や損傷情報等を記載した情報	・点検写真中心座標 ・カメラ中心座標 ・点検写真の角度 ・写真寸法 上記等を示すCSVファイルを作成
損傷抽出方法を示す文書	点検支援技術の使用機器や選定理由、損傷を自動抽出するか等を示す文書	任意の文書ファイル形式
損傷形状モデル	損傷の位置、形状等が把握出来るよう、点検写真や3次元モデルに付加した損傷情報	・3D形状モデル ・レイヤー構造写真 ・従来の損傷図



図-3 3次元データ納品物と点検調書との対応イメージ

上記の規定に従って撮影した写真は、空間上のどこに位置しており、どの方向を向いているのがメタデータとして記述されているため、大量の写真をつなぎ合わせることで一つの構造物を再現する3次元モデルを作成することが出来る。ここに点検技術者が記録した変状等を重ねることにより、構造物全体を俯瞰しながら3次元上で変状等が確認出来る。

しかし、平成30年度の現場実証では、3次元モデルを作成するために必要な点検写真は取得出来た一方で、メタデータを有する損傷形状モデルを作成することが出来なかった。これは、点検写真に求める要求性能(1画素あたりの実世界の長さや画角等)を規定しておらず、写真から変状等が抽出出来なかったためである。

そこで、点検写真の精度を管理するため、その撮影条件についてもまとめることとした(表-4)。

表-4 橋梁点検で推奨する撮影条件(橋梁編より抜粋)

幅0.1mmのひび割れを検出する場合、0.3mm/画素以下を推奨する。 カメラに応じて撮影範囲(視野サイズ)を決定する必要がある。 長手方向の視野サイズ(mm) = 長手方向のカメラ画素数 × 0.3 mm 縦方向の視野サイズ(mm) = 縦方向のカメラ画素数 × 0.3 mm		
	仕様	留意点
カメラ機種	ミラーレス一眼カメラを推奨	安定した高画質を確保するために必要
ラップ率	オーバー・サイド 30%以上を確保	平面展開図への合成処理時に必要
撮影角度	正対を原則とする	環境条件によって概ね10度までを推奨
撮影時の調整事項	試撮を行い、現場条件に応じて設定を確認・調整し撮影・記録する	手ブレ等を起こさないように安定した撮影が必要

今後、定期点検業務等を通じて取得したデータを用いた3次元モデル作成の検証を行い、本マニュアルの見直しを行うことで、このような3次元モデルを活用した点検業務の高度化を目指す。

なお、このようにして撮影した高精細な写真は、写真のみから変状等を確認出来るため、後述する人工知能開発のための教師データを作成する際の元になる写真として使用することが出来る。

3.3 人工知能技術活用の検討

現在は、点検支援技術等を用いて取得した大量の写真から、人手により変状等を抽出する必要があるが、将来的には人工知能(AI)を活用して変状等を自動抽出することにより、点検記録の作成に必要な人の作業を支援することが出来ると考えている。点検の流れの将来像について、図-3に示す。



図-3 点検の流れの将来像

ここで、変状等の自動抽出に用いるAIとしては、以下を想定している。まず、従来の点検では人が構造物を近接目視し、その視覚情報(入力)を頼りに点検要領(ルール)に基づき点検記録(結果)を作成していた。この流れをAIで実現する場合、点検で取得した写真(入力)と点検技術者が判断した点検記録(結果)から、AIが点検技術者の暗黙知やノウハウを学習するための教師データを用意し、これをもとにAIが個別に有するアルゴリズム(学習モデル)により学習させる。ルールを学習したAIは、入力から結果を推論できるようになるため、

変状等を自動抽出が出来るようになる。

このような AI の開発を行い、高精度な自動抽出が出来る AI へと成長させていくためには、AI に学習させるための教師データを大量に準備する必要がある。そこで、教師データの整備をまずは協調領域として国が行うことで、民間の AI 開発を支援することが出来ると考えている。

教師データを作成するためには、点検で取得した写真のどこに変状等があるかを写真上にタグ付け（アノテーション）し、AI が学習しやすい写真にリサイズするという処理が必要になる。図-3 で示した技術開発や調書作成に関する部分を図-4 に具体的に示す。

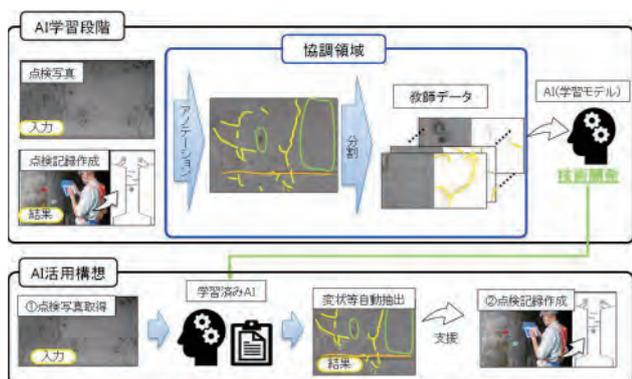


図-4 AI 学習に必要なデータと AI 活用のイメージ

そこで、国土交通省では、教師データを作成し、これを AI 開発者へ提供し AI 開発を支援するとともに、開発された AI の性能評価等を行うことを目的に「AI 開発支援プラットフォーム」の設立を検討している（図-5）。

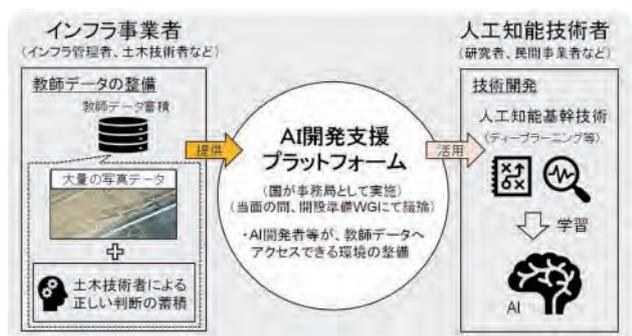


図-5 AI 開発支援プラットフォームの位置付け

本プラットフォームの設立に先立ち、良質で効率的な教師データ整備のあり方や、点検に関するデータの取得・保存・分析・活用を円滑に行うデータ基盤のあり方の検討等を行うために「AI 開発支援プラットフォームの開設準備ワーキンググループ」（以下 AI-PF 準備 WG）を設置⁶⁾し、検討を進めている。

第 1 回の AI-PF 準備 WG は平成 30 年 11 月 27 日

に開催し、教師データとする元写真に求める仕様やアノテーションの仕様を検討してきた。第 2 回は令和元年 7 月 16 日に開催し、教師データ提供に関する規約の検討や、今後の教師データ提供・プロトタイプ AI 開発に向けたスケジュールの共有を行った。

また、今後 AI の開発や精度向上を目指し、点検業務の高度化を推進していくためには、より多くの写真等を蓄積していく必要がある。そのため、点検支援技術の技術進展を踏まえた構造の撮り方を検証し、適宜前項で述べた「点検支援技術（画像計測技術）を用いた 3 次元成果品納品マニュアル（トンネル編／橋梁編）（案）」にフィードバックして行くことも必要となる。

4. おわりに

建設技能労働者数が減少し、老朽化が進むインフラを数多く抱える我が国においては、既存のインフラを効果的、効率的に維持管理していくことが重要である。

点検支援技術等の様々な次世代社会インフラロボットが市場に現れ、インフラ点検における人の作業の支援が図られる中、本稿で述べた取組は、このようなロボットに AI を取り入れ、人の判断も支援することを可能にするための環境整備である。

本取組を継続していく上でも、常に民間の技術シーズや現場のニーズの動向に注目しながら、国として着手すべき協調領域を適切に見極め、新しい技術の社会実装等によるインフラ維持管理のさらなる効率化に貢献して参りたい。

参考文献

- 1) 道路の維持修繕に関する省令・告示の制定について（平成26年4月2日記者発表）
<https://www.mlit.go.jp/common/001034659.pdf>
- 2) 道路の老朽化対策
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>
- 3) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000024.html
- 4) 道路トンネル点検記録作成支援ロボット技術に関する評価指標を公表し、技術公募を行います（平成30年7月19日）
<https://www.mlit.go.jp/common/001245608.pdf>
- 5) 道路橋点検記録作成支援ロボット技術に関する評価指標を公表し、技術公募を行います（平成30年8月24日）
<https://www.mlit.go.jp/common/001250028.pdf>
- 6) AI開発支援プラットフォームの開設準備WGの設置（平成30年7月27日記者発表）
<https://www.mlit.go.jp/common/001247205.pdf>

II 梗概集

●ポスターセッション要旨

1. 簡易遠隔操縦装置（ロボQS）の高度化について

～ バックホウ用アタッチメントの操作機能追加 ～

九州地方整備局 九州技術事務所

施工調査・技術活用課長 原 堅次

施工調査・技術活用課 ○深町 真吾

1. はじめに

九州技術事務所では、災害現場において汎用タイプのバックホウ運転席に電動式アクチュエーター等の装置を取付けることにより、バックホウの遠隔操縦が可能となる簡易遠隔操縦装置（以下「ロボQS」という）を保有している。

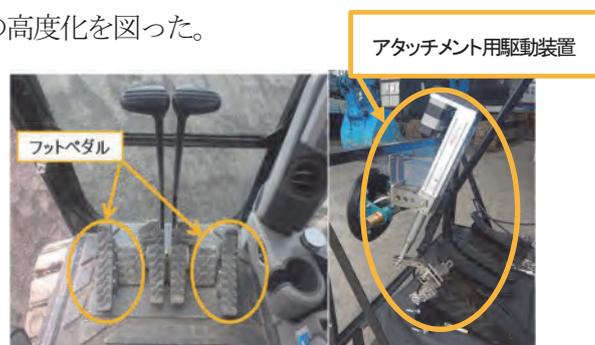


ロボQSが対応する現場は、法面崩壊など二次災害の恐れがあり有人施工が困難な場所で、災害発生直後の応急復旧作業において主に使用されている。このような現場では、倒木や巨石等が大量に発生している場合もあり、バックホウのバケットでの除去作業では作業効率が劣る。そのため、今回ロボQSのバケット操作機能に加えて、つかみ機やブレーカーなどのアタッチメント操作機能を追加し、災害初動時における装置の高度化を図ったので紹介する。



2. 高度化の概要

つかみ機やブレーカーなどのアタッチメント操作は、バックホウに装備された左右のフットペダルで行う。このペダルを稼働させる装置（アタッチメント用駆動装置）を新規に開発し、ロボQSに追加することで装置の高度化を図った。



3. ロボQSの操作機能

今回の高度化により災害現場の状況に合わせた複数の作業装置の選定が可能となり、災害初動時の迅速な対応が期待される。



4. おわりに

ロボQSの高度化により、迅速な作業が求められる災害現場からのニーズに対して、よりフレキシブルに対応できることとなった。今後も災害発生時にロボQSが有効に稼働し、応急復旧作業に貢献できれば幸いである。

2. 排水ポンプ車状態監視システム（DSシステム）の開発

—遠隔監視による安全で効率的な排水作業の継続—

国土交通省中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課長 大坪 晋作

国土交通省中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課専門職 ○鶴田 勇

1. はじめに

南海トラフ巨大地震の被害想定では、海拔0m地帯を抱える濃尾平野は、津波により広範囲に浸水するため、多数の排水ポンプ車による長期に渡る排水作業が必要となる。東日本大震災の津波（写真－1）による浸水被害においても、最大120台の排水ポンプ車が排水作業を実施したが、余震による津波発生が危惧される状況下で、作業員の安全確保が課題となっていた。その対策として、排水ポンプ車の稼働状態を遠隔監視することで、安全で効率的な排水作業の継続を可能とする「排水ポンプ車状態監視システム（以下「DSシステム※」と言う。）」を新たに開発した。

※ Drainage pump truck(排水ポンプ車) State monitoring(状態監視) システム



写真－1 津波襲来状況¹⁾

2. システム開発の目的

東日本大震災における緊急排水作業(写真－2)は、24時間体制で行われ、作業員は現場で排水状況の監視に当たっていたが、多くの余震によりしばしば作業が中断され、排水作業の継続や二次災害への懸念などの課題が指摘されていた。それらの課題を解決するために、排水ポンプ車の稼働状態を遠隔監視することで、ゴミ詰まりや給油等の必要な時だけ現場で作業を行い、二次災害に被災するリスクを少なくできる。また、多

数の車両を一括して監視することで、全体の排水状況を把握し、効率的な配置や運用が可能となる。

このような目的から、広範囲な湛水エリアで多数の排水ポンプ車を効率的に稼働させて、排水作業を継続すると共に作業員の安全性向上を図るためにDSシステムの開発を行った。



写真－2 夜間排水状況¹⁾

3. システムの概要

DSシステムは、排水ポンプ車の稼働状態をWEB上で情報端末機器から遠隔監視できるシステムで、その構成は車載の通報装置、WEBサーバ及び情報端末機器からなっている。通報装置は、排水ポンプ車の状態信号（車両及び排水ポンプ等の稼働状態や故障信号他）を取得・集約し、WEBサーバとの間でデータ通信を行う装置である。通信方法は、大規模災害を想定しているため、衛星回線を基本としているが、安価な携帯電話回線も選択可能である。WEBサーバは、受け取った排水ポンプ車の状態信号を蓄積・整理し、WEB上に配信する機器である。情報端末機器はパソコン、スマートフォンなどのWEB上に配信された情報を閲覧する機器のことで、全国の排水ポンプ車全てを一括で監視することが可能である。

DSシステムで監視できる内容は、車両位置情報、

排水ポンプ車稼働状態、故障等の不具合内容、運転及び故障の履歴などであり、地図表示画面、車両稼働監視画面、日報等の履歴画面から確認できる。

(1) 排水ポンプ車の位置情報

車両の位置は、国土交通省で運用している「車両位置情報共有化システム」を利用し、画面の地図上に車両アイコンで表示している。そのアイコンを「排水中・発電機ON・移動中など」の作業条件により色分けして表示することで、広範囲に配置した多数の排水ポンプ車の稼働状態を一目で把握することが可能である。地図表示画面の一部を図-1に示す。



図-1 地図表示画面（一部）

また、地図上の車両アイコン等をクリックすると、各排水ポンプ車個別の車両稼働監視画面へ移動する。

(2) リアルタイムな運転情報

車両稼働監視画面では、選択した車両のエンジン・発電機・各排水ポンプの運転・停止及びポンプ回転数、電流値等の計測値データをリアルタイムに表示している。車両稼働監視画面の一部を図-2に示す。



図-2 車両稼働監視画面（一部）

また、故障発生時には故障内容の表示とともに、登

録したメールアドレスに通知される。そのほかに、排水中の燃料切れ対策として、残りの燃料が一定量を下回った時、排水可能時間がカウントダウン形式で表示され、故障と同様にメールでも通知される。

なお、表示された情報は、WEBサーバに蓄積され、運転時間・回数・排水量などの帳票、運転及び故障履歴を画面表示及びデータ出力することができる。

(3) 異常診断機能と遠隔停止機能

遠隔監視では、ゴミ詰まりやホースのねじれ等の排水状況の変化は、故障が通知されるまで分からず、故障を把握してもすぐにポンプを停止することもできない。そのため、ポンプの破損に至るような重大な事態により排水作業を継続できないことが懸念される。それらの課題に対して、DSシステムにはポンプが故障する前の異常を把握するための異常診断機能とその診断を受けてポンプの破損を防ぐため、遠隔で停止操作を行う遠隔停止機能を有している。

4. まとめ

今回の開発により、巨大地震における津波浸水の排水作業に従事する作業員が、二次災害に被災する危険性を低減できるシステムが完成し、現在4台の排水ポンプ車に搭載され、稼働状態を遠隔監視できるようになった。台風襲来などによる河川出水時において、DSシステム搭載の排水ポンプ車を出動させて、実排水におけるシステムの機能検証を行い、所定の性能（位置情報、運転・停止等稼働状態、日報等）を遠隔から把握することができた。また、令和元年8月の前線に伴う大雨により浸水被害のあった佐賀県に出動し、現場に問い合わせることなく、事務所から遠隔監視を行い、DSシステムの有効性を確認した。

今後、大規模災害に対応するためには全国の排水ポンプ車への普及が不可欠であり、現在、コスト削減を図り早期に普及できるように、最低限必要な機能のみに限定した簡易システムの検討を進めている。

参考文献

1) 東日本大震災に関する写真は、東北地整HP「震災伝承館」より引用

3. ハイブリッド・サイフォン排水装置

燃料消費を大幅に軽減し、高揚程を達成！

株式会社山辰組 ○馬淵 剛
馬淵 和三

1. はじめに

国土交通省の「大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方（提言）」で、「ポンプ排水に要する大量の燃料消費を軽減することが可能な手法として、大容量排水技術（サイフォン等）についても開発・検討を進め、実用化の際にはその適用範囲を明確化すべきである。」を受け、弊社で開発した「呼び水式・サイフォン排水装置」は、平成24年度の本シンポジウムにおいてポスターセッション審査委員特別賞に選考していただいた。その後も改良を重ね、多様な現場条件にも対応可能なサイフォン排水装置として大きく進化させ、平成28年3月には国土交通省次世代社会インフラ用ロボット技術に認定していただいた。その後も幾つかのサイフォン新技術を開発し進化させたのでその成果と特長について報告する。

2. 新技術：「ハイブリッド・サイフォン」排水装置について

「ハイブリッド・サイフォン排水装置（以下、「ハイブリッド・S」と記す）」は天然ダム、砂防工事現場のように、高低差が大きい現場において、長期間にわたり常時排水を実施する際に、サクシオンホース、専用部材等を組み合わせて配管することで、サイフォンの作用による排水を可能にし、燃料費を大幅に縮減する装置である。

「ハイブリッド・S」の特徴として常時開口状態でサイフォンの作用による排水を可能であることが挙げられる。それを可能としたのが、サイフォン排水ホースの途中に水中ポンプ側とサイフォン吸水側の流れに任意に方向を切り替える機能を備えたY字状の注水合流部材「ワイ・ガッチャン」の開発である。Y字状の二股（2口）側を上流（淡水池側）に向け、二股の一方にサイフォン吸水ホースを連結し、他方に水中ポンプ注水ホースを連結する。そしてY字状の1口側を下流（吐出し口側）に向けてサ

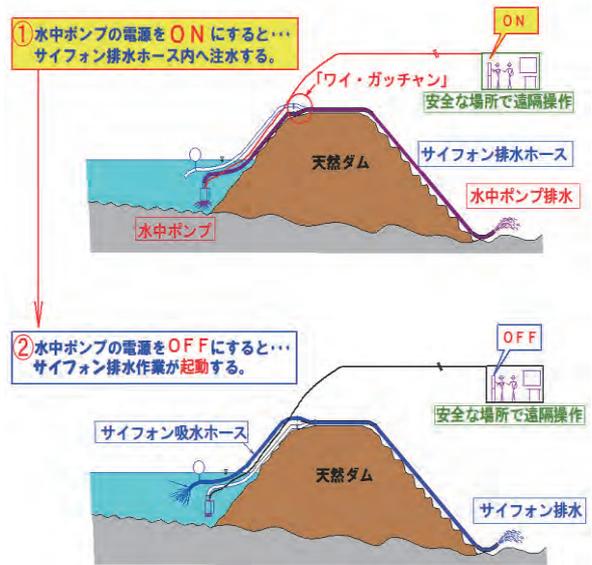


図-1 「ハイブリッド・S」の起動図

イフォン排水ホースを連結する。

「ハイブリッド・S」の設置が完了したら、水中ポンプの電源のON⇔OFFの操作だけで「水中ポンプ単独送水作業」⇔「サイフォン単独排水作業」⇔「サイフォン排水作業+水中ポンプ排水作業」の切り替えが可能であり、常時開口状態でサイフォンの作用による排水が可能となった。また、安全な場所から遠隔操作により排水方法の切替を行うことができることも本装置の特徴である。(図-1)。

3. 「ハイブリッド・S」の口径と作業性について

「ハイブリッド・S」の排水ホースの口径はΦ100mmとΦ200mmとなっている。大容量排水能力のあるΦ200mmハイブリッド・Sは、各部材の重さを考慮すると人力だけでは作業効率が伸びないため、運搬や設置作業には重機の併用が作業効率を向上させる。そのため、車両や重機が進入できる場所での大容量排水作業に適しているという

特長がある。

また、 $\Phi 100$ mmハイブリッド・Sの各部材は、進入路が無い場合、人力運搬が可能な重さの範囲で構成することを前提として開発したため、河道閉塞により生じた「天然ダム」や、老朽化した「ため池」などで、車両や重機が近づけない場所であっても、樹林を縫って人が通れるスペースさえ有れば、全ての機材を人力で運搬して排水作業を可能とした大きな特長を備えた技術となった。

4. 「水中ポンプ」と「ハイブリッド・S」の「燃料消費量」比率について

「水中ポンプ」と「ハイブリッド・S」の燃料消費量の比較を(表-1)に示す。なお「ハイブリッド・S」に計上されている燃費は1日2分間のポンプ送水を実施するための燃費であり、これは配管内に自然にたまる空気をポンプ送水で強制排水するためである。

燃料消費量の比較では、従来の水中ポンプの常時排水稼働に掛かる燃料消費量を「10,000」の比率とすると、サイフォン作用で稼働する場合は、わずか「7」の比率となり水中ポンプでの燃料消費量を「10,000 : 7」に軽減することができ、大幅な燃料消費の縮減を実現することが可能である。

表-1 水中ポンプとハイブリッド・Sの燃料消費量と温室効果ガス排出量の比較表

口径 = $\Phi 150$ mm、各1台 24時間稼働として			
機種	水中ポンプ	ハイブリッド・S	
消費量	120ℓ/日	0.083ℓ/日	
軽油消費量	1ヶ月	3,600 ℓ	2.5 ℓ
	6ヶ月	21,600 ℓ	15.0 ℓ
	12ヶ月	43,200 ℓ	30.0 ℓ
ドラム缶	1ヶ月	18 本	0.013 本
	6ヶ月	108 本	0.078 本
	12ヶ月	216 本	0.156 本
金額	1ヶ月	450,000 円	311 円
	6ヶ月	2,700,000 円	1,875 円
	12ヶ月	5,400,000 円	3,750 円
二酸化炭素排出	排出量	2.644kg-CO ₂ /ℓ	2.644kg-CO ₂ /ℓ
	1ヶ月	9.500 tonに換算	0.007 tonに換算
	6ヶ月	57.100 tonに換算	0.042 tonに換算
	12ヶ月	114.200 tonに換算	0.084 tonに換算
比率	10,000	7	

軽油単価を125円/ℓで計算。

6. 老朽化した「防災重点ため池」の「事前放流」、 「低水位管理」にも役立つ「ハイブリッド・S」

「農林水産省は6月11日、自然災害で人的被害が生じる恐れがある「防災重点ため池」を新たな基準で再選定した結果、5月末時点で63,722カ所が対象となったと発表した。これまでの約11,000カ所から大幅に拡大し、農業用ため池の総数(166,638カ所)の4割弱を占めた。決壊を防ぐ補強や緊急連絡体制の整備といった対策を優先的に進める。(2019.6.12付け日本経済新聞より)」とあるように、ため池の防災意識が高まっている。

「ため池を改修したいが、取水施設が老朽化して、水を放流できない。」「湛水している水を抜くためには水中ポンプや発電機が必要だが搬入する道がない。」「水中ポンプ排水では膨大な燃料費を覚悟しなければならない。」などの課題に対して「ハイブリッド・S」を検討のもと、実際に現地へ $\Phi 100$ mmハイブリッド・Sを人力運搬で搬入して放流した実績がある。延長100m、水頭差11m、放流量2.2 m³/minと同口径の水中ポンプの2倍以上の成果を上げ、燃料費は起動時の1分間だけであった。今後とも、燃料消費を軽減した「ハイブリッド・S」を、排水装置として多様な現場条件に対応可能な技術として伸ばしていきたい。(図-2)



謝辞: 「ハイブリッド・S」の技術検証において、国土交通省中部技術事務所、越美山系砂防事務所、岐阜県など多大なご理解とご協力を賜りました関係機関の皆様から謝意を表します。

4. カメラの視点数が映像の定量化の精度に及ぼす影響

立命館大学大学院 理工学研究科 ○藤井 翔太
立命館大学 理工学部 横山 隆明

立命館大学 理工学部 田坂 勇人
立命館大学 理工学部 建山 和由

1. 研究背景

2016年度から始まった i-Construction では、3D データをベースに ICT を全面的に活用することにより生産性を大幅に向上させる取り組みが進められている。一方、別のアプローチとして工事現場の映像情報を活用して現場管理の高度化を図る Visual Construction の取り組みも進められている。そこでは、定性的ながら網羅的に現場情報を記録することができるという映像の特性を活かし、生産性、安全性、施工品質をはじめとする様々な改善が議論されているが、これらの映像から定量的なデータを抽出することができると、より高度な現場管理を行うことができる。本稿では、現場映像の簡便な定量化手法の確立を目指し、映像をフリーソフトやオープンソースで処理した際に使用するカメラの台数が定量化の精度に及ぼす影響を調査した結果を報告する。

2. カメラの幾何学的な関係

本章では、映像の定量化のために必要なカメラの幾何学的な関係性を記す。

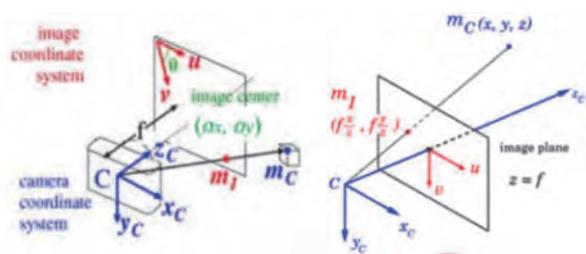


図 1. カメラの幾何学的な関係性²⁾

図 1 は、カメラの幾何学的な関係を説明した図である。図 1 の幾何学性を式にまとめると以下となる。

$$\begin{bmatrix} X_{image} \\ Y_{image} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x & 0 \\ 0 & f_y & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & t_x \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & t_y \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{world} \\ y_{world} \\ z_{world} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 X_{image} , Y_{image} : 画像座標, f_x , f_y : 焦点距離,

o_x, o_y : 光学中心, r_{im} : カメラの姿勢, t_x, t_y : 位置,
 $x_{world}, y_{world}, z_{world}$: ワールド座標

(1)式のように、画像座標は、焦点距離と光学中心からなる内部パラメーターとカメラの姿勢・位置からなる外部パラメーター、現実の座標であるワールド座標から構成される。画像座標は、画像内の特徴点の座標であり、内部パラメーターは、チェスボードによるキャリブレーションにより求まる。また、外部パラメーターは、基礎行列・基本行列の推定により算出される。これらのパラメーターを求めることで、ワールド座標を求めることができ、二次元画像から点群・三次元モデルと変換することができる。今回は、単独のカメラから撮影した一視点映像、異なる位置に置いた二台のカメラから撮影した二視点映像、さらにハンディカメラを持って様々な位置から撮影した多視点映像から定量化を行い、それらの差違を調査した。

3. 一視点による映像の定量化

一視点の映像からセンシングを試みた。そのために、以下のような実験を行った。

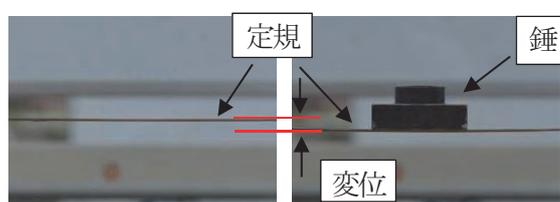


図 2. 正面一視点映像による梁の変位測定実験

図 2 は、梁のたわみを模擬して、定規の両端下にブロックを設置しており、165cm ほど離れた正面の位置から重りによる定規のたわみを撮影した画像である。たわみをピクセル単位で測定するために IrfunView というソフトウェアを利用した。測定結果は、実測値変位 5mm に対して、5.4mm(45pixel, 1cm=83pixel)であり、誤差は 0.4mm (8.0%) であった。

4. 二視点による映像の定量化

二視点の映像から点群化を試みた。点群化するにあたり、特徴点の取りやすいチェスボードの点群化を行った。Python と OpenCV によるプログラミングを作成して、以下の様な実験を試みた。

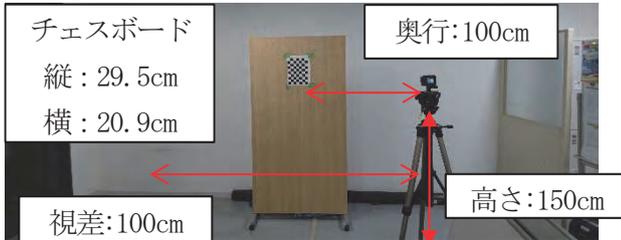


図3. チェスボードの点群化実験風景

図3のようにチェスボードをパーテーションに貼り付け、ボードから奥行 100cm 離れた場所から三脚高さ 150cm、視差 100cm となるように二枚撮影した。以下が、二枚の画像とその点群化結果である。



図4. 二視点から撮影したチェスボードの画像

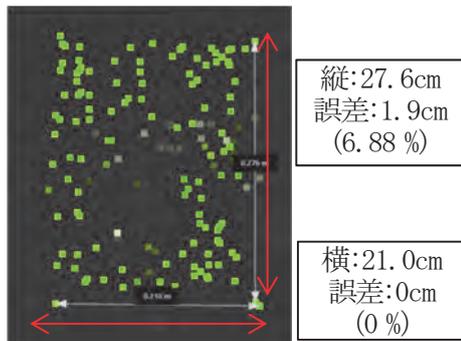


図5. チェスボードの点群結果

5. 多視点による映像の定量化

様々な位置からハンディカメラで撮影した映像をフリーソフトウェア Meshroom によって、3D モデリングを試みた。撮影のしやすさ等を考慮して、次の構造物を撮影した。



図6. 大学内の堆積場の映像

図6は、大学内の堆積場を撮影した画像である。堆積場の寸法は、横幅 13.8m・高さ(ブロック塀) 1.73m・奥行 5.2m ほどである。この建物の周りを一周して撮影を行った。撮影枚数は、103 枚となった。以下が、3D モデリングの結果である。



図7. 大学内の堆積場の点群化

図7は、図6の構造物を点群化したものである。処理時間は15分であった。ただし、点群の寸法を測ってみると、横幅 1.2m・高さ(ブロック塀) 0.14m・奥行 0.51m となり、誤差は、横幅 12.6m(91.3%)、高さ 1.59m(91.9%)、奥行 4.69m(90.2%) と大幅に異なった。

6. まとめ

フリーソフトやオープンソースで処理した一視点や二視点の映像を定量化すると、誤差が 10%以内となることが分かった。また、多視点の映像を定量化すると誤差が 90%以上となり、定量化の精度に大幅に影響を与えることが分かった。

今後は、映像から抽出した定量的なデータを活用してセンサーレス計測システムの開発を目指していく。

参考文献

- 1) 須田清隆, 建山和由, “中小零細建設業を対象にする映像を活用した ValueCIM の開発”, 2018/5/24
- 2) 呉海元, “視覚の幾何学1”, 2011/5/23

5. 施工状況のみ（見、観、看、診、視）える化を図る諸機能

株式会社キック ○才原 勝敏
株式会社キック 西垣 重臣

概要

施工状況を様々な角度から可視化を行う諸機能について報告する。独自のロジックを搭載した、安価で導入しやすいシステムの構築を目的とする。

1. 転倒警告システム

Raspberry Pi と公式拡張ボードである Sense Hat を使用した簡易な単独駆動型のシステムである。転倒の危険性をオペレータに知らせることを目的としているが、加速度から算出した角度の値を判断材料としてそのまま使用せず、角度変化のトレンドを読んで判断を行う独自のロジックを採用している。単独駆動型とは、インターネットなどの接続を必要としないという意味である。



Fig. 1 転倒警告システムの稼働イメージ

2. 接近警告システム

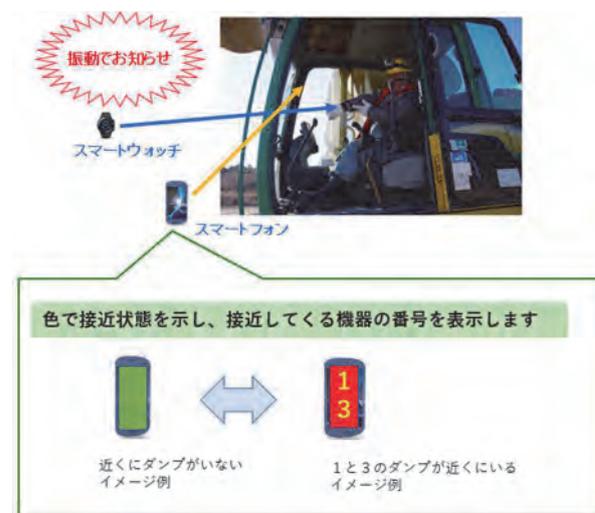
本システムは、施工現場に存在する単重機の接近を検知してオペレータに知らせるためのシステムである。

各重機に搭載されたスマートフォンから自車の位置情報をサーバーに送信し、また自車の位置を中心として他重機が指定範囲内に近づいてきた際に、オペレータに他重機の接近を知らせる。

今システムは接触の防止を主眼とはしておらず、もう少し遠距離（初期値100m）での接近を主眼としている。

接近を検知した際には、スマートフォンの画面の色が緑から赤に変わり、接近している重機の番号が表示される。また、オペレータがスマートウォッチなどの振動デバイスを身に着けている場合は、振動で知らせる。

例えば積込作業を行っているバックホウのオペレータが振動デバイスと共に装着した場合、土運搬を行っているダンプの侵入経路を見ていなくても、ダンプの接近があらかじめ把握できるので、積込状態を整えてダンプの到着を待つことが可能となる。これはダンプの積込待ち時間が減ることを意味し、稼働率の向上が



期待できる。

Fig. 2 接近警告システム

3. 高速データ計測機能

本システムは、Android スマートフォンに搭載された各種センサのデータを高速サンプリングし、インターネット上のサーバーへの準リアルタイム登録を可能とするシステムである。

重機の位置情報のみを把握したい場合は、さほど高速なサンプリングは必要とされないが、後述する施工管理システムの分析機能のデータ計測を本来の目的として開発されたものであるため、高速サンプリングが可能なシステムとして設計を行った。

一般的には、10Hz程度で計測を行うことが多いが、100Hzで計測し、10秒ごとにサーバーに送るといった使い方も可能であるため、ほぼリアルタイムでの計測、解析が可能となる。

計測可能な項目は、GPSからのデータとして、時刻、緯度、経度、移動速度、移動方位など、IMUからのデータとして3軸加速度、3軸ジャイロ、傾斜角、デジタルコンパスによる方位などがある。



Fig. 3 高速データ計測システム

4. コンクリート打設時間管理

本システムは、施工時間に限りのあるコンクリート打設の進捗度合いを可視化し、品質管理を行うシステムである。打設区画ごとに、練り混ぜ開始時間、打設開始時間、打設完了時間、残り時間などを一覧表示し、作業指示の目安とすることが可能なる。

打設許容時間は任意設定が可能であり、管理画面は一定時間ごとに自動で更新される。

打設中の区画は、背景が白で表示され、打設が終了した区画は、背景が青で表示される。打設中の区画に関しては、残時間が1時間を切ると、背景が黄色になり、30分を切ると赤で表示される。

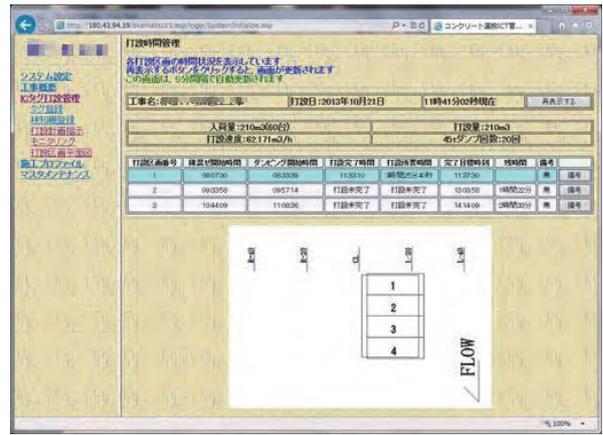


Fig. 4 打設速度モニタリング画面の例

5. 施工遠隔モニタリング

データ計測機能をインストールしたスマホを施工に使用する重機に搭載して計測したデータを使って施工状況の見える化を行い、インターネットブラウザ上に、ダッシュボード形式で施業状況の解析結果の一覧表示を行う。

定期的な自動更新となっており、事務所等では準リアルタイムでの施工状況の把握が可能となる。また、WEBシステムであるため、外出先などどこからでも状況の把握が可能となる。

計測システムを搭載する重機の組み合わせにもよるが、本システムで解析できることは、各重機の動きから、進捗率、作業土量、作業のラインバランスなど、非常に多岐にわたる。

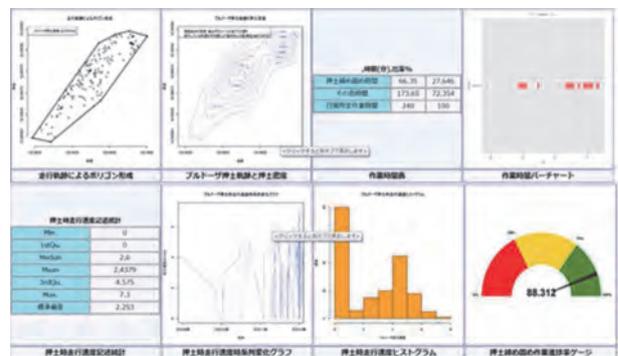


Fig. 5 ダッシュボード画面の例

6. 生産性を向上する屋内における建設機械の位置管理、予約管理

ビーコン位置情報技術+iPad 用アプリ 位置+プラス

レンタルのニッケン ○湯島 一郎

はじめに

少子高齢化により人手不足が深刻化しており、又働き方改革法案の施工もあり、いかに生産性を向上するかが強く求められている。

建設現場では資機材の位置管理・予約管理は必要不可欠であるものの、ホワイトボードに予定表を作成し、毎日昼礼にて集まり話し合う等アナログにて管理しており、省人・省力化の検討ができる作業である。

特に高層ビルや倉庫等大型の現場では高所作業車がピーク時で数百台使用され、決められた位置に無い場合は若手監督が歩き回って探していた。予約業務も同様で、急遽高所作業車が必要になる場合は若手監督へ連絡が行き、空いている高所作業車を探さなければいけないため、本来の業務に専念する事ができなかった。建設現場における高所作業車の位置管理・予約管理の生産性向上にニーズがあると考えて、それを満たす事ができる技術や商品を探す事とした。

屋内位置測位

建設現場では位置管理以外にその機械が何階にあるか、階層管理も求められており、GPS ではニーズを満たす事ができなかった。また、対象の機械が数百台になるため低コスト、高所作業車が不要になるタイミングにて撤去が必要になるため設置・撤去の容易さが重要となる。

現場環境

粉塵が多く、完全防水まで求めないが水がかかる事はあり、生活防水レベルの耐久性が求められる。業務効率化のために現場監督に iPad を支給するゼネコンが増えている。

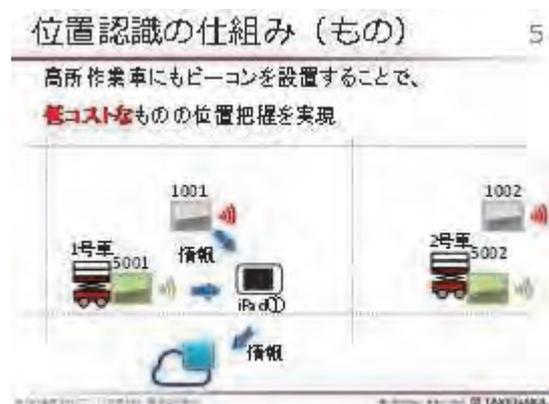
上記に基づき

- ①ビーコン技術にて測位
- ②高所作業車等にビーコンを取付る際に設置が容易な電池式、電池交換は年単位で望ましい。
- ③iPad 等タブレットで現場・事務所等場所を選ばず確認できる

事が、建設現場では適していると考えて、レンタルのニッケンでは竹中工務店開発の「位置+プラス」のレンタルを取扱いして、高所作業車・現場作業者の位置確認が容易になるなど建設現場での生産性向上を推進している。

位置+プラス

位置+プラスでは位置情報を発信する固定ビーコンを現場に設置し、高所作業車の情報を発信する移動ビーコンを高所作業車にも取付し、アプリを入れた iPad が近くを通る事により、何処の位置に何号車の高所作業車があると認識します。また、iPad を持った作業員も何処の固定ビーコンの近くにいるかわかる。



ビーコンの位置情報を生かし高所作業車の予約機能もありホワイトボードで管理していた高所作業車をアプリ上で一括管理。

「高車予約」アプリ



おわりに

人手の確保や働き方改革のため、業界は業務の効率化が急務と考え、レンタルのニッケンでは現場を管理できる商品に力を入れている。今後更にその需要が高まって行く事から幅広く展開して行く予定である。

7. ICT 地盤改良工の見える化を強かにサポート

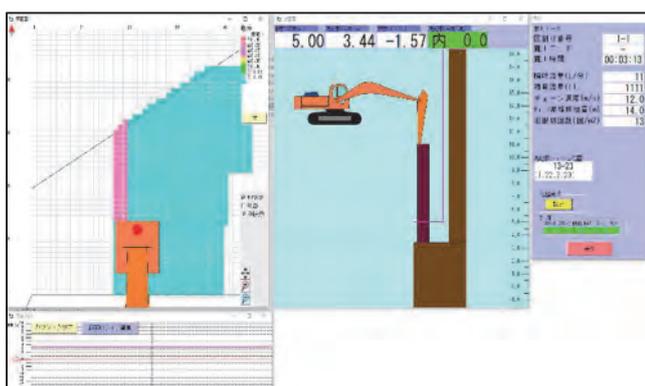
「中層地盤改良ガイダンスシステム」

一部改良管理計器との連動も可能にし、帳票出力もスムーズに

西尾レントオール株式会社 ○ 山口 秀樹

地中の見える化をリアルタイムに表現

本年度より国土交通省では i-Construction の取り組みの中の ICT 活用工事の対象に地盤改良工（中層・表層）が追加された。本取り組みの中で特に注目されているのが、施工履歴データを用いた出来形管理である。本技術はその管理要領に準拠した表層・中層改良工どちらにも対応することができるマシンガイダンスシステムである。オペレータは視覚では把握できない地中の刃先位置を平面位置だけではなく深さも知ることができることで設計通りの範囲と深度を漏れなく改良できたかをリアルタイムにシステム画面上で確認できる。



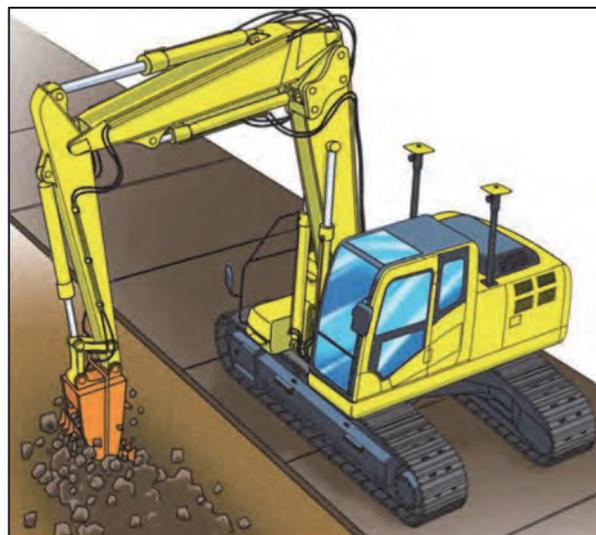
地盤改良工特有の設計データ作成にも対応

地盤改良工では、出来形だけではなく改良剤を対象エリアに規定量注入することも重要であるため、区割りごとに施工エリアを管理する必要がある。本技術はなるべく簡便にその設計データが作成できるような工夫をしている。設定ファイルの一括読み込や、システ

ム上での設計エリア範囲設定をグラフィックから処理できる事等がその一例となる。

一部改良管理計器との連動も可能

また一部の地盤改良技術で使用されている従来の改良管理装置との連携も可能となっており、オペレータにとっては施工のスタートボタンを本システムの施工開始ボタンと連動させ同期が取れることで操作ミスを防ぐ事ができ、管理者にとっては本技術の出来形データとともに品質管理のデータも本システムから出力可能となっているため、事務処理も大幅に減少される。



多様なアタッチメントに対応

本技術は、ベースマシンのバックホウに装着される様々なアタッチメントに対応が可能で、簡略されたものであれば描画にも対応できる点も評価を得ている。

8. 20年で1/10以下に減った建設機械のNOxの測定結果

(国研) 土木研究所 新田恭士

同上 ○吉永弘志

1. はじめに

オンロードおよびオフロードの自動車から排出される排出ガスにかかる情勢は、車載器による測定での規制等、めまぐるしく変化している（表-1）。温室効果ガスGHGの亜酸化窒素（一酸化二窒素） N_2O 、およびメタン CH_4 についてはオンロード車の測定事例が報告され、米国では測定値の報告が義務づけられるようになったが、建設機械にかかる知見は国内外にみあたらなかった。土木研究所は2015年から2018年度までの研究でこれらのGHGの概況を明らかにし、「建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素およびメタンの研究」（土木研究所資料第4385号、2019.）で公表した。報告書には窒素酸化物 NO_x 、一酸化炭素 CO 、

非メタン炭化水素NMHCの測定値も記載した。本稿ではこれらの測定値について報告する。

2. 測定方法

測定方法の概要を表-2に示す。2011年規制、および2014年規制に対応して、後処理装置のディーゼル微粒子捕集フィルター（DPF: Diesel Particulate Filter）、ディーゼル酸化触媒（DOC: Diesel Oxidation Catalyst）、およびSCRを搭載した20t、および13tクラスの油圧ショベルを測定した。年度ごとの測定状況を図-1、図-2、および図-3に示す。2015年度、および2016年度は測定対象の動作を「待機」、「走行」、「ならし(模擬)」、「掘削(実作業)」、および「掘削積込(模擬)」とし、信頼性向上と簡素化の検討を行った。測定対象とする動作を「待機」、および「ならし」の二種類とし、測定値を CO_2 比の排出量で評価することで、(1)「動力が小さく仕事量当たりの排出量が多い動作」と「動力が大きく仕事量当たり

表-1 排出ガス規制にかかる国際情勢.

 米国: [2015] VW社の不正発覚. 米国連邦環境保護庁による実路走行RDE (real driving emission) 試験を継続.[2014年モデル~] 自動車には温室効果ガスGHG (greenhouse gas) の報告義務

 欧州: [2017~] 使用過程車の排出ガスの規制との適合ISC (in-service conformity) を目的としたディーゼル乗用車等のRDE規制.[最速2019] 建設機械等に搭載されたエンジンの測定値の報告ISM (in-service monitoring) を義務付け.[2011~] 乗用車の浮遊粒子状物質の粒子数PN (particulate number) 規制.[2019~] 建設機械等のPN規制.

 日本: [2022~] RDE試験 (EUが先例). PN規制を検討中.

 中国: [2023~] RDE試験 (EUが先例). 走行中の排出ガスをモニタリングして政府のサーバーに送信するシステムをオンロード車に搭載する義務づけ.[最速2020~] 建設機械等の使用過程エンジンの排出物適合ISCの自主検査, および環境部門監査 (EUが先例).

 インド: [2024~] RDE試験 (EUが先例).

表-2 測定概要.

測定時期	2015年度 (10月, 1月), 2016年度 (12月), 2017年度 (10月), 2018年度 (8月)	
測定場所	土木研究所構内 (2015, 2016年度) つくば市内のレンタル会社 (2016, 2017年度)	
測定対象 (建設機械)	油圧ショベル	
	規制年	メーカーとクラス
	2011	A社20t, B社20tと13t
2014	A社20tと13t, B社20tと13t	
測定項目と 測定装置	測定項目	測定装置
	排気流量	ピトー管式流量計 (2015, 2016, 2017年度)
	排出ガス濃度	FTIR
測定対象(ガス)	CO_2 , CO , CH_4 , N_2O , NO , NO_2 , NMHC (非メタン炭化水素), NH_3 他	

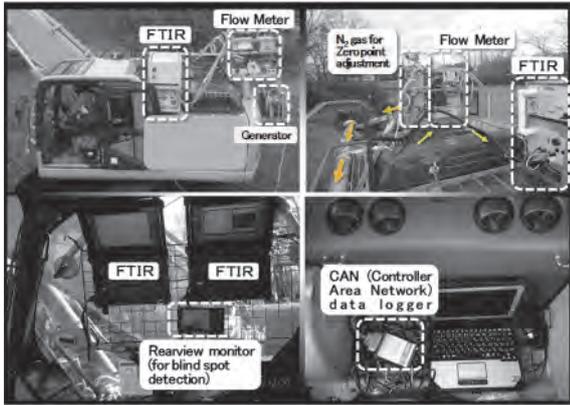


図-1 2016年度の測定.



図-2 2017年度の測定.



図-3 2018年度の測定.

の排出量が小さい動作」の測定値が得られること、(2) 排気流量の測定誤差の影響を抑制できること、(3) 測定場所の制約がなくなり、測定に要する治具の加工および配管の加工が不要になることで測定が簡素化できることを明らかにした。2017年度、および2018年度は測定対象の動作を「待機」と「ならし(模擬)」の2種類とした。短期間かつ低コストでより多くの数の建設機械が測定できるようになったことで測定値の信頼性も向上した。

3. 測定結果

NOx, およびCOの測定値を図-4に示す(記載を省略したがNMHCも経年で大きく減少)。土木研究所における測定値は「待機(アイドリング)」と「ならし(模擬動作)」の測定値にアイドリング時間率で重みづけして実工事での値に換算したものである。2014年規制に対応した最新の建設機械の排出ガスは20年前の1/10以下に抑制されていた。

また、排出ガスの測定値、および積算歩掛に記載された組み合わせ機械に基づいて、環境影響評価において使用する原単位を設定した。ユニット(工種)は軟岩掘削・硬岩掘削, 土砂掘削, 盛土工, 法面整形, 路床安定処理, サンドドレーン, サンドコンパクションパイル, 粉体噴射攪拌, 鋼矢板(アースオーガ併用圧入), 旧橋撤去, トンネル機械掘削, トンネル発破掘削, リバースサーキュレーション工, および地中連壁とした。軟岩掘削・硬岩掘削の例を図-5に示す。

今後、アイドリングストップの実情、およびユニットを構成する機械の規制対応の進捗に合わせて下方修正する予定である。

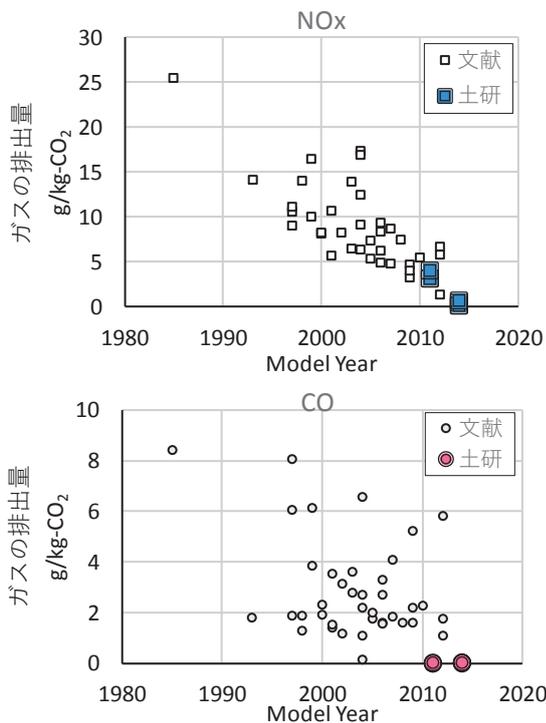


図-4 油圧ショベルの年式と排出ガス量の関係。文献値のNOxは4文献36台, CO, は5文献39台。土研(土木研究所)の測定は7台。

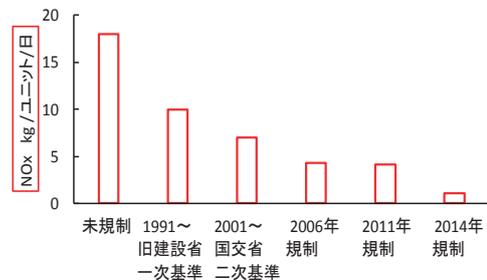


図-5 工種別の排出量の例(軟岩掘削・硬岩掘削)。

9. 低価格（10万円未満）の赤外線カメラによる熱中症・

火傷・火災の危険と熱資源（100℃未満）の可視化

（国研）土木研究所 ○吉永弘志

1. はじめに

20年ほど前の赤外線カメラは数百万円する高価なものであったため、防衛・防災等、特に高い安全性が求められるような分野等以外での導入が困難であったが、現在は低価格で小型・軽量化されたものが市販されるようになった（図-1）。低価格化により広範な用途が見出させると考えている。本発表は、用途案を提示することで新たな視点での活用の契機となることを目的としている。以下、用途案を列記する。



図-1 10万円以下の赤外線カメラ（google検索）。

2. 用途案

(1) 火傷・火災の危険回避

土木研究所における排出ガスの測定においては、雨天時に測定機器を保護するブルーシート（図-2）、およびエンジン回転数の測定を目的とした振動センサー（図-3）を設置した。これらは火災、センサの破損、および火傷の危険を伴う。図-4,5は排気管、およびエンジンルームの赤外線画像である。振動センサーの設置位置は、エンジン関連部品の温度を確認し、センサの損傷のおそれがないボディとした。図-4,5の画像は「建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素およびメタンの研究」（土木研究所資料第4385号, 2019.）にも記載して、将来の測定者に注意喚起した。マニュアル、シール等による「高温注意」の表記（図-6）には赤外線画像の付加が効果的と考えている。その他にも、機械整備（図-7）、高温の白熱球の危険（図-8）、および低温のLED（図-9）を使用することによる危険回避の説明にも活用できると考えている。



図-2 実験装置の雨よけ。



図-3 エンジン回転計。
（振動センサー式）



図-6 高温注意。

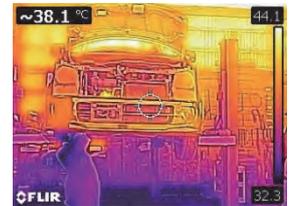


図-7 自動車整備。

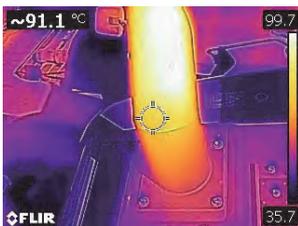


図-4 排気管。

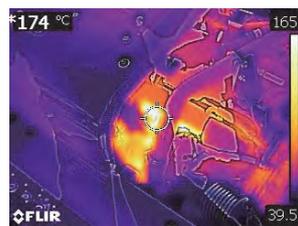


図-5 エンジンルーム。



図-8 白熱球（60W）。

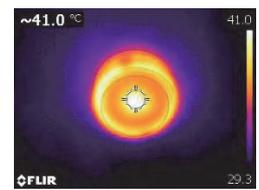


図-9 LED。
（白熱球60Wの明るさ）

(2) 熱中症の危険回避

近年、熱中症の危険を報道するマスコミでも赤外線カメラの画像が使用されるようになった。土木研究所における真夏の排出ガス測定では、アスファルトの駐機場でエアコンを使用しない条件で重機を操作する予定であった。しかし、赤外線画像の撮影(図-10)、熱中症計での測定を行い、危険を伴うと予想した。オンロード車の排出ガス測定ではエアコンを使用していることを確認して、エアコンを使用する条件に変更した。土木研究所資料第 4385 号にも赤外線画像を付して以上の理由を記載し、将来、同様な測定を行う方へ注意喚起した。路上工事(図-11)の熱中症対策(休憩・水分補給等)においても「路面温度: 60°、気温(路上): 39.5°、黒球温度(路上): 49.8°、湿度(路上): 35.5%、湿球黒球温度 WBGT(路上): 32.6」等の数字に画像を併用すると説得力があると考えている。

(3) 熱資源(100°C未満) 探査他

図-12 は手の熱で発電して LED を点灯させた実演である。エンジンの排熱、アスファルト路面等、従来は利用価値のなかった熱源での発電も可能になりつつある。100°C未満の熱源ではエネルギー消費を抑制する目的での活用は難しいが、非常用の照明や情報機器のデ

ータ保持等で活用される可能性もあると考えている。

その他、冷暖房・加熱機器の熱漏れ、路面温度の把握などの活用案を図-13~16 に示す。20 年前の路面凍結の検知装置等での路面温度の測定は、点での測定値に基づいていた。道路管理者やドライバーが画像(面)で路面温度を把握することは危険回避策として有望と考えている。



図-12 体温の熱で発電できる熱発電素子。



図-13 暖房熱の漏れ把握。



図-14 加熱漏れの把握。



図-10 夏季における運転席。



図-11 路上工事。



図-15 舗装、区画線による温度の違いの把握。
(黒色の舗装は高温、区画線は低温)

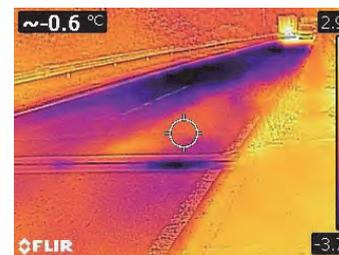


図-16 路面凍結の危険個所の把握。

10. 画像認識技術と人工知能を応用した建設機械自動停止装置の開発

株式会社 カナモト ○吉田 道信

角 和樹

植木 良

1. はじめに

i-Construction が提唱されて以来、施工現場に ICT 技術が急速に導入され、作業の効率化が進んでいます。

しかし施工の効率化が進む一方で、安全対策について事故災害防止が急務となっています。施工現場にて発生した事故災害の中でも、発生件数の上位にある「はさまれ・巻き込まれ」にて平成 30 年度だけでも、約 1 7 0 0 名の方が被災されております。弊社では、建設機械との「はさまれ・巻き込まれ」抑止するシステムを開発いたしました。「ナクシデント」と命名したこのシステムは、システムを搭載した建設機械（バックホウ等）の死角部分をカメラにて監視し、画像認識技術と人工知能を組み合わせ、設定したエリア内に人が立ち入った場合には、建設機械の動作を自動的に停止し、接触を事前に防止するシステムとなります。

2. 構成

このシステムは、バックホウ用のシステムのセットとして、赤外線ステレオカメラによる深度センサーと 200 万画素の RGB センサーを併せ持つ Intel 「REALSENSE Depth Camera」と、画像解析用小型 PC をセットにしたカメラユニット 3 台と、制御用 PC およびモニターを合わせて一つのユニットを構成します(写真-1・写真-2)。



写真-1 (ユニット単体)



写真-1 (設置状況)

3. 特徴

- ・バックホウの死角をカバーする。

バックホウの死角を見渡すように、カメラを設置します。カメラ一台当たり、水平角で約 70°、鉛直角 42° の視野角を持ちますので、3 台組み合わせることにより、バックホウのオペレータ席より死角となる左後方から右側にかけての視野をカバーします。(写真-3・写真-4)

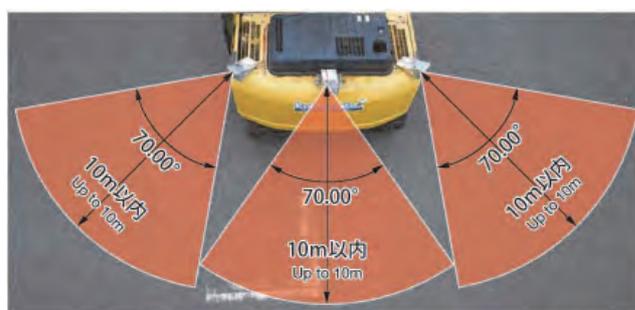


写真-3



写真-4

・深度センサーにより、認識範囲を任意設定

Intel「REALSENSE Depth Camera」内臓の赤外線ステレオカメラによる深度センサーにより、任意の対象物の距離を計測します。その機能を応用し、システムの動作範囲を任意に設定することができます。

・画像認識技術により、人のみを認識

「REALSENSE Depth Camera」は、深度センサーとは別に200万画素のRGBセンサーを有しており、常時の可視光映像をモニターしています。このセンサーで取得された映像を基に、画像解析用小型PCにて人のみを検出いたします。この検出プロセスにてAI（人工知能）を利用し、映し出された画像から人のみを検出します。これに深度センサーで取得された距離データを合わせて、認識範囲に侵入した人のみを検知し制御用PCに出力します。（写真-5）

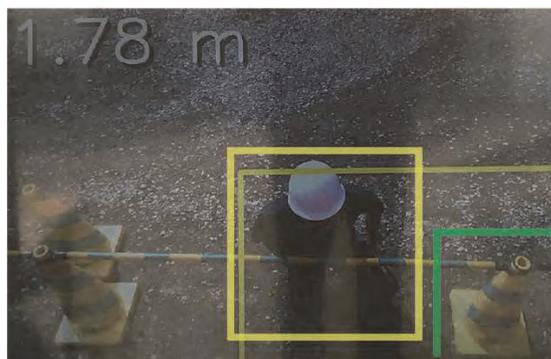


写真-5

また、AIの画像認識技術により、人の全身画像だけでなく、下半身などの部分映像でも認識できるようになっています。（写真-6）



写真-6

・建機を自動停止

認識範囲に人が侵入し、カメラユニットにて「人」と認識された場合、制御用PCに信号が送られ、バックホウの安全レバーを自動的にロックし、建機を停止させます。その後、センサーの認識範囲より対象物が避難し、危険回避と判断されれば自動的に作動状態に復帰します。

（図-1）

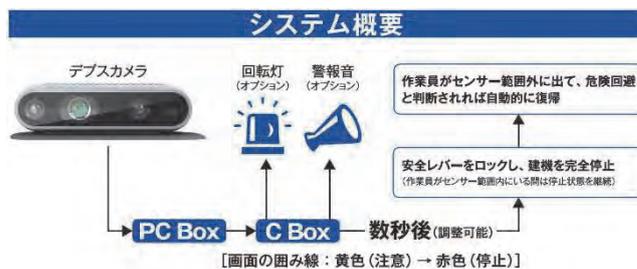


図-1

5. 導入効果

重機と作業員の触車事故の事前防止だけでなく、経験の浅いオペレータや作業員の多い現場での運用を強いられているオペレータへの精神的負担軽減も考えられます。また現在、バックホウだけでなくホイールローダや重ダンプへの対応機種拡大を図っております。このように、機材操作の負担軽減により、より働きやすい環境を作り、その結果現場の生産性向上に寄与することも考えられます。

6. 終わりに

このシステム「ナクシデント」は、あくまでも安全補助システムであり、運用するにあたり周囲に十分注意して重機操作されることをお願いいたします。

最後に我々は、今後の建設現場の技術の向上と普及に期待し、最新機材の提供を通じて現場環境の向上や更なる安全の向上に、貢献していきたいと考えております。

令和元年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集

令和元年 11 月 28 日 印刷

令和元年 12 月 2 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

印刷所 (株)アクセス

