

平成30年度

建設施工と建設機械シンポジウム
論文集・梗概集

平成30年11月28日～11月29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、実行委員会で採択を決定する。

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	金丸 清人	清水建設（株）	開発機械部
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	小林 真人	コベルコ建機（株）	企画管理部
委員	神宮寺 保秀	国土交通省 関東地方整備局	企画部
委員	玉石 修介	（一社）日本機械土工協会	
委員	行川 恒弘	前田道路（株）東京支店	製品部
委員	新田 恭士	（国研）土木研究所	先端技術チーム
委員	藤島 一雄	日立建機（株）	研究・開発本部 技術・製品戦略部
委員	本田 肇	（株）トプコン営業本部	スマートインフラマーケティング部
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
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. 阿蘇大橋地区大規模法面崩壊におけるロッククライミングマシンの適用事例
ネットワーク対応型無人化施工システムの適用 1
(株)熊谷組 ○飛鳥馬 翼、北沢 俊隆、佐藤 祐治
2. 無電柱化のための電線類埋設用掘削機械を用いた施工試験について 7
(国研) 土木研究所寒地土木研究所 ○大竹 まどか、小林 勇一、澤口 重夫
3. 遠隔操縦式バックホウの視認性向上について 11
国交省 関東地整 関東技術事務所 ○宮野 博匡
国交省 関東地整 長山 真一
4. 無人化施工の作業性に関するAI適用研究 15
(株)熊谷組 ○北原 成郎
(株)まざらん 西垣 重臣
(株)キック 才原 勝敏
5. 無人化施工におけるブルドーザ土工のインフォグラフィックス 21
(株)まざらん ○西垣 重臣
(株)熊谷組 北原 成郎
(株)キック 才原 勝敏
6. 照明車のLED化検討について 27
国交省四国地整四国技術事務所 ○竹内 伸一、大林 智仁
7. 機械学習と画像処理を用いた重機の自動カメラ追従システム 31
芝浦工業大学 ○井上 慎人、藤武 将人、吉見 卓
8. 不整地運搬車の自動走行技術の開発 35
(株)熊谷組 ○小林 勝、宮川 克己、北原 成郎
9. 狭隘な施工条件を克服した高速道路ランプトンネルの施工実績
— 特殊工法を使用した矩形シールドの施工実績 — 41
鹿島建設(株) ○加藤 淳司、真鍋 智、沼宮内 克己
阪神高速道路(株) 松川 直史
10. 大型遠隔操縦式草刈り機による情報化施工技術の活用について 47
国交省 中国地整 中国技術事務所 ○相羽 晴彦、香出 聡一郎
11. 地上移動体搭載型レーザースキャナーを用いた舗装路面プロファイルの算出 51
東亜道路工業(株) ○梅田 隼、塚本 真也
ライカジオシステムズ(株) 金子 公一
12. 建設機械におけるデータ交換手法の標準化について 57
(国研) 土木研究所 ○田中 洋一、新田 恭士、藤野 健一
13. TS等光波方式を使った生産性向上について
計測技術は日進月歩、大切なことは導入し易い環境作り 61
国交省 国土技術政策総合研究所 ○伊藤 薫、森川 博邦、小塚 清
14. 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 65
国交省 国土技術政策総合研究所 ○岡島 朝治、森川 博邦
(一財)先端建設技術センター 杉谷 康弘

15. i-Constructionにおける出来形管理に関するソフトウェアの機能要求仕様の検討	6 9
国交省 国土技術政策総合研究所	○川邊 好世、森川 博邦、杉谷 康弘
16. 新幹線断面における効率的な山岳トンネル構築への取り組み	7 3
(株)熊谷組	○米谷 裕樹、荒木章文
17. 新北陸トンネル(大桐)における清濁分離を用いた多量湧水の処理について	7 7
(株)熊谷組	○石田 和輝
(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構	高原 英彰、吉森 佑介
18. 国内初導入した4ブームフルオートコンピュータジャンボによる大断面トンネルの施工実績	
一宮古盛岡横断道路 新区界トンネル工事、国道45号 白井地区道路工事	8 1
鹿島建設(株)	○三浦 孝、牟田口 茂
19. 映像CIMによる圧入鋼矢板の施工管理について	8 5
可児建設(株)	○可児 憲生
(株)環境風土テクノ	須田 清隆
立命館大学	建山 和由
20. 映像IoTによる現場臨場の効率化に関する実験報告	8 9
可児建設(株)	○可児 純子
(株)環境風土テクノ	須田 清隆
立命館大学	建山 和由
21. 全方位カメラを用いた建設機械の位置推定システム	9 3
日本工業大学	○住吉 耀、石川 貴一郎
(一社)施工技術総合研究所	岩渕 裕、藤島 崇
22. スラリー揺動攪拌工法の適用拡大への取り組み	
一多層地盤への適用、着底層の管理	9 7
WILL工法協会	○島野 嵐、市坪 天士
	蔵谷 誠二、中馬 忠司
23. 相対式攪拌翼による深層混合処理工法のCAE解析に基づく性能評価	1 0 1
明石工業高等専門学校	○中尾 晃揮
あおみ建設	大古利 勝己、高橋 強
芝浦工業大学	稲積 真哉
24. クラウド活用型舗装一元管理システムの開発	1 0 7
(株)NIPPO	○竹内 伸、梶原 覚、駒坂 翼
25. 建設ICT導入普及研究会の活動について	
全国に先駆けて生産性向上に向けた組織作り	1 1 3
国交省 中部地方整備局	○川口 一彦
26. i-Construction普及加速事業におけるICT活用施工の効率化に向けた提案	1 1 9
国交省 総合政策局	○久保 恭伸
27. 基礎杭打設時期が廃棄物処分場の底面遮水工に及ぼす影響	1 2 3
呉工業高等専門学校	○龍尾 一海、重松 尚久
広島工業大学	森脇 武夫
28. 既存杭引抜きおよび抜き跡地盤埋戻し技術の高度化	1 2 9
明石工業高等専門学校	○橋本 功
(株)マルシン	桑原 秀一
芝浦工業大学	稲積 真哉
29. グラウンド改良工事における小型ロードスタビライザの運用	1 3 5
鹿島道路(株)	○端 孝之、新満 伊織

II 梗概集

II-1 ポスターセッション要旨

1. 災害時に活躍する遠隔操縦バックホウ等の出動実績について
～ 無人化施工 遠隔操縦機械 ～ …………… 183
国交省 九州地整 九州技術事務所 ○原 堅次、松岡 雅博
2. 海上コンポーザー (SCP) 作業船 (パイオニア第30 フドウ丸) …………… 185
(株) 不動テトラ ○深田 久、伊藤 竹史
3. 自立型清掃ロボット「TOギャザー」 …………… 187
(株) レンタルのニッケン ○飛山 太郎
4. スマートコラム工法
ー全自動施工管理が可能な狭小地対応型格子状地盤改良工法ー …………… 189
(株) 竹中土木 ○小西 一生
(株) エステック 中馬 忠司
(株) ワイビーエム 奈須 徹夫
5. LED パネルと FM ラジオの音声を組み合わせた工事車両用無音誘導システム
「おとなしくん®」の開発 …………… 191
福田道路(株) ○羽田 誠司、吉田 公一
(株) ソーキ 千葉 周
6. ヘリマシシステムを利用した時差安全停止装置
ー「磁界」と「IC タグ」と「自動停止機能」で重機接触災害を防止する！ …………… 193
瀧富工業(株) ○山田 泰之、瀧 哲也
7. 現場の見える化を動画や計測値を利用した
クラウドサービスでバックアップできるシステム「クラウド16PLUS」 …………… 195
西尾レントオール(株) ○山口 秀樹
8. エアロセンスのエアロボマーカーで土木現場を便利に明るく元気に！ …………… 197
エアロセンス(株) ○嶋田 悟、新井野翔子
9. 仮設道路計画アプリケーション「道路プランくん3D」
手書き感覚で、3次元描画！！ …………… 199
玉石重機(株) ○山口 孝人、野中 浩平
ジオサーフ(株) 和泉 紀儀

I 論文集

1. 阿蘇大橋地区大規模法面崩壊における ロックライミングマシンの適用事例

ネットワーク対応型無人化施工システムの適用

株式会社熊谷組九州支店
株式会社熊谷組九州支店
株式会社熊谷組

北沢 俊隆
佐藤 裕治
○飛鳥馬 翼

1. はじめに

平成28年熊本地震により熊本県阿蘇郡南阿蘇村立野地区において大規模な斜面崩壊が発生し、下部のインフラを押し流す大災害となった。阿蘇大橋地区斜面防災対策工事(以下、本工事)ではインフラの復旧工事の施工環境を確保するために、斜面頭部に残存する不安定土砂の除去(以下、頭部ラウンディング工)と崩壊斜面から流出する土砂や落石等を捕捉する土留盛土工(以下、土留盛土工)の築堤を平成28年以内に早期完了させた。緊急対策工事が終わり、恒久対策工事へとフェーズが進む中、斜面中腹に堆積した土砂が法面保護工の実施に支障を来すため、高所法面掘削機で除去することとなった。

本論文ではモニターを装備した遠隔操作室から大規模法面崩壊地での本格的な無人化施工を実施したので、その成果を報告する。

2. 本工事概要

2.1 阿蘇大橋地区被災状況

平成28年4月16日の熊本地震(本震)により発生した大規模崩壊は、崩壊長約700m、崩壊幅約200m、崩壊土砂量約50万m³におよび、国道57号、JR豊肥本線、阿蘇大橋を押し流した。(図-1)

被災した交通インフラの早期復旧が望まれるが、崩壊斜面の頭部には崩壊斜面を囲むように多数の開口亀裂や段差が発生し、滑落斜面では切り立った急傾斜の斜面となっており、降雨や余震などにより、さらなる崩壊の危険性があった。

2.2 緊急的な二次災害対策工事

本工事は直轄砂防災害関連緊急事業として土留盛土工の築堤と頭部ラウンディング工が主要な工事内容であった。二次災害の危険性があるため崩壊地内は立入禁止区域となり、復旧作業はすべて無人化施工により実施した。(図-2)¹⁾

当該斜面は黒ボク・赤ボクと呼ばれる阿蘇地域



図-1 阿蘇大橋地区被災状況



図-2 緊急対策工事全体概要図

特有の火山灰起源の特殊土壌が分布する長大な急斜面であるため、過去に類例の無い難工事となった。それでも平成28年10月22日に土留盛土工が完成、同年12月26日に頭部ラウンディング工が完了した同日に発注者である国土交通省九州地方整備局が開催する阿蘇大橋地区復旧技術検討会において、崩壊地内下方の交通インフラ工事を主作業とする有人施工を行う作業環境が整備されたことをご確認いただいた。²⁾



図-3 作業エリア平面図

(http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/n-kisyahappyou/h29/171211/05_siryu03.pdf)



図-4 作業エリア横断面図

(http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/n-kisyahappyou/h29/171211/05_siryu03.pdf)

2.3 恒久的な安定化対策

緊急的な対策が完了したことを受けて、国土交通省九州地方整備局は恒久対策工に着手し、以下のステップを進めることを発表した。(図-3, 図-4)³⁾

・恒久対策工の施工手順

- STAGE① 斜面中腹部の堆積土砂の除去を実施
- STAGE② ネット工を実施
- STAGE③ 土砂・岩塊の除去後ネット工の施工
- STAGE④ 土留盛土より上部の土留工・山腹工の施工
- STAGE⑤ 土留盛土の風化・浸食対策

本工事では崩壊斜面中腹に残る崩壊土砂等を無人化施工で斜面下部へ除去する(以下、斜面中腹崩壊土砂除去工)STAGE①の施工まで受け持つこととなった。

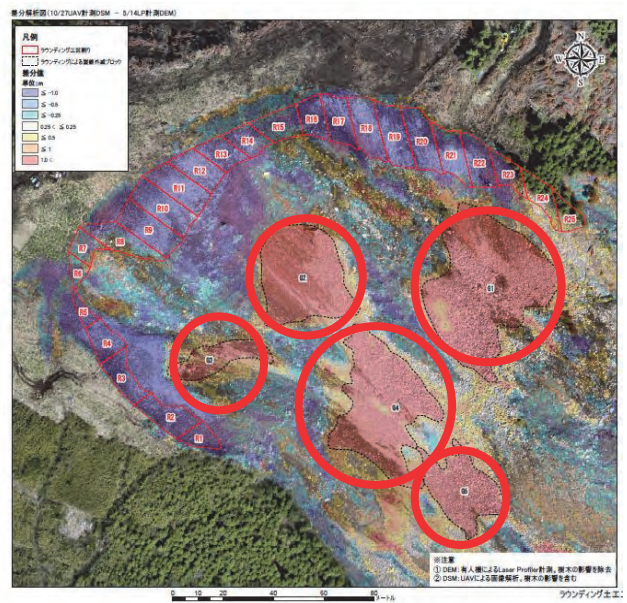


図-5 頭部ラウンディング差分解析

3. 斜面中腹崩壊土砂除去工の着手

斜面中腹には頭部ラウンディング工で撤去した土砂や岩塊が崩積土として残存していた。図-5 は崩壊直後に実施した航空レーザ測量と頭部ラウンディング工完了後に実施したUAV写真測量との差分解析である。ヒートマップにより表されており、色で土量の増減が分かる。図-5 の丸い部分が崩積土として残存している場所であり、今後施工される法面保護工において支障となるため、早期に撤去することが斜面中腹崩壊土砂除去工の目的であった。

3.1 土砂撤去の考え方(設計)

頭部ラウンディング工が完了した平成 28 年 12 月 26 日から当該施工の準備工が開始した平成 20 年 6 月まで月日が経過し、降雨等により崩壊地内の現況が変わってしまった恐れがあるため、着工前には再度 UAV 写真測量を実施した。崩積土の確認は前述したように崩壊直後の測量ラインとの差分解析によって計測した。したがって、崩積土の撤去は斜面崩壊直後の現況ラインに戻すことによって完了したと見なした。また当該施工エリアに堆積している土量は 11,600m³と判明した。

3.2 施工機械の選定

施工箇所は無人化施工エリアであるため、既存の技術で遠隔操作に対応している高所法面掘削機を採用した。高所法面掘削機には頭部ラウンディング工に使用したセーフティライマー工法(図-6)と、ロッククライミング工法(図-7)がある。両者の違いを表-1, 図-8, 図-9 に示す。セーフティライマー(以下, SCM)は施工能力は低いですが、独立したワイヤー取付円盤を装備しているため、履帯ごと機械全体が旋回できるので横移動に優位である。



図-6 SCM



図-7 RCM

ロッククライミングマシン(以下、RCM)は機械左右後方にウインチを装備しているため。横移動は困難であるが、機械が所有するワイヤーにシャックルで延長ワイヤーを継ぎ足すことによって限りなく下方へ降りることが可能である。

当該施工では大規模法面崩壊地の大量の崩積土や大きな岩塊を移動させる必要があるため、垂直方向の作業に優れ、施工能力が高いRCMを採用した。

3.3 施工方法

3.3.1 長尺ワイヤー付きウインチ搭載バックホウの導入

従来のロッククライミング工法はRCMに装備されているワイヤーの巻き出し長が50m程度なので、前述したように機械の施工範囲が広がるごとにワイヤーを継ぎ足す必要があり、その作業は人力によって実施している。当該施工エリアは大規模法面崩壊地であるため、ワイヤーを何本も継ぎ足す必要があり、崩壊地内での人力による継ぎ足し作業は二次災害の危険性があった。

そこでアタッチメントとして500mワイヤー付

表-1 高所法面掘削機比較

	SCM	RCM
最大バケット容量	0.25m ³	0.45m ³
特徴	ワイヤー取付円盤を装備	ウインチを装備
施工可能法面勾配	70°	90°

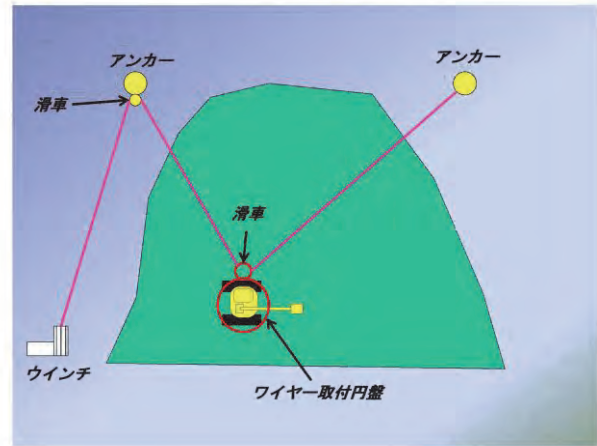


図-8 SCM 施工方法

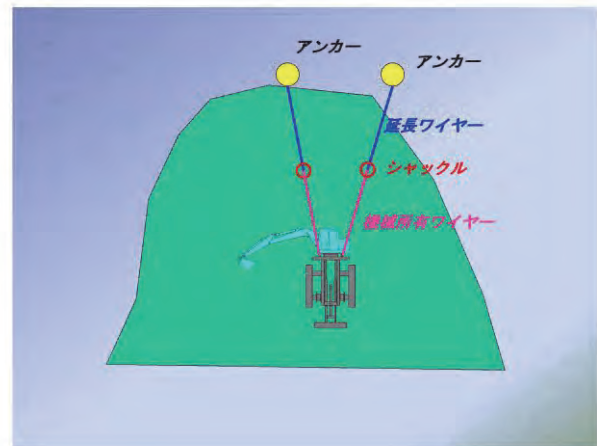


図-9 RCM 施工方法

きウインチを搭載した0.8m³級バックホウ(以下、ウインチ搭載BH)(図-10)を使用することにより、ワイヤー継ぎ足しの施工性の向上を図り、崩壊地内での人力作業を無くすことにより安全性を確保した。

降坂の方法として、RCM本体から出る主ワイヤーの残りが少なくなってきたら安定しやすい位置で機体を固定する。そして、片側の主ワイヤーを徐々に緩めウインチ搭載BHからワイヤーを引き出し延長し、伸びている主ワイヤーを巻き取り緊張する。同じことを左右両方のワイヤーで行い、ワイヤーの延長作業を完了させる(図-11)。ワイヤー延長作業は斜長200m程度の法面で実施すると、人力の場合半日掛かるのに対し、ウインチ搭載BHを使用すると1時間で完了するため、施工性が非常に向上した。

ウインチ搭載BHを使用したRCMの施工状況を図-12、図-13に示す。



図-10 ウインチ搭載BH

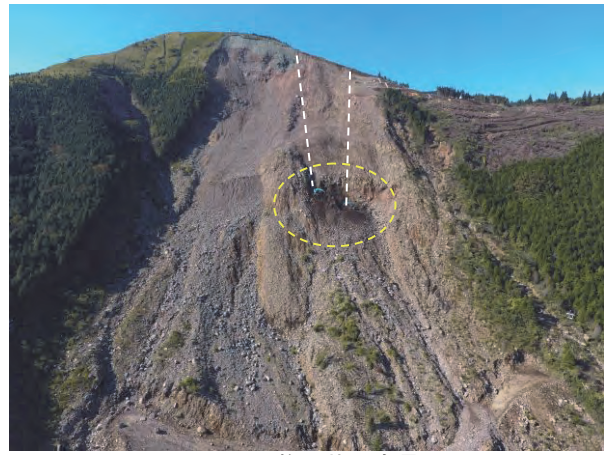


図-12 施工状況全景

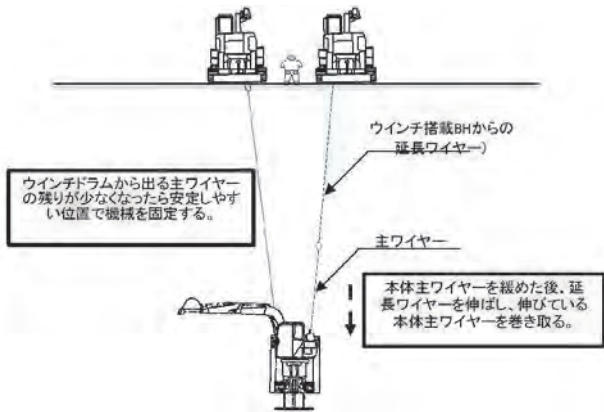


図-11 降坂状況



図-13 施工状況近景

3.3.2 ネットワーク対応型無人化施工の導入

目視による無人化施工が主流であるロッククライミング工法はオペレータの安全を確保するために有人施工エリアから遠隔操作を行う。

しかし、長大法面では、機械の状況や法面の状況をすべて視認することは困難である。別の角度から視認するために、オペレータが長大法面の有人施工エリアを移動することは施工効率の低下となり、また崩壊地の法肩付近を歩くことは墜落災害の恐れがあり極めて危険である。

そこで土留盛土工で採用したネットワーク対応型無人化施工システムを導入することにより、カメラの映像を使用して遠隔操作室から長距離無人化施工を行った。

無人化施工設備の配置図を図-14に示す。崩壊地を囲むように崩壊地上部と下部に固定カメラを設置した。上部と下部との通信は長距離通信が可能である25GHz高速無線アクセスシステムを使用した。RCMとの通信のための無線LANは崩壊地上部にのみ設置し、指向性の強い平面アンテナを使用し、山から見下ろすようにアンテナを設置した。遠隔操作室(図-15)は崩壊地より300m離れた山頂部に設置し、安全に遠隔操作を行った。

実施工においては崩壊地の凸部にRCMが隠れてしまい、無線通信が安定しない状況や固定カメ



図-14 無人化施工設備配置図



図-15 遠隔操作室

ラの死角になり RCM を視認できない状況が発生したり、無線信号が崩壊地の凹凸部に反射して通信に影響を及ぼすようなマルチパスと推測される通信状況が発生したりした。トラブルがあった際には固定カメラや無線 LAN の再配置やアンテナの角度を調整して改善を図った。

3.3.3 情報化施工の導入

遠隔操作室からの無人化施工では、カメラによる映像だけでは RCM の位置情報を把握することは難しい。また設計通りに掘削できているか状況確認の手段が無い。

そこで RCM に MG(Machine Guidance = マシンガイダンス)を導入し、車両の位置を把握しながら、設計を満たすように掘削作業を進めた(図-16、図-17)。設計データには 3.1 の項で述べたように、崩壊直後に実施した航空レーザ測量のデータを使用した。

一般的なバックホウの登坂角度は 30~40 度が限界で実際にはエンジン、ミッション、作動油タンクのオイルレベル等によって最大登坂角度が決まる。RCM はリフティング装置(図-16)により上部作業機体を水平に保ち、急斜面での安定した作業を可能にしている。しかし、遠隔操作室からの無人化施工では、カメラ配置によっては映像だけでは機体の姿勢を確認することができない。そのため、機体の傾きはオペレータの経験のみに頼らざるを得なくなる。そこで MG の水平器機能を使用することにより定量的な傾きを把握でき、RCM の姿勢を確認しながら安定した作業を進めることができた。

4. 施工完了確認

施工完了後に実施した UAV 写真測量と着工前の UAV 写真測量との差分解析により、掘削・整形土量を確認した(図-18)。枠で囲った箇所が当該施工箇所である。当該施工により土砂が移動したのは丸で囲った箇所であり、処理量が 11,700m³ となり、堆積していた土量 11,600m³ を処理できたことを確認した。

5. 成果のまとめ

RCM を導入したことによる当該施工の成果を以下に示す。

- ・着工前に UAV 写真測量を行ったことによって、堆積土砂の位置と土量を確認し、土砂撤去の設計の検討を容易にした。さらに完了後にも UAV 写真測量を行ったことによって土砂の移動を明確にし、堆積土量の処理の確認を容易にした。
- ・RCM を導入したことによって、遠隔操作により大規模法面崩壊地を安全に施工した。さらにネットワーク対応型無人化施工を適用することによって崩壊地から 300m 離れた安全な場所より超遠隔



図-16 当該施工導入 RCM



図-17 MG コントロールボックス画面

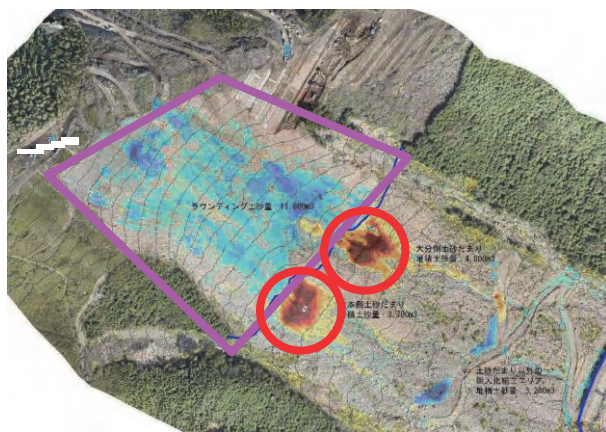


図-18 施工前後の土砂差分解析結果

操作を実施した。

- ・崩壊地内での作業は地盤の凹凸によりカメラ映像の死角が発生したり、無線が安定しないことが発生した。そのため無線中継車やカメラ車の検討が今後必要になってくる。
- ・ウインチ搭載 BH を導入したことによって、人力によるワイヤー延長作業を機械化し、施工効率を 6 倍に向上させた。さらにワイヤーを継ぎ足す作業員の安全を確保することも可能となった。

・MG を導入したことにより、重機の位置・姿勢情報の把握を容易にした。さらに設計ラインも明確に把握できるので、不足なく確実に掘削作業を実施した。

・所感であるが、過酷な作業を強いるため、RCM に装備された各機器(油圧系統ホース、車載カメラ、GNSS 等)については、あらかじめ十分な養生が必要であった。機械のメンテナンスで一時的に当該作業が実施できない日が発生した。

ICT 化・機械化を導入した結果、ロッククライミング工法の超遠隔操作を実現し、平成 29 年 7 月 24 より着工開始し、同年 10 月 31 日に完了という 3 ヶ月での早期完了を達成した。施工効率や安全の向上を達成したことで、大規模法面崩壊地においてロッククライミング工法による i-Construction を実現した。

5. おわりに

本工事においてロッククライミング工法にネットワーク対応型無人化施工とウインチ搭載 BH を導入した施工は初の試みであった。ウインチ搭載 BH は阿蘇大橋地区の長大法面工事だけでなく、一般的な法面工事にも適用可能である。i-Construction が推進されている中、本工事での実績が普及されることを望む。

本工事は平成 29 年 11 月 20 日に完了したが、現在阿蘇大橋地区では恒久対策工事と交通インフラの整備が進められている。こういった工事が早期着手できたことは、弊社が培ってきた無人化施工技術をベースに本工事において発注者を含めた工事関係者全員が少しでも早く復興を成し遂げたいという地道な努力の成果であったと感じている。熊本地震の復旧・復興作業はまだまだ継続中であるが、建設業界の応災力を発揮し少しでも早い復旧・復興を望む。

本工事は緊急対策工事を実施するものであったが、斜面中腹崩壊土砂除去工は無人化施工で実施するという恒久対策工事の一部を受け持つことができた。ロッククライミング工法による初の試みを実施して実績を残すことができ、施工現場を提供していただいた国土交通省九州地方整備局および熊本復興事務所の方々のご支援に深くお礼申し上げます。また協力業者である共栄機械工事株式会社には無人化施工の技術支援と超遠隔操作のオペレータ支援、大昌建設株式会社には RCM の提供とウインチ搭載 BH の開発にご協力いただきました。深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 野村真一・北原成郎・坂西孝仁：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防災対策工事、平成 29 年度「建設施工と建設機械シンポジウム」、2017
- 2) 国土交通省九州地方整備局ウェブページ：阿蘇大橋地区復旧における有人施工着手のための現地確認、http://www.qsr.mlit.go.jp/bousai_joho/tecforce/sabo/index.html
- 3) 国土交通省九州地方整備局ウェブページ：阿蘇大橋地区復旧技術検討会(第 6 回)、http://www.qsr.mlit.go.jp/bousai_joho/tecforce/sabo/index.html

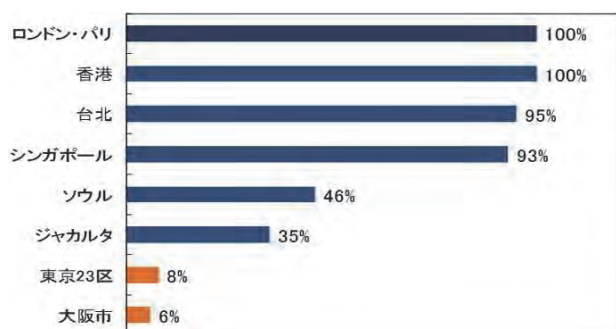
2. 無電柱化のための電線類埋設用掘削機械を用いた 施工試験について

(国研) 土木研究所寒地土木研究所〇 大竹まどか
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 小林 勇一
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 澤口 重夫

1. はじめに

近年、防災、景観・観光、安全・快適の観点から無電柱化が推進されている。しかし、電線共同溝事業に代表される電線類の地中化事業は、高額な整備コストなどを理由に中心市街地や都市部の幹線道路を中心として限定的に進められており、日本における無電柱化は諸外国と比べて大きく遅れている(図-1)。一方、郊外の美しい沿道景観を有する農村自然域においては、無電柱化により市街地以上に大きな景観改善効果が得られ、景観をいかした観光振興面からも無電柱化のニーズは高い²⁾。今後、これまで無電柱化の対象となりにくかった郊外部においても無電柱化が推進されることが期待され、郊外部も含めた無電柱化推進のためには、埋設手法の低コスト化や施工性の向上が求められている。

一方、無電柱化が進んでいる諸外国では、電線類埋設用掘削機械(以下、「トレンチャー」という。)を使用し、日本の主工法であるバックホウによる掘削と比較し、大幅に短時間で施工している事例がある。



- ※1 ロンドン、パリは海外電力調査会調べによる2004年の状況(ケーブル延長ベース)
- ※2 香港は国際建設技術協会調べによる2004年の状況(ケーブル延長ベース)
- ※3 台北は国土交通省調べによる2013年の状況(道路延長ベース)
- ※4 シンガポールは海外電気事業統計による1998年の状況(ケーブル延長ベース)
- ※5 ソウルは国土交通省調べによる2011年の状況(ケーブル延長ベース)
- ※6 ジャカルタは国土交通省調べによる2014年の状況(道路延長ベース)
- ※7 日本は国土交通省調べによる2016年度末の状況(道路延長ベース)

図-1 海外と日本の無電柱化率の比較¹⁾

そこで、郊外部における低コスト・高効率の電線類地中化技術検討のための基礎的研究として、海外で使用されているトレンチャーを用いた掘削から埋戻し・締固めまで一連の作業を想定した施工試験を行ったので報告する。

2. トレンチャーを用いた施工試験

日本では道路敷地内のような締め固まった箇所ではトレンチャーを使用した事例を確認できなかったため、小林ら³⁾は、トレンチャーの道路路盤に対する掘削能力を確認するための掘削試験を実施した。試験の結果、道路路盤の掘削においても、トレンチャーの掘削速度は従来のバックホウによる施工に比べて大幅に速く、電線類地中化における大幅な施工速度の向上が期待できることを確認した。しかし、一般的に埋め戻しに使用される締固め機械では、トレンチャーの幅の狭い掘削溝を締固めることができず、狭い掘削溝を効率的に締固め可能な施工方法を検討する必要があることを報告している。

そこで、幅の狭い掘削溝の締固め方法の検討を行い、トレンチャーによる掘削から埋戻し・締固めまで一連の作業を想定した掘削復旧施工試験を道路路体(未舗装部)において行った。

2.1 使用機械及び材料

試験フロー及び使用した機械の外観及び諸元を図-2及び表-1、表-2に示す。これらは、土木工事標準積算基準書(国土交通省)をもとに、従来のバックホウによる掘削をトレンチャー掘削に変更した場合として検討したものであり、歩道上または路側の作業を想定し、トレンチャーやその他使用機械ともに小型のものを使用した。

トレンチャーの機械構成は、専用機械と、汎用機械に装着して使用するアタッチメント式に分けられる³⁾。本試験で使用したトレンチャーは、日本国内でレンタル可能であった専用機械であり、

この機種は、掘削機構はチェーン式とホイール式の付け替えが可能である。

埋戻しは、発生土及び流動化処理土を埋戻し材料として使用した。発生土の埋戻しには、バックホウによる掘削に比べ土量が少ないことや掘削溝の幅が狭いことから、標準機械の規格（バックホウ山積 0.28m³）よりも小型の機械（バックホウ山積 0.08m³）を使用した。流動化処理土は、締固めが不要で、再掘削が可能な固さに配合できる材料である。その要求品質は、「流動化処理土利用技術マニュアル⁴⁾」より表-3のとおりとした。

締固め機械は、トレンチャー掘削による深く幅の狭い掘削溝を転圧できるものとし、タンパ、バックホウ用幅狭型振動コンパクト（以下、「コンパクト A」という。）、トレンチャー用改良型振動コンパクト（以下、「コンパクト B」という。）を使用した。タンパは、トレンチシュー（溝用転圧盤）を取り付けた規格の異なる3機種を、掘削溝の幅

や深さに応じて使用した。コンパクト A は、汎用バックホウのアームに振動コンパクトアタッチメントを取り付けたもの、コンパクト B は、遠隔操作が可能な小型トレンチャーのプラウ等を装着しているアタッチメント部分を、振動コンパクトに改造したものである。

2.2 試験方法

試験は、北海道苫小牧市にある苫小牧寒地試験道路の路体（未舗装部）にて実施した。試験区間の土質材料試験の結果を表-4 に、試験条件を表-5 に示す。

掘削深は、平成 28 年 2 月に国土交通省から発出された「電線等の埋設物に関する設置基準の緩和について」に示されている埋設深さ及び使用したトレンチャーの最大掘削深を参考に、30cm、50cm、60cm、75cm 及び 120cm に設定し、掘削延長は 20m とした。

埋戻し・締固めは、一層の仕上がり厚を 30cm 以

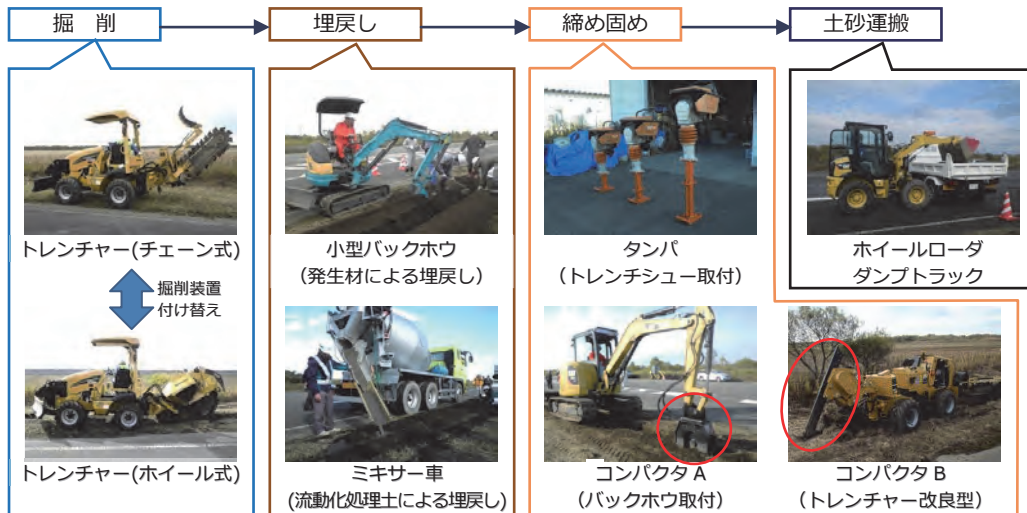


図-2 試験フロー及び使用機械の外観

表-1 掘削機械の諸元

使用機械	電線埋設用掘削機械（トレンチャー）	
機械構成	専用 機械	
掘削機構	チェーン式	ホイール式
最大掘削深	1,200mm	600mm
掘削幅	305mm	150mm, 250mm

表-3 流動化処理土の要求品質

最大粒径	13mm 以下
フロー値	140mm 以上(打設時)
ブリーディング率	3%未満
処理土の湿潤密度	1.40 g/cm ³ 以上
(後日復旧)一軸圧縮強さ	(歩道下)28 日後 200~600kN/m ²

表-2 締固め機械の諸元

	タンパ			コンパクト A	コンパクト B
	A	B	C		
転圧盤幅 [mm]	100	114	200	305	150
トレンチシュー高さ[mm]	0	0, 340	340, 500, 800	-	-
ベースマシン	(40kg 級 タンパ1 台)	(60kg 級 タンパ2 台)	(70kg 級 タンパ3 台)	超小旋回バックホウ	遠隔操作型トレンチャー

表-4 試験区間の土質材料試験結果

地盤材料試験結果			
土粒子の密度 (g/cm ³)	含水比(%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比(%)
2.615	38.7	1.302	34.4
地山密度(3 点平均)			
湿潤密度(g/cm ³)	含水比(%)	乾燥密度(g/cm ³)	
1.606	40.0	1.147	

表-5 試験条件

試験条件	掘削			埋戻し 材料	使用 機械	締固め		土砂運搬 使用 機械
	幅 [mm]	深さ [mm]	延長 [m]			使用 機械	トンチン 高さ[mm]	
①	トレンチャー チェーン式	305	300	発生材	小型 バックホウ	コンパクトA	-	-
②						タンパC	340	-
③		タンパB	0			-		
④		305	500			コンパクトA	-	-
⑤						タンパC	340	-
⑥		タンパB	0			-		
⑦		305	750			コンパクトA	-	-
⑧						タンパC	500, 340	-
⑨	トレンチャー ホイール式	150	300	発生材	小型 バックホウ	コンパクトA	-	-
⑩						タンパA	0	-
⑪		タンパB	0			-		
⑫		コンパクトB	-			-		
⑬		150	500			タンパA	0	-
⑭						タンパB	340	-
⑮		コンパクトB	-			-		
⑯		流動化 処理土	ミキサー 車			-	-	ホイールローダ ダンプトラック
⑰	250	300	20	発生材	小型 バックホウ	タンパB	0	-
⑱	250	600	20			タンパC	500	-
						タンパB	0	-

下とし、層ごとに締固めを行った。締固め度の確認は、国土交通省「土木工事施工管理基準及び規格値」に規定される現場密度の測定を、砂置換法（JIS A 1214）により実施した。本試験における規格値は、路体の基準を適用し、最大乾燥密度の90%以上（締固め試験（JIS A 1210））とした。測定は、試験条件⑤、⑥、⑫、⑬、⑭にて3回ずつ実施し、条件毎の平均値が規格値を満たすかどうかを確認した。

3. 試験結果

3.1 結果

(1) 掘削

① 掘削速度

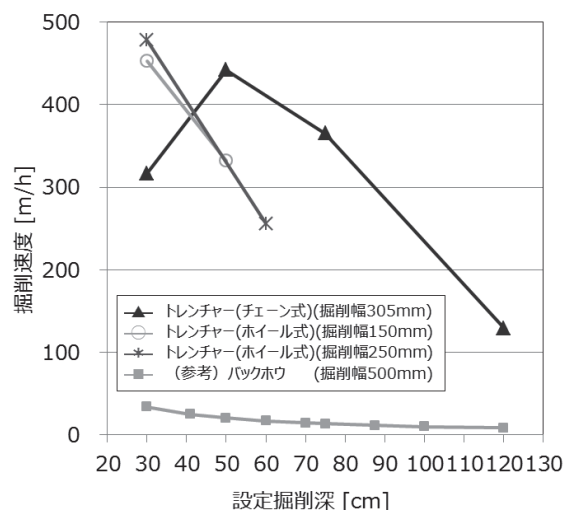
設定掘削深と掘削速度の関係を、図-3に示す。掘削速度は、掘削深が深くなるに従い低下する傾向であること、また従来のバックホウによる施工よりも大幅に速いことを確認した。

チェーン式では設定掘削深30cmよりも50cmの方が速い結果となったが、これは試験開始直後に設定掘削深30cmの測定を行ったため、オペレーターがトレンチャーの操作に慣れていなかったことが影響したと考えられる。

また、ホイール式は幅の違うトレンチングアタッチメント2種類で掘削を行ったが、幅の違いによる掘削速度の大きな違いは見られなかった。

② 掘削溝の深さ

掘削溝の深さにはバラツキが見られ、大きいところでは、設定掘削深と比較し最大で15cmほどの差が生じた。本試験は未舗装部で実施したため、



(※1) 掘削開始から設定掘削深へ到達するまでの速度は含まない。
(※2) バックホウの掘削速度は「平成30年度土木工事標準積算基準書」³⁾を元に試算。

図-3 設定掘削深と掘削速度の関係

地面の不陸箇所特に掘削深さのバラツキが大きくなった。また、掘削土や掘削溝側面から崩れた土砂が、溝内に落ち底に溜まってしまうこともバラツキの原因となっていた。

(2) 埋戻し

① 発生土による埋戻し

トレンチャー掘削後、発生土は掘削溝の両側に積み上げられた状態であり、埋め戻しはバックホウで発生土の山を崩す方法で行った。表層の埋め戻しにおいては、草や石など発生土以外のものが混入しないように注意を要したため、下層1層当たりの埋戻し速度の平均値が18m³/hだったのに対し、表層の平均値は7m³/hと約40%の施工速度であった。

② 流動化処理土による埋戻し

流動化処理土の施工速度は、掘削溝の深さ30cmの条件が77m/h、50cmの条件が105m/hとなり、深い条件の方が速い結果となった。30cmの後に50cmの条件で作業を行ったため、慣れの影響も考えられるが、掘削溝からの跳ねを抑えるため30cmの条件では打設速度を抑えたことが大きく影響した。流動化処理土を流し込む量や方向など現場条件に合った作業方法を検討することで、より施工速度の向上を図ることができると考えられる。しかし、流動化処理土は、作成から打設までの時間に制約があること、打設中にも流動化処理土の性状が変化すること等に留意が必要である。

(3) 締固め

① 締固め度

締固め度の結果を表-6に示す。いずれの施工方法も、最大乾燥密度の90%以上となり、規格値を満たす結果となった。機械毎の締固め度を比較すると、タンパ(3機種)の平均値101.0%が最も締固め度が高く、次にコンパクトA、コンパクトBの順

となった。

② 締固め速度

設定掘削深と締固め速度の関係を、図-4に示す。締固め速度を比較すると、表層を除き、コンパクタAが最も速く、タンパ、コンパクタBの順となった。

コンパクタAは、バックホウのアームの先端に取り付けられたコンパクタ本体が掘削溝に合わせて自然に動く構造であり、地表面では方向が固定されず締固めが困難であったため、表層の締固め速度が低下した。また、掘削溝が深い場合、掘削溝沿いに積み上げられる発生土の土量が多いため、掘削溝を跨いで機械が進入することができず、アームが届く位置までしか施工することができなかった。しかし、座って運転操作ができることから、これらの課題に対応できれば長距離の施工に適していると考えられる。

タンパによる施工は、掘削深さ120cmの条件では、掘削溝沿いの発生土が多くなり足場が悪かったことや、長いトレンチシューが必要となりタンパのバランスが悪くなったことから、作業補助者を1名追加した。そのため、設定掘削深が75cmよりも120cmの条件の方が速い結果となった。また、掘削溝が深い条件では作業者の疲労が大きく、長距離の施工は困難と考えられる。

コンパクタBは、他機種に比べ施工速度は遅かったが、掘削溝を目視しながらリモコンで操作が可能であり、人員の負担も少ないため、作業形態としては長距離の施工に適していると考えられる。

表-6 現場密度測定結果（砂置換法）

試験条件	⑫	⑬	⑥	⑤	⑭
締固め機械	タンパA	タンパB	タンパC	コンパクタA	コンパクタB
締固め度	104.4%	93.9%	104.6%	99.8%	92.5%

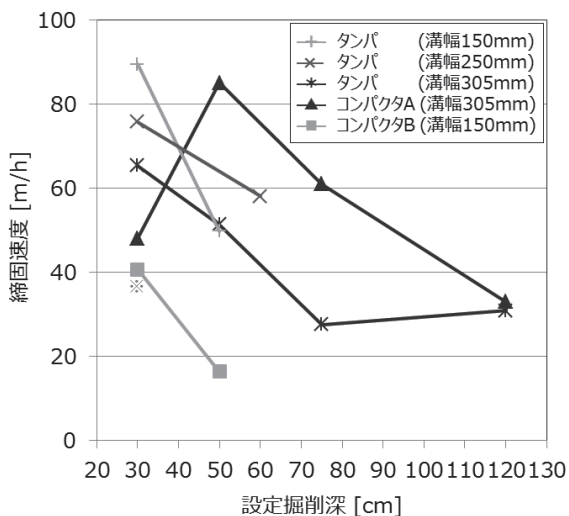


図-4 設定掘削深と締固め速度の関係

3.2 今後の課題

今回の試験から得られた、トレンチャー施工を行う上での課題を以下に示す。

(1) 掘削以外の施工速度の向上

トレンチャーの掘削速度に対し、埋戻し・締固め速度は4分の1以下であった。トレンチャーの施工速度をいかにするためには、埋戻し・締固め速度の向上が必要である。

(2) 発生土の積み込み作業の効率化

トレンチャー掘削後、掘削溝の両側に掘削土が積み上げられた状態であり、特に掘削深が大きく発生土が多い場合に埋戻しや締固め作業の支障になっていた。そのため、発生土の効率的な積み込み方法の検討を行うことは、全体の施工速度の向上に寄与するものと考ええる。また、掘削と同時に土砂運搬車両へ発生土の積み込みが可能な機構を有するトレンチャーも存在することから、このような機械の導入も期待される。

4. まとめ

低コスト・高効率の電線類地中化技術を検討する基礎資料とするため、トレンチャーを用いた掘削から埋戻し・締固めまで一連の作業を想定した施工試験を実施した。試験結果から、トレンチャー掘削による幅の狭い掘削溝も締固め可能であることを確認した。また、トレンチャーによる掘削速度をいかにするためには、締固め等の施工速度の向上が必要であることを確認した。

今後は、今回の試験結果をもとに、埋戻し・締固め速度の向上や発生土運搬作業の効率化に向けた検討、及びトレンチャーを用いた場合の施工費の試算を行うなど、トレンチャーを活用した効率的な電線類埋設技術について、検討を進めていく。

参考文献

- 国土交通省ウェブページ：無電柱化の整備状況、http://www.mlit.go.jp/road/road/traffic/chicyuka/chi_13_01.html（2018年8月31日確認）
- 岩田圭佑・松田泰明・高橋哲生：観光振興に向けた農村自然域の無電柱化による景観向上効果の考察，第57回土木計画学研究発表会・講演集，01-12，2018.6
- 小林勇一・田所登：海外の無電柱化で使用されている建設機械=ケーブル埋設用掘削機械の実態調査と掘削試験=，建設機械，第53巻第8号（通巻630号），pp.53～60，2017.8
- 独立行政法人土木研究所・株式会社流動化処理工法総合監理：流動化処理土利用技術マニュアル《平成19年/第2版》，2007
- 国土交通省：平成30年度土木工事標準積算基準書（共通編），I-12-①-1，2018
- 北海道開発局：平成30年度版建設機械等損料算定表北海道補正版，p.57，2018

3. 遠隔操縦式バックホウの視認性向上について

国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 ○ 宮野 博匡
 国土交通省 関東地方整備局 施工企画課 長山 真一

1. はじめに

河道閉塞・法面崩壊、火山噴火による火砕流・土石流等の災害現場においては、遠隔操縦式バックホウを活用し災害復旧を行うことが想定されており、復旧作業の初期段階では、現場への進入路の確保や、支障物の撤去作業を迅速かつ効率的に行う必要がある。

本報告は災害復旧作業の効率化を目的に、平成29年度に実施した映像技術による視認性向上に関する、調査及び検証の結果について紹介する。

2. 映像技術の選定

近年実用化されている映像技術を中心に技術調査を行い、施工時に必要となる「前方映像」と、走行時や周辺確認に必要となるやや上部からの「俯瞰映像」について、安全性の向上（画角、画質）を重点に、使用実績が高い技術を抽出した。

そのなかから①「車両搭載型制御カメラ（前方映像）」、②「俯瞰映像提示システム（俯瞰映像）」、③「従来型車載カメラ（前方映像）」3技術を検証対象選定した。

なお、無人化施工現場において使用されていることの多い③「従来型車載カメラ」は比較対象技術として選定した。

表-1-1 選定技術①②

①車両搭載型制御カメラ(前方映像技術)	表示画面・特徴
	 画質:ハイビジョン(1920*1080) 機能:360°の旋回が可能 実績:無人化施工での実績多数
②俯瞰映像提示システム(俯瞰映像技術)	表示画面・特徴
	 画質:ハイビジョン相当(92万画素) 機能:複数カメラの映像を合成した俯瞰映像 実績:無人化施工での実績あり

表-1-2 選定技術③

③従来型車載カメラ(前方映像技術)	表示画面・特徴
	 画質:スタンダード画質(640*480) 機能:カメラ2台2画面の映像 実績:無人化施工での実績多数

3. 実用性の検証

3.1 検証の概要

実用性検証は、遠隔操縦式バックホウへカメラを設置し、無人化施工現場にて実際に無線操縦式バックホウの操作実績を有する熟練オペレータ1人により試験ヤードにおいて以下の検証を実施した。

(1) 検証技術

検証を行う技術は、前項2. で選定した3技術に加え、「車両搭載型制御カメラ」（以下HD車載カメラという）2台を使った「鳥瞰映像」を組み合わせた2技術の計5技術で行った。

①「従来型車載カメラ」

キャビン上部カメラ2台による前方映像

②「HD車載カメラ」

キャビン上部のカメラ1台による前方映像

③「俯瞰映像システム」

複数カメラによる合成俯瞰映像

④「HD車載カメラ+鳥瞰映像」

②に加え、キャビン後方上部のHD車載カメラ2台による鳥瞰映像

⑤「HD車載カメラ+俯瞰映像システム」

③と④を組合せた映像システム

(2) 模擬作業による検証

遠隔操縦式バックホウが活用される作業は、災害発生後、復旧作業を開始するまでの初動作業である。具体的には、①工事用道路の築造、②排水ポンプ設置のための造成、③道路啓開（掘削、排土）、④堆積土砂の撤去準備であり、それ

に相当する動作を、図-1 の試験ヤードにて現場を直接目視せずバックホウに搭載したカメラ映像のみで行った。

併せて、鳥瞰画像に使用する HD 車載カメラの設置位置については、使用実績が無いため取付位置を変更しながら、最適な設置位置を検証した。

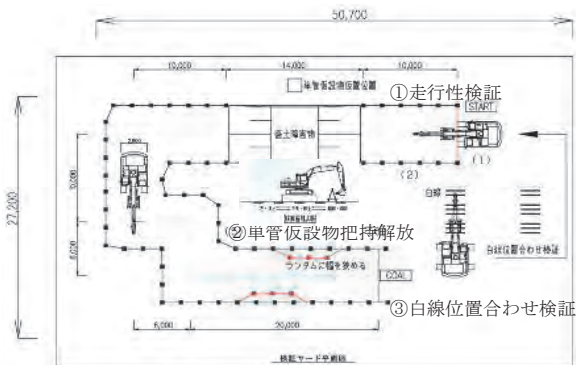


図-1 試験ヤード

① 走行性検証

初動作業時の走行路は直線とは限らず、また、平坦性も確保されているとは限られないことから、走行路の途中で盛土障害物を設置し、また、クランク部を複数設置し、走行性を走行時間により評価した。

② 単管仮設物把持開放検証

検証ヤードは土砂の掘削ができないため、単管で製作した仮設物を把持し、回転後、開放することにより、掘削の模擬動作として、初動作業時の単純掘削や障害物の除去を想定し、把持解放時間、指定位置と仮設物解放時の離隔により評価した。

③ 白線位置合わせ検証

車載カメラは奥行き感がつかみづらいことが多く、従来の無人化施工では奥行き感を補完するため別途、外部カメラを設置している。

しかし、遠隔操縦式バックホウを使用する初動作業では、外部カメラがない状態での作業のため、バケットの刃先を3本の白線に合わせる動作により検証し、奥行き感が補完できるか否かを白線と刃先の離隔で評価した。

なお奥行き感は、使用するカメラにより、焦点等も含め、異なる可能性があるため、遠距離、中距離、近距離の3ケースの検証を行った。

(3) 視認性の検証

視認性の検証は試験ヤードでの検証を行いつつ実施した。

「HD 車載カメラ」のみでの検証は、画角が狭く前方と左右の履帯が同時に見えないことが判明し、安全性が確保できないと判断し、前述の①～③の検証を中止した。



写真-1 履帯が確認出来ない状況

HD 車載カメラでの鳥瞰画像については、バックホウ後方に設けた仮説取付架台の左右にカメラを設置し、高さ、前後、左右幅方向に位置変更を行い、模擬動作での作業性及び視認性を検証した。



写真-2 仮説取付架台

① 高さ方向

高さは、キャビン後方上部から 2.3m、2m、1.5m の3ケースについて、それぞれ検証し、高い位置から徐々に下げながら確認を行った。

高さについては、カメラ位置が低いとキャビンの影響で前方の視認性が落ちるため、最も高い 2.3m が作業性、視認性が良い結果となった。

② 前後方向

高さ同様に最前方、中間、最後方の3ケースについて、最後方から前方へそれぞれ検証を行い、中間、最後方ではキャビンの影響で視認性が落ちるため、最前方が作業性、視認性が良い結果となった。

③ 左右幅方向

幅方向については、幅を狭くすると前方の視認性が悪くなることは明らかであるため、幅狭方向は、左右-0.5m の1ケースのみとし、左側のみ+1m 張り出したケースを検証することとした。幅狭方向は、やはり視認性が落ちる結果であった。

左+1m 張出しについては、作業性、視認性が良いとのオペレータの意見であった。理由は、前方視認性に関し、カメラを張り出すことでキャビンの影響をまったく受けないという点、履帯と上部旋回体が同時に視認できる点、併せて左方向の離隔が確認できる点が挙げられる。

なお、右側についても左同様張り出しし、検証を行ったが、障害となるキャビンが右側には無いため、張り出しの効果は見られなかった。

④ 右取付位置調整他

オペレータの意見を参考に右側カメラ位置を仮説架台下部へ変更した。

架台上 2.3m にカメラを設置した場合、地面とバケットの離隔距離は、斜め方向からの映像になるため、視認性に誤差が生じ、低い位置から写すことで誤差を少なくできると考えられる。

オペレータからも、地面から 10cm 程度の範囲は分からなかったが、分かりやすくなったとの感想を得た。

さらに左側カメラ前後方向についても前方視認性に関し、キャビンの影響をまったく受けないという点、履帯と上部旋回体が同時に視認でき、かつ履帯の 2/3 が視認できる点、併せて左方向の離隔が確認できる点を考慮し、最前方から中間位置へ変更し、最終位置を決定した。

俯瞰映像については、合成表示を行うため、メーカー技術者により、適切な位置へカメラを設置している。

表-2 鳥瞰カメラ設置状況

左側鳥瞰カメラ設置位置	右側鳥瞰カメラ設置位置
	
高さ: 後方上部 2.3m 前後: 中間位置 左位置: 車幅+1m	高さ: 架台下部 前後: 最前方 右位置: 車体端部
表示状況	
	

表-3 俯瞰カメラ設置状況

左右俯瞰カメラ設置位置	前後カメラ設置位置
	
表示状況(俯瞰映像システム+HD車載カメラ)	
	

3.3 検証結果

実用性検証状況および検証結果を、以下に示す。
なお、③HD 車載カメラ+鳥瞰映像システムの検証は、最終カメラ位置決定後の検証とし 3 回実施した、その他各技術の検証回数は以下のとおり。

- ① 従来型カメラ 3 回
- ② HD 車載カメラのみ 検証未実施
- ③ HD 車載カメラ+鳥瞰映像 3 回
- ④ HD 車載カメラ+俯瞰映像システム 5 回
- ⑤ 俯瞰映像システム 5 回

表-4 検証状況

試験ヤード全景	操作状況
	
把持解放状況	把持解放操作状況
	
白線合わせ状況	白線合わせ操作状況
	

表-5-1 実用性検証結果 1 / 2

検証システム	実用性検証項目		
	全体平均タイム	平均走行時間	平均把持開放時間
① 従来型カメラ	5分31秒	3分33秒	1分59秒
② HD車載カメラ	-	-	-
③ HD車載カメラ+鳥瞰映像システム	4分14秒	2分44秒	1分30秒
④ HD車載カメラ+俯瞰映像システム	4分40秒	2分55秒	1分45秒
⑤ 俯瞰映像システム	5分32秒	3分38秒	1分54秒

表-5-2 実用性検証結果 2 / 2

検証システム	仮説物把持解放結果		白線位置検証結果	
	最長離隔距離	標準偏差	最長離隔距離	標準偏差
① 従来型カメラ	0.79m	19.06~239.07	0.82m	24.83~6.92
② HD車載カメラ	-	-	-	-
③ HD車載カメラ+鳥瞰映像システム	0.41m	6.25~47.25	0.05m	8.16~20.55
④ HD車載カメラ+俯瞰映像システム	0.44m	19.75~130.75	0.06m	8.16~20.55
⑤ 俯瞰映像システム	0.44m	17.46~103.97	0.40m	24.82~5.62

3.4 検証の分析

(1) 走行性検証結果

走行時間については、③HD 車載+鳥瞰、④HD

車載＋俯瞰、①従来型カメラ、⑤俯瞰映像の順番となった。③HD 車載＋鳥瞰については、前方視認性、左右の履帯や視認性が最も優れているため、安心して走行ができていないのかと考えられる。

④HD 車載＋俯瞰については、前方視認性が優れていることと、左右の離隔が識別できるため、安心感があつたと考えられる。⑤俯瞰映像のみについては、俯瞰カメラの合成により、車載カメラ的画像是映し出せるものの、従来技術以外の2種類と比べると安心感という点で劣る部分があつたのではないかと考えられる。

(2) 仮設物把持解放結果

③HD 車載＋鳥瞰が、すべてにおいて良い結果であった。

③HD 車載＋鳥瞰については、標準偏差が、6.25～47.25であり、すべての方向で安定していると考えられる。奥行き感と高低差の補完が鳥瞰カメラでできているため、数回にわたる検証でも方向に対してばらつきがでなかったのではないかと考えられる。

次にばらつきが少なかったのは、⑤俯瞰映像である。俯瞰映像は、画面合成で奥行き方向の距離補正が完全ではなかったが、左右方向は、ほぼ補正ができていることと、比較的、距離補正がしっかりしている遠距離で視準し、それに合わせて設置したため、安定したのではないかと考えられる。また、常に安定した画面合成ができていると考えられる。

④HD 車載＋俯瞰については、オペレータがHD 車載と俯瞰映像の距離感等の違いによって、ばらつきがでたものと考えられる。従来技術については、奥行き方向にばらつきがひどく、奥行き方向が判別できていないと考えられる。

(3) 白線位置合わせ結果

③HD 車載カメラ＋鳥瞰と④HD 車載カメラ＋俯瞰映像システムの2つが良い結果であった。

この2つのシステムについては、HD 車載カメラを使用しており、その鮮明な画像とズーム機能により、良い結果となったと考えられる。

⑤俯瞰映像については、前述したが、仮設物把持開放検証と同様、奥行きは、遠距離方向で画像合成の誤差が少ない結果となった。

①従来技術については、遠距離で誤差が少ない結果もあれば、全体的に誤差がでている結果もあり、奥行き方向が判別できていないと考えられる。

4. まとめ

4.1 検証結果

遠隔操縦式バックホウの視認性向上に必要な映像技術について、調査及び検討の結果、すべ

ての検証において③HD 車載カメラ＋鳥瞰映像システムが最も良い結果となった。

HD 車載カメラは従来型カメラと比較すると鮮明な映像のため、障害物や地面とのバケットの距離が確認しやすく、左鳥瞰カメラは奥行き感の補完、右鳥瞰カメラは左に比べ低い位置にカメラを設置したことで高低差の補完、かつ、左右の鳥瞰カメラを比較することで、奥行きがとらえやすいと考えられる。

表-6 カメラ映像の比較

	鳥瞰左
従来型カメラ①の映像	
従来型カメラ②の映像	HD車載カメラ
	鳥瞰右

4.2 今後の計画

本検討により、検討が必要となる以下の課題について、H30年度に引き続き検討を行い、遠隔操縦式バックホウの視認性向上を目指す。

(1) 複数人のオペレータによる映像技術の検証

今年度は、映像の効果やカメラ設置位置を決定するため、一人の熟練オペレータで検証を実施した、実現場においては、熟練オペレータが必ず従事するとは限らないため、非熟練者と熟練者の検証を行い、非熟練者に対しても各映像システムの効果があるのか検証を行う。

(2) HD 車載カメラの再検証

検証を行ったHD 車載カメラは、画角が狭く、安全性確保の観点で走行性検証を中止したが、画角の広いHD 車載カメラの調達が可能となったため再度検証を行う。

(3) カメラ取付架台の設計

本検証では、取付位置の検証が必要であったため、仮設の取付架台としているが、検証結果を反映した、取付架台の設計を実施する。

4. 無人化施工の作業性に関する AI 適用研究

株式会社熊谷組
株式会社まざらん
株式会社キック

○ 北原 成郎
西垣 重臣
才原 勝敏

1. はじめに

搭乗操作オペレータは、自らの視点で空間を認識し、建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができる。そのため、自らの経験と勘で、計器に頼らず、反射的に判断し、建設機械を操作することができる。搭乗操作のイメージを図-1 に示す。

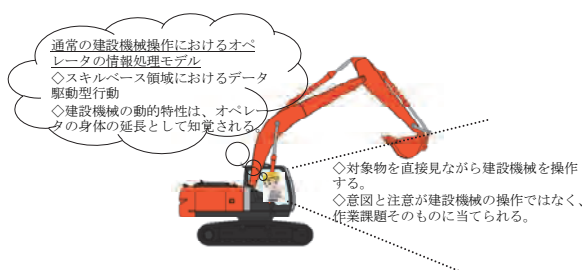


図-1 搭乗操作のイメージ

一方、遠隔操作オペレータは建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができない。遠隔操作のイメージを図-2 に示す。

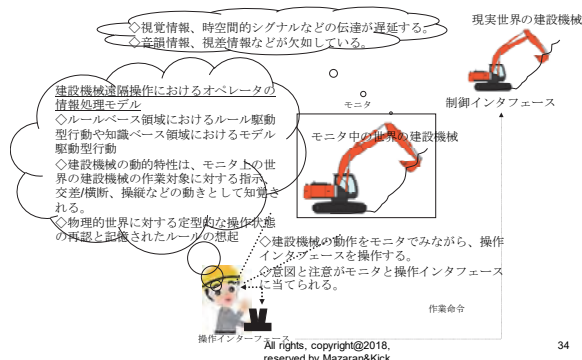


図-2 遠隔操作のイメージ

遠隔操オペレータは、遠隔操作作用モニタを通じて、固定カメラ映像や車載カメラ映像から新たな空間を認識して建設機械の遠隔操作を行う。ここでは、操作・映像の各遅延を伴いながら、建設機械の振る舞いに基づいて、その状況がどのように変化するかを投影または予測して、遠隔操作することを強いられる。オペレータの心的負荷は大き

い。具体的には、つぎに示す負荷が想定される。

- (1) 時間遅延に伴う連続的または間欠的な作業負荷
- (2) 空間を認知するための空間的視点取得、心的回転、直動などに関わる心的負荷
- (3) 建設機械の振る舞いとその外界を検知するための
 - 1) 物理的なヒントの欠如
 - 2) 視野限界
- (4) 満足度（操作性、生産性、安全性）評価の欠如

従って、オペレータには、追跡/追従過誤、過剰/過小操作、断続的操作などが発生しやすい。現場管理者は、施工現場に立ち入れないため、遠隔操作作用モニタをみて、またはオペレータからの口頭報告や作業日報により無人化施工状況を推測することになる。

遠隔操作オペレータと現場管理者にかかる負荷を軽減するための判断支援情報として、施工プロファイルのインフォグラフィックスを提供する。施工プロファイルとは、施工に伴って発生する事象の特徴、その特徴のパターンを示す指標などに関するデータ項目の集合である¹⁾。インフォグラフィックスとは、データ、情報、グラフィックなどの視覚的な混合表現である。施工プロファイルのインフォグラフィックスは図-3 に示す軸ごとに生成し、オペレータに提供する。

施工プロファイルのインフォグラフィックスを動的に提供することで、働き手の状況認識を促し、作業性（安全性、生産性）の向上を狙う。ここで動的とは情報の経時変化をいう。状況認識とは、自らの周囲に何が起きているかを知る能力をいう²⁾。施工プロファイルのインフォグラフィックス提供機能を、強化学習(reinforcement learning)手法の一つである Actor-Critic の枠組みに基づき構築する。強化学習とは Agent (制御器) が Environment (環境) から得る Reward (報酬) が大きくなるよう行動を学習していく枠組みである。施工プロファイルを提供することで、説明可能な AI、いわゆる XAI (Explainable Artificial Intelligence)³⁾を目指す。

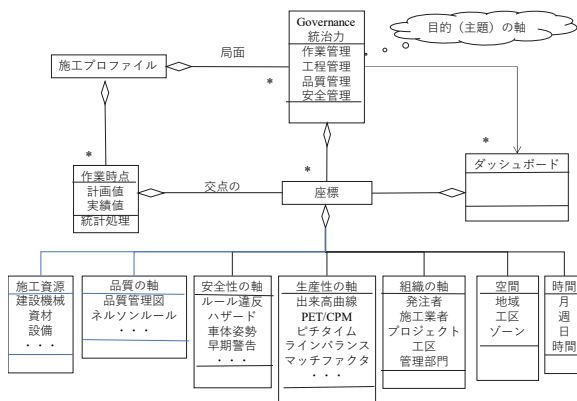


図-3 施工プロファイルのインフォグラフィックスの提供軸

本論文は、安全性と生産性の軸に注目して、遠隔操作オペレータの心的負荷を軽減する判断支援情報出力機能について報告する。判断支援情報は、遠隔操作性向の定量的評価と無人化施工領域に潜在するハザードの同定、並びに、これらの時空間変化の検知などで構成される。つぎに、不整地運搬車の搭乗操作と遠隔操作の比較分析について報告する。ここでは、作業性を操作性評価指標と安全性評価指標、そして生産性評価指標を活用し、その適用性を評価する。最後に、現在研究中の Actor-Critic の枠組みと判断支援情報出力機能の概要について述べる。

2. 判断支援情報を生成する定量的評価指標

作業性を操作性評価指標と安全性評価指標、そして生産性評価指標を活用し評価する。

2.1 操作性評価指標

操作性評価指標を以下に列挙する。

(1) 加減速性向

加速度分布の形状（歪度，尖り度，単峰性，二峰性など）に基づいて加減速性向を判断する。

(2) エネルギー性評価指標

1) 力積 (impulse)

計測した加速度に基づいて算出した力積の和（速度応答の和）をエネルギー評価尺度とする。速度応答はエネルギーの大きさを示す尺度である。計測された加速度応答に基づいて力積の和は、つぎの式により求められる。

$$I = \sum_{i=1}^{\tau} \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2} \quad (1)$$

2) 加速度の外れ値数: 中央値絶対偏差に基づいて外れ値数を計算する。

加速度の外れ値の数を数え上げる。外れ値のイメージを図-4に示す。

中央値は、データの中心性を計る尺度であり、平均値よりは外れ値の影響を受けない。中央値を中心としたバラツキを考慮したい。そこ

で、中央値絶対偏差(median absolute deviation)を活用する。中央値絶対偏差は、観測データの各値からその中央値を引いた値の絶対値の中央値として(2)式と(3)式により計算される。

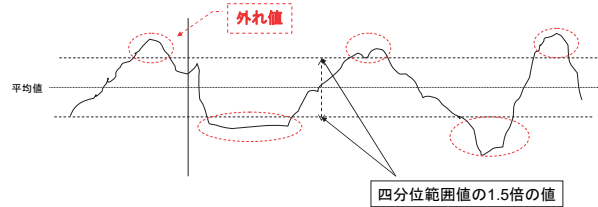


図-4 外れ値のイメージ

$$outlierMAD = K \times abs(x - median(x)) / MAD(x) \quad (2)$$

$$MAD(x) = median(abs(x_i - median(x))) \quad (3)$$

ここで、MAD: 中央値絶対偏差, $abs()$: 絶対値, $median()$ は中央値を計算する関数である。作業種別ごとの範囲値(上限値, 下限値)の計算と外れ値の検出に(3)式を用いる。

3) 躍度(jerk)指標

図-5に示すように、躍度は加速度の第一階差分である。躍度が小さいことは加速度の変化が小さいことを示し、その運動は滑らかである。



図-5 躍度(jerk)のイメージ

(3) 動的変位の評価尺度

主に建設機械の追従制御性の評価に用いる。

1) リアプノフ指数(Lyapunov exponent):

リアプノフ指数はごく接近した軌道が離れていく度合いを表す量である。

2) 転向角 (turn angle) のバラツキ

転向角は建設機械の操舵角を示す。直線追従制御のターゲットである基準線は直線である。そのため、転向角のバラツキは建設機械の直進性を表現する。

3) 走行軌跡の乱れ (直進性からの乖離度合い)

正矢(Versine)を計算する。正矢の定義式をつぎに示す。

$$versine = 1 - \cos \alpha \quad (4)$$

4) 旋回指標

操舵角とヨー角度の推移グラフを描画し、緩旋回、信地旋回、超信地旋回などを観察する。

- ・緩旋回：左右の履帯の速度に差をつけて、前進あるいは後退しながら弧を描いて進路を変えること。
- ・信地旋回（ピボットターン）：片側の履帯を停止して反対側の履帯だけを回転させ、停止側の履帯を軸（pivot）として旋回するもの。
- ・超信地旋回（スピントーン）：左右の履帯を互いに逆方向に等速回転させることにより、車体の中心を軸としてその場で旋回することをいう。

これらの不用意な旋回は、地表面を痛め、施工品質に悪影響を与えると思われる。

(4) 困難性指標

困難性を、ユーザ・インタフェースのデバイス（カーソル、マウス、ジョイスティックなど）の操作性評価に用いられている Fitts' Law や Steering law などを参考にして⁴⁾、目標物の大きさや目標物までの移動距離に基づいて困難性を示す(図-6)。つぎに示す評価尺度により表現する。

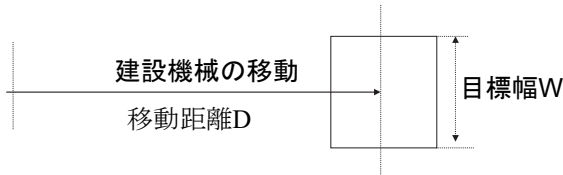


図-6 困難性を表す模式図

$$MT = a + bID$$

$$ID = \log_2\left(\frac{D}{W} + 1\right) \quad (5)$$

ここで、MT:目標までの移動時間、D: 開始点から、対象の中心までの距離、W: 動きの方向に測った対象物の幅、a, b: 定数である。a: 建設機械の開始・停止時間、b: 建設機械の速度などである。ID は困難性指標である。

(5) 意図形成の安定度

- 1) 学習能力: オペレータは、試行回数が増えるにつれて、作業環境に慣れる。そこで、作業所要時間と試行回数の関係を見る。
- 2) 作業環境の変化への素早い対応: 作業所要時間と困難性指標の関係を見る。
- 3) 作業所要時間と熟練と未熟練: 特定の課題の試行回数に対する反応時間の対数を見る。

2.2 安全性評価指標

安全性評価指標を以下に列挙する。

(1) 衝撃と自由落下

三軸加速度の計測値に基づいて、次式により時刻tにおける三軸合成値 force を計算する。三軸合成値は次式で得られる。

$$force = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2} \quad (6)$$

ここで、force: 三軸合成値、 α_x : 左右方向加速度、 α_y : 前後方向加速度、 α_z : 上下方向加速度である。

スマートフォンの自由落下に関して色々な研究がある⁵⁾。これらの研究を参考にして、自由落下と衝撃を検知するための判断ルールをつぎのように設定している。

三軸合成値=<0.7g のとき自由落下の途中

三軸合成値>=1.2g のとき衝撃

三軸合成値>=1.4g のときやや強い衝撃

三軸合成値>=2g のとき強い衝撃

(2) 転倒危険

前後方向加速度と左右方向加速度に相補フィルタを適用して車体姿勢（ピッチングとローリング）を計算する(図-7)。車体姿勢の時系列が連(run)を形成するとき、転倒危険が発生したとする。

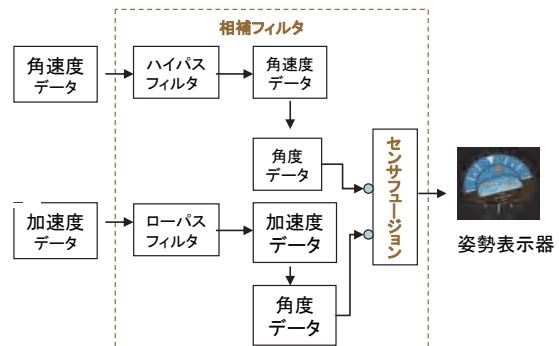


図-7 相補フィルタを適用した車体姿勢の計算

(3) 操舵危険指標

操舵危険指標(=走行速度/曲率半径)を計算する。

2.3 生産性評価指標

生産性評価指標を以下に列挙する。

(1) 進捗率

施工日の施工実績数量を施工目標数量で除した比率である。進捗率を進捗率ゲージで示す。

(2) 掘削土量と荷下ろし土量

経度と緯度の平面に対して、それぞれの土量を高さで表現した三次元ヒストグラムを示す。

(3) 積込場と荷下ろし場の作業状況

積込場と荷下ろし場の作業状況を示すために、それぞれの作業場におけるダンプトラックの到着

発進状況を発着累積グラフで示す。

(4) 実稼働時間と実稼働率

三軸加速度の分散の変化点を捉え、待機状態、アイドリング状態、稼働状態を識別するとともにそれぞれの時間と全時間を自動計算する。そして、実稼働時間と実稼働率を計算する。これらの情報を作業時間表と作業時間バーチャートで示す。さらに、積込と荷下ろしの所要時間とサイクルタイムの経時変化を折れ線グラフで示す。

(5) ピッチタイム（サイクルタイム）

ピッチタイムは実稼働時間を施工実績数量で除した比率である。言い換えれば、1仕事量に対するサイクルタイムを表す。各工程のピッチタイムをピッチダイヤグラムで示し、ラインバランス・ロス率を計算する。ピッチダイヤグラムとは各建設機械の稼働時間のバランス状態を図示したものである。ラインバランス・ロス率は(7)式で求められる。ここでピッチタイムはサイクルタイムを指す。

$$\text{ラインバランス・ロス率} = (\text{工程数} \times \text{ボトルネック工程のピッチタイム} - \text{各工程のピッチタイムの合計時間}) / (\text{工程数} \times \text{ボトルネック工程のピッチタイム}) \quad (7)$$

3. ケーススタディ

前述した判断支援情報を生成する定量的評価指標の適用性を評価するために、不整地運搬車の模擬動作を想定した搭乗操作と遠隔操作の比較実験を実施した。その概要を以下に示す。

- (1) 実施期間：2018年3月22日～2018年4月15日
- (2) 実施場所：(株)熊谷組技術研究所内走行試験ヤード
- (3) 実験に使用した不整地運搬車
この不整地運搬車の写真を写真-1に示す。



写真-1 実験に使用した不整地運搬車

(4) センサ

スマートフォン内蔵の三軸加速度計、三軸角速度計、GPS受信器を活用する。不整地運搬車キャビン内のスマートフォン車載状況を写真-2に示す。

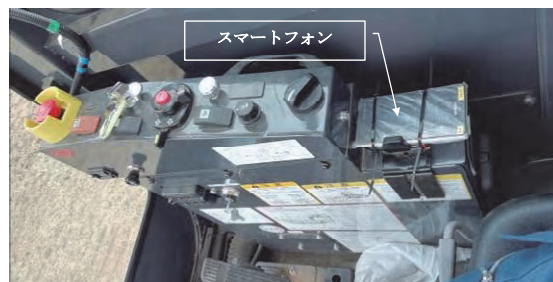


写真-2 スマートフォン車載状況

(5) 不整地運搬車の模擬動作

操作性能はつぎの3つに分けられる。

- ① 旋回性能：少ない範囲で針路を変える性能
- ② 停止性能：速やかに停止する性能
- ③ 保針・変針性能：針路を安定に保つ性能

これらの操作性能に注目し、つぎに示す模擬動作項目を実施した。

- ① 直進と停止
- ② 走行旋回：右回り、左回り
- ③ スピンターン：右回り、左回り
- ④ zig-zag 走行
- ⑤ ダンピング操作：直進→Uターン→後進→荷下ろし→直進

(6) 搭乗操作と遠隔操作の比較分析

搭乗操作と遠隔操作による不整地運搬車の模擬動作に伴い励起される三軸加速度応答値と三軸角速度応答値、そしてGPS受信器より自己位置を示す緯度、経度などを計測した。そして、これらの計測データに、前述した判断支援情報生成の数理モデルを適用することでインフォグラフィックスを作成し、データ解析を行った。

3.1 遠隔リアルタイムモニタリング・ダッシュボード

関係者は遠隔リアルタイムモニタリング・ダッシュボードにアクセスすることで、これらのインフォグラフィックスを閲覧することができる。遠隔リアルタイムモニタリング・ダッシュボードの画面例を図-8と図-9に示す。



図-8 メイン画面

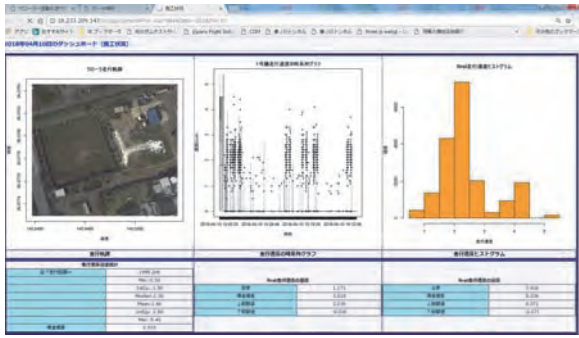


図-9 インフォグラフィックス表示画面

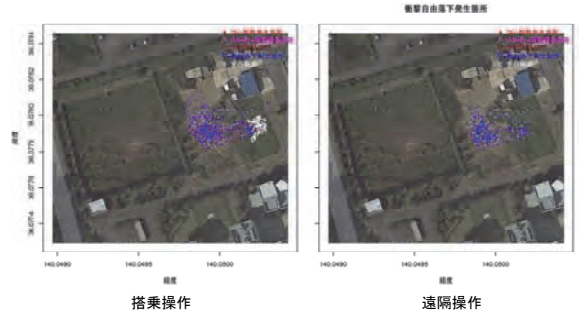


図-13 衝撃と自由落下

3.2 インフォグラフィックスの例

作成したインフォグラフィックスの一部を以下に示す

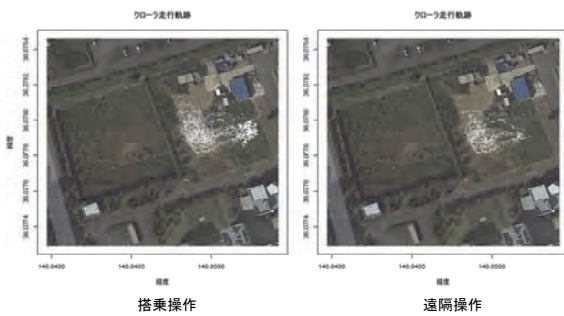


図-10 不整地運搬車の走行軌跡

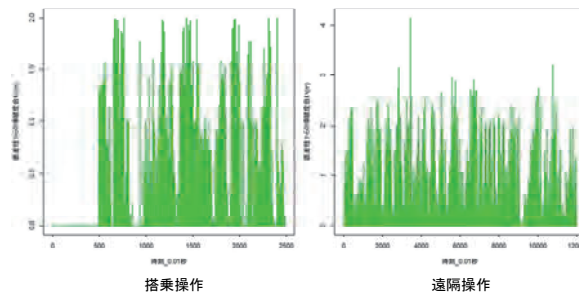


図-14 走行軌跡の乱れ（直進性からの乖離度合い）

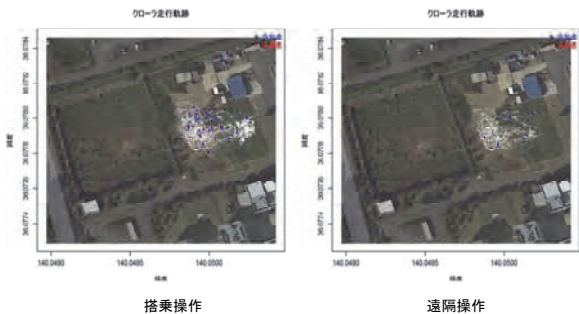


図-11 不整地運搬車の急加減速発生箇所

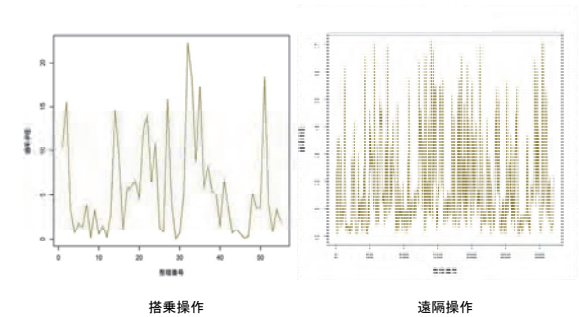


図-15 曲率半径

3.2 比較分析結果のまとめ

データ解析結果のうち、重要な特性値を表-1 に示す。

表-1 重要な特性値

	模擬動作	
	搭乗操作	遠隔操作
走行速度平均値 (km/hr)	4.62	2.77
走行速度躍度標準偏差	0.00125	0.000267
3軸合成値標準偏差	0.246	0.205
曲率半径平均値 (m)	5.63	1.89
直進性からの乖離度合い (m)	0.076902	0.097828

表-1 よりつぎのことがいえる。

(1) 平均走行速度は搭乗操作が遠隔操作よりも早い。搭乗操作の平均走行速度は、歩行平均速度にほぼ等しい。

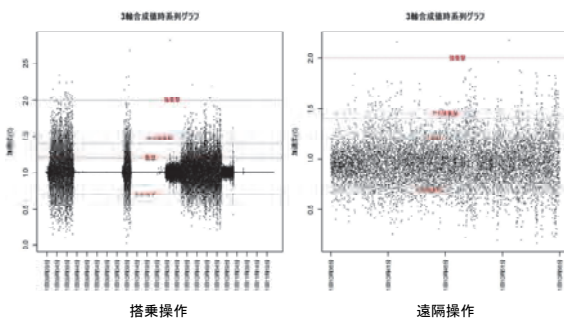


図-12 三軸合成値の時系列グラフ

(2) 走行速度の躍度標準偏差については、搭乗操作が遠隔操作より大きい。言い換えれば、搭乗操作は、遠隔操作よりも急加減速が発生しやすい。

(3) 搭乗操作の3軸合成値標準偏差が遠隔操作よりも大きい。言い換えれば、搭乗操作は、遠隔操作や自動走行よりも自由落下、衝撃などの事象が生じやすい。

(4) 曲率半径は搭乗操作が遠隔操作よりも大きい。言い換えれば、搭乗操作による走行が描く曲線は緩やかであり、遠隔操作による走行が描く曲線は非常に急である。

(5) 搭乗操作、遠隔操作のいずれも直進性は非常に良い。

これらの分析結果は、前述した搭乗操作と遠隔操作の特質をよく表している。無人化施工の作業性評価に活用できると思われる。

4. Actor-Critic の枠組みと判断支援情報出力機能

前述したように、施工プロファイルのインフォグラフィックス提供機能を、強化学習(reinforcement learning)手法の一つである Actor-Critic の枠組みに基づき構築する研究を行っている。強化学習とは Agent(制御器)が Environment(環境)から得る Reward(報酬)が大きくなるように行動を学習していく枠組みである。

Actor-Critic アルゴリズムは、Critic において状態の評価値を Temporal Difference (TD)法で学習しながら政策を改善するアルゴリズムである。Actor-Critic 法は、TD 学習の一種のアルゴリズムである。Actor-Critic 法では、エージェント内部に価値評価部分(critic)と行動選択部分(actor)が独立して存在する。critic は状態価値関数を評価し、その出力(TD 誤差)に基づいて actor は方策を学習する。

Actor-Critic 法は、状態や行動を評価する Critic 部分と、確率的政策を保持する Actor 部分より構成され、Critic の評価値に基づいて Actor の政策を改善していく。

Actor-Critic 学習システムは、報酬の遅れを取り扱い可能な強化学習法の一つであり、以下の実用的利点を持つ。

- (1) 連続値を含む行動出力への拡張が容易
- (2) 確率的政策により、隠れ状態を含む環境やマルチエージェント、ゲームなどへの適用も可能
- (3) 従来の教師付学習を Actor へ適用することにより、エキスパートの知識との統合が容易

Actor は、複数の手の中から、最適な解を導出するというタイプの写像である。そのため、エキスパートの知識を導入しやすい。

Actor-Critic の枠組みに基づく予測判別と判断支援モデルの構成を図-16 に示す。

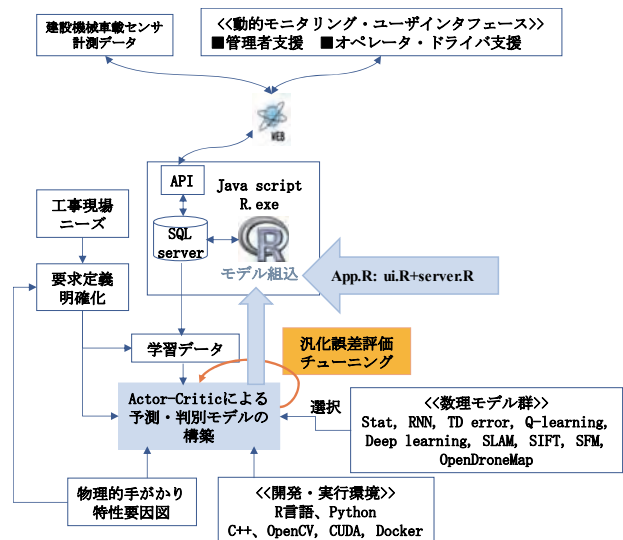


図-16 Actor-Criticの枠組みに基づく予測判別と判断支援モデルの構成

5. 今後の課題

判断支援情報を生成する定量的評価指標を無人化施工で活躍する建設機械に適用し、知見を積み重ねる。つぎに、求められる判断支援情報を整理する。そして問題に応じて Critic に組み込む定量的評価指標を整理するとともに、Actor に組み込むべき判断支援情報のフィードバック方法を構築する。これらが今後の課題である。

参考文献

- 1) S. Nishigaki, H. Sugiura, T. Takamura, H. Ogura and K. Hatori: "STUDY ON FRAMEWORK OF CONSTRUCTION PROFILE FOR COLLABORATIVE AND INTELLIGENT CONSTRUCTION," Journal of Applied Computing in Civil Engineering, Vol.14, 2005.
- 2) Team Coordination Training (TCT): "SITUATIONAL AWARENESS," The U.S. Coast Guard's Boating Safety Division, 2004.
- 3) David Gunning: Explainable Artificial Intelligence (XAI), DARPA/I2O. On line: [https://www.cc.gatech.edu/~alanwags/DLAI2016/\(Gunning\)%20IJCAI-16%20DLAI%20WS.pdf](https://www.cc.gatech.edu/~alanwags/DLAI2016/(Gunning)%20IJCAI-16%20DLAI%20WS.pdf)
- 4) Paul M. Fitts: The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement, the Journal of Experimental Psychology, 47, 381-391, 1954.
- 5) Kire Serafimov, Natasa Koceska: "PERVASIVE ALERT SYSTEM FOR FALL DETECTION BASED ON MOBILE PHONES," UGD Academic Repository, 2012.

- 6) 車体姿勢の推移グラフ
 - (2) 走行速度の基本情報（時系列グラフ，ヒストグラム，記述統計量，歪度，尖り度）
 - (3) 走行軌跡図
 - (4) 三軸加速度の時系列グラフ
 - (5) 三軸合成値_零交叉率_周波数時系列グラフ
 - (6) 走行抵抗
 - 1) 衝撃・自由落下事象の発生箇所
 - 2) 前後方向と左右方向の加速度の躍度の推移図
 - 3) サイドスリップ発生箇所
 - (7) 押土面積
 - (8) 転圧密度
 - (9) 載荷面変位の経時変化
 - (10) 地中応力の経時変化
- ### 2.3 押土面積と転圧密度

点密度を求めるために，カーネル密度推定を使う。

$x_1, x_2, \dots, x_N \sim f$ を確率変数の独立かつ同一な分布に従う標本としたとき，その確率密度関数のカーネル密度推定は次のようになる。

$$f_h(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

ここで， K はカーネル関数， h はバンド幅（平滑化パラメータ）である。 K としては，標準的なガウス関数（平均がゼロで分散が1）を採用することが多い。

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (2)$$

ここで，つぎの性質を満たすものとする。

$$\begin{aligned} \int K(x) dx &= 1, \\ \int xK(x) &= 0, \\ \int x^2K(x) &> 0 \end{aligned} \quad (3)$$

図-4 のイメージが示すように，カーネル密度関数は，ヒストグラムのように標本を一定幅の箱に入れて数えるのではなく，カーネル密度関数から決定されたコブを各標本に与えるものとみることができ，「コブの総和」によって推定が形成される。

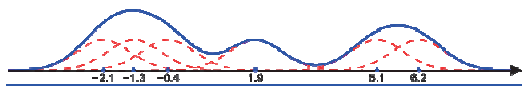


図-4 カーネル関数から決定されたコブを各標本に与えるイメージ

この関数を二次元に拡張したものが，二次元カーネル密度関数である。

カーネル密度関数を計算するときのバンド幅を計算する。計算法はつぎの式による。ここでのパラメータ値は rule of thumb に基づく，つぎのコードにより得る¹⁾。

```
function(x)
{
  r <- quantile(x, c(0.25, 0.75))
  h <- (r[2] - r[1])/1.34
  4 * 1.06 * min(sqrt(var(x)), h) * length(x)^(-1/5)
}
```

ここで， $\text{quantile}()$ ：四分位数を求める関数， $r[1]$ は第1四分位数， $r[2]$ は第3四分位数である

押土面積と転圧密度を求める手順をつぎに示す。

手順1：緯度，経度を UTM 座標系に変換し，m 単位とする。

手順2：ブルドーザの接地圧(kgf/cm²)を使用して力積を計算する。

手順3：力積を重みとしてカーネル密度推定法により，点密度とその等値線を求める。

手順4：点密度の90%，60%，30%などの信頼区間をその面積を求める。

手順5：押土面積と目標面積で除すことで，進捗率を求める。

手順6：等値線，信頼区間線を描画する。

2.4 載荷面変位の経時変化

施工平坦性を示す指標として，押土・敷き均しによる通過後の路面形状の変位を算出する。

この変位の算出に指して，Kelvin-Voigt model を用いる。ここで，つぎに示す作業仮設を置く。

(1) 地盤の勾配は少なくともブルドーザの履帯長，範囲内は一定である。

(2) 地盤の形状は，履板戴荷後，履板が離れるまで変化しない。

(3) 振動モデルは Kelvin-Voigt model である。

(4) ブルドーザのサスペンション(キャブダンパーマウントや積層板ダンパー)の振動は低周波である。

(5) 接触力(contact force)は履板を通じて等分布荷重として地盤へ伝わる。

(6) 対象とする地盤は等方均質弾性体である。

(7) 土中応力は Steinbrenner の応力解に従う。

鉛直加速度は路面の凸凹や轍だけでなく，カント，縦断勾配など，並びに走行速度の影響を受ける。そこで，三軸加速度の合成ベクトルである三軸合成値を用いる。三軸合成値は次式で得られる。

$$force = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2} \quad (4)$$

ここで, *force* : 三軸合成値, α_x : 左右方向加速度,
 α_y : 前後方向加速度, α_z : 上下方向加速度である

静的変位として, ブルドーザのスマートフォン
 設置地上高を用いる.

kelvin-Voigt model の運動方程式と過渡項と定常
 項の式を以下に示す

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (5)$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \sin \omega t = x_{st} \omega_0^2 \sin \omega t \quad (6)$$

ここで m :質量, x : バネ上質量の高さ, x_{st} :初
 期静的変位 (自重による静的変位), ζ : 減衰比
 (damping factor, ω_0 : 不減衰固有角振動数
 (natural angular frequency), ω : 角振動数(駆動
 周波数 driving frequency), $F_0 \sin \omega t$:周期的な強
 制外力などである.

過渡項(transient vibration)は, 静的変位を与え,
 急に開放した後に発生する自由減衰振動である.

$\zeta < 1$ のとき,

$$y(t) = \exp(-\zeta\omega_0 t) \frac{v}{\omega} \sin \omega t \quad (7)$$

ただし, v : 初速度である. ここでは走行速度の平
 均値を用いる.

定常項 (steady-state vibratin)は, 過渡応答が消滅
 した以後にも, 定常的に発生する強制振動である
 2)3).

$$y(t) = A \sin(\omega t - \phi) \quad (8)$$

$$A = \frac{mr}{M+m} \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + 4\zeta\lambda^2}} \quad (9)$$

$$\tan \phi = \frac{2\zeta\lambda}{1-\lambda^2} \quad (10)$$

パラメータ間につきの関係がある.

$$C_c = 2\sqrt{mk} \quad (11)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (12)$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1-\zeta^2} \quad (13)$$

$$\lambda = \sqrt{1-\zeta^2} \quad (14)$$

$$\zeta = \frac{C}{2\sqrt{mk}} = \frac{C}{C_c} \quad (15)$$

$$x_{st} = \frac{F_0}{k} \quad (16)$$

ここで, y : 振動振幅, M : 振動ローラの機械質量
 [kg], m : ローラの質点, k : ばね定数(suspension
 stiffness)[N/m], C 粘性減衰係数(viscous damping
 coefficient)[Ns/m], C_c : 臨界粘性減衰係数(critical
 viscous damping factor, r : ローラの半径, y : 振動
 ローラの振動変位(上向きを正とする), y_0 :振動振
 幅, ϕ : 位相, ζ : 減衰比, ω_0 :不減衰固有角振動数
 (natural angular frequency), ω : 角振動数(駆動周波
 数 driving frequency)などである.

減衰比 ζ の計算について以下に述べる. 対数減
 衰率 δ と減衰比 ζ にはつぎの関係がある⁴⁾.

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (17)$$

ここで, 減衰比 $\zeta \ll 1$ のとき,

$$\delta \cong 2\pi\zeta \quad (18)$$

とおける.

三軸合成値の波形は減衰項と定常項の重ね合わ
 せで形成される. ここで, 減衰項の波形だけを抽
 出することは困難である.

躍度は(19)式に示されるように, 減衰, 固有周
 波数, 駆動振動数と時刻の関数である⁵⁾.

$$\begin{aligned} Jerk = \omega^2 \int_0^t f(\tau) \exp(-\zeta\omega_0(t-\tau)) & \left[\frac{4\zeta^2 - 3\zeta}{(1-\zeta^2)^{3/2}} \sin \omega(t-\tau) \right. \\ & \left. + \frac{1-4\zeta^2}{1-\zeta^2} \cos \omega(t-\tau) \right] d\tau \end{aligned} \quad (19)$$

ここで,

$$f(t) = x_{st} \omega_0^2 \sin \omega t \quad (20)$$

である. そこで, 三軸合成値の躍度(jerk)を求める.
 つぎに, この躍度の対数減衰率 δ を求め, (18)式を
 利用して減衰比を計算する.

2.5 地中応力の経時変化

地中 z 深さの鉛直応力 σ_z を次式より得る.

$$\sigma_z(t) = \frac{2P_0(t)}{\rho} \left[\frac{2dBz(d^2 + B^2 + 8z^2)}{(d^2 + 4z^2)(B^2 + 4z^2)\sqrt{d^2 + B^2 + 4z^2}} + \sin^{-1} \frac{dB}{\sqrt{d^2 + 4z^2}\sqrt{B^2 + 4z^2}} \right] \quad (21)$$

ここで, $P_0(t)$: 等分布荷重, B : 転圧幅, d : 接地幅などである. 等分布荷重 $P_0(t)$ は次式より得る. p として, 次式より得られる力積⁹⁾を用いる.

$$p_0(t) = (L + mr\omega^2)v[1 - \exp(-\zeta\omega_0 t)] \left[\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \alpha t + \cos \alpha t \right] \quad (22)$$

ここで, L : 線圧 (linear load) [kgf/cm], v : 平均走行速度などである.

3. ケーススタディ

阿蘇大橋地区斜面防災対策工事土留盛土工(下段)2m 嵩上げ工事におけるブルドーザ敷均し・転圧状況(土留盛土工下段)のケーススタディについて以下に述べる.

工現場全体状況(対岸側から撮影)を写真-1 に示す.

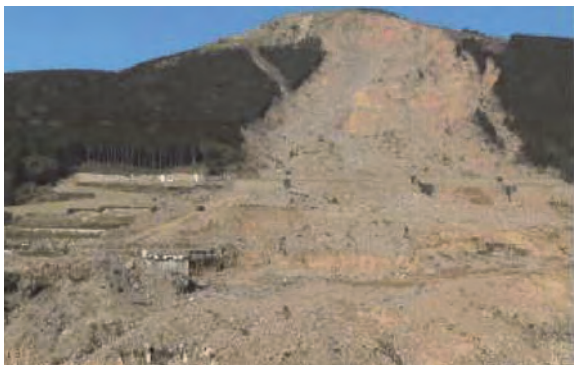


写真-1 施工現場全体状況(対岸側から撮影)

土留盛土工の施工では, 重機のトラフィカビリティを確保するため, 基盤掘削・整正を完了させた後, セメント固化材を使用した浅層混合処理を行う. 同処理後, 工事現場外プラントで製造した土留盛土材(改良土)を 10t ダンプ(有人)により場内に運搬し, クローラダンプ(無人)に積替え所定位置まで運搬し敷設した後, ブルドーザによる敷均し・転圧を行う. この工程を繰り返して盛土の構築を進める. 使用したブルドーザの写真を写真-2 に, 諸元を図-5 に示す. 土留盛土工の施工状況を写真-3 に示す.

スマートフォン Galaxy S3 に組み込まれている三軸加速度計, 三軸角速度計, 電子コンパス計, GPS 受信器などを使用する. ブルドーザのキャビン内のスマートフォン取付状況を写真-4 に示す.



図-2 使用したブルドーザ(16t 級)の写真

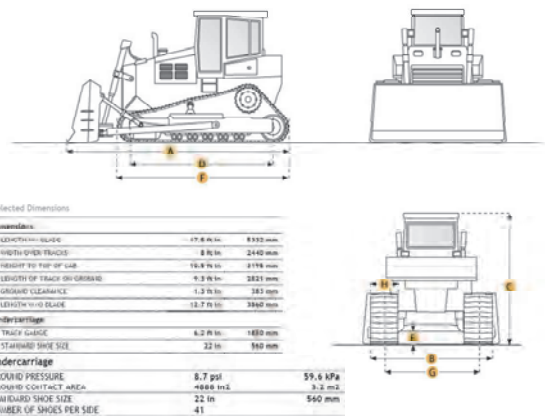


図-5 使用したブルドーザの諸元



写真-3 ブルドーザ敷均し・転圧状況(土留盛土工下段)



写真-4 スマートフォン取付状況

サンプリング周波数は, 対象とする建設機械の固有振動数を確認のうえ, 100~200HZ の範囲内で決定する.

計測する変数(データ項目)は, 時刻, 緯度, 経

度, 移動方位, 走行速度, x 軸加速度, y 軸加速度, z 軸加速度, x 軸角速度, y 軸角速度, z 軸角速度, No, 電子コンパス, エリア id, x y, 距離, FB(前進停止後進カテゴリ)である. ここで, 距離は建設機械間の大円距離である. エリア id は, 計測装置が存在するエリアの識別番号(積込場, 荷下場, 途中の道路など)である.

遠隔リアルタイム・ダッシュボードにアクセスすることで, ブルドーザ稼動情報に係るインフォグラフィックスをみることができる. 以下に示す. 遠隔リアルタイム・ダッシュボードの初期画面を図-6に示す.

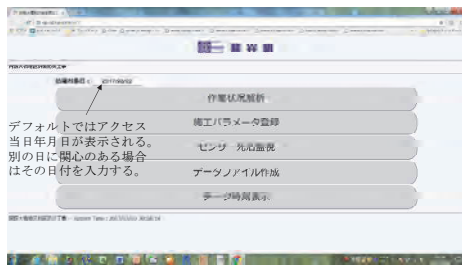


図-6 ダッシュボード初期画面

初期画面の最上位のボタン「作業状況解析」を押下すると, 前述したインフォグラフィックスを閲覧できる. インフォグラフィックスは5分間隔で更新される. 代表的なインフォグラフィックスを以下に示す.

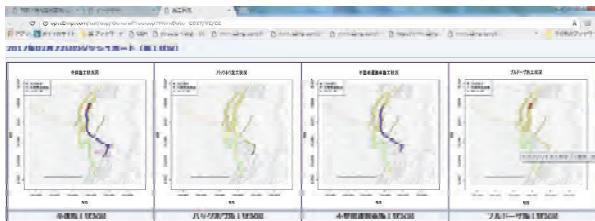


図-7 施工軌跡

ブルドーザの作業状況(走行軌跡によるポリゴン図, 押土軌跡と押土密度, 作業時間表, 作業時間バーチャート, 押土時走行速度記述統計, 押土時走行速度時系列グラフ, 押土時走行速度ヒストグラム, 進捗ゲージなど)を表示される.

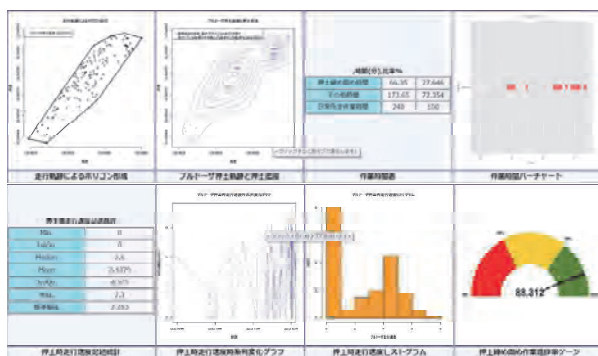


図-8 ブルドーザの作業状況

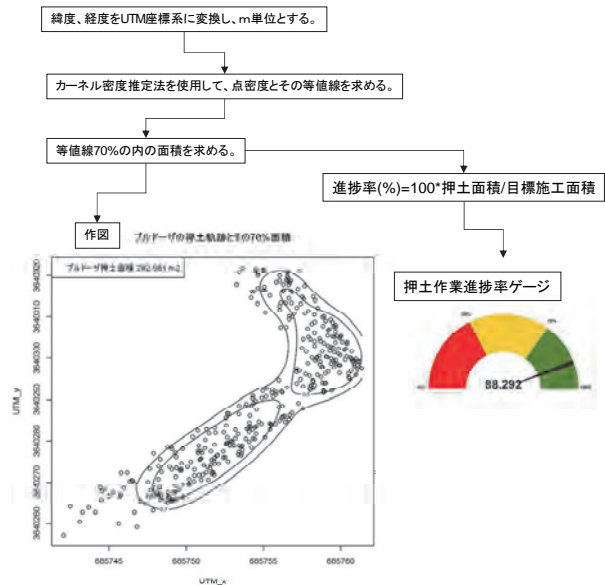


図-9 押土面積と進捗率

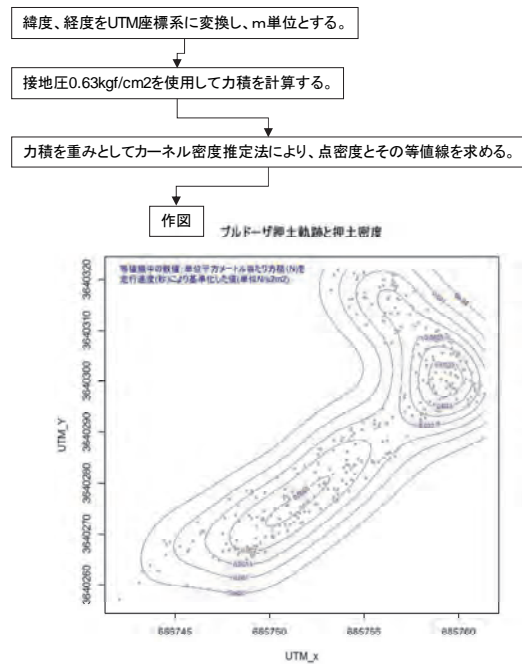


図-10 ブル転圧密度

4. ブルドーザ転圧効果の簡易的な判断方法のアイデア

ブルドーザ転圧効果の簡易的な判断方法のアイデアを以下に示す

地盤が軟弱なほど振動が増幅されることは良く知られている. 地中を伝わる地震波は硬い地盤ほど速く伝わり, 軟らかい地盤ほどその速度は遅く, 1周期の間に波の進む距離(波長)が短くなる. 波長が短くなる分, 振幅が増大して, エネルギーを一定に保とうとする.

そこで, 三軸合成値の経時変化から周波数の変

化をみて、転圧効果を判断することを試みる。周波数の変化を把握する簡単な方法として、零交叉率と短時間周波数のつぎの関係を利用する。

$$shortTimeFreq = zcr * F_s / 2 \quad (23)$$

ここで、 $shortTimeFreq$:短時間周波数, zcr :零交叉率, F_s :サンプリング周波数などである。

三軸合成値とその零交叉率,そして対応する短時間周波数の計算例を図-11に示す。

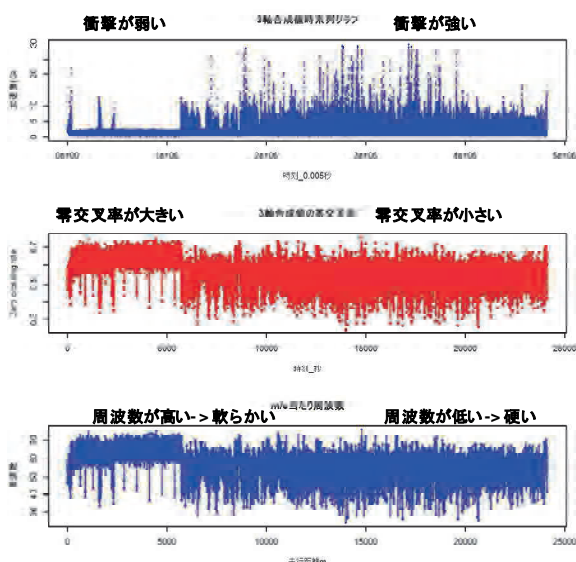


図-11 三軸合成値とその零交叉率,そして対応する短時間周波数の計算例

図-11 が示すように、零交叉率の経時変化データの変化点を検知することで、ブルドーザ転圧効果を簡易的な判断が可能である。

5. 今後の研究課題

今後の研究課題をつぎに示す。

載荷面変位の経時変化と地中応力の経時変化の計算と図示の機能のプログラムの現在作成中である。この機能をブルドーザ土工に適用し、経験と知見を積み重ねていく。

地盤接地圧の変化と地盤の硬さについて、図-12に示す関係があるという報告がある⁷⁾。三軸合成値、載荷面変位、地中応力などの経時変化から、図-12に示されるモードを検出できれば、より深い考察が可能となる。計測された加速度応答値から、地盤接地圧モードを検出する機能を研究する。

drum motion	interaction drum-soil	mode of operation	soil contact force	application of CCC	soil stiffness	roller speed	excitation amplitude
periodic	periodic loss of contact	Continuous Contact		yes	low	fast	small
		Partial Lift-off		yes			
		Double Jump		no			
		Rocking Motion		no			
chaotic	non-periodic loss of contact	Chaotic Motion		no	high	slow	large

図-12 振動ローラの運転モード (Modes of vibratory roller operation)

参考文献

- 1) Venables, W. N. and Ripley, B. D.: Modern Applied Statistics with S. p. 136, 2002.
On line: http://www.bagualu.net/wordpress/wp-content/uploads/2015/10/Modern_Applied_Statistics_With_S.pdf
- 2) Cornelia Dobresu: The influence of the stiffness characteristics of the soil compaction parameters when using vibrating rollers, pp. 13-17, 21st International Congress on Sound and Vibration, July, 2014,.
- 3) Siminiati, D., Hren, D.: Simulation on vibratory roller-soil interaction, pp. 111-120, Advanced engineering, 2, 1, ISSN 1846-5900, 2008.
- 4) Hamilton Cray: STRESS DISTRIBUTION IN ELASTIC SOLIDS, Research Assistant In Soil Mechanics, Graduate School of Engineering, Harvard University
- 5) Haoviang He, Ruifery Li, Kui Chen: Characteristics of Jerk Response Spectra for Elastics and Inelastic Systems, Hindaw Publishing Co., Shock and Vibration, 2015
- 6) K. A. Ismail, M. J. Strange: Impact of Viscoplastic Bodies: Dissipation and Restitution, J. Appl. Mech 75(6), 061011, 2008.
On line: <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1474383>
- 7) Dietmar Adam, Johannes Pistor: Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control: State of the art overview and recent developments.
On line: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_248241.pdf

6. 照明車のLED化検討について

国土交通省四国地方整備局四国技術事務所 ○ 竹内 伸一
大林 智仁

1. はじめに

現在、照明車に搭載されているメタルハライドランプは、現場作業のための光量としては十分であるが、操作性（点灯、再点灯までの所要時間等）にいくつかの改良すべき事項が指摘されている。また、ランプ自体の生産量が減少傾向にあり、将来的な資材調達においても不安がある。

更に、照明車の投光器付近には、被災状況や復旧作業を把握するためにCCTVカメラが装備されているが、カメラの遠隔操作ができないことから、現地職員が操作を行う必要があり、作業負荷の軽減を図るためには、遠隔操作の機能を付加する必要がある。

本報告は、これらの課題を改善するため、照明灯具のLED化、CCTVカメラの遠隔操作化について内容を検討し、その機器仕様を以下のとおりとりまとめたものである。

2. 検討概要

『照明灯具のLED化』と『CCTVカメラの遠隔操作化』の2項目について以下のとおり検討を行った。

2.1 照明灯具のLED化の検討

1) 利用可能な市販LED照明灯具の検討

既存照明車の設計根拠を整理し、市販されているLED照明灯具の性能、耐久性及び維持管理項目等を調査し、照明車に搭載可能な照明灯具について照度分布等のシミュレーションを行った。

また、照明灯具の上記検討結果を踏まえ、発電機容量等、機器仕様を整理した。

a) LED照明灯具の調査

LED照明灯具の調査結果は表-1のとおりであり、既存のメタルハライドランプに比較して、消費電力は大きく軽減されるが、器具光束が最大45%程度減少することが判明した。

表-1 適用可能なLED照明灯具度一覧

メーカー名	メタルハライドランプ投光器	岩崎電気(株) LED投光器	コイト電工(株) LED投光器	東芝ライテック(株) LED投光器	四国計測工業(株) LED投光器
外観					
消費電力	2.0kW	1.24kW	1.085kW	1.20kW	1.23kW
器具光束	200,000lm	130,000lm	107,000lm	130,000lm	118,000lm
発光効率	83lm/W	105lm/W	98.6lm/W	108lm/W	96lm/W
演色性	Ra94	Ra80	Ra80	Ra80	Ra90以上
寿命(時間)	12,000時間	40,000時間	40,000時間	40,000時間	60,000時間
灯具重量(電源重量)	19kg(25kg)	18.5kg(25kg)	24kg(9kg)	23kg(7kg)	8.6kg(8.5kg)

b) LED照明灯具架装時の課題等の確認

各LED照明灯具の重量、風荷重（受風面積）を確認し、結果は表-2のとおりであった。製品によっては、最大20%程度、受風面積が増大するが、既存の投光器の構造で、問題がないことが確認された。

2) LED灯具の照度性能の比較検証

LED照明灯具がメタルハライドランプと同等以上の照度性能を有しているか比較検証するため、既存照明灯具の照度実測定結果とLED照明灯具での照度シミュレーション（図-1）及び実証実験を行った。

両照明灯具とも現行の国土交通省建設機械購入仕様基準（以下「建仕」と呼ぶ）に規定される照明性能「幅50mで75lx」を満たしており、平均照度、最小照度、最大照度においてLED照明灯具は、メタルハライドランプの測定値と遜色なく、表-3のとおりLED照明灯具の性能が上回っているものもあった。

a) 実証実験

LED照明灯具を搭載した照明車（以下「LED照明車」と呼ぶ）の基本的な照明特性の評価、操作性の確認、課題の抽出、照度計測方法の確立を目的とした実証実験を実施した。

種別	メーカー名	灯具寸法	受風面積	重量	
				灯具	安定器/電源装置
メタルハライドランプ	東芝ライテック	φ461mm×450mm	0.17m ²	19kg	24kg
LED	岩崎電気	φ461mm×358mm	0.17m ²	18.5kg	12.0kg
	東芝ライテック	φ500mm×350程度	0.2m ²	23.0kg	7.0kg
	コイト電工	φ400mm×455mm×360mm	0.18m ²	21.0kg	7.0kg
	四国計測工業	φ370mm×450	0.11m ²	8.6kg	8.5kg

表-2 照明灯具寸法・受風面積一覧

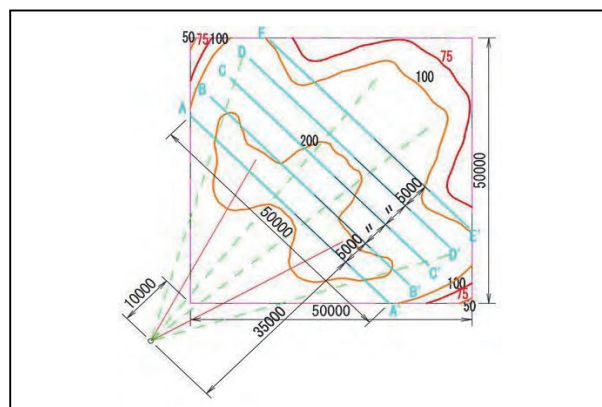


図-1 照度シミュレーション検証例（LED照明灯具）

表-3 メタルハライドランプと LED 照明灯具の実測値比較

灯具種別	メタルハライド	LED	備考
灯具高	20m		
演色性	94	90	▲ 4.3 ポイント
平均照度 (lx/m ²)	平均	117.4	+13.0 ポイント
	最小	106.1	+18.5 ポイント
	最大	129.6	+ 7.8 ポイント
最小照度 (lx)	平均	22.5	+ 4.9 ポイント
	最小	19.0	+22.1 ポイント
	最大	27.0	▲11.1 ポイント
最大照度 (lx)	平均	218.6	+53.5 ポイント
	最小	194.0	+53.1 ポイント
	最大	255.0	+46.7 ポイント

※ 背景色は、実測値が低い値を示す。

【実験項目】

- ・照度分布（水平面）
LED 照明車設置面における水平面照度を測定し、照度分布シミュレーション結果との整合性を確認。
- ・演色性（視認性）
分光放射照度計で「平均演色評価数」, 「色温度」を測定し、肉眼でも確認。
- ・通信機器への影響
LED 照明灯具が原因となる無線 LAN や各種ケーブル(有線)へのノイズ発生等を確認。

①水平面照度分布の測定結果

水平面照度を測定した結果、図-2 の枠内において建仕の要求性能である幅 50m で 75lx 以上を確保できるエリアが確認できた。

50m	34	45	54	60	61	58	52	46	40	34	30
45m	47	65	75	80	81	73	64	56	48	41	34
40m	61	90	105	109	105	91	80	67	56	48	40
35m	74	128	142	151	151	116	97	79	67	56	46
30m	132	177	193	192	165	145	115	98	81	64	52
25m	173	240	256	234	206	168	144	117	91	73	59
20m	196	279	297	275	243	205	165	132	106	81	62
15m	176	242	274	290	277	236	193	152	119	80	60
10m	175	202	220	271	295	285	194	142	104	75	54
5m	209	229	200	239	277	239	196	127	88	61	44
0m	125	209	175	176	196	172	131	87	65	46	33
光源	0m	5m	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m	45m	50m

図-2 照度分布の測定結果 (LED 照明灯具)



写真-1 水平面照度分布の測定状況

②シミュレーション結果との整合性確認

実証実験で測定した照度とシミュレーション結果との整合性について、「測定値による相関分析」を行った。その結果、相関係数は対地角 70 度の条件において、「0.938」であり高い相関が有り、シミュレーション結果との整合性を確認した。

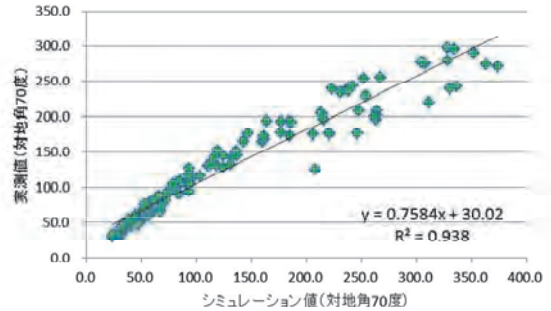


図-3 対地角 70° の場合の相関図

更にシミュレーション結果や配光角等から、各社が建仕の要求性能を満たす範囲について、照射面中央付近に「75lx で 50m 幅」の照射エリアを確保していることが判明した。

③演色性・色温度の測定結果

- ・全ての測点で「Ra90 以上」の平均演色評価数であることを確認した。また、肉眼による色見本でも確認した。
- ・色温度は「4750K ~ 5030K」と「昼白色」に近く、問題なし。

50m	95	95	95	95	95	95
40m	95	95	95	95	94	95
30m	95	95	95	95	94	94
20m	95	95	94	94	94	94
10m	95	95	94	94	94	94
0m	94	95	94	94	93	94
光源	0m	10m	20m	30m	40m	50m

図-4 演色性の測定結果

④ノイズ測定結果

監視カメラの映像に「画像のちらつき」や「フリーズ」はなく LED 照明灯具に起因するパケットロスも発生しなかったことから照明灯具として支障はない。

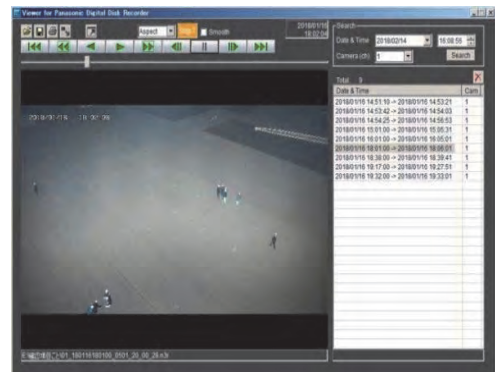


写真-2 映像データの確認状況

3) 建仕及び購入仕様書(ひな形)に記載する照明性能 (以下「照度」と呼ぶ) の評価基準(案)の設定

現行の建仕では、照度分布の条件として「50m 幅の水平面照度が、75lx 以上であること」と示されているが、その範囲について示されていない。

本項では、照明車が具備すべき「水平面照度分布範囲」及び「鉛直面照度分布範囲」について、現地での運用実績を考慮した仕様を検討した。

①排水ポンプ車設置時における照射範囲の想定
排水ポンプ車（30m³級）のポンプ6台を設置し、1本あたり2m設置幅を要するため12m程度の奥行きが必要であり、またホース1本当たり延長が50mであることから、w=12m×L=50mの水平面照射範囲を想定する。

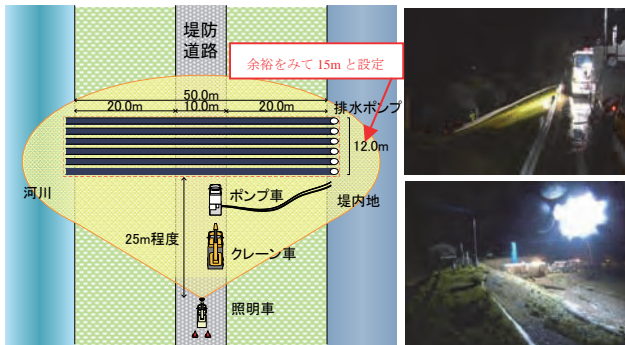


図-5 規定水平面照度を要する範囲（河川の場合） 写真-3,4 出動状況（河川）

②道路での最大照射距離の想定

今回確認できた照明車出動実績では、照射高さが平均でGL+11m程度、最大でGL+25m程度である。法勾配を1割と想定すれば、光源からの照射距離は45m程度となり、これを最大照射距離と想定する。

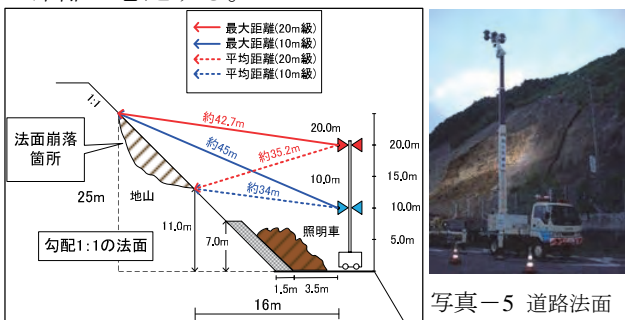


図-6 鉛直面照度分布の範囲（道路の場合） 写真-5 道路法面崩落時の出動状況

4) 照明車の性能仕様の数値基準

今回のシミュレーション結果等をもとに、現在の建仕の要求性能「75lx以上が幅50mにわたり確保できる照度」に加えて、性能を容易に検証できる数値基準を以下のとおり追加して明示することとした。

【要求性能】光源の鉛直下方投影位置から照射目標位置までの水平距離を明示するとともに目標位置での照度確保(75lx)範囲を明示する。

項目を追加した事由は以下のとおりである。

①夜間の安全・適確な作業の支援

光源高さをGL+約20又は約10mとした鉛直面への水平方向照射の照度を100とすると、光源を同位置にした地表面照射の場合の地面照度は、1/2~1/3程度となるため、夜間の安全・適確な作業を支援するためにも照射範囲の設定が必要である。

②検証する照射距離と照度について

《照射距離》河川、道路の現地利用実態から対象物までの照射距離は水平距離で概ね40~45mまでであること。

《照度確保》上記①のとおり、水平面で必要照度が確保できれば、鉛直面では水平面以上の照度を確保できること。

《照度確保範囲》照度確保には不利な下方水平面照射の利用が多い河川現場のケースを準用して、40m前方で奥行き15mの範囲で照度を確保できること。（図-5参照）

【採用する数値基準】

「75lxで50m幅」を検証する光源の設置位置は光源高さを地表面から照明装置を最高位置（ブーム高が最高時）とし、かつ鉛直下方投影位置から照射目標位置までの水平距離40mとする。また、「水平面照度」で「75lx」を検証することを明記する。

なお道路法面においては、被災状況に応じて照射範囲が変化するとともに、照射対象が上方となった場合は、照明灯具の性能よりも照明灯具の設置条件の方が支配的であることから上記条件でも不適な場合があり注意を要する。

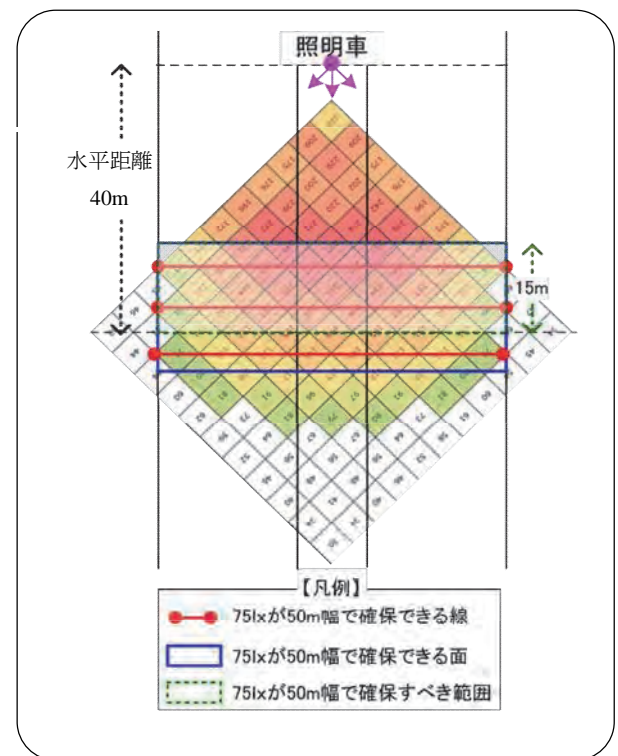


図-7 水平面照射時の照射距離

5) 機器仕様の整理

- a) 発電機容量はLED化により、発電機がコンパクト化(25kVA→13kVA)できる。
- b) 運転時間あたりの燃料消費量が40%軽減できることから燃料タンクをより小型化できる。
- c) 照明灯具のLED化により維持経費を20%縮減できる。

表-4 機器仕様の整理 (変更点のみ)

項目	見直し前	見直し後
1. 性能		
照明灯全光束	1,200,000lm 以上	約642,000lm 以上
(1) 照明装置 1) 照明灯		
ランプ形式	メタルハライドランプ	LED式 (瞬時に再点灯可能なもの)
出力	2kW(200,000lm以上)×6灯	1.0kW以上(107,000lm以上)
安定器	ベース車両搭載方式 (低電力型6個)	-
灯具	-	屋外用防雨形 耐食仕様
照度分布	75lx以上で幅50m以上にわたり確保できる照度分布とする。	アーム高が最高時にの鉛直下方投影位置から照射目標位置までの水平距離40m以上の位置において、水平面照度75lx以上で幅50mかつ奥行き15m以上にわたり確保できる照度分布とする。
(2) 発動発電機 1) 性能		
発電容量	25kVA以上	13kVA以上
(2) 発動発電機 2) 発電機用原動機		
燃料タンク容量	100L以上 (24h以上連続運転可能)	60L以上(24h以上連続運転可能な容量とし、燃料配管切替装置等により車両用燃料タンクと共用できる構造)

2.2 CCTVカメラの遠隔操作化

市販システムをもとに、監視カメラを含めた機器構成を検討し、国土交通省にて適用可能な遠隔操作制御システム仕様の整理を行った。

1) 監視カメラの機器の検討

監視カメラは、既存システムの拡張として映像共有システムにて画像提供し、遠隔操作が可能な機器構成とした。

2) ネットワーク構成の検討

照明車に設置したCCTVカメラの映像を共有化できるようネットワーク構成について検討した。また非常時には照明車単独で出動し、ネットワーク接続も、その出動時のみの接続となることから、維持経費が安価で、かつセキュリティレベルが高い体系を選択すると、図-8のとおりとなる。

本システムが構築されれば、「災害対策本部」、「災害対策支部」より直接、監視カメラを遠隔操作することが可能となる。

また本システムであれば、他地整に派遣した場合でも「支援本部」又は「支援支部」への映像提供が可能となる。

3. まとめにあたって

今回取りまとめた照明車の架装機器仕様は国土交通省の建仕に反映する予定である。

また、監視カメラの遠隔操作化は、災害発生時の状況把握として有効な手段であり、システム導入にあたっては、その運用ルールを事前にとりまとめておく必要がある。

(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からお礼を申し上げます。

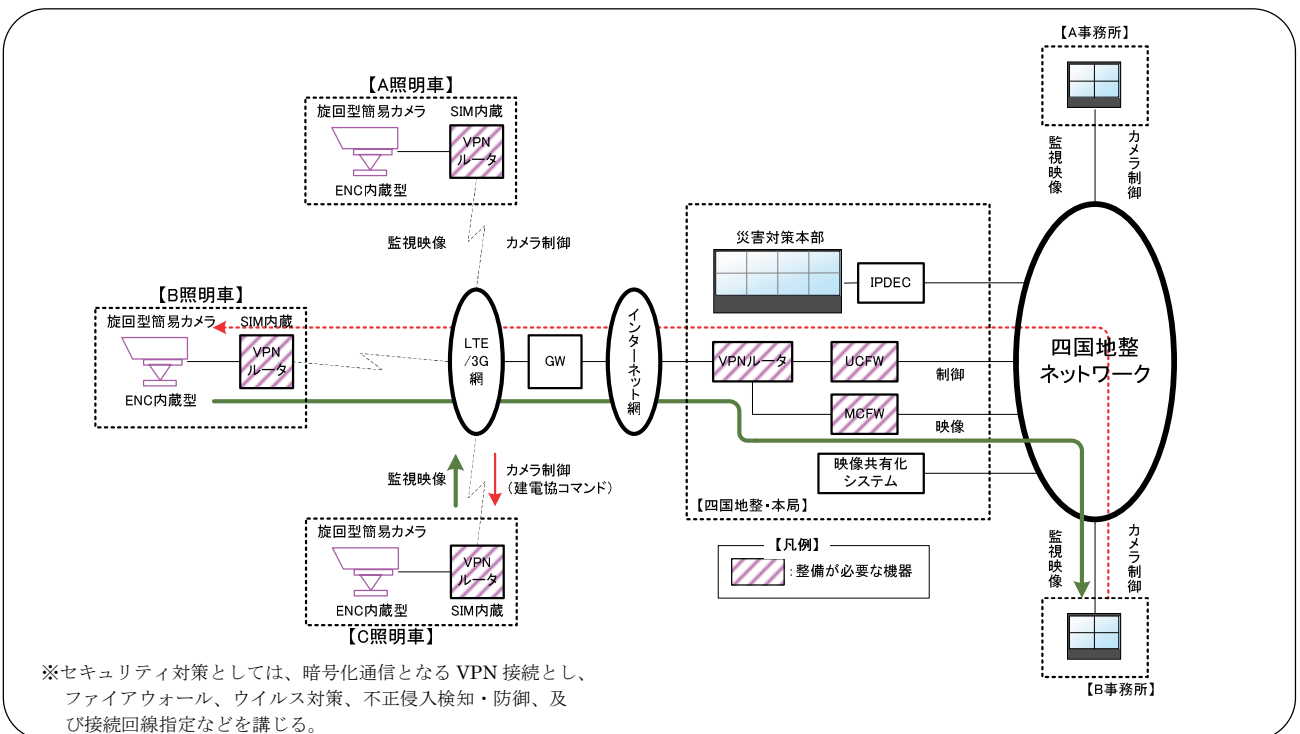


図-8 遠隔操作化するためのネットワーク構成

7. 機械学習と画像処理を用いた重機の自動カメラ追従システム

芝浦工業大学
芝浦工業大学
芝浦工業大学

○ 井上 慎人
藤武 将人
吉見 卓

1. はじめに

地震や台風、火山などの災害の多い日本では建造物の倒壊、河川の氾濫や土砂災害などが多く発生する。これらの災害現場では早急な復旧工事が求められるが、危険性が高いため人が立ち入ることができない。そのため近年、重機を安全な場所から遠隔操作により復旧作業を行う、無人化施工の技術開発・導入がなされている。重機操縦者は現場に設置した監視カメラの映像を頼りに施工作业を行っている。現状、広範囲内を作業する重機を監視カメラで映し続けるため、カメラ操縦者が遠隔操作により監視カメラの向きを変えている（図-1）。

このカメラ操縦者の業務軽減及び効率化を図るため、カメラ追従の自動化が求められている。

一部の重機は高精度 GPS が搭載されており、その位置情報を元にカメラ追従を行うことは技術的に可能であるが、実際の現場ではコストの問題からすべての重機に GPS を搭載することは難しい。一方で監視カメラは遠隔操作を行うため、常に現場に設置される。そこで本研究では監視カメラ映像をもとに、画像処理を用いて重機を追従するシステムを開発し、カメラ操縦者作業の自動化を行うことを研究目的とした。



図-1 無人化施工システム

2. 提案手法

ここでは、目的達成に対する現状での問題点を述べた後、それら問題点を解決するための提案システムの全体像および具体的手法を順に述べる。

2.1 技術的問題

まず重機を追従するためには、画面内の重機の位置を検出する必要があるが、既存の画像処理手法による追従では現場環境にある重機を検出し続けることは、以下の理由により難しい。

- ①重機は屋外で使用されるが、天候や時間帯などの環境の変化を受け、カメラに映る色合いが変化しやすい屋外での物体追従は一般に難しい。
- ②重機は旋回動作を行うが、その際、カメラに写っている面が変化するため、見た目が劇的に変化する。
- ③重機は広い範囲を移動するため、カメラとの距離が変化することで、画面サイズに対する重機のサイズが大きく変化する。

2.2 システム構成

本研究では、上記問題を解決できるロバストなカメラシステムの実現のため、開発した二手法の追従システム（ATM3D、POLO）を統合しロバストなカメラ追従システムを作成した。

提案する追従システムである ATCS(Automatic Tracking Camera System)は、大別して二種類の画像処理による検出手法を統合することでロバストなカメラ追従を実現した。一方は古くから用いられるテンプレートマッチングに動体検出を加え改良した ATM3D(Automated Template Matching meets motion detection)¹⁾。もう一方は、部位に着目し深層学習を用いた POLO(Parts-based YOLO)²⁾である。

①ATM3D の特徴：処理が軽快であり、通常のラップトップ PC でリアルタイムに動作させることが出来る。追従初期ほど検出精度が高い。ある程度のロバスト性が有るが、一度追従が失敗すると再び検出をすることが難しい。最初に重機の場所を教示する必要がある。

②POLO の特徴：検出精度が高く、一度検出に失敗しても再び検出することが可能でロバストである。データ処理量が多く高速に処理するためには GPU を要する。

これらを用いた ATCS の構成全体を図解したものが図-2 である。リアルタイムに追従を行うため、

現場環境に設置されたカメラ制御用 PC 内で常に ATM3D による追従を行い、かつロバスト性を高めるため、研究室に設置された GPU 搭載 PC にカメラ画像を送り POLO 検出結果を受け取る。図-3 はこれらのシステムフローを図示したものである。

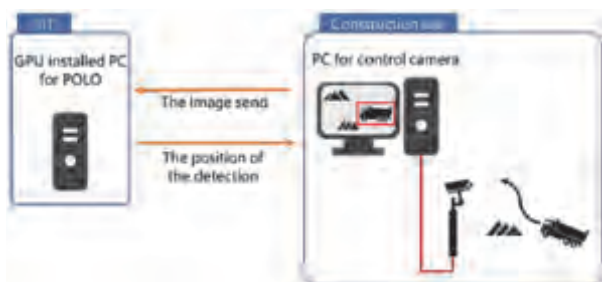


図-2 ATCSシステム図

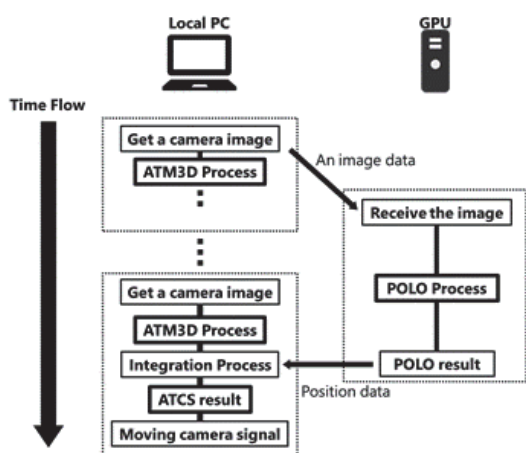


図-3 ATCSシステムフロー

2.3 ATM3D

ATM3D はテンプレートマッチングベースによる追従と動き検出を組み合わせたカメラ追従手法である。

まず、テンプレートマッチングに基づくカメラ追跡手法の有効性を確認した。この方法では重機を安定して追従することができるが、外観が大きく変わると失敗することがあった。これは、画像処理における物体追従手法の共通の問題である。しかし、この方法は、カメラの移動を行っている際にカメラ映像内の重機を検出し続けることを得意とする。次に、背景差分法を用いて動体検出に基づく重機の検出性能を確認した。重機がカメラ映像内を移動しているとき、重機を検出出来る。しかし、重機が停止したとき、またはカメラが動いたときに当然、重機を検出することができなくなる。これらの 2 つの方法の長所と短所を確認し、これらの検出方法を組み合わせて重機のカメラ追従を行うことにした。重機が動いているときは動体検出の結果を使い、カメラが動いているときはテンプレートマッチングベースの検出結果を使い、重機を追跡する (図-4)。

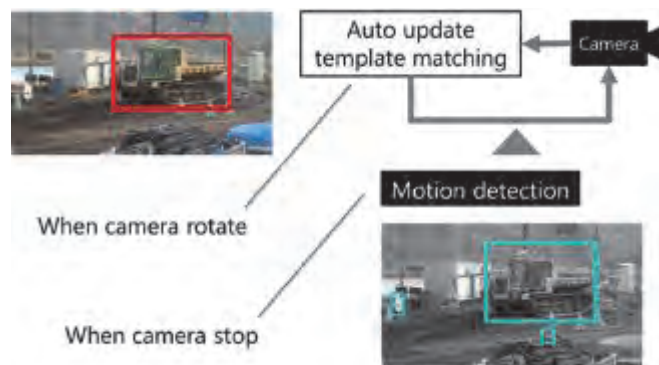


図-4 ATM3D

2.4 POLO

POLO は部位に着目した、機械学習による物体検出手法である。

現場では図-5 のように、カメラから重機の一部が隠れてしまうことが考えられる。一般に機械学習を用いた検出では、検出対象の一部が隠されることで検出精度が低下する。そこで POLO では図-6 のように重機の部位及び重機全体をデータセットとして学習を行っている。

POLO では機械学習による物体検出で有名な YOLOv2³⁾ をバックボーンとし、部位情報を有効的に活用することで、オクリュージョンに強い検出を実現した。



図-5 検出が難しい場合の例



図-6 データセット例

2.5 ATM3D と POLO の統合

ATM3D と POLO の検出結果を統合する手法について述べる。

ATM3D は初期テンプレートを設定してから、重機の見え方の変化が少ないほど追従精度は高い。一方で、POLO は時系列データを用いていない

め変化に依存しない。また POLO は他の重機の検出や突発的な誤検出が発生する可能性がある一方で、ATM3D の検出結果は追従対象から突如大きく離れることは少ない。ゆえに ATM3D の検出結果に POLO の検出結果が類似している場合のみ POLO の検出結果を採用する。

ATM3D および POLO はいずれも重機の検出結果として画面内の重機を囲む矩形で表現されるため、この2つの矩形の類似度は IoU を用いて算出し、閾値によって ATM3D と POLO の検出結果のどちらを採用するかを決定する。その後どちらを採用したかに関わらず採用した矩形位置に応じてカメラ雲台の制御と ATM3D で用いるテンプレート画像の更新を行う。

3. 実験と結果

無人化施工実験場において実際の現場で使用されている重機を用いたカメラ追従実験を行った。その結果、実験環境において重機をカメラ追従できることが確認できた。この映像を用いて、既存の追従方法などと比較するため、手動で正解データを用意し、比較を行った。また、他の有名な追従手法とである Boosting⁴⁾、MIL⁵⁾、MedianFlow⁶⁾、KCF⁷⁾ による追従との比較を行った。

図-7、図-8 は追従開始数秒後のフレームと最終フレームである。矩形はそれぞれの手法による検出結果を表しており、正解データ：赤色、MedianFlow：水色、KCF：青色、MIL：緑色、Boosting：白色、ATCS：黄色である。評価映像において重機を追従することが出来たのは、提案手法と Boosting のみであったことが確認できる。また、最終フレームの検出結果矩形の中心位置に着目すると、Boosting は重機から外れており、提案手法は重機の中心付近にあることがわかる。



図-7 検出結果(初期フレーム)

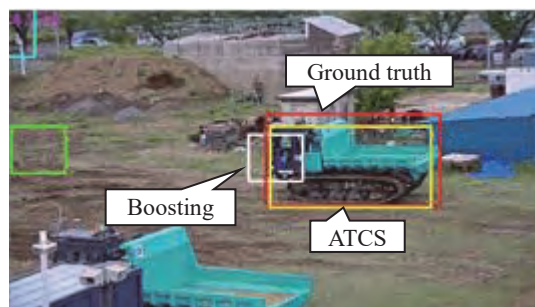


図-8 検出結果(最終フレーム)

また、これらを定量的に評価するために、評価用映像全体での「追従時間率」と「検出率」を示す二つの評価値を定義した。

二つの評価値の具体的な算出方法を述べる。正解の矩形と、検出結果として得られる矩形の、重なり度合いを示す IoU 値を、正解データのあるすべてのフレームで算出し、IoU 値が 0.7 以上のフレーム数をカウントする。これを全体のフレーム数で割ることで、「検出率」として数値化した。

この数値が高いほど、検出精度が高い状態を、維持できていた時間が長いことを意味するが、IoU 値が低くても追従することは可能なため、この数値は追従能力を完全に反映するものではない。故に、他の評価基準として重機の追従を開始してから追従ができなくなったフレームまでのフレーム数をカウントし、全体のフレーム数で割ることで、どれくらいの時間、重機を追っていたかを「追従時間率」として数値化した。追従ができなくなったフレームは正解データと検出結果の IoU 値がはじめて 0 になったフレームとした。評価値と各種法の値は表-1 のようになった。

他の手法と比較して、ATCS の2つの評価値はどちらも最も高く、提案手法の追従性能が最も高いことがわかる。しかし ATCS は通信速度に依存した遅延による影響で、検出精度が低下する箇所があることが分かった。

表-1 検出精度の比較

Method	Value	The trackable time ratio [%]	The detection ratio [%]
MEDIANFLOW		37.22	10.38
KCF		35.65	7.86
MIL		56.78	9.43
Boosting		100	23.27
ATCS		100	77.67

4. 統合方法の改善

ATCS の遅延問題を解決するため、POLO と ATM3D の統合手法を改良し、この問題を解決した ATCS+を開発した。図-8 が ATCS と ATCS+のシステムを比較したものである。ATCS では POLO の検出位置のみを受け取り、ATCS に統合していた。しかし ATCS+では、POLO に送信したフレーム画

像を記憶しておき、POLO から返ってきた検出位置をもとに送信時のフレーム画像から重機の画像を切り出す。次のフレームにおいてこの画像をテンプレートとしてテンプレートマッチングを行う。つまりカメラの移動により重機の位置座標は急激に変化する可能性があるのに対し、カメラが動いても重機の見た目は急激に変化しないことを利用し、遅れの問題を解決した。

カメラが動き、ATCS と ATCS+の検出結果の差が顕著なフレームを図-9、図-10に示した。青矩形が ATCS、黄矩形が ATCS+を表している。また評価値を比較したものを表-2 に示した。これらの結果から、黄矩形の方が重機全体を正しく検出しており、遅れの問題を解決できたことが確認できた。

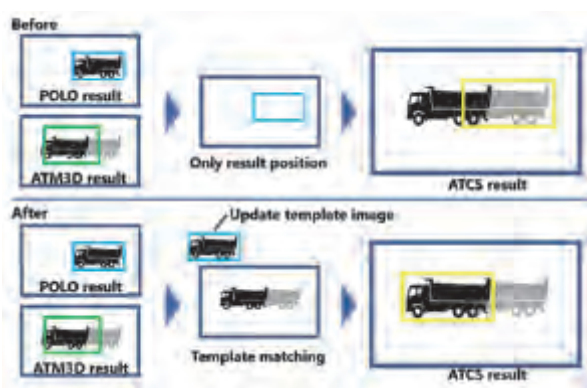


図-8 改善システム



図-9 ATCSとATCS+の比較例1

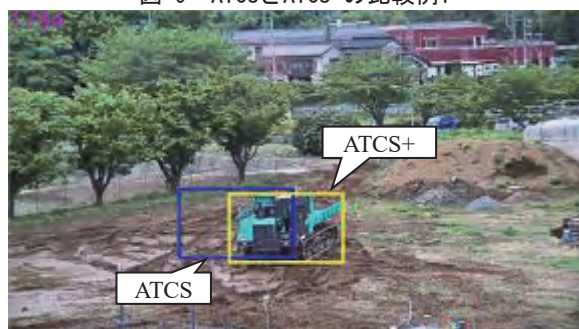


図-10 ATCSとATCS+の比較例2

表-2 改善手法の比較

Method	Value	The trackable time ratio [%]	The detection ratio [%]
ATCS		100	77.67
ATCS+		100	82.70

5. 結論

本稿では画像処理の適応が難しい、無人化施工現場での物体追従システムの構築に取り組み、通常の画像処理と機械学習に基づく二種類のアルゴリズム (ATM3D、POLO) を統合した新たなカメラ追従手法を提案した。画像処理を改良して提案した ATM3D ではテンプレートマッチングと動き検出を用いて、現場環境に適した、処理の軽い追従が可能である。また、機械学習側の検出アルゴリズムでは、既存のニューラルネットワークモデルを拡張した Part-based YOLO モデルが重機をよりロバストに検出可能である。実際の現場実験では、実用的なリアルタイム処理を維持し、かつ提案した統合手法がロバストであることを確認した。また、ネットワーク遅延とカメラの方向転換によって引き起こされる問題を解決し、よりロバストなカメラ追従を提供可能な改善手法とした。

参考文献

- 1) Makito Inoue and Takashi Yoshimi: Automatic Tracking Camera System for Construction Machines by Combined Image Processing, 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), 2018
- 2) Masato Fujitake, Takashi Yoshimi, "Estimation System of Construction Equipment from Field Image by Combination Learning of Its Parts", Asian Control Conference (ASCC), 2017
- 3) Erhan, D., Szegedy, C., Toshev, A., Anguelov, D.: Scalable object detection using deep neural networks. In: CVPR. (2014)
- 4) H Grabner, M Grabner, and H Bischof. Real-time tracking via on-line boosting. Proceedings of the 17th British Machine Vision Association 2006; September 4-7; Edinburgh, British.
- 5) Boris Babenko, Ming-Hsuan Yang, Serge Belongie. Visual Tracking with Online Multiple Instance Learning. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR) 2009; June 20-25; Miami Beach, Florida.
- 6) Z.Kalal, K. Mikolajczyk, J. Matas. Forward-Backward Error: Automatic Detection of Tracking Failures. Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition; 2010 Aug 23-26; Istanbul, Turkey.
- 7) João F. Henriques, Rui Caseiro, Pedro Martins, et al. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters. Journal of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015;37(3):583-596.

※本研究は、一般社団法人日本建設機械施工協会の平成29年度研究開発助成を受けて実施したものです。また、実験の実施においては、(株)熊谷組に御協力をいただきました。

8. 不整地運搬車の自動走行技術の開発

株式会社熊谷組
株式会社熊谷組
株式会社熊谷組

○ 小林 勝
宮川 克己
北原 成郎

1. はじめに

一般的な土木工事において発生土の運搬作業は、土砂積込場所から土砂搬出場所までの間のほとんど同じ経路を往復し、移動・積込・移動・搬出を繰り返す単調な作業でありながら、運搬経路からの逸脱や車両離合場所での接触といった危険や運搬車オペレータの疲労蓄積等による集中力の低下による危険がある。

また、昨今の建設分野での人材不足や国土交通省の推進する i-Construction への対応のため、1人当りの生産性向上の必要性が高まっている。

ここで、発生土の運搬作業の内容を確認すると土砂積込場所では、積込機械の位置が常に移動し、土砂搬出場所では、排土する位置を都度変えないと土砂の整形や均し等後作業の効率が低下する。そのため自動走行を土砂積込場所から搬出場所間とし、自動走行で1台の不整地運搬車が移動している時間に土砂積込場所や土砂搬出場所で、ほかの機械を遠隔操作して作業することで1人のオペレータが複数台の建設機械の運転管理が出来、生産性が向上する。また、同じ経路を何回も往復運転をすることが無くなるので不整地運搬車オペレータの作業負担が軽減する。

本稿では、「不整地運搬車の自動走行技術の開発」について説明する。

2. 自動運転技術の概要

2.1 ネットワーク対応型無人化施工技術

災害復旧工事において二次災害発生の危険がある場所での施工は、立入が禁止されているため、現場から離れた場所に設置した操作室から現場の映像や施工情報を基に遠隔操作式建設機械群を操作しての施工となる。この操作室と施工場所の通信にネットワークを対応させることで、光ケーブルをはじめ各種無線LANを使用出来るようになり、より安全で利便性のある場所に操作室を設置できるようになる。図-1にネットワーク対応型無人化施工概要を示す。

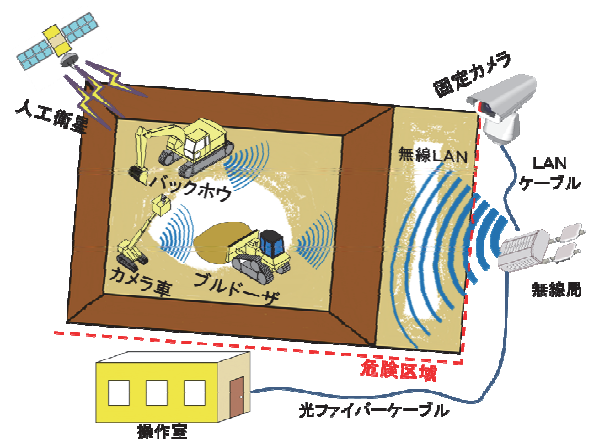


図-1 ネットワーク対応型無人化施工概要図

2.2 自動走行技術

今回開発した不整地運搬車の自動走行技術は、操作室から映像を見ながら不整地運搬車を遠隔操作し、その遠隔操作時の速度の加減と走行した経路をコンピュータに記憶させる。（これを「教示運転」という）自動運転では、教示運転で記憶した情報を基に自動走行経路を作成し、自車の位置と比較しながらコンピュータ制御で移動する。

操作室で集中管理することにより、複数台の建設機械を実際に乗り換えることなく、席を移動するだけで運転管理できる。

2.3 自動走行システムの構成

自動走行技術では、「ネットワーク対応型無人化施工技術」からネットワークを使用して不整地運搬車を遠隔操作する技術と人工衛星を利用した測位技術（GNSS）を活用している。

これらの技術に加え、GNSSと組合せてより高精度で連続して測位するためのIMU（慣性計測装置）並びに操作信号と車体の情報を操作盤と車体で送受信するため及び自動走行経路を作成し、作成した自動走行経路をもとに車体を制御するために操作盤内と車内に設置したコンピュータの2つの装置でシステムを構成している。図-2に無人化施工と自動走行のシステムの構成を示す。

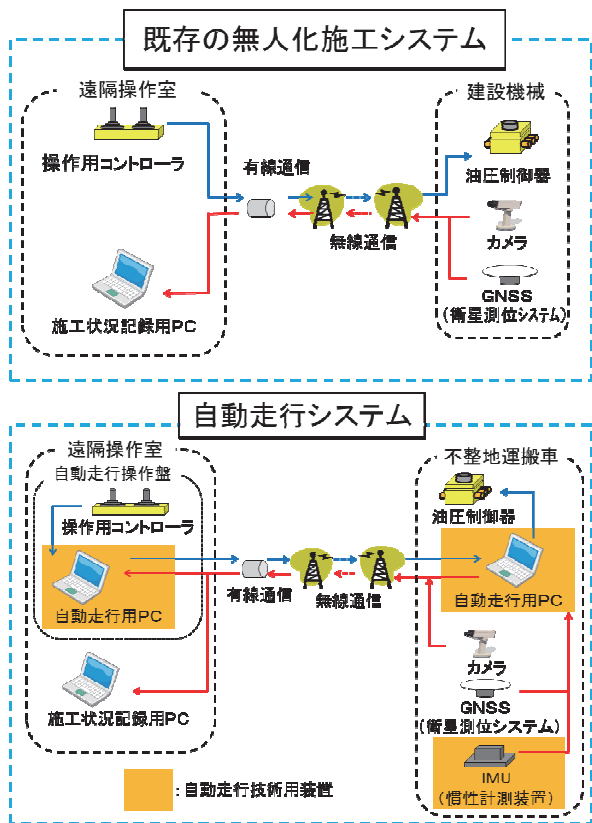


図-2 無人化施工と自動走行システム構成図

2.4 自動走行の手順

(1) 教示運転

操作室から教示運転開始信号を送信し、遠隔操作を行うと不整地運搬車は、移動しながらGNSSとIMUからの位置情報とコントローラからの速度情報を基に車載コンピュータが経路情報を作成する。この情報は、教示運転終了信号を受信するまで100ms毎に記録され、教示運転終了後に保存される。図-3に教示運転の概要を示す。

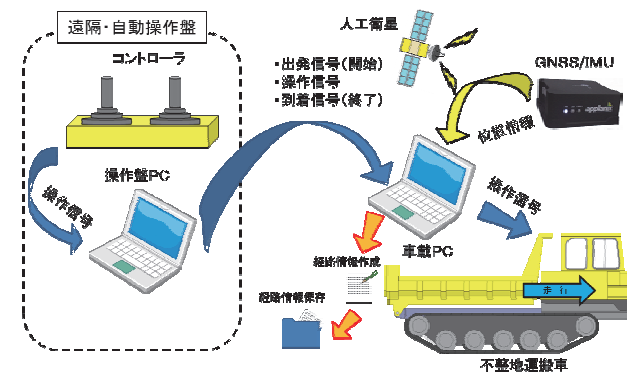


図-3 教示運転概要図

(2) 自動走行準備

モードを自動走行に切り換え、正走・逆走信号と開始信号を不整地運搬車に送信すると車載コン

ピュータが教示運転時に作成した経路情報を加工して自動走行経路を作成する。図-4に自動走行準備の概要を示す。

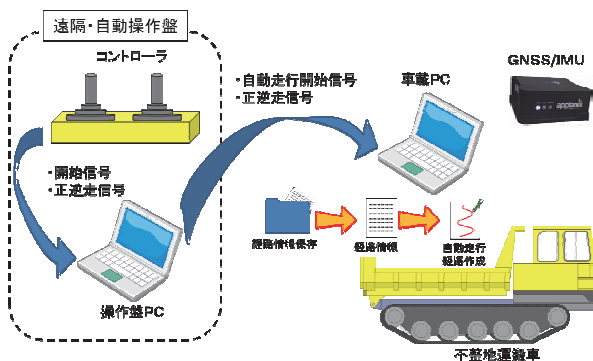


図-4 自動走行準備概要図

(3) 自動走行

自動走行の準備が完了後、再び開始信号を送ると車載コンピュータが自動走行経路と車体の位置を比較しながら不整地運搬車を制御して走行する。

自動走行中も車両と操作盤の通信は、常時行われており燃料やエンジン回転数等の情報を伝達する。安全装置として、操作盤からの停止信号、非常停止信号は、最優先され即座に自動走行を中止する。また、操作盤と車両の通信が途絶えた際も自動走行は、即座に中止される。図-5に自動走行の概要を示す。

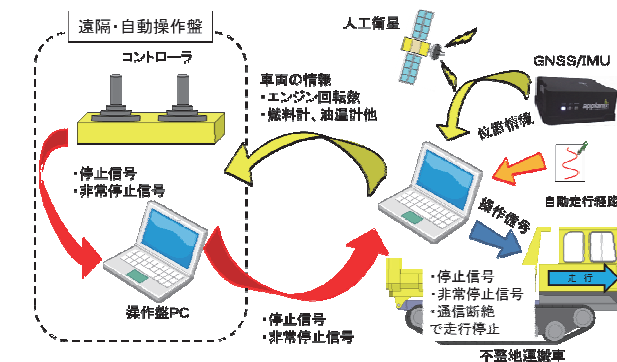


図-5 自動走行概要図

3. 使用機械

3.1 不整地運搬車

この自動走行技術に使用した不整地運搬車は、写真-1の11tクローラキャリアである。この車両は、排ガス対策としてDOC（ディーゼル酸化触媒）と尿素SCR（選択式還元触媒）を採用しており、最新の排ガス規制に対応している。

操作方式は、ジョイスティックレバーを採用し、走行・ダンプ・エンジン始動/停止・ホーンの操作が左手一本で行える。図-6にジョイスティック

クレバーを示す。

車両の状況確認は、図-7に示した視認性の良い液晶モニターが採用されており、エンジンの回転数や燃料計等の確認が容易に行える。このジョイスティックと液晶モニターは、同じ形状のものが遠隔操作盤に組み込まれており、運転席と同じ感覚で遠隔操作ができる。

今回、運転席に座っての操縦と操作盤での操縦ができるように搭乗モードと遠隔操作モードを切り換えるスイッチを図-8に示すように運転席に設置した。

遠隔操作・自動走行時にエンジンや通信状態、自動走行状態が外部より容易に視認できるように図-9に示すように運転席屋根の上に回転灯を設置した。

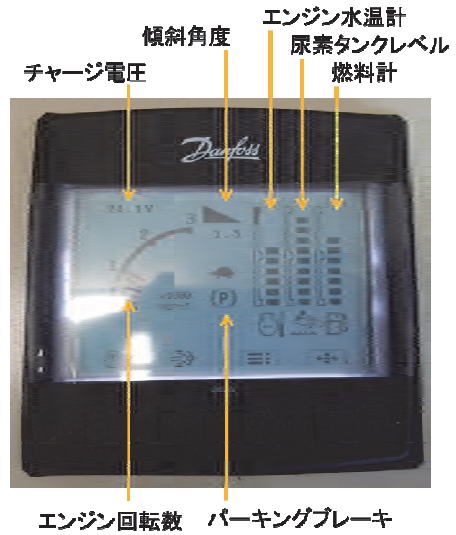


図-7 車両状態確認用液晶モニター



写真-1 自動走行対応型不整地運搬車



図-8 モード切り換えスイッチ

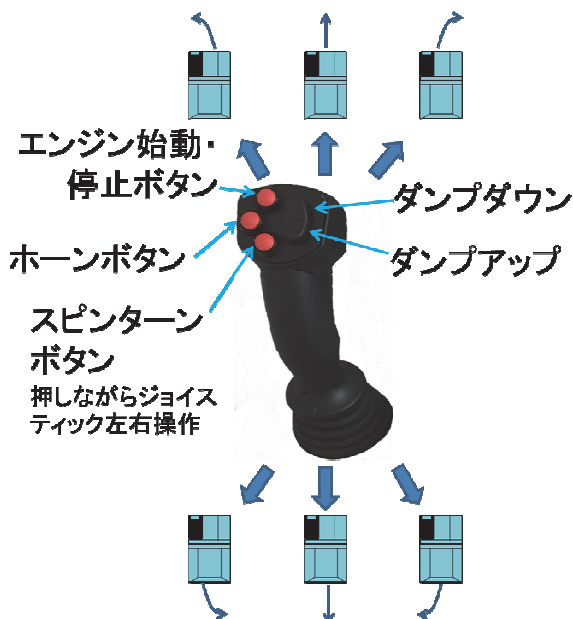


図-6 操作用ジョイスティックレバー



図-9 状態視認用回転灯

3.2 位置測位システム

自動走行技術において、不整地運搬車の位置を

正確に把握することは、自動走行経路作成や走行において重要である。

無人化施工において建設機械の位置を測位する方法は、人工衛星から発信されている電波を利用して測位するGNSS（全地球航法衛星システム）で、位置が判明している基準局と移動局である車両の位置を同時に測位し、基準局での既知位置情報と測位された位置情報の差を補正情報として車両に送信し、車両側で解析して車両の位置を確定する方法（RTK測量）が使用されるが、この測位方法には、次の欠点がある。

- ・測位するために人工衛星が4つ以上必要
- ・データの更新が遅い
- ・姿勢、方位が検出できない

車両の姿勢、方位、位置を測位するには、ジャイロや加速度計といった慣性センサを用いて求める慣性計測装置（IMU）があるが、IMUだけでは、加速度・角速度を用いた積分による計測であるために測位結果の誤差が時間と共に増大する。そこでGNSSとIMUの両方の長所を活用し、各々の短所を補ったGNSS/IMU（複合慣性計測装置）を使用してより高精度に車両の位置の測位を行った。写真-2にGNSS/IMUを示す。



写真-2 GNSS/IMU装置

3.3 車載コンピュータ

図-10 に示す車載コンピュータは、教示運転時においては、GNSS/IMUからの位置情報と操作盤からの速度情報から経路情報を作成し、教示運転終了と同時に保存する。

自動走行になると保存された経路情報と操作盤からの自動走行が自動走行経路に対して正走か逆走かの正逆情報をもとに自動走行経路を作成し、作成した自動走行経路と車両の位置情報を比較して不整地運搬車を制御して自動走行を行う。

遠隔操作では、操作盤からの操作信号を車体に

伝達して、車体を操作信号通りに稼働させる。また、車体の情報を操作盤に伝達して表示させる。

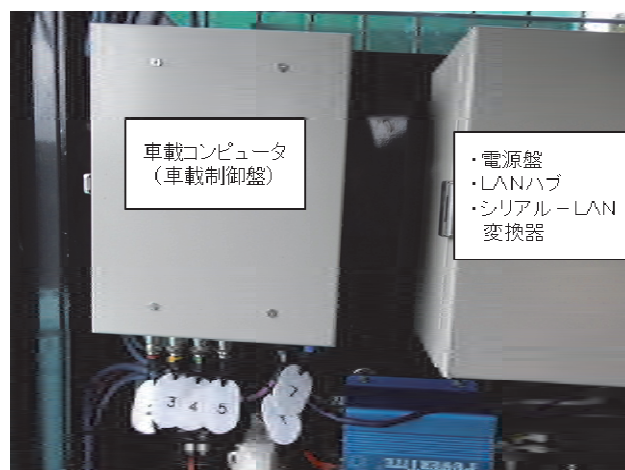


図-10 車載コンピュータ

3.4 遠隔・自動操作盤

操作室で不整地運搬車の遠隔操作・教示運転・自動運転を行う遠隔・自動操作盤は、運転席と同様に操作と車体の状態を表示する部分と自動走行・遠隔操作の準備状態を表示する部分から成り立っている。操作盤内にはコンピュータが組み込まれており、車載コンピュータと通信を行い操作信号と車体の状態信号の送受信を行っている。写真-3に遠隔・自動操作盤を示す。



写真-3 遠隔・自動操作盤

4. 自動走行技術の通信

自動走行技術における各種信号の流れを図-11に示す。

4.1 車両の状態、制御信号

操作盤の操作信号を不整地運搬車に伝達し制御を行い、また不整地運搬車の状態を操作盤に伝達し表示させる方法について説明する。

不整地運搬車内部では、エンジンや油圧ポンプ、

操作装置やディスプレイ等が車載ネットワーク（CAN）で結ばれて通信を行い制御している。

車体の各設備はCANの通信線であるCAN-busで接続されている。

今回の自動走行技術では、操作盤と車内にコンピュータを設置して車内のネットワークであるCANを全体のネットワークであるLANに変換して通信を行っている。

操作室のジョイスティックを操作すると操作盤内のCAN-busに操作信号が流れ操作盤内のコンピュータに伝達される。コンピュータ内でCANからLANに変換され、無線LAN等により車載コンピュータに伝達される。車載コンピュータ内でLANからCANに変換され車内のCAN-busに送られ各機器を動かし、操作通りに不整地運搬車を稼働させる。

エンジンの回転数や燃料の量等の情報は、操作信号の流れと逆に車載コンピュータでCAN-LAN変換され、操作盤へと伝達される。操作盤コンピュータで再びCAN-LAN変換して、操作盤の液晶モニターに表示される。

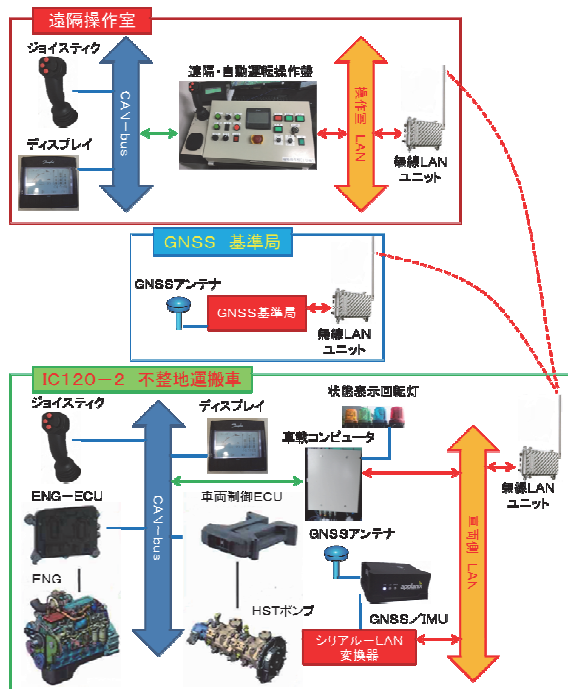


図-11 自動走行技術の通信

4.2 不整地運搬車の位置情報

不整地運搬車の位置情報は、GNSS基準局からの補正信号をLANで受け取りシリアル信号に変換してGNSS/IMU装置に伝達される。GNSS/IMU装置内で基準局の補正值を基に不整地運搬車の位置を算定しシリアル信号で出力し、シリアルLAN変換されて車載コンピュータに伝達される。

5. 実証実験

本技術の実運用に向けて、自動走行技術の精度と運用方法の確認を行うため、阿蘇大橋地区斜面防災対策工事の現場にて2回の実証実験を行った。

5.1 第1回目の実証実験

第1回目の実証実験では、教示経路に対する自動走行の精度に関する実験を行った。

実験内容は、現場に準備した試験経路を使用し、発進位置を横に逸脱させながら7回（7回目は1m横に逸脱）自動走行を行い、各回において教示経路に対する自動走行の蛇行量を測定した。

図-12に示すように教示経路に対する7回の自動走行の平均蛇行量は、最大値706mm 平均値327mmとなったが、実験経路の状況（約13°の勾配、地盤が黒ボク土を含む軟弱な崩落土、不陸、線形）が影響を与えていると考え、実験経路の状況等の外的条件を排除した同一条件での比較を行うために1回目の自動走行を基準として、再度蛇行量を算定した。算定結果は、図-13に示すように6回の自動走行の平均蛇行量は、発進から中間までは、最大値257mm、平均値71mmとなり、中間から終点までは、最大値94mm、平均値35mmとなった。

蛇行の特質としては、自動走行の教示運転に対する蛇行が、ほとんど同じ傾向で発生していることと発進位置を逸脱した影響は、経路を進行するに従い収束していることである。以上の実験結果より自動走行の蛇行量が35mmという自動走行時の制御としては、満足のいくものとなった。

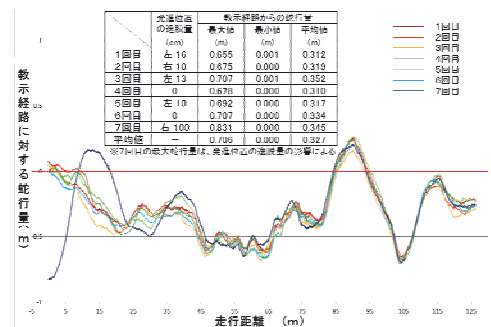


図-12 教示経路に対する自動走行の蛇行量

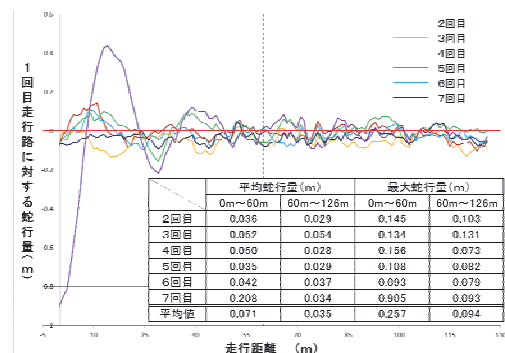


図-13 1回目の自動走行に対する各回の蛇行量

5.2 第2回目の実証実験

第2回目の実証実験では、自動走行技術の運用方法に関する実験を行った。

実験方法は、操作室内でオペレータ1名が自動走行式の不整地運搬車2台と遠隔操作式バックホウ1台を操作し、2台の不整地運搬車の土砂積込場所までの移動→土砂積込→土砂搬出場所までの移動→土砂搬出までの一連の作業を行い、自動走行技術を活用した運用方法の検証を行った。図-14に実験場所を図-15に実験手順を示す。

不整地運搬車が自動走行で移動している時間を利用してもう1台の不整地運搬車への土砂積込作業や土砂搬出作業を行うことにより、複数台の建設機械をオペレータ1名により操作し、一連の作業が行えることを確認出来た。写真-4に状況を示す。



図-14 運用方法に関する実験

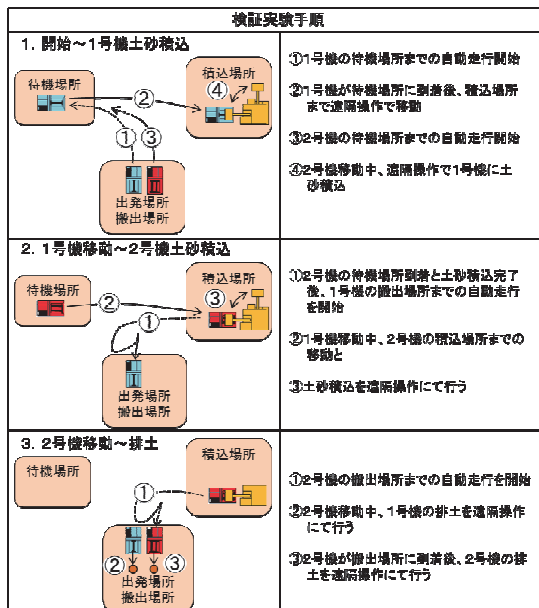


図-15 運用方法に関する実験の手順



写真-4 運用方法に関する実験状況

6. 今後の展開

今回の実証実験の結果、自動走行の精度に関して、外的要因が影響する場合と外的要因を排除した場合とでは、蛇行量の最大値で1/7、平均値で1/10となっている。これは、実験経路の状態による影響や車載コンピュータからの操作信号に対する車体の反応による影響が考えられる。今後、車両を制御するパラメータの調整・改良により、教示経路に対する自動走行の精度が高められると考えられる。

7. おわりに

オペレータ1人による複数台の建設機械の操作では、各機械の操作盤間の移動が生じるため、操作がやや煩雑に感じられた。今後は、操作盤のコンパクト化を進めオペレータの移動の負担を軽減する予定である。

安全面では、複数台同時走行時の相互間認識や不測障害物への対応等実施工に向けて更なる検討が必要であると考えられる。

今後は、本格的な実運用に向けて写真-5に示す当社筑波研究所内に新設した実験フィールドにおいて制御の向上と安全性の確立を進めていく所存である。



写真-5 筑波技術研究所内実験ヤード

9. 狭隘な施工条件を克服した高速道路ランプトンネルの施工実績

特殊工法を使用した矩形シールドの施工実績

鹿島建設(株)	○加藤 淳司
鹿島建設(株)	真鍋 智
鹿島建設(株)	沼宮内克己
阪神高速道路(株)	松川 直史

1. はじめに

本工事は、大阪府堺市内の住宅地において堺市が事業を行う府道高速大和川常磐西出入口の本線トンネル 350m とランプ 376m を開削工法で構築する工事である。本線から出口ランプに分岐する区間では近隣住民の環境負担軽減策として地上の工事占用幅を縮小し、生活道路を確保する目的で開削工法から矩形シールド工法に変更した。施工上の課題としては、小土被り発進、開削土留めとの近接併走掘進、線形管理、シールド機姿勢制御、急勾配施工等をあげ、これらに対する各種対策と成果について報告する。

2. 工事概要

2.1 事業概要

大阪中心部の慢性的な渋滞の緩和と沿道環境の改善のために「大阪都市再生環状道路」の整備が進められている。大阪府道高速大和川線は、この環状道路の一部を形成する路線であり、堺市三宝から松原市三宅に至る延長約 9.9km の自動車専用道路である。同路線は、大阪府、堺市、阪神高速道路(株)の三者が共同で事業を行う路線であり、その大部分は地下構造となっている(図-1 参照)。

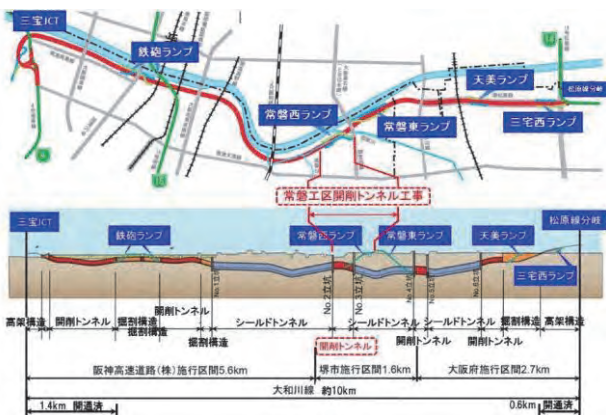


図-1 トンネル構造と事業区分(ランプ名は仮称)

常磐工区開削トンネル工事は、堺市に位置し、阪神高速道路(株)が同市から受託して施工している。本工区は、工区両端に本線シールドが転回する立坑、また、両立坑間にランプ分合流部(常磐西ランプ(仮称))を有するため、開削トンネル構造を採用している。

2.2 矩形シールドへの変更

当初の計画では、本線と出口ランプを同時に開削工法で施工する計画であった。特に、近隣家屋の官民境界が土留めから 4m まで近接する出口ランプの分岐部分における土留め施工時の杭打機を設置する工事占用帯では、沿道民家からの車両の出入りに必要な生活道路が長期間使用できない状況となるなど周囲に及ぼす影響が大きいことから施工法を再検討した。その結果、ランプ分岐部分は、地中切り開き工法で路下施工による躯体拡幅を行い、ランプ単独部については、シールドトンネルによる非開削工法をそれぞれ採用した。さらに、シールドでは、事業認可幅の制約から円形に比べ、最小限の掘削幅で構築できる矩形断面構造を採用することとした(図-2 参照)。

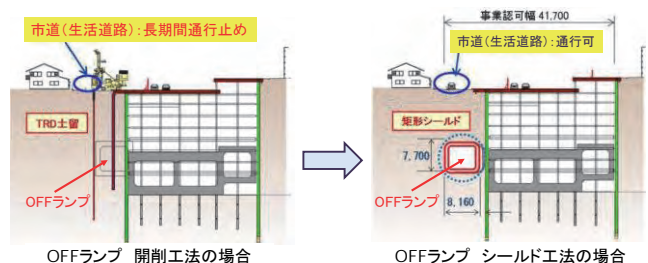


図-2 矩形シールド工法への変更

3. 矩形シールドの工事概要

3.1 シールド施工条件

出口ランプの工法変更にあたり、当初設計の道路線形をもとにトンネル線形を計画、構造物の建築限界を確保できるシールド断面形状を検

討し、事業認可幅内で構造物の必要最小断面を確保すること、ならびに本線開削部との離隔を確保する必要から矩形断面に決定した。

シールドトンネルは、地上の発進立坑から西に向かって225m掘進し、本線躯体に到達する。

トンネル線形は、発進直後の右カーブ $R=600\text{m}$ と連続した左カーブ $R=600\text{m}$ で掘進し、その後、約150mに渡って本線開削区間の土留め壁と併走する。縦断線形は発進立坑から8%の下り勾配であり、到達部手前で縦断曲線 $R=730\text{m}$ で上り1.37%に転じる。発進部は、1.5mの小土被りで、到達部で土被り17mとなる(図-3参照)。

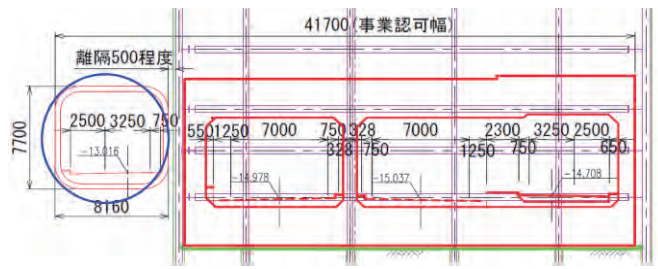


図-4 本線開削土留め併走区間断面図

掘進範囲の土質条件は、地表面付近2~5mの埋土層に深に洪積地盤の砂礫土層(N値50以上)と粘性土層(粘着力 $c=20\sim30\text{kN/m}^2$)が互層で構成される硬質地盤である(図-5参照)。

3.2 アポロカッター工法の導入

矩形シールドの工法選定に際しては、断面形状の多様性、洪積地盤や改良体掘進といった硬質地盤掘削への適応性^{1),2)}から、アポロカッター工法を採用した。アポロカッター工法は、小径のカッターヘッドによる自転と公転を組み合わせた掘削機構で、矩形をはじめ多様な断面形状に対応でき、硬質地盤掘削にも優れる。写真-1に工場仮組検査時のシールド機全景写真を示す。

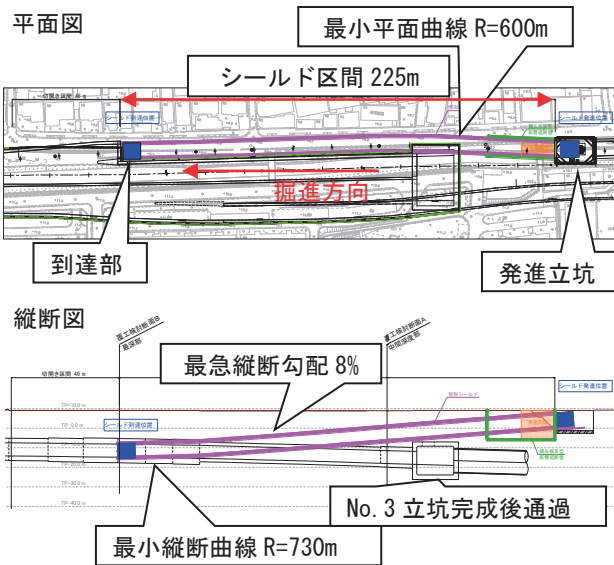


図-3 シールドトンネル線形概略図

シールドトンネルと土留め壁芯材との離隔は、既往の施工実績の最小である500mmを標準として計画した。トンネル断面は、都市計画の事業認可幅に収めることが前提条件であるため、シールドの蛇行余裕50mm、耐火被覆余裕25mm、内装設備余裕80mmを考慮すると矩形形状とする必要があった(図-4参照)。



写真-1 アポロカッターシールド機

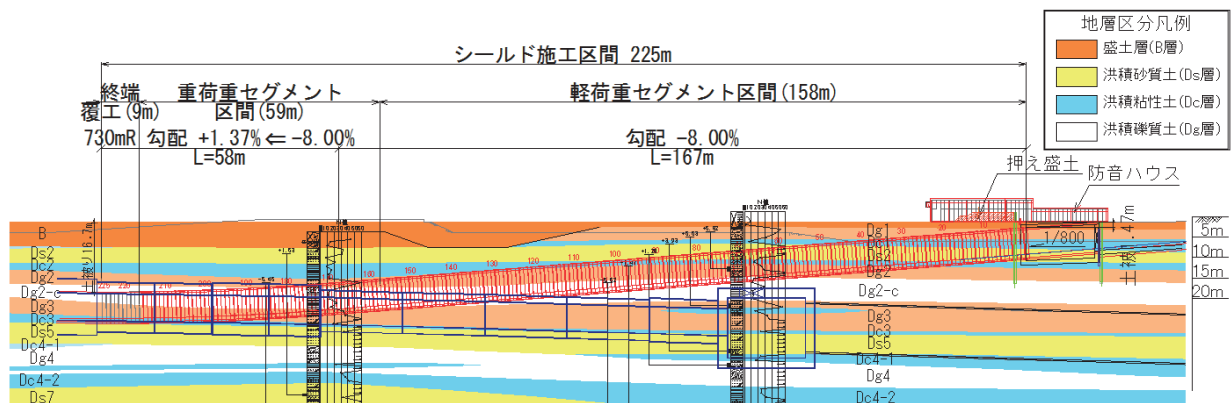


図-5 シールド機掘進区間土層縦断図

4. シールド機の仕様

矩形シールド機の掘削機構や装備仕様は、以下に挙げる施工条件を考慮した計画とした。

- ・小土被り発進
- ・地中障害物
(旧護岸間知石等、想定範囲は事前に撤去)
- ・到達部での全土被り圧の作用
(開削土留め背面であるため)
- ・土留め壁との掘削離隔が小さい
(セグメントと土留め壁芯材との離隔約500mm)

これらを勘案し、地表面影響を抑制するための同時裏込め注入装置、セグメント組立形状の精度を確保するための形状保持装置(上下左右拡張式)が、標準装備として採用された。

中折れ装置に関しては、曲線半径への対応には比較的余裕があるが、曲線施工時の余掘り量を極力小さくすること、到達時にシールド機方位の引上げ、そしてローリング修正を含め土留め壁併走に伴う姿勢制御への活用が期待できることから、標準で装備されることとなった。

図-6にシールド機概形図、表-1にシールド機諸元表を示す。

5. 施工上の課題

5.1 小土被り発進への対応

発進時のシールド機は、後端がほぼ地表面に位置しており、シールド機先端での土被りが1.5mである。発進立坑が近隣官民境界にも隔離4mと接近していることもあり、事前のFEM解析では、発進直後の土被り4m地点で、シールド直上21mm、官民境界0.9mmの沈下が予想されており、沈下防止対策が必要であった。

5.2 土留め壁併走掘進

本線開削部の土留め壁併走区間では、セグメントと土留め壁芯材との離隔は500mmの設計であるが、図-7に示すように掘進時には、カッター掘削部と土留め壁ソイルモルタル部分との離隔は最小250mmまで接近する。このため、慎重な線形管理と同時に、土留め壁への影響に配慮した切羽土圧の管理が要求された。

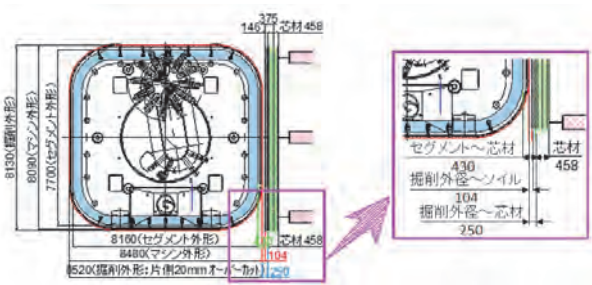


図-7 シールドと土留め壁の離隔

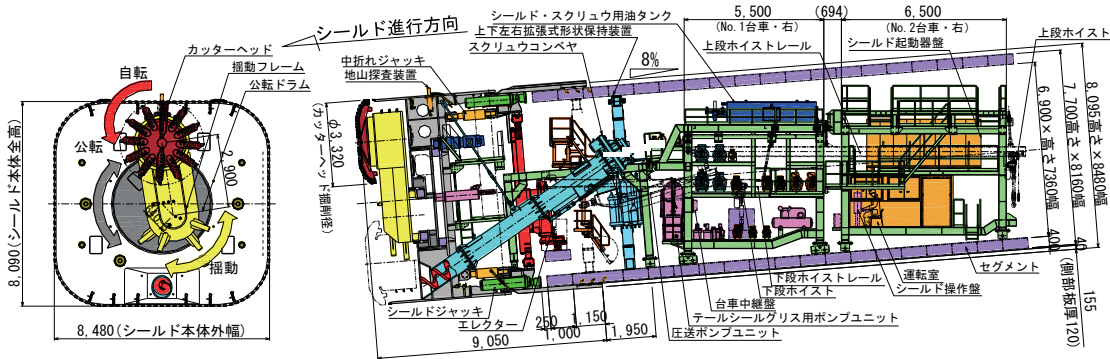


図-6 シールド機概形図

表-1 シールド機諸元表

シールド本体要目		カッターヘッド要目	
外 寸 法	▶ 高さ8,090mm × 幅8,480mm	形 式	▶ アポロカッター方式
機 長	▶ 9,050mm	公 転 周 期	▶ 4 min/rev (0.25rpm)
スキムプレート厚 (テール部)	▶ 上下155mm、左右120mm (SM490A)	カッターヘッド	▶ 回転数 4.7min ⁻¹ トルク 720kN-m
シールドジャッキ	上部 ▶ 2,500kN × 1,300st × 34.3MPa × 25本	揺動フレーム	▶ 回転数 Max0.9min ⁻¹ トルク 1,900kN-m
	下部 ▶ 3,000kN × 1,300st × 34.3MPa × 7本	公転ドラム	▶ 回転数 Max0.9min ⁻¹ トルク 2,200kN-m
中折れジャッキ	▶ 2,500kN × 200st × 34.3MPa × 24本	コピークットストローク	▶ Max 70mm
中折れ角度	▶ 左右1deg 上下1deg	スクリーユコンベヤ要目	
総 推 力	▶ 83,500kN	羽 径 × ピ ッ チ	▶ φ700mm × @600mm
本 体 重 量	▶ 6,500kN (後続台車1,000kN含む)	回 転 数	▶ Max12min ⁻¹
		ト ル ク	▶ 常用70.3kN-m
		排 土 量	▶ 141m ³ /h

5.3 線形管理とシールド機姿勢制御

土留め壁との近接併走掘進にあたり、隔離を保ちながらの掘進が必要であった。また、下り勾配 8%での掘進と到達付近での+1.37%までの引起しを伴うことから、線形管理がより重要となる。さらに、矩形シールドの場合、ローリングの発生により、テールクリアランスが著しく減少することで、セグメントの組立が困難になることが懸念された。これらのことから、シールド機、セグメントともに、方位とローリングを含めた姿勢制御を必要とした。

5.4 急勾配施工における安全確保

シールド掘進は、下り 8%の急勾配施工であることから、掘進時のセグメントをはじめとする坑内の資材搬送では、逸走防止、接触防止といった安全確保が必要であった。

6. 各種対策と計画

6.1 小土被り発進対策

発進に際しては、近隣民家にも近接しており、最小土被り 1.5m (押え盛土造成前)、矩形断面の上部が平坦であることから、沈下防止対策と地盤崩壊防止対策を施した。表-2、図-8 の内容で、押え盛土、影響遮断壁 (無芯ソイルモルタル壁)、浅層改良を施し、水平挿入式傾斜計を利用した地表面沈下の自動計測を押え盛土造成時に設置した。また、シールド機前胴からは、掘進中に沈下抑制特殊充填材 (ボイドキーパー) ^{3),4)} を注入した。裏込め注入もシールド機からの掘進同時裏込め注入方式を採用した。発進時の立坑の状況を写真-2 に示す。

表-2 小土被り発進対策

対策	内容
(1) 押え盛土	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・発進直後L=16.5m (機長程度), h=2.5m 盛土材・・・セメント改良土 (50kg/m³添加) 目的・・・①切羽圧への上載圧30kN/m²付加 ②加泥材、裏込め材の噴出防止
(2) 影響遮断壁	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・発進直後L=30m区間 (深さ15m) 立坑土留TRD施工時に無芯ソイルモルタル壁施工 (南北2面) 目的・・・周辺道路、家屋への沈下影響防止
(3) 浅層改良	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・土被り1D相当 (深さ8m) 程度までの区間 表層・・・セメント混合改良 (2m以深は薬液注入) 目的・・・①地表面沈下の抑止 ②加泥材、裏込め材の噴出防止
(4) 地表面沈下計測	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・発進直後L=22m (押え盛土区間含む) 2mピッチで水平挿入式傾斜計設置 (沈下量演算) 目的・・・①掘進時のリアルタイム計測 ②掘進時の設定切羽土圧の妥当性検証
(5) 沈下抑止特殊充填材	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・掘進中のマシン周囲のカッター余り部分に充填 (マシン前胴から掘進中に充填) 材料・・・流動性 (充填性) を有し、1ヵ月で地盤強度相当に硬化



写真-2 シールド発進状況

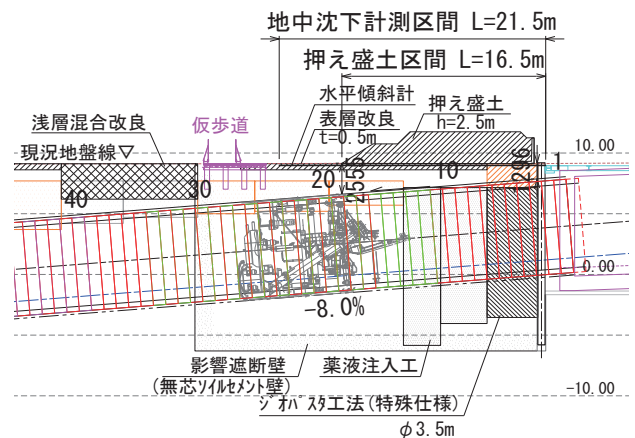


図-8 小土被り発進計画断面図

6.2 土留め壁併走掘進の対策

掘進時の切羽土圧管理では、掘進に伴い深度が連続的に増えることから、掘進 10m ごとに切羽土圧管理値を地下水位も勘案し、段階的に設定した。掘進深度に応じた静止土圧、主働土圧、静水圧を図-9 に示す。通常シールド工法の管理土圧は、ある程度土被りがある場合は、静止土圧に予備圧 20kN/m²を加えた値を用いるが、今回は小土被りであることと、土留め壁への影響を考慮する必要があり、予備圧は 10 kN/m²とした。

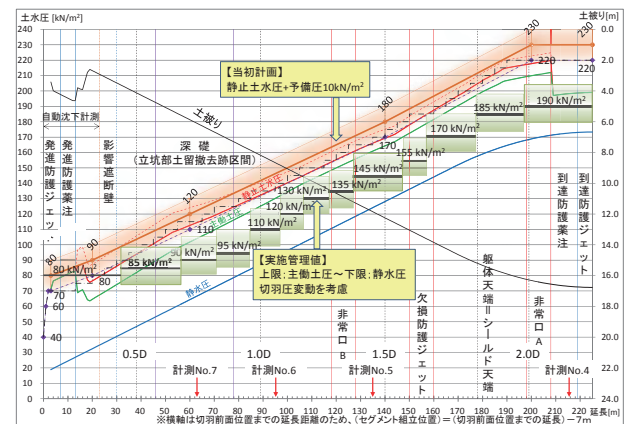


図-9 掘進深度ごとの切羽土圧管理値の設定

掘進管理に際しては、開削側の土留め計測管理データも同時に取り込み監視する計画とした。掘進時は、実測の地下水位に基づく土水圧を再計算し、矩形シールド機通過時の土留め変位と切梁軸力、地表面沈下を計測しながら、早い段階で最適な管理値を決定し掘進管理に反映した。

アポロカッター工法における切羽土圧管理は、泥土圧式シールド工法と同様の考え方に基づいて、噴発や閉塞を防ぎ、切羽土圧を安定させるために、添加材調整によるチャンパー内での掘削土砂の均質な混合攪拌と流動性確保が

求められる。本工法では、カッターヘッドが小径で、シールド機フードから露出しているため、特に慎重な切羽安定確保が必要である。そこで、チャンバーには上下3段、左右対称で合計6点の土圧計を配置し、カッター回転に伴う土圧分布を運転室内の土圧分布監視モニター(写真-3参照)にコンター図として可視化しながら切羽土圧管理を行うこととした。掘進は、15mm/min程度の速度で、平均日進量2m(昼方のみ)で計画した。以上の対策を表-3に整理する。



写真-3 土圧分布監視モニター

表-3 土留め壁併走掘進の対策

対策	内容
(1) 計測関係	<ul style="list-style-type: none"> 本線開削部土留め計測との連携 土留め変位、土留め支保工軸力、間隙水圧等 掘進データと同じ時系列でデータ監視、整理
(2) 切羽圧管理	<ul style="list-style-type: none"> 本線開削部土留め壁の監視(目視、カメラ設置) 地表面への影響と合わせ、切羽管理土圧設定を事前に検討 静止土水圧+予備圧(10kN/m²)を基準に最適な管理値を設定 →発進時の沈下計測実績から、主働土圧+予備圧での設定に変更
(3) 姿勢制御	<ul style="list-style-type: none"> 土留め壁併走区間では土留め壁側の緩みでシールド左右不均衡の恐れ マシン姿勢制御、ローリング制御の影響が想定されるため、 カッター余掘り制御、中折れ、シールドジャッキパターンで調整
(4) 線形管理	<ul style="list-style-type: none"> シールド掘削外径と土留め壁離隔:最小250mm→慎重な線形管理が必要 セグメント幅を1.0mとし、蛇行修正セグメントを計画的に準備

6.3 線形管理とシールド機姿勢制御の対策

姿勢制御システムを導入することで、本線開削土留め壁との小離隔での掘進に際し、カッター余掘り制御によるローリング修正対策も施した。

アポロカッター工法のシールド機は、カッターの切削精度(カッター回転軌跡)±3mmで掘進する。シールド機がローリングする場合は、写真-4のカッター操作画面に示すような目標軌跡をある座標軸で回転させたような軌跡として、余掘り修正掘削する制御が可能である。



写真-4 ローリング修正掘削システム

6.4 急勾配施工における安全対策

本施工では専用の搬送台車を導入し、事前には制動確認の試験も行った。掘進中の坑内運搬状況を写真-5に示す。また、切羽でのセグメント組立に際しては、勾配の影響を考慮し、エレクター周辺の可動足場や、後部作業デッキを水平に保てるよう作業性も配慮した。



写真-5 セグメント坑内運搬状況

7. 掘進実績と評価

7.1 小土被り発進の評価

図-10に地表面沈下測量結果を示す。裏込め材と沈下抑制特殊充填材は、シールド機全長(9.05m)が発進エントランス内(地盤内)に入って坑口の止水注入が完了してから注入した。施工ヤード内でシールド機全長が地山内に入るまでは沈下抑制特殊充填材を注入できず、余掘り量に相当する沈下が発生した。しかし、注入開始以降は沈下量を5~10mmに抑制でき、注入効果があったと考える。

また、発進後の押え盛土の効果により、切羽土圧を作用させた際の添加材の地表面への噴出もなく、安定した設定圧を保つことができた。

シールド周辺地盤への沈下影響、緩み影響の防止のために築造した影響遮断壁の効果も発揮され、遮断壁外側の官民境界(歩道縁石)での地表面沈下量は1mm以下に抑えられた。

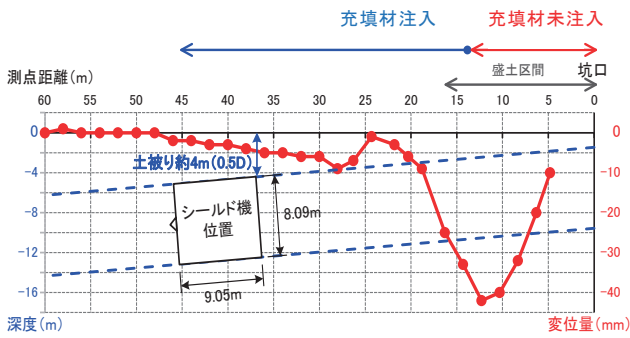


図-10 地表面沈下測量結果

7.2 土留め壁近接併走掘進の評価

掘進時は、地表面沈下抑制と、土留め壁に過剰な影響を与えないよう切羽土圧管理値を極力低く設定した。当初は、静止土水圧 (+予備圧 10kN/m^2) の設定としたが、発進時の地表面測量の結果と土留め壁への影響に配慮し、主働土圧+予備圧 10kN/m^2 まで抑えた設定に変更した。初期掘進から本掘進まで、延長225mを本線開削土留め壁からの漏水、出水を誘発せず無事終えた。

計測断面4ヵ所(図-11参照)のうち、掘進前後の影響の最も現れた測点No.6での土留め計測結果を図-12に示す。シールド機通過前後に軸力がやや減少傾向にあったが、土留め壁の変位はほとんど変化なく影響を抑えられた。

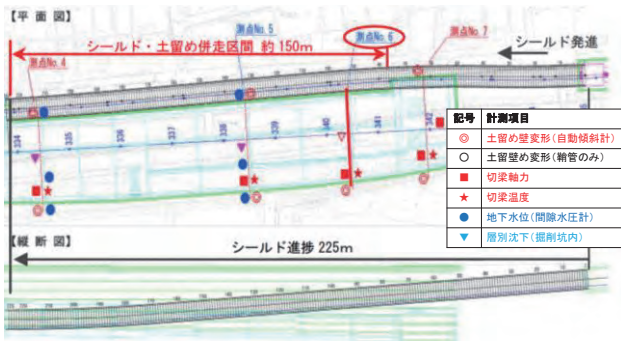


図-11 シールド併走部の土留め計測断面配置図

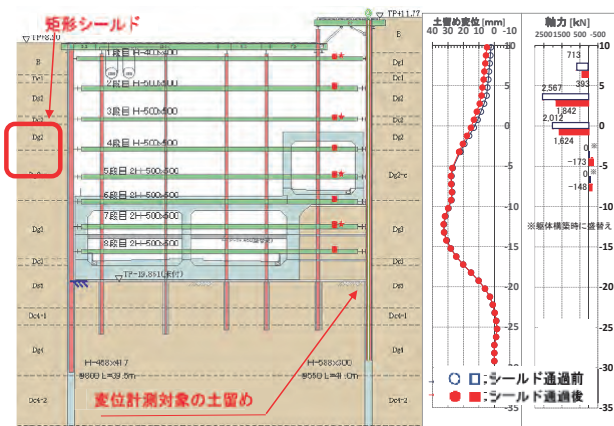


図-12 掘進前後の土留め計測結果 (測点 No.6)

7.3 姿勢制御の実績

姿勢制御では、到達付近での下り8%から1.37%まで引起す線形であったが、中折れ装置を上方向に効かせることで、セグメントに過剰な推力をかけず、目標の方位に掘進できた。

ローリング修正に対しては、ローリング角度やテールクリアランスを監視しながら、発生の程度に応じて、下記の対策を順次施した。

- ・カッター公転方向による修正
ローリング発生方向とカッター公転方向を逆転させ、地盤切削反力を利用して修正した。
- ・中折れ装置によるシールド機方位角修正
中折れ装置により、シールド機前胴の方向を傾け、重心位置が移動することで修正した。
- ・余掘り修正掘削システムによる修正
ローリング修正掘削による余掘りで、掘削軌跡を捻ることによって角度を修正した。

セグメント組立に必要なテールクリアランス確保のための施工上の限界値と、トンネル構造物の建築限界確保のための品質上の限界値から、ローリングの許容値を 0.5° に設定した。これに対し、施工中は最大 0.3° までのローリングが発生したが、上述の余掘り修正掘削システムによる修正掘進により、1機長相当(約9m)の修正掘進を継続して、基準の 0° までローリング修正に成功した。本工事で採用したアポロカッター工法の掘削機構が、矩形シールド機の姿勢制御にも有効であることが確認できた。

8. おわりに

近年、狭隘な都市部において、小土被り施工や構造物近接掘進、非円形断面トンネルの計画など厳しい条件での工事が増えている。本工事で得られた知見が、今後の同種工事の計画、施工に活用されれば幸いである。

参考文献

- 1) 奥平守幸・原田大・吉田潔・真鍋智・永森邦博・小田誠：地下通路工事における矩形シールド工法(アポロカッター工法)について、土木学会第63回年次学術講演会，2008.9
- 2) 鈴木隆文・山崎仁：東急東横線渋谷～代官山駅間地下化工事(シールド工事)，土木学会第64回年次学術講演会，2009.9
- 3) 真鍋智・渡辺幹広・馬目広幸・大嶋昇：高速道路ランプ部における矩形シールド工法の計画と施工，トンネルと地下，第49巻2号，2018.2
- 4) 真鍋智・吉田潔・渡辺幹広・戸川敬・馬目広幸・吉迫和生・牛垣勝・志村敦：矩形シールド工法による小土被り発進・既設土留め壁近接併走掘進の実績，トンネル工学研究発表会，2017.11

10. 大型遠隔操縦式草刈り機による情報化施工技術の活用について

国土交通省 中国地方整備局 中国技術事務所 ○相羽 晴彦
香出 聡一郎

1. 堤防除草の現状と課題

国土交通省が管理する河川では、堤防点検や堤体の保全のため、毎年出水期前後の年2回堤防除草を実施している。

除草方式は大型遠隔操縦式草刈り機（以下、「大型遠隔」）、ハンドガイド式草刈り機、肩掛け式草刈り機や人力等がある。

除草作業は以下の手順で実施している（図-1）。

- ①除草現場へ機械等を搬入し除草する。
- ②刈草を集草後、梱包する。
- ③除草面積や刈高を測定する。
- ④測定結果をもとに展開図や数量計算書等を作成する。
- ⑤確認立会等で発注者が出来形を確認する。

堤防除草では、現場での苦渋作業や現場作業完了後の書類作成の負担が課題となっていることから、作業の省力化を目的として検討することとした。

なお、今回対象とする除草方式は中国地方整備局管内で最も使用されている大型遠隔とした。

また、情報化施工技術の普及が近年進んでいることから、大型遠隔で活用可能な情報化施工技術についてシーズ調査を行い、活用する技術を選定後、試作装置の一部製作・動作確認を行った。

2. 大型遠隔の主要諸元

大型遠隔（写真-1）は1999年度に開発され、中国地方整備局管内では現在33台導入されており、大型遠隔による除草面積は中国地方整備局管内で全体の約70%を占めている。

大型遠隔には以下の特徴がある。

- ・作業員が機械に搭乗せず、ラジコンによる遠隔操作で除草を行う。
- ・堤防等の斜面上において等高線走行時に直進するように「法面自動直進走行制御機能」を有する。
- ・除草箇所の不陸に対して自動的に追従し刈高を一定にする「作業機高さ自動制御機能」を有する。



図-1 除草作業フロー（従来）



写真-1 大型遠隔操縦式草刈り機

大型遠隔の主要諸元は表-1 のとおりである。

3. 情報化施工技術の活用検討

情報化施工は、建設事業の生産性、施工品質、信頼性の向上を目的とした施工方法であり、ICT（情報通信技術）を活用している。国土交通省では1997年度から検討がなされ、2002年度以降試験施工が始まり、順次導入が進められている。

検討にあたり既存の情報化施工技術のシーズ調査を実施し、大型遠隔への導入効果を整理した（表-2）。

また、情報化施工技術を施工技術、品質管理技術、出来形管理技術と統合管理技術に分類し整理

表-1 大型遠隔の主要諸元（2016年度納入機械）

項目		諸元
機械質量		2,800 kg
寸法	全長	4,390 mm
	全幅	2,040 mm
	全高	1,260 mm
エンジン	定格出力	49.1 kW
作業速度		0～5.5 km/h
走行速度		0～6.5 km/h
作業装置	草刈り幅	1,850 mm
	最大傾斜角度	40°
	形式	フレールモア (ハンマナイフ式)
	駆動方式	油圧式

表-2 情報化施工技術のシーズ調査結果

No.	分類	技術名	概要	大型遠隔への導入効果	判定
1	施工技術	マシンコントロール (MC)	3次元設計データと建設機械の位置情報から操作制御を行う技術	モア装置の高さ管理での活用が考えられるが、既存の大型遠隔には不陸への追従機能があるため、必要性は低い	△
2		マシンガイダンス (MG)	3次元設計データに対する作業位置や動作状況を提供（表示）する技術	除草作業は地盤の変更や構造物の設置等と異なるため、活用には適さない	×
3		締固め管理	建設機械の走行軌跡と走行回数により盛土工事等の締固めや転圧を管理する技術	除草作業時の草刈り機の走行軌跡を取得することで、作業状況の記録と施工管理の省力化が期待できる	○
4	品質管理技術	巻き出し厚管理	建設機械の作業量（土工量）を計測管理する技術	堤防除草と関連性が低い	×
5		強度管理	施工前後や現場試験による強度等の試験データを管理する技術	堤防除草と関連性が低い	×
6		温度管理	アスファルト舗装の混合物温度を管理する技術	堤防除草と関連性が低い	×
7	出来形管理技術	出来形管理	施工量や形状寸法等を計測し数値管理を行う技術	集草後に用いることで高さ管理は可能となるが、既存の大型遠隔には不陸への追従機能があるため、必要性は低い	△
8	統合管理技術	稼働記録管理	建設機械の稼働状況や運行状況を管理する技術	堤防除草と関連性が低い	×
9		施工管理	複数の建設機械による出来形管理を統合管理する技術	堤防除草では複数の機械を使用することは少なく、関連性が低い	×

した。

3.1 施工技術

施工技術は、施工現場の3次元設計データと建設機械の作業装置の位置情報から、作業装置の自動制御や動作状況等を表示する操作支援を行う技術で、マシンコントロールとマシンガイダンスがある。

マシンコントロールは大型遠隔のモアの高さ管理に活用が可能であるが、作業機高さ自動制御機能を有していることから、必要性が低いと判断した。

マシンガイダンスは設計データと現地盤データの差分を表示するが、除草の場合は草を対象としており、大型遠隔での活用は適しないと判断した。

3.2 品質管理技術

品質管理技術は、作業回数や各段階の厚さ、地盤強度や温度等の品質に関するデータを施工と同時に取得し、管理する技術であり、締固め管理、巻き出し厚管理、強度管理や温度管理がある。

締固め管理は作業装置の走行軌跡を取得し、施工範囲内の作業回数を管理する技術であることから、大型遠隔で活用することにより、作業済範囲の表示・記録や作業面積等の計算が可能となり施工管理の省力化が期待できると判断した。

巻き出し厚管理と強度管理は土工の敷均しや締固めで使用されており、大型遠隔での活用は適しないと判断した。

温度管理についても、除草と関連性が低いことから、大型遠隔での活用は適しないと判断した。

3.3 出来形管理技術

出来形管理技術はトータルステーションやGNSSの測量機器を用いて、構造物や土工等の出来形形状を計測し、出来形管理図等を作成する技術である。

大型遠隔の場合、除草直後は刈草があり刈高の計測ができないため、集草後に計測する必要があり、省力化に繋がりにくい。また、大型遠隔は作業機高さ自動制御機能を有していることから、必要性が低いと判断した。

3.4 統合管理技術

統合管理技術は複数の建設機械の稼働状況や運行状況を記録し、施工状況全体の管理を行う技術である。

大型遠隔の場合、同一の現場に複数の機械が入ることは少なく、必要性が低いと判断した。

4. 試作装置の検討

情報化施工技術のシーズ調査結果より、締固め管理技術を活用し、大型遠隔の走行軌跡から作業済範囲の表示や記録を行い、それをもとに展開図や数量計算書の自動作成機能の検討を行うこととした(図-2)。

4.1 締固め管理システム

今回使用する締固め管理システムは、VRS方式のアンテナ一体型GNSS受信機を利用し、座標データをワイヤレス通信でPCやタブレット端末に送信することができるものとし、システムの改良や調整の対応が可能なものを使用した(写真-2)。

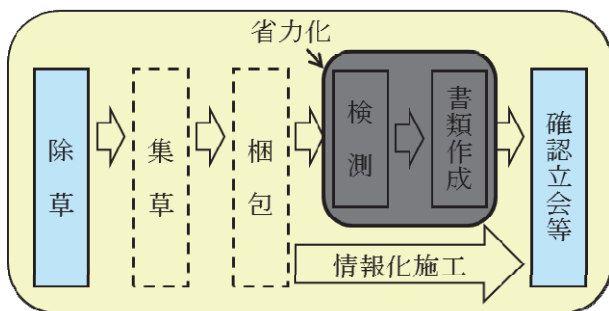


図-2 除草作業フロー(検討イメージ)



写真-2 締固め管理システム(左:GNSS受信機 右:システム用PC)

4.2 システムの改良検討

既存の締固め管理システムは盛土の締固めを対象としているため、大型遠隔に適用するにあたり以下の検討を行った。

(1) メッシュの大きさ

締固め管理システムでは、施工範囲を一定の大きさのメッシュで区切り、メッシュ内の一定面積を作業装置が通過した場合に、作業したとみなしメッシュが着色される。また、締固めの場合は同一箇所を複数回締固めることから、回数毎に色に変化する仕組みになっている。

締固めでは500mm又は250mm角のメッシュが標準である¹⁾が、大型遠隔の刈り幅から200mmメッシュとした(図-3)。

(2) メッシュの着色判定ルール

着色の判定はモア中央部とし、アンテナ一体型GNSS受信機からモア中央部までのオフセットと刈幅をシステムに設定した。

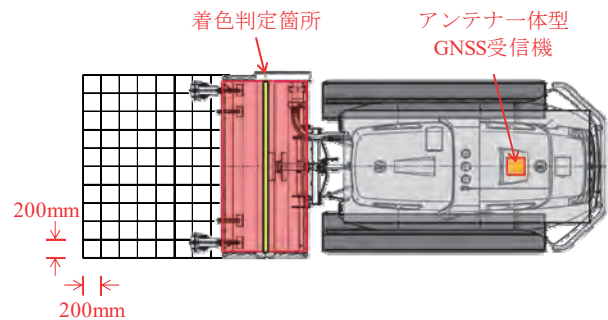


図-3 大型遠隔とメッシュサイズ

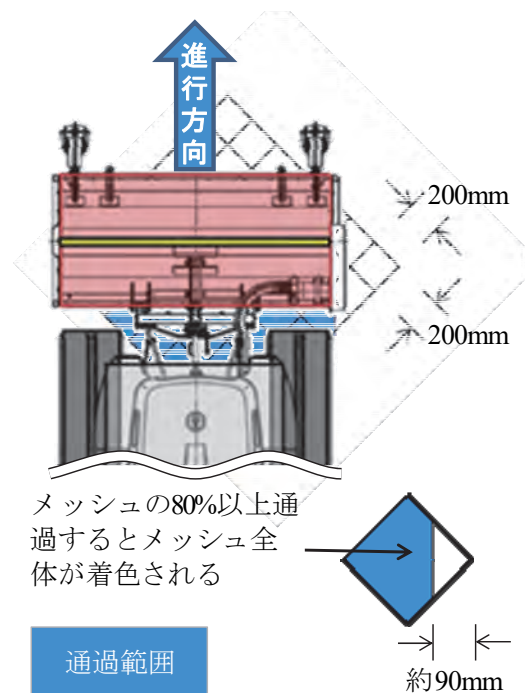


図-4 着色判定ルール

作業装置の両端部ではメッシュの一部しか通過しない可能性があるため、着色判定ルールが必要となる。締固めではメッシュの四隅の内1点を通じた場合に着色されるが、大型遠隔で同様にするると刈り残しが生じる。大型遠隔による除草では、刈り残しを防ぐため、ラップ幅約100mmを考慮し施工していることから、作業装置がメッシュ面積の80%以上を通過した場合に着色することとした(図-4)。

なお、除草を伴わない、機械の移動や転回時はシステム用PC(又はタブレット)端末上で着色のON/OFFを選択することにより、作業済範囲に含まれない。

5. 動作確認

改良後のシステムを大型遠隔に取り付けて、中国技術事務所構内のグラウンドで動作確認を行った(写真-3)。

動作確認は予め設定した仮想の除草範囲を大型遠隔が走行するよう操作し、システムの表示状況等を確認した(写真-4)。

動作確認の結果、GNSSの座標情報が正しいこ



写真-3 動作確認状況



写真-4 システム表示状況

とを確認し、除草幅に対して8~9メッシュが着色されたことから着色判定ルールが機能していることが確認できた。その他、モアを回転させた作業走行時の振動や速度もシステムに影響がないことを確認できた。

6. 今後の課題

2017年度は大型遠隔での活用に適した情報化施工技術を整理し、選定された締固め管理技術のシステムを一部改良後、動作確認を行った。

今回は、平坦地で動作確認を行ったが、堤防除草では傾斜地での作業となり、途中で勾配が変化する場合もある。

傾斜地では大型遠隔自体が傾いているため、GNSS受信機から着色判定箇所であるモア中央部までの相対的な座標関係が平坦地と異なる(図-5)。

このことから大型遠隔に傾斜計等を取り付け、取得した角度データによる座標の補正を今後検討する予定である。

また、展開図や数量計算書について、様式が現在定められていないことから、現在使用されている様式を収集・整理の上で作成機能を検討する予定である。

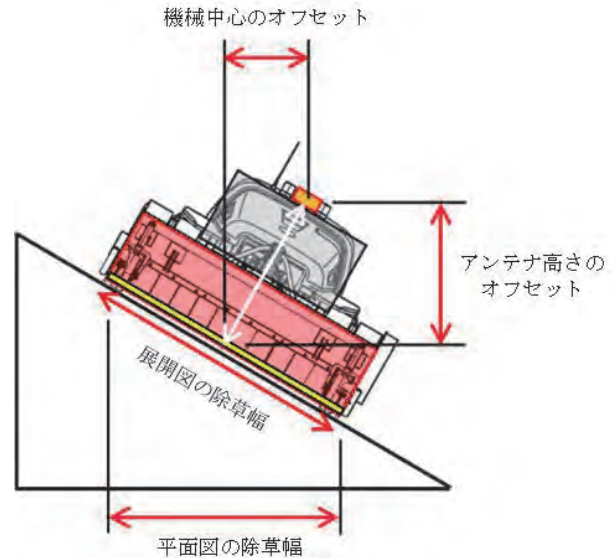


図-5 GNSSとモアの位置関係(傾斜地の場合)

参考文献

- 1) 国土交通省: TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領, 平成29年3月

11. 地上移動体搭載型レーザースキャナーを用いた

舗装路面プロファイルの算出

東亜道路工業株式会社
 ライカジオシステムズ株式会社
 東亜道路工業株式会社

○梅田 隼
 金子 公一
 塚本 真也

1. はじめに

国土交通省では建設業の生産性向上のための取り組みとして、i-Construction を推進している。その一環として ICT 技術の全面的な活用を掲げており、平成 28 年度から ICT 土工、平成 29 年度には ICT 舗装工が始まっている。平成 30 年度には新たに「地上移動体搭載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）（案）」が新設された。地上移動体搭載型レーザースキャナー(以下、地上移動体搭載型 LS)は、レーザースキャナーを移動しながら計測可能な計測技術で、データを迅速に取得可能なため、従来の地上型レーザースキャナー(以下 TLS)と比較して作業効率が極めて高い。特に道路のように長い距離を計測する場合に有利であると考えられる。

一方、従来より舗装の出来形の管理指標として平坦性があり、3m プロフィールメータ等により測定し、結果を提出することが求められている。

以上の背景より、本論文では、地上移動体搭載型 LS により得られる 3 次元点群データから舗装の平坦性、IRI を算出することを目的として、実路にて地上移動体搭載型 LS と舗装の平坦性や IRI の測定に一般的に用いられている低速プロファイラの測定を実施した。点群データから平坦性 $\sigma 3m$ と IRI を算出する手法を検討し、妥当性の確認を行ったので、ここに報告する。

2. 測定概要

関東地方の新設自動車専用道路にて測定を行った。現場は全線片側 1 車線、測定延長 934m(アスファルト舗装区間 L=134m, コンクリート舗装(トンネル) 区間 L=800m) であり、表層施工後に全区間の測定を実施した。

2.1 測定機器

測定時に使用した機器および解析ソフトウェアを表-1、写真-1 に示す。地上移動体搭載型 LS は Leica ProScan を、低速プロファイラには NEXCO の「路面プロファイラの性能確認方法」にて精度確認されたマルチロードプロファイラ(以下、MRP)を使用した。

表-1 使用機器およびソフトウェア

項目	使用機器名称	備考
地上移動体搭載型 LS (Leica ProScan)	トータルステーション TS	国土地理院 1 級(1 秒機) プリズムトラッキング 10Hz
	レーザースキャナ LS	最大スキャンスピード 1,000,000 点/秒 スキャンレンジ 40m ミラー回転 100Hz (外部バッテリー使用時)
点群処理ソフト	ProScan Ver1.02	各スキャンデータの取り込み、合成など
	SiTE-Scope 2019 ver3.00.00	指定範囲の点群抽出
設計データ作成ソフト	SiTEC 3D ver7.00.00	抽出エリア作成
低速プロファイラ	MRP-3000	NEXCO 試験方法 第 2 編 付属書 001「路面プロファイラの性能確認方法」 ¹⁾ にて精度確認済み機器
プロファイル解析ソフト	NEXCO 路面プロファイラ精度検証 ver1.0.0.β	性能確認
	ProVAL ver3.61.24	IRI 算出

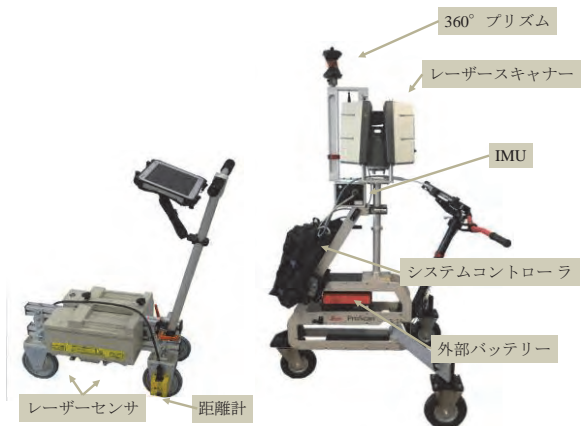


写真-1 MRP(左) Leica ProScan(右) 外観

2.2 地上移動体搭載型 LS の測定原理

国土交通省の ICT 舗装工において、使用するレーザースキャナーの測定精度は基層・中間層及び表層表面において、鉛直方向で $\pm 4mm$ 以内、平面方向で $\pm 10mm$ 以内と規定されており、点密度も 100 点以上/ m^2 が必要となる。図-1 に TLS 測定時の舗装表面でのレーザースポット形状のイメージを示す。従来の TLS 測定では、測定舗装表面が TLS 本体から離れるほどレーザーの入射角が小さくなり、ビーム長径の増加による延長方向の測定精度の低下や、放射方向の測定間隔増加による点密度の減少が発生する。よって規格を満たすためには、TLS 機種により異なるが、20~50m 毎に TLS 本体

を移設する作業が必要であり、測定後は点群処理ソフトを使用しデータを結合するなどの処理も必要となる。

一方、地上移動体搭載型 LS は自己位置を高精度に定位し、移動しながら測定できる計測技術である。測定原理を図-2に示す。①TSのトラッキングまたはGPSによる移動体の位置情報、②移動体搭載IMUによる移動体姿勢角情報、③移動体搭載型レーザースキャナーによるスキャンデータ、の3つの測定情報より絶対座標を持つ点群データの生成が可能となる。TLSと比較して、レーザースキャナーと測定路面が常に近い位置にあるため、ビーム長径の変動が少ない、点密度が確保しやすい、測定時間、解析時間が大幅に削減されるなどの利点がある。表-1に示す機器を使用して測定した場合、これまでの経験ではTSから前後300m計600m程度の区間を一度に測定することが可能である。なお、移動しながらの測定なのでTLSで行うような写真撮影はできないため、点群に色情報を付与することはできない。

Leica ProScanの測定手順を図-3に示す。TSの測定結果は、全ての点群に影響するため、その設置は特に慎重に行う必要がある。

2.3 IRIについて

平成25年2月に国土交通省から総点検実施要領(案)舗装編が策定され、舗装点検の調査項目として「ひび割れ率」「わだち掘れ量」「IRI(International Roughness Index)」の3指標を使用することが定められている²⁾。NEXCOが管理する道路においては新設工事における出来形管理基準や、保全における日常点検においてIRIが指標として用いられている³⁾。

IRIは、世界銀行が提案した路面のラフネス指標で、運転者の乗り心地に関連している。「2軸4輪の車輪の1輪だけを取り出した仮想車両モデルをクォーターカー(QC)と呼び、QCを一定の速度で路面上を走行させたときの車が受ける上下方向の運動変位の累積値と走行距離の比(mm/km またはmm/m)を、その路面のラフネスとする」と定義されている⁴⁾。従来用いられてきた平坦性σは評価路面自体の凹凸を直接評価する指標であるが、IRIはQCが評価路面を通行した際の振動具合を観測することで、間接的に路面のラフネスを評価するものである(図-4)。

IRIの測定装置は、算出方法によって表-2に示す4クラスに分類される⁴⁾。MRPによる測定はクラス2に分類される。一方、Leica ProScanによる測定でIRIを算出する手法は、クラス分類が明確ではないが、作成する路面プロファイルの元となる点群は正しい標高座標を持つので、クラス1あるいはクラス2に相当すると推測される。

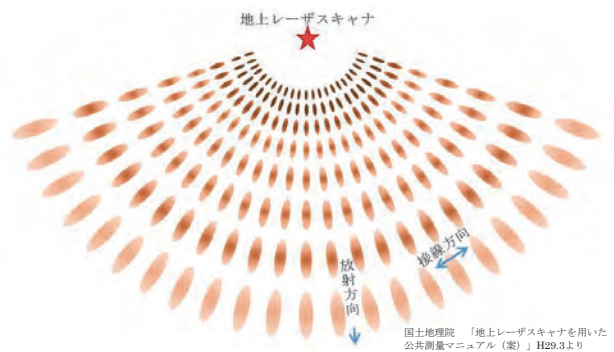


図-1 TLS測定時の舗装表面でのスポット形状

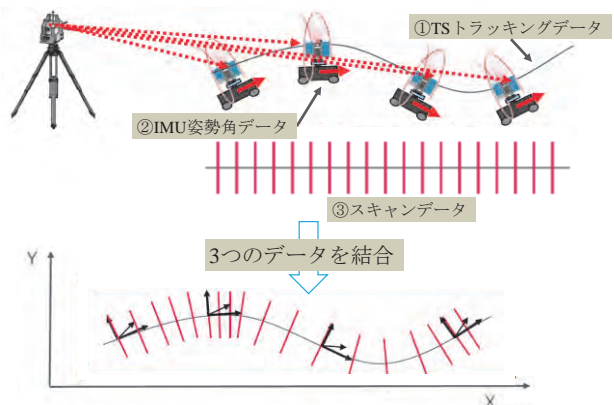


図-2 地上移動体搭載型LSの測定原理

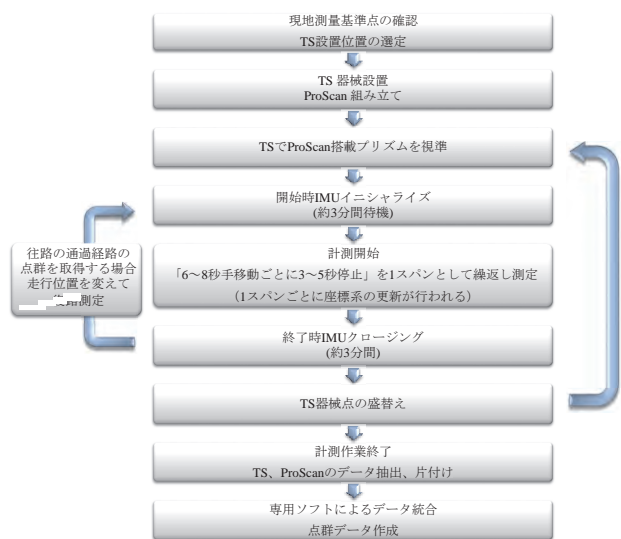


図-3 Leica ProScan 測定手順

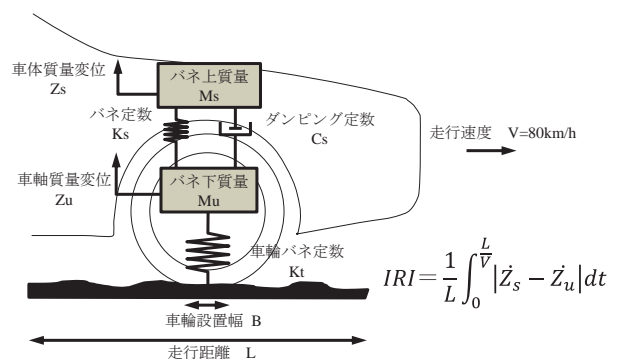


図-4 QCモデル

3. Leica ProScan のデータ処理方法の検討

平坦性の測定方法は車道中心線から 1m 離れた線上を測定すると定義されている。本研究では OWP 側に 1m 離れた線を測定線とした。MRP の測定は、測定線上を MRP レーザー照射部が通過するように走行する。Leica ProScan で計測した点群データより、平坦性の測定線上のデータを抽出する方法を以下の様に検討した。

3.1 Leica ProScan の測定位置

図-5 に示すように Leica ProScan は足元(機体下方)のデータは取得できないため、通常は走行位置を変えて往復走行することで欠損部が生じないように測定する。そのため IRI を算出するためのプロファイルを取得する車線と同一車線、反対側車線にて測定した二つのデータが得られるが、

- ① 二つのデータは微小ながら高低差が生じることがあるため、プロファイルの取得を目的とする場合は、一方のデータのみを使用する方が、精度が高まると予想されること
- ② 同一車線にて測定したデータは、測定時の足元の欠損部と測定線が重なってしまい、取得できない箇所が生じる可能性があること

という事由より、本検討においては、反対車線にて測定したデータのみを使用し測定線の点群を取得することとした。

3.2 プロファイル作成方法

3.2.1 測定線取得幅

図-6 に点群データから測定線上のデータを抽出するイメージ図を示す。点群を取得する抽出幅は、表-3 に示す四通りを検討した。

3.2.2 サンプルング方法

路面プロファイルを解析ソフト ProVAL に入力するためには等間隔の標高データを入力する必要がある。MRP の測定データは 0.01m 間隔で出力することが一般的である。Leica ProScan 測定データを同条件にて比較するため 0.01m 間隔にサンプルングした。まず各点に対し測定線上での位置(距離)の割り付けを行い、二次元データに変換した後サンプルングを行った。この際、サンプルングの手法として①最近傍点抽出方法、②区間平均算出方法の二つを検討した(図-7)。

4. 測定結果

4.1 測定状況

測定は 2018 年 3 月 19 日に実施した。延長 934m の上下線を、TS 設置位置の選定などの事前準備を含め約 3 時間半で測定した。Leica ProScan は台車の手押し作業員：1 名と、TS 据え付け、視準等作業員：1 名の計 2 名での作業であった。Leica ProScan 及び MRP の測定状況を写真-2 に示す。

4.2 Leica ProScan 精度確認

測定の妥当性確認のため、高さ方向の精度確認

表-2 IRI 算出方法の違いによるクラス分類

クラス	路面凹凸の測定方法	IRI の算出方法
1	水準測量	間隔 250mm 以下の水準測量で縦断プロファイルを測定し、QC シミュレーションにより IRI を算定する。
2	任意の縦断プロファイル測定装置	任意の縦断プロファイル測定装置で縦断プロファイルを測定し、QC シミュレーションにより IRI を算定する。
3	RTRRMS (レスポンス型道路ラフネス測定システム)	RTRRMS で任意尺度のラフネス指数を測定し、相関式により IRI に変換する。
4	パトロールカーに乗り込んだ調査員の体感や目視	パトロールカーに乗り込んだ調査員の体感や目視により IRI を推測する。



図-5 Leica ProScan 測定イメージ図

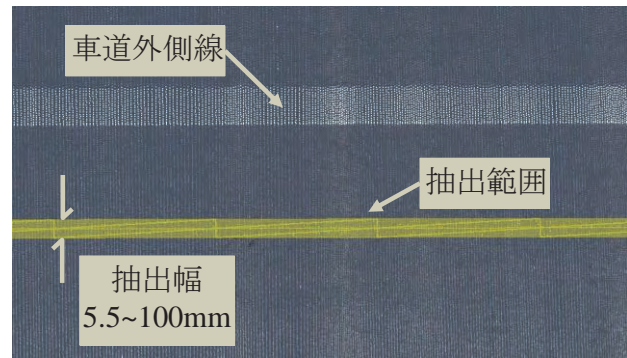


図-6 測定線抽出方法

表-3 測定線抽出幅の選定

測定線抽出幅	選定理由
5.5mm	3m プロファイルメータの測定車輪の幅を想定したもの
20mm	MRP の前輪の幅を想定したもの
50mm	水準測量にて使用するアルミスタッフの、地面に接する底面幅を想定したもの
100mm	低速プロファイル測定において、測定者に起因する走行軌跡の変動を考慮したもの

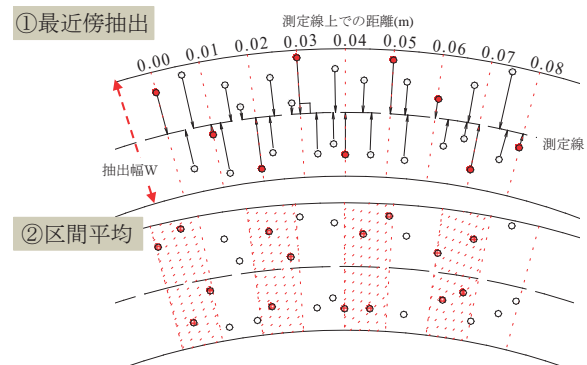


図-7 サンプルング方法



写真-2 Leica ProScan(左) 及び MRP(右) 測定状況

試験 5)を 2 個所で行った。検証方法は 1m 四方の検証路面を作り、検証路面の四隅を水準測量した平均値と、Leica ProScan により測定した検証路面内全点の平均値を比較するものである。測定結果を図-8、表-4 に示す。精度に関してはいずれも十分規格を満足するものであった。なお点群の色は、反射輝度で表示している。検証路面は①②ともに上り線側に作成したので、検証路面と距離が近い上り車線側を走行した測定結果の方が精度、密度共に下り車線走行と比較し良い結果となった。

上り線と下り線の高さを比較すると 2mm 程度ではあるが差が生じている。これは走行位置の違いによって生じた誤差と推測される。機械点の位置によって高さの差が生じることは地上移動体搭載型 LS に限らず従来の TLS においても同様であり、スキャナーの機械点を移動させる毎に必ず点群のラップ領域が生じる。ラップ領域において各点群の高さが異なるが、表-4 に示すように微小な差であり、出来形測定を目的とする際は問題ない誤差である。

しかし、本研究の線形上のプロファイルを算出するという目的においては、たとえ微小な差であっても二層に重なった状態の点群から抽出した場合、図-9 のように上下の点群の値を使用すると本来のプロファイルとは異なる形状となる事も想定されることから、本検討では前章に示したように片側車線でのデータのみを使用することとした。

4.3 評価区間での測定結果

現場内のコンクリート舗装において評価区間 200m 及び区間前後 20m の余長を含む 240m 区間を測定区間とし、NEXCO 試験方法「路面プロファイラの性能確認方法」を参考に検証を行い、Leica ProScan の路面プロファイラとしての性能を確認した。

4.3.1 データサンプリング結果

各プロファイル作成方法について検討する。サンプリングを行う際、0.01m 区間内に点群が存在しない場合があるが、その場合は前区間の値を引用し補間を行った。ただし上記区間が 0.05m 以上ある場合はエラー区間として記録を行った。Leica ProScan の解析方法に対しそれぞれ A~H と設定し、MRP により取得したプロファイルとの一致度を解析ソフト「NEXCO 路面プロファイラ精度検証」により算出した。結果を表-5 に示す。

抽出幅 5.5mm の時にエラー数が多く、最長空白区間も 0.27m と長いが、その他の抽出幅ではあまり変化がなかった。地上移動体搭載型 LS の点間隔は、縦断方向は台車手押し走行速度に依存し、横断方向は路面位置と LS との距離に依存するものである。本測定においては、走行速度は約 4~6m/s、TLS から測定線までの距離は約 10m でほぼ一定であり、点群の縦断ピッチは 5~20mm 程

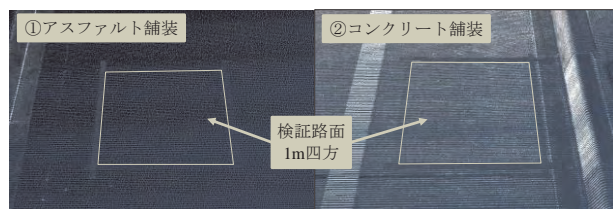


図-8 精度確認検証路面の点群図

表-4 Leica ProScan 精度確認試験結果

検証路面	TS から検証路面までの距離	真値となる四隅の平均値(m)	Leica ProScan 走行経路	Leica ProScan の測定高さ平均値(m)	高さの差(m) [±4mm以内]	点密度(n/m ²) [n=100以上]	可否
①As	150m	779.7385	下り車線	779.7360	+0.0025	2794	合
			上り車線	779.7381	+0.0004	5439	合
			上下結合	779.7373	+0.0012	8233	合
②Co	300m	775.7140	下り車線	775.7107	+0.0033	6233	合
			上り車線	775.7141	-0.0001	12938	合
			上下結合	775.7130	+0.0010	19171	合

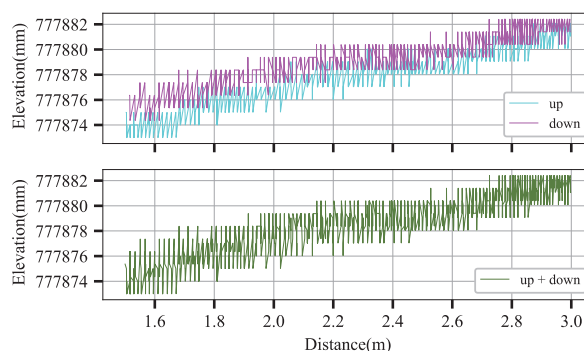


図-9 ラップ領域でのプロファイルの挙動

表-5 評価区間解析結果

番号	抽出幅 (mm)	サンプリング	抽出点数	平均点群数 /0.01m 区間	エラー数	最長空白区間
A	5.5	最近傍	14290	0.60	753	0.27
B	5.5	平均	14290	0.60	753	0.27
C	20	最近傍	51534	2.15	0	0.02
D	20	平均	51534	2.15	0	0.02
E	50	最近傍	128365	5.35	0	0.02
F	50	平均	128365	5.35	0	0.02
G	100	最近傍	256596	10.69	0	0.02
H	100	平均	256596	10.69	0	0.02
MRP	-	-	24000	1.00	-	-

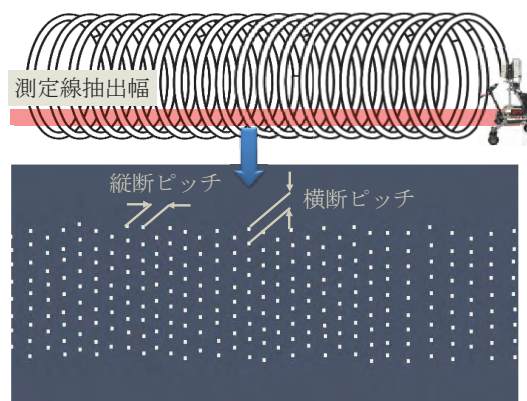


図-10 縦横断ピッチ イメージ

度、横断ピッチは 10~15mm 程度であったため、抽出幅 5.5mm ではエラー区間が多く生じた。以上のことから横断ピッチ以上の抽出幅であれば、抽出幅を増やしても縦断ピッチはほとんど変わらないと考えられる。平均点群数、エラー数を考慮する

と A, B の解析は 0.01mm 間隔でのサンプリングには適していないと言える。

4.3.2 プロファイル及び IRI 比較

前項にて算出した点群を用いて作成したプロファイルの一致度、及び IRI の精度を検証した¹⁾。ただし基準プロファイルは水準測量ではなく、同試験にて精度確認済みの MRP を使用している。ここで使用した MRP の、水準測量に対する移植性能は 0.996 である。また NEXCO の試験方法では移植性性能と反復性性能を乗じた評価値を算出することになっているが、本測定では複数回の測定は行っていないため移植性性能のみを算出した。

結果を表-6 に示す。プロファイル一致度は解析方法による違いは見られなかった。一方 IRI 精度は区間平均算出方法が優れているという傾向がある。A, B の解析は C~H の解析に比べて著しく低くなっている。抽出幅 20mm が最も IRI 精度が高い結果となった。

図-11 は MRP, Leica ProScan のプロファイルを表示したものである。Leica ProScan 測定による高さは絶対値を持つデータであるがグラフの表示の関係上起点を 0 にオフセットして表示している。C~H の形状はほぼ一致している。距離が進むにつれ差が大きくなっているが、これは MRP 側の傾斜計の精度に依存した誤差であるが、プロファイルの一致度、IRI 精度の算出にはほとんど影響しない。図-12 は一部区間を拡大したものである。MRP の傾斜計の影響により高さの値そのものは異なっているが、路面の形状はよく一致している。

4.4 全工区での測定結果

4.4.1 プロファイル及び IRI について

上下線全線において、Leica ProScan の解析方法 C~H を使用して作成したデータと MRP によるデータの比較を行った。結果を表-7 に示す。一致度、精度について 0.95 以上を緑、0.90 以下を赤で表示

した。評価区間での結果と違い、解析手法による違いは確認されなかった。プロファイルは上下線ともに一致度が高く、全線の相関係数は 1.000 と非常に高い結果が得られた。IRI 精度に関しても概ね高い値となったが、上り線 400~600m において精度が低かった。10m 区間 IRI(図-15)においても同様に、当該区間では Leica ProScan の値が高く

表-6 評価区間 性能確認結果

番号	抽出幅 (mm)	サンプリング	プロファイル一致度	IRI (mm/m)	IRI 精度
A	5.5	最近傍	0.9461	1.307	0.975
B	5.5	平均	0.9460	1.334	0.954
C	20	最近傍	0.9462	1.269	0.996
D	20	平均	0.9461	1.275	0.999
E	50	最近傍	0.9462	1.246	0.978
F	50	平均	0.9461	1.271	0.997
G	100	最近傍	0.9462	1.298	0.981
H	100	平均	0.9461	1.264	0.992
MRP	-	-	-	1.274	-

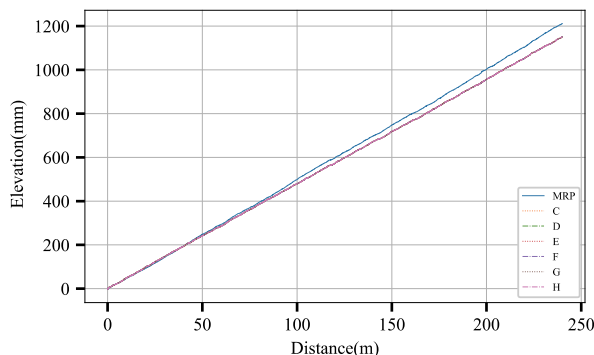


図-11 評価区間内プロファイル

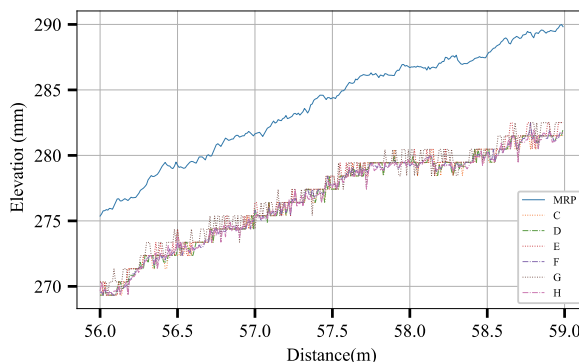


図-12 評価区間内プロファイル一部表示

表-7 全工区の性能確認結果

路線	区間(m)	プロファイル一致度						IRI(mm/m)						IRI 精度						
		C	D	E	F	G	H	MRP	C	D	E	F	G	H	C	D	E	F	G	H
下り	0-200	0.952	0.952	0.952	0.952	0.952	0.952	1.484	1.411	1.418	1.397	1.413	1.458	1.417	0.956	0.952	0.934	0.947	0.987	0.951
	200-400	0.969	0.969	0.969	0.969	0.969	0.969	1.403	1.317	1.321	1.303	1.312	1.317	1.291	0.992	0.993	0.955	0.986	0.966	0.967
	400-600	0.952	0.952	0.951	0.952	0.951	0.952	1.45	1.395	1.391	1.376	1.368	1.441	1.374	0.962	0.959	0.949	0.944	0.994	0.948
	600-800	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	1.499	1.367	1.37	1.38	1.374	1.415	1.379	0.912	0.914	0.921	0.917	0.944	0.920
	800-934	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	2.001	2.059	2.044	2.08	2.054	2.088	2.051	0.971	0.978	0.960	0.973	0.956	0.975
上り	0-200	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.676	1.643	1.678	1.637	1.629	1.645	1.687	0.966	0.999	0.961	0.953	0.969	0.989
	200-400	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	1.399	1.362	1.364	1.443	1.353	1.405	1.333	0.963	0.965	0.956	0.954	0.994	0.934
	400-600	0.966	0.966	0.966	0.966	0.966	0.966	1.264	1.532	1.535	1.549	1.545	1.520	1.545	0.733	0.730	0.715	0.719	0.744	0.719
	600-800	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	1.477	1.407	1.405	1.461	1.406	1.407	1.406	0.930	0.928	0.984	0.929	0.931	0.929
	800-934	0.940	0.940	0.940	0.939	0.940	0.940	1.934	2.044	2.044	2.117	2.043	2.074	2.006	0.889	0.890	0.817	0.891	0.860	0.928
平均	-	0.961	0.961	0.961	0.961	0.961	0.961	1.559	1.554	1.557	1.574	1.55	1.577	1.549	0.927	0.931	0.915	0.921	0.935	0.926

算出されている。IRI 差異の理由として、MRP の走行位置が測定線からずれていた可能性や、微小区間でのプロファイルの違いが影響したものと考えられる。

4.4.2 平坦性について

全線のプロファイルを用いて平坦性の比較を行った。なおジョイント等の控除は行っていない。結果を表-8 に示す。平坦性についても一定の相関が確認され、特に C、D が上下線共に高い一致度であった。平坦性は前項にて算出したプロファイルを元に計算されるので、プロファイル同様、下り線がより相関が高い結果となった。

5. まとめ

本研究は生産性向上を目的として、地上移動体搭載型 LS により取得した点群から IRI を算出する手法について検討を行い、以下の結果を得た。

1)路面プロファイルについては MRP との高い相関が認められ、IRI については一部区間を除いて概ね高い相関が得られた。また、平坦性は全線の比較において9割以上の一致度が得られた。

2)プロファイルの作成は、抽出幅 20mm の場合に相関が高い傾向があるが、サンプリング方法による大きな差は見られなかった。

以上のことから、測定及びデータ処理の方法にいくつかの留意点はあるものの、地上移動体搭載型 LS により舗装の IRI や平坦性を算出できる可能性を示唆するものであった。

6. おわりに

今後の課題として、ProScan の測定結果の反復性を確認していきたい。

ICT 舗装の開始により、舗装の管理が点管理から面管理へと移行している。面管理における情報量は非常に大きいため、膨大なデータの取り扱いに戸惑う声もあるが、そのデータには未だ見ぬ活用方法が眠っていると考えられる。

本研究の結果が今後の ICT 舗装での出来形管理において、生産性向上につながることを期待する。

参考文献

- 1) 東.中.西日本高速道路(株):NEXCO 試験方法 第二編, pp.54-58, 平成 29 年 7 月
- 2) 国土交通省:総点検実施要領(案)【舗装編】, pp.2. 平成 25 年 2 月
- 3) 東.中.西日本高速道路(株):舗装施工管理要領, pp.29, 35, 平成 29 年 7 月
- 4) (社)日本道路協会:舗装調査・試験法便覧, 第 1 分冊. pp.180-185, 平成 19 年 6 月
- 5) 国土交通省:地上移動体搭載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)(案), pp.56, 平成 30 年 3 月

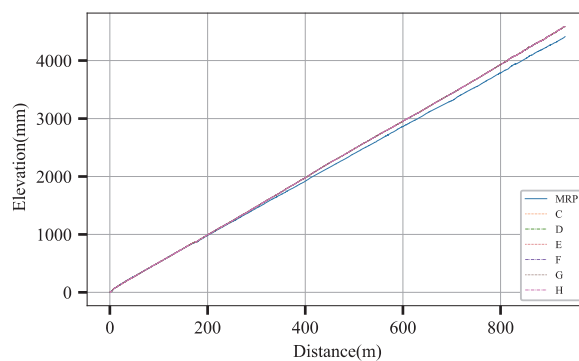


図-13 上り線全区間プロファイル

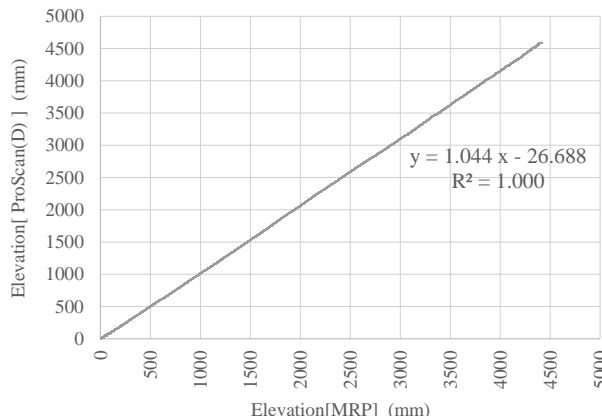


図-14 上り線 MRP-ProScan(D)プロファイル相関

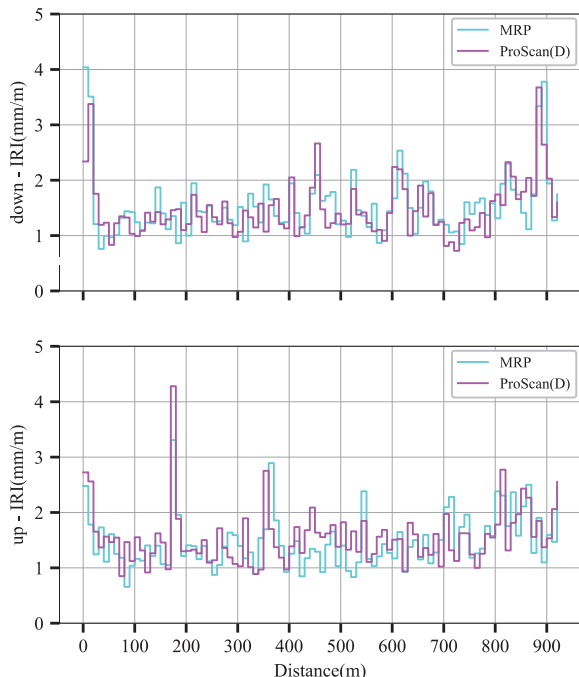


図-15 上下線 10mIRI

表-8 平坦性比較結果

路線	平坦性 σ3m						
	MRP	C	D	E	F	G	H
下り	1.299	1.285	1.278	1.284	1.272	1.296	1.288
		0.989	0.984	0.988	0.979	0.998	0.991
上り	1.287	1.341	1.349	1.360	1.363	1.383	1.385
		0.958	0.951	0.943	0.941	0.925	0.924

12. 建設機械におけるデータ交換手法の標準化について

国立研究開発法人土木研究所 ○ 田中 洋一
 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 藤野 健一

1. はじめに

国土交通省では、人口減少や高齢化による労働力不足の深刻化を打開するために「i-Construction～建設現場の生産性革命～」を推進している。平成15年に公表されたTS・GNSSによる盛土締固め管理要領は、i-Constructionにおける生産性向上を実現するために、従来の写真にて管理されていた捲出し高さ管理を締固め管理システムで使われるトータルステーション（TS）や全球測位衛星システム（GNSS）による高さ管理と施工管理履歴データによる品質管理項目の納品が追加された。また、さらなる生産性向上としてのICTを活用した施工管理・出来形管理・出来高管理は、平成29年度には浚渫工、平成30年度からは地盤改良工・舗装工（修繕工）を対象に施工管理履歴データを活用して実現することが明言されている。

土木研究所は、建設機械における異なるシステム間でのデータ交換を実現するため、国際標準規格であるISO15143（作業現場のデータ交換）を提案した。そして、平成30年3月には盛土締固め管理要領に準拠した施工管理履歴データの交換方法として、ISO15143を参照した「TS・GNSSによる盛土締固め管理データ交換標準」（データ交換標準）を作成¹⁾した。また、ICTを活用した施工管理・出来形管理・出来高管理を実現するために、ICT地盤改良工・ICT舗装工においても施工管理履歴データを活用する方法について研究を実施している。本論文では、今後のi-Construction展開により施工管理履歴データを活用するために必要となるデータ交換手法の整備方針について述べるものである。

2. ISO15143と国内標準

一般に、別々に構築されたシステムは、各データを交換するために、相互のデータ構造・データ要素の差異を整理して相手のシステムに依存した形式にデータを変換する必要がある。多くのシステムが存在する場合は、標準ルールを定めることでデータ交換が可能となる。標準ルールは、デー

表-1 現在ISO15143の構成

ISO/TC127 SC3/WG5		
項目名	項目名(英文)	No.
システムアーキテクチャ	System Architecture	15143-1 (2010/8)
データ辞書	Data Dictionary	15143-2 (2010/8)
テレマティクスデータ	Telematics data	15143-3 (2016/12)
作業現場の地形データ	Worksite Topographical Data	15143-4

タ要素の定義を人が容易に読取れる形で明示することで、相手のシステムのデータ形式に依存しないデータ交換が可能となる。ISO15143は、建設機械における建設機械におけるデータ交換の標準ルールを規格化したものとなっている。

2.1 ISO15143について

ISO15143は、ISO（国際標準化機構）の専門委員会TC 127土工機械において、日本が主査として作業グループISO/TC127/SC3/WG5を設立し、建設機械のデータ交換方法を提供した。現在は、ISO/TS15143（Technical Specification【技術仕様書】）としてPart1 System Architecture（システムアーキテクチャ）とPart2 Data Dictionary（データ辞書）が発行されている。また、Part3 Telematics data（テレマティクスデータ）は、平成28年にアメリカからの提案により追加・発行されている。そして、Part4 Worksite Topographical Dataが、今年から新規項目として規格化する作業が開始された。表-1に現在のISO15143の構成を示す。

システムアーキテクチャには、適用範囲・適用されるサービス・モデル化手法・システム構成と個別に指定されたデータ辞書に基づく構成・拡張・関連用語が記述されている。また、システムアーキテクチャは、道路盛土工のドーザ敷均しからローラ締固めを対象とした機械施工に必要なクラスを設定してUMLクラス図でモデルを構成し

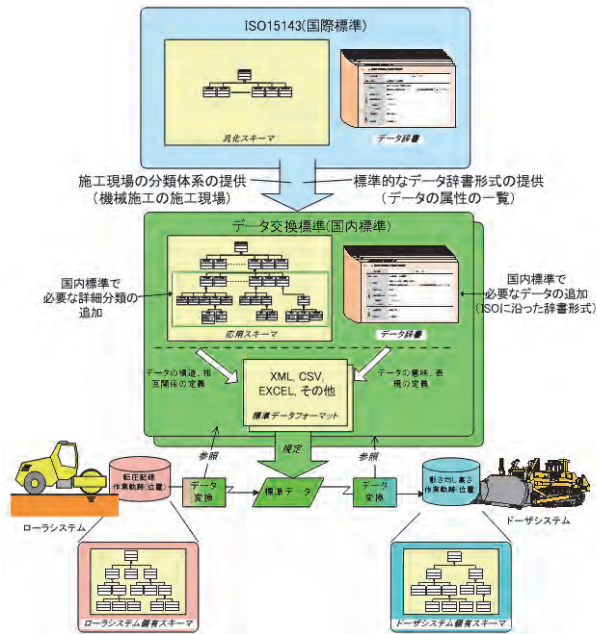


図-1 国際標準と国内標準の関係

た。ISO 規格書では各国で合意ができ、かつ日本の建設業に合致するように、概念レベルによるクラスを表記している。

データ辞書は、データ交換を実現するために標準化の対象となるデータ要素について記述している。ISO 規格書では、適用されるサービスの対象となるデータ要素 (Data element) および値域 (Value domain) をデータ辞書に記述している。

テレマティクスデータは、建設機械に関する情報が提供サーバからネットワークを介して、顧客側アプリケーションへ建設機械の稼働状態をデータ提供するための通信規格である。テレマティクスデータは、稼働機械に搭載されたデータ収集装置に集められ、データ提供サーバに集約される。ISO 規格書では、機械における性能や状態について分析するために使用される特定のデータ要素を含む、サーバからのデータ要求とデータ応答に使用された通信履歴について記述されている。また、ネットワークによるデータ交換を実現するため、XML (Extensible Markup Language) 形式もしくは JSON (JavaScript Object Notation) 形式によるファイル交換方法も記述されている。

2.2 国内標準について

国内標準は、ISO15143 を参照したうえで、国内の施工管理基準に準拠するために必要となる項目を追記し、データ交換標準を作成した。図-1 に ISO15143 と国内標準の関係を示す。データ交換標準は、ISO15143 のアーキテクチャにある作業現場のデータ交換汎用スキーマを参照して、実際に使われている管理装置のデータ項目やシステム開発

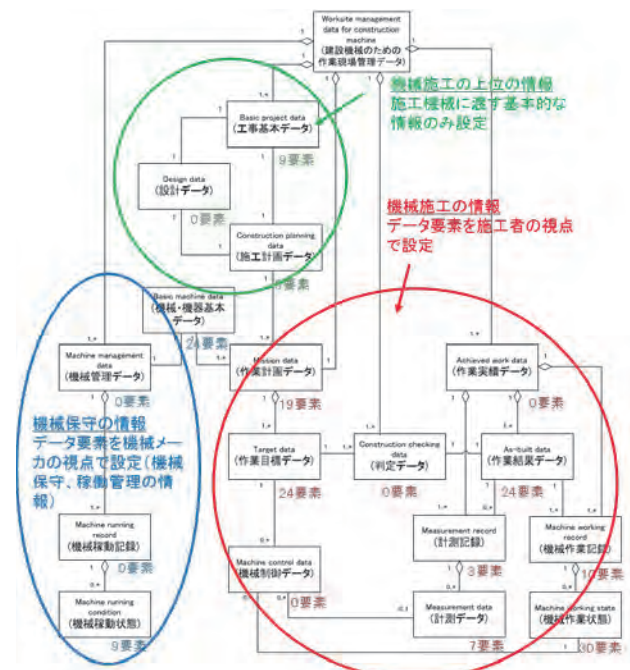


図-2 盛土締固め管理データにおける汎化スキーマ

者へのヒアリングにより、データ項目の分類と整理を実施した。データ項目は、ISO15143 のデータ辞書にあるデータ要素および値域を割当てた。

汎化スキーマは、締固め管理要領におけるデータ要素を記述して、使用するクラスを明確にしている。もし、使用されるクラス内にデータ辞書に該当するデータ要素が存在しない場合は、新たにデータ要素を定義し、表現するための値域を定義する必要がある。値域の定義内容は、データ要素を表すために必要となる数値のフォーマットやテキストの文字数などを厳密に表現している。図-2 に盛土締固め管理データにおける汎化スキーマを示す。

データ交換標準では、XML ファイル形式でデータ交換を実施するために汎用スキーマ XML Schema で表現し、構成要素図として整理した。図-3 に整理した構成要素図を示す。構成要素図で×印が付いている要素は、締固め管理要領では実体化されない要素であり、データ交換標準では出現することがない。

改訂された締固め管理要領は、新たに施工管理履歴データによる捲出し高さの管理方法を追加している。従来は、写真管理により行っていた捲出し高さ管理を締固めた後の層厚における差分により管理することで実現する。締固め層厚は、施工時の管理ブロックの計測データ Z 座標と下層施工時の上層と同じ XY 座標にある管理ブロックとの Z 座標差分を計算により求める。締固め層厚の計算では、現施工層の Z 座標と下層施工時の Z 座標データが必要となる。そのため、締固め層ごと、盛土材料ごとにログファイルを作成するよりは、

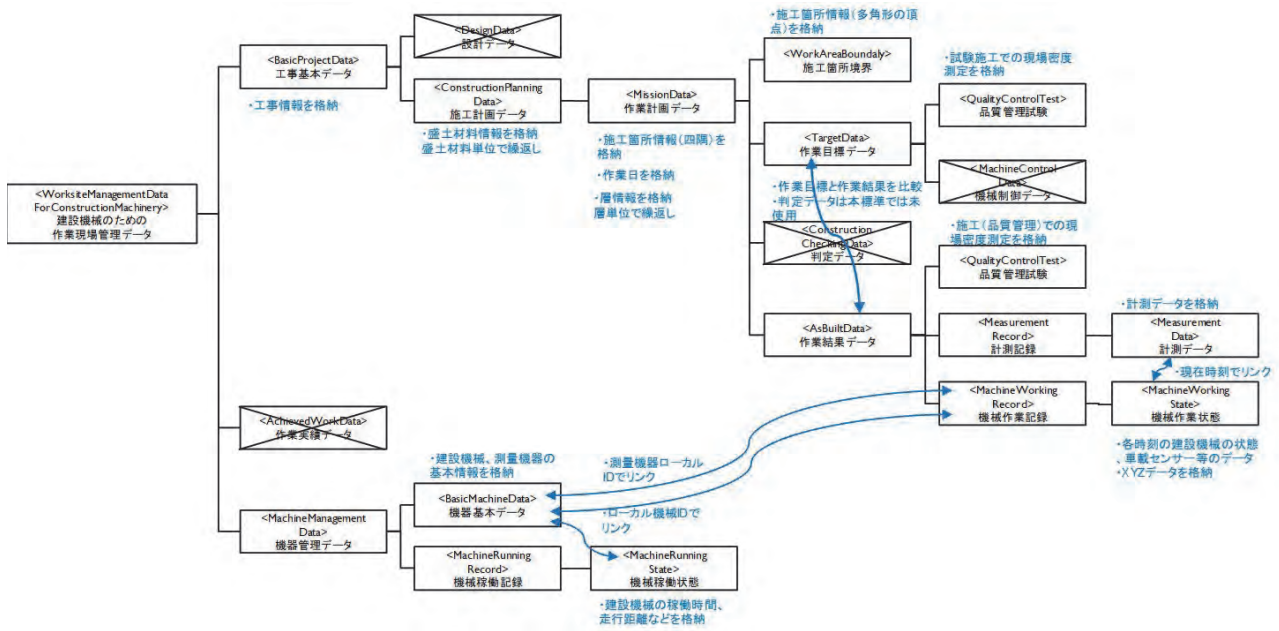


図-3 整理した構成要素図

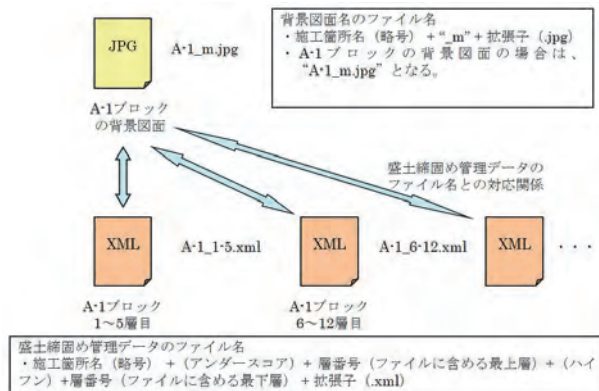


図-4 ログファイルの作成交換方法

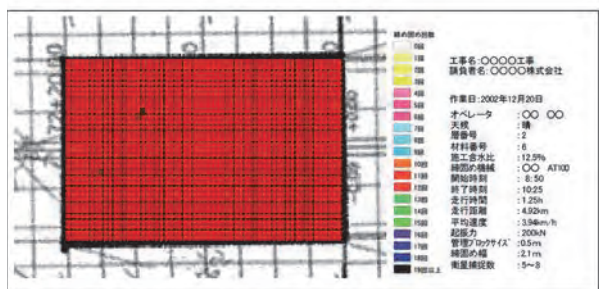


図-5 交換されるログファイルの表示イメージ

施工者による施工管理方法によりファイル作成の方が利便性は良いと考える。提出するログファイルの単位および名称は、1層1材料で1ファイルではなく、ある程度の自由なファイル単位でデータ交換できるように設定している。ログファイル命名規則は、施工箇所名+層番号+層番号+拡張子の順で記述する。また、施工箇所の背景となる図面

データは、JPEG ファイルで施工箇所名+拡張子の順で記述する。図-4 にログファイル作成・交換方法を示す。図-5 に交換されるログファイルの表示イメージを示す。

3. データ交換手法の整備方針

ISO15143 では、作業現場の地形データについて規格化を進めている。作業現場の地形データは、土工機械および測量機械を対象としたサーバ間連携によるデータ交換を対象に規格化される。また、対象となるサービスは、作業に必要な地形データと施工履歴から計測される日々の出来形について実施している。データ交換標準は、盛土工と舗装工を対象として作成した。今後は、施工管理履歴データが浚渫工や地盤改良工において活用されることが想定され、国内標準としての建設機械におけるデータ交換が必要となる。ここでは、ISO15143 および今後の国内動向を視野に入れ、データ交換標準にて整理した構成要素のうち、データが存在しない項目を中心にデータ交換手法の整備方針を述べる。

3.1 設計データ

データ交換標準では、確認を容易にするために必要となる背景図（設計データ）が JPEG ファイルにて交換されている。設計データは、先行して利用されているデータ交換手法である TS による出来形管理の施工管理データ交換標準²⁾や LandXML1.2 に準じた 3次元設計データ交換標準³⁾において XML ファイル形式で記述された地形データおよび設計データにて定義することで実現できると考える。しかし、作業計画データに格納

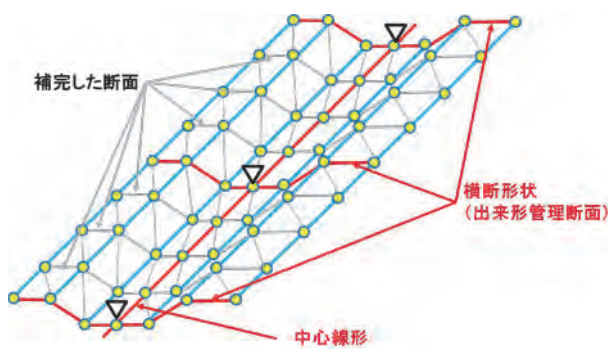


図-6 浚渫工における作業計画データの概念

測定項目	規格値	測定基準
基準高▽	-50mm	100本に1ヶ所。
位置・間隔w	D/4 以内	100本 以下は2ヶ所測定。
杭径D	設計値以上	1ヶ所に4本測定。
深度L	設計値以上	全本数
		L = ①1-②2 ①1: 改良体先端深度 ②2: 改良体天端深度

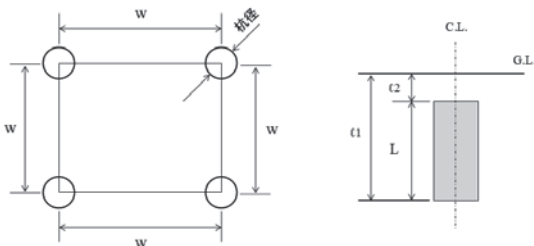


図-7 地盤改良工の出来形管理規格値と測定箇所

されている施工箇所データは、締固めの範囲の四隅を XY 座標にて定義している。そのため、設計データは、施工箇所データにある作業範囲の背景として必要な範囲をデータ記述するか、施工現場の全体をデータ記述するかを決める必要がある。

また、設計データを利用して作成する作業計画データは、浚渫工では掘削範囲・地盤改良工では改良範囲（立方体や円柱体）を定義する必要がある。浚渫工の掘削範囲は、TS による出来形管理の施工管理データ交換標準に記述のある出来形横断面セットに断面を補完し、面データ追加して記述すればよいと考えられる。図-6 に浚渫工における作業計画データの概念図を示す。地盤改良工の改良範囲は、浚渫工と同様に面データに出来形管理で必要となる基準高・位置・杭径・深度の基準となる箇所をデータ項目として記述する。地盤改良工の出来形管理規格値と測定箇所を図-7 に示す。

3.2 作業実績データ

作業実績データは、データ交換標準では締固め管理による品質管理データとしての締固め回数の交換が可能となった。浚渫工では、出来形・出来高管理が施工管理履歴データによるデータ交換の目

的となり、現在はバックホウのバケット位置を点群ファイル形式により交換している。地盤改良工は、出来形・出来高管理に必要となる改良範囲の形状にくわえて、計測した攪拌翼の回転数や固化剤の散布量なども施工管理履歴データとして交換する必要があるため、データ項目について工夫する必要がある。

3.3 判定データ

判定データは、浚渫工と地盤改良工では施工管理履歴データによる出来形管理を実施するために必要となる。データ項目は、出来形管理の規格値に示された項目および値と機械操作者による施工結果の比較値を交換できるようにする必要があると考える。

3.3 機械制御データ

機械制御データは、今後の自動運転ができた段階で定義が必要になると考える。現在は、締固めに関する自動運転サービスが展開されつつあり、それらを参考にデータ項目を考えることとしたい。

3.4 そのほか

データ交換標準は、ファイル形式を XML 形式にて実施した。データ交換標準は、ISO15143 Part3 で、JSON 形式が追加されており、XML 以外の対応も必要であると考ええる。また、今回 JPEG ファイルを参照したように、出来形管理結果となる点群データについても点群ファイルを参照するような方法も考えられる。そのためにも、ファイル自体を管理・参照するデータ項目を追加する必要があると考える。

4. おわりに

今後の i-Construction 展開により施工管理履歴データを活用した ICT による施工管理・出来形管理・出来高管理の実現のために、建設機械のデータ交換手法の確立を進めていきたいと考える。また、ISO15143 は、国内の施工管理基準に依存しない共通部分を規格として提案することで、海外への技術移転の障壁を少なくする活動をしていきたいと考える。

参考文献

- 1) 藤野健一ほか：TS・GNSSによる盛土締固め管理データ交換標準，土木研究所資料第4372号，2018
- 2) 北川順ほか：TS出来形管理の適用拡大に向けたデータ交換標準に関する検討，土木利用技術講演集，Vol.36，pp.17～20，2011
- 3) 谷口寿俊ほか：LandXMLを用いた道路形状の3次元設計データ交換標準に関する研究，土木学会論文集F3（土木情報学），Vol70・No.2，pp.I_133～I_143，2014

13. TS 等光波方式を使った生産性向上について

計測技術は日進月歩、大切なことは導入し易い環境作り

国土技術政策総合研究所 ○ 伊藤 薫
 国土技術政策総合研究所 森川 博邦
 国土技術政策総合研究所 小塚 清

1. はじめに

国土交通省では、建設現場の抜本的な生産性向上を図るため、平成 28 年度から i-Construction と称して様々な施策が導入されている。

TS（トータルステーション）においても日進月歩で進化している。1 人で測量することを想定し望遠鏡の機能を省いた機種が開発されており、安価で、しかも、ネジによる整準作業も無くボタン一つで自動的に整準が完了するため、作業性に優れている。現場にてフル活用出来れば、さらなる生産性向上が期待出来る。

一方で、従来の出来形管理要領では、このような機種を利用する具体的方法が明記されていないため、現場では用途が限定されてしまっている。

舗装工事でも、TS を用いた出来形管理ができない範囲が一部残されていたため、その制限を取り払い改善することが望まれていた。

従って、平成 29 年度では、その管理の制限をなくすことや、新技術を採用する手順の要領化に取り組み、新たな基準類として公表した。

この論文では、取り組んだ検討結果とその考え方について報告する。

2. 検討のコンセプト

要領の改善は、精度の高い TS がより安価になってきたこと、生産性を向上させる機能が搭載されたこと等を踏まえ、次を目標にした。

- ① より高い精度を持った TS を用い、出来形管理可能な範囲の制限を取り払うこと。
- ② 近年の技術開発で、国土地理院の認定が無く望遠鏡の機能を省いたような機種でも、一定の性能を確認することで出来形管理に採用できるようにすること。

2.1 適用範囲

適用する出来形管理要領は以下を対象とする。

- ① TS 等光波方式を用いた出来形管理要領（土工編）

- ② TS 等光波方式を用いた出来形管理要領（舗装工事編）

2.2 従来の要領に適応する機種

利用可能な TS は、国土地理院に登録されているか、JSIMA などそれに準ずる検査証明書の提出により使用可能となっていた。次の表にその機種一覧を示す。

表-1 従来の要領に適応する機種一覧表

TS 要領	土工編 (総ての測定)	舗装工事編	
		(基層・表層の標高測定を除く測定)	(基層・表層の標高測定)
使用条件	3 級 TS	3 級 TS、かつ鉛直角度 5" 読み	
測定距離	100m (3 級 TS) 150m (2 級 TS)	100m	
主な計測器			TS 測定不可
事前確認	書類提出	書類提出	

2.3 新要領で加えられた機種

国土地理院の認定が無い機種も利用可能となっている。従来の舗装工事編では計測不可の基層・表層を可能とすることにより、総ての出来形計測が可能となった。新要領では新たに追加した機種を加え、「TS 等光波方式」と呼ぶ。

表-2 新要領で加えられた機種一覧表

TS 要領	土工編 (総ての測定)	舗装工事編	
		(基層・表層の標高測定を除く測定)	(基層・表層の標高測定)
使用条件	3 級 TS 相当の性能	3 級 TS 相当の性能	1 級 TS
測定距離	精度確認基準を満たす距離	精度確認基準を満たす距離	100m
主な計測器			
事前確認	精度確認試験	精度確認試験	書類提出

3. 精度の高いTSによる利用範囲の拡大

従来のTSを用いた出来形管理要領では、国土地理院の認定や検査証明書の確認だけで出来形管理用TSと認められているため、非常に使いやすく生産性向上に効果のある要領となっていた。

精度確認試験を行えば認定の有無関係なく導入出来るといった要領は作成可能であるが、器械固有の確認試験が必要であるため、同じ機種であっても器械が代わる毎に試験が必要となる。

このため、先ず従来のTSを用いた出来形管理要領で制限されている舗装工事編の表層・基層の標高較差について精度確認試験をしなくても測定出来るように取り組むことにした。

具体的な作業として、実際にどのくらいの精度のTSを必要としているかを検証し、利用条件を定めた。

3.1 従来の要領の中でTSが測定出来る範囲

国土地理院でのTSの認定は、3級・2級・1級・特級の4種類がある。この内、施工現場でよく使われているTSは3級、2級、1級であるため、これらを比較する。

従来のTSを用いた出来形管理要領より、各種TSが測定出来る項目と規格値を以下の表にまとめた。

表-3 従来の要領で測定出来るTS一覧表

国土地理院の認定 TS	1級	2級	2級	3級	3級
水平角の最小目盛り	1"	10"	10"	20"	20"
鉛直角の最小目盛り	1"	5"	10"	5"	20"
高度気泡管(秒/目盛)	20"	30"	30"	40"	40"
舗装工出来形規格値 (中規模)					
表層の標高較差	-7mm	×	×	×	×
基層の標高較差	-9mm	×	×	×	×
上層路盤の標高較差	-25mm	○	○	×	○
下層路盤の標高較差	±40mm	○	○	×	○
土工出来形規格値					
掘削工の基準高	±50mm	○	○	○	○

凡例
 : 土工のみ測定出来る出来形管理用 TS
 : 舗装工・土工で測定出来る出来形管理用 TS (ただし、基層・表層は測定不可)

ただし、鉛直角の規定は国土地理院の認定に必要ない項目であるが、出来形管理用TSとしての要件のため、水平角の並びに表示した。

この一覧表の中で、表層と上層路盤の標高較差の規格値を比較すると、表層の規格値-7mmは上層路盤の規格値-25mmの4倍程度であるので、TSの性能の違いも同等以上あれば測定可能と推測出来る。

そこでTSの鉛直角の最小目盛りに注目し、上層路盤に必要な鉛直角の読み取り最小目盛り5"読みの5倍の精度がある1級のTSであれば、要求される精度を満足すると考えた。

従って、最大計測距離100mとした場合を想定し、以下の手順で検証することとした。

- ① 鉛直角の最小目盛りが5"読みのTSの鉛直誤差が、従来のレベルやスケールを用いた出来形管理の規格値に占める割合を把握する。
- ② 鉛直角5"読みTSの誤差が上層路盤の標高較差の規格値に占める割合と、鉛直角1"読みTSの誤差が表層の標高較差の規格値に占める割合が同等であることを確認する。

3.2 鉛直角5"読みのTSの誤差による影響

情報化施工やi-Constructionが導入される前の従来の出来形管理では、直接レベルやスケールにより測定するため、規格値は純粋に設計形状に対しての施工誤差を管理するための値であった。

レベルを使用する場合の精度は、4級水準点測量を想定しても、1kmの往復観測で20mm以内、実際は100m程度であれば0~数mmに収まってしまう。スケールやロッドであればJIS規格の誤差程度が潜在的に存在するが僅かであることがわかる。

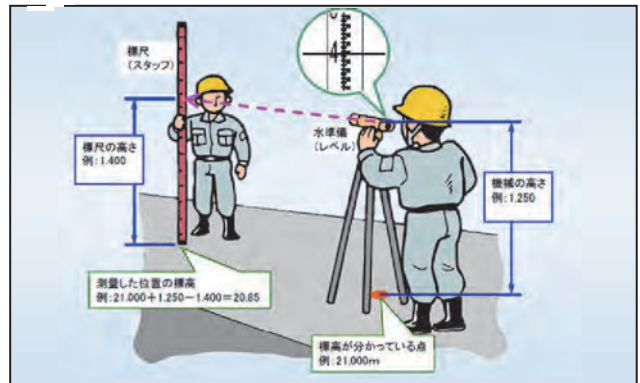


図-1 従来の水準測量 (JCMA ガイドブック引用)

それに対し、TSを用いた出来形管理では、最小目盛りの読み取りから算出される誤差が発生し、その割合は、器械点から測定点までの距離に比例して大きくなる。

TSで測定する水平距離をL、鉛直角の最小目盛り $\Delta\theta$ とすれば、測定する点での鉛直成分の器械

的な誤差 ΔH を簡単に計算することが出来る。

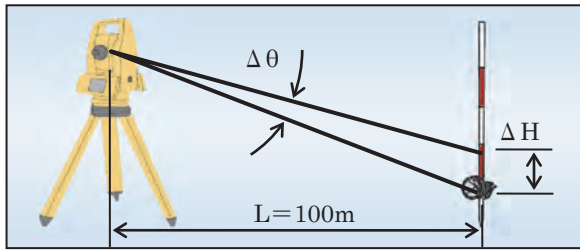


図-2 TSの最小目盛りに対する鉛直誤差

鉛直角の最小目盛りが5" 読みの3級TSと2級TSでは、実用的な測定距離を $L=100\text{m}$ 、 $\Delta\theta=5''$ とした場合、誤差 $\Delta H \approx 2.5\text{mm}$ となる。

下図に規格値に占める割合を示す。

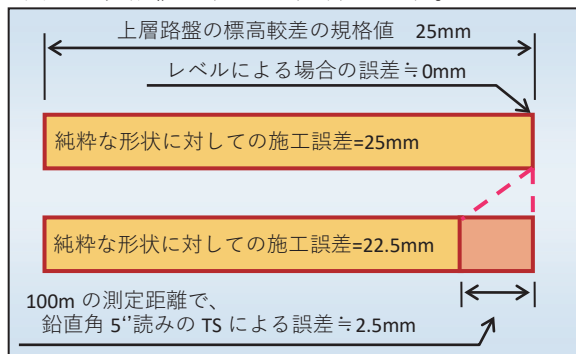


図-3 鉛直角5"読みTSの器械誤差が規格値に占める割合

従って、上図に示すように、誤差が規格値に占める割合は1/10程度であることがわかる。この程度であれば、実用的に問題が無いと判断出来る。

3.3 鉛直角1"読みのTS誤差による影響

鉛直角の最小目盛り1" 読みの1級TSでは、実用的な測定距離を $L=100\text{m}$ 、 $\Delta\theta=1''$ とした場合、誤差 $\Delta H \approx 0.5\text{mm}$ となる。

下図に、誤差が表層の標高較差の規格値に占める割合を示す。

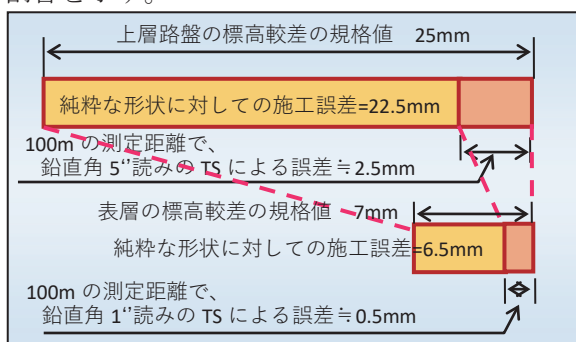


図-4 最小目盛りによる器械誤差が規格値にしめる割合の比較図

図に示すとおり、この精度の1級TSであれば、100m先の測定であっても誤差が規格値をしめる割合は1/10以下となり、表層の出来形管理が可能であると判断される。

3.4 据え付け誤差が規格値にしめる割合

TSにおいては、最小目盛りから来る誤差の他に、据え付け誤差が大きく影響する。国土地理院の認定に必要な高度気泡管の感度は20"~40"と大きい。国土地理院の認定条件だけでは誤差が大きくなるのがわかる。

TSを水平に設置する作業は、台座に取り付けられている整準ネジを回し、高度気泡管を頼りに水平を作る。(整準作業)

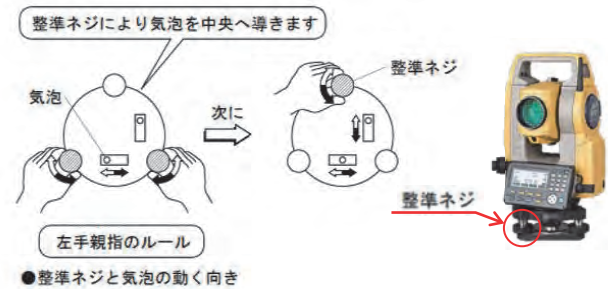


図-5 気泡管による整準作業

この気泡管の誤差は、標高較差7mmという規格値に対しては大きいので、表層の出来形管理をする場合、それを考慮する必要があると考えた。

それに対し、オートレベルの自動補正装置の基本的な仕組みは、上部から振り子のように吊り下げられている「コンペンセータ」と呼ばれる視準軸自動補正機構が、鉛直を保つと視準軸が水平になる仕組みで、コンペンセータの揺れを制御するためにオイルやマグネットによるダンパが備えられている。

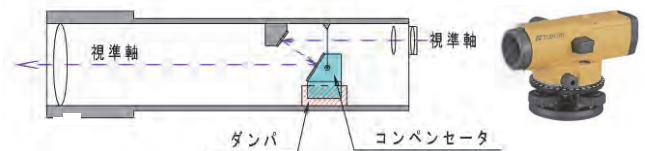


図-6 オートレベルの仕組み

TSの上級機種にも性能の高いコンペンセータが備わっており、有効にした場合、最小目盛りと同等かそれより高い精度で自動調整が行われている。

3.5 要領への記載について

上記の検討から、要領については次の2点の条件を満たせば、鉛直角1"読みのTSが使えることとした。

- ① 国土地理院の認定、または公的機関が発行する試験証明書を認すること。
- ② コンペンセータを搭載し、測定時にその機能を有効にすること

以上により、TSを用いた出来形管理は土工、舗装工総てのシーンにおいて、書類の確認のみで実用的な距離である100mの範囲内で使用することが出来るようになった。

4. 精度確認試験による利用機種種の拡大

望遠鏡が搭載されていないでも国土地理院が認定する TS と同じ機能（測角・測距）をもつ計測器が開発されている。

この望遠鏡が搭載されていない TS は、一般の自動追尾 TS に比べてコストが安くなっている。

さらに据え付けの手間を大幅に省く工夫がされ、一人で測量出来ることなど、生産性向上が期待されている。

なお「TS 等光波方式」は、将来新たに開発された技術でも使用出来るものとして命名した。



図-7 望遠鏡が搭載されていない TS

要領化にあたり、望遠鏡の機能を省いた TS について、カタログに掲載されている性能の確認と 1 級 TS ・ 2 級 TS と性能比較・確認を行った。

4.1 望遠鏡が搭載されていない TS の性能

公的機関の証明が出ない TS 等光波方式は、メーカーのカタログや仕様書に記載の性能で確認した。

表-4 望遠鏡が搭載されていない TS の仕様例 (カタログ抜粋)

製品名	LN-100	LN-100W
使用範囲 ¹⁾	距離 0.9 ~ 100 m 高低差 0.9 ~ 22m 高度角 ± 25° 22 ~ 100 m 高低差 ± 10m	
座標精度 ²⁾	H: 1.5 mm@ 50 m V: 3.0 mm@ 50 m	
測距測角精度	測距精度 ± 3 mm / 測角精度 5°	
自動整準範囲	± 3°	
傾斜補正部	方式 液体式 2 軸傾斜センサー 補正範囲 ± 6°	
自動追尾部	自動追尾可能距離 0.9 ~ 100m ²⁾ 駆動範囲 360° (水平方向) ± 25° (鉛直方向) 最高回転速度 60°/秒 (10rpm)	

メーカーカタログによると、測角精度は 5" であり 2 級 TS 程度の性能が備わっている。コンペンセータについては、液体式 2 軸傾斜センサーが装備されており、2 級 TS 程度の精度は期待出来る。

そこで、TS のどの級に相当する性能を有するかを、精度確認試験の結果をもとに判断することとした。

4.2 1 級 TS ・ 2 級 TS との比較

水平角・鉛直角について、水平位置・標高に置きかえ、1 級 TS ・ 2 級 TS との差異を比較することで検証を行った。結果を、以下の図に示す。

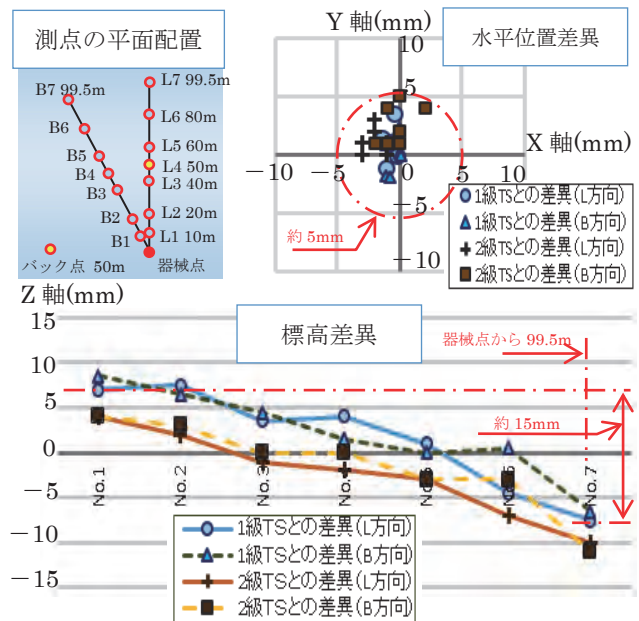


図-8 水平位置、標高の差異比較結果

比較結果より、水平位置の差異は 5mm 以内となったが、総ての TS との標高差異は器械点からの距離が遠くなるほど差異が増大する傾向 (100m で約 15mm) であった。これらより、1 級 TS ・ 2 級 TS 相当の性能を有していないと判断した。

従って、出来形管理要領中の「精度確認試験実施手順書 (案)」では、3 級 TS との差異の基準値を設け、3 級 TS が測定可能な範囲において、その基準値を満足する距離での使用を可能とした。

5. まとめ

舗装工事においては、1 級 TS を用いることにより基層・表層も含め総ての層で標高較差による出来形管理が行える様になった。同時に、土工、舗装工においては、望遠鏡が搭載されていない「TS 等光波方式」の使用が新たに認められた。

また、今回要領には反映まで至らなかったものの、2 級 1" 読みの TS でも、精度確認試験で測定可能距離を算定することにより舗装工の表層・基層の標高較差による出来形管理ができる可能性があることも確認できた。

確認試験の方法や基準値を決めることで、導入しやすい環境を作ることが出来たと考えている。

今後、より便利な新技術の出現も期待されることである。

参考文献

- 1) TS等光波方式を用いた出来形管理要領 (土工編), 2017
- 2) TS等光波方式を用いた出来形管理要領 (舗装工事編), 2017
- 3) TSを用いた出来形管理要領 (土工編), 2011
- 4) TSを用いた出来形管理要領 (舗装工事編), 2011
- 5) TS出来形管理ガイドブック平成24年度対応版 (日本建設機械施工協会), 2011

14. 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

国土技術政策総合研究所 ○ 岡島 朝治
 国土技術政策総合研究所 森川 博邦
 先端建設技術センター 杉谷 康弘

1. はじめに

国土交通省では、i-Construction の施策の一つである「ICT の全面的な活用」に向け、土工・舗装工における 3 次元計測技術を用いた面的な出来形管理に関する基準を策定してきた。その適用工種拡大を図る中で、今年度より新たに「河川浚渫工」に対応した ICT 出来形管理のための「音響測深機器を用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）」、「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）」を策定するに至った。

従来の河川浚渫における出来形計測は船上からのレッド測深・トータルステーション（以下、TS）等によるものが主であったが、流れの影響を受ける水上での計測は困難であり、場所によっては人が直接水中に入り計測することもあった。そこで、ICT 技術の導入によりこれらの作業が安全かつ簡単なものとなることが期待された。

本稿では、河川浚渫工への「面管理」導入に向けた管理項目の変更・基準整備のための検討や現場検証の結果等について紹介する。

2. 規格値の検討

2.1 現行規格値の運用実態

現行の管理断面における抽出管理を想定した規格値（表-1）は、その計測方法に関する明確な規定が無く、目視できない水中にて如何に幅・延長（掘削開始・終了位置）を特定し計測しているのか、現場の実態を調査する必要があった。定期的に河川浚渫を施工している直轄事務所（9 事務所）に対して調査したところ、ほぼ全ての事務所において、以下の実態が確認できた。

- 掘削範囲の幅や延長を直接特定、計測することは実質不可能のため、実施していない。
- 全ての計測点で基準高▽の計測値が合格しているという結果を以て、設計上の幅・延長を掘削できているものと見なしている。

上記の基準高▽の確認を以て幅の管理に代える方法は、ICT 土工や ICT 舗装工で検討した面管理の考え方に合致しており、出来形が目視できず境界も不明瞭な浚渫工の現場においては、面管理は適していると考えた。

表-1 従来の出来形管理基準（浚渫船運転工）

測定項目	規格値	測定基準	測定箇所
基準高▽	+200以下	延長方向は、設計図書により指定された測点毎。	
幅	-200	横断方向は、5m毎。 又、斜面は法尻、法肩とし必要に応じ中間点も加える。ただし、各測定値の平均値の設計基準高以下であること。	
延長	-200		

2.2 面管理の規格値案の検討

面管理では従来の断面管理と比べて計測点数が大幅に増加することから、現行の規格値をそのまま面管理に適用すると現行の基準で合格していた現場まで不合格となる恐れがあり、従来の管理水準と同等の施工結果が得られるよう新たに面管理のための規格値を設定する必要がある。

規格値の設定方法は、現行の管理方法で合格する現場にて施工直後の出来形を面的に計測し、個々の計測値に対する規格値を外れる割合を不良率 P として求める。その不良率を許容する正規分布の標準偏差σから規格値を設定するものとした。

現場実態は、河川浚渫を実施する直轄工事の現場（4 現場）にて、施工直後の出来形を 2.5m 間隔程度で TS を用いて面的に計測し調査した（表-2）。

表-2 現場実態調査結果（不良率）

	平均 (m)	標準偏差 (m)	最大値 (m)	最小値 (m)	母数	不良個数 (上限側)	不良率 (%)
現場1	-0.294	0.233	0.265	-1.402	139	1	0.7
現場2 [※]	-0.594	0.189	0.662	-0.950	214	3	1.4
現場3 [※]	-0.421	0.095	0.172	-0.642	278	2	0.7
現場4	-0.125	0.125	0.300	-0.390	140	3	2.1
全データ	-0.385	0.237	0.662	-1.402	771	9	1.2

※ 現場2・3は基準高▽の規格値を「+0以下」と設定しているため、従来規格値を参考に200下がりを仮に設計値とした場合の設計値からの離れ。

調査結果の平均値を中心とし、調査結果から割り出した不良率を踏まえた正規分布について、0.3%を棄却してよい上限値 (+2.75 σ) として設定した値に計測精度を加えた値を新たな規格値とする (図-1)。

①規格値 (mm)	②平均値 (mm) 【現場実態より】	③不良率(上側) P (%)	④ k_p *	⑤標準偏差 σ_p (mm) 【(①-②)÷ k_p 】	全数管理の上限値案 ②+2.75 σ_p (mm)
200	-265	1.2	2.257	206	302

※ k_p は正規分布のグラフにおいて平均値+($k \times \sigma$)の範囲内に全体の(100-P)%が含まれることを示す数値

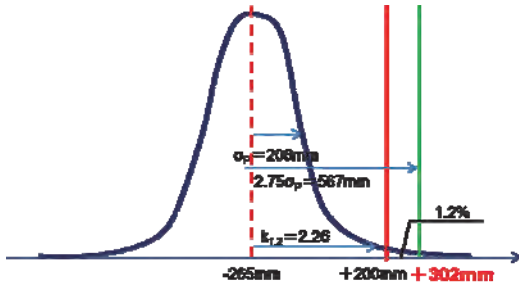


図-1 現場実態調査から算出した規格値案

実態調査結果から上限値を 302mm \div 300mm とし、その3分の1程度となる 100mm を計測精度として許容し、これを加えて、個々の計測値の規格値は「+400mm 以下」とした。

計測値の平均値に対する規格値は、従来の基準が「各測定値の平均値の設計基準高以下」であること、浚渫の目的が流下断面の確保であることから、「+0 (設計値) 以下」と規定した (表-3)。

表-3 面管理の出来形管理基準

測定項目	規格値		測定基準
	平均値	個々の計測値	
標高較差	+0以下	+400以下	1. 3次元データによる出来形管理において「音響測深機器を用いた出来形管理要領(河川浚渫)(案)」、「施工履歴データを用いた出来形管理要領(河川浚渫)(案)」に基づき出来形管理を面管理で実施する場合、その他基準に規定する計測精度・計測密度を満たす計測方法により出来形管理を実施する場合に適用する。 2. 個々の計測値の規格値には計測精度として ± 100 mmが含まれている。

3. 計測手法について

ICT 土工・舗装工とは異なり、水中部の計測に適した新たな計測手法を採用する必要があった。今回採用したマルチビームソナー (音響測深機器) と施工履歴データについて説明する。

3.1 マルチビームソナーを用いた出来形計測

マルチビームソナーは、測量船に艀装したマルチビーム測深機より、複数の音響ビームを扇状に照射することで広範囲の水深を面的に取得することができる、ナロー (細い) マルチ (複数の) ビーム測深システムのことである。

水中部の 3 次元計測方法として港湾浚渫にて既に運用されているものであり、「マルチビームソナ

ーを用いた深浅測量マニュアル (浚渫工編) (案)」 「3 次元データを用いた出来形管理要領 (浚渫工編) (案)」において採用されている。

3.2 施工履歴データを用いた出来形計測

3 次元 MC・MG 機能を搭載した ICT 建設機械では、オペレータの操作支援や作業装置の自動制御を行うため、施工中は作業装置 (バックホウの場合はバケットの爪先位置) の 3 次元座標データ (ここでは施工履歴データと呼ぶ) をリアルタイムに取得している。ここで取得した施工履歴データを点群処理ソフトウェアにより処理することで、出来形を面的に把握することができる。

施工後の出来形計測を省略できることから、大幅な省力化が期待される手法である。

4. 精度確認手法の策定

出来形管理要領の策定にあたり、計測に用いる機器・手法が一定の精度を確保しているか確認するための精度確認手法について定めるため、次のとおり検討を行った。

4.1 マルチビームソナーの精度確認手法の検討

マルチビーム測深に関わる既存の技術基準類として、前述の港湾浚渫の要領のほか、「水路測量業務準則施行細則」(海上保安庁)、「海洋調査技術マニュアル・深浅測量編」(一般社団法人海洋調査協会)を参考に設定した。GNSS の位置精度確認、測量船への機器設置位置の確認 (オフセット)、喫水確認、パッチテストによる誤差調整、水中音速度測定を実施し、全体の精度確認として井桁計測による計測精度検証を行うものとした。詳細は前述の基準類と同様の内容のため割愛する。

上記の井桁計測以外の装置全体の精度を確認する手法として、これまでの ICT 出来形管理要領と同様に検証点と計測結果を比較する方法を検討し、試行した。その方法は以下のとおりである。

- ・図-2 のように一測線上に 10m 間隔で検証点を設置し、マルチビームソナーで計測した検証点の基準高 ∇ と TS により計測した基準高 ∇ (真値) との標高差を評価する。

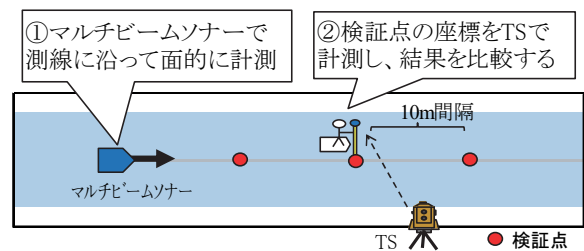


図-2 精度確認試験

計測した点の密度処理は「0.1m メッシュに 1 点」と「1m メッシュに 1 点」の 2 パターンとし、その

代表点の抽出方法は「中央値」、「最下値」、「最浅値」の3パターンで算出した。

上記精度確認方法の試行結果を表-4に示す。密度処理が1点/1mメッシュの場合でも、想定する評価基準の100mm以内に収まる結果となった。

表-4 精度確認試験結果（標高差（マルチー真値））

	点密度0.1m (中央値)	点密度0.1m (最下点)	点密度0.1m (最浅値)
検証点1	15mm	-7mm	35mm
検証点2	15mm	-6mm	46mm
検証点3	23mm	-17mm	50mm

	点密度1m (中央値)	点密度1m (最下点)	点密度1m (最浅値)
検証点1	31mm	-12mm	59mm
検証点2	15mm	-15mm	62mm
検証点3	23mm	-18mm	66mm

なお、今回の出来形管理要領化にあたっては、マルチビームは照射範囲の外側ほど精度が悪くなることを考慮し、検証点を設置するのは測線上ではなく、測線と平行な最大有効幅付近に設置するように規定した。

次に、マルチビームソナーの計測精度について検証するため、以下の計測を行った。

試験用プールの中で、10m×40m程度の範囲を対象に、TSを用いて1m間隔程度で面的に計測（真値）、その後マルチビームソナーにより面的に計測し、真値との基準高▽の差を評価する（図-3）。

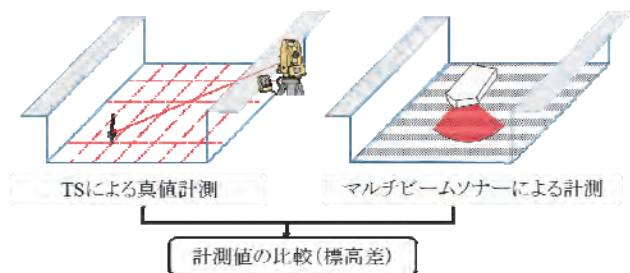


図-3 マルチビームソナーの精度検証方法

マルチビームソナーの計測点の密度処理は「0.1mメッシュに1点」と「1mメッシュに1点」の2パターンとし、代表点の抽出方法は「中央値」、「最下値」、「最浅値」の3パターンで算出した。

精度の検証結果を表-5に示す。

点密度1mの場合でも、標準偏差の3倍が100mm程度に収まることが確認できた。

4.2 施工履歴データの精度確認手法の検討

精度確認手法として、これまでのICT出来形管理と同様に検証点と計測結果を比較する方法を検討したが、水中に検証点を設置すると真値をTS等で計測するための船舶が必要となり、施工に先駆

表-5 マルチビームソナーの計測精度検証結果
（標高差（マルチー真値））

単位: mm(個数以外)

	平均	標準偏差σ	3σ	最大値	最小値	個数
点密度0.1m(最下値)	-1	10	30	36	-27	279
点密度0.1m(中央値)	21	8	24	98	6	279
点密度0.1m(最浅値)	42	12	36	145	23	279

	平均	標準偏差σ	3σ	最大値	最小値	個数
点密度1m(最下値)	-17	9	27	30	-36	279
点密度1m(中央値)	23	11	33	95	9	279
点密度1m(最浅値)	68	34	102	258	37	279

けて精度確認できなくなる等の問題がある。そこで、陸上で実施することを考慮し、以下の手順①・②の案について検討した。いずれも、施工に使用するICTバックホウを用いて行う。

【手順①：実際に掘削整形作業を行う方法】

- ・陸上にて5m×5m以上の平場を平坦にする作業を行い、施工履歴データを取得する。その後TSでも1mメッシュ間隔以上（16点以上）で計測し、施工履歴データによる計測値と比較、標高の差を算出する。（図-4）

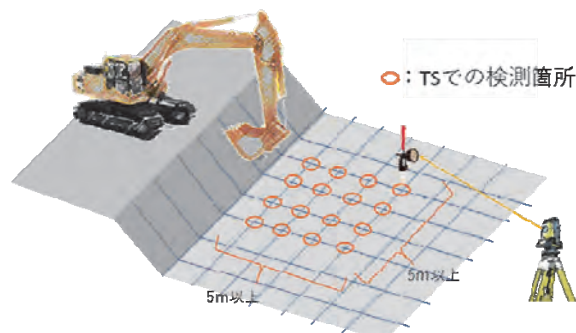


図-4 実際に掘削整形作業を行う方法

【手順②：プリズムにて爪先位置を計測する方法】

- ・バケットの爪先にプリズムを設置し、ブーム・アームを最も開いた状態から最も抱えた状態まで動作させ、爪先の軌跡を施工履歴データと自動追尾TSで計測する。TSの計測結果（3次元線データ）を真値とし、施工履歴データの計測結果との離れを計測精度として評価する（図-5）。

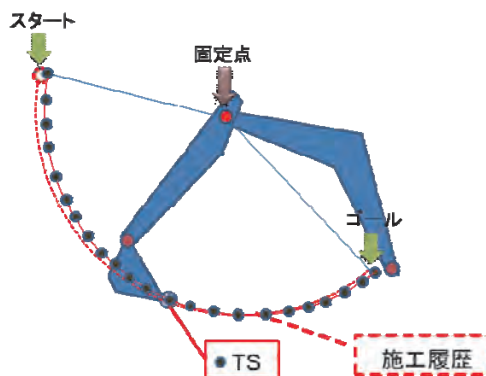


図-5 プリズムにて爪先位置を計測する方法

手順②は、手順①のような掘削可能なテストヤードを現場付近に調達できない状況を想定した。この場合、爪先位置とプリズム位置が正確には異なるため、爪先とプリズムの離れの分だけデータを補正する必要がある。

試行の際、バケットの操作速度を「低速」と「高速」の2パターンとし、更に施工履歴データ取得間隔を「1秒間隔」「2秒間隔」「(刃先の移動距離が)10cm間隔」「50cm間隔」の4パターンとして計測した結果を表-6、表-7に示す。

表-6 手順①の精度確認試験の実施結果

バケット操作速度	低速				高速			
	1秒	2秒	10cm	50cm	1秒	2秒	10cm	50cm
データ取得パターン								
平均(mm)	19.2	18	20.7	19.1	19.4	16.8	15.7	15.1
標準偏差σ(mm)	9.1	10.1	9.3	11.5	11.8	6.3	9.9	7.4
3σ(mm)	27.3	30.3	27.9	34.5	35.4	18.9	29.7	22.2

表-7 手順②の精度確認試験の実施結果

データ取得パターン	1秒	2秒	10cm	50cm
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

手順①による計測誤差は標準偏差の3倍が35mm程度、②の場合は80mm程度であり、ICT出来形管理における指標の計測誤差100mm以内であることを確認した。

実際の要領化に際しては、手順②の空中での動作は実際の掘削整形を模したものとし、動作範囲・評価点数等も手順①と同程度となるように規定した。

5. 堆砂による出来形への影響

施工履歴データによる出来形管理の利点は施工と同時に計測ができることだが、河川浚渫工の場合、施工・計測から竣工検査までの間に堆砂等により出来形が変化してしまうことが懸念された。

この河床変動の実態調査のため、2現場分の浚渫直後の出来形と3ヶ月経過後の出来形をTSにて計測し、基準高▽の変化量を調査した(表-8)。

表-8 浚渫直後から約3ヶ月経過後の標高変化量

単位:mm(個数以外)

	平均	標準偏差	最大値	最小値	個数
現場1	23	139	915	-328	171
現場2	-4	151	280	-610	222

規格値に河床変動の影響を加味することも検討したが、浚渫深が1m未満の工事があり得る中で、前項で決定した規格値400mmに河床変動の標準

偏差150mm程度を足すと規格値が大きくなり過ぎる。大きいときには数十cm程度も変動する可能性があることから、河床変動の影響を考慮した規格値とすることは避けた。

このため、実地検査までの河床変動のために施工・計測が同時にできる利点を生かせるよう、浚渫直後の職員による段階確認結果を持って、実地検査に代えることができるものとした。

6. ICT導入による効果の整理

今回の検討の際に調査した、従来型施工とICT施工との施工日数の比較結果等を図-6に示す。施工規模は2万m³として試算している。

図-6のICT浚渫工は起工測量と出来形管理にマルチビームソナーを、施工にICTバックホウを使用した場合のものである。施工中の計測データ取得により従来の検測作業員がほぼ不要となり、出来形計測も面管理・帳票作成自動化により省人化できる。なお、出来形管理に施工履歴データを使う場合は、出来形管理の日数はほぼゼロとなるため、大幅な省力化が見込める。

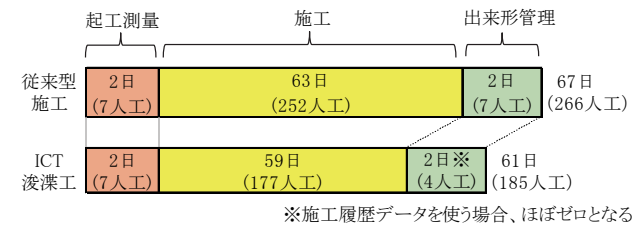


図-6 ICT施工の導入による工数の変化

工事費用については、労務費は減少するがICT導入に伴う初期費用・機械経費が増額となり、施工規模2万m³では工事価格全体に及ぼす価格増加は約1%という試算結果が出た。ただし一度導入してしまえば以降は初期費用がゼロとなるため、将来的には従来施工よりも安価となる見込みである。

何より、浚渫作業中の検測や水中での人手による計測作業が不要となることで、特に安全面への効果は大きいと言える。

施工履歴データの出来形計測への適用は、施工後の出来形計測作業が不要になるという、これまでのICT出来形管理にも無かった非常に画期的な計測手法となりうる可能性がある。

7. おわりに

河川浚渫工への面管理適用のために行った検証作業は、限られた時間の中で行ったものである。特に施工履歴データによる出来形計測は今回が初であるため、今後は実装後の実態把握とさらなる検証を進め、基準類については不断の見直しを行う所存である。

15. i-Construction における出来形管理に関する ソフトウェアの機能要求仕様の検討

国土交通省

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

○川邊 好世
森川 博邦
杉谷 康弘

1. はじめに

国土交通省では、i-Construction 施策として、平成 28 年度から ICT 土工を導入している。ICT 土工は、無人航空機による空中写真測量や地上型レーザースキャナーなど多点計測技術を起工測量や出来形計測に用いること、面的な出来形管理手法を導入した点が従前とは大きく異なる。このため、ICT 建設機械による情報化施工の取組では使っていなかったソフトウェアが必要になる。

国土技術政策総合研究所では、ICT 土工の出来形管理要領の策定に必要な検討を行ってきたが、ICT 土工の現場において適切なソフトウェアが選択される仕組みの構築を目的に、ソフトウェア開発者向けにソフトウェアの機能要求仕様を示し、併せて工事受発注者向けにソフトウェアの情報を提供するための検討も行った。

本稿では、ソフトウェア機能要求仕様の整備等に関するこれらの検討について紹介する。

2. 出来形管理要領に定めている機能

出来形管理要領は、無人航空機による空中写真測量や地上型レーザースキャナーなどの多点計測技術を用いた出来形計測及び出来形管理・出来高算出の方法を定めている。平成 30 年 3 月までに策定された出来形管理要領を表-1 に示す。

多点計測技術により取得される計測点群データは点ごとに 3 次元座標を保有している。その 3 次元座標データを利用することで出来形管理・出来高算出を行うことができるが、大量のデータを処理して出来形管理・出来高算出を行う必要があるため、専用のソフトウェアが必要となる。

2.1 出来形管理要領の概要

出来形管理要領は、ソフトウェアをデータ処理の段階により複数に分けている。

ソフトウェアは主に①点群処理ソフトウェア、② 3 次元設計データ作成ソフトウェア、③出来形帳票作成ソフトウェア、④出来高算出ソフトウェア

アで構成されている。地上型レーザースキャナーを用いた場合のソフトウェア構成を図-1 に示す。

表-1 出来形管理要領

ICT 土工における出来形管理要領 平成 30 年 3 月現在
地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案)
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)
無人航空機搭載型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案)
TS 等光波方式を用いた出来形管理要領(土工編)(案)
TS(ノンプリズム方式)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)
地上移動体搭載型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案)
RTK-GNSSを用いた出来形管理要領(土工編)(案)

【地上型レーザースキャナーを用いた場合のソフトウェア構成】

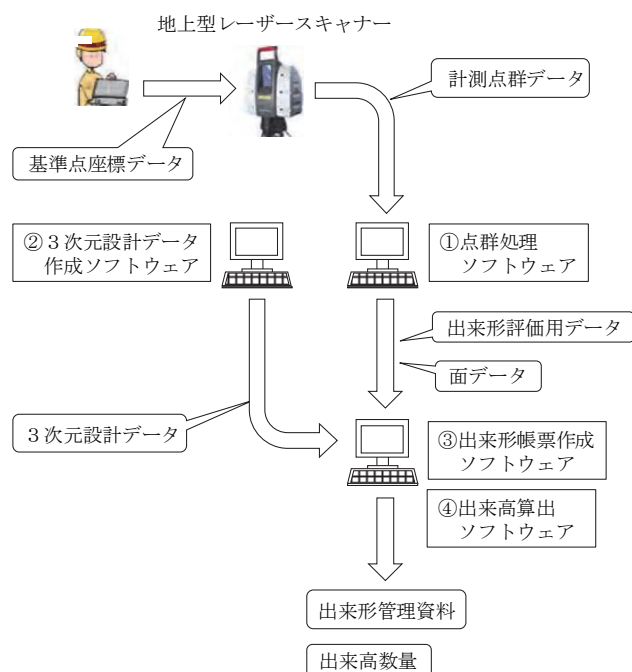


図-1 ソフトウェア構成

2.2 出来形管理要領に定めている機能

出来形管理要領に定めているそれぞれのソフトウェアが要求する機能を整理した(図-2)。

(1) 点群処理ソフトウェアの主要な機能

① 不要点を削除する機能

多点計測技術を用いて取得した計測点群データから出来形管理に関係のない樹木や建設機械などの点群を削除する。

② 代表値を算出する機能

不要点削除後の計測点群データから出来形評価に利用する代表値を算出する。

③ 点群データを面データに変換する機能

不要点削除後の計測点群データを面データに変換する。

(2) 3次元設計データ作成ソフトウェアの主要な機能

① 3次元設計データを作成する機能

設計図書や線形計算書などを基に設計形状を示す3次元設計データを作成する。

(3) 出来形帳票作成ソフトウェアの主要な機能

① 出来形を評価する機能

出来形評価用データ及び3次元設計データを基に出来形を評価する。

② 出来形分布図を作成する機能

出来形評価用データ及び3次元設計データを基に出来形を平面上に色分け表示する。

(4) 出来高算出ソフトウェアの主要な機能

① 出来高数量を算出する機能

現況地形及び出来形計測結果を基に出来高数量を算出する。

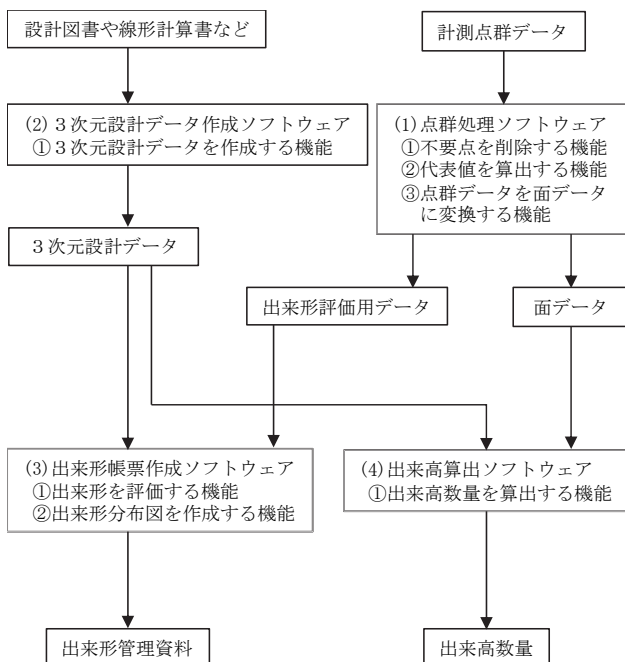


図-2 データ処理の流れ

3. 機能要求仕様の整備

機能要求仕様は、機能要求仕様書、機能確認ガイドライン及びサンプルデータによる構成とした。

3.1 機能要求仕様書に定める機能

出来形管理要領に定めている機能のなかで、機能要求仕様書に定める機能を選定した。また、出来形管理要領に具体的な計算方法が示されていない機能は、機能要求仕様書に計算方法を明示した。

(1) 機能要求仕様書に定める機能

機能要求仕様書に定める機能は、データ処理に人間の判断が介在する機能は対象外として、点群処理ソフトウェアの代表値を算出する機能、出来形帳票作成ソフトウェアの主要な機能及び出来高算出ソフトウェアの主要な機能を対象とした。

さらに機能要求仕様書に定める機能は、対象範囲を明確にするため、要求する機能を出来形評価に関する機能または数量算出に関する機能に分けて明示した。機能要求仕様書の適用範囲を図-3に示す。

① 出来形評価に関する機能

点群処理ソフトウェアの代表値を算出する機能及び出来形帳票作成ソフトウェアの主要な機能を、出来形評価に関する機能として補足説明を明示した。

② 数量算出に関する機能

出来高算出ソフトウェアの主要な機能を、数量算出に関する機能として補足説明を明示した。

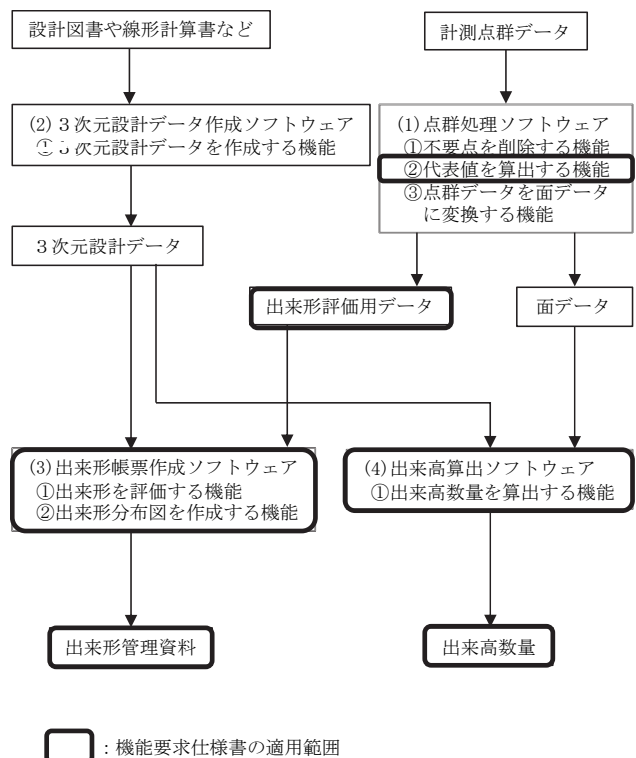


図-3 機能要求仕様書の適用範囲

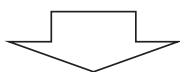
(2) 具体的な計算方法

点群処理ソフトウェアの代表値を算出する機能に関して、実在点を用いた算出方法の具体的な計算方法を4種類、機能要求仕様書に明示した。

機能要求仕様書に明示した具体的な計算方法を図-4に示す。

地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案)
2-3 点群処理ソフトウェアより

密度の変更方法は、用途によって様々な手法が開発されているが、座標値を変更するような処理をとってはならない。例えば、平面範囲(例えば出来形評価の計測密度である1㎡以内で鉛直方向の最下点や中央値を抽出することはよいが、平均処理を行ってはならない。



機能要求仕様書より
実在点を用いた算出方法

計算方法	内容
最上値	鉛直方向の最も標高が高い点の標高値
最下値	鉛直方向の最も標高が低い点の標高値
中央値	設計面との標高差の中央値をとる点の標高値
最頻値	設計面との標高差の最頻値をとる点の標高値

図-4 実在点を用いた算出方法

3.2 機能確認方法に関する検討

ソフトウェア開発者は、機能要求仕様書に準拠してソフトウェアを開発することとなる。機能要求仕様書に準拠していない機能が判明した場合、その機能を修正することとなる。このため、開発されたソフトウェアが、機能要求仕様書に準拠しているか簡易かつ迅速に確認できる方法が必要である。

すでに運用している、トータルステーションを用いた出来形管理を行うためのソフトウェアの機能要求仕様書を参考に検討した。

(1) TS 出来形管理用ソフトウェアの機能確認方法

「TSによる出来形管理に用いる施工管理データ作成・帳票作成ソフトウェアの機能要求仕様書(土工編)」の機能確認方法は、機能確認ガイドライン及びサンプルデータで構成されている。

機能確認ガイドライン及びサンプルデータを利用して、ソフトウェア開発者が自ら機能確認を行っている。

(2) 機能要求仕様書の機能確認方法

機能確認ガイドライン及びサンプルデータを利

用する方法は、簡易かつ迅速に機能確認を行うことができる。そこで、ICT土工用ソフトウェアにおいても機能要求仕様書に沿った機能確認ガイドライン及びサンプルデータを策定した。

機能確認ガイドラインには、サンプルデータを利用しての機能確認方法を明示した。サンプルデータには、不要点削除後の計測点群データ、3次元設計データ及び現況地形データを作成した。

(3) サンプルデータ

サンプルデータは、開発されたソフトウェアに入力するデータである。期待される算出結果も準備している。サンプルデータを入力することで算出された結果と期待される算出結果を比較することで機能確認を行うことができる。

サンプルデータのイメージを図-5に示す。

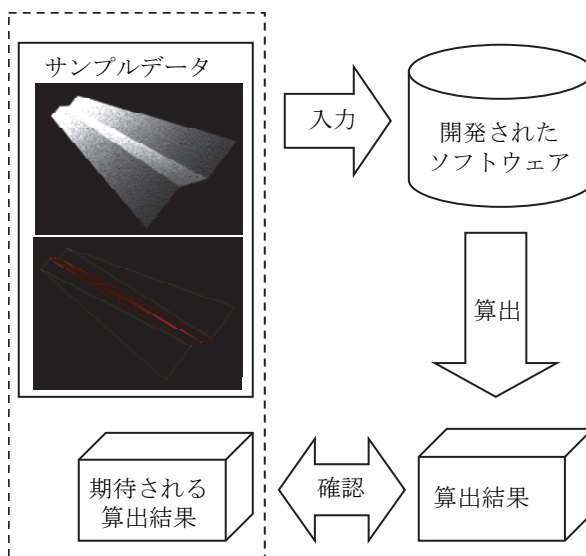


図-5 サンプルデータのイメージ

3.3 機能要求仕様の運用

(1) 検査職員の实地検査

出来形管理要領と合わせて運用されている監督・検査要領のなかで「検査職員は、施工管理データが搭載された出来形管理用TS等を用いて、現地で自らが指定した箇所の出来形計測を行い、3次元設計データの設計面と実測値との標高差が規格値内であるかを検査する。(ただし、この検査は、出来形帳票作成ソフトウェアの機能要求仕様書が配出され、計測データの改ざん防止や信憑性の確認可能なソフトウェアが現場導入されるまでの期間とする。)」と定めている。このため、本機能要求仕様を整備することで、検査職員の实地検査を省略することができるか検討した。

今回の機能要求仕様で整備した機能では、データ処理に人間の判断が介在する機能を対象外としている。このため、出来形管理要領に定めている全ての機能を整備しているものではなくデータ処

理に人間が介在する余地があるため、計算データの改ざん防止及び信憑性は確保できない。

したがって、検査職員の現地検査は、今回の機能要求仕様の整備のみでは省略できないと判断した。

(2) 受発注者向けの情報提供

受発注者向けの情報として、国土技術政策総合研究所ホームページに機能要求仕様を満たしたソフトウェアの一覧を閲覧できるように整備した。また、ソフトウェアごとに、搭載される機能を閲覧できるようにした。それにより、受発注者はソフトウェアの情報を効率的に確認することができる。ソフトウェア一覧のイメージを図-6に示す。

情報掲載の申請があったソフトウェア		企業HPへのリンク (ソフトウェア 紹介ページ)
企業名	ソフトウェア名+バージョン	
〇〇〇〇〇	〇〇〇〇〇	-
□□□□□	□□□□□	□□□□□
△△△△△	△△△△△	-

〇〇〇〇〇〇に搭載される機能			[凡例] ○：有 -：無
1. 出来形評価機能			
確認項目	機能の有無※1	備考※2	
1) 計測点群データを読み込む機能	○	/	
2) 出来形評価のための代表値を算出する機能	○	①②⑤⑥	
3) 出来形を評価する機能	○	①②⑤⑥	
2. 出来形管理資料の作成機能			
確認項目	機能の有無※1	備考※2	
1) 出来形管理資料について、国土交通省国土技術政策総合研究所で公開されている「土木工事共通仕様書」を適用する請負工事に用いる帳票様式に準ずる帳票を作成する機能	○	/	
2) 出来形管理基準上の計算結果として、平均値、最大値、最小値、データ数、評価面積、棄却点数を算出する機能	○	①②⑤⑥	
3) 出来形分布図を作成する機能	○	①②⑤⑥	
4) 出来形管理資料を出力する機能	○	/	
3. 出来形評価用データの出力機能			
確認項目	機能の有無※1	備考※2	
1) 算出した出来形評価用データを電子データで出力する機能	○	①②⑤⑥	
4. 数量算出機能			
確認項目	機能の有無※1	備考※3	
1) 現況地形や出来形計測結果等(出来形計測データ、起工測量計測データ、岩線計測データ)の面データを読み込む機能	○	/	
2) 数量算出機能	○	①②	
※1：「機能の有無」とは、実装される機能のうち機能確認ガイドラインに基づき正しく算出できることが確認できた機能をいう。			
※2：「機能の有無」が「○」である機能の算出方法(下記①～⑩のとおり)。 実在点：①最上値、②最下値、③中央値、④最頻値 グリッドデータ化：⑤差の最頻値、⑥差の平均値、⑦最近隣法、⑧平均法、⑨TIN法、⑩逆距離加重法			
※3：「機能の有無」が「○」である機能の算出方法(下記①～④のとおり)。 ①点高法：四点平均法、②点高法：1点法、③TIN分割等を用いた求積、④プリズモイダル法			

図-6 ソフトウェア一覧のイメージ

4. まとめ

本稿では、機能要求仕様の整備にあたり、その構成や運用に関して論じてきた。ソフトウェア開発者向けには、機能要求仕様書、機能確認ガイドライン及びサンプルデータを策定した。受発注者向けには、ソフトウェアの情報を提供できるように整備した。

それにより、出来形管理要領に基づき施工する場合に使用するソフトウェアに関して、ソフトウェア開発者及び受発注者がそれぞれ必要とする情報を整備することができた。

今後、機能要求仕様書に準拠したソフトウェアが市場に供給され、出来形管理要領に基づく工事が円滑に進むことでICT土工がさらに普及することを期待している。

参考文献

- 1) 国土交通省：地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案)平成30年3月
- 2) 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)平成30年3月
- 3) 無人航空機搭載型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案)平成30年3月
- 4) TS等光波方式を用いた出来形管理要領(土工編)(案)平成30年3月
- 5) TS(ノンプリズム方式)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)平成30年3月
- 6) 地上移動体搭載型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案)平成30年3月
- 7) RTK-GNSSを用いた出来形管理要領(土工編)(案)平成30年3月
- 8) TSによる出来形管理に用いる施工管理データ作成・帳票作成ソフトウェアの機能要求仕様書(土工編)平成25年3月

16. 新幹線断面における効率的な山岳トンネル構築への取り組み

株式会社 熊谷組

○ 米谷 裕樹
荒木 章文

1. はじめに

北海道新幹線(新函館北斗・札幌間)は、延長約211kmのうち、トンネルは約80%を占める。また、長大トンネルが多く存在するため、工事は5km前後のトンネル延長で発注されている工区が多く、ずり搬出方式として連続ベルトコンベアシステムが採用されている。鉄道トンネルでは道路トンネルに比べて幅員が狭いため、連続ベルコンの設置について、各工区とも苦慮しているところであり、その配置は様々で、現在でもその配置計画は確立されていないのが現状である。効率の良いずりだし計画を各種リスクの整理とともに検討し、確立を目指していくことが重要な課題と考える。

また、厚生労働省による「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」が改正され、切羽への立ち入りを原則禁止とし、その対策として機械化を積極的に進めることが求められている。

上記をふまえ、当社受注工事において切羽作業の安全と工程を確実に確保するため、従来の新幹線トンネル工事になかった新たな試みをいくつか採用し、施工の効率化を図った。これまで導入した機械・システムごとの概要と期待される効果を報告する。

2. 施工効率化の工夫

2.1 4ブームジャンボの採用

オートリターン機能付き油圧ドリフタを4台装備した4ブームジャンボを導入した。(図-1)これにより1人で2ブーム分の削孔を並行しておこなうことができ、作業時間の短縮と作業効率の向上が可能となった。(図-2)

チャージングケージには折りたたみ式のヘッドガードを搭載することにより浮石などの落下物から作業員を保護し、ロックボルト打設時には作業の妨げにならないような工夫を施した。



図-1 4ブーム2バスケットジャンボ



図-2 削孔状況

2.2 4連装爆薬遠隔装填システムの導入

従来の手だめによる爆薬の装填作業は、切羽に長時間密着することが多い。そこで、最低1.5mの離隔をとった位置で安全に作業することを目的として、爆薬遠隔装填システムを導入した。さらに従来の2連装機2台を4連装1台に集約することにより、切羽での準備作業と片付けにかかる時間、労力を低減させた。(図-3)

爆薬遠隔装填システムは、①爆薬供給ホッパー②込物(アンコ)供給振動フィーダー③装填機④装填ホース⑤装填パイプで構成されている。作業時は装填孔に装填パイプを挿入し、遠隔操作により後方の爆薬遠隔装填システムから爆薬と込物を圧縮エアで搬送・充填する。(図-4,5)



図-3 4連装爆薬遠隔装填システム

本システムの導入により、十分に切羽から離れた位置で装薬作業をおこなうため安全性が向上した。(図-6)また、圧縮エアにより爆薬・込物が孔奥に密充填されるため、安定して純爆することにより効率的に掘削ができています。(図-7)

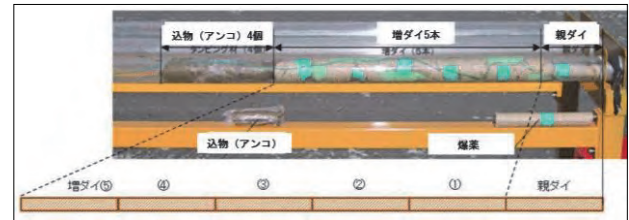


図-7 爆薬装填システムによる密充填状況

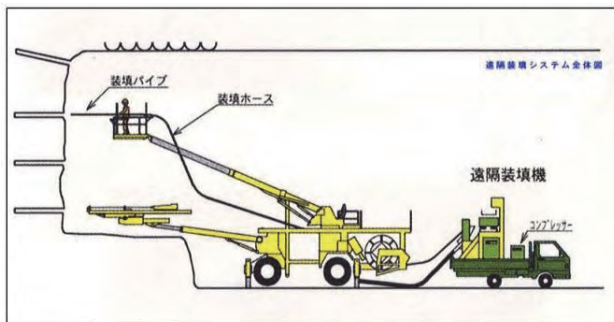


図-4 遠隔爆薬装填システム全体図

2.3 エレクタ搭載型吹付機の採用

エレクタ搭載型吹付機（最大吐出量 25m³/h）を採用し、1次吹付→支保工建込→2次吹付までのサイクルを機械の入れ替えなしに一連の作業でおこなうこととした。これにより切羽の安定性確保、狭い坑内で大型重機が離合することによる接触の危険性を低減させることができる。(図-8)

また、急結剤として液体急結剤に専用粉体助剤を混合するハイブリッド急結剤を導入し、低粉塵吹付けによる坑内環境改善に取り組んでいる。

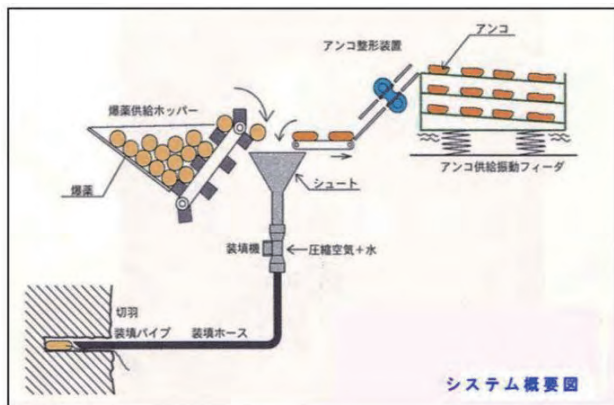


図-5 遠隔爆薬装填機システム概要図



図-8 エレクタ搭載型吹付機



図-6 装薬作業

2.4 吹付コンクリート遠隔操作試験施工

(1) 吹付コンクリート遠隔操作技術概要

吹付コンクリート工は掘削サイクルの中でも粉じん濃度が比較的高い場所での作業であり、坑内労働環境の改善は重要な課題である。加えて、切羽での作業中は落盤・土砂崩壊災害などに被災する可能性が高い。「坑内労働環境の改善」と「安全性の向上」を図ることを目的として、作業員が切羽から離れた安全でクリーンな環境下でコンクリートの吹付け作業を行うことができる、吹付コンクリート遠隔操作システムの試験施工を開始した。

吹付機に取り付けた3台のモニターカメラから

の映像と吹付機の操作信号を切羽から約 100m 後方に設置した操作室まで送信し、作業員がその映像を確認しながら吹付機を遠隔で操作して吹付コンクリートを施工する。(図-9,10)

吹付機左右のエレクタブームに取付けた2台のモニターカメラが従来吹付け作業における作業員の視覚を補完し、キャビン上方に取付けた1台のモニターカメラで吹付け箇所全体を俯瞰しながら、作業員は吹付け状況を確認する。(図-11)モニターカメラのレンズ表面にはエアバリアを形成し、吹付け粉じんの付着による視界悪化を抑制する。

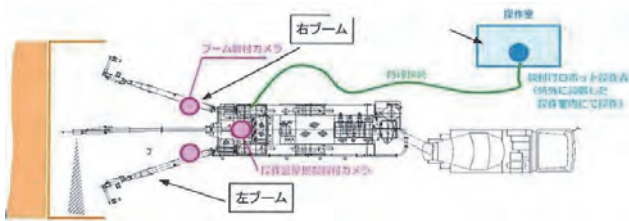


図-9 遠隔吹付概要

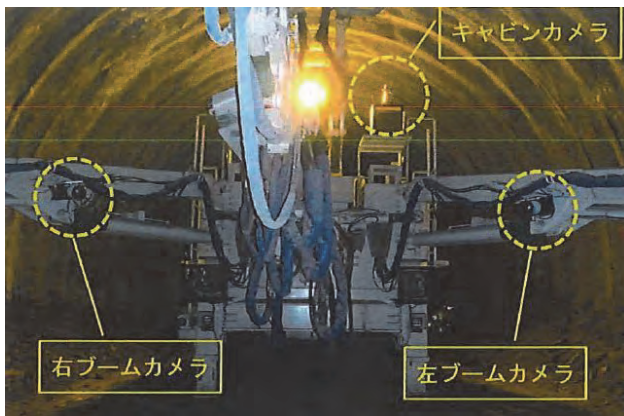


図-10 遠隔操作カメラ位置

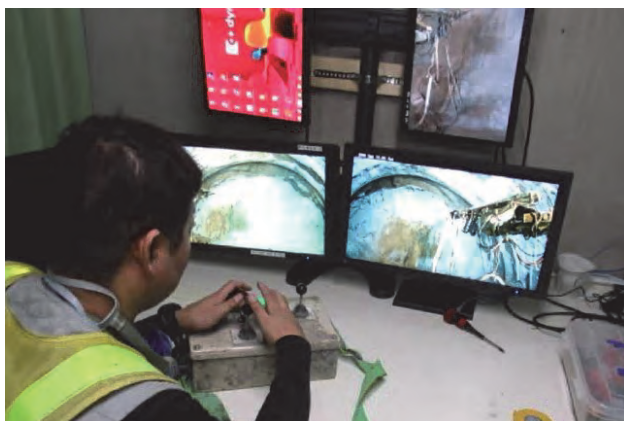


図-11 遠隔操作による吹付状況

(2)今後の改良

現在、試験施工を継続しているところではあるが、奥行きが表現しにくいモニター映像からの情報のみで吹付け作業を完了させるには作業員の能

力によるところが大きく、導入時には一定の訓練が必要となる。今後は作業員に対する事前のノズルトレーニングカリキュラムの構築に加え、映像情報の最適化、操作系システムの正確性向上を継続しておこなうことで実用化に向けた開発を進める。

2.4 大容量バッチャープラントの採用

掘削サイクルを効率的に進めるため、混合能力に優れるシャフトレスミキサーを実装する大容量バッチャープラントを導入した。掘削中の吹付コンクリートと防水工 (FILM 工法) の 1:3 モルタルの製造が重複する場面が発生しているが、待ち時間を短縮できるため進捗に貢献するとともにコンクリートの品質確保にも役立っている。

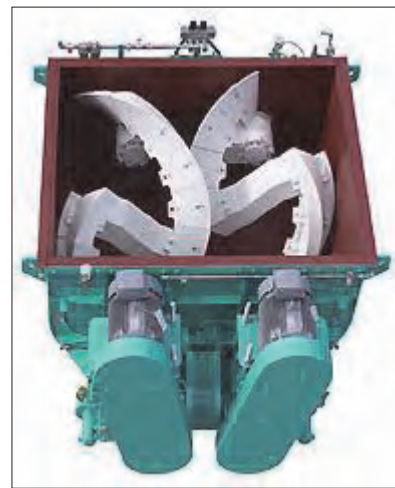


図-12 シャフトレスミキサー

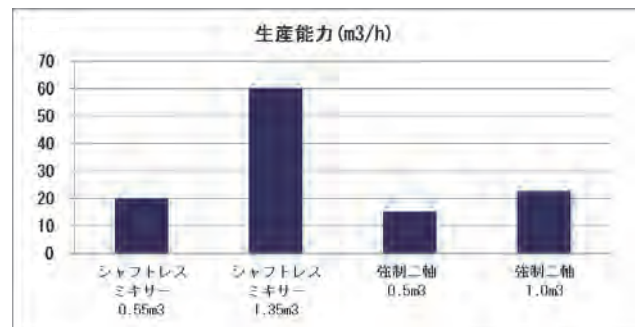


図-13 ミキサー形状の違いによる生産能力比較

2.5 テールピース台車の改善

連続延伸ベルコンは一般的に GL から+2m 程度の高さで延伸される。この場合、新幹線断面ではベルコンが支障するため、ターンテーブルを使用してもトラックミキサー車やダンプトラックが転回できない。また、インバート施工の際もベルコンが支障となり施工区間でベルト高を上げるなど事前の段取り替え作業が必要となる。(図-14) この

問題に対する従来の対策は、テールピース台車後方にベルコン位置を上げるための台車（カタナリー台車）を設置する等があったが、当現場ではカタナリー機能を持ったテールピース台車を新規開発し採用した。この設備によりベルコン延伸時には坑内ベルト高（GL+5,100mm）の確保が可能であり、後方の FILM 台車、スライドセントル、養生台車のベルト通過を同様の高さで計画している。



図-14 インパート施工部

2.6 ずりだし方式の改善

掘削により発生したずりは通常のベルコン方式の場合、切羽後方 70～80m に設置したクラッシャーにホイールローダでずりを投入し、テールピース台車を介して連続延伸ベルコンにより坑外へ搬出する。

ずり出しサイクルの短縮にはクラッシャーの大容量化が考えられるが、幅員の狭い新幹線断面のトンネル坑内に設置するには限界がある。よって切羽から早期にずりを搬出するため、切羽後方約 200m に設置したずり坑内仮置きヤードまで 25t 重ダンプにより運搬し、その後方に設置したクラッシャーに専属のホイールローダで投入する方法を採用した。

標準工法と比較すると 25t 重ダンプ 2 台とホイールローダ 1 台が必要となるが、吹付作業中でも切羽での作業に関係なく後方でずり搬出作業をおこなうことができ、確実なサイクル短縮が可能である。（図-15）

2.7 設備台車の採用

切羽後方約 150m の位置に設備台車を設置する。設備台車上には、電源設備（坑内用乾式トランス、高圧ケーブルリール、クラッシャー・テールピース台車電源用低圧ケーブルリール）、集塵機（2,400m³/min）、コンプレッサー（75kW×2 台）を搭載した。設備台車として坑内設備を集約したことにより、坑内切羽付近の駐機場所の確保と段取り替え作業が容易となった。



図-16 設備台車

3. まとめ

今回開発、導入された設備や方式は幅員の狭い新幹線断面トンネルでの施工を前提としたものだが、道路トンネルを含む多くの山岳トンネル現場で転用可能な技術と考える。継続して効果確認を行うとともに実績の蓄積とさらなる改良に努めたい。

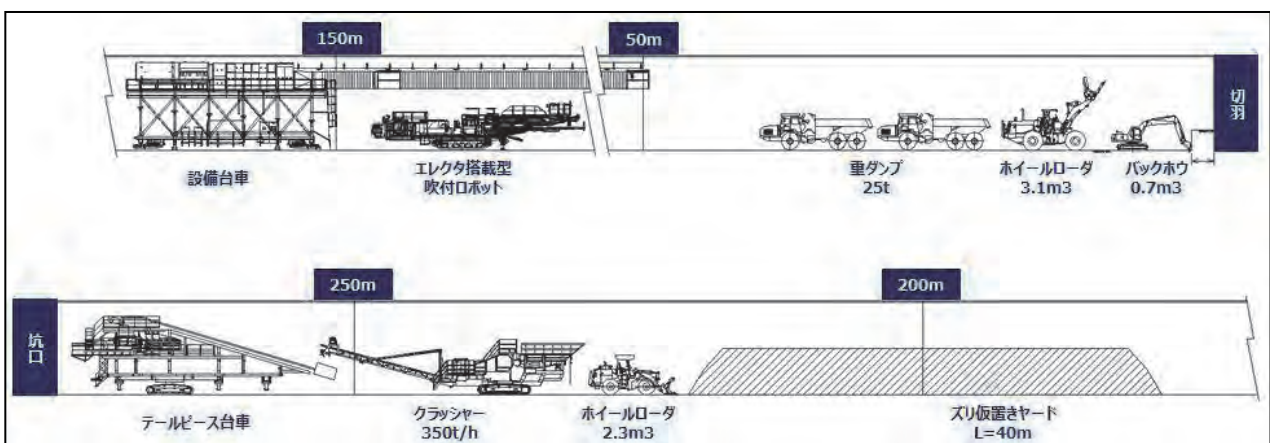


図-15 ずりだし時坑内配置図

17. 新北陸トンネル(大桐)における 清濁分離を用いた多量湧水の処理について

株式会社 熊谷組
 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構
 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

○ 石田 和輝
 高原 英彰
 吉森 佑介

1. はじめに

トンネル工事において、湧水の存在はトンネル掘削工程に影響し、不可分の関係にある。湧水処理が工程管理上クリティカルとなることもあるため、湧水を適切に排水する設備(以下「排水設備」)を整えることは非常に重要である。特にトンネル工事の場合、予期せぬ異常出水により排水能力を大幅に上回る湧水が発生することもある。この場合、迅速かつ的確に排水設備の再計画を行い、通常の作業を中止して設備の増設、段取替えを行うことが求められる。

本稿では、異常出水によって大幅な設備の段取替えが発生した当現場における実績の報告を行う。また、この実績を分析し、異常出水が発生した場合にも迅速に的確な対応を行えるよう、多量湧水を最適に処理する方法について考察する。



図-1 新北陸トンネル位置図

表-1 工事内容

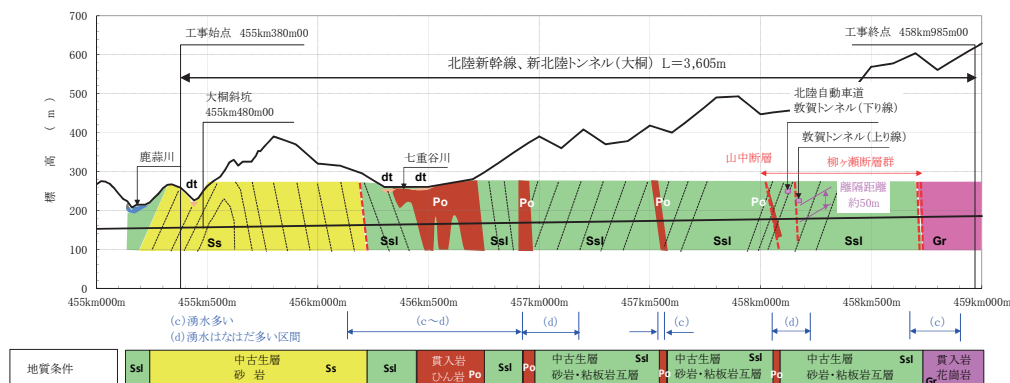
工事名	北陸新幹線、新北陸トンネル(大桐)
工事場所	福井県南条郡南越前町
工期	平成25年12月24日～平成32年2月25日
発注者	鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社
請負者	熊谷・不動テトラ・梅林・轟 特定建設工事共同企業体
トンネル延長	本坑 3,605m、斜坑 483m
トンネル線形	直線、上り 8.2‰
トンネル工法	NATM(発破・ベルコン方式)
掘削断面積	73.5m ² (新幹線複線断面)

2. 新北陸トンネル(大桐)の概要

新北陸トンネル(大桐)は現在建設が進められている北陸新幹線(金沢・敦賀間)の新北陸トンネル(全長 19,680m、図-1 参照)全 6 工区のうち、起点から 3 番目の工区で、3,605m を施工する工区である。新北陸トンネル(大桐)の工事内容を表-1 に、主要機械設備の一覧を表-2 に示す。長大トンネルの中間工区であるため、下り勾配の斜坑により本坑へアクセスする形となっている。また、断層群を通過することや、交差する北陸自動車道のトンネル施工実績より、当初から多量の湧水の発生が予想されていた。(図-2 参照)

表-2 主要機械設備一覧

削岩機	ドリルジャンボ	クローラ式4ブーム2バスケット 油圧ドリフタ190kg級
ずり積機	ホイールローダ	サイドダンプ式3.0m ³
ずり搬出設備	クラッシャー	300t/h
	連続ベルトコンベア	本坑 w = 610mm
建込機械	固定ベルトコンベア	斜坑・坑外 w = 750mm、計4基乗継
	エレクター一体型	定格荷重: 1000kg
吹付機械	吹付機	吐出量: 6~25m ³ /h
コンクリート製造設備	パッチャープラント	強制2軸型ミキサ1.0m ³ 60m ³ /h
湧水処理設備	シクナー	300m ³ /h (+150m ³ /h増設を当初より計画)
	脱水機	1960L
換気設備	送風機	2000m ³ /min、4.9kPa
	集塵機	2300m ³ /min



3. 排水設備の計画と施工

3.1 当初排水設備

当工区は前述のように斜坑があり、図-3 のような現場配置となっている。よって、当工区の最低地点(坑底部)から坑外仮設ヤード(斜坑坑口)までの延長 583m、高低差 48m の強制排水が必須という現場環境となっている。この排水設備の不備や能力不足は現場の水没につながる恐れがあり、当初からある程度の異常出水を想定した排水設備を計画するものとした。

当初計画においては、地質別にみた比湧水量の統計結果¹⁾を基に湧水量を想定した。当工区の地質は主に中古生層であることから、当工区の想定比湧水量を 1.0m³/min/km として算出し、掘削終了時の湧水量を 3.6m³/min と想定した。排水ポンプの選定にあたっては表-4 のような計算結果が得られたことから、初期設備としては表-5 に示す設備を配備した。これらの排水ポンプ電源は浸水による電源遮断を防ぐため、坑外(坑口)のトランスより給電を行うこととした。ポンプ 1 台につき 1 条の電源ケーブルを坑口から坑底部までの全線にわたって敷設した。また、停電時にもポンプが停止しないように、220kVA の非常用発電機と自発停自動切替盤を配備した。

濁水処理設備は想定湧水量 3.6m³/min = 216m³/h の処理が可能なものとして 300m³/h の設備を配備した。また、湧水量が想定を上回った場合に備え、150m³/h のシクナー増設を当初から計画に盛り込んだ。

その後湧水量の増加に伴い、平成 28 年 8 月ポンプを増設して表-6 に示す設備とした。また、平成 28 年 9 月に当初から計画のあったシクナー増設を実施して、濁水処理能力は 450m³/h となった。

3.2 異常出水の発生

平成 28 年 10 月、夜勤の作業を開始し本坑 TD1340m 地点にて掘削作業を開始した。発破を行わずに出し作業を開始したところ、湧水とともに切羽の崩落が継続するようになった。そこで、ずり出しを中止して切羽に対してコンクリート吹付を行ったが、湧水箇所の崩落は止まらず進行を続けた。崩落の進行と共に湧水量も徐々に増加して、明け方には切羽からの湧水量が推定で約 5m³/min となった(写真-1 参照)。切羽後方からの湧水もあったため、坑底部のポンプ能力が限界に達し、坑底部より水位の上昇が始まった。

このままでは坑内が水没してしまうため、早朝より緊急で発電機・排水ポンプ・配管の手配を行い、全作業員総出で排水設備の設置作業に取りかかった。6B 配管を 2 条追加敷設し、それぞれに 37kW のポンプを接続。ポンプ 2 台を 220kVA の発電機にて稼働した(写真-2 参照)。応急での排水は成功し水没は免れたが、恒久的な対策には大幅な設備の段取替えが必要であり、全作業が中止することとなった。この時の濁水処理流量は最大で 512m³/h = 8.53m³/min を記録した。

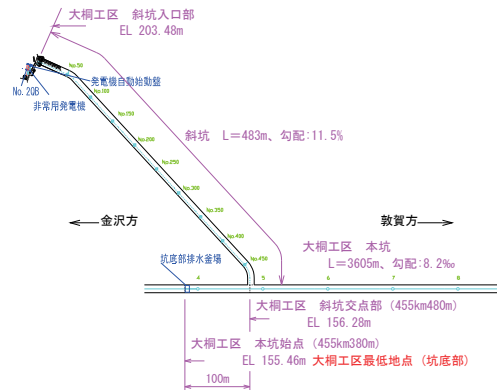


図-3 現場平面図(坑底部～斜坑坑口)

表-4 排水能力 (初期設備)

坑底部排水釜場 ↓ 坑外仮設ヤード 沈砂池	ポンプ容量 [kW]	排水流量 [m ³ /min]	
		6B配管	8B配管
	37	1.6 ①	2.0 ②
	45	1.8 ③	2.3 ④
配管延長 [m]	600	実揚程 [m]	50

表-5 排水設備一覧 (初期設備)

H27.08～	ポンプ容量 [kW]	配管	排水流量 [m ³ /min]
1 常用	45 200V	6B	1.8 ③
2 常用(予備)	45 200V	6B	1.8 ③
3 非常用 異常出水対策	37 200V	8B	2.0 ②
4 予備配管	なし	8B	-
合計			5.6

表-6 排水設備一覧 (増設後)

H28.08～	ポンプ容量 [kW]	配管	排水流量 [m ³ /min]
1 常用	45 200V	6B	1.8 ③
2 常用	45 200V	6B	1.8 ③
3 非常用 異常出水対策	37 200V	8B	2.0 ②
4 常用(予備)	45 200V	8B	2.3 ④
合計			7.9



写真-1 異常出水発生状況 写真-3 交差点部濁水タンク TD1340m



写真-2 坑底部緊急排水状況

3.3 排水設備の段取替え

恒久的な対策にあたって、下記の3点を基本方針として定めた。

- ① 今回と同程度の湧水でも処理できる濁水処理設備とする
- ② 現状の湧水状態に加えて、同程度の異常出水が発生しても対応可能なように、1000m³/hの排水設備とする
- ③ 清濁分離を行う

そこで、濁水処理設備は125m³/hのシックナーを増設し、合計で575m³/hの処理能力とした。

本坑からの排水は1000m³/h = 16.8m³/minの排水能力を確保するため表-7に示す設備を配備した。写真-3は交点部に設置した大容量のポンプである。

また、濁水処理能力に余裕を持たせるため清濁分離を行った。詳細は後の3.5項にて説明を行う。

排水設備が大幅に変更されたことから、電気設備についても大幅な変更が発生し、トランスや非常用発電機、電源ケーブルの増設を行った。

以上のように大規模な設備の段取替えを行って、異常出水への対策を整えた後に掘削作業を再開した。異常出水の発生から掘削再開までには約3週間を要した。

表-7 排水ポンプの配置と排水能力

坑底部排水釜場 ↓ 交点部濁水タンク	配管延長 [m]		70		実揚程 [m]		2	
	ポンプ容量 [kW]	配管	条数	排水流量 [m ³ /min]	1条	合計		
	22	200V	6B	4	4.2	16.8		
	合計					16.8		
交点部濁水タンク ↓ 坑外仮設ヤード洗砂池	配管延長 [m]		600		実揚程 [m]		50	
	ポンプ容量 [kW]	配管	条数	排水流量 [m ³ /min]	1条	合計		
	55	400V	6B	4	2.2	8.8		
	75	400V	8B	2	4.0	8.0		
	合計					16.8		

表-8 清水排水設備の配置と排水能力の変遷

H28.11~	ポンプ容量 [kW]	配管	条数	排水流量 [m ³ /min]	
				1条	合計
切羽付近 ~ 交点部清水タンク	ポンプ中継	6B	1	-	-
交点部清水タンク ~ 坑外ヤード給水槽	37 200V	6B	1	1.6	1.6
	合計				1.6
H29.05~	ポンプ容量 [kW]	配管	条数	排水流量 [m ³ /min]	
				1条	合計
切羽付近 ~ 90BL清水タンク	ポンプ中継	6B	2	-	-
90BL清水タンク ~ 交点部清水タンク	15 200V	6B	2	1.7	3.4
交点部清水タンク ~ 坑外ヤード給水槽	37 200V	6B	1	1.6	1.6
交点部清水タンク ~ 河川放流	55 400V	6B	1	2.2	2.2
	合計				3.8
H30.02~	ポンプ容量 [kW]	配管	条数	排水流量 [m ³ /min]	
				1条	合計
切羽付近 ~ 中央集水管	ポンプ中継	6B	2	-	-
中央集水管 ~ 90BL清水タンク	11 200V	6B	3	3.0	9.0
90BL清水タンク ~ 交点部清水タンク	15 200V	6B	2	1.7	3.4
交点部清水タンク ~ 坑外ヤード給水槽	37 200V	6B	1	1.6	1.6
交点部清水タンク ~ 河川放流	55 400V	6B	1	2.2	2.2
	合計				3.8
H30.03~	ポンプ容量 [kW]	配管	条数	排水流量 [m ³ /min]	
				1条	合計
切羽付近 ~ 中央集水管	ポンプ中継	6B	2	-	-
中央集水管 ~ 90BL清水タンク	11 200V	6B	3	3.0	9.0
90BL清水タンク ~ 交点部清水タンク	22 200V	6B	3	2.0	6.0
交点部清水タンク ~ 坑外ヤード給水槽	37 200V	6B	1	1.6	1.6
交点部清水タンク ~ 河川放流	55 400V	6B	2	2.2	4.4
	合計				6.0

3.4 送電容量の超過とデマンド抑制

負荷電気容量の増加による影響は現場内にとどまらず、電力会社の送電線の容量も足りなくなることが判明した。すでに許容値に近づいており、送電線の工事を行うまでは最大需要電力(以下「デマンド」)を1240kWまでに抑制する必要に迫られた。そこで、非常用発電機を常用運転し、75kWポンプ2台分の電力消費を発電機でまかなうこととした。約4か月にわたり、休日等を除いてこのデマンド抑制対策を実施した。送電線の張替えにあたっては、更なる湧水量増加でポンプや濁水処理設備を増設する可能性を考慮し、最大1700kWに対応するよう電力会社へ依頼した。平成29年8月に送電線張替えが完了し、発電機によるデマンド抑制対策を終了した。

3.5 清濁分離の実施と清水系統の変更

清濁分離に関しては、湧水状況の変化や切羽・インバート・覆工の進捗に応じて都度見直しを行い、排水設備の盛り替えを行ってきた。表-8に清水排水設備の配置と排水能力の変遷を示す。

当初の清濁分離は異常出水によって発生した切羽付近の湧水を清水として排水するものであり、水抜きボーリングや鋼管を用いた水抜き孔からの湧水をホース等で導水し(写真-5参照)、空のドラム缶や水槽によりポンプを中継して排水している(写真-6参照)。

平成30年2月には清濁分離に関する排水設備の大幅な見直しを行った。異常出水が発生したTD1340m付近はインバート・覆工まで施工完了しているが、この付近からは継続して多量の湧水が発生しており、この湧水が中央集水管に流れている。しかし、中央集水管に流れた水は濁水として排水していたため、多量の湧水が全て濁水として処理されていた。そこで、中央集水管の集水升にて堰をつくり、中央集水管を濁水区間と清水区間に分けることで、切羽湧水のみならず恒常化した多量の湧水を清水として排水した。図-4に清濁分離排水の平面図を示す。



写真-5 切羽湧水導水状況 写真-6 交点部清水タンク

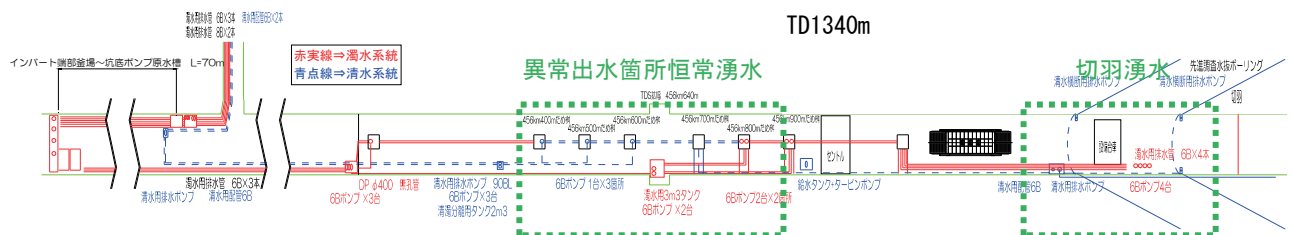


図-4 清濁分離排水平面図

4. 考察

図-5に濁水処理、濁水・清水の各排水、及び電力消費についての推移をまとめたグラフを示す。ここからは、このグラフにより当現場における多量湧水の処理に関して考察を行う。

4.1 湧水量と排水設備の関係について

今回最も注目すべき点が平成30年3月、4月である。全体湧水量が濁水処理能力を上回った。しかし、清水排水能力を増やして3.3m³/min以上(最大5.5m³/min)を清水として排水したことにより、575m³/hという濁水処理能力に対して、濁水処理量を417m³/h(7.0m³/min)に抑えることができた。もし、清濁分離を行っていなければ、掘削を中断して濁水処理設備の増設を行わなければならなかったはずである。平成30年2月に行った清水排水設備の段取替えでは、既存の中央集水管を活用したことにより、2日間で作業完了しているが、もし濁水処理設備を増設した場合には1週間程度は掛かると考えられる。よってその損失は大幅に小さいものであり、清濁分離の実施が有効であったことを証明する結果となった。

4.2 湧水量と電力消費の関係について

掘削距離の増加によっても電力消費は増加するが、特に異常出水後の湧水量の多い時期には湧水量とデマンド・電力使用量のグラフが似た変化をしており、湧水量と電力消費は密接に影響する。デマンド抑制のために発電機を使用した時期には、湧水量の増加に対してデマンドはほぼ横ばいであり、発電機がデマンド抑制に有効であったと言える。しかし、この発電機が消費した燃料代は、抑制された電気代を遥かに上回るものであり、恒久的なデマンド対策とはならない。本来であれば、

設備の大幅な増強を行った時点で今後の電力消費を見直し、電力会社との協議を行うべきであった。

続いて、清濁分離と電力消費の關係に着目する。清水0m³/hの平成30年1月に対して、5月は160m³/hを清水として排水し全体でも79m³/h多く排水しているが、そのデマンドはほぼ同じ値となっている。これは、清濁分離により濁水処理設備の電力消費を抑制できることを示すものである。

4.3 考察のまとめ

多量湧水の処理に関する、上記の考察をまとめると以下ようになる。

- ① 清濁分離を行えば濁水処理量を低減できる
- ② ①は濁水処理の薬品や電力の消費低減になる
- ③ 本設の中央集水管等を活用することで段取替えによるロスを抑制できる
- ④ 排水設備の稼働増により電力消費も増加する
- ⑤ ④より、電力消費についても都度見直しを行い、電力会社と協議する必要がある

5. おわりに

異常出水による水没の危機などを経て、大規模な設備の増強と清濁分離という貴重な経験をしてきた。しかし、これからの工事においても予想しない問題と直面する可能性は十分にある。これまでの経験を生かして工事の完工を実現すると共に、経験を蓄積して、今後も効率的かつ安全な施工を実現できるよう日々研鑽していく所存である。

参考文献

- 1) 日本道路公団委託(社)日本トンネル技術協会:「トンネル工事に伴う湧水濁水に関する調査研究(その2)報告書」, 昭和58年2月

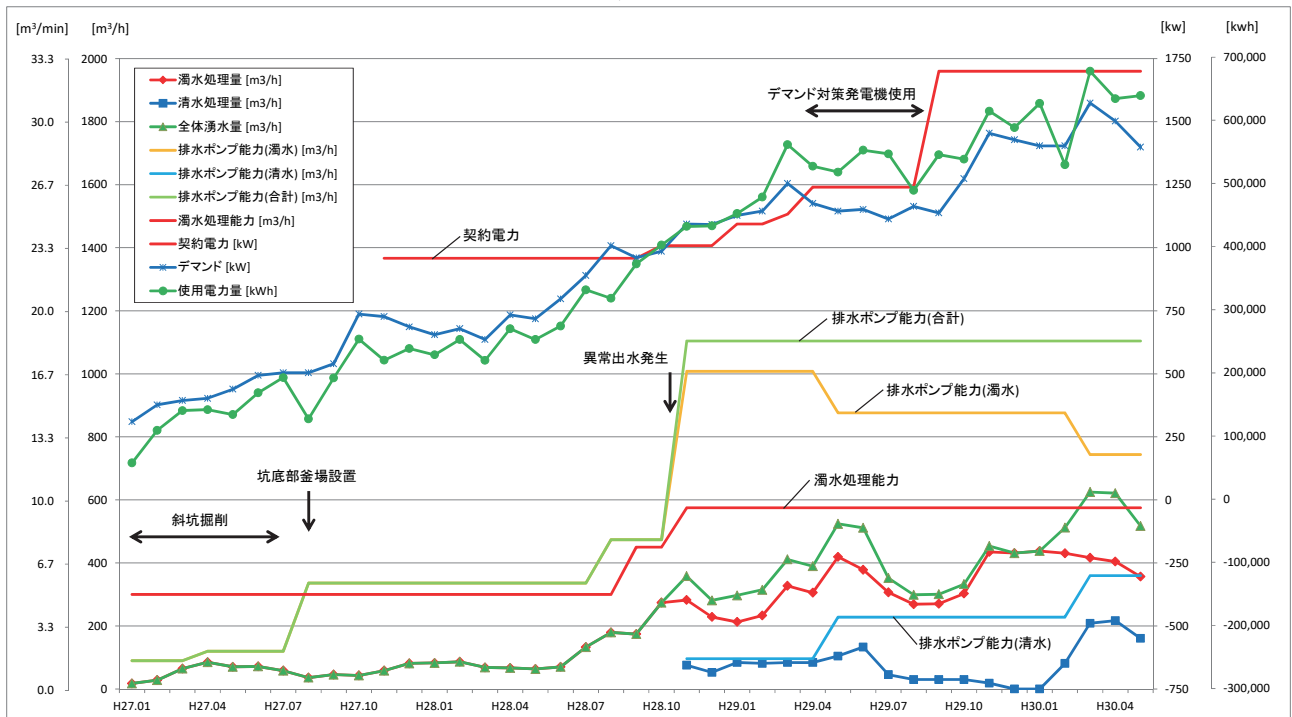


図-5 排水設備能力・排水量・電力消費の推移

18. 国内初導入した4ブームフルオートコンピュータジャンボによる 大断面トンネルの施工実績

—宮古盛岡横断道路 新区界トンネル工事, 国道45号 白井地区道路工事—

鹿島建設(株) ○ 三浦 孝
鹿島建設(株) 牟田口 茂

1. はじめに

硬岩地山を対象としたトンネル工事においては、ジャンボにより穿孔した孔に爆薬を装填し、岩盤を破碎する発破工法を採用する。この穿孔作業における穿孔位置・差角・孔尻深さ等は、発破効率に、ひいてはトンネル工事の生産性に多大な影響を及ぼす。しかし、従来、これらは主にオペレータの経験に基づいて設定され、その穿孔精度もまたオペレータの技量に依存している。これに対し、今回フルオートコンピュータジャンボを導入した2つの工事では、地山状況および発破後の切羽の形状測定結果に基づいて入力する穿孔プラン作成を、元請社員主導により実施した。

本稿では、大断面トンネルに4ブームフルオートコンピュータジャンボを導入し、積極的に活用した施工実績を報告する。

2. フルオートコンピュータジャンボについて

フルオートコンピュータジャンボ（アトラスコプロ社製 XE4C）には、コンピュータによるマシンコントロールシステム（RCS5）を搭載しており、穿孔プランに対する各ブームの穿孔範囲と穿孔順番を事前に登録することによって、コンピュータ制御のフルオート穿孔を可能としているため、専任オペレータ1名による穿孔作業を実現した。

2.1 期待される効果

今回の対象工事では、掘削工程を短縮するため、地山の良好な区間では1発破進行長を伸ばすことを計画した。

信頼性の高い発破を実現させるためには、確実な芯抜き発破（正確な孔間隔、孔深度、孔角度、孔尻位置）と、精度の高い払い発破（差角のブレによる過度の余堀の低減、発破による地山損傷の抑制）を必要とする。そこで、オペレータの熟練度に頼らず、フルオートコンピュータジャンボによる穿孔精度向上を期待した。

以下に期待される効果を示す。

- ① 穿孔をオペレータの技量に関係なく一定の精度により行うことができる。
- ② 穿孔圧力の適正な制御により孔曲がりを抑制し余堀量を適正に管理できる。
- ③ 穿孔データの自動収集機能により地山状況を可視化できる。
- ④ 施工人員を減らすことができる。

2.2 穿孔機の特徴

大断面トンネルの急速施工を行う場合、通常は3本の穿孔用ブームを有するドリルジャンボを2台並べて使用することが多く、その場合互いのブームを干渉し作業効率は悪くなることから、専任オペレータ1名による4ブームフルオートコンピュータジャンボを導入した（写真-1、写真-2）。



写真-1 4ブームフルオートコンピュータジャンボ (XE4C)



写真-2 マシンコントロールシステム

また本機は、最新鋭の高速穿孔用ドリフタとして 30kW 級削岩機(COP3038)を搭載している。表-1に削岩機の比較を示す。

表-1 削岩機の比較

項目	機種	
	ノーマル機	新型機
	COP 1838ME	COP3038
打撃出力, 最大, kW	18	30
重量, kg	170	165
ドリフタへの入力, 最大, kW	31	60
作動油圧, 最大, bar	230	200
流量, l/min	75 - 92	150 - 175
打撃周波数, Hz	60	102
1回当たりの打撃エネルギー, Nm	330	294

従来機(COP1838ME)と新型機(COP3038)を比較すると、COP1838MEは重量(kg)と1回当たりの打撃エネルギー(Nm)は大きいものの、流量(l/min)と打撃周波数(Hz)はCOP3038の方が大きい。これは、 $E=(mV^2)/2$ により、重量(m)は小さくても油量を上げて打撃周波数(打撃速度(V))を大きくすることにより、穿孔エネルギー(E)を大きくしていることを示している。

このことは、穿孔速度の比較によって確認することができる。メーカー資料から、ビット径φ51mm・石灰岩(160MPa)の場合、従来機COP1838MEの穿孔速度は4m/min(図-1)、新型機COP3038は6.4m/min(図-2)であり、約1.6倍の穿孔能力を有していることが分かる。

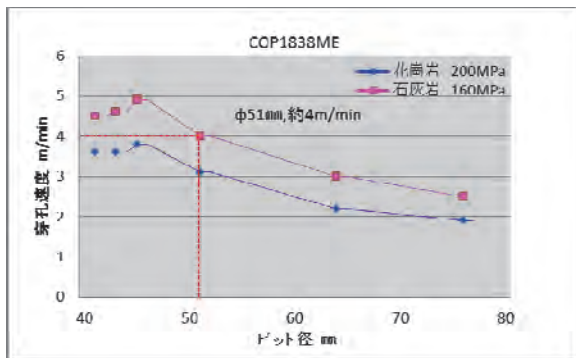


図-1 COP1838ME

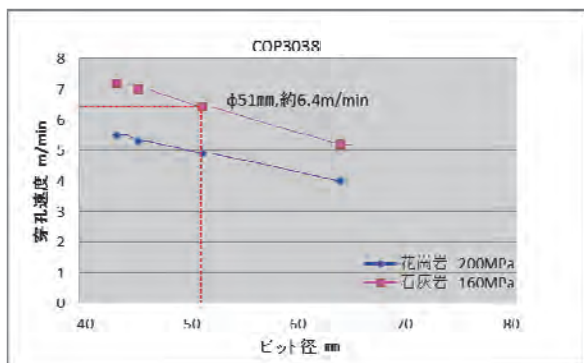


図-2 COP3038

2.3 活用事例

活用フローを図-3に示す。穿孔の基準とする切羽面(仮想切羽面)のトンネル延長と予定進行長、および穿孔プランを予め設定することで、発破プラン上の穿孔長と差角をコンピュータに計算させる。フルオート穿孔により全ての孔尻は揃い、外周孔も設計通りの差角によって穿孔される。そのため、穿孔精度は格段に向上するので、穿孔プランのまま掘削面の仕上がりに反映し易いことが特徴である。また、ロックボルト孔の穿孔に対する誘導機能を活用し、支保パターンの誘導画面に従って穿孔することによって、マーキングせずに所定の位置にロックボルトを打設できる。

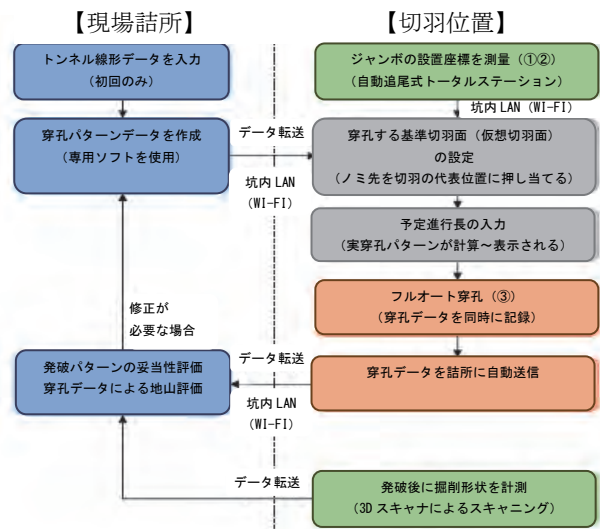


図-3 コンピュータジャンボの活用フロー

3. 導入実績

4 ブームフルオートコンピュータジャンボの導入により、①穿孔精度の向上(1発破進行率の向上)、②差角制御による余掘り低減、③コンピュータジャンボによる地山評価、④施工人員の削減、の4点について効果を確認したので、以下に示す。

3.1 穿孔精度の向上(1発破進行率の向上)

(1) 1発破進行率の向上

3Dスキャナを用いて進行・余掘り状況を測定した。オペレータの経験による穿孔・発破結果を図-4に示す。また、フルオートコンピュータジャンボによる穿孔・発破結果を図-5に示す。

従来のオペレータの経験による穿孔・発破では、穿孔深度、孔尻位置は不安定であり発破進行率もばらついた。

フルオートコンピュータジャンボによる穿孔・発破では、穿孔深度、孔尻位置は揃い、平均穿孔長3.6mに対して平均進行長3.4m程度と安定し、発破効率は向上した。(CI区間95%)

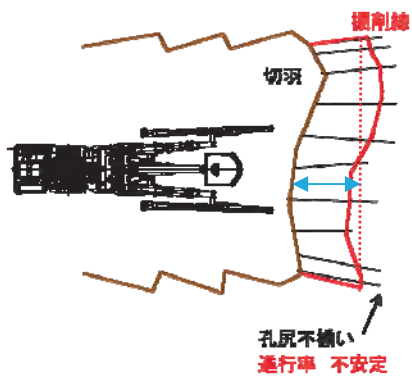


図-4 ノーマルジャンボを使用した場合の穿孔・発破

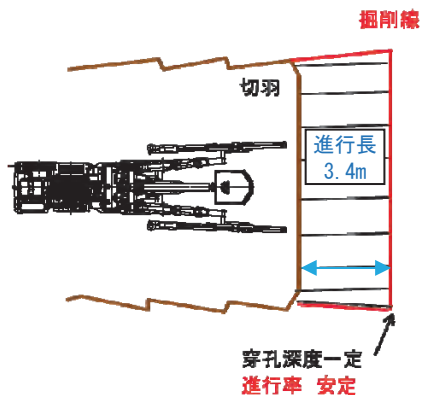


図-5 フルオートコンピュータジャンボ (XE4C) を使用した場合の穿孔・発破

(2) 穿孔データと3D計測データの連携

発破後の掘削形状を迅速かつ高精度に評価するため、発破ズリ出し後の形状を3Dスキャナによって測定した。据付けから撤収までの所要時間は約2分であり、施工サイクルを妨げることなく1名で計測可能であった (写真-3)。



写真-3 3Dスキャナによる切羽の形状測定状況

測定結果を3次元的に表示できるので、穿孔プランの適否を評価することが可能となった。図-6にコンピュータジャンボの穿孔データと形状測定結果を組み合わせた穿孔プラン改善例を示す。

当初の穿孔プランでは、踏前中央部において起砕不良であることが発破後の形状測定結果から判明した。このことから、孔尻間隔を当初よりも狭く見直した結果、図-6右下図に示すとおり、踏前中央部は起砕良好となり改善された。

このようにフルオートコンピュータジャンボの

穿孔データと3D計測データを連携させることによって、より効率の良い穿孔プランを作成することを可能とした。

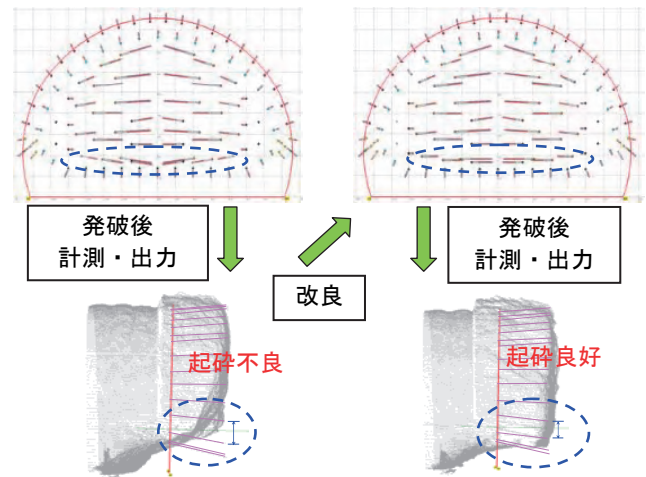


図-6 切羽形状測定による穿孔プラン改善例

3.2 差角制御による余堀低減

フルオートコンピュータジャンボの差角誘導機能による余堀低減効果について検証した。図-7に差角誘導機能無し、図-8に差角誘導機能有りの場合の3Dスキャナ測定結果を示す。双方の比較では余堀を40%程度低減したことが確認できる。しかしながら、地山の性質 (部分的な硬軟、亀裂の入り方) は常に変化するため、穿孔プランは随時地山に合わせて修正を必要とする。そこで、最適な余堀管理を行うために、基準となる設計穿孔プランを作り、外周孔差角のみを変えた穿孔プランを用意し、前回発破の余堀状況から穿孔プランを適時選択することによって安定的に余堀低減できた。

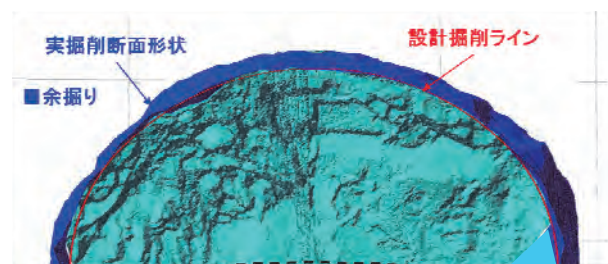


図-7 3Dスキャナ結果 (差角誘導機能無し)

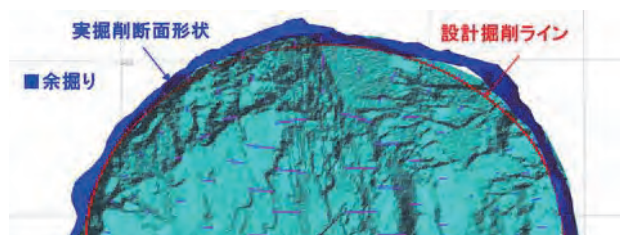


図-8 3Dスキャナ結果 (差角誘導機能有り)

3.3 コンピュータジャンボによる地山評価

コンピュータジャンボは各種センサーを搭載し、穿孔中の回転・打撃・送り圧力といった穿孔に直接関係するパラメータの他に日時、速度、穿孔長、穿孔位置(開始位置、終了位置)座標、差角などといったデータを取得している。

図-9に穿孔実績データの1つである穿孔速度を視覚化したデータを示す。これは三次元的に回転操作することが可能であり、立体的に地山脆弱部を把握することができる。

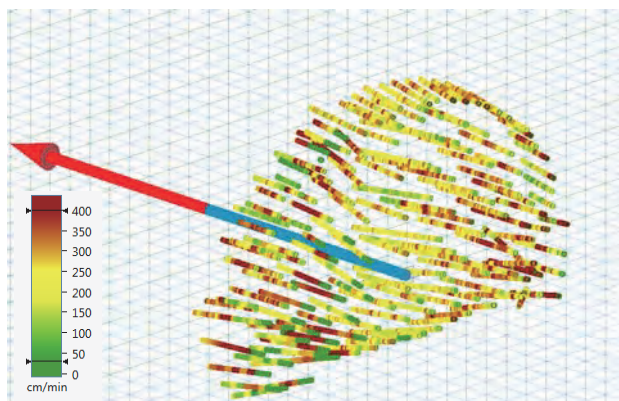


図-9 穿孔実績データ例(穿孔速度)

また、穿孔速度以外にも回転圧力や打撃圧力毎の表示も可能になっており、回転圧や水圧の変化を見ると硬さや亀裂性の有無といった評価ができる。図-10に硬さ(Hardness)、図-11に亀裂(Fracturing)を連続して並べた例を示す。

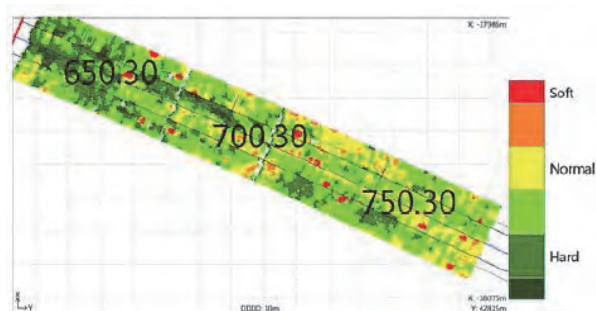


図-10 硬さ(Hardness)分布例

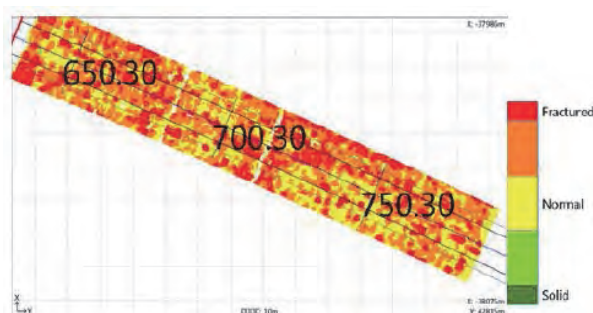


図-11 亀裂(Fracturing)分布例

図-10は穿孔速度を基本にして、穿孔深度が長くなったときの打撃エネルギーの損失による穿孔スピードの減少と打撃圧、フィード圧、回転速度の影響を計算に入れて、標準化された数値である。

図-11は亀裂や地山の硬軟の局所的変動を指標化したものであり、回転圧や水流の変動を考慮している。

穿孔実績データの活用の幅は非常に広く、切羽前方の地質予測や補助工法の選定根拠、肌落ち危険箇所の特特定等に活用した。

3.4 施工人員の削減

通常1台の3ブームジャンボに対し2~3名のオペレータを必要とするが、今回導入した4ブームフルオートコンピュータジャンボは、4ブームの穿孔作業を1名のオペレータによって可能とした。このため、3ブームジャンボを2台並べて使用する場合に比べ、大幅な施工人員の削減を達成した。

施工体制としては、専属オペレータ2名による、昼夜各1名によって穿孔作業を行った。また、メカニック1名を他の機械もメンテナンスしつつ常駐させて、専属オペレータ不在の際には、オペレータとしても従事した。

穿孔中の切羽作業員は換気・電気設備盛替や後方支援、次工程の段取りなどを行い、分業化により効率的に作業を進められた。

4. おわりに

今後の山岳トンネル工事は長距離化や不安定な地質、労働力の不足、一層の低コスト化、高速施工など、より難しい条件となることが予想される。

これらの状況の下、フルオートコンピュータジャンボの施工実績は、合理的な施工による生産性の向上や、地山評価技術を基にした安全性を向上させたことにより、山岳トンネル工事の施工技術発展に大いに寄与することを期待する。

参考文献

- 1) 赤石ら：「4ブームフルオートコンピュータジャンボによるICT施工例」, 土木学会第72回年次学術講演会, VI-717, 2017
- 2) 西川ら：「発破後の切羽の形状測定結果に基づく穿孔プランの改善」, 土木学会第72回年次学術講演会, VI-719, 2017

9	0.7	soil	0
10		sand	5



図4 映像による施工現場

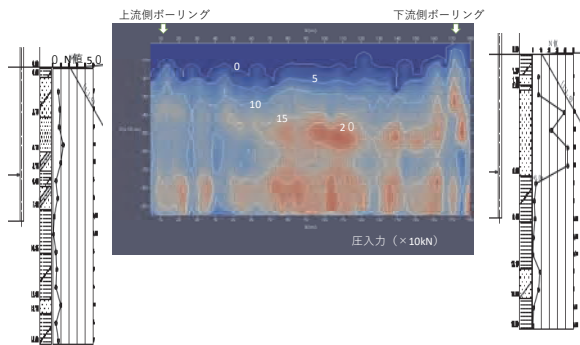


図5 圧入圧分布図

4. 情報化施工内容

情報化施工で採用したモニタリング項目およびその目的を表2に示す。鋼矢板の安定性管理は、主に鋼矢板頭部の変位計測にて行い、補助的に鋼矢板（縦方向）に生じるひずみ量の計測から部材に作用する荷重を推定するものとした。また鋼矢板の一体化を狙って鋼矢板頂部の連結を行っている。

表2 モニタリング項目

計測管理項目	計測箇所	計測目的	許容変位量(管理値)
鋼矢板 水平変位	鋼矢板頭部 3ヶ所 (上中下流)	鋼矢板の安定性確認	120mm
鋼矢板 ひずみ	鉛直方向 1側線	鋼矢板に作用する荷重	—
連結鋼材 ひずみ	水平方向 1側線	鋼鋼矢板に作用する荷重	—
水位	仮締切内外 計2ヶ所	作用水圧の確認(水位変動)	—

5. 管理方法

動態観測は、レーザー変位計（図4参照）による自動計測による24時間連続観測とした。施工中は、随時計測値（図5参照）を確認するとともに、計測

値に対する基準値を設定し、基準値を超過した場合には警報を発するシステムにしている。なお、夜間および休日については自動記録および自動警報により管理する。また、計測データの確認およびデータ分析の遠隔操作が可能なシステムを用い、作業ヤード以外からも随時監視を行っている。



100mm Model: DT 500・A 511
Measurement range: 0.2 to 70 m
Output: 4 to 20 mA
Measurement accuracy: ± 3 mm
Spot diameter (70 □) 100 mm

図6 レーザー測距器



図7 自動計測モニター画面

6. 映像管理

自動計測と共にネットワークカメラを設置して、遠隔からの現場臨場を映像で補完し、PCや携帯電話でのコミュニケーション環境（図8参照）を構築している。また、計測データの異常が確認された時の現地の模様を記録された映像で振り返りを容易にし、工事トラブルが発生する前に対策を講じ事故予防を可能している。



Networkカメラ ウェアラブルカメラ ドローン



タイムラプス映像化



オンライン接続

図8 映像活用システム構成



図9 映像収録管理DB (映像 CIM)

7. 情報化施工

a. 水圧変化

水位計測結果と映像 (図11参照) による振り返り臨場により、鋼矢板の両面の水位差 $\Delta h \approx 2.0\text{m}$ が、大潮の影響を受け、周期的 (図10参照) に最大変位が発生する (図12参照) ことが確認された。また、水位履歴では、3月初旬に2mを超え、最小水位差が $\Delta h \approx 0\text{m}$ で推移している。更に大雨の出水時に0.5m程度の水位上昇が計測された

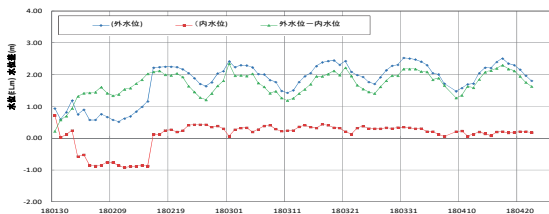


図10 鋼矢板水位差経緯



図11 水替えにより水位低下の臨場

b. 鋼矢板頂部の変位

鋼矢板頂部の変位については、最大、最小の両水位差で上流側が下流側に比べて3倍に近い変位 (図12参照) を計測され、上流側は3月に入ってから管理基準の120mmに達している。また、3月初旬の大雨時の水位上昇時に、急激に変位量を大きくするなど水圧の増加に敏感に反応していることが観察された。

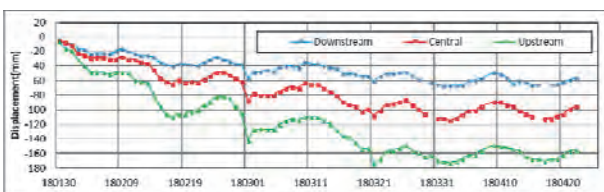


図12 日最大変位測定図 (上流、中間、下流)

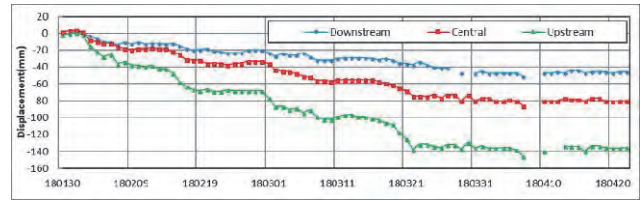


図13 日最小変位測定図 (上流、中間、下流)



図14 内水部の掘削状況の臨場

c. 水圧-変位履歴

干満の影響、特に大潮の周期で頂部変位 (図15, 16参照) が最大になり、かつ一回目の大潮時に比べ2回目以降3回目までは、大潮時の鋼矢板頂部の水位差 $\Delta h = 1.25\text{m}$ での残留変位 $\delta 1 \approx 40\text{mm}$, $\delta 2 \approx 30\text{mm}$, $\delta 3 \approx 40\text{mm}$, 累積残留変位 $\Sigma \delta \approx 110\text{mm}$ と塑性化の傾向が確認された。また、地盤が比較的に良い下流と、地盤が脆弱な上流での頂部変位を比べると、下流に比べ上流が大きくなることが確認された。例えば50mmの変位 δ を引き起こす水位差 Δh_{50} (図17参照) は、地盤が弱いほど大きくなり、上流側は $\Delta h_{50} = 1.25\text{m}$, 中間点 $\Delta h_{50} = 1.50\text{m}$, 下流側 $\Delta h_{50} = 1.85\text{m}$ と、上流側が下流側に比べ7割程度の地盤剛性であることが考察できる。ただし、大潮4回目以降は、地盤改良の効果により累積変位が110mmで固定され、残留変位 δ もほぼ発生していないことが確認された。

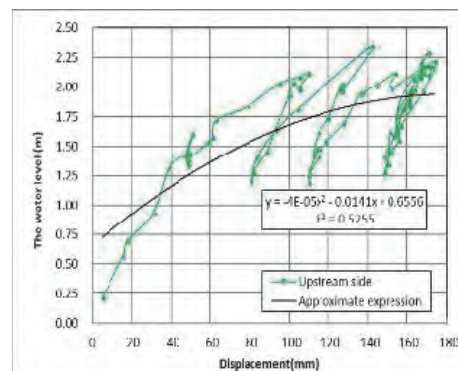


図15 上流側鋼矢板の水圧-頂部変位曲線

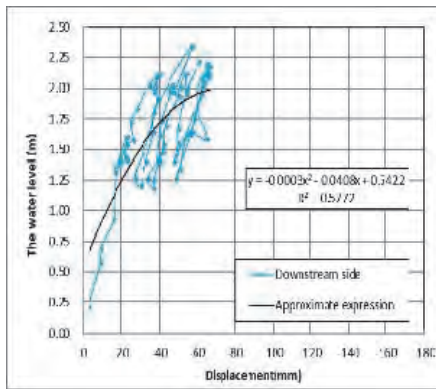


図16 下流側鋼矢板の水圧-頂部変位曲線

8. まとめ

本工事で実施した映像による仮想臨場を活用した情報化施工の効果は、現場、発注者およびコンサルタントが、リアルタイムに日常的に臨場を共有できたことで、計測データの評価を容易にし、それに従い対策工法の選定を早めることができたことで、現場の進捗を妨げることなく施工を進めることが出来たことである。

その結果、大潮の影響を受けた周期的な水圧の変動による根入れ部の緩み、河床部の掘削による応力開放が影響した地盤の緩み、および根入れ部近傍に設置した水替え工の釜場（図19参照）による土粒子の流出などの影響を評価（図18参照）しながら実施した対策工の効果について以下にまとめる。

- a) 根入れ部の変位を拘束するために掘削部の深部はセメント、浅部は石灰による地盤改良を実施、大潮の4周期以降の塑性化を防止した。
- b) 鋼矢板根入れ部に設置した大型土嚢による鉛直荷重を増加させたが、著しい効果は確認できなかった。
- c) ポンプ釜場による土粒子の引き込みが確認されたことで、根入れ部の地盤を維持するうえで釜場の位置変更は有効であった。

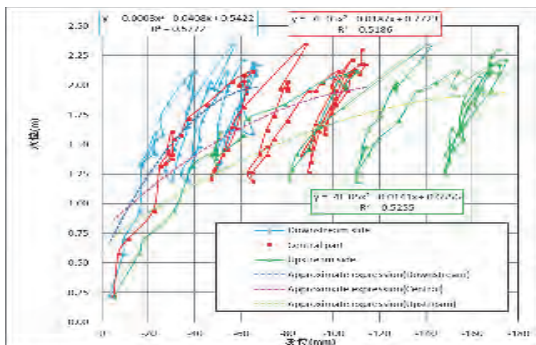


図17 上中下流3地点での鋼矢板の水圧-頂部変位曲線



図18 映像による振り返りでの上流側の臨場



図19 周辺の地盤の変状を矢板で仮押さした釜場の設置状況

9. 最後に

今回の映像を活用した情報化施工により鋼矢板構造物の挙動を観察、適宜、対策工の有効性を評価しながら施工管理が実施できた点、早朝や休日で現場不在時でも、降雨や出水など鋼矢板の異常値の発生を適宜映像で遠隔監視できたことが、迅速なリスク判断に繋がり最大リスクを回避できたと考えられる。中小建設業のように一人現場が多い作業条件において、IoTによる仮想臨場が可能になることは、安全性の面で、その効果は大きいと確信している。

参考文献

- 1) 河川構造物設計要領 h 28. II 中部地方整備局 p4 -1-19・自立式鋼矢板(仮設)
- 2) 須田他「中小零細建設業を対象にする映像を活用したCIMの開発」日本機械化協会 平成27年度建設施工と建設機械シンポジウム

20. 映像 IoT による現場臨場の効率化に関する実験報告

可児建設株式会社
株式会社環境風土テクノ
立命館大学

○ 可児 純子
須田 清隆
建山 和由

1. はじめに

建設現場の「働き方改革」では「CIM 制度整備・定着化」「生産性向上」「社員満足度向上」など、多様な挑戦が行われている。CIM(Construction Information Modeling /Managements)の解釈は、①シームレスな情報共有、②トレーサビリティ機能の充実、③建設情報の資産化・知財化と共に④i-Construction への展開と考える。一方、中小建設業では、CIM が浸透しない理由として①技術者の高齢化と若い人が入社しない②小規模工事が多く、個人にノウハウが集中している③高齢技術者の退職と同時にノウハウが失われる④経験主義が強く技術継承（コミュニケーション）が苦手であるなどが考えられる。本報告では、中小企業の実情で今後増々、人材確保が困難になる現状で、限られた人的資源の有効活用として、移動時間や打合せ会議の効率化を目的に、現場の臨場を映像で行うことによる効率化に関する実験的考察をまとめたものである。特に、中小建設業の働き方改革として、IoT によるリアルなコミュニケーションでの仮想臨場は、安全監視や品質管理などのプロセスのコンカレント化による現場負担の軽減策として期待するものである。

2. 現状分析

過年度の研究から、中小建設業の現状として施工現場でのコミュニケーションの特性に関して、以下に示すようにリスクイメージの個人差のみでなく、空間やリスクを捉える手順にも個人差があることが確認されている。

【中小建設業のコミュニケーション特性】

- ① 工事現場では個人個人の価値観や経験値に照らし合わせて、現場空間のリスクを決定していることが多い。そのため、リスク評価など経験の違いや知覚情報によって個人差が表れており、共通なリスク判断を難しくしている。
- ② 中小建設業は高齢化が著しく、コミュニケーション能力の不足が見られ、建設空間に対す

るリスクイメージの捉え方や感じ方において、感覚的な説明に終始する傾向がある。

- ③ 現場の捉え方としては、熟練技術者は俯瞰的に現場を観察した後にその現場のリスクの発生要因を人瞰的にフォーカスし、虫瞰的に原因や要因を分析し、認識したリスクを思考の過程を省略して単純なイメージで表現する傾向が強い。
- ④ 小規模現場では会議や打ち合わせのために移動時間が工事進行に影響することがあり、十分なコミュニケーション機会が取れなく、問題発生後に原因追跡や分析に手間取ることが多い。

以上より、中小建設業の技術者の特性として経験量によって異なる技術課題の表現力や、リスクイメージやリスク判断難度を伝えるコミュニケーション齟齬の発生、および現場立会いや打ち合わせなどコミュニケーションする上での移動に要する時間負担などが複合的な問題に発展し、中小建設業においては施工現場の生産性の障害になっていることが推察できる。

3. 研究目的

本研究の目的は、上記課題であるコミュニケーションの対応として、映像デバイスを主なセンサーとした先端の IoT 技術による臨場創出であり、‘施工の見える化’とより進展させた

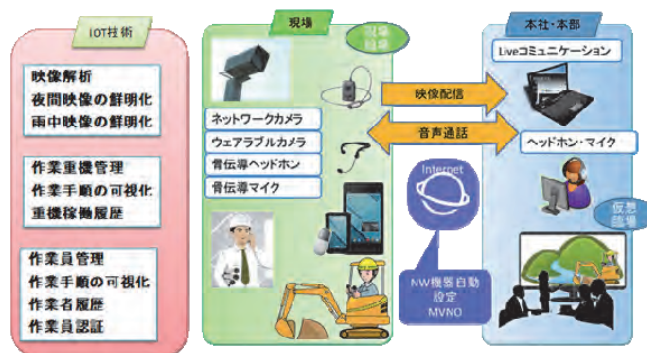


図1 既存IoT技術の活用による仮想臨場環境

‘Visual-Construction’の有益性の評価である。試行工事を通じて、全周型カメラやネットワークカメラで撮影した映像による施工現場の状況監視、および施工プロセス（映像の時系列管理）の最適化、品質管理（全体画像から部分切り出しで詳細精査）の高度化とともに、現場立地への対応として自営LTEネットワークによる情報管理の有用性など、映像情報のIoT化による『仮想臨場の演出による遠隔コミュニケーション（図1参照）』の有効性を確認するものである。

4. 映像活用の効用

映像活用の効用は、過年度の研究を通じて、ターンバック機能、センシング機能、ビッグデータ機能、コミュニケーション機能の四つの機能の有益性が確認されている。そのため、これらの機能を最大活用できるように施工現場の課題やリスクを判断し、臨場を表す映像シーンを撮影取得することが重要になる。

① ターンバック機能

現実空間の事象を画像情報として時系列的に蓄積することにより、本来は操作できない時間を映像という媒体の中で巻き戻す振り返り機能で、a) 事故・災害時の状況把握（事象発生の前後も含めて）やb) 工事のトレーサビリティ（施工品質の保証、検査への適用）に適用

② センシング機能

現実空間での事象を逐次蓄積し、現実モデルの現況把握や環境等による不可把握のための映像情報の提供する課題追求機能で、a) 構造物の状態監視、b) 仮想モデルと現実モデルとの空間的整合性の検証、c) 作業工程の監視と管理、d) 運用状況の把握およびe) 外部環境因子の状況把握に適用

③ ビッグデータ機能

蓄積データの様々な解析や映像データによるAI化を実現する情報集積機能で、a) 危険事象（インシデント）の検出と防止策の検証、b) 効率的な施設運用（システムとの連携）およびc) 作業効率の検証などに適用

④ コミュニケーション機能

映像による共通認識や合意形成への展開を促進する会話機能で、a) 日常の施工リスクの伝達、b) 施工空間のイメージ共有化およびc) コミュニケーション齟齬の解消などに適用

5. 試行工事

5.1 試行工事概要

試行工事では、以下の工事に適用し、IoTを活用した映像臨場を実施・その効果を検証している。

表1 試行工事一覧（●適用）

試行工事	工事概要	リアル映像監視	映像記録	IoT現場見学会
河川築堤工事	平成26年度庄内川大治築堤工事	●	●映像 CIM・タグ	
道路改修工事	国土交通省41号名濃バイパス道路建設工事	●計測併用	●映像 CIM	
河川改修工事	愛知県総合治水対策特定河川工事	●	●映像 CIM	●コミュニケーション
河川改修工事	国土交通省平成29年度庄内川大蟪螂低水護岸工事	●計測併用	●映像 CIM・タグ	●コミュニケーション

5.2 コミュニケーションシステム

工事現場の映像臨場には、過年度の研究成果である映像CIM技術に、360°全周を撮影する全周型映像（図4参照）やネットワークカメラによるリアル映像にモバイル通信技術をもってコミュニケーションシステムを構築している。モバイル通信技術（図2参照）には、ウェアラブルカメラと骨伝導ヘッドホンと骨伝導マイクによって臨場確認を可能にしている。



図2 骨伝導装置

6. 臨場検証

映像活用の臨場検証としては、ネットワークカメラによるリアルタイムな定点映像やモバイル映像による移動点映像に双方向会話を可能にしたリアルコミュニケーションの臨場効果と、上記映像をタイムラプス化した記録映像を収録した映像

CIMデータベース（図16、17参照）の検索機能を活用して、映像の振り返り（ターンバック）や映像解析（センシング）による現場精査などの臨場効果を検証している。記録映像については、工事現場を俯瞰的、人瞰的、虫瞰的と視野の規模に応じて収録整理している。

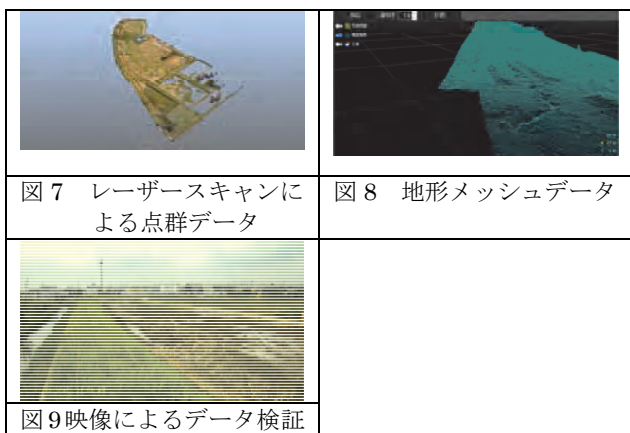
6.1 施工詳細を捉える臨場（愛知県総合治水対策特定河川工事）

MCによるICT土工の臨場として、ウェアラブルカメラでMCの運転手順や施工方法を確認し、施工性の高い手順の選定を容易にしている。同時に施工現場の丁張レスによる施工出来栄えが分かりやすく確認できている。



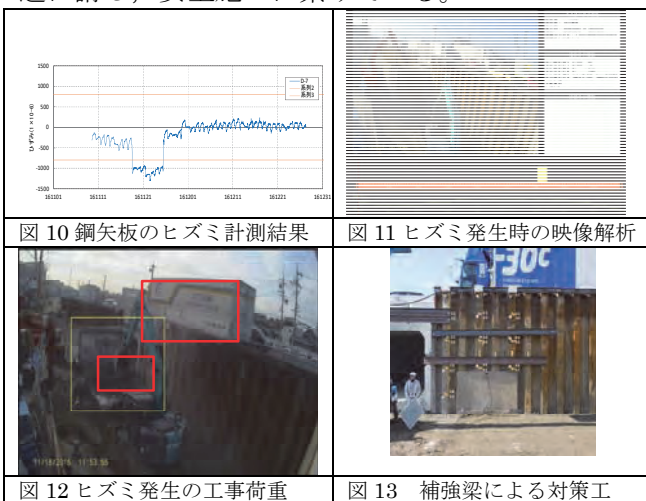
6.2 測量結果に対する臨場（愛知県総合治水対策特定河川工事）

レーザースキャンで測定・処理した点群データで作成した3次元メッシュの仕上がりを、実際のネットワークカメラで撮影した映像から切り出した画像から測定データの確認を容易にしている。



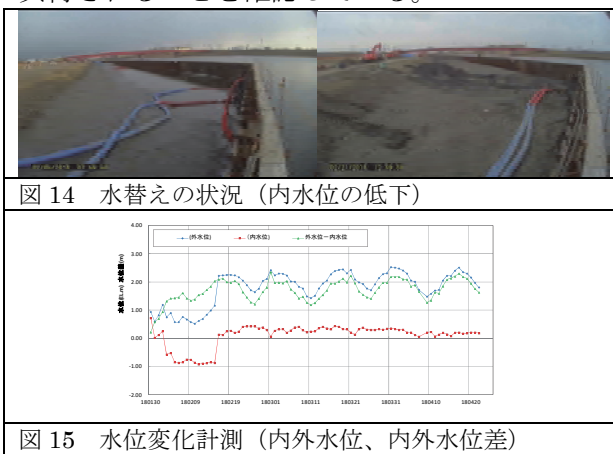
6.3 局所的な要因を捉える臨場（国土交通省41号名濃バイパス道路建設工事）

土留め鋼矢板のヒズミ計が、管理基準近傍に大きく発生したことで、ネットワークカメラで撮影した映像によりヒズミ発生時刻での施工状況を確認し、数値解析による要因分析を行い対策工を迅速に講じ、安全施工に繋げている。



6.4 鋼矢板への荷重変位の臨場（国土交通省平成29年度庄内川大蟠螂低水護岸工事）

水替えによる水位差の計測結果の考察に、施工状況を振り返り（ターンバック）、施工時荷重（水圧）の周期性として大潮時に最大荷重が鋼矢板に負荷されることを確認している。



6.5 鋼矢板への荷重変位の臨場（国土交通省平成29年度庄内川大蟠螂低水護岸工事）

収録した記録映像に、施工上の課題や注意事項などをタグ化し、映像の重要度を点数化しデータベースに収録している。施工後の、技術や工法の情報の取り出しや分析を可能にしている。



図16 施工データのタグ付け



図 17 検索された映像の重みづけ

7. 現場見学会での臨場実験

映像による臨場を、遠隔での会議室で、現場とのリアルコミュニケーションと施工記録を収録している映像 CIM を活用して、俯瞰的な視点、人目



線の視点、虫瞰的な視点での現場の課題表現について、映像の情緒性に対してスケール感を表すことを目的に3面

のスクリーンをもって双方向コミュニケーションによる現場見学会を開催、映像による臨場表現の効果を検証している。

IoT 現場見学会を実施した結果、その効果について以下にまとめる。

- ①リアル映像や映像記録によって現場の臨場感が室内でも詳細に表現したことで、遠隔でも現場と同等の意思決定や技術判断ができるようになった。
- ②全天球型映像は取りこぼしがなく、現場全体を捉える臨場には有効であった。
- ③現場技術者との音声を伴うリアルタイムのやり取りが、遠隔での現場の状況認識の迅速化を可能にした。

一方、課題として、映像を撮影する位置の決定や施工の流れを捉える技術力の差によって現場の説明力が大幅に異なる点、IoT 技術に関して通信速度や容量における課題が挙げられた。特に、中小企業においては、前者の技術力において技術者格差は大きく、企業によっては技術力の底上げ方策が必要になると考えられる。ここでは、この技術力によって映像の撮り方が異なる可能性があることから、これを修正するために映像撮影のガイドラインの整備が必要になると考えられた。ここでは、映像の撮影のガイドラインとして、技術者が考えながら映像の撮影方法を誘導する17条のルール作りを提案している。

【映像撮影ガイドライン】

- 一 映像を撮る前に現場風景の隅々まで眺めよう
- 二 現場風景にある環境の変化を想像しよう
- 三 現場風景に自分を置いてスケールを感じよう

- 四 現場風景に存在する人々を想像しよう
- 五 現場風景にある最大のリスクを感じよう
- 六 要するに、土木屋の感性と知性を動員して現場風景の意味を知ろう
- 七 そのうえで、現場風景の押さえるべき要所を考えよう
- 八 押さえるべき要所は、点から線（接近景）、線から面（中景）をたどり俯瞰化（全景）で捉えよう
- 九 現場風景の映像には、問題を表し、原因を表現し、結論を刻もう
- 十 次世代にもわかりやすく、現場風景の映像の中に存在する意味やリスクを伝えよう
- 十一 土木技術の継承のために先人たちの土木のメッセージを理解しよう
- 十二 映像を振り返り、積極的に先人たちの知財を追跡しよう
- 十三 土木技術を伝えるにふさわしい映像をみんなで集め、利用しよう
- 十四 映像のなかで残すもの、変えるもの、測るものを論（あげつら）おう
- 十五 映像にある良いところを大いに語らい真似しよう
- 十六 その中で、土木を誤解するもの、見苦しいもの、センスのないものを伝えることはやめよう
- 十七 地域の土木技術を維持するために映像利用の作法を学ぼう

8. 最後に

一般に、技術者の判断は、リスク、品質、コスト、効率性など多岐にわたるが、技術者固有の認知能力で、現場から問題要因を感知し対応している。特に職人的な技術者の多くは、‘百聞は一見に如かず’や‘理屈じゃない’と断言する人が多い。そのような技術者が保有する施工ノウハウは、情緒的に捉えているところがあり、論理的な説明を苦手としている。映像活用は、この苦手な部分を補い、職場内のコミュニケーションの環境づくりとしてその意味で大きく貢献すると確信している。今後、映像に設計情報やスケールを組み込むことで、劇場型になる映像でも現実規模に近いリスク認知を可能にすると想像できる。また、映像集約は、中小建設業にとって当に知財化でもあり、技術伝承でもあることから、人系の生産性を高める i-Construction の実現に繋がっていくものと考え

参考文献

- 1) 須田他：「中小零細建設業を対象にする映像を活用した CIM の開発」日本機械化協会 平成 27 年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集
- 2) 須田他：「映像を活用した統合型データモデルの研究」平成 27 年 12 月（一財）日本建設情報総合センター第 14 回 研究助成事業成果報告会

21. 全方位カメラを用いた建設機械の位置推定システム

日本工業大学

施工技術総合研究所

○ 住吉 耀
石川 貴一郎
岩渕 裕
藤島 崇

1. はじめに

i-Construction 推進における建機の自動化において、高精度な位置推定は重要な技術の一つである。位置推定手法に関する研究は数多くなされており、GNSS (Global Navigation Satellite System) や SLAM (Simulation Localization And Mapping), TS (Total Station) による自動追尾による位置計測などがある。

屋外環境下における代表的な位置推定手法では GNSS と慣性航法装置を融合した GNSS/IMU 複合航法がある。GNSS/IMU 複合航法は Mobile Mapping System¹⁾などの移動体計測の位置推定手法として採用されているが、屋内や山間部などの GNSS 不可視環境下においては、GNSS による観測更新ができず、慣性航法のみによる位置推定となるため、計測精度が低下する。SLAM は、位置推定と地図構築を同時に行う手法であり、屋内外において使用されている²⁾。

SLAM は移動ロボットの位置推定で用いられることが多いが、レーザ SLAM ではレーザスキャナを用いて、時系列に取得された形状をマッチングして移動距離、姿勢を推定するため、周囲に形状の特徴物がないと距離の圧縮が起きるといった課題がある。またカメラによる SLAM もあるが、ロバスト性が低いという課題と画像特徴が少ないとレーザ SLAM と同様に位置推定に失敗するという課題がある。また、移動ロボットの分野では、事前に作成した地図に対して位置を推定するマップマッチングによる位置推定手法がよく使われるが、事前に高精度な地図を作る必要があることと、時々刻々と環境が変化する施工現場にあっては地図の更新を高頻度に必要とするため、建設機械の位置推定手法としては向いていない。さらに、これらのシステムの多くは、高精度な位置推定が可能であるものの、高価なセンサを必要とするという課題がある。

そこで本研究では安価なカメラシステムを用いた位置推定手法について検討を行うことを目的とする。

カメラを用いた位置推定手法も多数研究されており、例えば倉爪ら³⁾は、屋内向けの全方位カメラによる位置推定を利用したデッドレコニング情報の補正手法を提案している。また、瀧口ら⁴⁾は赤外線全方位カメラと赤外 LED から構成される位置標定システムを提案し、太陽光下においても 27.7mm の精度をロバストに達成しているが、赤外発光のシステムが複雑になっている。

2. 提案手法

2.1 システム概要

本研究で用いる手法は、位置が既知のランドマークを最低三つ使用する位置推定手法⁴⁾を基本としており、ランドマークの中心位置は事前に TS により計測する。ランドマークには AR マーカを貼り付け、それぞれに固有の ID を付与している。そのため、認識された AR マーカの ID からランドマークの位置を呼び出すことができる。そのため作業範囲が広範囲になる場合においては、ランドマークの個数を増やすことで、作業範囲を広げることが可能である。また、作業範囲内においては、すべてのランドマークが同時に撮像される必要があるため、ロバストな位置推定を行うためにはランドマークの個数を増やす必要がある。

カメラによる位置推定システムでは、ミラーや魚眼レンズを使用した全周カメラが用いられることが多いが、一画素当たりの解像度が低くなるため、AR マーカまでの距離が遠いとマーカ認識率が低下する恐れがある。そこで、本研究では、解像度を高めるため、Web カメラを 6 台使用し全周を撮像するシステムを構築した。使用したカメラは、UVC(USB Video Class)に準拠した Logicool C615 を使用した。カメラは USB により PC に接続される。PC は、CPU Core-i7 3.6GHz、メモリ 16GB、GPU GeForce GTX1060、OS Ubuntu 16.04 を使用し、ROS(Robot Operating System) kinetic がインストールされている。



図-1 複数台の Web カメラによる全周囲撮像システム

図 3 にシステム系統図を示す。各カメラは、ROS で公開されているパッケージ `usb_cam` を使用した。またカメラは事前に ROS の `camera_calibration` パッケージを用いてキャリブレーションを行った。

撮影データは、カメラ事出力され、それぞれに対し、AR マーカの認識を行い、その方位角に基づいて自作した Localization node でリアルタイムに位置推定を行う。

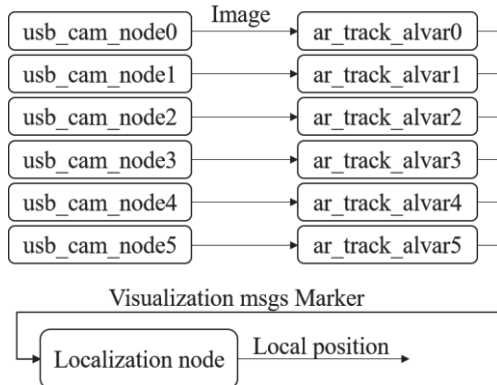


図-2 システム系統図

2.2 ランドマークの認識

本システムでは、カメラから見た AR マーカの撮影角度から計測座標を推定する。各ランドマークに貼り付けられた AR マーカをそれぞれ個別に認識するため、ROS の `ar_track_alvar` を利用した。`ar_track_alvar` はあらかじめ ID が割り振られたマーカを印刷し、カメラでマーカを撮影することで、各マーカとカメラとの相対位置を 3次元座標で推定するものである。マーカのサイズを拡大することで、遠距離からの計測を行うことが可能となる。図 3 にマーカの例を示す。今回は実験的にマーカのサイズを 200mm とした。認識可能な距離はカメラとの組み合わせにより変化するが、今回認識が可能な距離は 14m であった。この時のマーカは画像上で 21×21pixel で撮影されていた。認識可能距離を延ばすためには、マーカサイズを大きくするか、カメラ解像度を上げる必要がある。



図-3 使用した AR マーカ

2.3 自己位置推定アルゴリズム

AR マーカ観測時のランドマークおよびカメラの位置関係を図 4 に示す。`ar_track_alvar` からの出力は、各カメラの座標系で推定されたマーカの位置と向きであり、位置推定の演算には、この位置から算出した、カメラからのマーカ方位角を用いる。またランドマークの位置はあらかじめ TS などで計測しておき、座標を既知しておく必要がある。

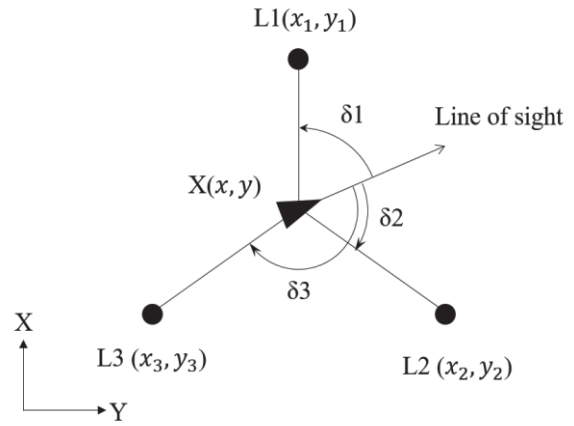


図-4 ランドマークとカメラの位置関係

カメラ位置を (x, y) 、各ランドマークの座標を (x_i, y_i) , $i=1, 2, 3$ とし、ターゲットの観測方位を δ_i とすると、下記の式で表される。

$$\delta_1 = \tan^{-1} \frac{x_1 - x}{y_1 - y} \quad (1)$$

$$\delta_2 = \tan^{-1} \frac{x_2 - x}{y_2 - y} \quad (2)$$

$$\delta_3 = \tan^{-1} \frac{x_3 - x}{y_3 - y} \quad (3)$$

ターゲット i, j の観測方位間の角度 $\varphi_{i,j}$ は、

$$\varphi_{i,j} = \tan(\delta_j - \delta_i) = \frac{\frac{x_j - x}{y_j - y} - \frac{x_i - x}{y_i - y}}{1 + \frac{x_j - x}{y_j - y} \frac{x_i - x}{y_i - y}} \quad (4)$$

となり、この式を整理すると、式(5)が得られる。

$$x^2 - \alpha_{i,j}x + y^2 - \beta_{i,j}y + \gamma_{i,j} = 0 \quad (5)$$

ここで、

$$\alpha_{i,j} = x_i + x_j + \frac{y_j - y_i}{\varphi_{i,j}} \quad (6)$$

$$\beta_{i,j} = y_i + y_j - \frac{x_j - x_i}{\varphi_{i,j}} \quad (7)$$

$$\gamma_{i,j} = x_i x_j + y_i y_j - \frac{x_j y_i - x_i y_j}{\varphi_{i,j}} \quad (8)$$

このとき、自己位置座標(x,y)は、式(9)、(10)で表される。

$$x = \frac{1}{D} [(\beta_{3,1} - \beta_{2,3})(\gamma_{2,3} - \gamma_{1,2}) - (\beta_{2,3} - \beta_{1,2})(\gamma_{3,1} - \gamma_{2,3})] \quad (9)$$

$$y = -\frac{1}{D} [(\alpha_{3,1} - \alpha_{2,3})(\gamma_{2,3} - \gamma_{1,2}) - (\alpha_{2,3} - \alpha_{1,2})(\gamma_{3,1} - \gamma_{2,3})] \quad (10)$$

$$D = (\alpha_{2,3} - \alpha_{1,2})(\beta_{3,1} - \beta_{2,3}) - (\alpha_{3,1} - \alpha_{2,3})(\beta_{2,3} - \beta_{1,2}) \quad (11)$$

姿勢角 δ_1 はこれらを式(1)に代入することで得る。

3. 評価試験

作成した位置推定システムの性能確認のため、精度検証を行った。精度検証では、カメラを移動させた場合の移動距離の相対精度検証、AR マーカー内で大きく移動させた場合の位置推定精度の検証を行った。

3.1 移動距離の相対精度検証

Mitutoyo SD-100E デジタルスケールを取り付けた長さ1mのリニアシャフト上部にカメラシステムを設置し、リニアシャフト上で中央を原点とし、カメラを0.1mごとに0~0.5m動かしたときのカメラの位置精度を検証した。使用した機材の外観を図5に示す。SD-100Eは器差0.07mm 繰返し精度0.01mmで計測可能である。また実験環境の写真を図6にランドマークとの位置関係を図7に示す。図7の黄色プロットは、それぞれ移動させたカメラの位置を示す。

図6、7に示したように、スライドの設置位置は、ランドマークの中央付近とした。また、環境光の影響を軽減するため、実験は屋内で行った。図8に結果を示す。図中の横軸は、デジタルスケール上での移動距離、縦軸は本手法で得た移動量とデジタルスケールとの誤差である。移動距離が大きくなるほど、誤差が増大する傾向が見取れる。最大誤差は500mmの移動で約30mmであった。



図5 リニアスライドに取り付けたカメラシステム



図6 相対精度検証環境

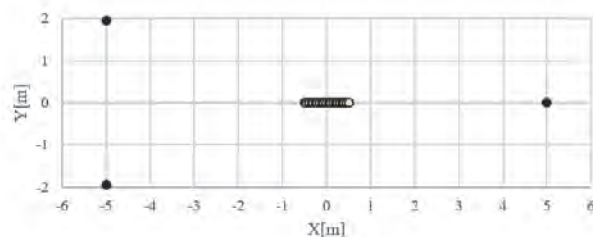


図7 システム設置関係図

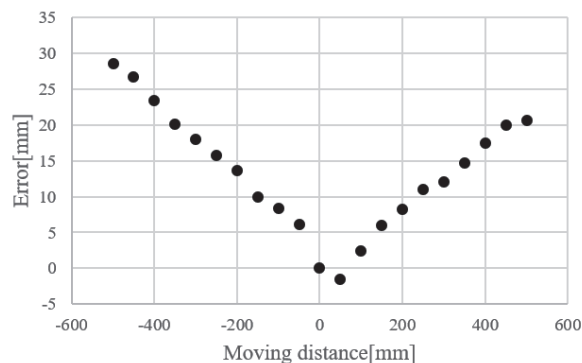


図8 移動量に対する誤差

3.2 屋外環境における位置推定精度

前節では、ランドマーク中央付近に置いた場合のカメラ移動量の相対精度について評価した。本節では、ランドマーク内を移動させたときの座標値をTSによる計測結果と比較する。使用したTSはTopcon GT、測距精度は $2+2\text{ppm} \cdot D$ mmである。ランドマークは、各辺が約10mの正三角形と

なるように配置した。実験では、このランドマークで囲われた正三角形の中でカメラシステムを移動し、各点においてカメラによる位置推定とTSによる計測を同時に行った。

位置推定結果を図10に示す。3点のランドマークの中心付近では誤差は約0.06mであったが、カメラシステムが中央から外れるに従い誤差が大きくなり、その最大誤差は1.05mであった。

ランドマークの中央付近においては、十分な精度であるが、ランドマークが作る3辺に近づくとしたがつて精度が悪化している。特に計測精度が悪化しているAの箇所では、ランドマークの画像上の位置が画面端に撮影されており、カメラの収差補正などのキャリブレーションが不足していることが計測誤差の要因として考えられる。



図-9 実験環境

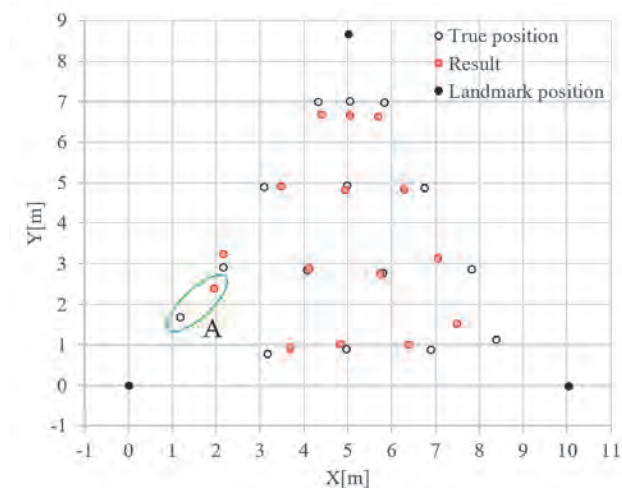


図-10 屋外環境時観測結果

4. 考察

本システムはランドマークの方位をカメラで観測することで位置推定を行っている。そのため、観測された方位角に誤差があれば、推定結果に影響を及ぼす。そこで本節では、方位角に誤差があった場合の影響についてのシミュレーションした結果を示す。方位角に誤差が生じる要因には、カメラシステムのキャリブレーション不足、ARマーカ認識時におけるマーカ中心位置のズレが

考えられる。どちらも、観測値としてはピクセル値のズレとなる。図11に方位角誤差が1°の時の位置推定のシミュレーション結果を示す。図に示すように中央部では精度が高いことがわかるが、ランドマークが作る三角形の辺に近づくとつて精度が低下することがわかる。またその時の誤差は最大で0.3mであり、今回の評価試験では、それ以上の角度誤差が生じていたことが示唆される。以上から、より高精度な位置推定を行うためには、カメラキャリブレーションの精度向上が必要であると考えられる。

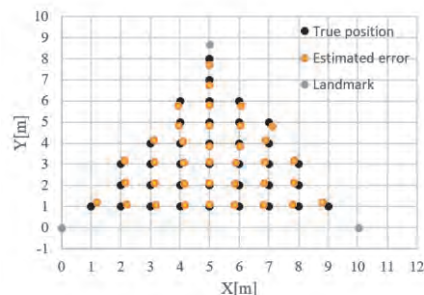


図-11 シミュレーションによる誤差評価結果

5. まとめ

本論文では、Webカメラと位置が既知のランドマークによる安価な位置推定システムの可能性についてシステムを構築し、評価試験を行った。その結果、3点のランドマークの中央付近では、TSと比較して誤差が0.06mと十分な精度が出ることを確認したが、外側では精度が不十分な結果となった。誤差要因として、カメラの相互キャリブレーション不足によるが考えられる。今後はキャリブレーション手法の構築による性能向上と、安価な魚眼カメラなどとの性能の比較を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠, 瀧口純一, 清水聡, モービルマッピングシステムによる都市空間モデリング, 計測自動制御学会産業論文集 Vol.8, No.17, pp.132-139, 2009.
- 2) 大野和則・竹内栄二郎・永谷圭司・田所諭・小柳栄次・吉田智章, レーザスキャナと移動ロボットを用いた被災空間の密な三次元計測, 情報処理学会研究報告, 176巻・19号, pp.1-8, 2011
- 3) 倉爪 亮・本村 暁・山口 祐規・松岡 毅・山本 元司・長谷川 勉, 全方位カメラとドッドレコニング機能を有するサッカーロボットのロバスタな自己位置同定手法, 日本ロボット学会誌, 22巻・3号, pp.343-352, 2004
- 4) 瀧口純一, 竹家 章仁, 西口 憲一, 矢野 寛, 伊豫田真, 橋詰 匠全方位視覚情報に基づいた自己位置標定システム, 日本機械学会論文集 C編, 68 巻 673号, pp. 2722-2729, 2002

22. スラリー揺動攪拌工法の適用拡大への取り組み

—多層地盤への適用, 着底層の管理—

WILL 工法協会 ○島野 嵐
市坪 天士
蔵谷 誠二
中馬 忠司

1. はじめに

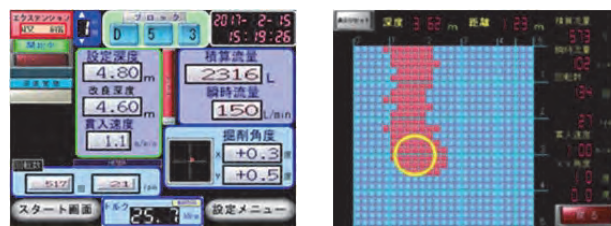
中層混合処理工法の一つであるスラリー揺動攪拌工法（WILL 工法）はスラリー状の固化材や改良材を地盤中に注入しながら、バックホウ型ベースマシンの先端に取付けたリボンスクリー型攪拌翼で、固化材と原位置土を強制的に上下左右に立体的に攪拌混合することにより安定した改良体を形成する地盤改良工法である。本工法は小型機による高い機動性、硬質地盤に適応可能な掘削性能、矩形改良体による効率的な改良体配置が可能ることから数多くの現場で採用されており深度 10 m 程度の深さを改良対象に施工が行われてきた。最近では大型機を用いる深層混合処理工法では適用が難しい「狭隘地施工」や「近接施工」といった建設市場のニーズに対し、本工法のさらなる高深度化や深層混合処理工法と同等の施工管理手法への対応が望まれている。

本稿では、深度 13m 迄適用可能な改良機の開発を行い、施工性および改良体品質の確認を行った結果を報告する。また、従来の中層混合処理機が不得手であった、異なる土層に各々適量の固化材を添加する「多層地盤への対応」や「改良下端層の着底管理」について、高性能施工管理システムを用いた適用例について述べる。

2. 工法概要（施工管理システム）¹⁾

バックホウをベースマシンとした改良機は、施工性・機動性に優れる反面、攪拌軸の鉛直性および攪拌翼移動速度（貫入・引抜速度）の定速性を確保しづらいことが短所であった。そのため従来の施工管理ではマシンのオペレータの熟練度が要求された。本工法では、これらをリアルタイムに表示される図-1(a)に示す施工管理システムを施工機運転席内に設置しており、オペレータはリアルタイムな施工管理が可能である。管理項目は、深度・

時間・攪拌機掘削角度・攪拌翼回転トルクであり、これらが画面上に表示される。また、画面の切り替えにより図-1(b)に示す攪拌翼位置（円形部）と既改良部（濃色部）・未改良部（薄色部）とに色分け表示する攪拌翼軌跡のナビゲーションシステムを表示できる。これにより、さらなる品質管理の信頼性向上を図ることを可能とした。



(a) 標準表示画面

(b) ナビゲーションシステム

図-1 WILL 管理装置画面表示例

3. 高深度対応改良機の開発²⁾

本技術はバックホウ型ベースマシンを用いることで機動性を向上させたものであるが、反面、大型三点支持式を用いたスラリー攪拌機のように長大なリーダーの装着や攪拌ロッドを継ぎ足すことにより高深度化をはかることが困難である。従来のバックホウのダンピングリーチ（アーム先端部の振り上げ時の高さ）は 1.4 m³クラスで 8~9m 程度であり、本技術にて装着可能な攪拌装置の長さも 10m 程度に限定されていた。

そこで、攪拌装置の軽量化やベースマシンの強化を図り、安全かつ 13m の高深度に対応可能な 3 タイプの改良機の開発を行った（写真-1 参照）。

- type1: 従来型 1.4 m³クラスベースマシン+屈曲可能攪拌装置(上部 4m+下部 9m=13m)
- type2: ブーム・アーム延長強化型 1.4 m³クラスベースマシン+13m 攪拌装置
- type3: 2 ピースブーム 1.9 m³クラスベースマシン+13m 攪拌装置



(a) 従来機(10mクラス)

(b) 高深度型 type1

(c) 高深度型 type2

(d) 高深度型 type3

写真-1 揺動攪拌工法改良機

3. 実大実験による施工性および品質の検証²⁾

高深度改良機の実用化に先立ち、実大実験により施工性および品質の検証を行った。

改良機は3つのタイプの内、最も掘削能力が劣ると推測される type1 改良機を用い、N 値 0 の貝殻混じり粘土を主体とした地盤で実施した。

掘削能力は従来の施工深度 10m 迄の施工機と比較し同程度の施工能力であり作業効率の低下は確認できなかった。

図-2 に改良後の全長コアボーリングを示す。採取したボーリングコアは、設計改良長 13m に対して同値の 13m の改良体が確認でき、コア採取率も 97% と連続性も高いことが確認できた。一軸圧縮強さもすべてのコアで設定した改良強度以上であり、本改良機が実用レベルの施工が十分可能であると判断した。

掘削長 (m)	コアの状況 (cm)										対象土	掘削長 (m)	採取長 (m)	採取率 (%)
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100				
1	[Core Image]										貝殻混じり粘土	1.00	0.98	98
2	[Core Image]											1.00	0.99	99
3	[Core Image]											1.00	1.00	100
4	[Core Image]											1.00	1.00	100
5	[Core Image]											1.00	1.00	100
6	[Core Image]											1.00	0.97	97
7	[Core Image]											1.00	0.95	95
8	[Core Image]											1.00	0.95	95
9	[Core Image]											1.00	0.95	95
10	[Core Image]											1.00	0.96	96
11	[Core Image]											1.00	0.95	95
12	[Core Image]											1.00	0.97	97
13	[Core Image]											1.00	0.98	98
											合計	13.00	12.65	97

図-2 実大実験全長ボーリングコア

4. 多層地盤への適用

4.1 上下2層改良

深層混合処理工法では多層地盤へ適用する場合、強度発現しにくい土層に着目し2~3土層(1層厚3m程度以上³⁾⁴⁾に分け、各層ごとに必要な材料添加量を決定しているが、浅層・中層混合処理工法では、全深度を同一添加量で施工を行っている例

が殆どである。その理由として、改良対象深度が6~7m程度までの比較的浅い地盤を対象とした現場が多く、強度発現しにくい土層を安全側に境界設定しようとする各層3m以上で層分けを明瞭に行うことが難しいことや、各々の層へ計画添加量が混合されたかを記録をする手段がなかったこと等が挙げられる。

本工法は施工機先端部に攪拌翼を持ったロータリー式中層混合処理工法であり、施工中の攪拌混合深度と材料吐出深度を明確にできること、前述の高性能管理システムにより深度ごとの注入量を記録できることから、従来の深層混合処理工法と同様に層分けをした管理が行える。13mの最大改良長に対して改良層を上下2層に分け管理を行った施工事例を以下に示す。

4.2 適用例⁵⁾

(1) 地盤概要および施工仕様

最大改良長 13m に対して上部 7m が N 値 0 の含水量が多い腐植土混じり粘土および泥炭(以下、泥炭土とする)。下部 6m が N 値 2~3 の粘性土であった。事前の土質調査および室内配合試験の結果を基に土質境界の不陸や攪拌翼径を考慮し、上部 8.3m までを 120kg/m³、下部 8.3~13.0m を 85kg/m³ の2種類の添加量にて施工するものとした。各々の層への添加量(スラリー注入量)は前述の専用管理装置を使うことにより図-3に示すような帳票への記録が可能である。なお、施工は写真1(c)に示す type2 高深度対応改良機を用いて行った。

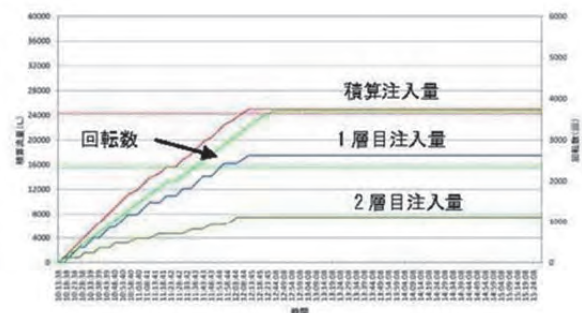


図-3 注入量・回転数チャート帳票例

(2) 品質確認

品質確認試験の確認項目は①改良深度②改良体のコア採取率③改良体の一軸圧縮強度の3項目とし、それぞれの確認方法は①全長コアボーリングによる採取長を確認②全長コアボーリングにおけるコア採取率を確認③25検体以上の供試体について一軸圧縮試験を行い、所定の強度の確認およびそのバラツキを確認、とした。

(3) 改良体のコア採取率および改良深度

全長ボーリングによるコア採取率測定結果を表-1 および図-4 に示す。改良長は設計改良長 13m に対して 13m の改良体を確認した。コア採取率は泥炭土で 93.3%(1m 最低値 86.0%)、粘性土で 97.2%(1m 最低値 87.0%)であり、泥炭土、粘性土共に日本建築学会の指針に示されている全長で粘性土 90%以上・砂質土 95%以上(1m 当たりの採取率は 5%減)⁶⁾ の値を満足しており、従来の深層混合処理工法同様に連続性の高い改良体が造成されたことを確認した。

(4) 改良体の一軸圧縮強度およびそのバラツキ

改良体の一軸圧縮強度およびその変動係数 CV の評価は同仕様で施工した 2 つの施工ブロックの試験値を合算し行った。一軸圧縮強度およびその変動係数 CV を表-2 に示す。改良体の一軸圧縮強度の変動係数 CV は 19.2%であり、本工法の従来機の変動係数 CV が 10.2~33.7%の範囲⁷⁾、一般的なスラリー攪拌工法の変動係数 CV が 25~35%の範囲⁷⁾であることから、本工法の従来攪拌機や他のスラリー攪拌工法と同等の品質を有していることを確認した。さらに異なる土質に各々適量の固化材を添加することにより固化材低減の効果が確認できた。

表-1 コア採取率一覧

土質	泥炭土	粘性土	合計
掘削長 (m)	21.00	18.00	39.00
採取長 (m)	19.60	17.51	37.11
コア採取率	93.3%	97.2%	95.2%
(1m 最低値)	(86.0%)	(87.0%)	(86.0%)

※掘削長は 3 箇所のコア採取率の合計

掘削長 (m)	コアの状況 (cm)										対象土	掘削長 (m)	採取長 (m)	採取率 (%)	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100					
1	[Image]										泥炭土	1.00	0.95	95	
2	[Image]											1.00	0.98	98	
3	[Image]											1.00	0.99	99	
4	[Image]											1.00	0.97	97	
5	[Image]											1.00	0.99	99	
6	[Image]											1.00	0.98	98	
7	[Image]											1.00	0.98	98	
8	[Image]											1.00	0.95	95	
9	[Image]											1.00	0.96	96	
10	[Image]											粘性土	1.00	1.00	100
11	[Image]												1.00	0.99	99
12	[Image]												1.00	0.98	98
13	[Image]												1.00	0.97	97

図-4 全長ボーリングコア抜粋

表-2 一軸圧縮強度と変動係数

土質	全長コア		合計
	泥炭土	粘性土	
固化材混合量 (kg/m ³)	120	85	---
検体数 (検体)	16	10	26
設計強度 (kN/m ²)	100	100	100
平均強度 (kN/m ²)	156.4	176.9	164.3
標準偏差	---	---	31.48
変動係数 CV	---	---	19.2%

5. 改良下端層の管理⁹⁾

5.1 着底管理

地盤改良の施工目的が沈下抑制や盛土のすべり破壊防止の場合、改良地盤の支持方式として改良地盤を良質地盤に着底させる方式である「着底型」が用いられることが多い。着底型改良において、改良下端が設計上必要とされる支持地盤に到達していない場合、支持力不足や不同沈下等の要因となり上部構造物に影響を及ぼす可能性がある。そのため、着底管理基準の精度向上は非常に重要な課題である。

一般的に着底管理は貫入速度・攪拌翼回転速度および施工機械の状態等により定性的に判断をし、さらに、これらは支持地盤の性状により変化するため、土質・地質関連資料との整合性を確認し施工初期段階に現場ごとの着底管理基準を設けている。現行の本工法の管理基準は、以下の事象が複数項該当した場合に改良下端が所定の支持地盤に着底したと定性的に判断している。

- ① 貫入速度が 0m/min となる
(掘削能力を超える硬質地盤等)
- ② 貫入速度が低下する
(掘削能力内の未固結層等)
- ③ 掘削音や振動に変化が生じる
(砂礫層・風化岩等)
- ④ 攪拌翼回転速度が低下する
(掘削能力内の未固結層等)
- ⑤ 攪拌翼回転速度が著しく速くなる若しくは回転不能となる
(掘削能力を超える固結粘土、岩盤等)

5.2 実現場における計測

(1) 計測手法

実施工において、既存の標準貫入試験の実施位置の近傍にて、施工機の攪拌トルク値と貫入速度を計測し、地盤強度 (N 値の深度分布) との関連性について整理した。データ収集は、地盤構成の異なる 3 現場の 5 地点において計測を行った。

施工中は、図-1 に示す画面を施工マシン運転席内に備え付けられたモニターで確認しながら管理を行う。この専用管理装置にて記録されたデータは施工記録として図-5 に示すようなアウトプットが可能であり、施工深度と攪拌トルクの軌跡を確

認することができる。このうち、支持地盤上部 50cm 部を中心に、攪拌トルクの平均値と攪拌機貫入速度の平均値を抽出し、土質データとの検証を行った。

(2) 現場データの検証

各項目における検証結果について以下に述べる。

1) N値と攪拌トルク値の関係

N値と攪拌トルク値の関係について、図-6 に示す。数値のバラツキは大きいですが、粘性土・砂質土それぞれN値の増加に伴い攪拌トルクは上昇しており比例関係にあることが分かった。また、同一N値の位置で攪拌トルクと貫入速度の関係を見ると、貫入速度が速いほど攪拌トルクが大きくなっており比例関係にあることが分かった。

2) 攪拌機貫入速度と攪拌トルク値の関係

攪拌機貫入速度と攪拌トルク値の関係を図-7 に示す。攪拌機貫入速度と攪拌トルク値はバラツキがあるものの、N値の大きさによりトルク値の分布を領域分けすることができた。これより施工時の攪拌機貫入速度と攪拌トルク値により改良対象地盤の概ねのN値が判断できると考える。

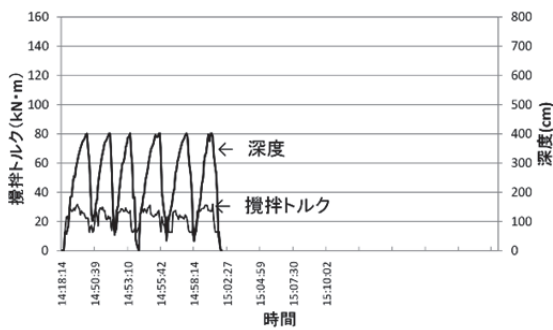


図-5 施工記録アウトプット例

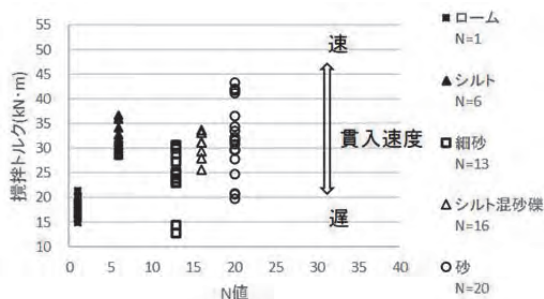


図-6 N値と攪拌トルク値の関係

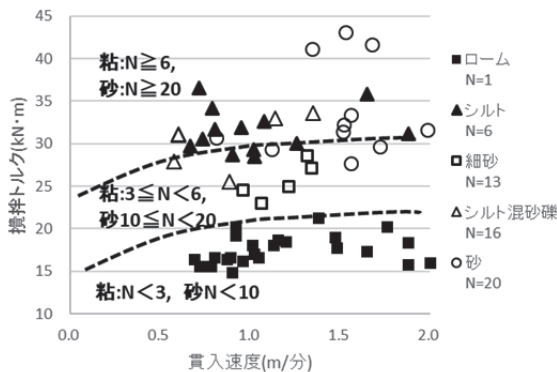


図-7 攪拌機貫入速度と攪拌トルク値の関係

6. まとめ

実大実験によりスラリー揺動攪拌工において深度 13m までの改良体造成が可能でありその品質が従来工法と同等以上であることが確認できた。

また、高性能施工管理システムを用いることにより、従来の中層混合処理機が不得手であった、異なる土質に各々適量の固化材を添加する「多層地盤への対応」や、地盤改良の下端が支持地盤に到達したか否かを判定する「改良下端層の着底管理」に対して、十分ではないが施工管理が可能であることを確認した。

今後はさらに実現場でのデータ収集、検証結果を蓄積することにより管理手法の確立をしていきたいと考える。

参考文献

- 1) 島野ら：幅広い土質に対応可能とした高性能管理システムを用いた中層混合処理工法，基礎工 Vol. 42, pp. 28-31, 2014.
- 2) 市坪ら：中層混合処理工法における高深度改良機の開発およびその品質確認試験(その 1)，土木学会第 73 回 年次講習会，投稿中，2018.
- 3) (財)土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版，p181, 2004.
- 4) DJM 工法研究会：DJM 技術マニュアル，p63, 2014.
- 5) 島野ら：中層混合処理工法における高深度改良機の開発およびその品質確認試験(その 2)，土木学会第 73 回 年次講習会，投稿中，2018.
- 6) 日本建築センター：改訂版建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針，p241, 2009.
- 7) (一社)日本建設機械施工協会：建設技術審査証明報告書 WILL 工法，2013.
- 8) 地盤工学会：地盤改良効果の予測と実際，pp215-216, 2000.
- 9) 島野ら：中層混合処理工法における地盤評価手法の検討，第 52 回地盤工学研究発表会，pp. 669-670, 2017.

23. 相対式攪拌翼による深層混合処理工法の CAE 解析に基づく性能評価

明石工業高等専門学校
あおみ建設
あおみ建設
芝浦工業大学

○ 中尾 晃揮
大古利 勝己
高橋 強
稲積 真哉

1. はじめに

わが国には主として粘土やシルトのような微細な粒子で構成された軟弱地盤や、特に都市臨海部においては緩んだ砂質地盤などの軟弱地盤が多数存在するため、軟弱地盤対策は重要な技術的課題となっている。図-1 で示されるように軟弱地盤は盛土や構造物の安全性に大きく影響を与えるため、原地盤に対して安定性の確保や強度および支持力等を高める地盤改良が必要となる。同時に、地震大国であるわが国においては、地震による地盤の液状化や沈下等の災害を抑制させるためにも液状化対策として地盤改良工法が必要不可欠である。そのため、様々な軟弱地盤に対して種々の地盤改良工法が実施されている。

地盤改良工法に関する課題の一つとして、当該施工中、原地盤（地中）の状況を目視（可視化）できないため¹⁾、改良体造成工程の適切な設計・管理が困難であることが挙げられる（図-2 参照）。

本研究では地盤改良工法の一つである相対攪拌式深層混合処理工法の攪拌翼ならびに地盤状況を3次元的にモデル化し、数値解析手法の一つである個別要素法（Distinct Element Method ; DEM）による粒状体解析を実施し、コンピュータ上で相対攪拌式深層混合処理工法の一連、特に相対式攪拌翼による地盤の攪拌混合シミュレーション（Computer Aided Engineering ; CAE）を行う。さらに、当該シミュレーション結果より土粒子の挙動を評価し、相対攪拌式深層混合処理工法の性能を評価する。

2. 地盤改良工法と相対攪拌式深層混合処理工法

地盤改良工法は軟弱地盤に対して液状化防止、支持力増加および圧密促進等の様々な効果をもたらす。また、現在、地盤改良工法として置換工法、圧密促進工法、締固め工法、固結工法、補強工法および注入工法等の多くの工法が存在し、それぞれ地盤の特性に合わせて選択されている。

その中の一つとして固結工法の内、深層混合処

理工法が挙げられる。深層混合処理工法はセメント系および石灰系の固化材を原地盤中に供給し、原位置土と攪拌混合することで地中に安定した改良体（改良柱）を造成する工法である（図-3 参照）。

図-3 では深層混合処理工法としてスラリー攪拌工法および粉体噴射攪拌工法の2種類が挙げられ、本研究ではスラリー攪拌工法の一つである相対攪

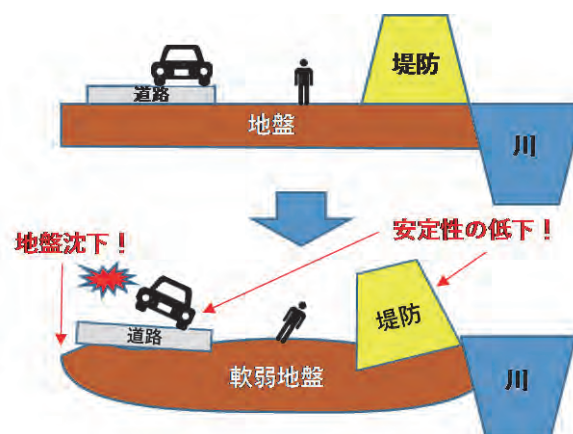


図-1 軟弱地盤に起因する様々な影響

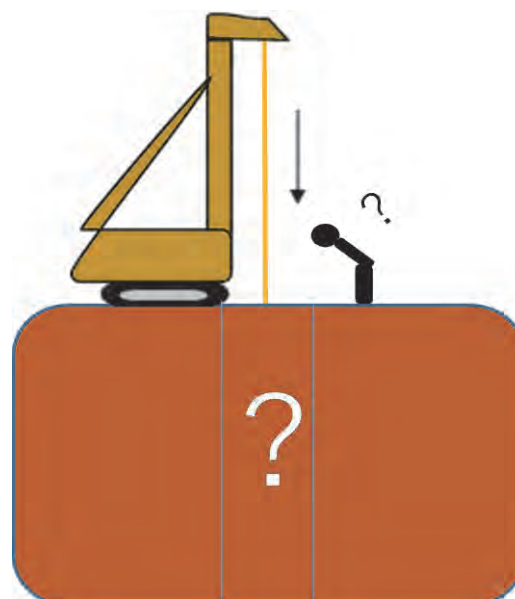


図-2 地盤改良に関する課題の一例（工程の可視化）

拌式深層混合処理工法^{2),3),11),12)}に着目している。

相対攪拌式深層混合処理工法は回転方向、回転速度(角速度)の違う、相対式攪拌翼を原地盤中に貫入させながら内翼・外翼を互いに逆方向に回転させ、先端の掘削ヘッドでスラリー状の固化材を吐出させながら掘削・攪拌混合を行うことで、対象土に対する共回りやつれ廻り現象を解消しつつ、3次元的に原地盤と固化材を攪拌混合することができ、均質な改良体を造成する工法である^{2),3)}。そのため本工法は盛土の安定、地盤のすべり防止、擁壁の安定、液状化対策等において適用されている(図-4参照)。さらに、相対攪拌式深層混合処理工法によって改良された地盤性能は、改良後の品質調査等によって実証されている^{3),4),11)}。なお、図-5は本工法の施工順序を示している。

3. 個別要素法 (DEM) による粒状体解析

DEMによる粒状体解析⁵⁾は剥離、滑りおよび要素間の接触といった連続体ベースでは計算できない現象を解析する手法であり、解析対象を自由に運動できる円形(2次元)や球形(3次元)の集合体をモデル化し、不連続面で区切られた要素の集合体において個々の要素ごと2階常微分方程式を立て解くことにより要素の動きを追跡し、集合体としての変形や動的挙動を解析する。DEMによる粒状体解析では個々の要素の運動を評価できるため、粒状体内部の力学を可視化するのに適した解析手法である^{6),7)}。

DEMによる粒状体解析は土粒子や粉体等の流動・混合攪拌をシミュレーションすることが可能であり、従来、岩盤工学分野において導入され、その後、地盤工学分野においても適用されるようになってきている^{8),9)}。現在では土石流、液状化現象、落石問題等災害や地盤の挙動解析に用いられるようになってきている。

3.1 要素間接触モデル

DEMによる粒状体解析では各球形要素を剛体として表現し、球形要素間に接触条件を与える(図-6参照)。すなわち、法線方向にはバネとダッシュポッド、接線方向にはそれらに加えてスライダを与える。ここで、法線方向は球形要素の中心点を結んだ方向であり、接線方向は法線に直行する方向である。基本的に法線方向は要素間の反発力(斥力)を、接線方向は摩擦力を表現している。また、バネは反発力や摩擦力を発揮するために存在し、ダッシュポッドはエネルギー減衰させるために粘性的な挙動を表現する。さらに、スライダは摩擦則に基づいて摩擦力の大きさをコントロールする役割を有している⁵⁾。

3.2 解析条件

DEMによる粒状体解析の条件として、球形要素

(ball)および面(wall)の材料特性を表すパラメータを与える必要がある。ただし、DEMによる粒状体解析においては材料特性を表すパラメータの決定が困難である。換言すれば、各球形要素の接触特性を数少ないパラメータで表現するため、且つ各球形要素の径が変化すれば材料特性を表すパラメータも変化するため、当該パラメータの決定方法は複雑となり、確実性の高いパラメータを決

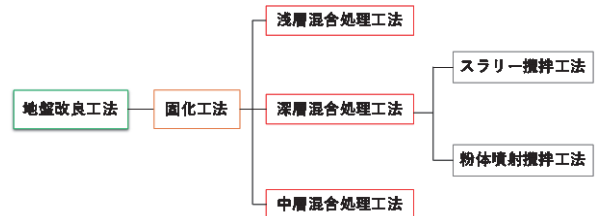


図-3 地盤改良工法の分類

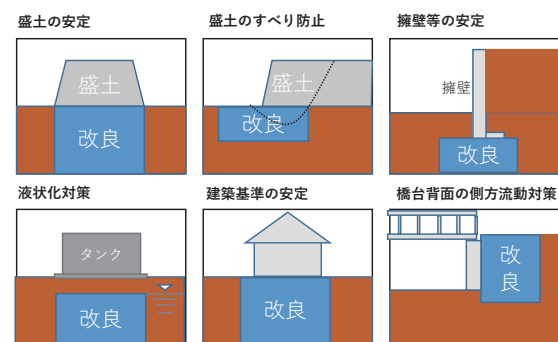


図-4 相対攪拌式深層混合処理工法の適用事例

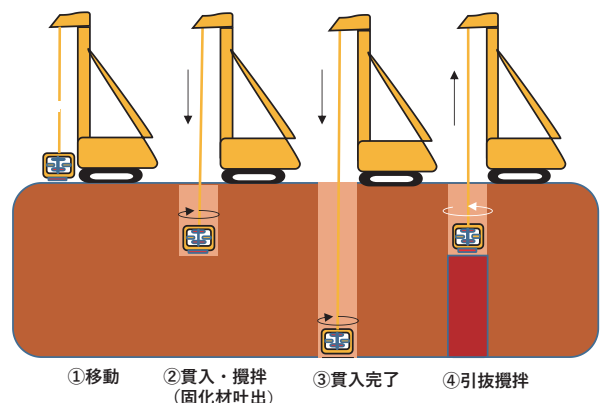


図-5 相対攪拌式深層混合処理工法の施工順序(往復吐出)

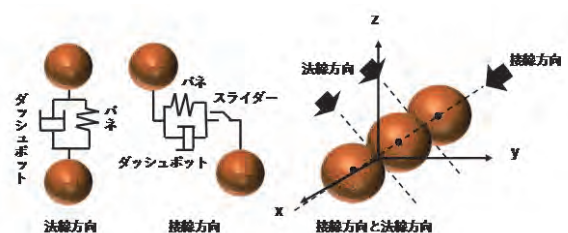


図-6 DEMにおける球形要素の接触モデル

定することは難しい。しかしながら、試験的な根拠に基づいて当該パラメータを決定することができれば、地盤工学的に意味のあるパラメータ設定が可能になる¹⁰⁾。

以下では粒状体（球形要素の集合体）の特徴と球形要素との関係を整理することで、材料特性を表すパラメータを分類する。粒状体の特性 M は、粒状体の種類 P 、粒状体の置かれた環境 C から決定できると考えられる（式(1)参照）。

$$M = fM \{P; C\} \quad (1)$$

ここで、粒状体の種類 P は一次的性質で、粒状体の置かれた環境 C は外部から左右されるもので、粒状体の構造状態 K と粒状体の応力状態 S から成るとする（式(2)および式(3)参照）。

$$P = \{\text{粒状体の種類}\} = f_p \{\text{比重, 粒径, 粒度, 粗度, 粒形, 粒子硬度 等}\} \quad (2)$$

$$C = \{\text{粒状体の置かれた環境}\} = f_c \{K; S\} \quad (3)$$

さらに、粒状体の構造状態 K と粒状体の応力状態 S は式(4)および式(5)で表される。

$$K = \{\text{粒状体の構造状態}\} = f_x \{\text{密度(間隙比), 含水比, 骨格構造}\} \quad (4)$$

$$S = \{\text{粒状体の応力状態}\} = f_s \{\text{応力}\} = f_s \{P; K\} \quad (5)$$

以上より、粒状体の特性 M は粒状体の種類 P ならびに粒状体の構造状態 K の独立した2つの特性から記述が可能である（式(6)参照）。

$$M = fM \{P; C\} = S = fM \{P; f_c \{K; S\}\} = fM \{P; f_c \{K; f_s \{P; K\}\}\} = fM1 \{P; K\} \quad (6)$$

したがって、地盤を粒状体として仮定する場合、球形要素の特性を表すパラメータ P_m と粒状体地盤の構造状態を表すパラメータ K_m の2つに整理できる（式(7)および式(8)参照）。

$$P_m = (D_{max}/D_{min}, D_{min}, \rho, v, kn/ks, kn, h) \quad (7)$$

$$K_m = \{\text{構造状態}\} \quad (8)$$

ここで、 D_{max} および D_{min} ：最大および最小粒径、 ρ ：粒子密度、 v ：粒子摩擦係数、 kn ：法線方向のばね定数、 ks ：接線方向のばね定数および h ：減衰定数である。

4. 相対攪拌式深層混合処理工法のモデル化

4.1 対象地盤のパラメータ

本研究において解析対象に仮定した原地盤は粘性土地盤である。よって、粘性土を再現するパラメータ P_m を設定する必要がある。そこで、粘性土のフロー試験を実施するとともに、DEMによる粒状体解析を用いて当該フロー試験結果をフィッティングすることにより、DEMによる粒状体解析上で粘性土の P_m を決定する。

エアモルタルおよびエアミルクの試験方法（JHSA313-1992、 $\Phi 80\text{mm} \times h 80\text{mm}$ のエアシリンダを使用）に準拠し、含水率 45～65%の粘性土に対してフロー試験を実施する。表-1 はフロー試験

表-1 粘性土のフロー試験結果（含水率-フロー値）

含水率(%)		粘性土				
		45%	50%	55%	60%	65%
フロー値 (mm)	X方向	100	218	400	450	540
	Y方向	102	222	401	448	538
	平均値	101	220	400	449	539

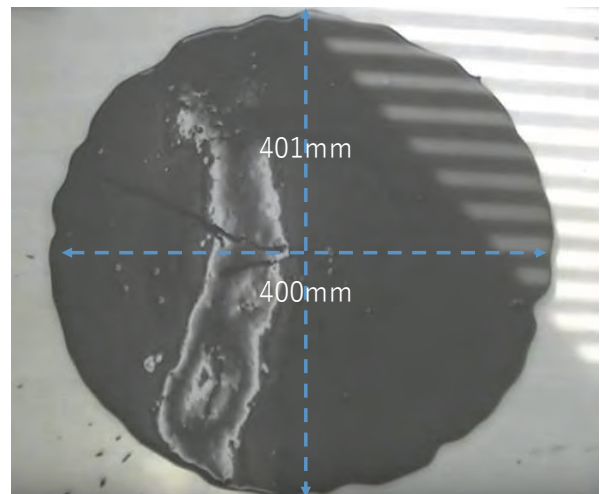


図-7 フロー試験の動画撮影例（粘性土：含水率55%）

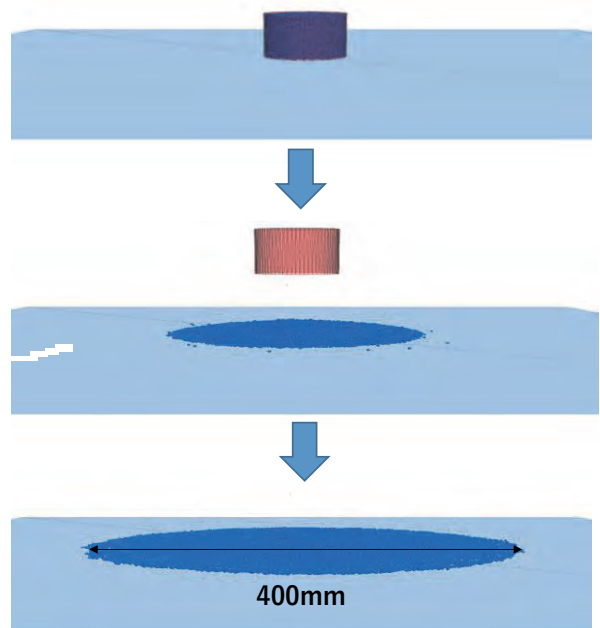


図-8 粘性土（含水率55%）のフロー試験に関するDEMによる粒状体解析を用いたフィッティング

表-2 粘性土（含水率55%）のパラメータ P_m

	density (kg/m ³)	kn (N/m)	ks (N/m)	hn	hs	rr_fric	fric
粘性土	1270	2.0e8	5.0e7	2.0e-3	2.0e-3	0.1	0.175

表-3 相対式攪拌翼のパラメータ

	Zspin (Inner blade) (rad/s)	Zspin (Outer blade) (rad/s)	Zvel (m/min)
攪拌翼	-2.1	0.7	-2.5

の結果を示している。加えて、DEMによる粒状体解析に基づくフロー断面における流動挙動とフロー試験結果を比較するため、フロー試験の真上部から動画撮影も実施し（一例として図-7参照）、経過時間ごとのフロー値を求めている。

DEMによる粒状体解析を用いて、各含水率の粘性土の流動挙動の再現を試みる。一例として、図-8は、含水率55%の粘性土に対してフロー試験で得られた流動挙動（フロー値400mm）を、DEMによる粒状体解析でフィッティングした結果である。さらに、表-2は含水率55%の粘性土に対してフロー試験で得られた流動挙動（フロー値400mm）を、DEMによる粒状体解析でフィッティングした際のパラメータPmである。なお、表-2においてはdensity：密度、kn：法線方向のばね定数、ks：接線方向のばね定数、hn：法線方向の減衰定数、hs：接線方向の減衰定数、rr_fric：転がり抵抗係数およびfric：摩擦係数に相当する。なお、球形要素の径は直接的な土粒子径を設定せず、単位集合体として3mmとしている。図-9は仮定した原地盤（粘性土地盤）の諸元を示しており、直径3000mm・高さ3300mmの円柱内に直径3mmの球形要素を135084個配置している。また、仮定した原地盤は粘性土地盤の空隙率（porosity）は0.36として設定している。なお、図-9では球形要素の挙動を区別しやすいように、X軸100mm毎に3層に色分け（左：赤、中間：白、右：茶）している。

4.2 相対式攪拌翼のパラメータ設定

別途、3次元CAD（Computer Aided Design）ソフトを用いて作成した相対式攪拌翼には、回転、掘削および接触のパラメータを与える必要がある。表-3は、相対式攪拌翼に設定した回転速度（角速度）および掘削速度のパラメータを示している。表-3において、Zspin：Z軸における回転速度（角速度）およびZvel：Z軸における掘削速度を表している。また、相対式攪拌翼における接触のパラメータは鉄製の面要素と球形要素間で設定されるデフォルトのばね定数を与えた。

図-10は3次元CADで作成した相対式攪拌翼の諸元を示している。また、図-11は相対式攪拌翼が解析対象地盤（粘性土地盤）に貫入された際の状況を表している。

5. 相対攪拌式深層混合処理工法に関する攪拌混合シミュレーション

5.1 掘削攪拌における土粒子挙動

図-12は解析対象に仮定した原地盤（粘性土地盤）へ、相対攪拌式深層混合処理工法として相対式攪拌翼で掘削・攪拌することをシミュレーション

した結果の一例である。これより、掘削・攪拌が開始されてから15～30秒経過後、相対式攪拌翼先端の掘削ヘッドによる掘削状況が表現されており、中央層（白）が両側層（赤・茶）へ拡がりつつ攪拌されている。切削ヘッドの回転方向に球形要素（粒子）が混合されているため、切削ヘッドによる切削エネルギーが大きく作用していると判断できる。また、掘削攪拌が開始されてから45～60秒経過後においても掘削攪拌が進行している状況が確認できる。さらに、掘削攪拌が開始されてから75～90秒経過後、中央層（白）が両側層（赤・茶）へ拡がりつつ攪拌されていることと同時に一部の球形要素は上方へ移動している。すなわち、掘削攪拌によって3次的に球形要素が動いていることが確認できる。

5.2 攪拌のみによる土粒子挙動（速度ベクトル）

図-13は解析対象に仮定した原地盤（粘性土地盤）における相対式攪拌翼に掘削方向速度を与えず、相対攪拌のみに球形要素の速度ベクトルを評価した一例である。これより、相対攪拌を開始してから時間の経過とともに球形要素の速度ベクトルが大きくなっており、攪拌が加速されている状況が確認できる。また、相対攪拌により外翼内の球形要素が様々な方向に移動している。すなわち、相対攪拌の期待性能である共回り防止効果を果たしている。また、掘削ヘッド付近は回転方向に大きく速度が与えられ渦を巻いているため、掘削における大きなエネルギーが生じているといえる。さらに、外翼上部、中部、下部から球形要素が大きな速度を持ち移動しており、外翼内の球形要素が混合され、外翼回転の影響によって運動速度が大きくなっていると推測できる。

5.3 攪拌混合シミュレーションの可能性

本研究は目視確認が困難な地盤改良工程を再現し改良効果を事前に予測するため、また地盤改良工法の更なる高度化のため、コンピュータ上で地盤改良工法を試作し、再現・分析する技術（Computer Aided Engineering；CAE）の適用を試みている。大規模な地盤改良工法の研究・開発工程において早い段階でCAEを導入することができれば、手戻りを削減し、試設計や実験の回数を劇的に減らすことが可能になり得る。また、様々な状況や現象を多方面から検証できるため、地盤改良工法の信頼性向上にも貢献することができる。本研究で実施している相対攪拌式深層混合処理工法として相対式攪拌翼による攪拌混合シミュレーションでは、相対式攪拌翼の貫入・回転設計ならびに攪拌翼形状の更なる合理化に将来的に寄与することができる。

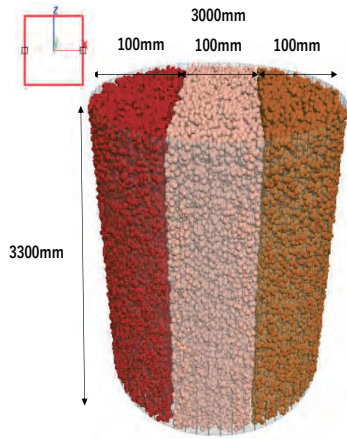


図-9 DEMによる粒状体解析において仮定した原地盤の諸元

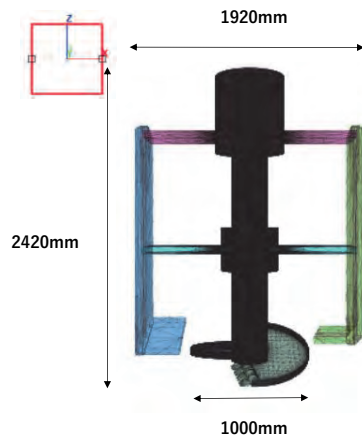


図-10 相対式攪拌翼の諸元

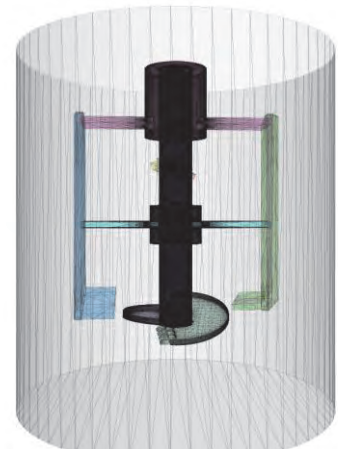


図-11 相対式攪拌翼の地盤内状況

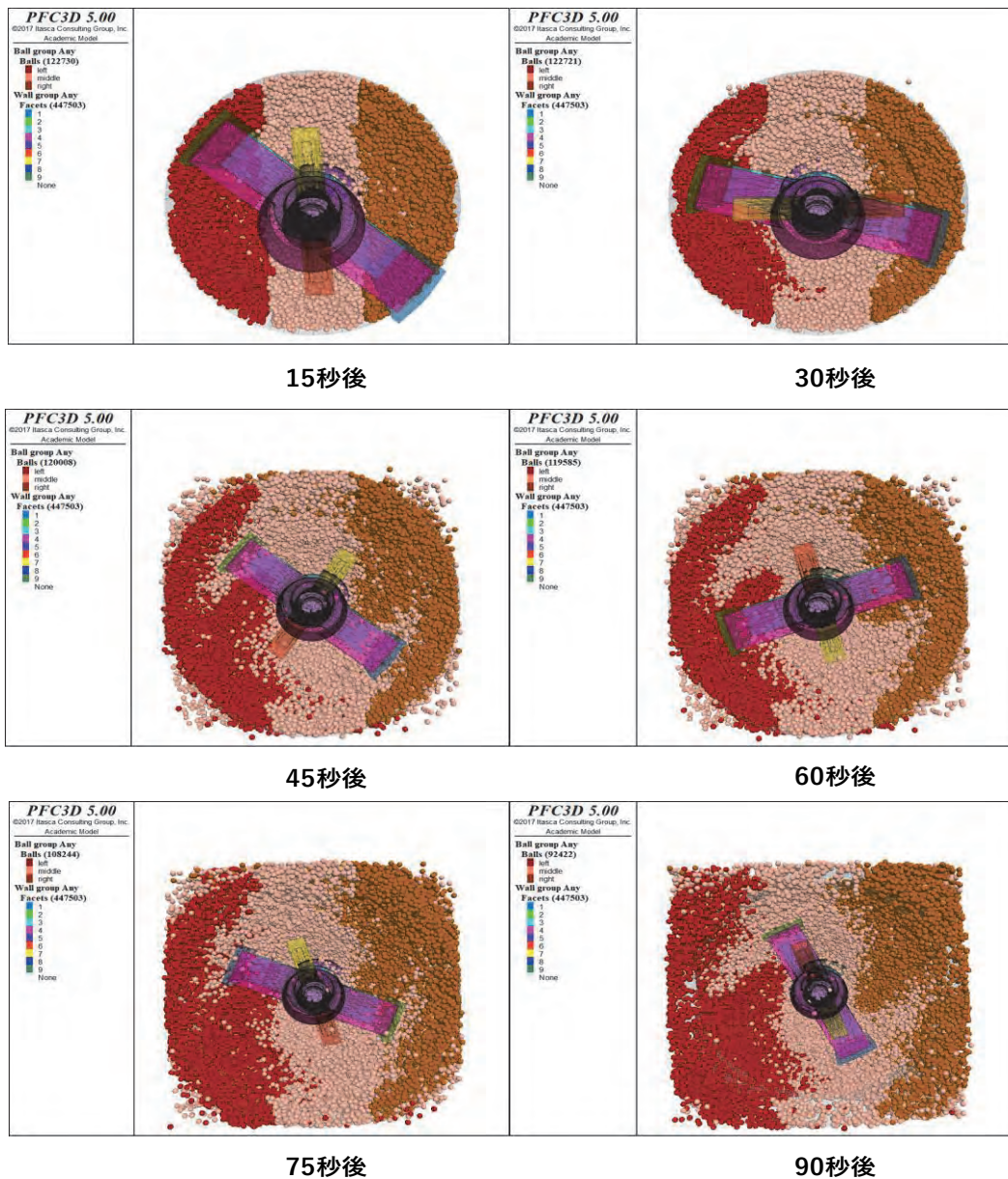


図-12 相対攪拌式深層混合処理工法における相対式攪拌翼の掘削・攪拌シミュレーションの一例（球形要素の挙動）

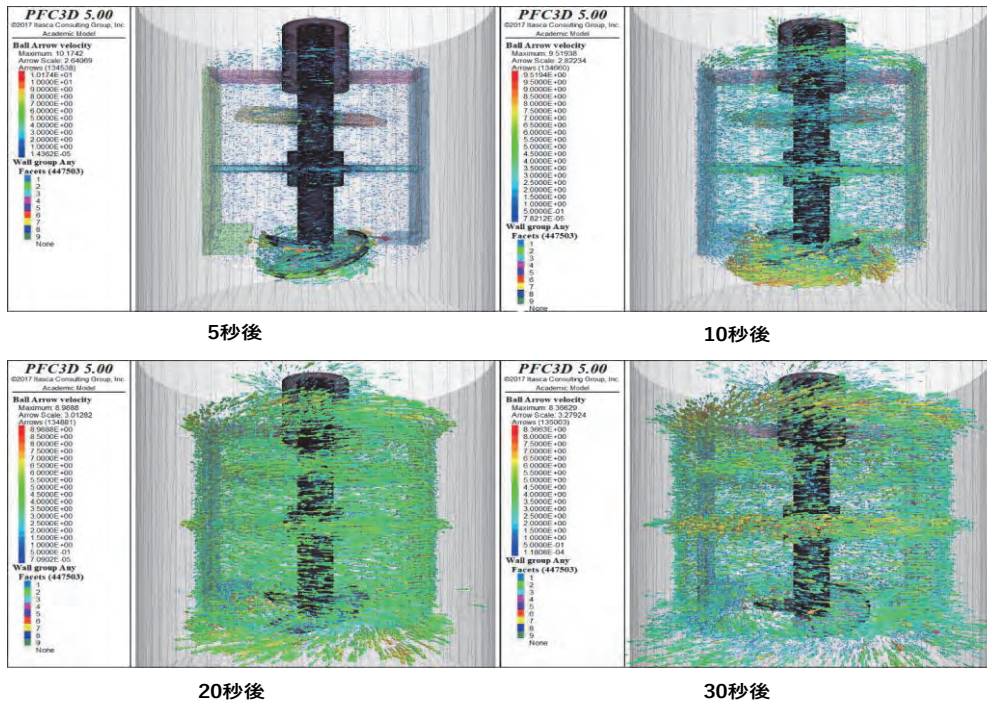


図-13 相対攪拌式深層混合処理工法における相対式攪拌翼の攪拌シミュレーションの一例(球形要素の速度ベクトル)

6. おわりに

本研究では地盤改良工法の一つである相対攪拌式深層混合処理工法に着目し、CAEの適用、すなわち、相対式攪拌翼ならびに施工現場(地中)を3次元的にモデル化し、DEMによる粒状体解析を用いてコンピュータ上で相対式攪拌翼による原地盤の攪拌混合シミュレーションを実施した。

得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 相対式攪拌翼による掘削攪拌では球形要素の拡がり表現することができ、掘削を伴わない攪拌のみでは球形要素の挙動を速度ベクトルによって速度の大きさ、方向および挙動範囲を定量的に表現することができた。すなわち、攪拌混合のシミュレーションは可能であると考えられる。
- (2) DEMによる粒状体解析によって、球形要素(粒子)の挙動や相対式攪拌翼の攪拌特性を把握することができるため、地盤改良工法を可視的に評価できる可能性を明らかにした。
- (3) 相対攪拌式深層混合処理工法として相対式攪拌翼による攪拌混合シミュレーションでは、相対式攪拌翼の貫入・回転設計ならびに攪拌翼形状の合理化に寄与できることを提言した。なお、本シミュレーションにおいて相対攪拌式深層混合処理工法は固化材の吐出の再現および実挙動との対比は今後の課題である。

参考文献

- 1) 足立有史・木付拓磨・土屋潤一・稲積真哉: ICT 施工の導入による杭・地盤改良工事の見える化, 地盤工学会誌

- , 66(1), pp.24~25, 2018
- 2) 鈴木貴史: DCS 工法(相対攪拌式深層混合処理工法) DCS工法の特長と施工方法, 建設機械, 51(1), pp.43~47, 2015
- 3) 清水貞治: 軟弱地盤での自立壁体工法の施工事例(DCS工法), 基礎工, 31(12), pp.46~49, 2003
- 4) 木付拓磨・澤口宏・今井正・高植俊彰・土屋潤一・稲積真哉: 大口径・大深度深層混合処理工法の適用におけるリアルタイム管理システムの導入, 材料, 67(1), pp.93~98, 2018
- 5) ITASC Consulting Group, Inc.: Distinct Element Method, <https://www.itascacg.com/software/pfc/distinct-element-method>, 2018.08.22
- 6) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション -拡張個別要素法で破壊を追う-, 森北出版, 1997
- 7) 酒井幹夫: 粉体の数値シミュレーション, 丸善出版, 2013
- 8) 山本修一: 個別要素法による粒状体の力学的挙動に関する解析的研究(その1), 大林組技術研究所報, 48, pp.49~54, 1994
- 9) 山本修一: 個別要素法による粒状体の力学的挙動に関する解析的研究(その2), 大林組技術研究所報, 52, pp.73~80, 1998
- 10) 前田健一, 森口周二, 松島亘志, 小山倫史: 地盤工学のための個別要素法-パラメータの設定と土と地盤の作り方-, 地盤工学会誌, 63(8), pp.71~78, 2015
- 11) 見世祐樹, 高橋強, 原俊郎, 奥野倫太郎: 大口径相対攪拌工法KS-S・MIX工法の施工事例, 土木学会第71回年次学術講演会, pp.1329~1330, 2016
- 12) 横井勉, 奥野倫太郎, 大古利勝己: 大口径相対攪拌工法の施工事例, pp.41~43, Vol.45, No.6, 基礎工, 2017

24. クラウド活用型舗装一元管理システムの開発

株式会社NIPPPO

梶原 覚
駒坂 翼
○ 竹内 伸

1. はじめに

2016年度より始まった i-Construction の ICT 土工は、「UAV による測量」や「ICT 建機による丁張りレス施工」、「ICT 機器による面での出来形検査」が生産性向上を目的として進められている。

一方、舗装工事にて求められる精度は「ミリメートル」単位であるため、使用される施工機械は当然ながら同様の精度が必要であり、それを実現するために早くからセンサ技術を活用したマシンコントロールが実施、導入されてきた。しかしながら舗装工事は主に、材料を外部から搬入して使用する場面が多く、マシンコントロールにより施工能力が向上しても、その材料の入荷状況が出来高に影響する特長をもっている。また、舗装分野ではなじみの少ない CIM (Construction Information Modeling/Management) は、ライフサイクル全体を見通した情報マネジメントと、3次元モデルを活用した情報の見える化が並行して実践されている。土工においては後者の3次元モデルと属性情報の活用が有効であるが、舗装工事においては、むしろ前者の全体を見通した情報マネジメントが有効と考える。

これらを考慮し、今般、舗装版 CIM の切り口として、生産性向上、省人・省力化を目指した舗装工事での舗装施工情報一元管理システム「N-P Manager」を開発した。以下にその概要と内容を示す。

2. 舗装の品質管理

舗装にて使用される材料は、大別してアスファルトとコンクリートの2種類がある。施工時の主な品質管理項目についてアスファルトは「温度」、コンクリートは「時間」であり、その作業工程の要所において管理される(図-1)。しかしながら現状では、その要所における管理担当者が異なるため、施工時点においてはそれぞれの担当者が個別に情報を所有し、共有されていない実情がある。特にコンクリートでは、練り混ぜ開始から打込み完了までの経過時間が規定されているため、その経過時間を把握する連続した時間管理が重要になってくる。これらのことより、このコンクリート

の時間管理が見える化、共有化するシステム(N-P Manager-Co)の検討からはじめた。

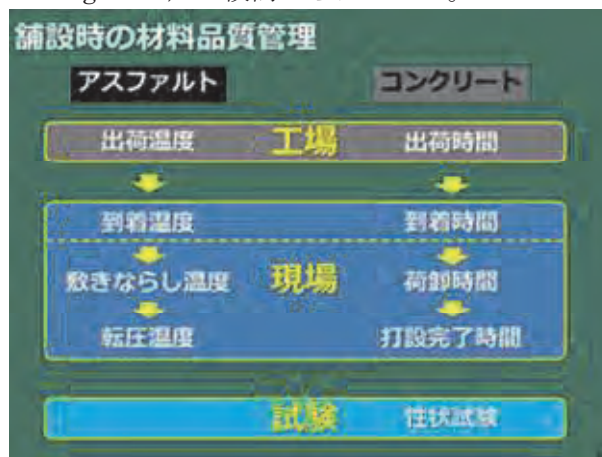


図-1 舗設材料の品質管理

3. クラウド型グループウェアシステムの活用：(N-P Manager-Lite)

管理項目である「時間」と、データのリアルタイムな「情報共有」をキーワードとして検討したところ、車両動態管理システムとクラウド型グループウェアを活用することが簡易的に実施できると考えた。情報共有に関しては、クラウド型グループウェアシステムに備わる複数人が同時に編集できる表計算ソフトを使用して対応することとし、時間に関しては人力に頼らず少しでも簡易的に実施すべく、車両動態管理システムに備わるジオフェンス機能およびアラート機能を活用し、その機能から発せられるメールを管理時間として活用することを考えた(図-2、写真-1)。



図-2 車両動態管理とジオフェンス



写真-1 受信メールでの管理時間入力作業

性状試験のデータに関しても試験立会い時に直接入力することにより、リアルタイムで情報共有ができることとなった。またそのグループウェアを閲覧できるタブレットをプラント側にも設置することにより、プラント側では知りえなかった生コン車の待機状況なども確認することができ、プラント側から現場側へ出荷調整の確認をすることも可能となった（写真-2）。



写真-2 生コンプラントとの情報共有

4. コンクリート施工情報一元管理システム（N-P Manager-Co）の開発

前項においてクラウド型グループウェア活用でもその活用効果が確認されたが、その機能上データ入力のための人員を減らすことはできなかった。これに対応することと更なる機能の拡張も踏まえて、施工情報一元管理システム（N-P Manager-Co）を開発した（図-3）。

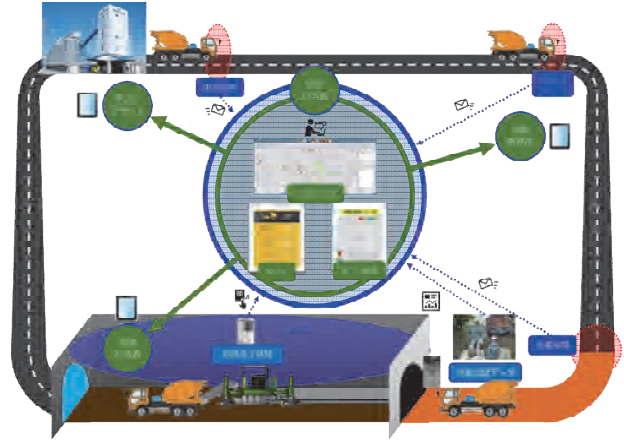


図-3 N-P Manager-Co 構成図

5. コンクリート施工情報一元管理システム（N-P Manager-Co）の特長

基本的な時間の管理方法はクラウド型グループウェアを活用した方法を踏襲し、その他の付加価値機能を追加した。今回開発したシステムの特徴を以下に記す（図-4）。



図-4 N-P Manager-Co メイン画面

- (1) 生コン車の運行状況や現場の進捗がリアルタイムに共有、確認ができる。
- (2) インターネット上で使用することができ、端末に専用ソフトを必要としない
- (3) 管理時刻（出荷，到着）が自動で記録されるため、人為的な操作ミスがない。
- (4) 経過時間が監視され、規定時間に近づくと警告表示をする。
- (5) 管理時刻と連携した簡易平面図により、施工の進捗状況が視覚的に確認できる。
- (6) 性状試験データや強度試験データも記録することができ、管理図に表示できる。
- (7) 記録したデータを帳票出力することができる。
- (8) 打設時の気象状況（気温，湿度）も同時に記録することができる（写真-4）。

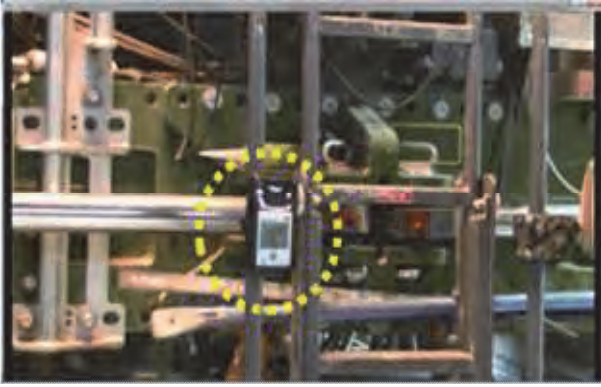


写真-4 Wi-Fi 接続型温湿度計

6. 適用事例

開発した本システムを、高速道路新設工事でのトンネル内におけるコンクリート舗装工事に適用した。当該現場は延長が約 3km と長く、トンネル内部においては携帯電話通信圏外であったため、インターネット接続を必須とする当該システムが使用できない環境にあった。そこで可搬型屋外設置用の Wi-Fi 装置を使用してトンネル内を Wi-Fi エリア化し、インターネット接続を可能にすることでこれに対応した（写真-5）。



写真-5 可搬型屋外設置用 Wi-Fi 装置

7. 導入効果

7.1 省人・省力効果

クラウド型グループウェアシステム活用の時にその効果は確認されていたが、人員によるデータ入力作業が不要になったことから人員を 1 名削減することができた。またインターネット上で動作するソフトであるため、上位管理者が事務所に居ながら進捗を確認することができ、現場と事務所の相互連絡する頻度が少なくなったため、お互いにストレスを感じることなく好評であった。また、記録されたデータはそのまま出力することができるため、現場終了後の事務所作業を削減することができ、就労時間削減にも寄与した。

7.2 品質管理上の効果

リアルタイムで品質データが共有されることで、規格外の製品が現場で使用されることを未然に防ぎ、さらにトレーサビリティが取れることによって、問題・課題の抽出が容易になった。

7.3 安全性の向上

出荷から到着までが、クラウドを通じリアルタイムで確認でき、ダンプや生コン車の搬入状況や適正な配車が出来るようになり、また WEB 上のジオフェンスを通過した際に、メールを自動配信することにより、LED 工事看板の表示を変えることも可能で、周辺交通の安全性も向上した。

8. 今後の課題

8.1 出荷時間の正確性

規格で規定されている生コンの運搬時間は、「練り混ぜ」から「打込み」までの経過時間である。当該システムは生コンプラントを出発した時刻で管理しているため、本来の管理時刻とは異なる。生コンプラントにおける「練り混ぜ」から「出発」までの時間はほぼ一定であるため、時刻をマイナスオフセットすれば対応可能である。また今後生コン出荷伝票の電子化が進めば、生コンプラントから「練り混ぜ」時刻情報を入手し、対応可能になるものと思われる。

8.2 アジテータ車管理番号と GPS 端末の紐付け

生コンクリートは多種多様な使い方ができることから、様々な現場で使用される。そのため条件にもよるが、その日に自社の現場に入場するアジテータ車を固定することが難しい。このような状態であるためアジテータ車に設置する GPS 端末は、出発するときに渡し、戻ってきたら回収するという方法を取らざるを得なかった。外見ではどの生コン車にどの GPS 端末が搭載されているか確認できないため、伝票に GPS 端末の番号を記入して対応した。今後別の方法も検討する必要があると思われる。

8.3 「荷卸」と「完了」判定の自動化

時間管理項目の半分は自動化することができたが、荷卸しと完了の部分に関しては人によるスマートフォンや、タブレットの操作にて実施している（写真-6）。操作忘れや間違いによるミスを無くすことと人員削減を目的として、今後自動判定するシステムも検討している。



写真-6 「荷卸」「完了」操作画面

9. アスファルト施工情報一元管理システムの展望 (N-P Manager-As)

コンクリートの施工情報一元管理システムと同様、アスファルト舗装の施工情報一元管理システムの開発を進めている。前述したように、舗装にて使用される材料は、大別してアスファルトとコンクリートの2種類がある。アスファルト施工時の主な品質管理項目は「温度」であり、各作業工程の中で「出荷温度」「到着温度」「敷ならし温度」「転圧温度」を管理する必要がある。

現状の温度管理方法は、温度管理員が棒状の温度センサを有する温度計を材料内部に挿入し、材料の内部温度を測定して野帳などに記録する。現状の温度管理箇所と各温度管理方法を下記に示す。

(1) 出荷温度

出荷温度は、アスファルト合材（以下、合材）が工場から出荷される時の温度であり、合材を練り上げるミキサーチップに取り付けられた温度計により測定され、測定された温度は、自動的に伝票に印字される。現場では、その出荷伝票を元に、出荷温度の確認を行っている。

(2) 到着温度

到着温度は、合材が現場に到着した時の温度であり、温度管理員が、合材運搬ダンプトラックの荷台に上り、合材温度を測定する。

(3) 敷均し温度

敷ならし温度は、アスファルトフィニッシャー等の敷ならし機械が合材を敷ならした直後の温度であり、その敷ならし面内部の温度を測定する。

(4) 転圧温度

転圧温度は、ローラ等の転圧機械が転圧作業を行う時の温度であり、その転圧直前の敷ならし面内部の温度を測定する。転圧温度は、適正な締め固め密度が得られるように定められた温度であり、転圧作業を開始させる指標である。

これら従来の温度管理方法では、各作業工程における管理者が異なるため、舗設時点においては個別に情報を所有し、現場全体として情報が共有されていない実情がある。また、温度測定のために各箇所管理員が必要なことや、合材運搬ダンプトラックへの昇降作業が必要なことから、人員と労力を要している。

これらのことより、基本的な温度管理方法は従来方法を踏襲し、材料運搬ダンプ一台毎の材料管理を行うことと省人省力化を目的に、アスファルト施工管理の見える化、共有化するシステム (N-P Manager-As) の開発を進めている。このシステムにおける要素技術の紹介とシステム全体の展望を述べる (図-5)。

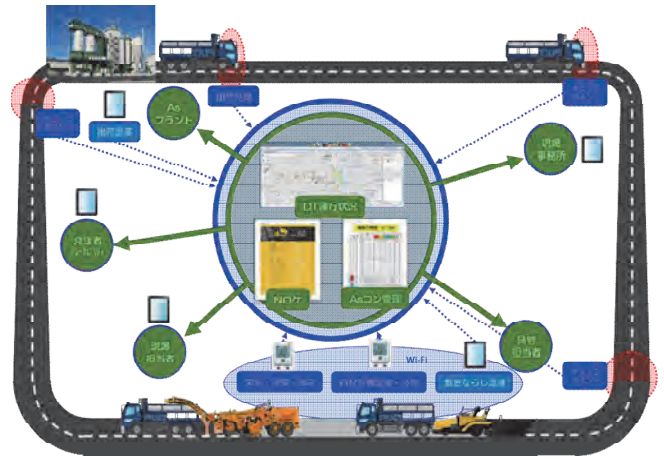


図-5 N-P Manager-As 全体概要図

9.1 運搬温度・到着温度の新たな管理方法

従来の温度管理方法は、それぞれの管理ポイント（出荷，到着）が個別に存在しており、それらを連続的に管理する方法ではなかった。また到着温度にいたっては前述したように、多大な労力を持って測定している。今般、これらの課題に対し、この運搬中の温度と後述する到着温度の測定の自動化、省人省力化をすることを目的に、Wi-Fi 温度ロガーを用いた新たな温度測定手法を開発した。

以下にその概要と特長を記載する。

- (1) プラントにて合材運搬ダンプトラックがアスファルト合材を積載した後に、その合材に Wi-Fi 温度ロガーの温度センサを挿入する (写真-7, 8)。



写真-7 Wi-Fi 温度ロガー設置状況



写真-8 Wi-Fi 温度ロガー表示

- (2) 運搬中は、Wi-Fi 温度ロガーに合材温度変化が連続的に記録される。
- (3) 現場到着時は、現場の Wi-Fi エリアに入ることにより、Wi-Fi 温度ロガーのデータが自動的にクラウドにあがる。
- (4) クラウドに蓄積された温度データは、インターネットを通じてリアルタイムに共有できる。

9.1-1 現場内への Wi-Fi 環境の整備

前述した管理手法を実現するには、合材ダンプトラックが到着する箇所、即ち合材を敷きならすアスファルトフィニッシャー周囲に Wi-Fi 環境を構築する必要がある。Wi-Fi 環境を構築する機器は幾つかあるが、舗装現場と言う過酷な屋外環境、そして確実にデータを取得できることを考慮し、可搬型屋外設置型の Wi-Fi 装置をアスファルトフィニッシャーに設置することとした。これによりアスファルトフィニッシャーの周囲約 100m を Wi-Fi 化することができ、インターネット接続を可能とした(写真-9)。また、インターネット接続が可能になったことにより、温度記録だけでなく、ネットワークカメラを用いて、遠隔地からリアルタイムに状況確認を行うことも可能となった。



写真-9 Wi-Fi 装置取付け状況

9.2 敷きならし温度および進捗管理手法

近年、欧米では、敷きならし時のトレーサビリティを得る手段として、敷きならし温度を面で管理する機器の使用が進められている(写真-10, 11)。

この機器はアスファルト合材敷きならし面の温度をリアルタイムで可視化することが出来るため、施工時の合材温度ムラやその要因と考えられる異物混入などに対する早期対応をすることが出来る。機器には、GPS アンテナの他に気象計を備えているため、施工位置、施工速度、気象データ(気温、気圧、風速、湿度)も同時に収集でき、施工時のトレーサビリティとして、記録することができる。

欧米においては、当該機器に通信端末を搭載し記録データをクラウドにあげることによりその状況をリアルタイムに共有しているが、この通信端末が日本国内の規格に適合しないため、現状では共有することができない。



写真-10 敷きならし面管理機器 取付け状況



写真-11 敷きならし面管理機器 画面表示

9.3 転圧温度管理手法

従来、工法規定方式による盛り土の締め固め密度の管理方法として、締め固め回数などを記録する転圧管理システムが使用されている。舗装工事においても例外では無く、この転圧管理システムの適用される現場が多くなって来ている。

転圧温度や転圧回数を管理、記録している、これら従来使用されてきた既存の転圧管理システムは、スタンドアロンで作動するものであり、施工時点においては転圧回数などを可視化した情報を、オペレータだけしか確認することができない。

クラウド型転圧管理システム (Smart Roller) は、施工データがインターネットを通じてクラウドに上がり、転圧温度や転圧回数等の施工状況がクラウドを通じて、リアルタイムに確認、共有が出来る (写真-12, 13)。



写真-12 クラウド型転圧管理システム取付け状況



写真-13 クラウド型転圧管理システム 画面表示

9.4 システムの展望

(1) 温度管理の省人化

前述した要素技術は個々に存在するものの、これらを一括して管理するものは存在しない。今般開発進行中であるアスファルト施工情報一元管理システムは、前述したアスファルト施工の各管理項目をクラウド上で一元管理し、現場管理の省人省力化と施工時のトレーサビリティを得ることを目的としている。また個々の管理点においては、施工時に規格外 (温度) の材料使用を未然に防ぐことができ、品質確保につなげることができる。

(2) 使用材料の位置管理

前述したアスファルト施工情報一元管理システムを用いることで連続的な材料管理が行えるが、その材料と施工の出来形記録等が個別に管理されている。材料と位置情報を紐付けるために、合材運搬ダンプトラックの車両ナンバーを認識することで、プラントで出荷された材料が、どこでどういう状態で施工されたかが記録できる。また、この情報を道路管理者と共有することで、維持修繕を行うときのトレーサビリティとして活用できる。建設当時の情報として、現状でも施工方法や出来形、使用材料等に関する情報は蓄積されている。このシステムを活用し、連続的な材料の管理記録や施工記録を蓄積することで、維持修繕時にその地域特性にあった、より良いものづくりを行うことにつながると想定している。

(3) 画像データの活用

前述した管理項目、方法は全て数値的な管理である。これらの項目とタイムラプス等の画像データを連携させることで、施工情報の本当の意味での見える化を行うことが出来る。このように ICT, IoT 技術を活用し、施工情報を一元管理することで、その他の ICT, IoT 技術との連携が容易になり、施工管理方法に拡張性を持たせることが出来る。

10. おわりに

近年の通信技術やその周辺機器の進化のスピードはすさまじく、技術的やコスト的に過去に実施出来なかったものが実現可能となってきている。またそれにより建設業そのものの管理方法や、施工方法が変わってきており、省人省力化に繋がる技術となってきている。今回はコンクリート舗装用の管理システムの紹介を行ったが、アスファルト舗装の施工情報一元管理システム (N-P Manager-As) についても前項で述べたとおり、開発中である。今後も舗装と言う枠組みおよび既存のシステムにとらわれず、使いやすく、真に現場に役立ち、使われるものをコンセプトとして開発していく所存である。

25. 建設ICT導入普及研究会の活動について

全国に先駆けて生産性向上に向けた組織作り

国土交通省 中部地方整備局 ○川口 一彦

1. はじめに

中部地方整備局では、計画から調査・設計・施工・維持管理、そして修繕に至る一連の建設プロセスにおいて、ICT（情報通信技術）を活用し、効率化・高度化による生産性向上等を図ることを目的とした、産学官連携による「建設ICT導入普及研究会（以下、「研究会」と言う）」を平成20年11月に設立し、建設ICTの導入普及に向けた活動を行っている。



図-1 研究会設立時の ICT 施工の概念図

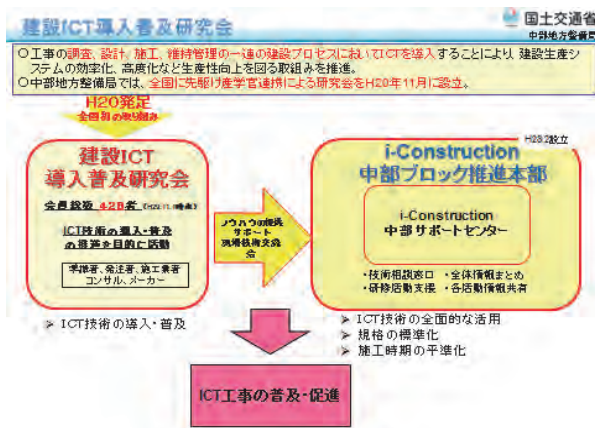


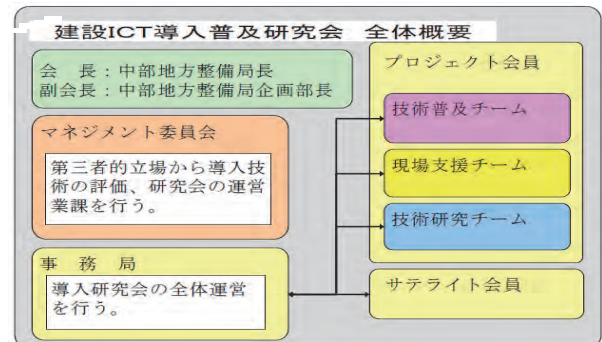
図-2 中部地整における研究会の役割

2. 研究会の設立について

研究会設立当時（平成20年）は、国土交通省において、建設産業における生産性の向上等のため、建設生産システムの効率化・高度化を目指し、CALS/ECの行動計画や情報化施工推進戦略等がとりまとめられていた。

これらの構想を現場での実現に向け、中部地方整備局では、日本建設機械施工協会の協力を得て受発注者及び開発者等の関係者が一体となり、技術普及・現場支援・技術研究を行う建設ICT導入研究会（後に建設ICT導入普及研究会に改名）を全国に先駆けて設立しました。

設立においては、全国より一般公募で会員の募集を行った。会員はICTのノウハウを有したプロジェクト会員とICTの習得を希望するサテライト会員（一般会員）からなり、設立当初は178者でスタート。その後、会員が増加し1年後には300者を超えるまでに成長した。なお、平成30年3月末には会員数が430者になっており、設立より10年を経過してなお増加し続けている。



マネジメント委員	
名古屋工業大学 山本 名誉教授【委員長】	(独)土木研究所 技術推進本部先端技術チーム 首席研究員
名城大学 鈴木 名誉教授	(財)日本建設情報総合センター 建設情報研究所 研究開発部 次長
国土交通省 大臣官房 技術調査課 課長補佐	(社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 所長
国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課 企画専門官	中部地方整備局 企画部 総括技術検査官
国土交通省 国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究 センター長	中部地方整備局 中部技術事務所長

図-3 研究会の構成

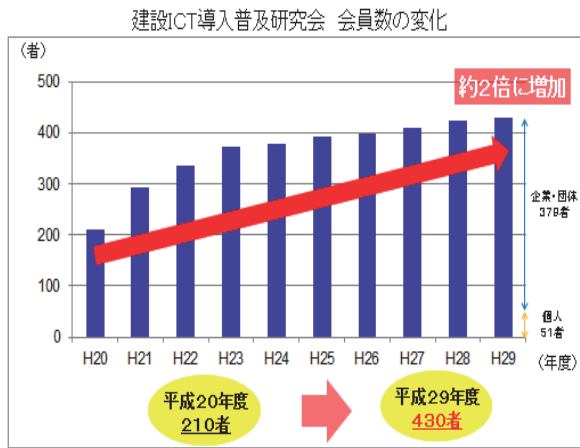


図-4 会員数の推移

3. 研究会設立当時の活動について

設立当時の主な活動としては、ICT技術の普及・現場支援・技術研究としていた。

技術普及活動としては、ICT現場見学会、ICT総合サイト運営、ICT通信（メール）、ICT講習会等の活動を行っていた。

3.1 現場見学会

ICT現場見学会はモデル事業において開催。見学会は、平成22年2月よりCPDS(継続学習制度)認定を受け継続的に実施しており、平成29年度末までに40現場以上の実施実績がある。

なお、平成29年度からはICT現場技術体験会と改名し、工事見学とICT技術者から最新技術を学べる講習をセットで開催している。



写真-1 平成22年当時の様子
(MGバックホウとTS・GNSS 締固め管理を見学)



写真-2 平成22年当時の様子
(普及段階であったTSによる計測を説明)

試験施工現場見学会

建設ICT試験施工現場において現場見学会を開催(H20～)

建設ICT導入研究会では建設ICT技術普及活動の一環として、「建設ICT技術とはどんなものか？」を理解することを目的に開催。

★開催場所: 各試験施工現場

★合計12回開催
(参加者数 合計約1,100名)
内訳
H20 1回 (参加者数 約100名)
H21 10回 (参加者数 合計約900名)
H22 1回 (参加者数 約100名)

【参加者の声】

- ◆情報誌等で見るのと異なり、実物を見た事で、これまでイメージがなかった物を形としてとらえる事ができ、とても良かった。
- ◆TSを実際に操作し、使い易さや便利さを実感した。

ICTバックホウの風速体験ができる!

TSでの計測が体験ができる!

図-5 当時(H22)の見学会開催報告

3.2 ICT総合サイトの運営

研究会の情報発信の窓口としてICT総合サイトを開設。

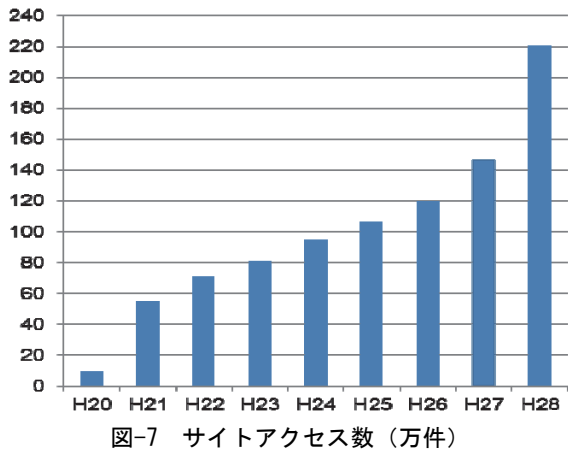
サイトメニューとしては、目標・行動指針、建設ICT解説、イベント情報、各種情報館、ICT通信、基準・要領等のコーナーを設けICT施工を進める上での重要な情報を発信。

また、HPへのアクセス数は、平成20年度の約9万6千回から、平成28年度末には約23倍の約220万件に到達。現在もその水準を維持している。

専門サイトとしては高いアクセス数を記録しており、関心度の高さが伺える。



図-6 ICT総合サイトHP (当時)



3.3 ICT講習会・セミナー

研究会設立当時にはICT施工は一般的な呼称では無く施工方法に重点をおいた「情報化施工」が主なイメージであったため、品質管理、出来形管理を行うICT施工について講習を率先的に行う必要があった。その為、発注者側である中部地方整備局の各事務所でICT説明会を開催し啓発を行った。平成22年度には中部地方整備局管内のほぼ全事務所にあたる29カ所でICT説明会を実施した。



図-8 当時の開催風景

3.4 ざっくりICTシリーズ

現場支援活動としては、モデル事業実施要領の策定や「ざっくりICTシリーズ」(初心者でも分かるICT入門)を、研究会員の協力も得て作成し、少しでもICTを身近に感じて貰う工夫を行った。



写真-3 ざっくりICTシリーズ

3.5 情報共有システムの導入

中部地方整備局では直轄工事を対象にICT施工と同時に施工現場の情報伝達ツールとして「情報共有システム(ASP)」の試行導入を実施。

平成21年度には、約250工事で試行を行った。

導入に際しては研究会会員が説明会などを実施してサポートを行っている。

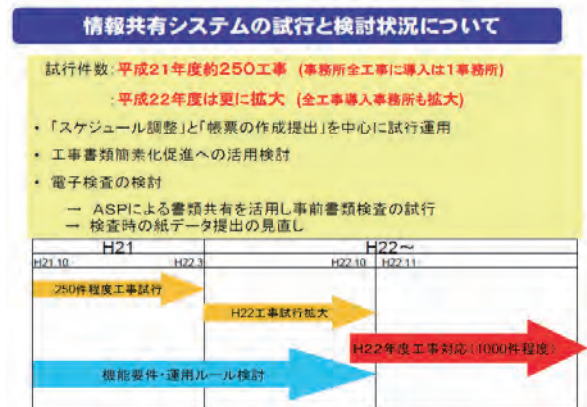


図-9 情報共有システムの試行状況図

3.5 その他の活動

研究会では、モデル事業を支援するため、受注者、発注者及びICTのノウハウを有する研究会員が現場へ集結し、説明や相談会を実施。これは後記する「ICTアドバイザー」の設立に発展している。

技術研究活動としては、モデル事業を通じ、研究会員の研究所等の協力を得て、出来形管理要領、施工要領等の関係要領の策定や改訂を実施。また、定期的なプロジェクト会議を行い課題解決を図った。これは、現在、全国のICT活用工事に使用されている各種要領や基準の基礎となっている。

4. 現在の活動について

国土交通省では、平成28年度からi-Constructionの取り組みの一環としてICT活用工事の本格運用を開始し、本年度で3年目に突入している。研究会設立当時は、ICT技術の紹介やモデル工事の検証など試行的な内容に重点を置かれていたが、本格運用が始まってからは、ICT活用工事のサポートや、地方自治体への普及啓発活動、将来の担い手確保を目的としたICT講座の開設などに移行している状況である。

以下にその取り組みの一部を紹介する。

4.1 建設ICT推進セミナー

研究会の会員等により、建設ICTの導入効果や課題、品質向上や創意工夫事例、最新の建設ICT技術について発表を行う「建設ICT推進セミナー」を建設技術フェア in 中部の会場内特設会

場で開催。

セミナーは、最新の建設技術の展示及び実演等を行い、約 200 名と多数の聴講者が参加し、建設 ICT に関する新たな提案や情報共有が行われた。

■日 時:	平成 29 年 10 月 19 日 (木) 13:00~15:00
■開催場所:	吹上ホール (建設技術フェア会場内)
■内 容:	1) UAVによる3Dレーザー測量&自動画像処理サービスについて 2) 自動追尾TSと施工管理ツールを活用した生産性向上と 3) 施工者ができるUAV・LS計測支援状況と後付けマシンガイダンスシステムについて 4) I o Tによる重機土工の「全工程見える化」について 5) 九州北部豪雨におけるUAVを活用した流木調査について

図-10 建設 ICT 推進セミナー概要

4.2 現場技術体験会

ICT活用工事の施工現場の会場で、ドローン等の計測機器やICT建設機械等を用いた現場技術体験会を、会員等の協力のもとで開催。

この体験会では、従来の現場見学に加えて日本建設機械施工協会や研究会会員の協力のもと、ICT技術を学べる講習会も同時に開催している。

開催時期	開催場所	内 容	参加人数	内訳		
				関係員	自治体職員	施工者等
H27.8.2	長野県飯岡市	ICT測量機(ドローン)のGNSS機能の管理、7台出力処理	80	18	9	28
H27.11.25	三重県桑名市	ICT測量機(ドローン)のGNSS機能の管理、7台出力処理	80	10	6	34
H27.12.2	岐阜県岐阜市	ICT測量機(MCクレーン)のGNSS機能の管理、7台出力処理	70	6	0	64
H28.12.20	静岡県富士宮市(4カ所)	3次元測量機、3D測量データ作成、ICT測量機による施工状況、3D出力処理	180	31	19	100
H28.1.24	三重県津市	3次元測量機、3D測量データ作成、ICT測量機による施工状況、3D出力処理	118	15	13	89
H28.1.28	岐阜県岐阜市	3次元測量機、3D測量データ作成、ICT測量機による施工状況、3D出力処理	107	16	4	87
H28.2.2	愛知県豊田市	3次元測量機、3D測量データ作成、ICT測量機による施工状況、3D出力処理	135	17	6	112
H28.3.4	三重県津市	3次元測量機、3D測量データ作成、ICT測量機による施工状況、3D出力処理	80	10	10	60

図-11 最近の実施実績 (H29以降は現場技術体験会)



図-12 現場技術体験会の様子

4.3 ICTアドバイザー登録制度

建設ICTに先駆的に取り組んでいる企業等の技術者をアドバイザーとして登録し、発注者である自治体や受注者である地元建設業者等が必要なときに実践的なアドバイス等が受けられる「ICTアドバイザー登録制度」を平成29年3月より運用している。

平成30年9月現在で、56社93名がアドバイザーとして登録し、建設ICTに関する相談への助言や研修の講師等として積極的に活動している。

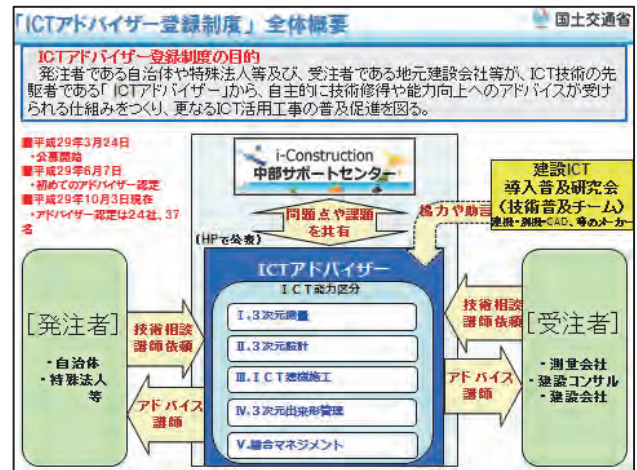


図-13 ICTアドバイザー登録制度



写真-4 ICTアドバイザー認定式の様子

4.4 地方自治体活動への支援・協力

中部地方整備局管内では、自治体においても積極的にICT活用工事への取り組みを行っている。

静岡県では全国に先駆けて平成28年度にICT活用工事の積極的な導入を目的とした「ふじのくにICT活用工事支援協議会」を設立した。平成29年度には岐阜県においても「清流の国ぎふICTモデル工事支援協議会」を設立している。

また、平成30年度は三重県で支援協議会の設立を予定している。支援協議会の設立においては、日本建設機械施工協会の全面的な協力を得て設立ノウハウやモデル工事の技術的支援を行い、モデル工事の施工に伴う主な技術的支援は研究会会員が行っている。

5. ICT活用工事の実施状況について

中部地方整備局発注の直轄工事のうち、ICT土工では平成28年度96工事で実施、平成29年度は137工事に拡大。

平成29年度の中部地方整備局における新規のとり組みとして、ICT浚渫工（港湾）、ICT河道しゅんせつ工、ICT舗装工、ICT砂防に拡大した。

5.1 活用工事の効果検証について

中部地方整備局発注の直轄工事で、H29年度末までに完成した工事の受注者から提出されたアンケート（N=100）を分析した。

ICT（土工）による「起工測量」から「データ納品」までの一連の延べ作業時間（人・日）は、従来施工と比較し、約31%の削減効果が発現。

作業時間の削減は、生産性向上のほか、政府が強力に推し進める“働き方改革”にも大きく寄与している。

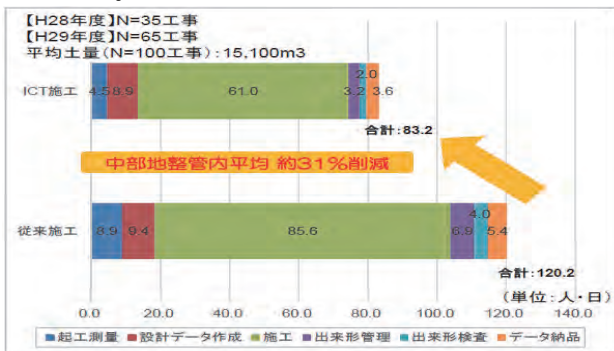


図-18 作業時間の比較

また、中部地方整備局がこれまでに発注したICT活用工事の受注回数を解析したところ複数回数受注した施工業者が40%となった。

一般土木CランクのICT（土工）普及率を見ると中部地方整備局管内で53%の受注者が経験済みとなり、経験者が半数を超えたこととなった。

一般土木CランクのICT（土工）普及率（受注者数）

	長野県	岐阜県	静岡県	愛知県	三重県	中部地整全体
ICT（土工）受注者数	14	27	28	23	27	119者
全工事受注者数	23	53	58	43	48	225者
普及率	61%	51%	48%	53%	56%	53%

※1：平成28年度～29年度の過去2年間の工事を対象。
 ※2：ICT（土工）受注者数・全工事受注者数ともに重複する受注者は除く。
 ※3：ICT（土工）受注者数の5県以外のその他の都道府県（2件）は除く。

図-19 ICT活用工事の普及率

5.2 ICT施工における安全性の向上

研究会のマネジメント委員よりICT施工の安全性の解析指示があったため実施したところ、ICT施工により、丁張り設置作業がほぼ無くなるため、建設機械周辺での手元作業員が不要となり、接触事故の危険性が高い建設機械と作業員が錯綜する

作業時間が約46%減少することにより、安全性の向上に大きく寄与することが判明した。

これは、ICT施工の導入効果として新たに評価すべき項目である。

○建設機械周辺の延べ作業時間（人・日）（定量的評価）

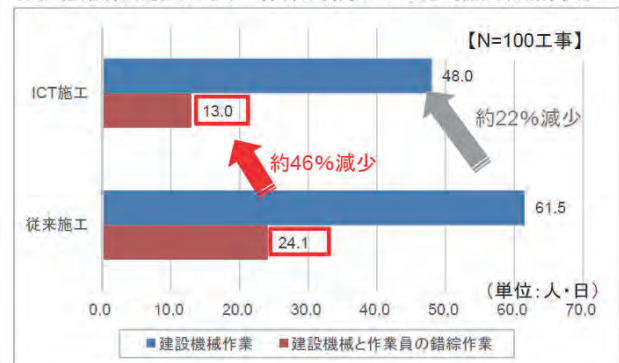


図-20 安全性の比較

6. おわりに

本稿で紹介したとおり、中部地方整備局では平成20年に建設ICT導入研究会の設立し、全国に先駆けて建設ICTの活用促進による生産性向上に取り組んできた。

平成28度から始まったi-Constructionの取り組みの中でICT活用工事（土工）の本格実施が開始された。

これにより中部地方整備局管内の平成29年度までの実施経験割合（ICT工事／全工事）がCクラス業者で過半数を超え、ICT施工の普及の兆しが見えてきた。

これは、全国に先駆け研究会を設立し普及に取り組んできたマネジメント委員や会員の成果の賜物ではないかと考えている。

今後も日本建設機械施工協会及び研究会の会員等、関係者のご協力をいただきながら、直轄工事だけでなく自治体工事を含めて、建設ICTの活用促進に向けた取り組みを引き続き推進したい。

26. i-Construction 普及加速事業における ICT 活用施工の効率化に向けた提案

地方公共団体への ICT 専門家派遣事業

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課 施工調整係長 ○久保 恭伸

1. はじめに

国土交通省では、生産性を向上させることを目的とした「ICT 活用工事」を推進している。また、直轄工事での実施結果では生産性が向上したことが確認されている（図-1 参照）。その一方、地方公共団体が発注する中小規模の工事では、導入費用が高額な ICT 建機の活用に関する知識が不十分であることや、ICT の導入メリットが受発注者に十分共有されていないため、ICT の導入を躊躇している企業が多い。

そこで国土交通省では、平成 29 年度より地方公共団体が発注する工事において、中小企業にとって負担が大きい 3 次元設計データ作成作業や、人材育成等に ICT 活用支援を実施（平成 29 年度は 10 件）し、ICT 活用による効果とノウハウの周知を進めている。本稿は地方公共団体の支援の結果として、支援を通じて得た知見、事例を報告するとともに i-Construction のさらなる地方展開加速について提案をするものである。

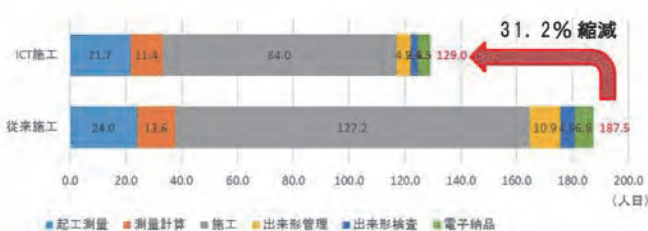


図 1 ICT 土工の活用効果

2. 支援概要

本事業における支援概要は以下の通りである。

2.1 支援対象現場

本取組では、ICT への対応が遅れている地方公共団体発注工事をフィールドに、現場支援型モデル事業を

実施した。平成 29 年度は 10 現場を対象とした。（図-2 参照）。

2.2 支援内容

本取組は、ICT に対応できる技術者やノウハウが不足している地方公共団体発注の中小規模の現場に ICT 専門家を派遣し、適切なアドバイスにより ICT 活用施工工事の成功事例を創出することで ICT 活用ノウハウの地域での共有、ICT 活用工事の地方公共団体規模での積極的発注、各地域での ICT 活用普及展開活動の自主的展開が実施されることを目標としている。

具体的導入支援内容としては大きく 3 つの支援（①現地支援② 3 次元設計データ作成支援③見学会等支援）を実施した。

① 現地支援

ICT 専門家を工事現場に派遣し ICT 機器の選定、ICT を活用した施工計画の立案支援を実施したほか、ICT の活用方法について指導を行った。

② 3 次元設計データ作成支援

ICT 活用工事で必須となる 3 次元設計データ作成に関して、3 次元設計データ作成講習会を実施した。講習会においては、ICT 活用工事に関わるソフトウェア等を試験的に使用してもらい、3 次元設計データの作成方法等のノウハウ習得を目指した。

③ 見学会等の実施

現場見学会の企画立案や講習会用資料の作成、運営支援等を実施した。（図-2 参照）

3. 支援の結果

10 現場を対象に、ICT 活用モデル工事の支援を行った。その内、現場において施工方法を改善することで効果が表れた事例 1 件（秋田県）、モデル工事の実施によって施工者が習得した技術の活用により施工が効率化した事例 1 件（沖縄県）について紹介を行う。

3.1 施工方法の改善事例（秋田県）

① 従来手法と施工日数

当該現場は、砂地で崩れやすい現場のため、切土高さを徐々に切り下げていく必要があった。従来施工を行う場合、丁張設置・粗掘削を行い、ある程度粗掘削が進んだところで法面整形作業を行うという施工を繰り返し行う必要があった。さらに小段があるため、多くの丁張設置作業が必要となり、従来手法に沿って作業を行った場合、法面整形まで施工を終えるには 37 日かかるという想定であった。（図-3 上段参照）

② ICT 建機を用いた手法と施工日数

そこで従来機の代わりに ICT 建機(MC バックホウ)を導入した。従来であれば丁張設置後、粗掘削、法面整形作業を行っていたが、ICT 建機を導入することによ

って、丁張設置作業がなくなり、粗掘削・法面整形作業の繰り返し作業となった。その結果、日当たり施工量が従来に比べ、およそ 1.15 倍に増加した。さらに ICT 建機の能力に合わせたダンプの運行管理を行うことにより、25 日間で施工が終了し、従来施工に比べ、12 日間の工期短縮が実現した。短縮された理由としては、従来施工であれば多くの丁張設置・スラント確認作業を行う必要があったが、ICT 建機を導入することでそれらの作業を省略することが可能になり、その分の作業時間が削減されたことに加え、施工のムラを無くすことでダンプの待機時間を削減できたことが挙げられる。（図-3 下段参照）（図-4 参照）

H29年モデル事業実施箇所と普及支援の実施概要

主な支援概要

- ① ICT導入計画の支援
- ② 3次元設計データ作成支援
- ③ 現場見学会の支援
- ④ 技術指導と効果検証
- ⑤ 協議会・報告会の支援



図 2 平成 29 年モデル事業実施箇所と普及支援の実施概要



図3 施工方法改善結果

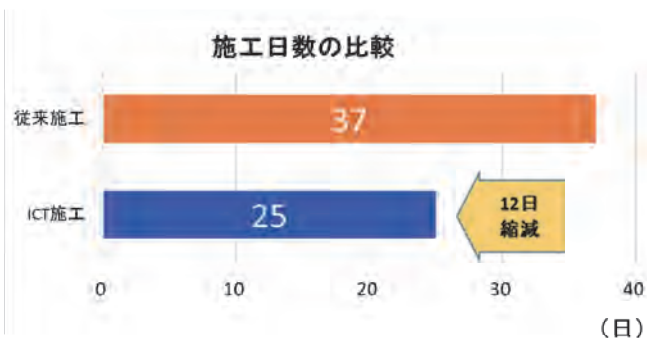


図4 施工日数縮減効果

この作成経験を踏まえ、B工区にてデータ作成を行ったところ、データ作成の支援なしで本線+仮設道路の計2路線の作成時間は0.5人・日であった。A工区と同規模相当で換算を行うと作成時間は0.25人・日であり、75%程度の作成時間が削減された。(図-5参照) データ作成に関して難しいというイメージを持ちがちだが、ソフトウェアの操作方法等を理解することで作成時間を削減することが可能となる。

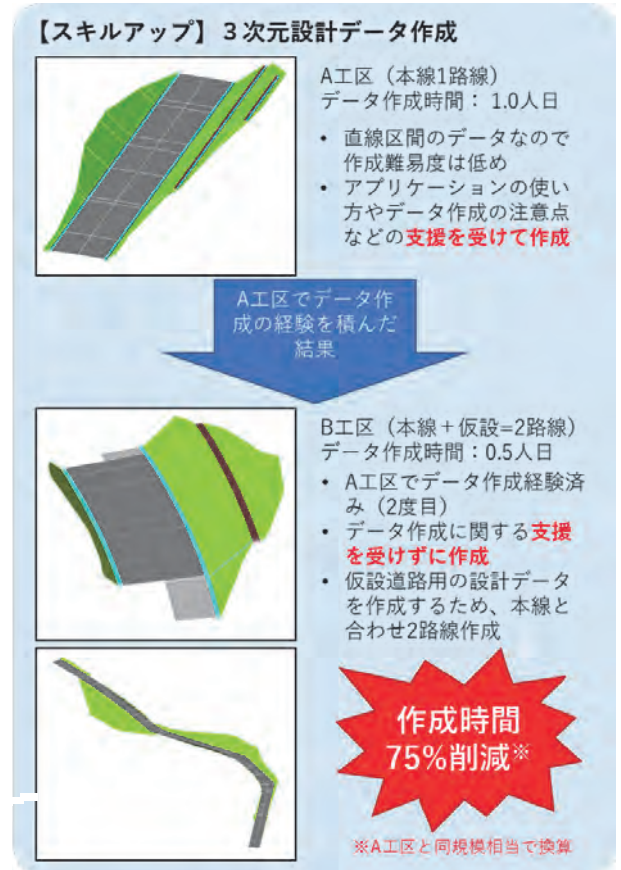


図5 3次元設計データ作成時間 省力化効果

3.2 現場技術者の技術活用事例 (沖縄県)

沖縄県のモデル工事現場 (A工区とする) において、本取組による支援により3次元データ作成技術を習得した担当者が次工事においてICTを活用 (B工区とする) し現場の効率化に寄与した事例を紹介する。

① データ作成時間比較

現場の規模としてはA工区に関しては延長約100m、掘削土量約20,000m³、法面整形約2,000m²であり、B工区は本線延長約100m、仮設道路約200m、掘削土量約9,000m³、法面整形約1,000m²であった。A工区のデータ作成を行う際は、ソフトウェア等の使用方法やデータ作成時の注意点等の支援を受けながら作成を行い、作成時間は1人・日であった。

② 3次元設計データの活用方法

B工区では、作成した3次元設計データを丁張設置に活用し、ICT建機による施工以外の面でも効率化を図った。ICT活用工事 (土工) では土工作业においては丁張を不要とすることが可能であるが、土工に付随する排水構造物設置工等によりの周辺構造物については設置にあたり丁張が必要になる。そのため、座標計算などの事前準備が必要であったが、3次元設計データを活用することにより現場内のどこでも迅速な丁張作業が可能になった。このように3次元設計データを内製化することが出来れば、大幅なコスト削減に繋がるだけでなく、構造物の位置出し等土工以外の工種にもデータを活用することが出来るため、省人化や工期の短縮を図ることが可能となる。(図-6参照)

- 3次元設計データを従来施工にも利用することで、ICT建機を利用しない工事でも効率化を図る事が可能

丁張り設置に利用

- 座標計算などの事前準備不要
- 現場内のどこにでも丁張り設置可能

従来手法 30分/1箇所

3次元設計データを活用 10分/1箇所

作成時間 66%削減

図 6 3次元設計データ活用例（丁張り設置）

4. ICT 活用施工の効率化に向けた提案

ICT を導入することで丁張りや補助作業員を削減することが可能となる。しかし、中小規模の工事は大規模工事と異なり施工量が少ないため、上記の削減効果だけではコストも含めた ICT による効率化の効果が小さい。そこで事前の施工計画立案段階で ICT 建機の導入時期・期間の検討・ICT の適用範囲の決定を行うことで、ICT 建機の拘束期間の短縮を図るほか、ICT 建機の能力を最大限に活かすための最適なダンプ配置の検討を行うことによって、ICT の導入効果を得ることが可能となる。また中小規模の工事では土工のみの工事は少なく、他工種での ICT の活用も重要となる。本取組においても、これらの工夫を取り入れることで、ICT の効果が得られることが確認された。下表に本取組におけるモデル工事現場における現場条件と提案内容を示す。（表-1 参照）

表 1 現場条件に応じた提案内容

段階	現場条件	提案内容
3次元起工測量	施工範囲が広い 上空が開けている UAV 飛行可能区域 等	空中写真測量 (UAV) による計測
	風が強いことが多い 接近危険構造物に近い 現場の高低差がある DID 地区に該当する 等	地上型レーザースキャナ (TLS) による計測
施工計画, 施工時	ダンプ増が可能 施工範囲, 幅が広い 機械体制の変更可能	能力に応じてダンプ台数を増加し, 施工日数を短縮 ICT 建機のクラスを上げ, さらに生産性を向上させる
	ダンプ増が不可 施工範囲, 幅が狭い 機械体制の変更不可	従来建機の有効な組合せ ICT 建機のクラスを下げる 使用期間短縮でコスト削減 簡易的 3D マシンガイダンス
出来形管理	面管理が非効率になる場合 施工地域が降雪地帯	従来管理 (仕様書等による) TS 出来形管理 TS (ノンプリズム) 方式による管理
	上記のような問題がない場合	空中写真測量 (UAV), 地上型レーザースキャナ (TLS) による計測

5. まとめ

今後は、多様な形態での工事において ICT 活用による効率化の事例をとりまとめ、それらの事例をパターン化し定量的な観点で分析することにより、現場規模や現場条件に応じた適切な ICT 活用方法が確立され、さらなる ICT 活用工事の普及に繋がると考える。
本取組が地方公共団体や中小規模の ICT 活用の導入のきっかけとなれば幸いである。

27. 基礎杭打設時期が廃棄物処分場の底面遮水工に及ぼす影響

呉工業高等専門学校 ○ 龍尾 一海
 広島工業大学 森脇 武夫
 呉工業高等専門学校 重松 尚久

1. はじめに

我が国では大量の廃棄物が埋立処分され、多くの最終処分場では埋立の完了時期を迎えようとしている。そのため、最終処分場跡地を土地資源として有効利用することが求められている。しかし、現状では海面埋立型廃棄物処分場の跡地利用は、運動場や緑地などに利用されることが多く、建築用地等の高度利用はほとんど行われていない¹⁾。本研究では海面埋立型廃棄物処分場を取り上げるが、一般に海面埋立処分場では底面遮水基盤として在来粘土に期待することが多く、土中における保有水等の浸透経路長として透水係数 $k=10^{-5}\text{cm/s}$ 以下の地層が層厚 5m 以上確保されていることが求められている。処分場跡地を高度利用するために大規模構造物を構築した場合は、**図-1** のように粘性土層を貫通して基礎杭を打設することになるため、遮水工の健全性の確保が問題となる。

これまでの研究で圧密が完了した粘性土地盤では、基礎杭打設が底面粘土層の遮水機能に及ぼす影響については問題ないことが小型土層を用いた実験的な検討によって確認されている^{2),3)}。しかし、地盤の圧密が完了するにはかなりの時間を要するため、廃棄物の埋立が完了した跡地を早期に有効利用することができないという問題点がある。

そこで本研究では、未圧密地盤において大規模構造物を建設する際の基礎杭打設が底面粘土層の遮水機能へ及ぼす影響について、異なった圧密度において杭を打設する小型模型実験を行い、遮水機能の有効性を検討した。

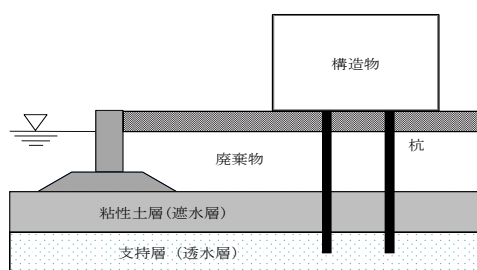


図-1 海面埋立型廃棄物処分場のイメージ図

2. 実験方法

2.1 実験に用いた試料

本実験で使用した粘土は、岡山県水島港より採取した沖積粘土で、その物理特性を**表-1**に示す。

2.2 実験装置

実験装置の概略図を**図-2**に示す。実験装置は直径 150mm、高さ 340mm の筒型モールドの装置を用いる。実験の手順は以下の通りである。

表-1 粘土試料の物理特性

土粒子の密度	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.744
液性限界	$w_L(\%)$	80.5
塑性限界	$w_P(\%)$	31.8
塑性指数	I_p	48.7

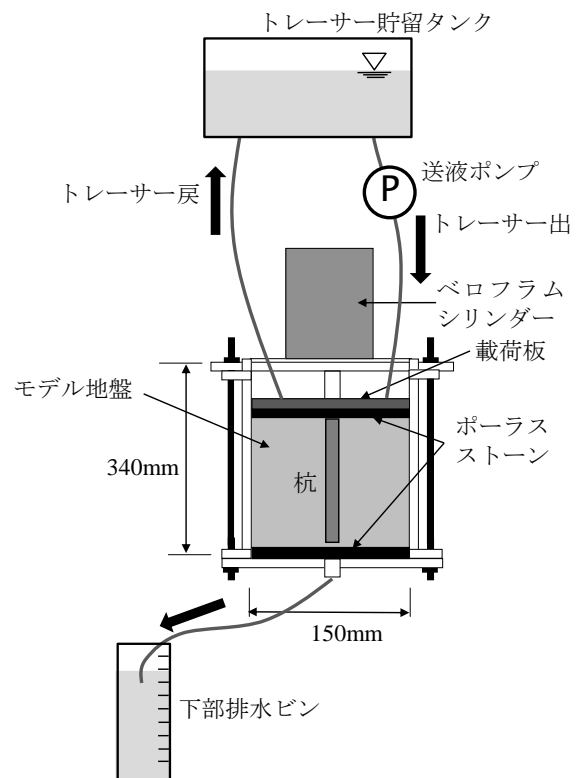


図-2 実験装置概要図

2.3 モデル地盤の作成

使用する粘性土を液性限界の 2 倍の含水比 ($w=160\%$) で練り返して調整する。その後、脱気を行い、実験装置の円筒モールド内に試料を投入した。モデル地盤の圧密は両面排水で行った。表-2 に実験ケースを示す。シリーズ 1 では、24 時間サイクルで 0 (自重)、10、20、50kPa の圧密圧力を載荷させ圧密を行った。最終荷重 (50kPa) においては、3t 法により決まる圧密終了時間を満足するまで圧密を行い、最終沈下量及び含水比を測定し、この地盤を圧密度 100% のモデル地盤とした。この時の沈下量と時間の関係をもとに、 \sqrt{t} 法により圧密度 90% の時の沈下量及び経過時間を求めた。また、圧密度 90% の時の沈下量をもとに圧密度 80、70% における沈下量及び経過時間も求めた。

シリーズ 2、シリーズ 3 では、シリーズ 1 で得られた結果をもとに、圧密時間を調整してモデル地盤の作成を行った。今回の実験ではモデル地盤の目標圧密度を 90、80、70% として圧密を行い、その結果、圧密度が 94、88、81、77、69、54% のモデル地盤となった。表-3 にそれぞれのモデル地盤を作成した際の圧密時間を示す。

2.4 杭打設、トレーサー循環、試料採取

杭を打設するシリーズ 2、シリーズ 3 では、作成した粘土地盤に上部から長さ 90mm の模型杭 ($\phi 10\text{mm}$) を粘土層上端から打設速度 30mm/min で打設する。なお、杭を打設する際は粘土層の表面にひび割れや亀裂が生じないように、粘土層表面を反力板によって押さえてある。

汚染モデル物質を粘土試料に浸透させるために、トレーサー循環を行った。粘土試料上部においてトレーサーの循環を送液ポンプにより 9 日間行った。試料下端からの排水は排水ビンに導き、排水量の測定を行った。汚染物質のトレーサーについては臭化物イオン (Br^-) を用いた。本研究で用いたトレーサー溶液の臭化物イオン濃度は全て 5,000mg/l とした。一般的に、廃棄物処分場の保有水には、イオンとして、 Cl^- や SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} などが含まれており、臭化物イオンは微量である。ただし、これらの主要なイオンは土中において土粒子へ吸着されたり、生物分解等による変動が大きく、本研究では実験利用には適さない。このため、実験期間中における吸着や分解による変動が小さく、実験結果を安全側に評価できる臭化物イオンを用いるものとする⁴⁾。

トレーサー循環後、汚染物質の粘土地盤への浸透を検討するため、試料採取を行う。図-3 に試料採取の流れを示す。最初に底板を取り除いたモールドを上下反転させ、載荷に利用したベロフラムシリンダーを使用して試料を 10mm 押し上げる。

含水比、臭化物イオン濃度を測定するために杭周辺、試料外縁部(杭より十分離れた位置)、試料中間部に内径 30mm のアルミ製の円筒を手動で粘土に挿入し(挿入深度: 10mm)、筒を粘土と一緒に引き抜き、試料を採取する。挿入した深度まで残った粘土を除去し、これらの作業を試料がなくなるまで繰り返す。図-4 に含水比と臭化物イオン濃度を測定するための粘土試料の採取平面位置を示す。試料については、片側を含水比測定用、もう片側を臭化物イオン濃度測定用とする。また、杭周辺の粘土については、円筒の中にある粘土を押し出し、片側を含水比測定用、もう片側を臭化物イオン濃度測定用として採取する。

表-2 実験ケース

バッチ	No.1	No.2	No.3
シリーズ 1	杭なし $U=100\%$	杭なし $U=100\%$	杭なし $U=100\%$
シリーズ 2	杭あり $U=94\%$	杭あり $U=81\%$	杭あり $U=77\%$
シリーズ 3	杭あり $U=88\%$	杭あり $U=69\%$	杭あり $U=54\%$

表-3 モデル地盤作成時の圧密時間

圧密時間(min)	圧密度(%)
19,780	100
2,520	94
2,030	88
1,320	81
1,080	77
880	69
590	54

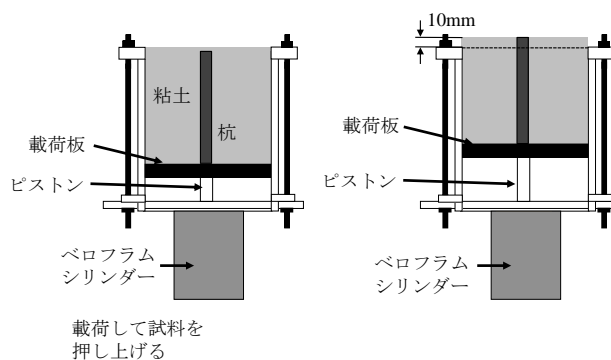


図-3 試料採取作業の流れ

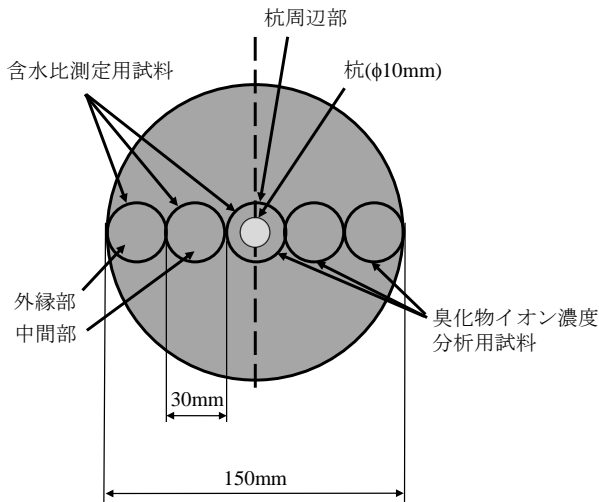


図-4 粘土試料の採取平面位置

2.5 排水量の測定

試料上部を循環させたトレーサーの液面から排水ビンとして利用したメスシリンダー内の水面までの水位差は、 $\Delta h=1,680\text{mm}$ とし、トレーサー循環を9日間行った。その間の排水量を容量1,000mlのメスシリンダーで1日ごとに測定した。

2.6 結果の整理

各実験終了後に採取した粘土試料については、含水比と臭化物イオン濃度を測定するとともに、沈下量、排水量、透水係数とトレーサーの移流距離を算出したが、紙面の都合上、沈下量、排水量、透水係数と移流距離に関しては省略する。測定された臭化物イオン濃度の整理方法は以下の通りである。

臭化物イオンは、もともと海水中に61mg/l程度含まれているため、式(1)を用いて臭化物イオン濃度の変化を臭化物イオン相対濃度 C/C_0 として評価する。臭化物イオン相対濃度は供給液の濃度と採取した試料から測定された濃度の比で表される。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_m - C_1}{C_2 - C_1} \dots\dots\dots (1)$$

ここに $\frac{C}{C_0}$: 臭化物イオン相対濃度

C_m : 濃度の実測値(mg/l)

C_1 : 初期間隙水中の濃度(61mg/l)

C_2 : 供給液の濃度(mg/l)

さらに杭打設による周辺地盤への影響を検討するため杭周辺部と外縁部、中間部と外縁部の臭化物イオン相対濃度差 $\Delta C_N/C_0$ 、 $\Delta C_M/C_0$ を式(2)、(3)で算定する。相対濃度差は杭打設の影響が少なく、トレーサーの浸透が少ないと考えられる外縁部に比べ、杭周辺部、中間部での杭打設による影響の有

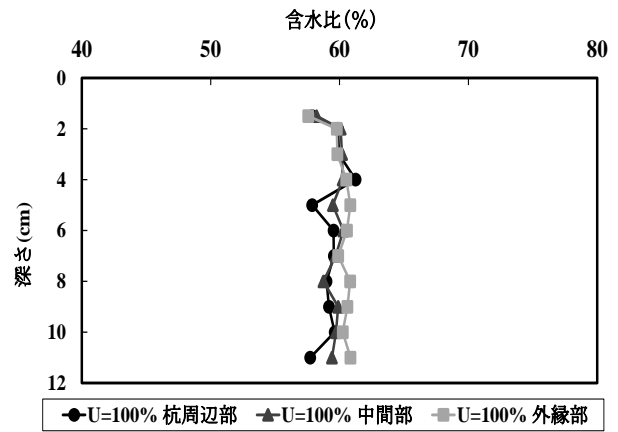


図-5 含水比の深度分布(圧密度 100% No. 1)

無を表す指標である。

$$\Delta \frac{C_N}{C_0} = \frac{C_1}{C_0} - \frac{C_3}{C_0} \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta \frac{C_M}{C_0} = \frac{C_2}{C_0} - \frac{C_3}{C_0} \dots\dots\dots (3)$$

ここに $\Delta \frac{C_N}{C_0}$: 杭周辺部と外縁部の臭化物イオン相対濃度差

$\Delta \frac{C_M}{C_0}$: 中間部と外縁部の臭化物イオン相対濃度差

$\frac{C_1}{C_0}$: 杭周辺部の臭化物イオン相対濃度

$\frac{C_2}{C_0}$: 中間部の臭化物イオン相対濃度

$\frac{C_3}{C_0}$: 外縁部の臭化物イオン相対濃度

3. 実験結果と考察

3.1 含水比の深度分布

図-5 に圧密度 100%で杭を打設しなかった場合の含水比の深度分布を示す。なお、この図では代表としてNo.1の実験の含水比深度分布のグラフを示すが、圧密度 100%で杭を打設しなかった場合、含水比の深度分布は 60~65%の間にまとまり、杭周辺部、中間部、外縁部で大きな差はなかった。このことから、圧密度 100%の地盤では含水比の深度分布に半径方向の違いは現れず、ほぼ均質な地盤であることがわかる。

図-6~図-11 に杭を打設した場合のトレーサー循環後の各試料の含水比の深度分布を示す。杭を打設した場合は、圧密度に関係なく杭周辺部の含水比が中間部、外縁部に比べて小さくなっている。この原因として、杭を打設したことにより、杭の体積に相当する粘土が杭の側方に押し上げられるため、杭周辺で圧密が進行し、間隙が減少したため

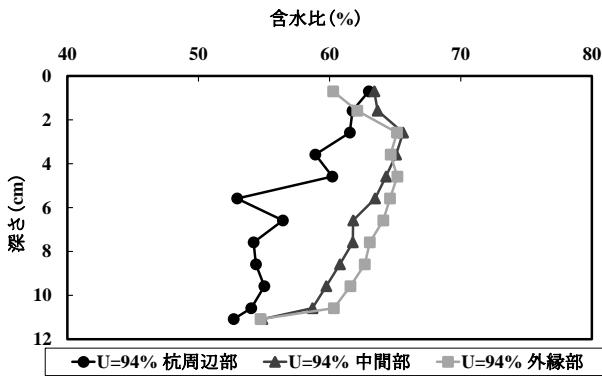


図-6 含水比の深度分布 (圧密度 94%)

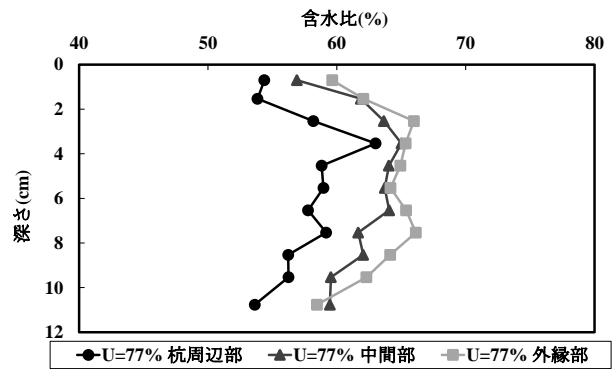


図-9 含水比の深度分布 (圧密度 77%)

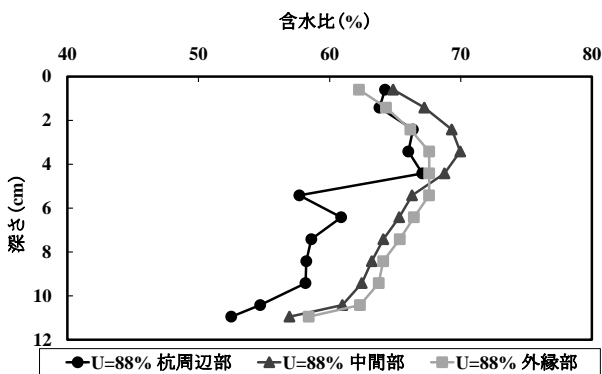


図-7 含水比の深度分布 (圧密度 88%)

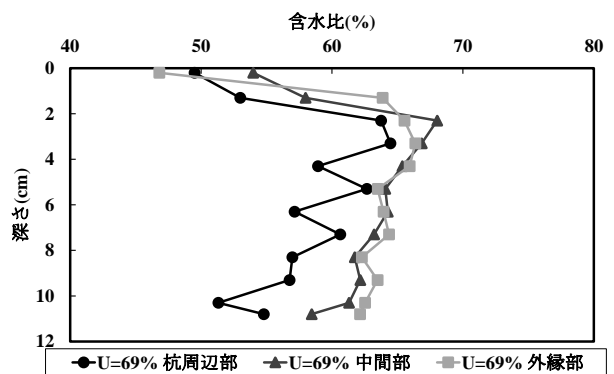


図-10 含水比の深度分布 (圧密度 69%)

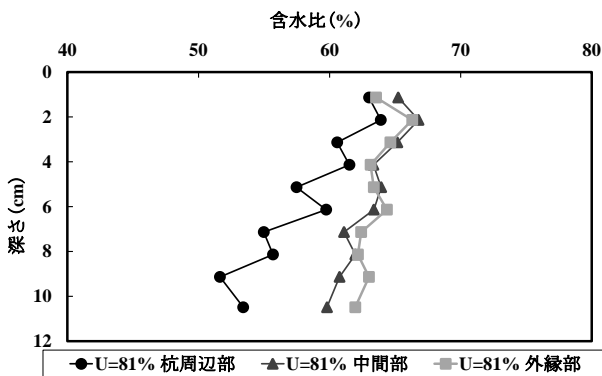


図-8 含水比の深度分布 (圧密度 81%)

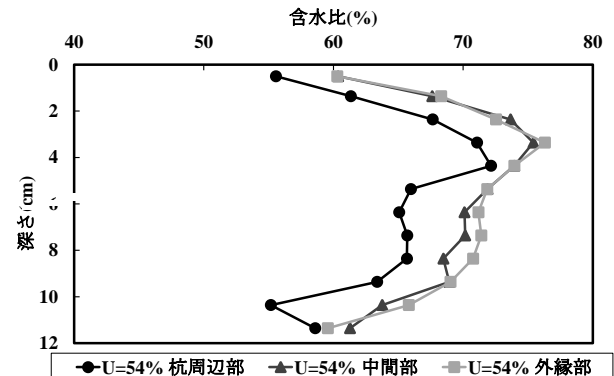


図-11 含水比の深度分布 (圧密度 54%)

あると考えられる。このことは、杭打設時の圧密度が大きいほど顕著に表れている。この原因として、杭打設時の圧密度が高いほど杭を打設するときの粘土層内の間隙が少なく、杭を打設したことによりその間隙がさらに少なくなったためと考えられる。また、粘土地盤の上下端部での含水比は小さく、粘土層中層部の含水比が高くなっていることがわかる。この原因として、今回の実験では両面排水で圧密を行っており、圧密が上下端から進行していくため、上下端部では排水が促進されるが粘土層中層部では圧密の進行が遅れ、排水が十分に行われていないことが考えられる。

3.2 杭打設による深度及び杭周辺地盤への影響

図-12～図-17 は表-2 のシリーズ 2, シリーズ 3 に示す地盤条件で杭を打設し、トレーサーを循環させたときの臭化物イオン相対濃度差の深度分布を表したグラフである。臭化物イオン相対濃度差が小さいほど杭打設による影響が小さいことを意味する。また、本研究では臭化物イオン相対濃度差 0.10 を閾値⁵⁾として検討を行った。

圧密度が 94, 88, 81% と高い場合は全深度において臭化物イオン相対濃度差が 0.10 以下である。これは、含水比のときと同様に、杭を打設するときの圧密度が高いほど、粘土層内の間隙が少ないた

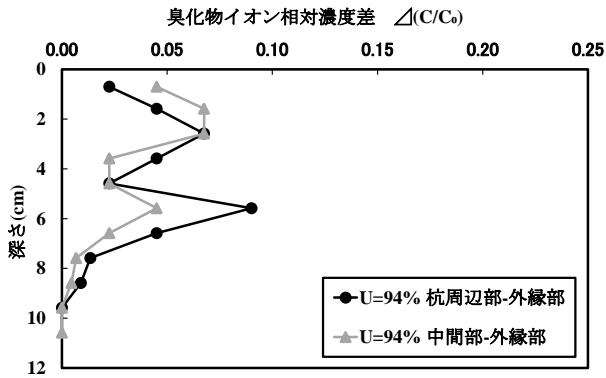


図-12 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 94%)

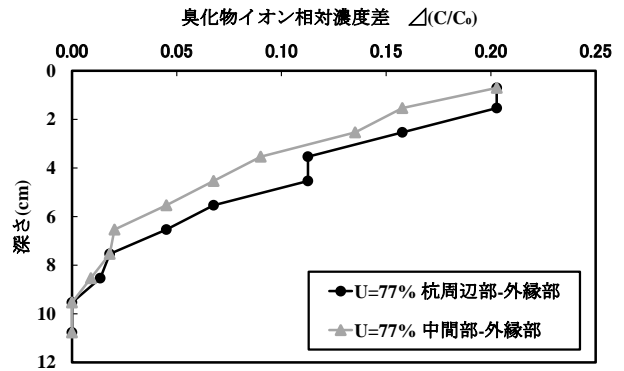


図-15 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 77%)

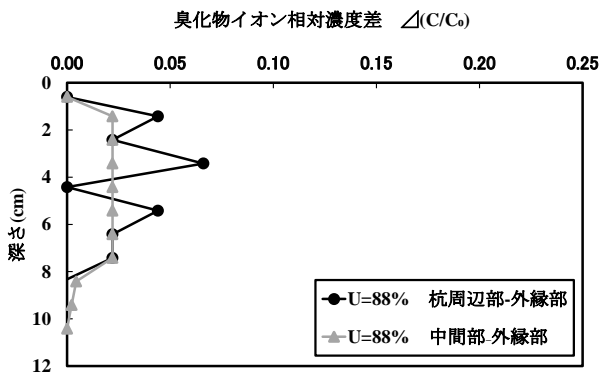


図-13 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 88%)

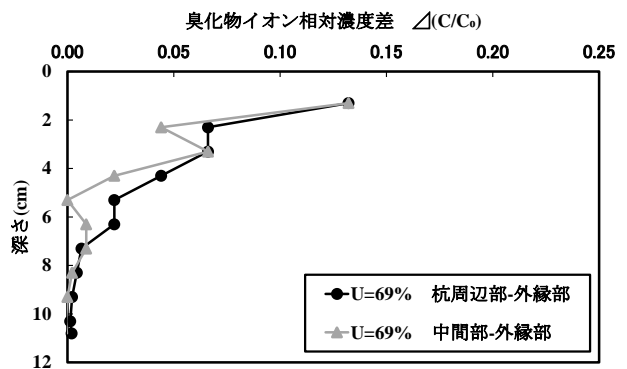


図-16 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 69%)

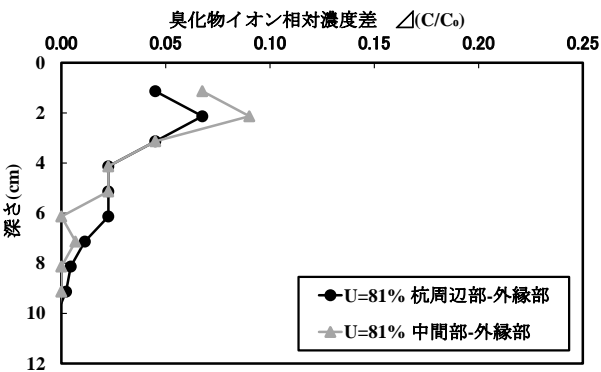


図-14 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 81%)

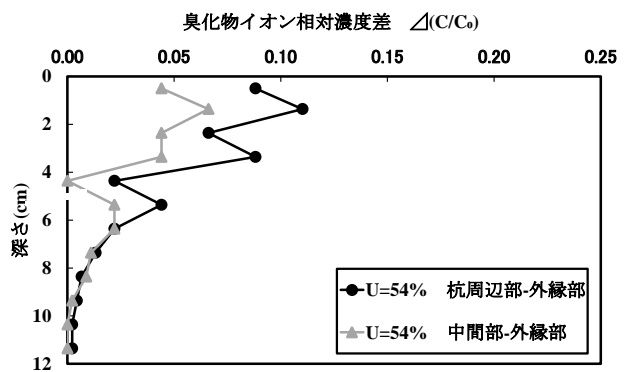


図-17 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 54%)

め、杭打設による影響が小さくなったと考えられる。また、圧密度が 77, 69, 54%と低い場合はいずれも臭化物イオン相対濃度差が 0.10 を超える地点が存在することがわかる。これは、杭打設時の圧密度が低い場合粘土層内の間隙比が大きく、杭打設によって粘土層内の圧密が進行してもなお、粘土層内に大きな間隙が存在しており、それによってトレーサーが循環しやすくなったため臭化物イオン相対濃度差が大きくなったと考えられる。特に圧密度 77%の場合の臭化物イオン相対濃度差は粘土層上層部では 0.20 となっており、圧密度 69, 54%の時と比べて杭打設時の圧密度は大きいにも

かわらず、臭化物イオン相対濃度差が大きくなっていることがわかる。これは、杭を打設した際に粘土層にクラックが生じたなどの原因でトレーサーが浸透しやすくなったためと考えられる。全体としては、深度 8cm 以深では臭化物イオン相対濃度差が 0 に近い値となっていることがわかる。これは、杭打設により、粘土と杭の間に隙間ができるが、深度が小さい範囲では杭と粘土の密着が悪いため、杭打設による影響が大きくなるが、深度が大きい範囲では杭と粘土の密着が良くなり、杭打設による影響が小さくなったと考えられる。

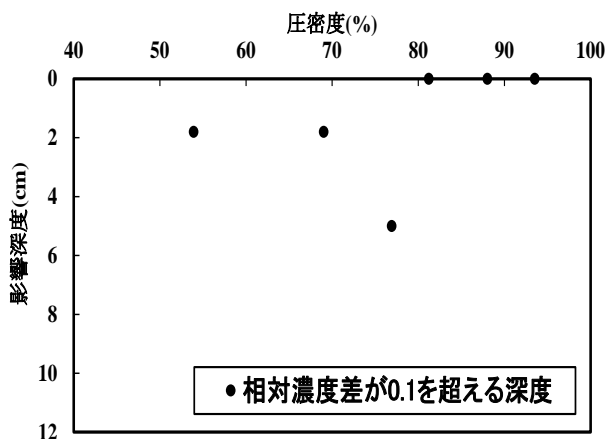


図-18 圧密度と影響深度の関係

3.3 圧密度と影響深度の関係

図-18 は臭化物イオン相対濃度差が 0.10 を超えるときの深度を影響深度として、圧密度と影響深度の関係を表したものである。この図より圧密度 80%以上では影響深度が 0 であり、圧密度が 77%では影響深度が 5cm となっている。また、圧密度が 54, 69%では影響深度が約 1.8cm となっている。理論上では圧密度が大きくなるほど影響深度が小さくなると考えられるが、圧密度 77%の影響深度が大きくなった。この原因として、杭打設の際に粘土層にひび割れが入ったなどのことが考えられる。このことから、圧密度が 80%を超えた状態で杭を打設すると杭打設による汚染水浸透の影響はないといえる。また、圧密度が 70%以下で杭を打設した場合は、粘土層上層部～中層部にかけては杭打設の影響がみられるが、底部では影響深度が 0 になっているため杭打設による汚染水の浸透の影響はないと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 圧密度 94%のモデル地盤を作成する場合、3t 法で決定される圧密度 100%の圧密時間の約 1/10 まで圧密時間を短縮することが可能である。94%より低い圧密度のモデル地盤を作成する場合もさらなる圧密時間の短縮が期待できるといえる。
- (2) 粘性土モデル地盤に杭を打設すると、杭周辺の粘土が外に押し出され圧密が進行するため、杭周辺部の含水比が中間部、外縁部に比べて小さくなる。このことは圧密度が異なるすべてのモデル地盤において同様の結果となった。
- (3) 杭打設時の圧密度が高いほど臭化物イオン相対濃度差が小さくなり、杭打設時の圧密度が低いと粘土層上層部では臭化物イオン相対濃度差が大きくなった。そのため、圧密度が低い

状態で杭を打設すると深度が小さい範囲では杭打設により汚染水が浸透する可能性がある。

- (4) 圧密度が 80%を超えた状態で杭を打設すると臭化物イオン相対濃度差が 0.10 を超えることがなかったため、杭打設による汚染水浸透の影響はないといえる。
- (5) 圧密度が 80%以下で杭を打設した場合には、粘土層上層部で臭化物イオン相対濃度差が 0.10 を超える地点が存在したため、粘土層上層部～中層部にかけては杭打設により汚染水が浸透する可能性があると考えられる。しかし、粘土層底部では臭化物イオン相対濃度差が 0 に近い値となっていることから、圧密度が低い地盤でも杭を打設することによる遮水層への影響はないと考えられる。

参考文献

- 1) 菊池喜昭, 菅野高弘: 環境リスク面からとらえた廃棄物の地盤工学的利用, 地盤工学会誌 pp.28-29, 2008.
- 2) 蔦川徹, 森脇武夫, 岡本拓, 渡辺修士, 平尾隆行: 基礎杭打設による海面処分場の底面遮水工に与える影響, 第 17 回廃棄物学会研究発表会, pp.916-918, 2006.
- 3) 菊池喜昭, 森脇武夫, 勝見武, 平尾隆行, 蔦川徹, 服部晃, 岡本功一, 山田耕一, 佐々木広輝: 管理型海面廃棄物処分場に打設する基礎杭が底面遮水基盤に与える影響, 港湾空港技術研究所 資料 No.1252, 2012.
- 4) 平尾隆行, 森脇武夫, 菊池喜昭: 管理型海面廃棄物処分場の底面遮水基盤に打設された杭周辺地盤の遮水性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.73, No.1, 67-82, 2017.
- 5) 平尾隆行, 下所諭, 福原和頭, 蔦川徹, 森脇武夫, 小松登志子: 海面管理型廃棄物処分場の底面遮水工に及ぼす基礎杭打設の影響, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.1212-1214, 2003.

28. 既存杭引抜きおよび抜き跡地盤埋戻し技術の高度化

(株)マルシン
芝浦工業大学
明石工業高等専門学校

桑原 秀一
稲積 真哉
○橋本 功

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に大量に建設された建築物や道路構造物の老朽化が進んでおり、近年これらは深刻な問題として露呈してきている。また、東日本大震災による国民の防災意識の向上および人口減少による公共施設の利用者減少などに伴い、構造物の解体、建替え需要はますます増加している。我が国の都市の多くは軟弱地盤上に位置しており、多くの既設構造物は杭基礎を使用している。そのため、既設構造物解体後の土地において新たな土地活用を図る場合、新設構造物の杭基礎や山留め壁などに干渉しないよう既存杭を撤去しなければ、新設杭や山留め工事などの工期および品質に悪影響を与える。また、地中に残存した既存杭に有用性がない場合は産業廃棄物として扱われるため、土地売却取引などにおいては瑕疵としてしばしばトラブルの原因となる¹⁾。

既存杭引抜き工事において既存杭の地中残置と抜き跡地盤の不良化という2つの大きな問題が未だ解決されない。本論文では、杭先端パワーチャッキング工法（PG工法）による既存杭引抜き工事の品質向上、安全性向上および従来工法で頻繁に発生していた施工トラブルや様々な問題点の改良について、施工理論より明らかな知見および実施工例を用いて示す。

2. 杭先端パワーチャッキング工法（PG工法）

従来工法によって生じる施工上の問題点を解決するべく開発された新工法が杭先端チャッキング工法である。特徴としては、ケーシング先端に装備されたチャック爪によって既存杭を抱えこみ、既存杭をケーシングに内包した状態で引上げを行い、それと同時にケーシング先端部からの充填材吐出による引抜き孔の埋め戻しを行う点にある。

2.1 施工手順

- ① 既存杭の杭頭を着工前に事前測量を行う。
- ② 測量された杭芯より逃げ芯を直交2方向に打ち込み、定尺棒を用いてケーシングの中心を杭芯にあわせる。
- ③ ケーシングの鉛直精度を確認して掘削を開始

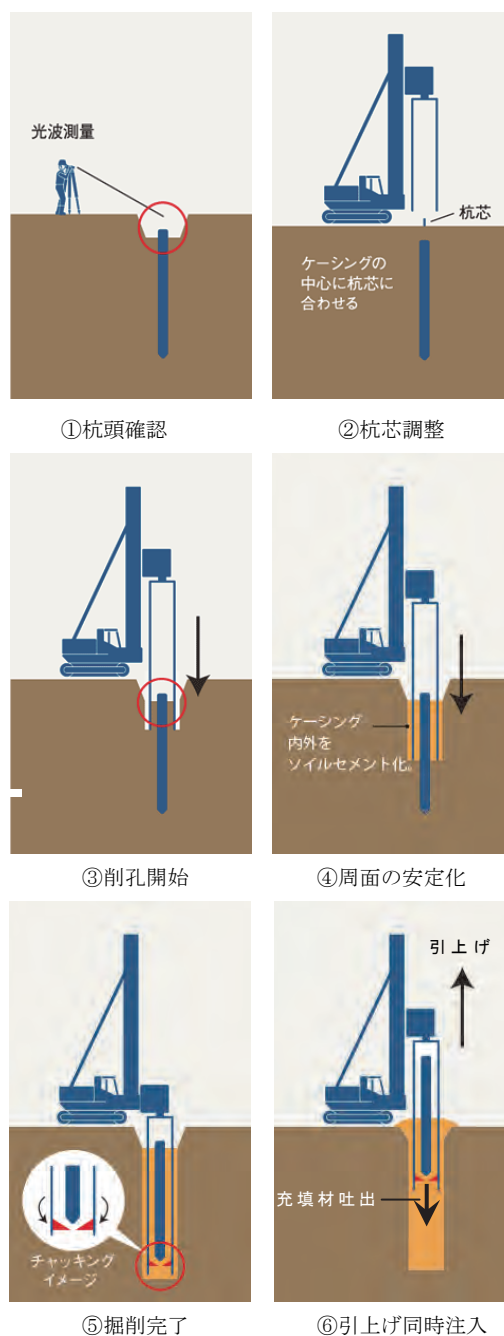


図-1 PG工法の施工手順

する。ケーシングは既存杭の傾斜に沿って追隨するため、ケーシング傾斜角度にリーダー

角度を調整する。

- ④ 掘削時にケーシング先端部から水またはセメントミルクを吐出し、ケーシング内外を泥土化またはソイルセメント化する。これにより地盤の掘削抵抗を減少させ、孔壁の崩壊やケーシング内の土砂の供回りによる既存杭の破壊を防止する。
- ⑤ 掘削完了後、押圧装置を作動させ既存杭をチャッキングする。
- ⑥ 充填材を吐出し、流量計により必要注入量の確認を行いつつケーシングを引き上げる（図-1 参照）。

2.2 杭先端チャッキング方式の有用性

(1) 事故の発生抑制

既存杭の引抜工法として、一般的にケーシング縁切り工法が採用されている。施工手順としては、地盤内に存在する既存杭の外周をケーシングにより削孔して摩擦抵抗を解放する。そして、ケーシングを引き上げた後に既存杭にワイヤーロープを玉掛し、クレーン等によって引き抜くことで地盤内から既存杭を撤去する。この工法では、ワイヤーロープを既存杭に玉掛するためにケーシングを一旦地上に引き上げる必要がある。その際の孔壁の崩壊や土砂の落ち込みによって既存杭周面の摩擦力が増加し、引抜開始と同時に想定以上の荷重がかかったワイヤーロープが破断した事例がある。また、引抜いた杭の引き倒しの際に杭が折れ、引抜杭の落下、ワイヤーロープ破断の反動による重機の転倒などの二次災害を引き起こす可能性がある²⁾。

PG 工法ではケーシングを一旦地上に引き上げる必要がないため既存杭周面の摩擦増加はなく、ワイヤーロープも使用しないため、従来工法のように引抜き時に想定外の荷重がかかることに伴う事故の危険性は存在しない。また、引抜杭の引き倒し作業はなく、ケーシングに内包している引抜杭をケーシング下部から排出するため、杭の破損がある場合でも安全に取り出すことが可能である。よって PG 工法では、従来工法における重大事故発生の可能性を排除しており、より安全性の高い工法であるといえる。

(2) 既存杭の確実な撤去

地盤内の既存杭が、打撃工法による打設の影響や上下杭の継ぎ手不良、打設中の破損等によって分裂している場合が多く存在する。これらの既存杭を従来工法を用いて撤去する場合に、ワイヤーロープによる引抜時に既存杭が分離し、地盤内にその一部が残存する可能性がある³⁾（図-2 参照）。残置杭が新設杭に対して及ぼす影響については不明な点が多いが、新設杭に干渉する場合には施工上の大きな障害となることは明らかである。また、

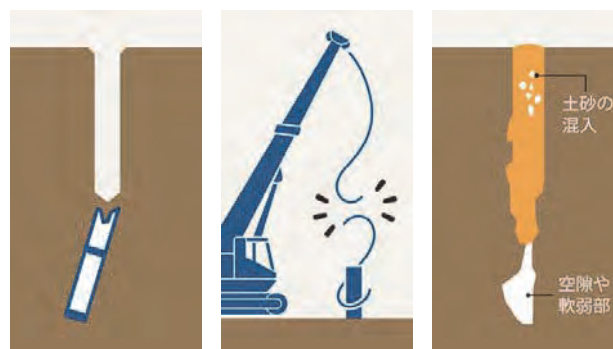


図-2 従来工法における主な問題点



図-3 破損・分離しやすい既存杭の例

新設杭に干渉しない場合であっても、地震動の検討の際に杭の水平地盤ばねの評価に影響を及ぼす可能性が示唆されている⁴⁾。後世にわたって土地の活用を繰り返していくには、既存杭を確実に撤去することが必要であるといえる。

PG 工法では地盤内の既存杭全体をケーシングで下部から抱え込んで引き上げるため、中折れ杭、破損杭、ジョイント部未接合杭などの従来工法では引抜きが難しいとされていた杭も確実に撤去できる。また、既存杭の周囲もケーシングで内包することから、従来工法では杭から剥離して残存する可能性が高かったセメントミルク根固め部なども同時に撤去することが可能であり（図-3 参照）、今後、必須となる拡大根固め杭などの根固め部も確実に撤去することができる。

(3) 杭長不明な場合の引抜き

過去の記録等が無く周辺の施工実績をもとに杭長を仮定して工事に着手する現場が存在する。従来工法の場合、実際に施工して杭長が長い場合には、予定深度削孔後にケーシングを引き上げ、ワイヤーロープ掛けによる引抜作業時に周面抵抗による負荷で引抜きが行えない時に初めて杭長が長いとの判断となる。つまり、ケーシング内に杭があるのか又は杭先端を越えて削孔しているかの判断が不可能である。しかし、PG工法の場合はチャック爪の突出し操作によって確認が可能である(図-4参照)。ケーシング内に杭がある場合はチャック爪の突出しが途中で止まり、ケーシング削孔が杭先端の所定位置を通過している場合はチャック爪が全長突出する。押圧装置にある突出確認部のストローク幅により地表にて目視で確認することができる。

(4) 杭頭が深い場合の引抜き

地下構造物の解体撤去後や、土壤汚染による土砂入れ替え時に杭を地中でカットした等で杭頭が深い場合、従来工法ではワイヤーロープの玉掛け時に空堀部分の土砂の崩壊や杭の倒れが発生し、杭頭にケーシングが被らず玉掛けできない可能性がある。つまり、既存杭の引抜きが行えない場合がある。

PG工法ではケーシング削孔後、ケーシングに既存杭を内包して同時に引き上げるので、従来工法と違い杭頭部ワイヤーロープ掛けを要しない。よって、既存杭の杭頭が深い場合(地盤面より最大-10.3m実績)であっても、既存杭の位置確認のための事前測量を行うことで、地盤面からの引抜施工を確実に行う事が可能である。隣接構造物に近接して施工する場合で、杭頭が深い場合でも従来工法のように頭出しの為の掘削は不要であり、地盤沈下等の隣接構造物への影響を抑制することができる。

2.3 最深部からの同時注入方式の有用性

(1) 原地盤の復元性の向上

文献⁵⁾では、既設構造物の撤去に伴う既存杭引抜きが地盤内空洞として存在することを仮定した上、2次元全応力解析の実施によって、以下を明らかにしている。

既存杭引抜きを空洞として放置している場合、両側の地盤が引抜きに倒れるように変位し、引抜き付近の地表面で著しく地盤沈下が発生する。杭引抜きに充填材を注入した場合、横方向に一体となって変位し、引抜き付近の地表面で微小な地盤沈下が生じる。また、地震動が作用した場合、引抜きを空洞として放置しているとき地表面の広い範囲において非常に大きな沈下が発生するのに対



図-4 チャック爪の突出

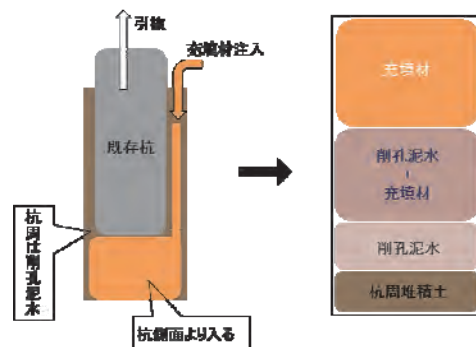


図-5 抜き跡地盤の不良化

して、引抜き孔に充填材を注入した場合、沈下は発生しなくなる。これらのことから、引抜き孔に対して充填材による埋め戻しを行うことが、地盤の安定化に対して有用であることが分かる。

加えて、充填材の強度が原地盤の強度に対して過度に小さいと、周辺地盤が引抜き孔部へ沈み込むように応力が作用するため、引抜き孔が存在しない地盤の挙動と大きく異なる可能性がある。充填材の強度が原地盤の強度に対して過度に大きいと、周辺地盤に作用する応力が大きくなり、地盤の変位が大きくなる可能性がある。よって、充填材の強度を原地盤と同程度にすることで、原地盤の復元性を高めることが充填材による引抜き孔の埋戻しにおいて重要である⁵⁾。

従来工法の場合には工法の性質上、充填材は引抜き孔上部からの流し入れとなる。よって、深度方向に関係なく全長にわたって確実に充填材を注入することは困難であり、土塊等の落ち込みも懸念される(図-5参照)。不均一な充填材注入は空隙や軟弱部を発生させ、当該地の陥没、周辺地盤の地盤沈下、作業地盤不良による重機の転倒などの重大な事態を引き起こす原因となる。また、埋め戻し箇所周囲の地盤が緩み、新設杭の周面抵抗が発揮できない場合や、杭先端地盤を既存杭の引抜作業時に乱すことで新設杭の先端支持力が発揮できない場合、新設杭が傾斜や偏心を起こして再施工に至る場合もあり、新設杭の施工品質及び工期への

大きな影響を与える⁶⁾。

PG 工法においては既存杭の引抜き作業をしながらケーシングの先端部から充填材を注入していくため、引抜き孔最深部からの充填材注入が可能である。これによって、引抜き孔全長にわたって均一な充填を行うことが可能となり、不完全な注入に伴う空隙や軟弱部の発生、杭孔の崩壊を抑制することが可能となる。また、地盤の各層に合わせて、強度の異なる充填材を鉛直方向に重ねて注入する工法を採用することが可能となる。よって、適当な充填材を選定し、PG 工法を用いることで原地盤の復元性を大幅に高めることが可能である。

(2) 作業工程の簡略化

従来工法においては、既存杭の引抜きおよび抜き跡地盤の埋戻しにおいて、

- ① ケーシングによる既存杭周囲の削孔
- ② ケーシングの引上げ
- ③ ワイヤロープの玉掛け
- ④ 既存杭の引抜き
- ⑤ 充填材による引抜き孔の埋戻し

という工程を踏む必要がある。しかし、PG 工法ではケーシングの先端から充填材を吐出可能であるため、既存杭引抜き作業と同時に引抜き孔への充填材注入が行え、既存杭の撤去と同時に抜き跡地盤の埋戻しが完了する。つまり、従来工法における作業工程②、④、⑤の三工程が一工程で行われるのと同義である。従来工法における作業工程を省略することになり、工期短縮につながる。また、引抜き作業と同時に充填材注入が行われるため、早急に抜き跡地盤の安定化を図ることができる。

2.4 施工管理装置

杭抜き工事を一元的に管理できるシステムであり、施工管理品質の向上と総合的な施工記録を収集することができる(図-6参照)。削孔深度などの施工状況をリアルタイムで確認することが可能であり、充填材の注入量を計算して示すため現場管理業務を簡略化することができる。

PG 工法では引抜き注入時に、引抜き孔上部の液面管理を行う(図-7参照)。施工管理装置によって算出される1mごとの規定量の注入と液面管理による必要量の注入に応じた引抜き速度を確認しながら引き上げを行い、周辺地盤の崩落等を防止するとともに引抜き孔全長にわたり確実な充填材注入を可能とする。充填材の注入量は、ケーシング削孔時または既存杭引き上げ時の引抜き孔の崩壊を考慮しない規定量と、崩壊した部分を満たすに必要な量との総和が引抜き注入量となる。また、液面管理を行うことにより、予定よりも引抜き孔が拡大した場合でも確実に必要量の充填材を注入することが可能である。

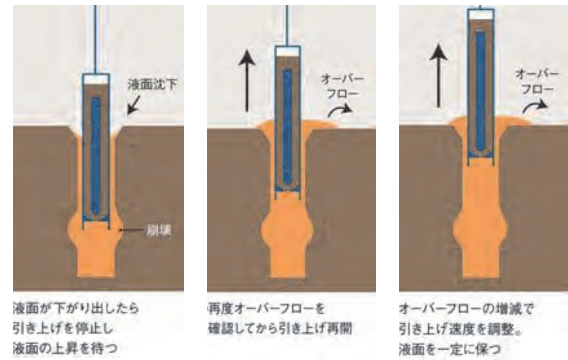


図-6 PG 工法施工管理装置

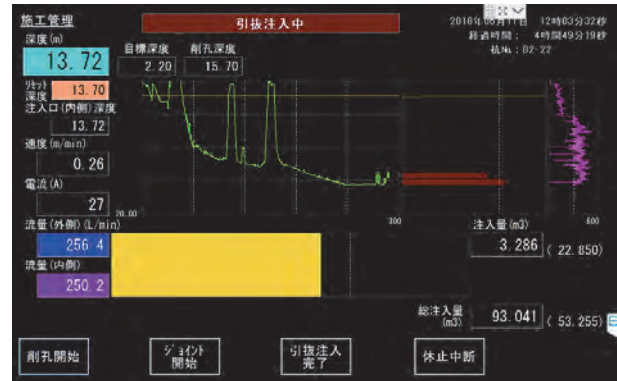


図-7 液面管理による充填材注入

3. PG 工法における抜き跡地盤の埋戻し

3.1 既往の充填材

既存杭引抜きに伴う引抜き孔の発生は地盤沈下等を誘発するが、充填材による埋め戻しを行うことで、大幅に改善することが明らかとなっている⁷⁾。既存杭引抜き孔に対する充填材は大きく分けて、土砂、流動化処理土、貧配合セメントミルクの3種類を挙げることができる。

土砂による埋め戻しは、施工が容易且つ安価である点が利点として挙げられる。しかし、既存杭引抜き孔の埋戻しには転圧技術が存在しないことから、均一な充填が難しく、安定した強度を確保できない。また、原地盤に対して比重の軽い土砂を埋め戻したことにより、その後1ヶ月程度まで埋め戻し部の沈下が発生した事例や、大雨の影響で沈下、陥没した事例がある⁶⁾。

流動化処理土は土砂、水、セメント系固化材を配合して得られる充填材であり、土砂に建設汚泥を用いるリサイクル材である。高い流動性とセメント系固化剤による自硬性を有するため、微小な空間へも充填されていき、締固め不可能な空間でも強度を発揮するという特徴を持つ。遮水効果を有するため安定した強度を発揮する利点がある。しかし、流動化処理土は外部からの搬入となるため、使用できる現場は搬入可能な地域に限られ、施工状況に合わせての打設が難しい⁸⁾。

貧配合セメントミルクは、水、セメント、ベン

トナイトを混合した充填材である。高い流動性と自硬性を有するため、微小な空間にも充填され強度を発揮する。また、水、セメントの配合管理によって強度などの品質管理が容易であり、汎用のプラント設備にて混練作業ができるため、現場の施工状況に合わせて適時作製することが可能である⁶⁾。PG工法では、従来工法に比べての作業工程省略による工期短縮が特徴であり、その利点を最大限に発揮可能な充填材である。

しかし、一般的に貧配合セメントミルクは、水とセメントの材料分離により深度方向によって強度が不均一になる可能性がある。また、地下水浸入によって所定の値よりも強度が低下する、あるいは固化不良が起こるなどの可能性がある。

3.2 充填材に求められる性能

PG工法により、既存杭引抜き孔の最深部から引抜き孔の全長にわたって確実に必要量の充填材を注入することが可能となり、従来工法において発生していた土塊の落ち込みや軟弱部の発生による埋め戻し地盤の不良化は改善される。また、充填材として貧配合セメントミルクを用いることで、対象とする原地盤に合わせて強度調整が容易に行え、施工状況に合わせて適宜現場での充填材の作製が可能となる。よって、PG工法による既存杭の引抜きおよび抜き跡地盤の埋め戻し作業を停滞させることなく実施できる。

しかし、貧配合セメントミルクは材料分離を起こしやすく、材料分離を起こすと深度方向によって質的に不均一になってしまい、既存杭引抜き孔の全長にわたって均質に所定の強度が発揮されない。また、地盤内では地下水が浸入してくる可能性があり、地下水の影響によって、充填材の固化不良を誘発する恐れがある¹⁰⁾。あるいは、充填材に地下水が混入することで配合設計時の水量を上回り、所定の強度が発揮されない問題が考えられる。

上記の課題を解決し、対象地盤の復元性を高めるためには、材料分離を起こさずに深度方向に関係なく均質な強度を発揮する性質、および早急にゲル化性能を発揮して地下水の浸入を防止する性質を有する充填材が求められる。

充填材による埋め戻し処理後の地盤には、新設工事の施工時に掘削可能、且つ崩壊しない強度が必要であり、理想的には原地盤と差がないことが望ましいとされるが、地盤は様々な地層が重なっており、要求される強度は層ごとに変化していく⁴⁾。早急なゲル化は硬化を待つ時間のロスをなくすことができ、地盤の各層に合わせて強度の異なる充填材を鉛直方向に重ねて注入する工法を採用することが可能となる。よって、材料分離を起こさず、早急なゲル化性能を持つ充填材を用いることで、PG工法における抜き跡地盤の埋戻しによる、原地盤の復元性を大幅に高めることが可能である。

また、現状として既存杭引抜きとその後の埋め戻し処理が及ぼす影響について精査されることは少なく、その評価に関して適切なマニュアル等も存在しない⁹⁾。充填材の改良は元より、既存杭引抜きとその後の埋め戻し処理について、指針等の策定は急務であるといえる。

4. PG工法による実施工例

4.1 水中に杭頭がある際の引抜き（事例1）

表-1に水中に杭頭がある際の引抜き施工事例の詳細を示す。橋脚や橋台の基礎杭の場合、基礎を撤去すると既存杭頭が水位より下がる場合がある。従来工法ではケーシングによる既存杭周囲の削孔完了後、ケーシングを地上に引き上げ、再度、既存杭にワイヤーをセットするために、ケーシングを被せる作業をしなければならないが、杭頭が水中にあると杭の位置の特定が困難になる（図-8参照）。PG工法では、既存杭周囲の削孔完了後に杭をチャッキングし、ケーシング引き上げと同時に既存杭を引き抜くので水中に杭頭がある場合でもスムーズな施工が可能である。

4.2 新設杭干渉部での長尺杭の引抜き（事例2）

表-2に新設杭干渉部での長尺杭の引抜き施工事例の詳細を示す。既存杭引抜き後の新設杭打設においては、抜き跡崩壊や杭芯ズレの発生などのトラブルが多く発生している。特に新設杭干渉部における長尺杭の引抜きでは、新設杭施工時に傾斜削孔となった場合の修正の困難さや品質の低下（杭芯ズレと斜杭）は大きく、細心の注意を払わなければならない。この施工例は中掘工法で打設された長尺（67m）のPC杭の引抜きであり、まず残置の問題が懸念されたが、問題なく引抜きは完了した（図-9参照）。また、新設杭は既存杭と同程

表-1 施工事例1の詳細

工事内容	橋脚の基礎杭の引抜き
杭明細	PHC杭（φ500, L=7.0m, 10本）
使用機械	TK-750（1台、オーガー） アボロ 12000（ケーシング φ800）



図-8 水中に杭頭がある際の引抜き

表-2 施工事例2の詳細

工事内容	新設杭干渉部の既存 PC 杭引抜き
杭明細	PC 杭 (φ600, L=67.0m, 1本)
使用機械	DH-608 (1台, アースオーガー) SMD-240HP (ケーシング, φ800)



図-9 新設杭干渉部での引抜き (67m)

度の長さの場所打ち杭であり、崩壊や傾斜削孔の問題も懸念されていたが、問題無く施工が完了している。当現場では引抜き孔に最深部より適当な充填材と量(当現場は $qu28=0.3 \text{ N/mm}^2$ のセメントミルク、注入量は削孔体積量)を注入することにより、長尺杭の引抜きに於いても新設杭の打設に悪影響を与えない引抜き孔を形成できた。

5. おわりに

本論文では、杭先端パワーチャッキング工法(PG工法)の有用性および、PG工法を用いることによる、地盤内の既存杭撤去技術の安全性、品質の向上について示した。示された性能について以下にまとめる。

- (1) ワイヤロープを用いないため、それに伴う事故の危険性が存在しない。
- (2) チャッキングにより杭全体および杭の周囲もケーシングに内包して引き上げるため、極端な斜杭や湾曲杭を除いた、あらゆる状況の既存杭を地盤内から撤去可能である。
- (3) ワイヤロープによる玉掛けを要しないため、杭頭が深い場合でもチャッキングによる引抜きが可能である。
- (4) 杭の引抜きと同時に抜き跡地盤への充填材注入を行うため、従来工法と比較して工期が短縮される。
- (5) 引抜き孔最深部からの充填材注入により、引抜き孔全長にわたって均一な充填を行うことが可能となり、従来工法における引抜き孔上部からの不完全な注入に伴う空隙や軟弱部の発生、杭孔の崩壊を抑制できる。
- (6) 施工管理装置と液面管理により、引抜き孔に

必要な量の充填材注入が可能となる。

- (7) 対象とする原地盤と同程度の強度を発揮する充填材を用いることで、原地盤の復元性を高めることができる。

PG工法によって引抜き工事の施工上の問題点は大きく改善されるが、既存杭の抜き跡地盤の安定化については、充填材等の規定がなくいまだ多くの問題点を抱えている。また、残置杭が新設杭および周辺地盤に及ぼす影響についても解明されていない現状である。後世においても土地利用が可能となるように、引抜きから抜き跡地盤の安定化までの技術を確立せねばならない。

参考文献

- 1) 村上隆生：基礎杭の残置、埋戻し部分の地盤支持力の瑕疵を否定し、代理業者の説明義務違反も否定した事例, No.82, pp.166-167, 2011
- 2) 桑原秀一・濱田聡一郎・鳥越友輔・稲積真哉：既存杭の引抜き工法の開発と引抜き孔が周辺地盤に及ぼす影響について, 第71回土木学会年次学術講演会概要集, 第VI部門, pp.41-42, 2016
- 3) 桑原秀一・濱田聡一郎：構造物とりこわし工における既存杭の引抜き工事について, 平成27年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 新技術・新工法部門, pp.1-6, 2015
- 4) 桑原文夫：杭の支持層到達を確保するための方策, 基礎工, Vol.45, No.8, pp.2-7, 2017.
- 5) 納庄一希・鳥越友輔・稲積真哉・桑原秀一：杭基礎の引抜き孔が周辺地盤の動的挙動に及ぼす影響の解析的検討, 第51回地盤工学研究発表会講演集, pp.1201-1202, 2016.
- 6) 既存杭引抜き工法協会：既存杭引抜き工事「その目的から計画～工事」, 既存杭引抜き工法協会, pp1-11, 2017.
- 7) 川原知也・稲積真哉・桑原秀一・江口忠臣：既存杭抜き跡地盤の埋戻し処理と周辺地盤の沈下挙動に関する解析的検討, 第53回地盤工学研究発表会発表論文集, pp.867-868, 2018
- 8) 鳥光照雄・岩淵常太郎・坂本克美・小橋秀俊：土を固める原理と応用, 土と基礎, Vol.52, No.12, pp.101-108, 2004.
- 9) 桑原秀一：既存杭引抜き工事の問題と杭先端パワーチャッキング工法, 地盤工学会誌, Vol.66, No.5, pp.46-47, 2018
- 10) 崎浜博史・堀井宏謙・八重樫光・西正晃：既存杭撤去後の掘削孔に埋戻された泥砕固化体の品質調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.447-448, 2015

29. グラウンド改良工事における小型ロードスタビライザの運用

鹿島道路株式会社
鹿島道路株式会社

○ 端 孝之
新満 伊織

1. はじめに

一般的なロードスタビライザ(写真-1)は最大1m程度の路床や路盤といった地盤改良に使用されている機械であるが、200mmまでの浅い施工深さに特化した小型のロードスタビライザ(写真-2)を開発し、2012年から主にグラウンド表土の改良工事の現場で供用してきた。今日、グラウンドの表土改良で一般的に使用されている農業向けの耕耘機との比較を行い、性能・機能についての評価を行ってきたのでこれを報告する。



写真-1 一般的なロードスタビライザ



写真-2 小型ロードスタビライザ

2. 背景

校庭やグラウンドなどの運動施設の表土は、長年の使用により圧密されて透水機能が低下し、不陸が発生して水溜りが出来るようになり、運用に

支障をきたすようになる。そのように機能が低下した状態に客土、或いは改良材を敷きならして、攪拌、混合・分粒改良を行うことで機能回復を図る事が出来る。

近年では新規にゴルフ場を造成するような市街地から離れた場所の大規模な工事が減り、都市部での比較的小規模なグラウンド等の改良工事が増加する傾向にある。以上のことを踏まえ新たに開発したのが当論文の小型のロードスタビライザである。

3. 概要

当機械は車体後方のフード内にあるロータを回転させ、機能の低下した表土をビットで攪拌混合し改良を行う。通常のロードスタビライザと異なるのは、この時、小石や粗粒塊などは下層へ、細粒分は表層へとフード内にあるスクリーンで分離させる事が出来る事である。除礫作業が不要で土のかきほぐし、混合作業を行う事が出来る。攪拌・分粒までを1パスの施工で行う事が出来るので、効率的な工法である(図-1)。また、下層へ分離された石の層は排水層として機能する。同時に補充材や改良材を添加・混合することで用途に応じたグラウンド等にリフレッシュする事が出来る。本体の寸法と重量はセルフローダで回送できるように全幅は2450mm、重量は12.5トンとなっている。トレーラを使用せずに回送できるため、回送コストの低減が可能で、狭い現場内での移動のし易さなども考慮している。

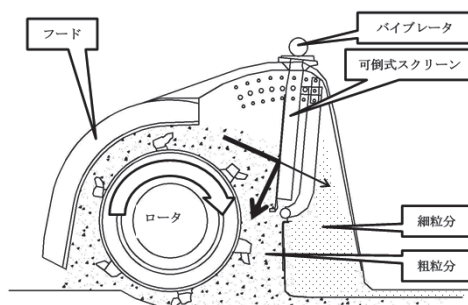


図-1 攪拌・分粒のイメージ

4. 機能・性能

施工深さ100～200mm程度の範囲に特化しており、施工幅員が2000mm、施工速度は4～10m/min程度であるが、深さや土の固さによって変動する。折り返しの移動なども含み、1日(実働8時間)で約1000～2000㎡程度の施工を行う事が可能である。車体は扱いやすさを重視し、上面が平坦になっており左右・前方の視界を確保している。使用場所としては一度整備済みであるグラウンド等を想定しており、浅い施工深さの改良に特化する事で機械全体を従来のロードスタビライザより小型化している。分粒は、フード内にスクリーンを組み入れ、粗粒分はスクリーンに当たることで前方へ落とし、細粒分は網を通過し後方へ落とすことにより行っている(写真-3)。スクリーンは網目のサイズの異なるものを複数製作しており、土質に応じた網目の細かさのものを使用する事ができる。また、角度調整が可能であり、含水比等状況に応じて分粒に最適な角度に調整する事ができる。エンジン出力は131kWのものを使用しており、機能を限定することで通常のロードスタビライザと比較して半分程度の出力となっている。燃料消費量は10ℓ/時間程度で同じ面積の施工で比較すれば少なくなる。主要諸元表を表-1に記す。



写真-3 スクリーンを通過しない石

表-1 主要諸元表

全長	6300mm
全幅	2450mm
全高	2555mm
総重量	12500kg
機関出力	131kW
混合出力	105kW
混合深さ	最大200mm
混合幅	2000mm

5. 施工事例

これまで神社の参道や、各地のグラウンド等で施工を行ってきた。具体的には、学校の校庭や野

球場、特殊なものでは馬術場などである。

神社の参道で施工した例では総面積約5000㎡、深さ150mmでの施工を行った。施工対象は参道の中央付近幅員5mで、左右両端は通行帯として確保された。現場の路面は踏み固められた状態で、轍状の変形も一部に存在しており、表面には浮石も散見され、水溜りが発生している個所があった。(写真-4)ここでは表土の攪拌・混合、分粒による透水性の回復と、浮石の除去を目的として施工を行った。



写真-4 改良前表土

この現場での施工速度は5m/min程度であり、現場の施工条件のため1日約1000㎡の施工に留まった。これは施工当日中に施工済みの箇所を解放する必要があり、当機械の稼働時間は8時～13時の間で制限されたためである。施工前後の状態を比較すると写真-5の左側が施工前、右側が施工後である。



写真-5 改良前・後の状態

混合改良施工前は小石が表面にも転がっているが、施工後は表面には見受けられなくなっているのが分かる。また、施工当日に降雨があったが水溜りが発生することも無く、排水機能が回復されたことが確認された。また、コンパクトに作られた本機では限られた施工エリア内での他の機械とのすれ違いなども問題なく行うことができ、円滑に施

工を進めることができた。

次にグラウンドでの施工の例として、北海道の中学校グラウンドの例を上げる。水捌けの改善を主な目的として施工を行ったものである。この現場では表土の改良材として、雑草の発生抑止効果や表土の飛散防止効果が期待される植物系の材料(写真-7右下)を混合し、施工深さは150mmという条件で施工した。改良材が十分に混ざる混合具合に調整し、1日あたり1000㎡～1500㎡程度の施工を行うことができた。また、エンジン出力77kWの農業向けトラクタと耕耘機アタッチメントでの攪拌混合を試験的に行い、混合状態の比較を行ったが、トラクタでは同等の混合状態にするには縦横に各2回以上走行し混合する必要があると目視では判断され、改良材の混合性能では小型ロードスタビライザの方が有利であると判断された。写真-6が施工前の降雨後の状態で、1レーン分だけ試験的に攪拌した状態である。このように水捌けが悪化しており、1度水が溜まると3日程はグラウンドが使用できないような状態であるとのことであった。写真-7が改良の施工状況である。写真手前側が攪拌改良済みの箇所で、色の明るい部分は仮転圧まで完了しており、色の濃い機械の走行位置周辺の部分は攪拌改良のみが終わり、未転圧の状態である。結果として水捌けは改善され、降雨後でも1日あればグラウンドが使用できる状態にまで回復していることが1年後の追跡調査でも確認できた。



写真-6 改良前・降雨後の状態



写真-7 攪拌改良～仮転圧まで

次も学校のグラウンドであるが兵庫県での小学校校庭施工の例である。当初は全体の半分程が工事区画として確保されている状態で、残りは共用中という状態であった。この現場でも植物性の改良材を混合して施工を行い、深さは150mm、面積は合計4400㎡である。写真-8のように埋設物や遊具の関係もあり狭隘な場所の攪拌施工もあったが問題なく入り込んで施工を行うことができた。



写真-8 狭隘な箇所の施工

次に野球場の改良工事である。この現場は企業敷地内の多目的グラウンドと隣接する、野球場部分の改良を行ったものである。水捌けの改善を主な目的として施工を行った。埋設物の関係で施工深さは100mmとしており、面積は約2800㎡で、1日で施工を行った。1日での施工量が他現場より多いのは、浅い深さでの施工であるため、攪拌時に速度を出しやすいためである。写真-9は攪拌改良後、ブルドーザで整形しコンバインドローラで転圧をしている状況である。作業手順は現場の条件や状況により異なるが、改良材の敷き均し、小型ロードスタビライザでの攪拌改良、ブルドーザ・モータグレーダでの整地・整形、タンデムローラ・タイヤローラによる転圧、表面処理仕上げといった流れでの作業となる。写真-10は改良完了後の状況である。この後表面に化粧砂を敷き均し完成となる。



写真-9 改良の順次作業の様子



写真-10 改良後の状態



写真-11 試走の状況

次の現場は茨城県にある馬術場の改良を行ったものである。競技馬場として特に求められる条件として、硬さ、泥濘・水溜りができない事、グリップ力があることが求められた。表土を一部除去した上で真砂土を搬入し、さらに植物性の改良材を混合して改良を行った。このような現場では改良材を混合する場合、従来の作業手順であれば搬入土に改良材をバックホウなどで事前に混合したものを敷き均した後にさらに耕耘機を使用して攪拌を行うという作業が必要であったが、小型ロードスタビライザを使用することで、事前の混合が不要となるので作業の手数が減る。このように転石の処理が必要の無い条件でも高い混合性能を活かし作業時間の短縮が可能である。仕上がり状態の確認として馬術場オーナーに試走してもらったところ、施工直後であるため硬さについては不足を感じるが、グリップ力があり乗りやすい馬場に仕上がっているとの評価であった。写真-11は試走時の状況である。加速や方向転換などで特に荷重のかかった場所でも、深くは掘れておらず、スリップが無いことが確認できた。半年後、硬さについては追跡調査を行ったところ施工後10年経過している既設馬場と同程度の水準になっていることが確認できた。最後に2014年以降の施工実績一覧として表-2を掲載する。

表-2 2014年以降の施工実績

名称	施工年月	場所	施工面積(m ²)	種類
中学校グラウンド	2014.11	北海道北斗市	5,050	校庭
運動公園	2015.11	北海道北斗市	800	野球場
馬術場	2016.7	茨城県東茨城郡	260	競技馬場
小学校グラウンド	2016.11	兵庫県西宮市	4,400	校庭
馬術場	2017.7	茨城県水戸市	2,100	競技馬場
小学校グラウンド	2018.2	東京都立川市	7,150	校庭

6. 今後について

これまでに2012年から7年間小型ロードスタビライザを運用し、1日での歩掛りや改良の効果について確認してきた。今後も問題点の改善と改良を進めていく予定である。

具体的な改良としては昨今の建設業全般の課題ともなっている情報化施工への対応が挙げられる。現在施工深さの調整はガイドを見ながらオペレーターが操作しているものであるが、当機械には元々センサー制御をすることができる電気、油圧系統が備わっているため、それを利用して2D、3D-MCによる施工を行うには、それほど機械側にも大規模な改造を施す必要が無く、既存のシステムを応用することができる。機械の構造は、ロータは左右のシリンダを個別に動かして斜めにすることも可能であり、ブルドーザのブレードと似たような制御を行い施工することも可能と考えられる。さらに、埋設物の位置と深さが分かっている場合は接近時の警告機能などにも利用できる。また、攪拌漏れ、ムラを防ぐためGNSSを利用した攪拌走行位置の表示、記録を行う機能の利用も、既存のローラーの転圧管理システムと同等の機能で行うことができるため応用の検討を行いたい。

7. おわりに

当機械の概要をまとめる。

- ・当機械、小型ロードスタビライザは、グラウンド等表面の改良に特化した分粒装置付きのロードスタビライザである。
- ・車体を小型・軽量にすることで、セルフロードでの運送が可能であり、施工エリアの限られた現場でも運用しやすい。
- ・農業向けのトラクタ牽引式耕耘機と比較した場合、混合性能に勝り、転石の処理も同時に行うことができるので省力化が可能である。

30. 現況路面データを基準に用いた3D切削システム

トータルステーション不要の3D-MCシステム

株式会社トプコン ○ 平岡 茂樹
 (一社) 施工技術総合研究所 八木橋 宏和
 株式会社トプコン 小川 和博

1. はじめに

舗装業界は、ICT 舗装工が施工されて2年目に入っており、維持修繕などの第2段階に移行する時期に差し掛かっている。(図-1) そこで今回、その一助となりうる道路維持修繕工の最も一般的な切削オーバーレイ工の効率向上につながるマシンコントロールシステムを紹介する。

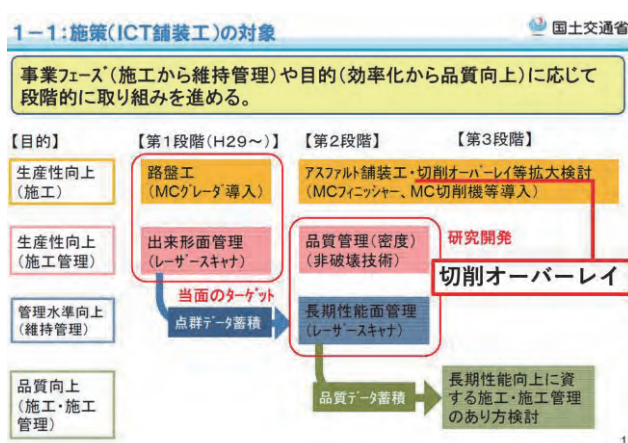


図-1 出展：国土交通省 ICT 舗装工について（国土交通省ホームページ）

従来は、現況高さから設計高さを計算して路面に切削深さをマーキングして施工していた。また、既にトータルステーション（以下 TS）を用いた3D-MCシステムも既に活用されているが、以下の課題があることから利用場面が限定されていた。

- ① 切削機の正確な位置を求めるための TS 設置に時間がかかる。
- ② 既設道路の修繕工事では、TS の設置場所が無い場合や街路樹、街灯などの障害物も多く存在し、限られた場所にしか設置できない。このため盛り替えの頻度が多くなり、大型三脚等で設置するため更に設置作業に時間がかかる。
- ③ ダンプ等により視通が遮断され、その間作業が中断するため、TS の追尾状況を監視する必要がある。

本稿では、本 MC システムの予備実験として、車載システムを台車に搭載し、システムの確実性と、従来の TS を用いた 3D-MC システムに対する作業の効率化の期待値について評価を行った。また、本システムに必要な 3 次元の現況面計測方法についても検証したので合わせて紹介する。

2. 本 MC システムについて

本システムは、切削オーバーレイ工に ICT を適用し、準備の効率化、作業の省人化と安全性の向上を図るシステムである。従来は、現況高さから設計高さを計算して路面に切削深さをマーキングして施工、また、3D-MC では自動追尾 TS を活用して設計高さにコントロールしていた。一方、本システムでは、従来の 3D-MC が高さを持つ設計面であるのに対し、設計厚さを設計面として利用している。現場施工時は、施工機械の 2 次元位置を GNSS で計測する。次に制御位置高さをソニックセンサ計測し、設計切削深さ（設計厚さ）と同じになるように施工機械を制御する新しいロジックの ICT 舗装システムである。(図-2)

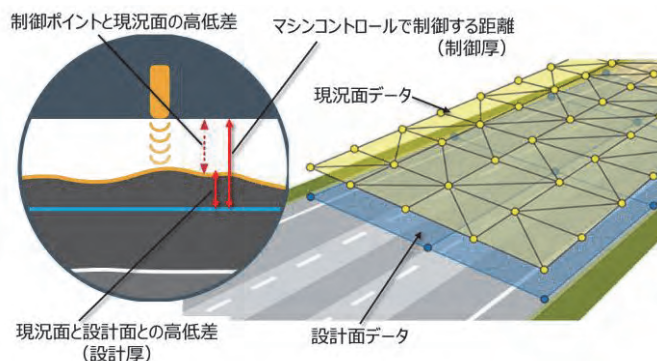


図-2 現況面と設計面の活用イメージ

作業ルーチンとしては、まず現況面データを取得し、その現況面データから設計面データ（厚さ）を作成、その2つのデータが入力された MC システムで切削機、アスファルトフィニッシャを制御

する。本稿では、本 MC システムの設計厚算出値の正確性と効果、本 MC システムに必要な現況面の計測方法につき検証した。

3. 検証実施日および場所

- ・ 検証日：平成 30 年 2 月 15 日～2 月 20 日
- ・ テストヤード概要（図-3）

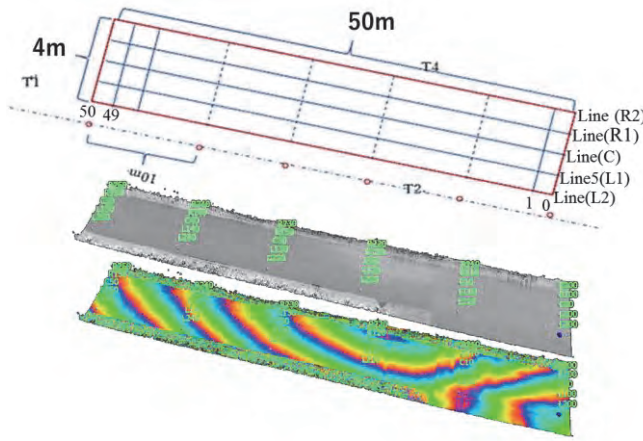
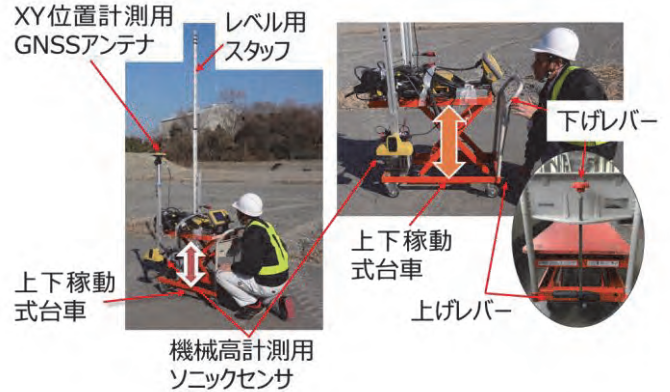


図-3 検証テストヤード

4.2 設計厚計算値検証

実際に切削工に使う前に現況面データと設計面データを入力し、専用昇降可能台車でオングレードに合わせた時の高さをレベルで計測し設計高さとの比較検証を実施した（写-1）。RTK-GNSS の位置データから施工位置を特定し、ソニックセンサで現況面計測後システムとして正しく切削厚を算出してコントロールできるか確認した。（図-5）



写-1 上下稼動式台車

4. 本 MC システムの評価

今回は、実際の切削機で検証する前段階のテストとして、本システムを台車に搭載して実験を行った。

4.1 本 MC システムの構成

本 MC システムの構成（実装例）と作業手順について（図-4）に示す。

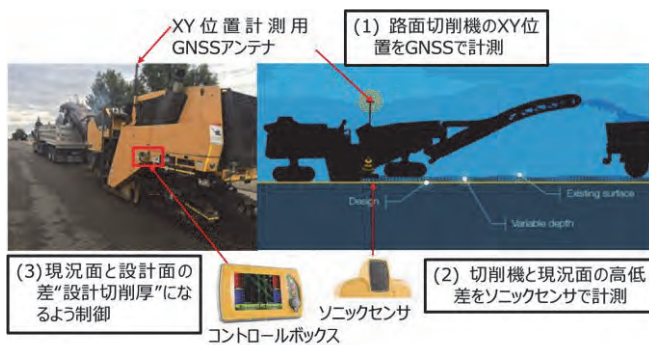


図-4 本 MC システム構成図



図-5 本システム検証状況

- ① 検証点において正しく切削厚が計算されているかを確認した。
- ② ソニックセンサの計測値により台車（切削機）を昇降した結果を計算値と比較した。

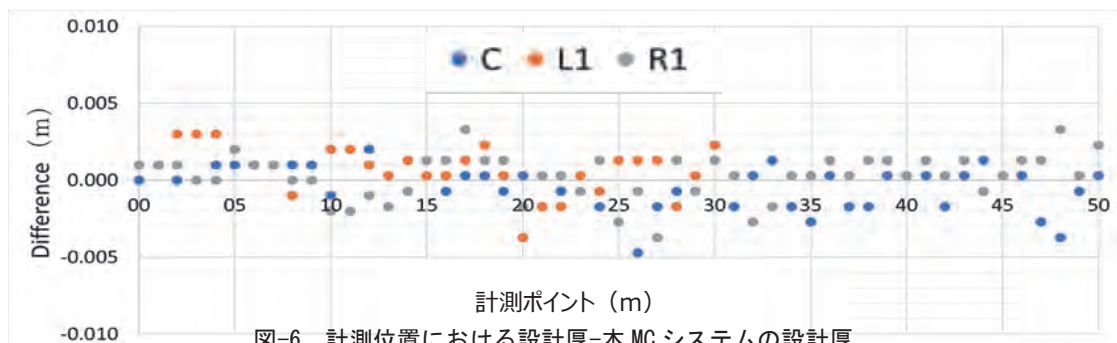


図-6 計測位置における設計厚-本 MC システムの設計厚

以下グラフは、計測位置における「設計厚一本MCシステムで計算された設計厚」をC、L1、R1ラインで1m毎に計測した結果を示したグラフである(図-6)。舗装材料が細かい舗装面では±3mm以内かつ標準偏差1.2mm、透水性アスコンの場合でも標準偏差1.5mmであり実施工でも問題なく使えるレベルと想定される。また、現地盤との比較計測用ソニックセンサの精度についても、レベルでの計測値と比較して±1mm以内であることを確認した(図-7)。

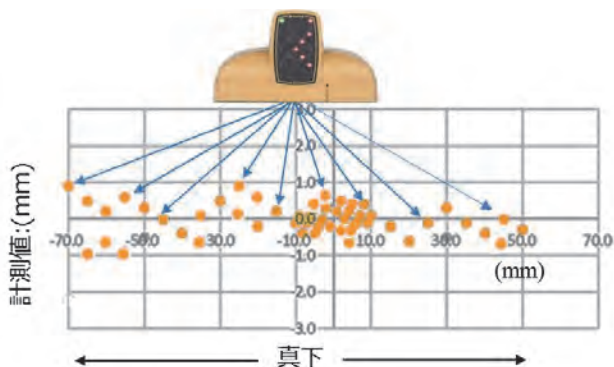


図-7 ソニックセンサ精度確認グラフ

4.3 切削工の効率化検討

本実験では、本システムの効果検証として(図-8)の3つのケースについて準備から出来形管理までの作業性を比較した。

- ・延長100m 幅員6m (2m 毎3レーン) 切削総延長300m 600 m²
- ・1レーン切削機セット5分 100m 切削時間(15m/分) 7分=12分 3レーン 36分
- ・切削作業フロー(図-8)

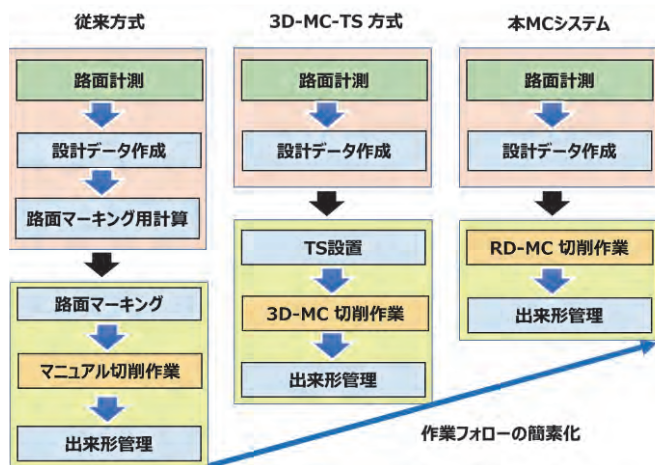


図-8 切削作業フロー比較

- ・路面マーキング 2人工 20分
- ・切削工ではオペと左右のアジャストマン2名で3人工

【TSシステム(左右制御)】

- ・TSはスタート時左右1台ずつ設置(2回), TS盛替えは片側1回(合計3回)
- ・TS設置3分 後視点観測3分 計6分 左右2ヶ所+盛り替え1箇所 計3回となり TS設置計18分(6分×3回)
- ・プリズムをロストしないよう1名TS側駐在 TSサポート 36分
- ・切削工は切削機オペ1人工のみ
- *TSを設置できる場所が限定され頻繁に盛り換えが必要な場合あり。もしプリズムをロストした場合切削作業ストップのリスクもある。

【本MCシステム(左右制御)】

- ・切削機オペ1人工 36分のみ

③期待できる効果

- ・作業時間短縮

従来は2人工56分, TSは48分, 本MCシステム(VRSの場合)は, 36分となる。本MCシステムはTS設置の準備時間が無くなり, TSシステムより25%作業時間短縮となる。従来工法と比較すると更に路面マーキング作業も不要なことから36%作業時間の短縮となる。(図-9)

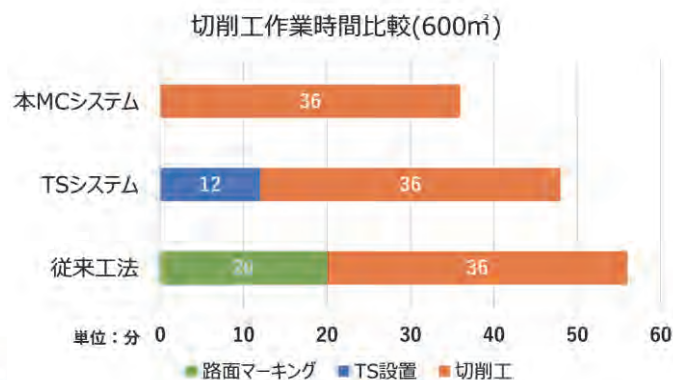


図-9 切削作業時間比較

- ・省人化

従来は, 路面マーキング作業, 左右2名のアジャストマン作業が入り, 延べ人工時間148分, TSシステムの場合, 最初の2台の機械設置作業で2人工, プリズムロスト回避のサポートで1人工を含め延べ人工時間は90分。

一方, 本MCシステムの延べ人工時間は, 切削機オペ1人工36分となる。よって本MCシステムは, 従来に比べて76%削減, TSに比べて60%削減の省人化が期待できる。(図-10)

②検証結果

【従来工法】

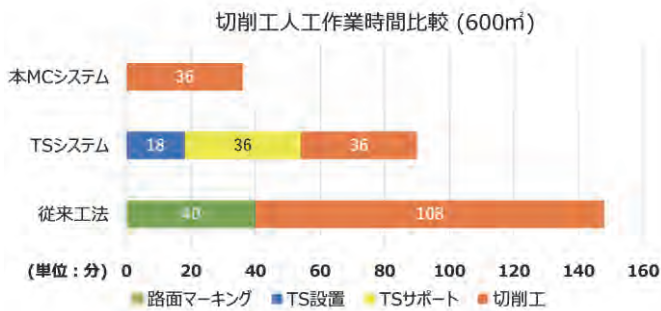


図-10 切削延べ人工作業時間比較

④従来工法, TS システムの課題解決効果

本システムを活用することにより, 以下従来工法および TS システムの課題解決効果が考えられる。

- ・路面マーキングする必要が無いため, マーキングのために道路を遮断する必要がない。
- ・TS を設置する必要がないため, TS 設置場所まで光源を置く必要がない。
- ・TS の視通を確保するため大型三脚の使用, あるいは頻繁に盛り変える必要が無い。
- ・TS を使用しないのでダンプなどの遮断によるロスもなく, TS 側に作業員を置くなどの“お守り”をしなくて良い。
- ・夜間作業は, 昼間作業より危険であり, 省人化が図れば安全性も向上する。

5. 現況面観測方法の検証

本 MC システムの利用においては, 現況面を正確に計測する必要があり, 現況面を効率的に取得する方法について検証を行った。

1m メッシュを TS (X,Y), レベル (H) で計測し, 各計測方法 (①~④) の標高を比較した。

5.1 検証計測方法

①移動式路面計測装置“RD-M1”(以下「本計測装置」という (図-11, 写-2)。



図-11 RD-M1 システム構成



写-2 移動式路面計測装置計測状況

②地上型レーザースキャナ (写-3)



写-3 地上型レーザースキャナ計測状況

③車輪移動式プリズムを用いた自動追尾型 TS (国土地理院で規定が無い TS 等光波方式) (写-4)



写-4 車輪移動式プリズムを用いた自動追尾 TS 計測状況

④ノンプリズム型 TS (2級 TS) (写-5)



写-5 ノンプリズム TS 計測状況

5.2 現況面計測精度検証結果

現況路面 3 次元データの取得について, 以下に述べる 4 種類の方法を検証した。比較検証は, 1m メッシュを TS (X,Y), レベル (H) で計測し, 各

計測方法の標高を比較した（表-1）。

5.3 現況面計測時間比較

- ・自動追尾 TS+車輪移動式プリズムの計測時間が圧倒的に短い。
- ・移動式路面計測装置は 400 m²以上になれば車輪移動式プリズムを用いた自動追尾 TS より計測時間が短くなる。
- ・ノンプリズム型 TS の計測時間は、移動式路面計測装置、地上型レーザースキャナとほぼ変わらないが自動計測機能を使えば視準作業は不要となり省人化につながる。（図-12）

5.4 現況面計測方法比較結果まとめ

現況面データ取得方法では交通規制ができる場合とできない場合があり、施工規模でも効率が変わってくるが、小規模現場では車輪移動式プリズム方式がレベルと比較しても計測時間を 64%削減できた。中規模から大規模現場では移動式路面計測装置がかなり有効だが他計測方法よりばらつきがやや大きい。

また、交通規制ができない場合は、舗装工事の要求精度を考えるとノンプリ TS あるいは地上型レーザースキャナになるが、コスト面から考えるとノンプリ TS、わだち等の詳細も計測したい場合

場合は地上型レーザースキャナとなり状況に合わせて選択する必要がある。

6. おわりに

本稿では、切削オーバーレイ工で使う最新の本 MC システム“RD-MC”の効果について、新しいロジックを使って本システムが正しく切削厚を算出しているか、作業効率も含めて検証した。その結果、目標厚さ（レベル）に比べて標準偏差で 1.2mm と高精度にコントロール可能であること、従来の TS システム（3D-MC）と比べ作業効率（省人化）が 60%向上するシステムであることを確認した。

また、本システムを活用することにより、TS の設置とサポート作業がいらなくなることから省人化だけではなく、路上の作業員削減により、夜間の安全面という点でも大きなメリットになると考える。

一方、本システムに必要な現況面データの計測方法については、①移動式路面計測装置、②地上型レーザースキャナ、③車輪移動式プリズムを用いた自動追尾型 TS、④ノンプリズム型 TS について比較実験を行ったが、交通規制ができる場合とできない場合、また規模によって使い分ける必要があることがわかった。

表-1 計測精度比較表（計測点数：n=255）

計測方法	条件	平均値 (m)	標準偏差 (m)	最大 (m)	最小 (m)	最大-最小 (m)
ノンプリズム型TS	1 mに1箇所 ファインモード	0.001	0.0009	0.002	-0.003	0.005
地上型 レーザースキャナ	ファインモード	-0.002	0.0012	0.002	-0.006	0.008
車輪移動式プリズムを用いた自動追尾TS	移動体計測	0.001	0.0019	0.007	-0.006	0.013
移動式路面計測装置 “RD-M1”	最大時速 10km	-0.011	0.0041	0.000	-0.023	0.023

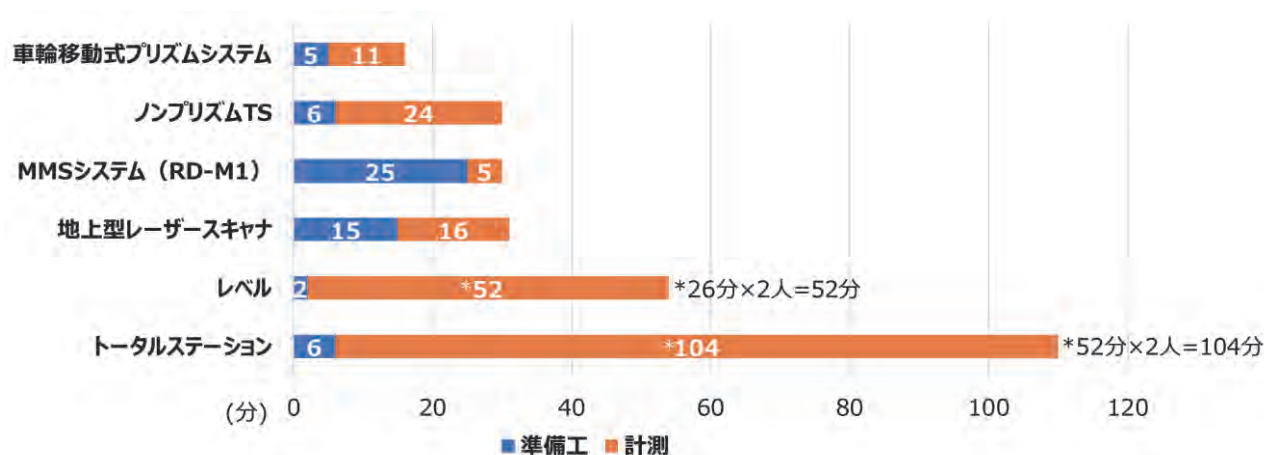


図-12 現況測量計測時間比較表 (4m×50m 200 m²)

今回の実験では、交通規制できる場合は、車輪移動式プリズムを用いた自動追尾 TS、交通規制できない場合は、既に出来形管理でも活用されている地上型レーザースキャナ他、ノンプリ型 TS の活用も効率向上に有効と考えられる。

本実験により、舗装維持管理においても ICT を用いた本 MC システムが「生産性向上」、「熟練オペレータ不足への対応」、「安全性の向上」に寄与できる可能性を確認できた。今後は、実機による効果検証等によりシステムの適用性の確認とその効果、また、極端なわだち掘れや切削機のタイヤ式とクローラ式の違いによる影響など今後の取り組み課題として検証していきたい。

本システムが舗装維持管理の生産性革命の一助になると幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省 総合政策局 公共事業企画調製課, 第1回ICT導入協議会 (平成29年3月7日開催), 【資料-4】 ICT舗装工について, P1, 2017

31. 排水機場における状態監視診断技術の適用について

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○平地 一典
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 澤口 重夫

1. はじめに

排水機場ポンプ設備は、洪水被害防止を目的に河川に設置された極めて重要な社会基盤施設であり、豪雨や異常出水時には確実に稼働することが要求される。そのため、設備の万全な整備が不可欠であり、これまで管理者は、定期的に整備する「時間計画保全」の考え方で維持管理を実施している。この手法は、確実な整備が行えるという点でメリットが大きいが、内部劣化の有無によらずに定期的に整備を行うため、経済的で不利な場合がある。さらに排水機場においては、今後50年で約40%が設置後50年超となり、老朽化の進行による故障頻度上昇の懸念がある反面、整備予算は年々削減されている。そこで、この相反する状況下で効率的で適確な設備維持管理を行うため、土木研究所先端技術チームを中心として、常用系設備で導入されている「状態監視保全」を「非常用設備」である排水機場ポンプ設備の維持管理において導入するための研究を進めている¹⁾。これまで、振動、超音波、潤滑油、サーモグラフィ等の適用について検討を実施している。本研究では、低回転である横軸ポンプ設備減速機の診断について検討を行った。

2. 減速機の診断手法の検討

排水機場ポンプ設備の減速機(図-1)は、故障が発生すると排水機場の運転ができなくなるため、致命的な設備に分類されている。これまでは、目視による点検や潤滑油温度、時間計画保全による取替等の維持管理が行われてきた。排水機場で稼働している減速機は入力1000回転程度、出力120回転程度と非常に低回転であり、加速度計による振動計測が困難な設備であった。



図-1 排水機内部(左)と減速機(右)

そこで、本研究では加速度計、SPM(ショックパルスメソッド)、AE(アコースティックエミッション)の3つの計測器による計測結果を比較し、減速機の軸受の状態監視に最適な診断手法の検討を行った。

2.1 減速機の診断

減速機は軸受や歯車で構成される機械であり、特に軸受は精度の高い精密部品である。軸受に損傷を受けると、一定の回転数で回転している場合、周期的な振動が発生することがわかっている。損傷箇所別による周波数は次式で与えられる。

・外輪の傷が転動体と接触する周波数

$$f_o = \frac{Z}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \times fr \quad (1)$$

・転動体の傷が内輪又は外輪に接触する周波数

$$f_b = \frac{ZD}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right) \times fr \quad (2)$$

・内輪の傷が転動体と接触する周波数

$$f_i = \frac{Z}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \times fr \quad (3)$$

ここで、 Z : 玉数、 d : ボール径、 D : ピッチ径、 α : 接触角、 fr : 軸回転数とする。

上記で得られた周波数を基本周波数として、整数倍の高調波成分等を見ることにより軸受の診断が可能である²⁾。

2.2 ローター試験機での計測

計測器の比較を行うため、図-2のローター試験機を製作して軸受の異常状態を再現し、加速度、SPM、AEの3つの計測器で計測した。ローター試験機はインバーター制御機能がついたモータ駆動で、A、B、2つの軸受の間におもりを着脱できるフライホイールを有する構造である。

計測条件は軸受Aのボールベアリングを脱脂し、金属接触の状態でも10時間程度の運転を行ったのち計測した。また、試験機の軸径は12mmであり、実機の1/10程度であるため、回転数を10倍した1200rpmから減速させて200rpmまで計測した。

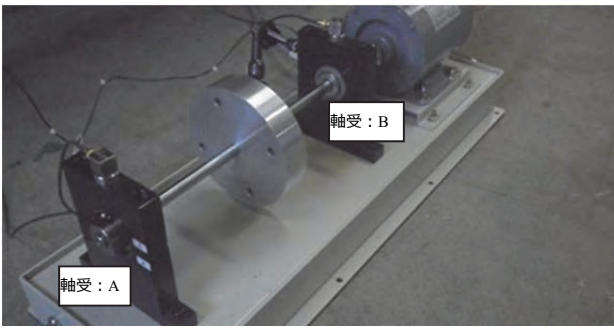


図-2 ローター試験機

2.3 加速度計による計測

はじめに、図-3 に示す圧電式 3 方向加速度計で計測した。計測結果を図-4 に示す。

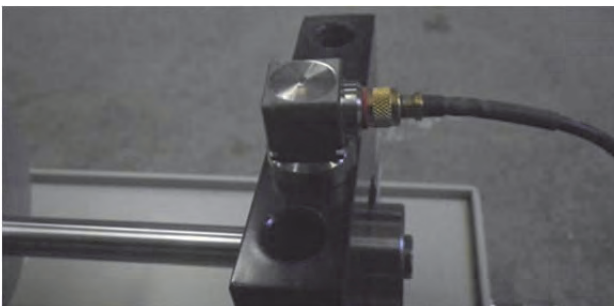


図-3 3方向加速度センサー

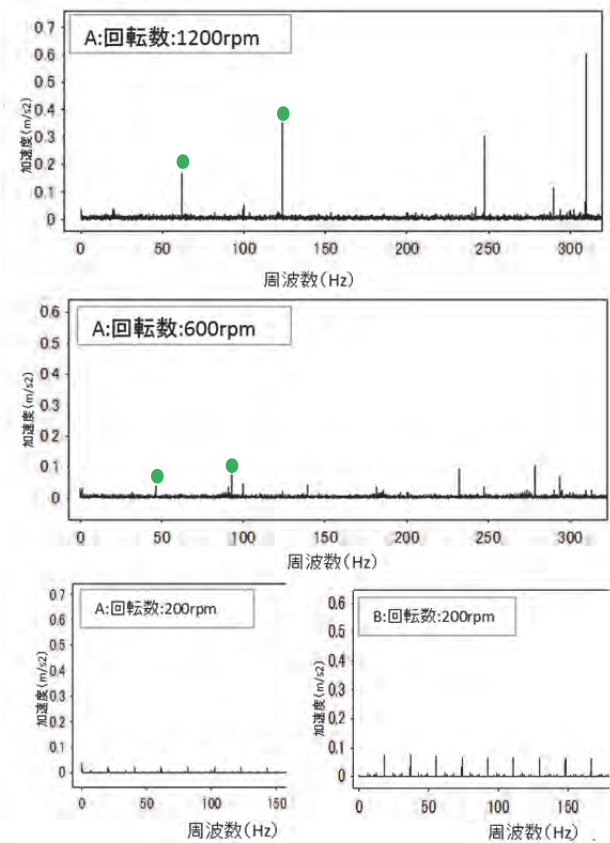


図-4 加速度計による周波数解析結果

回転数 1200rpm の周波数解析では、式(3)より求めた内輪傷に起因する周波数 65.1Hz に近似した 63Hz とその 2 倍の卓越周波数が現れている。しかし回転数が減るに従い卓越周波数があまり見られなくなり、回転数 200rpm では正常な軸受との違いが判断できない結果となった。

2.4 SPM による計測結果

次に同様の条件で図-5 に示す SPM instrument japan 社製の SPM 計測装置で計測を行った。



図-5 SPM 計測装置

SPM は、軸受の内外輪と転動体の接触面から生じる衝撃波（ショックパルス）を検知し、状態を診断する技術である。計測には、発生するショックパルスの周波数と共振するように設定した加速度センサーを用いる。図-6 に示すようにショックパルスは金属の接触部から発生し、振動周波数に比べて高い周波数のため、低い回転数であっても接触面が存在するとショックパルスが生じることがわかっている³⁾。

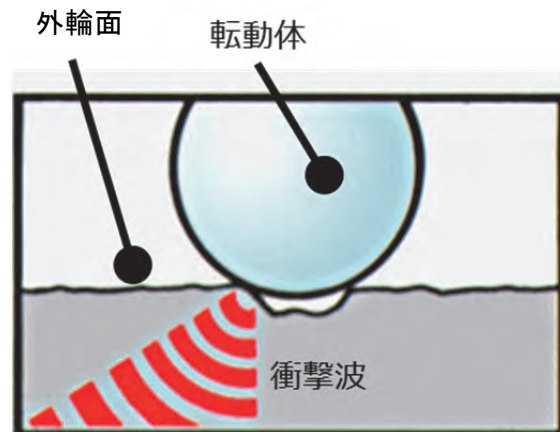


図-6 ショックパルスの発生

SPM 計測器により回転数 1200rpm から 200rpm まで計測し、周波数解析した結果を図-7 に示す。周波数解析の結果から、回転数を減少させても内

輪傷に起因すると思われる卓越周波数が確認できる結果となった。

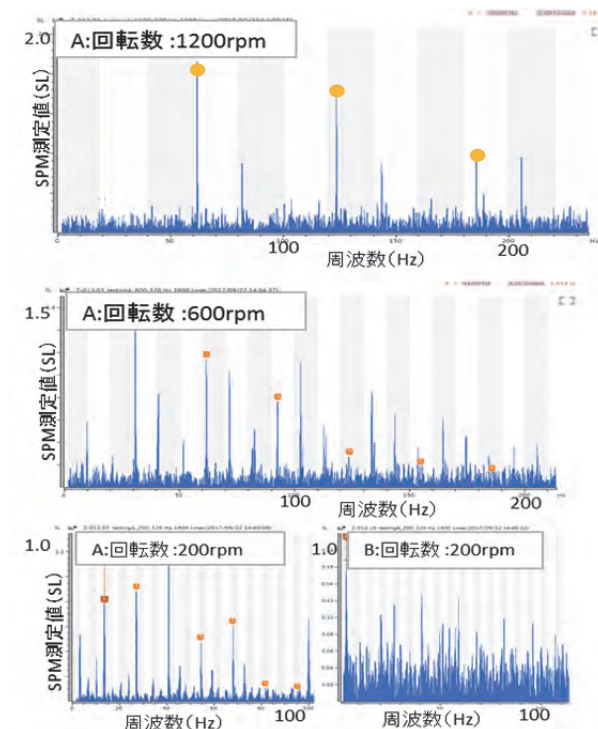


図-7 SPMによる周波数解析結果

2.4 AEによる計測結果

AEセンサーでの計測では、図-8に示す簡易型のFirst AE社製AEセンサーを用いて、ノイズが主な原因となる2mV以下のAEをカットして計測を行った。AEとは、微小破壊を始めとする材料内部の動的な変形、変態、転移、破断などにより弾性波が発生する現象であり、数百kHz～数MHzと非常に高い周波数である⁴⁾。



図-8 AEセンサー

今回の計測では、AEの発生の有無を確認することが目的であるため、計測のみ可能なAE計測システムを用いた。その結果を図-9に示す。横軸は時間、縦軸はAEの実効値(RMS値)を表してい

る。回転数1200rpm及び600rpmでは多くのAEを計測している。更に回転数200rpmであっても正常な軸受Bとの違いが分かる結果となった。ただし、台座の振動やセンサーのズレなどでも大きなノイズが発生するため、大きな騒音や振動がある排水機場では、解析する際のノイズ除去方法の検討が必要である。

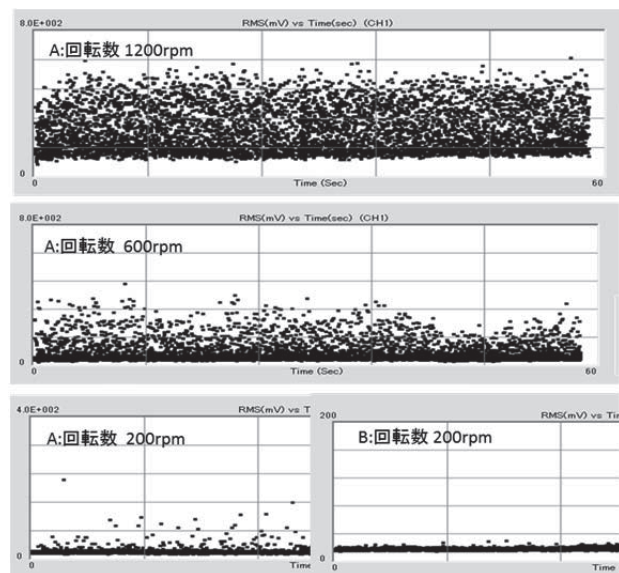


図-9 AE計測結果

2.5 軸受表面の精密評価

計測を行ったローター試験機の軸受Aを分解し、光学顕微鏡(500倍)及び電子顕微鏡(10000倍)で撮影し、内輪、外輪、転動体の表面状態の観察を行った。目立つ損傷が見られた内輪の様子を図-10に示す。

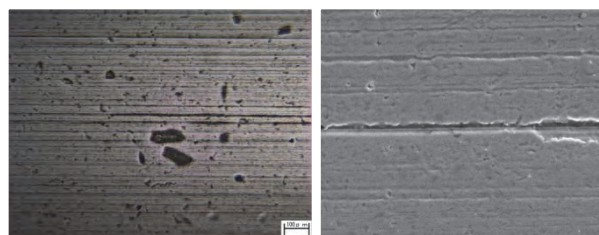


図-10 内輪の光学顕微鏡(左)及び電子顕微鏡(右)写真

光学顕微鏡では100μm程度の圧痕が確認でき、電子顕微鏡では切削摩耗と考えられる傷跡が確認できた。計測結果の周波数解析からも内輪傷に起因する卓越周波数が確認できたことからSPMによる解析結果と軸受の表面状態が一致する結果となった。


3. 現場での診断事例

3.1 SPMによる計測結果

ローター試験機の結果を基に、北海道内の設置後 40 年近くが経過した排水機場において、遊星歯車減速機の診断を実施した。遊星歯車減速機の仕様を表-1 に示す。

対象の減速機は出力側が 159rpm と低い回転数となっており、これまでの加速度計における診断では加速度の値が小さく、周波数解析に苦慮していた設備である。

表-1 遊星歯車減速機の仕様

	主原動機形式	ディーゼル機関
	主原動機出力	228kW
	減速機型式	遊星歯車
	減速比	1/6.27
	出力側回転速度	159rpm
	入力側回転速度	1000rpm

計測の様子を図-11 に、計測結果を図-12 に示す。



図-11 SPMによる計測

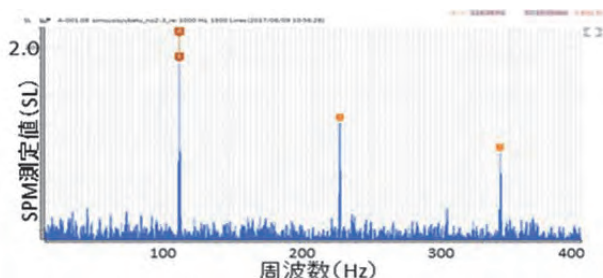


図-12 減速機の周波数解析結果(SPM)

この減速機で発生したショックパルスの周波数解析からは、低回転であっても特徴的な周波数成分が得られた。この軸受の仕様を元に得られた内輪傷に起因する損傷周波数の基本成分と、その2倍3倍の周波数成分があることから軸受の内輪に傷がある可能性が推測され、今後の変化を注視する必要がある。ただし、計測ポイントの違いにより解析結果が変わることがあり、特に排水機場は設置場所により設備の形状が異なるため、計測ポイントの選定方法の確立が必要である。

3.2 AE による計測結果

同じ減速機の出力側の軸受を、AE センサーで計測した結果を図-13 に示す。

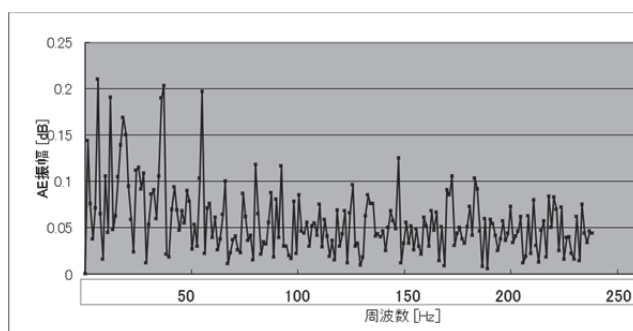


図-13 減速機の周波数解析結果(AE)

50 回転以下の低い周波数帯では卓越周波数が確認できるが、SPM に比べノイズ信号が多く、このままでは評価できないデータとなった。ただし、近年の AE 計測装置は進歩が著しく、研究も進んでいるため、フィルタのかけ方や解析手法等、今後も検討していく予定である。

4. まとめ

非常に単純な構造であるローター試験機を用いて、加速度、SPM、AE の 3 つの計測器で計測した結果、計測器それぞれの特徴を把握することができた。また、SPM については、解析結果が軸受表面の状態と一致することがわかった。さらに、現場での減速機診断においても、加速度計が苦手とする低速回転での異常診断が、SPM では可能であることがわかった。

今後、AE も含め様々な診断手法を組み合わせることで、非常用設備である排水機場ポンプ設備の総合的な状態監視診断手法を検討していく予定である。

参考文献

- 1)中島淳一,梶田洋規,藤野健一:河川ポンプの多様な診断,土木技術資料第59巻・第8号,2018
- 2)豊田利夫:回転機械診断の進め方,日本プラントメンテナンス協会,pp.213-215,1991
- 3)亀井稔:転がり軸受の稼働状態における的確評価の実現,(社)日本プラントメンテナンス協会,第46回設備管理全国大会講演,2006
- 4)日本非破壊検査協会:アコースティックエミッション試験Ⅱ,2008

32. オイル分析と遠隔車両監視システムによる建設機械の予防保全

株式会社小松製作所

○ 村上 満理奈

安部川 利治

1. はじめに

お客様に建設機械を有効にご使用いただくためには、定期的な建設機械の健康管理による、故障に対する予防保全が大切である。弊社では、オイルクリニック（海外では KOWA; Komatsu Oil and Wear Analysis）と呼ばれるオイル分析によって機械の状態を診断するサービスを実施している。このオイルクリニックは、定期的にサンプリングされたオイルを分析するサービスであり、分析時における機械の健康状態を知ることができる。ただし、オイルクリニックだけで稼働中の機械の状態を常に監視することは、サンプリング回数や分析のリードタイムなど様々な課題がある。

そこで弊社ではオイルクリニックに加え、車両の情報を遠隔でリアルタイムに監視することができるシステム KOMTRAX を併用することにより、機械の状態をより適切に監視するシステムを導入している。本稿では、オイルクリニック及びオイルクリニックと KOMTRAX 併用による予防保全について報告する。

2. オイルクリニックの必要性

建設機械の健康診断(点検・調整)には、外装の破損やオイル漏れなどを見つける目視チェックをはじめ、異音や異常振動の有無、臭いなど五感を使用するものと、温度、圧力、回転数、流量、クリアランスなど計測機器を使用するものがある。これらは主に外からの検査となるので、エンジンや油圧ポンプ、トランスミッションなどのコンポーネント内部の状態を見ることはできない。しかし、内部を見るために定期的に車両を分解して直接確認することは、現実的ではない。そこで各コンポーネント内部部品と接しているオイルを分析する

ことで、間接的ではあるが内部部品の摩耗に関する情報を得、状態を推察することが重要となってくる。

一般に機械の故障パターンはバスタブ曲線(故障率曲線)を描くことが知られているが、これは機械の時間当たりの摩耗量にもあてはまる。車両の健康診断にたとえると初期摩耗→正常状態(健康状態)→老化現象→末期現象と言うことになる(図1)。末期現象を経たのち、行く末は大破ということになるが、そうならないためにも異常の初期段階で適切な処置を施し、正常状態を維持、あるいは計画的なオーバーホールや機械の更新に役立てるのがオイル分析サービスであるオイルクリニックである。

もちろん機械には突発的な故障も避けて通れないが、定期的なオイル分析で異常の兆候や初期段階での検知が可能となり、ダウンタイムやメンテナンスコストの低減に貢献できる。

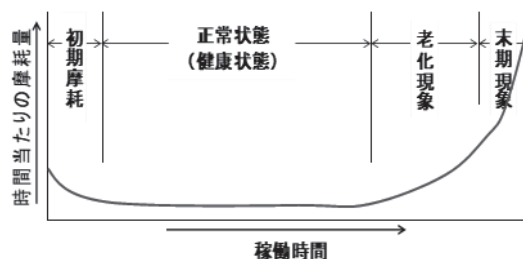


図-1 摩耗バスタブカーブ

3. オイルクリニックの概要

オイル分析のためのサンプリングは定期的(コマツ推奨は 500 時間毎)に、可能な限り同条件下において実施することが重要である。

オイル中の摩耗粉は静置すれば沈降するため、上澄みと底部ではオイル中の摩耗粉濃度が異なる。稼働中の車両のオイルラインから均一なオイルをサンプリングできれば理想的だが、稼働中は高温、高压であり、またファイナルドライブなど物理的にサンプリングが不可能な箇所もある。そこで昼休み中や、その日の作業が終了した直後など、オイルが十分に攪拌されているときにサンプリングをするように推奨している。またサンプリング箇所は油面から5~10cmを基本としている。

4. オイルクリニックの分析項目について

適切にサンプリングされたオイルはコマツ社内管理、運営しているオイル分析センタに送付され、下表に示す項目について、分析される(表1)。送付されたオイルは番号で一元管理され、車両情報、オイル分析結果をまとめて独自のデータサーバに保管される仕組みになっている。車両毎の使用に伴う状態が蓄積されていくため、個別の車両のカルテとして機能する。オイルクリニックがサービス開始した1977年から現在にかけて、分析手法の検討やデータ蓄積・解析の改善など、日々サービス向上に努めた取組を実施している。分析されたデータをもとに、弊社において各車両のオイル情報から推察できる車両の状況について、正常/注意域/異常値、と報告書に判定を下しお客様に返答する。もちろんこの際に対応が早急に迫られていると診断された案件に関しては即現場にサービスマンを派遣するなど、分析結果から診断される情報に応じて臨機応変に対応している。

表-1 オイルクリニック分析項目

分析項目	分析装置	診断内容	
金属元素	ICP	摺動部品の摩耗	
		異物混入(ダスト)	
		エンジンクーラントの混入	
性状劣化	FT-IR	酸化劣化	
		添加剤残存量	
		不溶解分量	
混入物	GC-MS	燃料希釈	
		FT-IR	腐食、潤滑性低下、エンジンクーラントの混入
			パーティクルカウンタ

5. オイルクリニックの診断

分析項目は多々あるが、オイル分析結果からコンポーネントの内部状態を推定するためにまず着目するのは、金属元素分析(ICP)結果である。各コンポーネント部品に使用されている金属は既知であるから、オイル中に特定の金属が多量に含まれていれば、その部品の摩耗が進行していると推定できる。例としてエンジンの使用金属と部品を表2に示す。

表-2 エンジンの使用金属と部品

Fe(鉄)	ピストン、シリンダーライナ、クランクシャフト、バルブガイドなど
Cu(銅)	メインメタル、コンロッドメタル、クランクスラストメタル、カムシャフトブッシュ、オイルクーラなど
Cr(クロム)	ピストンリング、排気バルブなど
Al(アルミ)	アルミピストンなど
Pb(鉛)	メインメタル、コンロッドメタルなど

しかし、各金属は多数の部品に使用されており、ある金属が多く出たからと言って摩耗部品を推定することは簡単ではない。そのような場合、複数の金属項目を組み合わせて推定できることもある。例えばある時期から鉛(Pb)が検出されるようになり、その後銅(Cu)濃度が上昇してきた場合、メインメタルやコンロッドメタルのオーバーレイ(表層が鉛で第2層が銅)の摩耗が進行していると推定できる。

また、Fe(鉄)とクロム(Cr)の両方が検出されれば、ピストンリングとシリンダーライナの摩耗が進行しており、潤滑に問題があることが推定される。この時、オイル消費量が増加したり、ブローバイガス圧力の上昇が見られれば、この部分の摩耗がかなり進行していると判断でき、大破前にメンテナンスを実施したり、あるいは買い替えなどの検討ができるようになる。

更にコンポーネント部品ではないが、一般的なダスト(埃)はシリコン(Si)とアルミ(Al)が含有されていることから、これらが検出されればオイル中にダスト(埃)の混入を疑うことができる。

これらの結果を総合して判断すると、吸気配管の不具合などによりダスト(埃)の混入が起こり、これによりピストンとシリンダーライナの摺動部分

の摩耗が進行しオイル消費増大やブローバイガス圧力上昇が起こったと推定できる。この場合、摩耗したピストンリングやシリンダーライナの修理(交換)はもちろん、原因であるダストの混入防止が必要ということになる。

このような分析結果から修理コストを抑制した事例を下記に挙げる。オイルクリニック結果を図2に示す。エンジン冷却水の成分であるナトリウム(Na)、メタルベアリング成分である銅(Cu)が5,500h程度から増加していることが分かる。

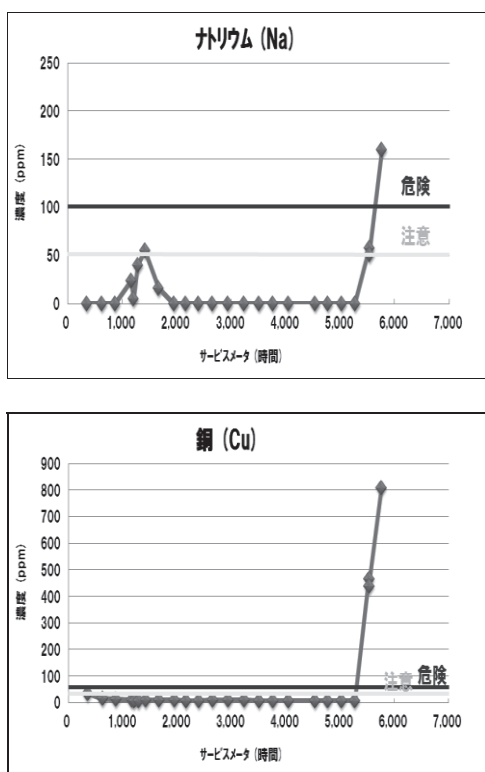


図-2 Na, Cuの金属分析結果

これらのことから、ピストンのシールが破損し、エンジン冷却水がエンジンオイルに混入、潤滑性が悪化することによりベアリングが損傷していることが推定できる。そこで、エンジンの分解調査を実施した、メタルベアリングが損傷を確認した(図3, 4)。

これによって、エンジンが大破する前に修理をすることができ、修正コストを約2,300千円抑制することができた。



図-3 クレビスシール破損状況

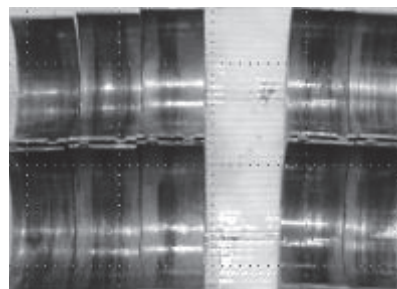


図-4 コンロッドメタルの異常摩耗

6. KOMTRAXの活用

これまで説明してきたオイルクリニックは、オイル分析を定期的実施することで故障の兆候を掴み、大破を阻止する、といった役割を果たすサービスである。直接的にオイルを採取、専用の分析装置を用いた分析と、これまで蓄積してきたデータから得られる診断によって機械の稼働を止めることなく車両の内部状態に関する情報を得ることができる。

ただし、お客様自身による定期的な採取および送付が必要であり、そして分析、診断、対応、まで数日間のリードタイムが発生する。そこで、車両監視システムであるKOMTRAXデータを併用していくことが必要となる。

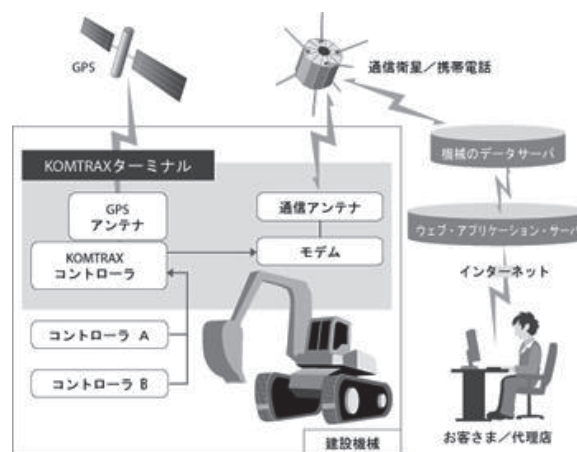


図-5 KOMTRAX概略図(コマツHPより)

KOMTRAX では、車両位置情報や稼働状態(エンジン ON/OFF)、オーバーヒートや油圧低下などのエラー情報を通信で遠隔監視できるようになっている。また鉱山や砕石向けの大型建設機械限定ではあるが KOMTRAX Plus という車両の健康状態・稼働状態を常にモニタリングするシステムも搭載している。下記に KOMTRAX 及び KOMTRAX Plus の主な監視項目を示す(表 3, 4)。

表-3 KOMTRAX の主な監視項目

車両管理	稼働時間、位置情報、位置履歴、交換情報、燃料消費量
保守管理 (エラー情報)	オーバーヒート、油圧低下、油量低下、充電不良、フィルタ目詰まり

表 4. KOMTRAX Plus の主な監視項目

車両情報	エンジン回転数、出力、水温、油温、油圧、吸気温度、排気温度、ブローバイ圧力(クランクケース圧力)、積載量、クラッチ係合時間 など
------	--

以下 KOMTRAX とオイルクリニック併用による予防保全方法例を紹介する。図 6 は KOMTRAX データである。このデータより、2 速段に入れたまま約 1 分間ブレーキを踏んでいることが分かる。またこのような長時間ブレーキを踏みながらの作業をしている場合オーバーヒートによる不具合が発生することが予測されるため、オイル分析を実施し状態を確認、不具合の兆候がみられる場合、修理や 1 速段に入れエンジンプレーキを使用するといった運転方法の提案が可能となる。

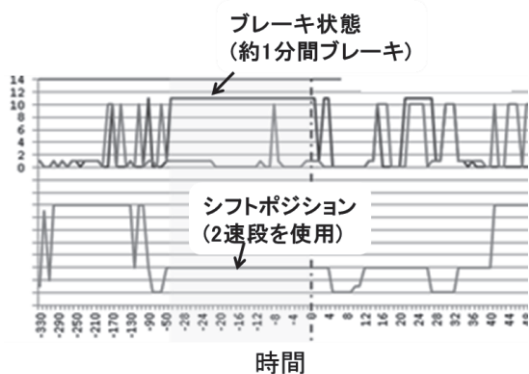


図-6 KOMTRAX データ

7. 今後の展開

これまで説明してきたように、オイルクリニックと KOMTRAX 情報を併用した車両状態診断は非常に有効な手法であるが、さらにオイルの状態をリアルタイムで監視することができれば、より有効な予防保全が可能となる。オイルの状態を監視する方法としては、オイル状態センサを搭載する方法がある。このオイル状態センサとは、オイルの誘電率を測定する方法やオイル中のコンタミ量を光学的に評価する方法などが知られている。誘電率測定を用いたオイル評価結果を図 7 に示す。

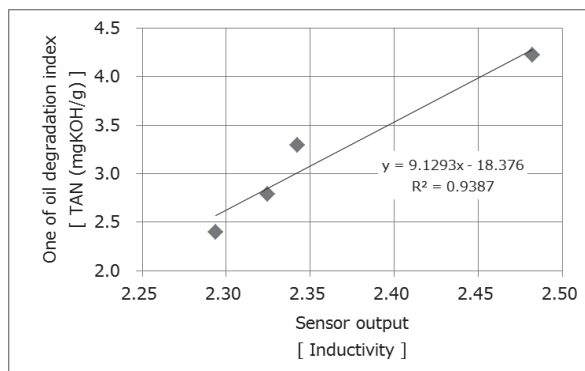


図-7 センサ出力(誘電率)とオイル劣化の関係

これよりオイルの劣化をセンサがとらえていることが分かる。これらセンサを搭載し、既に実績ある KOMTRAX システムに加えることで、より的確なサービスを提供することができる。

8. おわりに

これまで弊社では、オイルクリニック、そして KOMTRAX の情報から蓄積した情報で車両状態を診断してきた。今後ここにオイルセンサ等リアルタイムで車両の状態を知ることのできる手法を取り入れることで、より迅速に故障の兆候を捉え、車両 1 台毎に作業環境を反映した車両診断を下すことが可能と考えている。この活動を通じて、将来的に多くのお客様の建設機械に対し、ダウンタイム、ライフサイクルコストを低減することができるかと確信している。

参考文献

- 1) 著者 村上: オイルクリニックと KOMTRAX による建設機械の予防保全, 潤滑経済, 7 月号, p10~13, 2018 年

33. 排水ポンプ車の性能把握のための 簡易な点検装置開発について

近畿地方整備局近畿技術事務所 ○ 南口 由行

1. はじめに

災害対策用機械の排水ポンプ車は、河川の氾濫等で浸水した箇所であふれた水を排水すること等を目的に2018年4月1日現在で全国に354台配備されています。

現在、全国に配備されている排水ポンプ車のほとんどに搭載されている排水ポンプは、災害現場でクレーン等の重機を使用せずに設置できるようコンパクト化・軽量化するために高精度かつ軽合金による構造で設計・製作されています。そのため、ゴミや土砂等を含んだ水を排水した場合、排水ポンプの羽根車やケーシング等が摩耗・変形してしまい本来の性能（吐出量）が発揮できなくなるおそれがありますが、排水ポンプの性能を点検・確認するには、ポンプの総運転時間を基に製作メーカー等の専門的な知識を有している技術者が実施する分解点検が必要でした。

現状実施している定期点検は、排水ポンプの動

作確認・目視点検が主で、本来の性能（吐出量）を発揮しているか分からず適切な分解点検や更新の時期が把握しづらいという問題点がありました。

その問題点を解消するため、排水ポンプ車の運転操作、定期点検を委託している受注者でも操作可能な排水ポンプの性能把握のための簡易な点検装置を開発しました。

2. 点検装置

2.1 点検装置の設計

点検装置の設計にあたっては、技術事務所だけでなく排水ポンプ車が配備されている各事務所等でも活用できる様な点検装置となるよう下記の点に留意し設計を行いました。

(1) 点検場所

点検装置による点検を実施するためには、排水ポンプでの実排水が必要となりますが、事務所により河川または水槽等を利用しての循環排水作業が想定されるため、どちらでも対応可能な構造としました。

(2) 小型、軽量化

点検装置の設置場所を固定し常設することは、どの事務所でも困難なのは明白であるため、使用時のみ設置することを想定し、人力のみで設置可能とするため出来る限り小型、軽量化を目指しま

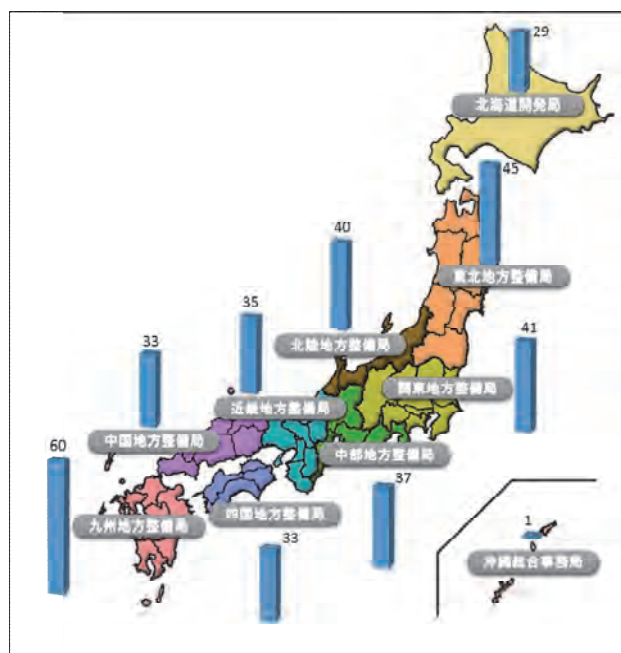


図-1 排水ポンプ車の配備状況



写真-1 排水ポンプ車に搭載している排水ポンプ

した。

(3) 計測精度

計測精度については、高い方が良いのは当然のことですが、計測精度を求めすぎてしまうと、どうしても装置が大きくなってしまうため、装置の位置づけを一次スクリーニングのための装置とし、小型・軽量化に重点を置くこととしました。

(4) 操作性

専門的な知識を有していなくても、操作や定期点検を実施している人が扱えるような簡易な構造、計測項目としました。

2.2 点検装置の概要

点検装置の概要については、下記に示すとおりです。

- ・全長：約 1.5 m
- ・総重量：約 80 kg
- ・計測項目：吐出流量、吐出圧力

3. 点検装置の精度確認

3.1 工場試験設備での精度確認

製作した点検装置の測定精度を確認するため、排水ポンプを新規製作した際に実施される工場試験方法（JIS B 8301（2000）、8302（2002））に則り測定した結果と工場試験設備（工場常設の大型水槽や吐き出し側の直鋼管等）と点検装置を用いた測定結果の比較を実施しました。

3.2 近畿技術事務所構内での精度確認

点検装置自体の精度確認は、工場試験で確認することは出来ましたが、実際の点検実施方法となる近畿技術事務所内で所有している水槽を活用しての点検方法でも、その測定結果の精度を確認する必要があるため、工場試験での測定結果と近畿技術事務所構内での測定結果についても比較を実施しました。

3.3 精度確認の結果

今回の精度確認では、排水ポンプの仕様点（1

00%運転時 吐出量：5m³/min、全揚程：10m）付近での流量、圧力を測定し、その測定値より揚程を算出しその値を JIS に準じた工場試験結果と比較することで、その精度確認を行いました。また、実際の点検時には大型の水槽の手配が困難で100%運転が困難な小型水槽での運用が想定されるため、ポンプの回転数を「100%、80%、60%」とした場合の確認も実施しました。

ポンプ性能を確認する上で、100%運転による測定結果をもとに、その性能を確認することが理想となりますが、今回の精度確認（100%運転時）では最大で約2.3%の誤差が確認され、測定装置の誤差として適さない結果となりました。

これは排水ポンプ車で使用する排水ホースが可搬性を考慮したポリエステル繊維製のホースとな



写真-3 工場試験設備による測定状況



写真-4 近畿技術事務所での測定状況



写真-2 点検装置

表-1 精度確認試験の結果

ポンプ 回転数 (%)	工場試験 測定誤差 (%)	技術事務所構内 試験測定誤差 (%)
100	9.1 ~ 24.1	8.6
80	3.4 ~ 12.7	5.9
60	0 ~ 3.4	3.6

っているため、100%運転時の大水量運転においては、ホース自体が脈動してしまい流量が不安定になったことが原因と推察されます。

しかしながら、60%運転であれば工場試験、近畿技術事務所構内試験とも約4%の誤差に収まり今回開発した点検装置による性能確認に問題が無いことが確認されました。

4. 点検装置を活用した点検

4.1 分解点検を実施する基準値

本点検装置の点検結果を活用して、適切な時期に分解点検を実施できるようにするためには、その基準値が必要となります。その基準値設定の目安とするため、全国の分解点検の実績を調査しましたが、その実績全てが絶縁抵抗の低下やポンプの羽根車の回転不良といった明らかな異常発生によるもので、性能の低下を懸念しての分解点検の実

績は確認できませんでした。

そのため、実際どの程度排水量が低下すれば視覚的に確認出来るかの試験を実施してみました。その結果、ポンプの回転数を30~40%低減したところで明らかな排水量の低下が確認できました。また、製作メーカーへ聞き取り調査を実施したところ、排水量が半減するなど大きく性能低下する場合は、ケーシングが損傷するなど排水ポンプの内部で不具合が発生している可能性が高いということであったため、当面の間30%以上の性能低下が確認された場合に分解点検を実施することとし、点検整備フロー図を作成しました。

4.2 点検装置を活用した点検マニュアル

排水ポンプ車の点検は、大きく分けると専門知識を有している製造メーカー等が実施する分解点検と災害時の出動を委託契約している業者（以下、「災対業者」と言う。）が行う定期点検の2つがあります。本点検装置を活用するのは定期点検時ですが、災対業者のほとんどは機械にあまり精通していない土木業者等となっています。そのため、土木業者等の人でも精度の高い測定が可能となるよう機器の設置、測定の方法および留意点を写真や図を活用してとりまとめた点検マニュアルを作成しました。

また、ポンプの性能を評価しようとする場合、本来はそのポンプの性能曲線を作成し評価する必要がありますが、今回の点検装置では一次スクリーニングを行うことを目的としていますので、点検者が目で確認出来る測定値（ポンプの回転数、



写真-5 排水量低下確認の試験状況

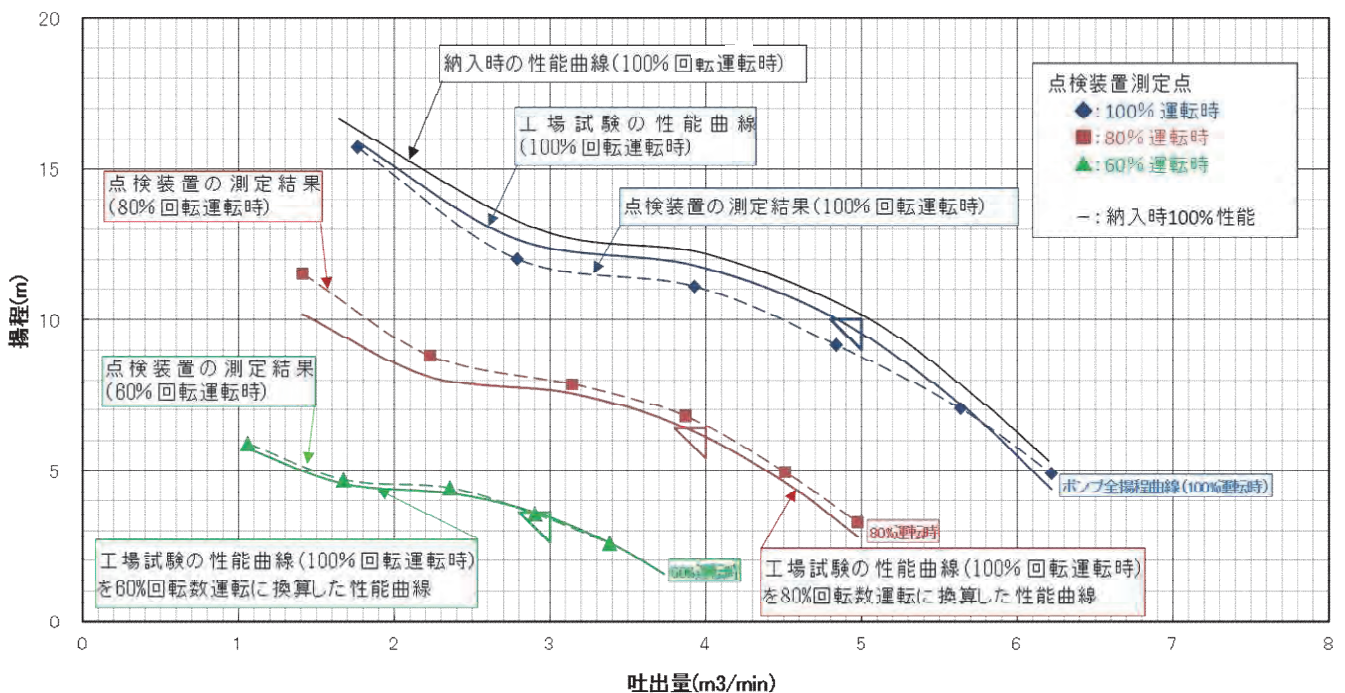


図-2 工場試験での測定結果比較図

測定流量、圧力、測定高差)のみをメモ、記入すれば点検結果(性能低下率)が算出される点検表を市販の表計算ソフトで作成し、より点検者の負担が軽減できるようにしました。

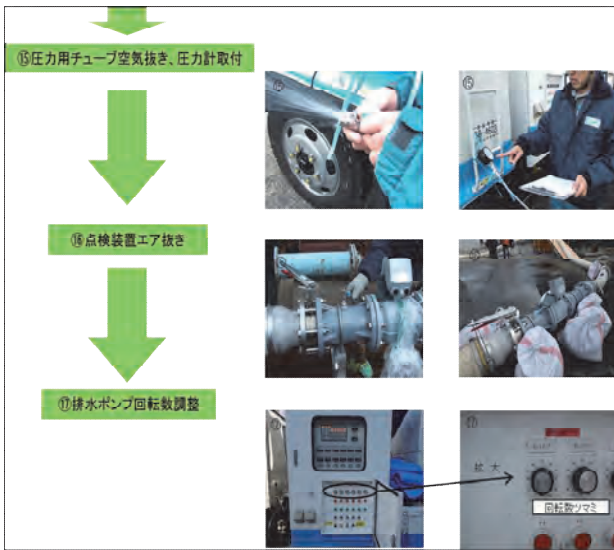


図-3 排点検マニュアルの一例

5. ワーキンググループの開催

本点検装置を全国でも活用してもらえよう本省を含め近隣の地方整備局に実際に点検装置を見てもらい意見交換等を行うため、ワーキンググループを開催しました。

その結果、目視できない部分が点検で把握出来るのは意義があるという意見や今後のデータ収集方法等について意見を交換しました。

6. 今後の検討事項

4章で記載しましたとおり、排水ポンプの性能低下を理由に分解点検、整備が行われた事例はなく、機器の総運転時間や劣化具合等と性能(吐出量)にどのような相関があるかは現状まったく分からない状況となっています。適切なタイミングでの整備、更新を行うためには、この相関を把握する事は不可欠です。そのため今後は、図-4のフローに則って分解点検を実施した排水ポンプの総運転時間や劣化具合等とその時の性能(吐出量)をとりまとめたデータを蓄積し、分解点検を判断する基準値の更新が重要と考えます。

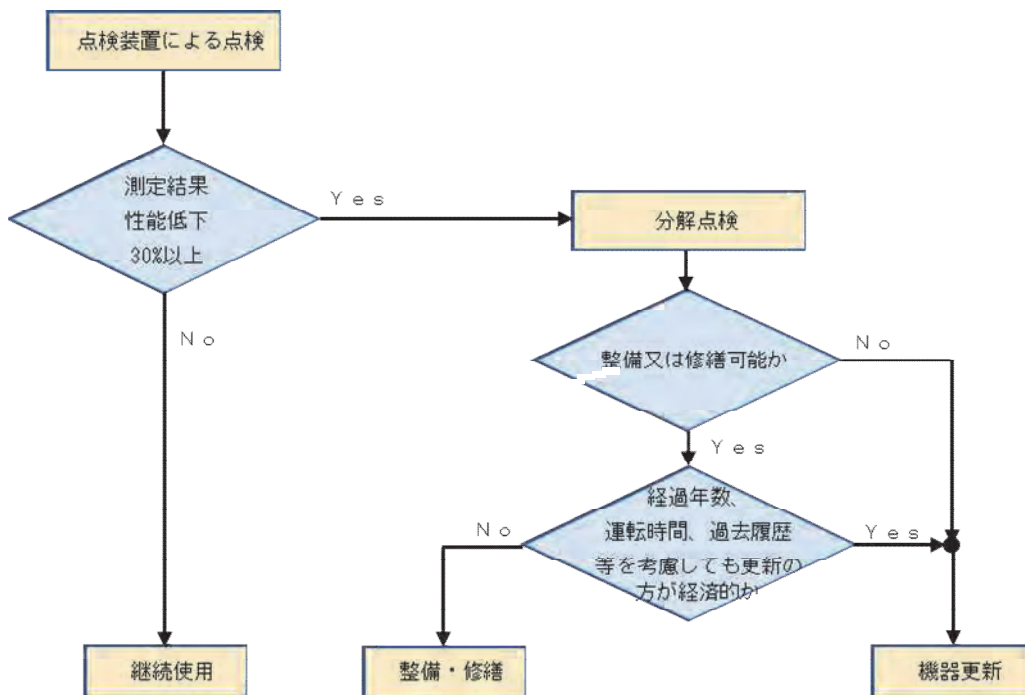


図-4 点検整備フロー図

表-2 点検表

<ポンプ：60%回転運転>

ポンプ	点検装置測定				速度ヘッド E	ポンプ性能測定値		ポンプ性能換算値 ※100%回転に換算		換算からの 揚程計算値 J	性能比較 K
	A	B	C	D		F	G	H	I		
回転数 (%)	目標流量 (m ³ /h)	測定流量 (m ³ /h)	圧力 (MPa)	測点高差 (m)	(m)	吐出量 (m ³ /min)	全揚程 (m)	吐出量 (m ³ /min)	全揚程 (m)	(m)	性能低下率 (%)
60	180m ³ /h	168	0.023	1.3	0.113	2.80	3.76	4.67	10.44	9.54	4.57
60		186	0.018	1.3	0.138	3.10	3.27	5.17	9.09		

※ A、B、C、D を記入すれば、その他は自動計算されます。

34. 除雪機械の情報化施工技術の検討について

国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 施工調査・技術活用課 橋本 隆志
 ○長谷川 崇

1. はじめに

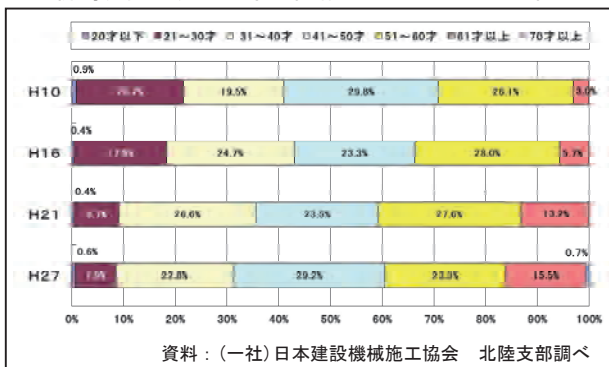
北陸地方整備局では、管内 3 県（新潟県・富山県・石川県）の直轄国道管理区間 14 路線、合計約 1,076km の冬期道路交通を確保するため、約 500 台の除雪機械を配備し除雪作業を実施している（写真-1）。



写真-1 北陸の除雪作業状況

除雪作業において、除雪機械の運転は作業装置を路面状況、道路構造、沿道状況等の変化に適応させた難しい操作が必要であり、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の推移（新潟、富山、石川県 直轄および地方公共団体）



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、全国初の取り組みとして 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。

除雪機械の情報化施工技術の検討は、平成 22 年度から「凍結防止剤散布車の作業ガイダンス装置（以下「散布ガイダンス」という）、「ロータリ除雪車の作業ガイダンス装置（以下「ロータリ除雪ガイダンス」という）、「歩道除雪車の作業ガイダンス装置（以下「歩道除雪ガイダンス」という）を開発し、順次現場への導入を進めてきた（表-2）。

現在は、先行開発してきた作業ガイダンス装置の改良と、将来目標の除雪機械自動運転化に向けたマシンコントロール化の検討を進めているところである。

表-2 除雪機械情報化施工技術の検討経過

	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	将来
凍結防止剤散布車	作業ガイダンス開発						作業ガイダンス改良			自動 運 転 化
ロータリ除雪車			作業ガイダンス開発			作業ガイダンス改良				
歩道除雪車					作業ガイダンス開発					
一次除雪機械 (除雪トラック)							作業ガイダンス検討 マシンコントロール検討			

本稿では、先行開発した散布ガイダンス、ロータリ除雪ガイダンスの運用コスト低減、現場での操作性向上を目的とした改良及び、将来目標の除雪機械自動運転化に向けた、一次除雪機械（除雪トラック）のマシンコントロール化（作業装置の運転操作の自動化）の検討について報告するものである。

2. 作業ガイダンス装置の概要と課題

2.1 作業ガイダンス装置の概要

(1) 散布ガイダンス

凍結防止剤散布作業は、あらかじめ散布計画区間を設定し、凍結防止剤を必要な箇所に必要量散布する。散布ガイダンスは交差点や橋梁部等の散布計画区間の開始・終了地点と、散布量、散布幅を警告音と画面表示にてガイダンスするものである(図-1)。



図-1 散布ガイダンスの概要

(2) ロータリ除雪ガイダンス

拡幅除雪作業は、次の除雪に必要な堆雪帯を確保するため、道路の路肩端まで装置を寄せて作業を行う必要がある。現場ではあらかじめ道路に設置したスノーポールなどを目標に除雪するが、設置間隔には限りがありポールからポールの間は、先のポールを目的にして感覚的に操作を行う必要があることから、操作に熟練度が求められる。また、家屋、交差道路等、除雪した雪の投雪を禁止している区間があり事前に把握しておく必要がある。ロータリ除雪ガイダンスは除雪装置の路肩への接近と、投雪を禁止している区間への接近を警告音と画面表示にてガイダンスするものである(図-2)。



図-2 ロータリ除雪ガイダンスの概要

(3) 歩道除雪ガイダンス

歩道除雪作業は、雪に覆われた歩道の除雪を行うため、マンホールや段差等の障害物の有無と、バス停、家屋等除雪した雪の投雪を禁止している区間を事前に把握しておく必要がある。歩道除雪ガイダンスは歩道除雪における障害物への接近と、投雪を禁止している区間への接近を警告音と画面表示にてガイダンスするものである(図-3)。

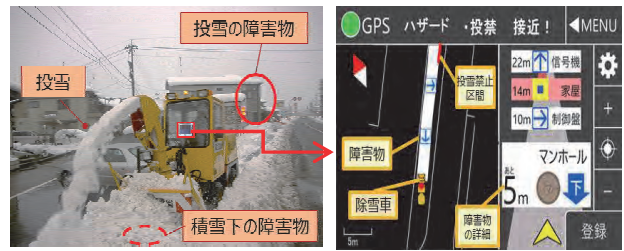


図-3 歩道除雪ガイダンスの概要

2.2 課題

開発した除雪機械の作業ガイダンス装置の性能比較を下記に示す(表-3)。

作業ガイダンス装置は、各々開発当時の最新技術を組み合わせてきたが、近年開発を進めて行く中で、導入費用や技術の進展により、歩道除雪ガイダンスで実現した機能が、先行開発した「凍結防止剤散布車」、「ロータリ除雪車」のガイダンスには導入できていない課題が2点あった。

(1) 背景地図表示機能

降雪や積雪が多く視界不良の場合や、工区間応援で土地勘のない工区を除雪する場合に、どこを走行しているのかを把握できる「背景地図の表示機能」が備わっていなかった。

(2) ガイダンス情報作成

ガイダンスを行うためにはガイダンス情報(路肩端線形データ、障害物・投雪禁止区間・散布計画区間データ等)の作成が必要であるが、ガイダンス情報の作成には現地測量や、パソコンでデータを編集し、装置に登録することが必要であり、作成費用が高額かつ複雑で、現場での作成が困難であった。

この課題から「凍結防止剤散布車」、「ロータリ除雪車」のガイダンス装置の改良を実施した。

表-3 作業ガイダンス装置の性能比較

項目	作業ガイダンス装置の仕様		
	凍結防止剤散布車	ロータリ除雪車	歩道除雪車
開発年度	H22~H24	H25~H26	H27~H28
ガイダンス内容	背景地図表示機能	×	△(緑石位置のみ表示) ○(電子国土地図)
	散布区間の開始・終了	○	-
	散布設定(量・幅)	○	-
	路肩端への接近警告	-	○
	投雪禁止箇所の警告	-	○
データ登録・編集機能	障害物等への接近警告	-	×
	データ登録・編集機能	△データ編集が必要	△現地測量が必要 ○
測位装置	方式	D-GPS	RTK-GNSS (VRS)
	公称精度	1m	2~3cm
装置価格(取付費・消費税等含まず)	200万円	200~250万円	50万円程度
データ作成費用(1工区当たり)	100万円程度	150万円程度	20~30万円
データ作成期間(1工区当たり)	5日間程度	5日間程度	半日程度

3. 作業ガイダンス装置の改良

3.1 背景地図表示機能搭載の検討

降雪や積雪が多く視界不良の場合や、広域的な工区間応援時に除雪作業を安全に実施するための対応として、背景地図表示機能の搭載を検討した。使用する地図は、ある程度の精度があり、定期的な更新がなされて、入手が無料である「電子国土地図(基盤地図情報)」を背景として表示する機能を検討した。電子国土地図の精度・利点を下記に示す(表-4)。

表-4 電子国土地図の精度・利点

要求項目	電子国土地図の精度・利点
一定の精度が保証されていること	1/2,500 水平偏差 1.75m以内 標高偏差 0.66m以内
定期的に更新がなされる 継続的な入手が確実なこと 発行元が国であること	地理空間情報活用推進基本法に基づき整備 更新が定期的に行われている 作成元が国土院である
入手が無料であること	国土院のHPより無料でダウンロードできる

(1) 散布ガイダンス画面レイアウト

散布ガイダンスは、散布車の位置から最も近い散布計画区間の位置情報と、散布仕様(散布量、散布幅)を、散布開始または散布終了位置の手前で文字表示と音声でガイダンスしていた(図-4)。今回、背景地図表示機能を搭載することで、現場(路線)状況の把握と、カーナビゲーションのように先にある散布計画区間の情報を表示できるように改良した(図-5)。



図-4 改良前 散布ガイダンス画面

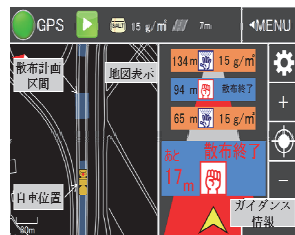


図-5 改良後 散布ガイダンス画面

(2) ロータリ除雪ガイダンス画面レイアウト

ロータリ除雪ガイダンスは、路肩端の平面線形、投雪禁止区間までの距離を画面表示と音声でガイダンスしていた(図-6)。今回、背景地図表示機能を搭載することで、沿道(従道路や家屋など)状況を把握しやすい画面とした(図-7)。また、障害物(マンホールや橋梁ジョイント等)への接近警告の機能を追加した。

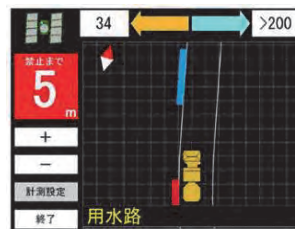


図-6 改良前 ロータリ除雪ガイダンス画面

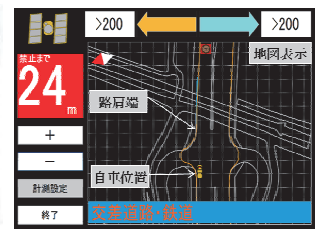


図-7 改良後 ロータリ除雪ガイダンス画面

3.2 ガイダンス情報登録・編集機能搭載の検討

ガイダンス情報の登録を簡素化かつ安価とするための対応として、ガイダンス情報の登録・編集機能の搭載を検討した。

(1) 散布ガイダンス 地図登録機能の搭載

散布ガイダンスでガイダンス情報(散布計画区間)を登録するためには、パソコンにより複雑なデータ作成、登録が必要であった。今回、背景地図表示機能を搭載したことにより、ガイダンス画面で表示される背景地図上をタッチすることでガイダンス情報を簡易に登録・編集できる「地図登録機能」を搭載した(図-8)。



図-8 改良後 ガイダンス情報登録・編集機能

(2) ロータリ除雪ガイダンス お手本ライン登録機能の搭載

ロータリ除雪ガイダンスでガイダンス情報(路肩端線形)を登録するためには、仮想基準点測量方式(VRS)で詳細な現地測量を実施する必要があった(写真-2)。今回、ロータリ除雪車自体や計測車両で現地を走行することで作業軌跡から路肩端を設定する「お手本ライン登録機能」を搭載することにより、詳細な現地測量がなくてもガイダンス情報の登録が可能となった(図-9)。



写真-2 改良前 ガイダンス情報登録・編集機能



図-9 改良後 ガイダンス情報登録・編集機能(お手本ライン登録機能)

3.3 現地適応性の検証

今回改良した、作業ガイダンス装置を現地にて試運転して性能、視認性、使いやすさ等の確認のためオペレータへのヒアリングを実施した。

- 検証実施時期 平成30年2月16日～3月14日
- 検証実施区 (表-5)

表-5 検証実施区

ガイダンス装置種類	試験実施区
凍結防止剤散布車	新潟国道事務所 安田工区
ロータリ除雪車	長岡国道事務所 宮本工区
	長岡国道事務所 堀之内工区

オペレータへのヒアリングで得られた評価・意見を下記に示す(表-6)。今回改良した「背景地図表示機能」や「障害物接近警告機能」、現地作業を省力化できる「ガイダンス情報登録・編集機能」については概ね良好であるという評価を得た。しかし、ガイダンス装置全般の意見として、「作業中は頻りに画面を確認できない」、「凍結防止剤は自動散布となれば有効」との意見もあった。このことから今後は、画面を注視する形式の作業ガイダンス装置だけでなく音声主体のガイダンスの検討や、これまでも要望があった作業補助となる作業装置操作のマシンコントロール化(自動化)等を検討する方針とした。表-2に示した検討のスケジュールに基づき、平成29年度からは、一次除雪機械の作業ガイダンス装置およびマシンコントロール化を検討している。

表-6 オペレータの評価・意見

	散布ガイダンス	ロータリ除雪車ガイダンス
改良機能の評価	<ul style="list-style-type: none"> ■背景地図表示機能 <ul style="list-style-type: none"> ・概ね良好な評価 ・工区広接や、散布区間等の情報を熟知していない場合には有効 ■ガイダンス情報登録・編集機能 <ul style="list-style-type: none"> ・現地作業を省けるため有効 	<ul style="list-style-type: none"> ■背景地図表示機能 <ul style="list-style-type: none"> ・概ね良好な評価 ■障害物接近警告機能 <ul style="list-style-type: none"> ・概ね良好な評価
ガイダンス装置全般に対する意見	<ul style="list-style-type: none"> ■使い勝手に関する意見 <ul style="list-style-type: none"> ・散布計画区間を熟知していない若手や新人には有効 ・作業中は頻りに画面を確認できない ・自工区で熟練オペレータが多い場合には、登録作業の負担があるため、ガイダンスはなくてもよい。 ■今後の展開への意見 <ul style="list-style-type: none"> ・ガイダンス装置は中間段階。自動散布(運転)になると、非常に有効な装置 	<ul style="list-style-type: none"> ■使い勝手に関する意見 <ul style="list-style-type: none"> ・路肩までの距離の目安を若手に教えるのに有効 ・周囲の安全確認が最も重要。投雪先の状況を注視する必要があるため、頻りにガイダンス画面を見るのができない

3.4 作業ガイダンス装置改良の効果

背景地図表示機能を追加したことで路線状況の把握が容易になり、ガイダンス情報の登録・編集機能を改良したことで、登録にかかる労力・費用の低減に繋がった。除雪作業のオペレータからは若手や新人の教育に有効と評価され、除雪作業現場からもガイダンス装置歓迎の声があがっている。今回改良に伴い改善された項目を下記に示す(表-7)。

表-7 改良に伴い改善された項目

改良項目	凍結防止剤散布車		ロータリ除雪車	
	改良前	改良後	改良前	改良後
ガイダンス内容	背景地図表示機能	x	○電子国土地図 △(線石位置のみ表示)	○電子国土地図
	障害物等への接近警告	-	x	○(機能追加)
データ登録・編集機能	△PCでのデータ編集が必要	○地図登録機能	△現地測量が必要	○お手本ライン登録機能
データ作成費用(1工区当たり)	100万円程度	30~40万円程度	150万円程度	100万円程度
データ作成期間(1工区当たり)	5日間程度	1日程度	5日間程度	2~3日間程度

4. 一次除雪機械作業ガイダンス装置の試作

平成29年度は、これまでに開発した各ガイダンス機能を装備した作業ガイダンス装置を試作。平成30年度は、必要機能の追加・改良を行い、機能の要求仕様をとりまとめる予定である(写真-3)。装備するガイダンス機能を下記に示す(表-8)。

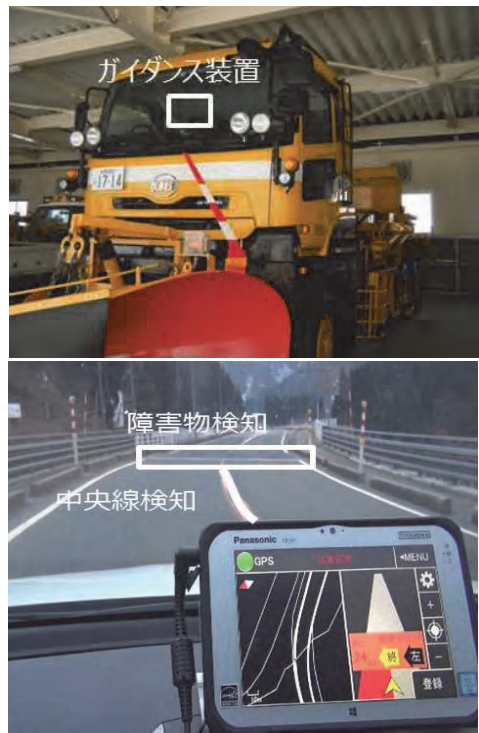


写真-3 一次除雪機械の作業ガイダンス装置

表-8 装備するガイダンス機能

装備する機能	ガイダンス方式
障害物への接近警告機能	画面表示、ブザー音
路肩端・道路中心線への接近警告機能	画面表示、ブザー音
除雪速度(30km/h)に対応したガイダンス	音声・ブザー音等

5. 一次除雪機械マシンコントロール化への検討

除雪作業における安全性・施工性・生産性の向上を目的に、一次除雪機械(除雪トラック)の作業装置の「マシンコントロール化」へ向けての検討を平成29年度から実施している。マシンコントロール化のイメージを下記に示す(図-10)。

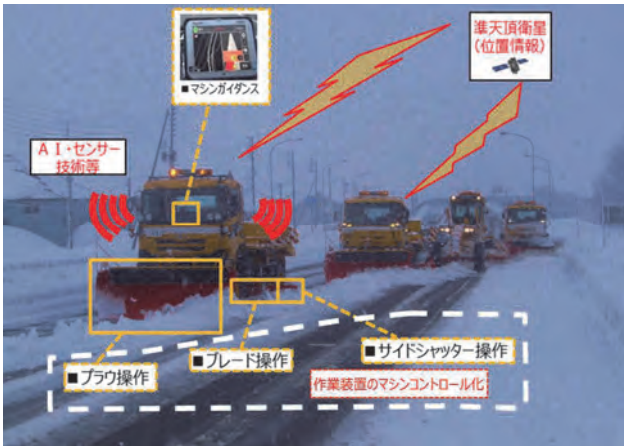


図-10 一次除雪機械マシンコントロール化イメージ

5.1 要素技術の検討

作業装置のマシンコントロール化に必要な「要素技術」をについて市場を調査し、結果をまとめた(表-9)。

表-9 要素技術のとりまとめ

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 ・進天頂衛星システム「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

要素技術は大きく3つに分類される。

(1) 精度の高い衛星受信機・地図データ

精度の高い衛星受信機と地図データ組み合わせることによって自車位置、作業装置の位置が把握でき、精度の高い位置情報での作業装置の動作制御が可能となる。

(2) センサー技術

様々なセンサー技術を組み合わせることで、路面積雪量、雪抱え込み量、作業装置の状況等の把握ができ、雪の量に合わせた作業装置の角度、押付圧等の動作制御が可能となる。

(3) AI技術

今後発展が期待される AI 技術を活用することで、積雪の有無や障害物・歩行者等の感知や、オペレータ作業履歴の蓄積等ができ、作業装置動作タイミングの自動化制御や、障害物・歩行者等の回避制御等が可能となると推測される。

5.2 今後の検討スケジュール

今後のマシンコントロール化検討スケジュールを下記に示す(表-10)。マシンコントロール化を各作業装置毎に進めて行くが、まずは、現段階で

実用可能な位置情報によるマシンコントロール化を進めて行く。その後、技術開発の状況を踏まえセンサー技術と併せたマシンコントロール化の検討、AI技術などをどのように活用して行けるのかを検討する。

表-10 検討スケジュール

検討年度	H29	H30	H31	H32	将来
①位置情報と合わせたマシンコントロール化	マシンガイドス(障害物、中央線検知等)				自動運転化
	サイドシャッター操作				
	ブレード操作				
	ブラウ操作				
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				

5.3 熟練オペレータの運転技術データ収集

除雪機械(作業装置)のマシンコントロール化を検討するにあたり、実際の現場での熟練オペレータの運転技術データを収集するために、ドライブレコーダで除雪作業状況と運転室内のレバー操作状況の録画を行い、作業装置の制御データを収集するセンサーを設置し、データロガーに記録した(表-11)。

表-11 除雪トラック運転技術データ収集内容

データ収集工区	国道49号 29.6km 新潟国道事務所 安田工区
データ収集期間	平成29年12月6日～平成30年1月16日
ドライブレコーダ設置数	7箇所(前後路面状況、除雪機械作業装置周辺、運転室内レバー操作状況)
データロガーによるデータ収集数	作業装置(ブレード、ブラウ、サイドシャッター等)操作制御データ、ブレード押付圧、振動データ等 5.5点のデータ



写真-4 ドライブレコーダ撮影画面(7箇所)

5.4 運転技術データ分析・整理

収集した運転技術データの分析・整理を行い、結果についてとりまとめた。

(1) 運転技術「データの見える化」整理

除雪トラックの位置情報データと合わせて、ドライブレコーダによる撮影画像及び、データロガーで取得した制御データを地図上にプロットし、運転技術「データの見える化」を実施した。これによりどの箇所で、どのように除雪作業(作業装置の操作)が行われているかを分析した(図-11, 写真-5)。



図-11 作業装置操作の軌跡(電子国土地図)

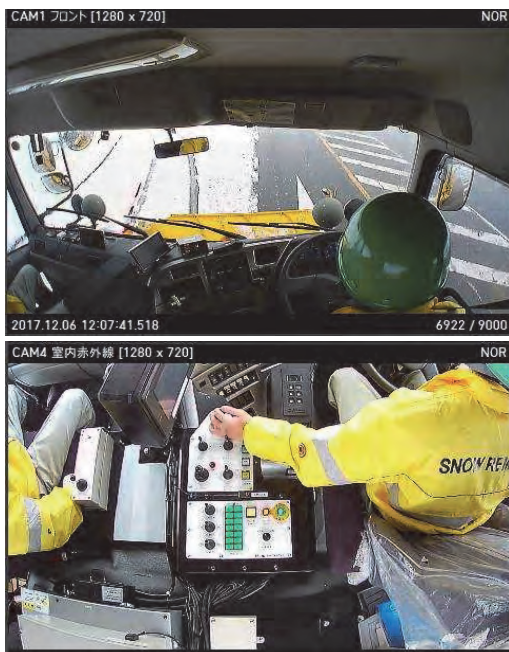


写真-5 作業装置操作状況録画

(2) 位置情報データと作業装置操作データの関連付け

見える化したデータから、路面に積雪がある場合には、ほぼ確実に作業装置(サイドシャッター等)を操作する箇所を把握することができた(図-12)。

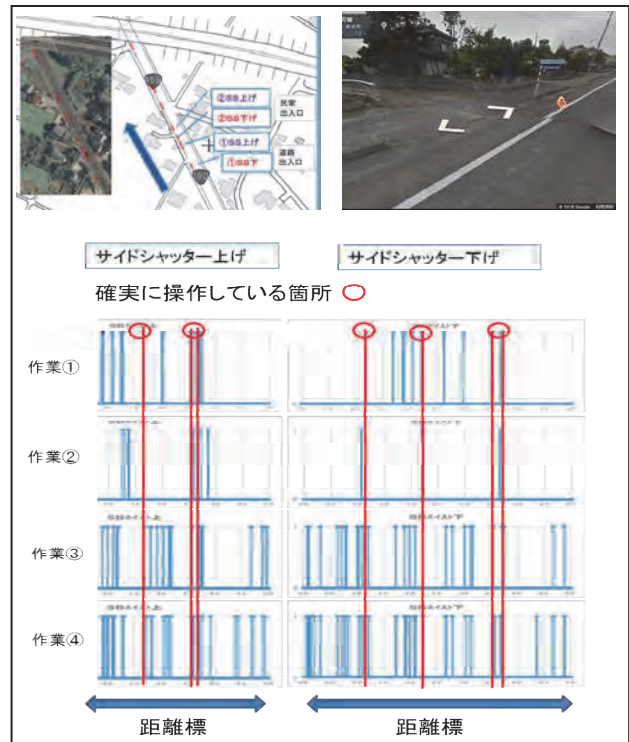


図-12 作業装置操作箇所の把握(サイドシャッター操作)

5.5 サイドシャッターのマシンコントロール化

平成30年度は、運転技術データの分析結果を基に、交差点に除雪した雪を残さないようにするために操作が頻繁な、サイドシャッターのマシンコントロール化を検討する。準天頂衛星「みちびき(センチメートル級測位)」を衛星受信機として使用し、高精度の地図データと組み合わせた制御ユニットを製作し、操作を行う箇所において自動でサイドシャッターの開閉操作が行えるようにする(写真-6)。



写真-6 サイドシャッターの動作状況

5. おわりに

開発した作業ガイダンス装置により、初心者でも障害物や投雪禁止箇所の見落としがなくなり、安全かつ効率的な除雪作業が行えるようになった。

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、作業装置のマシンコントロール化の技術開発を行い、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。

35. アンケート結果から見る除雪機械開発の方向性

国土交通省 公共事業企画調整課 施工安全企画室 今野 孝親

1. はじめに

平成 21 年を境に国の総人口が減少に転じ¹⁾、高齢化が急速に進展するなか、各業界において労働力不足が叫ばれるようになってきている。担い手不足及び高齢化の問題は除雪業界においても顕在化しており、今後の冬期道路の交通を確保していくために早急な対応が求められている。

労働力不足の対策の 1 つとして、ロボットや AI を活用した省人化の試みが各業界で進められており、自動車業界においても自動運転の開発が急速に進んでいる。国土交通省では、この動きに呼応して、現在開発が進められている自動運転技術の除雪分野への適用を視野に、除雪作業の将来的な自動化に向けた検討を始めている。

自動化に向けた機械開発は、経費及び期間ともに大規模なものとならざるを得ないため、その実施にあつたては、導入効果を踏まえた優先度を整理した上で進める必要がある。この検討の一環として、直轄国道における除雪体制の現状把握、及び今後の除雪機械の高度化・自動化に向けた検討の基礎資料を得ることを目的に、除雪業者を対象としたアンケート調査を実施した。

本論文では、除雪機械の高度化・自動化に向けた機械開発の方向性について、アンケート調査から得られた機械の操作難易度や作業事故の発生頻度等を指標としたニーズ評価の結果を基に報告する。なお、今回報告する内容は、現在省内で検討中のものであり、今後検討を進めるにあたっての基本的な考え方を示したものである。従って、機械開発の優先度評価手法として確定されたものではなく、詳細な評価方法については今後変わる可能性があることに留意願いたい。

2. 調査概要

アンケート調査は、国が委託している除雪工事（作業）の契約業者を対象に実施しており、調査方法等の概要については以下のとおりである。

- ① 調査期間
平成 29 年 8 月～平成 29 年 9 月の 1 ヶ月間
- ② 調査方法
悉皆調査（平成 29 年度未契約の場合は、平成 28 年度の契約業者を対象に実施）
- ③ 調査数

430 社（H29 契約業者：398 社、H28 契約業者：32 社）

④ 主な調査内容

- ・ 除雪作業従事者の年齢、経験年数、就業状況
- ・ 除雪機械別人員状況
- ・ 除雪機械及び作業装置別習得難易度
- ・ 除雪オペレータの必要能力
- ・ アクシデント発生状況
- ・・・等

3. 直轄国道の除雪体制

直轄国道の除雪業者数は 430 社であり、アンケート結果から得られた除雪作業従事者の合計数は約 6,800 人であった。この体制で直轄国道の除雪延長約 19,000km を担っている。各地方支分部局の除雪業者数及び除雪作業従事者数の集計結果を図-1 に示す。なお、除雪業者数は、複数の工区を受注している重複業者を含んだ数値であり、除雪作業従事者については、除雪機械の運転手のほか、安全確認や作業補助を担当する助手のみを担当する方も含んでいる。

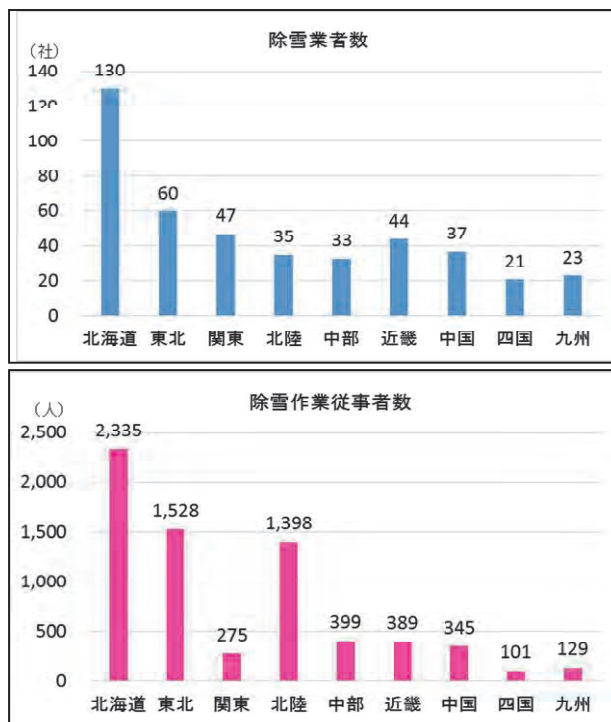


図-1 除雪業者及び除雪作業従事者数

4. 除雪作業従事者の状況

4.1 年齢構成

除雪作業従事者の年齢構成としては、40代が31%で最も多く、次いで50代、60代と続いている。20代以下の若手は6%と非常に少ない一方で、50代以上は45%と除雪作業従事者の半数近くが50歳を超えており、将来的な除雪体制の維持が危惧される状況となっている(図-2)。

年齢構成を他産業と比較すると、20代以下の比率が全産業と比較して圧倒的に少なく、若手の比率が低いと言われている建設業と比較してもさら低い状況である。若手の比率が低い分、逆に40歳以上の高齢層の比率が高くなっており、除雪業界の高齢化が他産業よりも深刻な状況であることがわかる(図-3)。²⁾

除雪作業従事者の年齢層が他産業よりも高いという調査結果の中で、唯一65歳以上の人員比率は全産業を下回っている。これは、除雪作業に必要な不可欠な各種能力(視力、体力、判断力等)の維持が難しくなってくる年齢であることが起因していると推察できる。

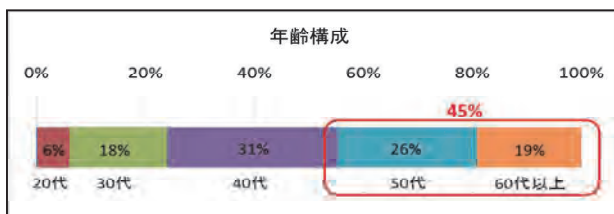


図-2 除雪作業従事者の年齢構成

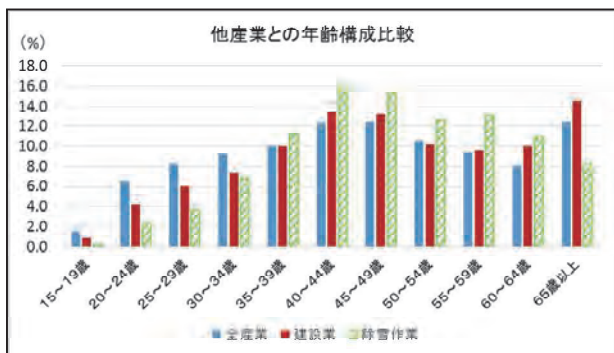


図-3 他産業との年齢構成比較

4.2 経験年数

経験年数については10年以上の経験を有する方が55%となっており、ベテランの除雪作業従事者は少なくない(図-4)。ただし、年齢構成において30代以下の方が24%であるのに対して、経験年数10年未満の方が45%であることから、就職と同時に除雪作業に従事するのではなく、1度他の職業等を経てから除雪作業に従事している傾向があると判断できる。

この観点から、経験年数が5年未満及び10年未満の方の年齢分布を整理すると、いずれの場合も

50代以上の方が3割近くを占めており(図-5)、経験が浅くかつ高齢の従事者も少なくないことがわかる。また、年齢と経験年数のマトリックス表(図-6)からも、経験の浅い従事者が比較的年齢の高い層まで広く分布していることが確認できる。

こうした高齢の新人従事者に対応するためにも除雪作業の省力化の必要性が高まっていると言える。

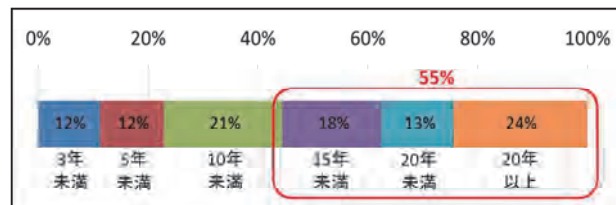


図-4 経験年数構成

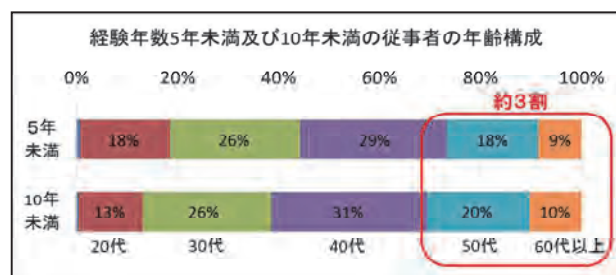


図-5 経験年数が浅い従事者の年齢構成

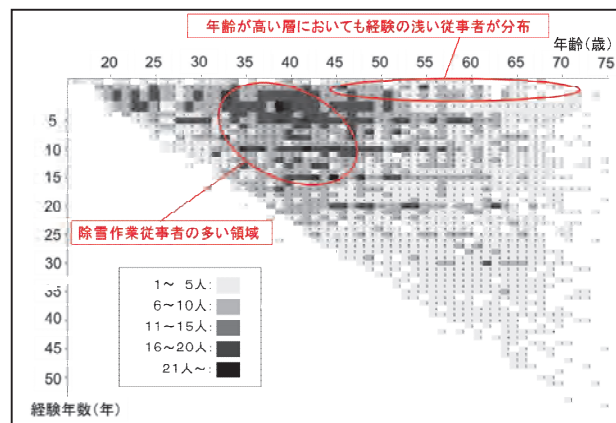


図-6 年齢と経験年数の分布図

5. 除雪機械オペレータの確保状況と必要能力

5.1 機種別人員状況及び習得難易度

除雪機械を運転するためには、機種により異なるが、大型免許や大型特殊免許が必要である。さらに、除雪作業の技能を習得するためには、免許取得後も実作業の中である程度の経験を積む必要がある。各機種別の運転人員状況及び難易度(習得年数)について調査した結果を図-7に示す。

機種別の人員状況としては、大型特殊免許を必要とする機種(除雪グレーダ、ロータリ除雪車、除雪ドーザ)の人員が比較的少ない状況である。また、必要習得年数においても、同じく大型特殊免許を必要とする機種を難しいとする回答が多く、

特に操作レバーが多く細かな操作が求められる除雪グレーダについては、技能習得に必要な年数を5年以上とする回答が5割を超えており、特に操作の簡略化ニーズが高い機種であることがうかがえる。

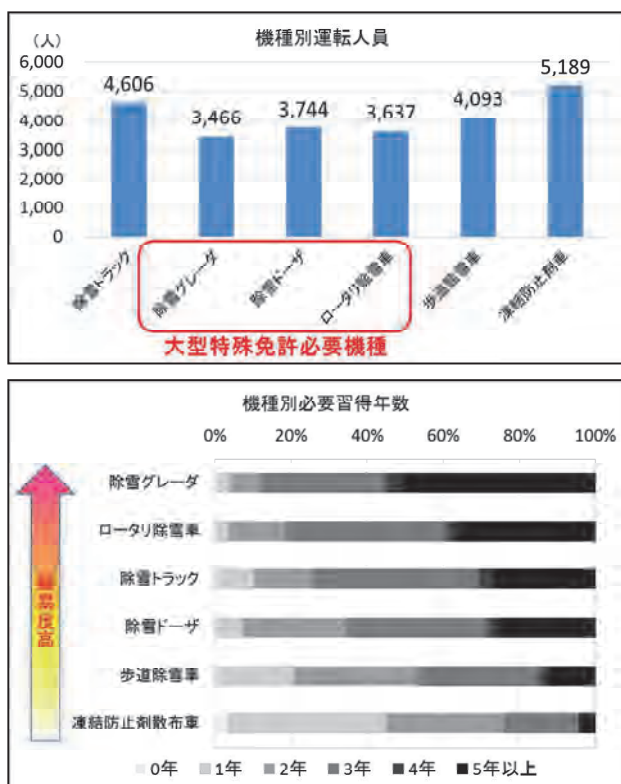


図-7 機種別運転人員及び必要習得年数

5.2 必要とされる能力

除雪作業従事者のうち、除雪機械オペレータについては、除雪作業を安全かつ的確に行うための高度な運転操作能力が求められる。この除雪機械オペレータとして求められる能力は、特に事故等のアクシデントを引き起こさないために必要な能力と言えるが、各能力の重要性と、それら能力の有無に直結するアクシデントの発生状況の関連性を確認するための調査を実施した。

必要能力に関するアンケートについては、除雪オペレータに求められる代表的な能力についての必要性を、アクシデントに関するアンケートについては、その発生頻度について、それぞれ選択式で回答を得たものを集計している。集計結果を図-8、9にそれぞれ示す。

必要能力に関しては、どの能力についても必要不可欠とする回答が多かったが、特に「周囲の交通・歩行者状況の危険性判断に基づく車両及び作業装置の運転操作能力」を必要不可欠とする回答が最も多い結果であった。

一方で、アクシデントの発生頻度では、最も重要視されている上記能力の有無に直結するアクシ

デントである「通行・駐車車両、歩行者等との衝突・接触」は、相対的な発生頻度としては低い結果となっている。

この結果から、必要能力としては、頻発するアクシデントを抑えるための能力より、影響度の大きいアクシデント（重大事故）を防ぐための能力を重視していると考えられる。除雪機械の開発にあたっては、各作業装置の省力化（簡易化）のほか、一般交通（追越し車両、歩行者等）の動態把握等安全性向上に資する運転操作支援機能の検討が必要不可欠である。

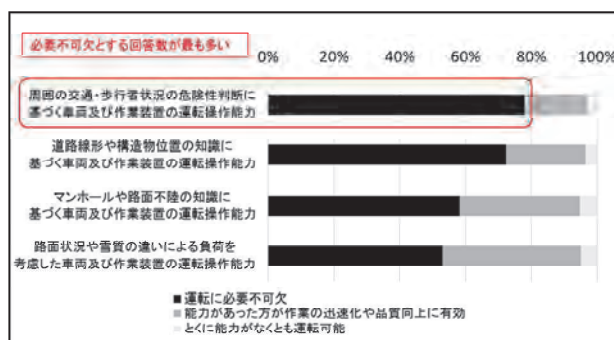


図-8 除雪オペレータに求められる能力

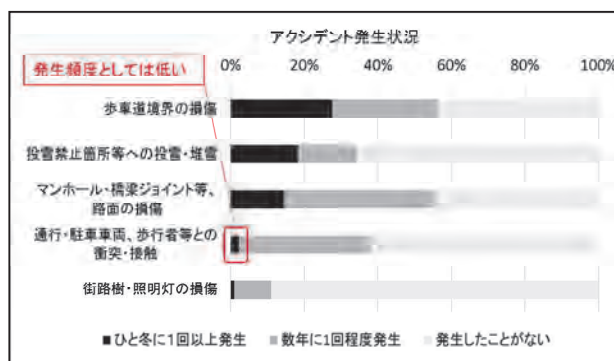


図-9 アクシデント発生状況

6. 作業装置別ニーズ評価

6.1 作業装置別操作難易度

自動化のニーズは、一般的に操作難易度の高い装置に対するニーズが高いと判断できることから、アンケート調査において、各作業装置別の操作難易度の確認を行った。調査方法は、各オペレータに操作が難しいと感じている作業装置を選択（複数回答可）してもらい、その回答数の多い装置を操作難易度の高い装置として整理した。

集計結果は図-10のとおりであり、除雪グレーダ及び除雪トラックの路面整正装置が突出して高い評価結果となっている。路面整正装置は、押付圧、切削角、進行角等の制御すべき内容が多く、積雪及の状況等に応じた細かな操作が必要であることから、この様な結果になったと考えられる。

なお、ここでの操作難易度は、絶対的な装置の操作難易度を表しているものではなく、「普段操作し

- ・除雪グレーダ-リーニング
- ・凍結抑制剤散布車-散布装置

④ 必要能力別習得年数

上記必要能力を習得するために要する年数について、「複数年以上」とした回答数を集計したもの。各作業装置の的確な操作の実施に最も関連性が深いと思われる能力の習得困難度を自動化（能力補完）ニーズとして評価に反映している。

⑤ 操作難易度

6.1 節の回答数を集計したもの。各作業装置の操作難易度をニーズ評価として反映している。

⑥ 操作頻度

6.2 節における「高」の回答数を集計したもの。各作業装置の操作頻度の高さをニーズ評価として反映している。

(2) 評価方法

評価は、各評価項目において最も回答数が多かったものを1とした場合の回答数比率を評価値として整理し、最終的に各評価項目の評価値（回答数比率）を全項目（7項目）分足し合わせた合計値でニーズ評価を実施している。作業装置別の評価例を図-12に、作業装置全体のニーズ評価結果を図-13に示す。

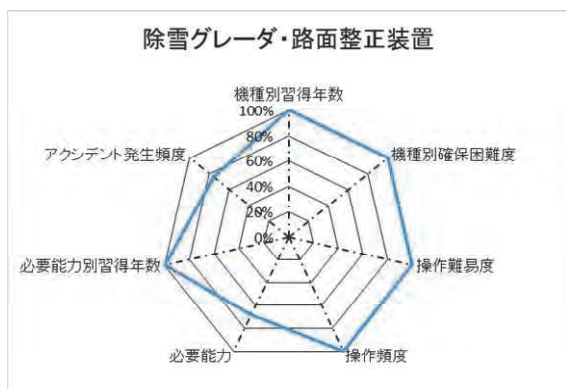


図-12 ニーズ評価例

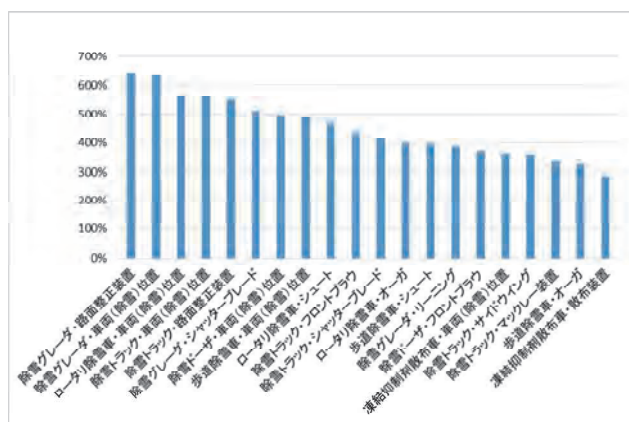


図-13 ニーズ評価結果

評価結果としては、操作難易度において突出して高い評価であった「路面整正装置」が総合的ニ

ーズ評価においても評価が高く、また、道路線形や周囲の交通状況等を考慮した制御を常に求められる「車両（除雪）位置」についても高い評価となっている。なお、総合評価の特徴としては、各作業装置が装備されている本体機種の評価値の影響が反映されることから、作業装置単体としての難易度としては中間位以下であった「除雪グレーダ・シャッターブレード」が総合評価においては、上位評価となっている。

7. 機械開発の方向性

7.1 技術的難易度

今後の機械開発の方向性としては、前述のニーズ評価の結果をベースとして、開発優先度を検討していく。ただし、機械開発は、同じ作業装置の開発であっても、操作の一部をサポートするものから完全自動化まで開発のレベルが幅広いから、どの段階を目指すかによって、その技術的難易度も大きく異なる。従って、開発優先度の検討にあたっては、ニーズ評価と技術的難易度を複合的に捉えて開発対象と開発レベルを決定する必要がある。

開発レベルについては、「官民 ITS 構想・ロードマップ 2018」³⁾で示されている自動車の自動運転レベル表に倣い、除雪車の自動化レベルとして設定した。各開発レベルの技術的分類は以下のとおりである。

① レベル1（ガイダンス機能）

除雪作業を効率的かつ的確に実施するために必要な情報（作業位置、操作開始タイミング、ハザード情報等）をオペレータに付与することで、除雪作業をサポートするもの。

② レベル2（部分的自動化）

各作業装置の動作の一部を自動化して操作の省力化を図るもの。

③ レベル3（条件付自動化）

各作業装置の動作全てを自動化し、オペレータは機械運転及び緊急回避操作のみを実施するもの。

④ レベル4（高度作業自動化）

作業装置のほか、車両本体の運転も自動化し、車両本体と作業装置の同時制御による無人施工を実施。ただし、春山除雪や自動車専用道路の除雪等作業域が限定されたもの。

⑤ レベル5（完全作業自動化）

作業域無限定での完全自動化を実現したもの。

7.2 機械開発の方向性

機械開発の基本的な考え方としては、ニーズが高く、技術的難易度の低いものから優先的に実施していくことになると考えられる。図-14はニーズ評価と技術的難易度をマトリックス表として表したものであるが、表の左上の領域がそれに該当す

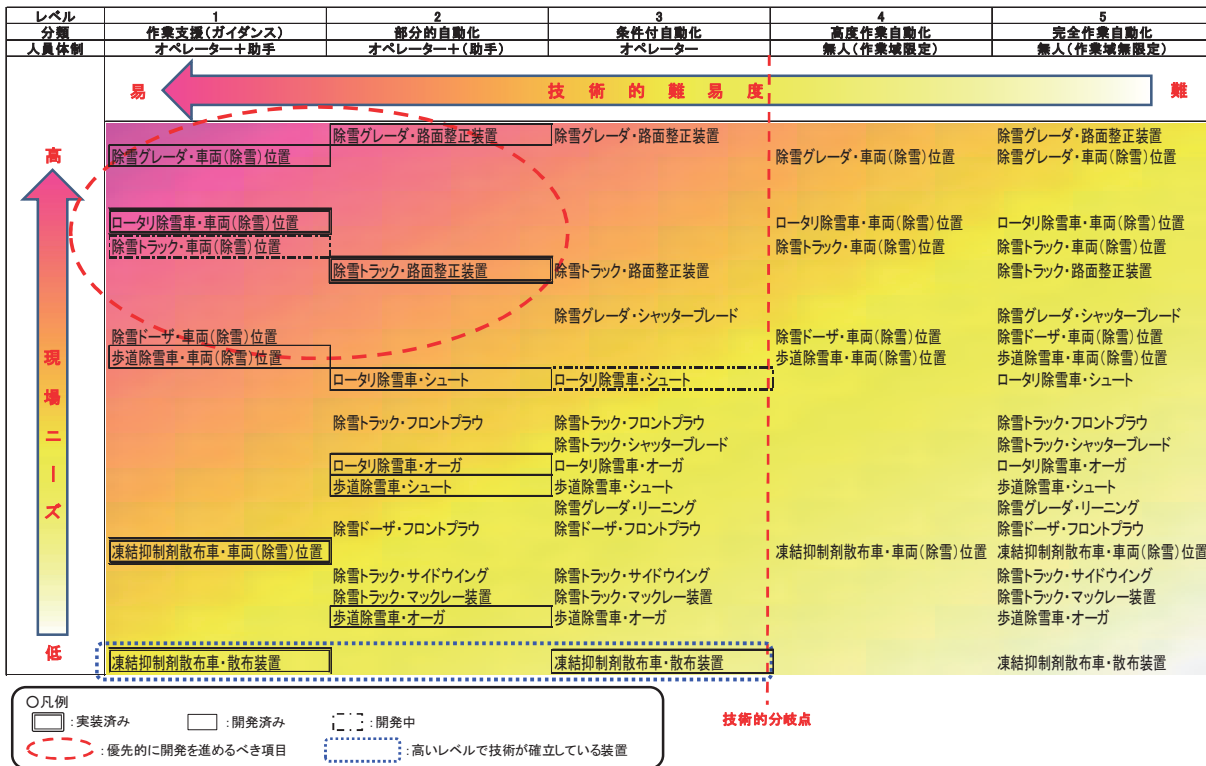


図-14 開発優先度マトリックス表 (案)

る。ニーズ評価が高いものであっても、技術的難易度が高いもの、特にレベル4以上については、車両本体の自動運転技術の確立が必要であり、実現までしばらく待たなければならぬと考えている。これらの技術については、一般の自動車や運送用トラックの技術動向に依存せざるを得ない状況であり、それらの開発を待って除雪機械への転用を検討する流れになると考えている。

7.3 実装に向けた検討

除雪機械の省力化を目的とした開発はこれまでも取り組まれてきており、図-14に示す通りレベル2までの多くが開発済みである。技術としては開発済みであっても、精度や特に経済的な問題が大きな壁となって、これまで現場への導入が進んで来なかった経緯がある。

近年、IT分野の技術開発が急速に進展しており、同時に建設施工現場への導入も加速している状況である。また、準天頂衛星の運用開始や直轄国道における3次元地図データ作成の推進等、除雪作業の自動化に向けた環境は徐々に整備されつつあり、現場導入への難易度は下がっている状況ではあるが、新機能追加に伴う機械単価の上昇は想定される。

この課題を解決する方策の一つとしては、導入により省力化・効率化が見込めるものを実装段階に移すことが考えられる。例えば、図-14で示した凍結防止剤散布車の散布装置については、高いレベルで技術が確立していることから、この装置を導入することで、省力化・効率化による除雪費の

削減が実現できれば、実装が進むことも考えられる。

8. おわりに

除雪機械の自動化・省力化を目的とした開発は過去から進められてきたが、これまでは開発テーマの抽出を肌感覚で行い、抽出後に個々の開発テーマに関するニーズ調査を実施する形で進められてきた。除雪機械の自動化に向けた開発を今後本格的に進めていくにあたっては、機械の開発ニーズや現時点の開発状況等を俯瞰的に捉えたうえで、開発の方向性を判断することが必要であり、本調査では、その判断の基となる各作業装置の開発優先度を網羅的に整理したところである。

今後は、本論文で示した機械開発の優先度評価をベースに、各指標の採否や重み付け等の評価方法の詳細について議論を深め、また、開発の目標年次や実装に向けた環境整備及び予算的措置を含めた計画について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 「人口推計」(総務省統計局)
- 2) 労働力調査年報2017(総務省統計局)
- 3) 「官民ITS構想・ロードマップ2018」(高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議)

36. 視程障害時の除雪車運行支援に向けた

ミリ波レーダによる周囲探知に関する基礎検討

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○新保 貴広
 (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 佐藤 信吾

1. はじめに

近年、積雪寒冷地では異常な暴風雪に伴い、車両の立ち往生や長時間にわたる通行止めなどの発生が増えてきている。

このため、暴風雪による視程障害時においても安全に除雪作業が行え、道路交通の早期解放を可能とする除雪車運行支援技術の開発に対する現場ニーズは非常に高い。

除雪車運行支援技術には、自車位置を推定し車線内を走行するための車線走行支援技術と、除雪車周囲の人・車両・道路工作物などを探知し、衝突事故を防ぐための周囲探知技術が必要である。

本稿では、周囲探知技術の基礎検討として、気象の影響を受けにくく、自動車の予防安全技術に使用されているミリ波レーダ(76GHz)を用いて、実際の吹雪時などに行った探知実験について報告する。

2. ミリ波レーダの周囲探知実験

ミリ波レーダは、ミリ波帯(30GHz~300GHz)の電波を用いて障害物を検出するものである。

電波を利用しているのでカメラやLiDAR^{※1}などに比べ、気象の影響を受けにくい特徴があり、自動車の予防安全技術に使用されるなど実用化が進められているが、吹雪時の影響については明らかにされていない。

そこで、市販車用ミリ波レーダが、暴風雪による視程障害時に周囲探知技術として適用可能か検証した。

現在、ミリ波レーダに使用できる周波数帯は、24GHz帯と76GHz帯である。24GHz帯は近・中距離用、76GHz帯は長距離用として用いられる場合が多い。

実験では、除雪車が前方障害物を探知するために必要な検出距離を70m以上と想定し、長距離用の76GHz帯ミリ波レーダを使用した。

表-1に実験に使用したミリ波レーダの諸元を示す。

表-1 ミリ波レーダ諸元表

項目	性能
最小検出距離	< 1m
最大検出距離	> 175m (> 10dB target) > 100m (> 0dB target)
距離方向検出精度	< +/- 0.5m
同一角度、同一速度に2つのターゲットが存在する場合の距離方向分離性能	< 2.5 m
水平視野角	> 20 deg
同一距離、同一速度に2つのターゲットが存在する場合の水平方向角度分離性能	< 3.5 deg
垂直視野角	4.2 - 4.75 deg

2.1 車両及び人の探知実験(晴天時)

実験は寒地土木研究所石狩吹雪実験場で行った。

ミリ波レーダは、高さや角度が調整できるように設置し、計測場所は直線方向に100m程度確保した(写真-1)。



写真-1 実験場所全景 (実験①, ②)

レーダの設置高と設置角度、対象物との水平検出距離を基本のパラメータとし、以下の実験を行った。

- 実験①：車両の検出実験
- 実験②：人の検出実験

2.1.1 実験①：車両の検出実験

実験①の概略図を図-1に示す。



図-1 実験①概略図

実験①は、車両を対象とし、レーダの設置高と設置角の組合せにより検出可能な水平距離を確認し、以降の実験におけるレーダの設置高、設置角の基準を定めた。

検出状況（代表例）を写真-2に、検出結果（代表例）を図-2に、実験結果を表-2に示す。



写真-2 実験① 車両検出状況（代表例）

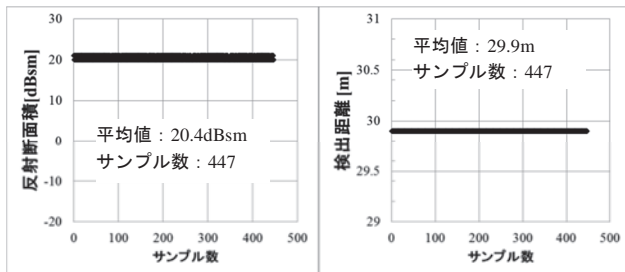


図-2 実験① 検出結果（代表例）

表-2 実験① 検出結果

設置高 Z[m]	設置角 θ [deg]	水平検出距離 R[m]						
		10	20	30	40	50	60	70
1.0	0	○	○	○	○	○	○	○
1.0	1	○	○	○	○	○	○	○
1.5	2	○	○	○	○	○	○	○
1.5	3	○	○	○	○	○	○	○
2.0	2	△	○	○	○	○	○	○
2.0	3	○	○	○	○	○	○	○
2.5	3	□	○	○	○	○	○	○
2.5	4	○	○	○	○	○	○	○
3.0	4	×	○	○	○	○	○	○

○：検出
 △：一部未検出（検出データに一部欠測あり）
 ×：未検出
 □：1回目は検出、2回目は未検出

図-2は、レーダ設置高2m、設置角3度、水平検出距離30mの条件において、20秒程度計測した際の反射断面積及び検出距離を示したものである。

反射断面積とは、レーダから電波の照射を受けた対象物の電波反射強度の係数で、検出に必要とされる反射断面積の目安は-10dBsmである。反射断面積の平均値は20.4dBsm、変動量は-0.4～0.6dBsmであった。

また、検出距離はレーダから対象物までの距離であり、検出距離の平均値は29.9m、変動量は±0mであった。

実験の結果、レーダの設置高3m、設置角4度、水平検出距離10mの条件で、未検出であった1例を除き、設置高・設置角・水平検出距離の全条件において、車両を検出することができた。

実験結果を参考に、基本の実験条件をレーダの設置高2m、設置角3度に定めた。

2.1.2 実験②：人の検出実験

実験②の概略図を図-3に示す。

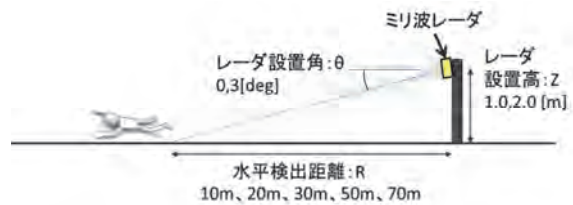


図-3 実験②概略図

実験②は、人を検出対象とし、立ち・しゃがみ・腹ばいの状態に分けて検出の可否を確認した。

検出状況（代表例）を写真-3に、検出結果（代表例）を図-4に、実験結果を表-3に示す。

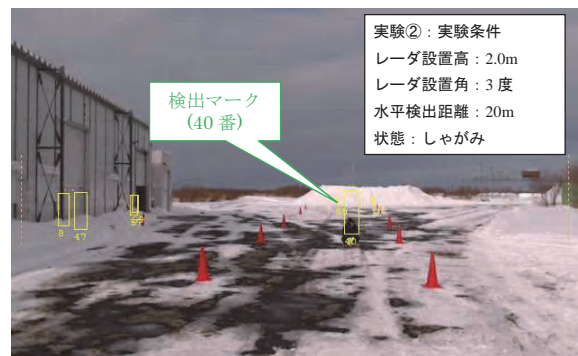


写真-3 実験② 人検出状況（代表例）

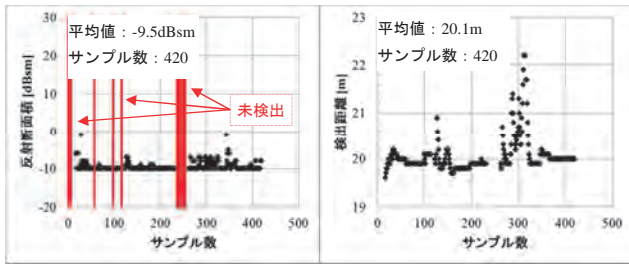


図-4 実験② 検出結果(代表例)

表-3 実験②検出結果

設置高 Z[m]	設置角 θ [deg]	水平検出距離 R[m]										
		10			20			30			50	70
		立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	
1.0	0	○	△	×	△	△	×	△	△	×	△	○
2.0	3	○	×	×	△	△	-	△	△	-	△	△

○ : 検出
 △ : 一部未検出 (検出データに一部欠測あり)
 × : 未検出
 - : 未実施

図-4 は、レーダ設置高 2m、設置角 3 度、水平検出距離 20m、検出対象がしゃがんだ状態において、20 秒程度計測した際の反射断面積及び検出距離を示したものである。

反射断面積の平均値は-9.5dBsm、変動量は-0.5～8.5dBsm であった。

また、検出距離の平均値は 20.1m、変動量は-0.5～2.1m であった。

実験の結果、人が立っている状態では、10m～70m 先まで検出することができたが、姿勢が揺れた場合などでは、検出データの欠測により、一部未検出となる場合があった。

また、しゃがんだ状態では、立っている状態より反射断面積が小さくなるため、さらに未検出となる場合が多く発生した。

腹ばいの状態では、全条件で検出することができなかった。

2.2 降雪時及び雪が堆積した状態の車両探知実験

降雪及び車両に堆積した雪がミリ波レーダの検出性能に与える影響を検証するため、以下の実験を行った。

実験③：晴天時の車両の検出実験

実験④：降雪時の車両の検出実験

実験⑤：降雪により車両に雪が堆積した状態の検出実験

計測場所全景を写真-4 に示す。

吹雪状況での実験を効率的かつ確実に行うため、実験場にミリ波レーダと実験車両を 45 日間存置し、監視用カメラで吹雪の発生状況を確認しながら、遠隔制御により計測を行った。

実験車両は、レーダから 30m の距離に実験車両①を、70m の距離に実験車両②を配置した。

視程距離は、ミリ波レーダから約 50m 離れた箇所に設置されている後方散乱型視程計の計測値と、実験車両の側方に 10m 間隔で設置した視程確認用スノーポールの目視観測結果を採用した。

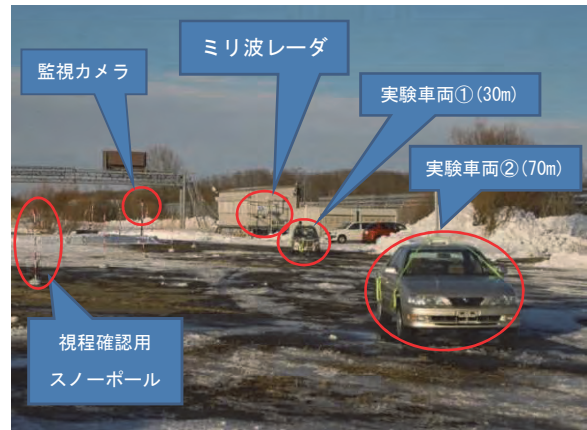


写真-4 実験場所全景(実験③～⑤)

2.2.1 実験③：晴天時の車両の検出実験

実験③の概略図を図-5 に示す。

実験条件は、レーダ設置高を 2m、設置角を 3 度に固定した。



図-5 実験③概略図

実験③は、計測日の 9:30、11:00、13:30、14:30、15:30、16:30 に 1 回当たり 1 分間の計測を行った。

検出状況(代表例)を写真-5 に、検出結果(代表例)を図-6、図-7 に示す。

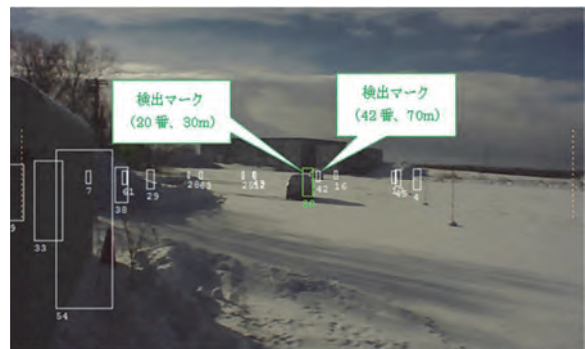


写真-5 実験③ 車両検出状況(代表例)

図-6、図-7は、反射断面積、検出距離、検出角度、検出率について、計測時刻毎に計測データの平均値を示したものである。

実験車両①の平均反射断面積は 6.1dBsm であり、変動量は-2.6~+2.9dBsm であった。実験車両②では 16.3dBsm, 変動量は-0.3~+1.7dBsm であった。

実験車両①の平均検出距離は 29.5m, 変動量は±0.1m であった。実験車両②では 69.5m, 変動量は±0.4m であった。

検出角度は対象物をレーダの正面で検出した場合は 0 度となり、右側に検出した場合が+, 左側に検出した場合が-で表される。実験車両①の平均検出角度は 0.3 度であり、変動量は-0.9~+1.4 度であった。実験車両②では 1.7 度, 変動量は-0.4~+0.8 度であった。

検出率は実験車両①及び②ともに全計測時刻において 100%であった。

晴天時の計測値を基準とし、降雪時及び車両に雪が堆積した状態の計測値と比較した。

2.2.2 実験④：降雪時の車両の検出実験

実験④の概略図を図-8に示す。

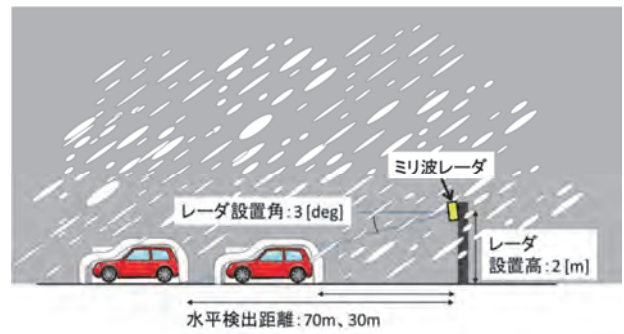


図-8 実験④概略図

実験④は、降雪に伴う視程距離の違いによる検出性能を比較するため、降雪が発生した時間帯で連続的に計測した。

最も視程距離が低下した計測日の検出状況(代表例)を写真-6に、検出結果(代表例)を図-9、図-10に、実験結果比較表を表-4に示す。

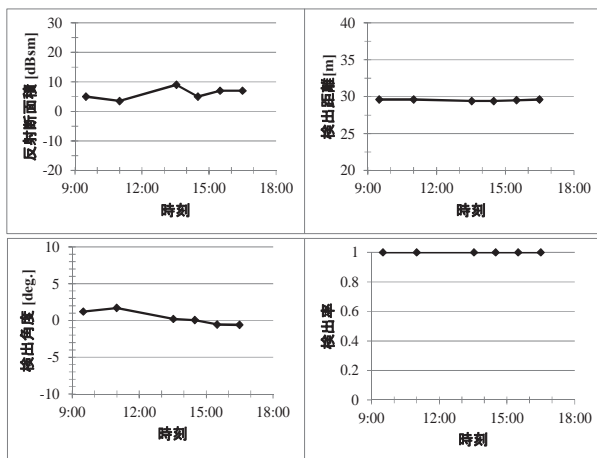


図-6 実験③検出結果(代表例) [30m, 実験車両①]

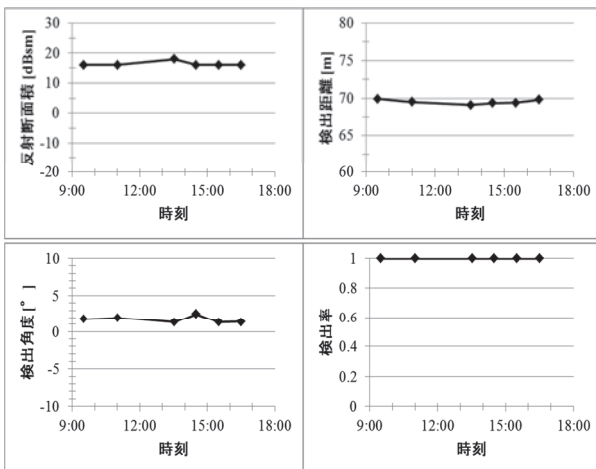


図-7 実験③検出結果(代表例) [70m, 実験車両②]

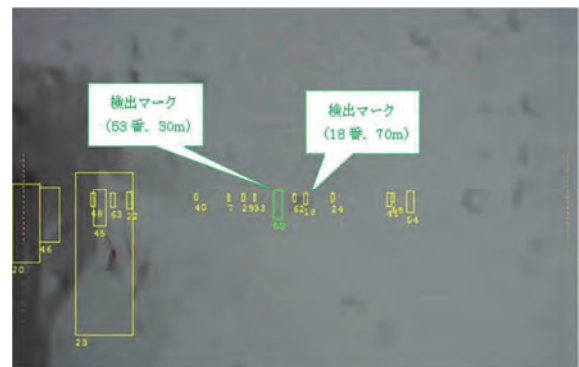


写真-6 実験④ 車両検出状況(代表例)

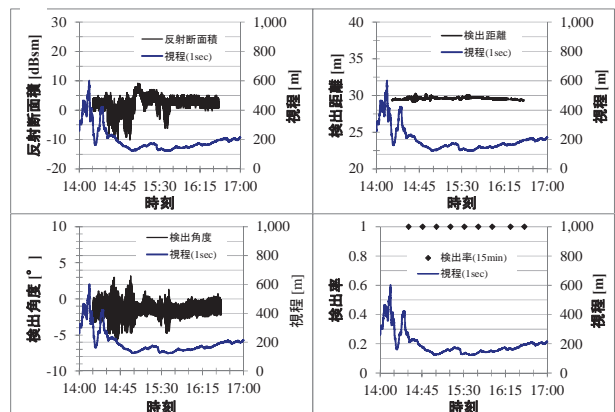


図-9 実験④検出結果(代表例) [30m, 実験車両①]

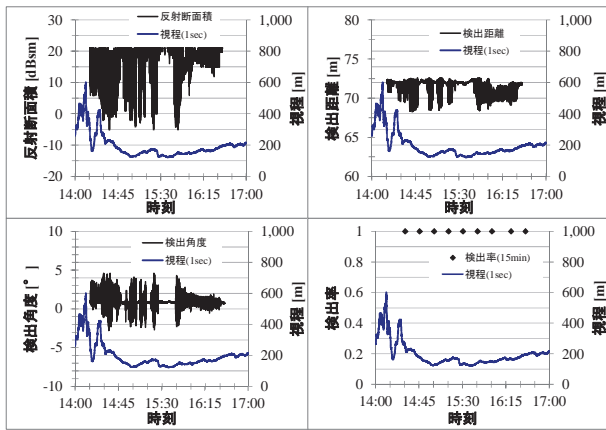


図-10 実験④検出結果(代表例) [70m, 実験車両②]

実験の結果、後方散乱型視程計の平均視程距離は173mで、最低値は写真-6と同日の15時36分の123mであった。また、同時刻の視程確認用スノーポールを目視確認による視程距離は約50mであった。

表-4 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験③：晴天時				実験④：降雪時			
			平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値		
				変動量			変動量			
30m 実験車両①	反射断面積	dBsm	6.1	3.5	9	2.7	-10	9		
	検出距離	m	29.5	29.4	29.6	29.6	29.2	30.3		
	検出角度	度	0.3	-0.6	1.7	-1.5	-5.6	3.2		
	検出率	%	100	100	100	100	100	100		
70m 実験車両②	反射断面積	dBsm	16.3	16	18	18.1	-5	21		
	検出距離	m	69.5	69.1	69.9	71.6	68.3	72.6		
	検出角度	度	1.7	1.3	2.5	0.9	-2.8	4.6		
	検出率	%	100	100	100	100	100	100		

実験③の計測結果と比較すると、視程距離の低下に伴い各計測項目の変動量は大きくなり、特にマイナス方向の変動量が大きくなる傾向が見られたことから、降雪の影響によりレーダの受信レベルが低下することで、計測誤差が大きくなるものとする。

しかし、対象物の検出率に関しては、実験車両①、②ともに検出に必要とされるレーダの反射断面積-10dBsmを上回っており、全ての計測時刻にわたって検出率は100%であった。

このことから、76GHz帯のミリ波レーダは、目視による視程距離が50m程度の吹雪時でも70m先の車両の探知が可能であることを確認できた。

2.2.3 実験⑤：降雪により車両に雪が堆積した状態の検出実験

実験⑤の概略図を図-11に示す。



図-11 実験⑤概略図

実験⑤は、車両上に雪が堆積し、かつ晴天時において、1日6回(9:30, 11:00, 13:30, 14:30, 15:30, 16:30)、1回当たり1分間の計測を行った。

降雪により生じた車両上の積雪深は、ルーフ上に設置した雪尺を監視カメラにより目視計測した。

車両上の積雪深が最も大きかった計測日の検出状況(代表例)を写真-7に、実験車両の積雪状況を写真-8に、実験結果比較表を表-5に示す。

実験車両①のルーフ上の積雪は15cm、実験車両②の積雪は20cm、車両周辺の積雪は40cm程度であり、テールランプ付近の車両背面は露出している状態であった。

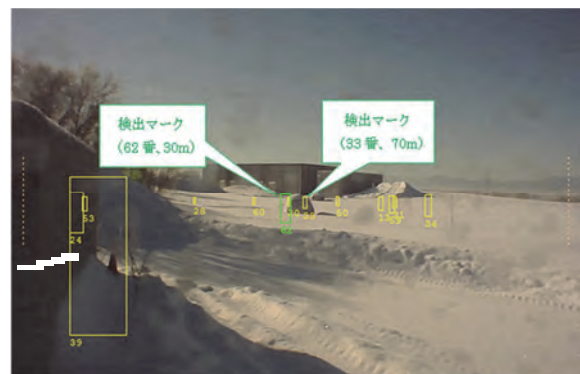


写真-7 実験⑤ 車両検出状況(代表例)



写真-8 実験車両積雪状況

表-5 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験③：晴天時			実験⑤：積雪時		
			平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値
				変動量			変動量	
30m 実験 車両 ①	反射 断面積	dBsm	6.1	3.5 -2.6 ~ 2.9	9	2.2	-6 -8.2 ~ 6.4	8.5
	検出距離	m	29.5	29.4 -0.1 ~ 0.1	29.6	29.7	29.3 -0.4 ~ 0.4	30.1
	検出角度	度	0.3	-0.6 -0.9 ~ 1.4	1.7	-0.5	-2.5 -2 ~ 2.3	1.8
	検出率	%	100	100 0	100	100	100 0	100
70m 実験 車両 ②	反射 断面積	dBsm	16.3	16 -0.3 ~ 1.7	18	15.9	8.5 -7.4 ~ 5.1	21
	検出距離	m	69.5	69.1 -0.4 ~ 0.4	69.9	71.3	70 -1.3 ~ 1	72.3
	検出角度	度	1.7	1.3 -0.4 ~ 0.8	2.5	0.9	0.2 -0.7 ~ 1	2
	検出率	%	100	100 0	100	100	100 0	100

実験車両に雪が堆積することにより、雪が堆積していない状態より平均反射断面積は低下するものの、検出に必要とされる反射断面積-10dBsmを上回っているため、全ての計測時刻において検出率は100%であった。

3. まとめ

本稿では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、除雪車周囲の人・車両・道路工作物などとの衝突事故を防ぐための周囲探知技術について検討した。

市販車用ミリ波レーダ(76GHz帯)を用いて実際の吹雪時に探知実験を行い、目視による視程距離が50m程度の吹雪時でも、70m先の車両の探知が可能であることを確認した。

一方、晴天時に人を対象とした検出実験で、人がしゃがんだ状態や腹ばいの状態では、検出できない場合があった。

現在開発が進められている79GHz帯高分解能ミリ波レーダは、76GHz帯ミリ波レーダよりも距離分解能の向上が見込まれており、しゃがんだ状態や腹ばいの状態の人を検出できる可能性があることから、早期の実用化を期待したい。

今後は、ミリ波レーダの除雪車への搭載方法の検討及び走行時における探知性能の検証を行う予定である。

※1:LiDAR (Light Detection And Ranging : 光による検知及び測距技術)

37. 次世代山岳トンネル施工システムの構築

重機・ヒト・環境の位置・移動・状態を統合ガイダンス

清水建設（株） ○ 小島 英郷
 (独) 労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 清水 尚憲
 (株) 演算工房 林 稔

1. はじめに

世界では、ICT 機器の爆発的な普及や、AI、ビッグデータ、IoT 等の社会実装、あらゆる場面で革新的なデジタル・システムが生まれようとしている。

政府は「未来投資戦略 2018」での成長戦略と「Society 5.0」の本格的な実現にむけて、新たな仕組みの導入を進め始めている。その中で国土交通省は、全ての建設生産プロセスにおいて、ICT 等を活用する i-Construction を推進し、建設現場の生産性を 2025 年度までに 2 割向上させることを目指している。

この様な時代に合わせて、次世代を見据えた新たな施工管理の在り方を構築する試みを始めたので報告する。

2. システム概念

2.1 開発の背景

建設業における労働災害の発生件数は下げ止まりにあり(図-1)、山岳トンネル施工の労災保険比率は、建設業他職種に比べて4倍以上高い。その理由として切羽崩落災害と重機接触災害の二大重篤災害が、依然として繰返し発生している現状があり、少子高齢化問題や働き方改革などを内包する労働生産活動の中での安全性の向上が、生産性の向上に優先する喫緊の課題となっている。

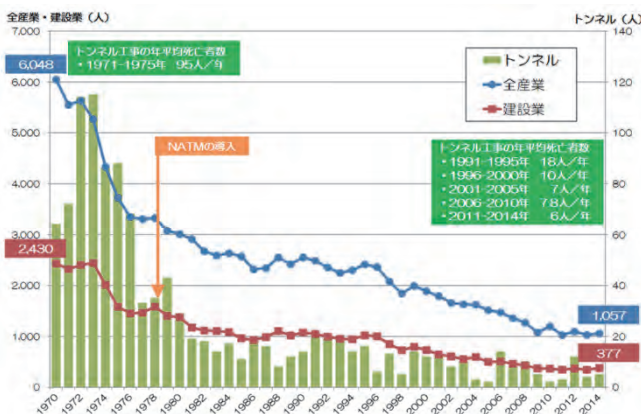


図-1 建設業の労働災害と山岳トンネルでの死亡事故件数の推移

2.2 基本概念

施工システムを構築するにあたり、二つの重要な考え方を概説する。

(1) 支援的保護システム¹⁾

生産現場にある安全衛生上のリスク低減は、安全管理体制や制御システムにより回避しているが、最終的に活動者の能力（教育や察知力）に依存して防御している。支援的保護システムとは、デジタルテクノロジーによる支援システムを組み込むことで、残留リスクに含まれる不確定性を低減することにより、ヒューマンエラーに起因する重篤災害を低減しようとするものである。(図-2)。

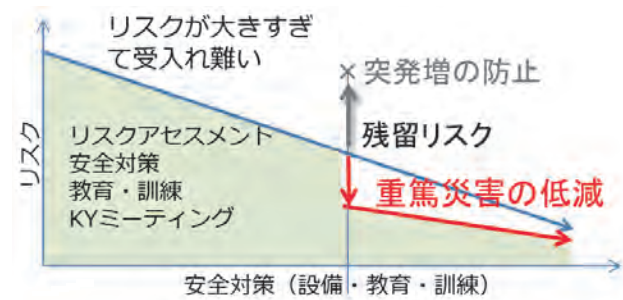


図-2 支援的保護システムの概念

(2) Safety2.0

建設現場の生産活動は、工程進捗にあわせて、工事環境、工事関係者、工事機械等の組合せが目まぐるしく変化する。生産する対象物に対して、安全システムの固定化は、運用体制が困難であることから、これまで元請管理責任の下で師弟関係的な安全リスク管理手法を熟成させてきた。一方、海外欧米などの建設現場では、早々に安全システムとしての考え方に主眼が置かれ、安全設備の様式、安全思想に差異が観られるとも言われている。

ヒトを主体とした安全の方法論、例えば相方への声掛けや命綱の捌き方など、師弟関係による教育的な安全技術を Safety0.0 とし、産業革命後に起きた機械化、ロボット化により、相互を隔離および安全装置の搭載によりヒトの安全を確保する時代の安全工学を Safety1.0 としている。Safety2.0

は、より高度なデジタルテクノロジーを生産現場に組み込むことで、ヒトと機械が協調しながら協働作業を可能とし、安全性と生産性を高次元で達成させようとするものである(図-3)。

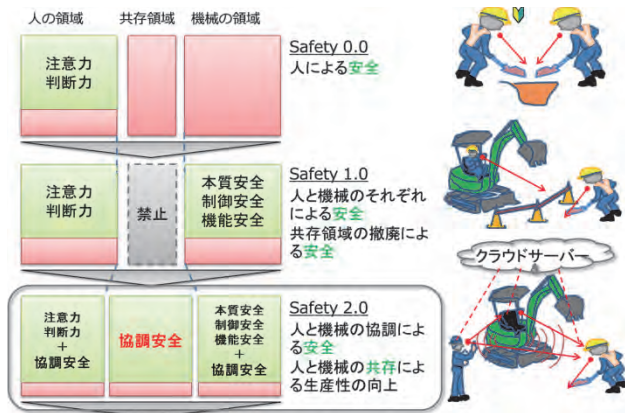


図-3 Safety2.0の概念

2.3 システムの構成

これまで、建設現場の生産活動は、現場代理人、監理技術者の頭脳に経験値としてデータを蓄積・高度分析と共に、彼らからの伝達指令がある一方で、協力関係にある工事関係者との情報共有と技術力、調整能力に下支えされてきた部分が多い。しかし、これらは全てアナログ生産体制であり、下げ止まりの重篤事故も散発する体制に限界状態が来ているとも云われている。

本施工システムは、「支援的保護システム」と「Safety2.0」の概念をベースに最新のデジタルテクノロジーを駆使し、ヒトと機械、生産環境の全てをデジタル情報で見える化、それらから安全ガイダンスを導出するとともに管制体制を通じてヒト・機械に直接指令を出すものである(図-4)。

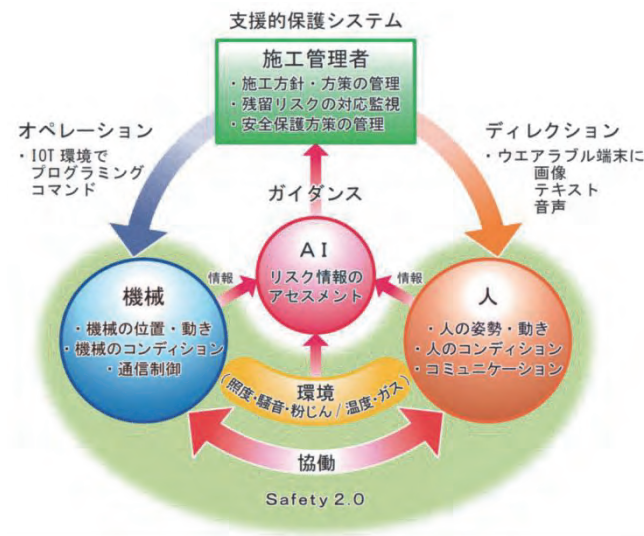


図-4 高度施工管理システムの概念

建設現場の生産活動に係る三要素(機械、ヒト、協働する環境)において、ヒトと機械の位置、移動、稼働状況とそのコンディションの情報、また、ヒト・機械に影響を与える作業環境をデジタル的に常時モニタリングすることで、生産指示に対するPDCA評価がより客観的になると同時に、膨大なデータ解析(もはやヒトによる対応はできないものでありAI人工知能からの判断ガイダンス)から、生産性と安全性がより安定的に底上げ・向上されるものと考えている。

2.4 山岳トンネル高度施工管理システム

山岳トンネル施工は、1970年代以降、工法発展とともに機械化・大型化、従事者の人数が激減し、生産性、安全性が飛躍的に改善されてきた。しかし、掘削作業は、固定された人員と機械編成によって、掘削箇所をサイクル作業を繰り返す工種であることから、他の工種に比べて本施工システムの構築と検証評価に都合が良いことから、まずはトンネル施工でのシステム開発に着手し、その後、他工種へも技術展開することとした(図-5)。

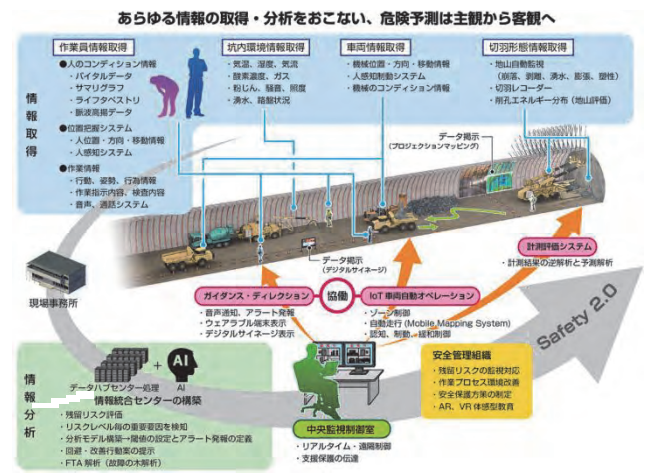


図-5 山岳トンネル高度管理システムの概念

構築する山岳トンネル高度管理システムは、さまざまな生産管理(安全衛生、品質・出来形、作業環境、歩掛進捗など)を含むものの中から、まずは安全衛生について、切羽崩落災害と重機接触災害の2大重篤災害の撲滅(100%)を開発目標とした。

(1) 山岳トンネル重篤災害撲滅の課題

山岳トンネルの労働災害は死に至る重篤災害につながる率が高く、それらは切羽崩落災害と重機接触災害の二つに代表される。このうち、重機接触災害の防止対策には、操縦者からの死角部における挟まれ轢過に対するさまざまな対策ルールがある。車両始動時にオペレーターが行う周囲の目視確認や車両発進・後退時のクラクション合図、作業毎の立ち入り禁止区域設定と重機稼働半径への立ち入り禁止ルールなどがある。最近では、強力なバ

ックブザー音装置やバックモニター、センサーカメラ、受発信タグ装着による接近センサー技術なども導入されている。しかしながら、それら運用とルール遵守徹底により安全が確保されているとしているにもかかわらず、最終管理体制が Safety0.0 に主眼が置かれているがゆえに、安全条件が揃わなくてもヒトの判断次第で稼働が可能な状態にあり、残留リスクの増減回避は、すべて瞬間的にヒトに委ねられた生産体制となっている。

(2) 山岳トンネルの施工環境

山岳トンネル施工では、作業指揮者や作業員は、ヘルメット、保護メガネ、耳栓、防塵マスク、保護手袋、落石防護用のバックプロテクター、保護長靴を常時着用しての作業であり、身体五感の低下状況にある。また、機械熱による高温多湿環境、照明機器による部分陰影の発生と変化、換気システムによる粉じん浄化の常時維持、削岩機等の高騒音に曝露される狭隘空間内での大型重機の高度な機械操作など、他工種の施工環境と比べても、心理・身体・機械・設備のすべてにおいて、過酷な作業形態である。

(3) 位置測位・コンディションシステムの概念

山岳トンネル高度管理システムの根幹技術となる、ヒトと機械の位置・移動・稼働・コンディションを把握するシステムの概念を示す(図-6)。

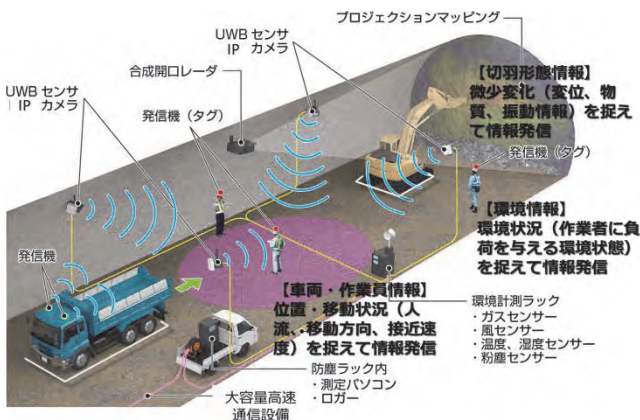


図-6 位置測位・コンディションシステム

3. 現場実証

新東名高速道路 高取山トンネル西工事 (中日本高速道路株式会社) での掘削工事において、約3ヶ月間のシステム検証を実施した(写真-1)。

3.1 装置と方法

UWB (Ultra Wide Band) 測位システムをトンネル側壁の高さ4m位置に20m間隔で設置した。UWB測位システムは、正確な時間情報を提供するマスターアンテナとの同期計測により、誤差が30cm以下の測位が可能であると言われている。掘削に係る作業員および重機車両の全てに発信タグを2個

ずつ付け追尾した。一方で、トンネル形状内では、電波の乱反射によりセンシング環境が低下することも知られており、画像からの位置測位と合せたハイブリッド方式も検証することとした。また、構成するシステム機器のロバスト性も確認した。



写真-1 位置・移動把握技術の検証状況

3.2 データの取得検証

(1) ヒトのコンディション

作業サイクルとヒトの運動頻度データを比較して相関関係を観たが、ヒューマンエラーを防止する為のコンディションデータを蓄積するためには、注意意識や交感神経の状態から心身状態の予測に至るアルゴリズムが必要と考える(図-7)。

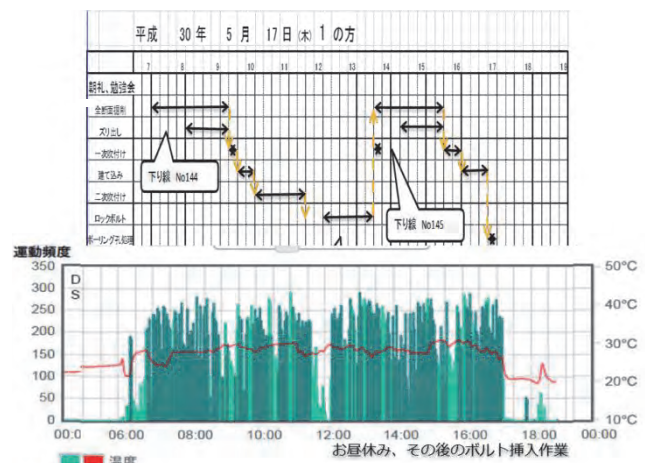


図-7 ヒトの活動量

(2) ハイブリッド追尾

取得したデータから、もっとも単純な一例を示す(図-8)。センシングエリアには、重機車両が一切なく、職長が始業前の環境点検に徒歩で入った状況である。UWB位置測位と画像処理による位置測位の結果を比較すると、UWB測位が公称精度以上にマルチパス発生の影響を受けることが分かった。



図-8 位置・移動の比較結果

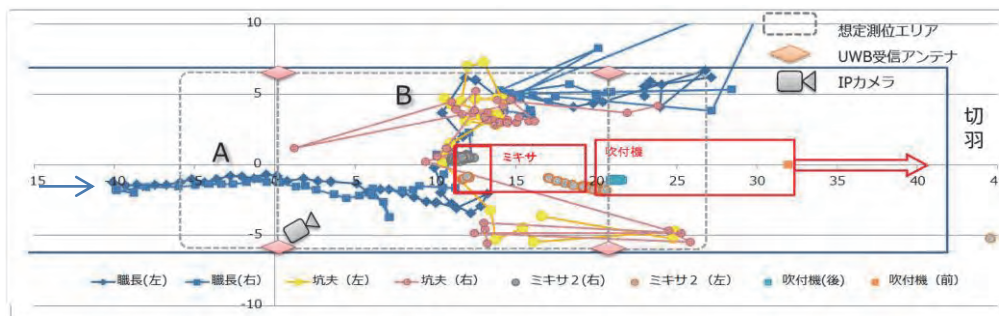


図-9 UWB位置測位システムによる結果

(3) 重機械による干渉

UWB 測位システムが、坑内環境の影響を受けている例を示す(図-9)。センシングエリアの半分に重機車両が駐機した吹付け作業中に、坑口側から進入した職長が坑夫に声を掛け(状況 A)、両者がミキサ車の反対側に向かった(状況 B)ものである。この駐機車両の有り無しにより、測位環境が大きく変化することが見て取れる。一方、動画データからの画像処理による位置測位は、モノのそばに立ち止った状態や車両背面を通過する行動は追尾できず、また、粉じんや光陰の関係から測位が乱れる場合も確認された。

3.3 危険パターン設定と抽出

社内にデジタル保管されているすべての事故報告書と、山岳トンネル施工マニュアル・個別作業手順書から、重機接触災害に繋がる 16 の危険パターンを分類設定し、取得データから危険パターンとの照合抽出が可能であることを確認した。(表-1)。

3.4 結果と考察

ヒトの活動量は、作業内容との相関性は見られなかったが、ヒヤリハットにつながる心理的な状態変化の予測には、心拍や脈圧などの他の相関項目も取得評価するアルゴリズムが必要であると考えられる。

電波方式による測位システムは、狭隘部での大型重機(複雑な金属構造)による乱反射の影響は避けられないと考える。また、画像のヒト抽出技術

表-1 16危険パターンと抽出結果

No.	危険パターン名	検知有無	検知精度 ^(※2)
1	スリ出し作業中の立入禁止区域への進入	有	×
2	車両走行路への進入	— ^(※1)	—
3	重機が後退している	有	×
4	重機を離れる	有	×
5	止まっている重機の近くでの作業を行う(運転者搭乗中)	有	×
6	重機の急発進	有	△
7	重機車前周囲の確認をしない	有	×
8	必要な照度が保持されていない	有	○
9	坑内における重機の移動が最高速度(10km/h)を超え	有	△
10	車両系建設機械の乗車席以外の箇所に作業者が搭乗	有	×
11	坑内の気温が37度を超える場所がある	無	○
12	切羽近くに長時間滞在	無	×
13	換気が不十分なままの作業	無	○
14	(私病等により)1箇所に停止する	有	△
15	WBGT(熱中症指数)の値が、基準値を超過する	有	○
16	重機・車両の切返し中に作業員が近づく	—	— ^(※1)

(※1):今回の評価期間中の測定は不可または困難

(※2):測定精度に依存する、データクレンジング負荷 (○小 △中 ×大)

は、ヒトの立位特徴量を学習したもので、画角設定にはある程度の制限があった。システムのロバスト性が原因と思われる事象も度々発生し、取得データの欠損や精度の課題と合せて、高度なデータクレンジング技術が必要であることがわかった。

4. おわりに

3ヶ月間の現場実証において、システム概念の有効性が確認できた成果は大きかった。一方で、システムの運用面の課題が大きく、また、“初代 AI 安全所長”を育てあげるには、膨大なデータ量が必要であり、良質なデータ取得のためのフルオート化も重要な課題である。閉所空間内での位置測位の精度向上技術もタイムリーに取り入れていきたい。

建設業界においても、デジタル化を避けることはできず、バーチャル空間(理想)と現実空間(現場)との高度な融合認知・ガイダンスが、今後の生産性と安全性を高める最重要技術と考えている。

参考文献

- 1) 清水尚憲,大塚裕,濱島京子,土屋政雄,梅崎重夫,福田隆文,北條理恵子,機械安全-支援的保護システム(Supportive Protective System,SPS)(統合生産システム(IMS)におけるSPSのリスク低減効果,日本機械学会論文集2018年84号860号p17-00425

38. 次世代社会インフラ用ロボット導入に関わる トンネル点検記録作成支援ロボットの要求性能検討

-性能評価にかかる指標と検証手順について-

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課 ○東山 遼
 土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム 新田 恭士
 国土技術政策総合研究所 社会資本施工高度化研究室 大槻 崇

1. はじめに

我が国の社会インフラをめぐるのは、老朽化の進行、現場の担い手不足等の課題に直面している。国土交通省では、より効果・効率的なインフラ点検・災害対応を実施するためにロボットの現場導入を推進してきた。

今までの経緯としては、H25 年度に経済産業省と共同の検討会でロボットの重点導入5分野（橋梁、トンネル、水中（ダム、河川）、災害対応、災害応急復旧）を設定し、H26 及び 27 年度に重点5分野についてロボットを民間企業等から公募し、直轄現場等でその性能を検証してきた。H26 及び 27 年度の現場検証において一定の性能が確認された技術について、災害対応分野のロボットは実際の災害現場での積極的な活用を推進し、維持管理分野のロボットは実際の点検と同等の条件下でその実用性の検証（「試行的導入」）を進めてきた。今回は、トンネル維持管理ロボットにおける「変状写真の撮影」を行う点検記録作成支援ロボットについて、H29 年度までに行ってきた「試行的導入」に伴う評価およびトンネル点検記録作成支援ロボットを定期点検等で実装するための性能を明らかにするために作成した要求性能（案）について紹介する。

2. 現在、想定しているロボットの利用場面とその先に目指している将来像

現在のトンネル定期点検は、近接目視により行うことを基本としており、必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用して行うと「道路トンネル定期点検要領」に記載されている。具体的には、肉眼により部材の変状等の状態を把握し評価が行える距離まで近接して目視を行い、打音検査（ハンマ等）、現地での計測・記録（チョーキングと写真撮影、野帳への記録）を実施することとされている。（図 1）このように、現段階ではトンネルの定期点検において部分的にでもロボットが人の作業を代替するに至っていない。

【従来点検の進め方】

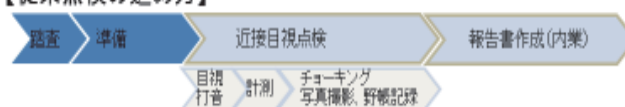


図 1. 従来点検

このような状況の下、H27 年度まで確認できたロボット技術の進捗状況が「近接目視には及ばないが、一定程度以上の変状は確実に確認できるレベル」であることを考慮して、H29 年度に想定した当面の点検ロボット利用場面を図 2 の通り設定し、ロボットの実用化を図ることとした。

具体的には、点検員が目視確認、打音検査までは行うが、一部の変状や、点検の際にトンネル内壁面にチョークで記録された文字や記号はロボットで写真撮影し、人間による写真撮影の大部分を省略（ロボットでの撮影では不鮮明さが残る可能性があるものは近接撮影）、更にロボットで十分計測可能な変状が写真撮影できる技術の場合には、当該変状については人による計測とチョーキングを省略することで効率化を図るものである。

（図 2、図 3）

【ロボット手法(当面)】

※近接目視には及ばないが、一定程度以上の変状は確実に確認できるレベル。

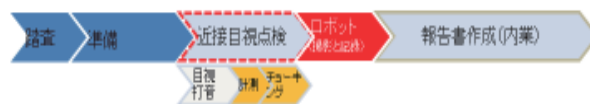


図 2. 当面のロボット活用

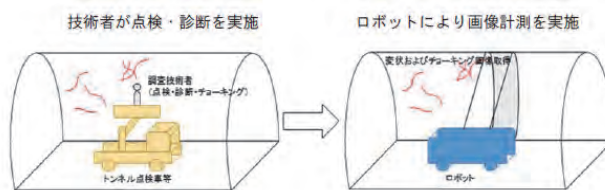


図 3. ロボット活用イメージ

このようにして、国内の定期点検では実用化してこなかったロボットの導入を図るものである。

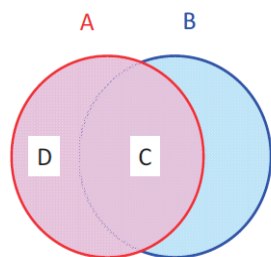
また、更なる活用拡大の将来像として、ロボット技術が「近接目視で確認できる全ての変状をロボットで確認できるレベル。」と検証できた際には、図4のような活用を想定している。具体的には、ロボットによるスクリーニングを近接目視点検に先だって行い、点検範囲の絞り込みを行ったうえで、点検員が手の届く範囲に近づき、目視確認、打音検査までは行うが、写真撮影とチョーキング（軽微な変状を除き）をほぼ全面的に省略することで、大幅な効率化を図るものである。（図4）



図4. 将来のロボット活用

3. 評価指標について

上記のような活用に向けた検証にあたり検討した評価指標について説明する。本検証で最も重要な指標となったのは、平成30年3月14日に意見を募集した「道路トンネル点検記録作成支援ロボット技術の要求性能(案)に対する意見を募集します」の公表で設定した「A-1:変状写真の撮影」部分である。この評価項目は、「点検員が当該技術により取得した画像(写真)を見て、別添に示す画像の判読精度(変状等を判読できる画像であること、変状と誤認しない画像であること)を有している。」である。評価指標は、判読可能率「(近接目視で検出した変状のうち、当該技術で記録した画像にて判読可能な変状箇所数) / (近接目視で検出した変状箇所数)」とした。



- A : 近接目視で検出した変状箇所数
- B : 当該技術で記録した覆工展開画像
- C : Aのうち、当該技術で記録した画像にて判読可能な変状箇所数
- D : Aのうち、当該技術で記録した画像にて判読不可能な変状箇所数(判読不能)

判読可能率 = C/A (Dが0であれば、C=Aとなり100%)

図5 判読可能率のイメージ

この判読可能率で示していることは、ロボットが過検出(変状でない箇所を誤って検出すること)は許容されるが、未検出(人が近接目視で検出した変状箇所をロボットが検出できないこと)は許容されないことである。

つまり、図5のA(近接目視で検出した変状箇所数)の内、D(Aのうち、当該技術で記録した画像にて判読不可能な変状箇所数)が0で、A=Cでなければならないということである。(Cは、Aのうち、当該技術で記録した画像にて判読可能な変状箇所数)この指標は、人の作業をロボットが代替する際にロボットの見逃しがあつてはならないという条件を反映したものであり、ロボットの社会実装に寄与する優位な指標である。

4. 本検討で行った検証手順について

(1) 検証トンネルの選定

当該指標を用いた、今回の検証では、トンネル定期点検時のスケッチ作業から変状展開図作成に至る作業における最先端のロボット技術による支援に対して、評価を行うものである。このことを踏まえ検証対象トンネルとして、葦尾根トンネルと国道246号線の新諸淵トンネルを選定した。H27年度の試行的導入においては、一般的な道路トンネルの条件を念頭におき下記の3点の条件のもと、5つのトンネルを検証候補地として、現場説明会、開発者との意見交換会を行った結果、葦尾根トンネルにて検証を行うこととした。

- ①断面の大きさは2車線道路程度。
- ②覆工の材料はコンクリート。
- ③山岳工法(矢板工法またはNATM)で建設されたトンネル。

また、H28年度の試行的導入の現場選定においては、ロボットの現場適用性を確認することを念頭におき、下記の4点を条件に選定を行い、5つのトンネルを検証候補地として、新諸淵トンネルにて検証を行うこととした。

- ①直近に点検し覆工表面にチョーキングが残っているトンネル(H28年度にトンネル定期点検を実施したトンネルが対象)。
- ②点検結果(変状展開図)が作成されているトンネル。
- ③矢板工法のトンネルで変状(ひび割れ、溶脱物等)が比較的多いトンネル。
- ④直轄国道のトンネル。

また、検証作業の効率を高めるために、対象トンネルに対して全てのスパンを対象にせず、検証に優位なスパンを抽出(トンネル坑口付近とトン

ネル中間部（光の影響の確認）、変状種類の多い区間）し評価を行った。（図6、図7）

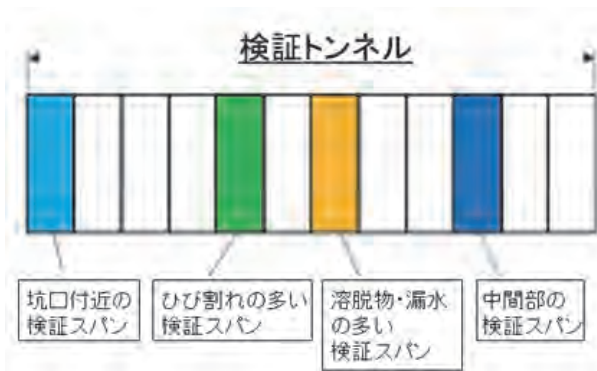


図6 検証箇所を選定



坑口付近のスパン

ひび割れの多いスパン



溶脱物の多いスパン

図7. スパン抽出例

(2) ロボット計測の流れ

本試行的導入は、従来トンネル定期点検実施により作成された変状展開図（図8）とロボット技術により取得された画像をオルソ化した覆工展開画像（図9）を比較検証した。

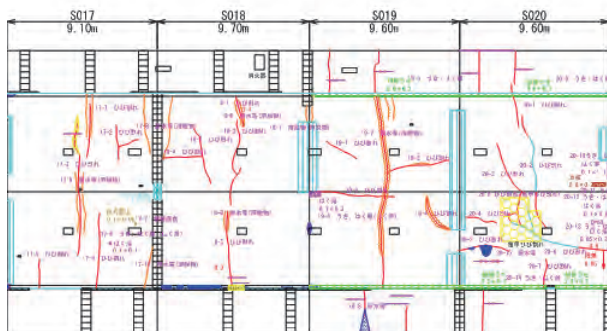


図8 変状展開図

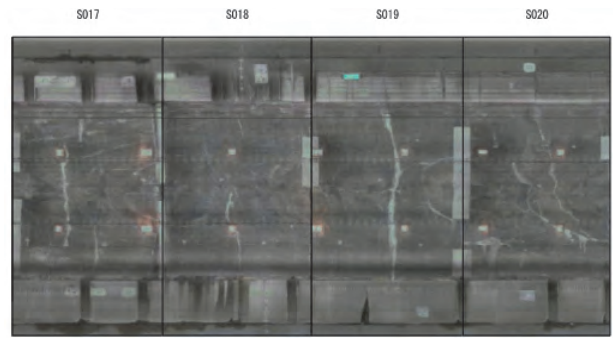


図9 ロボット技術による覆工展開図

評価対象は、「道路トンネル定期点検要領」に基づいた近接目視において、変状展開図に記載がある変状とした。評価は、ロボット技術による覆工展開画像にて該当する変状の存在を確認し、「判読可能な画像精度であるか」を判定することにより行った。また、判定は、「道路トンネル定期点検要領」における「5. 定期点検の体制」に示される「(1) 必要な資格要件」((1) 大学卒業後、5年以上のトンネルに関する実務経験を有するもの、(2) 短大・高専卒業後、8年以上のトンネルに関する実務経験を有するもの、(3) 高校卒業後、11年以上のトンネルに関する実務経験を有するもの、(4) 前項1)～3)と同等以上の能力を有すると道路トンネルの管理者が認めたもの)を満足する資格を有した3名により行うものとし。この3名が判読可能とした場合に評価することとした。

5. 検証技術と検証結果

「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会トンネル維持管理部会」の審議を経て設定した上記の道路トンネル点検記録作成支援ロボット技術に対する要求性能に関し、開発者から申請のあった「変状写真の撮影」について、試行的導入の現場検証の際に得られた結果を用いてロボット技術の評価を行った。この試行的導入を行ったロボット技術は、H27年度の現場検証において、検証委員会より「I. 試行的導入に向けた検証を推奨する」と評価された表1の4技術である。

試行的導入を行った4技術全てにおいて、「圧ぎ、ひび割れ」、「うき、はく離」、「鋼材腐食」を表す変状箇所のチョーキングを全箇所識別できた。（表2）なお、当該4技術の要求性能（性能指標）に対する評価結果については、「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会トンネル維持管理部会」の審議を経て、平成30年3月29日に「道路トンネル点検記録作成支援ロボット技術（変状写真の撮影）の評価結果を公表します」においても公表を行っている。

今後、当該4技術は、実用化される予定である。

表1. 評価対象技術

技術名	開発者	技術概要
走行型高速3Dトンネル点検システム MIMM-R (ミーム・アール)	パシフィックコンサルタンツ株式会社	取得した3D可視化情報を総合的に活用し健全性診断を支援することにより、トンネル点検全般の高度化、効率化、省力化、安全性向上、コスト削減を図れる。
走行型高精度画像計測システム (トンネルトレーサー)	中外テクノス株式会社	交通規制なしで撮影ができ、50km/hの速度では0.3mm以上のひび割れを検知する。交通規制内の低速撮影では画像は近接点検時と同等の解像感のある高精細な画像が得られ、覆工面の状態をより正確に記録することができる。
高精度トンネル覆工計測装置	西日本高速道路エンジニアリング 四国株式会社	覆工コンクリートのひび割れと、はく離の前兆である段差を検出し、コンクリート片がはく離する恐れのある箇所を非接触かつ定量的に検出する技術。
トンネル覆工コンクリート内部・表面調査システム	三井造船株式会社	マルチパスレーダによる計測データを覆工表面レーザ計測者による展開画像データと統合することで、トンネル覆工コンクリートの表面と内部状況を同時に把握し、総合的な判定・管理が可能となる。

表2. 検証結果

チェック項目の有無	変状種類	変状等箇所数				
		現行点検(基準)	中外テクノス	パシフィックコンサルタンツ	ネクスコエンジニアリング	三井造船
有り	圧ざ、ひび割れ	76	76 [100%]	76 [100%]	76 [100%]	76 [100%]
	うき、はく離	47	47 [100%]	47 [100%]	47 [100%]	47 [100%]
	鋼材腐食	未検証				
無し	漏水等	71	71 [100%]	71 [100%]	71 [100%]	71 [100%]
	計	196	196 [100%]	196 [100%]	196 [100%]	196 [100%]

1) 100%は判読可能率

6. 今後の方策

(1) 後発類似技術の推進

「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会トンネル維持管理部会」で評価された技術以外の技術について、平成30年7月19日に「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！～新技術情報提供システム(NETIS)テーマ設定型(技術公募)の実施～」にて公表した道路トンネル点検記録作成支援ロボット技術評価指標(案)に基づき新技術活用システムの「テーマ設定型」による公募と検証を進めており、今回検証した4技術に続く技術を求めている。

(2) 納品における覆工画像の活用に向けた検討

今年度からトンネル・橋梁の定期点検(各10件程度)において、従来点検の実施に合わせて、要求性能案に対する評価が高水準である点検記録作成支援ロボットの活用を点検受注者により実施し、3次元的に正確な位置情報を付した変状等の記録について3次元モデルを介して蓄積する試行を実施する。今後、AI等による変状検知機能を組み合わせ、「人手」で行っている点検記録写真の整理等についての代替を実現し、効率的な公物管理を目指す。

(3) AI・ロボット等革新的技術のインフラ分野への導入

国交省ではロボットの導入を推進してきたが、今後は「人の作業」の支援のみならず、「人の判断」の支援が生産性の向上のカギであり、建設生産プロセス、維持管理、災害対応分野での人工知能(AI)の社会実装を目指している。このために、土木技術者の正しい判断を蓄積した「教師データ」を提供し、民間のAI開発を促進するとともに、技術開発成果を活用できる環境整備に取り組む。



図10. AI 施策概要

7. おわりに

部会委員並びに、関係者には大変なるご尽力を賜り心から感謝申し上げますところである。今後はAIの導入も踏まえた維持管理分野におけるロボット導入について、点検技術者が判断できる環境整備にも寄与できるように努めていきたい。

II 梗概集

●ポスターセッション要旨

1. 災害時に活躍する遠隔操縦バックホウ等の出動実績について

～ 無人化施工 遠隔操縦機械 ～

九州地方整備局 九州技術事務所

副所長 松岡 雅博

○施工調査・技術活用課長 原 堅次

1. はじめに

近年、日本における自然災害は、地震や台風、局地的な集中豪雨等、各地で甚大な被害をもたらしている。

自然災害により発生した被災現場では、早急な復旧作業を求められるが、二次災害の恐れがあるなど人が立ち入ることが困難な現場では、無人化施工による安全な施工方法が望まれている。

今回、九州で発生した近年の大規模災害において、国土交通省が保有する分解組立型バックホウが全国各地から応援出動した事例や、小規模な災害では迅速な出動により、緊急復旧活動に寄与した出動実績を紹介するものである。



2. 無人化施工

無人化施工とは、災害復旧工事等の現場において、ラジコン装置等を取り付けた建設機械群をオペレータが遠隔地より安全かつ円滑に操作するもので、特に二次災害等の恐れがある現場においては、非常に有効な施工方法といえる。

しかし、無線で遠隔操縦できる建設機械は全国的に少ないうえに大型の機械が多いため、災害現場での施工事例が少ないのが現状である。無人化施工機械は全国に配備されているが、災害が多発した九州地方整備局で保有する無人化施工機械等を紹介する。

① 分解組立型バックホウ



・現場に12ブロックに分解し陸送、空輸が可能。

② 遠隔操縦式バックホウ



・現地に持ち込むだけで遠隔操縦が可能な専用機械。

③ 簡易遠隔操縦装置（バックホウ用）



・汎用バックホウに装着することで遠隔操作が可能となる装置。

3. 九州地方整備局における出動実績

九州地方整備局における出動実績を以下に紹介する。

■ 無人化施工機械出動履歴

年度	出動先	災害名等	出動機械
平成22年度	鹿児島県	南大隅町土石流	簡易
平成24年度	鹿児島県	国道220号土石流災害	簡易
平成27年度	鹿児島県	垂水市土砂災害	分組、遠隔
平成28年度	熊本県	熊本地震	分組、簡易
平成28年度	鹿児島県	垂水市土砂災害	遠隔
平成29年度	大分県	豊後大野市地すべり	簡易
平成29年度	福岡県	九州北部豪雨	分組
平成29年度	宮崎県	国道220号斜面崩壊	分組、遠隔、簡易
平成30年度	大分県	中津市耶馬溪町山崩れ	分組、遠隔、簡易

分組：分解組立型バックホウ
遠隔：遠隔操縦式バックホウ
簡易：簡易遠隔操縦装置



4. おわりに

今後の災害対応に向けて、無人化施工機械のオペレータの育成や操作性の向上等を図り、災害現場の早期復旧のため、無人化施工を積極的に導入し地域の皆様の安全・安心に努めるものである。

2. 海上コンポーザー（SCP）作業船 （ぱいおにあ第30 フドウ丸）

株式会社不動テトラ ○ 深田 久
伊藤 竹史

1. 概要

サンドコンパクションパイルは、良く締め固まった砂杭を地盤中に造成することで、粘性土地盤の支持力増大、沈下の低減、安定性の増大を図るとともに、砂地盤の締固めを図ることによって液状化防止を図る地盤改良工法であり、陸上及び海上の地盤改良工法として広く適用されている。

不動テトラはこのサンドコンパクションパイルを世界で初めて開発し、コンポーザー工法として世界各地で採用され、パイル延長は地球訳9周分の施工実績を有している。コンポーザーの施工手順を図-1に示す。施工機械はケーシング（鋼管）の上部にバイブロハンマーを装備しており、振動を利用してケーシングを地盤中に貫入する。所定深度に達した後にケーシングを引抜き、所定深度まで砂を地盤中に排出した後に、ケーシングを打ち戻して砂杭の径を拡大し、よく締め固まった砂杭を地盤中に造成するもので、打戻し式サンドコンパクションパイル工法と呼ばれている。

今回紹介するサンドコンパクション船「ぱいおにあ第30 フドウ丸」は、海洋における埋立造成事業や既存岸壁の耐震化等に適用される地盤改良船である。海底地盤中に直径1,000~2,000mmの締め固まった砂杭を造成することができ、各種護岸・岸壁・栈橋等の沈下・安定・支持力対策や液状化対策等を行う。大深度施工に対応し、最大で水面下70mまでの打設が可能である。

「ぱいおにあ第30 フドウ丸」は、平成5年に大水深・大深度施工を可能とする最新鋭のサンドコンパクション船として造船し、沖合人工島をはじめとする埋立造成事業に対応してきた。

近年、輸送の国際競争力を高め、物流ネットワークを強化する政策が推進される中、大型のコンテナ船やクルーズ船の接岸を可能とする大深度岸壁の整備や耐震化が社会的要請となっており、海洋での地盤改良

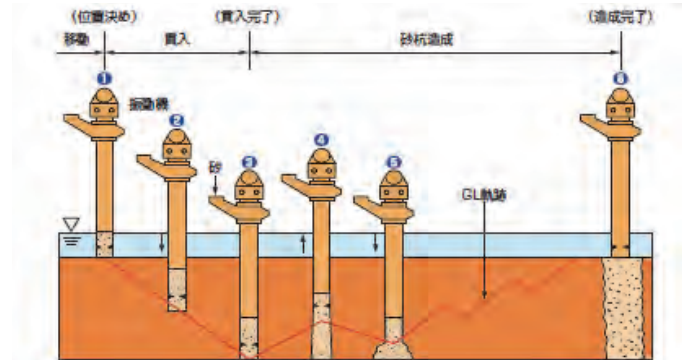


図-1 コンポーザーの施工手順



写真-1 ぱいおにあ第30 フドウ丸の概要

工事の必要性を見込み、今回、環境対策や安全対策、操船の自動制御など、作業の効率化と機能の向上を含めた以下のリフレッシュを実施した。ぱいおにあ第30 フドウ丸の概要と仕様をそれぞれ写真-1と表-1に示す。

2. ばいおにあ第30 フドウ丸のリニューアル

(1) ネットワーク型 RTK-GPS 測位 (VRS 方式) 導入による作業効率化

VRS 方式とすることで、速やかに正確な位置情報を得ることができる。ここで、VRS (Virtual Reference Station) とは、仮想基準点方式と呼ばれ、複数の電子基準点の観測データから、測量箇所のごく近傍に基準点があるかのような状態を作り出す技術である。電子基準点は、国土地理院より提供されており、この情報を利用することにより、測量データの誤差を補正し、高精度な位置情報を取得できる仕組みである。

これにより、これまで必要であった固定局の設置が不要となり、2人で2台必要であった受信機も1人1台で測量が可能となり、測量作業が軽減される。誘導画面の事例を図-2に示す。

(2) 作業船位置・回航情報システム導入

作業船の回航経路を記録・表示するシステム(全日本漁港建設協会)を導入したことで、作業船の現在位置や回航履歴など、作業船の管理運用に必要な様々な情報がインターネットで提供される。パソコンやスマートフォンのブラウザで閲覧でき、遠隔にある管理事務所などで、リアルタイムの情報を得ることが可能となった。

3. 施工実績

今までの施工実績には、東京国際空港(羽田)、関西国際空港、東京湾アクアラインやみなとみらい21等がある。

4. おわりに

今回、ばいおにあ第30 フドウ丸のリフレッシュに伴う新機能について報告した。そのほか、船員・作業員の作業空間や居住環境改善のために、室内設備を一新している。今後は、さらに実績を積み重ね、新しい能力を発揮していきたいと考える。

表-1 ばいおにあ第30 フドウ丸の仕様

		ばいおにあ第30 フドウ丸
砂杭径	(mm)	1,000~2,000
砂杭ピッチ	(m)	2.0~6.3
打設深度	(m)	水面下70
連装数	(連装)	3
パイプロハンマ	(kW)	300
ケーシング径	(mm)	800~1,200
船体寸法		70×30×4.6
全長×全幅×深	(m)	
排水量	(ton)	4,900
リーダー高	(m)	水面上90
主機関	(PS)	3,000×2
補機関	(PS)	155
主発電機	(kVA)	2,500×2
補発電機	(kVA)	125

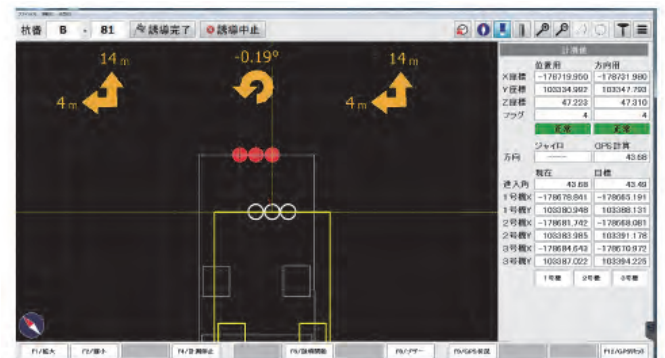


図-2 VRS-GPS 測位システムの誘導画面



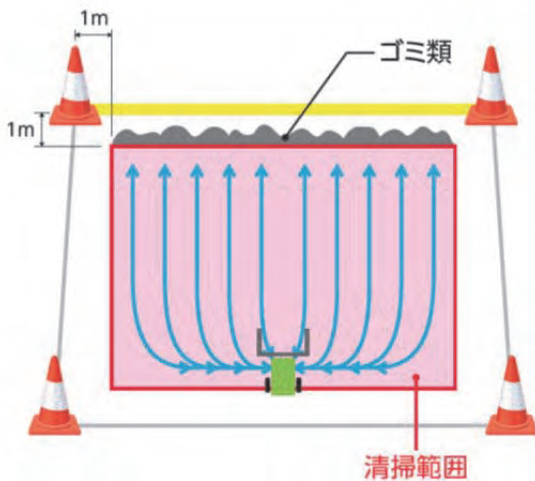
図-3 作業船位置情報システムの概要

3. 自立型清掃ロボット「T0ギャザー」

株式会社レンタルのニッケン 飛山 太郎

当該清掃ロボットは、作業所や工場等の作業員の負担軽減策として、自動的に清掃対象物をかき集めるロボットです。

国内建設需要が増加傾向にあるなかで、建設技能労働者の不足が大きな課題となっています。「T0ギャザー」(ロボット本体長さ64cm×幅40cm×高さ29cm、本体重量22kg、ブレード幅100cm)は、作業所の床上にある清掃対象物をかき集めるロボットであり、あらかじめカラーコーンにて指定された四角形の清掃領域内の一片に清掃対象物を集めることが特長です。四隅に置かれたカラーコーンをレーザースキャナで検出することで清掃領域を判断し、移動経路を自動生成します。



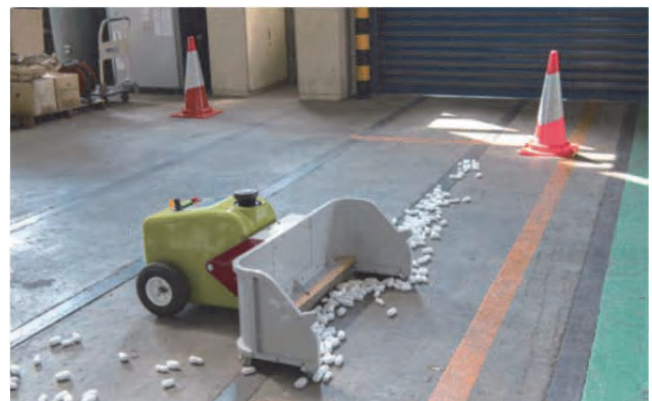
これまで耐火被覆工事では、床上に落下した材料を作業終了時に人が清掃していました。1日の作業時間の約20%を清掃作業に費やす重労働であり、作業所の労働環境を改善するために自動清掃ロボットが要望されていました。従来の吸引型清掃ロボットでは、吸引対象物の量が多く、すぐにタンクが満杯になってしま

うため効率が悪く、余計な人手もかかっていました。当該清掃ロボットを作業時間中に随時作動させることで、作業後に一片に集められた材料を人手で集積、清掃できるため清掃時間を半減させることを目標としています。清掃スピードは、清掃領域100m²の範囲で30分以内(参考)でかき集め可能です。

全体図



作業の様子



4. スマートコラム工法

-全自動施工管理が可能な 狭小地対応型 格子状地盤改良工法-

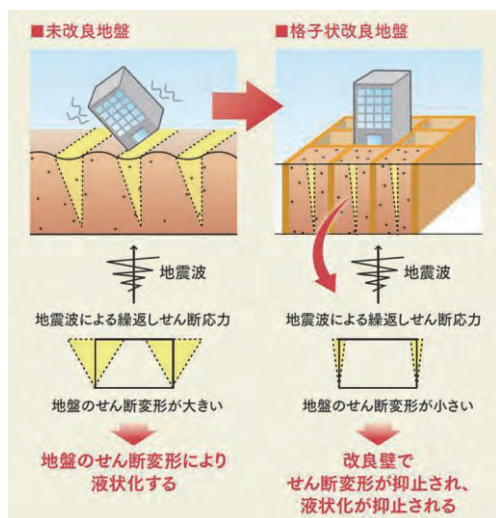
(株) 竹中土木 ○小西一生

(株) エステック 中馬忠司

(株) ワイビーエム 奈須徹夫

◆工法開発の背景

東日本大震災以降、既成の市街地や港湾施設など、従来の工法では対応困難であった狭小地における液状化対策ニーズが高まっています。こうした中、信頼性の高い液状化対策工の一つに格子状地盤改良工法（TOFT工法）があります。



図一1 TOFT工法の液状化抑止メカニズム

しかし、従来のTOFT工法では、施工機械の大きさから狭小地対応が困難で、一方、小型を特徴とする従来の宅地用改良機でも、機械の性能面でTOFT施工に要求される壁状改良体構築には適していませんでした。

また、将来的には労働人口の減少により、経験豊富な地盤改良機オペレーターや管理職員の不足も懸念されます。

そこで我々は、小型でも従来大型機と同等の改良体性能（改良径、改良壁の一体化）を確保し、自動施工管理による改良品質の安定化と省人化施工を実現する小型機械攪拌式地盤改良機「スマートコラム工法」を開発・実用化しました。

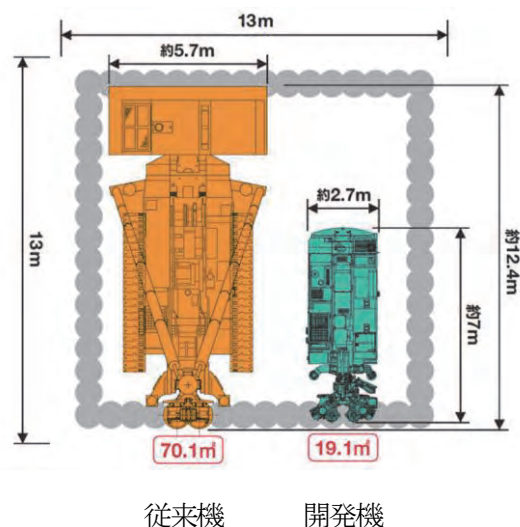


図一2 狭小地対応型 格子状地盤改良工法
＜スマートコラム工法＞

◆工法の特徴

スマートコラム工法は、従来の大型施工機に比べ、占有面積で30%以下という大きさを実現しています。

施工機は、単軸機と2軸機をラインアップし、施工対象地の条件によって使い分けることが可能となっています。



図一3 従来機とスマートコラムの大きさの比較

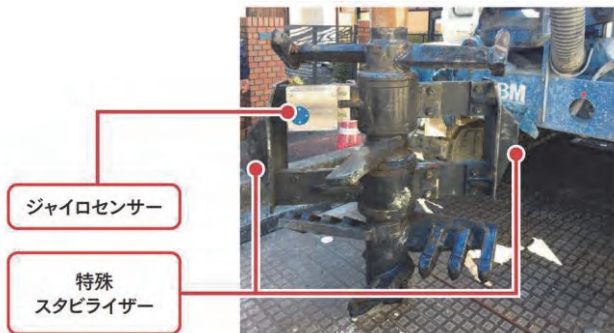


単軸機と2軸機をラインアップ
 施工効率の向上と複雑な施工条件への対応を可能としました。

タイプ	適用範囲
単軸機	住宅地・工場・狭雑な土地での建築工事など（狭間で施工形状が複雑な場所）
2軸機	堤防沿い・鉄道沿い・道路など（狭間で施工延長が長い場所）

図一4 施工機のタイプと適用範囲

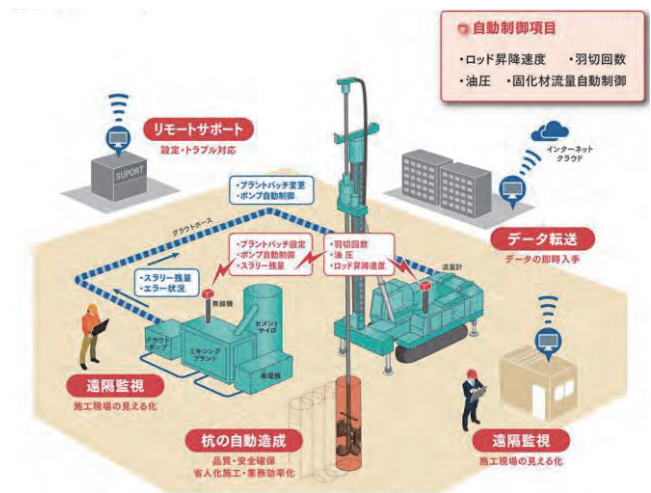
TOFT 工法の設計上必要な有効壁厚を確保するために、油圧モータの回転トルク特性を最適化し、改良径φ1000mmを実現しました。また改良壁の一体化に対しては、ラップ精度確保を目的に改良体の鉛直性を高める機能（単軸機：特殊スタビライザー、2軸機：多軸ロッドによる剛性補強）や掘削の軌跡管理システムを装備しました。その結果、1/200以上の鉛直精度を保つことができ、TOFTの設計要求性能を満足する高剛性な格子状地盤改良体の造成を可能としています。



図一5 鉛直精度を確保する特殊攪拌翼（単軸機）

◆全自動施工管理による高品質・省人化施工

従来の小型改良機では、対象地盤の地層硬さの影響でオーガ回転数が変動するため、羽根切り回数確保はオペレーターの技量でカバーしていました。本工法（単軸機）では、新たに全自動施工管理システム（羽根切り回数、油圧、ロッド昇降速度、固化材流量を自動制御）を導入しています。



*Y-LINK(YBM製)をベースに、独自の全自動施工管理システムを構築

図一6 全自動施工管理システムの概要



図一7 全自動施工管理画面

表一1 手動・自動制御の比較

項目	羽根切り回数 (回/m)	昇降速度 (m/分)	改良強度 (kN/m)	変動係数 (%)	サイクルタイム (分/本)
(目標値)	400	最大1.0	1,500	45以下	-
手動制御	平均400	0.5~1.0	2,409(平均)	37	30
自動制御	最低400	ほぼ1.0	2,264(平均)	33	25(17%短)

全自動制御を行うことで、手動に比べ変動係数が小さく、サイクルタイムの短縮も可能となり、改良体品質の更なる安定化を実現しています。また自動化による作業員の削減や、遠隔監視による管理の省力化にも成功しています。

スマートコラム工法は、耐震技術の更なる信頼性の向上および省力化の実現に寄与して参ります。

5.LED パネルと FM ラジオの音声を組み合わせた工事車両用無音誘導システム

『おとなしくん®』の開発

福田道路株式会社 ○羽田 誠治
株式会社ソーキ 千葉 周
福田道路株式会社 吉田 公一

開発の背景

アスファルト舗装工事では、合材を積載したダンプトラックを後進によりアスファルトフィニッシャ（以下、AF）へ接続させる。また、接続後も合材の受入れに伴い荷台操作や前後進の細かな指示が行われる。

通常、これらの指示は誘導員によるホイッスルやAFのクラクションを使った合図により行っている。しかしながら、工事騒音の中でもダンプトラックの運転者へ聞こえるよう合図の音量はさらに大きく、ホイッスルやクラクションなどの誘導時の騒音の削減は環境対策として重要であると考える。

そこで、これらの工事車両誘導に伴う騒音への対策を目的として、AF のオペレータのボタン操作により、LED パネルと FM ラジオの音声を同期制御する工事車両無音誘導システム「おとなしくん®」を開発した。

工事車両無音誘導システムの概要

「おとなしくん」の概念図を図-1 に示す。

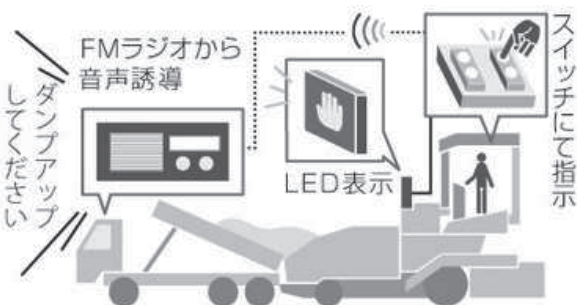


図-1 「おとなしくん」の概念図

LED パネルには、一般的な LED よりも明るいフルカラー SMD（チップ型の LED 発光素子）の高輝度フルカラー製品を採用し、大型のパネルサイズと併せて、日中や遠距離での視認性を確保した。さらに、表示内容に

ついては、矢印や○×等の記号だけでなく、表-1 の例1、2のような直感的にわかり易いアニメーションを多用した。また、文字については、表-1 の例3のようにミラー越しでも視認できるように通常の文字と鏡文字を1秒間隔で交互に表示する方式とした。

FM ラジオ音声は、FM トランスミッタを用いることにより、LED パネルの表示内容に対応する音声ガイダンスがダンプトラックの FM ラジオから同期して流れる仕組みとなっている。同期して流れる音声の例を表-1 に示した。合図による誘導とは異なり、音声ガイダンスの言葉による誘導は、より具体的であり、ダンプトラックの誘導ミスが生じにくい。

表-1 LED パネルと FM ラジオ音声の同期例

例	LED パネル	FM ラジオ音声
1		『フィニッシャにドッキングを開始してください』
2		『ダンプアップしてください』
3		(待機時)

「おとなしくん」は、目と耳の両方からの情報で、誘導する側の指示をより確実に相手に伝えることができるツールである。引き続き、トンネル工（NATM）や道路除雪工などの誘導システムとしても検討中であり、今後も幅広い現場において、工事車両の安全で確実な誘導に貢献できるよう機能向上に努めていきたい。

6. ヘリマシステムを利用した時差安全停止装置

「磁界」と「IC タグ」と「自動停止機能」で重機接触災害を防止する！

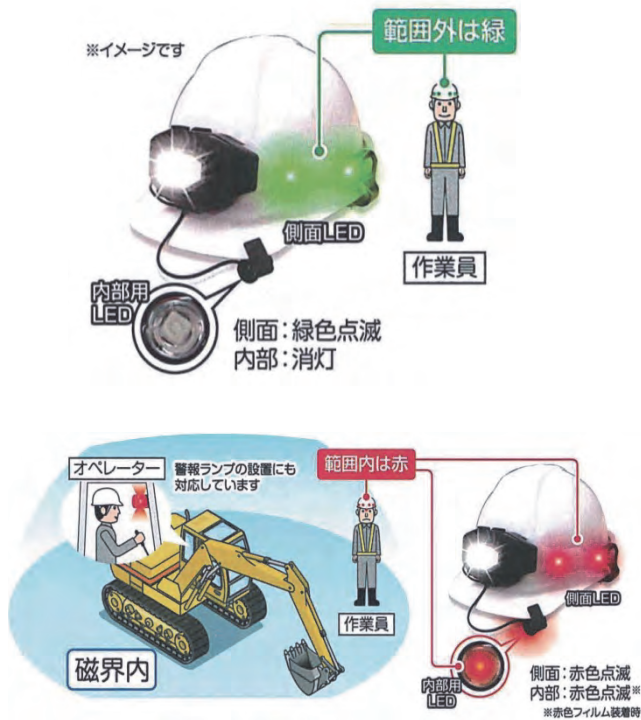
瀧富工業 瀧 哲也
瀧富工業 ○ 山田 泰之

ヘリマシステムとは

工事現場にて稼働する『重機や車輛』と『近接する作業員』にお互いの危険を知らせて『接触事故のリスクを低減する』ことを目的としたシステムです。危険エリアに作業員が入ると作業員のヘルメットに取付たヘルバンドが赤く光ったり、オペレーターには重機に取付た警報ランプとブザーで危険を知らせます。

- ・重機オペレーターが警報に気付かなかった場合。
- ・何かしらの原因で重機をすぐに止められなかった場合

上記のような場合でもタイマーでセットした時間経過後に重機の油圧をカットし停止させる事が可能です。



約4～14mの範囲で段階的に調整可能

ヘリマシステム+時差安全停止装置を併用すれば！

① 万が一、オペレーターが警報に気付かなくても、タイマー設定時間経過後重機が停止します。

② タイマーで止まる時間を設定出来ます。

〔タイマーでセット可能な時間は1～8秒です。〕
〔タイマーの時間変更は別途工賃が必用です。〕



7. 現場の見える化を動画や計測値を利用したクラウドサービスで

バックアップできるシステム「クラウド16PLUS」

臨場感を持った記録データで現場のカイゼンをサポート

○ 西尾レントオール株式会社 山口 秀樹

見える化から始まる現場の分析→改善

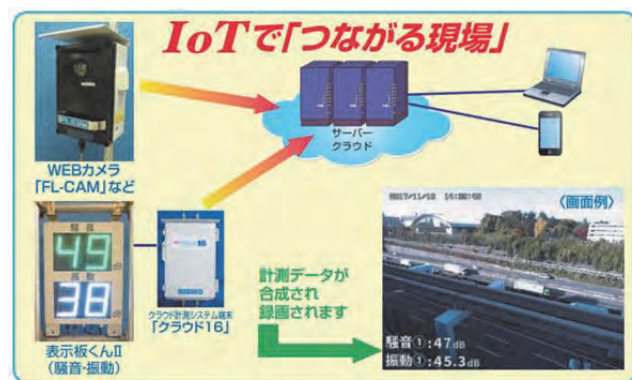
本技術はクラウドサービスを利用し現場の見える化を、計測システムやWEBカメラでサポートしていく技術です。昨今WEBカメラ自体は急速に普及し、安全・防犯・環境対策において建設現場での利活用も増加しています。「クラウド16PLUS」は、WEBカメラから得られる動画情報を、クラウドに上げ、特定多数の関係者がモニタリングできることはもちろん、一定期間動画を保存しておける為、過去の履歴もすぐに検索できるシステムです。加えて、本システムの特徴は、現場内で計測している騒音・振動・風速・温度・雨量・粉塵・ガス濃度等の環境計測値や、法面崩落を管理する際の動態観測の測定値等を1画面で合成表示可能な事です。動画と計測値を時系列に保存し測定値が大きかった時間帯を抽出し、その時現場がどのような状態だったかを動画ですばやく確認可能で、現場の見える化をサポートします。動画はHD画像や全方位画像などにも対応可能です。



異常発生時や計測値が予め設定した警戒値を超えた場合には、現場内に設置したパトライトやアラームを

起動させることができます。またインターネットを通じ、登録した電子メールに自動的に異常を通知する事も可能です。

モニタリング画面自体は、パソコン・タブレット・スマートフォン等、媒体を限定せずあらゆるブラウザで表示が可能となっており、IDとパスワードを保有した対象者は、時間・場所を選ばずモニタリングすることが出来ます。また特定の権限者はカメラの方向・拡大縮小も自在に変更できる為、広範囲なエリアを1台のカメラでフォローができます。



現場では刻々と状況が変化し、それに応じて安全・環境性を高めたり、効率化を進める為の対策立案が不可欠です。その際の判断材料として、動画及び計測値が一体となった克明な記録が残っていることは、有効な対策を立案する際に非常に役立ちます。「クラウド16PLUS」は標準で1ヶ月のデータをクラウド上に残すことが可能で、手元に保存するためのダウンロード機能も充実しています。

尚、本技術は、2018年7月にNETISに登録され、ますます活用の効果が期待されるものとなっております。(NETIS番号: KT-180043-A)

デモ画面: <http://nishi202.dyndns.biz/login/index> ID: cloud16 パスワード: cloud16pwd

8. エアロセンスのエアロボマーカ―で土木現場を便利に明るく元気に！

“ドローン・自動計測対空標識・画像解析クラウド”の全自動ワークフローで
効率的で安定・安全な測量総合ソリューション “AEROBO®測量 2.0”

エアロセンス株式会社 嶋田悟

エアロセンス株式会社 新井野翔子

エアロセンスはソニーとロボットベンチャーの ZMP の合弁企業である。建設現場の効率化が求められる中、従来、多数点の測定や土量の計算、紙資料の作成など、現場での作業やその後の処理に多くの工数と時間を要していた測量事業に対し、新たに、ドローン・自動計測対空標識・画像解析クラウドを用いたドローン測量の総合的ソリューション“AEROBO®測量 2.0”を提案している。

“AEROBO®測量 2.0”の概要

“AEROBO®測量 2.0”は、エアロセンスがロボットと AI 技術を駆使し、自社で設計開発・販売サービスを手掛ける 3つの製品と、それらを自動化させた産業に用いているシステム・サービスの総称である。完全自律飛行ドローン、高精度の自動測位が可能なマーカ―、画像データをスピーディーに解析するクラウドシステムで構成され、全過程が自動化されている。特に、2018年に NETIS（新技術情報提供システム）登録が完了した「AEROBO®（エアロボ）マーカ―」は、工数がかかっていた標定点関連作業について、小型・軽量・簡単操作で、置くだけでスタティックの高精度測位を可能とし、かつ画像検出を AI 技術で自動化させた、業界初の測量計測機能と対空標識機能を合体させた製品である。ドローン、マーカ―、クラウド、いずれの製品も習熟したスキルが必要なく、安全なソリューションと独自開発のソフトで「誰でも・いつでも・どこでも」使用が可能となり、土木現場における写真測量のほか、インフラ業界（建築・土木・エネルギー・通信・運輸等）のニーズに応じたサービス提供を行っている。

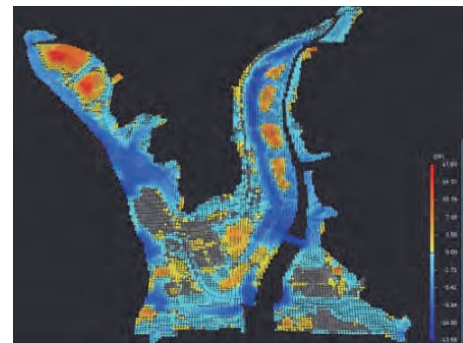
(NETIS 番号：KT-180029-A)

実施例の紹介

甚大な被害をこうむった東日本大震災。南三陸町で進められている復興事業において、自律型ドローンを活用した工事が進められた。ドローン経路作成・飛行、



GCP 測量・解析等、UAV 測量の各工程を一気通貫で行い、3D モデル化、3D CAD の造成計画図との合成、切盛土量の自動計算など、測量結果を高精度・高密度に定量化・可視化することによって、結果として、90ha の土地の測量を約 1 週間、従来比 1/6 の工期で実現した。このように、AEROBO®測量総合ソリューションの利用による業務効率化が広がっている。



土量計測結果

カラースケールは現況と整地計画との高低差[m]

グレー色は造成完了部分

今後の展開

これまで、多くのユーザーのみなさまに、UAV 測量のトータルソリューション、すなわち各工程を一気通貫に進めることで得られる高効率・高精度な成果について、評価を頂いてきた。業務効率化に向けた商品の開発に引き続きとりくんでいくが、特に、基準点測量の効率化への期待が高い状況を踏まえ、このたび AEROBO[®] マーカーを活用した基準点測量機能の充実を図った。当該機能により、マーカーを設置するだけで、網平均計算から帳票出力までがカバーされ、基準点測量業務が大幅に削減されることになり、業務効率化に活用いただけると願っている。これらの機能を含め、引き続き、お客様の声に耳を傾け、新たな提案を行っていきたい。

9. 仮設道路計画アプリケーション「道路プランくん3D」

手書き感覚で、3次元描画！！

玉石重機株式会社 ○山口孝人

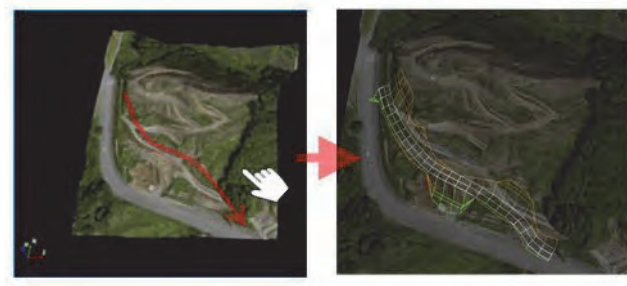
野中浩平

ジオサーフ株式会社 和泉儀紀

1. はじめに

現在、国土交通省が進める i-Construction には施工段階でも盛んに取り組みが進められている中、当社も重機土工に関連する[UAVによる起工測量]⇒[3D解析・3Dモデリング]⇒[ICT建機施工]⇒[竣工測量]まで対応を確立している。

永年の施工経験から蓄積しているノウハウを ICT 技術に融合させ、施工技術基盤を構築している。



3D画面

2. 開発の経緯

現場経験が豊富であるが、コンピューター操作の不得意なベテラン責任者の意図が織り込めるようにならなければ、ICT 施工が定着しにくいと考え、本ソフトウェア「道路プランくん3D」を開発した。

地形図が表示されている画面に対して、仮設道路の経路指示を行うことで、誰でも 3D 図面を得ることができる。

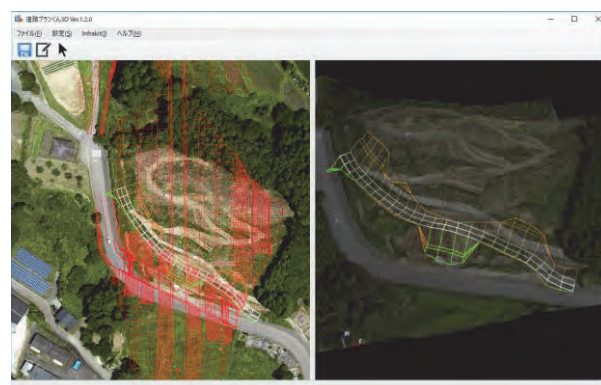
このデータは ICT 建機への変換用ソースデータとして使用できると共に、各種 2D 図面や施工数量としても表すことができる。

このように容易に 3D 図面化や ICT 施工が取り組める基本がコンピューターが不慣れであっても可能となることを目指して開発を行った。

3-1-2 道路の画面表示

PC・タブレット画面には、2D/3D の 2 つの画面が並んで表示され、イメージを具体的に把握することが出来る。

2D 画面には、設計図(DXF)を表示することができるため、設計との比較も可能である。



2D画面

3D画面

3. 製品紹介

3-1 アプリケーションの機能

3-1-1 道路の描画

基本的な機能としては、PC・タブレットなどのタッチスクリーン画面の地形図を指でなぞるだけで、思い通りの道路を 3D 描画できる。

3-1-3 道路の調整

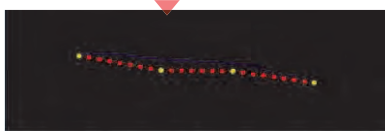
3D 画面で描画された道路の調整を行うと、2D/3D の画面が更新され、変更した内容をリアルタイムに確認することができる。

また、土量計算書の結果は、「CSV」形式で保存も可能である。

3D画面



縦断面図



点名	地点 CPI(m)	標高 F(m)	地点 CPI(m)	標高 F(m)	標高差(D)
NO1	100.000	100.000	NO1	100.000	0.000
NO2	100.500	100.500	NO2	100.500	0.000
NO3	101.000	101.000	NO3	101.000	0.000
NO4	101.500	101.500	NO4	101.500	0.000
NO5	102.000	102.000	NO5	102.000	0.000
NO6	102.500	102.500	NO6	102.500	0.000
NO7	103.000	103.000	NO7	103.000	0.000
NO8	103.500	103.500	NO8	103.500	0.000

土量計算書(CSV)

区	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
2	100.500	100.500	100.500	100.500	100.500	100.500	100.500	100.500	100.500	100.500	100.500
3	101.000	101.000	101.000	101.000	101.000	101.000	101.000	101.000	101.000	101.000	101.000
4	101.500	101.500	101.500	101.500	101.500	101.500	101.500	101.500	101.500	101.500	101.500
5	102.000	102.000	102.000	102.000	102.000	102.000	102.000	102.000	102.000	102.000	102.000
6	102.500	102.500	102.500	102.500	102.500	102.500	102.500	102.500	102.500	102.500	102.500
7	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000
8	103.500	103.500	103.500	103.500	103.500	103.500	103.500	103.500	103.500	103.500	103.500
9	104.000	104.000	104.000	104.000	104.000	104.000	104.000	104.000	104.000	104.000	104.000
10	104.500	104.500	104.500	104.500	104.500	104.500	104.500	104.500	104.500	104.500	104.500
11	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000
12	105.500	105.500	105.500	105.500	105.500	105.500	105.500	105.500	105.500	105.500	105.500
13	106.000	106.000	106.000	106.000	106.000	106.000	106.000	106.000	106.000	106.000	106.000
14	106.500	106.500	106.500	106.500	106.500	106.500	106.500	106.500	106.500	106.500	106.500
15	107.000	107.000	107.000	107.000	107.000	107.000	107.000	107.000	107.000	107.000	107.000
16	107.500	107.500	107.500	107.500	107.500	107.500	107.500	107.500	107.500	107.500	107.500
17	108.000	108.000	108.000	108.000	108.000	108.000	108.000	108.000	108.000	108.000	108.000
18	108.500	108.500	108.500	108.500	108.500	108.500	108.500	108.500	108.500	108.500	108.500
19	109.000	109.000	109.000	109.000	109.000	109.000	109.000	109.000	109.000	109.000	109.000
20	109.500	109.500	109.500	109.500	109.500	109.500	109.500	109.500	109.500	109.500	109.500
21	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000
22	110.500	110.500	110.500	110.500	110.500	110.500	110.500	110.500	110.500	110.500	110.500
23	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000
24	111.500	111.500	111.500	111.500	111.500	111.500	111.500	111.500	111.500	111.500	111.500
25	112.000	112.000	112.000	112.000	112.000	112.000	112.000	112.000	112.000	112.000	112.000
26	112.500	112.500	112.500	112.500	112.500	112.500	112.500	112.500	112.500	112.500	112.500
27	113.000	113.000	113.000	113.000	113.000	113.000	113.000	113.000	113.000	113.000	113.000
28	113.500	113.500	113.500	113.500	113.500	113.500	113.500	113.500	113.500	113.500	113.500
29	114.000	114.000	114.000	114.000	114.000	114.000	114.000	114.000	114.000	114.000	114.000
30	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500
31	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000
32	115.500	115.500	115.500	115.500	115.500	115.500	115.500	115.500	115.500	115.500	115.500
33	116.000	116.000	116.000	116.000	116.000	116.000	116.000	116.000	116.000	116.000	116.000
34	116.500	116.500	116.500	116.500	116.500	116.500	116.500	116.500	116.500	116.500	116.500
35	117.000	117.000	117.000	117.000	117.000	117.000	117.000	117.000	117.000	117.000	117.000
36	117.500	117.500	117.500	117.500	117.500	117.500	117.500	117.500	117.500	117.500	117.500
37	118.000	118.000	118.000	118.000	118.000	118.000	118.000	118.000	118.000	118.000	118.000
38	118.500	118.500	118.500	118.500	118.500	118.500	118.500	118.500	118.500	118.500	118.500
39	119.000	119.000	119.000	119.000	119.000	119.000	119.000	119.000	119.000	119.000	119.000
40	119.500	119.500	119.500	119.500	119.500	119.500	119.500	119.500	119.500	119.500	119.500
41	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000

3-1-4 道路の保存と活用

作成した道路データは「XML」と「3D-DXF」の2つの形式で保存される。

保存されたデータは、重機ガイダンスデータや3D-CADデータとして活用することができる。

重機ガイダンスデータ



3D-CAD データ

3-2 操作の主な流れ

- ① サーフェスの入力
 - PC・タブレット画面に、現況データ「XML」を読み込み表示させる。
- ② 道路のテンプレート設定
 - 設計したい道路の条件をテンプレートに入力する。
- ③ 背景図の入力(必要な場合)
 - PC・タブレット画面に、航空写真(TIF)や設計図(DXF)を読み込み表示させることもできる。
- ④ 道路の描画
 - 道路描画には、直感的な描画ができる「手書き入力」と半径(R)を確認しながら描画ができる「IP 指定入力」の2つの方法がある。どちらも簡単な操作で道路を描画することができる。
- ⑤ 道路の調整
 - 3D画面で描画された道路は、自由に線形が変更され、また、道路勾配の変更もできる。
- ⑥ ファイル保存
 - 描画した道路データは「XML」と「3D-DXF」の2つの形式で保存される。

4. 今後の展開

誰もが使用することが容易なため、導入しやすく幅広い活用が考えられる。

- ① 精度を上げて、仮設にとどまらず本工事への活用
- ② 緊急時、災害時の避難道路・支援物資道路、その他にも使用できる可能性
- ③ 発注・設計～施工測量・計画まで使用できる

等
 以上のように、幅広いニーズに応えられるよう技術を変化させ対応していくことで、様々な分野での活用ができる様に開発を継続する。

現在、特許出願中である。

平成30年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集

平成 30 年 11 月 26 日 印刷

平成 30 年 11 月 28 日 発行

編 集 一般社団法人 日本建設機械施工協会
発行所

〒105-0011 東京都港区芝公園 3 - 5 - 8
(機械振興会館内)

T E L (03)3433-1 5 0 1

F A X (03)3432-0 2 8 9

複製厳禁

印刷所 (株)アクセス

