

平成28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28年11月29日～11月30日

東京・機械振興会館

一般社団法人 日本建設機械施工協会

平成28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28年11月29日～11月30日

東京・機械振興会館

主催：一般社団法人 日本建設機械施工協会

後援：経済産業省、国土交通省

国立研究開発法人 土木研究所、公益社団法人 土木学会
公益社団法人 地盤工学会、一般社団法人 日本機械土工協
会、一般社団法人 日本機械学会、一般社団法人 日本建設
機械工業会、一般社団法人 日本測量機器工業会、日刊工
業新聞社、日刊建設工業新聞社、日刊建設通信新聞社、日
刊建設産業新聞社（順不同）

論文審査規定概要

1. 審査方法

論文アブストラクト及び本論文の2段階で行い、アブストラクトについてはシンポジウム実行委員会委員が全編を審査し、本論文については1編あたり5名の委員が審査を行う。

下記の審査基準に基づき、実行委員会にて採択を決定する。

2. 審査基準

新規性、有用性、完成度、信頼度並びに本シンポジウムの主旨に合致するかどうかの視点で採否の判断を行う。

3. 審査委員名簿（委員五十音順・敬称略）

	委員名	機関名	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	開発本部商品企画室	
委員	小澤 学	日立建機（株）	開発本部	グローバル開発戦略部
委員	梶田 洋規	（国研）	土木研究所	先端技術チーム
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	佐藤 康博	鹿島建設（株）	機械部	
委員	竹内 幸弘	（株）	トプコンソキアポジショニングジャパン	営業企画部
委員	玉石 修介	（一社）	日本機械土工協会	
委員	新田 恭士	国土交通省	総合政策局	公共事業企画調整課
委員	行川 恒弘	前田道路（株）	工事事業本部	機械センター
委員	林 輝	国土交通省	関東地方整備局	企画部 施工企画課
委員	山本 茂太	キャタピラー	ジャパン(株)	販売促進部
委員	渡部 純	（株）	カナモト	レンタル事業部
委員	竹之内 博行	（一社）	日本建設機械施工協会	施工技術総合研究所
委員	加藤 正幸	（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 口述発表者

I 論文集

1. 無電柱化に使用するケーブル埋設用掘削機械の海外事例と試験施工について	……………	1
(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	田所 登	
(国研)土木研究所寒地土木研究所	大槻 敏行	
2. 道路啓開時における路上車両移動技術について	……………	5
国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所	○島崎 浩志	
国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所	弓削 竹志	
国土交通省 関東地方整備局 施工企画課	服部 達也	
3. 軟弱地盤のトラフィカビリティを把握する土質調査試験について	……………	9
次世代無人化施工技術研究組合 (国立研究開発法人 土木研究所)	○片野 浩司	
次世代無人化施工技術研究組合 (国立研究開発法人 土木研究所)	橋本 毅	
次世代無人化施工技術研究組合 (国立研究開発法人 土木研究所)	山田 充	
4. 河道閉塞による湛水部の緊急排水技術の開発	……………	13
株式会社大林組	○西村 俊亮	
	柴田 昌輝	
株式会社ダムドレ	佐藤 忞	
5. ソイルセメント山留め壁を施工する際に発生する 地盤の摩擦音を活用した土質判別技術に関する基礎実験	……………	17
日本大学生産工学部	○下村 修一	
日本大学短期大学部	酒匂 教明	
日本大学大学院	奥山 誠也	
7. 鉄筋ユニットブロックによる鉄筋コンクリート構造物隅角部配筋の省力化	……………	23
大成建設株式会社	○猪口 泰彦	
大成建設株式会社	高倉 克彦	
大成建設株式会社	村田 裕志	
8. 次世代型クローラ式スタビライザの開発 —路床安定処理工法の品質、安全性向上について—	……………	27
株式会社 NIPPO	○丑久保 吾郎	
範多機械株式会社	小西 剛	
9. 高品質・高精度なシールドトンネル構築技術 —6つの最新技術で実現—	……………	31
株式会社フジタ	○中村 多聞	
	浅沼 廉樹	

20. i-Construction 実施プロセスにむけた「カイゼン」への期待			
－ICT 活用工事における無人航空機 UAV 活用の効果と「カイゼン」案－	株式会社 大林組	○杉浦 伸哉	7 5
	株式会社 大林組	田島 僚	
21. エアフレームを使用した覆工コンクリート養生システム			7 9
	東急建設株式会社	○大峰 秀之	
		満尾 淳	
		寺山 拓也	
22. 熟練技能維持システムの開発と生産性向上に関する研究			
－作業動線解析による生産能力維持と次世代建設生産システム－	株式会社 浅沼組	○田村 泰史	8 3
	国土交通省	稲垣 孝	
	株式会社 浅沼組	桑原 茂雄	
23. 縮径トンネル掘削機（縮径 TBM）			
－トンネル掘削機外径の縮小・復元が可能な縮径 TBM－	戸田建設株式会社	○市川 政美	8 7
		和田 洋一	
24. 作業量の確保と疲労低減を狙った自動掘削ホイールローダの開発			9 1
	株式会社小松製作所	和田 稔	
		今泉 雅明	
		○今西 康太	
25. ペイロード計測システムを搭載した油圧ショベルの開発			
－建設施工のコスト低減と効率向上の追及－	キャタピラージャパン株式会社	○白澤 博志	9 7
26. i-Construction における空中写真測量及びレーザースキャナの出来形管理への適用について			
－UAV 等の出来形管理要領の諸規定設定根拠について－	国土交通省	○近藤 弘嗣	1 0 1
	国土技術政策総合研究所	長山 真一	
	アジア航測(株)	石田 大輔	
27. i-Construction で適用する土工出来形の面的管理に関わる基準類の検討			
－面的な出来形管理基準の検討について－	国土交通省	近藤 弘嗣	1 0 5
	国土技術政策総合研究所	○長山 真一	
	施工技術総合研究所	藤島 崇	
28. 油圧ショベルが各種の動作で排出する温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定			1 0 9
	土木研究所	○吉永 弘志	
	国土交通省	野村 正之	

29. 大規模住宅造成地に適用した丸太打設液状化対策& カーボンストック(LP-LiC)工法の事例紹介	飛島建設株式会社 飛島建設株式会社 株式会社ミサワホーム	○沼田 淳紀 村田 拓海 松下 克也	…………… 1 1 5
30. 大型建設機械の転倒防止のための地盤養生法に関する基礎的検討	(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 (独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所	○堀 智仁 玉手 聡	…………… 1 2 1
31. 重機周り作業員検知システムの機能向上	ーアラウンドウォッチャーの機能向上ー 鹿島建設株式会社	○三宅 ヨシタカ	…………… 1 2 5
32. トンネル工事現場における坑内位置把握システムの開発	ー屋内空間でのヒト・モノの位置をリアルタイムに把握ー 株式会社 安藤・間 株式会社 安藤・間 株式会社 日立ソリューションズ	○澤 正樹 清水 充子 賀川 義昭	…………… 1 2 7
33. 地下埋設物可視化システムの開発と実用化	ー掘削工事における“地下の見える化”を実現ー 清水建設株式会社 茨城工業高等専門学校 株式会社菱友システムズ	○西村 晋一 岡本 修 石田 新二	…………… 1 2 9
34. 大型建設機械の設置地盤における現場地耐力試験とその性能比較	(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 (株)東洋スタビ	○玉手 聡 堀 智仁 若原 千恵 田村 繁雄	…………… 1 3 3
35. 充填硬化材の加圧注入圧を利用したトンネルの補強技術の開発	ー補強セグメントの解析と載荷実験ー 大成建設株式会社 大成建設株式会社 大成建設株式会社	○竹中 計行 高倉 克彦 猪口 泰彦	…………… 1 3 9
36. 歪み計測による疲労劣化検知技術の紹介と適用事例	株式会社 IMC 株式会社 IMC 株式会社 IHI	○小林 大祐 柴田 勝規 宮崎 信弥	…………… 1 4 3
37. ジャイロ効果を利用したROVによる姿勢制御した水中構造物の健全性評価	ーインフラ点検用水中ロボットー 株式会社 大林組	○江原 雅洋 沼崎 孝義 三輪 徹	…………… 1 4 7

II 梗概集

● ポスターセッション要旨

1. 視程障害時の除雪車運行支援に向けた基礎的試験 153
国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所 ○三浦 豪
国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所 高本 敏志
国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所 村上 和也
2. 扇形および矩形断面を造成できる高圧噴射攪拌工法の紹介 155
－F T J－F A N（エフティージェイファン）工法－
株式会社不動テトラ ○深田 久
3. 災害復旧等の危険エリアにおける建機の遠隔操縦ロボット 157
－ゴム人工筋肉を利用した、小型・軽量で汎用性のある建機用無線操縦ロボット－
株式会社アクティオ 稲葉 誠一
株式会社アクティオ ○今関 政美
4. ICTを活用したAR技術「埋設物可視化システム」 161
－掘削工事における“地下の見える化”を実現－
清水建設株式会社 ○三木 浩
茨城工業高等専門学校 岡本 修
株式会社菱友システムズ 西原 邦治
5. 人型ロボットによる建設機械操縦効率化「DOKA ROBO」 163
－汎用建設機械の運転席に設置して遠隔操縦を可能とする人型ロボット－
株式会社 カナモト ○笹原 久之
吉田 道信
株式会社 富士建 角 和樹
6. 護床ブロック移設アタッチメントの開発と施工 165
－省力化(省人化)による一人当たりの生産性の向上－
玉石重機株式会社 ○片岡 広志
玉石重機株式会社 濱山 祐司
日立建機株式会社 友澤 茂治
7. 新型ハイブリッドショベルと新型マグネット仕様機のご紹介 167
コベルコ建機(株) 佐伯 誠司
コベルコ建機(株) 古賀 信洋
8. 坑内中継・モニタリングシステム 169
－崩落後のトンネル坑内を安全にモニタリング→復旧できる技術－
西尾レントオール株式会社 ○山口 秀樹
西尾レントオール株式会社 佐藤 芳和

I 論文集

1. 無電柱化に使用するケーブル埋設用掘削機械の 海外事例と試験施工について

(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 田所 登
 (国研)土木研究所寒地土木研究所 大槻 敏行

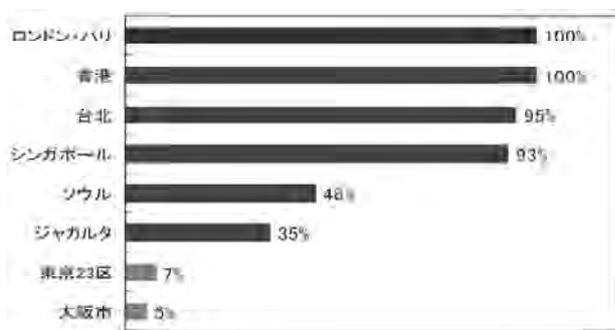
1. はじめに

日本における無電柱化は、防災、景観・観光、安全・快適の観点から推進されており、主に市街地や歴史的街並、狹隘道路の電線類地中化が進められている。

しかし、図-1 に示すとおり、日本の無電柱化率はヨーロッパやアジアの主要都市と比較し、東京23区で7%、大阪市で5%と極めて低い。この原因の一つとして、電線類地中化等の施工費用が極めて高いことが挙げられる。無電柱化の促進のためには、より安価で施工性の高い手法が求められている。

無電柱化が進んでいる諸外国では、電線類地中化にトレンチャーなど専用のケーブル埋設用掘削機械を使用しており、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。

そこで、低コスト・高効率の電線類地中化手法を検討する基礎資料とするため、海外のケーブル埋設用掘削機械の実態調査、掘削試験を行った。



- ※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2013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⁾

2. ケーブル埋設用掘削機械の実態調査

ケーブル埋設用掘削機械の実態を把握するため、機械の概要、施工事例および日本国内での販売体制について調査を実施した。調査方法は、インターネットによる調査、およびケーブル埋設用掘削機械を製作しているメーカーへのアンケート調査とした。

2.1 ケーブル埋設用掘削機械の概要

インターネットによる調査の結果、ケーブル埋設用掘削機械のメーカーは、欧米を中心に14社(フランス3社、イタリア2社、イギリス2社、アメリカ4社、スウェーデン1社、ドイツ1社、オーストラリア1社)確認でき、多数存在していることがわかった。

ケーブル埋設用掘削機械としては、主にトレンチャーが使用されており、固い岩盤やアスファルトの掘削が可能なものや、掘削と同時に土砂積込やケーブル敷設が可能なものなどがある。

図-2 に、トレンチャーによるケーブル埋設状況の一例を示す。この例では、アスファルトの上からの掘削と同時に、トラックへの土砂積込とケーブル敷設を行っている。



ホームページより引用²⁾

図-2 トレンチャーによるケーブル埋設状況の一例

インターネット調査で確認できたメーカーを対象にアンケート調査を実施し、5社から回答を得た。なお、機械総質量が100tを超える製品も販売されているが、今回の調査では、日本国内での運搬が困難である機械総質量が35tを超えるものは対象外とした。

表-1に、トレンチャーの代表的な機械構成と掘削機構を示す。なお、掘削機構の呼称はメーカーにより異なる場合がある。

機械構成については、専用機械は本体構造や操作方法がトレンチャー掘削に適した設計となっている一方、アタッチメント型は専用機械と比較して本体価格が安価である。また、掘削機構については、ホイール式は岩盤などの固い地盤の掘削に適している一方、チェーン式は深く掘削する場合に適している。道路の表面をホイール式で掘削した後、チェーン式で深く掘削する場合もある。

表-2に、調査で回答を得たメーカー5社の機械の特徴を示す。掘削機構は、フランスの2社とイ

ギリスの1社はホイール式が多いのに対し、アメリカの2社はチェーン式が多い。また、機械総質量は、フランスの2社は10t以上が多いのに対し、イギリスの1社とアメリカの2社は10t未満が多いなど、国やメーカーにより特徴が見られる。

図-3に、トレンチャーの機械総質量と最大掘削深さの関係を示す。

最大掘削深さは、ホイール式が450~1,600mmで平均913mm、チェーン式が762~1,829mmで平均1,307mmとなっており、チェーン式の方が大きい傾向にある。ホイール式は、最大掘削深さの約2倍のホイール直径が必要であり装置が大きくなるため、掘削機構で比べると、チェーン式の方が比較的軽量で深い掘削深さへの対応が可能である。

図-4に、機械総質量と最大掘削幅の関係を示す。最大掘削幅はホイール式が70~450mmで平均235mm、チェーン式が120~610mmで平均287mmとなっており、チェーン式の方がやや大きい傾向にある。また、最大掘削幅が305mm以下のものが全体の約76%を占めており、狭隘なものが多いことがわかった。

表-1 代表的な機械構成と掘削機構

機械構成		専用機械	アタッチメント型
掘削機構	ホイール式	ディスク状のホイールの円周上に掘削用の刃が付いたもの  ホームページより引用 ³⁾	楕円状のチェーンに掘削用の刃が付いたもの  ホームページより引用 ³⁾
	チェーン式		

表-2 メーカー5社の機械の特徴

国名	回答機種数	機械構成	掘削機構		機械総質量※		同時施工可能作業
			ホイール	チェーン	10t未満	10t以上	
A社	フランス	7機種 専用機械	6機種	1機種	2機種	5機種	ケーブル敷設 7機種 埋め戻し 4機種 残土処理 2機種
B社	フランス	5機種 専用機械	5機種 (付替可能1機種)	1機種	1機種	4機種	ケーブル敷設 2機種 埋め戻し 2機種 残土処理 1機種
C社	イギリス	7機種 アタッチメント型	5機種	2機種	5機種 (不明2機種)		ケーブル敷設 3機種 残土処理 5機種
D社	アメリカ	10機種 専用機械	2機種 (付替可能2機種)	10機種	9機種	1機種	ケーブル敷設 6機種 残土処理 3機種
E社	アメリカ	8機種 アタッチメント型	3機種	5機種	8機種		

※機械構成がアタッチメント型の機械総質量は、想定されるベース機械の質量を含む。

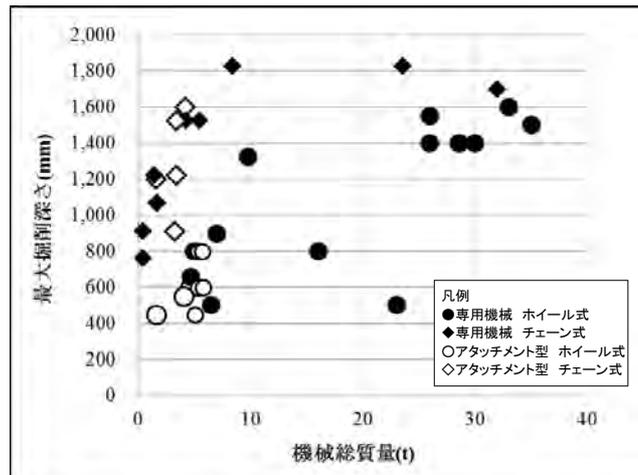


図-3 機械総質量と最大掘削深さの関係

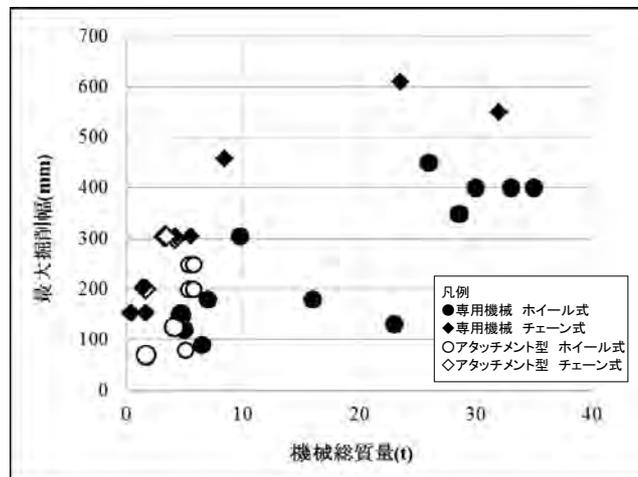


図-4 機械総質量と最大掘削幅の関係

2.2 ケーブル埋設用掘削機械の施工事例

アンケート調査結果から、試験施工を除く具体的な施工事例を表-3に示す。

電力線や通信線の直接埋設または管路埋設が行われており、施工場所は郊外部の未舗装路側、路肩、法面、および市街地の舗装路面下、未舗装路側となっている。

平均施工速度は、郊外部では750～857m/日、市街地では250～1,000m/日であり、市街地では大きな差がみられた。

日本の主な電線類地中化手法である電線共同溝方式では、施工速度が10m/日程度で行われていることから、施工条件などに違いはあるが、諸外国では非常に速い施工速度で作業が行われていることがわかった。

表-3 施工事例

区分	施工事例	施工延長 (km)	施工日数 (日)	平均施工速度 (m/日)
郊外部	①セーズエマルヌ77 (フランス) ・農村部、路肩の電線地下埋設 ・未舗装路側 ・電力線3本×150mm 2 ・施工金額：400,000€ ・土木コスト：13€/m ・使用機械：専用機械 26t ・掘削幅：280mm ・掘削深さ：900mm	30	35	857
	②フランス ・郊外部の電力線の管路埋設 ・未舗装、路肩、法面 ・電力線3本、管路埋設 ・使用機械：アタッチメント型 ・掘削深さ：1000mm	30	40	750
市街地	①パリ近郊ビヤンクール ・街路のトレンチ、電線地下埋設 ・舗装路面下 ・2本TPC、φ63 ・施工金額：3,900,000€ ・土木コスト：65€/m ・使用機械：専用機械 23t ・掘削深さ：450mm	60	240	250
	②ショーモン (フランス) ・住宅街の道路にトレンチ施工 ・舗装路面と未舗装路側 ・3本HDPE、φ40 ・施工金額：1,750,000,000€ ・土木コスト：35,000€/m ・使用機械：専用機械 23t ・掘削幅：100mm ・掘削深さ：400mm	50	110	455
	③クレマ (イタリア) ・住宅街の電話線地下埋設 ・舗装路面下 ・1本、管路埋設 ・使用機械：アタッチメント型	1	3	400
	④インド ・市街地、電力線の直接埋設 ・舗装路側 ・電力線1本、直接埋設 ・使用機械：アタッチメント型 ・掘削深さ：400mm	50	50	1,000

2.3 日本国内での販売体制

調査の結果、日本国内に販売体制およびメンテナンス体制をもつメーカーは4社あった。

日本ではこれまで、トレンチャーは主に農業用機械として農地の暗渠排水の掘削などに使用されており、トラクターなどに取り付けるアタッチメント型のチェーン式が主流であった。しかし、昨今の日本国内の無電柱化推進の機運にあわせ、専用機械を取り扱う海外メーカーも日本国内での販売に参入する動きを見せており、1社が今年から新規参入しているほか、アンケート調査を通じて日本進出に意欲を示すメーカーも1社あった。

3. ケーブル埋設用掘削機械による掘削試験

日本におけるトレンチャーの使用実績をメーカーに聞き取りしたところ、主に農場やゴルフ場など土壌の柔らかい箇所で使用されており、道路敷地のような締め固まった箇所で使用された実績は確認できなかった。

そこで、締め固まった地盤に対しての掘削能力を確認するため、掘削試験を実施した。

試験に使用したトレンチャーは、日本国内でレンタルが可能であった2機種とした。

使用したトレンチャーの外観および諸元を表-4に示す。どちらの機械もアタッチメント型であり、ベースマシンは農耕用トラクターとスキッドステアローダーである。また、掘削機構はどちらもチェーン式である。

表-4 外観及び諸元

	掘削機械 A	掘削機械 B
外観		
機械構成	アタッチメント型	アタッチメント型
ベースマシン	農耕用トラクタ	スキッドステアローダー
掘削機構	チェーン式	チェーン式
装置取付位置	車体後方	車体前方
駆動方式	P T O	油圧
逆回転機構	無	有
過負荷時安全機構	クラッチ式	油圧リリーフ弁式
作業進行方向	前方	後方
掘削幅	150mm	205mm
最大掘削深	100cm	119cm
切刃列数	18列	36列

試験は、北海道江別市の寒地土木研究所角山試験場構内で行った。掘削面は未舗装の地山箇所、埋め戻し土や粘性土が締め固まった箇所である。事前のコーン指数試験の結果は 1,200kN/m² 以上（貫入不能）であり、これはダンプトラックの走行が可能な程度に締め固まった状態である。

試験条件は掘削深さ 60cm, 80cm, 100cm とし、掘削を各 2 回行った。

図-5 に試験で得られた掘削深さと掘削速度の関係を示す。

いずれの機械も、試験条件の深さを掘削することは可能であった。

掘削速度は、掘削機械 A が 111.0～219.8m/h、掘削機械 B が 34.6～64.8m/h となった。いずれの機械も掘削深と掘削速度の相関は見られなかったが、掘削機械 A と B で掘削速度が大きく異なる結果となった。

原因として、掘削機械 B は進行方向が後方となり運転操作しにくいこと、掘削幅が大きく切刃列数が多いため玉石などが切刃機構に詰まりやすく、過負荷時安全機構の作動による停止が多かったことなどが挙げられる。

今回の試験では、同じ機械構成と掘削機構のものを使用した、ベースマシンの操作方法や掘削幅、切刃列数などの違いにより、施工速度に大きく差が出ることを確認できた。

4. 海外のケーブル埋設用掘削機械を日本へ導入するうえでの課題

海外のケーブル埋設用掘削機械の日本への導入を検討するにあたり、以下の課題が考えられる。

4.1 施工条件の違い

トレンチャーによる電線類地中化が一般的となっている国では、施工条件がほぼ確立しており、メーカーはそれに合わせたトレンチャーの製造・販売を行っている。

しかし、日本と海外では施工条件が異なるため、導入を検討するためには、日本における具体的な施工方法や必要な機械の仕様・性能などを整理する必要がある。

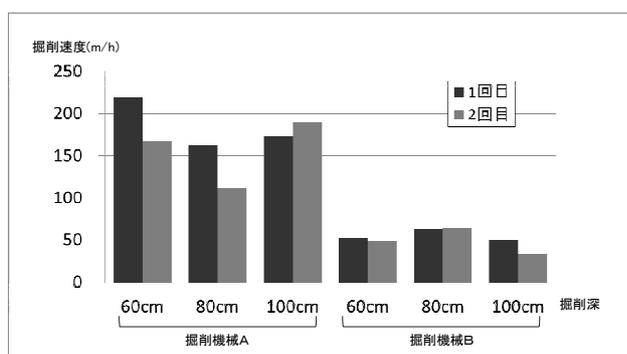


図-5 掘削深さと施工速度

4.2 機械構造、安全基準

日本で海外のトレンチャーを使用する場合、一般的な輸入機械と同じく、労働安全衛生法および関係法令で定められた規格や安全基準等を満足する必要がある。また、公道を走行する場合には、道路運送車両法に基づく保安基準へ適合し、運輸支局等への登録が必要となる。公道を走行しない場合は、オフロード特殊自動車に該当するため、オフロード法による排出ガス基準に適合したものでなければならない。

また、海外のアタッチメント型機械を日本で使用しようとする場合、装着装置の規格が合わず装着できない場合がある。その場合は、アタッチメントもしくは建設機械の装着装置の改造が必要になる。

4.3 市場の拡大

前述のとおり、日本国内にトレンチャーの販売体制およびメンテナンス体制をもつメーカーは現在 4 社しかなく、限られたトレンチャーしか調達することができない。

日本国内でトレンチャーによる施工をより普及させるためには、海外メーカーの日本進出や国産メーカーの参入など市場の拡大が必要である。

5. まとめ

海外で使用されているケーブル埋設用掘削機械の調査を行い、機械の特徴等を把握するとともに、施工速度が非常に速いことを確認した。また、掘削試験の結果から、同じ機械構成と掘削機構をもつトレンチャーでも、条件により施工速度に大きな差が出ることを確認できた。

ケーブル埋設用機械を日本へ導入するためには、施工方法などの整理が必要であるが、導入できれば大幅な施工速度の向上が期待できる。

無電柱化を推進するため、国土交通省では『無電柱化低コスト手法技術検討委員会』(H26.9 発足)の検討をうけ、H28.4 より「電線類の埋設に関する設置基準」を緩和し、浅層埋設や小型ボックス活用埋設等の低コスト手法の導入を可能とした。海外のケーブル埋設用掘削機械メーカーも日本の動向に注目しており、今後の市場の拡大に期待したい。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ： <http://www.mlit.go.jp/>
- 2) RIVARD社ホームページ： <http://www.rivard.fr/>
- 3) VERMEER社ホームページ： <http://www.vermeer.com/>
- 4) AFT社ホームページ： <http://www.trenchers.co.uk/>

2. 道路啓開時における路上車両移動技術について

国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 ○ 島崎 浩志
 国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 弓削 竹志
 国土交通省 関東地方整備局 施工企画課 服部 達也

1. はじめに

首都圏での大規模災害の発生時には、多くの人的・物的被害や国全体の経済被害は甚大なものとなると予想される。

発災時には、被災地内の多くの道路において、大渋滞や放置車両による通行障害が懸念されるため、人命救助や支援物資輸送のための緊急通行車両をいち早く通行させるために道路啓開を迅速かつ効率的に行う事が必要不可欠である。

また、平成26年11月21日に災害対策基本法の一部を改正する法律が施行され、迅速な道路啓開に向けた措置として放置車両対策等の強化を図るための措置が盛り込まれ、首都直下地震をはじめとする大規模な災害発生時に道路管理者が放置車両・立ち往生車両の移動・撤去を行うことが可能となった。

関東地方整備局では、首都圏での大規模災害発生時に全国各地からのアクセスが可能となるよう、放射道路を活用し、都心に向けた八方向（八方位）毎に優先啓開ルートを設定し、郊外から一斉に道路啓開を実施する首都直下地震道路啓開計画を策定した。

本報告では、迅速な道路啓開に用いる既存機材の評価検討、開発・改良について紹介するものである。



図-1 首都直下地震に備えた八方向からの道路啓開

2. 車両移動技術の調査

関東地方整備局管内の各事務所が災害時の協定を締結している協力会社を対象に、車両移動のための機材の種類および保有状況を調査し、その有用性を評価し、車両移動技術として選定を行った。

2.1 車両移動機材の種類

既存機材のうち、車両を移動することができる機材類には、以下のものがある。

①レッカー車

乗用車から大型車までを対象とした特殊車両で、けん引以外にもクレーン装置による吊り上げや油圧装置での持ち上げ、ウインチの巻き上げなど、車両を対象とした様々な機能がある。



写真-1 レッカー車の概要（大型・中型・小型）

②フォークリフト

通常は荷物を持ち上げて、積み込み、運搬、荷下ろしなどの荷役作業を行う機械であるが、乗用車を横向きに持ち上げ、移動することが可能である。



写真-2 フォークリフトでの乗用車の持ち上げ作業

③ホイールローダ

掘削バケットを取り外し、フォークアタッチメントに交換することで、フォークリフトと同様に乗用車を横から持ち上げて移動することができる。



写真-3 ホイールローダでの乗用車の持ち上げ作業

④車両移動用ジャッキ

乗用車のタイヤ4輪をキャスター車輪で持ち上げ、数人の手押し作業で移動可能となる装置である。小型軽量でレバー操作のみなため、複数準備しておくことで作業体制により同時作業が可能となる。



写真-4 車両移動用ジャッキでの乗用車の移動作業

⑤クレーン装置

ラフテレンクレーンやクレーン付トラック、クレーン機能付油圧ショベルなどの機械で車両を吊り上げて移動する技術がある。



写真-5 クレーン装置による乗用車の吊り上げ作業

⑥けん引装置・けん引台車

故障車や事故車などをけん引する目的で使用され、けん引装置やけん引台車は、被けん引車の前輪などを持ち上げて固定することで、車両移動が可能となる。



写真-6 けん引装置による乗用車のけん引作業

2.2 車両移動技術の選定

車両移動機材の種類としては6種類が存在するが、災害発生時の対応と準備可能な台数（既存の調達可能な台数）、作業効率や問題点、注意事項等を考慮して、道路啓開に用いる車両移動技術として選定を行った。

レッカー車は、既存台数と対象車両への作業効率が6種類中で最も良いと判断し選定した。

フォークリフトとホイールローダは、調達可能な台数確保と作業習熟度に課題が残るが、技術として有効であると考えられるため選定した。

車両移動用ジャッキは、手押しによる人力作業であること、長距離移動に向かないこと、路面性状（勾配や段差）に影響を受けることなどの欠点はあるが、装置が簡易かつ安価で作業の習熟も容易なこと、整備局の各事務所で多く保有していることから選定した。

クレーン装置は、吊り上げて車両の向きや位置を変える作業であり、移動するためには別途移動用機材や運搬車両が必要となることから、選定より外した。

けん引装置は、乗用車同士で対応可能であるが、既存台数が非常に少なく、けん引車両の後部にフックを取付ける改造が必要となることから、選定より外した。

上記により、レッカー車、フォークリフト、ホイールローダ、車両移動用ジャッキの4機種を車両移動技術として選定した。

3. 道路啓開実作業への適用検討

3.1 既存の車両移動技術

レッカー車による移動を基本に、前述の②～④の機材を併用することで検討を行った。

移動対象となる車両と使用する車両移動機材の適応性は図-2のとおりで、貨物車やバスなどは、レッカー車以外の機材では対応が困難という整理となった。

乗用車の移動については、寸法・形状・質量などにもよるが、レッカー車以外に前述②～④の機材を利用する移動手段も可能であり、災害発生時には渋滞状況や放置車両の台数に応じて、それぞれの機材・手法を組み合わせた対応が考えられる。

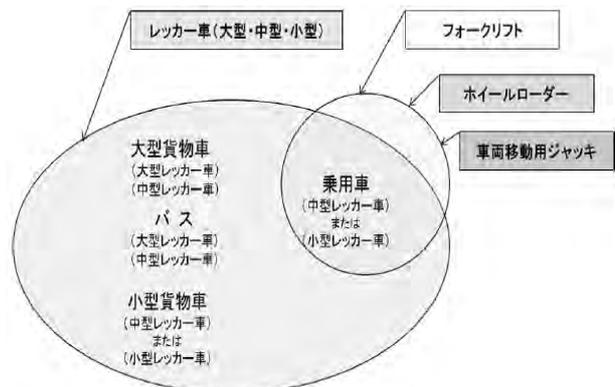


図-2 既存の車両移動機材の適応性

4. 新たな車両移動技術の検討および既存技術の改善検討

新たな車両移動技術として、災害時の協定締結を行う協力会社が多く保有している建設機械のホイールローダの活用と、車両移動用ジャッキの改善について検討した。

4.1 ホイールローダ用のアタッチメント

ホイールローダを用いて乗用車のけん引移動を行うためのアタッチメントを開発する。

- ①災害発生時に調達できるホイールローダは、メーカーや機種により板厚や寸法が変わるため、複数の機種・規格に対応可能なアタッチメントとする。
- ②後輪のブレーキが解除できない場合には、ドーリー（けん引補助車輪）を取付けることで、けん引可能な状態とする。

4.2 車両移動用ジャッキの改善

段差や溝を乗り越える際の作業性向上、逸走防止など現状の課題について改善検討を行った。

- ①キャスター車輪の大型化
段差や溝の乗り越え時の作業性向上対策としてキャスター車輪を大型化した。
- ②ブレーキ装置、旋回ロック機能の追加
傾斜地や仮置き時の逸走防止のため、ブレーキ装置と走行方向を固定できる旋回ロック機能を追加する。
- ③けん引用フックの取付け
建設機械などでけん引するため、端部にけん引用フックを取付ける。

5. 車両移動機材の試作および既存機材の改造

5.1 ホイールローダ用アタッチメントの試作

ホイールローダのバケットで前輪を持ち上げレッカー移動する方式とし、以下を設計条件に試作を行った。

- ①乗用車の前輪を持ち上げる機構は、既存のフォークリフトのレッカー用アタッチメントを流用する。
- ②設計荷重は、流用するフォークリフトのアタッチメント仕様から、最大1,200kgとする。
- ③ホイールローダのバケットに固定する車両移動機材のフレームは、バケットを水平に下ろした状態の爪先に取り付けて前輪を持ち上げる。
- ④アタッチメントは、バケットに一式積み込んで運搬可能なものとし、分解・組立作業は人力作業による。
- ⑤後輪のブレーキ解除ができない場合は、ドーリー若しくは車両移動用ジャッキを利用する。
- ⑥乗用車メーカーの仕様から、車体諸元等の許容範囲を表-1のとおりとする。

表-1 乗用車用の試作条件

移動方法	車両（ホイールローダ）
対象車両	乗用車（ワンボックス車）
設計条件	車両総重量 2000kg、前輪 1200kg、後輪 800kg



写真-7 ホイールローダ用車両移動機材

5.2 車両移動用ジャッキの改造

5.2.1 車両移動用ジャッキ（旧型）の改造

- ①キャスター車輪の大型化による段差・不陸対策と安定性の向上
- ②逸走防止用ストッパーの追加
- ③旋回ロック機能の追加
- ④けん引作業用アイボルトの追加



写真-8 改造後の車両移動用ジャッキ（旧型）

5.2.2 車両移動用ジャッキ（新型）の改造

車両移動用ジャッキ（旧型）の改良結果から、キャスター車輪を4輪とも大型化した場合、キャスターの取付高さが高くなり、持ち上げ時の作業性が悪化するため車両移動用ジャッキ（新型）にて改良を実施した。

外側のキャスター車輪のみ大きい車両移動用ジャッキ（新型）を対象に以下の追加改良を実施した。

①逸走防止用ブレーキの追加

車両移動用ジャッキ（新型）は、タイヤの周囲に配置するためにキャスター車輪の高さが低く設計されており、フレームとの隙間も少ないため、追加するブレーキはキャスター車輪を外側から押える構造とした。

②旋回ロックの機能の追加

旋回ロックは 90° ごとに穴を開けた回転円板を取り付ける構造とした。

③けん引用アイボルトの追加

車両移動用ジャッキ（旧型）の改良と同様にけん引用アイボルトを追加するが、車両移動用ジャッキ（新型）は左右対称であるため、作業時の左右配置とけん引方向に合わせてアイボルトを前方1箇所追加した。



写真-9 改造後の車両移動用ジャッキ（新型）

6. 機能検証

ホイールローダ用アタッチメントおよび改良した「車両移動用ジャッキ」の機能検証を行った。

車両移動に要した作業時間を表-2 に示す。

表-2 車両移動時間

分類	車両移動用ジャッキ	ホイールローダ用アタッチメント
作業人員	4人	3人（オペ除く）
移動準備	6分	19分
20mの移動	1分	1分
後片付け	4分	14分
合計	11分	34分
移動速度	約 30m/min	約 80m/min

ホイールローダ用アタッチメントは、ホイールローダへの取付に時間を要したため移動準備の時間が多くかかっているが、取付作業は習熟すれば短縮できること、取付は最初だけで、2台目以降の作業には影響がないため、実用にお

いて問題は無いと思われる。かつ、機械による移動作業であるため作業員の疲労が少なく、安全性が高い。

車両移動用ジャッキは、車両の移動時間については従来とほとんど変わりはないが、段差や溝のある場所での作業性や傾斜地における安全面での向上が図れた。



写真-10 新型車両移動用ジャッキの機能検証状況



写真-11 ホイールローダ用車両移動機器の機能検証状況

7. おわりに

今回試作した車両移動機材は、平成27年度道路啓開実動訓練および平成28年度九都府市合同防災訓練の道路啓開訓練に使用され、実用の効果が確認できた。なお、乗用車の車両移動用ジャッキは、平成27年度に関係事務所（13事務所）に33基を配備、平成28年度も引き続き配備する方針である。今後は小型貨物用車両の移動技術の開発に取り組む予定である。

謝辞

今回の車両移動機材の試作および改造にあたり、道路啓開時における路上車両移動技術研究会、本省・各地方整備局の災害時の道路啓開技術（路上車両移動技術）の検討WG及び局内の関係各課の方々より、貴重なご意見を頂き誠にありがとうございました。この紙面を借りて御礼申し上げます。

3. 軟弱地盤のトラフィカビリティを把握する 土質調査試験について

次世代無人化施工技術研究組合（国立研究開発法人 土木研究所） ○ 片野 浩司
次世代無人化施工技術研究組合（国立研究開発法人 土木研究所） 橋本 毅
次世代無人化施工技術研究組合（国立研究開発法人 土木研究所） 山田 充

1. はじめに

遠隔・無人化施工は、噴火や地震災害時などの緊急工事への対応を目的として開発された我が国特有な技術であり、多くの実績がある。(写真-1)

無人化施工は、これまで主に火山災害（土石流）やドライな状態の環境に対応してきたが、近年は集中豪雨による水災害（地滑り、土石流、出水）が頻発しており、適用範囲の拡大が求められている。(写真-2)

これまで出水環境下での無人化施工では、水中部用途に改造されたバックホウやブルドーザーなどの作業機械が用いられてきた。

しかしながら、大規模な水災害、土石流災害では施工範囲が広がり、これらの作業機械だけではなく、資材等の運搬機械も必要なことが明らかになってきた。

そこで、浅水域から陸上にわたって移動可能で、数百メートルを効率よく走破可能な半水中型クローラダンプ（以下「重運搬ロボット」という。）の開発を行い、これに水中バックホウや水中ブルドーザーなどの作業機械と組み合わせることで、半水中での無人化施工を実現することにした。

開発の中で土木研究所では、走行地盤状況の観測として重運搬ロボットが走行する際、軟弱地盤の走破性を示すトラフィカビリティを検討する。平成27年度はトラフカビリティの指標として用いられているコーン指標値を他の評価量で代替できないかを把握する土質調査試験を行った。



雲仙普賢岳無人化施工 南大隅深層崩壊無人化施工
写真-1 無人化施工例¹⁾

なお、本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：NEDO）の中で実施されている。

具体には、民間セクター及び関係法人とで設立した「次世代無人化施工技術研究組合」（略称UC-Tec）により研究開発を行うものである。



写真-2 徳島県阿南市を流れる那賀川の氾濫(H26年8月)¹⁾

2. 開発内容と実施項目

本研究では、無人化施工の適用範囲を、作業員が入り込むことが危険な浅水域・水際に拡大し、頻発する水災害への迅速な対応を可能とすることを目的とした。

その研究内容は、水深2m程度の水際や半水中部で、作業・運搬などの一連の施工を実現する無人化施工の実証システムの構築、及び浅水域から陸上にわたる数百メートルの多様な状況下を効率よく安定して走破可能な遠隔操作型重運搬ロボットの開発である。(図-1)

重運搬ロボットによる運搬作業を図-1に、開発イメージを図-2に示す。

また、開発項目として、次の5つの実施項目を設定している。

- ① 遠隔操作による半水中作業システムの構築と実証・評価
- ② 遠隔操作型重運搬ロボットの開発
- ③ 作業・走行支援センシング技術
- ④ 操作支援システム技術

- ⑤ 無人化施工・半水中作業のための基礎的ロボット技術の検討とシステム構築に向けたフイージビリティスタディ

従来型の遠隔操作水中バックホウ



+

組合せ



本開発による半水中運搬ロボット

遠隔操作室

図-1 重運搬ロボットによる運搬作業

【具体的研究開発内容】



図-2 開発イメージ

3. 作業・走行支援センシング技術

実施項目「③作業・走行支援センシング技術」では、半水中での遠隔操作による走行性や作業性を確保するための、走行経路の形状や地盤の状況を計測する技術の検討を行っている。

検討項目は次の3項目である。

- ① 走行地盤状況の観測
 - ・ 走行する地盤の状況の把握
- ② 空間把握技術（他組合員が担当）
 - ・ 混濁した水中で地形の形状を検知
 - ・ 電磁波レーダや緑色レーザによる水中探査技術
- ③ 位置・姿勢検知（他組合員が担当）
 - ・ リアルタイムで車体の位置や姿勢を計測
 - ・ GNSS/IMU（慣性計測装置）による水中向

け位置・姿勢検知システムを構築

土木研究所が担当している「①走行地盤状況の観測」の検討課題は、重運搬ロボットが走行する軟弱地盤のトラフィカビリティの把握である。平成27年度はトラフカビリティの指標として用いられているコーン指標値を他の評価値で代替できないか確認することとし、土木研究所の構内で土質調査試験を行った。

以下、平成27年度の結果を報告する。

4. 研究内容及び結果等

4.1 研究内容

トラフィカビリティの評価に利用されているコーン指数の代替指標候補として、市販されている計測機器を用いて、以下について相関性の検証を行った。密度、含水比については、コアサンプル採取により確認した。

- ① 地盤反力係数：重錘落下試験
（使用機器：インパクトソイルテスター IST-04（日東建設））
- ② せん断強度：ベーンせん断試験
（使用機器：ポケットペイン SH-63B（高容量2kgf）（筑波丸東））

試験の流れは、以下の通りである。

(1) 準備、敷均し

試験に使用した土の特性を表-1に示す。

山砂、川砂、粘性土（ここではローム）の各々について、図-3の供試体フレーム内に厚400mmになるように敷均し、試験用地盤を作製した。（写真-3）

敷均しにあたっては、湿地ブルドーザの走行に必要なコーン指数300~400kN/m²（道路土工要綱）を考慮し、締固め度85%、含水比を最適含水比から湿潤側に加し、1層10cmで巻き出し、供試体フレーム内側につけた線を目印に地盤を作製した。

その際、事前に地盤材料の含水比を電子レンジ速乾法で確認し、不足分を加し、攪拌混合して1層毎の重量をクレーンスケールで測定しながら盛り立てた。この最適含水比から順に加しする作業を4回行った。

表-1 試験に使用した土の特性

試料	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)
川砂	1.740	14.8
山砂	1.746	16.7
ローム	0.989	54.0

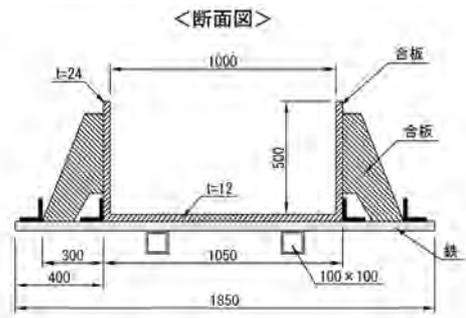


図-3 供試体フレームの仕様

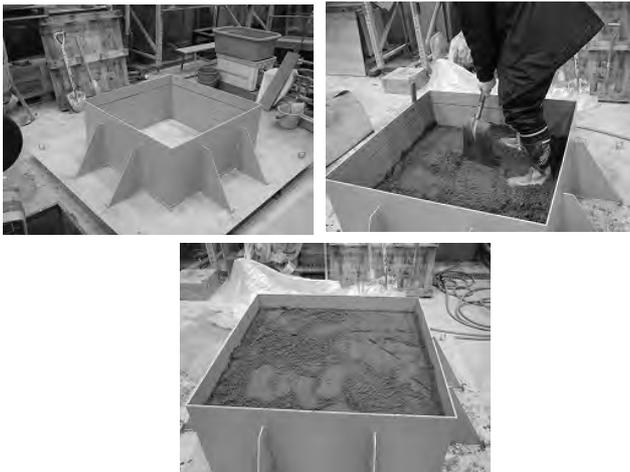


写真-3 供試体フレーム（左上）、敷均し作業（右上）、盛り立て完了（下）

(2) 測定

敷均し後、ベーンせん断試験、コーン指数試験、重錘落下試験、コアサンプル採取の順番に測定した。（写真-4）

供試体フレームの中で効率的に試験を行えるようにベーンせん断試験とコーン指数試験は、周辺地盤の影響が少ない場所で行った。コーン指数試験は、深さ方向に5cm毎に35cmまで読み取った。

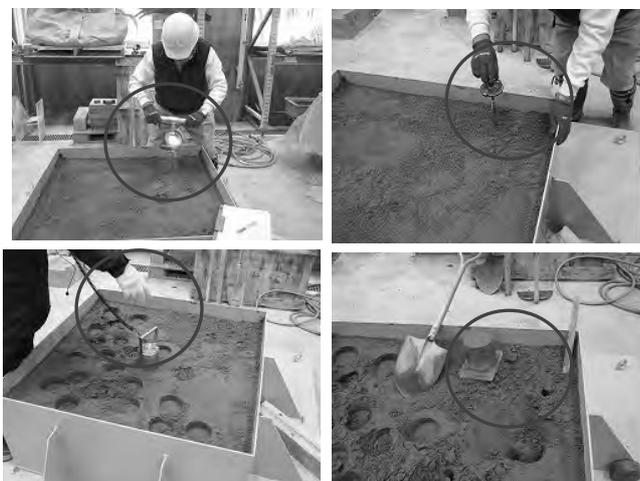


写真-4 コーン指数試験（左上）、ベーンせん断試験（右上）、重錘落下試験（左下）、コアサンプル採取（右下）

ベーンせん断試験は、羽の先端が地盤から10cm深さのところまで計測した。重錘落下試験は10回の測定の平均を1データとして30回行った。コアサンプルは深さ方向に3段階（上・中・下）で採取した。

4.2 試験結果及び考察

(1) 重錘落下試験とベーンせん断試験の適用範囲

コーン指数は、全試験範囲で土の固さの判定が可能であった。これに対し、重錘落下試験は、コーン指数が大きくなる含水比の低い範囲では地盤反力係数が得られたが、コーン指数が小さくなる含水比の高い範囲では、地盤の軟質化に伴い、地盤反力係数が得られなかった。（図-4）

逆にベーンせん断試験は、コーン指数が小さくなる含水比の高い範囲ではせん断強さが得られたが、コーン指数が大きくなる含水比の低い範囲では、ベーンせん断試験機器の上限値を超え、計測値を得られなかった。（図-4）

(2) トラフィカビリティとの関係

湿地ブルドーザが走行可能なトラフィカビリティをコーン指数350kN/m²程度として、コーン指数が得られる含水比状態（図-5の山砂の15~20%付近、図-6のロームの55%付近）を見ると、重錘落下の地盤反力係数が得られている。そのため、湿地ブルドーザのトラフィカビリティを満足するには、重錘落下の地盤反力係数が得られる強度以上が必要である。

一方、ベーンせん断強さは、含水比が高く、コーン指数が小さな範囲で計測が可能だったものの、湿地ブルドーザのトラフィカビリティの地盤強度範囲内に至らなかった。

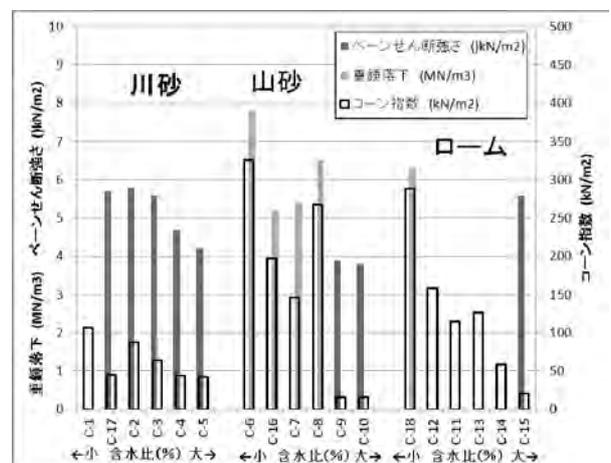


図-4 川砂、山砂、ロームの計測データ

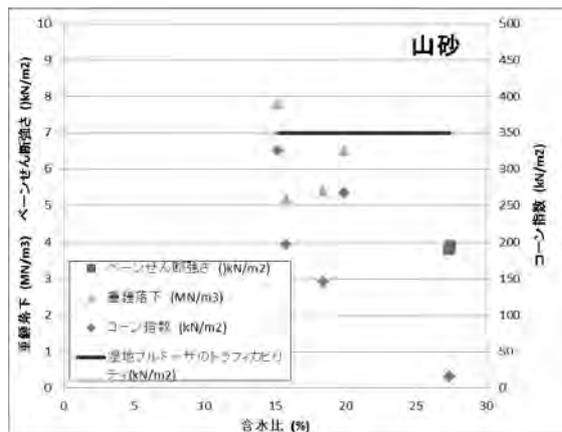


図-5 含水比とコーン指数等（山砂）

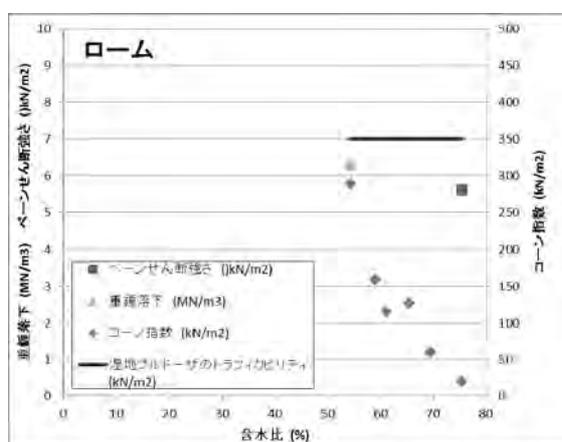


図-6 含水比とコーン指数等（ローム）

(3) コーン指数との相関性

コーン指数と重錘落下の地盤反力係数については強い相関があった（図-7）。但し、トラフィカビリティを評価するには、違う材質に変えて試験を行うなど更なるデータの拡充が必要である。

一方、コーン指数とベーンせん断強さについては弱い相関があった（図-8）。今回地盤が軟質な場合の適用範囲がわかったため、湿地ブルドーザのトラフィカビリティに近い、より硬質な場合のデータを収集する必要がある。

(4) 今後の課題

重錘落下試験は、軟弱地盤のために重錘が地盤に相当沈み込んだことから、例えば重錘の重さを軽量化するなどの改良により、適用範囲を広げることができると思われる。重錘を地盤に落とすだけという簡単な計測方法なので、継続して軟弱地盤の評価を行いたい。

ベーンせん断試験では、強度の上限値から、湿地ブルドーザのトラフィカビリティ付近の強度特性は調査できなかった。しかし、ベーンを深く貫入させることで深度方向の地盤強度の変化が調査

できることから、ベーンの羽を小型化するなどして抵抗力を下げ、湿地ブルドーザのトラフィカビリティでの地盤で調査が可能になるような改良を行い、計測したい。

なお、今回の試験では、ベーンせん断試験の実施深さを10cmに固定したが、複数深さで実施することで、深さ方向に含水比が変化することで強度の変化あったコーン指数の結果と併せ、ベーンせん断強さの相関がわかるものと考えられる。

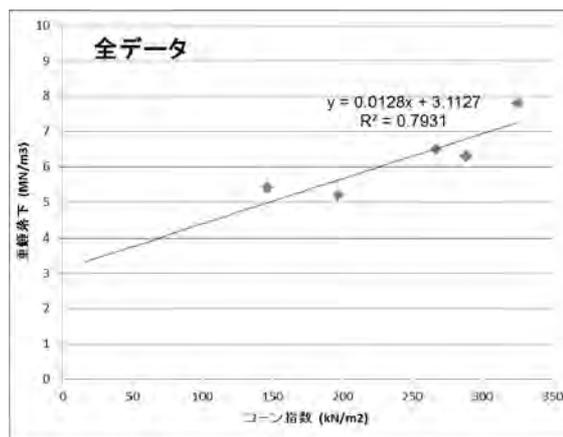


図-7 コーン指数と重錘落下

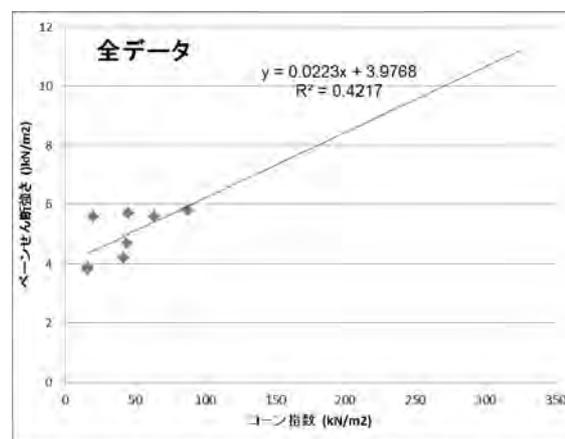


図-8 コーン指数とベーンせん断強さ

謝 辞

本研究開発の実施にあたり、ご指導・ご助言を賜っておりますSIP、NEDOをはじめ関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」各研究開発課題の概要 (<http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/kadai/k07-53.pdf>)

4. 河道閉塞による湛水部の緊急排水技術の開発

株式会社大林組

○ 西村 俊亮

柴田 昌輝

株式会社ダムドレ

佐藤 恣

1. はじめに

豪雨や地震によって、山間部で斜面崩壊や地すべりが発生すると、流出した土砂が河道を閉塞し、背面に湛水部が形成されることがある。近年では、平成 23 年 9 月に四国・中国地方に上陸した台風 12 号による集中豪雨で、和歌山県および奈良県で大規模な河道閉塞が 5 ヵ所で形成された事例が報告されている¹⁾。河道閉塞が決壊すれば、短時間に大量の土石流が下流域に流れ込み、甚大な二次災害を引き起こす可能性がある。二次災害を未然に防ぐためにも迅速な排水作業が求められる。

現在河道閉塞による湛水部の緊急排水には、排水ポンプ車や大型の電動ポンプなどが用いられている。しかし、災害直後は土砂災害によって周辺道路が寸断され、現地への車両や重機の搬入が困難な場合もあり、①排水作業を開始するまでに多大な時間を要する、②継続的な排水には大量の燃料供給が必要となる、③夜間には燃料が不足し十分な排水作業ができない、といった問題がある。

そこで、ヘリコプターによって排水装置を現地に輸送することを想定し、人力のみで迅速に排水装置を設置でき、災害直後から緊急排水を開始できる技術(以下、ポータブルサイフォン排水)を開発した(図-1)。

2. 技術の概要

ポータブルサイフォン排水は、サイフォンの原理を利用することで、燃料を不要とし、昼夜連続排水が可能である。サイフォンの原理とは、排水管内を水で満たした状態にすると、水中ポンプを介さずとも、水位の高い方から低い方へ、出発地点の水位より標高が高い所を通過して水が移動するという原理である。

排水装置は、以下の部材で構成される(図-2)。

- ・ポータブル排水管：人力で運搬可能な排水管で、現場で必要な本数を接続して使用する。
- ・軽量バルブ：吸い込み口と吐き出し口に設置し、排水の起動・停止の役割を担う。
- ・バルブユニット：サイフォンの開始に必要な水を管内に注水するための「注水バルブ」、管内の空気を抜くための「エア抜きバルブ」、管内が水で

満たされたことを検知するための「満水検知装置」で構成される。標高が最も高い位置に設置する。

軽量バルブおよびバルブユニットは、制御盤によってコントロールされており、排水装置設置後に制御盤の自動運転を ON にすれば、図-3 に示すフローに従って、サイフォン排水が開始される。また、排水中に湛水部の水位が目標まで下がると、水位計がこれを検知して、制御盤により軽量バルブが閉じられ、排水が停止される。この時管内は満水状態で保持されるため、降雨等で再び水面が上昇した際、注水なしで排水が再開される。

制御盤には、排水が正常であることを携帯電話に通知する機能を付与し、遠隔監視を可能にした。

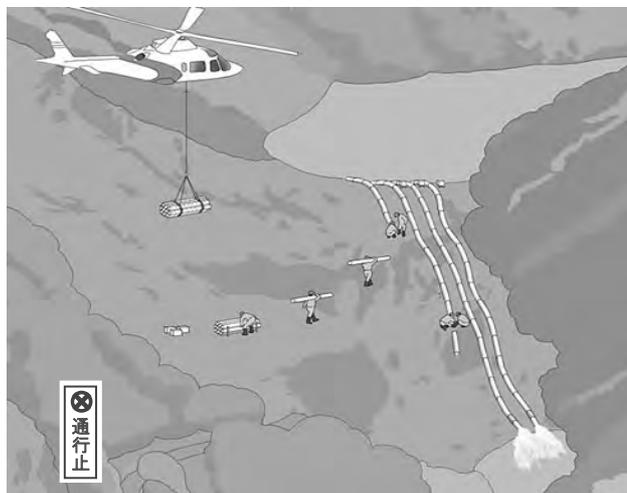


図-1 ポータブルサイフォン排水の適用イメージ

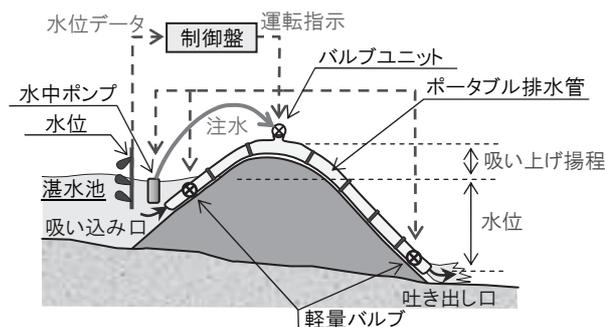


図-2 排水装置の構造

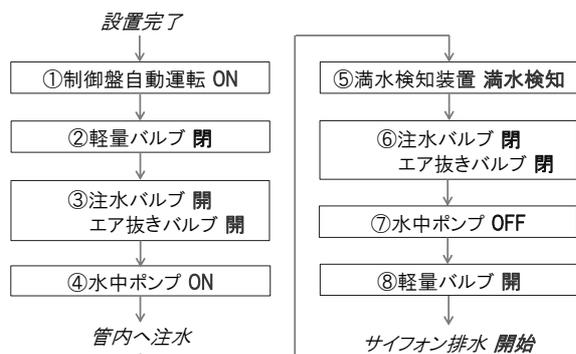


図-3 自動運転フロー



写真-2 ポータブル排水管の気密性確認 実験状況

3. 開発における検討事項

3.1 部材の選定

排水装置の各々の部材について、人力で運搬でき、簡単・迅速に組み立てられ、十分な排水能力を確保できるものを選定した。

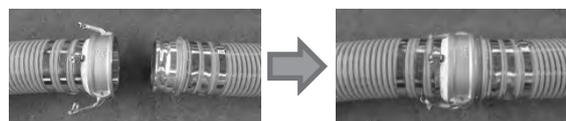
(1) ポータブル排水管

ポータブル排水管には、サクシオンホースを採用した(写真-1)。サクシオンホースは、軽量で可搬性に優れる上に、柔軟性があり、設置現場の凹凸にも対応できる。サクシオンホースの継手にはカムロックを採用し、ワンタッチで接続可能とした。管径は、次項に示す軽量バルブに合わせて内径φ150mmとし、1本の長さは可搬性を考慮して2.5mとした。重量は、カムロックを含めて約15kgである。

継手部の気密性は、サイフォンの原理の成立性に大きく関わる。そこで、サクシオンホースと継手の取付け部および継手の連結部が、所定の気密性を有していることを検証するために、実験を実施した。

写真-2 に示すように、ポータブル排水管を2本連結させ、一方の端部をアクリル板で閉塞し、もう一方の端部を真空ポンプに接続した。次に真空ポンプを動作させて、管内を減圧していった。

管内に作用させる最大負圧は、限界圧力水頭を参考に決定した。サイフォン排水では、排水装置の頂部付近で負圧が最大となり、それが限界圧力水頭以下になるとサイフォン排水が継続できなくなる。一般的に、限界圧力水頭は-7.0m～-8.5mである²⁾。一方で、限界圧力水頭が-8.7mで管内に気泡が発生した事例³⁾



ワンタッチ接続

写真-1 ポータブル排水管

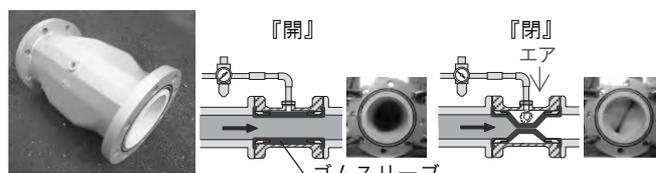


図-4 空圧ピンチバルブ構造



写真-3 軽量バルブの耐負圧性確認 実験状況

も報告されている。以上を参考に、本実験では管内に作用させる最大の負圧を-0.090Mpa(圧力水頭-9.2m相当)とした。

実験の結果、-0.090Mpaまで減圧しても空気の侵入は確認されなかった。また、最大負圧のまま1時間放置したところ、管内圧力は変化せず、排水管継手部の気密性は十分確保できることを確認した。

(2) 軽量バルブ

軽量バルブには、アルミ鋳鉄製空圧式ピンチバルブを採用した(図-4)。空圧式ピンチバルブは、バルブ内に筒状のゴムスリーブが設置してあり、空気を送り込んでゴムスリーブを変形させることでバルブを開閉する仕組みである。弁体がゴムスリーブであるため、φ150mmで約20kgと非常に軽量なのが特長である。一方で、空圧式ピンチバルブは、その構造上管内に負圧がかかるとゴムスリーブが内側に変形し、管内を閉塞してしまう可能性がある。そこで、軽量バルブの耐負圧性を検証する実験を実施した。

写真-3 に示すように、軽量バルブの一方をアクリル板で閉塞し、もう一方を真空ポンプに接続した。次

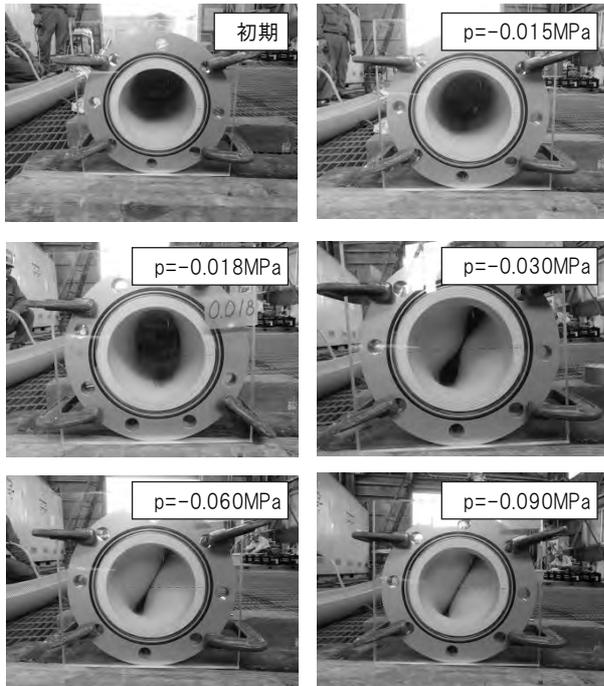


写真-4 軽量バルブ断面変化状況

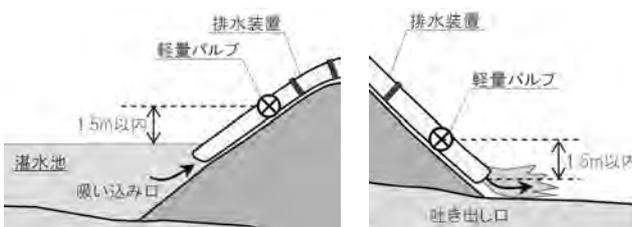


図-5 軽量バルブの配置位置

に真空ポンプを作動して軽量バルブ内を徐々に減圧し、ゴムスリーブの変形による断面変化を目視により観察した。軽量バルブ内に作用させる最大負圧は、前項の実験と同様に、 -0.090MPa とした。

写真-4に実験の結果を示す。写真-4に示すように、バルブ内の圧力が -0.018MPa になると、ゴムスリーブが内側に変形し始めた。その後、 -0.030MPa でゴムスリーブの一部が接着し、さらに -0.090MPa でゴムスリーブが密着して閉塞した。

以上の結果から、軽量バルブが元の断面形状を維持できる圧力は、 -0.015MPa 以下と考えた。これを圧力水頭に換算すると 1.5m となる。この圧力水頭より負圧が大きくなると、軽量バルブ断面が縮小され、排水効率が低下する。よって、軽量バルブを排水装置に組み込む際は、吸い込み側、吐き出し側のそれぞれの水位から 1.5m 以内の高さに設置する必要がある(図-5)。

(3) バルブユニット

写真-5に示すように、バルブユニットは、注水バルブ、エア抜きバルブ、満水検知装置から構成される。材質は硬質塩化ビニルで、内径 $\phi 150\text{mm}$ 、長さ 0.7m 、重量約 25kg である。

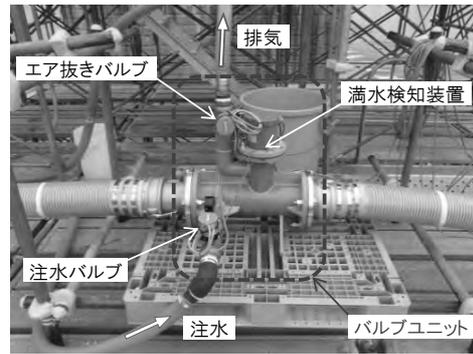


写真-5 バルブユニット

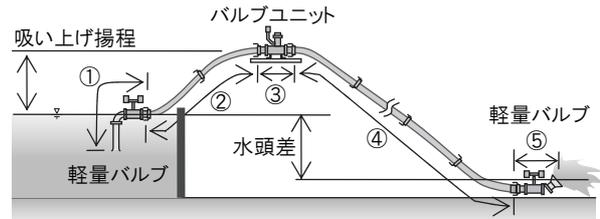


図-6 排水管区間区分図



写真-6 排水実験状況

表-1 排水実験結果

ケース	水頭差 (m)	排水管延長 ①+②+③(m)	排水管延長 ④+⑤(m)	流量 (m^3/min)
case1	1.51	8.3	17.3	2.6
case2	1.51	8.3	24.8	2.3
case3	0.59	8.3	17.3	1.5
case4	0.75	8.3	24.8	1.5

※排水管延長①～⑤は図-6に示す区間に対応する

3.2 排水実験による摩擦損失係数の設定

排水計画時に必要となる排水量は、管内流速と管断面積を掛け合わせることで算出する。管内流速は、図-6に示す区間ごとの損失水頭を計算し、ベルヌーイの定理²⁾より、水位差と全体の損失水頭が等しくなる「水頭差 $H = \text{損失水頭の合計 } \Sigma h$ 」として算出する。

損失水頭として考慮するものは、全区間(区間①～⑤)における摩擦損失水頭に加え、吸い込み口となる区間①で発生する流入損失水頭、曲管損失水頭、吐き出し口となる区間⑤で発生する曲管損失水頭、拡大管損失水頭、吐出残留速度水頭である。この内摩擦損失水頭は全区間で発生し、排水量に大きな影響を与えるため、摩擦損失係数は、排水実験(写真-6)を行い、その結果をフィードバックして設定した。

排水実験では、水頭差と排水管の延長をパラメータとして実験ケースを設定し、各ケースの流量を計測した。表-1に排水実験ケースおよびその結果を示す。

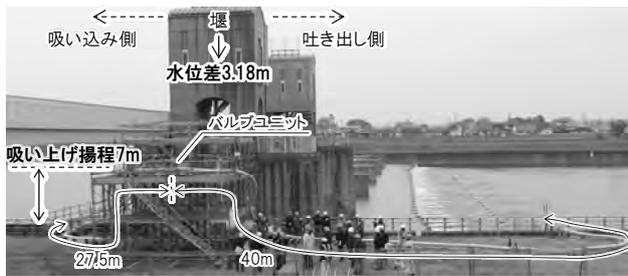


写真-7 現場検証状況(多摩川ニヶ領宿河原堰)

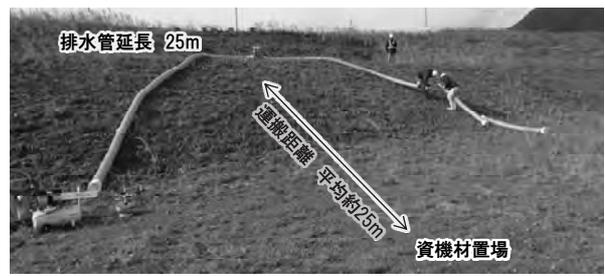


写真-8 現場検証状況(雲仙普賢岳)

排水実験の結果から摩擦損失係数を求めると0.031となり、排水計画時にはこの値を用いることとした。

4. 現場検証実験

ポータブルサイフォン排水は、国土交通省の「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進」の一環である「災害応急復旧技術の公募」に、「排水作業の応急対応」ができる技術・システムとして応募した。本公募において、ポータブルサイフォン排水は現場検証に値する技術として採択され、多摩川と雲仙普賢岳において現場検証実験を実施した。以下に現場検証実験の内容および結果を示す。

4.1 多摩川における現場検証実験

多摩川ニヶ領宿河原堰における現場検証は、ポータブルサイフォン排水の成立性および排水能力を確認するために実施した。写真-7 に示すように、吸い上げ揚程が7mとなるようにステージを組み、ステージ上にバルブユニットを配置した。排水管は、バルブユニットから多摩川上流側に27.5m、下流側に40.0m設置した。なお、下流側の40.0mは、本来の長さ2.5mの排水管ではなく、20.0mのサクシオンホースを2本接続して実施した。水位差は、堰を挟んで3.18mであった。限界吸い上げ揚程は計算上7.21mであり²⁾、排水限界に近い条件である。

上記の条件でサイフォン排水を試行した結果、問題なく一定時間排水することができ、ポータブルサイフォン排水の成立性を確認することができた。また、計測した排水量は $2.40\text{m}^3/\text{min}$ であった。

事前に算出した排水量は $2.13\text{m}^3/\text{min}$ であり、計測した排水量の $2.40\text{m}^3/\text{min}$ と概ね整合する結果となり、排水量算出方法の妥当性が確認できた。なお、計測した排水量が計算結果を若干上回った原因は、下流側の排水管継手が本来よりも少なく、継手部における摩擦損失が低減されたためと推察される。

4.2 雲仙普賢岳における現場検証実験

雲仙普賢岳における現場検証実験は、排水装置設置の容易さを確認するために実施した。写真-8 に示すのり面(勾配1:2.0、高さ約3m)に、排水管延長25mの排水装置設置に要する時間を計測した。作業人員は2名とし、作業員には作業直前に初めて手順

を伝えて、設置させた。資機材の運搬距離は平均で約25mとした。

実験の結果、設置に要した時間はわずか10分程度であり、誰でも簡単・迅速に組み立てられることが確認できた。なお今回の結果を、仮に排水管延長100m、運搬距離100mに換算すると、約2.5時間で設置が可能となる。

以上の2つの現場検証実験の結果、ポータブルサイフォン排水は、次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会応急復旧部会から、「緊急排水作業が必要となった場合には、導入を検討すべき技術として推薦する。」との高い評価を頂いた。

5. まとめ

当社は、平成23年の台風12号によって形成された河道閉塞の緊急対策工事を担当した。ポータブルサイフォン排水は、その工事からニーズを汲み取り、開発に至った技術である。

この度、国土交通省の公募において、当技術の成立性や排水装置設置の容易さが示された。今後は、実現場への適用を目指していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会地盤工学委員会斜面工学研究小委員会現地調査団:平成23年台風12号土砂災害第2回調査報告書,平成24年8月
- 2) 社団法人土木学会:土木工学ハンドブック第四版I, pp.485-491,平成元年11月
- 3) 武田直人:大規模災害に対応するサイフォン排水技術の開発 - 河道閉塞の緊急排水対策 -, 建設の施工企画,平成24年3月

5. ソイルセメント山留め壁を施工する際に発生する地盤の摩擦音を活用した土質判別技術に関する基礎実験

日本大学生産工学部
日本大学短期大学部
日本大学大学院

○ 下村 修一
酒匂 教明
奥山 誠也

1. はじめに

山留め工事で止水工法を採用する場合、ソイルセメント壁を難透水層に到達させ、根切り場内の地下水位を低下させることが多い。壁先端が難透水層へ十分に根入れされていない場合、場内の地下水位の低下処理によって止水工法の狙いに反して周辺地盤の地下水位も低下させてしまい、周辺地盤の沈下を招く恐れがある。ソイルセメント壁の施工では、深層混合処理工法や埋込み杭工法と同様に直接土質を確認することが困難なため、掘削オーガの貫入抵抗やオペレーターの感触が土質判別や地盤の硬軟の判断のよりどころとなる。深層混合処理工法や埋込み杭工法では主に支持層への根入れ確認が最重要項目となるため、地盤の硬軟との相関性が比較的高いと思われる掘削オーガの貫入抵抗(例えば 1)を用いることは有効と考えられる。一方、例として土丹と密な砂地盤の比較を挙げると、両者の貫入抵抗は同程度であったとしても透水性は著しく異なる。このような場合は、掘削オーガの貫入抵抗だけでは土質判別は難しく、難透水層への根入れの判断は困難である。しかしながら、これに代わり客観的に施工時の難透水層への根入れを確認する技術は確立していない。そのため、施工時における壁長の管理は地盤調査結果に基づく長さ管理となり、安全側の判断として壁長を長く設定せざるを得ない。特に難透水層の傾斜や不陸が著しい場合、現状の技術では十分な対処が出来なく大きなトラブルを引き起こす可能性がある。難透水層の分布状況を推定する精度は地盤調査箇所数を増やすことで高めることは可能となる。しかし、コストと工期の面から調査箇所数には限界があるため、施工段階で根入れを最終確認する手法の要求は高いと考えられる。

一方、施工時にオペレーターが感覚的に得られる情報として、振動や音がある。例えば粒径の小さな地盤材料よりも粒径の大きな地盤材料の方が掘削時に大きな音が発生することは想像に難くない。

著者らは既に地盤調査手法のひとつであるスウェーデン式サウンディング試験(SWS 試験)を対象に摩擦音を活用した土質判別の有効性を確認している²⁾。SWS 試験は、土質を直接確認できないため、調査記録にオペレーターが感じた音や振動を記録しており、このような記録を客観的な数値として示すことでオペレーターの経験に依存しない評価が可能となる。

そこで本研究では、施工時に得られる掘削オーガーと地盤の摩擦音に着目し、摩擦音を活用した難透水層の判別技術の可能性について模型地盤を対象とした室内実験で検討した。

2. 実験装置

2.1 模型施工機械

図-1 に模型施工機械を示す。模型施工機械は、掘削オーガーを取り付けた駆動部、掘削オーガーの回転速度、貫入速度およびセメントミルクの吐出量をコントロールする制御部、セメントミルクタンクからなる。セメントミルクタンクはピストンにより連続的にセメントミルクの吐出が可能である。

図-2 に掘削オーガー先端付近の詳細を示す。掘削オーガーは削孔径 550mm の単軸の実機を想定し、縮尺約 1/6 として、軸部径 30mm、羽径 90mm

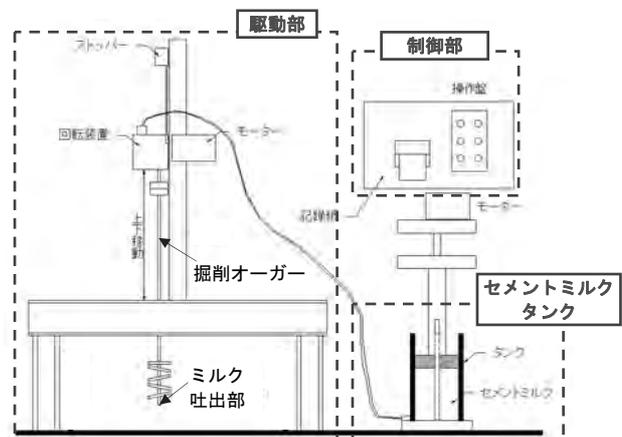


図-1 模型施工機械

とした。先端はダブルオーガー、その上部はシングルオーガーとした。軸部に中心および中心から10mm程度外側の2か所に空洞を設けた。中心の空洞はマイクおよびそのケーブルを内蔵するために設けた。マイクとオーガー先端部の間に閉空間を設け、この空間内に響く摩擦音を計測する。マイクの設置位置を上下させることで閉空間長さのコントロールが可能である。もう一方の空洞はセメントミルクの流路である。

2.2 摩擦音測定システム

摩擦音の収録には既往の研究²⁾と同様のシステムを採用した。写真-1にマイクおよび送信機の設置状況を示す。マイクはオーガー中空部内に内蔵し、モーター部付近のオーガー軸部に設置した送信機と接続している。施工時に収録した情報は送信機から無線で受信機に送られ、受信機と接続したアンプ兼AD変換器を通してパソコンに取り込まれる。

図-3に取り込んだデータから得られる時刻歴波形の一例を示す。同図には参考としてSWS試験を対象として実施した既往の研究²⁾で得られた波形も合わせ示した。SWS試験では、ハンドルを4半回転させた時の摩擦音を収録している。試験は人力で半回転毎に静止するため、時刻歴波形には4つの山が確認できる。一方、本実験では機械により連続的に掘削オーガーを回転させており、50rpmで掘削ツールを制御した結果、時刻歴波形には10秒間で8.5山程度が連続的に確認できる。

2.3 摩擦音の測定深度

図-4に測定深度と掘削オーガー位置の関係を示す。同図は一例として1層地盤で15cm/minで制御した場合の掘削オーガー位置を示している。測定開始の深度は地表面を0cmとして1層地盤を対象とした試験では深度0cm, 10cm, 20cm, 30cmで、各10秒間測定した。2層地盤を対象とした試験(5.2節)では摩擦音の連続的な変化をとらえることを目的として10秒間の測定を連続的に行った。各実験では地盤の掘削時以外に気中での機械摩擦音と各深度の暗騒音を測定した。図-4に示すように、深度によりオーガー羽部の地中への貫入量は異なるため、この影響により地中での回転貫入時の摩擦音レベルに違いが現れることが予想される。

2.4 摩擦音データの処理方法

時刻歴データをフーリエ変換した音圧レベルSPLで表現すると、(1)式となる。

$$SPL(f_j) = 10 \log_{10} \frac{PSW(f_j)}{P_0^2} = 20 \log_{10} \frac{1}{\sqrt{f_s N}} \cdot \frac{|X_j|}{P_0} \quad (1)$$

ここに、PSWは周波数 $f_j = f_s / N$ (Hz) ($j=0, 1, \dots, N-1$) でのパワースペクトル密度関数、 X_j は音圧(Pa)、 N は全データ数、 $P_0 = 2 \times 10^{-5}$ (Pa)である。

摩擦音はサンプリング周波数 $f_s = 44.1 \text{ kHz}$ で収録した。

さらに、既往の研究²⁾と同様に時刻歴データ $P(t)$ から次式により実効値 P_E を求めた。

$$P_E = \sqrt{\frac{\int_0^T \{P(t)\}^2 dt}{T}} \quad (2)$$

ただし、実効値は全区間ではなく小区間に分割して算出した。まず全収録時間10秒を区間 $T(\text{term}) = 0.2 \text{ s}$ に分割し、区間毎の実効値を算出し、(1)式に準じてSPLを求めた。このとき、後述する検討結果より、6000Hzのハイパスフィルターと8000Hzのローパスフィルターをかけた。

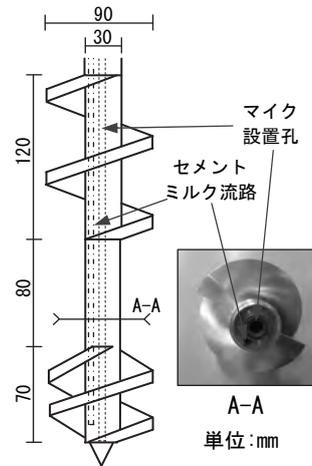


図-2 オーガー先端付近詳細

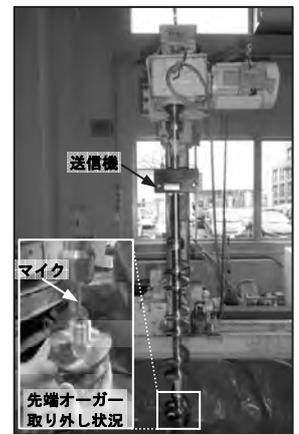


写真-1 マイクと送信機の設置状況

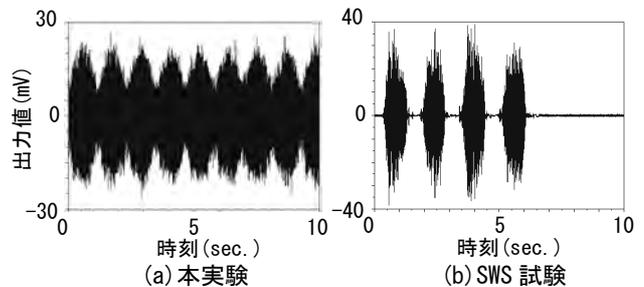


図-3 時刻歴データの一部

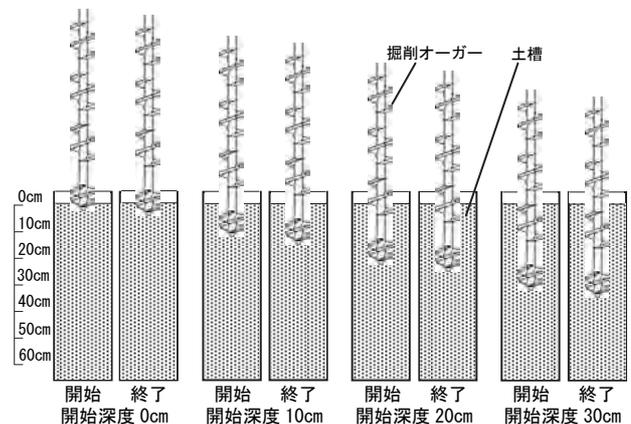


図-4 測定深度(15cm/min, 1層地盤の場合)

3. 模型地盤

模型地盤の試料土には珪砂 5 号(土粒子密度 $\rho_s=2.667$)と笠岡粘土(土粒子密度 $\rho_s=2.710$, 塑性指数 $I_p=45.1$)を用いた。

図-5 に各試料土と各試料土を混合した土の粒径加積曲線を示す。4 章の予備実験では珪砂 5 号のみを用い、5 章の土質と音圧レベルの関係を求める実験においては珪砂 5 号に笠岡粘土を所定量混合した。

珪砂 5 号のみを用いた模型地盤では乾燥状態の砂を土槽に投入しながら土槽側面を木槌で打撃して密な地盤を作製した。この模型地盤を飽和させる場合には、その後に地盤上面から水道水を注ぎ水位が地表面となることを確認した。笠岡粘土を混合した模型地盤については、珪砂 5 号と笠岡粘土を乾燥状態で所定量攪拌混合し、その後所定量の水を加えてホバート型ミキサーで攪拌混合して作製した試料土を用いた。この試料土を土槽に高さ 10cm 程度投入する毎に表面を突き固めて模型地盤を作製した。

4. 予備実験

表-1 に摩擦音の計測パターンを示す。実施工の流れの中で土質判別を行うには地盤掘削中に摩擦音を計測することとなる。摩擦音に影響する因子として、オーガの回転、貫入及びセメントミルクの吐出が挙げられる。精度の高い土質判別となり得るかは気中での機械摩擦音やセメントミルクの吐出音に対して地中での回転貫入時の摩擦音のレベルが十分に高いことを確認する必要がある。

本研究では乾燥した珪砂 5 号の模型地盤を対象に表-1 に示すパターンに対して機械摩擦音や最適な閉空間長さなどの検討を行った。なお、摩擦音は暗騒音レベルからの変化量となるため、すべての実験で暗騒音レベルに大きな違いがないことを確認した。

4.1 機械摩擦音の検討

図-6 に気中における暗騒音と機械摩擦音の音圧レベルのスペクトルを示す。機械制御は回転のみ(50rpm)と回転貫入(50rpm, 15cm/min)の 2 種類とし、閉空間長さは 0cm とした。図-6 より、機械摩擦音は広範囲な周波数帯域で暗騒音に対して音圧レベルの明瞭な増加が認められており、回転の影響が大きいことが分かる。また、6000~10000Hz の帯域では暗騒音レベルに近い値を示しており、同帯域での機械摩擦音の影響は小さいことが分かる。

図-7 に模型地盤中(深度 10cm)で掘削オーガを手動制御および機械制御(回転のみ 50rpm)した時の音圧レベルのスペクトルを示す。閉空間長さは 0cm である。図-7 には手動制御時の暗騒音及び機

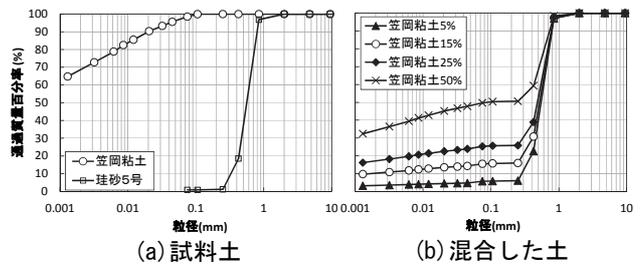


図-5 粒径加積曲線

表-1 予備実験パターン

	暗騒音	回転	回転貫入	回転貫入+セメントミルク	回転貫入(手動)
気中					
地中					

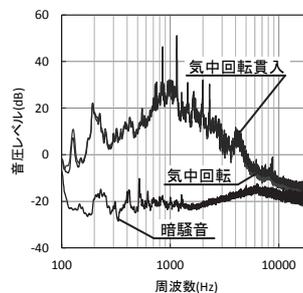


図-6 気中の機械摩擦音

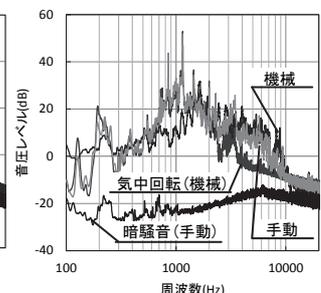


図-7 手動制御と機械制御の比較

械制御による気中の回転のみの結果も併記した。図-7 より、機械摩擦音の影響がなく、オーガと地盤間の摩擦音のみが得られる手動制御の結果を見ると 10000Hz 以下の帯域で暗騒音に対して音圧レベルの明確な上昇が確認できる。一方、機械制御では 4000~10000Hz の周波数帯域で気中回転に対して音圧レベルの明確な上昇が確認できる。さらに、この周波数帯域で手動制御と機械制御の違いは小さい。

以上より、機械制御では 6000~8000Hz の帯域の音圧レベルを抽出することで地盤とオーガ間の摩擦音の評価が可能と判断した。なお、機械摩擦音の特性は装置毎、制御方法毎に異なると予想されるため、実機においても機械毎にこれらの影響を把握する必要がある。よって、ここで提案したフィルター処理は、本装置に限り有効であることに注意が必要である。以後の検討では機械制御のみを対象とする。

4.2 閉空間長さの検討

図-8 に閉空間長さを 0, 1, 2 および 5cm として回転貫入(50rpm, 15cm/min)した時の模型地盤中(深度 30cm)の音圧レベルのスペクトルを示す。地盤の摩擦音の評価は、気中での回転時に対する地中

での回転貫入時の音圧レベルの差が大きいほど土質別の音圧レベルの差が明瞭に表れ、土質判別の精度は高くなる。図-8より、6000~8000Hzの帯域において気中回転の音圧レベルは閉空間長さに因らないが、閉空間長さを0cmとした地中回転貫入時の音圧レベルは最も上昇が大きいことが分かる。よって、以後の検討では閉空間長さを0cmとする。

4.3 測定深度の検討

図-9に回転貫入(50rpm, 15cm/min)した時の模型地盤中の測定深度毎の音圧レベルの実効値の時刻歴を示す。なお、測定開始深度は深度0, 10, 20及び30cmであり、10秒間測定しているため、各深度2.5cm掘削する間の記録となる。図-9より、測定開始深度0cmの実効値は深度が極浅いと気中の回転時と大きな違いはなく、深度が深くなるにつれて増大している。これは先端ビットが十分に地盤に噛み合い掘削オーガの羽と土の接触面積が広がったことによる。図-4に示したように、特に深度0cmではオーガの羽と土の接触面積は急激に広がるため、実効値の上昇程度に表れたと考えられる。測定開始深度10cmではダブルオーガが完全に地中に入っており、実効値の上昇程度

は緩やかである。深度20cmでは深度10cmに比べて実効値は大きい値はほぼ一定である。シングルオーガが地中に貫入し始めており、地盤とオーガ間の接触面積が広がっているにもかかわらず、深度に応じた増加傾向は認められない。また、深度20cmと30cmでは実効値に大きな違いは認められないことから、マイクの設置位置から離れた位置での土とオーガ間の摩擦音の影響は小さく、先端ビットによる地盤の切削と先端付近のダブルオーガの羽上を移動する土の摩擦音が支配的と考えられる。以上より、深度が浅い範囲での計測は実際の施工を想定した場合に難透水層の判別の必要性はないことから、以後の検討では主に深度30cmを対象とする。

4.4 回転速度および貫入速度の影響

図-10に回転速度を25rpm, 50rpmおよび75rpmで、貫入速度を15cm/minに固定した場合および回転速度を50rpmで貫入速度を30cm/minとした場合の実効値の時刻歴を示す。まず回転速度の違いに着目すると25rpmは他の回転速度と異なり、気中回転時の音圧レベルが高く、波形に大きな振幅が認められ、掘削オーガと地盤間の摩擦音を評価するこ

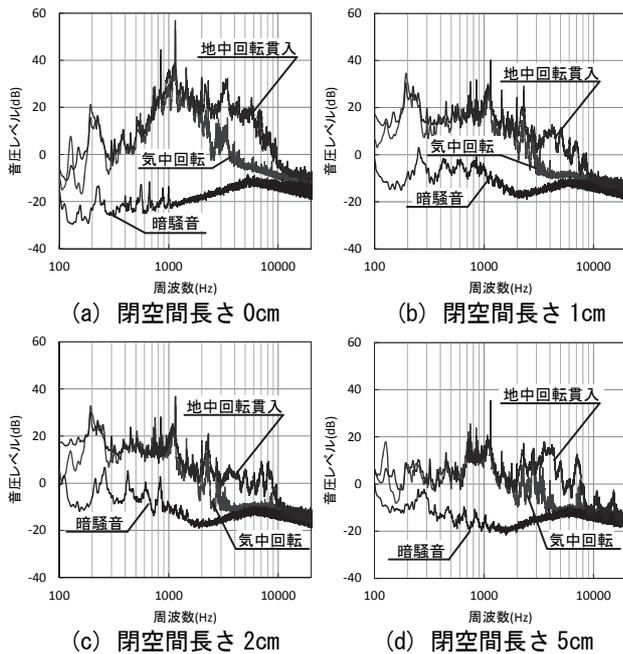


図-8 閉空間長さの影響

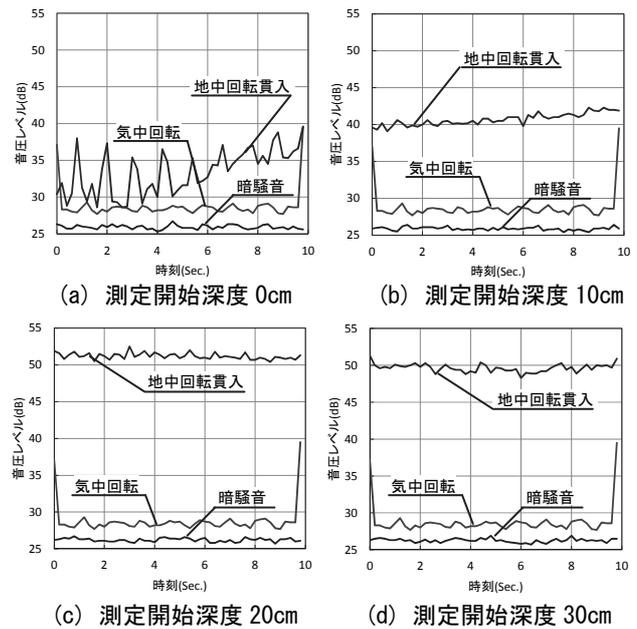


図-9 測定深度の影響

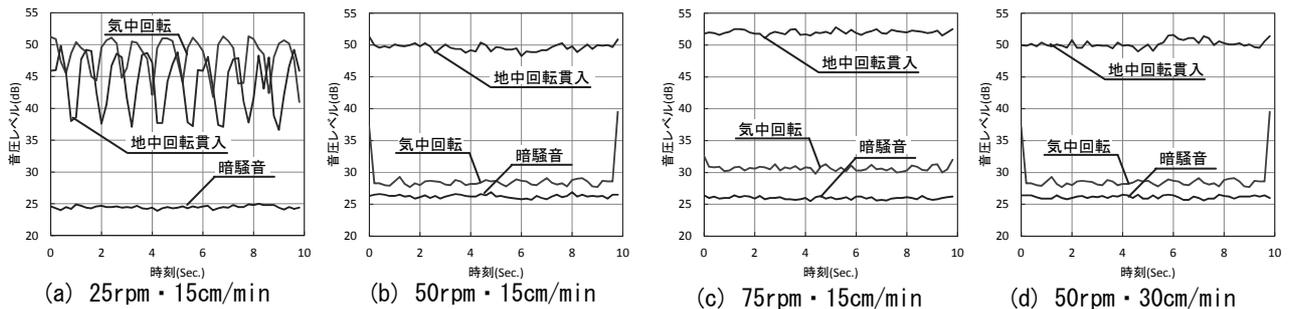


図-10 回転速度および貫入速度の影響

とが困難である。一方、50rpmと75rpmは氣中回転時の音圧レベルが低く、掘削オーガーと地盤間の摩擦音の評価が可能であり、回転速度が速いほど音圧レベルが高いことが分かる。貫入速度の違いに着目すると、貫入速度が2倍になっても音圧レベルの違いは認められない。貫入速度が速くなるとダブルオーガーへの土の供給量が増加し、土の移動の円滑さが失われて摩擦抵抗が大きくなるが、音圧レベルに顕著な違いを生じさせるほど大きな影響はないと考えられる。

以上より、砂地盤については貫入速度ではなく回転速度の影響が摩擦音に対しては大きいと考えられる。制御方法によって機械摩擦音の除去方法に検討の余地を残すが、以降では土質と摩擦音の関係を検討することを主目的に、代表として50rpm、15cm/minでの機械制御を対象とする。

4.5 セメントミルク吐出の影響

ソイルセメント壁の施工においては掘削と同時にセメントミルクを注入する。セメントミルクを注入することによって先端ビット付近の土が緩み切削が容易になるとともに、土はセメントミルクと攪拌混合されて流動性が向上する。そのため、音圧レベルの低下が予想される。

図-11に氣中における水のみでの吐出(960cc/min)、回転貫入のみおよび回転貫入時に水を吐出した場合(960cc/min)の音圧レベルのスペクトルを示す。同図より、検討周波数帯域である6000~8000Hzでは水のみでの音圧レベルは暗騒音と同レベルであり、回転貫入時においても水の吐出の有無による音圧レベルの違いは認められない。このことは、水がオーガーの中空部内を通過することや吐出孔から排出されることは、音圧レベルの大小関係に及ぼす影響は無視できるほど小さいことを示している。セメントミルクは懸濁液であるため、水に比べて吐出時に異なる影響が出る可能性もあるが、水吐出そのものは地盤の掘削に比べて影響は極めて小さく、水とセメントミルクでは傾向は変わらないと判断し、実験の難易度も考慮した上で、本実験ではセメントミルクの代わりに水を用いた。

図-12に水の吐出量を0cc/min、480cc/min(注入率50%)および960cc/min(注入率100%)とした場合の掘削時の音圧レベルの実効値の時刻歴を示す。なお、乾燥地盤では吐出した水が地盤に浸透し、水による地盤掘削への影響を十分に把握できないと判断し、ここでは飽和地盤を対象とした。図-12より、実効値は吐出量0cc/minで42dB、480cc/minで38dB、960cc/minで34dBであり、吐出量が多いほど実効値は小さい。これは水の吐出量が多いほどビット先端地盤の切削が容易になったこと及びオーガー羽上を砂がスムーズに移動できるようになったことによると考えられる。

5. 土質と音圧レベルの関係

5.1 1層地盤を対象とした検討

表-2に実験条件を示す。実験では、原位置に細粒分が全く含まれていない地盤が存在することは稀であるという前提のもと、細粒分が含まれた4種類の1層地盤を対象に、水の吐出の有無も条件に行った。

図-13に実効値の時刻歴の平均値と笠岡粘土の含有率の関係を示す。同図では深度20cmと30cmのデータを示した。図-13より、特異点はあるものの、水の吐出の有無に因らず概ね粘土分含有率が高い(平均粒径が小さい)ほど音圧レベルは低くなるこ

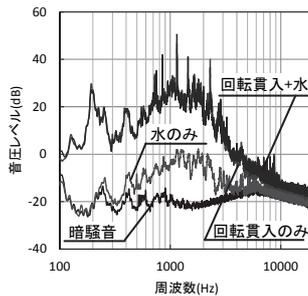


図-11 氣中における水吐出の影響

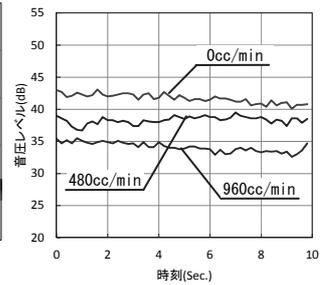
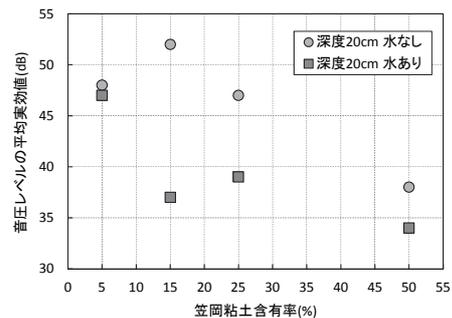


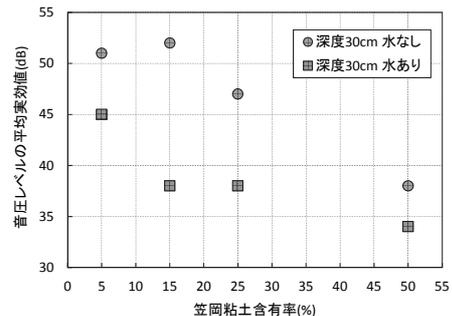
図-12 水吐出量の影響

表-2 実験条件(1層地盤)

Case	試料土の配合(質量比)		含水比 %	回転速度 rpm	貫入速度 cm/min	水 cc/min
	珪砂5号	笠岡粘土				
1D	95	5	5	50	15	0
1W						960
2D	85	15	10			0
2W						960
3D	75	25	15			0
3W						960
4D	50	50	20			0
4W						960



(a) 深度 20cm



(b) 深度 30cm

図-13 笠岡粘土含有率と平均実効値の関係

とがわかる。これはSWS試験を対象とした地盤の摩擦音の結果と同様である。

SWS試験では、スクリーポイントの回転によって生じるスクリーポイントと地盤間の摩擦音が主となる。一方、本実験では先端ビットによる地盤の切削に加えて、オーガーの羽上を土が移動する際のオーガーと土の摩擦も測定する摩擦音レベルの大きな因子となる。粘土分が増えるにつれて、平均粒径は小さくなり、音圧レベルは低下するが、土の粘着性が高まることで土の流動性は低下し、音圧レベルが増大すると考えられる。粘性土の種類によっては粒径と粘着力の影響程度が異なることも予想される。ただし、ソイルセメント壁の施工においては、掘削と同時にセメントミルクを吐出することを考慮すると、土の粘着力による流動性の低下は小さくなることが予想される。これらの影響については今後の課題とし、本実験の地盤条件内においては、SWS試験を対象とした地盤の摩擦音の評価と同様に平均粒径が小さいほど音圧レベルは低くなると判断した。

5.2 2層地盤を対象とした検証

前節で得られた水を吐出した場合の音圧レベルと粘土分含有率の関係の相関性を検証するため、2層地盤を対象として摩擦音を測定した。

表-3に実験条件を示す。本研究は難透水層への根入れの判断を摩擦音で評価することを目的としているため、上層を透水層（笠岡粘土5%）、下層を難透水層（笠岡粘土50%）とした。実験は上層の層厚を20cmとし、水を吐出した場合のみを対象とした。計測は深度0cmより10秒間の測定を深度30cm程度まで連続的に行った。

図-14に音圧レベルの実効値について、各深度の10秒間の平均値の深度分布を示す。同図には前節で得られた、各土質の実効値（透水層は46dB、難透水層は34dBで、いずれも深度20cmと30cmの平均値）も併記した。深度が10cm程度までの浅い領域では音圧レベルが低く、下層の難透水層と同程度になっている。これは予備実験でも示したように、オーガーの羽上の土の接触面積が狭いためと考えられる。深度15cmくらいではほぼ笠岡粘土5%の1層地盤の結果と同程度の45dBを示した。それ以深は音圧レベルが低下して笠岡粘土50%の1層地盤の結果と同程度の35dBを示した。このことは、上層の粒径の大きな透水層の摩擦の影響は認められずオーガー先端付近の影響が大きいことを示唆している。以上より、本実験の範囲内では、音圧レベルから土質を精度良く判別できる可能性が示された。

6. おわりに

本研究ではソイルセメント壁の施工時において、

表-3 実験条件 (2層地盤)

層厚 cm	試料土の配合 (質量比)		含水比 %	回転 速度 rpm	貫入 速度 cm/min	水 cc/min
	珪砂5号	笠岡粘土				
上層(透水層)	20	95	5	50	15	960
下層(難透水層)	50	50	50			

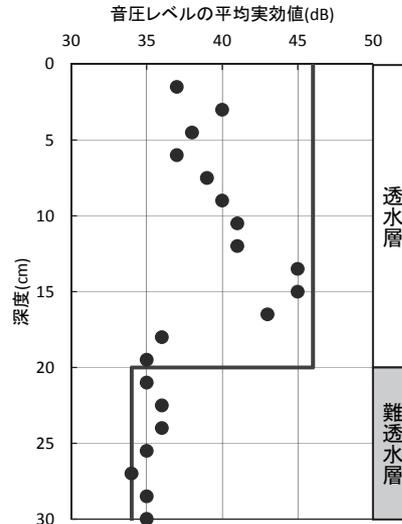


図-14 2層地盤における平均実効値の深度分布

難透水層への根入れを確認する手法として掘削オーガーと地盤間の摩擦音に着目し、模型地盤を対象に可能性を検証した。その結果、限られた条件下ではあるが以下の知見が得られた。

- 1) 機械の摩擦音は制御方法により異なるが、特定の周波数成分をカットすることで除去できる可能性がある。
- 2) 摩擦音は先端地盤の切削とオーガー羽上の土の移動によるものであり、セメントミルク(水)の吐出によりその値は低下する。
- 3) セメントミルク(水)を吐出した場合、粒径が小さい地盤ほど摩擦音は小さい。
- 4) 摩擦音を指標とすることで難透水層を判別できる可能性がある。

謝辞

本研究は平成26年度日本建設機械施工協会研究開発助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 下村修一・武居幸次郎・玉川悠貴：埋込み杭の施工時に得られる積分電流値と標準貫入試験のN値の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I，pp.395-396，2012
- 2) 酒匂教明・下村修一・片岡翔太・川村政史：摩擦音を利用した土質判別性能を有するスウェーデン式サウンディング試験，地盤工学会誌，Vol.63，No.4，Ser.687，pp.6-9，2015

7. 鉄筋ユニットブロックによる 鉄筋コンクリート構造物隅角部配筋の省力化

大成建設株式会社
大成建設株式会社
大成建設株式会社

○ 猪口 泰彦
高倉 克彦
村田 裕志

1. はじめに

RC ボックスカルバートの隅角部では、壁と底版・頂版の主鉄筋が交差し、それに加えてせん断補強鉄筋や隅角部補強鉄筋、ハンチ筋等が配置される。このため、隅角部は鉄筋が高密度に配置され、組立が難しくなり、熟練技術を有した技能者による施工が必要となる。一方で、技能者は全体として減少の傾向にあり、また、大型工事の集中もあって技能者の確保も困難になりつつある。このため、隅角部の配筋を合理化・省力化することが求められてきつつある。

そこで、図-1 に示すように、隅角部の鉄筋をユニット化した工場製品として設置し、底版及び側壁の鉄筋を現地組立する方法を考案した。この鉄筋ユニットブロックの設置は、鉄筋工ではなく普通作業員でも施工可能となる。隅角部の複雑な配筋を現地組立不要とすることで、当該箇所の鉄筋組立労務を削減することも可能となる。

この鉄筋ユニットブロックが構造として成立することを確認するために、道路構造物の RC ボックスカルバートの隅角部を想定し、考案した配筋方法を適用した L 形の縮小モデル試験体に対して、正負交番荷重実験を行うことでその耐荷性状を確認した。

2. 鉄筋ユニットブロック概要

2.1 構造概要

鉄筋ユニットブロックの断面は、鉄筋を接続用鋼板 A に溶接して接続することで構成される。この鋼板を接続用鋼板 B に溶接し、積層することで 1 つのブロックを形成する。積層する間隔は鉄筋間隔相当としている。現地組立する鉄筋は、プレート定着型鉄筋とし、切欠きを設けた接続用鋼板 B にこの鉄筋を嵌合させることで定着する構造とした。鉄筋に発生した引張力は、主鉄筋⇒接続用鋼板 B⇒接続用鋼板 A⇒ユニット内の主鉄筋相当鉄筋と伝達される。この概念図を図-2 に示す。隅

角部補強鉄筋に相当する鉄筋を、ハンチと直角方向に配置することで、隅角部を開く方向に荷重が作用する際の割裂ひび割れに抵抗する。

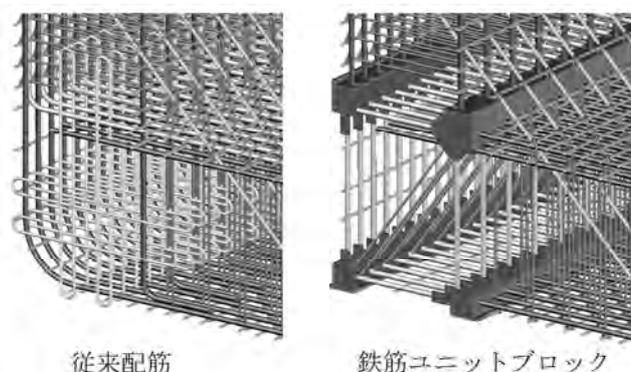


図-1 隅角部配筋の省力化イメージ

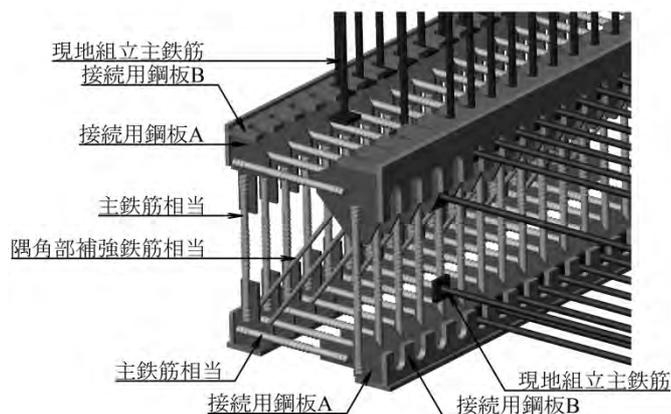


図-2 鉄筋ユニットブロック概念図

2.2 接続部の加工

現地組立する鉄筋との接続部の加工寸法を図-3 に示す。接続用鋼板 B の切欠きは、プレート定着型鉄筋の摩擦圧接により生じるバリ、施工余裕を考慮し、節の高さを含めた鉄筋径 D に両側 10mm ずつ加えた寸法とした。鉄筋に生じている引張力を伝達するためのプレートと接続用鋼板 B の掛け

代は、接続用鋼板 B の板厚 t の半分とした。

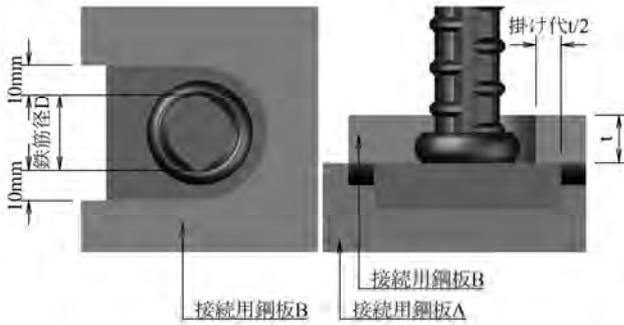


図-3 接続部の加工寸法

2.3 在来工法との比較

鉄筋ユニットブロックを開発するにあたり、工程、生産性、費用の面で在来工法と比較した。比較の対象としたのは道路構造物の RC ボックスカルバートで、図-4 に示す 5×5m の範囲で延長方向 18m の鉄筋・型枠・コンクリートのみの構築工事である。なお、耐荷性状を確認した L 形の縮小モデル実験も同じ範囲を対象としている。

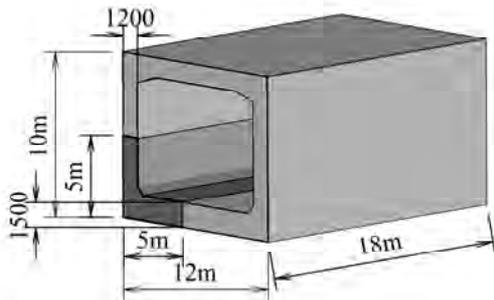


図-4 在来工法との比較範囲

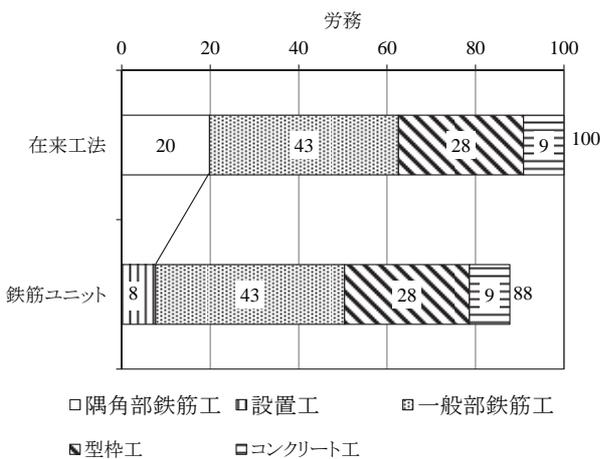


図-5 在来工法との労務の比較

生産性については、隅角部鉄筋組立の労務を比較した。ただし、在来工法では熟練した鉄筋工、鉄筋ユニットブロックを使用した場合は設置工として集計している。比較の結果、工程では 11% 程

度の短縮を、隅角部の鉄筋組立に関する労務では 60% 程度の低減を期待することができる。一方で、総鋼量の増加と鋼板の加工費の発生により、費用の面では 12% 程度の増加が見込まれる。在来工法を 100 とした場合の比較結果を図-5 及び図-6 に示す。

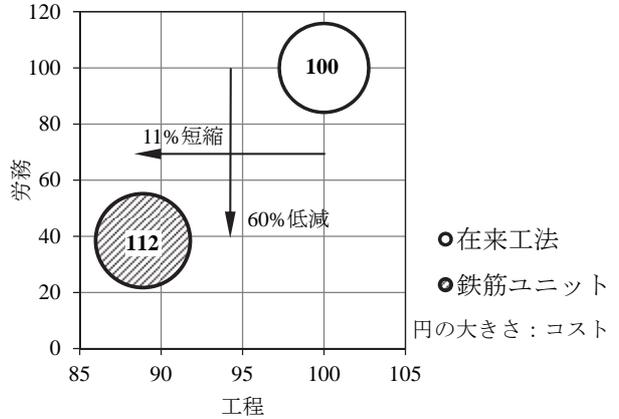


図-6 在来工法に対する位置づけ

3. 縮小モデル実験概要

3.1 試験体の制作

試験体の概要を図-7 に示す。試験体の製作及び載荷は、過去の実験的研究に倣って行った¹⁾。縮小モデルは実物の 1/2 サイズの底版と側壁を模擬しており、底版厚は 600mm、側壁厚は 500mm、構造物軸方向の試験体幅は 720mm とした。

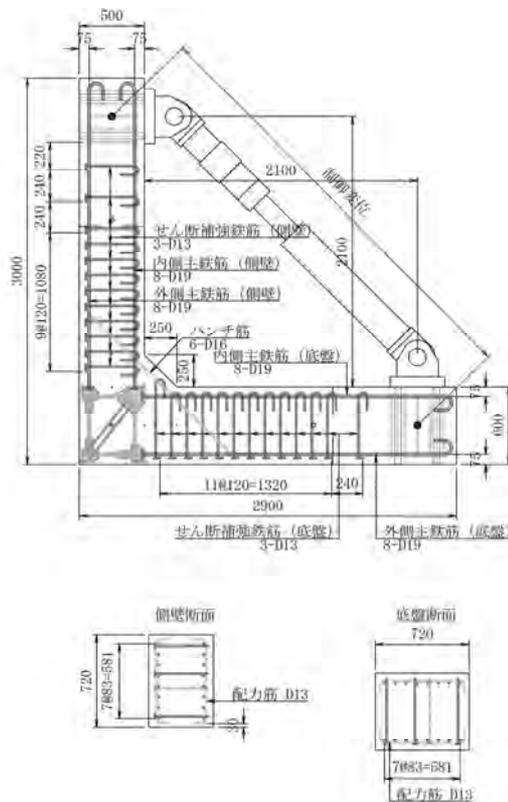


図-7 試験体の概要

主鉄筋としてD19を8本、せん断補強鉄筋としてD13を120mm間隔で配置した。ハンチ筋は主鉄筋の1/2の量とし、D16を6本配置した。

写真-1に示す鉄筋ユニットブロックを製作し、試験体の隅角部に適用した(写真-2および写真-3)。この試験体の鉄筋組立労務は、従来配筋の場合と比較して50%程度省力化された。ただし、写真-3に示すように倒した状態で試験体を製作している。

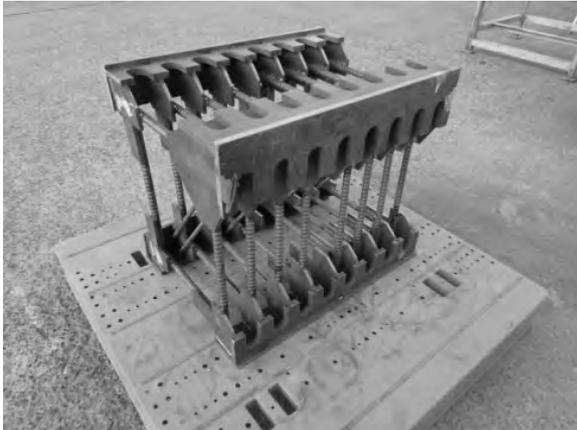


写真-1 鉄筋ユニットブロック

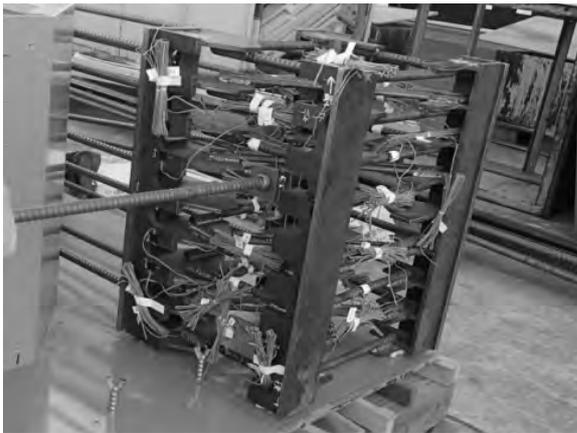


写真-2 鉄筋接続状況

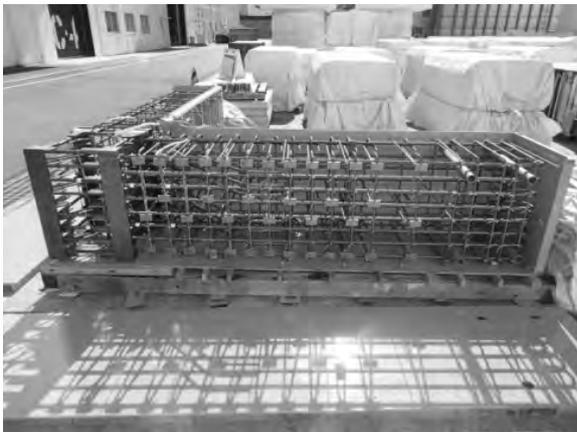


写真-3 鉄筋組立完了

3.1 荷重実験概要

荷重方法は、自己反力で隅角部に正負の曲げモーメントが作用するようにし、ジャッキの押す方向(内側引張)を正、引く方向(外側引張)を負として加力した。正負交番荷重においては、主鉄筋の降伏変位を $1\delta y$ (正負でそれぞれ $+1\delta y = +18\text{mm}$, $-1\delta y = -13\text{mm}$)とし、以降 $\pm 2\delta y$, $\pm 3\delta y$ ・・・と同一変位で3回ずつ正負に繰り返して変位制御によって荷重した。荷重実験時における材料強度を表-1に示す。

一メントが作用するようにし、ジャッキの押す方向(内側引張)を正、引く方向(外側引張)を負として加力した。正負交番荷重においては、主鉄筋の降伏変位を $1\delta y$ (正負でそれぞれ $+1\delta y = +18\text{mm}$, $-1\delta y = -13\text{mm}$)とし、以降 $\pm 2\delta y$, $\pm 3\delta y$ ・・・と同一変位で3回ずつ正負に繰り返して変位制御によって荷重した。荷重実験時における材料強度を表-1に示す。

表-1 荷重時における材料強度

材料	強度
コンクリート 圧縮強度 f_c	37.6N/mm ²
鉄筋 D13 降伏強度 f_y	384N/mm ²
鉄筋 D16 降伏強度 f_y	401N/mm ²
鉄筋 D19 降伏強度 f_y	403N/mm ²

4. 実験結果と考察

従来配筋の試験体による実験結果¹⁾と、隅角部に鉄筋ユニットブロックを使用した場合の荷重変位曲線を図-8に、履歴吸収エネルギーを図-9に示す。ただし、履歴吸収エネルギー W は、式(1)にて算定した各荷重ステップ毎の荷重変位曲線の近似面積である²⁾。

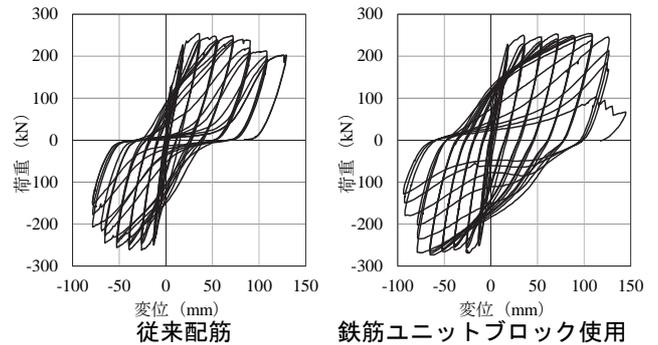


図-8 荷重変位曲線

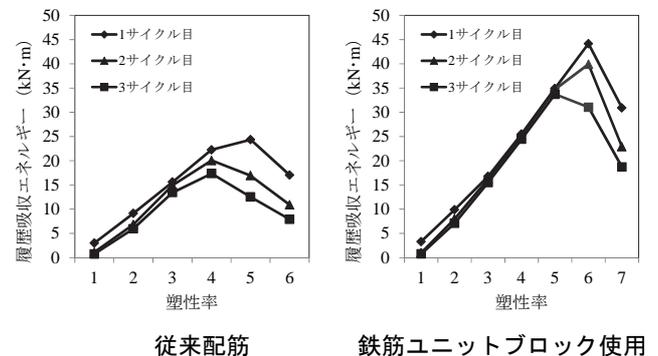


図-9 履歴吸収エネルギー

$$W = \sum_i \frac{1}{2}(P_{i+1} + P_i)(\delta_{i+1} - \delta_i) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 W : 履歴吸収エネルギー

P_i : i 番目のデータ計測時における荷重
 δ_i : i 番目のデータ計測時における変位

最大耐力は従来配筋によるものと同等であった。荷重変位曲線は、従来配筋をしたものと比較して、特に 4δ 以降において大きく膨らみ、エネルギー吸収性能が向上している。履歴吸収エネルギーの比較からも、エネルギー吸収性能の向上が確認できる。

これらは、隅角部において鉄筋ユニットブロックがコンクリートを拘束し、従来配筋よりも剛なものとなったためであると考えられる。そのため、写真-4 に示すように、側壁基部に損傷が集中した。

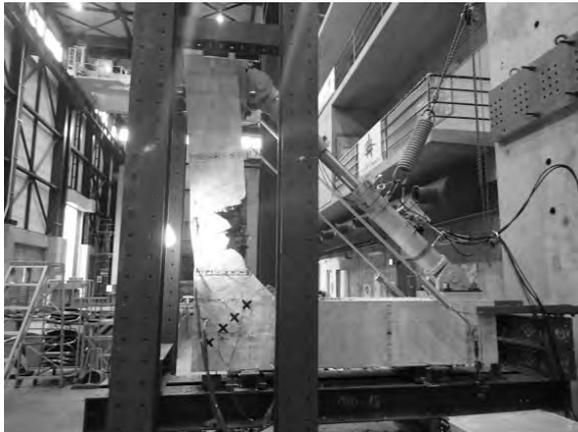


写真-4 実験終了時の試験体

$-6\delta y$ の 2 サイクル目にて、側壁内側のハンチ上部のコンクリートが剥落した。図-9 に示すように、履歴吸収エネルギーは、 $6\delta y$ の 2 サイクル目にてその増分が以前よりも小さくなり、同じく 3 サイクル目では $5\delta y$ の 3 サイクル目よりも小さくなっている。これらのことから、 $-6\delta y$ の 2 サイクル目において、側壁内側の主鉄筋が座屈したものと考えられる。

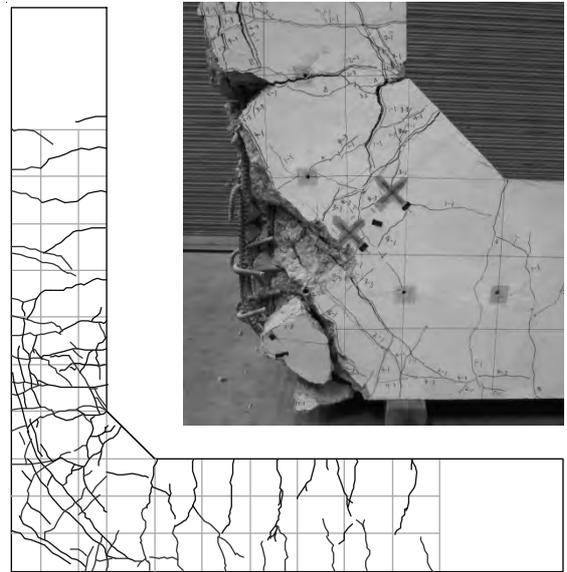
試験体の外観について、従来配筋した場合の実験結果との比較を図-10 に示す。鉄筋ユニットブロックを使用した場合その損傷は軽微である。これは、上述のごとく隅角部の剛性が高まったためと考えられる。また、鉄筋ユニットブロック内に、隅角部補強鉄筋相当として配置した鉄筋が、正載荷時の割裂ひび割れの抑止に効果的であったと言える。

5. まとめ

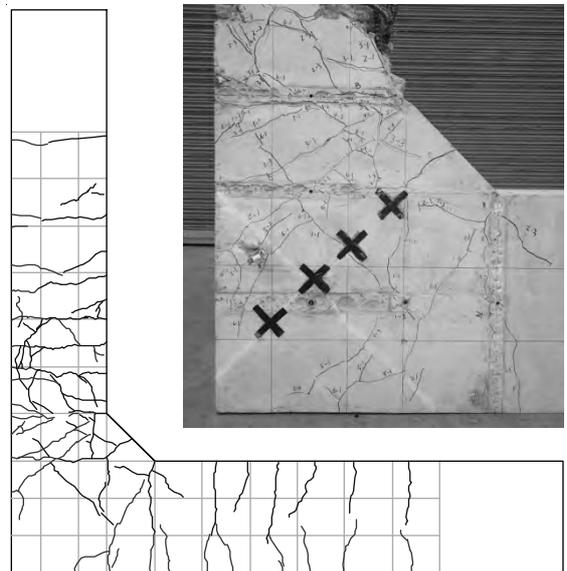
鉄筋ユニットブロックにプレート定着型鉄筋を嵌合させることで、隅角部の鉄筋の組立は簡便となり、省力化を実現できる。その規模は、隅角部鉄筋組立労務について従来配筋に対して約60%の低減と試算し、試験体作成においては同じく約50%の低減であった。

本実験の仕様の鉄筋ユニットブロックを使用すると、隅角部の剛性が高まり、エネルギー吸収性能が向上することを確認した。また、ハンチと直角方向に隅角部補強鉄筋相当の鉄筋を配置することで、正載荷時の割裂ひび割れの抑止に効果があることを確認した。

今後コストダウンを図るために接続部の加工を簡素化する検討を行う予定である。



従来配筋



鉄筋ユニットブロック使用

図-10 損傷状況とクラック発生状況

参考文献

- 1) 村田裕志・武田均：RC ボックスカルバート隅角部の配筋合理化に関する実験的研究，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，V-198，pp.395-396，2015
- 2) （独）土木研究所：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン（案），2006

8. 次世代型クローラ式スタビライザの開発

－ 床安定処理工法の品質、安全性向上について －

株式会社 NIPPO
 範多機械株式会社

○ 丑久保 吾郎
 小西 剛

1. はじめに

日本の平野部は国土全体の約 3 割程度と少ないにもかかわらず、都市部を中心に軟弱地盤が多い。さらに、日本列島の下には、4つのプレートが入り組んでいることで、世界有数の地震多発国でもある。近年、日本では大きな地震が相次いで発生しており、その都度地盤が崩壊し、道路や建造物は甚大な被害を受けている。

このような背景から、地盤改良工法は日本に欠かせない技術の 1 つとなっている。その中でも舗装の下約 1m 前後の地盤である路床の安定処理工法は現位置混合方式であることから、短期間、かつ低コストで施工できるため、各種建設工事で採用されることが多い。

今回、路床安定処理工法の主力機械であるクローラ式スタビライザを約 20 年ぶりに刷新し、次世代を見据えた技術を導入したので紹介する。

2. 開発の背景

現位置混合による路床改良用クローラ式スタビライザの混合装置タイプは、図-1 のように区分されている¹⁾。

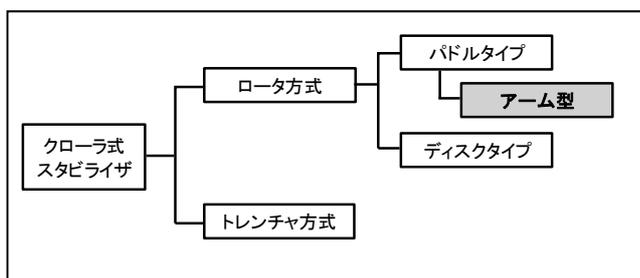


図-1 混合装置区分

本開発機の混合装置は、パドルタイプの 1 つであるアーム型を採用した。これはロータ回転中心から放射状に伸ばしたフレーム（アーム）の先端に混合爪を装着したものである。

社内での工事実績を元に評価したタイプ別の特性比較は表-1 のようになっている。

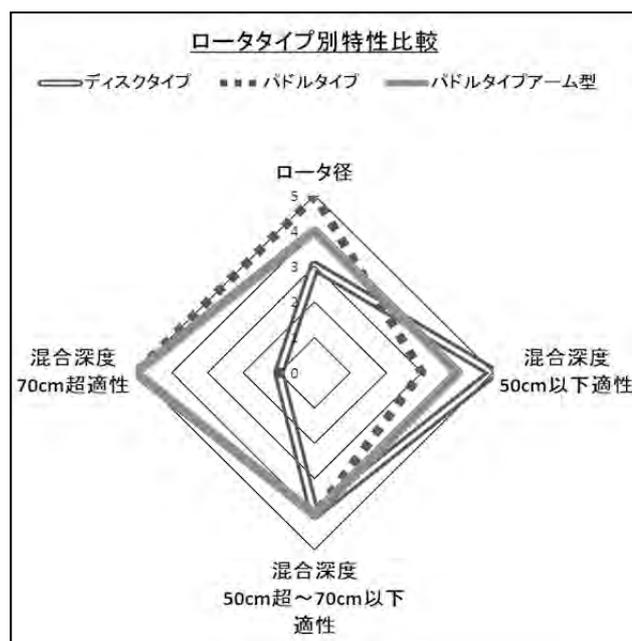


図-2 ロータタイプ別特性比較



写真-1 従来型パドルタイプ

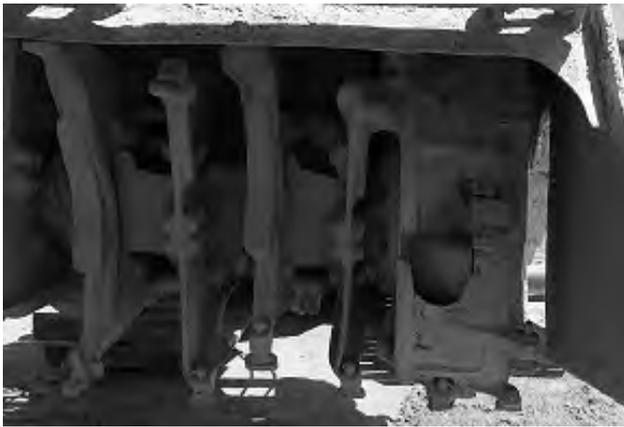


写真-2 従来型ディスクタイプ

現位置混合による路床改良工事における混合深さは、50cm 前後の頻度が比較的多いため、そこを中心として出来るだけ広範囲の混合深さに対応できる機械が現場から求められていた。

表-1 に示すように、ロータ径が大きくなると適性混合深さも大きくなるが、50cm 以下の適性が下がる。逆にロータ径を抑えると 50cm 以下の適性は上がるが、混合深さが大きくなると適性は下がる。

大径ロータで挿入深度が小さいと、混合土をロータ後方に飛散させるようになり、混合均一性が上がらない。一方、小径ロータで挿入深度を大きくしようとすると、回転中心部が土中に埋もれる形となり、駆動部分への土砂侵入による機械トラブルの原因となる。また、小径ロータに多いディスクタイプは、強度的にも挿入深度を大きくするには不向きである。

そこで本開発機では、大径ロータの採用で挿入深度を大きくすると同時に、挿入深度が小さい場合でも、混合土を後方に飛散させる動きを抑えるロータ構造とし、高いレベルで混合深さ特性バランスを確保した。また足回りは、従来機と同様に湿地シュー（三角断面シュー）の履帯仕様とした。写真-1 に開発機の全景、表-2 に主要諸元を示す。



写真-3 開発機全景

表-1 開発機主要諸元

重量	本体質量	kg	約27,200
機体寸法	全長	mm	9,750
	全幅	mm	2,980
	全高	mm	約3,000 (キャブ折畳時)
走行性能	作業速度	m/min	(最大) 約28.5
	回送速度	km/h	(最大) 約3.3
混合装置	混合幅	mm	2,000
	最大混合深さ (最大掘削深さ)	mm	800 (1000)
	ロータ形式		パドルタイプ (アーム型)
	ロータ径	mm	1,900
	シフト量	mm	左右各 650
	チルト量	度	左右各 5

3. 開発機の概要と特徴

3.1 エンジンの排ガス規制対応

本開発機には、オフロード法 2011 年規制基準 (Tire4 Interim) 同等のディーゼルターボエンジンを搭載している。本エンジンの窒素酸化物 (NOx) 浄化方式には尿素 SCR システムが採用されている。

従来機より定格出力が 105kW (140PS) 向上したことにより、土質による負荷によらない安定した作業が可能となっている。

3.2 混合装置の特徴

3.2.1 構造

本開発機の混合装置は、前述したようにアーム型というパドルタイプの 1 つで、アーム先端に装着されている混合爪は、バックホーの掘削バケット用ポイント (爪) である。流通量が豊富な部品であるため調達が容易で、交換時の溶接作業も不要である。

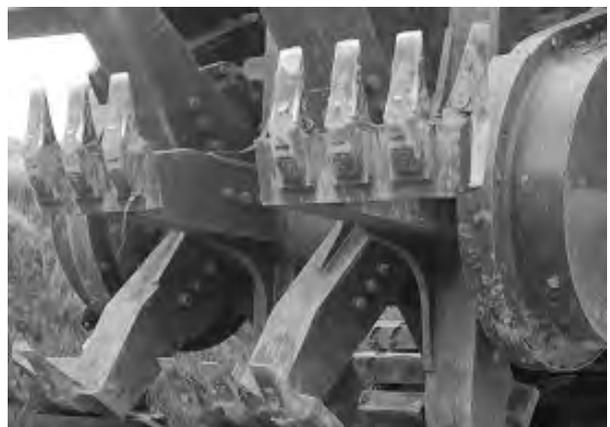


写真-2 混合爪

この混合爪に改良土が乗ることで、固化材が散布されている上層部と軟弱土である下層部を連続的に入れ替えるように混合する。

また、新たに開発したハーフロータフード（写真-3）は、ディスクタイプの混合装置に装着されているフルカバータイプより軽量化を実現しながら、混合土の後方飛散を最小限に抑えられるので、フード内での対流効果による混合均一性が期待できる。また、本フードは自重によるフリーポジショニングシステムとなっているため、幅広い混合深さに対応可能である。特に従来型のパドルタイプでは、混合土の後方飛散が多くなる50cm以下の混合深さに効果的である。



写真-3 ハーフロータフード

3.2.2 混合深さ自動制御システム

路床安定処理が適用される現場は不整地である場合が多く、機体の姿勢も常に変化するため、混合装置の深さも連動して変化する。

従来機では、機体の姿勢変化をオペレータが適宜判断し、手動操作にて混合装置の深さを調整していた。

本開発機では、混合装置および機体に取り付けた複数のセンサにより、機体前後方向の姿勢と混合装置の位置を検出し補正制御を行うことができる、混合深さ自動制御システムを新たに導入した。本システムにより、機体の姿勢に影響されず、一定の混合深さを保つことが可能となった。本システム概念図を図-3に示す。

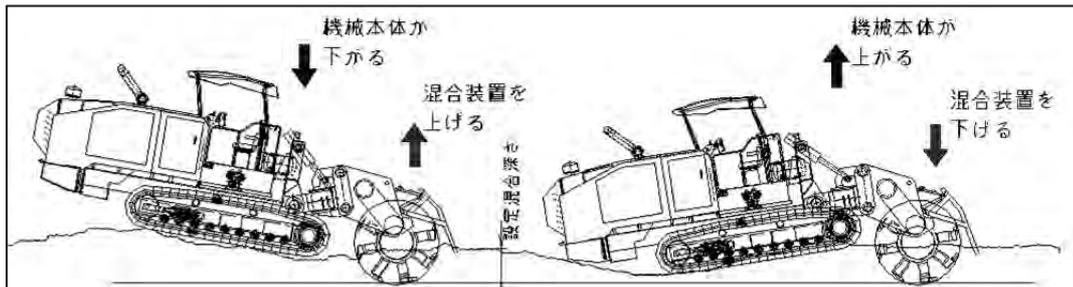


図-3 混合深さ自動制御システム概念図

本自動制御システム稼働中は、混合装置にかかる負荷検出機能とも連動させることで、過負荷検出時には制御を一時的に中断し、通常負荷になると制御を自動復帰させるようになっている。この機能は、混合装置各部の保護を目的としている。

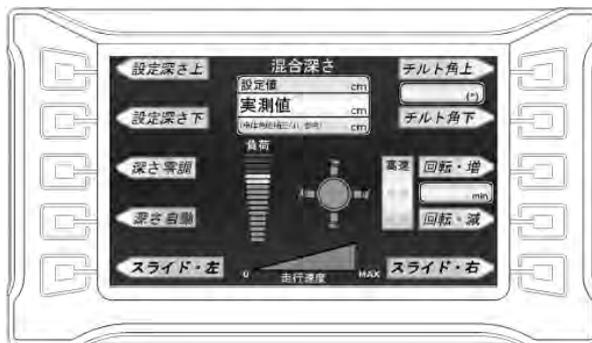


図-3 混合深さ自動制御システムパネル

なお、混合深さ自動制御中において、一時的に手動スイッチによる操作を行った場合は、手動操作を優先させるプログラムを採用している。

また、本混合装置にはチルト機構も組み込まれており、左右各5度ずつ傾斜させることができる。これにより、機体の前後方向だけでなく左右方向の姿勢に応じた、きめ細かな深度調整が可能である。

さらに今後、現場使用状況の調査とヒアリングを行い、前述した混合装置自動制御システムに、横断方向の傾斜を任意の設定値に保つ自動チルトシステムの追加も検討している。

3.2.3 操舵微調整システム

混合装置を左右にスライドした状態での施工は、走行負荷が著しく偏るために直進性の確保が難しい場合がある。また、ロータにかかる負荷によっても影響される。

従来機では、左右独立の操舵レバーをオペレータが手動で操作するため、常に操舵レバーを微調整していた。

本開発機では、電子油圧制御による操舵微調整システムを採用した。左右の走行モータへ出力する指令値に、左右の走行負荷を加味した補正を加えることで、直進性を確保することができる。

なお、本システムの操作パネル(写真-4)は、運転席の左右に1つずつ配置されているので、オペレータのポジションが左右いずれの場合でも手元での操作が可能となっている。



写真-4 操舵微調整システムパネル

3.3 安全性向上技術

従来機および本開発機のように全長・全幅が大きく、運転席が機体中央付近にレイアウトされた機械は死角が多く、視認用ミラーも有効な位置に装着できない場合が多い。

今回新たに採用した「バードモニタ」(全方位俯瞰モニタリングシステム)は、機体周囲に設置した6個のカメラから取得した画像が、コントローラを介して合成処理され、上空から撮影したような画像となる(写真-5)。この画像は連続的に更新されるので、死角のない機体周囲の画像をリアルタイムでモニタリングできる。



写真-5 バードモニタ

また、「バードモニタ」画像と各カメラ単体のポイント画像との切り替え表示が可能になっているため、状況に応じて最適な画像を選択し、安全性の向上を図っている。

なお、6個のカメラの内、後方カメラについては、機体部分から混合装置を跨ぐように設置されており、混合装置の上下左右動作に影響されず定点画

像を取得することができる。運搬時はカメラステーの伸縮機構により格納して、運搬による振動からカメラを保護できる(写真-8、写真-9)。



写真-6 後方カメラ伸長時



写真-7 後方カメラ格納時

4. 工事実績

H28年4月～7月までの期間で関東地方の4件の現場で稼働した。混合深さについては、現場毎に55～80cmと広範囲であったが、それぞれ良好な混合状況を確認できた。

5. おわりに

本開発機は、従来機の踏襲と新技術の採用をバランスよく組み合わせることに意識をおいた。特に新技術については、事前準備や複雑な操作を極力なくし、オペレータの技量によらない機械を目指したつもりである。

現位置混合による路床安定処理工事は、年毎に増減はあるが、長期に渡り継続的に発注が出ており、将来的にも需要が続くと考えられる。

今後、本開発機についても新たな要望が出てくると予想されるが、常に現場施工に寄り添った技術開発を心がけていきたい。

参考文献

- 1) 福川 光男：舗装技術者のための建設機械の知識題目、舗装41-11、2006年

9. 高品質・高精度なシールドトンネル構築技術

～6つの最新技術で実現～

株式会社フジタ

○ 中村 多聞
浅沼 廉樹

1. はじめに

近年のシールド工事は、立坑用地の確保が困難なことや、既設構造物などの障害物を避けるために、長距離化や大深度化が進む傾向がある。技術開発もセグメントの自動組立てや自動搬送など、高速化や省力化に重点を置いた動向となっている。一方、より高品質で高精度なシールド掘進管理を行うための計測・測量技術に関しては、依然として開発が遅れており、新技術導入による現場職員の負担軽減が求められていた。

これらの問題を解決する為に、弊社では平成24年度から高品質シールドの技術開発プロジェクトを発足し、現場での様々な問題を抽出するとともに、ニーズ・シーズを調査した。この結果に基づき、新たな機械装置やシステムの開発を行った。

本稿では、これらの総まとめとして開発した各シールド技術の紹介及び導入結果を述べるものである。各開発技術の名称を表-1に、概要図を図-1に示す。

表-1 6つの最新技術の名称

	高品質化の要素技術
掘進管理の高度化	①テールクリアランス計測
	②セグメント真円度計測
	③遠隔測量システム (FRS)
	④チャンバー見える化
安全の高度化	⑤FH ブラシシールド
情報化	⑥IC タグによるセグメント品質管理

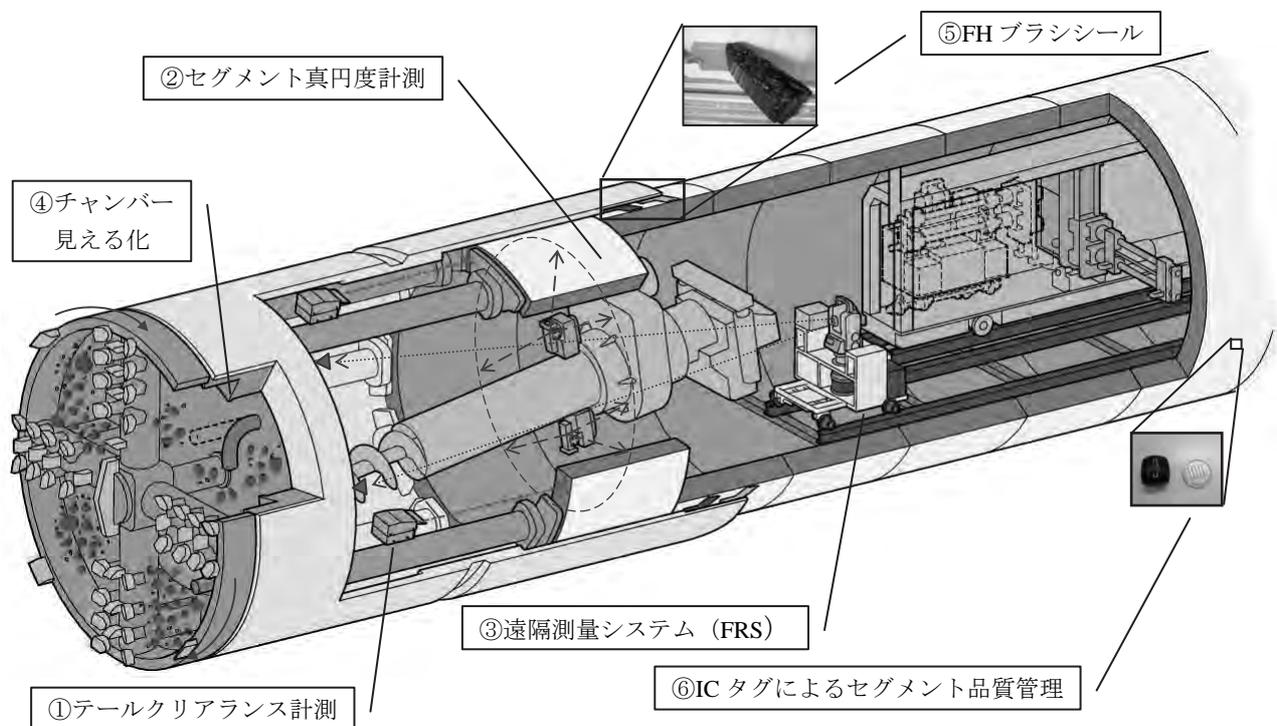


図-1 高品質シールド概要図

2. 現状の課題

今回の開発に係わる6つの計測や管理について現状の課題を以下に述べる。

(1) テールクリアランス計測

テールクリアランス計測は、作業員がコンベックスやスチールテープ、楔形の測定器などを用いて行うことが多く、計測頻度もシールドマシンの掘進前後にのみ行うだけである(図-2参照)。計測は不安定な足場で行うことが多く、大断面トンネルでは高所作業での計測も発生するため、安全面での改善が課題であった。



図-2 従来のテールクリアランス計測状況

(2) セグメント真円度計測(中大口径と小口径)

セグメント真円度の測定は、シールドマシンの構造の問題や後方設備の支障物により、後続台車通過後の支障物がない位置で、レーザー測量器や測量用スタッフで計測するのが一般的であった(図-3参照)。しかし、この手法ではセグメント組立て時から真円度確認までかなりの時間が経過しており、不具合の発生状況や、セグメントがシールドマシン後胴部から抜け出て地山部へ移り変わる時の変化を計測する事は難しかった。また小口径の断面では、計測作業自体を狭隘なスペースで行うことになり、精度の維持や連続的な計測の自動化が中大口径の断面よりも遅れていた。



図-3 従来の真円度計測状況

(3) 坑内測量

シールド工事の掘削状況や出来形を確認するために日々行う測量作業は、多くの場合、職員が二人一組で坑内作業の休憩中や交替時の限られた時間に行っており、担当者には大きな負担となっていた。各ゼネコンや測量器メーカーを中心に自動測量システムを開発・実用化していたが、多くのシステムは坑内に測量器を固定する為、他の作業に支障をきたす事という課題があった。

(4) チャンバー内の性状

泥土圧式シールド工法では、切羽の安定とスクリーコンベアからの排土のしやすさを目的に、チャンバー内で掘削土砂を塑性流動化させる必要がある。その際、添加材の注入量が少なければ、チャンバー内で土砂が固着したり閉塞したりして、排土が困難になる。一方、過度に流動化させると、スクリーコンベアから土砂が噴発し、切羽の不安定化や土砂の取り込み過多を起こす。

これまででは一般的に、チャンバー内の土圧やマシンの作動状況、スクリーコンベアからの排土状態などから、技術者の経験によって添加材の注入量を調整していた。そのため、流動性を定量的に判定して添加材の注入量と注入位置を適切に管理するニーズがあった。

(5) シールドマシンテール部の止水

シールドマシンテール部の止水は、テールブラシ本体と充填されるパテグリス(ペースト状のパテ)により行われ、止水性維持にはこのテールブラシの追従性とパテグリスの地山流出防止が重要となる。線形が複雑なシールド工事では、テール部隙間の変位によるブラシの形状変形やパテグリスの地山流出により止水性が低下し、シールドマシン内への地下水や裏込め材が流入していた。(図-4参照)

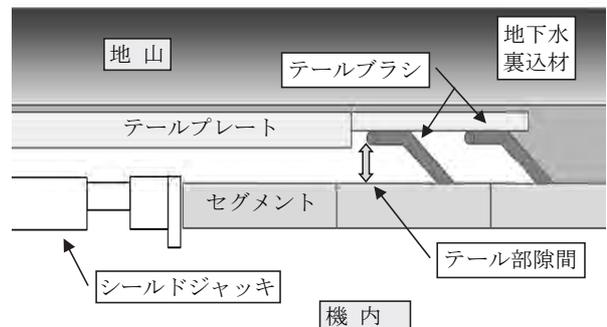


図-4 シールドテール部イメージ

(6) セグメント品質データの管理

セグメント製作時の情報や、現場での施工情報は供用後の維持管理においても重要な情報となる。しかし、シールド掘進後や工事終了後は膨大な記録から必要なデータだけを抽出することは非常に手間がかかり、維持管理における課題となっていた。

3. 各技術の概要と導入結果

3.1. テールクリアランス計測システム

(1) システム概要

本システムは、レーザー照射と画像処理方式を用いてテールクリアランスを計測する。シールドマシン後胴部に計測ユニットを設置し、シールドマシンテール部にレーザー照射しながら非接触にてテールクリアランスの計測を行う(図-5参照)

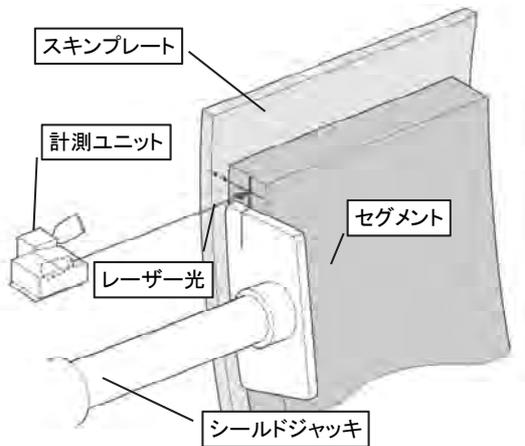


図-5 テールクリアランス計測システム概念

(2) 導入結果

本システムを大手筋シールド(京都府京都市上下水道局)で導入。テールクリアランスはセグメント組立て時だけでなくシールドマシン掘進時もリアルタイムで計測が可能であることを確認した(図-6、図-7参照)。

また、有効性を確認するためにシールド掘進開始から終了までのテールクリアランスの計測を人と本システムで行い結果を比較した。表-2より、計測精度は±2.5mm以内である事が分かった。このバラツキの原因としては、画像認識に用いられるセンサの受光素子数が関係しており、検出面の端部は場所によって受光素子の感度に変化する事から精度誤差を生じていた。この対策として、センサ自体の受光素子数を増やし、検出面を細分化させて検出結果の安定を図った。

表-2 テールクリアランス計測結果

SJ ストローク	20R押し (単位: mm)								
	上クリア			右クリア			左クリア		
	実測	計測	誤差	実測	計測	誤差	実測	計測	誤差
738	26	25.70	0.30	35	33.95	1.05	27	26.09	0.91
841	25	23.64	1.36	35	35.49	-0.49	27	26.69	0.31
949	24	22.50	1.50	36	36.80	-0.80	28	29.65	-1.65
1,058	25	26.61	-1.61	37	37.82	-0.82	27	26.65	0.35
1,168	24	25.60	-1.60	37	36.50	0.50	27	27.37	-0.37
1,270	24	26.14	-2.14	37	37.86	-0.86	27	28.37	-1.37
1,420	23	25.56	-2.56	39	37.70	1.30	26	26.89	-0.89
1,530	20	18.61	1.39	40	38.80	1.20	26	27.24	-1.24
1,755	21	23.56	-2.56	40	41.23	-1.23	27	27.41	-0.41



図-6 計測ユニット設置状況

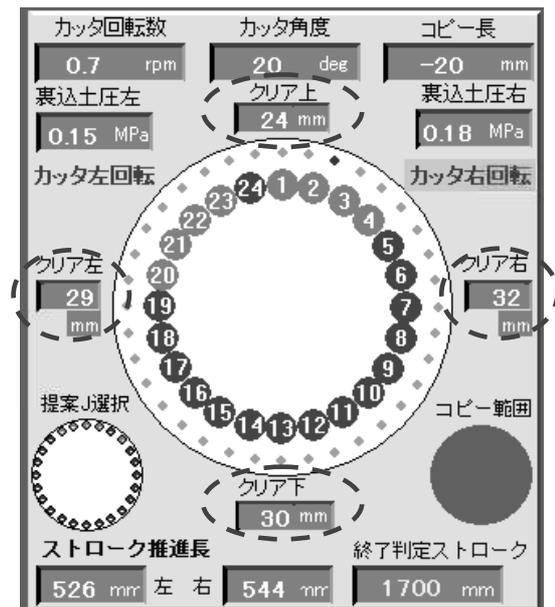


図-7 テールクリアランス表示画面

3.2. 中大口径用真円度計測システム

(1) システム概要

中大口径用真円度計測システムは、シールドマシンに装備される形状保持装置の前後に計測ガイドバーを5箇所設置し、レーザー距離計をリング毎に5台配置することで、3リング分の内空変位を同時に計測する(図-8参照)。

また、計測されたセグメント内空変位は制御ユニットにて瞬時に解析され、シールド運転中にセグメント真円度として表示される。

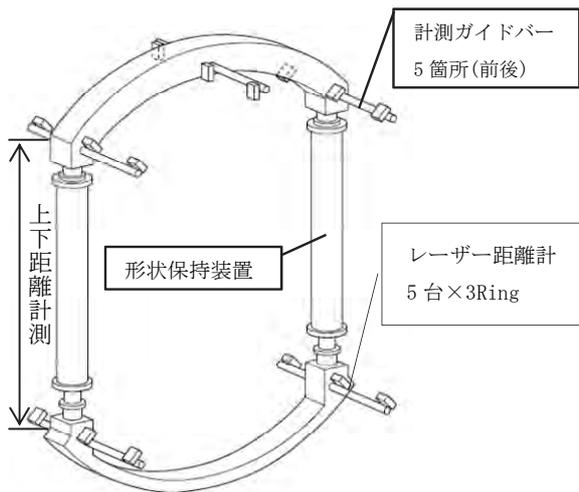


図-8 形状保持装置と真円度計測システム

(2) 導入結果

本システムを砂町シールド（日本下水道事業団）で導入した（図-9 参照）。計測結果は図-10 のように表示され、シールドマシンオペレータは、この3リング分の計測データを参考に、掘進中はジャッキ選択に留意すると共に掘進完了時のセグメントの真円度を切羽に連絡し、セグメントの組み方でひずみを修正した。



図-9 計測機器設置状況

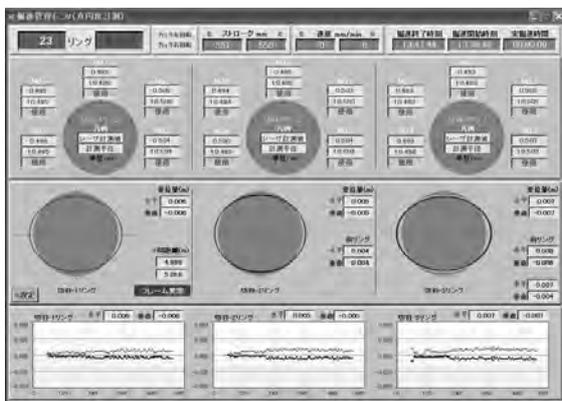


図-10 真円度計測表示画面

3.3. 小口径用真円度計測システム

(1) システム概要

小口径用真円度計測システムは、小口径シールドマシンを対象に開発したもので、設置スペースが限られたシールド坑内でも計測可能にするために、回転式レーザー距離計を採用した。システムの構成は、シールドマシン内に計測部と制御装置、中央制御室に通信表示ユニットの3つで構成される。計測部は、セグメントが見通し可能な2箇所に取り付け、レーザー距離計がセグメントに対して垂直に照射・計測できるように行った(図-11 参照)。

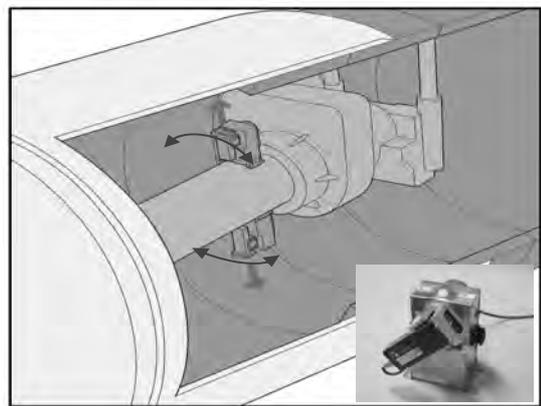


図-11 真円度計測システム概要図

(2) 導入結果

松戸幹線 501-2 工区（千葉県）に導入し以下の3点を確認した。

- ・ 高精度なセグメント内空計測が可能。
- ・ シールド掘進と連動してリアルタイム計測が可能。
- ・ 計測装置の小型化の実現。

計測部が小型化したことで、小口径断面（内径2m程度）の狭隘なシールドマシン内に後付けで設置が可能となった（図-12 参照）。



図-12 計測機器設置状況（上側）

3.4. 遠隔測量システム (FRS)

(1) システム概要

本システムは、測量器に設置した位置出しカメラにより、測量用基準点（以下ダボ点と表記）を画像認識し測量器自身の位置を算出する。坑内測量のタイミングで、測量器を搭載した測量台車をダボ点まで自走させて測量を行うことを可能とし、一連の作業すべてを作業所事務所から遠隔操作することにより、大幅な省力化と従来システムの課題解決を実現した。遠隔測量システムの概要を図-13、図-14に示す。

本システムによる測量の手順は以下のとおりである。

- ① シールドマシン近くに配備した格納台車より、測量台車を本線レール上に設置する。
- ② 測量台車をダボ点付近まで移動する。
- ③ ダボ点を画像認識することにより測量器の自己位置を算出する。
- ④ 後視点を視準後、シールドマシン内の計測点を測量する。
- ⑤ 計測データを用い、シールドマシンの挙動解析を行う。
- ⑥ 測量台車を、格納台車まで走行させ格納する。

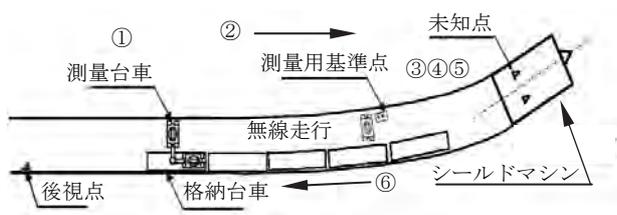


図-13 遠隔測量システムの概要（平面図）

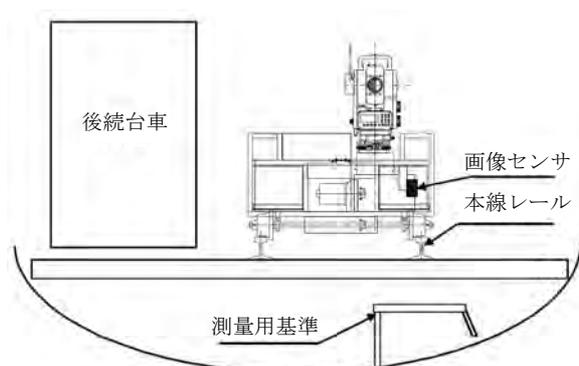


図-14 遠隔測量システムの概要（断面図）

(2) 導入結果

現場導入により、以下の2点を確認した。

- ・ 高精度なデータを有効活用
- ・ 遠隔操作による測量作業が可能

測量精度は、誤差±10mm以内だった。また、シールドマシン内に複数の計測点を設けることで、マシン本体のピッチングやローリング、方位角等が計算でき、シールドマシンの挙動解析

が可能となることがわかった。

また遠隔測量システムは、人が測量を行う場合と比べて約1/8に省力化できた。

（人：坑内で2人×約1時間⇒本システム：事務所で1人×約15分）。ネットワークの使用で作業所事務所外からの遠隔操作も可能であることを確認した。また操作が容易なため、測量未経験者でも取り扱いができる。

3.5. チャンバー見える化

(1) システム概要

チャンバー見える化は、曲げ変位と曲げ速度を計測するセンサを硬質ゴムに埋め込んだ曲げセンサを使用する（参照）。これをチャンバー内に設置して測る。土砂が適正な塑性流動状態にあるかどうかを、パソコンの画面上で即時に表示する。

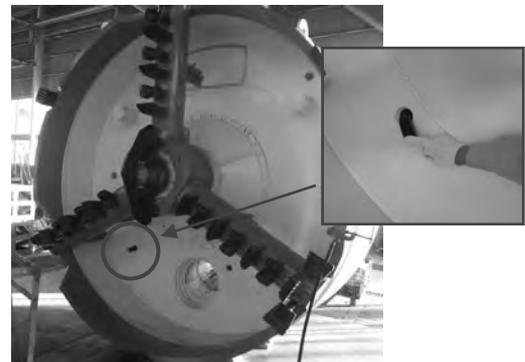


図-15 曲げセンサ設置状況

(2) 導入結果

本システムを岡崎線送水管工事（愛知県企業庁）にて導入した。曲げ変位量を緑や黄、赤などの色相で、曲げ速度を彩度で示すことによりチャンバー内の流動状態を表示した（図-16）。計測された流動性の変化に応じて添加材の注入量や注入位置を即時に変更して、高度な掘進管理が可能となった。

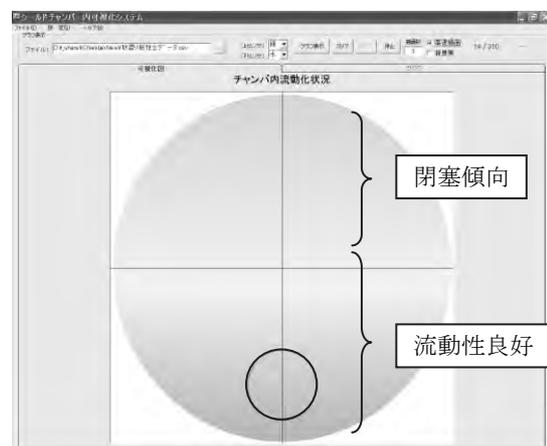


図-16 チャンバー内可視化モデル

3.6. FH ブラシシール

(1) 製品概要

FH ブラシシールは、液性ゴムを主剤とした 2 液反応型弾性シール材をテールブラシに充填する構造で、液状ゴムがブラシと一体化するため、弾性ゴム本来の優れた伸縮性と耐久性を活かすことができ、曲線施工や高水圧の施工条件でも高い追従性と遮水性を発揮する。これにより、ブラシ内部の裏込材固着によるセグメント拘束力を軽減し、ひび割れなど不具合が発生するといった問題も解消することができる。

(2) 導入結果

FH ブラシシールの性能確認するため、同一のシールド機を 2 台使用した岡崎線送水管工事（愛知県企業庁）の片側 1 台に FH ブラシシールを導入した。従来のシール材を使った時の施工状況を図-17 に、FH ブラシシールを使った時の施工状況を図-18 に示す。到達時には、FH ブラシシールを採用したシールド機の方が、エレクトーリングの文字が確認できるほど漏水や裏込材の流入が少なかった。

FH ブラシシールの特長は以下の 3 点である。

- ・ 高止水性（0.3MPa の場内水圧試験）で止水性能確認（図-19 参照）
- ・ 曲線施工で高追従性・優れた耐久性
- ・ 施工（充填）が簡単（液状ゴムで充填、常温硬化）



図-17 従来のシール材を使用した施工状況



図-18 FH ブラシシールを使用した施工状況

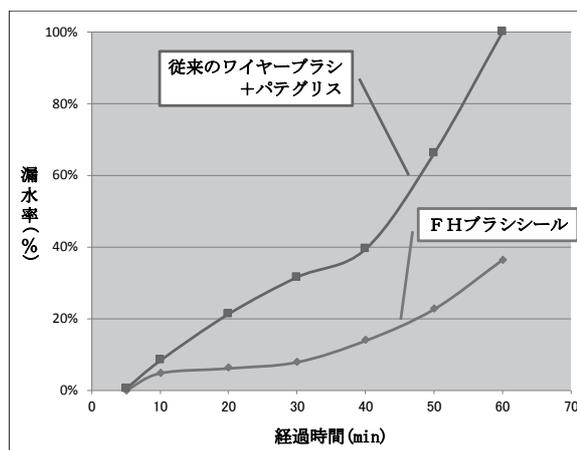


図-19 場内水圧試験結果

3.7. IC タグによるセグメント品質管理システム

(1) システム概要

製造工程において、セグメント型枠のスペーサーに IC タグを内蔵して、セグメントの製造情報や施工情報、トンネルの掘削情報などを書き込み、工事のトレーサビリティを図る。竣工後にもセグメントの維持管理として役立てることができる。

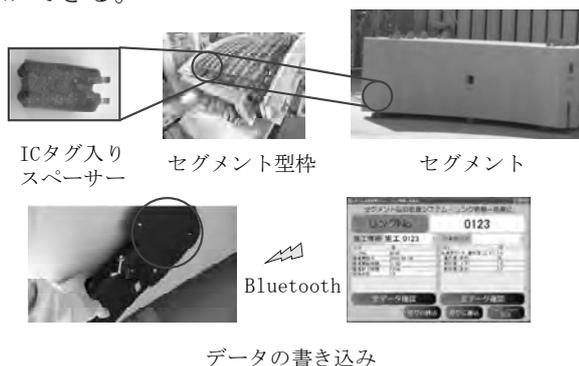


図-20 IC タグのシステム構成

(2) 導入結果

本システムを砂町シールド（日本下水道事業団）にて導入を行い、施工後や施主へ引き渡した後、個々のセグメントのメンテナンス情報を IC タグに書き込むことで、維持管理に役立てることができた。

4. おわりに

今回開発されたこれらの技術は、シールド工事の技術指針として大口径だけでなく小口径のシールド工事にも適用可能な技術である。今後は多くのフィールドで運用し実績を増し、その有効性を確認していきたい。

最後に本技術の開発に際し、ご支援・ご協力いただいた関係各部署と各作業所に紙面をお借りしてお礼を申し上げます。

10. 施工効率及び、品質向上を目的とした自走式路面乾燥機の開発

鹿島道路(株)機械部 ○ 新満 伊織
芳賀 潤一
伊藤 圭祐

1. はじめに

近年、道路橋床版、特にコンクリート床版の耐久性向上のために、床版内部への雨水等の浸透を防ぐことが重要であるとの認識が高まり、各高速道路株式会社では耐久性の高い床版防水システム（グレードⅡ）が適用されている。確実な防水効果を得る為には、防水工施工時のコンクリート床版面は適切で十分な事前処理が必要である。特にコンクリート床版の水分量が多いと防水層にピンホールやブリストリング等が発生し、更にコンクリート床版と防水層との接着が阻害される事で舗装の早期破壊といった損傷に繋がることから、防水層施工前の水分量の適切な管理が重要である。

このような事から、熱風発生装置を搭載し熱風を広範囲の路面に吹き付け、コンクリート床版を効率的に乾燥させる『自走式路面乾燥機』を開発した。

2. 従来施工における路面乾燥方法

2.1 人力作業

従来作業においては、人力によりウエスやスポンジで路面の水を取り除いた後（写真-1）、ガスバーナ等でまんべんなく炙る作業を行っていた（写真-2）。この方法では、限られた面積或いは



写真-1 スポンジローラを使用した吸水作業



写真-2 ガスバーナを使用した路面乾燥作業

狭い部分に対応できるが、広い面積を乾かすには効率が悪く、路面を炎で直接炙る事による悪影響も考えられる。特にコンクリート床版では、表面が乾いたように見えても内部に水分が残っていることがあり、後から舗装境界面で剥離等の問題を引き起こすことに繋がる。

2.2 機械作業

当社では路上表層再生工法に用いる目的で、自社開発した路面ヒータ（写真-3）を保有している。路上表層再生工法は既設アスファルト舗装を軟化させるために路面を加熱する工程があり、同工程



写真-3 路面ヒータ

においては路面ヒータを先行させ、路面を加熱することが必須となっていた。近年では当該工法のニーズは減少傾向にあり、路面ヒータを滞水処理や路面乾燥に適用する事例が増えてきた。

しかし、アスファルト舗装を軟化させるほどの高い加熱能力を有しているため、路面の過加熱が懸念され、現場条件によっては適用が不向きと判断されることもあった。

3. 新規開発の自走式路面乾燥機

既設舗装を直接炙ることにより乾燥させる従来方法では前述の通り、乾燥の過不足、作業効率、既設舗装の劣化等が危惧される。そこで、路面を直接炙り加熱することにより乾燥させるのではなく、一定の幅に熱風を吹き付け、乾燥度合いの均一化や作業効率の向上、既設舗装の劣化を防止し、路面乾燥に特化した専用の自走式路面乾燥機を開発した。(写真-4) 本機の構造としては、タイヤ式のアスファルトフィニッシャを流用し、本体トラクタ部分に、ブローと熱風発生機、灯油タンク及びエンジン発電機を搭載した構造となっている。

車体最前列に設けたナイフエッジノズルにブローから大量のエアを送り込むことにより、路面滞水と塵埃を吹き飛ばし、続いて200℃～250℃の熱風を吹き付ける熱風チャンバが通過することで、路面を乾燥させる仕組みとなっている。

本体の走行性能は、母体となっているアスファルトフィニッシャに準じ、一定速での走行が可能である。また、ナイフエッジノズルとチャンバ油圧シリンダーにより左右300mmずつスライドさせる事が出来るため、本体幅よりも外側にオフセットさせての施工が可能である。回送時には、

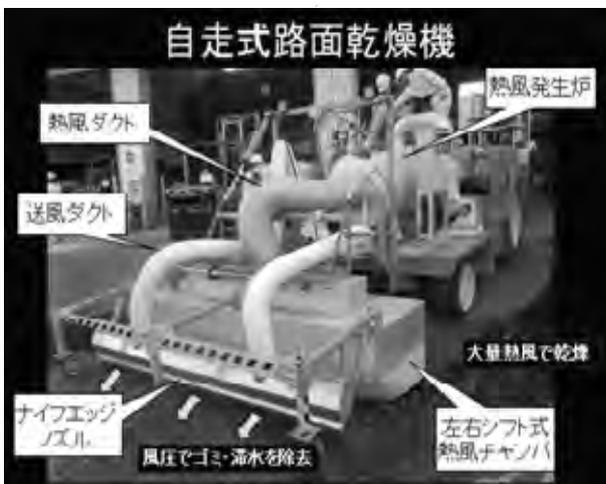


写真-4 自走式路面乾燥機名称説明

ナイフエッジノズル及びチャンバを、並行リンク機構によって上下動させ、コンパクトに回送することができる。表-1に自走式路面乾燥機のスペック表を記載する。

表-1 自走式路面乾燥機スペック表

主要寸法	全長	8000mm
	全幅	2450mm
	全高	2610mm
車体重量		8000Kg
熱風発生能力	燃焼量	23L/h
	設定温度	200～250℃
その他	・使用燃料 本体:軽油 路面乾燥機:灯油	
	・横行シリンダーによりチャンバ位置調整機能	
	・平行リンクによりチャンバ水平維持機能	

4. 路面滞水処理作業評価試験

延長36m、幅4.4mのコンクリート舗装のヤード上にて、水を一定量散布し、自走式路面乾燥機の路面滞水処理能力の検証を行った。

4.1 試験方法

評価試験は、図-1に示すように試験ヤードを4工区に分けて実施した。走行速度は工区ごとに2、3、4m/minに設定し、走行前の湿潤時と走行直後の路面水分量を測定した。なお、コンクリート床版は前日より湿潤養生し、当日も散水した。また、試験当日の天候は晴れ、外気温12～16℃、風速1～3m/secであった。

水分量の測定には(株)ケット社製の電気抵抗式水分計HI-100を用いた。参考文献(1)より、出力されるカウント値と床版面の含水量は相関関係があるとされ、水分状態は図-2に示すように概ねカウント値が230以下であれば表面乾燥状態であり、一部の床版防水システムの施工要領書においても、防水工前の床版面上のカウント値は概ね200以下とすることが規定されている。

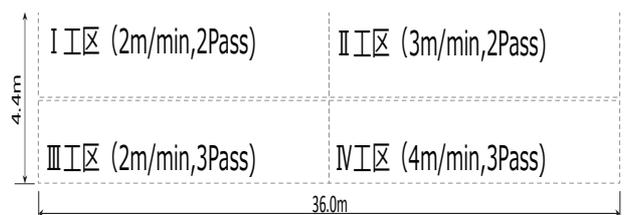


図-1 試験施工ヤード及び検証条件

コンクリート表面の水分状態	カウント値の目安									
	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000
①絶乾状態	■									
②乾燥状態		■								
③表面乾燥状態			■							
④湿潤状態				■	■	■	■	■		
⑤滞水状態						■	■	■	■	■

電位抵抗式水分計のカウント値

図-2 カウント値と水分状態の関係

4.2 評価試験結果

(1) 走行速度による影響

路面乾燥機の走行速度と通過直後に測定したカウント値の関係を図-3, 図-4に示す。測定は各工区9点ずつ実施し, 上図は平均値を, 下図は測定値の範囲を表している。いずれの速度でも, カウント値はほぼ同様の低下傾向にあり, 2Passすることで概ね200程度に収束している。また, 2および4m/minの走行速度で3PassしたⅢ・Ⅳ工区では, 3Passすることで走行直後のカウント値が200を十分に下回る結果となった。なお, 2Pass通過直後のカウント値に大差は無いが2m/minで走行したⅢ工区はその後次第に乾燥が促進され, 3Pass走行直前には概ね200を切っていることが確認された。したがって, 実施工を考慮すると, 最初の1Passは4m/min程度の速度で広範囲を乾燥させ, その後の路面乾燥状態に応じて走行速度を適宜変更することで, 床版全体を均一に且つ効率的にカウント値200以下にすることができるものと考えられる。

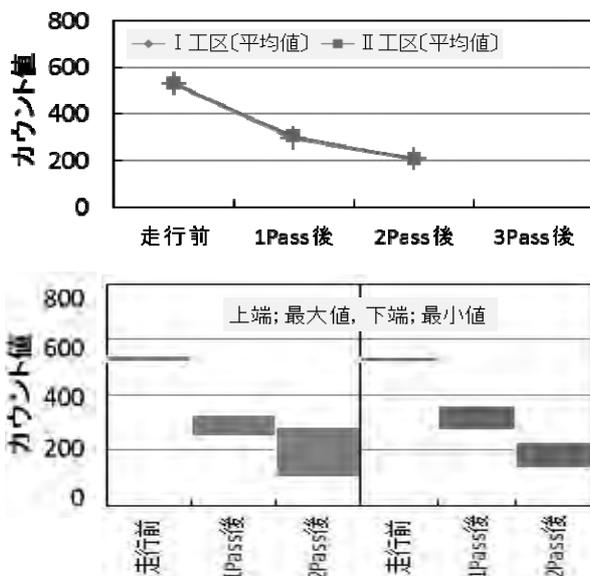


図-3 Ⅰ・Ⅱ工区走行速度とカウント値測定結果

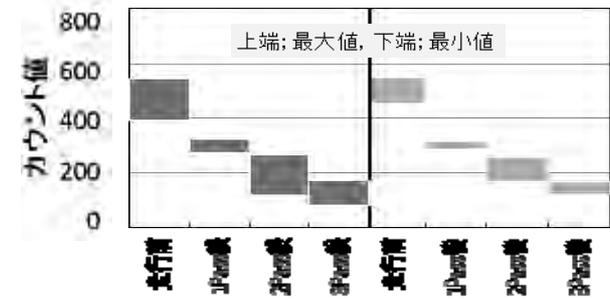
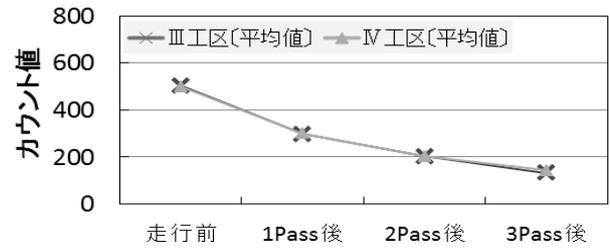


図-4 Ⅲ・Ⅳ工区走行速度とカウント値測定結果

(2) カウント値と水分状態

カウント値と路面の水分状態を写真-5～写真-7に示す。走行前のカウント値550は, 薄く滞水した状態であり, 1Pass後のカウント値300の路面は, コンクリート表面に水分が滲み出ている状態となっていた。2Pass後のカウント値200では, 表面が白く乾き, 目視で水分が残留しているとは判断できない状態であった。また, 乾燥機通過直後の路面温度は, いずれの条件でも約20℃程度であり, 既設コンクリート床版を劣化させるような高い温度ではないことも確認した。



写真-5 走行前 カウント値 : 550



写真-6 走行前 カウント値：300



写真-7 走行前 カウント値：200 以下

5. 小型路面乾燥機

自走式路面乾燥機と併用して構造物の隅部などを乾燥させる目的として、小型路面乾燥機（写真-8）も同時に製作した。



写真-8 小型路面乾燥機

これは、コンクリートの養生などで用いられる、いわゆるジェットヒータをバッテリー式自走台車に搭載し、熱風吹き出し口にダクトを取り付けチャンバに熱風を吹き込む機構となっている。

6. おわりに

本報では、路面を直接炙るのではなく熱風を吹き付けることで効率的に路面を乾燥させることが可能な自走式路面乾燥機と、施工端部や構造物の隅部を乾燥させる際に用いる小型路面乾燥機について紹介した。また、自走式路面乾燥機を用いて路面滞水処理作業評価試験による効果の検証についても述べた。先の試験結果から、限定された条件下ではあるものの、路面に水分が薄く滞水した湿潤状態であっても、自走式路面乾燥機を有効に走行させることで、床版防水工が可能とされるカウント値 200 程度以下まで乾燥できることを確認した。本機の導入実績として、国交省工事、高速道路工事等の新設工事、補修工事に導入した。今後はショットブラスト後の路面乾燥等の適用現場拡大と、より確実な床版防水工の施工に繋げたいと考えている。なお、施工効率をより向上させる目的で本機に搭載したナイフエッジノズルと熱風チャンバの組み合わせによる路面乾燥システムは、特許出願済みである。

参考文献

- 1) 谷倉他, 床版防水工における水分計の適用性に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 1112-1123, 2013
- 2) 芳賀潤一, 自走式路面乾燥機を用いたコンクリート床版面の水分除去に関する一検討, 土木学会 第 71 回年次学術講演会

11. 大規模造成工事での UAV 空中写真測量検証等の活用事例

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

1. はじめに

近年では、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)は建設現場の状況確認¹⁾や橋梁・ダム²⁾の維持管理などでの利用が注目され、また、国交省の生産性向上を目的として施策した「i-Construction」においても、UAVを用いた空中写真測量の方法が示され、起工測量や出来高・出来形管理における業務効率化が期待されている。i-Constructionでは、土工事の全面的なICT化を推進しており、起工測量や出来形管理にUAVを活用して面的管理、3次元データの生成を効率的に行うことを念頭に進められている。

UAV写真測量の画像処理手法として、空中写真から3次元点群データを生成するSfM(Structure from Motion)が用いられているが、UAVによる写真測量の実績はまだ少なく、その精度について不明な点が多い。

本稿は、大規模造成工事を対象としたUAVによる現場空撮及び空中写真測量事例を紹介し、その有効性と測量精度や課題について検討した内容を述べる。

2. UAVによる現場空撮

現在、造成現場やダム現場等では、施工状況の把握にUAV空撮を活用し始めている。従来、地上では定点写真の撮影や航空写真撮影を依頼して全景写真を撮影していたが、安価なUAVを用いることで空中全景写真を簡単に撮影できるようになり、広範囲の造成現場では短時間での状況把握に有効である。

2.1 空撮

図-1に示す東西方向600m、南北方向600mの約36haの造成現場を対象として南北800m×東西1000mを外周しながら撮影した。

UAVは図-2のDJI社製Phantom3を使用し、飛行高度を100m維持しながら15分間手動操縦で飛行した。UAV実機及びカメラ諸元を表-1に示す。

図-3、4は2015年10月、2016年3月に空撮した写真である。施工範囲全域で盛土・切土箇所による起伏が半年経過することで全体的に起伏が小さくなり、造成施工の進捗が一目で確認できる。また、図-5のように高度100m位置からバックホウなどの重機の稼働状況が把握できる。

による起伏が半年経過することで全体的に起伏が小さくなり、造成施工の進捗が一目で確認できる。また、図-5のように高度100m位置からバックホウなどの重機の稼働状況が把握できる。

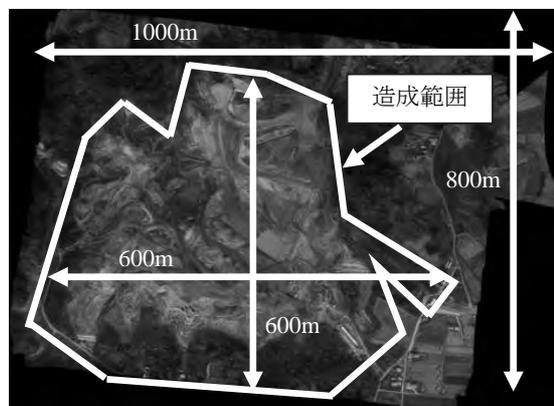


図-1 UAV空撮及び写真測量範囲



図-2 UAV実機(Phantom3)

表-1 Phantom3 機体諸元

項目	概要
機種名	Phantom3 Advanced
機体形式	4 発マルチローター
直径	290mm
機体重量	1.28kg
カメラ機種名	Sony EXMOR 1/2.3"
画素	4000×3000 pixel
シャッタースピード	1/8000 秒

3. 空中写真測量の精度検証試験

3.1 試験概要

本試験は空撮と同じ約36haの造成現場を対象として南北800m×東西1000mを撮影した。試験は2015年12月、2016年3月の計2回実施し、図-6の手順で行った。

3.2 使用機器

UAVによる写真測量試験において、図-7のUAVを使用した。表-2にUAV、表-3に一眼レフカメラ諸元を示す。

3.3 飛行計画

本試験では、1回当たり15分の飛行を複数回に分割して自律飛行を行った。図-8に飛行範囲全体を網羅する飛行経路、表-4に測量試験2回の飛行条件を示す。飛行高度による測量精度の影響を確認するため、飛行高度を100m、120mの2条件を設定した。

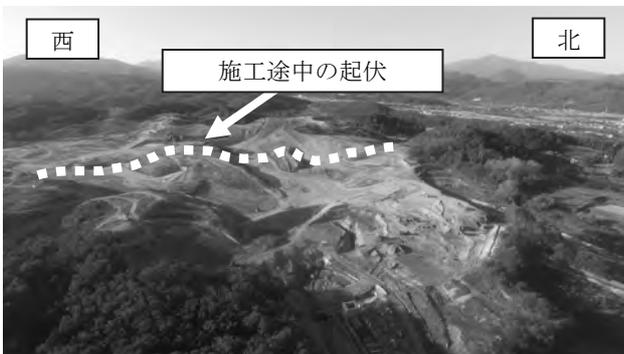


図-3 UAV空撮風景(2015年10月)



図-4 UAV空撮風景(2016年3月)



図-5 現場重機の往来状況

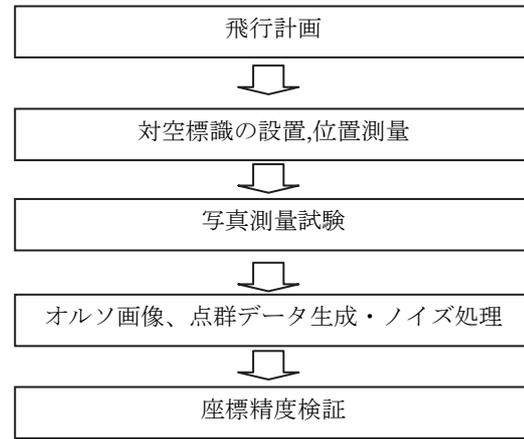


図-6 写真測量試験フロー



図-7 UAV実機(Ideorobo)

表-2 Ideorobo機体諸元

項目	概要
機種名	Ideorobo X61000-2400
機体形式	6発マルチローター
機体直径	1100mm
重量	7.5kg (バッテリー、カメラ含む)

表-3 一眼レフカメラ性能諸元

項目	概要
機種名	Sony α 6000
画素数	6000×4000 pixel
シャッタースピード	1/1000 秒

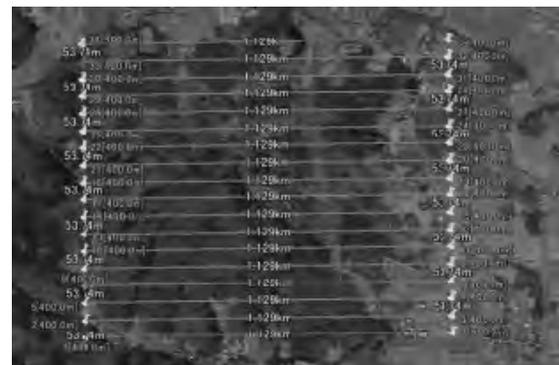


図-8 飛行経路(2015年12月)

飛行時の安全管理として、飛行中に操縦者は、UAV のバッテリー電圧が半分以下・風速計で 6m/s を観測した場合、直ちに離陸地点へ帰還するよう指示するためにモニター上で監視する。

表-4 UAV 写真測量試験 飛行条件

	測量試験条件	
	1 回目 (2015 年 12 月)	2 回目 (2016 年 3 月)
飛行高度	120m	100m
飛行速度	12m/s	8m/s
飛行回数	4 回	6 回
飛行時間	60 分	90 分
撮影範囲 (1 枚当たり)	141×110m	118m×100m
撮影枚数	1601 枚	2326 枚
オーバーラップ率	70%	70%
サイドラップ率	70%	70%

3.4 試験準備及び写真測量試験

試験準備として、測量範囲に対空標識を設置し、図-9 のように対空標識の中心を GNSS 測量した。対空標識は測量範囲の詳細な起伏を得るため、高低差が大きい箇所又は測量範囲の外周等を選定し、標識の間隔を 100m 以内となるよう設置した。また、対空標識を測量解析に用いる標定点と用いない検証点に分類し、図-10 の 2015 年 12 月は標定点 19 点、図-11 の 2016 年は標定点 18 点及び検証点 2 点設けた。



図-9 対空標識の GNSS 測量状況

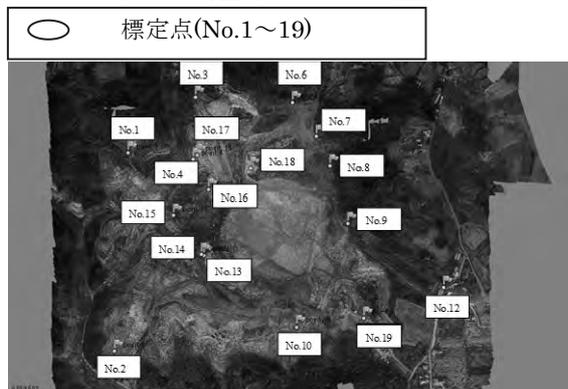


図-10 1 回目の対空標識位置 (2015 年 12 月)

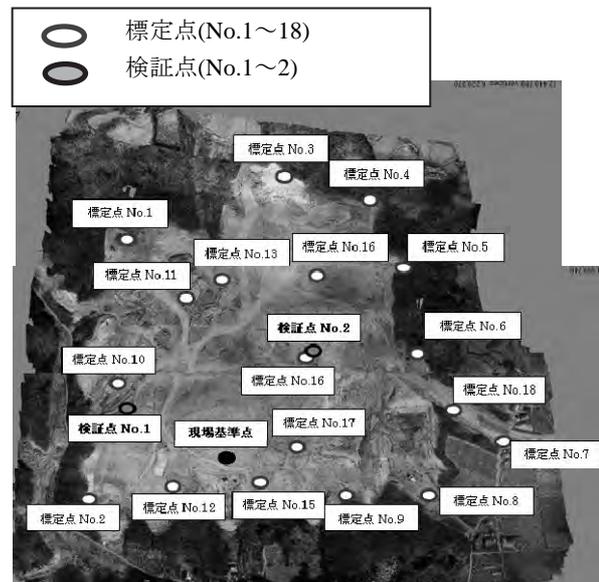


図-11 2 回目の対空標識位置 (2016 年 3 月)

3.5 測量解析

撮影写真からオルソ画像及び 3 次元点群データを生成し、樹木など不要なデータをノイズ処理した。3 次元データ生成には SfM ソフト「PhotoScan」、3 次元データのノイズ処理は点群処理ソフト「TrendPoint」を用いた。PhotoScan による点群データ処理として、1 回目の 2015 年 12 月は 1~4 回の飛行写真を一括で処理し、2 回目の測量写真 2326 枚は一括処理に 10 日以上要すると予想されたため、2 回目の 2016 年 3 月は 1~3 回及び 4~6 回の飛行写真を分割して並列処理を行った。

尚、点群データ生成作業中に、図-12 に示す点群データの出力結果に空白箇所が残る課題が生じた。原因として、重ダンプ走路等の重機が往来する箇所では、重機の向きや地表面がたわみ変状し、特徴点が増減したことが影響したと考えられる。解析時、点群より TIN サーフェスを作成し、空白箇所を補間することで対応した。



図-12 2 回目の点群データ出力結果 (2016 年 3 月)

3.5.1 測量作業時間

測量作業時間の比較として、現場の GNSS による出来高測量の作業時間を表-5, UAV 写真測量時間の結果(2016年3月)を表-6に示す。表-5,6より現地測量は GNSS 測量が 16 時間に対して, UAV 写真測量は準備時間を含め 6.5 時間であり, 9.5 時間短縮し省力化が図れ, 有効である。一方, 今回の UAV 写真データ処理では処理時間に 120 時間以上を要したため, 写真枚数が 1600 枚以上と多いことと特徴点の変化などの解析条件の影響と考えられる。今後, 飛行経路毎に分割・並列解析を行うなどの対処が課題となる。

表-5 出来高測量作業時間

作業手順		所要時間(時間)
現地作業	GNSS 測量	16
データ処理	座標出力～土量計算	16
合計時間		32

表-6 UAV 写真測量解析作業時間

作業手順		所要時間(時間)	
現地作業	準備、撤去作業	5	6.5 (測量全体)
	写真測量	1.5	
データ処理	点群データ作成	127	129.1 (処理全体)
	ノイズ処理	2.1	
合計時間		137.6	

3.5.2 測量精度の検証結果

本試験では, i-Construction 策定前の空中写真測量精度検証として, オーバーラップ・サイドラップ率を 70%に統一し, 飛行高度を 100m, 120m に設定することで, 高度による測量精度の違いを検証した。対空標識で測量した GNSS 座標を基準とし, 点群データの座標との差分を抽出した高度 120m 及び高度 100m の結果をそれぞれ図-13(a),(b)に示す。図-13(a),(b)より XYZ 座標の差分は高さ方向の誤差はおおむね 3cm, 平面方向の誤差は 6cm 以内であり, 高度 100~120m の測量精度は, 空中写真測量を用いた出来形管理要領²⁾の要求精度±5cm に近い値を示した。但し, 図-13(b)の検証点 No.1 の高さ座標が 12cm の誤差が確認された。誤差の要因として, 検証点 No.1 が飛行範囲を 2 分割した境界に位置し, 測量結果の端部としての歪みによる影響と考えられる。

統計的な傾向を確認するため, 代表的な標定点 17 点を用いた水平・鉛直座標より最大値, 平均値, 標準偏差を表-7に示す。表-7より, 水平・鉛直方向において高度 100m で平均値及び標準偏差が小さい傾向が確認され, 高度を低くすることで, 全体的に座標の最大値及び平均値で 37%以上, 標準偏差で 44%以上の精度向上が図れた。以上のように, 高度 100m において国土省の出来形管理基準を

満たす測量精度を得られた。

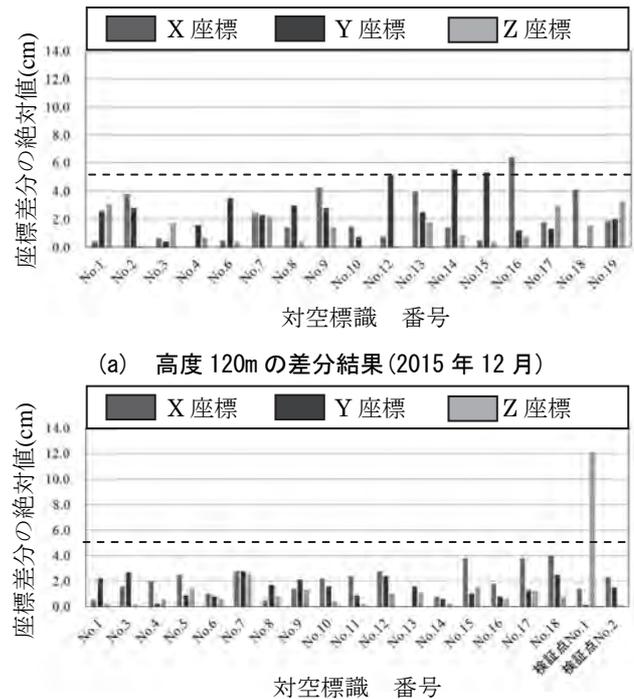


図-13 飛行高度による UAV・GNSS 測量座標の差分比較

表-7 飛行高度による標定点の座標差分の統計値

		水平	鉛直
1 回目 (高度 120m)	最大値(cm)	6.4	3.3
	平均値(cm)	2.5	1.3
	標準偏差	1.6	1.1
2 回目 (高度 100m)	最大値(cm)	4.0	2.5
	平均値(cm)	1.5	0.9
	標準偏差	0.8	0.6
変化率 (2 回目 /1 回目)	最大値(%)	-37	-24
	平均値(%)	-38	-33
	標準偏差(%)	-50	-44

4. おわりに

本稿では, 大規模造成工事現場において UAV による空撮及び写真測量を行い, 写真測量ではオーバーラップ・サイドラップ率は一定とし, 飛行高度等の条件による測量精度と測量作業時間について検証した。本試験より, GNSS を用いた測量と比較して, 測量時間が大幅に短縮できることと高度 100m において出来形要領の要求精度を確保できることを確認した。一方, 点群データ処理において解析条件による長時間の解析時間等が生じる場合があるため, 解析時間を短縮化する手法等の検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 和田章三, 田中正人, 岡本直樹: 4D 土工管理のマルチコプタ運用, 建設機械施工 Vol.66, pp.39-45, 2014
- 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(土工偏)(案), p.35, 2016,

12. 3 連揺動型掘進機による地下通路の施工実績

— 日比谷連絡通路工事 R-SWING®工法 —

鹿島建設株式会社
 鹿島建設株式会社
 鹿島建設株式会社
 東京地下鉄株式会社

上木 泰裕
 ○ 山田 敏博
 中津留 寛介
 橋口 弘明

1. はじめに

都心の再開発プロジェクト等においては、テナントの利便性向上のため、建物と駅を地下でつなぐ地下連絡通路のニーズが高まっている。

これらの建設工事にあたっては、地表面から掘り下げる従来の開削工法では、地上に交通規制が多く発生することや、地下埋設物の移設や防護が必要となるなど様々な問題がある。

またシールド工法などの非開削工法による短い距離の工事では、コストが割高になってしまうこと、土被りの小さい箇所には適用が難しいことなどいくつかの問題がある。

そこで、矩形断面の揺動型掘進機（以下、R-SWING 機）を用いた R-SWING 工法を開発した。

今回は、適用 2 例目となる R-SWING 工法を使用した地下連絡通路の施工実績を報告する。

2. R-SWING 工法について

2.1 適用範囲

一般的な R-SWING 工法の適用範囲を下記に示す。

表-1 R-SWING 工法の適用範囲

地盤条件	土質	粘性土、砂質土
	N 値	20 以下
	土被り	5~10m 程度
	地下水圧	0.1MPa 程度
適用寸法	形状	矩形
	幅	4.6~9.2m
	高さ	3.6~9.0m

2.2 基本構成

図-1 に基本型 R-SWING 機の概要図を示す。幅 2.3m、高さ 0.9m のルーフマシンを上部に、高さ 2.7m の本体マシンを下部に配置し基本ユニットとした。掘削は、揺動カッター方式（図-2 参照）を採用しており、函体受座には、姿勢制御を目的とした中折れ機構を装備している。基本ユニットを必

要に応じてブロックの様に結合できる構造で、図-3 のように大断面施工も対応可能である。

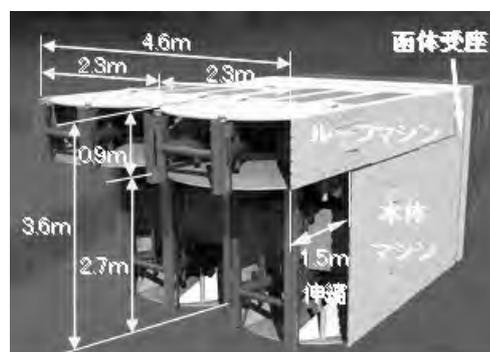


図-1 R-SWING 機(基本型)

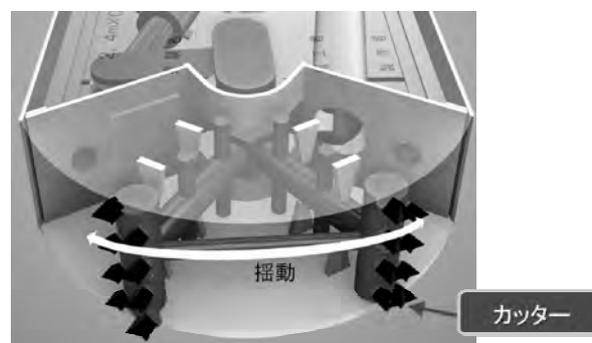


図-2 揺動カッター方式

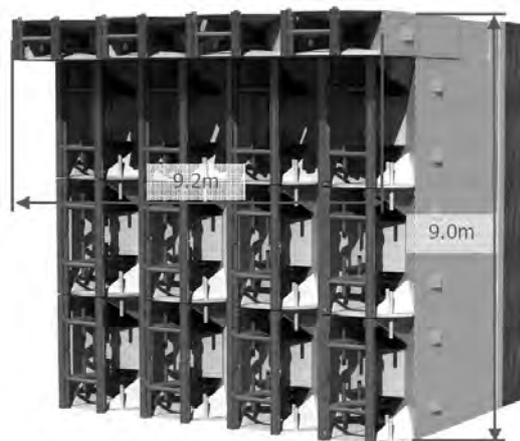


図-3 最大拡幅機 (4×4)

2.3 特徴

- ・可動式ルーフを装備し、前方に1.5m突き出した状態での掘削が可能で、地盤沈下抑制に有効である。
- ・各ユニット間をボルトのみで結合出来る機構とすることで、組立・解体作業を簡素化した。

3. 施工実績

3.1 工事概要

本工事は、新日比谷計画開発ビル建設に伴う日比谷駅において、千代田線バリアフリー1ルート及び日比谷線と千代田線との乗換ルートを整備するとともに、既設出入口を撤去し地下鉄に接続する通路及び出入口を新設する工事である。

今回日比谷線側をR-SWING工法にて約40m推進を行い、無事に完了した。

- ・現場名：(仮称)新日比谷計画事業と日比谷線及び千代田線日比谷駅鉄道施設整備等に伴うその2土木工事
- ・工事場所：東京都千代田区有楽町1丁目地先
- ・事業主：三井不動産株式会社
- ・発注者：東京地下鉄株式会社



図-4 現場位置図

3.2 諸元・土質条件

- ・トンネル掘削寸法：
幅7.25m×高さ4.275m
- ・セグメント：
六面鋼殻合成、桁高350mm、幅=1,000mm
- ・平面線形：直線、縦断線形：3‰
- ・掘削土層：粘土質シルト・粘土
- ・N値：0~3程度

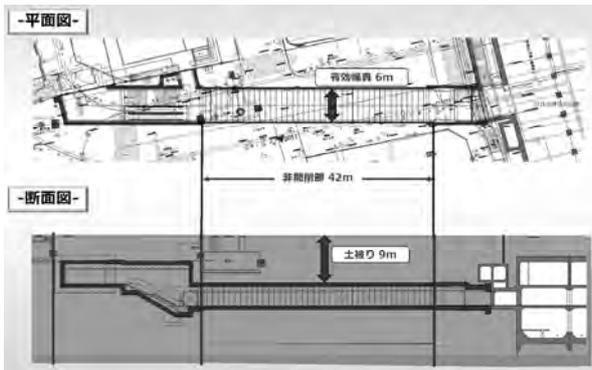


図-5 平面・縦断図

3.3 R-SWING 機

(1) 掘進機構成

今回のR-SWING機は、地下連絡通路形状寸法が幅7.25m、高さ4.275mであるため、大きさを調整する必要があった。(図-6参照)

そこで、基本型のルーフマシン(幅2.3m×高さ0.915m)と、本体マシン(幅2.3m×高さ2.71m)を3連とし、幅は各ユニット間、高さはルーフマシンと本体マシン間にそれぞれスペーサを設置し調整を行った。また、スペーサ部はカッターの延長及び揺動角度を調整することにより掘削断面を確保した。(図-7参照)

なお、左右のルーフマシンと本体マシンは他現場で使用したものを整備し転用した。



図-6 3連R-SWING機全景写真

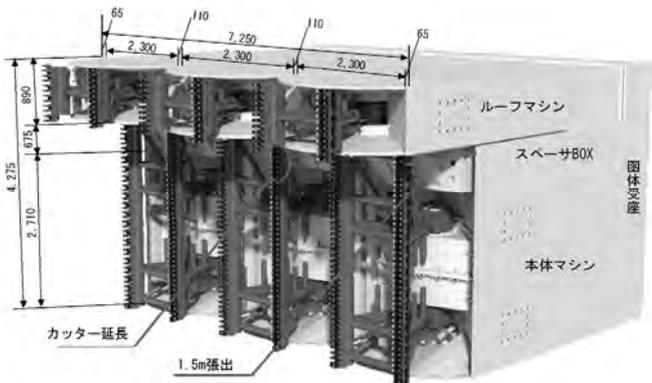


図-7 R-SWING機スペーサ配置図

(2) 切削ビット

当工事では、発進時の防護として地盤改良(高圧噴射攪拌)工法を採用した。既設人孔防護も兼ねており、改良体の延長が発進から10m及び到達防護の3mと合わせて13mと全掘進延長(40m)の33%を占めるため、掘削抵抗値の低減が求められた。

そのため、切削実験を実施し、当初の鋸刃型から切削性のある先行ビット型(超硬チップ入り)とした。

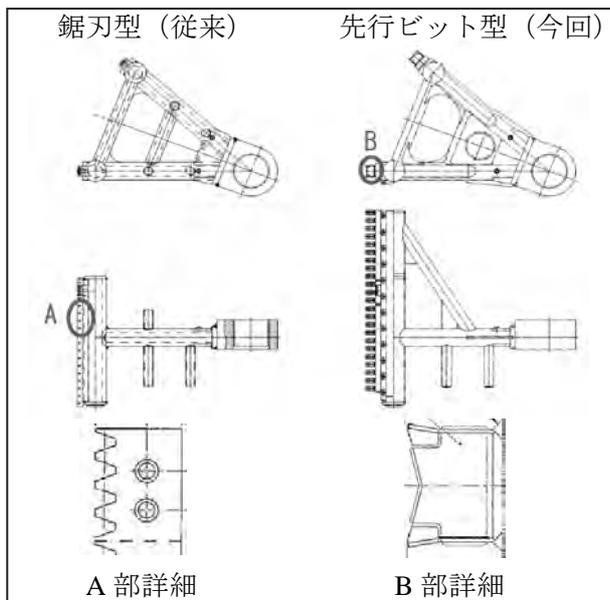


図-8 カッター変更図

3.4 セグメント

今回採用するセグメントは、耐力が高く、桁高を小さくすることが可能であり、二次覆工を省略できる六面鋼殻合成セグメントを採用した。

- ・種別：六面鋼殻合成セグメント
- ・外径：幅 7,250 mm×高 4,275 mm
- ・内径：幅 6,550 mm×高 3,575 mm
- ・セグメント幅：1,000mm、セグメント桁高：350mm
- ・重量：24.4t/Ring (6分割)

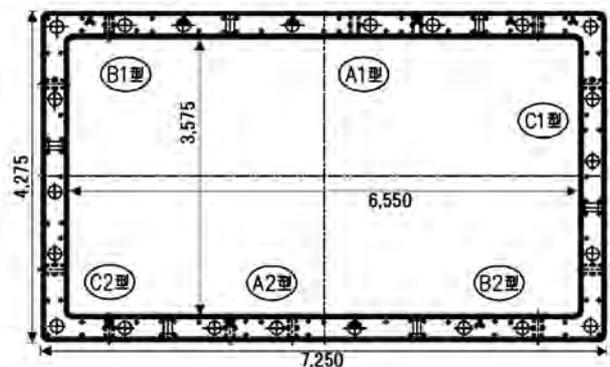


図-9 セグメント

3.5 元押し装置

推進工法とは、推進管に掘進機を取り付け、後方の油圧ジャッキで押し進め、地中を掘進して管を埋設する工法である。従来は、油圧ジャッキと推進管の間に押輪を設置し少ない油圧ジャッキで推進管全体を押し構造が一般的である。

今回、大断面の推進工となるため、元押し装置をシールド機の推進装置を参考に改造し、押輪を無くし、多くの油圧ジャッキを配置することにより施工性及び安全性の向上を図った。

- ・油圧ジャッキ：2,430kN×1,900st×16本
- ・総推力：38,880kN×20mm/min

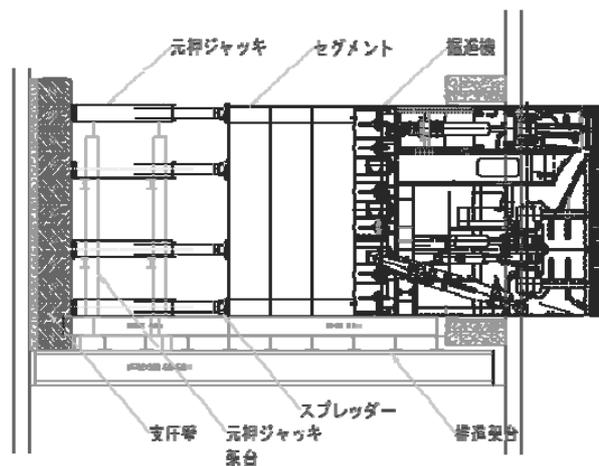


図-10 機器配置図

(1) バッキング防止

新しい推進管を接続する際、油圧ジャッキを縮め、組立スペースを作る必要がある。このとき全ジャッキを縮めるため、既設推進管がバックする可能性があることから、今回は、6分割のセグメントを組む際、必要な部分の油圧ジャッキのみを縮めることで、バッキングを防止することができた。

(2) セグメント組立精度の向上

セグメント全6ピースを1ピース每天井クレーンで組立を行うが、1ピース組立ごとに油圧ジャッキを押し当てる為、セグメントの傾きなどがなく組立精度が向上した。



図-11 セグメント組立状況

(3) 初期の方向制御

油圧ジャッキを選択することで、個々に作動させることができるため、初期の方向修正を容易に行うことができた。

(4) 掘進と元押し装置の連動運転

従来掘進機と元押し装置は個々に運転操作するが、今回は連動運転の機構を追加し、どちらかトラブルが発生してもすぐに停止させることが可能となり、掘進機の押し付けや排土過多などのトラブルを未然に防ぐことが可能となった。

3.6 施工実績

(1) マシン組立実績

本工事の発進立坑は、路上に位置しているため路下へのR-SWING機の投入は、地下埋設物が支障となり、所定の位置にセットすることができない。そのため、建築工事の用地を一部借用し、投入立坑を設けて地下で発進立坑まで横引きする計画とした。各ブロックの投入は、100tクローラークレーンにて行い、立坑下で本体マシン、スペーサBOX、ルーフマシン及びスペーサを1連毎に組付け、横移動させ所定の位置にセットした。(図-12 参照)

組立は全てボルト結合としたため、溶接作業がなく、組立施工期間が24方(夜間作業)と横引き作業等の付帯作業が発生したが、同規模のシールド機と比べると50%短縮することができた。(図-13)



図-12 マシン横引状況



図-13 マシン接合状況

(2) セグメント組立実績

セグメント組立もマシンの組立と同様に建築ヤード内の投入開口から荷卸しし、トラバースャーで横移動して路下に設置した4.8t天井クレーンにて組立を行った。

組立には、1リング(6ピース)当り150分の時間を要した。

(3) 掘進実績

純掘進速度(カッターが揺動している時の元押し装置のジャッキ速度)は、発進及び到達防護の地盤改良体内の掘進において平均4.3mm/min、最大5.8mm/min、地山においては平均8.4mm/min、最大10.5mm/minで掘進することができた。

純掘進速度の違いは、揺動ジャッキの装備圧力を超えないように、元押し装置のジャッキ速度を調整することで、ビットの切込量を調整し、揺動ジャッキの圧力管理を行ったためである。

元押し推力は、所要推力として計画時に25,088kNに対して装備推力38,880kNの元押し装置を準備した。実績としては、約22,500kN(装備推力の約58%)の推力で所定の位置まで推進することができた。



図-14 掘進状況



図-15 坑内全景

4. おわりに

今回の地下通路の施工で、低コスト化、工期の大幅な短縮が実現できた。今後のアンダーパス工事及び地下連絡通路工事のニーズが高まっている状況下でR-SWING工法の今回の実績が、今後の同種工事への展開へ大きく寄与するものと考えている。

13. 建築現場用無人搬送車に関する研究

足利工業大学
戸田建設株式会社

○ 仁田 佳宏
稲井 慎介

1. はじめに

建築構造物および土木構造物の建設現場は、建設資材の搬入搬出、設置個所への搬送などの重労働作業が多く存在しているうえ、労働力不足や労働コストの高沸が生じており、大きな問題となっている。そこで、建築現場の生産コストの抑制および生産性の向上を目的として、ロボット技術や ICT 技術を活用した”i-Construction”が、国土交通省を中心に推奨されつつある^{1, 2)}。 ”i-Construction”の具体的な事例としては、TS や GNSS 技術による 3D マシンコントロールや 3D マシンガイダンスなどを利用した ICT 建設機械、ドローンを活用した測量、パワーアシスト機器や無人搬送車(AGV)を用いた建設資材の搬入搬出などがあげられ、活用事例が増えている¹⁻⁵⁾。

本研究は、建設現場の生産性向上を目指して、重労働作業となる建設資材の搬送を自動化することを目的に、建設現場に適した AGV について検討を行う。一般的に、AGV は機械製造、物流分野の工場や自動倉庫で広く利用されており、二輪速度差制御を用いた双輪駆動キャスタを用いたものが多い⁶⁾。双輪駆動キャスタは、平坦で障害物が少ない室内の工場や自動倉庫では有用な駆動機構であるが、半屋外で 20mm 程度の段差や障害物が多く存在する建設現場に適した駆動機構とはなっていない。また、AGV は、一般的に磁気テープや磁気タグなどが敷設された専用の通路もしくは Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) 技術を用いて、自動搬送を行っている。しかし、建設現場は、工場などのように半永久的な施設ではないため、AGV 専用の通路や磁気テープなどのインフラの設置を敬遠する傾向も強く導入が進んでいないのが現状である。また、磁気テープなどを必要としない SLAM 技術の活用も検討されているが、建設工事の進み具合などに合わせてレイアウトが頻繁に変更される建設現場においては、頻繁に環境地図の更新を行わねばならず、利便性の問題が指摘されている。このような課題点を踏まえ、本研究では、建設現場に適した AGV の開発を目的と

して、AGV の駆動機構および走行制御アルゴリズムについて、検討を行う。

2. 駆動機構の検討

建設現場に適した AGV の駆動機構の検討として、二輪速度差制御による双輪駆動キャスタ、四輪独立制御によるメカナムホイールおよびオムニホイールの 3 種類の駆動機構を、図-1~3 に示す AGV 模型を用いて比較する。AGV 模型は、ギヤ比 1:30 のギヤードモータを用いており、3 種類ともホイールの外径は 60mm である。また、AGV 模型の寸法は、160mm×100mm の車体に車輪を配置したものであり、最低地上高は、双輪駆動キャスタは 24mm、オムニホイールおよびメカナムホイールは 19mm である。

比較対象とした 3 種類の駆動機構は、いずれも機械的な操舵機構を用いずにモーター制御のみで全方向移動可能であり、実用性、利便性ともに高い駆動形式である。二輪速度差制御による双輪駆動キャスタは、図-1 に示すように、後輪二輪が駆動輪となり、左右の回転方向および速度差を利用して、旋回および操舵が可能である。メカナムホイールは、図-2 に示すように各ホイールに斜め方向に複数のバレルが設置された形状をしており、各ホイールの回転方向を個別に制御することで全方向移動可能である。オムニホイールは、図-3 に示すように、円周方向に複数のバレルが設置された形状をしており、メカナムホイールと同様、各ホイールの回転方向を個別に制御することで全方向移動可能である。

はじめに、障害物回避アルゴリズムを比較する。双輪駆動キャスタ、メカナムホイールおよびオムニホイールともに全方向に移動可能であるが、双輪駆動キャスタは、横方向に移動する際に旋回が必要となるのに対し、メカナムホイールおよびオムニホイールは、車輪の特性を活かし、旋回を必要とせずに横方向の移動が可能となる。その為、障害物の回避アルゴリズムが、双輪駆動キャスタとメカナムホイールおよびオムニホイールでは大

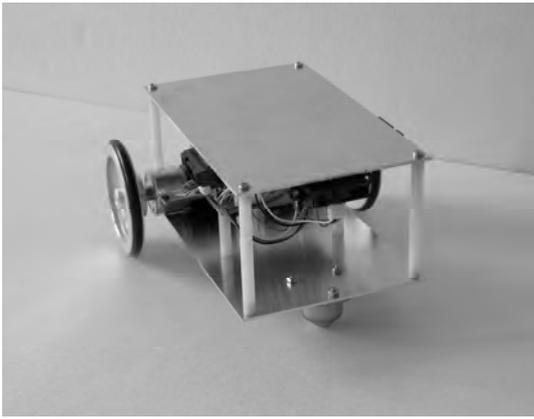


図-1 双輪駆動キャストを利用した AGV 模型

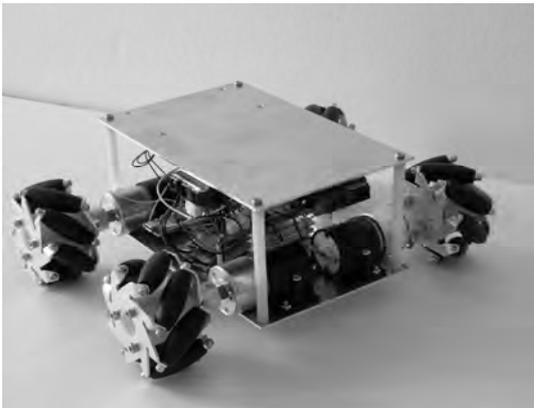


図-2 メカナムホイールを利用した AGV 模型

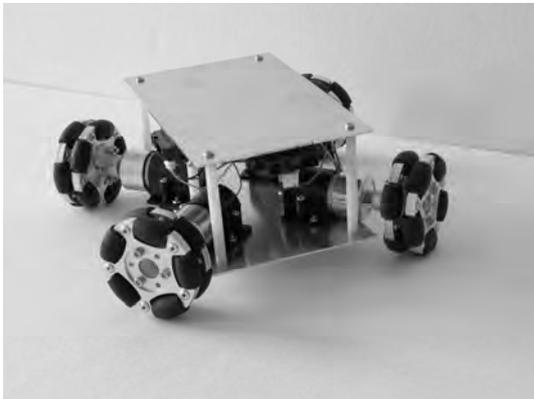
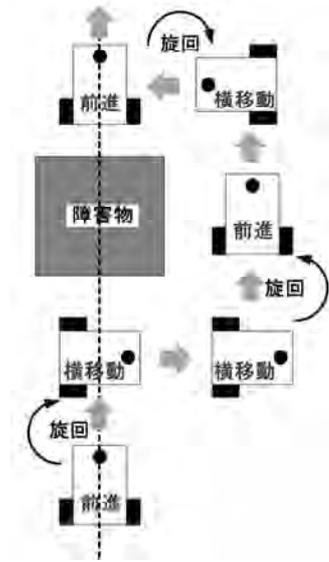
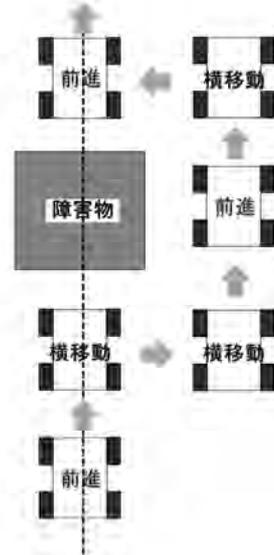


図-3 オムニホイールを利用した AGV 模型

大きく異なる。双輪駆動キャストによる障害物の回避は、図-4(a)に示すように、まず障害物の前で旋回を行ったうえで、横方向に移動する。次に障害物の幅以上に横方向に異動した後、再び旋回を行い、前進を再開する。また、障害物回避後に、回避前の車線に戻るためには、旋回および横方向の移動を行った後、再び旋回をする必要がある。双輪駆動キャストに対して、メカナムホイールおよびオムニホイールは、図-4(b)に示すように、障害物の前で、障害物の幅以上に横方向に移動した後、前進を行えば、障害物を回避できる。また、



(a) 双輪駆動キャスト



(b) メカナムホイールおよびオムニホイール
図-4 障害物回避アルゴリズム

障害物回避後に、回避前の車線に戻るためには、横方向の移動のみを行えば十分である。つまり、メカナムホイールもしくはオムニホイールを用いることで旋回を行う必要がなくなり、障害物回避アルゴリズムを簡素化できる。また、AGV が建設現場で旋回を行うと、積載した建設資材の長さを考慮した旋回半径となるため、幅広い通路を必要とするうえ、旋回時には荷崩れを引き起こしやすいため、可能な限り旋回を避ける必要がある。従って、障害物回避アルゴリズムについては、旋回を可能な限り避けることができるため、双輪駆動キャストより、メカナムホイールおよびオムニホイールの方が有用である。

次に、踏破性能について検討する。メカナムホ

イールおよびオムニホイールが全輪駆動であるのに対し、双輪駆動キャスタは後輪二輪駆動となる為、踏破性能は高くなく、比較検討に用いた直径 60 mm の車輪とボールキャスタの組み合わせでは、約 7 mm の段差の登攀が限界となる。一方、メカナムホイールとオムニホイールは、全輪駆動であるため、比較検討に用いた直径 60 mm の車輪で、約 19 mm までの段差が登攀可能となる。

最後に、直進性能について検討を行う。メカナムホイールとオムニホイールは、特殊形状の車輪を用いた全輪駆動であるため、各車輪の速度および回転方向の制御が重要となり、直進性能は積載物となる建設資材の形状や重量の影響を双輪駆動キャスタよりも大きく受ける。一方、双輪駆動キャスタは後輪二輪駆動であるため、両輪の回転速度がほぼ一致していれば、直進性が保たれ、積載物となる建設資材の影響はほとんど受けない。従って、メカナムホイールやオムニホイールよりも、双輪駆動キャスタの方が高い直進性能を示す。メカナムホイールとオムニホイールを比較すると、メカナムホイールは進行方向に車輪が取り付けられているのに対し、オムニホイールは進行方向に対して車輪が斜め方向に取り付けられているため、地面の凹凸の影響をメカナムホイールよりも大きく受け、メカナムホイールよりも直進性が低くなる。ただし、オドメトリやデッドレコニングを用いる場合は、オムニホイールの方が正確にモデル化しやすく、各車輪の回転速度や回転方向に基づいた走行制御を行えるため、オムニホイールの方が高い直進性能を示す。

以上の比較検討結果より、障害物が多く、路面も平坦ではない建設現場においては、工場や自動倉庫で実績の多い双輪駆動キャスタよりも、メカナムホイールもしくはオムニホイールの利用が有用と考えられる。ただし、メカナムホイールもしくはオムニホイールの使用においては、直進性能が課題となるため、直進性能向上のための、走行制御アルゴリズムの開発を必要とする。

3. 走行制御アルゴリズム

駆動機構の検討結果を考慮して、建設現場用 AGV ではメカナムホイールを使用することを前提に、建設現場用の走行制御アルゴリズムについて検討を行う。建設現場は、工場や自動倉庫などとは異なり一時的な使用であるうえ、工事の進捗具合により、頻繁にレイアウトが変更される。そこで、本研究では、信用度の高い磁気テープによる走行制御手法を、コーナー、荷積および荷卸し箇所に適用し、直線部分に関してはマーカを用いた走行制御アルゴリズムを提案する。提案する走行制御アルゴリズムは、AGV の走行経路の多く

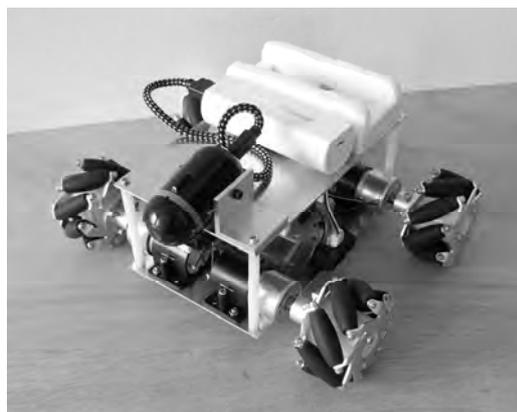


図-5 Wi-Fi カメラを搭載した小型 AGV 模型

の部分占める直線部分に磁気テープを敷設する必要がなくなるため、AGV のための設備を簡素化できる利点がある。

メカナムホイールは、積載物の重量および形状の影響を大きく受けるため、直進させるためには、走行中に水平方向および角度方向の修正を行う必要がある。そこで、AGV にカメラを搭載し、搭載したカメラの映像を用いて画像処理を行うことで、直進させるアルゴリズムを提案する。直進させるための提案アルゴリズムを下記に簡潔に示す。

- (1) 撮影した画像上に、床上に設置された長方形マーカがあるか確認する。
- (2) 長方形マーカがある場合、長方形マーカの水平方向の位置を確認する。
- (3) 長方形マーカが撮影画像の中央に無い場合は、中央にくるように AGV を横移動する。長方形マーカの撮影画像内における角度を算出する。
- (4) 長方形マーカの角度が横軸と平行でない場合は、平行となるように AGV を旋回させる。
- (5) 再度、長方形マーカが撮影画像の中央にくるように横移動を行う。
- (6) 長方形マーカが撮影画像上に表示されるまで、AGV を前進させる。
- (7) (1)に戻る

また、オムニホイールについてもほぼ同様の走行制御アルゴリズムを適用可能である。

提案した直進走行のための制御アルゴリズムの有用性を検討する目的で、図-5 に示すような Wi-Fi カメラを搭載しメカナムホイールを利用した AGV 模型と図-6 に示すような画像処理プログラムを用いて、実証実験を行う。ただし、実証実験では、3.0cm×20.0cm の白色の長方形プレートを長方形マーカとして用いている。提案する走行制御アルゴリズムを用いない場合は、3.0m 進むと最大で約 9.0cm 横にずれるのに対し、提案アルゴリズムを用いた場合はほぼずれることなく直進できる。

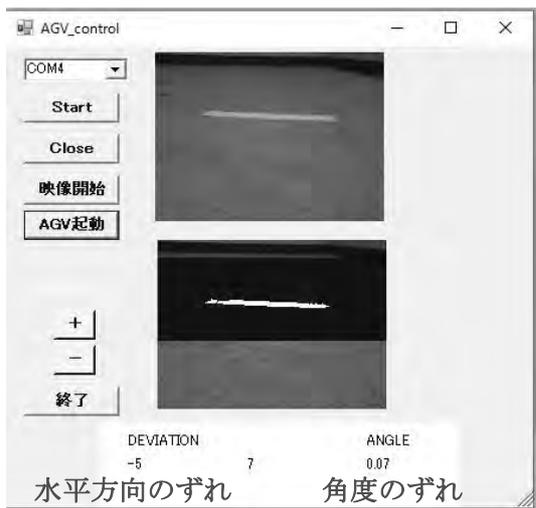


図-6 直進走行のための画像処理画面

以上の結果から、磁気テープによる走行制御手法を、コーナー、荷積および荷卸し箇所に適用し、直線部分に関してはマーカーを用いる走行制御アルゴリズムを用いることで、より建設現場に適したAGVを実現できると考えられる。

4. まとめ

本研究は、建設現場の生産性向上を目指して、重労働作業のひとつである建設資材の搬送を自動化することを目的に、建設現場に適したAGVについて検討を行った。

まず初めに、AGVの駆動機構の検討を行い、双輪駆動キャスタ、メカナムホイールおよびオムニホイールを、障害物回避性能、踏破性能および直進性能について比較した。比較結果から、障害物や段差などが多い建設現場の現状を考慮すると、利便性などからメカナムホイールもしくはオムニホイールが有用であることを確認した。ただし、メカナムホイールもしくはオムニホイールは、双輪駆動キャスタと比較して直進性能が良くないため、直進性を高める工夫が必要となる。

次に、建設現場に適したAGVの走行制御手法について検討を行った。検討から、直進走行のための長方形マーカーによる走行制御アルゴリズムとコーナー、荷積および荷卸し箇所に磁気テープを敷設する手法を併用した走行制御アルゴリズムを提案した。直進走行のための制御アルゴリズムについては、メカナムホイールを用いたAGVモデルによる走行実験により有用性を確認している。

以上の検討結果から、建設現場用無人搬送車には、メカナムホイールもしくはオムニホイールの利用と、マーカーと磁気テープを併用した走行制御アルゴリズムの使用が実用的と考えられる。今後は、実際の建設現場を想定した実証実験の実施を計画している。

参考文献

- 1) 立石洋二：施工の効率化、高品質化に貢献する自動化技術・ロボット技術，土木技術，Vol.67・No.4，pp.24～29，2012
- 2) 井上猛雄：建機ロボット最前線-進む、無人化・情報施工とロボット，ロボコンマガジン，No.99，pp.6～21，2015
- 3) (社)日本建設業連合会 インフラ再生委員会：2016施工CIM事例集，2016
- 4) 大本絵利・土井暁・鈴木理史・浜田耕史・滝沢平一郎・柏友仁：フレキシブル水平搬送システムの開発，第14回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.151～156，2014
- 5) 大本絵利・土井暁・金子智弥：資機材搬送省力化のための低床式AGVの開発と適用，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，pp.1027～1028，2016
- 6) Günter Ullrich：Automated Guided Vehicle Systems - A Primer with Practical Applications-, Springer, 2015

14. 同心円状レチクル内蔵トータルステーションを用いた 基礎杭精度管理手法

クモノスコーポレーション (株) ○ 中庭 和秀
クモノスコーポレーション (株) 西 乃輔
大阪大学 矢吹 信喜

1. はじめに

構造物の基礎形式の中で、最も多く活用される形式として、杭基礎がある。基礎杭の工法には、大きく分けて既製杭工法と場所打ち杭工法があり、施工条件・地質条件等を総合的に判断して決定される¹⁾。このうち、既製杭工法とは、工場などで製作された杭を現場まで運搬し、設計値として決められた位置に杭を配置し、貫入していく方法で、地盤に掘削した孔に既製杭を挿入するプレボーリング工法が広く採用されている。

既製杭の施工において、設計位置への杭の誘導方法としては、検尺による位置の確認が一般的である。これは、まず、測量によって設計位置のポイントを出す。このポイントには杭が埋設され、亡失してしまうことから、出したポイントから数メートル離れた位置に、逃げ杭心を2点設置する。杭の建込みの工程で、この2点から、杭表面に対して直接検尺ロッドを当て、剣尺ロッドの長さとして杭半径の和が、設計のポイントから逃げ杭心までの逃げ距離と等しくなる位置に杭を建て込む。この方法では、検尺ロッド自体の距離計測精度が高くない上に、ロッドの当て方によって容易に誤差が増大してしまうという問題があった。

そこで著者らは既往の研究において、円柱構造物の中心座標を同心円レチクル内蔵トータルステーション（以下、TS）により、簡易に精度よく計測する方法を開発し、基礎杭の施工現場においても適応可能であることを明らかにした²⁾。

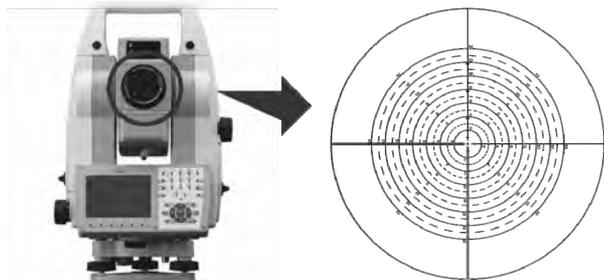


図-1 同心円レチクル内蔵 TS

本論文では、基礎杭の施工現場への適応性を向上させるための、同心円レチクル内蔵 TS の改良について提案する。

2. 既往の研究

同心円レチクル内蔵 TS (図-1) は、レチクルに同心円の目盛を付加し、専用の計測プログラムをインストールした TS である。同心円の目盛を用いて、TS の方向を合わせて距離を計測することで、従来の TS では計測できなかった、円柱構造物の半径と中心座標、球体の中心座標といったものを計測することができる。

この同心円レチクル内蔵 TS において、円柱形の構造物の中心座標を測定する計測モードとして、「1点杭計測」モードがあり、基礎杭の施工現場でも活用されている (図-2)。この計測モードではまず、同心円目盛で直立した杭の両端を挟むようにして、TS の視準方向を円柱の中心軸に合わせる。その後、図-3 に示す計測画面で、杭半径 (既知値) を入力して、測距することで自動的に計算が施され、杭の中心座標が計測結果として表示されるため、容易に杭の中心座標を取得することができる方法である。



図-2 基礎杭中心座標の計測風景



図-3 「一点杭計測」結果画面



図-4 「杭打計測」計測結果画面

しかしこの計測モードは、単に円柱構造物の中心座標を取得するための計測モードであり、基礎杭の施工のように、予め決められた設計座標の位置に、基礎杭を移動させるような場面での活用には、最適化されていなかった。そのため、得られた実測の中心座標と設計座標との差を算出する時には、計測者の手元での計算が必要となる。これにより計測者に手間が掛かり、杭位置誘導の方向、距離の間違いの発生や効率的な作業を阻害する要因となっていた。

3. 杭打機能の開発

3.1 杭打ち機能の開発

同心円レチクル内蔵 TS の基礎杭施工現場への適応性を向上させるため、「杭打計測」モードを開発した。この計測モードでは、設計値と実測値の差である ΔX 座標、 ΔY 座標を自動的に計算して表示する。

設計の座標値は、現場での計測を実施する前にテキストファイルにて座標リストを作成し、TSに読み込ませ、現場では座標リストから杭名(測点名)を選択する。1本の杭を施工し終わると、次の測点を選択し直すことで、次の杭の計測に移ることができる。

計測結果の保存については、座標リストとは別のファイルが自動的に作成される。保存する情報としては、測点名、設計X値、設計Y値、測定X値、測定Y値、測定Z値、測定時刻で、測距する毎に一行ずつ時系列順に保存される。

3.2 開発の成果

本研究により開発した計測プログラムの計測結果画面を図-4に示す。この画面は直径600mmの杭を設計座標(0,0)の位置に設置した時の計測結果画面である。従来の計測画面にはなかった設計座標のX値、Y値及び設計値と実測値との差がずれ量が追加されている。既製杭の半径は既知であることから、杭半径の既知・未知を選択する項目を

削除した。本研究により以下の成果が得られた。

(1) ずれの視覚化

設計値をTSに読み込ませ、現況の座標値だけでなく、設計値との差を自動的に算出し、計測結果として表示するため、ずれ量・ずれ方向の把握が用意になり、杭の誘導も効率的に行うことができる。

(2) 報告書作成の効率化

杭の番号、杭半径、設計座標、実測座標、中心からのずれ量、計測時間といった、杭の施工管理に必要な情報が一画面に集約されている。そのため、現場での作業効率が向上するだけでなく、計測画面のキャプチャ画像をそのまま報告書に転用できるようになる。これにより計測後の作業においても、効率よく作業を行うことができる。

4. おわりに

本論文では、既存の同心円レチクル内蔵TSに改良を加え、計測した杭の中心座標を表示するだけでなく、実測値と設計値を比較した杭のずれ量を自動的に算出し、計測結果画面に表示する方法を提案した。この方法により、基礎杭の施工における位置の計測において、杭の誘導を容易に行うことができるようになるため、基礎杭の施工における精度管理を効率的に行うことができるようになる。

今後は、現場の計測者の意見を踏まえ、さらなる利便性の高い機能も実装と使いやすいシステムを目指す。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書 IV.下部構造，pp.74, 2014
- 2) 中庭和秀・矢吹信喜・阿部幸夫・西乃輔：同心円状レチクル内蔵トータルステーションの開発と杭打設システムへの応用，土木学会論文集F3（土木情報学），Vol. 68, No.2, pp.I-55～I-63, 2012

15. 情報化施工向け油圧ショベルにおける マシンコントロール機能の開発

日立建機株式会社
株式会社日立製作所

○ 泉 枝穂
成川 理優

1. はじめに

国土交通省は、2016 年度より国の直轄工事に「i-Construction」を導入することを発表した。その中で、土木建設現場の ICT 活用による施工は、3D データをベースに、測量・設計から施工、管理、検査にいたる全プロセスに展開するもので、生産性、安全性を大きく高める取り組みとして期待されている。

現状、マシンガイダンス機能を搭載したショベルが多く使用されているが、操作はオペレータが実施するため、出来形は技量に依存する部分が大きく、生産性及び品質向上の面で課題があった。

日立建機では、施工目標面情報とショベルの位置、姿勢情報を照合しながらフロントを半自動制御することで、効率的な作業が行えるマシンコントロール機能を備えた油圧ショベルを開発した。本論文では、マシンコントロール機能の概要とその特徴について述べる。

2. マシンコントロール機能

従来のマシンガイダンス機では、施工目標面とバケットの位置関係を気にしながら操作を行う必要がある。それに対し、マシンコントロール機では、施工目標面に対して掘り過ぎることを気にせず操作が可能である。

本開発機に搭載したマシンコントロール機能の特徴について説明する。

2.1 掘り過ぎ防止機能

本機能は、施工目標面とバケットとの距離情報を基にフロントを半自動制御することで、施工目標面に対する掘り過ぎを防止し、効率的な掘削を可能とするものである。各操作におけるマシンコントロールの動作について、それぞれ説明する。

(1) ブーム下げ操作

ブーム下げ操作によりバケットが施工目標面に近づくと、ブーム下げ動作を減速し、施工目標面上で停止するように制御する。この動作の概念図を図-1 に示す。本制御は、掘削動作を開始する際に、バケット先端を掘削開始位置に合わせたり、

バケットの先端を用いて測量を行ったりする場合に有効な機能である。

また、バケット底面のうち、目標面と最も近い部分を選択して制御する。これにより、バケット先端のみでなく、後端部の目標面への侵入も防止することができる。

(2) 掘削操作

アームまたはバケット操作によりバケットが施工目標面に近づくと、必要に応じ、施工目標面とフロントの位置関係によってフロント速度を制御する。本操作においても、前述した内容と同様に、バケット底面のうち、目標面と最も近い部分を選択して制御する。アーム引き操作により自動でブームが上がる例についての概念図を図-2 に示す。

掘削方向に連続した複数の施工目標面に対して掘削操作をした場合には、面のつなぎ目に対して減速をかける。これによって、掘削操作の途中で角度が変化するような施工目標面においても、連続して掘削することができる。

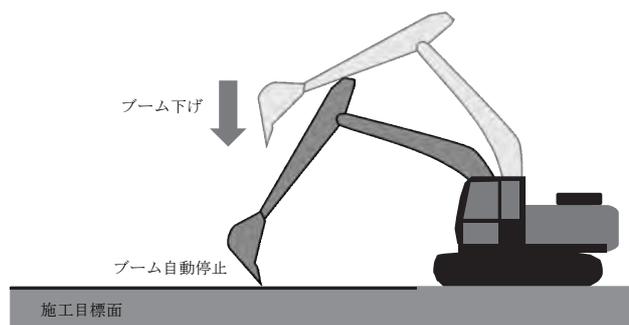


図-1 ブーム下げ操作による停止制御

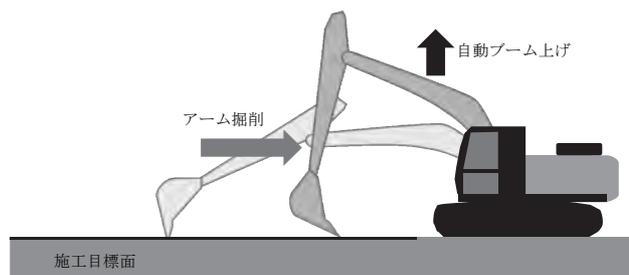


図-2 掘削操作によるブーム上げ制御

また、バケット操作によりバケットが施工目標面に近づいた場合には、バケットの動きを停止せずにブームを上げるように制御する。これにより、任意のバケット姿勢で位置合わせが可能となる。

2.2 バケット角度保持機能

本機は、バケット角度を一定に保持する機能を備えており、この作業モードで使用する際には、バケット操作をしなくても、バケット角度を一定に保つことができる。本機能は、目標面とバケットの距離、角度が所定の条件を満たす場合に有効となる。

バケット角度保持機能の概念図を図3に示す。本機能を用いることで、ブームとアームの操作のみで法面形成も行うことが可能となる。また、本機能が有効であっても、オペレータによりバケット操作が行われた場合には、オペレータの操作を優先してバケットを動かすことが可能であり、その際にもブーム上げ操作を自動で行う為、目標面を掘り過ぎることを防止することができる。

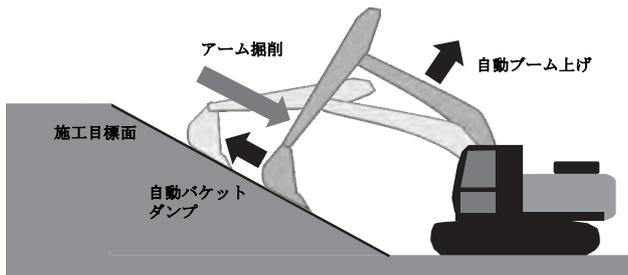


図-3 バケット角度保持機能

2.3 作業モード切替

マシンコントロールの作業モードとして、速度を優先する粗掘削モードと、精度を優先する仕上げモードとを備えている。粗掘削モードではオペレータの操作を優先するために、レバー操作に対する減速を弱めに設定している。一方、仕上げモードではオペレータ操作よりも精度を優先するため、オペレータのレバー操作に対し減速を強めに設定している。このようにアクチュエータの速度を抑えることで、施工目標面に対する高精度な制御を実現している。よって、オペレータは、施工目標面まで距離が遠い場合には粗掘削モードを選択し、仕上げ時には仕上げモードを選択するように使用する。

なお、この作業モードの切り替えや、2.2節で説明したバケット角度保持機能の有効化は、操作レバー上のスイッチで容易に変更可能である。

このように、ZX200X-5Bのマシンコントロール機能は、操作レバーに設けられたスイッチによりレバーから手を放すことなくON/OFFを変更可能であり、マシンコントロールが不要な状況下での使い勝手を高めている。さらに、使い勝手と安全性を両立させるために、走行状態や、車体の傾斜角度といった条件により、マシンコントロールのON/OFFを自動で変更する機能を設けている。

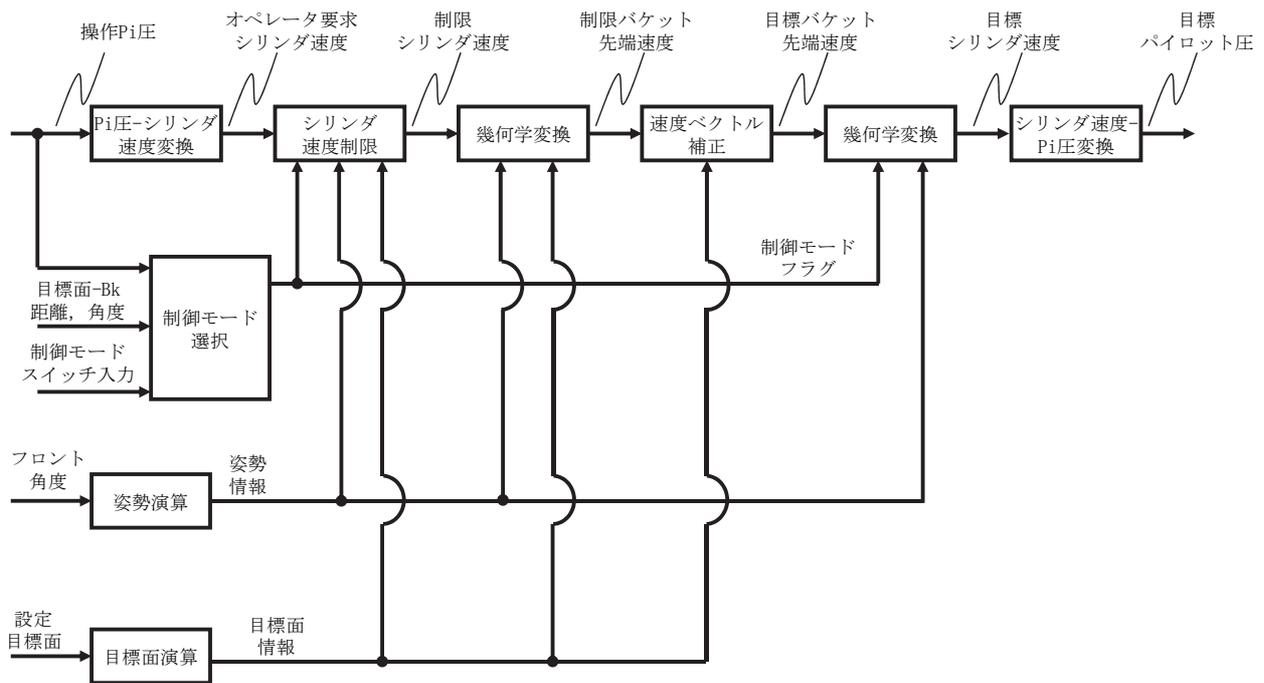


図-4 制御ロジック概要

2.4 制御ロジックの概要

マシンコントロールにおける制御ロジックの概要を図4に示す。各操作に応じて、目標パイロット圧を算出する方法について、図4を用いて説明する。

操作レバーに基づくパイロット圧信号とフロント姿勢情報、目標面情報に基づきフロントの速度を制限するように、シリンダ速度の制限目標値を算出する。このシリンダ速度を幾何学変換により、バケット先端速度に換算する。換算されたバケット先端速度を、目標面に沿った掘削となるよう補正する。補正されたバケット先端速度を、幾何学変換によりシリンダ速度に変換する。最終的に、変換されたシリンダ速度となるように、目標パイロット圧を出力する。

ここで、目標速度を算出する手法について詳細を述べる。一般的に、ロボット工学等で用いられる逆運動学問題は、作業機先端の動作から、各関節の動作を求めるものである。一方、油圧ショベルにおいては、オペレータの掘削操作はアームやバケットに表れるが、オペレータの操作よりもアクチュエータを速く動かすことは強い違和感を生じる要因となる。そこで、アームやバケットの角速度は与えられるものとして逆運動学問題を解く構成とした。定式化した逆運動学問題は以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{bm} \\ \dot{\theta}_{am} \\ \dot{\theta}_{bk} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、数式(1)において、 \dot{x} : バケット制御点水平方向速度、 \dot{z} : バケット制御点鉛直方向速度、 $\dot{\theta}$: バケット制御点角速度、 $\dot{\theta}_{bm}$: ブーム角速度、 $\dot{\theta}_{am}$: アーム角速度、 $\dot{\theta}_{bk}$: バケット角速度、 J^{-1} : 逆ヤコビ行列である。

バケット制御点の鉛直方向速度は、目標面に侵入しないような動作をするために、図4における速度ベクトル補正で算出される値である。

掘り過ぎ防止機能において、アームやバケットの掘削操作が行われた場合は、アーム角速度、バケット角速度、バケット制御点鉛直方向速度を用いて目標ブーム角速度を算出する。

バケット角度保持モードにおいては、アーム掘削操作が行われた場合に、アーム角速度、バケット制御点鉛直方向速度、バケット制御点角速度を用いて、目標ブーム角速度及び目標バケット角速度を算出する。

このように目標角速度を算出することで、オペレータによるアームやバケットの操作を活かしつつ、制御するブーム角速度を算出できる。

これに加えて、油圧ショベル特有の課題である、油圧の応答性や負荷による速度変化に対応する為、姿勢、油温、シリンダ負荷圧に応じた制御を行っている。

3. システム構成

本開発機のシステム構成と共に、マシンコントロールを実現するために必要な機器について説明する。

3.1 全体システム

ZX200X-5Bのシステム構成を図5に示す。ショベル設置された角度センサ、ストロークセンサ、車体傾斜センサにより、ショベルの姿勢を検出する。またパイロットラインの圧力センサにより、オペレータの操作を検出する。レバー入力装置やディスプレイコントローラからは、マシンコントロール機能の設定変更要求を受け取る。また3Dシステムコントローラから、目標施工面情報を取得する。情報化施工コントローラは、これらの情報からフロントを半自動制御するための指令値を演算し、後述する油圧制御ユニットへ出力することで、マシンコントロール機能を実現する。

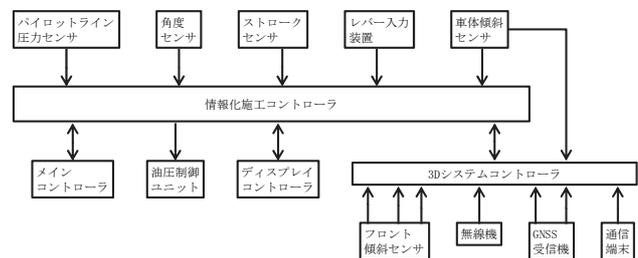


図-5 システム構成

3.2 油圧機器

油圧ショベルは、オペレータのレバー操作によりパイロットバルブが駆動し、生じた圧油によってコントロールバルブ内のスプールが動き、油圧シリンダの動作を制御する。油圧機器のシステム構成を図6に示す。

本機の油圧システムは標準機と同一であるが、パイロットバルブとコントロールバルブの間に、マシンコントロール用油圧制御ユニットを搭載している。この油圧制御ユニットには、電磁比例弁が含まれており、これらは情報化施工コントローラからの指令により駆動される。これらの電磁比例弁を駆動することで、オペレータ操作によるパイロット圧に対して介入し制御することで、マシンコントロール機能を実現している。さらに、油

圧式遮断弁，電磁式遮断弁を搭載することで，電磁比例弁故障時の安全性を確保している。また，マシンコントロールを用いない場合は標準機と同等の操作感を確保できる。

3.3 インタフェース機能

前述したマシンコントロール機能を実現するにあたり，同時に開発した操作系インタフェース機能について説明する。

(1) レバー入力装置

図 5 において，レバー入力装置は従来の油圧シヨベルに搭載されているものと異なる仕様のものを採用した。前述した様に，本レバー入力装置には，複数の ON/OFF スイッチや，アナログ入力機能がある。これにより，制御モードやマシンコントロール機能の ON/OFF 切り替えを手元から行えるようにした。

ZX200X-5B は，2D 仕様機も存在しており，各仕様機に応じて必要な入力を備えることにより，使い勝手を考慮している。例えば，2DMG，2DMC 仕様機においては，必ず施工目標面の設定が必要となるが，施工目標面情報を設定するだけでなく，基準位置も操作レバーのスイッチを用いて設定可能としている。3DMG，3DMC 仕様機では，3D システムコントローラと連携し，モニタ画面表示を操作レバーから変更することを可能とした。

(2) ディスプレイ

図 5 において，ディスプレイコントローラを通して，車体の標準モニタに出力するための情報のやり取りを行う。車体のモニタに搭載した MG・MC に関する表示内容の一例を図 7 に示す。各種警告通知や作業モードはアイコンで表示する。前述したレバー入力装置を用いて，これらのアイコン部分にて，作業モードの切替えなども行うことができる。

4. 掘削結果

図 8 に示すような施工目標面を想定し，バケット角度保持モードにて掘削を行った結果の一例を写真 1 に示す。

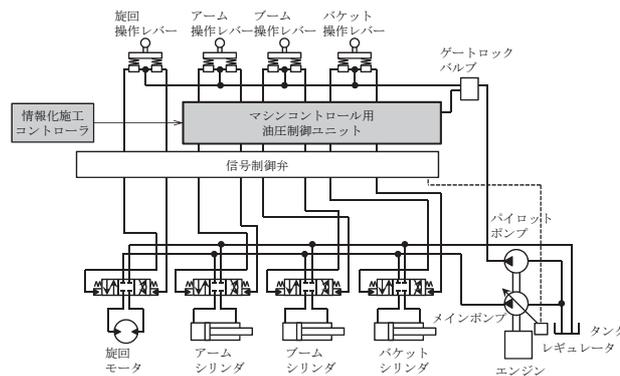


図-6 油圧機器システム構成

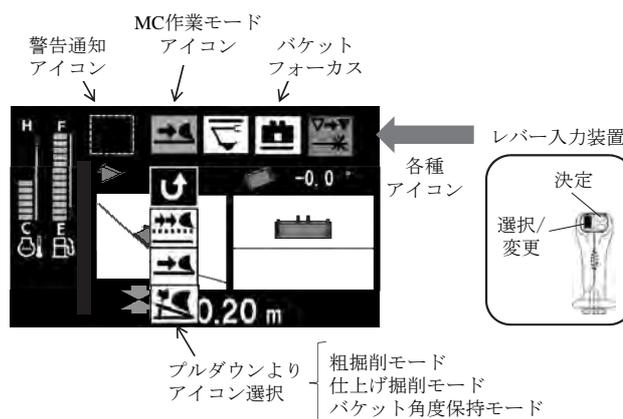


図-7 図，写真のキャプションは下に置き，



図-8 施工目標面の一例



写真-1 掘削現場の写真

16. MC 導入による施工時間および生産性などへの効果について

～モータグレーダによる敷き均し施工～

(国研)土木研究所 ○ 橋本 毅
(一社)施工技術総合研究所 竹本 憲充
(国研)土木研究所 梶田 洋規

1. はじめに

情報化施工技術は、現在様々な施工現場にて使用されているが、国土交通省では平成 25 年 3 月に新たな「情報化施工推進戦略⁽¹⁾」を策定し、その中でマシンコントロールモータグレーダとマシンコントロールブルドーザを「一般化推進技術」としてさらなる普及を進めている。マシンコントロール（以下 MC）とは、TS や GNSS などを用いて施工機械の位置を把握し、その位置における設計値（あらかじめ入力された設計データ）と作業装置（ブレードなど）との差を算出し、作業装置が設計値に添うよう自動的にリアルタイムで制御を行う技術のことであり、オペレータの負担を軽減することによる施工の効率化や高精度化などが期待されている。しかしながら、その導入効果を実現現場にて把握した例はあるが⁽²⁾、試験ピットにおける実験などにて定量的に把握した例は少なく、施工条件等を調整した基礎実験による、効果の定量的な把握が、さらなる普及を促進する上で必要とされている。

そこで本研究では、MC 施工の優位性を定量的に明らかにすることを目的とし、施工条件を同一にした 2 つの試験場にて従来施工と MC 施工を行い、施工にかかる作業時間および出来形のバラツキを比較した。対象の工種は、モータグレーダによる路盤敷き均し施工とした。

なお、本研究は土木研究所と民間企業 5 社（鹿島建設、鹿島道路、トプコンソキアポジショニングジャパン、西尾レントオール、NIPPO）による共同研究にて行った。

2. 実験概要

2.1 実験概要

幅 6m、全長 70m（直線部 45m、曲線部 25m）の路床を 2 レーン用意し、その路床上に厚さ 0.30m になるよう路盤材料（M40）をモータグレーダにて敷き均す実験を行った。モータグレーダは MC システムを搭載した機体を使用し、1 レーンは MC を使用せずに（従来施工）、2 レーンは MC を使用

して（MC 施工）施工を行った。モータグレーダの仕様を表-1 に、実験状況を図-1、2 に示す。

表-1 モータグレーダ仕様

メーカー	KOMATSU
定格出力	123kW
型式	GD655
運転質量	16555kg
ブレード幅	3.710m
全長	8.695m
全幅	2.460m
全高	3.370m



図-1 実験状況 1



図-2 実験状況 2

また実験では一般的な施工と同様に、直線部 10m ピッチ、曲線部 5m ピッチで設定した測点における仕上がり高さを計測し（水系下がりで計測）、設計高さ（基準高さ）±1cm 以内になった時点で終了とした

2.2 データ計測

実験結果として以下のデータを測定した。

- ① 施工開始から終了までにかかった時間
- ② 仕上がり高さ計測回数
- ③ 施工終了後、中央・右・左の 3 測線上 1m ピッチの仕上がり高さ（出来形）。TS にて計測（図-3）
- ④ 上記出来形計測後、図-3 に示した左 2.5m 測線上の平坦性。マカダムローラにて締固めた後、3m プロファイルメータを用いて測定（図-4）し、舗装試験法便覧「S028 舗装路面の平坦性測定方法」に基づき算出した。

2.3 オペレータ

表-2 に示す様々な経験を持った 6 名のオペレータにて実験を行った。

表-2 実験オペレータ

	年齢	業務経験年数
A さん	52	33
B さん	36	16
C さん	33	10
D さん	30	8
E さん	23	5
F さん	22	1

3. 実験結果

施工にかかった実作業時間（計測作業などを含まない、敷き均し作業のみの時間）を図-5 に、仕

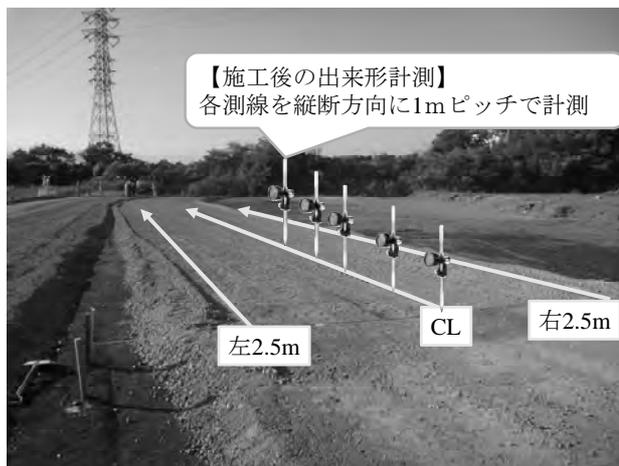


図-3 出来形計測点



図-4 平坦性測定状況

上がり高さ計測回数を図-6 に、3 測線上 1m ピッチで測定した施工終了後の出来形を目標高さからの乖離で表し、さらにそのバラツキの標準偏差を算出した結果を図-7 に、さらに図-3 に示した左 2.5m 測線上の平坦性を図-8 に示す。

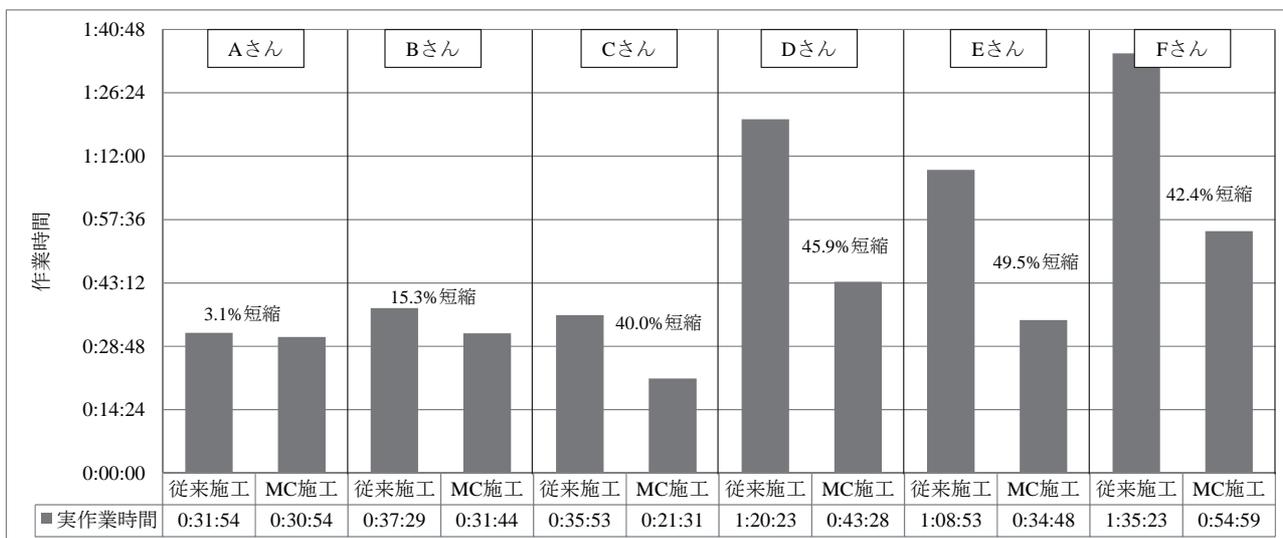


図-5 実験結果（実作業時間）

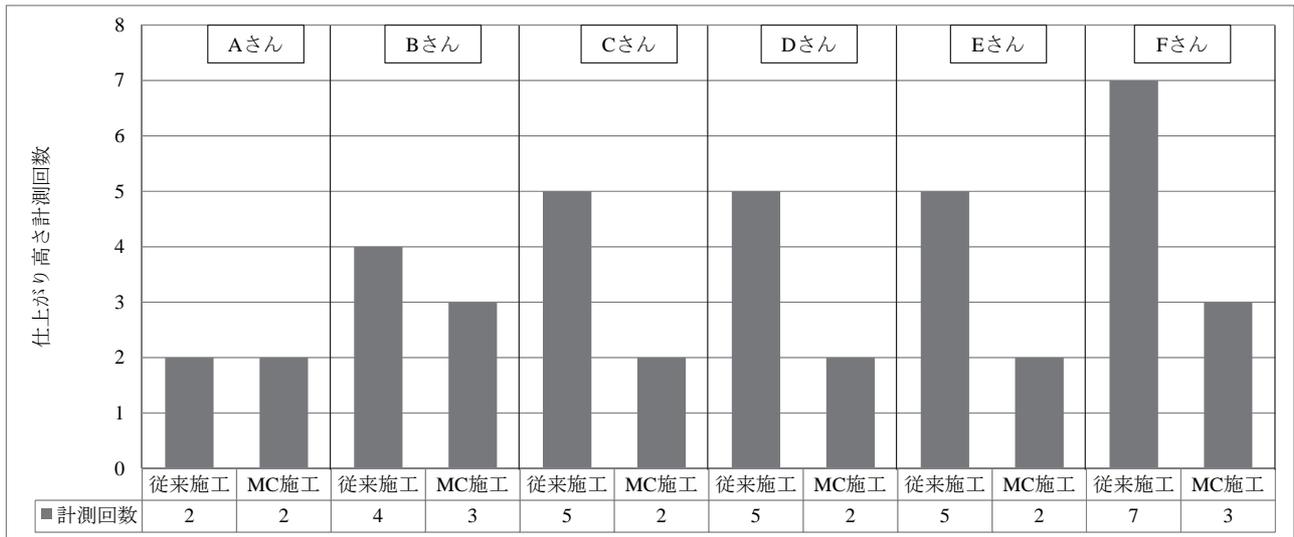


図-6 実験結果（仕上がり高さ計測回数）

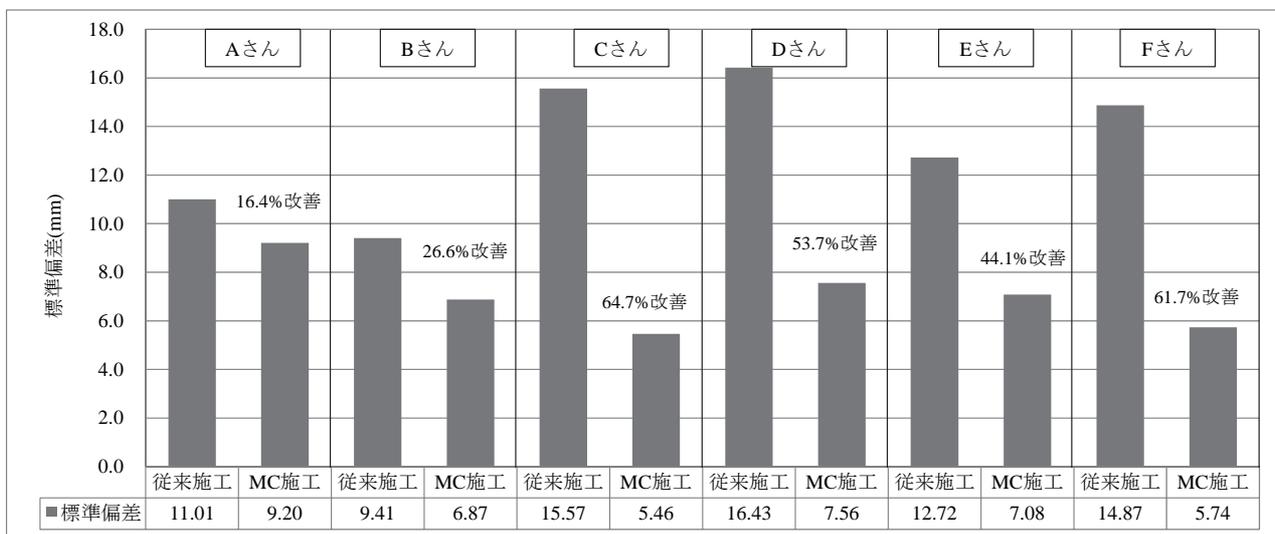


図-7 実験結果（出来形バラツキ）

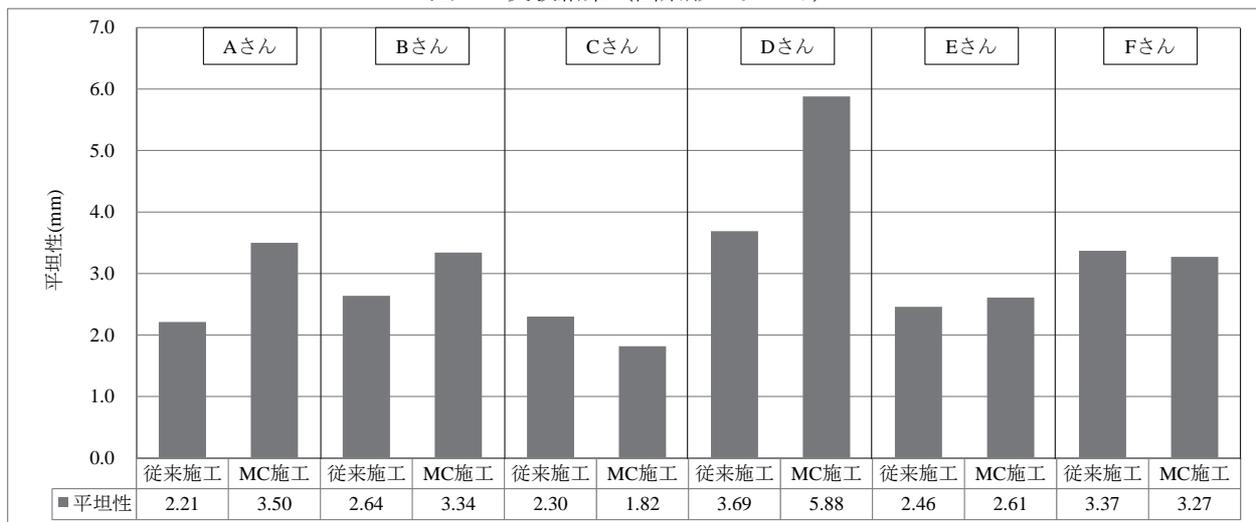


図-8 実験結果（平坦性）

図-5によると、すべてのオペレータにてMC施工を導入することにより実作業時間が短縮され、その短縮率は熟練者（経験15年以上：Aさん、B

さん）では約3～15%程度、非熟練者（経験9年未満：Dさん、Eさん、Fさん）では約40～50%程度となっており、非熟練者の方がMC施工導入

による作業時間短縮効果が高いことがわかる。さらに非熟練者に MC 施工を導入した場合、E さんは MC 施工を導入しない熟練者並みの実作業時間（約 30～40 分）で施工が可能であり、D さん F さんはそれよりやや遅い実作業時間で施工可能であることがわかる。

図-6によると、すべてのオペレータにて MC 施工を導入することにより仕上がり高さ計測回数が同等あるいは削減され、その削減回数は熟練者では 1 回程度、非熟練者では 3～4 回程度となっており、非熟練者の方が MC 施工導入による計測回数削減効果が高いことがわかる。さらに非熟練者に MC 施工を導入した場合、MC 施工を導入しない熟練者並みの計測回数（2～4 回）で施工が可能であることがわかる。

図-7によると、すべてのオペレータにて MC 施工を導入することにより目標高さに対する出来形のバラツキが改善され、その改善率は熟練者では約 16～26%程度、非熟練者では約 40～60%程度となっており、非熟練者の方が MC 施工導入によるバラツキ改善効果が高いことがわかる。さらに非熟練者に MC 施工を導入した場合、MC 施工を導入しない熟練者並みのバラツキ（標準偏差約 10mm 以内）かそれ以上で施工が可能であることがわかる。

図-8によると、平坦性はオペレータの経験、MC 施工の有無による明確な傾向はないことがわかる。また、特異なデータ（C さんの MC 施工、D さんの MC 施工）を除くと、各平坦性の値はオペレータの経験、MC 施工の有無にかかわらずほとんど同一（2～4mm）であることがわかる。

なお、オペレータ C さんは、MC 施工の社内トレーナー（社内オペレータに MC 施工を教育する）として勤務しており、通常为重機オペレータと違い、現場経験はほとんどないが MC の操縦には長けている人物である。そのような特殊な被験者であるため、実験結果も他のオペレータとは異なる傾向が出ている、従って上記検討からは除外することとした。

4. 生産性に対する効果の試算

本章では、MC 施工を導入することによる生産性（時間当たり施工土量）への効果について試算する。

図-5 より、熟練者（経験 15 年以上：A さん、B さん）、非熟練者（経験 9 年未満：D さん、E さん、F さん）の実作業時間平均を算出すると、表-3 のようになる。

表-3 実作業時間平均 (h)

	熟練者	非熟練者
従来施工	0.58	1.36
MC 施工	0.52	0.74

次に、平均仕上がり高さ計測回数を算出すると、表-4 のようになる。

表-4 平均仕上がり高さ計測回数 (回)

	熟練者	非熟練者
従来施工	3.00	5.67
MC 施工	2.50	2.33

仕上がり高さ計測 1 回にかかる時間を 10 分（1/6h）とすると、表-3、表-4 から作業時間平均が算出できる。（表-5）

表-5 作業時間平均 (h)

	熟練者	非熟練者
従来施工	1.08	2.30
MC 施工	0.94	1.13

本実験の施工土量 420.3m³（幅 6m×全長 70m×厚さ 0.30m）を表-5 の値で除することにより、熟練者、非熟練者の従来施工、MC 施工における時間・人当たりの施工土量が算出できる（表-6）。

表-6 時間・人当たりの施工土量 (m³/h・人)

	熟練者	非熟練者
従来施工	389	182
MC 施工	449	372

また、2014 年の年齢階層別建設業就業者数は図-9 のようになる⁽³⁾。モータグレーダオペレータの

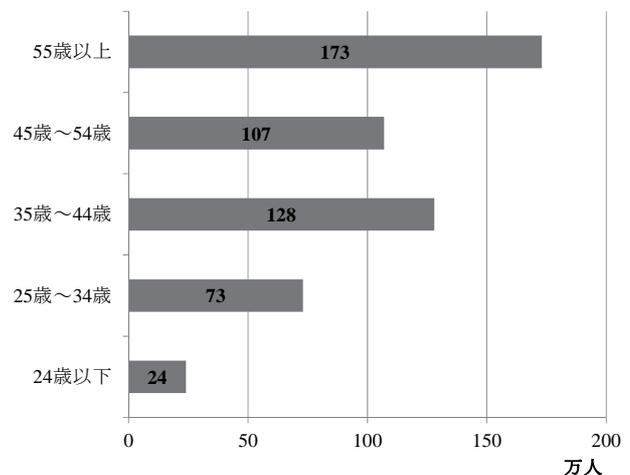


図-9 年齢階層別建設業就業者数（2014年）
（建設業ハンドブック 2015）

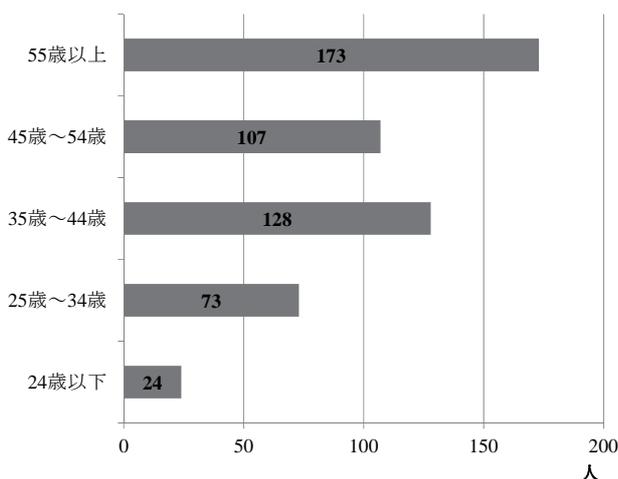


図-10 年齢階層別モータグレーダオペレータ数
(2014年・図-9より仮定)

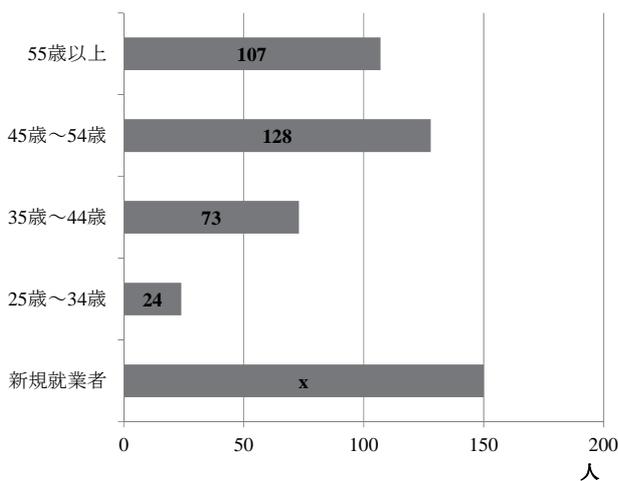
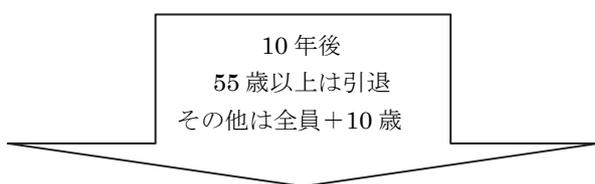


図-11 年齢階層別モータグレーダオペレータ数
(2024年・図-10より仮定)

人数および年齢階層別割合は正確にはわからないが、ここでは図-9に示した全建設業就業者の1/1万の人数であり割合は同一であると仮定する(図-10)。また年齢と実務経験は必ずしも同一ではないが、簡便のため35歳以上を熟練者、以外を非熟練者と仮定すると、図-10よりモータグレーダオペレータの熟練者は408人、非熟練者は97人となる。この人数に表-6の値を乗することにより、従来施工、MC施工によるモータグレーダ路盤敷き均し工の時間当たり全施工土量が算出できる(表-7)。

表-7 時間当たり全施工土量 (m³/h)

従来施工	1.76×10 ⁵
MC施工	2.19×10 ⁵

表-7によると、MC施工を導入することにより全施工土量は約24%向上し、モータグレーダ路盤敷き均し工にMC施工を導入することは、生産性に効果があることがわかる。

また、図-10に示した2014年の年齢階層別モータグレーダオペレータ数のうち、55歳以上の173人が10年後までにはすべて引退し、他の年齢のオペレータは10年後まで1人も辞めないと仮定すると、2024年の年齢階層別モータグレーダオペレータ数は図-11のようになる。ここで新規オペレータ数x人は、24歳以下に限らず、年齢によらない新規オペレータ数と考えることができる。上記と同様に、35歳以上を熟練者、以外を非熟練者と仮定すると、2024年における熟練者は308人、非熟練者は(24+x)人となる。そこで上記の計算とは逆に、この2024年のオペレータ数にて、表-7に示した2014年従来施工での全施工土量1.76×10⁵m³/hを達成するために必要な新規オペレータ数x人を算出すると表-8のようになる。

表-8 2024年に2014年従来施工での全施工土量を達成するために必要な新規オペレータ数(人)

従来施工	285
MC施工	77

表-8によると、10年後も2014年従来施工での全施工土量1.76×10⁵m³/hを達成するためには、従来施工のままでは新規オペレータを285人確保しなければならないのに対し、MC施工を導入した場合は、約1/4の77人確保すればよいことになる。建設産業は他産業と比べ、高齢者の割合が高くなっており、近い将来の高齢者大量退職に伴う熟練技能者不足が危険性として存在している⁽³⁾。MC施工の導入は、この将来予想されている熟練技能者不足に対しても、効果的であることがわかる。

これまで述べたように、上記試算は下記の3つの仮定のもとに行われている。

- ① モータグレーダオペレータの年齢階層別人数は建設業就業者数(図-9)の1/1万である。
- ② 年齢35歳以上を熟練者、以外を非熟練者とする
- ③ 2014年に55歳以上であるオペレータは10年後までにはすべて引退し、他の年齢のオペレータは10年後まで1人も辞めない

これらの仮定は現実と比較して正確ではないが、現実とそれほど大きく乖離はしていないと考えら

れる。従って上記の試算結果数値は必ずしも正確ではないが、MC 施工の導入が、生産性の向上、熟練技能者不足への対応に効果的であるとは言えると考えられる。

5. まとめ

モータグレーダ路盤敷き均し工において、施工条件を同一にした 2 つの試験場にて従来施工と MC 施工を行い、施工にかかる作業時間および出来形のバラツキ、平坦性を 6 人のオペレータによる実験で比較した。また作業時間結果より 2014 年と 2024 年の生産性（時間当たり施工土量）を試算した。その結果以下の点が判明した。

- (1) すべてのオペレータにて MC 施工を導入することにより作業時間の短縮、仕上がり高さ計測回数の削減、バラツキの改善が可能である。
- (2) MC 施工導入による作業時間短縮率、仕上がり高さ計測回数の削減回数、バラツキ改善率は非熟練者の方が高い。
- (3) 非熟練者に MC 施工を導入した場合、MC 施工を導入しない熟練者並みかやや遅い実作業時間、MC 施工を導入しない熟練者並みの仕上がり高さ計測回数、MC 施工を導入しない熟練者並みのバラツキで施工が可能である。
- (4) 平坦性はオペレータの経験、MC 施工の有無による明確な傾向はなく、その値も（特異なデータを除くと）ほとんど同一である。
- (5) 2014 年の生産性（時間当たり施工土量）を試算すると、MC 施工を導入することにより向上した。従って MC 施工の導入は生産性の向上に効果的である。
- (6) 10 年後の 2024 年において、2014 年従来施工での全施工土量と同量を達成するために確保しなければならない新規オペレータの人数を試算すると、MC 施工を導入すれば、従来施工のままに比べて確保しなければならない新規オペレータが少なくてよい。したがって、将来予想されている熟練技能者不足に対して、MC 施工の導入は効果的である。

モータグレーダのオペレータは、周辺環境や材料配分などを即座に分析・判断し、ブレード操作や速度調整、操舵などを行わなくてはならない。MC 施工を導入することにより「ブレードの上下操作」を自動化することが可能となり、オペレータは他の操作に専念することができる。このことが、MC 施工導入により非熟練者でも熟練者なみの効率や精度が実現できる理由ではないかと考えられる。今後さらに中間の経験を持つオペレータなど様々な条件や、オペレータの疲労度に与える影響などのデータを蓄積していきたい。

また、本実験結果では敷き均し施工直後の出来

形にはオペレータの経験、MC 施工の有無によって明確な傾向が現れたが、敷き均してから転圧を行った後の平坦性では、明確な傾向は現れなかった。これは、転圧を行うことによる高さバラツキの凝縮や、TS とプロファイルメータによる測定方法の相違などが理由として考えられる。これについても今後さらなる実験、検証を行いたい。

さらに、オペレータ C さん（MC 施工の社内トレーナー）の傾向が、他のオペレータと異なってしまった理由についても今後検証を進め、現場熟練者（A さん、B さん）と MC 施工のみの熟練者（C さん）で「最適な施工手順」に対する考え方が異なるかどうか、すなわち従来とは異なる「MC 施工用の最適施工手順」が存在するか否かについても、さらなる研究を行っていきたい。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省：情報化施工推進戦略，2013.
- (2) 相良幸雄，藤島崇，椎葉裕士，柴藤勝也：復興道路工事への情報化施工技術の活用効果=日本建設機械施工協会（情報化施工委員会復興支援 WG）の取組，建設機械，Vol. 52，No. 3，pp. 63～67，2016.
- (3) 日本建設業連合会：建設業ハンドブック 2015，2015.

17. ソイルセメント柱列壁工法における 出来形計測システムの開発

株式会社竹中工務店 ○ 濱田 幸弘 浦瀬 誠
田屋 裕司 三幸 謙一

1. はじめに

市街地で増加する大規模な地下空間を有する建物の構築では周辺環境に対する影響を抑制することや地下水対策へのコスト低減が求められ、これまでも敷地や地盤等の施工条件に沿った最適な山留め壁に関する技術が数多く開発されてきた(図-1)。しかし近年、建物の地下深さや規模が大きくなるにつれ、山留め壁の不具合による出水が工期やコストに多大な影響を与える事例が発生している。特に大規模な出水事故は復旧に労力と時間がかかると共に、周辺建物やインフラに対して甚大な影響がある事象である。このような地下工事の出水リスクを低減するためには地下工事の要となる山留め壁の品質を確実に管理し、確保することが重要である。

本技術は、山留め壁の構築においてこれまで実現されていなかった汎用機による出来形計測手法を実用化することで掘削前に不具合範囲(出来形精度不良に伴うラップ不足等)の検知が可能な画期的なものである。この技術は地下工事のリスクを大きく低下させ、安心・安全な施工の実施に大きく貢献するものである。本技術の開発について以下に報告する。

2. 開発のねらい

近年、関西圏で発生した当社施工の大規模地下工事における、山留め壁の不具合による出水事象とその概要を図-2に示す。また、図-3から当社大阪本店管轄の過去10年間のB2F以深の地下階を有する建物の施工において採用した山留め壁の工法の過半はソイルセメント柱列壁工法であることが分かる。そこで地下工事の出水リスクの低減には採用事例が多いソイルセメント柱列壁の品質確保がより効果的で重要であるといえる。

2.1 山留め壁の遮水性不良原因の追求

開発に先立って、ソイルセメント柱列壁から出水が生じたNプロジェクトでの原因の追求を行うこ

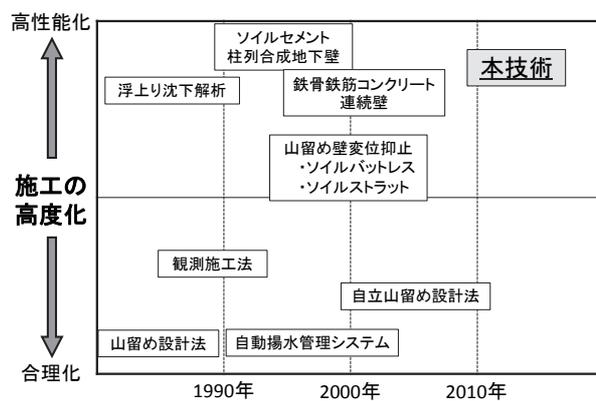
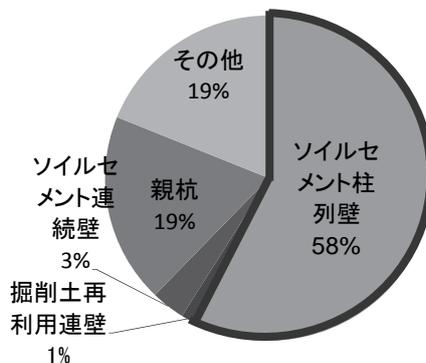


図-1 当社における本技術開発の位置づけ

項目	工法名	ソイルセメント柱列壁
プロジェクト		Nプロジェクト
断面形状		
ソイルセメントの造成方法		オーガ先端から固化液を吐出して原位置土と混合攪拌
出水状況		 山留め壁から出水 想定出水量(最大5m ³ /分)

図-2 出水事故発生事例



(当社大阪本店過去10年間B2F以上)

図-3 山留め工法種類

とで技術開発の方向性を探った。このプロジェクトではφ900@600, L≒40mの大口徑ソイルセメント柱列壁工法を採用したが, GL-35m~40mの砂礫層の遮水性確保が不十分であったことが, 掘削前の揚水試験で確認された。原因追及の手順は遮水不良範囲を推定し, 不良個所のソイル壁体の出来形や性状をコアボーリング試料により判断する方法とした。試験概要及びコアボーリング採取結果を図-4に示す。コア採取試料より遮水不良はGL-35m以深で発生しており, セメント分が少なく遮水性が低い状態であった。この結果からコアボーリング孔自体がソイル径内から外れた, または不具合部分の山留め壁は構築中にセメント分が流出したことが想定された。Nプロジェクトで想定されたソイルセメント柱列壁の遮水不良の主な原因を図-5に示す。遮水不良を引き起こす様々な原因が推定されたがコア採取した試料からは鉛直精度によるラップ不足の可能性が最も濃厚であると考えた。このようなソイル体同士のラップ不足は, 地盤条件や施工手順に関わらず大深度のソイルセメント柱列壁工法において起きうる事象であり, 解決策を見出すべき最重要の課題と考えた。

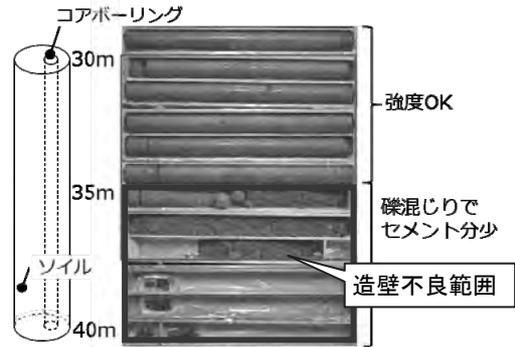


図-4 ソイルセメント柱列壁の遮水不良原因

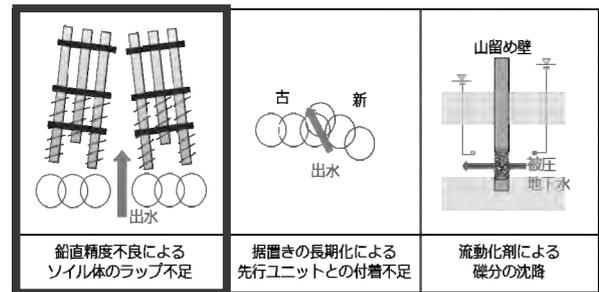


図-5 ソイルセメント柱列壁の遮水不良原因

2.2 ソイル体のラップ量計測方法の確立

ソイルセメント柱列壁からの出水事故を防止するためには, 山留め壁構築時の鉛直精度を確保する, もしくは山留め壁の出来形を確認し不具合範囲を見つけ出して対策を実施することが必要である。鉛直精度を確保する技術は施工中に様々な工夫が実施されているものの, その精度を掘削前に確認することは容易ではない。そこで必要な技術開発は山留め壁の出来形を計測し不具合範囲を確実に特定し評価することだと考えた。そのためには山留め壁構築時の鉛直精度の計測により出来形として隣り合うユニット同士のラップ量が算出できなければならない。写真-1, 2, 3に既往のソイルセメント柱列壁の施工時の鉛直精度の計測が可能な専用機の写真を示す。現在, 山留め壁の出来形計測技術は, R社とS社の2社が保有している。既存技術の特徴は差動トランス式ローラー型傾斜計を山留め機のロッド中央部に直接内蔵し有線で計測器本体と接続することで削孔時にリアルタイムで傾きを計測しながら鉛直精度とラップ量を検出するものである。高い精度かつリアルタイムで測定できる反面, 傾斜計を削孔ロッドの内部に内蔵させるためにロッド内径が汎用機の50mm程度に対して約120mmと2倍以上も大きいものである。さらに傾斜計と計測器を結ぶ電線が接続され, システムと常に連動するために山留め機本体が出来形を計測するための専用の機械となっている。この山留め壁の出来形計測がリアルタイムで可能な機械は国内に数台程度である。山留め壁出来形の



写真-1 山留め出来形計測専用機



写真-2 山留め出来形計測専用機

計測を要望する際には専売技術による高額な施工

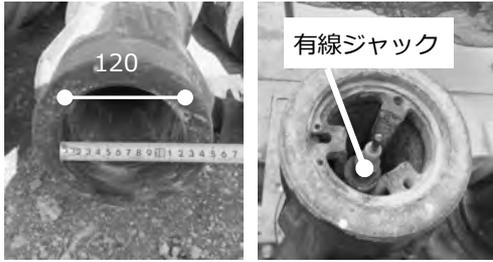


写真-3 専用機のロッド形状

費と専用機の逼迫度に縛られることになる。専用機での山留め壁の出来形計測が汎用性の高い技術となるためには機械の台数の増加が必要となる。数千万~数億円/台の投資となる為、現実的ではないのが実情である。さらに、リアルタイムで計測し、ラップ不良が発覚しても施工途中での削孔穴の修正が困難なため再削孔による対策を行っているのも事実である。このようなことから本開発の方針は山留め壁の出来形計測において汎用機で尚且つ、どこの専門会社でも容易に施工時に計測可能で、さらに現場の施工管理者が施工日毎に出来形を確認することで不具合想定範囲への止水対策と地盤状況に応じた早期の掘削工法の選択が可能なるものを目指すものとした。上記に挙げた山留め壁の出来形計測における技術開発に際して、以下の方針を設定し取組んだ。

- ① 汎用機に簡易に設置可能な計測器の開発と工事手順の確立。
- ② PC上で容易に見える化できるデータ処理システムの開発。

2.3 精度確認と解析技術の確立

ソイルセメント柱列壁の計測値として必要な位置や傾斜、回転等の測定が可能となる機器はGPSや角度計、傾斜計、加速度計等である。計測器に求められる性能は山留め機への取付けを考慮するとコンパクトなサイズ且つ、無線又は接続のための線がないことである。また、地中や水中での

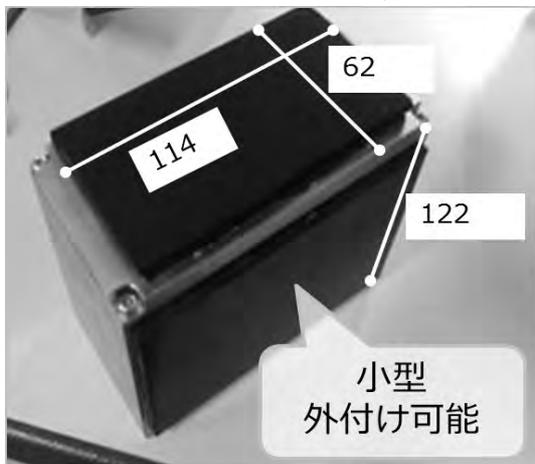


写真-4 ジャイロ計測器

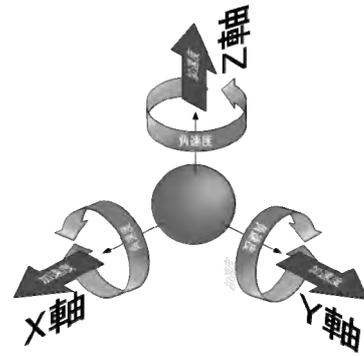


図-6 ジャイロ計測器概念図

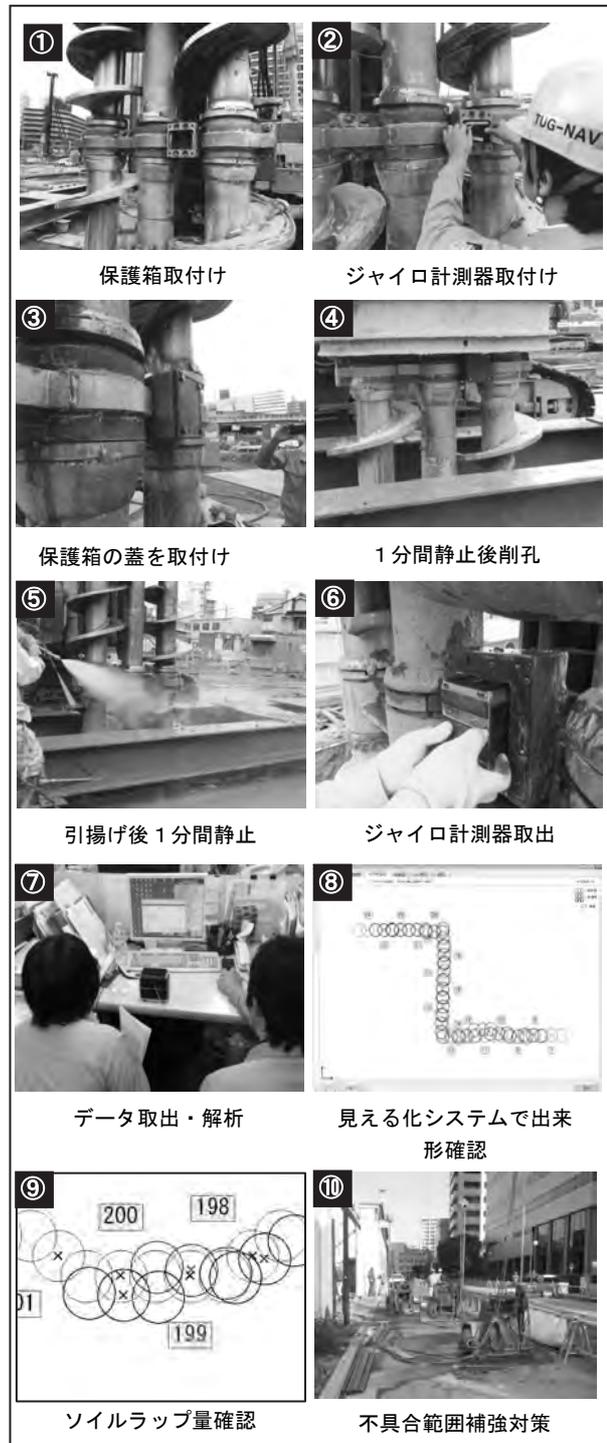


図-7 山留め壁出来高計測フロー

計測のための耐久性が確保される加工処理ができること、数cm単位での精度で検出できることである。コストや精度に対する信頼性、汎用性を検討した結果、全ての面で優位性を確認したメモリー機能を有するジャイロ計測器（写真-4）を用いることとした。ジャイロ計測器は加速度や角速度を累積しながら計測することにより位置情報を記録できる機器（図-6）であり、携帯やデジカメの手振れ補正さらには乗り物の姿勢制御などに使われていて信頼性も高い。

2.4 効果の確認及び検証

2.4.1 山留め壁出来形計測システム概要

計測から出来形確認までの作業フローを図-7に示す。①ジャイロ計測器を山留め機の多軸ロッドの連結バンドに固定した②保護箱の中に入れる。③水密性を確保するためにゴムパッキンを挟みながら保護箱の蓋を閉め、④1分間の静止をユニット毎に行い削孔する。1分間の静止の目的はジャイロ計測器が始動後に受ける旋回や振動及び移動に関する計測値（ドリフト量）を削孔開始時刻の特定により、不要なデータとして自動的に排除し精度を高めることである。⑤山留め壁の構築は通常の施工ステップで行い、最後の引き上げ時に再度補正のための1分間の静止を行う。⑥施工終了後にジャイロ計測機を保護箱から取り出しデータを吸い上げ見える化システムでソイルの出来形を確認し、遮水性の確保を判断する。計測精度は挿入式傾斜計との実測値を検証し約 1/400 の精度であることを確認している。

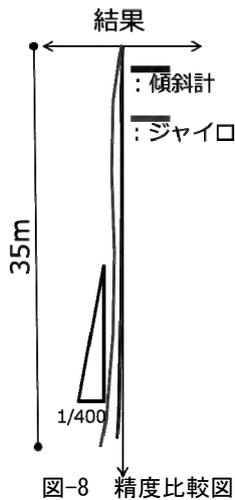


図-8 精度比較図

2.4.2 山留め壁出来形見える化システム概要

見える化システムはジャイロ計測器で計測したデータをCSV形式に変換してデータを読み込み図面やグラフとしてアウトプットできるものである。作業所のPCの画面上で削孔深度毎の出来形が設計図との比較で容易に確認できる。(図-9) ⑫において着色されている部分は計測が実施されている部分を示している。出来高確認画面⑬は山留全体図の一部分を拡大したものであり、この水平断面図からソイル体が深度毎どれだけずれているのかの確認が可能である。また、⑭のように鉛直方向に関してXY軸と回転角としてのずれも併せて確認できるものとなっている。さらに、要点であるラップ量は制限値を設定することで、簡易な検索

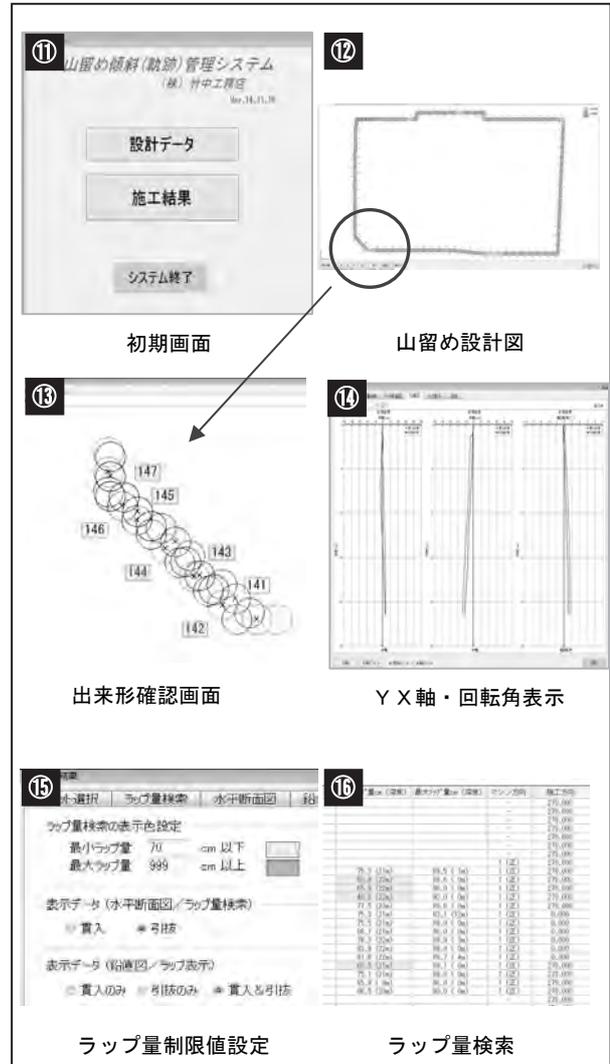


図-9 見える化システム概要

で値を超えているものがマーキングにより一目で確認できる。(⑯) この見える化システムを使用し、Sプロジェクトで全ユニットの計測を行いソイルラップ量の状況を確認した。揚水試験の結果は、計測したソイルの出来形で想定される箇所と同一の場所で遮水不良の可能性を示し、本システムの有効性を証明することができた。

3. 結論

山留め壁の出来形を汎用の山留め機で計測する技術を開発し、実用化および特許の取得を行った。また、併せて計測結果からソイルユニットのオーバーラップの状態を見える化するソフトを開発し、不具合範囲の特定を速やかにして、対策の可否判断が行えるものとした。実施工においてもソイルの出来形確認から不具合範囲を特定し掘削前や掘削時の対策が確実に実行できることを確認している。本技術は、大深度ソイルセメント柱列壁を施工する複数の物件で今後採用が予定されている。また、これからの地下工事において、安心安全を増すことに寄与するものである。

19. ICT 施工技術を活用した地盤整正機による路盤工の紹介

－ 新機械編成による更なる効率化 －

大成ロテック株式会社 ○横山 真吾
○田中 純
○高橋 勁太

1. はじめに

路盤の仕上げ作業には、ブルドーザやモータグレーダを用いるのが一般的である。しかし、これらの運転作業には、熟練の技術が必要とされる。昨今、熟練オペレータの高齢化や建設工事従事者の減少などが課題となっており、これらの課題への対応策として、ICT 技術を活用したマシンコントロール技術が積極的に導入されている。

それらの背景を踏まえ、大成ロテック株式会社では、路盤工の仕上げ作業に着目し、平成 22 年より、ブルドーザやモータグレーダに代わる ICT 技術を活用した地盤整正機を導入し、実績を上げている。

本稿では、地盤整正機による施工事例と、地盤整正機の問題点を整理し、更なる施工効率の向上を目指した新機械編成による路盤工の施工事例を紹介するものである。

2. 地盤整正機による施工事例

2.1 地盤整正機の概要

2.1.1 機械概要

使用する地盤整正機は、米国 GOMACO 社製の「トリマー9000」である。

地盤整正機は、通常のブルドーザなどと同様の排土板に加え、専用の切削ビットによるトリミング機構（鋤取り）を特徴とする機械である。

地盤整正機は、①エンジン、油圧装置、履带式走行装置を備えた「ベースマシン」、②トリミング装置を備えた「トリマーヘッド」、③材料排出用の「ベルトコンベア」を装備している。

施工方法は、予め高めに敷均し、転圧を行った地盤を、ワンパスにてトリミングし、余剰材料をベルトコンベアを介して、ダンプトラックに排出する。その後、転圧ローラにて再度転圧を行う手順となる。

地盤整正機の全景を写真-1 に、主要諸元を表-1、機械構成図を図-1 に示す。



写真-1 地盤整正機全景

表-1 地盤整正機主要諸元

名称	9000トリマー
全高(運搬時)	3,000mm
全幅	5,060mm
全長	13,720mm
総重量	24,600 kg
施工幅	4,470mm

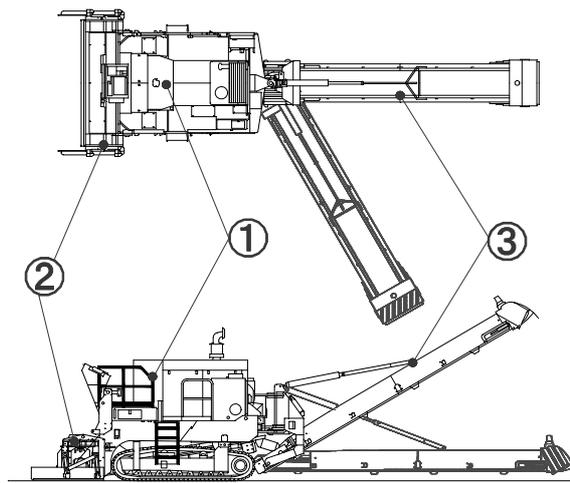


図-1 機械構成図

2.1.2 制御方法

地盤整正機の制御には、ブルドーザ等と同様の ICT 技術を採用して施工を実施する。ICT 技術

は、①GNSS(Global Navigation Satellite System)とレーザー技術を融合した「高精度GNSSシステム」もしくは、②自動追尾式トータルステーション(以下、TS)を用いた制御方式を採用する。また、併用して横断スロープセンサおよび超音波式グレードセンサを使用する。

自動追尾式TSによる施工概念図を図-2、施工状況写真を写真-2に示す。

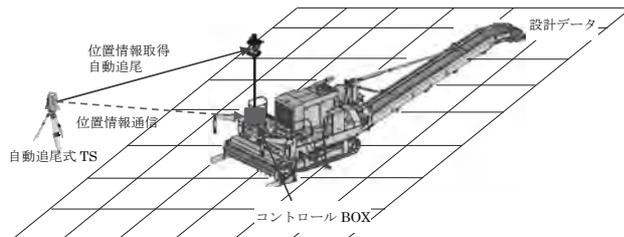


図-2 自動追尾式 TS による施工概念図



写真-2 施工状況

2.2 施工事例

大規模駐車場における地盤整正機の施工事例およびその施工精度、施工効率の検証結果を以下に示す。

工事概要を表-2に示す。

表-2 工事概要

施工期間	2010年6月～7月
施工数量	約 10,900 m ²
施工厚	150mm
使用材料	RC-40

2.2.1 地盤整正機を用いた機械編成

当該現場での機械編成を図-3に示す。

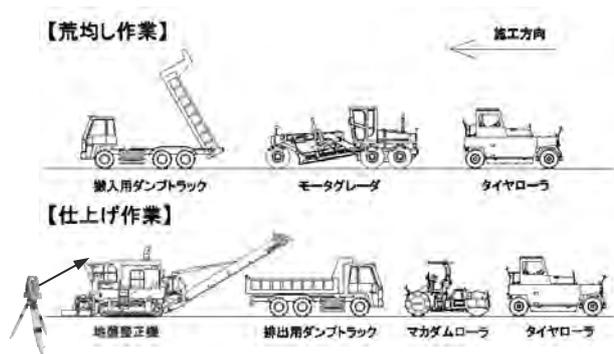


図-3 機械編成図

図-3に示す通り、地盤整正機での施工方法では、事前にモータグレーダ等の敷均し機械を使用し、丁張やICT機器を使用して検出した高さを目安に、予め高めに仕上げる。その後、自動追尾式TSにより制御された路盤整正機を使用してトリミングを行い、余剰材料をダンプトラックへ排出する機械編成となる。

トリミング状況写真を写真-3に示す。



写真-3 トリミング状況

2.2.2 施工結果

地盤整正機での施工結果を、①施工精度②施工効率に関して評価した。

① 施工精度

施工精度は、設計高さと同圧後の仕上がり高さとの誤差を評価した。

施工精度の比較を表-3に、地盤整正機および汎用機(自動追尾式TS制御によるモータグレーダ施工)による施工精度のヒストグラムを図-4および図-5に示す。

表-3に示す通り地盤整正機での施工では、誤差の頻度が±10mm以内に92%、±15mm以内に100%となるのに対し、モータグレーダでは、

±10mm 以内に 96%、15mm 以内に 100%となる結果となった。また、標準偏差においても、地盤整正機では、4.88mm、モータグレーダでは 4.58mm とほぼ同等の結果となった。

表-3 施工精度比較

項目	従来工法 モータグレーダ	地盤整正機 9000トリマー
誤差の 頻度 (%)	±5mm	70
	±10mm	96
	±15mm	100
	±20mm	100
標準偏差	4.58	4.88
データ数	75	390

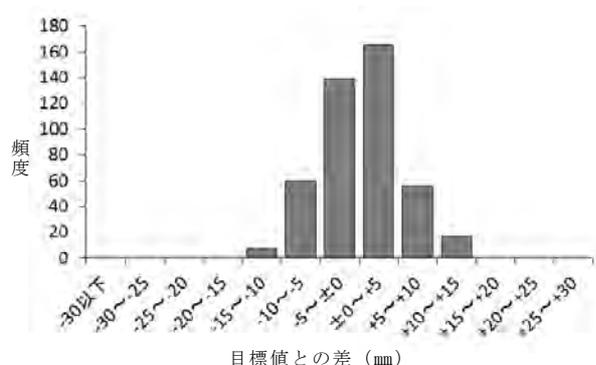


図-4 地盤整正機の施工精度

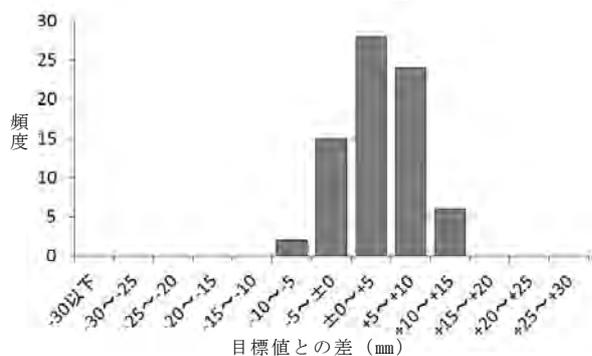


図-5 モータグレーダでの施工精度

② 施工効率

地盤整正機および汎用機械による路盤工の 1日当たりの平均施工数量比較を表-4 に示す。

地盤整正機を導入した結果、モータグレーダでの施工に対して、約 1.8 倍の施工効率の向上が得られた。

表-4 施工数量比較

項目	従来工法 モータグレーダ	地盤整正機 9000トリマー
施工面積	6,000 m ²	10,900 m ²
施工日数	3 日	3 日
1日当たり平均 施工数量	2,000 m ² /日※	3,630 m ² /日※
施工効率向上 効果	1.8 倍	

※ 施工数量は、導入現場での社内実績値

3. 本機械編成の課題

2.2 施工事例で示す導入事例においては、同等の施工精度、また施工効率の向上が確認できたが、課題も残されている。

地盤整正機の特徴は、2.1.1 機械編成に示す通り、計画高さより少し高めに敷均し、転圧した路盤をトリミングをし、ワンパスで仕上げ作業を行うことである。

そのため、トリミング前の路盤が設計高さより低い場合、仕上がり面が盛り仕上げとなり、ローラの転圧減の違いにより、出来形不足等の問題が生じる事例もある。

また、トリミング前の路盤が設計高さより高すぎる場合、排出する材料が過多となり、作業効率が大きく低下する。

表-5 にトリミング前の路盤高さによる 1 日当たりの施工数量の比較を示す。

表-5 トリミング厚ごとの施工数量比較

トリミング厚	0~8cm	8~13cm
最大施工数量	4,100 m ² /日	2,800 m ² /日
最小施工数量	3,200 m ² /日	1,700 m ² /日
平均施工数量	3,630 m ² /日	2,570 m ² /日
施工効率	0.7 倍	

本機械編成による事前の敷均し作業では、モータグレーダ等の敷均し機械を使用するが、粗均し高さの目安は、丁張や ICT 機器を使用して検測を行う方法を用いている。しかし、丁張設置では、無駄な作業の追加、ICT 機器による検測では、安全面の問題等の問題が課題となっている。

以下に、従来機械編成での問題点をまとめる。

- ① 事前の粗均し作業の精度が、出来形および施工効率に大きな影響を与える。
- ② 粗均し作業において、中精度、かつ高効率な機械施工が必要である。

4. 新たな機械編成による施工

4.1 新技術の採用

3.本機械編成の課題を解決するための粗均し機械に求められる条件は、以下のとおりである。

- ① 精度に mm 単位は必要としない
- ② 丁張、検測を必要としない高さ制御
- ③ 日々の事前準備が不要

そこで、上記課題を解決するため、従来のマシンコントロール技術にジャイロ技術を融合したGNSS 制御による高速施工型マシンコントロール技術を粗均し用のブルドーザに搭載し導入を試みた。

使用する高速施工型マシンコントロール技術は、トプコン社製の「3DMC²(3DMC スクエア)」である。

4.1.1 機械概要

搭載する重機制御機器①3DMC² および、位置情報測定装置②VRS-RTK-GNSS (N-trip)の概要を以下に示す。

システム概念図を図-6 に示す。

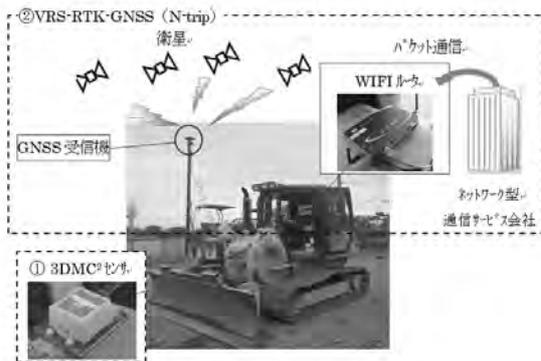


図6 システム概念図

① 3DMC²システム

3DMC²システムは、センサから得られたロール、ピッチ、ヨーの加速度と、GNSS から得られる(X, Y, Z)の測位データを結合させることで、従来のシステムに比べ安定した排土板の制御を可能とし、高速施工においても高品質な施工を実現するシステムである。センサ概念図を図-7 に示す。

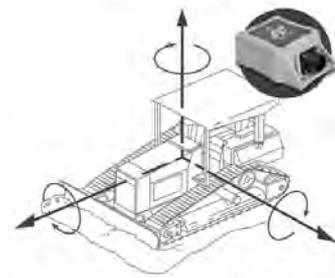


図-7 センサ概念図

② VRS-RTK-GNSS (N-trip 方式)

マシンコントロール技術を活用するには、正確な位置情報を取得する必要がある。従来の固定局を設置した RTK-GNSS 方式では、日々の施工前準備作業として固定局を設置する必要があった。

それに対し、VRS-RTK-GNSS 方式では、重機の電源を入れることでネットワーク環境が確立し、位置情報補正データを受信して正確な位置情報を取得することが可能となる。

4.1.2 施工事例

3DMC²+VRS-RTK-GNSS システムをブルドーザに導入し、精度の検証を行った事例を以下に示す。工事概要を表-6 に示す。

表-6 施工概要

施工期間	2014年7月
施工数量	約 14,000 m ²
施工厚	200mm
使用材料	セメント安定処理路盤

施工精度の検証は、上記システムによるブルドーザを使用して路盤を敷均し、ローラによる転圧後の仕上がり高さ为目标値と比較した。施工精度を表-7、施工精度のヒストグラムを図-8、施工速度比較を表-8 に示す。

表-7 施工精度

項目	施工データ	
誤差の頻度 (%)	±10mm	43.4
	±20mm	72.7
	±30mm	93.3
	±40mm	100
標準偏差	17.2	
データ数	184	

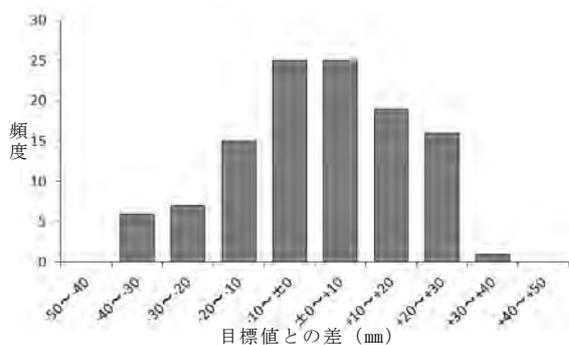


図-8 施工結果

表-8 施工速度比較

	従来技術	3DMC ² システム
施工速度 (km/h)	1速	2速
	3.4	5.6(1.64倍)

※カタログ値より

表-7、図-8 より、±30mm 以内に 93%、±40mm 以内に 100%となる結果となった。また、表-8 に示すとおり重機の施工速度は、従来のマシンコントロール技術での粗均し作業が、1速であったのに対し、新技術を採用することで約 1.64倍の速度である 2速での施工が可能となった。

4.2 新機械編成による路盤工

4.2.1 機械編成

4.1 に示すブルドーザを地盤整形機と組み合わせた新たな機械編成図を図-9 に示す。

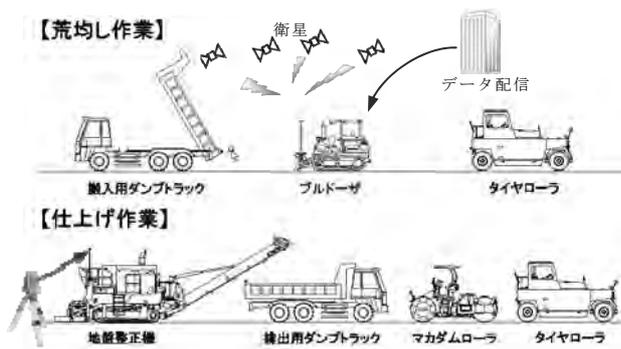


図-9 機械編成図

新機械編成による施工手順を以下に示す。

- ① 3DMC²+VRS-RTK-GNSS 技術を搭載したブルドーザを使用し、路盤材を敷均し、転圧を行う。仕上がりの目標値を、設計高さ+3~4cm とすることで、設計高さより 0~7cm 高い路盤を形成する。

- ② 地盤整形機を使用して、路盤をトリミングし、仕上げ転圧を行う。

4.2.2 施工事例

新機械編成による施工事例を表-9 に示す。

表-9 工事概要

施工期間	2016年3月~4月
施工数量	約 67,400 m ²
施工厚	200mm
使用材料	RC-40

4.2.3 施工結果

新機械編成での施工結果を、①施工精度②施工効率に関して評価した。

①施工精度

施工精度は、設計高さと転圧後の仕上がり高さとの誤差により評価した。

新機械導入前後の精度比較を表-10、施工精度のヒストグラムを図-10 に示す。

表-10 精度比較

項目	9000トリマー ブルドーザ	9000トリマー 3DMC ² ブルドーザ*
誤差の 頻度 (%)	±5mm	70
	±10mm	96
	±15mm	100
	±20mm	100
標準偏差	4.88	3.58
データ数	390	44

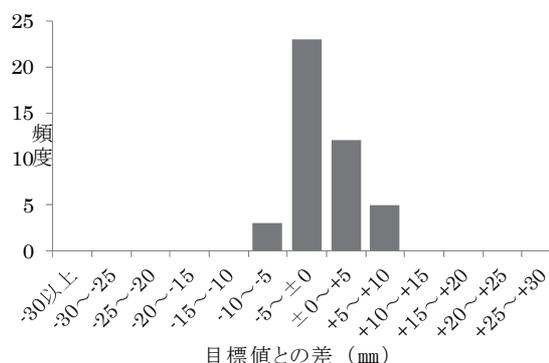


図-10 施工結果

表-10 に示す通り新機械編成での標準偏差は 3.58mm、従来機械編成では 4.88mm であり、安定した量を鋤取することで施工精度向上の効果が確認できた。

②施工効率

新機械編成と従来機械編成での施工量の比較を表-11 に示す。

表-11 施工量比較

項目	9000 トリマー ブルドーザ	9000 トリマー 3DMC ² フルト ² サー ²
施工面積	10,900 m ²	67,400 m ²
施工日数	3 日	13 日
平均施工数量	3,630 m ² /日※	5,180 m ² /日※
施工効率向上効果	1.42 倍	

※ 施工数量は、導入現場での社内実績値

表-11 に示す通り、従来機械編成による施工では 3,630 m²であったのに対し、新機械編成による施工では 5,180 m²と約 1.42 倍の施工効率の増加が確認できた。

5. 考察

地盤整正機と 3DMC²+VRS-RTK-GNSS 技術を搭載したブルドーザによる新たな機械編成を構築することで確認できたことを以下にまとめる。

- ① 地盤整正機施工前の路盤を、適切な高さに仕上げる事が可能となり、施工効率の向上が確認できた。
- ② 粗均し作業時の検測作業員が不要となることで安全性の向上が確認できた。
- ③ 丁張不要、事前準備不要による省力化が確認できた。

導入現場の事例より、上記 3 点の向上が確認できたが、施工効率に関しては、碎石の搬入状況等に大きく左右される。そのため、当該機械編成の導入は、地盤整正機による新機械編成の効果が得られる条件での施工が重要であり、従来施工技術と並行して導入を検討していく必要がある。

6. おわりに

ICT 技術の発達、建設業界において急速に発達しており、今後も I-Construction をはじめ、

ますますの発展が期待される。

今後も、ICT 技術を積極的に取り入れ、工事現場の省力化、出来形の向上を目指していく所存である。

20. i-Construction 実施プロセスにむけた「カイゼン」への期待

ー ICT 活用工事における無人航空機 UAV 活用の効果と「カイゼン」案 ー

株式会社 大林組
株式会社 大林組

○ 杉浦 伸哉
田島 僚

1. はじめに

国土交通省が発表した施策である i-Construction (図-1) が発表されて半年か経過した。実際の ICT 活用工事を進めるにあたり、従来の基準類見直しもあり、実施にむけた 15 の基準 (図-2) が策定された。



図-1 ICT 技術の全面的な活用(土木)の実施内容

このような迅速な取組は従来の国の動きではあまり考えられない動きであり、国の実施に向けた意気込みを感じる。

その ICT 活用工事の推進にあたり、本論文では、この 15 の基準の中で、施工会社として非常に気になるまた重要な「出来形検査への適用」部分について、基準にそった実施において、どの部分を「カイゼン」すべきかを施工現場における実際のデータをまとめたので報告する。

	名称	新設	改訂	本学会標準(凡用)
新基準	1 UAVを用いた3次元測量マニュアル(案)	○		
	2 電子納品基準(土木及び設計)		○	
	3 3次元設計データ交換標準(測量用フォーマットを含む)	○		
	4 ICTの全面的な活用(土木)の推進に関する実施方針	○		
	5 土木工事施工管理標準(案)(出来形管理基準及び検査)		○	
	6 土木工事施工管理標準(案)(施工管理データによる出来形管理標準(案)を含む)	○	○	
	7 土木工事施工管理標準(案) 施工管理標準(案) 出来形管理標準(案)	○		
	8 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理標準(土木編)(案)	○		
	9 レーザースキャナーを用いた出来形管理標準(土木編)(案)	○		
	10 地方整備局土木工事管理技術標準(案)		○	
	11 建設部分検査技術標準(案)及び併用規		○	
	12 部分仕における出来形管理方法(案)		○	
	13 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理の監督・検査標準(土木編)(案)	○		
	14 レーザースキャナーを用いた出来形管理の監督・検査標準(土木編)(案)	○		
	15 工事現場検定標準の適用について		○	
種別標準	記号換算標準	○		

図-2 新たに導入する 15 の新基準及び積算基準

2. 15 基準の内の空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理基準要領(案)について

当社ではすでにこの 15 の基準が出る前から、施工現場における面的管理の 1 つとして出来高数量を把握するために、UAV を活用し、SfM 技術を活用してきた。そもそもこの出来高管理の目的は、従来のダンプトラック台数における搬出・搬入の土量管理を行うだけでなく、「出来形」も含め、出来高としてのリアルタイム数量を精度良く、迅速に把握することが目的であった。

その目的を実施する方法として、当社では UAV による出来高計測を行ってきたが、実施してきた UAV の高さ方向の計測については、土量管理における誤差を許容した範囲での利用を考えており、±5 cm 以下に納めることでもすでに運用していた。

しかしながら、今回の 15 の基準のうち、特に出来形計測に関する「空中写真計測(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土木編)(案)」については、実現場での対応が難しいと思われる内容が記載されていた。

そもそもこれらの新基準は ICT ツールを活用し、施工現場における生産性向上を目的として導入されるはずであるが、この基準の中に書かれている、UAV に搭載するカメラの仕様として、計測性能については地上画素寸法が 1cm/画素以内との記述や、

進行方向の写真ラップ率が90%以上という「仕様規定」(図-3)が果たして実現場において作業性も考慮した状況において生産性向上に寄与するか否かを判断する必要があると感じた。

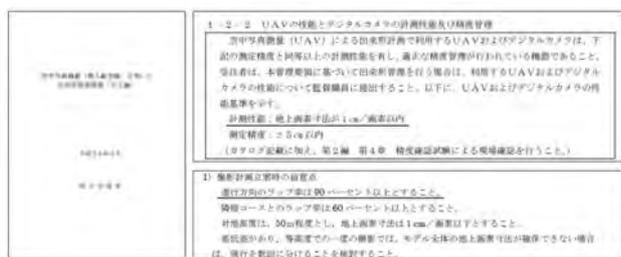


図-3 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土木編)(案)抜粋

本論文は、この部分の見極めとして、「地上解像度」と「ラップ率」に着眼し、「検証点」における現場での測量データと SfM による解析により得られたデータを比較検証するとともに、生産性向上をはかりながら、精度を担保する組み合わせを検証した。

なお、検証にあたっての構成は以下の通りである。

- UAV: エンルート QC730 (写真-1)
- 搭載デジカメ: SONY α 6000
- 搭載レンズ: 単焦点 16mm 及び 30mm



写真-1 UAV: エンルート QC730

3. 地上画素寸法の違いについて

従来の当社における「出来高」「出来形」計測を行うに当たり実施してきた地上解像度は「地上画素寸法が2cm/画素」である。

地上画素寸法の考え方は図-4 のような考えから計算で求める。

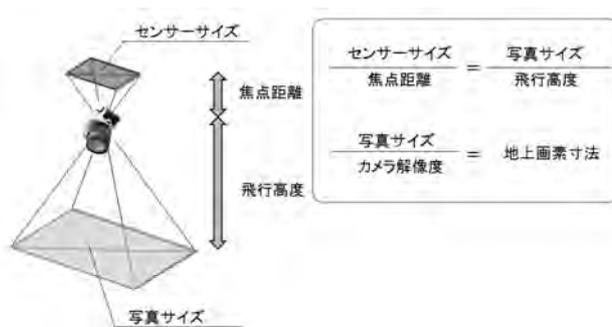


図-4 地上画素寸法の考え方

この図-4 からわかる通り、地上画素寸法に起因するのは飛行高度であり、搭載カメラのレンズ仕様と高さの関係から地上画素寸法は求められる。(表-1)

表-1 飛行高度による地上画素寸法

カメラ名	α6000	
センサーサイズ	23.5mm	15.6mm
解像度	6000	4000
焦点距離	30mm	

高度(m)	撮影幅(m)	撮影高さ(m)	地上画素寸法(横:mm)	地上画素寸法(縦:mm)
50	39.2	26.0	6.5	6.5
55	43.1	28.6	7.2	7.2
60	47.0	31.2	7.8	7.8
65	50.9	33.8	8.5	8.5
70	54.8	36.4	9.1	9.1
75	58.8	39.0	9.8	9.8
80	62.7	41.6	10.4	10.4
85	66.6	44.2	11.1	11.1
90	70.5	46.8	11.8	11.8
95	74.4	49.4	12.4	12.4
100	78.3	52.0	13.1	13.1

地上画素寸法が解析データに与える影響はどうかという観点で検証していなかったのが、今回の基準提示を機に、地上画素寸法における違いが実測データと比べてどのくらい誤差を生じるのかについて以下の内容で検証した。

3-1 地上解像度の違いにおける施工効率の変化

表-2 のように、地上画素寸法として1cmから4cmまでの状況を構築し、比較検討を行った。

表-2 地上画素寸法による比較

	飛行高度	焦点距離	地上画素寸法	ラップ率
i-Con対応	60m	30mm	1cm	90-60%
実施内容1	60m	16mm	2cm	90-60%
実施内容2	85m	16mm	3cm	90-60%
実施内容3	135m	16mm	4cm	90-60%

3-2 精度検証による効果比較

これらの撮影方法により SfM による写真解析結果を基に、精度検証の為の場所を以下の場所において実施した。特に写真解析においては誤差が大きく出やすい法面部を含め 2 カ所で比較検討を行った。(写真-2)



写真-2 検証点場所

その結果、検証点すべてにおいて、実測との誤差が±5cm の中に収まっていることが確認できた。今回策定された、15 基準の中において、出来形計測の許容値については、道路土工では±5cm という範囲であれば、合格となっているため、十分この許容値に入っていることが証明された。(表-3)

表-3 検証点精度比較(地上画素寸法)

検証点(平坦部)精度比較					
項目	X	Y	Z	誤差	許容値
I-Con	-	-	-	-	-
地上解像度1cm	-	-	-	-0.015	-0.039
現場実測	86598.931	-82160.539	50.473	-	-
地上解像度2cm	86598.964	-82160.515	50.46	0.033	-0.013
地上解像度3cm	86598.942	-82160.545	50.47	-0.011	0.003
地上解像度4cm	86598.904	-82160.475	50.51	0.027	-0.037
検証点(法面部)精度比較					
項目	X	Y	Z	誤差	許容値
I-Con	-	-	-	-	-
地上解像度1cm	-	-	-	-	-
現場実測	86615.259	-82119.09	50.43	-	-
地上解像度2cm	86615.274	-82119.064	50.45	0.015	0.020
地上解像度3cm	86615.249	-82119.073	50.435	-0.010	-0.005
地上解像度4cm	86615.3	-82119.123	50.454	-0.041	-0.024

4. 進行方向ラップ率の違いがもたらす作業性について

地上画素寸法がデータ解析において特段問題になることがないことが証明されたが、次は「進行方向ラップ率」についての違いが解析においてどの程度の影響があるのかを検証した。

比較対象としては従来の当社実施方法である地上画素寸法 2cm と今回の出来形基準で規定された地上画素寸法 1cm とを比較した。

4-1 進行方向ラップ率の違いによる施工効率の変化

表-4 を観ていただければ明らかであるが、当社従来方法と比べ、地上画素寸法やラップ率が少し違うだけでもこのような大きな施工効率につながる事がわかっている。

表-4 施工効率比較

フライト比較								
	飛行高度	焦点距離	地上解像度	ラップ率	飛行速度	飛行時間	作業時間	写真枚数
大林標準	60m	16mm	2cm	80-60%	5m/s	約3分	約10分	約160枚
I-Con対応	60m	30mm	1cm	90-60%	1m/s	約30分	約90分	約1000枚
解析比較								
	1枚あたりの面積	解析時間	法面部の解析	全解析				
大林標準	約2.5ha	0.5h	0.5h	0.2h				1.2h
I-Con対応	約2.5ha	4.5h	2h	4.5h				11.0h

よって、次の検証としては、地上画素寸法が 1cm と 2cm のそれぞれに対し、進行方向ラップ率を 70%~90% で実測と比べてどの程度の誤差があるかを検証した。

4-2 ラップ率の違いによる実測比較

地上画素寸法とラップ率の違いを変えたものを表-5 で示す。

表-5 地上画素寸法とラップ率比較

(地上画素寸法2cmの場合)

	飛行高度	焦点距離	地上解像度	ラップ率
実施内容1	60m	16mm	2cm	90-60
実施内容2	60m	16mm	2cm	80-60
実施内容3	60m	16mm	2cm	70-60

(地上画素寸法1cmの場合)

	飛行高度	焦点距離	地上解像度	ラップ率
★I-Con対応	60m	30mm	1cm	90-60
実施内容2	60m	30mm	1cm	80-60
実施内容3	60m	30mm	1cm	70-60

この組み合わせで検証点における高さ比較をしたのが次の表-6、7である。

表-6 検証点精度比較(ラップ率)地上画素寸法 2cm

検証点 平坦部 精度比較(地上画素寸法2cm)					
項目	X	Y	Z	誤差	許容値
現場実測	86598.931	-82160.539	50.473	-	-
実施内容1 (90%)	86598.964	-82160.515	50.46	0.033	-0.013
実施内容2 (80%)	86598.934	-82160.526	50.461	-0.003	0.012
実施内容3 (70%)	86598.912	-82160.529	50.478	0.019	-0.005
検証点 法面部 精度比較(地上画素寸法2cm)					
項目	X	Y	Z	誤差	許容値
現場実測	86615.259	-82119.09	50.43	-	-
実施内容1 (90%)	86615.274	-82119.064	50.45	0.015	0.020
実施内容2 (80%)	86615.298	-82119.073	50.456	-0.039	-0.026
実施内容3 (70%)	86615.243	-82119.068	50.456	0.016	-0.026

表-7 検証点精度比較(ラップ率)地上画素寸法 1cm

検証点 平坦部 精度比較(地上画素寸法1cm)					
項目	X	Y	Z	誤差	許容値
I-Con (前回実測90%)	-	-	-	-	-
現場実測	86598.931	-82160.539	50.473	-	-
実施内容1 (80%)	86598.922	-82160.542	50.471	0.009	0.002
実施内容2 (70%)	86598.961	-82160.558	50.540	-0.030	-0.067
検証点 法面部 精度比較(地上画素寸法1cm)					
項目	X	Y	Z	誤差	許容値
I-Con (前回実測90%)	-	-	-	-	-
現場実測	86615.259	-82119.09	50.43	-	-
実施内容1 (80%)	86615.246	-82119.082	50.449	0.013	-0.019
実施内容2 (70%)	86615.252	-82119.104	50.464	0.007	-0.034

結果としては、地上画素寸法 1cm で進行方向ラップ率が 70%の場合に平坦部の誤差許容値である $\pm 5\text{cm}$ を超える点が出た。その後、これが「点」としてだけの誤差なのか、周囲の面としても同じような誤差が生じるのかを確認するため、図-5 のように同じ場所を 3D レーザスキャナで計測したものと面的に比較検討した。

その結果、やはり地上画素寸法 1cm で進行方向ラップ率が 70%の場合には、面的にも平坦部の許容誤差 $\pm 5\text{cm}$ を超えるエリアがあることがわかった。(図-5)

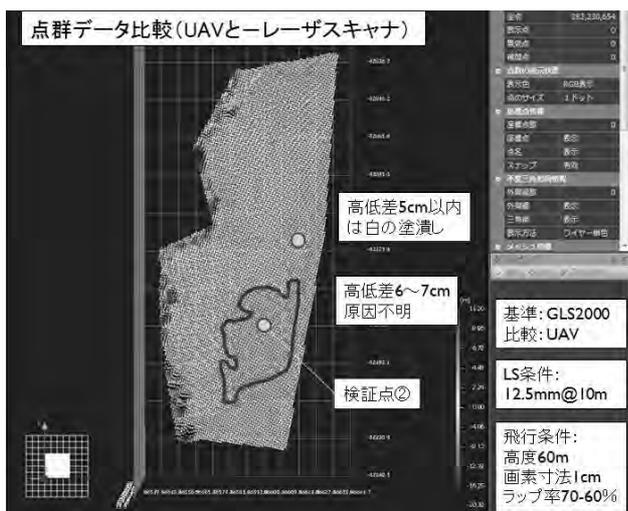


図-5 点群データ比較

5. 生産性向上への最適な「解」

今回の検証からは、「空中写真計測（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」における記述通りの仕様で取得される方法で「出来形精度」が担保されることは確認できたが、一段と生産性向上を高める上において、基準を緩和した「地上画素寸法 2cm，進行方向ラップ率 80%」でも十分な「出来形精度」が担保されることが証明出来た。

6. おわりに

平成 28 年 3 月に「空中写真計測（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」を含む 15 の基準がでて半年が過ぎた。

すでに ICT 活用工事における出来形検査を受けるにあたり、この基準を適用している現場が出てきていると思われるが、国土交通省が進める i-Construction の目的は、建設産業全体の生産性向上であり、それを阻害してまで、基準にこだわるものではないと思われる。

平成 28 年 4 月に出された i-Construction の報告書に書かれているが、現状を「更に」良くするための提案は積極的に受け入れる「カイゼン」姿勢を国もとることを約束している。(図-6)

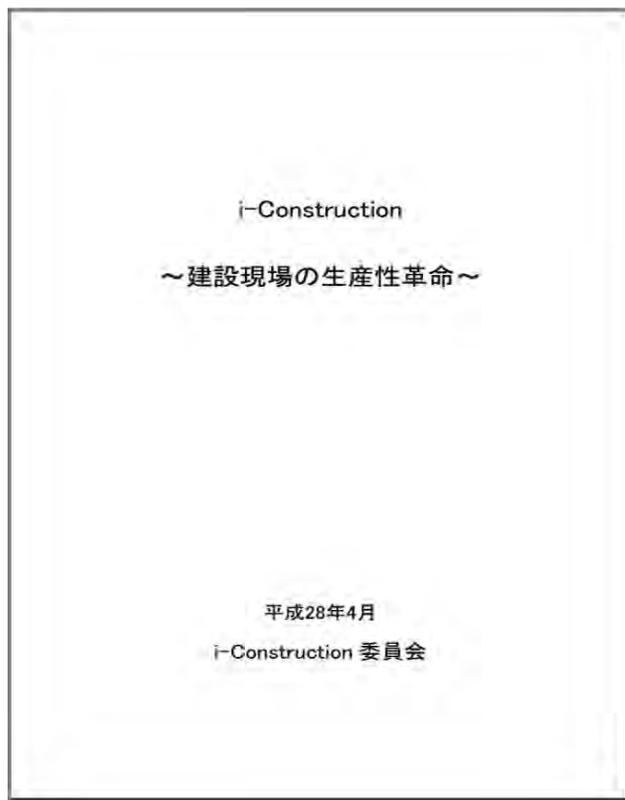


図-6 i-Construction～建設現場の生産性革命～
<http://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>

その意味において、今回の様なデータを元に、施工性を更にカイゼンするための提案は積極的に受け入れてもらうことが可能であると思われるし、また、そうしなければ業界全体としての生産性は向上しない。

本論文がその一部を担えればと思う。

21. エアフレームを使用した覆工コンクリート養生システム

東急建設株式会社

○ 大峰 秀之
満尾 淳
寺山 拓也

1. はじめに

近年山岳トンネル工事においては、覆工コンクリートの品質確保が大きな命題となっており、多くの振動・締固めシステムや養生システムが各社で開発され実用化されている。

養生システムに関しては、種々の方法が提案されているが、その多くは大規模な鋼材フレームを用いるものであり、組立、移動、解体などにおいて多大な労力を要する。そこで当社はカンボウプラス株式会社と共同で、エア注入式のフレームを用いた養生システムを開発し、山岳トンネル工事に適用した（写真1）。フレームをエア注入式にすることにより軽量化が図れ、組立、移動、解体が容易にかつ安全に行うことが可能となった。本報では、そのシステム概要と適用結果を報告する。



写真-1 装置全景

2. システム概要

本養生システムは、主チューブ、副チューブと養生シートで構成される。移動台車に主チューブの脚部を固定した後に、ブロー設備により空気を注入することによってフレームが自立する。その後散水設備を取り付けることにより覆工コンクリート、チューブ、シートで覆われた密閉空間を湿

潤状態とすることが可能となる。

また、本システムの特徴として、主チューブには伸縮機構が装備されており、二車線道路の多彩なトンネル断面にも対応可能となっている。

図-1 にシステム構成図を、表-1 に使用機器を示す。

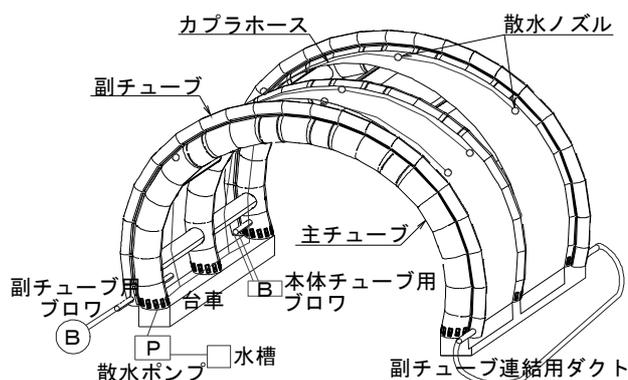


図-1 システム構成図

表-1 使用機器一覧（1スパン当り）

名称	仕様	数量
台車設備	養生システム移動用	2台
エアフレーム	—	1式
ブロー	主チューブ用 1.5kw	1台
ブロー	副チューブ用 0.4kw	1台
ミストポンプ	200V 3.7kw	1台
散水ノズル	最小通路径：0.15 mm	9個
ホース	1/4、3/8	1式
接続プラグ等	1/4、3/8	1式

3. 現場導入

鹿児島県内の山岳トンネル現場へ本養生システムの試験導入を実施し、組立～解体の作業性と、覆工コンクリートの養生効果を確認した。

3.1 装置組立

本養生システムの部材質量はエアフレーム本体で、1 スパンあたり約 300kg である。その他の部材、資機材は軽量であり、組立時には移動式クレーン等は必要なく、ほぼ人力での作業が可能である。組立順序は図-2 に示す。

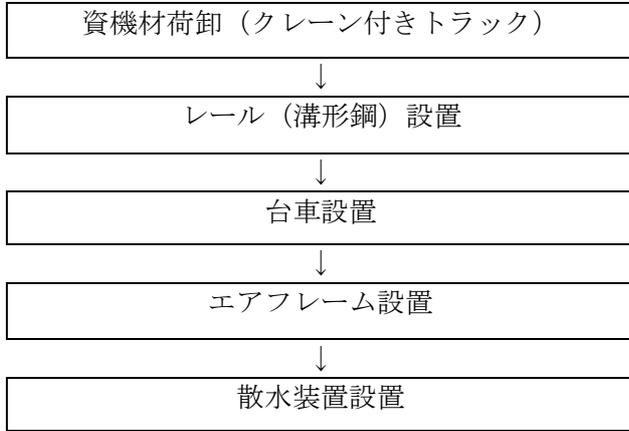


図-2 組立順序図

従来の養生システムは装置の組立に移動式クレーンを常時必要とし、1 スパンの組立に約 1 日、作業員 6~7 名程度必要であるが、本養生システムでは 5 名程度の作業員にて約 3 時間で組立が可能である。また、解体、搬出も容易である。養生終了後エアフレームの空気を抜き、搬出するまで約 2 時間 30 分と非常に短時間に作業を終えることが可能である。

また、エアフレームは空気を注入すると自立するので、組立、解体作業は散水ノズル、ホースの設置以外は高所作業車を使用せず、地上での作業となるので安全性も向上した。写真 2~6 にエアフレーム設置状況を示す。



写真-2 レール・台車設置



写真-3 エアフレーム敷き広げ



写真-4 空気注入状況



写真-5 ノズル・ホース設置状況



写真-6 設置完了

3.2 実験結果

(1) 保湿効果の確認

覆工コンクリートの養生期間は7日とし、1日2回、各2時間程度の散水を実施した。エアフレーム内に温・湿度計を設置し、本装置の密閉性・保湿性の確認を実施した。養生期間中の温度は大きな変化はなく、湿度は常に80%以上が確保されていることが確認できた。

(2) トレント（透気性）試験結果

養生効果の検証を目的としてコンクリートの表面透気係数 KT 値の測定を行った。本試験方法は日本コンクリート工学会、品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価研究委員会「施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書」¹⁾ で実施された共通試験で取り上げられている試験方法である。表面透気係数 KT 値の測定は、Torrent 法²⁾ に基づく二重チャンバー方式の透気性試験機を用いた。測定では内部セル内を真空ポンプにより減圧し、減圧を停止してからの復圧を時間変化として計測し、その測定結果から表面透気係数 KT 値を求めるものである。図-3に示すように、二重チャンバー方式である本試験方法は、内部セルと外部セル内の圧力を平衡させて透気性を評価するため、シングルチャンバー法で問題となる極表層のスキンといわれる脆弱層の影響を排除でき、表面から数センチの透気性を評価できるものである。写真7に試験状況を示す。

表面透気性試験を実施する箇所では、試験前に覆工コンクリートの表面含水率を測定した。測定には Kett 社製コンクリート・モルタル水分計 HI-500 を使用した。

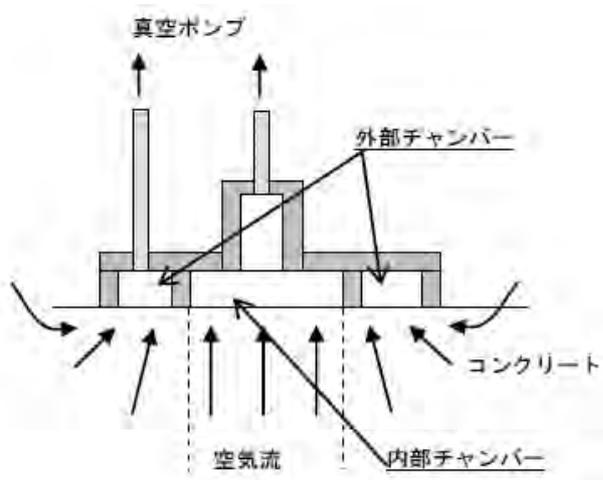


図-3 透気性試験概念図

測定位置は図-4、図-5に示す。106BL～108BLのS.L.付近で5箇所、肩付近で3箇所測定を行った。



写真-7 透気性試験状況

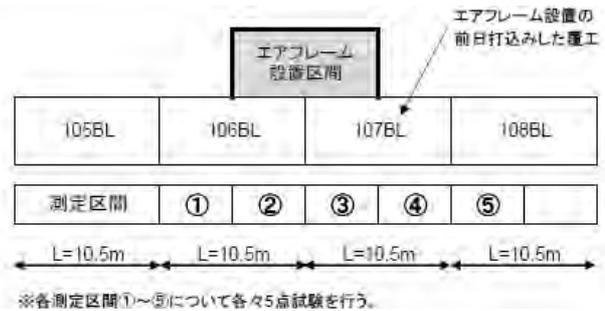


図-4 測定位置平面図

- ①～⑤断面 ⇒ S.L.(スプリングライン)付近、地盤から1.8m程度
- ①、③、⑤断面 ⇒ 肩(トンネル中心から3m)付近、地盤から5.5m程度
- ③断面のミスト発生位置

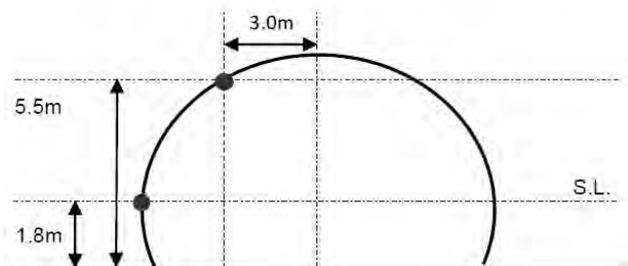


図-5 測定位置断面図

試験結果を表-2に示す。中性化速度係数は、既往の研究³⁾およびコンクリート標準示方書⁴⁾より算出した。

表面含水率は、養生をしていない区間と比較して、エアフレームを設置した区間の方が高い結果となった。また、S.L.付近と肩付近では、S.L.付近の方が高い結果となった。これは肩付近の方が、風が吹抜けやすく、コンクリート表面から水分が蒸発しやすかった可能性が考えられる。

表面透気係数 KT 値は、エアフレームを設置した区間の③107BL-S.L.付近が最も小さく、養生をしていない区間の⑤108BL-S.L.付近で最大となった。肩付近と比較して、S.L.付近の表面透気係数 KT 値のバラつきが大きいのは、コンクリート表面に表面気泡が多く発生していることが影響していると考えられる。

既往の研究³⁾を参考にして算出した中性化速度係数は、配合や環境条件を考慮したコンクリート標準示方書⁴⁾から求まる中性化速度係数よりも全体的に小さくなる傾向を示した。なかでも、エアフレームを設置した区間の方が小さくなることが確認された。

5. おわりに

エアフレームを用いた養生システムの効果を、コンクリートの表面透気係数KT値を測定することにより確認した。その結果、養生をしていない区間よりも表面透気係数KT値が小さくなることが確認できた。これは本養生システムの効果により覆工コンクリート表面部が緻密になったものと考え

られる。

今後、本養生システムを自社工事に対して本格的な適用拡大を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価研究委員会「施工の確実性を判定するためのコンクリート試験方法とその適用性に関する研究報告書」, 2009.7
- 2) Torrent R.and Frenzer,G.:A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete,International Symposium Non-destructive Ttesting in Civil Engineering,p985,Sept.1995
- 3) 小野聖久、上東泰：非破壊試験による充実性評価とコンクリートの耐久性に関する考察、土木学会第60回年次学術講演会、5-259、2005.9
- 4) 土木学会：2012年度制定コンクリート標準示方書【設計編】、p.147、2012.12

表-2 試験結果一覧

測定区間	測定位置	養生条件	表面含水率 (%)	表面透気係数 KT 値 ($\times 10^{-16}m^2$)	中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)		
					既往の研究 ³⁾ から算出した値	コンクリート標準示方書 ⁴⁾	
①106BL	S.L. 付近	なし	6.0	5.41	2.83	4.04	
	肩付近		6.0	7.01			
②106BL	S.L. 付近	エアフレーム	7.5	4.60			2.75
③107BL	S.L. 付近		6.8	3.73			2.66
	肩付近		6.3	5.49			2.83
④107BL	S.L. 付近		5.6	9.40			3.08
⑤108BL	S.L. 付近	なし	5.7	11.77			3.18
	肩付近		5.6	8.53			3.03

22. 熟練技能維持システムの開発と生産性向上に関する研究

－ 作業動線解析による生産能力維持と次世代建設生産システム －

株式会社 浅沼組
国土交通省
株式会社 浅沼組

○ 田村 泰史
稲垣 孝
桑原 茂雄

1. はじめに

建設作業現場において、熟練技能者が培ってきた“カンやコツ”といったものは、現場生産能力の重要な財産であり、組織運営による利益やその目的物の品質および建設業の継続的な発展に大きな影響を与えるものである。

現在の我が国の少子高齢化進展による技能伝承の停滞や建設生産システムの低下が生産能力維持の障害となり、生産性の低迷に拍車をかけることになる。よって、建設業における今後の中長期的な対応が課題となる¹⁾。

そのような背景により、田村ら²⁾はIT技術の活用で熟練者の技能を記録し、作業特性の見える化により構築された管理ツールを活用することで生産性を維持させる、「熟練技能維持システム」の開発を先行研究として継続している。

具体的には、工場の製造ラインでの生産性改善に活用されている、「映像による動線解析技術」の建設作業現場への試行として、屋外作業の映像データを解析し作業特性を定量化する。その作業特性の分析により技能維持や効率性のポイントを提案するものである。先行研究では、実現場での撮像モニタリングの実施とシステム構築の検証を行った結果、作業特性のモデル化などシステム基盤の構築には概ね成功をみたが、現地におけるビデオカメラでの撮像モニタリングでは、仮設物等による不可視部への対応と屋外作業特有の環境影響（影による照度変化等）による解析誤差に対する計測精度向上対策が課題となった。今回の研究は、その課題への対策として、衛星測位システム（GNSS）によるモーションセンサーを使用したモニタリング技術の開発により、計測精度向上とシステム汎用性の具現化を目指すものである。

本論では、改善された新たなモニタリング手法とそのシステム開発について報告し、システム活用による技能伝承と建設生産性の考察および次世代建設生産システムへの提案について述べたものである。

2. 熟練技能維持システムの概要

2.1 システムの定義

先行研究により構築された「熟練技能維持システム」の定義について述べる。

当該システムは、映像データの動線解析で技能の暗黙知を形式知化することにより、技能伝承と生産性の向上を図るものである。

2.2 開発の概要

(1) モニタリング手法

施工状況を撮像し、工場等の生産性改善に使用されている、動線解析ソフトでの映像分析で出力された動線データを作業特性の管理ツールとして活用するものである。以下にシステムの出力媒体となる管理ツールの概要を述べる。

(2) 管理ツールの概要

①動線軌跡図

動線データを軌跡図として描画したものである。動線の混み具合や形状、重複状況により作業エリアにおける稼働率の低下要因等を映像とともに照合し改善のポイントとして抽出するものである。

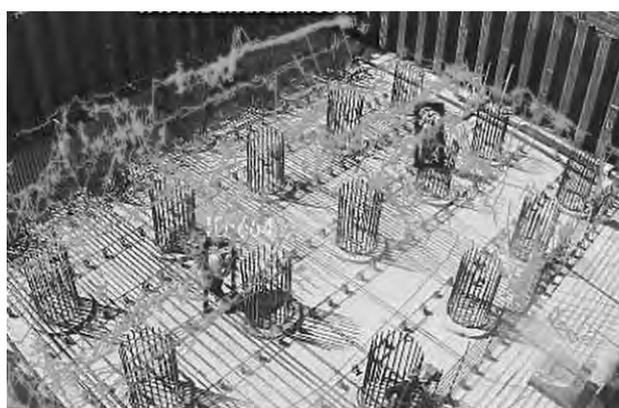


写真-1 動線軌跡図

②作業特性図

動線データにより、作業エリアの稼働率および進捗度を作業の特性としてグラフ化（作業特性波形図）したものである。繁忙期や出来高の推移が把握でき計画時の改善策抽出および効率化対策の

判断を補完させる管理ツールとなる。

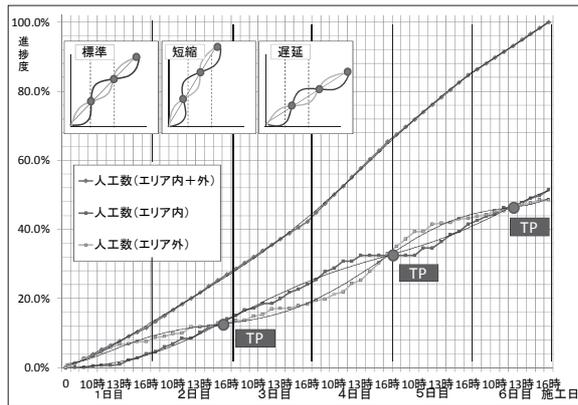


図-1 作業特性波形図

③進捗予測ツール

動線データによる作業特性を統計的手法で解析し、進捗における最適な人員配置や出来高の予測値を算出する。また、事前の予測をもとに、施工中の進捗状態と完了予測を照査することで、工程遅延リスクの低減とムダの発生を防止させる。

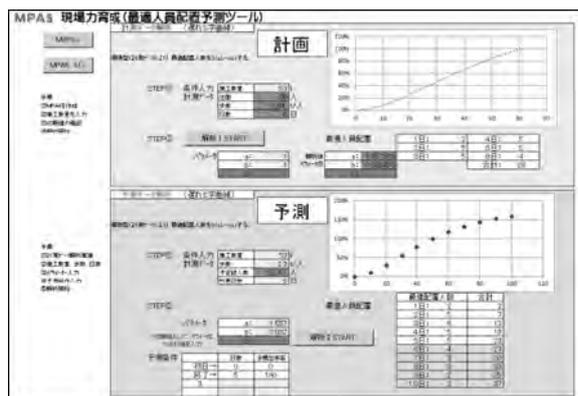


図-2 最適人員配置予測ツール

(3) 先行研究における課題（計測精度の向上）

課題として、計測精度の向上を目的とした、モニタリング手法と管理ツールの改善が挙げられた。

まず、モニタリング手法については、複数の作業員や広範囲な施工場所において撮像を行う場合、死角部分を補うために多数の撮影設備が必要であるとともに、その映像により複数の作業員を識別できる人物認識ソフトが別途、必要となる。また、照度等により画質が低下した場合、影の部分的人物として認識する等の屋外モニタリング特有の不具合の発生が判明したため、測定環境に適したモニタリング手法の選択が必要となった。

次に管理ツールの改善点としては、動線描画図のみでは、作業員の姿勢など動態の特徴が明瞭ではない。改善点の抽出時において動態の変化を判断しやすくするため、動線軌跡とともに作業員の行動特性（パフォーマンス）を表現できる管理ツールにより精度を向上させる必要がある。

3. 動態測定技術の開発による対策の実施

3.1 モニタリング手法（ロガーの開発）

先行研究の課題である、計測精度の向上対策として、衛星測位システムによるモーションセンサーを活用した動態測定の手法を考案した。

モーションセンサーは、3軸加速度センサーと3軸角速度センサー、GNSS（全世界的航法衛星システム）受信機から構成され、緯度経度や角速度等の計測情報をセンサー内のメモリに記録するロガーとして開発した。ロガーをヘルメットに内蔵することで作業員の位置情報と動態を詳細に計測できる構造とした。

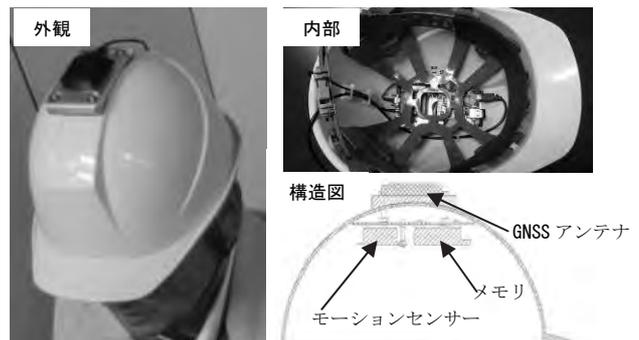


写真-2 ヘルメット内蔵式ロガー（外観・内部・構造図）

3.2 管理ツールの改善（パフォーマンス評価）

映像による動線軌跡図だけでは、ランダムな線描画の重複となり作業特性のポイント抽出が明瞭にならない場合がある。工場等の屋内作業では固定的な生産ラインに沿った作業形態であり、作業員の動線がほぼ定型化されている。よって、軌跡図において非効率な動作となる部分は、比較的明瞭である。一方、建設現場の場合では工場等と比較して広範であるとともに動作範囲の自由度が高い場合が多い。また、車両や重機械の稼働との競合もあるため、一見して定型化された動線とならない場合が多い。そこで、モーションセンサーの特性を活用し、動作の急激な変化等の行動特性を軌跡図に表示しパフォーマンス評価として判別することのできる管理ツールとした。

4. 新たなモニタリング手法による管理ツールでのシステム改善

4.1 システム定義の補足

先行研究での管理ツールにおいては、ポイント抽出に明瞭さが不足していた。また、そのポイントについても生産性向上の視点では達成度が明確でないため、適切な対策を見出すことができなかった。よって、「生産性向上」という漠然とした効果目標ではなく、リスクを事前抽出させる、「エラーを防止するシステム」として定義を補足することで生産の停滞を防止し維持させるものとした。

この定義を踏まえ、新たな管理ツールを構築することとした。

4.2 管理ツールと活用による効果

先行研究による3種の管理ツール(2.2(2)①～③)を基本として、新たなモニタリング手法により出力される管理ツールの概要およびその活用による効果について述べる。

①視線軌跡描画ツール

モーションセンサーによる動態(姿勢)計測で、上下左右の頭部の向きを定量化することにより作業者の視線を平面描画させる。これにより、作業者が動作中に注視していた箇所を推定できるため、その作業ポイントの分析により施工設備の改善を実施し安全性および施工性の高い施工環境を確保することが可能となる。また、点検作業等においては目視点検の記録として活用できる。

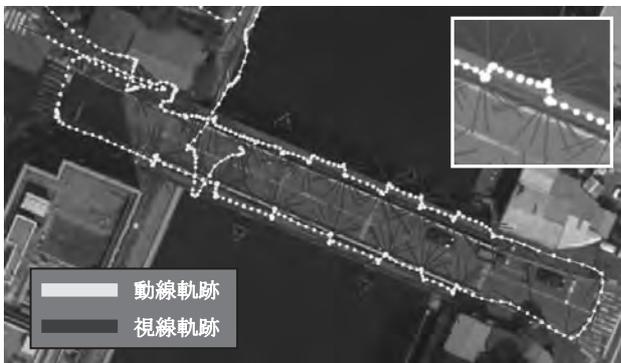


写真-3 動線軌跡図と視線軌跡図

視線軌跡は、動態計測による方位角(左右方向)と、ピッチ角(上下方向)を平面線の向きおよび長さを変化させ動線軌跡上に表示している。

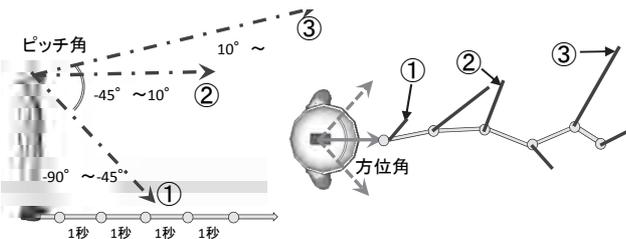


図-3 動態計測による視線方向の表示

②パフォーマンス評価ツール

建設現場における作業者の行動を観察すると、施工状態や難易度の変化、危険回避等の非正常行動の場合において、体勢や歩行速度、進行方向に特徴的な動態変化が生じていることが分かる。例えば、作業通路に支障物がある場合や重機械との接近の場合、作業者は危険を回避するため、迂回行動を行う。このとき通常の歩行に比べ速度や進行方向が急に変化する。このような特性により、作業者のパフォーマンス変化を軌跡図に描画させることでポイントの明瞭化を図り、前出の動線軌

跡図の効果的な表現手法として、エラー要因の抽出が可能となる。

システムプログラムでは、判別条件としての動態変化の度合いを自由に設定できるため、作業者の特性や習熟度、作業環境に応じた評価が可能となる。

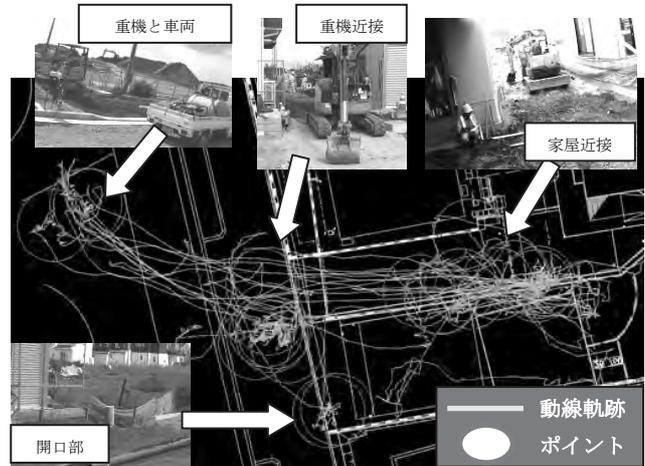


写真-4 動線軌跡図とパフォーマンス評価

③気づき改善ツール

映像等の管理ツールの観察記録と抽出された改善事項を集計し、気づき改善ツールとしてシステムに記録保存する。ここでは、不具合事例や施工のコツ等とともにモーションセンサーで計測された歩行距離、速度等も併せておく。このデータを蓄積する事で、事後のフィードバック資料として活用させるとともに、暗黙知を形式知化する教育ツールとしてナレッジマネジメントに活用し、次世代へのエラー防止ツールとして伝承させる。



図-4 気づき改善ツール



図-5 システム画面

5. システム開発の今後の課題

5.1 モニタリング手法における課題

モニタリング手法における課題として2点挙げられる。1点目は、ロガーの小型化による装着型への改良である。今回はヘルメット内蔵型としたが、ロガーを脱着可能な装着型とすることでより多くの作業員への適用と汎用性を向上させる必要があると考える。方法としては、センサー基板の改良と無線記録方式の採用でロガーの小型化を行う。

2点目として、センサーはGNSSによる受信方式であるため、屋内や上空制限のある場所、トンネル内では精度が低下する。他工種および維持管理における点検作業への適用を考えた場合、さまざまな条件に対応できる手法の開発が必要である。方法としては、ICタグによる追尾等の補填技術とのハイブリット方式の開発とともに、演算方式による位置補正プログラムの構築が必要である。

5.2 管理ツールにおける課題

出力される管理ツールは、モニタリングデータの加工によりさまざまなスタイルの媒体にアレンジすることが可能である。よって、解析対象の作業条件に適合させるツールとするために新たなプログラミングが必要となる。特にパフォーマンス評価においては、動態変化の設定条件をさらに細分化し、施工環境への柔軟な対応で精度の向上を図る必要がある。また、現時点では作業員の動作測定に主眼をおいているが、ロガーの小型化に伴い、施工機械や使用資材等の計測を可能とさせ、人物以外の多種多様な動線解析手法で、より俯瞰的な作業特性の把握が可能ではないかと考える。

6. 次世代建設生産システムへの提案

当該システムの活用により、次世代に向けた建設生産システムの活性化への提案を以下に述べる。

6.1 見える化したマニュアルとしての活用（計画時管理ツール）

映像と動線描画等の管理ツールによる視覚的情報を施工マニュアルとして活用し、ツールによる現場臨場感の体感で習熟度を向上させる。

その効果として、次世代技術者の教育ツールとすることで技能伝承が促進されるとともに、技能による国際市場への参入も可能となる。また、IT活用による建設業の魅力再生で、若手技能者や従事者の増加により担い手確保と育成が促進される。

6.2 統計予測等によるエラー防止ツールとしての活用（施工時管理ツール）

工事工程、最適人員配置を計画時に予測し、そのデータをもとに施工時との乖離の見える化で、ムリやムダの排除となり工程遅延リスクの低減が可能となる。その効果として、施工時の予測と検証によるPDCAの実践を定量化した管理手法とし

て活用できるため、効率的で質の高い品質管理を維持できる。また、施工条件の改善にもなるため、労働安全環境が改善し安全性と生産効率も向上する。

6.3 グラフと映像等による施工記録としての活用（完成時管理ツール）

管理ツールや映像データ等を電子媒体としてのパッケージ化で記録保存を行うことにより、国交省が導入を推進中のCIMシステムへの追加が可能となり後のフィードバックが容易になる。

その効果として、記録をデータベースへ蓄積することにより、類似工事の施工計画および維持管理、更新工事への設計計画資料として活用することが可能となる。また、記録化されたデータは作業現場での実態に即した施工情報であるため、効率化を目的とする新技術開発にも活用でき建設業全体の技術力向上に繋がる。

7. おわりに

建設業における生産能力維持の対策として、建設作業現場における動態測定と動線解析で作業特性を見える化した管理ツールシステムの研究事例を示した。さらに、その管理ツールの活用による効果と次世代建設生産システムへの適用について考察した。今後は、その効果を詳細に実証するため、モニタリング手法および管理ツールについての更なる改善と汎用性の向上で、より多くの現場モニタリングデータの蓄積が必要になってくると考える。

生産現場における技能は、熟練者の指導と自己研鑽によって習熟し磨かれてゆくものである。そしてその技能伝承の資質が生産物の品質そして業界全体の風潮を堅持してゆくものであると考える。その観点からすると、技能伝承や生産能力の維持は、受け継ぐ方はもとより、受け継がせる方の責務も重いものである。これを維持させるためのコツは、ツールの活用によるミクロ的マネジメントだけではなく、組織やシステムをうまく運用させるマクロ的マネジメントとの両輪の稼動を継続させることであり、それが次世代への財産になると考える。当該システムが、次世代建設生産システムの効果的な運用の一端になれば幸いである。

参考文献

- 1) 稲垣孝：作業動線解析を活用した熟練技能維持システムの開発について、建設マネジメント技術、2016年5月号、pp.37～43、2016
- 2) 田村泰史・稲垣孝・桑原茂雄・田中優：土木学会論文集F4（建設マネジメント）、Vol.71 No.4特集号、pp.I-131～I-138、2015

23. 縮径トンネル掘削機（縮径 TBM）

一 トンネル掘削機外径の縮小・復元が可能な縮径 TBM 一

戸田建設株式会社

○ 市川 政美
和田 洋一

1. はじめに

山岳トンネル掘進中に地山に拘束されても、トンネル掘削機(TBM)の径を機械的に小さくする機能を付加することで地山拘束状態から脱出することが可能となる掘削機(縮径TBM)を開発した。従来の地山拘束状態からの解除方法と比較して、工期を最大で約6分の1に短縮可能であり、危険を伴う人力による作業を機械化することで安全性が飛躍的に向上する。

2. 開発の背景

従来の山岳トンネル掘削工法と比較し、高速施工が可能なTBMの欠点として、掘削地山の崩壊や硬岩切削時の岩ズリ付着等により、マシン本体が拘束され掘削不能となるリスクが挙げられる。

2.1 従来の拘束解除方法

マシン本体が拘束された場合、TBM本体への地山の締め付けを解除するため、本体上部の拡幅掘削を行わなければならない。施工はすべて人力作業となり、一般的には山岳トンネル在来工法で行う。拡幅掘削は、片状に破碎された地山掘削となることから切羽および本体周りの安定確保のため補助工法や先受け工として注入式フォアポーリング、鏡面の安定には注入式鏡ボルト工等が必要となる。その手順は、

(1)崩壊等を防止するため、後方からマシン本体を覆う地盤に、また、切羽面に地山浸透性があり固結体強度、強度発現の優れたシリカレジンの地盤改良注入を行う。

- (2)人力によりマシン周囲の拘束状態の原因となっている土砂を取り除くために横坑を設置する。
- (3)人力にて横坑から順次マシン周囲の掘削を行い、支保工・矢板等でマシンを覆い、土砂を取り除く。(一般的にはマシン周長の上部2/3程度)
- (4)拘束の原因となる土砂を取り除いた後、マシンの動きを確認してから支保工等を撤去し再掘進を行う。拡幅部は充填をする。

以上のようにTBM本体が地山に拘束されたときには掘進再開まで危険性を伴う多大な労力を要することになる。(写真-1～写真-3)

3. 縮径TBMの開発

3.1 縮径TBM

従来のマシンの拘束を解除する作業は、長期間にわたる作業となるため工期やコストを圧迫することになる。これらを解決するためにマシン胴体を縮径させることで容易に拘束を解除することが可能な掘削機(縮径TBM)を開発した。

拘束解除に必要な期間は、従来工法では1回あたりで約3ヵ月(当社試算)を要していたが、縮径TBMを用いることにより約0.5ヵ月で解除可能となる。また、全ての作業をマシン内部で行うため安全性が飛躍的に向上する。

通常、TBMでのトンネル掘削は5km～10kmと長距離施工となるので、掘削対象地質にもよるが拘束の頻度は高く(1回/2km程度と予測)、縮径TBMを用いることによりコストの縮減にも繋がる。



写真-1 人力拡幅掘削状況



写真-2 支保工建込状況



写真-3 拡幅掘削完了状況

3.2 縮径TBMの特長

マシン径を縮小・復元する構造上の特長は、

- (1)縮径TBMの本体は内胴と外胴の二重構造で構成されている。更に外胴は分割された鋼殻で構成され、各鋼殻に縮径・復元ジャッキを装備することで所定の縮径量を確保する。(図-1)
- (2)機内から縮径・復元ジャッキを操作することで全ての鋼殻が連動して作動する。
- (3)外鋼殻部を8分割とし、オーバーラップさせる構造で縮径・復元用ジャッキを1分割に1台装備し、100mmの縮軽量を確保した。(図-2)
- (4)掘進速度を砂岩部(一軸圧縮強度 100~150Mpa)で 15~40mm/min, 泥岩部(一軸圧縮強度 40~80Mpa)で 50~60mm/min 確保するために、カッターモーター(150kw)を5台装備し、トルクを確保した。
- (5)前胴部グリッパとして縮径・復元ジャッキを2段ジャッキ (32t×90st×8本:φ120)とし、2段目にグリッパ機能を持たせた。(図-3)
- (6)中胴部はスラストジャッキが配置され、後胴部にはメイングリッパが装備されているため、小型の縮径・復元ジャッキを16台とした。(図-4)
- (7)外鋼殻と内鋼殻の土砂侵入防止構造は2段構造のワイヤブラシ型シールとし、縮径および復元時に追随性をもたせる構造とした。(図-5)



図-3 前胴部2段ジャッキ(グリッパ)位置



図-4 中胴部, 後胴部縮径・復元ジャッキ配置



図-1 縮径TBM前胴部構造概要

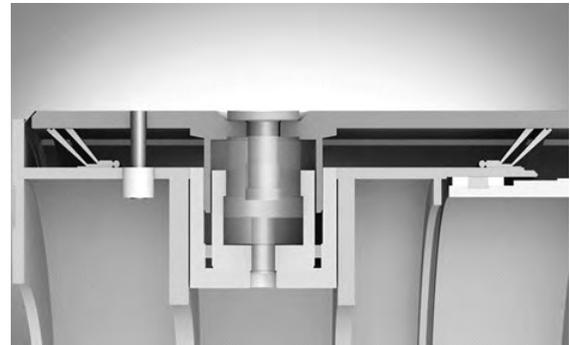


図-5 外鋼殻と内鋼殻の土砂侵入防止構造

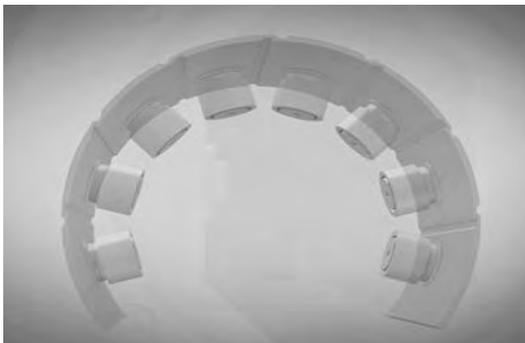


図-2 外鋼殻部と縮径・復元ジャッキ位置



図-6 外鋼殻継ぎ目部構造

- (8)分割した外鋼殻の継ぎ目止水はオーバーラップ構造とし、縮径時、外鋼殻継ぎ目の土砂を押し出すよう端面をテーパ構造とした。(図-6)
- (9)覆工にセグメントが必要な場合はシールドジャッキを後胴に必要時装着できる構造とした。(図-7)(エレクターは後方台車に搭載)
- (10)前胴外鋼殻部に8個、中胴外殻部に8個の土圧計を装備し、地山締付け状況を検知する構造とした。

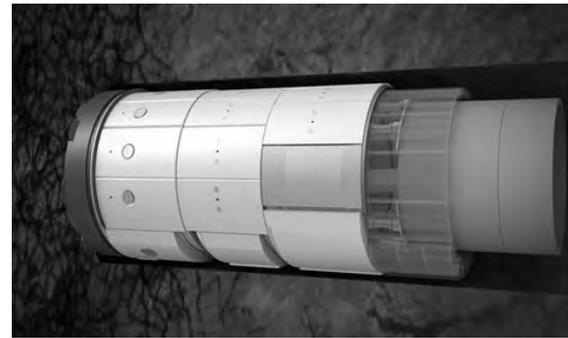


図-7 シールドジャッキ装着時概要図

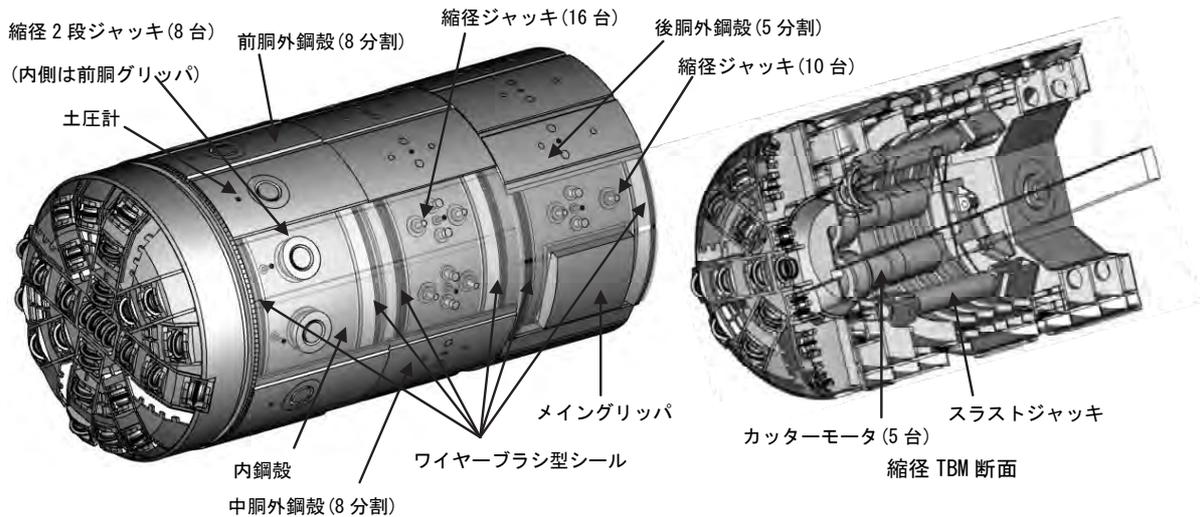


図-8 縮径TBM全体組立図

3.3 縮径TBMの拘束状態解除方法

崩落性地山により縮径TBMが拘束された場合の拘束状態解除方法の一例を紹介する。

- 1)切羽が崩落性地山に接近してきたときにマシン外殻に設備した複数の土圧計変位経過を監視する。(図-9)
- 2)坑内のボーリングマシンで切羽前方の地山状況を調査する。(図-10)
- 3)掘削機後方からマシン全体を覆う地盤に地盤改良注入を行い、地山の崩壊等を防止する。(図-11)
- 4)マシン胴体を縮径させ、地山の拘束を解除する。
- 5)マシンを縮径したまま掘進する。1回の地盤改良よりも崩落性地山の距離が長い場合は、再度地盤改良を行う。マシンを進めるための反力がメイングリッパで取れない場合は、シールドジャッキを装備し、セグメント覆工を利用して反力を確保して掘進する。
- 6)マシン外殻に設備した土圧計の変位を監視しながら拘束状態が発生しない位置で縮径した胴体を復元し、掘進する。(図-12)

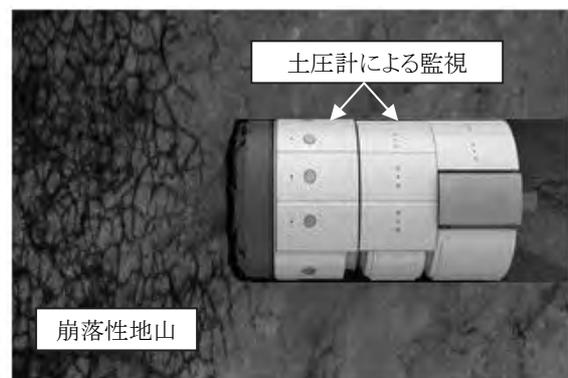


図-9 崩落性地山遭遇概要図

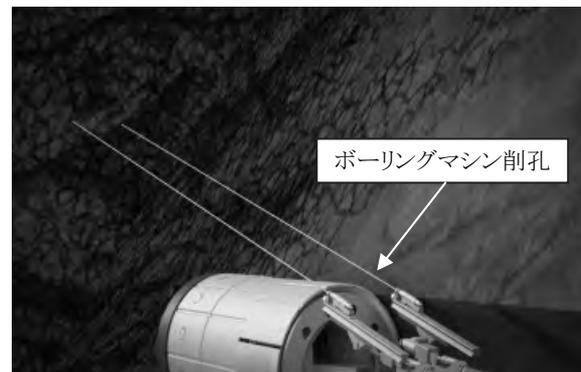


図-10 ボーリング地山調査概要図

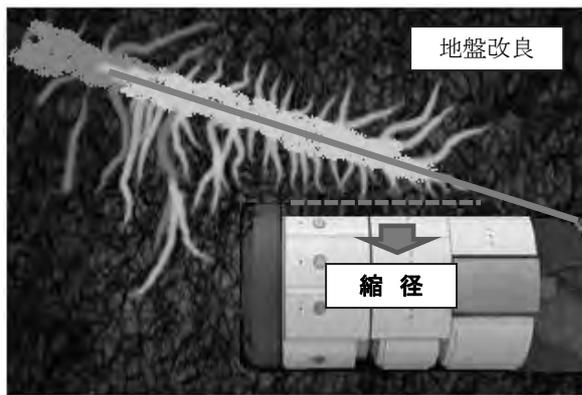


図-11 地盤改良概要図

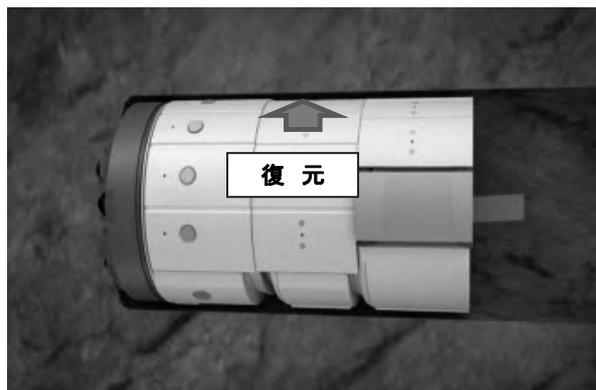


図-12 縮径TBM復元図

3.4 拘束原因別縮径TBMの拘束状態解除方法

マシンの拘束原因は地山状態により軽微なものから重大なものまでである。下記にそれぞれの想定した拘束状態の対応策を記す。

(1) 切削粉が地山と外殻の間に入り込んで拘束された場合

・施工手順

- ① 鋼殻部を切削粉による拘束が解除される程度まで縮径する。
- ② 切削粉をエア・水等により洗い流しながら、通常のTBM掘進方法により当該区間を脱出する。

・脱出後の縮径掘削部の対処方法

地山の押し出し等により拘束されたわけではなく、縮径掘削部は内空断面を確保できているので拘束区間は吹付コンクリートによる支保を行う。

(2) 幅10m程度の断層破碎帯等での崩落性地山等により、外殻が拘束された場合

・施工手順

- ① 坑内より前方地質探査を実施し、前方の破碎帯区間長・地質性状等を把握する。
- ② 把握した区間長や地質性状を考慮して、坑内より拘束部およびTBM前方の破碎帯区間を地盤改良する。

③ 外殻部を縮径し、拘束を解除する。拘束部地山が安定していることをマシンに装備した土圧計等により確認する。

④ 通常の掘進方法により当該区間を脱出する。

⑤ 崩落性地山区間が長い場合は、縮径を段階的に行って、上記の①～④を数回繰り返して良好地山区間まで掘進する。

・脱出後の縮径掘削部の対処方法

縮径により、内空断面が確保されていない箇所は対象区間を順次、『縫い返し：NATM工法における既存技術』により、適正断面に修正して吹付コンクリートによる支保を行う。

(3) 比較的長距離での押し出し性地山や崩壊性地山等により、初期掘削段階で外殻が拘束された場合

・施工手順

- ① 坑内より前方地質探査を実施し、前方の破碎帯区間長・地質性状等を把握する。
- ② 地質性状を考慮して、坑内より外殻および面盤全面を地盤改良する。
- ③ マシン外殻を残し、面盤およびマシン駆動部等を取り外す。
- ④ 面盤を撤去した後の開放された鏡面からNATM工法により良好地山区間まで掘進する。この際、掘削断面はTBMの外径より一回り大きい断面とする。
- ⑤ 良好地山区間まで到達した段階で、安全性を確保した後、面盤およびマシン駆動部等を再設置する。
- ⑥ 外殻部を縮径して拘束を解除し、拘束部地山が安定していることを装備した土圧計により確認後、拘束状態から脱出する。
- ⑦ NATM施工区間を、開放されたマシンを移動させ、良好地山区間から、通常の掘進方法によるTBM掘削を再開する。

・脱出後の縮径掘削部の対処方法

拘束された区間は縮径により、内空断面が確保されていないため、対象区間を順次、『縫い返し』により、適正断面に修正する。

4. まとめ

縮径TBMは外殻の鋼殻に装備した土圧計の推移を監視し、地山の締め付け状態を検知しながら掘進する。締め付け状態を検知した時点でマシンが拘束される前に縮径・復元をしながら安定した掘進を行うことが可能なトンネル掘削機である。優位点の一つとして縮径した状態でも掘進できることで掘削を止めるリスクが少なくなる。

TBMは、山岳トンネル工法と比較して4～5倍の高速施工が可能だが、拘束による掘進停止という多大なリスクのある工法であった。そこで、縮径TBMを使用することにより工期を順守し安全に山岳トンネルを構築することが可能となると考える。

24. 作業量の確保と疲労低減を狙った 自動掘削ホイールローダの開発

株式会社小松製作所

和田 稔
今泉 雅明
○今西 康太

1. はじめに

ホイールローダは建設工事現場から砕石・鉱山現場などにおいて主に掘削積込機として使用されるが、掘削作業において効率よく作業量を確保するためには車両の前進、ブームおよびバケットの動きを適切にコントロールする必要があるため、オペレータの技量が必要となる。

しかし今後は熟練オペレータの減少が懸念されており、技量を持ったオペレータの確保が困難になることが予想されている。

そこで、オペレータの技量によらず作業量を確保し、さらに疲労の軽減を狙いとして、掘削時の作業機レバー操作を不要とした自動掘削機能、および形状変更により掘削性を改善したバケット、作業機ストロークエンドにおけるショック低減機能を装備したホイールローダ WA600-8 を開発した(図-1)。

本稿では、これらの作業性改善機能について紹介する。

2. 作業機システムの構成

WA600-8 の作業機制御システムを図-2 に示す。作業機の操作はブーム用とバケット用の 2 本の電気レバーで構成され、各レバーの角度信号が作業

機コントローラに入力される。コントローラは入力された操作信号から 4 本の EPC (Electric Proportional Control) バルブを通してブームとバケットのメインバルブを制御して各油圧シリンダを駆動し、作業機をコントロールする。

センシングはブーム角度センサによりブーム角度を検出し、ベルクランク角度センサによりバケット角度を検出する。また作業機の負荷状態としてブームシリンダのボトム側の油圧をブームボトム圧センサで検出している。



図-1 WA600-8

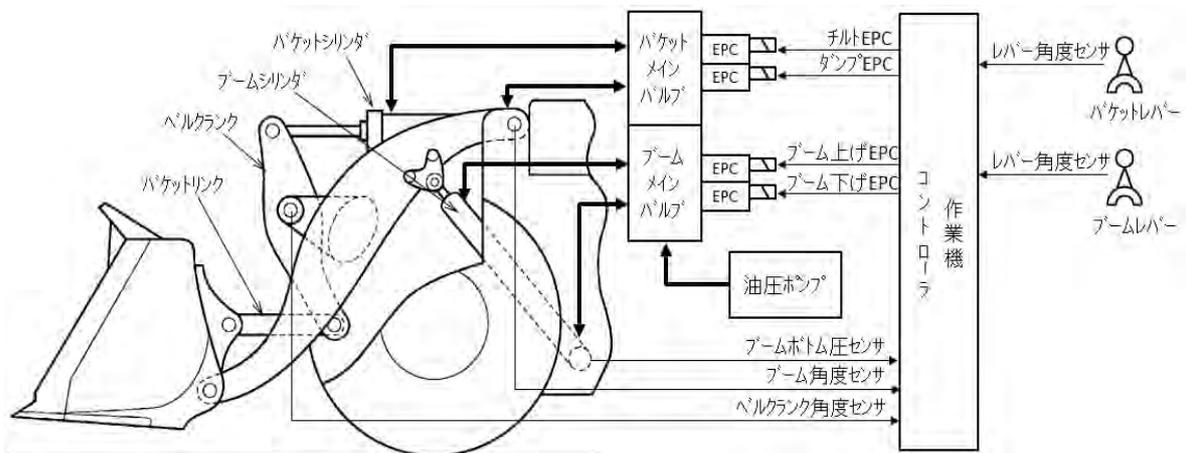


図-2 WA600-8 の作業機制御システム

3. 作業性改善機能

3.1 オート掘削によるイージーオペレーション

掘削作業の自動化機能としては従来機においても半自動掘削機能「セミオート掘削」を装備していた。セミオート掘削は図-3に示すとおり、オペレータが走行の駆動力を上げるために走行シフト段をF2→F1に落とすスイッチ操作(キックダウン操作)、および前輪のグリップ力を上げるためにブームを上方に上げるレバー操作(リフト操作)を手動で行い、トルクコンバータ速度比の低下を検知した後に、自動的にバケットの角度を上方に変える操作(オートチルト)を一定周期で作動⇄停止を行うものである。しかしながら、オートチルトまでの操作がオペレータの手動による点や、オ

ートチルトの動作が掘削対象物の負荷によらず一定の時間間隔で作動することから、効果がオペレータの技量に依存し、熟練オペレータ並みの作業量が確保できなかった。

それに対してWA600-8ではブームボトム圧センサからの負荷フィードバック信号により制御することで、上記の問題点を改善した「オート掘削」を開発した。

オート掘削機能は車速の低下とブームボトム圧の上昇から掘削の開始を認識して各操作を自動的に作動させることにより、キックダウンからリフト・チルトにおいてオペレータによるレバーの手動操作を全て不要とした(図-4)。また、ブームボトム圧の変動パターンから作業負荷状況を検出す

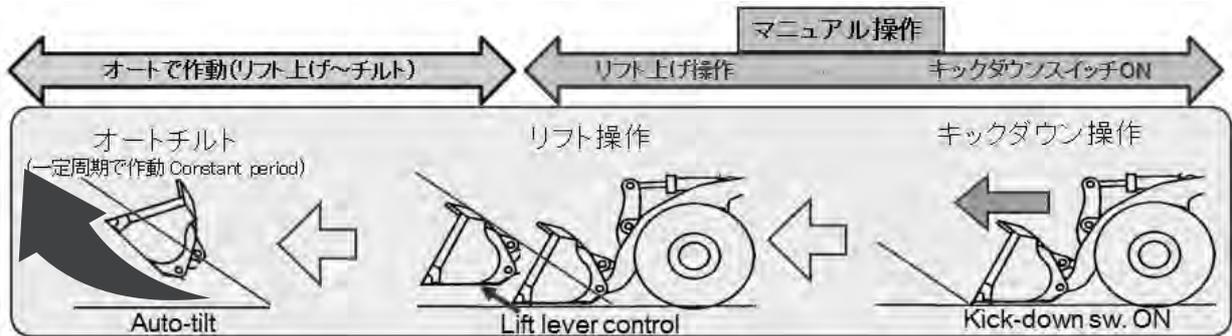


図-3 従来のセミオート掘削機能概要

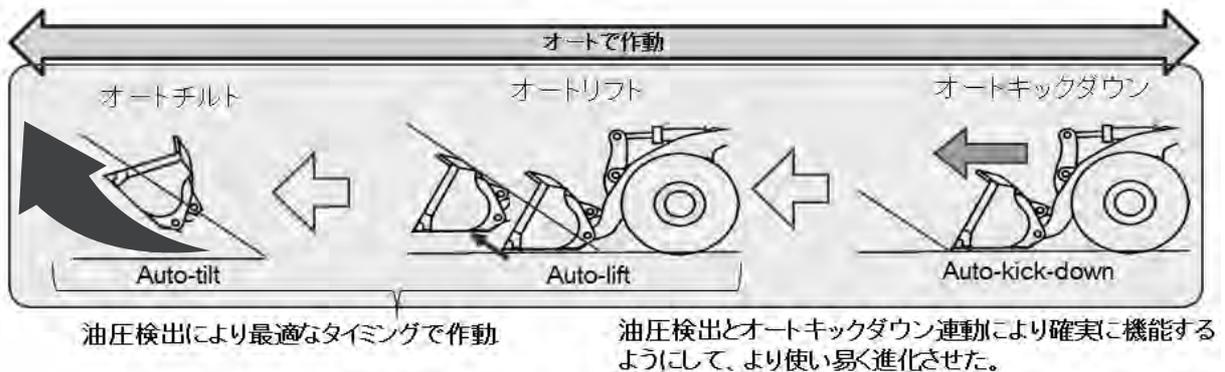


図-4 オート掘削機能概要

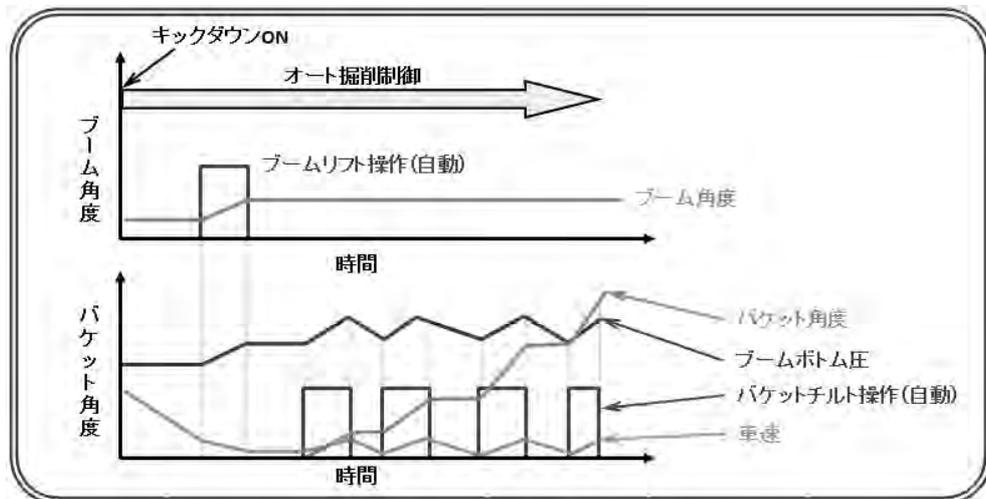


図-5 ブームボトム圧変動に対するオート掘削作動イメージ

ることで、掘削対象物の傾斜に応じて適切な作業機の操作タイミングで作動することを可能とした。

このことによって新人オペレータでも熟練オペレータ並みの作業量を確保することが可能となり、熟練オペレータに対しては作業負荷の軽減が可能となった。またオペレータはアクセルワークに集中することが可能なため、非熟練者でもアクセルペダルの踏み込み量をコントロールすることで作業量調整が可能である。

図-6 はオート掘削を使用した場合とマニュアル操作した場合での作業量を新人オペレータ、中堅オペレータおよび熟練オペレータの各オペレータレベルで検証した結果を示す。作業量はベテランオペレータを1として相対的に表している。この結果によると新人オペレータによる操作では熟練オペレータに比べて作業量が14%少ないが、オート掘削を使用することによって熟練オペレータとほぼ同等の作業量を確保できている。

またそのときの作業量を縦軸、燃料消費量を横軸に表したグラフを図-7 に示す。この中で燃料消費量に対する作業量を作業効率（作業量/燃料消費量）として評価すると、中堅オペレータや新人オペレータでもオート掘削を使えば、熟練オペレータに対して95%の作業効率を確保できている。またハッチングで表した範囲は、中堅オペレータがオート掘削を使ってアクセル操作した場合の結果になる。この結果から、アクセルワーク操作で作業量と燃費を調整可能となることがわかる。

またオペレータの作業負荷の効果として、マニュアル操作とオート掘削を使った場合でVシェー

プ作業1サイクル当りの右手作業機レバーの操作量を比較したところ、オート掘削によって掘削時の作業機操作が減少することにより、右手負荷が20~30%低減する結果となり（図-8）、特に長期間連続的に作業するオペレータに対して疲労低減効果が大きいと考えられる。

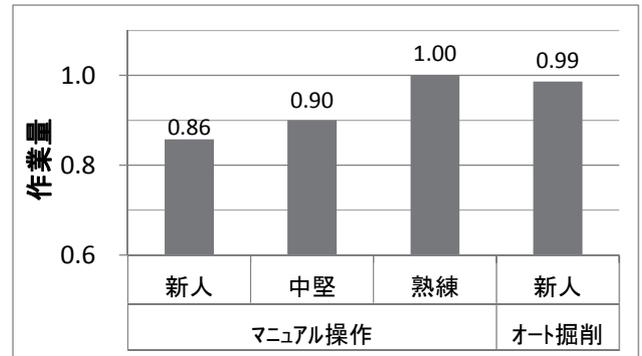


図-6 オート掘削とマニュアル操作の掘削量比較

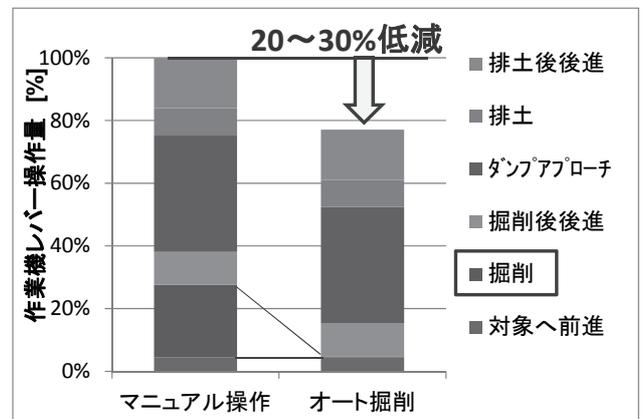


図-8 オート掘削とマニュアル操作の操作量比較

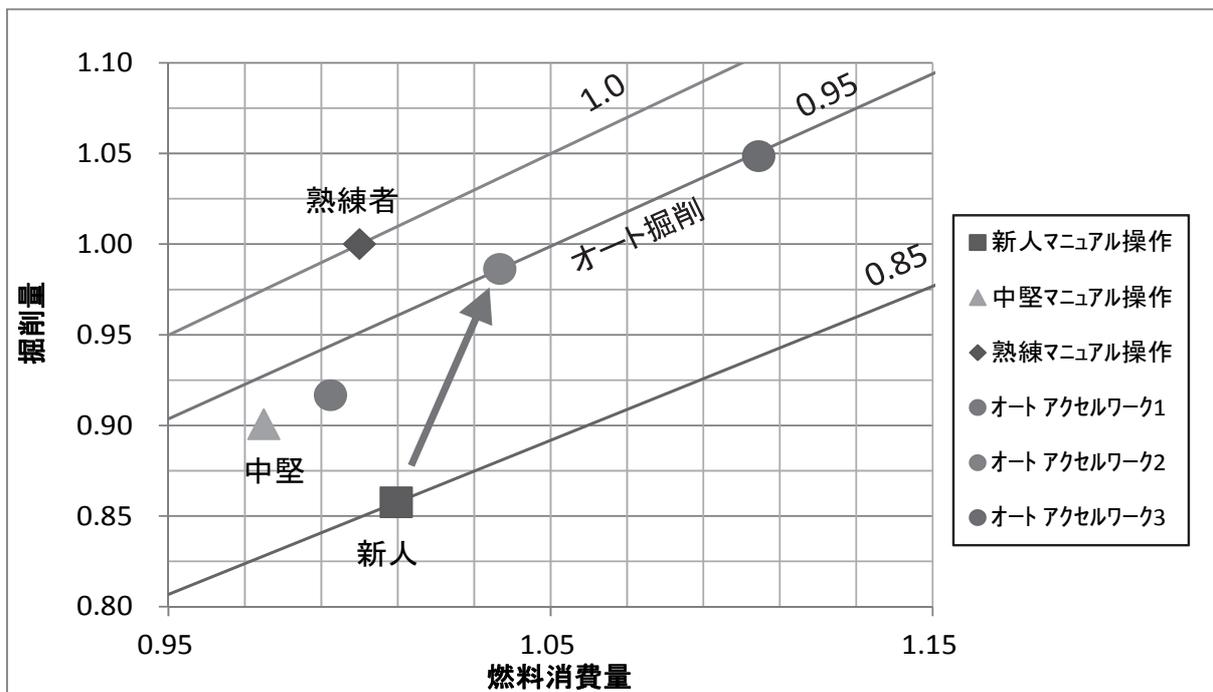


図-7 オート掘削とマニュアル掘削の燃費効率比較

3.2 作業効率を向上させる掘削性改善バケット

従来のバケットに対して、バケット内側の底面に傾斜をつけ、奥側の曲面半径を大きくすることによって掘削性を改善したバケットを開発した(図-9)。

従来のバケット形状では掘削作業を行う場合、バケット奥に押し込まれて溜まった対象物(石または土)が、さらに押し込まれてくる対象物の受け入れを阻害し、バケットのすくい込みが滑らかに行われず、掘削量を確保できないという現象があった。

それに対して、底面の傾斜および大きなバケット半径によって、掘削時にバケットを山に突入させるに従って、バケット内に押し込まれて傾斜部から曲面部にいたる対象物をさらに滑らせて、該当曲面部を競りあがるようにバケット奥側で巻き上げることができる(図-10)。このため、更なる対象物が押し込まれても、その押し込みが阻害されることがなくスムーズな掘削が可能となる。また、バケット上部のスペースが確保できるため、バケット間口の上部側からの対象物の流れ込みも促進できる。さらに、底面の傾斜によって山への

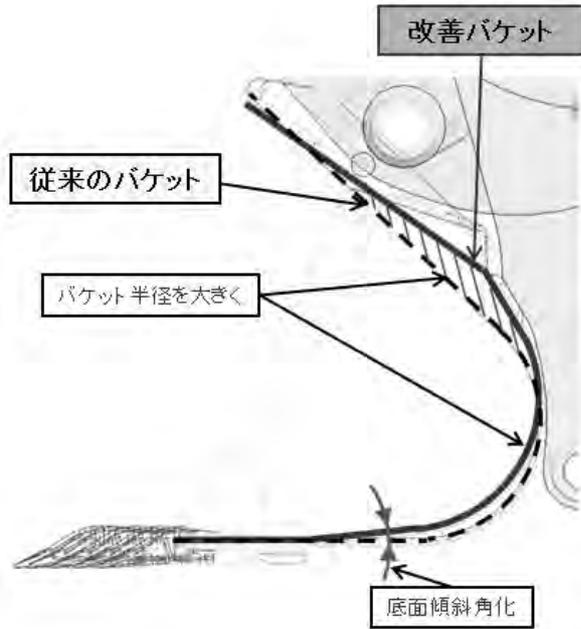


図-9 バケットの掘削性改善

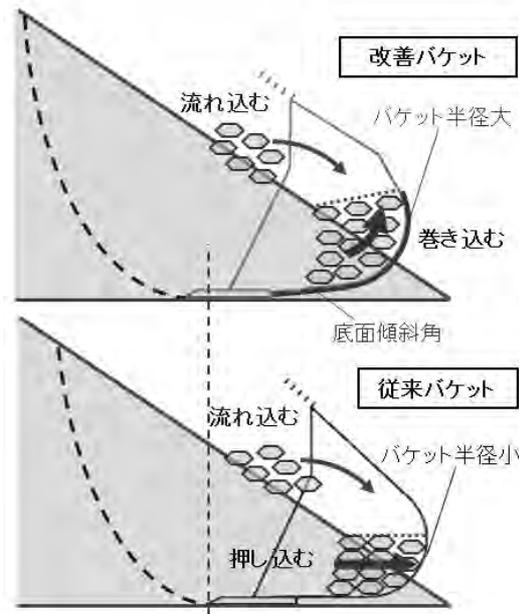


図-10 掘削時の荷の流れ

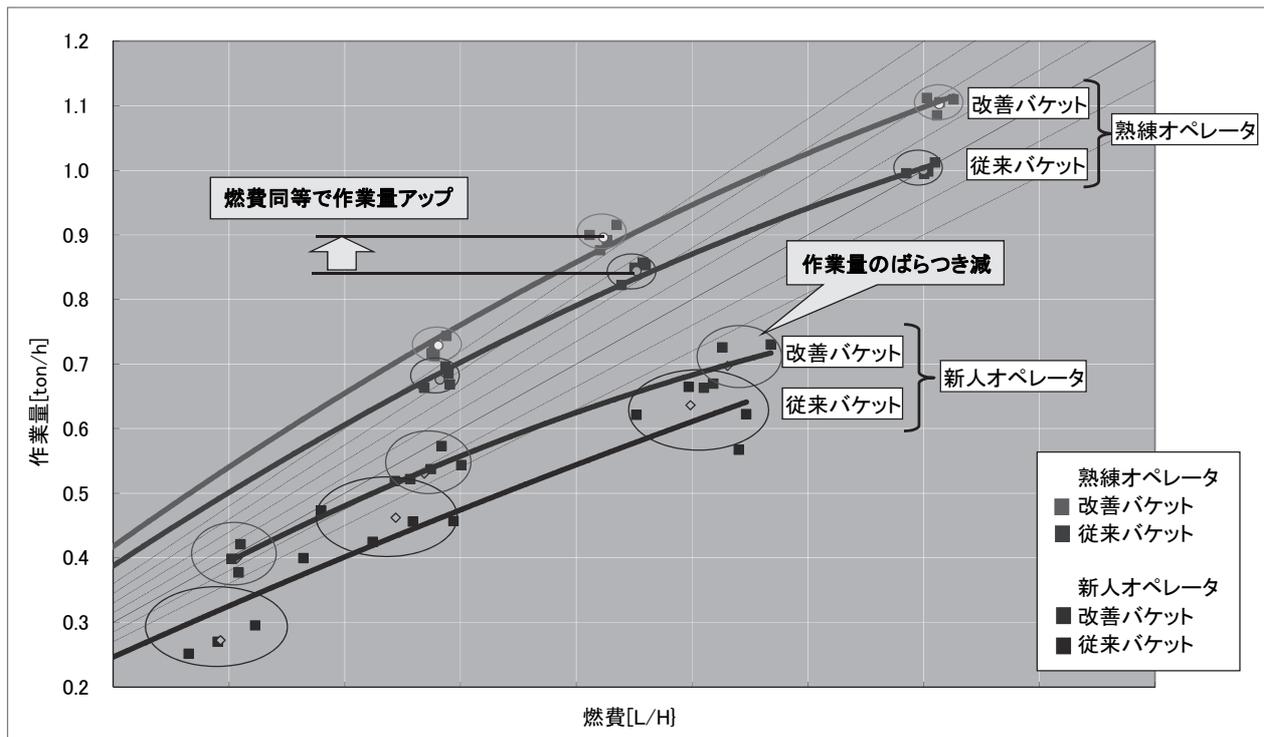


図-11 バケットの作業量比較

突入と同時にバケットに下向きの力が発生するため、ホイールローダの前輪に荷重がかかって牽引力をかけやすくなることが期待できる。

改善したバケットの効果を検証した結果を図-11に示す。バケットを掘削作業に適した形状にすることで、社内試験では同一燃費での作業量が従来バケットに対し7%向上した。また、非熟練オペレータで行った試験では、作業量の向上とともに、積み込み量のばらつきが改善した。

また、一般ユーザに実際にバケットを使用してもらった結果、図-12および表-1のような評価が得られており、オペレータの感覚的にも掘削作業が容易になったことがわかる。

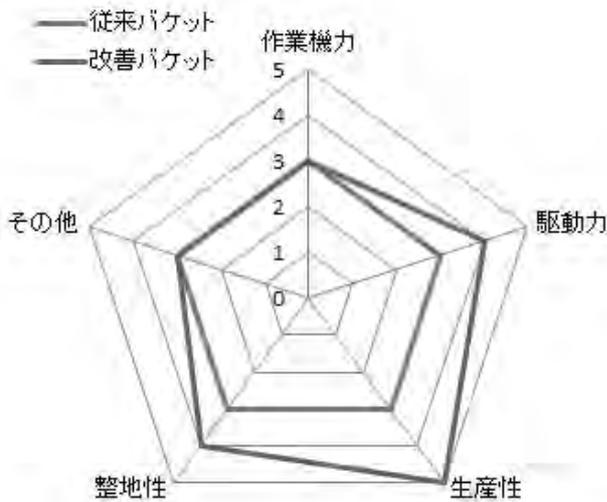


図-12 一般ユーザによるバケット評価

表-1 一般ユーザによるバケットコメント

ユーザオペレータ評価	
①	対象物への整地、押し込み時の駆動力が上がった感じがする。
②	最後まで押し込まなくても容易に荷を満杯にできる。 (特に粘土質・製品[碎石・砕砂]対象物では積込重量アップした)
③	整地時の抵抗感が少なくなった。
④	荷離れが良い。

3.3 作業機のショックレスコントロール

ホイールローダの特に大型の機種では、作業機の慣性が大きいため急停止時の衝撃も大きくなる。従来機から採用しているバケットポジショナ・ブームポジショナにより設定された位置への停止時の衝撃は、ポジショナの緩停止機能により緩和されているが、掘削後や排土後の作動限界での衝突による衝撃は緩和されていなかった(図-13)。

そこで作業機ショックレスコントロールとして、バケット作動限界での衝突時の衝撃を緩和する機能を新規開発した。ブーム角度センサおよびベル

クランク角度センサによりバケットの位置と作動限界との距離を認識し、バケット操作によってバケットが作動限界にある程度近づいたところから、自動的に徐々にバケットのメインバルブ開口量を絞ることでバケットの速度を遅くして作動限界位置で緩やかに停止させる(図-14の実線)。

一方でホイールローダの掘削作業では掘削後の走行開始前にバケットの上方作動限界(チルトエンド)付近でバケットを高速に動かしてバケットに積まれた積荷の位置を調整する操作を行うことがある。そのため、チルトエンド付近からのレバー操作に対しては緩停止機能を制限し、レバー操作のとおりバケットが作動するようにしている(図-14の点線)。

また、衝撃緩和は運転席におけるスイッチ操作により3段階の調整を可能とした。

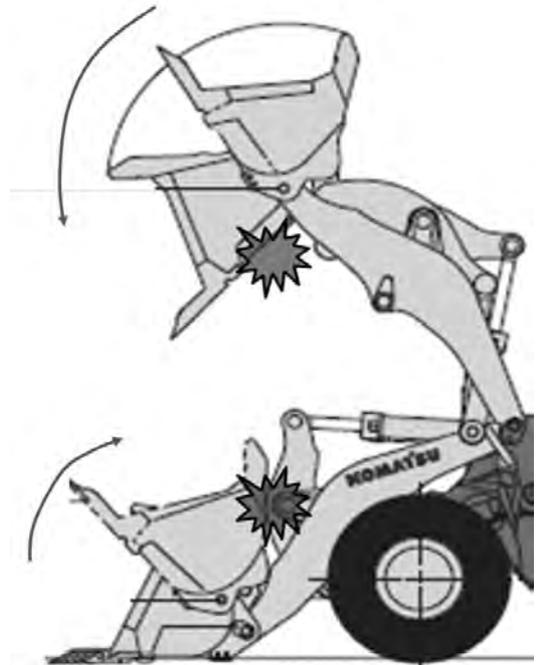


図-13 掘削後・排土後の作動限界による衝撃

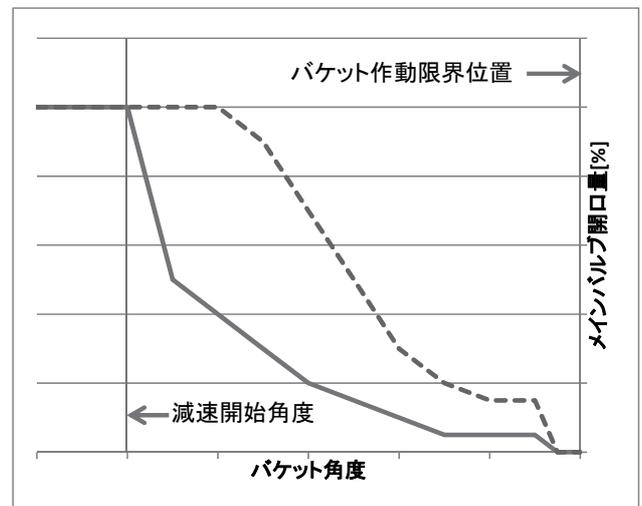


図-14 作動限界でのバケット流量制限

4. 最後に

自動掘削機能により，新入オペレータと熟練オペレータの作業量の差が小さくなり，掘削性改善バケットとの相乗効果により燃費・作業効率の向上を図ることができた。また，作業機のショックレス化を図ることもできたので，熟練オペレータを含む全てのオペレータに対して疲労軽減が期待できる。

今後も更なる燃費・作業効率の向上，作業容易化，疲労軽減に取り組んでいきたい。

25. ペイロード計測システムを搭載した油圧ショベルの開発

－ 建設施工のコスト低減と効率向上の追及 －

キャタピラージャパン株式会社 ○ 白澤 博志

1. はじめに

近年の建設施工分野においては、建設機械に対する環境対応性の向上、省エネルギー化といった持続可能性（サステナビリティ）への貢献が求められる傾向にあり、例として、排出ガス規制（オフロード法）の段階的な強化、燃費基準及び低燃費型建設機械の認定制度の導入等が挙げられる。建機メーカーもこれに呼応した製品開発を遂行する事は当然の事ながら、一方で、建設施工分野においては、日々、施工効率の向上、コスト低減、生産量管理の容易化が求められており、これらのニーズに応える事もまた必須である。

当社では、2015年から油圧ショベル「Fシリーズ」を順次市場導入しており、最新の排出ガス規制オフロード法2014年基準に適合する事は勿論の事、燃料消費量を従来モデルから低減する性能向上も図っている。更に、新たなバリューを付与する為、施工コスト低減及び効率向上に貢献するペイロード計測システム「Cat プロダクションメジャメント」を開発、適用した。本システムは、油圧ショベルバケット内の荷の重量を計量するものである。計量の為に車両やフロント作業機の静止は不要で、通常のトラック積み込み操作の過程で自動的に計量するシステムであるのに加え、高い精度により品質も確保されている。本論文では、このペイロード計測システムの技術について解説する。



図-1 Cat プロダクションメジャメントを搭載した油圧ショベル Cat 336F(L)XE

2. 建設施工における生産土量管理方法

建設施工現場においては、建機等によって動かされた土量の管理が必要であり、また、現場から土砂・岩等の材料をダンプトラックで持ち出す工程においては、最大積載量を順守する為に、積み込み量を適切にコントロールする技量が求められる。

2.1 一般的な計量方法

従来の計量方法として、荷を積載した状態で、ダンプトラックごと固定式/携行式トラックスケールに載り、重量を計測する方法が挙げられる。

(図-2)トラックスケールは計量器として、正確な計測が可能であるが、設置場所が基本的に固定となる為、現場レイアウト、ダンプトラックの走路等の考慮が必要で、導入コストも高価である。碎石現場では、プラントの一部としてトラックスケールが設置されている事が多いが、一般土木では一時的な現場となる為、トラックスケールを設置するケースは、コストの点からも大規模工事現場等、限定的である。



図-2 携行式トラックスケール(一軸)による計量例

2.2 建機のペイロード計測システムによる計量

当社製品のホイールローダ、オフハイウェイダンプトラック、アーティキュレートダンプトラックには、近年、オプション機能としてペイロード計測システムを用意してきた。アクチュエータが受ける圧力やボディのひずみをセンシングする事でペイロードを算出する原理であり、トラックスケールを使用する事無く、生産土量を把握する事が可能となった。(図-3)

一方、油圧ショベルは、上部構造体が旋回するという特有の機構を有しており、旋回操作中、荷に遠心力が働く為、鉛直方向の荷重をセンシングするだけでは正確な計量は困難である。後付けタ

イブのペイロード計測システムが存在してはいたが、簡易的なセンサのみで精度が比較的低かったり、車両・フロント作業機の静止によって計量精度を確保する事が必要な場合もあり、サイクルタイムを悪化させる要因となっていた。更に、装着工事の手間やキャリブレーションの手間も後付けタイプにおいては課題となっていた。



図-3 ペイロード計測システムを搭載した建機の場合

3. Cat プロダクションメジャメント

上述の課題を解決し、社製品の油圧ショベルに工場出荷時から搭載可能な純正ペイロード計測システムとして開発、実用化したのが、Cat プロダクションメジャメントである。

3.1 システム構成

3.1.1 ブームシリンダ圧力センサ

ブームシリンダ内の圧力を計測するセンサが油圧ラインに装備されている。バケット内に荷が入って重量が増加すると、フロント構造物の支点となるブームシリンダの内部圧力が増加する事を利用して、バケット内荷重を算出することができる。

3.1.2 ストロークセンサ付バケットシリンダ

バケットの姿勢（角度）を把握する為、バケットシリンダロッドの動きをセンシングするシリンダ内蔵型センサである。従来の簡易的な後付けペイロード計測システムではバケットの姿勢を考慮しないものも存在していたが、Cat プロダクションメジャメントは、バケット姿勢もセンシングして、高精度に貢献している。また、強固なバケットシリンダガードを装備する事で、センサのハーネスコネクタ部への飛来物等による損傷を回避しており、耐久性／信頼性も確保されている。

3.1.3 ポテンションメータ（角度センサ）

ブーム後端部ピンに装備されたポテンションメータがブームの姿勢（角度）をセンシングし、ブーム先端部ピンに装備されたポテンションメータがアームの姿勢（角度）をセンシングしており、ブーム及びアームの姿勢を検知する。

3.1.4 旋回速度センサ

スイングフレーム部に設置された旋回速度センサは、3軸加速度計とジャイロ機能を有しており、

上部構造体の旋回速度をセンシングしている。旋回操作により、バケット内の荷を含むフロント構造物にかかる遠心力を算出し、ブームシリンダ圧力センサによるペイロード計測値を補正する。この旋回速度センサの採用により、旋回操作中でも、動的にペイロード計測を可能とさせると共に、計測精度の向上にも貢献している。

3.1.5 ピッチ／ロールセンサ

スイングフレーム部に設置されたピッチ／ロールセンサは、車両の前後方向及び左右方向の傾き角度をセンシングしている。車両の傾き具合によって、ブームシリンダ圧力センサによるペイロード計測値に誤差が生じる為、本センサによって正確なペイロード値に補正している。

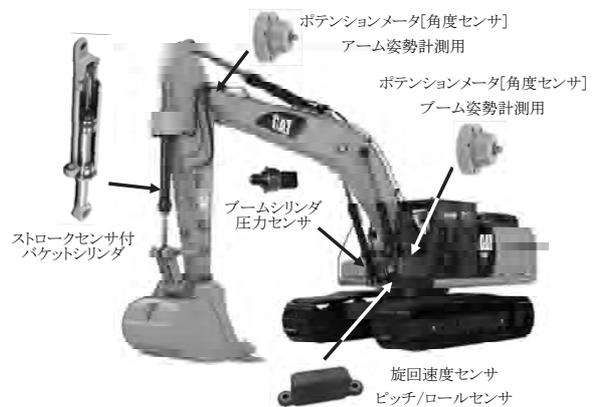


図-4 Cat プロダクションメジャメント センサ群

3.1.6 モニタ

本システムの関連データ表示機能は、標準モニタに統合されており、オペレータ視界の妨げとなる追加モニタの装備は不要となっている。（図-5）



図-5 関連データモニタ表示

モニタにはバケット内荷重、現在積込みを行っているトラックへの積込み量、積込みバケット杯数カウント、積込みが完了したトラック台数のカウント等のデータが表示される。

3.2 ペイロード計測プロセス

本システムは、油圧ショベルがトラックに対して土等の材料を積み込む作業を想定した計量システムであり、油圧ショベルの①掘削、②ブーム持ち上げ+旋回、③トラックへの排土、④掘削ポイントまで持ち下げ旋回、の過程でペイロードを計量するシステムである。

オフハイウェイダンプトラックやホイールローダは、油圧ショベルの様に旋回する機構は無い為、基本的には、鉛直方向の荷重を計測すれば良いのに対し、油圧ショベルは旋回操作が加わるので、正確な計測の為に、鉛直方向の荷重値に対して遠心力の影響を補正する必要がある。本システムでは、掘削してバケット内に荷が入り、ブーム持ち上げ旋回操作を開始した時点から、0.02秒間隔で荷重のサンプリング計測を行い、2~3秒間に集めた100以上の荷重計測データを元に、フロント作業機の姿勢、旋回速度、車体の傾斜に応じて補正を加えた正確なペイロードを算出する。

油圧ショベルのブーム持ち上げ旋回操作中に、ペイロード計測プロセスが進行し、計測開始の為に何等かのスイッチを押す等の操作も不要である事から、オペレータは車両やフロント作業機を静止させる必要が無く、通常のトラック積込作業を行うだけでペイロードが計測できる。(図-6) オペレータにとってはストレスフリーなシステムであり、また、サイクルタイム向上に貢献するシステムとなっている。

車両の動き	モニタ表示	
掘削		前回積込時の計量値表示
持ち上げ 旋回開始		バケット内荷重値リセット 計量状況表示 計量開始
持ち上げ 旋回終了		バケット内荷重表示更新 計量終了
排土		トラック積載量更新 残り積込み量更新 バケット杯数更新
復帰		計量状況表示消灯

図-6 ペイロード計測過程のモニタ表示遷移

3.3 ガイダンス機能

本システムでは、モニタ上で予め現場で積込作業に使うトラックの情報(トラック名称、最大積載量)を登録する事ができ、積込み作業を行う際にそのトラック情報を呼び出すと、該トラックの

最大積載量が目標積込み量として設定される。トラックへの積込み杯数を重ねていくと、積載した土量分が目標積込量から差し引いて表示されていくと同時に、目標積込み量への到達状況を示すアイコン表示が変化していく事で、オペレータは、トラックにあとどれだけ積込みを行えば、目標に達するか瞬時に把握できる。(図-7) 目標積込量を超過して積載すると、アラーム音でオペレータに警告する為、トラックの過積載が回避できる。逆に、過小積載の回避も可能であり、生産効率向上に寄与する。

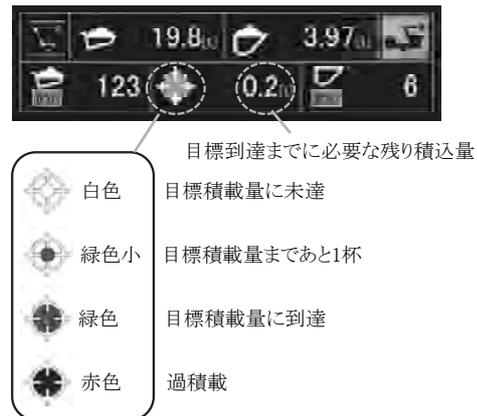


図-7 モニタ上のガイダンス表示機能

3.4 計量精度

本システムは、ブーム持ち上げ旋回動作という動的な状態においても、高い計量精度を発揮する事が可能であり、ペイロード計量値は、±5%の精度を95%の確度で保つ事が可能である。トラックスケール並みのスペックを有しており、生産量の管理に十分耐えられる性能である。尚、高い精度を確保しているものの、検定に合格した特定計量器ではない為、取引・証明用に使用する事はできない。

また、上述の精度を確保する為には、次に示す一定の作業条件を満たす必要がある。

- ・車両傾斜角を10度以下に保つ。
- ・積込み作業時にブームを上げ過ぎない/アームを巻き過ぎない。
- ・持ち上げ旋回操作の2.5秒以上の継続。
- ・持ち上げ旋回時の旋回速度を適度に保つ。(5~35度/sec)

本システムの計量精度を確認する為に、油圧ショベル実機にてトラック積込み作業を行い、Catプロダクションメジャメントによる計量値と、トラックスケールによる計量値との比較を行う試験を実施した。その試験結果を表-1に示す。5回行った比較計測で、本システムの計量値とトラック

スケール計量値との誤差は全て 5%以内におさまっており、スペックが示す通りの高い計量精度を示した。

表ー1 Cat プロダクションメジャメント計測精度確認試験結果

ケース	計測システム	計測結果 [ton]	計測結果 差異
#1	CPM	25.3	+1.2%
	トラックスケール	25.0	-
#2	CPM	24.4	+1.7%
	トラックスケール	24.0	-
#3	CPM	26.1	+4.4%
	トラックスケール	25.0	-
#4	CPM	28.2	+0.7%
	トラックスケール	28.0	-
#5	CPM	23.0	+4.5%
	トラックスケール	22.0	-

*CPM: Cat プロダクションメジャメント

3.5 キャリブレーション

本システムは、計量精度を確保する為にキャリブレーション作業が必要であるが、校正用ウェイトは不要であり、車両単体で簡単な操作を行うだけで作業は完了する。キャリブレーション操作としては大きく2つあり、①ブーム上げ/下げ単動作によるキャリブレーション、②ブーム持ち上げ/持ち下げ旋回動作によるキャリブレーションである。キャリブレーション作業は、数分で完了する内容であり、また、必要とされる頻度はバケット交換時及び6か月毎としており、メンテナンス省力化を図っている。

3.6 計測データ管理

Cat プロダクションメジャメントは、モニタ上にリアルタイムにペイロード計量値を表示するだけでなく、計量データの蓄積も行っており、モニタ上で別途、総積載量、総バケット杯数、総トラック台数を呼び出して確認する事ができる。

また、遠隔で車両状態を管理するシステム「Product Link」が油圧ショベルに搭載されており、Product Link から得られる情報を管理閲覧する「Vision Link」上で、蓄積した計量データ（総積載量、総バケット杯数、総積載量、時間当たり作業量 (ton/hr)、燃料生産性 (L/hr)) を管理する事も可能である。(図-8)

4. Cat プロダクションメジャメント導入の効果

従来の生産土量計量方法に変わり本システムを導入する事で、施工コストの低減、生産効率の向上を主とした、以下の効果が期待できる。

- ・トラックスケールを設置するスペースが無い現場でもペイロード計量が行える。
- ・トラックスケール操作人員が削減できる。
- ・トラックスケールで計測する工程が省略できる為、サイクルタイムが短縮できる。
- ・比較的低コストかつ容易に生産量管理が行える。
- ・オペレータの勘に頼らずに、トラックの最大積載量を順守する積み込み作業が、正確かつ容易に行える。
- ・トラックの最大積載量に対して過小積載を回避して生産効率を向上させる。
- ・計量データの分析により、オペレータに対し省燃費運転及び効率向上運転の指導を行える。

5. おわりに

紹介した Cat プロダクションメジャメントは、現在、Cat 油圧ショベルFシリーズの中でも一部のクラス・機種にのみ用意されている機能であるが、今後は本システムを他のクラス・機種にも拡充して導入し、市場ニーズに応じていく。また、建設施工コストの低減、効率向上に貢献する更なる新技術の開発を常に追求し、リーディングカンパニーとして、マーケットを牽引する役割を担っていく所存である。



図ー8 Vision Link の計量データ確認画面例

26. i-Constructionにおける空中写真測量及びレーザースキャナの 出来形管理への適用について

－ UAV等の出来形管理要領の諸規定設定根拠について －

国土交通省 ○ 近藤 弘嗣
 国土技術政策総合研究所 長山 真一
 アジア航測（株） 石田 大輔

1. はじめに

国土交通省が推進するi-Constructionのトップランナー施策の一つ「ICTの全面的活用」は、土工工事において3次元起工測量、3次元設計データ作成、ICT施工、3次元出来形管理及び3次元データでの納品を行うというものであり、具体的取り組みとして、この流れを定めた15の基準類を昨年度末に発出するとともに、直轄の土工工事において「ICT活用工事」の公告が始まったところである。基準類の中でも、ドローン等の活用を直轄工事の出来形管理にまで認める上で必要な「出来形管理要領」は、3次元データを活用するうえでの革新的な概念である「面管理」を定めた「出来形管理基準」とともにICT活用工事を規定する中心的な通知である。

本稿では、この「出来形管理要領」策定に際しての検討や現場検証の状況、及び基準の根拠について紹介する。

2. 出来形管理要領における計測基準の概要

今般策定したのは、地上型レーザースキャナで取得した3次元点群データを対象とした「レーザースキャナを用いた出来形管理要領」と、UAVによる連続写真からsfmソフトにより復元した3次元点群データを対象とした「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領」である。いずれも測量法に基づく作業規程の準則に位置付けられておらず、出来形管理基準に規定された計測精度±50mmを担保する計測プロセスが存在しない。

そこで、出来形管理要領における精度担保に関する規定については、一定の計測プロセスと現場での精度確認プロセスを規定した。技術毎に以下に示す。

2.1 空中写真測量（無人航空機）を用いる場合

sfmを用いた生成3次元点群の精度に関する早坂ら¹⁾の既往研究によれば、精度に良い影響を与

えるのはラップ率、地上画素寸法である一方、写真測量においてプロセスが規定されているキャリブレーションや焦点距離の固定については、sfmを用いる場合は精度向上にあまり寄与しないことがわかっている。結果として、以下のような規定とした。次章以降でその検証結果を示す。

(1) 計測プロセス規定

- ① 地上画素寸法：1cm／画素以内
- ② ラップ率：進行方向90%，隣接方向60%
- ③ 標定点設置間隔：外周100m間隔以下，天端上200m間隔目途（図-1）。検証点は標定点として利用できない。
- ④ キャリブレーション：写真測量同様の手法の他，セルフキャリブレーションも許容

(2) 精度確認規定

- ① 検証点設置間隔：天端上200m間隔で標定点と交互に設置（図-1）
- ② 検証点精度：x,y,z各成分で各々±50mm以内
- ③ 検証頻度：撮影毎

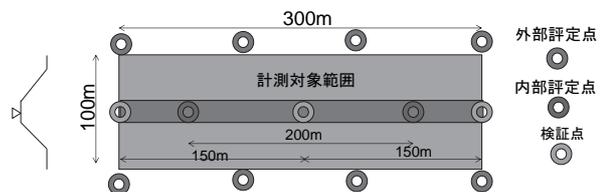


図-1 標定点及び検証点設置イメージ

2.2 地上型レーザースキャナを用いる場合

(1) 計測プロセス規定

事前の精度確認の条件（最大距離以内）で測定

(2) 精度確認規定

- ① 確認方法：実際に利用する最も厳しい条件（最も長い距離）において2既知点間の長

さを計測

② 検証点精度：長さの算出結果が±20mm 以内

③ 検証頻度：事前に1回実施

sfm と違って点密度に限界のあるレーザースキャナの場合は、検証点をピンポイントで取得することが困難であることから、座標間の成分比較ではなく、2既知点間の長さの比較としたものである。

3. 規定案に基づく計測精度検証

出来形管理要領に規定する予定である上記計測プロセスの妥当性を確認するための精度検証を実施した。ただし、2. で述べた規定と検証時では想定している以下の諸元が異なっている。

- ・空中写真測量の地上画素寸法：1cm/画素程度
- ・空中写真測量の進行方向ラップ率：80%

3.1 検証方法

(1) 正解データの取得方法

TSを用いて標高値を測定した。図-2で示すとおり、正解データは管理断面上に測点を設け2m間隔で測定する。これを5断面間（6測線分）について測定する。測線間隔は4mを標準とした。この5断面間を評価範囲として、この範囲を含む形で被評価データの計測を行う。

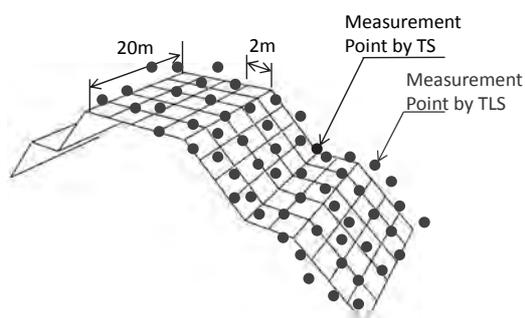


図-2 正解データの測線イメージ

正解データの測定については、試行現場の施工者が実施するか、実験協力会社により実施したが、いずれの場合もTSを用いた出来形管理に準じた計測方法とした。

法面へ踏み入ることが困難な場合は、図-3のようにリボンロッドにシールプリズムを張り付けた器具を製作し、ターゲットの計測値から、地表に接しているテープとの距離と設計法面勾配から、地表との接点の座標を算出した。

なお、本手法については、事前検証により真値との差が±3mm以内であることを確認している。

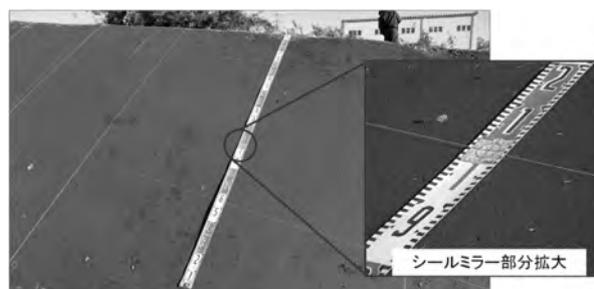


図-3 法面正解データ取得用器具

(2) 被評価データの取得方法

① 地上型レーザースキャナ

設置個所から最も遠い箇所において、点密度10cm以内、2既知点の基線長が±2cm以内となることが確認された地上型レーザースキャナとする。測定については、試行現場の施工者が実施するか、実験協力会社により実施した。

② 無人航空機による写真測量

標定点は概ね100m間隔以内、同程度の数の検証点を設け、すべての点において各成分それぞれ±50mm以内であることを確認した。

地上解像度、ラップ率は先述のとおりとし、sfmソフトはPix4Dとした。撮影及び3次元点群復元作業については著者らで実施した。詳細は別著²⁾による。

(3) 比較方法

標高値を正解データと比較するうえで、平面座標をそろえる必要がある。そこで、被評価計測から得られる点群データを図-4のようにTINデータ化したうえで、正解データと同じ平面座標値における三角面上の標高座標値と正解データとの標高較差を評価する。

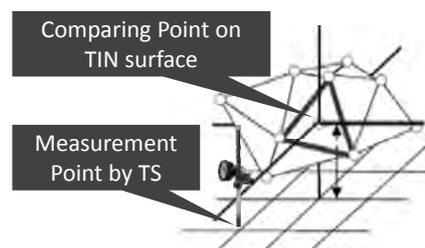


図-4 正解データと被評価データの標高比較方法

(4) 現場諸元

国土交通省直轄の道路事業6現場、治水事業3現場において実施した。

3.2 計測精度検証結果（レーザースキャナ）

9現場におけるTSとレーザースキャナの標高較差について、部位別（天端・法面の別）に取りま

とめた結果が以下のとおりである。

① 天端

- ・標準偏差： 24mm
- ・平均 : +15mm

標準偏差の2倍が±50mmに収まっていることを考えると、概ね±50mmが達成可能な計測精度であると評価できる。具体的な結果の分布は図-5のとおりであり、いくつかの計測値で±50mmを超えているものがあるが、以下の理由により計測精度の評価からは排除できると考える。

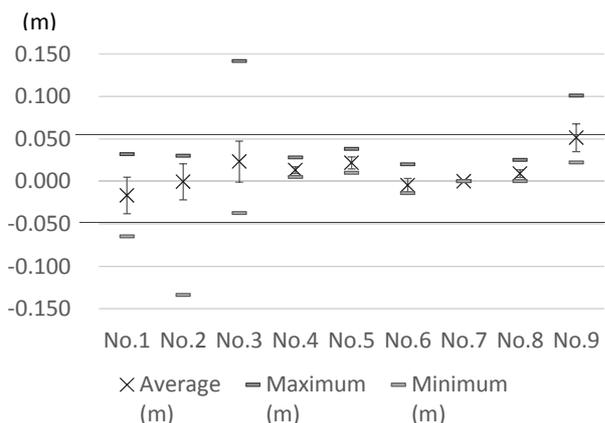


図-5 天端の計測結果の正解データとの標高差

・現場No.3

較差が±50mmを大きく超えている結果が含まれている。この現場を精査すると、ブルドーザによる転圧途中の現場であり、履帯の凹凸により、レーザースキャナがとらえた表面と、正解データとしてのTSがとらえた表面が大きく異なっていた可能性がある。

・現場No.9

平均値が+50mmを超えている状況である。データを精査したところ、2既知点の基線長が±2cm以内となることの確認がなされていなかったため、そもそも精度が担保出来ない条件での測定がなされていた可能性がある。

・現場No.2

原因は特定できないものの、±50mmを超えている計測点は72のうち3点と、エラーとしては5%を下回っているため、実用上問題にならない（例えば別の機材で再測する等により個別にエラーとして排除出来る）ものと考えられる。それ以外の現場も同様に±50mmを超過するのは数点に留まる。

② 法面

- ・標準偏差： 17mm
- ・平均 : +12mm

天端同様、概ね±50mmが達成可能な計測精度であると評価できる。具体的な結果の分布は図-6のと

おりであり、計測値で±50mmを超えている点も各現場1点前後であったことから、実用上問題にならないと考える。

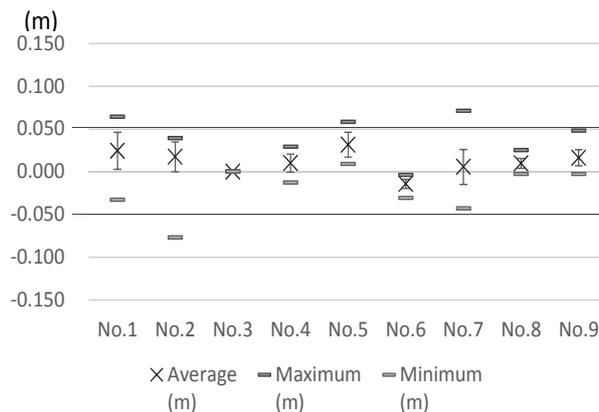


図-6 法面の計測結果の正解データとの標高差

3.3 計測精度検証結果（空中写真測量）

9現場におけるTSと空中写真測量の標高較差について、部位別（天端・法面の別）に取りまとめた結果が以下のとおりである。

① 天端

- ・標準偏差： 24mm
- ・平均 : - 4mm

この結果のみを評価すると、レーザースキャナと遜色ない。±50mmを超えている理由については、現場No.3-1等説明可能なものもあるが（レーザースキャナの現場No.3と同一のため）、多くは原因が特定できず、数も多いことから、±50mmが概ね達成可能だと評価するのは困難であると言える。具体的な結果の分布は図-7のとおりである。

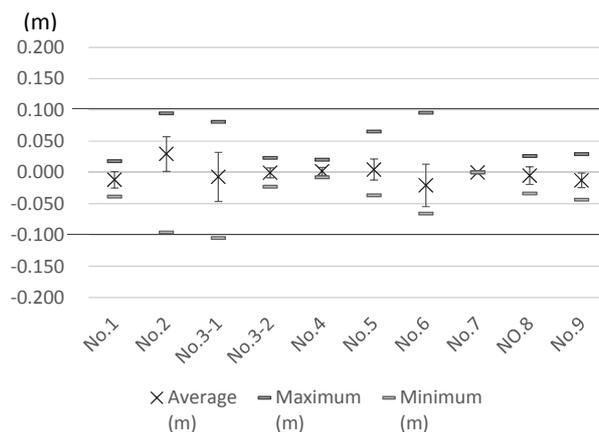


図-7 天端の計測結果の正解データとの標高差

② 法面

- ・標準偏差： 32mm
- ・平均 : + 7mm

標準偏差の大きさから、±50mmが概ね達成可能だと評価するのは困難であると言える。具体的な

結果の分布は図-8のとおりである。

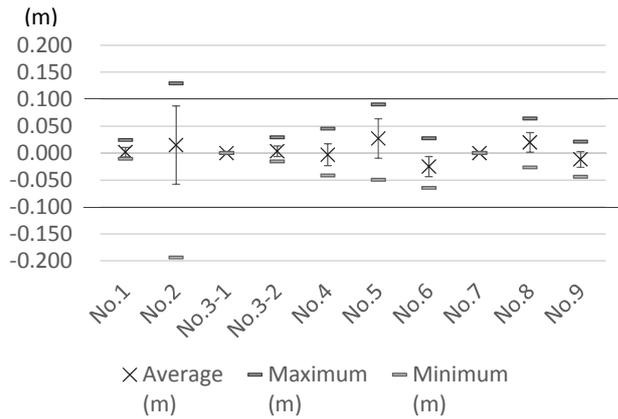


図-8 法面の計測結果の正解データとの標高差

③ 検証点残差

検証点におけるモデルと真値の残差ベクトルの高さ成分については、表-1のとおりである。一応±50mmに収まっているものの、現場No.8のようにギリギリのものもある。

表-1 法面の計測結果の正解データとの標高差

	No.1	No.2	No.3-1	No.3-2	No.4	No.5	No.6	No.8	No.9
検証点数	3	5	1	5	7	4	5	5	7
検証点RMS誤差 垂直(m)	0.019	0.015	-	0.014	0.018	0.018	0.013	0.026	0.017
検証点最大誤差 垂直(m)	0.032	0.027	-0.042	0.023	0.033	0.030	0.026	0.048	0.029
標定点数	5	5	4	5	5	5	5	5	5
標定点RMS誤差 垂直(m)	0.005	0.026	0.005	0.006	0.009	0.016	0.011	0.003	0.016
標定点最大誤差 垂直(m)	0.011	0.032	0.009	0.011	0.014	0.022	0.021	0.005	0.026

現場No.8で最大の検証点誤差が生じたのは、図-9のNo.5の検証点であるが、外周標定点の間隔が140m弱と若干離れていることから、そのほぼ中間に位置する検証点で残差が大きめに出たと思われる。(なおNo.6の位置の検証点も、+23mmとそれなりに大きな残差が出ている。) 制度設計上は、外周標定点は100m間隔程度とすることが望ましいことが分かった。

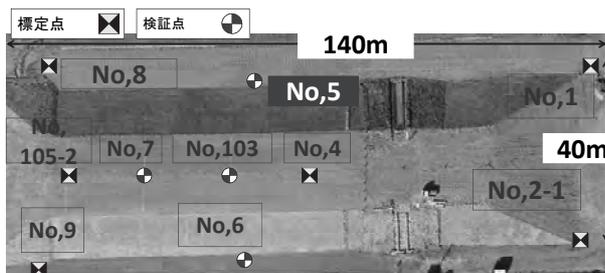


図-9 現場No.8の標定点、検証点分布の様子

4. 規定素案の修正と結論

検証結果より、レーザースキャナについては、当初素案どおりの計測基準とした。一方空中写真測量については、実験で採用した諸元を以下のとおり修正することとした。

① 空中写真測量の地上画素寸法

1cm/画素程度を1cm/画素以内とした。

分解能の低さによる精度悪化については、地上画素寸法を小さくすることで対応できる。ただし、出来るだけセンサーサイズの大きい機材を採用することを想定しており、望遠レンズによりこれに対応することは想定していない(写真測量の常識からすれば、基線高度比が下がることで、高さ精度は逆に悪くなる。)

② 空中写真測量の進行方向ラップ率

80%→90%とした。

写真測量の常識からすれば、基線高度比を半分にするだけで精度が倍悪くなるが、sfmソフトの場合は多くの写真によりマッチング不良を極小化する仕様であると考えられ、経験的にもラップ率の大きさが高さ精度向上にも寄与していることが早坂ら¹⁾の既往研究にも表れていることから、精度向上を期待して、実験時諸元よりも高く設定した。

5. おわりに

15の基準類を発出するべく行った検証作業は、限られた時間の中行ったため、十分なサンプル数による念入りの分析が行われたとは言い難い。要求精度を達成するにはプロセス規定が不十分であったり、逆に無意味に縛りを入れている可能性もあるだろう。今後展開されるICT活用工事の中でさらなる検証作業を進め、i-Constructionの取り組みが逆に現場の生産性を落とすことがないように、基準類については不断の見直しを行う所存である。

謝辞

本検証作業にあたり、UAVによる空中写真測量作業及び3次元点群復元作業は、アジア航測(株)の自主研究という形で多大なる協力いただいた。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 早坂寿彦・大野裕幸他：UAVによる空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証，国土地理院時報，No.127，pp.107～116，2015
- 2) 石田大輔・近藤弘嗣他：UAVによる出来形管理に向けた3次元点群生成と精度検証，第16回建設ロボットシンポジウム論文集，2016(掲載予定)

27. i-Construction で適用する土工出来形の面的管理に 関わる基準類の検討

－ 面的な出来形管理基準の検討について －

国土交通省
国土技術政策総合研究所
施工技術総合研究所

近藤 弘嗣
○ 長山 真一
藤島 崇

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 i-Construction の施策として、平成 28 年度から国土交通省発注工事のうち一定規模以上の土工工事で施工プロセスの各段階において ICT を全面的に活用する「ICT 活用工事」を導入することとなった。

「ICT 活用工事」では、出来形管理において、UAV による空中写真測量やレーザースキャナーを用いて取得した 3 次元点群データを活用することとし、出来形管理項目に、従来の管理断面に現れる幅・法長などの長さ計測に変えて、「面管理」を導入している。

本報文では、「面管理」に向けた管理項目の変更を実現する基準整備に際しての検討や現場検証の状況、及び基準の根拠について紹介する。

2. 出来形管理基準の検討内容

出来形管理基準として、「面管理」を導入するにあたり基本的な考え方は、従前の管理手法で合格となっているものは、面管理においても合格する管理水準とすることとして以下の手順で理論整理、データ取得及び解析を行なった。

2.1 従来の管理項目の品質管理上の整理

従来の出来形管理基準（掘削工、盛土工）では、基準高、幅、法長を計測している（図-1）。これらを管理項目とする品質管理上の意味は、以下の通り整理しておけば十分であると考えられる。

- ① 構造物としての機能確保に必要な形状（幅員・線形・連続性）の確保
 - ・天端の基準高を管理することで、次工事に引き継ぐ基盤としての機能を確認できる。
 - ・天端の幅を管理することで、構造令等で定められている設計条件を満たすための基盤としての最低限の幅員を確保するという機能を発揮できるかを確認できる。
 - ・出来映えを目視で確認することで、線形構造物

としての連続性を確認できる。

② 構造物としての安定性（法面勾配）の確保

・土工部の法面の安定管理として設計の法長より規格値以上の長さを確保することで、勾配が十分緩やかになることを確保できる。

③ 設計数量の確保

・横断面を構成する線分について、設計値より規格値以上の長さを確保することで、体積算出の元となる横断面積が十分大きくなることを確保できる。

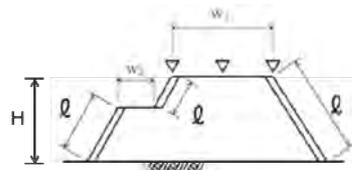


図-1 従来の出来形管理基準（道路土工（盛土））

2.2 面的な形状管理での代替妥当性の整理

面管理では、点群データのそれぞれの計測点について、3次元設計データとの差分（標高較差等）だけで管理することを想定しているが、2.1 で示した品質管理上の要求に対応できることを以下の通り整理した。

① 形状（基準高）の確保

計測対象が標高なので、同等以上の管理は出来る。

② 形状（幅員）の確保

管理対象の両端の法面の形状（標高）を上下限内に制限することで、幅員を確保し得る基盤であるか否かが管理できる。幅員の規格値-100mm を両端に-50mm ずつ配分し、法肩の設計位置から 50mm だけ内側に入った点を通り、設計法面と平行する面が、法面との標高較差等の下限となるようにすればよい（図-2）。

法肩と天端の幅員の関係と同様に、法尻と小段の幅員についても同様の考え方を適用すると、法面の標高較差等の上限が導かれる。

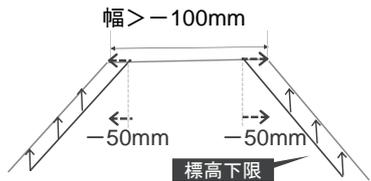


図-2 規格値の換算（幅員）

③ 法面勾配の確保（法長の代替）

同じく、管理対象の両端の法面の形状（標高）を上下限内に制限することで、勾配を管理できる。法長の規格値-100mmを両端に-50mmずつ配分し、法長がその分短い状況を想定すると、法の中心を回転軸として法が立つ方向に回転できる。法肩の標高の上限は天端の基準高の規格値（+50mm）で決まってくるので、回転に伴い法肩が描く円弧と、設計基準高から+50mmだけ高い面との交点を通り、設計法面と平行する面が、法面の標高較差等の上限となるようにすればよい（図-3）。法肩と天端の基準高の関係と同様に、法尻と小段の基準高についても同様の考え方を適用すると、法面の標高較差等の下限が導かれる。

なお、小段の基準高については規格値は無いが、小段には通常、法面排水設備を施工され、その排水工に基準高の規格値があることから、実質的には管理されているとみなすことができる。

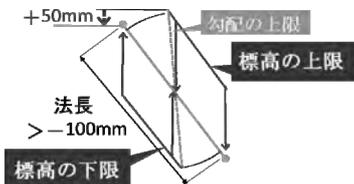


図-3 法長から高さ管理へ変換

2.3 従来の規格値の換算

40mの測点毎の管理断面に関する従来の規格値について、以下の考え方により標高較差等に換算する。

① 基準高規格値の標高較差への換算

計測対象が標高なので、従来の規格値そのままの±50mmとする。河川盛土の場合は-50mmとする。対象とする部位は、天端である。

② 幅員規格値の標高較差等への換算

対象とする部位は、法面である。3次元設計データとの差分を標高較差と水平較差のいずれかで評価することを考える。水平較差も考慮に入れるのは、設計法面が1割勾配より急な場合、水平較差の換算規格値の方が厳しく、安全側の管理を供することができるためである。

標高較差への換算値は図-4のとおり、法肩の可動域が基準高の規格値±50mmと幅員の規格値を配分した-50mmからなるので、設計法肩が、幅員方

向に-50mm、標高方向に-50mm移動した地点を通る法面が下限となる。この時の設計法面との標高較差は、 $-50-50/x$ (mm) である。ここで、 x は比高を1としたときの法肩と法尻間の距離を x として勾配の程度を表したものである。

標高較差の上限値は法尻と小段の幅員の関係から同様に、 $50+50/x$ (mm) と表される。

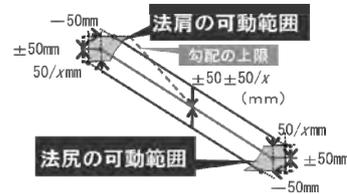


図-4 幅員規格値の換算（標高較差）

水平較差への換算値も法肩、法尻の可動範囲に由来し、下限ないし上限を示す面は、垂直較差の場合と同一である。ただし、設計法面との差分を水平距離で表すことから、図-5のとおり、 $50+50x$ (mm) または、 $-50-50x$ (mm)と表せる。

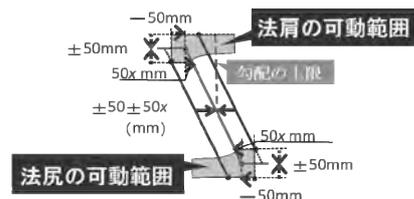


図-5 幅員規格値の換算（水平較差）

③ 法長規格値の標高較差等への換算

②と同じく対象とする部位は、法面であるが、②より規格値が小さい場合（すなわち安全側の管理を供することができる場合）のみ、換算結果を採用することとなる。まずは、図-6で示すとおり、標高較差を V 、水平較差を H 、設計法長を L 、そして法長の規格値に由来し、法長の下限を kL として与える定数を k とする。

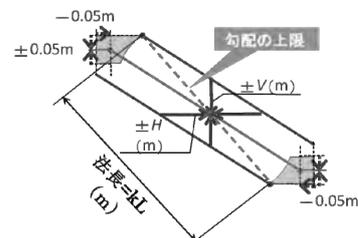


図-6 法長規格値の換算

幾何学的にこれら変数の関係を整理しすると、

$$V = \left(\frac{0.5L}{\sqrt{1+x^2}} + 0.05 \right) - \frac{1}{x} \sqrt{0.25k^2x^2 - \left(\frac{0.5L}{\sqrt{1+x^2}} + 0.05 \right)^2} \quad (1)$$

$$H = \left(\frac{0.5L}{\sqrt{1+x^2}} + 0.05 \right) x - \sqrt{0.25k^2x^2 - \left(\frac{0.5L}{\sqrt{1+x^2}} + 0.05 \right)^2} \quad (2)$$

となる。(1)式と $0.05+0.05/x$ 、あるいは(2)式と $0.05+0.05x$ との大小を比較する。単位を **m** にそろえたため、②の式とは若干変形がなされている。解析的に解くのは困難であるが、以下の特徴から代表的な条件の元で数値代入により、傾向が確認でき、少なくとも 4 割勾配以下通常の条件下においては、②の式の方が小さい、すなわち安全側で管理できることがわかる。

- ・ H 、 V とも、 $L=5m$ の時に最小の値を取る。
- ・ この時の k は 0.98 または、0.96 したがって、法長の規格値は無視してよいと言える。

2.4 管理項目と平均値規格値の決定

2.3 の検討から、管理すべき部位と従来の規格値の換算値としては、以下のとおりとなる。

- ・ 天端：標高較差
(従来の規格値換算値：±50mm)
- ・ 法面 (1 割勾配以上)：標高較差
(従来の規格値換算値：±50±50/x(mm))
- ・ 法面 (1 割勾配未満)：水平較差
(従来の規格値換算値：±50±50x(mm))

ただし、これを面管理の規格値にそのまま適用することは、特に従前の管理断面間の施工精度の現状を無視しており、過剰管理の懸念がある。

また、設計勾配 x により変化する規格値が実用上使いにくいことも懸念されることから、以下の手順で規格値素案を導くこととする。

i) 設計勾配 x を含まない定数化

道路土工指針、河川砂防技術基準 (設計編)、河川堤防指針及びそれらを参考とする地整の標準設計マニュアル類における、土質・岩質毎の標準法勾配の範囲から区分を設定し、区分内で最も安全側、すなわち標高較差等の式の最小値を採用する (図-7)。

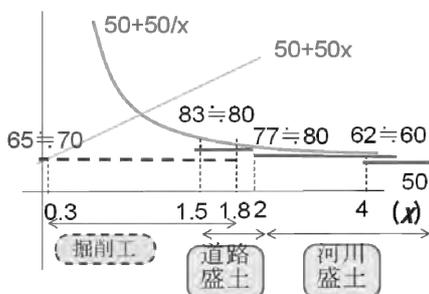


図-7 水平または垂直較差の上下限值

これにより、標高較差または水平較差の上下限值は、

- ・ 掘削法面の上下限值：±70mm
- ・ 道路盛土法面の上下限值：±80mm
- ・ 河川盛土法面の下限値 (4 割勾配以下)：-60mm
(4 割勾配より大きい)：-50mm

と導かれる。

ii) 管理項目の設定

i) の上下限值は、以下の管理項目の設定の根拠となる。

・ 設計数量の担保の観点から、計測値の平均値に対する規格値として採用

従来管理断面に対して規格値が設定されており、数量は 2 管理断面の面積を平均したものに延長を乗じる平均断面法により算出していたので、面管理においても、計測値の平均値が従来の規格値を基に導き出した、i) の値に収まるよう管理されれば、数量の担保としては十分である。

・ 形状管理の観点から計測値全数に対する規格値設定のための目標値として採用

i) の値は抽出検査を想定した上下限值であるため、これを全数管理相当の規格値とするために、次節で紹介する不良率算出にあたっての境界値とする。

2.5 全数規格値設定の考え方

図-8 は、全数計測値の分布と、3.4 の上限値 B_U 、下限値 B_L の関係を模式的に示している。抽出検査を想定した境界値なので、全数管理を行うと境界値を外れた分布が存在し得る。これは「許容すべき不良」であることを踏まえ、下限値を外れた計測点数の割合 (下限不良率 P_L とする。)、上限値を外れた計測点数の割合 (上限不良率 P_U とする。) を、従来手法で合格した現場の施工精度実態調査から求めることで、全数管理に相応した規格値とするものである。施工精度実態調査の結果は、次節で述べる。

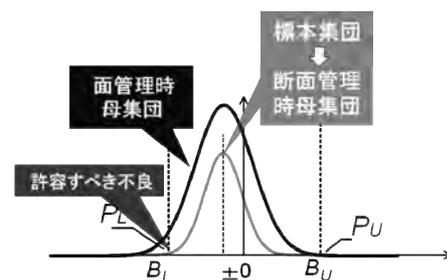


図-8 不良率の考え方

実態の上限不良率及び下限不良率から、全数管理に相応した規格値を設定する考え方は以下のとおりである。

・ 許容不良率 P

工種別 (掘削工、河川盛工等)、部位別 (天端、法面) に現場の実態から求めた上限不良率、下限不良率の大きい方を許容不良率 P とする。

・許容分布の標準偏差 σ_P

平均を ± 0 とし、 B_L を外れる下限不良率 P 、 B_U を外れる上限不良率 P を与える分布の標準偏差を σ_P とする(図-9)。

・全数管理に相応した規格値： $\pm 3\sigma_P$

標準偏差の3倍以内に収まっていれば許容分布にはほぼ(99.7%)入ることから、 $\pm 3\sigma_P$ を個々の計測値に適用する規格値とする。

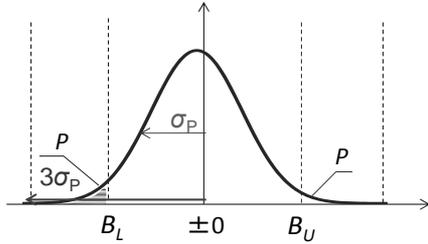


図-9 許容すべき不良率の規格値の設定

3. 結果と考察

3.1 施工精度実態調査結果

工種別・部位別の、 P_L 、 P_U 、 P 及び σ_P 算出結果と、個々の測定値の規格値案(= $\pm 3\sigma_P$)は表-1のとおりである。

表-1 調査結果からの規格値案

		平均値規格値(案)	不良率(%)	σ_P	規格値(個々の計測値) $\pm 3\sigma_P$
		B_U, B_L	$P(P_L/P_U)$		
路体路床	天端	$\pm 50\text{mm}$	6.2(0.2/6.2)	33	$\pm 99\text{mm}$
	法面	$\pm 80\text{mm}$	4.7(4.7/1.1)	48	$\pm 144\text{mm}$
河川盛土	天端	-50mm	8.2(8.2/-)	36	-108mm
	法面	-60mm	6.8(6.8/-)	40	-120mm
掘削	路盤	$\pm 50\text{mm}$	5.9(5.9/2.0)	32	$\pm 96\text{mm}$
	法面	$\pm 70\text{mm}$	2.7(1.7/2.7)	36	$\pm 108\text{mm}$
	天端	$\pm 50\text{mm}$	24.2(24.2/8.1)	71	$\pm 213\text{mm}$

以上の結果を用いて規格値とする場合に、問題が生じ得る以下の点について考察を加えた。

i) 河川掘削の結果について

今回の現場が全て河床掘削であったため、そもそも平滑に施工されることが期待されないことから、バラツキとしては非常に大きくなっている。

一方で、陸部の掘削について、同じ地山掘削である道路の掘削工の結果と違いがあることも考えるにくいこと、またそもそも従来管理の規格値も河川掘削と道路掘削は共通であることから、以後道路掘削の結果を準用することとする。

一方、河床掘削そのものの管理としては、水中計測となることから光学的に計測する機器が適用できる可能性は極めて低く、面管理がそもそも適用されない可能性が高いことから、考慮から外してもよいとした。

ii) 個々の計測値の規格値案に対する適用性の確認

従来の管理手法で合格となる成果が、面管理に

おける規格値でも合格となるかどうかについて、今回の現場において確認したところ、1現場について、路体盛土法面に関する個々の計測値の規格値を満足出来ないことが確認できた。具体的には、地山との擦り付け部分の仕上がりが設計面からかなり逸脱していたことが確認された。通常、天端の数量不足を避けるため、用地境界を侵さない範囲内で設計よりも大きめに盛ることが想定される場所であり、下限値しかない法長での従来管理では特に問題とならなかったが、これが顕在化した形であると考えられる。法面の標高較差の上限値は、法尻の基準高や小段の幅員に由来するが、盛土の最下段についてはそもそもそうした管理がなされていないので、その部位については、面管理から除外するといった応用動作が必要となるだろう。

4. 結論

表-1の $\pm 3\sigma_P$ の値を四捨五入(下限値しかない河川盛土は切り捨て)し、誤差の発生要因が独立している計測精度として個々の計測値に $\pm 50\text{mm}$ を加えた結果として表-2のとおり面管理に適用する出来形管理基準の規格値を策定した。

表-2 面管理に適用する出来形管理基準の規格値

		平均値規格値(案)	規格値(個々の計測値)
		B_U, B_L	$\pm 3\sigma_P$
路体盛土	天端	$\pm 50\text{mm}$	$\pm 150\text{mm}$
	法面	$\pm 80\text{mm}$	$\pm 190\text{mm}$
河川盛土	天端	-50mm	-150mm
		-60mm^{*1}	-170mm
	法面	-50mm^{*2}	-170mm
掘削	天端	$\pm 50\text{mm}$	$\pm 150\text{mm}$
	法面	$\pm 70\text{mm}$	$\pm 160\text{mm}$

*1 法面勾配が4割以下

*2 法面勾配が4割より大きい場合

5. おわりに

15の基準類を発出するべく行った検証作業は、限られた時間の中で行ったため、要求精度を達成するプロセス規程に過不足があることも想定される。今後展開されるICT活用工事の中でさらなる検証作業を進め、基準類については不断の見直しを行う所存である。

参考文献

- 1) 早坂寿彦・大野裕幸他：UAVによる空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証，国土地理院時報，No.127，pp.107～116，2015
- 2) 近藤弘嗣他：i-Constructionで適用する土工出来形の面管理に関わる基準類の検討，第16回建設ロボットシンポジウム論文集，2016

28. 油圧ショベルが各種の動作で排出する 温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定

土木研究所 ○吉永 弘志
国土交通省 野村 正之

1. はじめに

建設機械の排出ガスは、特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律（通称「オフロード法」）の定めにより、原動機単体での測定値により規制されている。規制値は図-1 の例に示すように経年で強化されており、欧米でも同レベルで推移している。さらに近年は新たな変化の兆候がみうけられる。米国 EPA (Environmental Protection Agency) では自動車の路上検査を実施しており、欧州連合 (EU) は、2017 年 9 月以降、実際の路上走行時の排ガス試験 (RDE: real driving emissions test) を順次義務付けることで合意した¹⁾。また、米国では、温室効果ガスの二酸化炭素 CO_2 、亜酸化窒素 N_2O (温室効果は CO_2 の 298 倍²⁾)、およびメタン CH_4 (同 25 倍²⁾) の規制値 (standard) を定めており、重量車のエンジン (HEAVY-DUTY HIGHWAY ENGINES) の CO_2 、 N_2O 、および CH_4 の規制値は 627、0.10、および 0.10 g/hp-hr としている³⁾。自動車の規制は後に建設機械にも波及する見込みが高い。EPA では、確立した見解等ではないと断りつつも、実稼働している建設機械の排出ガスを測定した値を公表している⁴⁾。海外における自動車の規制の動向をふまえると、建設機械の排出ガスについては、(a) 実稼働での測定値、および (b) N_2O と CH_4 の測定値にかかる知見が今後必要となる可能性がきわめて高い。知見不

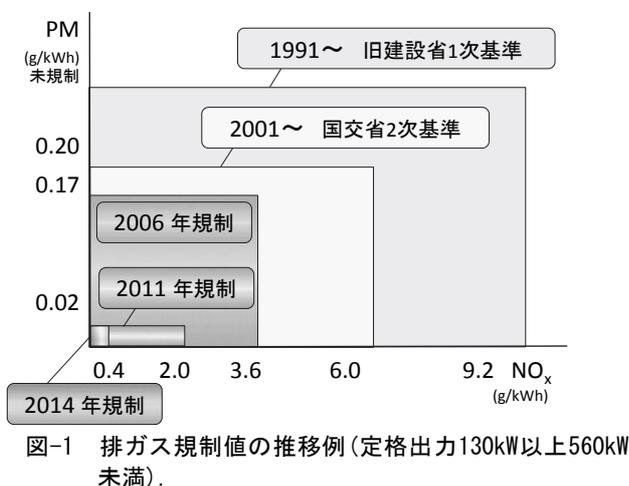


図-1 排ガス規制値の推移例 (定格出力130kW以上560kW未満).

足等により、環境対応の遅れのみならず、拙速な対応 (必要性の低い測定を受け入れや負担の大きい測定方法、評価方法の採択等も含む) になることを防ぐためには、測定にかかる知見を深めておくことが必要である。

土木研究所においては、構内の試験場において搭載式の測定器を建設機械に設置して排出ガスの測定を行ってきた^{5),6),7),8)}。本稿においては測定の概要について紹介するとともに2015年度に測定したデータ⁸⁾を以下の観点で分析した結果等について述べる。

オフロードの法の規制値は仕事量 $W(\text{kWh})$ あたりの排出ガス量 $M_G(\text{g})$ となっているため、排出ガスの濃度 C_G のみならず、エンジンの回転数 R_E 、トルク T_E 、および排出ガスの流量 V_G の測定が必要になる。 R_E の測定は比較的容易であるが、屋外の実機で T_E を直接測定する方法はない。杉谷ら^{5),6),7)} は燃料消費量の測定値および、熱効率の仮定値に基づいて仕事量 (= R_E と T_E の積に相当) を算出し、野村⁸⁾ は ECU (Engine Control Unit) が出力する R_E 、および T_E の信号を利用した。これらの測定値は結果的に屋内でのエンジン単体試験での測定値を振り所にするようになる。一方、排出ガスの流量 V_G については測定方法による違い等が生じる課題がある⁹⁾。

本稿においては、各種の排出ガスの量 $M_G(\text{g})$ と CO_2 の量 $M_{\text{kg-CO}_2}(\text{kg})$ の比を排出率 r_{G/CO_2} とした評価により、測定が簡素になり課題が解消される (表-1) ことについて述べる。この方法は、山本らが推奨する方法^{9),10)} と同一である。

第2章では測定の概要を示す。第3章では、ECU の出力に基づく $W_1=2\pi R_E T_E$ と FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy フーリエ変換赤外分光法) に基づく CO_2 の測定値の相関が良いことを示す。次に M_{CO_2}/W_1 が建設機械の待機、走行、ならし、および掘削の異なる作業内容でも一定値で安定していることを示す。このことは M_G/W での評価と $r_{G/\text{CO}_2}=M_G/M_{\text{kg-CO}_2}$ での評価が等価であることを意味する。最後に現行の屋内のエンジン単体試験での規制値および米国での温室効果ガスの規制値を r_{G/CO_2} に換算し、2015年度の測定値と比較した

例について述べる。

表-1 排出ガス評価量の現場測定.

評価量	オフロード法の評価量(屋内での試験法)	本稿が提案する評価量
	M_G / W	$r_{G,CO_2} = M_G / M_{kg-CO_2}$
	M_G : 排出ガス量(g) W : 仕事量(kWh)	M_G : 排出ガス量(g) M_{kg-CO_2} : CO ₂ 量(kg)
測定値	排出ガス濃度, 排出ガス流量, エンジン回転数・トルク	排出ガス濃度, エンジン回転数
測定値の信頼性	屋外の測定では低い	左記よりは高い
現場適用性	△	◎ (安価かつ正確)

表-2 測定概要.

測定日時	2015年10月~2016年1月
測定場所	土木研究所構内
建設機械	油圧ショベル 20t クラス.DPF 装着 1台
動作	待機, 走行, ならし, 実掘削, 模擬掘削
測定装置と内容	ECU: エンジン回転数, トルク FTIR: 排出ガス濃度 流量計(ピトー管式): 排出ガス流量
ガスの種類	CO ₂ , CO, CH ₄ , N ₂ O, NO, NO ₂ , NMHC, NH ₃ , H ₂ O 他.

表-3 測定等項目(図-3).

(A)	エンジン回転 R_E (1/s). ECU の出力.
(B)	トルク T_E (%). ECU の出力.
(C)	CO ₂ 濃度 C_{CO_2} (%). FTIR での測定.
(D)	排ガス流量 V_G (L/s). 流量計での測定.
(E)	動力相当値 $W_1 = R_E \times T_E \times 2\pi / 100$. W_1 に $T_E = 100\%$ でのトルク値(Nm)を乗じた値が動力(W)になる.
(F)	CO ₂ 排出量 M_{CO_2-1} (g/s) [算定法-1]. $M_{CO_2-1} = R_E \times 6.69 / 2 \times r_G \times C_{CO_2} / 100 \times 1.83$, $r_G = (-21.5 + 14 + 15) / 14 \times C_{CO_2} / 100 + 1$ 6.69: エンジンの排気量(L).排気は2回転で1回. 1.83: CO ₂ の 20°C での密度(g/L). r_G : 軽油の燃焼による体積の増加率.化学式は $C_{14}H_{30} + 21.5O_2 = 14CO_2 + 15H_2O$ を仮定.
(G)	CO ₂ 排出量 M_{CO_2-2} (g/s) [算定法-2]. $M_{CO_2-2} = V_G \times C_{CO_2} / 100 \times 1.83$



図-2 油圧ショベルに搭載した測定装置.

2. 測定概要

測定の概要を表-2 および図-2 に示す。DPF (Diesel Particulate Filter)を搭載した 20t クラスの油圧ショベルに測定装置を設置し、待機、走行、ならし、実掘削、模擬掘削の一連の動作を行い排出ガスの濃度および流量を FTIR およびピトー管式の流量計で測定した。同時にエンジンの ECU の出力よりエンジンの回転数とトルクのデータも取得した。オペレータを3人とし、出力のモードを出力優先と燃費優先の2種類のモードを組み合わせ、13回測定した。測定方法の詳細については既に報告している⁸⁾。

3. 測定値

本稿においては、全13回の測定(CASE-1~13)のうち、1回分(CASE-1 10月測定)の測定値について整理し、考察した結果について述べる。

3.1 測定値の時間変化

仕事量 W および CO₂ の量 M_{CO_2} に関連する測定値および測定値を加工した値の時間変化を図-3 に示す(測定等の項目は表-3)。(B)の ECU のトルク出力は最大トルクとの比(%)となっているため動力(W)を算出するためには最大トルク値が必要である。最大トルク値は一般には公開されていないため、本稿ではこの数値を使用せずにデータ処理した。(F)の CO₂ 排出量 M_{CO_2-1} はエンジンの回転数と燃焼の化学式から排出ガスの流量を計算し、濃度を乗ずることで排出量を計算した値である。温度による体積と密度の変化は相殺されると考えた。(G)の CO₂ 排出量 M_{CO_2-2} は排出ガスの流量の実測値を使用している。

建設機械ではエンジンの回転数を固定して動作を行うので R_E および V_G の変動が小さいが、他の測定値等がほぼ同様な時間変動する傾向がみられる。未整理ではあるが他の CASE も同様な時間変化をしていた。

なお、各測定値には多少の時間差が生じることが考えられるが、異なる時計で時刻を計測したためデータ整理においては時間変動のタイミングが合うように調整した。

3.2 動力と CO₂ の関係

CASE1 の表-3 の(E)動力相当値 W_1 と(F)の CO₂ 排出量 M_{CO_2-1} および(G)の CO₂ 排出量 M_{CO_2-2} の相関を図-4 に示す。データは 0.2 s 単位で取得したが 1.0 s 間で平均している。相関が良いこと、二種類の算定法に大差がないこと等がわかる。平均の時間を長くすれば、相関はさらに良くなった。未整理ではあるが他の CASE も同様な傾向であった。

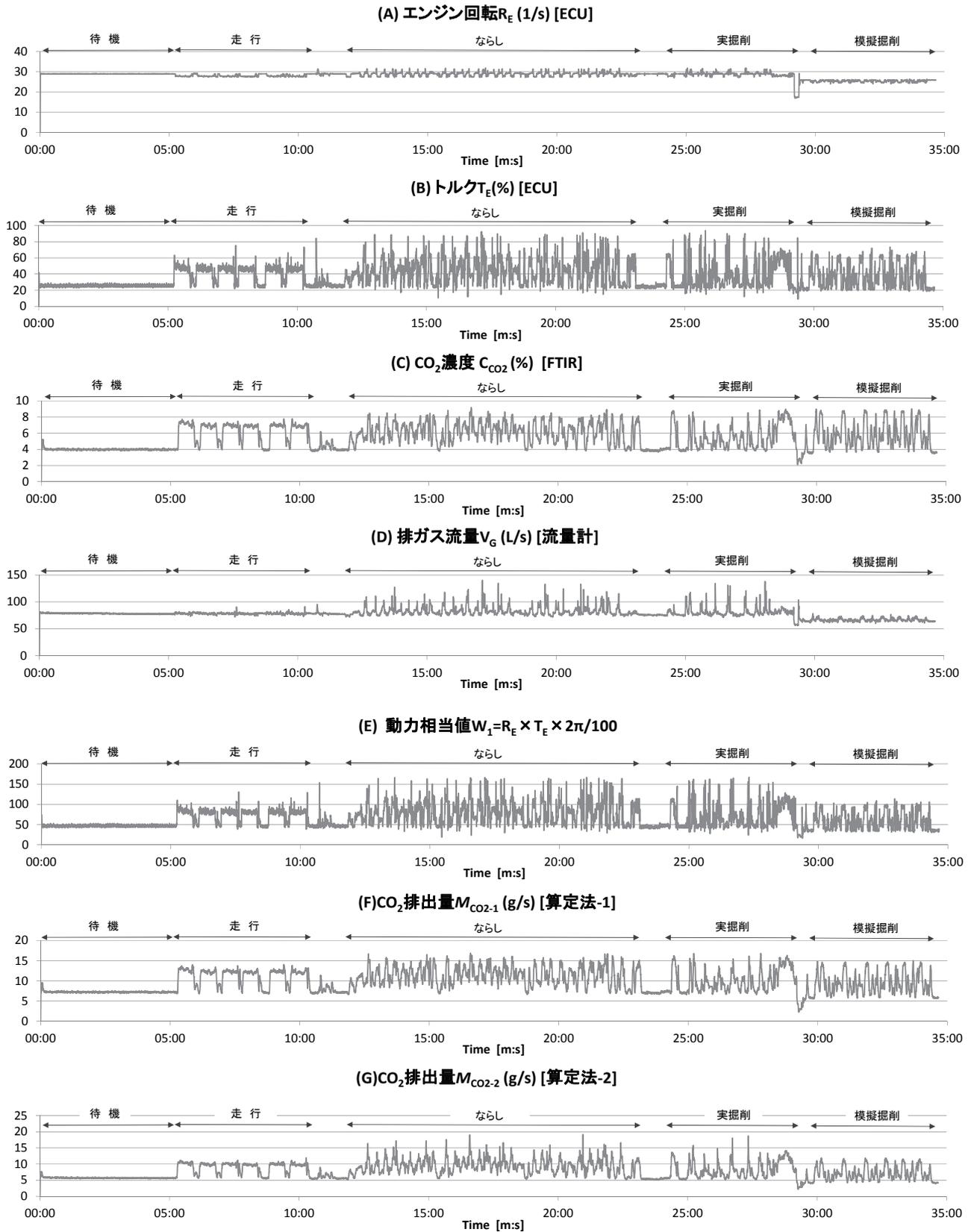


図-3 測定値の時間変化 (CASE-1).

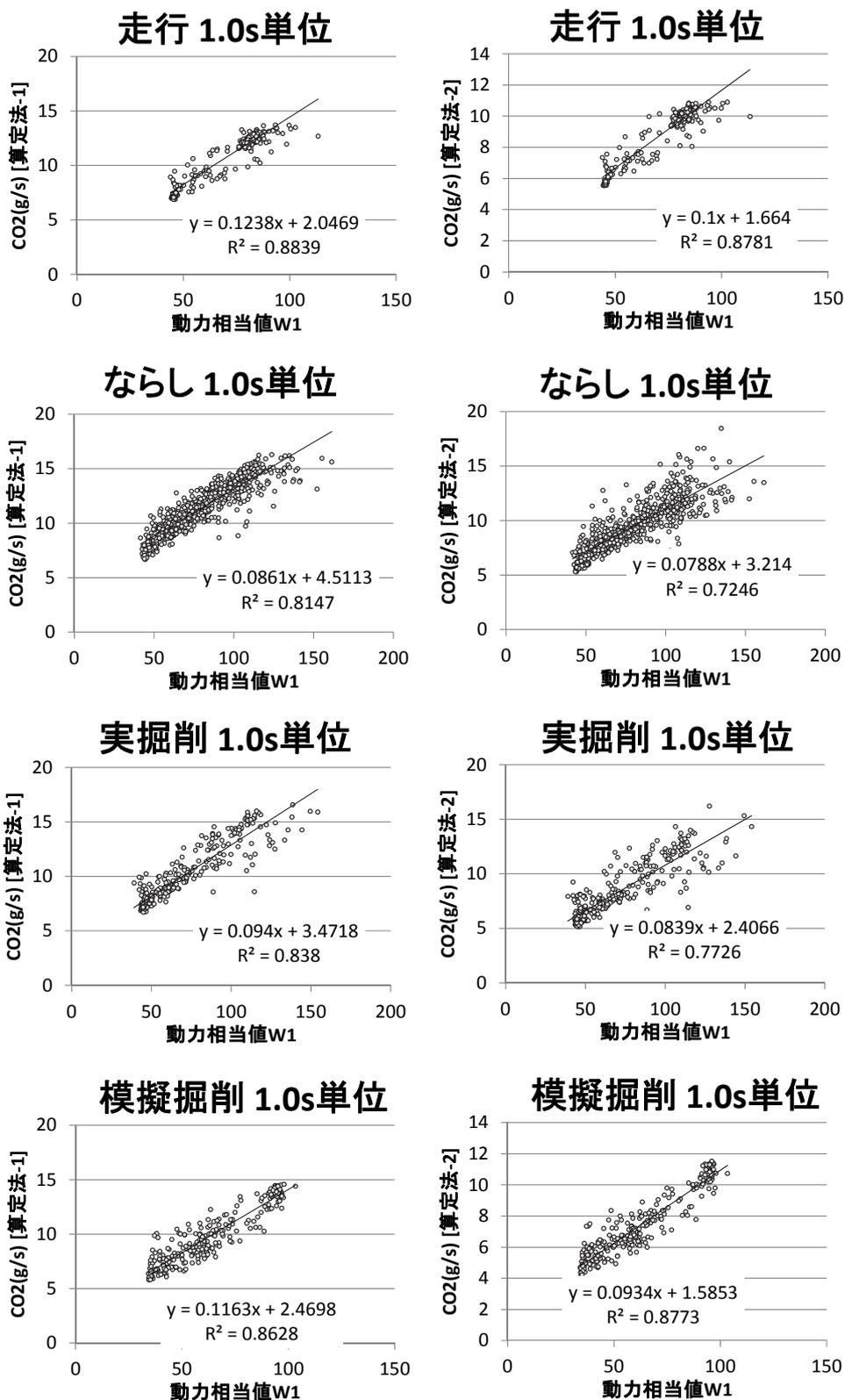


図-4 動力とCO2の相関(CASE-1 1.0 s単位).

次に M_{CO_2}, W_1 , および M_{CO_2}/W_1 を以下の分類で整理した(図-5)。

- (a) 待機, 走行, ならし, 掘削の動作別
- (b) 算法法-1, 算法法-2 の流量の計算方法別

動力相当値 W_1 は走行, ならし, および実掘削で大きくなり, M_{CO_2} は動作別では W_1 と同様の増減をする傾向を把握できる。また算法法-2 では算法法-1 より M_{CO_2} が小さいので流量の測定値が小さくな

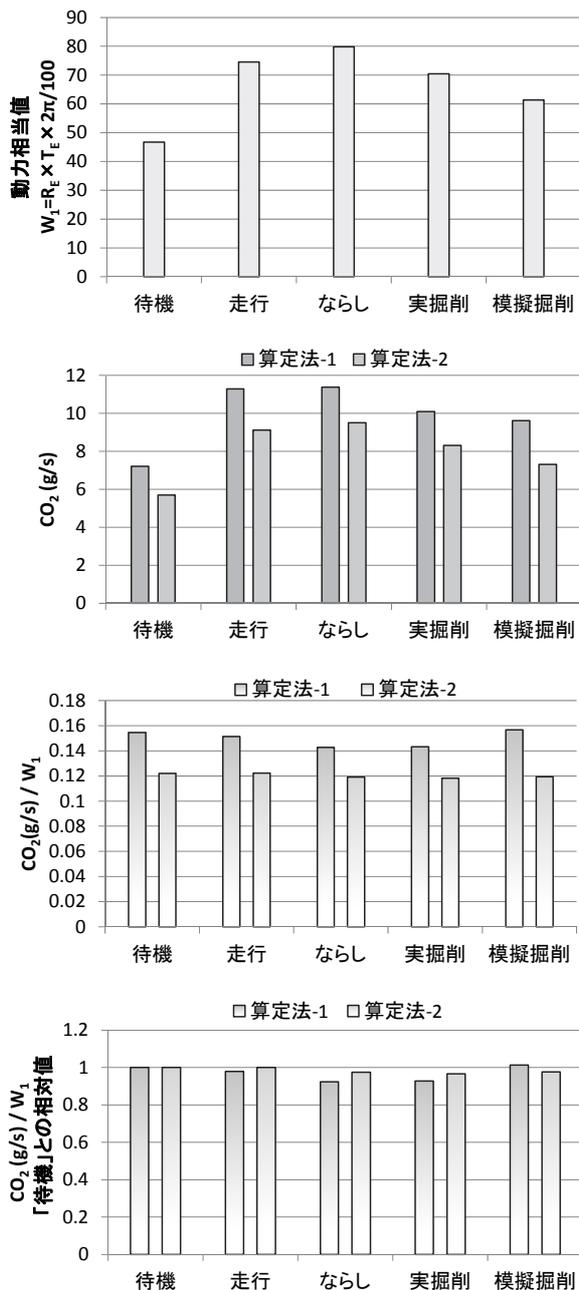


図-5 運転モード、動作、および算定方法別の動力とCO2.

表-4 排出ガス規制値の排出率 $r_{G/CO2}$ への換算例.

熱効率 (%)	規制値(g/kWh)			米国規制 g/kwh換算	$r_{G/CO2}$			
	NO _x	NMHC	CO	N ₂ O,CH ₄	NO _x	NMHC	CO	N ₂ O,CH ₄
20	3.3	0.19	5	0.13	2.67	0.15	4.04	0.11
30	3.3	0.19	5	0.13	4.00	0.23	6.07	0.16
40	3.3	0.19	5	0.13	5.34	0.31	8.09	0.22

る傾向を把握できる。どちらの方法が真値に近いかは不明であるが、ピトー管式の排出ガス流量計の測定値が小さくなる傾向は山本らの報告⁹⁾と一致する。

このように動作の内容、機械のモード、測定方法により W_1 , M_{CO2} , および M_{CO2}/W_1 が異なるが

M_{CO2}/W_1 について「待機」の動作と比較した値 (図-5の最下段) は安定した一定値になっている。このことは M_G/W での評価と M_G/M_{CO2} での評価が等価であることを意味する。したがって、 $r_{G/CO2}=M_G/M_{kg-CO2}$ で各種の排出ガスを評価できる。 $r_{G/CO2}=M_G/M_{kg-CO2}$ で評価する便益は以下である。

- (1) 動力の測定値が屋内でのエンジン試験のデータに依存する矛盾を回避できる。
- (2) 企業秘密的な ECU のデータの提示を求める必要がなくなる。
- (3) 排出ガス流量を測定するための配管、装置等が不要になる。
- (4) 信頼性の確保が困難になると予想される排出ガス流量の測定値を使用しなくても良い。

$r_{G/CO2}=M_G/M_{kg-CO2}$ で評価する方法の妥当性については、今後、他の測定値等でも確認する予定である。

3.3 温室効果ガスおよび窒素酸化物

- (1) 規制値の濃度比への換算

本稿における温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定値を規制値と比較する目的で規制値を式(1)~式(3)で $r_{G/CO2}$ に換算した。換算では熱効率、軽油のCO₂ 排出原単位等の数値を使用した。

$$r_{G/CO2} = L_G / M_{CO2,1kWh} \quad \text{式(1)}$$

$$M_{CO2,1kWh} = Q_{1kWh} \times K_{CO2} \quad \text{式(2)}$$

$$Q_{1kWh} = 100 / \eta \times 3600 / 1,000 \quad \text{式(3)}$$

ここで、 L_G :排出ガスの規制値(g/kWh), $M_{CO2,1kWh}$: エンジンの仕事量 1 kWh で排出される CO₂(kg), K_{CO2} : 軽油の CO₂ 排出係数¹¹⁾0.0687 kg-CO₂/MJ, Q_{1kWh} : 仕事量 1 kWh での燃料の発熱量(MJ), η : 熱効率(%),

これらの式に基づいてエンジン出力 75-130kW の2011年規制値を換算した結果を表-4に示す。

- (2) 温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定値

$r_{G/CO2}$ に換算した温室効果ガスおよび窒素酸化物 NO_x の測定結果を図-6に示す。表-4の規制値を併記している。ただし、欧州の路上走行試験の試験においては、台上試験の規制値を2.1倍する等の措置を講じている¹²⁾こと等を考慮し、NO_x については規制値を2.1倍した。一例ではあるが、測定値は規制値等を下回る値となった。

4. まとめ

海外における自動車の規制の動向から、建設機械の排出ガスについては、(a)実稼働での測定値、(b)N₂OおよびCH₄の測定値にかかる知見が今後必要となる可能性がきわめて高いと考え、構内で実稼働する油圧ショベルについて、エンジンの回転数、トルク、および排出ガスの流量、ならびにCO₂, N₂O, CH₄, およびNO_x等の濃度を測定し、測定値

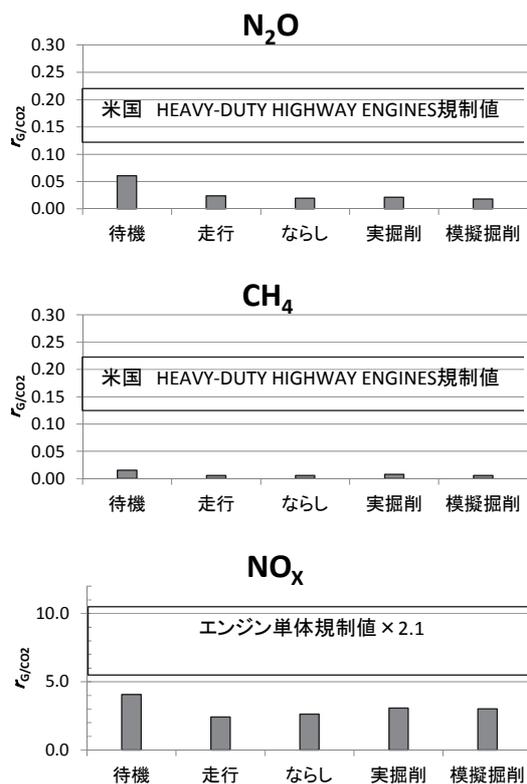


図-6 温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定値。

を分析した。

実機での測定においては、トルク及び排出ガスの流量の測定が課題になるが、解決策として**排出ガスの量 M_G (g)とCO₂の量 M_{kg-CO_2} (kg)の比を排出率 r_{G/CO_2} とした評価量の採択を提案した。** r_{G/CO_2} の評価ではトルクおよび排出ガス流量の測定が不要になる。 r_{G/CO_2} の妥当性の根拠として、動力 W_1 とCO₂の測定値の相関が良いこと、 M_{CO_2}/W_1 が建設機械の待機、走行、ならし、および掘削の異なる作業内容でも一定値で安定していることを示した。

最後に現在の規制値を r_{G/CO_2} に換算し測定値と比較した。

本稿で示したのは1回の測定値のみであり、本稿の扱いは速報的なものである。今後、他のデータの解析、および測定等を行い知見の進展に努める予定である。

謝辞

実験にあたっては、国立環境研究所の近藤美則氏、元土木研究所(現国土交通省)の上野仁士氏、西山章彦氏、および岩田電業株式会社の岩田恒夫代表はじめ金田三千代氏、村田秀二氏、田孝博氏、齋藤遼吏氏、宇賀神哲哉氏に助言、協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) European Commission: Press release, Commission welcomes Member States' agreement on robust testing of air pollution emissions by cars Brussels, 28 October 2015.
- 2) ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, PART 86—CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE HIGHWAY VEHICLES AND ENGINES, §86.1818-12 Greenhouse gas emission standards for light-duty vehicles, light-duty trucks, and medium-duty passenger vehicles.
- 3) ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, PART 1036—CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE HEAVY-DUTY HIGHWAY ENGINES, §1036.108 Greenhouse gas emission standards.
- 4) U.S. Environmental Protection Agency, Populations, Activity and Emissions of Diesel Nonroad Equipment in EPA Region 7, 2010.
- 5) 杉谷康弘, 藤野健一, 石松 豊: 車載型計測装置による建設機械の排出ガス計測方法の検討, 土木技術資料 53-7, 2011.
- 6) 石松 豊, 杉谷 康弘, 西山 章彦, 藤野 健一: 実稼働状態の建設機械排出ガス計測結果における一考察, 平成25年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.195-198, 2013.
- 7) 藤野健一, 西山章彦, 杉谷康弘: 建設機械排出ガスの実態調査事例, ENGINE REVIEW, Vo1.5, No3, 2015.
- 8) 野村正之: 建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討, 建設機械 2016.5, pp.63-69, 2016.
- 9) 山本敏朗: センサベースのポータブル排出ガス計測器による車載計測, ENGINE REVIEW, Vo1.5, No.3, 2015.
- 10) 山本敏朗, 堤玲子, 岩田恒夫, 小川恭弘, 加藤裕: 尿素SCRシステム搭載貨物車の路上走行時におけるNO_x, NH₃およびN₂Oの排出挙動, 公益社団法人自動車技術会 学術講演会前刷集, No.68-13, 2013.
- 11) 環境省: 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン, 2003.
- 12) TRANSPORT&ENVIRONMENT: Real-world Driving Emissions tests:the facts, December 2015.

29. 大規模住宅造成地に適用した丸太打設液状化対策 & カーボンストック(LP-LiC)工法の事例紹介

飛島建設株式会社
飛島建設株式会社
株式会社ミサワホーム総合研究所

○ 沼田 淳紀
村田 拓海
松下 克也

1. はじめに

COP21 では、世界共通の長期目標が立てられ、これに 196 カ国が同意し、今後各国はこれに向けた対応を行うこととなる。一方、2016 年熊本地震においても液状化による被害が発生し、地震国日本では液状化対策が今後さらに望まれると考えられる。日本の森林資源は現在極めて豊富で、樹木を育てる時代から使う時代へとパラダイムシフトしている。木材の長期利用は、地球温暖化緩和に大きく貢献し資源も豊富であることから、木材を大量に使用し液状化対策とする「丸太打設液状化対策&カーボンストック工法 (Log Piling Method for Liquefaction Mitigation and Carbon Stock, 以降、LP-LiC 工法と記す)」が実用化されている。

この工法は、丸太を液状化の発生しやすい地下水位の浅い地盤に打設することで、打設した丸太の体積分地盤を密実にし、液状化対策を行うものである。丸太は、基本的には地下水位以深に没するので、腐朽などの生物劣化を生じることがなく¹⁾、これにより木材に炭素を半永久的に貯蔵できるのが大きな特徴である。

今までに、実験的な施工に加え、戸建て住宅、集会所、集合住宅、公園など比較的小規模な施工が実施されてきた。今回、約 1.6ha の大規模住宅地に本工法が適用された。本報では、この事例について、工事にいたる経緯、設計、工事概要、炭素貯蔵効果について紹介する。

2. 工事にいたる経緯

大規模分譲住宅「アルビオコート検見川浜」の造成工事では、初めて大規模な液状化対策工事に LP-LiC 工法が採用された。

表-1 に、「アルビオコート検見川浜」の事業概要を示す。2011 年東北地方太平洋沖地震 (マグニチュード：9.0、千葉市美浜区真砂における震度：5 強) では、当該地点の敷地内に

明確な液状化発生の記録が確認されていないが、敷地北西側では大量の噴砂が確認され、また、千葉県の液状化しやすさマップでも液状化の可能性が示されていることから、当該地点での液状化対策が実施された。対策工法には、サンドコンパクションパイル工法、砕石パイル工法、鋼管杭工法と LP-LiC 工法の比較が行われ、LP-LiC 工法が、低振動低騒音で周辺環境への影響が少ない、林業の活性化や炭素の地中貯蔵による地盤温暖化緩和策が図れる、(一財)先端建設技術センターの建設技術審査証明を取得し対策効果に裏付けがある、といった理由により採用された。

3. 設計

LP-LiC 工法の設計では、主に、丸太径、丸太長さ、丸太打設間隔、丸太頭部深度を決める。液状化判定に対する設計は、既往の設計法を用いる。丸太頭部深度は、丸太の生物劣化を考慮するために行うものである。

図-1 に、当該地点のボーリング調査結果の一例を示す。当該地点は、昭和 30 年代までは浅瀬の海域であり、昭和 40 年代前半に埋め立てられた。GL-3.65m 付近が旧海底面と考えられ、その上位には粘性土またはシルトによる埋土層があり、旧海底面以深には砂層が堆積している。砂層の上端面付近に N 値の低い層があり、液状化発生の可能性がある。

液状化に対する目標性能は、国土交通省(都

表-1 アルビオコート検見川浜の事業概要

項目	内容
所在地	千葉県千葉市美浜区真砂三丁目 (旧真砂第4小学校跡地)
開発面積	16,554.85m ²
区画数	97区画 (平均宅地面積 137.9m ²)

市局)の「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針(案)」²⁾にならい、GL-5m以浅の各層が「A:顕著な被害の可能性が低い」となることとした。液状化判定は、建築基礎構造設計指針³⁾に従った。地震動はマグニチュード7.5、地表面水平加速度200Galとした。

LP-LiC工法の液状化対策に関する設計は、サンドコンパクションパイル工法のA法による設計に用いられる図⁴⁾を参考に、 N 値を補正 N 値に拡張した。図-2に、用いた原地盤と丸太打設後の丸太間地盤の補正 N 値の関係を示す。この図より、原地盤における補正 N 値から丸太打設後丸太間地盤における補正 N 値を改良率に対して推定し、丸太径と丸太打設間隔を設定した。この結果、丸太末口径0.15m、丸太打設間隔1.0mとした。表-2に、各ボーリングについて、原地盤と設計で求められた液状化に対する最小の安全率を示す。原地盤では、一部で安全率が1.0を下回る箇所があり、丸太を打設することで、設計ではこれらが1.0を上回るように丸太末口径と丸太打設間隔を設定した。図-3に、国土交通省指針における液状化判定結果を示す。B1とB2の「顕著な被害の可能性が低い」のレベルから、Aの「顕著な被害の可能性が低い」のレベルに改良する設計とした。

丸太頭部深度は、地下水位と建設される構造物の深度より決定した。木材は、地下水位以深では生物劣化を生じないので、丸太は地下水位以深に設置するのが基本である。ただし、地盤は、毛管現象により自由水面よりも高い位置まで飽和状態にあるので、毛管水頭分を考慮した^{1),5)}。地下水位は変動するので、その下限値を設定するが、一時的な地下水位低下は生物劣化に影響しないので大局的な地下水位変動を考えた。図-4に、敷地内10地点における地下水位観測結果を示す。図中には、標準貫入試験(以降、

SPTと記す)のボーリング孔内水位も併記した。一様粒径の細砂では毛管水頭を0.5m程度以上見込めること⁶⁾、地下水位の観測記録より、生物劣化に対する丸太頭部深度は、GL-1.0mとした。さらに、貯水槽の埋設深度との関係から最終的に丸太頭部深度をGL-1.28mとした。なお、丸太頭部は、碎石により充填するが、空気と触

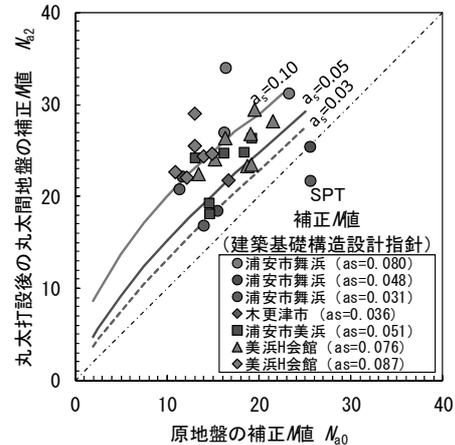


図-2 原地盤と丸太打設後の丸太間地盤の補正 N 値の関係

表-2 ボーリングごとの液状化に対する安全率

ボーリングNo	最小の液状化に対する安全率 F_L (最小) GL0.0m~5.0m	
	原地盤	設計値
No.1	2.46	2.46
No.2	0.96	1.17
No.3	0.97	1.18
No.4	2.40	2.43
No.5	1.16	1.44

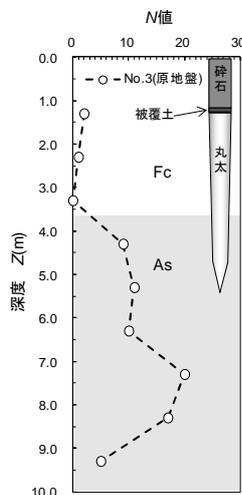
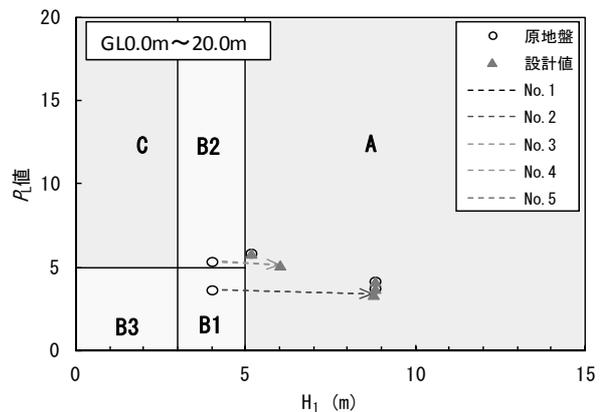


図-1 当該地点のボーリング調査結果の一例



判定結果	H_1 の範囲	D_{50} の範囲	N_2 の範囲	液状化被害の可能性
C	3m以下	5mm以上	5以上	顕著な被害の可能性が低い
B3	3m以下	5mm未満	5未満	顕著な被害の可能性が比較的低い
B2	3mを超え、5m以下	5mm以上	5以上	
B1	3mを超え、5m以下	5mm未満	5未満	顕著な被害の可能性が低い
A	5mを超える	-	-	

図-3 国土交通省指針における液状化判定結果

れやすい面ができるので、空気を遮断する目的で無機質の土質系材料（被覆土）で被覆した。改良深さは、使用する丸太の標準長さが4mで、これに充填材の深さを加えGL-5.28mとした。丸太の樹種は、県産材のスギを50%以上使うこととし、残りは長野県産材のカラマツを使用した。

表-3 に、液状化対策の概要を示す。図-5 に、丸太伏せ図と断面図を示す。液状化対策は、道路と歩道を除く 97 宅地の全面に実施した。

4. 工事概要

工事の実施期間は、2015 年 8 月 1 日～12 月 15 日である。表-4 に、使用機械を示す。図-6 に、施工手順を示す。敷地が広大であるため、丸太を運搬する機械と砕石運搬のためのタイヤ

ショベルを用いた。丸太打設は、鋼管を先行回転圧入後、丸太を圧入した。その後、被覆土を投入し、人力で締め固め、砕石を投入し、バイブレータで締め固めた。施工速度を上げるために、鋼管の先行回転圧入用に、一部専用の削孔機を用いて無排土で削孔を行った。これらを 3 パーティーで実施した。写真-1 に、施工状況を示す。

丸太打設後に丸太間地盤で、SPT により品質管理試験を実施した。表-5 に、液状化に対する品質管理試験結果を示す。SPT 結果より液状化に対する安全率を求めた。GL-5m 以浅についていずれも液状化に対する安全率が 1.0 以上であることを確認した。図-7 に、原地盤、設計値、丸太打設後の液状化に対する安全率の深度分布の一例を示す。原地盤では、深度 4.5m

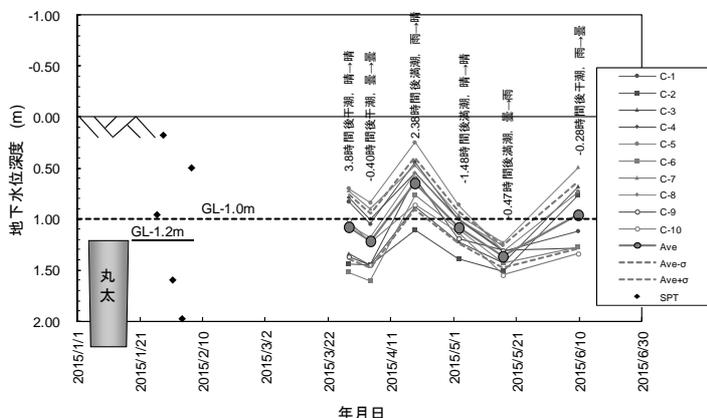


図-4 地下水位観測結果

表-3 液状化対策の概要

項目	内容
改良面積	13,382.29m ²
改良深さ	5.28m
改良体積	70,658m ³
丸太寸法	末口 0.15m×長さ 4.0m (先付けあり、皮剥ぎ、テープ付き)
丸太打設間隔	1.0m (正方形配置)
打設点数	7,000 本 (スギ) +6,420 本 (カラマツ) =13,420 本
丸太使用材積	1,207.8000m ³



図-5 丸太伏せ図と断面図 (丸太打設間隔 1.0m)

付近で FL<1.0 であった。設計では、このような地盤を FL \geq 1.0 となるように LP-LiC による丸太打設位置を設定した。LP-LiC 工法を実施することで、液状化に対する安全率は、設計値をさらに上回る結果が得られた。

丸太打設後、地盤の長期許容鉛直支持力度を確認するために、6 地点で平板載荷試験 (JGS 1521-2012, 平板直径 0.30m) を実施した。平板載荷試験は、丸太打設間地盤で実施した。表

表-4 使用機械

機械名称	型番	用途	台数
丸太打設機	BA100 (10t)	先行回転圧入, 丸太圧入	2
丸太打設機	SPD20FL (20t)	先行回転圧入, 丸太圧入	1
削孔機	SW1565	先行回転圧入	1
運搬機	ヤドカリ	丸太運搬	1
タイヤショベル	WA30 (0.4m ³)	碎石運搬	2
バックホウ	PC128 (0.45m ³)	整地等	1
発電機		パイプレータ碎石締固め	3

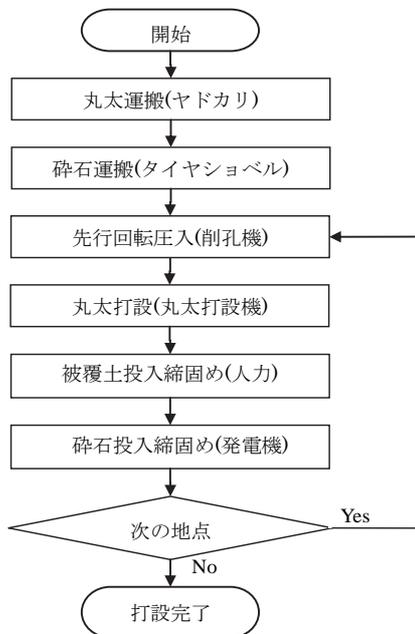


図-6 施工手順



写真-1 施工状況

-6 に、求められた長期許容支持力度を示す。いずれの地点も、120kN/m² の荷重段階においても極限荷重に達せず、長期許容鉛直支持力度は 40kN/m² 以上で、設計上必要な 30kN/m² を十分上回ることが確認された。

5. 炭素貯蔵効果

LP-LiC 工法の大きな特長は、丸太に固定された炭素を半無限に貯蔵できることである。今までの比較的小規模な事例において、丸太による炭素貯蔵量は、工事による二酸化炭素排出量の 10 倍を超え、大幅に上回ることが確認されている⁷⁾。

図-8 に、本工事によって丸太に貯蔵された炭素量と工事によって排出された二酸化炭素量を示す。なお、数値はいずれも二酸化炭素に換算している。本工事では継ぎ材を用いていないので、継ぎ材による排出は無い。工事によって排出される二酸化炭素量は、現場の敷地内で施工によって排出されるもののみを対象とし、敷地外の材料などの運搬や通勤、現場事務所の電気などによる排出は対象としていない。

本工事によって丸太に貯蔵された総炭素量

表-5 液状化に対する品質管理試験結果

ボーリング	深度	標高	原地盤	設計値	丸太打設後	判定
	m	KBM	FL	FL	FL	
No. 1	0.10	3.30	*2*5	*2*5	*2*5	OK
	0.60	2.80	*5	*5	*5	OK
	1.05	2.35	*5	*5	*5	OK
	1.55	1.85	*5	*5	*5	OK
	2.50	0.90	*5	*5	*5	OK
	3.35	0.05	*5	*5	*5	OK
	3.85	-0.45	2.46	2.46	2.60	OK
	4.50	-1.10	2.47	2.47	2.57	OK
No. 2	0.35	3.06	*2*5	*2*5	*2*5	OK
	0.85	2.56	1.63	2.34	2.59	OK
	1.50	1.91	1.04	1.37	1.35	OK
	2.50	0.91	1.17	1.56	1.01	OK
	3.43	-0.01	*5	*5	*5	OK
	3.93	-0.52	1.07	1.33	*5	OK
	4.50	-1.09	0.96	1.17	1.63	OK
No. 3	0.50	2.90	*5	*5	*5	OK
	1.30	2.10	*5	*5	*5	OK
	1.80	1.60	*5	*5	*5	OK
	2.50	0.90	*5	*5	*5	OK
	3.33	0.07	*5	*5	*5	OK
	3.83	-0.43	1.11	1.42	2.35	OK
	4.50	-1.10	0.97	1.18	1.77	OK
No. 4	0.15	3.23	*2*5	*2*5	*2*5	OK
	0.58	2.81	*5	*5	*5	OK
	0.93	2.46	*5	*5	*5	OK
	1.30	2.08	*5	*5	*5	OK
	1.80	1.58	*5	*5	*5	OK
	2.50	0.88	*5	*5	*5	OK
	3.18	0.21	*5	*5	*5	OK
	3.68	-0.29	2.41	2.41	2.41	OK
	4.50	-1.12	2.40	2.43	2.43	OK
	No. 5	0.13	3.31	*2	*2	*2
0.58		2.86	*5	*5	*5	OK
0.95		2.48	3.28	3.28	1.64	OK
1.20		2.23	2.83	3.05	1.30	OK
1.70		1.73	*5	*5	*5	OK
2.50		0.93	*5	*5	*5	OK
3.30		0.13	*5	*5	*5	OK
3.80		-0.37	1.40	1.84	2.44	OK
4.50		-1.07	1.16	1.44	2.46	OK

は、検討対象層

液状化判定外メッセージ

- *1 : 液状化判定を考慮しない
- *2 : 地下水位面以浅に存在する土層
- *3 : 液状化判定深度以深に存在する土層
- *4 : 洪積層の土層
- *5 : FC > 35% かつ $I_p > 15$ の土層
- *6 : D₅₀ > 10mm の土層
- *7 : D₁₀ > 1mm の土層

表-6 地盤の長期許容鉛直支持力度

地点番号	降伏荷重 q_y (kN/m ²)	極限荷重 q_u (kN/m ²)	許容支持力 q_a (kN/m ²)	最大沈下量 S_{max} (mm)	判定 $q_a \geq 30$
No. 1	—	120以上	40以上	1.59	OK
No. 2	—	120以上	40以上	1.35	OK
No. 3	—	120以上	40以上	1.27	OK
No. 4	—	120以上	40以上	2.29	OK
No. 5	—	120以上	40以上	1.15	OK
No. 6	—	120以上	40以上 </td <td>2.01</td> <td>OK</td>	2.01	OK
備考	「—」は、降伏点認められず.		$q_y/2$ or $q_u/3$ の小さい値		

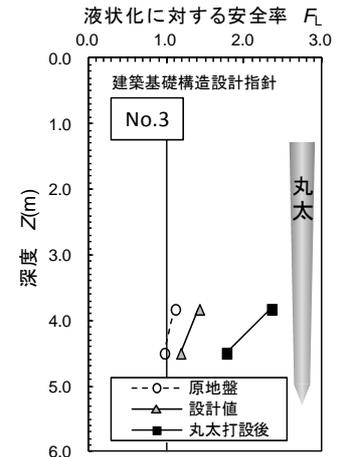


図-7 原地盤・設計値・丸太打設後の液状化に対する安全率の深度分布の一例

(二酸化炭素換算値)は 790.6t-CO₂、工事によって排出された総二酸化炭素量は 37.7t-CO₂、その収支は 753.0t-CO₂の貯蔵側であった。

図-9 に、既往の工事における丸太材積 1m³ 当たりの丸太による炭素量と工事による二酸化炭素排出量(二酸化炭素換算)の収支を示す。使用する樹種により密度が異なるので、それにより値は異なるが、本工事においてもカラマツの場合もスギの場合も、既往の工事事例と同様の傾向を示すことがわかる。このように、工事の丸太による炭素貯蔵は、既往の計測結果と同様に、丸太打設間隔が 1m と広く大規模な今回の事例においても、炭素貯蔵効果が極めて大きいことが確認された。

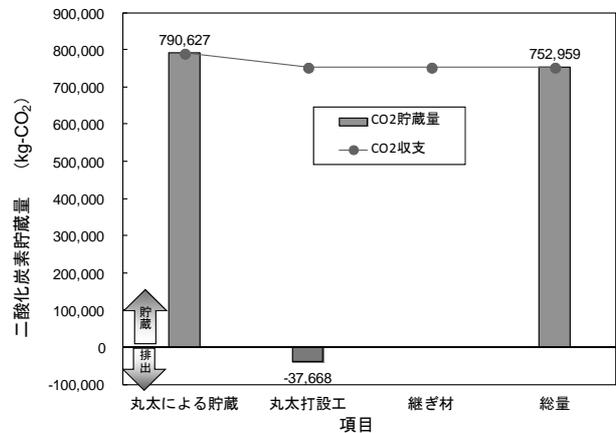


図-8 丸太による炭素量と工事による二酸化炭素排出量(二酸化炭素換算)

6. まとめ

- (1)大規模住宅造成地における LP-LiC 工法の設計と施工の概要を示した。
- (2)丸太打設後の地盤の液状化に対する安全率は、いずれも GL-5m 以浅で 1.0 以上であった。
- (3)丸太打設後の地盤の長期許容鉛直支持力度は、いずれも 40kN/m² 以上であった。
- (4)本工事で LP-LiC 工法により貯蔵された炭素量は、工事による排出量の 10 倍以上であり、既往の計測事例と同様に、丸太による炭素貯蔵効果が極めて大きいことが確認された。

本報は、文献 9)を再編集したものである。

謝辞：本工事の一部は、農林水産省平成 27 年度新たな木材需要創出総合プロジェクト事業(地域材利用促進のうち新規分野における木材利用の促進)の補助を受けて実施したものである。ここに記して感謝致します。

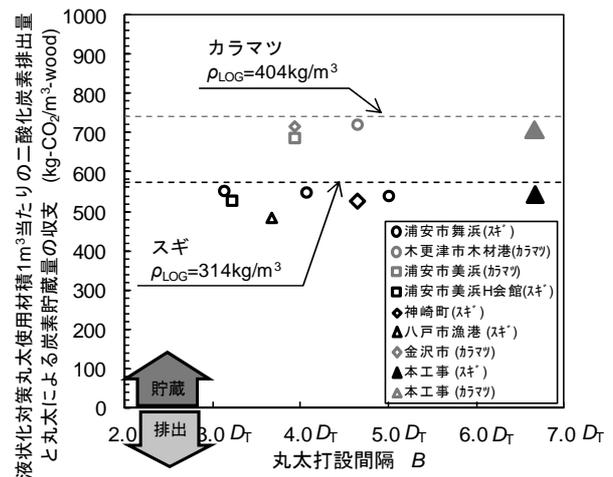


図-9 丸太材積 1m³ 当たりの丸太による炭素量と工事による二酸化炭素排出量(二酸化炭素換算)

参考文献

- 1) 中村裕昭, 濱田政則, 沼田淳紀: 土木分野での木材地中使用するの歴史的事例, 木材利用研究論文報告

- 集 11, 土木学会木材工学特別委員会, pp.95-101, 2012.8.
- 2) 国土交通省都市局：宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針, 2013.4.
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 2001.
- 4) 地盤工学会：液状化対策工法, p.238, 2004.7.
- 5) 沼田淳紀, 淡路一成, 村田拓海：地下水変動を考慮した種々の土質を用いた木材の生物劣化試験, 木材利用研究論文報告集 14, 土木学会木材工学委員会, pp.111-116, 2015.8.
- 6) 土質工学会：入門シリーズ 8 地下水入門, p.35, 1988.
- 7) 沼田淳紀, 村田拓海, 三輪滋：丸太を用いた液状化対策工法による炭素貯蔵効果, 第 66 回日本木材学会大会研究発表要旨集, Q29-07-1030, 2016.3.
- 8) 沼田淳紀, 村田拓海, 三輪滋, 飯田達夫, 川崎淳志, 松下克也：大規模分譲住宅地における LP-LiC による炭素貯蔵効果, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, V-076, pp.151-152, 2016.9.
- 9) 沼田淳紀, 松下克也, 村田拓海, 川崎淳志, 三輪滋：LP-LiC 工法の大規模分譲住宅造成への適用事例, 木材利用研究論文報告集 15, 土木学会木材工学委員会, pp.83-88, 2016.8.

30. 大型建設機械の転倒防止のための 地盤養生法に関する基礎的検討

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

1. はじめに

大型の移動式クレーンや基礎工事用機械等の建設機械の転倒災害は頻度こそ低いものの、依然として災害は発生している。これら建設機械の過去の災害事例を分析すると、走行中の転倒に起因する災害が数多く発生している。特に、機械の履帯が敷鉄板の端部に載った際に、地盤に沈下が生じて転倒していた。労働安全衛生規則では、建設機械の転倒防止のために敷板の敷設を義務づけているが、その設置方法や機械設置時の安全性の評価手法については十分な知見がない。そこで本研究では、大型建設機械の転倒災害を防止するための地盤養生の方法を明らかにすることを目的としている。本稿では、平面的な地盤養生の効果を確認する模型実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験の概要

2.1 実験装置

本研究では、万能試験機を用いて載荷実験を実施した。実験の概要を図-1 に示す。実験装置にはロードセルが設置してあり、その先には載荷ロッド

が備わっている。載荷ロッドの先端の形状は球状であるため集中荷重が作用する。一方、履帯の接地形状は長方形であるため作用は分布荷重となり、実験とは載荷状態が異なる。しかし、載荷ロッドの形状を長方形とした場合、ロッドが固定されているため載荷の進行とともに敷鉄板との接触面積や接触位置が変化する。それにより、データの解釈が困難となるため、本研究では簡単のため、先端が球状の載荷ロッドを用いた。

2.2 敷鉄板模型の製作

敷鉄板模型は実物(914mm×1829mm×25mm)の1/25スケールで作製した。材質は鉄である。図-2 に模型の寸法を示す。敷鉄板模型の寸法は幅36mm、長さ72mm、厚さ1mmである。

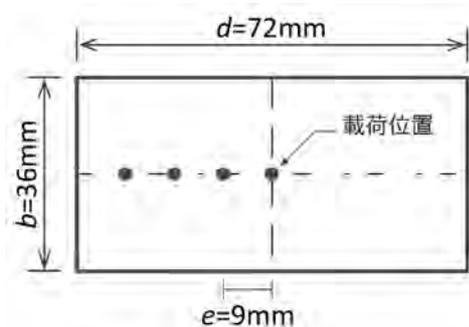


図-2 敷鉄板模型の寸法

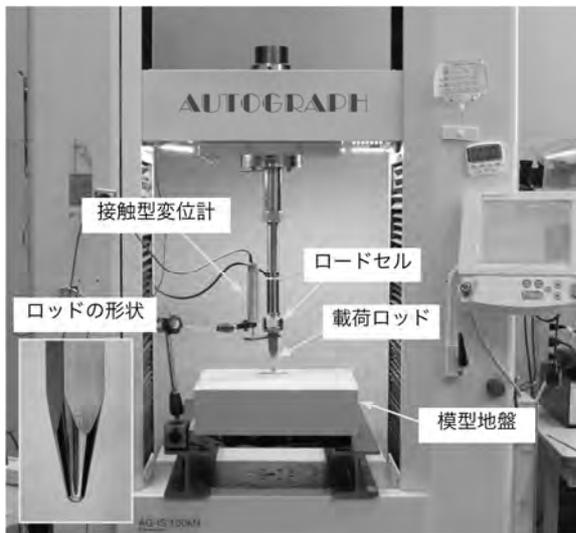


図-1 実験の様子

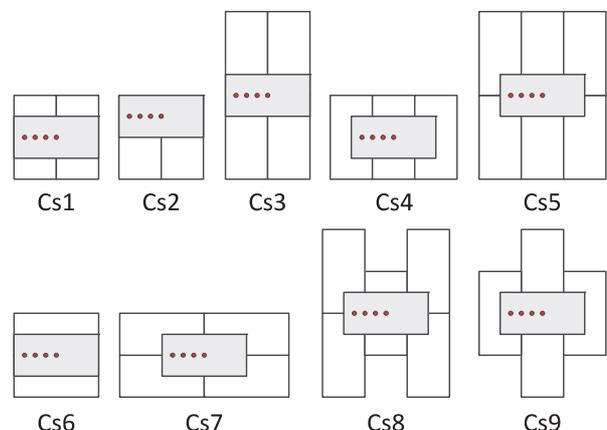


図-3 敷鉄板模型の敷設方法

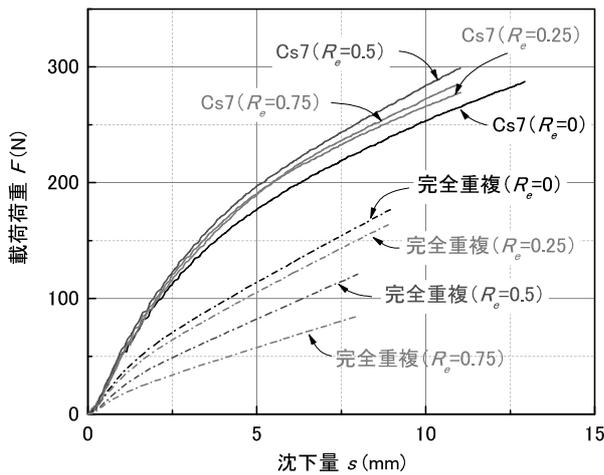


図-4 実験結果の一例

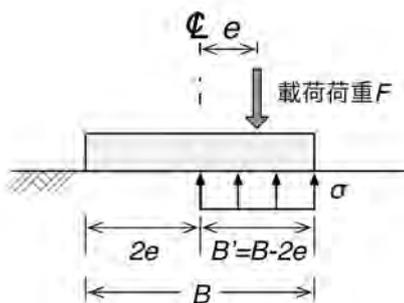


図-5 偏心荷重と有効幅の関係

2.3 実験条件

荷重の載荷位置は、図-2 に示すように中心から 9mm($=d/8$)ずつ偏心させた全 4 箇所である。これは機械の移動荷重を模擬している。本研究では、敷鉄板の中央から載荷位置までの距離を偏心量 e と定義し、 e を最大偏心度 e_{max} ($=d/2$) で除した値を偏心度 R_e と定義した。

敷鉄板の敷設方法を図-3 に示す。本研究では、1 枚敷きに加え、重ね敷きでは、Cs1~Cs9 及び 2 枚の敷鉄板を完全に重複させた条件（完全重複）を加えた、全 11 ケースについて実験を行った。なお、本研究では、建設現場の地盤を平面的に養生することを想定している。例えば、Cs1~Cs3 は同じ設置方法で生じる敷設方法であり、Cs4 および Cs5、Cs8 および Cs9 も同様である。

3. 実験結果

3.1 実験結果の一例

図-4 に実験結果の一例を示す。図中には、Cs7 と完全重複の載荷荷重 F と沈下量 s の関係を示した。一点鎖線で示した完全重複の結果は R_e の増加とともに $F-s$ 関係は低くなっている。すなわち、敷鉄板の中央と端部では、敷設効果に差があり、同一荷重条件で比較すると、中央に比べ端部では大きな沈下が生じる可能性がある。一方、実線で示した Cs7 の $F-s$ 関係は、 R_e の違いによる差は小

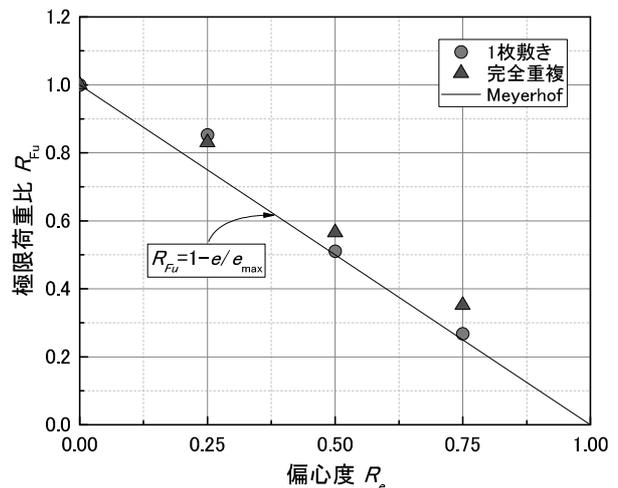


図-6 極限荷重比と偏心度の関係

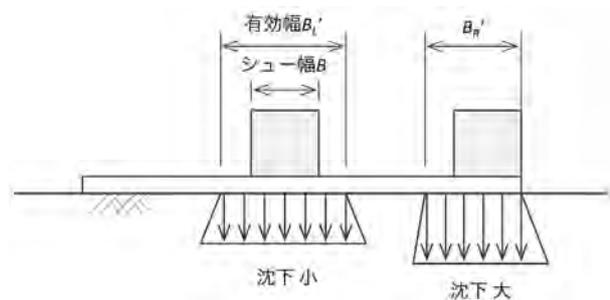


図-7 敷鉄板の端部に機械を位置した際の接地圧分布

さく、完全重複に比べ全体的に高い値を示している。これらの結果から、敷鉄板を重ね敷きする場合、敷設方法の違いにより、 $F-s$ 関係が大きく異なることが分かった。

図-5 に偏心荷重と有効幅に関する概念図を示す。Meyerhof は幅 B の基礎幅に対して、偏心量 e の位置に鉛直荷重 F が作用した場合、荷重は実質的に B' の部分で支持されると述べている¹⁾。 e の増加に伴い、応力 σ は台形または三角形に分布するが、本研究では、問題を簡単にするため、 B' の幅に均等に応力が作用すると仮定した。

極限荷重 F_u と応力の関係は式(1)で表すことができる。 F_u は（公社）地盤工学会が規定している極限支持力の求め方を参考に求めた²⁾。同手法は沈下の増加が大きくなり、 $F-s$ 関係が直線的に増加し始める荷重を極限支持力と定義している。

$$F_u = \sigma \cdot (B - 2e) = F_{u0} \cdot (1 - 2e/B) \quad (1)$$

ここで、 F_{u0} は中央載荷条件 ($e=0$) での F_u である。

式(1)より、式(2)の関係式が得られる。

$$\frac{F_u}{F_{u0}} = 1 - \frac{e}{B/2} = 1 - \frac{e}{e_{max}} \quad (2)$$

式(2)より、荷重と偏心度との関係式が得られる。

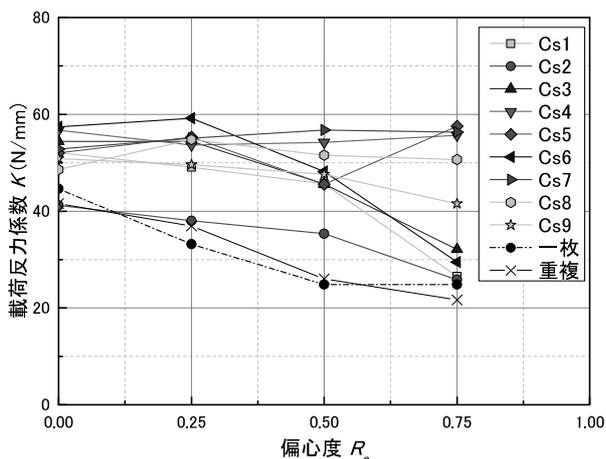


図-8 荷重反力係数 K と偏心率 R_e の関係

図-6に極限荷重比 R_{Fu} と偏心率 R_e の関係を示す。 R_{Fu} は、各荷重地点での F_u を中央荷重条件での F_{u0} で除した値であり、式(2)の左辺に相当する。図中には1枚敷きおよび完全重複の結果を示している。両実験結果ともに R_e の増加に伴って R_{Fu} は低下している。特に端部に荷重した条件 ($R_e=0.75$) では、一枚敷きで0.26、完全重複では0.35となっており、中央荷重に比べ約7割程度 F_u が低下している。また、一枚敷きと完全重複の結果を比較すると、 $R_e=0.5$ および 0.75 では、わずかに完全重複の R_{Fu} が高くなっているものの、両者に大きな差は無い。以上の結果から、極限荷重比 R_{Fu} と偏心率 R_e は、よく対応していることがわかった。

図-7は敷鉄板上にくい打機等の大型建設機械を設置した際の接地圧分布の概念図を示している。図のように右側の履帯が敷鉄板の端部に載った条件では、左右の履帯の有効幅に差が生じる。つまり、右側の履帯の有効幅 B_R は小さくなるため、有効接地面積は減少し、結果的に接地圧が増加する。一方、左側の履帯の有効幅 B_L は B_R よりも大きく、接地圧は低下する。このように、左右の履帯の有効面積の差が沈下量の差に現れ、機体に傾斜が生じて転倒に至ることが考えられる。そのため、安全に作業をするためには、不同沈下が発生しないような地盤養生の方法を明らかにする必要がある。

4.2 適切な地盤養生方法の検討

(1) 荷重反力係数と偏心率の関係

図-8に荷重反力係数 K と偏心率 R_e の関係を示す。荷重反力係数とは、 F - s 関係の弾性域における傾きである。 K が大きい場合、同一荷重に対する沈下量 s が小さく、相対的に敷鉄板の敷設効果が高いことを意味する。図より、完全重複における K は偏心率 R_e の増加とともに低下している。その他、Cs1やCs2、Cs3、Cs6等についても $R_e=0\sim 0.25$ では K は大きいものの、端部に荷重した $R_e=0.75$ で

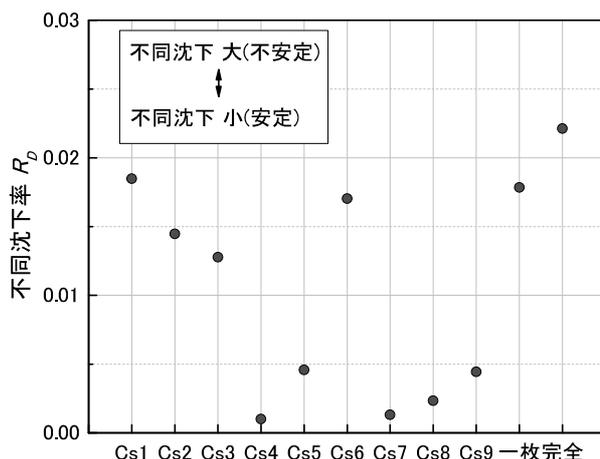


図-9 不同沈下率

は K が低下している。一方、Cs4 および Cs7 については、 R_e の違いによらず、 K はほぼ一定となっている。したがって、敷鉄板の端部に履帯が位置した場合でも安定した地盤養生の効果を得られると考えられる。

次に、敷鉄板上を通過する移動荷重により生じた沈下量の最大値と最小値の差を不同沈下量 Δs とし、単位荷重増分 ΔP に対する Δs の割合を不同沈下率 R_D と定義した。式(3)にその関係式を示す。

$$R_D = \Delta s / \Delta P \quad (3)$$

図9に各実験ケースにおける不同沈下率 R_D を示す。Cs4 および Cs7、Cs8 では R_D が低く、不同沈下が発生しにくい安定した敷設方法である。それに対して、Cs1 および Cs2、Cs6、一枚敷き、完全重複では R_D が高く、機械が現場内を移動する際に不同沈下が発生するおそれがある。これらの設置方法はいずれも上部の敷鉄板の短辺側の端部が下部の敷鉄板の端部と一致した条件であり、荷重が実質的に作用する有効面積が小さくなり、地盤養生の効果が小さくなったと考えられる。このことから、接地圧を低減させるためには、上部敷鉄板の短辺側の端部が下部敷鉄板の中央に位置するよう設置する必要がある。

(2) 荷重反力係数と偏心率の関係

図-10に極限荷重 F_u と偏心率 R_e の関係を示す。敷鉄板の敷設方法の違いにより、 F_u に差があることが確認できる。特にCs2 および完全重複については、1枚敷きの結果とほぼ同じであり、重ね敷きによる F_u の増加は見られない。一方、Cs3 および Cs6 は、 $R_e=0$ および 0.25 では F_u は高いが、 R_e の増加とともに F_u が $R_e=0$ の1/2以下となっている。すなわち、敷鉄板の中央と端部で F_u が異なるため、不同沈下の発生が懸念される。Cs4 および Cs5 についても、端部 ($R_e=0.75$) に荷重した条件では F_u が大きく低下している。それに対して、Cs7 は、 R_e の違いにかかわらず F_u はほぼ一定であり、機械

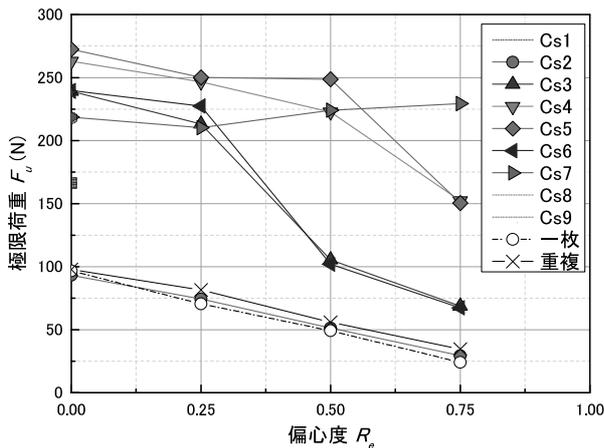


図-10 極限荷重 F_u と偏心率 R_e の関係

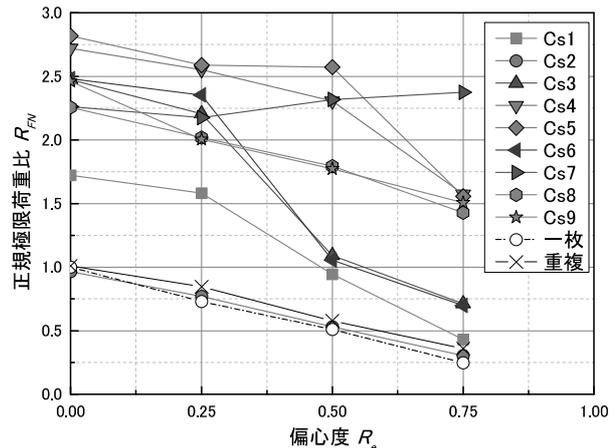


図-11 正規極限荷重 R_{FN} と偏心率 R_e の関係

設置時に不同沈下が発生しにくい敷設方法であると考えられる。

図-11に正規極限荷重比 R_{FN} と偏心率 R_e の関係を示す。ここで、 R_{FN} とは、各条件での F_u を一枚敷きの中央荷重条件の F_u で除した値である。結果を見ると、Cs1, Cs2, Cs3, Cs6, 完全重複では $R_e=0.75$ の R_{FN} が 1 以下となっている。すなわち、一枚敷きよりも地盤養生の効果が低い。それに対して、Cs4, Cs5, Cs7, Cs8 および Cs9 では $R_e=0.75$ の R_{FN} が 1.4~2.4 となっており、敷鉄板の敷設方法の工夫により、見かけの地盤の強度が高くなっていることが分かる。前述した実験結果を踏まえると、 R_e の違いによる F_u の変動が少ない Cs7 の敷設方法が最良であると考えられる。

以上の結果から、敷鉄板の敷設方法の違いにより地盤養生の効果が異なることが明らかになった。本論文では、敷鉄板の短辺と長辺の長さの比が 1:2 の敷鉄板を対象とした模型実験を実施したが、一般的には 1:4 の敷鉄板も広く利用しているため、今後はそのような敷鉄板についても検討を行うとともに、砂質土や火山灰質粘性土等の地盤材料を用いて実験を行い、データの蓄積を行う予定である。

4. まとめ

大型建設機械の転倒防止に必要な敷鉄板の敷設方法を明らかにするために、敷鉄板模型を作製して、荷重実験を行った。その結果以下に示す知見を得た。

(1) 敷鉄板を一枚敷きで敷設した場合、敷鉄板の中央と端部では、荷重が作用する有効面積等の違いにより、同一荷重に対して生じる沈下量が異なる。これにより、機械が傾斜して転倒に至る可能性が示唆された。

(2) 敷鉄板を二枚重ねて敷設する重ね敷きにおいて、敷鉄板の敷設方法の違いにより、地盤養生の効果が異なることが明らかになった。機械の

不同沈下を防ぐためには、上部敷鉄板の短辺の端部が下部敷鉄板の中央に位置するように設置する必要がある。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 25750141 の助成を受けたものです。末筆ながら、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Meyerhof, G. G. : The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads, *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.440-445, 1953.
- 2) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説, pp.697-735, 2013.

31. 重機周り作業員検知システムの機能向上

～アラウンドウォッチャーの機能向上～

鹿島建設株式会社

○ 三宅 ヨシタカ

1. はじめに

当社は、重機と作業員との接触防止を目的とした「アラウンドウォッチャー」（以下本システム）を2012年に開発し、トンネル現場を中心に導入してきた。本システムは、磁界を利用したICタグを採用するとともに、重機周りを監視するためのカメラを組み合わせた信頼性の高い作業員を検知するシステムとして接触事故の防止に寄与している。

導入以来、現場環境に応じた改造や、トンネル現場以外への導入に対する改良を行っており、これら本システムの機能向上について紹介する。

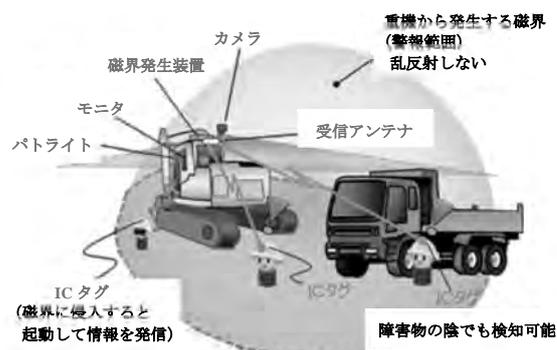


図-1 システム概要

2. 開発の目的

建設工事では、作業員と重機との近接作業が多く、作業員が重機の死角に無意識に入ってしまう場合がある。これまで作業員と重機との接触防止には様々な対策が図られているが、依然事故が多発しているのが現状である。これまで広く一般に接触事故防止対策として開発、運用されてきた超音波や電波を用いる方式の検知システムは、乱反射による誤検知や、障害物に遮られることで検知漏れの課題があり、信頼性に欠けるところがあったため、これらの課題を解決した信頼性の高いシステムの開発が求められていた。

3. システムの概要

本システムの概要を図-1、写真-1 及び写真-2 に示す。機器構成は、周辺を映す魚眼カメラ、ICタグを携帯した作業員を検知するユニット及び警報を発報する機器となっている。

重機に設置した磁界発生装置で形成する磁界範囲内に作業員が侵入すると、侵入者のICタグが電波を発信する。

重機に設置した受信機が受信するとパトライトが点灯し、侵入者名の表示を行うと同時に警報音によって侵入を重機運転手に知らせる。侵入者の位置は、モニター画面に表示される魚眼カメラの周辺映像により確認できる。

本システムは、トンネル現場を中心に10現場23台を導入し運用している。



写真-1 機器設置状況（運転室屋根）

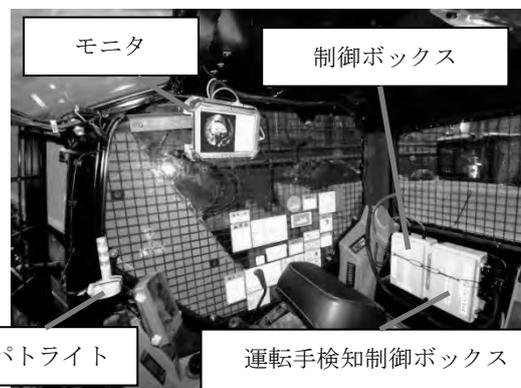


写真-2 機器設置状況（運転室内）

4. システムの機能向上

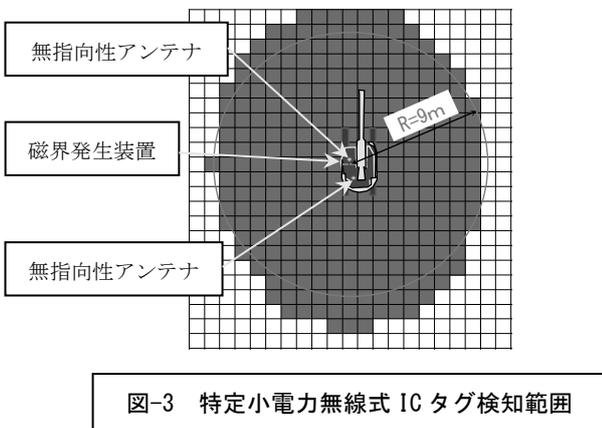
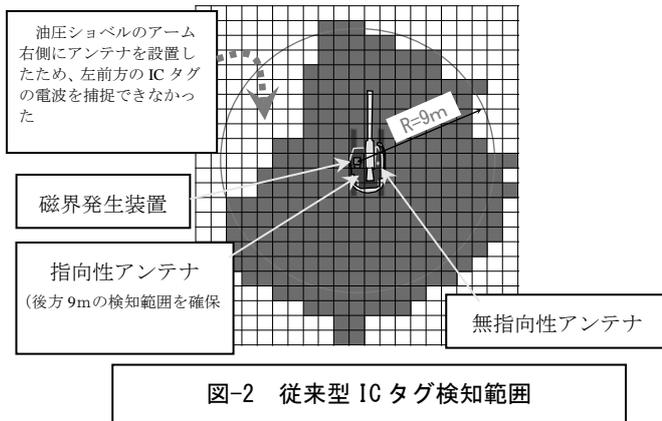
本システムの機能向上として、検知精度の向上と運転席限定磁界の採用について述べる。

4.1 検知精度の向上 (IC タグの改良)

本システムの旧 IC タグは微弱電波式 (以下従来型タグ) のものを採用していたため、インバータノイズの干渉により検知が不安定になることがあった。この対策として、従来型タグの 50 倍の出力 (電力比) を有する特定小電力無線式タグに変更し、検知の不安定さを解消した。

従来型タグによる検知範囲を図-2 に示す。従来型タグではアンテナに指向性、無指向性の 2 種類のアンテナを採用した。重機後方の検知は後方 9 m の検知を確保するために指向性アンテナを使用した。従来型タグでは、微弱電波を捕捉するためアンテナの設置位置の調整が必要で、現場環境によっては検知が不安定になる箇所が存在した。

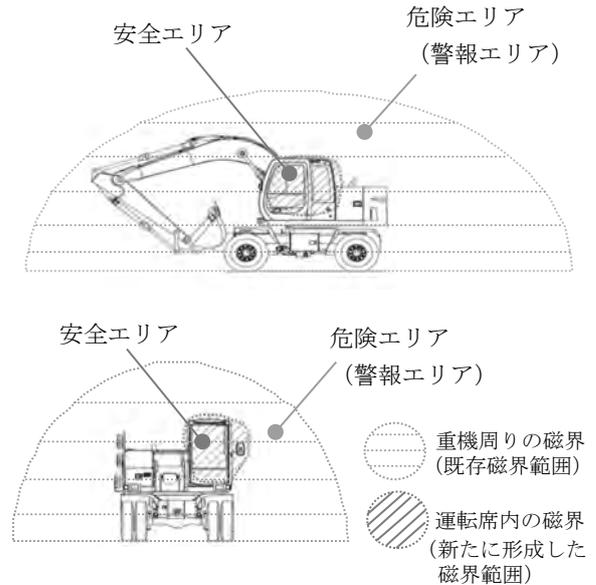
特定小電力無線式タグによる検知範囲を図-3 に示す。アンテナは無指向性アンテナを 2 本設置した。IC タグの仕様を変更することで形成した磁界エリア内においてより安定した検知が可能となった。



4.2 運転席限定磁界の形成

本システムでは、従来から近接作業する他重機運転手を検知し続ける問題があった。

そこで、運転席内に限定磁界 (安全エリア) を形成することで他重機に乗車した運転手の識別が可能となった。この運転手の情報が得られたことで、運転手に関しては警報を鳴らさないようにする警報制御を実現した。



5. おわりに

現在、機能を追加した最新版はダム現場 (2 台) とトンネル現場 (2 台) に導入し良好に運用中である。本システムは、現場導入後、運用によって生じた問題点を改善することで信頼性の高いシステムが構築できたと考える。

今後は、設置の簡便さ及び導入費用の低減などの更なる改良を図り、より多くの重機に採用されることによって作業員と重機との接触事故撲滅に貢献できることを願っている。

参考文献

- 1) 三宅ヨシタカ: 磁界と IC タグを利用して重機周囲を常時監視, 建設機械施工, Vol.66 No.4 pp.70~72, 2014.4

32. トンネル工事現場における坑内位置把握システムの開発

－ 屋内空間でのヒト・モノの位置をリアルタイムに把握 －

株式会社 安藤・間 ○澤 正樹
株式会社 安藤・間 清水 充子
株式会社 日立ソリューションズ 賀川 義昭

1. はじめに

山岳トンネルや地下トンネル等の屋内空間では、GPS 等の測位衛星による位置判定が行えないため、トンネル坑内の作業員や重機、機械の位置を詳細に把握することが難しく、現在は RFID (radio frequency identifier) や坑内 PHS により大まかな位置を特定するに留まっている。

これらのシステムは、坑内に等間隔に設置したアンテナが、管理対象物に取り付けた RFID タグや PHS からの電波を受信することで位置を特定する。

また、アンテナ同士は通信ケーブルで接続されており、工事の進捗、すなわちトンネルの延伸に合わせてアンテナの設置と通信ケーブルおよびアンテナ用電源ケーブルの敷設が必要となる。そのため、常に専門業者による工事・管理が必要となり、定期的にコストが発生する。

そのほか、人手不足が心配される昨今、少ない人数で現場の生産性を維持・向上させるためには、現場内の作業員や重機、機械の位置把握や動線管理を確実に行うことが求められている。

そこで、筆者らは、運用が容易で低コスト、かつ詳細に位置把握が行える「坑内位置把握システム」を開発し実用化した。

2. システムの概要

2.1 システムの機器構成

今回開発した「坑内位置把握システム」は、IEEE802.15.4 対応無線¹⁾を採用したシステムで、以下の3つの機器で構成されている。

(1) タグ (写真-1)

- ・位置を特定する対象 (ヒト・モノ) に装着する。ヒトの場合は、ヘルメットに装着する。
- ・ボタン電池内蔵で定期的に電波を発信する (6ヶ月の稼動が可能)。
- ・内蔵の加速度センサーによりタグ装着者の動き (転倒等) を検知できる。

(2) ルータ (写真-2)

- ・位置管理するブロックごとに設置する (最大間隔: 210m)。

- ・タグの電波を受信し、その情報を隣のルータへ転送し続けることで、監視用パソコンまで転送する。

- ・20,000mAh のモバイルバッテリーで約 1 ヶ月稼動する (AC100V での稼動も可能)。

(3) 監視用パソコン

- ・トンネル出入口付近に設置。
- ・ルータからの情報を集約し、管理対象の作業員や重機、機械の位置を表示する。



写真-1 タグ[モノワイヤレス社製 TWE-Lite2525A]とルータ[モノワイヤレス社製 MoNoSTICK]

2.2 システムの仕組み (図-1)

位置を特定する対象 (ヒト・モノ) にタグを装着し、位置管理するブロックごとにルータを設置する。タグとルータとの距離が短いほど、ルータが受信する電波強度が高くなる。複数のルータがタグを検知した場合、よりタグに近いルータが受信する電波強度が最も高くなり位置把握を行う際の元データとなる。

このデータは無線により連続して隣のルータへの転送を繰り返す、最終的に監視用パソコンまで転送され集計処理される。監視画面上では、集計結果を可視化することで管理対象の位置を把握できるようになっている。

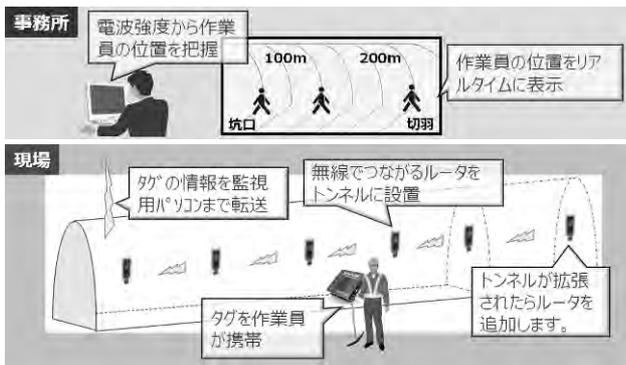


図-1 システムの仕組み

2.3 システムの特長

本システムの特長は3つあり、これらの特長がシステムの低コスト化、運用・管理の単純化・効率化に貢献している。

(1) 無線による通信

タグとルータ、ルータ同士のすべてが無線で通信を行うため、ケーブルの敷設工事が不要である。

(2) 設置機器の小型化・単純化

現場に設置するのはルータのみなので、機器設置は現場職員や作業員でも対応が可能である。

(3) ルータ故障時の自動回避機能

ルータが故障した場合、故障したルータの次のルータへ自動的にデータを転送する。

3. 実用化に向けた実証実験

3.1 実験現場の状況

- ・ シールドトンネル（地下トンネル）
- ・ 総延長：約4,000m
- ・ 内径：3,000mm
- ・ トンネル壁面は鋼製セグメントとRCセグメントが混在
- ・ トンネル内に90度の急曲線部がある

3.2 実験の条件

- ・ ルータ設置間隔：50m ごと
- ・ ルータ設置個数：17 個
- ・ 実験区間：トンネル入口から850m まで

3.3 実験の詳細と結果

ヘルメットにタグを装着した作業員がルータ設置区間850mを徒歩で移動する。作業員に同行した連絡者が、トンネル入口付近に設置した監視用パソコンをモニタリングしている監視者に作業員の位置を報告（写真-2）。画面上に表示されている位置と報告された位置との乖離がないことを確認した（写真-3）。

また、ルータの故障を想定し、任意のルータの電源を強制的に落とした。監視用パソコン上では、正常に作業員の位置が表示されていることが確認できたので、ルータが故障してもそのルータの隣のルータにデータが転送され、システムとしては問題なく稼働できていることを確認した。

当初予想していた屋内空間における電波の乱反射や、工事用の高圧ケーブルからのノイズによる影響は見られなかったが、隣り合うルータの通信境界付近では、位置の特定が難しく、作業員の進行方向とは逆の位置を表示することもあった。しかし、通信境界付近を通過すれば数秒以内に正しい位置が表示されることが確認できたため、本システムのトンネル現場への適用は問題ないと判断した。



写真-2 実験の状況(坑内)

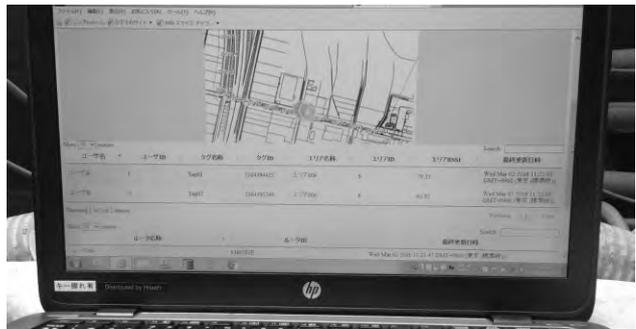


写真-3 実験の状況(坑口の監視用パソコン)

4. おわりに

本システムでは、先に述べたようにタグに内蔵されている加速度センサーにより、作業員の転倒も検知可能で、異常な状態を迅速に把握でき安全面にも貢献するシステムになっている。

間違いなく訪れると言われている人手不足に対応するためには、少ない人数で今以上に現場管理の効率化を図らなければならない。そのためには、日進月歩のICTツールを上手く活用していく必要がある。

今回は主にトンネル現場での実用化を目指したが、今後はトンネルに限らずダム等の点検通路や地下構造物の耐震補強工事等の屋内空間、建築現場での展開を視野に入れてシステムの改良を進めていく所存である。

付録

- 1) IEEE802.15.4：米国に本部を有するIEEE(アイ・トリプリー)により策定された標準規格で、消費電力も小さく通信距離が数十mと長い。ZigBee(ジグビー)という通信規格の下位レイヤ(物理層、MAC層)としても利用されている。

33. 地下埋設物可視化システムの開発と実用化

－ 掘削工事における“地下の見える化”を実現 －

清水建設株式会社
茨城工業高等専門学校
株式会社菱友システムズ

○ 西村 晋一
岡本 修
石田 新二

1. はじめに

都市部における地下埋設物は、都市の近代化や人口集中に伴って多様化し、上下水道管やガス管、送電線、通信ケーブル等が複雑に入り組んでいる。このため、開削工事や立坑工事など地下掘削を行う工事では、地下に埋設されたライフラインを損傷しないよう、それらの位置を関係者全員が事前に共有する必要がある。地上から見えない埋設物の情報を共有するためには、たとえば、現状では現地に看板やスプレーなどで位置を表示している。また、現地で紙の図面を広げながら、地下埋設物の確認作業を行っているが、埋設物の敷設状況は直接視認できないため、見落とし等のミスが生じる可能性があった。

そこで、ICT および衛星測位技術に着目し、タブレット端末を利用して誰でも簡単に地下埋設物を精度よく可視化できるシステムを開発した。本稿では開発したシステム概要と現場における実用性の評価結果を紹介する。

2. 地下埋設物可視化システム

地下埋設物可視化システム（以下、本システムと称す）は、タブレット端末のカメラで写している風景画像に埋設物の図面を重ねて投影することで埋設物の存在や位置を可視化するシステムであり、AR 関連技術の一種に位置づけられる。写真-1 にタブレット端末による使用時のイメージを示す。



写真-1 タブレット端末による使用イメージ

2.1 AR の概念

AR とは「拡張現実感(Augmented Reality)」の略で、実際の景色、地形、感覚などにコンピュータを使ってさらに情報を加える技術を指す。

具体例としては、コンピュータがカメラやマイク、GNSS、各種のセンサなどで得たその場所や周囲の状況に関する情報を元に、現実世界から得られた画像や映像、音声などに加工を施して利用者に提供するシステムなどが挙げられる。

本システムは、このような AR 技術であると同時に、利用する図面情報のビッグデータをインターネット通信でダウンロードすることから ICT にも位置付けられる。

2.2 衛星測位について

近年では、米国が中心に管理運営する GPS に加えてロシアの GLONASS、日本の準天頂衛星 QZSS、中国の BeiDou など、複数の衛星を複合的に利用するマルチ GNSS(Global Navigation Satellite System) の時代が到来している。このマルチ GNSS を有効に活用する測位技術として、リアルタイムに高精度で位置を求められる RTK(Real-Time Kinematic) 法がある。図-1 に RTK 法を用いた測位システムの標準的な構成を示す¹⁾。

RTK 法は、座標値が既知である基準局と観測点である移動局の 2 局を用いて、衛星から送信される搬送波を観測して相対位置を計測する方法である。基準局で観測したデータは、無線などの通信手段を用いて移動局に送信し、移動局で観測したデータとともに測位計算して座標値を求める。

RTK 法では測位解として、衛星からの搬送波数の推定が完了するまでの状態を Float 解、完了して測位精度が数 cm まで収束した状態を Fix 解という。また、測位開始から Float 解を経て Fix 解になるまでの時間を初期化時間という。図-2 に初期化における初期化時間と測位誤差の関係（概念図）を示す²⁾。RTK 法では、この初期化時間を短縮するため、衛星から送信される異なる 2 つの搬送波を観測する 2 周波対応の受信機が一般的である。しか

し、他の衛星測位システムを併用するマルチ GNSS 測位では観測衛星数が増加するため、近年では 1 周波受信機であっても初期化時間を短縮できる。このような 1 周波受信機であっても Fix 解までの初期化時間は 30 秒～1 分程度と十分実用的な時間である。

この 1 周波受信機は、主にコンシューマ向けに製造されていた単独測位受信機がベースとなっており、安価で小型軽量、省電力であることが特長である。本システムにおいても、測定誤差が小さく、より安価なシステムとするため、この 1 周波 RTK 測位を採用した。その結果、測定者の位置を数 cm の誤差でリアルタイムに検知することが可能となった。

2.3 本システムの構成

本システムの機器構成と通信イメージを図-3 に示す。本システムは、基準局のアンテナ・受信機と PC、移動局のアンテナと受信機、クラウドサーバで構成される。現場事務所に設けた基準局の PC と、移動局のタブレット端末はインターネットで接続され、常に最新の観測データが端末に送られる (図-3 参照)。

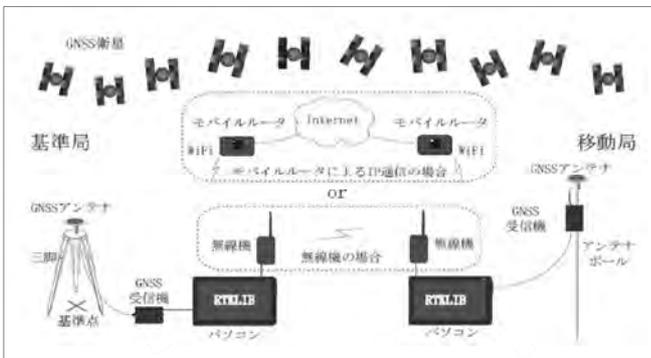


図-1 RTK法の標準的な構成

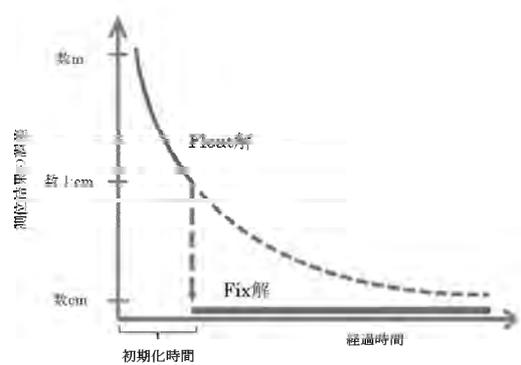


図-2 RTK法の初期化における解の収束状況概念図

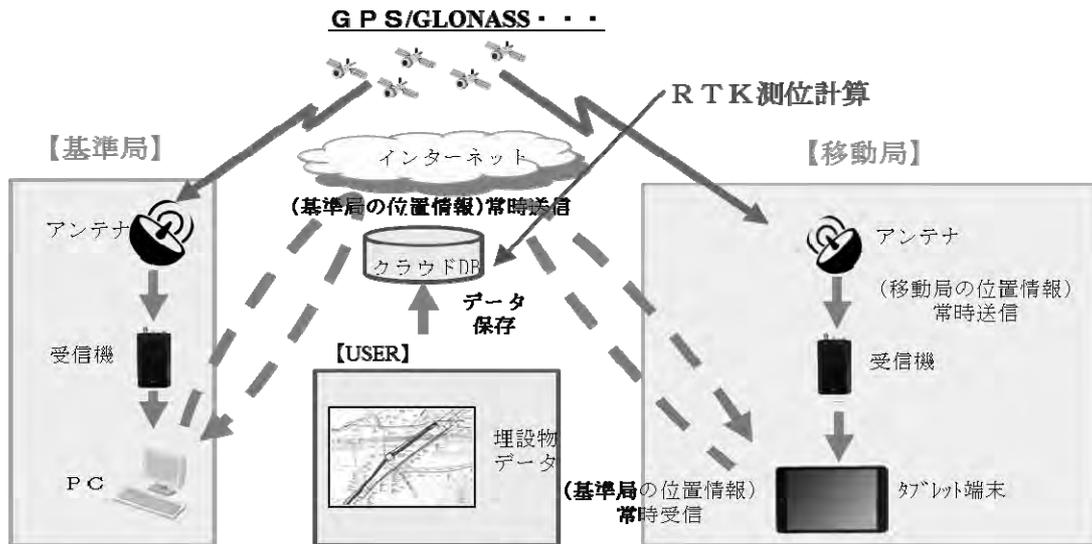


図-3 機器構成と通信イメージ

アンテナと受信機は超小型タイプを採用した。アンテナを写真-2に、受信機を写真-3に示す。また、写真-4に移動局（操作者）の装備例を示す。受信機とタブレット端末は無線通信であり、アンテナはヘルメットに取り付けるため、使用者は負担を感じることなくシステムを使うことができる。

2.4 図面データの登録

現場への適用に当たっては、事前に埋設物の図面データの登録が必要である。当社の現場では、まず電子化されていない紙ベースの図面を CAD データに変換する。次に登録する図面の四隅の座標を緯度経度に変換した後、これをクラウドサーバのデータベースに登録する。試掘調査等で埋設物の位置情報が更新された場合は、サーバ内のデータを更新すればよい。

なお、施設の管理者や事業者の方々など、当社の現場以外で本システムを採用する場合においても、この埋設図面の事前登録作業は必要となる。

3. 現場への適用

本格運用に先立ち、当社で施工中の東京外環自動車道大和田工事において試行を行った。当現場は多数の地下埋設物が存在することから、本システムの実用性確認を行うのに最適と判断した。

3.1 試行現場の概要

東京外環自動車道大和田工事は外環事業の千葉県区間において、東京外環自動車道の函体（ $L=1,668m$ ）を開削工法およびシールド工法により構築するものである。開削工事区間の函体イメージを図-4に示す。当工事エリアは住宅街に位置し、多数の地下埋設物が存在する。

3.2 試行の結果

現場での操作手順ならびに試行の結果を以下に説明する。まず、移動局の使用者がタブレット端末と GNSS アンテナ・受信機を携行して現場に向かい、地下埋設物の近傍に近づくと、周辺に存在する埋設物の対象図面リストが画面に自動表示される（図-5）。次に、使用者が確認したい図面を選択すると当該図面及び使用者がいる位置が表示される（図-6）。この際、埋設管が見えている箇所画面表示と比較したところ、その誤差は数 cm 以下であることを確認した。

続いて、タブレット端末の内蔵カメラで掘削工事を行う地表面を眺めると、直下に敷設された埋設物のラインが浮き上がるように地表面の映像上に投影される（図-7）。端末を使用する位置や保持する角度等に応じて、地表面のライブ画像に埋設物の敷設ラインが自動的に追従して表示されるため使い勝手が良く、誰にでも手軽に操作できることを確認した。

なお、通信状況によるが、基準局は半径 10km

範囲にある複数の端末（移動局）で同時利用が可能である。



写真-2 アンテナ



写真-3 受信機



写真-4 移動局の装備例

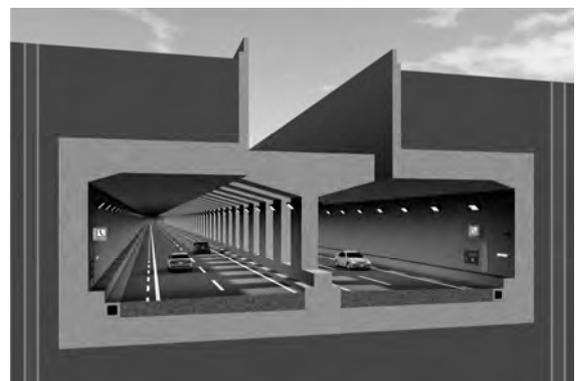


図-4 函体完成予想図



図-5 タブレット端末の表示画面①
【図面リスト表示】



図-6 タブレット端末の表示画面②
【埋設図面表示】

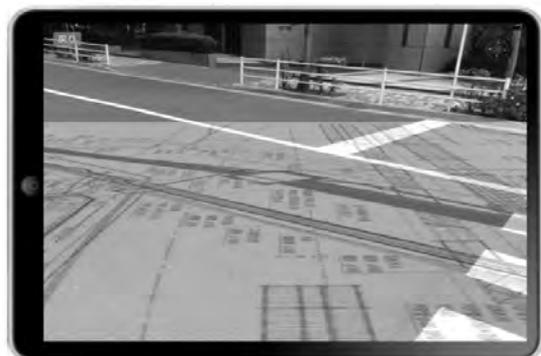


図-7 タブレット端末の表示画面③
【カメラ映像に投影】

4. おわりに

本システムの最大のメリットは、直接見ることができない地中の埋設物の種類や位置を、高精度の位置検知性能を確保しつつ、誰でも簡単・手軽に“見る”ことができる点である。本システムにより自分のいる位置と埋設物の存在と位置が「即座に一目でわかる」「正確に把握できる」ため、安心して効率よく地下掘削工事を行うことができる。紙ベースの図書を持つことなく図面の施工情報を現地で参照できるため、現場での作業性の向上も図れる。今回の試行によって、本システムの精度、手軽な操作性など実用性を確認できた。

今後は一層確実に効率的な現場管理の技術として、掘削を行う現場に順次展開していく予定である。また、将来は、官庁や事業者の方々の要望に応じて、そのニーズに対応できるものに本システムをカスタマイズして、採用を働きかけていくことも検討している。

参考文献

- 1) 岡本修:センチ・メートル測位 RTK法の基礎と実力, トランジスタ技術2016年2月号, pp.66-79, 2016.
- 2) 埴和広・岡本修他:衛星測位受信機の比較に関する実験的研究, 日本測量協会応用測量論文集, vol.26, pp.21-32, 2015.

34. 大型建設機械の設置地盤における現場地耐力試験とその性能比較

(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 ○玉手 聡
同 上 堀 智仁
(株)東洋スタビ 若原 千恵
同 上 田村 繁雄

1 はじめに

移動式クレーンを含めた大型の建設機械の転倒防止には支持地盤の安定確保が不可欠である。しかしながら、作業現場の地耐力は目視や踏査によって経験的に判断される場合も多く、その判断を誤ったことによる転倒事故がたびたび発生している¹⁾。本研究ではこのような転倒災害の防止を目的に、作業現場において簡易に実施可能な地耐力試験の方法を検討した。その方法をここでは現場地耐力試験と呼び、以下では、BCTと略して言う。BCTはドラグ・ショベルなどの建設機械の自重を反力に、載荷板を介して荷重を静的に載荷する試験であり、試験時間が10分から20分程度の短時間で終了することを特徴とする。本研究では、BCTの適用性を調査することを目的に、地盤条件が異なる5カ所の現場で試験を行った。この試験では平板載荷試験の結果との比較を行うとともに、BCTの載荷速度の違いが結果に与える影響も調査した。本論文では、一連の試験から得られた結果を示し、その結果に基づいてBCTによる簡易な地耐力確認の実施を提案する。

2 現場地耐力試験の概要

2.1 試験方法の検討

表-1は平板載荷試験²⁾(以下、PLTと言う)と現場CBR試験³⁾とBCTの比較を示す。PLTはJISと地盤工学会で基準化された試験法であり、地盤の支持特性を直接的に調査できる方法である。PLTは、直径300mmの載荷板から段階的に作用させる載荷圧力 q とそれに対する変位量 S の関係から地盤の支持特性や変形特性を求める載荷試験である。しかしながら、各段階では荷重を30分保持する必要があるため、実施には少なくとも2.5時間から4時間を要することとなる。そのため、建設機械等を設置する度毎にこれを実施することは、現実的には困難という問題があった。

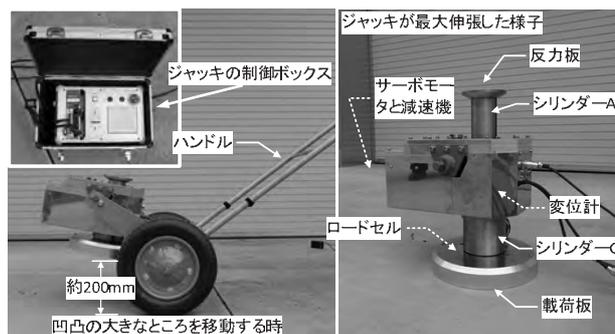


図-1 現場地耐力試験(BCT)装置の外観と構成

現場CBR試験(以下、CBRと呼ぶ)では、直径50mmの載荷板を1mm/分の一定速度で貫入させ、貫入量が2.5mmと5.0mmの時の載荷圧力を記録する。したがって、試験に要する時間は5分と短く、効率性が高い。しかしながら、載荷板が小さいために評価範囲はPLTよりも狭く限定されるという問題があった。そのためCBRは通常、道路施工における路床と路盤の品質管理に用いられている。

今回の地耐力確認ではPLTに準じた性能を目標としたことからBCTでは、載荷板の形状と大きさをPLTと同じ直径300mmのものとした。ただし、試験時間を短縮するために、載荷方法はCBRの変位制御を参考とし、BCTでは変位速度の標準値を5mm/分に設定した。この値はCBRの1mm/分に対して、BCTとCBRの載荷板の直径比が6倍であることなどを考慮したものである。これによって、BCTの試験時間は10分から20分程度となり、PLTに比べて大幅な時間短縮が可能となった。以上のように、BCTはPLTとCBRを応用した方法であり、地耐力評価の基本的な部分についてはPLTに準じることとしている。

2.2 試験装置と試験方法

図-1は開発したBCT装置を示す。詳細は既報^{1),4),5),6),7)}に譲り、ここではその概要を述べる。本装置には載荷と計測の両機能が

表-1 平板載荷試験と現場 CBR 試験と現場地耐力試験の比較

	平板載荷試験(PLT) JGS 1521:2012	現場 CBR 試験(CBR) JIS 1222:2013	現場地耐力試験(BCT) <今回提案>
載荷板	直径 300mm の円形	直径 50mm の円形	直径 300mm の円形
載荷方法	荷重制御 (計画最大荷重を 5 から 8 段階で載荷)	変位制御 (1mm/min)	変位制御 (5mm/min)
反力装置	実荷重又はアンカー	実荷重(ダンプトラックなど)	実荷重(建設機械)
沈下量	基準ばりから載荷板上の 4 点の沈下を計測	架台に対する貫入ピストンの変位を 2 点で計測	載荷ジャッキの伸張量から建設機械の浮き上がり量を補正して計算
所要時間 (1箇所)	2.5 時間から 4 時間	5 分	10 分から 20 分

車輪付きの架台にユニット化して搭載されており、手押しで現場内を自在に移動できるものとなっている。載荷ジャッキは電動モータで動作する仕組みである。ジャッキはシリンダーA とシリンダーC がそれぞれ上下に伸張する構造であり、上昇した反力板はドラグ・ショベルなどの建設機械の下部走行体に接合する。これによって、載荷板にはその自重を反力とした荷重が作用する。この荷重を載荷板の面積で除した値が載荷圧力 q である。

BCT 装置は建設機械の後部（カウンターウエイト側）から手押しで挿入して設置することが可能であり、PLT の準備に際して必要な建設機械下部での装置の組み立てが BCT では不要である。載荷板の沈下量 S は、BCT 内の変位計で直接計測するジャッキのストローク量 s_c から反力として用いたドラグ・ショベルの浮き上がり s_{it} を差し引いて間接的に求める方法を採用し、試験を簡易に実施できるように改善されている。

3 現場実験

3.1 表層軟弱地盤(GB1)における実験

茨城県稲敷郡阿見町の現場(GB1)において BCT と PLT を行った。表-2 は試験の実施箇所とそのコード名を示す。GB1 では図-2 に示す No.1, No.2 及び No.3 の 3 ポイントにおいて BCT を 4 試験と PLT をそれぞれ 1 試験行った。同試験は施工建築物の周囲で行ったためポイント間の距離は 130m から 250m と離れている。各ポイントでは PLT を中心に BCT はそれを囲むように 1m 間隔で行った。図-3 は GB1 の代表地点で行った標準貫入試験から得られた N 値と土質の分布を示す。表面から深さ 0.9m (GL-0.9m) にはロームを主体とした盛土が堆積する。さらに、GL-3.8m までは有機質シルト、有機質土、粘土の層が続いて存在している。この深さまでは N 値が 1 または 2 の軟弱な層が分布しており水位は GL-2.6m に存在する。GL-3.8m 以深では細

砂及び中砂を主体とする層が分布し、N 値は最大 50 まで増加している。なお、表面から GL-1.15m までの浅い部分については N 値が得られておらず硬軟は不明である。

写真-1 は試験の様子を示す。ドラグ・ショベルの下部走行体と上部旋回体の向きは平行に設置して載荷試験を行った。機体の浮き上がり量は前部と後部で計測した。

BCT ではジャッキを標準値の 5mm/分 で変位させた。試験の終了は載荷圧力 q が上限の 1400kN/m² に到達するかジャッキの伸張量が最大に達するまでを基本とした。

図-4 は 3 ポイントにおける q と沈下量 S の関係を示す。ここで、BCT では PLT のような予備載荷を行ってないため q - S 関係には表面の緩みによる影響が載荷初期の部分に現れていた。そのため、本結果の比較では最急部勾配における接線と S 軸の交点を修正原点としてデータを再整理した。3 ポイントの結果に共通して BCT と PLT の曲線には良い一致が見られる。一方、3 ポイントの地耐力には差が見られ No.3 の q - S 曲線は No.1 と No.2 のそれに比べて上方に位置している。すなわち、No.3 の地耐力は No.1 と No.2 のそれに比べて高い。 $q < 400$ kN/m² で S の増加に対する q の増加が高く現れ(傾きが大きく)、 $q > 400$ kN/m² ではその傾きを減少させている。

JGS 1521:2012 の方法に従って極限支持力 q_a を求め、PLT に対する BCT の誤差を計算したところ 3 ポイントで 2% から 20% であり平均は 13% であった。また、地盤反力係数 K_v については 2% から 19% であり平均 8% の誤差であった。松尾は地盤調査から得られた土のせん断強さのデータを例示する中でその変動係数 V_{cu} の値は 0.2 から 0.4 程度と述べている⁸⁾。GB1 での PLT に対する BCT の誤差は 20% 以下であり、通常の

表-2 GB1 の試験箇所と実験コード

地盤の状態	表層軟弱地盤		
場所とコード	茨城県稲敷郡阿見町内(GB1)		
ポイント	No.1	No.2	No.3

現場地耐力試験	BCT_1 -a, b, c, d	BCT_2 -a, b, c, d	BCT_3 -a, b, c, d
平板載荷試験	PLT_1	PLT_2	PLT_3

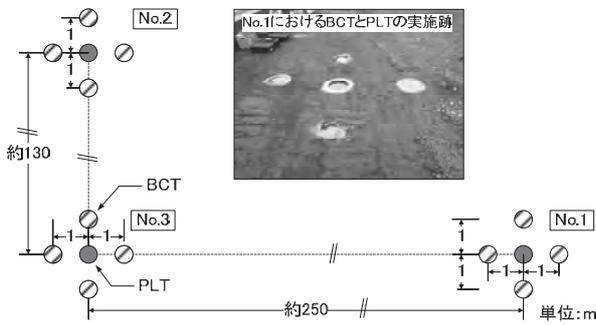


図-2 GB1における試験ポイントの位置関係

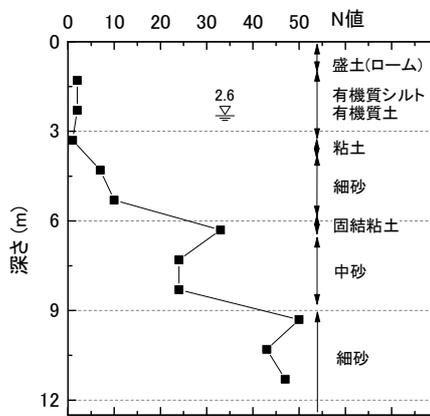


図-3 GB1のN値と土質分布

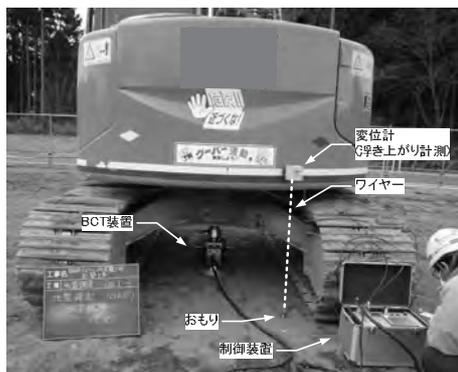
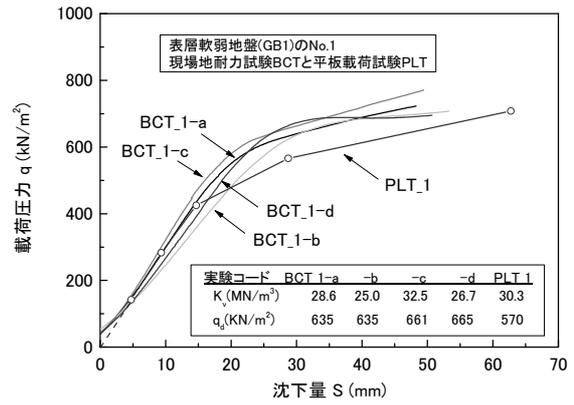
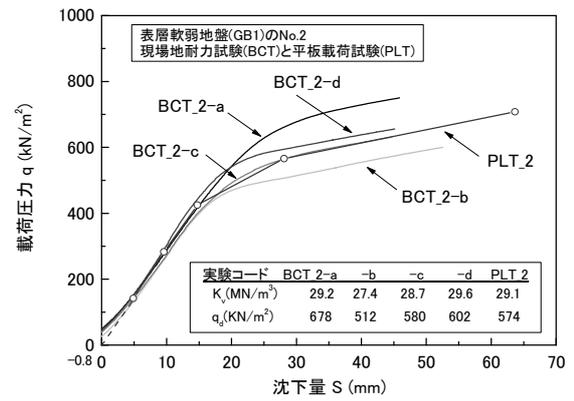


写真-1 GB1のNo.1における実験の様子

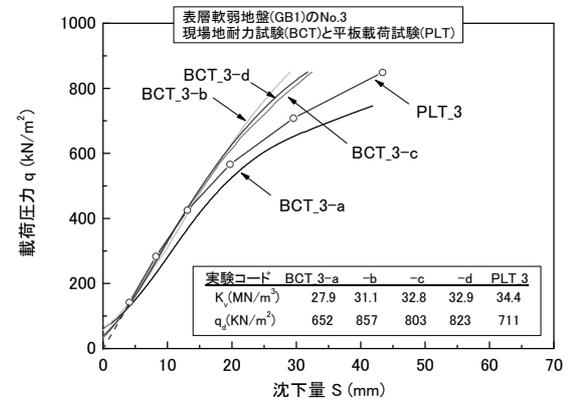
地盤調査における変動の範囲内の程度であったと見ることができる。したがって、BCTではPLTと概ね一致する結果が得られることがわかった。



a) No.1の結果



b) No.2の結果

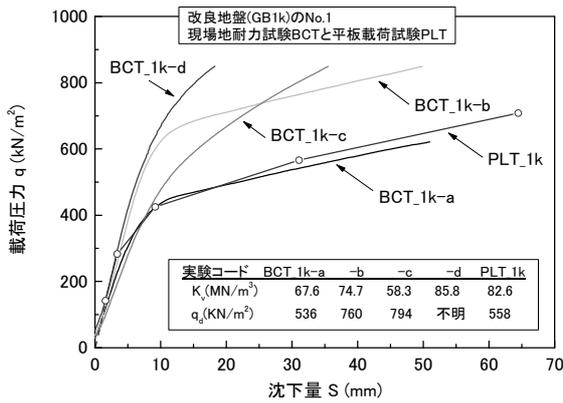


c) No3の結果

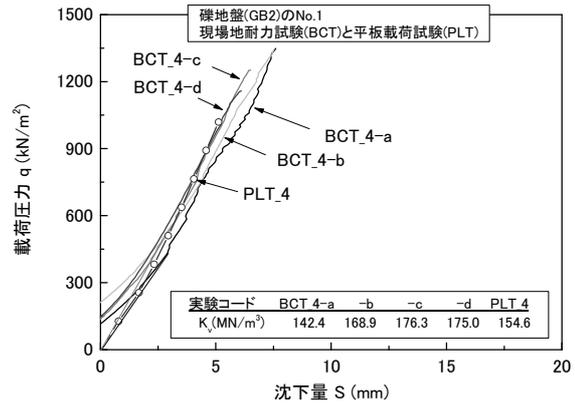
図-4 GB1における現場地耐力試験と平板載荷試験から得られた載荷圧力と沈下量の関係

3.2 表層改良地盤 (GB1k) における実験

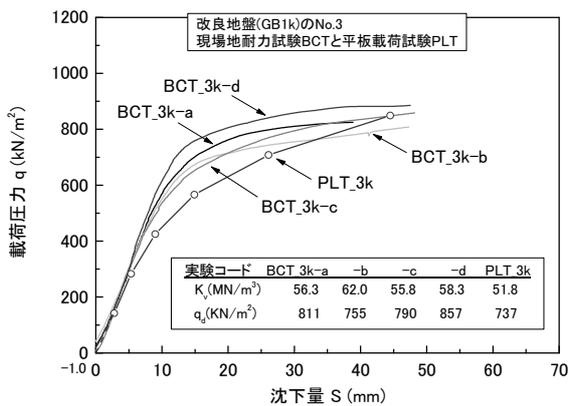
GB1では先の試験終了後に表層をセメント混合処理する地盤改良が施された。その方法は散布車でセメントを散布した後にスタビライザーで深さ1mまで攪拌混合するものであった。混合後には表面をブルドーザで整地した後にタイヤローラーで転圧した。この地盤改良から7日の養生期間を経てから改めて両試験を行った。



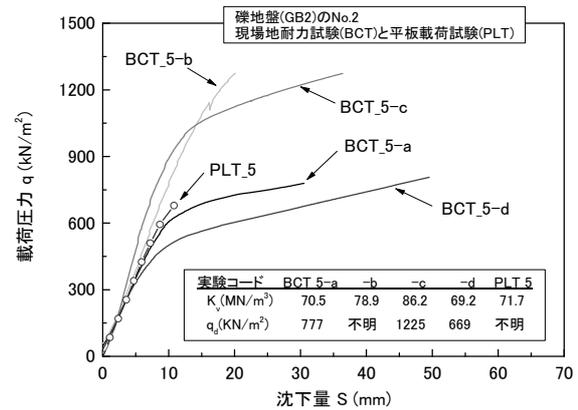
a) No. 1 の結果



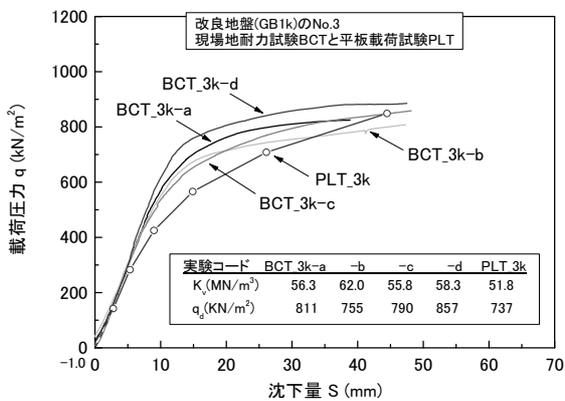
a) No. 1 の結果



b) No. 2 の結果



b) No. 2 の結果



c) No. 3 の結果

図-5 GB1の地盤改良後に行った現場地耐力試験と平板載荷試験の結果

表-3 GB2の試験箇所と実験コード

地盤の状態	礫地盤	
場所とコード	東京都練馬区大泉町内(GB2)	
ポイント	No.1	No.2
現場地耐力試験	BCT_4-a, b, c, d	BCT_5-a, b, c, d
平板載荷試験	PLT_4	PLT_5

図-6 GB2での現場地耐力試験と平板載荷試験から得られた載荷圧力と沈下量の関係

図-5は改良後に先と同じポイント近傍で行った試験の結果を示す。先の図-4と比較して改良後地盤の曲線には大きな差が見られる。このような結果のバラツキは各ポイント内のみならずポイント間にも現れている。ローム(火山灰質粘性土)は改良強度が得にくい土質であり、さらに混合ムラによってその差は大きくなる。現場で作製した改良土と実験室のその(室内/現場)強度比は最大3倍にもなる⁹⁾とされており、作製方法と養生環境によって強度にはかなりの差を生じることが知られている。No.1のPLT_1kとBCT_1k-aのように良く一致した結果がある一方で、BCT_1k-dのように q_d を判別できないほど S 増分に対する q の増分が大きくなる結果が見られた。したがって、改良地盤そのものの位置的な強度差が大きいことからBCTの再現性をここで議論することは適当でない。しかしながら、現場はこのような強度差が発生しうる状況であることもGB1kの結果から明らかとなり、転倒防止にはBCTのような試験による

地耐力確認が必要なことがわかった。GB1kでは改良地盤に生じる強度のバラツキを再確認するとともに、BCTはその分布をピンポイントで調査できることがわかった。すなわち、転倒災害の防止にBCTによる調査は有効なことがわかった。

3.3 礫地盤(GB2)における実験

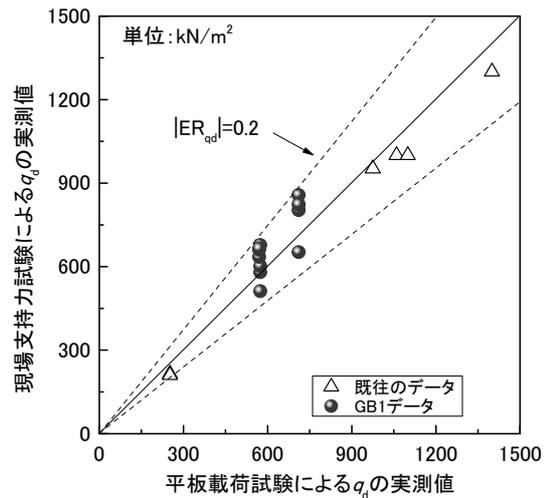
東京都練馬区大泉町内の現場(GB2)においてBCTとPLTを行った。表-3は試験の実施箇所とそのコード名を示す。No.1とNo.2の両ポイント間の距離は20m程度である。N値と土質柱状図は未調査であったが、No.1では武蔵野礫層を主とする堅固な面が観察されていた。一方、No.2は表面が覆土されており、そこには施工による乱れが見られた。図-6はGB2におけるBCTとPLTの結果を示す。No.1ではS増分に対するq増分が大きくqが1200 kN/m²以上でも曲線に明確な屈曲は見られない。BCTとPLTを比較すると曲線はほぼ一致しておりK_vも142.4 MN/m³から176.3 MN/m³で差は小さい。平均に対する誤差は2%から4%程度であることから、非常に堅固な地盤においても両試験の結果は良く一致することがわかった。一方、覆土されたNo.2ではBCTの結果に大きな差が見られ、q_dの値は669kN/m²から計測範囲外(1200 kN/m²以上)に分布する。このような比較的大きな差は覆土の厚さや表面の乱れによって生じたものと考えられる。

GB2(No.2)の結果から、同一現場内では地耐力が位置によって大きく異なるケースが確認され、その差は目視で判別困難なものであった。そのため、建設機械の設置では改めてBCTのような試験による定量的確認が必要なことがわかった。

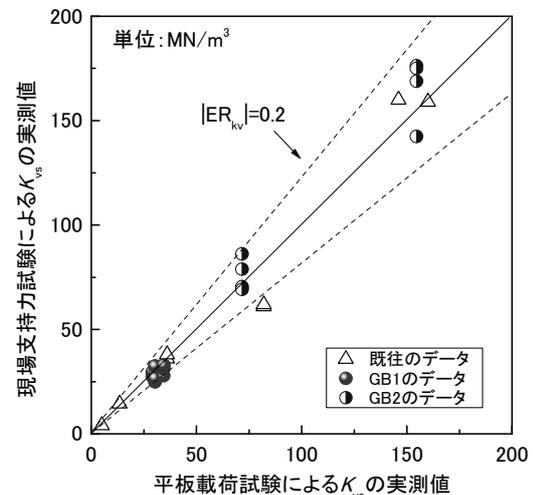
3.4 BCTとPLTの結果比較

図-7はBCTとPLTから得られたq_dとK_vの比較を示す。同図には今回取得したデータに加えて既報¹⁾に報告したデータもプロットしている。なお、GB1kにおける地盤改良後のデータはこれに含めておらず、その理由は先にも述べたとおり地盤改良そのものによる土のせん断強さのバラツキが大きいため、このデータから結果の再現性を議論するのは適当で無いため対象から除外した。

q_dとK_vに共通してPLTの結果とBCTの結果には1:1の比例関係が認められ、軟弱な地盤から堅固な地盤までの幅広い条件で両試験の結果には良い一致が見られた。さらに、誤差率ERを式(1)と式(2)のように定



a) 極限支持力 q_dの比較



b) 地盤反力係数 K_vの比較

図-7 現場地耐力試験と平板载荷試験の結果の比較

義してPLTに対するBCTの誤差を計算した。

$$ER_{q_d} = \frac{q_{d(BCT)} - q_{d(PLT)}}{q_{d(PLT)}} \quad (1)$$

$$ER_{k_v} = \frac{K_{v(BCT)} - K_{v(PLT)}}{K_{v(PLT)}} \quad (2)$$

ここで、ER_{q_d}はq_dの誤差率でありq_d(BCT)はBCTのq_d値を意味しq_d(PLT)は同様にPLTの値をである。ER_{k_v}はK_vの誤差率でありK_v(BCT)はBCTのK_vでありK_v(PLT)は同様にPLTの値である。

q_d(BCT)とK_v(BCT)の実測値はともにERが0.2程度の幅に分布している。先に述べたように精度良く調査されたN値や土のせん断強さの変動係数Vが0.2から0.4と言われている⁸⁾。一方、PLTに対するBCTの誤差も

約 20%以内に分布している。Vは収集したデータの平均値に対する標準偏差であるが、ERはPLTのデータを基準としてBCTの値を比較したものである。

VとERは異なる指標であることから直接的な比較は本来適当でないが、ERはVの範囲内となっていることから、BCTによる誤差はほぼ地盤側の強度的なバラツキによるものと推定することができる。したがって、BCTとPLTの試験法自体の違いが結果に与える差は非常に少ないと考えられる。

施工では効率性と経済性が求められ、仮設の地耐力確認でも同様と思われる。BCTとPLTに要する時間と労力の差を考えれば、BCTの有効性は明らかである。特に現場での転倒防止では、BCTはPLTによる調査を十分補完するものと言える。なお、大型機械では設置面(基礎サイズ)の増大によって影響範囲も拡大する。BCTはPLTと同様なスケール効果による適用の限界²⁾もあることから、BCTによる浅い部分の調査に加えて、工事前に行われた深い部分の地盤調査のデータも参考に地耐力は総合的に検討される必要がある。

4 まとめ

本研究では建設機械の転倒を防止するために仮設の地耐力を効率的に確認するための方法「現場地耐力試験」(BCT)を考案し、これを実施するための試験装置を開発した。そして、同装置による現場実験の結果が平板載荷試験(PLT)による結果とほぼ一致することを確認した。特に、今回取得したデータとこれまでに蓄積した試験データを総合した解析からは、PLTに対するBCTの誤差率が0.2程度の範囲内であり、これは精度良く行われた通常の地盤調査の変動係数と同レベルかそれ以下であった。したがって、BCTはPLTとほぼ同一の試験結果を示しつつ、10分から20分という短時間で迅速かつ容易に実施可能な試験であることから、建設機械を設置する作業現場の地耐力を確認する手段としてBCTの利用を提案する。

現在BCTは(公社)地盤工学会が発行する基準書において「基準以外の方法」として紹介されており¹⁰⁾、また、国土交通省が提供する「公共工事投における新技術情報システム」(NETIS)に登録されている(KT-160051-A)¹¹⁾。BCTの適応性については今後も実験的調査を継続する予定であり、様々な地盤条件におけるデータを蓄積して

本試験の有効性を検証したいと考えている。

参考文献

- 1) 玉手聡, 堀智仁: 作業現場における地耐力確認の方法—移動式クレーンを含めた建設機械等の転倒防止対策—。労働安全衛生総合研究所技術資料。JNIOH-TD-NO.3. 2015.
- 2) (公社)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 第8編載荷試験第3章平板載荷試験, pp.697-723, 2013.
- 3) (公社)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 第8編載荷試験第3章平板載荷試験 3.4 現場CBR試験, pp.723-729, 2013.
- 4) 玉手聡, 堀智仁: 重機を反力とした簡易な支持力試験の検討, 第45回地盤工学研究発表会, 平成22年度発表講演集, pp.33-34, 2010.
- 5) 玉手聡, 堀智仁: 現場の地耐力確認を目的とした簡易試験法の実験的検討, 平成22年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.93-96, 2010.
- 6) 玉手聡, 堀智仁: 地盤の支持力調査における簡易試験法の適用に関する実験的考察, 日本建設機械化協会, 平成23年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.137-140, 2011.
- 7) 玉手聡, 堀智仁: 載荷速度の違いが支持力計測に与える影響, 第46回地盤工学研究発表会, 発表講演集, pp.159-160, 2011.
- 8) 松尾稔. 地盤工学—信頼性設計の理念と実際—。1984. 64-72.
- 9) 社団法人セメント協会: セメント系固化剤による地盤改良マニュアル(第4版), pp.93-111, 2012.
- 10) (公社)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 第8編載荷試験第3章平板載荷試験 3.5 基準以外の方法, pp.729-731, 2013.
- 11) 現場地耐力試験システム: 公共工事等における新技術活用システム(NETIS), KT-160051-A, 国土交通省関東地方整備局, 2016.

35. 充填硬化材の加圧注入圧を利用したトンネルの補強技術の開発

－ 補強セグメントの解析と載荷実験 －

大成建設株式会社
大成建設株式会社
大成建設株式会社

○ 竹中 計行
高倉 克彦
猪口 泰彦

1. はじめに

高度成長期以来構築されてきた建設物が、老朽化や建設当時との荷重条件の違いによる耐荷力不足の問題に直面しており深刻な問題となっている。都市部の地下に建設されている地下鉄、下水道、共同溝などのトンネルでは、都市再開発による外荷重変化に伴う覆工の変状といった事例が生じており、トンネルの補強技術に対する需要が高まっている。このような状況を鑑み、筆者らは充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強を目的とした技術の開発を行ってきた。本稿では、提案する補強技術の解析検討とその効果を確認するために行った載荷実験結果について報告する。

2. 充填硬化材の加圧注入圧を利用した補強構造の概要

2.1 補強構造の概要

補強構造を図-1 に示す。補強構造は、既設トンネルの内面に補強リングを配置し、既設トンネルと補強リングの間にゴムチューブを配置する。そのゴムチューブ内に充填硬化材を加圧注入して既設トンネルを外側へ押す圧力を作用させて、鉄筋応力の緩和と補強リングと既設トンネルとの一体化を図るものである。

2.2 補強構造の特徴

補強構造の特徴を以下に示す。

- ① 即時的な補強効果を発揮できる。
補強時に充填硬化材の加圧注入を行うことから、補強工完了時点で、加圧注入による補強効果を発揮できる。
- ② 既設トンネル内空を大きく侵さない。
既設トンネルに支柱や水平梁などを設置して補強する従来工法に比べて、補強リングによって補強できることから、補強リングの厚さ分しか内空を侵さない。
- ③ 既設トンネルの施工誤差に対応できる。
既設トンネルと補強リングの間にゴムチューブを配置することから、既設トンネルの目違いや変形に対応した補強が可能である。

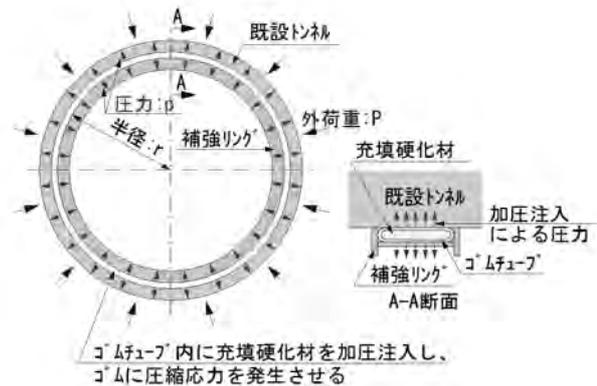


図-1 補強構造の概要

2.3 補強構造の成立性の検討

補強構造の成立性のポイントは、①充填硬化材が液体から硬化体に変化する過程で、加圧注入圧が残留すること、②既設トンネルに悪影響を与えない充填硬化材の注入圧を設定することである。

①の加圧注入圧の残留については、既実験¹⁾より圧力は 2/3 まで低くなるが残留することを確認している。②の加圧注入圧の設定は、補強リングを一定の間隔で配置(図-2 参照)して加圧注入を行うことから、セグメントのリング間継手に与える影響を考慮する必要がある。また、図-1 のようにトンネル全体に加圧注入を行う場合には、セグメントのリング方向の軸圧縮力を低減させることから、引張鉄筋への影響を考慮する必要がある。そこで、既解析²⁾により既設トンネルに悪影響を及ぼさない注入圧の大きさを確認している。



図-2 補強リング配置模式図

3. 補強対象

補強の対象は、図-3 に示すように縦つぶれの変形を生じたトンネル、もしくは将来的に縦つぶれの変形が懸念されるトンネルを考える。ここでは、縦つぶれの変形においてトンネル頂部に内側引張の曲げモーメントが卓越する場合のトンネルの部分補強を取上げる。なお、トンネル頂部には補強部材を配置可能な空間が 50cm 程度存在する条件とする。このような空間を有する構造物は、2車線の道路トンネルや複線の鉄道トンネルなどが挙げられる。

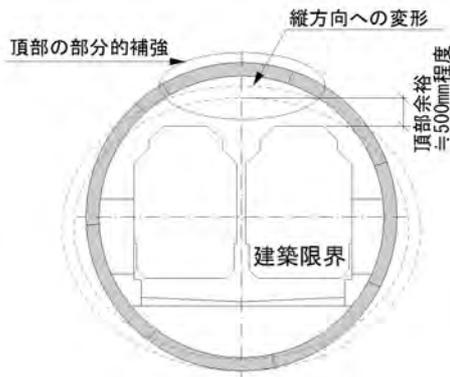


図-3 部分補強の対象概要図

4. 部分補強部材の構造検討

4.1 部分補強部材の構造検討方法

補強構造の検討は、2次元フレーム解析で行った。モデルは、図-4 に示すように円形トンネルの頂部に補強アーチを配置する形状とした。なお、補強アーチと既設トンネル（セグメント）との接続部材は剛性の高い部材とした。解析は、セグメントと補強アーチの間に充填硬化材の加圧注入圧（ 67kN/m^2 ）の圧力を作用させて、既設トンネル頂部に外側引張の曲げモーメントが効率的に発生する補強部材の構造を検討した。

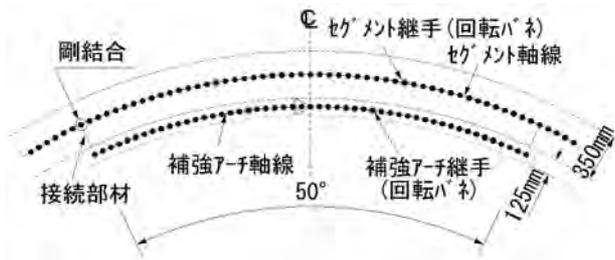


図-4 トンネル頂部構造モデル (TYPE-1)

4.2 部分補強部材の構造検討結果

補強アーチを配置したモデル (TYPE-1) に加圧注入圧を作用させた場合の頂部付近の曲げモーメントを図-5 に示す。TYPE-1 では、補強の目的とは反して頂部付近に内側引張の曲げモーメントが発生する。これは、補強アーチに発生する軸圧縮力の反力が接続部材を介して既設トンネルに内側引張の曲げモーメントが発生していると考えられる。

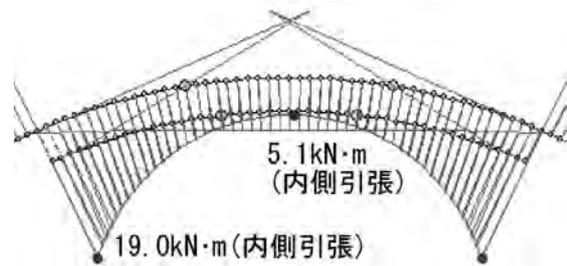


図-5 頂部曲げモーメント (TYPE-1)

そこで、内側引張の曲げモーメントを抑えるために、図-6 に示すような補強アーチ両端部を結ぶ弦材を配置したモデル (TYPE-2) を考案した。TYPE-2 の既設トンネルと補強アーチの接合 (A) 部は、スライド可能なピン結合として解析を行った。TYPE-2 のモデルに加圧注入圧を作用させた場合の頂部付近の曲げモーメントを図-7 に示す。TYPE-2 では、注入圧によって頂部付近に補強に有効な外側引張の曲げモーメントが発生することが確認された。

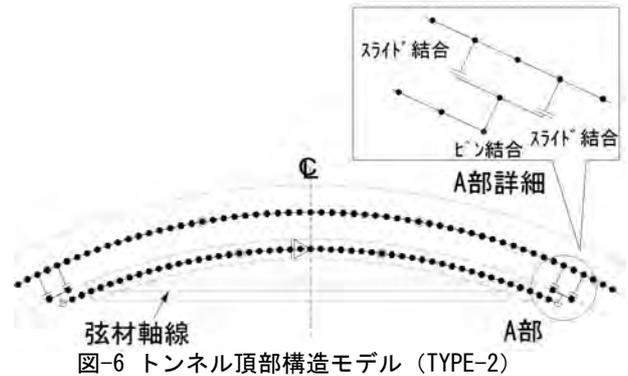


図-6 トンネル頂部構造モデル (TYPE-2)

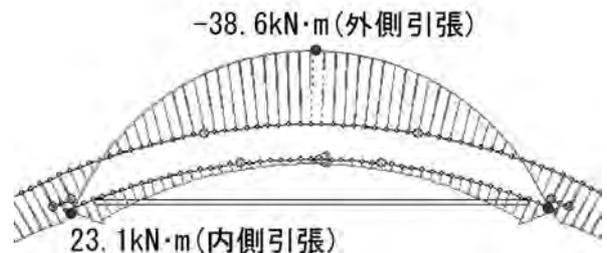


図-7 頂部曲げモーメント (TYPE-2)

4.3 部分補強部材による効果の試算

TYPE-2 による部分補強効果を確認するため、図-8 に示す検討条件で、側圧が低下し曲げが卓越するケースとして地下水が 10m 低下した場合について試算した。セグメントは、日本下水道協会の標準セグメントを参考に高さ 350mm、幅 1000mm とした。補強アーチは主桁高 125mm、幅 700mm とし、弦材は溝形鋼[125 を補強アーチ両側に 2 本設置した。加圧注入圧は、頂部設計水圧の 100kPa の残存圧力 67kPa (既実験結果 1) から加圧注入圧の 2/3) を作用させた。補強範囲は図-4 に示すように頂部から両側に 25° ずつの 50° 区間としたが、この時の補強部材の高さ (補強アーチ頂部から弦材

下端までの距離)は約45cmとなった。

設計荷重時から部分補強時までの曲げモーメント分布を図-9に示す。設計荷重時から地下水位が10m低下することによって頂部の曲げモーメントが約2倍に増加しているが、部分補強を行うことによって、頂部の曲げモーメントは地下水位低下時から約25%低下した。以上より、加圧注入圧によりセグメントに作用している断面力が緩和することを確認した。

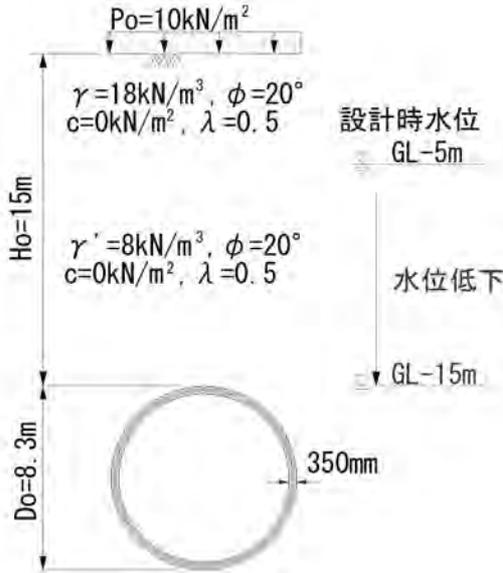


図-8 部分補強試算条件

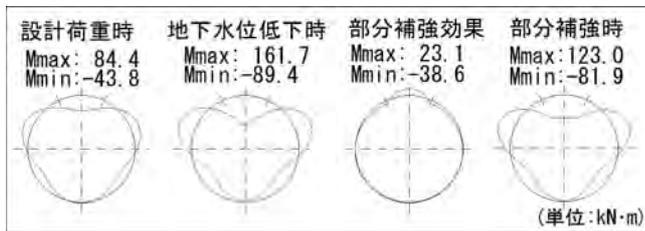


図-9 試算における曲げモーメント分布図

5. 補強セグメントの荷重実験

5.1 実験概要

部分補強の効果を確認するために、図-10に示すような部分補強を行ったセグメントの曲げ荷重実験を行った。RCセグメント内径は6,000mm、高さ300mm、幅1,200mmである。補強アーチは桁高125mm、幅750mm、弦材の仕様は溝形鋼[125とした。補強アーチの両端部は、セグメントに固定された接合金物と接合する仕様とした。この接合部は、φ35mmの丸鋼によりピン接合としているが、補強アーチの接合部の丸鋼通し孔を長孔とすることで、スライド可能な接合としている。

充填硬化材は、高炉セメント系無収縮グラウト材を使用し、セグメントと補強アーチの間にはゴムチューブを配置して、充填高さを35mmとした。加圧充填は、補強アーチを設置したセグメントをスライド支承に設置して行い、荷重実験は、充填後2週間養生して実施した。計測器は、セグメン

ト、補強アーチ、補強アーチ端部、弦材に設置し、加圧注入時及び荷重実験時に測定した。なお、実験にあたっては、セグメントを平面要素、充填硬化材の加圧時は荷重、硬化時はバネ、補強アーチを梁としてモデル化した、2次元の非線形有限要素法解析を行い比較を行った。

荷重前の標準供試体の圧縮試験の結果、セグメントの圧縮強度は84.4N/mm²、充填硬化材の圧縮強度は94.7N/mm²であった。

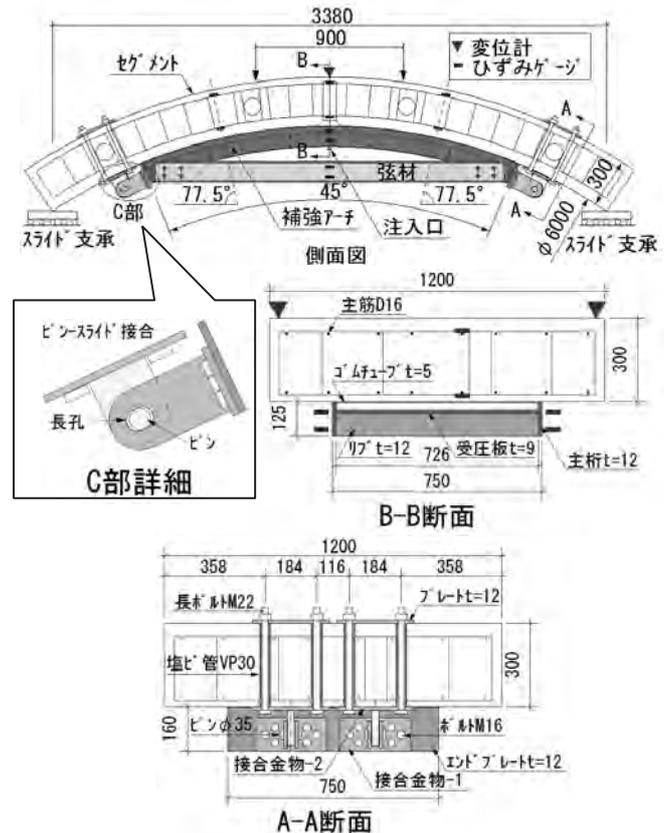


図-10 補強セグメント概要

5.2 実験結果

(1) 加圧注入結果

充填硬化材は充填性を確認するため、100kPaまで加圧注入し、20kPaまで減圧した後、再加圧して100kPa程度となった時点でバルブを閉め終了した。圧力センサーと注入口の高低差から、最終注入圧は注入口で80kPa程度であった。加圧注入圧と主筋ひずみの関係を図-11に示すが、加圧注入により目的であった外側引張の曲げの発生を確認した。また、主筋ひずみの計測値は解析により傾向を概ね再現できた。充填硬化材は約2日で固体に移行するが、主筋ひずみは外気温の変化の影響を受けつつ変化するが、引張側(外側)と圧縮側(内側)のひずみ差は最終加圧注入時から著しく小さくなるような現象は認められなかった。1週間養生後の荷重直前の主筋の内外ひずみ差は約60μであり、解析結果において硬化後の残存圧力40~60kPaに相当していた。

(2) 荷重実験結果

荷重実験は、内側の主鉄筋降伏後に荷重点のコンクリートが圧壊の兆候が見られたのでその破壊直前で荷重を中止した。最大荷重時には、補強アーチの端部が変形し、写真-1のように補強アーチの端部付近はセグメントと大きな離隔があった。最大荷重は462kNで、補強のない単体セグメントの破壊荷重299kNの約1.5倍となった。

荷重と鉛直変位の関係を図-12に示す。セグメントは200kNまでは比例関係を示しているが、250kNを過ぎた付近から変位が急に大きくなり、解析値とのずれが大きくなる。これは、破壊時に見られた補強アーチ端部の変形によるものと考えられる。

荷重と主筋ひずみの関係を図-13に示す。主筋ひずみの降伏は荷重287~368kNで発生した。計測値は有限要素法の解析値とほぼ同様の傾向を示しており、加圧注入圧が40~60kPaの解析値が計測値を概ね再現している。図-13には単体セグメントの解析結果も付記する。引張鉄筋が許容応力度に達する解析値は、単体セグメントで170kN程度、加圧注入圧40kPaの場合で260kN程度と単体セグメントの1.5倍程度の耐力増加が見込まれる。補強セグメントの最大荷重が単体セグメントの破壊荷重の約1.5倍と解析値と同じ傾向を示したことから、解析が概ね実験を再現している。

補強アーチと弦材の荷重とひずみの関係を図-14に示す。補強アーチの解析値のひずみは、軸圧縮力と曲げ成分が徐々に大きくなるのに対し、計測値は曲げ成分が卓越し、軸力成分は引張側に移行した。補強アーチははりの挙動に近い荷重分担を示したと考えられる。弦材のひずみは、計測値の傾向は解析値と近いが、計測値では曲げ成分の伸びは小さい。その原因としては、補強アーチが変形したことや弦材端部の条件がピン接合に近い状況になっていたと考えられる。

6. まとめ

充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強構造の解析的な検討と荷重実験を実施し、補強セグメントに対する充填硬化材の加圧注入時にセグメントの補強に有効な外側引張の曲げが発生すること、補強セグメントが単体セグメントの約1.5倍の破壊耐力を有することを確認した。

参考文献

- 1) 高倉克彦, 森田泰司: 充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強技術の開発～充填材の硬化過程における残存圧力確認実験～, 土木学会第69回年次学術講演会, VI-110, 2014
- 2) 猪口泰彦, 高倉克彦: 充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強技術の開発～部分補強に関する解析的検討～, 土木学会第70回年次学術講演会, VI-327, 2015

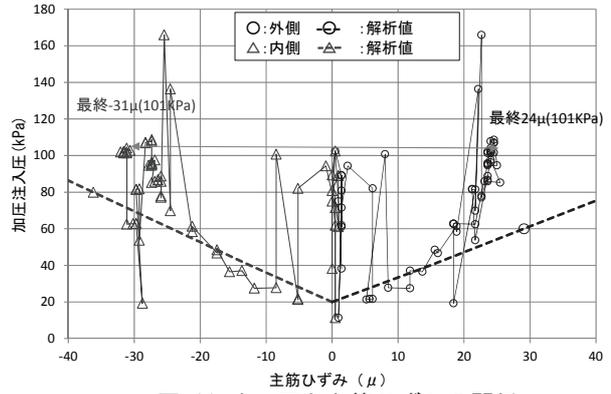


図-11 注入圧と主筋ひずみの関係

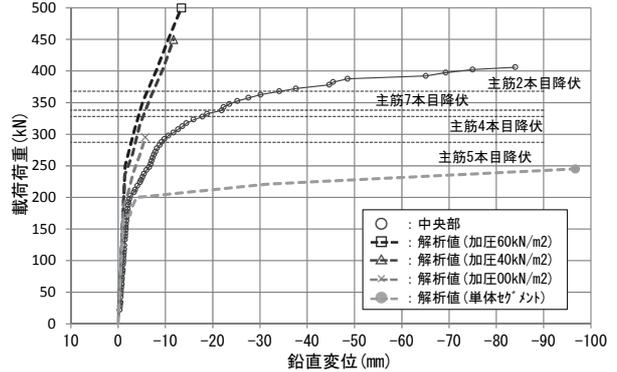


図-12 荷重と鉛直変位の関係

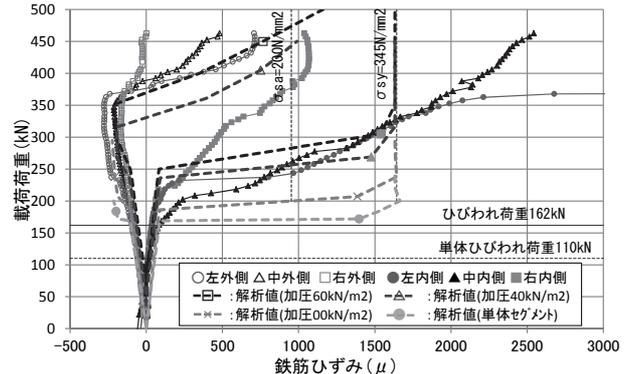


図-13 荷重と主筋ひずみの関係

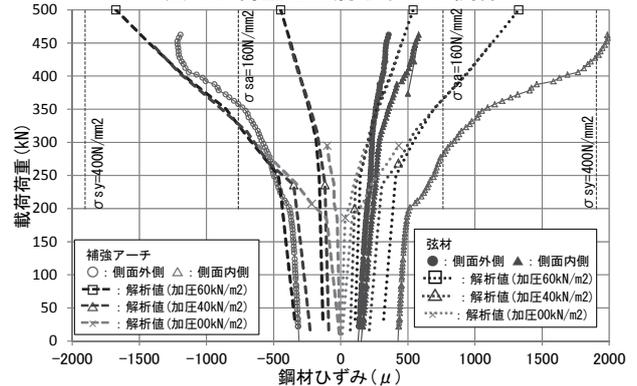


図-14 荷重と補強アーチ及び弦材のひずみの関係



写-1 荷重試験後の状況

36. 歪み計測による疲労劣化検知技術の紹介と適用事例

株式会社 IMC
株式会社 IMC
株式会社 IHI

○ 小林 大祐
柴田 勝規
宮崎 信弥

1. はじめに

わが国では長きにわたる経済成長の鈍化により、高度成長期に整備された社会インフラが更新時期を迎えてもなお使われ続けようとしている。また、比較的新しい施設においても、左記影響によって維持管理コストを可能な限り抑えることが日常化しており、必ずしも十分な保守を受けているとは言いがたいケースが見受けられる。本論文で紹介する手法は、このような社会背景において各種構造物の損傷を、高費用対効果かつ高精度に自動監視するために開発したものである。複数のセンサによる計測値の同一性検定を行うことで、従来の手法よりも微小な損傷を簡易な計測によって検出することができる。

本論文では具体的な手法の解説と実際の設備への適用事例、そこで実際に疲労き裂を検出した事例を紹介する。東日本大震災以来、大規模震災への備えが叫ばれて久しく、前述のように老朽インフラが多数残る状況は非常に大きなリスクを抱えていると言えるが、本手法を用いることで、そのリスクを軽減できるものと考えている。

2. 歪み計測による疲労劣化検知技術

本手法は対象構造物に設置した複数の歪みセンサの計測値に対して、SI-F 法による分析を適用することによって疲労劣化を検知するものである。SI-F 法とは、東京工業大学の轟研究室により提案された、統計的手法による検知技術である。

従来の異常検知では、図-1 に示す通り、個々のセンサデータにしきい値を設け、個々にしきい値を越えたか否かで良否判定を行っていた。この方法では外乱（温度変化、荷重変化など）によって、特に問題が無くてもしきい値を超える場合があり、誤った診断を行うことが多かった。また、誤診断を防ぐためにしきい値を緩めに設定すると異常検知精度が下がり、真の異常発生を見逃してしまう危険性がある。

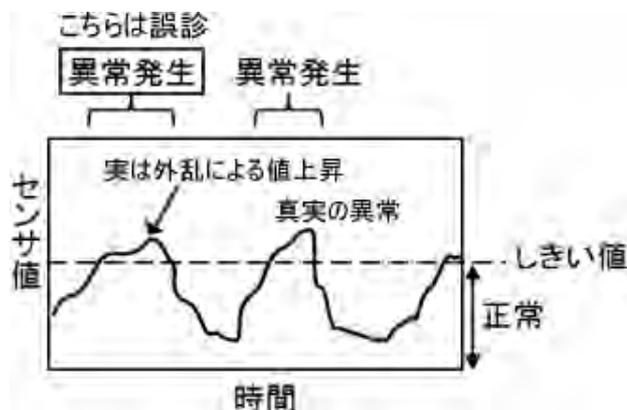


図-1 従来の異常検知技術

これを防ぐためには、図-2 に示す通り、複数のセンサデータの相関関係に着目して、その変化により異常発生を判定することが有効である。複数のセンサデータの相関関係は、温度変化や荷重変化といった外乱の影響を受けにくいいため、誤診断の回避と高精度化の両立が可能になる。

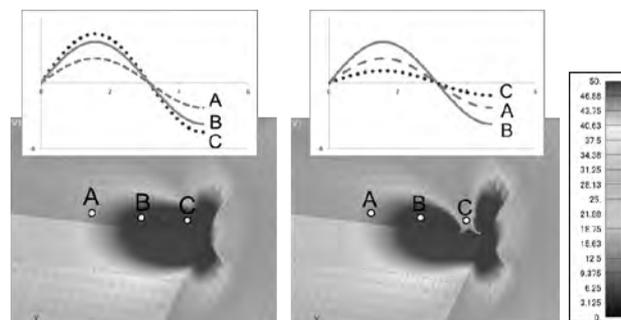


図-2 SI-F 法 異常検知技術³⁾

SI-F 法では、正常な時の相関関係に対して、診断時の相関関係が同一とみなせるか否かを判定し、同一とみなせない場合に異常発生と診断する。その判定には、データ同士の同等性を検定する統計的手法である、F 検定を用いる。算出された F 値は外乱の影響を受けにくく、値が大きいほど異常度が高いことを示す単一の数値であるため、しきい値を設けて自動診断が可能である。

3. 適用事例

前章で紹介した手法は、既に複数の鉄鋼構造物（コンテナクレーン、船舶等）に適用しており、そのうちの 1 例において実際にき裂を検知したので紹介する。

紹介事例は、2 本の支柱の溶接部にき裂が発生したものであり、以前より同箇所は構造的に脆弱であることが懸念されていたが、日常的な点検が困難な場所であるため、本手法を適用して、き裂の発生を監視していたものである。

後述するように、溶接部の前後に、各 2 枚ずつ歪みセンサを設置している。以後は便宜的に前側を A、後側を B とし、それぞれ前側、後側のき裂発生を監視している。

(1)対象位置 A

①歪み計測開始時

図-3 のように、溶接継ぎ手部の応力が集中する位置に歪みセンサ a、b を設置した。

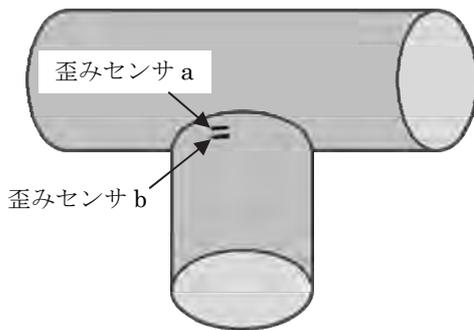


図-3 歪み計測開始時の位置 A

設置した歪みセンサ a および b の間の距離は、30mm である。(図-4)

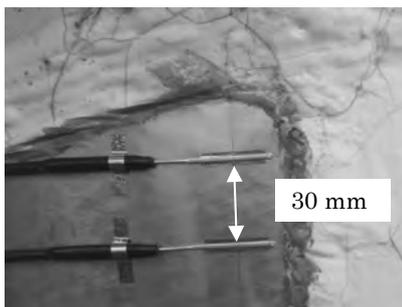


図-4 歪みセンサ a および b

②計測開始 3ヶ月後

図-5 に示す位置に 20mm 程度のき裂を目視確認した。き裂位置は、歪みセンサ a から約 100mm の位置で発生している。実際に発生したき裂の状態を図-6 に示す。

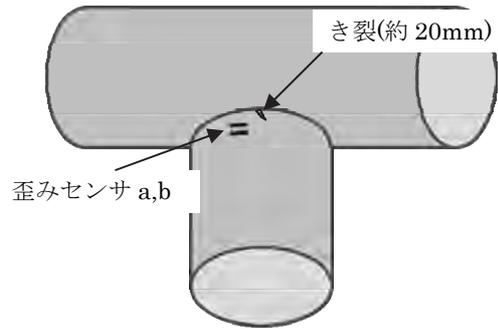


図-5 歪み計測開始約 3ヶ月後の位置 A

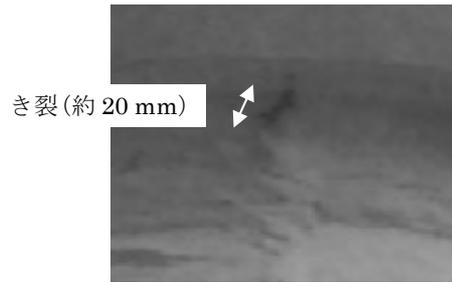


図-6 歪み計測開始約 3ヶ月後、位置 A で発生したき裂

この時の位置 A における歪みデータの F 検定処理結果を図-7 に示す。後半に、F 値が急上昇している（歪みセンサ a、b の相関関係が崩れている）のが確認できるが、この時にき裂が発生したと思われる。

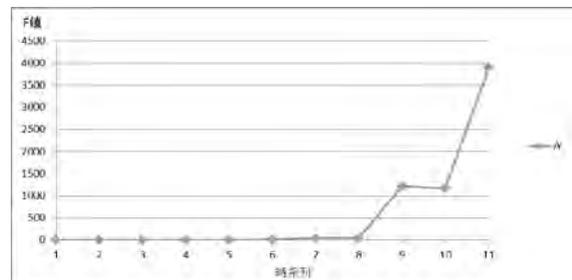


図-7 歪み計測開始約 3ヶ月後の位置 A における F 値

③計測開始 6ヶ月後

図-8 に示すとおり、き裂は約 90mm まで進展した。結果き裂はセンサまで約 40mm の位置に迫っている。

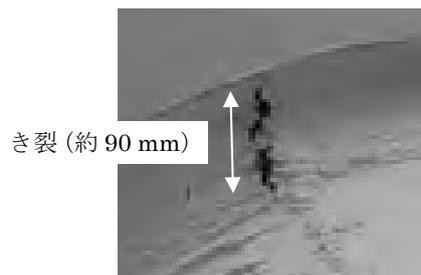


図-8 歪み計測開始約 6ヶ月後、位置 A で発生したき裂

この時期の F 値のグラフを図-9 に示す。3 ヶ月後と比べて F 値自体が大きく、より長く値が高い状態が続いている。これはき裂が約 20mm から約 90mm まで進展する過程に伴うものと考えられ、F 値が大きくなっているのは、き裂の進展速度自体が増しているためと推測される。

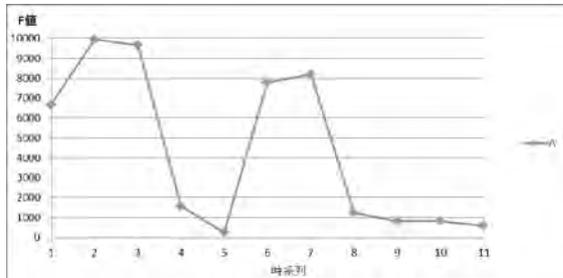


図-9 歪み計測開始約 6 ヶ月後の位置 A での F 値

(2)対象位置 B

①歪み計測開始時

位置 A と同様に、溶接継ぎ手部の応力が集中する位置に歪みセンサ c, d を設置した。(図-10) 歪みセンサ c と d の間の距離は、30mm である。

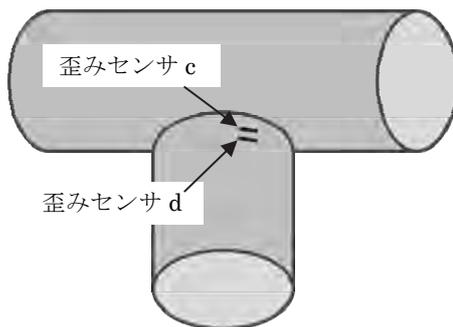


図-10 歪み計測開始時の位置 B

②計測開始 3 ヶ月後

位置 B においてき裂等の異常を目視確認することはできなかったが、図-11 に示すように、この時期に歪みセンサ c, d に基づく F 値のグラフを見ると、後半に小さな値の上昇を検知している。これは後に位置 B において目視確認されるき裂の発生初期を捉えたものと考えられる。

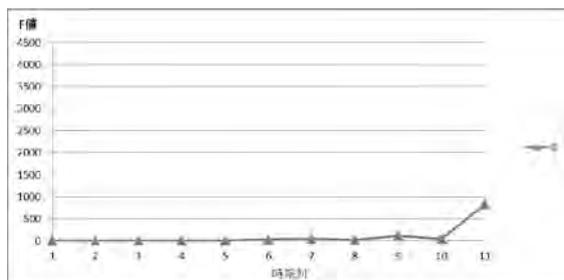


図-11 歪み計測開始約 3 ヶ月後の位置 B での F 値

③計測開始 6 ヶ月後

き裂発生は目視確認できなかったが、図-12 に示す位置に 15mm 程度の錆が発生していることを確認した。実際に発生した錆の状態を図-13 に示す。錆は歪みセンサ c から約 120mm の位置で発生している。

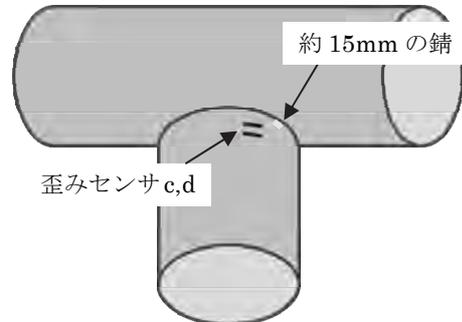


図-12 歪み計測開始約 6 ヶ月後の位置 B

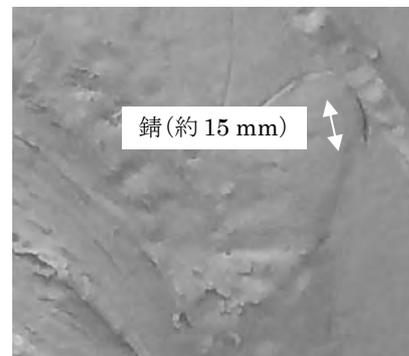


図-13 歪み計測開始約 6 ヶ月後、位置 B で発生した錆

上記時期における F 値のグラフを図-15 に示す。これを見ると F 値の変動は検知されておらず、前述の通り、錆の発生を目視確認したものの、この期間におけるき裂の進展はない、または微小であったものと思われる。

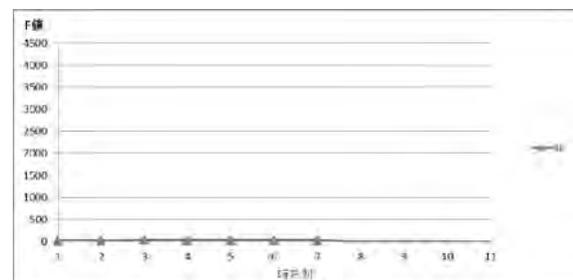


図-14 歪み計測開始約半年後の位置 B での F 値

④計測開始 10 ヶ月後

図-12 で示した発錆箇所新たにき裂が生じているのを確認した。よって計測開始 3 ヶ月後に検出した F 値上昇は、ここで確認されたき裂の発生初期段階によるものと考えて間違いのないと思われる。

位置Bで発生したき裂の写真を図-15に示す。

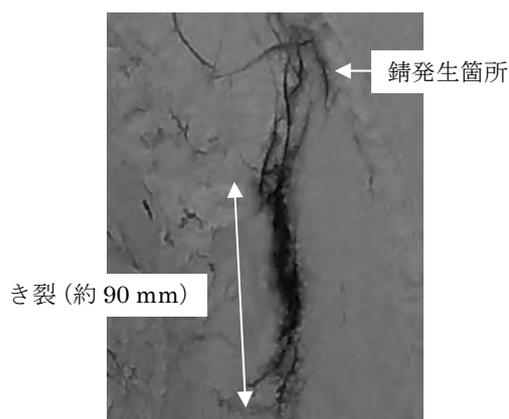


図-15 歪み計測開始約10ヶ月後、位置Bで発生したき裂

4. 結果の評価

前章に示したとおり位置Aにおいては、き裂の発生及び進展に伴いF値の大きな変動を検出しており、本手法によるき裂検出性能が、実運用においても期待通り発揮されることが確認された。

また、位置Bにおいては、塗装によって覆い隠された発生初期段階の微小き裂によると思われる兆候も捉えており、本手法におけるき裂の検出性能が十分に高く、かつ構造的に重要な部分のき裂監視にも適用可能であることが確認された。

5. 今後の課題

①F値のしきい値の設定

適用事例の位置Aでは、F値のかなり大きな値を検出したため、異常値であることが分かりやすかったが、位置Bでは、小さなピーク値のみが検出されたため、このピーク値は異常値なのか、それとも一時的な値であるかの判断が難しかった。よって、今後はより事例を重ね、F値のしきい値として適切な値、またはF値を定める基準式を設定し、特別なノウハウを有しなくても本手法による診断が行えるようにする必要がある。

②歪みセンサの異常検出範囲

今回の適用事例では、両事例ともに歪みセンサの近傍でき裂が発生したため、非常に良好な検出性能を発揮できたが、実際にどの程度の距離まで有効な検知が可能か、検証していく必要がある。

また、今回の適用事例では予め構造的に脆弱な箇所が判っていたため、あえて歪みセンサ間の距離を30mmと狭くすることで検出性能を向上させていたが、その代償として検出可能範囲が小さくなっている。今回のように監視すべき範囲が比較的小範囲に限定できる場合はこれで良いが、どこにき裂が発生するか特定が難しい場合、紹介事例のような30mm間隔での設置では、非常に多くの歪みセンサを各所に設置しなければならず、効率が

悪い。よって、より広範囲に監視するためのセンサ間隔及び配置の検討を進めるとともに、監視目的に見合ったセンサ配置を決めるための基準、方法の検討を行う必要がある。

6. おわりに

今回紹介した歪み計測による疲労劣化検知手法は、鉄鋼構造物やコンクリート構造物であれば適用することができる汎用性のある技術である。前述のとおり、少なくとも適切にセンサを配置すれば、き裂の発生を初期段階で検出することが可能である。これは特に、日常的に点検や補修を行うことが難しい高所、水中、閉鎖空間や酸欠環境など（橋梁の支承や主桁の裏側、船舶のバラスタタンク内等）における構造物の維持管理において非常に有効な手法であると考えている。また、本手法による監視はコンピュータによる自動監視が可能であるため、多くのインフラを集中して少ない人員で管理することが可能となる。これらのことから、本手法は今後増加の一途をたどる老朽インフラの維持管理において、その合理化と高精度化を同時に果たすことが可能であると考えている。

- 1) 柴田勝規・宮崎信弥・戸村雅一：作業船における予知保全技術と適用事例紹介，建設機械施工 Vol.66, No.8 August 2014
- 2) 宮崎信弥：老朽化インフラの声なき悲鳴をキャッチ，IHI 技報, Vol.54, No.2, 2014
- 3) 財団法人 機械システム振興協会，機械システム等の疲労劣化診断モニタリング技術の開発に関するフィージビリティスタディ報告書（2009）

37. ジャイロ効果を利用した ROV による姿勢制御した水中構造物の健全性評価

－ インフラ点検用水中ロボット －

株式会社 大林組

○ 江原 雅洋
沼崎 孝義
三輪 徹

1. はじめに

我が国の社会インフラ施設の多くで進行する老朽化、年々リスクの高まる大規模地震や頻発する風水害などの災害、一方、社会情勢としての人口減少・少子高齢化の進行といった重要かつ喫緊の課題がある。これに対して、近年の ICT などを活用し、効率的・効果的な対応を可能とする技術を開発し、導入することが求められている。

その中で、ダム水中部の潜水士による近接目視の代替（精査）または支援（概査）ができる技術・システムが国交省から公募の対象となった。そこで、ジャイロ効果を搭載した水中ロボットを新規製作し、ダム現場の実証試験に参加し、水中部のダム壁面やゲート戸当りの良質な映像を取得することができた。

本報文は、開発した水中点検ロボットの機能ならびにダム実証試験の結果について記述する。

2. ジャイロ効果の機能

ダムなどの水中構造物の点検作業は、通常潜水士により実施され、水中写真の撮影も行われている。この点検作業を水中点検ロボットに代替させると共に当社が開発したジャイロ効果活用した水中ロボットを使用することで対象物を見失うことなく低速で本体を回転・静止させ、ブレのない映像を取得することを可能とした。

スカイツリー建設時に威力を発揮した当社開発機械である吊荷方向制御装置を水中で使用できるようにした装置で、ジャイロ効果を活用し水中を浮遊する装置などの姿勢制御機能を有する。

ジャイロ効果とは、地球ゴマのように物体が高速で自転運動するとその姿勢を保持する現象である。図 2-1 にジャイロ効果の概要説明図示す。

高速回転フライホイール

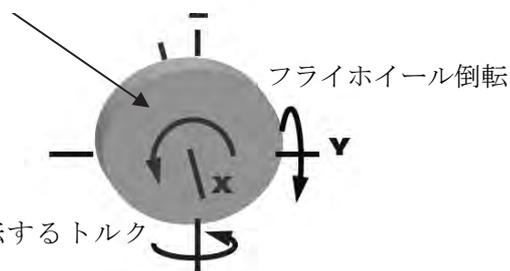


図 2-1 ジャイロ効果の概要説明図

3. 水中点検ロボットの機能

3-1 システム構成

水中点検ロボットのシステム構成図を図 2-1 に示し、①～⑥について説明を加える。

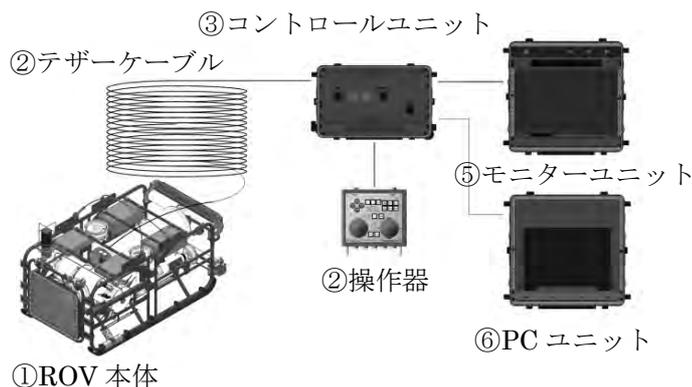


図 3-1 水中点検ロボットのシステム構成図

① ROV (Remotely Operated Vehicle) 本体

点検を行うロボット本体。アクアジャスター®、パンチルト機能付きハイビジョンカメラ、後方監視カメラ、高輝度 LED 照明、推進装置、ケレン装置、ラインレーザー、プロファイリングソナー、

深度センサ、姿勢センサなどを搭載している。
 (写真 3-1)

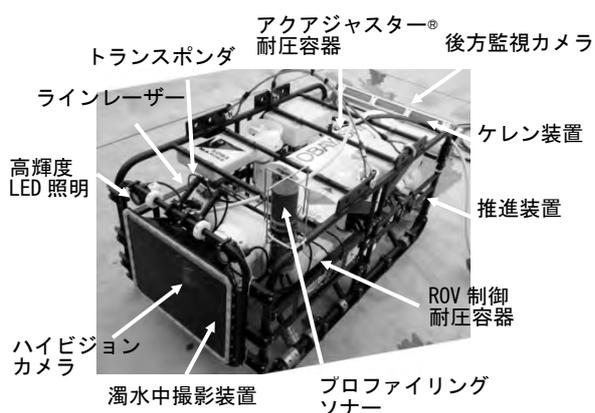


写真 3-1 ROV 本体の装備機能

②テザーケーブル

ROV 本体とコントロールユニットを接続する水中ケーブル。送電線、光ファイバー、テンションメンバで構成されている。

③コントロールユニット

ロボットシステムを制御するコントローラ。CPU やトランスなどを内蔵している。

④操作器

ROV 本体の運転を行う。アクアジャスター®やカメラの操作用スイッチ、推進装置操作用のアナログスティックなどにより構成されている。

⑤モニタユニット

ROV が撮影したハイビジョン映像を表示するモニタおよび録画するレコーダー、ROV の深度と方位をテキスト表示するディスプレイで構成されている。

⑥PC ユニット

ROV の全ての情報を表示し、ログ保存するための PC。PC ユニットの表示画面を写真 2-2 に示す。

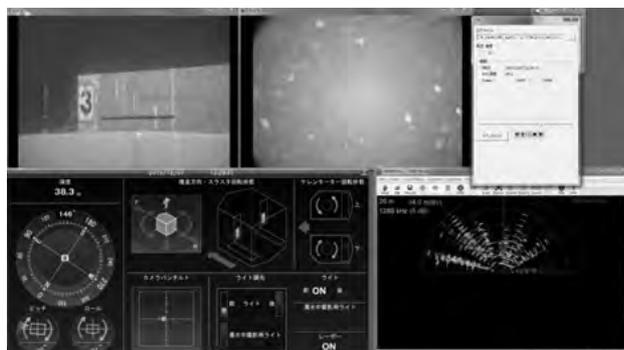


写真 3-2 PC ユニット表示画面

PC ユニットの表示画面は、【上段左端】ハイビジョンカメラの映像 【上段中央】後方監視カメラの映像 【上段右端】ログ状態表示 【下段左側】ROV の姿勢、深度、方位の各センサ情報、推進装置やケレン装置回転状態、カメラポジション、調光レベルなどをグラフィカルに表示する ROV 状態表示画面 【下段右側】ソナー画面 となっている。

3-2 ロボットの機能

ROV 本体に搭載したハイビジョンカメラで対象物を撮影し、ラインレーザーで大きさの把握が可能である。ハイビジョンカメラには、濁水中での撮影環境を改善させるため、カメラ前方に清水を満たした容器（濁水中撮影装置）と画面上のマリンスノーなどが除去できる画像詳細強化装置を配置している。さらに、ソナーを使用することで、濁って視界の悪い環境でも、ダム壁など周囲の構造物と ROV の位置関係を広範囲に把握することができる。

ROV の後方にはケレン装置と後方監視カメラを装備しており、推進装置の力でロールブラシを壁面に押し付けて清掃することが可能である。

PC ユニットに保存したログは、再生時に全ての情報を同期して再生することができ、報告書作成時の作業負荷を軽減している。

3-3 ロボットに装備可能な機能

ロボットには拡張性があり、横移動用推進装置や水中で軽作業を行うマニピュレーターなどを追加可能である。また、Ether 通信を使用し、各種センサなどを増設して PC に表示することができるよう設計されている。

4. 水中心検ロボットの位置確認機能

ROV 本体の位置を正確に把握することは、広域の水中心検における課題の一つである。計測方法として GPS を使用する場合、山間部であることやダム堤体の電波障害物により、GPS が十分な数の衛星からの電波を取得できない懸念がある。

そこで当社は、作業船が見渡せる陸上に自動追尾機能付きのトータルステーションを使用し、作業船に設置したプリズムの位置座標を連続的に取

得した。さらに、作業船に船体ジャイロとトランスポンダ（音波センサ機器）を設置し、作業船の方位や ROV の相対位置をリアルタイムにモニタリングできる位置確認システムを構築した。

これら一連の測位情報を連動させることで、ROV の絶対位置座標を把握できる。ROV 位置確認の概念図を図 4-1 に、天ヶ瀬ダム検証後の ROV 軌跡図を図 4-2 に示す。

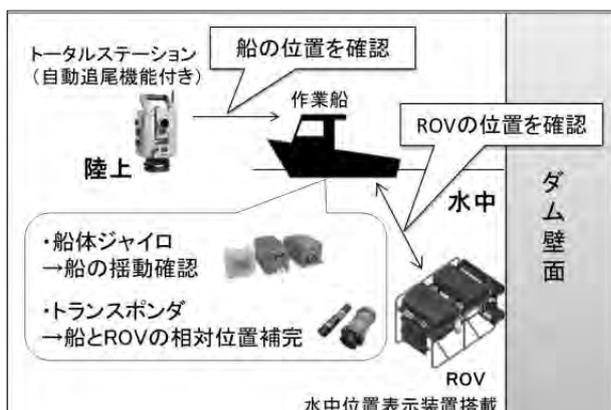


図 4-1 ROV 位置確認の概念図

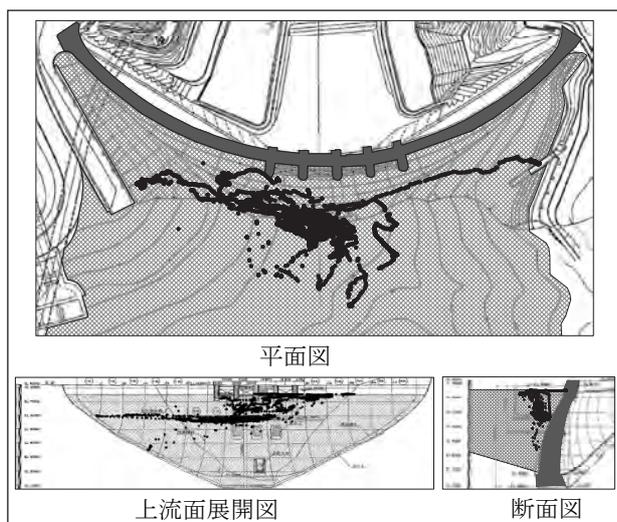


図 4-2 検証後の ROV 軌跡図 (天ヶ瀬ダム)

5. 国交省ダム実証試験の結果

5-1 準備作業

当社は、平成 27 年 11 月 20 日に天ヶ瀬ダム（京都府）、同年 12 月 7 日に弥栄ダム（広島県・山口県）のダム点検公募調査を実施した。調査当日のタイムスケジュールを以下に示す。

・天ヶ瀬ダム

8:30～ 9:00 朝礼

9:00～ 9:30 事前測量

9:30～11:00 機材搬入、設置

11:00～15:30 調査（昼休憩 1 時間）

15:30～17:00 片付け、撤収

・弥栄ダム

7:30～ 8:30 機材搬入、朝礼

8:30～ 9:00 事前測量

9:00～10:30 設置、移動（上流～堤体部）

10:30～16:30 調査（昼休憩 1 時間）

16:30～17:15 移動、片付け、撤収

トータルステーションは右岸と左岸の基準点を視準し据え付けた。ROV 本体を含む機材 1 式は、ワンボックス車 1 台に収納して運搬した。

天ヶ瀬ダムではインクラインに格納された巡視船にて、弥栄ダムではダム湖上流の浮棧橋に係留された監視船にて機材を設置した。全ての作業は測量、船長、無線報告、ROV オペレーター、ケーブル介錯が各 1 名の計 5 名で行い、設置に概ね 1 時間、撤去に概ね 30 分を要した。天ヶ瀬ダムと弥栄ダムの調査準備状況をそれぞれ写真 5-1, 2 に示す。



写真 5-1 調査準備状況（天ヶ瀬ダム）



写真 5-2 調査準備状況（弥栄ダム）

5-2 調査内容

各ダムでの調査項目は以下の通り。

- ・横継目、水平継目、壁面の概査
- ・模擬版探索、精査

- ・予備ゲート戸当り変状調査
- ・低水放流設備および着底水深調査
- ・選択取水塔調査（弥栄ダムのみ）

模擬版とは、あらかじめ予備ゲート付近に設置されたコンクリート製の調査用試験体である。模擬版は、各ダムにおいて4種類設置されており、円柱状の突起や幅の異なるクラックが設けられている。

5-3 調査結果

横継目、水平継目、壁面の概査ではクラックの有無を確認しながら水深40m付近まで潜行した。水中映像は、高輝度LED照明と画面上のマリンスノーなどが除去できる画像詳細強化装置を使用しながら、ハイビジョンカメラで撮影した。弥栄ダムの横継目の概査状況を写真5-3に示す。

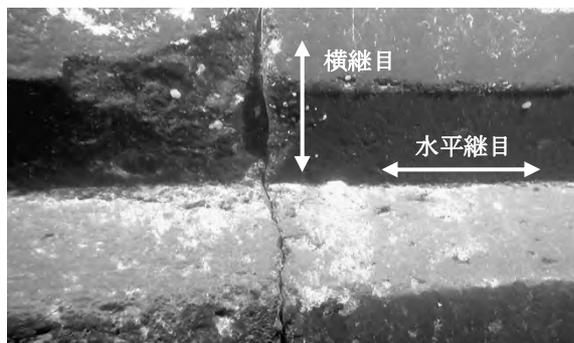


写真5-3 水深30m横継目概査状況(弥栄ダム)

模擬版精査はジャイロ効果を使用した制御とラインレーザー（照射幅100mm）を用いて計測した。弥栄ダムの模擬版精査状況を写真5-4に示す。



写真5-4 模擬版精査状況(弥栄ダム)

予備ゲートの戸当り調査では変状箇所が見られなかった。また、調査時間の制約で低水放流設備を確認することができなかった。予備ゲート下部着底水深調査では天ヶ瀬ダムで40m、弥栄ダムで

82mであった。

選択取水塔調査では、着底水深41mにて流木の堆積を確認した。また、水深20m付近でROVに搭載したケレン装置を使用してスクリーンの清掃を行った。その結果、スクリーンのヘッドロが取れて金属の光沢が現れた。選択取水塔流木状況を写真5-5に、清掃後のスクリーン状況を写真5-6に示す。



写真5-5 選択取水塔流木状況(弥栄ダム)

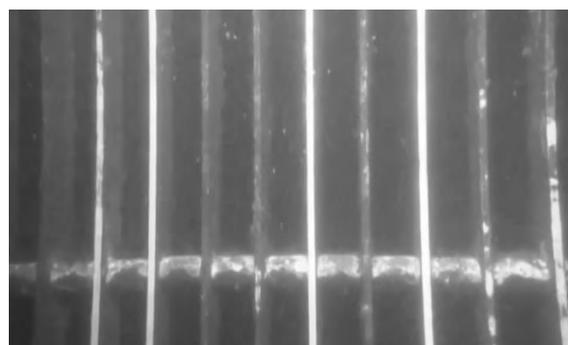


写真5-6 清掃後のスクリーン状況(弥栄ダム)

6. おわりに

今回2件のダム調査は、クラックの把握ができる映像を取得することができ、一定の成果はあげられたと考える。対象となるダムを定期的に調査する場合には、事前に検査対象の図面を3次元化してシステムに取り込んでおき、トランスポンダやトータルステーションで測位したROVの位置を、図面上にリアルタイムでプロットすることも可能であり、検査対象位置が分かればその位置への誘導も可能となる。

一方、基本的に揚重機を使わずにROVをセットすることを考えて製作を行ったが、ROV本体が130kgとなったため、着水揚収時の作業性をより良くするための機器の軽量化や、着水揚収方法の効率化が必要であると感じた。

また、海上栈橋のコンクリート下面の点検への適用できないかという要請もあり、現在の ROV を改造もしくは新規製作を検討しているところである

参考文献

- 1) 井上, 渡辺, 脇坂, 他, ”ジャイロモーメントを利用した吊荷制御装置の開発と実用化”, 日本ロボットシンポジウム, pp107-116(1995)
- 2) 井上, 小泉, 小野, ”超高層建設における高出力吊荷回転装置の開発”, 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, (岡山) , 1A1-B09, (2011)
- 3) <http://www.kwk.co.jp/marine/products/robot.html>
(広和株式会社マリンシステム部)

II 梗概集

● ポスターセッション要旨

1. 視程障害時の除雪車運行支援に向けた基礎的試験

国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所 ○三浦 豪
国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所 高本敏志
国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所 村上和也

1. はじめに

近年、積雪寒冷地では気候変動の影響による異常な暴風雪に伴い、視程障害が発生し、除雪作業が行えず、車両の立ち往生や長時間に亘る通行止め、集落の孤立等の障害が発生するケースが増えてきている。暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業を行える除雪車の開発についての現場ニーズは非常に高い。

そのため、除雪車周囲の人、車両、道路工作物等との衝突事故や車線逸脱を防ぎ、除雪作業を可能とする除雪車運行支援技術が求められている。

除雪車の運行支援には、車線走行支援技術、及び周囲探知技術が必要である。

本稿では、車線走行支援技術の基礎検討として、位置精度が高く移動体でも使用可能なVRS方式のネットワーク型RTK-GPS (VRS-GPS) 及び比較的安価に調達できるRFIDを使用して、積雪時の検証試験を行った。

2. VRS-GPSによる計測試験

積雪時におけるVRS-GPSによる自車位置の計測精度について、停止した乗用車の屋根に設置したアンテナ部に雪を被せることで積雪状況を模擬的に再現し、検証試験を行った。

なお、試験には、ジェノバ社仮想基準点により、100HzのRTK測位ができるVBOX3i (VBOX社製) で構築したシステムを使用した (図-1)。

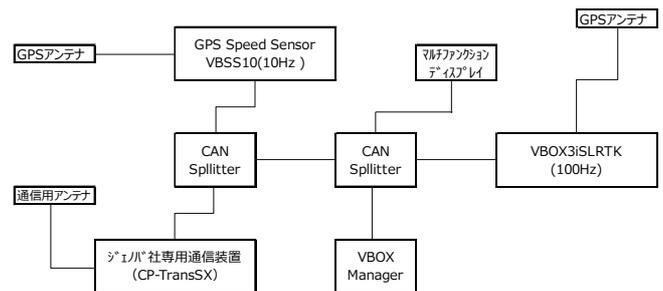


図-1 計測システム構成図

その結果、積雪がゼロの場合、計測位置の変位は1.9×1.4cmの範囲内であった。しかし、積雪を8.4cmにした場合は、変位が14.8×60.9cmとなり、積雪により計測精度が落ちることを確認した (図-2)。

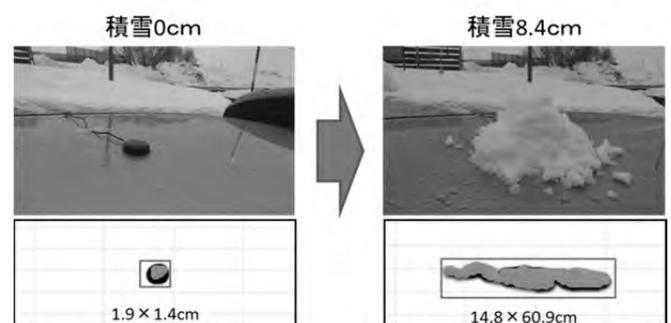


図-2 アンテナ部の積雪による計測位置の変位

3. RFID検知試験

舗装に埋設したRFID (ICタグ) の積雪時における検知について、アスコンの中にプラスチックタイプとシールタイプのICタグ (表-1、写真-1) を埋め込み (写真-2)、アスコンと雪を積層して、アスコン5cm+雪0~40cm、走行速度30km/hで検証試験を行った (図-3、写真-3)。

なお、試験には、送信出力を250mWから1Wまで可変で設定できるDOTR-920J（東北システムズ・サポート社製）のRFIDリーダを使用した。

表-1 使用したICタグの概要

	メーカー	名称	検知距離	作動温度	費用	特徴
プラスチックタイプ	LogiHex	MISH	長距離 (6.8m)	-20℃～ 100℃	84000円ロット (100個)	水・金属 対応
シールタイプ	Smartac	Shortpole	長距離	-40℃～ 85℃	65000円ロット (1000個)	水・金属 非対応



写真-1 使用したICタグ



写真-2 ケース内へのICタグ取付状況
(この後、アスコン打設)

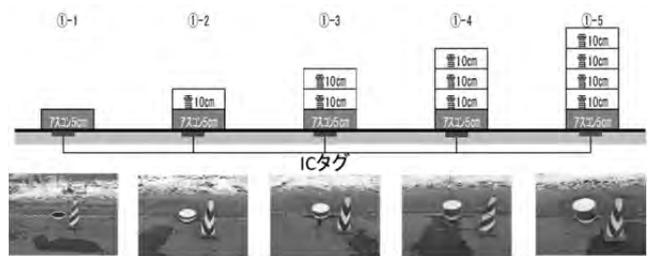


図-3 RFID検知試験パターン（イメージ）



写真-3 RFID試験状況

その結果、反射波（マルチパス）の影響で検知が不安定な状況はあったが、RFIDリーダの送信出力を1Wとした場合には、プラスチックタイプは鉛直距離3m×水平距離2m以内で検知可能であった。

また、シールタイプは鉛直距離2m×水平距離2m、または鉛直距離3m×水平距離1m以内で検知可能であった。なお、雪かぶりによる違いは見られなかった。

4. まとめ

VRS-GPSはアンテナ部の積雪により計測精度に影響が生じるため、アンテナ周囲に雪が付着しないような工夫が必要であること、RFIDについては積雪時においてもICタグの検知が可能であり、ICタグに情報を持たせることで自車位置の検出に利用が可能であることを確認した。

今後、これらの結果を踏まえて、視程障害時の除雪における車線走行支援への活用を検討していく。

2. 扇形および矩形断面を造成できる高圧噴射攪拌工法の紹介

－ FTJ-FAN (エフティジェイファン) 工法 －

株式会社不動テトラ ○ 深田 久

1. はじめに

高圧噴射攪拌工法は、超高圧のジェット噴流によって地盤を切削し、セメント系の材料（固化材）を用いて固化改良体を造成する地盤改良工法である。近年では、耐震化等のニーズを受けて、高圧噴射攪拌工法の用途も広がっており、既設構造物直下を施工する事例も出てきている。しかしながら、従来の高圧噴射攪拌工法では、既存躯体を貫通する削孔や、大断面の円形改良体を構造物の外周部から造成する必要があり、経済性や施工性における課題があった。

そこで、既設構造物の外周部から固化材スラリーを構造物直下方向に噴射し、改良体を造成することで躯体の撤去もしくは削孔を必要とせず、無駄のない効率的な改良体の配置が可能な揺動式複流線固化材スラリー噴射攪拌工法【以下、本稿ではFTJ-FAN (エフティジェイファン) 工法とよぶ】を開発した。ここでは、FTJ-FAN工法の概要および特徴と、既設河川堤防の耐震補強の事例を紹介する。¹⁾

2. FTJ-FAN工法の概要

FTJ-FAN工法は、図-1、図-2 に示すように、攪拌翼の正面にほぼ水平に取り付けた複数の噴射ノズルから高圧かつ大流量の固化材スラリーを揺動噴射させることで、任意の角度の扇形あるいは矩形(長方形)状の改良体を地盤内に造成する工法である。

FTJ-FAN工法の特徴を以下に示す。

- ①超高圧固化材スラリーの周囲にエアを沿わせるエア併用施工（二重管）により、周辺地盤、構造物への変位影響を抑制しながら、地盤改良体の造成が可能である。
- ②揺動ジェット方式の採用により扇形あるいは矩形（長方形）の改良体の造成が可能で、効率よく改良体を配置できる。（写真-1、写真-2 参照）

③自走式施工機を使用するので機動性に富む。

扇形タイプの標準的な噴射距離は、砂質土地盤で半径 3.5m、粘性土地盤で半径 3.0m、最大噴射距離の実績は砂質土地盤で半径 4.0m である。扇形の揺動角度は 180° まで任意に設定可能である。矩形タイプは噴射距離 4.0m、改良幅 0.5m である。なお、噴射仕様は地盤条件や施工条件に合わせて決定する。改良体の設計基準強度は砂質土地盤で $q_u=3,000\text{kN/m}^2$ 、粘性土地盤で $q_u=1,000\text{kN/m}^2$ を標準仕様とする。適用地盤は、砂質土地盤で $N\leq 30$ 、粘性土地盤で $N\leq 3$ を対象としている。

FTJ-FAN工法には、12t 級の超小型施工機と 25 t 級の小型施工機の 2 種類があり、自走式のため機動性に富み、小型のため狭隘地への適用性が高い。

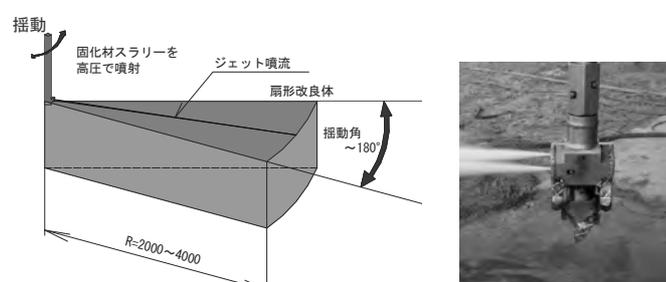


図-1 扇形タイプの噴射模式図とスラリー噴射状況

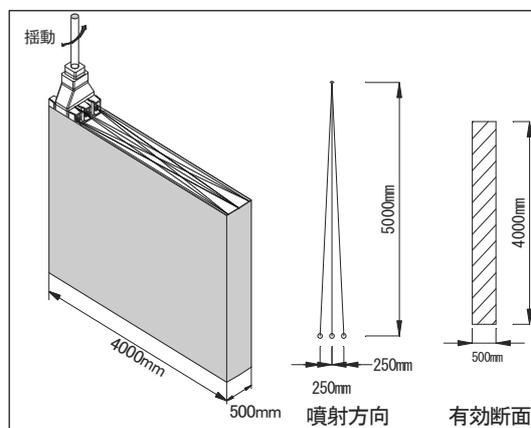


図-2 矩形タイプの噴射模式図

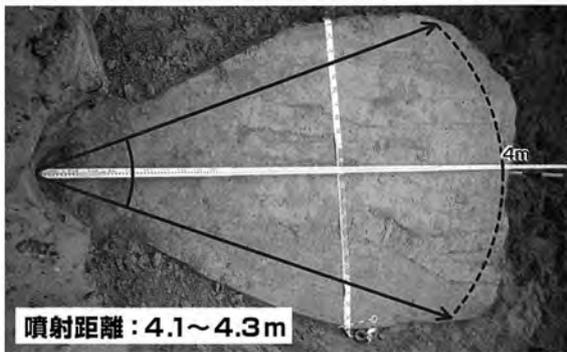


写真-1 扇形改良体の出来型形状



写真-2 矩形(長方形)改良体の出来型形状

3. 施工事例

既設の河川堤防の特殊堤の直下地盤の液状化対策を目的として施工した事例を紹介する。当地区では図-3に示すように、川裏側に民地が迫っており施工ヤードの確保が困難であった。そのため川表側(河川側)から既設構造物直下を固化する必要がある。さらに写真-3に示すように、施工区間の一部(延長140m)は、施工スペースが幅3.0m程度しか確保できず施工機の幅が2.3mであるので、施工機の横は人が一人歩ける程度であった。そのため、資機材等はフロート式台船に搭載することで施工を行った。

図-3に示すように必要改良幅4.8mを確保するために、FTJ-FAN工法と二重管式高圧噴射攪拌工法(エフツインジェット工法)を組み合わせた。FTJ-FAN工法は扇形の部分となり、揺動角 117° を基本に、一部線形および施工順序の関係から $53\sim 180$ 度、噴射距離の半径 $R=4.0$ mの扇形形状の施工をおこなった。円形の部分がエフツインジェット工法であり、改良径直径 $D=2.0$ mの円形状の施工を行った。

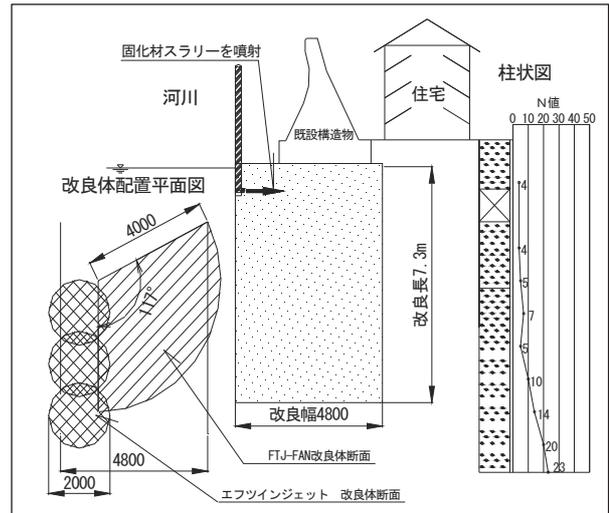


図-3 改良仕様の概要と原地盤柱状図



写真-3 特殊堤における施工状況

改良対象土層はN値=6~30程度の「細砂」である。細粒含有率(F_c)が1.3~4.5%と少なく、均等係数(U_c)は5.0以下と非常に粒径が揃っている。改良深度は地震時に「液状化する」範囲を網羅する深度で、改良率は100%である。施工後の出来形確認のため、鉛直ボーリングと斜めボーリングを実施し、改良体コアが全域で採取されたことを確認した。

4. おわりに

今後は、FTJ-FAN工法の施工ニーズに応じた技術の改善と更なる開発を進めていく所存である。

参考文献: 1) 秋間健, 岡戸雅則, 田中肇一, 大林淳: 既設河川堤防の耐震補強—FTJ-FAN工法—, 基礎工, 2016. 7.

3. 災害復旧等の危険エリアにおける建機の遠隔操縦ロボット

ー ゴム人工筋肉を利用した、小型・軽量で汎用性のある建機用無線操縦ロボット ー

株式会社アクティオ 稲葉誠一
株式会社アクティオ ○今関政美

はじめに

2016年4月14日21時26分にM6.5、4月16日1時25分にはM7.3の地震が熊本県において発生した。

東日本大震災から5年しか経過しておらず、今もなお震災復興工事、福島第一原子力発電所内では、放射能との戦いが続いている。

また2015年9月の豪雨により茨城県常総市において鬼怒川の堤防が決壊したニュースは記憶に新しく、近年の日本は地震や豪雨による土砂災害のリスクが非常に高まっていると感じざるを得ない。

弊社は建設機械の総合レンタル業として、通常の建設現場のみならず、様々な災害現場に仮設トイレや発電機、重機などをレンタルで提供してきた。災害復旧現場での重機作業は運転手に危険が伴うことから、遠隔より操縦可能なラジコン対応型バックホウを、建機メーカーと共同開発の末、2012年10月に導入した。

ラジコン対応型バックホウの特長と課題

ラジコン対応型バックホウは0.45m³ (13tクラス)と0.7m³ (20tクラス)の2機種で、共にクレーン仕様及びアタッチメントが装着可能な配管仕様、情報化施工のマシンガイダンスシステムが短時間で装着出来るよう各種センサの取付ベース材を標準装備とした。

また0.45m³については、アスファルト舗装上やコンクリート上も走行出来るようゴムPAD仕様とし、0.7m³については軟弱地盤も走行可能な鉄シューとした。商品の構成を次に掲載する。

バックホウ本体に、直接操作と無線操作の切替スイッチ、アンテナ及び受信器・制御装置が組み込まれた専用機で、約100m程度離れた場所からラジコン操作が可能となり、数々の危険施工現場で活用いただいた。



受信器・制御装置



切替スイッチ



コントローラ

しかし、ラジコン対応型専用機となり、大型であることから、運搬などに時間と手間を要し、また運搬コストも重荷になることから改善が必要と考えた。

災害は、いつ、どこで発生するか予知出来ない。災害発生地域にある重機に簡単に搭載出来れば、迅速に復旧工事に着手することが可能となる。

そこで既存の重機をロボットに操縦させるという発想から、コーワテック株式会社が開発したアクティブ・ロボSAM（サム）を紹介する。

既存の建機がそのまま使える

アクティブロボ SAM

本製品の概要

バックホウの操縦では、4方向レバー（前後左右）2本とペダルに直結した2方向レバー（前後）2本が使われ、4方向レバーと2方向レバーを持ち替えながら手で動かしたり、4方向レバーを手で、2方向レバーを足で踏んで動かしたりする。SAMでは全てのレバーに空気圧で駆動するアームを取付け、2方向レバーを動かすアームには2本の人工筋肉、4方向レバーを動かすアームには4本の人工筋肉を使用。モーターではなく、人工筋肉を採用したのは、『振動、水、土砂に強く、壊れにくく、ヒトと同じような柔軟な動きをするからである。空気圧駆動の場合、圧縮空気を作るエアコンプレッサー（空気圧縮機）と、それを貯めるエアタンク（10L）が必要だが、両方とも運転席に設置出来るようになっている。

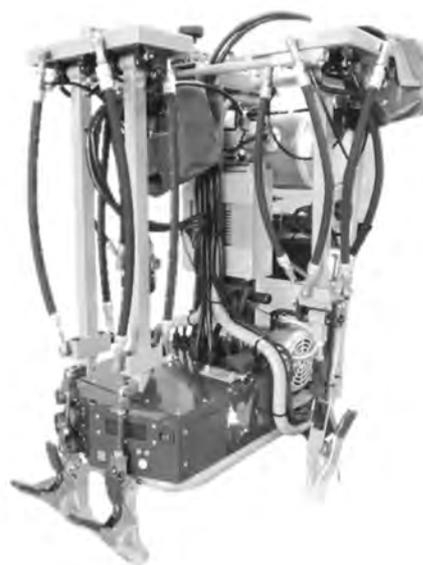
ロボットを動かす時に問題となるのがバッテリーであるが、SAMは建機のバッテリーを利用するため、建機が燃料切れになるまで動かせる。（コントローラは約10時間）。また建機の始動、停止（イグニッションの操作）もSAMのコントローラから可能である。

SAMの本体を運転席の上に直接置き、ベルトと上部の固定装置で簡単に固定出来る。また、大人の男性が座ることが前提の運転席は、どの建機でも似たようなサイズであり、操作の割り当ては違っても、4方向レバー2本と2方向レバー2本で動く建機が多い。そのため、この操作方式の建機なら、メーカーや機種・大きさを問わず、既存の建機に搭載し遠隔操縦が可能となる。

SAM本体は総重量52kg、尚且つ3分割出来るため、宅配便、航空便での運搬も可能であるし、ミニバンサイズの車両で全ユニットを運搬、あるいは人力で担いで山道運ぶことも可能である。各パーツの重量は、マウントフレーム25kg、作業レバー用アーム18kg、走行レバー用アーム9kgである。



アクティブロボSAM搭載状況



アクティブロボSAM本体



遠隔操縦用送信機



建機側受信器

遠隔無線システム

オペレータは遠隔操縦用送信機を持ち、走行および作業レバーに各々対応させたジョイスティックの傾き角を指令値として、その他データを加えてロボット側の無線モジュールにリアルタイムで通信する。ロボット側では指令値に従い、空気圧をON-OFFソレノイドバルブを経由して人工筋肉に供給する。そしてロボットは送信機側のジョイスティックの倒し角まで建機の操縦レバーを傾ける。また、その他の通信データとしては、バックホウのエンジン始動・停止、エンジンアクセル調整機能、オペレータの安全を確保するために必要な非常停止信号などを送受信している。例えば、無線が途切れた時やオペレータが転倒した場合、バックホウのエンジンを停止する機能を備えている。

想定する活用場面

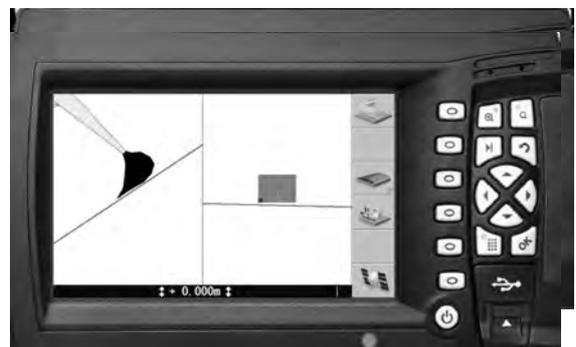
豪雨による河川の決壊、地震や火山の噴火による土石流や津波などによる災害が発生した現場で、2次災害を防ぐために治山・治水・砂防・地すべり防止策を図り、周辺住民の安全の確保、道路・鉄道の寸断防止など、被害軽減化を対象とした重機による緊急の復旧作業を想定。特に、初動時の作業においては常に危険が伴うため、重機オペレータの安全や周辺環境の変化などに対する注意を図るとともに、適切な作業進捗を担保するために活用する。災害現場では大型重機を投入出来ない狭隘な場所もあり、小型重機にも搭載可能なことから、倒壊した家屋からの救出作業にも活用出来るものと考えられ、活用場面に広がりが見込める。

今後の展開

オプションでカメラ動画画像伝送装置を搭載することで、遠隔操作室からより安全に重機を操縦することが可能となる。更に、衛星測位技術（GNSS）を利用したバックホウマシンガイダンスシステムを活用すれば、3次元設計データとバケットの爪先との差分をガイダンスしてくれ、災害現場の復興工事において、より精度の高い施工が実現可能となる。

マシンガイダンスシステムのモニタ

バックホウの位置が確認出来る



設計とバケットの爪先との差分を表示

おわりに

今回はバックホウへの搭載を紹介したが、バックホウは掘削作業のみならず、油圧ブレーカでの破碎作業も遠隔操縦出来るように改良、またブルドーザやローラ・ホイールローダへの搭載も検討課題である。

建設業のみならず、危険作業や人材不足に悩む林業や農業、鉱業などにも展開出来ればと考えている。

今後も最新のICT技術、ロボット技術を取り入れ、現場が安全に、効率良く、精度良く、施工出来るよう、レンタルという形で貢献したいと思う。

4. ICTを活用したAR技術「埋設物可視化システム」

－ 掘削工事における“地下の見える化”を実現 －

清水建設株式会社 ○三木 浩
茨城工業高等専門学校 岡本 修
株式会社菱友システムズ 西原 邦治

1. はじめに

都市部における地下埋設物は、都市の近代化や人口集中に伴って多様化し、上下水道管やガス管、送電線、通信ケーブルなどが複雑に入り組んでいる。このため、開削工事や立坑工事などでは、それらの位置を関係者全員が事前に共有する必要がある。

そこで、ICT および衛星測位技術に着目し、タブレット端末を利用して誰でも簡単に地下埋設物を精度よく可視化できるシステムの開発を行い、その実用性を現場で確認したので紹介する。

2. 地下埋設物可視化システム

地下埋設物可視化システム（以下、本システムと称す）は、タブレット端末のカメラで写している風景画像に埋設物の図面を投影することで埋設物を可視化するシステムであり、AR関連技術の一種に位置づけられる。ARとは「拡張現実感(Augmented Reality)」の略で、実際の景色、地形、感覚などにコンピュータを使ってさらに情報を加える技術を指す。

本システムは、基準局のアンテナ・受信機とPC、移動局のアンテナと受信機、クラウドサーバで構成される。現場事務所に設けた基準局のPCと、移動局のタブレット端末はインターネットで接続され、常に最新の観測データが端末に送られる。（図-1 参照）



図-1 機器構成と通信イメージ

近年では、米国が中心に管理運営するGPSに加えてロシアのGLONASS、日本の準天頂衛星QZSS、中国のBeiDouなど、複数の衛星を複合的に利用するマルチGNSS(Global Navigation Satellite System)の時代が到来している。マルチGNSSで増加する衛星を有効に活用することで、安価な1周波受信機によるRTK法が実用的に利用できるようになった。

RTK法は、座標値が既知である基準局と観測点である移動局の2局を用いて、衛星から送信される搬送波を観測して相対位置を計測する方法である。基準局で観測したデータは、無線などの通信手段を用いて移動局に送信し、移動局で観測したデータとともに測位計算して座標値を求める。

本システムでは、マルチGNSSに対応した1周波受信機を採用することにより、小型軽量省電力を実現するとともに、RTK法による数cmの測位精度と安価なシステムを実現した。

3. 現場での適用

アンテナと受信機は超小型タイプを採用した。アンテナを写真-1に、受信機を写真-2に示す。また、写真-3に移動局（操作者）の装備例を示す。



写真-1 アンテナ



写真-2 受信機



写真-3 装備例

受信機とタブレット端末は無線通信であり、アンテナはヘルメットに取り付けるため、使用者は負担を感じることなくシステムを使うことができる。

本格運用に先立ち、当社で施工中の東京外環自動車道大和田工事において試行を行った。当現場は多数の地下埋設物が存在することから、本システムの実用性確認を行うのに最適と判断した

現場での操作手順ならびに試行の結果を以下に説明する。まず、移動局の使用者がタブレット端末とGNSSアンテナ・受信機を携行して現場に向かい、地下埋設物の近傍に近づくと、周辺に存在する埋設物の対象図面リストが画面に自動表示される。次に、使用者が確認したい図面を選択すると当該図面及び使用者がいる位置が表示される(図-2参照)。この際、埋設管が見えている箇所と画面表示と比較したところ、その誤差は数cm以下であることを確認した。

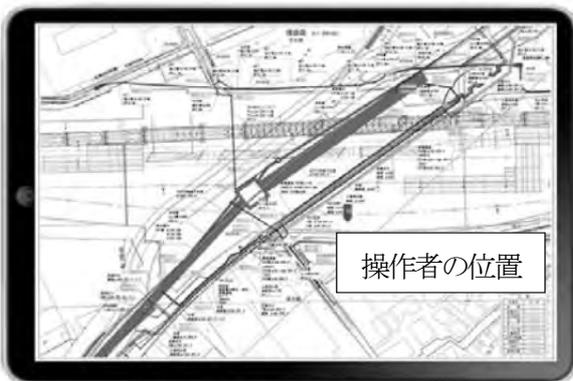


図-2 タブレット端末の表示画面

続いて、タブレット端末の内蔵カメラで掘削工事を行う地表面を眺めると、直下に敷設された埋設物のラインが地表面の映像上に投影される。写真-4にタブレット端末による使用時のイメージを示す。



写真-4 タブレット端末による使用イメージ

端末を使用する位置や保持する角度等に応じて、地表面のライブ画像に埋設物の敷設ラインが自動的に追

随して表示されるため使い勝手が良く、誰にでも手軽に操作できることを確認した。

なお、通信状況によるが、基準局では半径10km範囲にある複数の端末(移動局)を同時に利用することが可能である。

現場への適用に当たっては、事前に埋設物の図面データの登録が必要である。当社の現場では、まず電子化されていない紙ベースの図面をCADデータに変換する。次に登録する図面の四隅の緯度経度情報をクラウドサーバのデータベースに登録する。試掘調査等で埋設物の位置情報が更新された場合は、サーバ内のデータを更新すればよい。

なお、施設の管理者や事業者の方々など、当社の現場以外で本システムを採用する場合においても、この埋設図面の事前登録作業は必要となる。

4. おわりに

本システムの最大のメリットは、直接見ることができない地中の埋設物の種類や位置を、高精度の位置検知性能を確保しつつ、誰でも簡単・手軽に“見る”ことができる点である。本システムにより自分のいる位置と埋設物の存在と位置が「即座に一目でわかる」「正確に把握できる」ため、安心して効率よく地下掘削工事を行うことができる。紙ベースの図書を持つことなく図面の施工情報を現地で参照できるため、現場での作業性の向上も図れる。今回の試行によって、本システムの精度、手軽な操作性など実用性を確認できた。今後は一層確実で効率的な現場管理の技術として、掘削を行う現場に順次展開していく予定である。また、将来は、官庁や事業者の方々の要望に応じて、そのニーズに対応できるものに本システムをカスタマイズして、採用を働きかけていくことも検討している。

参考文献

- 1) 岡本修:センチ・メートル測位RTK法の基礎と実力, トランジスタ技術2016年2月号, pp.66-79, 2016.
- 2) 埜和広・岡本修他:衛星測位受信機の比較に関する実験的研究, 日本測量協会応用測量論文集, vol.26, pp.21-32, 2015

5. 人型ロボットによる建設機械操縦効率化「DOKA ROBO」

－ 汎用建設機械の運転席に設置して遠隔操縦を可能とする人型ロボット －

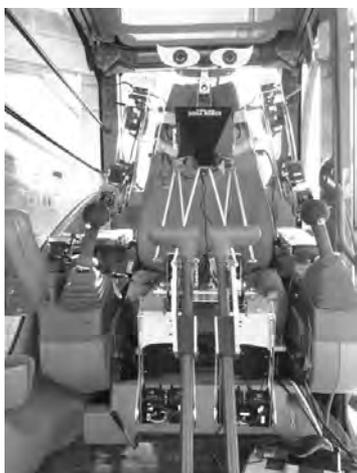
株式会社 カナモト ○笹原 久之
吉田 道信
株式会社 富士建 角 和樹

1. はじめに

災害現場は人の立ち入りが困難な場合や人命に危険を及ぼす状況が多く、人が安全に復旧作業を行うためには遠隔操作の建設機械が必要となる。普及するためには運用コストも重要であり、汎用機器を多用し安価で使いやすい遠隔操縦システムを目指している。本システムは2007年より開発を開始し、次世代社会インフラ用ロボット開発・導入現場実証に参加し改良を加えて機能向上を目指している。

2. ロボットの構成

DOKAROBO 本体は双腕、双脚を持った人型をしており、バックホウの場合は双腕先端を実機作業レバーに取付けて掘削積込の作業を行う。移動時の走行は双脚で実機走行レバーを操作することで可能となる。写真－1にロボット本体の写真を示す。



(写真－1)

ロボットは上半身と下半身に分割されており組立てると一体化する。その他に制御ユニット、通信ユニット、電源供給ユニットから構成され運転席後部または前部に設置される。電源供給ユニットは動力源として建設機械のバッテリーを使用し、電圧変換装置で本体に接続される。実機本体の電源を使用するため長時間稼働が可能である。各部位のサイズは概ね身長150cmの成人と同じ構成である。腕や脚を10cm×10cm以下の断面となるように構成し可動範囲を確保している。本体のフレームは軽量化のためにアルミやジュラルミンを使用し接合部はアルミブロックにて強靱な構造としている。主要諸元を表－1に示す。

項目	内容
全長 / 最大幅	150cm/50cm
操縦ロボット重量	18kg
取付時間	60分/2人
動力	電力: 12V、300W
アクチュエータ	サーボモータ 35個
自由度	26/全体
フレーム材料	アルミ、ジュラルミン
カメラ	FullHD(1920×1080) 2台
無線方式	無線LAN(IEEE802.11b/g/a等) 特定小電力無線
操作距離	200m(中継局により延長可能)

(表－1)

3. ロボットの特徴

(製造会社、機種問わずに使用可能)

多種類の建設機械を操作可能にするために運転席からのレバーの位置(距離、高さ、方向)が

異なっても稼働範囲が確保できるように柔軟な構造となっている。ロボット設置後に両腕と両脚にレバーやペダルの位置及び稼働範囲を教え込まなければならないため、教示機能モードにより位置校正を行う。中立位置が確定すれば各レバーの可動範囲を前後左右に動かして教示させ作動を確認する。また、操作規格による実機作業レバーの変換が可能で操縦者が慣れている操作を選定することも可能である。

(短時間で建設機械に設置・撤去が可能)

ロボットは運転席に一人で運べるように小型・軽量で扱いやすくなっている。腕と胴体部の上半身が10kg、下半身の脚部が8kgである。運転席のシートに30cm角の台座を敷き専用ベルトにて固定するため部品の取外しがなく改造が不要である。2人で60分程度の作業で設置が完了し、撤去も2人で30分程度である。一人で搬入し設置している状況を写真-2に示す。



(写真-2)

(頭部カメラにより3D画像による操縦が可能)

HMD(ヘッドマウントディスプレイ)を使用すれば立体視が可能である。ロボットの頭部には2台のカメラが装着されており操縦装置側に3D画像化し伝送する。合成画像とすることによりデータ量を減らし遅延の少ないシステムにすることが可能となる。HMDに表示させれば立体感を感じることができ、バケットの位置の判定が容易になる。人の頭部に相当するカメラの雲台はピッ

チ、ロール、旋回の3軸仕様となっており操縦者頭部のジャイロセンサにより視点をトラッキングすることも可能で、操縦者は搭乗して操作している時と同じ目線での作業が可能となる。操作状況を写真-3に示す。



(写真-3)

4. 課題と展開

作業効率の向上には確実な動作と、操作側と実機側の動作遅延と視覚情報遅延を少なくすることが必修条件であり、そのためには確実な通信回線の確保が必要である。視覚情報を捕捉するには作業位置や周りの状況判断ができる距離や起伏の情報が必要であり、それにはロボットの頭部もしくは機械本体に距離センサや測域センサを設置し情報を画面にインポーズすることにより作業の効率化を促すことができる。現在、破碎機による作業も可能となっており、今後は地盤改良機のアタッチメントやブルドーザー、不整地運搬車の遠隔操縦も予定している。今後は改良を重ねNETIS登録も予定している。

5. おわりに

DOKAROBOは小型・軽量のロボットに高機能なソフトウェアを実装し、汎用建設機械を安全に効率よく遠隔操作することを目標に開発を進めている。基本的な作業が確実・安全に行え、誰もが安心して使用できるロボットを開発し、災害復旧などの危険な場所での作業の活用を図っていきたいと考えている。

6. 護床ブロック移設アタッチメントの開発と施工

－ 省力化(省人化)による一人当たりの生産性の向上 －

玉石重機株式会社 ○ 片岡 広志
玉石重機株式会社 濱山 祐司
日立建機株式会社 友澤 茂治

1. はじめに

河川の頭首工(堰堤)の改修に伴い、その下流に設置された護床ブロックの再利用を目的とした移動が施工指定された。30年以上前に敷設された護床ブロックを破損させずに撤去・再利用するという施工であり、当初はクレーンで護床ブロックを吊り上げ、台車に積み込み運搬するよう計画されていた。しかしながら、吊り金具が腐食していることやブロックの劣化等の問題があった。安全性・施工性・経済性を考慮して検討した結果、護床ブロックを持ち上げるためのアタッチメントの開発に到った。ブロックを吊るのではなく持ち上げることにより破損を少なくでき、実際に良好な施工となったことを報告する。



写真-1 護床ブロック

2. 施工の概要

既設の護床ブロックを約 850 個撤去を行い、その内約 650 個を再利用する工事である。

2.1 施工条件

- ① 吊り金具取り付け部分の強度が不明である。
- ② 護床ブロックの吊り金具が腐食している。
- ③ 護床ブロックの重量は $W=3.8$ tf である。
- ④ 迂回水路は施すものの湧水はある。
- ⑤ 河床の支持地盤は砂地で良好である。
- ⑥ 撤去した護床ブロックは再利用する。

2.2 施工方法の検討

既設の護床ブロックの吊り金具取り付け部分の強度が不明であり、その護床ブロックに取り付けられてある吊り金具が腐食しており、クレーンによる吊り作業は安全上からも困難であることから、吊る作業からバックホウに装着したアタッチメントで持ち上げるという施工方法に変更し、アタッチメントの開発を行った。

河床の支持地盤は砂地で支持力は良好である。

3. アタッチメント(ブロックリフター)の開発

機能条件は、重量 $W=3.8$ tf 幅 $w=2.0$ m 厚さ $t=0.9$ m の護床ブロックを持ち上げ台車に積み込むことである。

3.1 アタッチメント(ブロックリフター)

標準仕様を図-1 のブロックを底面から支えるフォーク状の爪を 3 本採用した。外側のフォークをスライド可能とし、ブロックの大きさに対応できるようにした。

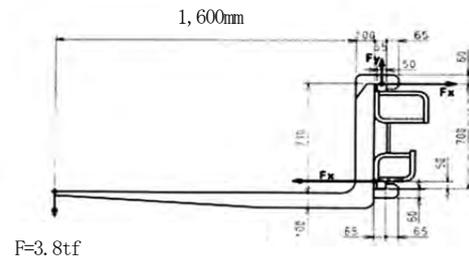


図-1 ブロックリフター側面図

- ・規格強度 : 4,000 kgf (1 本あたり)
- ・フォーク長 : 1,600 mm
- ・フォーク幅 : 250 mm
- ・フォーク厚 : 100 mm

3.2 ベースマシーン(バックホウ)の選定

重量 $W=3,8 \text{ tf}$ を土砂の比重 1.8 で割れば 2.1m^3 となる。したがって、土砂に換算した山積 2.1m^3 級のバックホウ(45t)をベースマシーンとした。

4. ブロックリフターによる施工

図-2 に当初計画(クレーンによる施工)とブロックリフターによる施工フロー図を示す。クレーンで吊り上げるには、栗石に埋まったブロックを掘り起こし、玉掛けの準備をしなければならない。一般的な玉掛け作業は、クレーン1台、特殊作業員1名、普通作業員2名で行うことになる。一方、ブロックリフターの施工ではバックホウ1台でブロックを掘り起こし・持ち上げ・台車に積み込むことができる。

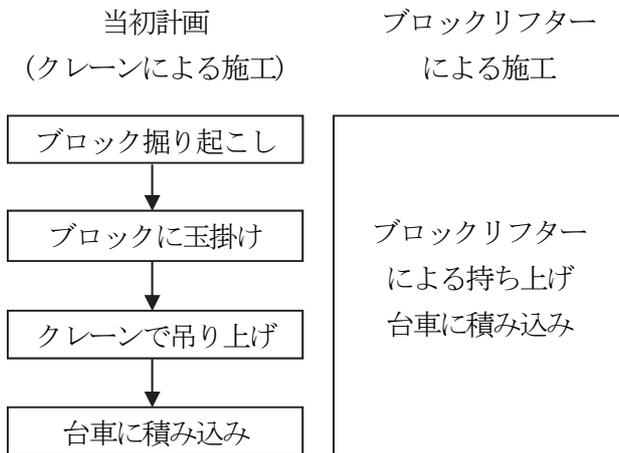


図-2 作業フロー図



写真-2 掘り起こし作業



写真-3 持ち上げ作業



写真-4 積込作業

5. まとめ

当初計画のクレーンによる施工は、4名で行われる。ブロックリフターによる施工では、写真-2, 3, 4のようにバックホウ1台(1名)で行うことができる。4名から1名に省力化(省人化)になったことは、一人当たりの生産性が上がったことになる。

本来、バックホウは掘削機械である。この工事でも掘削はあり、バックホウは使用することになっている。その機種を予定していなかった作業に使えたことは、バックホウの汎用性を最大限に使用したことになる。既設の構造物を撤去し再利用するリユースは、今後とも増加すると思われる。同じように、アタッチメントを開発し、バックホウを再使用していくことも、リユースである。

7. 新型ハイブリッドショベルと新型マグネット仕様機のご紹介

コベルコ建機（株）ショベル開発部 中大型ショベル開発Gr 佐伯 誠司
 コベルコ建機（株）環境機械開発部 環境機械開発Gr 古賀 信洋

1. 新型ハイブリッドショベル

弊社が開発した新型ハイブリッドショベル SK200H-10 は、20 トン級で「業界初」となる大容量リチウムイオンバッテリーと、従来比約5 倍の出力を有する発電電動機を採用した。図-1 に SK200H-10 のシステム構成図、写真-1 に外観を示す。

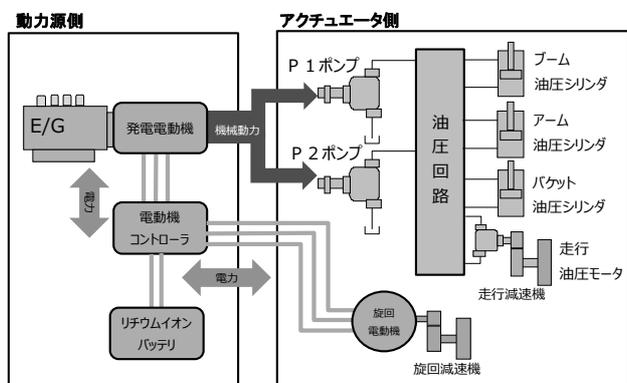


図-1. SK200H-10 システム構成図



写真-1. SK200H-10 外観

SK200H-10 の大きな特徴としては、「発電電動機の大型化」、「旋回駆動の完全電動化」「リチウムイオンバッ

テリの採用」の3つが挙げられる。これにより、キャパシタ式のハイブリッドショベル SK200H-9 と比較して蓄電量、持続力、アシスト効率が改善し、燃料消費量を低減させると共に作業速度も大幅に向上させた。図-2、3 に弊社社内基準に基づいて計測した作業量比較と燃費比較の結果を示す。

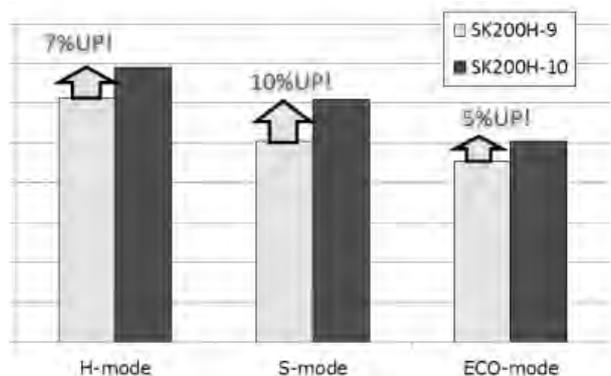


図-2. 作業量[m³/h]比較

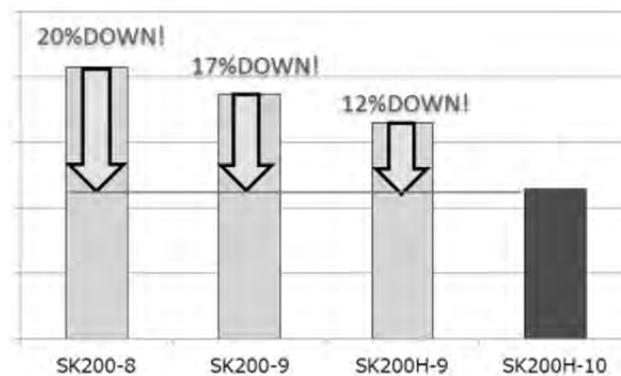


図-3. 燃費[L/h]比較

(※同一作業量での比較結果)

また、大きなエンジン動力が必要な重掘削時においても、大型の発電電動機がエンジンをアシストすることで必要な動力を確保することが出来るようになった。これによりエンジン回転数を従来機よりも低く設定することが出来るため、エンジン騒音が軽減しオペレータの作業環境改善にも繋がった。

2. 新型マグネット仕様機

油圧ショベルを応用したマグネット付きスクラップハンドリング機（マグネット仕様機）にも SK200H-10 と同じ発電電動機を採用し、これまで油圧ポンプを介して行っていた発電システムを一新させた。図-4 に新型マグネット仕様機のシステム構成図、写真-2 に外観を示す。

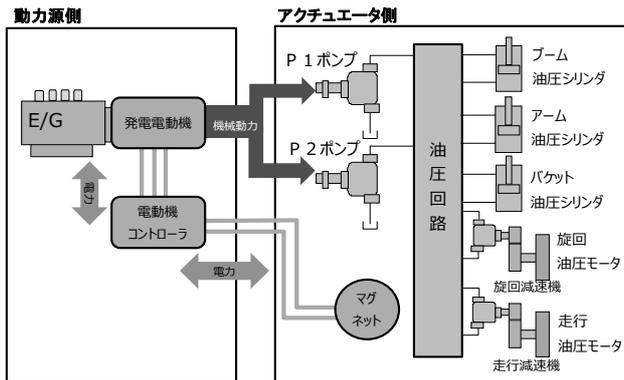


図-4. 新型マグネット仕様機 システム構成図



写真-2. 新型マグネット仕様機 外観

電力変換効時のエネルギーロスを低減したことで、マグネット吸着量を大幅にアップさせ、更に燃料消費量も大幅に低減した。図-5 に電力変換効率、図-6、7 に弊社社内基準に基づいて計測した作業量比較と作業量燃費比較の結果を示す。



図-5. 電力変換効率

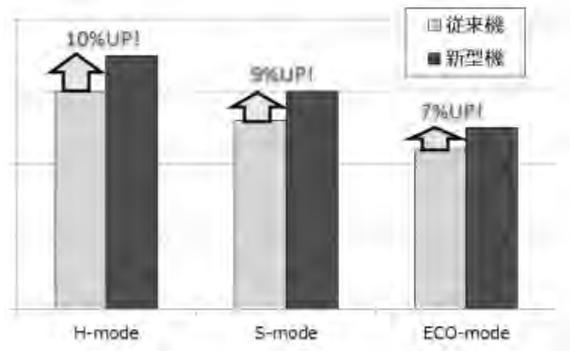


図-6. 作業量[ton/h]比較

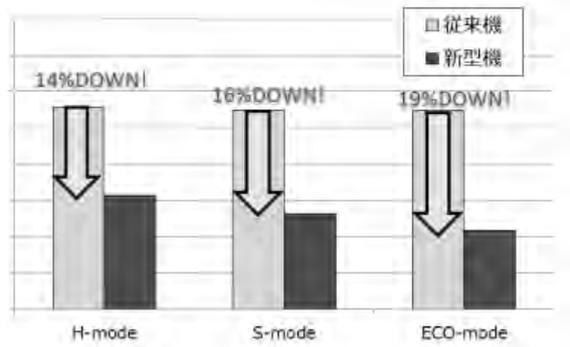


図-7. 作業量燃費[L/ton]比較

(※同一条件での比較結果)

また、システムのシンプル化と併せて従来機体右前にあった制御盤をガード内に収納することで機体右前のレイアウトがスッキリさせ、操作オペレータからの視界性とメンテナンス時の機体上面へのアクセス性を大きく改善した。



図-8. 機体右前外観比較

8. 坑内中継・モニタリングシステム

－ 崩落後のトンネル坑内を安全にモニタリング→復旧できる技術 －

西尾レントオール株式会社 ○山口 秀樹

西尾レントオール株式会社 佐藤 芳和

概要

本システムは無人化施工で使用されている遠隔操作可能な施工機械をベースとし、5GHzの無線LANを構築させ、トンネル坑内でも長距離のラジコン操作を可能にした技術です。深層部でのモニタリングや、施工作业を円滑に稼働させる事ができます。本技術はH27年度次世代社会インフラ用ロボット開発・導入技術の公募にも参加し、検証して頂いた技術となります。災害調査部会のトンネルI部門では活用を推薦する技術としても評価されました。

従来の問題点

トンネル坑内で円滑にかつ安全に復旧作業をすすめる為には、無線が快適に目的地点に到達し、機能することが必須となり、それが可能になる事で遠隔操作車両が目的地に進入する事ができるようになります。従来の無線機は、トンネルのような閉鎖空間では通信が安定せず、開放空間での無線到達距離よりも短くなってしまいます。これを解決するには、無線の出力を上げたり、中継局を増設する必要がありますが、有事の際、簡単に出力をあげたり、坑内に立入り中継局を設置するのは出来れば避けたい事となります。

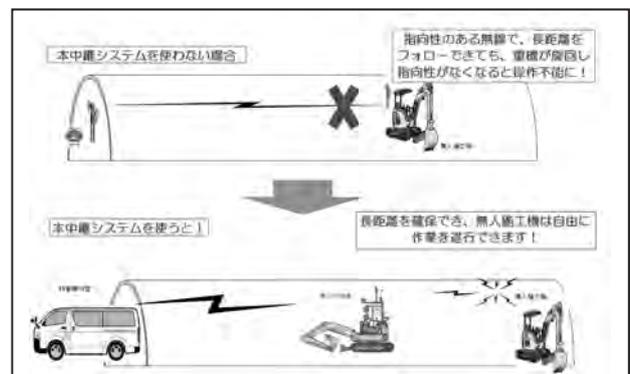


モニタリング装置・無線を搭載した遠隔操作車両

またモニタリングする為の高鮮明な画像を送受信するには、大容量の伝送速度を持った無線機を採用する必要があります。

解決策

弊社では遠隔無人車両及び高出力・大容量の無線LANを保有しており、レンタルが可能になっています。この技術を融合し、指向性・無指向性アンテナを組み合わせる事で最深部の目標地点まで遠隔操作を可能とし、バックホウのような旋回する機体でも安定した作業が出来る無線網を構築する事ができます。



従来との比較

特徴

中継車両はバックホウなどの施工機械を採用しており、モニタリングカメラ・ガス検知器等測定機・無線機の搭載重量制限を気にすることなく選択する事が可能です。また崩落現場等では走行の邪魔になる落下物などが、調査・移動する際の弊害になる場合も想定されます。本システムは、重機のスペックに見合ったものであれば除去しながら走行することも可能です。モニタリングの主設備となる車載カメラは赤外線やLEDも搭載しており照明のない坑内でも視認が可能で、旋

回機能もついている為、モニタリングしたい方向を安全な操作室から任意に指定できる事も調査を円滑に進めることができる要因となっています。



暗闇でも視認性が高い車載カメラを採用

また1セットでは700Mの距離を到達できる事を、H27年度次世代社会インフラ用ロボット開発・導入技術の公募検証では確認いただきましたが、この連結をする事で、到達距離は延長させていく事も可能になります。



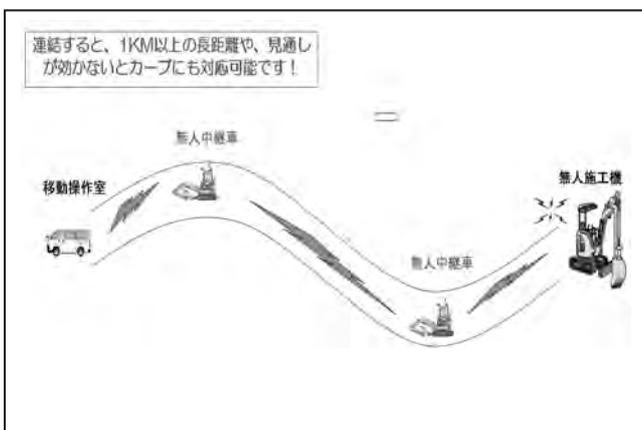
モニタリング操作室内

屈伸したトンネルも中継システムで解決

今回、無線到達距離の長距離化を実現する為に、指向性のアンテナを採用していますが、この欠点はアンテナ同士がお互いを視認できる位置関係にないと安定した通信を確保できない事です。弊社では指向性アンテナを旋回体につけ回転できる技術を保有しており、それを組み合わせる事で、屈伸したトンネルでも到達距離を確保できるシステムを構築することが可能です。屈伸数分の中継車両が必要となりますが、安全を最優先し復旧する為には欠かせないシステムになるケースもあると考えています。

今後

無人化施工と共通の課題ですが、遠隔操作車両の運転にはある程度の慣れが必要なので、効率よく調査業務を遂行するには、オペレータの育成が必要と考えています。また、中継車の現在位置の把握が現状ではモニタリング画像でトンネル設備の距離標を確認したり走行速度+時間で計算する事で対応しており、不確定要素が多い。この問題は将来屋内での位置把握技術が開発・改良されてくれば解決できると考えています。



屈伸連結イメージ図

建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集（平成28年度版）

平成 28 年 11 月 25 日 印刷

平成 28 年 11 月 25 日 発行

編 集 一般社団法人 日本建設機械施工協会
発行所

〒105-0011 東京都港区芝公園 3 - 5 - 8
(機械振興会館内)

TEL (03)3433-1501

FAX (03)3432-0289

複製厳禁

印刷所 (株)アクセス