

## S 3. ICT 搭載型無人化施工機械の施工性検証試験結果について

一般社団法人 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 鈴木 勇治

### 1. はじめに

集中豪雨や地震による地滑り等で、河道閉塞（以下、天然ダム）が発生し、越水による天然ダムの決壊の恐れがある場合には、緊急排水路の掘削というような応急復旧<sup>1)</sup>が実施される。このような復旧対策には、二次災害防止のために無人化施工が広く採用されることが望まれる。我が国における無人化施工には 30 年もの歴史があり<sup>2)</sup>、雲仙普賢岳の復興工事等の様々な災害現場で採用されてきた。しかし、無人化施工の作業効率は搭乗操作よりも低いため、特に緊急的な対応を求められる応急復旧工事では、更なる作業効率の向上が求められている。

施工技術総合研究所では、国土交通省東北地方整備局および東北技術事務所の委託により、災害復旧現場で特に緊急的な対応が必要な応急復旧工事を想定し、無人化施工で広く用いられる無人化施工機械（遠隔操縦式建設機械）に ICT（情報通信技術）を活用した最適な操作支援システムの構成を検討し、施工効率の向上、安全性の確保を目指す手法として取りまとめると共に、ICT 搭載型無人化施工機械を利用した施工性検証試験を実施し、この試験施工の結果から災害復旧工における迅速性の確保に主眼を置いた活用手法をとりまとめた。

本報は、無人化施工に適用する情報化施工技術と、それをを用いた災害復旧対策を実現するための検討結果および試験施工結果について述べる。

### 2. 目的

#### 2.1 災害復旧現場における無人化施工のニーズ

無人化施工が、応急復旧工事に適用された代表的な事例として、平成 20 年に発生した岩手・宮城内陸地震での天然ダム対策がある。この災害では多くの天然ダムが確認されたため、全国から遠隔操縦式油圧ショベルが集められ、現地で地元の施工業者が操作技術を習得して復旧工や対策工に臨んだ。しかし、遠隔操縦に慣れることができず、搭乗施工に切り替えて実施された例や、無人化施工技術に精通した技術者や操作者が現場に存在し

なかったために通常の施工が実施された等の報告がある。被災地の地元で災害協定を結んでいる施工業者が自ら操作した無人化施工は、ほとんどの現場で確実に稼働できずに遠隔操縦熟練者を要請したのが現実であった（表-1 参照）。

表-1 岩手・宮城内陸地震での無人化施工

実施現場	A現場	B現場	C現場	D現場
対象工種	水路掘削	堰堤ポケット掘削	除石工	倒木作業
遠隔操作者	地元の施工業者	地方の熟練者	地方の熟練者	地元の施工業者
無人化施工実施期間	1週間程度	10日程度	数日	10日程度
作業現場での問題点等	走行、姿勢安定に苦労した熟練者が手配されなかった	重機足元整地に手間を要した	オペレータ要請に日数を要した	操作訓練を受けた4人の内2人は適応できなかった

これらの事例から、応急復旧工事における現状の無人化施工の問題点を整理すると、表-2 の通りとなる。

表-2 応急復旧工事での無人化施工の問題点

問題点と詳細
①無人化施工に習熟したオペレータが少ない。 ・モニタを通じた現場状況の確認に手間を要する。 ・遠隔操縦装置での操作に慣れない。
②危険区域内では丁張等の目標物を設置できず、施工の精度が確保できない。 ・掘削等での切り出し位置が特定できない。 ・施工形状を確認できない。

以上から、災害現場で復旧工として求められる現場ニーズをまとめると以下のように区分される。これらの現場ニーズに対応することで確実に効率的な災害復旧工が実現されると考える。

#### ① 安全性に対するニーズ

操作者の二次災害を防ぐために、立ち入り禁止区域内で行う工種や作業を遠隔操縦式油圧ショベルで実施できること。

#### ② 操作性に対するニーズ

遠隔操縦式油圧ショベルの操作が、迅速に、且

つ確実にできること。

### ③ 施工性に対するニーズ

立ち入り禁止区域内での作業が、極力短期間で完了すること。また、応急復旧工に求められる品質・出来形が確保できること。

## 2.2 施工性検証試験の目的

無人化施工は、通常施工（操作員搭乗）と比べ生産性に劣るとされている<sup>3)</sup>。災害復旧現場における遠隔操縦式油圧ショベルによる無人化施工の特徴と施工効率への影響を表-3に示す。この表より、「施工状況の把握」、「施工の判断」、「機体転倒の危険性の判断」についての支援を行うことが施工効率の向上を図るための課題であると言える。これら課題に対して、安全・確実に効率的な災害復旧工を実現することを目的として、無人化施工機械にICTを搭載した操作支援方式の検討と施工性検証試験を実施した。

表-3 無人化施工の特徴と施工効率への影響

無人化施工の特徴	施工効率への影響
中継モニターや車載モニターを通じて現場や施工箇所の視認を行う。	距離感をつかみにくく、施工状況の把握に時間がかかり、施工効率が低下する。
一般に現場内に人が立ち入ることができず、丁張等による施工の目標物となるものを設置できない。	所定の形状・大きさの掘削や盛土を行うのに、勘や推量に基づいて判断することになり、施工効率が低下する。
機体の傾斜度合いを体感できない。	機体の転倒を防ぐために慎重な操作を強いられ、施工の効率が低下する。

## 3. ICT搭載型無人化施工機械

施工の品質や出来形の確保と施工効率の向上のために、油圧ショベルに搭載する情報化施工技術としては、三次元マシンガイダンス（以下、MG）が考えられる。この技術は、RTK-GNSSや自動追尾TSによる測位情報を基に、油圧ショベルの自己位置を特定し、目標とする設計面および油圧ショベルのバケットの位置関係をモニター表示するシステムである。モニターには平面表示や断面表示が可能であり、施工の場面に応じた設計面を表示できる（図-1、図-2参照）。

このMG技術を利用することで、現場ニーズに対して以下のような効果が期待できる。

### ① 安全性のニーズに対する効果

現場での丁張の設置が不要となる。また、MG情報を利用することで地形の三次元データが取得できるので現場内での測量等の有人作業が必要なくなる。

### ② 操作性のニーズに対する効果

MGに現況情報や目標位置情報を与えることで、油圧ショベルの目標位置への誘導が確実にできる。また、機体の姿勢（傾斜）も明らかとなるため、安全な操縦が可能となる。

### ③ 施工性のニーズに対する効果

施工対象物の三次元設計情報をMGに搭載することで、施工開始直後から施工目標に合わせた施工が可能であるため、施工時間の短縮化が期待できるとともに、施工目標と油圧ショベルバケットとの位置関係がモニター上で確認できるため、確実な施工が実現できる。

災害時の応急復旧対策工を実施することを想定した遠隔操縦式油圧ショベルの操作支援システムは、RTK-GNSS測位システムを基本とすることが一般的である（図-3参照）。

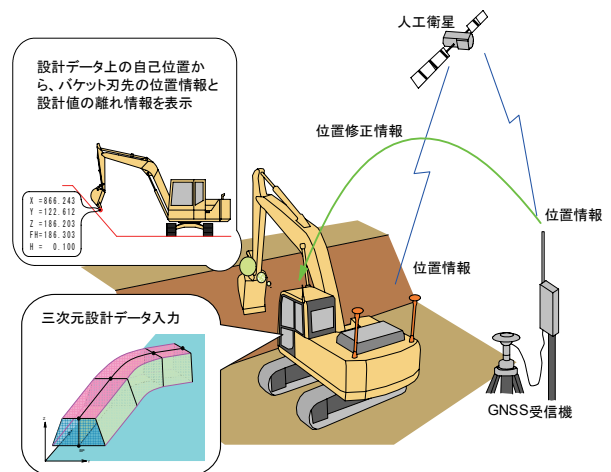


図-1 油圧ショベルのMG

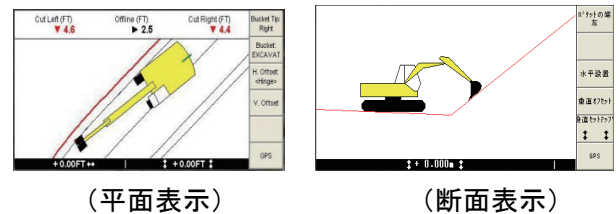


図-2 MGのモニター表示例

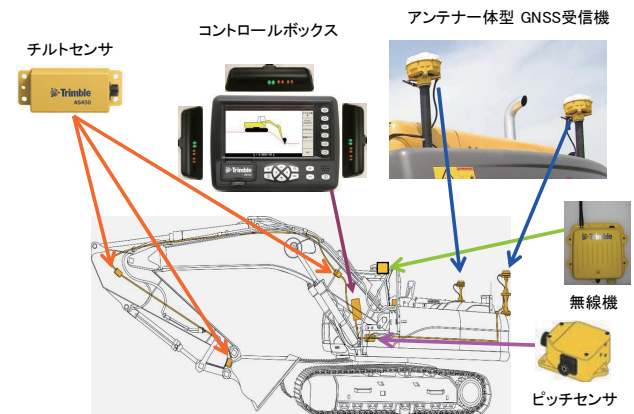


図-3 RTK-GNSS測位MGの機器構成（移動局側）

RTK-GNSS測位を精度良く行うには、上空に5基以上の衛星が適切な位置に配置されていることが必要となるため、山間部での現場や周囲に高い

構造物がある現場など上空の視界が妨げられる場所では測位解析が成立せず、システムが稼働しないことになる。

このような GNSS 測位が適用できない場合には、自動追尾 TS による測位（図-4 参照）を利用して三次元 MG を実施するか、機体に設置したセンサから機体の姿勢を求めて、基準位置からの高さと前後方向のみをガイダンスする二次元 MG（図-5、図-6 参照）を利用する方法がある。

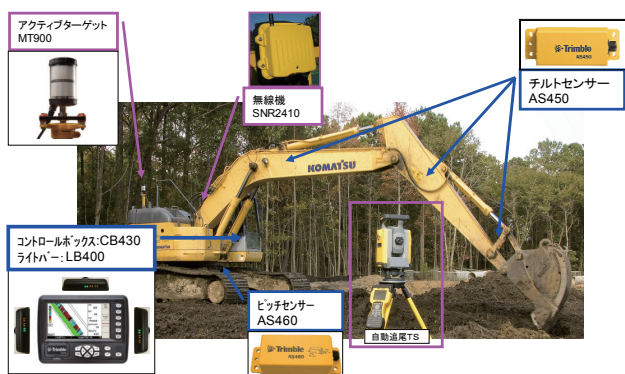


図-4 自動追尾 TS 測位の三次元 MG

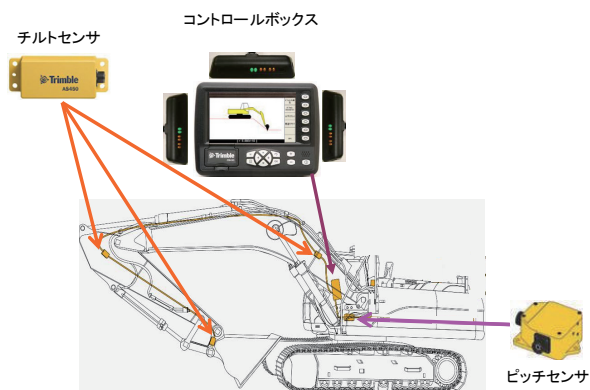
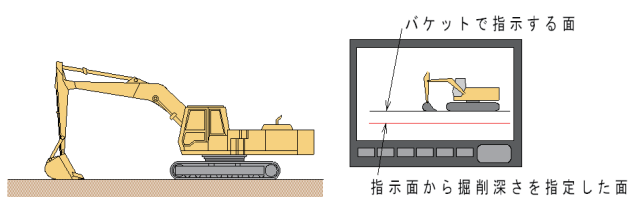
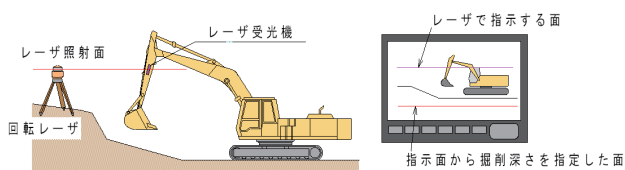


図-5 二次元 MG の機器構成



(設定したバケット位置を基準とする二次元 MG)



(回転レーザを基準とする二次元 MG)

図-6 二次元 MG の概要

また、遠隔操縦を効率的に且つ確実に実施するためには、油圧ショベルに車載カメラを搭載し、更に、機体と現場との位置関係が確認できるようにする遠隔操縦式カメラ台車を利用する。車載カメラとして一般的に利用されているものは、キャビン上に1機、あるいは2機のカメラを搭載して、バケット位置の施工状況が把握できるようにしているが、機体の走行の安全性を向上するため、油圧ショベル本体前方の左右端に前方確認用のカメラを設置することが考えられる（図-7 参照）。

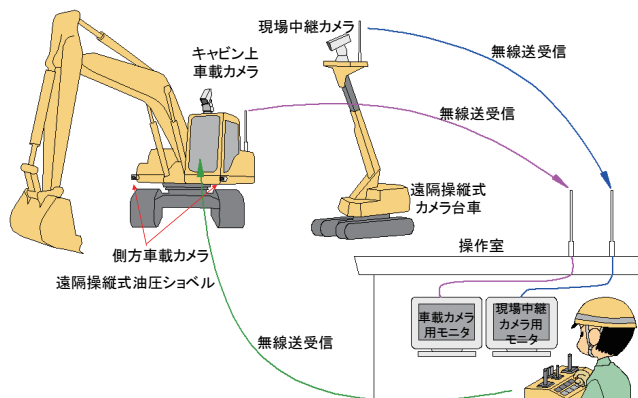


図-7 現場中継カメラ

#### 4. 施工性検証試験

試験施工では、MG 搭載型無人化施工の施工効率検証の他に、①MG に必要となる三次元設計データの簡易的な作成手法、②設計データ作成に必要な地形データの取得手法、③安全で確実な重機走行の確認、④施工現場での周囲の安全確認を実現するための車載カメラ配置、等を確認した。

本報では、施工効率の確認として、進入路造成試験、排水路掘削試験と、重機の姿勢を確認する安全性検証試験について報告する。

##### 4.1 進入路造成試験

進入路造成試験は、図-8 に示す様に上り勾配の走路を幅 4m で造成を行った。なお、造成時の操作方式として、①モニタ確認による遠隔操作、②モニタ確認による遠隔操作+MG 操作 の 2 通りの方式で実施し、この作業に係わる作業時間と出来形形状の精度を計測して施工効率と施工精度を検証した。

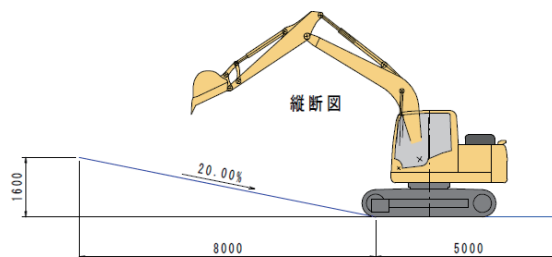


図-8 進入路造成試験モデル断面図

## 4.2 排水路掘削試験

排水路掘削試験は、図-9 に示す様に、溝幅 1.5m、深さ 1m の排水路を掘削すると共に、幅 1m の築堤の盛土造成を延長 2.5m にて実施した。

試験施工は、①モニタ確認遠隔操縦+MG 操作、②モニタ確認遠隔操縦、③目視確認遠隔操縦、④登場操縦 の4通りの操作方法で実施し、オペ A (遠隔操縦のベテランであるが MG 操作未経験者) とオペ B (MG 操作に慣れているが遠隔操縦の未経験者) の二人のオペレータにより、4通りの操作を各 3 ケースずつ実施し、この作業に係わる作業時間と出来形形状の精度を計測して施工効率と施工精度を検証した。

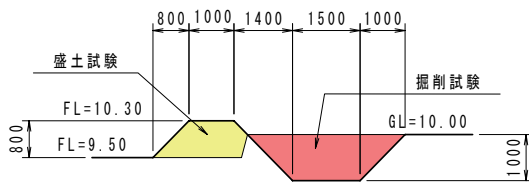


図-9 排水路造成試験モデル断面図

## 4.3 試験機械

### (1) 遠隔操縦式バックホウ

施工性検証試験に使用した油圧ショベルは、国土交通省東北地方整備局岩手河川国道が所有する遠隔操縦式バックホウ (0.45m<sup>3</sup> 級) を借用し、このバックホウに MG 機器を取り付けて実施した (写真-1 参照)。



写真-1 遠隔操縦式バックホウ

### (2) MG 機器

MG 機器は、選定の主な条件として、コントロールモニタ上に設計データと合わせて二次元 CAD 背景図の取込みが可能な機器で、RTK-GNSS 測位の他に、自動追尾 TS 測位が可能な機器を選定した。

二次元 CAD 背景図読み込みが可能な機器の選定理由は、三次元設計データを搭載しない場合でも二次元 CAD 背景図を取り込むことで、目標位置への誘導 (走行) が可能であること、また、自動追尾 TS 測位が可能な機器は、衛星測位が不可能な場合、あるいは測位精度が低下した場合の使用

を考慮したことによる (写真-2 参照)。

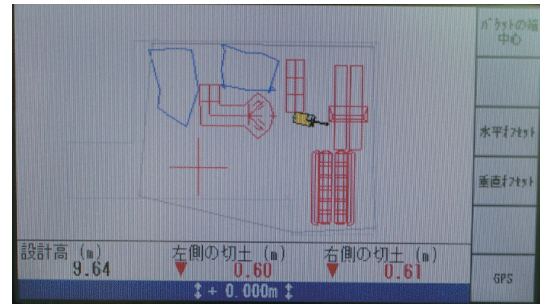


写真-2 MG モニタ表示 (CAD 背景)

### (3) 試験ヤード

試験ヤードは、国土交通省東北地方整備局東北技術事務所の構内とした。写真-3 に試験ヤードの航空写真を示し、図-10 に試験配置図を示す。



写真-3 試験ヤード

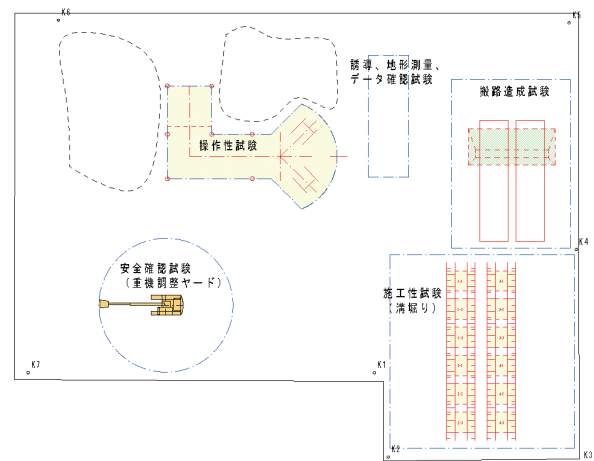


図-10 試験配置図

## 5. 試験結果

施工性検証試験では、MG 併用の遠隔操縦は、通常の遠隔操縦と比べ施工効率や施工精度で同等以上となり、MG による操作支援の効果が示された。

### 5.1 進入路造成試験

進入路造成試験については、MG を使用したケースの施工効率がモニタ確認遠隔操縦と比べて約 1.4 倍となる結果が確認された。このことは、MG のコントロールモニタに施工目標が明確に表示さ

れているため、大まかな造成の後に整形していく繰り返し施工をする必要がなく、部分的に仕上げていく施工が可能となることで、繰り返しの施工数が減少していることにある。

また、施工精度については、施工目標と出来形状との差分面積により求めた結果、精度が向上していることが確認された。

図-11 に出来形状図を、表-4 に試験結果を示し、写真-4 に試験実施状況写真を示す。

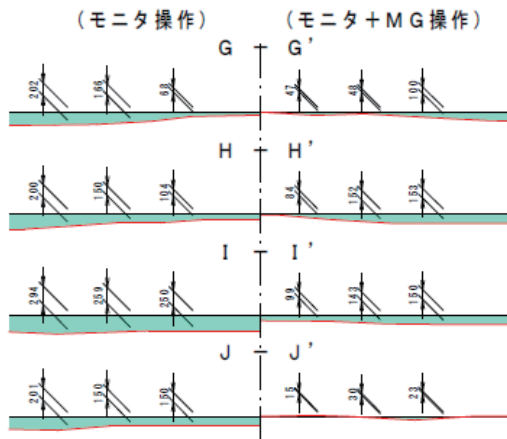


図-11 進入路造成試験出来形図

表-4 進入路造成試験結果

施工内容	ケース	施工効率*1 (時間当り施工量)	施工精度*2 (差分面積)
進入路造成	モニタ操作	5.08m/h	2.95 m <sup>2</sup>
	MG併用	7.10m/h	1.31 m <sup>2</sup>

\*1：時間当り進入路長さの施工量

\*2：構築物の設計面と実際の出来形面との差を面積として表したものの



写真-4 進入路造成試験実施状況

## 5.2 排水路掘削試験

排水路掘削試験については、MG を使用したケースはモニタ確認操縦のみのケースと比較して、施工効率はほぼ同等であった。このことは、施工範囲が狭かったことで、粗掘削や粗盛土の段階がほとんどなく施工開始から繊細な操作を必要としたことにあると考えられる。表-5 に排水路掘削試験結果を示す。

また、出来形精度では、MG を使用したケースは、モニタ確認遠隔操縦よりも向上していることが確認された。このことは、施工目標が明確に示されることで精度の向上が求められることは当然である判断できる。

表-5 排水路掘削試験結果

施工内容	ケース	施工効率*1 (時間当り施工量)	施工精度*2 (差分面積)	
排水路掘削・築堤	ホ <sup>ハ</sup> A	モニタ操作	19.1m <sup>3</sup> /h	0.78 m <sup>2</sup>
		MG併用	17.1m <sup>3</sup> /h	0.34 m <sup>2</sup>
	ホ <sup>ハ</sup> B	モニタ操作	15.9m <sup>3</sup> /h	1.03 m <sup>2</sup>
		MG併用	18.0m <sup>3</sup> /h	0.46 m <sup>2</sup>

\*1：時間当りの掘削・盛土量で評価

\*2：構築物の設計面と実際の出来形面との差を面積として表したものの

ホ<sup>ハ</sup> A：遠隔操縦のベテランであるが MG 操作未経験者

ホ<sup>ハ</sup> B：MG 操作に慣れているが遠隔操縦の未経験者

ここで、施工精度（施工目標面と出来形状との差分面積）と時間当たり施工量との関係を図-12 に示す。このグラフより、例えば施工精度の余裕幅をある程度持たせて精度を気にせず施工を実施したとすれば、MG を使用するケースは、モニタ確認遠隔操縦と比較して約 1.3 倍の施工効率の向上が期待できる。

写真-5 に試験実施状況を、図-13 に出来形状図を示す。

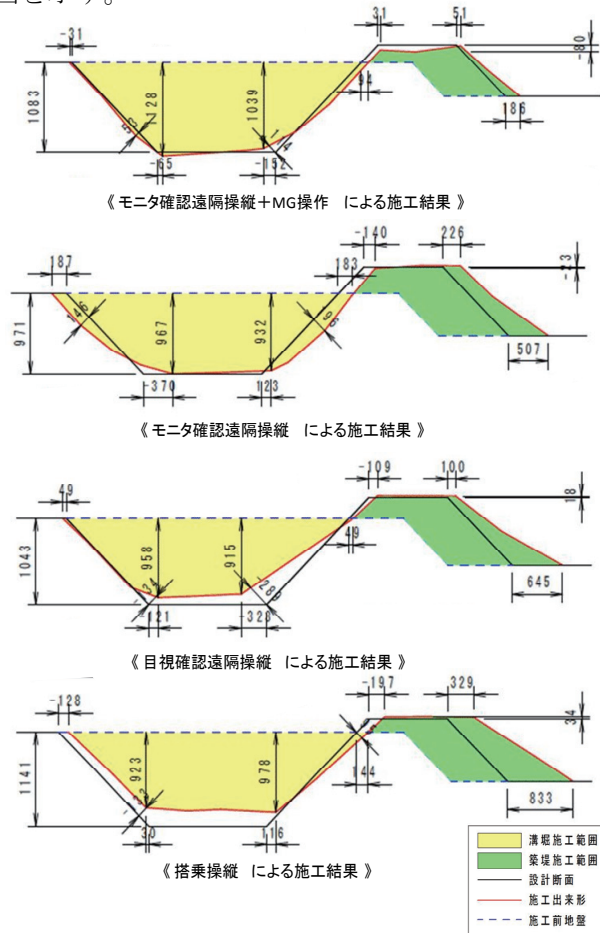


図-12 排水路掘削試験出来形図

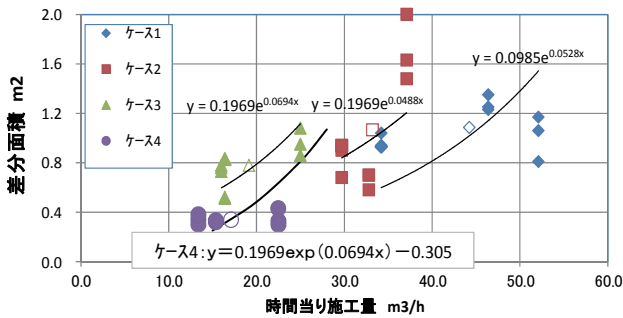


図-13 時間当たり施工量と誤差の関係



写真-5 排水路掘削試験実施状況 (掘削完了時)

### 5.3 安全性検証試験

安全性検証試験については、MG コントローラの重機傾斜表示 (図-14 参照) を確認しながら傾斜路を走行し、操作者がこの傾斜情報を見ることで確実な走行ができることを確認した。

また、機体前方左右に取り付けた側方車載カメラからの中継映像を確認することで、前方の情報が把握しやすくなることと、傾斜の情報が風景から判断できることが確認できた。なお、前方確認用の側方カメラには、写真-6 に示す様にクローラがフレーム内に映っていることが重要である。

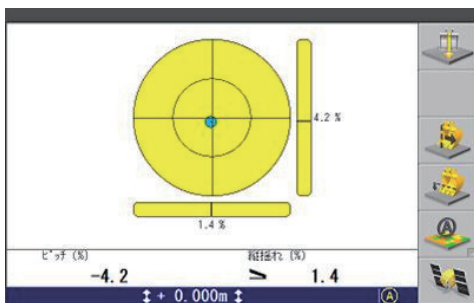


図-14 電子気泡による機体の傾斜表示例



写真-6 前方確認用側方カメラの中継映像

## 6. まとめ

遠隔操縦式油圧ショベルの施工および情報化施工技術は、最近では急速に普及しつつあるが、現時点ではまだ経験者が少なく、技術に関する知識を有している技術者も少ない状況である。

遠隔操縦技術については、ある程度の油圧ショベル操作経験がある操作者であれば、遠隔操縦のレクチャを数時間受けるだけで操作が可能となるが、実施工で技術を生かす場合は、例えば、ベテランオペレータにおいても、空間認知の才能が優れていない場合には遠隔操作は困難であると言われてるように、操作の慣れや本質的な才能が要求される。

また、MG 技術については、最近の情報化施工の普及で経験者は増えてきているが、技術的なサポートを機器メーカーに頼っているのが現状である。そのため設計データの作成、管理や簡易なトラブルについて対応できる技術者が殆どいないのが現状である。

緊急的な災害復旧においては、遠隔操作式油圧ショベル技術と MG 技術のある程度理解して現場経験を積んだ技術者が求められる。そのためには、設計データ作成技術、遠隔操縦技術、MG 施工技術の 3 技術に重点をおいた技術者を育成するとともに、継続的な教育を実施することが求められる。

## 7. おわりに

本検討および試験施工の実施に当たりご理解とご協力を頂きました建設無人化施工協会の皆様と、本論文の執筆、発表に関しまして、国土交通省東北地方整備局東北技術事務所関係者様のご理解を頂きましたことをここに記し、謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 天然ダム対策工事研究会:天然ダム対策工事マニュアル, 2010.11
- 2) 古澤正紀:無人化施工に見る技術開発の歴史~情報化施工技術・ICT の先駆けとなった各種の取組み~, NETIS プラス第 2 号, pp.16~23, 2011
- 3) 山元弘:建設工事における無人化施工, 建設マネジメント技術, pp.17~22, 2007.6