

2.7 大規模土砂災害等に対する迅速かつ安全な機械施工に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 27

担当チーム：技術推進本部先端技術チーム

研究担当者：藤野健一、茂木正晴、橋本毅、
西山章彦、油田信一

【要旨】

大規模土砂災害発生時（地震・噴火・地滑りなどによる災害）には、迅速かつ適切な対応が望まれている。近年は豪雨、地震などが頻発しているため、従来の対応以上により適切な対応を採ることが管理者に求められている。しかしながら、2次災害のリスクが高く、地盤、足場が不安定なことが多い土砂災害現場において、安全性に配慮しつつ、高い効率で施工を行う事はその状況判断の難しさなどから極めて難しく、新たな土木技術・建設機械技術によって、災害時に最善を尽くせる方策を提供することが急務となっている。

現在、災害発生時（地震・噴火などによる災害）における初動対応として無人化施工技術が適用されており、雲仙普賢岳等の人立ち入ることのできない被災箇所での復旧活動などに利用されている。このように大規模土砂災害等において無人化施工は、災害の規模や現場状況（人への危険度合い）によって迅速かつ安全な施工技術として期待できるものと考えられる。工種としては主に土砂災害等発生後の災害緊急対策として、土堰堤工事、除石工事における掘削・積み込み・運搬等などに導入・活用されている。

しかし、有人での機械施工による品質や作業効率と比較すると改善しなければならない課題がある。

本研究では、大規模土砂災害発生時に起こる状況・復旧時の建設機械の使用状況・操作手法などの実態を調査・分析し、それぞれの課題を把握した。これに基づき、安全・迅速に復旧工事を達成し得る技術の整理を行うとともにその技術の適用性や導入手法を検討した。そして、それらをとりまとめて災害時における建設機械の活用マニュアルの提案を行った。また、併せて災害対策用機械、遠隔操作型建設機械の作業効率改善に向けた支援システムの提案を行った。

キーワード：無人化施工，建設機械，災害，災害復旧，サイクルタイム

1. はじめに

現在、災害発生時（地震・噴火などによる災害）における初動対応として無人化施工が適用されており、雲仙普賢岳等で利用されている。大規模土砂災害等において、この無人化施工技術の適用は、災害の規模や現場状況（人への危険度合い）によって迅速かつ安全な施工を実現する技術として期待できるものと考えられる。

工種としては主に土砂災害等発生後の災害緊急対策として、土堰堤工事、除石工事における掘削・積み込み・運搬等などに導入・活用されている。

本研究では、大規模土砂災害発生時に起こる状況・復旧時の建設機械の使用状況・操作手法などの実態を調査・分析し、それぞれの課題を把握した。これに基づき、安全・迅速に復旧工事を達成し得る技術の整理を行うとともにその技術の適用性や導入手法を検討した。そして、それらをとりまとめて災害時における建設機械の活用マニュアルの提案を行った。また、併せて災害対策用機械、遠隔操作型建設機械の作業効率改善に向けた支援システム

の提案を行った。

2. 研究の流れ

表-1に示す研究項目について検討を進め、研究成果目標として大規模土砂災害時における最適な建設機械技術導入のためのマニュアルの提案、ヒューマンインターフェースを活用した無人化施工技術（調査技術、遠隔操作型建設機械）における施工効率の改善および操作制御法の汎用化システムの提案を進めた。

3. 災害対応及び災害予防保全に関わる施工プロセスの整理

人的な危険リスクの回避と迅速な緊急復旧活動を目的とし、無人化施工技術を中心とした災害発生時の対応に関わるプロセスを図-1のように整理した。

具体的な内容としては、災害現場の実態、現場での対応に関して事例、聞き取り等より調査整理を進め、無人化施工技術の現場導入に関する課題を整理した。また、

災害現場の調査と復旧のための準備といった各プロセスに関してポイントとなる要素を整理した。

表-1 研究項目

	年度					
	22	23	24	25	26	27
災害対応及び災害予防保全に関わる施工プロセスの整理		●	●	●	●	
災害時に有効な施工技術・建設機械技術と災害状況の相関整理		●				
災害対策技術の適用性検証（空間認知技術等を含む）	●	●	●	●	●	
土砂災害対策機械の性能評価及び施工面から見た技術活用シミュレーション			●	●	●	●
被災箇所への事前調査技術の構築				●	●	●
作業効率向上のための支援システムの提案					●	●
災害対応建設機械活用マニュアルのとりまとめ			●	●	●	●

表-2 に示すように被災状況に応じた適用工種（図-2, 3 に事例を示す。）の実態を整理することができた。例えば、福島第1原発周辺の瓦礫撤去のような人の立ち入ることのできない箇所に関しては、雲仙普賢岳で利用されている伝送システムを長距離対応にするなど、現場の災害状況に応じてシステム構成を使い分けるといった対応が図られている。

表-2 無人化施工の適用工種一覧

工種	種別	細別
土工	掘削、積込み、運搬、整形、転石破碎	掘削、積込み、運搬、整形、転石破碎、土砂型枠
コンクリートダム工	コンクリートダム本体工	RCCコンクリート運搬・敷均し・転圧 有スラングコンクリート運搬・打設
鋼鉄ダム工	鋼鉄ダム本体工	鋼鉄スリット運搬・据付 基礎コンクリート運搬・打設
護床工・根固め工	根固めブロック工	根固めブロック運搬・据付
その他	解体工	橋梁解体、煙突解体、鉄塔解体、工場跡解体
	緑化工	緑化材運搬・吹付け
	仮設工	土壌運搬・設置

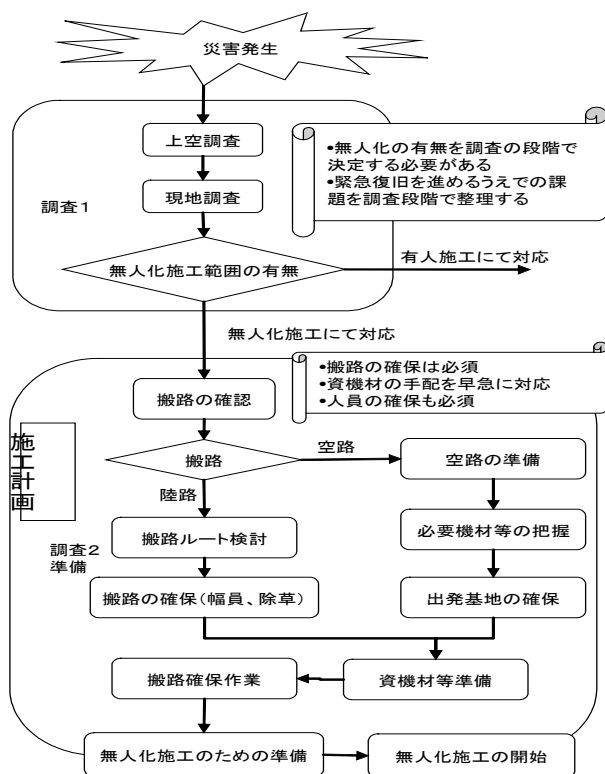


図-1 施工までの流れとポイント



図-2 無人化施工（土工）



図-3 無人化施工（ブロック調査）

4. 災害時に有効な施工技術・建設機械技術と災害状況の相関整理

現場では、災害の被災状況に応じて利用する建設機械・施工規模は拡大する傾向があり、このことは、通常の土木工事と同様に目的・規模に応じた実態がある。

災害時に有効な施工技術・建設機械技術に関しては、

5. 災害対策技術の適用性検証

これまでの研究では、無人化施工における作業効率を作業時間の観点から評価し、ディスプレイや通信系などの機器の差異とオペレータの慣れや経験の各々について、それが作業時間に及ぼす影響を検討し、これに基づいて適切な操作方式や新しい機器の開発を進めている。しかし、開発を進めるためには、現場で実際の建設機械を用いて具体的な作業を行い、その作業に要する時間を計測・評価することが重要で現場での作業は、建設の進行に伴って環境が変化するため、同一の環境条件での実験・計測を繰り返すことができず、対策技術の適用性検証を妨げていた。

そこで、現場での掘削作業を想定した繰り返しが可能なモデルタスクを提案し、これを用いた実験により災害対策技術の適用性検証を進めることとした。

以下に本研究において提案したモデルタスクについて概説する。

5.1 モデルタスク I

油圧ショベルの不整地走行とバケットによる複数の固形対象物を移設する。

油圧ショベルは、待機位置より図-4, 5 に示す凹凸のある経路を固形対象物が設置されている作業エリアまで走行し、固形対象物を油圧ショベルのバケットによって移設する。

固形対象物の形状は、ドラム缶(φ570mm×高さ760mm、重量約100kg、持ち手高さ2,000mm)、土嚢(800mm×800mm×高さ800mm、重量約300kg、持ち手高さ2,000mm)、鋼製立方体(1,200mm×1,200mm×高さ1,200mm、重量約500kg、持ち手高さ2,000mm)計3個とする。また、固形対象物には掬い上げ用の鋼製バーをほぼ水平に付けておき掘削に類似したバケットの軌跡により、固形対象物を持ち上げることができるようにする。

このモデルタスクでは、動作の繰り返しにおいて、走行後の油圧ショベルの位置は毎回適当にバラツキ、それによって、バケット操作に対する環境に適当な変動外乱が与えられることとなる。そのため、固形対象物の移設作業におけるバケットの操作内容は全く同じではない複雑なモデルとなっており、より詳細な解析が可能となるものと考えられる。

5.2 モデルタスク II

油圧ショベルの走行とバケットによる固形対象物のハンドリングを単純化した固形対象物を移設する。

モデルタスク II は実験の容易性を優先し、短時間での繰り返し実験を可能とすることを主眼として設定した。

このモデルタスクでは、図-6, 7 に示すフィールドにおいて待機場所から作業エリアまで走行し、次に固形対象物を油圧ショベルのバケットによって移設する。

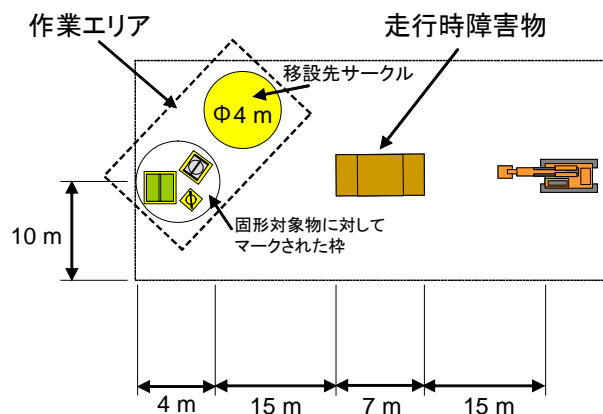


図-4 タスクモデル I におけるフィールド



図-5 モデルタスク I での試験状況

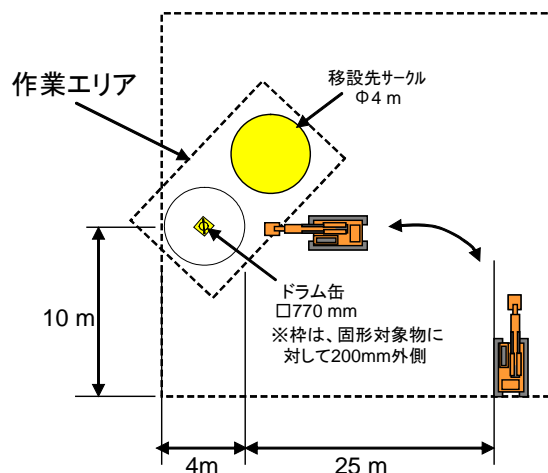


図-6 タスクモデル II におけるフィールド



図-7 モデルタスク IIでの固形対象物の移設状況

このモデルタスク IIでは、初期位置から、屈曲を含む約 30m の経路を走行し、バケットによる作業に適した位置まで移動してから、モデルタスク I で用いた 1 つの固形対象物を移設先サークルに移設し、次に再び、初期位置の枠内に固形対象物を戻す。ここで移設する固形対象物は、ドラム缶(φ570mm×高さ 760mm, 重量約 100kg, 持ち手高さ 2,000mm)とする。

モデルタスク II は、モデルタスク I に比べて 1 回の作業時間を短くすることによって、より多くの実験回数の確保、作業の容易性を重視していることが特徴である。したがって、このタスクでは、オペレータの操作内容に関する学習過程が操作回数によって変化することをより顕著に計測することができ、搭乗操作と遠隔操作での違いを明確に解析することができるものと考えられる。

6. 土砂災害対策機械の性能評価及び施工面から見た技術活用シミュレーション

作業効率に起因する要素の 1 つとして、対象物を掴む動作がサイクルタイムの差異に大きく寄与することがわかった。オペレータは対象物を掴む行動を行ううえで空間内の対象物への奥行きや幅といった視覚情報から作業への判断が作業時間の増加につながる事が考えられる。(図-8, 9 との比較)

また、アイマークレコーダー (EMR-9) を用いてオペレータの作業内容の把握の有無、作業するうえでの自身の位置や対象物の配置及び建設機械の状態把握といった空間把握の構築がオペレータの経験やオペレータに与えられる知覚情報によって作業効率の違いが現れていることが実験により明らかにした。(図-10, 11, 12)

これまで油圧ショベルによる無人化施工では一般に搭乗での施工に対して約 60% の施工効率と言われてきたが、比較実験では、図-13 に示すようにサイクルタイムが搭乗での操作に比べて約 2.3 倍という結果が得られた。

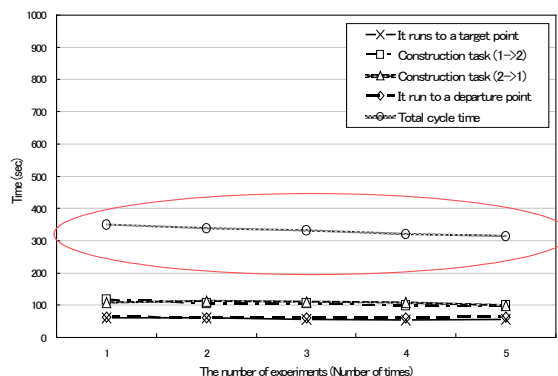


図-8 搭乗操作でのサイクルタイム

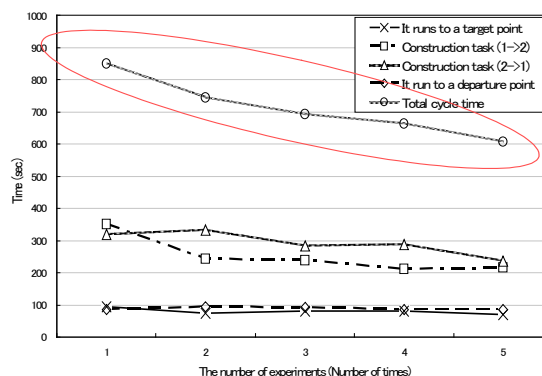


図-9 搭乗操作でのサイクルタイム



図-10 操作経験 1 年未満のオペレータの視線軌跡



図-11 操作経験 5 年以上のオペレータの視線軌跡



図-12 オペレータの視線軌跡

また、搭乗と遠隔での操作、遠隔操作環境・搭乗での操作方法の違いといったインターフェース差について計測実験を行い、段階的に操作環境や操作系インターフェースを変えることによって、サイクルタイム差に差があらわれることを確認した。

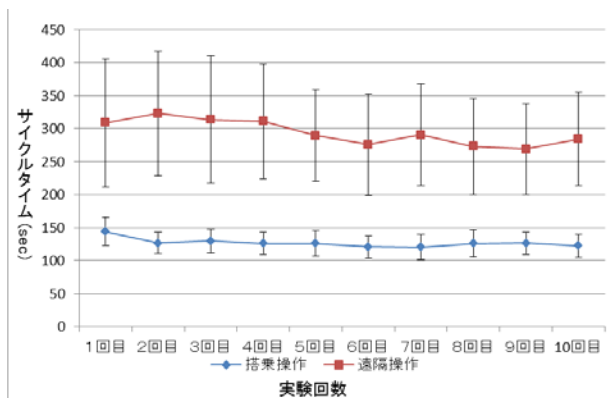


図-13 搭乗操作と遠隔操作のサイクルタイムの実態

7. 被災箇所への事前調査技術の構築

災害発生後に復旧対応を進めるうえで、図-14 に示すように無人化施工技術の活用の決定や人員や資機材の調達にあたり必要となる情報を安全・迅速に収集する必要がある。

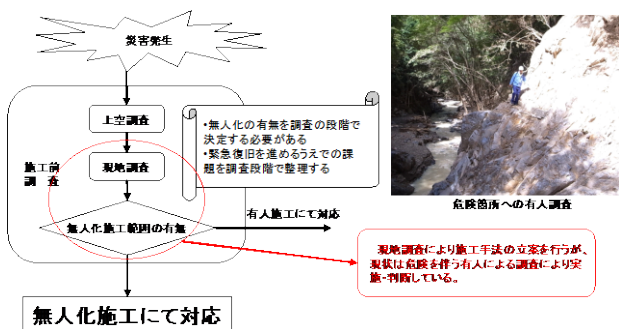


図-14 事前調査の流れ

情報収集には、事前調査技術の構築が必要であり、一般的には、ヘリコプター等の航空機を利用しているが、無人調査ロボット等といった事前調査技術を必要に応じて活用する必要がある。

また、現状の事前調査等のニーズとして、近年の深層崩壊や河道閉塞等の事例が増加しており、踏査による正確な現状把握ができない状況下において迅速な復旧及び早期の現場監視が求められている。

そこで、本研究では、安全・迅速に監視活動に入ることと、後の復旧活動に必要な無人化施工技術のサポートとして、災害対応マルチプラットフォームの開発を進めた。図-15 に示すように具体的な運用方法に関しては、無人探査機 (UAV, UGV) のような移動ロボットのようにアクティブな調査は難しいが、無人化施工技術を用いた具体的な復旧活動を進めるうえで、必要となる即時な現場状況の映像や建設機械を操作するうえで必要となる通信の中継基地としての役割が可能となる。

なお、本研究に関しては、先端建設技術センターとの共同研究によって開発を進めたものである。



図-15 マルチプラットフォーム

8. 施工効率改善可能な遠隔操作システムの提案

8.1 新しい操縦装置の提案

現在、一般的な遠隔操作操縦装置は、図-16 に示すようなジョイスティックタイプである。本装置は実際の油圧ショベル運転席の操縦装置とは操作感覚が異なっていることが、施工効率低下の原因の一つではないかと考えられる。そこで、図-17 に示すような操縦席型操縦装置を製作し、実験にて効果を検証することとした。



図-16 ジョイスティック型操縦装置



図-17 操縦席型操縦装置

置を製作し (図-22, 23, 24), 実験にて効果を検証することとした。

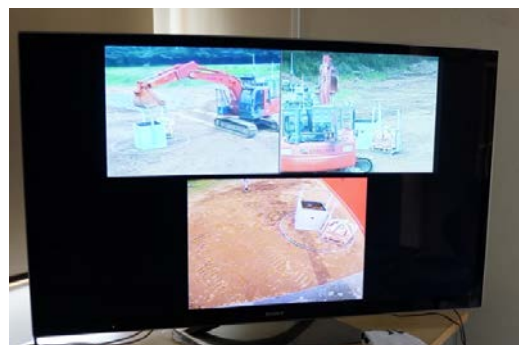


図-18 一般的な遠隔操作画面

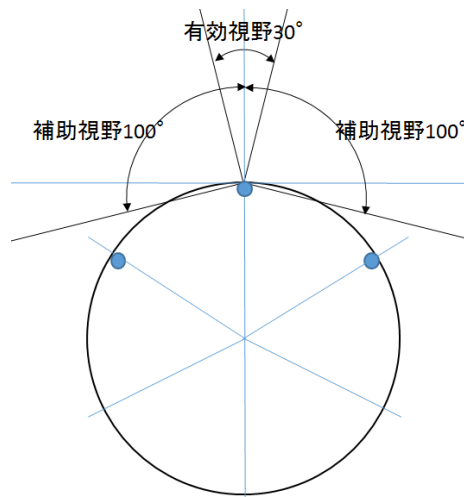


図-19 一般的な視野角 (水平)

8.2 新しい画像装置の提案

現在, 一般的な遠隔操作画面は, 図-18 に示すように, 車載カメラ映像 1+外部カメラ映像 2 で構成されている。遠隔操作時のオペレータは車載カメラからの映像情報を比較的多く使用している⁽²⁾ ため, 車載カメラ映像の情報量を増加することにより, 施工効率の向上が図れるのではないかと推察できる。

また, 人間の視野角のうち有効視野 (眼球運動だけで瞬時に情報受容できる領域) は, 水平角約 30°, 垂直角約 20°以内となっており, 非常に狭い範囲であるが, 補助視野 (物体の存在がわかる領域) は, 水平角約 100°, 垂直角約 130° (上 45°, 下 85°) となっており非常に広い範囲となっている⁽³⁾。(図-19, 図-20)

これに対し図-18 で示した現在一般的な車載カメラの映像は, 水平約 90°, 垂直約 60°程度の画角を持っており, 上記の有効視野はカバーしているが, 補助視野はカバーできていない。遠隔操作が搭乗操作に比べ施工効率が劣るのは, この補助視野の有無が原因の一つではないかと考えられる。

そこで, 図-21 に示すように車載カメラを 1 台から 4 台に増やし, 上記補助視野をカバーできるような画像装

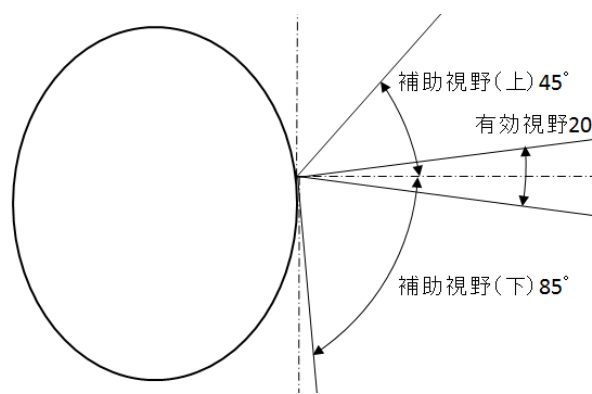


図-20 一般的な視野角 (垂直)



図-21 車載カメラ4台設置状況

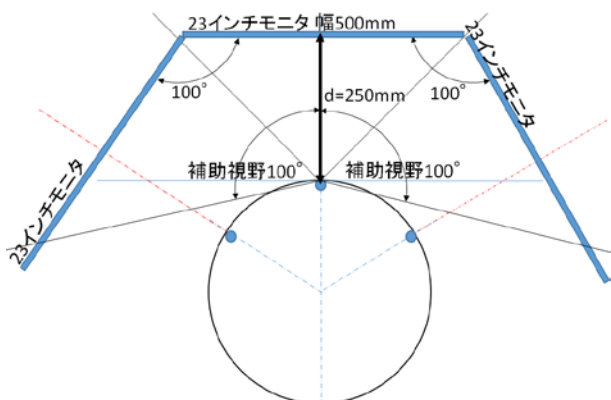


図-22 モニタ配置 (水平)

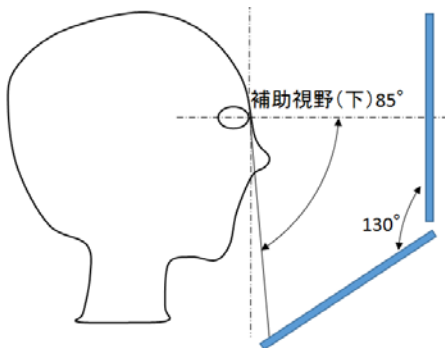


図-23 モニタ配置 (垂直)



図-24 提案した画像装置

8.3 実証実験

3章にて示した標準実験モデルを用い、4章にて提案した新しい装置の検証実験を行った。実験は10名のオペレータにて各10回ずつ行い、標準実験モデル完了に費やした時間(サイクルタイム)を計測した。

実験パターンは、従来の搭乗操作、4章にて提案した新しい装置の検証、参考として直接目視による遠隔操作、以上を考慮して、下記の①～⑧のパターンとした。

- ① 通常の搭乗操作
- ② JS (ジョイスティック) + 車載カメラ1台
(現在一般的な遠隔操作システム)



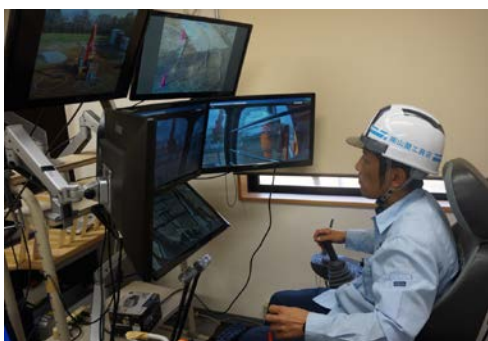
③ JS+車載カメラ4台



④ 運転席型+車載カメラ1台



⑤ 運転席型+車載カメラ4台



⑥ JS+やぐらからの直接目視



⑦ JS+地上からの直接目視



⑧ JS+運転席からの直接目視



各オペレータ10名の3回目以降のサイクルタイムをすべて平均した結果を図-25に示す。

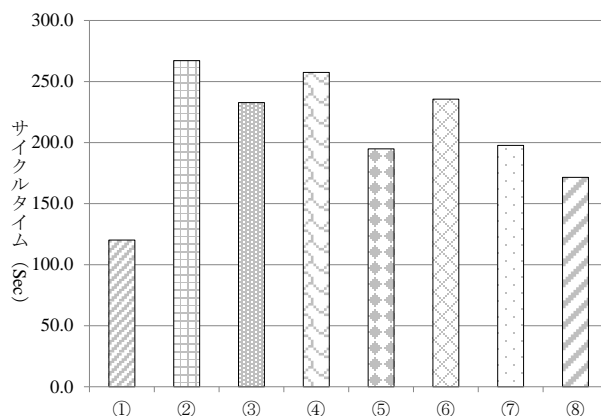


図-25 実験結果

9. まとめ

前章にて行った検証実験結果(図-25)から以下のことが明らかとなった。

- (1) ①通常の搭乗操作と②JS+車載カメラ1台(現在一般的な遠隔操作システム)を比較すると、現在一般的な遠隔操作システムのサイクルタイムは、通常の搭乗操作に比べ約2.3倍となっており、施工効率にして約43%程度である。
- (2) ①通常の搭乗操作と⑧JS+運転席からの直接目視、また②JS+車載カメラ1台と④運転席型+車載カメラ1台、さらに③JS+車載カメラ4台と⑤運転席型+車載カメラ4台を比較すると、運転席型のインターフェースがジョイスティックに比べ施工効率改善に効果があることがわかる。
- (3) ②JS+車載カメラ1台と③JS+車載カメラ4台、および④運転席型+車載カメラ1台と⑤運転席型+車載カメラ4台を比較すると、車載カメラによる視覚情報量の増加が施工効率改善に効果があることがわかる。
- (4) ②JS+車載カメラ1台、⑥JS+やぐらからの直接目視、⑦JS+地上からの直接目視、⑧JS+運転席からの直接目視を比較すると、カメラ画像による遠隔操作より直接目視の方が施工効率は高く、さらに直接目視に置いても、運転席>地上>高所、の順で施工効率が高いことがわかる。これは通常の搭乗操作環境により近いほど施工効率が高いことを表しているのではないかと推察できる。

10. 災害対応建設機械活用マニュアルについて

これまでに発生した災害時の無人化施工技術による支援を始めとした施工実績を踏まえ、発災後の迅速・安全な復旧活動を進めるうえで必要となる対応策を具体的に整理した。また、現地での人的リスクを無くす技術として必要となる無人化施工を展開するために必要となる手順、具体的なシステム構成や技術的課題等を整理し、これまでに蓄積された災害対応経験者の知見を踏まえ、災害対応建設機械活用マニュアルをまとめた。マニュアルは、発災直後の状況判断から復旧作業に至る一連の流れを示すとともに必要となる機器構成や施工時の運用を具体的に示した。

参考文献

- 1) 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一: 油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案, 建設機械施工論文, Vol.66, No.8, pp.71~79, 2014.
- 2) 西山章彦, 茂木正晴, 藤野健一: 2014 油圧ショベル無人化施工の遠隔操作と搭乗操作における操作者視点の比較に関する研究 平成 26 年度建設ロボットシンポジウム No67
- 3) 矢口博久他: 眼・色・光-より優れた色再現を求めて-, 公益社団法人日本印刷技術協会, p.9, 2007.

STUDY ON QUICK AND SAFE CONSTRUCTION USING CONSTRUCTION MACHINES FOR THE LARGE-SCALE DISASTER

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2015

Research Team : Construction Technology Research
Department (Advanced Technology
Research Team)

Authors : FUJINO Kenichi

MOTEKI Masaharu

HASHIMOTO Takeshi

NISHIYAMA Akihiko

YUTA Shinichi

Abstract : At present, the Unmanned Construction System (UCS) is adapted on initial operation against the disaster. For instance, it has been used in Unzen. When the scale of the disaster is big, or the danger to a person is big, the UCS is expected as a quick and safe construction technology. The Remote Controlled UCS is introduced into construction site to repair earth-fill embankment or to remove rock, as urgent measures after the disaster outbreak. However, the UCS is not introduced into the all disaster site which is effective site for UCS because a procedure of the introduction is not arranged clearly. And the biggest problem of UCS is the lower construction efficiency than a normal operation. In this research, first, the actual situation such as the environmental situation at the time of the disaster outbreak, and the operating situation of the construction machine were investigated and analyzed. Next, Applicability and introduction technique of the technology that is possible to make the recovery work quickly and safely were considered. Third, the optimal procedure to introduce UCS to disaster response was suggested. And the last, the effective system considering human interface to improve construction efficiency of UCS was suggested.

Key words : Unmanned construction technology (system), Construction machinery, Disaster, Disaster recovery work, Cycle time