

2.9 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 25

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、大槻崇、
西山章彦、橋本毅、岩谷隆文

【要旨】

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に関しては、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。

無人化施工技術は、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・積込み・運搬等の機械施工に遠隔操作による無人化施工が導入・活用されている。

本研究では、災害発生時の対応に関わるプロセスを整理するとともに現場で利用されている技術である遠隔システムの操作性に関する検証を行い、操作性の向上による習熟度の短縮、作業効率の向上、疲労感の低減を目的とし、モニタの配置、操作、今後のシステム改良に向けた検討を併せて行うものである。

本年の報告では、昨年度に発生した奈良県での深層崩壊による土砂災害現場状況を事例に施工上の危険箇所に関無化施工を導入するプロセス上の課題を整理した。

また、無人化施工に関わる要素技術向上に向けた検討として、建設機械に搭乗して操作を行った場合と現場情報を遠隔地のモニタに表示・操作する遠隔操作システム（雲仙普賢岳で利用されている遠隔システムをベースに土木研究所によって構築したシステム）によって操作を行った場合の操作者（オペレータ）の習熟度、施工効率及び施工精度について検証した結果を報告する。

キーワード：遠隔操作技術，IT施工システム，災害，建設機械，油圧ショベル，空間認知，奥行き感覚

1. はじめに

無人化施工の適用に関しては、災害の規模や現場状況（人への危険度合い等）によって個別に判断されている。

例えば、災害発生時（地震・噴火などによる災害）に無人化施工が適用されている具体的な事例として、現在、雲仙普賢岳等での利用が挙げられる。

無人化施工を採用すれば人的な二次災害をさけることができることから、緊急的な災害対応には極めて有効であるが、必ずしもそれが活用されるとは限らない。

被災現場に対する緊急復旧活動を進めるうえでは、現場状況の適切な把握と復旧のために必要となる人及び資機材の選定と確保が必要となる。

例えば、写真-1 に示すように災害発生後に上空より被災状況を確認し、復旧のために必要となる陸路及び空路の確保を検討するとともに、被災の規模と二次的な被災リスクを低減させる観点から復旧のための計画を構築しなければならない。

そこで、本研究では、まず緊急復旧活動を低リスクで遂行するうえで必要となる無人化施工技術を導入するうえで必要となる課題について、昨年度に発生した奈良県

での深層崩壊による土砂災害現場事例に基づき整理した。

また、現場での無人化施工の作業性の向上は被災現場の復旧期間を大きく左右する重要な因子であり、そのための技術的な改善は重要な要素だと考えられる。



写真-1 土砂災害現場

したがって、作業スキルとして必要となる習熟度、施工効率及び施工精度について、建設機械に搭乗して操作を行った場合と現場情報を遠隔地のモニタに表示・操作する遠隔操作システムによって操作を行った場合を比較した実験について報告する。

2. 無人化施工技術の現場での導入課題

2.1 災害現場の実態

図-1 に示す平成23年9月に発生した台風12号による災害事例を大規模土砂災害現場の具体的な事例として、検討を進めた。

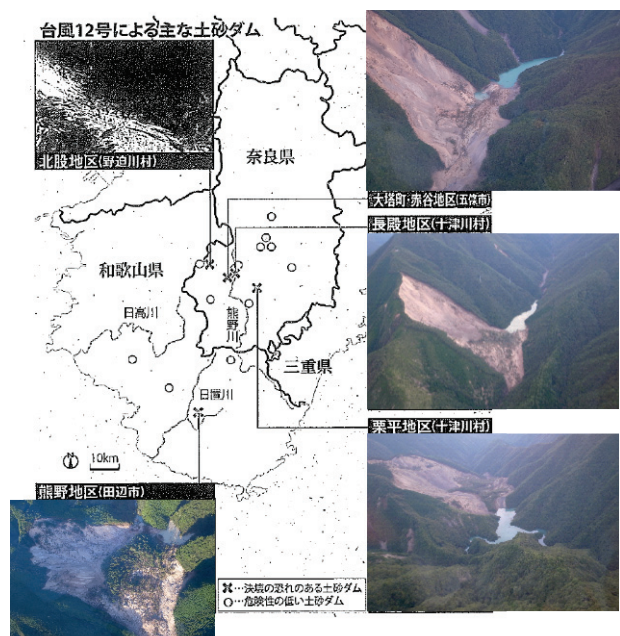


図-1 現場被災状況



写真-3 現場踏査 2



写真-4 現場状況

2.2 現場での対応

現地での対応としては、上空からの被災状況調査のほか現場踏査を行い、復旧のための空路及び陸路の検討を進めた。具体的な復旧計画を立案するうえでは、写真-2, 3 に示すように現場踏査を行っており、復旧のための資機材の搬路確認を進めている。



写真-2 現場踏査 1

しかし、現地の状況が写真-4 のように資機材等の搬入が可能となる状況ではなく、人力による陸送も不可能な現場もあり、空路による対応が必要となるケースが考えられる。

陸路が不可能な現場では、写真-5 に示すように使用する建設機械を分解し、ヘリコプターによる搬入により対応している実態がある。



写真-5 分解型油圧ショベル

2.3 無人化施工技術の現場への導入課題抽出

写真-6 に示すように大規模な土砂災害が発生した場合、短期間に復旧を進めるうえでは、人員を投入した活動が作業効率上有意だと考えられるが、二次災害のリスクを考慮した場合、現実的な対応とならないことが多い。



写真-6 土砂崩落箇所近傍

そこで、二次災害を低減させるための緊急復旧対応として土堰堤等の構築を無人化施工技術の使用を検討することによって対応する必要性があるものといえる。

しかし、具体的に無人化施工技術を現地に展開するうえで、以下のような課題が考えられる。

1) 現地において二次災害リスク判断の対応・判断

雨水の状況や軟弱地盤等の把握と箇所があり、現地での復旧活動に際して二次災害のリスクを想定する必要があると考えられる。陸路若しくは空路によって資機材及び施工機械の搬入が可能な状況にあっても降雨による崩落や土砂流出等によるリスクを判断し、無人化施工エリアを設定する必要がある。

2) 陸路及び空路の確認を目的に事前調査の必要性

現場踏査を行い、資機材を建設機械等によって搬入出可能であるかを確認する必要がある。また、そのための搬路の整備が物理的に可能であるかを明らかにし、陸路若しくは空路による資機材の搬入を早急に計画する必要があると考えられる。

3) 無人化施工エリアの調査及び事前整備の必要性

無人化施工を現場で採用する際には、施工内容に応じた使用機械の選定検討のほかに遠隔操作の支障となる現地での障害物や操作基地となる操作室の設置に関して事前に踏査等による調査と考えられる。長距離遠隔操作については、現場状況に応じて有線・無線の選定・設定が事前検討事項だと考えられる他、無人化施工を進めるうえでの有人エリア整備計画（使用機械や資機材搬入）を

優先して検討することが、迅速・効率的手法だと考えられる。



写真-7 復旧のための搬路の整備

3. 無人化施工における作業効率等に関する要素実験

3.1 実験の目的

映像情報として現場情報をモニタより提供し、遠隔にて操作するシステムに関して操作性に関する検証実験を行った。検証実験では、今後の遠隔操作システムの改善を目的とし、遠隔操作における習熟度合いとして、作業時間、作業の正確さに関する実験を実施した。

3.2 実験条件

実験では土木研究所保有の油圧ショベルを利用し、土木研究所内建設機械屋外実験場にて実施した。

主に実現場での掘削積込み作業を想定した施工モデルについて、搭乗操作と遠隔操作システムによる操作の比較、検証実験を実施した。

検証対象とする遠隔操作システムは、遠隔地において現場情報をモニタにより操作者に提供するものである。検証するうえで操作者（オペレータ）の習熟度として、作業効率（時間）、作業の正確さ計測、評価するものである。



写真-8 実験に使用した油圧ショベル（遠隔機能付き）

3.3 実験内容

図-2に示す建設機械屋外実験場にて、障害物（図-3）を越えて作業エリアまで移動する。作業エリアでは、掘削作業に見立てて1 t土嚢等の対象物を①～②に移動する。移動に際して、操作者は、対象物を所定の位置に移動し、マーキングされた箇所に対象物を移動・設置する。
→対象物の形状を検討した。

実験は、決められたルーチンワークについて、表-1に示すように各操作者5回作業を行うものとした。

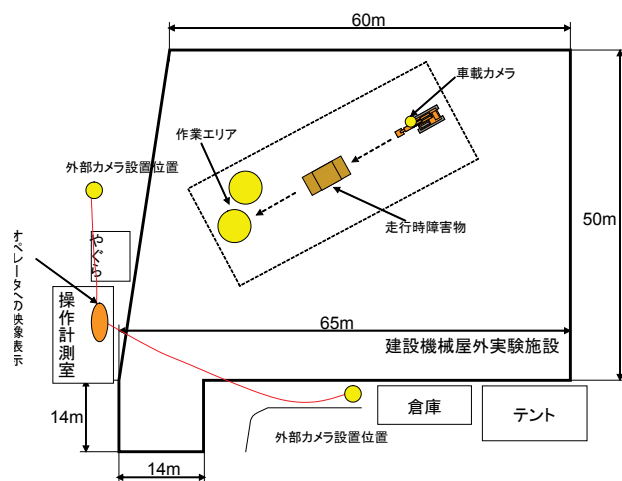


図-2 実験フィールド



写真-9 対象物



図-10 対象物の移動

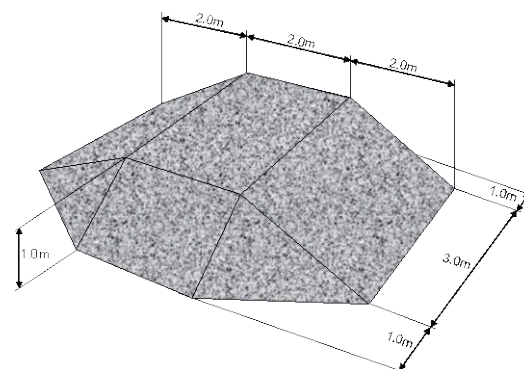


図-3 走行障害物

表-1 実験ケース

操作者	搭乗操作回数	遠隔操作回数
経験1年未満	5回	5回
経験5年以上	5回	5回

1) 操作者

本実験では、習熟度合いを把握するうえで、以下に示す一般オペレータを対象に実施した。

- ・経験1年未満 3名
- ・経験5年以上 3名

2) 実験の流れ

遠隔操作システムの総合的な検証として、出発地点から目標とする作業エリアまでの移動、作業エリア内での対象物の移動設置、作業エリアから出発地点までの移動とし、作業1サイクルは、図-4に示すものとなる。

搭乗操作に関しては、操作者（オペレータ）の習熟度・施工効率を評価するうえでの指標とする実験ケースである。

遠隔操作システムによる実験については、プレハブ内での操作とし、外部の情報がプレハブ内で分からないようしたうえで実験を実施した。

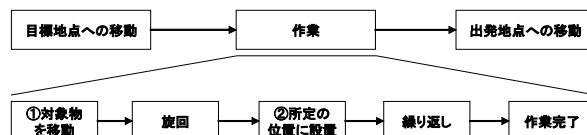


図-4 サイクル動作

3) 計測

計測については、作業効率の観点から一連の動作における作業時間と精度の観点から移動作業後の設置位置を計測した（写真-11, 12）。計測に際しては、サイクルタイム解析のためのビデオ撮影を行った。



写真-11 実験状況



写真-12 操作状況（遠隔操作）

3.4 実験結果

実験結果に関しては、作業効率・作業精度に関して以下に基づき整理した。

1) 作業効率の推移

経験1年未満のオペレータと経験5年以上のオペレータの走行・掘削までの作業時間記録データについて、搭乗操作データと遠隔操作データの解析を行い、それぞれ3人の平均結果を図-5～8に示す。

搭乗操作及び遠隔操作のいずれも1回目の操作以降に関して操作の慣れが見られる結果となった。特に搭乗操作に関しては、経験1年未満オペレータの操作効率がトータルサイクルタイムで150sec程度の低減が見られた。

また、経験5年以上のオペレータに関しては、遠隔操作において経験1年未満のオペレータと同様な500sec程度の低減が見られた。

平成22年度に実施した遠隔操作経験者による習熟度の確認する実験結果では、3回目以降からサイクルタイムの収束が見られており、本実験での経験1年未満のオペレータと経験5年以上のオペレータ（いずれも遠隔操

作未経験者）に関しても類似した習熟を示す結果となった。

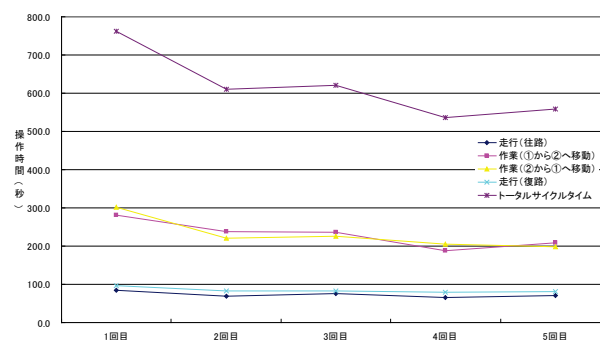


図-5 経験1年未満OPサイクルタイム（搭乗操作）

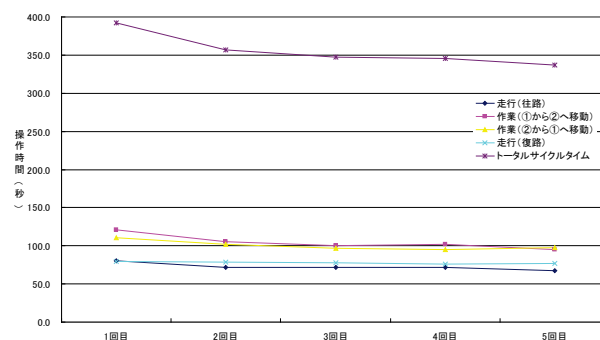


図-6 経験5年以上OPサイクルタイム（搭乗操作）

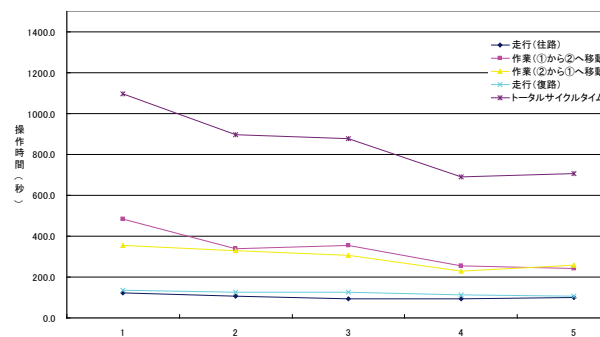


図-7 経験1年未満OPサイクルタイム（遠隔操作）

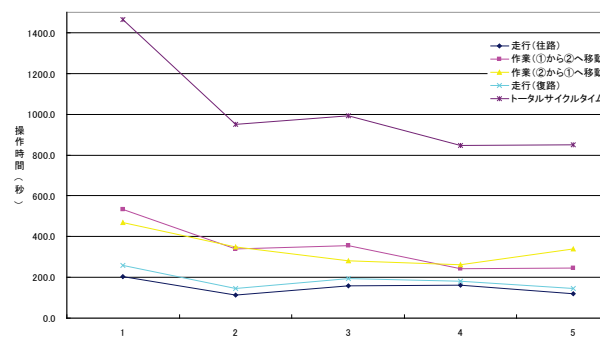


図-8 経験5年以上OPサイクルタイム（遠隔操作）

2) 作業精度の推移

作業精度の計測に関しては、写真-13に示すように対象物の移動作業後の設置位置のズレについて搭乗操作と遠隔操作において計測を行った。



写真-13 設置位置のズレ計測状況

計測値の評価に関しては、当初設置されていた位置を基準として移動作業後に設置した際に生じるズレとの比（作業後設置位置／当初設置位置）を比較評価した。評価として当初の設置位置に近い位置に戻した場合を施工精度が高いものとして評価を行った。

計測結果については、図-9～12に示す傾向が確認された。

搭乗操作に関しては、図-9, 10に示す経験1年未満のオペレータと経験5年以上のオペレータとを比較してみると経験5年以上のオペレータが経験1年未満のオペレータよりも施工精度が良好である結果が得られた。

遠隔操作に関しては、経験1年未満のオペレータと経験5年以上のオペレータでは、バラツキが大きく適切な施工精度が得られない結果となった。

搭乗操作では経験者が有意であるにも関わらず遠隔操作等では、有意さを認められる結果とならなかった。

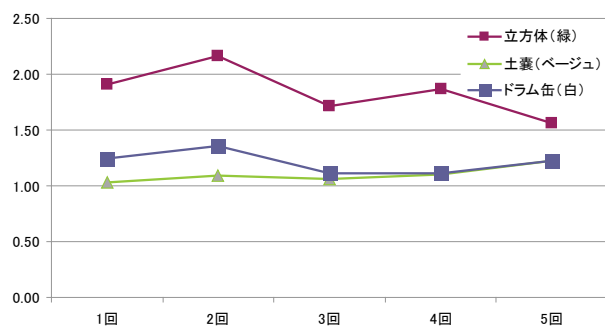


図-9 経験1年未満 OP 施工精度（搭乗操作）

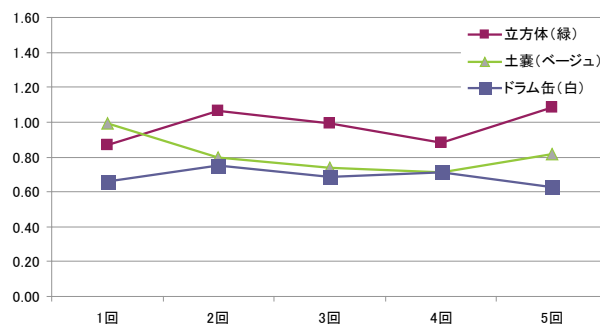


図-10 経験5年以上 OP 施工精度（搭乗操作）

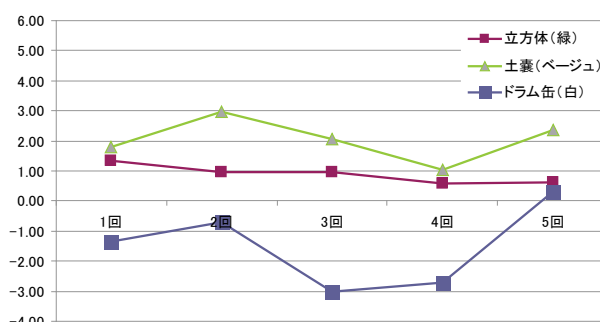


図-11 経験1年未満 OP 施工精度（遠隔操作）

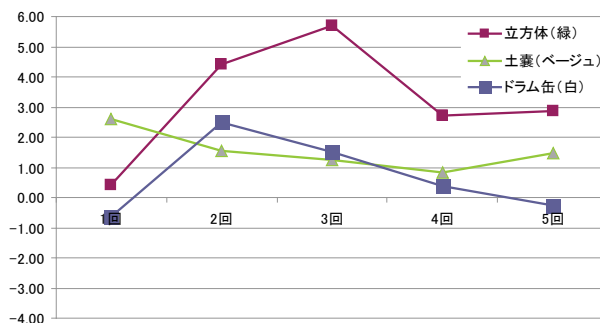


図-12 経験5年以上 OP 施工精度（遠隔操作）

また、実験後にオペレータに対してヒアリングを実施した結果として、経験1年未満のオペレータと経験5年以上のオペレータともに奥行き感覚をつかむことの難しさが挙げられた。特に遠隔操作に関しては、2次元の映像からの情報のみでは、対象物の掴み作業で奥行き判断に時間を要するとともに所定の設置位置に戻す作業判断にも時間を要した。そのため搭乗操作と遠隔操作の精度に相対的ではあるが違いがみられた。

4. まとめ及び考察

4.1 無人化施工技術の現場での導入課題

災害発生時において、現場の迅速な復旧は被災者及び周辺住民の生活及び安全確保の観点から必要なものであるが、迅速に対応するうえでも二次災害の防止などについて現場での慎重な調査と冷静な判断が必要となる。

しかし、災害発生時には、現場調査を実施した後、具体的な施工手法を決定するに際して関係機関等との調整に時間を要している実情があり、時間経過とともに降雨等による気象変化に伴い、二次崩落によって現場状況が激変してしまうケースも考えられる。

迅速な緊急復旧を進めるうえでは、暫定的であっても安全確保のための応急復旧は必要不可欠なものと考えられる。例えば、赤谷地区における土砂崩壊の二次災害を防止するうえでの土堰堤施工に関しては恒久的な対応を進める仮設的な対応といえ、短期間での現場対応を要するものと考えられる。

緊急時の復旧活動においては、人力による作業が多く、そのための人的な危険リスクも高いものとなっている。

本研究では、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の整理を行った。

具体的には、災害現場の実態、現場での対応に関して調査整理を進め、無人化施工技術の現場導入に関する課題を整理してきた。図-13 に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。

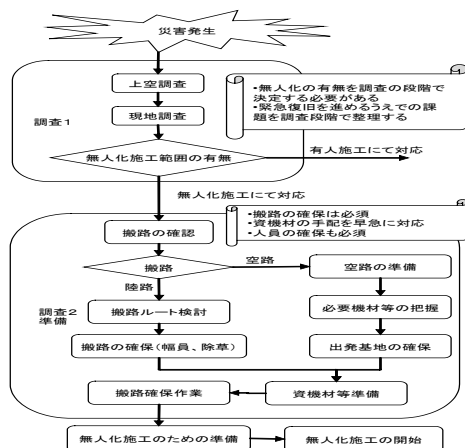


図-13 無人化施工導入の流れ (案)

図-13 に示すように課題となる点を以下に述べる。

①発生時において被災規模の的確な把握のための調査体制を構築する必要がある、上空からのマクロ的、地上からの精緻な情報収集体制が必要となる。

②被災状況から緊急応急復旧の有無と無人化施工技術投入の必要性を決定するとともに復旧時の搬路の確保を優先的に進める必要が考えられる。

③復旧の為に被災現場までの搬路確保は有人・無人に係らず必要なものであるため対応初期の段階より進めるべきものと考えられる。

無人化施工技術の導入に関して、現段階では施工効率の面で有人作業に劣ることから迅速な対応を考えた場合、現場での対応を全て無人化することは難しく。作業エリアの中で人的なリスクが高い箇所をスポットで対応することが最良だと考えられる。

4.2 無人化施工における作業効率等に関する要素実験

1) 搭乗操作及び遠隔操作の共通事項

搭乗操作及び遠隔操作に関しては、概ね2回以降の操作よりサイクルタイムの収束が見られた。その内訳として、走行と作業に関して大きく大別すると走行に関しては操作回数に関係なくサイクルタイムが安定しており、オペレータの習熟が関連する結果ではなく、今回の実験ではオペレータの操作回数による個人の技量が左右するものでないことが伺える。一方、作業に関しては、対象物を掴む動作が付加されていることがサイクルタイムの差異に大きく寄与する結果となった。オペレータは対象物を掴む行動を行ううえで奥行き感覚及び写真-14 に示すような幅感覚を知覚しながら作業を行っていることが作業時間の増加につながるものが共通事項として考えられる。



写真-14 オペレータの作業視点 1

2) 熟達評価

共通事項でも述べたように奥行き感覚の知覚が作業（行動）の遅れに寄与していることがオペレータの作業視点によって分かってきたが、これと同時に作業の熟達度合いの違いを確認することができた。

写真-14 は、経験5年以上のオペレータの視点をアイマークレコーダによって捉えたもので、対象物を掴もう

とする場合、左右の位置関係を的確に捉えていることが分かる。一方、写真-15は、経験1年未満のオペレータの視点をアイマークレコーダによって捉えたものであり、対象物を捉えようとするポイントが掴めずに視点が泳いでいるような状況が分かる。

このことは、作業内容（ルーチンワーク）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熟練者と未熟練者の間に違いとして定性的に現れているものと考えられる



写真-15 オペレータの作業視点 2

3) 搭乗操作と遠隔操作とのサイクルタイム相違

図-13に示すように経験1年未満のオペレータでは、1回目では搭乗操作と遠隔操作とのサイクルタイム差は約333secであり、習熟した4,5回目においては、約152sceとなり、搭乗操作と遠隔操作のサイクルタイムがともに習熟していく中で遠隔操作が搭乗データに近づく傾向がみられた。

また、作業効率としては、4,5回目の作業時間のみを評価してみると搭乗操作では約400sceに対して遠隔操作では約493sceとなり、搭乗操作を1とした場合、遠隔操作では約0.8の作業効率であることが分かった。

経験5年以上のオペレータに関しては、搭乗操作では2回目以降のサイクルタイムが約347secと収束しているおり、遠隔操作では4,5回目より収束が見られ、約848secのサイクルタイムとなっていた。

なお、経験5年以上のオペレータと経験1年未満のオペレータを比較した場合、搭乗操作では約50sec上回る作業効率になっていたにもかかわらず、遠隔操作では逆に大幅にサイクルタイムが増加した。これは、油圧ショベルの搭乗操作が日立式操作方式、遠隔操作の操作が標準操作方式（JIS式）となっていたためで、経験年数が長いオペレータは普段日立式での操作に慣れていたことから、普段使わない標準操作方式である遠隔操作におい

てかえって違和感を感じたために作業効率が損なわれたものと推定される。

逆に、経験が浅いオペレータはそのような方式の違いはあまり関係せず、熟練者に比べると効率は多少損なわれるものの、ほぼ同様の効率が得られることが判明した。

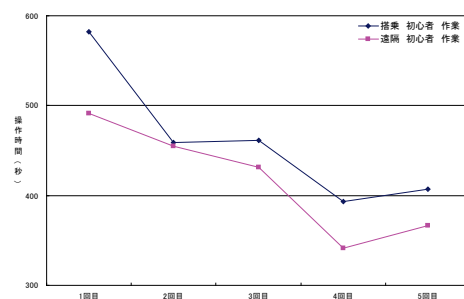


図-13 初心者 OP の作業操作時間

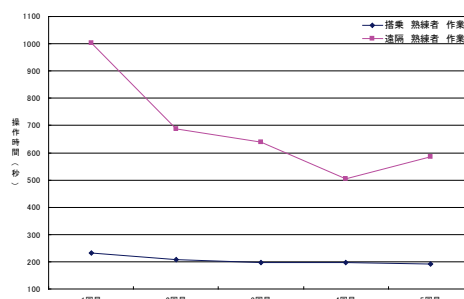


図-14 熟練者 OP の作業操作時間

5. 今後の課題

今後、無人化施工技術の現場での導入に関する研究については、災害事例を調査するとともに抽出した課題に対して現場での意見を踏まえた円滑な導入検討を進める必要がある。

また、作業効率と精度の向上に関しては、土研内での試験データ数を増やすとともに作業効率を向上させるための検討として、オペレータの作業に関する慣れや遠隔操作を円滑に進めるうえでの奥行き感覚の認知情報に関する検討が必要となる。

参考文献

- 1) 茂木正晴・藤野健一・大槻崇：建設現場への無人化施工技術の普及と今後の技術ニーズ-遠隔操作システムの検証実験報告-，第12回建設ロボットシンポジウム論文集，pp89. ～96, 2010. 9
- 2) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Takashi Ootuki, Takeshi Hashimoto :ORESEARCH ON VISUALPOINT OF OPERATOR IN REMOTE CONTROL OF CONSTRUCION MACHNERY, The28th International Symposium on Automation and Rodotics in Construcion, pp532-537, 2011.6

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

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2013

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

Authors : FUJINO Kenichi
MOTOKI Masaharu
OOTSUKI Takashi
NISHIYAMA Akih
HASHIMOTO Takeshi
IWATANI Takafumi

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.

The main aim of this project are

- Arrangement an introduction process at the time of the disaster outbreak.
- For improvement of the operability, shortening of the skill time, reduction of the fatigue, examination of the most suitable system (placement of a monitor and the joy stick) of the remote system.

In the report of this year, a problem on introducing UCS into the danger site was arranged, in reference to the disaster site situation by the depths collapse in Nara that occurred in last year.

And, when the operator controls construction machine directly or he controls it using remote system (he can check the situation of site only via monitor), the degree of achievement, construction efficiency and construction precision were inspected.

The remote system which is based on the system used at Unzen was developed at PWRI.

Key words : Unmanned construction technology (system), Unmanned construction technology (system), Remote control technology (system), Remote controlled construction machinery, Construction machinery, Disaster, Disaster recovery work