

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、山口崇、
橋本毅、西山章彦

【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、雲仙普賢岳等の人が立ち入ることのできない被災箇所での復旧活動に利用されている。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。また、この無人化施工については、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・積込み・運搬等の機械施工を遠隔操作による施工技術が導入・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。

そこで、本研究では、無人化施工として利用されている建設機械の遠隔操作技術の実態を明らかなものとするため、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基礎データ計測・検証、作業効率向上を目的としたシステム提案に向けた検討を行うものである。

本研究報告は、標準的な作業手順や作業環境を整えることによって横並び評価できる標準的なモデルタスク¹⁾を活用して、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った結果を述べる。また、遠隔での操作における作業効率改善について考察する。

キーワード：遠隔操作、油圧ショベル、作業効率、モデルタスク、サイクルタイム

1. はじめに

現在、日本では災害発生時（地震・噴火などによる災害）の初動対応として無人化施工が適用されている。この無人化施工は、人が立ち入ることのできない危険な箇所（雲仙普賢岳、福島第1原子力発電所の瓦礫撤去等）での迅速かつ安全な施工技術として利用されている。現在の無人化施工技術により、作業員やオペレータの安全を確保しながらある程度の品質や効率で施工を行うことは可能である。しかし、有人による施工機械の操作に比べて作業の品質やスピードが劣るなどの課題があり、現場での適用に際して更なる作業効率（作業時間）の向上が期待されている。

そのため、適切な遠隔操作方法や新たな機器の開発を目的として無人化施工における作業効率（作業時間）を評価することにより、ディスプレイや通信系などの機器の違いやオペレータの習熟や経験の差異が作業の効率に及ぼす影響の検討が進められている。

しかし、実現場（特に災害発生後の復旧活動）では作業の進捗に伴う環境変化のため、同一環境条件での比較検証実験・計測ができない状況にあり、それが研究開発を適切に進める上で1つの障害となっていた。

本報告は、土木研究所において提案した作業効率（作

業時間）の評価のために定式化した、現場での掘削作業を想定し、繰り返しが可能なモデルタスク¹⁾を活用して、搭乗と遠隔での操作、あるいは、遠隔操作における操作環境や操作方法の違いなどの操作インターフェースの違いについて作業時間を計測する実験を行った結果を述べる。また、これに基づいて、遠隔での操作における作業効率の改善方法について考察を行う。

2. 比較検証の流れ

油圧ショベルの搭乗での操作は、オペレータは直接目視による視覚と聴覚、体性感覚情報などの知覚システムをフルに活用しているものと考えられる。

一方、遠隔での操作では、一般に対象となる作業現場から提供される映像のみにより操作が行われ、更に映像も幾つかの視野の情報に限られている。

この差異が作業効率（作業時間）に与える影響を定量的に把握することは、遠隔での操作効率向上に関する研究を進める上で有効かつ不可欠である。そこで、土木研究所では標準的なモデルタスク¹⁾による試験方法を提案し、より定量的に作業効率（作業時間）の改善に向けた検討を進めている。

比較検討に関しては、図1に示すフローに基づき検討

を進めた。

まず、搭乗での操作と無人化施工の現場で実際に使用されている遠隔装置での操作による基礎データを取得した。次に、操作装置や操作環境等の条件を変え、その違いによる作業効率の比較検討を行った。

なお、作業効率の指標は、作業開始から終了までのサイクルタイムとした。

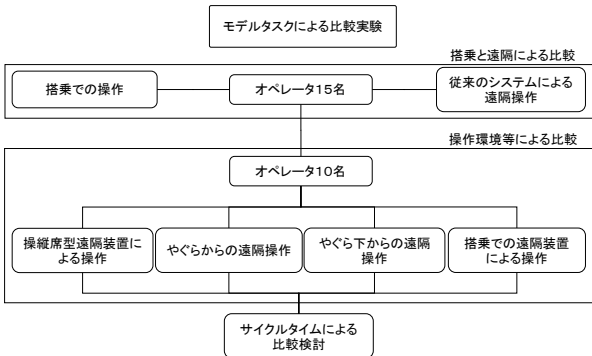


図1 比較実験フロー

3. モデルタスク

油圧ショベルの搭乗での操作は、オペレータは直接目視による視覚と聴覚、体性感覚情報といった知覚システムをフルに活用しているものと考えられる。

一方、遠隔での操作では、対象となる作業現場から提供される映像（限られた空間からの視覚情報）により操作が行われている。

この差異が作業時間（サイクルタイム）に与える影響を定量的に把握することは、遠隔での操作効率向上に関する研究を進める上で有効かつ不可欠である。そこで、土木研究所では標準的なモデルタスク¹⁾による試験方法を提案し、より定量的に作業時間（サイクルタイム）に向けた検討を進めることとした。

提案したモデルタスクのエリアを図2に示す。

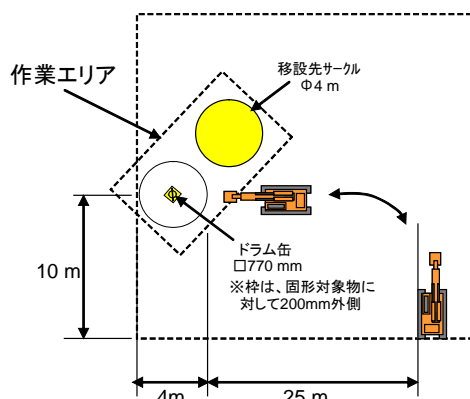


図2 モデルタスクエリア平面図

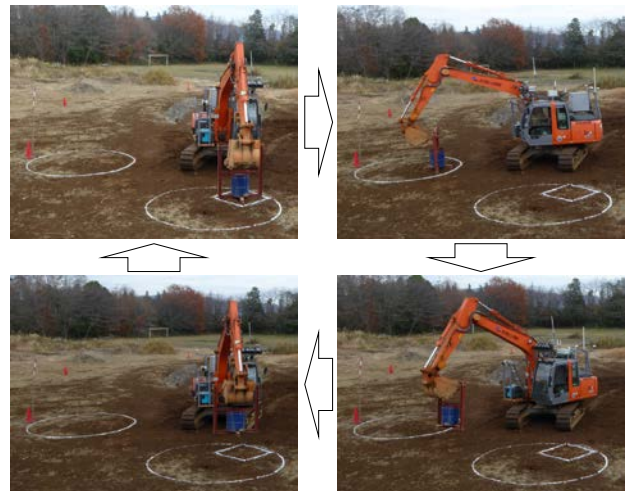


写真1 固形対象物の移動手順

モデルタスクは、これまでに実施してきた無人化施工の作業要素を取り入れたもので、屈曲部を含む約30mの経路を作業エリア手前まで走行し、作業に適した位置まで移動してから、写真1に示すように固形対象物を移設先サークルに移設し、その後、再び、初期位置の枠内に固形対象物を戻すといった作業手順となっている。

この動作に関しては、油圧ショベルによる掘削を模しているが、土砂を利用した場合、一般的にバケットの山積み量の違いが作業に影響してしまう。このことから、再現性の観点で、バケットの山積み量を毎回同じにすることが困難となる。そこで、図3に示す固形対象物を掬い上げる類似作業モデルを設定した。

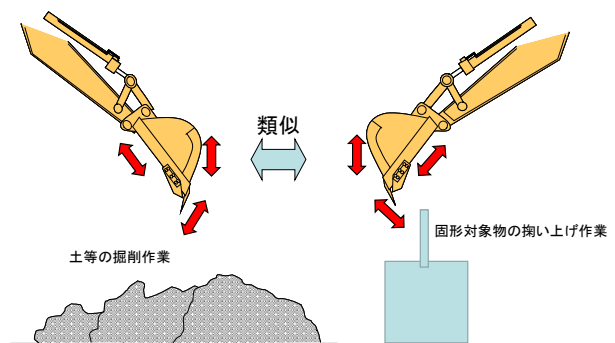


図3 作業モデル

ここで使用する油圧ショベルは0.5m³クラス、固形対象物としてドラム缶形状(底部枠770mm×高さ760mm、重量約100kg、持ち手高さ2,000mm)とした。

実験時の作業回数は、搭乗操作及び遠隔操作を各々10回連続で実施し、その作業時間を計測し、作業サイクルタイムを比較した。

実験フィールドと実験中の様子を写真2に示す。



写真2 実験フィールド全景

4. 搭乗・遠隔操作における比較検証実験

4.1 実験内容

実験は、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おいて、搭乗操作と遠隔操作による作業時間（サイクルタイム）の計測・評価を行った。

実験協力者（以下、オペレータという）は、油圧ショベル操作歴5年以上あるオペレータ15名とし、モデルタスクによる試験方法により、先に搭乗操作を行い、次に遠隔操作による作業時間（サイクルタイム）を計測した。また、搭乗操作及び遠隔操作は各々10回実施し、操作回数毎にオペレータ15名の操作傾向（慣れの度合い）を確認した。



写真3 搭乗操作状況

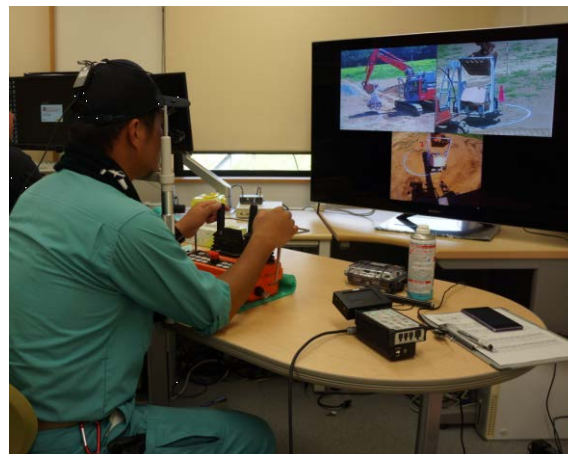


写真4 遠隔操作状況

4.2 実験計測結果

実験結果として、オペレータ15名の作業時間の平均値を図4に示す。搭乗操作については2回目以降からサイクルタイムが安定した傾向が見られた。しかし、遠隔操作に関しては、回数毎のサイクルタイムに若干バラツキが見られる結果となった。また、オペレータによるサイクルタイムの違いは、搭乗操作では標準偏差18secとなり個人差が小さいのに対して、遠隔操作での標準偏差81secとなり、個人差によるバラツキが大きいことが傾向として確認された。

次にオペレータ15名の平均値から搭乗操作と遠隔操作におけるサイクルタイム差を整理すると、遠隔操作での平均は294secであり、搭乗操作での平均127secとの比較として、約2.3倍の時間がかかることが計測された。

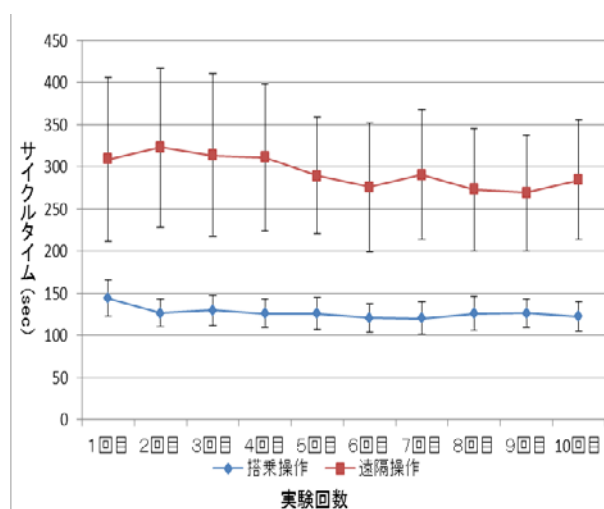


図4 搭乗操作と遠隔操作での平均サイクルタイム差

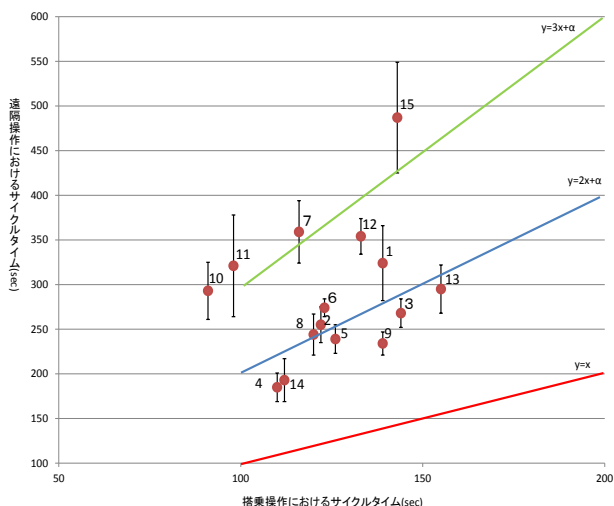


図5 オペレータ 15 人のサイクルタイム差

また、本実験での計測データを、横軸に搭乗操作時のサイクルタイム、縦軸に遠隔操作時のサイクルタイムとして、オペレータ 15 名のサイクルタイムデータ散布図を整理した。その結果を図 5 に示す。(図 5 にプロットされている数字はオペレータ No. である。) その結果、サイクルタイム差が約 2 倍 ($y=2x$) の傾向を示すグループと約 3 倍 ($y=3x$) の傾向を示すグループに分類することができた。

これらの各グループでは、10 回の操作における作業時間のバラツキに異なった傾向が見える。すなわち図 5 に示すとおり搭乗操作に対して約 2 倍のサイクルタイム差のある遠隔操作グループでは標準偏差は平均 19.7sec、約 3 倍のサイクルタイム差のある遠隔操作グループの標準偏差は平均 43.2sec であり、搭乗操作に比して遠隔操作の所要時間が大きいグループは遠隔操作における所要時間のバラツキも大きいことが示されている。

4.3 オペレータの操作傾向

実験計測結果で述べたようにモデルタスクをオペレータ 15 名が 10 回実施したサイクルタイムは、搭乗操作に関しては、全てのオペレータについて、サイクルタイムのバラツキは小さかった。しかし、遠隔操作によるサイクルタイムに関しては、図 5 で見られるように個人によっては、ある程度のバラツキがあることが計測できた。

この遠隔操作でのサイクルタイムの傾向をオペレータの個人毎に分析すると、オペレータは大きく 3 つのタイプに大別することができる。その傾向は、以下のとおりである。

①安定タイプ：遠隔操作のサイクルタイムが搭乗操作

と同様に安定しているケース (図 6)

②変動タイプ：実験回数毎にサイクルタイムの変動が見られるケース (図 7)

③向上タイプ：実験回数毎にサイクルタイムが短縮するケース (図 8)

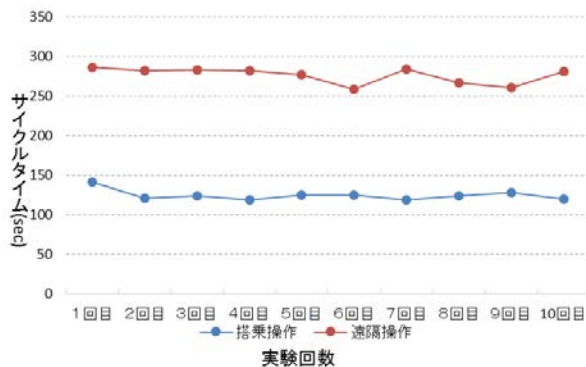


図6 安定した傾向の作業時間 (サイクルタイム) 例

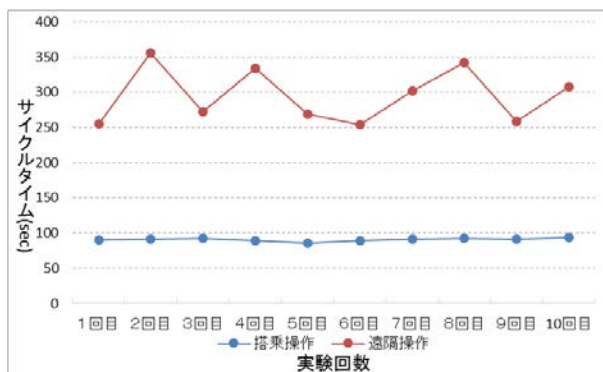


図7 変動した傾向の作業時間 (サイクルタイム) 例

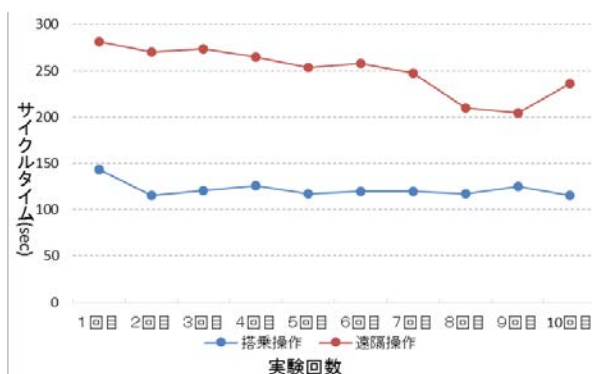


図8 回数毎に向上する傾向の作業時間 (サイクルタイム) 例

5. 操作環境等の違いによる比較検証実験

5.1 実験内容

モデルタスクを用いて遠隔操作時におけるサイクルタイムの遠隔操作の環境および、操作方法の違いによる比較実験を行った。

なお、この比較実験を進めるにあたっては、実験ケー

スが多岐に渡り、準備から計測に要する時間やオペレータの長時間拘束の困難さからオペレータを限定する必要があり、前記15名から10名を選抜した。選抜にあたっては、操作技量のバラツキを少なくするため操作傾向が比較的類似しているオペレータを選んだ。

比較実験については、前記の実験と同様に、先に搭乗操作を行い、次に操縦席型遠隔装置による操作、やぐらからの遠隔操作、やぐら下からの遠隔操作、搭乗での遠隔装置による操作の順番で、モデルタスクを各々10回実行させ、そのサイクルタイムを計測した。

5.1.1 操縦席型遠隔装置による操作

実験で使用している油圧ショベル（日立製 0.5m³）と同タイプの操縦席に既存の遠隔装置を接続改造したもので、従来の遠隔操作装置と同様に計測室内で実験を実施した。

本比較検証実験では、映像装置については、従来の遠隔操作と同様なモニタと映像情報（建設機械搭載カメラ1台、固定カメラ2台からのリアルタイム映像）により実施した。（写真5）



写真5 操縦席型遠隔装置による操作状況

5.1.2 やぐらからの遠隔操作

鉄骨製のやぐら（地上高3.0m）より直接目視にて遠隔操作を実施した。やぐらでの操作に関しては、モデルタスクにおける建設機械の走行・作業範囲を目視にて確認できるもので、室内からの遠隔操作の映像情報より多くの情報が得られる条件での操作となる。ただし、やぐら正面に建設機械を設置した際、バケットによる死角が存在している。



写真6 やぐらからの遠隔操作状況



写真7 やぐらでのオペレータの操作状況

5.1.3 やぐら下からの遠隔操作

写真8に示すように地上からの直接目視により遠隔操作を実施した。オペレータの位置は、油圧ショベルとほぼ同じ平面上であるが、モデルタスクにおける建設機械の一連の作業範囲が目視で確認できる位置としたため、やぐらからの操作に比べると結果として死角は少ない。



写真8 やぐらでのオペレータの操作状況

5.1.4 搭乗での遠隔装置による操作

搭乗での遠隔操作については、従来の遠隔操作装置を建設機械操縦席に持ち込み、操縦席内の操作レバーを使わずに遠隔装置で走行・作業を行う。

映像等、操作に必要なとなるオペレータへの情報については、操作装置以外は全て搭乗操作と同じ条件となる。



写真9 搭乗での遠隔操作状況

5.2 実験結果

比較検証結果として、図9に示すサイクルタイム（平均値±標準偏差）が明らかとなった。

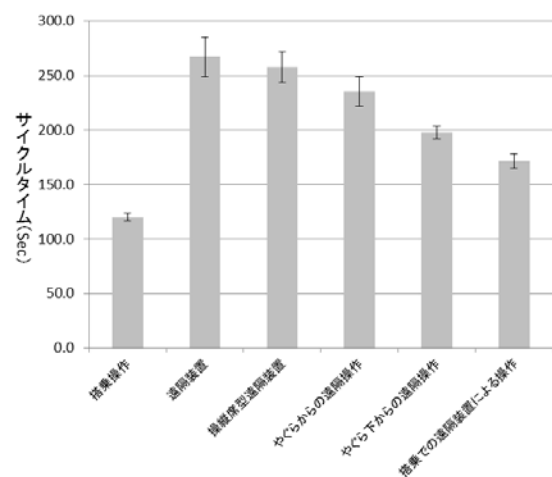


図9 操作環境等の違いによるサイクルタイムの実態

遠隔操作環境の違いによるサイクルタイム差に関しては、やぐらの上からの遠隔操作 235sec ± 13.7、やぐらの下からの遠隔操作 197.7sec ± 5.8 で見られるように環境から与えられる視覚情報の違いによってサイクルタイム差が現れることが明らかとなった。

インターフェース差による違いに関しては、搭乗操作 120sec ± 3.4 に最も近いサイクルタイムは、搭乗での遠隔操作 171sec ± 6.9 であった。また、遠隔操作 267sec

± 17.9 に対して操縦席型遠隔装置 257sec ± 14.4 は若干サイクルタイムが低くなる傾向が確認できた。

6. まとめ・考察

6.1 搭乗操作と遠隔操作の実態

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。モデルタスクによる実験で、オペレータの搭乗操作と遠隔操作を比較した場合、遠隔操作は搭乗操作の概ね約 2.3 倍の時間を要する結果が得られた。これを単純に効率に換算すると 43%となり、サイクルタイムから作業効率の実態を確認することができた。また、遠隔操作による作業時間（サイクルタイム）には、個人差による傾向として、大別すると3つの傾向を確認することができた。

今後、無人化施工技術となる映像装置・操作装置の技術開発、オペレータの適応能力の評価や操作訓練を進めるうえで、データの蓄積及び解析が必要だと考えられる。

6.2 操作環境等の違いによる比較検証実験

本比較検証実験では、搭乗操作から従来の遠隔操作の他に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、サイクルタイム差の違いを確認することができた。このことは、搭乗での操作時に得られる環境情報の取得によって作業効率が向上できること、モニタ等からの映像情報からでは認知することができないファクターが存在していることを示唆しているものと考えられる。また、搭乗での遠隔操作装置によるサイクルタイムが搭乗操作に対して約 70%であることから、作業効率向上のための操作系インターフェースの研究開発が操作の必要性があることが確認できた。

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) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Akihiko Nishiyama：RESEARCH ON OPERATORS' MASTERY OF UNMANNED CONSTRUCTION, The30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, US B No. 186, 2013
- 3) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Takashi Ootuki, Takeshi Hashimoto：RESEARCH ON VISUAL POINT OF OPERATOR IN REMOTE CONTROL OF CONSTRUCTION MACHINERY, The28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction 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 : FY2010-2015

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

Authors : FUJINO Kenichi

MOTEKI Masaharu

YAMAGUCHI Takashi

HASHIMOTO Takeshi

NISHIYAMA Akihiko

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. 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 is a main theme in the Public Works Research Institute (PWRI). In the report of this year, 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), Construction machinery, Disaster, Disaster recovery work