

|| 投稿論文 ||

無人化施工における施工効率低下要因の検討

橋本 毅¹・山内 元貴²・山田 充²・油田 信一³

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所主任研究員 技術推進本部 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail : t-hashimoto@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人土木研究所研究員 技術推進本部 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail : yamauchi-g573bs@pwri.go.jp

³芝浦工業大学客員教授 SIT 総合研究所 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)
E-mail : yuta@ieee.org

近年我が国では様々な災害が多く発生している。これら災害発生後に行われる復旧工事は、2次災害の危険がある場所での施工になる場合が多い。そこで、遠隔操作ができる建設機械を用い、危険地域から離れた安全な場所からオペレータが操作を行う「無人化施工」が日本独自の手法として開発されている。しかし、無人化施工は通常施工と比較して施工効率が低下するといわれており、無人化施工の導入を促進し、災害復旧工事を安全かつ迅速に完了させるためには、施工効率を改善することが必要とされている。

施工効率改善のための研究開発を推進するためには、無人化施工における施工効率低下原因を明確にし、その原因に対処するための研究開発にリソースを注力することが重要であると考えられる。しかしながら、低下原因を定量的に検証した研究はこれまで行われていない。

そこで本研究では、無人化施工時の施工効率低下原因を把握することを目的として、実際の遠隔操作建設機械を用いた実機実験による検討を行った。

キーワード： *unmanned construction, remote control, construction equipment, working efficiency*

1. はじめに

近年我が国では、豪雨による土砂災害、地震災害、火山災害等が多く発生している。これら災害発生後に行われる復旧工事は、2次災害の危険がある場所での施工になる場合が多い。そこで安全に復旧工事を行うため、遠方より遠隔操作ができる建設機械を用い、危険地域から離れた安全な場所からオペレータが操作を行う施工方法が開発されている(図-1)。この施工方法は日本で独自に開発されたといわれており¹⁾、「無人化施工」と呼ばれている。初めは1969年の常願寺川応急復旧工事より導入が開始され、1993年に開始された「雲仙普賢岳無人化施工試験工事」を契機に大幅に発展し、実用的な施工手法として確立された。その後、有珠山噴火、新潟県中越地震、東日本大震災、紀伊半島大規模土砂災害、熊本地震などの災害現場で導入され、国内にて200件近くの導入実績がある^{2)~6)}。

しかし、一般的に無人化施工は通常施工と比較して施工効率が低下するといわれており⁶⁾、茂木らにおける定量的な研究成果でも、遠隔操作時の施工効率は搭乗操作の約45%程度であることが示されている⁷⁾。無人化施

工の導入を促進し、災害復旧工事を安全かつ迅速に完了するためには、無人化施工の施工効率を改善することが必要である。

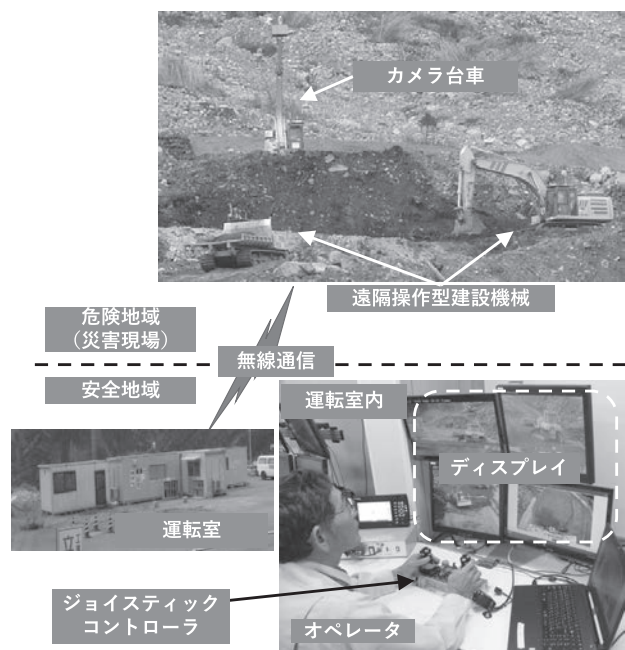


図-1 無人化施工概要

施工効率改善のための研究開発を推進するためには、無人化施工における施工効率低下原因を明確にし、その原因に対処するための研究開発にリソースを注力することが重要であると考えられる。しかしながら、施工効率低下の原因を発表論文数やオペレータへのヒアリングにて把握した例はあるが⁸⁾、低下原因を定量的に検証した研究はこれまで行われていない。

そこで本研究では、無人化施工時の施工効率低下原因を把握することを目的として、実際の遠隔操作建設機械を用いた実機実験による検討を行った。

2. 実験概要

遠隔操作が搭乗操作と比べ施工効率が低い原因は、オペレータが搭乗操作時と異なる環境で操作していることにあると考えられる。

現在一般的な無人化施工における遠隔操作は図-1に示すように、運転建屋内で、遠隔操作のジョイスティックコントローラを用い、操作する建設機械に搭載されたカメラ(以下車載カメラ)および作業状況全体を見れる位置に設置したカメラ(以下外部カメラ)などの複数の映像をディスプレイにて視覚し操作している。したがって、搭乗操作時との相違点は大きく分けて下記の3点であると考えられる。

1) 周辺状況把握のための視覚情報の相違

搭乗操作時：建設機械運転席からの直接目視にて周辺状況を把握する

遠隔操作時：車載カメラ映像および外部カメラ映像をモニタにて周辺状況を把握する

2) 操作インターフェース(以下操作IF)の相違

搭乗操作時：建設機械運転席に設置されている操作レバーにて操作する

遠隔操作時：遠隔操作用ジョイスティックコントローラ(以下JS)にて操作する

3) 体感情報の相違

搭乗操作時：機体の傾き、振動、エンジン音などを体感できる

遠隔操作時：上記情報を得ることができない


これまでの先行研究では^{1), 7), 9)~11)}、様々な施工効率低下要因が挙げられている。代表的なものを例示し、上記1)~3)に分類すると表-1のようになる。

本実験では、搭乗操作環境から遠隔操作環境へ向け、上記の相違点の一つずつ変化させていき、各条件で同様のタスクを行いその完遂時間を比較することで、どの相違点が施工効率低下に最も寄与しているかを明らかにすることを試みた。

表-1 先行研究にて挙げられた施工効率低下要因例

先行研究にて挙げられた要因例	本研究の分類
カメラ映像の遅延	1)
カメラ映像の解像度不足	
カメラ映像の奥行き感不足	
カメラ映像の画角不足	2)
操作レバーが短い	
操作レバーの反応が異なる	3)
音や振動などのフィードバックが異なる	

表-2 油圧ショベル仕様

外観	
型式	HITACHI ZX120
運転質量	12,000 kg
バケット容量	0.5 m ³

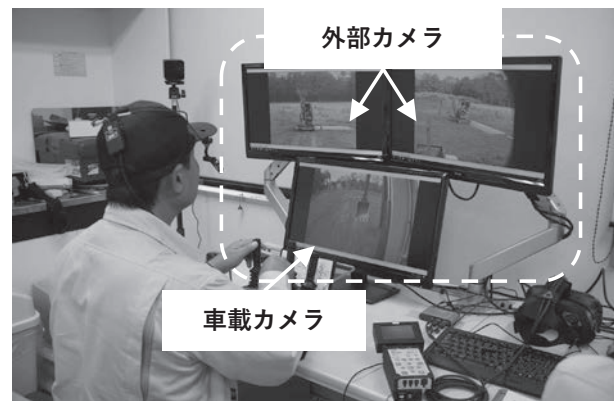


図-2 遠隔操作実験環境

実験は土木研究所が保有する搭乗操作も可能な遠隔操作型油圧ショベル(表-2)を用い、目標となる遠隔操作環境は、図-2に示す一般的な無人化施工と同様なものとした。

搭乗操作から図-2に示す遠隔操作へ操作環境を変化させていく場合、施工効率への影響要因を明確にするためには各変化を最小限にする(例えば、操作IFの変化のみにする)ことが重要である。そのため本実験では、参考文献12)にて開発したHMDと、参考文献13)にて開発した運転席型遠隔コントローラを活用し、各変化を最小限にするよう工夫した。HMDは、装着することで図-2の3つのディスプレイを同等の大きさ、位置に見えるように設定している(図-3)。また、運転席型遠隔コ

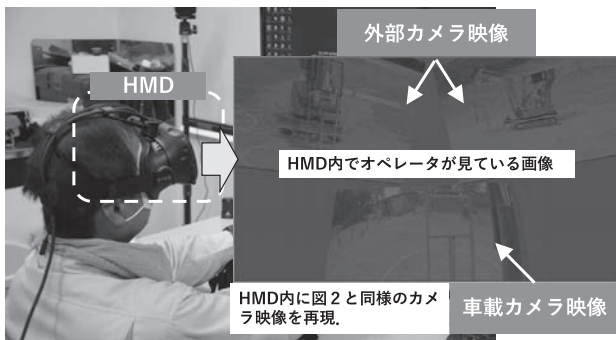


図-3 HMD システム



図-4 運転席型遠隔コントローラ

表-3 比較実験を行った操作環境の条件

実験条件	① 搭乗	② 搭乗+HMD	③ 操作室+HMD +運転席型	④ 操作室+ディスプレイ +運転席型	⑤ 操作室+ディスプレイ +JS
操作IF	運転席レバー	運転席レバー	運転席レバー	運転席レバー	JS
視覚情報	運転席から直接目視	カメラ映像 (HMD)	カメラ映像 (HMD)	カメラ映像 (ディスプレイ)	カメラ映像 (ディスプレイ)
体感情報	有	有	無	無	無

↑ ↑ ↑ ↑ ↑

視覚情報の相違

体感情報の相違

画像表示の相違
(HMD or ディスプレイ)

操作IFの相違

ントローラは、表-2 に示した油圧ショベルの運転席および操作レバーと同一のもので構成され、それらを用いて遠隔操作ができるようになっている(図-4)。表-3 に比較実験を行った操作環境の条件を示す。実験条件①・②間では視覚情報のみ、②・③間では体感情報のみ、③・④間では画像情報のみ、④・⑤間では操作IFのみが異なっており、HMDと運転席型遠隔コントローラを活用することで、前述の1)~3)の相違に加え、画像表示の相違の実験条件変化をつくり出すことができた。また、HMDと運転席型遠隔コントローラ以外の実験に使用した機器を表-4 に示す。現在一般的に無人化施工にて使用されている機器は、表-4 に示す機器と技術レベルはほぼ同等であるため、本実験にて現在の無人化施工効率低下原因を把握可能である。なお、HMDはオペレータによっては後述のように測定困難となる場合があるため、実験実施は慎重に行った。

実験を行ったオペレータを表-5 に示す。本研究では、今後無人化施工を広く普及するために、無人化施工の経

験のないオペレータが初めて無人化施工を実施した場合の施工効率低下原因を把握することを目的とし、オペ

表-4 実験機器

名称	型式
車載カメラ	AXIS Q1615-MKII
外部カメラ (2台)	AXIS Q6155-E
無線LAN アクセスポイント	icom SE-900
ディスプレイ (3台)	iiyama X2382HS
JS	日立建機純正 特定小電力無線

表-5 オペレータ

	年齢	経験年数
オペレータ A	49	24
オペレータ B	64	30
オペレータ C	65	20
オペレータ D	64	44

表-6 実験結果 (サイクルタイム平均 (秒))

	実験条件①	実験条件②	実験条件③	実験条件④	実験条件⑤
オペレータ A	166	237	253	236	274
オペレータ B	161	—	310	328	497
オペレータ C	203	270	267	279	331
オペレータ D	184	358	355	336	453

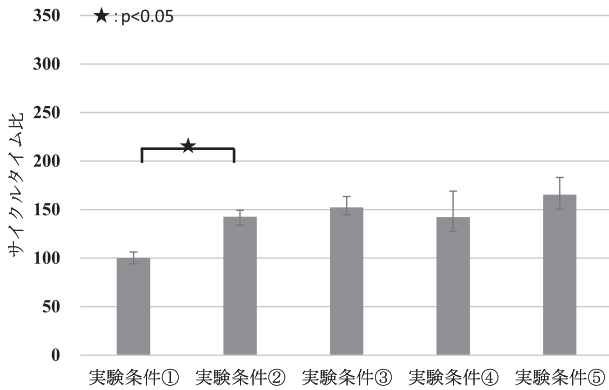


図-5 実験結果 (オペレータ A)

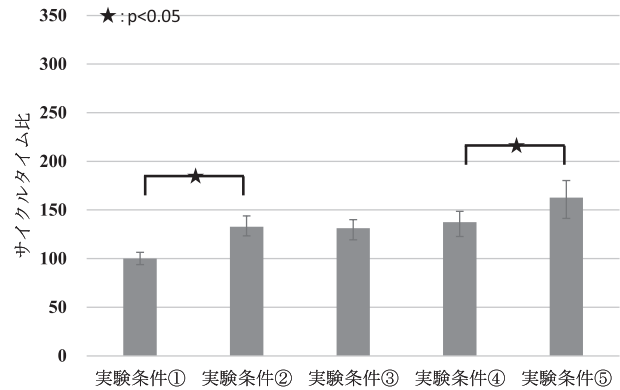


図-7 実験結果 (オペレータ C)

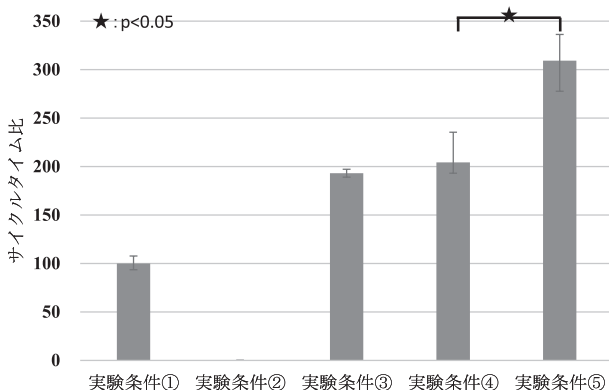


図-6 実験結果 (オペレータ B)

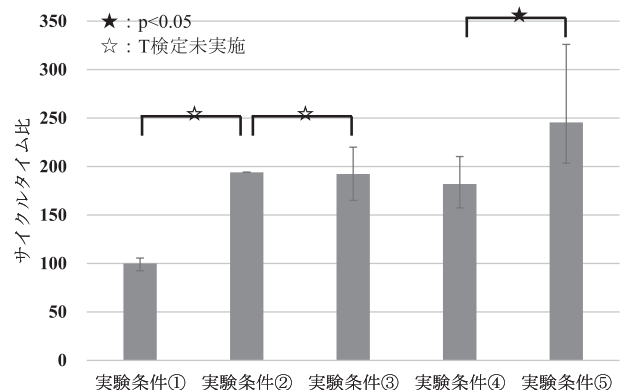


図-8 実験結果 (オペレータ D)

レータは日常的に油圧ショベルの運転を行っているが無
人化施工の経験はない4名を選定した。

また、搭乗操作、JS、運転席型コントローラのレバー
操作パターンは、すべてのオペレータが日常的に操作し
ているパターン(通称日立パターン)とした。

各条件にて実施するタスクは、茂木らが参考文献14)
にて提案したモデルタスクⅡ(油圧ショベルによる走
行、対象物把持、対象物移動、対象物設置、を行う一連
のタスク)とした。オペレータは各条件において本モデ
ルタスクを練習2回、本番5回の計7回行い、本番のタ
スク完遂時間(以下サイクルタイム)を計測した。

3. 実験結果

各実験条件における5回のサイクルタイム平均を表-6
に示す。サイクルタイムはオペレータによって差がある
ため、各データを実験条件①(搭乗操作)5回のサイクル

タイム平均を100とした値(以下サイクルタイム比(%))
で表したものを図-5～8に示す。ここで、オペレータ
Bの条件②では、HMD装着に強い違和感を覚えたため
データは取得できなかった。また、オペレータDの条
件②では、同様の理由で実験回数が1回しか実施できな
かったため、1回のデータのみで表している。また実験
条件の相違によるサイクルタイム比の差が有意であるか
サイクルタイム5回分のデータを用いてt検定を行い、
有意確率pが0.05より小さい場合は有意差があるとし、
グラフに★印を追記した。ただしオペレータDの条件
①②間、および②③間は、上述の通り条件②のデータが
1つしかないため、t検定を行っておらず、グラフに☆
印を追記している。図-5～8によると実験条件⑤のサ
イクルタイム比の平均は220.6であり、実験条件①(搭
乗操作)に対する施工効率は約45%となっている。これ
は先行研究7)の結果と一致している。

さらに実験条件間のサイクルタイム比の差を表-7に

表-7 サイクルタイム比の差 (%)

実験条件	①→②	②→③	③→④	④→⑤
相違点	視覚情報の相違	体感情報の相違	画像表示の相違	操作 IF の相違
オペレータ A	42.6 ★	9.7	-10.1	23.1
オペレータ B	-	-	11.2	104.8 ★
オペレータ C	32.8 ★	-1.5	6.2	25.3 ★
オペレータ D	94.1 ☆	-1.7 ☆	-10.3	63.5 ★

示す。数値が正の場合はサイクルタイムが増加している、すなわち施工効率が低下していることを表しており、逆に数値が負の場合は施工効率が向上していることを表している。またグラフと同様に有意差がある環境間には★印をつけている。

4. 施工効率低下原因の検討

表-7より、各操作環境の相違が本実験条件において施工効率低下にどのように影響しているか検討を行った。

1) 視覚情報の相違(実験条件①→②)

表-7によると、データが取得できた3名中t検定を実施できた2名のオペレータにおいて、視覚情報の相違によるサイクルタイム比の変化に有意差がありその値は増加している(約33～43%)。また残り1名のデータにおいても、サイクルタイム比の差は大きく増加していることがわかる(約94%)。このことから視覚情報の相違は施工効率低下の要因であると考えられる。

2) 体感情報の相違(実験条件②→③)

表-7によると、データが取得できたオペレータ3名中2名では体感情報の相違によるサイクルタイム比の差に有意差があるとは言えない。残り1人においても、そのサイクルタイム比は減少、すなわち施工効率は改善しており、かつその差は非常に小さいことがわかる(約2%)。このことから体感情報の相違は施工効率低下の大きな要因ではないと考えられる。

3) 画像表示の相違(実験条件③→④)

表-7によると、すべてのオペレータにおいて画像表示の相違によるサイクルタイム比の差に有意差があるとは言えない。このことから画像表示の相違は施工効率低下の大きな要因ではないと考えられる。

4) 操作 IF の相違(実験条件④→⑤)

表-7によると、オペレータ4名中1名では操作 IF の相違によるサイクルタイム比の差に有意差があるとは言えないが、他すべてのオペレータにおいて、操作 IF の相違によるサイクルタイム比の変化に有意差がありその値は増加をしている(約25～105%)。この

ことから操作 IF の相違はオペレータによっては施工効率低下の大きな要因であると考えられる。

上記1)～4)の検討により、無人化施工による施工効率低下の大きな要因は、視覚情報の相違と操作 IF の相違であると言える。

次にどちらの方がより影響が大きいか検討する。表-7によると、視覚情報の相違と操作 IF の相違の両方のデータが取得できた3名のオペレータにおいて、視覚情報の相違によるサイクルタイム比の差の方が操作 IF の相違によるものより若干大きい。従って、視覚情報相違の影響の方が大きいと考えられる。

5. おわりに

無人化施工における施工効率低下要因について検討するため、搭乗操作環境から遠隔操作環境へ向けて、相違点を一つずつ変化させていき、各条件で同様のタスクを行いその完遂時間を比較することで、どの相違点が施工効率低下に最も寄与しているかを明らかにすることを試みた。この実験結果から、以下の点が明らかとなり、無人化施工施工効率低下要因の把握に一つの解答を得ることができた。

- (1)無人化施工時の施工効率低下の大きな要因は「周辺状況把握のための視覚情報の相違」「操作 IF の相違」の2つである。
- (2)「周辺状況把握のための視覚情報の相違」「操作 IF の相違」では前者の方が施工効率への影響が若干大きいと考えられる。
- (3)「体感情報の相違」「画像表示の相違」は施工効率低下の大きな要因ではない。

上記(1)～(3)の結果は、モデルタスクのような油圧ショベルによる掘削作業のみにおけるものであり、他の作業、例えば不整地での走行や、ブレーカによる破碎作業などの施工においては、機体の傾きや音、振動などの体感情報が重要となる可能性がある。これについては今後さらなる様々な施工条件での検討を行いたい。

また今回の実験では、表-3に示す実験条件①～⑤の実施順番はすべてのオペレータで同一であった。順番を

変化させることによる影響も今後検討を行いたい。

無人化施工は災害に対応するのみではなく、通常の施工現場でも活用することで、オペレータの働き方改革や昼夜作業による生産性向上にも資する技術として期待される。そのためには施工効率の改善は必須であり、今後さらなる研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 古屋弘, 栗生暢雄, 清水千春: 3D画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」, 大林組技術研究所報, No.76, pp. 1-10, 2012.
- 2) 藤野健一: 無人化施工の現状と展望 - 技術開発状況と今後の展開について, 建設機械, Vol.39, No.3, pp. 1-6, 2003.
- 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, No.349, pp. 17-22, 2007.
- 4) 建設無人化施工協会技術委員会: 雲仙普賢岳火山砂防事業における無人化施工の最新技術, 建設の施工企画, No.740, pp. 48-52, 2011.
- 5) 植木陸央, 猪原幸司, 北原成郎: 「無人化施工」による災害復旧と今後の取り組みについて, 建設マネジメント技術, No.421, pp. 45-53, 2013.
- 6) 新田恭士: 災害復旧に貢献する無人化施工技術, 土木技術, Vol.67, No.4, pp. 16-23, 2012.
- 7) 茂木正晴, 藤野健一, 油田信一: 無人化施工におけるヒューマンインターフェースの作業効率評価, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.6, pp. 426-429, 2015.
- 8) 山口崇, 吉田正, 石松豊: 遠隔操作におけるマンマシンインターフェースに関する実態調査, 土木学会第59回年次学術講演会概要集, Vol. 59, pp. 373-374, 2004.
- 9) 伊藤禎宣, 坂野雄一, 藤野健一, 安藤広志: 無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について, 土木学会論文集F3, Vol. 73, No. 1, pp. 15-24, 2017.
- 10) 伊藤卓正, 辻敏夫, 栗田雄一, 佐伯誠司, 山崎洋一郎: 座席振動フィードバックを用いた油圧ショベル遠隔操作システム, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集2018, 2A2-B03, 2018.
- 11) 植弘隆, 松井宗廣, 溝口裕也, 五十嵐勇気, 田村圭司, 前田昭浩, 水田貴夫, 松尾陽一: 砂防工事における無人化施工の実態と課題について, 平成23年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 482-483, 2011.
- 12) 橋本毅, 山内元貴, 新田恭士: 無人化施工の迅速展開に向けた頭部装着型ディスプレイの活用について, 土木技術資料, Vol.61, No.12, pp. 24-27, 2019.
- 13) 茂木正晴, 西山章彦, 橋本毅, 藤野健一, 油田信一: 油圧ショベルの遠隔操作における視覚及び操作系インターフェースの違いによる作業効率の向上について, 第16回建設ロボットシンポジウム論文集(CD-ROM), O6-4, 2016.
- 14) 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, Vol.66, No.8, pp. 71-79, 2014.

(2021.9.10 受付, 2022.2.27 採用決定)

STUDY ON CAUSES OF DECREASED CONSTRUCTION EFFICIENCY IN UNMANNED CONSTRUCTION SYSTEM

Takeshi HASHIMOTO¹, Genki YAMAUCHI²,
Mitsuru YAMADA², and Shinichi YUTA³

¹ Senior Researcher, Advanced Technology Research Team, Public Works Research Institute

² Researcher, Advanced Technology Research Team, Public Works Research Institute

³ Guest Professor, SIT Research Laboratories, Shibaura Institute of Technology

In recent years, many disasters have occurred in Japan. Restoration work performed after these disasters may be executed in extremely dangerous places where there is a risk of a secondary disaster. Therefore, “unmanned construction”, in which the operator operates from a safe area away from the dangerous area using a construction machine that can be operated remotely, has been developed as a unique method in Japan. It is said that unmanned construction is generally low efficiency construction so an improvement of efficiency has been needed.

In order to efficiently promote the improvement of construction efficiency, it is important to clarify the cause of the decrease in construction efficiency in unmanned construction and to focus resources on research and development to deal with the cause.

So, in this study, Therefore, in this study, in order to understand the cause of the decrease in construction efficiency during unmanned construction, we conducted an examination by an actual machine experiment using an actual remote-controlled construction machine.