



ネットワーク型次世代無人化施工システムの開発

一般財団法人先端建設技術センター，九州地方整備局，九州地方整備局雲仙復興事務所，
近畿地方整備局，近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所，(株)熊谷組，西松建設(株)

業務内容の概要

平成 23 年 3 月 11 日以降，大規模災害における超長距離（30 km を超える）無人化施工技術に注目が集まっている。大規模火山噴火では，危険区域が火口から 10 km を超える広範囲に及ぶ場合がある。これまで無人化施工は，そのほとんどが 1 km 未満の範囲からの遠隔操作であり，10 km を超える長距離からの遠隔操作については，施工実績もなく適用性についての技術的検証も事例がなかった。我々開発グループは，広範囲に立入制限された大規模災害を想定し，IP（インターネットプロトコル）をベースとして，光ケーブル網等の長距離通信手段を活用することで 30 キロメートル以上の遠隔地からの超長距離無人化施工や多数重機の同時遠隔操作技術を実用化した。

管内に大規模火山を有する九州地方整備局の主導のもと，雲仙復興事務所管内において長崎河川国道事務所の協力を得ながら各種要素技術について実地検証を行った。検証では，長距離通信手段として光ケーブル，長距離無線 LAN，衛星通信を適用するとともに，近距離の現場内通信手段として特定小電力無線，無線 LAN，公共ブロードバンド（BB）無線を適用し，データの伝送能力，伝送の遅延や映像劣化が操作性に与える影響，オペレータの技量差や操作限界について検証を実施した。

検証の結果，雲仙復興事務所管内の大型建設機械を 30 km 以上離れた操作室から遠隔操作が可能であることを確認するとともに，超遠隔地からの無人化施工の工事への適用性についての課題を明らかにした。この超長距離遠隔操作実験の後，平成 23 年 9 月に紀伊半島を襲った台風 12 号災害等で発生した天然ダムにこの技術を用いて，初めて本格的な無人化施工を実施した。

光ファイバー統合ネットワーク無人化施工システムを使用した LAN 対応の無人化施工を被災地の奈良県野迫川村の北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事に導入し，無事竣工した。深層崩壊で発生した滑落崖の頭部の法面整形工で土砂を 4 台の遠隔操作式建設機械で安全に撤去した。災害現場付近は二次被害が想定され，操作室を設ける場所がなかったことから，見通しのない 1 km 離れた安全な場所に

操作室を設け，光ファイバーを敷設し施工が可能であることが実証できた。

これらの技術の確立により，今後発生が懸念される大規模災害への対応において，これまでの性能を大幅に上回るスケールでの遠隔操作技術の適用を可能とし，従来困難であった多数の画像を駆使した高度な無人化施工を可能とした。

業務内容

1. 超長距離遠隔操作実証実験

(1) 実験の概要

大規模火山噴火では，危険区域が火口から 10 km を超える広範囲に及ぶ場合がある。これまで無人化施工は，そのほとんどが 1 km 未満の範囲からの遠隔操作であり，10 km を超える長距離からの遠隔操作については，施工実績もなく適用性についての技術的検証も事例がなかった。我々(財)先端建設技術センター，(株)熊谷組，西松建設(株)は，広範囲に立入制限された大規模災害を想定し，国土交通省で管理する光ケーブル網等の長距離通信手段を活用することで実現する数キロ～数十キロメートルからの超長距離無人化施工技術について実地検証を行った。この検証では，長距離通信手段として光ケーブル，長距離無線 LAN，衛星通信を適用し，近距離の現場内通信手段として特定小電力無線，無線 LAN，公共ブロードバンド（BB）無線を適用し，データの伝送能力に加えて，伝送遅延や映像劣化が操作性に与える影響，オペレータの技量差や操作限界について検証を実施し，結果的に雲仙復興事務所管内の大型建設機械を 30 km 以上離れた操作室（長崎河川国道事務所）から遠隔操作が可能であることを確認した。

(2) 実証実験の目的

実証実験は，広範囲に立入が制限された場合の緊急対策工事を想定し，遠隔地からの重機遠隔操作が迅速且つ確実に実施できるか検証することを第一義的な目的とした。同時に，通信手段等の要素技術について，災害時を想定した実工事への適用性を見極めるために各種条件を設定し検証を行った。

検証内容のポイントは大きく分けて、①システムの通信能力（伝送速度、伝送遅延、映像品質、通信可能範囲など）の検証、②伝送品質の低下や遅延等の通信状況がオペレータの操作や施工性に及ぼす影響の検証、の二点から成る。特に本実験では、これまで無人化施工への適用実績のない光ファイバ網と無線 LAN を通信システムの基軸に設定し、衛星通信や長距離無線 LAN 等を代替通信手段として検証した。その理由は、これまでの無人化施工技術の弱点であった「混信」と「伝送遅延」の問題解消に期待したからである。IP を適用すれば、チャンネル数の制約を受けないため、安全な所から多数の重機を確実に遠隔操作できる。その一方、これまでのこの方式が、伝送遅延や画質劣化がオペレータの操作や施工性に及ぼす影響についても検証した。本実験では、データ圧縮能力と伝送量変動への追従性能に優れた高性能カメラエンコーダーを使用し、無人化施工における超長距離遠隔操作技術について検証を実施した。以下に、この実験で検証した項目の概略を示す。

<p>実地検証の内容</p> <p>I. 各種通信手段の適用性検証（伝送能力、遅延など）</p> <p>①長距離通信能力（操作室～現場内中継局）</p> <p>②現場内通信能力（現場内中継局～重機）</p> <p>II. 操作環境および操作技能の検証（操作限界など）</p> <p>③遠隔操作のための操作環境（遅延、画質劣化の影響）</p> <p>④オペレータの技量（操作限界）</p> <p>III. その他の検証</p> <p>⑤建設機械の機能維持（給油、メンテナンス）</p>

(3) 実験期間

平成 23 年 3 月 19 日（土）～ 4 月 14 日（木）

(4) 実験場所（図一 1）

- ・ 施工フィールド：長崎県島原市北上木場町
- ・ 操作室（1）：国土交通省長崎河川国道事務所

- ・ 操作室（2）：国土交通省雲仙復興事務所

(5) 実験結果と課題

本実験の実施により 30 km を超える長距離の遠隔操作であっても、一定の通信品質（画像伝送能力、伝送遅延や通信品質）を確保すれば、従前の無人化施工の操作室と同等の操作環境を構築することが可能であることが検証できた。表一 1 に実験の検証結果をまとめて示す。

これにより必要な技能を有するオペレータの確保や、LAN 等の通信ネットワークの構築維持、重機への給油や修理等のメンテナンス手段の確保、作業工種等の適用性拡大など、円滑で確実な無人化施工を緊急復旧工事で実現するための課題が明確になった。

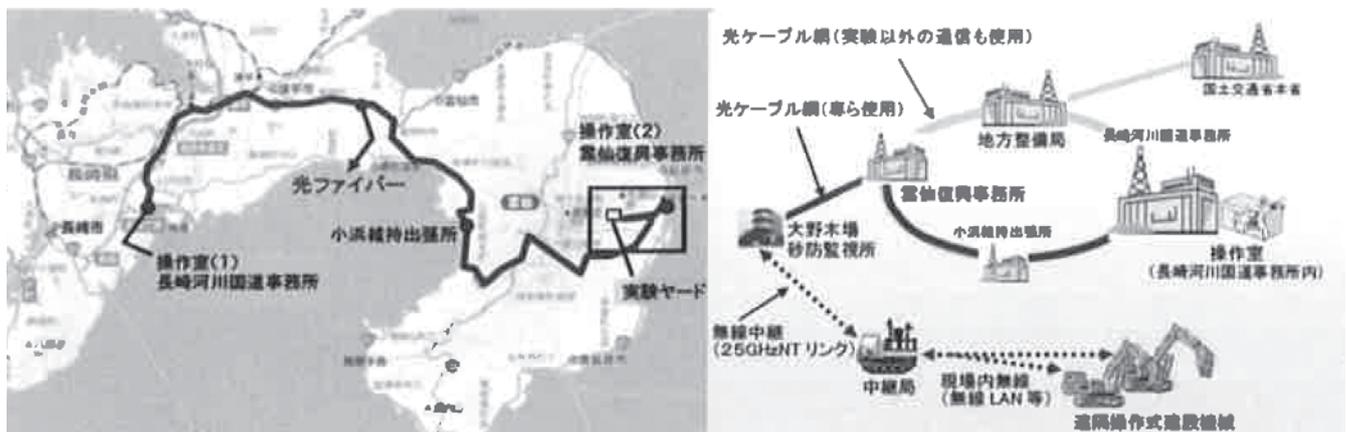
2. 北股地区河道閉塞緊急対策工事無人化施工

(1) 緊急対策工事への導入

平成 23 年 9 月に大きな被害をもたらした台風 12 号災害で奈良県に発生した天然ダムにおいて、昨年、初めて本格的な無人化施工を実施した。ここで前述した実験結果を基に光ファイバ統合ネットワーク無人化施工システムを使用した LAN 対応の無人化施工を、被災地の奈良県野迫川村の北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事法面整形工の一部（5100 m³）に導入した。深層崩壊で発生した滑落崖頭部の安定化の為、バックホウを中心とした 4 台の遠隔操作式建設機械を 1 km 離れた遠隔操作室から操作して安全に排土を行っている。実際の工事へ本格的に導入できたことにより今後の大規模災害への対応に遠隔操作技術が大きな役割を果たす可能性を示した。

(2) 無人化施工導入の経緯

被災した北股地区は奈良県南西部の和歌山県境付近に位置し、崩壊は北股川左岸支沢北側斜面で発生した。崩壊規模は標高差約 200 m、最大幅約 200 m、面積約 8.25 ha、崩壊土量約 120 万 m³ である。崩壊土砂は尾根部より南西側方向へ崩壊し、支沢を閉塞させ、いわゆる天然ダムを形成し、更に土砂は支沢で西側へ屈曲し下流の北股集落の一部



図一 1 超長距離遠隔操作実証実験 概要図

表一 超長距離遠隔操作実証実験 検証結果

検証事項		検証結果
1	ネットワークの伝送状況 (操作データ伝送遅延 100 msec 以下)	・各通信ネットワークにおいて伝送遅延 100 msec 以下となった。(衛星通信方式を除く)
2	操作性の確認	・操作性に差異はあるが、各通信ネットワークにおいて超長距離の遠隔操作が可能であることが確認できた。 ・長距離無線 LAN, 及び公共ブロードバンドは機器設定により伝送量を調整することで操作性に改善が期待できる。 ・衛星通信は遅延が大きいため通常操作には不向きだが、緊急時の遠隔操作には有効な手段となり得る。
3	無線到達距離	各通信方式の特徴を生かした遠隔操作の可能性が確認できた。
4	無線の回り込み評価 (指向性確認)	①無線 LAN (IEEE802.11j) : 伝送量は大きいですが、回り込みに劣る ②公共ブロードバンド : 伝送量は小さいが、到達距離が長く回り込みに優れる
5	画像伝送条件による 操作限界	画像の遅延 ・遅延時間 1.5 秒 (通常 + 1 秒) が限界 画像の劣化 ・伝送レート 384 kbps, フレーム数 15 fps が限界 (通常 : 1.5 Mbps/30 fps) ※どちらの値も作業内容により異なる。 ※連続数時間の操作が可能かについては検証していない。
6	画像伝送能力	無線 LAN (IEEE802.11j) ・安定した伝送では、6 画像/チャンネル (1 画像 : 1.5 Mbps/30 fps) ・最大では 10 画像/チャンネルも可能
7	オペレータ技量能力	熟練者と非熟練者のサイクルタイムには 2 倍近い差があった。
8	遠隔操作による 給油作業の可能性	給油機械や重機の給油口等の技術開発が不可欠であるが、遠隔操作的には十分可能であることが確認できた。

に至った。本緊急対策工事は、天然ダム背後に湛水した流入水を速やかに排出し、通水機能を持たせる仮排水路の設置と崩壊した斜面にて工事用道路の敷設を行いながら散在した倒木の処理を行い、その後、崩壊地の安定化を図るため、崩壊地法肩部の緩んだ地盤を除去しながらの法面整形を行っていた。そして脆弱な土砂状地盤が分布する尾根頂部の土砂崩壊等の発生を抑制するため、尾根頂部の掘削により、地山を安定させる必要があった。しかし、頂部の数箇所は脆弱なやせ尾根状の地形のため、不安定であり、急傾斜面側への転落も懸念され、地山内での潜在的な流れ盤すべりによる崩壊の危険もあることから、不安定な地質により建設機械作業による 2 次災害の危険性を考えて無人化施工機械による法面整形工を実施することになった。また当現場付近は起伏が大きく湾曲しており直視出来ないためカメラ画像遠隔操作型無人化施工を採用した。

(3) 無人化施工の詳細 (表一 2, 写真一 1, 図一 2)

重機の操作室は二次災害防止の観点や、同時発注予定のあった砂防堰堤施工の関係もあり被害の無かった旧北股小学校に設置した。しかしこれにより無人化施工エリアの頂部無線基地局と操作室間は 1 km 程度で無線では送信が難しくなったことから、この間は既設のモノレールの敷設しあった箇所に沿わず形で光ファイバケーブルを敷設し操

作データ、画像データ、情報化施工データ等の全てを LAN 化して送信する統合ネットワーク無人化施工システムを導入した。また頂部無線基地局から移動している重機間は 5 GHz 帯無線 LAN システムを使用してデータを伝送した。画像は頂部に固定カメラ 3 台、ハイビジョン 1 台と車載カメラが各重機に 2 ~ 3 台使用されている。また法面監視用に防護土堤にハイビジョンカメラを設置して無線基地局まで 25 GHz 小電力無線機で画像を伝送した。これら

表一 2 北股地区工事概要

工事名	北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事
工事場所	奈良県吉野郡野迫川村北股地先
発注者	国土交通省近畿地方整備局
施工者	(株)熊谷組 関西支店
工期	平成 23 年 9 月 30 日 ~ 平成 24 年 8 月 31 日
工事内容	<ul style="list-style-type: none"> ・法面整形工 (有人機械 : 6,700 m³ 無人機械 : 5,100 m³) ・倒木処理 30,000 本 ・工事用道路 3,000 m ・仮排水路工① (径 1,100 × 3 条) 内面平滑 188 m ・仮排水路工② (径 600 × 1 条) 内面平滑 205 m ・池処理工 : 6,520 m³ ・防護土堤工 : 1 式



写真一 北股地区無人化施工状況



図一 無人化機器設備概要

の無線の確実な配信のために基地局と反対側に無線中継局を設置している。

無人化施工機械は、除根、掘削作業 5000 m³ を油圧ショベル 0.45 m³, 0.8 m³, ブルドーザ 16 t, キャリアダンプ 10 t の 4 台を使用して施工した。

(4) 情報化施工システムの活用

無人化施工での施工中は人が測量等で作業エリアに立入

ることは危険である。そこで北股無人化施工においても測量レスで掘削・敷均施工できる衛星測位システム GNSS を活用した油圧ショベルガイダンスシステムやブルドーザ排土板自動制御システムを導入した (写真一 2)。これにはガイダンスシステムや排土板自動制御システムのコントローラを直接 LAN 変換するネットワーク伝送装置 (CAN-LAN 変換) を開発し、ネットワークにつなげるようにすることで操作を全て操作室で行うことが初めて可能になった。

3. 開発による効果

(1) 技術的效果

- ・国土交通省等既設の光ファイバ網を利用して、はじめて 30 km 以上の無人化施工が可能であることを実証することができた。
- ・超長距離での遠隔操作での技術的課題が明確になり、今後無人化施工での迅速な対応を促進することができた。
- ・実証実験の成果を実際の無人化施工現場で生かし、仮設の光ファイバでも対応できることを示した。
- ・情報化施工システムも同時に利用して安全に施工できることを示した。
- ・はじめて天然ダム上での本格的無人化施工を実施し、無人化施工の可能性を広げることが示せた。

(2) 経済的效果

全体の IP 化により無線機は複数使用しなくて済むことになり無人化施工のコストは低減している。

システムの立ち上げ時間が無線 LAN 等により 20% 程度短縮されている。

(3) 波及効果

これまで無人化施工で無線 LAN による施工事例等が発表されているが、既設の光ファイバ 1 本に集約した遠隔操作を実現している例はなく、併せて高度な情報化施工を



上段: 油圧ショベルガイダンスシステム, 下段: ブルドーザ排土板自動制御システム
写真一 2 情報化施工システム

有人運転と同様に遠隔操作で実現した事例はない。

このシステムの確立により操作室の配置等の制約が減り、システムの標準化がし易くなる等、今後の火山災害など大規模災害への対応の道筋を示すことが出来た。無人化施工の可能性を拡大する貴重な事例となる。

本技術は、第5回ロボット大賞 ロボットビジネス／産業実装部門（2012年10月）および第13回建設ロボットシンポジウム／優秀論文賞（2012年9月）を受賞している。

参考資料

1. 学会、技術誌等への発表論文

- ①大規模災害を想定した超長距離からの遠隔操作実証実験（九州地方整備局）

- ②超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察（建設ロボットシンポジウム'12.9）
 ③雲仙普賢岳超遠隔操作実験における伝送状況確認試験等について（ク）
 ④災害応急・復旧工事に対応した無人化施工による超長距離遠隔操作実験でのオペレータの作業性に関する研究（ク）

一般財団法人先端建設技術センター、九州地方整備局、九州地方整備局雲仙復興事務所、近畿地方整備局、近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所、(株)熊谷組、西松建設(株)

お断り

このJCMA報告は、貢献賞を受賞した原文とは一部異なる表現をしてあります。

橋梁架設工事の積算 ——平成24年度版——

■改訂内容

1. 鋼橋編
 - ・横取り設備質量算定式の見直し
 - ・製作工務単価の変更に伴う架設用の製作部材単価改訂
 - ・積算例題の見直し
2. PC橋編
 - ・二組桁横取り装置設備を追加
 - ・プレキャストセグメント主桁組立工の適用範囲拡大
 - ・架設支保工工法の供用日数の補正方法の説明図追加 ほか

■ B5判／本編約 1,100 頁（カラー写真入り）
別冊約 120 頁 セット

■定価

非会員：8,400 円（本体 8,000 円）
会 員：7,140 円（本体 6,800 円）

※別冊のみの販売はいたしません。

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも

沖縄県以外 600 円
沖縄県 450 円（但し県内に限る）

■発刊 平成24年5月

一般社団法人 日本建設機械施工協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>