

7. 第4世代無人化施工の緊急対策工事への適用

超長距離遠隔操作実証実験から北股斜面崩壊災害復旧工事適用へ

(株)熊谷組土木事業本部機材部 北原 成郎

(株)熊谷組土木事業本部機材部 ○ 坂西 孝仁

1. はじめに

これまで様々な緊急災害現場に対応していくため、無人化施工システムの新たな技術開発を行いステップアップをしてきた。無人化施工の適用範囲を広げる第4世代ネットワーク型無人化施工技術は国土交通省で実施された「超長距離からの遠隔操作実証実験」結果を参考に、北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事、赤松谷川11号床固工工事で使用し現場導入しながら開発を進めている。その開発と課題へのアプローチを紹介し、今後の課題と展望について述べる。

2. 第4世代無人化施工とは

2.1 無人化施工の変遷

無人化施工は、人間が立ち入ることができない危険な作業現場において、遠隔操作が可能な建設機械を使用し、作業を行うことである。

当社は雲仙普賢岳の除石工事、砂防えん堤工事を皮切りに有珠山復旧工事、荒砥沢治山工事、南大隅町災害復旧工事、赤松谷川床固工工事等の無人化施工に従事してきた。こうした中で無人化施工技術は徐々にブラッシュアップされて来た。

この発展の歴史を大きく分けて次の4世代に分類してみた。(図-1)

(1) 第1世代 建設機械へ遠隔操作の導入

80年代後半に遠隔で操作できる建設機械が登場した。特定小電力無線を使用して30m程度の範囲から操作できる水中ブルドーザや、遠隔操作式油圧ショベル等が登場した。

(2) 第2世代 長距離遠隔操作技術の確立

特定小電力無線が届かない300m以上の距離から建設機械を遠隔操作する技術が確立された。無線中継機等を使用し映像カメラを作業エリアに設置して、操作室でモニターしながら遠隔操作する現在のスタイルが確立された。

(3) 第3世代 情報化施工の導入

無人化施工では丁張りレスを目的としてGNSS等を使用した情報化施工がいち早く導入された。振動ローラの転圧回数管理、ブルドーザの排土板制御や油圧ショベルのマシンガイダンスシステ

ム等である。こうした技術は雲仙普賢岳の災害復旧工事を中心に開発され、盛土やRCCコンクリートの施工精度向上とオペレータの負担の軽減や作業効率の向上に貢献した。

(4) 第4世代 ネットワーク技術の導入

これまでの無人化施工で使用される操作系、映像系、情報系(情報化施工データ)データはアナログやデジタル機器が混在した状態で、それぞれ個別の無線機で伝送をしていた。ネットワーク型無人化施工ではこれを全てデジタルデータに変換してネットワーク上で伝送する。これにより光ファイバケーブル等の高速通信網にも対応できるようになり、超長距離からの遠隔操作が可能になった。また操作室設置位置の自由度が向上し、適用工事の範囲が拡大すると共に、設置の省力化と、無線混信の減少が図れる。



図-1 無人化施工技術発展の歴史

2.2 第3世代の課題

従来は操作系に関してはラジコンに使用されている特定小電力無線、映像系であればアナログ式の50GHz簡易無線、情報系は2.4GHz小電力データ無線等と別々の無線によるシステムを使用してきた。設定に時間がかかり、調整は運用しながら行っていた。こうした中で高速大量データの伝送のできる無線LANが導入され、操作系、映像系、情報系データを全てデジタルデータ化してネットワークに乗せることが試みられるようになってきた。(図

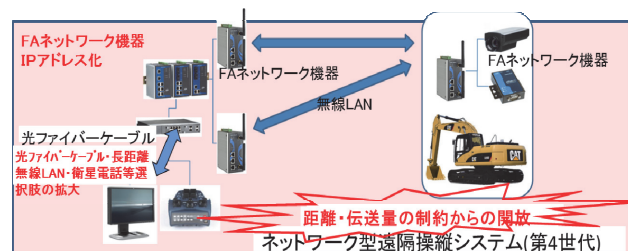


図-2 従来型とネットワーク型無人化施工の違い

3. 超長距離からの遠隔操作実証実験

「超長距離からの遠隔操作実証実験」は国土交通省が平成23年に雲仙復興事務所で実施したものである。この実験結果はその後の貴重な指針となった。その内容は以下のとおりである。(図-3)

3.1 実験概要と成果

実験は東日本大震災を機に国土交通省が火山等広範囲に立入制限された大規模災害を想定し、国土交通省専用光ファイバケーブル網等の長距離通信手段を活用し、数キロ～数十キロメートルの超長距離無人化施工技术について実証実験をしたものである。これまで無人化施工は、そのほとんどが1km程度の距離にある操作室からの遠隔操作であり、10km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も技術的検証事例がなかった。この実験は長距離通信手段として光ファイバケーブル、長距離無線LAN、衛星通信の使用、近距離の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）無線を使用した。各方式のデータ伝送能力、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、雲仙普賢岳おしが谷実験場にある建設機械を30km以上離れた操作室（長崎河川国道事務所）から光ファイバケーブル使用して無人化施工が可能であることが検証できた。

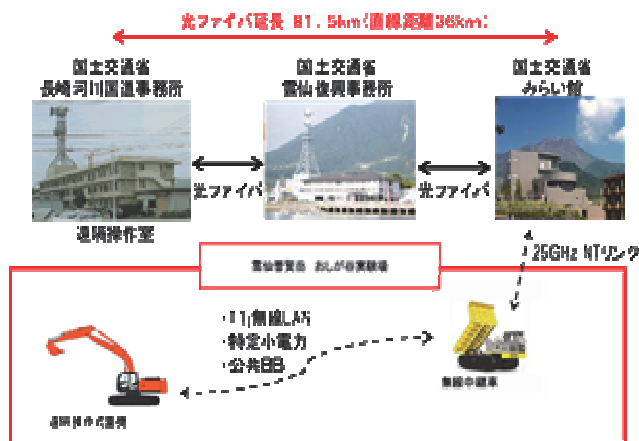


図-3 超長距離遠隔操作実験の実験概要図

3.2 実験課題

実験結果から以下の課題が浮かび上がった

(1) 回線変化に対する対応

この実験は国土交通省の高規格機器と専用光ファイバケーブル回線を使用した条件であったが、実際に公衆用一般回線や自主回線で光ファイバケーブルを使用した場合の各データへの影響がどの程度か判らない。またネットワークを構築する際の機器選定も課題であった。

(2) 多数建設機械稼働時のネットワーク状況の把握

今回の実験で同時稼働した建設機械は4m³油圧ショベル1台と45tダンプトラック1台で、他の建設機械は単独実験であり、ネットワーク上の問題は発生しなかった。しかし多数の建設機械が同時に稼働する場合どのような状態になるのか、またその時のシステム構築方法や、ネットワークの管理方法の確立は今後の課題となった。

(3) デジタルアナログ変換機の選定

操作系、映像系、情報系それぞれをネットワーク回線に載せるための変換機の選定とその設定方法の確立が必要であり、個別には対応研究はしてきたが統合した場合のネットワークの状況や無線機との相性についての課題があった。

4. 北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事



写真-1 北股地区河道閉塞緊急対策工事施工状況

昨年2月に平成23年9月の台風12号災害で発生した奈良県北股地区の天然ダム緊急対策工事において本格的な第4世代光ファイバケーブル統合ネットワーク型無人化施工システムを導入し、実験課題を検証する機会を得ることが出来た。(写真-1)

4.1 工事概要

工事名 北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事
発注者 国土交通省近畿地方整備局
住 所 奈良県吉野郡野迫川村北股地先
工 期 平成23年9月30日～平成24年8月31日
工 種 法面整形工（無人化施工）
(有人施工：6,700m³ 無人施工：5,100m³)

4.2 法面整形工の無人化施工導入経緯

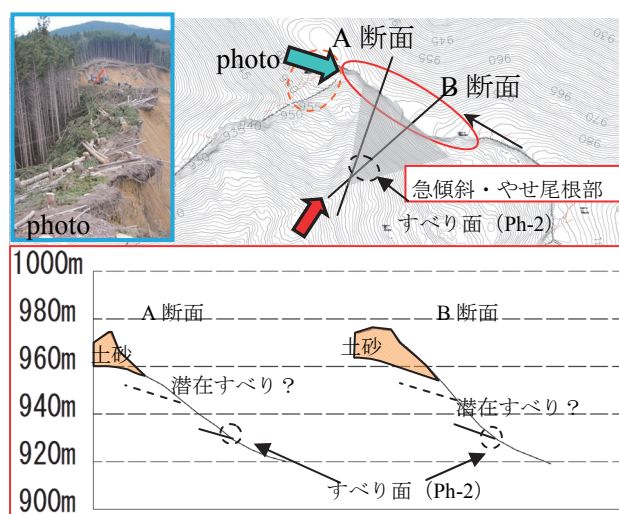


図-4 掘削部平面図および無人化施工提案箇所

本緊急対策工事を施工した北股地区は高野山裏側の奈良県南西部、和歌山県境付近に位置する。法面崩壊は北股川左岸支沢北側斜面で発生し、規模は標高差約200m、最大幅約200m、面積約8,25 ha、崩壊土量約116 万m³である。崩壊土砂は尾根部より南西側方向へ流れ支沢を閉塞させ、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に至った。

本工事は、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た。そして頭部の尾根部分は脆弱な土砂状地盤が分布しているので、更なる土砂崩壊等の発生を抑えるため、尾根頂部を掘削により山全体を安定させる必要性があった。しかし頭部の数箇所は脆弱なやせ尾根上での不安定化、および急傾斜面側への転落が懸念され、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、建設機械作業による2次災害の危険性を考慮し、今後も崩壊の影響のない場所からの遠隔操作型無人化施工システムにより法面整形工を実施することになった。(図-4)

4.3 無人化施工の詳細

(1) 機器設備構成

建設機械の操作室は二次災害防止の観点や、新設される砂防堰堤施工の関係もあり、被害影響の無かった旧北股小学校に設置した。操作室から施工場所は見通しがなく、手前の山に隠れるように左直角方向に位置しており、高低差が250m程度ある。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1km程度となり直接無線では伝送が難しい地形であった。光ファイバケーブルは既設モノレールが設置されていたので、これに沿わず形で敷設した。(図-5)



図-5 北股地区河道閉塞緊急対策工事仮設配置

また現場の無線基地局から遠隔操作建設機械間は5GHz帯無線LANシステムを使用して各データを伝送した。映像は現場に固定カメラ3台、ハイビジョン1台と車載カメラが各2～3台搭載され使用された。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25GHz小電力無線機で映像を伝送した。

(2) 使用機械

除根、掘削作業5100m³を0.45m³油圧ショベル、0.8m³油圧ショベル、16tブルドーザ、10t不整地運搬車の4台を使用して施工した。(写真-2)



写真-2 北股地区河道閉塞緊急対策工事使用建設機械

(3) 北股無人化施工の特徴

①カメラ映像遠隔操作型無人化施工システム

現場施工範囲は100m程度であるが、現場滑り面周囲で起伏が大きく湾曲しているので目視が難しく、建設機械が施工エリアに入ると周囲の地盤は滑る可能性があるので安全を考慮しカメラ映像遠隔操作型無人化施工を採用した。(写真-3)



写真-3 北股地区河道閉塞緊急対策工事操作室内

②マルチタイプ光ファイバケーブルの使用

光ファイバケーブルは伝送容量と距離(1000m以下)からマルチタイプケーブルを使用した。扱い易いので光ファイバケーブル敷設には、現場頂部に行く既設モノレールを使用できたので2日で敷設できた。(写真-4)



写真-4 光ファイバケーブル敷設状況

③LAN上に情報化施工システム(マシン・イクスシステム)

通常建設機械にあるシステムコントロールボックスを操作室に設置するために、ネットワーク伝送装置(CAN-LAN変換)を開発し、全ての操作を操作室で行うことが可能になった。(写真-5)



写真-5 ネットワーク伝送装置(CAN-LAN変換)

4.4 施工成果

(1) 仮設光ファイバケーブル敷設して使用

また伝送容量は使用台数等からL2スイッチ等は全て100Mベース機器を採用し、仮設の光ファイバケーブルでもコスト的に対応可能であることを示した。課題であった機器の選定等や管理方法について、実際の現場で対応したことにより、多くの貴重なデータやノウハウを得ることが出来た。

(2) 情報化施工システム使用

情報化施工システム機器を操作室に設置しても誤動作がなく施工できることを示した。これにより情報化施工が取り込みやすくなり、今回は法面施工の安全性が高まった。

(3) 天然ダム上での本格的無人化施工

潜在的な流れ盤すべりによる崩壊の危険もある厳しい条件での施工を実施し、天然ダム上での本格的無人化施工を光ファイバケーブル使用で可能になったことで操作室のレイアウトの自由度が向上し、他の災害復旧等へ無人化施工の可能性を広げることが示せた。

(4) 工期の短縮

使用機材全体の調整は全体のIP化により事前設定が可能でありシステムの立ち上げ時間が20%程度(2日)短縮した。

無線機は複数使用が無くなり機器コストは低減したが、ネットワーク対応人員が必要になった。

4.5 施工課題

(1) ネットワークに対する管理方法の確立

当初ネットワークトラブル時に問題箇所の切り分けが出来ず解決に時間がかかってしまった。ネットワークシステムトラブルは、

- ①ハード的に切り分けるために、ネットワーク機器類のインジケータ表示についてのまとめ。
- ②ネットワーク管理ソフトを使用した管理手法の確立。

等の対策をしておかないと把握対応が難しい。

(2) 使用機器の研究

使用機器の大半が外国製で日本語資料も無くシステム構築を手探りでしている状態なので、資料翻訳や動作テスト等が必要である。また最新技術情報、製品情報等の収集をして全体の動向をつかむ必要がある。現在の無線機の主力は5GHz帯無線LANで、外国の製造メーカでコストも高く、能力も現在の大容量映像を送るには十分な無線能力であるとはいえない。特殊な用途なので一民間企業では新規機器開発をすることが難しい分野でもあるが、官民一体となった機器開発も必要と思う。

(3) コストの低減

予算では従来と比較して機器コスト10%減と試算していたが、機器等のマッチングの不具合もあ

り変わらなかった。逆にシステム管理にかかる人件費が10%程度増えてしまった。またなかなか有能な人材がタイムリーにおらず、人材育成の必要な分野であると思われる。今後、国産民生用の汎用機器を使用したコスト削減や、トラブル時の対応も進める必要がある。

5. 赤松谷川11号床固工工事へ

現在課題と取り組みながら施工中の赤松谷川11号床固工工事について紹介する。

5.1 工事概要

工事名 赤松谷川11号床固工工事
発注者 国土交通省 九州地方整備局
住 所 長崎県南島原市深江町上大野木場地先
工 期 平成24年12月11日～平成27年3月30日
工 種 掘削工 200,247 m³
床固工 RCCコンクリート48,445 m³
無人化施工仮設 一式



写真-6 赤松谷川11号床固工 操作室と施工現場風景

5.2 工事建設機械

遠隔操作車 19台

45t重ダンプトラック3台、40tアークユレトダンプトラック(エジクタータイプ)2台(写真-7)、63tブルドーザ、16tブルドーザ、測量車、4m³油圧ショベル、1.2m³油圧ショベル2台、0.8m³油圧ショベル、清掃車、清掃吸引車、高圧洗浄車、無線中継車、カメラ車3台、11t振動ローラ



写真-7 40tアークユレトダンプトラック(エジクタータイプ)

5.3 作業フローと無線システム

コンクリート製造工場から10tダンプトラックで積換設備まで運搬し40t重ダンプに積換え打設場所へ運搬し、ブルドーザで敷均し、振動ローラで締固める。(図-6)

無線システムは操作室から赤松谷川10号床固工堰堤上にある無線基地局までは(400m)2線の光ファイバケーブルを使用し、無線基地局から建設機械までは最大400m程度あるので、無線中継車を設置しその伝送には25GHz小電力無線機を使用している。無線中継車と建設機械間は5GHz帯無線LANを使用している(図-7)

5.4 課題施工へ取り組み

北股無人化施工に対しての課題の取組については以下のとおり実施している。

(1) ネットワーク対する管理方法

稼働台数が19台に及びIPアドレスだけでも500以上に及ぶので、理解し易いアドレス体系の導入とその集中管理をしている。

各建設機械に設置されている機器のインジケータの意味の整理や、マニュアルの整備をしてトラブル時の俊敏な対応が可能になった。

ネットワーク管理にIPアドレスグループ毎に管理用パソコン用意して管理ソフトを使用してネットワーク状況を把握して全体管理が出来るようにした。これにより何処の部分で回線の負荷がかかっているのか把握ができるようになり、予めの対応が出来てトラブルの減少につながっている。

(2) 使用機器の研究

ハイビジョンカメラ等の大容量データ送信の必要箇所には11nの5GHz帯無線LANを使用している。国産汎用機が使用できる、トラブル対応も容易となった。

(3) コストの低減

一定期間ネットワーク専門家を配置してシステムの問題点、ポイントを整理した。これによりシステム常駐費用が低減できている。

6. 今後の展望

今後の展望を見据えて以下の実験を北股無人化施工で行った。

① 急斜面登坂実験

油圧ショベル等の遠隔操作施工機械を使用して傾斜15～25度登坂試験と時間、カメラ機器配置についての研究。より難しい傾斜地での無人化施工が可能になる。

② 連続土嚢構築実験

連続土嚢(長さ10m)使用した連続土嚢の作成実験。無人化施工にて施工可能か確認した。

③ 3D高画質映像比較実験

ハイビジョン映像、3Dハイビジョン映像、標準映像による作業効率比較の研究。3D等導入効果の確認により、費用対効果の検討できる。

こうした実験を今後も続け、作業の適用範囲を広げ、最適な無人化施工を追及していく。

7. おわりに

第4世代のネットワーク型無人化施工システムは超長距離遠隔操作実験から始まり北股地区災害復旧工事を経て技術の確立がなされ、今後は工期短縮、費用低減につながる標準無人化施工システムとして確立し、災害復旧工事の施工範囲も広がるだろう。紹介したように現在施工中の雲仙普賢岳赤松谷川11号床固工工事にもこのノウハウが活

かされている

こうして確立できたのも国土交通省九州地方整備局、国土交通省近畿地方整備局等多くの関係者方々をはじめとする現場関係者の努力が実を結んだ結果と思う。この場を借りてお礼を申し上げたい。今後は無人化施工等の新規工種への適用を目指して精進し、機器開発や技術提案のすそ野を広げていきたいと考えている。

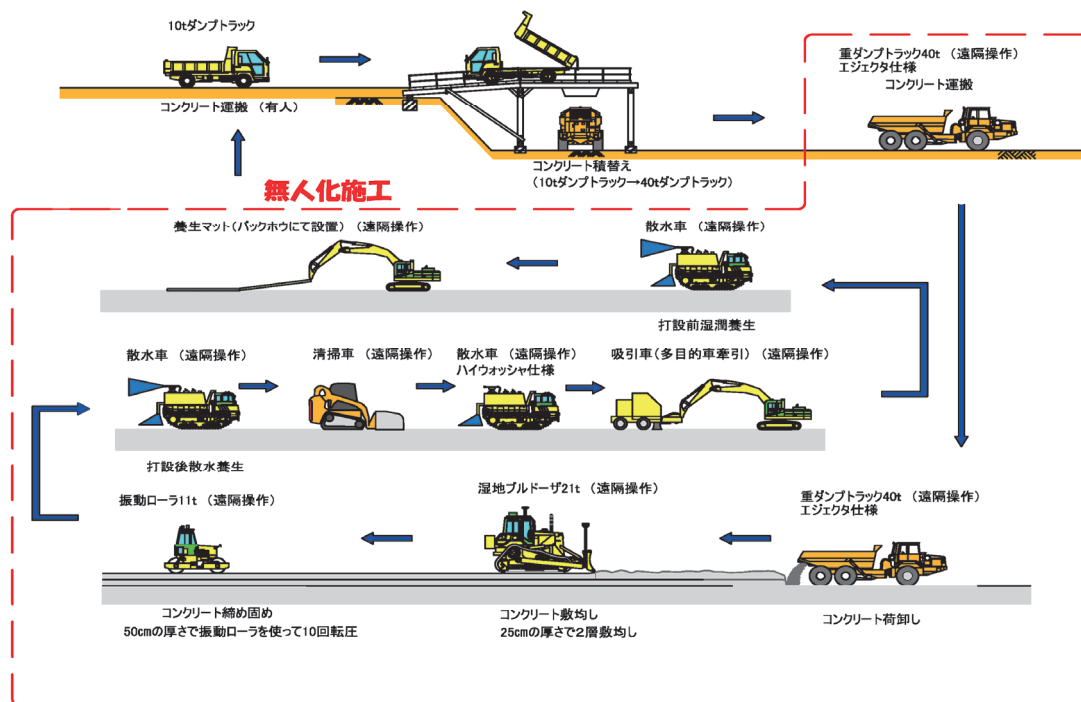


図-6 赤松谷川 11 号床固工コンクリート打設フロー

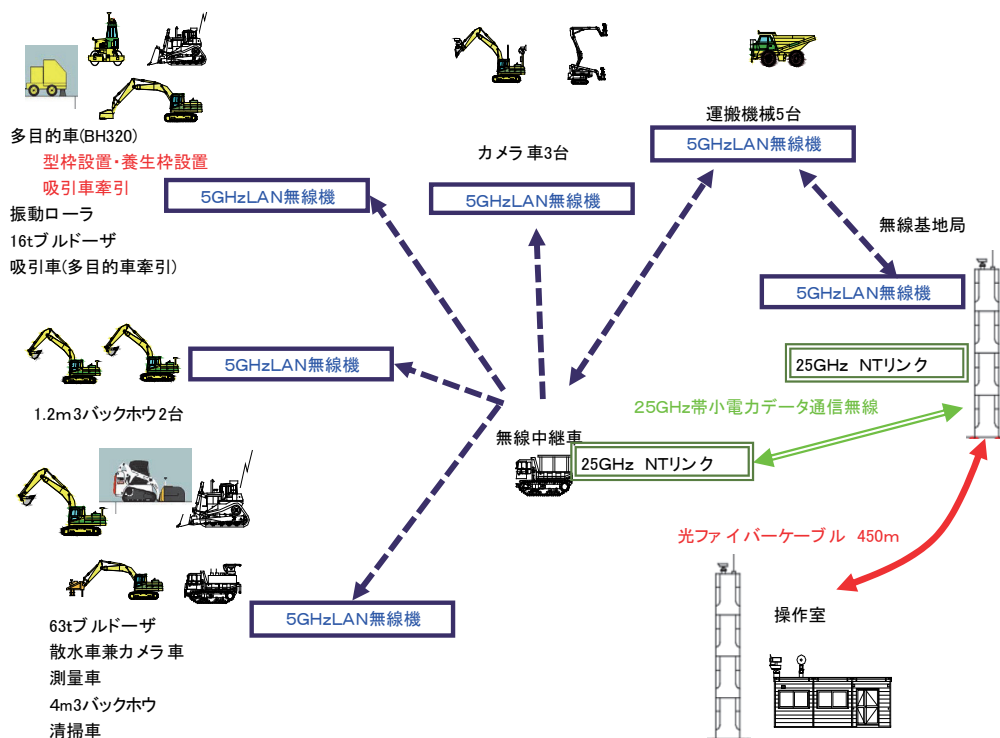


図-7 赤松谷川 11 号床固工 無線システム