

北股地区河道閉塞緊急対策工事無人化施工

ネットワーク型無人化施工と情報化施工の導入

北原成郎・坂西孝仁

ネットワーク型無人化施工の出発点となった「超長距離からの遠隔操作実証実験」は、その後の無人化施工システムの形態を大きく変えるものであった。特にこの技術を導入した北股地区河道閉塞緊急対策工事は、光ファイバケーブルを導入して操作室のレイアウトの自由度が大きくなったばかりか、情報化施工の導入についても問題なく可能であることが実証されたことにより、今後の自然災害等緊急対策工事の工種拡大につながると考えられる。また北股では、今後の無人化施工の工種拡大のため諸実験も実施しているので、それを含めて紹介する。

キーワード：ネットワーク, 無人化施工, 光ファイバケーブル, 緊急対策工事

1. はじめに

国土交通省で実施されたネットワーク型無人化施工技術「超長距離からの遠隔操作実証実験」は大きな可能性を我々に示唆した。北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事に初めてネットワーク型無人化施工を現場導入した際、我々が一番考慮したのはネットワーク上への情報化施工の導入であった。この北股の現場の成功が現在展開している他の無人化施工につながっている。このネットワーク型無人化施工と情報化施工の導入について北股の現場を通して紹介し、その他実験等も含めて紹介する。

2. ネットワーク型無人化施工導入への経緯

まずは無人化施工の発展の歴史について述べる。

(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。

現在まで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きた。

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)。

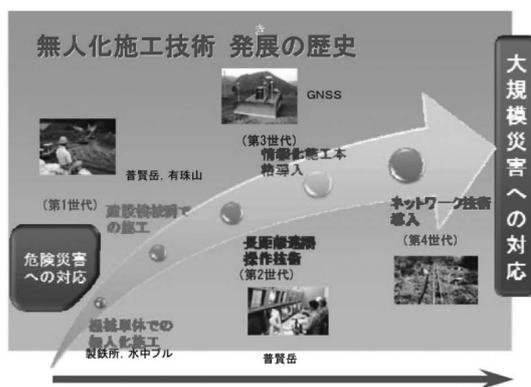


図-1 無人化施工技術発展の歴史

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が伝送できる無線LANが導入され、操作系、映像系、情報系データを個別にネットワーク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。

(2) ネットワーク技術の導入へ

操作系データは低レートでリアルタイム性が重要。映像系データはデータ量が大きく高品質で効率よくデジタル化する機器の選択が重要。情報系データは高度なネットワーク機器が必要である。

これらの条件を満たすにはその特性に合わせた機器選定が必要となる。しかし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や、超長距離からの遠隔操作が可能と考えた。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。こうして全てをネットワーク化する下地は出来つつあった(図-2)。

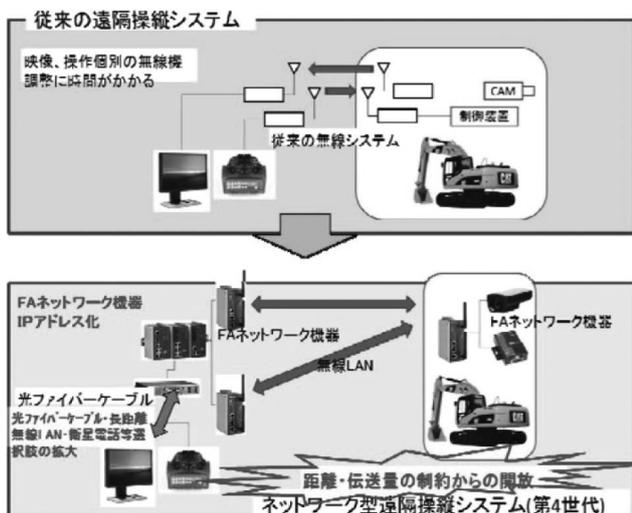


図-2 従来型とネットワーク型無人化施工の違い

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年に九州地方整備局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ネットワーク技術導入の貴重な指針となった。その内容は以下の

とおりである。

(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km～数十kmの超長距離無人化施工技術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を使用したネットワーク型無人化施工が可能であることが検証できた(図-3)。

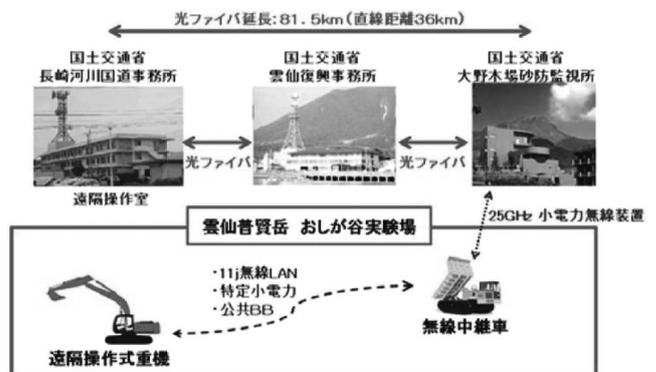


図-3 超長距離遠隔操作実験の実験概要図

(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情報化施工導入の可能性の検証

操作系、映像系データはネットワーク回線で伝送が可能であったことが検証できたが、情報化施工のマシンガイダンスシステムやブルドーザ排土板制御システムなどの情報化施工システムをネットワーク上に直接伝送できないと、コントロールボックスを従来のように建設機械上に搭載しガイダンス画面をカメラで撮影して操作室で簡単な操作する程度しか出来ず、情報化施工の威力を十分には発揮できないことが問題であった。このため変換機の開発は進めていたが実作業には導入してみないと不具合等がわからずネットワークの状況や無線機との相性についても課題があった。

4. 北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事

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、情報化施工も含めた実験課題を検証する機会を得ることが出来た(写真—1)。



写真—1 北股地区河道閉塞緊急対策工事施工状況

(1) 工事概要

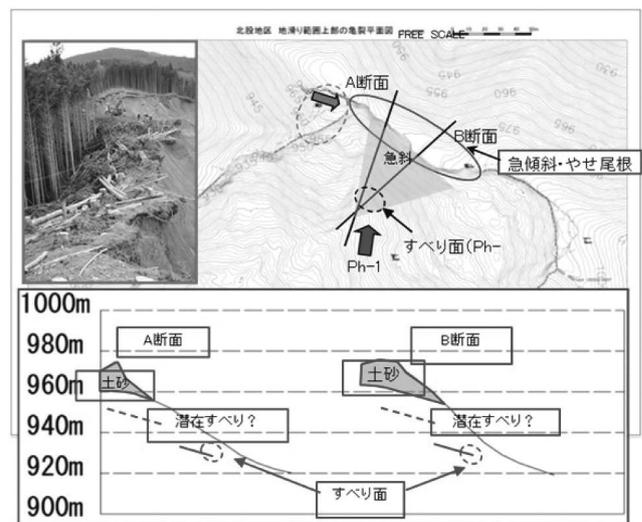
工事名 北股川北股地区河道閉塞緊急対策工事
 発注者 国土交通省近畿地方整備局
 住 所 奈良県吉野郡野迫川村北股地先
 工 期 平成23年9月30日～平成24年8月31日
 工 種 法面整形工(無人化施工)
 (有人施工: 6,700 m³ 無人施工: 5,100 m³)

(2) 法面整形工の無人化施工導入経緯

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200 m、最大幅約200 m、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った。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)。



図—4 掘削部平面図および無人化施工提案箇所

(3) 無人化施工の詳細

①機器設備構成全ての映像データ、重機操作系データは現場と操作室にてネットワーク変換してその間を敷設した光ファイバケーブルと無線LANシステムで結んだ。これにより設備設置場所の自由度は上がり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できた。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250 m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1 km 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を活用して、これに沿わせ形で敷設した(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5 GHz 帯無線 LAN システムを使用して各データを伝送した。映像は固定カメラ3台、ハイビジョン1台と車載カメラを使用したが無線基地局でデジタル変換した。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25 GHz 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 5100 m³ を 0.45 m³ 油圧ショベル, 0.8 m³ 油圧ショベル, 16 t ブルドーザ, 10 t 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機械

(4) 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100 m 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ため目視が難しく、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ため、安全を考慮しカメラ映像遠隔操作型無人



写真-3 北股地区河道閉塞緊急対策工事操作室内

化施工を採用した(写真-3)。

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(1000 m 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

③情報化施工システムの導入

油圧ショベルにはマシンガイダンスシステム、ブルドーザには排土板制御システムなどのGNSSを使用した情報化施工システムを導入した。詳細については後述する。

(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、外国の製造メーカーでコストも高く、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. ネットワーク上への情報化施工の導入

北股無人化施工では情報化施工を導入するためにネットワーク上で伝送するためハードの開発とそれを動かす3Dデータの作成方法の確立をする必要があった。

(1) ハードウェアの開発

通常情報化施工のマシンガイダンスシステム等のコントロールボックスは建設機械の本体に登載されている。無人化施工の場合はこれまでコントロールボックスの表示画面をカメラに撮り画像データで操作室のディスプレイに表示していた。また電源のON/OFFや簡単な表示切替は電磁式押しボタン等で遠隔操作していたが、データの入れ替えや細かい設定変更は操作室からは出来ず、超長距離になればなるほどこれを解決する必要があった(図-6)。

コントロールボックス本体はCANにより動作しているが、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)を開発した(写真-5)。現場で運用した結果、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。

この装置はバックホウに搭載後、ブルドーザにも順次導入され情報化施工の設定が操作室から出来るようになり大幅に操作性も改善した。



図-6 従来の情報化施工データの伝送方法



写真-5 ネットワーク伝送装置(CAN-LAN変換)

(2) 情報化施工データの作成について

北股などの現場に情報化施工を導入する際は当初から3Dデータがあるわけではなかった。このデータの作成はハードと並んで大きな課題の一つであった。

データ作成は以下のような過程を経て作成した。

① 3Dデータの確認

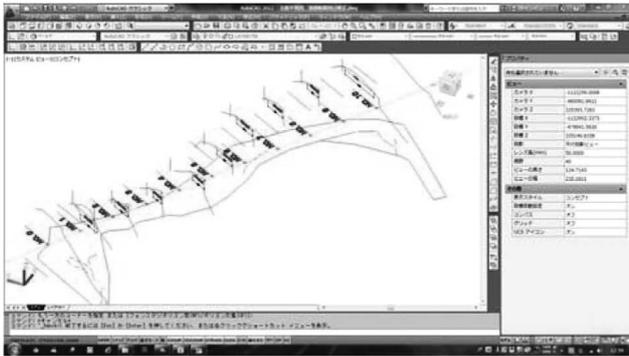
まずは現場の3Dデータがあるのか発注者に確認することから始まる。北股では発注者の現場図面はAUTOCADの3Dデータであったが不完全なものであった。これにより測量会社等を通じてデータ作成が必要になった。これをある航空測量会社に依頼したところ、この箇所の航空測量3Dデータを保有していたので供給を受けた。

② 設計断面の作成

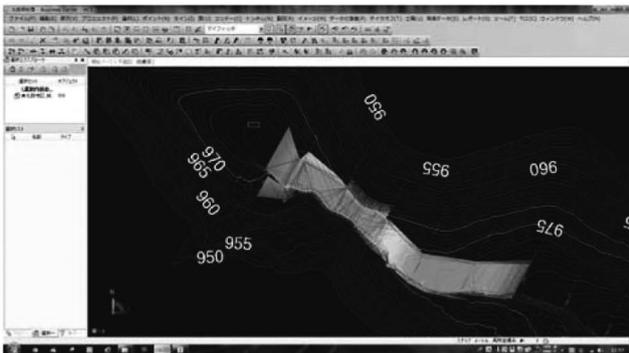
現場の頂部を安定させるためにどの程度掘削する必要があるか地質も含めて担当部署にて解析した。これを基に現場にて10mごとの断面を作成し、航空測量3Dデータに貼り付けてCADによる掘削平面を作成した(図-7)。

③ 3Dデータの作成

専用ソフトでこのCAD図面からマシンガイダンス



図一七 CADによる断面データの作成



図一八 専用ソフトによる掘削断面データの作成

データを作成してコントロールボックスにデータを入力した。これにより丁張りレスで現場施工が可能になり変更も操作室で可能になった（図一八）。

6. 今後の展望

今後の無人化施工の展望を見据えて以下の実験を行った。

(1) 無人化による連続土嚢作成実験

大型土嚢は各種土木工事や災害時の応急対策として非常に多くの場面で使用されるものである。これを無人化施工にて容易に作成するため、折り畳み式の箱型連続土嚢の使用が可能か検証した。具体的には運搬用治具を作成して運搬車から連続で土嚢降ろしを確実に



写真一六 連続土嚢作成実験風景

展開して土砂を充填できるか基礎実験した。この実験は引き続き国の建設技術研究開発助成を利用して産官学の共同で改良が進められている（写真一六）。

(2) 標準画像とハイビジョン画像の比較実験

業務用低遅延エンコーダを使用してハイビジョン画像（1920×1080）と標準画像（720×480）の画像を使用した作業効率の比較実験。バックホウにより大型土嚢を吊り上げて180度回転して設置し、また吊り上げて元の位置戻す作業を5分間当りの作業回数を計測し比較したが、結果は明らかにハイビジョン画像により作業効率が向上したことがわかった（図一九）。しかしハイビジョン画像は現在エンコーダの能力からは伝送速度も十分でなく遅延も大きいので現状の無線機では使用が難しい（写真一七）。これを低遅延3Mbps伝送速度でハイビジョン画像が送れるエンコーダ、デコーダを国の建設技術研究開発助成をうけて産官学共同で開発中である。

種類		1回目	2回目
① SD	標準画像 NTSC (720×480)	3.33	3.25
② HD	ハイビジョン画像 FullHD (1920×1080)	3.67	3.5

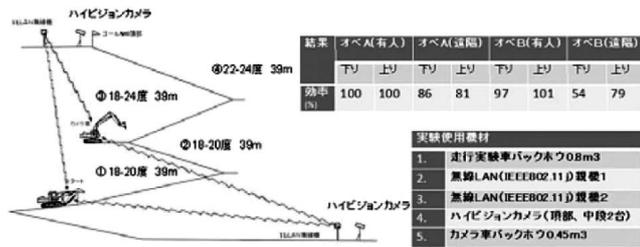
図一九 標準画像とハイビジョン画像の比較実験結果



写真一七 標準画像とハイビジョン画像の比較実験風景

(3) 登坂能力実験

油圧ショベルにより三箇所を折り返しのある18～24度の登坂路を上り下りする実験を、経験年数の違うオペレータ（経験8年と3年）で有人と無人の走行時間で比較した（図一十）。画像は2台の画像用固定カメラと車載カメラを使用した。有人走行を100%とすると無人走行の作業効率は80%程度であった。オペレータからは斜面では特に現在使用している固定式上下カメラでは折り返し中に見づらい場面があるという意見が出た。これより固定式ではなく自由にカメラ角度が変えられる首振り式のカメラを開発し現在稼働中の無人化施工現場に投入して検証中である（写真一八）。



熟練オペレータが有人にて急傾斜をバックホウで昇り降りした場合を100とした場合の効率を比較

図一 10 登坂実験概要と結果



写真一 8 登坂実験風景

7. おわりに

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で本格的に導入され、更に情報化施工技術の伝送も加味されて確立された。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。これらの技術は現在施工中の雲仙普賢岳赤松谷川11号床固工工事、岩国宇佐川除石工事にも活かされている。こうして見ると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への流れは今の流れの原動力となり大きいものであったことが改めて認識できた。これ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の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。

JCMA

【筆者紹介】

北原 成郎 (きたはら しげお)
 (株)熊谷組
 土木事業本部 機材部



坂西 孝仁 (さかにし こうじ)
 (株)熊谷組
 土木事業本部 機材部

