特集≫≫　最先端の高度な建設技術の開発と実用化

次世代無人化施工技術
拡張型高機能遠隔操作室の開発
緊急災害対応で柔軟な拡張性を持つ移動式遠隔操作室

北　原　成　郎・坂　西　孝　仁・飛鳥馬　　翼

無人化設備構築の時間を短縮し，迅速に災害対応することを目的として開発された高機能遠隔操作室は，阿蘇大橋地区斜面防災対策工事に導入され，工事着手後３日目に無人化施工開始という効果を発揮した。当該工事に代表されるような近年の災害は，規模の拡大化や複雑化する傾向にあり，高機能遠隔操作室の導入後の課題も見えてきた。その課題を解決するために開発された，段階的に遠隔操作室の機能を拡張し，柔軟に災害対応を可能にする拡張型高機能遠隔操作室の紹介をする。
キーワード：無人化施工，緊急災害対応，移動式遠隔操作室，ネットワーク対応型無人化施工システム

1. はじめに

人の立入りが危険な災害現場に導入される無人化施工技術は，難易度の高い現場であるほど設備が複雑化し，無人化施工開始までの準備期間が長くなる。災害現場では時間の経過とともに状況が大きく変化するため，無人化設備の構築の時間をいかに短縮して，迅速に工事に着手するかが課題となっている。

また複雑化した通信システムは，設備構築時の誤配線や機器の損傷などのトラブルを招きやすく，緊急時の対応には障害となる。

災害対応を含め砂防工事など様々な一般的な工事において生産性向上を目指す i-Construction においても，ICT の役割はリアルタイム性が求められるため，可能な限り障害を少なくすることが重要となる。

これらの課題を解決するために，ネットワーク対応型無人化施工システムに対応した移動式遠隔操作室である高機能遠隔操作室（**写真**―１）を開発した。当該開発は平成 28 年熊本地震により熊本県阿蘇郡南阿蘇村で発生した大規模斜面崩壊の緊急対策工事に導入され，工事着手後３日目に無人化施工開始という緊急対策工事への迅速な対応を発揮した。

当該工事に代表されるような近年の災害は，規模の拡大化や複雑化する傾向にあり，遠隔操作で同時に稼働させる建設機械の台数は災害現場の条件に適するよう柔軟に対応していくことが求められている。

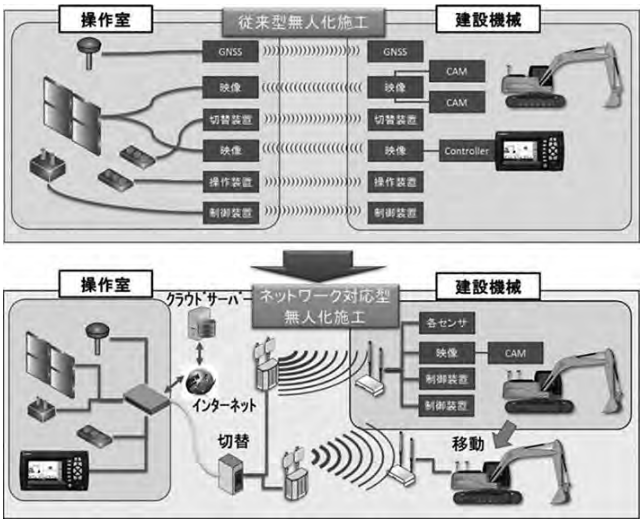
ここではネットワーク対応型無人化施工システムの能力を最大限に引出し，大規模災害においても迅速に柔軟な対応ができる拡張型高機能遠隔操作室を開発したので紹介する。

写真―１　高機能遠隔操作室

2. ネットワーク対応型無人化施工システム

高機能遠隔操作室，拡張型高機能遠隔操作室はネットワーク対応型無人化施工システムに対応するように開発されている。ネットワーク無人化施工システムとは無人化施工で必要とされる①建設機械の遠隔操作信号，②作業用固定カメラ・車載カメラの映像信号，③情報化施工機械（MG・MC）の制御信号を変換機器によって IP（Internet Protocol ＝インターネット・プロトコル）化して伝送し，１つの M2M（Machine to Machine）ネットワーク上で無人化施工機械群の一元管理をするシステムである（**図**―１）。

当該システムは東日本大震災を契機に，広域での災害対応（火山災害・原子力災害等）を想定し，国土交



図―1 従来方式とネットワーク対応型の違い

通省が平成 23 年 3 月に長崎で実施した超長距離遠隔操作実証実験の成果を基に確立された。この成果により施工箇所から 80 km を超える遠隔操作室から安定して遠隔操作式建設機械の操作が可能であることが実証された[1)]。

当該システムには以下のメリットがある。

(1) 無線資源の有効活用

IP 化により遠隔操作式建設機械との通信手段として無線 LAN の選択肢が増えた。無線 LAN は現場に適した無線機やアンテナを自由に選択が可能である。また 1 周波数で複数の建設機械を遠隔操作可能であるため，無線周波数の干渉回避やコスト削減となる。

(2) 遠隔操作室設置位置の自由度向上

IP 化により通信手段として長距離無線 LAN, 光ケーブル等の選択肢が増え，通信の中継も容易になった。これにより遠隔操作室位置の自由度が向上し，現場から数十 km 離れた安全な場所からの遠隔操作が可能になった。

(3) 最新技術の導入が容易

IoT 機器や自動運転等の最新技術も導入が可能で，現場状況により技術を組合わせ，システムの発展性や拡張性が向上した。また国土交通省が推進する i-Construction へも適用が可能である。

3. 高機能遠隔操作室の開発

拡張型高機能遠隔操作室の報告の前に，本開発の中核となっている高機能遠隔操作室の概要を説明する。

(1) 開発概要

無人化施工は大規模になると施工に必要な遠隔操作式建設機械や作業用固定カメラ等の映像設備が増加し，それに伴い通信機器等の付帯設備も増加する。1 台の建設機械に制御，映像等の通信機器が 2 ～ 5 台程度接続されるため，通信機器の設定には時間を要する。また通信の基本として送信側と受信側の機器が 1 組存在するので，建設機械側の通信機器と対を成す機器が遠隔操作室側にも存在する。したがって，無人化施工が大規模になると，遠隔操作室側の通信網が複雑化し，通信機器の設定と併せて遠隔操作室の構築にも時間を要し，誤配線といったトラブルが発生する恐れがある。このような時間経過は緊急時の対応には大きな障害となる。

一方で，現場の条件によって建設機械の仕様や台数が変動することはあっても，遠隔操作室の基本的な構成は変わらない。建設機械の台数とカメラの台数が決まってしまえば，遠隔操作室の構成も自ずと決定するのである。

そこでネットワーク対応型無人化施工システムの特徴を活かし，あらかじめ遠隔操作室のシステム機器設置と設定が完了している高機能遠隔操作室を平成 27 年度に開発した。当該開発は無人化施工システム構築工程のロスを最小限とするため，基本となる機器の設定をあらかじめ行うことによって災害対応を迅速に行うことを可能にする（**図―2**）。

図―2 高機能遠隔操作室の機能

高機能遠隔操作室の開発上でのコンセプトは本設の遠隔操作室を準備している間に災害の初期対応として導入することである。初期対応ということで，建設機械を 3 台制御可能なシステムを構築した。高機能遠隔操作室の特徴を以下に示す。

①遠隔操作室は 10 t トラック等に積載し迅速に移

動が可能
②モニタ等の機材は室内に設置したまま移動することが可能
③遠隔操作室の屋上には無線基地局設置用ステージを設け，現地で簡単に組立が可能
④映像はすべてデジタル化し，ハイビジョン映像を表示することも可能

高機能遠隔操作室は開発直後に鹿児島県垂水市の除石工事（砂防緊急除石工事（深港川（2）1 工区），以下，垂水）に試験導入され，その後，熊本県阿蘇郡南阿蘇村の緊急対策工事（阿蘇大橋地区斜面防災対策工事，以下，阿蘇）に本格的に導入された（**写真**―2）。

写真―2　阿蘇での高機能遠隔操作室設置状況

(2) 導入効果

従来の設備構築の時間の比較対象として雲仙普賢岳の赤松谷川 11 号床固工工事（以下，雲仙）における実績と，高機能遠隔操作室を導入した垂水・阿蘇での実績を**表**―1 に示す。

雲仙での実績を見ると，20 台の遠隔操作式建設機械を稼動させるとなると 25 日掛かり，多数の建設機械を稼動させるには大幅な時間を要することが分かる。中でも遠隔操作室の設備の構築日数は全設備構築日数の半分以上を費やしている。

垂水と阿蘇初期での無人化施工開始までの時間が異なっているのは，垂水では本設の無線基地局の設置を行ってから施工開始していたことに対し，阿蘇では遠隔操作室の上に簡易の無線基地局を設置したため，阿蘇の方が早急に施工を実施できたためである。遠隔操作室の設備の構築は両者共に全設備構築日数の半分以下で完了している。

阿蘇においては本設の遠隔操作室からの施工開始には 20 日掛かった。しかし，高機能遠隔操作室を導入したことによって，初期の段階で高機能遠隔操作室から 6 台の建設機械を遠隔操作しながら，14 台の建設機械を遠隔操作可能な本設の遠隔操作室を準備することができた。このように，従来では 2 週間から 1 ヶ月程度要していた準備期間を大幅に短縮することに成功し，迅速な災害対応を可能にした。

一方で，高機能遠隔操作室を実際の災害現場に導入したことや，阿蘇での無人化施工実績により，今後の災害対応の課題も見えてきた。①初期対応においても現場の条件により建設機械の台数が多くなることがあるということ，②遠隔操作室を本設してしまうと遠隔操作室の汎用性が無いという課題である。特に後者は現場の状況に応じてカメラ設備や建設機械の増加が必要になった際に，無人化設備の増加に合わせて遠隔操作室の拡大も必要であり，遠隔操作室を設置してしまってからではそれの拡大は困難であった。

4. 拡張型高機能遠隔操作室の開発

(1) 開発概要

前述した課題を解決するために拡張型高機能遠隔操作室（**写真**―3，4）を開発した。開発のコンセプトとしては従来の高機能遠隔操作室の機能に加え，拡張性，柔軟性，信頼性を高め災害への対応力をさらに向上させるものである。拡張型高機能遠隔操作室の特徴を以下に示す。

(a) 拡張性の向上（**図**―3）

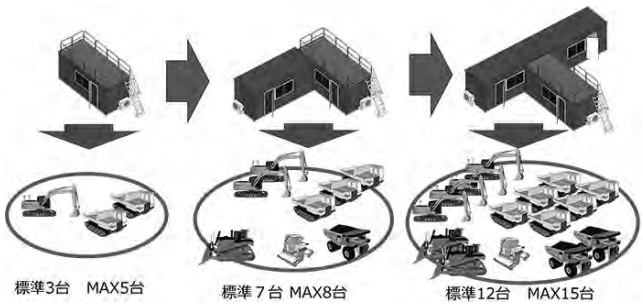
1 棟で独立した遠隔操作室を段階的に 2 棟，3 棟と拡張していくことが可能である。本開発では 2 棟を標準装備している。1 棟では最大 5 台，2 棟では最大 8 台，3 棟では最大 15 台までの建設機械を制御することが

表―1　設備構築に要した時間の比較

	建設機械の稼働台数	遠隔操作室の設備構築日数	無線基地局や建設機械の設備構築日数	無人化設備工開始から無人化施工開始までの日数
雲仙	20 台	15 日	10 日	25 日
垂水	5 台	2 日	4 日	6 日
阿蘇（初期）	6 台	1 日	2 日	3 日
阿蘇（本設）	14 台	7 日	13 日	20 日

写真―３ 拡張型高機能遠隔操作室

写真―４ 拡張型高機能遠隔操作室内部設備



図―３ 拡張型高機能遠隔操作室の拡張性

でき，災害現場の条件により柔軟に対応することを可能にした。

（b）柔軟性の向上

通常，遠隔操作室内にはカメラオペレータという作業用固定カメラの制御を行う無人化施工特有の作業員が常駐する。カメラオペレータは建設機械の動きに合わせてカメラを制御させる必要があり，適正な映像が提供されないと建設機械オペレータは操作不能となり，誤操作による事故発生の恐れもある。したがって，カメラオペレータは建設機械オペレータとのコミュニケーションが重要となる。

従来，カメラオペレータの操作卓は，すべてのカメラ映像を大型モニタに分割表示させていた。そして遠隔操作室の内部構成より，建設機械オペレータとコミュニケーションが取れる場所に配置していた。しかし，**図**―３のように遠隔操作室の組合わせが変わってしまうと，それに合わせてカメラオペレータ操作卓の再配置をする必要性があり，大型モニタの再配置をすることは非常に労力を費やすことになる。

そこで，本開発では建設機械オペレータの操作卓と同様の大きさのモニタを４分割表示し，それを４台組合わせることによって，大型モニタと同等の機能を作り出した（**写真**―５）。これによって，カメラオペレータ操作卓を自在に配置することが可能になり，建設機械オペレータとのコミュニケーションを容易にした。

写真―５ カメラオペレータモニタ

また，カメラ映像の表示は阿蘇の工事の実績より，固定カメラと車載カメラの映像を 32 台まで表示することが可能である。

（c）信頼性の向上

通信ネットワークが高度化・複雑化すると，通信障害が発生しやすくなり，機械制御や映像の遅延に起因する。ネットワーク対応型無人化施工システムを安定させながら，その機能を最大限に発揮させるためには，ネットワーク管理技術が重要である。

そこで，本開発ではネットワーク死活監視システムを導入した（**図**―４）。従来はネットワーク管理者が無線やカメラ等のネットワーク機器の通信状況を常に把握し，ネットワーク負荷を分散させるように無人化施工の通信管理を行っていた。本システムはメイン画面に死活監視をしたいネットワーク機器を登録しておくことによって，通信状態を正常（緑）・警告（黄）・異常（赤）を画面上で大きく信号表示し，直観的に把

図―４　ネットワーク死活監視システム

握することが可能である。これによって，ネットワーク管理者が常に監視していなくても，誰でも通信状況を把握することが可能であり，異常が発生した場合は速やかにネットワーク管理者に報告することが可能となり無人化施工の効率化が図られる。

(2) 実証実験

(a) 災害現場への導入

今年の５月に硫黄山噴火の災害対応として，宮崎県えびの市えびの高原の沈殿池の掘削工事（以下，えびの）に試験導入する機会を得られた（**写真―６**）。

写真―６　えびの施工状況

本工事において稼働させた遠隔操作式建設機械は３台（バックホウ２台，クローラダンプ１台）だったため，１棟の本遠隔操作室を導入した（**写真―７**）。無人化設備構築に要した日数は，遠隔操作室の設備構築に１日，無線基地局や建設機械の設備構築に３日掛かり，５日目には無人化施工を開始できる環境を整備した。これは高機能遠隔操作室と同等の効果を発揮したと言える。

さらに，本工事では初の試みとして作業用固定カメラにハイビジョン映像を導入した。これによって従来

写真―７　拡張型高機能遠隔操作室搬入状況

よりもモニタ映像が鮮明になり，オペレータの負担も軽減された。従来はハイビジョン映像を IP 化する技術が少なく，既存の技術を導入したとしても高価であったり映像に遅延があったりと，ハイビジョン映像を無人化施工で使用するには不適であった。今日では技術革新により遅延が少なく，比較的安価に導入できる技術が増加してきたため，無人化施工に採用できるようになった。このように本開発はネットワーク対応型無人化施工システムを活用することにより，新技術にも容易に対応できることを確認した。

(b) 接続実験

えびのでの工事が完了し，本遠隔操作室を保管場所に戻す機会に合わせて，遠隔操作室２棟の接続実験を実施した。クレーンを使用して設置，ユニットハウス２棟の組合せ，電源や通信設備のケーブルの接続を

写真―８　拡張型高機能遠隔操作室荷卸状況

写真―9 拡張型高機能遠隔操作室連結状況

行った結果，5時間程度で接続が完了した（**写真―8, 9**）。このことから，災害現場においても1日掛からずに2棟の接続が可能であり，迅速かつ柔軟に拡張できることを確認した。

5. おわりに

本稿では，拡張型高機能遠隔操作室が高機能遠隔操作室の機能を維持しつつ，ネットワーク対応型無人化施工システムを最大限に活用し，遠隔操作室を柔軟に拡張できることを確認した。ネットワーク技術に適用した最新技術の導入が容易となり，複雑化する災害対応へ迅速に無人化施工を適用する可能性を示した。

発生頻度や規模が拡大傾向にある近年の災害において，2次災害を防ぐ無人化施工の需要は高まっている。こうした突発的な災害に迅速に対応し，速やかに被害の拡大を防止するためには，平時から遠隔操作式建設機械やオペレータの準備が必要である。本開発がそういった準備のための操作訓練や無人化施工の技術開発に活用され，社会貢献に役立てられれば幸いである。

謝 辞

最後に，技術支援を戴いた㈱ファテックと㈲E-MEC，開発関係者の方々に深くお礼申し上げる。

JCMA

《参考文献》

1）新田恭士・松尾修・北原成郎・黒田昇・田村圭司・下田孝徳，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，2012年9月

［筆者紹介］

北原 成郎（きたはら しげお）
㈱熊谷組
土木事業本部ICT推進室
室長

坂西 孝仁（さかにし こうじ）
㈱熊谷組
土木事業本部機材部
担当部長

飛鳥馬 翼（あすま つばさ）
㈱熊谷組
土木事業本部ICT推進室