

総合的な i-Construction による緊急災害対応

阿蘇大橋地区斜面防災対策工事における無人化施工

坂西孝仁・北原成郎

熊本地震（本震）により、熊本県南阿蘇村立野地区において大規模な斜面崩壊が発生した。この災害に対して国土交通省九州地方整備局の直轄砂防災害関連緊急事業により、阿蘇大橋地区斜面防災対策工事が実施された。この工事は最新の無人化施工技術と建設 ICT を導入し総合的な i-Construction を実現した。
キーワード：熊本地震、緊急対策工事、無人化施工、建設 ICT、i-Construction、自動運転

1. はじめに

平成 28 年 4 月 16 日に発生した熊本地震（本震）により、熊本県南阿蘇村立野地区において大規模な斜面崩壊が発生した。この崩壊の影響により、国道 57 号や JR 豊肥本線が崩壊した土砂により流出し、国道 325 号では阿蘇大橋が落橋するなど周辺一帯では甚大な被害を受けた。この災害に対して緊急的な対策を安全かつ迅速に講じるため、国土交通省九州地方整備局の直轄砂防災害関連緊急事業により、地震直後から建設 ICT や最新無人化施工技術を駆使しながら、阿蘇大橋地区斜面防災対策工事が実施された。また今回崩壊地内に立ち入ることなく、安全かつ迅速に実施することが求められ、過去に類例のない環境下で緊急災害対応を実施し、調査・設計・施工・管理の全ての段階において総合的な i-Construction を実現した。

2. 工事概要

(1) 工事施工体制

阿蘇大橋地区で発生した大規模崩壊の規模は、長さ約 700 m、幅約 200 m にもおおよび、崩壊土砂量は約 50 万 m³ と推測される。この崩壊斜面の上部には至る所に開口亀裂や段差が発生し、滑落斜面は切立って急傾斜となっており、降雨や余震等により更なる崩壊の危険性があった。このような状況の中、本工事においては二次災害を防ぐことを最重要課題とし、滑落斜面およびその周辺地盤の挙動を監視・計測しながら最新の無人化施工技術を導入した。また砂防、地盤、機械システムの専門家からなる施工委員会を設置し、技術的対応について検討、助言を得ながら施工の流れに基



図一 阿蘇大橋地区斜面防災対策工事全体概要図

づき復旧工事を進めている。

(2) 無人化施工の工事概要

斜面下部の交通インフラ復旧に向け、斜面下部での有人による施工環境を迅速に整える必要があることから、恒久的な法面对策の前に斜面上部からの落石を捕捉し、斜面下部で行われる復旧工事の安全を確保するために、土留盛土工を無人化施工で築造した。また斜面頭部の不安定土砂の除去（以下、ラウンディングという）は遠隔操作で上段土留盛土工完了後施工した（図一）。

(a) 土留盛土工

土留盛土工は崩壊地下部に落石や崩落土砂を捕捉する上下 2 段各 300 m を施工した。盛土位置は落石シミュレーションの結果に基づき、施工性を考慮し比較的緩勾配となる勾配変化点に配置した。盛土形状は無人化施工での施工性を考慮し、高さ 3 m、土留天端幅を 5 m とした（図二）。

本工事の無人化施工による土留盛土工は、最新の

表一 1 2段階立上げのシステム比較

	第1段階	第2段階
概要	高機能遠隔操作室の設置・運用	超遠隔操作室の設置・運用
内容	崩壊地現場詰所付近に3日程度で立ち上げた高機能遠隔操作室の使用	崩壊地より1 km 程度離れた安全な場所から14台の建設機械を遠隔操作した操作室の設置
設備	下流下部無線局, 下流中部無線局設置作業用固定カメラ6台	4箇所の無線局設置 作業用固定カメラ13台 監視用固定カメラ3台
稼働建設機	バックホウ2台, 不整地運搬車2台 ブルドーザ1台, カメラ車1台	バックホウ6台, 不整地運搬車4台 ブルドーザ1台, カメラ車3台
作業内容	工事用進入路造成	土留盛土築造
設置位置	崩壊地現場下流(熊本側)現場詰所付近	崩壊地現場下流(熊本側)1 km 付近病院付近
外観		



図一 2 土留盛土工施工状況

ネットワーク対応型無人化施工システムを導入した。

大規模な緊急対策工事であり、かつ迅速に無人化施工設備を立ち上げ、多数の遠隔操作式建設機械を用いて施工することが必要なため、無人化施工システムを、以下に示す2段階で立ち上げて施工を進めた(表一1)。

①第1段階(高機能遠隔操作室の設置・運用)

本工事は地震直後の平成28年5月5日より施工体制を確保し、着手した。第1段階ではバックホウ2台、不整地運搬車2台、ブルドーザ1台と高機能遠隔操作室を導入し、短期間で遠隔操作を開始した。通常無人

化システムの稼働には、機器の設置や設定、調整に10日程度を要するが、本システムは遠隔操作室の機器設置と設定が事前に完了しており、現地に運搬した段階で機器の調整のみで容易にシステムが稼働できる状態となっている。このシステム化された高機能遠隔操作室を導入することで、3日という短期間で無人化施工を開始することができ、土留盛土施工箇所までの工事用進入路造成に速やかに着手できた。

②第2段階(超遠隔操作室の設置・運用)

第2段階では、高機能遠隔操作室により無人化施工を実施している間に準備を進め、遠隔操作式建設機械と設備の増強を図った。遠隔操作室は二次災害を受けにくい現場から約1 km離れた場所に設置した(以下、超遠隔操作室という)。高機能遠隔操作室と超遠隔操作室の切り替えは、各々の無線環境を両立させながら行うことにより作業の連続性を確保し昼の休憩時間中30分程度で完了した。第2段階は平成29年6月中旬より運用を開始し、14台の建設機械と21台の作業用固定カメラを操作できる設備とした。

また段階的な伝送システムを採用した。超遠隔操作室から700 m間は光ファイバーケーブルを敷設し、その先のケーブル敷設が困難な区間は、150 Mbpsの伝送量のある25 GHz高速アクセスシステムを2系統設置して無線中継局まで伝送した。無線中継局から各無線局までは有線LANおよび25 GHz高速アクセス

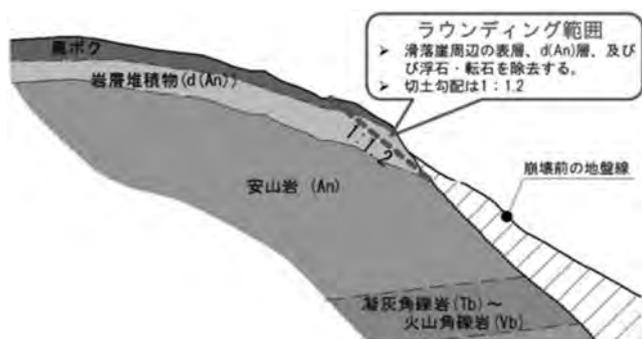


図一3 阿蘇大橋地区斜面防災対策工事無線システム概要図

システムで伝送し、各無線局から建設機械までは、5 GHz の無線 LAN を使用した。このような段階的な伝送容量をもつシステムを採用したことにより、安定的に超遠隔操作室から現場建設機械間 1 km のデータ伝送が可能となった（図一3）。

(b) ラウンディング

崩壊地頭部の滑落崖周辺は極めて急勾配で黒ボク等がオーバーハングしている。亀裂も多くみられ、岩屑堆積物が不安定な状況であり、落石の危険性が高い。このため、崩壊地下部の土留盛土工と併せて、滑落崖周辺の不安定土砂を除去するラウンディングを実施した（図一4）。



図一4 ラウンディング標準断面

ラウンディングは頭部に設置したアンカーからワイヤで吊り下げた高所法面掘削機により実施した。40°程度の急斜面部をラウンディングすることから、高所法面掘削機の横移動が可能でセーフティクライマー工法を採用した。施工は崩壊地頭部付近の遠隔操作によ

る無人化施工であるため、高所法面掘削機に搭載した車載カメラと施工付近の作業用固定カメラ映像をオペレータがカメラモニターで確認し施工を進めた。今回は目視およびモニター映像を確認しながらの遠隔操作を行い、約 17,000 m³ を切土掘削 1 : 1.2 の勾配で除去した。各モニター映像は超遠隔操作室まで配信され、総合的な施工監理を実施した。

3. 最新無人化施工システムの導入

阿蘇大橋地区斜面防災対策工事の無人化施工には、最新のネットワーク対応型システム、建設 ICT を導入し、総合的な i-Construction を確立した。その概要について述べる。

(1) ネットワーク対応型無人化施工システムの導入
従来の無人化施工システムでは建設機械操作データ、作業用固定カメラ・車載カメラの映像データ、マシンガイダンス・マシンコントロールの情報データを各個別の無線機で対応していたことから無線機の台数も多くなり調整に時間を要した。

また中継が難しく伝送も 300 m 程度であるため、遠隔操作室の位置も限定されていた。

これらの問題を解消すべく開発したネットワーク対応型無人化施工システムは、以下のメリットがある。

①無線資源の有効活用が可能

建設機械操作データ、作業用固定カメラ・車載カメラの映像データ、マシンガイダンス・マシンコントロー

ル等の情報データは変換機器で IP（インターネットプロトコル）化して送信するため、1 周波数に多くのデータが効率良く送信可能になり無線資源の有効利用となる。

②遠隔操作室の設置位置の自由度が向上

IP 化により長距離無線 LAN，光ファイバーケーブル等の使用が可能で，中継も容易になった。これより遠隔操作室位置の自由度が向上し，現場から数十 km 離れたより安全な位置に遠隔操作室の設置が可能になった。

③最新技術の導入が容易

IoT 機器や自律運転等の最新技術の導入も容易になり，システムの発展性や拡張性が向上した。

本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，国土交通省が平成 23 年 3 月に雲仙復興事務所で実施した「超長距離からの遠隔操作実証実験」の成果を基に確立された。この結果により 80 km を超える遠隔操作室から，安定して建設機械の操作が可能であることが実証された。

この技術はその後，赤松谷川 11 号床固工工事等で実績を重ね，今回本工事にも導入された。

(2) 建設 ICT（情報化施工）の導入

当現場では 3 次元ガイダンスシステム，マシンコントロール（ブルドーザ排土板制御）を搭載した建設機械を使用した（図一 5）。通常は建設機械にコントローラが搭載されているが，当現場ではコントローラを遠隔操作室に設置できるように，CAN（Controller Area Network）方式を採用するコントローラに，特

殊な CAN-LAN 変換器を開発・使用した。これによりコントローラを遠隔操作室に設置でき，ガイダンス操作，データ設定や機器設定も遠隔操作室で可能になった。

これはネットワーク対応型無人化施工システムによる基盤技術のメリットの一つである。

(a) マシンガイダンス（バックホウ）

マシンガイダンスを法面整形施工のガイダンスの他に，改良材攪拌作業範囲の指示や測量機として検査立会いに使用した。

①改良材攪拌作業

マシンガイダンスを，改良材攪拌作業へ使用した。1 ブロック毎の改良範囲を赤枠で表示し，オペレータは改良範囲に対応した改良材を投入した後に，図示された範囲と作業深さを確認しながら作業を実施した。

②法面整形作業

盛土の平面形状は数か所の折れ点を有する形状であり，作業用固定カメラや車載カメラによる映像とマシンガイダンスを併用し施工した。無人化施工においては必要不可欠なシステムの一つである。

③出来形検査立会

マシンガイダンス搭載バックホウを測量機として，出来形検査立会に使用した。バケットの爪先で，盛土施工済位置を計測し，盛土が正確に築堤されているか，発注者立会いのもと検査を実施した。バックホウを測量機代わりに使用し，現場から 1 km 程度離れた安全な遠隔操作室から立会いが可能になった。

④水平器の使用

作業現場周辺地盤は黒ボク土が多く堆積しており，降雨時には建設機械が沈み込んだり，滑ったりするこ



図一 5 施工における i-Construction の取組み

とが多々発生したため、マシンガイダンスの水平器機能を使用し、建設機械の傾斜を確認しながら施工を進めた。カメラの配置によっては映像のみでは、微妙な角度は認識できない。そのため、機械の傾きはオペレータの経験のみに頼らざるを得なくなる。水平器機能の使用により定量的な角度を把握でき、オペレータにとっては重要な判断情報が得られ重大なトラブル回避につながった。

(b) マシンコントロール（ブルドーザ排土板制御）

ブルドーザによる基盤整形、盛土の敷均しにマシンコントロールを導入した。盛土高さの仕上げにおいて、オペレータの負担は大きく減り、各盛土層の高さを数 cm 程度の誤差に収める精度の高い盛立が可能になった。

(3) i-Construction の確立

今回の工事では有識者会議を開催し、同会議での見解をベースに、発注者と施工者の検討会議を主体とした事業マネジメントを実施した。また3次元データを一貫して使用した建設 ICT の導入により、調査、設計、施工、管理検査も含めた総合的な i-Construction を実現した（図-6）。

調査では航空レーザ測量により、崩壊地の詳細な地形情報取得を行った。

設計では調査結果より、その3次元データの地形図上に3次元モデルによる対策工の計画・設計を行った。

施工では前述したとおり、3次元設計モデルを活用した建設 ICT を導入し、精密な無人化施工を実現した。

管理、検査では ICT 建設機械を使用した出来形検査や UAV した。

差分解析は着工前、大雨後、または工種の変わり目に実施した。崩壊地法面土砂の的確な堆積状況の把握が可能になり、柔軟な現場施工対応につながった。

4. 新技術の開発

本工事では不整地運搬車の自動運転技術と無人移動体画像伝送システム用無線機の開発を行っている。

(1) 不整地運搬車の自動運転

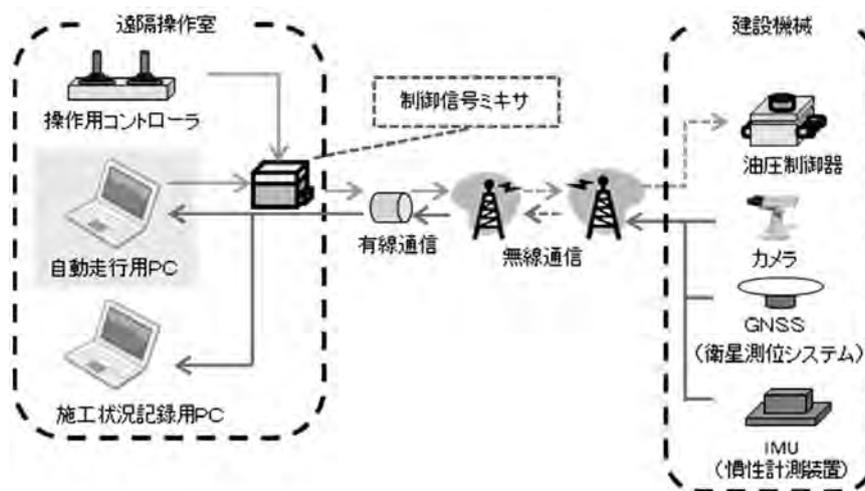
建設機械の自動運転は建設 ICT と制御 PC により、複数の建設機械を1人のオペレータで操作し、生産性向上が期待できる。

本工事では、決められた運搬経路を走行する不整地運搬車に着目し、自動運転させることにした。オペレータが操縦により、走行させたい軌道をあらかじめ走行させた際の Way Point（以下、WP とする）を保存し、その後、WP に沿って自動制御による追従走行を行った。建設機械には GNSS と慣性センサユニット (IMU) を搭載し、現在の建設機械の位置情報と方位角をセンサから読み取り、自己位置を推定し、WP に対しフィードバック制御を行った。本開発の自律制御システムを以下に示す（図-7）。

- ① 遠隔操作式建設機械であれば制御信号ミキサにより制御 PC からの指令を操作器と同じ信号に変換して制御するので、建設機械の改造が必要なく経済的である。



図-6 i-Construction による総合的な取組み



図一七 自動走行システム

- ②制御信号ミキサおよび制御 PC は遠隔操作室側に設置されるため、自動制御とオペレータ制御の切替および制御プログラムの変更が容易である。
- ③制御信号ミキサは操作器からの信号を優先して建設機械へ送信するため、万が一自動制御により建設機械が暴走してしまった際には操作器から信号を与えることにより自律制御が停止するシステムになっている。

WP と自律制御との誤差は、一部曲線部で 1 m 程度の誤差があるものの概ね 40 cm 以下の誤差で WP に追従し制御できた。

(2) 無人移動体画像伝送システム用無線機の開発

無人化施工では 4.9 GHz 帯無線 LAN を中心に使用しているが、使用できるチャンネル数が減り、安定して使用可能な有効な無線機が少ない状況にある。平成 28 年 9 月に電波法が改正され利用可能となった「無人移動体画像伝送システム」新規 2.4 GHz 帯、新規 5.7 GHz 帯の無線周波を利用可能な無線機（表一 2）と既存の無線機を本工事内の不整地運搬車とドローンに搭載し、受信する電界強度、映像の伝送速度を既存の無線機と比較を行った。今回実験で使用した無線機は既存の無線機と比べ出力が高いため、既存 2.4 GHz 帯の

無線機と比べ長距離においても通信が可能となった。しかし、新規 2.4 GHz 帯については使用帯域が 5 MHz と狭いことからデータ容量が大きい映像を伝送する際にコマ落ちが発生した。新規 5.7 GHz 帯についてはチャンネル幅が既存の周波数と同様 20 MHz であるため問題なくデータを伝送することを確認できた。

5. まとめ

今回工事での無人化施工に係る成果は、以下のとおりである。

- ①ネットワーク対応型無人化施工技術の確立とその高度化

ネットワーク対応型無人化施工システムを導入し、2 段階立上げをしたことにより、工事用進入路造成等の初期対応時は高機能操作室により迅速に遠隔操作に着手できた。また多数の建設機械が必要となる盛土工事でも、光ファイバーケーブルを使用し 1 km 離れた安全な遠隔操作室から、無線システムのトラブルもなく建設機械を稼働することが可能となった。

- ② i-Construction を先導する技術基盤の形成

3 次元モデルと ICT 建設機械・機器を活用し遠隔操作室で集中管理することにより調査・設計・施工・検査の全過程で i-Construction を実現した。施工機械と連動した技術は無人化施工に限らず広く i-Construction を推進する基盤を形成することができた。

6. 今後の展望

無人化施工は当初からネットワーク化された無線システムと遠隔操作室を使用することから、ICT 機器を集中管理しやすい環境が整っている。今回の事例

表一 2 実験で使用した無線機の仕様

周波数帯	2.4 GHz	5 GHz
チャンネル数	5 MHz 幅 2 ch	20 MHz 幅 5 ch
出力	400 mW	50 mW
動作温度湿度	- 40 ~ + 65℃ 0 ~ 90%	
防水防塵性能	IP65	
寸法	(W) 150 (H) 115 (D) 55 mm	
重量	450 g	



は、今後の無人化施工による緊急対策工事のみならず他工種でも、UAVを主体にした測量、測量結果の3次元モデル化、そのデータを使用したICT建設機械による施工というi-Construction確立に参考になる要素が多くある。当現場でも活用した施工中の差分解析は、現場状況の変化を定量的に把握でき、出来形管理、安全管理等に活用できる。更に解析速度が上がり、日々の現場管理に使用されると更なる省力化が期待でき、今後急速に開発が進む技術である。

第5世代移動通信システム時代に入ると遅延は1ms、伝送量は10Gbpsと現状の有線システムと変わらない品質で、無線伝送が可能になる。IoTが加速し、多くの建設機械を離れた場所から遠隔操作することが可能になる。またその情報網を使用して、機械データ、位置データ、作業量データ等が自動的に集中管理されることによりi-Constructionの取組も加速される。来年よりみちびき（準天頂衛星システム）の本格的サービスが開始されると通常のGPSシステムで高精度のナビゲーションが可能になり、建設機械の自動化は更に進むことになる。我々はこれを機に省力化の推進と作業効率の向上を進め、作業員不足の改善等の諸問題に取り組むことが今後の課題となる。

7. おわりに

謝 辞

本稿作成にあたり、国土交通省九州地方整備局をはじめ、現場関係者の方々にご助言やご見解を教示していただいた。この場を借りてお礼を申し上げる。今後は無人化施工等の幅広い分野への適用を目指して精進し、新技術を取り入れながら、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。

JCMMA



【筆者紹介】

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



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