

3. 最新の無人化施工技術と i-Construction で挑んだ阿蘇大橋地区 斜面防災対策工事

国土交通省九州地方整備局熊本復興事務所

野村 真一

(株)熊谷組土木事業本部ICT推進室 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

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。この影響で国道57号やJR豊肥本線が約300mの区間に渡り遮断し、国道57号に接続する阿蘇大橋も落橋するなど周辺一帯は、壊滅的な被害を受けた。これを受けて斜面上部に残る多量の不安定土砂の崩壊による二次災害を防止するため、国土交通省九州地方整備局は直轄砂防災害関連緊急事業として、阿蘇大橋地区斜面防災対策工事が実施された。

本稿ではこの工事に導入された最新の無人化施工技術と建設ICTにより実現した「総合的なi-Construction」について報告する。

2. 工事概要

2.1 無人化施工導入経緯



図-1 阿蘇大橋地区被災状況

阿蘇大橋地区で発生した大規模崩壊の規模は、長さ約700m、幅約200mにもおよび、崩壊土砂量は約50万 m^3 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(図-1)。また専門家、砂防・道路・鉄道関係者からなる「阿蘇大橋地区復旧技術検討会」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づき復旧工事を進めている(図-2)。

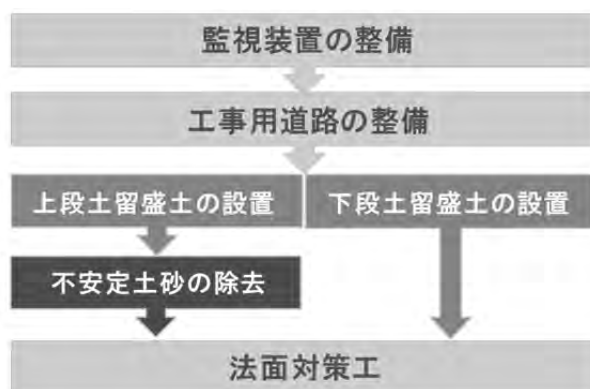


図-2 施工の流れ

2.2 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-3)。



図-3 阿蘇大橋地区斜面防災対策工事全体概要図

①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300mを施工した(図-4)。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することとした(図-5)。

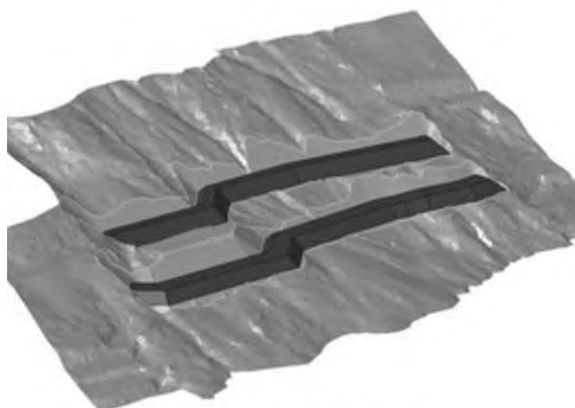


図-4 土留盛土工の3次元モデル

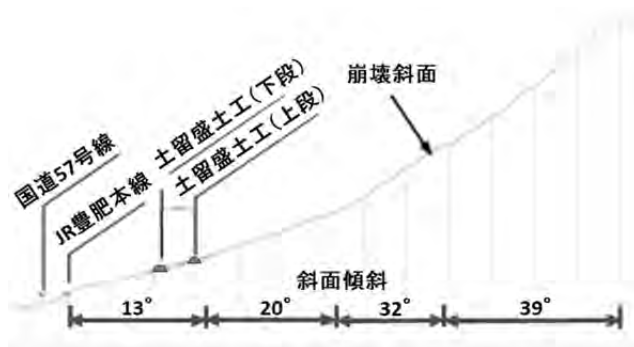


図-5 崩壊地斜面傾斜角度

盛土形状は無人化施工での施工性を考慮し、高さ3m、土留天端幅を5m¹⁾。施工については下記のとおり実施した。

- 土留盛土工は、セメント系固化材と現地崩壊土を現位置攪拌して敷均・転圧する方式と、場外で購入土とセメント系固化材を混合攪拌した改良土を搬入し敷均・転圧する方式により施工
- 目標強度レベルⅠの0.5N/mm²
- 現場密度試験、圧縮強度試験よりバックホウ(0.8m³級)の4回転圧で締固め度90%以上を満足することを確認

②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-6)(図-7)。

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なセーフティライマー工法を採用した(図-8)。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17,000m³を切土掘削1:1.2の勾配で除去した。各モニター映像は操作室まで配信され、総合的な施工監理を実施した。

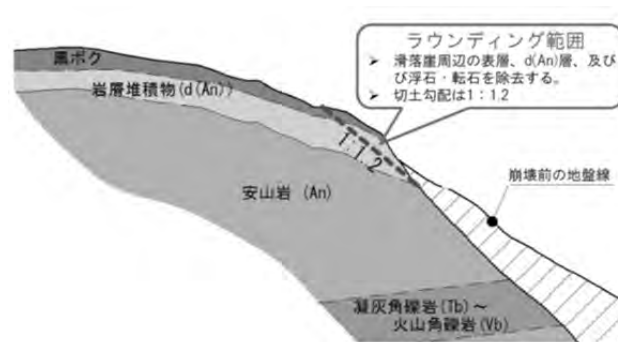


図-6 ラウンディング標準断面

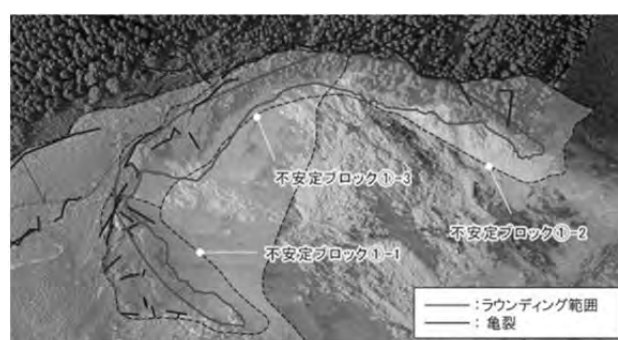


図-7 ラウンディング範囲

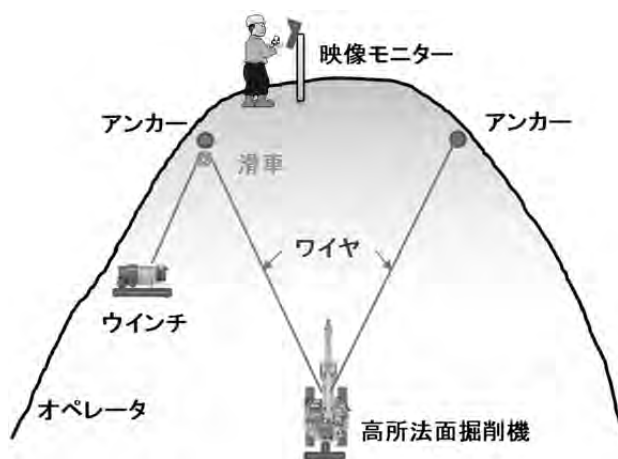


図-8 高所法面掘削機

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を導入した。その概要と当現場に導入されたシステムについて述べる。

3.1 ネットワーク対応型無人化施工システム

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300m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（図-9）。

a. 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。

b. 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。

c. 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。

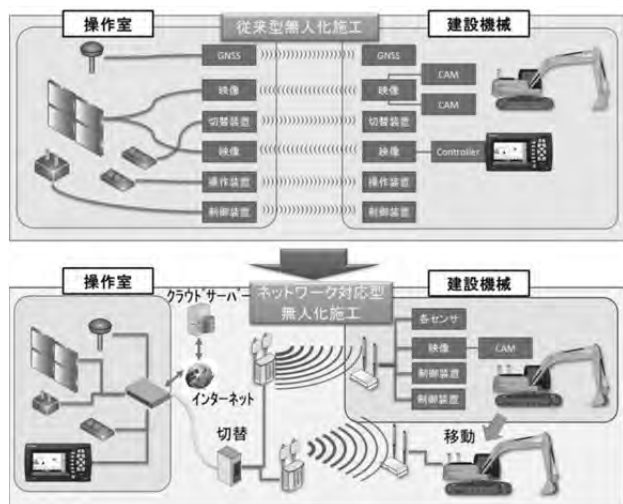


図-9 従来方式とネットワーク対応型の違い

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80km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。

3.2 土留盛土工用無人化施工設備

本工事の無人化施工による土留盛土工は、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-1）

表-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	前線地現場事務所付近に3日程度で立ち上げた高機能遠隔操作室の使用	前線地より1km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	下流下部無蓋局、下流中部無蓋局設置 作業用固定カメラ6台	4箇所は無蓋局設置 作業用固定カメラ13台 監視用固定カメラ3台
稼働建設機械	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	前線地現場下流（熊本側）現場事務所付近	前線地現場下流（熊本側）1km付近病院付近
外観		

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1km離れた場所に設置した（超遠隔操作室）。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700m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、150Mbpsの伝送量のある25GHz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25GHz高速アクセスシステムで伝送し、各無線局から建設機械までは、5GHz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1kmのデータ伝送が可能となった（図-10）。



図-10阿蘇大橋地区斜面防災対策工事無線システム概要図

3.3 ラウンディングにおける無人化施工設備



写真-1 ラウンディング遠隔操作状況

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。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（写真-1）。

4. 新技術の導入

4.1 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。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（図-11）。



図-11 ICTを導入した無人化施工システム

① 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。

a. 改良材攪拌作業

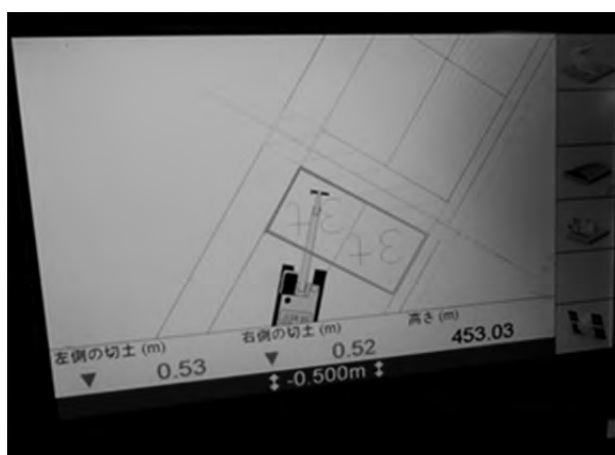


写真-2 マシンガイダンス改良材攪拌作業使用画面

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（写真-2）。

b. 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（写真-3）。

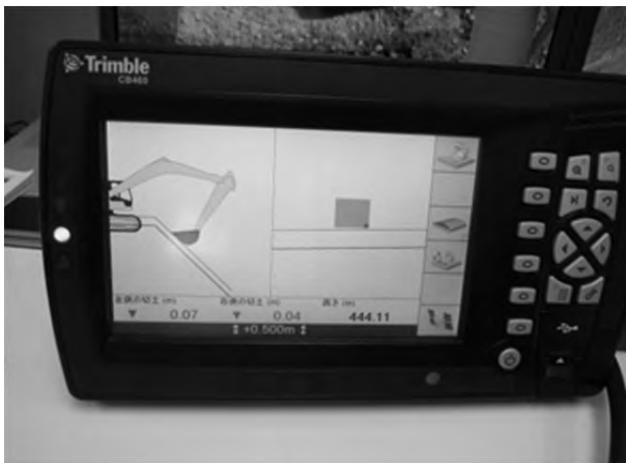


写真-3 マシンガイダンス法面整形作業使用画面

c. 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(写真-4)。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1km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。



写真-4 マシンガイダンス使用検査立会状況

d. 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(写真-5)。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。



写真-5 マシンガイダンス泥濘部水平器使用状況

② 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。(写真-6)



写真-6 ブルドーザ排土板制御システム使用状況

4.2 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-12)。



図-12 i-Constructionによる総合的な取組み

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(図-13)。



図-13 施工におけるi-Constructionの取組み

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(図-14)。

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。



図-14 管理、検査におけるi-Constructionの取組み

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。

a. 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1km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無く建設機械を稼働することが可能となった。

b. 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ことによりi-Constructionの取組も加速される。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

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。

8. 参考文献

1) 砂防学会 誌 Vol. 70No. 3(332) September 2017 P