

# 雲仙普賢岳火山砂防事業における 無人化施工の最新技術

建設無人化施工協会 技術委員会

近年、大規模災害において、無人化施工の重要性が広く認知されてきた。その技術の発祥の地であり、これまで育ててきた雲仙普賢岳での無人化施工技術の現在の状況を報告する。無人化施工は雲仙普賢岳の砂防事業で技術が確立し、現在も継続的に実施される工事をとおして技術進展が図られている。本稿では、雲仙普賢岳での無人化施工の最新の対応技術事例として情報化施工への取組、施工の効率化への取組、新たな工法への取組、災害防止への取組についてそれぞれ紹介する。

キーワード：災害対応、無人化施工、情報化施工、遠隔操作

## 1. はじめに

最近では、大規模な災害発生時に、危険区域での施工において、無人化施工の活用が検討されることが多くなってきた。これは雲仙普賢岳での無人化施工技術が17年間、着実に技術として発展していることを示している。無人化施工技術の発達については継続した工事により技術の伝承と発展がはかられ、現在の災害対応へ大きな役割を果たすようになってきた。

無人化施工の技術レベル毎の内容は、精度を要しない操作距離数十mの掘削等の単純作業から、カメラ映像、GPSを用いた情報化施工、超遠隔施工等の高度な通信技術等を駆使するものまでいくつかの段階がある。特に最近では情報化施工を取り入れた新しい世代の無人化施工へと発展してきている。

建設無人化施工協会は、有珠山噴火の無人化施工の対応を契機に、2000年11月に設立された任意団体で無人化施工技術を推進するために活動を行っている。以下に、協会に参加する会社が行っている無人化施工の現状技術の一部を報告する。

また水無川における雲仙普賢岳砂防事業は、水無川砂防基本構想に基づき、流域を火砕流や土石流被害から守り、安全な生活を確保することを目的として砂防堰堤等を建設する事業である。

現在でも平成新山の下流域は、土石流や落石の危機があり、法的にも立ち入りを制限されている「警戒区域」となっている。

立ち入り禁止区域では、落石や土石流等の危険から、監視カメラによる映像を元に、遠隔操縦装置を装備したブルドーザ・バックホウ・ダンプトラック・振動ローラ等の建設機械を操作する無人化施工を実施している。

## 2. 無人化施工技術の歴史

重機を遠隔操作する技術は雲仙以前からあったが、無線装置などを装備した遠隔操作室を操作基地として複数の遠隔操作式建設機械を稼働させる施工が行われるようになったのは、1994年（平成6年）1月に開始された「雲仙普賢岳水無除石無人化試験工事」からである（図-1）。

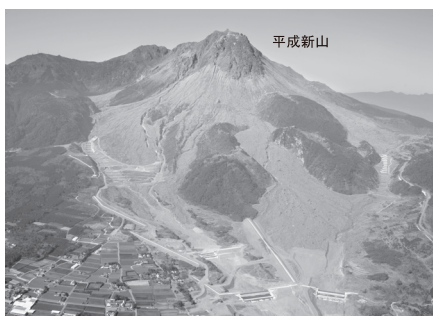


写真-1 雲仙普賢岳

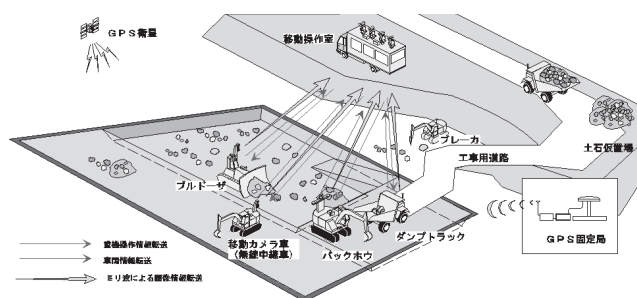


図-1 無人化施工（除石概念図）

この試験施工は、国土交通省（旧：建設省）の実績が少ない技術の現場適用性を確認する「試験フィールド事業」の最初の適用事例であった。技術内容は、立ち入り禁止区域における緊急除石工を、遠隔操作式建設機械により行うもので、図一2の条件が与えられた。

- ・ 100 m以上の遠隔操作が可能であること。
- ・ 2～3 m程度の礫の破碎が可能であること。
- ・ 一時的な温度100℃、湿度 100%で作業が可能であること。

図一2 試験フィールドの施工条件

試験施工の開始当初は、一般施工（有人）では単純な施工とされる除石（掘削・運搬）作業においても困難を極めた。無線障害等様々な問題が発生したが、工事関係者の努力により解決され、災害復旧に資する施工技術と認められた。

その後、1 km以上の超遠隔操作での施工より、工事規模が拡大し、さらに安全な施工法として確立し、有珠山への対応へ発展した。

最近では情報化施工を駆使して、より精度や効率を向上させることにより、無人化施工技術の完成度を高めている。

以下では最近の技術の一端として、情報化施工への取組、施工の効率化への取組、新たな工法への取組、災害防止への取組についてそれぞれ紹介する。

なお5.～7.で紹介する工法は各施工業者の技術提案であり、標準化されたものではない。

### 3. RCC 工法概要

現在、続けられている無人区域での床固工などの砂防工事では、主にRCC工法（Roller Compacted Concrete）により施工しているのでその施工手順を示しておく。施工は図に示すフローに沿って、固く練ったコンクリートをダンプトラックで運搬、ブルドーザで敷き均し、振動ローラで転圧して固める工法である。



写真一2 RCC工法による床固工

## 4. 情報化施工への取り組み事例

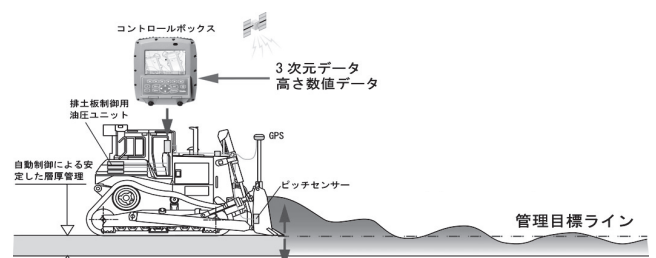
### (1) 排土板制御システムの概要

情報化施工の導入例としてブルドーザの排土板制御システムを紹介する。本システムは、RCCコンクリートの材料撤出し後の敷均し作業を行うブルドーザ施工管理を行うものである。

施工はオペレーターが遠隔操作室においてカメラ車の映像を利用し運転を行うが、映像のみでは確認が困難な現在の施工位置と地盤標高は、敷均し管理システムを利用し、排土板を計画高に合わせ作業を行う。仕上げ作業はGPSを利用した排土板制御システムを利用し、設定された敷均し作業時におけるブルドーザの排土板高さを自動で制御しながら施工を行う。

### (2) システム構成

敷均し管理に使用する排土板制御システムは、GPSを利用したRTK-GPS測量等の高精度な3次元計測技術によりブルドーザの排土板位置を計測し、敷均し標高を高精度に管理するものである。ブルドーザの排土板にはGPSアンテナを両端に配置し、中央にはピッチングセンサーを搭載して、排土板の3次元位置をリアルタイムに測位し、排土板を自動で制御する。ブルドーザの運転室に設置したシステムに予め設計値を入力しておく、排土板がその計画標高に敷均し作業を行う。このシステムを使用することにより、現地での丁張を必要としない敷均し作業を可能とするとともに、作業箇所全面の敷均し標高を色別表示により確認



図一3 敷均し管理システム概要

表一1 システム構成

区分	機器名	仕様・規格	台数	備考
GPS基準局	GPSアンテナ	L1/L2	1台	転圧システムと共用
	GPS受信機	RTK対応・2周波数	1台	
	通信設備(無線モデム)	特定小電力無線・PHS等	1式	補正データ送信
	その他	ケーブル・電源等	1式	
移動局 ※ブルドーザ	GPSアンテナ	L1/L2	2台	GCS900仕様
	GPS受信機	RTK対応・2周波数	2台	GCS900仕様
	通信設備(無線モデム)	特定小電力無線・PHS等	2式	送受信
移動式操作室 ※敷均システム	通信設備(無線モデム)	特定小電力無線・PHS等	1式	座標データ受信
	コントロールボックス	排土板制御システム	1台	GCS900
	レベルセンサー	電光パネル	1台	GCS900排土板制御
	管理用PC	敷均管理システム	1台	

することができる。図—3に概要図を示す。

システムに使用する主要機器を、表—1に示す。

(3) 施工

このシステムの導入により、コンクリートの敷均し時間が短縮され、仕上がり精度が大きく向上している。

実験の結果では、施工効率は手動で敷き均す場合の1.7倍に向上している。写真—3に施工状況を示す。これまでは施工が困難であった作業で、情報化施工の恩恵を大きく受けた工種である。



写真—3 敷均し状況

5. 施工の効率化

砂防堰堤工や床固工のコンクリート構造物構築工事でのRCC工法を無人化施工で行うためには、現地の土砂を型枠として利用する土砂型枠工法が必須となる。この土砂型枠設置の施工効率向上を目的として、ソフト的なアプローチとしてのガイド線表示システムとハード的なアプローチのフォーミング・ブレード工法を開発し、施工へ導入している。

従来法では無人測量システムにより、土砂型枠施工位置を多数マーキングし、その後、バックホウの幅1m程度の法面バケットにより土砂型枠を整形していた。

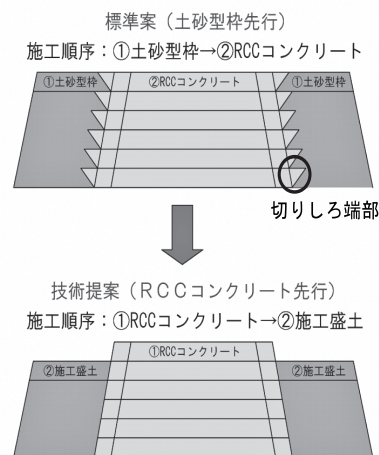
フォーミング・ブレード工法では油圧ショベルに取り付けた型枠用ブレードの位置と鉛直角度（それぞれGPS・傾斜計により測定）を、遠隔操作室のモニターに表示誘導し、ブレードを土砂型枠の施工位置に設置し、それをガイドに他の油圧ショベルで土砂を盛り立

てて型枠を施工する。

従来の工法と比較して17%以上の効率向上例が報告されている。

6. 新たな工法への取り組み(RCCコンクリート先行打設について)

無人化施工の初期には土砂型枠はRCCコンクリート先行打設であったが、現在、無人化施工でのRCCコンクリートの打設は、土砂型枠を設置した後、RCCコンクリートを打設する「土砂型枠先行型」にて施工がされている。この方式は、本体に対して余分な部分(切りしる端部)の打設を伴い、また、本体露出部については、はつり作業を伴う。その一方で、「RCCコンクリート先行打設型」に比べてRCCコンクリートの品質、出来形、作業性および作業効率等で有利な部分が多いため、一般工法とされてきた(図—4参照)。



図—4 RCCコンクリート先行打設の概念

赤松谷川3号床固工工事では、近年、ダム工事で採用されている台形CSGダム工法の内部先行打設に着目し、同工法で使用されている特殊法肩締め機の遠隔操作化等を行うことで、打設コストの縮減につながるRCCコンクリートの先行打設に取り組むこととした。図—5、写真—7に概要図等を示す。



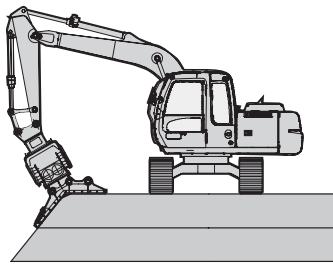
写真—4 型枠用ブレード



写真—5 フォーミング・ブレード工法 施工状況



写真—6 操作状況



図一五 特殊振動締固め機械による施工



写真一七 特殊振動締固め機械

### (1) 打設方法および管理手法

RCC コンクリートを10tダンプトラックで運搬し、試験ヤードに荷降ろし後、ブルドーザ21t級にて敷き均す。敷均し（リフト）厚は本施工と同様に50cmとし、薄層2回（@25cm×2）とした。敷均し後、バックホウ1.4m<sup>3</sup>級にて法肩部の整形を行った。整形終了後、特殊法肩締固め機による法肩締固めを行った。法勾配については、本施工は、1:1.0、1:0.5、1:0.2、1:0の4種類あるが、試験施工では、最も勾配の緩い1:1.0と最も勾配のきつい1:0の2種類とした。法肩締固め終了後に、振動ローラにて本体部分の転圧を行った。同時作業でバックホウ1.4m<sup>3</sup>級にて法肩部分の施工盛土を設置した。施工盛土の設置後、振動ローラにて法肩部および法肩と接する施工盛土部分の追加転圧を行った。

無人化施工では締固め度の測定ができないため、特殊法肩締固め機の締固め秒数および振動ローラの追加転圧回数にて管理を行うものとし、これを試験施工により決定することとした。

### (2) 試験施工

試験施工により、締固め秒数および追加転圧回数と締固め度の相関関係を確認し、規定の締固め度が得られる締固め秒数および追加転圧回数を決定することとした。また、それぞれの締固め秒数および追加転圧回数における沈下量を測定し、本施工時の巻出し量、巻出し厚の参考とすることとした。

締固め秒数は、10秒、15秒、20秒の計3種類とした。また、追加転圧回数は、2回（1往復）、4回（2往復）、

表一 試験結果一覧表（締固め秒数15秒）

転圧回数	法勾配 1:1.0	法勾配 1:0
追加転圧なし	1.010	1.011
追加転圧 2 回	1.026	1.018
追加転圧 4 回	1.035	1.026



写真一八 RCC コンクリート先行打設工法施工状況

6回（3往復）の計3種類とした。締固め度の計測は、密度水分計で行い、計測点は各種2箇所とし、その2箇所の平均値を計測結果とした。

### (3) 試験結果

通常の転圧回数（無振動6回、有振動4回 計10回）で締め固めた時の乾燥密度を「1」とした場合の締固め秒数15秒における試験結果一覧を示す。

この結果を受け、特殊法肩締固め機によるRCCコンクリート先行打設は、品質的に問題ないことが確認され、本施工を行っている。

## 7. 災害防止への取り組み

### (1) 赤外線カメラ画像による落石・土石流検知システム

雲仙普賢岳等の災害復旧工事において、地震による不安定な溶岩ドームの崩落や局地的豪雨による土石流の発生を早期に検知することを目的に開発されたシステムである。これにより、避難の安全性が向上するものである。

システムの構成

- ①ズームレンズ付広角赤外線カメラ
- ②ズームレンズ付標準赤外線カメラ
- ③水平・鉛直旋回機構（標準赤外線カメラのみ）
- ④画像処理ボード内蔵パソコン
- ⑤ディスプレイ（2台）
- ⑥警報用回転灯、スピーカー
- ⑦専用ソフト

### (2) システムの内容

遠隔操作室に高精度赤外線カメラ監視システムを設

置し、対象エリアを専従監視員が常時観察する。赤外線広角カメラで全体を監視し、溶岩ドームとガリー等複数のエリアを赤外線望遠カメラで監視する。観測エリア内の山体や河川部の変化を画像処理技術で自動的に検出するシステムである。予め設定された変化許容範囲を超えた場合、回転灯と警報を鳴らし専従監視員に注意を促す。専従監視員は土石流・落石等を確認、直ちに警報を発し、緊急避難を行うことで安全な退避を可能とする。

以下にシステムの特徴を挙げる。

- ①雲仙普賢岳は、有明海に面しているため山頂はほぼ一年中霞みが掛かっているため霧を透過する赤外線

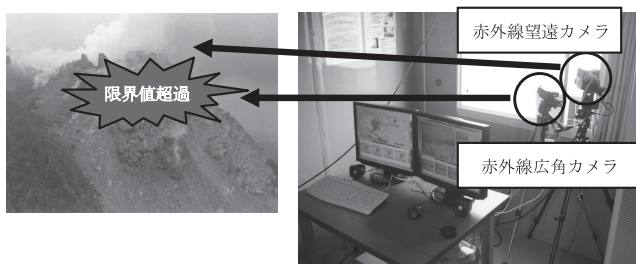


写真-9 システム設置状況

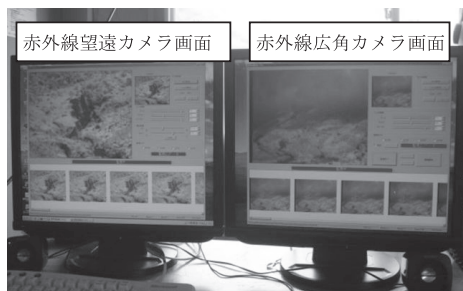


写真-10 監視用モニター

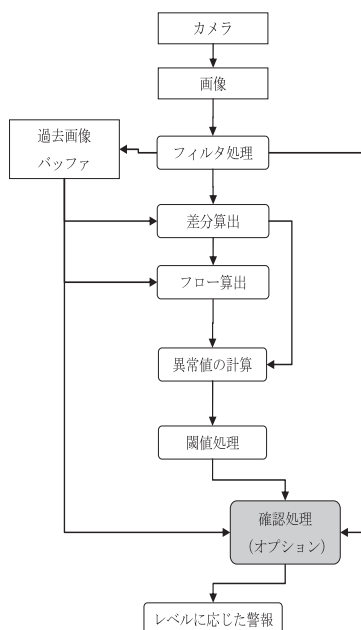


図-6 画像処理フロー図

カメラを採用している。

- ②広角カメラで全体を監視し、旋回台付標準カメラで崩落箇所2箇所、土石流箇所（ガリー）2箇所を監視している。
- ③画像処理技術で自動検知ができ、全体の変化を優先したり、小範囲で動きのあるものを優先することがパラメータの調整で可能となっている。

## 8. おわりに

雲仙普賢岳における無人化施工技術の情報化施工への取組、施工の効率化への取組、新たな工法への取組、災害防止への取組をそれぞれ事例として紹介した。このように様々な無人化施工の工種において施工各社の地道な努力により、技術が少しずつ進歩している。

無人化施工は、「建設機械等による災害対処・復旧支援について 提言」(平成19年2月)や「火山噴火緊急減災対策砂防計画策定ガイドライン」(平成19年4月)でも注目されており更なる活用が望まれる。

前述の技術開発事例は多くの災害現場でも活用されていくことが期待される。建設無人化施工協会では、無人化施工を活用し、安全な災害復旧工事が数多く実施されるように、これからも、無人化施工技術の把握と技術情報の提供に努めて行きたいと考える。

最後に国土交通省 九州地方整備局 雲仙復興事務所の皆様をはじめとする関係者各位のご指導、ご助言に深く感謝いたします。

<建設無人化施工協会 HP >

<http://www.kenmukyoku.gr.jp/index.html>

JICMA

### 【参考文献】

- 1) 災害復旧における無人化施工 建設無人化施工協会 技術委員会 建設機械 第47巻 第7号 p.1~7 平成23年7月1日
- 2) 赤外線カメラによる画像監視システム 第12回建設ロボットシンポジウム論文集 無人化施工によるプレキャストアーチカルバート据付工事の実績 渡部文人, 大内田聖和, 野末 晃, 三鬼尚臣, 藤岡 晃 P.57~66, 2010年9月7日 (社)日本ロボット工業会
- 3) フォーミングブレード 九州技報 No.44 2009.1 水無川における最近の無人化施工 渡部文人 p.33~39, (社)九州地方計画協会
- 4) 無人化施工におけるブルドーザ排土板制御システム 北原成郎・周藤健 建設機械 第44巻 第10号 平成20年10月1日

### 【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  
 担当部長

