

無人化施工の推移と展望

建設無人化施工協会 技術委員会

無人化施工技術は、1993年（平成5年）度の試験施工以来、災害復旧工事などにより大きく発展してきた。特に近年の自然災害の増加により、緊急災害時の無人化施工は重要性を増してきている。また、無人化施工で蓄積された先端技術は、無人化施工だけにとどまらず、情報化施工にも展開を見せ始めている。本報文では、無人化施工の技術の概要と変遷、水平展開された技術、最近の無人化施工の事例と今後の発展性および課題について述べる。

キーワード：無人化施工、情報化施工、推移と展望、建設ロボット、無線通信技術

1. はじめに

無人化施工とは、「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」と定義できる。無人化施工で行う災害に対応する工事には、災害発生直後の被害を最小限に食い止めることを目的とした「応急対策工事」と、災害がある程度沈静化した後に行う本格的な「復旧工事」に分類できる。さらに作業員が被災しないよう保護したり、劣悪な環境を避けるために無人化施工工事が行われる。

無人化施工の歴史は、1969年（昭和44年）の常願寺川の「富山大橋脚沈下応急復旧工事」において、河口部に堆積した土砂の掘削、押土に「水中ブルドーザ」が導入されたのが始まりである。1990年（平成2年）雲仙・普賢岳の噴火ののち、1993年（平成5年）から始まった「雲仙普賢岳噴火災害緊急対策工事」で、国土交通省（旧建設省）が除石工事の掘削・積込み・運搬の一連の土木工事に、「無人化施工」の「試験フィールド制度」を適用したことを契機に「実用的な工法」として確立され、この後、多くの災害復旧工事で利用されるようになった。

2000年（平成12年）の「有珠山噴火災害緊急対策工事」では、「2 km以上離れた箇所から操作する超遠隔施工」が実用化され、従来方式から更なる発展を遂げる契機となった。また、2004年（平成16年）の新潟県中越地震では、大規模土砂崩落現場での災害対策工事を官・民が一体となった無人化施工工事で成果を

上げている。

「無人化施工技術」は飛躍的に進歩・発展し現在では「土木技術」と「遠隔操縦技術」ならびに「各種遠隔施工支援技術」などが融合した世界に類を見ない「新たな施工技術」へと発展し、多くの実績を残すまでになった。

1993年（平成5年）に雲仙・普賢岳で行われた試験施工で初めて建設機械を組合わせて施工する本格的な無人化施工が始まった。無人化施工技術の発達は、この雲仙での災害復旧工事の果たした役割が大きく、無人化施工技術のインキュベータの役割を果たした。また、時々発生する多様な災害に対応した実績を積重ねることにより、技術がさらに高度化するなど進化を続けている。

雲仙・普賢岳では、火砕流や土石流の範囲が広く、広大な作業域で多くの重機を効率よく動かすことが求められた。有珠山では、高速道路や市街地でのビル、電柱等の障害物への対応が求められた。三宅島では、発生するガスへの対応、姫川等の砂防工事では狭隘な山間地への対応など、その現場に適した形で工事を行ってきた。新潟県中越地震の際は、崩壊する危険のある法面で難しい作業を行っている。

こうした技術開発の中核的役割を果たしてきた建設無人化施工協会は、無人化施工に関わる16社によって2000年11月24日に設立された無人化施工技術を推進するための活動を行う任意団体である。

雲仙・普賢岳での試験施工から12年が経過し、最新の情報化施工の流れの中で無人化施工も新たな転機を迎えている。建設無人化施工協会会員の活動を中心

にこれまでの推移と今後の展開について簡単にまとめたのでここに紹介する。

2. 無人化施工技術の変遷（歴史）

表一1に無人化施工の技術変遷を示すが、以下に雲仙・普賢岳の技術開発の現状とそれによって展開された技術現況を紹介する。

（1）試験フィールド制度による技術の確立

雲仙・普賢岳の無人化施工は、1993年（平成5年）7月に国土交通省（旧：建設省）が、「試験フィールド制度」を活用し、民間に技術提案を公募したことから始まる。公募された技術は、土石流発生後の遊砂地等における緊急除石工を遠隔操作付き建設機械により行うものであり、下記の技術的条件を満たすものとされた。

- ①100 m以上の遠隔操作が可能であること。
- ②2～3 m程度の礫の破碎が可能であること。
- ③一時的な温度100℃、湿度100%で作業が可能であること。

試験施工は、1994年（平成6年）から始められたが、有人では単純作業とされる除石作業でさえも、無人化施工には困難なものであった。作業は、無線の混信、電源トラブル、耐久性の問題およびカメラの死角等による接触のほか、様々なトラブルによってしばしば中断された。しかし、最終的には、要素技術の積極的な活用と工事関係者の努力により、問題がひとつづつ解決され試験工事は無事終了した。

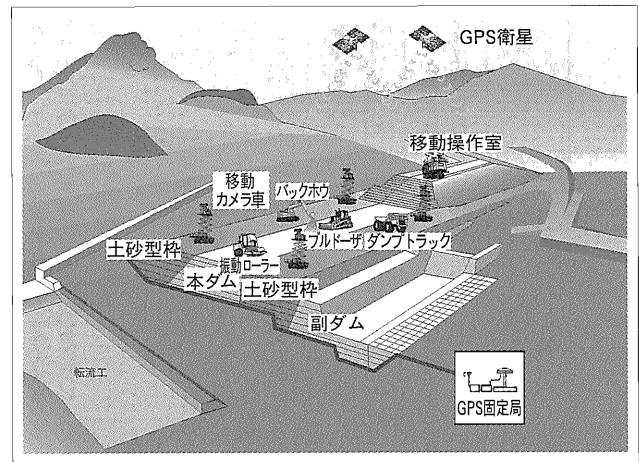
これらの経験を生かし、その後に実施された緊急除石工で、作業能力的な見通しがたったことから、「雲仙における無人化施工に関する委員会」が無人化施工における除石工について、実用の域に達したものと評価を下し、その後、10万m³以上の本格的な施工が実施されていくことになる（写真一1）。



写真一1 除石工施工状況

（2）除石工から構造物への展開

土工（除石工）での技術の確立をみた無人化施工は、砂防構造物へ対応すべく技術展開していくこととなる。1995年（平成7年）9月よりRCC（Roller Compacted Concrete）工法による砂防堰堤の築造が開始された（図一1）。



図一1 無人化施工（RCC）概念図

RCC工法が採用された理由は、RCCをダンプトラックにて堤体まで運搬し、ブルドーザで敷均し、振動ローラーで締固め、堤体を構築するといった打設工程が土工の延長線にあり、これらに無人化施工を適用しやすかったことによる。

しかしながら、構造物の構築では、さまざまな作業に対応する無人化施工機械の開発が必要になった。また、品質確保の要求が付加されることにより、精密な施工と同時に品質管理面での技術が求められた。

無人化施工機械の開発では、まず、振動ローラーや小型ブルドーザの遠隔化が図られ、それ以後、無人スイーパー、無人散水車などが開発されていった。さらに有スランプのコンクリート打設のため無人のアジテータ車、ポンプ車も現場に導入された。

1999年（平成11年）には、従来の建設機械の運転席に外部制御ユニットを搭載し、そのユニットで操作レバーを動かし、遠隔操作を行う機器も開発された（ロボQ、直動式遠隔操作システム：ALD（Active Lever Drive Control System）システム）（写真一2）。操作レバーの遠隔操縦には空圧またはステッピングモータ+ワイヤを使用する。汎用の建設機械に装着可能であるため、今後、注目される技術である。

また、同年に共用変換器の開発もなされた。本機器は、メーカー各社の遠隔操作機械の遠隔操作を統一することにより、国が常備する遠隔操作装置と民間の保有する遠隔操作機械の有効活用を目的としている。

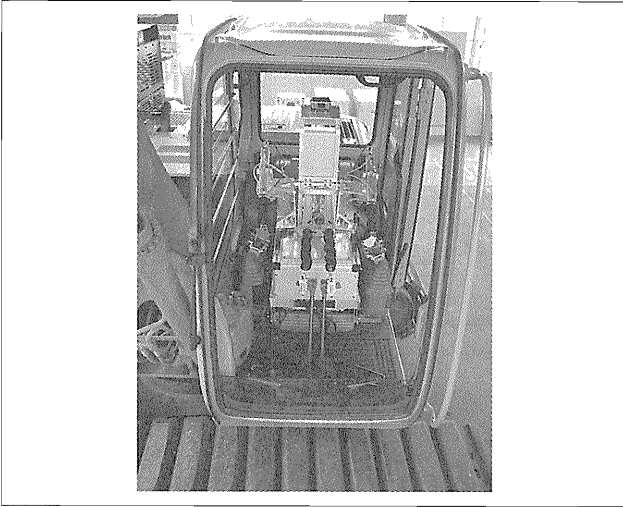


写真-2 ロボQ取付け状況

施工管理技術としては、RTK-GPSを利用した敷均し管理、転圧管理システムが開発された。その後、無人の簡易支持力測定、無人測定の開発を経て最新技術の3次元座標を使った施工システム(3章)へ発展していった。

その他の構造物では、把持装置の開発と上記の測量技術を組み合わせることで、鋼製スリットの設置が行われた(写真-3)。



写真-3 スリットダム施工状況

(3) 無線通信・映像技術について

これらの技術は、無人化施工の基盤となる技術で前記の工種的な技術展開と同時並行的に進められた。無人化施工で無線や映像伝送に求められたものは、確実な通信とともに遅延のない映像技術である。

そのなかで、重要な役割を果たしたのは1995年(平成7年)に開発された50GHz簡易無線用アンテナを常に対向させる自動旋回台である(写真-4)。映像伝送に使われる50GHz帯の簡易無線は、直進性が



写真-4 自動旋回台

高いため、アンテナを常に対向させることを要し、頻繁に移動を伴う作業重機での適用は難しいものとされていた。自動旋回台は、ジャイロ、角度計等のセンサーを組合わせたもので、プリセットされた方向を常に維持する仕組みとなっている。

この装置の開発によって移動体にカメラおよび50GHz帯簡易無線を搭載することが可能となり、有人施工のオペレータの視野に近い映像を用いて施工が行えるようになったことは画期的であった。

次に求められたものは、より安全な場所から操作を行うことができるための遠隔操作距離の延伸(以後、超遠隔施工)である。1995年(平成7年)頃から無線を組合わけて距離を延伸する中継方式への取組みが開始された。

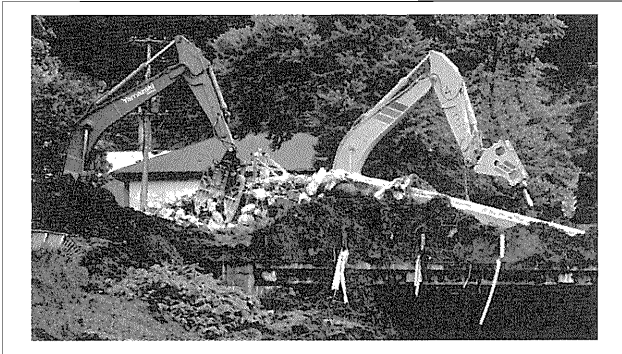
1997年(平成9年)には、建設無線協会が設立され、協会で認可を受けた高出力無線を使い、直接、遠隔操作距離を延伸する直接方式への取組みがなされた。これらの方式が工事として採用されたのは1999年(平成11年)の除石工事からで、以後、数回実施されている。

(4) 技術の水平展開

雲仙・普賢岳で培った無人化施工技術は、全国各地でその蓄積技術を生かし施工環境に合せ展開、進展している。

技術展開された代表例は、2000年(平成12年)の有珠山災害復旧における超遠隔施工(写真-5)や2001年(平成13年)の三宅島災害復旧の把持装置や測量技術を駆使し、コンクリートブロックを積上げた床固工の構築などが挙げられる。

また、新たな技術例では、2002年(平成14年)、樽前山の無人化試験施工で、50GHz帯簡易無線の無指向性アンテナ(オムニアンテナ)が開発・導入され、



写真一5 有珠山 橋梁破砕施工状況

2003年（平成15年）には利根川水系砂防の谷沢川において、無線環境が悪い狭隘地でローミング機能を有効利用した無線LANが採用された。

また、運用事例としては、2004年（平成16年）10月の新潟県中越地震の妙見町での無人化施工（後記）や2006年（平成18年）の沖縄地すべり災害復旧、岐阜県東横山の土砂災害復旧があり、現在、鹿児島県桜島でも大規模な除石工が予定されている。

このように無人化施工は、雲仙・普賢岳の試験施工から着実に進化しており、新たな施工環境や技術要求を与えることで、さらなる可能性を持つものと考えられる。

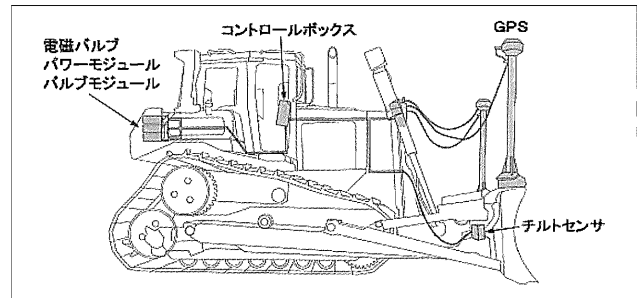
3. 最新の無人化施工技術

2章で述べたとおり、無人化施工技術はここ十数年のあいだに目覚ましい進歩をとげている。3章では、最新の技術を無人化施工に適用した実例を紹介する。なお、以下の技術は丁張を必要としないものであり、有人施工の工事ですでに適用されているが、無人化施工における施工支援システムとしてより高い効果が期待できる技術である。

（1）ブルドーザ排土板制御システム

RCCの敷均し作業は、コンクリートの品質確保等に重要なものである。本システムは、ブルドーザの排土板を自動制御することによって、オペレータの負担を軽減するとともに、施工精度の向上や品質の確保に寄与する技術である。

排土板の左右両端に設置した2台のGPS受信機とチルトセンサにより、排土板の3次元位置を計測し、排土板の高さを自動的に調整する（図一2）。これにより、オペレータはブルドーザの前後進操作のみで敷均し作業ができる。本システムの導入により、敷均し高さの均一さが向上し、また、繰返し高さを確認するこ



図一2 機器取付け図



写真一6 敷均し状況

とがなくなったため、作業時間の短縮が可能となった（写真一6）。

（2）3次元バックホウコントロールシステム

従来の掘削・盛土作業などは、無人測量装置などで切出し位置や勾配を確認しながら行う必要があり、仕上げ段階において特に時間を要していた。本システムは、コントローラに表示される3次元の設計データとバケット位置の差をオペレータが常時確認しながら作業ができるため、効率的な作業が可能となり出来形の向上にも大きく貢献する技術である（写真一7）。

無人化施工に適用させるため、コントローラに表示画面をカメラで撮影し遠隔操作室に伝送するとともに、



写真一7 システム搭載機

画面を切替えるための押しボタンスイッチを無線操作式とする方法を採用している（写真—8）。



写真—8 遠隔操作室の状況

本システムの導入により、切出し位置や施工途中での確認に無人測量装置が不要となり、作業効率の向上が可能となった。

4. 無人化施工の展望

1993年（平成5年）度に雲仙・普賢岳で実施された試験フィールド工事以前に行われた無人化施工は、特殊なケースと捉えられ無人化施工という観点で普及・水平展開されることは無かった。一方、被災後の復興を迅速に行うためには、危険な条件下でも被災地における工事の施工が必要不可欠である。

特に雲仙・普賢岳の水無川河口周辺では、火山灰等の堆積物が降雨などにより土石流となって災害を拡大することが予想された。そのためには実用的な工法として無人化施工を確立し、技術の向上を図ることで適用工事範囲を拡充していくことが求められ、現在に至っている。

（1）雲仙・普賢岳以前で無人化施工が普及しなかった要因

普及を阻害した主な要因としては以下のことが考えられる。

- ①有人作業と比較して作業効率が極端に劣る。
- ②カメラによる画像伝送設備を備えず、目視による施工には作業環境や作業内容、品質の確保に限界がある。
- ③被災後の危険な状態であっても有人による工事を実施した過去の事例と比較され、特殊な案件でしか採用されなかった。

（2）雲仙・普賢岳以後で無人化施工が普及され始めた要因

- ①雲仙・普賢岳で継続的に無人化施工が採用されたことにより、機械技術、無線技術、画像処理技術、オペレータ習熟度の向上などの基礎が培われた。継続的な工事によって各種技術は確実に進歩し、作業効率も大幅に向上した。
- ②1995年以降、各地で発生した土石流災害、山腹崩落災害、岩盤崩壊、地すべり、噴火災害などにおいても採用され始め、各々特殊な作業環境、作業内容であっても、柔軟に対応することができる技術力が培われた。
- ③新しい技術の導入により、河道掘削・除石、遊砂池構築、砂防堰堤の築堤、鋼製スリット砂防堰堤の構築、ブロック積み砂防堰堤の構築など多岐にわたる工事が無人化で実施可能になった。

（3）災害復旧工事以外での普及・展開

危険、苦渋、劣悪な作業環境の対策として、以前から特殊な分野で遠隔操縦方式による単純な施工に導入されているが、最近では様々な分野に導入されており災害復旧工事以外でも適用される例が増加している。実施例を以下に示す。

（a）粉塵対策

粉塵が多い坑内（写真—9）での割岩作業での導入例で、坑内グリズリ部の大岩塊小割作業用に導入された電動・遠隔操作式ブレイカである。



写真—9 トンネル仕様の遠隔操作機械

（b）ガス対策

火山地帯での噴出ガス対策として、操作室に特殊装置を導入した例で、三宅島無人化施工では、火山性ガス下での作業を伴うため、オペレータの安全のため、脱硫装置付き遠隔操作室を使用した（写真—10）。

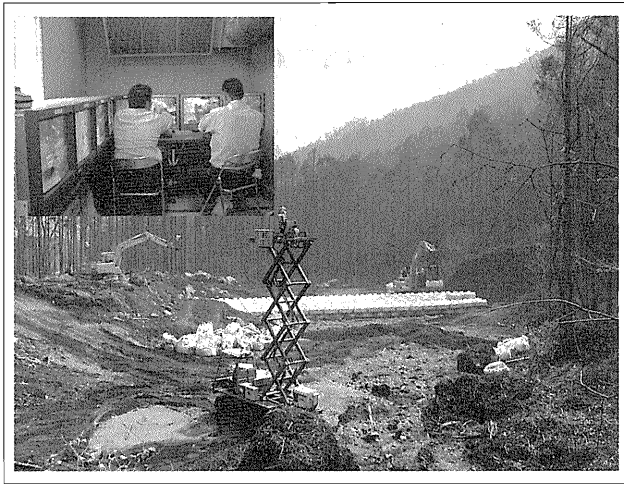


写真-10 三宅島での無人化施工状況

(c) 土壌汚染対策

オペレータの作業環境改善のため、土壌汚染対策として実施された例がある。土壌汚染にかぎらず環境対策分野では今後施工が増加する可能性が高い。

(4) 新潟県中越地震以後の課題

妙見町土砂崩壊現場での無人化施工は、これまでの経験を生かし、比較的スムーズに無人化施工へ移行できた好例である。当時、余震が続くなか、遺体の捜索が急がれており、最善の工法として無人化施工を行った。

幸い北陸地方整備局管内に無人化施工機械が3台あり、迅速に現地導入できたことが成功へつながった。緊急時の対応において機械の調達是最も重要な要素であり、全国で無人化施工が広まることで遠隔操作付き建設機械が容易に調達できる環境が整うことを期待する。災害多発地帯などでは国と民間が一体となって機械や無線機器を迅速に提供できることが望ましい。

また雲仙・普賢岳では無人化施工の管理技術が特に発達してきた。無人測量機などはその代表例であり、今後も情報化施工を取込んでさらに無人化施工がスムーズに展開できるような環境が整いつつある。

5. おわりに

無人化施工が多様化、高度化しさらに工種を拡大していることを示した。今後無人化施工が解決すべき課題を以下にまとめる。

(1) 災害時における応急、復旧工事への適用

遠隔操縦式の建設機械による無人化施工が災害時に有効活用出来ることが確立された現在、更なる発展の

ための課題として、

①予測のつかない災害のために無人化施工可能な機械を保管・維持・管理し、要請があれば迅速に現地へ機械を搬送可能な体制が必要である

②無人化施工には不可欠な「各種遠隔施工支援技術」レベルの停滞なき向上が重要である

ことが挙げられる。

特に技術革新の著しいコンピュータに関わる電子技術の向上に合わせた情報化施工などの取組みが重要である。

(2) 今後の無人化施工導入に向けて

無人化施工は、上述のとおり災害復旧工事以外の分野において、少なからず作業員に危険が伴うような工事での安全性の向上や施工環境の改善を補う方法としての採用が進みつつある。しかし残念ながら、高度な技術の組合せで成立つ無人化施工技術は、割高な設備であると同時に、作業効率が有人作業より低減することから、コスト的な課題は絶対的である。

割高な設備面では、より多く使われることによりコストは圧縮される。また、作業効率についても、情報化施工を組合せた管理面を含めた工事全体の効率向上の可能性もある。

今後はこれらの研究を推進し、無人化施工技術の向上を止めさえしなければ、様々な分野で無人化施工が採用されていくものと信じている。

JCMIA

《参考文献》

- 1) 松井宗広：建設機械の無人化施工技術，建設機械，pp.35～40，1997. 3月号
- 2) 村松敏光：情報化施工と今後の動向①，建設機械，pp.8～19，2002. 1月号
- 3) 平地正憲：建設無人化施工協会の役割と今後の展望，建設機械，pp.7～11，2003. 3月号
- 4) 吉田 貴：三宅島における無人化施工の導入事例とその期待効果，建設機械，pp.12～15，2003. 3月号
- 5) 青野 隆：有珠山噴火災害復旧工事における無人化施工，建設機械，pp.20～25，2003. 3月号
- 6) 北原成郎：雲仙普賢岳災害復旧工事における無人化施工，建設機械，pp.16～19，2003. 3月号
- 7) 猪原幸司・吉田 貴・藤岡 晃：災害復旧工事における遠隔操作式建設機械の現状と最新工事事例，建設機械，pp.7～13，2005. 5月号
- 8) 岡本 仁・浅野正照：赤松谷川床固工工事における最新の無人化施工技術，月刊メディア砂防，pp.14～17，2006. 9月号

[筆者紹介]

建設無人化施工協会

〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 (新宿センタービル)

tel: 090-4549-4009

fax: 03-3344-4437

URL: <http://www.kenmukyou.gr.jp/>