

建設工事における無人化施工

独立行政法人土木研究所技術推進本部先端技術チーム

やまもと ひろし

主席研究員 山元 弘

1. はじめに

平成19年3月25日の能登半島地震では、輪島市で遠隔操縦式油圧ショベルが復旧作業にあたった。また平成18年5月岐阜県揖斐川町地すべり、同年6月沖縄県中城村地すべりでは、平成18年のロボット大賞優秀賞に選ばれた「ロボQ」と呼ばれる遠隔操縦装置が、復旧作業に用いられた。近年の災害では、国が危機管理として保有する遠隔操縦式機械を初め、無人化施工で復旧作業にあたることは、特別なことではなくなってきた。

雲仙普賢岳の災害を契機として継続的に用い続けられ、建設無人化施工は、発展し熟度を増してきた。可住地の人口密度が高く、災害が多い背景、国柄、関係者の英断と継続的な努力もあり、このいわゆる雲仙タイプの建設無人化施工は、世界に類を見ない新たな施工技術となっている。

日本は、ロボット大国である。総合科学技術会議でも、産業用ロボットのほか、人の役に立ち、次世代基幹産業候補との議論があり、科学技術基本計画に反映されている。建設分野でも、昭和の昔から取り組まれ、「雲仙タイプ」を含め無人化施工に至っているものもある。また観測施工から発展したいわゆる情報化施工から、無人化施工に至っているものもある。

ここでは、建設工事の幅広い分野における無人化施工の現状を紹介し今後について展望する。

2. いろいろな無人化施工

(1) 3次元マシンコントロール（排土版制御）
戦後、建設工事は機械化が進められ、人力作業は機械作業となり、施工能力は飛躍的に増大した。また省力化は、安全性にも効果があった。作業の一部分に着目すれば、無人化は継続的に進められてきたとも言える。

このような観点で、最近身近で話題となっている技術では、グレーダやブルの自動ブレード制御（3次元マシンコントロール）の導入が進みつつある。この技術は、敷均しのブレード操作を自動で行うもので、以前より回転レーザーでの高さ制御が行われており、近年のGPSまたは自動追尾トータルステーションでは位置に応じた高さ制御を行うようになっている。

従前では、作業員が計測して修正作業を行っていたが、この技術では、修正作業は大幅に短縮され、計測は作業終了前の確認のみとなる。また丁張り等の施工目標の設置の省略が可能で、欠点をあげれば現場の作業員には施工現場の目印がないこととなる。ここでの効果は、丁張りの省略や作業時間が短縮されることにより、生産性の向上、

計測作業員の省人・省力化，人による計測頻度が下がるため安全性が向上，運転時間が短縮されて環境負荷が低減等，複合的に効果がある。品質確保としては，所定の厚さと平坦性が，面的に，オペレータの操作技量によらずに担保され，かつ記録にとることも可能である。さらに精度向上に価値があるならば，この方向性も考えられる。また結果としての工期短縮は，受発注者がこれを生かすことができるのであれば，事業効果の早期発現，工事による社会的損失の低減，総合的環境負荷の低減，仮設等定常経費の低減，機器・技術者の次の現場への早期移動，受注機会の拡大等，好材料がそろっている。

欧米では，比較的大規模現場に恵まれている，丁張り技術者の確保に難渋することがある，工期短縮ボーナスがある，高機能機械の保有により受注が有利になる等で，大きく普及が進んでいる。日本でも大規模現場を中心に導入が進んでいるが，一定の稼働が担保されれば，普及の臨界点に到達すると考えられ，このためにも中小現場での転用先が確保されること，レンタル会社からの活用ノウハウとセットでの供給などが期待されている。

またこの技術は，遠隔無人化施工にも適用することが可能で，平成18年度には雲仙でブルドーザによるRCC敷均し作業に用いられており，遠隔操作の制約を克服しようとするものであり，さらに大きな効果を上げられているものとみている（写真 1）。



写真 1 RCC 敷均し状況

(2) 無人化施工の活躍の場

冒頭にあげた事例での無人化施工とは，「『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，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，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。」こととされている。また，前項では施工効率の向上を含む事例を紹介した。これらを含めて，全体像を概観したい。

圧気式のケーソンは，苦渋かつ危険で効率の問題もあり，昭和末には無人化施工を実用化している。掘削積込の位置は限定されており，カメラや計測データをITVに表示して遠隔操作する，有線のシステムであった。技術は進んでおり，無人での解体作業や地盤計測も可能となっている。地下工事では，ほかにシールド等，高度に省人プラント化が進められ，施工効率の向上にも寄与している。

港湾工事では，水中敷石均し等で，潜水夫や視界と施工効率の問題があり，水中バックホウで，遠隔操作が可能で（かつマスタスレーブ操作が可能で），バケットによる触感計測が可能な機械が開発されている。また，ケーソン据付でも，遠隔無人化施工の技術が実用となり，精度・効率・技術の安定性とも良好と聞いている。

建築工事は，ビルの設計時から考慮されていれば，ビルの階ごとの繰り返しが多く，施工位置が限定されていることから，いわゆる装置化施工に向いているとされてきたが，自動化施工にあっては，施工効率の向上にも効果があると聞いている。また，ダイオキシン汚染で問題となった焼却炉の解体でいくつかの機械が開発され，無人化施工が行われた。その他解体での遠隔機械も開発されている。

崖地・斜面の作業では，目視タイプの遠隔操縦

として、専用機械が独自の発展を遂げており、ある程度の規模があれば施工効率も有利となっている。

このほかにも、危険、苦渋、劣悪な作業環境の対策として、災害復旧のほか、以前から比較的単純な施工に導入されていたが、近年さまざまな分野で事例が増えている。例えば、粉じん対策として坑内での割岩作業、ガス対策として三宅島無人化施工脱硫装置付遠隔操作室、土壌汚染対策としてオペレータの作業環境改善等がある。

これらにあっても、解決されるべき課題が特定され、無人化施工が活躍すべき場が明確となって、開発が進められてきたと考えられる。

3. 建設無人化施工

(1) 雲仙普賢岳まで

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で、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、その後桜島野尻川の河口部に堆積した噴出物の掘削、押土に用いられたことは広く知られている。また立山砂防では、危険個所での作業に1983年に無線遠隔操作の油圧ショベルを導入した。これらは、見通しのきく場所での目視であり、精度・効率は有人より悪く、特殊な案件での採用にとどまり広く使われるには至らなかった。このため安全が確保されてからの着手となっており迅速な復旧が必要との認識がある一方、ここでは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るなどの問題も提起されていた。

建設無人化施工は、1990年雲仙普賢岳の噴火の後、1993年から始まった雲仙普賢岳噴火災害緊急対策工事で、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た。試験フィールドで公募された技術は、土石流発生後の遊砂地等における緊急除石工

を遠隔操作建設機械により行うもので、100m以上の遠隔操作、2～3m程度の礫の破碎、一時的な温度100℃、湿度100%での作業が条件となっていた。ベースとなる技術は、先に述べた遠隔操縦と無人ケーソンの有線ITVがあったが、1994年の試験施工では、無線の混信、電源、耐久性およびカメラ死角等による接触等さまざまなトラブルを克服し、その後の緊急除石工で作業能力の見通しがつき、10万m³以上の施工が行われた。そしてこの後、多くの災害復旧工事で利用されるようになった（2004年9月現在108件の工事、建設無人化施工協会調べ）（図1）。

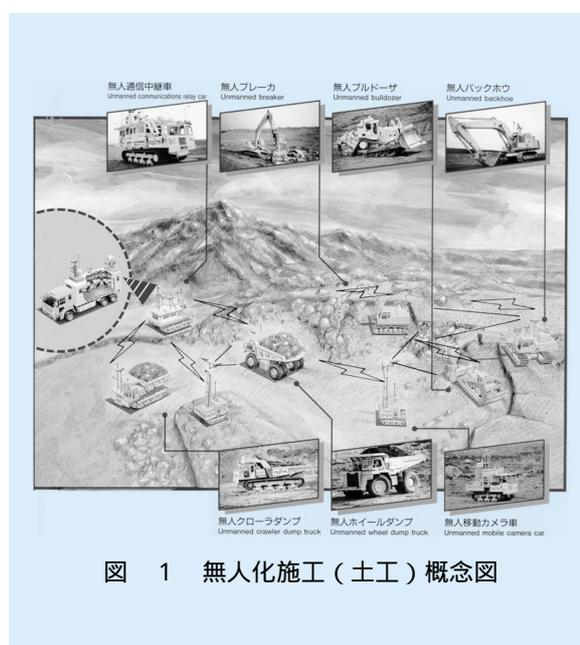


図 1 無人化施工（土工）概念図

無人化施工技術の発達には、この雲仙での継続的な災害復旧工事の果たした役割が大きく、機器やシステム、関係者の技術の熟度が増し、また、時々発生する多様な災害に対応した実績を積み重ねることにより、技術がさらに高度化するなど進化を続けている。

表 1 に無人化施工の技術変遷を示す。

(2) 雲仙普賢岳を中心とする展開

土工（除石工）で確立された無人化施工は、1995年土工での技術を展開したRCC工法による砂防堰堤に進められた。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と、精度よい施工と品質管理技術が求められた。

無人化施工機械の開発では、まず、振動ローラ

表 1 無人化施工の技術変遷（建設無人化施工協会提供）

	1994 平成 6 年	1995 平成 7 年	1996 平成 8 年	1997 平成 9 年	1998 平成 10 年	1999 平成 11 年	2000 平成 12 年	2001 平成 13 年	2002 平成 14 年	2003 平成 15 年	2004 平成 16 年	2005 平成 17 年	2006 平成 18 年
無線伝送技術	50GHz 簡易無線の実用化（1983） 特定小電力無線の実用化（1989） 小電力データ通信の実用化（1992） 雲仙で重機制御・データ伝送に SS 無線を使用（伝送距離 150m） RTK GPS で On The Fly 機能が可能になる。 雲仙で多数の特定小電力無線を同時に使用（伝送距離 150m）	雲仙で中継局を実験的に使用 500Hz 簡易無線の自動旋回台実用化 雲仙で建設無線を使用（伝送距離 800m） RTK GPS で On The Fly 機能が可能になる。		雲仙で建設無線を使用（伝送距離 800m） 建設無線協会設立		雲仙で中継局を使用した超遠隔施工を採用（伝送距離 1,500m） SS 無線多重伝送の実用化 小エリア簡易無線の利用開始 SS デジタル映像（500mW）の導入	有珠山でダイレクト方式長距離伝送を実施（伝送距離 1,200m） SS 無線多重伝送の実用化 小エリア簡易無線の利用開始 SS デジタル映像（500mW）の導入		樽前山で簡易無線のオムニアンテナを採用 小エリア簡易無線モデム開発 SS デジタル映像（10mW）の導入 雲仙で 1.2GHz 帯映像無線を使用		谷沢川で無線 LAN による超遠隔施工を実施（伝送距離 700m） 無線 LAN の試験実施 樽前山で簡易無線のオムニアンテナを採用 中越地震で SS デジタル映像を導入		PHS によるデータ伝送利用
建設機械の無人化	成願寺川の復旧工事で無人水陸両用ブルドーザを使用（1969） 北陸地方整備局立山砂防工事事務所で無人バックホウを採用（1983） 世界初の遠隔操作重機群による無人化施工実施 移動操作室・カメラ車の導入 重ダンプの無人機械開発 クローラダンプの無人機械開発					北陸技術事務所が共用変換器を開発 九州技術事務所がブル Q を開発 九州技術事務所がロボ Q を開発 雲仙で無人測量車を開発 北海道開発局が無人調査機械（災害調査車・小型ヘリ）を開発 建設無人化施工協会設立		北陸技術事務所が 45t ラフテレンクレーンの無人化に着手 九州技術事務所がクロ Q を開発 雲仙で無人測量車を採用 雲仙でアジテータ付無人コンクリート運搬車を採用 雲仙で無線中継専用車を採用 雲仙で無人ポンプ車を使用 ホイールローダの無人スイーバの実用化					GPS による無人測量実施 ブルドーザ排土板自動制御
工種・工法の拡大	雲仙で除石工事に無人化施工を採用 構造物解体工事への無人化適用 雲仙で GPS を用いた土工管理システムを採用 無人バックホウによる GPS 現況測量実施 雲仙で砂防堰堤工事に RCC 工法を採用 GPS を使用した敷均し・転圧管理システムの導入 無人機械による転石破砕			コンクリート型枠設置の無人化 有珠山で橋梁撤去工を実施 護床ブロック設置の無人化 土嚢設置の無人化			無人スイーバ導入 雲仙で簡易式支持力測定器を無人で使用 無人散水車の導入 三宅島で無人化施工実施		雲仙で簡易式支持力測定器を無人で使用 雲仙で緑化工に無人化施工を採用（生育基盤材の散布）		雲仙で着工前測量の無人化（技術提案） 雲仙で施工管理に伴う測量の無人化（技術提案） 雲仙で丁張りおよびライン引きの無人化（技術提案）		雲仙で MC の採用（ブルバックホウ） 雲仙ではつり作業の無人化（技術提案） 中越地震で無人化施工実施 ISM 工法の無人化施工実用化

や小型ブルドーザの遠隔化が図られ、それ以後、無人スイーバ、無人散水車などが開発され、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、ポンプ車が導入された。

1999年には、従来の建設機械の運転席にレバー等を操作する装置を搭載し、圧縮空気とゴムのアクチュエータ等を用いて遠隔操作を行う機器も開発された（ロボ Q、ALD システム）。多くの従来の建設機械に装着可能であるため、汎用性が高くロボット大賞優秀賞となる等注目されている（写真 2）。同年に共用変換器の開発もされ、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。また遠隔操縦ラフテレンクレーンの開発も行われている。

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、無人測量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



写真 2 ロボ Q（油圧ショベル）

へ至っている。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る等、多岐にわたる工事が無人化で実施可能になった（写真 3）。

3 次元座標を使った施工システムでは、先に述べたブルドーザ排土版の 3 次元マシンコントロー



写真 3 スリットダム施工状況



写真 4 システム搭載油圧ショベル

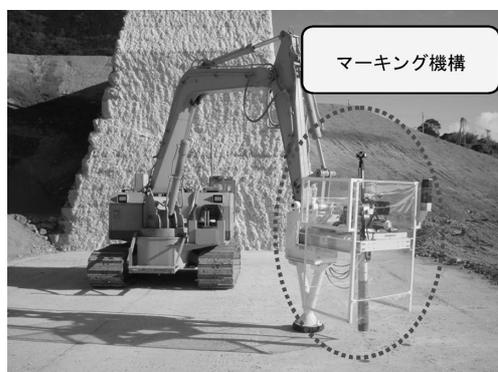


写真 5 無人測量機械

ルのほか、油圧ショベルの掘削・盛土作業で、切り出し位置や勾配とバケット位置をオペレータに表示するものがある。従来は、無人測量装置で確認しつつ、特に仕上げ段階において時間を要していたが、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り、2006年に導入された（写真 4、5）。

(3) その他の技術展開

その他の技術展開事例として、2000年の有珠山噴火災害緊急対策工事では、2 km 以上離れた個

所から操作する超遠隔施工が実用化されて従来方式からの発展の契機となり、2001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の構築などがある。また、2002年の樽前山無人化試験施工で、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、2003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。

運用事例としては、2004年の新潟県中越地震の妙見町での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あげており、2006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、雲仙のほか桜島でも工事が予定されている。

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を求めたことに対し、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、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、中越地震では、崩壊する危険のある法面で難しい作業を行ったことなどが、現場に応じての対応としての特色となっている。

このように無人化施工は、雲仙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。

4. 建設無人化施工の今後に向けて

(1) 災害時の緊急・応急復旧等を含めた対応

妙見町土砂崩壊現場での無人化施工は、余震が続く中、遺体の捜索が急がれていたが、国の保有する無人化施工機械により迅速に着手された。緊急時の対応では、機械調達は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建設機械が容易に調達できる環境が整うことが期

待される。また計画的に国と民間により機械，無線機器，オペレータを迅速に確保する体制をとることが期待される。

「建設機械等による災害対処・復旧支援に関する懇談会」(座長 京都大学防災研究所河田恵昭所長)の提言(平成19年2月16日)では，無人化施工に関する内容が含まれており，技術開発だけでなく体制についても提言がなされている。

「機械とオペレータを，適時に確実に適切に，運用できる，事前を含む体制」は，災害対処・復旧支援では無人化施工だけでないテーマとなっている。例えば，一定の機械を国で持つとして，何をどこにどれくらい，をどのようにして決めていくのがよいのか。発災にあつての機材調達，技術者・オペレータの確保，また平時での教育・育成および所在把握。技術としては，被災状況を把握・調査する遠隔情報収集システム，ヘリ空輸に適した分組可能機械等がある。

「提言」には「参考資料」として具体項目についてまとめられており，また国土交通省ホームページでは懇談会の経緯も公開されており，今後の参考とすべきものと思われる。

(2) 技術・体制・制度に思うこと

無人化施工には不可欠な，無人測量機などの各種遠隔施工支援技術・管理技術レベルの向上が重要で，情報技術の向上に合わせた情報化施工などの取り組みが重要とされており，国土交通省総プロ「ロボット等によるIT施工システムの開発」でもこれに資する取り組みがなされている。

「完全無人の体制」とは別に，「原則無人でどうしても必要な時にのみ立ち入る体制」であっても「原則有人でいつでも待避できる体制」とは現場の組立は別物になるとの認識があつてよいと思われる。建設工事の事故災害死亡者は，労働人口当たり他産業平均の約4倍であることは忘れることはできない。

無人化施工技術は，機器費が割高で，作業効率は有人作業より低く，コスト的不利である。機器費は，多くの現場で使われて稼働を上げること

で，作業効率は，情報化施工を組み合わせ，管理面を含めた工事全体の効率向上で，対処を目指すことが期待される。

無線電波の周波数帯域と強度はしばしば話題となるが，現在周波数割当の見直しが議論されている。映像1回線分確保の提案があることが公開されているが，今後の議論を見守る必要がある。

技術の継承・向上は，実際の工事を通じてなされるものであり，危機管理や建設技術の発展のためにも，無人化施工の工事が拡大されていくことが期待される。

5. おわりに

土木学会建設用ロボット委員会土木小委員会，建設無人化施工協会技術委員会から表・写真等の資料提供，またご教示いただきました。厚くお礼申し上げますとともに，無人化施工の発展を祈念いたします。

【参考文献】

「緊急時の無人化施工ガイドブック」,(財)先端建設技術センター，平成13年7月

村松敏光：「情報化施工と今後の動向＝無人化施工を事例として＝」，建設機械，①2002.1，②2002.4

藤野健一：「無人化施工の現状と展望＝技術開発状況と今後の展開について＝」，建設機械，2003.3

藤岡晃：「災害復旧時の無人化施工」，土木施工2006.4
建設無人化施工協会技術委員会，「無人化施工の推移と展望」，建設の施工企画，2006.11

「第24回建設用ロボットに関する技術講習会テキスト」，土木学会，平成19年5月

【参考ホームページ】

土木学会建設用ロボット委員会

<http://www.jsce.or.jp/committee/robot/index.html>

建設無人化施工協会

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

建設機械等による災害対処・復旧支援に関する懇談会提言

http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/kensetsusekou/kondankai/saigaifukkyuu_kon/kondankai_index.htm