

無人化施工による応急対応技術と その基盤となるデジタル通信技術の開発

無人化施工の新たな工法と作業環境改善

吉田 貴

近年の災害対処において、人間が作業できない危険条件下での施工を可能とする無人化施工技術が有効性を発揮している。しかし、適用可能な工種は限られており、近年、急速に発展した ICT 技術の導入には、無線通信等の制約が残る。また、これらの制約により、オペレータへ提供する画像情報等の改善や、この改善による施工の効率化または品質確保や向上が進展しにくい状況下にあると考える。本開発は、これらの課題を解決し、緊急時における我が国の災害対処能力を高めることを目的として実施したものである。

キーワード：無人化施工、新型土嚢、土質改良、デジタル映像伝送、建設技術研究開発助成

1. はじめに

無人化施工は、昭和 44 年（1969 年）の常願寺川の応急復旧工事が始まりとされる。その後、平成 5 年に国土交通省（旧建設省）により実施された雲仙普賢岳での「試験フィールド制度」の適用（写真—1）と以後の継続的な事業により実用的な工法として確立した。

近年、わが国は、地震活動期に入ったとも言われ、地震や火山活動が活発化している。また、各地で台風や豪雨による被害も発生している。これらの災害に対応する無人化施工への要求は、年々、高度化し、また、施工条件も厳しさを増している。

このような現状を鑑み、無人化施工による新型土嚢（どのう）を用いた高速築堤技術、泥濘化した軟弱地盤改良技術および無人化施工の適用範囲拡張につながる通信基盤技術の開発を平成 24 年から平成 26 年まで、3 ヶ年にわたり実施した。



写真—1 雲仙普賢岳 試験フィールド施工状況

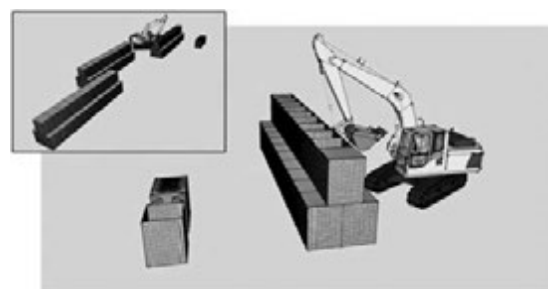
2. 新型土嚢を用いた高速築堤技術の開発

(1) 開発の概要

大型土のう工は、各種の災害対策現場において、代表的な工法と言える。その作業は、中詰土砂材料の確保、袋詰め、運搬、設置（玉掛、据付）の各ステップで、人手を要する細かい作業に時間を要しているのが実態である。そこで、これらの作業を省力化するとともに、まだ、危険性が残る災害地内で、安全に施工を行うため、無人化施工による新型土嚢を用いた高速築堤技術の開発に着手した。

具体的には、既存大型土嚢による築堤に対して、2～3 倍程度の高速施工を実現するための新型土嚢・土嚢展開装置（アタッチメント）・土砂等充填装置を開発し、フィールド試験で技術の成立性を実証することとした。また、被災地の地盤形状（起伏等）に追従し、曲線部・屈曲部施工に対応可能な構造を有する新型土嚢の構造および設置方法を開発（机上検討）することとした。

図—1 に概要図を示す。



図—1 新型土嚢の築堤概要図

(2) アタッチメントおよび治具の製作

平成 25 年度に数種類の試作品にて実施した実証実験の結果から、写真-2 のアタッチメントおよび土嚢設置治具を最終形状と定め、平成 26 年度に改良と評価を実施した。



写真-2 アタッチメントおよび治具概要図

(3) 新型土嚢仕様の決定

新型土嚢の仕様決定に際し、7種類の試作を行い、それぞれ、展開性や強度等について、場内試験を実施した(表-1, 図-2)。また、開発最終年度に雲仙普賢岳にて実証実験を行い、仕様を決定することとした。決定した新型土嚢の基本仕様は、1セルが1辺1(m)の立方体で、10セルとした。

表-1 新型土嚢の試験結果(抜粋)

品名	線径	目合い	判定
市販品	4 mm	75 mm	パネル切断発生
試作 1	6 mm	75 mm	良好
試作 2	6 mm	100 mm	若干変形
試作 3	8 mm	150 mm	強度過大



図-2 新型土嚢および場内試験状況

(4) 施工能力の確認と目標達成

最終年度に施工能力の確認を雲仙普賢岳実験ヤードにて行った。実証実験の結果、施工能力は、72 (m/日) となり、本開発の目標とする施工能力の 60 (m/日) を大きく上回った(表-2)。

(5) フィールドでの適用性の確認

フィールドでの適用性を確認するため、上記実証実験にて、2段積みを行い、出来形等を確認した。写真

表-2 実証実験結果

項目	内容等	結果
1 段目 1 列目	土嚢荷取り・セット	06 分 10 秒
	土嚢展開	05 分 00 秒
	土砂仮充填	12 分 00 秒
1 段目 2 列目	土嚢荷取り・セット	06 分 45 秒
	土嚢展開	07 分 25 秒
1 段目 全体	土砂全充填, 天端整地	1 時間 03 分 25 秒
1 段目 合計	20 m 築堤全作業	1 時間 40 分 05 秒
1 列の作業時間		50 分 02 秒
時間当たり作業量	(60 分 / 50 分) × 10 m	12m
日当たり作業量	作業時間を 6 時間とする	72m



写真-3 実証実験での出来形状況



図-3 新型土嚢施工フロー

一-3 に出来形写真を示す。有人施工に比しても遜色のない出来形となったと考えている。

(6) 施工方法の確立

実証実験をふまえ、新型土嚢の施工方法を確立した。施工フロー等を図-3 に示す。なお、この施工フローは、下段 2 列、上段 1 列・10 (m) の 2 段設置である。

3. 泥濁化した地盤改良技術の開発

(1) 開発の概要

近年の無人化施工では、土砂災害に対応した事例も

多く存在する。ここで問題になるのは、台風や豪雨によって被災した施工箇所の土質条件である。土質は、一般に含水比が高く、また、巨大な礫が存在することも多い(写真—4)。このような条件下での施工は、重機足場の確保が難しく、また、礫等による効率低下や施工のトラブルが発生しやすい。このため、一般(有人の場合)には、礫の除去、仮排水や改良材等による土質改善等の準備作業を実施した後に、応急対応を行ってきた。

しかし、無人化施工は、技術特性上、より緊急的対応が求められる場合に採用されることが多い。また、無人化施工で可能な準備作業は、限られている。この条件下での施工は、雲仙等で実施されている無人化施工と比べ、大幅な効率低下となっていた。

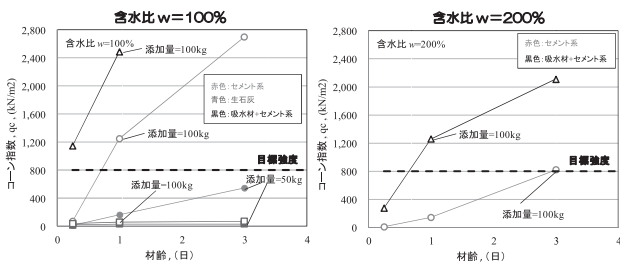
このような状況を鑑み、無人化施工の効率向上のため、泥濘化した軟弱地盤改良技術を開発することとした。開発の対象とする地盤は、含水比200(%)程度とし、目標とする改良能力は、コーン指数800(kN/m²)程度とした。また、目標とする施工能力は、時間あたり100(m²)程度とした。この目標を達成すべく、固化材、固化材供給方法、処理(攪拌)方法を検討・開発することとした。



写真—4 軟弱地盤下での施工状況

(2) 改良材の検討と決定

想定される高含水の泥濘軟弱土における土質改良特性を把握する目的で、模擬軟弱土を用いた室内固化実験を行った。無人化施工に適応可能な改良材として、セメント系改良材、生石灰、吸水材+セメント系固化材を用いて改良し、コーン試験で改良体の硬度を確認



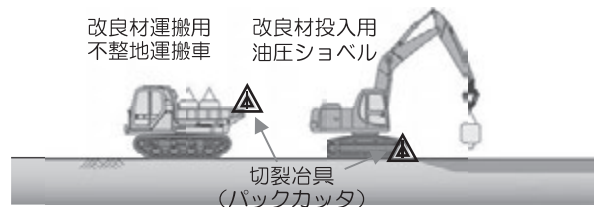
図—4 室内試験結果

した。室内試験(コーン試験)の結果(図—4)、セメント系固化材(粉体)を添加量100kg/m³使用することにより、材齢1日で、所定の強度が得られることを確認した。

(3) 改良材の供給方法の検討と決定

改良材の供給方法について、いくつかの手法を比較検討した。供給装置(空気圧送)、散布用バケツ、供給フィーダ等は、固化材を散布するための装置としては特殊となる。汎用性、緊急時における手配、故障した場合の対応等を考慮すると、専用機を適用するのは難しいと考えた。

この結果、無人化施工による改良材の供給方法は、フレコンパツクの直接投入(図—5)が最も適しているという結論とした。



図—5 改良材供給・散布方法概要図

(4) 切裂き冶具の試作と決定

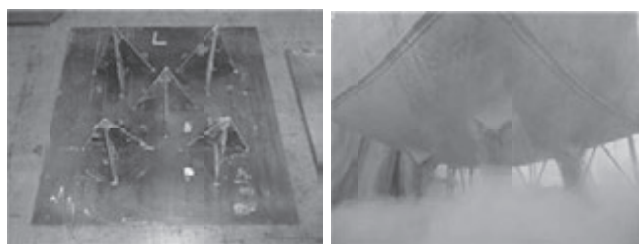
切裂き冶具(パツクカッタ)の仕様等を決定するため、数種類の試作機を製作し、要素実験を実施した。

実験の結果、切裂き冶具にて、固化材を定量的に散布することは可能であった。冶具の形状、寸法等については、大きな穴をあけるのではなく、小さい穴を多数あける、下記の形状であれば、短時間で定量的に排出することが可能であった(表—3、写真—5)。

切裂き冶具の設置方法については、対象区域の近傍の泥濘化していない地盤、あるいは、セメント系固化材(フレキシブルコンテナ)を運搬する不整地運搬車のベツセル付近に設置する方法等がよいと考えている。

表—3 切裂き冶具による排出結果(抜粋)

項目	タイプ	タイプ	タイプ
突起幅(mm)	300mm	300mm	250mm
突起部高さ(mm)	300mm	300mm	250mm
設置間隔(mm)	250mm	300mm	250mm
投入時間 地切り~全部排出まで	2分35秒	1分50秒	5分10秒
切裂幅(mm)	約280	約280	約230
排出状況	多量に排出	多量に排出	安定して排出
備考	突起部の方向が45°	突起部の方向が45°	
切裂状況			



写真—5 切裂き冶具および要素実験状況

(5) 攪拌方法の検討と決定

地盤改良に使用する油圧ショベルと攪拌用スケルトンバケット、攪拌バケット（油圧駆動）を用いて要素実験を行い、有人の0.6程度の強度を得られることを確認した(写真—6,表—4)。また、施工能力（時間）、攪拌性能（均一）についても無人化施工に適用できることを確認した。



写真—6 要素試験状況

表—4 攪拌要素試験結果

養生期間	σ_{3h}	σ_{6h}	σ_{1d}	σ_{3d}
パドル式（無人）	1.81	13.1	32.7	77.9
パドル式（搭乗）	2.01	12.7	231	1,051
スケルトン（無人）	1.44	21.2	165	635
スケルトン（搭乗）	9.62	18.3	292	1,035
室内試験	—	68.5	1,248	2,700

表中の内容・数値：コーン指数 qc (kN/m²)

算出方法：表層から10,20,30,40cmで計測した平均値

(6) まとめ

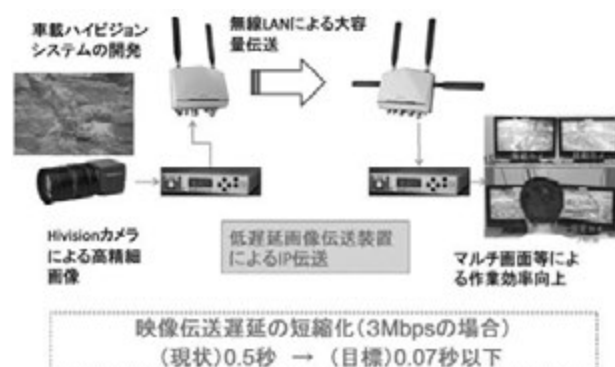
上記に示した数種類の要素実験の結果より、無人化施工による地盤改良は可能であるという結論とした。

4. 低遅延型画像伝送技術の開発

(1) 開発の概要

近年、無人化施工の施工条件等の難易度が上がるなか、高い現場適用性を実現するためには、無線LAN等を利用したネットワーク型無人化施工が不可欠となってきている。

ネットワーク型無人化施工では、映像情報、操作情報、施工管理情報等のすべての情報を、一つの情報網



図—6 開発の概要図

に集約して伝送する。そのため、この情報網の回線品質、容量、速度等の確保が重要であり、また、この情報網の効率的な運用も必要となる。映像情報は、伝送する情報の中で、情報網の容量に与える影響が最も大きい。難易度の高い施工では、高画質かつ数多くの映像を必要とし、情報伝送量も膨大なものとなる。

その一方で、情報網の容量等には限界があり、トレードオフの関係がある。場合によっては、画質、映像数のどちらか、または両方を取捨選択する必要がある。

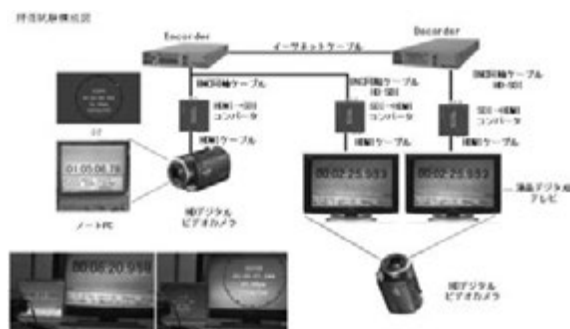
この問題を解決するため、高品質かつ低容量という、従来で言えば相反する画像伝送技術の開発に着手した。

具体的な開発目標値としては、高精度画像（30fps）、伝送速度3.0(Mbps)で遅延時間70(msec)以内とした。また、重機への搭載環境（振動、粉塵、熱、湿度等）を満足し、かつ、同条件下で、通信途絶することのない安定した動作性能の確保を目指すこととした(図—6)。

(2) 既存技術の調査・検討およびテスト機の選定

本技術の開発に際し、まず、既存技術の調査を実施した。具体的には、放送業界等で使用されている複数メーカーの画像伝送装置を入手し、これらの機器の性能、特性および本開発目標に対する可能性や適用性等について、実験を実施した。この実験結果より、テスト機を選定し、開発を進めることとした。

図—7に実験系統図を示す。



図—7 実験系統図

(3) テスト機による試験と開発項目の抽出

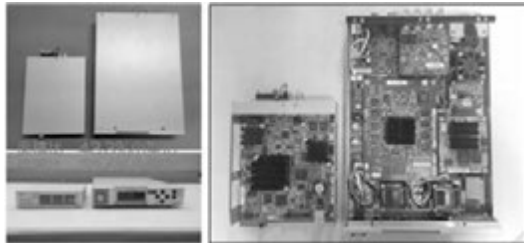
既存技術調査により選定したテスト機を使用し、開発目標を達成するための具体的な開発項目を抽出することとした。各種評価試験を実施し、表—5を開発項目とした。

表—5 開発項目一覧

開発項目		対応策
項目	概要	
画像改良	総合的な画質向上	①ノイズフィルタ追加 ②デブロッキングフィルタの最適化
	低レートでの映像破綻	処理ブロック単位の変更
	ブロックノイズ対策	グレーのブロックノイズに対する改良実施
通信性能改良	パケットロス時の画面フリーズ復帰対策	ネットワーク復旧後の速やかな再確立改良実施(10秒→1秒へ改良)
耐振動性能改良	建設機械への搭載対策	2G程度の振動に対する改良実施

(4) 試作品の製作と改良

具体的な開発項目のうち、ソフト対応(画質・通信性能)とハード対応(耐振動性能)を進め、試作品を製作した。試作機は、テスト機に対して、面積比・体積比が、約40(%)程度低減した(写真—7)。



写真—7 試作機とテスト機の比較

(5) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証

試作品改良と併行して、平成26年4月に国土交通省が公募した次世代社会インフラ用ロボット現場検証に応募した。現場検証では、一定の評価が得られた。下記に概要を示す(写真—8)。

内容：次世代社会インフラ用ロボット



写真—8 現場検証状況

応急復旧部会 現場検証

日時：平成26年12月19日

場所：雲仙普賢岳水無川2号堰堤内実験場

検証内容：従来の2.4GHz帯(OFDM)によるSD映像と今回開発した画像伝送装置によるHD映像の操作性に関する検証

(6) 目標と成果の対比

本開発の開発目標と成果の比較表を表—6に示す。

表—6 開発目標と成果の比較表

本研究開発の開発目標	本研究開発の開発成果
高精度画像(30fps)の伝送	目標性能を確認。
3.0(Mbps)の伝送速度の実現	設定を3.0(Mbps)とし、7.0(Mbps)とほぼ同等の結果。特段の映像破綻もなし。目標達成と判断。
遅延時間70(msec)以内の伝送	遅延時間測定で10(msec)という結果。これに無線装置の伝送遅延が加わったとしても、目標達成と判断。
建設機械への搭載条件下での安定した動作確保性能の実現	実現場の搭載試験および現場検証においても、安定した動作。目標達成と判断。
必要な性能および仕様の公開	必要な性能を計測し、その性能に基づいて試作機を製作。仕様書を別途、作成。目標達成と判断。

5. おわりに

謝辞

本研究開発は、国土交通省大臣官房技術調査課から公募された平成24年度～平成26年度建設技術研究開発助成制度により実施したものである。共同開発者である国立研究開発法人土木研究所、青木あすなろ建設(株)、(株)大本組、(株)熊谷組、西松建設(株)、(株)フジタの各関係者のご尽力に厚く御礼を申し上げます。また、本報文を書くにあたり、ご協力およびご指導いただいた関係各位に深甚なる敬意を表します。

JICMA

《参考文献》

- 1) 無人化施工における連続土嚢を利用した高速築堤技術の開発(2015.09 第15回建設ロボットシンポジウム)
- 2) 無人化施工における低遅延高精細画像伝送システムの開発(2015.09 第15回建設ロボットシンポジウム)

【筆者紹介】

吉田 貴(よしだ たかし)
(一財)先端建設技術センター
企画部
参事

