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―

一般財団法人先端建設技術センター 企画部兼技術調査部 参事 吉田（よしだ） 貴（たかし）

1. はじめに

無人化施工は，昭和44年（1969年）に常願寺川の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」の適用と以後の継続的な事業展開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。昨年５月の口永良部島新岳噴火や本年４月の熊本地震は記憶に新しいところである。また，各地で台風や豪雨による被害も発生している。平成27年は，全国で788件の土砂災害が発生したとの報告が国土交通省からされている。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ヵ年にわたり実施した。本報文は，この三つの技術開発の概要について述べるものである。

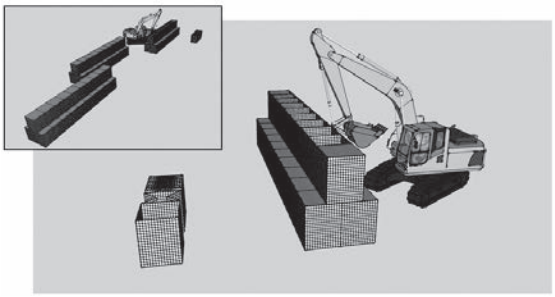
2. 新型土嚢を用いた高速築堤技術の開発

⑴ 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，一般的に行われる工法の一つである。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。

次頁（図―１）に開発概要図を示す。また，次項に新型土嚢を用いた高速築堤技術の開発における開発成果の概要を示す。

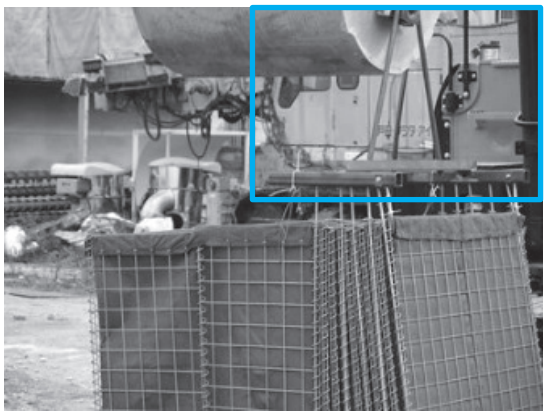


図―1　開発概要図

⑵　アタッチメントおよび治具の製作

新型土嚢を把持するためのアタッチメントおよび土嚢設置治具を平成24年度に初期設計した。その後，平成25年度から製作し，工場等での実証実験の成果をふまえ，改良等を行った。この改良等の結果，下記（写真―1，2）に示すものをアタッチメントおよび土嚢設置治具の最終形状と定め，平成26年度に更なる改良と評価を実施した。

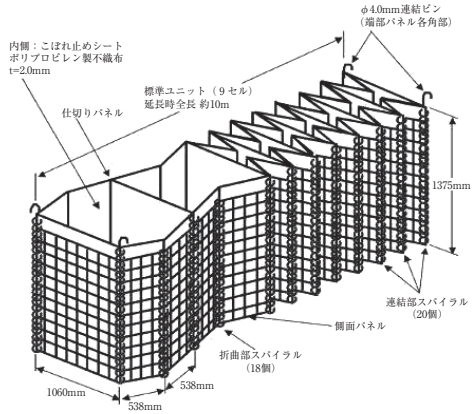
写真―1　新型土嚢把持用アタッチメント



写真―2　新型土嚢設置用治具（青囲み部）

⑶　新型土嚢仕様の決定

新型土嚢の仕様決定に際し，7種類の試作を行った。また，それぞれについて，展開性や強度等について，場内試験を実施した。開発最終年度には，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1mの立方体で，10セルとした。下記（図―2，写真―3）に新型土嚢の概要と土木研究所での場内試験状況を示す。



図―2　新型土嚢の概要

写真―3　土木研究所での場内試験状況

⑷　施工能力の確認と目標達成

開発最終年度である平成27年度に，無人化施工による実作業での施工能力確認を雲仙普賢岳にて行った。この結果，施工能力は，72（m/日）となり，目標値である60（m/日）を大きく上回ることとなった。

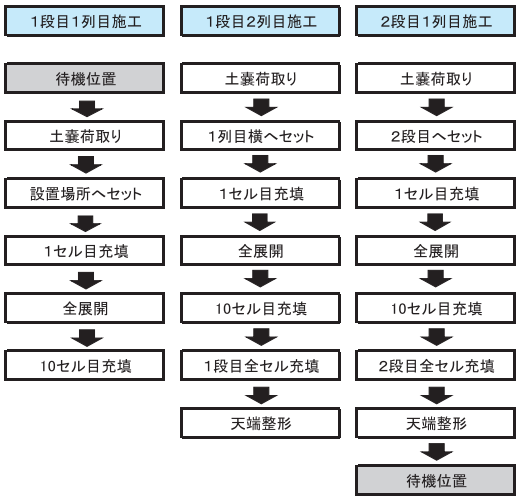
⑸ フィールドでの適用性の確認

前述実証実験にて，フィールドでの適用性を確認するため，２段積みを行い出来形等を確認した。下記（**写真―４**）に出来形写真を示す。この結果，有人施工に比しても遜色のない出来形となった。

写真―４　無人化施工による２段積み出来形

⑹ 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（**図―３**）を下記に示す。なお，この施工フローは，下段２列，上段１列・10mの２段設置を想定したものとなっている。



図―３　施工フロー

3. 泥濘化した地盤改良技術の開発

⑴ 開発の概要

近年の無人化施工は，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。このような条件下での土質は，一般的に含水比が高く，また，巨大な礫が存在することも多い（**写真―５**）。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。無人化施工は，技術特性上，初動または，より緊急的な対応が求められる場合に採用されることが多い。ただし，無人化施工で可能な準備作業は限られている。

このような場合，土質改善のため，まず，ヤード内の礫を小割りし，それを運搬機走行路等に敷き詰め，多少の足場改善をした後，掘削等の作業を実施していた。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800kN/m^{2}程度とした．また，目標の施工能

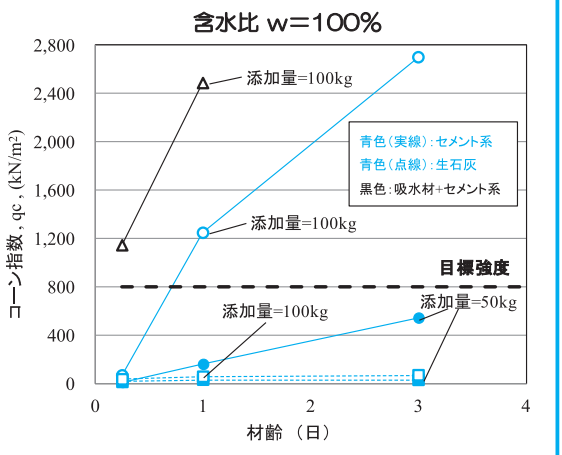
写真―５　軟弱地盤下での施工状況

力は，時間あたり100m²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。次項に泥濘化した軟弱地盤改良技術の開発における開発成果の概要を示す。

⑵ 改良材の検討と決定

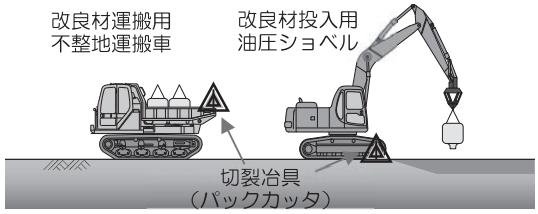
想定される高含水の泥寧軟弱土における土質改良特性を把握する目的で，模擬軟弱土を用いた室内固化実験を行った。無人化施工に適応可能な改良材として，セメント系改良材，生石灰，吸水材＋セメント系固化材を選定し，コーン試験で改良体の硬度を確認した。室内試験（コーン試験）の結果，セメント系固化材（粉体）を添加量100kg/m³使用することにより，材齢１日で，所定の強度が得られることを確認した。



図―４　室内試験結果

⑶ 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），散布用バケット，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，フレコンパックの直接投入が最も適しているという結論とした。

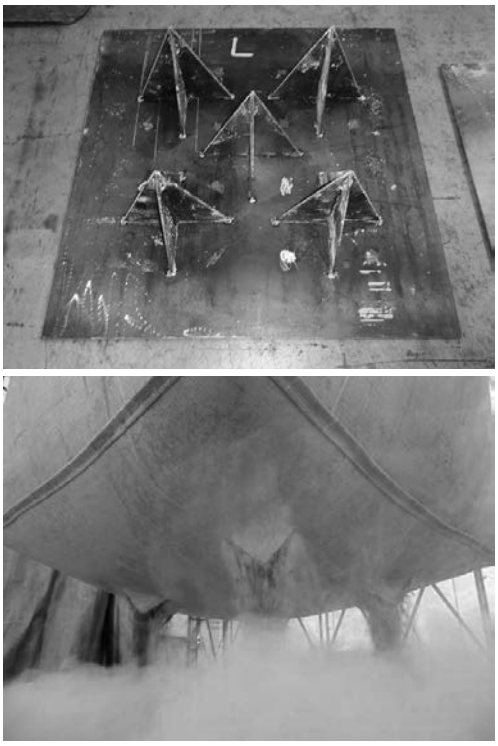


図―５　改良材の供給方法

⑷ 切裂冶具の試作と決定

切裂冶具（パッククッタ）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次頁の形状であれば，短時間で定量的に排出することが可能であった。

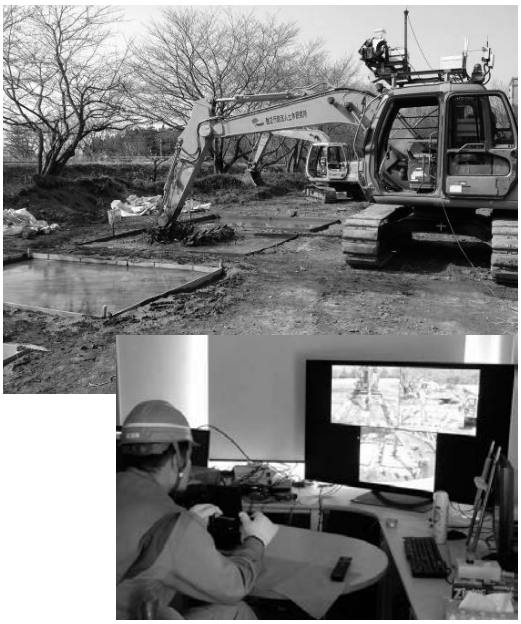
切裂冶具の設置方法については，対象区域の近傍の泥濘化していない地盤，あるいは，セメント系固化材（フレキシブルコンテナ）を運搬する不整地運搬車のベッセル付近に設置する方法等がよいと考えている。



写真―6　切裂冶具および排出状況

⑸　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６割程度の強度を得られることを確認した。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―7　実験状況（無人化施工）

表―1　実験結果

養生期間	σ_{3h}	σ_{6h}	σ_{1d}	σ_{3d}
パドル式（無人）	2	13	33	78
パドル式（搭乗）	2	13	231	1,051
スケルトン（無人）	1	21	165	635
スケルトン（搭乗）	10	18	292	1,035
室内試験	－	69	1,248	2,700

⑹　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

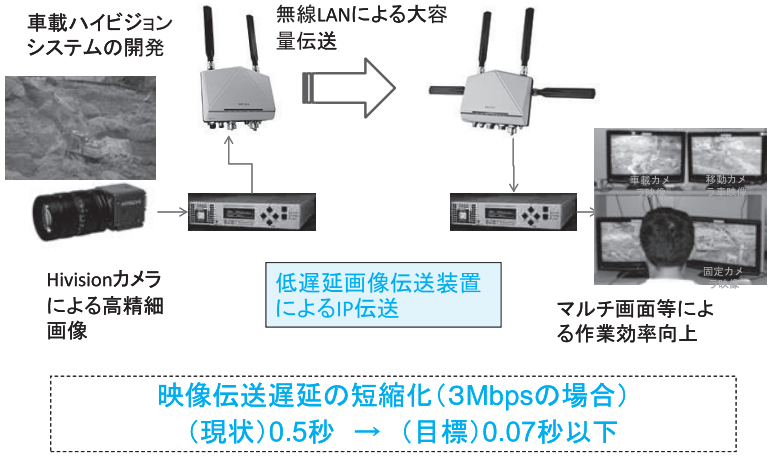
⑴　開発の概要

近年，無人化施工の施工条件等の難易度が上がる中，高い現場適用性を実現するために，無線LAN等を利用したネットワーク型無人化施工の採用が増えている。

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，速度等の確保とともに情報網の効率的な運用も重要となる。

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。場合により，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。開発目標値としては，高精度画像（30fps），伝送速度3.0Mbpsで遅延時間70msec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



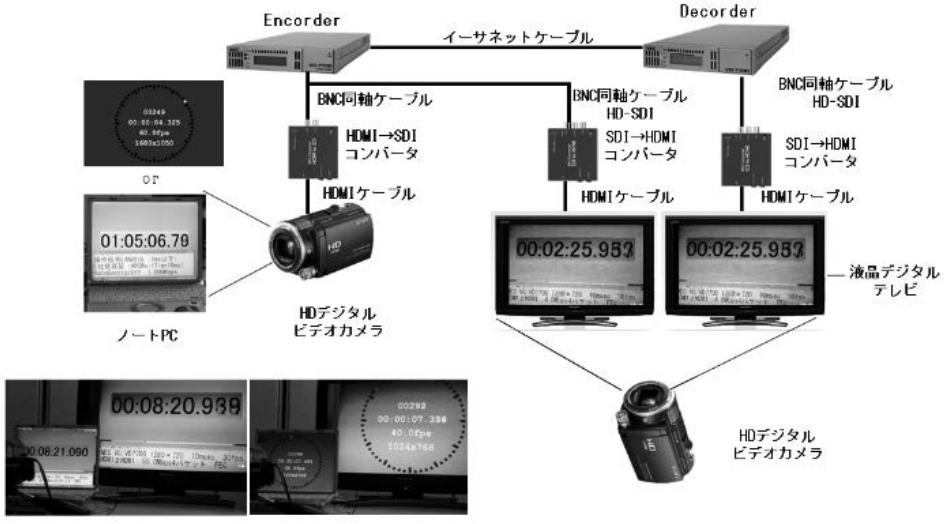
図―6　開発概要図

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。

⑵　開発のベース機器の評価と選定

開発に際し，開発の効率化の観点から，現在，製造販売されている業務用機器の性能を評価し，その機器を改良し目標を達成する方針とした。性能評価については，DSCQS値と言われる放送業界で一般的に用いられる映像評価法により行った。

この評価法で使用する映像ソースは，奈良県で実施した無人化施工の実映像とNHK標準動画を用いた。複数社の機器の評価を実施した結果，今後の開発体制等も含め，ある機器製造メーカおよび機器を選定し，今後の開発を進めることとした。



図―7　映像評価構成図

⑶　画質性能の改良

選定した機器を目標とする性能にするためには，次の課題に対して改良（対策）を行う必要があった。

① トータル画質の向上
② 4 Mbps以下の伝送下での映像破綻の改善
③ グレーのブロックノイズ対策

次に改良（対策）の内容を示す。

① トータル画質の向上

トータル画質の向上を図るため，下記を行った。

・ノイズリダクションフィルターの追加

・デブロッキングフィルタの最適化

② 4 Mbps以下の伝送下での映像破綻の改善

データ処理量が多いため，映像破綻をしていた。このため，圧縮処理単位を4×4ブロックから8×8ブロックに変更することでデータ量処理量を低減させた。また，復元時のブロック予測は，一つ前のみのブロックを参照していたものを四つ前まで参照することにより画質の向上につなげることとした。

③ グレーのブロックノイズ対策

通常の処理では，重要な低周波成分データも捨てられていた。このため，画像のDCT（離散コサイン変換）を行う際に低周波成分を担保することにより，ブロックノイズを抑えることとした。

⑷ 通信性能の改良

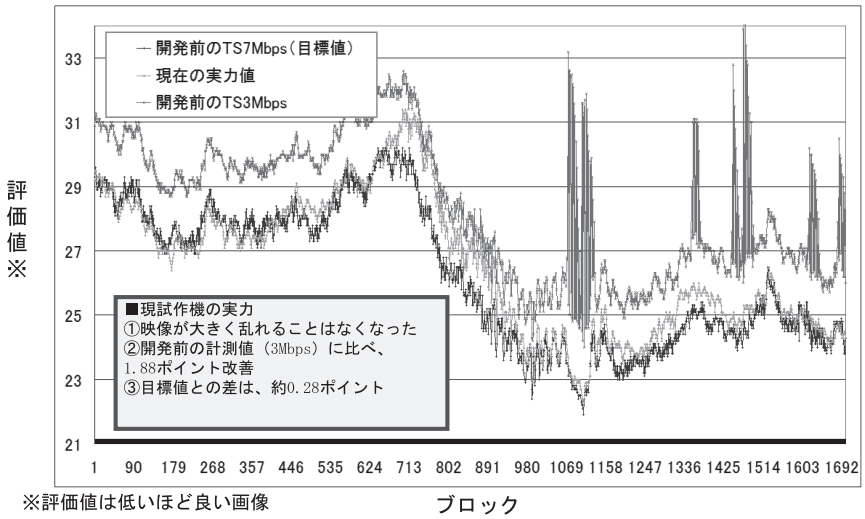
デジタル映像通信は，通信途絶や不安定化が生じると当然であるが，パケットの遅延やロスが発生する。この現象に対し，機器は，このパケット遅延やロスに反応し，映像表示を停止する機能を有している。また，復帰は，通信状態が安定した10秒後というのが，放送業界の一般となっている。

しかし，無人化施工における移動体通信は，通信の不安定化が発生しやすい。また，映像停止は，施工効率に大きな影響を及ぼす。極論だが，映像停止より乱れていても映像が伝送されるほうを選択するのが，無人化施工である。よって，この復帰時間処理を1秒とし，すぐに復帰できるような仕様に設定を変更した。

⑸ 耐環境性能の改良

開発機器は，移動体通信，特にバックホウの車載カメラ映像伝送に使用することを想定している。このため，振動が大きい建設機械に搭載しても破損しないような「JIS-D-1601 段階20」を満足する耐振対策を施した。また，粉塵対策として，粉塵フィルタも加え，耐環境性能を向上させた。

これらの改良により，すべての課題等を解決した。

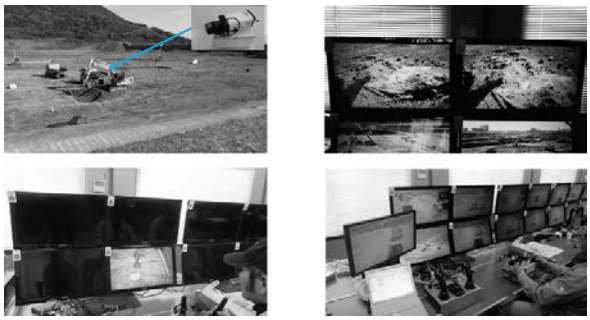


図―8 画質等改良結果

⑹ 次世代社会インフラ用ロボット現場検証

約2.5年の開発・改良を経て，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（平成26年度，平成27年度）に応募し，平成27年度には，「活用を推薦する（★★）」という評価が得られた。

内　　容：次世代社会インフラ用ロボット
　　応急復旧部会　現場検証
日　　時：平成26年12月中旬，平成27年11月中旬
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画像の操作性に関する検証



写真―８　現場検証状況（平成26年度）

写真―９　現場検証状況（平成27年度）

⑺ 実現場への適用

前述の平成26年度の現場検証後，上記システムは，赤松谷川11号床固工工事（国土交通省）に適用された。また，平成27年度には，鹿児島県垂水市二川深港の土砂崩落災害復旧工事に適用されている。

⑻ 目標と成果の対比

本研究開発の目標に対する成果を下記に示す。

表―２　開発目標に対する成果

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
3.0Mbpsの伝送速度の実現	設定を3.0Mbpsとし，7.0Mbps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70msec以内の伝送	遅延時間測定で10msec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

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式会社，株式会社大本組，株式会社熊谷組，西松建設株式会社，株式会社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。