

災害対応ロボットへの取り組み

建設無人化施工協会

はやせ ゆきとも あおき ひろあき
早瀬 幸知 / 青木 浩章

1. はじめに

災害対応ロボットへの取り組みということであるが、われわれが行っている建設無人化施工もロボットという概念とは多少異なるものの、遠隔操作が可能な建設機械群による作業はロボット関連技術の一環として今回の題材をとらえてみたい。

建設無人化施工は、雲仙普賢岳の噴火災害をきっかけとして人間が容易に近寄れない環境下において、遠隔操作が可能な建設機械群を駆使して除石作業を行うことを目的として開発がなされたものである。また、雲仙普賢岳から10年後の有珠山の噴火災害の復旧工事においても活用され、それを契機として“建設無人化施工協会”が設立、その後も全国各地における土石流災害や河道閉塞等の災害復旧工事に多く参加をしてきた。3年前に発生した福島第一原子力発電所構内でのガレキ除去等においても活用され、遠隔操作による建設機械群の作業が少しは認知されたのではないかと思っている。

しかし、これまでの建設無人化施工ではまだまだ対応しきれていない課題も多く、今後の災害復旧作業における無人化施工の方向性について、建設無人化施工協会会員が取り組んでいる技術的課題への対応について報告をしたいと思う。

2. 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

国土交通省は「災害現場における復旧工事等のための、無人化施工技術の高度化（適用可能な現場条件、工種等の拡張）に関する技術開発」をテーマとして、平成24年度建設技術研究開発助成制度による公募を行った。

一方、近年の災害対応において、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が、適用可能な工種が限られていることや無線通信等の制約から近年のICT技術の進展に対応できず、オペレータへの画像情報等の提供の改善も遅れ、施工スピードや品質改善が進展しにくい状況下にある。

これらの課題等を踏まえ、前述の建設技術研究開発助成制度に応募し、緊急時におけるわが国の災害対処能力を高めることを目的として、一般財団法人先端建設技術センターを代表者、独立行政法人土木研究所および協会会員による研究開発組織で「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」として取り組むこととした。

具体的な研究開発対象は、《無人化施工における新たな工法の開発》と《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》であり、相

互に密接関連する以下の3課題について実施するものである。

《無人化施工における新たな工法の開発》

- (1) 新型土嚢を用いた高速築堤技術の開発
 - (2) 泥濘化した軟弱地盤上で建設機械による作業を可能にするための地盤改良技術の開発
- 《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》
- (3) これらの緊急復旧作業の遠隔操作に必要な性能を具備した低遅延画像伝送技術の開発

なお、これらの試験施工を実施するに当たり、インターネット・プロトコル（以下「IP」という）を使ったネットワーク型無人化施工を行う予定であり、伝送距離や無線チャンネル数等の制約を受けない無人化施工の実現が可能となる。

(1) 新型土嚢を用いた高速築堤技術

① 開発目標

災害直後の応急・復旧対策として、無人化施工

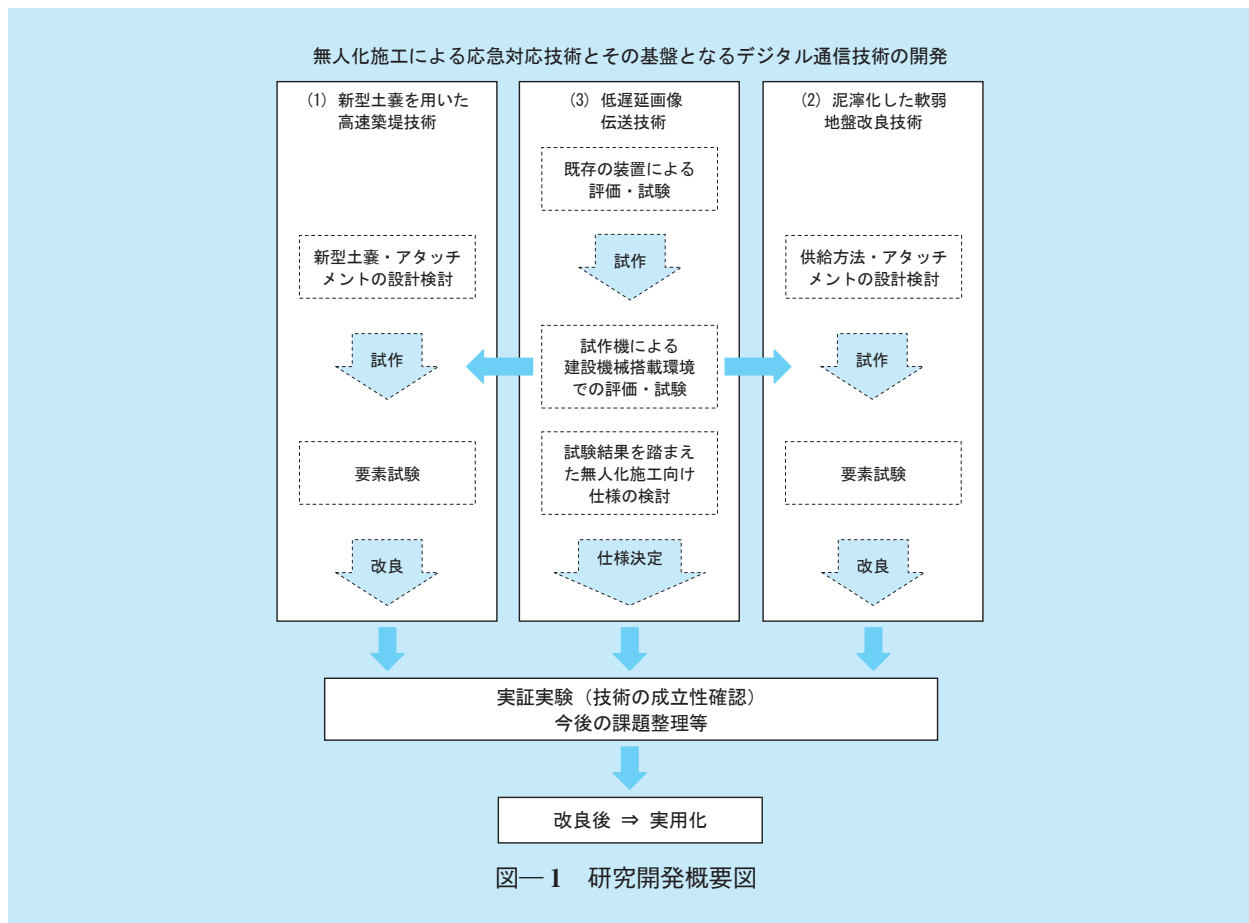
による新型土嚢を用いた高速築堤技術の開発で、無人化施工に適した土嚢、土嚢運搬・設置方法および内部充填方法の検討・確立を行う。

- ・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。
- ・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検討する。

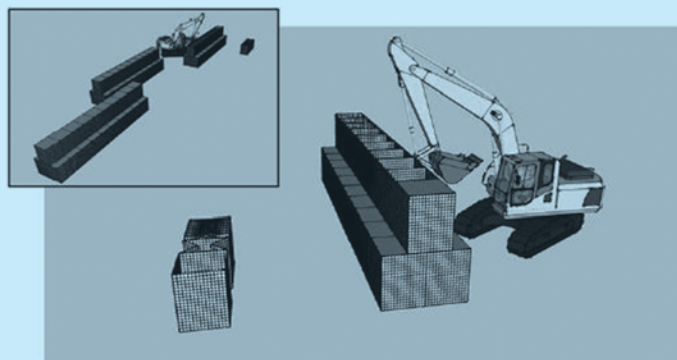
② 計画・実施方法

本研究開発課題は、従来の土を詰めた土嚢を小運搬する代わりに、遠隔操作で容易に展開・自立する新型土嚢袋に土嚢設置場所で土砂等を充填することにより、作業を高速化する技術（高速築堤技術）を開発するものである。

具体的には、高速施工が可能な新型土嚢を試作し、遠隔操作によるフィールド試験により遠隔操作での土嚢袋展開・土砂充填試験により実現性を



図一 1 研究開発概要図



図一 2 新型土嚢概要図

確認するとともに、その形状・設置展開方法・連結等について検討し、研究開発目標に掲げるより幅広い現場条件への適用を目指すものである。

③ 想定される導入効果

遠隔操作での急速築堤技術を実現することにより、土石流や地滑り落石の危険箇所、あるいは河道閉塞箇所直下等の危険箇所における土嚢設置作業の無人化が可能となり、作業員の安全が確保される。また、危険区域での土嚢設置作業は、安全な場所で製作した土嚢をクローラダンプ等で輸送し設置する必要があるが、小出しで重量物を何往復も輸送することに加え、輸送経路の造成等も必要なことから多大な時間を要していたが、輸送時間などが短縮され応急対策の時間短縮が可能なることから被災地の安全性が向上する。

一例として、新潟県中越地震のケースでは、大規模な河道閉塞への対応にヘリコプターによる輸送手段のみに限られ、莫大な輸送コストが発生した。本開発技術の実現により、材料輸送を最小化

し大幅なコストの縮減効果が期待できる。

(2) 泥濘化した軟弱地盤改良技術

① 開発目標

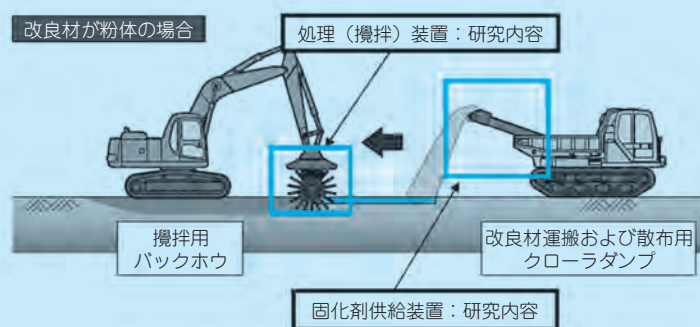
災害直後の応急・復旧対策として、無人化施工による泥濘化した軟弱地盤改良技術の開発であり、無人化施工に適した固化材、固化材供給方法、処理（攪拌）方法の検討・確立を目指す。

- ・含水比100%程度の軟弱地盤を対象に、遠隔操作で改良材を投入・混合し、トラフィカビリティ確保のために必要なコン指数 800kN/m^2 程度に改良できる能力と、1時間当たり 100m^2 程度の施工能力を実現する。

- ・所定の範囲について、必要十分な改良を効率的に実施する施工管理方法を実現する。

② 計画・実施方法

軟弱地盤改良工法について、無人化施工に適した工法全体の検討を行う。次に固化材、固化材供給方法、処理（攪拌）方法についての検討を行



図一 3 地盤改良工法検討（例）

い、固化材を確定し固化材供給および処理（攪拌）について具体的な方法を取りまとめる。

とりまとめた具体的な方法に基づき、供給装置と処理（攪拌）装置の検討を行う。同時に要素実験計画を策定する。

策定した要素実験計画に基づき要素実験を行う。要素実験終了後に実験で得られた成果や今後の検討課題等のとりまとめを行う。

③ 想定される導入効果

現状の無人化施工技術においては、高含水比の軟弱土に対応可能な地盤改良技術が確立していないため、降雨等により泥濘化した現場では、建設機械の走行が妨げられるなど効率の悪い作業を強いられることが多くある。遠隔操作で簡易に軟弱地盤を浅層改良する技術の実現により、これまで遠隔操作で行っていた軟弱土の除去や土石運搬、排水処理に要する余計なコストを削減することができ、足場改善による作業効率の大幅な改善が期待できることからコスト縮減が期待できる。

(3) 低遅延画像伝送技術

① 開発目標

緊急時の無人化施工技術に対応した現場適応性に優れた画像伝送システムを開発する。高精細度のカメラ映像を低遅延で圧縮・伝送・伸張可能な装置を開発し、過酷な環境条件下で使用される無人化施工用建設機械に搭載可能な性能を確保する。

・開発する低遅延画像伝送装置は、バックホウによる精密作業（旋回、土嚢設置、地盤改良等のアタッチメント作業）を確実に実施するために必要な性能として、高精度画像（30fps）を3.0Mbpsの伝送速度で遅延時間70msec以内にデジタル伝送できる能力の実現を目指す。

・災害復旧現場における移動体（建設機械）への搭載条件（振動、粉塵、熱、湿度等）を明確にし、同条件下で通信途絶することのない安定した動作性能を確保する。

・必要な要求性能および仕様の公開に向けたとりまとめを行う。

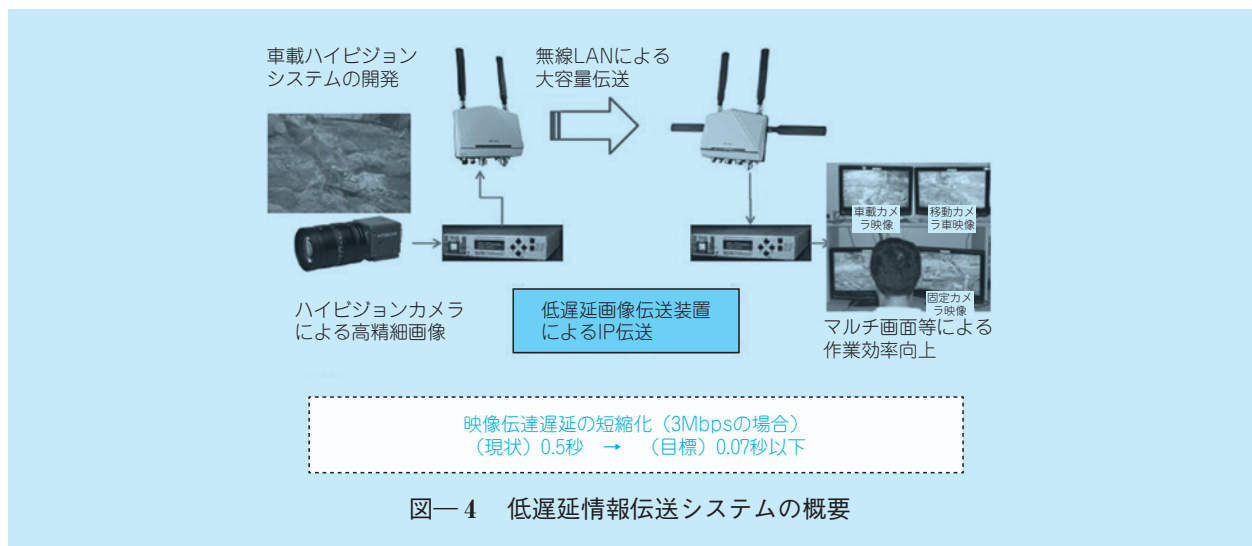
② 計画・実施方法

本研究開発は、緊急時の無人化施工技術に対応した現場適応性に優れた画像伝送システムを開発するものであり、具体的には、過酷な環境条件下で行われる無人化施工に必要な要求性能（リクワイアメント）を明確にし、高精細度のカメラ映像を低遅延で圧縮・伝送・伸張可能な装置を開発し、過酷な環境条件下で使用される無人化施工用建設機械に搭載可能な性能を確保するため以下の試験を行う。

- ・画質改良と画像評価試験
- ・通信性能改良と評価試験
- ・耐震性能対応と評価試験

③ 想定される導入効果

無人化施工に対応した低遅延画像伝送技術は、これまで開発されておらず全て市販品を組み合わ



図一 4 低遅延情報伝送システムの概要

せて利用していたため、長距離からの遠隔操作や複数の建設機械に必要な画像伝送においては遅延や画質低下が発生し、作業中断などのトラブルを招いていた。建設機械への搭載を想定し、低遅延かつIPに対応する技術を開発することで、長距離からの無人化施工や複数建設機械の操作に必要な画像伝送が可能となり、影響が広範囲にわたる火山噴火での災害対応など、長距離かつ大規模な災害への適用性が拡大し、被災地の安全性向上に貢献できる。

また、これまでの無人化施工では、映像伝送に使用可能な無線に限られ、同時に見ることができないカメラ映像数も10画像に満たない状況であった。本研究開発の実現により、高精度映像を低遅延でIP伝送することが可能となり、多数の映像を駆使した大規模な無人化施工が可能となるとともに、複数カメラを活用することにより施工効率改善が期待できる。また、既設光ファイバーや無線LANの適用が可能となり、既設インフラ活用等により長距離からの映像取得コストを低減することが可能である。

3. 次世代型無人化施工システムの開発

(1) 現在の無人化施工の問題点と自律型制御について

現在、長崎県雲仙普賢岳等で行われている無人化施工は、現場からの動画を見て常時操作するモニター依存型のシステムである。モニター情報だけで現場の状況を判断しながら運転を行う必要があるため、高度な運転技術や複数の画像取得のための装置と通信環境が必要となり工法適用の障害となっている。

さらに、こういった技術を継承する現場自体も少ないのが現状で、現状のままでは今後も多発する自然災害等を、本工法にて対応することが厳しくなると目される。そこで、前述の問題解決のため、作業機械に人間の五感に代わるセンサ類を搭載し、作業開始命令を与えれば自ら判断して作業

を行う「自律制御技術」を適用した次世代型の無人化施工システムを開発している。

ここでは、平成25年度に実証した振動ローラの自律走行について述べる。車体中央の屈曲点を関節として操舵するアーティキュレート機構の機械制御に加え、走行中の振動がセンサ類の機械装置や制御にどのような影響を与えるのかが研究の要点であった。

(2) 振動ローラの自律走行実証について

① 使用機械とシステムの概要

今回実証に使った振動ローラには、人間の五感に代わる以下のセンサ等の機器を搭載している(図-5)。

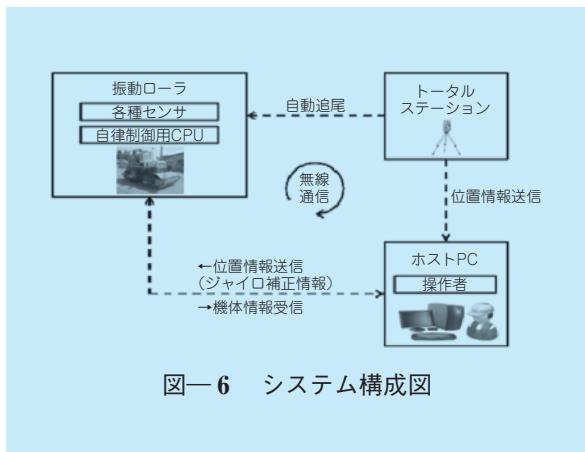


図-5 振動ローラと搭載センサ

- 1) 姿勢検出センサ (MEMS型ジャイロ)
- 2) 速度検出センサ (ロータリーエンコーダ)
- 3) ステア角度検出センサ (ワイヤー式ポテンシヨメータ)
- 4) 前方探査センサ (2Dスキャナ)
- 5) 車載カメラ
- 6) 全周プリズム

実機は、これらセンサ情報等を簡単に制御に反映できるよう油圧弁制御が電子制御型となっている機体として、雲仙普賢岳等で実際に使用している遠隔操作仕様の11t級の振動ローラを使用した。また、本システムの構成を図-6に示す。

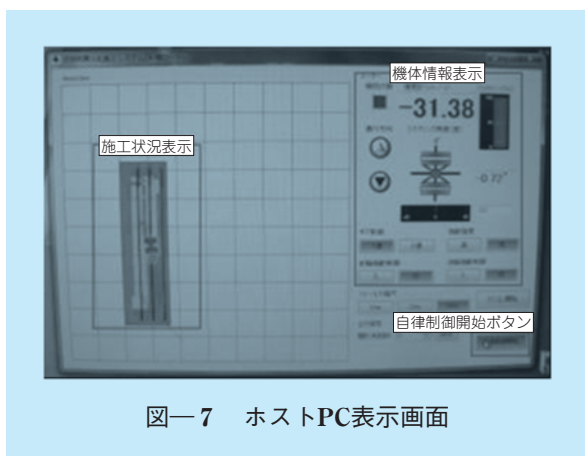
トータルステーション (以下「TS」という)、振動ローラ (11t級)、ホストPCで構成されており、機器間はWi-Fiで通信を行う。TSはジャイロ補正情報取得のため、常時測距を行いホストPC側に位置情報送信している。一方、振動ローラで



図一六 システム構成図

は自律制御用CPUにて、取得したセンサ情報をもとに駆動部の制御量の演算を行い、さらにホストPCから送信されてくる情報を元にジャイロ補正を演算し、振動ローラを目標へ自己誘導を行う「慣性航法」にて走行～転圧作業を行う。

図一七にホストPCに表示される画面を示す。ホストPCの表示画面では、振動ローラによる転圧回数における施工状況および振動ローラの機体情報を表示する。また、画面上のボタンにて、振動ローラに自律制御開始命令を送信することができる。



図一七 ホストPC表示画面

② 検証実験

本システムの自律走行精度を検証するための実験を行った。以下に設定した施工条件を示す。

- ・ 転圧回数：有振動 2 回/レーン
- ・ レーン長：25m
- ・ 転圧路：3レーン
- ・ 施工ラップ幅：0 mm
- ・ 走行速度：1 km/h

③ 実験結果

図一八に実証実験の様子を示す。結果は以下のとおりである。



図一八 実証実験の様子

- ・ 自律作業は有振動と無振動とで比較して大差がなく、搭載センサ類の耐振動性は十分であった。
- ・ アーティキュレート機構の機械制御において、車体中央が屈曲する際に前後輪間で発生する不規則な挙動は、演算を工夫し制御することができた。
- ・ 締固め作業において施工重複幅に影響がある隣り合う二つのレーン間の最大離隔は約400mm程度であった。

4. おわりに

このほかにも今後の災害に備えるものとして、水中での運搬作業が可能な水陸両用のクローラダンプや、固定カメラが不要で車載カメラのみでガラ撤去等が行えるバックホウ、常に安定な姿勢が制御可能な建設機械の開発等、未来に向けて開発が必要なものは、種々想定されている。

今後も災害対応ロボットへの取り組みとして、近未来における無人化施工を模索しながら、その技術を高め開発を進めるとともに、既存技術の継承にも力を入れていく所存である。また、今後は産官学と連携して無人化施工技術の普及と発展に努めていきたい。