

無人化施工における無人測量システムの開発

開発経緯と改良型システムの導入結果

橋 詰 亮・浅 沼 廉 樹・三 鬼 尚 臣

平成2年11月、198年ぶりの噴火活動によって島原市を中心に大きな被害を与えた雲仙・普賢岳。復興が進んだ現在もなお、溶岩ドームの崩落や土石流による被害が想定される水無川流域では立ち入りが禁止された警戒区域が設定されている。

警戒区域での災害復興工事は、遠隔にて建設機械を操作する無人化施工にて行われている。無人測量システムとは、警戒区域内での測量を遠隔操作で行う機械である。本報では、雲仙・普賢岳における無人化施工に導入されてきた無人測量システムの開発経緯と、その改良システムの導入結果を述べるものである。
キーワード：無人化施工，無人測量，雲仙・普賢岳，GPS

1. はじめに

雲仙・普賢岳における無人化施工は、平成5年の試験フィールド制度として採用されて以来、除石工事や砂防ダムの工事を経て改良、発展してきた。

平成10年に施工された水無川2号砂防ダム工事では、CSG工法、RCC工法を用い無人化施工にて実施された。水無川2号砂防ダム工事での測量作業では、①盛土・切土管理用丁張り出しと測点位置出し、②土砂型枠施工位置管理、③出来形管理などがあり、これらの測量作業を人が警戒区域に立入らず無人化施工で行う必要があった。そこで安全な位置に設置されたコントロールルームから遠隔操作で測量できる無人測量システムの技術開発を行った。

本システムは、特に砂防ダム工事の土砂型枠作業時のRCCコンクリート測点の位置出し及び堤体出来形の計測を高精度かつ短時間で遠隔測量できる技術に重点を置いて開発された。

2. 無人測量システム

現在までに、3台の無人測量システムが開発され現場に導入されてきた（写真—1）。水無川2号砂防堰堤工事において1号機による実証実験を実施し、その後、測量精度の向上や測量時間の短縮を図るため、微小位置決め操作が容易に出来るXYテーブル機構を搭載した2号機を、赤松谷川2号砂防ダム工事に導入・運用を行った。そしてマーキング機構を新たにした3号機を赤松谷川5号床固工事に導入した。

(1) 無人測量システム（1号機，2号機）概要

無人測量システムはマーキング機構を有し、警戒区域内での出来形測量、土砂型枠やブロックなどの据付けを行うための位置出し作業を、遠隔にて行うシステムである。主な構成は、①マーキング機構、②トータルステーションシステム、③制御ユニットの3つの部分で構成されている。無人測量システムの概略図を図



1号機

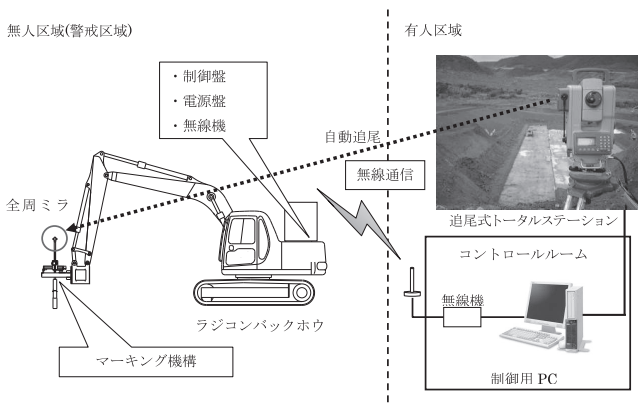


2号機



3号機

写真—1 無人測量システム



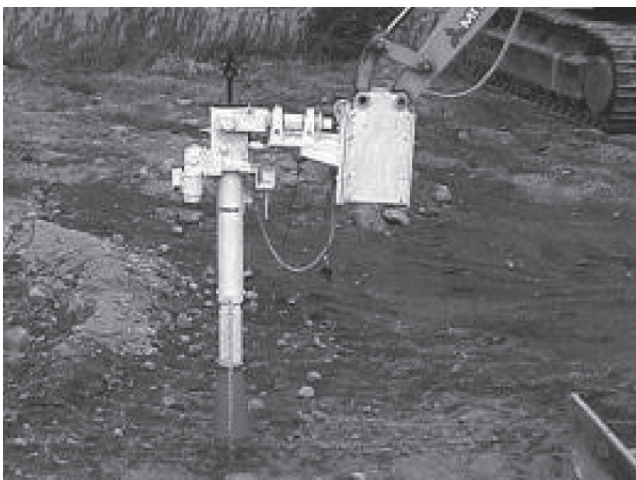
図一 無人測量システム概略図

—1に示す。計測は追尾式トータルステーションにて行い、現地にマーキングを残す。無人測量システムの操作は、他の遠隔施工重機と同様にコントロールルームにて行われる。

(2) マーキング機構

マーキング機構は、無人操縦可能なバックホウのアタッチメント部分に取り付けられている。その制御ユニットは重機運転席後部に設置してある。2号機では、微小位置決め操作が可能なXYテーブル機構を採用した。

マーキング方式は、逆さに噴射が可能なスプレー缶を用いて行われる。写真—2にマーキング機構(Z軸)を示す。スプレーの搭載されるマーキング機構の最上部には全周プリズムを搭載し、ユニバーサル機構により鉛直を保つ構造となっている。Z軸を下降させ地面と接地させ、 $\phi 100$ mmのマーキングを行う。



写真—2 マーキング機構 (Z軸)

(3) トータルステーションシステム

トータルステーションシステムは、Z軸に取り付けられた全周プリズムを自動追尾することで目標マーキン

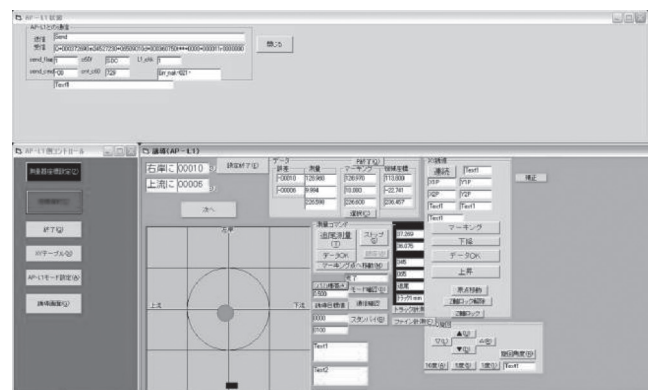
グ点に誘導を行うシステムである。自動追尾中は、プリズムがアームなどで隠れた場合にも、自動でサーチを行うため、警戒区域内での無人測量が可能となっている。本システムでは、無線による測定命令とデータ取得機能により、遠隔にてトータルステーションの制御を行うことができる。また2号機では、トータルステーションに加えて、GPSを使用しての測量も可能となり、トータルステーションの追尾の届かない場所での作業も可能となった。

(4) 制御ユニット

制御ユニットでは、トータルステーションシステムからの測量データをパソコンモニター上に表示させることで、目標マーキング点へ誘導を行う。また、2号機では、バックホウでの大まかな誘導後、微小位置決めデータの計算を行い、XYテーブルによって目標マーキング点へ自動誘導を行う。



写真—3 XYテーブル機構



図—2 誘導画面

3. 改良型無人測量システム (3号機) の開発

無人測量システム2号機は、長年にわたり現場に導入・運用され、トータルステーションとGPSとのハイブリット化や、使用無線機器の変更などのマイナー

チェンジが行われてきた。しかし、経年劣化により動作が不安定になってきたこともあり、新規リニューアルを行った。リニューアルを行うにあたり、

- ①ベースマシンの占有回避
- ②システム簡略化による安定動作
- ③マーキング方式の変更
- ④測量精度の向上

を目指した。

無人測量システムは、着工前測量から完成検査での出来形測量までの工事期間中ベースマシンを占有していた。測量時以外には施工機として使用するために、バケットと測量システムの付替えが容易なものとする。

(1) 改良型無人測量システムの概要

改良型無人測量システム概要図を写真-4に示す。ベースマシンは従来までの0.45 m³級バックホウから、無人化施工で一般的に使用される0.8 m³級バックホウとし、施工機械としての汎用性を高めた。アタッチメントは、ベースマシンから取り外した時に自立する形状とし、制御ユニットもアタッチメントに全て集約している。また2号機では誘導を自動制御にて行っていたが、新システムではON-OFF制御とした。プログラムを軽く、簡略化することで、より速く誘導を行うことが可能となった。

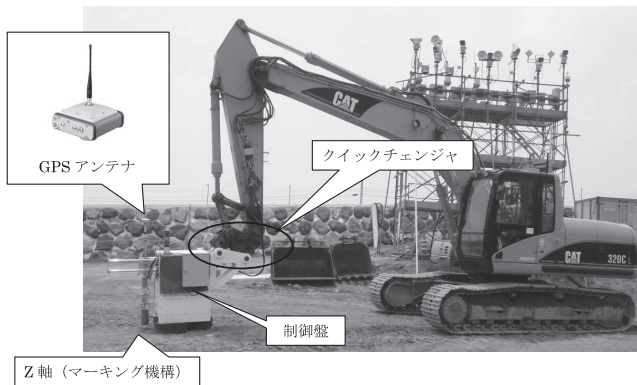


写真-4 改良型無人測量システム概略図

アタッチメント部には油圧駆動のクイックチェンジャシステムを搭載しており、バケットと無人測量システムの迅速な交換を可能にしている。

マーキング機構もこれまでのXYテーブル方式から、回転するアーム上をZ軸がスライドし、目標点まで移動するrθ方式とし、マーキング方式も新たにコンプレッサを搭載し、自動スプレーガンによるマーキング方式となった。写真-5に改良型無人測量システムを示す。計測はGPSと追尾式トータルステーションのどちらでも可能となっている。



写真-5 改良型無人測量システム

(2) 誘導機構

3号機の誘導機構は、従来のXYテーブル方式からrθ方式に変更している。従来方式では、自動誘導を行っていたため、XYスライダーによって位置決めを行っていたが、改良型システムの簡略化に伴ってrθ方式とした。図-3に示すように、rθ方式では、稼働範囲を広く取ることが出来る。また構造物の際の測量を行う場合にフレームが邪魔にならないといったメリットが挙げられる。

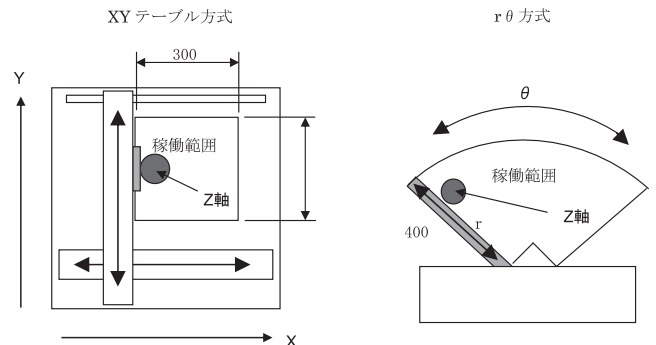
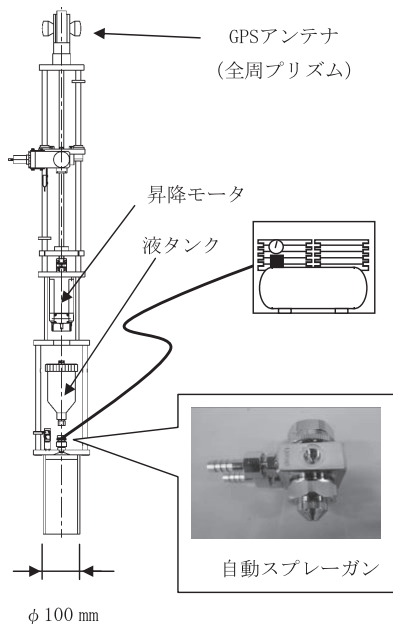


図-3 誘導機構

(3) マーキング方式

従来の缶スプレーを使用するマーキング方式では、液ダレによって噴出口に塗料が付着し、長時間放置するとスプレーが出来なくなる問題があった。そこで改良型システムでは、新たにコンプレッサを搭載し、自動スプレーガン（噴射ノズル）を用いる方法を採用した。

マーキング機構（Z軸）は、自動スプレーガン、塗料容器、昇降モータ、ユニバーサル機構から構成されている。Z軸頂部には、GPSアンテナもしくは全周プリズムが搭載される。図-4にマーキング機構（Z軸）の構成図を示す。本体側に収納されているコンプレッサからのエアによって、スプレーガンへ塗料を導き噴



図—4 マーキング機構

射を行う。スプレーガンのノズルは広角丸型で、 $\phi 0.5$ mm のノズル径でありながら、 $\phi 100$ mm のマーキングを可能としている。

(4) 使用塗料

使用塗料は試験施工により決定した。試験は、①フェノールフタレイン、②溶剤系着色剤（赤）、③多目的水性塗料（赤）、④多目的油性塗料（赤）の4種類の塗料（溶液）で行った。フェノールフタレインは、アルカリ性を紅色で示す指示薬で、コンクリートのアルカリ性に反応させ着色させる。溶剤系着色剤は、シンナーで薄め使用した。

それぞれの塗料（溶液）をコンクリート試料にマーキングし、評価を行った。評価は、塗料の発色、経時変化、濡れたコンクリート上へのスプレー、取扱性を総合して行った。予備試験より、噴射時間は3秒、ノズルからコンクリート面までの距離を250 mmとした。

発色が最も良かったのは、水性塗料と、溶剤系着色剤であった。経時変化では、フェノールフタレインのみ噴射を行った翌日には全体的に薄くなっていた。濡れたコンクリート面への噴射では、油性塗料と溶剤系着色剤が優れていたが、希釈にはシンナーが必要となり取り扱いに注意が必要である。

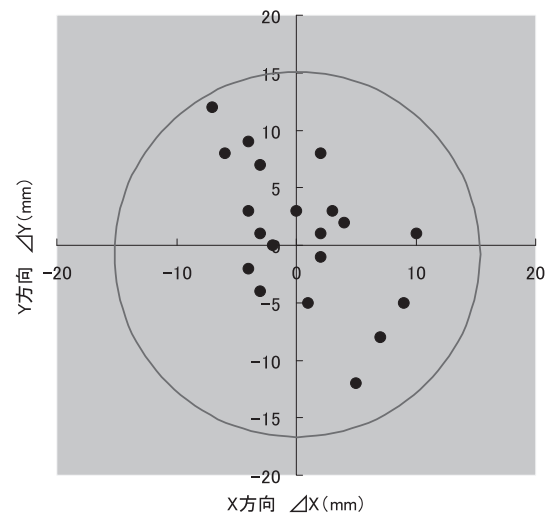
上記した結果より、発色に優れ水にも強かった溶剤系着色剤を採用とした。また、スプレー缶での問題であった、長時間放置した後のマーキングでも、自動スプレーガンと溶剤系着色剤での組み合わせでは、噴射が可能であることを確認することができた。

4. 改良システム導入結果

(1) マーキング精度検証

マーキング精度の検証は、事前に有人測量にて目標点（釘）を打ち、無人測量システムにて誘導、マーキングを行い目標点との誤差を計測し行った。測量器はGPSを使用した。

平面誤差分布を図—5に示す。有人にて計測を行った目標点を原点（0, 0）とし、無人測量システムによるマーキング点の誤差成分（ ΔX , ΔY ）を示したものである。分布図より、無人測量システムの平面誤差は15 mm以内の範囲に入っていることが確認できる。高さ誤差に関しても、最大で14 mm、平均11 mmと良好な結果が得られた。2号機の平面誤差は20 mm以内であったが、新システムでは15 mm以内と更に精度が向上した。これは、これまでZ軸上方に取付けられていたZ軸昇降モータを、改良型システムでは、Z軸下方に取り付けたことで重心が低くなり、鉛直性が増したことに起因すると考えられる。



図—5 平面誤差分布



写真—6 マーキング状況

(2) サイクルタイム

サイクルタイムは、赤松谷川5号床固工工事の実績より、一点あたり平均で1分23秒であった。これは重機移動時間を含めた時間であり、マーキングを行ってから次の目標点への誘導、マーキングまでの時間である。2号機のサイクルタイムが4分23秒であったことから、大幅な施工スピードの向上を図ることができた。これはコンプレッサを用いたことで塗料噴射時間を短くすることができたこと、 $r\theta$ 方式のON-OFF制御にしたことによると考えられる。

5. おわりに

無人測量システム1号機から2号機では、XYテーブル機構を付加することで、微小位置決めが可能となり、自動制御により高精度のマーキングを行える様になった。しかし、3号機である改良型無人測量システムでは、自動制御を行っていたXYテーブル機構を廃止し、新たにON-OFF制御の $r\theta$ 方式へと大きく機構を変えた。これにより、マーキング精度は維持したまま、施工スピードを大きく向上することが出来た。また、マーキング方式も缶スプレーからコンプレッサを搭載し、自動スプレーガン方式を採用することで、2号機までにあったスプレーノズルの詰まりを回避することが可能となった。

改良型システムの自立する形状や、制御システムの一体化によって、アタッチメントの付け替えが迅速に行うことができ、目標である、ベースマシンの占有を防ぐことも実現した。

現在、雲仙・普賢岳の無人化施工において、位置出し測量や、出来形確認測量は無人測量システムを用いて完全に遠隔で行われている。測量精度はGPS自身の精度に依存する部分が大いだが、Z軸の鉛直性の向上により、目標通りの高い精度となっている。

今後は、本システムを更に改良発展させ、測量サイクルの更なる短縮と、雨などの悪条件下での確実な



写真一七 施工状況

マーキングの実施を目指す。

また、この無人測量システムで蓄積した無人化技術を、今後の無人化施工の品質確保、出来形管理、安全対策などに応用していきたいと考える。

JCMA

【筆者紹介】

橋詰 亮 (はしづめ りょう)

(株)フジタ

建設本部 土木エンジニアリングセンター 機械部



浅沼 廉樹 (あさぬま なおき)

(株)フジタ

建設本部 土木エンジニアリングセンター 機械部



三鬼 高臣 (みき ひさおみ)

(株)フジタ

九州支店 おしが谷作業所

