

雲仙普賢岳無人化除石工事

Workerless Sand - Retarding - Basin Construction for Pilot Project for Sabo Works at Mt. Fugen in Unzen

佐藤 英一*
Eiichi Satou

城戸 克美*
Katsumi Kido

小原 俊之*
Toshiyuki Obara

小西 保**
Tamotsu Konishi

石井 正典**
Masanori Ishii

吉田 貴***
Takashi Yoshida

要 約

近年、建設業は社会構造の変化に起因する若年労働者の不足、労働生産性の向上、労働環境の整備等の問題を背景に建設機械の自動化、省力化が強く求められており、その対応の一つとしてエレクトロニクスまたはメカトロニクスを利用した遠隔操作技術を含む無人化技術の展開が図られている。

しかし、現状では遠隔操作技術の分野は、機械単体を対象とした技術は確立されているが、複数機械を組合せた施工全体のシステムとして技術を適用する取組みはあまり例を見ない。

本報告では、平成6年2月から掘削・積み込み・転石小割・運搬の一連の作業を全て遠隔操作で行っている雲仙普賢岳噴火災害における無人化施工の概要と課題について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 無人化技術の特徴
- § 4. 実績
- § 5. システムの適用の結果と課題
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

平成2年11月17日、198年ぶりに噴火した雲仙普賢岳は、4年を経過した現在も活発な火山活動を続け、いまだ終息のめどは立っていない。この間、度重なる火砕流や土石流の発生により今なお、多くの地域住民が不自由な生活を余儀なくされている。

そこで、土石流による災害防止対策として、上流部の砂防ダム群とその下流の導流堤群および遊砂地から構成されている水無川火山砂防基本計画が、建設省により策定された。

上流ダム群の設置や下流遊砂地の常時の容量確保のための除石工事を早期に推進するにあたり、建設省は有人

* 九州(支)島原(出)

** 機材部機械課

*** 機材部電気課

による施工は危険なため、無人化施工技術を平成5年7月に民間から公募し、建設省は同年から創設された「試験フィールド制度」を適用し、試験施工を実施した。

当社は、「ラジコン遠隔操作による土石流堆積土砂の掘削および搬出技術」により参画し、人が立ち入ることのできない警戒区域内において、監視および押土・掘削・積み込み・運搬・小割の一連の作業をラジコン遠隔操作とする世界でも初めての無人化施工を行った。

試験施工は2回実施され、第1回目は遠隔操作の将来的な運用の可能性調査、2回目は梅雨時期における遊砂地内での緊急堆積土砂除去工事への遠隔操作の適用性について各種調査が実施された。この試験施工の結果、7月初旬に建設省より無人化施工が実用化領域にあるとの判断がなされ、除石工事がパイロット事業化された。

本文は無人化施工のシステムおよび適用結果について述べる。

§ 2. 工事概要

写真-1に施工位置を示し、表-1に試験施工2件およびパイロット工事の工事工程を示す。



写真-1 施工位置図

本工区は、国道57号線上流の警戒区域内の3号遊砂地に位置し、除石量が100,000m³でありフィールド内での掘削・積み込み・監視および土砂仮置場までの一次運搬距離880mの内150mを遠隔操作による無人化とし残り730mを有人操作とした。土砂仮置場から安徳海岸土捨場までの警戒区域外での2次運搬(2000m)を有人施工としている。

試験フィールド制度による1期の無人化施工試験では、キャリオールダンプ方式による不整地での運搬作業の効率化を考慮し、2期工事では前方式に重ダンプトラック(77t)1台を追加することにより、掘削・積み込み・運搬作業の効率を高めた。

パイロット事業の適用となった今回の工事は、1次運搬距離が中距離であり、除石量は試験工事よりも大量のため、重ダンプトラック2台による大量運搬方式とし、更なる掘削、運搬能力の向上を目指した。

遠隔操作の概要は、以下の通りである。

警戒区域内の左岸側導流堤上にバックホウ・ブルドーザ・重ダンプ等の重機群の操作ヤードとして全体の管理を行う移動式操作室2台を配置し、遠隔操作および車両情報収集を行った。また、超遠隔操作室システムの検証としてバックホウを対象とし、操作ヤードから1.2km南東側に離れた非警戒地域に操作室を設置した。

移動式操作室内部での遠隔操作は、ヤード外に配置した全体監視用固定カメラ、高所カメラ車およびヤード内に配置した局部監視用無線操作式カメラ車(4台)からの映像によってラジコン遠隔操縦装置等を搭載した機械群の動きを確認しながら行った。ラジコン遠隔操作および車両情報伝達手段は、出力10mW以下の特定小電力無線局を、映像伝達には50GHz帯の簡易無線局を使用した。

表-2に主要機械一覧表、図-1に無線機械構成図を示す。

表-1 実施工程表

年	平成6年												平成7年			日当り作業量	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	掘削日当り	搬出日当り
工事名	数量		1/25~4/30		6/23~8/30		10/1~3/30			1,263		1,647		(m ³)	(m ³)		
雲仙普賢岳火口除石無人化施工試験(その2)工事	5,500m ³		-----		-----		-----			-----		-----		518	518		
3号遊砂地除石無人化施工試験(その1)工事	18,000m ³		-----		-----		-----			-----		-----		977	977		
3号遊砂地第1工区無人化除石工事	100,000m ³		-----		-----		-----			-----		-----		1,263	1,647		

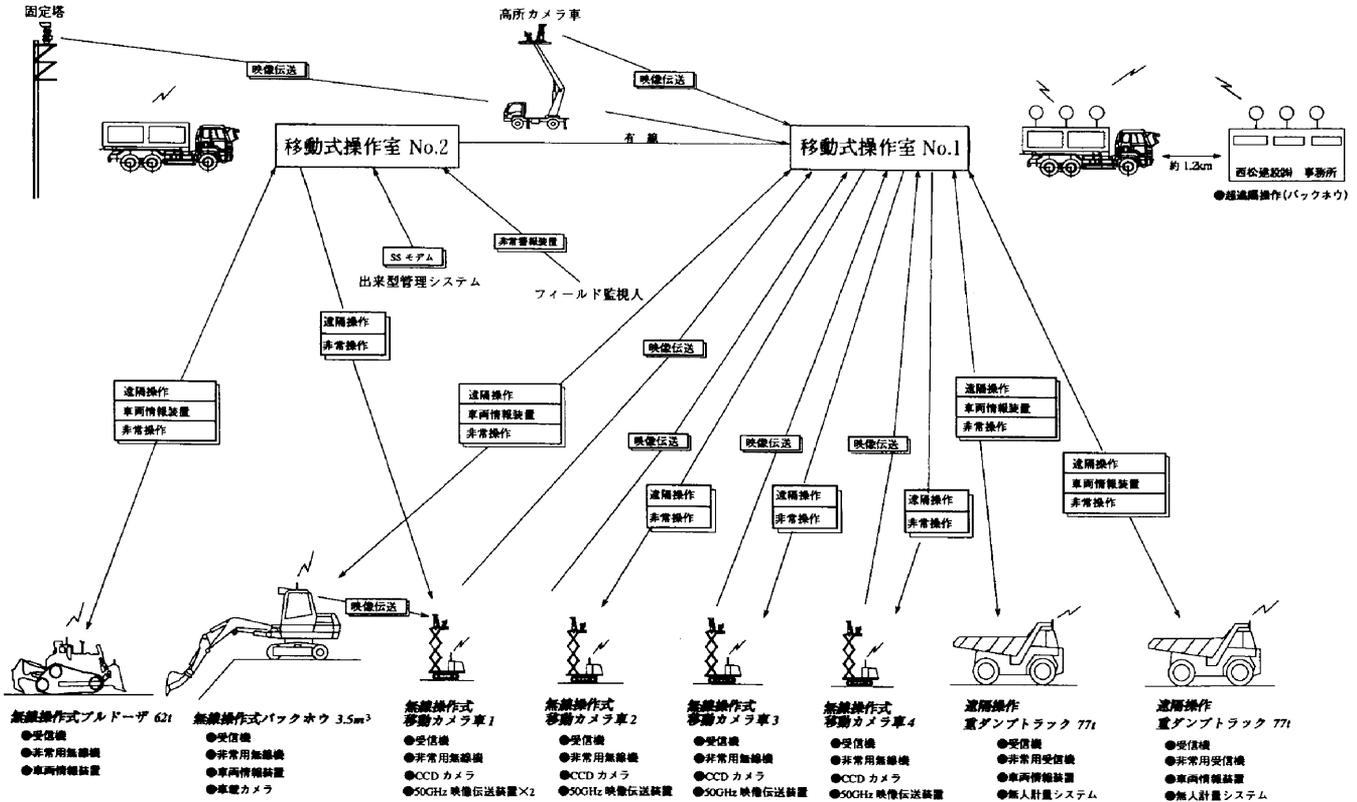


図-1 無線機械構成図

表-2 主要機械一覧表

機械名称	規格	台数	操作方式	作業内容	使用工事
ブルドーザ	62t級	1	リモコン式	掘削・埋土・整地	
バックホウ	3.0m ³ 級	1	リモコン式 2D, 3D映像搭載	掘削・積み込み	
ブレイク	油圧3450kg	1	リモコン式	転石破砕	1期、2期
バックホウ	12.5m ³ 級	2	リモコン式	土砂搬送場までの一次運搬	1期、2期
重ダンプトラック	77t級	2	リモコン式	土砂搬送場までの一次運搬	2期、3期
移動式カメラ車	2tクローラ	3	リモコン式 2D映像搭載	警戒区域内作業監視	
移動式カメラ車	4tクローラ	1	リモコン式 2D映像搭載	警戒区域内作業監視 バックホウ映像伝送中継	3期
高所カメラ車	4t高所作業車	1	有人操作	有人区域より全体監視	3期
移動式操作室	10t搭載	2	有人乗込み 2D映像搭載	遠隔操作及び集中管理	

※使用工事については、以下のように定める。
 空間：全ての工事で使用
 1期：雲仙普賢岳水無除石無人化施工試験（その2）工事で使用
 2期：3号選砂地除石無人化施工試験（その1）工事で使用
 3期：3号選砂地第1工区無人化除石工事で使用

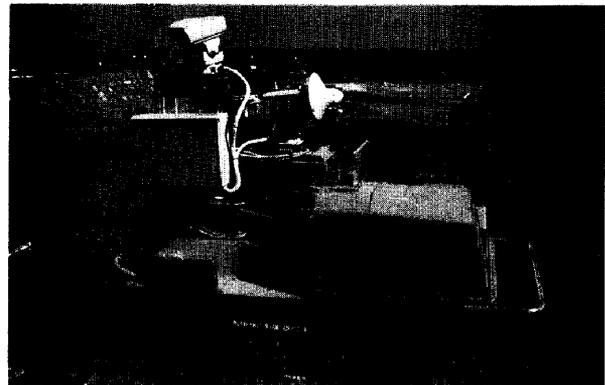


写真-2 無線操作式カメラ車

§ 3. 無人化技術の特徴

無人化技術として適用したラジコン遠隔操作システムについて以下に示す。

3-1 機器

1) 無線操作式カメラ車

無線操作式カメラ車は、施工ヤード内の任意位置での局部監視カメラとして4tクローラ1台、2tクローラ3台の計4台使用した。シザーズ上に屋外用ハウジングで覆われたCCDカメラ、制御箱および映像を無線送信する簡易無線局を装備している。

4tカメラ車は伝送装置を2台装備し局部監視の他にバックホウの車載カメラ映像の中継車としても使用している。写真-2に無線操作式カメラ車を示す。図-2に映像システム構成図を示す。

2) バックホウ車載カメラ

バックホウには、実際の運転に近い臨場感を出すために、3D（立体映像）および2Dのカメラが搭載されている。カメラ映像は、微弱電波を使用し、4t無線操作式カメラ車に送信される。写真-3に車載カメラを示す。

3-2 システム

1) マルチリンクシステム（超遠隔操作）

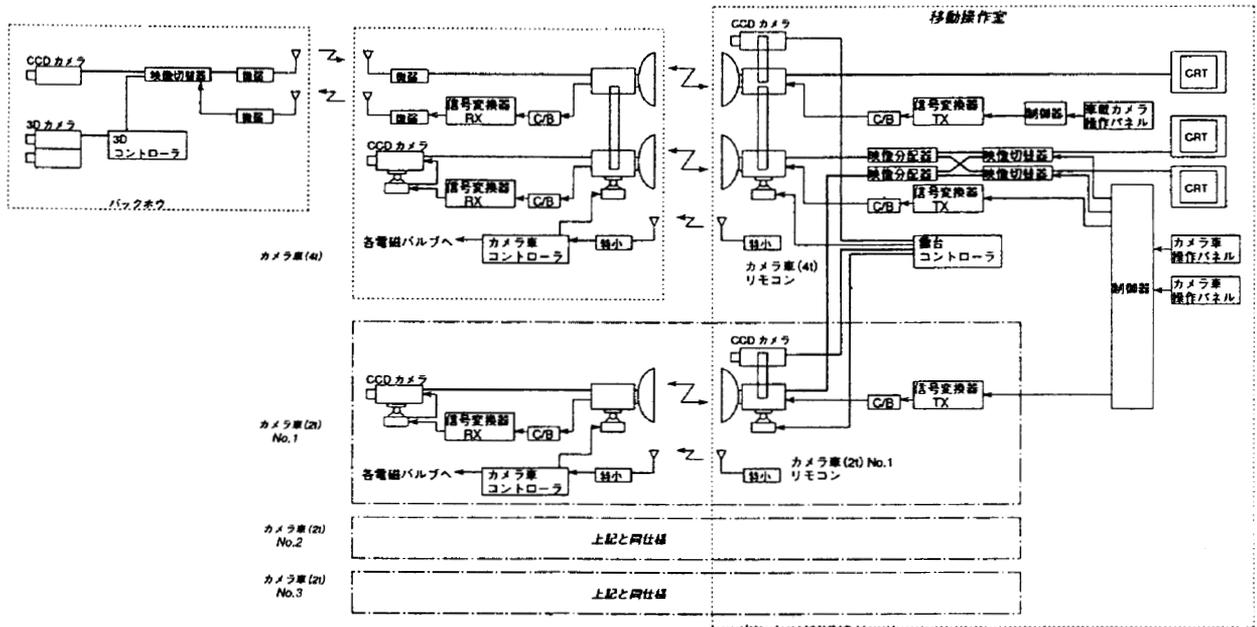


図-2 映像システム構成図

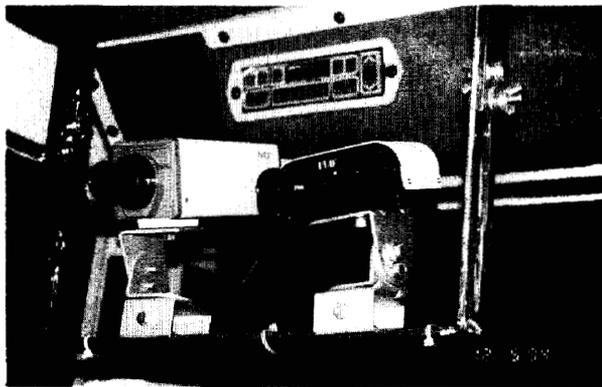


写真-3 バックホウ車載カメラ



写真-4 超遠隔操作室

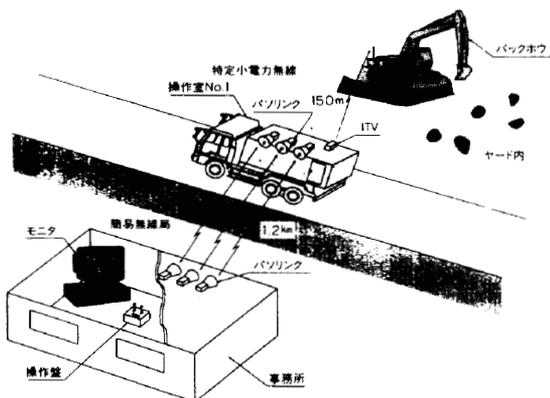


図-3 超遠隔操作概要図

マルチリンクシステムは、遠隔操作距離1200m（見通しがきけばそれ以上可能）で施工ヤード内のバックホウ

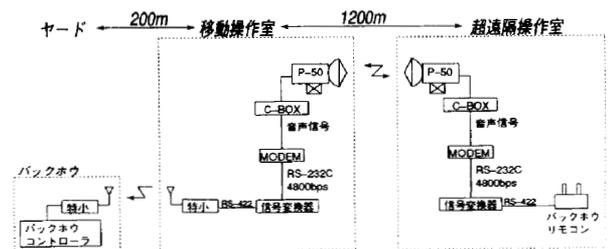


図-4 超遠隔操作システム構成図

を操作するものである。操作信号は超遠隔操作室内の操作盤からRS-422で出力されRS-232Cに変換し、音声モデムへ送信する。モデムから出力される音声信号を導流堤上操作室と超遠隔操作室間に対向させている簡易無

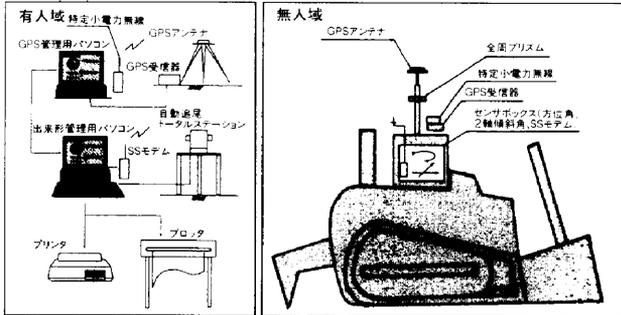


図-5 出来形管理システム



写真-5 出来形管理システム画面

表-3 自動追尾トータルステーション仕様

トータルステーション	
測距精度	±1mm+2ppm
測角精度	2"
追尾装置部	
自動追尾速度	10° /s
自動追尾精度	±20" 以下 (水平、上下)
視準距離	500m以下
自動追尾駆動範囲	水平±100°、垂直±20°
サーチ機能	水平±10°、垂直±2°

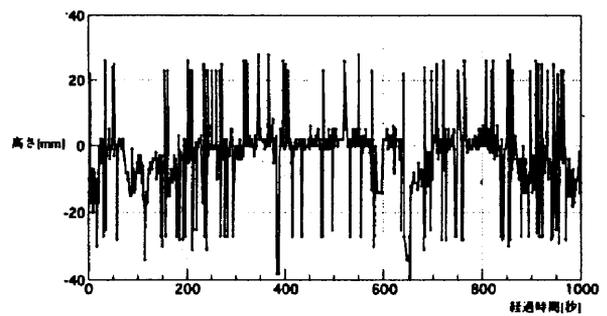


図-6 自動追尾トータルステーション高さ方向計測結果

線局の音声信号入力へ入力することによって、導流堤上の簡易無線局より出力される。この音声出力をRS-232Cにモデムで変換し、それをRS-422に変換後、特定小電力無線局によってバックホウ受信機に送信する。写真-4に超遠隔操作室、図-3に超遠隔操作概要図、図-4に超遠隔操作システム構成図を示す。

2) 出来形管理システム

出来形管理は、走行するブルドーザの接地高をリアルタイムに自動測量することにより行っている。図-5に出来形管理システム構成図を示す。

測量方法は、自動追尾トータルステーションを用いて、ブルドーザに搭載した全周プリズムの測距・測角を行い、このプリズムの3次元座標を計測する。同時にブルドーザキャビン上部に搭載した2軸傾斜計と光ファイバージャイロによりブルドーザの姿勢角および方位角を計測する。計測データを制御用コンピュータに送信しプリズムの3次元座標をブルドーザの接地高に換算する。計測結果は写真-5に示すように、画面上にはブルドーザの施工ヤード内での平面位置、その位置での計画地盤との標高差、法面整形を行う位置が表示される。表-3に自動追尾トータルステーション仕様を示す。

現場の施工環境により粉塵等が多い場合は自動追尾ト

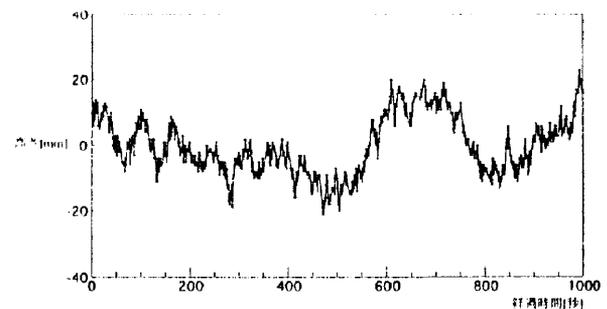


図-7 GPS高さ方向計測結果

ータルステーションのプリズムからの反射光量の減衰が大きく、計測不可能となる。これに対処するため衛星を利用したGPSによる計測を併用した。GPSの測量は、干渉測位法の1つであるリアルタイムキネマティックオンザフライ測量を採用した。1点の計測時間は、表示までに約2秒程要する。なお、自動追尾トータルステーション方式とGPS方式との停止時の高さ方向の瞬時値を2期の工事で計測し、図-6、7のようなデータが得られた。自動追尾トータルステーションは、常に微小ながら追尾をかけているために、ある値を中心とした分散がみられる。そのため±3cm以下の精度を要求する場合、10秒間程度のデータの平均処理が必要である。一方、GPSのデ

ータは、値が一定に安定せず、3cm程度の幅で不規則に変動しているため、ある時間内で平均化しても値は収束しない。したがって、通常の出来形管理は自動追尾方式を主にGPSを補助とすることとした。

これらの測量によって得られたデータから計測終了後、横断面、等高線の自動作図および点高法による土量計算を自動で処理する。

3) オートブレードコントロールシステム

施工フィールドの最終出来形形状は、上下流方向に一定の勾配をもつが、ブルドーザブレードの遠隔操作だけでは勾配の仕上り精度が悪いため、高さおよびチルトの自動コントロールとして以下のシステムを採用した。

ブレードの高さ方向制御は、ブレードにレーザ受光器を装備し、基準となる回転レーザのレーザ光の受光器中心からのズレ量を検知し、これをブレードの操作信号として出力する。次に、ブレードのチルト角制御は、ブレードの傾斜センサにより設定したチルト角度に自動的にコントロールされる。図-8にオートブレードコントロールシステム構成図を示す。

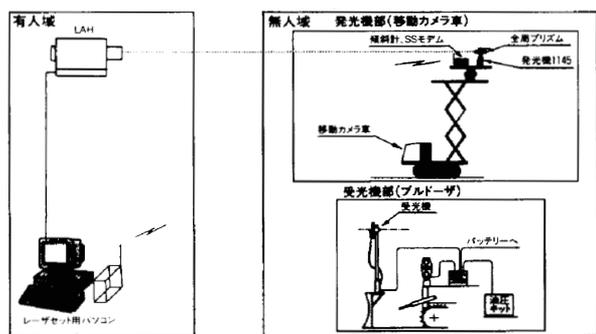


図-8 ブレードコントロールシステム構成図

回転レーザは、±4°の範囲でのセルフレベルング機能を有し、レベル状態ではレーザ光の勾配設定が0～+10%の範囲で可能であり、本工事では仕上がり流下勾配4.1%に射出するように設定した。

フィールド内を移動するため回転レーザ移動用車両として無線操作式カメラ車を流用し、回転レーザに傾斜をもたせた方向と実際の使用場所の傾斜方向を合わせて設置するため、雲台に回転レーザとともに2軸傾斜計、光ファイバージャイロを搭載しており、これらの機器から有人域に送信されるデータで回転レーザの水平および傾斜方向を合わせることができる。

4) 稼働管理システム

稼働管理システムは、遠隔操作オペレータへの重機稼働

働情報の伝達および重機の稼働管理を目的とし、移動操作室に無線伝送された重機稼働情報をCRTに表示するとともに、ICカードにデータを記録する。データは毎日作業終了後に集中管理室の稼働管理パーソナルコンピュータで読み取り、各重機械およびオペレータごとの帳票を印字する。

5) 無人計量システム

無人計量システムは、施工ヤードから仮置場までの一次運搬量を自動的に計測することを目的とし、運搬車のベッセル歪から積載量を換算するシステムである。重ダンプトラックのベッセルに歪計および近接スイッチを取付け、重ダンプトラックに搭載したICカードにデータを記録する。データは作業終了後に無人計量パーソナルコンピュータにICカードから読み込み、出荷計量日報および出荷計量月報を印字する。

図-9に計量ユニット取付図、図-10に稼働管理・無人計量システム構成図を示す。

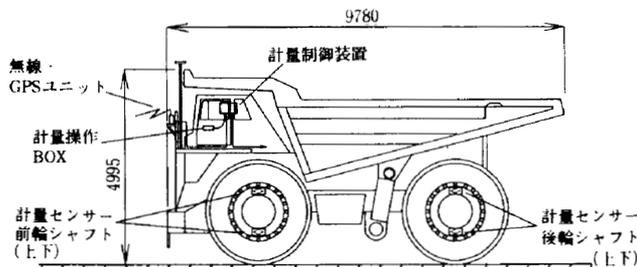


図-9 計量ユニット取付図

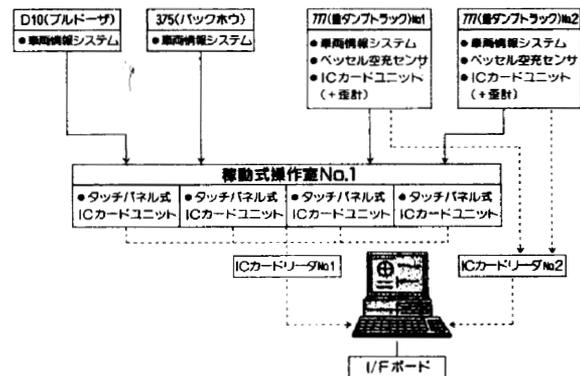


図-10 稼働管理・無人計量システム構成図

3-3 安全対策

1) 耐熱対策

一時的な温度100℃、湿度100%の施工条件下でも運転を可能とするため、油圧配管、電気配線、電気機器および燃料タンクに断熱材貼付け等の対策を行っている。

2) 非常時脱出対策

警戒区域内での遠隔操作機械の無線機故障や機械故障等に対し、作業用とは別途の遠隔操作による警戒区域外への脱出対策をとっている。以下にブルドーザを例に対策内容について記載する。

故障状況を次の3レベルに設定しそれぞれ対策をとっている。送信機のみが故障し車両を動かすことができない場合(レベル1)は、予備送信機により車両を運行制御する。受信機のみが故障して車両を動かすことができない場合(レベル2)は、非常用受信機インターフェースを介し、非常用送信機から操作信号伝送することによりアクチュエータを駆動して、安全な場所に移動する。エンジンを始動できない等の動力源のトラブルにより車両を動かすことができない車両本体の故障の場合(レベル3)は、非常用の送信機および受信機を使用して、車両のバッテリーにより非常用動力ユニットを駆動し、ブレードおよびリッパが車両移動を妨げない位置に保つとともに、ブレーキを解放し、別の遠隔操作牽引車両により、安全な場所まで牽引する。(写真-6, 7)



写真-6 遠隔操作式ブルドーザ牽引装置



写真-7 無線操作式カメラ車牽引装置

§ 4. 実績

表-4に各遠隔操作機械の作業実績を示す。各重機の作業能力は、バックホウの能力に左右される。1期工事では不整地での運搬を考慮し、キャリオールダンプ2台を採用したが、走行速度が遅いこと、積載容量が少ないことから、バックホウの待ち時間が多く、作業効率は、有人に比べ70%程度となっている。そこで2期工事およびパイロット工事では、施工数量が多く工期も短いことから、重ダンプトラック2台を採用した。また施工方法として、バックホウの積込み位置を固定し、集土はブルドーザを中心とした施工法によって対処した。その結果、施工効率は有人施工と同等もしくはそれ以上となった。その要因を以下に列記する。

- ・バックホウは、移動をほとんど行わず積込み作業のみとした。
- ・77t級重ダンプトラックの積載容量が大きいため、日当たりの運搬車両入替え時間が短縮された。
- ・オペレータの遠隔操作習熟度が向上した。

表-4 作業実績表

機械名称	規格	台数	作業工程	作業能力			
				有人施工 m ³ /h	無人化施工 m ³ /h		
					1期工事	2期工事	3期工事
ブルドーザ	62t級	1	掘削・押土	298.1	128.5	203.9	277.3
ブルドーザ	3.0m ³ 級	1	搬込	254.0	107.3	204.2	277.3
キャリオールダンプ	28t級ブルドーザ牽引+キャリオールダンプ12.5m ³	2	一次運搬	1台当り 75.7 (150m)	58.9	43.5 (600m)	-
重ダンプトラック	77t級	2	一次運搬	1台当り 102.2 (880m)	-	1台 142.0 (600m)	2台 138.5 (880m)
ブレーキ	油圧3450kg級 本体洗用	1	仮石破砕	20.0	20.7	20.0	-

§ 5. システムの適用の結果と課題

以下に、施工機械、遠隔操縦性、映像関係、導入システムについて項目別に結果と課題を示す。

5-1 施工機械

当パイロット工事のように、日当り施工数量が多く中距離程度の運搬作業の場合は、キャリオールダンプ方式では能力不足となるため、重ダンプトラックが施工効率を向上させる上で適応性に富んでいた。しかし重ダンプトラックの場合、施工条件・安全の面で以下の制約が加わる。

- ・他の重機械との位置関係を考慮した走行回転半径を確保するため、フィールドが十分広いことが必要である。
- ・走行路は、十分な幅員と整地が必要である。

5-2 遠隔操縦性

遠隔操作時、送信側と受信側とのデータ処理および無

線通信時間が瞬時でなく、リモコン操作開始から重機械が動作するまでのタイムラグが50ms程度となった。このため、停止させたいところで止めることができない等の問題が当初懸念されたが、オペレータは半日程度の練習でタイムラグに対応する操作に慣れることができ、作業時には支障とはならなかった。

バックホウの超遠隔操作では、通常の遠隔操作よりさらに20msのタイムラグが発生するため70msの遅れとなり、操縦に対してわずかながら動作遅れが感じられたが、これも遠隔操作と同様に超遠隔操作習熟度の向上によって作業上支障とならないと思われる。

5-3 映像関係

パイロット工事では、監視カメラを増設したことにより、オペレータの映像情報選択の範囲が拡大し、作業効率の向上、安全性の確保ができた。また、バックホウに2Dおよび3Dの車載カメラを搭載したことで、バケットの掘削位置での土石の状況や重ダンプトラック積込み時の積込み量および積込の位置の状況を臨場感をもってとらえられた。

5-5 導入システム

(1) 出来形管理システム

2期工事までは、自動追尾トータルステーションの測距光と追尾光を同軸で出し、2波が干渉しないように追尾光の出力を弱めていたため、追尾可能距離が140m前後であった。3期工事では、施工ヤードが広くなり、最大300mの追尾距離が必要となった。そこで出力を上げても干渉しない2波それぞれの波長を選択し、追尾光到達距離が400mとなったが、測距光の到達距離は500m程度と短くなった。

自動追尾トータルステーション方式とGPS方式とを適用した結果は、自動追尾トータルステーション方式はリアルタイム性や精度上すぐれているため見通しがきく近距離(400m以内)で適している。遠距離や見通しがきかない場合は、高精度を要求しなければGPS方式が適用できる。しかしGPSは、計測後表示されるまでに2秒程度のタイムラグがあること、衛星からの電波受信の状態や受信機間通信が良好でない状態では時として単独測位になり、その場合にはデータが数十m移動するときがある。したがって、今後の処理方法として単独測位のデータの表示は表示用ソフト上で切り捨てる等の対策が必要である。一方、現在はGPSの標準ソフトウェアを使用しているが、将来遠隔操作のナビゲーションをリアルタイムオンザフ

ライで行う場合は、重機の姿勢や他重機との位置関係を表示可能な独自のソフト開発が必要となる。

(2) 無人計量システム

歪計による計量精度は、土捨場での土量計測に対して5%以内と良好な結果を得た。システムはバックホウオペレータへ積込み時の計量データ表示機能を有しているが、特定小電力によるデータ送信であるため、他の遠隔操作機械への電波変調の影響を考慮し、表示しなかった。しかし過積載防止という施工管理面からデータ表示は必要と思われ今後、電波変調防止対策の検討が重要である。

(3) オートブレードコントロールシステム

使用したコントローラがモータグレーダ用であり電磁比例弁のコントロールに対応するタイプであったが、使用したブルドーザはON/OFFの電磁弁であったためPWM(パルス信号による制御器)を取り付けて対応した。その結果、操作前の流量調節によって、ブレード高さおよびチルト自動制御は±5cm以内の精度で行えた。

しかし、油温が変化すると、毎回その調整を行わなければハンチングを起こしてしまうため、油温対策が必要である。

§ 6. おわりに

平成5年度に創設された試験フィールド制度による雲仙普賢岳無人化施工に当社のラジコンによる無人化技術が採用されて以来、3件の工事を施工することができた。無人化施工技術は機械技術のみならず、マンマシンインターフェース面での技術の向上が、施工効率を高めることにつながり、かつ施工の安全へとつながる。

遠隔操作機械単体での技術とは異なった遠隔操作機械の組み合わせによる一連の遠隔操作技術の実施工において取得したノウハウを、砂防ダム等の構造物構築に必要な無人化技術に結び付けるような、将来に向けた更なる深度化を図る必要があると考える。

末筆ながらご指導、ご協力を頂いた関係各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 石井 正典・桑原 資孝・小西 保：ラジコン遠隔操作による土砂の掘削および搬出技術に伴う施工支援システム、平成6年度建設機械と施工法シンポジウム論文集、pp.260～265、1994