

テレアースワークシステム（遠隔土工システム） の開発と実施

Development and practice of Tele-Earthwork system

(株)フジタ ○酒向 信一*
(株)フジタ 藤岡 晃*
(株)フジタ 梶田 秀芳**
(株)フジタ 奥松 俊博*

By Shinichi SAKOU, Akira FUJIOKA, Hideyoshi MASUDA, Toshihiro OKUMATSU

「テレアースワークシステム」とは、危険地帯から離れた安全な場所に各無人重機の集中管理操作室（コントロールルーム）を設置し、通信中継車を介して立体映像・コンピュータグラフィックス・各種作業用モニターを用い、遠隔操作により、土砂の掘削・積み込み・運搬・捨土までの一連の操作を安全に行うシステムである。

本システムは、建設省「試験フィールド制度」の適用第1号として、「雲仙における無人化施工」に関する技術提案に応募し、選定された。無人化施工試験工事は、平成6年2月末から4月末までと平成6年6月末から8月中旬までの工期で実施し、良好な結果が得られた。

本論文は、テレアースワークシステムの概要と、実験工事の結果について報告するものである。

【キーワード】自動化・ロボット化、建設機械、マルチメディア、双方向通信

1. はじめに

雲仙普賢岳は、1991年11月以来依然活発な活動を続けている。現地では、土石流による被害地域の拡大を防ぐために、流出した土砂の除去工事が懸命に進められている。しかし、火砕流からの安全上の問題からその範囲は限られたものとなっている。

そこで、建設省は、新設された「試験フィールド制度」の適用第1号として、「雲仙における無人化施工」に関する技術提案を公募した。

当社は、図-1に示す「テレアースワークシステム（遠隔土工システム）」を提案し、選定された。平成6年1月25日から4月30日までの工期（以下、1期工事と呼ぶ）と、平成6年6月23日から8月31日まで工期（以下、2期工事と呼ぶ）で無人化試験施工を実施し、当初の予想以上の成果が得られた。

2. テレアースワークシステムの概要と特長

本システムの特長を以下に述べる。

(1) 双方向で同時に多重通信を行い、通信中継車を經由することで3km程度の遠隔操作ができる。

(2) 立体映像、音声、コンピュータグラフィックス等を使用することで、あたかも重機に乗っているような臨場感を伴った、きめ細やかな重機遠隔操作ができる。

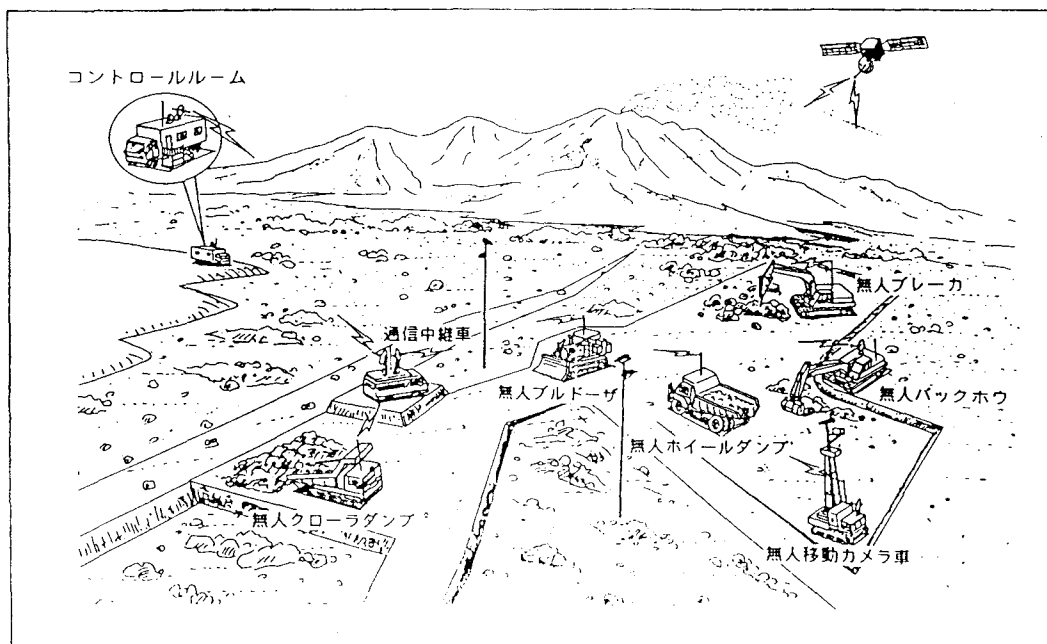
(3) 通信は双方向であり、重機の運転状況がコントロールルームで把握できる。

コントロールルームでは、制御信号を重機等に送信すると共に、重機の各種データを受信することができるため、運転状況をリアルタイムに把握することができる。これにより、立入禁止区域内はもちろんのこと、遠隔地の重機のトラブルを未然に防止することができる。

(4) GPSとトータルステーションにより、掘削管理、車両の位置表示、出来形の把握等の施工管理ができる。

* 技術本部技術研究所 045-591-3917

** サンケン 03-5411-2733



図－１ テレアースワークシステム概要図

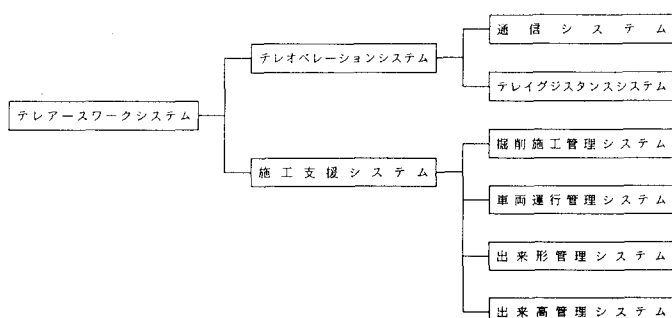
(5)通信衛星を利用したグローバル情報伝達システムにより、現場から離れた本社等から現場の状況が把握できる。

3. システムの構成

「テレアースワークシステム」は、図－２に示すように、「テレオペレーションシステム」と「施工支援システム」から構成されている。

「テレオペレーションシステム」は、無線により映像および制御データを通信し、数km離れた場所の重機や装置をリアルタイムにリモートコントロールするシステムである。

「施工支援システム」では、GPS・自動追尾トータルステーションで、無人測量を行い、採取したデータをコンピュータ処理し、施工の支援を行うシステムである。



図－２ システムの構成

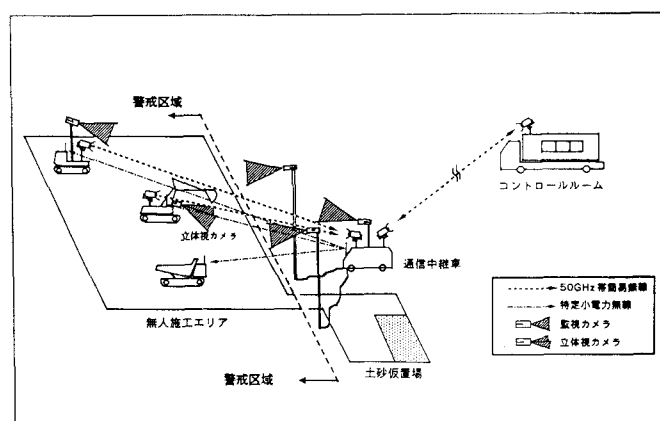
3-1 テレオペレーションシステム

「テレオペレーションシステム」は、「通信システム」および「テレイグジスタンスシステム」から構成されている。

「通信システム」は、遠隔制御に必要な制御データと映像の通信を行うシステムである。図－３に通信システムの概要図を示す。

無人施工エリア付近に設置した通信中継車と各重機間の通信には特定小電力無線を使用し、また通信中継車とコントロールルーム間の通信には、数kmの通信が可能である50GHz帯簡易無線を使用することにより、遠隔操作を可能にしている。

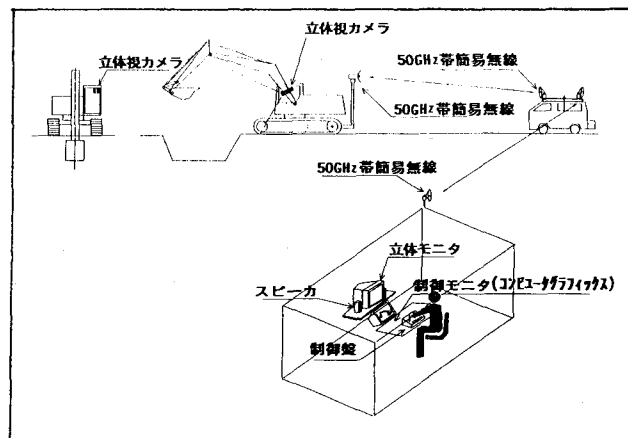
「テレイグジスタンスシステム」は、遠隔で細やかな作業を行うために、立体映像などを見ながら重



図－３ 通信システム図

機の操作を行うシステムである。図－４にテレグジスタンスシステムの概要を示す。

以上のシステムにより、オペレータはコントロールルームで、立体映像や重機姿勢のコンピュータグラフィックス画像などを頼りに、実際に重機に乗っているかのような臨場感を得ながら、安全な場所で重機を操作することができる。さらに、重機のメンテナンス情報（燃料残量、エンジン油温など）についても、ディスプレイ上で常時確認できるため、オペレータは、遠隔操作では伝わりにくい無理な操作からの回避や、危険区域内でのエンジン停止など、様々なトラブルを未然に防ぐことができる。



図－４ テレグジスタンスシステム概要図

3-2 施工支援システム

「施工支援システム」は、掘削施工管理システム、車両運行管理システム、出来形管理システム、出来高管理システムで構成されている。

これらのシステムは、GPSと自動追尾トータルステーションを利用して無人測量を行い、採取したデータをコンピュータ処理し、施工支援を行うシステムである。

4. 試験施工

4-1 試験施工概要

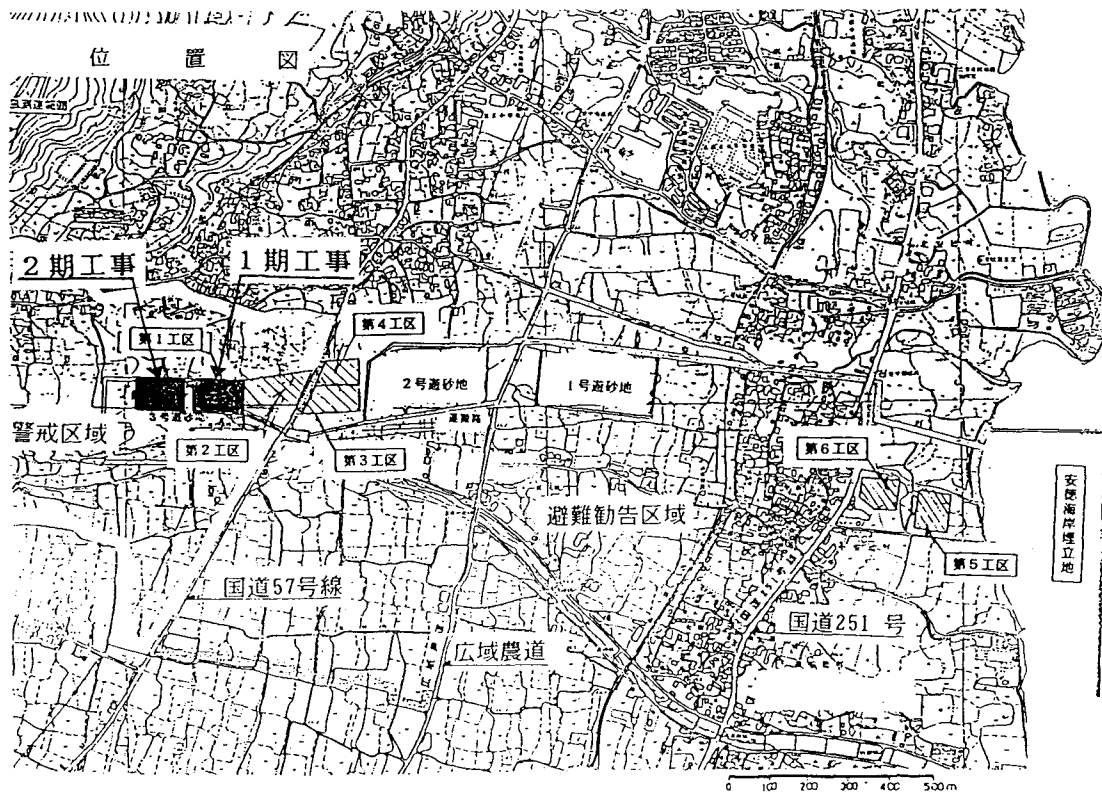
試験施工工事における当社の工区は、1期工事および2期工事ともに、図－５に示すように国道57号線より上流にあり、立入りが一切禁止されている警戒区域内であった。工事概要を以下に示す。

(1期工事)

- ・工事名称：雲仙普賢岳水無除石工無人化試験

(その1) 工事

- ・工事場所：長崎県島原市天神元町地先
- ・工 期：平成6年1月25日～4月30日
- ・発注者：建設省九州地方建設局
- ・工事数量：除石工 6,500 m³（掘削、積み込み）



図－５ 工事箇所位置図

(2期工事)

・工事名称：3号遊砂地除石工無人化試験

(その2)工事

・工事場所：長崎県島原市天神元町地先

・工 期：平成6年6月23日～8月31日

・発注者：建設省九州地方建設局

・工事数量：除石工 16,500 m³ (掘削・積み込み)

4-2 使用機械

試験施工に使用した各重機の仕様を表-1に示す。
また、選定理由を以下に述べる。

1) 破碎

破碎に使用する破碎機の選定は、現地堆積土砂の粒度分布曲線および、一軸圧縮強度より選定を行った。

粒度分布曲線から、粒径 1,500mm以上は、全体の2%程度と見られ、3.0m³級のバックホウを使用することにより 1,500mm以下の転石および土砂を除去し、これ以上の径の転石を破碎機で破碎することとした。破碎は、現地転石の強度は、一軸圧縮試験の

結果、約300kgf/cm²程度であり、油圧ブレーカで破碎可能であると判断し、余裕をみて 3,000kg級を採用した。

なお、油圧ブレーカは、1.6m³級バックホウに装着した。

2) 掘削・積み込み

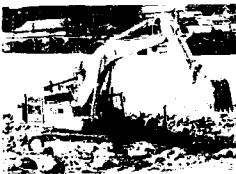
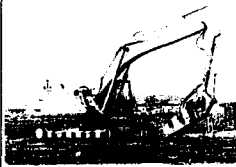
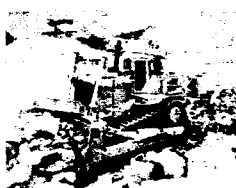
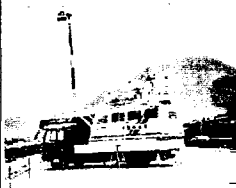
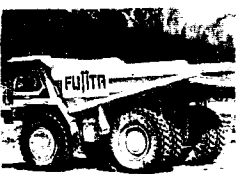
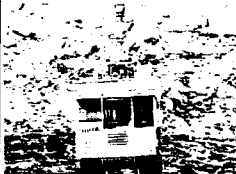
現地堆積土砂は、玉石混りの比較的ルーズな状況と想定され、掘削・積み込みは、3.0m³級バックホウのみで十分能力を発揮できるものと判断した。

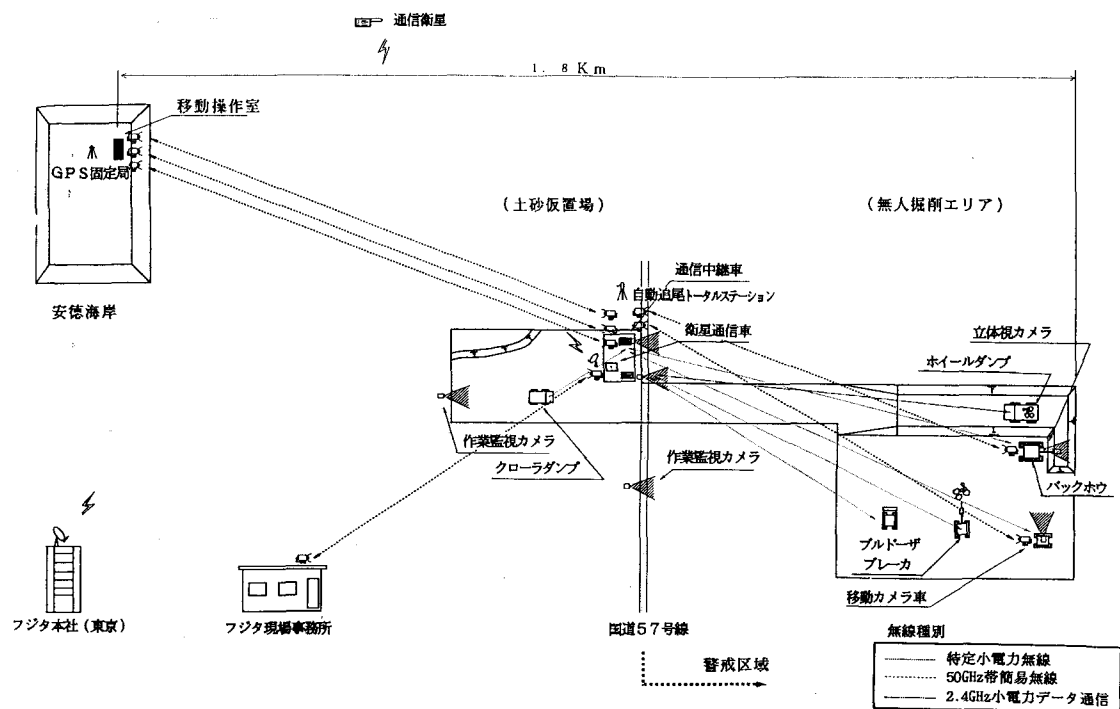
また、整地および掘削・集土用のブルドーザは、62t級および16t級を使用した。

3) 運搬

現地堆積土砂の粒度分布曲線から判断すると、大きな転石の数量は少ないが、広範囲にわたって分布しているため、走行路の整備も常時行う必要があると想定された。このため、運搬車両は、クローラタイプが望ましく 12t積のクローラダンプを選定した。しかし、掘削・積み込み機とのマッチングの問題および運搬能力を考慮し、78t積のホイールタイプのダンプトラックも併用した。

表-1 重機仕様一覧

機種		仕様		機種		仕様	
バックホウ PC650		運転整備重量	6,500 kg	ブレーカ PC400		運転整備重量	42,300 kg
		バケット容量	2.5 m ³			ブレーカ重量	2,900 kg
		フライホイール出力	410 ps			フライホイール出力	280 ps
		接地圧	1.06 kgf/cm ²			接地圧	0.77 kgf/cm ²
		登坂能力	35°			登坂能力	35°
		最大掘削 深さ	8,865 mm			最大掘削 深さ	7,760 mm
		半径	14,015 mm			最大掘削 半径	12,020 mm
		主要寸法 全長	14,010 mm			主要寸法 全長	11,700 mm
		全幅	4,135 mm			全幅	3,340 mm
		全高	4,910 mm			全高	3,450 mm
ブルドーザ D-10N		総重量	62,800 kg	通信中継車		車種	4 tユニック車
		フライホイール出力	527 ps			主要寸法 全長	5,940 mm
		接地圧	1.33 kgf/cm ²			全幅	2,340 mm
		登坂能力	30°			全高	2,715 mm
		主要寸法 全長	9,480 mm			主要設備	ミリ波無線機、 特定小電力無線機、 監視カメラ、測量機器 その他
		全幅	3,200 mm				
		全高	4,150 mm				
ホイールダンプ HD785		運転整備重量	142,955 kg	移動カメラ車 MST-500		運転整備重量	3,890 kg
		積載重量	78,000 kg			積載重量	2,500 kg
		フライホイール出力	1,024 ps			フライホイール出力	64 ps
		接地圧	6.15 kgf/cm ²			接地圧	0.12 kgf/cm ²
		登坂能力	15°			登坂能力	35°
		主要寸法 全長	10,100 mm			主要寸法 全長	3,600 mm
		全幅	5,010 mm			全幅	1,850 mm
		全高	5,002 mm			全高	2,150 mm
クローラダンプ MST-3300		運転整備重量	20,700 kg				
		積載重量	12,500 kg				
		フライホイール出力	365 ps				
		接地圧	0.305 kgf/cm ²				
		登坂能力	35°				
		主要寸法 全長	6,800 mm				
		全幅	3,200 mm				
		全高	2,800 mm				



図－6 試験施工の通信システム

4) 支援機械

その他の機械として、通信中継車1台および作業状況の監視映像を得るため、2.0t積クローラダンプにカメラを搭載した移動カメラ車1台を開発した。さらに、固定監視カメラを設置した。

4-3 通信システム

試験施工における通信システムは、図－6に示すとおりである。コントロールルームと通信中継車間は、50GHz帯簡易無線により通信を行い、通信中継車と各重機間は、制御データおよびメンテナンスデータに特定小電力無線、映像関係に50GHz帯簡易無線を使った。

特定小電力無線での遠隔操作は、各区域の無線が干渉し、遠隔操作に支障をきたす可能性が高い。そこで、他工区と同一チャンネルおよび隣接チャンネルは使用しないように調整を行った。また、特定小電力無線での連絡通信は全工区で使用を禁止することとした。

4-4 施工実績

(1) 1期工事

1期の試験施工は平成6年3月1日より施工を開始し、6,500m³の除石を3月22日までの実施工日20

日間で完了した。図－7に土量累計出来高図を示す。また、写真－1にコントロールルームでの操作状況、写真－2に施工状況を示す。

試験施工は、3月14日にコントロールルームを安徳海岸埋立地に移動するまでを前半（遠隔操作距離約200m）とし、その後を後半と分類すると、全期を通しての日平均除石土量は、325m³/日であるが、前半235m³/日、後半510m³/日、（最大715m³/日）を記録している。前半での施工効率は後半に比べ低い値となっている。これは、当社の工区は立入りが禁止されているため、工事の事前作業となる掘削場所までの進入用道路の造成、および施工エリア測量についても無人で行う必要があったことが主要因である。また、オペレータの操作の慣れや通信システム、無人重機の機能および操作性を施工しつつ事前確認を行ったことも効率低下につながった。

これに対して、後半は、2kmの遠隔操作で施工を行ったにもかかわらず、前半に比較し施工数量が向上している。これは、オペレータが操作に慣れたことやシステム全体の信頼性が向上したことによる。また遠隔操作でも作業効率の低下はないことを示している。

(2) 2期工事

2期の試験施工工事は、平成6年7月8日より掘削・運搬を開始し、16,000m³の除石を7月27日までの実施工日16日で完了した。遠隔操作距離は約1.5kmである。図-8に土量累計出来高図、写真-3に施工状況をまた写真-4にコントロールルームでの操作状況を示す。

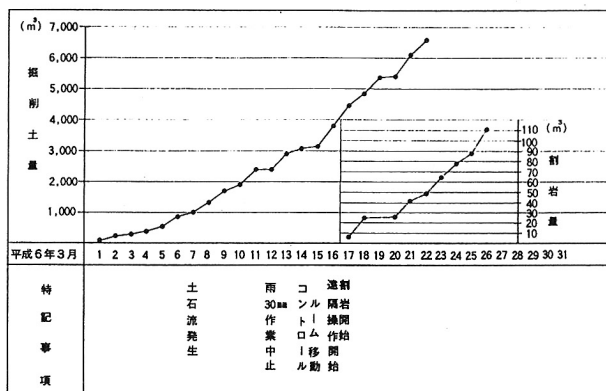


图-7 土量累計出来高図 (1期工事)

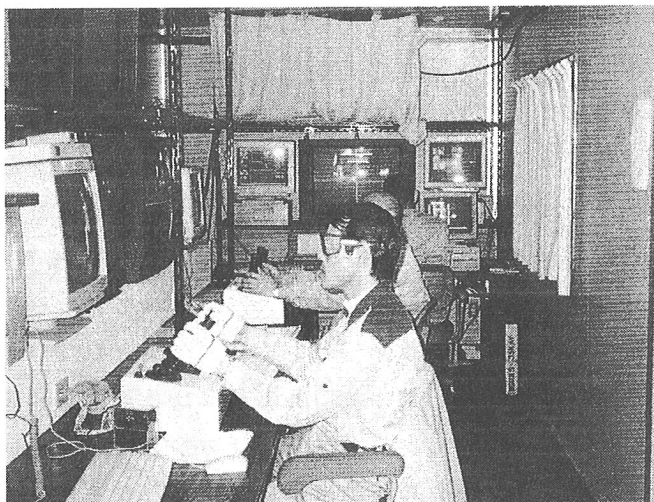


写真-1 コントロールルーム(1期工事)

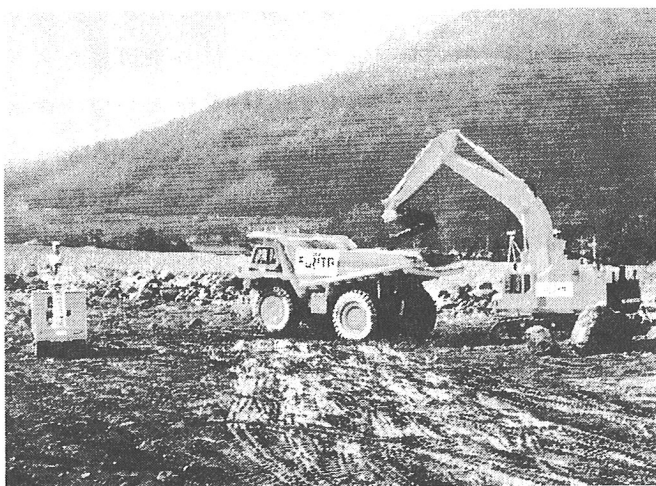


写真-2 施工状況(1期工事)

2期工事における日平均除石量は $1,015\text{m}^3/\text{日}$ 、最大 $1,518\text{m}^3/\text{日}$ を記録している。施工機械・システム、施工条件は1期工事とほぼ同じであったにもかかわらず1期工事に比較し、約3倍の施工効率を上げている。これは、梅雨の影響がなかったこと、1期工事の経験から作業支援用画像関係のシステムを強化したことなどが挙げられる。

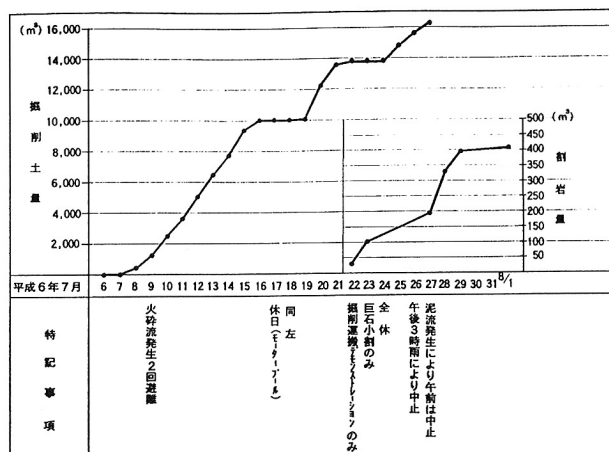


圖-8 土量累計出來高図 (2期工事)

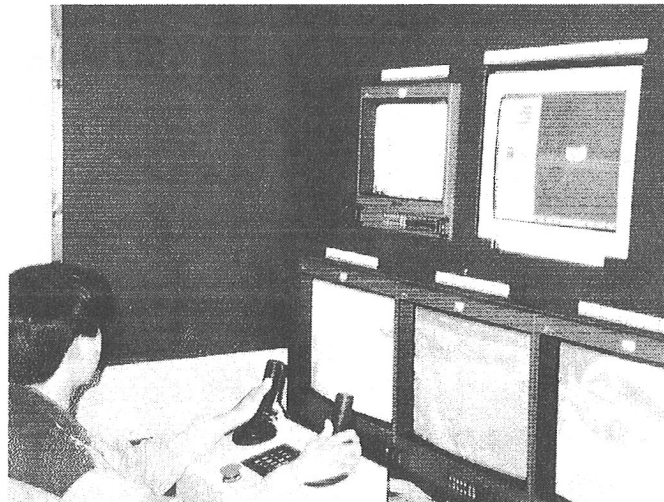


写真-3 コントロールルーム(2期工事)



写真-4 施工状況(2期工事)

4-5 施工支援システム

(1) 出来形管理

無人施工エリア内の土工事出来形測定は、自動追尾トータルステーションとGPSリアルタイムキネマティック測量法を併用して行った。

トータルステーションの場合は、バックホウの上部に目標プリズムを取付け、これを自動追尾しながら測量を行った。GPSの場合は、クローラダンプにアンテナを取付け（写真-5）、これを走行させながら測量を行った。

測定したデータは、当社の土量管理処理システムで解析処理され、出来形、出来高の管理に用いた。図-9にその出力例を示す。



写真-5 GPS搭載クローラダンプ

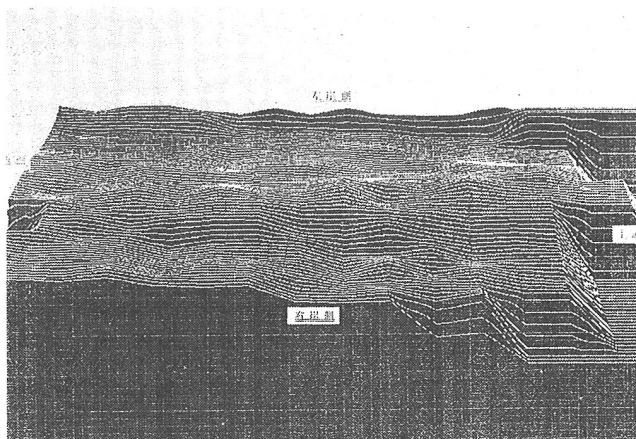


図-9 出力例

(2) 車両位置モニタリング

無人施工エリアでの重機間の接触や走路からの逸脱防止を目的とし、車両位置のモニタリングを行った。これには、GPSディファレンシャル法を用いた。

対象車両は、クローラダンプとホイールダンプと

し、作業中常時モニタリングを行い、無線を介してコントロールルーム内のコンピュータ画面上に車両位置を表示し、安全監視を行った。

(3) グローバル情報伝達システム

作業現場（島原）と本社（東京）間の情報伝達の手段として、通信衛星を利用したグローバル情報伝達システムを用いて、通信衛星テレビ会議を行った。通信衛星テレビ会議は、工事期間中適宜行い、本社メンバーとの施工打合せに用いた。音声のみならず画像を伴う会議を行うことで効果的な会議を行うことができた。

4-6 その他検証項目

試験施工期間中において、今後の遠隔操作について予備調査として下記の項目の実験を行った。

(1) 夜間作業実験

遠隔操作で夜間の作業が可能かどうか検証するため夜間作業実験を行った。

(2) 雨天時の施工

雨天時の通信性能を確認するため雨天時で遠隔操作実験を行った。

(3) 水路掘削実験

今回の除石工事は、施工精度は余り要求されなかったが、今後、水路等の土構造物を遠隔で構築する場合の施工性を確認するため、水路の掘削実験を行った。

4-7 安全管理

工事に際して、通常の工事と異なり、土石流や火砕流に対する安全対策を考えておく必要があった。このため職員および作業員は常に自衛隊無線を受信できる無線機を携帯した。

避難に関しては、緊急避難路を設定し、避難用車両を作業場所に常時配置し、駐車方向も下流に向けて駐車した。

また、毎週1回避難訓練を行い、万全を期した。

5. 今後の課題

今回の試験施工を通して、今後の改良点としては次のことが挙げられる。

(1) 作業性の改善

コントロールルーム内の映像モニターの配置や視野の拡大などで作業環境を向上させる。

(2) 作業の一部に自動化を組み入れる。

土砂運搬の自動化など、既開発技術を適用し、省力化を図る。

(3) 無線の使用可能帯域の拡大、および出力の増加など法的規制の緩和が望まれる。

(4) 耐振性、耐熱性の改善

これら様々な項目を洗い出し、今後の施工に役立てる必要がある。

6. おわりに

今回の試験施工は、我が国でも初めての大規模な無人化施工の試みであり、技術的にも未経験なものが多くあったが、予想以上の試験結果を得ることができた。また、2期工事では遠隔操作に女性オペレータ2名が活躍するなど、本システムが汎用性に優れていることも立証し、建設業のイメージアップにも貢献することができた。

今後は、さらに完成度を高め、本格的な無人化施工に対応していきたいと考える。ご協力頂いた関係各位に感謝致します。