

60. 大型土工機械の遠隔操作技術の開発 (雲仙における無人化施工)

(株)熊谷組：岡田 喬・*北原 成郎
海瀬 芳治

1. はじめに

建設機械の遠隔操作技術は、いままでに種々な分野で利用されている。クレーンのように操作を機械の運転席で行うよりも別の場所で行う方が効率的である場合や人間が環境上の理由で作業場所に近づけない場合などそれぞれ利用目的が異なる。本開発の大型土工機械の遠隔操作技術とは、後者のケースにあたり、人の立ち入れない危険区域内の大規模土木施工を遠隔操作で行うシステムである。

雲仙普賢岳の水無川流域では、土石流災害を防ぐため、警戒区域内の大量の堆積土砂を取り除く必要がある。本システムは、この試験工事である建設省試験フィールド制度「雲仙における無人化施工」に適用するため、開発したものである。

この試験工事では、以下の条件を満たすシステムが求められた。

- ①不均一な土砂の状態であつ、岩の破碎を伴う掘削と運搬（直径2～3mの礫の破碎）
- ②現地の温度、湿度条件に対応可能（一時的に100°C、100%に耐えるもの）
- ③施工機械を遠隔操作することが可能（100m以上）

これらの条件に対応するために、無線技術、GPS技術、画像技術などの高度技術を組み合わせて、総合的な施工システムを開発した。



写真-1. 遠隔操作による土工機械の施工状況

2. システムの概要

本システムは、危険区域の堆積土砂を無線による遠隔操作型建設機械により、安全かつ継続的に掘削、搬出するものである。施工区域は面積約4800㎡、搬出土量は約4700㎡である。

基本となる車輛は、通常的大型建設機械であり、土砂掘削・積み込み、路盤整形・土砂集積、運搬、転石破碎の基本作業をバックホウ、ブルドーザ、ダンプトラック、ブレーカの組合せで行う。車輛についてはそれぞれの作業バランスと遠隔操作での操作性を考慮して、最も効率のよい機種及び仕様を選定をした。(表-1)

これら大型車輛に、遠隔操作システム、ITV画像伝送システム、GPS車輛位置検出システムなどを搭載し、映像支援、測量システムのための無線中継車とこれらの操作を集中して行う移動操作室によりシステムが構成されている。2台の操作室を高さ3mの導流堤上に設置し、各システムを効果的に使用して100m程度の範囲にある各車輛を遠隔操作する。

このシステムの特徴は、大型機械による作業の単純化、各車輛ごとの複数カメラ映像による作業の効率化、および車輛位置を把握する正確性と固定設備を持たない機動性にある。つぎに遠隔操作技術をささえる各システムを解説する。

表-1. 主要機械・設備一覧表

工種	機械設備	台数	仕様	仕様	
除石工	掘削・押土	ブルドーザ	1	62ton級	遠隔操作
	積み込	バックホウ	1	3.0.㎡級	〃
	運搬	ダンプトラック	1	45ton級	〃
	小割り	ブレーカ	1	バックホウ1.7㎡級装着 油圧2,200kg	〃
設備工	無線中継車	1	バックホウ0.45㎡級	〃	
	移動操作室	2	4tonトラック搭載	有人運転	

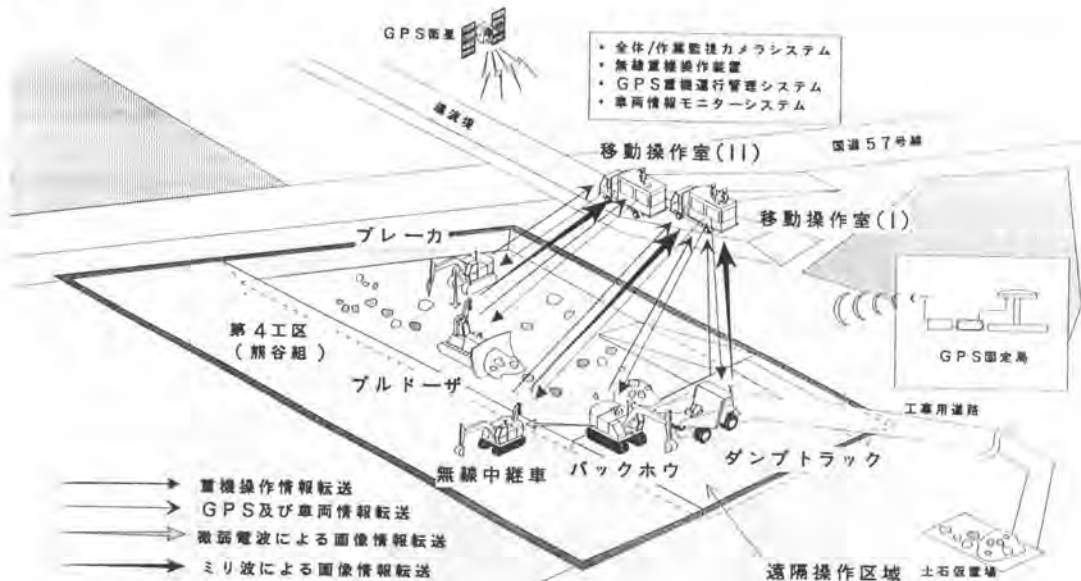


図-1. 遠隔操作技術の概要

(1) 遠隔操作システム

各車輛と操作室間の操作、画像、データの転送はすべて無線を通して行われる。無線は特定小電力局、簡易無線局、微弱電波の三種類をその特性を活かして効果的に活用している。各車輛の操作は主に無線操縦装置の2本の操作レバーによって行い、操作データは特定小電力局の無線を介し、車輛本体に装備した受信機からドライブユニットを通して各電磁弁などを動作させている。その他、ITV・アンテナ操作や車輛の故障状態を知らせる車輛情報伝達装置も特定小電力局を利用している。他の簡易無線、微弱電波は主に画像伝送に利用している。(図-2)

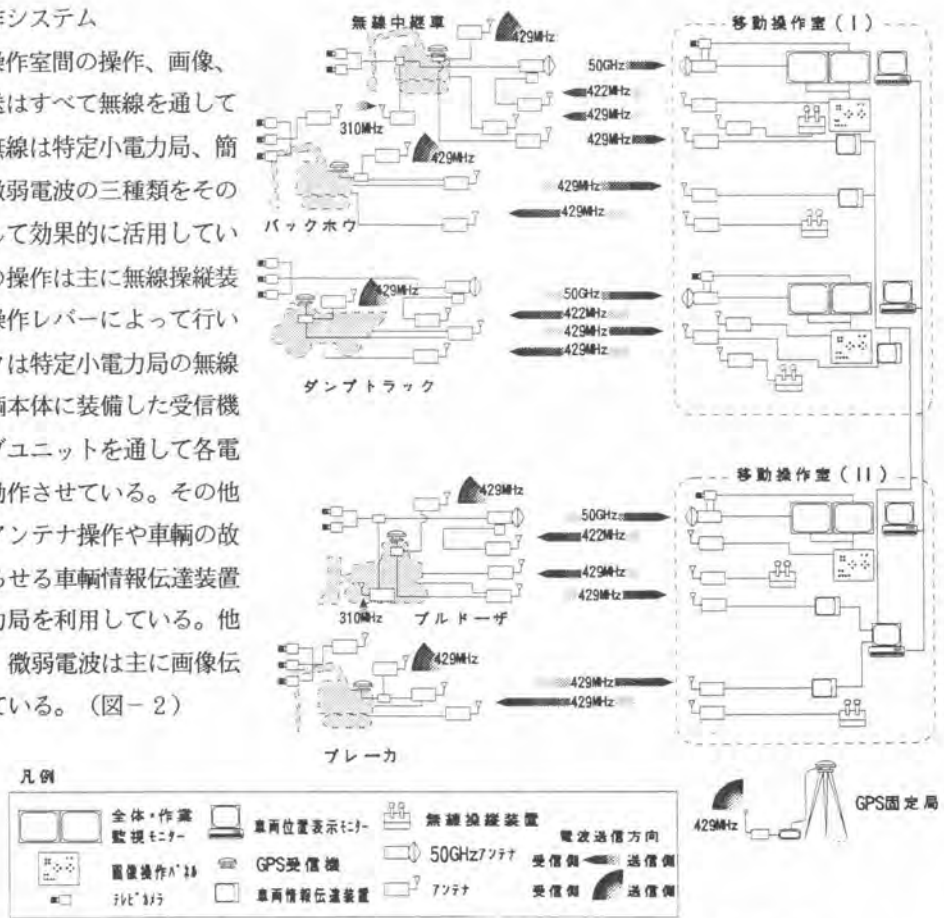


図-2. 遠隔操作システム ブロック図



写真-2. 操作状況

(2) I T V画像伝送システム

このシステムは、遠隔操作に重要である映像情報を的確に送信するもので、I T V（監視カメラ）を各車輛の適切な位置に設置し、その映像を各画像伝送システムの無線設備を介して移動操作室に転送する。

カメラは、ダンプトラック、バックホウ、ブレーカに3台、ブルドーザ、無線中継車に2台、操作室に4台のカメラがそれぞれ設置され、作業の監視映像を角度、方向を変えてモニターに映し出す。一般に画像伝送用の無線には、50GHz帯のミリ波を用いるが、周波数が高く長距離伝送が可能な反面、指向性が強く通信不能になりやすい。この対策として、移動機械側のアンテナを常に移動操作室側アンテナに向けるため、光リンク機構による自動追尾型アンテナシステムを採用した。

操作室屋上の全体監視カメラは各車輛の接近状態やダンプトラック、ブルドーザなどの動きの大きな車輛を監視する。なお全体監視カメラは操作室側の50GHz帯無線機のアンテナ方向を各車輛側に合致させる目的を合わせ持つ。旋回作業の多いバックホウやブレーカでも常に画像を安定して伝送するために、指向性のない300MHz帯のメートル波の微弱電波の無線機を用い、それぞれの車輛から無線中継機能を有する車輛（無線中継車、ブルドーザ）を中継して、ミリ波に換えて移動操作室に伝送するシステムを採用した。

各車載カメラの画像は、オペレータが必要に応じてフットスイッチで操作中に選択・切替えができ、また複数画像を同時に表示する2分割・4分割の合成画面のモニター機能をもつシステムとした。



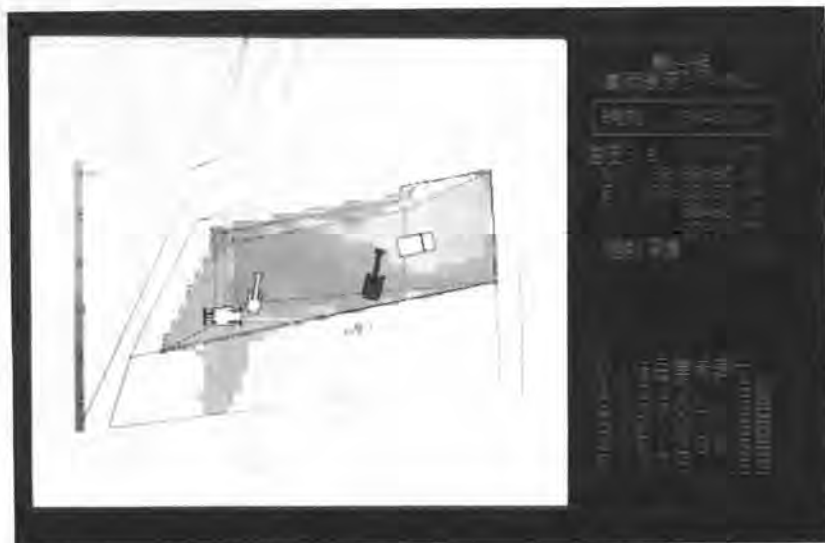
写真-3. 無線中継車に装備したアンテナ群

(3) G P S車輛位置検出システム

遠隔操作による施工では、車輛の位置計測が重要になる。複数車輛の位置検出方法では、GPSによる測定が最も適している。このシステムは通常の作業時には、測定に遅れのないディファレンシャル測位法を用い、全車輛の位置をリアルタイムに示すことができ、オペレータは作業場所を正確に知ることが可能になった。GPSは各車輛に1台ずつ搭載されており、導流堤上のGPS固定局のからの情報を得て、各車輛の精度の良い位置情報を測定していく。

車輛には、磁気方位センサーを載せ、車輛の向きを測定しており、モニター上に機械の動きがわかりやすく表示される。操作室内の表示用コンピュータに表示された車輛は、指定することで注目車輛として、座標位置が数値としても表示される。モニター上には施工区域とグリッドが表示され、さらに土工量管理システムからの出来高差分布図が施工目標として表示することができる。またバックホウにはアーム・ブームに取り付けた傾斜計のデータとアーム長、ブーム長から掘削深さが計算、表示される。こ

れら位置情報は、車輛情報伝達装置を経由して車輛監視用コンピュータに送られ、座標変換等の処理をして、各表示用コンピュータに地形図情報とともに車輛を表示する（写真－４）



写真－４．表示用コンピュータ画面

(4) 土工量管理システム

本工事では、危険区域という特殊条件下での無人化施工に対応するため、GPS測量を活用した土工量管理システムを構築し、実用化を図った。出来形測量は、無線中継車（0.45m³バックホウ）を工事の進捗に合わせて遠隔操作で工区内を走行させ、リアルタイムキネマティック測量により出来形地形の観測を行い、測量データを移動操作室の監視用コンピュータに車輛情報伝達装置により自動送信する。取り込まれた測量データは、予めワークステーションにより3次元処理された原地形、計画地形データをもとに現地事務所のコンピュータで処理することで、断面図、等高線図、鳥瞰図等の作図および各種帳票類を作成し、出来形、出来高関連の施工データを集中管理する。また、これらの施工段階の地形状況は、各格子点毎に残施工高として6段階の色分け表示（出来高差分布図）して車輛位置検出システムに転送し、遠隔操作作業時に必要なビジュアル情報として活用した。

3. 結果

今回の試験施工の目標は、遠隔操作による施工が通常の有人による施工に効率面でどこまで近づけるかである。施工期間中に行った有人運転（通常の乗車運転）を100%として、遠隔操作による無人運転との比較を行った。その結果を表－2に示す。また、試験施工に先だって行った予備実験の結果もあわせて載せている。予備実験では0.45m³のバックホウに簡単な設備で単体の車載カメラを無線化したもので、その結果を記載している。バックホウ、ブレーカについてはシステムの効果が表れ、予備実験か

ら大きく改善されている。これに対しダンプトラックは機械の特性上大きな効果は得られなかった。動作範囲が大きく速度のある機械は、遠隔操作による効率の低下が表れやすい。またブルドーザのように前後の繰り返し移動が主な機械は、遠隔操作に向いていると言える。

表-2. 施工性比較表
 施工性比較表（有人運転を基準（100%）とする）

仕様 作業	予備実験		フィールド試験
	※1 RC (他の技術なし)	RC+ITV (常時画像伝送技術なし) (極めて狭い範囲の画像)	RC+全無人化技術 (ITV3台・画像伝送・GPS位置検出等)
掘削 (バックホウ) (90°旋回)	※2 10%以下	20~25%	50~55%
掘削・押土 (ブルドーザ) (速度比)	—	—	72% 前進:80% 後進:65%
小割り (ブレイカ) (純作業時間)	※2 5%以下	30~40%	55~60%
土砂運搬 (ダンプトラック) (走行速度比)	—	—	27%

※1 RC:遠隔操作
 ※2 ほとんど施工不可(歩掛り工の数値として設定しにくい)

4. おわりに

約1カ月間の試験工事は大きな障害もなく、無事完了することができ、無人化施工の貴重なデータを収集することができた。その中で見いだされた将来の工事への問題点を表記しておく。

- (1) 無線の障害
- (2) 遠隔操作による効率の低下
- (3) 施工機械の接触、横転などの事故
- (4) 機械の耐久性

これらは、今回の試験工事では大きな問題とならなかったが、今後より操作距離が離れ、複雑な地形条件となった場合には表面化することが予想される。

遠隔操作機械の複合作業は今までにない新しい経験も数多くあり、特にいままでと違った視点で土工事を見ることができた。この開発は機械の運転席から離れた人間が何を基準に作業をするのか、必要な基準とはなにかを探ることから始まったといえる。このことは将来完全ロボット化を考える時に必ず検討しなければならない問題でもある。複合機械の遠隔操作技術は実用化の段階に入ったばかりであり、今後大きく発展が期待される分野である。単なるラジオコントロール技術ととらえるだけでなく、将来の自律型ロボットの複合作業への対応の第一段階と考え、開発改良を続けていきたい。最後に本開発に際し、多大なご指導、ご協力をいただいた関係各位に深く感謝の意を表します。