

建設機械の自動化による 次世代建設生産システムの開発

A⁴CSEL[®] (クワッドアクセル) によるダム堤体本格的盛り立て実施

田中 秀昭

建設作業の多くは人の手に頼ってきた。しかし、ここ十数年、若年層作業員の離職と入職者の減少には歯止めはかからず、高齢者層作業員の従事者比率は高まっている。なかでも機械化された重機土工は、高齢者層作業員の活躍できる場であり、これにより人手不足を凌いできた。しかし、間もなく限界に近づきつつある。また、建設機械と作業員の混在する作業は労働安全性において大きな問題となっている。このような背景の下、汎用建設機械を自動化し、繰り返し行う作業は自動により行い、自動化された機械への作業指示は人から行うことによって、必要最小限の人員により施工を可能とする「次世代建設生産システム」を開発した。これにより省人化と生産性向上を同時に実現し、施工フィールド内の人員削減によって安全性向上を実現する。今回、小石原川ダム（ロックフィルダム）の堤体におけるコアの本格的盛り立てに本システムを適用したのでその実績について報告する。

キーワード：自動化、自律運転、ブルドーザ、ダンプトラック、振動ローラ、ICT、AI

1. はじめに

建設業の作業員は、約20年前から減少の一途を辿り、深刻な人手不足に陥っている。人手に頼らざるを得ない建設業にとって人手不足は大きな問題である。その人手不足の原因は若年層在職者の減少にある。若手の作業員は業界を離れ、更に若い作業員の職はないため作業員の高齢化は進んだ。このような状況の下、機械化された重機土工では、高齢作業員でもオペレータとして活躍し、昨今はMC/MG機能を有した建設機械により、経験不足者、女性、外国人でも操作は可能となり人手不足を補ってきた。しかし、根本的な問題解決には至っていない。また、建設業におけるここ10年の年齢別死亡災害件数は、60代以上では30～40%、50代以上を含めると約60%に達する。起因別に見てみると建設機械に関わる死亡災害は25～30%を占めている。このような問題を抱える建設業の課題解決策の一つとして、建設機械の自律自動化に着目し開発を行ってきた。建設機械に作業指示を送り、機械は自律的に自動運転を行い、必要最小限の人員により多数の機械を同時に稼働させる。これをコンセプトとして、次世代の建設生産システムA⁴CSEL (Automated/Autonomous/Advanced/Accelerated Construction system for Safety, Efficiency, and Liability) (以下「本システム」という)を開発した。A⁴CSELの最終的目



図一 本システムのダム堤体施工イメージ

標は「現場の工場化」である。定型的な繰り返し作業は本システムによる自動化機械に担当させて、機械をどう動かすかの計画は人が担当することにより、現場の省人化、生産性と安全性の向上を図る。機械の開発は単純な動作の振動ローラから始め、機動力のある無限軌道式のブルドーザ、長距離走行可能なタイヤ式のダンプトラック、いずれも汎用建設機械を自動化している。

本稿では、当該システムをダム堤体の本格的コアの盛り立て作業に適用し成功したので、その報告を行う(図一参照)。

2. システム概要

(1) 全体システム

重機土工の場合、従来の人に頼った施工では、世話役は各オペレータへ事前に作業指示を行い、現場の状況変化に応じて無線により新たな指示を出すとともにオペレータ同士の柔軟な対応により施工を行ってきた。これらは世話役の機転を効かしたタイムリーな判断とオペレータの長年の経験による熟練技術により実現してきたものである。これに対し本システムでは、世話役の代役とした統合的なマネジメントシステムと、オペレータの代わりとなる自律制御コンピュータにより成り立っている。図一2にシステム構成図を示す。自動化された重機は指示された通りに動作するようプログラミングされ、その指示内容は「施工計画システム」を用いて作業に必要な条件を入力することにより各作業のタイムスケジュールは自動作成される。これを同システムのシミュレーション機能によって事前に施工手順・方法を確認することができる。これら施工計画の内容は「施工管制システム」へ送られ、各重機のサーバ（作業指示を個々の重機へ発信するシステム）を通して重機に指示を伝える。「施工管制システム」は全ての自動化重機の稼働状態を把握しており、作業エリアの区分管理によって、作業全体の開始指示や一時的な中断及び再開、施工の進捗管理、重機の管制を実施する。

(2) 自動振動ローラ

自動振動ローラは12t級ローラを使用した。表一1に機械仕様、写真一1に自動振動ローラの全景を示す。自動化には、振動ローラにGNSS、方位センサ、姿勢計測装置、自動操舵装置、制御用コンピュータ（以

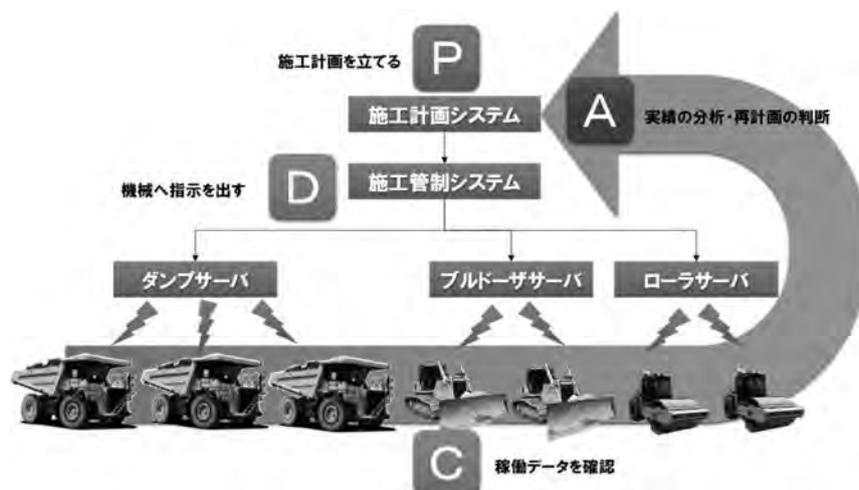
表一1 自動化した振動ローラの仕様

項目	仕様	備考
運転質量	120 kN	12.2 t
全長	5,895 mm	
全幅	2,300 mm	
全高	2,130 mm	
締固め幅	2,130 mm	
起振力	308 kN	
定格出力	110 kW	



写真一1 自律自動化振動ローラ全景

下制御 PC と呼ぶ) 等を実装した。転圧作業は、制御 PC が上位システムから転圧範囲を受け取った後、機体の位置を計算し、前後進・走行速度・操舵角を自動制御して行く。安全装置は、前後方向にレーザスキャナを搭載し、障害物を検知した際に自動停止する機能を備えた。その他特徴として、実工事から取得した熟練オペレータの操作データに基づく自律制御方法を確立していることと、土質条件に応じて制御パラメータを自動制御する自律性を保有し、直線走行、繰り返し走行とも、誤差は±10 cm 以下に収めることができ、熟練オペレータと同等の施工精度を確保している。



図一2 システム構成図

(3) 自動ブルドーザ

自動ブルドーザは22t級 ICT ブルドーザを使用した。表一2に機械仕様、写真一2に自動ブルドーザの全景を示す。自動化には、振動ローラと同様、GNSS、方位センサ、姿勢計測装置、制御PC等を実装した。ブルドーザの機械的特徴は無限軌道のクローラを備えている点である。左右クローラの回転は、制御PCにより機体の向きとまき出し経路の差分を旋回量として計算し機体側コントローラへ送られる。そして機体側コントローラにより左右クローラの回転方向と回転速度は制御される。まき出し作業は、上位のシステムからダンプトラックによって荷下ろしされた材料の位置と量・まき出し範囲・まき出し高さを制御PCは受け取り、まき出し経路を計算し前後進・走行速度・排土板高さを自動制御して行う。排土板の高さはブルドーザの ICT 機能を使用して制御している。安全装置は、重機周りに一定の磁界を発生させ、ICタグを携帯した作業員が磁界内に侵入したら直ちに重機を自動停止させる機能を備えた。その他の特徴として、排土板で材料を押し出した際に、まき出された材料の広がり形状を材料の性状に合わせて予測するシミュレータを開発し、まき出し経路選定の基本モデル生成に役立てたこと、実際にまき出しを行い、材料が余った際に排土板背面に材料を抱え後退しながら敷きならすバック引き機能を有していることを挙げる。

表一2 自動化したブルドーザの仕様

項目	仕様	備考
運転質量	217 kN	22.1 t
ブレード幅	3,970 mm	
ブレード高	1,100 mm	
全長	5,680 mm	
全幅 (本体)	2,965 mm	
全高	3,332 mm	
定格出力	162 kW	



写真一2 自律自動化ブルドーザの全景

(4) 自動ダンプトラック

自動ダンプトラックは55t積ダンプトラックを使用した。表一3に機械仕様、写真一3に自動ダンプトラックの全景を示す。自動化には、他の機種と同様、GNSS、方位センサ、姿勢計測装置、制御PC等を実装して実現した。走行は、上位システムから材料の積み込み場所・荷下ろし場所・走行経路を受け取った後、自車位置・向き・速度・経路形状から、スロットル量・リターダ（ブレーキ）量・ステアリング角度を自動制御して行う。荷下ろし地点到着後はベッセル昇降速度を自動制御して荷下ろしを行う。ダンプの操舵関係は、操舵用油圧回路を直接制御しているためハンドルに自動操舵装置の必要はない。安全装置は、前後方向にレーザスキャナを搭載し、障害物を検知した際に自動停止する機能と走行路の勾配や不陸に応じ精度よく追従する走行制御機能を有している。

(5) 通信装置

図一2に示す各重機のサーバと重機間の通信には5GHz帯のメッシュ無線LANを使用した。作業エリアを外周から取り囲むよう固定局を設置し、エリア内の重機に移動局を設置することによって、メッシュ状のネットワークを構成する。これにより常時途切れず良好な通信状態を確保した。

表一3 自動化したダンプトラックの仕様

項目	仕様	備考
最大積載荷重	523 kN	55.0 t
空車質量	437 kN	44.6 t
最高速度	70 km/h	
全長	9,355 mm	
全幅	4,595 mm	
定格出力	533 kW	



写真一3 自律自動化ダンプトラックの全景

3. ロックフィルダム堤体コア盛り立て自動化実績

(1) ダム堤体コア自動盛り立て概要

福岡県朝倉市にて施工中の小石原川ダム本体建設工事において、本システムの自動化重機による本格的な堤体の盛り立て作業を実施した。当該ダムはロックフィルダムであり、今回の自動化施工はコア材の盛り立てについて行った。重機は前述の3種類の重機を使用し、台数は、自動振動ローラ（12t級）2台、自動ブルドーザ（22t級）2台、ダンプトラック（55t積）3台の合計7台とした。自動にて施工を行ったエリア全景を写真-4に示す。自動化施工は、コア材約1,300m³の盛り立てを途切れることなく連続的に行った。



写真-4 自動化施工エリア全景（左岸から右岸望む）

(2) 自動化施工計画

自動化施工の計画は、図-2に示した施工計画システムによって行う。同システムに作業エリアの区分、各重機の歩掛、機械の台数、仕上げ高さ等の設定を行うと、タイムスケジュールは自動的に計算される。図-3に計画平面図を示す。施工範囲は、上流レーン（178m × 14m）と下流レーン（119m × 14m）の2つに分け、まき出し長を5.4mずつとして計画した。機械台数は、上流レーンはダンプ2台、ブルドーザ1台、振動ローラ1台、下流レーンはダンプ1台、ブルドーザ1台、振動ローラ1台とした。材料の積込みは、同一のエレベーションにコア材仮置き場を設置し、ホイローダによる有人積込みを行う計画とした。以上の設定によって算出した施工時間は約5時間であり、タイムスケジュール上、機械配置等の矛盾はないことを確認した。

(3) 安全対策

自動運転の基本は人車完全分離であるため、自動化重機稼働範囲は全域を立ち入り禁止措置とした。また、車両系建設機械等の資格を有した運転手は不要であるものの、監督署への相談の結果、自動制御監視員

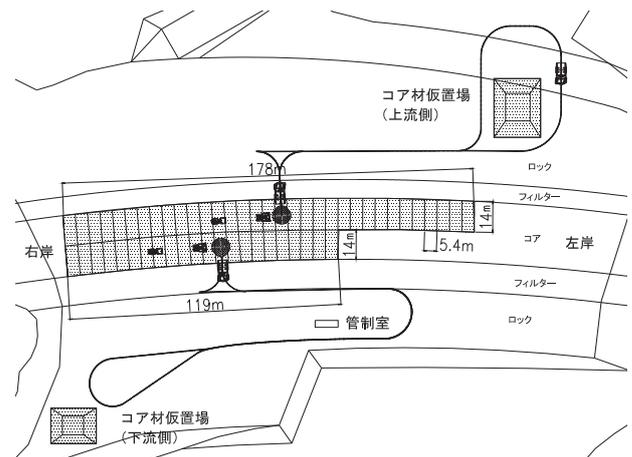


図-3 自動化施工計画平面図

は有資格者であることとした。非常時の際は、管制システムからの一斉停止若しくは個々の重機の無線式非常停止スイッチによる対応とした。無線LANが途絶えた場合や、GNSSによる衛星補足数が不足する場合は重機単独により停止する。

(4) 自動化施工の実績

図-3に示すように施工管制室を施工エリアのダム下流側に設置し、施工管制システムより自動運転の開始を行った。管制室の状況を写真-5に示す。ダンプはコア材仮置き場からスタートし自律走行をして施工エリアへ向かう。到着後は後退で進入しベッセルを上げて荷下ろしを行う。ブルドーザはダンプの退出の信号を受けた後まき出しを開始する。これを計55回繰り返した。一方、振動ローラはブルドーザとの離隔を十分取れた段階で転圧を開始する。転圧した範囲は上位のシステムにより管理されているため、複数台のローラを稼働させても重複による過転圧は生じない。写真-6に施工状況を示す。これら3機種を連携させた一連の作業には、一切の無駄な動きはなく、連続して計画した5時間で施工を終えた。要した人員は7



写真-5 管制室の状況



写真一六 自動化施工の状況



写真一七 仕上がり状況

台の重機に対し2名の監視員のみである。仕上がり状況を写真一七に示す。作業効率、品質とも有人の場合と遜色のない実績であった。

(5) 考察

今回のように定型的な盛り立て作業は自動化に適した作業であり、熟練オペレータと同等の施工速度、施工品質で施工できることを実証した。一般に若いオペレータを一人前に育てるには、普段の作業の中で、上手いオペレータの動きを見させ、自身によって運転技術を磨き育てる。昨今のゲーム機世代の若者は運転技術の上達は早いものの作業の先読みができないため一人前に育つまで長い年月を要する。急速に進む人手不足の現代においては、このような時間は取れないため、数年にわたって身につける技術を AI 手法も取り

入れたプログラムに置き換えることによって、今回のような自動化による盛り立て工事は可能となる。自動化施工は品質のばらつきはなく人間のように休む必要もない。また、夜間に照明はなくても GNSS の衛星さえ補足できていれば施工は可能である。更に重機同士の接近作業も可能である。有人作業であると重機同士の接触を避けるため、ある程度の離隔を取らなければならない。しかし、機体の位置は GNSS によって精度よく管理しているため、十分な離隔をとることなく工程を進めることができる。一方、問題点もある。機械やセンサの故障などアクシデントで計画通り進まなくなった場合、有人であると機転を効かせて対応できる。しかし自動化の場合、作業を一旦停止し、仕切り直しを行ってから再開となるため時間はロスする。定型的な動きが乱れた場合の対応策が今後の課題と言える。

4. おわりに

今回、初めて本格的な堤体の盛立作業に本システム A⁴CSEL を適用し、有人施工と遜色のない結果を得ることができた。しかしながら本成果は限定された条件による結果であるため、今回得た実績をもとに、更なる改善を図り、自動化重機数台の小規模な運用から、20～30台の大規模な運用まで適用可能なシステムに仕上げていく所存である。

尚、本開発で使用した振動ローラは酒井重工製 SV512、ブルドーザはコマツ製 D65PXi ICT ブルドーザ、ダンプトラックはコマツ製 HD465 である。

JCMIA

【筆者紹介】

田中 秀昭 (たなか ひであき)
鹿島建設㈱
機械部 自動化施工推進室
担当部長

