

GNSS 測位技術を活用したケーブルクレーン自動化運転技術の開発

西松建設建設(株)	正会員	○田中	勉
西松建設建設(株)	正会員	戸田	泰彰
西松建設建設(株)		井上	洸也
西松建設建設(株)		梅木	清文

1. はじめに

我が国における労働人口の減少の流れは今後さらに加速するとされており、特に建設業における施工の省人化、無人化への取り組みは喫緊の課題である。このような状況の中で、ダム堤体工における生産性向上、CIM や ICT 技術を活用・組み合わせる「i-Construction」の実現を目指し、ケーブルクレーンを使用したコンクリート打設の自動化技術開発に取り組んだ。

開発したシステムはコンクリート打設作業の際に都度遷移する打設位置や、バケット積載重量の変化に応じて、運搬の軌道や速度を変化させ、最適化された自動運転を実現する。GNSS 測位技術を活用した高精度な位置決めと、状態フィードバック制御を利用したバケット振れ止め制御が本システムの大きな特徴である。また、柱状打設へ適用した場合には、クレーン運転士が目視確認できない箇所においても安全かつ迅速にバケットを到達、開放できるため、打設作業時間の短縮に繋がる。本システムは、熊本県立野ダム建設工事の堤体工において試験運用を実施し、コンクリート打設作業への適用性を確認した。

2. ケーブルクレーン自動運転システムの概要

ダムコンクリート打設で用いられるケーブルクレーンは、左右岸にかけ渡したワイヤーロープ（主索）を軌道として横行トロリが移動するクレーンである。本開発で対象としている軌索式ケーブルクレーンは、片岸の上下流方向に軌索鉄塔を設置することで、主索を移動する横行トロリと、軌索を移動する走行トロリの位置を調整し、ケーブル固定塔を結ぶ平面上の任意の位置に吊荷を移動させる（図-1）。

システムはGNSSから受信した信号を利用してコンクリートバケットの位置を測位し、ダム堤体CIMデータと連携させることで、目標位置となる打設点までの運搬を高精度で制御する自動運転システムである。主に以下の3つのサブシステムで構成される（図-2）。

(1) 堤体打設オペレーティングシステム

ダム堤体CIMデータが包含するブロック区分、3次元位置データを利用し、タブレット端末のタッチパネル上に打設エリアの平面を表示させて、自動運転の目標位置となるコンクリート打設点を指定する。

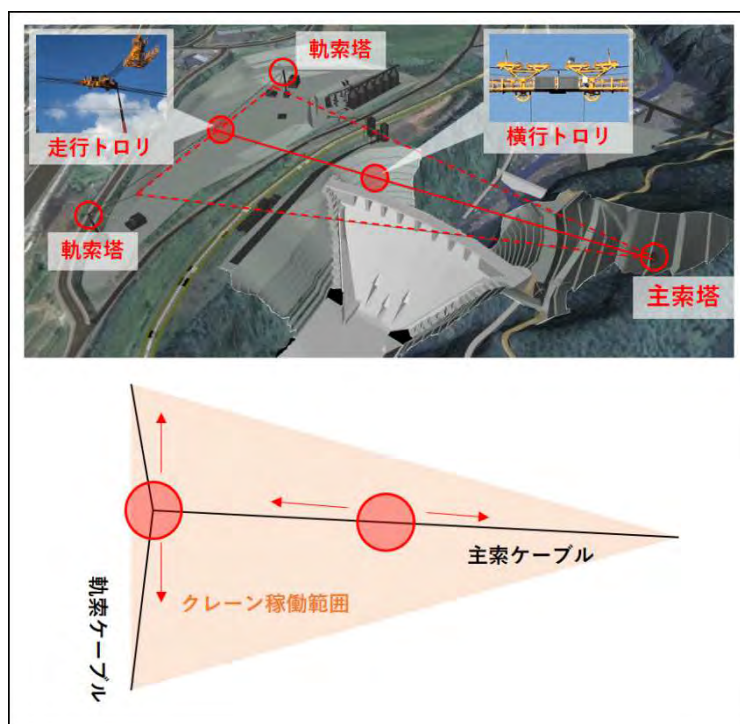


図-1 軌索式ケーブルクレーンの概要

キーワード ダム、ケーブルクレーン、GNSS 測位技術、コンクリート打設、バケット位置制御

連絡先 〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目2番1号 西松建設株式会社 技術研究所 TEL03-3502-0247



図-2 ケーブルクレーン自動運転システムの概要図

(2) 自動運転システム

軌索式ケーブルクレーンにおける横行トロリ，走行トロリ，フックブロック（バケットを吊るす装置）にGNSS 受信装置を設置してバケット位置を測位し，指定された打設点に向けて自動でコンクリートを運搬する

(3) 統合管理ディスプレイ

自動運転中の打設進捗状況をリアルタイムで確認できる（図-3）．さらにコンクリート品質情報，打設位置等の打設結果データを取得し，ダム堤体全域のコンクリート品質データを蓄積・管理する．

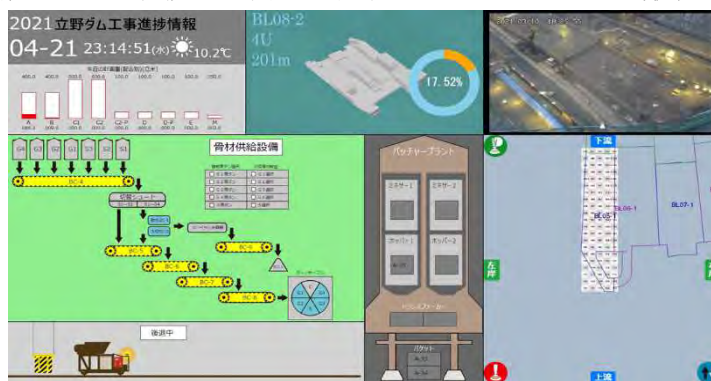


図-3 統合管理ディスプレイの概要

3. システムのハードウェア構成

システムを構成するハードウェアの情報を設置個所毎に示す（図-4）．以下に各設置機器とその機能について説明する．

(1) 横行トロリ／走行トロリ

GNSS 受信モジュールを内蔵した制御ユニットと，GNSS アンテナを各トロリに搭載している．取得した測位データ等の各種データ伝送用として無線アクセスポイントを設置している．各機器への給電については，ソーラーパネルからの電力を充放電コントローラを介してバッテリーに蓄電して利用する

（写真-1）．



図-4 システムを構成する機器および設置場所

(2) フックブロック及びコンクリートバケット

前述のトロリと同様の機器によって GNSS 測位及び無線によるデータ伝送を行う。給電については既設のコンプレッサを利用する。コンクリートバケットの側面にレーザー距離計を下向きに設置し、出力値によってバケットの地面への着床を検出している(写真-2, 3)。

(3) GNSS 基準局

クレーン操作室の近傍で上空の見晴らしの良い場所に、GNSS アンテナと制御ユニットからなる基準局を設置する。

(4) クレーン操作室

操作室内には自動運転制御用 PC とデータ管理用 PC を設置する。室外には無線アクセスポイントを設置し、横行/走行トロリ、フックブロックからのデータを取得して制御用 PC に伝送する。制御用 PC はケーブルクレーン制御用 PLC と有線(LANケーブル)で接続し、産業用オープンネットワーク規格 (FL-net) を使用して、自動運転システムからケーブルクレーンへ動作指令を伝送する。

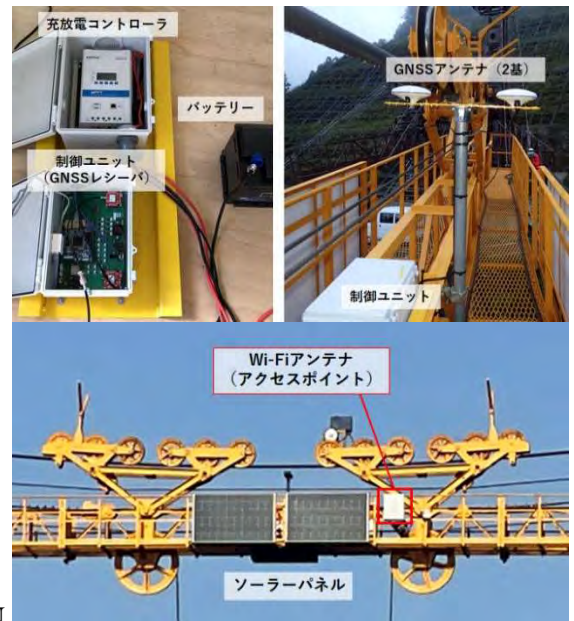


写真-1 ハードウェアの設置状況

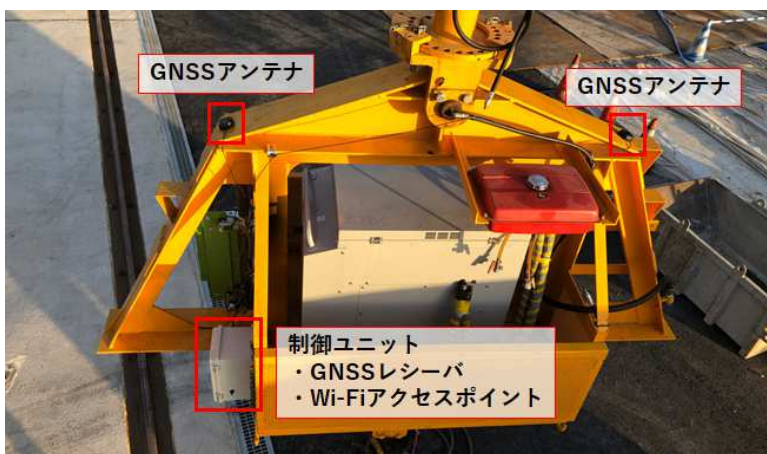


写真-2 フックブロックへの設置状況



写真-3 レーザー距離計の設置状況

(5) バッチャープラント

骨材供給/コンクリート製造設備制御用 PLC からのデータ取得用として、伝送用 PLC 及び PC を設置する。各 PLC 間の通信は FL-net を使用しており、バッチャープラントの稼働状況、コンクリート配合情報等の各種データを、自動運転システムのデータ管理用 PC に伝送する。

(6) トランスファーカ管制盤

バッチャープラント操作室内に設置されているトランスファーカ管制盤に、伝送用 PLC を接続し、トランスファーカ稼働状況等の各種データを取得する。取得データは FL-net で自動運転システムのデータ管理用 PC に伝送する(写真-4)。



写真-4 バッチャープラントの通信機器

4. 自動運転システムの制御

(1) 自動運転による打設フロー

本システムの打設 1 サイクルにおける動作フローを示す(図-5)。ケーブルクレーンとバッチャープラント・トランスファーカの各システムが連動して、動作信号をやり取りすることで、一連サイクルの自動運転を実現

する。

(2) バケツ振れ止め制御

横行トロリとそこから吊り下げられたフックブロックの測位データを0.1秒毎に計測することで、バケツ振れの挙動をリアルタイムで取得する(図-6)。得られたバケツ振れ角度及び角速度、振れ方向(横行トロリ進行方向の成分を算出)を制御パラメータとして使用し、横行トロリを加減速する制御(状態フィードバック制御)をシステムに実装している。

具体的には目標位置に近づいた際の横行トロリ減速停止制御において、(横行トロリとフックブロック、バケツの機械的な機構を単振動の振り子として扱い)振り子の周期 T と、減速開始前の初速度 V の2つの既知の値から、規定の振れ止め制御を与えた場合の停止までに必要な距離(制動距離) L を算出している。横行トロリの減速停止制御プログラムにおいてこの L を使用することで、バケツの振れを抑え、且つ目標位置に高精度で停止させる、複合的なバケツ停止制御を実現する。

5. ダム建設工事への適用試験

本開発にあたって、システム設置から試験導入までを熊本県内の立野ダム建設工事にて実施した。

(1) バケツ到達位置精度の検証

堤体打設オペレーティングシステムにより、タブレット端末から目標位置(打設点)を指定して(図-7, 写真-5)自動運転を行い、指定した目標位置とバケツ停止位置を比較した結果、X方向(東)及びY方向(北)いずれも±150mm以内であることを確認した。この位置精度は、実際の打設作業において打設点付近でのバケツ位置の修正を必要としないため、スムーズな作業を実現し、打設サイクルタイムの短縮に寄与する。

(2) 自動化による打設サイクルタイムの短縮

上記の自動運転での打設点への到達及びバンカー線上への着床では、概ね手動運転と同等の作業時間で一連の動作ができることを確認している。

手動運転における作業上の制約として、クレーン運転士が目視確認でバケツを着床させる際に死角となるため、トランスファーカをバケツ着床位置よりも60m後方で一旦停止して待機させる必要がある。これを自動運転では目視確認が不要なため、待機位置を近づけることができる待機位置を8mまで近づけた場合の打設サイクルタイムの短縮効果について、トランスファーカの

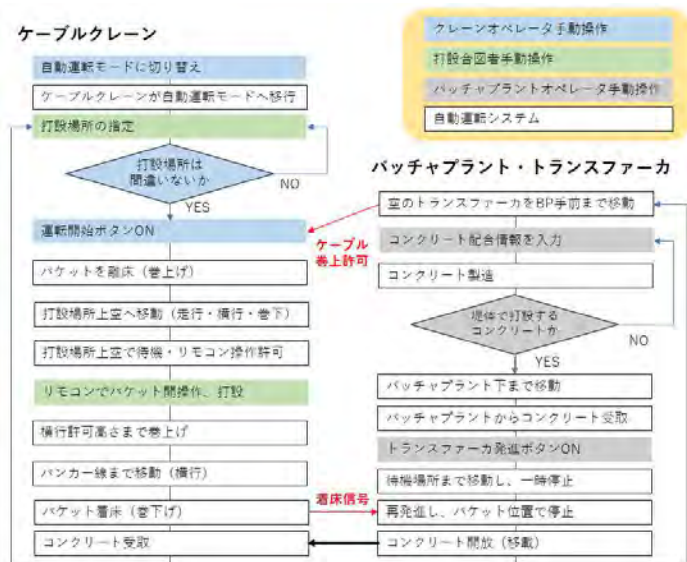


図-5 自動運転打設フロー

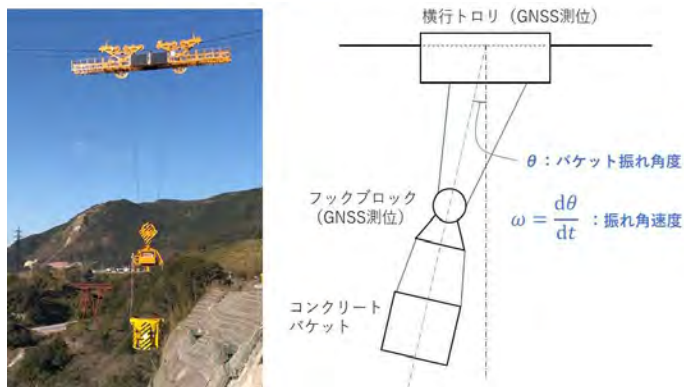


図-6 バケツ振れ止め制御



図-7 打設位置指定画面

動作シーケンスから算出した理論値と、現場試験での計測結果を示す(表-1)。トランスファーカの車輪の摩耗やバンカー線のレールの摩耗といった経時劣化により、理論値と実測値との差異が生じてはいるが、短縮効果としては実測値で25.3[s]であり、試算したとおりの効果が確認できた。この短縮時間は、打設サイクルタイム全体の約10%に相当し、これにより自動運転の導入が打設作業の生産性向上に寄与することが検証された。



写真-5 自動運転によるコンクリート打設状況

(3) デジタルサイネージとコンクリート品質情報管理

ケーブルクレーンやバッチャープラントなどの、各設備の稼働状況を示す動作信号を収集し、デジタルサイネージとして統合的に情報を表示する。さらに収集したコンクリート品質データ(配合データ及び試験データ)を打設位置データ(GNSS 測位データ)と紐付けることで、ダム堤体全域のコンクリート品質データの蓄積と管理を行う(図-8)。この蓄積データをダム堤体 CIM モデル上に付与・表示させることで、日々の打設データの管理を効率化できる。

(4) システムの安全対策

システムの現場導入にあたって、予期しないシステム不具合等による事故発生を未然に防止するための安全対策を実装しており、主な3項目について以下に記載する。

a) 横行トロリ移動制限域の設定

自動運転中に横行トロリが移動できるエリアを設定し、エリアの境界ではソフトリミットによってトロリを非常停止させる。具体的にはバンカー線付近のプラント設備や通路等のエリアを進入不可とすることで、バケットとの接触等の事故を未然に防止する。

b) バケット巻下げ高さ制限の設定

打設位置(バケット目標位置)情報から、堤体面のエレベーションを取得する。堤体面から5m上部をバケット接近不可エリアとすることで、自動運転中の巻下げ時に、バケットが堤体面や重機と接触することを防止する。

c) レバー操作による手動モードへの切替機能

自動運転中であっても、クレーン運転士が手動運転用の操作レバーを作動させた瞬間に自動運転は終了され、手動運転によるクレーン操作が可能となる。これにより緊急時に運転士がクレーン異常動作を認知したと同時に、手動運転による回避行動を取ることができる。

表-1 自動化による作業時間の短縮

トランスファーカ待機状態からバケット接近までの所要時間

運転モード	待機位置	所要時間 [s]	
		理論値	実測値 (10回平均)
手動	60m 後方	40.5	50.1
自動	8m 後方	15.7	24.8



図-8 コンクリート品質管理システム

6. まとめ

GNSS 測位技術を活用したケーブルクレーン自動運転システムを開発し現場導入を図った。横行トロリとフックブロックの測位データを活用したバケット振れ止め制御を実装し、コンクリートバケットを高精度に打設点まで自動運搬することが可能となり、サイクルタイムの向上に寄与できた。さらにコンクリート品質データを収集、ダム堤体 CIM モデル上に蓄積する品質管理システムを構築した。今後は現場での活用を通して、更なる改良を進め、生産性向上の一つのツールとして活用できるシステムに構築していきたい。