

8. ケーブルクレーン自動運転システムの開発

GNSS 測位技術を活用したシステムの構築及びダム堤体工への適用

西松建設株式会社

戸田 泰彰
○井上 洸也
田中 勉

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、今回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。システムの特徴は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である。

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. 開発システムの構成

2.1 軌索式ケーブルクレーン

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（写真-1）。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）。

2.2 開発システムの概要

本システムは GNSS（衛星測位システム）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 (Construction Information Modeling) 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自動制御するシステムである。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図を表示させて、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。

(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

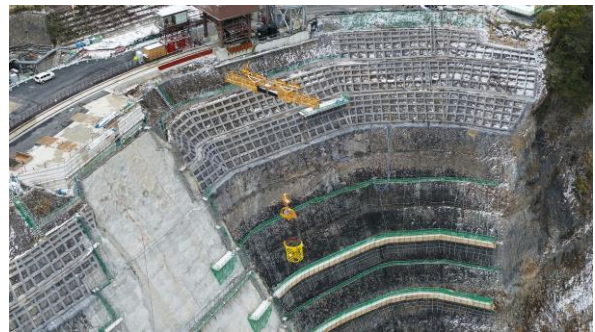


写真-1 ケーブルクレーンによるコンクリート打設

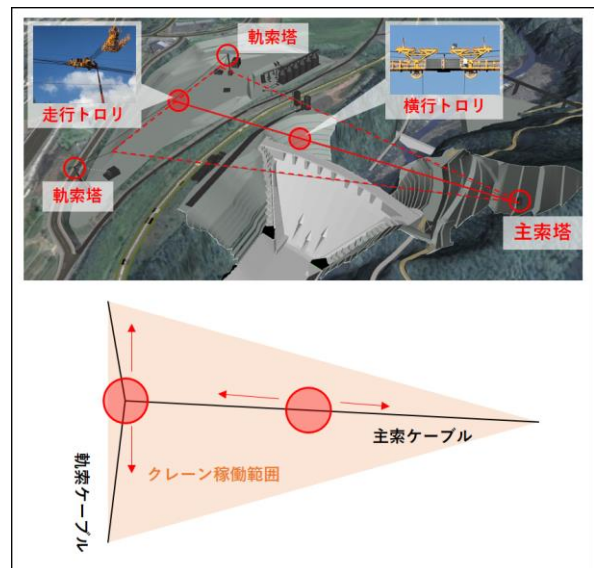


図-1 軌索式ケーブルクレーン

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。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。

2.3 開発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-3)。以下の(1)~(6)で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-2,3,4)。全ての設置機器はボルト締結による固定に加えて、ワイヤーロープによる脱落防止を施しており、万が一のトロリからの機器の落下を防いでいる。

(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-5,6)。

(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。クレーン操作室へのデータ伝送



図-2 ケーブルクレーン自動運転システムの概要



図-3 システムを構成する機器及び設置個所

は有線（LAN ケーブル）で行う（写真-7）。

(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-8）。

(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。



写真-5 GNSS 受信装置（フックブロック）

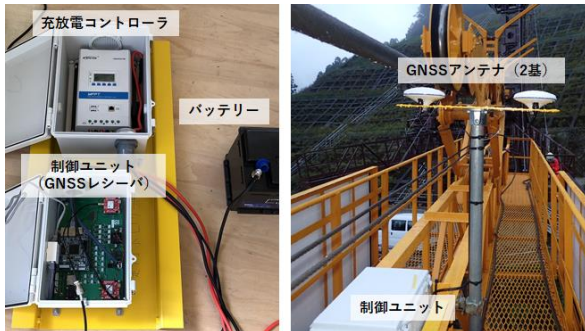


写真-2 GNSS 受信装置（横行トロリ①）



写真-6 コンクリートバケット

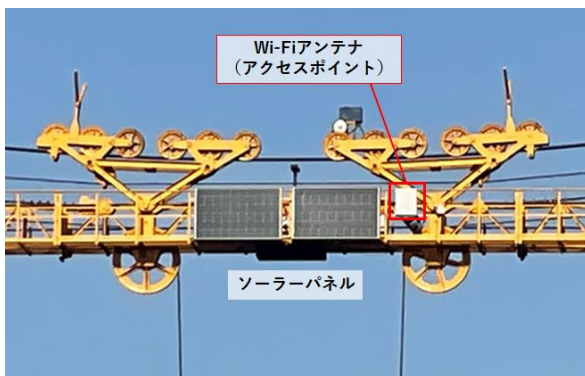


写真-3 GNSS 受信装置（横行トロリ②）



写真-7 GNSS 基準局



写真-4 GNSS 受信装置（走行トロリ）

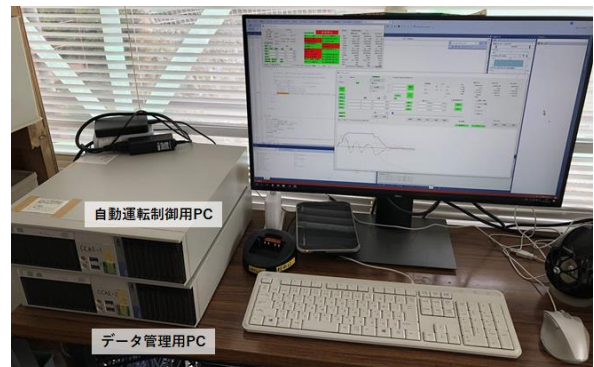


写真-8 クレーン操作室

(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-9)



写真-9 バッチャープラント通信機器

3. 自動運転システムの制御

3.1 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-4)。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。

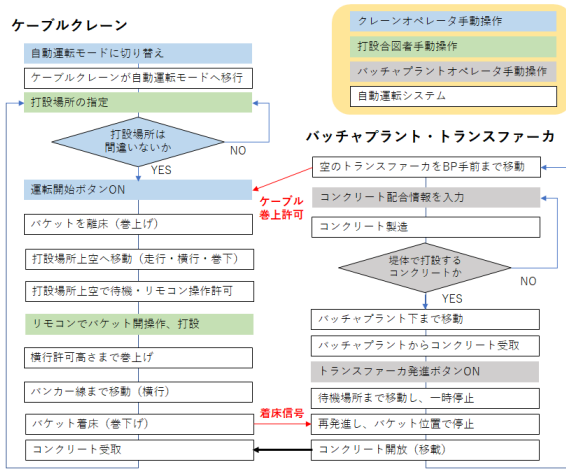


図-4 自動運転打設フロー

3.2 バケット位置制御

前述の横行トロリ、走行トロリ、フックブロックに設置した GNSS 受信装置を使用して、リアルタイムの測位データを取得する。本システムでは現場に設置した基準局との相対測位 (RTK 測位) により、誤差数センチメートルでの測位を可能としている。

測位データはグローバル座標系で与えられるため、ケーブルクレーン動作ベクトル (横行方向、走行方向、鉛直方向) と整合したローカル座標系への座標変換を行う。自動運転の目標位置 (打設点) についても同じ座標変換を行う。変換後の位置デー

タを使用してケーブルクレーンの 3 次元方向の制御 (横行トロリ移動、走行トロリ移動、バケットの巻上下げ) を行うことで、バケットを目標位置に向けて自動で運搬する。

3.3 バケット振れ止め制御

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、バケット振れの挙動をリアルタイムで取得する (図-5)。得られたバケット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。

自動運転において、バケットを高い位置精度で打設点に停止させ、且つその地点でバケットの振れを十分抑えることが必要であり、その複合的な制御を状態フィードバック制御によって実現している。

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、バケット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、バケットの振れを抑え、且つ目標位置に高精度で停止させる、複合的なバケット停止制御を実現する。

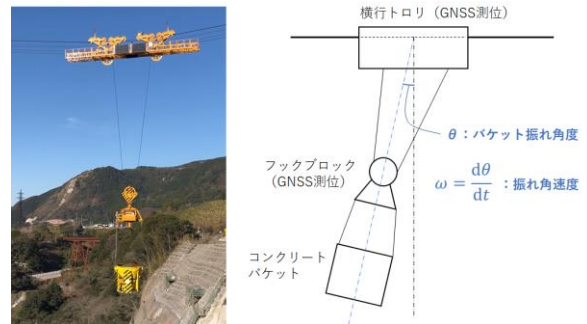


図-5 バケット振れ止め制御

4. 適用試験

4.1 立野ダム建設工事への適用

本開発にあたって、試運転から導入までを熊本県内の立野ダム建設工事にて実施した。本工事は、熊本県内白川 沿川の洪水被害を防ぐことを目的とした洪水調節ダム (流水型ダム) を建設する工事である。

工事概要及び立野ダム諸元を示す (表-1,2)。

表-1 工事概要

工事名	立野ダム建設（一期）工事		
発注者	国土交通省 九州地方整備局		
施工者	西松・安藤ハザマ・青木あすなる特定建設工事共同企業体		
工期	平成30年2月16日～平成33年3月31日		
工事内容	基礎掘削	V=約710,000m ³ （全体V=約710,000m ³ ）	
	堤体工打設	V=約33,000m ³ （全体V=約350,000m ³ ）	
	減勢工打設	V=約18,000m ³ （全体V=約50,000m ³ ）	
	基礎処理工	L=約80,000m（全体L=約120,000m）	

表-2 立野ダム諸元

位置	左岸	熊本県菊池郡大津町大字外牧地先	
	右岸	熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字立野地先	
河川名	白川水系白川	堤高	約90 m
ダム名	立野ダム	堤頂長	約200 m
型式	曲線重力式コンクリートダム	堤体積 (減勢工を含む)	約40万 m ³
集水面積	約383 km ²	天端高	標高282.0 m
湛水面積	約0.36 km ²	洪水時最高水位	標高276.0 m
貯水容量	約1,000 万m ³	計画堆砂量	約60万 m ³
目的と役割	洪水調整専用ダム（流水型ダム）		

4.2 試験内容と結果

(1) バケット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-6）自動運転を行い、指定した目標位置とバケット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、際の打設作業において打設点付近でのバケット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) バケット着床動作の確認

コンクリート打設後は、トランスファーカから次のコンクリートを受け取るために、バンカー線上にバケットを着床させて待機する必要がある。このバケット着床動作の自動運転プログラムを作成し、適用試験を実施した。

着床プログラムの中で、バンカー線の上空付近でバケットの振れを抑えながら高い位置精度で停止させるために、前述の状態フィードバック制御を使用している。約120mに及ぶバンカー線上において着床試験を行い、上流部、中央部、下流部でいずれも安定して自動運転でバケットを着床できることを確認した。

(3) 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ット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ット着床位置よりも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6m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、実打設での計測結果を示す（表-3）。トランスファーカの動作シーケンスから算出した理論値には及ばないものの、1サイクル当たり18.8秒の作業時間短縮が可能であることが確認できた。今後は理論値との差異の分析を行い、さらに作業時間を短縮させるための検討を進める。

打設サイクルタイム短縮に関してはこの他にも、専用のリモコンを使用したバケット位置調整機能をシステムに実装しており、打設点近くでの合図者のリモコン操作によって（クレーン運転士を介せず）最終的なバケット位置調整を可能としている（写真-10）。自動運転制御による高精度の



図-6 打設位置指定画面

表-3 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 (5回平均)
手動	60m 後方	40.5	43.3
自動	6m 後方	12.5	24.5

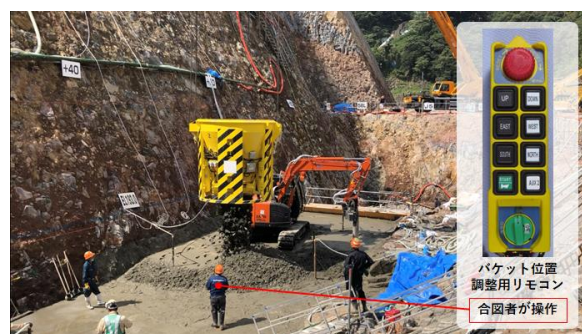


写真-10 自動運転によるコンクリート打設

位置合わせと、合図者によるリモコン操作を組み合わせることで、柱状打設において発生するクレーン運転士が目視確認出来ないエリアに対しても、作業を迅速かつ安全に進められ、サイクルタイム短縮に寄与する。

4.3 統合管理ディスプレイ

(1) デジタルサイネージによる打設進捗管理

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てグラフィック表示する(図-7)。デジタルサイネージとして統合的に情報を表示することで、現場職員及び作業員が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。

(2) コンクリート品質情報管理

バッチャープラントからコンクリート品質データ(配合データ及び試験データ)を取得し、これを打設位置データ(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。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。



図-7 統合管理ディスプレイ

4.4 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、その内の主な3項目について以下に記載する。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

5. まとめ

本開発で得られた成果を以下に記載する。

- (1) GNSS測位(RTK測位)によってトロリやバケットの位置を取得し、得られた位置データを使用してコンクリートバケットを打設点まで自動運搬することが可能である。
- (2) 開発したバケット振れ止め制御を用いることで、目標位置(打設点)で振れを十分抑えつつ、高い位置精度でバケットを停止させることが可能である。また戻り動作についても同様に、バンカー線上の既定位置に安定してバケットを着床させることが可能である。
- (3) デジタルサイネージにより、自動運転中の打設進捗状況をリアルタイムで確認でき、さらに日々の打設データを蓄積し、ダム堤体全域のコンクリート品質データを管理できる統合管理ディスプレイを開発した。

本システムの現場運用について、実打設での試験運用を通してサイクルタイム短縮効果が確認できたことで、さらに本格的な運用を進めている段階である。今後は制御プログラムの作り込みや、運用中での改善検討を進めることで、ダム堤体工の生産性向上に寄与する、自動運転システムの構築を加速させる。