

ケーブルクレーン自動化運転システムの開発

A Development of the Automatic Cable-Crane Operation System

小田 和俊*
Kazutoshi Oda

荏隈 幸五千*
Koichi Enokuma

要 約

ダム建設工事の施工における施工機械および設備計画の良否、あるいは、これらの機械や設備を運転管理するオペレータの技量は、工程・工費・品質に大きく影響する。特に重力式コンクリートダムにおけるコンクリート運搬・打設設備であるケーブルクレーンは、施工の主体をなす機械であり、その運搬能力が施工に及ぼす影響は大である。

本報は、重力式コンクリートダムにおけるコンクリート打設運転作業の自動化による運搬作業の正確性と運搬サイクルの短縮を計り、オペレーター的能力差による運搬サイクルの変動やヒューマンエラーによる災害を無くすことを目的として開発した「ケーブルクレーン自動化運転システム」について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 開発目標及び経緯
- § 3. システム概要
- § 4. 制御方法
- § 5. 安全対策
- § 6. 稼働実績
- § 7. 考察
- § 8. 終わりに

§ 1. はじめに

重力式コンクリートダムのコンクリート運搬・打設設

備としてのケーブルクレーンは、ワイヤーロープを主構造体とすることから、剛性に乏しく揺れやすい。そのため、オペレーターの運転技術や合図者の合図技術および両者の協調性が安全や運搬能力を左右する。特にコンクリート打設作業のように、時間当たりの運搬量が重要視される作業では、個人の技量が工事出来高・安全性に大きく影響を及ぼすことから様々な問題が派生している。一方、近年、建設業界では技能労働者・熟練労働者の不足や高齢化が進み、作業員やオペレーターの不足が深刻な問題となりつつある。今後ますます安全性や作業環境の改善・生産性の向上が望まれる中で、これらの問題を解決する一つ的手段として、安全で安定したコンクリート運搬能力をもつケーブルクレーンの自動化運転システム（以下、本システムと略）の開発に取り組んだ。

* 九州(支)鳴瀬ダム(出)

§ 2. 開発目標および経緯

過去にも他社において、ケーブルクレーンの自動運転の開発が試みられているが、クレーンの揺れ止め技術が確立されず、現在まで実用化されたシステムは見当たらない。本システムの開発は、平成4年10月より計画・検討を始めた。開発に際し、自動運転の基本となる揺れ止め技術（制振制御）が重要であることから平成6年8月に二風谷ダムのケーブルクレーン制振制御の要素実験を行い、システムの有効性を確認した。その後、実用化へ向けて次のような開発目標を設定し、開発を進めた。

- ①熟練オペレーターと同等もしくはそれ以上のサイクルタイムおよび操作性を確保する。
- ②コンクリートバケットの目標停止位置に対して±10cm以内で停止する停止位置精度を有する。
- ③コンクリートバケットを目標位置へ運搬・移動する場合に、揺れを制御しながら目標への移動が可能なシステムとする。
- ④システムは、構成機器の故障、不具合、ソフトのエラーに対し、十分なフェールセーフ機能を有する安全なシステムとする。

§ 3. システム概要

3-1 全体概要

ケーブルクレーンの自動化で重要な技術要素は、バケットの目標位置合わせと制振制御である。目標位置合わせ

に必要なデータは、横行トロリ位置・速度、および目標位置までの距離である。また、制振制御に必要なデータは、バケットの巻上索が主索となす角度、および横行トロリ直下に対する方向と速度である。開発に当たり、これらの計測手法や計測機器の選定が重要なファクターとなる。従来、角度の検出や距離の計測には、エンコーダや光波距離計を使用するのが一般的であるが、測定物が高速移動することや測定対象物が制御対象であることから測定時間・データ処理速度・計測誤差（エンコーダでワイヤロープのスピードや距離を計測する場合には、経時変化（長期的）、温度変化（短期的）、張力変化（短期的）による誤差が発生する。）等の問題による不確実性から、CCDカメラ付き自動追尾測角儀を用いた位置計測システムを採用した。これは自動追尾用の反射プリズムを測定物（横行トロリ）に取付け、これを2台の自動追尾測角儀により追尾させ、水平角・垂直角を測定し3次元座標位置（X、Y、Z）を割り出すものである。このシステムの採用により、停止位置精度が格段に向上した。

本システムは、図-1のハードウェア全体構成図、図-2の全体ブロック図に示すように、機械室システム、操作室システム、横行トロリシステム、フックブロックシステム、合図誘導システム、位置計測システムで構成されている。

(1) 機械室システム

機械室システムは、ケーブルクレーンの機械室制御盤（巻上・横行主幹盤および走行主幹盤）と、ウインチエンコーダ（回転数をデジタル化する装置）からの情報を操

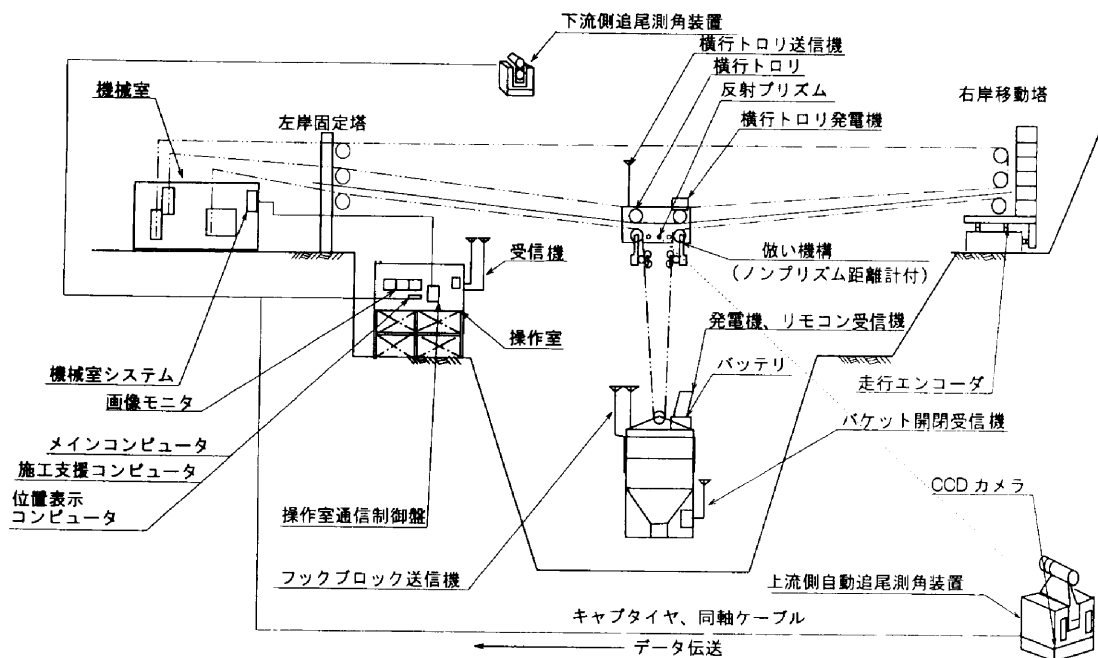
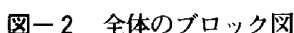


図-1 ハードウェア全体構成図



(2) 操作室システム

メインコンピュータは、バケットの制振や目標位置までの運転制御に必要なデータを横行トリシシステム、フックブロックシステム、および機械室コンピュータとの通信により集積し、そのデータをファジィコントローラに入力することにより、制振制御と運転制御の異なった2つの制御をおこなうための出力量を演算し、各ウィッチの操作量データとして機械室システムに送信している。また、運転制御の中でコンクリート運搬時の運搬軌道は、

施工支援コンピュータ(写真-1)は、コンクリート打設時の打設順序の入力、打設位置の3次元座標計算とメインコンピュータのデータファイルへの出力機器を合せ持つとともにファジィコントローラを内蔵し、ファジィコントローラのモニタとしても使用している。

位置表示コンピュータ(写真-2)は、クレーンの吊り荷の位置やコンクリート運搬時のバケット運搬軌跡、運搬場所のリフト・ブロックの表示、バケットスケジュールの確認変更画面等で構成され、これらの監視画面により、オペレーターの機械操作や安全確認を支援する。

フックブロックシステムは、加速度計、バケットへの送信機、リモコン受信機、操作室送信機、電力装置で構成されている。このシステムは、バケットの加速度計のデータとともに打設側合図者のリモコン信号を特定小電力無線で送受信するほか、バケット移動中のリモコン誤操作を防止するため、移動中はリモコン信号が送受信できない機能を持たせている。

横行トロリスシステムは、トロリ本体に取り付けた傾斜計、光ファイバージャイロ、倅い装置（フック巻上ワイヤーに沿わした角度検出装置）および、電力装置で構成されている。当初の計画では、トロリとフックブック間の距離計測のため、ノンプリズム距離計を使用した

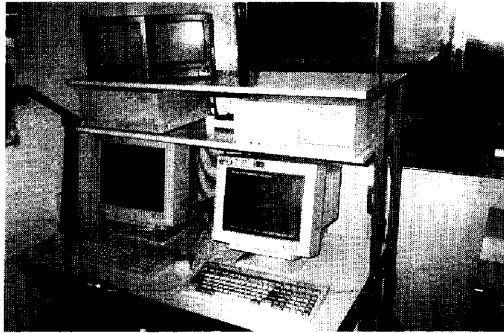


写真-1 施工支援コンピュータ



写真-2 位置表示コンピュータ

設作業のみの自動運転では、高さの精度はそれほど必要としないことから、巻上ウインチのエンコーダで距離算出を行った。

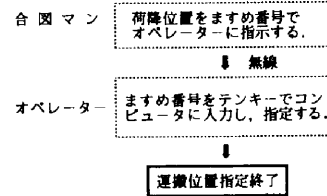
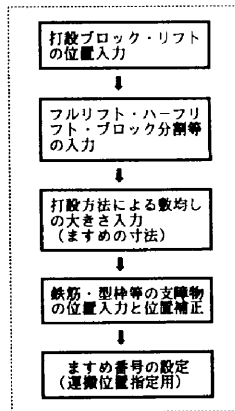
(5) 合図者誘導システム

合図者誘導システムは、ケーブルクレーンを打設側合図者がリモコン操作で自在に動かせるシステムである。ただし、危険防止のため次のような条件を設定した。

- ①リモコン操作が可能な位置は、コンクリート放出場所付近のみ。
- ②運転速度は、微速のみ。
- ③自動運転時のみ操作可能

本システムでは、コンクリートバケット運搬目標位置の設定を三次元座標とし、打設ブロックを2～3mの大きさのマス目に分割し、各々のマス目を数字による表示とし、基本的には、この数字の順番に打設場所を変更する。マス目の大きさの設定は、1バケットでの運搬量や敷均しの状態によってコンクリートの広がりかたが変化することから、任意に変更できる。コンクリートの打設・敷均し状況が1バケット毎に変化する場合は、0.5～1mの範囲で合図者が操作可能なリモコンシステムを採用した。これにより作業性が大きく向上した。(リモコンによるクレーン操作は有資格作業となるため、クレーン免許所持者を配置した。)

担当職員が打ち合せ終了後、施工支援コンピュータに入力する。
(入力時間10分)



自動運転スタートボタンを押せば自動運転を行なう。

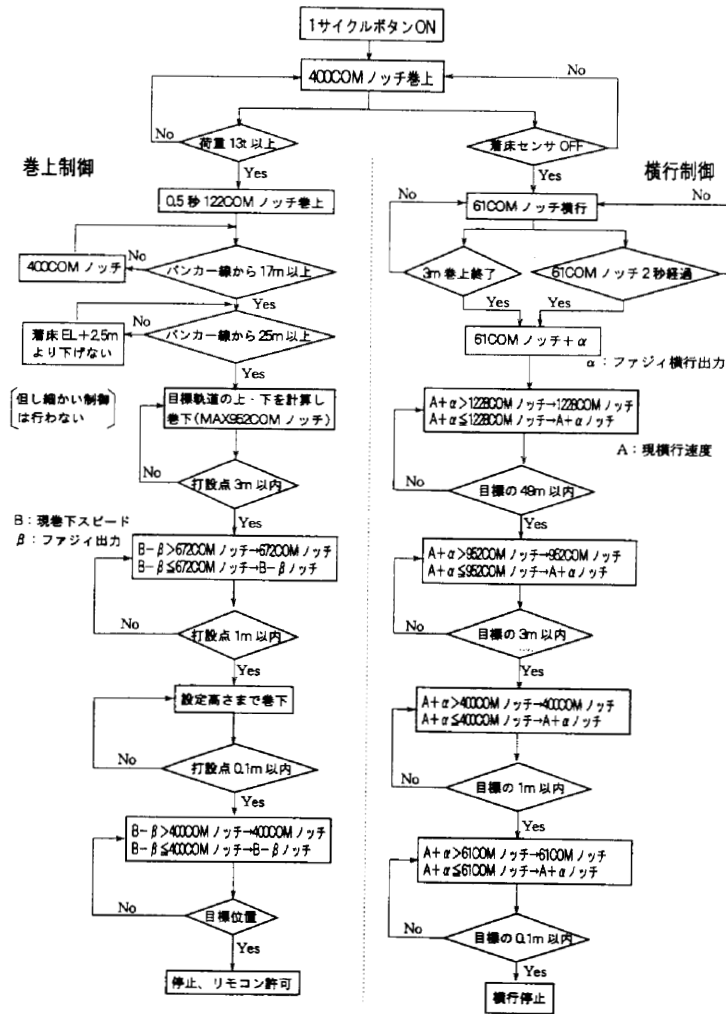
図-4 運搬位置指定方法

§ 4. 制御方法

4-1 制振

ケーブルクレーンの制御は、バケットの制振および位置決めが重要である。しかしケーブルクレーンは、主構造体がワイヤーロープであることから制振、制御はかなり困難である。特にコンクリート打設作業のように運搬高速化が必要な作業では、高速運転から短時間かつ正確に目標場所に停止させる技術が必要である。手動運転の場合は打設側合図者の合図で減速→停止となるが、目視のため減速開始点の再現性がなく、不安定かつ個人差によるところが大きい。手動運転の基本操作は、停止目標の数十メートル手前で横行速度を減速し、トロリより前方に吊り荷を振る。前方に振った吊り荷が、後方に振り戻されるときに、トロリを減速→停止させることで、揺れを作らずに目標位置に停止させる。

本システムでは、ケーブルクレーンの運転状態量を各システムで計測、数値化し、メインコンピュータでファジィ演算を行い、制振および位置決めを行う。ファジィによる制振制御は、加速度および減速時に行っている。ファジィ演算の前件部に8変数を(表-1)、後件部に2変数(表-2)を使用し、バンカー線から打設点までの加速・減速と打設点からバンカー線までの加速・減速の4群に分類し、ファジィルールの構築を行う。制御はファジィ演算結果である後件部2変数の出力値を累積し、



図ー5 制御フロー

ウインチ制御出力値を計算する。ただし、制振・減速に必要な最短の制動距離（速度に比例）があり、目標が近い場合に最大まで加速すると制動距離が確保できず、目

表ー1 ファジィ演算（前件部）

変数名	レンジ	意味
トリ位置	±30m	目標位置と横行トリ現在位置との差
トリ速度	±1.2m/sec	横行トリの移動速度
ANGL角度	±6.4度	横行トリとバケット位置との相対角度
ANGL速度	±1.22度/秒	ANGL角度の変化量
バケット位置	±20m	バケットの位置
バケット速度	±1.2m/sec	バケットの移動速度
バケット加速度	±2G	バケットの上下方向の加速度
張力	±20tf	巻上索張力

表ー2 ファジィ演算（後件部）

横行	±128COM/秒	横行速度変化量(1/2秒毎)
巻上	±128COM/秒	巻上速度変化量(1/2秒毎)

標位置での停止が出来なくなるため、横行および巻き上げの各々について、操作室のメインコンピュータでトリ位置、およびバケット位置ごとの最大速度を規定している。この最大速度をファジィルールで規定することも可能であるが、ファジィ演算の高速化のために、今回はメインコンピュータで行った。

図ー5にパンカー線から打設点までの、自動運転1サイクルの概略制御フローを示す。

通常、ケーブルクレーンのウインチ速度は5ノッチ（段階）程度である。しかし、自動化では細かな速度調整が必要なことから、ウインチ速度をコンピュータ内で1228ノッチ（段階）に細分化した。

4ー2 位置計測

横行トリ位置計測は、まずプリズム設置位置を計測し、その後、横行トリ中心に位置変換する。プリズム位置は、固定塔～移動塔間の直線ABをプリズム設置位置の分だけ平行移動した直線A' B' と、追尾装置LAHT2とCのなす直線LAHT2・Cの交点で示される。

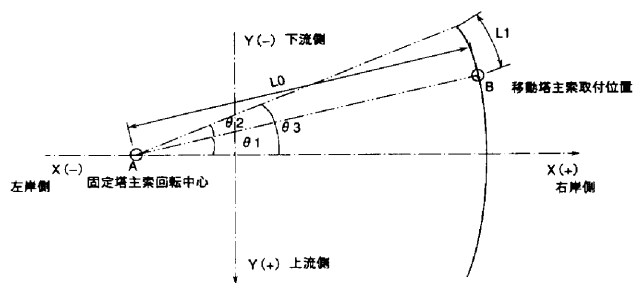


図-6 横行トロリ位置計測原理図1

1) 直線A' B' の算出

図-6より直線AB(直線A' B')の傾きは,

$$\tan(-\theta_1) = -\tan(\theta_1)$$

$$\theta_2 = \frac{180 \times L_1}{\pi \times L_0} \text{ (deg)}$$

よって

$$\theta_1 = \theta_3 - \theta_2 = \theta_3 - \frac{180 \cdot L_1}{\pi \cdot L_0} \text{ (deg)}$$

で表される。

ここで、A (x_A, y_A) とおくと、直線ABは以下のようになる。

$$y = -\tan(\theta_1)x + \tan(\theta_1)x_A + y_A$$

直線A' B' は直線ABを図-6の様に平行移動したものより

$$y = -\tan(\theta_1)x + \tan(\theta_1)x_A + y_A + \frac{L_2}{\cos(\theta_1)} \quad (1)$$

となる。

4-2-2 直線LAHT2・Cの算出

同様に図-7よりLAHT2・Cを求めると、以下のようになる。

$$y = \tan(\theta_4 + \theta_5)x - \tan(\theta_4 + \theta_5)x_2 + y_2 \quad (2)$$

4-2-3 交点の算出

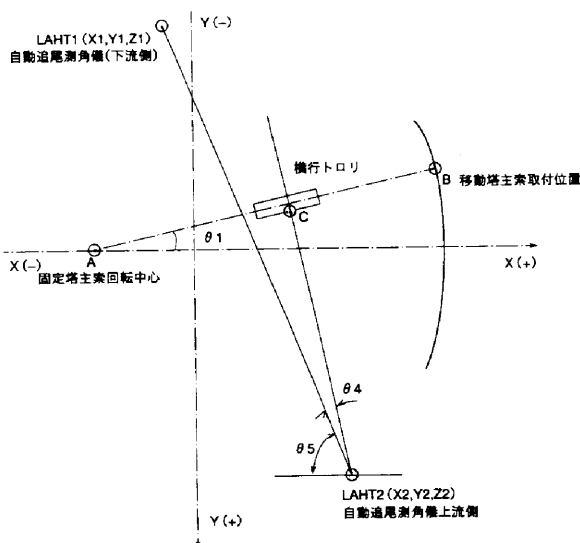


図-7 横行トロリ位置計測原理図2

①, ②式における傾きをそれぞれ以下のように置き換える

$$\tan(\theta_1) = \tan\left(\theta - \frac{180 \cdot L_1}{\pi \cdot L_0}\right) = \alpha$$

$$\tan(\theta_4 + \theta_5) = \beta$$

よって、①, ②式における傾きをそれぞれ以下のように置き換える。

$$y = -\alpha x + \alpha x_A + y_A + \frac{L_2}{\cos(\theta_1)} \quad (1')$$

$$y = \beta x - \beta x_2 + y_2 \quad (2')$$

①', ②' の式を解くと交点C (x_c, y_c) は以下の様になる。

$$x_c = \frac{\alpha x_A + \beta x_2 + y_A - y_2 + \frac{L_2}{\cos(\theta_1)}}{\alpha + \beta}$$

$$y_c = \frac{\alpha \beta x_A - \alpha \beta x_2 + \beta y_A - \alpha y_2 + \frac{L_2 \beta}{\cos(\theta_1)}}{\alpha + \beta}$$

4-4 C点からの置き換え

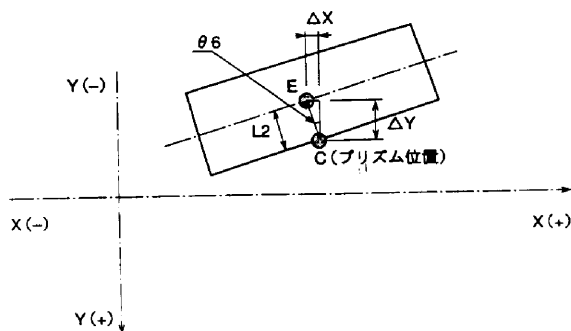


図-8 横行トロリ位置計測原理

図-8において

$$\Delta x = L_2 \sin(\theta_1), \Delta y = L_2 \sin(\theta_1)$$

E点は ($x_c - \Delta x, y_c - \Delta y$) より

$$x = \frac{\alpha x_A + \beta x_2 + y_A - y_2 + \frac{L_2}{\cos(\theta_1)}}{\alpha + \beta} - L_2 \sin(\theta_1)$$

$$y = \frac{\alpha \beta x_A - \alpha \beta x_2 + \beta y_A - \alpha y_2 + \frac{L_2 \beta}{\cos(\theta_1)}}{\alpha + \beta}$$

$$-L_2 \cos(\theta_1)$$

4-5 E点の高さの算出

図-7においてLAHT2 X_2, Y_2, Z_2 から点Cに対する仰角を θ_v とするとC点の高さは以下の様になる。

$$z_c = \sqrt{(x_2 - x_c)^2 - (y_2 - y_c)^2} \times \tan(\theta_v) + z_2$$

z_c と z_e は主軸方向に対して直行方向に配置されているため、高さはほぼ同様である。よって

$$z_e - z_c = \sqrt{(x_2 - x_c)^2 + (y_2 - y_c)^2} \times \tan(\theta v) + z_2$$

4-5 バケットの位置計測

4-5-1 概要

横行トロリ巻上シーブ主軸に、巻上ワイヤロープの揺れ角度を検出する傾装置（エンコーダを取り付けた角度検出装置）と傾装置に取り付けたノンプリズム距離計で、横行トロリとフックブロック間の距離を計測する一方、横行トロリの傾斜角は、横行位置により変化するが、内蔵した光ファイバージャイロにより傾斜角を計測する。これら傾装置の角度情報およびノンプリズム距離計による距離情報、および光ファイバージャイロによる傾斜角情報からフックブロックの位置（＝バケット位置）を算出する。

4-5-2 原理

図-9にバケット位置計測原理図を示す。

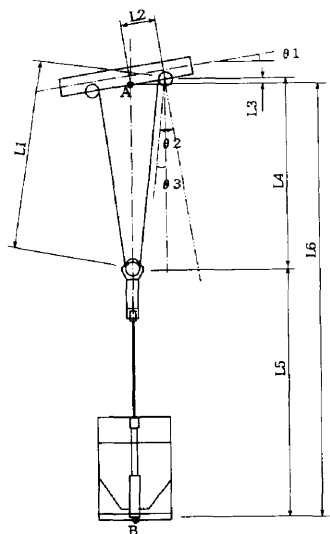
バケット位置は、図中Bで表される。

$$L_3 = L_2 \times \sin \theta_1$$

$$L_4 = L_1 \times \cos \theta_3$$

$$L_6 = L_4 - L_3 + L_5$$

となり、自動追尾測角装置により計測されるAを（X, Y, Z）とするとBは（X, Y, Z-L₆）となる。



θ_1 ：横行トロリ光ファイバージャイロで計測する傾斜角

θ_2 ：傾装置計測角

θ_3 ：鉛直方向に対する傾角度（ $\theta_2 - \theta_1$ ）

L_1 ：ノンプリズム距離計で計測する右岸側巻上シーブとフックブロック間の距離

L_2 ：巻上シーブ回転中心と横行トロリ中心間距離（固定値）

L_3 ：横行トロリ傾斜による高度差

L_4 ：横行トロリ中心とフックブロックの高度差

L_5 ：フックブロックとバケット底部の高度差（固定値）

図-9 バスケット位置計測原理図

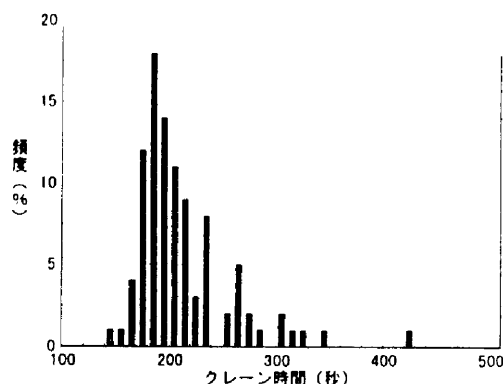
§ 5. 安全対策

本システムでは、通常のケーブルクレーンが持つ安全装置以外に、自動化で予想される危険に対し、次のような安全装置・対策を行っている。自動運転中に不具合が発生すると、本システムは動作を停止するが、システムモードの切り替えにより手動運転は可能となる。

- ①各制御コンピュータ（3台）はLANで接続され、各々の制御データの相互監視により、ソフトウェアの暴走や通信途絶などの異常を監視する。異常が発生した場合は、機械室コンピュータが各ウインチを緩停止させる（緩停止機能）。
- ②自動運転中、位置決めコンピュータの誤演算等により目標位置を超えて運転・制御が継続される場合は、機械室CPUの自動運転時の移動限界監視により自動運転は停止する。
- ③機械室コンピュータが故障した場合は、ウインチ制御盤に故障信号を出力し、各ウインチの主幹電源を自動的に遮断して誤動作を防止する。
- ④位置表示コンピュータは、過去の打設履歴によりバケットが侵入できない領域を計算し、イエローゾーン（注意）とレッドゾーン（危険）を設定する。自動運転中にバケットが各ゾーン内に侵入した場合には、位置表示コンピュータが注意表示や機械室コンピュータへのウインチ停止の指令を出し構造物等への接触・激突を防止する。なお、位置表示コンピュータは、インターフェースユニットと機械室システムのエンコーダ情報を位置決めコンピュータから独立して取り込み、独自にバケットの位置を計算し表示していることから、バケット位置の二重確認が行われ、正確な位置情報が提供される。
- ⑤自動追尾測角儀の故障、光路障害、ケーブル断線などで自動追尾計測が不可能となり、横行トロリの位置情報を把握できない状態が発生した場合、自動運転は停止する。ただし自動追尾測角儀は、上下流の各々1台、計2台によって、交互に1/10秒毎に計測を行っており、1台の測角儀が故障した場合も他方の測角儀が計測を継続するため、自動運転は継続する。

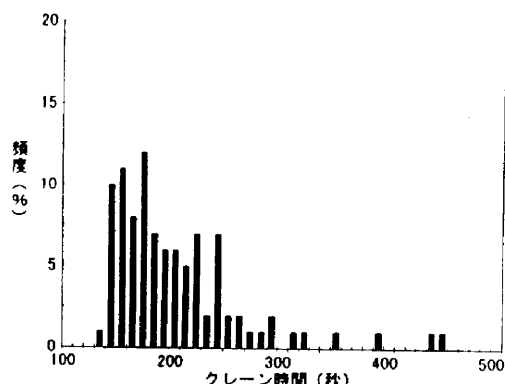
§ 6. 稼働実績

本システムは、平成8年1月より自動化運転を開始した。当初は机上プランや要素実験で予測し得なかった問題点が多発したが、その後の実打設作業の中で安全性と作業性（サイクルタイムの短縮）を考慮しながら、プロ



※ 自動・手動運転比較のため、同一場所で測定した結果、自動運転時平均は(209秒/サイクル)で、安定したサイクルタイムで運搬していることがわかる。なお、手動運転時は(208秒/サイクル)であり、同等の運搬能力であることもわかる。

図-10 自動運転時のサイクルタイム



※ 自動・手動運転比較のため、同一場所で測定した結果、手動運転時平均は(208秒/サイクル)である。しかし、時間のバラツキが大きく不安定なサイクルタイムで運搬していることがわかる。

図-11 手動運転時のサイクルタイム

グラム修正や器機調整を行い、平成8年6月には、当初の開発目標を上回る自動化運転システムを構築することができた。

図-10に自動運転時、図-11に手動運転時のサイクルタイム表を示す。また、図-12に平成9年11月時点の自動運転による打設実績を示す。

§ 7. 考察

自動化運転システムの導入により、合図者は放出時のリモコン操作、クレーンオペレーターは計器類およびバケット移動時の監視が主な作業内容となり、両者の精神的・肉体的疲労は大幅に軽減された。その結果、作業場所や周囲の安全確認、機器の点検を十分に行う余裕が生まれ、コンクリート打設作業時の安全性が大きく向上した。また、コンクリートの運搬能力もオペレーターや合図者の技能に左右されず、新人の合図者やオペレーター

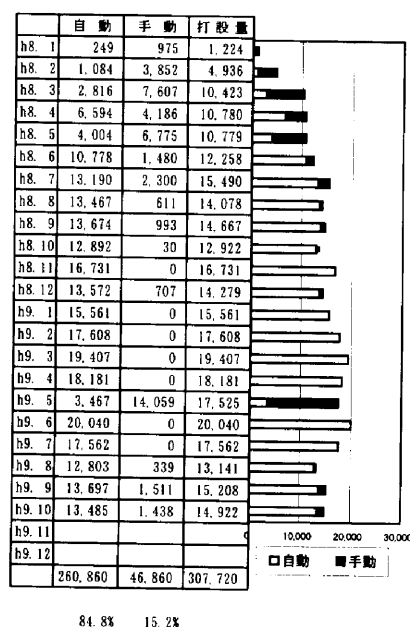


図-12 自動運転打設実績

でも数時間の指導教育で熟練者と同等の安定した運搬能力を保てることから、施工性や労務環境は大きく向上した。しかし、反面自動化に慣れ、手動運転時の合図能力やクレーン操作能力が向上しない等の裏面性も併せ持っており今後、取り組むべき課題である。

今回の自動化運転システムは目標以上の成果を上げ、ケーブルクレーン作業の省力化および合理化に大きく貢献したものである。今後さらに簡易操作が可能な自動運転支援システムおよび完全無人化クレーンシステム等の開発が望まれるが、今回の開発は将来の開発に向けて大きな第一歩を踏み出したものと考えている。

§ 8. おわりに

鳴淵ダムにおける本システムの導入にあたり、発案から計画立案、実証実験、現場での機器調整や運転調整等、開発にあたり様々な分野・立場の方々にご迷惑とご心配をおかけいたしました。おかげさまで平成9年3月に建設大臣認定期間(財団法人)ダム技術センターより技術審査証明書(技審証0801号)の認証を取得するとともに開発段階で数件の特許出願登録ができました。この場を持ちまして関係各位様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小田和俊, 荏隈幸五千, 近藤操可, 石井正典, 赤木晃: ダムコンクリート打設用ケーブルクレーンの自動化運転-ダム工学-pp.43~52
- 2) ダム建設技術・技術審査証明 報告書