

ダム建設工事におけるコンクリート運搬設備の自動化

Automatization of Concrete Transport Equipment for Dam Construction

阿部 勉*
Tsutomu Abe

要 約

ダム建設工事におけるコンクリート運搬作業を自動化し、安全とコストダウンを図る目的で研究を行った。

システムの自動化そのものについては、所期の目的を十分達成できたが、作業能率の点で、従来の人間による瞬間的な判断の連続作業方式と、各種作業動作の連系をセンサーとタイマーで行う自動化方式とでは、サイクルタイムに差がでて、今後には多少の課題を残すこととなった。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 系統図
- §3. 自動化トランスファーカーの動作
- §4. トランスファーカーの停止位置の解析と検出
- §5. 自動化トランスファーカーの特徴
- §6. 自動化トランスファーカーの運転結果
- §7. 考察
- §8. おわりに

§1. はじめに

コンクリート運搬設備を分類してみると、Fig.1 のようになる。

従来のコンクリート打設方法は、上記の分類におけるバケット台車方式とケーブルクレーンあるいはジブクレーンとの組み合わせが一般的であったが、最近では各種の方法が試みられている。

前記の分類で、コンクリートポンプによる運搬方法やインクラインと組合わせた方法、あるいは特殊コンベアなどによる方法などが、今後は増加していくものと思われる。

本報告は、これらの分類の中で、トランスファーカー方式を施工サイトで採用する計画があったことを機会

*機材部電気課

に、本方式を自動化し省力化・安全化を図り、施工技術の向上を図った結果について述べたものである。

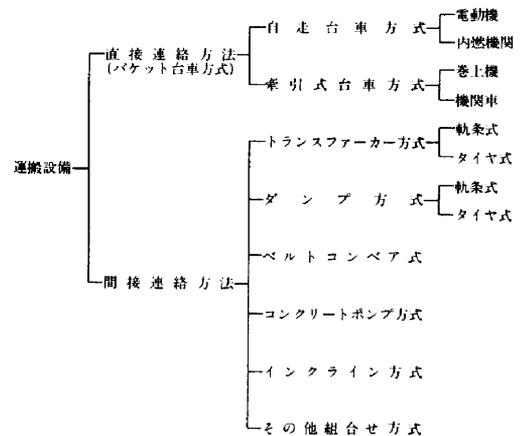


Fig.1 コンクリート運搬設備

§2. 系統図

システム中心部を Fig.2 に、系統図を Fig.3 に示す。

RS₁₋₂ トランスファーカーのバケット側での停止用光センサー (光電スイッチ)

RS₃₋₅ トランスファーカーのバッチャー側での停止位置表示用光センサー (光電スイッチ)

MS₁₋₂ トランスファーカーのバッチャー側での停止及び減速用磁気センサー (マグネット素子)

LS トランスファーカーの非常停止用ワイヤ型リミットスイッチ

盤Aのスタートボタンを押すことにより、トランスファーカーを起動させる。

その際ケーブルクレーンのオペレータより、スイッチ盤Bを通してバケットが着床しているとの信号を、トランスファーカーが受信しているか否かにより、二つのパターンでの動作を行うので、各パターンについて述べる。

§ 3. 自動化トランスファーカーの動作

バッチャープラントのオペレータは、トランスファーカーへのコンクリートの積込みが終了したことを確認するとバッチャープラント運搬室内に設置されたスイッチ

3-1 トランスファーカーがバケットの着床信号を受信している場合

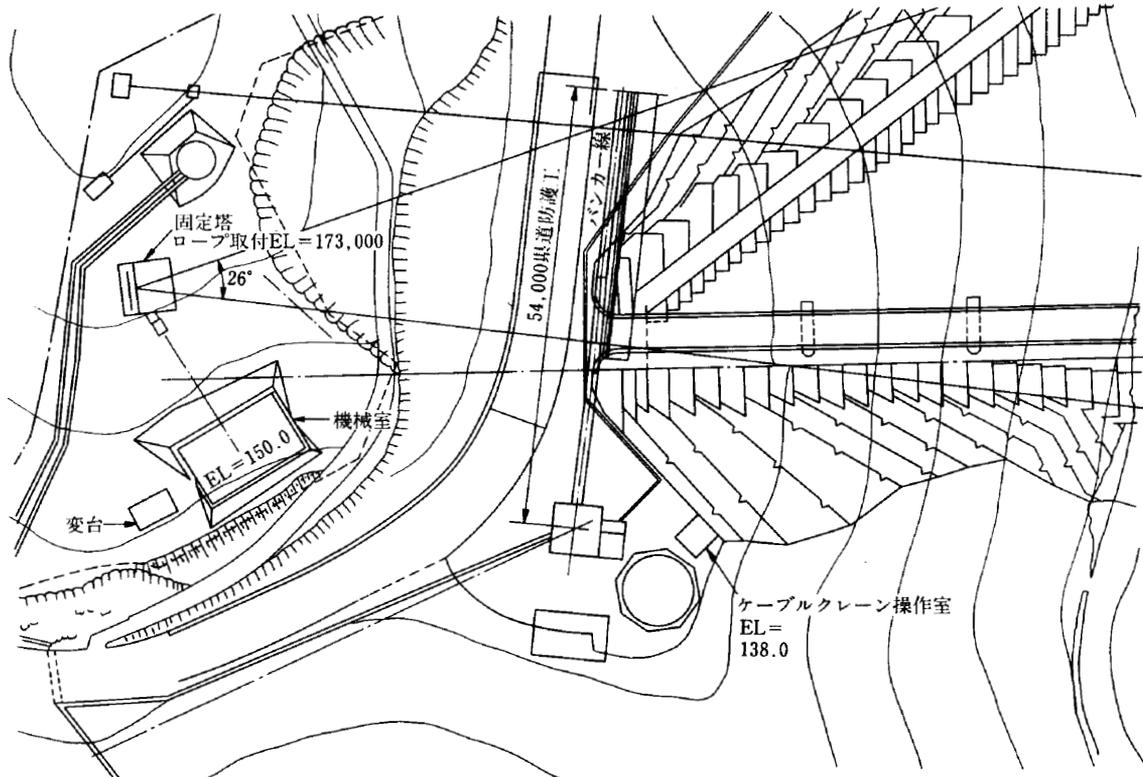


Fig.2 システム中心部

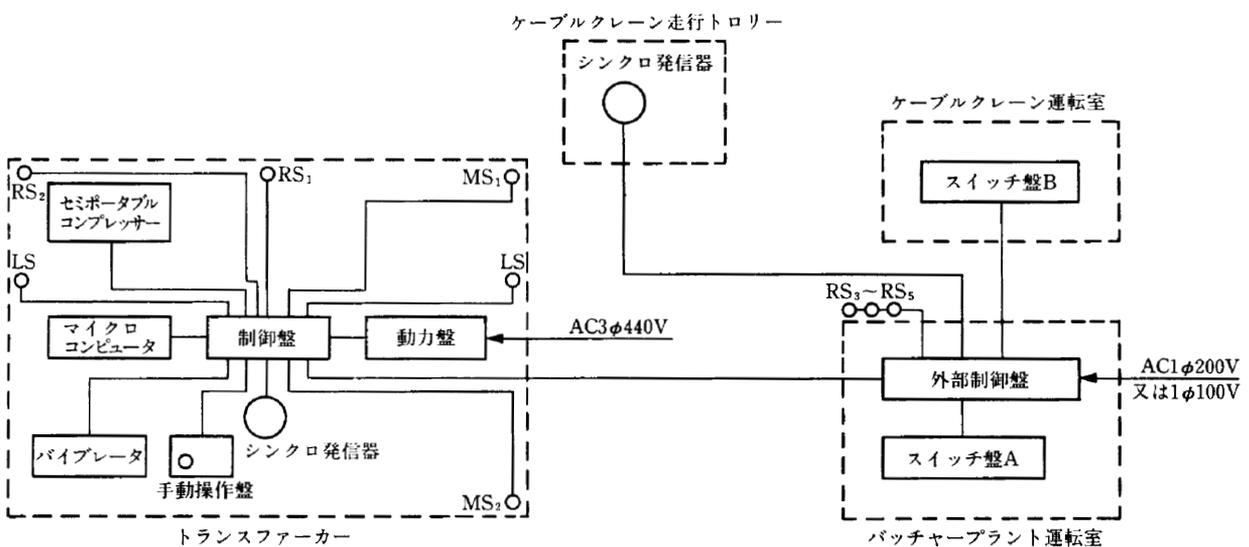


Fig.3 系統図

トランスファーカーは高速 (110m/min) でスタートし、ケーブルクレーンの走行トロリー及びトランスファーカーのそれぞれに搭載されたシンクロ発信器からの信号を、トランスファーカーに搭載したマイクロコンピュータで解析し、バケットの着床位置を判断する。

バケットの着床位置の手前10mで一旦中速 (44m/min) に減速し、5 m手前でさらに低速 (22m/min) に減速した上でバケットを光センサー (光電スイッチ) にて検出して、一定距離を走行して停止する。

バケットの位置が、シュートの正面であることを光センサーにて確認できたならば、ホップを開きバイブレータを起動させてコンクリートを積み替え、一定時間後にバイブレータを停止させホップを閉じる。

ホップ「閉」の信号で、トランスファーカーはバッチャープラント方向へ高速で進行し、停止位置手前5mで低速に減速する。

バッチャープラント下の停止予定位置では、磁気センサーを使用して定位置に停止させ、光センサーにて定位置を確認してバッチャープラントのオペレータ室にランプ表示する。

これらの一連の動作で確認できない場合は、ケーブルクレーンのオペレータあるいはバッチャープラントのオペレータがインチャージ動作をさせることにより、最終的な停止位置を確認させる。

3-2 トランスファーカーがバケットの着床信号を受信していない場合

前記と同様に、トランスファーカーは高速でスタートし、バケットの着床予定位置をマイクロコンピュータにて解析し、着床予定位置の手前10mで低速に減速する。

着床予定位置の手前5mで一旦停止し、ケーブルクレーンのオペレータからのバケット着床信号を受信するまで待期する。

バケットの着床信号を受信すると、低速で再スタートし、バケットを検出後一定距離を走行して停止する。

停止後の動作は、バケットの着床信号を受信している場合と同様である。

§ 4. トランスファーカーの停止位置の解析と検出

4-1 停止位置の解析

停止位置の解析のため Fig.4 の如くケーブルクレーンの固定軸を原点とした座標を考え、ケーブルクレーンの可動範囲のセンター (中心軸) を y 軸とする。

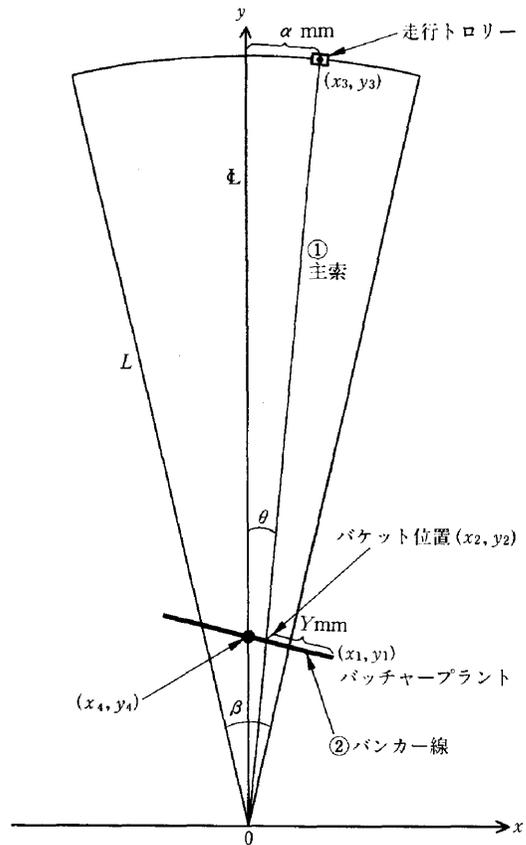


Fig.4 解析用座標

上図において

$$L=235,000 \text{ (mm)} \quad \beta=26^\circ$$

$$(x_1, y_1)=(26,500, 51,400) \quad (x_4, y_4)=(0, 58,000)$$

$$\alpha_{max} = \pm (2\pi L \times \frac{1}{2} \beta \times \frac{1}{360^\circ}) \approx \pm 53,320$$

トランスファーカーの停止位置の解析のためには、バケットの着床位置の解析も必要となるが、これらの解析にはマイクロコンピュータを使用する。

走行トロリーの走行距離 α (mm) より、トランスファーカーの走行すべき距離 Y (mm) を演算することで停止位置を求める。ただし α の値は、y 軸の右側を+, 左側を-で表わすものとする。

Fig.4 において、ケーブルクレーンの主索①の軌跡の方程式は、次のように表わせる。

$$y = \alpha x \dots\dots\dots(1)$$

座標 (x_3, y_3) を L 及び θ を使って表わすと次のようになる。

$$x_3 = L \sin \theta \dots\dots\dots(2)$$

$$y_3 = L \cos \theta \dots\dots\dots(3)$$

(1)式を変形すると下記のようなになる。

$$\alpha = \frac{y}{x} \dots\dots\dots(4)$$

(4)式に(2), (3)式を代入すると

$$a = \frac{y_3}{x_3} = \frac{L \cos \theta}{L \sin \theta} = \frac{1}{\tan \theta}$$

これを(1)式に代入すると

$$y = \frac{1}{\tan \theta} x \dots\dots\dots(5)$$

また、同じ Fig.4 において、バンカー線②の方程式は c 及び d を定数として次のようになる。

$$y = cx + d \dots\dots\dots(6)$$

座標 (x_1, y_1) , (x_4, y_4) は既知であるので、それぞれの座標を(6)式に代入すると

$$51,400 = 26,500 \times c + d \dots\dots(7)$$

$$58,000 = 0 \times c + d \dots\dots(8)$$

これにより、(6)式は次のように示される。

$$y = -0.249x + 58,000 \dots\dots(9)$$

バケット着床位置 (x_2, y_2) は、(5)式と(9)式の交点であるので、次式が成り立つ。

(5)式より

$$x_2 = \tan \theta \cdot y_2 \dots\dots\dots(10)$$

(9)式より

$$y_2 = -0.249x_2 + 58,000 \dots\dots(11)$$

(10)式を(11)式に代入して

$$y_2 = -0.249 \cdot (\tan \theta \cdot y_2) + 58,000$$

$$y_2 = \frac{58,000}{1 + 0.249 \tan \theta} \dots\dots(12)$$

また(10)式より

$$x_2 = \tan \theta \cdot \frac{58,000}{1 + 0.249 \tan \theta} = \frac{58,000 \cdot \tan \theta}{1 + 0.249 \tan \theta} \dots\dots(13)$$

トランスファーカーの走行距離 Y は

$$Y = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \dots\dots(14)$$

で示される。ここで、

$$x_1 = 26,500$$

$$y_1 = 51,400$$

$$\tan \theta = \tan \frac{\alpha}{2\pi L} \times 360 = \tan \frac{180}{\pi L} \alpha$$

$$x_2 = \frac{58,000 \cdot \tan \frac{180}{\pi L} \alpha}{1 + 0.249 \cdot \tan \frac{180}{\pi L} \alpha}$$

$$y_2 = \frac{58,000}{1 + 0.249 \cdot \tan \frac{180}{\pi L} \alpha}$$

であるので、これらを(14)式に代入して

$$Y = \sqrt{\left\{ 26,500 - \left(\frac{58,000 \cdot \tan \frac{180}{\pi L} \alpha}{1 + 0.249 \cdot \tan \frac{180}{\pi L} \alpha} \right) \right\}^2 + \left\{ 51,400 - \left(\frac{58,000}{1 + 0.249 \cdot \tan \frac{180}{\pi L} \alpha} \right) \right\}^2} \dots\dots(15)$$

(15)式において、 L は既知であるので、走行トロリーの走行距離 α が得られれば、トランスファーカーの走行すべき距離 Y が演算され、停止位置が決まる。

走行トロリーの走行距離 α を求めるためと、演算されたトランスファーカーの走行すべき距離を検出するために、それぞれにシンクロ発信器を搭載する。

前述の解析により、トランスファーカーの走行すべき距離が求められるが、それに伴う諸動作については §3 で述べたように、ケーブルクレーンのバケットが着床しているか否かによって多少の差異がある。

トランスファーカーの停止位置は、トランスファーカーの走行すべき距離によって決まることになるが、車輪の滑りやシンクロ発信器のデータ精度などの影響を考慮し、最終的な停止位置は、トランスファーカーとバケットの位置関係により定まる (§3 参照)。

停止位置の検出には、バケット側では光センサー(光電スイッチ)を、バッチャプラント側では磁気センサー(マグネット素子)を用い、位置確認には両側とも光センサーを用いる。

4-2 トランスファーカーの停止位置の検出

(1) バケット側での停止位置検出器等の配置は Fig.5 に示すように、トランスファーカーに光センサー(反射型光電スイッチ)を2個設置し、バケットには反射板を設置する。

トランスファーカーは低速で走行中に、光センサー RS_1 によりバケットに設置された反射板を検知すると、一定距離 P を走行後停止する。この一定距離 P は、あらかじめマイクロコンピュータに記憶させておく。

光センサー RS_2 は、停止したときにバケットに設置された反射板を検知している状態に設置する。

(2) バッチャプラント側での停止位置検出

トランスファーカーの停止位置の手前5mの地点に減速指示用磁気センサー(マグネット素子)を設け、停止位置(バッチャプラントのホップの真下)にも停止指令用磁気センサーを設けることにより停止位置を検出する。

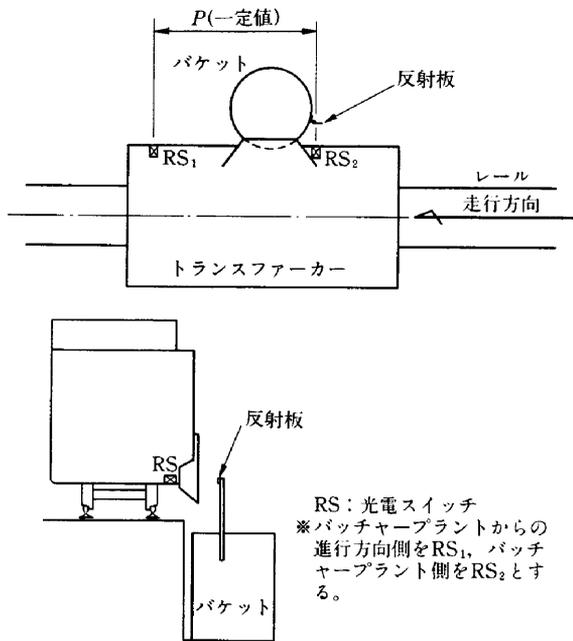


Fig.5 検出器配置説明図

§ 5. 自動化トランスファーカーの特徴

従来のトランスファーカーに採用されている駆動用モータは、二次抵抗制御巻線形モータ、極数変換かご形モータなどがブレーキと併用されたものが主流であったが、自動化するにあたっては、位置決め精度を高めるために1：5以上の速度制御が必要となることと、速度制御が容易であること等が要求され、前述のモータは、今回開発の自動化運転のためのモータとしては不適當である。

前述のモータ以外で1：5以上の速度制御が可能で制御の容易な方式としては、渦電流制御式、一次電圧制御式、インバータ制御式などがあるが、この中では、応答性やブレーキ機能、メンテナンスなどの面から一次電圧制御方式が比較的優れている。

しかしながら、自動化への容易性ではインバータ制御方式の方が適しており、省エネのメリットもあるため、今回はインバータ制御方式を採用した。

モータはかご形モータを採用し、ブレーキ機構としては電磁ブレーキ及びエアブレーキを採用している。

さらに、非常停止用にトランスファーカーの前後にワイヤ型リミットスイッチを設け、逸走防止を図るとともに、ケーブルクレーンの運転室及びバッチャープラントの操作室にも非常停止用スイッチを備えている。

トランスファーカーの最大走行距離は、(15)式における α 及び L が既知であることにより、約42mと求められるが、稼働サイクルを検討するにあたっては、余裕を見込

んで45mとした。

Fig.6に示した稼働サイクル概略図は、トランスファーカーが始動する時点で、バケットが既に着床している場合のもので待機時間がないときのものである。

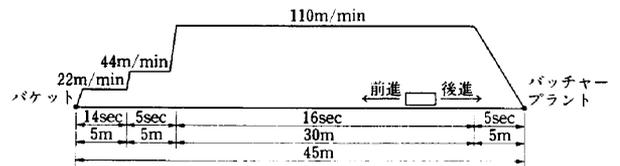


Fig.6 稼働サイクル概略図

トランスファーカーがバッチャープラント下より始動を開始し、最大距離を走行後バケットの位置まで達するのに40秒を要するのが前進走行である。

トランスファーカーが、バケット側での停止位置を確認してから2秒後に自身のホップのゲートを開き、一定時間バイブレータを稼働させ、トランスファーカーからバケットへのコンクリートの積み替え作業を行った後、高速でバッチャープラント下へもどるのが後進走行である。

後進走行の場合の稼働サイクルは、Fig.6におけるバッチャープラントとバケットを入れ替えたものと同様となる。ただし、この場合は中速を省いている。

これらの動作より、コンクリートの運搬サイクルタイムは、次のようになる。

バッチャープラントからトランスファーカーへの積み込み時間が20秒、トランスファーカー前進走行時間が40秒、バケットへの積み替え時間が25秒、トランスファーカー後進走行時間が40秒の計125秒が、1回のコンクリート運搬に要するサイクルタイムとなる。

このサイクルタイムは、トランスファーカーの最大走行距離の場合であり、さらにバケットへの積み替え時間を25秒と設定した際の試算であるから、実際のコンクリート打設時には多少のサイクルタイムの短縮を期待できることになる。

トランスファーカーの停止位置（バケット側、バッチャープラント側とも）がずれた場合は、ケーブルクレーン及びバッチャープラントのオペレータがインチングを行い、正規の停止位置に停止させる。

正規の位置に停止後は、インチングができないものとする。

§ 6. 自動化トランスファーカーの運転結果

自動運転を開始した当初は、各種のトラブルにみまわれた。

トラブルの主なものは、操作線の断線、制御盤内のインバータ保護回路（温度関係）の動作、トランスファーカーのシンクロ発信器用変換器の配線の断線等であった。

これらのトラブルを処理した後は、比較的スムーズな自動運転ができたが、当初の走行計画どおりにはならない面も出てきたため、実際に合わせて修正したところもあり、サイクルタイムが若干遅くなった。

主なトラブルと修正について以下に述べてみる。

6-1 操作線の断線

断線した操作線は、バッチャープラント下に設置したトランスファーカーの外部制御盤と、トランスファーカー本体に搭載した制御盤内に設けられたマイクロコンピュータを結んだVCTS（シールド付ビニルキャブタイヤケーブル）0.75mm²16芯であった。

この操作線以外に、トランスファーカー本体と外部とを結んでいるケーブルとしては、制御用2RNCT（2種ゴム絶縁クロロプレンキャブタイヤケーブル）1.25mm²20芯と、電源供給用3RNCT22mm²4芯の2本であったが、どちらもシース材がクロロプレンであるゴム絶縁キャブタイヤケーブルであり、可という性がVCTSに比べて優れているため、断線することはなかった。

操作線は合計3回断線したが、機械的強度の不足の外に、配線方式を水トラフ（側溝にトラフを用い、これに水を張ったもの）使用の転がし配線としたことによる、屈曲時の抵抗増加も断線の一原因と考えられた。

操作線の断線が生じた際の対処としては、当初はこの配線方式に問題があるものと判断し、メッセンジャーワイヤを利用した架空配電方式に変更した上で、移動に対しては滑車を利用するものとした。

しかしながら、前述のような対処を施したにもかかわらず再度断線したため、最終的には電線のサイズを0.75mm²から1.25mm²にアップし、機械的強度をアップすることにより対処した。これにより、以後は断線によるトラブルは解消された。

6-2 制御盤内のインバータ保護回路の動作

トランスファーカーの制御盤に取付けられた各種の制御機器のうち、インバータに係る保護回路が何度か動作し、15分前後の運転不能時間が発生した。

この原因は、トランスファーカーの運転において、電気制動を多用することをあらかじめ考慮した回生電力放電ユニットの収納ケースが小さく、このユニットの冷却効率が悪かったためと判断された。

処置としては、このユニットの収納ケースに強制冷却用ファンを取付けたが、この効果は大きく、処置以後は

この種のトラブルは発生しなかった。

6-3 トランスファーカーのシンクロ発信器用変換器の配線断線

ケーブルクレーンの走行塔の位置を検出するシンクロ発信器からの信号により、トランスファーカーの停止すべき位置をマイクロコンピュータで演算し、その位置まで走行させることになるが、トランスファーカー自体が停止予定位置まで走行するのに、走行距離を検出しなければならないため、トランスファーカー自体にもシンクロ発信器を搭載している。

この発信器用変換器の内部配線が、ハンダ付け処理をしている部分を多く持っていることで、トランスファーカーの移動に伴う振動やコンプレッサーの運転、バイブレータの運転に伴う振動のために、十分なハンダあげのなされていない箇所での断線が発生した。

このことについては、十分なハンダあげをすることで対処し、以後トラブルは発生しなかった。

6-4 主な修正

トランスファーカーの運転速度は、計画当初においては高速を110m/min、中速を44m/min、低速を22m/minとしてサイクルタイムを計算していたが、実際に現場にセットして各種のスピード及びレール状態でのスリップ距離を測定したところ、計算以上の数値となったため、位置決め精度を確保する必要がでてきた。

これにより、高速を77m/min、中速を44m/min、低速を16.5m/minと設定し直した。また、バッチャープラント側へもどる際の減速指令位置を、停止予定位置の手前5mとしていたが、高速から低速に完全に移るのに6mは必要という計測結果から、減速指令位置を停止予定位置の手前6mに修正した。

このような修正に伴い、サイクルタイムとしては約2分30秒となり、計画時より約25秒程度遅くなった。

§7. 考察

トランスファーカーの自動化運転システムを実施してみたが、基本的にはほぼ満足のゆく結果が得られたものと考えられる。

しかしながら、個々の問題点を取りあげてみると、まだまだ検討の余地があるので、主なものについて述べてみる。

7-1 サイクルタイムについて

計画どおりであれば、有人運転時とそん色ないサイクルタイムを実現できる見通しであったが、§6-4で述べたように、トランスファーカー自体のスピードとスリッ

ブ距離の関係から、高速・低速移動のスピードをダウンさせざるを得なかったことで、当初よりもサイクルタイムは増加した。

また、無人（自動）の欠点として、一つ一つの行動を各種センサーの検知に頼っているため、動作が有人（手動）運転に比較して緩慢であるとの指摘もあった。

このような問題点に対処するためには、駆動装置、ブレーキシステム、検知システムの再検討が必要である。

たとえば、駆動装置は速度制御範囲の広い直流電動機を採用してみるとか、ブレーキ機構に回生制動とレールブレーキを組み合わせるとかでも、かなりの改善が可能であると思われる。

さらに、検知システムを充実させることにより、インテグレーション動作の減少を図れば、有人運転に劣らないサイクルタイムの確保は可能と考えられる。

7-2 構造・機構について

今回採用したトランスファーカーでは、§6.で述べたようなトラブルが発生したが、これらの原因の主たるものは、制御盤やシンクロ発信器などに対する構造的な配慮が多少不足していたことによるものである。

すなわちトランスファーカー自体に搭載した制御盤やシンクロ発信器変換器などに対して、通常の移動で生じる程度の振動ぐらいしか配慮されていないと思われるような構造であったため、耐振性にやや問題を生じたものと思われる。耐振性については、コンプレッサーやパイプブレータ、ゲートの開閉に伴うコンクリートの落下振動まで考慮し、今後は対処しなければならないであろう。

また、操作ケーブルの配線方式については、今回対処したような滑車利用の架空配線方式も、ケーブル自体の機械的強度が十分得られれば良い方法であるが、架設やメンテナンスに一まつ不安があるため、できればトルクモーター内蔵型のケーブルリール方式を採用するか、移動部分にシールドケーブルを使わなくて済む機構とすることが望ましいと考える。

7-3 省力化・安全化について

省力化については、無人運転としたことにより、トランスファーカーのオペレータが1名省けることになって、一応所期の目的は達せられたと考えられるが、他の作業、たとえばバンカー線周囲のこぼれたコンクリート清掃などが有人運転の場合に比べて回数が増えたり、サイクルタイムの遅延によるコンクリート打設時間の延長などがあつたりして、総体的に見ると、大幅な省力化とまではゆかなかつたと思われる。

しかしながら、オペレータを省けるということは、それだけ事故を起こす可能性が減ることになるため、安全

化という面では優れているものと考えられる。

サイクルタイムを短縮することにより、経済性と安全性を確保できるものと考えられるので、今後は、いかにサイクルタイムが短縮できるかということについての検討を重点に対処してゆくことが肝要と考える。

§8. おわりに

本システムの開発意図は、トランスファーカーの無人運転による省力化と、コンクリート打設サイクルの短縮・安全化による経済性の追求ということにあつたが、必ずしも意図を満足させ得る結果とはならない面もあり、今後の検討を待つことになった。

しかしながら、本システムを採用していただいた桐見ダム出張所の皆様の御協力により、貴重なデータや対処方法についての現場サイドの意見を得られたことは、今後の諸システムの開発にも利用できるものであり、大変貴重な資料が得られたわけである。

これらをもとに、今後更に一歩進んだ開発に取り組みたいと考えている。