

# コンクリート運搬用ケーブルクレーンの自動運転システムに関する研究

(第1報, ケーブルクレーンの大型実験モデルとシミュレーションモデル)

Automatic Operation System of Cable Crane for Concrete Dams

(1st Report, Large-Scale Experimental Model and Simulation Model of Cable Crane)

藤田 隆 史\*・井上 肇 博\*・稲 葉 金 正\*\*  
栗 本 雅 裕\*\*・石 井 敏 之\*\*・大 塚 義 一\*\*

Takafumi FUJITA, Toshihiro INOUE, Kanemasa INABA, Masahiro KURIMOTO, Toshiyuki ISHII and Yoshikazu OTSUKA

## 1. ま え が き

近年, コンクリートダム建設工事において施工の合理化, コスト低減を目的としてロボット化, 自動化技術の開発が進められている<sup>1), 2)</sup>. 特に, ケーブルクレーンを用いてコンクリートを目的位置まで運搬し打設する作業は, 少数の熟練作業者が長年の経験に基づいて行っているため, コスト高, 工事遅れの要因となっている. 著者らは, このルーチンワーク的な作業であるダムコンクリート運搬・打設の自動化に取り組み, コンクリート運搬用ケーブルクレーンの自動運転システムの開発を行っている. この自動運転システムは, バンカー線でトランスファーカーからコンクリートを受け取り, 指定された打設地点にコンクリートを運搬・打設し, 再びバンカー線に戻るサイクルを自動的に行うことができる. 既に開発されているバッチャープラントでのコンクリート混練からバンカー線でのトランスファーカーによるコンクリート運搬までの作業の無人システムと併せることによりダムコンクリート打設の一連の作業が自動的に行える.

本報では, まず弾性ばねで結合された多質点系<sup>3)</sup>によるケーブルクレーンのシミュレーションモデルについて述べる. また, 実機クレーンの1/10スケールの大型実験ケーブルクレーンを製作し, クレーンの静特性, 動特性について実験結果と理論的解析結果<sup>4)</sup>との比較, 検討した結果について報告する.

## 2. 模型ケーブルクレーンの構成

模型ケーブルクレーンの概略図を図1に, その基本仕様を表1に示す. 横行, 走行トロリーおよびバケット3次元

座標は自動追尾式光学距離計 (AP-L1) を用いて測定する. ただし, 測定距離が数十mと長く, 横行速度が速いため, 動的な測定精度は良くない. 同時に横行, 巻上げモータに取りつけたエンコーダからもトロリー, バケット位置を測定する. 測定データは有線で制御コンピュータに送信される. 制御コントローラは, トロリーの走行およびバケットの巻き上げ指令信号を作成し, 駆動システムに送信する. 駆動システムは指令信号を受けて駆動する横行, 走行, 巻上げのACサーボモータとデジタルサーボ制御盤からなる.

表1 模型ケーブルクレーンの概略図

Maximum load	1.2 kN
Main rope span	50.0 m
Rail rope span	20.0 m
Maximum lift	6.5 m

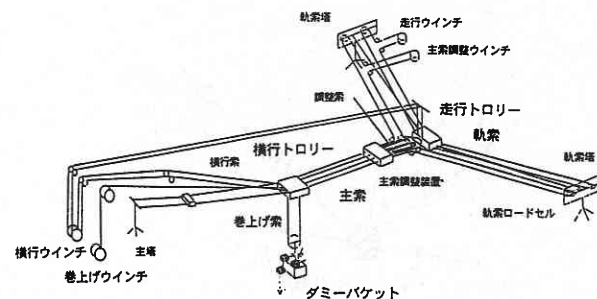


図1 模型ケーブルクレーンの概略図

## 3. 解析モデル

図2に解析モデルを示す. 索は多質点系とし質点間は弾性ばねで結合させた. ここでは主索系 (主索, 横行トロリー, バケット) についてのみ述べる. 軌索系 (軌索, 走行

\*東京大学生産技術研究所 第2部

\*\*(株)奥村組技術研究所

研 究 速 報 .....  
 トロリー、主索調整装置) については同様に導かれるので省略する。ここでつぎのことを仮定する。

- (1) 主索質点  $i$  の座標を  $(x_{1,i}, y_{1,i}, z_{1,i})$  とする。各質点を結びつけているばねは軸方向にのみ伸縮する弾性体とするが、横行トロリーのある位置が索の最下点になることを考慮して、いまトロリーが走行しているばね (質点  $j_1, j_1 + 1$  間のばねとする) はトロリー位置で2つに分ける (図3)。トロリーの左側のばねをばね1, 右側をばね2と呼び、初期索長をそれぞれ  $l_1^{(1)}, l_1^{(2)}$  とする。
- (2) 横行トロリーに作用する駆動力  $F_1$  は索の接線方向に働くが、図3のようにばね1とばね2のなす角の2等分線に直角方向として近似する。
- (3) 索とトロリー間に働く摩擦力  $R_1$  は一定とする。また、摩擦力は主索に関してはトロリーの両となりの索質点 ( $j_1, j_1 + 1$ ) にのみ作用するとし、それぞれにトロリーと索質点間距離に反比例するよう分配する。すなわち、トロリーと質点  $j_1$ , 質点  $j_1 + 1$  の距離の比を  $s_1 : (1 - s_1)$  とすると、摩擦力は質点  $j_1$  に  $(1 - s_1)R_1$ , 質点  $j_1 + 1$  に  $s_1 R_1$  とする。

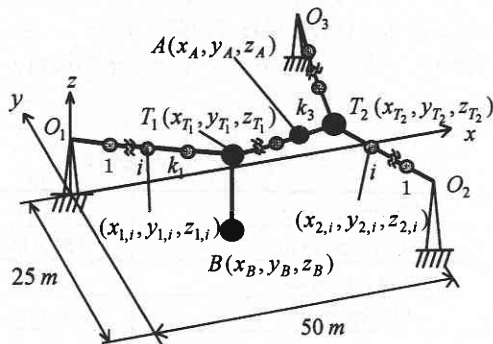


図2 解析モデル

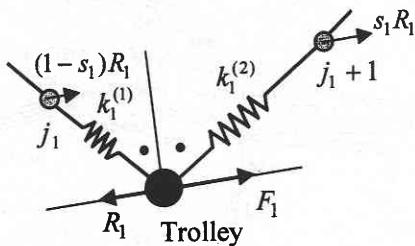


図3 索質点  $j_1, j_1 + 1$  間のばねの拡大図

3.1 主索の運動方程式

主索質点の運動方程式は以下ようになる。

- (1) 質点  $i$  ( $i \neq j_1, j_1 + 1$ ) について

$$m_1 \ddot{x}_{1,i} = -\frac{A_1 E_1}{l_1} \left\{ (x_{1,i} - x_{1,i-1}) - \frac{l_1 (x_{1,i} - x_{1,i-1})}{\sqrt{(x_{1,i} - x_{1,i-1})^2 + (y_{1,i} - y_{1,i-1})^2 + (z_{1,i} - z_{1,i-1})^2}} \right\} + \frac{A_1 E_1}{l_1} \left\{ (x_{1,i+1} - x_{1,i}) - \frac{l_1 (x_{1,i+1} - x_{1,i})}{\sqrt{(x_{1,i+1} - x_{1,i})^2 + (y_{1,i+1} - y_{1,i})^2 + (z_{1,i+1} - z_{1,i})^2}} \right\} - c_{1,x,x} (2\dot{x}_{1,i} - \dot{x}_{1,i+1} - \dot{x}_{1,i-1}) - c_{1,x,y} (2\dot{y}_{1,i} - \dot{y}_{1,i+1} - \dot{y}_{1,i-1}) - c_{1,x,z} (2\dot{z}_{1,i} - \dot{z}_{1,i+1} - \dot{z}_{1,i-1}) \dots \dots \dots (1)$$

$$m_1 \ddot{y}_{1,i} = -\frac{A_1 E_1}{l_1} \left\{ (y_{1,i} - y_{1,i-1}) - \frac{l_1 (y_{1,i} - y_{1,i-1})}{\sqrt{(x_{1,i} - x_{1,i-1})^2 + (y_{1,i} - y_{1,i-1})^2 + (z_{1,i} - z_{1,i-1})^2}} \right\} + \frac{A_1 E_1}{l_1} \left\{ (y_{1,i+1} - y_{1,i}) - \frac{l_1 (y_{1,i+1} - y_{1,i})}{\sqrt{(x_{1,i+1} - x_{1,i})^2 + (y_{1,i+1} - y_{1,i})^2 + (z_{1,i+1} - z_{1,i})^2}} \right\} - c_{1,y,x} (2\dot{x}_{1,i} - \dot{x}_{1,i+1} - \dot{x}_{1,i-1}) - c_{1,y,y} (2\dot{y}_{1,i} - \dot{y}_{1,i+1} - \dot{y}_{1,i-1}) - c_{1,y,z} (2\dot{z}_{1,i} - \dot{z}_{1,i+1} - \dot{z}_{1,i-1}) \dots \dots \dots (2)$$

$z$  方向については同様なので省略する。

ただし、 $m_1$  は主索質点質量、 $l_1$  は主索質点間ばねの自然長、 $A_1$  は主索の断面積、 $E_1$  は弾性係数であり、主索の初期索長を  $L_1$  とする次式で計算される。

$$m_1 = \frac{\rho_1 L_1}{N_1}, \quad l_1 = \frac{L_1}{N_1 + 1} \dots \dots \dots (3)$$

- (2) 質点  $j_1$  について 式 (1), (2) 右辺の  $(x_{1,i+1}, y_{1,i+1}, z_{1,i+1})$  を横行トロリーの変位  $(x_{T1}, y_{T1}, z_{T1})$  に、また右辺第2目の  $l_1$  を  $l_1^{(1)}$  とし、さらに、右辺に摩擦力  $-\text{sgn}(s_1)(1 - s_1)R_1$  を加えることで得られる。

- (3) 質点  $j_1 + 1$  について 式 (1), (2) 右辺の  $(x_{1,i}, y_{1,i}, z_{1,i})$  を横行トロリーの変位  $(x_{T1}, y_{T1}, z_{T1})$  に、また右辺第1項目の  $l_1$  を  $l_1^{(2)}$  とし、さらに、右辺に摩擦力  $-\text{sgn}(s_1)s_1 R_1$  を加えることで得られる。

3.2 横行トロリーの運動方程式

横行トロリーについての運動方程式を以下に示す。ここでは、 $x$  方向のみ示す。

$$M_{T1} \ddot{x}_{T1} = F_{1,x} - \text{sgn}(\dot{s}_1) R_{1,x} - \frac{A_1 E_1}{l_1^{(1)}} \left\{ (x_{T1} - x_{j1}) - \frac{l_1^{(1)} (x_{T1} - x_{j1})}{\sqrt{(x_{T1} - x_{j1})^2 + (y_{T1} - y_{j1})^2 + (z_{T1} - z_{j1})^2}} \right\} + \frac{A_1 E_1}{l_1^{(2)}} \left\{ (x_{j1+1} - x_{T1}) - \frac{l_1^{(2)} (x_{j1+1} - x_{T1})}{\sqrt{(x_{j1+1} - x_{T1})^2 + (y_{j1+1} - y_{T1})^2 + (z_{j1+1} - z_{T1})^2}} \right\} + \frac{A_4 E_4}{l_4} \left\{ (x_B - x_{T1}) - \frac{l_4 (x_B - x_{T1})}{\sqrt{(x_B - x_{T1})^2 + (y_B - y_{T1})^2 + (z_B - z_{T1})^2}} \right\} - c_{T1,x} \dot{x}_{T1} - c_{T1,y} \dot{y}_{T1} - c_{T1,z} \dot{z}_{T1} \dots \dots \dots (4)$$

ただし,  $(x_B, y_B, z_B)$  はバケットの座標値,  $A_4, E_4, l_4$  はそれぞれ巻き上げ索の断面積, 弾性係数, 初期索長である.

右辺第1項目は駆動力, 第2項目は摩擦力, 第3,4項目はそれぞれトロリーと索質点  $j_1, j_1 + 1$  間のばねの弾性力, 第5項目はトロリーとバケット間の巻き上げ索の弾性力, 第6, 7, 8項目は減衰力である.

### 3.3 バケット (質点 B) の運動方程式

バケットについても  $x$  方向の運動方程式のみを示す.

$$M_B \ddot{x}_B = -\frac{A_4 E_4}{l_4} \left\{ (x_B - x_{T1}) - \frac{l_4 (x_B - x_{T1})}{\sqrt{(x_B - x_{T1})^2 + (y_B - y_{T1})^2 + (z_B - z_{T1})^2}} \right\} - c_{B,x} \dot{x}_B - c_{B,y} \dot{y}_B - c_{B,z} \dot{z}_B \quad \dots (5)$$

ここで, 駆動システムを PI Controller と仮定すると, ケーブルクレーンのブロック線図は図4のようになる. 得られた運動方程式は線形加速度法を用いて連立差分方程式とし, それを Newton-Raphson 法を用いて解く.

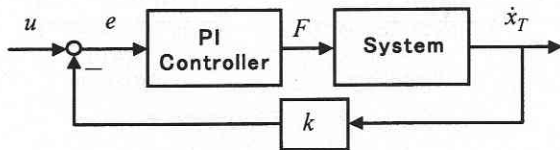


図4 ケーブルクレーンのブロック線図

## 4. 静的実験

静的実験を行い, 未知である主索, 軌索, 調整索の初期索長, 弾性係数を同定した. 実験は, 走行トロリーは軌索中央に固定し横行トロリーを動的な影響が無視できる低速で  $x = 9\text{ m}$  から  $41\text{ m}$  間をゆっくりと静的に移動させ, 任意位置での横行, 走行トロリーの静的位置を測定した. バケット質量  $77\text{ kg}$  としたときの横行トロリーの静的な移動軌跡について実験結果およびシミュレーション結果を図5に, 横行トロリーが主索中央にあるときのケーブルクレーンの形状を図6に示す. シミュレーションでは, 主索は11質点, 軌索は7質点モデルとした. 索の垂下量は最大で約  $2.2\text{ m}$  である. シミュレーション結果は実験結果とよく一致していることがわかる.

## 5. 自由振動実験

横行トロリーに  $t = 4.5\text{ (s)}$  で鉛直方向  $-25\text{ cm}$  の強制変位を与えた後,  $t = 7.0\text{ (s)}$  で解放し自由振動させた. 横行, 走行トロリー位置はそれぞれ軌索, 主索の中央に固定, バケット質量  $77\text{ kg}$  の場合について時刻歴振動波形の実験結果およびシミュレーション結果を図7に示す. 横行トロリー

と走行トロリーは逆位相で振動し, 振動周波数は実験で横行トロリー  $0.52\text{ Hz}$ , 走行トロリー  $0.51\text{ Hz}$ , 解析で横行トロリー  $0.52\text{ Hz}$ , 走行トロリー  $0.52\text{ Hz}$  である. また, ケーブルクレーンの運動方程式をつりあいのまわりで Taylor 展開することで得られる線形連立運動方程式をモード解析

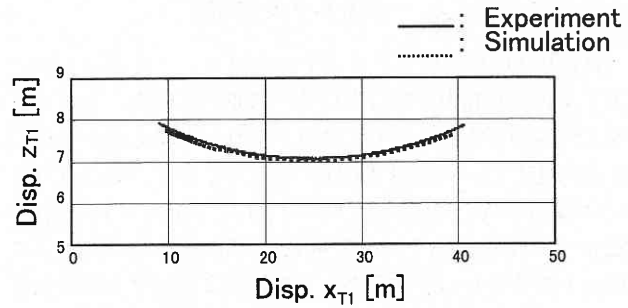


図5 静的実験結果1 (横行トロリーの移動軌跡)

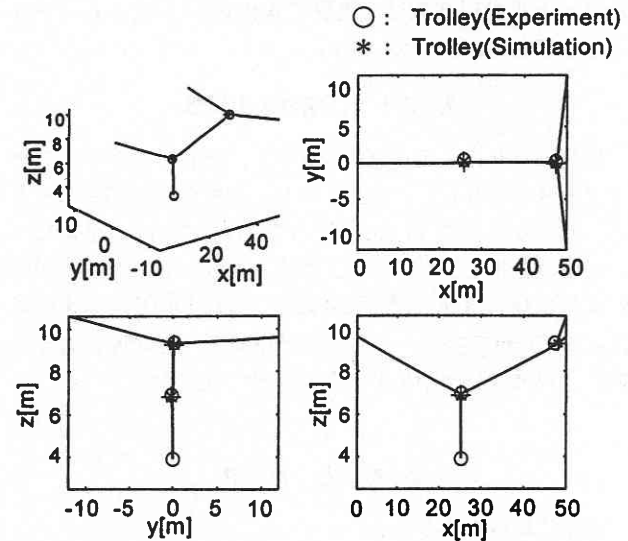


図6 静的実験結果2 (横行トロリーが主索中央における索形状)

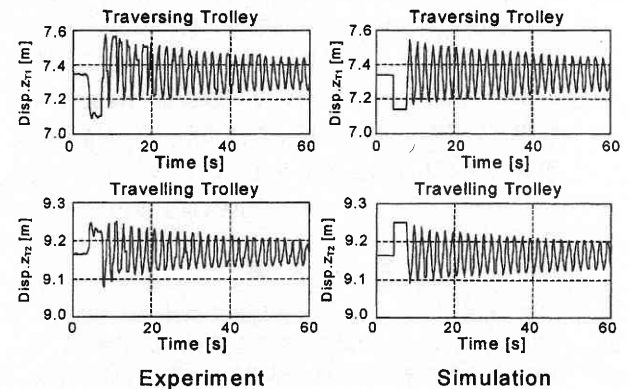


図7 自由振動実験結果 (横行, 走行トロリー鉛直方向変位)

研究速報 .....  
 した結果、モード形状および固有振動数から自由振動実験では2次モードが励起したことがわかった。したがって、実機ケーブルクレーンにおいてコンクリート開放によって生ずる鉛直方向振動（リバウンド）も2次モードにあたる。

6. 一定トルク入力実験

横行用 AC サーボモータのトルクリミットを設定して一定トルクの駆動力で横行トロリーに走行させた。トルクを変えて実験をすることで、横行トロリーと主索間の摩擦係数  $R_1$  を同定した。同定結果は  $R_1 = 25 \text{ N}$  である。走行トロリーは軌索中央に固定し、横行トロリーを  $x = 13 \text{ m}$  から  $22 \text{ m}$  まで走行、バケット質量  $M_B = 77 \text{ kg}$  の場合について横行トロリーとバケットの  $x, z$  変位およびバケットの振れ角  $\theta$  の実験結果およびシミュレーション結果を図8に示す。シミュレーションで用いた駆動力は  $F_1 = 18 \text{ N}$  である。バケット振動周波数は、実験で  $0.46 \text{ Hz}$ 、シミュレーションで  $0.47 \text{ Hz}$  となった。

7. ステップ速度入力実験

横行モータにステップ信号を与え、横行トロリーをステップ速度で駆動した。走行トロリーは軌索上に固定してある。バケット重量  $77 \text{ kg}$ 、巻上げ索長さ  $5.1 \text{ m}$  の場合について実験結果を図9に示す。横行トロリーとバケットの相対変位は横行等速区間で  $\pm 44 \text{ cm}$ 、横行トロリー停止時以降は  $\pm 70 \text{ cm}$  であり、バケットはトロリー停止時に大きく振れ、以降減衰率が小さいため振動し続けた。

8. あとがき

以下に結論をまとめる。

- (1) 弾性ばねによって結合された多質点系よるケーブルクレーンのシミュレーションモデルを構築し、動特性、静特性について理論的解析を行った。
- (2) ケーブルクレーンの静特性、動特性について大型実験ケーブルクレーンを用いた実験結果と理論的解析結果との比較、検討を行った。また、その結果より解析モデルの妥当性が示された。

(1998年4月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 城岡, 米田, ほか: 奥村組技術研究年報 No. 23 (1997).
- 2) 平松, 塚本, ほか: 鹿島技術研究年報 No. 45 (1997).
- 3) 江原: 日本機械学会論文集, 36-287 (1970), 1067-1074.
- 4) 丸山, 堀, 村山: 架空索の理論とその応用, 地球社.

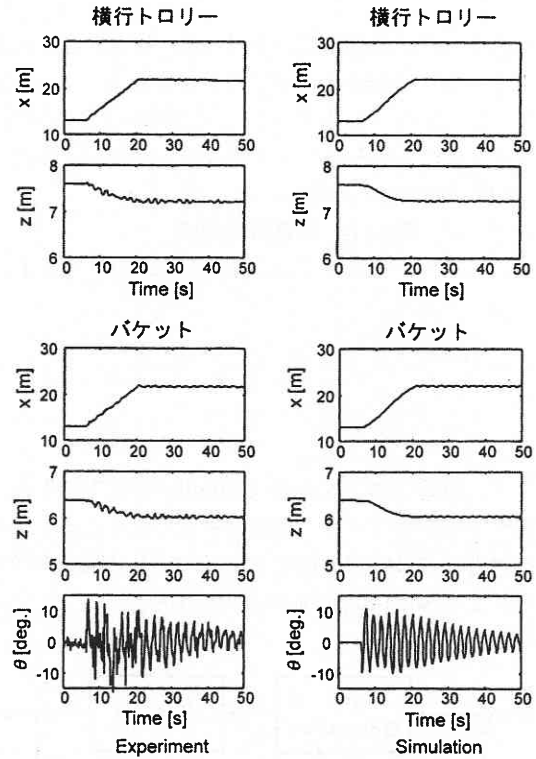


図8 一定トルク入力実験結果

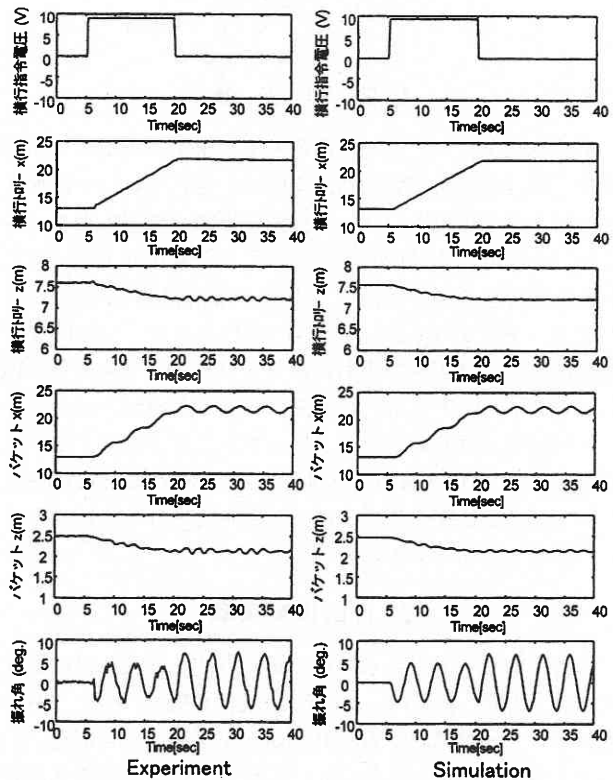


図9 ステップ速度入力実験結果