

エレベーター制御ケーブルの形状解析

渡辺誠治*
石川雅洋**

Deformation Analysis of Elevator Traveling Cable

Seiji Watanabe, Masahiro Ishikawa

要旨

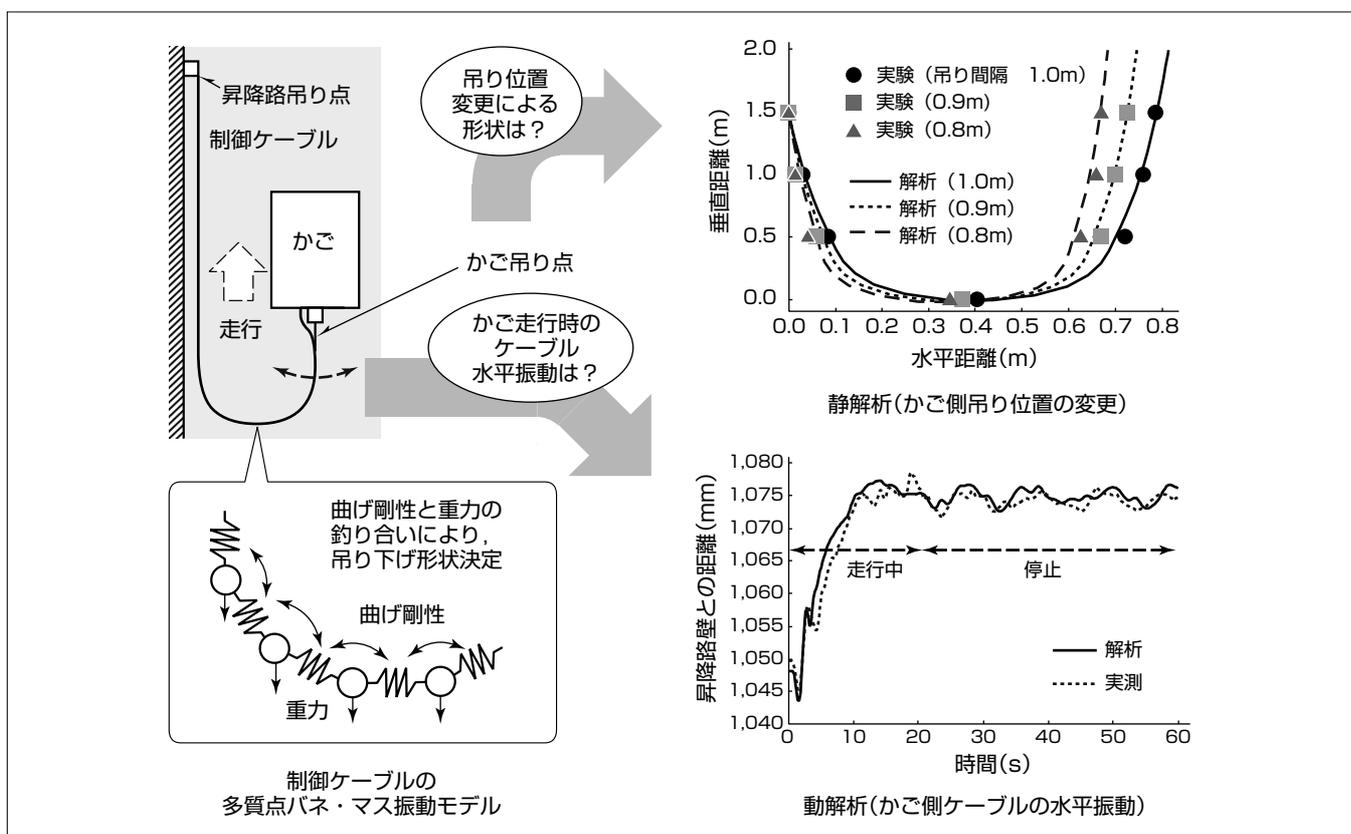
高層ビル向けのエレベーターでは、制御ケーブルの吊り下げ長さ増大に対し、昇降機器とケーブルのすき間を適切に管理する必要がある。また、高速走行時に発生するケーブルの横揺れについても事前に把握しておかなければならない。さらに、制御ケーブルは、ケーブル両端の水平吊り間隔や、温度変動による材料特性変化によって、吊り下げ形状が異なってくる。

そのため、設計段階で様々な要因を考慮した上でケーブルの最適な吊り構造を実現する必要がある。ここでは、二次元平面内で運動する制御ケーブルに対し、多質点のバネ・マスで構成される解析モデルを導出した。

ケーブルモデルに含まれる物理パラメータの温度特性を

同定し、得られたケーブルモデルを用いてケーブルの吊り試験と解析を比較した結果、静的なケーブルたわみ形状に関して、両者は良好に一致することを確認した。さらに、実機試験塔で走行試験を実施し、ケーブルの水平振動について解析と試験結果を比較することにより、動的なケーブル振動についても定量評価が可能であることを確認した。

このように、導出した制御ケーブルの解析モデルを用いることによって、ケーブルの変形形状を様々な条件下で評価可能となった。これによって、かごと制御ケーブルのすき間管理など、ケーブルの最適な吊り構造を開発段階で事前評価することができる。



エレベーター制御ケーブルの変形形状を予測する技術

温度変化に対するケーブル吊り下げ形状の違いを正確に模擬できる解析モデルを構築することによって、かごと制御ケーブルのすき間管理など、ケーブルの最適な吊り構造を開発段階で事前評価することができる。

1. ま え が き

高層ビル向けのエレベーターでは、制御ケーブルの吊り下げ長さが増大するため、ケーブルの吊り下げ形状を事前に把握し、昇降機器とのすき間を管理することが必要となる。また、昇降速度の高速化に伴い発生するケーブルの横揺れについても把握しておかなければならない。

制御ケーブルの吊り下げ形状は、ケーブル両端の水平吊り間隔によって変化する。さらに、温度が変わると材料特性が変化するために、吊り間隔が一定であったとしても、吊り下げ形状が異なってくる。

このように、設計段階で様々な要因を考慮した上で、ケーブルの最適な吊り構造実現を目的に、制御ケーブルの形状解析モデルを構築した。

本稿では、モデルの概要、及び試験と解析の比較結果について述べる。

2. 解析モデル

2.1 モデル概要

ここでは、長方形断面の制御ケーブルについて検討し、短軸方向の揺れが支配的な二次元平面内でのケーブルの変形・振動を考える。二次元平面での制御ケーブルモデルとしては、ケーブルを多リンクで構成し、曲げ剛性を回転バネでモデル化した手法が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。

本稿では、ケーブルを多質点のバネ・マスモデルとし、ケーブル軸方向の変形も考慮する。二次元モデルの概略を図1に示す。ケーブルを分割した多質点($i = 1, \dots, N+1$)には、上下・水平の2方向並進変位(x, y)を自由度として与える。また、各質点間はバネ(k)で動きを拘束される。

2.2 一般化力の導出

分割した各質点には、次の3つの一般化力が作用する。

- (1) 隣接する質点*i*と*i+1*の間で発生する張力で、長手方向に生じるケーブルの伸びを抑制($\tilde{F}_{i,i+1}$)
- (2) 重力によって生じる鉛直下向きの力で、ケーブル位置によらず一定(F_i)
- (3) 隣接する質点の幾何(きか)形状で決まるケーブルの曲

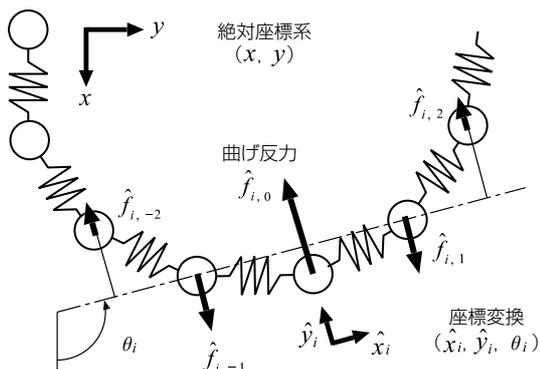


図1. 二次元の制御ケーブルモデル

率に対して発生する曲げ反力($f_{i,j}$)

分割したケーブル長さを Δx とすると、張力 $\tilde{F}_{i,i+1}$ は次式で与えられる。

$$\tilde{F}_{i,i+1} = k \left\{ \sqrt{(x_{i+1} + \Delta x - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} - \Delta x \right\} \quad \dots\dots(1)$$

また、質点*i*に作用する重力は次式となる。

$$F_i = m_i g \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 m_i は質点*i*の質量、 g は重力加速度を表す。

単位長さあたりの曲げ反力は、微小変位を仮定した4階微分の式で与えられる。

$$f = -EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad \dots\dots(3)$$

しかしながら、ケーブルの下端における吊り下げ形状を微小変形として扱うことができない。そこで、質点ごとに前後質点位置を結ぶ直線を基準線とし、この基準線に対する変位を微小変位と考え、式(3)を適用する。

図1に示すように、質点*i*に対して θ_i 回転した局所座標系(\hat{x}_i, \hat{y}_i)を定義し、この局所座標系での曲げ反力 $\hat{f}_{i,0}$ を差分方程式を用いて表すと次式を得る。

$$\hat{f}_{i,0} \approx -EI \frac{\hat{y}_{i+2} - 4\hat{y}_{i+1} + 6\hat{y}_i - 4\hat{y}_{i-1} + \hat{y}_{i-2}}{\Delta x^3} \quad \dots\dots(4)$$

回転による座標変換を伴わない差分方程式での評価は、式(4)のみを考慮すれば良いが、回転した局所座標系内では、曲げ反力を内力として釣り合わせる必要がある。そこで、差分に用いた前後合計5点の質点に対し、図1で示すように力を分配する。ここで、 $\hat{f}_{i,-2}, \hat{f}_{i,-1}, \dots, \hat{f}_{i,2}$ は、内力の条件から次式を満たす。

$$\sum_{j=-2}^2 \hat{f}_{i,j} = 0 \quad \dots\dots(5)$$

局所座標系で導出した曲げ反力 $\hat{f}_{i,j}$ ($j = -2, 1, \dots, 2$)は、角度 θ_i で元の座標系に再変換されて、各質点の x, y 方向に一般化力として与えられる。このときの力を $f_{i,j}^x, f_{i,j}^y$ と定義する。また、張力 $\tilde{F}_{i,i+1}$ の x, y 方向分力を $\tilde{F}_{i,i+1}^x, \tilde{F}_{i,i+1}^y$ とする。

2.3 運動方程式

質点*i*の慣性力と前節の一般化力が釣り合うことから、質点*i*に対する運動方程式が次式で与えられる。

$$m_i \ddot{x}_i = \tilde{F}_{i,i+1}^x - \tilde{F}_{i-1,i}^x + \sum_{j=-2}^2 f_{i+j,-j}^x + F_i \quad \dots\dots(6)$$

$$m_i \ddot{y}_i = \tilde{F}_{i,i+1}^y - \tilde{F}_{i-1,i}^y + \sum_{j=-2}^2 f_{i+j,-j}^y \quad \dots\dots(7)$$

各質点の運動は x_i, y_i の2自由度の運動方程式(6), (7)で記述される。なお、ケーブル分割長さ Δx は、曲げ剛性の影響を正確に評価できるように10cmを基準とした。

3. ケーブルの温度特性評価

3.1 温度変化の評価式

運動方程式(6), (7)中の曲げ反力は温度の影響が大きいため、試験による同定が必要である。今回の計算モデルでは、実測結果を基に、曲げ反力のパラメータであるヤング率 E を温度 T の関数として与える。ヤング率 $E(T)$ は、温度の上限及び下限で、ある一定値に近づくような式(8)に示すシグモイド曲線であると仮定する。

$$E(T) = \frac{c + d \exp(aT + b)}{1 + \exp(aT + b)} \quad (a > 0) \dots\dots\dots(8)$$

3.2 試験片によるたわみ測定

試験に用いたケーブルの仕様と試験条件を表1に示す。試験は、ケーブルを片持ち支持条件で恒温槽に設置し、自重によるケーブル先端の鉛直変位を測定した。

試験で得られたケーブルたわみ量の温度変化から、式(8)の未知変数 a, b, c, d を同定し、試験と同一の条件での解析と試験結果を比較すると図2を得る。ケーブル先端のたわみ量はおおむね一致しており、温度変化の影響を正しく評価できていることを確認できた。

3.3 自由曲げ径の評価

次に、両端を支持したケーブルを恒温槽に設置し、吊り点部の傾きが鉛直となる最適吊り間隔(自由曲げ径)を実測で求め、解析結果と比較する。試験条件を表2に、解析結果のケーブル形状と実測結果との比較を図3に示す。温度が下がると若干のずれが見られるものの、ケーブル厚さ(20mm)程度の違いであり、評価として問題ないレベルで計算ができている。

表1. ケーブルの仕様と試験条件

断面	107×20 (mm)
線密度	3.74kg/m
ケーブル長さ	300mm
温度(℃)	-5, 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40

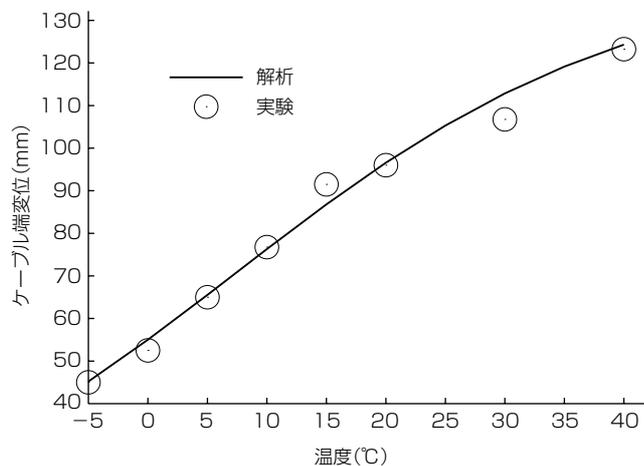


図2. 温度変化によるたわみ量の比較

4. 吊り下げ試験による評価

この章ではケーブル長さを実機に近い状態まで長くして、吊り点間隔を変えることによって、ケーブル下端の変形状態を正確に再現できているかどうかを検証する。吊り下げ試験の測定条件を表3に示す。

表3で示す3パターンの吊り点間隔に対し、解析と実測を比較した結果を図4に示す。点で示す実測結果に対し、曲線で示す解析結果はよく一致していることを確認できた。

表2. 試験条件

吊り点からの測定高さ	0.7m
ケーブル下端までの高さ	1.7m
温度(℃)	-5, 10, 20, 40

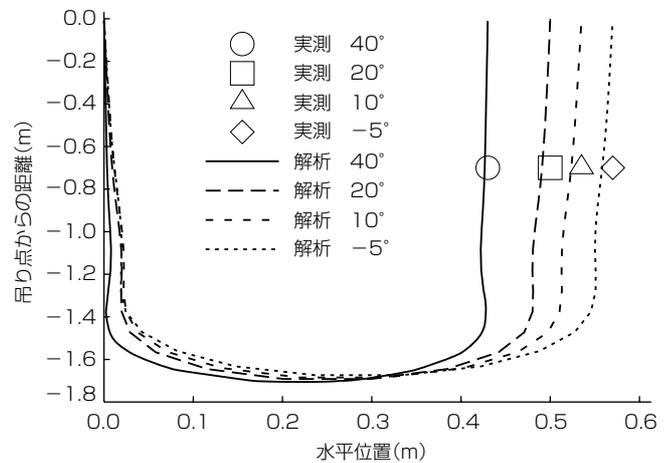


図3. 自由曲げ径の比較

表3. 試験条件

ケーブル長さ	20m
温度	23℃
吊り点間隔	1,000, 895, 800 (mm)
吊り点高さ	下端から1.5mと18m

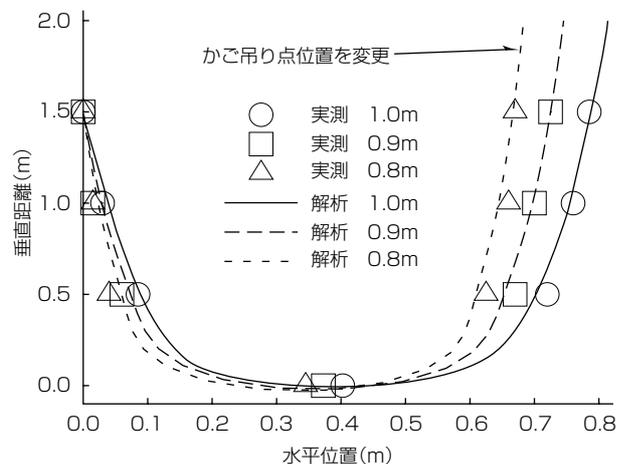


図4. 実機相当長さでの形状比較

表 4. 試験条件

温度	12℃
走行距離	最下階から64m
速度	360m/min
ケーブル長さ	81.5m

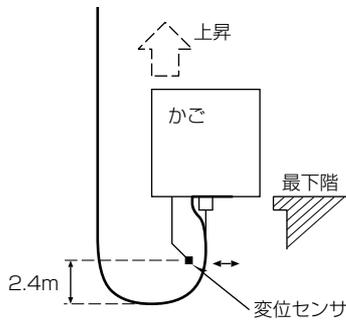


図 5. 変位センサ設置位置

5. 走行時の振動評価

5.1 試験条件

実機に設置した制御ケーブルに対し、走行時におけるかご下近傍のケーブル水平変位を測定し、解析結果と比較する。測定条件を表 4 に、測定位置を図 5 に示す。

5.2 解析結果との比較

走行試験と解析結果の比較を図 6 に示す。ケーブルの水平変位は昇降路から離れるかご側方向を正とする。図 6 から、解析はほぼ実測と対応していることがわかる。なお、走行開始直後の 3 秒付近で、ケーブル下端が、一旦(いったん)、かご側に引き寄せられる振動が実測で観測されており、この現象も解析で再現できている(図 7)。

6. むすび

二次元平面内で運動する制御ケーブルの形状解析モデルを構築し、ヤング率を温度の関数とすることによって、温度変化に対するケーブル吊り下げ形状の違いが正確に模擬できることを確認した。また、導出したケーブルモデルを用いて走行試験と比較した結果、ケーブル振動についても定量評価が可能であることを確認した。

このように、このモデルを用いることによって、制御ケーブルの変形状を様々な条件下で評価可能となったため、

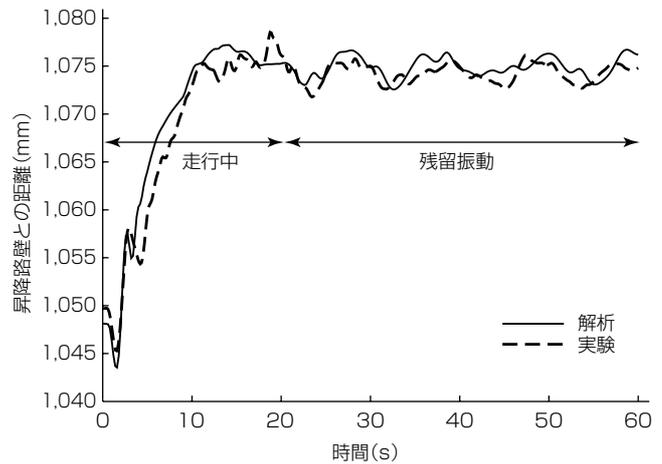


図 6. ケーブルの水平変位

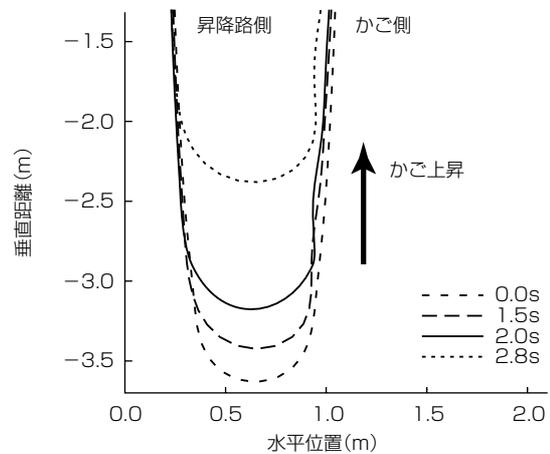


図 7. ケーブル下端の走行開始挙動

かごと制御ケーブルのすき間管理など、ケーブルの最適な吊り構造を開発段階で事前評価することができる。

参考文献

- (1) 増田隆広, ほか: エレベータ用移動ケーブルの運動シミュレーション, 日本機械学会論文集C編, 60, No.579, 3808~3815 (1994)
- (2) 鎌田崇義, ほか: マルチボディ・ダイナミクスによるエレベータ用テールコードの挙動解析-粘弾性モデルによるパラメータの同定-, 日本機械学会“昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩”技術講演会論文集, No.08-75, 43~46 (2009)