

エレベータロープ振れの計算手法と共振時の応答倍率評価 Numerical Calculation Method of Elevator Rope Sway and Investigation of Displacement Magnitude under Resonance Condition

昇降機システムの安全・安心問題研究会*¹ (主査 藤田 聡 (東京電機大学))
Panel of Elevator Safety and Reassurance*¹

*¹ 日本機械学会 昇降機・遊戯施設技術委員会 JSME Technical Committee of Elevator and Amusement Facility

Several modelings of the elevator rope sway have been proposed by elevator makers. However, the modelings rely on elevator makers' specific information. Therefore a generalized rope sway model has been required especially for the seismic operation against long-period ground motions or the strong wind operation. In this paper, a difference equation against the wave propagation equation of the string vibration is applied for the resonance evaluation of the elevator suspension rope. By the simulation results, it is concluded that the resonance behavior is not linear but affected by the car vertical motion induced by the rope sway. As the resonance behavior of the rope sway is influenced by several physical parameters, the effect of the rope length is evaluated as a first step.

Key words : Elevator, Rope sway, String vibration, Nonlinear vibration, Resonance

1. 緒 言

日本機械学会交通・物流部門の下部組織である昇降機・遊戯施設技術委員会では、昇降機技術に関する問題の調査・分析を目的に、2011年度に立ち上げた「昇降機システムの安全・安心問題研究会」において継続的な活動を行っている。2015年度からは、産学連携の交流強化を図ることを目的の一つとして、研究会において「エレベータロープ振れ計算ワーキンググループ(WG)」を立ち上げた。本WGでは、ロープ振れに対する計算評価手法を検討テーマとして、昇降機メーカー、大学から10名程度のメンバーが参加して、意見交換を実施してきた。ロープ振れに着目してWGを立ち上げた理由は、以下のとおりである。

1. 建物の高層化に伴い、エレベータロープの長尺化が顕在化してきている。
2. 高層ビルが強風や長周期地震動を受けて、建物に低周波の持続振動が発生した場合に、エレベータロープの横揺れに対する共振現象が、社会的にも注目されている。
3. 各社が独自のエレベータロープ振れ評価を実施しているものの、社会的に客観性のある評価手法が提案されていない。

そこで、WG内では、以下に示す技術内容について討議を重ねてきた。

1. 公知文献を元にした、昇降機メーカー各社で評価しているロープ振れの技術紹介
2. メーカー独自手法によらない、客観的な計算手法の検討
3. 大学側からの、ロープ振れ評価の統一的な計算手法の提案、および手法の確立

このように、ロープ振れに対する一般的な計算手法を確立することができれば、建物高さに応じて、長周期管制運転におけるセンサ設定を汎用的に指定可能になると考えられる。さらに、一般的な計算手法を簡単な数式や

閾値として明示できるようになれば、長周期管制運転の設計検討を楽に実現できるようになる。

本報告では、エレベータの主ロープを対象として、ロープ振れを計算するための手法について説明するとともに、建物の固有周期とロープ振れの固有振動数が一致する場合の共振応答特性について、数値解析を実施した結果について示す。なお今回の計算では、かごの上下振動による張力変動を考慮した共振特性について検討しており、張力変動によりロープ振れの応答倍率が非線形特性を示すことを、数値計算で明らかにする。さらに、ロープ振れに関連するパラメータであるロープ長さ、線密度、張力、減衰比などの内、建物高さの違いとして影響してくるロープ長さを変更した場合の、最大応答倍率や共振周波数などの共振特性について分析した結果を示す。

2. ロープ振れのモデル化

ロープ振れに関しては、昇降機メーカーによる加振試験評価が多数実施されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また、エレベータロープの振れ評価手法に関しては、公知文献の内容から、主に4つの手法が提案されている。

1. ロープを弦振動の波動方程式で構成し、時間と空間の差分方程式で演算^{(3),(4)}
2. ロープを多質点のバネマスモデル(マルチボディダイナミクス)で構成し、運動方程式を数値積分^{(2),(5),(6)}
3. ロープを1自由度(1-DOF)のバネマス系で近似し、2階の微分方程式を解析演算あるいは数値積分⁽⁵⁾
4. ロープを梁要素あるいはリンク要素の有限要素(FE)モデルで作成し、時刻歴応答解析を実施

FEモデルによる解析はFEMアプリケーションに依存し、汎用性に乏しいことから、ここでは、上記1から3の手法について比較分析する(表1)。

Table 1 Comparison of each calculation method

	Difference equation		Multi-body dynamics		1-DOF model	
Accuracy	Good	○	Good and advantageous to include other physical conditions	◎	Not good, dependent to modal analysis, and difficult to evaluate car motion	×
Complexity	Easy to make, hard to evaluate distributed tension or car motion	○	Difficult to make	×	Easy, required to set equivalent mass and equivalent spring	○
Generality	Difficult to use, required specific knowledge	×	Difficult to use, required specific knowledge	×	Easy and available to analytic solution	◎
Parameter	Easy to determine	◎	Not easy, required calculation of spring and damper	×	Not easy, required calculation of eigen frequency and damping ratio	×

表1の比較結果より、最も扱いが容易で解析の精度が高いと考えられる差分方程式の手法を用いて、ロープ振れをモデル化する。まず、図1のモデルを用いて、ロープ弦振動に対する波動方程式を次式で与える。

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + C \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial z} \left(T(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\rho A, C, T(z)$ は、ロープの線密度、減衰係数、ロープ張力を表す。

u は、時間 t と空間座標 z の関数であるため、以下のとおり時間と空間に対する差分方程式を導入し、ロープ振れ $u(z, t)$ を評価する。

$$\left(1 + \frac{C\Delta t}{2\rho A} \right) u_{j+1}^i = 2 \left(1 - \frac{\Delta t^2 T(z)}{\Delta z^2 \rho A} \right) u_j^i + \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} \left(\frac{T(z)}{\rho A} - g \frac{\Delta z}{2} \right) u_{j+1}^{i+1} + \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} \left(\frac{T(z)}{\rho A} + g \frac{\Delta z}{2} \right) u_j^{i-1} + \left(-1 + \frac{C\Delta t}{2\rho A} \right) u_{j-1}^i \quad (2)$$

ここで、 $\Delta t, \Delta z, i, j$ は、時間刻み、ロープ分割長さ、空間座標と時間座標の離散番号を表す。

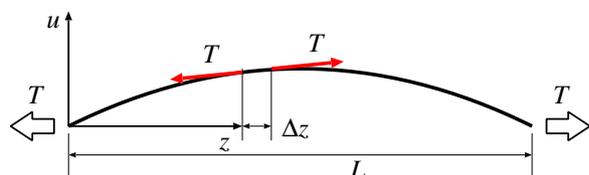


Fig. 1 Rope string vibration model

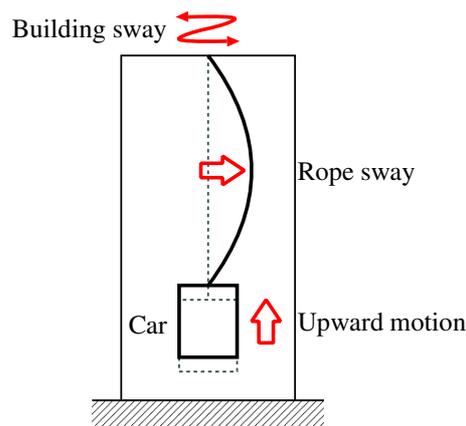


Fig. 2 Rope sway and car's vertical motion

既存の公知文献で得られているロープ振れの実験に基づく共振特性の中には、線形の応答特性とは異なり、共振周波数が振幅に応じて変化する非線形振動特性となる場合がある。そこで、図2で示すように、かごの上下振動がロープの張力変動に影響を与えると考えて、ロープ振れの波動方程式に、かご上下振動による張力変動を考慮する。

このとき、かごの上下変位量は、ロープの水平変位により持ち上げられるかご上昇量から求めている。この上下変位量による加速度運動が、かごの慣性質量に作用することで、張力変動を求めることができる。なお、実際には、かごに対してガイド支持部での摩擦力が発生するものの、本解析検討では、摩擦力を無視した評価を行う。また、かごとロープの間には、バネやダンパーなどの綱止め要素を考慮せず、直接拘束されるモデルとしている。

3. 数値計算結果

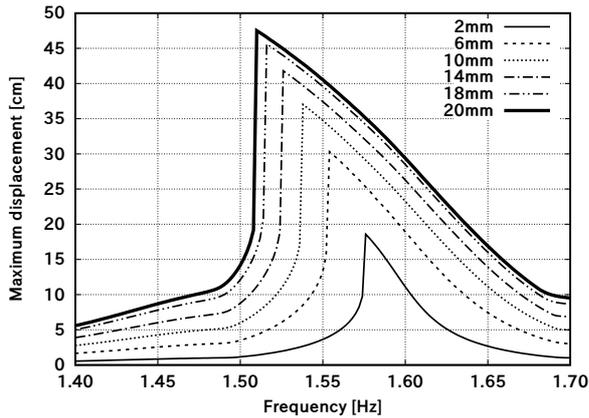
以下では、表2で示す条件で、建物上部(ロープ上端)に正弦波の強制変位加振入力(y_b)を与えた場合の数値計算結果を示す。なお、ロープ下端位置(かご位置)では、水平方向の変位を与えずに拘束している。また、計算ではロープ1本での評価を実施している。

Table 2 Simulation parameters

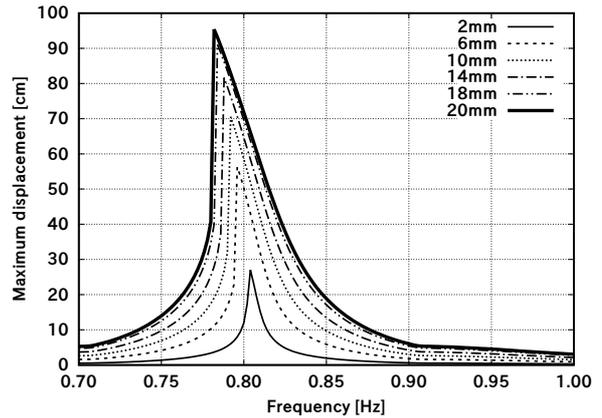
Enforced input	y_b	[mm]	2 ~ 20
Rope length	L	[m]	20, 40, 60, 80
Rope linear density	ρA	[kg/m]	0.494
Car weight	M	[kg]	200
Damping ratio	ζ	[%]	0.2

ロープ振れの共振時における振幅の応答倍率を評価するためには、ロープ振れに対する減衰比を適切に設定する必要がある。ロープ振れの減衰比はロープ振幅や張力に依存することが実験的に知られており、一定の値を設定することは困難であるが、ここでは既存の公知文献情報⁽³⁾を参考に、 $\zeta = 0.2\%$ として計算を実施する。

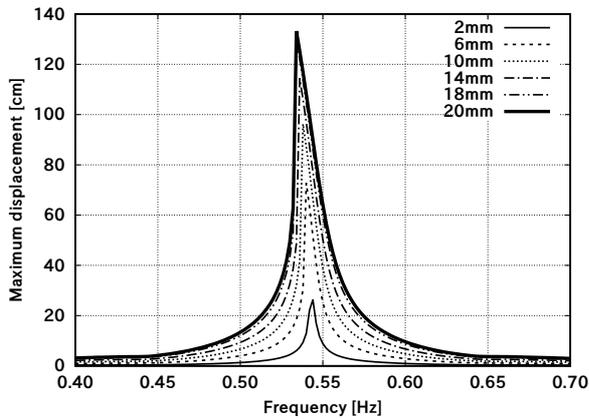
ロープ長さに関して、 $L = 20, 40, 60, 80\text{m}$ の4パターンで計算した結果を図3に示す。各グラフでは、ロープ共振周波数前後の周波数範囲(0.3Hz)で建物強制変位加振の加振周波数を変えて、その時のロープ振れ最大値を表示している。また、建物の強制変位加振振幅は $y_b = 2 \sim 20\text{mm}$ の範囲で6パターンの計算を行っている。なお、ロープ長 $L = 60, 80\text{m}$ の2ケースについては、建物強制変位加振振幅を $y_b = 200\text{mm}$ にした場合の結果について、図3の(c-2),(d-2)として追記している。



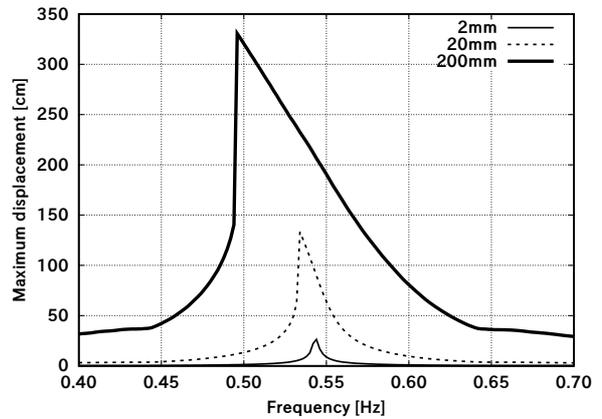
(a) $L = 20\text{m}$



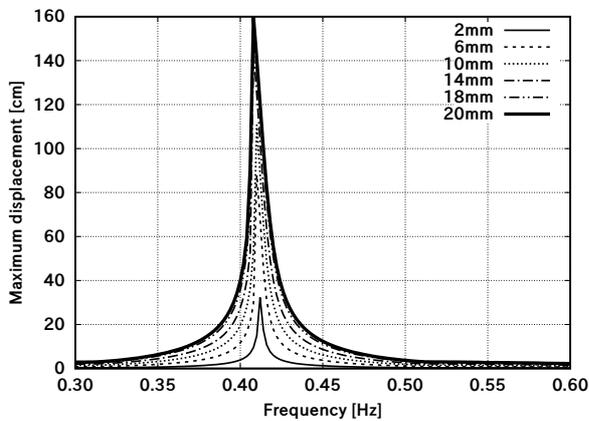
(b) $L = 40\text{m}$



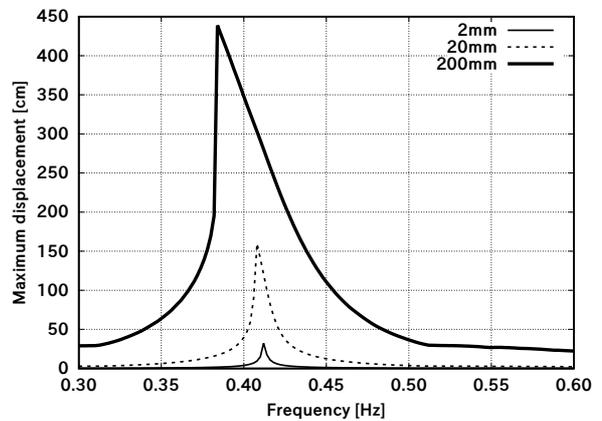
(c-1) $L = 60\text{m}$



(c-2) $L = 60\text{m}$, including $y_b = 200\text{mm}$ condition



(d-1) $L = 80\text{m}$



(d-2) $L = 80\text{m}$, including $y_b = 200\text{mm}$ condition

Fig. 3 Influence of rope length and building enforced motion

ロープ長が長い条件である図 3(d-1) を見ると、線形振動応答に近い特性を示していることがわかる。すなわち、共振周波数付近で大きなロープ振れが発生しており、加振振幅を変えても最大ロープ振れの発生する周波数は、ほとんど変化していない。しかしながら、建物加振振幅をより大きくした場合の図 3(d-2) を見ると、最大ロープ振れの発生する周波数が低周波側に移動していることがわかる。同様の傾向は、ロープ長さ $L = 60\text{m}$ の結果である図 3(c-1),(c-2) でも確認できる。

これより、ロープ上端に与える建物強制加振の入力が小さい場合は、線形応答特性を示すものの、強制変位加振の入力値が大きくなるにつれて、共振周波数が低周波側に移動するソフトニング特性(非線形応答)を示すことがわかる。なお、図 2 で示すかごの上下振動を考慮しない(すなわち張力変動を考慮しない)モデルの場合、建物強

制加振入力を変えても線形応答特性を示すことは確認済みである。そのため、この非線形応答特性は、かごの上下変動に伴う張力変動に起因していると言える。このような非線形応答特性は、実際のロープ振れ挙動でも確認されており、かごの上下振動を考慮した本解析モデルの妥当性を裏付けている。

次に、ロープ長さが短い $L = 20, 40\text{m}$ の結果である図 3(a),(b)を確認すると、加振入力が小さい段階から非線形応答を示していることがわかる。そのため、ロープ長さと建物強制変位加振との間には、何らかの関係があると考えられる。そこで、ロープ長さ (L) に対する建物強制変位加振 (y_b) の比 (y_b/L) を横軸にして、ロープ振れの応答倍率と最大ピーク発生の周波数変化を整理すると図 4, 図 5 を得る。

図 4 の縦軸は、図 3 で得られたロープ振れの最大値 (u_{max}) を、建物強制変位加振入力の等価換算値 (\bar{y}_b) で割った値 (u_{max}/\bar{y}_b) で無次元化した値であり、ロープ振れの振動応答倍率を示している。なお、 \bar{y}_b については、ロープ上端の加振入力 y_b とロープ下端入力 0 の条件から、平均値として求めている。

$$\bar{y}_b = \frac{y_b + 0}{2} = y_b/2 \quad (3)$$

また、グラフの右軸には、振動応答倍率から逆算したロープの等価減衰比 $\bar{\zeta}$ を示している。

$$\frac{u_{max}}{\bar{y}_b} = \frac{1}{2\bar{\zeta}} \quad \rightarrow \quad \bar{\zeta} = \frac{\bar{y}_b}{2u_{max}} \quad (4)$$

対数表記した図 4 を見ると、ロープ長が短い場合の結果にばらつきがあるものの、無次元化したロープ加振入力に対して、1本の直線に集約される傾向が見られる。また、ロープ加振入力が小さくなると、線形応答倍率である $1/(2\bar{\zeta}) = 250$ に漸近していることが確認できる(図 4 の太点線)。すなわち、加振入力が小さい条件(ロープ長に対して建物変位が十分小さい条件)では、線形応答特性と見なせると結論付けられる。一方、加振入力が大きくなると、応答倍率が低下していき、見かけ上の減衰比(等価減衰比)が大きくなることわかる。

次に、最大振幅が生じる共振周波数の変化を図 5 で考察する。図 5 では、縦軸を無次元化するために、表 3 で示す各ロープ長さでの固有振動数で割り算をしている。図 4 と同様に、計算値にばらつきが存在するものの、概ね 1本の曲線に集約される傾向が得られている。

このように、建物加振入力をロープ長さで割った無次元入力を用いることで、線形系では変化することのないロープ振れの最大応答倍率、および共振周波数の変化を、ロープ長さの違いによらず求めることができる。

なお、図 4, 図 5 で得られたロープ長さ毎の数値ばらつきに対しては、共振点付近での最大加振振幅の取りこぼしの影響が考えられる。そこで、共振点付近で周波数を細かく変更した場合の追加計算を実施することで、ばらつきに別の要因が内在していないか確認する必要がある。

Table 3 Natural frequency of rope sway

Rope length L [m]	20	40	60	80
Natural frequency f [Hz]	1.59	0.81	0.54	0.41

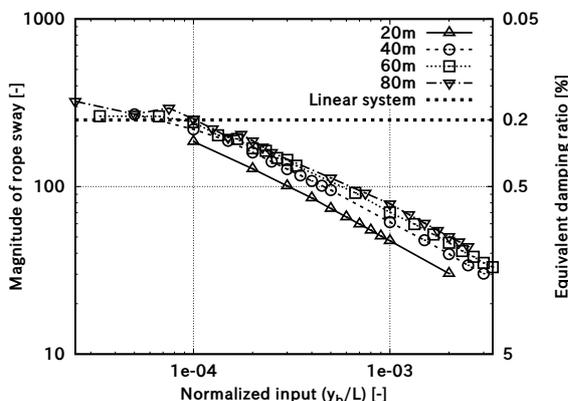


Fig. 4 Magnitude of rope sway against normalized input

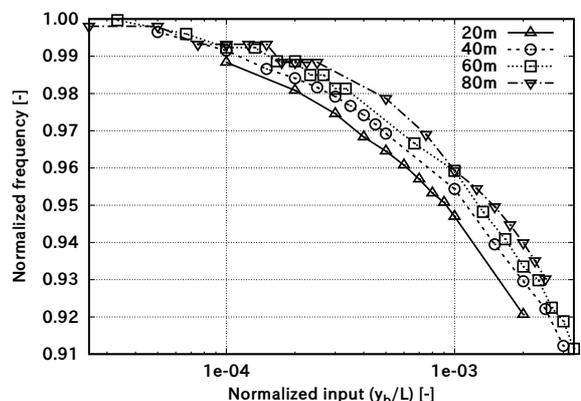


Fig. 5 Resonance frequency shift against normalized input

4. 結 言

本報告では、エレベータの主ロープを対象として、ロープ振れを計算するための手法について説明するとともに、建物の固有周期とロープ振れの固有振動数が一致する場合の共振応答特性について数値解析を実施した結果について示した。計算結果より、ロープ振れに伴うかごの上下振動によって、共振周波数の応答が加振入力増大とともに低周波側に移動することを明らかにした(ソフトニング特性)。

さらに、建物加振入力をロープ長さで割った無次元入力量を用いることで、ロープ振れの応答倍率と、共振周波数の変化がロープ長さによらず、ある特定の曲線で表現できることを確認できた。

今後は、今回計算評価ができなかった、ロープ線密度、かご質量、ロープ減衰比などのロープ振れに影響を与える別の因子に対する評価を、本計算モデルを用いて引き続き実施する。

なお、今回の数値解析結果は、東京電機大学の修士学生(玉城殿)による計算支援を受けており、ここに謝意を示す。

文 献

- (1) 奈良俊彦, 太田正寿, 重田政之, 和田忠之, "エレベーターの耐震性強化と実証試験", 日立評論, Vol.63 No.10 (1981), pp.679-684.
- (2) 金子元樹, 中川淳一, 新井晋治, "エレベーターロープの横振動モデルの実験検証", 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩講演論文集, (2003), pp.1-4.
- (3) 木村弘之, 飯島智樹, 松尾繁憲, 藤田善昭, "エレベーター・ロープの横振動解析(実験結果と解析結果の比較)", 日本機械学会論文集(C編), Vol.74 No.737 (2008), pp.31-36.
- (4) 志村勇太, 藤田聡, 皆川佳祐, "昇降機ロープの振動挙動解析に関する研究", Dynamics and Design Conference 講演論文集, (2015), 318.
- (5) 中山徹也, 宮田弘市, 中村秀広, 関谷裕二, 重田政之, "長周期地震時のエレベーター長尺物振れの実時間予測", 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩講演論文集, (2007), pp.19-22.
- (6) 渡辺誠治, 西田隆雄, 山根尚志, "長周期地震動におけるエレベーターロープの挙動解析", 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩講演論文集, (2007), pp.15-18.