

2021年12月20日

昇降機システムの安全・安心問題研究会 エレベータロープ振れ計算WG 活動の記録

1 期間

2015年10月27日～2021年12月20日

2 メンバー

参加者一覧(順不同, WG出席者を全員記載)

埼玉工業大学	皆川佳祐
東京電機大学	玉城涼子
日立	安部貴, 関谷裕二, 渡辺友康
東芝	田中和宏, 小川要一, 志岐知洋
オーチス	小野田立志, 清本公二, 井澤和彦
フジテック	原田守, 植田和昌
三菱	渡辺誠治, 中澤大輔
シンドラ	四之宮正典

3 背景

建物の高層化に伴うロープの長尺化が顕在化し, 強風や長周期地震動によるロープ横揺れの共振現象が社会的に注目されている. 各社でロープ振れ評価は実施されているが, 社会的に客観性がある手法は提案されていない.

4 目的

メーカー独自手法に拠らない客観的なロープ振れの計算手法を確立する.

5 関連講演論文および要旨

5.1 論文①

題名 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

著者 昇降機システムの安全・安心問題研究会

出典 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩講演論文集, (2020.01.24), pp37-42

要旨 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

入力の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.

5.2 論文②

題名 エレベーターロープの縦横連成振動メカニズム

著者 渡辺誠治

出典 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩講演論文集, (2020.01.24), pp43-48

要旨 本論文では, ロープの横振動・縦振動それぞれに対する等価1自由度振動方程式の定式化について述べた. 導出した式は, ロープの質量を考慮した等価張力, 等価質量で構成され, 2つの振動方程式は互いに状態変数が連成する非線形振動特性を示すことを明らかにした. また, 横振動と縦振動の固有振動数の関係から, 以下の事象を明らかにすることができた.

1. 縦振動の固有振動数が横振動固有振動数の2倍よりも十分低い場合(ロープの剛性が十分低い場合), 横振動の共振特性は線形特性に近づき, 最大ピークが増大する.
2. 縦振動の固有振動数が横振動固有振動数の2倍よりも低い場合, 横振動の共振特性は共振周波数が高周波側に移動するハードニング特性を示す.
3. 縦振動の固有振動数が横振動固有振動数の2倍よりも高い場合, 横振動の共振特性は共振周波数が低周波側に移動するソフトニング特性を示す.

5.3 論文③

題名 1自由度エレベーターモデルによるロープ横振動の評価

著者 渡辺誠治

出典 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩講演論文集, (2020.11.09), オンライン

要旨 本報告では, エレベーターの主ロープを対象として, 1自由度振動モデルと差分方程式の比較を行うとともに, ロープ振れに影響するパラメータを適切に設定することで, 共振倍率を整理した. 計算結果より, 縦振動の影響による差異があるものの, 1自由度振動モデルと差分方程式は概ね同様の共振倍率特性を示すことが明らかとなった. また, ロープ長さ, かご質量, ロープ線密度を変えた場合の共振倍率を評価する手法について提案し, 各変数条件に対して一つの曲線で共振応答倍率が表現できることを示した.

5.4 論文④

題名 1自由度エレベーターモデルによるロープ横振動の共振曲線

著者 渡辺誠治

出典 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩講演論文集, (2021.12.02), オンライン

要旨 論文②③では、共振周波数前後におけるロープ横振動の定常値を数値積分により求めることで、共振曲線を導出している。この方法では、共振曲線の導出にシミュレーションによる計算が毎回必要となり、汎用性に欠ける検討内容となっている。本報告では、エレベータの主ロープを対象として、縦横連成振動を考慮した1自由度振動モデルに対する共振曲線を解析的に導出した結果について示した。解析手法として、陰関数を用いて数値的に解を求める方法と、2次方程式に近似して解析解を求める方法を提案し、どちらも数値積分のシミュレーションとして得られた共振曲線の結果とほぼ対応することを確認できた。さらに、得られた解析解を元に、増幅率(共振倍率)を無次元化する方法を求め、ロープ長さ、かご質量、ロープ線密度、ヤング率など、ロープ仕様によらず、一律に評価できる無次元化の入力量を導出し、得られた無次元化入力により、増幅率が一つの曲線として与えられることを確認した。

6 具体的成果

6.1 ロープ振れモデル化の比較検討【参照論文①③】

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
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
3. ロープを1自由度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
4. ロープを梁要素あるいはリンク要素の有限要素モデルで作成し、時刻歴応答解析を実施

上記4タイプの手法を比較検討し、比較的扱いが容易な差分方程式と1自由度モデルの2タイプの手法を、本WGでは扱うことにした。

なお、両手法によるロープ振れの計算結果の比較については6.4項に示す。

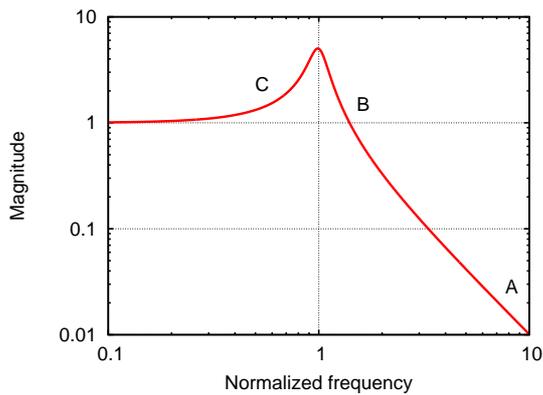
6.2 1自由度縦横連成モデル【参照論文②】

ロープの横振動・縦振動それぞれに対する等価1自由度振動方程式の定式化により、下記知見を得た(図1参照)。

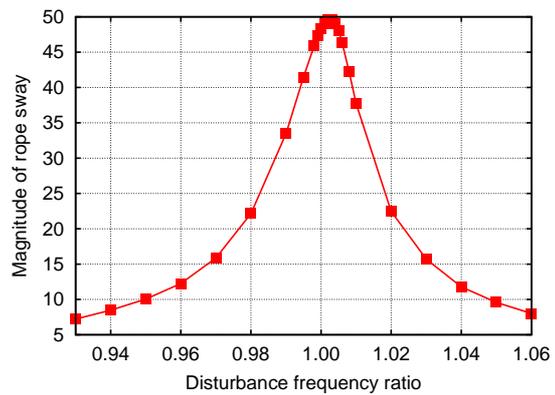
(Case A) 縦振動の固有振動数が横振動固有振動数の2倍よりも十分低い場合(ロープの剛性が十分低い場合)、横振動の共振特性は線形特性に近づき、最大ピークが増大する。

(Case B) 縦振動の固有振動数が横振動固有振動数の2倍よりも低い場合、横振動の共振特性は共振周波数が高周波側に移動するハードニング特性を示す。

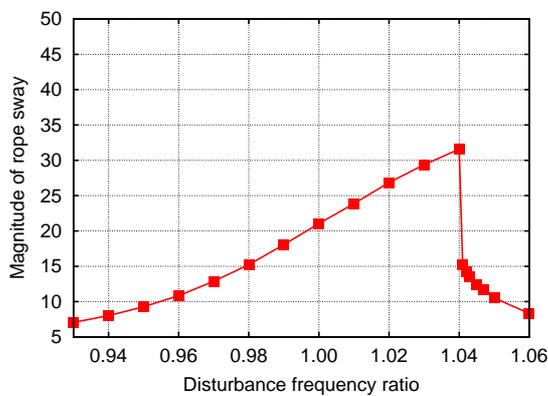
(Case C) 縦振動の固有振動数が横振動固有振動数の2倍よりも高い場合、横振動の共振特性は共振周波数が低周波側に移動するソフトニング特性を示す。



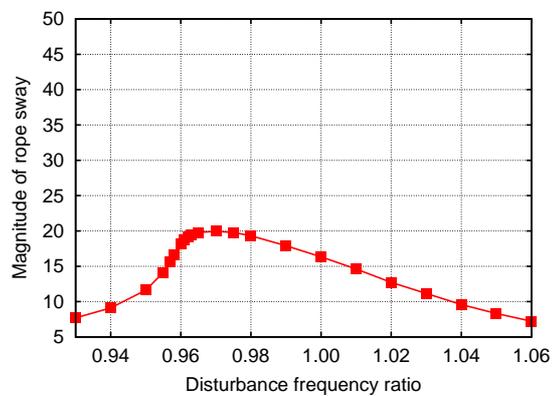
Frequency response of vertical vibration



Quite low stiffness condition (Case A)



Low stiffness condition (Case B)



High stiffness condition (Case C)

図1 縦振動の固有振動数が横振動の共振特性に与える影響

6.3 減衰比の設定【参照論文①③】

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、本WGでは既存の公知文献情報を参考に、減衰比 $\zeta = 0.2\%$ として計算を実施した。

6.4 差分方程式と1自由度モデルの比較検証【参照論文①③】

図2の左図に差分方程式、右図に1自由度モデルの計算結果を示す。

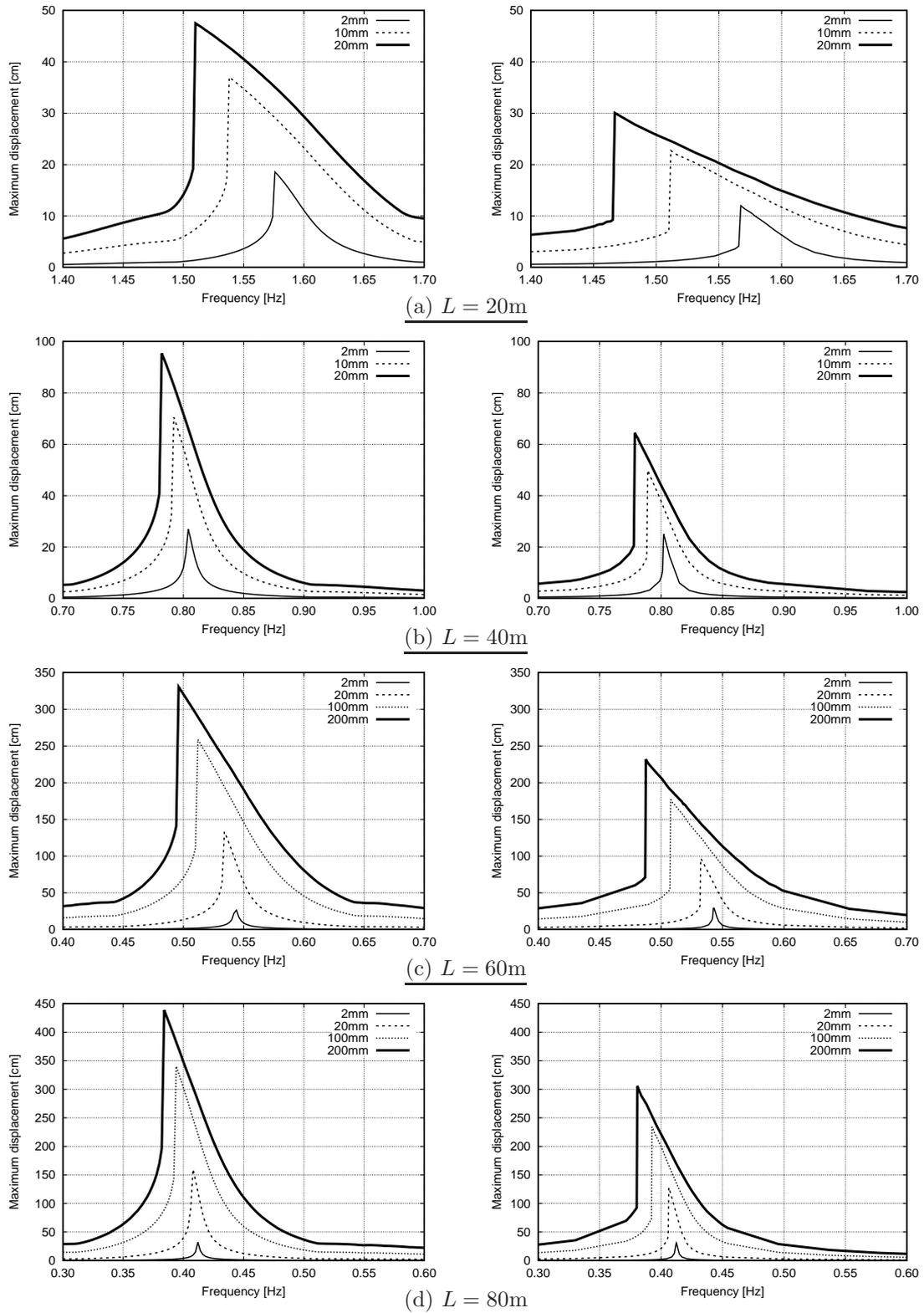


図2 ロープ長さや建物加振入力に与える影響(左図: 差分方程式, 右図: 1自由度モデル)

建物入力が微小な線形応答に近い状態では、差分方程式と1自由度モデルの結果は一致する。一方、建物入力が大きくなり、共振周波数が低周波側にずれていく非線形効果が生じる場合、1自由度モデルでは、最大ピークが小さめになる結果が得られる。この理由として、以下が考えられる。

1. 縦振動の動特性を考慮した1自由度モデルでは、横振動による幾何学的なかごの持ち上がり量以上に、かご振動が発生している。そのため、差分方程式よりも大きな縦振動によって、張力が緩みやすくなることで、共振点の傾きがより急激となる。これにより応答倍率が低下している。
2. 縦振動に減衰項を設けた1自由度の縦振動モデルでは、ロープ横振動に伴う縦振動で、横揺れを減衰させる効果となっている。そのため、設定した縦振動の減衰が、横振動の減衰比を等価的に増やすように作用している。
3. ロープ長が長くなると、ロープ全長に渡っての張力変化が大きくなり、ロープ振れの振動モードは最大振幅位置が中央から下側にずれる形状に変化する。これに対し、1自由度モデルでは、正弦波のモード形状を仮定していることから、差分方程式からのずれが発生していると考えられる。
4. 1自由度振動モデルは、微小変形を前提として導出した簡易モデルであるため、かご上下振動が大きくなる大変形での精度低下が想定される。

今後の課題 1自由度モデルの簡易化によるモデル化誤差が発生しているのとは別に、差分方程式による定式化では、かご縦振動の運動方程式が含まれていないため、この影響を把握しておかなければならない。より精度の高い検証として、実機試験や他の解析手法(多質点モデルや有限要素モデル)との比較が、今後の課題である。

6.5 1自由度モデルによる無次元化した共振倍率の評価【参照論文③】

以下に、ロープ長さ、かご質量、ロープ線密度を変えた場合の共振倍率を評価する手法について提案し、各変数条件に対して一つの曲線で共振応答倍率が表現できることを示した。

6.5.1 ロープ長さの影響

1自由度モデルの縦横連成の運動方程式から、建物振動に関する外力項 Y_b を表現すると、次式となる。

$$Y_b = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \hat{T} \frac{2}{\pi} y_b \frac{1}{\rho}, \quad \hat{T} = \left(M + \rho \frac{L}{2}\right) g \quad (1)$$

ここで、 M, L, ρ, g は、かご質量、ロープ長さ、ロープ綿密度、重力加速度である。

縦軸，横軸を下記で無次元化したロープ振れの共振応答倍率を図3に示す。

【縦軸】 ロープ振れの最大値 (y_{max}) を，建物強制変位加振入力 y_b の等価換算値 ($\bar{y}_b = \frac{2}{\pi} y_b$) で割った値 (y_{max}/\bar{y}_b) として無次元化

【横軸】 建物等価入力 (y_b/L^2)

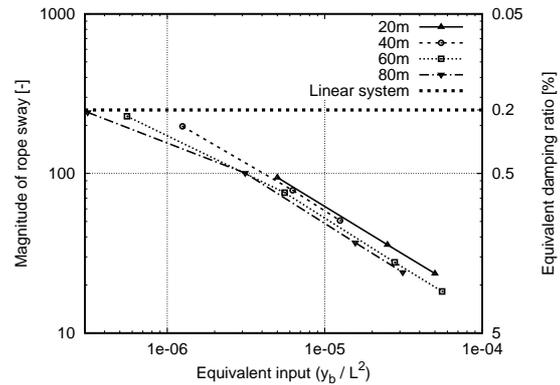


図3 ロープ長さの等価入力に対するロープ振れの共振応答倍率

6.5.2 かご質量の影響

(1) 式のかご質量を変えた場合の建物等価入力として， $\hat{T}y_b/g \approx My_b$ を用いて無次元化したロープ振れの共振応答倍率は図4となる。

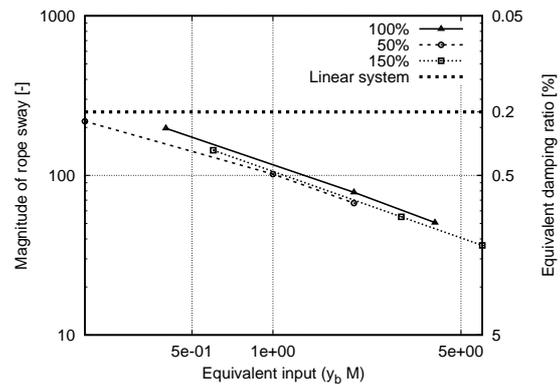


図4 かご質量の等価入力に対するロープ振れの共振応答倍率

6.5.3 ロープ線密度の影響

ロープ線密度を変えた場合の建物等価入力として， y_b/ρ を用いて無次元化したロープ振れの共振応答倍率は図5となる。

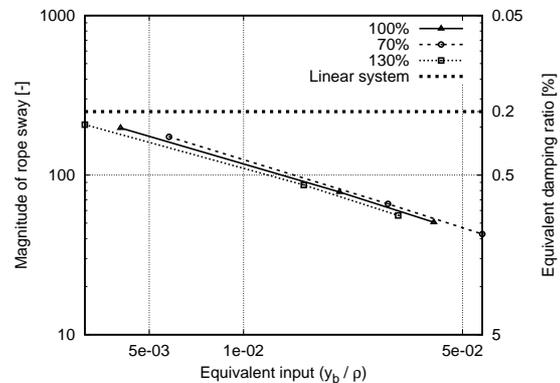


図5 ロープ線密度の等価入力に対するロープ振れの共振応答倍率

6.6 1自由度モデルによる共振曲線の解析解と無次元化【参照論文④】

シミュレーションすることなく応答倍率を簡便に導出することを目的に、入力として無次元パラメーター Q を定義する。

$$Q = \frac{1}{4} \left(\frac{kD}{\hat{T}} \right) \left(\frac{D}{L} \right) \frac{1}{1 - \{\omega_v / (2\omega_h)\}^2} \quad (2)$$

ここで、 k, D は、ロープの鉛直方向剛性、建物頂部の最大変位量、 ω_v, ω_h は縦振動の固有振動数、横振動の固有振動数を表す。

無次元パラメーター Q を用いて解析的に得られた共振曲線は、1自由度振動モデルによる計算結果と概ね対応するとともに、簡便に導出できることを確認した。

導出した無次元パラメーター Q を用いれば、エレベータの仕様によらず、統一的な検討を行うことができると考えられる。そこで、横軸を Q の絶対値(Q は負の値をもつ)、縦軸を増幅率の最大値 $\sqrt{\Gamma}$ として整理すると、図6を得る。

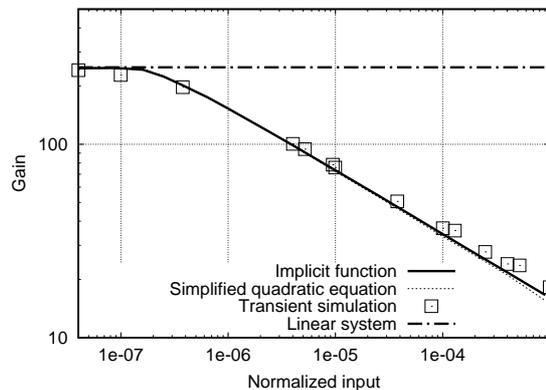


図6 無次元パラメーター Q に対する増幅率の最大値

論文③では、無次元化した結果に若干のばらつきが見られていたが、本手法で導出した無次元パラメーター Q を採用することで、種々のエレベータ仕様・建物の加振条件によらず、1つの曲線に集約できる。

7 関連資料

WG議事録および関連資料を添付する。

以上