

エレベーター調速機張り車の動挙動解析技術

福井孝太郎* 加藤雅樹**
渡辺誠治*
新川岳史**

Dynamic Analysis of Vertical Movement of Elevator Governor Tension Sheave

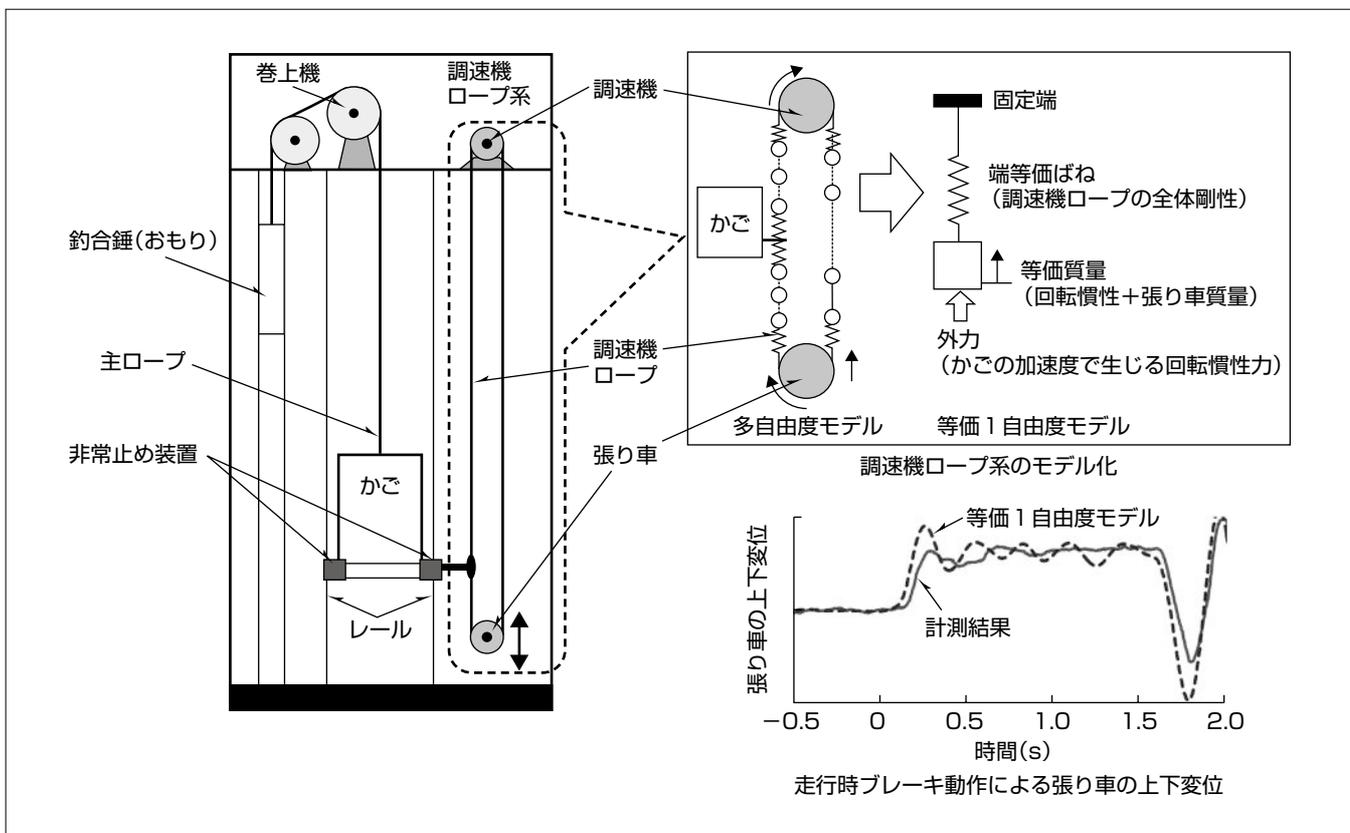
Kotaro Fukui, Seiji Watanabe, Takeshi Niikawa, Masaki Kato

要旨

エレベーターには、かごの異常速度を検出して非常止め装置を動作させる調速機が設置されている。調速機を駆動する調速機ロープは、昇降路下部に上下方向に非拘束に設置された滑車(張り車)によって張力が与えられている。張り車は動滑車のため、かごの走行中に回転とともに上下に変位して振動する。しかし、かご停止位置の違いで張り車の上下位置が変化することはなく、張り車の上下変位は、かごの速度変化によって生じる動的な現象と言える。この走行中の張り車の上下変位及び振動の発生メカニズムについては詳細な分析がされておらず、また、調速機、調速機ロープ、張り車からなる調速機ロープ系の各種パラメータと

上下振動との関係も明確化されていなかった。

そこで、まず調速機ロープを多質点とした解析モデルで動解析を行うことによって、かごの加減速中に張り車が上下に振動する振動モードを再現し、その存在を確認した。さらに、この振動モードに着目し、等価1自由度モデルを導出することで、かごの加減速中に生じる調速機ロープ系の回転慣性力が、張り車に外力として作用し、上下変位を引き起こすことを明らかにした。この等価1自由度モデルはエレベーターを用いた実機試験の結果とも整合しており、このモデルを活用することで動的効果を考慮した調速機ロープ系の最適設計を行うことができる。



エレベーター調速機の張り車上下変位に対する等価1自由度モデル化

エレベーターには、かごの異常速度を検出して非常止め装置を動作させる調速機が設置され、調速機を駆動するために調速機ロープが昇降路と並行に設置されている。調速機ロープに張力を与えるために昇降路下部に設置された張り車は、上下方向に拘束されておらず、かごの走行中に上下に振動する。この振動を評価するために、等価1自由度モデルを構築して現象を再現するとともに、各パラメータの振動への影響を明らかにした。

1. ま え が き

ロープ式エレベーターでは、かごと釣合錘(おもり)が主ロープでつるべ式につながれており、かごと釣合錘間の滑車を巻上機で回転させることでかごの昇降を実現している。さらに、エレベーターが過速状態になった場合でもかごを安全に停止させるために、エレベーターの速度を巻上機とは別に常時監視する調速機ロープ系が設けられている。調速機は昇降路上部又は、昇降路直上の機械室に設置されており、調速機ロープは調速機及び昇降路下部に設けられた張り車によってループ状に構成され、かごの動作に合わせてロープが移動し調速機が回転する構成となっている。ここで、張り車はロープに張力を与えロープの振動を抑える役割を持ち、調速機ロープが伸びた場合にも張力が保たれるように張り車の上下変位は非拘束となっている。

エレベーターの走行中に、張り車は回転とともに上下に振動する。この張り車の上下振動を含む調速機、調速機ロープ、張り車からなる調速機ロープ系の挙動評価については、従来用いられている振動モデル⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾の手法によって定量的に評価することが可能で、調速機ロープ系の設計に反映されている。しかし、張り車の振動発生メカニズムと調速機ロープ系を構成する各種パラメータとの相関などは、従来のモデルでは明確化されていなかった。そこで、本稿では、調速機ロープ系の振動評価を行う上で、特に重要となる張り車の上下振動に着目した等価1自由度振動モデルと、対応する運動方程式の導出結果について述べる。この運動方程式から、各種パラメータが張り車の上下振動に与える影響を明確化することができ、建物高さやかごの加減速の違いによる調速機ロープ系の振動状態を容易に推定することが可能となった。

2. 多自由度モデルによる張り車の上下変位評価

調速機ロープ系の挙動を再現するために、まず、ロープを集中質量とばねに分割した多自由度モデルを構築する。図1のようにかご側の調速機ロープのかご下側をロープa、かご上側をロープb、戻り側をロープcとし、それぞれを多質点でモデル化する。さらに、調速機の回転、張り車の回転、張り車の上下変位をそれぞれ x_1 、 x_2 、 x_3 (かご上昇方向及び張り車上昇方向を正とする)とし、かごの上下変位 x_4 を入力とする。

このモデルを用いて、かごが一定加速度で上昇する場合の張り車の上下変位を計算した結果を図2(c)の実線で示し、その時のかごの加速度及び速度を図2(a)、図2(b)に示す。この結果から、かごが一定加速度で上昇する場合、張り車は振動を伴いながら一定量上昇することが分かる。

さらにこのモデルを用いて振動モード解析をすると、低次の振動モードとして図3に示す3つの主要モードが存在

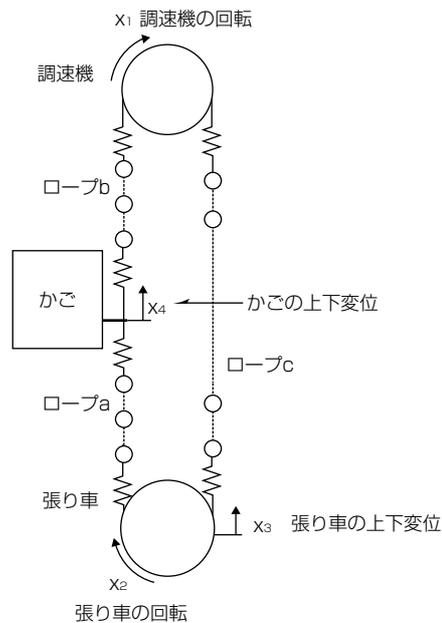


図1. 多自由度モデル

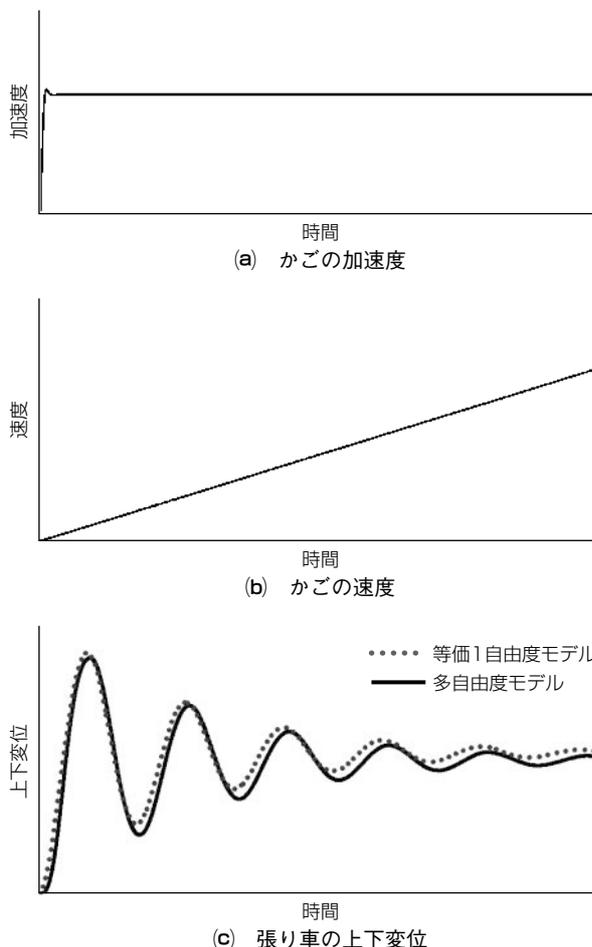


図2. 一定加速中のかごと張り車の挙動

することが分かった。周波数が低い方から順に、1次が張り車の上下振動モードで、2次・3次が調速機と張り車が同方向に回転する振動モードと逆方向に回転する振動モードである。図2(c)の張り車の上下振動は、図3で示す1次振動モードに対応している。

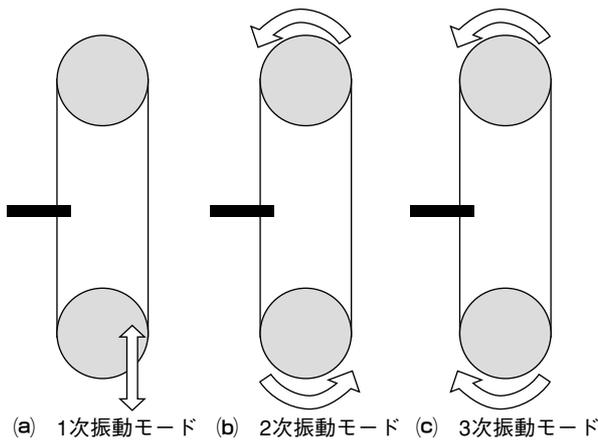


図3. 調速機ロープ系の基本振動モード

3. 等価1自由度モデルでの評価

調速機ロープ系の時間応答は、かごの上下変位を入力とする強制変位加振となる。そこで、かごの上下変位 x_4 を入力として、図3の1次振動モードに対応する張り車の上下変位 x_3 を状態変数にして等価1自由度の運動方程式を導出すると、次式を得る。

$$\hat{M}\ddot{x}_3 + 2k_c x_3 = M_{gov}(1 - \alpha)\ddot{x}_4 = F(\ddot{x}_4) \dots\dots\dots(1)$$

M_{gov} : 調速機ロープ系の回転慣性(調速機ロープと調速機, 張り車それぞれの回転慣性質量の合計)

\hat{M} : 回転慣性を含めた等価質量

k_c : ロープcのばね定数

α : かごの位置を表すパラメータ(最下階位置を0, 最上階位置を1とする)

式(1)の右辺は一般化力であり、かごの加速度 \ddot{x}_4 の関数(調速機ロープ系全体の回転慣性力)となる。そのため式(1)の張り車の上下変位は図4に示すような等価1自由度の力加振による応答で評価できることが分かる。さらに、かごに一定の加速度が作用した場合、式(1)の一般化力は一定値となるため、その外力値に応じて、張り車は上下に一定量変位する。なお、張り車自身の質量は式(1)の一般化力に含まれず、運動方程式の慣性項である等価質量 \hat{M} のみ含まれている。そのため、張り車の質量は、振動周波数のみに影響し、張り車の上下変位量には直接影響しない。

図4の等価1自由度モデルに減衰を考慮して、2章で述べた多自由度モデルと同じ条件で張り車の上下変位を計算すると図2(c)の点線の結果となり、多自由度モデルの結果(実線)とおおむね一致することが確認できる。

4. 実測との比較

等価1自由度モデルの妥当性を実機評価するため、エレベーター試験塔で、通常走行中のエレベーターを巻上機ブレーキで停止させた際の、かごの減速度と張り車の上下変位を計測する試験を行った。

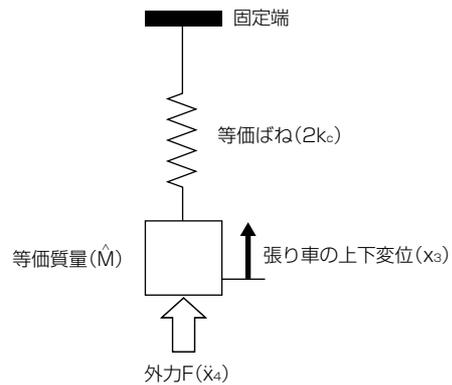
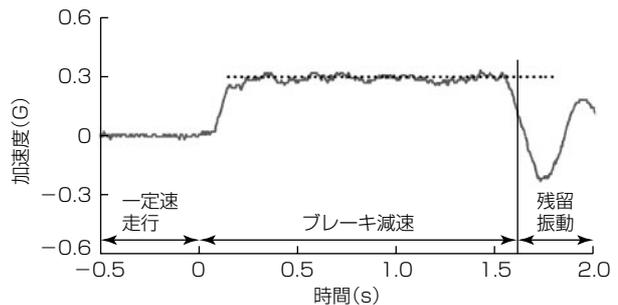
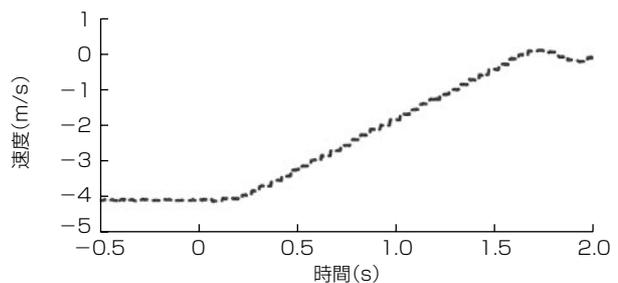


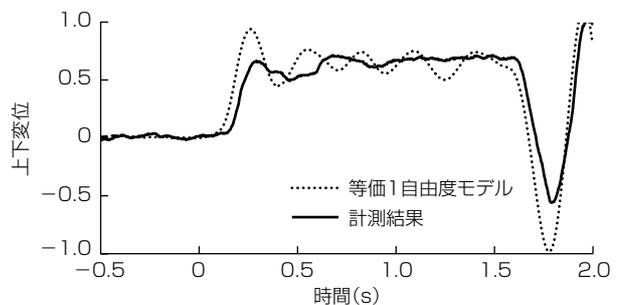
図4. 等価1自由度モデル



(a) かごの加速度



(b) かごの速度



(c) 張り車の上下変位

図5. 巻上機ブレーキ制動時のかご及び張り車の挙動

エレベーターが中間階付近を定格速度(4 m/s)で下降中に巻上機ブレーキを作動させた場合のかごの加速度、かごの速度、張り車の上下変位の計測結果を図5に示す。加速度のグラフに示すように、かごが下降中の時刻0秒のとき、巻上機ブレーキが動作してかごが0.3G程度で減速(上向きに加速)する。その後約1.7秒でかごが停止する。停止後は、主ロープの剛性によってかごに残留振動が発生する。

ここで、実機で計測したかごの加速度を式(1)に入力して得られる張り車の上下変位の計算結果を図5(c)に点線で示す。なお、張り車の変位は収束値を1として正規化した値

で示す。これらから、張り車の変位は実測値と対応していることが分かり、このモデルの妥当性を確認できた。

5. 各パラメータとの関係

式(1)から張り車の上下変位 x_3 の収束値を次式で求めることができる。

$$x_3 = \frac{M_{gov}(1-\alpha)\ddot{x}_4}{2k_c} = \frac{LM_{gov}(1-\alpha)\ddot{x}_4}{2EA} \dots\dots\dots(2)$$

- L : 昇降行程
- M_{gov} : 調速機ロープ系の回転慣性
- α : かごの位置
- k_c : ロープCのばね変数
- \ddot{x}_4 : かごの加速度
- E : 調速機ロープのヤング率
- A : 調速機ロープの断面積

式(2)を基に各パラメータと張り車の上下変位量の関係を整理するとともに、パラメータを変えた試験で妥当性を検証する。

(a) かごの加速度の向き

かごの加速度の向きが図5に対して反対(負の値)の場合、張り車は下に変位することを実機で確認した。これは、式(1)の一般化力の符号から明らかである。

(b) 張り車の質量

式(2)で、張り車の質量は上下変位に影響しない。そこで、張り車の質量を半分にして同様の試験を行い、張り車の上下変位の試験結果を比較したところ、差異は見られなかった。それによって、式(2)は妥当と言える。

(c) かごの位置の影響

式(2)から、かごの位置が高いほど(α が1に近づくほど)張り車の上下変位が小さくなることが分かる。実際にかごの位置を変えてブレーキ制動時の張り車の上下変位を計測した結果、式(2)の計算とほぼ一致した(図6)。なお、張り車の上下変位は最下階で0.3Gで減速した場合の収束値を1として正規化した。

(d) 昇降行程の影響

式(2)で、昇降行程が十分大きい場合、調速機ロープ系の回転慣性はロープ自重とほぼ等しくなる。ロープ自重

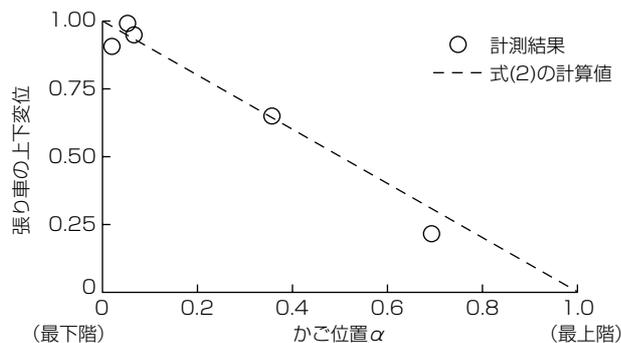


図6. かごの位置と張り車の上下変位の関係

は昇降行程に比例することから、張り車の上下変位は昇降行程の2乗に比例する。

6. む す び

エレベーターの調速機ロープ系での、かごの走行中に張り車の上下変位及び振動が生じるメカニズムを明らかにするため、等価1自由度モデルを構築し、各パラメータから張り車の変位を求める関係式を導出した。得られた等価1自由度モデルの妥当性を検証するためエレベーターの実機試験を行い、実測と対応する結果が得られた。

今後、この等価1自由度モデルを調速機ロープ系の最適化に活用する。

参 考 文 献

- (1) 渡辺誠治, ほか: エレベーター調速機・非常止め機構の動挙動解析, 日本機械学会, 第20回交通・物流部門大会講演論文集, 75~76 (2011)
- (2) 鎌田崇義, ほか: マルチボディ・ダイナミクスを用いたエレベータ用ガバナのシミュレーション解析, 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講演論文集, 35~38 (2011)
- (3) 友部亮一, ほか: 弾性体要素を用いたマルチボディダイナミクスによるガバナロープのモデル化, 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講演論文集, 51~54 (2014)