

高速エレベーターの ロープシミュレーション技術

渡辺誠治*
東中恒裕**

Rope Simulation Technology for High Speed Elevator

Seiji Watanabe, Tsunehiro Higashinaka

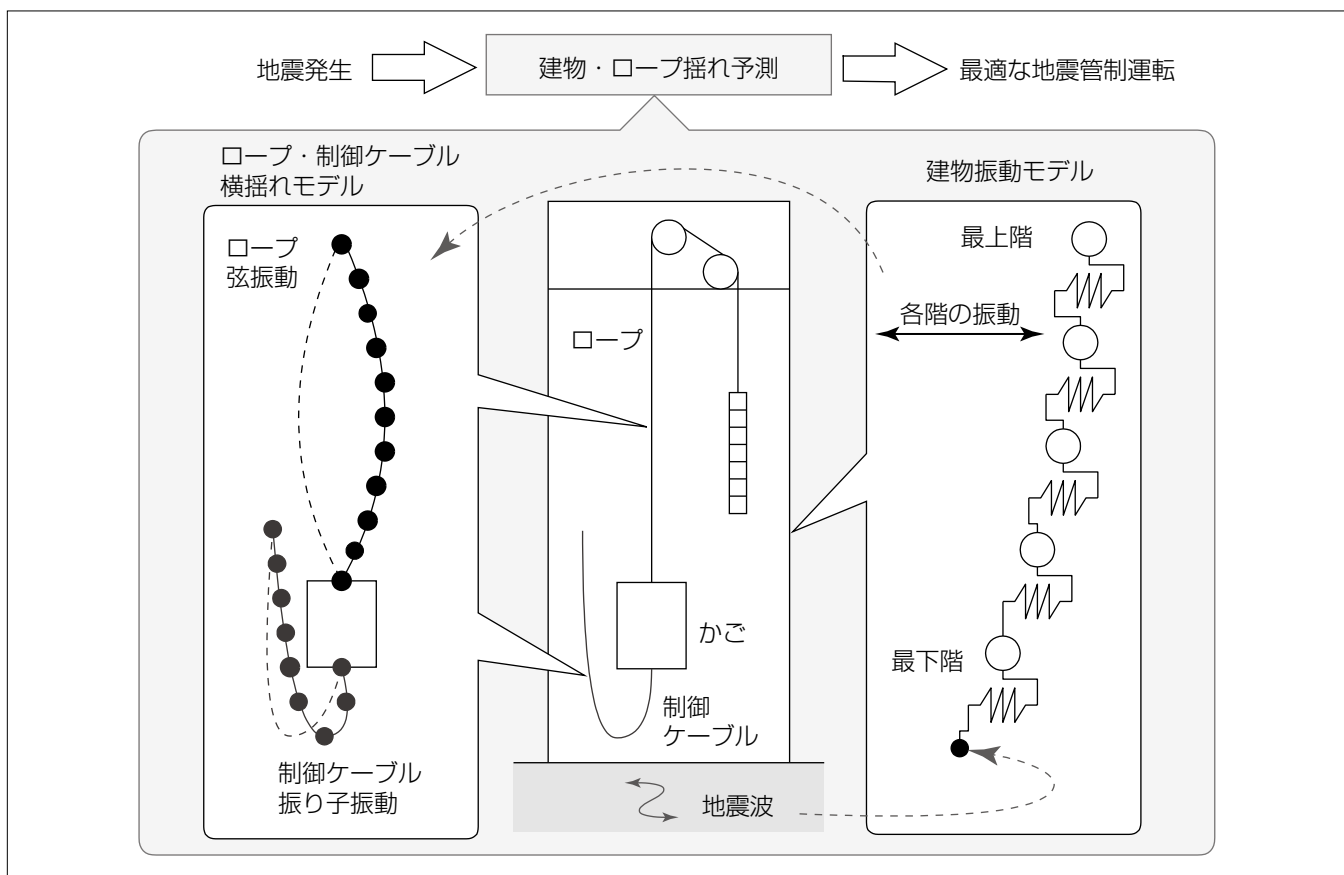
要旨

2003年の十勝沖地震、及び2004年の紀伊半島沖地震、中越地震で観測された長周期地震動では、高層建築物の横揺れとともに生じるエレベーターロープの振動が注目されるようになった。長周期地震動は、数秒から十数秒の揺れが数分間にわたって継続するものであり、高層建築物の固有周期がこの揺れと一致すると、大きな建物振動を引き起こすことが知られている。この建物振動によって、エレベーターロープやケーブル類が大きく揺れて損傷する場合があります。今回の東日本大震災でも、長周期地震動による建物とロープの揺れによる被害が確認されている。

従来、長周期地震動に起因するエレベーターロープの横

振動評価に関しては、長周期地震動による建物振動のデータが乏しいことから、ロープ横振動の成長過程などの詳細な検討が十分に行われていなかった。そこで、長周期地震動における建物の揺れを評価できる建物振動モデルを構築するとともに、高層建築物に納入される高速エレベーターをターゲットに、エレベーターロープ及び制御ケーブルの横振動を評価可能なロープ振動モデルを作成した。

得られた振動モデルに基づき、長周期地震動によって発生するロープ揺れを抑制する対策について検討した結果を述べる。



建物振動及びエレベーターロープ・制御ケーブルの振動を予測する技術

長周期地震動を受ける建物に対し、各階における建物振動を計算するとともに、建物内に設置されたエレベーターのロープ・制御ケーブルの揺れを評価し、地震被害を防止する最適な地震管制運転を実現できる。

1. ま え が き

震源から遠く離れた位置で発生する長周期地震動では、通常の地震感知器では感知できない建物の揺れにもかわらず、エレベーターロープなどの長尺物が損傷する場合があります。2003年の十勝沖地震、2004年の紀伊半島沖地震や中越地震、そして今回の東日本大震災で、震源から約150km以上離れた平野部で、比較的長い周期(4~7秒)の地震動によって、従来の地震感知器が動作せずに、ロープやケーブル類が揺れて損傷する事象が確認されている。

従来、このような長周期地震動に対する建物の揺れとエレベーターロープの揺れについては、詳細な検討がなされていなかった。そこで、建物及びロープの振動モデルを構築することによって、ロープ揺れの評価を行うとともに、ロープ損傷を防止するための対策を実施した。

本稿では、導出した振動モデルに基づき、ロープの引っかかりを防ぐ機器の対策効果を確認するとともに、長周期地震動によるロープの揺れを推定し、ロープ揺れを抑制する管制運転方式について述べる。これによって、乗客の安全確保と昇降路機器の被害低減を図ることができる。

2. 建物振動モデル

図1に建物振動モデルを示す。建物は、多質点系の等価せん断剛性モデルとして表される。この時、建物の1次固有周期 T (秒)は、式(1)で近似できる。

$$T = 0.025H \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 H は建物高さ(m)を表す。

建物振動モードを図示すると、図2となる。長周期地震動では建物の1次固有振動モードが支配的となるため、ロープ揺れに対しては、建物の1次固有周期と一致するロープ長での評価が重要となる。

3. ロープ振動モデル

エレベーターには、図3に示すように、種々のロープが設置されている。

このうち、制御ケーブル以外は、ロープの両端が拘束された弦振動として横振動を評価できる。そこで、図3の右に示すように、ロープを多質点のバネ・マスモデルとして運動方程式を導出する。なお、制御ケーブルについては次章で述べる。

ロープの横振動を表す運動方程式は弦振動の式となり、運動方程式にはロープの張力がパラメータとして用いられる。ロープ張力 T は、式(2)で示すように3つの項で構成された、垂直・水平変位と時間の関数となる。

$$T(x, y, t) = T_s + T_v + T_h \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 T_s はかごの自重(静荷重)、 T_v はロープ縦振動によるかごの慣性変化、 T_h はロープ横振動によるロープの伸びを表す。

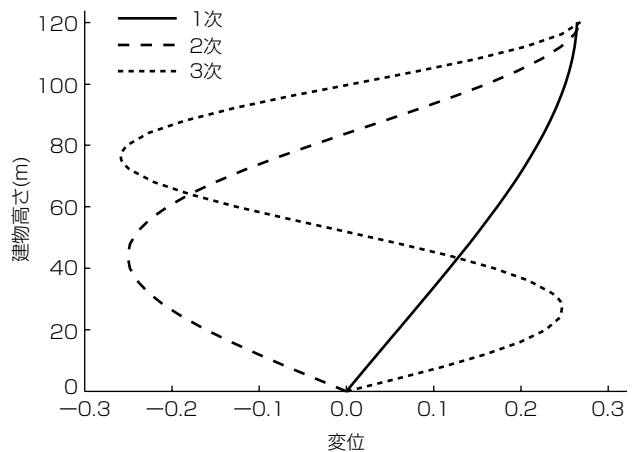


図2. 建物振動モード

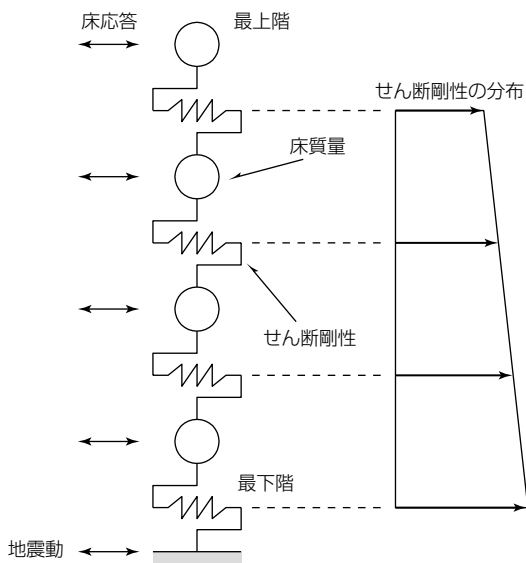
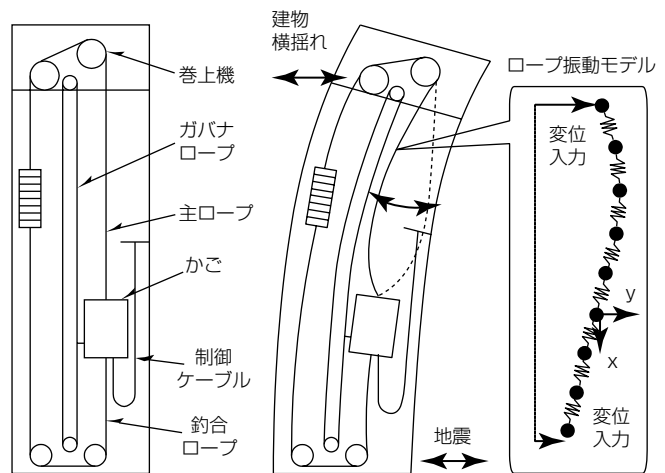


図1. 建物振動モデル



(a) エレベーターの基本構成 (b) ロープの横振動

図3. 高速エレベーターの基本構成とロープ振動モデル

このことから、ロープの横変位 y は、 T_h によって、かごの上下振動と連成していることがわかる。さらに、ロープの伸びの影響 (T_h) で弦振動の固有振動数が変化するため、ロープの横振幅に依存した非線形特性を示す。また、ロープ横振動の減衰率は非常に小さく、振動が長時間にわたって持続することが実験で確認されている。

4. 制御ケーブル振動モデル

制御ケーブルは、昇降路の中間階で一端が固定され、他端がかご下に吊り下げられる構成であるため、3章で示した弦振動ではなく、振り子状の振動が発生する。

そこで、長方形断面の制御ケーブルに対し、二次元平面内でのケーブルの振動を考える。ケーブルを多質点のバネ・マスとして、ケーブルの長手方向の変形も考慮した二次元振動モデルの概略を図4に示す。

各質点の運動は x 、 y の2自由度の運動方程式で記述される。各質点には、隣接する質点同士で発生する長手方向の張力、鉛直方向の重力、隣接する質点の幾何形状で決まる曲げ反力が作用する。

かご側吊(つ)り下げ点近傍における制御ケーブルの走行時水平振動について計算した例を図5に示す。図5から、

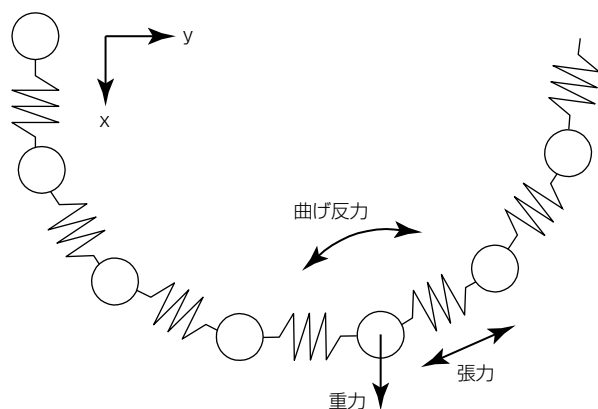


図4. 制御ケーブル振動モデル

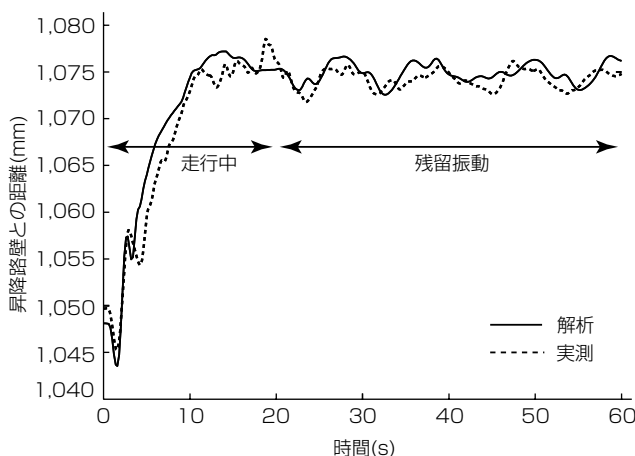


図5. ケーブルの水平変位

解析はほぼ実測と対応していることがわかる。このように、制御ケーブルの揺れについても、ロープと同様に計算で評価することができる。

5. ロープ横振動の低減

5.1 ロープの引っかかり対策

ロープが大きく揺れて、昇降路機器にロープが引っかかるのを防ぐ部品を、図6に示すように昇降路内に追加した。プロテクタは、ロープの揺れが増大して昇降路機器の背面にロープが回りこみ、昇降路機器と引っかかるのを防止し、釣合いおもり側レールを連結するタイバーは、かご側又は釣合いおもり側のロープと昇降路機器の干渉を防止する。

これらの追加部品によるロープの揺れ低減効果について解析検討した結果を図7に示す。ロープがプロテクタに接触することによって、ロープ横揺れの振幅増大が抑えられており、ロープの引っかかり防止に有効なことがわかる。

5.2 長周期地震時管制運転

長周期地震動によって、建物が1次の固有周期で揺れ続けている場合、図6で示すように、かご位置(ロープ共振階)によっては、ロープが建物振動と共振して大きな揺れになる。

そこで、従来の地震感知器では検出できないゆっくりとした建物揺れを検知し、ロープの揺れを推定可能な長周期感知器を開発した。この感知器によって、所定のロープ振幅を超えたと判断すると、建物の長周期振動に応じた管制運転に移行する。

エレベーターは、最寄り階での停止によって乗客の安全を確保した後、ロープの共振が発生しない階(ロープの非

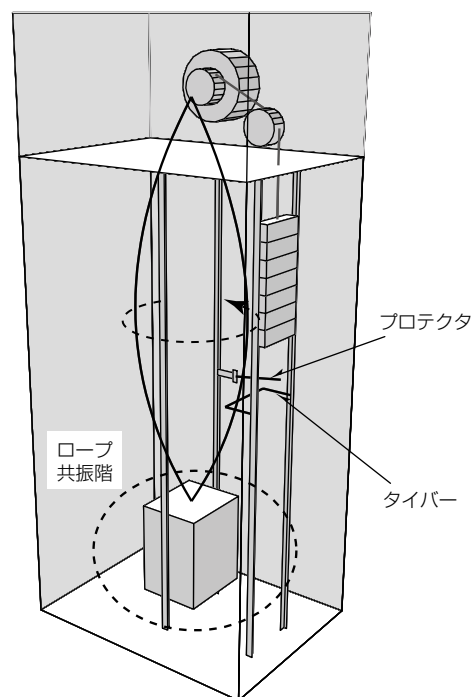


図6. ロープの引っかかり対策

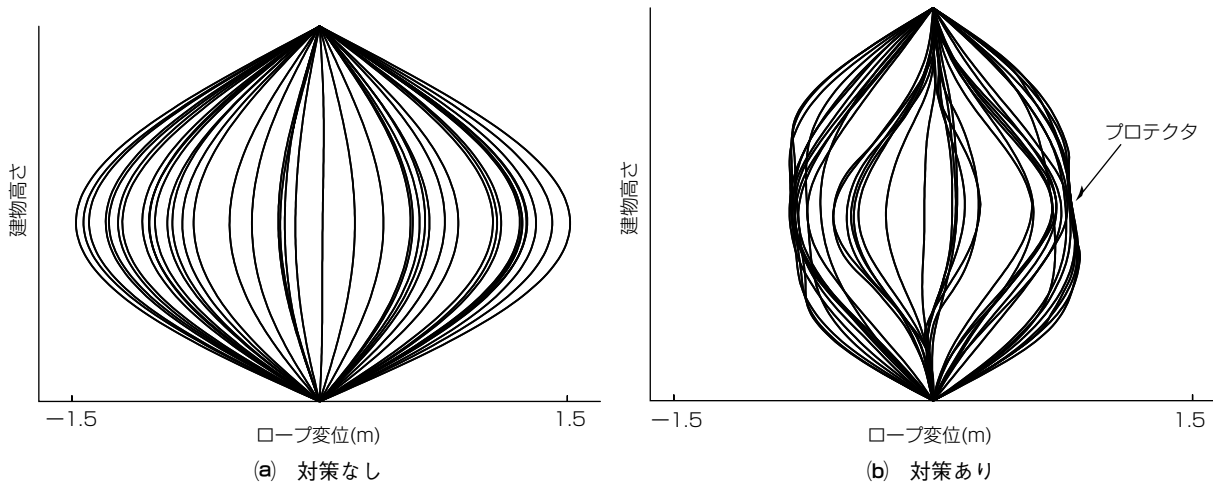


図7. 引っかかり対策の効果

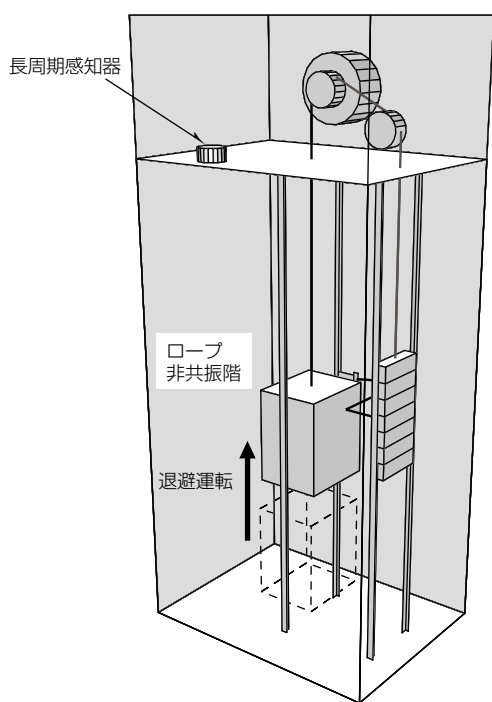


図8. 非共振階への退避

共振階)への退避を行う(図8)。これによって、ロープ揺れは収束し(図9)、建物の揺れが収束した場合は、自動的に通常の運転に復帰することができる。

この長周期地震時管制運転によって、ロープの非共振階へ迅速に退避することが可能となり、昇降路機器の破損を低減するとともに、復旧運転によって利用者へのサービスを、安全に再開することができる。

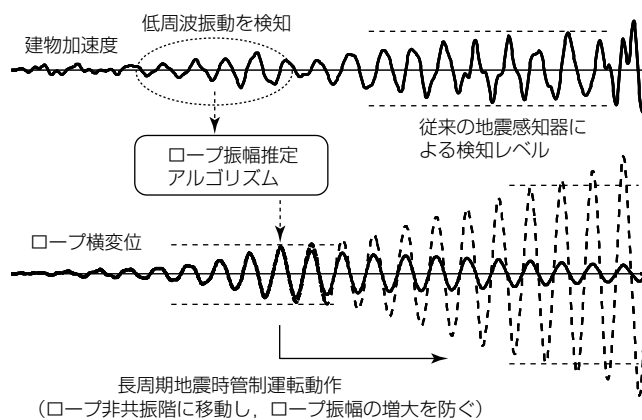


図9. 長周期地震時管制運転

6. むすび

高層建築物に設置される高速エレベーターに対し、長周期地震動でのロープ横振動を評価するために、建物振動及びロープ・制御ケーブルの振動モデルを構築した。これらのモデルを用いることによって、長周期地震動発生時におけるロープ振動の予測が可能となることを示すとともに、ロープの引っかかりを防止するための機器の対策と管制運転方式について述べた。これによって地震による昇降路機器の損傷低減と、乗客へのサービス向上を図ることができ、従来よりも耐震性を高めたエレベーターを実現することができる。