MR 流体ダンパを取り入れた新構成エレベータ非常止め装置の基礎検証

A Fundamental Verification of an Elevator Emergency Stop Device with a Magnetorheological Fluid Damper

佐藤 駿介^{*}(学生員), 小林 尚暉^{*}, 川瀬 圭祐^{*}, 中川 聡子^{*}(正員)

Shunsuke SATO (Stu. Mem), Naoki KOBAYASHI, Keisuke KAWASE, Toshiko NAKAGAWA (Mem)

High-speed and long-distance elevator systems have a serious issue that a large impact force from an emergency stop device injures the passengers in an elevator cage during the emergency stoppage. Therefore, we focused on the safety of the passengers in an elevator cage and proposed a new emergency stop device that consists of a spring and a magnetorheological fluid damper having the variable damping coefficient by a controlled magnetic field. In this paper, we would like to introduce our test installation that consists of the spring, the magnetorheological fluid damper, sensors, a digital controller with LabVIEW and a linear actuator for simulating the deceleration of the emergency stop device. Additionally, we evaluate the fundamental performances of our proposed device that was measured by using the magnetorheological fluid damper as a passive mode.

Keywords: magnetorheological fluid damper, elevator, emergency stop device, magnetic field, safety device.

(2016 年 11 月 24 日受付, 2017 年 4 月 7 日再受付)

1 緒言

近年, 意匠を凝らした超高層ビルが世界各地に展開している。しかし超高層ゆえ, 利用者が円滑, 快適に移動できるよう, 高速かつ大容量のエレベータが求められている。そのため, 日本国内における様々な企業も技術開発に力を注いでおり, エレベータは海外へ輸出されるインフラとして急成長を遂げている[1]。しかしながらエレベータの高速化, 大型化は, システムを構成する電気, 機械的要素に対し, 過大な負荷を与え, このことが異常運転を発生させる原因ともなることが懸念されている。万が一このような大型エレベータにおいて事故が発生した場合に, その構造上, 被害は非常に深刻なものになると考えられることから, エレベータには厳しい安全基準が定められ, 様々な安全装置が組み込まれている。そのような安全装置の一つに, 巻き上げ機の異常運転や釣りワイヤの破断などの事故発生時に, 乗客が乗るかご部を, 定められた速度, 距離内で停止させるための「非常止め装置」がある。この装置は, 停電時に作動できない電気機構を用いず, より信頼性が高いとされている機械機構によって構成されている。しかし摩擦材の接触抵抗を利用しているた

め, 停止直前にかご部に大きな減速度(衝撃)が発生し, これにより乗客が負傷する事例が報告されていることから, より安全な装置が求められている[2]。

そのため, 本研究グループは, 制御ダンパ付き非常止め装置を提案する[3]。本装置は, 従来の機械的な非常止め装置に新しくばねと制御 MR 流体ダンパを挿入したもので, 非常止め部には従来通り確実にかごを停止させ, MR 流体ダンパには事故発生時にリアルタイムで制御を加えることで乗客に加わる危険な衝撃を緩和させる役割を持たせた, 所謂, 複合装置である。

本研究グループは Matlab/Simulink を用い, 上記の提案システムに対し, 非常停止時のシミュレーションを行い, MR 流体ダンパの制御により乗客への衝撃となるかご減速度の最大値を, 定員時に 24%緩和できることを突き止めた。この結果から, 各種国際規準と照らし安全性能の向上が可能となる事を, 実機ベースの計算機シミュレーションにて確認している[4, 5]。さらに, 模擬実験による本システムの有効性の検証を行うため, 小型模擬実験装置および MR 流体ダンパシステムの製作を行った。この装置では主に, 下部に取り付けられた直動シミュレータによって①従来型非常止め装置のブレーキ力(減衰力)特性再現が可能であるか, ②製作した MR 流体ダンパが制御に適する線形な特性をもつか, について検証が行われている[6]。

そこで本稿では, 提案する MR 流体ダンパを, いわゆるパッシブダンパとして使用した場合の, 非常停止

連絡先: 中川 聡子, 〒158-8557 世田谷区玉堤 1-28-1, 東京都市大学工学部電気電子工学科,
e-mail: nakagat@tcu.ac.jp
^{*}東京都市大学

時衝撃緩和性能について、乗客人数の変化等も考慮した模擬実験を行う。

2 エレベータ制動装置

図 1 に、現在一般的に使用されているエレベータ及び非常止め装置の構造図を示す。本研究の対象である非常止め装置とは、ロープの切断等で乗客の乗るかごが落下、あるいは調速機によりかごが危険速度に到達したことが検知された時に、かごの動きを自動的に停止させる究極の安全装置で、国際安全基準では取り付けが義務化されている。非常止め装置は、図 1 にあるように、かごの床部分に設置され、末広のくさび状摩擦材と、これを取り囲む U 字形ばねで構成される。この装置はかごが危険速度に達すると、①くさび状摩擦材が即座に引き上げられて噛み込み、②くさびの周りを囲む U 字形ばねがこの噛み込みで押し広げられ、③反力で芯部のガイドレールが締め付けられ、④これが鉛直方向のガイドレールへの垂直抗力として働き、⑤その抗力と（可変）摩擦係数との積でブレーキ力となり、⑥かごが制止されるものである。また、非常止め装置には、かご速度が定格速度の 1.4 倍となる危険速度に達しないうちに自動的に作動しなければならないという規定がある。

図 2 に、従来型の非常止め装置における実落下試験から得られた非常停止時の減速度実測値を示す。現在の非常止め装置の特徴として、摩擦材の熱特性により停止直前の低速時にくさびとガイドレール間の摩擦が急増し、非常に大きな減速度が発生することが知られている。また乗客が少人数の際に非常止め装置が作動すると、乗客に、より強い衝撃が加わることが問題となっている。このような危険な衝撃が乗客の負傷の一因となることから、新構成の装置を用いることでこれを緩和させ、非常停止時における乗客の安全を確保することを目指す。

3 新構成エレベータ非常止め装置

3.1 MR 流体

MR 流体（磁気粘性流体）は、液体中にミクロンサイズの磁性粉末を分散させた懸濁液である。この液体に外部から磁界を作用させると、磁性粉末がクラスタ

Fig. 1 Conventional stop device. [7]

Fig. 2 Characteristics of emergency stop device. [8]

ーを形成し、内部応力が増加するものである。本研究で使用している MR 流体に含まれる媒体及び磁性粒子について、表 1 に示す。この液体は、平常時は図 3 左側の写真のように容器の中で傾けると流れる程度の粘度であるが、磁石を近づけることで右側のように容器上部に固着する程の粘度に変化させることができる。

3.2 MR 流体ダンパ

MR 流体ダンパは、シリンダ内に MR 流体を封入し、外部からの磁界により流体の粘度を変化させることで、等価的にダンピング係数を制御できるダンパである。

本研究においてはエレベータという限られた空間に設置することを考慮し、図 4 に示すように、コイル

Table 1 Properties of MRF. (Sigma Hi-Chemical: E-600)

Quantity	Inclusion
Medium	Poly-alpha-olefin
Magnetic Particle	Iron (Fe)

Fig. 3 MRF (Sigma Hi-Chemical: E-600).

内にシリンダを挿入し、コイルの電流によって縦方向に磁界を発生させダンピング係数を制御する構成とし、小型化、軽量化を図っている。図 5 に、ダンパ直上の電流-磁束密度の特性を、シリンダに磁性流体を注入した場合と注入しない場合に分けて示す。図より、シリンダ内の MR 流体の存在によって、磁束が中心部に集約される効果があることがうかがえる。

さて、この MR 流体ダンパを用いて測定した、流体温度ごと(22 °C, 24 °C, 29 °C)のコイル電流-ダンピング係数特性を図 6 に示す。一般に MR 流体の特徴として、流体の温度依存性が挙げられる。提案するエレベータ非常停止時には、ダンパ作動時間が 3 秒程度と短く、ピストン部の運動も 2Hz 程度と低いことから、流体内部の粒子が動くことによる温度の急激な上昇はないものと考えられる。また、図 6 より温度差 7°C の計測に対しても、特性のばらつきは見られないことがわかった。さらに、このダンパはコイルを直接シリンダに巻き付けているため電流印加時の温度上昇も懸念されるが、コイル電流 $I=1.07$ A を 30 分間流し続けた際の温度変化を測定したところ図 7 の温度特性となり、2 °C 程度の温度変化しかないことも確認できた。

図 6 より、本 MR 流体ダンパのダンピング係数は入力したコイル電流に対して線形性をもつこと、これにより制御性の良好な MR 流体ダンパとなることが確認できた。本実験において MR 流体ダンパのダンピング係数の変化幅は、最低値を $C_{min}=60$ Ns/m, 最大値を $C_{max}=160$ Ns/m として使用するものとする。なお、図 6 のダンピング係数は、ピストン部に与えた初期変位に対するステップ応答波形から求められる [6]。

3.3 新構成エレベータ非常停止装置

図 8 に提案する新構成非常止め装置が搭載されたエレベータシステムのモデル図を示す。本システムは、エレベータかご部と非常止め装置との間にバネと MR 流体ダンパが組み込まれており、ダンパの特性を変化させることで衝撃の緩和を行う。また異常運転時に、万が一、本ダンパへのコイル電流制御が不能になった場合でも、一般的なサスペンションとして機能できることは大きな利点である。

図 8 に示すように、非常止め部(質量 m [kg])の変位を x_1 [m], かご部(質量 M [kg])の変位を x_2 [m] とすると、両質点に対する運動方程式は、式(1), (2) となる。ここで K [N/m] はばね定数を、 C_0 [Ns/m] はダン

パのダンピング係数の定常値を、 ΔC [Ns/m] はコイル電流が作る磁界で MR 流体の粘性が変化する際に生じるダンピング係数の追加値を、 F_B [N] は非常止め装置のブレーキ力を表す。また外乱加速度項として、 (F_B/m)

Fig. 4 MRF damper.

Fig. 5 Magnetic flux density characteristics of MRF damper.

Fig. 6 Measured damping coefficient to coil current

Fig. 7 Temperature characteristics of MRF damper.

今、状態変数ベクトルを $\mathbf{x} = (\dot{x}_1 \ x_2 \ x_1 \ x_2)^T$ とすると、(3),(4)式から (5)式の状態空間表示が得られる。

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{C_0 + \Delta C}{m} & \frac{C_0 + \Delta C}{m} & -\frac{K}{M} & \frac{K}{M} \\ \frac{C_0 + \Delta C}{m} & -\frac{C_0 + \Delta C}{m} & \frac{K}{M} & -\frac{K}{M} \\ \frac{M}{1} & \frac{M}{0} & \frac{M}{0} & \frac{M}{0} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_B \\ \alpha_g \end{pmatrix} \quad (5)$$

乗客重量の設定に関しては、実際のエレベータモデルにおいて、乗客1人当たりの重量を66 kgとしてい

また、本実験装置を用いて測定した、シミュレータへの入力指令及び出力加速度の比較を図 10 に示す。図 10 より、本実験装置において、本シミュレータは入力信号を精度良く再現できていることが確認できた。ま

Symbol	Quantity	Value
M_{24}	Mass of cage (Full complement;24)	7.8 kg
M_1	Mass of cage (One passenger)	6.28 kg
M_p	Mass of passenger	0.066 kg
K	Spring constant	1250 N/m

Parts	Type
AC-servo motor	SGMPS-08A2A2C (Yaskawa)
Servo pack	SGDV-5R5A (Yaskawa)
Ball screw	BNT 1405-2.6 (THK), Length; 7 cm
Liner guide	SSR 15 XW (THK)

Fig. 10 Comparison between input and measured deceleration.

た、測定した加速度信号には、ノイズ処理として①AD変換前に遮断周波数 60 Hz, 2 次 2 段のアナログローパスフィルタ, ②AD 変換後に LabVIEW 上で遮断周波数 50 Hz, 5 次 1 段のデジタルローパスフィルタの 2 種類の信号処理を行っている。これらのフィルタにおけるカットオフ周波数は、図 2 の実ブレーキ特性を FFT にかけて、主たる周波数成分が切り取られないよう、かつ直動運動シミュレータのサーボ機構のインバータノイズはカットされるよう選定している。

4 衝撃緩和効果の検証

提案システムの有効性を検証するため、MR 流体ダンパが本エレベータ模擬装置において十分機能するか、ダンピング係数の一定なパッシブダンパとして使用した場合の衝撃緩和効果の測定を行う。ここで、衝撃緩和効果の評価のため以下の(6)式を定義する。

$$\text{(緩和率) \%} = \{1 - (\text{提案型 減速度最大値}) / (\text{従来型 減速度最大値})\} * 100 \quad (6)$$

4.1 定格人数乗車時 (24 人)

従来型非常停止特性 (図 2) との比較のため、図 11 に、乗客人数を定員である 24 人(かご重量 7.8 kg), MR 流体ダンパのダンピング係数を最小および最大の値である $C=60, 160 \text{ Ns/m}$ とした場合の、かご減速度特性の測定結果を示す。図 11 より、従来型と比較し、両者とも 19 %程度の緩和率を持つことが確認された。

4.2 最少人数乗車時(1 人)

図 12 に、乗客人数を 1 人 (かご重量 6.28 kg)として MR 流体ダンパのダンピング係数を $C=60, 160 \text{ Ns/m}$ に

(A) $C=60 \text{ Ns/m}$.

(B) $C=160 \text{ Ns/m}$.

Fig. 11 Measured deceleration characteristics. (full complement)

(A) $C=60 \text{ Ns/m}$.

(B) $C=160 \text{ Ns/m}$.

Fig. 12 Measured deceleration characteristics (one passenger)

設定した際の、かご減速度特性を従来型非常停止特性と比較する。これは先に述べたが、乗客人数が少ない場合に生じる過大な減速度ピークがエレベータ業界で問題視されているからである。図 12 より、問題視されている乗客 1 人時において、停止時の衝撃緩和効果が従来型と比較し、減速度の最大値が $C_{min}=60 \text{ Ns/m}$, $C_{max}=160 \text{ Ns/m}$ の両者とも、26 %程度である事が確認された。

4.3 乗客人数の変化に対する衝撃緩和効果

図 13 に、各人数における提案システムの減速度最大値に対する緩和率を示す。本実験では、ダンピング係数を $C_{min}=60$ Ns/m から $C_{max}=160$ Ns/m まで 20 Ns/m ずつ変化させ、さらに乗客数を 1, 6, 12, 18, 24 人と変化させていった。図 13 より、測定した人数においては 18~26 % の減速度最大値の緩和が確認され、乗客人数が少なくなるにつれ緩和率が高くなることが確認できた。また人数に関わらず、ダンピング係数を $C_{min}=60$ Ns/m から $C_{max}=160$ Ns/m まで変化した際の、それぞれの減速度の最大値に大きな差は見られないものの、人数ごとにダンピング係数 C の最適値が異なることが読み取れる。このことより、今後、パッシブダンパから制御ダンパに切り替えることで、更なる特性向上が見込めるものと考えられる。

図 14 は、各乗客人数に対する減速度の最大値を、提案システムと従来型非常止装置との比較から描いたものである。特に非常停止時の衝撃が大きくなって問題となる乗客 1 人の場合の減速度については、提案型システムの減速度最大値が、従来型の乗客定員時とほぼ同じ値にまで緩和できることが確認でき、本システムが高い衝撃緩和性能を持つことを確認した。

今後、MR 流体ダンパにリアルタイムで制御を加えることで、すでに実機ベースのデジタルシミュレーションで得られているように[4,5]，すべての乗客人数においてより高い衝撃緩和の効果を得られるものと期待される。

5 結言

これまでに本研究グループが提案してきた MR 流体ダンパを用いて新構成のエレベータ非常止め装置について模擬装置を作成し、計算機による種々のシミュレーションによって、その有効性を確認してきた。本稿においては、まず MR 流体ダンパをダンピング係数の一定なパッシブダンパとして用いた場合の、非常停止の際に発生する大きな衝撃力に対し、実験的にその緩和効果を確認した。

ただし、乗客数によって最大の衝撃緩和率を得るために設定すべきダンピング値が異なることもわかり、このことから、状況に応じたダンピング定数の逐次制御が、今後のより大きな衝撃緩和達成の鍵であることを示唆することができた。

Fig. 13 Decrease rate to the number of passenger.

Fig. 14 Deceleration peak value to the number of passenger.

参考文献

- [1] 日刊工業新聞, 日立・三菱電機・東芝エレベータ、中国のエレベーター速度競争で火花散らす, 2016/6/2. <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00387474>
- [2] 国土交通省 社会資本整備審議会, 平和台駅エレベーター主索破断事故 調査報告書, 2012.
- [3] 芳賀, 遠藤, 中川ほか, エレベータ非常停止時の加速度を緩和するための MR 流体ダンパ装置の基礎研究, 電気学会 LD 研究会資料 LD-12-55, pp11-16, 2012.
- [4] T. Uchida, S. Sato and T. Nakagawa, A Proposal of Control Method for an Elevator Emergency Stop Device with a Magnetic Rheological Fluid Damper, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 50, No. 11, 2014.
- [5] S. Sato, T. Uchida, N. Kobayashi and T. Nakagawa, Evaluation of an Elevator Emergency Stop Device with a Magnetorheological Fluid Dumper Controlled in Conformity with the Elevator Safety Guide, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 51, No. 11, 2015.
- [6] 小林, 佐藤, 中川, MR 流体ダンパを用いた衝撃緩和システムの特性の測定, 電気学会 LD 研究会資料 LD-16-25, pp135-139, 2016.
- [7] 船井, エレベータの安全・快適技術, 国際交通安全学会誌, Vol.27, No.2, p.31-39, 2002.
- [8] 社団法人 日本エレベータ協会, JEAS-A517(改正 06-10), 日本エレベータ協会標準, 2008.