810 m/min 超高速エレベーター非常止め装置に関する研究* (摩擦材の開発)

岡田 亮二^{*1}, 簗河原 準^{*2}, 山田 俊宏^{*3}

An Emergency Stop Device for a Super High Speed Elevator (810 m/min) (Development of Braking Materials)

Ryoji OKADA, Jun SUGAHARA and Toshihiro YAMADA

A braking material for an emergency stop device for a super high speed elevator (810 m/min) was developed. The material is a special cast iron containing Cr, Ni and P. Its structure is a pearlitic matrix of flaky graphite, steadite and cementite, and its wear resistance is about 10 times that of FC250. Its coefficient of friction is about 1.5 times that of FC250. A new emergency stop device made of the material was proven to conform to Japanese standards and ANSI (American National Standards Institute) standards for stopping distance and car inclination criteria in tests conducted by dropping actual scale equipment.

Key Words: Tribology, Friction, Wear, Elevator

1. 緒 言

ビルの超高層化に伴い、ビル内の垂直交通手段であるエレベーターの高速化はますますその重要性を増している。エレベーターの高速化は、駆動装置、制御装置ばかりでなく安全装置の性能向上を必要とし、とくに非常時、落下する乗りかごを停止させる非常止め装置はその性能向上が不可欠である。

非常止め装置とは、ロープが破断し乗りかごが落下した場合、乗客を含めた乗りかごと破断したロープとの総重量を一定減速度範囲で停止させる安全装置である。停止による衝撃から乗客を保護するため、乗りかごを停止させる減速度は、非常止め装置が動作した速度と停止に至るまでの摺動距離から算出する平均減速度が $0.35 \sim 1.0G$ ($3.45 \sim 9.8m/s^2$)の範囲と定められている。

図1は非常止め装置の概略構造を示す。一般に非常止め装置は乗りかごの下端部に2台(1組)設置されており、壁に固定されたレールに対応する位置に2個のくさび状摩擦材が配置され、その外側にバネが配置された構成である。乗りかごが最高速度を越え所定速度に達すると、2個のくさび状の摩擦材が上方に引き上げられ、レールを挟圧すると同時にバネを押し広げ、バネの反力によって生じるレールと摩擦材との摩擦力によって落下する乗りかごを停止させる機構である。

Fig.1 Emergency stop device.

* 原稿受付 1995年8月23日。

^{*1} 正員、日立製作所機械研究所 (〒315 土浦市神立町502)。

^{*2} 正員、日立製作所水戸工場 (〒312 ひたちなか市市毛1070)。

^{*3} 日立製作所機械研究所。

摩擦材には高速、高面圧の過酷な摺動条件における高い摩擦係数と耐摩耗性が求められ、且つ人命を守る安全装置であるため高い信頼性が必要となる。

従来、摩擦材として鋳鉄が用いられており、動作速度が約640m/minとなる定格速度540m/minの超高速エレベーター用非常止め装置にも採用されている。しかし、非常止め装置の動作速度が800m/minを超えると、鋳鉄を中心とする鉄系材料では摩擦熱によって異常摩耗が発生し制動が困難になると予測され、摩擦材として耐熱性に優れた特殊セラミックスを用いた非常止め装置が開発されている。特殊セラミックスを用いた非常止め装置は、現在世界最高速である定格速度750m/minの超高速エレベーターに実用化されている⁽¹⁾。

一般に非常止め装置の動作速度はエレベーターの定格速度の約20%増に設定される。筆者らは非常止め装置の動作速度が約960m/minとなる定格速度が810m/minの超高速エレベーターを開発するため、従来にない運動エネルギーを持つ乗りかごを安定に制動できる非常止め装置用金属摩擦材の開発を進めた⁽²⁾。開発した摩擦材は、従来、非常止め装置用摩擦材として用いられてきた片状黒鉛鋳鉄FC250に各種添加元素を加え、摩擦係数と耐摩耗性の改善を図った鋳鉄である⁽²⁾。本論文では、非常止め装置動作時の摺動状態を模擬した摩擦試験機によって評価した開発材と従来材FC250の摩擦特性、及び開発材を用いて製作した810m/min超高速エレベーター用非常止め装置の性能について報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料 表1は従来材であるFC250の組成範囲を、図2は金属組織を示す。従来材FC250は素地がほぼ100%パーライト組織の片状黒鉛鋳鉄であり、フェライトの析出はない。黒鉛形状は良好な片状であり、A型黒鉛である。

本実験では、上記FC250にCr, Ni, P, Siを添加して各種組織、組成の鋳鉄を試作し、実験に供した。なお、試作鋳鉄はすべて片状黒鉛鋳鉄であり、黒鉛形状はFC250とほぼ同一とした。

Table1 Chemical composition of FC250.

C	Si	Mn	P	S
3.2	1.81	0.60	0.01	0.018

Fig.2 Microstructure of FC250.

2.2 摩擦試験機と試験条件 図3は実験に用いた摩擦試験機の概略を示す。本試験機は代表的エレベーターレール材料であるSS400で製作した円盤状の試験片(TP2, ϕ 750mm)、摩擦材で製作したピン状試験片(TP1, ϕ 11 mm)、摩擦材試験片(TP1)を円盤(TP2)に押し付ける油圧駆動のX, Yテーブル、及び円盤駆動装置、測定・制御装置から構成される。ピン状試験片はXテーブル上に設置されたホルダー(Zテーブル)に支持され、ホルダーにはX方向(押し付け方向)、及びZ方向(摩擦方向)にロードセルが接続されている。

Fig.3 Schematic diagram of wear tester.

実験では、回転する円盤(TP2)に摩擦材試験片(TP1)を押し付け、同時に円盤(TP2)の回転数を減速させて非常止め装置動作時の乗りかごの速度変化を模擬した。停止に至るまでの押し付け力、摩擦力、回転数、摺動半径を1ms間隔で取り込み、減速時の摩擦係数変化を算出した。また摩耗量は、摩擦材試験片(TP1)の試験

前後の長さをマイクロメーターを用い、端面内3箇所測定し、その平均値の差から求めた。

平均摩擦係数と比摩耗量は、上記データと摩耗量から下式のごとく定義した。

$$\mu_s = \int Fv dt / \int Pv dt \quad (1)$$

$$\omega = W / \int Pv dt \quad (2)$$

μ_s は平均摩擦係数、 F は摩擦力、 v は摩擦速度、 P は押し付け力、 ω は比摩耗量、 W は摩耗量である。

表2は試験条件を示す。一般に非常止め装置の動作速度はエレベーター定格速度の約20%増に設定される。そこで、本実験では摩擦速度は開発エレベーターの定格速度である810m/minの約20%増、及び現行の超高速エレベーターと比較するため、現行超高速エレベーターの定格速度である540m/minの約20%増の範囲に設定した。減速度は非常止め装置規格から0.35～1.0Gに設定し、面圧はエレベーターの運動エネルギーから決定した。なお、実機では摩擦材の摩耗と共にバネが緩和し面圧が低下するが、実験では摩擦中の面圧は一定に保つ条件とした。また、摩擦中、円盤(TP2)の摺動面における摩擦材試験片(TP1)の押し付け位置は一定とし、摺動軌道は円状とした。摺動半径は約700mmであり、初速度16m/sから9.8m/s²の減速度で停止した場合、約6回転摺動する。試験終了後、円盤(TP2)の表面はXテーブルに設置したバイトによって切削加工して摩擦試験の影響層を削除し、初期の表面粗さに戻した後、アセトンを含ませたガーゼを用いて洗浄、乾燥後、次の試験に供した。摩擦材試験片(TP1)は、摩擦試験ごとに新たな試験片を用いた。先ず初期長さを測定後、摺動面をアセトンを含ませたガーゼを用いて洗浄、乾燥後、試験に供した。

Table2 Conditions of wear test

Sliding velocity	10 ～ 16 m/s
Deceleration	6 ～ 10 m/s ²
Pressure	6 ～ 10 kgf/mm ²
Lubrication	None

2.3 落下試験 落下試験とは、非常止め装置が制動すべき乗りかご、ロープの全重量に相当する重りを搭載したかごを所定高さから落下させ、所定速度で非常止め装置を動作させて落下するかごを停止させる実機条件での性能確認実験である。表3は、開発材を搭載した非常止め装置を用いて行った落下試験の条件を示す。なお、搭載重量は行程300mのエレベーターを想定した13,000kgfとした。

落下開始から停止に至る速度変化、バネ各部の応力、レールの摩擦跡を測定し、摩擦跡から算出した平均摩擦係数、加速度変化、停止後の乗りかごの傾き及び摩擦材の摩耗量から非常止め装置の性能を確認した。

Table 3 Conditions of droptest.

Weight	13,000 kgf
Velocity at Brake operating	964 m/min (16 m/s)
Lubrication	None

3. 結果と考察

3.1 摩擦試験機結果 図4は現行の超高速エレベーター(定格速度540m/min)の非常止め装置動作条件における、FC250と最も性能の優れた試作材(以後、開発材と表記する)の、摩擦開始から停止に至までの摩擦係数変化を示す。FC250の摩擦係数は、摩擦開始直後に $\mu \approx$ 約0.2から急激に低下し、停止時に高くなる。開発材はFC250と異なり、摩擦直後の摩擦係数 $\mu \approx$ 約0.2から低下が認められず、変動の少ない安定した値を示す。

図5、6は摩擦試験結果から算出したFC250と開発材の平均摩擦係数と平均比摩耗量の比較である。開発材はFC250に比較し、平均摩擦係数が約1.5倍、比摩耗量が約1/10の優れた特性を示す。なお、本結果は各種試験条件で行った結果の平均値であり、試験条件によって平均摩擦係数、比摩耗量ともに多少の変動がある。

Fig 4 Change in coefficient of friction depending on sliding velocity in wear test.

Fig. 5 Average coefficient of friction.

Fig. 6 Average wear rate.

3. 2 摩擦形態 図7は、図4に示した試験完了後のFC250からなる摩擦材試験片(TP1)の縦断面組織である。摩擦面下には約0.1mmの深さ域まで塑性流動層が認められる。

摩擦面の温度 θ sは、試験片とホルダーの熱容量、試験片とホルダーとの接触状態によって異なるため一概に類推はできないが、岡林ら⁽³⁾、岡田ら⁽⁴⁾の測定結果と、試験時の摩擦材試験片の赤熱状態、及び試験後の変色から約800℃に達していると推定され、摩擦形態は摩擦熱によって軟化した表層が塑性流動する熱的摩擦形態と考えられる。

Fig. 7 Microstructure in cross-section of FC250 after wear test.

3.3 添加元素の影響 開発材の摩擦係数、耐摩耗性向上は、各種元素の添加による特性改善の結果である。各種元素の添加による物性の変化と、摩擦特性との関連について以下論じる。

開発材はCr, Ni, P, Siを添加した片状黒鉛鑄鉄であり、その組織は微細なパーライト素地に網目状のステダイト相、少量のセメントイト相が析出し、フェライト相の析出はない。

図8はPを添加した場合のブリネル硬さ(以後H_Bと表記する)を、図9は析出するステダイト相の面積率を示す。P添加によって、室温のビッカース硬さ(以後H_vと表記する)が約H_v600~800であるステダイト相が網目状に析出し、材料の平均硬さが増加し摩擦係数と耐摩耗性を高める。

Fig. 8 Relation between Brinell hardness and P content.

Fig. 9 Relation between Steadite and P content.

一般に、高りん鑄鉄はステダイト相の析出によって摩擦係数と耐摩耗性を高めるが、高速摺動、高面圧条件では、摩擦係数、耐摩耗性とも急激に低下し、且つ摩擦係数が不安定になる⁽⁵⁾。これは摩擦熱によるステダイト相の軟化によって、硬質相としての効果が低減するためと考えられる。

本開発材では耐熱性改善のためCr, Niを添加し、上記の特性低下の軽減を試みた。Crを添加することによってセメントイト相の析出量が増加し、セメントイト相と比較し、より低温で生じるステダイト相の軟化の影響が軽減されることは既に知られている⁽⁵⁾。ここでは、主にNi添加によるパーライト相の耐熱性改善について論じる。

熱的摩耗形態においては、摺動面のみならず、摺動面を保持する摩擦表面層の強度が、摩擦係数、摩耗に対して問題になると考えられる。前述のごとく、摩擦表面は約800℃と推定されるが、摺動面を保持する摩擦表面層は急激に温度が低下し、約600℃になると予想される⁴⁾。そこで、Ni添加量の適正值を求めるため、Ni添加量を変えて、600℃における物性値を測定した。

図10はFC250にCrを1%、Niを0.1~2.3%添加した場合の600℃におけるパーライト相のHV硬さ変化を、図11は600℃における熱伝導率変化を示す。高温硬さは荷重50gfで測定し、約10点の平均値を示す。熱伝導率は、黒鉛の影響を避けるため、黒鉛形状、黒鉛析出量(面積)を事前に測定し、ほぼ同一形状の材料を用いてレーザフラッシュ法により測定した。

Fig. 10 Relation between Vickers hardness of Pearlite in 873K and Ni content.

Fig. 11 Relation between thermal conductivity in 873K and Ni content.

図10に示すように、Ni添加によってパーライト相の室温及び高温硬さが増加する。前述のごとく、本条件での摩擦は、摩擦面から深さ0.1mm域まで塑性流動が生じる熱的摩耗形態である。従って、高温における硬さ増加は、その流動抵抗を向上させパーライト相自体の耐摩耗性を高めると考えられる。さらにパーライト相中に網目状に析出するステダイト相、およびステダ

イト相の近傍に析出するセメントイト相の保持力が増すため、摩擦熱による硬質相の効果低減を軽減すると考えられる。

一方、図11に示すようにNi添加によって熱伝導率は低下する。一般に、鋳鉄の熱伝導率は黒鉛の析出量とその形状に依存する。しかし、前述のごとく測定した試料片の黒鉛析出量と形状はほぼ同一であるため、図11に示す熱伝導率の差は、Ni添加によるパーライト相の熱伝導率変化に起因すると考えられる。熱伝導率の低下は摩擦面直下の温度上昇を引き起こし、特に熱的摩耗における流動抵抗を低下させ、摩擦係数、及び耐摩耗性低下を生じさせる。従って、Ni添加の適正範囲は耐熱性と熱伝導率から決定されねばならない。

各種元素の添加量を変化させた実験結果から、耐熱性と熱伝導率との両立を図る組成値として、Cr=1%、Ni=2%、P=1.5%の添加量を決定した。

3.4 落下試験機結果 図12は開発材を搭載した非常止め装置を用いて行った落下試験結果の一例を示す。本結果では速度964m/minで装置が動作し、安定した制動特性を示して停止した。レールの摩擦跡から測定した摺動距離を用いて算出した平均減速度は0.76G (7.45m/s²)であり、かごの傾きとともにANSI(American National Standards Institute)に準拠した仕様を満足した。

図13は図12に示した落下試験における摩擦係数の変化を示す。なお縦軸の摩擦係数は、同一条件におけるFC250の平均摩擦係数を1.0として、相対値で表記する。摩擦係数は摩擦開始直後に低下が認められず、変動が少なく安定した値を示す。その変化は、図4に示す摩擦試験機結果にほぼ等しい。また、落下試験後の摩擦材の断面組織を観察した結果、摺動面より深さ約0.1mmまで塑性流動層が、深さ約0.2mmまで熱影響層が認められた。これらの結果から、実機相当の落下試験においても、摩擦試験と同様に熱的摩耗形態が生じていると考えられる。

Fig. 12 Change in velocity of droptest.

Fig 13 Change in coefficient of friction depending on sliding velocity in droptest.

図14は540m/minエレベーターと810m/minエレベーターの仕様から算出した非常止め装置が制動すべき乗りかごの運動エネルギーと平均減速度を1Gと仮定した位置エネルギーとの総和(以後、制動エネルギーと表記する)を示す。FC250が摩擦材として用いられている現行540m/minエレベーターの非常止め装置の制動エネルギーは約1MJであり、今回開発の810m/minエレベーター非常止め装置の制動エネルギーは約3.6MJとなる。図12、13に示すように開発材を用いた810m/minエレベーター非常止め装置は3.6MJの制動エネルギーを安定に制動することができる。さらに、摩擦材の摩擦係数と耐摩耗性の向上によって非常止め装置の軽量化が可能となり、その結果、現行540m/minエレベーターの非常止め装置に比較し、装置重量を約14%軽量化することができた。

なお、摩擦試験機と落下試験における摩擦係数の絶対値は一致しない。この原因は摩擦試験機と落下試験における摩擦材とレール(相当材)との熱容量差にあると考えられる。薄肉のレールを両面から挟み摩擦する実機に比較し、摩擦試験機では摩擦材に相当する微少な試験片を体積約6000倍のレール相当のディスクに加圧する。その結果、摩擦試験機では摩擦面におけるレール(相当)側の温度上昇が実機レールに比較して低く、摩擦熱のレール側分配率が実機より高くなるためと考えられる。

Fig 14 Comparison of braking energies.

4. 結 言

- (1) Cr, Ni, Pの添加によって、高温強度の低下を防ぎ、FC250に比較して平均摩擦係数約1.5倍、比摩擦量約1/10のエレベーター非常止め装置用鋳鉄を開発した。
- (2) 開発材を採用した非常止め装置を用いて落下試験を行ない、13,000kgの落下重量を964m/minの速度から0.76Gの減速度で停止させることができた。
- (3) 540m/minエレベーター用非常止め装置の制動エネルギーの3倍以上を保証し、さらに軽量化を達成した高性能非常止め装置を開発した。

参考文献

- (1) 杉田和彦, 西村信寛, 岡田浩二, 機講論, No.930-6(1993), 35
- (2) 岡田亮二, 山田俊宏, 實河原準, 機講論, No.940-57(1994), 183
- (3) 岡林邦夫, 川本信, 潤滑, 18, 4(1973), 282
- (4) 岡田克己, 吉田忠弘, 土方明躬, 潤滑, 24, 1(1979), 27
- (5) 辻村太郎, 真鍋修二, 鋳物, 60, 2(1988), 100