エスカレータの踏段異常走行検出装置に関する研究*

小 倉 学^{*1}, 治 田 康 雅^{*2}
吉 川 達 也^{*3}, 庵 下 英 樹^{*3}

Study on Curved Rail Safety Device of Escalator

Manabu OGURA^{*4}, Yasumasa HARUTA,
Tatsuya YOSHIKAWA and Hideki ANSHITA^{*4} Mitsubishi Electric Corp., Human Resources Development Center,
2-2-1 Akashia-Dai, Sanda-shi, Hyogo, 669-1323 Japan

CRS (Curved Rail Safety Device) is one of the safety devices of the escalator. With the feature with a wide range of detection, zone type CRS is often adopted. In the zone type CRS, an operation track is generally set up along the traveling direction of the step at the upper and lower curved section of escalator. And the rise of the step due to catching shoes between step is detected as displacement of the operation track. In this type CRS, it is preferable that the operation force is constant in the whole area within the range of detection. In this paper, the conditional equation that the operation force is constant is derived. CRS with nearly constant operation force is designed, and the validity of the design is confirmed by the experiment.

Key Words: Escalators, Safety Device, Accident Prevention, Detectors, Step, Curved Rail Safety Device

1. 結 言

エスカレータは、連続・大量輸送という特徴を生かし、デパート、スーパー、駅舎などを中心にわが国だけでも4万台以上が稼働している。そして、不特定多数の市民が利用するという立場から、安全性には十分な配慮がなされており、人身事故の発生頻度は極めて低いものに抑えられている。安全性の確保、向上に寄与しているものに各種の安全装置があり、構造物が相對運動をする箇所へ万が一手足等が食い込んだ場合、それを検知し、運転をただちに停止する機能を持つ。

このような安全装置の一つに、踏段異常走行検出装置(CRS: Curved Rail Safety Device)がある。CRSは、隣接する踏段の段差が小さくなる箇所において、踏段間へ靴先等が食い込んだ場合、これを検出し、エスカレータをただちに停止するための安全装置である。踏段間に靴先等が食い込むと、段差縮小動作がロックされるため、上段側の踏段が浮き上がる。CRS

はこの踏段の浮き上がりをリミットスイッチで検出するもので、踏段が段差を縮小しながら走行する領域の、ある一定範囲にわたって検出が可能なゾーンタイプ⁽¹⁾と、領域中の1点だけで検出するポイントタイプ⁽²⁾とに大別される。

ゾーンタイプのCRSは、検出範囲が広いという特徴から採用される例が多く、踏段の浮き上がりを、前記一定範囲にわたって配置された作動レールの変位として、検出するのが一般的である。このタイプのCRSでは、検出範囲(踏段の進行方向)の全域にわたって、動作力(リミットスイッチが動作するときの作動レールの押上げ力)が一定であることが望ましく、これまでリミットスイッチを1個のみ用いて、動作力を一定とする方法が考案されている⁽³⁾。しかし、この方法は、作動レールの両端を支持する圧縮ばねの予圧力を零とするものであり、作動レールを所望の位置に保持するという、基本的な機能を持たないものであった。逆に、予圧力が大きい場合、作動レール両端の動作力に比べ中央部の動作力が大きくなり、靴先等の食い込みを確実に検出しようとした場合、誤動作耐力が十分に確保できないという問題が生じる。

本論文では、CRSの動作解析のための簡易モデルを作成し、その動作特性についての検討を行った。そ

* 原稿受付 2006年8月7日。

^{*1} 正員、三菱電機(株)人材開発センター(〒669-1323 三田市あかしあ台2-2-1)。^{*2} 正員、三菱電機(株)稲沢製作所(〒492-8682 稲沢市菱町1)。^{*3} 三菱電機(株)稲沢製作所。

E-mail: Ogura.Manabu@ab.MitsubishiElectric.co.jp

して、動作力を一定にするための設計条件を見出した。さらに、その条件での動作が実験においても確認できたので、その内容について報告する。

2. CRS の構成と動作

2・1 エスカレータの構成 図1は、エスカレータ全体と踏段部分の構成図である。エスカレータの各構成要素は、トラスと呼ばれる主枠に組み付けられている。トラスの上部と下部に配置された上部スプロケット、下部スプロケット間には踏段チェーンが巻き掛けられており、これを駆動ユニットで駆動することで、踏段チェーンに結合された踏段が循環移動する。踏段の両側面には、駆動ローラ (Step chain roller) と追従ローラ (Trailing roller) が設けられており、それらをそれぞれ、駆動レール (Main track)、追従レール (Trailing track) で案内することにより、踏段の軌道と姿勢が制御される。本論文で取上げる CRS は、踏段の段差が変化する上下の曲部 (図中 M、N 部) において、追従レールに付加する形で構成されている。上下曲部の CRS の構成、動作には基本的な差はない

Fig. 1 Whole constitution of escalator

Fig. 2 Operation principle of CRS

め、以下、上曲部の CRS について動作原理、詳細構成を説明する。

2・2 CRS の動作原理 図2は、CRS の動作原理を示す概略図である。下段側踏段に搭乗した乗客の靴先等が、上段側踏段のライザに押付けられた場合、曲部で踏段間の段差が小さくなる際に、靴先が踏段間のすきまに引き込まれることがある。このとき、段差が小さくなろうとする踏段間の相対運動がロックされるため、上段側踏段は駆動ローラを中心に回転運動し、ライザ側が持ち上がる。これに伴い上段側踏段の追従ローラも追従レールから離れて浮き上がる。ここで、追従ローラの上方に作動レール (Operation track) を配置しておく、浮き上がった追従ローラは作動レールを押上げ、作動レールは変位する。このように、踏段間への靴先等の食い込みを、作動レールの変位として検出するのが、CRS の動作原理である。

2・3 CRS の詳細構成 図3は、上曲部における CRS の詳細図である。CRS の作動レールは追従レール上に転動する追従ローラに覆いかぶさるように、追従レールの上に配置されている。作動レールの両端は、レバー A、B により支持されている。レバー A、B は、追従レールに固定されたブラケット A、B に乗る形となっており、下方へは変位できなくなっている。一方、上方への変位に対しては、圧縮ばねのばね力が作用するように構成されており、締込みナットの締込み量を変えることで、圧縮ばねの予圧力が調整できるようになっている。すなわち、圧縮ばねに予圧力より大きな上方向の力が作用しない限り、作動レール

Fig. 3 Detail constitution of CRS

は持ち上がらない。また、作動レールの中間部分には、レバー D が取付けられており、作動レールのレバー D 取付位置が上方へ一定量変位した際、ブラケット B に固定されたリミットスイッチが押し込まれて、スイッチが動作し、エスカレータが停止するよう構成されている。

2.4 CRS の理想的な動作力 CRS は、靴先等が階段間に食い込んだときには確実に動作しなければならないが、ライザへのベビーカーの押付けやスツーカーキャリヤによる階段の引っ掛け、蹴飛ばし等のいたずらに対しては、動作してほしくない。したがって、動作力、すなわち、リミットスイッチが押し込まれるときの、追従ローラが作動レールを押上げる力の設定が重要となる。

図 4 は、追従ローラが作動レールを押上げる位置を横軸にとり、理想的な動作力と圧縮ばねの予圧力が大きい場合の動作力を、模式的に比較したものである。理想的な動作力は領域 A (ベビーカーの押付けやいたずらによる作動レールの押上げ力) より大きく、領域 B (靴先等の食い込みによる作動レールの押上げ力) より小さい範囲にあり、できるだけ一定となっていることが望まれる。これに対し、圧縮ばねの予圧力が大きい場合には、作動レール両端での動作力に比べ、中央の動作力が大きい山形の特性となり、靴先等の食い込み時に確実に動作(動作力が領域 B にかからない)させようとすると、両端の動作力が領域 A に入り込んでしまい、ベビーカーの押付けやいたずらに対し CRS が反応するという、誤動作耐力が十分でない状態となる。この誤動作耐力を向上させるためには、CRS の設計パラメータである圧縮ばねのばね定数、予圧力、リミットスイッチの位置、動作ストローク等をうまく設定することにより、動作力が作動レールの全範囲にわたって領域 A と領域 B の間にあり、しか

もできるだけ一定となるようにする必要がある。

3 章では、上記パラメータスタディを行うために作成した CRS の簡易モデルと、動作力一定となる条件について説明する。

3. CRS のモデル化と動作力一定の条件

図 5 に CRS の簡易モデルを示す。作動レールをまっすぐな剛体ばりとし、その両端 A, B を予圧力 P_A , P_B のかけられたばね定数 k_A , $a \times k_A$ の圧縮ばねで支持されているとしている。ここで、 a は正の定数である。作動レールの全長を l とし、A 端から距離 $p \times l$ ($0 \leq p \leq 1$) の位置 D に、作動レールの変位を検出するリミットスイッチが配置され、A 端から距離 $b \times l$ ($0 \leq b \leq 1$) の位置 C で作動レールが追従ローラにより押上げられるとする。

初期状態 AB であった作動レールの点 C に、押上げ力 F_C が作用したとする。 F_C の端点 A, B における分力 F_A , F_B がそれぞれ、予圧力 P_A , P_B よりも大きい場合、点 A, B は持ち上がる。しかし、分力が予圧力 P_A , P_B よりも小さい場合は、持ち上がらない。したがって、作動レールの動作を考える場合、分力 F_A , F_B と予圧力 P_A , P_B との大小関係で、場合分けして考える必要がある。ここで、分力 F_A , F_B は、

$$F_A = (1-b)F_C \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_B = bF_C \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。そして、場合分けの境界となる条件は、 $F_A = P_A$, $F_B = P_B$ より、

$$F_C = \frac{1}{1-b} P_A \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$F_C = \frac{1}{b} P_B \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。式(3)は点 A が持ち上がり始めるときの F_C の値、式(4)は点 B が持ち上がり始めるときの F_C の値を表す。また、点 C に $F_C = F$ の力が加わったとき、

Fig. 4 Comparison of ideal operation force with existing

Fig. 5 Simple model of CRS

点 A, B の少なくとも一方が持ち上がり、点 D の変位が $y_D = y_x$ になり、リミットスイッチが動作したとすると、この y_x が動作ストロークであり、 F が動作力である。さらに、点 D における作動レールの変位が y_x であるときの、点 A, B の変位を y_1, y_2 として、以下場合分けをして動作力 F とばね定数 k_A , 予圧力 P_A, P_B , 動作ストローク y_x , 定数 a, p , 変数 b の関係を検討する。ただし、現実性を考えて、

$$F \geq 0, \quad P_A \geq 0, \quad P_B \geq 0, \quad y_x \geq 0 \quad \cdots \cdots (5)$$

とする。

(1) $F_A < P_A$ かつ $F_B < P_B$ の場合

作動レールが動作することはないため、動作力に関する関係式はなし。

(2) $F_A \geq P_A$ かつ $F_B < P_B$ の場合

この場合、点 A は持ち上がり、点 B は持ち上がらない。 $F_A = F_1$ のときリミットスイッチが動作したとすると式(1)より、

$$y_1 = \frac{F_1 - P_A}{k_A} = \frac{(1-b)F - P_A}{k_A} \quad \cdots \cdots (6)$$

また、

$$y_2 = 0 \quad \cdots \cdots (7)$$

よって、

$$y_x = (1-p)y_1 \quad \cdots \cdots (8)$$

式(6)より、

$$y_x = (1-p) \frac{(1-b)F - P_A}{k_A} \quad \cdots \cdots (9)$$

であるから、動作力 F は、

$$F = \frac{1}{1-b} \left(\frac{k_A y_x}{1-p} + P_A \right) \quad \cdots \cdots (10)$$

となる。さらに、この式を書き換えると、

$$F = \frac{F_1}{1-b} \quad \cdots \cdots (11)$$

となる。式(11)は、点 A を持ち上げたときの動作力が決められている場合、 $F_A \geq P_A$ かつ $F_B < P_B$ となる条件下での動作力が、押上げ位置のみの関数となることを意味しており、実際の動作と符合する。また、動作力が式(10), (11)で与えられる b の範囲は、

$$0 \leq b < \frac{(1-p)P_B}{k_A y_x + (1-p)(P_A + P_B)} \quad \cdots \cdots (12)$$

である。

(3) $F_A < P_A$ かつ $F_B \geq P_B$ の場合

この場合は、点 A は持ち上がらず、点 B は持ち上がる。 $F_B = F_2$ のときリミットスイッチが動作したとすると、 y_1, y_2 は、

$$y_1 = 0 \quad \cdots \cdots (13)$$

$$y_2 = \frac{F_2 - P_B}{k_A} = \frac{bF - P_B}{k_A} \quad \cdots \cdots (14)$$

であり、 y_x は、

$$y_x = p y_2 = p \left(\frac{bF - P_B}{k_A} \right) \quad \cdots \cdots (15)$$

となる。よって、

$$F = \frac{1}{b} \left(\frac{a k_A y_x}{p} + P_B \right) \quad \cdots \cdots (16)$$

であり、この式を書き換えて、

$$F = \frac{F_2}{b} \quad \cdots \cdots (17)$$

が得られる。動作力が式(16), (17)で与えられる b の範囲は、

$$\frac{a k_A y_x + p P_B}{a k_A y_x + p(P_A + P_B)} < b < 1 \quad \cdots \cdots (18)$$

である。

(4) $F_A \geq P_A$ かつ $F_B \geq P_B$ の場合

この場合、点 A, B への分力が両方とも予圧力より大きい場合、両点とも持ち上がる。したがって、作動レールに関する力とモーメントの釣合いから、

$$k_A y_1 + P_A + a k_A y_2 + P_B = F \quad \cdots \cdots (19)$$

$$(k_A y_1 + P_A) l = (1-b) l F \quad \cdots \cdots (20)$$

という関係が成り立ち、これらの式から y_1, y_2 を求めると、

$$y_1 = \frac{(1-b)F - P_A}{k_A} \quad \cdots \cdots (21)$$

$$y_2 = \frac{bF - P_B}{a k_A} \quad \cdots \cdots (22)$$

であり、動作ストローク y_x は、

$$y_x = y_1 + p(y_2 - y_1) \quad \cdots \cdots (23)$$

であるから、式(21)~(23)から動作力 F は、

$$F = \frac{a k_A y_x + a(1-p)P_A + p P_B}{a(1-p) + b(ap - a + p)} \quad \cdots \cdots (24)$$

となる。ここで、分母の b にかかるカッコ内が 0、すなわち、

$$ap - a + p = 0$$

$$\therefore a = \frac{p}{1-p} \quad \cdots \cdots (25)$$

の関係が成り立つとき、式(24)は、

$$F = \frac{a k_A y_x + p(P_A + P_B)}{p} \quad \cdots \cdots (26)$$

となる。よって、押上げ位置 b によらず動作力一定の CRS が実現できる。ただし、式(24), (26)から動作力を求められる b の範囲は、

$$\frac{(1-p)P_B}{k_A y_x + (1-p)(P_A + P_B)} \leq b \leq \frac{a k_A y_x + p P_B}{a k_A y_x + p(P_A + P_B)} \quad \cdots \cdots (27)$$

である。参考文献(3)の CRS は $p=0.5$, $a=1$ で、しかも予圧力 $P_A = P_B = 0$ の特殊な場合のみを取扱ったものである。

4章では、以上の計算式を基に、両端での動作力 F_1 ,

F_2 が固定されているときの動作力について、パラメータスタディを行い、動作力特性について考察する。

4. 両端の動作力を固定した場合の 動作力特性の考察

CRSの動作力設定を行う際、両端の動作力を所望の値に合わせるとい手法は、よく用いられる。ここでは、両端の動作力を固定し、A端、B端のばねのばね定数の比 a と動作ストローク y_x を、それぞれ変化させたときの動作力の変化についてシミュレーション検討し、結果の考察を行う。

4・1 a の違いによる動作力の変化 表1に検討に用いた計算条件を示す。ただし、力の大きさはすべて、階段間へ靴先が食い込んだときの押上げ力の下限值 F_m で割って、無次元化している。図6は、表1の条件下で a をパラメータとして計算した、動作力特性である。 $a=1.326$ のケースは、 a と p の関係が式(25)を満たしている。両端における動作力 F_1 、 F_2 を固定した場合、式(12)の領域の動作力は式(11)で表され、式(18)の領域の動作力は式(17)で表される。その間の領域の動作力は式(24)から求められる。また、それぞれの領域の境界は式(4)と式(11)で表される曲線の交点、および式(3)と式(17)で表される曲線の交点として、求められる。すなわち、

Table 1 Calculative condition when a is changed

p	0.57
y_x (mm)	2.5
F_1	0.53
F_2	0.53
k_A (/mm)	0.05

Fig. 6 Operation force characteristic when a is changed

$$b = \frac{P_B}{F_1 + P_B} \quad \text{..... (28)}$$

および、

$$b = \frac{F_2}{F_2 + P_A} \quad \text{..... (29)}$$

である。ここで、 F_1 、 F_2 をさらに分解して考えると、

$$F_1 = P_A + k_A y_1 \quad \text{..... (30)}$$

$$F_2 = P_B + a k_A y_2 \quad \text{..... (31)}$$

であり、式(30)には a が含まれていないが、式(31)には含まれている。すなわち、 F_1 、 F_2 が固定の場合、 a が変化すると P_A は変化しないが、 P_B は変化する。 a の変化に伴い、式(3)で表される曲線は移動しないが、式(4)で表される曲線は移動し、式(11)で表される曲線との交点も移動する。

さらに図6からも明かなように、 a を変化させることで動作力の最大値を小さくすること(あるいは、最小値を大きくすること)には限界があり、その値は式(3)と(17)の交点、よって b が式(29)から求められる値であるときの F の値となり、

$$F = F_2 + P_A \quad \text{..... (32)}$$

この式は、最大動作力がB端の設定動作力よりも、最低でもA端のばねにかけた予圧力 P_A の分だけ、大きくなることを示している。

4・2 y_x の違いによる動作力の変化 表2は、シミュレーションに用いた計算条件である。ここでのシミュレーションは、 a と p の関係が式(25)を満足する

Table 2 Calculative condition when y_x is changed

p	0.57
a	1.326
F_1	0.53
F_2	0.5
k_A (/mm)	0.073

Fig. 7 Operation force characteristic when y_x is changed

場合について行った。図7は、表2の条件下で y_x をパラメータとして計算した動作力特性である。4・1項の場合と同様に、式(12)の範囲の動作力は式(11)で表され、式(18)の領域の動作力は式(17)で表される。そして、これらの範囲の動作力は y_x の変化の影響は受けて、同一曲線上に乗る。一方、 F_1 、 F_2 の内訳は式(30)、(31)であり、 y_x が変化すると y_1 、 y_2 が変化するから、 F_1 、 F_2 が固定であっても P_A 、 P_B は両方とも変化する。よって、式(3)、(4)で表される曲線は y_x の変化とともに移動し、式(11)、(17)で表される曲線との交点も移動する。したがって、式(27)の範囲の動作力は変化し、今回のケースでは、 y_x が大きくなるほど動作力が小さくなる傾向にある。また、 y_x が変化しても、式(27)の範囲では動作力が一定に保たれており、 $y_x=2.5\text{mm}$ のケースでは、作動レールの広い範囲にわたって、動作力が一定に保たれていることがわかる。

5. 実験による確認

4章では、シミュレーションにより CRS の動作力特性の検討を行った。特に、作動レールの全範囲にわたって動作力をほぼ一定に保てる、CRS の実現可能性を示した。そこで、本章では、現行の CRS と最適

と考えられる CRS の動作力について、シミュレーションと実験の比較を行い、モデル化やシミュレーションの妥当性を検証する。

表3に現行 CRS の仕様、図8にその動作力特性を示し、表4に最適化した CRS の仕様、図9にその動作力特性を示す。最適化計算を行う条件としては、①動作力の最大値 $\leq 0.76 F_m$ 、②動作力の最小値 $= 0.67 F_m$ 、③ p および y_x の値は従来と同じ、④ a と p は式(25)の関係とする、⑤予圧力 $\geq 0.085 F_m$ 、⑥予圧力負荷時のばねの縮み $\geq 0.6\text{mm}$ の6条件を用いた。現行 CRS、最適化した CRS のいずれにおいても、シミュレーション結果と実験結果はよく一致しており、モデル化およびシミュレーションの妥当性が確認された。現行 CRS の動作力の最大値と最小値の差に比べ、最適化した CRS の最大値と最小値の差は1/3程度になっており、作動レールの全範囲にわたって動作力をほぼ一定にできている。また、最大値が抑えられ、最小値が引上げられていることから、裕度が大きく、誤動作耐力も向上した CRS が得られていることがわかる。なお、作動レールの両端部分を完全に動作力一定としていないのは、作動レールを保持するために、ある程度の予圧力が必要(上記最適化の条件⑤、⑥)となるためである。

Table 3 Specification of existing CRS

p	0.57
a	1.0
y_x (mm)	2.5
F_1	0.53
F_2	0.5
P_A	0.33
P_B	0.35
k_A (/mm)	0.033

Fig. 8 Operation force characteristic of existing CRS

Table 4 Specification of optimal CRS

p	0.57
a	1.326
y_x (mm)	2.5
F_1	0.67
F_2	0.67
P_A	0.085
P_B	0.085
k_A (/mm)	0.1

Fig. 9 Operation force characteristic of optimal CRS

6. 結 言

CRS の動作解析のための簡易モデルを作成し、その動作特性についての検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) 作動レールの押上げ位置によらず、動作力が一定となる設計条件が明らかとなった。

(2) CRS 動作力特性のシミュレーション結果と実験結果がよく一致し、モデル化およびシミュレーションの妥当性が確認できた。

(3) シミュレーションによる動作力特性のパラメ

ータスタディ結果を基に、CRS の最適設計を行い、裕度が大きく、誤動作耐力も向上した CRS の提案を行った。

文 献

- (1) Syoji, H. et al., Operation track for escalator, *Published utility model application*, JP, 54-136286, U (1979).
- (2) Nakazawa, T. et al., Safety device for escalator, *Published patent application*, JP, 54-003790, A (1979).
- (3) Nakamura, H. et al., Safety device for escalator, *Examined utility model application publication*, JP, 63-046456, Y (1988).