エスカレーター踏段のライザー形状に関する一考察*

小倉 学^{*1}, 治田 康雅^{*2}
吉川 達也^{*3}, 喜成年 泰^{*4}

Consideration on Riser Shape of Escalator Step

Manabu OGURA^{*5}, Yasumasa HARUTA,
Tatsuya YOSHIKAWA and Toshiyasu KINARI^{*5} Human Resources Development Center, Mitsubishi Electric Corp.,
8-1-1 Tsukaguchi Honmachi, Amagasaki-shi, Hyogo, 661-8661 Japan

The comb structure between cleats in adjoining steps is one of the safety features in escalators. It prevents the biting of shoes, hands and feet between adjoining steps. This comb structure is between the riser cleat in the upper side step and the demarcation comb in the lower side step. Now, the depth of overlap of the comb structure in the upper side of the riser is gradually reduced over that in the lower side of the riser to make for easy exit when shoes, hands or feet are bitten between steps. This method greatly contributes to the prevention of nasty accidents. On the other hand, this ease in exit also makes it easier to be bitten in the upper side of the riser. Therefore, as one idea, safety improvement by making it more difficult to be bitten by deepening the engaging in the upper side of the riser is a likely area for study. In this paper, the riser cleat shape and step composition are examined with the view that "it should not ever be easy for shoes to be bitten between steps". As a result, if you follow this view, the overlap depth should be enlarged in the upper side of the riser.

Key Words: Elevator, Mechanism, Design, Safety Engineering, Escalators, Safety Device, Comb Structure, Steps, Riser Cleat Shape, Overlap Depth

1. 緒 言

エスカレーターは、不特定多数の一般人が利用するという機器の性格上、安全性には十分な配慮がなされている。そのような安全対策の一つに、踏段クリート（突起）やコム（櫛歯構造）相互の噛み合わせ構造がある。噛み合わせ構造は、踏段の踏板上面クリートとエスカレーター乗降部のコムとの間、および、隣接する踏段の下段側踏段踏板前端部と上段側踏段ライザー（蹴上げ部）クリートとの間に設けられており、これら相対運動を行う構造物間の隙間部分へ靴先等が噛み込むことの防止を目的としている。この噛み合わせ構造によって、隙間部分への噛み込み事故に対する安全性は極めて高いものとなっているが、残念ながら、噛み込み事故を完全に防止することはできていない。

現状の踏板前端部-ライザークリート間の噛み合わせ構造は、踏段間の段差が小さくなるに従い噛み合わせが徐々に浅くなる形状となっており⁽¹⁾⁽²⁾、靴先など

が踏段間の隙間に一旦噛み込んで、段差が小さくなると抜けやすくなる特性を有している。この特性が重大事故の未然防止に大きく貢献している。一方、この噛み合わせを浅くしていくことによる抜け易さは、噛み込み易いことを意味しており、この観点から、従来とは逆に、段差の縮小に伴い噛み合わせを深くすることにより噛み込み難くさを向上させるという安全対策にも検討の余地が残っていると考えられる。

そこで、本論文では、従来とは見方を変え、“噛み込み難さの向上”という視点に立ち、単に通常動作時の噛み込み難さの改善を図るためにライザー上部（踏段間段差の小さい領域）の噛み合わせを大きくするだけではなく、いたずら等により、踏段が浮き上がった場合の噛み込み難さの改善を図るという観点からも、踏板前端部とライザークリートの噛み合せ（ライザークリートの形状）をどのようにすればよいかについての理論検討を行う。

2. エスカレーターの踏段構造と
噛み込みメカニズム

2・1 エスカレーターの構造と動作 図1は、エスカレーター全体と踏段部分の構成図である。エスカレーターの各構成要素は、トラスと呼ばれる主枠に組みつけられている。トラスの上部と下部に配置された

* 原稿受付 2010年2月22日。

^{*1} 正員、三菱電機(株)人材開発センター(☎661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1)。^{*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。^{*4} 正員、金沢大学理工研究域機械工学系(☎920-1192 金沢市角間町)。

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

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。すなわち、乗降口部では、踏段の踏面が水平にならび、一定傾斜部では、踏段が階段状となり、その間の上下曲部(図1中、M,Nの部分)では、踏段の段差が変化しながら走行する。

Fig.1 Complete schematic of escalator

前述したように、踏段の踏板とライザーには、多数のクリート(突起)が設けられている。踏板に設けられたクリートの前端部(デマコム: demarcation comb)は、ライザークリートとの間で梳き上げ構造(噛み合わせ構造)を構成している。また、前述したように、各踏段は、駆動ローラを支持する駆動ローラ軸(Step chain roller shaft)を介して踏段チェーンに連結されているため、上下の曲部では、隣接する踏段の同一相当部位が駆動ローラ軸間の距離を半径とした相対円運動を行うように段差が変化する。さらに、踏段と駆動ローラの間は回転自由となっていることから、踏段のライザー側は駆動ローラを中心に回転する(浮き上がる)ことが可能な構造となっている。

2・2 踏段間への噛み込みメカニズム 以上のように構成されたエスカレーターでは、隣接する踏段間の梳き上げ構造部に靴先等が噛み込むことが稀にある。この噛み込みメカニズムを図2を用いて説明する。図2

は、上昇運転時の上曲部における搭乗踏段(下段側踏段)とその上段側の踏段の相対運動を表す概略側面図である。この場合の相対運動を上段側踏段を基準にして考えると、搭乗踏段が上段側踏段に対し、踏段上の同一相当部位が円運動を行うように矢印 z の方向に相対変位する。このため、搭乗踏段の踏板前端コーナー部の移動軌跡は、上段側踏段の踏板前端コーナー部を中心とし、半径が駆動ローラ軸間の距離 r_D の円弧となる。踏段間への噛み込み事故は、この相対運動中に、搭乗踏段に乗った利用者の靴先等が上段側踏段のライザーに押付けられている場合に発生する。

Fig.2 Relative motion between boarding step and upper side step

第1の噛み込みメカニズムは、図に示しているように、ライザークリート表面と靴の裏側あるいは先端との摩擦力により、ライザークリート間に喰い込んでいた靴先が下方に曲げられ、踏板前端部とライザークリートの間の梳き上げ構造部に噛み込んでしまうというものである。また、第2の噛み込みメカニズムは、靴先等のライザーへの押付け力が一定値以上であるとき、ライザークリート表面と靴の裏側との摩擦力により、上段側踏段のライザー側が浮き上がって、踏板前端部とライザークリートの噛み合わせ角 α が小さくなり(開口部ができることもある)、梳き上げ効果が低下して、踏板前端部とライザークリートの間に靴先が噛み込んでしまうというものである。

従来の踏段の梳き上げ構造においては、靴先等が噛み込んだ場合、抜け易くするとの配慮から、踏板前端部とライザークリートとの噛み合い角 α がライザーの下部で大きく、上方へいくほど小さくなるように構成されており、これが逆に、ライザー下部に比べライザー上部での梳き上げ効果を低下させるというトレードオフの関係となっている。したがって、従来とは考え方を改めて“噛み込み難さの向上”を目的とした安全対策を施すと仮定した場合、第1の噛み込みメカニズ

ムについてのみ対策するのであれば、梳き上げ効果の向上を図るべく、単純にライザー上部における噛み合い代 α を大きくすれば良いことは明らかである。しかし、この対策が、第2の噛み込みメカニズムに対する対策、すなわち、踏段が浮き上がった場合の噛み合い代 α の減少を抑える方向になっているのかどうかを確認する必要がある。

そこで、次章では、第1の噛み込みメカニズム（上段側踏段が浮き上がらない場合）の対策となる、ライザー上部の噛み合い代 α を大きくする場合のライザークリートの設計方針を明らかにするとともに、第2の噛み込みメカニズム（上段側踏段が浮き上がる場合）の対策として、ライザークリート形状がどうあるべきなのかを明確化する。

3. ライザークリート表面形状の設計方針

3・1 上段側踏段が浮き上がらない場合 図3は、踏段の段差が小さくなる場合の搭乗踏段の踏板前端コーナー部の移動軌跡と上段側踏段ライザークリートの表面形状との位置関係を表す概略図である（踏板前端部とライザークリートが噛み合っている）。踏段間段差が縮小する際、隣接踏段は同一相当部位が相対円運動し、また通常、側面から見たライザークリートの表面形状は円弧となっていることから、踏板前端コーナー部の移動軌跡と上段側踏段ライザークリート表面形状は、原点O（上段側踏段の踏板前端コーナー部）を中心とする半径 r_D の円弧と、任意の点E（ c, d ）を中心とする半径 r_F の円弧として表すことができる。搭乗踏段踏板前端コーナー部の移動軌跡上の任意の点をD（ x_D, y_1 ）、点Dとy座標が等しいライザークリート表面上の点をF（ x_F, y_1 ）とおけば、それぞれの点は、

$$x_D^2 + y_1^2 = r_D^2 \quad \text{-----(1)}$$

$$(x_F - c)^2 + (y_1 - d)^2 = r_F^2 \quad \text{-----(2)}$$

Fig.3 Relation between demarcation comb corner and surface shape of riser cleat

という式を満足する。よって、これらの式から、上段側の踏段が浮き上がらずに、搭乗踏段と上段側踏段の段差が縮小していく場合の踏板前端コーナー部の高さ y_1 におけるライザークリートと踏板前端との噛み合い代 α は、

$$\alpha = x_D - x_F \\ = -\sqrt{r_D^2 - y_1^2} - c + \sqrt{r_F^2 - (y_1 - d)^2} \quad \text{-----(3)}$$

である。上段側踏段が浮き上がらずに通常の状態で搭乗踏段と上段側踏段の段差が縮小していく場合の噛み合い代 α の大きさの変化を評価するためには、踏板前端コーナー部の高さ y_1 の変化に対する α の変化の感度、すなわち、 α の y_1 に関する微分値に着目すれば良い。式(3)を y_1 で偏微分した値を s とおけば、

$$s = \frac{\partial \alpha}{\partial y_1} = \frac{y_1}{\sqrt{r_D^2 - y_1^2}} - \frac{y_1 - d}{\sqrt{r_F^2 - (y_1 - d)^2}} \quad \text{---(4)}$$

となる。ライザー上部の噛み込みにくさ（梳き上げ効果）をライザー下部と同等かそれ以上にするためには、 y_1 の増加に対し噛み合い代 α が一定か増加するようにすればよいから、 $s \geq 0$ であれば良い。したがって、

$$\frac{y_1}{\sqrt{r_D^2 - y_1^2}} - \frac{y_1 - d}{\sqrt{r_F^2 - (y_1 - d)^2}} \geq 0 \quad \text{-----(5)}$$

となる。ここで、 $r_F = kr_D$ とおけば、 $y_1 \leq 0$ であることから、現実的な解として、

$$d \geq (1 - k)y_1 \quad \text{-----(6)}$$

が得られる。この式は、ライザーの上部へいくほど噛み合い代 α が一定か大きくなるために円弧中心Eのy座標 d がとるべき値の範囲を示すものであるが、 y_1 がとる全範囲にわたって式(6)を満足するように d の値を定める必要があることには注意を要する。

図4～6は、式(4)から、 $r_D = 400\text{mm}$ としたときの d と s の関係を、 y_1 をパラメータとして示したグラフである。図4、5、6はそれぞれ、 $0 < k < 1$ ($r_F < r_D$)、 $k = 1$ ($r_F = r_D$)、 $k > 1$ ($r_F > r_D$)の場合の一例として、 $k = 0.9$ 、 $k = 1.0$ 、 $k = 1.1$ の場合を示している。ここで、 y_1 の範囲は $-200\text{mm} \leq y_1 \leq 0$ としている。

これらの図と式(6)とから、 y_1 の増加に対し噛み合い代 α が増加する（ $s \geq 0$ となる） d の範囲を求めると、 $0 < k < 1$ の場合には、 $y_1 = 0$ のときに d の取り得る範囲が最も狭くなり、すべての y_1 の範囲で式(5)が満足されるのは、 $d \geq 0$ の場合となる。また、 $k = 1$ の場合には、 y_1

Fig.4 Relation between d and s when parameter is y_1 ($k=0.9$)

Fig.5 Relation between d and s when parameter is y_1 ($k=1.0$)

Fig.6 Relation between d and s when parameter is y_1 ($k=1.1$)

の値によらず、 $d \geq 0$ が求める d の範囲となるが、 $d=0$ の場合には、 $s=0$ となり、噛み合い代 α は増加しない。さらに、 $k>1$ の場合には、 $y_1=y_{\min}$ (=ライザー下端の y 座標、ここでは-200) のときに d の取り得る範囲が最も狭くなり、すべての y_1 の範囲で式(5)が満足されるのは、 $d \geq (1-k)y_{\min} > 0$ の場合である。

以上の検討により、上段側階段が浮き上がらない場合におけるライザー上部の噛み込み難さを向上（梳き上げ効果を向上）させるための、即ち、ライザー上部へいくほど踏板前端コーナー部とライザークリートの噛み合わせを深くするための基本的な設計方針（ライザークリート表面形状の円弧中心 E の y 座標の定め方）が明らかとなった。実際のライザークリートを設計する際のテクニックとして、ライザーの上部へ行くほどある階段間差までは水平噛み合い代 α を増加させ、その位置より段差が小さい範囲については、噛み合い代を一定とするという方法も取り得る。

3・2 上段側階段が浮き上がる場合 図7は、靴先のライザーへの押付け等により、上段側階段が浮き上がる場合の搭乗階段と上段側階段の相対的な位置関係を示す概略図である。エスカレーターの上下曲部 M、N（図1）で階段の段差が縮小する場合、通常、階段の踏面は水平を維持した状態であるが、前述したように、上段側階段のライザーに靴先等が一定力以上で押付けられると、階段間の段差縮小がロックされるため、上段側の階段のライザー側が駆動ローラの回転中心 A を中心に浮き上がる。そして、上段側階段のライザークリートと搭乗階段の踏板前端部との間隔 p は広がる（広がることを前提としているため、前項での噛み合い代 α とは逆に、間隔が広がる方向を正としている。ライザークリートと踏板前端部が噛み合っている場合、 p は負となる。以後、階段間隔 p と呼ぶ）。

Fig.7 Relative position relation between boarding step and upper side step when the step lifts

以下、上段側階段が浮き上がる場合の搭乗階段踏板前端コーナー部の高さ方向の位置と階段間隔 p との関係について詳細に述べる。

図8は、上段側階段が浮き上がる場合の階段間隔 p を説明するための概略図である。座標の原点 O に搭乗階段踏板前端コーナー部の回転移動中心点（上段側階段踏板前端コーナー部）をとり、搭乗階段踏板前端コーナー部の移動軌跡（半径 r_D ）上に任意の点 $D(x_D, y_1)$

Fig. 8 Outline figure to express gap between steps p when the step lifts

をとる。エスカレーターの上下曲部 M, N (図 1) で踏段間の段差が小さくなるときに、搭乗踏段が下方 (y 軸の負の方向) から上昇し、搭乗踏段踏板前端コーナー部が点 D の位置にきたときに靴先の押付けなどにより踏段間の段差の縮小がロックされたとすると、点 D と y 座標値が等しい上段側踏段のライザークリート表面上の点 B (x_B, y_1) は、駆動ローラの回転中心 A (a, b) を中心に点 D と y 座標が一致するように回転移動 (半径 r) し上昇する。このときの関係を式で表すと、

$$x_D^2 + y_1^2 = r_D^2 \quad \text{----- (7)}$$

$$(x_B - a)^2 + (y_1 - b)^2 = r^2 \quad \text{----- (8)}$$

$$p = x_B - x_D \quad \text{----- (9)}$$

となる。よって、式(7)から、

$$x_D = -\sqrt{r_D^2 - y_1^2} \quad \text{----- (10)}$$

であり、式(8)と、基本的に $x_B < a$ であることから、

$$x_B = a - \sqrt{r^2 - (y_1 - b)^2} \quad \text{----- (11)}$$

である。したがって、式(9), (10), (11)より、踏段間隔 p は、

$$p = a - \sqrt{r^2 - (y_1 - b)^2} + \sqrt{r_D^2 - y_1^2} \quad \text{---- (12)}$$

となる。

図 9 中の濃い線は、 $a = -60\text{mm}$, $b = -80\text{mm}$, $r_D = 400\text{mm}$ の場合に r をパラメータとして、 y_1 と p の関係を示したものである。 p が負の場合は踏板前端部とライザークリートが噛み合っている。また、図中の薄い線は、 $c = -5\text{mm}$, $d = 5\text{mm}$, $r_F = 400\text{mm}$ の場合の上段側踏段が浮き上がらない場合の y_1 と p (=初期踏段間隔 p_0 : 踏段が浮き上がらない場合の踏段間隔) との関係を示したものである。ライザークリート表面の駆動ローラ回転中

Fig. 9 Relation between y_1 and p when parameter is r

心 A からの距離 r は

$$r = \sqrt{\left\{a - c + \sqrt{r_F^2 - (y_1 - d)^2}\right\}^2 + (y_1 - b)^2} \quad (13)$$

として求められ、この値は y_1 によって異なるため、段差の縮小がどの位置でロックされるかによってその後の踏段間隔の広がり方に違いが生じる。図 9 中の $r = 312.4\text{mm}$ と 331.6mm のケースは、それぞれ、 y_1 が -200mm と -100mm の位置で段差の縮小がロックした場合の踏段間隔の広がり方を示したものである。

段差の縮小がロックした後の上段側踏段の浮き上がりに伴う踏段間隔 p の変化を評価するためには、 y_1 の変化に対する p の変化の感度、すなわち、 p の y_1 に関する微分値 q (踏段間隔拡大感度) に着目すれば良い。そこで、式(12)を y_1 で偏微分した値 q を求めると、

$$q = \frac{\partial p}{\partial y_1} = \frac{y_1 - b}{\sqrt{r^2 - (y_1 - b)^2}} - \frac{y_1}{\sqrt{r_D^2 - y_1^2}} \quad (14)$$

となる。図 10 は、各定数の値が図 9 を求めた場合と同様としたときの r をパラメータとした y_1 と q の関係を示したものである。 r を変えることにより y_1 と q の関係は大きく変化するが、どの曲線も $y_1 = b$ の位置で q は同一値 q_b となる。

$$q_b = -\frac{b}{\sqrt{r_D^2 - b^2}} (= 0.204) \quad \text{----- (15)}$$

実際のエスカレーターでは、安全装置が装着されており⁽³⁾、踏段が大きく浮き上がることはないため、基本的に踏段が浮き上がり始めるときの q ($=q_0$: 初期踏段

間隔拡大感度) が重要となる。 q_0 は式(13)の r を式(14)に代入することにより求めた q の値であり、

$$q_0 = \frac{y_1 - b}{a - c + \sqrt{r_F^2 - (y_1 - d)^2}} - \frac{y_1}{\sqrt{r_D^2 - y_1^2}} \quad (16)$$

である。図 10 中、 q_0 を薄い線で示す。参考までに、踏段浮き上がり後の踏段間隔拡大感度 q の例として、 $y_1 = -200\text{mm}$ ($r = 312.4\text{mm}$) と $y_1 = -100\text{mm}$ ($r = 331.6\text{mm}$) の場合を示す。

Fig.10 Relation between y_1 and q when parameter is r

次に、初期踏段間隔拡大感度 q_0 が任意の値をとるとき、点 B の位置を求める。式(11)を用いて式(14)を書き換えると、

$$q = \frac{y_1 - b}{a - x_B} - \frac{y_1}{\sqrt{r_D^2 - y_1^2}} \quad \text{----- (17)}$$

となる。式(17)において、駆動ローラの回転中心 A (a , b) と点 D の回転半径 r_D は定数であるから、 q の値を決めることにより、 y_1 と x_B の関係 (点 B の軌跡) を求めることができる。したがって、式(17)の左辺を q_0 (一定値) とすれば、点 B の軌跡として、初期踏段間隔拡大感度 q_0 が一定となる曲線、すなわち、初期踏段間隔拡大感度 q_0 が一定のライザークリート表面形状を求めることができる。式(17)から、 $q = q_0$ としたときの y_1 と x_B の関係は、

$$x_B = \frac{(q_0 a + b - y_1) \sqrt{r_D^2 - y_1^2} + a y_1}{y_1 + q_0 \sqrt{r_D^2 - y_1^2}} \quad \text{----- (18)}$$

となる。図 11 は、 $a = -60\text{mm}$, $b = -80\text{mm}$, $r_D = 400\text{mm}$ としたときに、初期踏段間隔拡大感度 q_0 をパラメータとして、 q_0 が一定となる点 B (x_B , y_1) の軌跡、すなわち、 q_0 一定のライザークリート表面形状を示すものである。

Fig.11 Locus that q_0 is constant

すべての曲線は点 A を通過しており、これは、式(18)の q_0 を式(15)の q_b とおくことにより解析的に証明することができるが、 $q_0 = q_b = 0.204$ (図では 0.203 と 0.205 の場合を記載) の場合に極限値的に現れる十文字の軌跡は解析的に求めることはできない。図から、 $y_1 > b$ の領域では、 x_B の値が小さくなるほど q_0 の値が小さくなり (踏段間隔が開き難い)、 $y_1 < b$ の領域では、 x_B の値が大きいほど q_0 の値が小さくなっている。したがって、踏段が浮き上がる場合にも浮き上がらない場合にも靴先等が噛み込みにくい踏板前端部とライザークリートの噛み合せ構造について総合的に考えると、ライザーの下部では、第 1 の噛み込みメカニズムによる噛み込みを防止するために必要最小限の噛み合せ代を確保し、ライザー上部では、噛み合せ代をできるだけ大きくとれば良い (強度が許す範囲でライザークリートをできるだけ高くすれば良い) と言える。したがって、ライザークリートの表面形状を円弧とする場合には、ライザー下部から上部にかけて徐々に噛み合せが深くなるように円弧中心を定めれば良い。

4. 結 言

本論文では、エスカレーターの踏段間 (噛みあわせ構造部) への靴先などの噛み込み事故に対する安全対策の一つの考え方として、噛み込み難さの向上 (梳き上げ効果の向上) を図るという場合を仮定して踏段のライザー形状に関する理論検討をおこなった。その結果、

1) 上段側踏段が浮き上がらない場合に噛み込み難さを

向上させるためには踏段の段差が小さくなるほど踏板前端コーナー部とライザークリートの噛み合わせを深くするか維持する必要があるが、これを実現するための設計方針として、ライザークリート表面形状を規定する円弧中心の y 座標の制約条件を明らかにした。

- 2) 上段側踏段が浮き上がる場合の踏段間隔拡大感度は、ライザー下部ではライザークリート表面の位置が上段踏段側へいくほど小さく、ライザー上部では下段踏段側へいくほど小さくなり、噛み込み難くなる。
- 3) 上記 1), 2) より、踏板前端とライザークリートの噛み合わせは、基本的にライザーの上部へいくほど大きくなるように設定すれば良い。

尚、本論文は、あくまで、噛み込み難さ（梳き上げ効果）に着目し、踏段間への噛み込みの発生を低く抑えるためにはどうすべきかについて実施した理論検討であり、今後、実用化を目指す場合には、万が一噛み込んだ場合の引き抜き難さ等、総合的な検討、評価が必要である。

文 献

- (1) Nakajima, M., Step of escalator (in Japanese), *Japanese Patent Disclosure*, JP, H03-284594, A(1991).
- (2) Sugita, K. Kitamura, S., Step of escalator (in Japanese), *Japanese Patent Disclosure*, JP, S61-192689, A(1986)
- (3) Ogura, M. Haruta, Y. Yoshikawa, T. Anshita, H., Study on Curved Rail Safety Device of Escalator, *Transactions of the JSME*, Vol. 73, No. 726, C(2007), pp. 385-391