

# エスカレータのステップブラケットの強度

## Strength of Step Bracket for Escalator

中尾 彰 一\* 寺 西 勝 也\*  
Shōichi Nakao Katsuya Teranishi

### 要 旨

エスカレータのステップを構成する部品のうち、とくにステップブラケットは乗客荷重を支持し、かつステップ構成の中心となるものであるから強度的に信頼性が高く、長年月の使用において常に高い精度を維持するものでなければならない。

日立エスカレータには、従来広く用いられてきたアルミ合金鋳物製にかわって軽量で、量産性にすぐれた薄鋼板をプレス成形したステップブラケットを採用しているが、その実用にあたり理論計算と実験による強度と精度の検討を行なった。その結果、ステップブラケット部材に生ずる応力は計算値と実験値がよく一致する。また光弾性実験および動的な繰りかえし負荷試験にも大きな応力集中、破損、変形が無く、強度的にじゅうぶんな信頼性をもっていること、および経年変形が無く、長期にわたり蛇(だ)行のない正常な運転を行なうことを確認した。

### 1. 緒 言

エスカレータは建物の下階床から上階床へ、水平輸送から傾斜輸送、さらに再び水平輸送を経て人を運ぶ独特の交通機関である。図1はその構造の概略を示したものである。これに用いるステップは乗客が直接乗るものであり、乗降口ではステップ上面の細かいピッチの棧(さん)が、床端に設けたくしと高い精度でかみ合って、乗客の足先が床下に吸い込まれないように保護している。したがってステップはエスカレータを構成する部品の中でもとくに重要なものであり、次のような性能が要求される。

- (1) ステップを構成する各部品がそれぞれ高い精度を持ち、ステップ組立品が均一で高い精度を持つこと。
- (2) 乗客荷重に対してじゅうぶんな強度と剛性を持ち、長年月使用しても破損、変形などを起こさず精度を維持できること。
- (3) 既納品との互換性があり、一部品だけでも交換できるこ

と。

- (4) エスカレータ本体に随時、容易に取り付けおよび取りはずしできること。
- (5) ステップは1台のエスカレータに普通50~70セット使用するものであるから、各部品は量産性に富む材質、構造であること。
- (6) ステップの自重によりステップチェーンに生じる張力を小さくするため、できるだけ軽量であること。

ステップを構成する部品の中でもとくにブラケットは乗客荷重をささえるものであるから、これらの性能をじゅうぶん満足しなければならない。従来エスカレータのステップブラケットには、比較的加工が容易で精度も出しやすく、かつ軽量のアルミ合金鋳物が一般に用いられているが、われわれはさらに強度的信頼性が高く、長年月の使用後も安定した精度で、上記の諸条件をじゅうぶん満足する薄鋼板プレス成形ステップブラケットを開発し実用に移した。

以下ステップブラケットの強度の理論的究明と、薄鋼板プレス製

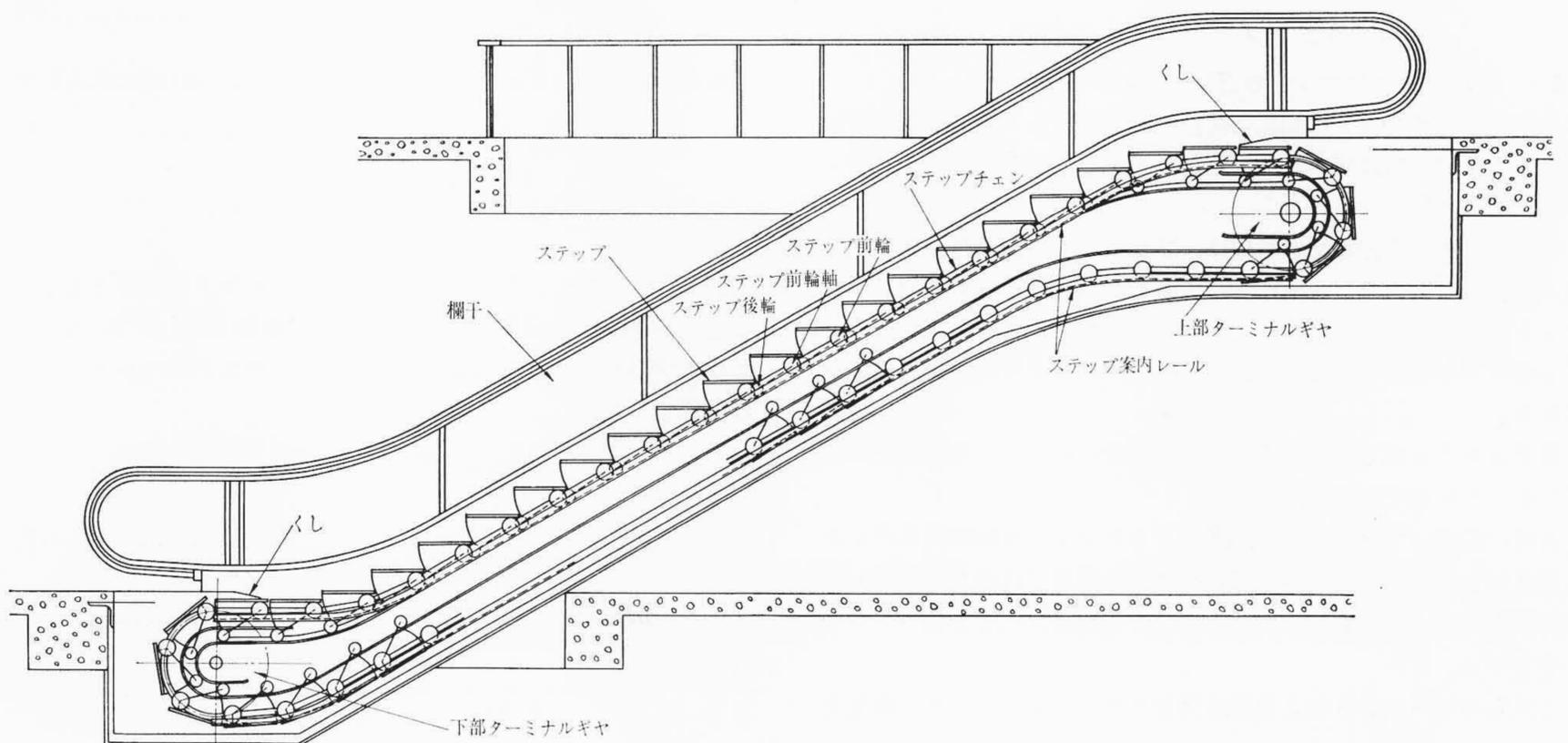


図1 エスカレータ構造図

\* 日立製作所水戸工場

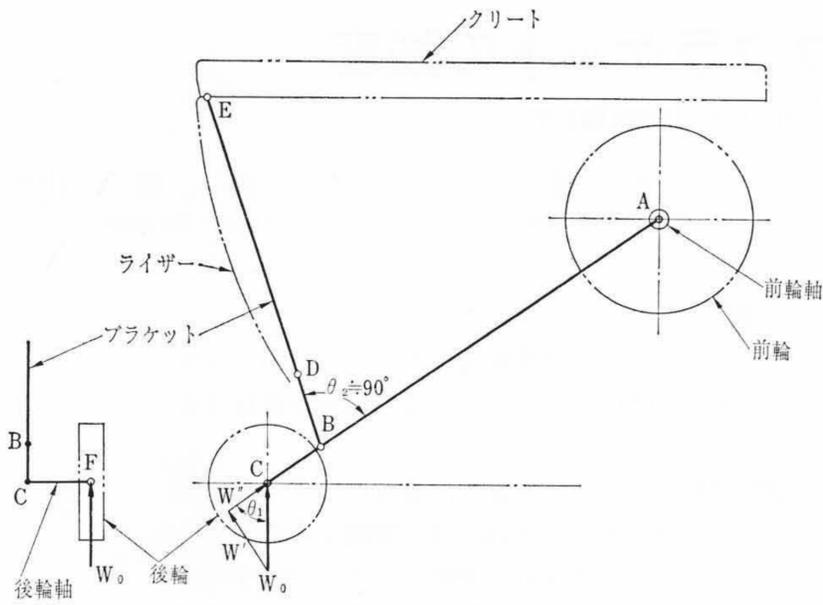


図2 ステップブラケットに加わる力の関係

ブラケットの静的および動的な強度と精度の試験結果について述べる。

### 2. ステップの構造

ステップを構成する部品には、ステップ上面に細かいピッチの棧を有し、床端のくしとかみ合うクリート、これをささえる左右のブラケット、傾斜輸送部で生ずる前後ステップ間の段差が水平部に移行するに従って徐々に消滅するとき、乗客の足元がクリート間にはさまれないように保護するライザと呼ぶ保護板、左右のブラケットを結ぶ補強、前、後輪軸および前後輪などがある。ステップのクリート面が水平輸送でも傾斜輸送でも常に水平を保つのは、図1に示すようにステップの前、後輪をささえるガイドレールの形状による。したがってクリートと前、後輪を取り付けるブラケットはこれに適するように、一般に三角形をなしている。後輪はブラケットに直接取り付けられるが、前輪は一般に前輪軸と一体になってステップチェーンに取り付けられ、ステップはブラケットの先で前輪軸と軸受を介して取り付けられており、この軸受部でエスカレータ本体と自由に切りはなせるようになっている。

### 3. ステップブラケットの強度

#### 3.1 ステップブラケットの部材に加わるモーメント

ステップブラケットに加わる荷重による応力を、理論的に解析してみる。まず最初にブラケット部材に生ずる曲げおよびねじりモーメントを求める。

ステップ上に加わる乗客荷重は、ブラケットに取り付いている前輪と後輪によってレール上に支持されるが、前輪の分担荷重はブラケットに関係なく直接クリートから受けるものと考えてよい。したがってブラケットの強度に関係する外力は後輪からの支持反力のみである。

図2はステップブラケットの部材構成とこれに加わる外力との関係を示したものである。

後輪の位置、すなわち図の点Fはブラケットの後輪軸固定点Cから突き出しており、したがってブラケット部材には点Fから加わる支持反力によって垂直力、曲げモーメントおよびねじりモーメントが発生する。

これらのモーメントおよび垂直力を求めるにあたって次の仮定をおく。

仮定

- (1) 部材  $\overline{ABC}$  の点A、すなわち前輪軸との結合部は固定点である。

- (2) 部材  $\overline{ABC}$  と部材  $\overline{BDE}$  の交点Bは剛に接続しており、したがって2部材の点Bにおける変位は等しい。
- (3) 部材  $\overline{ABC}$  と部材  $\overline{BDE}$  とは直角に交わる。  
( $\theta_2 \doteq 90^\circ$ )
- (4) 部材  $\overline{BDE}$  の点DおよびE、すなわちライザとの結合部はねじりに対してのみ剛であり、曲げに関しては自由支持である。
- (5) 部材  $\overline{BDE}$  の点Dに必要なライザ取り付け用の穴は部材の変形に関係しない。

いま後輪軸のブラケットからの突出長さを  $\overline{CF}$ 、後輪すなわち点Fから加わる支持反力  $W_0$  が部材  $\overline{ABC}$  となす角  $\theta_1$  をとすれば、部材  $\overline{BC}$  の点Bには、

$$T = W_0 \cdot \overline{CF} \cdot \sin \theta_1 \dots\dots\dots (1)$$

$$M_X = W_0 \cdot \overline{CB} \cdot \sin \theta_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$M_Y = W_0 \cdot \overline{CF} \cdot \cos \theta_1 \dots\dots\dots (3)$$

のモーメントが生ずる

ここに、 $T$  はねじりモーメント、 $M$  は曲げモーメントであり、曲げモーメントの記号  $X$  および  $Y$  は紙面に平行な曲げ、および紙面に直角方向の曲げを表わす。

部材  $\overline{AB}$  および  $\overline{BDE}$  には上記のモーメントが伝達される。すなわち部材  $\overline{AB}$  が点Bにおいて伝達されるモーメントを記号1、部材  $\overline{BDE}$  が点Bにおいて伝達されるモーメントを記号2で表わせば、

$$T = T_1 + M_{2YB} \dots\dots\dots (4)$$

$$M_X = M_{1XB} + M_{2XB} \dots\dots\dots (5)$$

$$M_Y = M_{1YB} + T_2 \dots\dots\dots (6)$$

であり、前述の仮定(2)から各部材のモーメントによるたわみ角あるいはねじれ角が点Bにおいて等しいとおくことによって、2部材が分担するモーメントの大きさを求めることができる。

たとえば、ねじりモーメント  $T$  の各部材が分担するモーメントの大きさについては、部材  $\overline{AB}$  の点Bにうけるねじりモーメント  $T_1$  による点Bのねじれ角を  $\phi$ 、部材  $\overline{BDE}$  の点Bから加わる曲げモーメント  $M_{2YB}$  による点Bにおけるたわみ角を  $\psi$  とすると、

$$\phi = \frac{T_1 \cdot \overline{AB}}{G \cdot J_1} \dots\dots\dots (7)$$

$$\psi = \frac{(3\overline{BD} + \overline{DE}) \cdot M_{2YB}}{3E \cdot I_{2Y}} \dots\dots\dots (8)$$

であるから、(7)式と(8)式を等しいとおき、(4)式に代入して、

$$T_1 = \frac{k_1}{k_1 + 1} \cdot T \dots\dots\dots (9)$$

$$M_{2YB} = \frac{1}{k_1 + 1} \cdot T \dots\dots\dots (10)$$

となる。

以下同様にして、各部材が分担するモーメントの大きさを求めることができ、部材  $\overline{AB}$  については点B、部材  $\overline{BDE}$  についてはとくにライザ取り付け穴がある点Dに対してその生ずるモーメントを求め整理すると、

$$T_{1B} = \frac{k_1}{(k_1 + 1)} \cdot T \dots\dots\dots (11)$$

$$M_{1XB} = \frac{k_2}{(k_2 + 1)} \cdot M_X \dots\dots\dots (12)$$

$$M_{1YB} = \frac{k_3}{(k_3 + 1)} \cdot M_Y \dots\dots\dots (13)$$

$$T_{2D} = \frac{1}{(k_3 + 1)} \cdot M_Y \dots\dots\dots (14)$$

$$M_{2XD} = \frac{\overline{BD}}{2\overline{BE}(k_2 + 1)} \cdot M_X \dots\dots\dots (15)$$

$$M_{2YD} = \frac{1}{(k_1 + 1)} \cdot T + \frac{3\overline{BD} \cdot k_3}{2\overline{AB}(k_3 + 1)} \cdot M_Y \dots\dots\dots (16)$$

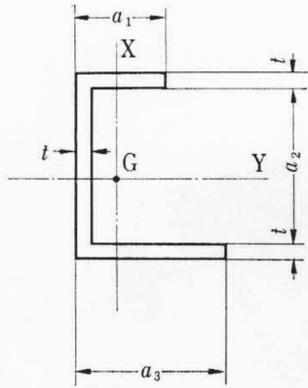


図3 薄鋼板プレス製ステップブラケット部材の基本断面形状

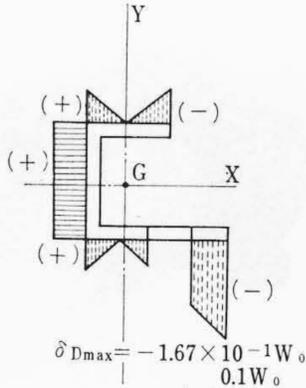


図4 部材に生ずる応力分布(点D)

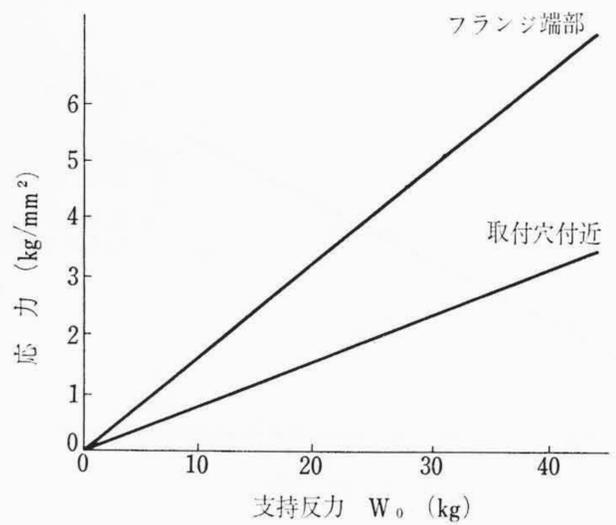


図5 部材に生ずる応力計算値

さらに部材  $\overline{AB}$  および  $\overline{BDE}$  が相互に変位を規制するために生ずる引張りあるいは圧縮力は、

$$W_1 = \frac{(2\overline{BE} + \overline{BD})}{2\overline{BD} \cdot \overline{BE}(k_1 + 1)} \cdot M_x \dots\dots\dots (17)$$

$$W_2 = \frac{(2\overline{AB} + 3\overline{BC}) \cdot k_2}{2\overline{AB} \cdot \overline{BC}(k_2 + 1)} \cdot M_x \dots\dots\dots (18)$$

ここに、記号  $B$  および  $D$  は各部材の点  $B$  あるいは  $D$  に生ずる分担モーメントを表わしている。また係数  $k_1, k_2$  および  $k_3$  は2部材の断面形状、支持方法および長さによって定まる定数で、各部材の断面がそれぞれ一定とすれば、

$$k_1 = \frac{(3\overline{BD} + \overline{DE}) \cdot G \cdot J_1}{3\overline{AB} \cdot E \cdot I_{2Y}} \dots\dots\dots (19)$$

$$k_2 = \frac{\overline{BD}(3\overline{BE} + \overline{DE}) \cdot I_{1X}}{3\overline{AB} \cdot \overline{BE} \cdot I_{2X}} \dots\dots\dots (20)$$

$$k_3 = \frac{12\overline{BD} \cdot E \cdot I_{1Y}}{\overline{AB} \cdot G \cdot J_2} \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 $J$ : 部材断面によって定まるねじりに関する定数で、薄板断面では近似的に、 $a$  を辺の長さ、 $t$  を板厚とすれば、 $\sum a_i \cdot t_i^3 / 3$  である。

- $I$ : 断面二次モーメント
- $G$ : せん断弾性係数
- $E$ : たて弾性係数

であり、ブラケットに生ずるモーメントおよび引張力は部材の断面形状および長さを定めれば上式によって求めることができる。

3.2 ブラケット部材に生ずる応力

ステップブラケットの断面形状は一般に薄板のフランジを組み合わせたもので、薄板構造におけるねじりモーメント  $T$  によるせん断応力  $\tau$  は、部材の板厚を  $t$ 、辺の長さを  $a$  とすれば近似的に、

$$\tau_i = \frac{3t_i \cdot T}{\sum a_i \cdot t_i^3} \dots\dots\dots (22)$$

であり、曲げモーメント  $M$  による曲げ応力  $\sigma$  は、断面係数を  $z$  とすれば、

$$\sigma = \frac{M}{z} \dots\dots\dots (23)$$

で求められる。したがってブラケット部材の寸法諸元を定め(9)~(16)式によって各部のモーメントを求めれば、部材に生ずる応力を知ることができる。(1)~(3)式のモーメントは支持反力  $W_0$  に比例し、(9)~(16)式のモーメントおよび(17), (18)式の荷重は(1)~(3)式のモーメントに比例するから、求める応力はブラケットに加わる支持反力  $W_0$  のみに比例する値になる。

4. 薄鋼板プレス成形ブラケット強度

以上支持反力  $W_0$  によってブラケットに生ずる応力の理論解析を

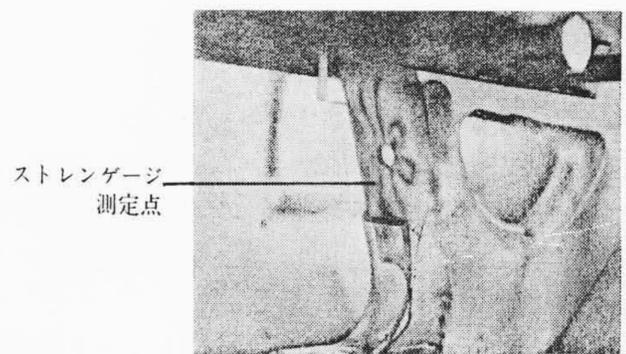


図6 光弾性応力しま模様

行なったが、ステップブラケットは長期にわたって乗客荷重が繰り返しかえし加わるから、その応力値は長期の繰り返しかえし荷重に耐えるものであり、またステップに必要な高い精度を維持するために、荷重による変形量が小さく、長期間使用しても永久変形しないものでなければならない。

われわれはこのような条件に対して従来のアルミ合金鋳物よりもはるかにすぐれ、軽量でかつ量産性に富む薄鋼板をプレス成形したブラケットを開発した。その部材断面は図3の基本断面形状に示すように、かなり大きいフランジを持つU状絞り曲げ形状である。各部の応力を上述の計算式により求めた結果、ブラケット構成部材中もっとも曲げ応力が高くなるのは図2の点D、すなわちライザ締め付け穴のある部分であって、その曲げモーメントおよび垂直力による応力の分布は図4のようになり、最大値は大フランジ端に生じている。

さらにねじりモーメントによって生ずるせん断応力を求め、図4に示す応力との合成値を求めれば、図5のようになる。図5にはあとで述べる応力の実測点およびフランジ端部における応力を示している。

いま、ステップの自重を30kg、乗客荷重を120kgとすれば、後輪1個が分担する荷重、すなわちブラケットに加わる支持反力  $W_0$  はこれらの和の1/4であるから37.5kgとなり、このときの応力は最大6.3kg/mm<sup>2</sup>となる。この値は使用する薄鋼板の疲労限以下であり、じゅうぶんな寿命が保証できる。

5. 実験による強度の検討

5.1 光弾性実験による応力集中の検討

一般に部材の断面が急変する部分には応力の集中がみられるから<sup>(1)(2)</sup>、ブラケットに対して、応力が大きく、かつ取り付け穴がある図2の点D付近について、その応力分布の状態を光弾性実験により調べた。

図6は光弾性モデルに現われた応力しま模様である。穴周辺にわ

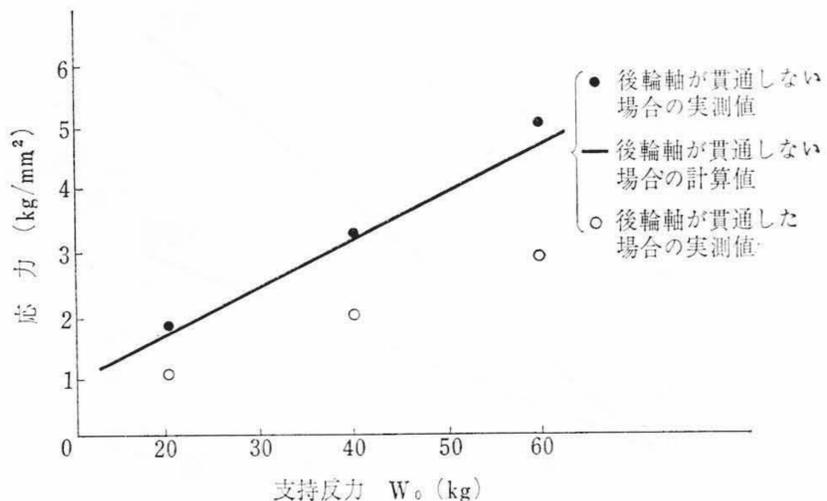


図7 部材に生ずる応力の比較

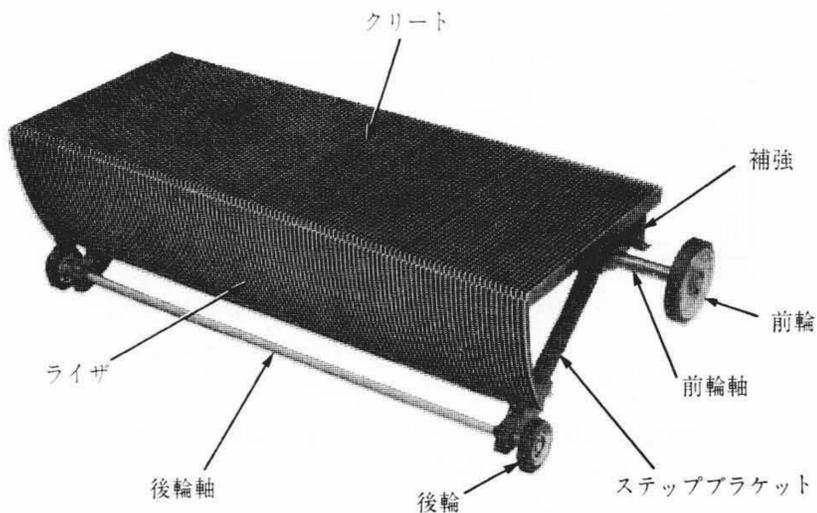


図8 薄鋼板プレス製ステップブラケットを用いたステップ

ずかの応力集中がみられるほかは折り曲げ部においてもまったく集中がみられず、強度的に安定している。

### 5.2 実物による強度の検討

次に実物による負荷試験で強度の検討を行なった。

図7は、図2の点Dにおけるストレインゲージによって測定した応力と、先の理論に基づいた点Dにおける応力の計算値とを併記したものである。両者はよく一致しており、またその常用荷重における応力値から強度的信頼性の高いことがわかる。

なお、ステップに加わる乗客荷重は、エスカレータ1回転ごとに繰り返し与えられるから、繰り返し応力に対する疲労強度についても検討を加えた。これについてはブラケット単品、ステップ組立品それぞれについて、最大225%の乗客荷重に相当する負荷を振動試験機によって繰り返し与えた。結果は $10^7$ 回の繰り返し後にもまったく強度上の欠陥がなく、長期間の使用に対して信頼性の高いことを確認した。

### 6. 実用したステップの構造<sup>(3)</sup>

以上、これまで一般に用いられてきたステップの構造、すなわち図2のように後輪軸がブラケット後端に片持ばりの形で取り付けている場合のブラケットの強度を検討した。しかし、ブラケットの強度がじゅうぶんでも、負荷時のたわみが大きければ、ステップとしての精度が低下し、エスカレータの運転を円滑に行なうことが困難となる。

いま、後輪軸が左右のブラケット間を貫通して連結した構造を考えると、後輪軸は両端支持ばりの形となり、先に述べたブラケットに加わるねじりモーメントおよび曲げモーメントの一部を後輪軸が分担することになる。したがって、ブラケットに生ずる応力が減少し、ステップの剛性を高めるだけでなく、左右のブラケット間隔の変化をも規制する効果をもつ。

図8はこのような考えに基づいて実用とした薄鋼板プレス成形ブラケットを用いたステップである。この新しいステップ構造のブラケ

ットに生ずる応力の実測値を図7に併記したが、その値は片持ばり状に後輪軸が取り付けられている場合の約60%で、繰り返し荷重試験でもブラケット間隔の変化がまったくなく、その効果の大なることが確認された。

### 7. 結 言

以上、エスカレータのステップブラケットの強度の理論検討、および新しく開発したプレス製ブラケットの試験結果について述べたが、これらをまとめると、

- (1) ステップブラケットの部材応力の理論計算値と実測値とはよく一致し、また、実用荷重時における応力は最大 $6.3 \text{ kg/mm}^2$ で、じゅうぶん強度を有することが確認された。
- (2) プレス製ブラケット部材には取付穴周辺にわずかの応力集中がみられるほかは、折曲げ部その他に過大な応力の発生はないことがわかった。
- (3) プレス製ブラケットは225%の乗客荷重に相当する負荷の繰りかえし試験で、繰りかえし $10^7$ 回後にもまったく異常がなく強度および精度が高く、じゅうぶんな耐久性を有している。

このような薄鋼板プレス製ステップブラケットは、すでに日立製作所が発表しているC形エスカレータ<sup>(4)</sup>およびエスカレーンに実用され、性能の優秀性を実証している。

最後に、本ブラケット開発にあたり、強度の検討、プレス成形作業にご協力いただいた日立製作所日立研究所、機械研究所および多賀工場の関係各位に深く感謝する。

### 参 考 文 献

- (1) 西田正孝：応力集中（昭42）
- (2) 辻二郎，西田正孝，河田幸三：光弾性実験法（昭40）
- (3) 実用新案出願中
- (4) 原，中尾：日立評論 50,582（昭43-9）