

エスカレーター手摺のFEM解析

毛利圭佑*
橋丘 豊*

Analysis with Finite Element Method for Escalator Hand Rail

Keisuke Mori, Yutaka Hashioka

要 旨

近年、様々な製品の設計開発で有限要素法(Finite Element Method : FEM)による解析技術が欠かせない存在になっており、三菱電機のエスカレーターでもトラス、床板、踏段等の様々な金属製部品の設計・評価に用いている。

しかし、非線形材料の組合せで構成されるエスカレーター手摺(てすり)では、解析モデル化技術が確立されておらず、経験や実験の繰り返しによる設計を行っていた。

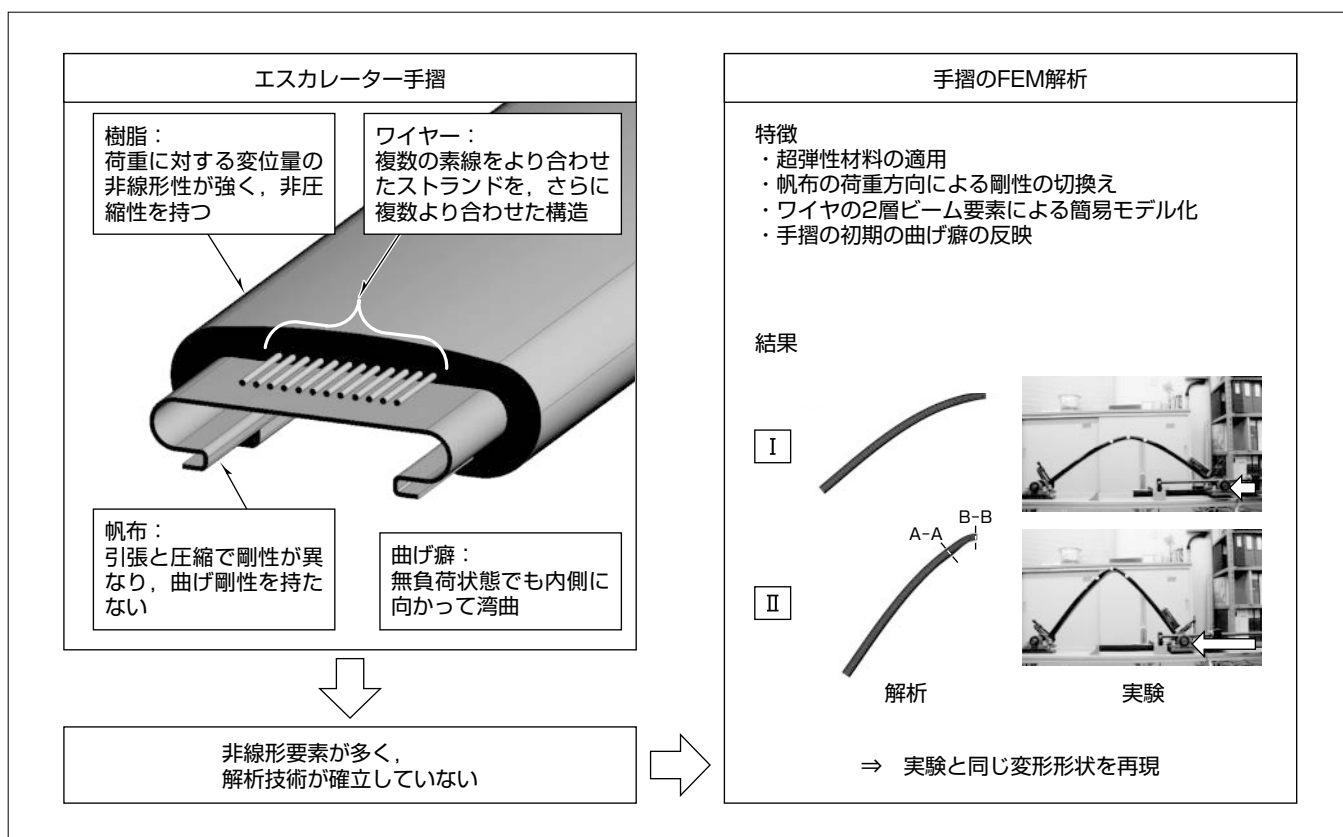
一方、正曲げと逆曲げを繰り返すエスカレーター手摺は、曲げ剛性が大きいと手摺ガイドに容易に沿わず、手摺ガイドの摩耗の増加、騒音の発生、手摺の振動や早期劣化が起こることが分かっており、曲げ剛性が小さく強度も満足す

る手摺の設計が求められている。

そこで、実験と同じ変形状を再現できるFEM解析モデルを構築した。この解析モデルは、超弾性材料の適用、帆布の荷重方向による剛性の切換え、ワイヤの2層ビーム要素による簡易モデル化、手摺の初期の曲げ癖の反映を特徴とする。

解析モデルの妥当性を確認するために行った実験では、圧縮量に対する曲率の関係と、断面形状の変形が解析結果とよく一致することが確認できた。

今回構築した解析モデルを用いることで、手摺の設計・評価を容易に行うことができ、開発時間を短縮することが期待できる。



エスカレーター手摺のFEM解析

従来、経験や実験の繰り返しによる設計を行っていたエスカレーター手摺に対して、実験と同じ変形状を再現できるFEM解析モデルを構築することによって、手摺の評価が容易になり、開発時間を短縮することが期待できる。

1. ま え が き

近年、様々な製品の設計開発で有限要素法による解析技術は欠かせない存在になっており、当社のエスカレーターでもトラス、床板、踏段等の様々な金属製部品の設計・評価に用いられている。

しかし、エスカレーター手摺は、樹脂、金属、布材からなるC字断面形状の複合体であり、非線形要素が多いため、解析モデル化技術が確立されておらず、経験や実験の繰り返しによる設計が行われていた。

そこで、実験と同じ変形形状を再現できるFEM解析モデルを構築するために、樹脂材のひずみエネルギー密度関数のパラメータの同定、布材の荷重方向(引張、圧縮)による剛性の切換え、多数の素線のより合わせで構成されるワイヤの簡易モデル化、複合体となった手摺の初期の曲げ癖の測定を行った。

本稿では、解析モデルの4つの特徴、及び実験結果と解析結果の比較について述べる。

2. エスカレーターの手摺構造

2.1 手 摺

一般的なエスカレーター手摺は、図1に示すように樹脂材によってC字の断面形状が形成され、C字の内側部分には帆布と呼ばれる布材が配置されている。エスカレーター手摺はC字断面の開口部側が、T字断面の手摺ガイドに係合して、それに沿って移動する構造になっており、C字の

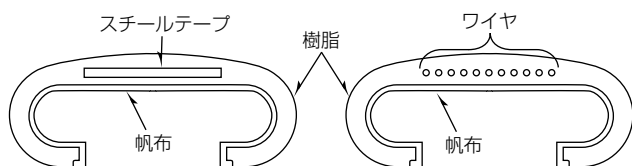


図1. 手摺の断面図

内側部分の帆布材が摺動(しゅうどう)材として手摺と手摺ガイドの間の摩擦を低減する役割をしている。また、樹脂内部には手摺の引張強度を確保するために抗張体(金属材料)が配置されており、一般に、スチールテープやワイヤが用いられる。

2.2 手摺駆動装置と手摺経路

エスカレーター手摺の駆動方法として、図2に示すシーブ駆動方式が一般的に使われている。このシーブ駆動方式では、シーブに手摺を巻きかけて駆動するため、シーブ部分では手摺のC字断面の開口部が円弧の内側になるように(開口部側が凹となるように)湾曲する正曲げ形状になる。一方、シーブに巻きかけられる前後の弓ローラ部では、手摺の平坦(へいたん)部が円弧の内側になるように(開口部側が凸となるように)湾曲する逆曲げ形状になる。また、上部と下部のニュアル部でも手摺の進行方向が反転することで手摺が正曲げされる。

このように正曲げと逆曲げを繰り返すエスカレーター手摺で、手摺の曲げ剛性が大きいと手摺ガイドに容易に沿わず、手摺ガイドの摩耗の増加、騒音の発生、手摺の振動と早期劣化が起こることが知られており、曲げ剛性が小さく強度も満足する手摺の設計が求められている。

3. 解析モデルの構築

今回構築したFEM解析モデルの4つの特徴について述べる。

3.1 超弾性材料の適用とパラメータ同定

手摺のC字断面を形成する樹脂材のように非常に大きな弾性変形を示す材質は、超弾性材料と呼ばれ、荷重に対する変位量の強い非線形性と、変形の前後で体積が変化しない非圧縮性を持つことが知られている。そのため超弾性材料は、ひずみ量に対する応力をヤング率ではなく、ひずみエ

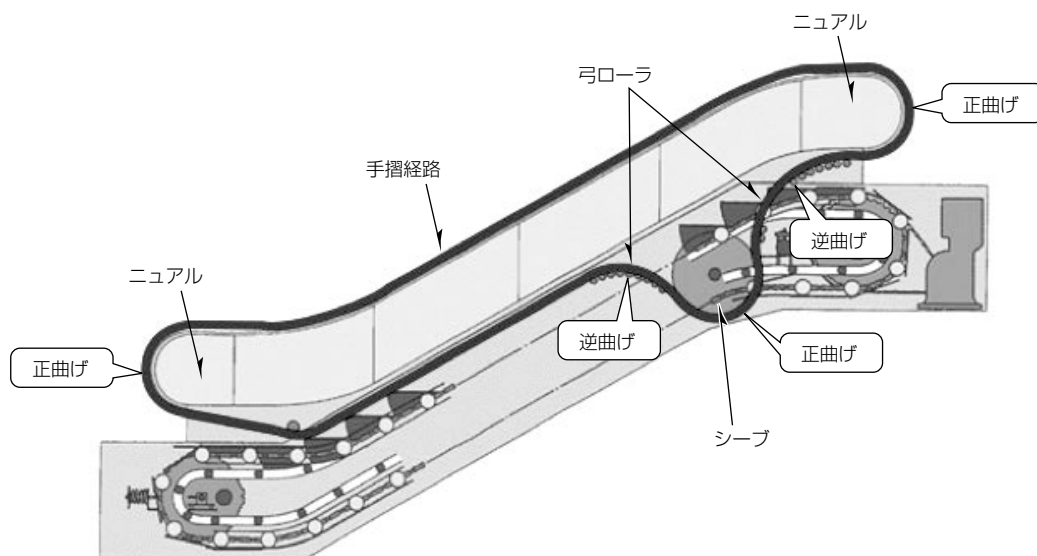


図2. 手摺駆動装置と手摺経路

エネルギー密度関数で関係付ける⁽¹⁾⁽²⁾。ひずみエネルギー密度関数のパラメータは、等方2軸引張試験で同定した(図3)。

3.2 帆布の荷重方向による剛性の切換え

帆布は、引張に対しては剛性を持つが、圧縮に対してはたるみによる皺(しわ)が発生して剛性を持たないため、引張と圧縮でヤング率を切り換えるようにした。また、帆布は曲げ剛性も持たないようにした。

3.3 ワイヤの簡易モデル化

スチールテープのような薄い板材はシェル要素を用いて簡単にモデル化できるが、ワイヤは複数の素線をより合わせたストランドを更に複数より合わせて構成されており、構造が複雑で接触要素も多いため、詳細にモデル化すると計算負荷が膨大になってしまう。そのため、図4に示すように、ワイヤの曲げ特性を表すビーム要素とワイヤの引張特性を表すビーム要素に分けて、それを組み合わせた2層のビーム要素でワイヤを簡易モデル化した。

まず、ワイヤの曲げ特性を表すビーム要素として、素線のヤング率やワイヤのねじり角等からワイヤの曲げ剛性弾性係数を計算式から求める⁽³⁾。次に、引張特性を表すビーム要素としてワイヤの引張剛性弾性係数と引張ビーム要素の直径を求める。この時、引張ビーム要素が曲げ剛性に与える影響の割合が十分小さくなるように考慮した。

3.4 手摺の初期の曲げ癖の反映

手摺は、完成後ドラムに巻きつけて保管されるため、巻

き癖がついており、無負荷状態でも正曲げ方向に湾曲している。この巻き癖が手摺を曲げた際の変形形状に大きく影響していることが次に述べる実験で分かったため、曲げ癖の測定を行い、解析モデルに初期形状を与えることで反映させた。

4. 実験と解析の比較

4.1 実験条件

解析モデルの妥当性を確認するために、実験を行い解析結果と比較した。

実験装置は、シープの前後の逆曲げ部分を想定して約1mの長さで切り取った手摺の両端をピン支持とし、一端は変位固定、他端は長手方向に圧縮の強制変位を与えられる構造とした。その時の圧縮方向の反力と変位を計測する。また、手摺の長手方向中心付近に3点のマークを貼り、圧縮変位を与えた時の手摺挙動を動画で撮影する。その後、動画解析によって、マーク3点の位置から手摺の曲がり具合(曲率)を計算する。実験は、抗張体がスチールテープの場合とワイヤの場合の2種類について行った。手摺は断面と長手方向に対して左右対称の変形と仮定し、解析は1/4モデルとした。

4.2 実験結果

手摺を圧縮した時の圧縮量-曲率の比較のグラフを図5に示す。また、図5のI点とII点における実験と解析の手摺の変形形状の比較を図6に、II点における解析の手摺断面形状を図7に示す。

図5(a)のスチールテープ手摺の圧縮量-曲率の結果は、圧縮量が100 mmを超えた付近で実験も解析も急激に曲率が上昇し、その後傾きは緩やかになり、両曲線はよく一致している。また、図6(a)のスチールテープ手摺の変形形状の比較では、II点で、実験も解析も手摺中央から2本に折れ曲がるように不連続に変形している。さらに、図7(a)のII点でのスチールテープ手摺の解析の断面形状では、手摺はA-A断面でふくらみ、B-B断面で手摺の開口部がつぶれて帆布に接触するような変形をしており、実験と同じ変形を再現できている。

図5(b)のワイヤ手摺の圧縮量-曲率の結果は、スチールテープ手摺に対して、曲率の急激な上昇がない曲線であることが実験と解析で一致している。また、図6(b)のワイヤ手摺の変形形状の比較では、実験も解析もなだらかな円形に変形している。さらに、図7(b)のII点でのワイヤ手摺の解析の断面形状を見ると、B-B断面での手摺の開口部と帆布の接触はなく、解析によって実験と同じ変形を再現できた。

これらの結果から、今回構築したFEM解析モデルによって、変形形状の異なる2種類の手摺の変形を再現できていることを確認できた。

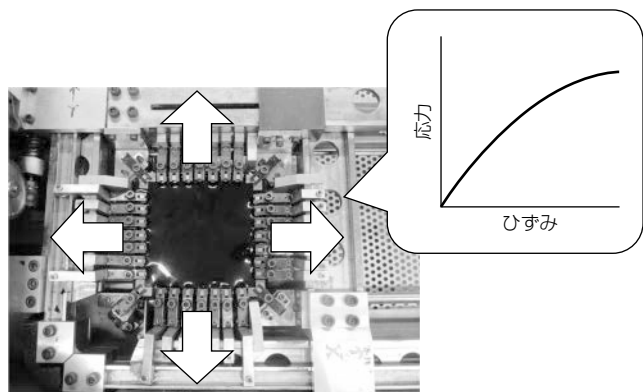


図3. 等方2軸引張試験

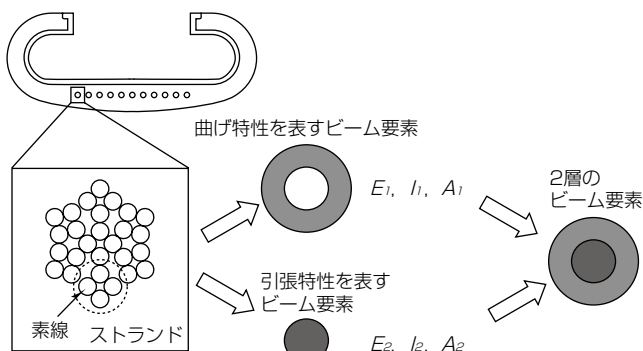


図4. ワイヤの簡易モデル

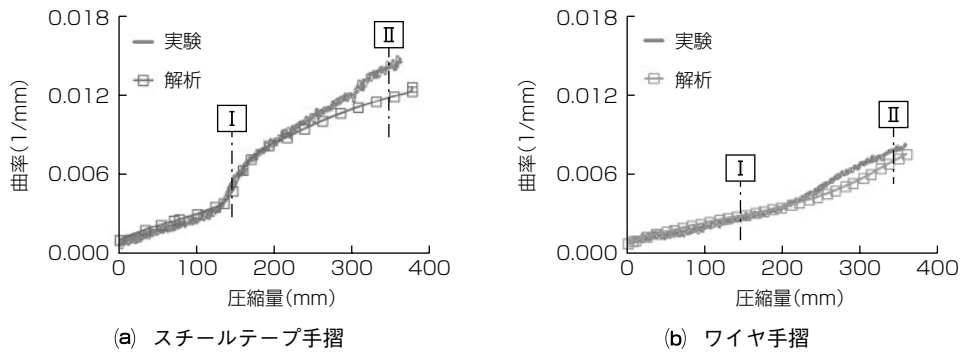


図5. 圧縮量-曲率の比較

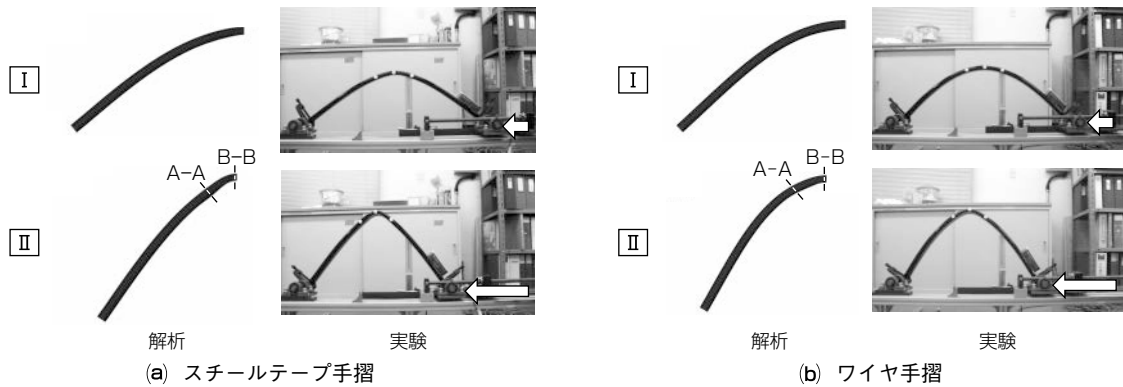


図6. 変形状の比較

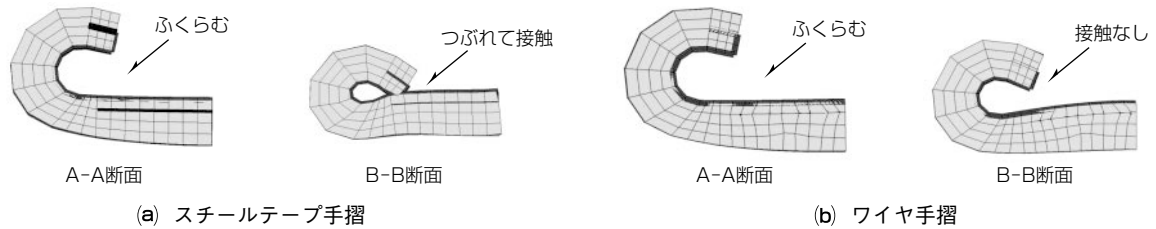


図7. II点での解析の手摺断面

5. むすび

超弾性材料の適用，帆布の荷重方向による剛性の切換え，ワイヤの2層ビーム要素による簡易モデル化，手摺の初期の曲げ癖を反映することで手摺の曲げ形状を再現できる解析技術について述べた。

今後は，この解析モデルを用いた新たな手摺構造の開発，手摺経路の検討を進める予定である。

参考文献

- (1) 川端季雄：ゴムの多軸応力解析について，日本ゴム協会誌，**43**，No. 5，347～357（1970）
- (2) 山下義裕，ほか：補強ゴムのひずみエネルギー密度関数の近似式，日本ゴム協会誌，**65**，No. 9，517～528（1992）
- (3) ワイヤロープハンドブック編集委員会編：ワイヤロープハンドブック，日刊工業新聞社，387～394（1995）