原著論文

有限要素法を用いたシューズのグリップ性評価手法†

高 本 義 国* 西 脇 剛 史*

An Estimation Method of Shoe Sole Traction based on FEM

Yoshikuni TAKAMOTO* and Tsuyoshi NISHIWAKI*

Abstract

Shoe traction has a great influence on running performance. Materials used in shoe soles have visco-elastic properties with strain-rate dependency. In previous studies concerning shoe traction, "Coloumb's friction theory" of contact between two rigid bodies has been used, however, this application has not been proper. In this study, the assumption that the appearance of slipping depends upon the stored energy in the sole/surface interface is proposed. The numerical estimation method of shoe traction, based on FEM considering the visco-elastic properties of shoes materials, is developed. The appropriateness of the numerical model is discussed by comparing experimental results. Using this model, the effects on traction of the constitutional parameters, midsole hardness, and outsole density are quantified. Furthermore, the application of the model to traction on wet surface is discussed.

Key words : Finite Element Method, Shoe Sole Traction, Visco-Elastic Property, Grip Index, Wet Grip Index

1. 緒 言

シューズと路面との間の滑りは、ランニング動作に大きな影響を及ぼす。ランニングシューズにおいても、グリップ性は安全面や機能面における最も重要なシューズ機能の一つとされており、グリップ性を高めるためのシューズソールの研究開発は盛んに行われている。

ランニングシューズには、グリップ性以外にも重量、耐久性、衝撃緩衝性、屈曲性など様々な要求特性が存在する。そのため、通常ランニ

ングシューズソールはミッドソールとアウトソールと呼ばれる二つのパーツを積層することによって形成される。ミッドソールに使用する材料としては、エチレンビニルアセテート発泡体（以下、EVA と称する）、アウトソールに使用する材料としてはラバー、ラバーを発泡させたラバースポンジ（以下、RS と称する）などが主流を占めている。

従来のシューズグリップ性に関する研究は、クーロン摩擦理論に基づくアウトソールと路面との間の界面特性の向上を目的とした表面改

†原稿受付 1998年3月3日

1997年10月 スポーツ工学シンポジウム1997にて発表

*株式会社アシックススポーツ工学研究所

〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台6-2-1

*ASICS Corporation, 6-2-1, Takatsukadai, Nishi, Kobe, Hyogo, Japan (651-2271)

質が中心であった¹⁾²⁾。しかしながら、クーロン摩擦理論は、変形を考慮しない剛体間の摩擦を想定しており、非線形性、ひずみ速度依存性を有する粘弾性材料である EVA やラバースポンジから構成されるシューズのグリップ性評価にそれを適用することは妥当ではない。

本研究を遂行する上で、滑りのメカニズムとして式(1)に示す仮説を提唱する。

$$SEI = TE - SES \quad (1)$$

ここで、SEI (Strain Energy in sole/surface Interface) はソール路面間の凝着相に蓄積されるエネルギー、TE (Total Energy) はランニング動作を介してソールに加えられるエネルギー、SES (Strain Energy in Sole) はソールに蓄積されるエネルギーを示す。

滑りは、ソールと路面間の凝着相に一定のせん断エネルギーが蓄積され、その相が破壊されることにより発生するという仮説を提案した。ランニング中、ソールにはその種類に関わらず一定量の外力が加わるが、その一部はソールの変形としてソール内部に蓄積され、残りは凝着相を破壊するエネルギーとなる。この仮説によれば、高いグリップ性を有するソールとは、TE

を可能な限り SES に充当し、SEI を低減させるソールであると考えられる。

本研究では、まず、上記仮説に基づき、シューズソール材料の粘弾性特性を考慮した数値モデルによるシューズグリップ性評価手法を開発し、実験との比較検討からその妥当性を議論する。次に、材料・形状等のソール構成要素が、グリップ性に与える影響を検討し、さらに、濡れた路面上でのグリップ性評価手法を提案する。最後に、本研究によって得られた知見を基に、高グリップ性を有するソールの設計指針を示す。

2. 解析手法

グリップ性が問題となるシューズソール前足部の一部分 (100×20×20mm) を、グリップ性数値評価モデルとした。ソールはミッドソールとアウトソールの二層構造をなし、ともに立体要素でモデル化した (Fig.1)。

ミッドソールにはシューズ材料として一般的に使用される EVA、アウトソールには RS を使用した。EVA 硬度、RS 密度等は、実際のシューズに使用される範囲内から選択した。

EVA、RS の準静的一軸圧縮試験及び落錐衝

Fig.1 The numerical model using in this study

Fig.2 Loads acted on shoes during contact phase
(a) horizontal loads, (b) vertical loads

突実験を行い、前者より得られた応力-ひずみ関係を、後者より得られた落錐の加速度応答及び材料の変位を再現できる解析モデルを、各々の材料について構築した³⁾。

ランニング中にソールに作用する荷重の測定には、地面反力測定装置（サンプリング周波数 1000Hz, Kistler 社製）を用いた。被検者は体重 50kgf の女性ランナー一名である。被検者の体重によりソールに加わる荷重の絶対値は異なるものの、時系列変化の態様は被検者間において差はなく、ソールのグリップ性の相対評価に対して、ランナーの体重の大小は影響を及ぼさないと考え、被験者は標準的な体重を有するランナー一名とした。測定された荷重を、接触面積で除することにより、解析モデルに作用させる単位面積あたりの水平荷重 Ph 及び鉛直荷重 Pv を求めた (Fig.2)。

単位面積当りの水平荷重 Ph 、及び鉛直荷重 Pv は、それぞれ式(2)、(3)で与えられる。ここで、 θ は荷重と鉛直軸とのなす角度であり、荷重作用時間 t との間には式(4)の関係が成り立つ。 $t = 0$ は、ランニング着地中期、水平荷重が制動期から推進期に変わる時点に相当する。鉛直荷重はこの時点において最大となり、離地に向かって余弦的に減少する。これに対して、水平荷重はこの時点において0となり、離地に向かって正弦的に増加する。

$$Ph = 0.0086 \sin \theta \quad (2)$$

$$Pv = 0.0086 \cos \theta \quad (3)$$

$$\theta = 500t \quad (4)$$

先の仮説に基づき、グリップ性を定量化する指標として、グリップ性数値評価指標 Grip Index (以下、GI と称する) と定義した。GI は、式(5)のようにミッドソールとアウトソールを合わせたソール全体に蓄積されるエネルギーを、アウトソール単位体積あたりに蓄積されるエネルギーで除することにより求める。

$$GI = E_{\text{tot}} / E'_{\text{out}} = (E_{\text{out}} + E_{\text{mid}}) / E'_{\text{out}} \quad (5)$$

ここで、 $E_{\text{tot}} = E_{\text{out}} + E_{\text{mid}}$ はミッドソールとアウトソールを合わせたソール全体に蓄積されるエネルギー、 E'_{out} はアウトソール単位体積あたりに蓄積されるエネルギーを示す。前者は式(1)における SES、後者は SEI に対応する。GI が大きくなるほど、グリップ性が高いことになる。

高速度ビデオ（毎秒500コマ、NAC 社製）を用いて、ソールと路面との間の滑りを観察した結果、荷重作用開始から0.07秒経過時において、滑りが発生することが明らかとなった。そこで、本解析では、この時点までに EVA 及び RS に蓄積されたエネルギーから算出された GI を評価対象とした。

3. 解析結果

用いた解析対象は、Fig.3に示すような材料、

Fig.3 Sample variations

Fig.4 Side view of deformed sole shape (Sample B)

形状等のソール構成要素が異なる A-D の 4 種類のサンプルである。なお、VC は塩化ビニルシート（厚さ 1 mm）を表すが、これはミッドソールの変形をアウトソールに伝達させないことを目的に使用した。VC の弾性率は、EVA、RS のそれよりも極端に大きく、剛体板とみなすことができる。Fig.3 中の EVA、RS に追記された数値は、それぞれ EVA 硬度、RS 密度を示す。硬度 65 の EVA と、密度 $0.4\text{g}/\text{cm}^3$ の RS は、ほぼ同程度の初期弾性率を示す。

Fig.4 に、解析結果の一例として、Fig.3 サンプル B の変形状態を示す。

Fig.5 に、サンプル A-D の GI を示す。EVA 硬度 55、RS 密度 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ で、VC を挿入したサンプル A が、最大の GI を有し、EVA 硬度 65、RS

Fig.5 Numerical results, GI

密度 $0.4\text{g}/\text{cm}^3$ のサンプル B が、最小の GI を有するという結果であった。

4. 考 察

4. 1 GI の妥当性検証

Fig. 6 Experimental setup

GI による数値評価手法の妥当性を検証するために、A-D4種類のサンプルを作製し、滑り試験を用いたグリップ性測定を行った。本測定方法は、Fig. 6(a)に示すように、路面との間にソールサンプルを装着した台車に鉛直荷重31.5kgfを作用させ、それを水平方向に引張速度0.07m/sで金属製ワイヤーを介して牽引し、ワイヤーに作用する張力をロードセルにより測定するものである。

測定結果例を Fig. 6(b)に示す。滑りが発生するまでの静止摩擦領域において、得られた張力を時間積分し、ソールに蓄積されるエネルギーを算出した (Fig. 6(b)中、網かけ部)。静止摩擦領域において、ソールに蓄積されるエネルギーが大きいほど、グリップ性が高いことになる。

Fig. 7に、GI と滑り試験結果の相関を示す。Fig. 7によれば、GI により最もグリップ性が高いと評価されたサンプルAは、滑り試験においても最もソールに蓄積されるエネルギーが大きかった。GI と滑り試験結果の間には、5%水準で相関関係があり、本研究冒頭で提案した GI による評価が妥当であることが検証された。

4. 2 ソール構成要素がグリップ性に与える影響

GI による数値評価手法を用いて、ソール構成要素である EVA 硬度、RS 密度、高剛性を有する VC の挿入が、GI に与える影響を検討した。Fig. 8(a)~(c)には、(a) EVA 硬度、(b) RS 密度、(c) VC 挿入位置を変化させた時の、式(5)中、GI, E_{tot} ,

Fig. 7 Relationship between GI and experimental results

E'_{out} を示す。

まず、EVA 硬度の影響を検討するため、Fig. 3中モデルBを用いて、RS 密度を0.6g/cm³一定とし、EVA 硬度を55, 60, 65と変化させた時の GI を算出した。Fig. 8(a)によると、EVA 硬度が小さくなるほど GI は増加した。これは、EVA 硬度が小さくなると、ソールの弾性率は小さくなり、 E_{tot} , E'_{out} はともに増加したが、前者の増加率の方が大きかったためである。以上より、ミッドソールの変形を促すことにより、ソールに高いグリップ性を付与することができるといえる。

次に、RS 密度の影響を検討するため、Fig. 3中サンプルBを用いて EVA 硬度を60一定とし、RS 密度を0.4, 0.6, 0.8g/cm³と変化させた時の GI を算出した。Fig. 8(b)によると、RS 密度が大きくなるほど GI は増加した。これは、RS 密度が大き

Fig.8 Effects of each shoes parameters on GI

くなると、 E_{tot} 、 E'_{out} はともに減少したが、後者の減少率の方が大きかったためである。以上より、アウターソールの変形を抑制することにより、ソールに高いグリップ性を付与することができるといえる。

前述したように、路面と接触しないミッドソールの変形を促し、路面と接触するアウターソールの変形を抑制させることにより、ソールに高いグリップ性を付与することが可能となる。しかしながら、剛性の大きく異なる両層を単純に積層した場合は、剛性の低い層が剛性の高い層の変形に追随し、上記効果が十分に得られない。そこで、上記効果を得るために、両層よりも高剛性を有する第三層 (VC) を介在させるこ

とにより、両層間の変形の連続性を遮断する方法を検討した。VCを介在させた場合のGIに与える影響を検討するため、Fig.3サンプルDを用いてEVA硬度を60、RS密度を0.6g/cm³一定とし、VC挿入位置をモデル最下層から2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0mmと変化させた時のGIを算出した。Fig.8(c)によると、VCをミッドソールとアウターソールとの境界面に挿入した場合、 E_{tot} 、 E'_{out} はともに減少したが、後者の減少率の方が大きくなったため、挿入無しの場合に比べ、GIは増加した。一方、ミッドソール内部もしくはアウターソール内部にVCを挿入した場合は、挿入無しに比べ、GIは小さくなった。以上より、せん断変形量が大きく変化するミッドソールと

アウトソーラとの境界面に高剛性層を挿入することにより、両層間の変形の連続性を遮断し、ソールに高いグリップ性を付与することができるといえる。

4. 3 ウェットな路面上でのグリップ性数値評価

上記解析モデルを応用し、ウェット状態におけるグリップ性評価を検討した。ウェットな路面上での滑りは、ソールと路面との間の水膜層に一定のせん断エネルギーが蓄積され、それが破壊することにより発生する。高速度ビデオ(毎秒500コマ, NAC社製)を用いて実際の滑りの様子を観察すると、ドライな路面上ではソールが一定量変形した後、滑りが発生するのに対し、ウェットな路面上ではソールの変形が生じる前に、水膜層が破壊し、滑りが発生していることが確認できた。これは、ウェットな路面でのグリップ性評価において、ソールと水膜層を独立してモデル化する必要があることを示唆するものである。そこで、水膜層を線形はり要素で、ソールを立体要素で構成した複合モデルを、ウェットな路面上でのグリップ性数値評価モデルとして構築した。各はり要素の長さは1mm、断面

積はその位置により変化させ、断面積の総和がモデルの面積に等しくなるよう設定した⁴⁾。弾性率はEVAおよびRSの初期弾性率(EVA0.5~0.8kgf/mm², RS1.0~2.0kgf/mm²)に比べて小さくなるように0.1kgf/mm²とした(Fig.9, 10)。

式(6)のように、水膜層に相当するはり要素部分単位体積当りに蓄積されるエネルギーをWGIと定義し、WGIの大きさと水膜層の破壊しやすさに相関があると考え、それをウェットな路面上でのグリップ性数値評価指標とした。

Fig.9 The numerical model on wet surface

Fig.10 Top view of the model on wet surface including 176 solid elements and 36 beam elements, corresponded to sole and water, respectively

$$WGI = 1 / E_{\text{wat}} \quad (6)$$

ここで、 E_{wat} は水膜部分単位体積当りに蓄積されるエネルギーを示す。

Fig.3に示した4種類のサンプルについて、WGIの算出を行った。Fig.8に得られた各WGIを示す。Fig.11によれば、サンプルDが最大のWGIを有し、サンプルBが最小のWGIを有した。この結果から、GIとWGIとの間には相関関係がないことが確認できた。

WGIの妥当性を検証するために、上記の4種類のサンプルについて、濡れた路面において、同様のグリップ性測定を行った。Fig.12によれば、WGIにより最もグリップ性が高いと評価されたサンプルDは、滑り試験においても最大のグリップ性を有した。WGIと滑り試験結果との間には、5%水準で相関関係があり、WGIがウェットな路面上でのグリップ性指標となることが検証された。

4. 4 高グリップ性を有するソールの設計指針

上記結果により、ドライな路面においては、ミッドソールの変形を促進し、アウトソールの変形を抑制すると共に、せん断変形量が大きく変化する境界面に、高剛性を有する第三層を介在させることが、高いグリップ性を得るためのソール設計の基本指針であることを示した。しかしながら、ウェットな路面においては、ドライな路面と高グリップを有するソール構造が異なる。これは、各々の路面状態の特性を把握し、適切な解析モデルを選択する必要があることを示している。

実用的なソール設計を行なう際、デザイン的に、アウトソールの分割により形成される意匠は不可欠である。足部からソールに作用する荷重を、感圧導電インクを用いた足圧分布測定装置(サンプリング周波数60Hz、テックスキャン社製)により、シューズソールと足裏との間に発生する荷重の直接測定すると、鉛直荷重最大時において、Fig.13のような分布が得られた。この荷重分布は、足の解剖学的特徴やランニン

Fig.11 Numerical results ,WGI on wet surface

Fig.12 Relationship between WGI and experimental results on wet surface

Fig.13 Planter load distribution measured by pressure sensors

グ動作を原因とするものであり、第二趾において最大となり、第一趾、第三趾、第四趾、第五趾の順に減少する。各意匠は分離独立しており、その変形状態は作用する荷重により異なる。これは、ソール設計を行なう際には、本論文で提案した解析手法に、Fig.13に示したような荷重分布を適用しなければならないことを示唆するものである。

5. 結 言

シューズ材料の粘弾性特性を考慮した数値モデルを用いてグリップ性評価手法を開発し、実験との比較によりその妥当性を検証した。本手法を用いて評価を行なった結果、ドライな路面においては、ミッドソールの変形を促進し、アウターソールの変形を抑制すると共に、境界面に高剛性を有する第三層を介在させることにより、高いグリップ性をソールに付与しうること

が明らかとなった。ウェットな路面においては、ソール路面間の水膜に相当する界面相を適用したモデルを新たに構築し、評価を行なった結果、高グリップを有するソール構造がドライな路面のそれとは異なることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 小野英哲他, 建築物の床のすべりおよびその評価方法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演集, (1980), pp.339-340.
- 2) 吉岡 丹 他, 建築物の床のすべりに関する研究, 日本建築学会大会学術講演集, (1983), pp.267-268.
- 3) 西脇剛史, 計算工学講演会論文集, vol.3, (1998), pp.303-306.
- 4) Tsuyoshi Nishiwaki, A new numerical modeling for laminated composites, Composite Structure, vol.32, (1995), pp.641-647.