原著論文

シューズソール材料の力学的特性シミュレーション†

西脇 剛 史* 奈迫 光 男*

Mechanical Simulation of Shoe Sole Materials

Tsuyoshi NISHIWAKI* and Mitsuo NASAKO*

Abstract

The sole of the shoe is one of the most important parts in shoe designing, and various properties are required of shoe soles. Especially, it is said that cushioning is a significant factor. This cushioning property depends upon the shoe sole material and structure. EVA is usually applied to running shoe soles. Clarifying the EVA mechanical properties is important to the designing of sole cushioning. However, it is difficult to predict the EVA mechanical behavior, because EVA materials have both non-linearity and strain rate dependency. In this study the mechanical behaviors of EVA materials were simulated by using numerical simulation. Based on the simulation system, the influences of running velocity and runner's weight upon the EVA cushioning are discussed. The results showed that EVA cushioning property is affected by running velocity more than by runner's weight.

Key words : Finite Element Method, Damping Property, Material Testing, Shoe Sole, EVA Foam

1. 緒 言

スポーツシューズは大きく分けてアッパー・ミッドソール・アウトソールの3つのパーツで構成されており、各々があらゆる障害からランニング中のランナーを守りランナーのパフォーマンスを最大限に発揮するための重要な役割を担っている。例えばアッパーは甲を被っている部分で小石などから足を保護しており、アウトソールは路面をグリップしランナーの力をロスなく路面に伝える役目を持っている。中でも、着地時の衝撃を和らげる衝撃緩衝性は、障害防止などの上で最も重要な機能のうちの一つ

である。衝撃緩衝性は、そのほとんどをミッドソールが担っており、その材料としては、EVA (Ethylene Vinyl Acetate) やPU (Polyurethane) の発泡体が主流となっている。これら高分子系発泡体は軽量かつ高い衝撃緩衝性を有しており、シューズソールのみならず他の工業分野においても用いられている。特に、EVA発泡体(以下EVAと称す)は低価格で比強度が高いことから、非常に多く用いられているが、材料非線形性を有し、ひずみ速度依存性が強いことから、その挙動を予測するのは困難である。したがって、これら高分子系発泡体の衝撃緩衝性に優れた構造を検討する際には、試料の上に落錘

†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-ku, Kobe, Hyogo, Japan (651-2271)

を落下させて加速度や変位を測定するという実測に頼っているのが現状である¹⁾²⁾³⁾。

一方、近年のコンピュータの急速な発達を背景にして、有限要素法に代表される数値シミュレーションは安価で、強力なツールとして構造設計に幅広く取り入れられている。これら数値シミュレーション手法を構造設計に適用した場合、実測が困難な条件下における構造物の力学的挙動を予測することも可能となる。非線形でかつ高いひずみ速度依存性を有する高分子系発泡体の力学的挙動を数値シミュレーションにより予測することが可能となれば、材料および構造の設計に重要な指針を得るとともに、試作コストの低減や開発サイクルの短縮にも有効となるであろう。

本研究では、有限要素法を用いたEVAの力学的挙動シミュレーションを行った。まずEVAの一軸圧縮シミュレーションを行い、実験との比較から準静的一軸圧縮下におけるシミュレーションの妥当性を議論した。次に落下衝撃シミュレーションを行い、実測定との比較から、動的荷重下でのシミュレーションの妥当性を検証した。さらに、構築した落下衝撃シミュレーション手法を用いて、落錘の質量や落下高さの変化が緩衝性に与える影響を体系的に検討した。

2. 供 試 材 料

使用した材料は、シューズソールの緩衝材として最も多く用いられているEVAの発泡体で硬度がSRIS-C 45, 50, 55, 60, 65, 70°のものである。(以下それぞれEVA45-70と称す)なお、各材料は同一組成 (Vinyl Acetate含有率25%)の樹脂を使用し、発泡倍率を変化させることのみによって硬度を調節した。

3. 一 軸 圧 縮 特 性

上記EVAの一軸圧縮シミュレーションを行うとともに、インストロン社製4204型万能材料試験機を用いて一軸圧縮特性を測定した。試験片寸法は20mm×20mm、厚さ30mmであり、圧縮速度は20mm/min. とした。一方シミュレーションは10

mm×10mm×30mmの1/4モデルとし、40立体要素(2×2×10)でモデル化した。なお、用いた構成方程式は以下に示すものであり、式(1)中 p は加えられる圧力で λ および η は材料固有の定数である。式(2)(3)中 E は初期弾性率、 E_t はひずみ硬化係数、 ν はPoisson比であり、式(5)中 V_0 は変形前の体積、 V は変形後の体積を表している。また添字 t は降伏応力以後での値を示している。本研究では、 E 、 E_t 、 λ および η をコントロールすることにより、すべてのEVAの挙動を表現した。

$$\frac{dp}{dt} = C_1 K \dot{\epsilon}_{kk} - C_2 \left[\frac{K + K_t}{3\lambda + 2\eta} \sigma_{kk} \right] + C_3 \left[\frac{K - K_t}{3\lambda + 2\eta} \epsilon_{kk} \right] \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2)$$

$$K_t = \frac{E_t}{3(1 - 2\nu_t)} \quad (3)$$

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{kk} \quad (4)$$

$$\epsilon_{kk} = \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (5)$$

Fig.1にEVA45および70におけるシミュレーションと実測との比較を示す。一般に、EVAの様な発泡体のS-Sカーブは3つのステージに分けられると言われている。Fig.1中、微小ひずみ領域(Aステージ)では線形弾性挙動を示すが、Bステージにおいては、気泡の弾性座屈により、非常に小さな勾配を示している。さらにひずみが増加し気泡の座屈が進むとともに、EVAの密度は上昇し、Bステージ終了時においてEVAは中実体となるため、その後の圧縮剛性は先の2ステージに比べて非常に大きなものとなる⁴⁾。Fig.1から明らかなように、EVA45, 70においてシミュレーションと実験との間には、上記3ステージを通して良い対応が確認できた。また、他のEVAにおいてもシミュレーションと実験との間に良い対応が得られることを確認した。Fig.2に他の硬度のEVAの実測定結果を示す。

4. 落下シミュレーション

次に、よりひずみ速度が大きい場合として、剛体落下シミュレーションによるモデルの妥当

Fig.1 Comparison between analytical and experimental results for EVA foam stress-strain curves

Fig.2 EVA foam stress-strain curves obtained from compression test

性を検討した。

4. 1 シミュレーション手法

シミュレーションに用いたモデルをFig.3に示す。モデルの対称性を考慮し、1/4モデルとした。落錘は先端に46.5mmの曲率半径を有する直径45mmの円柱であり、剛体と仮定している。EVAは100mm×100mm、厚さ15mmの直方体とし400立体要素によってモデル化した。

EVA底面を完全拘束し、落錘に初速度を与え、落下開始から60msec. までをシミュレーションの対象とし、落錘重心の節点に発生する鉛直方向変位、及び加速度を時系列的に算出した。ランニング時の平均的着地速度から落錘に与えた初速度は1.0m/sec.とし、ランニング時の地面反力の第1ピークを再現するために、落錘の質量を10kgとした。

4. 2 結果

各EVAについてシミュレーションを行い、実測との比較を行った。Fig.4に用いた実験装置の概略図を示す。水平な台上に装着した厚さ15mmのEVA上に落錘を自由落下させ、落錘に取り付けた加速度計および変位計の信号を動歪アンプ、A/D変換器を介してコンピュータに取り込み、時系列的に処理した。条件はシミュレーションと同一とし、落錘の落下高さを5cm落錘の質量を10kgとした。

Fig.5に、EVA55の場合の加速度および変位の時系列データにおけるシミュレーションと実験との比較を示す。本測定によれば、Fig.5中Aが接触開始を、Bが接触終了を示しており、Bにおいては変位が完全には回復していないことがシミュレーションおよび実験から確認できる。

また、硬度の異なる他のEVAの最大変位および加速度ピーク値におけるシミュレーションと実験との比較をFig.6に示す。最大変位を示したFig.6(a)によれば、両者の間により対応が確認できる。一方、衝撃緩衝性の評価パラメータとしてよく用いられる加速度ピーク値¹⁾³⁾の結果をFig.6(b)に示す。加速度ピーク値の実測において、特

Fig.3 Finite element model used in this study

Fig.4 Schematic illustration of cushioning measurement system

Fig.5 Acceleration and displacement curves obtained from analytical and experimental results

に低硬度EVAに繰り返し打撃を行った際に‘へたり’と呼ばれる塑性変形が発生し、これが原因となる大きなシミュレーション結果との差が見られた。しかしながら、先の結果より一軸圧縮及び剛体落下という異なる変形速度において、シ

(a)EVA hardness dependency upon maximum displacement

(b)EVA hardness dependency upon maximum acceleration

Fig.6 Comparison between analytical and experimental results

ミュレーションと実験との間にはよい相関があると考え、本シミュレーションはEVAの力学的挙動の予測に有効であると判断した。

5. 考察

Fig.3に示した数値モデルを用いて、衝突速度や落錘質量を変化させた場合の変位や加速度応答の違いについて、シミュレーションによる検討を行った。

5. 1 落下速度一定条件下

シューズのミッドソール材として使用頻度の高いEVA60において、落下高を5cmで落下速度を1.0m/sec.一定とし、落錘質量を2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20kgと変化させることにより、落錘質量が最大変位量及び加速度ピーク値に与える影響を検討した。

結果をFig.7に示す。Fig.7によれば、変位量は落錘質量の増加とともに大きくなっており、これは落錘が衝突時に有する運動エネルギーを考えると妥当なものである。一方、加速度ピーク値は落錘質量が増加するとともに小さくなった。この結果は、走速度一定の条件下でランナーの体重が軽いほど衝撃緩衝性が重要な問題となる

Fig.7 Drop weight dependency upon both maximum displacement and acceleration

ことを示唆している。

5. 2 落錘質量一定条件下

EVA60において、落錘の質量を10kg一定とし、落下高を2, 5, 10, 15, 20cmと変化させることにより落下速度を0.63, 1.00, 1.40, 1.71, 1.98m/sec.と変化させて、落下速度が最大変位量及び加速度ピーク値に与える影響を検討した。

結果をFig.8に示す。Fig.8によれば、落下高が

高くなると変位量とともに加速度ピーク値も大きくなっている。この結果は、EVAの応答が落下速度に大きく依存していることを示しており、ランナーの走速度（接地速度）が増すほど衝撃緩衝性が重要であることを示している。

5. 3 運動エネルギー一定条件下

すべてのEVAに対し、衝突瞬間に落錘の持っている運動エネルギー一定条件下において落錘質量および落下高をそれぞれ(1 kg, 50cm), (2 kg, 25cm), (5 kg, 10cm), (8 kg, 6.25cm), (10 kg, 5 cm), (20kg, 2.5cm)と変化させた場合の最大変位量および加速度ピーク値を比較した。

Fig.9に結果を示す。Fig.9(a)によれば、最大変位量は運動エネルギー一定の条件下においてはほとんど差異がみられない。一方Fig.9(b)によれば、加速度ピーク値は大きく影響を受けており、落下高が低くなると急激に小さくなっている。この結果は、運動エネルギー一定の条件下において、加速度の大きさは落錘の慣性力に反比例するという原理が反映されているものである。

Fig.8 Drop height dependency upon both maximum displacement and acceleration

以上の結果は、シューズの衝撃緩衝性を表す重要な因子である衝撃加速度が、落錘質量よりも落下高すなわち落下速度に対してより感度が高いことを示唆している。

(a)Maximum displacements obtained from simulation under constant kinetic energy condition

(b)Maximum accelerations obtained from simulation under constant kinetic energy condition

Fig.9 Analytical results under constant kinetic energy condition

6. 結 言

シューズソールの緩衝材として最も多く使用されているEVAの一軸圧縮特性を測定することにより、各材料の特性を把握した。これらの材料に対する落下シミュレーションを行い、動的変形挙動をよく表すことができた。

さらに、本シミュレーション手法を用いてEVAの硬度・落下高（速度）・落錘質量を変化させ、それぞれの変形量と加速度との関係について議論した。落下高すなわち落下速度が増すほど、シューズの衝撃緩衝性を表す重要な因子である衝撃加速度が問題となることを示した。

しかし、剛体による加速度応答でランナーにとっての緩衝性をどれだけ表現できているのかは疑問である。今後は、シューズの緩衝性を考えるうえで、剛体落下よりも人間の感覚に近い評価手法について検討していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) P.R. Cavanagh, The Running Shoe Book, Anderson World Inc., (1980).
- 2) 宇治橋他3名, 機講論, No.96-20 (1996), 111.
- 3) 福岡, 日本機械学会誌, 95-888 (1992), 984.
- 4) L.J. Gibson and M.F. Ashby, Cellular Solids, Pergamon Press, (1988).