

シューズミッドソール設計を目的とした発泡樹脂の微視的数値解析

小塚 祐也^{*1}, 野々川 舞^{*2}, 西脇 剛史^{*2}

Microscopic numerical analysis of resin foam for midsole material designing

Yuya KOZUKA^{*1}, Mai NONOGAWA, Tsuyoshi NISHIWAKI

^{*1} Asics corporation Institute of Sports Science
6-2-1, Takatsukadai, Nishi-Ku, Kobe, 651-2271, Japan

Due to excellent properties, high damping, low density and unique stress-strain curve, resin foams have been widely used in various industrial fields. As a midsole the application of the resin foams is dominant, because the plastic foam has many designing parameters such as foaming ratio, matrix resin type, cell size and geometry. In the designing process of midsole material, the prediction of mechanical behavior is very important. In this study the simplified numerical simulation model for EVA(Ethylene-Vinyl Acetate) foam is proposed. This model is constructed by thin shell elements and void is represented by Kelvin's truncated octahedron. The cell wall thickness distribution is considered by the shell elements' thickness control. In order to check the validity of the proposed model, stress-strain relationship under the uni-axial compressive load is compared with experimental one. After the checking, friction effect between rigid plate and foam surface on the mechanical behavior is discussed. Moreover it was confirmed that the model could predict the foaming ratio dependency.

Key Words : Finite Element Method, Numerical model, Bubble, Porous Media, Sport engineering, Numerical model

1. 結 言

発泡樹脂は軽量で高い緩衝性を有することから、スポーツシューズのミッドソール材として広く用いられている。発泡のメカニズムとしては、物理発泡と化学発泡があり、気泡の均一性に欠ける物理発泡は自動車内装や家電外装用途等に主として利用されている。一方、化学発泡は気泡の均一性が高く、より優れた力学特性を有することからシート材やシューズミッドソールに利用されている。化学発泡された樹脂内部の気泡は、個々に独立しており、その内部には気体が充填されている⁽¹⁾。これら独立気泡型の発泡樹脂は圧縮負荷下において、未発泡樹脂が示す線形的な応力-ひずみ関係とは挙動が大きく異なる。その特徴は、低ひずみ領域での弾性領域、次に気泡の崩壊に基づくプラトー領域、その後、応力が大きく上昇する緻密化領域の3種類に分類することができる。スポーツシューズの緩衝性を考慮したミッドソールの材料設計を検討する場合、弾性およびプラトー領域が発現される応力値の制御が重要である。そのため、発泡樹脂の複雑な力学的変形挙動を予測することは必要不可欠だと考える。

これまでに、発泡樹脂の微視的挙動予測に関する数値解析は、いくつか報告されており、それらはモデル化手法にて大別できる。例えば、X線CT画像等を基に気泡の微視的構造をソリッド要素にて詳細に再現したモデル化が挙げられる⁽²⁾。この手法では、各気泡の変形挙動を詳細に再現できるものの、気泡構造の複雑さから要素数の増大が懸念される。また、異なる気泡構造を持つモデルを作成するためには、材料の作製、微視的構造の撮影も必要となる。一方、複雑な気泡構造を簡便に捉えることにより要素数の削減、さらには計算時間の短縮を目指し

^{*1} 客員, 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)

^{*2} 正員, 株式会社アシックス スポーツ工学研究所

E-mail: koduka-yu@asics.co.jp

た研究も行なわれている。この手法では、多面体を用いて気泡をモデル化することで、気泡形状や気泡壁厚が発泡樹脂の力学的特性に及ぼす影響が議論されている。これまで N.J.Mills らによって、力学的挙動に対する多面体のアスペクト比の影響が論じられている⁹⁾が、発泡樹脂の密度増加に伴う気泡壁厚の影響を論じている報告は見られない。

そこで、本研究ではシューズミッドソールの緩衝性を向上しうる材料設計指針を得ることを目的とし、気泡径や気泡壁厚の不均一性を考慮した発泡樹脂のモデル化手法を提案する。具体的には、ケルビン 14 面体を用いて発泡樹脂の微視的構造をモデル化するとともに、気泡内部の圧力を考慮して、圧縮負荷下における応力-ひずみ関係を予測する。実験値との比較を行なうことによって、その妥当性を検証した後、発泡樹脂の密度が力学的特性に及ぼす影響や実験状況が結果に与える影響を検討した。

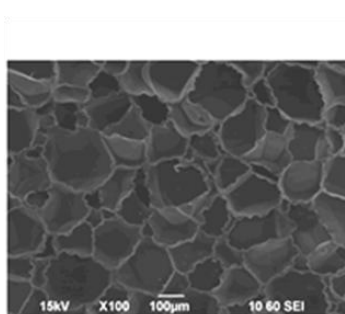
2. モデル化手法

本研究で対象とする材料は、一般的なスポーツシューズのミッドソールに使用されるエチレン酢酸ビニル共重合体 (Ethylene Vinyl acetate, EVA) を母材とする発泡樹脂である。図 1 に、本研究で使用した材料の SEM 画像および、CT 画像から構築した 3 次元構造を示す。

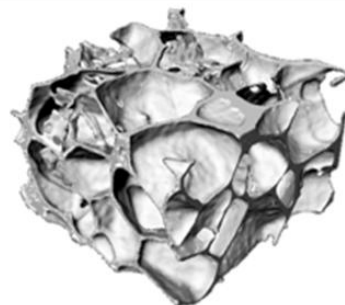
本研究では、図 2 に示すように、3 次元空間を充填可能なケルビン 14 面体を用いて、発泡樹脂のモデル化を行なった。XY 平面には 36 個、その他の平面には 18 個の気泡が存在するため、解析対象は計 158 の気泡で構成されることとなる。

上記ジオメトリを基にして、3 次元有限要素モデルを作成した。樹脂部に関しては、気泡径より十分薄いことからシェル要素を用いて表現した。図 1 に示すように発泡樹脂の気泡は、その成形上、形状や気泡壁厚に差異が生じる。一方、本有限要素モデルでは多面体の体積が均一であるため、形状に不均一性を導入することは困難となる。そこで、気泡の不均一性を考慮するべく、全シェル要素の板厚を 8 段階に分割し、その値には差異を与えた。その際、モデル全体の密度が解析対象とする発泡樹脂のそれと同一という条件下にて無作為に設定した。樹脂部は線形弾性体とし、ヤング率 34MPa、ポアソン比 0.4、密度 947kg/m³を用いた。各材料定数は、実験から得られた未発泡樹脂のものと等価である。各気泡に充填されている気体は理想気体とした。有限要素モデルの節点数は 11,454、要素数は 15,968 である。

上記有限要素モデルを用いて、一軸圧縮負荷下における発泡樹脂の変形挙動を解析した。図 3 に示すように YZ, ZX 平面に対称条件を用いることで 1/4 モデルとした。発泡樹脂の上下には実験治具を模擬した剛体面を配置し、上部の剛体面を-Z 方向へ移動させることでひずみ 0.75 を与えた。なお、下部の剛体面は完全固定とし、剛体面と発泡樹脂との間、ならびに発泡樹脂同士においては、摩擦係数が 0.0, 0.5 のクーロン摩擦を用いた。本解析は汎用の陽解法ソフトウェア Radioss(Altair engineering Inc)を用いて行なった。



(1)SEM image



(2)3dimensional structure based on X-ray CT images

Fig.1 Resin foam structures

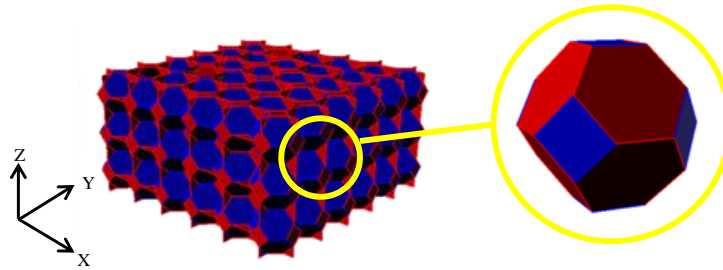


Fig.2 Geometry of resin foam model consists of Kelvin foam model

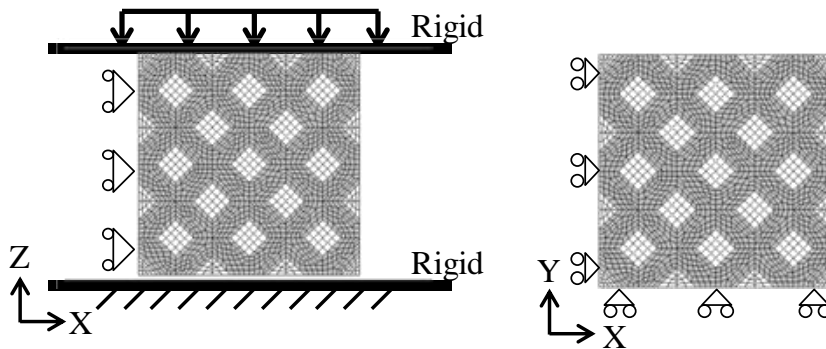


Fig.3 Finite element model and boundary conditions

3. 解析結果

一般的なスポーツシューズのミッドソールに使用される密度 127kg/m^3 の発泡樹脂における、一軸圧縮負荷下での変形挙動の解析を実施した。図4中の波線は解析より得られた応力-ひずみ関係、実線は実験より得られたそれを示す。解析結果は、弾性、プラトー、緻密化の各領域において、実験での応力-ひずみ関係を精度よく再現できていることが確認できる。また表1には、一軸圧縮負荷下における発泡樹脂のX線CT画像と、解析における気泡の変形状態を比較した。上段に示した実験結果よりプラトー領域（ひずみ0.4）において気泡壁の座屈が、緻密化領域（ひずみ0.6）においては、気泡の潰れや気泡壁間での接触を観察することができ、下段に示した解析結果においても、同様の変形状態が確認できた。

これらの結果より、前章にて提案したケルビン14面体を用いて構築したモデルは、一軸圧縮負荷下での力学的挙動を再現しうることが示唆された。

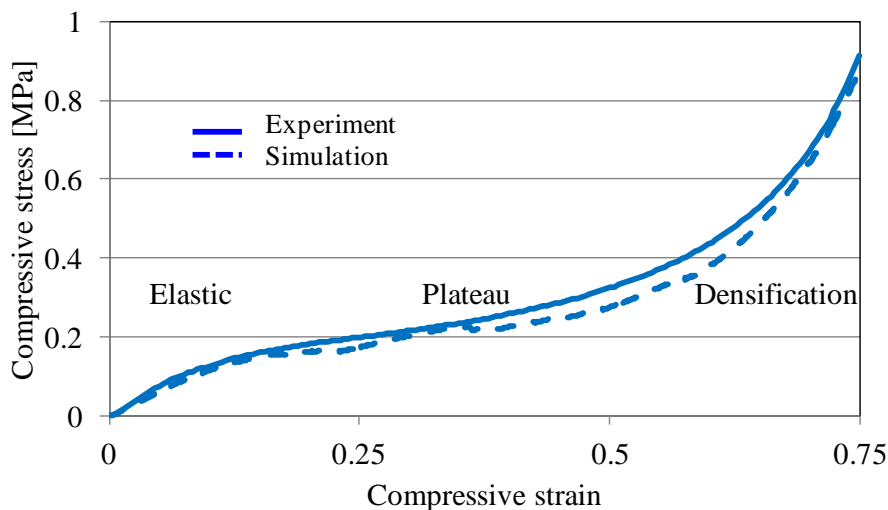
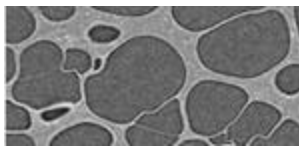
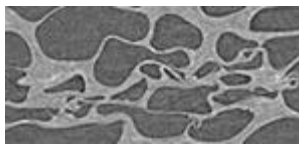
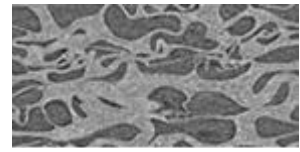
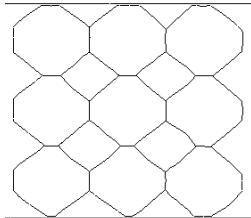
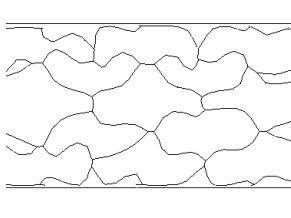
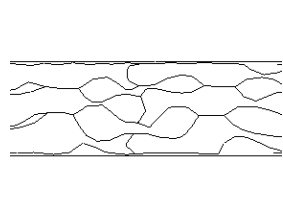


Fig.4 Comparison of experimental and calculation results

Table1 Comparison between the both images in 3 regions

Phase (strain)	Elastic (0.05)	Plateau (0.4)	Densification (0.6)
Experiment			
Simulation			

4. 考察

本章では、発泡樹脂と剛体面間の摩擦係数、および発泡樹脂の密度が、一軸圧縮負荷下での応力—ひずみ関係に及ぼす影響について検討を行なった。

摩擦係数が及ぼす影響を検討するため、発泡樹脂の自己接触における摩擦係数を 0.5 の一定、剛体面と発泡樹脂との間の摩擦係数を 0.0, 0.5, 1.0 とし、前章と同一条件で解析を行った。図 6 に示した解析結果より、剛体面と発泡樹脂間での摩擦係数は、ひずみ 0 から 0.75 までの圧縮ひずみ領域において、応力—ひずみ関係に影響しないことが明らかになった。これは剛体面に接触しているモデル表面の拘束状態が、モデル内部の気泡壁の座屈や、壁間での接触に影響を及ぼさないことを示唆する。

次に、樹脂の発泡倍率が力学的挙動に与える影響を検討するため、発泡樹脂の密度を 3 章で示した解析より小さい 69.6kg/m^3 に変更して解析を行なった。この密度を表現するため、2 章で示した気泡壁の板厚決定方法にて、各気泡の板厚を再設定した。図 7 には解析と実験結果を示すとともに、図 4 で示した密度 127kg/m^3 での応力—ひずみ関係を併記する。この結果より、低密度な発泡樹脂でも実験での応力—ひずみ関係を再現しうることが確認できた。また、実験、解析結果ともに、高密度な発泡樹脂に比べ、低密度な発泡樹脂では弾性、プラトー、緻密化の各領域で応力値の低下が見られた。また、プラトー領域が拡大することも確認できた。これは低密度の発泡樹脂では高密度のそれよりも気泡壁が薄く、気泡径が大きいいため、気泡壁の座屈荷重が小さく、壁間での接触が発生するまでにより大きな圧縮変位が必要になるためと考えられる。これらの結果より、本数値モデルを用いることで気泡径や気泡壁厚を変化させた、様々な密度を有する発泡樹脂の一軸圧縮負荷下での力学的挙動を、精度よく再現できうることが確認できた。

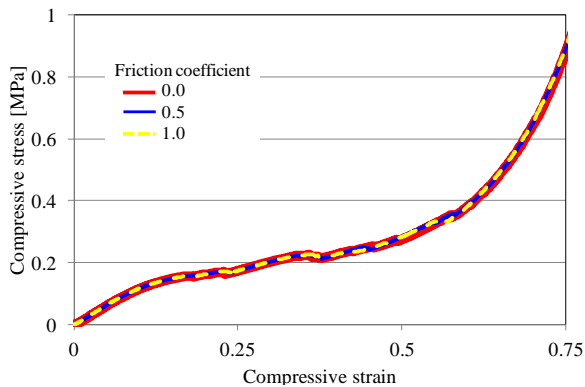


Fig.6 Effect of friction coefficients

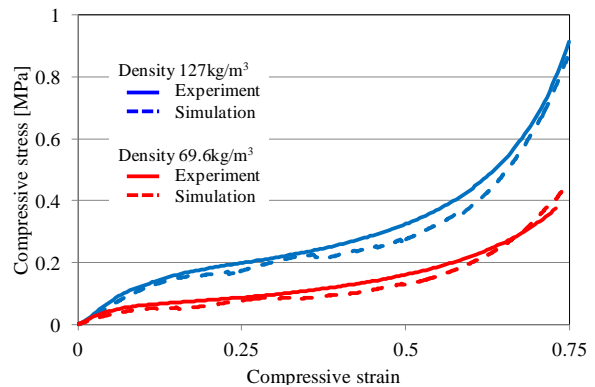


Fig.7 Comparison of experimental and calculation results

5. 結言

本研究では、気泡径や気泡壁厚の不均一性を有する発泡樹脂の微視的構造を、ケルビン 14 面体を用いてモデル化し、圧縮負荷下における応力—ひずみ関係を予測した。実験値との比較を行なうことによって、モデルの妥当性を検証した後、解析条件や密度が結果に与える影響を検討した。その結果、ケルビン 14 面体で構成された数値モデルを用いることにより、一軸圧縮負荷下における発泡樹脂の応力—ひずみ関係を精度良く予測できることを確認した。また、発泡樹脂を圧縮する剛体面と樹脂間の摩擦係数は、応力—ひずみ関係に影響を与えないことが明らかとなった。発泡樹脂を低密度化した場合、実験、解析ともに、弾性、プラトー、緻密化の各領域においても、応力が低下し、プラトー領域が拡大することが確認された。

文 献

- (1) L.J. Gibson, M.F.Ashby, “Cellular Solids Structure and Property”, Cambridge University Press(1999).
- (2) 野々川舞, 小塚祐也, 西脇剛史, 中西康雅, 小林卓哉, “X 線 CT 画像を元にした発泡樹脂の数値モデル化”, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス講演論文集(2013).
- (3) N.J.Mills, R.Stampfli, F.Marone, P.A.Brühwiler, “Finite element micromechanics model of impact compression of closed-cell polymer foams”, Internal Journal of Solids and Structures, No.46 (2009),pp. 677-697.