20213 均質化理論を用いた発泡材料の特性評価手法の開発

Development of evaluation method for foam materials using homogenization theory

○学 篠田 佳克 (筑波大)

正 松田 昭博 (筑波大)

Yoshikatsu SHINODA, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki

Akihiro MATSUDA, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki

In this paper, development of evaluation method for foam materials under large deformation using homogenization theory was described to analyze the mechanical characteristics of foam materials. The foam materials are applied to packing material, automobile seat and sports equipment. The mechanical uniaxial tensile tests using foam materials were conducted to investigate the effect of the microscopic structure on the mechanical characteristics. The porosity of the specimens was 26%, 61%, 66%, 76%, and the pore shape was nearly spherical. In the simulation, the deformation of microscopic structure was uniform, and microscopic periodicity was kept under large deformation. The polymer matrix was supposed to have incompressible hyperelasticity, and the hyperelasticity was represented by Mooney-Rivlin model. The applicability of the proposed model for the foam materials was shown by comparing the numerical simulation with the mechanical loading test results. The effect of the microscopic structure on the mechanical characteristics was shown.

Key Words: homogenization theory, foam materials, microscopic structure

1. 緒言

ポリウレタン発泡材料に代表される軟質発泡材料は、柔軟で緩衝性に優れ、軽いなどの特徴を持つ。また、材料が安価で成形性に富むことから、梱包材や自動車のシート、スポーツ用具など幅広い分野で緩衝材として用いられている。

発泡材料を緩衝材として用いる際の重要な特性としては、低ひずみ速度での柔らかさ、想定される応力レベルでのエネルギー吸収量、加工の容易さなどが挙げられる。

発泡材料の力学特性は母材であるポリマーの特性に加え、発泡成形により生じる微細構造の特性を考慮する必要がある。材料の特性評価は非常に複雑である。そのため、発泡材料の設計は試作した発泡材料を材料試験で評価するという手法がとられている。そこで、発泡材料の品質や性能の向上に数値解析を用いた設計合理化が有効であると考えられる。

これまでに、一軸引張試験結果と数値解析結果を比較することで、開発したプログラムと提案したモデルの有効性について明らかにしてきたが、本研究では発泡材料内部の空隙の配列の影響について数値解析を用いて検証した。

2. 均質化解析方法

本研究では発泡材料の力学特性を解析するために、発泡材料を規則的で周期的な微細構造を有する材料と仮定し数値解析を実施した。大変形に対する定式化では、2つの異なる座標系 X と Y を用いて記述した⁽¹⁾⁽²⁾。ここで、 X は巨視的な座標系で Y は微視的な座標系である。巨視的な挙動を座標系 X で記述し、微視的な挙動を座標系 Y で記述する場合、2つの座標系はスケール比 ε を用いて、以下のように表される。

$$Y = X / \varepsilon \quad (1)$$

微細構造のスケールが構造全体のスケールに比べて非常に小さい場合、スケール比 ε は非常に小さい値となる。この時、剛性、伸び、応力、ひずみなどの巨視的な特性は、微細構造の特性の体積平均値として与えられる。また、微細構造は一樣に変形し、微細構造の周期性は大変形下でも保たれると仮定することができる。

したがって、微細構造の変位 y は巨視的な変位 Y と周期的で微視的な変位 w に分けることが可能となる。

$$y = \tilde{F}Y + w \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{F}$ は巨視的な変形勾配テンソルであり、数値シミュレーションにおいて境界条件として与えられる。

また、大変形を受ける発泡材料の均質化定式化を行うため、有限変形を考慮し、以下の仮想仕事の原理を用いた。

$$\Pi(v) = \int \left[\dot{T}_T + \frac{1}{2} T : (\nabla v : \nabla v) \right] dV - \int i \cdot v dS - \int \rho \dot{g} \cdot v dV \quad (3)$$

ここで、 $\dot{T}_T$ は Truesdell の応力速度、 dV は変形後の体積要素、 dS は変形後の面積要素、 $\dot{g}$ は物体力速度、 i は表面力速度を示している。数値解析においては巨視的な変位速度を既知な量として与えた。

3. 発泡材料の一軸引張試験

母材のポリマーは同一で、発泡率が異なる発泡材料を対象として一軸引張試験を実施した。試験体は発泡率が 26%、61%、66%、76% のものを用いた。試験条件は変位制御とし、変位速度 2mm/min で破断するまで試験を行った。

引張試験の試験結果を図 1(a)に、発泡率と初期剛性の関係を図 1(b)に示す。これより、発泡率と初期剛性の間には線形関係があることがわかった。

(a) Nominal stress and strain (b) Relationship between the initial stiffness and the porosity

Fig. 1 Tensile loading test results

4. 発泡材料の力学特性評価

材料モデルは、発泡材料の母材のポリマーを非圧縮性超弾性体として、既往の研究でポリマーによく用いられている Mooney-Rivlin モデルの高次式(4)を用いた。

$$W(I_1, I_2) = C_{11}(I_1 - 3) + C_{12}(I_1 - 3)^2 + C_2(I_2 - 3) \quad (4)$$

ここで、 $W(I_1, I_2)$ はひずみエネルギー密度関数、 I_1, I_2 は変形勾配テンソル F により表される左 Cauchy-Green 変形テンソルの主不変量、 C_{11}, C_{12}, C_2 は材料定数を表している。

図 3 の引張試験の結果より、発泡率 0% にあたる初期剛性が発泡材料の母材のポリマーの初期剛性として考え、母材のポリマーの各ひずみにおける応力を、発泡率が 26% の試験体の各ひずみにおける応力の 1.5 倍として算出した。さらに母材のポリマーの引張応力と引張ひずみの関係から式(4)の材料定数 C_{11}, C_{12}, C_2 を導出すると、式(5)のようになる。

$$C_{11} = 0.58 \text{ MPa}, C_{12} = 0.055 \text{ MPa}, C_2 = 0.25 \text{ MPa} \quad (5)$$

図 2(a)に、発泡材料を均等な円孔を規則的に有する材料として作成した解析モデルを示す。図の灰色部分がポリマーで白抜きの部分が空隙を示しており、空隙は均一な大きさで上下左右に規則的に整列しているとした。また、微細構造が周期性を有していることから均質化理論を適用することができる。この時、解析対象は図 2(a)で示したモデルの一部分のみとなり、計算コストを大幅に抑えることができる。

数値解析における発泡率は、解析モデルの空隙半径を与えることで再現することができる。境界条件として、マクロで一般的な変形勾配を与え、上下左右にユニットセルが存在する周期境界条件を適用した。

解析モデルおよび境界条件の妥当性を検証するために、以上の条件を用いてユニットセルに対して一般的な引張変形を与える数値解析を実施した。また、図 2(b)に示すように引張方向を変化させ、内部の空隙の配列の影響を評価した。

高分子発泡材料は発泡率が低いときにはポリマーの特性が強く表れると考えられる。高分子材料は非圧縮性の変形挙動を示すことから、解析においても変形条件が非圧縮性条件となるように、引張方向の伸びである λ_1 と、それと直交する方向の伸び λ_2 を $1/\lambda_1$ として与え、 λ_3 は 1.0 となるようにマクロな変形勾配テンソル F_1 を式(6)のように与えた。

次に、発泡率の高い発泡材料ではポアソン比が 0 に近い変形を示すことから、引張方向の伸び λ_1 を数値解析の条件として、引張方向と直交する方向の伸び λ_2 と λ_3 は 1.0 となるようにマクロな変形勾配テンソル F_2 を式(6)のように与えた。

$$F_1 = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 1/\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

さらに、これらの変形勾配テンソルに次の回転行列 R を掛けることによって、境界条件として与える式(7)のマクロな変形勾配テンソル $\tilde{F}$ を求めた。

$$\tilde{F} = R \cdot F \cdot R^T \quad (7)$$

図 3 に、式(6)の F_1 で与えられる変形勾配を用いて、引張方向と発泡率の異なる条件下で数値解析を行い、得られた応力-ひずみ曲線を示す。図 3(a)において解析結果が途中で終了しているのは、要素の一部に異常な変形が生じたためである。また、引張角度が 60°, 90° 方向の解析結果はそれぞれ 30°, 0° の結果と一致するため省略した。

解析結果より、材料試験と同様に発泡率が上昇するにつれ剛性が低下した。式(6)の F_1 の変形条件では、応力-ひずみ曲線の形状は引張角度に依存しないが、0°方向の剛性が 30°, 45°方向に比べ低下した。これは、引張角度が 0°方向と 30°

45°方向で、引張方向に対する空隙の配列が異なることに起因している。式(6)の F_2 の変形条件では、応力-ひずみ曲線の形状および発泡率が初期剛性に与える影響は、引張角度に依存しないことが分かった。これは、引張方向と直交する方向に変形が生じないことから、空隙の配列の影響が小さいためである。

(a) Simulation model (b) Unit cell
Fig. 2 Unit cell for the homogenization analysis

(c) Tensile direction 45°
Fig. 3 Effect of tensile direction

5. 結言

本研究では、発泡材料の力学特性評価手法の確立を目的として、発泡材料の発泡率を変化させた試験体を用いて材料試験を実施し、発泡率が軟質発泡材料の力学特性に与える影響を評価した。

また、発泡材料を均一な半径の円孔が周期的に存在するモデルと仮定し、均質化理論を用いた数値解析を実施した。その結果、数値解析において、材料試験と同様な剛性低下を示した。また、引張角度を変更した解析結果から、同一の発泡率においても、変形方向に対して微細構造が異なれば、巨視的な力学特性に違いが生じるということを示した。

参考文献

- (1) Terada, K., Hori, M., Kyoya, T., and Kikuchi, N., "Simulation of the multi-scale convergence in computational homogenization approaches", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, No. 16 (2000), pp. 2285-2311.
- (2) Takano, N., Ohnishi, Y., Zako, M., and Nishiyabu, K., "The formulation of homogenization method applied to large deformation problem for composite materials", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, No. 44 (2000), pp. 6517-6535.