

計算力学的手法を援用した材料構成式の ハイブリッド型同定法の開発

吉林工業大学

神戸大学 工学部

胡 平

富田佳宏

(平成5年度外国人技術者養成援助助成 AF-93049)

1. 緒言

ポリマー材は、引張下でくびれの発生・伝播挙動を示し、一様応力状態を実現することは困難で、通常的手法によりその構成式を同定することは不可能である。このような問題に対して、筆者ら¹⁾は、現象論的な構成式を用いて、応力ひずみ関係の実験と数値シミュレーションによるハイブリッド型同定法を提案した。しかしながら、変形軟化・硬化及び高分子鎖の配向異方性を伴うポリマー材の変形挙動は複雑であり、現象論的構成式により表現には限界がある。本稿では、先に提案した手法をポリマー材の微視的構成とその発達を考慮した、分子鎖網目理論による構成式の同定に適用し、その妥当性の検討を行った結果を報告する。

2. 分子鎖網目理論による構成式

高分子の変形は、負荷された応力が分子鎖セグメントの回転に対する分子間抵抗と分子配向に対する抵抗を超えた場合に発生する²⁾。分子間抵抗に対して、分子鎖にせん断応力 τ が負荷されたときに生ずる相当塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}^p$ は次式で表される³⁾。

$$\dot{\gamma}^p = \dot{\gamma}_0 \exp \left[-AS/T \left\{ 1 - (\tau/S)^{5/6} \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_0$ 、 A は定数、 T は絶対温度である。ポリマー材のひずみ軟化²⁾及び硬化⁴⁾を表現するために、式(1)中の S を $S_0 = 0.077G / (1 - \nu)$ を初期値とする次の発展方程式で与える。

$$\dot{S} = h(1 - S/S_{SS})\dot{\gamma}^p \quad (2)$$

ここで、 h は正の定数、 $G = E / (2(1 + \nu))$ はせん断係数、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。また、 S_{SS} は S の収束値であり、軟化のとき²⁾ $S_{SS} \leq S_0$ 、硬化のとき⁴⁾ $S_{SS} > S_0$ とする。分子配向に対する抵抗は、塑性流れを駆動しない背応力 B_{ij} として導入され、8鎖モデルの場合、その主成分 B_i は次のように表される⁵⁾。

$$B_i = C^R \lambda_L / 3 \left\{ (\lambda_i^2 - \lambda^2) / \lambda^2 \right\} L^{-1}(\lambda^2 / \lambda_L) \quad (3)$$

ここで、 $\lambda^2 = (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) / 3$ 、 C^R はゴム弾性係数、 λ_L は限界伸び比、 λ_i^2 は主塑性伸び比、 $L(x)$ は

Langevin関数²⁾である。以上の相当塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}^p$ 及び背応力 B_{ij} を用いて、塑性ひずみ速度を次式で定義する²⁾。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\gamma}^p \sigma_{ij}^* / (\sqrt{2}\tau) \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij} - B_{ij}$ は駆動応力、 σ_{ij} はコーシーの応力である。なお、式(1)、(4)中の τ には $\tau = (1/2\sigma_{ij}^{*l}\sigma_{ij}^{*l})^{1/2}$ を用いる²⁾。式(4)の塑性ひずみ速度に弾性ひずみ速度を加えて弾塑性構成式を定式化し、有限要素解析⁶⁾を適用する。

3. 同定方法

前述の式(1)～(3)には8つの未知パラメータ(E 、 ν 、 $\dot{\gamma}_0$ 、 A 、 h 、 S_{SS} 、 C^R 、 λ_L)が存在するが、ヤング率 E とポアソン比 ν は荷重-変位曲線の弾性域より決定できる。従って、シミュレーションによって得られた荷重-変位曲線における荷重 $\bar{\sigma}$ は、変位 u と残り6つのパラメータ x_i ($i=1\sim 6$)の関数として、 $\bar{\sigma}(u, x_i)$ と表せる。つぎに、パラメータが未知の与えられた荷重-変位曲線における荷重と前述の構成式を用いた有限要素シミュレーションにより得られた荷重-変位曲線における荷重との差を評価する関数 f を次式で定義する。

$$f = \sum_{j=1}^N \{ \bar{\sigma}(u_j) - \bar{\sigma}(u_j, x_i) \}^2 \quad (5)$$

ここで、 $\bar{\sigma}(u_j)$ ($j=1\sim N$)はパラメータの同定に用いる荷重-変位曲線上の N 個の評価点での荷重値である。この評価関数 f を最小にするパラメータ x_i を求めるためにsimplex法⁷⁾を用いる。式(5)の関数 f の値が十分小さくなるまでsimplex法を繰り返し用いることによりパラメータ x_i の値を同定する。

4. 結果及び考察

解析モデルとして、Fig. 1に示す平面ひずみブロックの引張りを想定する。変形の対称性を考えて、全体の1/4の領域を解析対象とし、Crossed Triangles要素を用いて四角形単位で 4×16 分割する。準静的な等温変形を仮定し、端面に一定の変位速度 $\dot{u}/L = 1.0 \times 10^{-3}/s$ を与えて変形を進める。

まずケーススタディとして、上記の構成式に適当なパラメータ値⁸⁾を導入し、シミュレーションにより荷重-変位曲線を創生する。その曲線に対して上述の手法によりパラメータの同定を行い、初期値と収束状態を検討する。同定を行う前に、評価関数 f のパラメータの変化に対する挙動を検討した結果、6つのパラメータのうち $\dot{\gamma}_0$, C^R については、関数 f の変化に大きく寄与しないことがわかった。そこで、この2つのパラメータについてはシミュレーションのときに与えた数値で一定とし、残り4つのパラメータを同定する。

ひずみ硬化を示す荷重-変位曲線に対して、この4つのパラメータに初期値を与えて同定した結果をFig. 2 (a), (b)に示す。Fig. 2 (a)は、横軸に計算の繰り返し数、縦軸に現在のパラメータの値を収束した値で無次元化した値を示している。計算を繰り返すにつれて振動しながら4つのパラメータが、収束していることがわかる。また、荷重-変位曲線はFig. 2 (b)のような推移をし、最終的に実線で示す与えた荷重-変位曲線に完全に一致している。これにより、同定手法の妥当性が確認できた。

つぎに、パラメータの値が未知の荷重-変位曲線を2つのパラメータの組みによって得られた荷重-変位曲線から創生し、その曲線に対して上記と同様に4つのパラメータの同

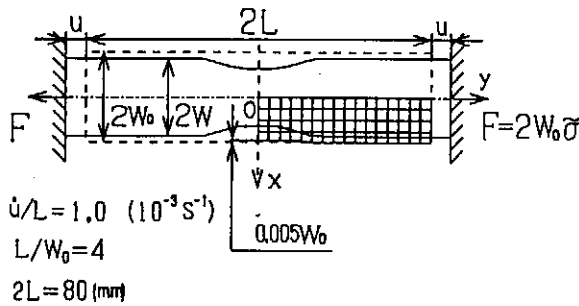


Fig. 1 Analytical model and finite element discretization

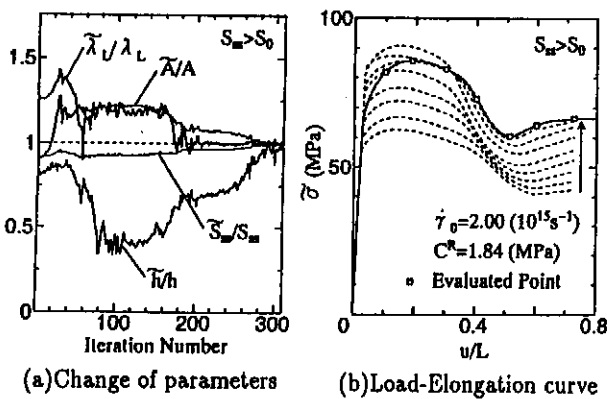


Fig. 2 Identification for known parameters (strain hardening)

定を行った。ひずみ硬化を示す荷重-変位曲線に対する同定結果をFig. 3 (a), (b)に示す。収束過程は前述のものと同様であるが、最終的に収束した曲線と同定に用いた曲線とは、完全には一致していない。しかしながら、評価点における荷重の誤差は約3%以内であり、荷重-変位曲線の形状も、ほぼ一致しているため、適当に創生した荷重-変位曲線に対してもパラメータの同定はできたものとする。発生した若干の差は、Fig. 3 (b)の太線で表される荷重-変位曲線を有するポリマー材の応答を用いた構成式により完全に表すことができなかったものと考えられる。また、同様な結果がひずみ軟化材についても得られた。

つぎに、G' Sellら⁹⁾がHDPE (高密度ポリエチレン)を用いた実験により得た荷重-変位曲線に対してパラメータの同定を行った。ただし、2つのパラメータ $\dot{\gamma}_0$, C^R については、詳細な情報がないので材料が変化してもほぼ一定の値をとると仮定し、さきの荷重-変位曲線の創生時の値を用いる。実験により得られた荷重-変位曲線に対する同定結果をFig. 4 (a), (b)に示す。Fig. 4 (a)の \tilde{h}/h の変化状態が前述の2つの場合に比べて大きいものの、ほぼパラメータ、荷重-変位曲線とも収束値に近づいている。ただ

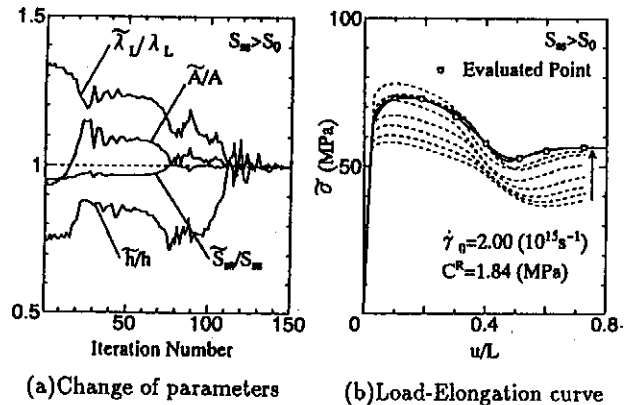


Fig. 3 Identification for unknown parameters (strain hardening)

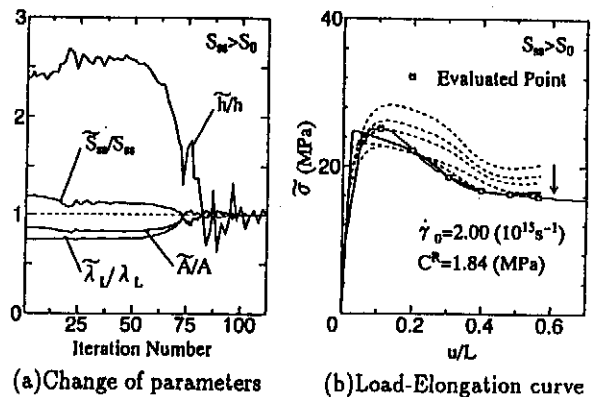


Fig. 4 Identification for experimental data

し、最終的に収束した曲線と実験によって得られた曲線とは、ひずみの小さい領域では差が見られるが、ひずみの大きい領域では良好に一致している。これは、用いた構成式が高分子鎖の配向によって発生する異方性については十分考慮できるが、配向が始まる前の比較的小さい変形に対して、多少の問題を含むことによるものと考えられる。しかしながら、全体的にみて、ほぼパラメータは同定できたものとする。

参考文献

- 1) 富田・林・田中, 機論, 58-554, A (1992), 115-119
- 2) Boyce, M. C., Parks, D. M., and Argon, A.S., Mech. Mater., 7,(1988), 15-33.
- 3) Argon, A. S., Philos. Mag., 28-39 (1973), 839-865.
- 4) 田中・富田, 機講論, 930-71,(1993-11), 539-540.
- 5) Wu, P. D., and Van der Giessen, E., J. Mech. Phys. Solids., 41-3,(1993), 427-456
- 6) 富田, 数値弾塑性力学, (1990), 養賢堂.
- 7) Nelder, J. A., and Mead, R., Comput. J., 7,(1965), 308-313.
- 8) Boyce, M. C., and Arruda, E. M., Poly. Eng. and Sci., 30-20,(1990), 1288-1298.
- 9) G'Sell, G., and Jonas, J. J., J. Mater. Sci., 14, (1979), 583-591.