

非線形移動硬化モデルの応用研究

三重大学 工学部 機械工学科

助手 王 建定

(平成5年度奨励研究助成 AF-93039)

1. 研究の背景

近年塑性加工技術の基礎理論である塑性力学は材料の微視挙動の異なる立場から多くの研究がなされ、大きな成果を遂げた。中でも繰り返し塑性変形及び繰り返し粘塑性変形の構成式は、繰り返し負荷下のほとんどの非弾性挙動を精度よく記述できるようになった。しかしながら、繰り返し塑性構成式の定式化にはまだいくつかの問題点が残されており、特に単軸及び多軸ラチェット変形は最もシミュレーション精度の悪い問題の一つである⁽¹⁾。したがって、本研究では単軸及び多軸ラチェット変形に適用可能な移動硬化モデルをひずみ硬化/動的回復の機構に基づいて定式化し、提案したモデルの適用性の証明及びモデルの具体的な応用を示した。

2. 研究方法

本研究で提案した移動硬化モデル⁽²⁾及び従来のArmstrong-Frederickモデル⁽³⁾を用いて、IN738LC材料のいろいろな応力・ひずみ条件下での塑性力学挙動をシミュレーションし、それらの結果と実験結果を比較することにより、提案したモデルの単軸・多軸ラチェット変形に対する有効性及び先進性を示し、そして非比例変形に対するモデルの適用性を証明する。

次に本研究で使ったモデルの概要を紹介する。

本研究では、微小ひずみを扱うから、ひずみ ϵ を次式のように弾性成分 ϵ^e と塑性成分 ϵ^p に分解する。

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (1)$$

金属材料が塑性変形を受けると、転位に作用する種々の内部応力が発生する。そこで、移動硬化変数 α を次式のように N 個の成分に分解する。

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \alpha_i \quad (2)$$

なお、本研究では次のような記号を用いる。

($\dot{\quad}$): 時間に関する微分

(\cdot): 2階のテンソル間の内積 [$a : b = \text{tr}(ab)$]

$\langle \cdot \rangle$: Macauley の括弧 [$x \geq 0$ ならば、 $\langle x \rangle = x$,

$x < 0$ ならば $\langle x \rangle = 0$]

H : Heaviside のステップ関数 [$x \geq 0$ ならば $H(x) = 1$,
 $x < 0$ ならば $H(x) = 0$]

モデルA: 動的回復の臨界状態を考慮したモデル

Armstrong-Frederickモデルをはじめとする硬化/動的回復モデルでは、 α_i の発展式はひずみ硬化と動的回復の2項からなる。動的回復の微視的機構としては、交差すべりが考えられる。これは障害物に堆積した転位が交差すべりによって可動性を回復するからである。そして交差すべりを生じるためには高いエネルギーが必要との考え方から、 α_i の動的回復は α_i の大きさ $\|\alpha_i\| = [(3/2)\alpha_i : \alpha_i]$ がある臨界値 r_i に達したときに生じると仮定した。この結果、 α_i の発展式は次のように表された。

$$\dot{\alpha}_i = \zeta_i \left[(2/3)r_i \dot{\epsilon}^p - H(f_i) \langle \dot{\epsilon}^p : k_i \rangle \alpha_i \right] \quad (3)$$

ここで ζ_i は材料定数であり、また $k_i (= \alpha_i / \|\alpha_i\|)$ は α_i の方向を示す2階のテンソルである。さらに $f_i = \|\alpha_i\|^2 - r_i^2$ は、動的回復の臨界状態を表わす関数である。

モデルB: モデルAの拡張

さらに、 α_i の動的回復は $\|\alpha_i\|$ が臨界値 r_i に近づくにつれて非線形的に活発になると考え、上式を次のように拡張した。

$$\dot{\alpha}_i = \zeta_i \left[(2/3)r_i \dot{\epsilon}^p - (\|\alpha_i\|/r_i)^{m_i} \langle \dot{\epsilon}^p : k_i \rangle \alpha_i \right] \quad (4)$$

ここで m_i は材料定数である。

モデルC: Armstrong-Frederickモデル

Armstrong-Frederickモデルでは、 α_i の動的回復は単純に α_i に比例すると仮定されるから、 α_i の発展式は次のようである。

$$\dot{\alpha}_i = \zeta_i \left[(2/3)r_i \dot{\epsilon}^p - \alpha_i \dot{p} \right] \quad (5)$$

ここで、 ζ_i 及び r_i は材料定数であり、 p は累積塑性ひずみである。

3. 研究成果

前述のモデルA, B, Cのラチェット変形に対する有効性及び他の複雑な変形に対する適用性を、ZiebsらのIN738LC合金の850°Cでの実験結果⁽⁴⁾に基づいて検討した。

850°Cでのこの材料の著しい等方硬化が認められなかったため、各モデルのシミュレーション計算のとき、次のような関係式を用いた。

$$\dot{\epsilon}^P = (3/2)A\sigma_{\text{eff}}^{b-1}(S-\alpha) \quad (6)$$

ここで、Aとbは材料定数であり、Sは偏差応力である。そして

$$\sigma_{\text{eff}} = [(3/2)(S-\alpha):(S-\alpha)] \quad (7)$$

である。

各材料定数はTable 1のように決められた。

3.1 ラチェット変形に対するシミュレーションと実験結果との比較

Fig. 1は一定引っ張り応力(175MPa)に繰り返しねじり変形(相当せん断ひずみ片幅0.424%)を重畳した多軸ラチェット変形(相当ひずみ速度0.1%/s)の実験結果とモデルのシミュレーション結果を示す。この図から、モデルCは多軸ラチェットひずみの累積を過大評価することがわかる。

一方本研究で提案したモデルAを用いて計算した結果、繰り返し数の増加につれてラチェット変形が飽和する傾向にあるが、繰り返し数が小さいときにはかなりの精度で実験結果と一致している。またモデルBではラチェット実験から決める材料定数 m_i を導入しているため、実験結果を精度よくシミュレーションできる。

Table 1 Material constants

Models A and B		Model C	
$r_1 = 44.6$	$\zeta_1 = 2000$	$r_1 = 90.0$	$\zeta_1 = 2100$
$r_2 = 41.8$	$\zeta_2 = 835$	$r_2 = 40.0$	$\zeta_2 = 450$
$r_3 = 21.0$	$\zeta_3 = 455$	$r_3 = 120.0$	$\zeta_3 = 150$
$r_4 = 25.4$	$\zeta_4 = 285$		
$r_5 = 31.2$	$\zeta_5 = 165$		
$r_6 = 32.0$	$\zeta_6 = 100$		
$r_7 = 27.0$	$\zeta_7 = 65$		
$r_8 = 25.0$	$\zeta_8 = 40$		
$m_i = 1$ for Model B ($i = 1, \dots, 8$)			
$E = 1.65 \times 10^5$, $\nu = 0.33$, $A = 5.43 \times 10^{-25}$, $b = 8.8$			

Fig. 2は最大応力 $\sigma_{\text{max}} = 700\text{MPa}$ 、 $\sigma_{\text{min}} = -200\text{MPa}$ である単軸ラチェット変形における引っ張りピークひずみの繰り返し数に伴う変化、すなわち単軸ラチェットひずみの累積を示す。この図からモデルAとBはともにラチェット変形を実験結果より約2倍の程度で予測しているが、モデルCよりは若干の改善が見られる。またFig. 3は最大応力 $\sigma_{\text{max}} = 700\text{MPa}$ 、 $\sigma_{\text{min}} = 200\text{MPa}$ のときの結果である。Fig. 2とFig. 3から、最大応力が同じであるが最小応力が

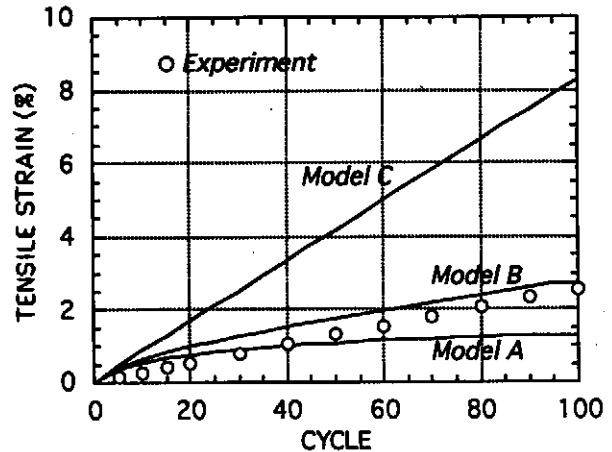


Fig. 1 Results of multiaxial ratchetting

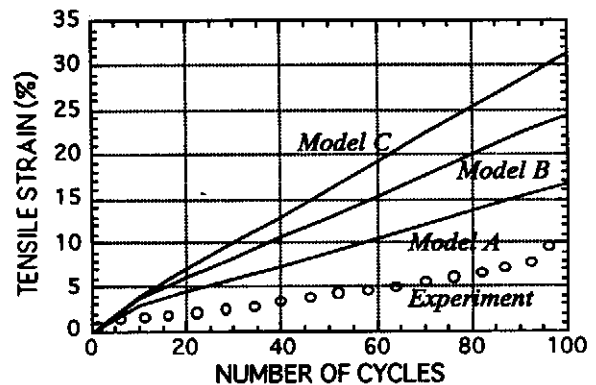


Fig. 2 Results of uniaxial ratchetting
($\sigma_{\text{max}} = 700\text{MPa}$, $\sigma_{\text{min}} = -200\text{MPa}$)

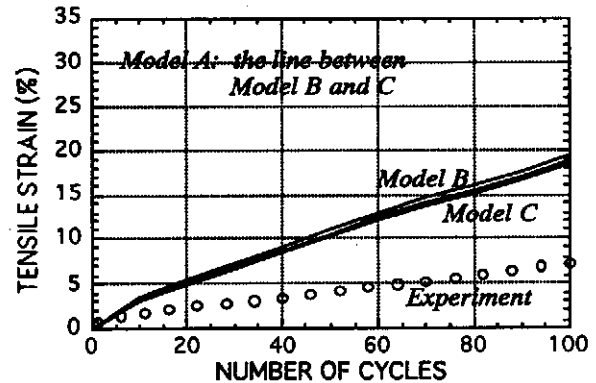


Fig. 3 Results of uniaxial ratchetting
($\sigma_{\text{max}} = 700\text{MPa}$, $\sigma_{\text{min}} = 200\text{MPa}$)

異なるこの二つの実験条件下でのラチェット変形はほとんど差がないことがわかる。そして、モデルAとBもこの傾向を示している。一方のモデルCではこの傾向が見られなかった。

3.2 他の非比例変形の実験結果との比較

以上では、モデルAとBを用いて、多軸及び単軸ラチェット変形のシミュレーション精度を従来のモデルより改善できることを示したが、モデルの妥当性を検証するためには、他の変形状態での応力ひずみ応答を検討しておく必要がある。特に非比例変形では、予期しない計算結果が得られる可能性があるから、本研究では各種の非比例変形をシ

ミュレーションし、対応の実験結果と比較してモデルの適用性を示した。なお、ある典型的な非比例変形（例えば十字型ひずみ経路、円形ひずみ経路など）に対する検討は他の材料についても行っており、本研究のIN738LC合金についても同じ結論を得たため、この報告書ではそれらを省略する。ここで幾つかの新たな結果を報告する。

Fig. 4は定常引っ張りひずみ(0.424%)に繰り返しせん断ひずみ(相当せん断ひずみの片幅0.0424)を重ねた多軸応力緩和(相当ひずみ速度0.1%/s)の例を示す。この図から、モデルCでは、応力緩和は実験結果よりはるかに早く、間もなく0に近づくことがわかる。また、モデルAは応力緩和をやや遅く予測しているが、モデルCよりは実験結果に近い。一方のモデルBは多軸応力緩和についても精度よく予測することができる。

最後に、Fig. 5は引っ張りひずみと相当せん断ひずみが等しい菱状のひずみ経路(片幅0.424%)の応力応答の実験(相当ひずみ速度0.1%/s)及び計算結果を示す。これらの結果から、いずれのモデルの計算結果も実験結果とよく一致している。正確に言えば、モデルCの方は最大応力の幅をやや大きく予測しており、モデルA(モデルBの結果はモデルAとほぼ同じ)の方がもっと実験結果と一致する。

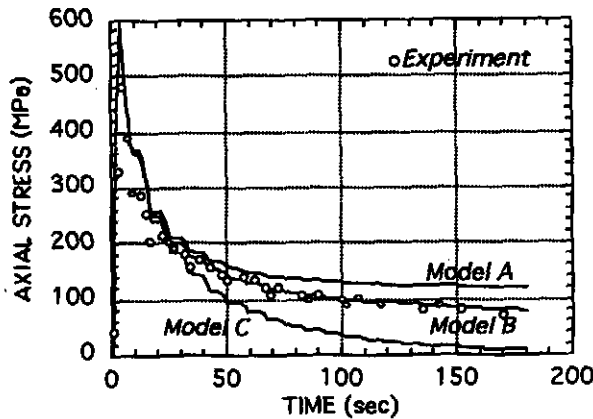


Fig. 4 Results of multi-axial stress relaxation

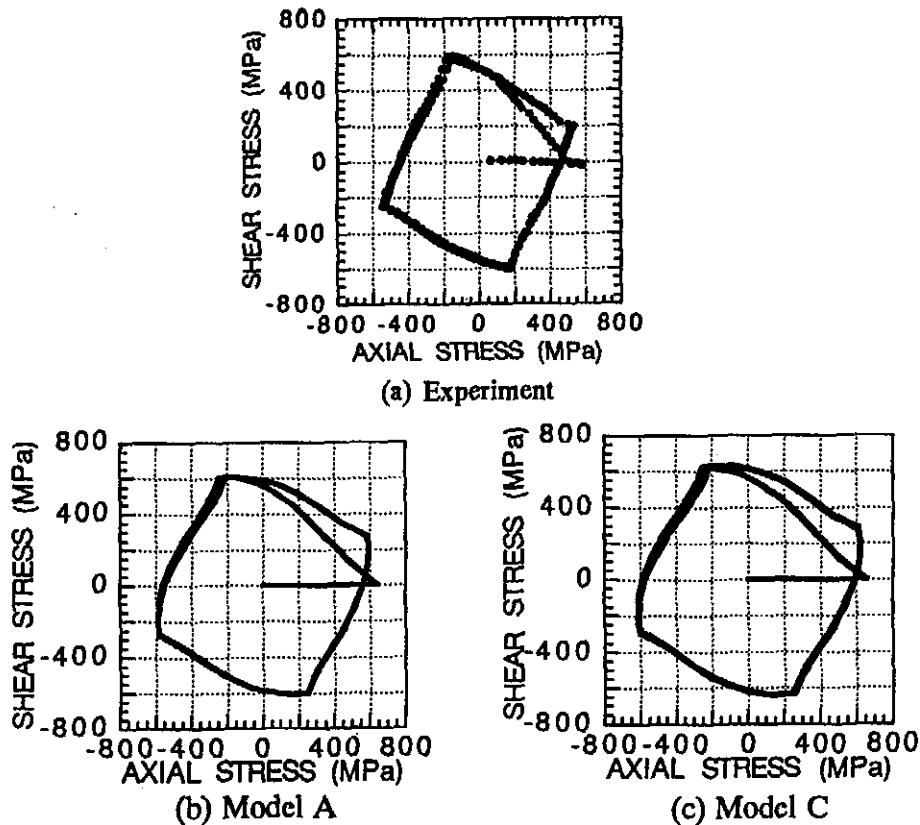


Fig. 5 Stress responses of diamond-shape straining test

4. 結 論

本研究では、提案したモデルの実際の応用性を検証するため、IN738LC合金の各種の応力ひずみ状態下での応答をモデルA, B, Cでシミュレーションし、実験結果と比較した。得られた結果をまとめると次のようである。

- (1) モデルAとBはモデルCに比べて単軸及び多軸ラチェットのシミュレーション精度を改善することができる。
- (2) モデルAとBはモデルCに比べて多軸応力緩和のシミュレーション精度を改善することができる。
- (3) モデルAとBはモデルCと同じように他の各種の非比例変形を精度よくシミュレーションすることかできる。

謝 辞

本研究の実施に当たり、御支援をいただいた財団法人天田金属加工技術振興財団に、心より厚く御礼申し上げます。

また本研究の遂行に当たり、御指導を賜わった名古屋大学工学部大野信忠教授に心から厚く御礼申し上げます。

さらに貴重な実験データを提供されたJ. Olschewski博士らに深く感謝します。

参考文献

- [1] Ohno N., "Recent Topics in Constitutive Modeling of Cyclic Plasticity and Viscoplasticity," *App. Mech. Rev.*, 43 (1990), 283-295.
- [2] Ohno N. and Wang J-D., "Kinematic Hardening Rules with Critical State of Dynamic Recovery," *Int. J. of Plasticity*, 9 (1993), 375-403
- [3] Armstrong P. J. and Frederick C. O., "A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect," CEGB Report, RD/B/N731, Berkeley Nuclear Laboratories, 1966.
- [4] Ziebs J., Meersmann J. and Kuhn H-J., "Effects of Proportional and Nonproportional Straining Sequences on Hardening/Softening Behavior of IN738LC at Elevated Temperatures" "Preprints of MECAMAT '92, Sept. 1-4, 1992, Cachan, France.