複合階層塑性変形モデルに基づく実用的構成式*

小幡谷 洋一^{*1}, 靳 忠 效^{*2}Practical Constitutive Equation Based on
Multiple Strata Plasticity Model

Yoichi OBATAYA and Zhongxiao JIN

The constitutive equation based on the multiple strata plasticity model proposed in the previous paper contains a term involving the tensor $\mathbf{Q}$ describing the activation state of the slip systems in polycrystalline metal. In this work we aim to clarify the characteristic of $\mathbf{Q}$ under the proportional and nonproportional loadings. To describe visually the complicated stress state a two-dimensional stress plane is newly introduced by applying each magnitude of normal and shearing deviatoric stress tensors. The stress trajectory can be expressed in terms of two angle parameters, Θ and θ , on the stress plane. All of the quantity of $\mathbf{Q}$ can be given by the simulation calculations under various loadings with a virtual specimen of polycrystalline metal. Each component of $\mathbf{Q}$ can be systematically related to the deviatoric stress using a specific function of Θ and θ . In addition, it is suggested that the hardening characteristic of the slip system may be presumed analytically by comparing the experimental results with the constitutive equation.

Key Words: Plasticity, Dislocation, Constitutive Equation, Slip System, Combined Stress, Polycrystalline Metal, Hardening

1. 緒 言

著者らは前報⁽¹⁾において、多結晶金属材料に関する複合階層塑性変形モデルを提示し、その適用性について若干の検討を加えた。このモデルはマクロ-メゾ-ミクロといった階層にまたがる挙動を統計力学的思考と結晶塑性学的手法を用いて統一的に記述しようとするものである。具体的には、(1)ミクロ層における転位の平均的移動挙動を不規則障害物説⁽²⁾に基づいて巨視的外応力と結びつけ、(2)多結晶仮想試験片の各すべり系における分解せん断応力を外応力より評価し、(3)すべり系の硬化特性(分解せん断応力-すべり量曲線)がすべて等価となるよう各すべり系での実動転位密度を定め、(4)最終的に巨視的塑性変形がすべり系の活動状態に基づくものとして、塑性構成式を構築している。しかし、すべり系の活動状態を反映するテンソル $\mathbf{Q}$ の特性評価には結晶構造を考慮した多結晶体の仮想試験片による数値シミュレーションが不可欠であった。前報では面心立方格子の結晶粒からなる仮想試験片についての検討を行ったが、別の研究⁽³⁾ではテ

ンソル $\mathbf{Q}$ の特性が結晶構造に依存しないことを示している。したがって、テンソル $\mathbf{Q}$ の特性と外応力状態との一般的関係を見い出すことが本モデルにとって実用上重要な課題となる。

そこで、本研究では前報と同様の仮想試験片を用い、さまざまな比例および非比例荷重試験下の結果をもとにテンソル $\mathbf{Q}$ の定式化を試みた。なお、新たに導入した二次元応力表示法が多軸応力下のすべり系の活動状態を総合的に記述する上で有効なことを示している。

2. 塑性構成式

不規則障害物説では塑性ポテンシャル関数 $W(\bar{\sigma})$ と内部構造変数 A_s はそれぞれ以下のように与えられている。

$$W(\bar{\sigma}) = 2(\bar{\sigma}/\sigma_{ys})^{m_s} \dots\dots\dots (1)$$

$$A_s = \frac{n_0}{bN} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は Mises 形の相当応力、 σ_{ys} と m_s は定数、 n_0 は障害物の線密度、 N は可動転位の面密度、 b はバーガースベクトルの大きさである。関数 $W(\bar{\sigma})$ の微分関数 $f(\bar{\sigma})$ を用い、塑性構成式は次式で与えられる。

* 原稿受付 1996 年 7 月 8 日。

^{*1} 正員, 福井大学工学部 (〒910 福井市文京 3-9-1)。^{*2} 福井大学大学院。

$$d\epsilon_p = (C : Q) \frac{f(\bar{\sigma})}{A_s} d\bar{\sigma} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $d\epsilon_p$ は塑性ひずみ増分テンソル、 C は4階のテンソル、 Q は2階のテンソルである。テンソル C の成分 C_{ijkl} は弾性コンプライアンステンソルからの類推で次のように仮定している。

$$\left. \begin{aligned} C_{1111} &= C_{2222} = C_{3333} (= C_{11}) \\ C_{1112} &= C_{1113} = C_{2211} = C_{2213} = C_{3311} = C_{3312} (= C_{12}) \\ C_{1212} &= C_{2121} = C_{2323} = C_{3232} = C_{3131} = C_{1313} (= C_{44}) \\ \text{その他の } C_{ijkl} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

なお、前報では $C_{11}=1$, $C_{12}=-C_{11}/2$, $C_{44}=2C_{11}$ とおくことにより実験結果をよく説明できることを示した。すべり系の活動状態を反映するテンソル Q は以下の手順によって与えられる。結晶軸方位がランダムとなるよう配置された多結晶体(仮想試験片)を考える。 r 番めすべり系のすべり面法線方向の単位ベクトルを $\mathbf{a}^r$ 、すべり方向の単位ベクトルを $\mathbf{n}^r$ とすると、一般化されたシュミット因子テンソル μ^r は

$$\mu^r = (\mathbf{a}^r \mathbf{n}^r + \mathbf{n}^r \mathbf{a}^r) / 2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

である。外応力テンソル σ (同偏差応力 σ') による分解せん断応力 τ は次式で与えられる。

$$\tau = \text{tr}(\mu^r \sigma) = \text{tr}(\mu^r \sigma') \quad \dots\dots\dots (6)$$

分解せん断応力 τ とすべり量 γ の関係を示すすべり系の硬化特性を次式で表現する。

$$|\tau| = \tau_c (1 + c|\gamma|^n) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 τ_c は臨界分解せん断応力、 c と n は定数である。 $|\tau| \geq \tau_c$ となるすべり系が活動可能となるが、活動中のすべり系が $[\tau \times d\tau < 0]$ の条件を満たす場合には活動をいったん停止する。このようなすべり系を怠惰すべり系と呼ぶが、その急増現象は応力経路の屈曲直後に見られる。実動転位の平均移動距離は不規則障害

Fig.1 $\|\sigma_N\| \sim \|\sigma_T\|$ stress plane

物説によって与えられるので、理想塑性ひずみ増分テンソルに対応するテンソル Q の成分 Q_{ij} は次式で与えられる。

$$Q_{ij} = \frac{\sum_{r=1}^M \mu_{ij}^r d\gamma^r}{\sum_{r=1}^M d\gamma^r} = \frac{\sum_{r=1}^M \left\{ \mu_{ij}^r |d\tau^r| \left(\frac{|d\tau^r|}{\tau_c} - 1 \right)^{(1/n)-1} \right\}}{\sum_{r=1}^M \left\{ |d\tau^r| \left(\frac{|d\tau^r|}{\tau_c} - 1 \right)^{(1/n)-1} \right\}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 M は活動すべり系の総数である。

塑性構成式をマトリックス表示すれば、以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_{11} \\ d\epsilon_{22} \\ d\epsilon_{33} \\ 2d\epsilon_{12} \\ 2d\epsilon_{23} \\ 2d\epsilon_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{33} \\ 2Q_{12} \\ 2Q_{23} \\ 2Q_{31} \end{bmatrix} \times \frac{f(\bar{\sigma})}{A_s} d\bar{\sigma} \quad \dots\dots\dots (9)$$

3. 二次元応力表示法

多軸応力下の多様な負荷経路におけるテンソル Q の変化特性を総合的に検討するため、以下に示す二次元応力表示法を導入する。偏差応力テンソル σ' を垂直応力テンソル σ_N とせん断応力テンソル σ_T とに分割して考える。

$$\sigma' = \sigma_N + \sigma_T = \begin{bmatrix} \sigma'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma'_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \sigma'_{12} & \sigma'_{13} \\ \sigma'_{21} & 0 & \sigma'_{23} \\ \sigma'_{31} & \sigma'_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (10)$$

それぞれのテンソルの大きさ $\|\sigma_N\|$ および $\|\sigma_T\|$ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \|\sigma_N\| &= \sqrt{(\sigma_{11}'^2 + \sigma_{22}'^2 + \sigma_{33}'^2)} \\ \|\sigma_T\| &= \sqrt{2(\sigma_{12}'^2 + \sigma_{23}'^2 + \sigma_{31}'^2)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

同様に偏差応力増分テンソル $d\sigma'$ も以下のように $d\sigma_N$ と $d\sigma_T$ に分割しておく。

$$d\sigma' = d\sigma_N + d\sigma_T = \begin{bmatrix} d\sigma'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d\sigma'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d\sigma'_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & d\sigma'_{12} & d\sigma'_{13} \\ d\sigma'_{21} & 0 & d\sigma'_{23} \\ d\sigma'_{31} & d\sigma'_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (12)$$

図1に示すように、 $\|\sigma_N\|$ および $\|\sigma_T\|$ をそれぞれ横軸と縦軸にとった応力平面上で応力状態と応力経路を考える。図中の応力点 $P(\|\sigma_N\|, \|\sigma_T\|)$ を通る応力経路が直線であるとし、この間の応力変化が $d\|\sigma_N\|$ および

$d\|\sigma_T\|$ であると考え (図1参照)。なお, $d\|\sigma_N\|$ と $d\|\sigma_T\|$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\begin{aligned} d\|\sigma_N\| &= (\sigma_N : d\sigma_N) / \|\sigma_N\| \\ d\|\sigma_T\| &= (\sigma_T : d\sigma_T) / \|\sigma_T\| \end{aligned} \quad (13)$$

点 P を通る応力経路は原点 0 から P までの距離 $\|\sigma\|$ ($=\sqrt{\|\sigma_N\|^2 + \|\sigma_T\|^2}$) を基準に, 図中に記した角度 θ および θ によって記述できる。 θ および θ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\|\sigma_N\|}{\|\sigma_T\|} \quad (14)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\|\sigma_N\|(d\|\sigma_N\|) + \|\sigma_T\|(d\|\sigma_T\|)}{\sqrt{\|\sigma_N\|^2 + \|\sigma_T\|^2} \sqrt{(d\|\sigma_N\|)^2 + (d\|\sigma_T\|)^2}} \right\} \quad (15)$$

なお, 上式を適用する際, 応力経路が $\|\sigma_N\|=0$ より始まる時には $\|\sigma_N\|=d\|\sigma_N\|/2$, $\|\sigma_T\|=0$ より始まる時には $\|\sigma_T\|=d\|\sigma_T\|/2$ とする。 $\cos \theta < 0$ の場合は除荷に相当するので繰返し塑性の問題として後日別途検討する。 $\theta=0$ のときは比例負荷であり, その他はすべて非比例負荷に相当する。上の応力表示法に対応させ, テンソル Q も垂直テンソル Q_N とせん断テンソル Q_T に分割して考える。すなわち

$$\begin{aligned} Q &= Q_N + Q_T \\ &= \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & 0 & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (16) \end{aligned}$$

それぞれのテンソルの大きさ $\|Q_N\|$ および $\|Q_T\|$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \|Q_N\| &= \sqrt{(Q_{11}^2 + Q_{22}^2 + Q_{33}^2)} \\ \|Q_T\| &= \sqrt{2(Q_{12}^2 + Q_{23}^2 + Q_{31}^2)} \end{aligned} \quad (17)$$

Fig. 2 Examples of stress path including nonproportional loading

4. シミュレーション結果および考察

仮想試験片は前報⁽¹⁾と同様の方法で構築し, 面心立方格子 (FCC) の結晶粒が 1890 個となる多結晶体である。比例負荷試験は多軸応力状態を含め, θ の値を種々変化させて行った。また, 比例負荷後に非比例負荷経路となるさまざまな試験 (代表的な負荷経路を付録の付表に示す) を行ったが, それらの応力経路のいくつかを図2の $\|\sigma_N\|$ - $\|\sigma_T\|$ 平面上に示した。いずれも臨界分解せん断応力 τ_c を 1.0 MPa, 定数 n を 0.1 とすることにより, 各応力経路下でのテンソル Q の各成分の値を式(8)に基づいて算定した。

4.1 比例負荷試験結果 図3にはすべての試験結果における $\|Q_N\|$ と $\|Q_T\|$ の関係を示す。試験点にばらつきはあるが, 全体として両者の関係は次式で表すことができる。

$$\|Q_N\|^2 + \|Q_T\|^2 = \|Q\|^2 = \text{Constant} \quad (\equiv Q_0^2 \text{ とおく}) \quad (18)$$

ここで, $Q_0 \approx 0.594$ であった。なお, ここで用いた仮想試験片中の結晶の個数はおおよそ $12 \times 12 \times 12$ 個程度であり, 多結晶体とはいえ実用的には極めて小さな試験片に相当する。したがって, 図3にみられるばらつきには結晶粒方位の配列方法も影響を与えているとも考えられる。そこで, 以下では試験点中央部の軌跡を与える式(18)の関係を理想的な試験片に対するものと解釈する。

図4には比例負荷試験で得た Q_{ij} の変化特性の一例を示す。負荷直後の低応力領域より Q の各成分はほぼ一定となっている。この傾向は他のいずれの試験にも共通していた。図5には Q と σ' との関係を見る

Fig. 3 Relation between $\|Q_N\|$ and $\|Q_T\|$ under proportional loading

ため、縦軸に $\{Q_{ij}/\|Q\|\}$ 、横軸に $\{\sigma'_{ij}/\|\sigma'\|\}$ をとって試験結果を整理したものである。いずれの成分に対しても試験点がほぼ傾斜1の直線上に乗っており、比例負荷でのテンソル Q は偏差応力テンソル σ' を用い次

式で定式化できる。

$$\frac{Q}{\|Q\|} = \frac{\sigma'}{\|\sigma'\|} \quad \text{.....(19)}$$

4.2 非比例負荷試験結果 一例として、図2の応力経路K-5の場合、すなわち比例負荷によって σ_{11} を一定値まで加え、その後 σ_{11} を一定のまま σ_{12} を増加させた試験結果について述べる。図6には Q の各成分の変化挙動を相当応力との関係で示す。各値とも比例負荷下で一定値を示すが、非比例負荷過程に入ると相当応力の増加とともに変化している。この間の応力経路を図7(a)に、また図7(b)には $\|Q_N\|-\|Q_T\|$ 平面上に式(18)の関係(図中の破線で示す円弧)と試験結果とを示した。応力経路折り曲げ点Pに対応する $\|Q_N\|-\|Q_T\|$ 平面上の点はP'である。応力経路PGに応じ、 $\|Q_N\|$ と $\|Q_T\|$ の関係は円弧上を移動し、G'に至っている。したがって、少なくとも式(18)の関係は非比例負荷下においても成立することがわかる。この過程ではつねに $\angle G'OP' > \angle GOP \equiv \theta$ という関係が成り立ち、この角度の差が非比例の効果を与えると考える

Fig. 4 Variation feature of Q_{ij} under proportional loading

Fig. 5 Relation between $\{Q_{ij}/\|Q\|\}$ and $\{\sigma'_{ij}/\|\sigma'\|\}$ under proportional loading

Fig. 6 Variation feature of Q_{ij} for the case of K-5 in Fig. 2

Fig. 7 Variation feature of $\|Q_N\|$ and $\|Q_T\|$ for the case of K-2 in Fig. 2

れる。ここで、 $\|Q_N\|$ および $\|Q_T\|$ はパラメータ θ の関数 $h(\theta)$ を用いて次式で与えられるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \|Q_N\| &= Q_0 \cos\{\theta + h(\theta)\} \\ \|Q_T\| &= Q_0 \sin\{\theta + h(\theta)\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

$h(\theta)$ が $[h(0)=0]$ の条件を満たすなら、上式は比例負荷の場合となる。式(20)より次式を得る。

$$h(\theta) = \tan^{-1} \frac{\|Q_T\|}{\|Q_N\|} - \theta \dots\dots\dots (21)$$

上式右辺の値は応力経路に応じた試験点に対してすべて算出できる。種々の応力経路における試験結果の検討により、関数 $h(\theta)$ は次式で表しうることがわかった。

$$h(\theta) = \eta_1 \tan(\eta_2 \theta) \dots\dots\dots (22)$$

ここで、 η_1 と η_2 は定数であり、最尤法により $n=0.1$ の場合には $\eta_1 \doteq 0.138$, $\eta_2 \doteq 0.8$ を得た。図8は式(21)および式(22)より計算される $h(\theta)$ の値をそれぞれ縦軸と横軸にとって整理したものである。若干のばらつきがあるものの、両者の対応は良好である。以上のことより、 $\|Q_N\|$ と $\|Q_T\|$ は応力経路に依存するものとして式(22)の関数を用いた式(20)との関係で定式化される。

一方、図6でのテンソル Q の各成分の変化挙動は $\|Q_N\|$ と $\|Q_T\|$ の変化特性に依存しているように見える。ここでは式(19)からの類推として次式が成り立つものと仮定する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_{ii}}{\|Q_N\|} &= \frac{\sigma'_{ii}}{\|\sigma_N\|} \\ \frac{Q_{ij}}{\|Q_T\|} &= \frac{\sigma'_{ij}}{\|\sigma_T\|} \quad (i \neq j) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

非比例負荷下のすべての試験結果に対し、上式左辺お

よび右辺の値をそれぞれ縦軸と横軸にとって示したのが図9である。試験点はいずれも傾斜1の直線の周辺に散在し、そのばらつきも図5でのそれとほぼ等しい。したがって、三軸応力を含む非比例負荷におけるテンソル Q の各成分は偏差応力を用いた式(23)によって定式化できる。なお、この式は比例負荷の場合を含んでいる。

$\|\sigma_N\| = \|\sigma'\| \cos \theta$, $\|\sigma_T\| = \|\sigma'\| \sin \theta$ と式(20)との関係を用いると、式(23)は次の一般式に書き換えることができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_{ii}}{Q_0} &= R_N \frac{\sigma'_{ii}}{\|\sigma'\|} \\ \frac{Q_{ij}}{Q_0} &= R_T \frac{\sigma'_{ij}}{\|\sigma'\|} \quad (i \neq j) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

ここで、 R_N と R_T は非比例度を示すパラメータと考えられ、それぞれ次式で与えられるものである。

$$\left. \begin{aligned} R_N &= \frac{\cos\{\theta + \eta_1 \tan(\eta_2 \theta)\}}{\cos \theta} \\ R_T &= \frac{\sin\{\theta + \eta_1 \tan(\eta_2 \theta)\}}{\sin \theta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

比例負荷 ($\theta=0$) の場合には $R_N=R_T=1$ となるので、すべり系の活動状態には各偏差応力成分は同等の効果を与える。しかし、非比例負荷の場合には $R_N \neq R_T$ となるので、すべり系活動状態に及ぼす垂直偏差応力成分とせん断偏差応力成分の効果には差のあることがわかる。

以上、本論文での二次元応力表示法を適用することにより、比例および非比例負荷の場合を含めテンソル Q の特性は偏差応力との関係ですべて定式化することができた。このことは、本モデルの実用性を向上させ、複雑な塑性変形挙動を認識・記述する上での利器

Fig. 8 Relation between $\{\tan^{-1}(\|Q_T\|/\|Q_N\|) - \theta\}$ and $\{\eta_1 \tan(\eta_2 \theta)\}$

Fig. 9 Relation between Q and σ' under nonproportional loading

となる。

例えば、非比例負荷下の実験における任意点での垂直塑性ひずみ増分の成分 $d\epsilon_{11}$ とせん断塑性ひずみ増分の成分 $d\epsilon_{12}$ が与えられているとしよう。それらの比は本モデルに従うなら定式化した式を用いて次式で与えられる。

$$\frac{d\epsilon_{11}}{d\epsilon_{12}} = \frac{C_{11} - C_{12}}{C_{44}} \frac{\tan \theta}{\tan(\theta + \eta_1 \tan(\eta_2 \theta))} \frac{\sigma'_{11}}{\sigma'_{12}} \quad \dots\dots\dots (26)$$

応力経路が与えられているので θ と θ および偏差応力はすべて既知である。上式は内部構造変数 A_s の大きさに依存しないので、一連の実験結果をもとに η_1 と η_2 の適切な値を評価できる。すべり系の硬化特性値 $n=0.1$ のほか、 n を 0.05, 0.2 および 0.3 として評価した η_1 と η_2 の値を図 10 にパラメータ n との関係で示した。 n の増加に従って η_1 と η_2 が系統的に変化することがわかる。したがって、実験結果をもとに適切な n の値を評価できると考える。 η_1 と η_2 が決定されるなら、実験データを用い応力経路上のすべての点における内部構造変数 A_s は次式より求まる。

$$A_s = \frac{Q_0}{2} \sqrt{9 + 7 \sin^2\{\theta + \eta_1 \tan(\eta_2 \theta)\}} \frac{dW(\bar{\sigma})}{d\bar{\epsilon}_p} \quad \dots\dots\dots (27)$$

ここで、 $C_{11}=1$, $C_{12}=-1/2$ および $C_{44}=2$ としている。前報⁽¹⁾で示した純銅の実験結果をもとに、式(27)で評価した A_s の変化特性を図 11 に示した。図中には、静引張り(Tension)、ねじり(Torsion)、比例負荷(A-1 と A-2)および段階状負荷(case B)の場合の A_s を累積塑性ひずみとの関係で示した。当然ながら前報での結果とよく対応しており、変形初期で A_s が急減した後、比例負荷の場合にはほぼ一定値に収束し、非比例負荷の場合には段階状の応力経路に応じて規則的に変化している。

以上のことからわかるように、さまざまな微視的構造をもつ材料の系統的な実験をもとに変形履歴に依存する内部構造変数 A_s の発展則を明らかにすることが今後の課題といえる。その際、ここで示した実用的な構成式は有効であると考えられる。

5. 結 論

仮想試験片を用いた比例および非比例負荷試験下のテンソル $\mathbf{Q}$ と外応力との関係を、多軸応力状態を記述する新たな二次元応力表示法を導入して検討した。得られたおもな結果は以下のとおりである。

(1) 比例および非比例負荷のいずれの場合も、すべり系活動状態を反映するテンソル $\mathbf{Q}$ は応力経路を

Fig. 10 Dependence of the value n on η_1, η_2

Fig. 11 Variation of internal structure variable A_s for pure copper

表す角度 θ と θ を用いて偏差応力テンソル σ' との関係で統一的に定式化できた。非比例負荷の場合、すべり系の活動状態に及ぼす垂直偏差応力とせん断偏差応力の効果は必ずしも等しくないことがわかった。

(2) すべり系の硬化特性値 n の適切な値および内部構造変数 A_s の変化特性は実験結果と本モデルとの対比によって容易に評価しうることを示した。

(3) 結論(1)を得たことにより、応力状態と微視構造状態を分離して構築している本モデルは、複雑な塑性変形挙動を認識・記述する上で実用的にも有効なものと考えられる。

文 献

- (1) 小幡谷洋一・新忠效・岡崎敦則, 機論, 62-601 (1996), 2149-2156.
- (2) 鶴戸口英善・岡村弘之, 材料試験, 10-99 (1961), 72-77.
- (3) Jin, Z. X. and Obataya, Y., Mem. Fac. Eng. Fukui Univ., 44-1 (1996), 51-60.

付表 Typical stress paths in the nonproportional loading tests

case	step	σ_{11} (MPa)	σ_{22} (MPa)	σ_{33} (MPa)	σ_{12} (MPa)	σ_{23} (MPa)	σ_{31} (MPa)
1	1st	0→50	0	0	0	0	0
	2nd	50	0	0	0→50	0	0
2	1st	0→50	0	0	0	0	0
	2nd	50→200	0	0	0→50	0	0
3	1st	0→30	0	0	0→30	0	0
	2nd	30	0	0	30→90	0	0
4	1st	0→30	0	0	0→30	0	0
	2nd	30→90	0	0	0	0	0
5	1st	0	0	0	0→50	0	0
	2nd	0→50	0	0	50	0	0
6	1st	0	0	0	0→50	0	0
	2nd	0→50	0	0	50→150	0	0
7	1st	0→30	0→20	0	0→60	0→20	0
	2nd	30→72	20	0→60	60→81	20→52	0→15
8	1st	0	0	0	0→50	0→50	0→50
	2nd	0→150	0→-150	0	50	50	50
9	1st	0→50	0	0	0	0	0
	2nd	0	0	0	0→100	0→100	0→100
10	1st	0	0→30	0→50	0	0→16	0→32
	2nd	0→35	30	50→70	0→30	16→50	32→80
11	1st	0→50	0→50	0	0	0	0
	2nd	50	50	0	0→150	0	0
12	1st	0→60	0	0→10	0→40	0→30	0
	2nd	60→100	0→40	10→70	40	30→80	0→30
13	1st	0→50	0→61	0	0	0	0
	2nd	50→110	61→81	0→30	0→6	0→2	0
14	1st	0	0→30	0→50	0	0→20	0→40
	2nd	0→35	30	50→70	0	20	40
15	1st	0→50	0→50	0	0	0	0
	2nd	50	50	0	0→150	0→150	0→150

1st: Proportional loading

2nd: Nonproportional loading