J031014

**二曲面異方硬化モデルによる SUS316 ステンレス鋼の
繰返し予負荷後の変形挙動解析***金子 堅司^{*1}, 千葉 亮^{*2}, 三浦 千尋^{*2}**Deformation Analysis of SUS316 Stainless Steel after Cyclic Preloading
by Using Anisotropic Two Surface Hardening Model**Kenji KANEKO^{*1}, Ryo CHIBA and Chihiro MIURA^{*1} Tokyo University of science Dept. of Mechanical Engineering

1-14-6 Kudan-kita, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan 102-0073

A plastic constitutive model for predicting deformation behaviors of metal under various complex loadings is investigated experimentally and theoretically. In this report, some simulation analyses using the anisotropic two surface hardening model were performed for elastic-plastic deformation behaviors of SUS316 stainless steel in loading along the strain paths with corner after cyclic preloading. It is confirmed that the presented anisotropic hardening constitutive model is reliable for predicting deformation behavior of SUS316 stainless steel after cyclic preloading.

Key Words : SUS316 stainless steel, Two surface constitutive model, Cyclic preloading, Biaxial loading

1. 結 言

一般構造材料は繰返し負荷や突発的な負荷を受ける可能性がある。こうした時の機器の安全性を精密に確認するためには、材料の非弾性特性を詳細に知ることが不可欠である。SUS316 ステンレス鋼は耐食性の良いオーステナイト系ステンレス鋼の中でも特に優れた耐食性を持ち、高温強度も高いことから船舶部品、各種化学工業、配管部材など様々な構造物に用いられており、材料特性を詳細に知ることが重要となっている。

本研究は、SUS316 ステンレス鋼の塑性構成式について実験的かつ理論的に検討したものであり、異方性降伏条件式と二曲面構成モデルを用いて複雑なひずみ経路に沿った応力-ひずみ関係について予測計算を行い、実験結果と比較検討する。

2. 実 験⁽¹⁾⁽²⁾**2・1 実験装置**

コンピュータ制御による横型閉ループ油圧サーボ制御二軸組み合わせ応力試験機を用いる。この試験機により試験片に引張りとおねじり負荷を与え、ひずみ制御にて実験を行う。

2・2 試験片

実験に用いた SUS316 ステンレス鋼の試験片は並行部長さ 40mm、外径 20mm、肉厚 1.5mm の薄肉円筒である。

2・3 単純予負荷後ひずみ経路折り曲げ負荷実験

初めに引張方向に 2% 負荷した後、ひずみ経路を折り曲げる。その後は、ひずみ速度を $\dot{\epsilon}_1=1 \times 10^{-3}$, $\dot{\epsilon}_2=1 \times 10^{-4}$, $\dot{\epsilon}_3=1 \times 10^{-5}$, $\dot{\epsilon}_4=1 \times 10^{-6}$ [1/s] と変化させながら、各ひずみ速度にてそれぞれ 1.0%, 0.8%, 0.7%, 0.5% ひずませる行程を 1 サイクルとし、3 サイクル分負荷する。ひずみ経路の折り曲げ方向は 45° , 90° , 135° である。

2・4 繰返し負荷後ひずみ経路折り曲げ負荷実験

まずひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1 \times 10^{-4}$ [1/s] で繰返し数 $N=20$ まで引張圧縮繰返し負荷を行う。その際の繰返しひずみ

^{*1} 正員, 東京理科大学 (〒160-0016 東京都千代田区九段北 1-14-6)

^{*2} 学生, 東京理科大学大学院 工学研究科

E-mail: kaneko@rs.kagu.tus.ac.jp

幅は $\Delta \varepsilon = \pm 1.0$ [%], ± 0.5 [%] とする。その後ひずみ経路を折り曲げて負荷をかける。その際、前述の実験の同様のひずみ速度変更サイクルを2回連続して負荷する。繰返し予負荷後のひずみ経路折り曲げ角度は $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ である。

3. 繰返し予負荷後ひずみ経路が折れ曲がる負荷の解析

3・1 二曲面硬化モデル (Two Surface Hardening Rule) ⁽³⁾

降伏曲面の外側に限界曲面を設定し、降伏曲面の移動、限界曲面の移動と膨張を考慮した解析を行う。二曲面硬化則を用いることで、応力-ひずみの弾性から塑性への過渡的な挙動を記述することが可能になる。その他に、限界曲面の移動により永久軟化現象を記述でき、限界曲面の膨張により繰返し加工硬化の表現が可能となる。

3・2 SUS316 ステンレス鋼の降伏曲面 ⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾

繰返し予負荷後の降伏曲面を実測した例を図1に示す。これらを式(1)で近似し、図2に示す形状係数 p, q, r および回転角度 θ を予負荷や後続負荷の関数として定式化を行った。なお、実際に測定された降伏曲面は塑性ひずみが0.02~0.04%生じる点を降伏点としているので厳密な弾性領域とならない。そこで、降伏曲面の大きさを相似的に縮小して解析に用いた。

$$f = \frac{(\sigma_1 - \alpha_1)^2}{q^2} + \frac{(\sigma_3 - \alpha_3)^2}{\left\{ \frac{(p-r)(\sigma_3 - \alpha_3) + 2pr}{p+r} \right\}^2} - 1 = 0 \quad (1)$$

Fig.1 Yield surfaces after cyclic preloading

Fig.2 Shape parameters

3・3 降伏曲面の移動

・ Ziegler 則

Ziegler 則では降伏曲面の中心は、負荷点と中心とを結ぶ方向に移動するもので、式(1)で表せる。

$$d\alpha_{ij} = d\mu(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (2)$$

ここに、 $d\mu$ はスカラー量である。

・ Philips 則

Phillips タイプの降伏曲面の中心は、応力増分の方

$$d\alpha_{ij} = d\mu d\sigma_{ij} \quad (3)$$

・ Prager 則

Prager タイプの降伏曲面の中心移動は、偏差塑性ひずみ増分 ($d\varepsilon_{ij}^p$) の方向に移動するもので、式(3)で表せる。

$$d\alpha_{ij} = d\mu d\varepsilon_{ij}^p \quad (4)$$

ここに、 $d\epsilon_{ij}^p$ は偏差ひずみ成分である。

3・4 解析対象

解析の対象は、前述のひずみ経路折り曲げ負荷実験を用いる。この実験から得られた応力経路を入力し、ひずみ経路を計算する解析を行う。図3に $\angle \epsilon = +2.0\%$ の繰り返し予負荷後ひずみ経路が折り曲がるように負荷を続行したときの応力経路の結果を示す。

3・5 解析方法⁽⁸⁾

解析は実験から得られた応力経路に沿った応力増分を与え、以下の手順を繰り返すことでひずみ経路を計算する。

(1)後続降伏曲面形状の決定

繰り返し予負荷後およびその後の後続負荷に伴う後続降伏曲面の形状係数と回転角が予負荷点の関数として決定される。決定式については紙数の関係から省略する。

(2)塑性ひずみ増分の計算

弾性ひずみ増分はフックの法則より計算する。塑性ひずみ増分ベクトルは負荷点における降伏曲面の外側法線方向に生じるとする関連流動則式(5)を用いて計算する。

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

塑性ひずみの大きさは Dafalias&Popov の式に基づく式(6)で計算される加工硬化係数 HB を用いて決定する。限界曲面は予負荷直後ひずみ経路が折れ曲がる直前までは中心を原点にもつ半径 $\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$ の円として定義される。予負荷直後の負荷点から応力増分方向に直線を引き、この直線と限界曲面とが交わる点と負荷点との距離を δ_m とする。後続降伏曲面においても同じ手順で負荷点と限界曲面との距離を求め、これを δ とする。この δ_m , δ を用いて加工硬化係数 HB は次式で表される。

$$HB = K + h \frac{\delta}{\delta_m - \delta} K \quad (6)$$

ここに、 K : ひずみ経路折り曲げ時の加工硬化係数 h : 加工硬化係数の大きさを決める係数

(3) 後続降伏曲面の中心の決定

降伏曲面の中心の移動は Prager タイプと Phillips タイプの混合則に則るものとする。

$$d\alpha_{ij} = d\mu \left\{ M \frac{d\epsilon_{ij}^p}{\sqrt{d\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p}} + (1-M) \frac{d\sigma_{ij}}{\sqrt{d\sigma_{ij} d\sigma_{ij}}} \right\} \quad (7)$$

$$M = 1 - \frac{\delta}{2\delta_m} \quad (8)$$

$d\mu$ はスカラー、混合比 M は式(8)を用いて決定する。また、 $d\mu$ は未知のスカラー量で、これを求めるためには、後続する負荷点が常に降伏曲面上に存在する条件を用いて $d\mu$ の4次方程式である降伏条件式を解いて求める。本解析では $d\mu$ を Newton-Raphson 法による近似解として求める。また、後続負荷中 M が一定で変わらないと仮定した場合の解析も比較のため行った。図8に混合比について検討した結果を示す。いずれの場合もひずみ経路急変直後での近似はよいとは言えないが、 M を一定とする場合はひずみ増分方向が一定しない。式(8)に依ればひずみ増分方向は実験値とほぼ一致している。

4. 解析結果および考察

図6は、繰返しずみ幅 $\Delta\epsilon = \pm 0.5[\%]$ で予負荷を与えた後ひずみ経路を $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 折り曲げた場合のひずみ経路を応力経路から逆に求めた結果である。ひずみ経路の急激な方向変化を精度良く予測することは出来ないが、ひずみ増分方向はほぼ満足できる結果となっている。これに対応する応力ひずみ曲線を図4及び図5に示す。実験結果は負荷途中でひずみ速度を $\epsilon_1=1 \times 10^{-3}, \epsilon_2=1 \times 10^{-4}, \epsilon_3=1 \times 10^{-5}, \epsilon_4=1 \times 10^{-6}[\text{1/s}]$ と段階的に変化させており、滑らかな曲線となっていないが、予測値は概ねひずみ速度が $1 \times 10^{-4}[\text{1/s}]$ での応力に一致した結果となっている。

図7は降伏曲面を縮小近似した場合のひずみ経路予測結果をひずみ経路が 45° 折り曲がる場合について比較して示している。降伏曲面を小さく近似すればひずみ増分方向の急激な変化に対応した精確な解析が可能になる。が、大きさに対応した回転角の決定にも配慮が必要になる。図7の結果において、降伏曲面の縮小によって見込み通りひずみ経路急変後の早い段階でのひずみ増分方向の正確な予測が出来ているが、急変後ひずみが進展したときの予測に難がある。回転角の決定に更なる検討の余地があると考ええる。

図8は降伏曲面の移動則における混合係数 M の影響について調べた結果である。 M を一定値とした場合、わずかながらひずみ増分方向の変化の追随性が悪くなっていることが分かる。

Fig.3 Typical experimental results on stress path in loading along the strain path with a corner

Fig.4 Comparisons between experimental and calculated results on Stress-strain curve ($\theta = 45^\circ$)

Fig.5 Comparisons between experimental and calculated results on Stress-strain curve ($\theta = 90^\circ, 135^\circ$)

Fig.6 Comparisons between experimental and calculated results ($\Delta\epsilon = \pm 0.5[\%]$)

Fig.7 Effects of yield surface size
($\angle \epsilon = \pm 0.5[\%]$, $\theta = 45^\circ$)

Fig.8 Effects of mixing ratio in translation rule
($\angle \epsilon = \pm 1.0[\%]$, $\theta = 45^\circ$)

5. 結 言

実験から得られる降伏曲面形状を忠実に近似した異方性降伏条件式と二曲面構成モデルを用い、予負荷または繰返し予負荷を受けた後にひずみ経路が変化する負荷の解析を行い、SUS316 ステンレス鋼に対する実験結果と比較検討し、構成モデルの有用性を確認した。

降伏曲面の中心の移動には Phillips 則を Prager 則で補正する混合則を用いる。移動量決定は次負荷点が降伏曲面上に存在する条件から Newton-Raphson 法による数値解析を用い、降伏条件式が 4 次以上の高次曲面にも対応出来る。限界曲面の移動により永久軟化現象を記述でき、限界曲面の膨張により繰返し加工硬化を表現する。

文 献

- (1) 矢崎 健晴, 金子 堅司, 小山田 隆信, 金属材料の粘性特性と時効特性に及ぼす繰返し負荷の影響: 第 1 報, SUS 316 L ステンレス鋼に対する単軸繰返し負荷の場合, 日本機械学会論文集, A 編 62(601), 2122-2129, 1996-09-25
- (2) 小山田, 金子; 金属材料の粘塑性特性とひずみ時効に及ぼす予加工と変形速度の影響(SCM435 調質鋼及び SUS316 ステンレス鋼に対する単軸応力下での影響), 機論, 59-567, A(1993-11), pp.140-145.
- (3) 金子, 池上, 白鳥; 種々の複雑な前ひずみ経路に対する金属材料の降伏条件式と塑性流れの式, 機論, 41-350, A(1975-10), pp.2793-2802
- (4) 深津一太郎; A7075 のラチェット変形における初期・後続降伏曲面に関する研究, 東京理科大学工学部機械工学専攻 2005 年度卒業論文
- (5) 金子, 阿部, 塩川, 馬場; SUS316FR 鋼のラチェット変形下における後続降伏曲面に関する研究, 日本機械学会九州支部記念講演 会講演論文集 No.978-2(1997.10) 97.
- (6) 金 子, 馬場, 中村; SUS316FR 鋼, S25C 鋼 および黄銅のラチェット変形中の後続降伏曲面に関する研究, 日本機械学会年次大会講演論文集, No.99-1, pp.123.(1999-7)
- (7) Kenji KANEKO; STUDY ON SUBSEQUENT YIELD SURFACES OF SUS316FR S.S.UNDER MECHANICAL RATCHETING, The 8th International Symposium on Plasticity and Its Current Applications,(2000-7), Whistler, Canada.
- (8) 金子堅司, 岩 城 毅; 「メカニカルラチェット変形の連続体力学シミュレーション」, 日本機械学会 2010 年 度第 23 回 計算力学講演会講演論文集 (CMD2010JSME23rd Computational Mechanics Conference, CD-ROM, (2010-9)