

# I-27

## 多軸繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式

大阪大学大学院 学生員 池内智行  
 建設 省 正 員 小野 潔  
 大阪大学工学部 正 員 西村宣男

**1. はじめに** 鋼構造物が地震力などの繰り返し作用を受け大きな塑性変形を生じる場合の塑性変形挙動を把握するためには、鋼材の繰り返し塑性履歴を精度よく表現できる構成式が必要となってくる。そこで、著者らは鋼材の単調載荷曲線を基本とした一軸繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式を開発した。この構成式を多軸応力状態において繰り返し塑性履歴を受ける鋼材へと拡張する。また、この拡張した構成式を用いて既往の研究による多軸応力状態での実験のシミュレーションを行い構成式の精度を確認する。

**2. 多軸応力状態への拡張** 一軸応力状態に対する構成式として、応力-ひずみ関係を、弾性域、非線形遷移領域、単調載荷曲線に準ずる領域に分けそれらの移行点を応力に対応して定義した。つまり、図-1に示すように応力の変化が荷重の反転点から弾性域の大きさに達するまでは弾性域(点3-4)、さらに応力が、過去に受けた最大応力に達するまでは非線形遷移領域(点4-5)、それ以降は単調載荷曲線に準ずる領域(点5以降)となるとした。同様に多軸応力状態においても $\pi$ -平面上に降伏曲面と記憶曲面の二つの曲面を定義し、図-2において3-4-5のような応力経路を通るとき偏差応力が降伏曲面内であれば弾性域(点3-4)、降伏曲面と記憶曲面の間ならば非線形遷移領域(点4-5)、記憶曲面の外側なら単調載荷曲線に準ずる領域(点5以降)とする。さらに弾性域の大きさを決定するために必要となる最大塑性ひずみ振幅、降伏閾の出現や非線形遷移領域の挙動を決定する単調載荷曲線上の塑性ひずみを塑性ひずみ空間の中で定義する。

**1) 降伏曲面と記憶曲面** 降伏曲面にはvon Mises型とTresca型の二種類の降伏条件式があるが、金属材料の場合には、von Misesの降伏条件の方が実際の実験結果とよく一致することが知られている。von Misesの降伏条件に従うとすると、降伏曲面は次のように定義される。

$$f(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}, \kappa) = \frac{3}{2} (s_{ij} - \alpha_{ij})(s_{ij} - \alpha_{ij}) - \kappa^2 = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{ij}$  は応力、 $s_{ij}$  は偏差応力、 $\alpha_{ij}$  は降伏曲面の中心、 $\kappa$  は弾性域の大きさを表す。偏差応力が降伏曲面に達した後、つまり $f(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}, \kappa) > 0$  のとき、降伏曲面上に偏差応力が接していなければならないので偏差応力の変化に伴い降伏曲面は移動していく。降伏曲面の中心を次のように定義する。

$$\alpha_{ij} = s_{ij} (1 - \sqrt{\frac{2}{3}} \kappa / |s_{ij}|) \quad (2)$$

塑性域を非線形遷移領域と単調載荷曲線に準ずる領域とに分けるため過去に受けた最大相当応力を示す曲面を記憶曲面として定義する。降伏曲面と同様にvon Mises型の曲面として定義すると次のようになる。

$$F(\sigma_{ij}, \bar{\kappa}) = \frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} - \bar{\kappa}^2 = 0 \quad (3)$$

ここで $\bar{\kappa}$  は過去に受けた最大相当応力を表す。

**2) 最大塑性ひずみ振幅** 一軸での最大塑性ひずみ振幅を多軸応力状態に拡張するため塑性ひずみ空間に次のような曲面を考える。

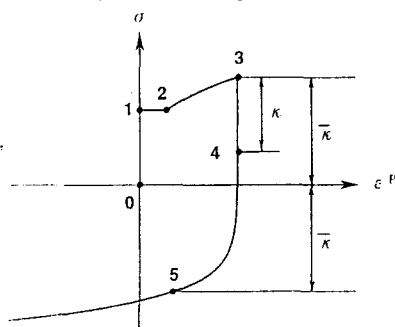


図-1 一軸での構成式

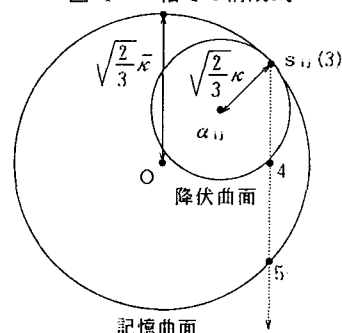


図-2 降伏曲面と記憶曲面

$$\phi(\epsilon_{ij}^p, \eta_{ij}, \rho) = \frac{2}{3}(\epsilon_{ij}^p - \eta_{ij})(\epsilon_{ij}^p - \eta_{ij}) - \rho^2 = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon_{ij}^p$  は塑性ひずみ、 $\eta_{ij}$  は曲面の中心、 $\rho$  は曲面の半径を表し、この曲面の直径が最大塑性ひずみ振幅として定義される。

3) 単調載荷曲線上の塑性ひずみ 一軸では履歴を受けた単調載荷曲線上の塑性ひずみを  $\epsilon_{max}^p$  として定義した。これは、応力が過去に受けた最大応力を更新したときのみ塑性ひずみ増分を加算して求めた。多軸応力状態においても偏差応力が記憶曲面を越えたときのみ相当塑性ひずみ増分を加えることによって求めることとする。相当塑性ひずみ増分は次のように表される。

$$d\epsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3}} d\epsilon_{ij}^p \quad (5)$$

ここで、 $d\epsilon^p$  は相当塑性ひずみ増分、 $d\epsilon_{ij}^p$  は塑性ひずみ増分を表す。

**3. 計算結果と実験結果の比較** 一般に実験で鋼材に多軸応力状態を発生させる場合、中空断面部材の長軸方向に軸力を与えて直応力を生じさせ、円周方向にねじりを与えてせん断応力を生じさせる手法が使われる。

1) 単調載荷実験 崎元ら<sup>2)</sup>は円形鋼管の単調載荷試験を行っている。図-3にシミュレーション結果と実験結果との比較を示す。ST-1は直応力をせん断力の二倍に保ちながら比例載荷したもので、ST-4は直応力を  $0.87\sigma_y$  に保ちながらせん断力を単調載荷したものである。両方とも非常に良く一致し、構成式を拡張するときに仮定した von Mises の降伏条件式の妥当性をよく示している。

2) 繰返し載荷実験 Shenら<sup>3)</sup>は角形鋼管を使い多軸応力下で繰返し塑性履歴を受ける鋼材の実験を行っている。この実験では軸力を一定に保ちながらせん断力を変化させ繰返し履歴を与えている。今回の報告で拡張した構成式と Shenらの実験結果との比較を図-4に示す。いずれも非常に良く追跡できておりこの構成式の妥当性が検証できた。

#### 4. 結論

- 1) 以前発表した一軸での構成式を多軸応力状態へ拡張した。
- 2) 多軸応力状態に拡張した構成式を用いて既往の研究で行われた実験のシミュレーションを行い実験結果と比較し、構成式の妥当性を確認した。

#### 《参考文献》

- 1) 西村宣男, 小野潔, 池内智行, 新家徹: 各種鋼材の繰返し塑性履歴特性に関する実験的研究, 鋼構造論文集, No. 1, 1994
- 2) Komatu, S. and Sakimoto, T.: Elasto-plastic behavior of thin-walled steel tubes under combined forces, Proc. of JSCE, No. 235, 1975
- 3) Shen, C and Mizuno, E.: Development of a cyclic two-surface model for structural steels with yield plateau, NUCR Research Report, 1993

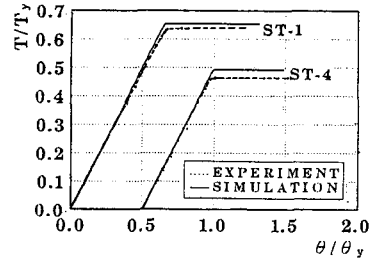


図-3 単調載荷実験とシミュレーション

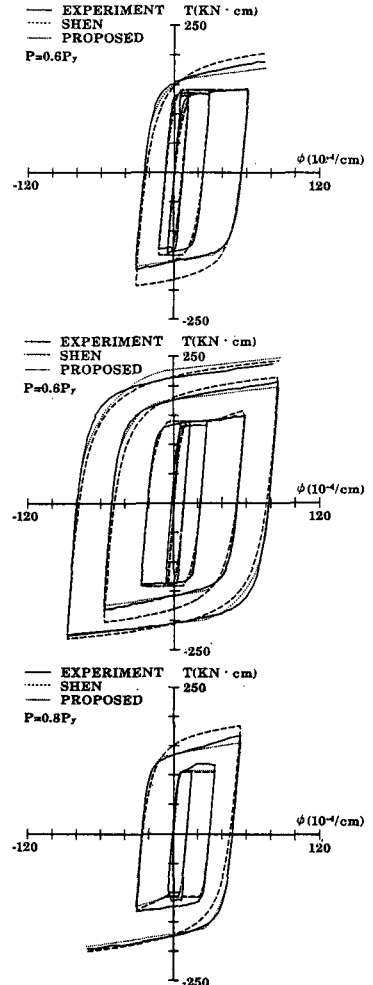


図-4 繰返し載荷実験とシミュレーション