

大阪大学大学院 学生員○小野 潔

大阪大学工学部 学生員 池内智行

大阪大学工学部 正 員 西村宣男

1. はじめに ラーメンに地震力などの繰返し外力が作用した場合、隅角部で局部座屈が発生し十分な変形能が期待できないことが考えらる。鋼構造物においては、許容応力度設計法から限界状態設計法への移行の試みがなされている。限界状態として終局限界状態を考えた場合、繰返し外力が作用した場合の構造物の塑性変形挙動を把握しておくことが重要となり、鋼材の繰返し塑性履歴を精度良く表現できる構成式が必要となってくる。そこで、本研究においては、鋼材の繰返し引張・圧縮試験を行いその実験結果を基にDafalias・Popovの二曲面モデルの修正し、構成式の高精度化を試みた。

2. 二曲面モデル Dafalias・Popovの二曲面モデル<sup>1)</sup>においては、一軸状態での真応力-塑性ひずみの関係を弾性域、定常塑性係数  $E_o^p$  で表現される定常塑性域、接線塑性係数  $E_o^p$  で表現される非定常塑性域の3つの領域にわけている。接線塑性係数  $E_o^p$  については着目している点、はじめて塑性にはいる点の応力から境界線までのそれぞれの距離  $\delta$ 、 $\delta_{in}$ 、曲線部の曲率を表す形状パラメーター  $h$  を用いて以下のように表現している。

$$E^p = E_o^p + h \frac{\delta}{\delta_{in} - \delta} \quad (2.1)$$

水野らはこのモデルに形状パラメーター  $h$  などの点について修正したモデル<sup>2)</sup>を提案している。

### 3. 本研究における改良点

降伏棚の取扱いについて 図-1のように降伏棚上で荷重を反転させた場合、反転させたループでも降伏棚が現れる。降伏棚上で荷重を反転させない単調載荷時の降伏棚の長さ  $a$  と、降伏棚上で荷重を反転させたときに現れる降伏棚を合計した長さ  $(a+b)$  を比べてみると、ほぼ同じになった。そこで、降伏棚上で荷重を反転させても、それらの降伏棚の合計の長さが単調載荷時の降伏棚の長さに達するまで降伏棚の挙動をとることとした。

境界線について 境界線、とくに境界線の移動量を正確に把握することは構成式の精度を高める上で大変重要となってくる。図-2の実験結果より、鋼材が繰返し塑性履歴を受けると境界線が外側に移動し、境界曲面が拡大していくことが分かる。また、単調載荷時のループとひずみ硬化開始点で荷重を反転させたときのループをそれぞれ原点とひずみ硬化開始点を一致させ比較してみると、図-3のように降伏棚を除きこれら2つのループはほぼ重なった。そこで、この2つのループは等価なものであると考えはじめてひずみ硬化に入る側のループではひずみ硬化開始点から1.3% (降伏棚の長さ) だけ原点よりに返った点を、反対側のループではひずみ硬化開始点をそれぞれ仮想原点とすることとした。

Kiyoshi ONO, Tomoyuki IKEUTI and Nobuo NISHIMURA

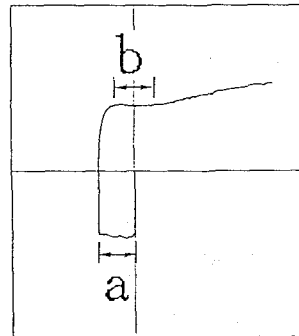


図-1 降伏棚の挙動

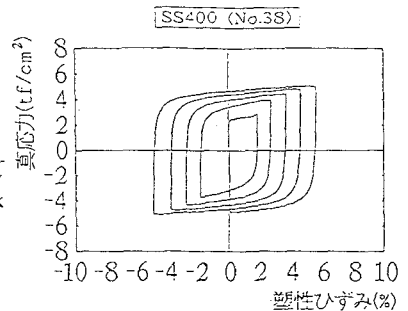


図-2 実験結果

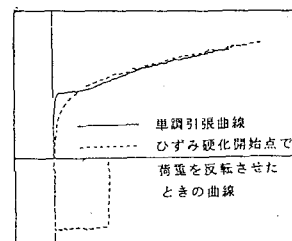


図-3

圧縮側のループの境界線の切片( $R_c$ )と傾き( $E_0^p$ )を、仮想原点からの引張側の塑性ひずみの最大値 $\varepsilon^p_t$ とそのループに入るまでの反対側の塑性ひずみの返し量の最大値 $\Delta \varepsilon^p_{max}$ の関数とし、引張側においても同様に以下の式のように定義した。

$$R_{t, c} \text{ or } E_0^p{}_{t, c} = \frac{a}{\varepsilon^p_{c, t} + (\Delta \varepsilon^p_{max})^b + c} - \frac{a}{c} + R' \text{ or } E_0^p{}' \quad (3.1)$$

ここで $R'$ 、 $E_0^p{}'$ はそれぞれ単調載荷時の境界線の切片と傾き

形状パラメータ $h$ について Dafalias・Popovの二曲面モデルは形状パラメータ $h$ は1つのループでは一定であるとしていたが、水野らは次式のように $h$ を $\delta$ の一次関数として表現している。

$$h = m\delta + n \quad (3.2)$$

しかし、それぞれのループによってかなり $m$ 、 $n$ の値がばらつき、1つのループの $m$ 、 $n$ の値で全てのループを表現することは困難なように思われる。 $n$ をひずみ硬化開始点で荷重を反転させた時の値で固定し、実験結果より $m$ と $\delta_{in}$ の関係を調べたところ、 $m$ は $\delta_{in}$ と共に増加している傾向がみられたので、 $m$ を $\delta_{in}$ の単調増加関数として表現することとした。

弾性域の減少について 鋼材が繰り返し塑性履歴を受けると、塑性ひずみの振幅が増加するにつれ弾性域は減少するといわれている。そこで最大塑性ひずみ振幅とその時の弾性域の大きさ $\kappa$ を初期の弾性域の大きさ $\kappa_0$  ( $= 2\sigma_y$ )で除して無次元化したものとの関係を調べてみたところ、図-4ようになった。図-4からも分かるように弾性域は最大塑性ひずみ振幅が1%ぐらいまでのうちに急激に減少し、その後ほぼ一定値に近づくことが分かる。そこで繰り返し塑性履歴にともなう弾性域の減少を以下の式によって考慮することとした。

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = \frac{1-b}{(1+\varepsilon^p_{max})^m} + b \quad (3.2)$$

ここで $\varepsilon^p_{max}$ は最大塑性ひずみ振幅

**4. 結論** Dafalias・Popovや水野らの二曲面モデルに境界線の決定の仕方、形状パラメータ等の点に修正を加えることによって、図-5のように実験結果を精度良く再現できるようになった。《参考文献》

- 1) Dafalias, Y. F. and Popov, E. P. : Plastic internal variables formalism of cyclic plasticity, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol.43, Dec, 1976
- 2) Shen, C., Mizuno, E. and Usami, T : Further study on two-surface model for structural steels under uniaxial cyclic loading, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.9, NO.4, pp257-260, January 1993.

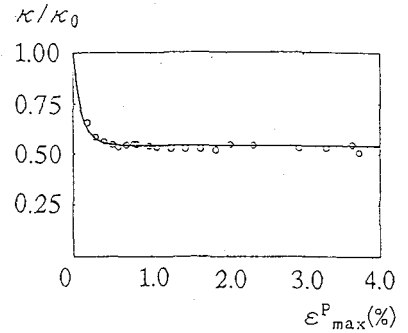


図-4 弾性域の減少

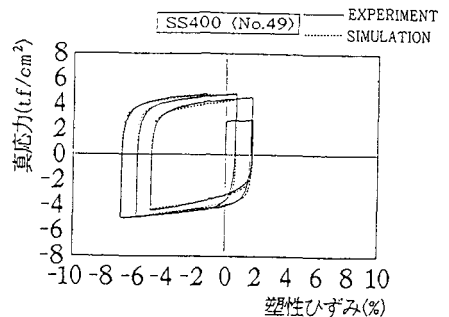
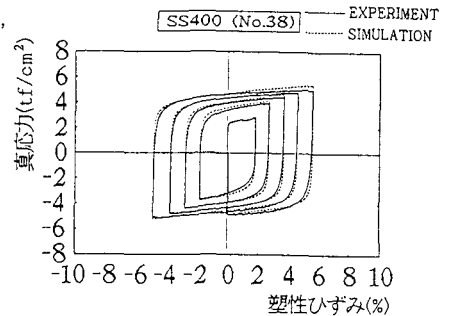


図-5 実験結果と予測曲線との比較