

繰り返し载荷を受ける鋼材の塑性履歴特性

大阪大学工学部 正員 西村宣男 大阪大学大学院 学生員 誉田善之
大阪大学工学部 学生員 小野 潔

1. はじめに 近年、構造物の高層化や大スパン化が図られ、より高強度の鋼材への需要が高まる中で高強度を持ちながら低降伏比を有し塑性変形能の高い低降伏比高張力鋼（以下 L Y R 鋼）が開発された。また、鋼構造物の設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法へと移行しようとしている。限界状態として終局限界状態を考えた場合、地震力などによる繰り返し外力が作用し弾性限界応力を超えるような応力が生じる場合の全体的および局部的な構造物の塑性変形挙動を把握しておくことは設計や維持において大変重要となってくる。そこで、本研究では普通鋼、高張力鋼、L Y R 鋼について一軸圧縮・引張試験を行いその塑性履歴特性を明らかにするとともに、Dafalias・Popovの二曲面モデルをもとにして繰り返し塑性履歴特性を精度よく表現できる構成式方程式の開発を試みる

2. 繰り返し载荷試験 各種鋼材の繰り返し履歴特性を把握するため一軸圧縮・引張試験を行った。その結果を図-1に示す。L Y R 80を除き圧縮側、引張側の各ループに与えられた引張側、圧縮側の累積相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p^+$ 、 $\bar{\epsilon}_p^-$ が増加するにつれ応力が増加する傾向がみられ、S S 4 1, S M 5 8, L Y R 6 0の順にその傾向が強くみられた。ここで圧縮側、引張側の累積相当塑性ひずみとは今までの塑性ひずみ履歴の中で圧縮側、引張側で受けた最大の塑性ひずみのことである。

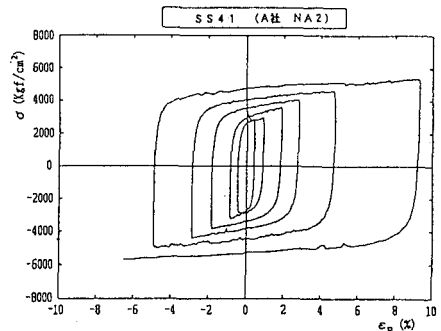


図-1 実験結果

3. Dafalias・Popovの二曲面モデル 繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の力学モデルとしてDafalias・Popovは内側に降伏曲面、外側に境界曲面の2つの曲面からなる二曲面モデルを提案した。一軸状態でのDafalias・Popovの二曲面モデルの概略を図-2に示す。真応力-ひずみ関係を弾性域、非線形塑性域、境界線と呼ばれる定常塑性域の3つに分け、それらの挙動をそれぞれ弾性係数E、接線塑性係数 E_p 、定常塑性係数 E_o^p を用いて表している。また、接線塑性係数 E_p については任意点Eの応力から境界線までの距離 δ を用いて次式により表現している。

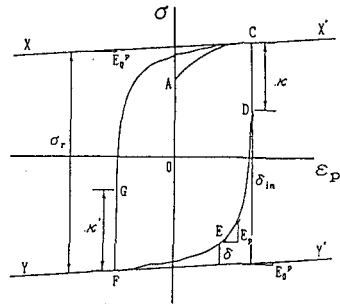


図-2 二曲面モデル

$$E_p = E_o^p + h \frac{\delta}{\delta_{in} - \delta} \quad (3.1)$$

ここで δ_{in} は初めて塑性域にはいる点から境界線までの距離、 h は形状パラメータと呼ばれ曲線部の曲率を表すものである。また、水野らはDafalias・Popovの二曲面モデルに境界線の移動、弾性域の減少、形状パラメータ h の点に修正を加えたモデルを提案している。

4. 著者らの改良点 Dafalias・Popovの二曲面モデルや水野らの修正モデルに従い数値シミュレーションを行い、実験結果と比較してみたところ余り良い適合性が得られなかった。そこで本研究において、実験結果を基に水野らの行った修正項目について

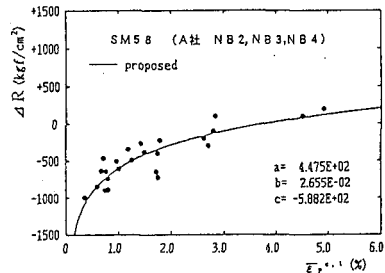


図-3 $\bar{\epsilon}_p^{+}$ と ΔR の関係

Nobuo NISHIMURA, Yoshiyuki HONDA, and Kiyoshi ONO

再検討してみた。まず境界線の移動に関して、実験結果より圧縮側、引張側の境界線の移動量と引張側、圧縮側の累積相当塑性ひずみとの関係を3パターンに分類した。SS41, SM58については圧縮側、引張側の累積相当塑性ひずみと境界線の移動量との間に図-3のような関係がみられたので両者の関係を対数関数で表すこととした。LYR60については圧縮側、引張側の各ループを引張側、圧縮側の累積相当塑性ひずみの分だけ原点の方に平行移動したものが図-4のように一本に重なったため、各ループの境界線はこの重なった境界線が平行移動したものであるとした。LYR80については境界線の移動はないものとした。次に弾性域の減少についてであるが図-5に累積相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ とその時の弾性域の大きさ κ を初期の弾性域の大きさ κ_0 ($=2\sigma_y$) で除した κ/κ_0 との関係を示す。ここで累積相当塑性ひずみとは圧縮側、引張側の累積相当塑性ひずみを合計したものである。この図より一度塑性履歴を受けると弾性域は減少し κ/κ_0 は一定の値になっていることがわかるので、 κ/κ_0 が一定であるとして弾性域の減少を考えることとした。最後に形状パラメータ h についてDafalias・Popovは δ に関係なく一定であるとしていたが、水野らは h と δ の間に線形の関係があることを指摘し両者の関係を次式で表現した。

$$h = e\delta + f \quad (4.1)$$

本研究においても実験結果を基に h と δ の関係を調べてみたところ図-6に示すように両者の間に上式のような関係が見受けられたのでこれを採用することとした。ただし、水野らが e, f の値として式(4.1)で得られる値を使っているのに対し、本研究においては式(4.1)を積分したものである次式からカーブフェティングによって求めた e, f の値を採用した。

$$\epsilon_p = \frac{\delta_{in}}{f} \ln \left(\frac{e\delta + f}{e\delta_{in} + f} \cdot \frac{\delta_{in}}{\delta} \right) + \frac{1}{e} \ln \frac{e\delta + f}{e\delta_{in} + f} \quad (4.2)$$

以上の修正を行いシミュレーションを行い実験結果と比較したものが図-7である。この図より境界線、曲線部の形状ともに実験結果をかなり精度良く再現していることがわかる。

5. 結論 各種鋼材の繰返し履歴特性を把握するため軸圧縮・引張試験を行った。その結果を基にDafalias・Popovの二曲面モデルや水野らの修正モデルを境界線の移動、弾性域の減少、形状パラメータ h の点について修正し、実験結果を精度良く表現できる構成式を開発した。

【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) Mizuno, E., Shen, C., Tanaka, Y., and Usami, T., : A UNIAXIAL STRESS-STRAIN MODEL FOR STRUCTURAL STEELS UNDER CYCLIC LOADING, U.S.-JAPAN SEMINER, 1991.7

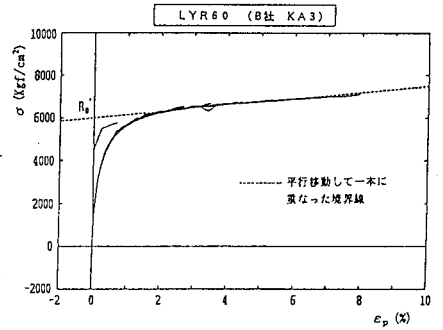


図-4 平行移動したループ

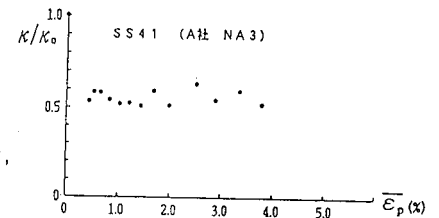


図-5 $\bar{\epsilon}_p$ と κ/κ_0 との関係

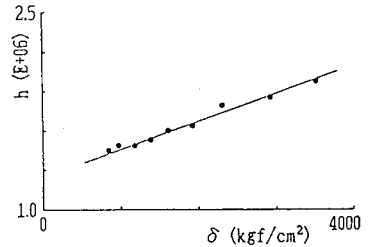


図-6 h と δ との関係

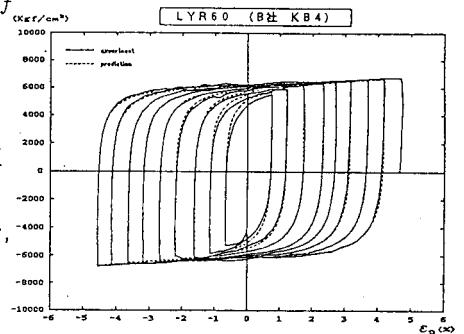


図-7 シミュレーション結果