

繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル その7 解析モデルの改良

正会員 笠井 和彦*¹ 同 山崎 久雄*²
同 小澤 秀允*³ 同 金子 洋文*⁴
同 貞末 和史*⁵ 同 小野 喜信*⁶

曲線モデル 歪速度依存性 Menegotto-Pinto モデル
応力上昇 応力 - 歪関係

1. はじめに

著者らは、既報にて^{1),2)} Menegotto-Pinto (M-P) モデルを基本関数とした鋼材の曲線履歴型モデルを提案した。モデルは4種鋼材 (SN490, SN400, LY225, LY100) を対象とし、様々な静的繰返し軸方向荷を用いた実験の結果と良く整合していた。一方、本論文では、同様にM-Pモデルを基本関数とするが、そのパラメータの設定法を大幅に変更し、より簡略で精度の高い解析モデルを提案する。なお、実験結果は一部を除き既報のものを用いるため、荷重波形などについては、既報²⁾を参照されたい。

2. 既報での応力 歪関係

曲線履歴型モデルの基本関数は、与えられた歪 ε で応力 σ を次式によって陽に表すM-Pモデルとする (図1a)。

$$\sigma = \sigma_r + E(\varepsilon - \varepsilon_r) \left[p + (1-p) \left\{ 1 + \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_a - \varepsilon_r} \right)^R \right\}^{1/R} \right] \quad (1)$$

ここに、 $E=205,000 \text{ N/mm}^2$ であり、 $(\varepsilon_r, \sigma_r)$ は歪反転後、現在の半サイクルが始まる点で既知とする。

また、 $(\varepsilon_a, \sigma_a)$ は傾き $E, p \cdot E$ を持つ2直線の交点座標を示す。既報では降伏点として示され、この値は双曲線関数で表される降伏判定関数より算出された。しかし本論文では $(\varepsilon_a, \sigma_a)$ を漸近線位置座標と称し、半サイクル開始時の応力 σ_r の関数で表す。また漸近線の傾き程度を示す p 値も σ_r の関数とする。

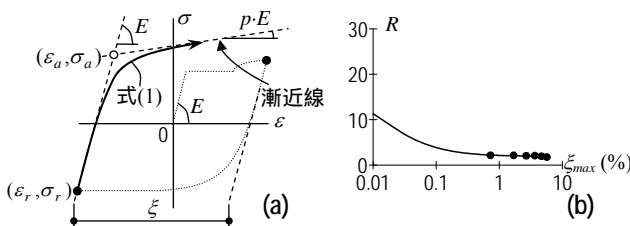


図1 (a)基本関数の幾何学的意味と、(b)曲率パラメータRの設定

さらに、式(1)中の R は $(\varepsilon_a, \sigma_a)$ と履歴曲線の曲率を調整するものであり、既報と同様に次式から求める。

$$R = R_0 \frac{a_1 \max}{a_2 + \max} \quad (2)$$

ここに、 ξ は半サイクル前の塑性歪を近似し(図1a)、半サイクル前において、歪振幅から σ_r/E を引いたものである。

以上のように漸近線の高低や傾き、曲線の丸みなどを支配する $(\varepsilon_a, \sigma_a), p, R$ の設定法を次節に示す。

3. モデルパラメータ同定

上記パラメータは「単調荷重」、「漸増振幅荷重」の2種実験 (例えば図7(a),(c)参照) から得られる。漸増振幅荷重から各振幅最終の半サイクルの歪・応力曲線を抽出し、それに式(1)が合うよう、 ε_a, p, R を同定する。例として図3(a)の $\varepsilon_r = -0.5\%$ の曲線を示す。これは次の振幅+1%へシフトする時の履歴である。ただし、+3%まで適用可能とするため、+1%を超える部分には、単調荷重実験から得た曲線(図3(b))を、文献3)に基づき継ぎ合わせる(図3(c))。

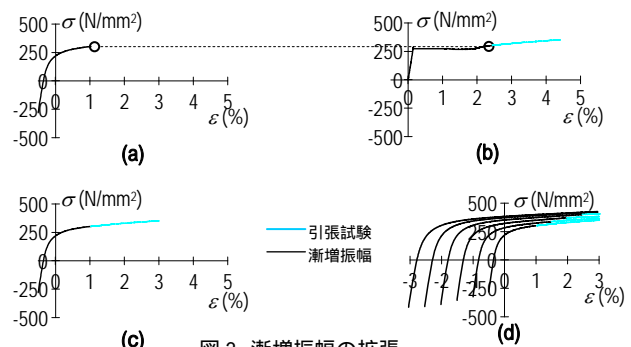


図3 漸増振幅の拡張

このように作成した各振幅の履歴(図3(d))に対し、式(1)が最もよく一致する ε_a, p, R の値を同定する。さらに σ_a 値を、 $\sigma_a = \sigma_r + E(\varepsilon_a - \varepsilon_r)$ から求める。得られた σ_a, p の値は、各鋼材において σ_r と一連の関係が得られる。図4にSN400Bの $\sigma_a - \sigma_r$ 関係、 $p - \sigma_r$ 関係を示す。

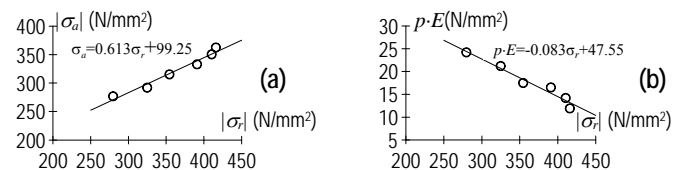


図4 $\sigma_a - \sigma_r$ 関係と $p - \sigma_r$ 関係 (SN400B)

また、 R と ξ_{max} の値には図1(b)のような関係が得られ、式(2)より実験結果と最も一致する R_0, a_1, a_2 を同定する。

4. 小振幅域における反転を考慮した応力 歪関係

上記モデル化により、単調荷重や両振り漸増荷重は正確に再現できるが、ここでは極端な片振りを含む、例えばシフト波形1の荷重²⁾を考える。歪の極値を0, +3, +2.5, +3, +2, +3, +1.5% ……とするもので、図5aにSN400Bの場合を示す。各半サイクルの歪範囲 $\Delta\varepsilon (>0)$ に対し、実験から同定した σ_a 値()を、前述の単調荷重・両振り漸増荷重に基づく $\sigma_a - \sigma_r$ 関係(図4a)から得た σ_a 値()と比べている。

図5aより片振載荷の実験値 σ_a は、 $\Delta\varepsilon$ が小の場合、 $\sigma_a-\sigma_r$ 関係(図4a)が示す値よりかなり高く、図5bのように前半のサイクルで解析値を上回る。また、 $\Delta\varepsilon$ がある範囲内だと図5b丸印に戻る傾向があるため、この範囲を $\Delta\varepsilon_1$ と呼び、 $\Delta\varepsilon < \Delta\varepsilon_1$ で、モデルが図6履歴Aのように半サイクル前の開始点 $R(\varepsilon_r, \sigma_r)$ に戻るよう $\sigma_a = \sigma_{a\text{ elast}}$ と設定する。ここに、

$$\sigma_{a\text{ elast}} = \sigma_{r0} - \sigma_{a0} + \sigma_r \quad (3)$$

一方、 $\Delta\varepsilon$ が上記の値から増大する順に、図6の履歴Bのように開始点 R を下回る軟化傾向、逆に上回る硬化傾向が現れる。そこで、まず $\Delta\varepsilon$ が経験最大値 $\Delta\varepsilon_{\text{max}}$ を超える場合に、解析モデルが応力上昇を表すようにし、図4aのような $\sigma_a-\sigma_r$ 関係を各鋼材から求め、その σ_a は $\sigma_{a\text{ orig}}$ と呼びかえる。

また、 $\Delta\varepsilon_1$ と $\Delta\varepsilon_{\text{max}}$ の間に $\Delta\varepsilon$ がある場合、 $\sigma_{a\text{ elast}}$ と $\sigma_{a\text{ orig}}$ との補間関数を用いて σ_a を算出する。これらをまとめ、

$$\sigma_a = \sigma_{a\text{ elast}} \quad (\Delta\varepsilon < \Delta\varepsilon_1), \quad \sigma_a = \sigma_{a\text{ orig}} \quad (\Delta\varepsilon > \Delta\varepsilon_{\text{max}}), \quad (4a-c)$$

$$\sigma_a = \sigma_{a\text{ elast}} + (\sigma_{a\text{ orig}} - \sigma_{a\text{ elast}}) \left(\frac{\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_1}{\Delta\varepsilon_{\text{max}} - \Delta\varepsilon_1} \right) \quad (\Delta\varepsilon_1 \leq \Delta\varepsilon \leq \Delta\varepsilon_{\text{max}})$$

ここに、多数の実験データから、SN490, SN400, LY225, LY100の順に $\Delta\varepsilon_1 = 2.0, 1.5, 1.0, 1.0\%$ とすることを推奨する。

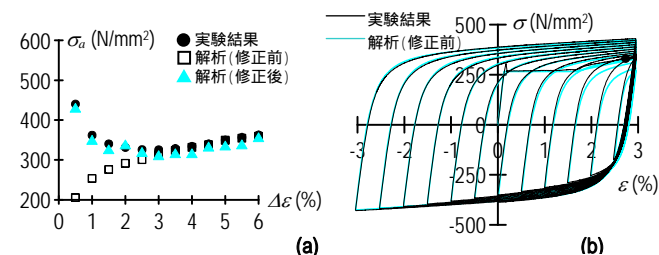


図5 シフト波形振幅による履歴挙動:
(a)実験と2種解析の比較,
(b)実験と解析(修正前)の比較

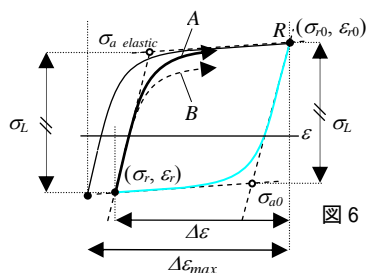


図6 $\Delta\varepsilon$ の大小関係による履歴挙動の差異

5. 精度検証2

以上の同定したパラメータを用い、小振幅域における反転も考慮した静的モデルの解析結果 σ と実験結果を図7に示す。なお図7(g),(h)はランダム載荷前半・後半に分割して示す。また、図7(d)は、既報には無い載荷であり、歪振幅 $\pm 0.5, 1.0, 1.5(\%)$ のそれぞれから最大歪振幅 $\pm 3.0\%$ へと向かう3種載荷のうち、2番目のものを示している。

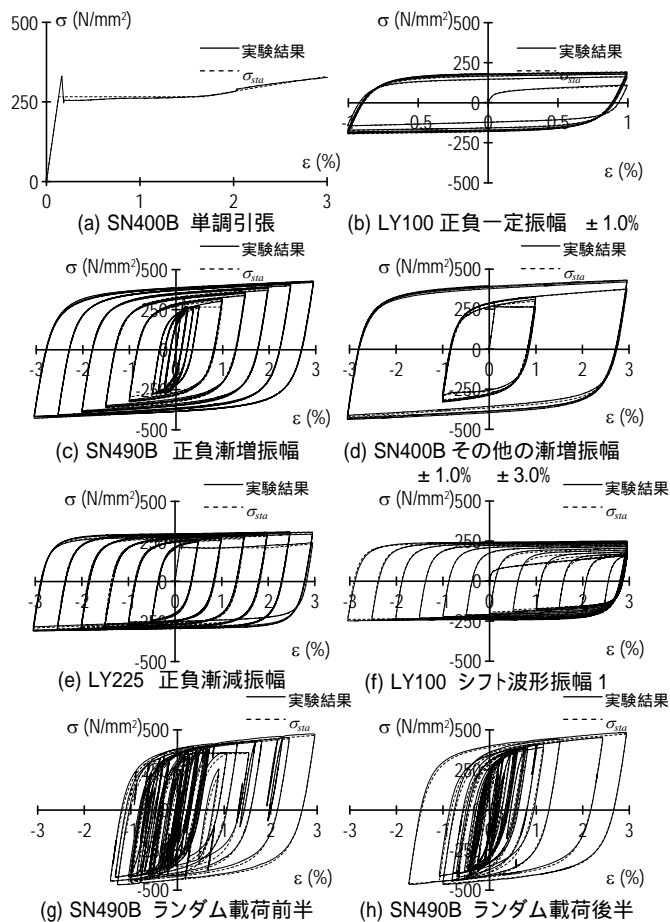


図7 曲線履歴型モデル(静的モデル)の精度検証

6. まとめ

提案した曲線履歴型モデルは Menegotto-Pinto モデルを基本関数とし、そのパラメータの設定法は、筆者らが過去に提案したものから著しく異なり、より簡略で精度の高いものとなっている。

降伏応力 $78 \sim 351 \text{ N/mm}^2$ の広範囲にある4種鋼材に対して同一な定式化を行い、ランダム載荷を含め多様な歪入力における応力が、高精度で予測できた。単調載荷と漸増振幅載荷の2種の実験の結果からモデルパラメータが抽出できること、漸近線位置座標は反転時の応力や、過去の反転時の歪振幅などで調節することなどが、本モデルの特徴である。

<< 参考文献 >>

- 山崎 笠井 ほか3名: 繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集C 構造, pp.745-746, 2005.9
- 山崎 笠井 ほか3名: 繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル (その3~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集C 構造, pp.935-940, 2006.9
- 加藤 ほか: 引張・圧縮繰返し荷重を受ける鋼素材の挙動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.803-804, 1970.9.

*1 東京工業大学 建築物理研究センター 教授・Ph. D.

*2 ユニオンシステム(株) 振動解析プロダクト

*3 東京工業大学 人間環境システム専攻 元大学院生

*4 (株)竹中工務店 技術研究所 工博

*5 広島工業大学 工学部建築工学科 講師

*6 (株)竹中工務店 技術研究所 工修

*1 Professor, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.

*2 Dynamic Analysis Research Complex, Union System Inc.

*3 Former Grad. Students, Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology.

*5 Research & Development Institute, Takenaka Corp., Dr. Eng.

*4 Lecturer, Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.

*6 Research & Development Institute, Takenaka Corp., M. Eng.