

繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル
その3 解析モデルの改良

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

曲線モデル 降伏判定関数 Menegotto-Pinto モデル
応力-歪関係 歪振幅依存性

1. はじめに

既報^{1),2)}において著者らは、応答解析に用いる鋼材ダンパーの解析モデルとして、振幅の増大に伴う降伏点の上昇を考慮した曲線履歴型モデルを提案し、建築構造用鋼材(SN400)を用いた繰返し載荷実験結果と計算結果との比較、および実験結果から計算パラメータ(材料特性値)を求める方法を述べた。その後、この既提案モデルの汎用性や精度を高めるために、前述のSN400のほかSN490, LY100, LY225の鋼種を加え、また正負振幅が非対称な漸増および漸減振幅(詳細はその4に記す)などを加えた繰返し載荷実験を行い、引き続き計算値との比較検証やモデルの改良を行ってきた。本報はこれを報告するものである。

なお、鋼材には座屈が生じず、かつ静的な繰返し応力を受けていることを前提としている。

2. 既提案モデルの改良

2.1. 既提案モデル

まず既提案モデルの概要を図1に示す。鋼材の履歴曲線は振幅が漸増するときに硬化し、漸減するときは軟化する³⁾が、この降伏点の振幅依存性を表すのに2次関数曲線による降伏判定関数¹⁾を考える。履歴ループの上昇または下降曲線上において歪の進行方向が正負反転したとき(この点を反転点という)、この反転点から引いた1次剛性 E_1 を勾配にもつ直線と降伏判定曲線(降伏判定関数を表した曲線)との交点を降伏点とし、さらに降伏点から2次剛性 $p \cdot E_1$ を勾配にもつ直線を引く。これら両直線に漸近するMenegotto-Pintoモデル⁴⁾を用いて鋼材の履歴曲線を表す。Menegotto-Pintoモデルでは履歴曲線の曲率を経験最大塑性歪の大きさに応じて決定でき、鋼材のバウシinger効果を精度よく近似することができる¹⁾²⁾。

Menegotto-Pintoモデルは式(1)~(4)で表される⁴⁾。

$$\sigma^* = p \varepsilon^* + \{(1-p) \varepsilon^*\} / (1 + \varepsilon^{*R}) \quad (1)$$

$$\varepsilon^* = (\varepsilon - \varepsilon_r) / (\varepsilon_y - \varepsilon_r) \quad (2)$$

$$\sigma^* = (\sigma - \sigma_r) / (\sigma_y - \sigma_r) \quad (3)$$

$$R = R_0 - a_1 \zeta / (a_2 + \zeta) \quad (4)$$

ここに ε =歪, σ =応力, $(\varepsilon_r, \sigma_r)$ =反転点の座標, $(\varepsilon_y, \sigma_y)$ =降伏点の座標, p =2次剛性比, R_0 =初期載荷での曲線形状係数, a_1, a_2 =曲線形状係数を与えるパラメータ, ζ =反転点から歪の最大経験点までの塑性歪量¹⁾を表す(最大経験点は正負各方向で定義)。

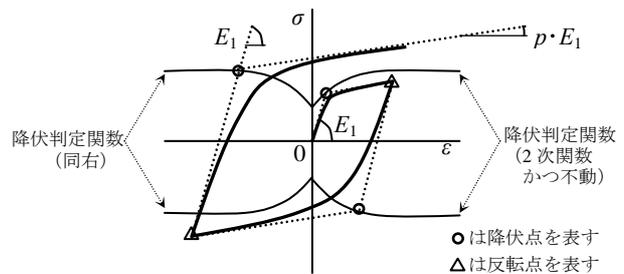


図1 既提案モデル

2.2. 降伏判定関数の変更

降伏判定関数として用いていた2次関数を双曲線関数に変更する。これは、振幅の増大によって降伏点の上昇が顕著に認められる極低降伏点鋼のLY100への対応を目指すものであるが、2次関数で対応可能であった他の鋼種についても双曲線関数によって同程度に対応できることを予め確認している。

第1~4象限の双曲線関数を用いた降伏判定関数をそれぞれ式(5)で定義する。ここに、式中のパラメータ σ_d, S, Q は図2で定義されている正の値である。また降伏判定関数の中心における歪値は ε_0 とし、詳細は次節で述べる。

降伏判定関数を双曲線関数とすることで、大きな歪においても降伏応力の上限を規定することができ、またそのパラメータに応じて降伏判定関数の曲率をなだらかにも急峻にもすることができる。

$$\sigma_y = \sigma_d + (\varepsilon_y - \varepsilon_0) / (1/S + |\varepsilon_y - \varepsilon_0|/Q) \quad (5a)$$

$$\sigma_y = \sigma_d - (\varepsilon_y - \varepsilon_0) / (1/S + |\varepsilon_y - \varepsilon_0|/Q) \quad (5b)$$

$$\sigma_y = -\sigma_d + (\varepsilon_y - \varepsilon_0) / (1/S + |\varepsilon_y - \varepsilon_0|/Q) \quad (5c)$$

$$\sigma_y = -\sigma_d - (\varepsilon_y - \varepsilon_0) / (1/S + |\varepsilon_y - \varepsilon_0|/Q) \quad (5d)$$

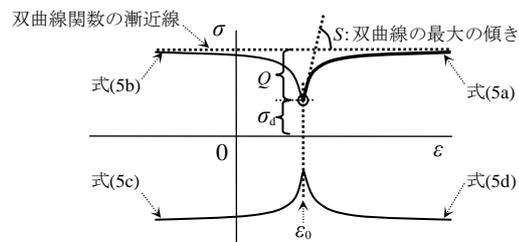


図2 改良提案モデルにおける降伏判定関数

2.3. 降伏判定関数の移動

既報の降伏判定関数は常に σ 軸に対称となる位置で考えていたが、非定常な歪振幅に応じ、降伏判定関数の考慮位置を ε 軸方向に正負移動させることとする。これは履歴ループの中心位置が σ 軸からずれるときの降伏点の評価をより精確に行うことを目指したものである。

具体的には、履歴ループの上昇または下降曲線上において歪の進行方向が正負反転し、新しい下降または上昇曲線を定義するときに必要な降伏判定関数の位置 ε_0 を、この反転点の歪と過去に経験した反対側の最大振幅における歪との平均値とする。ここで“反対側”とは、上昇曲線において反転した場合では歪の負側をいい、下降曲線において反転した場合では歪の正側をいう。

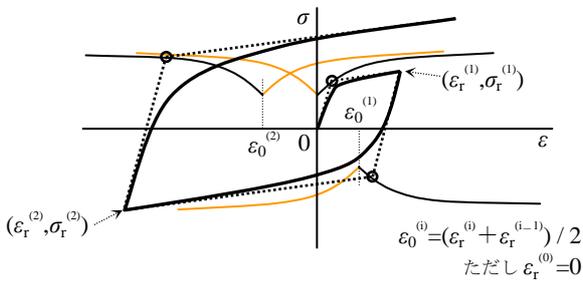


図3 降伏判定関数の移動

2.4. 弾性域・軟化域・硬化域の導入

上昇または下降曲線で反転した後の履歴特性として、上昇または下降曲線の開始点に戻る弾性挙動、漸減振幅に相当する軟化挙動、および漸増振幅に相当する硬化挙動を考える。そこで上昇または下降曲線を3つの範囲に区分し、どの範囲で反転が生じたかに応じて反転後の履歴特性を対応させる。反転後の履歴を弾性挙動とする範囲を「弾性域」、軟化挙動とする範囲を「軟化域」、硬化挙動とする範囲を「硬化域」と呼ぶ。表1にその定義と反転後の履歴則を、図4に各領域の範囲を示す。

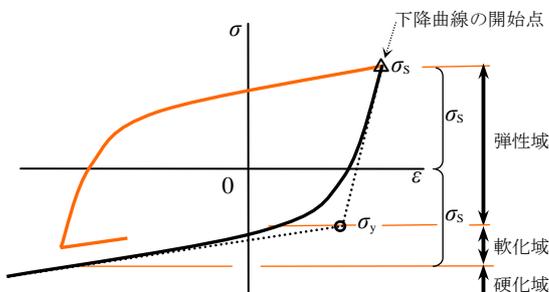


図4 下降曲線における弾性域、軟化域、硬化域

表1 弾性域、軟化域、硬化域の定義と反転後の履歴則

弾性域	定義	上昇または下降曲線の開始点から、開始点で定義した降伏点応力を超えない範囲(図4)
	履歴則	弾性域で反転したときは、開始点と反転点の座標中点を中心に、その間の上昇または下降曲線を180度回転させたものを反転後の履歴曲線とする。
軟化域	定義	弾性域を超え、上昇曲線または下降曲線の応力が当該曲線の開始点での応力を逆符号にした数値を超えない範囲(図4)。反転後の履歴曲線が軟化する領域。
	履歴則	軟化域で反転したときは、上昇または下降曲線の進行方向側において過去に経験した最大降伏点の応力(図5の σ_{y0})と同じレベルに降伏点を定義して履歴曲線を設定する。
硬化域	定義	上昇または下降曲線で軟化域を超える範囲(図4)。反転後の履歴曲線が硬化する領域。
	履歴則	硬化域で反転したときは、降伏判定関数を移動させて求めた新しい降伏点を用いて、履歴曲線を設定する。

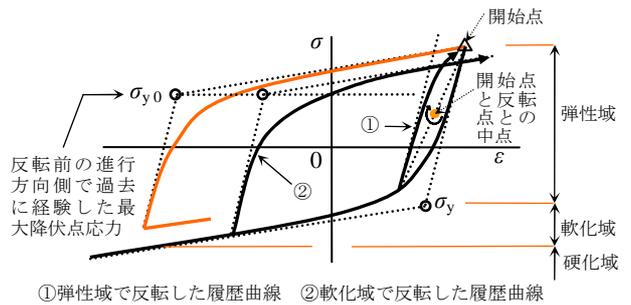


図5 弾性域および軟化域で反転した後の履歴

3. まとめ

本報では、既報で提案した鋼材の曲線履歴型モデルに対して、その汎用性や精度を高めるための改良内容を報告した。改良提案モデルによる計算値と実験値との比較検証は次報(その4, 5)で述べる。

【参考文献】

- 山崎 他：繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル(その1) 解析モデルの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造III, pp.745-746, 2005.9
- 貞末 他：繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル(その2) 実験概要およびモデル化の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造III, pp.747-748, 2005.9
- 金子 他：幅厚比の小さい極低降伏点鋼せん断パネルの力学特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造III, pp.743-746, 1997.9, 2005.9
- FC. Filippou 他：Effects of Bound Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints, Report No. UCB/EERC-83/19, University of California, Berkeley, 1983.8

*¹ ユニオンシステム(株)振動解析プロダクト
 *² 東京工業大学 建築物理研究センター 教授・Ph.D.
 *³ (株)竹中工務店 技術研究所 工修
 *⁴ (株)竹中工務店 技術研究所 工博
 *⁵ 東京工業大学都市地震工学研究センター 研究員・博士(工学)

*¹ Dynamic Analysis Research Complex, Union System Inc.
 *² Professor, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.
 *³ Research & Development Institute, Takenaka Corp., M.Eng.
 *⁴ Research & Development Institute, Takenaka Corp., Dr.Eng.
 *⁵ Post-Doctoral Research Fellow, CUEE, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.