

# 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

正会員 山崎 久雄\*<sup>1</sup> 同 笠井 和彦\*<sup>2</sup>  
同 小野 喜信\*<sup>3</sup> 同 金子 洋文\*<sup>4</sup>  
同 貞末 和史\*<sup>5</sup>

曲線モデル 降伏判定二次関数 Menegotto-Pinto モデル  
応力-歪関係 歪振幅依存性

## 1. はじめに

地震による建物の応答を軽減するための制振部材として、鋼材の履歴型ダンパーを用いた建物が多数建設されている。鋼材ダンパーの素材は、主に低い荷重レベルで降伏し、伸び性能に優れた LY100 や LY225 などの低降伏点鋼が大部分を占めるが、SN400 や SS400 などの普通鋼が用いられることもある。これらの鋼材ダンパーを付加した建物の地震応答解析を行う際には、鋼材ダンパーの解析モデルが必要であり、解析モデルとしては Tri-linear 型、Ramberg-Osgood 型、Bi-linear 型を修正したものなど種々のモデルが提案されている。

著者らも鋼材ダンパーの解析モデルとして、「Bi-linear 型モデル」<sup>1)</sup>と「曲線履歴型モデル」<sup>2)</sup>を提案し、せん断パネルおよび座屈補剛ブレースの実験結果との比較検討を行っている。なお、提案した解析モデルは、降伏点の振幅依存性を考慮しているところに特徴がある。

振幅の増大に伴って鋼材の降伏点が増大する特性は、特に、低降伏点鋼において顕著に見られる性質であるが、低降伏点鋼に関しては、さらに歪速度に対する依存性を有することも知られており<sup>3)</sup>、鋼材ダンパーの解析モデルの精度を向上させるには、これらの振幅依存性や歪速度依存性を考慮することが必要となる。

本研究は、上記した振幅依存性や歪速度依存性を考慮した解析モデルを構築することを目的とするが、まず、本報では、鋼材の応力-歪関係に関する基本的な特性をモデル化することを目的として、静的な繰返し応力を受ける鋼材の解析モデルを提示する。

## 2. 解析モデルの概要

### 2.1 降伏判定関数

鋼材の履歴曲線は、座屈を生じない場合、振幅が増大する時に硬化し、振幅が漸減する時に軟化する<sup>4)</sup>。この現象を考慮するための方法として、著者らは降伏点に振幅依存性をもたせた Bi-linear 型モデルを提案している<sup>1)</sup>。この解析モデルは履歴ループを直線により近似し、降伏点を変形の関数（以下、降伏判定関数）として、振幅依存性をもたせたものである。図 1 に縦軸を応力  $\sigma$ 、横軸を歪  $\epsilon$  とした場合の履歴経路を示す。

これは、除荷発生後、一次剛性による分枝直線と二次剛性のそれとの折れ点を、一次関数式からなる降伏判定関数を用いて定義することで、降伏点の振幅依存性を考慮したモデルである。降伏判定一次関数は、応力軸切片応力  $y$  と直線の傾き  $p \cdot E$  で与えられ、各象限について図 1 のように設定される。ただし、降伏判定関数を一次式で表した場合には、振幅の増大に伴い降伏点が増大する傾向がある。降伏点の上昇をモデルに反映するために使用範囲の振幅を考慮して降伏点を決定する必要がある。しかし仮に降伏点を実際よりも大きく設定し、ある特定の振幅での特性を再現するべくモデル化を行うと、他の振幅範囲で誤差を生じる。

そこで、この降伏判定関数に二次式を用いれば、変形の増大に伴い降伏点の上昇が緩和する現象を再現でき、より広い領域の振幅の大きさに対して、振幅に依存する降伏点の精度向上を図ることができる。降伏判定二次関数を用いた Bi-linear 型モデルの履歴経路を図 2 に示す。

降伏判定二次関数は、第 1 から第 4 の各象限についてそれぞれ式(1)の形で定義する。ここで、縦軸切片応力を  $y$  で表すが、降伏判定直線（図 1）での  $y$  とは別に設定され一般に同値ではない。

$$\sigma = 2y^2 + p \cdot E \epsilon + y \quad (1a)$$

$$\sigma = 2y^2 - p \cdot E \epsilon + y \quad (1b)$$

$$\sigma = -2y^2 + p \cdot E \epsilon - y \quad (1c)$$

$$\sigma = -2y^2 - p \cdot E \epsilon - y \quad (1d)$$

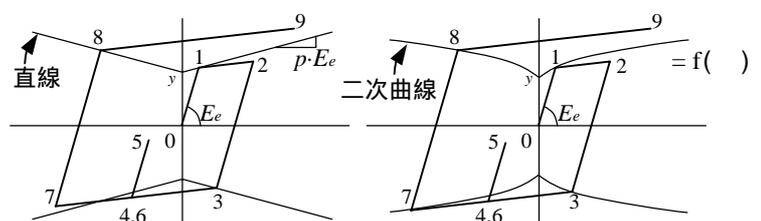


図 1 降伏判定一次関数を持つ Bi-linear 型モデル

図 2 降伏判定二次関数を持つ Bi-linear 型モデル

### 2.2 曲線履歴型モデル

応力-歪関係をモデル化するにあたり、その基本方針を次のようにとする。

履歴曲線は、降伏判定二次関数を用いた Bi-linear 型鋼

材モデルの一次剛性および二次剛性を表す各分枝直線に内接するような分枝曲線とする。すなわち Bi-linear の一次剛性と同じ傾きで曲線が立ち上がり、変形が進むに従い Bi-linear の二次剛性を表す直線に漸近させていく。(図3参照)

履歴曲線の基本関数は、Menegotto-Pinto モデル<sup>5)</sup>(以下、M-P モデル)に用いられているものを採用する。M-P モデルは応力を歪の関数で表したもので、RC 部材の鉄筋の非線形モデルとして簡単かつ高精度であることが報告されている。

M-P モデルの基本関数は式(2)から式(5)で表される。

$$= p + \{(1-p) \} / (1 + R)^{1/R} \quad (2)$$

$$= ( - r ) / ( 0 - r ) \quad (3)$$

$$= ( - r ) / ( 0 - r ) \quad (4)$$

$$R = R_0 - a_1 \xi / (a_2 + \xi) \quad (5)$$

ここに、

歪,  $r$ : 反転時の歪,  $0$ : Bi-linear での折れ点のひずみ,  $\sigma$ : 応力,  $r$ : 反転時の応力,  $0$ : Bi-linear での折れ点の応力,  $p$ : 二次剛性比,  $R_0$ : 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,  $\xi$ : 反転点から経験点までの塑性変形量

M-P モデルの特徴として式(2)における指数  $R$  および  $1/R$  ( $R$  を「曲線形状係数」と記す)が挙げられる。係数  $R$  は曲線の形状を決定する係数で、Bi-linear での折れ点座標と曲線との相対距離を調整するものである。かつ、この係数  $R$  は式(5)により、反転点時変形と経験最大時変形との距離の関数として与えることができる。ここで、式(5)で使用している  $R_0, a_1$  および  $a_2$  は鋼材の漸増繰返し載荷実験等の結果から決定できる。

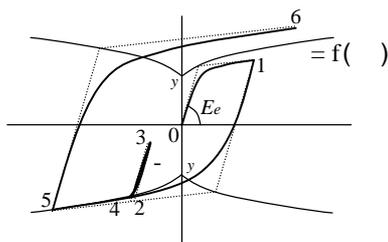


図3 降伏判定二次関数を用いた曲線履歴型モデル

一方、履歴の途中で降伏点を降伏判定二次関数(図1では直線)により再評価するのは、Bi-linear 型鋼材モデルでは折れ点を超え二次剛性による分枝直線上で除荷が発生した場合である。しかし履歴形状を曲線型とすると一次剛性と二次剛性の明確な区別ができないため、ここで

は除荷が発生した分枝曲線が、Bi-linear の折れ点応力を超える場合に、降伏判定二次関数により降伏点を再評価(漸近線の更新)することとした。図4に示すように Bi-linear の折れ点応力を超えずに反転したときは以前の漸近線を用い(図4の2A-3A)、超えて反転したときは漸近線を更新する(図4の2B-3B)。

最後に、解析モデルが実際の地震応答解析に用いられることを想定し、大きな振幅から小振幅に移行する際の応力の跳びだしを防止するルールを備えておかねばならないことは、Ramberg-Osgood モデルなど一般の曲線型履歴モデルの場合と同じである。図5中の第4点で反転すると再びそこから元の漸近線を目指とするが、第2点で設定された分枝曲線からは跳びださないようにする<sup>5),6)</sup>(図5の4-5-6\_xではなく4-5-6)。

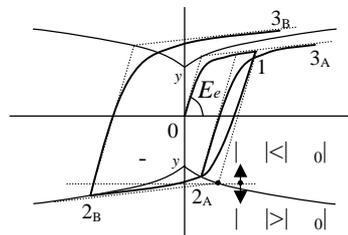


図4 降伏判定ルール

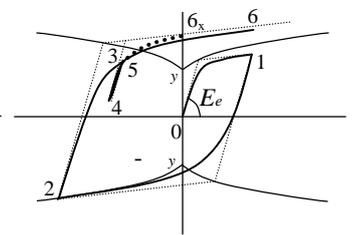


図5 飛び出しの防止

### 2.3 数値計算に必要な入力データ

上記の曲線履歴型モデルにより与えられた歪に対する応力を算定する際に必要な入力データを以下に示す。

$E_e$ : 一次剛性,  $E_t$ : 二次剛性

2: 降伏判定二次関数のパラメータ1(式(1))

1: 降伏判定二次関数のパラメータ2(式(1))

$y$ : 降伏判定二次関数のパラメータ3(式(1))

$R_0$ : 曲線形状のパラメータ1

$a_1$ : 曲線形状のパラメータ2,  $a_2$ : 曲線形状のパラメータ3

上記に挙げた係数は、鋼種ごとに異なる値を用いるが、それぞれの鋼種に対応した初期入力データを用いることで履歴モデルが設定できる。上記のパラメータを実験結果から求める方法については、次報(その2)で述べる。

### 3. まとめ

本報では、ひずみ振幅の増大に伴う応力度の上昇を降伏判定二次関数によって関数化し、バウシinger効果による曲線部分を M-P モデルによって表した、鋼材の曲線履歴型モデルを提案した。

なお、参考文献は(その2)にまとめて示す。

\*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 VBL 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., Dr. Eng.

\*4 Research & Development Institute, Takenaka Corp., M. Eng.

\*5 Researcher, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.