

# 繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル その8 歪速度、歪振幅依存性を考慮した 極低降伏鋼 LY100 の応力-歪関係

正会員 ○山崎 久雄\*<sup>1</sup> 同 笠井 和彦\*<sup>2</sup>  
同 小澤 秀允\*<sup>3</sup> 同 大木 洋司\*<sup>4</sup>  
同 金子 洋文\*<sup>5</sup>

動的載荷実験 歪速度依存性 歪振幅依存性  
応力上昇 非線形粘性要素

## 1. はじめに

鋼材は歪速度依存性を有するが、極低降伏点鋼 LY100 は最もその特性が著しいことは周知の事実である<sup>1)</sup>。著者らが既報その6<sup>2)</sup>で示したように、動的実験結果から静的実験結果を差し引いた応力上昇分は楕円履歴を描き、またその応力上昇の度合いは歪速度のみだけでなく、歪振幅にも依存性を有していることが分かった。本論文では、その6での検討を踏まえ応力上昇分の楕円履歴のモデル化を行い、その7で示した静的実験を表現できる曲線履歴モデル $\sigma_{sta}$ と足し合わせることで、歪速度、歪振幅依存性の影響に基づく耐力上昇を考慮した曲線履歴型モデルを提案する。なお本論文中での実験概要、結果は一部追加しているが、既報その6の結果を用いる。

## 2. 非線形粘性要素によるモデル化

歪振幅 0.2 %、振動数 3 (Hz)時の動的実験結果から同じ歪を入力した静的モデルの解析結果 $\sigma_{sta}$ を差し引いた履歴を図1に示す。この履歴を粘性体の楕円履歴とみなす。粘性体は式(1)のように力が粘性体部の速度の $\alpha$ 乗( $0 < \alpha < 1$ )と比例関係にあり、力と変形の関係は楕円型となる。動的載荷時の歪の入力を $\alpha(t)$ 、求めた楕円の応力を $\sigma(t)$ とし、その歪速度 $\dot{\alpha}(t)$ と $\sigma(t)$ との関係を図に表しても式(1)のような比例関係は得られない。しかし図2のように粘性要素に剛性 $E_b$ の弾性ばね要素を直列につないだモデル化を考えると、その時の粘性要素の歪 $\dot{\epsilon}_d$ は式(2)で表される。その歪速度 $\dot{\epsilon}_d$ と $\sigma_d (= \sigma)$ との関係を図に示すと、図3より $E_b$ がある値から、式(1)のように $\sigma_d$ が $\dot{\epsilon}_d$ に比例する関係が得られ、また形状より $0 < \alpha < 1$ となる非線形粘性体であると分かる。従って、この応力上昇分の楕円履歴を、図2の非線形粘性要素に弾性ばねをつないだ直列体でモデル化する。

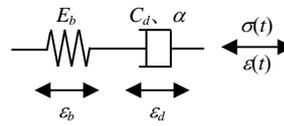


図2 粘性と弾性ばねによる直列体モデル

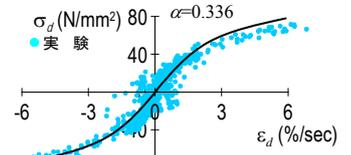


図3 歪振幅±0.2%  $\sigma_d$ - $\dot{\epsilon}_d$ 関係

## 3. モデルパラメータ同定

各歪振幅において図2の直列体を構成するモデルパラメータ $E_b$ 、 $C_d$ 、 $\alpha$ を同定する。現時点で実験結果より $\epsilon$ 、 $\sigma$ は分かっている。ここで式(2)より未知である $E_b$ から $\epsilon_d$ を求め、式(1)へ代入しそのときの応力を $\sigma_{cal}$ とすれば、式(3)より $R_\sigma$ が最も小さくなる時の $E_b$ 、 $C_d$ 、 $\alpha$ が求まる。このモデルパラメータ同定を正負一定振幅正弦波載荷のそれぞれの振幅 $\epsilon_0$ ごとに、5種の振動数から一つのパラメータ( $E_b$ 、 $C_d$ 、 $\alpha$ )を同定するが、 $E_b$ 、 $\alpha$ は計算上振動数、振幅にかかわらず一定の方が望ましいため、各振幅で同定後平均し( $E_b=87530$  (N/mm<sup>2</sup>)、 $\alpha=0.34$ )、 $C_d$ のみで再同定する。得られた $C_d$ の値を表1に示す。

$$R_\sigma = \sum_{i=1}^n [(\sigma_{cal,i}(E_b, C_d, \alpha) - \sigma_i)^2] \quad (3)$$

表1 同定した $C_d$

$\epsilon_0$ (%)	$C_d$ (N/mm <sup>2</sup> ·(sec/%) <sup>0.9</sup> )
0.2	36.99
0.5	33.16
1.0	24.32
2.0	17.19
3.0	17.53
Average	25.84

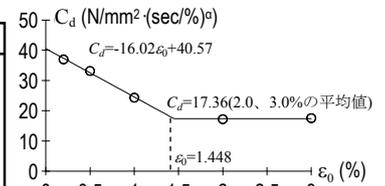


図4  $C_d$ - $\epsilon_0$ 関係

表1より $C_d$ に対して歪振幅依存性があることが分かる。これは既報その6での実験結果より歪振幅の増幅に伴い、応力上昇が小さくなることから明らかである。以上より $C_d$ と歪振幅 $\epsilon_0$ に図4の関係を得る。

## 4. 動的モデルの構成則

動的載荷時に、入力された歪を $\epsilon(t)$ とすると応力 $\sigma(t)$ は、図5、式(4)より、静的モデルから算出される $\sigma_{sta}$ と動的載荷による応力上昇分 $\sigma_{dyn}(t)$ との和によって求める。 $\sigma_{sta}$ は既報その7でのM-Pモデルより求められる。 $\sigma_{dyn}(t)$ は非線形粘性と弾性ばねの直列体の構成則である式(5)により算出される。(5)式は非線形微分方程式であり、解はRunge-Kutta法より数値積分して求める。

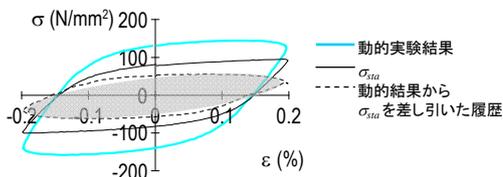


図1 動的実験と静的モデル $\sigma_{sta}$ の差から求まる楕円履歴

$$\sigma_d = C_d (\dot{\epsilon}_d)^\alpha \quad (1)$$

$$\epsilon_d = \epsilon - \sigma / E_b \quad (2)$$

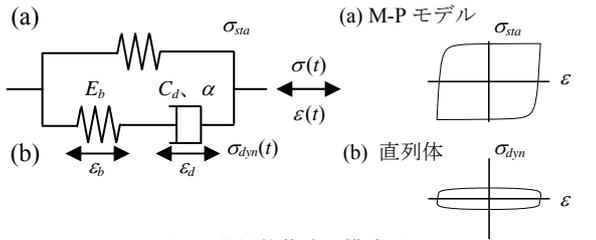


図5 動的荷重時の構成則

$$\sigma(t) = \sigma_{sta} + \sigma_{dyn}(t) \quad (4)$$

$$\dot{\sigma}_{dyn}(t) = \left\{ \dot{\varepsilon}_d(t) - \text{sgn}(\sigma_{dyn}(t)) \left( \frac{|\sigma_{dyn}(t)|}{C_d} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right\} E_b \quad (5)$$

以上より、動的荷重実験の歪を用いて数値解析を行う。なお、繰返し荷重時では、図4から歪振幅の更新により  $C_d$  は変化するが、その値は最小値を記録後変化させないこととする。初期荷重時ではその都度歪の値によって  $C_d$  を計算し、 $\sigma_{dyn}(t)$  を求めることとする。

## 5. 精度検証

### 5.1 動的繰返し実験概要

動的荷重結果と動的モデル解析結果  $\sigma$  との比較を行うが、ここで今回行った動的繰返し荷重実験概要について述べる。前述の通り、試験片形状、荷重装置等の実験概要は既報その6と同様であるが、荷重波形についてはその7と同様な波形が追加されている。ただし本論文では動的実験(歪速度 0.01 %/sec 以上)を行うため、その7での7種類の各荷重に振動数を設定し、正弦波荷重または、歪

速度一定の三角波荷重を行っている。荷重波形はその7の図を参照に、(i)単調引張試験は歪速度を 1.0, 10.0 (%/sec)として行った。(ii)については歪振幅を 0.2, 1.0, 3.0(%)の3種に設定し、動的荷重についてはモデルパラメータ同定のために 0.5, 2.0 (%)の振幅も追加した。振動数は 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 3.0 (Hz)の5種を、また歪速度一定の三角波荷重も 1.0, 6.0, 10.0, 30.0 (%/sec)で行っている。(iii)~(v)での動的実験は振動数を 0.1, 1.0, 3.0(Hz)の3種に設定し、また(vi)では 1.0 (Hz)の正弦波荷重を行った。

### 5.2 実験結果と動的モデル解析結果 $\sigma$ との比較

(i)~(vii)の動的荷重結果と動的モデル解析結果  $\sigma$  との比較を図6に示す。

## 6. まとめ

動的実験結果からその7での静的モデル  $\sigma_{sta}$  を差し引いた履歴は歪振幅、振動数によって形状は異なるが、楕円履歴が得られた。これを動的荷重による応力上昇とみなし、非線形粘性要素と弾性ばねによる直列体によってモデル化を行った。その際粘性係数  $C_d$  に歪振幅依存性が見られ、 $C_d$  の値を歪振幅による関数として、静的モデル  $\sigma_{sta}$  に足し合わせることで、結果様々な動的実験結果をとにも良好な精度で表わすことができた。

### << 参考文献 >>

- 山田 他: 動的繰返し荷重実験結果に基づくダンパー用鋼材の履歴特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第553号, pp.121-128, 2002.3
- 小澤, 笠井 他: 繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル その6 動的荷重を受ける極低降伏点鋼 LY100 の応力-歪関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 III, pp.935-940, 2007.9

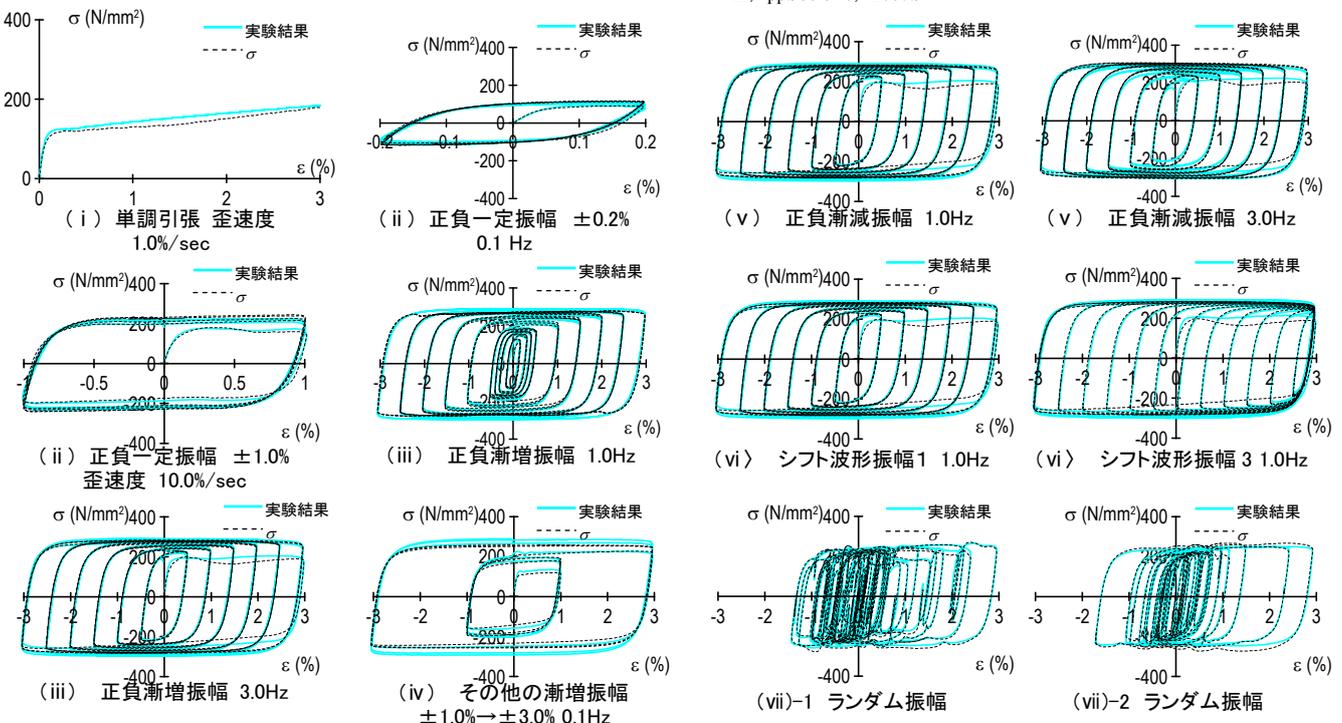


図6 曲線履歴型モデル(動的モデル)の精度検証

\*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 東京工業大学 人間環境システム専攻 元大学院生  
 \*4 東京工業大学 建築物理研究センター 助教  
 \*5 (株)竹中工務店 技術研究所 工博

\*1 Dynamic Analysis Research Complex, Union System Inc.  
 \*2 Professor, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.  
 \*3 Former Grad. Students, Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology.  
 \*4 Assist. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology.  
 \*5 Research & Development Institute, Takenaka Corp., Dr. Eng