

大阪大学大学院工学研究科	学生員	○金澤 佑樹
大阪大学大学院工学研究科	学生員	服部 伸幸
大阪大学大学院工学研究科	正会員	小野 潔
大阪大学大学院工学研究科	フェロー	西村 宣男
鳥取大学工学部	正会員	池内 智行

1. 目的

1995 年に発生した兵庫県南部地震によって土木構造物の耐震性確保の重要性が改めて認識された。その上で鋼構造物の耐震性を評価するために、地震による繰り返し外力によって繰り返し塑性履歴を生じる場合の強度や変形能を明らかにすることは重要である。構造物の挙動を明らかにする手法の一つとして有限要素法などの数値解析を用いることがあり、その場合繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の応力 - ひずみ関係を定義する構成式が必要である。この構成式については西村らによって精度が高くかつ簡易な定式法が提案されており、これを数値解析プログラムに組み込み、数値シミュレーションを実施することによって繰り返し作用を受ける鋼構造物の挙動を明らかにすることができる。本報告では狭降伏点レンジ - 低降伏比鋼の繰り返し塑性履歴特性を把握するとともに構成式の適用性を確認する。

2. 狭降伏点レンジ - 低降伏比鋼の機械的性質

狭降伏点レンジ - 低降伏比鋼(SN 鋼)とは、降伏点、降伏比にそれぞれ上限が設けられており、今回用いた SN490C は JIS 規格によって降伏点が 325 以上 445(N/mm²)以下で、降伏比 (σ_{yh}/σ_u) が 80%以下と定められている。今回は JIS4 号試験片で引張試験を行った。その結果を表-1 に示す。表-1 より JIS 規定を満足していることがわかる。

表-1 実験から求めた定数

試験片名	直径 mm	上降伏 応力	下降伏 応力	引張強 さ	降伏比 YR
		σ_{yh} N/mm ²	σ_{yl} N/mm ²	σ_u N/mm ²	
SN49-1	14.00	359.1	342.2	518.2	0.66
SN49-2	14.00	366.1	346.0	522.0	0.68
SN49-3	14.00	347.0	337.7	527.8	0.68
SN49-4	14.00	368.0	350.8	516.9	0.68
SN49-5	14.00	367.3	346.1	515.7	0.73
平均	14.00	361.5	344.6	520.1	0.69

3. 構成式の概要

構成式の概要を以下に示す。図-1(b)の点 0~8 は図-1(a)の点 0~8 に対応している(ただし点 4, 7 を除く)。図-1(b)において、一軸状態における塑性履歴曲線の真応力・塑性ひずみの関係を 0-1 の初期弾性域、1-3, 5-6, 8 以降の単調増大曲線に準ずる領域、3-5, 6-8 の遷移領域に分け、さらに単調増大曲線に準ずる領域を 1-2 の降伏棚、2-3, 5-6, 8 以降のひずみ硬化開始後の領域に、遷移領域を 3-4, 6-7 の塑性域、4-5, 7-8 の非線形遷移領域に分けて表現している。以下に各領域における構成式と定数を表現する式を示す。詳細は文献 1)及び 2)を参照されたい。

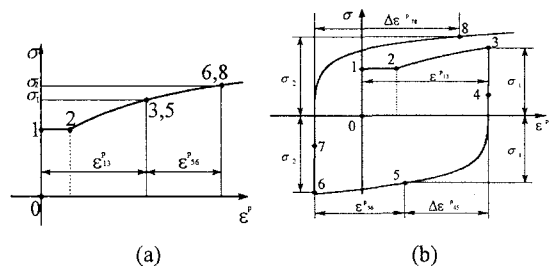


図-1 構成式の概要

・ 単調増大曲線を表す式: $\sigma = \frac{E_0^p}{b} e^{a \epsilon_{mon}^p} \ln(1 + b \epsilon_{mon}^p) + \sigma_y$ (1)

E_0^p : ひずみ硬化勾配

・ 弾性域の減少についての式: $\frac{\kappa}{\kappa_0} = \frac{c-1}{0.5} \epsilon_{mon}^p + 1$ ($\epsilon_{mon}^p \leq 0.5$), $\frac{\kappa}{\kappa_0} = c$ ($\epsilon_{mon}^p > 0.5$) (2)

κ : 弾性域の大きさ

κ_0 : 初期の弾性域の大きさ ($2\sigma_y$)

・ 非線形遷移領域を表す式: $y = E_0^p x + (\Delta \epsilon^p E_0^p - \Delta \sigma) \left(\frac{x}{\Delta \epsilon^p} \right)^{m+1} \left\{ (1+m) \ln \left(\frac{x}{\Delta \epsilon^p} \right) - 1 \right\}$ (3)

$$\Delta \varepsilon^P = \frac{e}{d} \sqrt{(\varepsilon_{mon}^P)^2 + 2d\varepsilon_{mon}^P} \quad (\text{遷移領域の塑性ひずみの大きさ}) \quad (4)$$

$$m = \frac{f}{\varepsilon_{mon}^P \{1 + \exp(g)\}} - 1 \quad (\text{塑性遷移領域の曲率に関する定数}) \quad (5)$$

$\varepsilon_{\sigma_{ys}}^{\text{mon}}$: ひずみ硬化開始点を原点とした時の単調載荷曲線上の塑性ひずみ
 a, b, c, d, e, f, g : 鋼材によって決定する定数

4. 構成式に含まれる材料定数の決定

構成式に含まれる定数決定のため、単調載荷実験(図-2)、弾性域の大きさの減少を調べる実験(図-3)、両振り実験(図-4)の3種類の実験を行った。以下にその結果を示す。また、それぞれの実験から、 d, e, f, g については文献¹⁾の手法、 a, b, c については文献²⁾の手法を用いて $a \sim g$ の定数を求めた(表-2)。

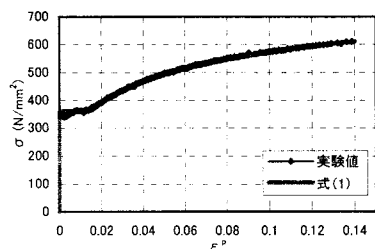


図-2 単調載荷曲線

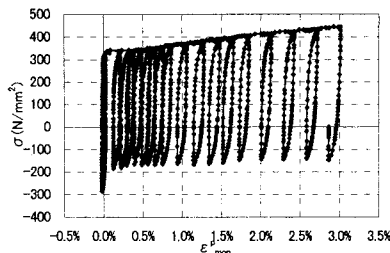


図-3 弾性域の減少実験結果

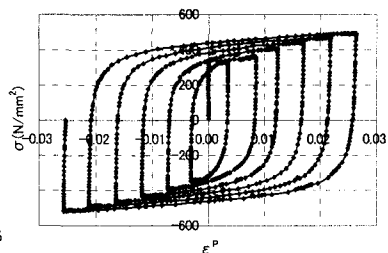


図-4 両振り実験結果

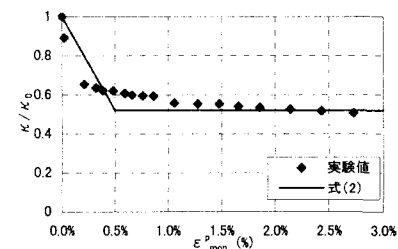


図-5 塑性ひずみの増加に伴う弾性域の大きさ(κ)の減少

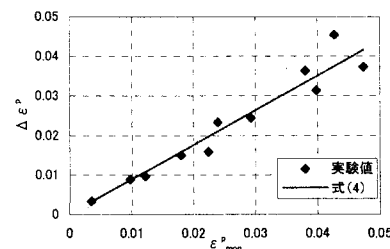


図-6 $\varepsilon_{mon}^P \cdot \Delta \varepsilon^P$ 関係

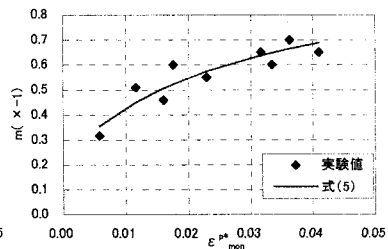


図-7 非線形遷移領域の曲率 m に関する構成式

表-2 実験から求めた定数

E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	降伏比 YR	E_{st}^0 (N/mm ²)	ε_{st}^0	a (N/mm ²)	b	c	d	e	f	g
2.15×10^5	3.62×10^3	6.70×10^{-1}	6.37×10^2	1.50×10^{-2}	0.00	5.09×10	5.20×10^{-1}	2.65×10^{-4}	2.31×10^{-4}	2.15×10^{-2}	-1.26

5. 構成式の SN490C への適用性の検証

提案した構成式の妥当性を検証するため、提案式による解析結果を実験データと比較した(図-8)。実験データを点、提案式を実線で示している。結果より、今回用いた SN490C においても提案した構成式で繰り返し塑性履歴を精度よく表現できることを確認した。なお、非線形遷移領域で荷重が反転した後の非線形遷移領域の大きさ $\Delta \varepsilon_a^P$ は下記の式により算出した(記号等は文献¹⁾参照)。

$$\Delta \varepsilon_a^P = \Delta \varepsilon^P - \Delta \varepsilon_2^P \quad (\Delta \varepsilon_2^P : \text{荷重反転点から遷移領域終了点までの塑性ひずみ})$$

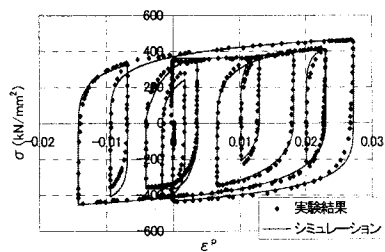


図-8 実験結果との比較

【謝辞】本研究は科学研究費補助金若手研究(B)および土木鋼構造教育助成金により行ったものです。また、新日本製鐵株式会社には鋼材提供のご協力を頂きました。ここに感謝の意を示します。

【参考文献】1) 西村 宣男, 小野 潔, 池内 智行: 単調載荷曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.27-38, 1995.4, 2) 鈴木 雄大, 小野 潔, 池内 智行, 岡田 誠司, 西村 宣男, 高橋 実: 実用的な鋼材の構成式の開発, 第6回 地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.351-358, 2003.