

大阪大学工学部 学生員○鈴木雄大 大阪大学大学院 正会員 小野 潔
大阪大学大学院 フェロー 西村宣男

1. 研究の背景と目的

兵庫県南部地震での鋼製橋脚の被害を受け、平成 8 年に改訂された道路橋示方書において、鋼製橋脚に関しては、初めて塑性域での変形性能を考慮した耐震設計法が導入された。鋼製橋脚のより合理的な耐震設計のためには鋼製橋脚の地震時の塑性履歴挙動を把握することが重要であり、そのひとつの手法に解析によるものがある。解析により鋼製橋脚の塑性履歴特性を精度良く把握するためには、精度の良い鋼材の構成式が必要となる。

すでに鋼材の構成式に関する多くの研究がなされている。その中の 1 つとして西村ら¹⁾は鋼材の塑性履歴特性を精度よく表現できる構成式を提案している。西村らが提案している単調載荷曲線を表す式は、ひずみが大きくなると傾きが負になる。通常解析では問題無いが、ひずみが大きくなると単調載荷曲線の勾配が負になり、実際の鋼材の特性と異なる可能性がある。さらに、この構成式に含まれるパラメータには、通常行う単調載荷試験以外の実験から求めるものがある。本来はこれらの実験を行い、パラメータを決定することが望ましいが、行われないことが多い。そのような場合パラメータを細かく規定しても構成式の精度の大幅な向上が望めないことから、より少ないパラメータで同程度の精度を持つ構成式を提案することにした。本研究の目的は、①単調載荷曲線を表す式が一樣伸びまで傾きが負にならないよう修正し、②精度の良さを維持しつつパラメータ数を減少させて簡素化することである。

2. 既往の構成式の概要

図-2 の点 0~8 は図-1 の点 0~8 に対応している(ただし点 4, 7 を除く)。図-2 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 以降の単調載荷曲線に準ずる領域、3-5、6-8 の遷移領域に分け、さらに単調載荷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 の弾性域、4-5、7-8 の非線型遷移領域に分けて表現している。例えば、ここで応力の絶対値が σ_1 である点 3 まで載荷した後、除荷したとする。除荷が進み点 5 において応力の絶対値が再び σ_1 に達したとすると、点 5 から再載荷する点 6 までの部分は図-1 の単調載荷の点 5 から点 6 までの部分と等価であると考える。

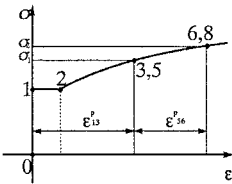


図-1 構成式の概要

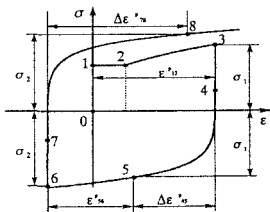


図-2 構成式の概要

3. 構成式の提案

3. 1. 単調載荷曲線を表す式の修正

単調載荷曲線を表す式の基本的な条件を満たしつつその傾きが少なくとも一樣伸びまで負にならない式(1.1)を提案する。この提案式はひずみ硬化開始点($\varepsilon^{p*}_{mon}=0$)において、真応力が下降伏点応力度となり($\sigma=\sigma_y$)、傾きがひずみ硬化勾配となる($E^p=E^p_{st}$)ことを満たしている。さらに、単調載荷曲線の傾きがひずみの増加とともに減少するが、決して負になる

$$\sigma = - \frac{a}{\varepsilon^{p*}_{mon} + \sqrt{\frac{a}{E^p_{st}}}} + \sigma_y + \sqrt{aE^p_{st}} \quad (1.1)$$

$$\sigma = a \ln \left(\frac{\varepsilon^{p*}_{mon}}{b} + 1 \right) + \left(E^p_{st} - \frac{a}{b} \right) \varepsilon^{p*}_{mon} + \sigma_y \quad (1.2)$$

ε^{p*}_{mon} : ひずみ硬化点を原点とした単調載荷曲線上の塑性ひずみ
 E^p_{st} : ひずみ硬化勾配
 σ_y : 下降伏点応力度

表-1 単調載荷曲線を表す提案式のパラメータ

	SS400	SM570	LYR590	極軟
a	280	500	600	70

ことはない。表-1 に提案式に含まれるパラメータ a をキャリブレーションにより求めた値、図-3 に単調載荷曲線について提案式(1.1)による解析結果、実験データならびに既往の構成式(1.2)による解析結果と比較したものを示す。図より本提案式が単調載荷曲線を精度よく表現できることがわかる。また提案式では傾きが負にならないことがわかる。

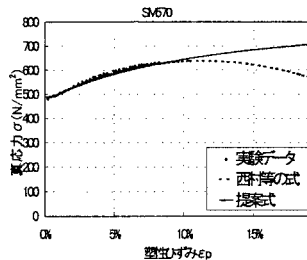


図-3 単調載荷曲線の比較(SM570)

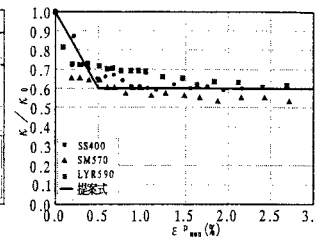


図-4 $\varepsilon_{p_{mon}}$ と κ/κ_0

3. 2. 弾性域の減少を表す式の簡素化

既往の研究より弾性域の減少を表すパラメータ κ/κ_0 は、単調載荷曲線上の塑性ひずみ $\varepsilon_{p_{mon}}$ が 0.5% までに急速に減少し、1% 以内ではほぼ一定値(図-4)となることが知られており、それを式(2.1)で表現している。そこで提案式では $\varepsilon_{p_{mon}}$ が 0.5% 以上では、 κ/κ_0 を鋼材ごとの一定値とし、0.5% 以内では κ/κ_0 を 1 から鋼材ごとの値まで直線的に減少させるものとした(図-4)。鋼材ごとの値は表-2 に示す値とした。

3. 3. 非線形遷移領域の曲率に関する値 m の簡素化

既往の構成式において非線形遷移領域の曲率に関する値 m は式(3.1)で表している。 m は、あらゆる $\varepsilon_{p_{mon}}$ に対して $-1 < m < 0$ を満たす。この条件を満たすように式(3.2)を提案する。 m 値を表す式は、全体を $-1 \times \tanh(\quad)$ で抑え、 $(\quad)$ の中を正数とすることで条件を満たした。また遷移領域のひずみの大きさ $\Delta \varepsilon^p$ と κ/κ_0 の増加に従い、 m の絶対値が大きくなるという傾向も満たしている。この式では遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta \varepsilon^p$ と、先に提案した各鋼材固有の値 κ/κ_0 を用い、全ての一般構造用鋼材に適用できる式とした。図-5 に、横軸に既往の構成式から求めた m をとり、縦軸に提案式から求めた m をとり比較したものを示す(SS400)。

4. 構成式の妥当性の検証

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ならびに既往の構成式による解析結果と比較した(図-6)。実験データを点、既往の式を点線、提案式を実線で示している。比較した試験の中で、構成式の精度がもっとも問われるランダム載荷試験について比較したものを図-6 に示す。その結果より、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。

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = \frac{1 - c}{(\varepsilon_{p_{mon}} + 1)^n} + c \quad (2.1)$$

κ_0 : 初期弾性域の大きさ($2\sigma_y$)
 κ : 弾性遷移領域の大きさ
 $\varepsilon_{p_{mon}}$: 単調載荷曲線上の塑性ひずみ

表-2 κ/κ_0 の鋼材ごとの一定値

	SS400	SM570	LYR590	極軟
κ/κ_0	0.6	0.6	0.6	0.8

$$m = \frac{f}{\varepsilon_{p_{mon}}^p + \{1 + \exp(g)\}f} - 1 \quad (3.1)$$

$$m = -[\tanh\{3.1 \cdot \Delta \varepsilon^{p_{0.29}} \cdot (\kappa/\kappa_0)\}]^{2.6} \quad (3.2)$$

$\Delta \varepsilon^p$: 非線形遷移領域の塑性ひずみの大きさ

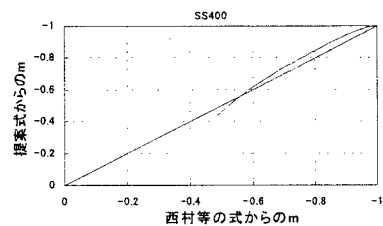


図-5 既往の式の m と提案式の m の比較

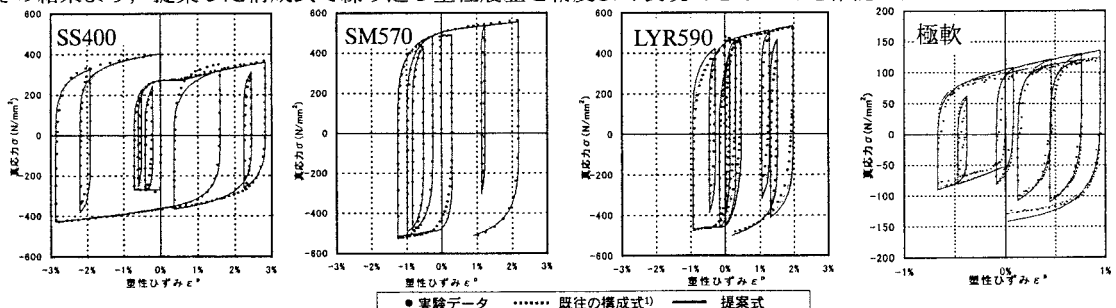


図-6 塑性履歴曲線(ランダム載荷試験)

【参考文献】

1) 西村宜男, 小野潔, 池内智之: 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鋼製式, 土木学会論文集, No.513/I-31, 27-38, 1995.4