

実用的な鋼材の構成式の開発

鈴木 雄大¹ 小野 潔² 池内 智行³ 岡田 誠司⁴ 西村 宣男⁵ 高橋 実⁶

¹学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）

²正会員 工博 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）

³正会員 工博 鳥取大学工学部木工学科（〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101）

⁴正会員 工修 石川島播磨重工業㈱（〒135-8731 東京都江東区豊洲 2-1-1）

⁵フェロー 工博 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）

⁶正会員 工修 独立行政法人土木研究所構造物研究グループ（〒305-8516 つくば市南原 1 番地 6）

1. まえがき

平成 7 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震では、道路橋の鋼製橋脚についても多くの被害を受けた。その後、鋼製橋脚について、正負交番載荷実験や解析等^{1),2)}により、耐震性能評価手法の開発、耐震性能向上のための手法の開発等の検討が実施され、その中から鋼製橋脚の耐震設計に有用な知見が得られた。それらの成果の一部は、平成 8 年 12 月に改定された道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編³⁾（以下、「道示 V」という。）の規定にも反映された。改訂された道示 V において、鋼製橋脚については、従来の弾性域での力を基本とした設計である震度法に加え、塑性域での耐力および変形性能を考慮した設計法が新たに追加された。

鋼製橋脚の合理的な耐震設計を行うには、鋼製橋脚の耐震性能を把握することが不可欠である。その代表的な手法として、鋼製橋脚を模した供試体による正負交番載荷実験等の実験によるもの¹⁾、局部座屈を考慮できる FEM 解析等の解析によるもの^{4),5)}の 2 種類が考えられる。しかしながら、費用や時間等の制約から、多種多様な構造諸元を有する全ての鋼製橋脚の耐震性能を実験のみにより把握することは事実上困難であり、比較的容易に行うことができる解析によって実験を補完することが必要になってくる。

解析によって鋼製橋脚の耐震性能を適切に把握するためには、当然のことながら精度のよい解析手法を用いることが重要であり、そのためには精度のよい構成式が必要となってくる。西村らは鋼材の繰返し塑性履歴特性を精度良く表現できる構成式を開発した^{6),7)}。そして、その構成式を用いた解析結果が鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果を精度良く再現できることを示し、開発した構成式を用いた解析に

より鋼製橋脚の耐震性能を適切に把握できること明らかにしている^{8),9),10)}。

ところで、鋼材の繰返し塑性履歴を精度よく表現できる構成式を用いた解析では、その解析自体の精度を高めるという観点から、構成式に含まれる繰返し塑性履歴特性を表現するパラメータは所定の材料試験から決定されることが望ましい。しかしながら、鋼製橋脚の正負交番載荷実験を行う場合、鋼材の引張試験は行ってもその他の繰返し塑性履歴に関するパラメータを決定するための材料試験は行わない場合がほとんどである^{1),2)}。そのような場合、材料試験を行わなかったパラメータは、過去の材料試験から得られた値を使うもの、または鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果と解析結果との比較によるキャリブレーションから求めた値を使うものの 2 通りが考えられる。実験結果と解析結果との比較によるキャリブレーションからパラメータを求める場合、構成式に含まれるパラメータは少ない方が望ましいと考えられる。構成式に含まれるパラメータは全て材料試験から求める方法が精度的に最も良いのは当然のことではあるが、上記のような実際に構成式が使用されている状況を考えると、ある程度精度を保ちながらパラメータの少ない構成式を開発することも、実用的観点からすると有用であると考えられる。

そこで、本研究では、西村らの開発した構成式（以下、「既往の構成式」という。）をもとに、その構成式に含まれるパラメータを少なくする等の変更を行い実用的でより有用な構成式の開発を試みた。そして、本稿で開発した構成式を用いた計算結果と、鋼材の繰返し載荷実験結果および既往の構成式を用いた計算結果との比較をおこない、その妥当性を確認した。

2. 既往の構成式の展開

(1) 構成式の概要

既往の構成式では、真応力－塑性ひずみで整理した鋼材の塑性履歴曲線を単調引張曲線に準ずる部分、ヤング率で直線的に変動する部分、逆負荷に対して過渡的な挙動を示す部分の3領域に分けて表現している。既往の構成式は、真応力－塑性ひずみで整理した繰り返し塑性履歴曲線の引張側、圧縮側の単調載荷曲線に準ずる領域を圧縮側と引張側とで区別せず1本の単調載荷曲線で表現している。また、単調載荷曲線に準ずる領域以外の非線形的な挙動を示す遷移領域の塑性ひずみの長さ $\Delta \varepsilon^p_{mon}$ を、単調載荷曲線上の塑性ひずみの関数で表している。また、弾性域の減少や遷移領域でのループの曲率を変化させるパラメータを導入している。

単調載荷曲線を基にした構成式の概要を図-1に示す。図-1は真応力－塑性ひずみで整理した単調載荷曲線、図-2は繰り返し塑性履歴を受けた鋼材の真応力－塑性ひずみ関係を示しており、図-2の点0～8は図-1の点0～8（ただし点4、7を除く）と応力が等しくそれぞれ対応した点となっている。図-2において、一軸状態における真応力－塑性ひずみの関係を点0-1の初期弾性域、点1-3と点5-6、点8以降の単調載荷曲線に準ずる領域、点3-5と点6-8の遷移領域に分けている。さらに単調載荷曲線に準ずる領域を点1-2の降伏棚、点2-3と点5-6、8以降のひずみ硬化領域に、遷移領域を点3-4と点6-7の弾性遷移領域、点4-5と点7-8の非線形遷移領域の2つに分けている。単調載荷曲線を基にして、繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の真応力－塑性ひずみ関係を単調載荷曲線に準ずる領域とそれ以外の遷移領域に分けて表現する構成式では、これらの領域分けが重要となる。そのためには、単調載荷曲線上のある応力 σ まで達した後、荷重を反転させたときに再びその応力 $\sigma' = |\sigma|$ に達するまでの塑性ひずみ変化量、つまり単調載荷曲線上のある応力に対応する塑性ひずみ ε^p_{mon} と、そこで荷重を反転させた時に現れる遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta \varepsilon^p$ の関係を定式化する必要がある。そこで、単調載荷曲線上の塑性ひずみ ε^p_{mon} と荷重を反転させた時に現れる遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta \varepsilon^p$ の関係を以下の式(1)で表している。

$$\Delta \varepsilon^p = \frac{e}{d} \sqrt{(\varepsilon^p_{mon})^2 + 2d\varepsilon^p_{mon}} \quad (1)$$

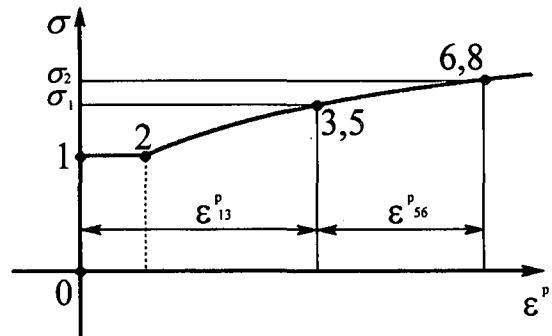


図-1 単調載荷曲線

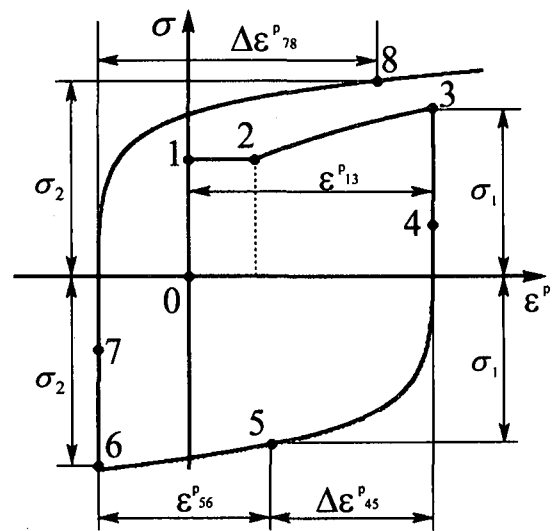


図-2 繰り返し載荷経路

ここに、 $\Delta \varepsilon^p$: 遷移領域の塑性ひずみの大きさ
 ε^p_{mon} : 単調載荷曲線上の塑性ひずみ
 d, e : 鋼材によって決まる定数

(2) 構成式の数学的表現

a) 単調載荷曲線に準ずる領域の表現

ひずみ硬化領域の単調載荷曲線については、以下の式(2)によって表現している。

$$\sigma = a \ln\left(\frac{\varepsilon^{p*}_{mon}}{b} + 1\right) + \left(E^{p*}_{st} - \frac{a}{b}\right)\varepsilon^{p*}_{mon} + \sigma_y \quad (2)$$

ここに、 ε^{p*}_{mon} : ひずみ硬化開始点を原点としたときの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

a, b : 鋼材によって決まる定数

ここで、式(2)はひずみ硬化開始点($\varepsilon^{p*}_{mon}=0$)にお

いて、 $\sigma = \sigma_y$, $d\sigma/d\varepsilon^{P*}_{mon} = E^P_{st}$ を満たしている。

降伏棚上で荷重を反転させた場合、現れてくる降伏棚の長さの累計が単調載荷時の降伏棚の長さに達するまで降伏棚の挙動を示すようになっている。

b) 弾性遷移領域の表現

鋼材が繰返し塑性履歴を受けるとバウシinger効果により弾性域の大きさは初期弾性域の大きさより減少し、ある程度以上の繰返し塑性履歴を受けると弾性域の大きさは一定値に収束することが明らかにされている^{6),7),11),12),13)} (図-3⁶⁾)。そこで、繰返し塑性履歴にともなう弾性域の大きさの変化を以下の式(3)によって表現している。

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = \frac{1-c}{(\varepsilon^{P*}_{mon}+1)^n} + c \quad (3)$$

ここに、 κ : 弾性域の大きさ
 κ_0 : 初期の弾性域の大きさ($2\sigma_y$)
 c, n : 鋼材によって決まる定数

式(3)は ε^{P*}_{mon} がある程度大きくなると弾性域の大きさ κ は一定値 $\kappa_0 \times c$ に漸近する。

c) 非線形遷移領域の表現

図-4に示すように非線形遷移領域の開始点(点4)を原点とし、x軸に塑性ひずみ、y軸に真応力をとる。非線形遷移領域上の任意の点P(x,y)における接線塑性係数 E^P を原点から非線形遷移領域の終了点(点5)までの塑性ひずみ $\Delta\varepsilon^P$ と真応力 $\Delta\sigma$ 、点5における接線塑性係数 E^P_0 を用いて以下の式(4)のように表現している。

$$E^P = \frac{dy}{dx} = E^P_0 + (1+m)^2 (E^P_0 - \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon^P}) \left(\frac{x}{\Delta\varepsilon^P}\right)^m \ln\left(\frac{x}{\Delta\varepsilon^P}\right) \quad (4)$$

ここで m は非線形遷移領域の形状を表すパラメータであり、 $-1 < m < 0$ である。式(4)において、非線形遷移領域の開始点($x=0$)では接線塑性係数 E^P は無限大であり、非線形塑性領域の終了点($x=\Delta\varepsilon^P$)では接線塑性係数 E^P は E^P_0 となっている。

これを塑性ひずみ x で積分すると、真応力 y は以下の式(5)で表される。

$$y = E^P_0 x + (\Delta\varepsilon^P E^P_0 - \Delta\sigma) \left(\frac{x}{\Delta\varepsilon^P}\right)^{m+1} \{(1+m) \ln\left(\frac{x}{\Delta\varepsilon^P}\right) - 1\} \quad (5)$$

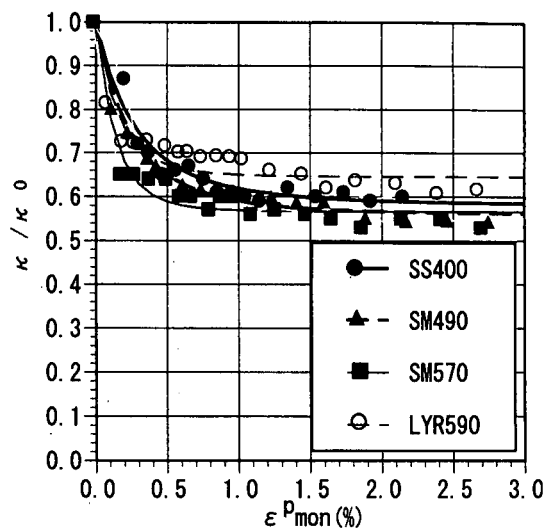


図-3 ε^{P*}_{mon} と κ/κ_0 の関係

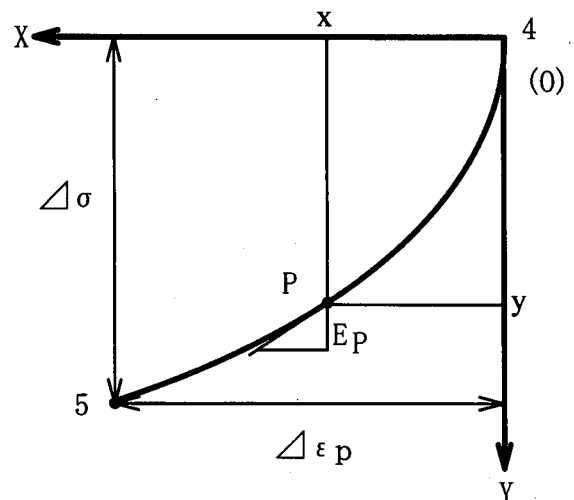


図-4 非線形遷移領域

非線形遷移領域の曲率の変化の影響は、材料パラメータ m を導入することによって考慮している。

非線形遷移領域の m は、単調載荷曲線上の塑性ひずみ ε^{P*}_{mon} が大きくなるに従って m の絶対値が大きくなる傾向にある。そこで ε^{P*}_{mon} の関数として以下の式(6)で表現することとした。

$$m = \frac{f}{\varepsilon^{P*}_{mon} + \{1 + \exp(g)\}f} - 1 \quad (6)$$

ここに、 f, g : 鋼材によって決まる定数

ただし、単調載荷曲線上の塑性ひずみが降伏棚の範囲内であるときは一定値($m=-0.01$)とする。式(6)より、 $\varepsilon^{P*}_{mon} \geq 0$ において常に $-1 < m < 0$ を満たしていることがわかる。

3. 構成式の変更

(1) 概要

構成式に含まれる構成式のパラメータの数を減らすこと等により実用的で有用な構成式の開発を行うため、2章に示した既往の構成式を構成する各領域について変更を行った。

以下に変更した具体的な内容を示す。

(2) 各領域ごとの具体的な変更内容

a) 単調載荷曲線に準ずる領域の表現

既往の構成式において、単調載荷曲線に準ずる領域を表現する式は、塑性ひずみがある一定以上の値になると塑性ひずみの増加とともに真応力が減少してしまう。その現象が現れる塑性ひずみの領域が解析対象とする塑性ひずみの領域より大きかったため、これまでの研究においては問題となることはなかった。しかし、今後、このような大きい塑性ひずみの領域まで解析する必要性が生じる可能性もある。そこで、今回、塑性ひずみが大きい領域でも真応力が減少しないように、単調載荷曲線に準ずる領域を表現する式を以下の式(7)のように定式化した。

$$\sigma = \frac{E_{st}^p}{b} e^{100a \varepsilon_{mon}^p} \ln(1 + 100b \varepsilon_{mon}^p) + \sigma_y \quad (a \geq 0) \quad (7)$$

式(7)はひずみ硬化開始点 ($\Delta \varepsilon_{mon}^p = 0$) において、 $\sigma = \sigma_y$, $d\sigma/d\varepsilon_{mon}^p = E_{st}^p$ を満たしている。

b) 弾性遷移領域の表現

図-2の点3-4や点6-7のような遷移領域における弾性域については、鋼材が繰り返し塑性履歴を受けると、バウシinger効果によって弾性域の大きさは初期弾性域の大きさより減少し、ある程度以上の繰り返し塑性履歴を受けると弾性域の大きさは一定値に収束することが明らかにされている。図-3に示したように、弾性遷移領域の大きさを表す κ が、単調載荷曲線上の塑性ひずみ ε_{mon}^p が 0.5% になるまでに急速に減少し、その後ほぼ一定値となっていることが確認できる。そこでこの特徴から、 κ/κ_0 を ε_{mon}^p が 0.5% までは 1 から鋼材ごとに決めた一定値 c まで直線的に減少させ、 ε_{mon}^p が 0.5% 以降は c の一定値とすることにして、以下の式(8)の様に定式化した。

$$\left. \begin{aligned} \kappa/\kappa_0 &= \frac{c-1}{0.5} \varepsilon_{mon}^p + 1 & (0 \leq \varepsilon_{mon}^p \leq 0.5(\%)) \\ \kappa/\kappa_0 &= c & (0.5 \leq \varepsilon_{mon}^p) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

c) 非線形遷移領域の表現

非線形遷移領域を表現する際の根幹となる式(5)に含まれる材料パラメータは、曲率を表すパラメータ m のみである。既往の構成式において、この m は材料パラメータ f, g を含んでいる。本研究で構成式の合理化を行うに当たって、根幹となる式(5)はそのままとし、曲率を表すパラメータ m の式(6)を簡素化することとした。

m を表す式(6)の簡素化にあたり、この式に含まれる材料パラメータ f, g を省略することとした。新たな式の提案にあたって、文献 6,7 で行われた材料試験の結果をもとに、非線形遷移領域の塑性ひずみ増分 $\Delta \varepsilon^p$ と弾性域の減少を表すパラメータ c をつかって、以下の式(9)のように定式化した。

$$m = - \left\{ \tanh(3.1 \Delta \varepsilon^{p0.29} c) \right\}^{2.6} \quad (9)$$

上の式(9)は $-1 < m < 0$ という条件を満たしている。

4. 構成式に含まれる材料パラメータの決定方法

(1) 概要

構成式は正確であると同時に、含まれる材料パラメータの決定のための実験方法や、その実験データからのパラメータの決定方法が明確でなければならない。

以下に既往の研究で提案された材料パラメータ決定に必要な実験法と算定方法を示す。本研究で開発した構成式の材料パラメータについても、その求め方は既往の構成式のものと同様である。

(2) 構成式に含まれるパラメータ

既往の構成式および今回変更した構成式に含まれる材料パラメータは以下の通りである。

① 単調載荷曲線に関するパラメータとして、既往の構成式である式(2)では、ヤング係数 E 、下降伏応力 σ_y 、降伏棚の長さ ε_{st}^p 、ひずみ硬化勾配 E_{st}^p 、ひずみ硬化開始後の曲線の形状を表現する a, b の 6 個がある。

今回変更を行った式(7)についても同様の 6 個である。

② バウシinger効果による弾性域の大きさの減少に関するパラメータとして既往の構成式である式(3)では、 c, n の 2 個がある。

今回変更を行った式(8)の場合は、 c の 1 個の

みである。

- ③ 非線形遷移領域に関するパラメータとして、既往の構成式である式(6)では、曲線部の形状を表現する f と g 、単調載荷曲線上のある応力レベルに対応する塑性ひずみ ε_{mon}^P と、そこで荷重を反転させたときに現れる遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta \varepsilon^P$ との関係を表現する e, d (式(1)) の4個がある。

今回変更を行った式(9)の場合は、②で求まる c と、①で求まる $\kappa_0 (=2\sigma_y)$ 、非線形遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta \varepsilon^P$ で表現されるので、パラメータ数は0個である。

以上のパラメータを求めるために、単調載荷実験(①に関するパラメータを求める)、小さいひずみステップで除荷載荷を繰り返す弾性域の大きさの減少を調べる実験(②に関するパラメータを求める)、原点を中心に与える正負のひずみを漸増させていく両振り実験(③に関するパラメータを求める)の3種類の実験を行う。

(3) パラメータを求めるための実験

構成式に含まれる材料パラメータを求めるため前節で述べた単調載荷実験、弾性域の大きさの減少を調べる実験、両振り実験の3種類の実験を行った。対象とした鋼種はすべて SM490 である。

構成式は塑性ひずみ-真応力関係を対象としている。実験から得られるデータは工学ひずみ ε_N と、荷重 P であるので、以下の式(10)のよって ε_N と P を、塑性ひずみ ε^P と真応力 σ に変換した。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{P(1+\varepsilon_N)}{A} \\ \varepsilon &= \ln(1+\varepsilon_N) \\ \varepsilon^P &= \varepsilon - \varepsilon^e = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 ε : 真ひずみ (対数ひずみ)
 ε^e : 弾性ひずみ
 A : 実験供試体の断面積
 E : ヤング率

a) 実験供試体

使用した実験供試体は、既往の研究と同様の図-5に示すような丸棒の繰り返し載荷試験片である。この試験片は、圧縮荷重載荷時に座屈したり、端部の拘束効果により一軸状態が乱されたりしない形状となっている。

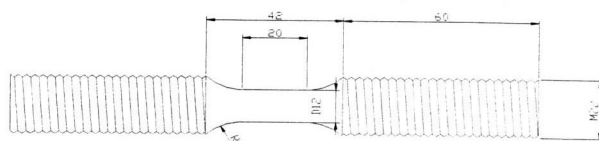


図-5 実験供試体

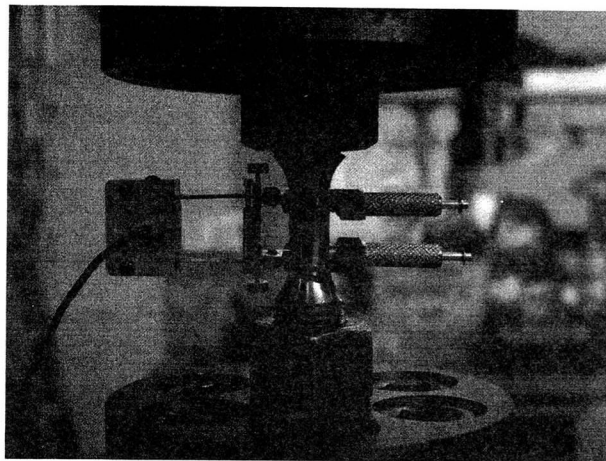


写真-6 材料試験の状況

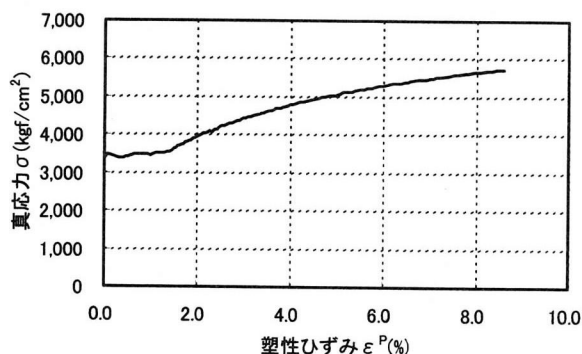


図-7 単調載荷曲線

b) 実験装置

繰り返し試験片の実験装置として島津サーボパルサー (容量 10tf) を用い、実験供試体を治具にねじ込み固定して実験を行った。荷重はサーボパルサーに内蔵されたロードセルにより、ひずみは平行部に取り付けた伸び計 (標点距離 15mm) により測定した。実験の状況を写真-6に示す。

c) 単調載荷実験

単調載荷曲線に関するパラメータを求めるために、単調載荷実験を行った。その実験結果の例を図-7に示す。パラメータを求めるために、実験結果を真応力-塑性ひずみに変換した後、下降伏応力 σ_y 、降伏棚の長さ ε_{st}^P 、ひずみ硬化勾配 E_{st}^P を決定する。さらに、 $\varepsilon_{mon}^{P*} = \varepsilon_{mon}^P - \varepsilon_{st}^P$ により求めたひずみ硬化開始点を原点とした塑性ひずみ ε_{mon}^{P*} と真応力

σ で表現した実験データを、 E^P_{st} 、 σ_y を代入した式(2)で回帰計算を行い材料パラメータ a, b を決定した。

同様に、今回変更を行った構成式の場合は式(7)で回帰計算を行う。

d) 弾性域の減少を調べる実験

弾性域の大きさの減少に関するパラメータを求めるために、図-8 に示すような小さいひずみのステップで除荷と載荷を繰り返す実験を行った。弾性域の大きさを決定するにあたり、除荷開始点から 0.03% オフセット法によって各除荷ループの弾性域の大きさ κ を求めた。こうして求めた弾性域の大きさ κ を初期の弾性域の大きさ $\kappa_0 (2\sigma_y)$ で割って無次元化し、それぞれの κ に対応する単調載荷曲線上の塑性ひずみ ϵ^P_{mon} との関係 (図-9) を調べ、式(3)によって回帰計算し、 c と n を求めた。

今回変更を行った構成式の場合は、実験データから c の値を読みとって求めたのみである。

e) 両振り実験

非線形遷移領域に関するパラメータを求めるため、図-10 に示すような、原点を中心に与える正負のひずみを漸増する両振り実験を行った。

まず式(1)の d, e から求める。実験データを真応力-塑性ひずみに変換し、変換したデータ各種鋼材の単調載荷曲線上の塑性ひずみ ϵ^P_{mon} と遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta \epsilon^P$ の関係を求める (図-11)。 ϵ^P_{mon} と $\Delta \epsilon^P$ を式(1)に代入して、回帰計算をすることによってパラメータ d, e を決定する。

つぎに非線形遷移領域の曲率に関する m を表現する材料パラメータ f, g をもとめる。そのために、それぞれの除荷・載荷のループについて ϵ^P_{mon} と $\Delta \epsilon^P$ を求める。この値と、式(2)を塑性ひずみで微分した式より E^P_0 を求める。同様に式(3)より弾性域の大きさ κ を求める。これにより非線形遷移領域の応力の幅 $\Delta \sigma$ が求まる。こうして求めた $\Delta \epsilon^P$ 、 E^P_0 、 $\Delta \sigma$ を式(5)に代入し回帰計算することにより m が求まる。さらに、ひずみ硬化開始点を原点とした塑性ひずみ ϵ^{P*}_{mon} と m を式(6)に代入して回帰計算することにより材料パラメータ f, g を決定した。

今回変更を行った構成式の場合は、非線形遷移領域についての材料パラメータを求める必要はない。

(4) 材料パラメータの算出

前節(3)の実験と計算方法で求められた材料パラメータを表-1 に示す。

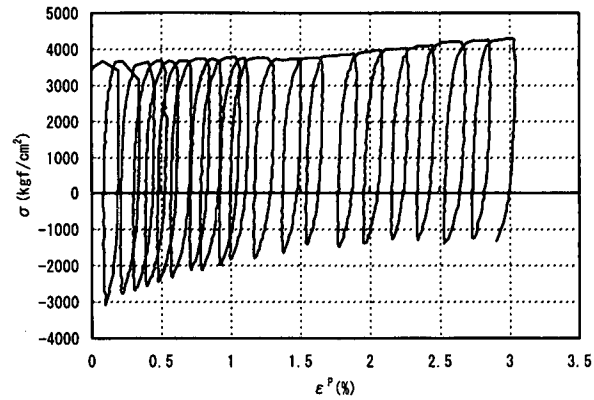


図-8 弾性域の大きさの減少を調べる実験

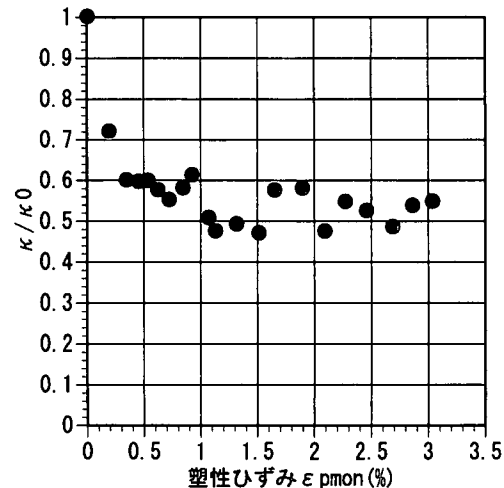


図-9 ϵ^P_{mon} と κ/κ_0 の関係

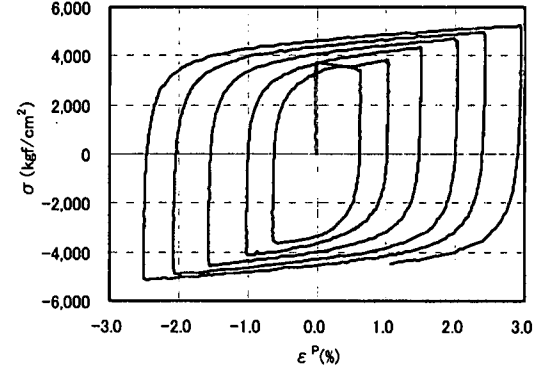


図-10 両振り実験

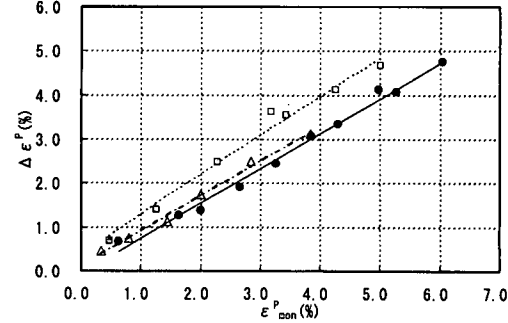


図-11 ϵ^P_{mon} と $\Delta \epsilon^P$ の関係

5. 構成式の妥当性の検証

表-1 材料パラメータ

既往の式			本研究で検討した式		
a	b	E_{st}^p	a	b	E_{st}^p
13286	0.101	60,561	0.0037	31.31	60,561
σ_y	E	ϵ_{st}^p	σ_y	E	ϵ_{st}^p
3,674	2.05E+06	1.44	3,674	2.05E+06	1.44
c	d	e	c	d	e
0.52	0.25	0.21	0.52	0.25	0.21
f	g	n	f	g	
3.44	-0.03	5.04	3.44	-0.03	

(1) 概要

単調載荷実験、弾性域の大きさの減少を調べる実験、両振り実験の3種類の実験のみから得られる材料パラメータを用いて、鋼材の一般的な塑性履歴特性を精度よく再現できること、すなわち変更した構成式の妥当性を検証する。そのために、材料パラメータを求める実験で使用した試験片を用いた1軸のランダム載荷実験と、本研究で変更を行った構成式を用いた計算結果とを比較した。

(2) 数値シミュレーションとランダム載荷実験との比較

構成式の妥当性を検証するために、ランダム載荷実験と比較した。ランダム載荷実験とは、鋼材の一般的な塑性履歴特性を再現するために、降伏棚上での除荷、単調載荷曲線上での荷重反転、非線形遷移領域上での荷重反転などの起こりうる状況を想定して、それが再現できるように載荷した実験である。

図-12 に実験データと、本研究で変更した構成式による計算結果ならびに既往の構成式による計算結果の比較を示す。

本研究で変更した構成式の計算結果に着目すると、単調載荷曲線に準ずる領域については実験データを精度よく表現できているが、非線形遷移領域については大きな誤差がみられる。この誤差の原因が、非線形遷移領域の曲率に関するパラメータ m の定式化に原因があると考えられる。そこで、本研究で開発した構成式のうち、 m を表現する式だけは既往の構成式(式(6))を用いることとした。以後この構成式のことを「開発した構成式」とよぶ。

ここで新たに、開発した構成式の計算結果と、実験結果及び既往の構成式の計算結果と比較した(図-13)。開発した構成式による計算結果は、実験結果を精度よく再現できることが確認された。このことから、開発した構成式で、ひずみ硬化領域、降伏棚上、いずれの領域の繰り返し履歴曲線を精度よく再現することができることになり、開発した構成式の妥当性が確認できた。

また、既往の構成式による計算結果との比較を見ても、開発した構成式に変更したことによる精度の低下はほとんど見られないことが確認できた。

6. 結論

本研究では、既往の構成式よりも材料パラメータの求めやすさという点で合理的な構成式を開発し、

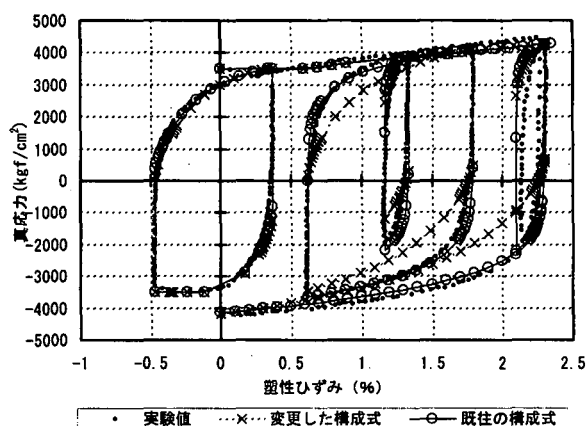


図-12 実験と変更した構成式の計算結果の比較

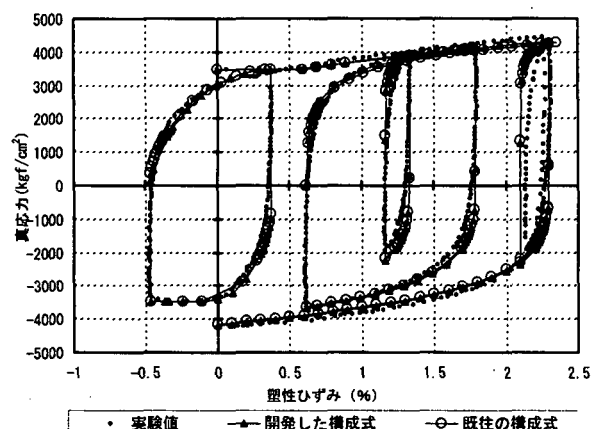


図-13 実験と開発した構成式の計算結果の比較

その妥当性を確認した。本研究をまとめると以下のようなになる。

- (1) 構成式の材料パラメータを減らすことにより合理化を行った。弾性域の大きさの減少を表す式を簡便なものに変更した。非線形遷移領域の曲率を表す m の式については、提案した式の精度が悪いことから、既往の構成式から変更しないこととした。
- (2) 単調載荷曲線を表す式の変更を行った。塑性ひずみが大きい領域で真応力が減少する問題を解決した。これにより、塑性ひずみが大きい領域についても解析を行うことができるようになった。
- (3) 本研究で開発した構成式の計算結果と、繰り返し試験片を用いた1軸のランダム載荷試験ならび

に既往の構成式による計算結果と比較することにより、本研究で提案した構成式（開発した構成式）の妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 建設省度土木研究所，首都高速道路公団，阪神高速道路公団，名古屋高速道路公社，（社）鋼材倶楽部，（社）日本橋梁建設協会：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書（Ⅰ）～（Ⅷ），（総括編），1997年4月～1999年3月
- 2) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，1996.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，1996年12月
- 4) 葛漢彬，高聖彬，宇佐美勉，松村寿男：鋼製パイプ断面橋脚の繰り返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究，土木学会論文集，No.577/I-41，pp.181-190，1997.
- 5) 葛漢彬，宇佐美勉，高聖彬：鋼製補剛箱形断面橋脚の繰り返し弾塑性挙動に関する解析的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.109-118，2000.
- 6) 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-13，pp.27-38，1995.
- 7) 西村宣男，小野潔，池内智行，新家徹：各種鋼材の繰り返し塑性履歴特性に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol.1，No.1，pp.173-182，1994.
- 8) 池内智行，谷口直子，西村宣男：兵庫県南部地震における鋼管単柱橋脚の地震損傷に関する一考察，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，pp.231-238，1997.
- 9) 池内智行，谷口直子，西村宣男，中川知和：兵庫県南部地震における鋼管橋脚損傷の数値シミュレーション，鋼構造論文集，Vol.4，No.14，pp.29-38，1997.
- 10) 池内智行，西村宣男：繰り返し曲げを受ける鋼製ラーメン橋脚隅角部の変形能，鋼構造年次論文報告集，第5巻，pp.199-206，1997.
- 11) Shen,C., Mizuno,E. and Usami,T.: Development of cyclic two-surface model for structural steels with yield plateau, NUCE Reserch Report, No.9302, March, 1993.
- 12) Shen,C., Mizuno,E. and Usami,T.: A generalized two-surface model for structural steels under cyclic loading, Proc.of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.10, No.2, pp.23-33, 1993.
- 13) Lee,C.G., Chang,K. and Sugiura,K.: The experimental basis of material constitutive laws of structural steel under cyclic and non-proportional, 平成3年度科学研究費補助金研究成果報告書，pp.3-14，1991.