

ファイバーモデルを用いた鋼部材の耐震性能照査指標・照査法 に関する一検討

徳永 宗正¹・薮本 篤²・小野 潔³・三好 崇夫⁴

¹ 学生会員 大阪大学 大学院博士前期課程（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）

² 学生会員 大阪大学 大学院博士前期課程（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）

³ 正会員 博士(工学) 東京工業大学 准教授 大学院理工学研究科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

⁴ 正会員 博士(工学) 大阪大学 助教 大学院工学研究科（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）

1. はじめに

道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁾（以下、「道
示V」という）において、塑性化を考慮する鋼製橋脚の
耐震性能照査は動的照査法により行うこととされている。
そして、動的照査法としては、非線形時刻歴応答解析に
よることが良いとされている。鋼製橋脚、鋼部材の耐震
性能評価のための非線形時刻歴応答解析手法として、道
示Vに解説されている $M-\phi$ 関係に基づく手法の他、フ
ァイバーモデルを使用した手法により鋼部材の耐震性能
を照査する例が報告されている^{2)~9)}。

ところで、著者らの既往の研究^{7)~9)}において、ファイ
バーモデル解析で得られるひずみは最大水平荷重時程度
までの領域であっても、繰返し回数および繰返し塑性履
歴の影響を受け、同じ水平変位に対しても、繰返し載荷
解析で得られるひずみがプッシュオーバー解析で得られ
るひずみより大きくなること等が報告されている。また、
熊木らは文献 10)で、ファイバーモデルによる非線形時
刻歴応答解析では、ひずみの累積が生じ、設計で用いる
にはひずみの累積を考慮する必要があることを指摘し、
実設計で用いる応答の評価手法および許容値について検
討が必要であるとしている。

他方、既往の実験的研究¹¹⁾により、鋼製橋脚について
は最大水平荷重時程度までの領域であれば、最大水平荷
重および最大水平荷重時変位等の耐震性能を示す指標は、
繰返し塑性履歴の影響を受けにくいことが報告されてい
る。したがって、ファイバーモデルを用いた鋼部材の耐
震性能照査法では、耐震設計上の限界値を最大水平荷重
時程度までの領域とする場合、繰返し塑性履歴の影響を
受けにくいという鋼部材の塑性履歴特性を適切に再現す
る必要がある。

著者らは既往の研究^{7)~9)}で、鋼部材の耐震性能照査で
安全側の評価をすることを念頭に、プッシュオーバー解

析から求めた特定の領域の平均ひずみをもとに、ひずみ
照査法で用いるひずみの許容値（許容平均ひずみ）の提
案を行った。しかし、プッシュオーバー解析から得られ
たひずみを基にした許容平均ひずみを非線形時刻歴応答
解析による鋼部材の耐震性能照査に用いた場合、鋼部材
は繰返し塑性履歴を受けるため、鋼部材の耐震性能を過
度に安全側に評価してしまう可能性が考えられる。

以上のことから、本論文では、ファイバーモデルを用
いた適切で合理的な鋼部材の耐震性能照査法として、繰
返し塑性履歴の影響を受けにくい指標である断面力を用
いた耐震性能照査法の提案を行うため検討を行った。ま
ず、ひずみ照査法による照査結果が繰返し塑性履歴の影
響をどの程度受けるのか検討を行った。次に、繰返し塑
性履歴の影響を受けにくい耐震性能照査の照査指標とし
て断面力に着目し、正方形断面鋼部材および円形断面鋼
部材を対象に、断面力を指標にした耐震性能照査法に関
する検討およびその有効性の確認を行った。

2. ひずみ照査法

本章では、繰返し塑性履歴が文献 7), 8)のひずみ照査
法および提案したひずみ照査法による照査結果に及ぼす
影響について検討を行った。

(1) 検討手法

本論文では、以下に示す、a)の載荷パターン、c)の供
試体および解析モデルを対象に、d)~f)に示す条件でフ
ァイバーモデルによる解析を行った。そして、ファイバ
ーモデル解析から求まる推定値と、実験結果およびシェ
ル要素を用いた弾塑性有限変位解析結果（以下、「実
験・解析結果」という）とを比較することにより検討を
行った。なお、本論文中的ファイバーモデルによる解析
は、全て EERC/Fiber¹²⁾を使用して行った。

a) 荷重パターン

本章では、荷重パターンの違いがひずみ照査法による照査結果に与える影響について検討するため、図-1 に示すプッシュオーバー解析および各 δ_y での繰返し回数 $n=1$ の繰返し荷重解析を行った。ここで、 δ_y はベルヌイ・オイラーのはり理論による降伏水平変位である。

b) ひずみの許容値の算出式

本章で対象としたひずみ照査法で用いるひずみの許容値は、著者らが文献 8) で提案している式(1)に示す平均値相当の許容平均ひずみ ε_{am} とした。式(1)は耐震性能照査で安全側の評価をすることを念頭に、繰返し塑性履歴の影響に対してひずみの許容値が小さめになるように、プッシュオーバー解析から得られるひずみを基に作成されている。

$$\frac{\varepsilon_{am}}{\varepsilon_y} = \frac{1.6}{0.04 + 2(N/N_y)^2 + (N/N_y)^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{\alpha^{-0.2} (\gamma_1/\gamma_1^*)^{0.25} R_F}{0.2 + 2(N/N_y)^2} \right] \quad (1)$$

ここで、 α ：圧縮側フランジのアスペクト比、 γ_1/γ_1^* ：リブ剛比、 R_F ：幅厚比パラメータ、 N/N_y ：軸力比、 $\bar{\lambda}$ ：細長比パラメータ

式(1)の詳細については、文献 7)、8)を参照されたい。さらに、式(1)を基に、文献 7)で提案した下限値相当の許容平均ひずみほど安全側過ぎない安全側の評価式が式(2)である。

$$\frac{\varepsilon_{am}}{\varepsilon_y} = \frac{1.4}{0.04 + 2(N/N_y)^2 + (N/N_y)^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{\alpha^{-0.2} (\gamma_1/\gamma_1^*)^{0.25} R_F}{0.2 + 2(N/N_y)^2} \right] \quad (2)$$

なお、上記の式(1)、式(2)の適用範囲は以下の通りである。

$$0.3 \leq R_F \leq 0.5, \quad 0.3 \leq R_F \leq 0.5, \quad 0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 0.5, \\ 1.0 \leq \gamma_1/\gamma_1^*, \quad 0.5 \leq \alpha \leq 1.7, \quad 0.0 \leq N/N_y \leq 0.5$$

c) 対象とした実験・解析結果

本章で対象とした実験・解析結果は、文献7)で対象した供試体、解析モデルと同じである

d) 鋼材の構成則

ファイバーモデル解析に用いた鋼材の構成則は、式(1)を算出した時と同様、図-2 に示す 2 次勾配が $E/100$ (E ：鋼材のヤング係数)のバイリニア型の構成則(以下、「バイリニアモデル」という)とした。なお、繰返し

し荷重解析では移動硬化則を適用した。

e) 解析モデルおよび要素分割

式(1)を算出した時と同様、図-3 に示すように、縦リブについても供試体、解析モデルを忠実にモデル化した。また要素分割は、高さ方向については後述の f) に示す基部から $(B_F+B_W)/2$ の範囲を 10 分割し、それ以外の範囲を 10 分割した。また、断面内の要素分割については、フランジおよびウェブでは、板厚方向に 2 分割、幅方向に 10 分割、縦リブでは板厚方向に 2 分割、幅方向に 2 分割とした。

f) ひずみ評価領域

式(1)を算出した時と同様、1 本柱形式の鋼製橋脚で曲げモーメントが最も大きくなる基部から $(B_F+B_W)/2$ の範囲をひずみ評価領域と設定した。ここで、 B_F はフランジ幅、 B_W はウェブ幅である。

(2) 繰返し塑性履歴がひずみ照査法による耐震性能照査結果に及ぼす影響

上述の 2. (1) のファイバーモデル解析から求まる推定値をもとに、繰返し塑性履歴がひずみ照査法による照査結果に及ぼす影響について検討を行った。

図-4 は実験・解析結果の最大水平荷重時変位 δ_m と、式(1)によりファイバーモデル解析から求まる推定値 δ_m^f を比較したものであり、図-5 は実験・解析結果の最大水平荷重時変位 δ_m と、式(2)によりファイバーモデル解析から求まる推定値 δ_m^f を比較したものである。(a) はプッシュオーバー解析における比較、(b) は繰返し荷重解析における比較、(c) はプッシュオーバー解析と繰返し荷重解析から求まる推定値を比較したものである。

式(1)による水平変位の推定精度に関しては、図-4(a) からプッシュオーバー解析における推定値 δ_m^f と実験・解析結果の δ_m の誤差は $\pm 20\%$ 程度の範囲にあることがわかる。図-4(b) から繰返し荷重解析における推定値 δ_m^f と実験・解析結果の δ_m の誤差は $40\% \sim 10\%$ 程度の範囲あることがわかる。さらに、図-4(c) から、プッシュオーバー解析における推定値 δ_m^f と、繰返し荷重解析における推定値 δ_m^f の間には、 $40\% \sim 0\%$ 程度の差があること

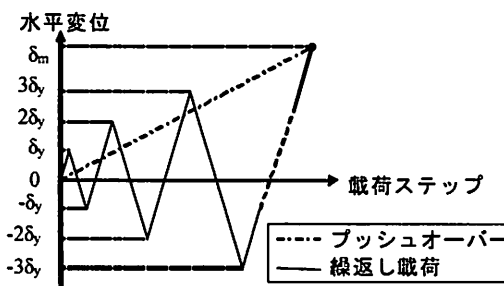


図-1 荷重パターン

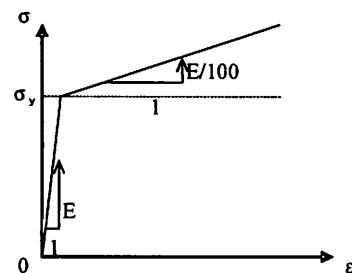


図-2 鋼材の構成則(矩形断面)

がわかる。

同様に式(2)による水平変位の推定精度に関しても、図-5(a)からプッシュオーバー解析における推定値 δ_m^f と実験・解析結果の δ_m の誤差は-30%~+10%程度の範囲にあることがわかる。図-5(b)から繰返し載荷解析における推定値 δ_m^f と実験結果の δ_m の誤差は-50%~+0%程度

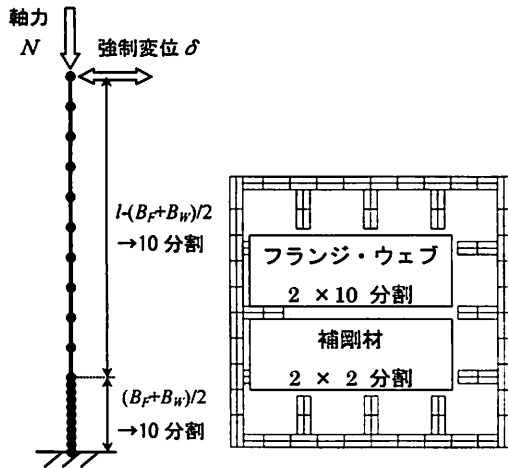


図-3 解析モデル (矩形断面)

の範囲あることがわかる。さらに、図-5(c)から、プッシュオーバー解析における推定値 δ_m^f と、繰返し載荷解析における推定値 δ_m^f の間には、-40%~0%程度の差があることがわかる。よって、式(1)、式(2)等の許容平均ひずみを用いたひずみ照査法による推定値 δ_m^f は繰返し塑性履歴の影響を受けやすく、繰返し塑性履歴を受ける鋼部材に対しては耐震性能を過小に評価してしまう可能性がある。

なお、式(1)、式(2)による水平荷重推定の精度に関しては、実験・解析結果の最大水平荷重 P_{max} とプッシュオーバー解析および繰返し載荷解析から得られる最大水平荷重の推定値 P_{max}^f の差は±5%程度の範囲、プッシュオーバー解析から求まる推定値 P_{max}^f と繰返し解析から求まる推定値 P_{max}^f の差は±5%程度の範囲にあり、繰返し塑性履歴が推定値 P_{max}^f に及ぼす影響および実験・解析結果と推定値の誤差は、いずれも小さかったことを報告しておく。

以上のことより、ファイバーモデルを使用した非線形時刻歴応答解析による鋼部材の耐震性能照査で、プッシュオーバー解析を基に算出したひずみの許容値により耐震性能を照査した場合、鋼部材の耐震性能を過度に安全

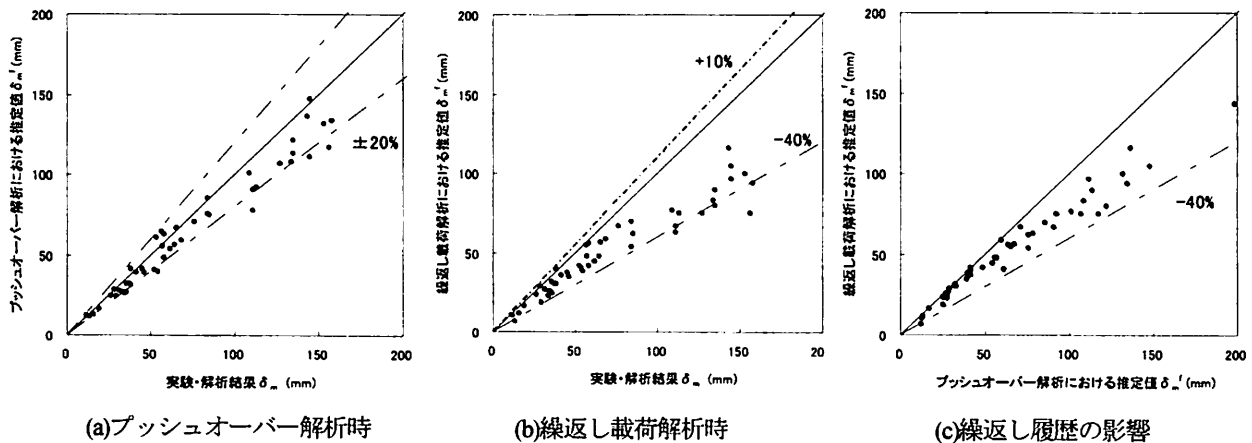


図-4 式(1)の最大水平荷重時変位推定の妥当性

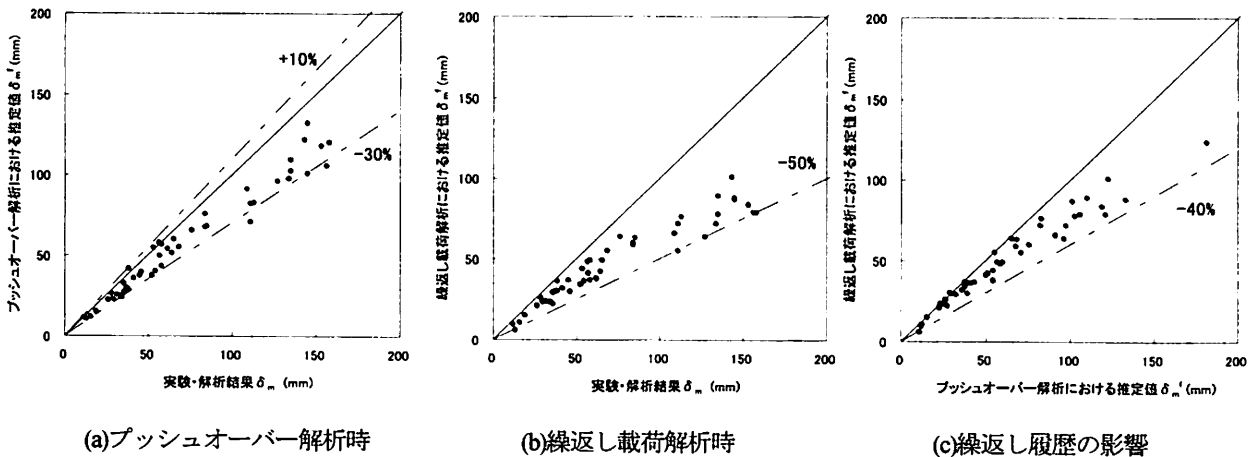


図-5 式(2)の最大水平荷重時変位推定の妥当性

側に評価してしまう可能性がある。

3. 断面力照査法の提案とその妥当性

本章では、繰返し塑性履歴の影響を受けにくい指標として断面力に着目した。そして、正方形断面鋼部材、円形断面鋼部材を対象に断面力を指標した照査法である断面力照査法の提案を行うとともに、その妥当性の検証を行った。なお、本論文における検討および提案する断面力照査法については、その有効性の確認を主目的としている。よって、本論文で断面力照査法の検討対象とした供試体が少ないこともあり、断面力照査法については、今後、詳細な検討を行い、より合理的な評価式の提案を行う予定である。特に、円形断面については、矩形断面と比較しても対象とした供試体数が少ないことから、構成則、要素分割等も含め検討を行う予定である。

(1) 断面力

断面力は、骨組解析において節点力から算出され、非線形履歴モデル ($M-\phi$ 関係、 $M-\theta$ 関係、 $\sigma-\epsilon$ 関係等) によらず算出される値である。よって、本論文で対象としたファイバーモデルのみだけでなく、非線形履歴モデルの種類に依存せず利用できる可能性のある指標である。さらに断面力は、ひずみ照査法のようにあらかじめひずみ評価領域を設定する必要がなく、部材の断面毎に照査を行えばよいと、実務設計における利便性も高いと考えられる。文献 13)でも断面力が繰返し塑性履歴の影響を受けにくいことを指摘しており、断面力を指標とした照査法の有効性について検討しているが、具体的な照査法の提案は行っていない。

ところで、図-6 に示すように、水平荷重 P は、特に最大水平荷重付近において、水平荷重の変化量に対して水平変位の変化量は大きなものとなっている。既往の研究⁷⁾⁹⁾において、実験・解析結果と推定式を比較した場合、水平荷重にくらべて水平変位のばらつきが大きくなっているのは、このことが要因の1つであると考えられる。よって、本章では、断面力(耐力)に着目した耐震性能照査法の提案を行う場合にも、変形性能(変位)に関する照査結果の精度にも着目することとした。

(2) 断面力照査法の提案

a) 限界状態、限界値の設定

断面力照査法の場合も鋼部材の耐震設計上の限界状態としては、文献 1)、7)と同様に最大水平荷重時とした。

ところで、既往の研究の多くは、耐震設計上の限界状態に対応する最大水平荷重、最大水平荷重時変位等の値を実験またはシェル要素を用いた有限要素解析(以下、

「シェル解析」という)から求め、それらの値を使って回帰計算等により耐震性能照査式の提案を行っている。断面力照査法の検討を行った文献13)でも、シェル解析から得られる断面力を基に、検討を行っている。

しかしながら、断面力は図-6に示すように断面力 M の限界値の微小な変化で、変位の照査結果が大きく変わることが予想される。以上のことから本研究では、断面力を指標する場合であっても、最大水平荷重時変位の推定値 δ_m' と実験結果の最大水平荷重時変位 δ_m との誤差を小さくすることを目的として、ファイバーモデル解析から得られる水平荷重作用位置での水平変位が実験結果から得られる最大水平荷重時変位 δ_m に達した時の、供試体、解析モデル基部の断面力(N_m , M_m)を抽出し、その断面力(N_m , M_m)をもとに、許容値の算出式の提案を行うこととした。ここで、 N_m は供試体、解析モデルに作用する軸力、 M_m は最大水平荷重時変位に達した時のファイバーモデル解析から求まる供試体、解析モデルの基部に発生する曲げモーメントである。

b) 検討手法

矩形断面の鋼材の構成則、解析モデルおよび要素分割は2.(1)と同様にした。円形断面については、以下の通りとした。

- ・ 鋼材の構成則は、図-7 に示す 2 次勾配 E/50 のバイリニア型とした。2 次勾配を E/50 としたのは、最大水平荷重に関して 2 次勾配を E/50 とした場合の解析結果と実験結果が良い一致を示したためである。
- ・ 解析モデルの要素分割を図-8 に示す。図-8 に示すように、高さ方向については、基部から直径 D の領域を 10 分割、その他の部分を 10 分割とした。断面内の要素分割については、板厚方向に 2 分割、円周方向に 64 分割とした。

また、断面力照査法の検討では、矩形断面、円形断面とも文献 11)に示される以下の供試体を対象とした。

(矩形断面) No.2, No.18, No.20, T1, B1, KD1, KD2, KD3, KD5, KD6, KD7-1, KD-10, M18, M20, M21, M22

(円形断面) No.6, T-7, KC-2_3, KC-1

載荷パターンについては、文献 7)と同様にプッシュオーバー解析とし、プッシュオーバー解析から得られる供試体基部の断面力(N_m , M_m)を抽出した。また後述の 3. (3) 節の妥当性の検証では、載荷パターンの違いが断面力照査法による照査結果に与える影響について検討するため、プッシュオーバー解析および繰返し載荷解析を行った。

c) 断面力照査法の提案

既往の研究¹⁴⁾で報告されている軸力と曲げモーメントが作用する部材に対する終局強度相関式としては、式

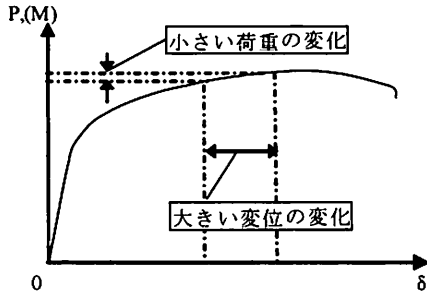


図-6 荷重照査法における変位の敏感性

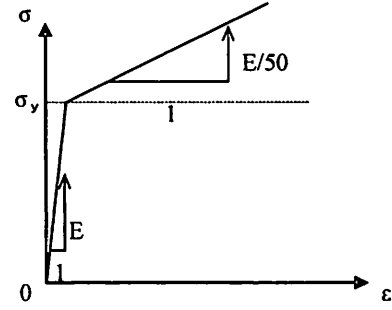


図-7 鋼材の構成則 (円形断面)

(3)のような形が多く見られる。本論文でも同様に式(3)の形を基本とした。

$$\left(\frac{N}{N_u}\right)^{\xi_1} + \left(\frac{M}{M_u}\right)^{\xi_2} = 1.0 \quad (3)$$

ここで、 N ：軸力、 M ：曲げモーメント、 N_u ：終局圧縮強度、 M_u ：終局曲げモーメント、 ξ_1 、 ξ_2 ：未知定数
 N_u の設定については、設計上の利便性を考慮し、既往の研究から柱の終局圧縮強度の高精度の予測が可能とされている Q-factor 法¹⁹⁾を用い式(4)のように表現することにした。

$$N_u = Q \cdot f(\sqrt{Q} \cdot \bar{\lambda}) N_y \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{矩形断面の場合：} Q &= \frac{\sigma_d}{\sigma_y} \quad (5) \\ &= \begin{cases} 1.0 & (R_R \leq 0.571) \\ 0.968/R_R - 0.286/R_R^2 + 0.0338/R_R^3 & (R_R \geq 0.571) \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{円形断面の場合：} Q &= \frac{\sigma_d}{\sigma_y} \quad (6) \\ &= \begin{cases} 1.0 & (R_i \leq 0.119) \\ 0.723 + 0.0330/R_i & (0.119 \leq R_i \leq 0.355) \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(\bar{\lambda}) &= \frac{\sigma_{\alpha}}{\sigma_y} \quad (7) \\ &= \begin{cases} 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \left[\frac{1 + 0.089(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2}{-\sqrt{1 + 0.089(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2}} - 4\bar{\lambda}^2 \right] & (\bar{\lambda} \geq 0.2) \end{cases} \end{aligned}$$

ここで、 Q ：式(5)、式(6)による局部座屈強度、 $f(\sqrt{Q} \cdot \bar{\lambda})$ ：式(7)による全体座屈強度、 N_y ：降伏軸力、 R_F ：幅厚比パラメータ、 $\bar{\lambda}$ ：細長比パラメータ、 R_i ：径厚比パラメータ

M_u については、本論文では「基本曲げ強度」と称することにし、橋脚部材のように三角形分布の曲げモーメントを受ける鋼部材の耐震性能に影響を及ぼすパラメータを含んだ形を与えた。正方形断面鋼部材に対しては式(8)、円形断面鋼部材に対しては式(9)のような形を与え

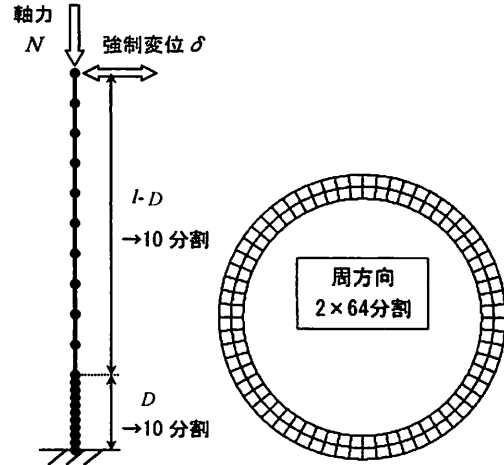


図-8 解析モデル (円形)

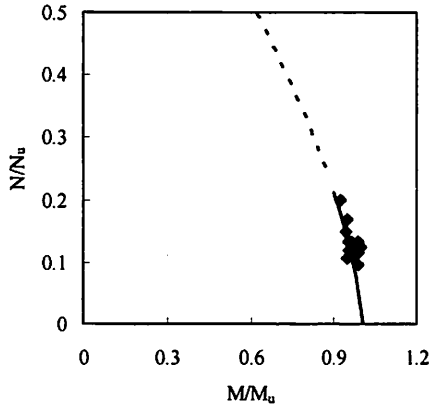
た。

$$M_u = \frac{c_1 \alpha c_2 (\gamma_t / \gamma_i)^{c_3}}{(h/B_F)^{c_4} R_R^{c_5} R_F^{c_6}} M_p \quad (8)$$

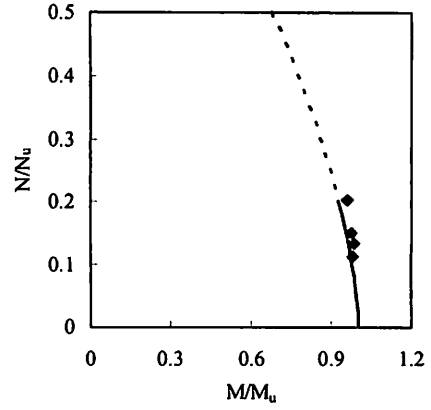
$$M_u = \frac{c_7}{(h/D)^{c_8} R_i^{c_9}} M_p \quad (9)$$

ここで、 $c_1 \sim c_9$ ：未知定数、 M_p ：ひずみ硬化を考慮しない全塑性曲げモーメント、 h ：照査断面から曲げモーメント分布においてゼロとなる点までの距離（橋脚の場合は水平荷重作用位置から基部までの高さ）。

まず 3. (2) a) で述べたように、それぞれの供試体についてファイバーモデル解析から得られる水平変位が実験結果 δ_m に達した時の供試体基部の断面力 (N_m , M_m) を求める。次に、その値を式(3)の (N , M) に代入し、式(3)の左辺の値の標準偏差が小さくなるように式(8)、式(9)の M_u に含まれる未知数 $c_1 \sim c_9$ 、式(3)の未知数 ξ_1 、 ξ_2 の値を決定した。以上より、断面力照査法に用いる照査式として、正方形断面鋼部材に対して以下の式(10)、式(11)を提案する。なおこれらの式は、実験結果に対して平均値相当の式となっている。



(a) 式(10)と (N_m, M_m) の比較 (矩形断面)



(b) 式(11)と (N_m, M_m) の比較 (円形断面)

図-9 断面力照査式と (N_m, M_m) の比較

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{N}{N_u} \right)^{1.6} + \left(\frac{M}{M_u} \right)^{0.82} = 1.0 \\ M_u = \frac{1.07 \alpha^{0.03} (\gamma_i / \gamma_i^*)^{0.03}}{(h/B_F)^{0.07} R_R^{0.14} R_F^{0.03}} M_p \end{array} \right. \quad (10)$$

ここで、 N ：応答軸力、 M ：応答曲げモーメント、 N_u ：式(4)により求められる連成座屈強度、 M_u ：基本曲げ強度

対象とした実験供試体の構造パラメータを考慮すると上記の式(10)の適用範囲は概ね次の通りである。

$$0.0 \leq N/N_u \leq 0.2, \quad 0.5 \leq \alpha \leq 1.5, \quad 1.0 \leq \gamma_i / \gamma_i^* \leq 15, \quad 0.3 \leq R_F \leq 0.5, \quad 0.3 \leq R_R \leq 0.5, \quad B_W/B_F \approx 1.0$$

また、円形断面鋼部材に対しては、以下の式(11)を提案する。なおこれらの式は、実験結果に対して平均値相当の式となっている。

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{N}{N_u} \right)^{1.64} + \left(\frac{M}{M_u} \right)^{1.0} = 1.0 \\ M_u = \frac{0.91}{(h/D)^{0.03} R_i^{0.11}} M_p \end{array} \right. \quad (11)$$

ここで、 D ：直径（外径）

対象とした実験供試体の構造パラメータを考慮すると上記の式(11)の適用範囲は概ね次の通りである。

$$0.0 \leq N/N_u \leq 0.2, \quad 2.7 \leq h/D \leq 6.4, \quad 0.03 \leq R_i \leq 0.08$$

図-9 に式(10)、式(11)と実験結果の (N_m, M_m) を比較したものを示す。図の縦軸は N/N_u 、横軸は M/M_u である。図から式(10)および式(11)は限界状態時の断面力の傾向をよく表現できていると言える。また、以下の式(12)は、式(10)と比較して、実験結果等に対して安全側の評価を与える式となっている。

$$\left(\frac{N}{N_u} \right)^{1.6} + \left(\frac{M}{M_u} \right)^{0.82} = 0.985 \quad (12)$$

(3) 断面力照査法の妥当性の検証

式(10)～式(12)によりファイバーモデル解析から求まる推定値と 3. (2) b) に記載されている実験結果を比較した。ここで、ファイバーモデル解析から求まる推定値 δ_m^f 、 $P_{\max}^f$ は、ファイバーモデル解析から得られる解析モデル基部の軸力、曲げモーメントが式(10)～式(12)の条件を満足した時の水平荷重、水平荷重作用位置の水平変位である。

図-10 は正方形断面鋼部材について、実験結果の最大水平荷重時変位 δ_m と、式(10)によりファイバーモデル解析から求まる推定値 δ_m^f を比較したものであり、図-11 は円形断面鋼部材について、実験結果の最大水平荷重時変位 δ_m と、式(11)によりファイバーモデル解析から求まる推定値 δ_m^f を比較したものである。(a)はプッシュオーバー解析における比較、(b)は繰返し載荷解析における比較、(c)はプッシュオーバー解析と繰返し載荷解析から求まる推定値を比較したものである。

正方形断面鋼部材の水平変位推定の精度に関しては、図-10(a)から、プッシュオーバー解析における推定値 δ_m^f と実験結果の δ_m の誤差は $\pm 20\%$ 程度の範囲にあることがわかる。図-10(b)から繰返し載荷解析における推定値 δ_m^f と実験結果の δ_m の誤差は $-30\% \sim +10\%$ 程度の範囲にあることがわかる。図-10(c)から、プッシュオーバー解析における推定値 δ_m^f と繰返し載荷解析における推定値 δ_m^f の間に $0\% \sim 10\%$ 程度の差があり、式(1)のひずみ照査法と比較して、繰返し塑性履歴の影響が若干ではあるが見られるが、式(1)による図-4(c)と比較するとその影響が小さいことがわかる。

円形断面鋼部材の水平変位推定の精度に関しては、図-11(a)から、プッシュオーバー解析における推定値 δ_m^f と実験結果の δ_m の誤差は $-20\% \sim 0\%$ 程度の範囲にあることがわかる。図-11(b)から繰返し載荷解析における推定値 δ_m^f と実験結果の δ_m の誤差は $-20\% \sim 0\%$ 程度の範囲にあることがわかる。図-11(c)から、プッシュオーバー解析における推定値 δ_m^f と繰返し載荷解析における推定値 δ_m^f の間に $0\% \sim 5\%$ 程度の差があり、式(10)と同様に繰

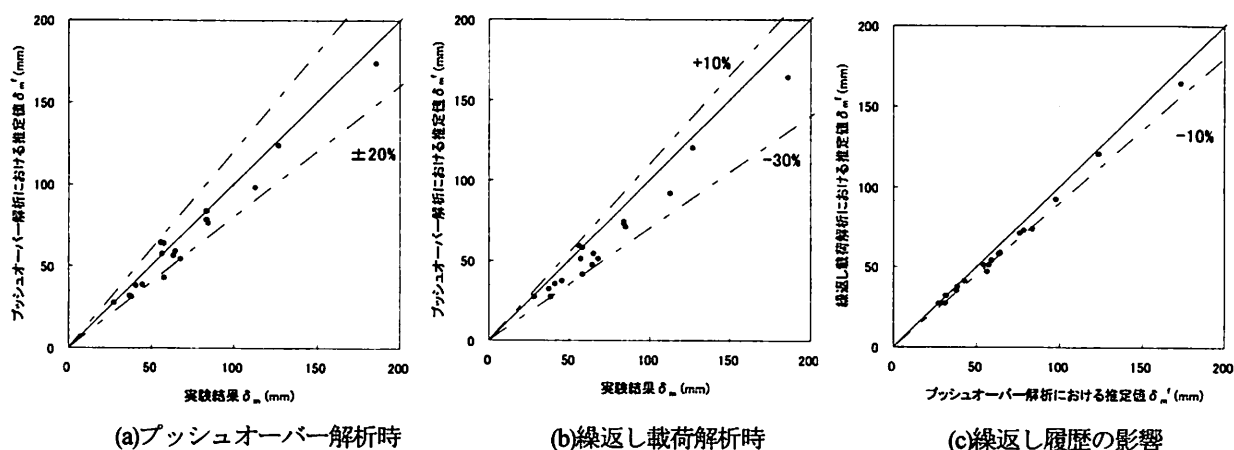


図-10 式(10)の最大水平荷重時変位推定の妥当性

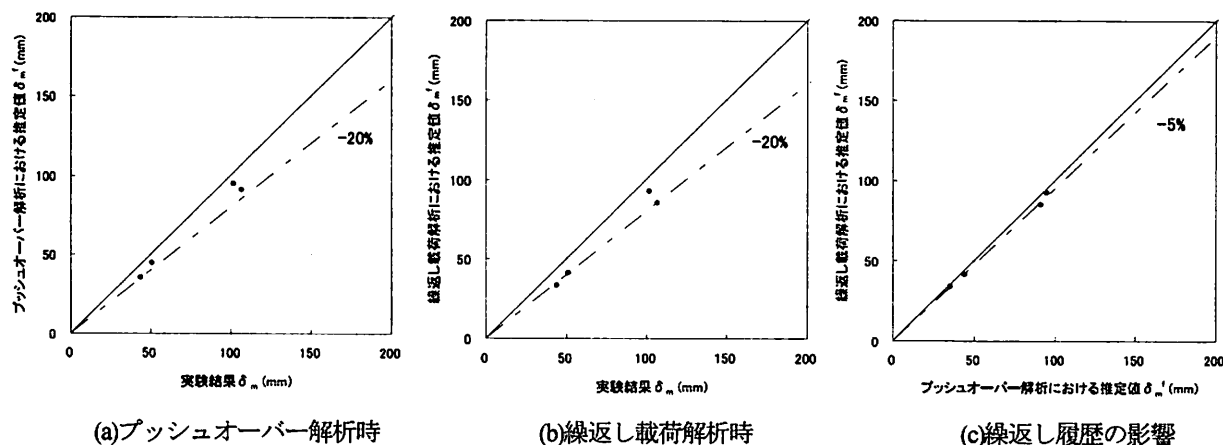


図-11 式(11)の最大水平荷重時変位推定の妥当性

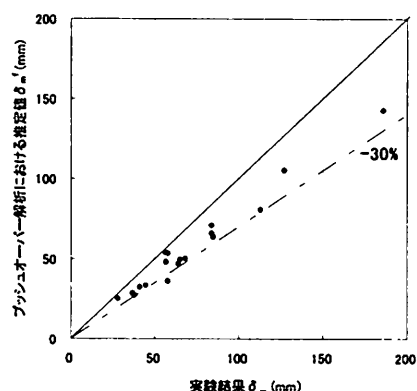


図-12 式(12)の最大水平荷重時変位推定の妥当性

返し履歴の影響をほとんど受けておらず、式(11)が鋼部材の耐震性能を適切に評価できることが分かる。

次に、図-12 は実験結果の δ_m と式(12)によりファイバーモデル解析から求まる推定値 δ_m^f を比較したものである。載荷パターンはプッシュオーバー解析のみとした。図から式(12)は水平変位に対して-30%~0%の誤差で推定できており、当初想定した通り式(10)と比較して安全側に評価していることがわかる。

なお、式(10)~式(12)による水平荷重推定の精度に関しては、実験結果の最大水平荷重 $P_{\max}$ とプッシュオーバー解析および繰返し載荷解析から得られる最大水平荷重の推定値 $P_{\max}^f$ の差は±5%程度の範囲、プッシュオーバー解析から求まる推定値 $P_{\max}^f$ と繰返し解析から求まる推定値 $P_{\max}^f$ の差は±5%程度の範囲にあり、繰返し塑性履歴が推定値 $P_{\max}^f$ に及ぼす影響および実験結果と推定値の誤差は、いずれも小さかったことを報告しておく。

以上より、式(10)~式(12)の断面力照査法は、プッシュオーバー解析において式(1)のひずみ照査法とほぼ同等の十分な精度を有しており、繰返し載荷解析において式(1)のひずみ照査法と比較すると繰返し塑性履歴の影響を受けにくく、繰返し塑性履歴の影響を受けにくいといった鋼部材の耐震性能を適切に評価できていることがわかる。

4. 結論

本論文では、ファイバーモデルを用いた適切で合理的な鋼部材の耐震性能照査法として、正方形断面および円形断面を有する補剛鋼部材を対象に、繰返し塑性履歴の影響を受けにくい指標である断面力を用いた耐震性能照

査法の提案を行うため検討を行った。本論文で得られた知見は以下の通りである。

- ・著者らの既往の研究で提案されたプッシュオーバー解析結果を基に算出されたひずみの許容値を使用したファイバーモデルによるひずみ照査法は、鋼部材の繰返し塑性履歴の影響を受けやすく、鋼部材の耐震性能を過度に安全側に評価をする可能性がある。
- ・断面力である曲げモーメントは鋼部材の繰返し塑性履歴の影響を受けにくい。この特性は、耐震設計上の限界状態を最大水平荷重時とした場合、最大水平荷重および最大水平荷重時変位といった耐震性能を示す指標が繰返し塑性履歴の影響を受けにくいという鋼部材の特性と同じであり、繰返し塑性履歴を受ける鋼部材の耐震性能照査指標として適していると考えられる。
- ・正方形、円形断面鋼部材を対象に断面力を指標とした耐震性能照査法を提案した。そして、既往の実験結果と提案手法による推定値との比較により、断面力照査法の有効性を確認した。さらに、提案手法による照査結果が繰返し塑性履歴の影響を受けにくく、繰返し塑性履歴の影響を受けにくいという鋼部材の耐震性能を適切に評価できることを明かにした。

なお、本論文で検討をおこなった断面力照査法については、本論文の検討結果を基に、今後、詳細な検討を行い、より合理的で適切な耐震性能照査法の提案を行う予定である。

謝辞

本研究は「平成20年度鋼構造研究・教育助成事業（土木学生研究）」の一環として行ったものであります。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2002。
- 2) 野中哲也，宇佐美勉，吉野広一，坂本佳子，鳥越卓志：上路式鋼アーチ橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究，土木学会論文集，No.731/I-63，pp.31-49，2003。
- 3) 福永勉，遠藤和男：明石海峡大橋の大規模地震動に対する耐震性能照査，本四技報，Vol.33，No.111，pp.24-28，2008。
- 4) 安永日，松村政秀，北田俊行：曲げおよびねじり

が同時に作用するコンクリート充填矩形断面鋼管のファイバー応力-ひずみ関係に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol.14，No.54，pp.69-81，2007。

- 5) 葛漠彬，河野豪，宇佐美勉：圧縮と曲げを受ける鋼部材セグメントの終局ひずみと鋼アーチ橋の動的耐震照査への応用，構造工学論文集，Vol.50A，pp.1479-1488，2004。
- 6) (社)日本鋼構造協会：鋼橋の耐震設計・制震ガイドライン，技報堂出版，2006。
- 7) 小野潔，橋本亮，西村宣男，山口栄輝：ファイバーモデルを用いた補剛矩形断面鋼部材の耐震性能照査法に関する一提案，橋梁と基礎，Vol. 41，No. 6，pp.26-33，2007。
- 8) 小野潔，橋本亮，西村宣男，山口栄輝：「ファイバーモデルを用いた補剛矩形断面鋼部材の耐震性能照査法に関する一提案」への討議に対する回答，橋梁と基礎，Vol. 42，No.3，pp.36-39，2008。
- 9) 橋本亮，小野潔，西村宣男：ファイバーモデルを用いた鋼製橋脚の耐震性能照査に関する一検討，鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，Vol.14，pp.129-136，2006。
- 10) 熊木幸，矢部正明：ファイバーモデルによる動的解析結果を用いた耐震性能照査に関する一考察，第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.153-160，2002。
- 11) 建設省土木研究所，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，鋼材倶楽部，日本橋梁建設協会：道路橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書（総括編），共同研究報告書第219号，1999。
- 12) 財地震工学研究開発センター：EERC/Fiber User's Manual，2007。
- 13) 奥村徹，後藤芳顕：鋼構造物におけるひずみ照査法と断面力照査法に関する一考察，第63回土木学会年次学術講演会講演概要集，1-475，pp.949-950，2008。
- 14) 西村宣男，笠原宏紹，菅田喜之：2軸曲げを受ける鋼はり-柱部材の相関強度式，土木学会論文集，No.428/I-15，pp.157-166，1991。
- 15) (社)土木学会：座屈設計ガイドライン，丸善，2005。