

# 鋼製R付箱形断面橋脚の耐震性について

林正挙\*, 山口栄輝\*\*, 後藤芳顯\*\*\*, 南野能克#, 久保喜延##

\*工修 九州工業大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

\*\*Ph. D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

\*\*\*工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

#九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

##工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

福岡都市高速1号線において、美観上の理由からコーナー部に曲率を有する箱形断面（R付箱形断面）の鋼製橋脚が提案された。しかしながら、R付箱形断面橋脚については、大地震に対する耐震設計を行うための基礎的資料が必ずしも十分に得られておらず、実橋脚の1/3.4の供試体を用いて実験が行われた。筆者らは、この実験結果に基づき、三曲面モデルを用いた複合非線形有限要素解析で載荷実験を精度良く再現できることを先に示した。本研究では、この解析法により、軸力比と細長比をパラメータとして、それらがR付箱形断面橋脚の強度と変形能に及ぼす影響を検討した。また、その結果を通常の箱形断面橋脚に対して提案された推定式と比較し、相関性のあることを示している。

Key Words: Steel bridge pier, Cyclic loading, Nonlinear finite element analysis, Local buckling

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、大地震時の変形挙動の把握が耐震設計上重要となり、単柱形式の鋼製橋脚については、実験的・解析的に数多くの研究がなされ耐震設計に関する有用な知見が多く得られている<sup>1)</sup>。鋼製橋脚の耐震性能を支配する因子には、橋脚を構成する板の幅厚比（または径厚比）、柱としての細長比、軸圧縮力、補剛材剛比、補剛材細長比などがある。葛らは鋼製パイプ断面橋脚と鋼製補剛箱形断面橋脚についてパラメトリック解析を行い、これらの因子が耐力と変形能に及ぼす影響を定量的に評価している<sup>2), 3)</sup>。さらにその結果に基づき、耐力と変形能の推定式を提案し、耐震設計に関する資料を提供している<sup>2), 3)</sup>。

美観上の理由から鋼製橋脚の断面形状としてコーナー部に曲率を有する断面（以下、R付箱形断面）が福岡都市高速1号線において採用された。R付箱形断面はこれまでも都市部で採用されているが、兵庫県南部地震レベルの大規模地震を想定した上での耐震性の検討事例はなかった。そこで、その耐震性に関する基礎的資料を得る目的で載荷実験が行われ、耐力、変形能などが検討された<sup>4)</sup>。

著者らはこの載荷実験結果をもとに、R付箱形断面橋脚の複合非線形有限要素解析を行い、構成則に三曲面モデル<sup>5)</sup>を用いれば、実験結果と良く一致した荷重

—変位関係、変形性状が得られることを報告している<sup>6)</sup>。また、この研究では補剛材剛比をパラメータとした解析も行っており、補剛材剛比の影響は最大耐力以降に顕著になることを明らかにしている。ただし、軸力比、細長比については、文献4)の実験供試体と同じ値のみを用いており、耐震設計を行うための資料としては必ずしも十分でない。

以上のことを踏まえて、本研究では、R付箱形断面橋脚の軸力比と細長比をパラメータとして、三曲面モデルを用いた複合非線形有限要素解析を行い、その耐力や変形能を検討する。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析モデル

本研究では、文献4)の実験供試体を基本橋脚とし、それをもとに細長比、軸力比を変化させて解析を行う。基本橋脚を図-1に示している。断面コーナー部は曲率半径142mmで丸みが付けられ、板厚はフランジ・ウェブで7mm、縦リブで8mmとなっている。使用鋼材はSM490Yである。一軸引張試験から図-2のような真応力—対数塑性ひずみ関係が得られているが、最大公称応力点以降はくびれが生じて変形が一様でないと考えられるため、その領域で真応力は一定値を取るとした。対称性を考慮して1/2のみを解析対象とし、柱基部

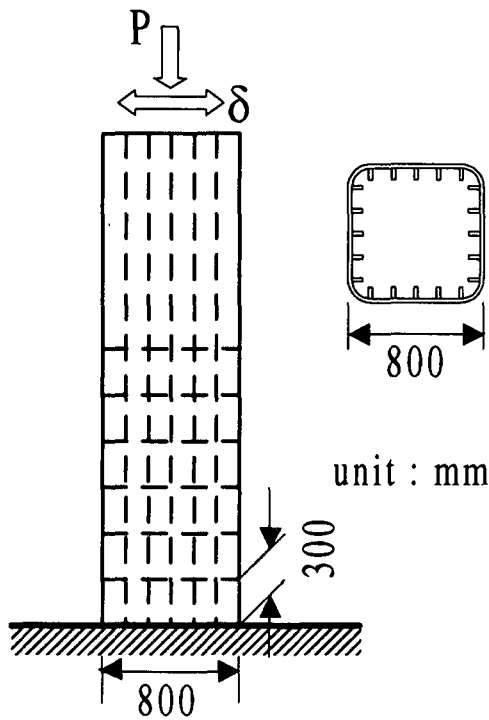


図-1 鋼製R付断面橋脚概略

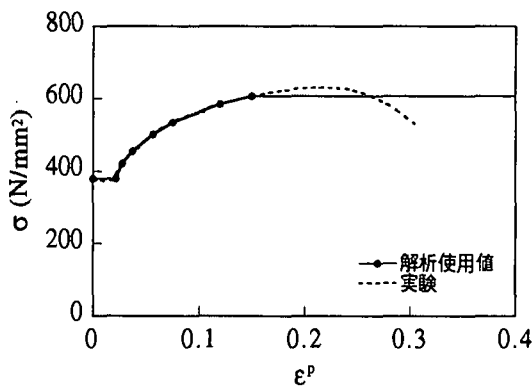


図-2 一軸引張応力下の材料挙動  
(真応力-対数塑性ひずみ関係)

から1800mmの高さまではシェル要素, 残りの部分は梁要素で要素分割を行う(図-3)。解析に用いた構成則は三曲面モデルであり, ユーザーサブルーチンとして汎用有限要素解析プログラムであるABAQUS<sup>7)</sup>に組み込んでいる。三曲面モデルの材料パラメータは図-2の一軸引張試験結果から定めた。

本研究では, 次式で定義される細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ と軸力比 $P/P_y$  ( $P_y$  = 全断面降伏軸力)を変化させてその影響を調べる。

$$\bar{\lambda} = \frac{\ell}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

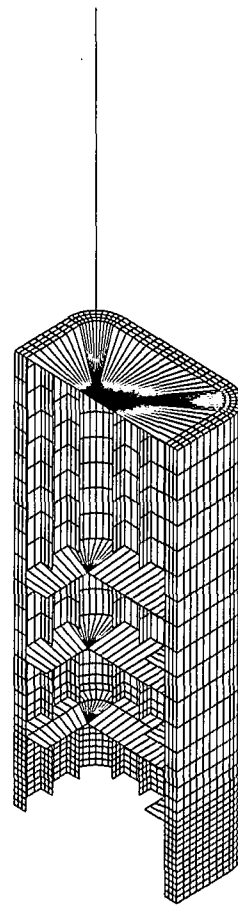


図-3 要素分割

ここに,  $\ell$  = 有効座屈長,  $r$  = 断面二次半径,  $\sigma_y$  = 降伏応力,  $E$  = 弾性係数である。なお, 断面は変更しないため, 補剛板(フランジ・ウェブ)の幅厚比 $R_f$ , 補剛材剛比 $\gamma/\gamma^*$  ( $\gamma^*$  = 線形座屈理論より求められる最適補剛材剛比)は基本橋脚と同じである。

細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ は0.200, 0.250, 0.289, 0.400, 0.500, 0.600の6ケース, 軸力比は各細長比について10%, 15%, 20%, 25%の4ケースを設定し, 合計24ケースの解析を行う。

## 2.2 荷条件

この種の荷条件実験で標準的に行われている方法に従い, 供試体を一定圧縮軸力 $P$ として作用させた上で, 繰り返し水平荷重 $H$ を準静的に作用させる水平交番荷重を採用する。水平荷重 $H$ の大きさは, 荷重点の水平変位 $\delta$ の振幅が $0 \rightarrow +\delta_y \rightarrow -\delta_y \rightarrow +2\delta_y \rightarrow -2\delta_y \rightarrow \dots$ と漸次増加しながら変化するように制御する。すなわち, 図-4からもわかるように, 各振幅における繰り返しは1回となっている。なお, 基本変位 $\delta_y$ は, 橋脚を片持梁と見なして求めた初期降伏水平変位である。

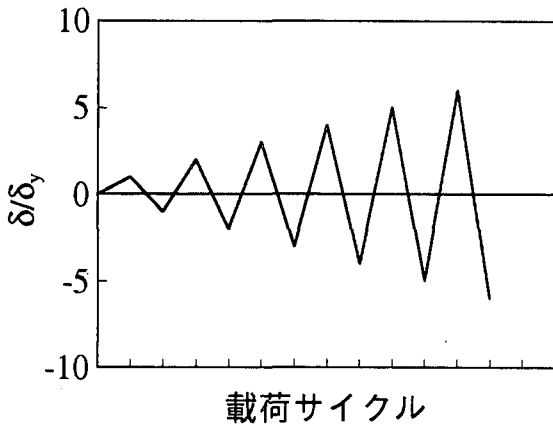
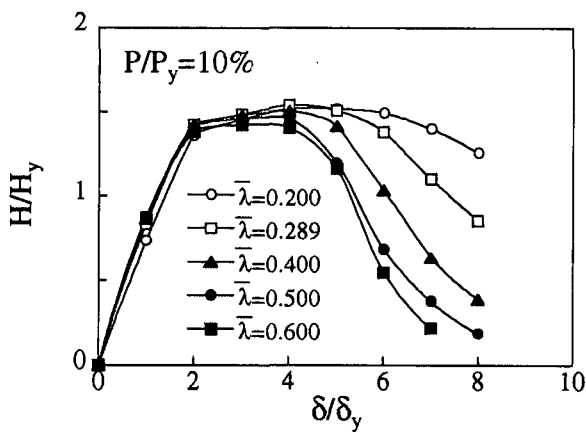
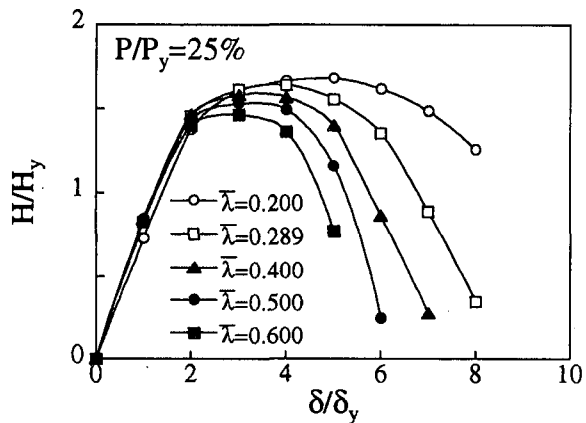


図-4 載荷点の水平変位履歴



(a)  $P/P_y = 10\%$



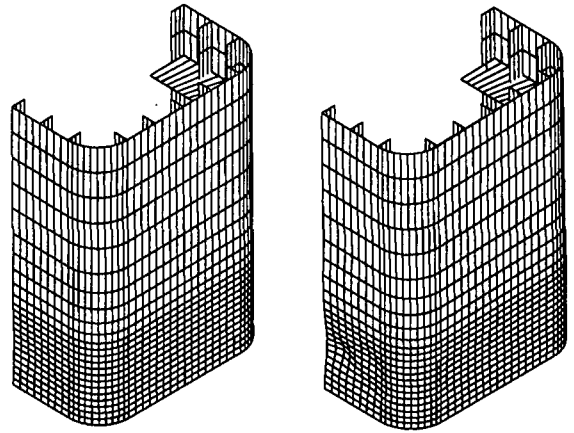
(b)  $P/P_y = 25\%$

図-5 細長比の影響

### 3. 解析結果および考察

#### 3.1 細長比の影響

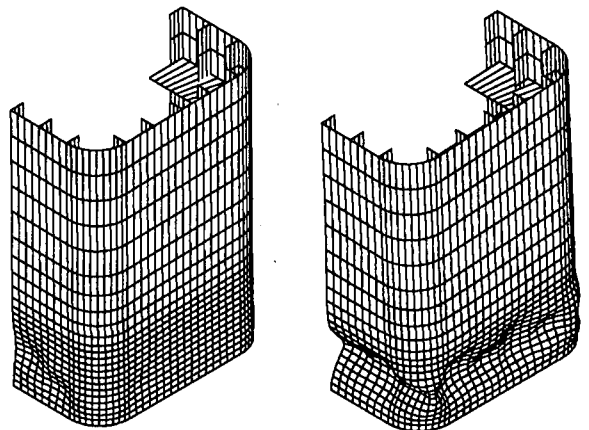
解析結果として、軸力比が10%と25%の場合における載荷点での水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を図-5に示している。図中、 $H_y$  は、橋脚を片持梁と見なして求めた初期降伏水平荷重である。この図から、



(a)  $4\delta_y$

(b)  $6\delta_y$

図-6 変形状 (λ-bar = 0.200)



(a)  $4\delta_y$

(b)  $6\delta_y$

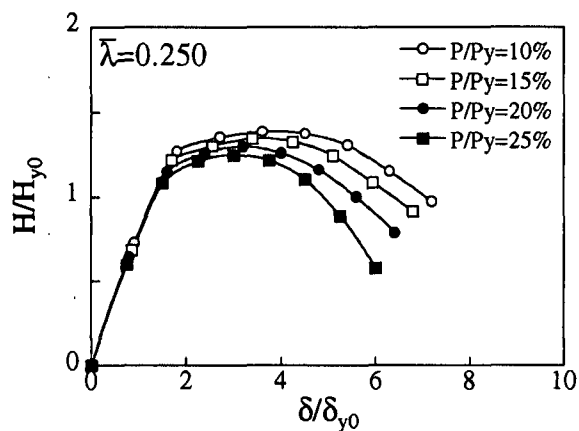
図-7 変形状 (λ-bar = 0.600)

細長比が大きくなるにつれて、最大耐力およびそれに対応する水平変位が小さくなること、最大耐力以降の耐力低下の割合が大きくなることが理解される。特に、後者については細長比の影響が顕著に表れており、軸力比が大きくなるにつれてその傾向が強くなっている。

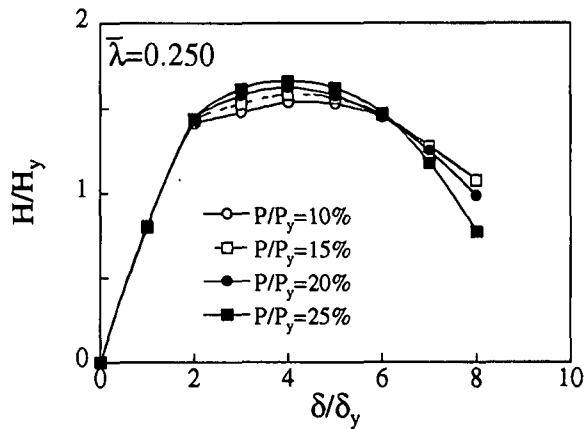
軸力比が15%の場合の変形状を図-6, 7に示している。細長比の大きい方が面外変形の生じ方も大きく、そのことが荷重-変位曲線の包絡線形状の違いになって現れていると考えられる。

#### 3.2 軸力比の影響

解析結果として、細長比パラメータが0.250と0.600の場合の水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を図-8, 9に示している。図-8(a), 9(a)で用いている  $H_{y0}$  と  $\delta_{y0}$  は、それぞれ軸力がゼロの場合における初期降伏水平荷重、初期降伏水平変位である。

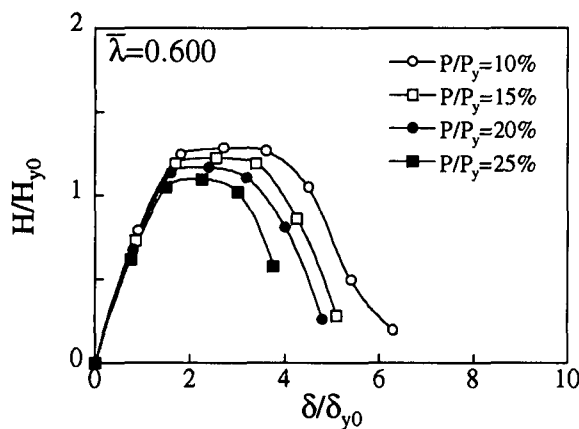


(a)  $H_{y0}$ ,  $\delta_{y0}$  による無次元化

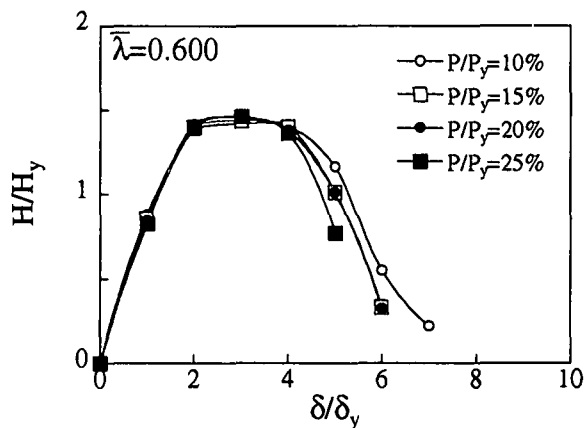


(b)  $H_y$ ,  $\delta_y$  による無次元化

図-8 軸力比の影響 ( $\bar{\lambda} = 0.250$ )



(a)  $H_{y0}$ ,  $\delta_{y0}$  による無次元化



(b)  $H_y$ ,  $\delta_y$  による無次元化

図-9 軸力比の影響 ( $\bar{\lambda} = 0.600$ )

図-8 (a), 9 (a)を見ると、軸力比が大きくなるにつれて、最大耐力および対応する水平変位が減少することが理解される。しかしながら、 $H_y$ と $\delta_y$ で無次元化すると、図-8 (b), 9 (b)に示すように、軸力比の影響は小さくなる。特に、細長比が0.600の場合、 $H_y$ と $\delta_y$ で無次元化すれば、最大耐力点を越えて若干耐力が低下する点まで、軸力比の影響はほとんど見られなくなる(図-9 (b))。

### 3.3 箱形断面橋脚の推定式<sup>3)</sup>との比較

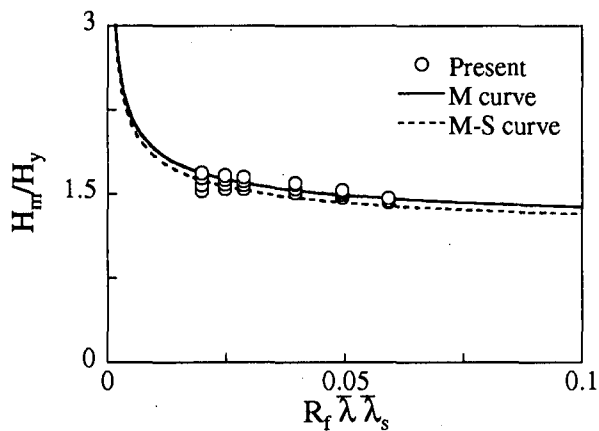
葛らは文献3)において、箱形断面橋脚の耐力と変形能の推定式を提案している。図-10に、推定式と本解析結果を示している。図中、M curveは箱形断面橋脚における平均値曲線、M-S curveは平均値曲線から標準偏差Sを差し引いた曲線である<sup>3)</sup>。また $H_m$ ,  $\delta_m$ ,  $\delta_{95}$ ,  $\bar{\lambda}_s$ は、それぞれ最大水平耐力、それに対応する水平変位、最大耐力の95%まで耐力が低下した点での水平変位、

補剛材細長比パラメータ<sup>3)</sup>を表している。

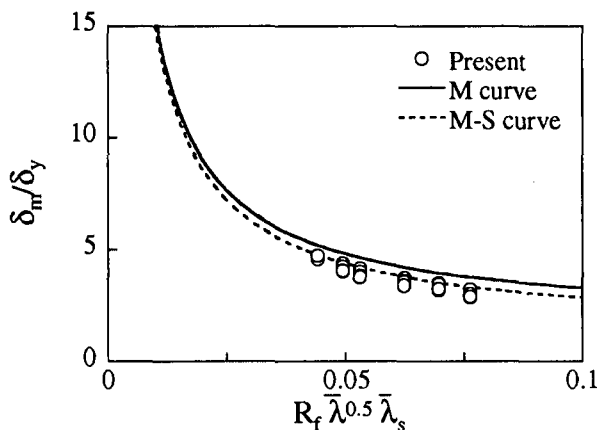
いずれの図でも、本解析結果は推定式とよい相関性のあることがわかる。このことは、吉崎らによる載荷実験結果において、箱形断面橋脚とR付箱形断面橋脚の耐力特性、変形能について顕著な差が見られなかったとの報告と合致している<sup>4)</sup>

### 4. まとめ

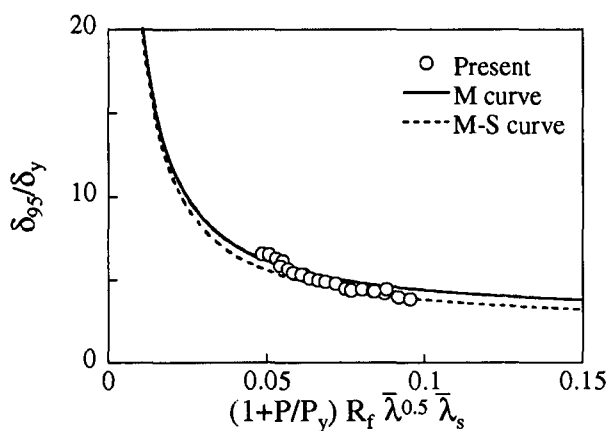
本研究では、構成則に三曲面モデルを用いて鋼製R付箱形断面橋脚の複合非線形解析を行った。断面構成は先に行われた載荷実験供試体と同じとし、細長比、軸力比を変化させてその影響を検討した。細長比、軸力比が大きくなるにつれて、耐力、変形能ともに低下するものの、初期降伏点での水平荷重、水平変位を用いて無次元化すれば、特に細長比の大きい領域において軸力比の影響はかなり小さくなることが明らかとなった。また、本解析で得られた耐力と変形能は、箱形断面橋脚の推定式とかなり良い相関性を有していた。



(a)  $H_m/H_y - R_f \bar{\lambda} \bar{\lambda}_s$  関係



(b)  $\delta_m/\delta_y - R_f \bar{\lambda}^{0.5} \bar{\lambda}_s$  関係



(c)  $\delta_{95}/\delta_y - (1+P/P_y) R_f \bar{\lambda}^{0.5} \bar{\lambda}_s$  関係

図-10 解析結果と推定式との比較

以上の結果を踏まえ、鋼製R付箱形断面橋脚の耐震特性について今後さらに検討していく予定である。

#### 謝辞

本研究は、平成8年度～平成9年度に福岡北九州高速道路公社に設置された「鋼製R付箱形断面橋脚柱の耐震性に関する検討会」での活動の延長として行ったものである。本研究の遂行に当たっては、検討会で行われた討議がたいへん参考になった。ここに記して関係各位に感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 耐震設計WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，土木学会（鋼構造委員会鋼構造新技術小委員会），1996年。
- 2) 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，pp181-190，1997年。
- 3) 葛漢彬，高聖彬，宇佐美勉：鋼製補剛箱形断面橋脚の繰返し弾塑性解析と耐震性評価，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，土木学会，pp.85-92，1997年。
- 4) 吉崎信之，村山隆之，安波博道，名取暢，辻治生：鋼製R付断面橋脚柱の耐震性に関する実験，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，土木学会，pp.339-346，1997年。
- 5) 後藤芳顯，王慶雲，高橋宣男，小畑誠：繰返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則，土木学会論文集，No.591/I-43，pp189-206，1998年。
- 6) 山口栄輝，後藤芳顯，阿部圭吾，林正挙，堂上幸男，吉崎信之：繰返し水平荷重を受ける鋼製R付断面橋脚の弾塑性有限変位解析，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，土木学会，pp.249-254，1998年。
- 7) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.5, 1995.

(1999年11月19日受付)

# ELASTIC-PLASTIC BEHAVIOR OF STEEL BRIDGE PIER OF BOX SECTION WITH ROUNDED CORNERS UNDER CYCLIC HORIZONTAL LOADING

Masataka HAYASHI, Eiki YAMAGUCHI, Yoshiaki GOTO, Yoshikatsu NANNO and Yoshinobu KUBO

From the aesthetic point of view, the construction of a steel bridge pier of a box section with rounded corners was planned. However, since its seismic resistance was not thoroughly understood, an experiment of the pier under cyclic horizontal loading was conducted. And we have established a finite element procedure to simulate the experiment with good accuracy. In the present study, by using the finite element procedure, we conduct the numerical analyses of this type of steel bridge pier to investigate the effects of the slenderness ratio and the axial compressive load. The numerical results thus obtained reveal that as the slenderness ratio increases, the load-carrying capacity and the ductility decrease. The same effects are found also for the axial compressive load. These numerical results are compared with the formula proposed for stiffened box-sectional steel bridge piers, and a good agreement is observed.