

# 円形断面を有する鋼製橋脚の変形性能評価方法に関する研究

渡邊英一\*, 堀江佳平\*\*, 新名 勉\*\*\*, 陵城成樹\*\*\*\*, 内田 諭\*\*\*\*\*

\*工博 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)  
 \*\*工修 阪神高速道路公団湾岸管理部 (〒550-0011 大阪市西区阿波座 2-1-1)  
 \*\*\*工修 阪神高速道路公団大阪建設局 (〒550-0006 大阪市西区江之子島 2-1-5)  
 \*\*\*\*工修 株式会社ニュージェック技術開発部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)  
 \*\*\*\*\*工修 株式会社ニュージェック技術開発部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

本研究は、これまで阪神高速道路公団が行ってきた大型実験結果をもとに、鋼材のひずみ硬化を考慮できる簡易解析モデルを提案し、この解析結果と実験結果とを比較して、鋼材のひずみ硬化が鋼製橋脚の変形性能に及ぼす影響を解析的に明らかにしている。この結果、円形断面を有する鋼製橋脚の終局状態（最高耐荷力点）が終局圧縮ひずみ  $\epsilon_u$  を定義することにより、簡易的に求められることが明らかになった。

つぎに、径厚比、および軸力比をパラメータとした解析結果を、終局曲げモーメントと曲率との関係について整理し、円形断面を有する鋼製橋脚の終局曲げモーメントと終局曲率の簡易推定法について検討している。

**Key Word** : steel bridge pier, circular cross section, ductility, ultimate curvature, section partition method, strain hardening

## 1. はじめに

兵庫県南部地震により被災した円形断面を有する鋼製橋脚の代表的な被災状況は、象足座屈であった。この座屈現象は大地震時にまず、圧縮縁端の外縁鋼板に局部座屈による面外変位が発生し、その後、地震時慣性力が繰り返し載荷され、この面外変位が全周に伝搬して生じるものである。この局部座屈は、断面変化点、および開口部（マンホール）等に発生しており、ほぼ全周にわたって亀裂が生じた橋脚も見られた。

円形断面橋脚の変形性能を向上させるためには矩形断面の場合と同様に、まず局部座屈を抑制すること、そして面外変位が橋脚全周に伝搬するモードを縦補剛材により抑制することが効果的であると考えられる。

そこで、本研究では、この縦補剛材が、円形断面を有する鋼製橋脚の変形性能に及ぼす影響を実験的に明らかにするため、正負交番載荷実験を行った。

そして、円形鋼製橋脚の変形性能評価法に関する一手法を実験的研究に基づいてまとめた。なお、本研究は建設省土木研究所との共同研究の一環として行われたものである<sup>1)~4)</sup>。

## 2. 正負交番載荷実験

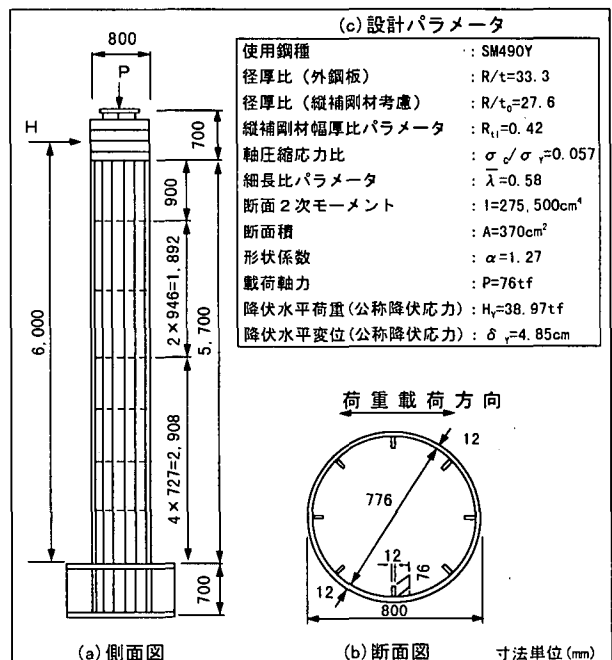
### 2.1 実験方法、および実験供試体

実験は、建設省土木研究所・部材耐震実験棟において実施された。また、荷重載荷方法は軸力  $P$  を載荷しながら

変位制御で行った。

本実験で用いた実験供試体 H9 を表-1 に示す。供試体 H9 は、局部座屈を抑制するため、幅厚比パラメータ  $R_t \leq 0.5$  を満足する縦補剛材が円筒内に 8 本設置されている。表中の  $t_0$  は、これらの縦補剛材の剛性を考慮した場合の等価板厚である。

表-1 実験供試体 H9



また、供試体 H9 は兵庫県南部地震により被災した鋼製橋脚の再構築に採用された橋脚の断面構成を忠実に縮尺 1/3 で再現したものである。

図-1 には荷重方法のパターンを示している。荷重方法は、両振り荷重であり、同一荷重変位における繰り返し荷重回数は 1 回である。

## 2.2 実験結果

図-2 には、供試体 H9 の荷重-変位曲線を示している。供試体 H9 は、降伏点以降、荷重変位  $2\delta_y$  に達するまで局部座屈による明確な面外変位は発生せず、耐力は上昇した。

荷重変位  $5\delta_y$  の時、局部座屈による面外変位が、供試体基部の圧縮応力状態にある外縁鋼板に約 10mm 程度の面外変位が観察され、耐力は緩やかに低下した。しかし、その座屈モードは、縦補剛材位置を節とするものであり、面外変位の円周方向への伝搬は縦補剛材位置で抑止されていた。

その後、荷重変位の増大に応じて、面外変位が増大し、供試体 H9 は崩壊した。座屈モードは崩壊時においても、縦補剛材位置を節とするモードを維持し、面外変位の円周方向への伝搬は観察されなかった。

これらのことは、鋼管の内側に設置した縦補剛材が、局部座屈の発生を抑制するとともに、局部座屈発生後も面外変位の円周方向への伝搬を抑止し、断面の形状保持に効果的であったことを示している。

また、最高耐力点以降の挙動は荷重荷重方法の影響を受けることが明らかになったが、矩形断面の鋼製橋脚の場合と比較して、その影響は小さいものであった。

## 3. 簡易モデルにおける静的解析

### 3.1 鋼製橋脚の曲げモーメント $M$ と曲率 $\phi$ との関係

解析モデルの断面は縦補剛材を等価な外縁鋼板の板厚に置き換えた無補剛断面である。等価板厚の算定においては、供試体の外形寸法を一定とし、断面 2 次モーメントを一定として算出している。

また、解析に使用した鋼材の応力とひずみとの関係はひずみ硬化を考慮したバイ・リニア型とした(図-3 参照)。図中の  $E$  は弾性係数を示し、 $E^*$  は塑性領域における鋼材の応力ひずみ曲線の勾配を示している(二次勾配)。

図-4 には、本解析において着目した弾塑性応力状態を示している。これらの中立軸  $z$  および抵抗曲げモーメント  $M_r$  の算出においては式(1)、および式(2)を満足するように求めた。

$$N = \int \sigma dA \quad \dots(1)$$

$$M_r = \int y \sigma dA \quad \dots(2)$$

ここで、 $N$ : 軸力、 $M_r$ : 抵抗曲げモーメント、 $y$ : 図心軸からの距離をそれぞれ示す。

なお、円形断面を有する鋼製橋脚の曲げモーメントと曲率との関係は、断面分割法により求めた。本解析においては、断面分割数を 400 としている。

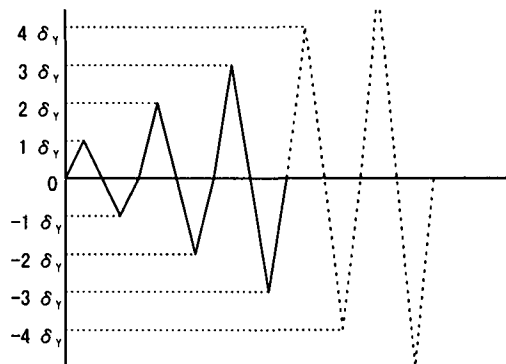


図-1 荷重荷重方法

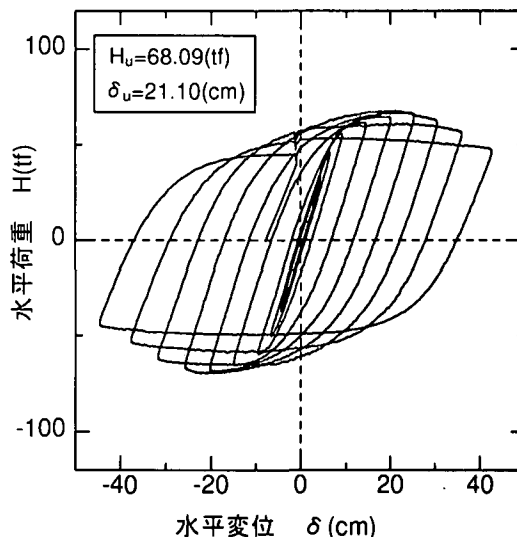


図-2 荷重-変位曲線

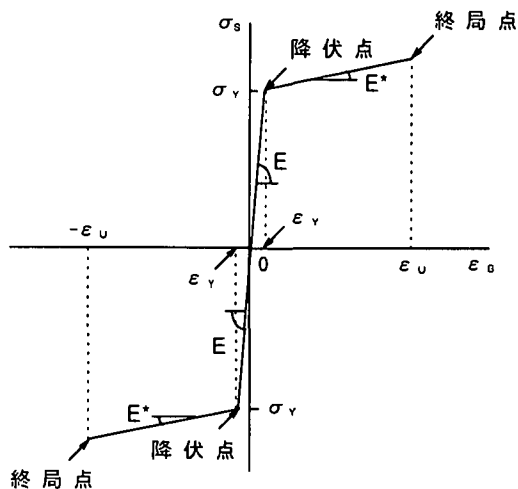


図-3 鋼材の応力とひずみの関係

これは薄肉断面を有する鋼製橋脚の場合、断面分割数を粗く設定した場合、式(1)、および式(2)により、断面の中立軸、および抵抗曲げモーメントを求める時に誤差が大きくなり、中立軸の位置が正確に求められない場合があるためである。

なお、本研究においては、円形断面を有する鋼製橋脚の終局状態として、荷重載荷方法の影響が小さい最高耐力力点とし、局部座屈は考慮していない。

### 3.2 水平荷重と変位との関係

道路橋示方書には、RC 橋脚を対象として、橋脚の終局状態を応力とひずみにより定義し水平荷重  $H$  と水平変位  $\delta$  を求めてエネルギー一定則により RC 橋脚の耐震性を照査する方法が規定されている<sup>5)</sup>。

ここでは、これと同様にして、次に挙げる仮定条件に基づいて鋼製橋脚の水平荷重  $H$  と水平変位  $\delta$  との関係解析的に求め実験結果との比較を行う。

- ① 供試体を片持ち梁としてモデル化し、付加曲げモーメントによる影響 (P- $\Delta$ 効果) は考慮しない。
- ② 供試体の薄肉補剛断面を無補剛断面に換算する。
- ③ 鋼材の応力とひずみの関係はひずみ硬化を考慮したバイ・リニア型とする。
- ④ 曲げモーメントにより断面内に生じる軸方向ひずみは中立軸からの距離に比例するものとする (平面保持の法則)。

また、供試体の水平荷重  $H$  と水平変位  $\delta$  は次にあげる方法により求めた。

- ① 圧縮縁の圧縮ひずみ  $\epsilon_y^*$  の値を与えて、供試体基部断面の終局曲げモーメント  $M_u^*$  を求め、供試体の高さ方向の曲げモーメント分布  $M_{(y)}$  を求める (図-5 参照)。このときの水平荷重  $H$  は  $M_u^*$  を荷重載荷位置までの高さ  $h$  で除して求める。
- ② 求めたモーメント分布  $M_{(y)}$  と対応する曲率分布  $\phi_{(y)}$  を求める (図-6 参照)。
- ③ 水平変位  $\delta$  は次式により求める。

$$\delta = \int \phi_{(y)} y dy \quad \dots(3)$$

なお、円形断面を有する鋼製橋脚の曲げモーメントと曲率との関係 (M- $\phi$  関係) において、降伏点以降、 $5 \phi_y$  に達する領域 (図-5、および図-6 斜線部) で、曲げモーメントの増大と比較して曲率が急増している。このため、鋼製橋脚の M- $\phi$  関係を求める時、この範囲の曲率と対応する曲げモーメントとの関係は、特に正確に求めなければならない。

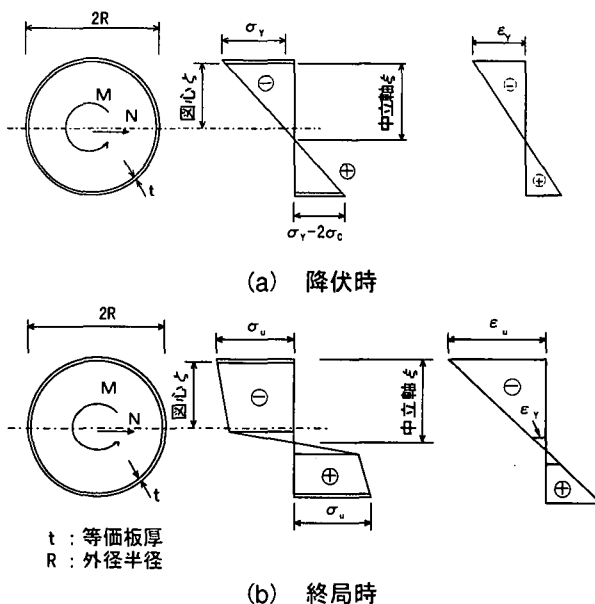


図-4 着目した応力状態

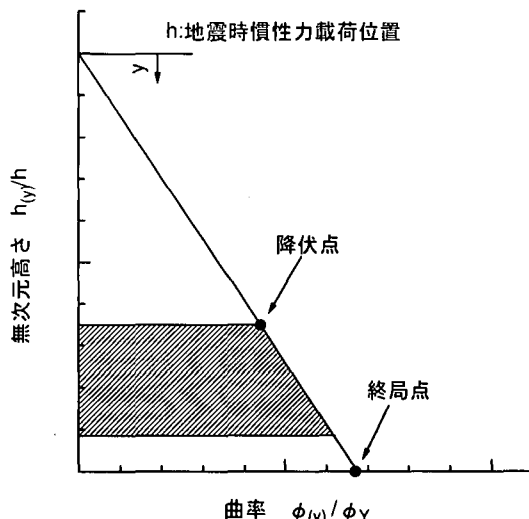


図-5 曲げモーメント分布 (概念図)

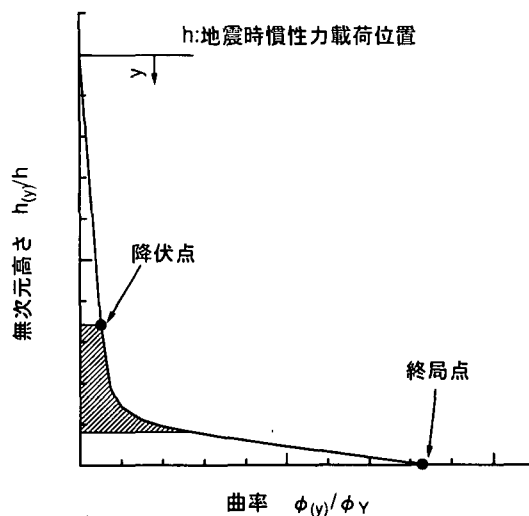


図-6 曲率分布 (概念図)

図-7には、解析結果(波線、および一点鎖線)と実験で得られた供試体 H9 の荷重-変位曲線の包絡線(実線)とを比較して示している。

最高耐荷力点において、実験値と解析値とを比較した場合、鋼材の2次勾配比  $E^*/E$  が 1/100 のとき、圧縮ひずみ  $\epsilon_u$  が  $17 \epsilon_Y$  に達したとき、解析値と実験値とがほぼ一致することが明らかとなった。

そして、鋼材の2次勾配比  $E^*/E$  が 1/150 の場合、圧縮ひずみ  $\epsilon_u$  が  $20 \epsilon_Y$  に達したとき、解析値は実験値をよく近似できることが明らかとなった。

また、最高耐荷力点以前の荷重と変位との関係において、実験値と解析値とを比較すると、解析値は実験値より、水平荷重値を大きく算定している。これは、本解析モデルでは残留応力を考慮していないからである。

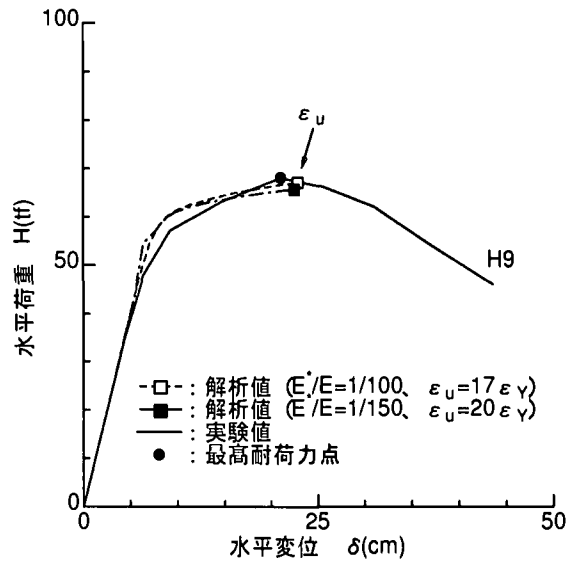


図-7 荷重-変位関係 (静的解析結果)

#### 4. 変形性能評価法

##### 4.1 弾塑性挙動と軸力比との関係

一般に鋼製橋脚の変形性能は降伏点以降の弾塑性挙動を考慮した水平荷重  $H$  と水平変位  $\delta$  をもとに評価されている<sup>5)</sup>。

本解析では、鋼製橋脚の曲げモーメントと曲率との関係に着目して、軸力比、ならびに径厚比の影響について検討した。

鋼製橋脚の外形半径を 150cm と固定し、表-2 に示すように幅厚比  $R/t$ 、ならびに軸力比  $\sigma_c/\sigma_Y$  を変化させて、パラメトリック解析を行った。

表-2 パラメトリック解析に用いた諸元

外形半径(cm)	150
径厚比 $R/t$	15, 20, 35, 50, 70
軸力比 $\sigma_c/\sigma_Y$	0.00, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.10, 0.11, 0.13, 0.15
降伏点(kgf/cm <sup>2</sup> )	3,600 (SM490Y)
ヤング係数 E(kgf/cm <sup>2</sup> )	$2.1 \times 10^6$
$E^*/E$	1/100

なお、本解析モデルの断面は無補剛断面とし、局部座屈は考慮していない。また、鋼材は SM490Y を使い、ひずみ硬化を考慮し、 $E^*/E=1/100$  とした。

なお、円形断面を有する鋼製橋脚の終局圧縮ひずみは、 $\epsilon_u=17 \epsilon_Y$  としている。

解析結果を、図-8、および図-9 に示す。図-8 には、軸力比と、終局曲率との関係を示し、図-9 には、軸力比と終局曲げモーメントとの関係を示している。

なお、図中の縦軸の終局曲率、およびに終局曲げモーメントは、それぞれ軸力比  $\sigma_c/\sigma_Y=0$  における降伏曲率  $\phi_{Y0}$ 、ならびに降伏曲げモーメント  $M_{Y0}$  で無次元化している。

図-8 より、軸力比と終局曲率との関係には、線形関係があり、ほぼ次式の関係満足しており、径厚比に関する差異は見られなかった。

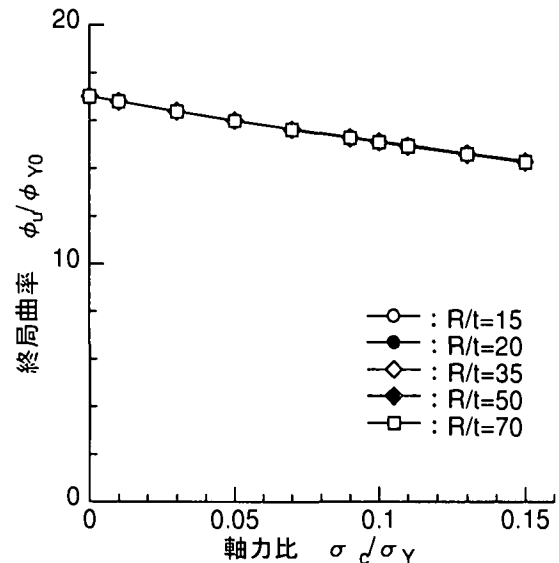


図-8 終局曲率と軸力比との関係

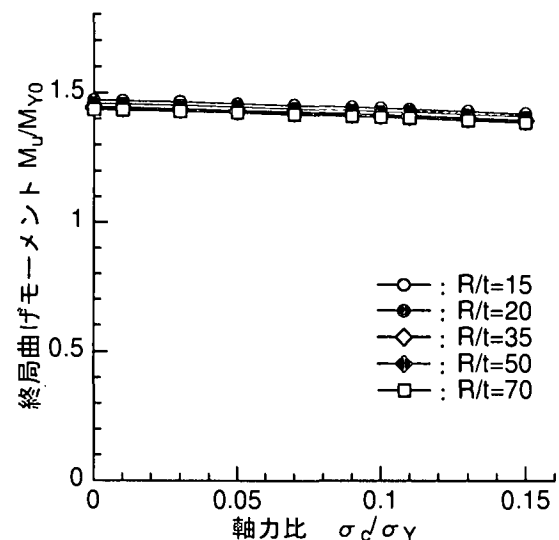


図-9 終局曲げモーメントと軸力比との関係

$$\phi_u/\phi_{y0} = -18.15(\sigma_c/\sigma_y) + \epsilon_u/\epsilon_y \quad \dots(4)$$

図-9より、軸力比と終局曲げモーメントとの関係においても、線形関係がみられ、ほぼ次式を満足している。

$$M_u/M_{y0} = -0.3443(\sigma_c/\sigma_y) + 1.447 \quad \dots(5)$$

軸力比と終局曲げモーメントとの関係を、径厚比において比較すると、径厚比を  $R/t=15\sim70$  と大きく変化させたにもかかわらず、ここでも、径厚比に関する差異はほとんど見られなかった。

#### 4.2 弾塑性挙動と縁端圧縮ひずみとの関係

図-10には、一般的な円形断面鋼製橋脚が有する径厚比  $R/t=35$  における縁端圧縮ひずみと曲率との関係を示し、図-11には、同じ径厚比  $R/t$  における縁端圧縮ひずみと曲げモーメントとの関係を示している。

ここで、図中の曲率、および曲げモーメントは、それぞれ軸力比  $\sigma_c/\sigma_y=0$  とした場合の降伏曲率  $\phi_{y0}$ 、ならびに降伏曲げモーメント  $M_{y0}$  で無次元化している。これらをそれぞれ、曲率変形性能  $\phi_u^*/\phi_{y0}$ 、および曲げモーメント比  $M_u^*/M_{y0}$  と定義する。また、横軸は縁端圧縮ひずみ  $\epsilon_u^*$  を鋼材の降伏ひずみ  $\epsilon_y$  で無次元化し、これを圧縮ひずみ比  $\epsilon_u^*/\epsilon_y$  とする。

図-10より、曲率変形性能  $\phi_u^*/\phi_{y0}$  と圧縮ひずみ比  $\epsilon_u^*/\epsilon_y$  との関係には、線形関係がみられ、ほぼ次式を満足している。

$$\phi_u^*/\phi_{y0} = (1 - \sigma_c/\sigma_y)\epsilon_u^*/\epsilon_y \quad \dots(6)$$

また、図-11より、曲げモーメント比  $M_u^*/M_{y0}$  と圧縮ひずみ比  $\epsilon_u^*/\epsilon_y$  との関係について、軸力比において比較すると、弾性範囲においては、ほぼ線形的に曲げモーメント比  $M_u^*/M_{y0}$  は軸力比  $\sigma_c/\sigma_y$  と比例して低下しているが、弾塑性領域においては、曲げモーメントは軸力比  $\sigma_c/\sigma_y$  の影響をほとんど受けていないことがわかる。また、圧縮ひずみ比  $\epsilon_u^*/\epsilon_y$  と曲げモーメント比  $M_u^*/M_{y0}$  との関係は、次式の関係を満足している。

$$\left. \begin{aligned} M_u^*/M_{y0} &= (1 - \sigma_c/\sigma_y)\epsilon_u^*/\epsilon_y & (0 < \epsilon_u^*/\epsilon_y \leq 1) \\ M_u^*/M_{y0} &= 0.303\epsilon_u^*/\epsilon_y + 0.597 & (1 < \epsilon_u^*/\epsilon_y \leq 2) \\ M_u^*/M_{y0} &= 0.031\epsilon_u^*/\epsilon_y + 1.141 & (2 < \epsilon_u^*/\epsilon_y \leq 5) \\ M_u^*/M_{y0} &= 0.01\epsilon_u^*/\epsilon_y + 1.246 & (5 < \epsilon_u^*/\epsilon_y) \end{aligned} \right\} \dots(7)_{(a)\sim(d)}$$

これは、本研究において、設定した軸力比の範囲内では、軸力による断面内の圧縮応力領域が小さく、断面のほぼ中央に位置するため、断面の抵抗曲げモーメントに与える影響が小さいためと考えられる。

図-12には軸力比  $\sigma_c/\sigma_y=0.10$  における、曲率変形性能  $\phi_u^*/\phi_{y0}$  と圧縮ひずみ比  $\epsilon_u^*/\epsilon_y$  との関係を示してい

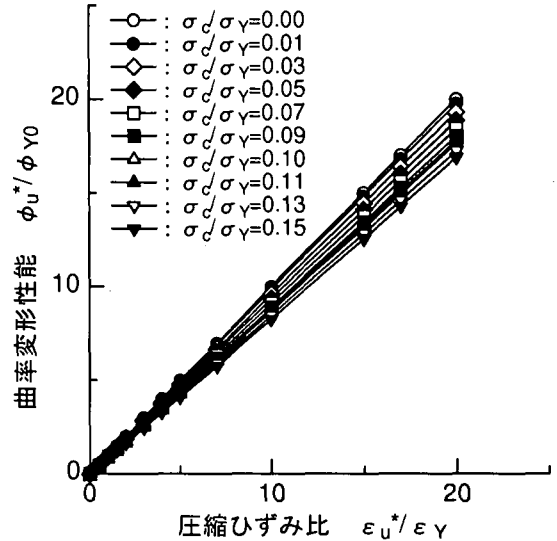


図-10 曲率変形性能と縁端圧縮ひずみとの関係 ( $R/t=35$ )

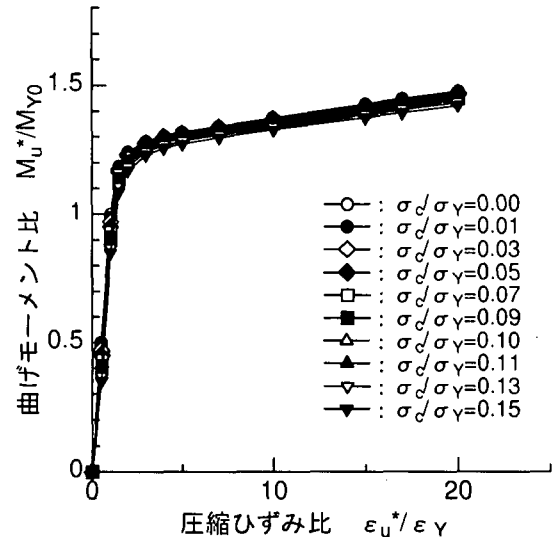


図-11 曲げモーメント比と縁端圧縮ひずみとの関係 ( $R/t=35$ )

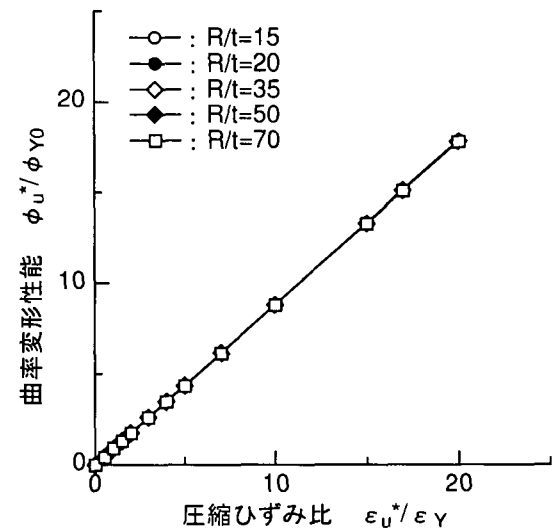


図-12 曲率変形性能と縁端圧縮ひずみとの関係 ( $\sigma_c/\sigma_y=0.10$ )

る。縁端圧縮ひずみと曲率との関係について、径厚比において比較すると、径厚比による差異は見られず、式(6)の関係をすべての径厚比において満足している。

これらのことから、円形断面鋼製橋脚の終局状態を最高耐力点とした場合、縁端圧縮ひずみ  $\epsilon_{\phi}^*$  の値を決定することにより、そのときの弾塑性曲率  $\phi_{\phi}^*$ 、および曲げモーメント  $M_{\phi}^*$  は式(6)~(7)により簡易的に求められ、求められた曲げモーメント  $M$  と曲率  $\phi$  との関係から水平荷重と水平変位との関係は簡易的に求められる(式(3)参照)。

## 5. まとめ

本研究において得られた結論をまとめると次のようになる。

- 1) 供試体 H9 の実験結果と解析結果との比較より、最高耐力点において、鋼材の 2 次勾配比を  $E^*/E=1/100 \sim 1/150$  の範囲に設定したとき、圧縮ひずみ  $\epsilon_{\phi}$  は  $17 \epsilon_y \sim 20 \epsilon_y$  に達しており、解析値は実験値をよく近似している(図-7 参照)。
- 2) 終局曲率、および終局曲げモーメントと軸力比との関係は、径厚比によらず線形関係があることが明らかとなった(図-8、および図-9 参照)。
- 3) 曲率変形性能と圧縮ひずみ比との関係は、線形関係を示す。また、径厚比による影響は無く、軸力比が増加すると、曲率変形性能が低下することが明らかとなった(図-12、および図-13 参照)。
- 4) 曲げモーメント比と圧縮ひずみ比との関係は圧縮ひずみ比の範囲に応じて、一義的にモデル化できる。
- 5) 円形断面鋼製橋脚の終局状態を最高耐力点とした場

合、縁端圧縮ひずみ  $\epsilon_{\phi}^*$  の値を決定することにより、弾塑性曲率  $\phi_{\phi}^*$ 、および曲げモーメント  $M_{\phi}^*$  は簡易的に求められる(式(6)~(7)参照)。

## 6. 謝辞

本研究は、「震災復旧対策技術委員会・鋼構造分科会、主査：渡邊京都大学教授、阪神高速道路公団」、および「鋼製橋脚研究委員会、主査：北田大阪市立大学助教授、(財)阪神高速道路管理技術センター」における研究成果を取りまとめたものである。ここに各委員会の委員の方々に深く感謝の意を表するものである。

## 7. 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：既設鋼製橋脚の耐震補強設計要領(素案)，1997年3月
- 2) 南莊淳，堀江佳平，陵城成樹，井元泉：鋼製橋脚の変形性能に関する実験的研究，土木学会，鋼製橋脚の非線形解析と耐震設計に関する論文集，pp.189~196，1997年5月
- 3) 南莊淳，西岡敬治，堀江佳平，陵城成樹：鋼製橋脚の耐震補強に関する研究，土木学会，構造工学論文集，pp.1047~1058，1998年3月
- 4) A.Nanjo, Y.Horie, S.Okashiro, I.Imoto : Experimental Study on the Ductility of Steel Bridge Piers, Proceedings of 5th International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Vol.1, pp.229~236, July 1997
- 5) 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

(1998年8月17日受付)

# STUDY ON A EVALUATION METHOD FOR DUCTILITY OF STEEL BRIDGE PIER WITH CIRCULAR CROSS SECTION

Eiichi WATANABE, Yoshihei HORIE, Tsutomu NIINA, Shigeki OKASHIRO and Satoshi UCHIDA

This paper summarizes the results of horizontal loading experiments using 1/3 scale model of actual steel bridge piers with thin-walled and stiffened circular cross-section by HANSHIN EXPRESS WAY PUBLIC Co.,. Based on this experimental results, we proposed an analysis model by section partition method, and conducted a comparative study with result of analysis and experiment regarding the elasto-plastic behavior of steel bridge piers using simple cantilever-beam models to be considered strain hardening.

We conducted the parametric analysis study on the relationships between the bending moments and curvatures in elasto-plastic behavior. In this analysis, the main parameters were the ratio of radius and thickness, and the axial compression stress ratio. Based on this result, we described the method of estimate the relationships of ultimate bending moment and curvature of steel bridge pier with circular cross section.