

## 縦リブを有する円形鋼製橋脚の繰り返し載荷実験

○田嶋 仁志<sup>1</sup>、半野 久光<sup>2</sup>、久保田 強<sup>3)</sup>、池田 茂<sup>4</sup>、寺尾 圭史<sup>5</sup>

<sup>1, 2</sup>首都高速道路公団 工務部設計技術課（〒100 東京都千代田区霞が関 1-4-1（日土地ビル））

<sup>3</sup>首都高速道路公団 東京第二環全部設計課（〒104 東京都中央区八丁堀 2-14-4）

<sup>4</sup>住友重機械工業(株) 鉄構機器事業本部技術部（〒141 東京都品川区北品川 5-9-11）

<sup>5</sup>(株)横河メンテック 技術管理室（〒273 千葉県船橋市山野町 27（横河テクノビル））

### 1.はじめに

兵庫県南部地震によって、円形鋼製橋脚においても象の足状の座屈などの損傷が見られた。このため、円形鋼製橋脚の耐震性と、それらの補強手法の検討が必要とされている。この手法の一つとして、縦リブを円筒内面に配置する補強方法が象の足状の座屈を改善し、変形性能を改善する手法として期待されているが、このような縦リブを有する円形断面の鋼製橋脚の変形性能に関する研究成果は比較的少ない。本研究では、縦リブを有する円形橋脚の変形性能を対象に、提案する縦リブ断面の設定法によって補剛した円形断面について、その無次元径厚比に着目して供試体を用意し、2軸繰り返し載荷実験を行ったのでその結果について報告する。なお、本研究では、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、鋼材倶楽部および日本橋梁建設協会の共同研究で行われた実験結果<sup>1), 2)</sup>とも比較引用している。

### 2.変形性能と縦リブ補強の基本的な概念

円形鋼製橋脚は、矩形橋脚に用いる補剛板と異なり、縦補剛せず環補剛のみの単純な円筒断面とするのが一般的である。したがって、道路橋示方書<sup>3)</sup>などでは、その断面の剛性を表すパラメータは円筒の半径Rと板厚tの比(径厚比:  $R/t$ )を用い座屈強度を表している。また、この径厚比は鋼材の降伏点強度を考慮した無次元径厚比 $R/t$ で表し、これまでに、円形橋脚の変形性能をこのパラメータとの関係で表す試みがなされ、その相関として $R/t$ が小さいほど橋脚の変形性能は大きくなることがわかってきてている。ここで、無次元径厚比 $R/t$ は次式のとおりとする。

$$R/t = (\sigma_y/E_s) \times (R/t) \times \sqrt{3(1-\mu^2)}$$

$\sigma_y$ : 鋼材の降伏点強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$E_s$ : 鋼材のヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

R : 円筒の板厚中心までの半径 (cm)

t : 円筒の板厚 (cm)

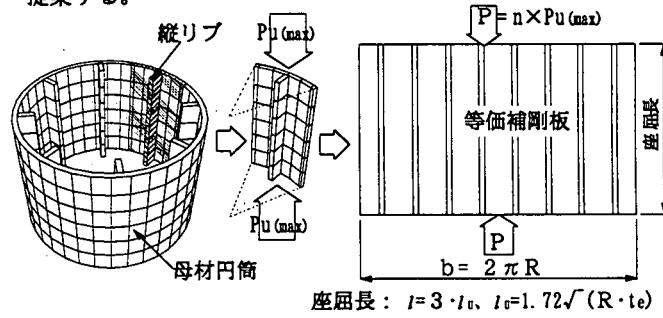
$\mu$  : ポアソン比

しかしながら、実際の補強手法としての板厚の増厚は非常に困難であり、耐力の上昇も大きい。そこで縦リブを円形橋脚の内面に取付ける方法を検討した。縦リブによる補強の目的は、円周方向に複数本配置することにより、震災でみられたような円周方向に発生する象の足状の座屈を防止することである。これにより、座屈モードは縦リブを節とするモードに移行し、円筒の座屈特性を改善することによって橋脚の変形性能の向上が期待できる。

### 3.縦リブ断面の設定法の提案

#### (1)設定法の概要

円形断面の縦リブに対する設定法は、縦リブ断面の設計と、その断面を有する橋脚の変形性能に関する設計よりも多く確立されていない。また補強を考えた場合、縦リブによる断面積増加は、橋脚の耐力上昇につながり、アンカ一部に負担をかけることから、極力小さくすることが望ましい。ここでは、これらの点を考慮した簡便的な設定法として、円形断面を図-1のように補剛板に置換する手法を提案する。



最も大きな圧縮力を負担する1本の縦リブに着目し、これが円周方向に連続する補剛板を擬似的に想定する。

図-1 縦リブを有する円筒断面の等価補剛板への置換

#### i)縦リブを取付けた断面の局部座屈に対する照査

円筒を縦リブによって補剛された等価な補剛板として座屈照査を行う。

#### ii)変形性能の向上

縦リブ補強によって、円筒断面の有する変形性能を向上させることができ期待できる。向上する変形性能の増分は実験結果より決定する。

#### (2)補剛板に置換した縦リブの剛性

この場合の補剛板としての必要な等価幅厚比は、矩形断面と同様に計算し、円筒としての効果も期待できるので、実験結果、解析結果などより判断し、以下の制限値とした。

補剛板 :

$$R_F \leq 0.4 \quad (\text{補強に対する制限値})$$

縦リブ(自由突出板) :

$$R_h \leq 0.5$$

円筒板パネル :

$$R_R \leq \text{約} 0.7$$

なお、 $R_F$ 、 $R_h$ 、 $R_R$ は道路橋示方書に示される幅厚比であり、 $R_R$ の制限により縦リブ本数が決定され、 $R_F$ および $R_h$ の制限により縦リブの断面が決定される。また、補剛

板としての縦寸法(a)は、ダイヤフラム間隔ではなく、座屈長( $l$ )とし、横寸法(b)を円筒の板厚中心で考えて平板に展開した補剛板と考える。すなわち、

$$\text{縦寸法(a)} : l = 3 \cdot l_u, l_u = 1.72 \sqrt{R \cdot t_e}$$

$$\text{横寸法(b)} : b = 2 \cdot \pi \cdot R = n \times \text{リブ間隔}$$

ここで、

$l$  : 補剛板としての座屈長 (cm)

$l_u$  : 円筒の基準座屈長<sup>4)</sup> (cm)

$R$  : 板厚中心で計った円筒の半径 (cm)

$t_e$  : 等価板厚 (cm)

この等価補剛板の縦寸法を座屈長( $l_u$ )の3倍としたのは、円形断面の損傷形態が局部的に集中する傾向にあるため、既設橋脚で通常5~6m間隔に配置されているダイヤフラム間隔は、損傷モードに影響を与えない仮定したことによる。この仮定により、必要縦リブ断面を過大とせず合理的な配置ができる。

なお、縦リブの剛性を評価するパラメータとして、矩形断面の補剛板で用いるような1本の縦リブとそれに協働する円筒部分を柱とみなす細長比 $\lambda_s^{5), 6), 7)}$ も考えられるが、基本的な考え方は同じであることから本論文では道路橋示方書で用いられている幅厚比を用いた。

## 4. 2軸繰り返し載荷実験

### (1) 実験概要

縦リブを有する円形橋脚を主眼にし実験を行った。提案する設定法による縦リブ寸法を基準としたリブの有無、および円筒断面の無次元径厚比に着目して供試体を用意し、変形性能などを計測した。道路橋示方書において弹性座屈の範囲である径厚比の大きいケースは実験例が少ないと考え、本研究の対象とした。

### (2) 実験手法

実験装置は、降伏荷重の15%の軸力を一定として載荷し、

水平方向に繰返し載荷する2軸載荷装置を用いて行った。水平方向の載荷のパターンを図-2に示す。

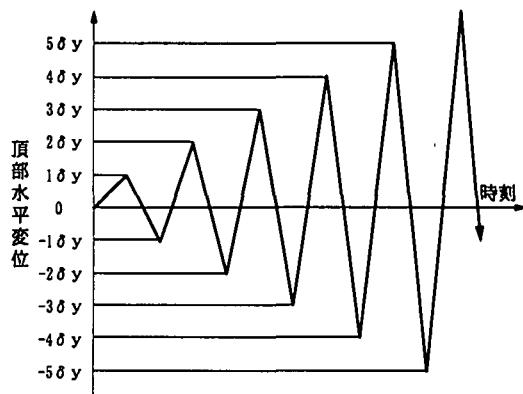


図-2 繰り返し載荷方法

### (3) 実験供試体

本実験に用いた供試体の形状および構造特性を図-3(a)に示す。参考のために、建設省土木研究所で行なわれたN0.6、N0.8<sup>1)</sup>、橋建協で行われたB2<sup>2)</sup>も図-3(b)に示した。供試体の選定にあたって、無補強の円筒断面に対して縦リブを有する断面を同じ径厚比で設定し、結果を対比させるようにした。本実験の対象とする無次元径厚比( $R_t$ )は、既設橋脚などの調査から、0.09, 0.11, 0.15の3ケースとした。

$R_t = 0.15$ 程度の無補剛断面をM24とし、これに縦リブを取り付けた断面をM25とした。無補剛断面に対する $R_t$ をパラメータとする実験は他機関においても実施されているが、 $R_t \geq 0.11$ の範囲の結果が少ないためM24を実施した。 $R_t = 0.11$ 程度の無補剛断面供試体N0.8に対して、M23を用意した。この範囲の径厚比においては、縦リブの断面寸法差による影響を確認するため、縦リブを有する等価補剛板の $R_F$ を0.26とするM19と $R_F$ を0.47とするM23の2ケースの縦リブ補強供試体を用意した。また、無補剛断面供試体N0.6は $R_t$ が0.07であり、無補剛でも高い

供試体	M24 (無補剛断面)	M25 (縦リブ補強)	M23 (縦リブ補強)	M19 (縦リブ補強)	M26 (縦リブ補強)	
断面図						
形状図						
構成部	円筒	$\phi 875 \times 7 \text{ mm}$	$\phi 875 \times 7 \text{ mm}$	$\phi 900 \times 9 \text{ mm}$	$\phi 900 \times 9 \text{ mm}$	$\phi 900 \times 11 \text{ mm}$
部	縦リブ	-	$10\text{-Rib Pl 45 \times 6}$	$8\text{-Rib Pl 45 \times 8}$	$8\text{-Rib Pl 70 \times 8}$	$2\text{-Rib Pl 60 \times 8}$
降伏点	$\sigma_y = 3,128 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 3,128 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 2,900 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 2,787 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 2,780 \text{ kgf/cm}^2$	
径厚比 $R_t$	0.153	0.153	0.113	0.109	0.088	
補剛パラメータ	$R_R$	-	0.791	0.760	0.745	0.607
	$R_F$ (座屈長: $l$ )	-	$0.397:l=304 \text{ mm}$	$0.465:l=344 \text{ mm}$	$0.258:l=355 \text{ mm}$	$0.369:l=383 \text{ mm}$
	$R_H$	-	0.464	0.335	0.511	0.436
	$\lambda_s$ (座屈長: $l$ )	-	$0.434:l=304 \text{ mm}$ ( $1.285:l=900 \text{ mm}$ )	$0.486:l=344 \text{ mm}$ ( $1.271:l=900 \text{ mm}$ )	$0.284:l=355 \text{ mm}$ ( $0.720:l=900 \text{ mm}$ )	$0.368:l=383 \text{ mm}$ ( $0.864:l=900 \text{ mm}$ )
	$I_R/I_o$	-	1.13	1.08	1.15	1.11

$I_R/I_o$ : 縦リブを含む断面と円筒のみの断面二次モーメントの比

図-3(a) 供試体の形状および構造特性

No. 6		$\phi 900 \times 16 \text{ mm}$
		無補剛断面
		$\sigma_y = 3,510 \text{ kgf/cm}^2$
		$R_t = 0.073$
No. 8		$\phi 900 \times 9 \text{ mm}$
		無補強断面
		$\sigma_y = 2,960 \text{ kgf/cm}^2$
		$R_t = 0.115$
B2		$\phi 900 \times 9 \text{ mm}$
		$8\text{-Rib Pl 100 \times 11}$ (断続)
		$\sigma_y = 2,910 \text{ kgf/cm}^2$
		$R_t = 0.113$
		$R_R = 0.761$
		$R_H = 0.543$
		$R_F = 0.152$ ( $l=379 \text{ mm}$ )
		$\lambda_s = 0.181$ ( $l=900 \text{ mm}$ )

図-3(b) 関連供試体の形状および構造特性

変形性能を保有していることより、やや小さい  $R_t = 0.09$  程度の縦リブ補強した断面を M26とした。供試体 M25、M 23、M26 の縦リブ断面は 3 節に示した設定法により、その本数および断面が最小となるように決定した。図-3(a)に示

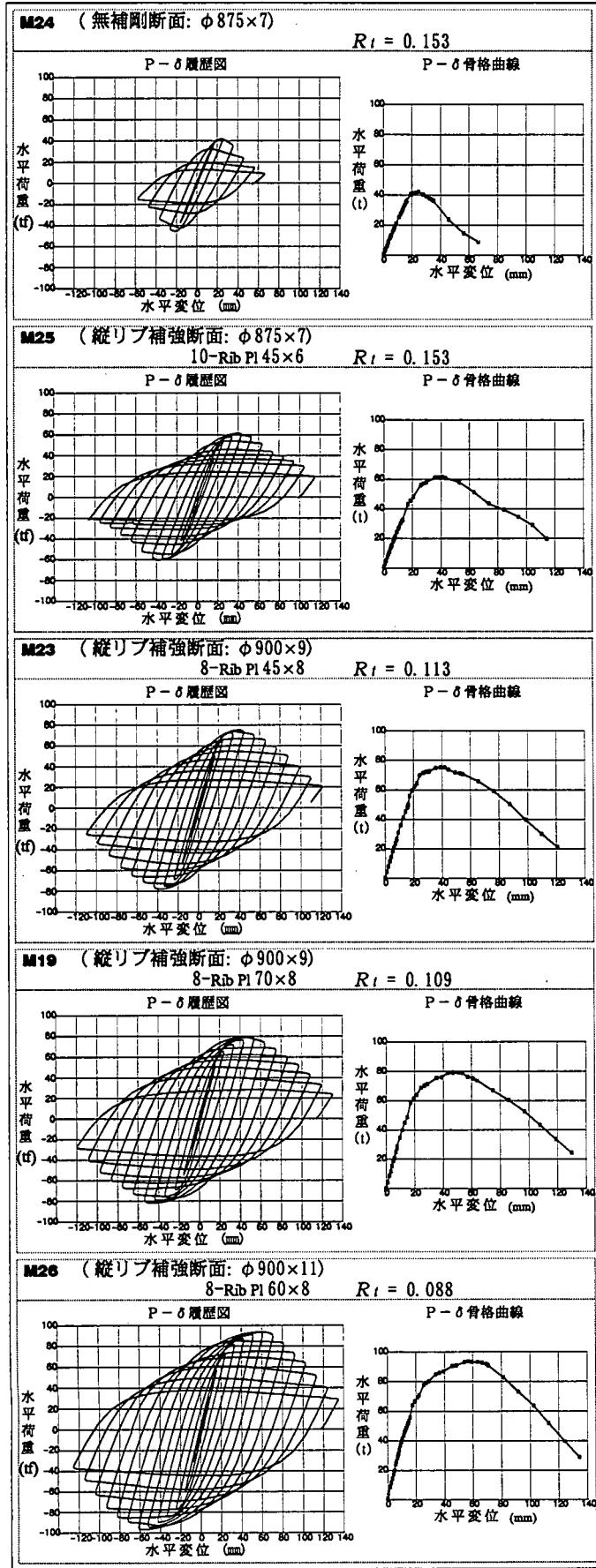


図-4 水平荷重-変位履歴図および骨格曲線

すようにこれらの縦リブ補強断面の供試体において、無補強断面に対する断面二次モーメント比は約 1.1 度となっており、これにより計算する耐力の上昇率は大きくな。

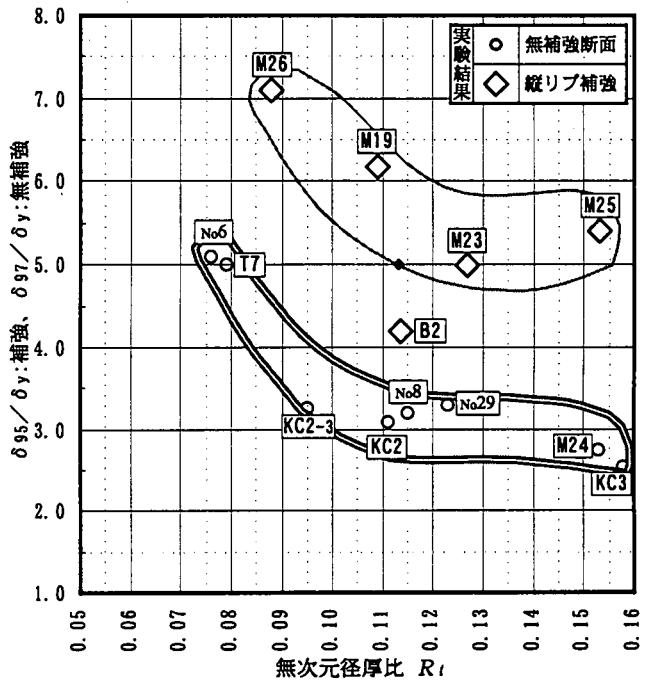


図-5 供試体の形状および構造特性

#### (4) 実験結果

##### a) 変形性能

図-4 に実験結果の荷重-変位履歴図および骨格曲線を示す。

また、図-5 に最大耐力付近の変位と降伏変位との比  $\delta 97 / \delta y$  と無次元径厚比  $R_t$  との関係を示す。

無補強断面で比較すると  $R_t$  が小さいほど変形性能が大きいことが分かる。しかしながら、 $R_t$  が 0.11 をこえた M24 と N0.8 を比較するとそれほど変形性能に差がないことがわかる。縦リブ補強した断面はいずれも無補強断面に対し、大きく変形性能が向上していることがわかる。

無補強断面では  $R_t \geq 0.11$  では  $\delta 97 / \delta y$  の値は約 3 度となっているが、 $R_t \approx 0.07$  で約 5 度とれることがわかる。これに対し、縦リブ補強した断面では、 $R_t \approx 0.15$  でも約 5 度の値を示しており、補強効果が大きいことを示している。

また、本論文で提案する設定法による縦リブを取付けた補強断面の変形性能の上昇は通常の利用範囲では  $R_t$  によらず一定で  $\delta 97 / \delta y$  の値にして 2.0 度であることがわかった。これにより、 $R_t$  をパラメータにして、無補強断面および縦リブ補強した断面の変形性能を推定でき、耐震性の照査が可能と考えられる。

一方、縦リブの断面を設定法に対して余裕を大きくして設けた供試体 M19 は、無補強断面 N0.8 に対する変形性能の上昇値で見ると、3 節の制限値を満たす縦リブを設けた M23 に比べて、約 1.2 倍大きい。これによって、縦リブの断面により変形性能に差があることがわかった。ただし、

M19は耐力の上昇も大きいことから、補強に際しては注意が必要である。なお、B2は縦リブの取付け方法がダイヤフラム位置で断続する構造の供試体であることから、実験結果について他の縦リブ補強供試体と同一に扱えない。

#### b) 縦リブの座屈長

縦リブ補強した供試体での変形形状から得られる計測座屈長を設計座屈長と比較して表-2に示す。この表において、荷重最大時の座屈長は  $I = 3 \cdot l_0$  で計算した値より小さいこと、また、実験結果によって変形性能の向上が期待できていることなどを考え、設計座屈長を簡便的に、 $I = 3 \cdot l_0$  とおくことに大きな問題はないと考える。

また、代表的な縦リブの座屈変形形状を図-7に示す。

表-2 縦リブの座屈長

	理論座屈長 $l_0 = 1.72\sqrt{R \cdot t_e}$	設計座屈長 $I = 3 \cdot l_0$	実験結果(計測座屈長)			備考
			降伏時	荷重最大時	終局時	
M19	118	355	140	140	150-300	
M23	115	344	-	120-150	350-400	
M24	95	284	-	120-150	120-140	縦リブなし
M25	101	304	-	120-210	110-290	
M26	128	383	-	80-200	100-320	
B2	126	379	-	100-150	150	

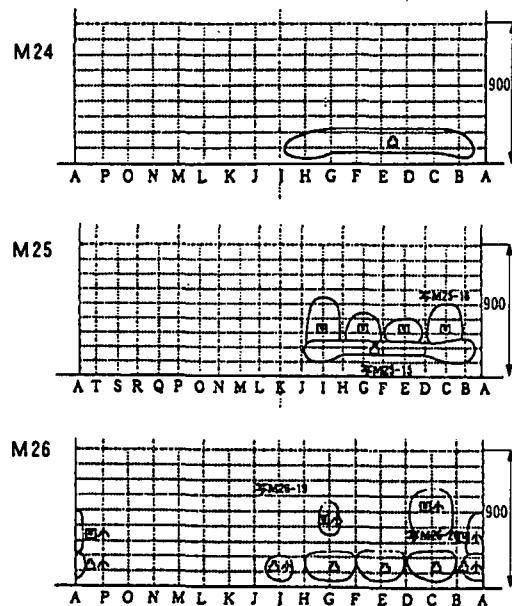


図-7 座屈変形形状

## 5.まとめ

縦リブを配した円形断面の鋼製橋脚に対して、その変形性能を2軸繰り返し載荷実験を行い検討した。橋脚の耐力の上昇を極力制限することは、特に既設橋脚を補強する場合、そのアンカーワークや下部工などへ負担を軽減することにつながる。このことに鑑み、本研究では、縦リブの断面に過度の余裕を残さない合理的な設定法を提案し、縦リブ補強した円形断面の橋脚の変形性能が無補剛断面に比較して向上することを確認した。橋脚の円形断面の無次元径厚比  $R_t$  が大きく、その断面が弹性座屈の範囲である場合においても縦リブ補強による効果が大きいこともわかった。一方、縦リブ断面の無次元化パラメータと変形性能の向上度との関係は、矩形断面のように明確な関係とならず、今後の課題となるが、実験の座屈変形形状より縦リブの座屈長が比較的理論値に近似していることは縦リブ補強を円筒の補強手段として擬似的に扱えることを示唆していると思われる。これらの知見をもとに、鋼製橋脚の耐震性能向上のための補強、あるいは、新設の橋脚などに対する設定法に本研究の成果を反映できればと考えている。

最後に、本研究にあたって、「首都高速道路の橋梁に関する調査研究委員会」の藤野委員長（東京大学工学部教授）をはじめ各委員の皆様のご指導をいただいたことに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1), 2) 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、(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方に関する共同研究報告書(I<sup>11</sup>, II, III, VI, VII<sup>21</sup>) - 鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験 -、1997.4
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書(I共通編、II鋼橋編)・同解説、1997.12
- 4) Lorenz,R:Achsenymmetrische Verzerrungen in dünnwandigen Hohlzylindern,Z.V.G.I.vol52,1908  
(土木学会：構造力学公式集)
- 5) 土木学会 鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・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、1996.7
- 6) 宇佐美 勉：ハイダクティリティー鋼製橋脚、橋梁と基礎、1997.6
- 7) 宇佐美 勉、鈴木 森晶、Iraj H.Mamaghani、葛 漢彬：コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案、土木学会論文集 No.525/I-33、1995.10