

# 鋼製橋脚の局部座屈挙動に及ぼす補剛材形状と配置の影響についての一検討

井原 啓介\*、黒田 充紀\*\*、阿部 英彦\*\*

\* 足利工業大学工学研究科土木工学専攻 学生 (〒326 栃木県足利市大前町 268-1)

\*\*工博 足利工業大学土木工学科 ( 同上 )

一定の軸力作用下において静的な水平交番荷重を受ける矩形断面鋼製橋脚の弾塑性変形挙動を有限要素法により解析をした。その結果から水平荷重-水平変位のヒステリシス曲線や、変形性能、局部座屈形状などについて比較検討した。解析対象は、1) ダイヤフラムを増設したもの、2) 縦補剛材としてL型鋼を用いたもの、また3) コーナー部を補強したものなど、縦横の補剛材の配置や形状が異なった橋脚供試体とした。また供試体の板厚、幅、及び高さは一定とした。その結果従来の縦方向の補剛に加え、ダイヤフラムなど横方向に配置を工夫し補剛することで、水平耐荷力及び、変形性能を向上させることが可能であることを示した。

Key Word : diaphragm, buckling mode, ductility, finite element analysis, elasto-plasticity

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）は、1923年関東大震災以来、最大の被害を各種施設にもたらした。その中に鋼製橋脚がある。被害の発生原因及び発生過程を明らかにするために、すでに多くの実験的<sup>1)~6)</sup>、数値解析的<sup>9)~18)</sup>研究が行われている。西川らは<sup>1)~2)</sup>矩形断面橋脚の角溶接部が縦方向に脆性的に裂けて崩壊することを避けるために、角部をコーナープレートにより補強した構造や角部を円弧状とし角溶接をなくした構造などについて実験を行った。この脆性的破壊を回避することができれば、変形性能の向上が期待できることが確認された。

また数値解析にいち早く取り組んだ中川ら<sup>9)</sup>はシェル要素を用いた弾塑性有限変形解析による軸圧縮力と繰返し曲げを受ける鋼製矩形断面橋脚の挙動を実験結果と比較する事により、解析の適用性を評価するための基礎資料を提供している。それによると水平荷重-水平変位曲線における最大水平荷重に若干の差はみられたものの、解析

値と実験値はほぼ一致したことを確認している。また異種（円弧形状コーナー、U型補剛材、コーナー部切欠など）の鋼製箱型橋脚についても解析を行い既設鋼製橋脚の補剛方法などの参考資料を提供している。これによると断面形状を工夫することにより鋼重を増加させずに耐震性を向上できる可能性があることが判明している。

これらを総合すると縦補剛材の配置や形状を工夫することにより変形に対する抵抗力を保ちながら、大きく変形できる能力（ここでは変形性能という）を向上させることが可能であると考えられる。

本研究では、これらの報告を元に縦補剛材の配置や形状の違いによる最大水平荷重、変形性能、及び局部座屈形状を比較するとともに、今まであまり行われていない横補剛材の配置によるその違いについても検討する。

## 2. 解析対象と解析方法

建設省土木研究所橋梁研究室で実施された実験<sup>4)</sup>の供

試体を対象とした。また図-1のような、水平荷重载荷方向を含む鉛直面を対称面とした全体の1/2モデルの3次元シェル構造である。使用要素は、4節点厚肉シェル要素(S4R, ABAQUS Ver.5.4, 5.6<sup>9)</sup>)を使用。メッシュ分割は、中川ら<sup>9)</sup>が解析に使用した橋脚モデルを参考とし、局部座屈の発生が考えられる脚基部付近において細かく分割した。断面形式として図-2のように供試体 No.1 (図-1) を標準断面とし No.2 はダイヤフラムを脚基部パネル間に2枚増設したものの、

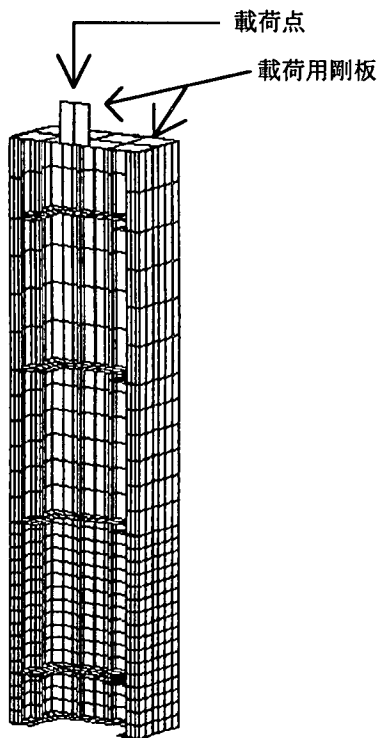
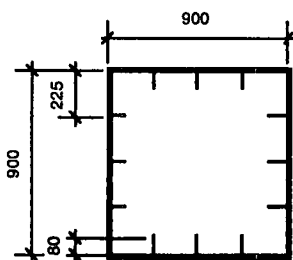
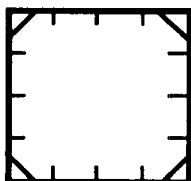


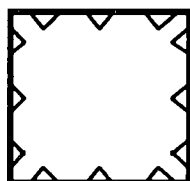
図-1 有限要素解析モデル (供試体 No.1 標準)



供試体 No.1 (標準)、供試体 No.2, No.3



供試体 No.4



供試体 No.5, No.6

図-2 解析対象断面

No.3 は一枚のダイヤフラムを脚基部パネルの中間に、もう一枚を脚中間部パネルの中央に配置したもの、No.4 は角部を板材により補強したもの(ダイヤフラムは No.1 と同じ)、No.5 は縦補剛材として L 型鋼を用いたもの(ダイヤフラムは No.1 と同じ)、No.6 は No.5 からダイヤフラムを全て取り去ったものである。また図-3 に示すように下部のベース補強板接合部を完全固定とする境界条件を与えた。载荷方法は図-4 に示すとおりである。まず供試体に所定の軸力(全断面降伏荷重の約 15%)を载荷した後、その軸力を一定に保った状態で脚上部の所定の载荷点に正負の繰返し水平荷重を静的に载荷する水平交番载荷を行った。水平荷重の設定については、橋脚基部が降伏応力度に達する水平荷重  $H_y$  を式(1)より、水平変位  $\delta_y$  を式(2)より求めた<sup>9)</sup>。

$$P = 0.15P_y, \quad P_y = A \sigma_y$$

$$H_y = 2 I (\sigma_y - P/A) / B L \dots \dots \dots (1)$$

$$\delta_y = H_y L^3 / 3 E I \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $H_y$ : 橋脚基部の塑性化が始まる時の水平荷重

$L$ : 橋脚高さ  $I$ : 断面二次モーメント

$\sigma_y$ : 降伏応力  $B$ : ウェブ高さ  $E I$ : 曲げ剛性

$P$ : 鉛直応力  $P_y$ : 降伏軸力  $A$ : 断面積

水平荷重の载荷(図-3)は载荷点位置の変位が  $+ \delta_y \Rightarrow - \delta_y \Rightarrow +2 \delta_y \Rightarrow -2 \delta_y \Rightarrow \dots \dots \dots \Rightarrow +7 \delta_y \Rightarrow -7 \delta_y \Rightarrow +8 \delta_y$  となるように強制変位をかける。各振幅における繰返しは 1 回とする。また材料定数は、ヤング率  $E = 2.1 \times 10^6$  (kgf/cm<sup>2</sup>)、ポアソン比 = 0.3、降伏応力  $\sigma_y = 2986$  (kgf/cm<sup>2</sup>) である。ひずみ硬化関数としては s s 400 相当の鋼材の引張り試験結果から得た応力-ひずみ関係を折線近似(図-5)で用いた。材料の構成則としては、Von-Mises の降伏条件および等方硬化則を用いた。解析には残留応力と初期不整の影響は考慮しなかった。

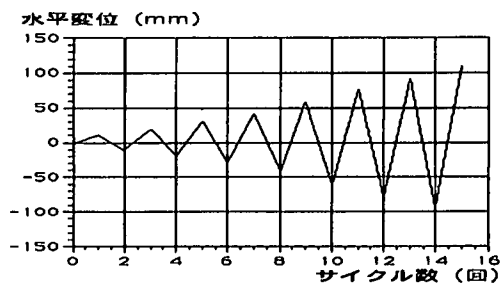


図-3 载荷サイクル<sup>9)</sup>

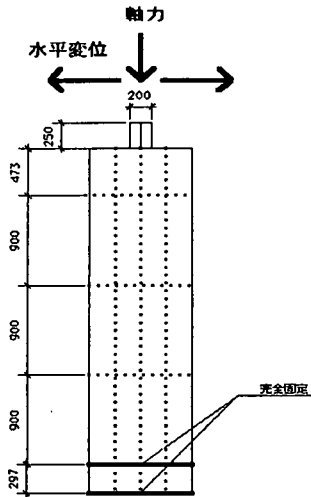


図-4 荷重方法

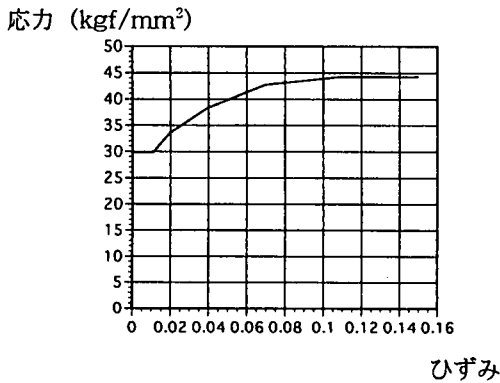


図-5 材料特性

### 3. 解析結果

図-6～図-18に解析で得られた変形状況及び荷重点における水平荷重-水平変位履歴曲線を示す。

(1) 変形状況 供試体 No.1(図-7)と No.2(図-9), No.3(図-11)を比較すると、No.2(図-9), No.3(図-11)では No.1(図-7)に見られる脚基部のパネル間の大きな局部座屈が低減されている。No.2(図-9)は7サイクルから最終サイクル間で脚中間部にまで変形が派及している。No.4(図-13)は No.1(図-7)の角部に見られる巨視的なくびれが小さくなっている。また No.5(図-15)についても若干の緩和が見られる。No.1(図-7)のウェブはへこんでいるのに対し、No.6(図-17)は膨らんでいる。

(2) 水平荷重-水平変位履歴曲線 無次元化した水平荷重-水平変位履歴曲線において、供試体 No.1(図-6)と No.2(図-8), No.3(図-10)を比較すると No.2(図-8)は最大水平荷重が No.1(図-6)のその約 1.2 倍に、No.3(図-10)は約 1.1 になった。これはダイヤフラムを増設したことにより局部座屈の波長を短くし剛性が増加したためと思わ

れる。また No.1(図-6)では水平荷重が4サイクルを過ぎると急激に減少し始めるのに対し、No.2(図-8)では7サイクルまでは水平荷重の減少がほとんど見られなかった。しかし最終サイクルで急激に低下している。これは中間部パネルの座屈と関係している。No.4(図-12)は No.1(図-6)より最大水平荷重が約 1.3 倍増加した。水平荷重は7サイクルから減少している。No.5(図-14), No.6(図-16)は No.1(図-6)より最大水平荷重が約 1.2 倍と No.2(図-8)の場合とほぼ同様の結果となった。また4サイクルから水平荷重は1サイクルごとに徐々に減少している。グラフの形を比較すると、供試体 No.1(図-6)はひし形に近いのに対し、他の供試体は平行四辺形に近い。またグラフの曲線で囲まれた面積はどの供試体も、No.1(図-6)より大きくなっている。

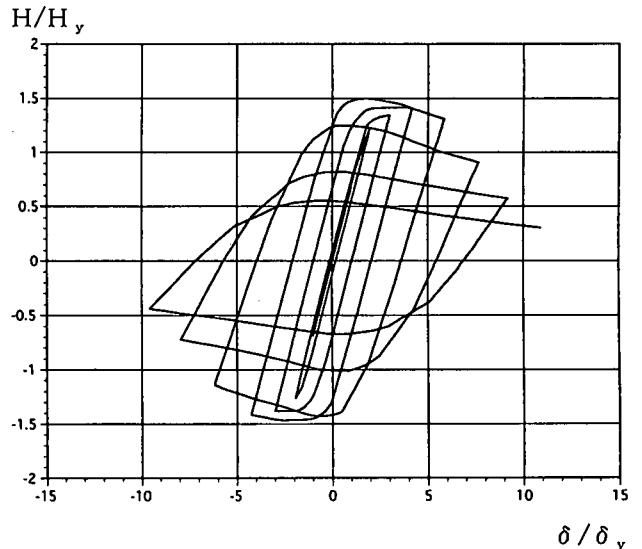


図-6 水平荷重-水平変位履歴曲線 (供試体 No.1)

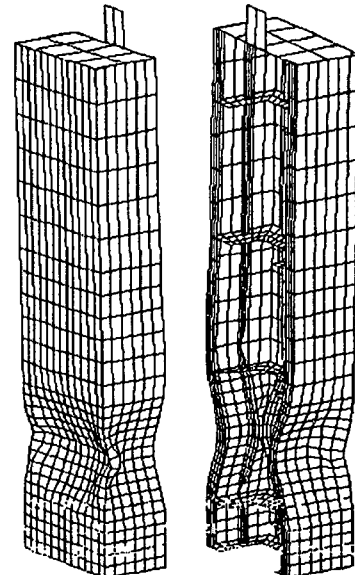


図-7 供試体 No.1 (標準) の変形状況

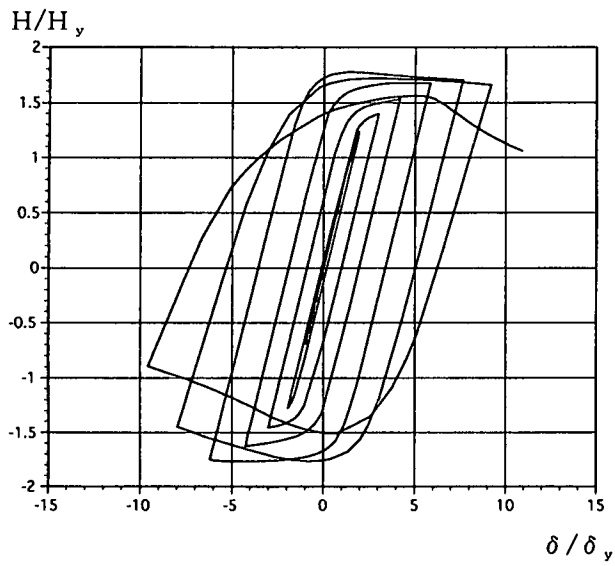


図-8 水平荷重-水平変位履歴曲線 (供試体 No.2)

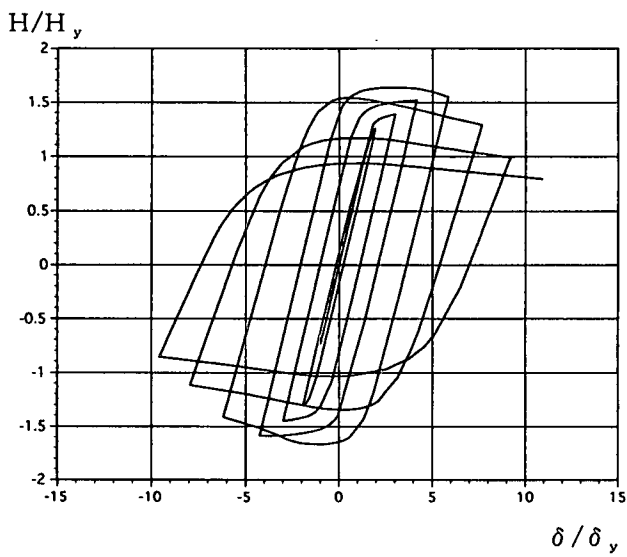


図-10 水平荷重-水平変位履歴曲線 (供試体 No.3)

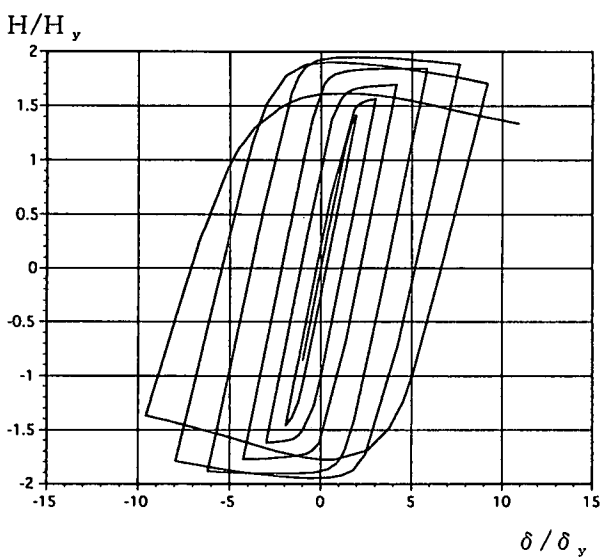


図-12 水平荷重-水平変位履歴曲線 (供試体 No.4)

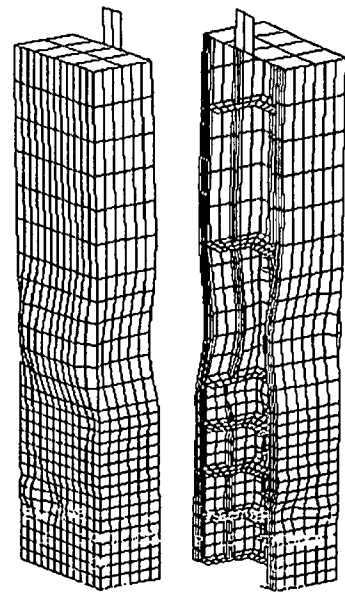


図-9 供試体 No.2 の変形状況

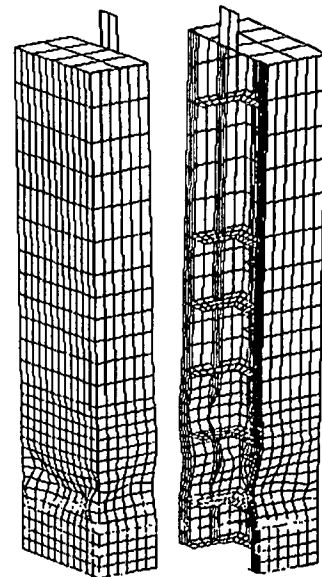


図-11 供試体 No.3 の変形状況

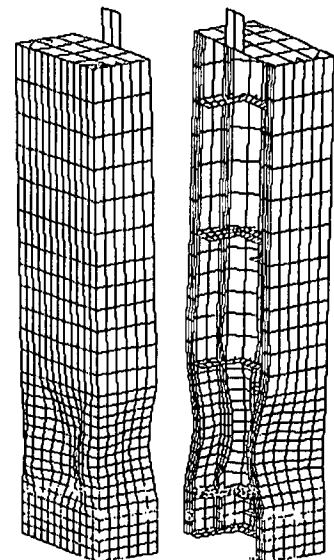


図-13 供試体 No.4 の変形状況

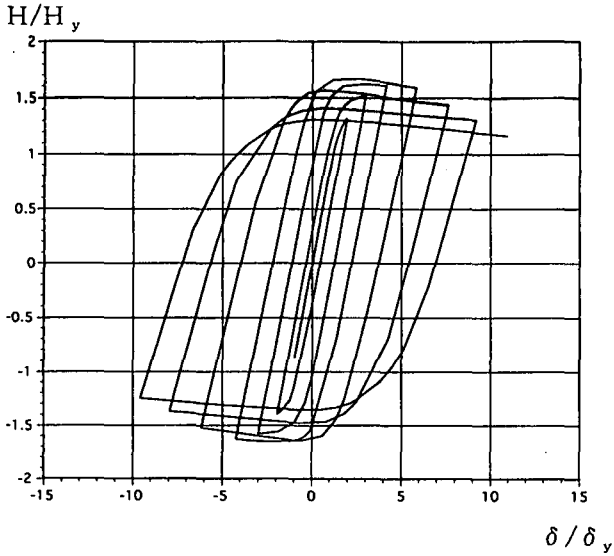


図-14 水平荷重-水平変位履歴曲線 (供試体 No.5)

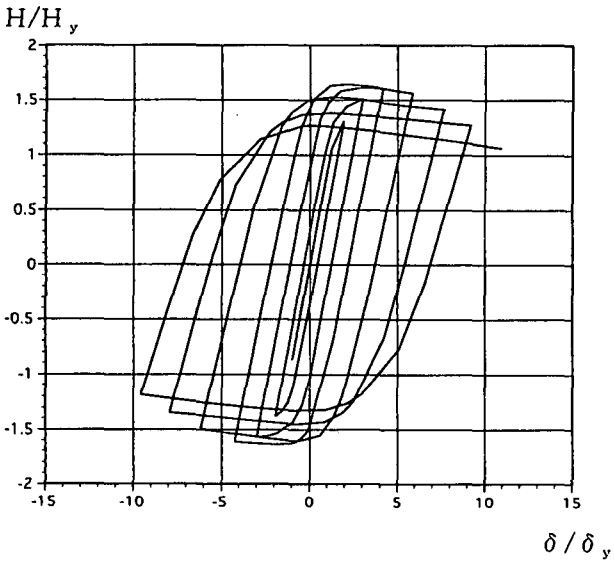


図-16 水平荷重-水平変位履歴曲線 (供試体 No.6)

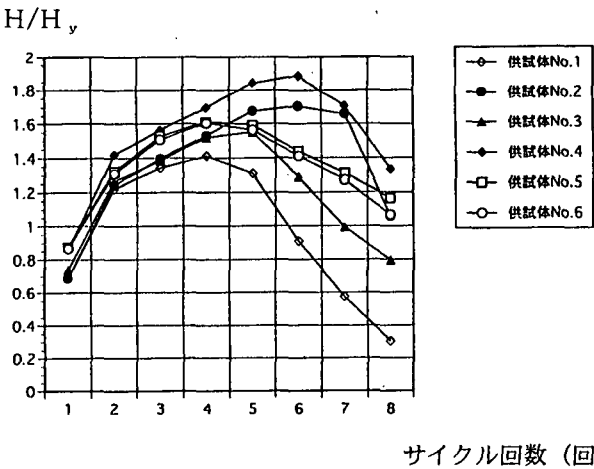


図-18 各サイクルにおける水平荷重

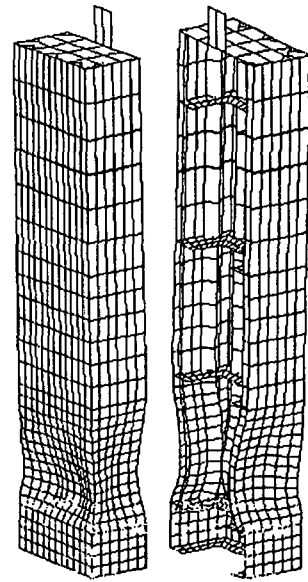


図-15 供試体 No.5 の変形状況

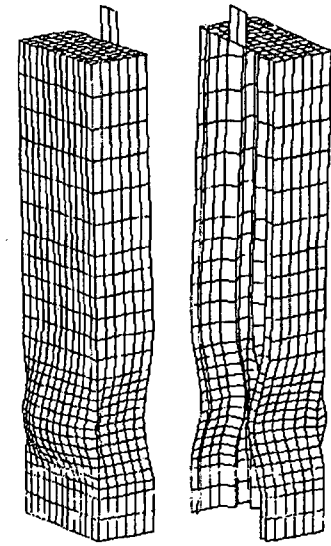


図-17 供試体 No.6 の変形状況

### 5. 考察

図-18のグラフは縦軸に各載荷サイクルにおける水平変位が最大に達したときの水平荷重を前述の  $H_y$  で除し無次元化した値をとり、横軸にはサイクル回数をとったグラフである。サイクル回数が4回を過ぎてから供試体 No.1, No.3, No.5 及び No.6 は水平荷重が低下し始めているのに対し、No.2 と No.4 は逆に上昇し6サイクルを過ぎてから低下している。No.2 と No.3 は5サイクルまでは非常に似た経路を通るがそれを過ぎると No.3 は徐々に水平荷重が低下していく。一般的に縦方向の補剛は橋脚の変形性能を高める効果があることがわかっている。今回の解析ではダイヤフラムの増設によって、No.2 では水平荷重の低下を縦方向をさらに補剛した No.4 と同等に押さえられている。No.3 では水平荷重が低下する割合が小さくなって

いる。また最終サイクルにおける水平荷重も、供試体 No.1 の約 2~4 倍に増加している。これらの結果から縦方向の補剛は最大水平荷重、変形性能の向上に有効であることはもちろんのこと、横方向の補剛も縦方向のものほどではないが、十分に有効であることが分かる。また L 型鋼の補剛効果は供試体 No.3(図-11)とほぼ同等である。今回の解析では、部材の脆性的破断を予測する具体的手法は導入していないので、溶接線に沿った脆性的破断の危険性がダイヤフラムの増設で軽減されるかどうかは不明である。「脆性的」破壊であるので、そのひずみは小さく、塑性ひずみの大小でその危険を予知することはできない。むしろ著者らは、脆性的な破壊は等方応力（すなわち直応力 3 成分の和）による材料の内部損傷と関連が深いと考えている。この視点で解析結果を検討することは今後の課題である。

謝辞：(株)神戸製鋼所 中川知和氏ならびにコベルシステム(株)森脇清明氏には、文献 9) の数値解析に関する貴重なデータをご提供いただいた。また東京電機大学 井浦雅司教授からは補剛システムについて有益な示唆をいただいた。ここに記して謝意を表します。また、数値解析の実行については、足利工業大学土木工学科元卒論生 青柳朋信氏、北英明氏に協力を得た。

#### 参考文献

- 1) 西川和廣, 上仙靖, 村越潤: 道路橋鋼製橋脚の被害と耐震設計に関する検討状況, 橋梁と基礎, Vol.30, No.8, pp.127~130, 1996.
- 2) 西川和廣, 上仙靖, 村越潤: 鋼製橋脚供試体の繰返し載荷実験橋梁と基礎, Vol.30, No.8, pp.131~134, 1996.
- 3) 橋本修身, 安波博道, 水谷慎吾, 小林洋一, 中川知和: コンパクト断面橋脚の耐震性に関する検討, 橋梁と基礎, Vol.30, No.8, pp.135~137, 1996.
- 4) 建設省土木研究所橋梁研究室: 鋼製橋脚に関する検討, 土木学会 震災調査特別小委員会 pp.2-16, 1996.2.
- 5) 井浦雅司, 熊谷洋司, 小牧理: 横力と一定軸力を受ける円筒エルの終局状態に関する研究, 土木学会論文集, I-38, No.556, pp.107-118, 1997.1.

- 6) 宇佐美勉, 才塚邦宏, 木曾英滋, 伊藤義人: ハイブリット地震応答実験による鋼製橋脚の強震時挙動, 土木学会論文集, I-32, No.519, pp.101-113, 1995.7.
- 7) 才塚邦宏, 宇佐美勉, 芳崎一也, 鈴木森晶: 兵庫県南部地震観測地震はを用いたハイブリット地震応答実験による強制橋脚の強震時挙動, 土木学会論文集, I-38, No.556, pp.119-129, 1997.1
- 8) 佐藤聖嗣, 佐藤昌志, 小山田欣裕, 当麻庄司: 鋼管橋脚模型の座屈特性に関する実験と考察, 土木学会第 51 回年次学術講演会, I-A7, pp.14-15, 1996.9.
- 9) 中川知和, 安波博道, 小林洋一, 橋本修身, 水谷慎吾, 森脇清明: 弾塑性有限変形解析による箱形鋼製橋脚の耐力と変形性能の評価, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.599-604.1996.1.
- 10) 高久達将, 安藤紘三, 川田豊, 山本学, 松田宏: 地震時の鋼製橋脚の弾塑性解析とベンチマークテスト, 橋梁と基礎, Vol.30, No.8, pp.138-141, 1996.
- 11) 日本橋梁建設協会: 鋼製橋脚の水平保有耐力の照査及び動的解析手法確立のための数値解析 方案書(案) pp.1-12, 1995.9
- 12) 中村秀治: 鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析, 土木学会論文集, I-37, No.549, pp.205-219, 1996.10.
- 13) 増田智成, 堂垣正博, 三上市蔵: 繰返し曲げを受ける鋼箱形圧縮柱の弾塑性挙動, 土木学会第 51 回年次学術講演会, I-A10, pp.20-21, 1996.9.
- 14) (株)神戸機械研究所: 阪神高速神戸線鋼製橋脚 (P-584 山側) の動的非線形解析, 土木学会構造工学委員会 構造工学震災特別小委員会資料, 1996.11.
- 15) 松村寿男, 宇佐美勉, 水野英二: 繰返し荷重を受ける薄肉構造物の弾塑性挙動に関する解析的研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会, I-A11, pp.22-23, 1996.9.
- 16) 中沢正利, 加藤健旨, 鈴木基行, 大塚久哲, 岩熊哲夫: 鋼製橋脚モデルの交番繰返し耐力に関する数値解析, 土木学会第 51 回年次学術講演会, I-A47, pp.94-95, 1996.9.
- 17) 宮川力, 池田茂, 古本吉倫: 鋼製橋脚の地震時耐力照査に対する検討, 土木学会第 51 回年次学術講演会, I-A58, pp.116-117, 1996.9.
- 18) 依田照彦: 非線形構造解析による鋼製橋脚のシミュレーションJWG2 資料, 土木学会構造工学委員会 構造工学震災調査特別委員会, 1996.5.
- 19) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc: ABAQUS/Standard Users Manual, Vol. I, II, Ver.5.4, Ver. 5.6, 1997.

(1997年3月31日受付)

## EFFECT OF SHAPE AND ARRANGEMENT OF STIFFENERS ON LOCAL BUCKLING BEHAVIOR IN RECTANGULAR STEEL PIERS

Keisuke IHARA, Mitsutoshi KURODA and Hidehiko ABE

We investigate elasto-plastic local buckling behavior in rectangular steel piers subjected to horizontal cyclic loading under constant compressive axial load. Various shapes and arrangements of stiffeners are considered; i.e., 1) additional diaphragms between regular diaphragms based on a conventional design procedure, 2) utilizing angle members as vertical stiffeners, and 3) reinforcement of corners of the pier section by simple plate members. Based on the results of the finite element analyses, it is shown that the additional diaphragms as well as angle-shaped vertical stiffeners much improve the ductility capacity of the piers.