

弾塑性有限変形解析による箱形鋼製橋脚の耐荷力と変形能の評価

(株) 神戸製鋼所 中川知和*

新日本製鐵(株) 安波博道**

住友金属工業(株) 小林洋一***

川崎製鉄(株) 橋本修身○

日本鋼管(株) 水谷慎吾○○

コベルコシステム(株) 森脇清明○○○

地震時に繰り返し荷重を受ける箱形鋼製橋脚の弾塑性変形挙動を、有限要素法により解析した結果について報告する。実験結果と解析結果を比較し、荷重-水平変位のヒステリシス曲線やひずみ履歴などが概ね一致することを確認した。さらに、従来ほとんど耐荷性能評価の対象とされていなかった断面形式として、1) コーナ部を補強した場合、2) コーナ部を円弧形状にした場合、3) 縦補剛材としてU形鋼を用いた場合、および4) コーナ部を切り欠いた場合につき、各々の変形能に及ぼす効果を調べた。

1. はじめに

阪神・淡路大震災により橋梁構造物に甚大な被害が発生し、従来比較的じん性の高いとされてきた鋼製橋脚にも数多くの損傷のあったことが報告されている¹⁾。これらの損傷の多くは、橋脚に軸圧縮力と繰り返し曲げが作用したことにより発生したとされているが、この現象を実験的・解析的に解明し、今後巨大な地震力が作用した場合にも大きな損傷を受けないような補強方法あるいは新しい構造形式を早期に決定する必要がある。

従来、鋼製橋脚の耐荷力と変形能の評価は主に実験的に行われており^{2)、3)}、数多くの準静的載荷実験から、各種パラメータ(幅厚比、細長比、補剛材剛比、軸力比、載荷履歴など)と耐荷力性能の関係が明らかにされてきた。これらの研究は、今後大規模地震に対する耐震性の評価手法確立に生かされる貴重なものであるが、現状では必ずしも全てのパラメータに対して実験結果が得られている訳ではなく、今後も引き続き各種の実験を行う必要がある。したがって、パラメータの組み合わせは膨大な数になるので、実験の補完のために今後なんらかの予測解析は必要と

なろう。また、より耐震性の高い新しい構造形式を探るためには、解析による予備検討は極めて有効と思われる。

鈴木・宇佐美ら⁴⁾は単調載荷時の鋼製橋脚の弾塑性有限変形解析を行い、解析により得られた荷重-変位曲線や座屈モードが実験結果とよく一致することを確認しているが、繰り返し載荷状態に対する解析は行っていない。また、池内・西村ら⁵⁾は、箱形断面柱が軸圧縮力と繰り返し曲げを受ける際の弾塑性有限変形解析を行い、局部座屈に対する鋼製橋脚の強度と変形能を評価しているが、実験との比較は行っていない。このように、まだこの分野での解析技術は確立されたとはいえないようである。

本研究では、このような背景のもと、シェル要素を用いた弾塑性有限変形解析により、軸圧縮力と繰り返し曲げを受ける鋼製箱形断面橋脚の挙動を局部座屈やP- Δ 効果を考慮してシミュレートし、実験結果と比較することにより、解析の適用性を評価するための基礎資料を提供することを目的としている。さらに、従来ほとんど耐荷性能評価の対象とされていなかった断面形式として、1) コーナ部を補強した場合、2) コーナ部を円弧形状にした場合、3) 縦補剛材としてU形鋼を用いた場合、および4) コーナ部を切り欠いた場合、について解析的に評価を行い、既設鋼製橋脚の補強方法あるいは新設鋼製橋脚の設計に関して参考資料を得ることを目的としている。

2. 実験との比較に用いた解析モデルおよび解析条件

解析に用いた有限要素モデルを図-1に示す(1/2モデル)。本モデルは、建設省土木研究所で実施された実験^{6)、7)}の供試体を対象としており断面形状は図-2に示

キーワード：鋼製橋脚、耐震設計、FEM解析

* 神戸総合技術研究所 078-992-5641

** 鋼構造研究開発センター 0439-80-2204

*** 土木・橋梁技術部 03-3282-6625

○ 鋼構造研究所 043-258-7091

○○ 基盤技術研究所 044-322-6220

○○○ ソリューションビジネス事業部 078-992-5983

すとおりである。なお、解析は、ケース1：標準供試体（コーナ部補強なし）、およびケース2：コーナ部補強の2種類に対して実施した。ケース2に関しては、実験では補強鋼材をコーナ内側にボルト接合して補強を行っているが、解析においてはコーナ部の要素の板厚を24mmに増加させ（ケース1では9mm）、接合面の滑りは考慮しなかった。また、図-1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。

つぎに載荷条件としては、図-1に示す上部載荷点に水平方向の強制変位を繰り返し与え、さらに同点に182tf（全断面降伏軸力に対する比は約15%）の鉛直方向荷重を常時載荷した。なお、強制変位量に関しては、実験で得られた実測値（ベース部の回転変形を考慮して補正したもの）を与えた。

解析には汎用有限要素解析プログラム「ABAQUS」8）を適用した。用いた要素は4節点厚肉シェル要素（S4R）であり、板厚方向のせん断変形を考慮するとともに、数値的ロッキングの回避と計算時間低減のために次数低減（1点）積分が行なわれている。また、次数低減積分を行った場合に発生しやすい数値的なゼロエネルギー・モードの変形を小さくするために、アワーグラス制御が施されている。

図-3に、解析で用いた応力-ひずみ関係を示す。これは、供試体から採取した鋼材の引張試験結果から得たものである。また、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。なお、多軸応力場における1軸等価塑性ひずみ ϵ^P としては、次式のような累積値を用いた。

$$\epsilon^P = \int \sqrt{\frac{2}{3} d\epsilon_{ij}^P d\epsilon_{ij}^P} dt \quad (1)$$

ここに、 $d\epsilon_{ij}^P$ は塑性ひずみ増分の成分、 dt は時間増分（荷重増分に対応）である。上式を用いた場合には、塑性ひずみ増分の絶対量が加算されるため、材料が圧縮と引張りを交互に受ける場合にも等価塑性ひずみは増加し続け、繰り返し載荷の回数の影響が現れることになる。

なお、解析においては初期不整と残留応力の影響は考慮しなかった。

3. 実験供試体の解析結果

(1) 変形状況

図-4および図-5に解析で得られた変形状況を示す

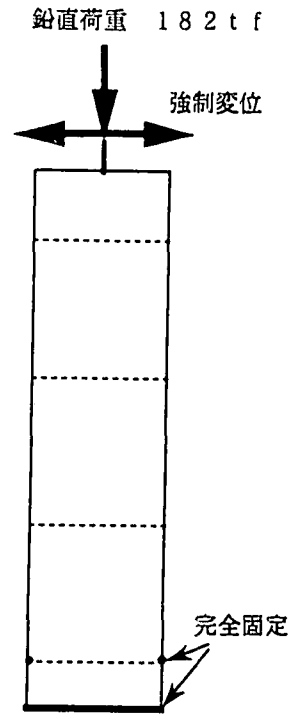


図-1 有限要素解析モデル

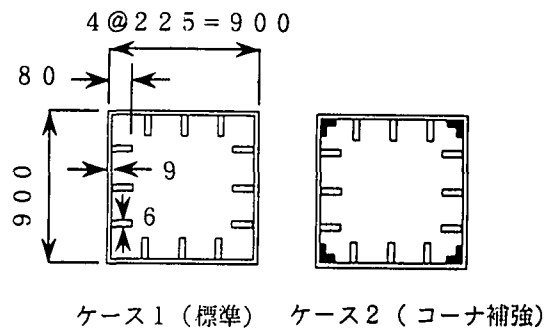


図-2 解析対象断面

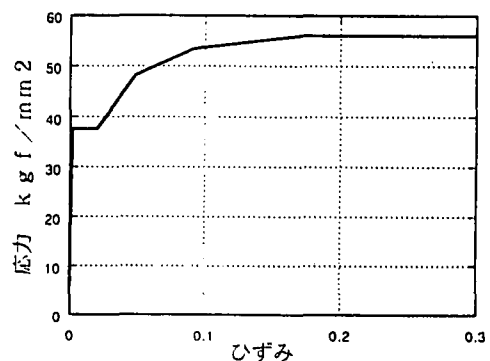
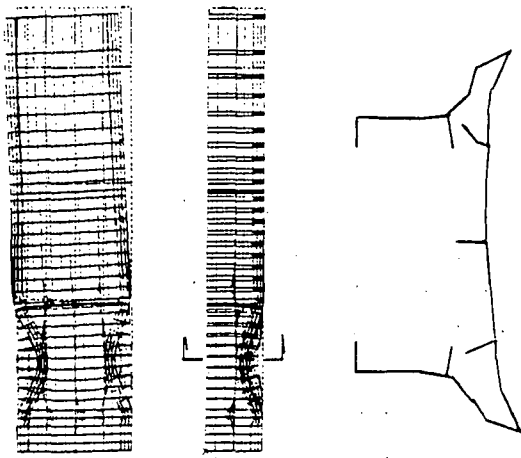


図-3 解析で用いた応力-ひずみ関係

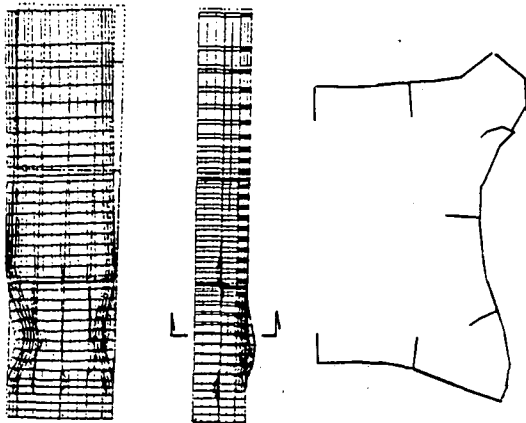
(8サイクル終了時)。ケース1に較べてケース2（コーナ部補強）では、コーナ部の角度変化が明らかに小さいことが、解析結果から判る。

(2) 水平荷重-水平変位関係

図-6および図-7に、解析により得られた載荷点における水平荷重-水平変位履歴曲線、および実験により得ら



ウェブ面 フランジ面 下パネル中央断面
図-4 ケース1標準供試体の変形状況



ウェブ面 フランジ面 下パネル中央断面
図-5 ケース2コーナ補強供試体の変形状況

れた同曲線の包絡線を示す。図-6はケース1（標準供試体）に対する結果であり、最大水平荷重に若干の差がみられるものの、解析値と実験値は概ね一致している。また、図-7はケース2（コーナ部補強）に対する結果で、最後の2サイクルを除いて両者は概ね一致している。最後の2サイクルでは、解析値の方が実験値よりも水平荷重が大きくなるが、これは解析においてはコーナ部補強鋼材とフランジ（およびウェブ）間の滑動を考慮しなかったことによると思われる。また、以上の履歴曲線における各サイクルの吸収エネルギー量の比較を図-8に示す。同図において、横軸は各サイクルにおける最大水平変位量、縦軸は図-9に示すような1サイクルのヒステリシス曲線の面積であり、1サイクル当りの塑性仕事量（すなわち吸収エネルギー量）に相当する。同図から判るように、ケース1の場合には解析値と実験値はよく一致しており、ケース2については変位が75mmまではよく一致するが、それ以降は先と同じ理由により解析値の方が吸収エネルギーが大きくなる。

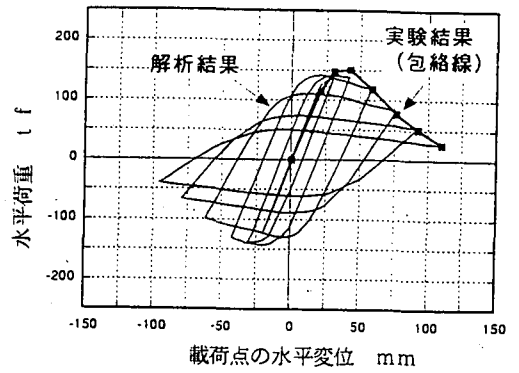


図-6 水平荷重-水平変位曲線（標準供試体）

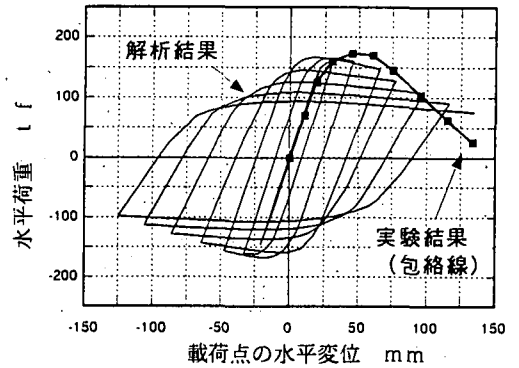


図-7 水平荷重-水平変位曲線（コーナ部補強）

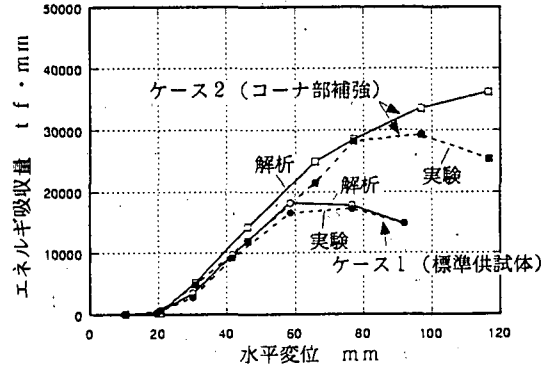


図-8 1サイクル当りのエネルギー吸収量

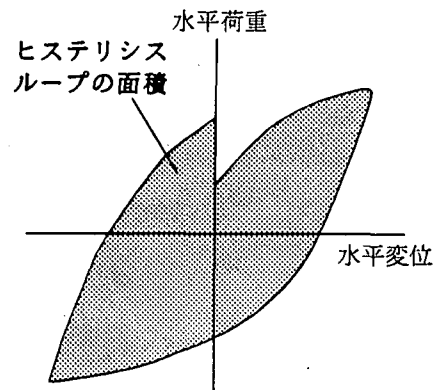


図-9 1サイクル当りのエネルギー吸収量の定義

(3) 応力-ひずみ履歴

つぎに、図-10に下部フランジ中心部の軸方向ひずみ履歴を示す(本図は各サイクルにおいて水平変位量が最大になった時点でのひずみを直線で結んだものであり、連続的な履歴曲線ではない)。局部座屈発生後のひずみは非常に大きくなるため実測値との比較はできないが、少なくともそれ以前のひずみは概ね一致しているといえる。なお、参考までに図-11に、解析により得られた同点の軸方向ひずみと軸方向応力の関係を示す。同図より、フランジが局部座屈した後も、材料は圧縮と引張を交互に受け、塑性ひずみが累積されていくことが判る。

また、図-12にはフランジ中心部と同コーナ部における累積等価ひずみ〔式(1)〕履歴の解析結果を示す。同図より、コーナ部にひずみが集中して最終的には40%以上の値に達することが判る。また、コーナ部を補強することによりひずみ量は低減することも判る。

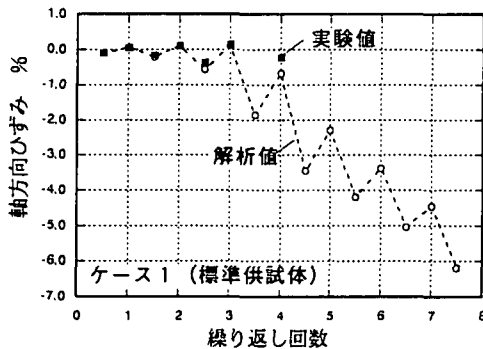


図-10 フランジ中央の軸方向ひずみ履歴

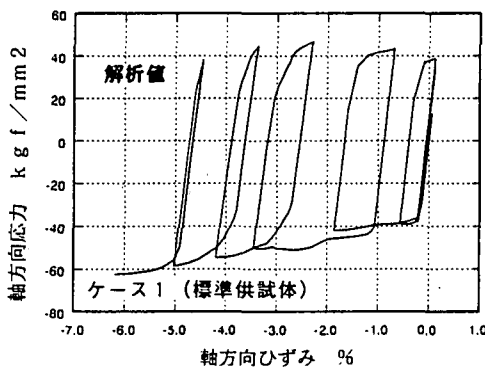


図-11 フランジ中央の軸方向ひずみ-応力関係

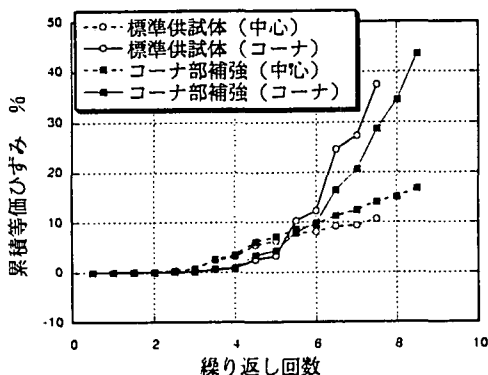


図-12 フランジの累積等価ひずみの履歴

4. 構造形式による変形能の相違

(1) 解析モデル

ここでは、図-13に示すような5種類の断面形状に対して前記と同様の弾塑性有限変形解析を実施し、各々の変形能を比較した。対象とした断面は全て3m×3mの箱形であり、高さ方向には3mピッチでダイアフラムが配置され、高さは15mである(計5パネル)。解析モデルとしては、下部の2パネルをシェル要素で分割し、上部3パネル分は平面保持の仮定が成立すると考えて骨組要素によってモデル化した。シェル要素と骨組要素の結合には剛体要素を用いた。荷重条件としては、上部端点に鉛直方向に2700tfを常時載荷した(全断面降伏軸力の約15%になるように設定した)。また基部は完全固定とし、上部端点には水平方向に $\pm \delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$... という様に、1サイクルに δ_y ずつ増加する強制変位を与えた(+9 δ_y まで)。ここに、 δ_y は橋脚基部の塑性化が始まる時の水平変位量で、次式で表される。

$$\delta_y = \frac{H_y L^3}{3EI} \quad (2)$$

$$H_y = \frac{2I}{BL} (\sigma_y - \frac{P}{A}) \quad (3)$$

ここで、 H_y は橋脚基部の塑性化が始まる時の水平荷重、 L は橋脚高さ(=15m)、 EI は曲げ剛性、 B はウェブ高さ(=3m)、 σ_y は降伏応力(=3770kgf/cm²)、 P は鉛直荷重(=2700tf)、 A は断面積である。なお、鋼材の応力-ひずみ関係としては図-3に示すものを用いた。

図-13において、タイプAは従来多用されてきた断面であり、比較のための標準断面とした。表1に、各々のタイプの断面性能や期待効果などを示す。表中 P_y は全断面降伏軸力である。同表から判るように、基本的には断面積がほぼ等しくなる(鋼重一定)ように各々の断面形状を決定した。また、タイプDのU形鋼の断面積と断面2次モーメント(フランジ内表面に関する)は、タイプAの補剛材のそれらとほぼ同じである。

(2) 解析結果

図-14に、1サイクル当りの吸収エネルギー量の推移を示す。同図において、横軸は式(4)によって正規化された各サイクルの最大水平変位量、縦軸は式(5)により正規化された1サイクル当りの吸収エネルギー量である。

表1 解析の対象とした橋脚の諸元

タイプ	断面積 cm ²	断面2次モー メントm ⁴	P/P _y	δ _y	期待効果など
A	4664	0.6502	0.154	76.7	標準断面
B	4975	0.7090	0.144	77.6	コーナの角度変化防止
C	4466	0.6028	0.160	76.1	コーナのひずみ集中の緩和
D	4745	0.6500	0.151	76.9	補剛材の横倒れ座屈防止および補剛材で区切られるパネル数の増加
E	4664	0.5884	0.154	76.7	フランジの座屈強度の上昇 (フランジの幅厚比、補剛材剛比の低減)

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_y} \quad (4)$$

$$\bar{E}_i = \frac{E_i}{E_e} \quad (5)$$

ここで、

$$E_e = \frac{1}{2} H_y \delta_y \quad (6)$$

同図から以下のようなことが判る。

- 1) タイプA (標準) に較べると、タイプB (コーナ補強)、タイプD (U形リブ) およびタイプE (コーナ切欠) は、吸収エネルギーが増加する (変形能が高くなる)。
- 2) タイプB (コーナ補強) とタイプE (コーナ切欠) は、 $\bar{\delta} = 6$ まではほぼ同じ量のエネルギーを吸収するが、それ以降は前者の方が低下が緩やかである。
- 3) タイプC (円弧コーナ) は、タイプA (標準) とほとんど同じエネルギー吸収量となる。

また、各タイプの挙動について考察を加えると以下のようになる。

- 1) タイプB (コーナ補強) では、コーナ部の角度変化が拘束されることにより全体の崩壊が阻止される。
- 2) タイプC (円弧コーナ) では、コーナ部のひずみ集中の緩和を期待したが、本例では効果は小さかった。
- 3) タイプD (U形リブ) では、標準断面と較べて、断面性能 (AおよびI) がほとんど同じであるにも関わらず、 E_i の最大値は1.5倍程度になっている。これは、通常の板状補剛材に較べてU形鋼は面外座屈を生じ難いこと、および補剛材で区切られるパネル数が倍増したことにより、フランジの座屈強度が上昇したためであると思われる。

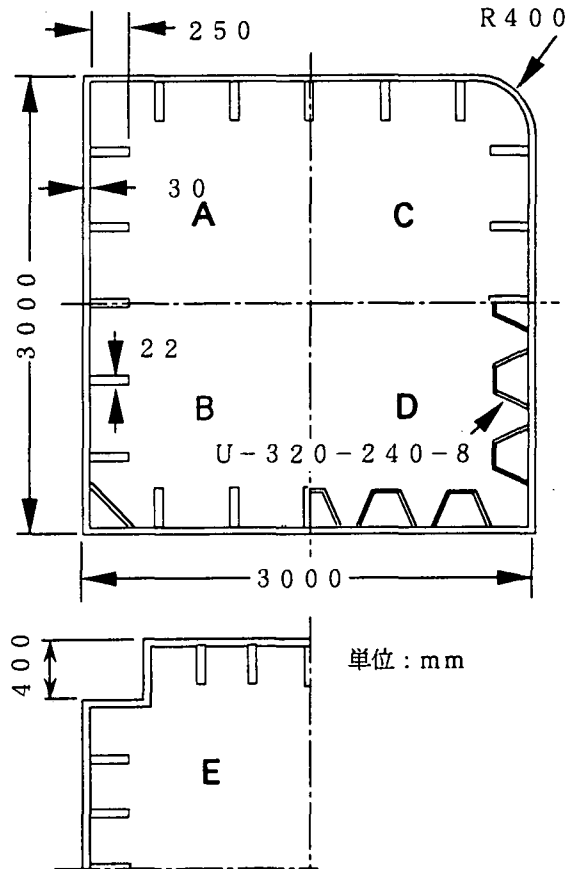


図-13 解析の対象とした断面形状

- 4) タイプE (コーナ切欠) の変形能が上昇したのは、フランジ幅が減少したことにより、標準断面に較べてパネルの局部座屈が生じ難くなったことによると思われる。ちなみに、フランジ幅を2140mmとして幅厚比パラメータと補剛材剛比⁹⁾を計算すると、各々0.266および2.644となる (標準断面では0.365および1.07)。

いま図-14から判断して変形能の優れた順に序列をつけるとすれば、タイプB (コーナ補強) > E (コーナ切欠) > D (U形リブ) > C (円弧コーナ) ≒ A (標準) となろう。いうまでもなく、この順序は一般化できるもの

ではなく、また実際には施工性や製作コストも考慮に入れて断面を設計する必要があるが、今後、既設橋脚の補強（タイプB）や新設橋脚（タイプC、D、E）の設計を行う際の参考になると思われる。

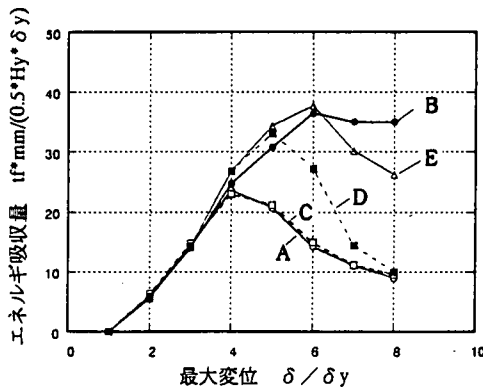


図-14 断面形状によるエネルギー吸収量の相違

5. 結論

1) 軸圧縮力と繰り返し曲げを受ける鋼製橋脚の挙動を、シェル要素を用いた弾塑性有限変形解析によってシミュレートし、実験結果と比較したところ、水平荷重-水平変位関係やひずみ履歴については概ね一致することを確認した。ただし、ボルト接合部での滑動が生じる場合には、解析の方が強度が高くなった。

2) 実橋サイズ（3m×3m）の箱形断面橋脚に関して、A：標準断面、B：コーナ部補強、C：円弧形状コーナ、D：U形補剛材、およびE：コーナ部切欠、の5種類を対象として解析を行ったところ、変形能（じん性）の高さはB、E、D、C、Aの順になった。これにより、断面形状を工夫することにより、鋼重をあまり増加させずに耐震性を向上できる可能性のあることが判った。

なお、鋼製橋脚の耐震性能向上に関しては、現在、建設省土木研究所を中心として首都高速道路公団、阪神高速道路公団、（社）日本橋梁建設協会、および（社）鋼材倶楽部の5機関による共同研究を実施しており、本解析はその一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会 鋼構造新技術小委員会：鋼構造物の安全性の調査報告（阪神大震災における鋼構造物の被害報告と今後の耐震設計について）、平成7年5月。
- 2) 鈴木森晶、宇佐美勉：繰り返し荷重下における鋼製橋脚モデルの強度と変形能の推定式に関する研究、土木学会論文集、No.519/I-32, pp. 115-125, 1995.7
- 3) 富永知徳、安波博道：厚肉少補剛断面を有する鋼製橋脚の変形能に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 40A, pp. 189-200, 1994.3
- 4) 鈴木森晶、宇佐美勉：軸圧縮力と横力を受ける箱形断面鋼片持柱の強度と変形能に関する解析的研究、構造工学論文集、Vol.41A, pp. 265-276, 1995.3
- 5) 池内智行、西村宣男：軸圧縮力と繰り返し曲げを受ける鋼箱形断面柱の耐荷力と変形能、第3回鋼構造シンポジウム鋼構造年次論文報告集、1995（投稿中）
- 6) 西川和廣、山本悟司、名取暢、寺尾圭史、安波博道、寺田昌弘：既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.42A, 1996（投稿中）
- 7) 西川和廣、山本悟司、高橋実：鋼製橋脚の補強に関する実験的検討、第21回日本道路会議論文集（B）、pp. 876-877, 1995.10
- 8) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS Theory Manual
- 9) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編、pp. 140-151、平成6年2月

EVALUATION OF STRENGTH AND DUCTILITY FOR BVOX SECTION STEEL PIERS BY FINITE ELEMENT ANALYSIS

Tomokazu Nakagawa, Hiromichi Yasunami, Youichi Kobayashi, Osami Hashimoto, Shingo Mizutani and Kiyooki Moriwaki

Elastic-plastic finite element analyses of steel piers subjected to an axial force and cyclic bending were carried out to evaluate the strength and the ductility under seismic loading. Comparison between analytical and experimental results are presented. Also, four types of cross sections with, (1) reinforced corners, (2) round shaped corners, (3) U-shaped vertical stiffeners and (4) concave corners, are analytically tested focusing on their ductility. It is found that types (1), (3) and (4) have an increased ductility compared to conventional cross sections.