

繰り返し水平荷重を受ける鋼製円筒橋脚柱の一解析法

山口栄輝*, 阿部圭吾**, 久保喜延***

*Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

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

***工博 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

道路橋示方書では、コンクリートを充填しない鋼製橋脚については、繰り返しの影響を考慮した載荷実験結果等に基づいて定められた諸数値を用いて動的解析を行い、耐震性を判定するのがよいとされている。兵庫県南部地震以降、鋼製橋脚の変形能に関する研究が精力的に行われているが、設計に活用できる実験データには限りがあり、またシェル要素を用いた非線形有限要素解析も多大な計算時間を必要とし、設計に用いることは容易でない。こうした点に鑑み、本研究では、繰り返し荷重下における円筒橋脚の変形挙動を、梁要素を用いた解析で求める手法について検討した。シェル要素解析に比べると、梁要素解析では計算時間が大幅に短縮できるものの、梁要素そのものは局部座屈を表現することができない。そこで、応力-ひずみ関係に修正を施すことにより対処した。したがって、修正応力-ひずみ関係を適切に定めることが本梁要素解析の要となるが、数値計算例を通して、ある鋼製円筒橋脚の変形性状から求めた修正応力-ひずみ関係は、高さや軸圧縮力の異なる円筒橋脚に対しても有効であることを示した。

Key Words: Steel-pipe bridge pier, Beam element, Modified stress-strain relationship

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震では、鋼製橋脚にも多大な被害が生じた。これらの被害の多くは、上部工重量に起因する軸圧縮力と地震力である繰り返し水平荷重により生じたものと考えられる。このような荷重下における鋼製橋脚の変形挙動に関する研究は従来より行われてきたが、兵庫県南部地震以降、その被害状況を踏まえ、さらに精力的に行われている^{1),2)}。

実験的検討が数多くなされている一方で、実験に要する費用・時間が多大であることから、実験結果をある程度の精度で再現できる解析法についても検討されている。すでに、汎用プログラムを用いた弾塑性有限変位解析で、実験結果と概ね一致した結果が得られることが報告されている³⁾⁻⁵⁾。これら解析的研究の多くは、シェル要素で橋脚をモデル化した上で、載荷実験に従い、変位制御で水平方向に交番載荷し、有限変形弾塑性解析を実行している。コンピュータの発達には目覚ましいものがあるが、現時

点においては、この種の解析で要求される計算量は、通常の実務設計で許容し得る限度を超えている。

平成8年の道路橋示方書耐震設計編⁶⁾では、コンクリートを充填しない鋼製橋脚については、動的解析を行って耐震性判定をするのがよいとされている。動的解析に用いる諸数値は、繰り返しの影響を考慮した載荷実験結果等に基づいて定めることが原則になっている。しかしながら、現段階では、設計に活用できる実験データには限りがあり、また設計に際して新たな載荷実験を行うのは現実的に無理がある。一方、上述のように、シェル要素を用いた非線形解析も多大な計算時間を要し、設計に用いることは容易でない。

ところで、鋼製橋脚の変形能については、繰り返し荷重下における荷重-変位履歴曲線そのものでなくとも、その包絡線が分かればある程度の情報は得られ、これをもとに、動的解析で用いる復元力モデルの構築も可能であると思われる。

こうした点に鑑み、本研究では、計算時間の短縮

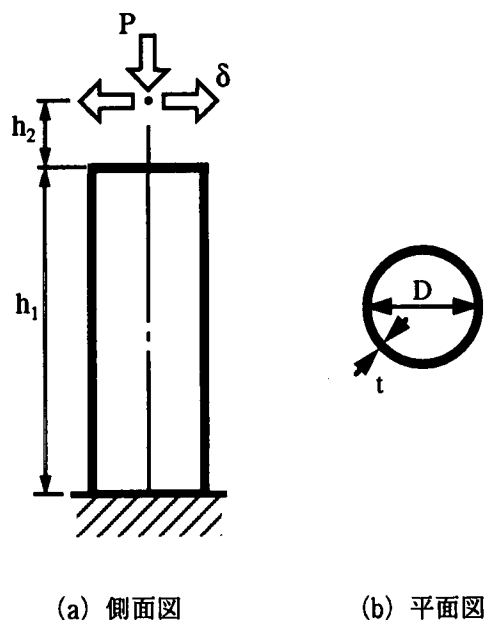


図-1 円筒橋脚柱供試体概略

を目的として、梁要素を用いた有限要素解析で荷重-変位履歴曲線の包絡線を求めることを試みた。解析対象として、ここでは、図-1に示すような鋼製円筒橋脚柱を取り上げ、計算はすべて汎用の有限要素法解析プログラム MARC⁷⁾で行った。

2. ベンチマーク解析

まず西川らによる鋼製円筒橋脚柱の荷重実験^{4), 8)}をベンチマーク解析対象として、検討を行った。これは図-1において、 $D=900\text{mm}$ 、 $t=9\text{mm}$ 、 $h_1=3173\text{mm}$ 、 $h_2=250\text{mm}$ として行われた実験であり、全断面降伏軸力 P_{y0} の 15%を一定圧縮軸力として作用させた上で、繰り返し水平荷重 H を準静的に載荷したものである。ここで、 P_{y0} は公称降伏応力度をもとに算出された値である。水平荷重 H の大きさは、載荷点の水平変位 δ の振幅を $0 \rightarrow +\delta_{y0} \rightarrow -\delta_{y0} \rightarrow +2\delta_{y0} \rightarrow -2\delta_{y0} \rightarrow \dots$ と漸次増加しながら変化するように制御された (δ_{y0} は、初期降伏水平荷重作用時における載荷点水平変位の理論値である)。実験の詳細については文献⁸⁾を参照されたい。

なお、この供試体は、高久らがシェル要素を用いた有限要素法で解析を行い、実験結果とよく一致した結果を得ている⁴⁾。以下では、この供試体を Pier-1 と呼ぶ。

2.1 シェル要素による解析 (シェル要素解析)

本研究では、図-1の円筒橋脚供試体を4節点



図-2 要素分割

シェル要素を用いて解析した。材料パラメータは文献⁴⁾に従って、ヤング率 $2.1 \times 10^4 \text{kgf/mm}^2$ 、ポアソン比 0.3、降伏応力 29.5kgf/mm^2 を用い、ひずみ硬化係数 0.01 のバイリニヤ型の単軸弾塑性挙動を仮定した。多軸応力下の弾塑性挙動は、ミーゼス型の降伏関数・ポテンシャル関数および移動硬化則で表されるとした。有限変形の影響は考慮に入れたが、幾何学的な初期不整 (製作誤差) および残留応力は無視した。

対称性を利用して 1/2 領域のみを解析対象とし、まず要素分割についての検討を行うため、単調載荷の下で、種々の要素分割を用いて実際に解析した。その結果、要素分割は最大荷重以降の荷重-変位応答に特に大きな影響を及ぼすことが判明した。これは文献⁹⁾で行われた検討と一致しており、結局、図-2に示すような、504 個の要素を用いた要素分割を本研究では採用することとした。

載荷条件は実験と同じとし、載荷点の水平変位 δ を制御することで、水平荷重 H を作用させた。この解析で得られた載荷点での水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を図-3に SHELL として記す。この図には実験結果 (EXPERIMENT) も示しているが、両者は互いによく一致している。またこの解析では、下端近傍でいわゆる“ちょうちん座屈”が発生した。図-4にそのモードを示している。

2.2 梁要素による解析 (梁要素解析)

図-1の円筒橋脚を2節点梁要素30個でモデル化し、弾塑性有限変位解析を行った。水平方向は線

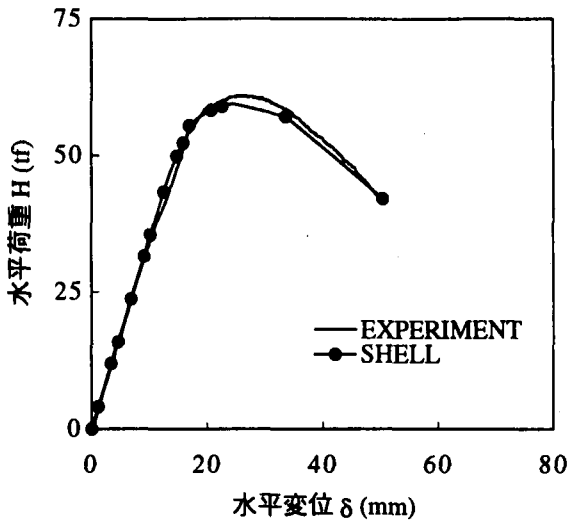


図-3 荷重-変位曲線
(Pier-1; 実験値とシェル要素解析結果)

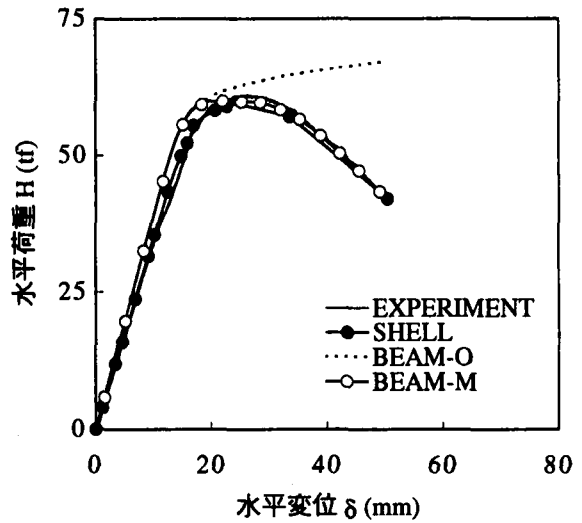


図-5 荷重-変位曲線
(Pier-1; 梁要素解析結果)

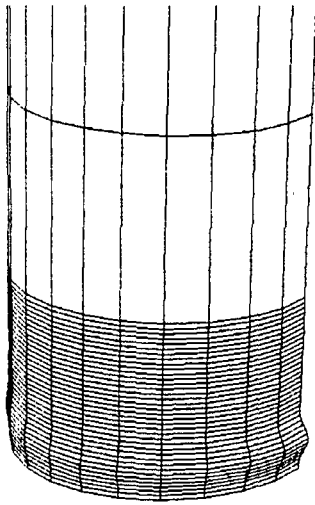


図-4 局部座屈モード

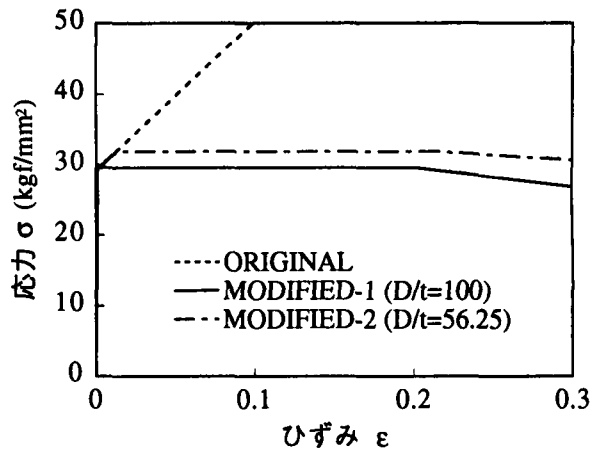


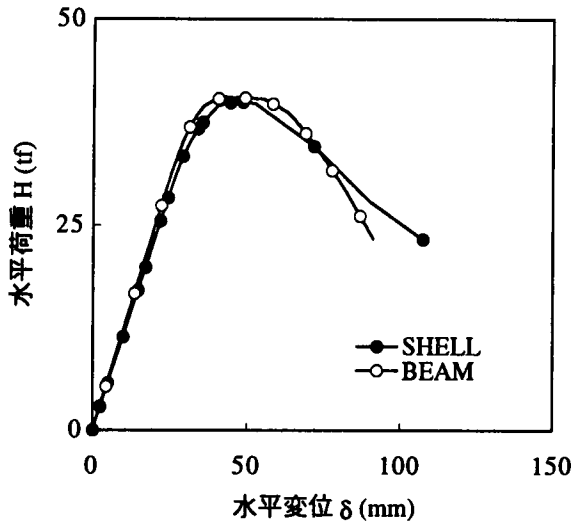
図-6 応力-ひずみ関係

り返し載荷ではなく、単調載荷とした。得られた水平荷重-水平変位曲線を図-5に BEAM-O として示している。実験やシェル要素解析で得られた包絡線と異なり、この曲線は単調に増加している。その主たる原因として、梁要素では局部座屈をとらえられない点が挙げられる。円筒橋脚に水平方向の繰り返し載荷を行うと、軸対称の局部座屈(ちょうちん座屈)が生じ、それに伴い剛性が低下する。この剛性低下を取り込めないために、梁要素解析では円筒橋脚の耐荷力を過大評価する結果となる。

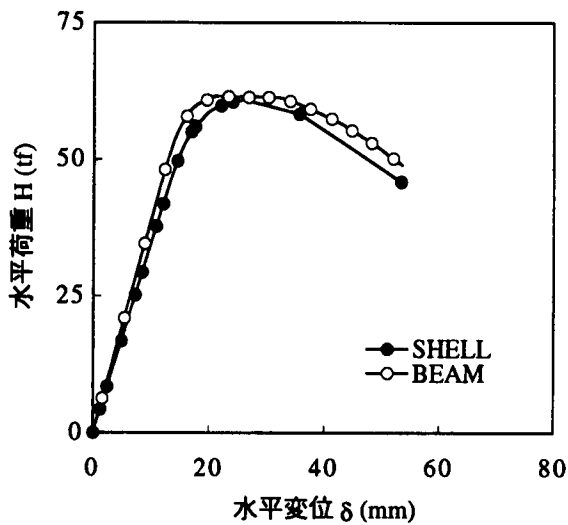
局部座屈による剛性低下の影響を取り込むため、ここでは、構成則に修正を施すことを考えた。すなわち、本来は材料の性質である応力-ひずみ関係に

構造特性を取り入れることとし、それにより、梁要素解析でシェル要素解析の包絡線を再現することを試みた。検討の結果、図-6に示す応力-ひずみ関係(MODIFIED-1)を用いることにより、シェル要素解析の包絡線とほぼ一致した水平荷重-水平変位曲線が得られた。それを BEAM-M として図-5に示している。

図-6の修正応力-ひずみ関係(MODIFIED-1)は、初期降伏応力以降、2本の直線で構成された簡単なものである。これらの直線の勾配は、本来の材料特性(ORIGINAL)の勾配とは異なっている。その差が局部座屈の影響である。最初の直線は勾配がゼロであるが、2本めの直線の勾配は負になっており、局



(a) Pier-1H



(b) Pier-1P

図-7 荷重-変位曲線

($D/t=100.0$; 高さ・軸圧縮力が異なる橋脚柱)

部座屈の影響がかなり大きくなった段階に対応している。

3. 有効性の検討

3.1 修正応力-ひずみ関係の適用性

上述の梁要素解析法の要は、局部座屈の影響も含んだ修正応力-ひずみ関係にある。ただし、2章では、Pier-1を対象に、修正応力-ひずみ関係を決定し、この特定の鋼製円筒橋脚についての有効性を示したに過ぎない。そこで、その適用性を検討するために、高さが1.5倍 ($h_1=4759.5\text{mm}$) になった円筒橋脚 (Pier-1H) および作用する軸圧縮力が

$0.1P_{y0}$ に減少した円筒橋脚 (Pier-1P) の梁要素解析を、MODIFIED-1を用いて行った。

これら2ケースの解析では、梁要素による計算だけでなく、シェル要素による解析も行った。図-7に、梁要素解析の結果をBEAM、シェル要素解析の結果をSHELLとして、載荷点での水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を示している。

Pier-1Hの大変形領域で2解析法間の計算結果(図-7(a))に差が見られるが、こうした大変形領域では耐力の低下も大きく、そもそも設計では考慮しない領域となっている。したがって、いずれのケースでも、梁要素解析による結果は、シェル要素解析の結果と実用上、十分によく一致していると結論づけてよいと思われる。またこれらの解析では、橋脚が高くなるにつれて耐力が低下し、軸圧縮力が減少すれば耐力の増す傾向がとらえられている。

上記の結果は、ある特定の鋼製円筒橋脚をもとに決定した修正応力-ひずみ関係が、異なる高さの円筒橋脚や異なる軸圧縮力を受ける円筒橋脚にも有効であることを示唆している。すなわち、ある特定の鋼製円筒橋脚をもとに修正応力-ひずみ関係を決定しておけば、高さや軸圧縮力の異なる円筒橋脚の包絡線は、梁要素解析で容易に求められることを示している。

3.2 径厚比の影響

次に、Pier-1の板厚 t を16mmに変更し、径厚比を減少させた鋼製円筒橋脚柱を考えた。板厚以外の寸法や載荷条件等の解析条件が、すべてPier-1と同じである円筒橋脚を標準橋脚 (Pier-2) として、まずシェル要素解析を行った。そこで得られた載荷点での水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を、梁要素解析で再現できるように修正応力-ひずみ関係を定めた。それを図-6にMODIFIED-2として示している。またこの修正応力-ひずみ関係を用いた梁要素解析結果として、載荷点での水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線 (BEAM) を、シェル要素解析の結果 (SHELL) とともに図-8に示している。

この新しい修正応力-ひずみ関係 (MODIFIED-2) も、初期降伏応力以降、3本の直線で構成された比較的簡単なものである。ただし、板厚が増すと局部座屈が発生しにくくなることを反映して、本来の材料特性から乖離する点の応力度は上昇している。これが径厚比の影響であり、今後さらに数値計算を行うことにより、この点に関して検討を加える予定である。

Pier-2を基に定めた修正応力-ひずみ関係

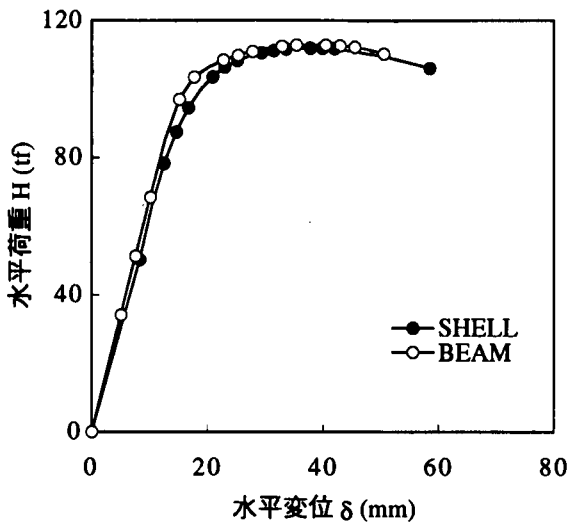
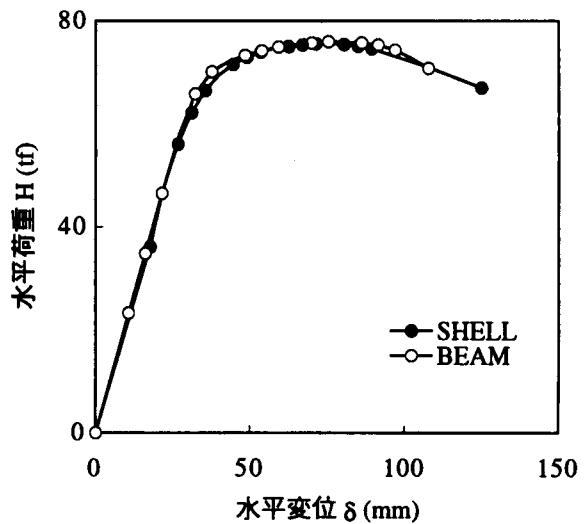


図-8 荷重-変位曲線 (Pier-2)



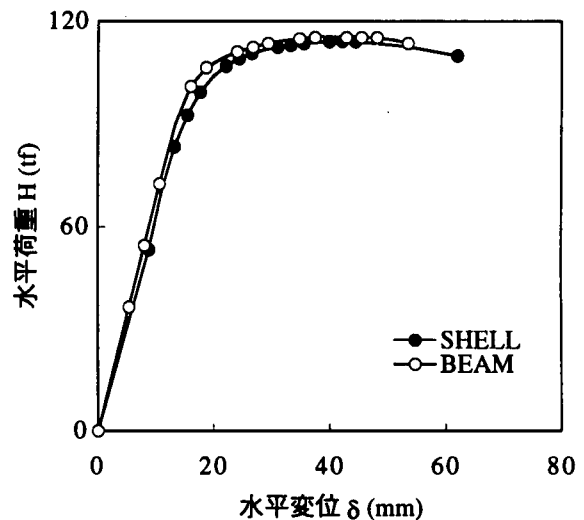
(a) Pier-2H

(MODIFIED-2) を用いて、高さを 1.5 倍 ($h_1 = 4759.5\text{mm}$) にした場合 (Pier-2H) と軸圧縮力を $0.1P_{y0}$ に減少した場合 (Pier-2P) の 2 ケースの解析を行った。計算結果を図-9 (a) および (b) に示しているが、いずれの場合も、梁要素解析の結果 (BEAM) はシェル要素解析の結果 (SHELL) を十分によく近似している。すなわち、図-9 の結果は、3.1 で得られた修正応力-ひずみ関係に関する知見が、異なる径厚比の鋼製円筒橋脚でも成立することを示唆している。またここでも、橋脚が高くなるにつれて耐力が低下し、軸圧縮力の減少に伴って耐力の増す傾向がとらえられている。

4. おわりに

本研究では、構成則に修正を施し、水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を梁要素解析で求めることを試みた。数値計算により、ある特定の鋼製円筒橋脚に対して決定した修正応力-ひずみ関係は、高さや軸圧縮力が異なる橋脚にも有効であることが示された。ただし、本梁要素解析法の要である修正応力-ひずみ関係は、材料特性のみならず、径厚比によっても変化する。今後は、その点に考慮して、修正応力-ひずみ関係の求め方に関する検討を行う予定である。

梁要素解析の利点は計算時間が短いことである。本研究で使用したコンピュータは Sun SPARCstation 20 であるが、シェル要素解析では計算終了までに約 10 時間を要したのに対し、梁要素解析は 10 分も必要としなかった。入力データの準備や計算結果の整理に要する時間もシェル要素解析に比べると、はる



(b) Pier-2P

図-9 荷重-変位曲線
($D/t=56.25$; 高さ・軸圧縮力が異なる橋脚柱)

かに短くてすむため、鋼製橋脚の変形能を把握する解析法としては、より実用的な手法であろうと考えている。なお、本研究では梁要素解析でも有限要素法を使用したが、道路橋示方書⁶⁾に定める鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力等の計算法に $P-\Delta$ 効果を導入しても、同じ計算結果を得ることはできると思われる。今後、この点についても検討を加えていく予定である。

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) 今後の耐震設計と耐震補強工法—鋼製橋脚, 橋梁と基礎, Vol. 30, No. 8, pp.127-141, 1996年.
 - 3) 中川和知, 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荷力と変形能の評価, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.599-604, 1996年.
 - 4) 高久達将, 安藤紘三, 川井豊, 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年.
 - 5) 安波博道, 寺田昌弘, 名取暢, 寺尾圭史, 西川和廣: 弾塑性FEMによる鋼管柱載荷実験のシミュレーション解析, 鋼構造論文集, Vol. 3, No. 9, pp.1-10, 1996年.
 - 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 丸善, 1996年.
 - 7) MARC K-6 マニュアル A~D 編, 日本マーク, 1994年.
 - 8) 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, pp.975-986, 1996年.
 - 9) 桜井孝昌: 構造工学震災調査特別小委員会WG2資料(WG2-27), 土木学会構造工学委員会, 1996年.
- (1997年3月31日受付)

A NUMERICAL PROCEDURE FOR ANALYSIS OF STEEL-PIPE BRIDGE PIERS BY BEAM ELEMENTS

Eiki YAMAGUCHI, Keigo ABE and Yoshinobu KUBO

After the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, much research from both experimental and numerical viewpoints has been conducted in Japan to improve the seismic performance of steel bridge piers. In this conjunction, nonlinear finite element analysis with shell elements has been found to reproduce experimental results with reasonable accuracy. Such an analysis is, however, very time-consuming. In the present study, a method to compute a characteristic behavior of steel-pipe bridge piers in a much shorter time is proposed. The key strategy is to employ beam elements with the modified stress-strain relationship that includes the effect of local buckling in itself. The validity of the proposed method is discussed through numerical examples.