

繰り返し水平荷重を受ける鋼製R付箱形断面橋脚の 弾塑性有限変形解析

山口栄輝*, 後藤芳顯**, 阿部圭吾***, 林正拳+, 堂上幸男++, 吉崎信之+++

- * Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)
 ** 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
 *** 工修 日立造船株式会社 鉄鋼事業本部建設本部計画部 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀2-6-33)
 +九州工業大学大学院 工学系研究科博士前期課程 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)
 ++福岡北九州高速道路公社 北九州事務所 (〒802-0072 福岡県北九州市小倉北区東篠崎3-1-1)
 +++福岡北九州高速道路公社 福岡事務所 (〒812-0055 福岡県福岡市東区東浜2-7-53)

福岡都市高速1号線においては、美観上の理由からコーナー部に曲率を有する箱形断面(R付箱形断面)の鋼製橋脚が提案された。しかしながら、R付箱形断面橋脚については、大地震後の機能保持にも配慮した耐震設計を行うための基礎的資料が十分に得られていないため、実橋脚の1/3.4の供試体を用いて実験が行われた。本研究では、その実験結果を有限要素法でシミュレーションすることをまず試みた。この解析においては、有限変形および材料非線形性の影響を考慮に入れ、ミーゼス型の弾塑性モデルを採用した。硬化則には等方硬化と移動硬化を用い、さらに三曲面モデルによる解析も行った。実験結果との比較により、三曲面モデルがR付箱形断面橋脚の解析にも有効で、従来の弾塑性モデルよりも優れていることが判明した。また三曲面モデルを用いて、縦補剛材剛比の異なる橋脚の解析を行い、補剛材剛比の影響は最大耐荷力以降で顕著になることを明らかにした。

Key Words: Steel bridge pier, Finite element analysis, Local buckling, Elastic-plastic behavior

1. はじめに

美観上の理由から鋼製橋脚の断面形状としてコーナー部に曲率を有する断面(以下、R付箱形断面)が福岡都市高速1号線において採用された。R付箱形断面に関しては、従来の矩形断面と比べ靱性に優れているとの報告もある^{1), 2)}が、兵庫県南部地震レベルの大規模地震を想定した上での耐震性の検討事例はなかった。そこで、鋼製R付箱形断面橋脚の耐震性に関する基礎的資料を得る目的で載荷実験が行われ、最大耐力、変形性能および破壊形態が検討された³⁾。

鋼製橋脚の耐震性を解明するには、費用や時間的な制約から実験だけでは自ずから限界があり、数値解析的な検討が必要となる。その際には、材料非線形や幾何学的非線形を考慮に入れた複合非線形解析を行うことが要求される。従来、この種の非線形解析は研究レベルでのみ行われてきたが、コンピュータ性能の飛躍的向上、汎用有限要素解析ソフトウエ

アの普及により、実務レベルにおいても設計者が比較的容易に行えるようになってきた。このような状況を反映し、兵庫県南部地震以降、有限要素法を用いた鋼製橋脚の複合非線形解析が数多く行われ、かなりの知見が蓄えられてきている^{4) - 6)}。

本研究では、有限要素法を用いて鋼製R付箱形断面橋脚を解析し、先に実施された載荷実験のシミュレーションをまず試みる。さらに、補剛材剛比を変更して解析を行い、R付箱形断面橋脚の変形性状に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概略³⁾

実験供試体の概略図を図-1に示している。断面のコーナー部には曲率半径142mmで丸みがつけられ、板厚はフランジ・ウェブで7mm、縦リブで8mmである。供試体高さは3073mm、載荷点は供試体頂部より280mm上の位置である。使用鋼材はSM490Yであり、その材料特性を把握するために、一軸引張試験が実施され

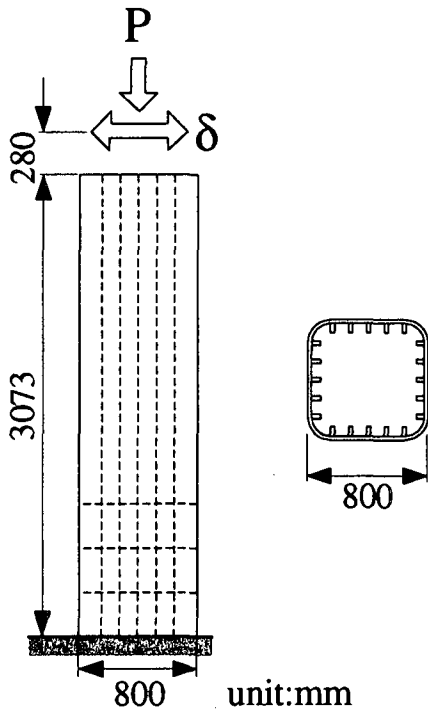


図-1 供試体概略図

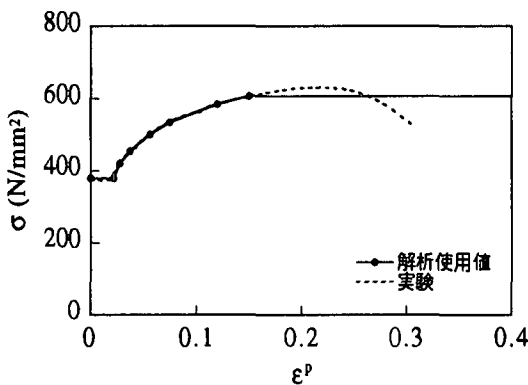


図-2 一軸引張応力下の材料挙動

た。図-2に、一軸引張試験で得られた真応力-対数塑性ひずみ曲線および本研究の解析で使用した真応力-対数塑性ひずみ曲線を示している。後者では、くびれの生じる公称応力最大点以降の真応力は一定と仮定している。

補剛板（フランジ、ウェブ）の幅厚比パラメータ R_R 、縦リブの幅厚比パラメータ R_h 、補剛材剛比 γ/γ^* (γ^* :線形座屈理論により求められる最適補剛材剛比)に制限を設けることで、耐震性能を向上させることができる⁷⁾。そのため、本載荷実験の設計では次のような制限が設けられた。

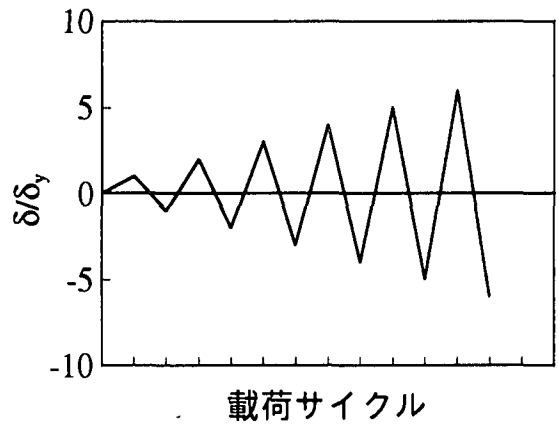


図-3 載荷点の水平変位履歴

$$R_R \leq 0.4, R_h \leq 0.5, \gamma/\gamma^* \geq 3 \quad (1)$$

本載荷実験では、供試体に全断面降伏軸力 P_{y0} の15%を一定圧縮軸力 P として作用させた上で、繰り返し水平荷重 H を準静的に作用させる水平交番載荷が採用されている。ここで、 P_{y0} は公称降伏応力 σ_{y0} をもとに算出した値である。水平荷重 H の大きさは、載荷点の水平変位 δ の振幅が $0 \rightarrow +\delta_{y0} \rightarrow -\delta_{y0} \rightarrow +2\delta_{y0} \rightarrow -2\delta_{y0} \rightarrow \dots$ と漸次増加しながら変化するよう制御された。図-3の概念図が示すように、各振幅における繰り返しは1回とされた。なお、基本変位 δ_{y0} は次式により算出された値である。

$$\delta_{y0} = \frac{H_{y0} h^3}{3EI} \quad (2)$$

$$H_{y0} = \left(\sigma_{y0} - \frac{P}{A} \right) \frac{Z}{h} \quad (3)$$

ここに、 h = 供試体下端と載荷点の距離、 EI = 曲げ剛性、 A = 断面積、 Z = 断面係数である。 H_{y0} 、 δ_{y0} は、それぞれ、橋脚供試体を片持梁と見なして求めた初期降伏水平力、それに対応する載荷点水平変位の理論値となっている。

なお、本実験の詳細については、文献3)を参照されたい。

3. 解析モデル

本解析では、有限要素法を用いて載荷実験の数値シミュレーションをまず試みるが、その際には、実験供試体および境界条件の対称性を考慮して供試体の1/2のみを解析対象とし、下端部より約半分の高

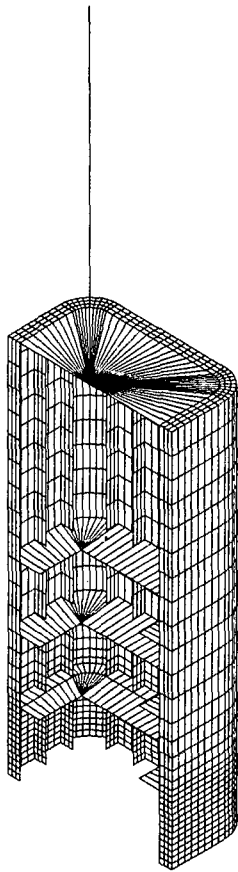


図-4 要素分割図

さまでシェル要素，残りは梁要素を用いて要素分割した(図-4)．境界条件は実験に合わせ，局部座屈を再現できるよう，有限変位，有限ひずみ問題として解析を行った．

材料挙動は，関連流れ則に従うミーゼス型弾塑性理論の構成則で記述できるとし，硬化則には通常の等方硬化則と移動硬化則を用いた．さらに，後藤らにより開発された三曲面モデル⁸⁾を用いた解析も行った．

三曲面モデルは，鋼製橋脚の繰り返し荷重下の挙動を精度よくシミュレートすることを目的として提案された繰り返し塑性モデルである．不変の境界曲面と縮小・移動する降伏曲面に加え，硬化係数の変化を表す不連続曲面を導入することにより，弾性域の収縮，ひずみ硬化，降伏棚といった現象を表現する．降伏関数にはミーゼス型を採用し，硬化則は等方硬化則と移動硬化則を組み合わせた混合硬化則を基本としている．

三曲面モデルは，ひずみの小さな領域から大ひずみの領域に至る鋼材の繰り返し弾塑性挙動を，少ない内部変数とパラメータで表現することを目指しており，土木研究所で実施された鋼製橋脚の繰り返し

載荷実験結果を用いたキャリブレーションにより，解析に必要なパラメータ数を減らし，鋼材の一軸引張試験の結果のみからすべてのパラメータが決定できるよう工夫されている．本解析では図-3に示す一軸引張試験結果より，材料パラメータを決定した．

4. 解析結果および考察

4.1 実験結果との比較

(1) 荷重-変位曲線

解析結果として，載荷点での水平荷重-水平変位関係の履歴曲線を図-5に示す．

等方硬化則による解析結果(図-5(a))では，荷重-変位曲線の勾配が負になるのが早く，履歴曲線の最大荷重値が包絡線には現れない．これは実験では観察されない現象であり，交番載荷問題における等方硬化則の適用性の限界を示すものと思われる．

移動硬化則による解析結果(図-5(b))は，等方硬化則による解析結果より実験結果に近い．しかしながら，弾性域が一定の大きさに保たれて縮小しないため，実験では逆負荷時に剛性の低下が認められるものの，解析結果にはそのような傾向は見られない．その結果，履歴ループの形は実験結果より角張ったものとなっている．これは移動硬化則の限界を示すものである．

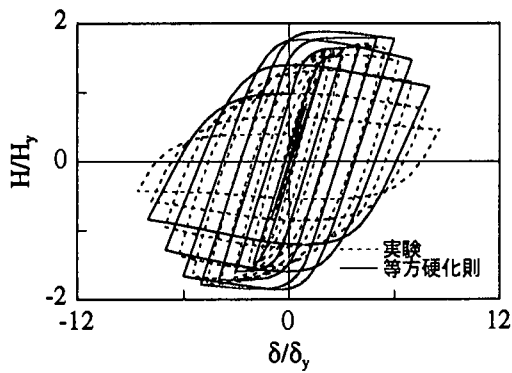
三曲面モデルの解析結果(図-5(c))は全領域について実験結果とかなり良く一致している．履歴曲線の形状も実験結果とほぼ同じであり，他の解析結果に比して，かなり精度の良い結果が得られている．

(2) 変形状

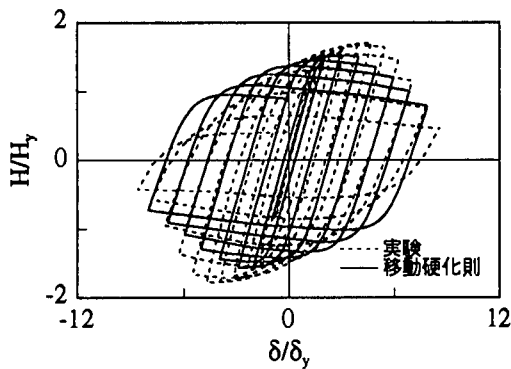
図-6に，三曲面モデルによる解析で得られた変形図を示す．これらは，載荷点での水平変位が折り返し点に達したときの供試体下端部の変形状態である．各図のタイトルにおける $+4\delta_y$ 等は，その変形が生じた際の水平変位を表している．

この図に示すように， $+4\delta_y$ 付近で供試体基部のフランジに局部座屈が生じ始め， $+7\delta_y$ では補剛板全体の面外変形が認められる．こうした変形状は，実験時の観察結果³⁾と非常に良く一致している．

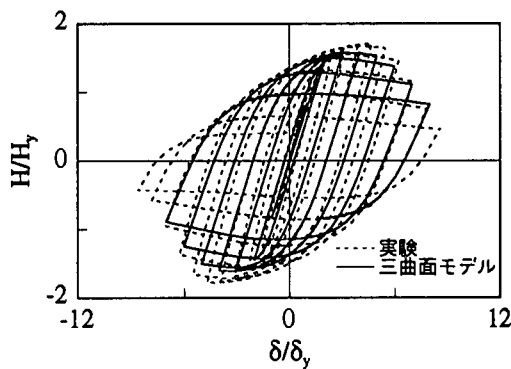
この供試体の縦補剛材剛比はかなり大きい($\gamma/\gamma^* = 3.12$)が，これらの変形図を見ると，縦補剛材位置で節になった局部座屈モードになっており，補剛効果の大きさがうかがえる．また局部座屈は最下段のダイアフラム位置より下側のみで生じており，ダイアフラムにより局部座屈の発生位置を制御できていることがわかる．これらの解析結果も実験結果と良く符合している．



(a) 等方硬化則



(b) 移動硬化則

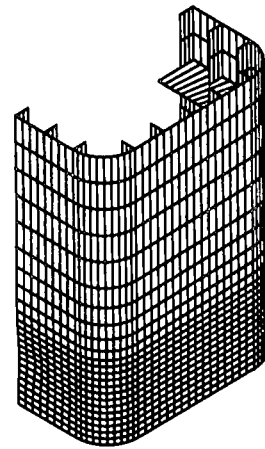


(c) 三曲面モデル

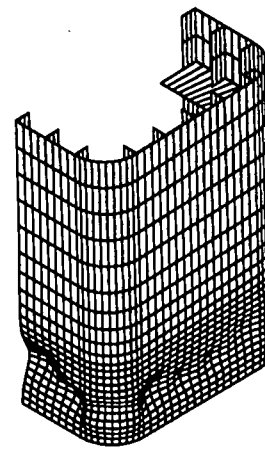
図-5 水平荷重-水平変位関係 (履歴曲線)

4.2 補剛材剛比の影響

R付箱形断面橋脚における縦補剛材剛比 γ/γ^* の影響を調べるために、 γ/γ^* の異なる橋脚についても解析を行い、解析結果として、載荷点での水平荷重-水平変位曲線(包絡線)を図-7に示している。図中の γ_0 は元の断面、 γ_1 は γ_0 に比べ γ/γ^* を約1/3にした新しい断面、 γ_2 は、元の断面を変化させずにダイアフラム間隔を広げて γ_1 にほぼ等しい



(a) $+4\delta_y$



(b) $+7\delta_y$

図-6 変形図

γ/γ^* にした橋脚を表す。図-7の結果より、 γ/γ^* を変化させても最大耐力にはあまり変化は生じないが、ピーク以降の領域において γ/γ^* の影響が大きく現れているのがわかる。これは他の橋脚による実験においても確認されている現象である⁷⁾。

次に γ/γ^* がほぼ等しい γ_1 と γ_2 の結果を見ると、互いによく一致した形状の包絡線となっている。これより、 γ/γ^* を調整する際は、断面の変更によっても、単にダイアフラム間隔の変更で対応しても、載荷点での荷重-変位応答に大きな差は生じないことがわかる。

また図-8には、載荷点での水平変位が $+7\delta_y$ の時の変形図を示している。 γ_0 の場合(図-6)には

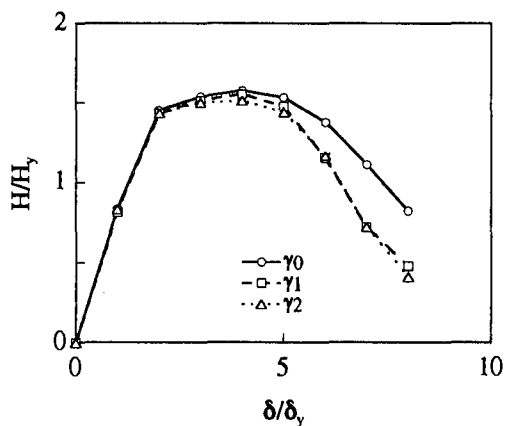


図-7 水平荷重-水平変位関係 (包絡線)

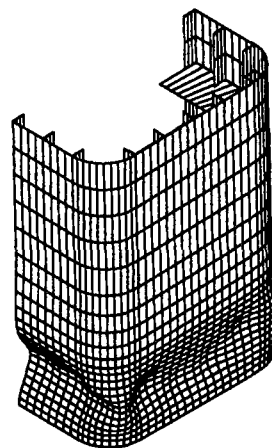
補剛材位置で節になった局部座屈モードが観察されるが、 γ/γ^* の値を低減した γ_1 、 γ_2 では、補剛材位置での節が明確ではなく、補剛板全体の面外変形が顕著になっている。補剛材の変形も γ_0 に比べると明らかに大きくなっている。これらは、 γ/γ^* の低減により補剛効果が減少したことに対応するものである。

5. おわりに

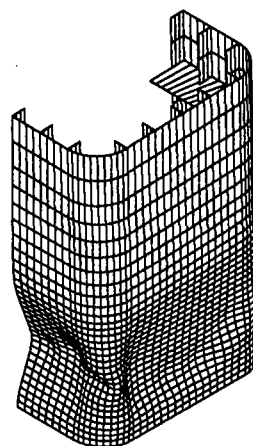
繰り返し水平荷重を受ける鋼製R付箱形断面橋脚の弾塑性有限変形解析を、通常の硬化則モデル（等方硬化則、移動硬化則）および三曲面モデルを用いて行った。この解析結果より、円形断面橋脚、矩形断面橋脚のみならず、R付箱形断面橋脚においても三曲面モデルは有効であり、他の通常の弾塑性モデルよりも優れていることが明らかとなった。また縦補剛材剛比 γ/γ^* の影響は、R付箱形断面橋脚でも最大耐荷力以降の劣化域で顕著になることを解析例により示した。

参考文献

- 1) 渡邊英一，杉浦邦征，播本章一，長谷川敏之：ダクティリティに基づく鋼製橋脚の有効な断面形状に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 38A，pp.133-142，1992年。
- 2) 渡邊英一，杉浦邦征，森忠彦，鈴木巖：補剛R付き箱形断面短はり一柱の強度と変形性能，構造工学論文集，Vol. 38A，pp.143-154，1992年。
- 3) 吉崎信之，村山隆之，安波博道，名取暢，辻治生：鋼製R付箱形断面橋脚柱の耐震性に関する実験，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，土木学会，pp.339-346，1997年。



(a) γ_1



(b) γ_2

図-8 変形図 (+7 δ_y)

- 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，pp.138-141，1996年8月。
- 5) 大田孝二，中村聖三，小林洋一，中川知和，水谷慎吾，野中哲也：鋼製橋脚の耐震設計に対する構造解析ソフトウェアの適用性，橋梁と基礎，pp.33-39，1997年12月。
- 6) 構造工学震災調査特別小委員会：鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，土木学会（構造工学委員会），1997年。
- 7) 耐震設計研究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。

- 8) 後藤芳顯, 王慶雲, 高橋宣男, 小畑誠: 繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 189-206, 1998 年.

(1998 年 8 月 17 日受付)

ELASTIC-PLASTIC FINITE DEFORMATION ANALYSIS OF STEEL BRIDGE PIER OF BOX SECTION WITH ROUNDED CORNERS UNDER CYCLIC HORIZONTAL LOADING

Eiki YAMAGUCHI, Yoshiaki GOTO, Keigo ABE, Masataka HAYASHI, Yukio DOJO
and Nobuyuki YOSHIZAKI

From the aesthetic point of view, the construction of a steel bridge pier of a box section with rounded corners has been planned. However, since its seismic resistance was not thoroughly understood, an experiment of the pier under cyclic horizontal loading was conducted. In the present study, we have tried to simulate the behavior of the pier specimen in this experiment by the finite element method. Three different elastic-plastic models of the isotropic hardening, the kinematic hardening and the three-surface model were employed in this analysis. The comparison of the numerical results with the experimental data indicates that the three-surface model is superior to the others. Using the three-surface model, then, the influence of the stiffeners were investigated analytically. The results show that the influence is not clear up to the peak load, but that it becomes apparent in the post-peak region.