

## 阪神・淡路大震災で被災した鋼製円筒橋脚の非線形動的応答解析

中川 知和\*、大谷 修\*\*、森脇 清明\*\*\*

\*工博 (株) 神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-22 神戸市西区高塚台1-5-5)

\*\* (株) 神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-22 神戸市西区高塚台1-5-5)

\*\*\*工修 コベルシステム(株) ソリューションビジネス事業部 (〒651-22 神戸市西区高塚台1-5-5)

阪神・淡路大震災で被災し、板厚変化部に大きな局部座屈の発生した阪神高速神戸線の鋼製円筒橋脚(P-584山側)の、非線形動的解析をシェル要素を用いた有限要素法により実施して、その応答特性や局部座屈の発生状況を調べた。その結果、本橋脚は、初期の衝撃的な地震動によって大きな塑性変形が発生し、エネルギー吸収をする余裕もなく板厚変化部で局部座屈に至ったこと、および局部座屈後の溶接部の破断を何らかの手段で阻止できるならば、局部座屈後も比較的変形能は高いことなどが判った。

Key Words: Hanshin-Awaji Earthquake, Cylindrical steel bridge pier, Seismic response analysis, FEM, Local buckling

## 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各種損傷のあったことが報告されている<sup>1)</sup>。これらの損傷の多くは、鋼板の局所的な塑性変形(局部座屈)により特徴付けられ、この局部座屈の大きさが直接橋脚全体の耐荷力を決定していることが、事実として確認された。したがって、局部座屈の発生メカニズムを調査することは、今後より合理的な耐震設計指針を検討して行くうえで極めて重要と思われる。

鋼製橋脚の局部座屈現象は実験的に再現され、各種のパラメータ(幅厚比パラメータ、細長比、軸力比など)と耐荷力性能の関係も把握されつつある<sup>2)、3)</sup>。しかしながら、実験的手法にも自ずから限界があり、実際に鋼製橋脚に生じた局部座屈の発生過程を詳細に追跡したり、各種因子が局部座屈現象に及ぼす影響を調べたい場合には、非線形動的解析がより有効と思われる(勿論、一定の解析精度が確保されているという前提の元で)。

通常、橋脚の非線形動的解析では、橋脚構造を断面変形の無いはり-柱部材としてモデル化し、局部座屈を考慮するために橋脚基部において非線形の曲げモーメント-曲率関係( $M-\phi$ 関係)が与えられる。このモデル化手法は、計算が比較的容易なので、設計時にしばしば用いられるが、 $M-\phi$ 関係は繰り返し載荷実験などから類推せねばならないので、必ずしも一般性のあるものとは言えない。特に、地震時の局部座屈挙動を数値的に精確に追跡する場合には、モデル化上の仮定が極力少ない解析が望まれる。そこで、シェル要素を用いた有限要素法により、 $M-\phi$ 関係を使用せずに直接的に局部座屈現象を解析する試みがなされている<sup>4)~7)</sup>。これにより、境界条件や材料の構成則などでいくつかの仮定が必要なものの、前記のモデル化に較べて著しい精度の改善が期待できる。

筆者らは、土木学会構造工学委員会震災調査特別小委員会を通じて阪神高速道路公団から提供された資料に基づき、阪神高速神戸線の鋼製円筒橋脚の地震時非線形動的解析を、局部座屈を考慮して行った。中村<sup>7)</sup>は、同種の橋脚の解析を、軸対称シェル要素を用いて周方向フーリエ級数展開法により行っているが、ここでは一般的なシェル要素を用いることとした。以下では、解析モデルおよび解析手法について概要を述べた後、阪神・淡路大震災時に神戸海洋気象台で観測された加速度データを入力した際の、局部座屈の発生状況、変位・加速度の応答などについて述べ、今後の鋼製橋脚の耐震設計法を考えるうえでの参考資料とした。

## 2. 鋼製円筒橋脚の解析モデルおよび解析方法

解析対象として、ここでは、図-1示すような阪神高速神戸線の鋼製円筒橋脚(P-584山側)を採り上げた。本橋脚は、東西に伸びる国道2号線の北側(山側)に位置しており、南北方向に強い揺れを受けたものと推定される。この周辺には同程度の寸法の鋼製円筒橋脚がいくつかあるが、殆どが柱中間付近で局部座屈しており、特に本橋脚は、板厚変化部で局部座屈を生じ、溶接部で全周にわたって破断していた(ただし、被災後もほぼ直立状態で、大きな傾きは見られなかった)。以下の解析では、局部座屈にともなう弾塑性変形は考慮するが、この破断までは考慮しないこととする。

図-2に、解析に用いたメッシュ分割図を示す。本橋脚は、下部に中詰めコンクリートが打設されているが、これを剛体と考え、中詰めコンクリート上端から上部のみをモデル化して、モデル下端は回転を拘束した。また、板厚変化部では、板厚中心軸が図-2のように半径方向に偏心しているため、節点(シェル要素の板厚中心)の半径座標値もこれと同様に変化させた。なお、比較のために、ダイヤ

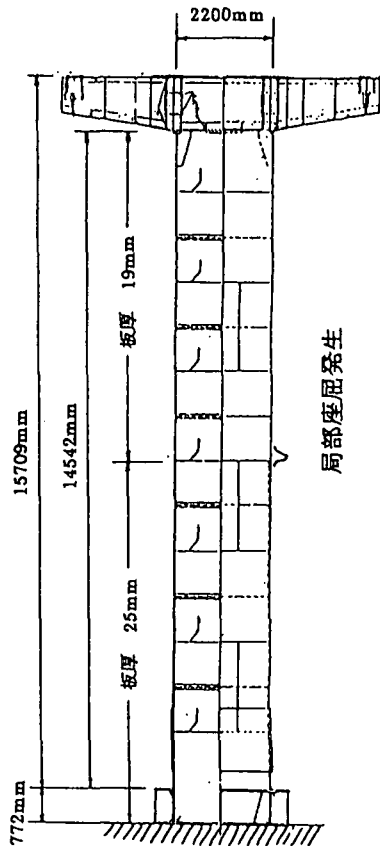


図-1 阪神高速神戸線P-584 (山側)

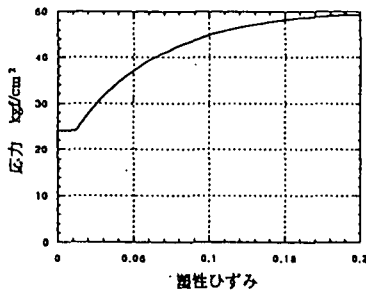


図-3 鋼材の応力-塑性ひずみ関係

フラムが無い場合の解析も行った。

次に、モデル上端は断面変形が無いものと考え、剛体回転するように変位の従属関係を与えた。また、上部工に相当する質量として422tonをこの位置で与えた。

解析で用いた材料の構成則は、等方硬化則 (Von-Misesの降伏条件) であり、応力と塑性ひずみの関係は図-3のように多直線近似で与えた。

入力地震波としては、図-4に示す神戸海洋気象台で観測された南北方向の加速度波形をモデル下端 (中詰めコンクリート上端) で水平方向に与えた。本地震波の最大加速度は821galで、図中の時刻3.54secで発生している。

以下、解析手法について、概要を述べる。解析プログラムはABAQUS (Version 5.5) であり、4節点厚肉シェル要素 (S4R) を用いた。この要素の特徴は、有限変形、有限膜ひずみおよび板厚方向のせん断変形を考慮していること、次数低減積分 (1点積分) を行っていること、などで

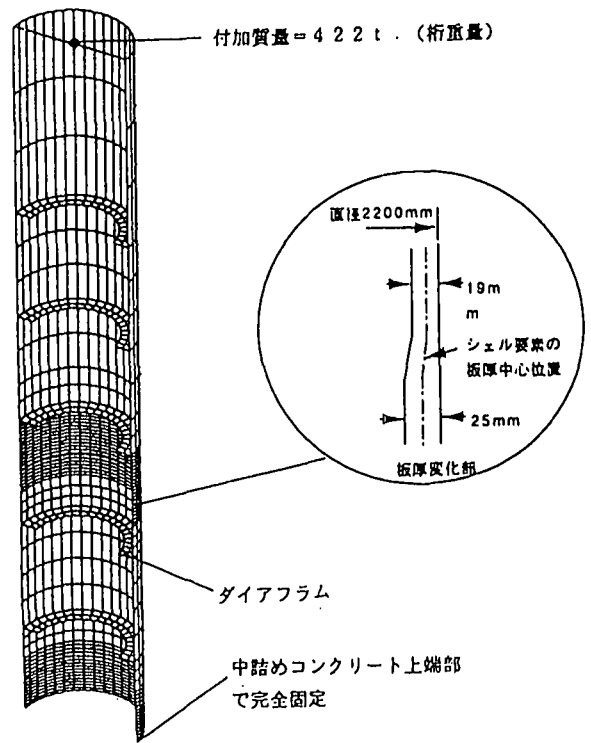


図-2 P-584 (山側) の解析モデル

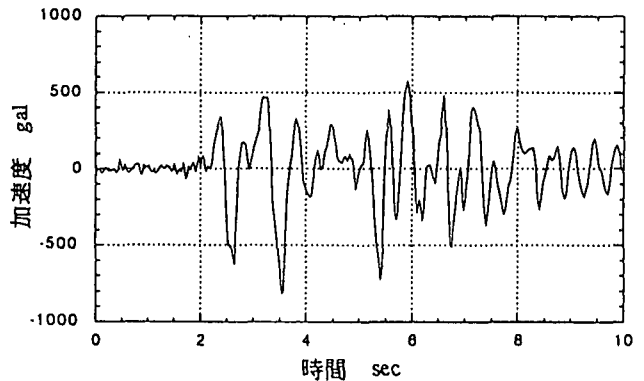


図-4 神戸海洋気象台における加速度波形 (南北方向)

ある。ひずみ増分から応力増分算出する際には、陰解法を使用しており、比較的大きなひずみ増分でも安定な解が得られるようになっている。

また、非線形動的応答解析は、直接時間積分法により行い、時間増分量は本解析の場合0.0088sec (平均値) とした。時間積分の方法としては、台形則に修正を加えた陰解法の一つであるHilber-Huges-Taylor法を用い、非線形の動的釣り合い式を各時間ステップでNewton-Raphson法により解いた<sup>8)</sup>。次に、解析における減衰定数  $h$  は、ここではゼロとした。これは、本解析法の場合、材料の塑性化にともなう減衰 (ヒステリシス減衰) は、剛性マトリックスの変化という形で陽に表され、 $h$  は他の減衰作用にのみ関連したものになるが、本橋脚のように大きな塑性変形を伴う問題では、ヒステリシス減衰が支配的になると考えたからである。ちなみに、 $h=2\%$  として本モデルを解析したところ、後述のような局部座屈は発生しなかった。これは、

ヒステリシス減衰以外の減衰作用を過度に見積もったことに起因すると思われる。

最後に、解析モデルの妥当性を確認するために実施した、実験との比較解析について簡単に触れる。図-5は、建設省土木研究所で実施された箱形断面鋼製橋脚の静的繰り返し載荷実験<sup>9)</sup>、<sup>10)</sup>を、上記のような解析法でシミュレートした結果であり<sup>4)</sup>、モデル橋脚上端の水平変位と水平荷重の関係を示している。同図中には実験で得られたヒステリシス曲線の包絡線も示したが、解析結果がこれと非常に良く一致していることが判る。本結果は静的荷重に対するものであるが、動的解析の場合には、減衰作用さえ適切にモデル化できれば同様の精度で解が得られるものと思われる。

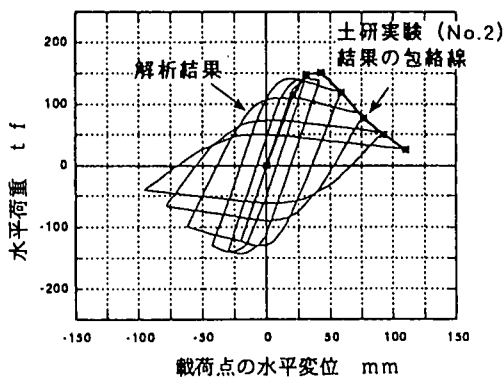


図-5 水平荷重-水平変位曲線<sup>4)</sup>

### 3. 非線形動的解析結果

#### (1) 局部座屈の発生状況

図-6に、地震発生後1sec~10sec間の変形状況を示す(変形量を3倍に拡大して表示した)。同図より、板厚変化部の直上部(板厚19mm側)から半径方向への膨れが発生し、この膨れた部分が軸圧縮力によって上下に押し潰されて行く様子が判る。本解析では、図の左側の局部座屈が一方向的に発達し、最終的に左側に約2°傾いた状態になる。実際には、前述の通り、板厚変化部で全周にわたって破断が生じ、橋脚全体の傾きそのものは小さかったが、これは解析では破断にともなう境界条件の変化を考慮していないことによると思われる。すなわち、実際には、板厚変化部のある特定の箇所、塑性ひずみが極めて大きくなり破断が生じた後、荷重の再配分によって他の溶接部が次々と破断したものと推測される。図-7には、大きな局部座

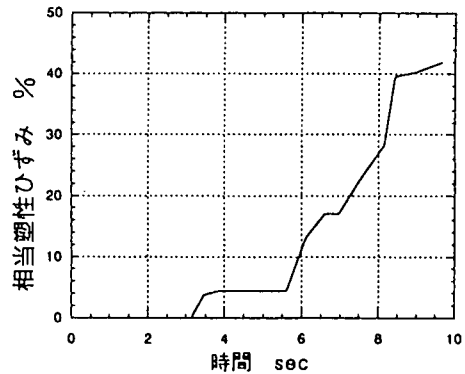


図-7 板厚変化部の相当塑性ひずみの時刻歴

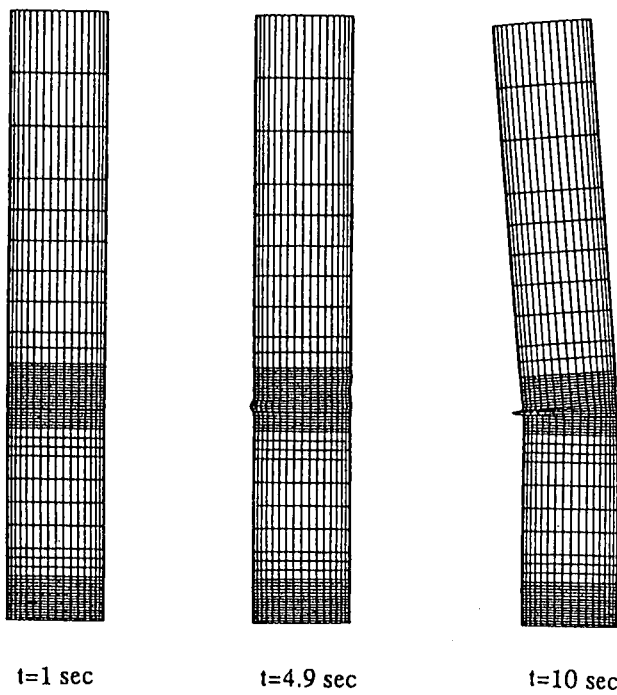


図-6 鋼製円筒橋脚の局部座屈発生状況



図-8 ダイアフラムが無い場合の局部座屈

屈を生じた部分の相当塑性ひずみの時刻歴を示したが、10sec後で48%と極めて大きくなり、破断の生ずる可能性の高いことが伺える。

ちなみに、ダイヤフラムが無い場合の10sec後の変形図を図-8に示す。この場合には全周にわたって局部座屈が発生し、より損傷度が高くなることが推察される。

### (2) 変位・加速度の応答挙動

図-9に、橋脚頂部(図-2の付加質量載荷点)における水平方向変位の時刻歴を示す。同図から判るように、時刻2sec~4secの間に橋脚頂部で最大240mmの変位が発生した後、一旦変位は100mm程度に減少し、6sec以降は再び変位が増加している(最大350mm)。このような応答は、図-4の加速度波形における、2sec~4sec間、および5sec~7sec間の2群の大きな振動に対応している。6sec以降で変位が漸増傾向にあるのは、局部座屈が進行したためと思われる。

次に、図-10に橋脚頂部の加速度の時刻歴を示すが、最大応答加速度は、500galとなった。本地震波の加速度応答スペクトルによれば、本橋脚の弾性応答加速度は1850gal(減衰定数5%、橋脚の固有周期0.77sec)であり、弾塑性変形を考慮することによってこれが1/4程度まで低下することが判る。特に、板厚変化部での局部座屈がこの低下に大きく寄与しているものと考えられる。

### (3) 水平変位-加速度関係

図-11に、橋脚頂部の水平変位と加速度の関係を示す。同図から、2sec~3secの間に発生した衝撃的な振動波によって大きな塑性変形が発生し、エネルギー吸収をする余裕もなく板厚変化部で局部座屈に至ったと思われる。実際には、局部座屈後溶接部が破断することによって、図-11とは違ったヒステリシス曲線を描いたものと思われるが、仮に破断が無かったとするならば、同図から判るように、局部座屈後も加速度のピーク値は急激には低下せず、また弾性応答部分の曲線の傾きも初期のそれと殆ど変わらないので、比較の変形能の高い構造体であると言える。

## 4. まとめ

阪神・淡路大震災で大きな局部座屈の発生した、阪神高速神戸線の鋼製円筒橋脚の地震時非弾性動的応答解析を、シェル要素を用いた有限要素法により行い、以下の知見が得られた。

- ①シェル要素を用いた直接シミュレーションによって、板厚変化部で発生した局部座屈現象を数値的に再現することができ、このような解析手法の妥当性が一部確認できた。
- ②初期の衝撃的な地震動によって大きな塑性変形が発生し、エネルギー吸収をする余裕もなく板厚変化部で局部座屈に至ったと思われる。
- ③局部座屈後の破断を何らかの手段で阻止できるならば、局部座屈後も比較の変形能は高い。

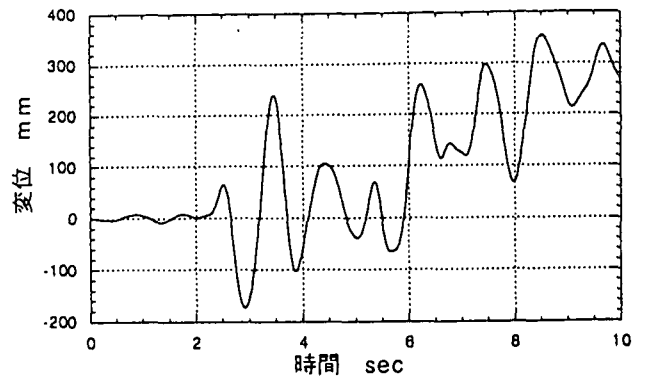


図-9 橋脚頂部の水平方向変位の時刻歴

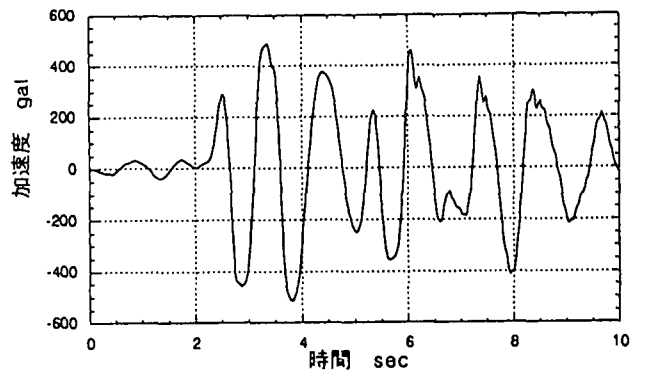


図-10 橋脚頂部の応答加速度の時刻歴

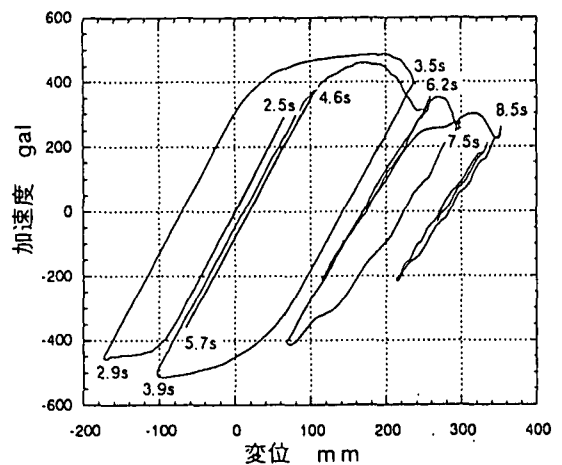


図-11 橋脚頂部の水平変位-加速度関係

最後に、本解析は土木学会構造工学委員会震災調査特別小委員会WG2における活動の一環として行ったことを付記し、資料提供に数々の便宜を図って頂いた阪神高速道路公団の担当者各位に感謝の意を表します。また、貴重な助言をいただいた大阪大学西村宣男教授に感謝の意を表します。

#### 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) 冨永知徳、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) 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荷力と変形能の評価、第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会、pp. 599-604, 1996.1
- 5) 西村宜男、池内智行、谷口直子、中川知和：鋼管橋脚の地震損傷の数値シミュレーション、土木学会関西支部年次学術講演会、1-130, 1996.5
- 6) 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
- 7) 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、No.549/I-37, pp. 205-219, 1996.10
- 8) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS Theory Manual
- 9) 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
- 10) 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中(B)、pp. 876-877, 1995.10

(1997年3月31日受付)

## Nonlinear seismic response analysis of cylindrical steel bridge pier damaged by the Hanshin-Awaji Earthquake

A nonlinear seismic response analysis of the cylindrical steel bridge pier for the Hanshin Highway road bridge which was heavily damaged by the Hanshin-Awaji Earthquake is performed. FEM (using shell elements) is used to simulate the local buckling which actually occurred near the welded joint where the plate thickness changes. The analytical results indicate that the impact-like seismic force caused a large plastic deformation in the locally buckled portion during the initial stage of the duration period, without allowing the structure to absorb the seismic energy. Also, this pier has a relatively high ductility even after the occurrence of local buckling, provided that no fracture occurs at the welded joints.