

# ( I - 40) 鋼製円筒橋脚の地震時における局部座屈発生機構について

早稲田大学大学院 学生員 山村 啓一  
早稲田大学理工学部 正会員 依田 照彦

## 1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震での被害状況をつぶさに観察すると、構造物の動的挙動に起因する破壊が、土木構造物に多大な被害を与えたことが分かる。しかし、その力学的要因は明確に解明されているとは言い難い。そこで本研究では、非線形有限要素解析を用いて、鋼板の局部的な塑性変形（局部座屈）に注目し、鋼製橋脚の地震時の動的挙動を解明することを目的とした。

## 2. 解析対象

解析対象は阪神高速神戸 3 号線の鋼製円筒橋脚（P-584 海側）である。この橋脚は、形状はフーチング部を除き、高さ約 16.4m、直径 2.2m の円筒橋脚で、下から約 2.6m 付近までコンクリートが充填してある。橋脚頭頂部に阪神高速道路公団により公開された、上部構造死荷重反力 482ton が付加質量として加わっている。この橋脚は地震により、中間部付近（板厚変化点）で局部座屈による脆性破壊が生じ北側に大きく（写真からの計測では約 60cm）傾いている。橋脚の概要図を図-1 に示す。この橋脚は図-1 に示すように 3 種類の鋼材により構成されている。それぞれの鋼材の材料物性値は電力中央研究所構造部において実施された材料試験結果を用いた<sup>1)</sup>。

表-1 材料物性値

|       | SS400                 | SM400                 | SM490                 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ヤング率  | 206GPa                | 206GPa                | 206GPa                |
| 降伏応力  | 235MPa                | 235MPa                | 326MPa                |
| 密度    | 7850kg/m <sup>3</sup> | 7850kg/m <sup>3</sup> | 7850kg/m <sup>3</sup> |
| ポアソン比 | 0.3                   | 0.3                   | 0.3                   |

地震波形は実際に神戸海洋気象台で観測された地震波の南北方向成分を使用した。最大加速度は、地震発生後約 4.5 秒付近における約 818gal である。時刻歴の地震波形を図-2 に示す。

## 3. 解析モデルおよび数値積分

解析モデルのモデル化は以下のように行った。基礎部は完全固定、上端は自由端となっている。フーチング部と上部工はモデル化せず、橋脚側面およびダイヤフラムは 4 節点厚肉シェル要素（S4R）を用いた。周方向の分

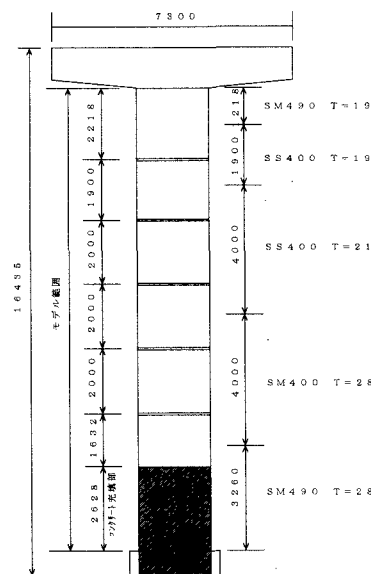


図-1 阪神高速神戸線円筒鋼製橋脚概要図 (P-584 海側) : 単位(mm)

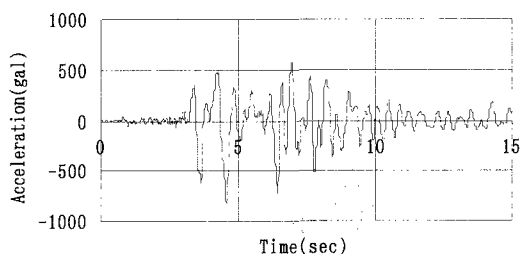


図-2 神戸海洋気象台加速度地震波

割数が変化する部分で、3 節点厚肉シェル要素（S3R）を使用してモデルを構築した。天井部と床の部分に 3 節点剛体要素（R3D3）を使用した。付加質量はマス要素（MASS）で加えた。座屈破壊の見られた板厚変化点（28mm→21mm）では十分に細かく要素を分割した。シェル分割に際しては板厚変化点での偏心を考慮して半径座標値を変化させた。コンクリート充填部は剛性を極端に高めることによりモデルの簡略化を図った<sup>2)</sup>。モデルの節点数は 3805 個、要素数は 3625 個である。構成則は等方硬化則のパイリニア型として、塑性後はヤング

キーワード：鋼製円筒橋脚、局部座屈、弾塑性解析、動的解析、有限要素法

連絡先：早稲田大学理工学部 〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1 Tel：03(5286)3399

率を 1/200 に低下させることとした。解析コードは汎用有限要素コード ABAQUS (Version5.7) を用いた<sup>3)</sup>。非線形動的応答解析は、直接時間積分である、台形則にわずかに修正を加えた陰解法 Hilber-Hughes-Taylor 法を用いて、非線形つり合い方程式は Newton 法で解いた。

解析は最初のステップで自重解析を行い、その後地震波による動的解析を行った。時間増分値は 0.01 秒で、地震発生から 10 秒間までを解析の対象とした。

#### 4. 解析結果

##### ① 時刻歴変位応答

図-3 に解析終了時点 (10 秒後) の全体の変形図と座屈部分の拡大図を、図-4 に橋脚頭頂部の時刻歴変位応答を示す。図-3 を見ると板厚変化点 (28mm→21mm) の上部で座屈が生じ大きく傾いている。これは実際の被害と一致している。図-4 を見ると 10 秒後の残留変位は 70cm となっている。この段階では橋脚全体がまだ若干揺れているので、最終的な残留変位は実際の橋脚において見られた値 (約 60cm) にほぼ一致すると考えられる。約 5 秒過ぎに大きな変位が見られるが、これは地震波形における 4～5 秒後付近の大きな加速度に対応していると思われ、地震の初期の段階において急激に変形を起こしたことが認められる。

##### ② 塑性変形発生機構

図-5 に局部座屈の起きた部位 (板厚変化点の 4 要素上) において、最大のひずみが見られた要素の軸方向ひずみの時刻歴を示した。圧縮側が円筒の内側表面、引張側が外表面での全ひずみである。これを見ると内側表面では地震波入力後約 5 秒で急激にひずみが 25% まで増大している。その後、徐々にひずみは増大して行き 10 秒後ではほぼ最大のひずみに至っている。内表面では最大 37% のひずみが発生しており、この値は破断が生じてもおかしくないレベルのひずみである。すなわち軸圧縮力によって、橋脚内側のひずみが急激に大きくなり破断が生じ、その後外表面に向かって更に破断が進んでいったと推測される。実際の被害では周方向全体に破断が生じていたが、解析では片側の方にひずみが集中した。これは破断による境界条件の変化を考慮に入れなかった為と思われる。

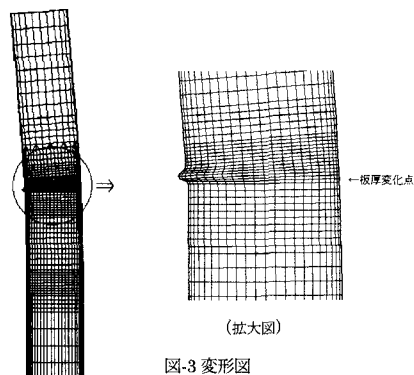


図-3 変形図

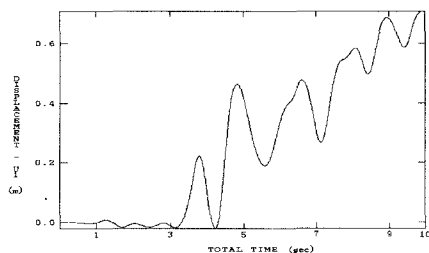


図-4 橋脚頭頂部の時刻歴変位応答

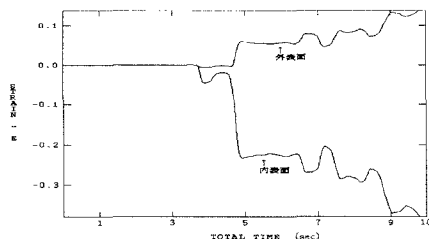


図-5 橋脚内外表面のひずみの時刻歴

#### 5. 結論

- i) 本解析の結果は兵庫県南部地震のときの際の被害に近い結果を与えている。すなわち残留変位はほぼ一致し、変形図においても座屈の発生位置および座屈形状が再現できている。
- ii) 座屈発生位置に関してはメッシュ依存性が高いため、座屈発生部においては、広範囲 (少なくとも座屈波長の 1.5 倍程度) の部分を細分化する必要がある。またシェルの偏心の効果も確認できた。
- iii) 座屈は地震初期の大きな慣性力により発生し、それに伴い内表面より破断が発生したと思われる。破断のメカニズムは完全に解明することは出来なかったが、その発生機構を示唆する結果は得られたと考えている。