

論文 数値解析による RC 橋脚の破壊メカニズムに関する検討

大内 一*¹・林 秀侃*²・幸左 賢二*³・田坂 幹雄*⁴

要旨：兵庫県南部地震以降、構造物の耐震設計に関する必要性が極めて重要視されている。本論文は、標準的な既存 T 型鉄筋コンクリート橋脚を対象に、種々の因子が耐力と破壊メカニズムに及ぼす影響を、非線形 F E M 解析を用いて検討したものである。パラメータ解析の結果、上部構造の回転慣性および上向き鉛直動は曲げ破壊モードを、下向き鉛直動はせん断破壊モードを助長させることが判明した。また、正負交番繰返し載荷履歴は、損傷形態を曲げ型からせん断型へ移行させる可能性があることが判明した。

キーワード：兵庫県南部地震、RC 橋脚、破壊メカニズム、非線形 F E M 解析

1. はじめに

兵庫県南部地震での鉄筋コンクリート橋脚（以下 RC 橋脚）の被害は、近代土木構造物が歴史上初めて受けた大被害であった。主鉄筋段落し部でのせん断破壊に、ひとつの特長をみることができる。被害原因として配筋方法のような抵抗側の問題の他に、鉛直地震動の影響や繰返し載荷履歴のような外力側の問題もある。また、T 型橋脚の場合には、上部構造の回転慣性の影響も考えられる。これらの因子が耐力や破壊モードに及ぼす影響を明らかにすることは、今後の耐震設計・耐震補強設計を進めていく上で、極めて重要なことである。

本論文は、標準的な T 型 RC 橋脚をとりあげ、2 次元非線形 F E M 解析を実施し、上述した因子の影響を明らかにしようとするものである。

2. 解析概要

2. 1 対象橋脚

解析対象として、標準的な既存 T 型 RC 橋脚を選定した（図-1 参照）。本橋脚は、支間 60 m と 39 m の鋼製単純桁を支持する直径 3.5 m × 平均高さ 12.66 m の円形橋脚で、フーチング天端より 6.45 m の位置で主鉄筋の 1/5 が段落しされている。

2. 2 解析モデル

解析は、橋軸直角方向に着目し、フーチング天端より上面を対象とした。橋脚は 2 次元でモデル化し、コンクリートを平面応力要素、鉄筋をトラス要素とし、境界条件は橋脚下端を固定とした。モデル化において、橋脚部分は円周方向に 12 分割した矩形断面として、主桁部分については幅 19.5 m × 奥行き 2.7 m として考慮した。

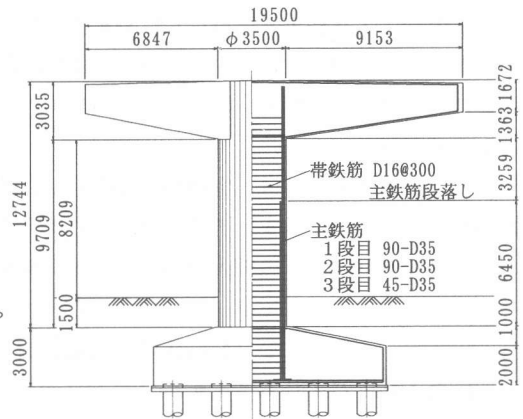


図-1 対象橋脚形状および配筋概要

* 1 (株)大林組技術研究所土木第四研究室、工博（正会員）

* 2 阪神高速道路公団神戸管理部、工学士

* 3 阪神高速道路公団復旧建設部、Ph. D.（正会員）

* 4 (株)大林組土木技術本部設計第一部、工学士

段落し位置は、以下の2種類を想定し、それぞれの段落し位置で解析を実施した。

① 段落し位置上部：実橋脚では、フーチング天端より6.45mの位置で1/5の主鉄筋が段落しされている。解析上の段落し位置は、コンクリート標準示方書[1]に基づく定着長(80cm)を考慮し、フーチング天端より5.65mとした。

② 段落し位置下部：兵庫県南部地震による橋脚の被害位置は、フーチング天端より3m程度が比較的多い。そこで、実橋脚の段落し位置の1/2あたりの3.20mを段落し位置下部とし、定着長を考慮して、フーチング天端より2.40mとした。

帯鉄筋は橋脚全長にわたりD16@300で配置されているが、解析では、要素間隔に図-2に示すせん断補強成分の面積を分配して帯鉄筋の効果を考慮した。

上述した条件により2次元有限要素分割した解析モデルを、図-3に示す。

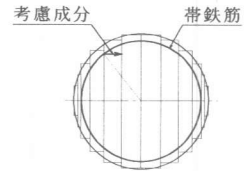


図-2 帯鉄筋考慮成分

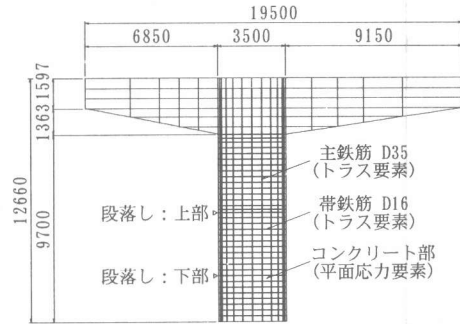


図-3 解析モデル

2.4 解析における着目点

破壊メカニズムと耐力に及ぼす影響要因として、以下に示すパラメータを想定した。

- ① 上部構造の回転慣性の影響：橋脚上部構造の回転慣性モーメントの影響を把握
- ② 鉛直動による軸力変動の影響：鉛直動による軸力変動の影響を把握
- ③ 橋脚根入れ部の影響：橋脚根入れ部の地盤をバネで評価し、根入れ部による影響を把握
- ④ 正負交番繰返し載荷履歴の影響：正負交番繰返し載荷による履歴の影響を把握

上記のパラメータを基に設定した解析ケース一覧を、表-1に示す。なお、根入れ部の地盤バネは弾性とし、図-1に示すフーチング上部1.5mの内、地表付近0.5mをコンクリート(設計基準強度17.7N/mm²)、残り1.0mを土(N値15)として、道路橋示方書[2]に基づき設定した。

2.5 解析物性

解析に用いる物性値は、実橋脚から採取した試料の室内強度試験結果を基に設定した。基本材料物性値を表-2に示す。また、材料の非線形特性は、以下のモデルを用いた。

- ① コンクリート：圧縮時の応力～ひずみ関係：Saenzのモデル
 圧縮ひずみの軟化特性：Darwin-Pecknoldのモデル
 ひびわれ後のせん断伝達特性：Al-Mahaidiのモデル
- ② 鉄筋：バイリニアモデル

表-1 解析ケース一覧

ケース	回転慣性	上下動	地盤バネ	繰返し載荷
1	なし	なし	なし	なし
2	あり	なし	なし	なし
3	なし	上向き	なし	なし
4	なし	下向き	なし	なし
5	なし	なし	あり	なし
6	なし	なし	なし	あり

*1 ケース1は基本ケース

表-2 基本材料物性値

	コンクリート	鉄筋
弾性係数(N/mm ²)	2.59×10 ⁴	2.06×10 ⁵
ポアソン比	0.167	0.300
圧縮強度(N/mm ²)	35.2(2182)* ¹	—
引張強度(N/mm ²)	2.5* ²	—
降伏点(N/mm ²)	—	349.1

*1 ()内は圧縮強度時のひずみ：μ

*2 道路橋示方書[3]より設定

2. 6 荷重条件

解析における荷重は、自重解析を行った後、単調荷重では、主桁部の節点に50cmの強制変位を与えた。また、繰返し荷重では、 $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ を載荷後、50cmの強制変位を与えた。ここで、 $1\delta_y$ は、主鉄筋の内45度範囲の鉄筋が降伏した時点とし、ケース1より設定した。

鉛直地震動は、最大級の上下動を想定し、鉛直動を上向きに1G作用させた場合（自重による軸力なし）および下向きに1G作用させた場合（自重による軸力2倍）の2ケースを設定した。

3. 解析結果

3. 1 基本ケース：ケース1

荷重～変位関係を図-4に示す。最大荷重は、段落しが上部の場合 $8.96 \times 10^6 \text{N/mm}^2$ 、下部の場合 $8.81 \times 10^6 \text{N/mm}^2$ である。図には、道路橋示方書[3]に基づく曲げ耐力およびせん断耐力を示してあるが、解析結果は、示方書の曲げ耐力に概ね対応している。図-5は、 $7\delta_y$ 時点での鉛直およびせん断ひずみ分布を示したものである。段落しが上部の場合、鉛直ひずみ、せん断ひずみとも橋脚基部で卓越領域が広がっており、基部での破壊形態を示している。一方、段落しが下部の場合、鉛直ひずみは基部と段落し部で同等に降伏領域が広がり、せん断ひずみは段落し近傍から基部に向かって卓越領域が広がっており、段落し位置および基部での破壊形態を示している。

3. 2 上部構造の回転慣性の影響：ケース2

図-6は、荷重～変位関係をケース1と比較したものである。最大荷重は、段落しが上部の場合 $7.65 \times 10^6 \text{N}$ 、下部の場合 $7.41 \times 10^6 \text{N}$ で、いずれもケース1を下回っており、降伏後の荷重低下はあまりみられない。図-7は、 $7\delta_y$ 時点での鉛直およびせん断ひずみ分布を示したものである。ケース1と比べると、段落しが上部の場合、鉛直ひずみは基部および段落し部で降伏領域が広がっている。一方、段落しが下部の場合、鉛直ひずみの降伏領域は特に段落し部で広がり、せん断ひずみは段落し近傍から上部に広がっている。上部構造の回転慣性により曲げ耐力が低下し、結果的に作用せん断力が15%程度小さくなるため、曲げ破壊モードが助長されることになる。

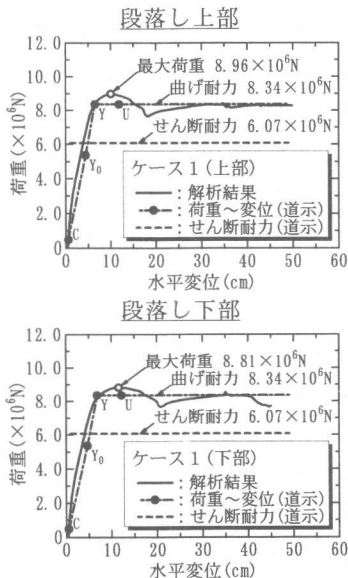


図-4 荷重～変位：ケース1

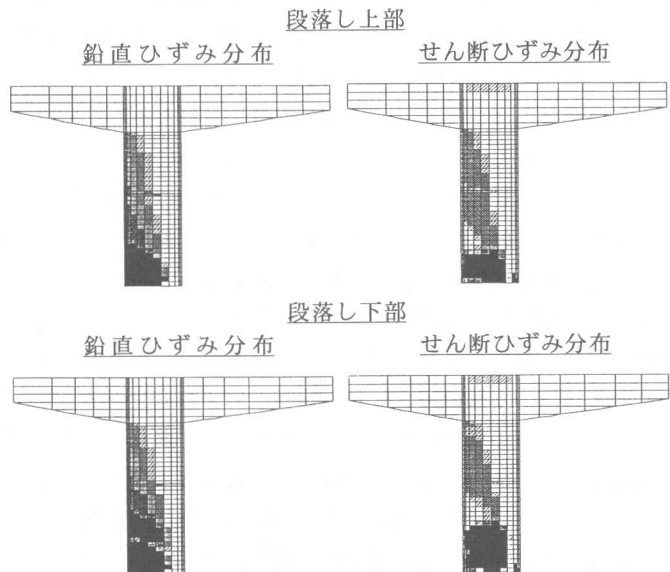


図-5 ひずみ分布：ケース1

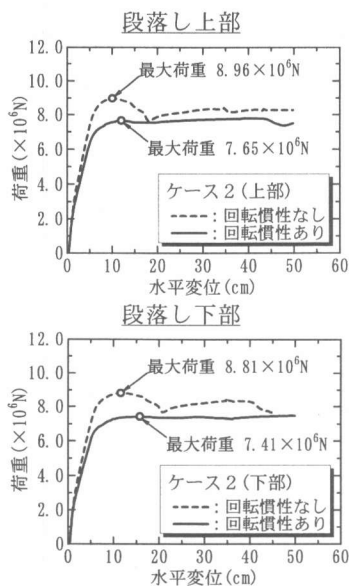


図-6 荷重～変位：ケース2

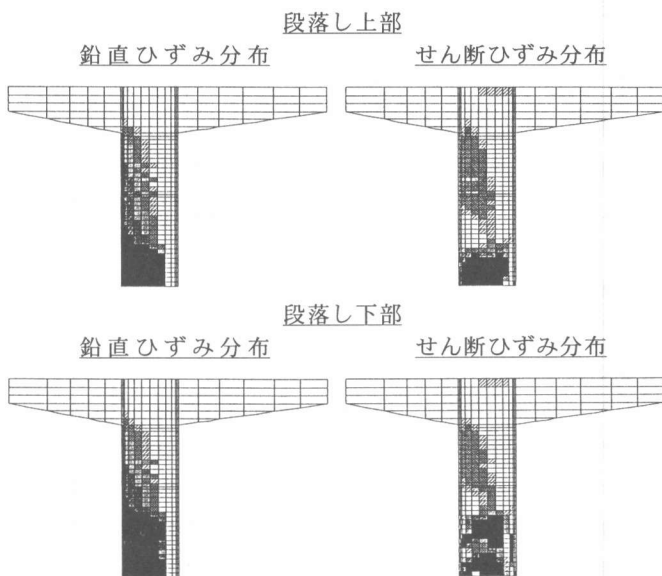


図-7 ひずみ分布：ケース2

3. 3 鉛直動による軸力変動の影響：ケース3, 4

図-8は、荷重～変位関係をケース1と比較したものである。最大荷重は、鉛直動を上向きに作用させた場合、段落しが上部で $8.59 \times 10^6 \text{N}$ 、下部で $8.31 \times 10^6 \text{N}$ とケース1を下回り、降伏後の荷重低下は小さい。逆に、鉛直動を下向きに作用させた場合、段落しが上部で $9.21 \times 10^6 \text{N}$ 、下部で $9.06 \times 10^6 \text{N}$ とケース1を上回り、降伏後の荷重低下は大きい。図-9は、段落しが上部の場合の 7δ 時点での鉛直およびせん断ひずみ分布を示したものである。鉛直動を上向きに作用させた場合、鉛直ひずみの降伏領域が基部において広がり、せん断ひずみの卓越領域は若干上方に広がっている。逆に、鉛直動を下向きに作用させた場合、鉛直ひずみの降伏領域は狭まり、せん断ひずみの卓越する領域は広がっている。一般に、せん断耐力は軸力変動の影響を受け、軸力が増加すれば大きくなり、逆に軸力が減少すれば小さくなる。一方、本橋脚での軸力変動によるせん断耐力の増減は、コンクリート標準示方書[1]によると2.5%程度であり、最大荷重の変動3%程度を下回っている。したがって、上向きに作用させた鉛直動は、回転慣性の影響と同様に曲げ破壊モードを助長し、下向きに作用させた鉛直動は、結果的に作用せん断力を増加させるためせん断破壊モードを助長することになる。しかし、最大荷重の変動量からもわかるように、鉛直動による軸力変動が橋脚の耐震性に及ぼす影響は小さい。

3. 4 橋脚根入れ部の影響：ケース5

図-10は、荷重～変位関係をケース1と比較したものである。最大荷重は、段落しが上部の場合 $9.82 \times 10^6 \text{N}$ 、下部の場合 $9.43 \times 10^6 \text{N}$ といずれもケース1を上回っている。また、降伏後の荷重低下は、いずれの場合もケース1よりも遅れており、この傾向は、段落し位置が上部の方が大きくなっている。図-11は、 7δ 時点での鉛直およびせん断ひずみ分布を示したものである。ケース1と比べると、段落し位置が上部の場合、埋戻し上端付近で鉛直ひずみの降伏領域が広がり、せん断ひずみの卓越領域は埋戻し上端付近に移動している。一方、段落しが下部の場合、埋戻し上端から段落し部で鉛直ひずみの降伏領域が広がり、せん断ひずみの卓越領域も埋戻し上端付近

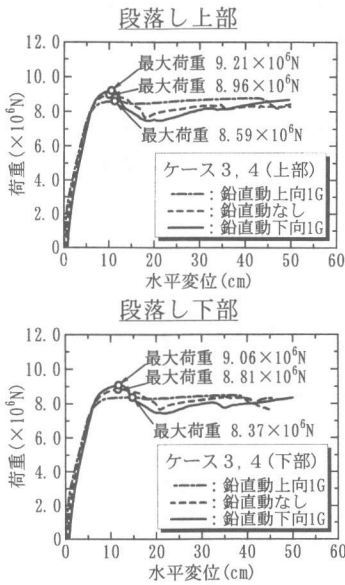


図-8 荷重～変位：ケース3, 4

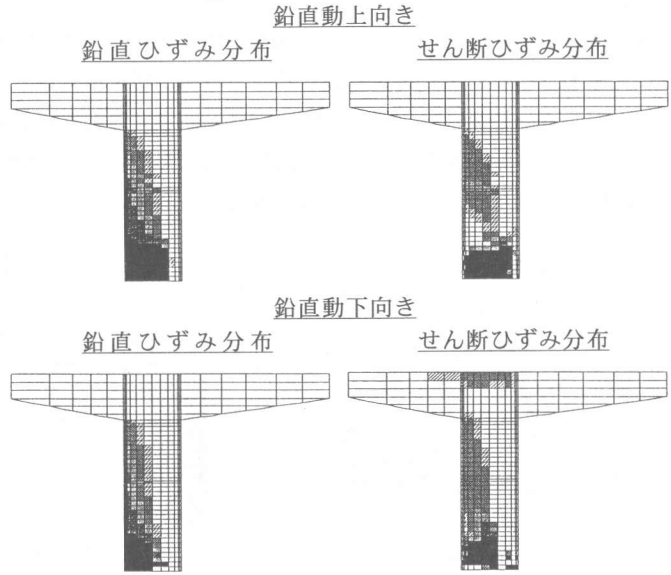


図-9 ひずみ分布：ケース3, 4 (段落し上部)

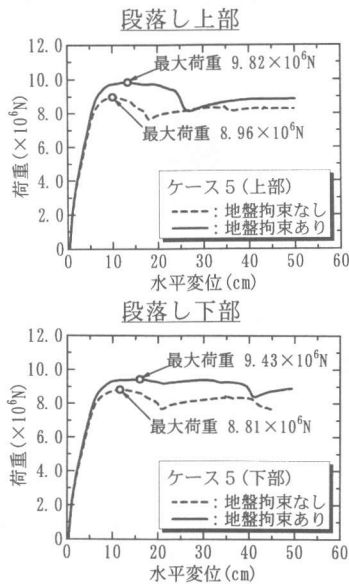


図-10 荷重～変位：ケース5

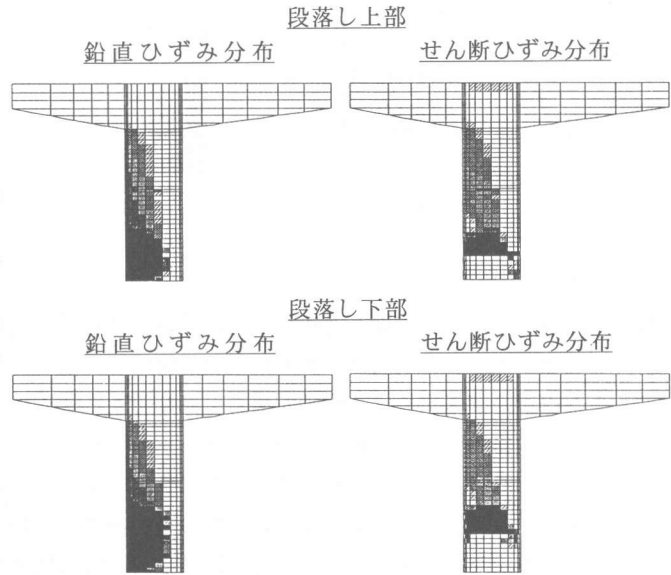


図-11 ひずみ分布：ケース5

から段落し位置付近に集中している。地盤拘束により曲げスパンが短くなるため、曲げ耐力は増加し作用せん断力を10%程度大きくしているが、段落しが上部の場合、損傷形態に及ぼす影響は小さい。一方、段落しが下部の場合、耐力の支配断面が基部から段落しに移り、せん断破壊モードを助長しているものと考えられる。

3. 5 正負交番繰返し载荷履歴の影響：ケース6

図-12は、荷重～変位関係をケース1と比較したものである。繰返し载荷後の最大荷重は、段落しが上部の場合 $7.82 \times 10^6 \text{N}$ 、下部の場合 $7.97 \times 10^6 \text{N}$ といずれもケース1を下回っている。また、

いずれの場合も、変位が進んだ時に、道路橋示方書[3]に基づくせん断耐力付近にまで急激に荷重低下を起こしている。図-13は、繰返し载荷後の7 δ_y 時点での鉛直およびせん断ひずみ分布を示したものである。ケース1と比べると、段落しが上部の場合、ひずみ分布に大きな変化はみられないが、下部の場合、鉛直ひずみ、せん断ひずみとも卓越する領域が段落し位置付近で広がっている。繰返し载荷履歴の影響により、損傷形態は曲げ型からせん断型へ移行する様子が伺え、この傾向は、段落しが下部にあるほど顕著である。

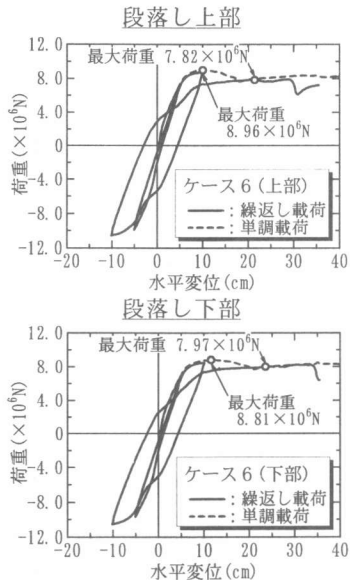


図-12 荷重～変位：ケース6

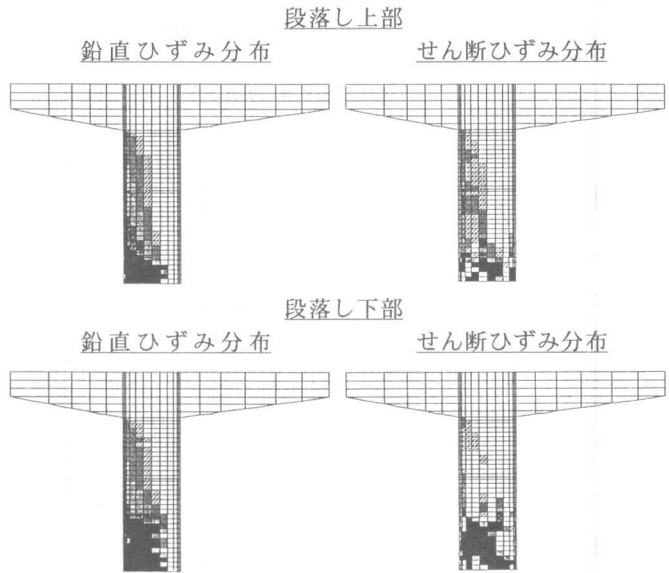


図-13 ひずみ分布：ケース6

4. まとめ

標準的な既存T型RC橋脚を対象に2次元非線形FEMによるパラメータ解析を実施し、橋脚の耐力と破壊メカニズムに及ぼす要因について検討し、以下の結果が得られた。

- ① 上部構造の回転慣性は、曲げ破壊モードを助長させる。
- ② 上向きに作用させた鉛直動は曲げ破壊モードを助長させ、下向きに作用させた鉛直動は、せん断破壊モードを助長させるが、その影響は小さい。
- ② 橋脚根入れ部の埋戻し土は作用せん断力を増加させるが、段落しが上部にある場合その影響は小さく、段落しが下部にある場合は結果的にせん断破壊モードを助長させる。
- ③ 単調载荷に対して曲げ破壊型であっても、正負交番繰返し载荷履歴の影響により、損傷形態は曲げ型からせん断型へ移行する可能性がある。

また、主鉄筋の段落し位置が橋脚の耐震性に及ぼす影響は大きく、段落しでのせん断耐力を適切に評価し、上述の結果とともに既設橋脚の耐震補強設計へ反映することが、今後の課題である。

参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書設計編、pp.113-119、pp.60-65、平成8年制定
- [2] (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説VI下部構造編、pp.237-241、平成8年12月
- [3] (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、pp.119-161、平成8年12月