

橋脚～基礎～地盤系の地震応答特性 に関する研究

矢部正明¹・川島一彦²

¹正会員 東京工業大学 社会人博士課程 工学部土木工学科 ((株)長大) (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²フェロー会員 工学博士 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

橋脚躯体と基礎構造の耐力およびじん性率の評価は個別に実施されることが多い。しかし、橋脚と基礎構造および地盤の非線形化は互いに影響を及ぼしあっているはずである。このような観点から、平成8年12月に改訂された道路橋示方書によって設計されたRC橋脚と杭基礎および周辺地盤を対象に、非線形動的解析を行いその地震応答特性を検討した。

Key Words : Seismic Design, Ductility Design, Reinforced Concrete Piers, Soil-Structure Interaction, Nonlinear Dynamic Response

1. まえがき

平成8年の道路橋示方書では、橋脚躯体と基礎構造の耐力およびじん性率の評価は、個別に評価される。しかし、橋脚と基礎構造および地盤の非線形化は互いに影響を及ぼしあっているはずである。このような観点から、橋脚躯体の要求じん性率に基礎～地盤系の非線形性が与える影響や橋脚躯体の塑性化が基礎構造に与える影響を解明する必要がある。本研究は、その第一ステップとして、RC橋脚～杭基礎～周辺地盤を非線形構造系にモデル化し、その地震応答特性を解析的に検討した。

2. 解析対象橋梁

解析対象橋脚と杭基礎を図-1に示す。これは、反力分散支承を用いた5径間連続鋼Iげた橋の一部を取り出したものであり、ともに道路橋示方書(平成8年12月)IV下部構造編とV耐震設計編に基づいて地震時保有水平耐力法によって耐震設計されている。表層地盤の固有周期は0.72秒である。

橋脚の降伏水平耐力(地震時保有水平耐力)は4.86MNであり、必要じん性率(許容塑性率)は、プレート境界型の大規模な地震を想定したタイプI地震動に対しては2.3、内陸直下型地震を想定したタイプII地震動に対して5.3である。

杭基礎は径1.2m、長さ2.8mの現場打ち杭9本から構成されている。道路橋示方書によれば、フーチング底面部にはこれより上に存在する構造部分の死荷重に相当する鉛直力(初期荷重)を作用させた状態で、上部構造、橋脚、フ

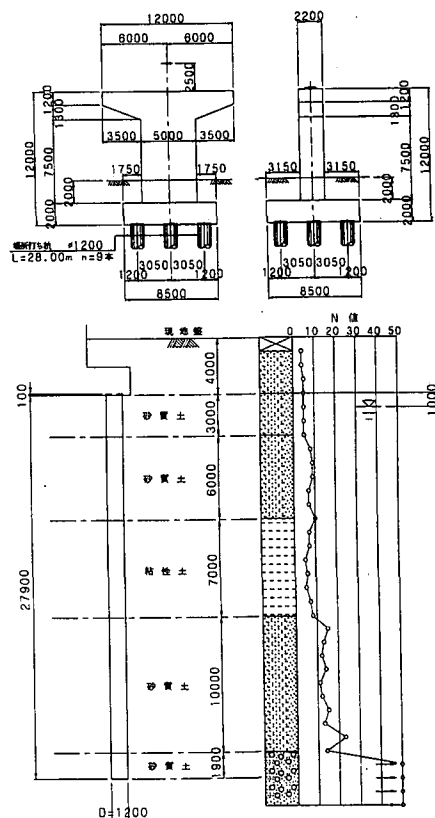


図-1 解析対象としたRC橋脚と杭基礎

ーチングの慣性力に相当する水平力および曲げモーメントを図-2に示すように漸増荷重として作用させて杭基礎としての地震時保有耐力を求める。載荷領域(1)では、橋脚がまだ降伏していないため、桁、橋脚、フーチングの慣性力を逐次、荷重漸増せながら作用させていく。やがて、橋脚が降伏に達するため、これ以後では、橋脚からはフーチングには橋脚の降伏水平耐力以上の地震力は作用しない。このため、載荷領域(2)では、死

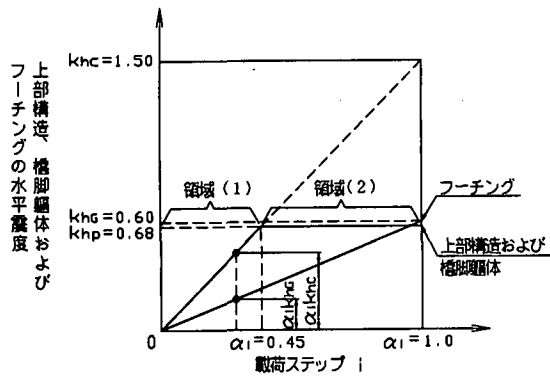


図-2 杭基礎への慣性力の載荷方法

荷重に相当する鉛直力を作用させ、さらに橋脚の降伏水平耐力を作用させた状態で、フーチングの慣性力のみを漸増させていく。ただし、道路橋示方書では、橋脚の降伏水平耐力に1.1倍の余剰耐力に対する補正係数を見込むように規定されている。このような荷重作用に対して、全ての杭において杭体が降伏する時もしくは、杭頭反力が押し込み支持力の上限值に達する時を杭基礎としての降伏と定義している。図-1の基礎では、図-2の荷重作用に対して杭基礎が降伏に達しないので、杭基礎の降伏耐力は、橋脚の降伏耐力を上まわり、基礎耐震性があると判定されることになる。

3. 解析モデル

図-3に解析モデルを示す。上部構造は1質点で表し、ゴム支承は線形せん断バネとダッシュポットによってモデル化した。ゴム支承の減衰定数は2%とした。橋脚基部から1.1mの範囲を塑性ヒンジ区間とし、この区間以外の橋脚躯体は、梁部を剛体、柱部を線形梁要素でモデル化した。フーチングは剛体とし、橋軸方向と橋軸直角回りの質量を有する2自由度系とし、杭体は非線形梁要素とした。杭の質量には杭に囲まれた範囲の地盤の質量も含めた。地盤は、基礎の影響を受けない自然地盤として1次元の非線形せん断バネモデルによって表した。杭軸直角方向(水平方向)と杭軸方向(上下方向)の基礎~地盤間バネは非線形せん断型バネとし、履歴減衰以外に逸散減衰として20%の減衰を考慮した。入力地震動は耐震設計上の基礎面において与えることとし、道路橋示方書の地震時保有水平耐力法に用いるⅢ種地盤の標準波形Ⅱ-Ⅲ-1から、多重反射理論により基礎面の地震動に変換した。

図-4は、図-3に示した解析モデルの復元力モデルを表したものである。橋脚躯体の塑性ヒンジ区間は、最大点指向型のバイリニアモデルで表した。場所打ち杭は、ひびわれ、初降伏、終局の3点を結んだ武田モデル。地盤は、双曲線モデル(Hardin-Drnevichモデル)を用いた。地盤バネは完全弾塑性型バイリニアモデルで表したが、1次剛性から2次剛性に変化する点は、杭軸直角方向の地盤バネでは受働土圧を、杭軸方向の地盤バネでは正側には杭の極限支持力、負側には杭体の軸引張耐力を用い

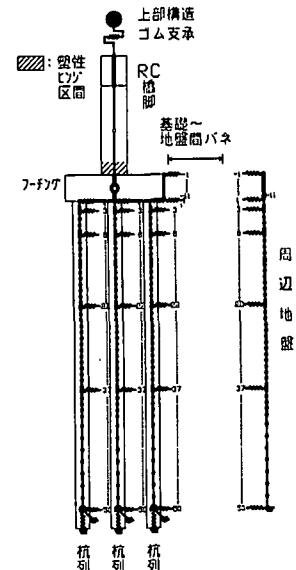


図-3 RC橋脚~杭基礎~地盤系の解析モデル

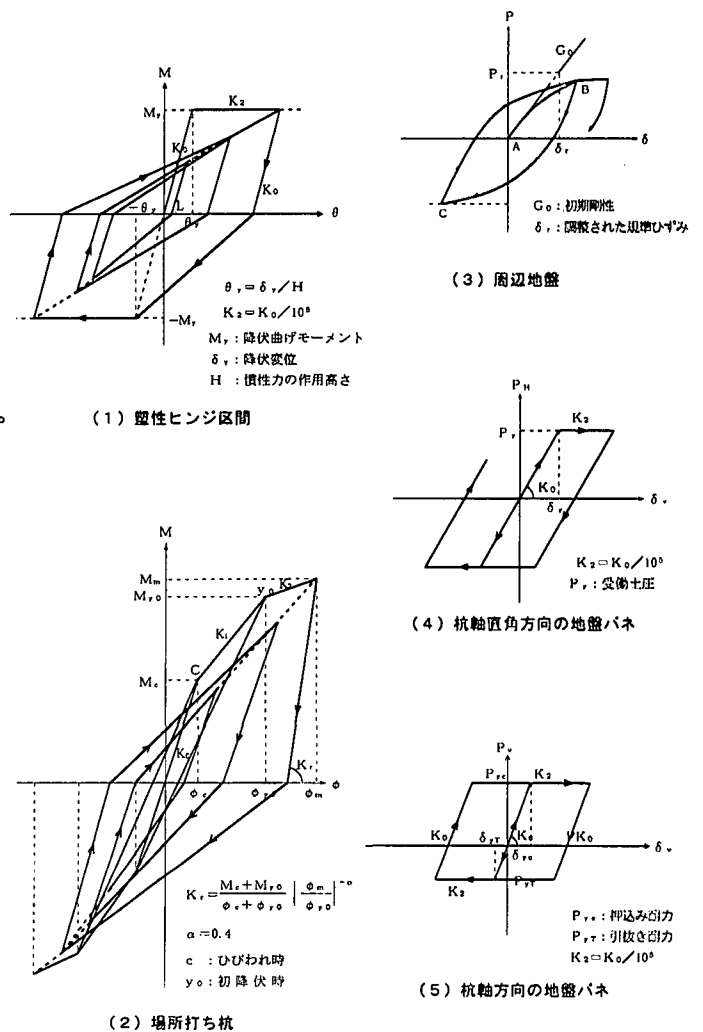


図-4 各要素の復元力モデル

た。

4. 地震応答特性

図-5は、橋脚の塑性ヒンジ区間中央に生じる曲げモーメントを慣性力作用位置までの距離で除して求めた水平力と、橋脚

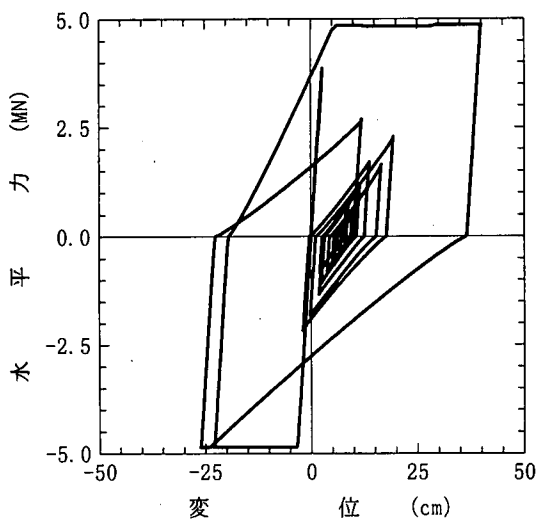


図-5 橋脚躯体の応答履歴

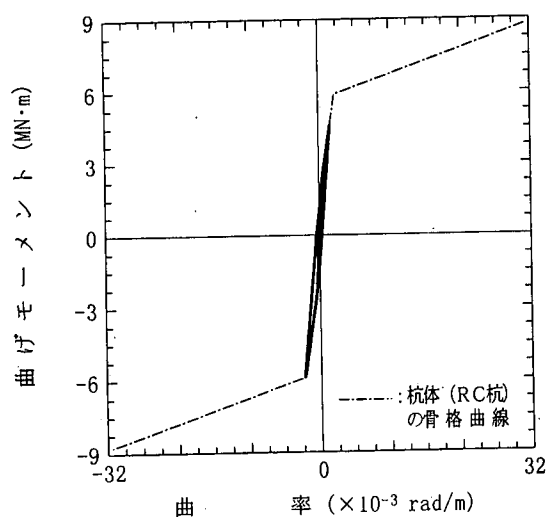


図-6 杭体の応答履歴 (杭頭部 杭1列当たり)

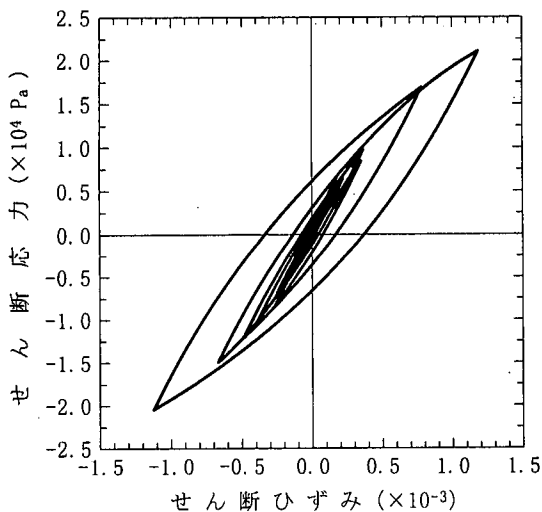


図-7 周辺地盤の応答履歴 (フーチング底面)

天端における水平変位との応答履歴である。最大応答変位は約40 cmで、応答塑性率は約11.5である。

図-6は、杭頭部位置に生じる曲げモーメントと曲率の応答履歴である。最大応答は初降伏点に達している。

図-7は、フーチング底面位置に相当する地盤のせん断応力

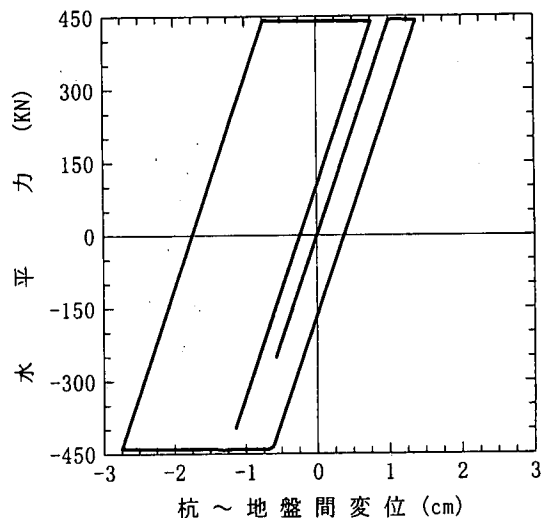
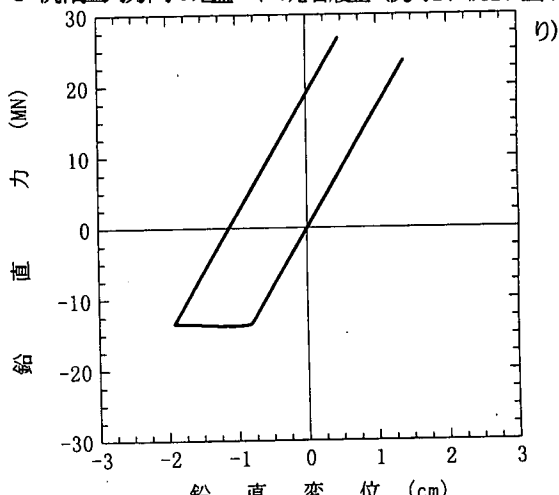
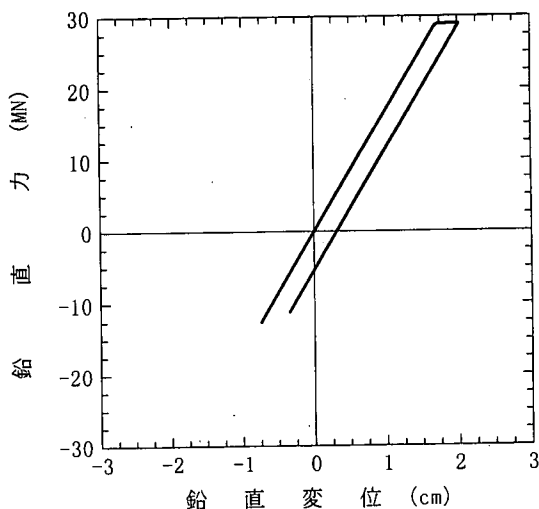


図-8 杭軸直角方向の地盤バネの応答履歴 (杭列1、杭1列当たり)



(1) 杭列1における杭軸方向の地盤バネ



(2) 杭列3における杭軸方向の地盤バネ

図-9 杭軸方向の地盤バネの応答履歴

とせん断ひずみの応答履歴である。せん断ひずみは最大1.1 × 10⁻³程度である。

図-8は、杭列1の杭頭部位置に相当する杭軸直角方向の地盤バネの応答履歴である。横軸は杭体と地盤間の相対変位を表しており、最大応答は約3 cmである。杭基礎は、ほぼ地盤と一緒に振動しているとみることができる。

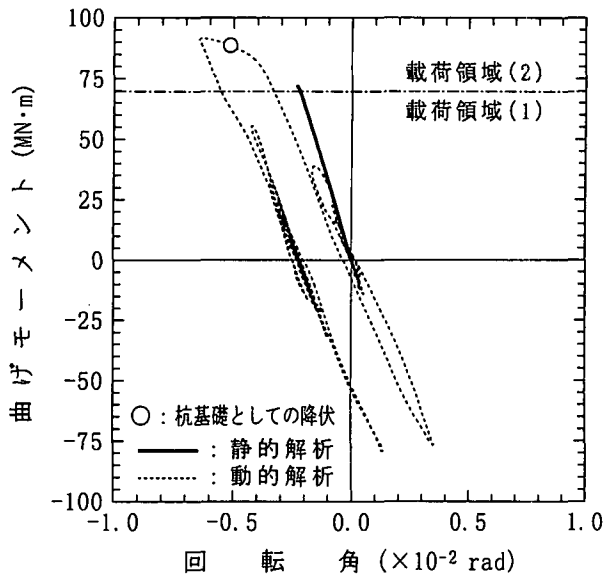


図-10 フーチング底面の応答履歴の比較

図-9は、杭列1と3における杭軸方向の地盤バネに対する応答履歴である。鉛直力と鉛直変位はともに押し込みを正、引抜きを負と定義している。杭列1では、引抜き力は杭体の軸引張耐力に達しているが、押し込み力は杭の極限支持力に達していない。反対に、杭列3では、押し込み力は杭の極限支持力に達しているが、引抜き力は杭体の軸引張耐力に達していない。

橋脚と杭基礎の降伏の順番に着目すると、まず、7.06秒に橋脚が降伏し、7.79秒に杭列1の引抜き力が杭体の軸引張耐力に達し、次いで7.91秒に杭列3の押し込み力が杭の極限支持力に達している。杭基礎全体としての降伏は、7.91秒に生じており、橋脚の方が杭基礎よりも先に降伏している。前述した静的解析では、橋脚が降伏に達する载荷領域(1)では、杭基礎が降伏に達していない。したがって、橋脚が降伏するまでは、静的解析と動的解析は整合しているが、橋脚が降伏した後では、静的解析と動的解析は異なる状態になっており、これについてはもう少し詳細に検討する必要がある。

5. 地震時保有水平耐力法と動的解析の比較

図-10は、フーチング底面に生じる曲げモーメントと回転角の履歴を示したものである。前述した静的解析結果も比較のために示してある。杭基礎が降伏に達する7.91秒における曲げモーメントと回転角の位置を○印で示した。

静的解析においてフーチングに生じる回転角は、载荷領域(1)では、作用曲げモーメントを増加させるにつれて増加する。载荷領域(1)と载荷領域(2)の境界部に達すると、橋脚が降伏するため、それ以後はフーチングの慣性力だけが増分水平力として作用するようになり、最終的にフーチングには 2.4×10^{-3} radの回転が生じる。

一方、動的解析では、曲げモーメントが $-48 \text{ MN} \cdot \text{m}$ に達した時点で橋脚が降伏するが、その後もフーチングには回転が生じ、杭基礎全体としての降伏(上述した○印)も生じた上で、最大応答として 6.4×10^{-3} radの回転が生じた後、変形が反転している。

このように、静的解析では、杭基礎の降伏が生じないのに、動的解析では杭基礎が降伏した。静的解析では0.6gの地震力をフーチングに見込んだが、動的解析ではフーチングに生じた最大加速度は0.5gであったため、地震力の違いが静的解析と動的解析の違いを生じたとは考えられない。また、図-8に示したように杭基礎と周辺地盤はほぼ一緒に振動しており、杭体が地盤より大きな振動を生じたために、このような差が生じたとは考えられない。結局、静的解析と動的解析の違いは、地盤の振動を見込んでいるかいないかであり、地表面で30cmにも達する地盤変位によって基礎に生じる変形が、動的解析では杭基礎に変形を生じさせるのに対して、静的解析ではこの効果が生じないことにありと考えられる。また、静的解析における橋脚とフーチングの慣性力の作用のさせ方も結果に影響を与える。これについては、今後、さらに検討していく予定である。

6. 結論

本研究の結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 地震時保有水平耐力法による静的耐震設計は、橋脚と杭基礎のいずれかが先に降伏するかを判断するためには、動的解析と同じ結果を得ることができる。
- 2) 動的解析では、橋脚が降伏した後杭基礎全体としての降伏が生じるが、静的解析ではこれを再現できない。
- 3) 上述2)の違いを生じさせる原因としては、周辺地盤の振動の影響と、静的解析における慣性力の作用のさせ方にあると考えられる。
- 4) 杭基礎の降伏耐力が橋脚の降伏耐力よりも大きいというだけでは杭基礎の耐震性は確保できない。このため、杭基礎の耐震性を確保するためには、基礎の降伏耐力がどれだけ橋脚の降伏耐力よりも大きくなければならないという点を明確にする必要がある。