

支承条件の違いによる曲線高架橋の大地震時非線形応答解析

北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川 俊郎
 北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 佐野 雅章
 新日本製鐵(株) 正会員 大嶽 敦郎
 (株) 開発工営社 正会員 鷲尾 昭夫

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震によって、高速道路、新幹線、地下鉄や港湾施設などの公共施設に非常に多くの被害がみられた。特に都市高速道路では数多くの高架橋の上部構造、橋脚、支承部などにおいて甚大な被害が生じている。支承部に着目すると、鋼製支承を有する高架橋では支承自体の損傷だけでなく、支承部の損傷の有無によって上部構造や橋脚に被害が及んだと考えられる損傷があった。この事実に対し、震災後に発刊された道路橋示方書¹⁾によると支承部から上部構造が逸脱した場合の衝撃などが比較的少ないゴム支承や、エネルギー吸収性能も合わせ持つ免震支承などを設計の際に考慮することを推奨している。また、既設高架橋の支承条件の見直しを検討する際には、支承タイプの違いが高架橋システムへの耐震性能や損傷にどのような影響を及ぼすのかについて検討しておくべきである。そのためには大地震を受ける場合を考慮し、上部構造、支承部および橋脚を1つの構造システムとして考えた高架橋全体系の動的挙動を調べておく必要がある。また、地震動は水平2方向および上下方向の3成分を有するので、支承部などの弱点となりやすい部分への影響を検討するために3次元的な挙動を捉えておかなければならない。特に連続曲線高架橋においては、耐震性の向上のためにも立体的な非線形応答性状を明らかにすることは不可欠であると考えられる。

そこで本研究では、連続曲線高架橋を立体骨組構造にモデル化し、支承条件を考慮した高架橋が大地震を受ける場合の動的挙動を、幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析を行うことにより、立体的な視点から比較検討を行う。動的解析に際しては、鋼製橋脚を有する連続曲線高架橋を、上部構造、支承、橋脚からなる高架橋システムとして捉え、おもに支承部および曲線高架橋の曲率が動的応答に与える影響について比較を行う。ここでは曲率半径の異なる曲線橋を対象として、支承部には①鋼製可動支承に落橋防止装置や摩擦の影響を考慮した場合、②水平反力分散支承を一方向のみに用い、橋軸直角方向については固定とした場合、③免震支承を一方向のみに用い、橋軸直角方向については固定とした場合の3通りについて検討する。このような支承条件や支承の配置方向の違いが連続曲線高架橋全体系の動的な非線形応答に与える影響について考察する。ここで、上部構造の応答変位、支承部の水平力—水平変位関係、橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係などについて着目し、比較検討を行う。

2. 解析モデル

本研究は、高架橋全体構造の動的な非線形挙動を明らかにすることを目的としているため、上部構造、支承および橋脚の相互作用を考慮できる最も基本的な解析モデルとして2径間連続曲線高架橋を対象とする。

2.1 上部構造・下部構造

本研究では、図-1に示すような2径間連続曲線高架橋を解析モデルとする。上部構造は支間長40m、総重量が約600tfの鋼箱形断面を設定し、解析に際してはこれを断面2次モーメントと総重量が等価である鋼断面に換算する。ここではそりねじり変形の影響を受けないものとする。

曲率半径Rは100mと200mの場合について比較する。また、支承配置の影響を比較するために図-2に示すような温度変化に伴う曲線桁の伸び変形を放射方向に許すように設置する場合と、曲線桁の接線方向に設置する場合の2通りを考える。鋼製橋脚の配置方向については中央および右側橋脚ともに支承の配置スペースを考慮して、支承方向と同一とする。

Nonlinear Dynamic Analysis of Curved Viaduct System with Various Bearing Conditions under Great Earthquake Ground Motions

by Toshiro HAYASHIKAWA, Masaaki SANO, Atuo OHTAKE and Akio WASHIO

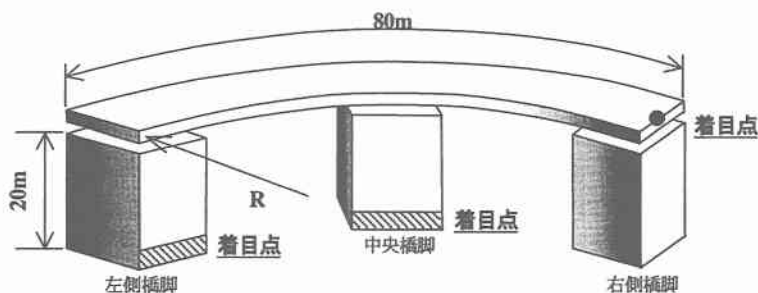


図-1 2径間連続曲線高架橋



図-2 支承の配置方向

すべての橋脚は高さ20mの正方形箱形断面を有する等断面鋼製橋脚とする。鋼製支承を用いた場合、固定支承を有する左側橋脚に上部構造の地震力が集中するが、その場合に対して、震度法と許容応力度法に基づいて橋脚を設計する。橋脚の断面諸元を表-1に示す。また、橋脚断面は幅24m、板厚50mmとしている。橋脚の基礎については十分剛である場合を考えて固定とする。ここで実際には、橋脚の設計条件は支承条件によって異なるが、本研究では支承条件の差違が高架橋全体系に及ぼす影響を検討するために、橋脚には同一の断面諸元を用いる。

2.2 支承条件

高架橋全体系に設置される支承は、水平2方向、鉛直方向、回転3方向のばね要素にモデル化する。水平2方向は支承条件に応じて非線形のばね特性を設定する。また、鉛直ばねは支承部の鉛直方向の剛な結合条件を表すために、十分大きなばね定数 ($1.0 \times 10^3 \text{tf/m}$) を設定し、回転方向ばねにはヒンジの条件を満たすように小さなばね定数 (1.0tf/m) を設定し、いずれも線形ばねとしている。

(1) 鋼製支承モデル

摩擦と移動制限装置の影響を考慮した場合を鋼製支承モデルとする。この支承の履歴特性は、支点反力による摩擦力が最大摩擦力以下の状態、支承部に作用する水平力が最大摩擦力を越えて支承がすべる状態、支承の変位が移動制限装置に到達した後に上部構造が橋脚と一体となり挙動する状態を設定する。ここで、最大摩擦力を越えて滑り始める水平力は支点反力に摩擦係数 0.05 を乗じた最大摩擦力であり、支承の水平変位が移動制限装置に到達するときの水平力は移動制限量を10cmと仮定したときの値である。また、支承の構成部材は支承に作用する力の大きさに関わらず弾性状態を保つものと仮定する。なお固定支承は大きな値を仮定しており、支承は水平方向に移動しない。

(2) 水平反力分散支承モデル

すべての支承は弾性ゴムと補強鋼板からなる四角形の積層タイプゴム支承とする。水平ばねの履歴特性は、支承が上部構造の慣性力により変位を生じる状態、支承の変位が移動制限装置に到達した後に上部構造が橋脚と一体となって挙動する状態を設定する。道路橋支承標準設計(ゴム支承、ころがり支承編)²⁾を参考に、水平反力分散支承の特性値を設定する。支承の水平変位が移動制限装置に到達するときの水平力は移動制限

表-1 橋脚の断面諸元

断面	(m^2)	0.4700
断面2次モーメント	(m^4)	0.4328
ねじり定数	(m^4)	0.6912
単位体積重量	(tf/m^3)	7.85
ヤング係数	(tf/m^2)	2.1×10^7
降伏応力度	(tf/m^2)	24000
ひずみ硬化		0.01

量を3.5cmと仮定したときの値である。本研究では、橋軸方向を水平反力分散支承、橋軸直角方向を固定支承としている。これを水平反力分散支承モデルとする。

(3) 免震支承モデル

すべての支承を鉛プラグ入り積層ゴムタイプの免震支承とし、水平ばねの水平力-水平変位関係をバイリニア型に設定する。道路橋の免震設計法マニュアル(案)³⁾を参考に、震度法レベルおよび地震時保有水平耐力レベルでの設計荷重と設計変位から免震支承の特性値を設定する。本研究では、橋軸方向を免震支承、橋軸直角方向を固定支承としている。これを免震支承モデルとする。

3. 解析方法

本研究では、鋼材の降伏および幾何学的非線形性の影響を考慮したはり柱要素の有限要素法と Newmark β 法($\beta=0.25$)、および修正 Newton-Raphson 法を併用した平面骨組のための有限変位動的応答解析法を3次元に拡張した方法である。ここでは部材の面内および面外変形それぞれについて材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した接線剛性マトリックスを作成し、ねじり変形は線形であるとして立体骨組の時刻歴応答解析を行う⁴⁾。また、鋼材の応力-ひずみ関係をバイリニア型に理想化し、降伏応力度を24000tf/m²、弾性係数 2.1×10^7 tf/m²、塑性域のひずみ硬化を0.01としている。減衰定数としては質量比例型を仮定し、1次の固有振動モードに対する減衰定数 $\eta=5\%$ を基準とする。解析に用いる骨組モデルは1要素あたりの節点数2のはり柱要素より構成され、橋脚の要素分割数は6、上部構造の分割数は16とする。

動的応答に際しての入力地震波は兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録を用い、これを橋脚基部の水平2方向および上下方向に作用させて高架橋全体系の地震応答解析を行う。

4. 非線形動的応答結果

4. 1 上部構造時刻歴応答変位

曲率半径100mの曲線高架橋の上部構造における時刻歴応答変位を図-3に示す。ここでは、図-1において上部構造の右端部に着目する。また、縦軸は応答変位、横軸は時間を表している。

鋼製支承モデルは橋軸方向において放射方向と接線方向の応答変位に大きな差はみられないが、橋軸直角方向では放射方向に比べて接線方向の応答変位がやや大きくなっている。また、放射方向および接線方向ともに橋軸方向では大きな残留変位を生じている。一方、橋軸直角方向に着目すると放射方向には残留変位は生じないが、接線方向は曲率半径の影響により若干の残留変位が生じている。水平反力分散支承モデルは放射方向と接線方向において橋軸方向応答変位および橋軸直角方向応答変位に大きな差はなく、鋼製支承のような残留変位も生じていない。免震支承モデルは3タイプの支承の中では最も応答変位が大きくなっており、橋軸方向応答変位においては放射方向よりも接線方向の応答変位がやや小さくなっている。一方、橋軸直角方向応答変位は放射方向に比べて接線方向の場合において大きくなっている。また、放射方向に支承を設置した場合、橋軸方向においてわずかに残留変位が生じていることがわかる。

曲線高架橋では、いずれの支承条件においても橋軸直角方向の応答変位は放射方向に比べて接線方向の方が大きく現れる傾向がみられる。支承の配置方向が接線方向である場合は、慣性力は2方向に分散されるために放射方向に比べて接線方向の応答変位が大きくなったと考えられる。

4. 2 支承部の水平力-水平変位関係

曲率半径100mの曲線高架橋の支承部における水平力-水平変位関係を図-4、図-5に示す。ここでは、図-1において左側橋脚および中央橋脚の支承部に着目する。縦軸は水平力、横軸は水平変位を表している。

いずれの支承条件においても設定した支承履歴特性が現れており、また支承の配置方向を比べると放射方向と接線方向ではそれぞれの支承水平力に大きな差はないことがわかる。最も大きな水平力が現れているのは鋼製支承モデルであり、中央橋脚の支承部では左側橋脚に比べて水平力がさらに大きくなっている。水平反力分散支承モデルは3タイプの中では中央橋脚の水平力が最も小さく、中央橋脚と左側橋脚の支承部の水平力はほぼ同じ値を示している。免震支承モデルは放射方向および接線方向ともに左側橋脚よりも中央橋脚の支承部で水平力が大きくなっている。これは支承部の剛性を表す履歴特性の傾きからわかるように、左側

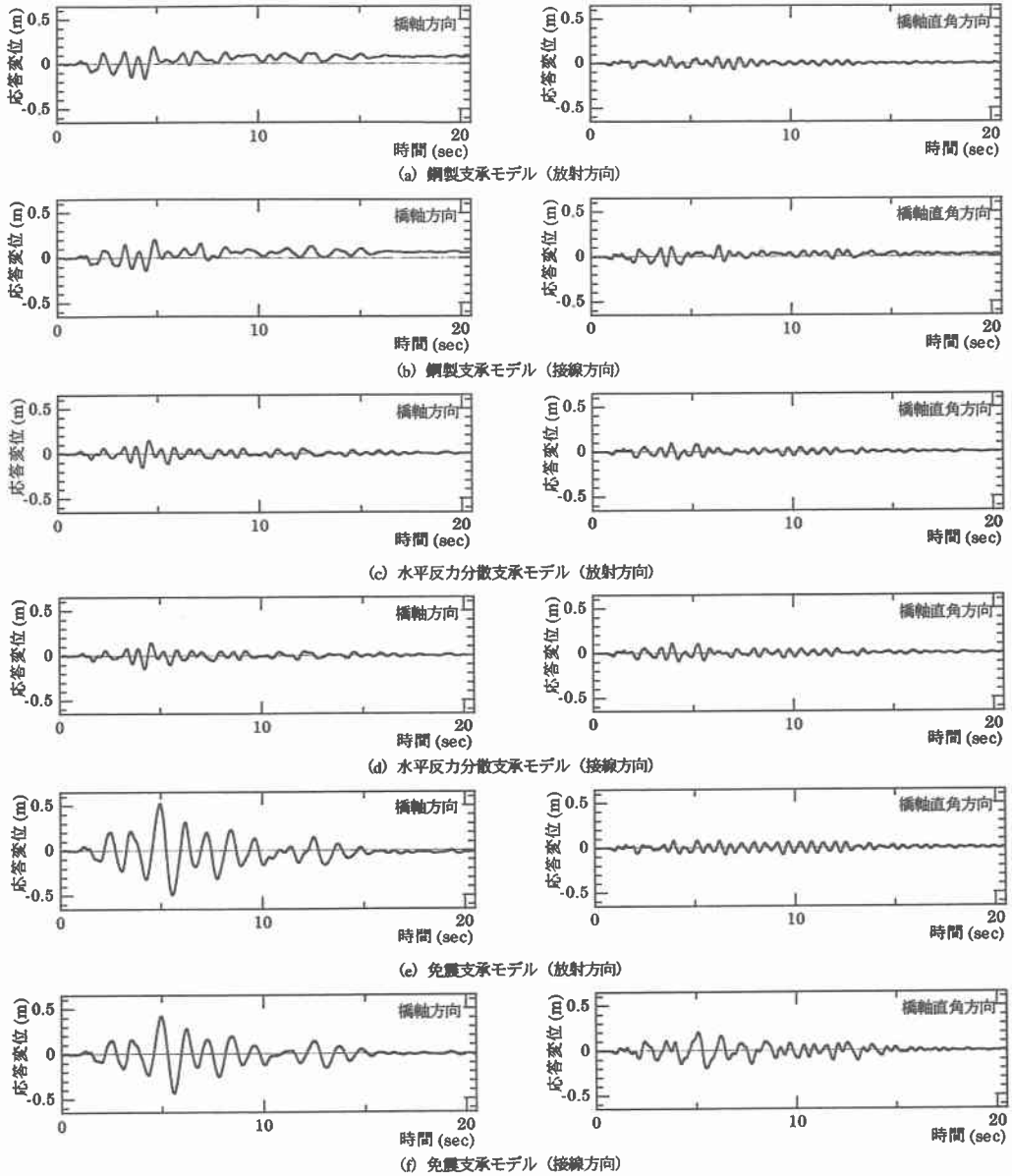


図-3 時刻歴応答変位

橋脚よりも中央橋脚の支承剛性が高く設定されているので、上部構造による慣性力が中央橋脚の支承部に集中しているものと考えられる。

4. 3 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係

曲率半径100mの曲線高架橋の橋脚基部における曲げモーメント-曲率関係を図-6、図-7に示す。ここでは、図-1において左側橋脚および中央橋脚基部に着目する。縦軸は曲げモーメント、横軸は曲率を表している。

鋼製支承モデルは放射方向と接線方向の履歴ループに特に差はみられないが、可動支承を設置した中央橋脚基部よりも、固定支承を設置した左側橋脚基部において特に大きく塑性化していることがわかる。これは左側橋脚が固定支承であるために、可動支承の場合よりも大きな慣性力が橋脚基部に伝達されると考えられ

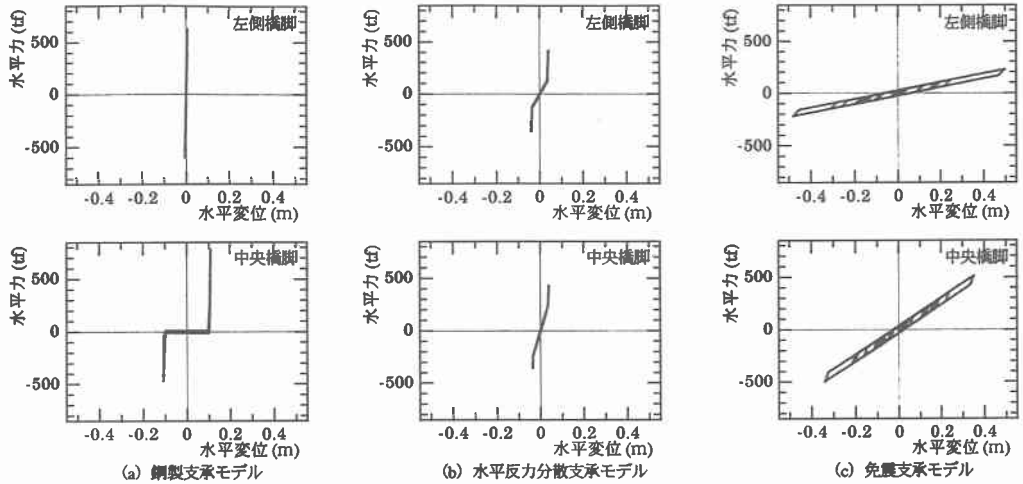


図4 支承部の水平力—水平変位関係（放射方向）

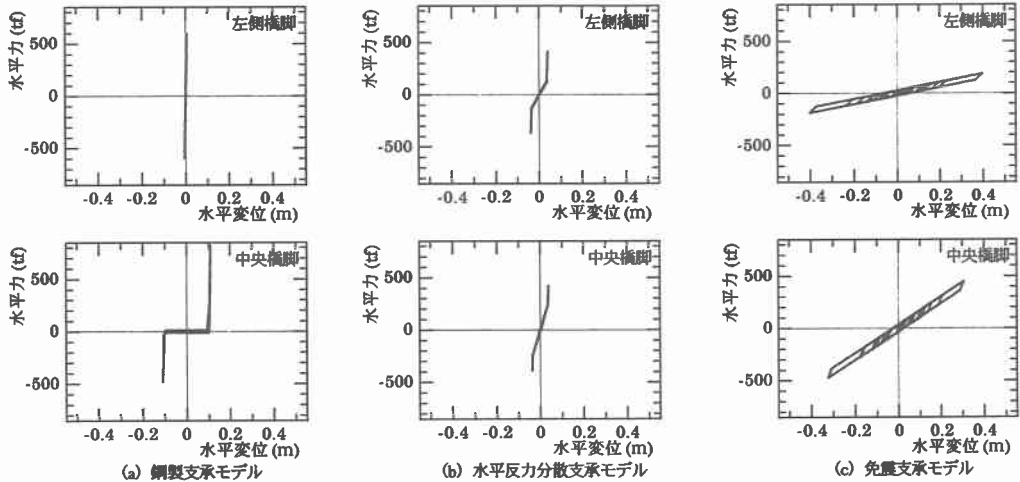


図5 支承部の水平力—水平変位関係（接線方向）

る。一方、水平反力分散支承モデルは支承の配置方向によらずに、左側橋脚基部および中央橋脚基部ともに弾性域にあることがわかる。免震支承モデルは鋼製支承モデルと逆の傾向がみられる。左側橋脚基部は解析モデルの中で最も履歴ループが小さくなっているが、放射方向および接線方向ともに左側橋脚基部よりも中央橋脚基部において大きな履歴ループが現れている。これは中央橋脚が左側橋脚の支承剛性よりも大きな値を用いているために、より大きな慣性力が中央橋脚基部に伝達されたことによるものと考えられる。また、放射方向に支承を配置した場合は、接線方向よりも橋脚基部の塑性化が大きいことがわかる。

5. おわりに

本研究では、鋼製橋脚を有する連続曲線高架橋を対象とし、支承部および曲線高架橋の曲率が大地震時の動的応答に与える影響について比較を行った。

曲線高架橋の時刻歴応答変位は、3 タイプの支承において支承の配置方向の影響は橋軸方向の応答変位には特にみられないが、橋軸直角方向では放射方向に比べて接線方向で応答変位が大きく現れる傾向が確認できた。支承部の水平力—水平変位関係は、支承の配置方向が放射方向の場合と接線方向の場合では3 タイプの支承部においていずれも水平力に大きな差はないことがわかった。橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係

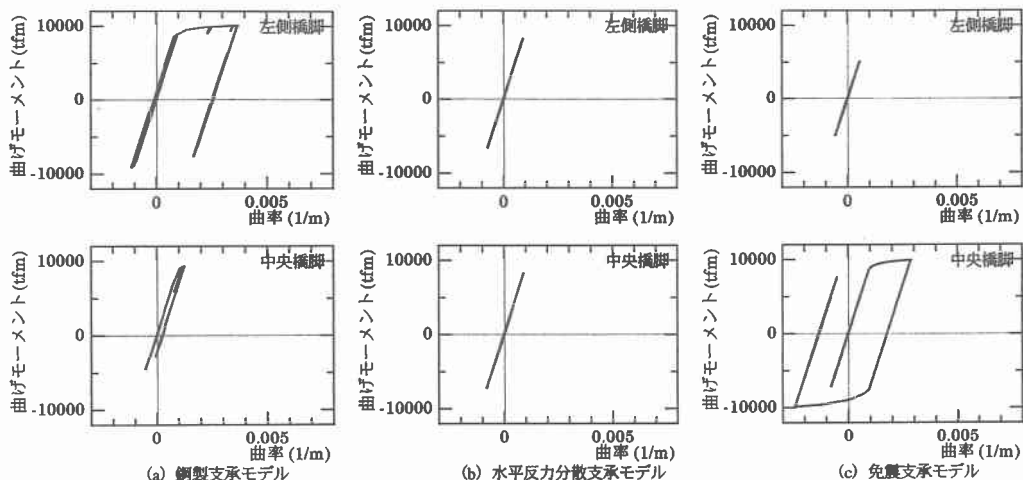


図-6 橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係（放射方向）

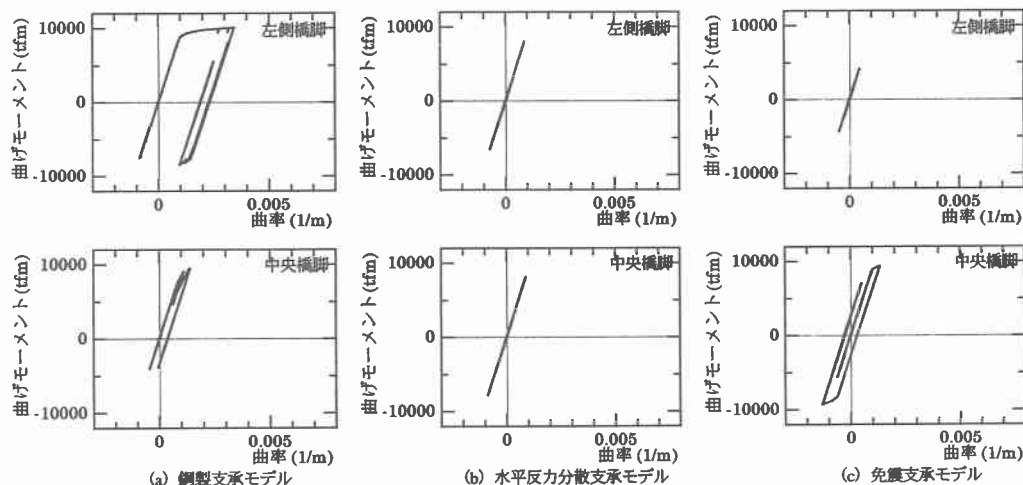


図-7 橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係（接線方向）

は、鋼製支承モデルは可動支承を設置した橋脚基部よりも固定支承を設置した橋脚基部において大きく塑性化する傾向があった。水平反力分散支承モデルは支承の配置方向によらず、いずれの橋脚基部においてもほぼ同じような履歴ループがあらわれることがわかった。免震支承モデルは支承剛性の高い橋脚基部で履歴ループが大きくなる傾向がみられた。

以上のように支承部の違いによる応答変位および橋脚基部への影響は無視できるものではなく、それぞれの動的特性が現れることがわかった。また、水平反力分散支承や免震支承などを採用するには支承部の剛性の決定が高架橋全体系の地震時挙動に大きく関わってくることから、より適切な設計および動的解析による検討が必要であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，Ⅴ耐震設計編，1996.12.
- 2) 日本道路協会：道路橋支承標準設計（ゴム支承・ころがり支承編），1993.4.
- 3) 土木研究センター：道路橋の免震設計マニュアル（案），1992.10.
- 4) 林川俊郎・大嶽敦郎・中島章典：レベル2地震動を受ける立体高架橋の非線形応答性状，土木学会北海道支部論文報告集，第54号（A），pp.146-151，1998.2.