

I - 1

4 径間連続曲線高架橋の大地震時における非線形挙動について

北海道大学大学院工学研究所 フェロー 林川 俊郎
 北海道大学大学院工学研究所 ○学生員 佐野 雅章
 北海道大学大学院工学研究所 学生員 化 鐘福
 (株) 開 発 工 営 社 正 会 員 高 橋 親 市

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震は日本の近代的大都市部において発生した直下型大地震であり、特に都市高速道路に大きな被害を受けた。都市部の高速道路は交通および物流の重要な社会基盤であり、また都市内部に位置していることから高架構造であることが多い。これまでは水平地震力が構造設計を支配していることが多かったため、想定した以上の地震力であった兵庫県南部地震により鋼製橋脚の座屈や亀裂、破断などを始め、支承部や桁、基礎などに多くの損傷が生じた¹⁾。

鋼製橋脚はコンクリート構造に比べて重量が軽く、鋼材の延性により塑性変形能力が高いために、耐震性に優れた構造であると考えられている。平成8年12月に改訂された道路橋示方書・同解説V耐震設計編では、コンクリートを充填しない鋼製橋脚に対して、地震時の応答や破壊のメカニズムなどが十分には解明されていないために地震時保有水平耐力および許容塑性率は規定されておらず、橋脚の脆性的な破壊を防ぐための構造細目、じん性を向上させるための構造細目が規定されている²⁾。また、高架橋システムの構成要素の一つである支承に関しては免震設計が追加され、高架橋の免震設計として適する場合には免震支承を採用することが推奨されている。

耐震性能の向上を目指した橋梁の設計としては、その構成要素を個別に耐震設計するのではなく、橋梁全体系の地震時挙動を把握し、想定する地震動に対する構成部材の損傷程度を性能規定することが重要と考えられる。つまりレベルⅡ程度の予想を上回る地震が発生した場合、損傷を受けることは避けることができないため、構成部材の変形性能によってある程度損傷は許すものの落橋を防ぎ、すぐには倒壊しないという構造的延性を持つことが重要である。

確実に落橋を防止するためには多径間連続構造にすることが考えられる。その際、地震力が一つの橋脚に集中しないようにするために地震時の水平力を分散する構造が望ましいことから、高架橋を新設する区間においては上部構造の連続化と合わせて免震設計を取り入れることが考えられる²⁾。

連続高架橋はその構造上、複数の橋脚や支承、落橋防止システムを有している。レベルⅡ地震動のように大きな外力が作用する場合、橋脚の他の構成要素の応答も大きく影響し、全体構造系では非線形領域に達するものと考えられる。道路橋示方書では、挙動が複雑になるような橋の場合は非線形動的解析などによって耐震照査することを明記している²⁾。大地震時における挙動を適切に評価するためにも、支承の挙動が橋梁全体系の応答性状にどのような影響を及ぼすのか検討することは重要であると考えられる。

そこで本研究では鋼製橋脚を有する4径間連続曲線高架橋を対象として、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い³⁾、支承条件の違いを考慮した高架橋が大地震を受ける場合の動的挙動について立体的な視点から比較検討を行うものである。動的解析に際しては、橋梁全体を上部構造、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全体系の動的応答に与える影響について比較する。支承部には、①鋼製可動支承に落橋防止システムや摩擦の影響を考慮した場合、②水平反力分散支承は橋軸方向のみ可動し、橋軸直角方向については固定とした場合、③免震支承は橋軸方向のみ可動し、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。また、支承の配置方向として①放射方向、②接線方向の2通りの場合を考える。比較検討の際は、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する。

2. 解析モデル

本研究は多径間連続曲線高架橋の動的な非線形挙動について検討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解析モデルとして図-1のような4径間連続曲線高架橋を対象とする。

Nonlinear Dynamic Analysis of 4-span Curved Continuous Viaduct System with Various Support Conditions under Great Earthquake Ground Motions

by Toshiro HAYASHIKAWA, Masaaki SANNO, Chong Pog EA and Shinichi TAKAHASHI

2. 1 上部構造・橋脚

上部構造については、曲率半径 100m、橋長 160m（支間長 40m×4 径間）、総重量 11.8MN の鋼箱形断面を設定する³⁾。橋脚はすべて高さが 20m である、断面幅 2.5m、板厚 0.05cm の正方形箱形断面の等断面鋼製橋脚として震度法および許容応力度法に基づき設計を行う。橋脚の設計に際しては支承条件などを考慮して各断面ごとに設計を行うべきであるが、本研究では支承条件や支承配置方向の違い、曲線桁の影響が高架橋システム全体系に及ぼす影響を検討するために、橋脚断面は全て同一の諸元を設定する。橋脚基礎の設定は十分剛であるとして固定とする。

2. 2 支承部

本研究で採用する高架橋に設置する支承は、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。その際、水平 2 方向は支承条件に応じた非線形のばね特性を有している。また、鉛直ばねについては剛な結合条件とするために十分大きなばね定数を設定し、回転方向ばねについてはヒンジの条件とするために小さなばね定数を設定する。また、支承の配置方向は図-2 のように放射方向と接線方向の 2 種類を考える。

(1) 鋼製支承モデル

鋼製支承モデルとして固定支承、可動支承の 2 種類を考える。ここで、固定支承は P1 橋脚上に設置し、固定の条件とするために水平 2 方向は大きなばね定数を設定する。可動支承はすべり支承（BP 支承）を採用し、摩擦と移動制限装置の影響を考慮する⁴⁾。可動支承は P2, P3, P4, P5 橋脚上に設置する。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、支承の変位が変位制限構造に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表すものである。ここで、最大摩擦力を超えて滑り始める水平力は支点反力に静止摩擦係数を乗じた最大摩擦力であり、支承の水平変位が変位制限構造に達したとき支承部に発生する水平力は変位制限量を 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部に発生する地震力の大きさに関わらず弾性状態を保つものと仮定する。

(2) 水平反力分散支承モデル

地震時の水平力を分散するデバイスの一つとして、弾性ゴムと補強鋼板からなる四角形断面の積層タイプゴム支承を考える。この支承の履歴特性は、支承が上部構造の慣性力により変位を生じる状態、支承の変位が変位制限構造に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表すものである。道路橋支承標準設計⁵⁾を参考に水平反力分散支承の特性値を設定する。支承の水平変位が変位制限構造に達するときの水平力は、変位制限量を 3.5cm と仮定したときの値である。本研究では、橋軸方向のみ水平反力分散支承の特性を有し、橋軸直角方向は固定の状態である支承部モデルを設定する。

(3) 免震支承モデル

地震時の水平力を分散するデバイスの一つとして、アイソレーターとダンパーが一体となった鉛プラグ入り積層ゴムタイプの免震支承を考え、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)⁶⁾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において設計荷重と設計変位から免震支承の特性値を決定する。先に述べた水平反力分散支承と同様に、橋軸方向のみ水平反力分散支承の特性を有し、橋軸直角方向は固定の状態である支承部モデルを設定する。

3. 解析方法

本研究は鋼材の降伏と幾何学的非線形性を考慮した、はり柱要素の有限要素法と Newmark β 法および修正 Newton-Raphson 法を併用した有限変位動的応答解析法によって非線形動的解析を行うものである³⁾。部材の面内

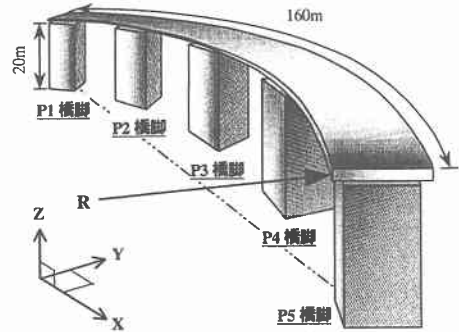


図-1 4 径間連続曲線高架橋

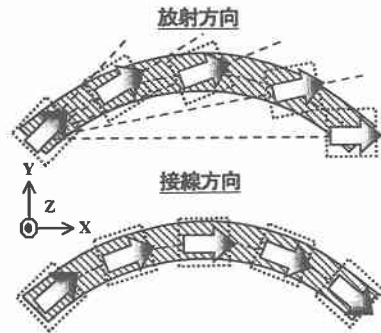


図-2 支承の配置方向

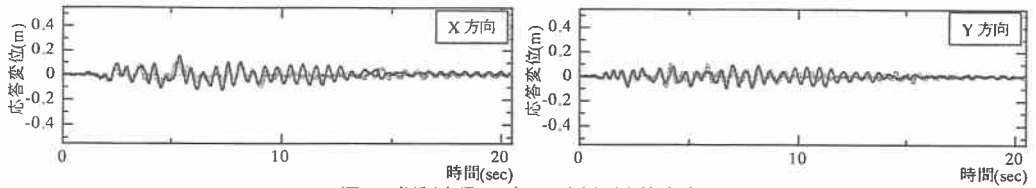


図-3 鋼製支承モデルの時刻歴応答変位

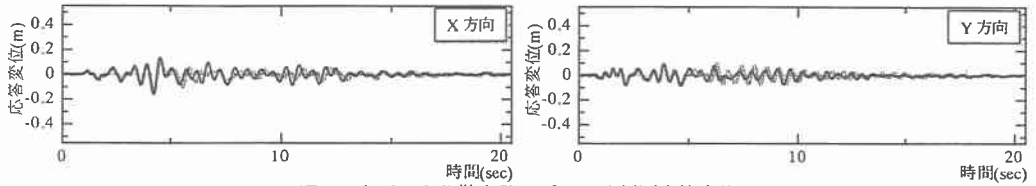


図-4 水平反力分散支承モデルの時刻歴応答変位

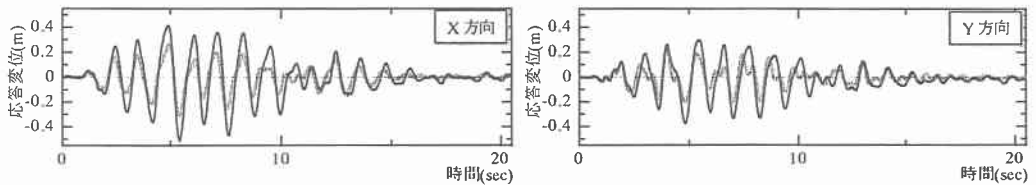


図-5 免震支承モデルの時刻歴応答変位

および面外変形は、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て3次元立体骨組の時刻歴応答解析を行う。また、鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニア型を仮定し、鋼材降伏応力は235MN、弾性係数 $2.0 \times 10^5 \text{MN/m}^2$ 、塑性域のひずみ硬化は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(5%)を設定する。解析に用いる骨組モデルは1要素あたり節点数2のはり柱要素より構成され、橋脚の要素分割数は5、上部構造の分割数は16とする。また、入力地震波はレベルⅡ地震波(兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録)を解析に使用し、これを水平2方向および上下方向に作用させて、高架橋全体の地震時挙動について立体的な視点から比較検討していく。

4. 非線形動的解析結果

比較検討の際は支承の配置方向を放射方向とした場合を基本として、支承条件および配置方向を接線方向とした場合の違いについて述べることにする。

4. 1 時刻歴応答変位

4径間連続曲線高架橋の上部構造左端の時刻歴応答変位を図-3～図-5に示す。また、それぞれ(a)はX方向、(b)はY方向の時刻歴応答変位である。なお、黒色の実線は支承の配置方向が放射方向の場合であり、灰色の実線は支承の配置方向が接線方向の場合である。縦軸は応答変位、横軸は時間を表している。

まず、X方向に注目すると3タイプの支承条件では免震支承モデルで最も大きな応答変位が現れている。これは鋼製支承モデル、分散支承モデルに設定されている変位制限構造が免震支承モデルには設定されていないために、変位や周期が大きくなったものと考えられる。鋼製支承モデル、分散支承モデルは最大応答値は同程度であるが、10秒以降は分散支承モデルの変位が小さくなっていく。これは分散支承モデルは各支承により上部構造の地震力が各橋脚に分散される構造となっているために、振動が小さくなっていくと考えられる。また支承の配置方向の影響は鋼製支承モデル、分散支承モデルでは最大応答値に大きな差は現れないものの、放射方向は接線方向よりも応答変位が大きくなる傾向がみられ、特に免震支承モデルでは差が大きくなっていることがわかる。これは放射方向の場合、高架橋全体は直線に近い挙動となるために支承部モデルの変位制限構造の影響が接線方向よりも放射方向に大きく現れるためであると考えられる。

一方、Y方向においても支承条件および支承の配置方向の違いについてはX方向と同様の傾向が現れている。これは支承部モデルの橋軸直角方向はすべて固定としているが、支承の配置方向を接線方向、放射方向の2タイプを考慮しているため各支承部モデルの橋軸方向特性がY方向に影響したからであると考えられる。

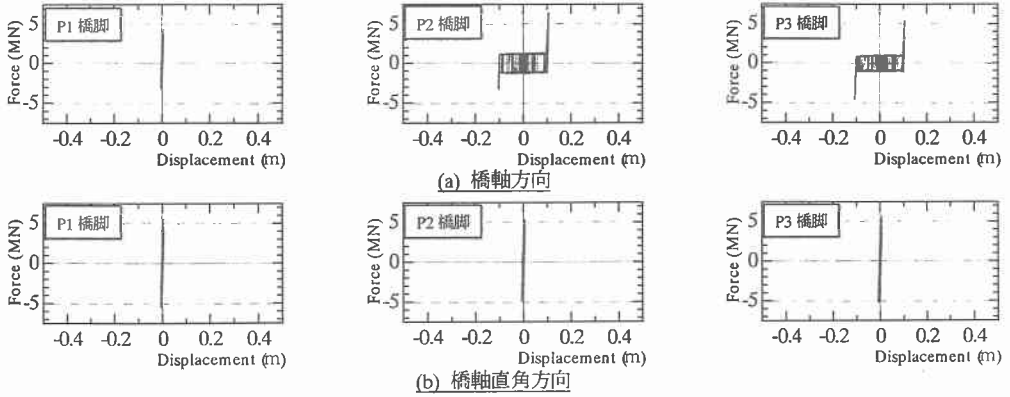


図-6 鋼製支承モデルの水平力—水平変位関係

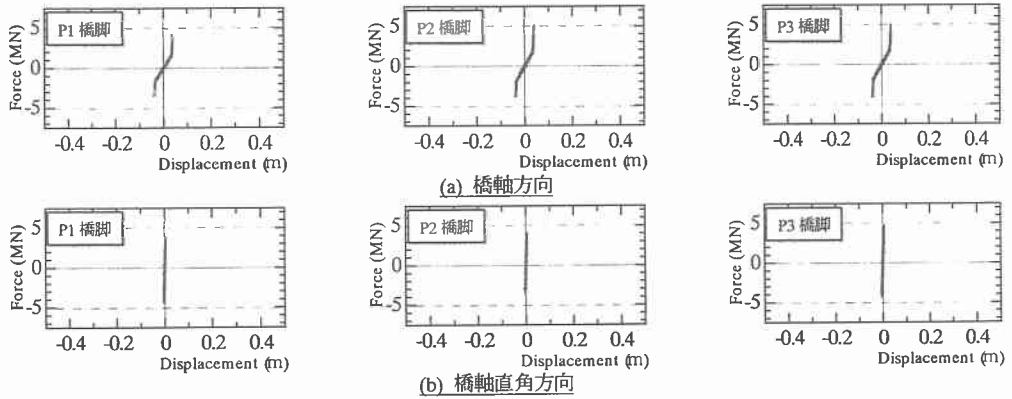


図-7 水平反力分散支承モデルの水平力—水平変位関係

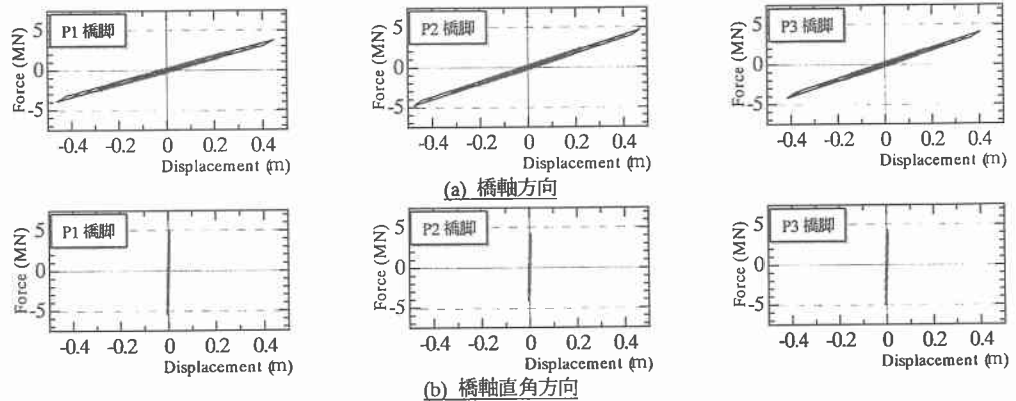


図-8 免震支承モデルの水平力—水平変位関係

4. 2 支承部の水平力—水平変位関係

4 径間連続曲線高架橋の支承部における水平力—水平変位関係を図-6～図-8 に示す。また、それぞれ(a)は橋軸方向、(b)は橋軸直角方向の関係である。ここでは P1、P2、P3 橋脚上に設置された支承部に着目する。なお、黒色の実線は支承の配置方向が放射方向の場合であり、灰色の実線は支承の配置方向が接線方向の場合である。縦軸は水平力、横軸は水平変位を表している。

各モデルともにそれぞれの支承の特性が再現されていることがわかる。橋軸方向においては免震支承モデルと

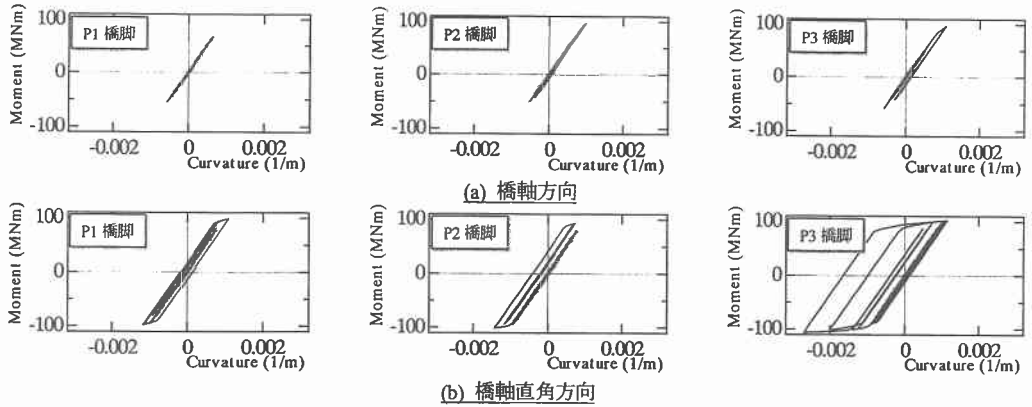


図-9 鋼製支承モデルの曲げモーメント—曲率関係

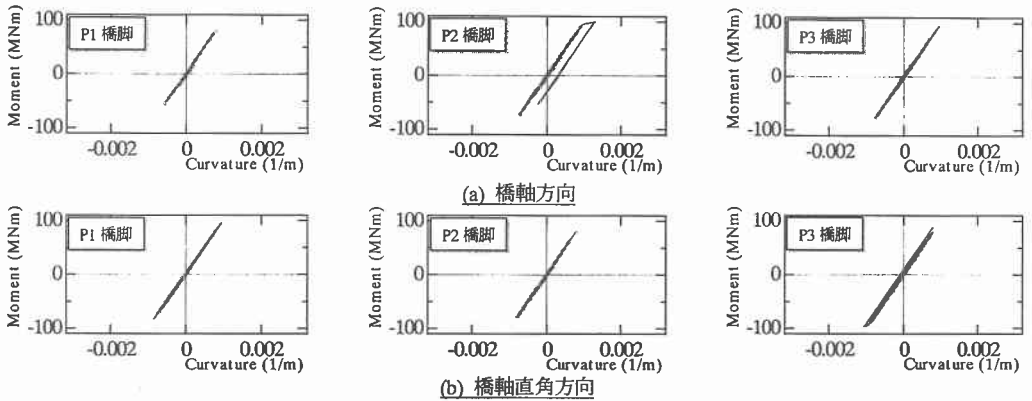


図-10 水平反力分散支承モデルの曲げモーメント—曲率関係

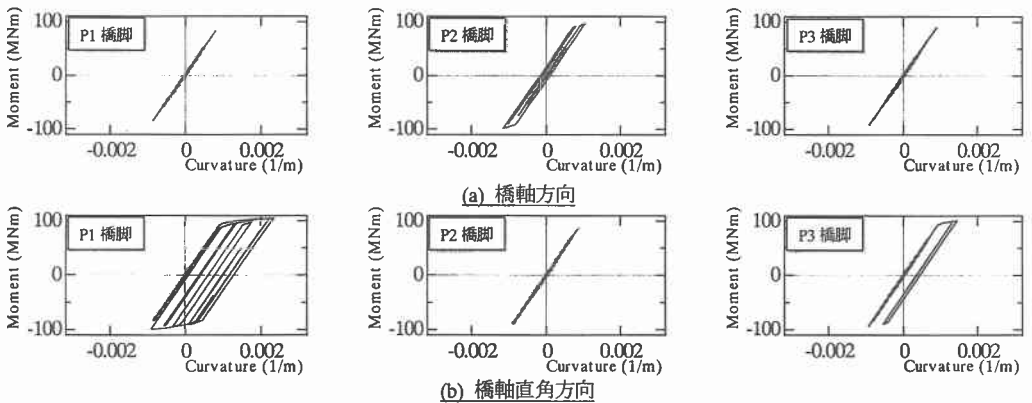


図-11 免震支承モデルの曲げモーメント—曲率関係

比較して鋼製支承モデル，分散支承モデルで大きな水平力が現れており，また3タイプの支承ともに鉛直反力の大きいP2，P3橋脚の支承部で水平力が大きくなっていることがわかる．支承の配置方向の影響については，放射方向は接線方向よりも高架橋全体が直線に近い挙動をするために放射方向の場合で大きな水平力が現れている．

一方橋軸直角方向では鋼製支承モデルの固定支承を設置したP1においてやや大きな水平力が現れているものの，3タイプの支承に大きな差はみられない．支承の配置方向による影響は，いずれのモデルにおいても接線方向よりも放射方向の場合でやや大きな水平力が現れていることがわかる．

4. 3 橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係

4 径間連続曲線高架橋の橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係を図-9～図-11 に示す。また、それぞれ(a)は橋軸方向、(b)は橋軸直角方向の関係である。ここではP1、P2、P3 橋脚基部に着目する。なお、黒色の実線は支承の配置方向が放射方向の場合であり、灰色の実線は支承の配置方向が接線方向の場合である。縦軸は曲げモーメント、横軸は曲率を表している。

まず橋軸方向においては3タイプの支承条件とも弾性範囲に近い履歴ループが現れているが、鉛直反力の大きいP2やP3で塑性化の傾向があることがわかる。また、支承の配置方向を接線方向とした場合はすべて弾性範囲にある。

橋軸直角方向では、鋼製支承モデルの橋脚基部はすべて塑性域に達しているがP3 橋脚基部で履歴ループが特に大きくなっている。これは支承部に発生した水平力はP1 橋脚とP3 橋脚ではほぼ同じであるが、P3 橋脚はP1 橋脚よりも鉛直反力が大きいために、支承部から伝達される上部構造の慣性力がP3 橋脚に集中して橋脚基部が先に塑性し始め、それに伴うエネルギー吸収効果によってP1 橋脚およびP2 橋脚に作用する慣性力が低減されたからであると考えられる。分散支承モデルはP3 橋脚基部でやや塑性しているが、P1、P2 橋脚基部では弾性範囲にある。免震支承モデルは鋼製支承モデル、分散支承モデルに比べてP1 橋脚で大きな履歴ループが現れている。これは、支承部の橋軸直角方向に発生する水平力は、鋼製支承モデル、免震支承モデル、水平反力分散支承モデルの順に小さい値となるが、免震支承モデルの中ではP1 橋脚の水平力がP2 橋脚およびP3 橋脚よりも大きいことから、P1 橋脚の履歴ループが特に大きくなったものと考えられる。また、支承の配置方向については橋軸方向と同様に接線方向とした場合はすべて弾性範囲にあることがわかる。

5. おわりに

本研究では4径間連続曲線高架橋を対象として、幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮した非線形動的解析を行い、支承条件の違いを考慮した高架橋が大地震を受ける時の応答性状について立体的な視点より比較検討を行った。

本研究のような曲線高架橋の場合、採用する支承の特性、特に鋼製支承や水平反力分散支承などの変位制限構造は高架橋全体系の応答変位に大きい影響を与えることがわかった。支承を放射方向に設定したときには、特に免震支承など変位制限構造を設けていない支承の場合は橋梁全体としては直線的な挙動を示すために応答変位が過大となる可能性を有しているといえる。また、支承部ー橋脚の関係においても鋼製支承や水平反力分散支承など、支承が変位制限構造に到達した際の衝撃によって、上部構造の大きな慣性力が橋脚に伝達することによって橋脚の基部を破壊することなども考えられる。よって、新設の橋梁の設計や既設高架橋の支承条件の見直しを検討する際には、鋼製支承や水平反力分散支承を採用する時は変位制限構造の影響および支承の配置方向にも十分注意する必要があるといえる。また、免震支承を採用するときは適用する橋梁の使用目的を念頭に置き、変位が過大となりやすいことを考慮して設計しなければならない。

【参考文献】

- 1) 土木学会：阪神・淡路大震災調査報告書ー土木構造物の被害、橋梁一、丸善、1996.12.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、1996.12.
- 3) 林川俊郎・大嶽敏郎・中島章典・佐野雅章：3成分大地震動を受ける連続曲線高架橋の非線形応答解析、構造工学論文集、Vol.45A、pp.849-858、1999.3.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I 共通編、II 鋼橋編、1996.12.
- 5) 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.
- 6) 土木研究センター：道路橋の免震設計マニュアル(案)、1992.10.