

支承条件を考慮した曲線高架橋の大地震時非線形応答性状

Dynamic behavior of curved viaduct system in consideration of bearing conditions

北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎(Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 小川 伸也(Shinya Ogawa)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 ダニエル・ルイス(Daniel Ruiz Julian)

1. まえがき

先の兵庫県南部地震では、港湾施設や新幹線、さらに地下鉄や高速道路などの公共都市施設に甚大な被害が生じた¹⁾。特に、道路や鉄道の高架橋で数多くの被害が発生した。橋梁の被害は、支承や橋脚など地震力が集中する箇所での損傷、崩壊が原因となったものが多く、これらの被害に伴って、上部構造も著しい被害が生じた。高架橋は上部構造・支承・橋脚で構成されており、個々の構造部材の耐震性能のみを考えるのではなく、高架橋全体の地震時応答性状を把握し、構成部材の性能照査を行うことが重要であると思われる。そのため、上部構造、支承そして橋脚を一つの構造システムとして考えた高架橋全体系が大地震動を受けた場合の動的挙動を調べなければならない。つまり、兵庫県南部地震のような大規模地震動が高架橋に作用するときに部材強度のみで抵抗するには限界があると思われる。そこで、橋脚、支承部および落橋防止システムなどの構成部材のある程度の損傷は許し、高架橋全体系としての機能を保持しながら、大規模地震にも耐え得る構造を持つことが重要である。このように耐震性に対する要求性能が高まるなか、少子高齢化や熟練労働者の減少への対応、コスト縮減などの目的から、耐震性を確保しつつ、施工性、安全性、経済性を満たした合理的な下部構造・基礎構造・支承の設計法・構造・工法が望まれている。

そこで本研究は、3径間連続曲線高架橋を立体骨組構造にモデル化し、幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析法を用いて3次元動的解析を行い、支承条件の違いが曲線高架橋の動的応答性状に及ぼす影響を比較検討する。

2. 解析モデル

本研究は連続曲線高架橋の3次元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、支承部、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3径間連続曲線高架橋を対象とする。なお、全体座標系(X-Y-Z座標系)は図-1に示すように設定する。

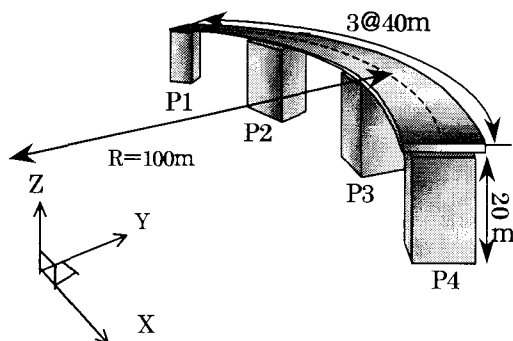


図-1 3径間連続曲線高架橋モデル

2.1. 上部構造・下部構造

上部構造は曲率半径 100m、橋長 120m (3@40m)、総重量約 8.82MN の鋼箱桁を使用する。橋脚は震度法および許容応力度設計法に基づき設計を行い、断面幅 2.4m、板厚 0.05m の正方形箱形断面の鋼製橋脚を採用し、橋脚高さはすべて 20m とする。橋脚の設計は支承条件を考慮して橋脚ごとに行うのが望ましいが、本研究では橋脚断面には全て同一の条件を設定した。また、橋脚の配置方向は各橋脚とも支承の配置スペースを考慮して、支承方向と同様にし、橋脚の基部は十分に剛である場合を考え固定とした。

2.2. 支承部

本研究で用いる支承部は水平 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た非線形ばねの特性を有しており、鉛直方向については剛な結合条件を表すために十分大きなばね定数を設定し、回転方向についてはヒンジ結合を表現するために小さなばね定数を設定する。

支承の配置方向については、実設計においては接線方向に支承を配置することが多いと思われるが、支承配置の影響を比較検討するため、図-2 に示すように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 P1 橋脚から P2・P3・P4 橋脚の方向に放射状に支承を配置する場合と曲線桁の接線方向に支承を配置する場合の 2 通りを考える。また、支承の配置方向を x 軸、その直角方向を y 軸とする局所座標系(x-y 座標系)を各橋脚上に設定する。

また、支承については次に示す(1)鋼製支承モデル(2)片免震支承モデル(3)面免震支承モデルの 3 通りについて比較検討する。

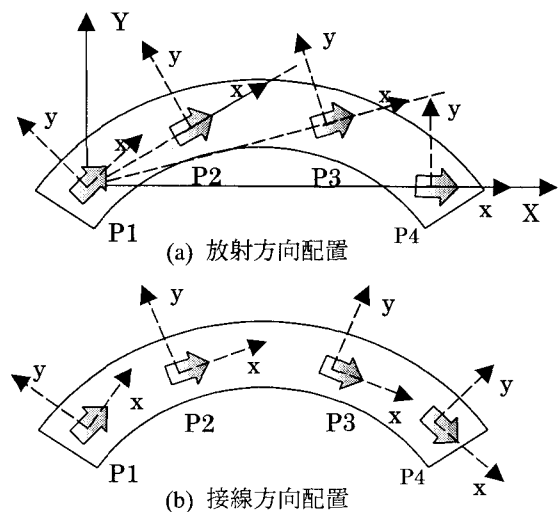


図-2 支承の配置方向

(1)鋼製支承モデル

本研究ではP1橋脚には鋼製固定支承を、P2・P3・P4橋脚には鋼製可動支承を採用する。ここで、鋼製固定支承、鋼製可動支承を表すばねの水平力-水平変位関係を図-3、図-4向に示す。鋼製固定支承は固定の条件とするため、水平2方に大きなばね定数を設定する。鋼製可動支承には摩擦と変位制限構造の影響を考慮したものを採用する。ただし、支承の配置直角方向に関しては剛な条件とするために十分大きなばね定数を設定する。支承の配置方向に関して、 K_1 は支点反力による摩擦力が最大摩擦力以下の状態での剛性であり、 K_2 は支承部に作用する水平力が最大摩擦力を超えて支承が滑るときの状態での剛性、 K_3 は支承が変位制限構造に達した後に上部構造と一体となって挙動している状態の剛性である。ここで、 F_1 は最大摩擦力を超えて支承部が滑り始める水平力であり、支点反力に静止摩擦係数を乗じた値である。また、支承は滑り始めてから0.1mで変位制限構造に達するものとし、 F_2 は支承の変位が変位制限構造に達したときに支承部に発生する水平力である。

(2)片免震支承モデル

本研究では、支承の配置方向は免震支承の特性を有し、支承の配置直角方向に関しては固定の状態としたものを片免震支承モデルとする。なお、免震支承は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-水平変位関係を図-5に示すようなバイリニア型に設定する。

(3)両免震支承モデル

片免震支承モデルに対し、支承の配置方向、配置直角方向の両方向に免震支承の特性を有するものを両免震支承モデルとする。

3. 解析方法と入力地震波

本研究では材料非線形性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($\beta=0.25$)および修正Newton-Raphson法を併用した平面骨組のための弾塑性有限変位動的応答解析法を3次的に拡張した解析法を用いる。上部構造および橋脚をはり柱要素にモデル化し、上部構造は1スパン40mを8要素に、橋脚を5要素に分割する。さらに、各要素の降伏条件を判定するために、はり柱のそれぞれの要素を断面方向に12分割、部材軸方向に5分割するファイバー要素を用いて表現する。断面の降伏はせん断応力による影響は小さいものとして、各ファイバー要素における垂直応力と垂直ひずみで評価する。さらに、面内および面外の2軸曲げモーメントと軸力の相関は断面を2次的にファイバー要素に分割することにより考慮する。本研究で用いるファイバー要素は、解析の際にファイバー要素の応力-ひずみ関係を求めやすくするために、図-6に示すように箱型断面をI型断面に置き換え、I型断面において断面方向にウェブを10分割し、上フランジ、下フランジと合わせ12分割し、部材軸方向には5分割し1要素を60個のファイバー要素に分割するものとする。また、使用する鋼材の応力-ひずみ関係をバイリニア型にモデル化し、降伏応力235MPa、弾性係数200GPa、塑性域のひずみ硬化を0.01とする。構造減衰は質量比例型を仮定し、1次の水平固有振動モードに対する減衰定数 $h=5\%$ を基準とする^{2,3)}。

入力地震波には兵庫県南部地震JR鷹取駅記録を使用する。この地震波は水平2方向、鉛直1方向からなる3成分地震波であり、N-S成分を橋軸方向(X軸方向)、E-W成分を橋軸直角方向(Y軸方向)に作用させて解析を行う。

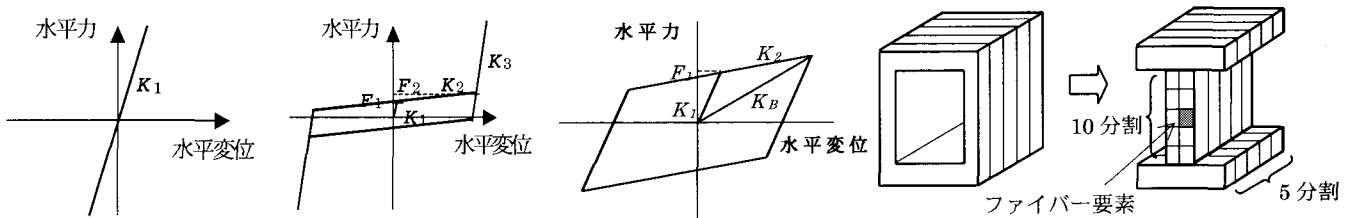


図-3 鋼製固定支承

図-4 鋼製可動支承

図-5 免震支承

図-6 ファイバーモデル

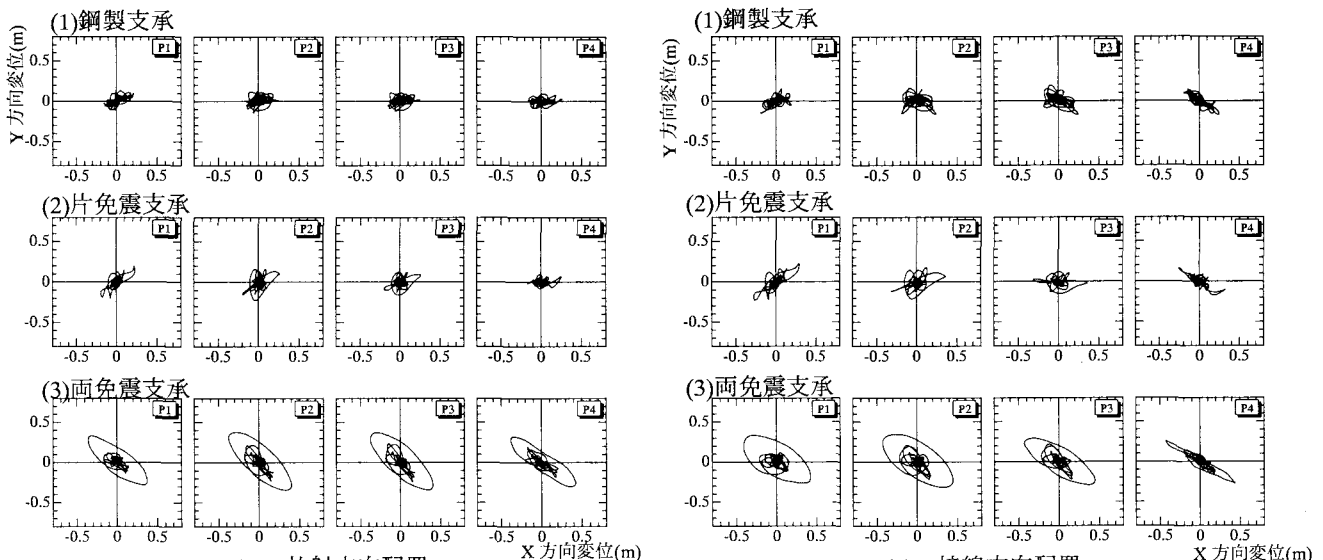


図-7 上部構造の応答変位軌跡

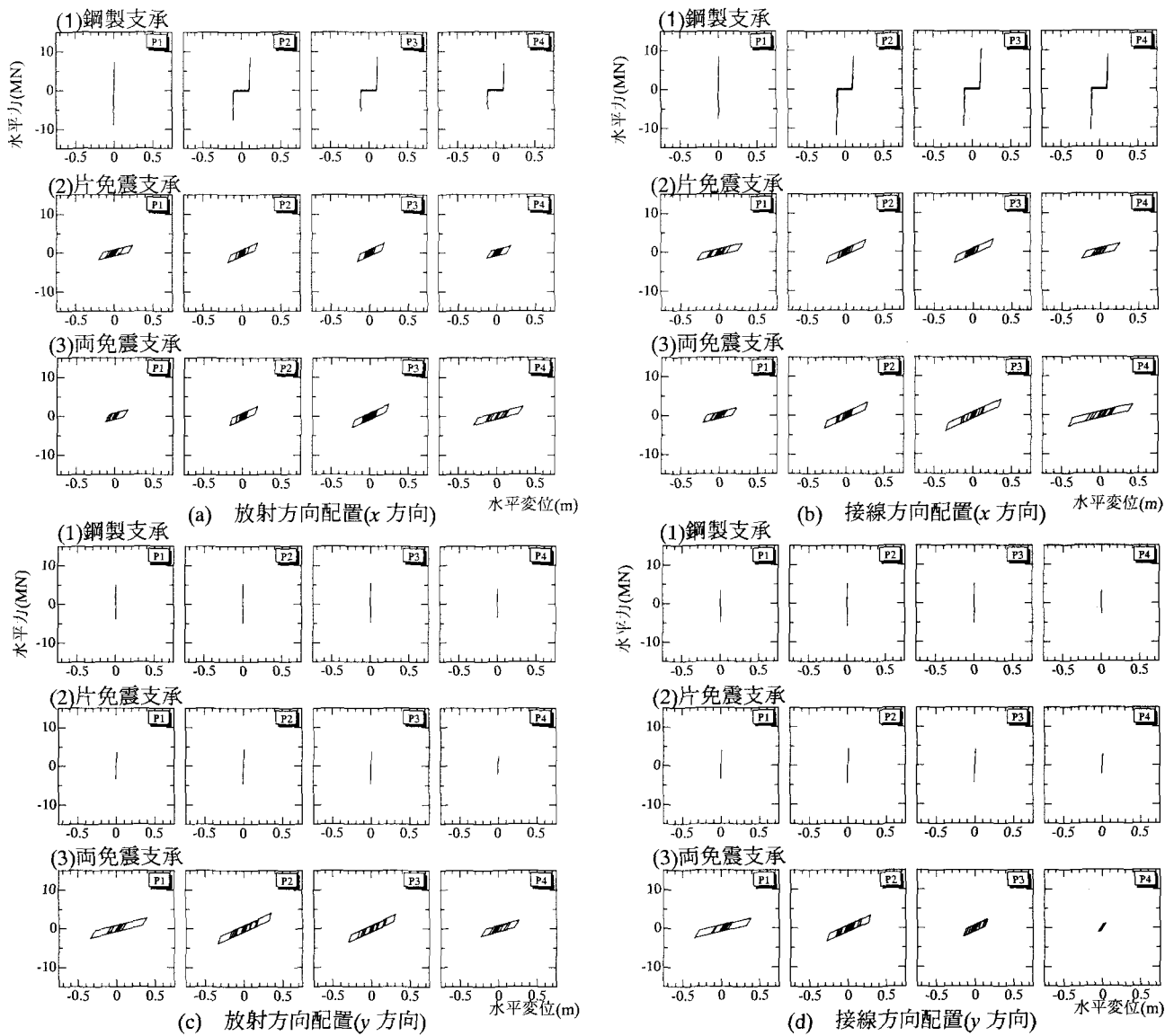


図-8 支承部の水平力-水平変位関係

4. 動的応答解析結果

4.1. 上部構造の応答変位

時刻歴応答解析によって得られた各橋脚上の上部構造における応答変位軌跡を図-7に示す。応答変位については全体座標系(X-Y-Z系)を用いて表す。

鋼製支承、片免震支承では支承の配置直角方向が固定条件であるために支承の配置方向に大きな応答変位を生じているが、鋼製支承では支承の配置方向以外にも若干大きな変位が生じている。これは上部構造にも大きな地震力が作用し、その上部構造を支える橋脚自体が変形していることが考えられる。それに比べて片免震支承ではほぼ支承の配置方向にのみ大きく挙動しており、上部構造への地震力を低減させる免震支承の特性が見られる。一方、両免震支承では変位が大きくなるにつれ支承の配置方向とは関係なく挙動し、上部構造が一体となって挙動していると考えられ、各橋脚上で同じ方向に大きな変位が生じている。

いずれの支承の場合も接線方向配置の方がY方向に大きな変位が生じている。これは、接線方向配置の方が支承の回転角が大きくなっており、対称的な構造のために上部構造が回転するように挙動するのに対し、放射方向配置ではX方向に上部構造が伸びるような構造となっているためと考えられる。そのため、支承の配置方向に生じる変位

は接線方向配置の方が大きくなっている。

4.2. 支承部の水平力-水平変位関係

時刻歴応答解析によって得られた支承部の水平力-水平変位関係を図-8に示す。なお、水平力-水平変位関係を調べる際には支承配置方向をx軸、直角方向をy軸とする局所座標系を用いる。

鋼製支承では、可動支承が変位制限構造に衝突したときに大きな水平力が発生していることがわかる。片免震支承では、免震支承の特性により鋼製支承に比べて水平力が小さくなっているが、その分変位が若干大きくなっていることがわかる。両免震支承では、y方向も免震化されているためにy方向の水平力も小さくなっており、変位が大きくなっていることがわかる。鋼製支承、片免震支承ではx方向の水平力が大きな橋脚ではy方向でも水平力が大きくなっているのに対し、両免震支承ではx方向の水平力が大きくなっている橋脚ではy方向では水平力が小さくなっており、変位も小さくなっている。

また、接線方向配置の方が全体的に水平力、水平変位が大きくなっている。これは、上部構造の応答変位からわかるように接線方向配置では支承の配置方向に生じる応答変位が大きくなっており、水平力も大きくなったと考えられる。

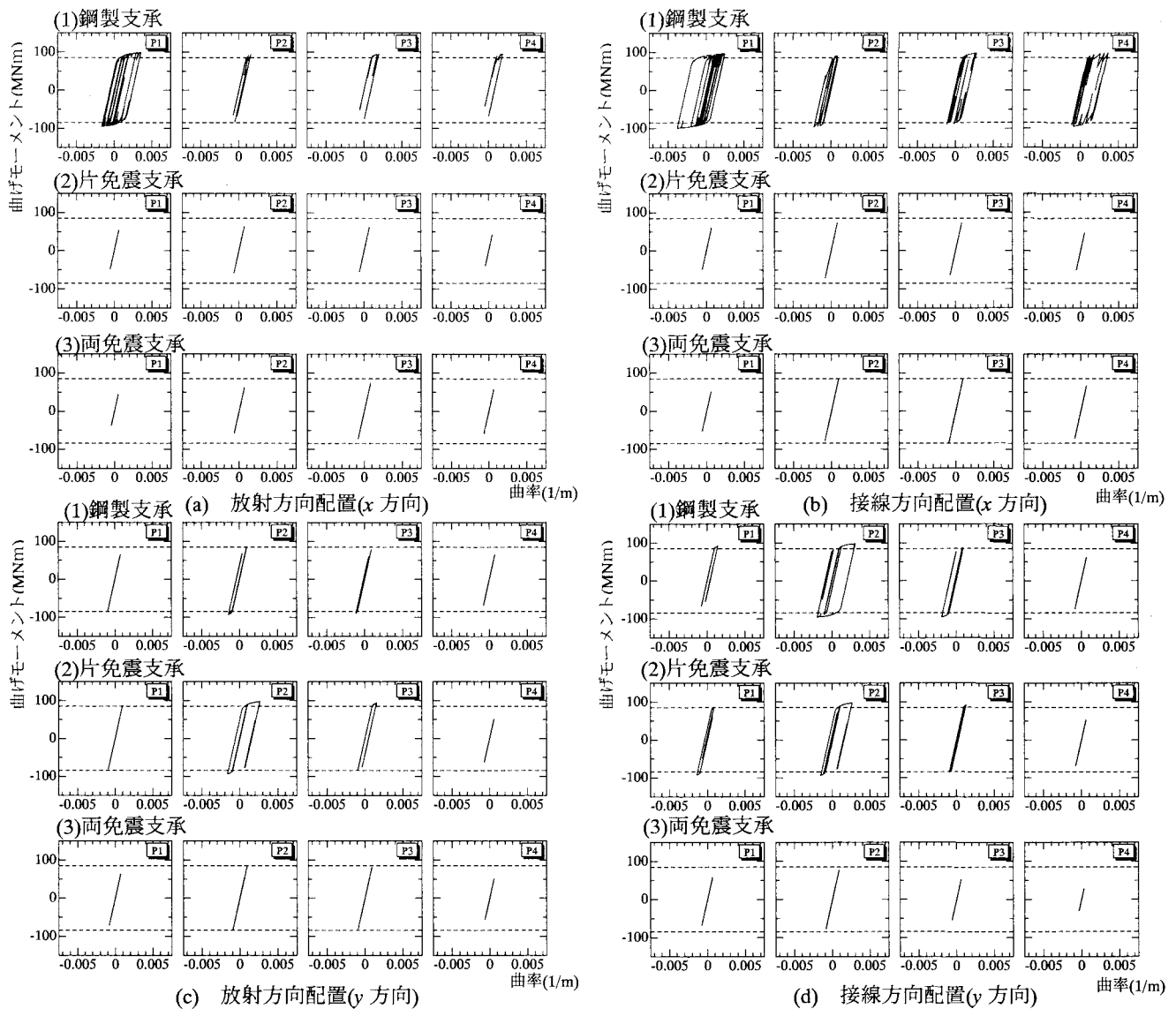


図-9 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係

4.3. 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係

時刻歴応答解析によって得られた橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係を図-9に示す。ここで、図中の破線は橋脚の降伏モーメントを示し、この値を超えると塑性化することを意味する。また、橋脚基部の曲げモーメントに関しても、局所座標系を用いる。

鋼製支承では、固定支承部を有するP1橋脚のx方向で大きな塑性履歴ループが見られる。P2・P3・P4橋脚でも塑性領域に入っており、やや大きな塑性履歴ループが描かれているため、鋼製支承では橋脚基部の損傷が予想される。なかでも固定支承部を有するP1橋脚基部の損傷が大きくなると思われる。y方向に関しては、外側の橋脚では弾性範囲内に収まっているが、内側2本の橋脚では塑性領域に入っており、地震力が大きく作用していると思われる。片免震支承では、x方向においてはすべて弾性範囲内に収まっているが、y方向に関しては固定条件のために鋼製支承と同じような結果となっている。両免震支承では、y方向に関しても免震化しているために橋脚基部に作用する曲げモーメントは小さくなっている。

上部構造の応答変位、支承部の水平力の結果からもわかるように放射方向配置に比べて、接線方向配置の方が全体的に曲げモーメントが大きくなっている。

5. あとがき

本研究では、3径間連続曲線高架橋を対象として、動的応答解析を行い、支承条件の差異が曲線高架橋の非線形動的応答に与える影響について比較検討した。

- (1) 鋼製支承に比べて片免震支承の方が、支承の配置方向に生じる変位は大きく、両免震支承では支承の配置方向にあまり関係なく挙動した。
- (2) 鋼製支承に比べて免震支承では水平力が小さくなり、水平変位が大きくなることがわかった。
- (3) 鋼製支承ではP1橋脚が塑性化することが考えられ、免震支承では弾性範囲内に収まることがわかった。

以上のように支承条件の差異により、曲線高架橋の動的挙動は大きく変わることがわかる。そのため、耐震性能を向上させるためには支承条件を十分考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：阪神・淡路大震災調査報告書－土木構造物の被害，橋梁－，丸善，1992.12.
- 2) 林川俊郎：橋梁工学 朝倉書店 2000.4.
- 3) 巢山藤明・真子幸也・落合稔・坂本佳子・野中哲也：ファイバーモデルを用いた鋼構造物の耐震設計法に関する一考察，橋梁と基礎，pp.32-40，2000.9.