

免震支承のハードニングを考慮した曲線高架橋の地震応答解析

Dynamic Response Analysis of Curved Viaduct System in Consideration of Hardning Effect of Base-isolated Bearings

北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学工学部 ○学生員 阿部 健次 (Kenji Abe)
 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)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 小川 伸也 (Shinya Ogawa)

1. まえがき

1995年に発生した兵庫県南部地震では、多くの橋梁構造物が被害を受け、橋脚や支承、桁に多くの損傷が見られた¹⁾。この地震のようなレベルⅡ規模の地震が起きた場合、個々の部材耐力のみで抵抗するには物理的、経済的に限界がある。その後改訂された道路橋示方書の耐震設計編²⁾に記述されているように、高架橋全体を上部構造、支承そして橋脚の各構造要素を1つの構造物として捉え、高架橋構造物の全体系が大地震を受けた場合の動的挙動を調べる必要がある。

支承部は高架橋の上部構造の荷重を下部構造に伝える重要な部材である。耐震性能向上として最近では免震支承が数多く普及している。ゴム材料を用いた免震支承は、せん断変形を生じるが大変形領域になると、せん断変形の剛性値が急激に大きくなる現象、すなわちハードニング現象が発生する。これまでは免震支承の復元特性はハードニングを考慮しないバイリニア型モデルで動的解析がされてきた。しかし、最近、ハードニングの履歴特性が明らかにされ、レベルⅡ地震動に対する高架橋では免震支承のハードニングを考慮した動的解析する必要がある^{3),4)}。

また、一般的に直線高架橋は、地震波を橋軸方向に作させた平面的な動的応答解析でほぼ正確な地震時の挙動を把握することが可能であると考えられるが、曲線高架橋は上部構造が曲線であり、3次元的な広がりを持つ構造物であることから正確な挙動の評価は困難である。そのため、動的解析を行うためには3次元非線形時刻歴応答解析が不可欠である。

そこで本研究では、免震支承を有する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

いて地震波の入力方向を変化させた3次元動的応答解析を行い、地震波の入力方向や免震支承のハードニング効果の有無が曲線高架橋動的応答性状に及ぼす影響を比較検討する。

具体的には上部構造の応答変位、支承部の水平力、橋脚基部の曲げモーメントなどに着目して、その動的非線形挙動について考察する。

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。

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の正方形箱型断面の鋼製橋脚を採用し、橋脚高さはすべて20mとする。橋脚の配置方向は各橋脚とも支承の配置方向を考慮して、支承方向と同様とした。また、橋脚の基礎は十分に剛である場合を考え固定とした。

2.2. 免震支承

本研究で用いた免震支承はばね要素にモデル化し、水平2方向に関してはハードニング効果の有無に応じた非線形のばね要素特性を設定した。支承の配置方向については図-2に示すように曲線桁の接線方向に支承を配置し、支承の接線方向をx軸、その直角方向をy軸とする局所座標系(x-y座標系)を設定する。

ハードニング特性については支承形式によって異なるが、本研究で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(LRB)を用いた。まず、ハードニング特性を考慮しない一般的なバイリニアモデルは図-3のようになる。1次剛性と2次剛性の比は、一般に使われている6.5:1とした。次にハードニングを考慮したトリリニア型モデルは図-4のようになる。ハードニング特性が生じない領域については簡易的にバイリニア型モデルとした。ハードニングの開始変位については0.2mとした。ハードニング現象を表現するため、3次勾

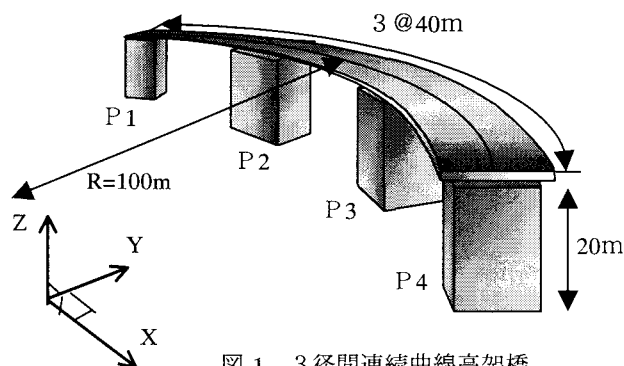


図-1 3径間連続曲線高架橋

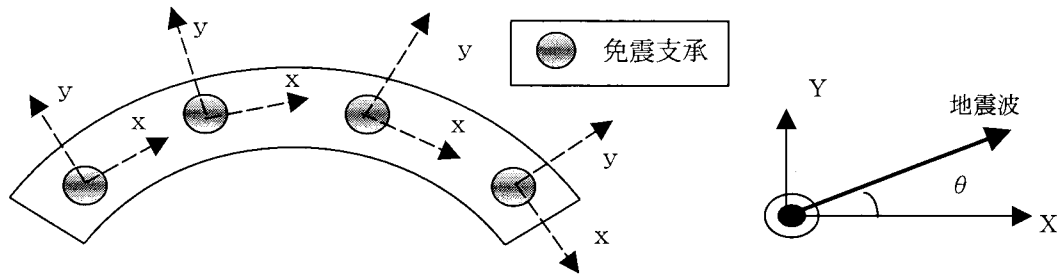


図-2 支承の配置方向と地震波の入力方向

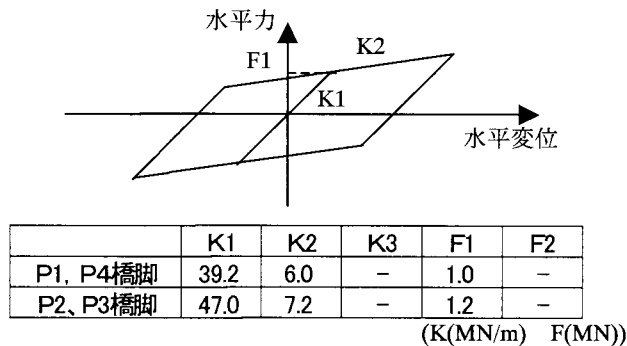


図-3 バイリニア型の復元特性のモデル化とその値

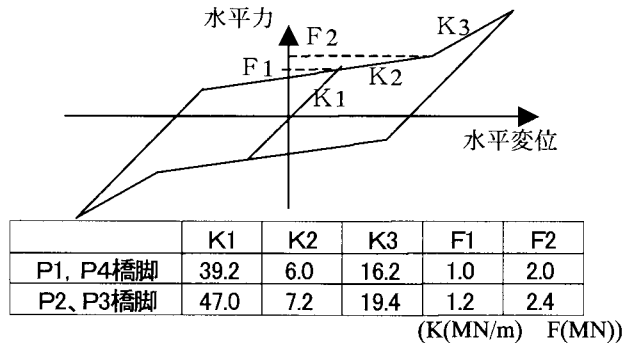


図-4 バイリニア型の復元特性のモデル化とその値

配を設けた。過去の実験結果を参考にして値を設定し、3次剛性と等価剛性の比を2.59:1とした。またハードニング発生時の除荷勾配については1次勾配と同一とした⁹⁾。

バイリニア型、トリリニア型両モデルともにx、y方向に免震機能を持たせ、復元特性は同じ値を用いた。また外側の橋脚であるP1とP4、内側の橋脚であるP2とP3それぞれ同じ値を用いた。

3. 解析方法・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次元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、それぞれの要素を断面方向に24分割、部材軸方向に5分割するファイバー要素を用いる。また、使用する鋼材の応力-ひずみ関係をバイリニア

にモデル化し、降伏応力235MPa、弾性係数200GPa、弾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⁹⁾。

入力地震波には兵庫県南部地震JR鷹取駅記録の3成分を使用する。地震波の入力方向角 θ は、図-2に示すようにX軸からの角度とし、 θ を 0° から 180° まで 15° ピッチで変化させて動的解析を行う。入力地震波の方向角の違いが曲線高架橋の地震時非線形挙動に与える影響について立体的な観点から比較検討する。

4. 動的応答解析結果

4.1. 上部構造の応答変位

各橋脚上の上部構造の最大応答変位と地震波の入力方向角 θ の関係を図-5に示す。横軸は地震波の入力方向角、縦軸は上部構造の最大応答変位である。また、応答変位は全体座標系(X-Y-Z系)を用いて表す。

P1~P4の各橋脚は、外側の橋脚であるP1とP4、内側の橋脚であるP2とP3はハードニング効果の有無に関わらず、それぞれ同じような応答変位を示している。各橋脚のX方向とY方向を比べると対称的な応答変位を示す。これは大地震時に上部構造は楕円のような動きをしていることを示している。各橋脚、両モデルを見ると、X方向では入射角 45° 、Y方向では入射角 120° 前後に最大値となるのがわかる。

各橋脚のバイリニア型モデルとトリリニア型モデルを比べると全橋脚、全角度において、ほぼ同じように推移しているのがわかる。しかし、5~10%程ではあるが概ねハードニングを考慮したトリリニア型モデルの方が応答変位は小さい。これはトリリニア型モデルではハードニングを考慮することにより応答変位が抑えられたためと考えられる。特に、大きな応答変位を示した時にはトリリニア型モデルとバイリニア型モデルを比べると応答変位に大きな差を生じている。小さな変位の時にはトリリニア型モデルはハードニング効果が現れずトリリニア型モデルと同じような応答変位を示している。ハードニング開始前はトリリニア型モデル、バイリニア型モデルともに同じ剛性を設定しているためと考えられる。

ハードニングを考慮したトリリニア型モデルは、さらに大きく応答変位を抑える役割を果たすと考えられるが、本

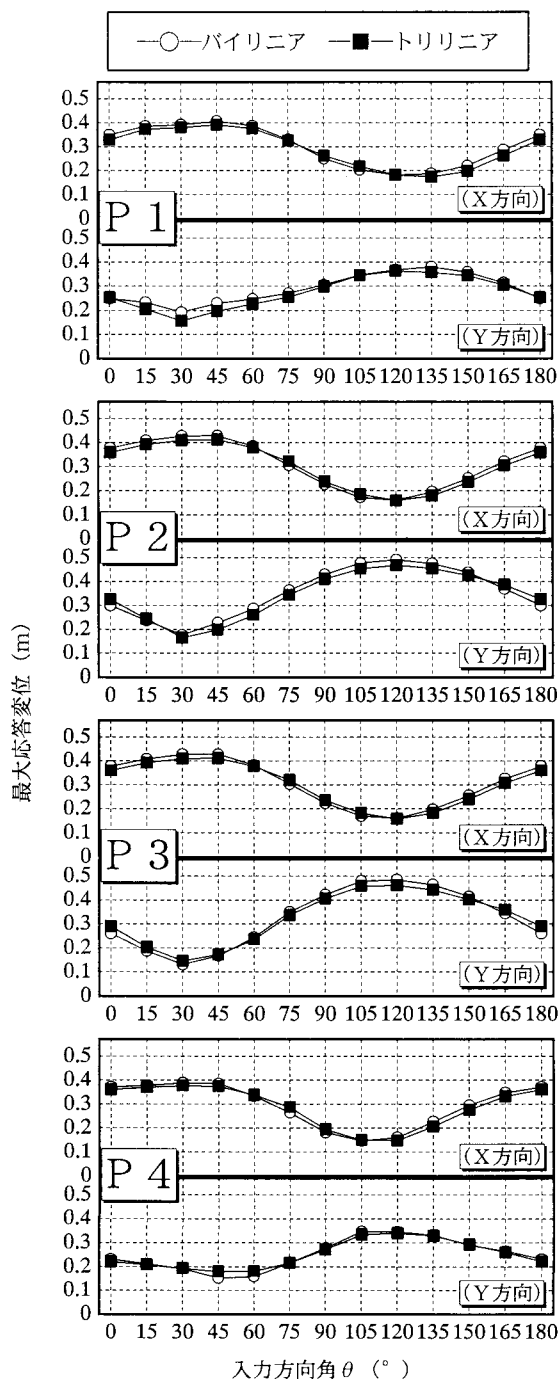


図-5 上部構造の最大応答変位と地震波の入力方向角 θ の関係

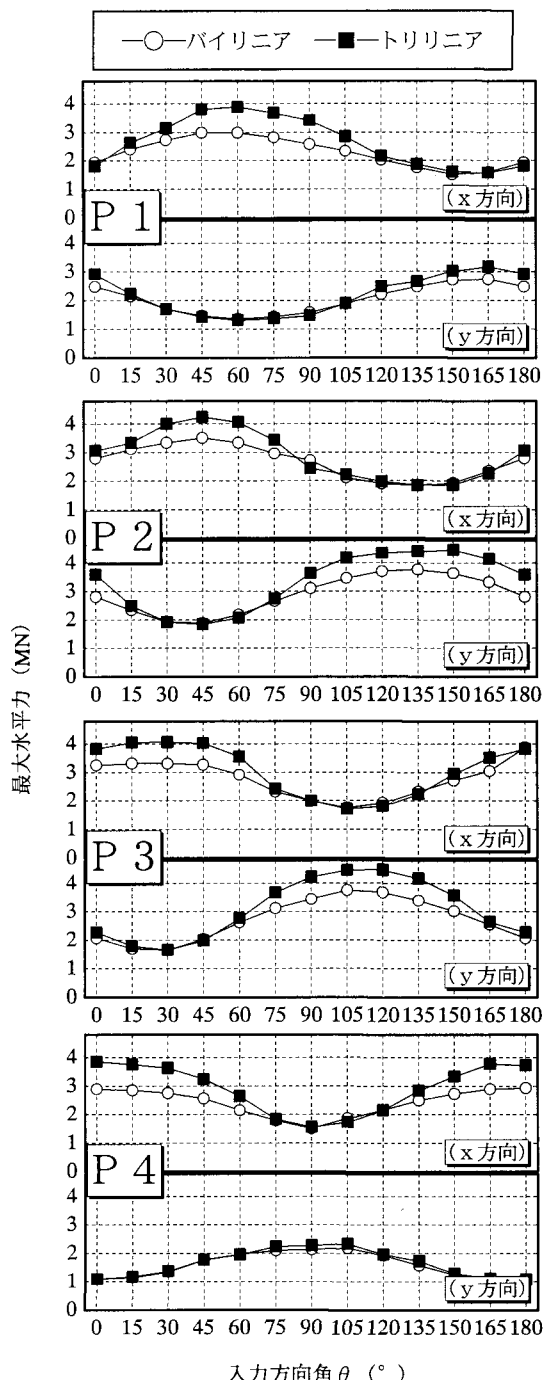


図-6 支承部の最大水平力と地震波の入力方向角 θ の関係

解析結果では顕著に差は認められない。後述する、ハードニング効果により橋脚基部が塑性領域に到達するため、結果として変位が大きくなったためと考えられる。

4.2. 支承部の水平力

支承部に作用する最大水平力と地震波の入力方向角 θ の関係を図-6 に示す。横軸は地震波の入力方向角、縦軸は支承の最大水平力である。なお、支承の水平力は支承配置方向を x 軸、直角方向を y 軸とする局所座標系を用いる。

地震波の入力方向角 θ により各橋脚は様々な値をとり、各橋脚により最大値は異なることがわかる。これは支承を

各橋脚の局所座標系の x 軸方向、 y 軸方向に設置したため、各橋脚の支承配置方向が一定ではないためである。

図-4 より、外側の橋脚である P1, 4 は $F2=2.0MN$ 、内側の橋脚である P2, 3 は $F2=2.4MN$ 以上の時にトリリニア型モデルはハードニング効果が発生する。そして、各橋脚をみると $F2$ の値以上になると、パイリニア型モデルに比べトリリニア型モデルは最大値が、15~25%程度の最大水平力の増加が見られた。これは、トリリニア型モデルではハードニング効果が現れたためと考えられる。トリリニア型モデルではハードニング効果として第 3 次剛性を考慮したことにより、免震支承がストッパーのような役割を果た

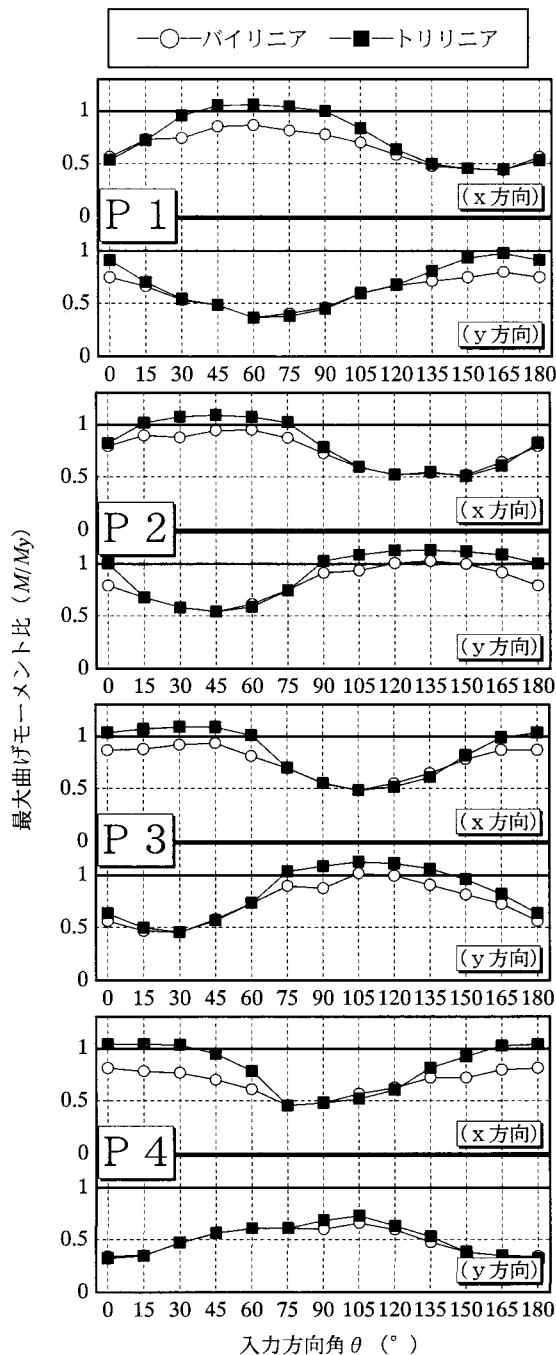


図-7 橋脚基部の最大曲げモーメント比と地震波の入力方向角 θ の関係

し、水平力が増加したためである。また解析結果から、支承部の水平変位はパイリニア型モデルに比べ、トリリニア型モデルの方が小さいということが確認されている。

4.3. 橋脚基部の曲げモーメント

橋脚基部に作用する最大曲げモーメント比 M/M_y と地震波の入力方向角 θ の関係を図-7 に示す。横軸は地震波の入力方向角であり、縦軸は橋脚基部の曲げモーメント (M) を橋脚断面の降伏曲げモーメント (M_y) で除した値である。ここで、橋脚の降伏モーメントは 84.8MNm である。つまり、この曲げモーメント比 (M/M_y) の値が、1 以内であれば、橋脚基部は弾性範囲内であることを意味

し、降伏は起こらないと考えられる。図中においては、 $M/M_y=1$ を太線で示す。また、橋脚基部の曲げモーメントは支承配置方向を x 軸、直角方向を y 軸とする局所座標系を用いる。

図-6 と図-7 を比べると各橋脚とも同じような形になっている。橋脚基部の曲げモーメントは支承部に作用する水平力に大きく依存している。つまり、支承部での水平力が大きいと、橋脚基部に発生する曲げモーメントは大きな値となる。パイリニア型モデルでは概ね塑性域には到達していないが、トリリニア型モデルでは塑性域に達している橋脚があることがわかる。

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、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を実施した。3 成分地震波の入力方向により、免震支承のハードニングの有無が曲線高架橋の非線形動的応答に与える影響を比較検討した。以下に結論をまとめる。

- 1) 地震波の入力方向の違いによって、ハードニングの有無に関わらず、上部構造の応答変位、支承部の水平力、橋脚基部の曲げモーメントは大きく変化することが確認できた。
- 2) 免震支承はハードニングを考慮した場合、第3次剛性として支承の剛性が急激に上がるため、上部構造の水平変位を減少させ、支承部の水平力および橋脚基部の曲げモーメントは増加させる傾向にあることがわかった。

以上から、免震支承を有する高架橋の動的解析する場合は、レベルII規模の地震において免震支承はハードニング効果が現れるため、トリリニア型でモデル化し、地震波入力方向を変え動的解析する必要がある。高架橋の耐震性の向上させるためには、免震支承の復元力の変化に十分注意して設計しなければならないと考えられる。

参考文献

- 1) 木学会：阪神・淡路大震災調査報告書—土木建造物の被害、橋梁—、丸善、1992.12.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編 2002
- 3) 足立幸郎ら：免震支承のハードニングに着目した免震支承と橋脚に塑性化が生じる免震橋梁の地震応答特性に関する研究、構造工学論文集 Vol.47A, pp905-916,2001.3.
- 4) 森下宣明ら：都市内高架橋に用いる支承の動的特性実験とその応用、橋梁と基礎、pp39-46、2002.3.
- 5) 足立幸郎ら：免震支承の等価剛性および等価減衰定数のばらつきが免震橋梁の地震応答特性に及ぼす影響、第4回地震時保有水平耐力法の基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp455-462,2002.12
- 6) 林川俊郎：橋梁工学 朝倉書店 2000.4