

免震支承のハードニングを考慮した 曲線格子高架橋の3次元非線形地震応答解析

Seismic Response Analysis of Curved Grillage Girder Viaduct with Base Isolation System

北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究科 ○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 カルロス メンデス (Carlos Mendez)

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。免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をする必要であると考えられる^{3),4)}。また、免震支承を用いた設計では、橋軸方向に対しては上部構造の慣性力の低減と分散の効果により下部構造に加わる地震力の大幅な低減が期待される。しかし、橋軸直角方向に対しては支承が固定条件でも上部構造の慣性力は分散され、また橋軸直角方向への落橋の恐れが考えられることから橋軸直角方向の免震化の適用事例は数少ない。また、橋軸直角方向免震化を行った場合、桁端部の道路との接合部には、水平2方向に相対変位が生じ、変位も増大されるため設計上、複雑さが増大すると考えられる。

そこで本研究は、免震支承を有する3径間連続曲線高架橋を3次元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免震支承のハードニング現象の有無が曲線高架橋動的応答性状に及ぼす影響、また橋軸直角方向の免震化による影響について比較検討する。

具体的には上部構造の応答変位軌跡、支承部における水平力-水平変位関係、橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係に着目して、その動的な非線形挙動について考察する。

2. 対象とした曲線高架橋

2.1. 橋梁概要

対象とした橋梁は Fig.1 のような3径間連続鋼製曲線格子高架橋とし、上部構造は曲率半径 100m、橋長 120m(3@40m)、幅員 15.0m、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 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。橋脚の基礎は十分に剛である場合を考え固定とした。支承形式は免震支承とし、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) が各橋脚上に3つ設置されている。

2.2 解析モデル

解析モデルは Fig.2 のようなモデルとし、全体座標系(X-Y-Z)を Fig.2 のように設定する。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 62 要素に、橋脚を 7 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 $\eta=5\%$ を基準とする⁵⁾。免震支承は水平ばねと鉛直ばねに置換した。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

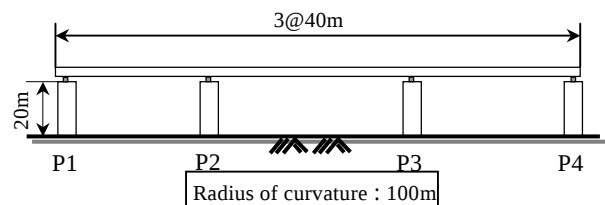


Fig.1 3-span continuous curved viaduct

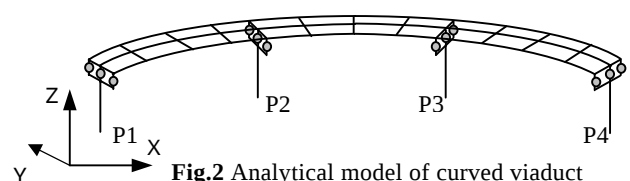


Fig.2 Analytical model of curved viaduct

ね要素特性を設定した。支承の配置方向については Fig.3 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。また、各橋脚上の内側の支承を I(inner)、中間の支承を M(middle)、外側の支承を O(out) とする。まず、ハードニング特性を考慮しないパイリニアモデルは Fig.4(a) 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モデルは Fig.4(b) 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パイリニア型モデルとし、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⁶⁾。パイリニア型、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。また、橋軸直角方向免震化の影響を考察するため、Fig.5 に示す 3 つのモデルを考えた。Case1 としては全橋脚の橋軸直角方向を固定とした片免震支承モデル、Case2 としては P1, P4 橋脚の橋軸直角方向を固定とし P2, P3 橋脚の橋軸直角方向を免震とした両免震両端固定モデル、Case3 としては全橋脚の橋軸直角方向を免震とした両免震支承モデルを作成し比較検討を行う。

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。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。加速度波形を Fig.6 に示す。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、 $\theta = 45^\circ$ 、 135° とした場合の地震波を用いる。また、 $\theta = 45^\circ$ 、 135° の場合の地震波変位軌跡を Fig.7 にそれぞれ示す。

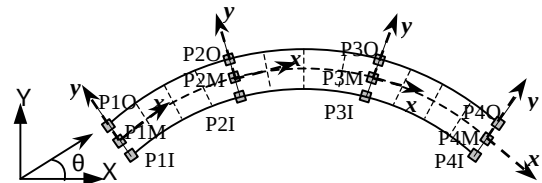


Fig.3 Arrangement of base isolation system

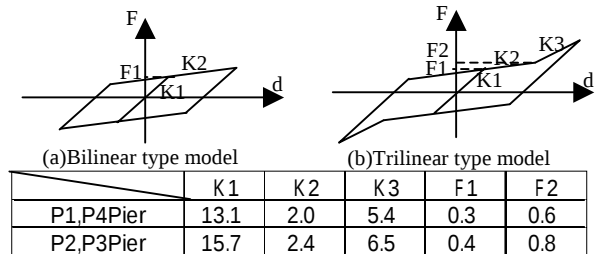


Fig.4 Analytical model of LRB (K(MN/m) F(MN))

	P1	P2	P3	P4
Case1	↔	↔	↔	↔
Case2	↔	↕	↕	↔
Case3	↕	↕	↕	↕

↔ (x: Move, y: Fix)

↕ (x: Move, y: Move)

Fig.5 Three different bearing supports

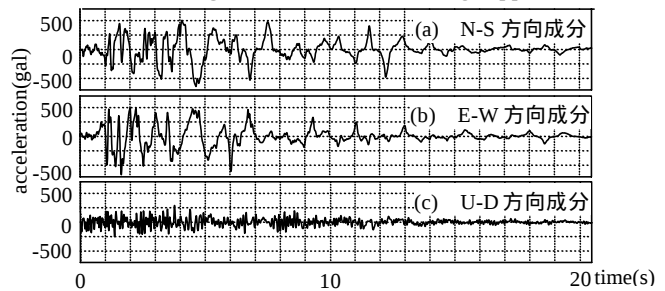


Fig.6 Acceleration time histories of Takatori record

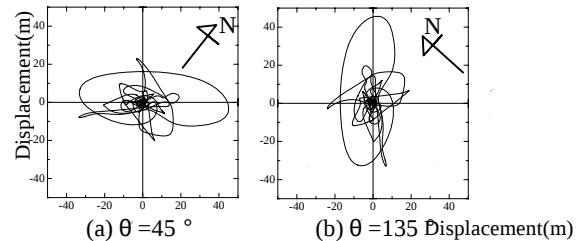


Fig.7 Relationship NS and EW of Takatori record's displacement

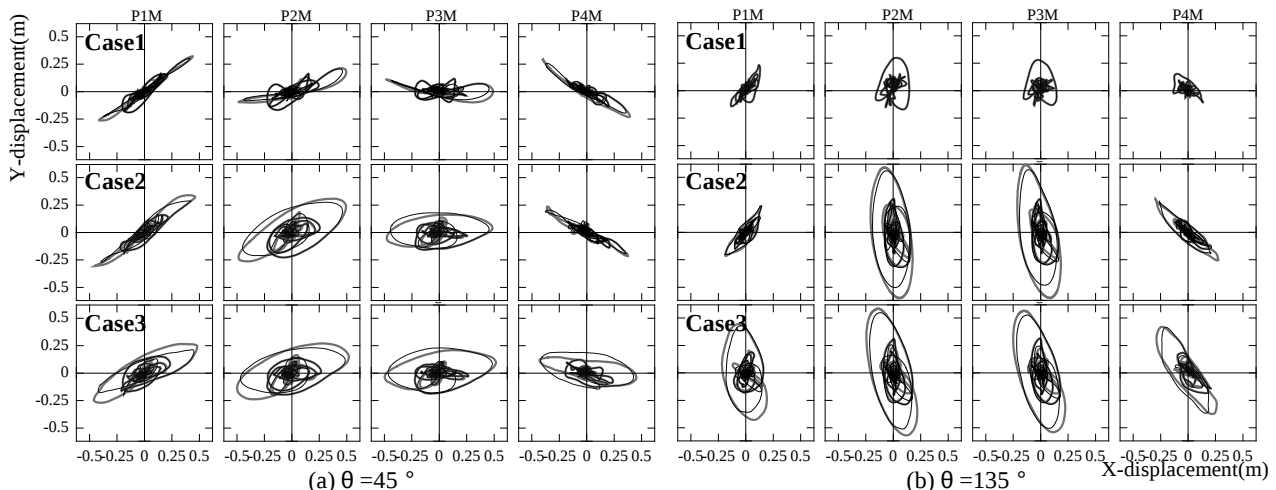


Fig.8 Relationship between X-displacement and Y-displacement at deck

— Bilinear — Trilinear

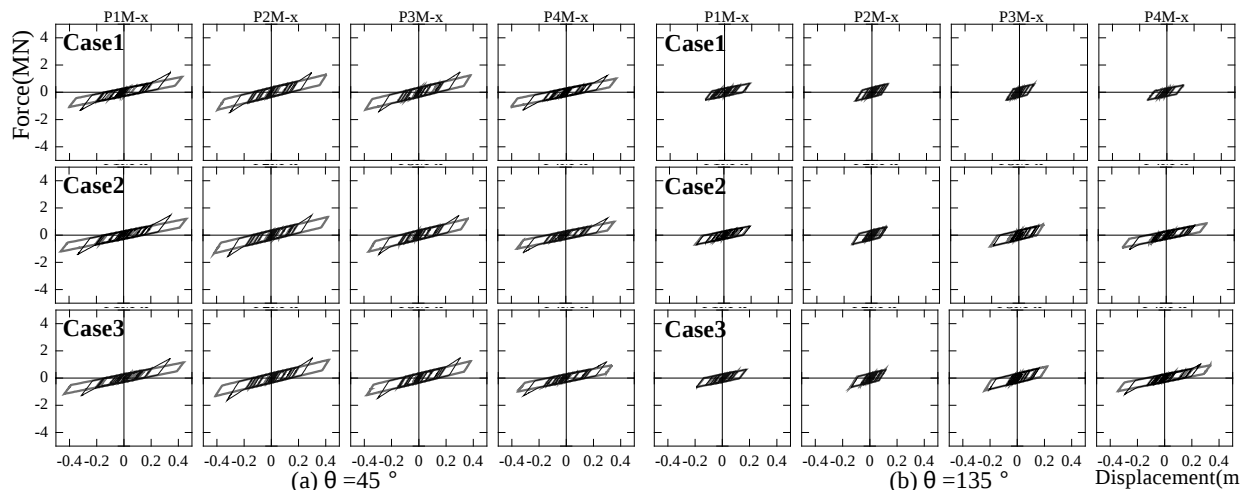


Fig.9 Relationship between force and displacement at bearings (x-direction)

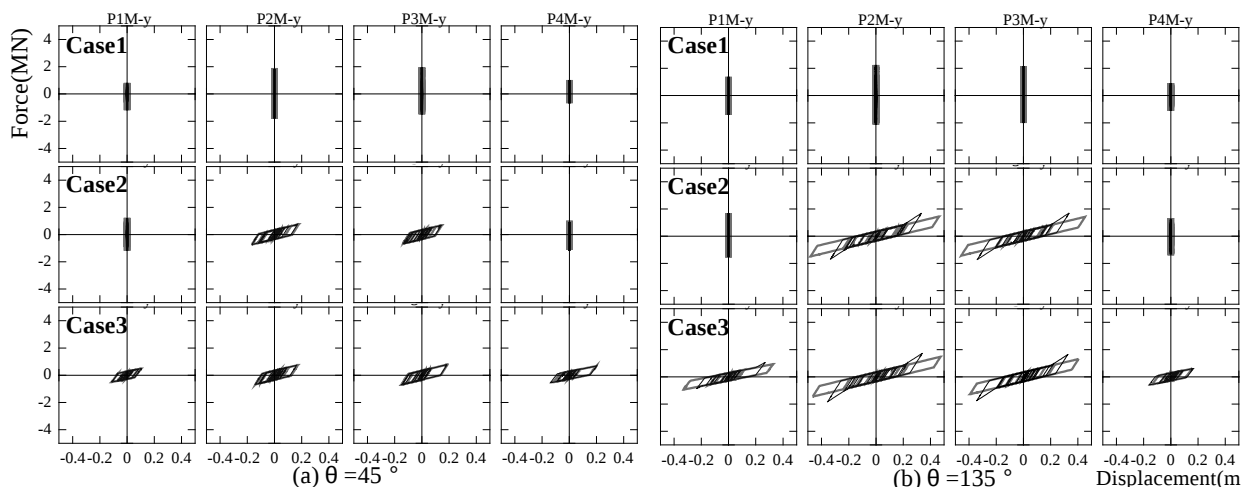


Fig.10 Relationship between force and displacement at bearings (y-direction)

4.動的応答解析結果

4.1.上部構造の応答変位軌跡

橋脚中央支承部上の上部構造応答変位軌跡を、Fig.8に示す。図中の薄い線はバイリニア型モデル、濃い線はトリリニア型モデルを示している。なお、応答変位については全体座標系 (X-Y-Z 系) を用いる。

橋軸直角方向免震化した Case2 の P2M、P3M、Case3 では地震波の変位軌跡に一致するように上部構造が揺れている。これは橋軸直角方向に変位制限が無いため支承部が自由に動き、地震波の成分に合わせ上部構造が応答するためである。橋軸直角方向固定とした Case1、Case2 の P1M、P4M では変位制限を有するため、支承の配置方向である接線方向に揺れていることがわかる。

バイリニア、トリリニア型モデルを比較すると、ほぼ同じように変位軌跡が推移していることがわかる。しかし、5~10%程度ではあるが、ハードニング効果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。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るが、本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、結果として変位が増大したためと考えられる。

4.2. 支承部の水平力-水平変位関係

橋脚中央支承部の水平力 - 水平変位関係の x 方向を Fig.9 に y 方向を Fig.10 を示す。図中の薄い線はバイリニア型モデル、濃い線はトリリニア型モデルを示している。なお、各橋脚上に設置された支承の橋軸方向を x 軸、橋軸直角方向を y 軸とする局所座標系を用いる。

x 方向に関しては全 Case において支承部を免震化しているため大きな違いはないが、 y 方向において橋軸直角方向免震化した Case2 の P2M、P3M、Case3 の支承では変位を伴いながら地震力を吸収しているが、固定条件とした Case1、Case2 の P1M、P4M 支承では変位を伴わずに大きく水平力が働いていることがわかる。

バイリニア、トリリニア型モデルを比較すると免震支承の水平力 - 水平変位関係の履歴特性が大きな値を示している時、顕著な差が生じ、バイリニア型モデルに比べてトリリニア型モデルでは水平力の増加と水平変位の減少が確認できる。トリリニア型モデルではハードニング効果を考慮したことにより、免震支承が大変形領域時に剛性が上がりストッパーのような役割を果たし、水平力が増加し、水平変位が減少したためである。免震支承は本来、第3次の剛性であるハードニング現象が現れるので、大地震を想定した高架橋の設計には免震支承の履歴の変化に注意する必要があると考えられる。

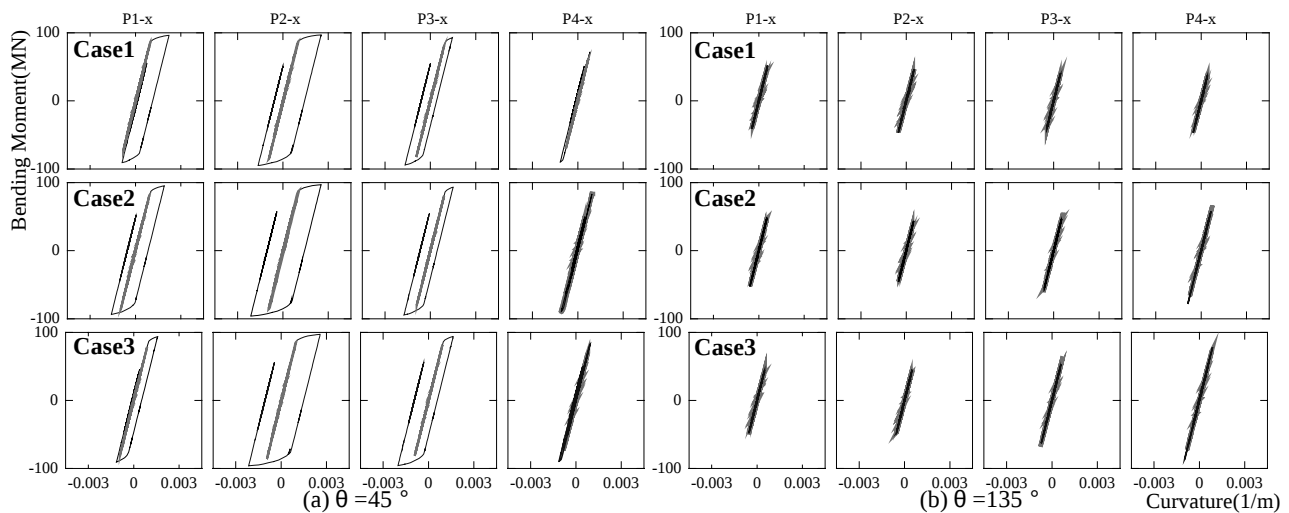


Fig.11 Relationship between bending moment and curvature at piers (x-direction)

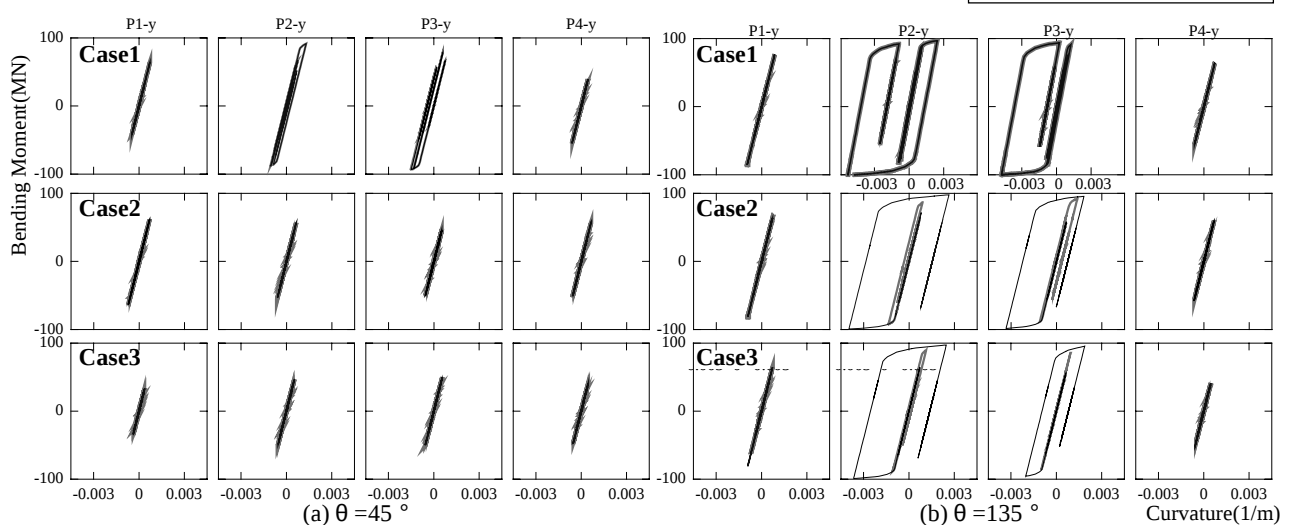


Fig.12 Relationship between bending moment and curvature at piers (y-direction)

4.3. 橋脚基部の曲げモーメント - 曲率関係

橋脚基部における曲げモーメント - 曲率関係の x 方向を Fig.11 に、 y 方向を Fig.12 に示す。図中の薄い線はバイリニア型モデル、濃い線はトリリニア型モデルを示している。なお、各橋脚上に設置された支承の橋軸方向を x 軸、橋軸直角方向を y 軸とする局所座標系を用いる。

橋脚基部の曲げモーメントは支承部に作用する水平力と比例関係にあるため、バイリニア型モデルに比べトリリニア型モデルの方が水平力は大きいことから、全体的にトリリニア型モデルが大きな曲げモーメントの値を示していることがわかる。また、Case2 と Case3 を比べると、 x と y 方向ともにそれほど大きな違いがないことがわかる。地震波 $\theta=135^\circ$ 、 y 方向の Case2、3 のバイリニア型モデルでは全橋脚が概ね弾性域内に収まっているが、Case1 では大きく塑性化していることがわかる。これは橋軸直角方向の固定条件が大きく影響しているものと考えられる。ハードニング効果に注意すれば橋軸直角方向免震化は地震力低減に有効に働くものと考えられる。

5. あとがき

免震支承のハードニングの有無、橋軸直角方向免震化が曲線格子高架橋の動的応答に与える影響を検討した。

バイリニア型モデルに比べハードニングを考慮したト

リリニア型モデルでは支承部に加わる水平力が増加するため、橋脚基部は塑性化する可能性があることがわかった。大地震時には免震支承(LRB)はハードニング現象が発生するため、設計時には注意する必要がある。また橋軸直角方向免震化については地震力の低減、上部構造端部の応答変位などの理由から Case2(両免震両端固定モデル)が設計上有利な構造物ではないかと考えられる。

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、1995.12.
- 2) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書 耐震設計編 2002
- 3) 足立幸郎: 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, pp.905-916, 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, pp.39-46, 2002.3.
- 5) 林川俊郎: 橋梁工学 朝倉書店 2000.4.
- 6) 足立幸郎: 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, pp.455-462, 2002.12.