

地震波入力方向による曲線高架橋の非線形動的挙動について

Study on influence of direction of earthquake ground motions on nonlinear dynamic behavior of curved viaducts

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 O 学生会員 荻島知之 (Tomoyuki Ogishima)
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 橋本 至 (Itaru Hashimoto)

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では高速道路などの橋梁構造物に多くの被害が発生し、橋脚や支承、桁に多くの損傷が見られた。このようなレベルⅡ程度の地震が発生した場合、部材強度のみで抵抗するには物理的・経済的に限界があると思われる。そのため、構造部材の損傷はある程度許すものの、構造系全体としての機能を保持することが重要である。確実に落橋を防止するためには上部構造を連続化することが考えられる。その際、地震力が1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させるような構造が望ましいことから、高架橋を新設する場合には桁の連続化と合わせて免震設計を取り入れることが推奨されている¹⁾。

連続高架橋はその構造上、複数の橋脚や支承を有している。レベルⅡ程度の大規模な地震動が作用する場合、上部構造、支承、橋脚の動的相互作用により、構造全体系では非線形領域に達するものと考えられる。そのため、大地震時における連続高架橋の挙動を適切に評価するためにも、上部構造・支承・橋脚からなる高架橋システムとして捉えた橋梁全体系の地震時動的挙動を調べておかなければならない²⁾。

特に、曲線高架橋は上部構造が曲線であることから、3次元的な広がりを持つ構造であり、地震時の挙動が複雑になる。そのため、地震波を橋軸方向に作用させた場合の応答を調べるだけでは設計上不利になる部分を把握することができなと考えられる。また、実際には地震波が橋梁構造物のどの方向から作用するのか事前にはわからない。よって、曲線高架橋の地震波の入力方向を考慮した立体的な動的応答性状を明らかにするためには、地震波の入力方向に着目した非線形動的応答解析を行うことが必要と思われる³⁾。

そこで本研究では、鋼製橋脚を有する2径間連続曲線高架橋を立体骨組構造にモデル化し、材料的非線形性と幾何学的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解析を行い、連続曲線高架橋の立体的な動的応答性状における入力地震波の方向の影響を比較検討する。具体的には、

支承の水平力-水平変位関係、橋脚基部の曲げモーメントを調べることににより、大地震時に設計上最も不利な条件となる地震波の方向を明らかにする。

2. 解析モデル

本研究は連続曲線高架橋の3次元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・支承部・橋脚の相互作用を考慮できる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。また、全体座標系(X-Y-Z座標系)を図-1に示すように設定する。

2.1 上部構造・橋脚

上部構造は曲率半径100m、橋長80m(2@40m)、総重量約5.88MNの鋼箱桁を使用した。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2.5m、板厚0.05mの正方形箱型断面の鋼製橋脚を採用し、橋脚高さは全て20mとする。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 支承

本研究で用いた支承部はばね要素にモデル化し、水平2方向に関しては支承条件に応じた非線形のばね要素特性を設定した。支承に作用する慣性力が大きくなると、支承の構成部材は塑性化することも予想されるが、ここでは支承に作用する力の大きさにかわらず弾性状態を保つものと仮定する。

支承の配置方向については、図-1に示すように曲線桁の接線方向に支承を配置し、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)を設定する。

(1) 基本モデル

P1 橋脚上に鋼製固定支承、P2、P3 橋脚上に支点反力による摩擦の影響のみを考慮した鋼製可動支承を設置したモデルを基本モデルとする。この場合、可動支承はx軸方向に上部構造による水平地震力を橋脚にほとんど伝達しないものとする。固定、可動支承を表すばねの水平力-水平変位関係は、図-2、図-3のように設定する。

(2) 鋼製支承モデル

基本モデルの鋼製可動支承に対し、摩擦と変位制限構造の影響を考慮した場合を鋼製支承モデルと呼ぶ。この可動支承におけるばね要素の水平力-水平変位関係を図-4に示す。 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、

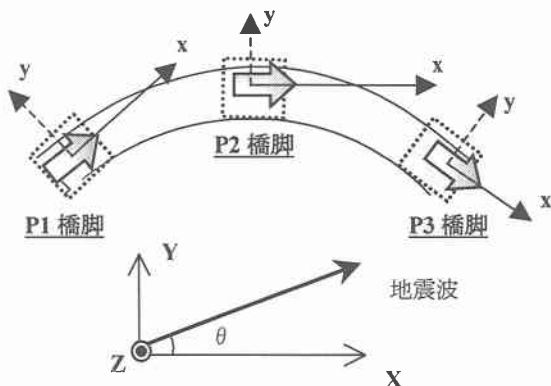


図-1 支承の配置方向と地震波の入力方向

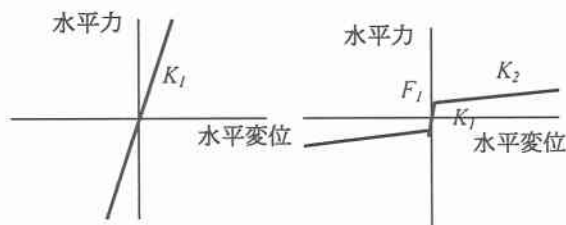


図-2 固定支承

図-3 可動支承(基本モデル)

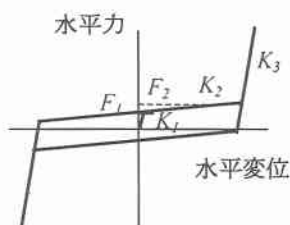


図-4 可動支承
(鋼製支承モデル)

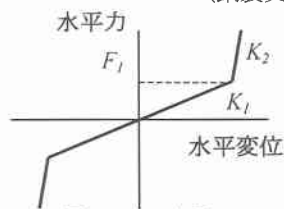


図-5 ゴム支承

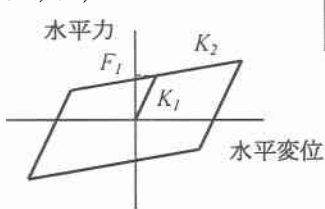


図-6 免震支承

K_2 は支承部に作用する水平力が最大摩擦より大きくなって、支承が滑る状態を表す剛性である。 K_3 は支承の変位が移動制限量に到達した後に、上部構造が橋脚と一体となって挙動する状態を表す剛性である。ここで、 F_1 は最大摩擦力を超えて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最大摩擦力である。また、 F_2 は支承の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で、仮定した移動制限量 10cm より算出した。基本モデルの場合と同様に、P1 橋脚上には鋼製固定支承を設置する。

(3) ゴム支承モデル

地震時の水平反力をほぼ均等に各橋脚に分散する水平反力分散支承の 1 つとして、積層ゴム支承を考える。この支承における水平力-水平変位関係を図-5 に示す。 K_1 は支承が上部構造の慣性力により変位が生ずる状態を表す剛性で、 K_2 は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剛性である。 F_1 は、支承の水平力が変位制限構造に達するときの水平力であり、移動制限量を 3.5cm と仮定したときの値である。ここでは、x 軸方向のみゴム支承の特性を有し、その直角方向は固定の状態である支承モデルを採用した。

(4) 免震支承モデル

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を考え、水平ばねの水平力-変位関係をバイリニア型に設定する。その支承モデルを、図-6 に示す。先に述べたゴム支承と同様に、x 軸方向にのみ免震支承の特性を有し、y 方向は固定の状態とした。

(5) 両免震支承モデル

免震支承モデルに対し、x 軸方向、y 軸方向の両方向に免震支承の特性を有するモデルを両免震支承モデルとする。

3. 解析方法・入力地震波

本研究では、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 ($\beta=1/4$) 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手法を用いる²⁾。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、降伏応力を 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。

表-1 固有振動解析結果

支承モデル	接線方向			
	X1		Y1	
	f (Hz)	T (sec)	f (Hz)	T (sec)
基本モデル	0.999	1.001	1.607	0.622
鋼製支承モデル	0.999	1.001	1.607	0.622
ゴム支承モデル	1.373	0.728	1.621	0.617
免震支承モデル	0.762	1.313	1.610	0.621
両免震支承モデル	0.710	1.409	0.706	1.416

はり柱要素の断面方向の塑性化については、断面分割されたファイバー要素で表現する。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、部材軸方向の応力とひずみで評価する。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 次元的にファイバー要素に分割することにより考慮する。

入力地震波には兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録の N-S 成分を使用する。地震波の入力方向角 θ は、図-1 に示すように X 軸からの角度とし、 θ は 0° から 90° まで 15° ピッチで変化させて動的解析を行う³⁾。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. 固有振動解析結果

動的応答解析に先立って、支承モデルを導入した高架橋全体系の固有振動解析を行った。固有振動解析によって算出された各支承モデルの X 方向 1 次と Y 方向 1 次の固有振動数を表-1 に示す。ここで、X1 は X 方向 1 次、Y1 は Y 方向 1 次の固有振動数 f と固有周期 T である。

X 方向の固有振動数は免震支承モデル、両免震支承モデルで固有振動数が比較的小さくなっており、免震支承の特性により長周期化することがわかる。また、ゴム支承モデルは、他の支承モデルに比べて固有振動数が大きくなっている。

一方、Y 方向の固有振動解析結果を見ると、両面震支承モデル以外のどの支承モデルもほぼ同等の値となっている。これは、支承配置直角方向は固定としているためである。両面震支承モデルでは y 方向にも免震支承の特性を有しているため、X 方向とほぼ同等の固有周期となっている。

5. 動的応答解析結果

5. 1. 支承の相対変位

P3 橋脚上に設置した支承部の最大相対変位と地震波の入力方向角の関係を図-7 に示す。横軸は地震波の入力方向角、縦軸は支承部の最大相対変位である。ここで、支承部の最大相対変位とは上部構造と橋脚頂部における応答変位の差の最大値を意味する。(a)は支承の配置方向 (x 方向)、(b)は支承の配置直角方向 (y 方向) に関する図である。

まず x 方向では、地震波の入力方向角 θ 支承の特性により各支承モデルの相対変位には顕著な違いが見られる。5 つの支承モデルの中で相対変位が大きくなるのは免震支承の特性を有している免震支承モデル、両免震支承モデルである。鋼製支承モデルとゴム支承モデルは変位制限構造の影響を考慮しているため、 θ が小さい範囲では支承部の相対変位はあまり変化することはない。支承部の移動制限量は鋼製可動支承

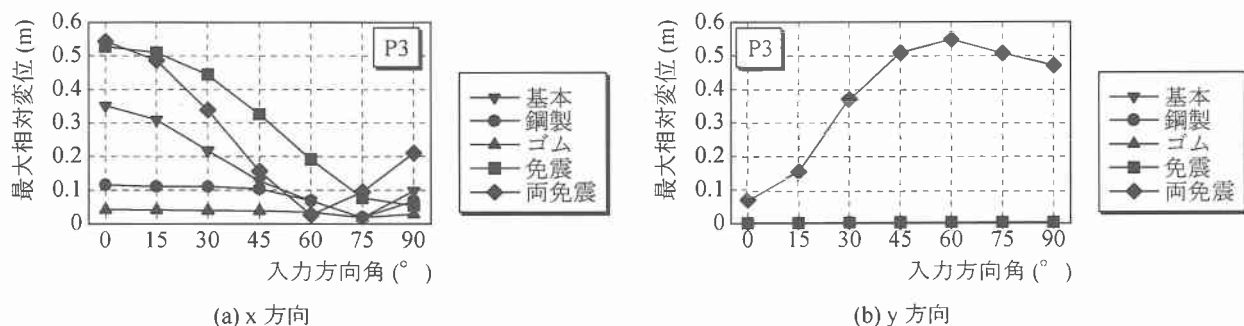


図-7 P3 橋脚上に設置した支承部の最大相対変位と地震波の入力方向角 θ の関係

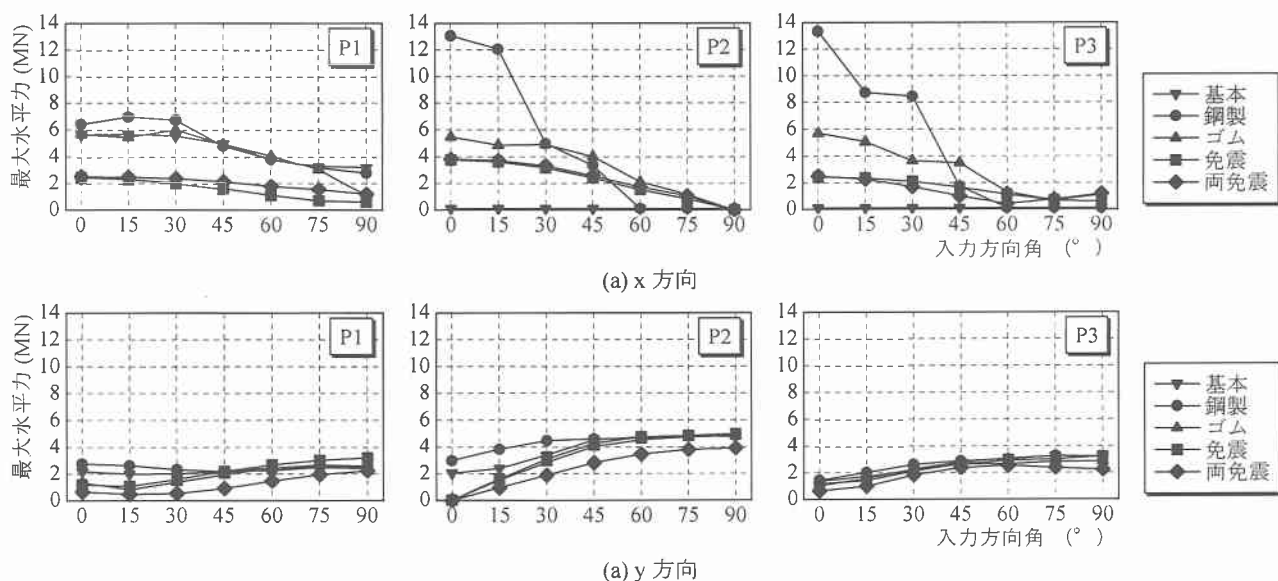


図-8 支承部の最大相対変位と地震波の入力方向角 θ の関係

が10cm、ゴム支承モデルは3.5cmと設定しているため、支承の相対変位はこの値より大きくなることはない。基本モデル、免震支承モデルは、 θ が大きくなるとそれに対応して相対変位が小さくなることがわかる。両免震支承モデルでは、基本モデル、免震支承モデルと同様に θ が大きくなるとそれに対応して相対変位が小さくなる傾向が見られるが、 θ が60°のときに相対変位が最も小さくなることがわかる。これは、P3橋脚が曲線桁の接線方向に配置されていることが影響しているためと思われる。

地震波の入力方向角 θ が大きくなると支承条件の違いによる影響が小さくなり、どのモデルも相対変位がほぼ等しくなるが、 θ が75°~90°になると両免震支承モデルが若干大きくなる。

y方向の結果を見ると、両免震支承モデルを除いた4つのモデルでは、固定条件としているため、地震波の入力方向角 θ が大きくなっても相対変位に変化は見られない。一方、両免震支承モデルではy方向も免震化されているため、他のモデルに比べて相対変位が大きくなっており、特に入力方向角 θ が30°以上になると比較的大きな相対変位が現れている。その最大値は θ が60°のときである。これは、P3橋脚が全体座標系 X 軸からおおよそ30°回転した位置に設置されており、地震波の入力方向角が60°の場合、y方向と地震波の方向がほぼ一致するためだと考えられる。

5. 2. 支承の水平力

支承部の支承配置方向に作用する最大水平力と地震波の入

力方向角 θ との関係を図-8 に示す。(a)は支承の配置方向 (x 方向)、(b)は支承の配置直角方向 (y 方向) の図である。

まず、x 方向に作用する水平力の結果を述べる。全ての橋脚で最も大きな水平力が作用しているのは鋼製支承モデルであり、その最大値は θ が0°のときに発生している。この鋼製支承モデルでは、 θ が0°~30°のときには、P1橋脚に比べてP2橋脚およびP3橋脚に作用する水平力の方が大きい場合があることがわかる。本研究で使用了鋼製支承はP1橋脚には固定支承、P2橋脚およびP3橋脚には変位制限構造の影響を考慮した可動支承を設置している。そのため、可動支承がそのストッパーに衝突することによって、固定支承よりも大きな水平力が発生したものと推測できる。

基本モデルでは固定支承を設置したP1橋脚では鋼製支承モデルよりやや小さめの水平力が発生しているが、P2・P3橋脚では水平力がほとんど発生していないことがわかる。これは、基本モデルの可動支承には変位制限構造の影響を考慮していないためである。

ゴム支承モデルでは、P1橋脚で θ が15°のとき、P2・P3橋脚では θ が0°のときに最大値をとる。ゴム支承は、鋼製可動支承と同様に変位制限構造を有しているため比較的大きな水平力が作用していると考えられる。

免震支承モデル、両免震支承モデルでは最大となるのが地震波の入力方向が0°のときであり、 θ が大きくなると支承に作用する水平力が小さくなる傾向が認められる。さらに、初期剛性 K_1 の値が大きい免震支承を有するP2橋脚ではP1・

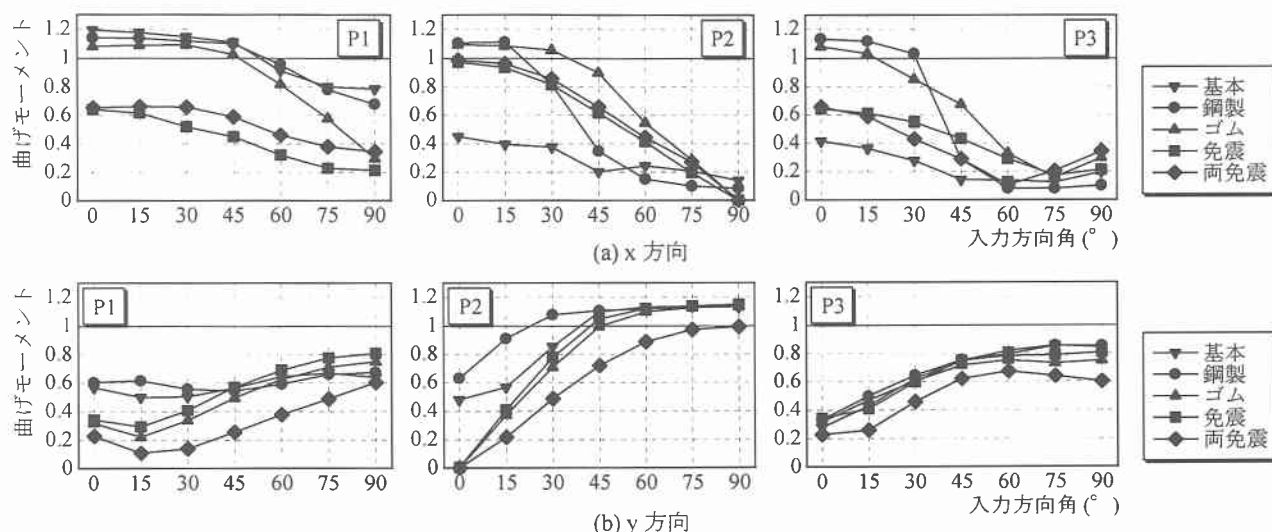


図-9 橋脚基部の最大曲げモーメントと地震波の入力方向角 θ の関係

P3 橋脚よりも大きな水平力が生じていることがわかる。

地震波の入力角 θ が大きい場合、どの支承モデルにおいても支承に発生する水平力は同程度で、非常に小さい値をとっていることがわかる。

一方、y 方向に発生する水平力では、基本モデル、鋼製支承モデル、ゴム支承モデル、免震支承モデルに関しては、y 方向を固定条件としているため、ほぼ同じような傾向が見られる。両免震支承モデルでは、y 方向にも免震支承の特性を有していることから、支承に発生する水平力は若干ではあるが小さく抑えられている。P1・P2 橋脚で θ が 90° のとき、P3 橋脚では θ が 60° のときに最大値をとる。水平力が最大になる角度は、図-7 において、支承の相対変位が最大になる角度と一致している。

5. 3. 橋脚基部の曲げモーメント

橋脚基部の支承配置方向に作用する最大曲げモーメントと地震波の入力方向角 θ との関係を図-9 に示す。縦軸には発生した曲げモーメントを降伏曲げモーメント 92.2MNm で除した値を採用した。つまり、この値が 1 以内であれば、橋脚基部は弾性範囲内に収まっているといえる。

x 方向の関係をみると、全ての支承モデルで θ が $0^\circ \sim 15^\circ$ のときに曲げモーメントが最大となる。P1 橋脚では、 θ が小さいときには、基本モデルおよび鋼製支承モデルで大きな曲げモーメントが作用している。これは、P1 橋脚上に設置した固定支承の影響である。P2・P3 の橋脚基部において、鋼製支承モデルでは大きな曲げモーメントが作用している。一方、基本モデルでは曲げモーメントの値が非常に小さいことがわかる。これは、基本モデルでは変位制限構造のない鋼製可動支承を採用しているため、橋脚自身によって作用する慣性力により曲げモーメントが生じるものと考えられる。また、 θ が大きくなると、支承部の特性による影響が比較的小さくなり、どの支承モデルでも同程度の曲げモーメントが発生するようになる。x 方向の曲げモーメントに関して、変位制限構造を有する支承や鋼製固定支承を持つモデルは、地震波の入力方向の差異が与える影響が大きくなることがわかった。

y 方向に着目すると、両免震支承ではその支承の特性により、上部構造による慣性力の作用が低減され橋脚基部に作用する曲げモーメントが小さく抑えられているものと思われる。

それ以外の支承モデルに関しては、y 方向を固定条件としているため、ほぼ同じような傾向が見られる。全ての支承モデルにおいて、曲げモーメントが最大となるのは θ が $75^\circ \sim 90^\circ$ のときであり、P2 橋脚では塑性化する傾向にある。これは、P2 橋脚に作用する支点反力が大きいため、他の橋脚に比べ大きな地震慣性力が発生したためと考えられる。

6. まとめ

本研究は 2 径間連続曲線高架橋を対象とし、地震波の入力方向を変化させた非線形動的応答解析を行い、その支承条件、地震波の入力方向が高架橋全体系の動的応答に与える影響を比較検討してきた。

基本モデルや免震支承モデルでは、地震波の入力方向角が 0° のときに、支承部の相対変位や水平力、橋脚基部の曲げモーメントなどの応答が最大となった。

しかし、鋼製支承モデルおよびゴム支承モデルでは、設計上最も不利になる地震波の入力方向と X 方向が必ずしも一致するわけではないことが明らかになった。これは、支承部に変位制限構造を設けることにより、発生する水平力の値が大きくなり曲線高架橋の動的挙動を複雑にしているものと考えられる。

また、両免震支承モデルでは x 方向・y 方向に免震支承の特性を有していることからその挙動が非常に複雑となり、特に地震波入力方向の差異が y 方向の応答に大きく影響を及ぼすことがわかったため、設計時に十分な検討が必要だと思われる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996.12.
- 2) 林川俊郎・大嶽敦郎・中島章典・佐野雅章：3 成分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.
- 3) 林川俊郎・荻島知之・Felix Daniel Ruiz Julian：地震波の入力方向に着目した曲線高架橋の非線形応答に関する研究，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.985-988，2001.8.