

地震波の入力方向が連続曲線高架橋の非線形応答に与える影響

Influence of direction of earthquake ground motions on nonlinear response of continuous 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 学生員 荻島知之 (Tomoyuki Ogishima)
 (株) 開発工営社 正員 勝山 寛 (Hiroshi Katsuyama)

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た。都市高速道路は都市の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。高架橋は上部構造・支承・橋脚で構成されており、その耐震性能を向上させるためには、その構成要素を個別に設計するのではなく、高架橋全体系の地震時応答性状を把握し、想定される地震動に対して構成部材の性能規定を行うことが重要であると考えられる。そのためには上部構造・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¹⁾。一般的に橋梁構造物を設計する場合、橋軸方向に地震力を作用させて動的応答解析を行う。直線橋に関しては、この方法で地震時挙動を把握することが可能である。ところが、曲線高架橋は 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いと考えられる。よって、地震波の入力方向を変化させた動的応答解析を行い、その非線形応答性状を調べることで、曲線高架橋の 3 次元的な動的挙動を明らかにすることができるものと思われる。

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、幾何学的非線形性と鋼材の降伏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、地震波入力方向の差異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する。具体的には、上部構造と橋脚頂部の応答変位、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-曲率関係に着目する。また、地震波の入力方向角と上部構造の最大応答変位、支承部に作用する最大水平力、橋脚基部に作用する最大曲げモーメントの関係を調べることで、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。

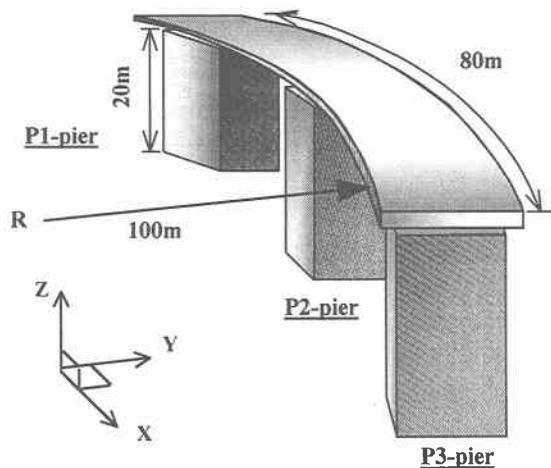


図-1 2 径間連続曲線高架橋モデル

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図-1 のような 2 径間連続曲線高架橋を対象とし、全体座標系 (X-Y-Z 座標系) をおく。また、支承の配置方向を x 軸、配置直角方向を y 軸とする局所座標系 (x-y 座標系) を図-2 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 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。橋脚の設計は、支承条件を考慮して断面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諸元を設定した。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 支承部

本研究では、鋼製支承を採用し、P1 橋脚上に鋼製固定支承、P2 橋脚・P3 橋脚上に鋼製可動支承を設置する。支承部は図-2 のように曲線桁の接線方向に配置し、可動支承は配置方向にのみ動くものとする。

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した。水平 2 方向は支承条件の特性を満足するような非線形ばねとした。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、回転ばねについてはヒンジ結合を表現するために非常に小さなばね定数を設定した。

鋼製固定支承は固定の条件とするため、水平 2 方向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を考慮したものを採用した。この支承は非線形ばね要素にモデル化し、支点反力による摩擦力が最大摩擦力以下のときの状態、水平力が最大摩擦力を超えて支承が滑っているときの状態、支承が変位制限構造に達したあとに、上部構造と

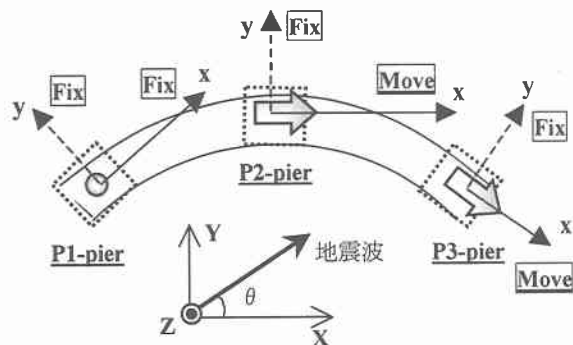


図-2 支承の配置方向と地震波の入力方向

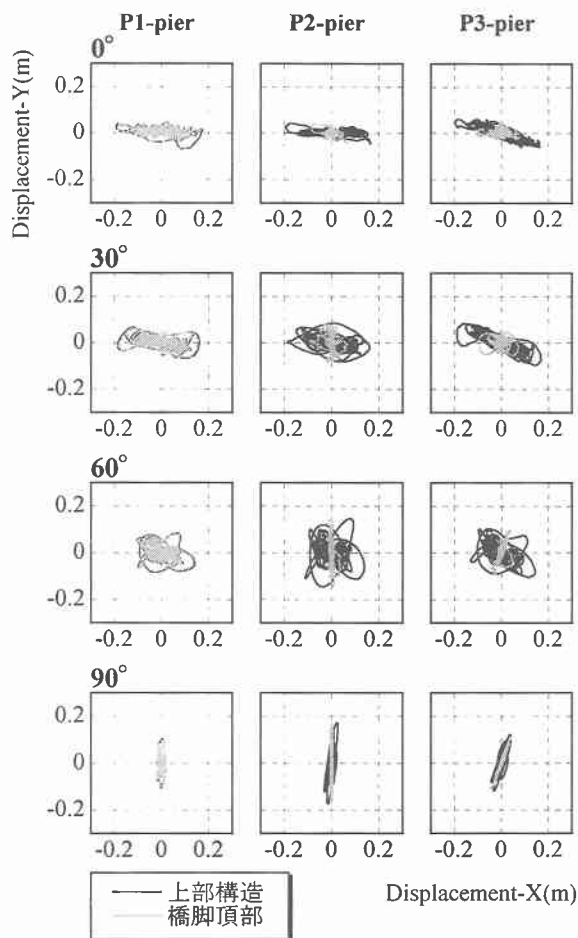


図-3 上部構造と橋脚頂部の応答変位

一体となって挙動している状態を表すものとする。ここで、支承部が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、支承は滑り始めてから 0.1m で変位制限構造に達するものとする。

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 ($\beta = 1/4$) 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方法を用いる²⁾。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。入力地震波には II 種地盤標準波の N-S 成分を使用する。地震波は、図-2 のように全体座標系の X 軸から角度 θ をつけた方向に作用させ、 θ を 0° から 90° まで 15° ピッチで変化させて解析を行う。

4. 非線形動的解析結果

4.1 応答変位

入力方向角 θ が $0^\circ \cdot 30^\circ \cdot 60^\circ \cdot 90^\circ$ の場合の各橋脚頂部と上部構造の時刻歴応答変位の軌跡を図-3 に示す。横軸は X 方向変位(Displacement-X)、縦軸は Y 方向変位(Displacement-Y)を表している。応答変位は全体座標系 (X-Y 座標系) を用いて表示している。図-3 において、濃い色の線が上部構造、薄い色の線が橋脚頂部の応答変位である。P1 橋脚には固定支承

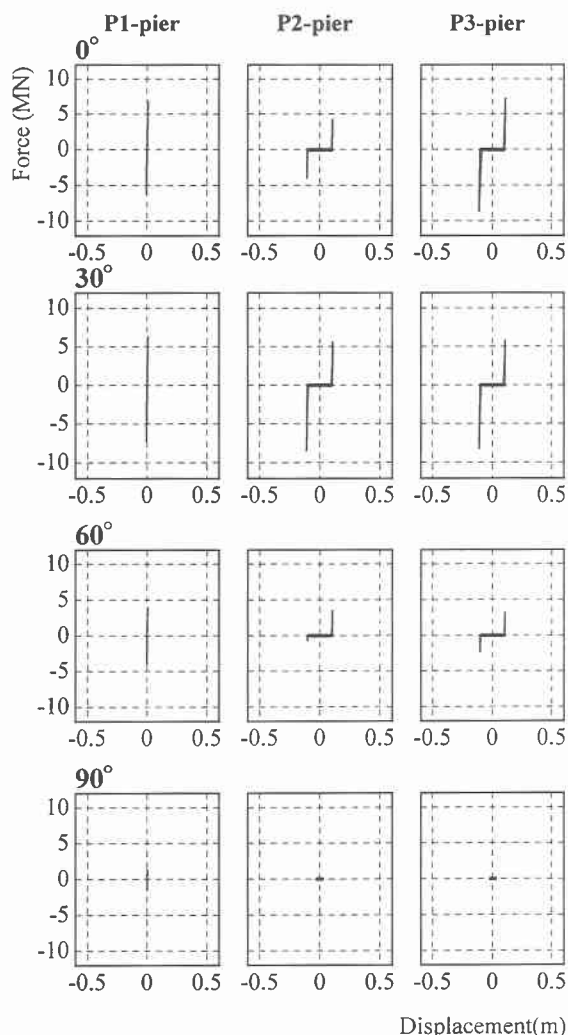


図-4 支承部の水平力-水平変位関係

を設置しているため、橋脚頂部と上部構造の応答変位は等しくなっている。また、地震波の入力方向角が小さい場合は X 方向に支配的に振動しているが、 θ が 60° よりも大きくなると、徐々に Y 方向変位が大きくなり、それに伴い X 方向の変位が小さくなる。 $\theta = 90^\circ$ になると Y 方向に振動するようになることがわかる。

P2・P3 橋脚には可動支承が設置されているため、地震波の回転角が小さいと上部構造は支承の配置方向、つまり x 方向に卓越して振動している。これは、地震波の X 方向成分が Y 方向成分に比べて大きいためと考えられる。また、回転角が大きくなると、P1 橋脚の場合と同様に Y 方向に振動するようになり、上部構造と橋脚頂部の相対変位は小さくなることがわかる。一方、橋脚頂部は P1 橋脚よりも小さい軌跡を描いている。これは、P2・P3 橋脚に可動支承を設置しているためであると考えられる。

4.2 支承部の水平力-水平変位関係

図-4 に θ が $0^\circ \cdot 30^\circ \cdot 60^\circ \cdot 90^\circ$ における x 軸に関する支承部の水平力-水平変位関係を示す。横軸は相対変位(Displacement)、縦軸は水平力(Force)を表している。支承部の水平変位と水平力を調べる際には、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。

各入力方向角に対して支承の特性が再現されていることがわかる。地震波の入力方向角が大きくなると、支承部に作用

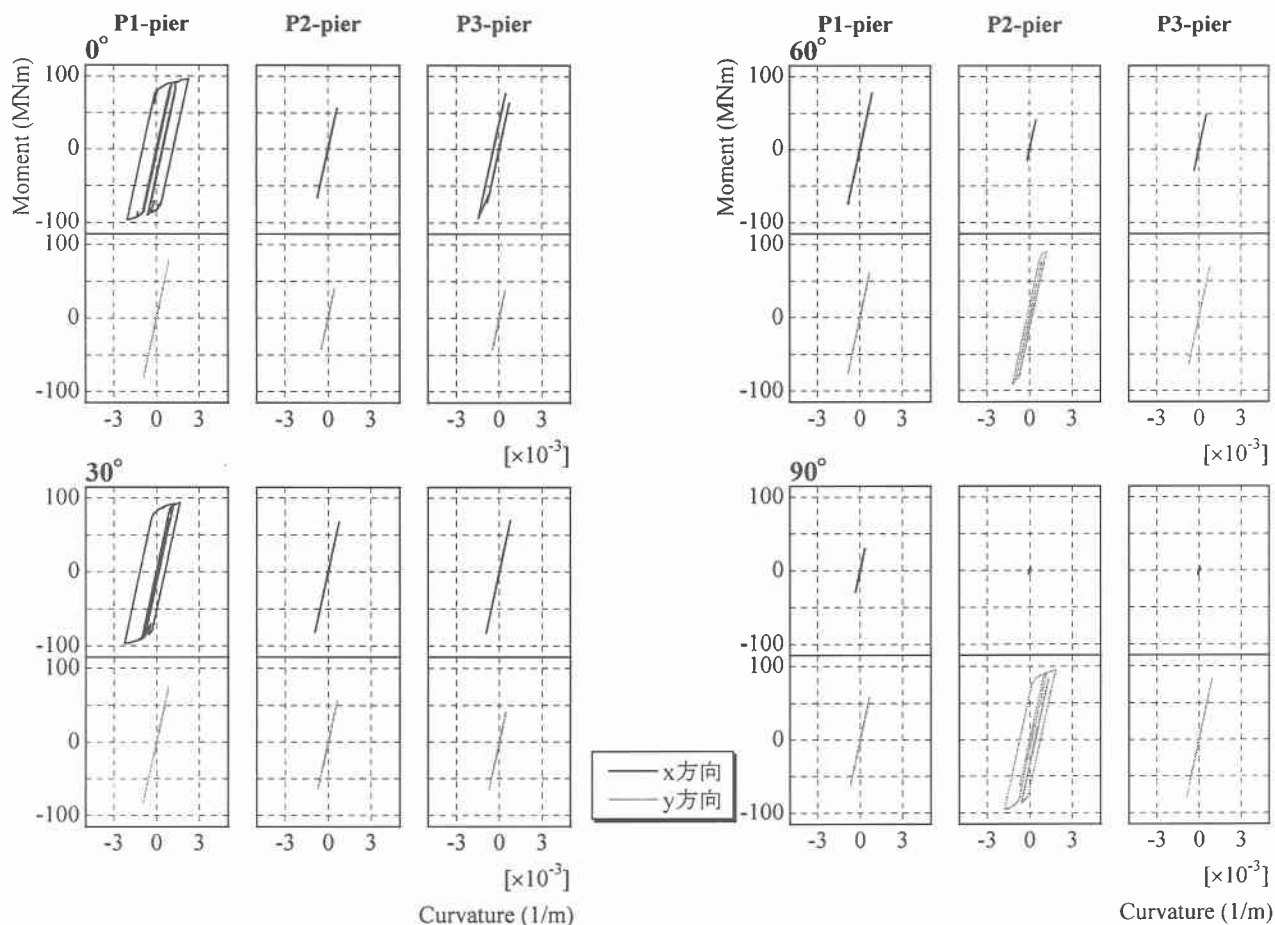


図-5 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係

する水平力が小さくなっている。今回使用した曲線高架橋モデルは、支承と橋脚を全体座標系の X 軸から約 20° の方向に配置していることから、 θ が大きくなると地震波の入力方向と支承の配置方向が一致なくなる。そのため、支承部の配置方向に作用する地震慣性力が小さくなると推測される。この傾向は特に可動支承において顕著に現れており、入力方向角 90° の場合では支承が移動制限装置に衝突していないことがわかる。本解析に使用している鋼製可動支承は支承が変位制限構造に到達するまでの距離を 0.1m としているが、 $\theta=90^\circ$ の P1・P2 橋脚の支承の相対変位は、それぞれ $0.018\text{m} \cdot 0.027\text{m}$ となっているため、変位制限構造に衝突せずに、水平力が小さくなったものと考えられる。

y 方向ではどの支承部にもほぼ同じぐらいの水平力が発生していることを確認している。これは、y 方向はすべての支承において固定としているため、あまり差がでなかったものと思われる。

4. 3 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係

図-5 に θ が $0^\circ \cdot 30^\circ \cdot 60^\circ \cdot 90^\circ$ における橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係を示す。色の濃い線は x 軸、色の薄い線は y 軸に関する関係である。横軸は曲率(Curvature)、縦軸は曲げモーメント(Moment)を表している。橋脚基部の曲げモーメント-曲率を調べる際には、支承部の場合と同様に、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。

x 方向の関係をみると、 θ が 0° と 30° の場合では P1 橋脚基部に塑性ループが現れている。これは、P1 橋脚上には固定支承を設置しているためと思われる。ところが、 θ が 60° と

90° の場合では固定支承を設置しているにもかかわらず、弾性範囲におさまっている。このことから、地震波の入力方向角 θ が小さいと P1 橋脚に地震力が集中するが、 θ が大きくなると、x 方向に作用する地震力が小さくなることがわかる。また、P2・P3 橋脚基部の x 方向の履歴はすべてほぼ弾性範囲にあり、 θ が大きくなると基部にかかる曲げモーメントが小さくなっている。これは、4-2.でも示したように、 θ が大きくなると、支承部に作用する水平力が小さくなるためと考えられる。一方、y 方向を見ると θ が 60° と 90° の P2 橋脚においてのみ、塑性ループが現れている。どの支承部もこの方向では固定であるが、P2 橋脚に作用する支点反力がもっとも大きいため、P2 橋脚基部だけが塑性したものと思われる。

以上のことから、 θ が小さいうちは、P1 橋脚基部にかかる曲げモーメントは P2・P3 橋脚に比べて大きくなっているが、入力方向角が大きくなるにつれて各橋脚に分散されていき、最終的には P2 橋脚基部に大きな負担がかかるようになることがわかる。

5. 地震波入力方向角と最大応答値の関係

地震波の入力方向角 θ (Direction Angle)を横軸に、上部構造の最大応答変位、支承部に作用する最大水平力、橋脚基部にかかる最大曲げモーメントを縦軸にとった図をそれぞれ図-6、図-7、図-8 に示す。

5. 1 上部構造の応答変位

X 方向変位が最大となるのは、P1 は $\theta=0^\circ$ 、P2・P3 は $\theta=15^\circ$ のときであり、Y 方向変位が最大となるのは全ての橋脚で $\theta=90^\circ$ のときである。ただし、 0° から 45° までは X

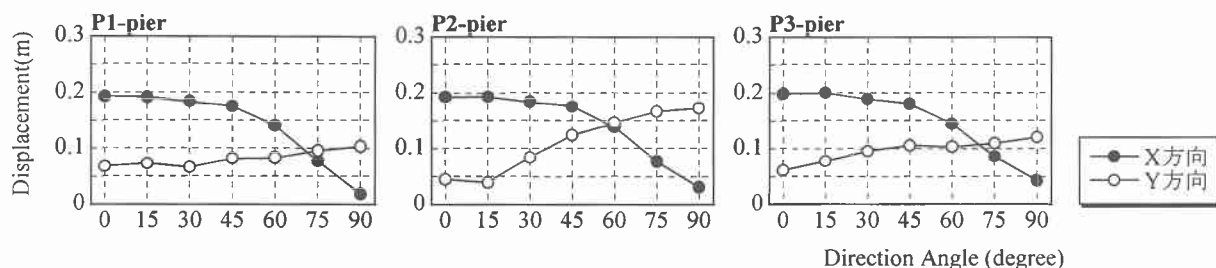


図-6 入力方向角 θ と上部構造の最大応答変位の関係

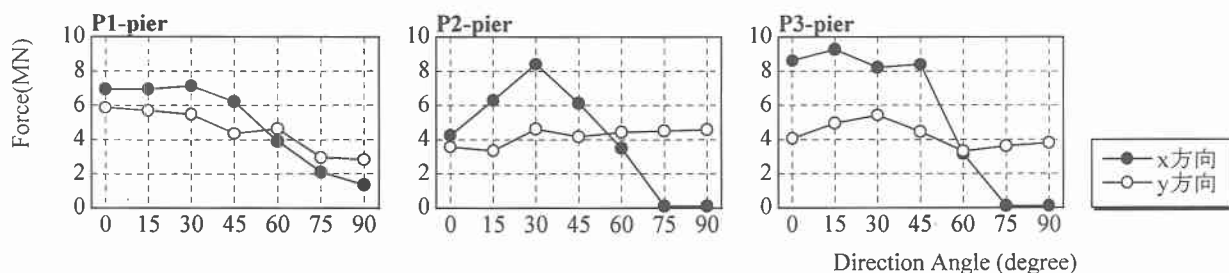


図-7 入力方向角 θ と支承部に作用する最大水平力の関係

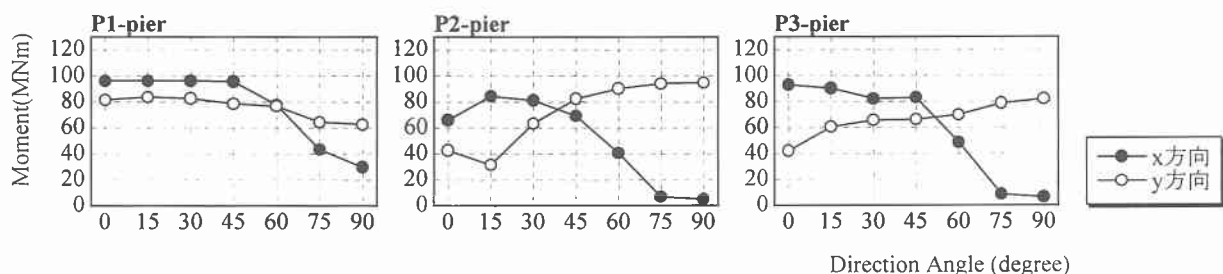


図-8 入力方向角 θ と橋脚基部に作用する最大曲げモーメントの関係

方向変位に大きな差はなくほぼ同じ値を示しているが、60°あたりから徐々に小さくなってきている。一方、Y方向変位では回転角 θ が大きくなると、それに対応して応答変位も大きくなっていることがわかる。

5.2 支承部の水平力

x方向、y方向とも全ての橋脚で $\theta=30^\circ$ 付近で水平力が最大値をとっていることがわかる。この傾向は、特に P2 橋脚で顕著に表れている。x方向における水平力の変化を見ると、P1 橋脚では 45°あたりから急激に減少しているが、P2・P3 橋脚ではピークがきた後、急激に値が小さくなっている。これは、P2・P3 橋脚上に可動支承を設置しているためと思われる。y方向は全て固定にしているため、どの支承にも同じくらいの水平力が作用しているが、地震波の入力方向角が小さい場合、P1 橋脚の支承にわずかながら大きな水平力が発生していることがわかる。

5.3 橋脚基部の曲げモーメント

x方向では $\theta=0^\circ$ から 15°のときに曲げモーメントが最大になっている。一方、y方向では P1 が $\theta=15^\circ$ のとき、P2・P3 が $\theta=90^\circ$ のときに最大となっている。x方向のグラフは、支承部に作用する水平力と同じような傾向があることがわかる。これは、上部構造の地震慣性力が支承を通じて橋脚に伝えられているためである。y方向を見ると、地震波の入力方向角が大きくなると、支承部の水平力はそれほど大きくないにもかかわらず、橋脚基部にかかる曲げモーメントは大きい値をとっている。これは、上部構造と橋脚が一体となって Y 方向に振動するため、支承部よりも橋脚に負担がかかっている

からだと推測できる。

6. まとめ

本研究では、鋼製橋脚を有する 2 径間連続曲線高架橋を対象として、幾何学的非線形性と鋼材の降伏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、地震波入力方向の差異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。

本研究で扱ったような曲線高架橋の場合、設計上最も不利になる場合の地震波の入力方向と橋軸方向 (X 方向)、橋軸直角方向 (Y 方向) が必ずしも一致するわけではないということがわかった。上部構造の変位に関しては、入力方向角 θ が小さい場合は応答変位にあまり変化がないため、橋軸方向、橋軸直角方向に分離して動的解析を行うことが可能と考えられる。ところが、支承部に作用する水平力は θ を 15° から 45°、橋脚基部に作用する曲げモーメントは θ を 15° としたときに最も大きくなっている部分があるため、設計時において入力地震波の方向を変化させて 3 次元動的応答解析を行い、地震動に対して不利になる部分を十分に把握しておく必要があると思われる。

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解析、構造工学論文集、Vol.45A、pp.849-858、1999.3