

## 3成分地震波の入力方向による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 three-dimensional earthquake ground motions

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 O 学生員 小川 伸也 (Shinya Ogawa)  
 (独)北海道開発土木研究所 正会員 池田 憲二 (Kenji Ikeda)  
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 ワリットモハット (Waleed A. Mohamed)

## 1. まえがき

先の兵庫県南部地震では、橋梁構造物に非常に多くの被害が見られた<sup>1)</sup>。特に、高架橋で数多くの被害が発生し、上部構造、支承、橋脚などに多大な損傷があった。高架橋は上部構造・支承・橋脚で構成されており、個々の耐震性能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。そのためには、上部構造、支承そして橋脚までを1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。通常、直線高架橋では地震波を橋軸方向に作用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であることから、平面解析による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次元動的非線形解析が不可欠であると考えられる<sup>2-4)</sup>。

そこで本研究は、鋼製支承を有する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次元動的解析を行い、地震波の入力方向や支承の配置方向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。

具体的には上部構造の応答変位、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-曲率関係などに着目して、その動的非線形挙動について考察する。

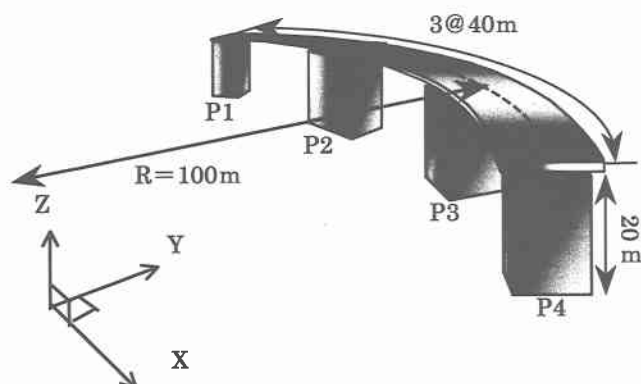


図-1 3径間連続曲線高架橋モデル

## 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、支承方向と同様に設定し、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

本研究では鋼製支承を採用し、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。支承・橋脚の回転角を表-1に示す。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。

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。橋軸方向(x軸)は支承条件の特性を満足するような非線形ばねとする。また、橋軸直角方向(y軸)については剛な結合条件とするために十分に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非常に小さなばね定数を設定する。

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の影響を考慮したものを採用する。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後に上部構造と一体となって挙動している状態を表すものとする。また、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、

表-1 支承の回転角

配置方向	P1 橋脚	P2 橋脚	P3 橋脚	P4 橋脚
放射方向	34.377°	22.916°	11.457°	0°
接線方向	34.377°	11.459°	-11.459°	-34.377°

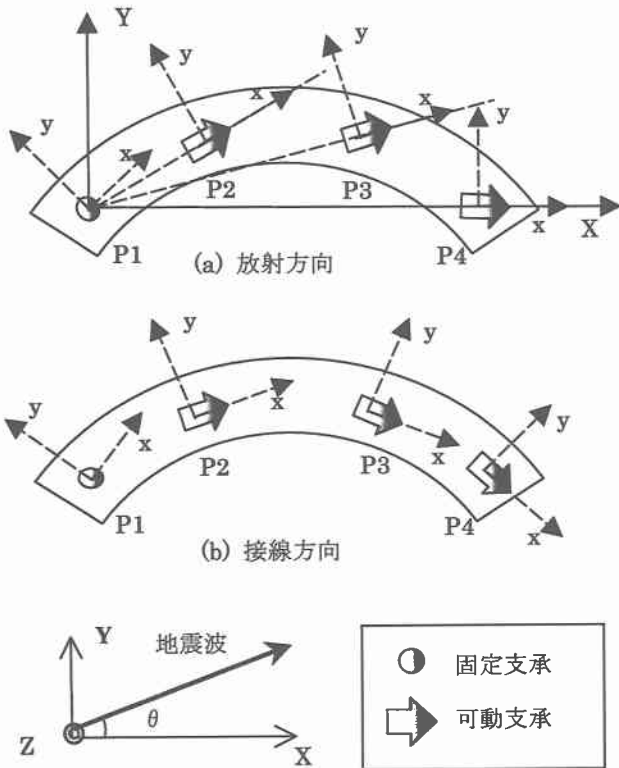


図-2 支承の配置方向と地震波の入力方向

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<sup>5)</sup>。

### 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  $\beta$  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方法を用いる。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<sup>6)</sup>。

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  $\theta$  は、図-2 に示すよ

うに X 軸からの角度とし、 $\theta$  を  $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $15^\circ$  ピッチで変化させて動的応答解析を行う<sup>7)</sup>。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  $\theta$  の関係を図-3 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。

まず、X 方向の結果を見ると、どちらの支承配置でも地震波の入力方向角  $\theta$  が  $0^\circ$  から  $90^\circ$  の間より  $90^\circ$  から  $180^\circ$  の間の方が変位は小さくなっており、 $0^\circ$  と  $180^\circ$  はほぼ同じ値を示している。支承を放射方向に配置した場合には  $\theta$  が  $60^\circ$  のときに最大値をとり、 $150^\circ$  のときに最小値をとる。一方、支承を接線方向に配置した場合には、 $\theta$  が  $30^\circ$  のときに最大値をとり、 $120^\circ$  のときに最小値をとる。

Y 方向の結果を見ると、どちらの支承配置でも支承の y 方向が固定されているため全体的に X 方向の変位より小さくなっているが、支承を放射方向に配置した場合には  $\theta$  が  $105^\circ$  から  $150^\circ$  の間では Y 方向の変位の方が大きくなっている。これは支承の配置方向が影響していると考えられる。また、P4 橋脚は可動方向が X 軸と同じため、変位が小さくなっている。

接線方向に比べて放射方向の方が最大値と最小値の差が大きいのは、支承の配置方向に伴う曲線桁の伸縮による影響が出たものと考えられる。

### 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  $\theta$  の関係を図-4 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。また、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。

x 方向の結果を見ると、支承を放射方向に配置した場合には外側 P1・P4 橋脚よりも、内側 P2・P3 橋脚の方が全体的に水平力が大きくなっている。ここで、P1 橋脚は固定支承、P2 橋脚、P3 橋脚および P4 橋脚は摩擦と変位制限構造の影響を考慮した可動支承である。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考えられる。 $\theta$  が  $60^\circ$  のときに P2 橋脚で最大値をとり、 $\theta$  が  $150^\circ$  のときにどの橋脚でも小さな水平力を与えている。一方、

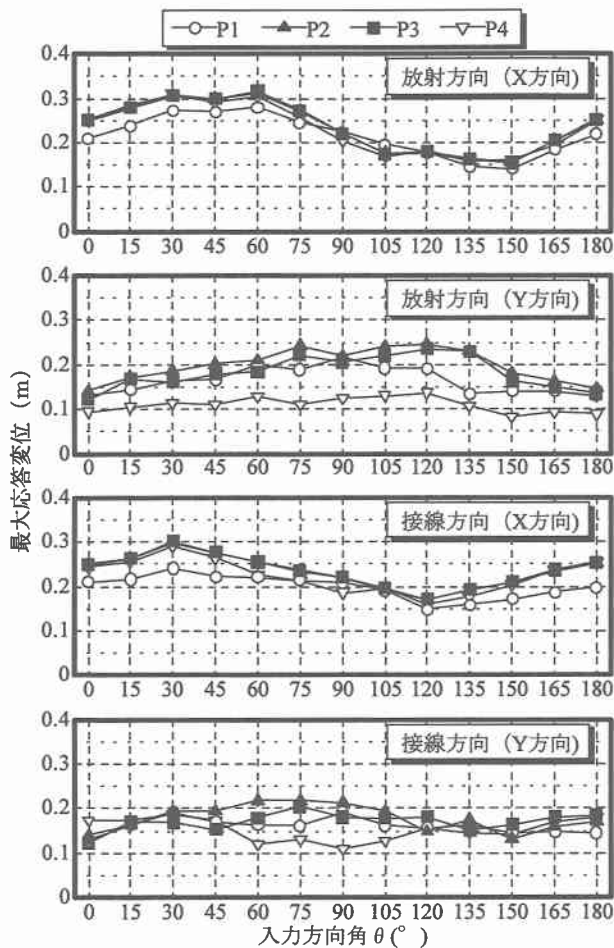


図-3 上部構造の最大応答変位と地震波の入力方向角  $\theta$  の関係

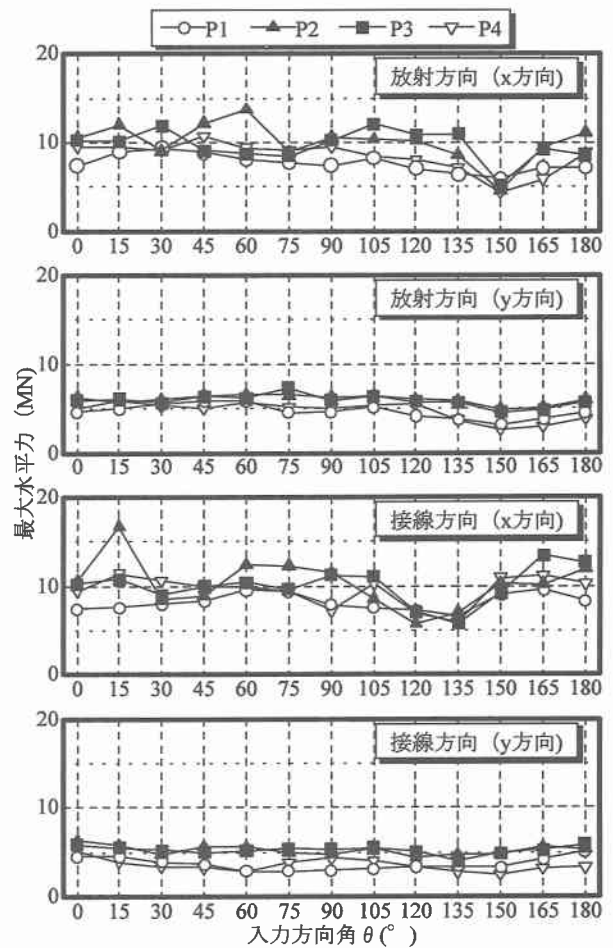


図-4 支承部の最大水平力と地震波の入力方向角  $\theta$  の関係

支承を接線方向に配置した場合には、ほぼ支承を放射方向に配置した場合と同じ傾向が見られるが、P4 橋脚では放射方向の時よりも大きな水平力が見られ、P2 橋脚では  $\theta$  が  $15^\circ$  のときに最大値をとる。これは P2 橋脚の回転角が  $11.459^\circ$  と地震波の入力方向角  $\theta$  と近いことが原因と考えられる。 $\theta$  が  $135^\circ$  のときに小さな水平力を示しており、これは支承の配置方向の違いによるものと考えられる。

y 方向の結果を見ると、どちらも x 方向に比べて水平力が小さくなっている。これはすべての支承において y 方向を固定しているためと考えられる。また、x 方向と同様に P1 橋脚・P4 橋脚よりも、P2 橋脚・P3 橋脚の方が全体的に水平力が大きくなっている。

### 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と地震波の入力方向角  $\theta$  の関係を図-5 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  $84.8\text{MNm}$  である。したがって、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。

x 方向の解析結果を見ると、ほとんどの場合において塑性化が起っており、特に固定支承を有する P1 橋脚は地震波の入力方向角がどの場合でも塑性領域に入っていることが確認できる。

y 方向の結果を見ると、内側 P2・P3 橋脚ではいずれの場合も塑性化するが、外側 P1・P4 橋脚はほとんどの場合において弾性範囲内に収まっている。

### 4.4 橋脚基部の曲率

橋脚基部の最大曲率と地震波の入力方向角  $\theta$  の関係を図-6 に示す。横軸は地震波の入力方向角、縦軸は橋脚基部の最大曲率である。また、橋脚基部の曲率は支承配置方向を x 軸、直角方向を y 軸とする局所座標系を用いる。x 方向の結果を見ると、ほとんどすべての場合において固定支承を有する P1 橋脚で大きな値を示している。

y 方向の結果を見ると、外側 P1・P4 橋脚と比較すると内側 P2・P3 橋脚では大きな値を示している。これは、内側の P2 橋脚と P3 橋脚に大きな水平力が作用し、橋脚基部の塑性化に伴い、最大曲率が大きくなったものと考えられる。

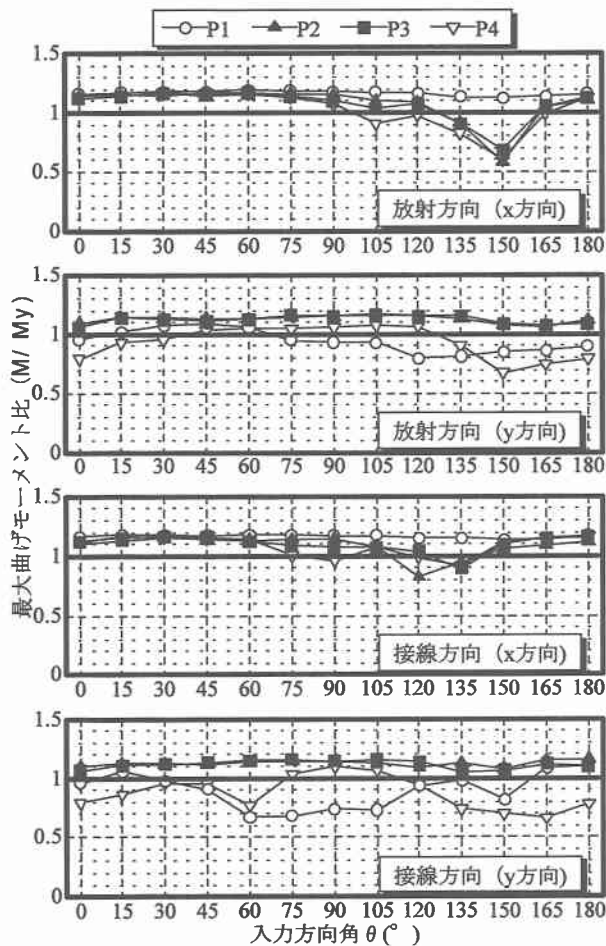


図-5 橋脚基部の最大曲げモーメント比と地震波の入力方向角  $\theta$  の関係

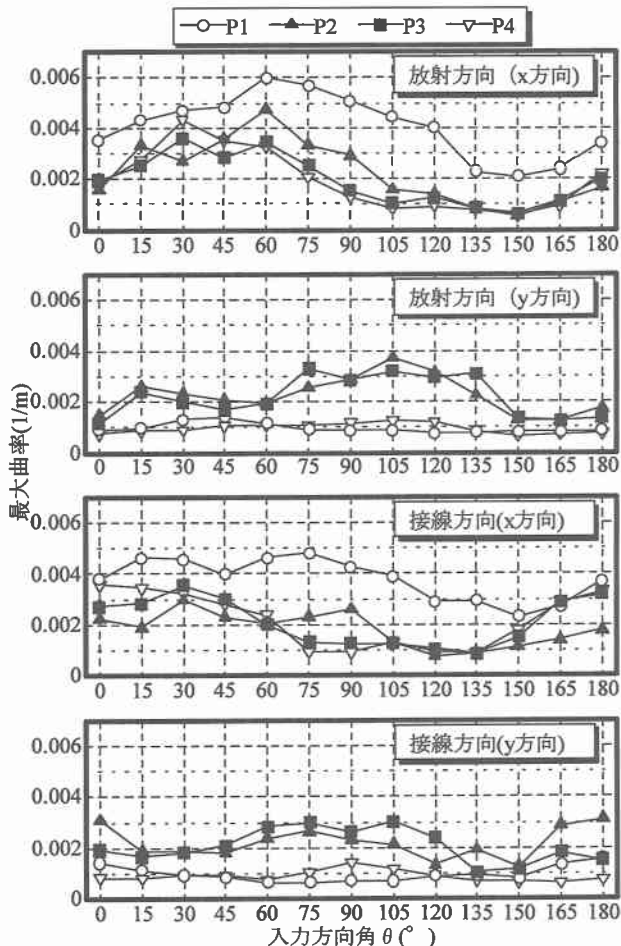


図-6 橋脚基部の最大曲率と地震波の入力方向角  $\theta$  の関係

## 5. まとめ

本研究では、鋼製橋脚を有する3径間連続曲線高架橋を対象として、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適用して、3成分地震波の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。

- (1)放射方向に支承を配置した曲線高架橋の応答変位は、曲線桁の伸び変形の影響により、最大値と最小値の差が大きくなる。
- (2)地震波入力方向角に近い支承の配置角度を有する橋脚では、水平力が大きくなる。また、移動制限装置を有する可動支承では、ストッパーに衝突することにより大きな水平力が発生する。
- (3)橋脚基部のx方向では固定支承を有するP1橋脚はすべての場合において塑性領域に入っていることが確認された。y方向では、内側P2・P3橋脚基部に塑性化による損傷が大きいことが認められた。

以上のように、曲線高架橋においては支承の配置方向、地震波の入力方向の違いによって、地震時の動的非線形挙動が大きく変化することが確認できた。今後、曲線高架橋の耐震性能を向上させるには、支承条件や支承配置などを十分に考慮する必要があると思われる。

## 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、1992.12.
- 2) 林川俊郎・大嶽敦郎・中島章典・佐野雅章：3成分大地震動を受ける連続曲線高架橋の非線形応答解析、土木学会構造工学論文集、Vol. 45A、pp849-858、1999.3.
- 3) 渡邊英一・杉浦邦征・北根英雄：地震時における構造物の3次元挙動、構造工学論文集、Vol.43A、pp.897-906、1997.3.
- 4) 山口栄輝・清水俊彦・川神雅秀・田崎賢治・野中哲也・久保喜延：鋼曲線ラーメン橋の地震時応答特性に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol.47A、pp.851-860、2001.3.
- 5) 林川俊郎・荻島知之・勝山寛：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、土木学会北海道支部論文報告集、第57号、pp240-243、2001.2
- 6) 林川俊郎：橋梁工学 朝倉書店 2000.4.
- 7) 林川俊郎・荻島知之・橋本至：地震波の入力方向と支承条件を考慮した曲線高架橋の非線形動的応答に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol. 48A、pp789-798、2002.3.