

I - 4

橋脚高さの異なる3径間連続曲線高架橋の大地震時非線形挙動

北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎
 北海道大学工学部 学生員 荻島 知之
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 佐野 雅章
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 佐藤 浩一

1. はじめに

兵庫県南部地震では橋梁構造物に多くの被害が見られた。特に、数多く的高架橋で被害が発生し、上部構造、支承、橋脚などに多くの損傷があった。高架橋は地震時の動的挙動が問題となるため、支承条件や橋脚高さの違いが高架橋各部の耐震性や損傷に及ぼす影響を検討する必要がある。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。特に曲線高架橋は3次元的な広がりをも有する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。したがって、高架橋全体系の立体的な非線形挙動を捉える必要がある。

そこで本研究では、曲線高架橋を立体骨組構造にモデル化し、幾何学的非線形と材料的非線形を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析を用いて、支承条件や橋脚高さが異なる高架橋の大地震時の動的挙動を調べる。ここでは、橋脚高さが同じ場合と橋脚高さが異なる場合の2つのモデルについて解析を行い、支承部と橋脚高さが、上部構造、支承、橋脚からなる高架橋システムの動的挙動に与える影響を比較検討する。支承部には摩擦や落橋防止装置の影響を考慮した鋼製支承、免震支承、水平反力分散支承を取り扱うが、ここでは鋼製支承についてのみ考察を記す。具体的には上部構造の時刻歴応答変位、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—曲率関係に着目して、動的非線形挙動について比較検討する。

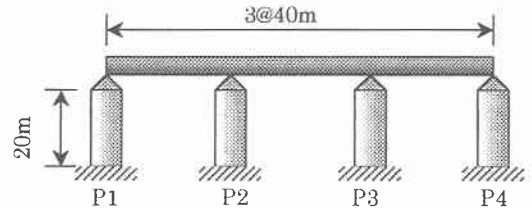
2. 解析モデル

本研究の目的は、高架橋システムの動的非線形挙動を明らかにすることであるため、上部構造、支承、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、3径間連続曲線高架橋を対象とした。

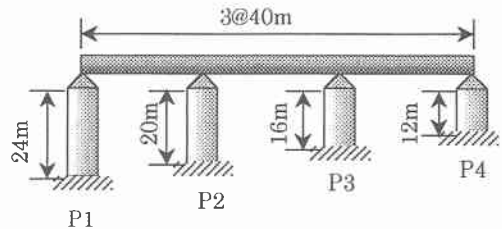
2. 1 上部構造、下部構造

曲線高架橋は構造的に3次元的な広がりを持ち、支承条件が高架橋全体系の動的挙動へ複雑に影響すると考えられる。ここでは、図-1に示すような連続曲線高架橋を解析モデルとし、橋脚高さの等しいタイプと橋脚高さの異なるタイプの2つの場合を考慮する。

上部構造は支間長 40m、鋼主桁 4 本と鉄筋コンクリート床版からなる総重量約 900tf の合成桁とした。これを断面 2 次モーメントと総重量が等価な鋼箱型断面に換算し、そりねじりの影響はないものとして解析を行う。曲率半径は 100m とし、支承の配置方向については、図-2に示すように P1 橋脚から放射、P2 橋脚から放射方向に配置した場合と曲線桁の接線方向に配置した場合の3つのパターンを考える。また、全体座標系を図-2のように置く。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、支承方向と同様とする。その支承、橋脚の回転角を表-1に示す。橋脚は震度法（設計水平震度 0.2）と許容応力度法により設計した。その断面諸元を図-3に示す。どの橋脚も断面は等しいものとし、橋脚の基礎は十分に剛である場合を考え固定とした。



モデルⅠ：橋脚高さの等しい曲線高架橋



モデルⅡ：橋脚高さの異なる曲線高架橋

図-1 3径間連続曲線高架橋の解析モデル

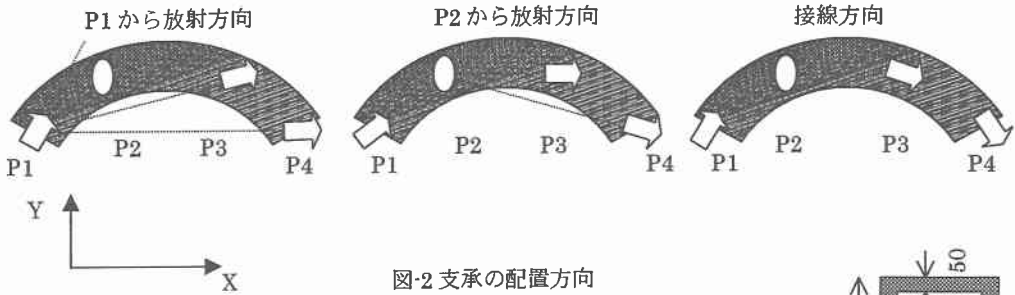


図-2 支承の配置方向

表-1 支承の回転角

配置方向	P1 橋脚	P2 橋脚	P3 橋脚	P4 橋脚
P1 から放射	34.377°	22.918°	11.459°	0°
P2 から放射	22.918°	11.459°	0°	-11.459°
接線	34.377°	11.459°	-11.459°	-34.377°

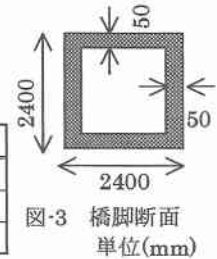


図-3 橋脚断面
単位(mm)

2.2 支承条件

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する。3 径間連続曲線高架橋の P2 橋脚上に固定支承、P1、P3、P4 橋脚上に可動支承を設置したものを鋼製支承モデルと呼ぶ。

固定支承は線形ばね、摩擦と移動制限装置の影響を考慮した可動支承は非線形ばねにモデル化し、それぞれのモデルの水平力—水平変位関係を図-4 に示す。可動支承において、K1 は支点反力による摩擦力が最大摩擦力以下の時の剛性、つまり支承が静止しているときの剛性であり、K2 は水平力が最大摩擦力を超えて支承が滑っているときの剛性である。また K3 は、支承の変位が移動制限量に達したあとに、上部構造と一体になって挙動するときの剛性である。詳しい支承部の諸元を表-2 にまとめた。

3. 数値計算結果

3.1 固有振動解析結果

動的非線形解析を行うのに先立って、曲線高架橋全体の固有振動解析を行った。その結果得られた水平 1 次の固有振動数と固有周期を表-3 に示す。P2 橋脚から放射方向に支承を配置したものは、モデルⅠ、モデルⅡとも固有周期がほぼ同じ値になった。ほかのタイプのものは、モデルⅡの固有周期の方が小さくなった。これは、モデルⅡの P3、P4 橋脚が短くなったためと考えられる。また、モデルⅠ、Ⅱとも接線方向に支承を配置した場合の固有周期が最も長くなる傾向が見られる。

3.2 動的応答解析結果

ここでは、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時刻歴応答解析法を採用した。また、入力地震波には兵庫県南部地震時の

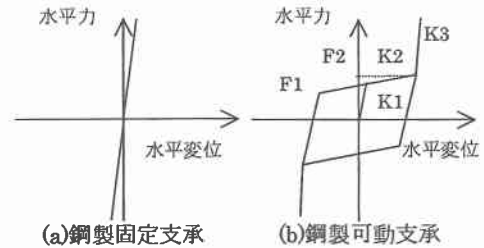


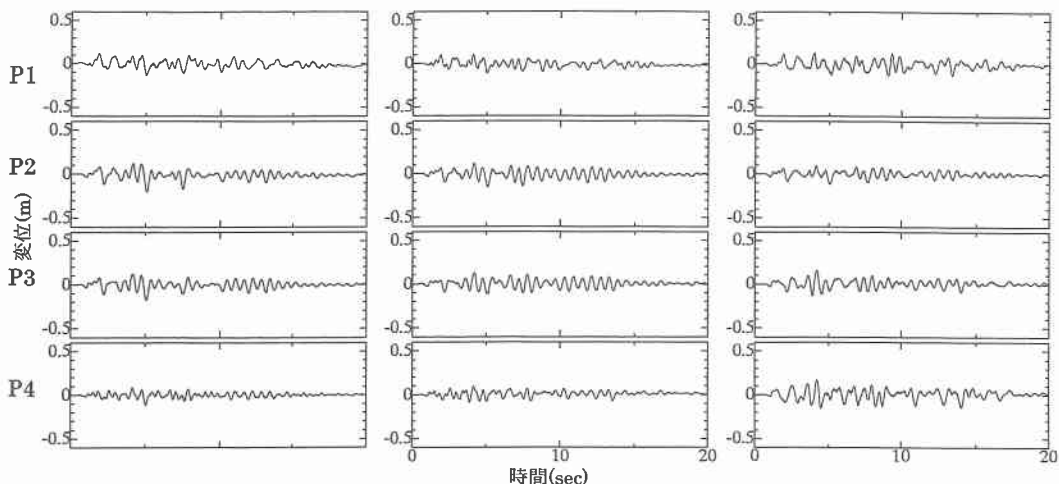
図-4 支承部モデルの水平力—水平変位関係

表-2 支承部の諸元

	鋼製支承	
	固定支承	可動支承
K1(tf/m)	1.0×10^5	5.0×10^3
K2(tf/m)	—	1.0
K3(tf/m)	—	1.0×10^5
F1(tf)	—	12.0
F2(tf)	—	12.1

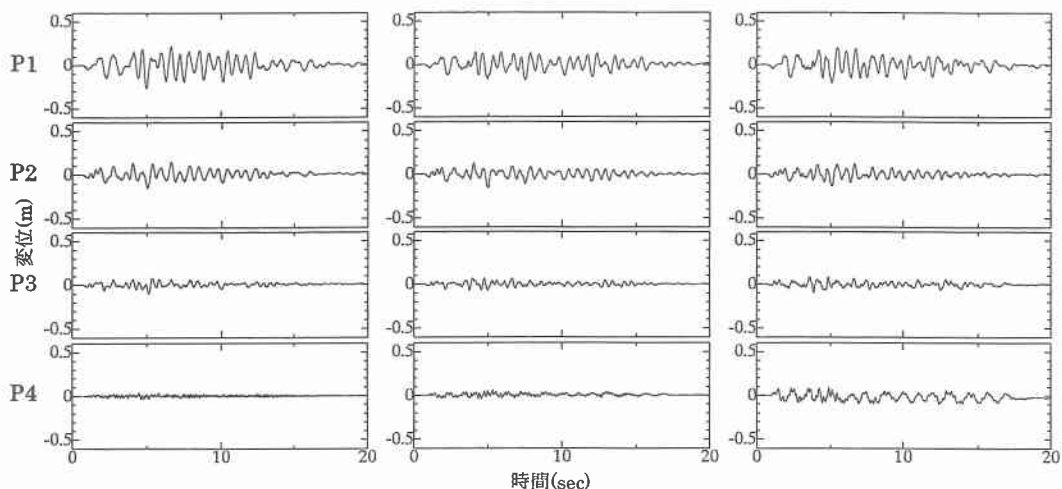
表-3 固有振動解析結果

	支承配置方向	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)
モデルⅠ	P1 から放射	0.799	1.252
	P2 から放射	0.844	1.185
	接線	0.710	1.409
モデルⅡ	P1 から放射	0.849	1.178
	P2 から放射	0.845	1.184
	接線	0.774	1.292



(a)P1 から放射方向 (b)P2 から放射方向 (c)接線方向

図-5 上部構造の Y 方向の時刻歴応答変位（橋脚高さが同じ場合）



(a)P1 から放射方向 (b)P2 から放射方向 (c)接線方向

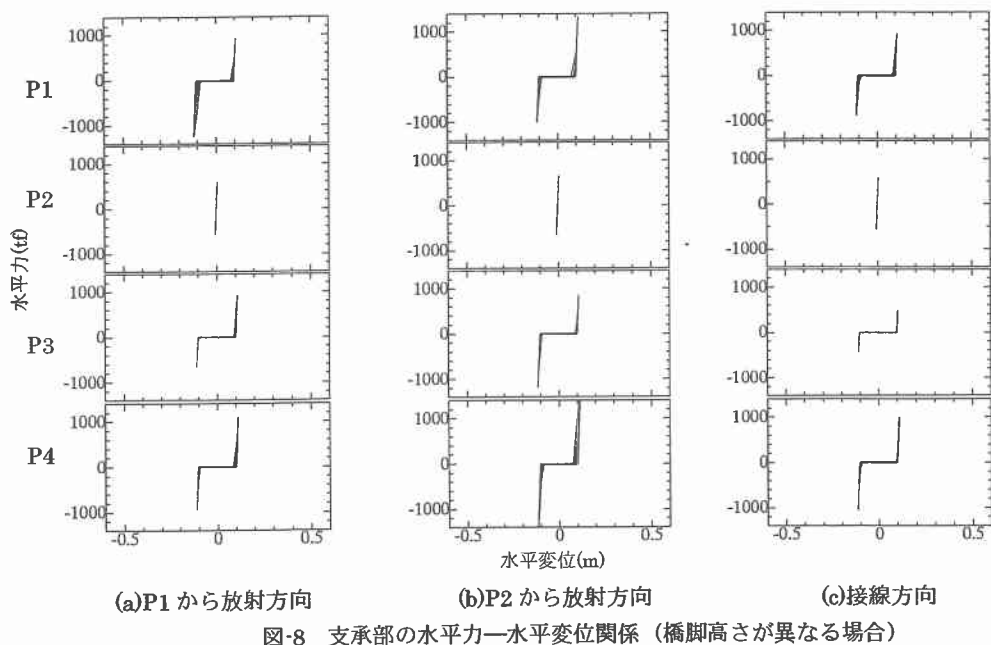
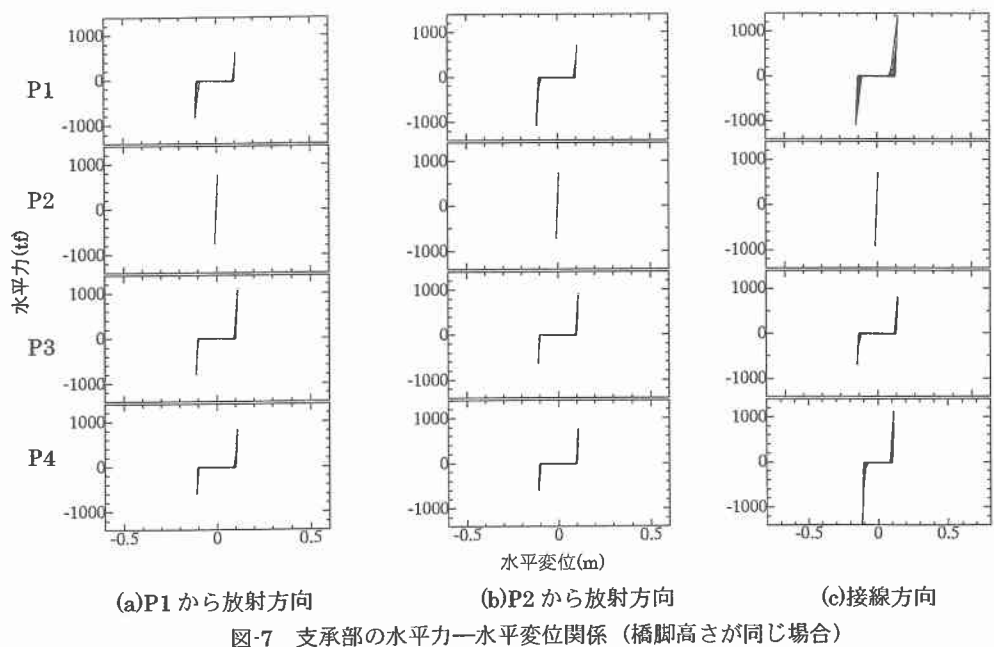
図-6 上部構造の Y 方向の時刻歴応答変位（橋脚高さが異なる場合）

JR 鷹取駅で記録されたものを使用する。

(1)上部構造の時刻歴応答変位

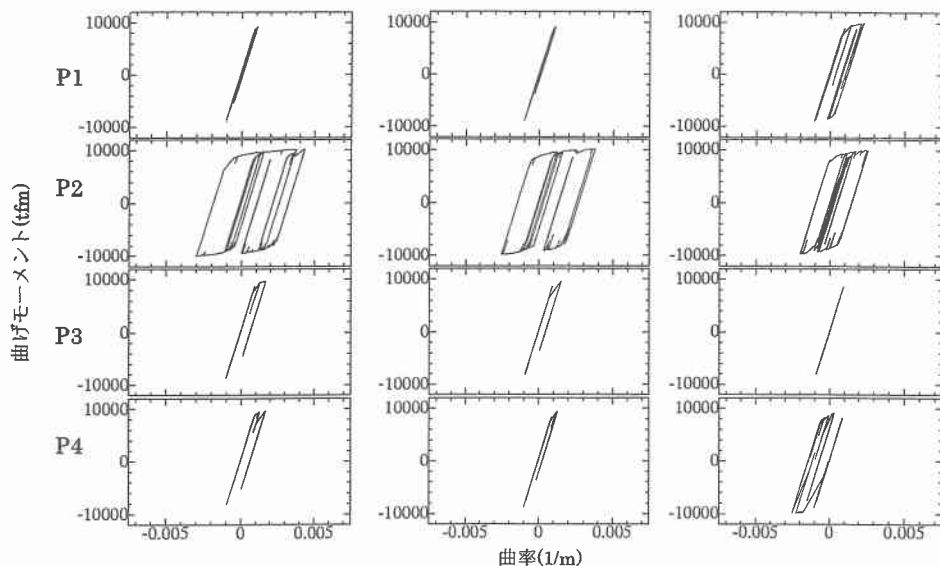
橋脚高さが同じであるモデルⅠの P1, P2, P3, P4 橋脚上部の Y 方向における時刻歴応答変位を図-5 に示し、橋脚高さが異なるモデルⅡの P1, P2, P3, P4 橋脚上部の Y 方向における時刻歴応答変位を図-6 に示す。また、(a)は P1 から放射方向に支承を配置した場合、(b)は P2 から放射方向に支承を配置した場合、そして(c)は接線方向に配置した場合である。縦軸は応答変位、横軸は時間を表している。

橋脚高さが等しい高架橋モデルⅠにおいて、支承条件にかかわらず、X 方向の応答変位がほぼ同じである。(a)、(b)では残留変位が生じている。また Y 軸方向変位は、(a)、(b)のような放射方向の場合、P2, P3 橋脚上の応答変位に比べ、P1, P4 橋脚上の応答変位は小さくなっている。(c)では逆に、P4



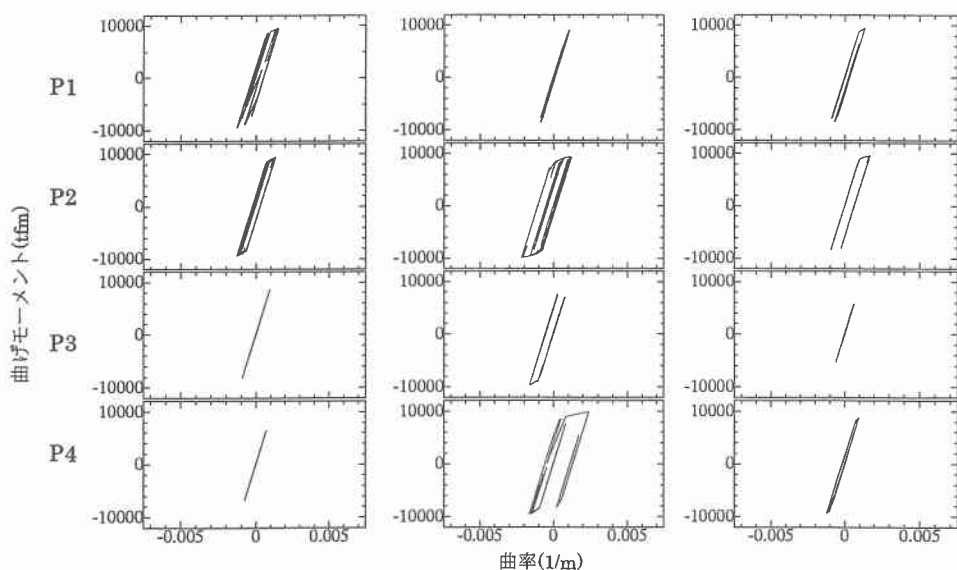
橋脚上の応答変位の方が大きく現れている。

一方、橋脚高さの異なる高架橋モデルⅡの Y 方向変位は図-6 より、(a)、(b)の場合、P1 橋脚上の応答変位が一番大きく、橋脚高さが短くなるにつれて応答変位も小さくなることがわかる。(c)では、P1 橋脚上の応答変位が一番大きく、ほかの橋脚上の変位はほぼ等しい。また、X 方向変位では、Y 方向変位ほど橋脚高さの差異が顕著には現れていないが、同じような傾向が見られる。



(a)P2 から放射方向 (b)P2 から放射方向 (c)接線方向

図-9 橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係 (橋脚高さが同じ場合)



(a)P1 から放射方向 (b)P2 から放射方向 (c)接線方向

図-10 橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係 (橋脚高さが異なる場合)

(2) 支承部の水平力—水平変位関係

橋脚高さが同じモデルⅠの支承部の水平力—水平変位関係を図-7に、橋脚高さが異なるモデルⅡの支承部の水平力—水平変位関係を図-8に示す。縦軸は支承に作用する水平力、横軸は支承の相対変位、つまり、支承上端と下端の水平変位の差である。また、(a)はP1から放射方向に支承を配置した場合、(b)はP2から放射方向に支承を配置した場合、そして(c)は接線方向に配置した場合である。いずれの場合も、設定した履歴特性通りの応答を示していることがわかる。

橋脚高さの等しいモデルⅠでは接線方向に支承を配置した場合に大きな水平力が作用している。橋脚高さの異なるモデルⅡにおいては、(a)や(b)のように放射方向に支承を配置した場合、橋脚高さが短い橋脚ほど大きな水平力が作用している。

(3) 橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係

橋脚高さが等しい高架橋橋脚基部の橋軸方向の曲げモーメントー曲率関係を図-9に示し、橋脚高さの異なる高架橋橋脚基部の橋軸方向の曲げモーメントー曲率関係を図-10に示す。また、(a)はP1から放射方向に支承を配置した場合で、(b)はP2から放射方向に配置した場合、そして(c)は接線方向に配置した場合である。縦軸は曲げモーメント、横軸に曲率を表している。

橋軸方向について見ると、橋脚高さが等しい高架橋モデルⅠでは、P2橋脚基部の履歴ループがP1、P3、P4橋脚基部に比べて大きくくなっている。これは、P2橋脚が固定支承であることから、地震力が各支承に分散されず、P2橋脚に集中するためと考えられる。(c)では、P1、P4橋脚でも履歴ループが大きくなっている。これは、図-7が示すように支承部に大きな水平力がかかっているためと考えられる。橋脚高さの異なる高架橋モデルⅡでは、固定支承を持つP2橋脚のほかに(a)ではP1橋脚、(b)ではP4橋脚の履歴ループが大きくなっている。

橋軸直角方向の曲げモーメントー曲率関係はどの場合もすべての橋脚でほぼ弾性域であった。

4. まとめ

本研究は3径間連続曲線高架橋を対象として、その支承配置方向や橋脚高さが上部構造、支承部、橋脚からなる構造システムとして捉えた高架橋全体系の動的非線形挙動、具体的には上部構造の時刻歴応答変位、支承部の水平力ー水平変位関係、橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係に与える影響を比較検討した。その結果、曲線高架橋においては支承の配置方向、橋脚高さの違いによって、地震時の動的応答が大きく変化することがわかった。

橋脚高さの等しい高架橋では支承配置方向が異なっても、上部構造の応答変位にはそれほど違いが見られないが、鋼製固定支承を設置している橋脚には地震力が集中するため、橋脚基部には大きな塑性ループが発生した。したがって鋼製支承を採用するには移動制限装置の設計荷重や橋脚の剛性などを十分に検討する必要がある。この塑性ループは放射方向に配置したときの方が大きくなる傾向が見られた。一方、支承部にかかる水平力は接線方向に配置したモデルの方が大きくなることがわかった。

橋脚高さの異なる場合は、X方向の応答変位にはあまり違いが見られなかったが、Y方向変位では、橋脚高さが長くなると、応答変位が大きくなる傾向がある。この場合、橋脚の高さが異なるために、支承部が負担する水平力や橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係に大きな差が生じる。固定支承(P2橋脚)から放射方向に可動支承を配置した場合(本研究では(b)のモデル)では、橋脚高さが短くなると、支承部により大きな水平力がかかり、橋脚基部が塑性化することがわかった。

以上のように、連続曲線高架橋は支承配置方向および橋脚高さによって、3次的に複雑な非線形挙動を示すことがわかった。高架橋全体系の地震時の動的挙動を正確に把握するためには、本研究で採用した立体骨組み構造の動的非線形応答解析が有用である。その耐震性を向上させるためには、多径間連続曲線高架橋を対象として、支間長や材料の異なる高架橋、基礎や地盤条件、落橋防止システムの影響を考慮した検討が必要となるであろう。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路指示方書・同解説、Ⅱ鋼橋編、Ⅴ耐震設計編、1996.12.
- 2) 林川俊郎・大嶽敦郎・平沢秀之・佐藤浩一：3成分地震波入力による鋼製橋脚の非線形挙動、土木学会北海道支部論文報告集、第53号(A)、pp.102-105、1997.2.
- 3) 林川俊郎・大嶽敦郎・中島章典：レベル2地震動を受ける立体高架橋の非線形応答性状、土木学会北海道支部論文報告集、第54号(A)、pp.146-151、1998.2.
- 4) 林川俊郎・大嶽敦郎・中島章典・佐野雅章：3成分大地震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.