

I-31

橋脚長の異なる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	フェロー	林川 俊郎
北海道大学工学部	学生員	佐野 雅章
北海道大学大学院工学研究科	学生員	大嶽 敦郎
宇都宮大学工学部	正会員	中島 章典

1. まえがき

先の兵庫県南部地震では、多数の構造物が被害を受けた。これに対し昨年発行された、道路橋示方書¹⁾によると、移動方向が自由であるゴム支承、さらにエネルギー吸収性能も兼ね備えた免震支承等を採用することを推奨している。また、橋脚の変形性能の照査に対応した動的解析では、橋脚自身の非線形性及び支承部の非線形性を考慮した適切な解析モデルを適用することが求められている。規模の大きな地震波が構造物に作用する場合、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。そのため構造部材が非線形領域に入っても適切な靱性を保ち、エネルギー吸収性能を高めることで構造部材に生じる損傷を最小限度にとどめ、結果として構造系全体としての崩壊を防ぐことが重要と考えられる。また、構造形式により高架橋がどのような非線形挙動を示すのかを検討しておく必要がある。

そこで本研究では、鋼製橋脚を持つ3径間連続高架橋を対象とし、橋脚高さが同じ場合と、橋脚高さが異なる場合の2つの解析モデルについて、その動的な非線形挙動を考える。同時に、大地震時における高架橋システムの橋軸方向に対する支承部への影響も考慮し、平面骨組のための弾塑性有限変位地震応答解析によって比較・検討する。ここで、支承部には①鋼製支承（摩擦と移動制限を考慮しない）、②鋼製支承（摩擦と移動制限を考慮する）、③水平反力分散支承、④免震支承の4タイプを考える。

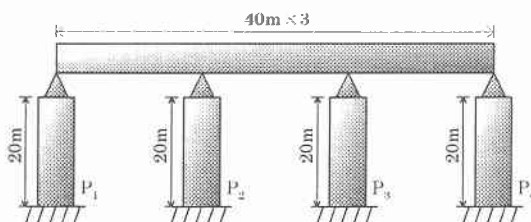
2. 解析モデル

2. 1 上部構造、下部構造

本研究では、橋脚高さが同じ場合と、橋脚高さがそれぞれ異なる場合とで、支承部および橋脚基部そして高架橋全体系に与える影響がどのように現れるのかを比較するために、図-1の解析モデルを用いる。

上部構造を支間長40m、鋼主桁4本の鉄筋コンクリート床板からなる総重量約900tfの合成桁として考える。解析に際し、これを断面2次モーメントと総重量が等価な鋼断面に換算し、モデル化する。橋脚は震度法と許容応力度法により概略設計し、断面幅を2m、板厚を0.05mの鋼製の正方形箱形断面とした¹⁾²⁾。また、橋脚高さが同じ場合には、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 橋脚の高さをともに20mとし、橋脚高さが異なる場合には、 P_1 、 P_4 橋脚の高さを20m、 P_2 橋脚の高さを28m、 P_3 橋脚の高さを36mとした。橋脚の基礎は十分剛である場合を考え固定とした。

モデル①：橋脚高さが同じ高架橋



モデル②：橋脚高さが異なる高架橋

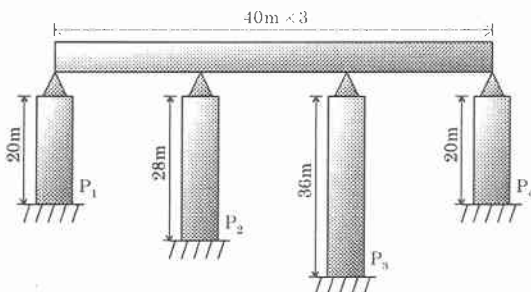


図-1 3径間連続高架橋の解析モデル

Nonlinear Dynamic Behavior of Viaduct System Having Variational Length of Piers under Strong Earthquake Ground Motions
by Toshiro HAYASHIKAWA, Masaaki SANO, Atsuo OTAKE and Akinori NAKAJIMA

ここでは、支承部の支持条件（非線形ばねモデル）による違い、橋脚の高さの違いによる高架橋全体の動的非線形応答に着目していることから、橋脚は同一断面のものをを用いる。その断面形状を図一2に示す。

なお、上部構造および橋脚をはり柱要素にモデル化し、橋脚は橋脚高さ20mで要素分割数を5、橋脚高さ28mで要素分割数を7、橋脚高さ36mで要素分割数を9とし、上部構造は1スパン40mを4要素に分割することとする。

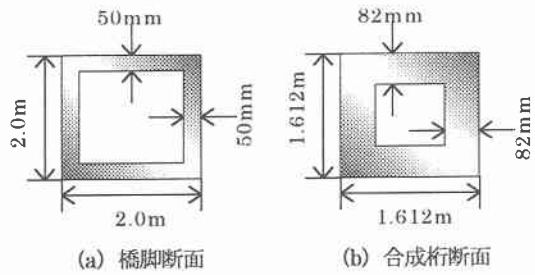
2. 2 支承部モデル

支承部の摩擦や移動制限装置、水平力—水平変位の非線形履歴の影響を考慮するために、異なる4種類の支承部を非線形ばねにモデル化する。高架橋全体構造系の解析モデルに取り入れた支承モデルを図一3に示す。

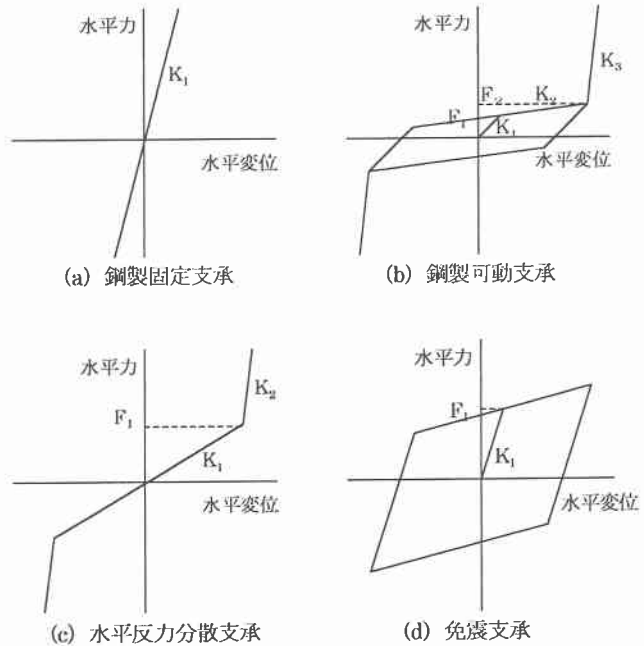
(1) 鋼製支承において、固定支承（図一3(a)）は橋脚と上部構造が一体となって挙動するので、水平ばね定数は十分に大きな値とする。可動支承（図一3(b)）は鉛直反力によって摩擦力を生じ、最大摩擦力を超えると滑り始め、移動制限装置に衝突後は橋脚と一体になって挙動する。この時の移動制限量を10cmとした。

(2) 水平反力分散支承（図一3(c)）は上部構造による水平地震力を各橋脚にバランス良く分担させる、反力分散型のゴム支承である。文献³⁾を参考にばね定数を設定し、移動制限量を3.5cmとした。

(3) 免震支承（図一3(d)）は鉛プラグ入り積層ゴム支承とし、水平力—変位関係はバイリニア型とする。文献³⁾を参考にばね定数を設定し、これらの支承部の諸元を表一1に示す。なお、本研究は支承部への影響を明らかにするため、鋼製支承の固定部を除き、各々の支承条件において同一の諸元を有するものとする。



図一2 断面形状



図一3 支承部モデルの水平力—水平変位

表一1 支承部の諸元

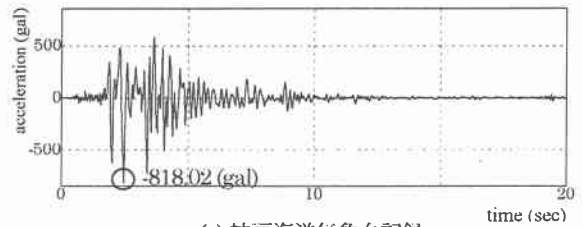
	鋼製支承		水平反力分散支承	免震支承
	固定支承	可動支承		
K_1 (tf/m)	1.8×10^8	5.0×10^3	1.2×10^3	2.0×10^3
K_2 (tf/m)	—	1.0	6.0×10^4	5.0×10^2
K_3 (tf/m)	—	6.0×10^4	—	—
F_1 (tf)	—	10.0	42.0	40.0
F_2 (tf)	—	10.1	—	—

3. 解析方法

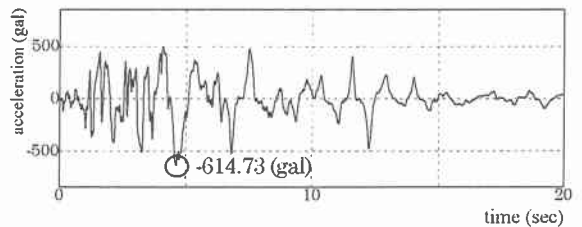
本研究においては、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した、いわゆる複合非線形問題として弾塑性有限変位解析をもとにNewmark β 法により動的応答解析を行う。その際、構造物における荷重—変位の非線形性を考慮した解法には増分理論を用い、Newton-Raphson法により収束計算を行う。また、桁や橋脚に用いる鋼材は、応力—ひずみ関係がバイリニア型になるものとし、ヤング率を $2.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$ 、降伏応力を 24000 tf/m^2 、ひずみ硬化を1%とする。減衰については、質量比例型を仮定し、1次の固有振動モードに対する減衰定数5%を用いることとする。

4. 入力地震波

動的応答解析を行うに際して用いる入力地震波として、図—4に示す兵庫県南部地震で観測された神戸海洋気象台記録（N-S方向成分）と、JR鷹取駅記録（N-S方向成分）を用いる。これら2種類の地震波を、解析モデルの橋軸方向に作用させた。神戸海洋気象台記録（図—4(a)）は主要動の継続時間が十数秒と短く、 $2.0 \sim 6.0 \text{ Hz}$ の振動数成分が多く含まれている。一方、JR鷹取駅記録（図—4(b)）は、神戸海洋気象台記録に比べ主要動の継続時間がやや長く、 0.8 Hz 付近の振動数成分が多く含まれている。これは解析モデルの基本固有振動数に近い値となっている。そこで、以下の数値計算結果には、JR鷹取駅記録による結果のみを示す。



(a) 神戸海洋気象台記録



(b) JR鷹取駅記録

図—4 入力地震波

5. 解析結果

5. 1 固有振動解析

動的応答解析に先立ち、 P_2 橋脚上を鋼製固定支承、 P_1 、 P_3 、 P_4 橋脚上を鋼製可動支承とした場合を基本モデルとする。この鋼製可動支承は上部構造による橋軸方向の水平地震力を橋脚に伝達しないものとする。さらに、鋼製可動支承部の摩擦と移動制限を考慮した場合を鋼製支承モデルとする。

鋼製支承、水平反力分散支承、免震支承を設置した場合について、図—1の解析モデル①、モデル②について固有振動解析を行った。免震支承モデルにおいては、水平保有耐力レベルにおける等価剛性を用いた。その結果、得られた水平1次の固有周期および固有振動数を表—2に示す。これによると、橋脚高さが同じモデル①に比べ、橋脚高さが異なるモデル②は支承条件によらず長周期化の傾向が見られる。

表—2 計算された高架橋の固有振動数 (Hz)

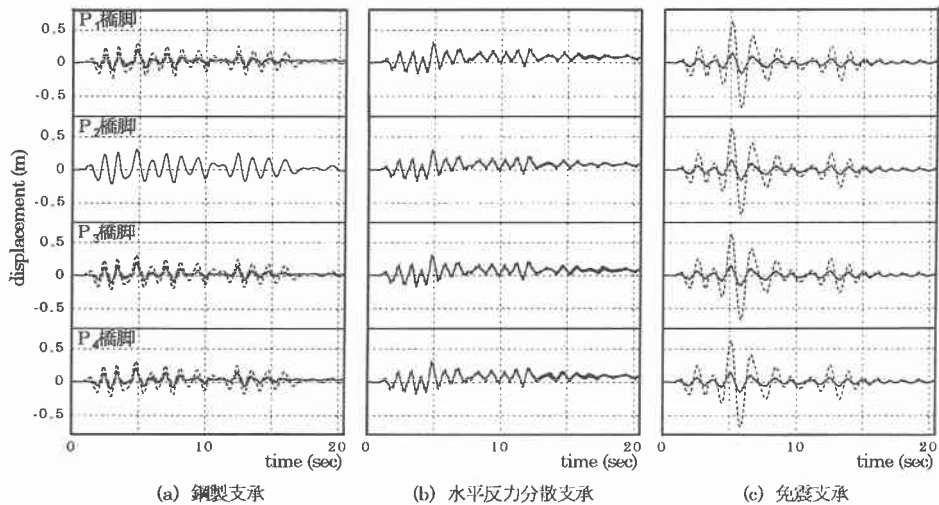
(固有周期 (sec))

	鋼製支承	水平反力分散支承	免震支承
モデル①	0.7144 (1.3997)	0.8898 (1.1238)	0.7022 (1.3258)
モデル②	0.4294 (2.3290)	0.7543 (1.4242)	0.6194 (1.6144)

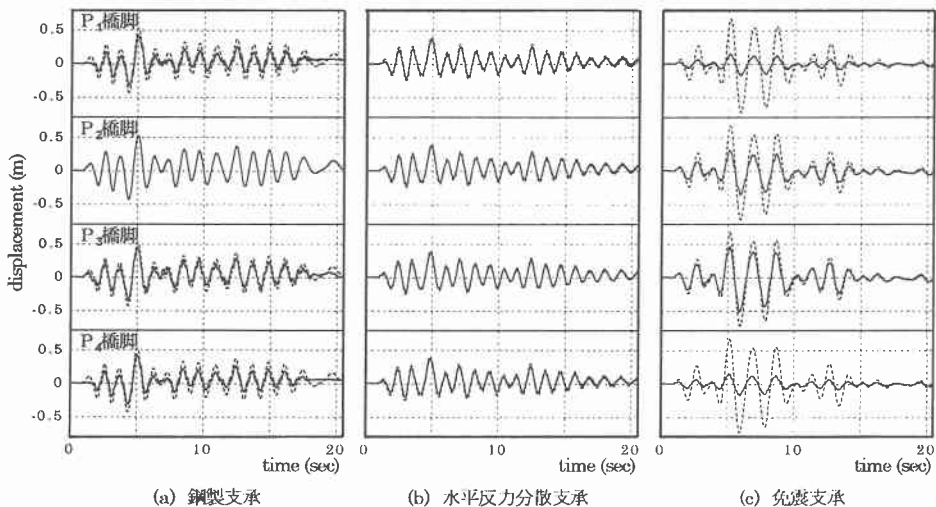
5. 2 動的応答解析

5. 2. 1 橋脚上端の時刻歴応答変位

橋脚高さが同じ解析モデル①の P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 橋脚上端の時刻歴応答変位を図—5に示し、橋脚高さが異なる解析モデル②の P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 橋脚上端の時刻歴応答変位を図—6に示す。また、(a)は鋼製支承、(b)は水平反力分散支承、(c)は免震支承をそれぞれ設置したモデルの応答変位である。縦軸は橋軸方向の水平変位、横軸は時間を表している。なお、図—5、図—6の破線は、高架橋モデルの上部構造の応答変位(P_2 橋脚上)を表し、実線は P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 橋脚上端の応答変位を表している。



図一五 橋脚高さが同じ高架橋



図一六 橋脚高さが異なる高架橋

橋脚高さが同じ高架橋において、鋼製支承モデルの P_2 橋脚では上部構造と橋脚が同じ挙動を示している。 P_1 、 P_3 、 P_4 橋脚では、橋脚上端部よりも上部構造の応答変位が大きい。水平反力分散支承では上部構造と各橋脚上端では、ほぼ同じ応答変位が得られる。また、鋼製支承モデル、水平反力分散支承モデルともに残留変位が生じている。一方、免震支承モデルでは上部構造の応答変位が大きく現れ、免震効果により橋脚上端の変位が小さく抑えられる。

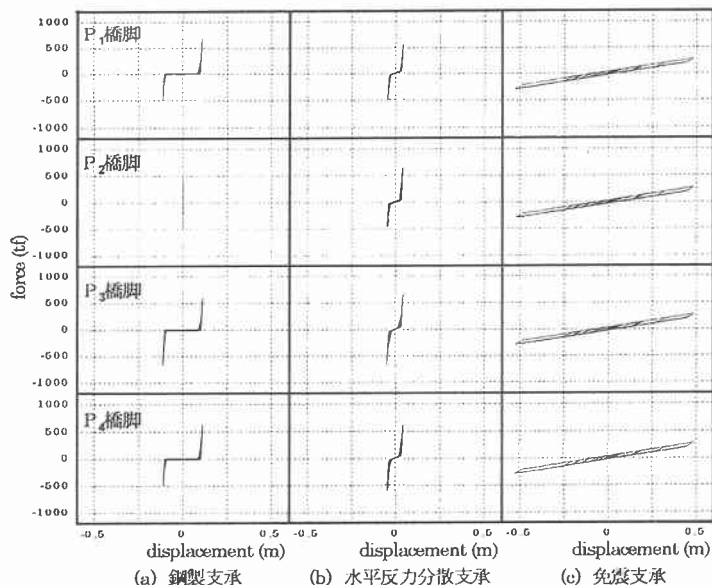
橋脚高さが異なる場合は、鋼製支承モデル、水平反力分散支承モデルの上部構造と各橋脚上端との相対変位は、橋脚高さが同じ場合と大きな差はない。免震支承モデルは P_1 、 P_4 橋脚上の支承部において、上部構造と各橋脚上端との相対変位が大きく、 P_3 橋脚上の支承部において上部構造と各橋脚上端の相対変位は最も小さくなっている。これは、免震支承に同一の非線形ばね定数を用いているためと考えられる。一般的に、橋脚高さが異なる解析モデルは橋脚高さが同じ解析モデルに比べ、どの支承条件においても応答変位が大きくなり、長周期化する傾向が見られる。

5. 2. 2

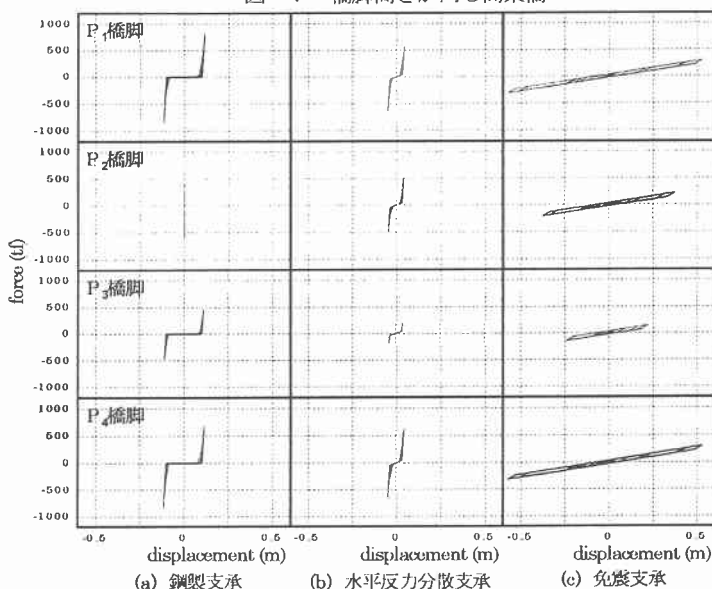
支承部の水平力—水平変位関係

橋脚高さが同じ解析モデル①の支承部の水平力—水平変位関係を図—7に示し、橋脚高さが異なる解析モデル②の支承部の水平力—水平変位関係を図—8に示す。また、(a)は鋼製支承、(b)は水平反力分散支承、(c)は免震支承をそれぞれ設置したモデルの水平力—水平変位関係である。縦軸は支承部に作用する水平力、横軸は支承部の相対水平変位を表している。

いずれの支承条件においても設定した支承部モデルの履歴特性を示している。橋脚高さが異なる場合、鋼製支承モデルでは、橋脚高さが低い橋脚上の鋼製可動支承に大きな水平力が作用するため、移動制限装置を破損する可能性がある。また、水平反力分散支承モデルおよび免震支承モデルともに、 P_1 、 P_4 橋脚上で大きな水平力を発生し、 P_2 橋脚、 P_3 橋脚の順に水平力が低減することが認められる。この理由として、橋脚高さが異なる解析モデル②では、橋脚高さが高い橋脚上の支承ほど作用する水平力が小さく、橋脚高さが低い橋脚上の支承ほど作用する水平力が大きいと考えられる。



図—7 橋脚高さが同じ高架橋



図—8 橋脚高さが異なる高架橋

5. 2. 3 橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係

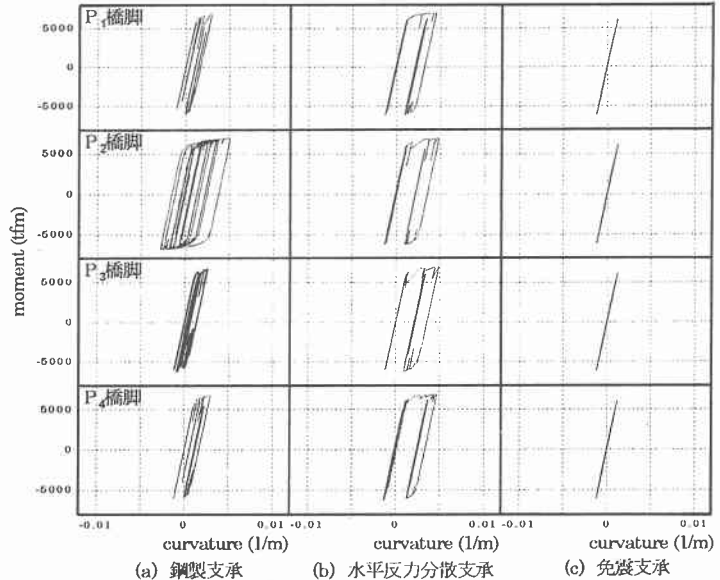
橋脚高さが同じ解析モデル①の橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係を図—9に示し、橋脚高さが異なる解析モデル②の橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係を図—10に示す。また、(a)は鋼製支承、(b)は水平反力分散支承、(c)は免震支承をそれぞれ設置したモデルの橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係である。縦軸は曲げモーメント、横軸は曲率を表している。橋脚高さが同じ解析モデル①では、鋼製固定支承を設置した P_2 橋脚基部において大きな履歴ループが得られ、鋼製可動支承を設置した P_1 、 P_3 、 P_4 橋脚基部に比べ損傷の度合いが高いといえる。水平反力分散支承モデル、免震支承モデルは、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 橋脚基部全てにおいてほぼ均等の履歴が見られる。特に免震支承モデルの橋脚基部は、免震支承のエネルギー吸収特性により弾性範囲内にあることがわかる。一方、橋脚高さが異なる解析モデル②では鋼製可動支承を設置した P_1 、 P_4 橋

脚基部において大きな履歴ループを描いている。これは、移動制限装置に設計荷重以上の水平力が作用したためと考えられる。鋼製支承、水平反力分散支承を設置した解析モデルは、橋脚高さが低い P_1 、 P_4 橋脚基部で大きな履歴ループを示し、橋脚高さがやや高い P_2 、 P_3 橋脚基部では履歴ループが小さくなる傾向にある。

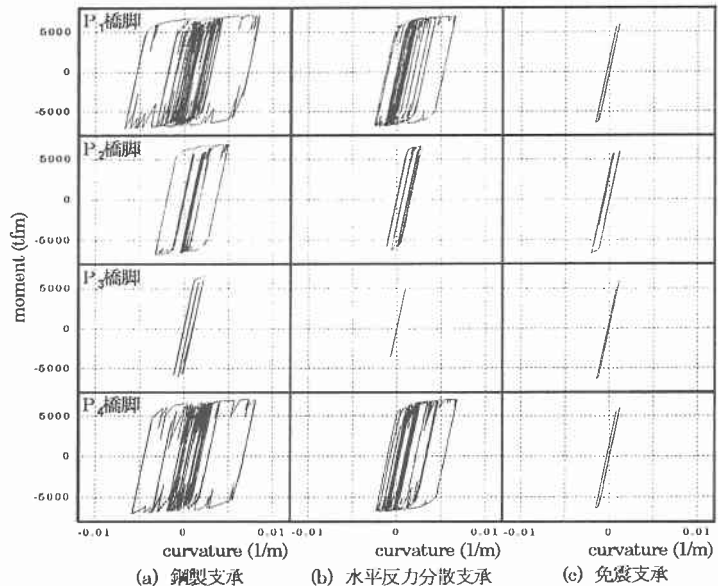
6. あとがき

本研究では、鋼製橋脚を持つ3径間連続高架橋を対象とし、橋脚高さや支承条件による違いが高架橋の動的非線形挙動に、どのような影響を与えるのかを比較・検討した。

橋脚高さが同じ場合は、鋼製支承を採用する際には特に移動制限装置の設計荷重、固定支承を有する橋脚の剛性を適切に決定する必要がある。水平反力分散支承、免震支承の場合はいずれの橋脚、支承部においても同様の挙動が見られる。一方、橋脚高さが異なる場合は、それぞれの橋脚の挙動が異なるため橋脚や支承部が負担する水平力に差が生じる。鋼製支承、水平反力分散支承を設置すると、橋脚高さが低い橋脚には、橋脚高さが高い橋脚よりも支承部お



図一9 橋脚高さが同じ高架橋



図一10 橋脚高さが異なる高架橋

よび基部に大きな地震力が作用する。また免震支承の場合、支承部が負担する水平力は、鋼製支承、水平反力分散支承の場合と同じ様な傾向を示すが、橋脚基部が受ける地震力は免震効果により一様に低減される。

[参考文献]

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅱ鋼橋編、Ⅴ耐震設計編、1996. 12.
- 2) 中島章典・大嶽敦郎・安波博道：上部構造の支承条件を考慮した高架橋の大地震時挙動に関する研究、鋼構造年次論文報告集、第4巻、pp. 9-16、1996. 11.
- 3) 林川俊郎・椋平剛史・小幡卓司・佐藤浩一：支承部の違いによる高架橋の大地震時挙動、土木学会北海道支部論文報告集、第53号(A)、pp106-109、1997. 2.