

支承部の違いによる高架橋の 大地震時非線形応答に関する研究

林川 俊郎¹・椋平 剛史²・大嶽 敦郎³・中島 章典⁴

¹正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻(060 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 工修 北海道室蘭土木現業所門別出張所(059-21 北海道沙流郡門別町字緑町41-64)

³学生会員 工学 北海道大学大学院 工学研究科修士課程(060 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科(321 栃木県宇都宮市石井町2753)

兵庫県南部地震では高架橋の支承部や橋脚等に多大の被害を受けた。規模の大きな地震が作用するとき、構造部材が局部的に非線形領域に入っても適切な靱性を保つことで構造物の損傷を最小限度に止め、同時に構造系全体としての崩壊を防止することが重要と考えられる。そこで、本研究は鋼製橋脚を持つ2径間連続高架橋を対象として、大地震時における高架橋の橋軸方向に対する支承部の影響を弾塑性有限変位時刻歴応答解析によって検討する。支承部には、①鋼製支承、②水平反力分散支承、③免震支承、④橋脚下部に免震支承を設置する構造形式を考え、支承部の違いによる高架橋の地震応答特性について考察する。

Key Words: viaduct, steel pier, bearing support, elasto-plastic finite displacement analysis,

1. まえがき

兵庫県南部地震では、高架橋の支承部や橋脚等に多大の被害を受けた。特に、鋼製支承を有する高架橋では支承自身の損傷に加えて、支承の損傷が2次的に上部構造や橋脚の損傷に影響した事例が数多く見られた。これに対して、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様の解説(案)」および昨年12月に改訂された道路橋補示方書によれば、耐震設計において動的解析による安全照査が設計段階で一般化され、移動方向が自由であるゴム支承、あるいは、それに加えてエネルギー吸収性能も兼ね備えた免震支承の使用が望ましいとされている。

このような観点から、支承部における支持条件の差異が高架橋の耐震性や損傷に及ぼす影響について検討する必要がある。また、既設高架橋の支承部の改良、落橋防止システムの改善、橋脚の変形性能の向上を図るためにも、上部構造、支承部および橋脚を含む高架橋全体構造系が大地震を受けた場合の動的応答性状を調べることは重要と考えられる¹⁾。

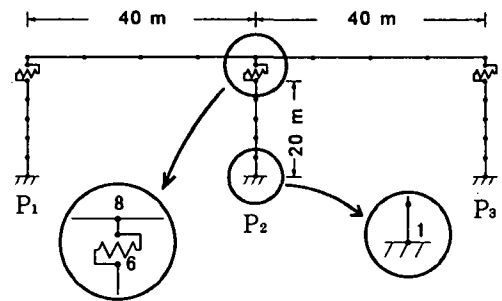
そこで本研究では、鋼製橋脚を持つ2径間連続高架橋を対象として、大地震時における高架橋システムの橋軸方向挙動に対する支承部の影響を、平面骨組のための弾塑性有限変位解析によって検討する。ここで支承部には、①鋼製支承、②水平反力分散支承、③免震支承を橋脚上部に設置、④免震支承を橋脚下部に設置する4つの異なる支承タイプを取り上げる。各支承タイプは、摩擦や移動制限装置の影響を考慮した非線形ばねにモデル化し、その支承部の差異が高架橋の動的応答性状に与え

る影響について考察する。

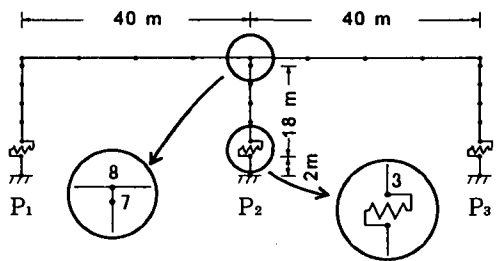
2. 解析モデル

(1) 上部構造、下部構造

本研究では、図-1に示すような支間長40m、橋脚高さ20mを持つ2径間連続高架橋を対象とした平面



(a) 解析モデル(支承:橋脚上部)



(b) 解析モデル(支承:橋脚下部)

図-1 高架橋の骨組寸法と解析モデル

骨組モデルを考える²⁾。図-1(a)は①鋼製支承②水平反力分散支承③免震支承を橋脚と上部構造の間に設置する場合であり、図-1(b)は④免震支承を橋脚の下部に設置する場合の解析モデルである。上部構造は、鋼主桁4本と鉄筋コンクリート床版から成る合成桁を考え、解析においては断面積及び断面2次モーメントを鋼に換算し、同等の総重量を持つ箱形断面にモデル化する。橋脚は鋼製の正方形箱形断面とし、P₂橋脚の断面幅を2m、板厚を0.05m、P₁橋脚の断面幅を2m、板厚を0.025mとした。本来、橋脚の設計は支承条件によっても異なるが、ここでは支承部を変化させたときの動的応答に関して比較、検討を行うことを目的としているので、同一の構造を用いるものとする。弾塑性地震応答解析に際しては、図-1に示される橋脚下端（節点番号1）の曲げモーメントの履歴特性、支承部の上下端（節点番号6、8）の時刻歴応答変位、及び支承部における水平力の履歴特性等に注目する。

(2) 支承部

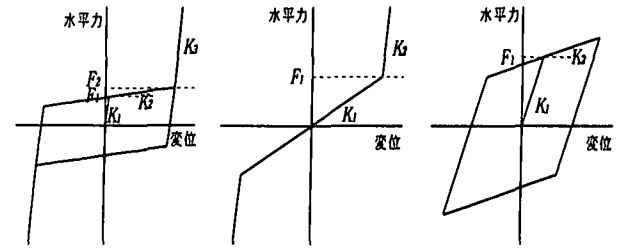
支承部の摩擦や移動制限装置、水平力-変位の非線形履歴の影響を考慮するために、異なる3種類の支承部は図-2に示すような非線形ばねにモデル化し、高架橋全体構造系の解析モデルに取り入れることとする。

①鋼製支承（図-2(a)）はP₂橋脚を固定支承（ヒンジ）、P₁橋脚を可動支承（ローラー）とする。固定支承は橋脚と上部構造が一体となって挙動するので、十分に大きなばね定数とする。可動支承は鉛直反力によって摩擦力を生じ、最大摩擦力を越えると滑り始め、移動制限装置に衝突後橋脚と一体となって挙動する。②水平反力分散支承（図-2(b)）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ゴム支承である。上部構造による支点反力に対する設計条件を満足し、P₁及びP₂橋脚に作用する地震力が1:2となるようにばね定数を設定し、移動制限量を34mmとした。③免震支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承とし、水平力-変位関係は図-2(c)に示すようなバイリニア型と仮定する。道路橋の免震設計法マニュアル(案)³⁾より、震度法及び地震時保有水平耐力法レベルにおいて支承に作用する設計荷重を求め、仮定した支承の設計変位を満足するように諸値を表-1のように設定した。

3. 動的応答解析

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弾塑性有限変位解析を基本とし、Newmarkの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法によって収束計算を行う。また、桁や橋脚に用いる鋼材において、応力-ひずみ関係がバイリニア型になるものと仮定し、ヤング率を $2.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$ 、降伏応力を 24000 tf/m^2 、ひずみ硬化率を1%とした。

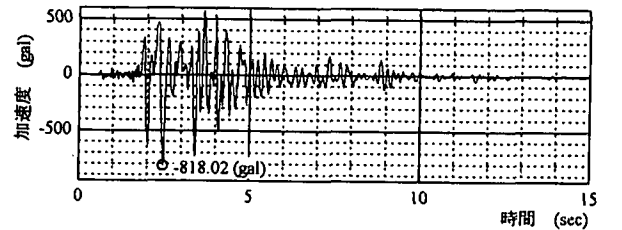
4. 数値計算結果



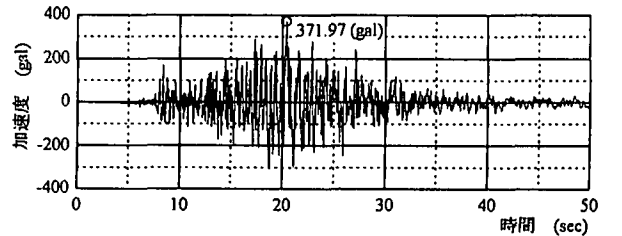
(a) 鋼製支承 (b) 水平反力分散支承 (c) 免震支承
図-2 支承部モデル(水平力-変位)

表-1 支承部の諸元

	鋼製支承		水平反力分散支承		免震支承	
	P ₂ 橋脚	P ₁ , P ₃ 橋脚	P ₂ 橋脚	P ₁ , P ₃ 橋脚	P ₂ 橋脚	P ₁ , P ₃ 橋脚
K ₁ (tf/m)	1.8×10^8	5.0×10^3	1625	740	2959.48	1025.12
K ₂ (tf/m)	-	1.0	6.0×10^4	6.0×10^4	660.17	170.53
K ₃ (tf/m)	-	6.0×10^4	-	-	-	-
F ₁ (tf)	-	5.625	55.25	25.16	58.04	25.27
F ₂ (tf)	-	5.7239	-	-	-	-



(a) 兵庫県南部地震(神戸海洋気象台、N-S成分)



(b) 釧路沖地震(大楽毛橋、橋軸方向)

図-3 入力地震波形

(1) 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の一例として、図-3(a)に示す神戸海洋気象台において観測された兵庫県南部地震(N-S方向)と、図-3(b)に示す大楽毛橋において観測された釧路沖地震(橋軸方向)を取り上げる。兵庫県南部地震は直下型の地震であり、主要動の継続時間が十数秒と短く、比較的2Hz~6Hzの高周波成分が多く含まれている。また、釧路沖地震はプレート内の地震で、主要動の継続時間が数十秒と長く、0.85Hz~2Hzの振動数が卓越している。これは本研究で用いた解析モデルの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、後者の入力地震波による結果のみを示すこととする。

(2) 固有振動数

動的応答解析に先立ち、各タイプの支承を設置した構造系の固有値解析を行った。その結果、得られた水平1次の固有周期及び固有振動数を表-2に示す。鋼製支承を設置した場合の固有周期1.135秒に比して、水平反力分散支承及び免震支承を導入することにより長周期化していることがわかる。支承部を剛結としたラーメン構造の固有周期及び固有振動数も比較のために表-2に示す。

表-2 固有周期と固有振動数

	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)
ラーメン構造	0.514	1.946
鋼製支承	1.135	0.881
水平反力分散支承	1.187	0.842
免震支承	1.595	0.627
免震支承(橋脚下部)	1.773	0.564

(3) 時刻歴応答変位

釧路沖地震を入力地震波とした場合の時刻歴応答変位曲線を図-4に示す。図-4(a)、(b)、(c)の上段は支承上部(節点番号8)における応答変位、下段は支承下部(節点番号6)の応答変位であり、図-4(d)の上段は上部構造中央(節点番号8)における応答変位、下段はP₂橋脚支承上部(節点番号3)における応答変位である。免震支承を有する高架橋の支承上部における最大応答変位は、他の支承タイプに比較してやや大きな値を得ている。しかし、支承下部の最大応答変位は免震支承を設置することにより、著しく減少していることがわかる。また、免震支承を橋脚下部に設置した場合も、上部に設置した場合と同様の傾向が認められ、橋脚の曲げ変形とともに支承部に残留変位を生じていることがわかる。

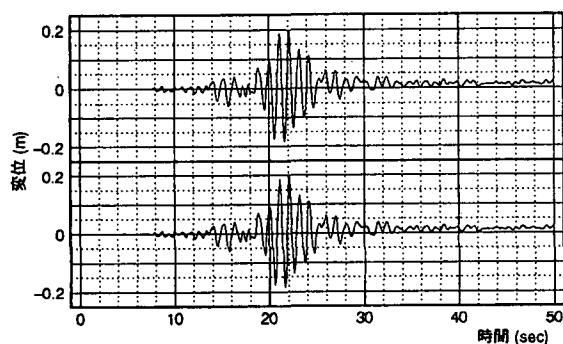
(4) P₂橋脚下端の曲げモーメントと曲率

同じく釧路沖地震を入力地震波とした場合の曲げモーメントー曲率関係を図-5に示す。図-5(a)、(b)、(c)はP₂橋脚下端(節点番号1)、図-5(d)はP₂

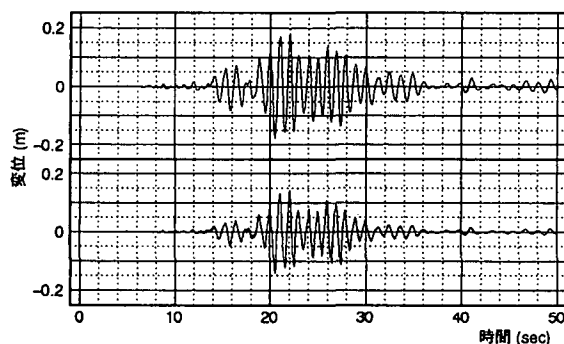
橋脚上端(節点番号7)の曲げモーメントー曲率関係である。解析モデルに用いたP₂橋脚の降伏モーメントは5936tf・mである。鋼製支承を設置した高架橋は図-5(a)に示すように塑性域に達している様子がわかる。水平反力分散支承を設置した場合には橋脚下端において若干降伏していることが認められる。一方、免震支承を設置した場合、橋脚は常に弾性域を保ち続けていることが理解できる。

(5) 支承部の水平力と変位

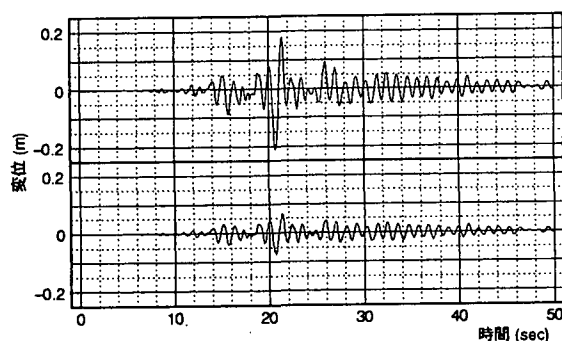
同様に釧路沖地震を入力地震波とした場合の支承部における水平力ー変位関係を図-6に示す。ここでいう支承の変位とは、支承上下での相対変位を指す。上段はP₂橋脚の支承部、下段はP₁橋脚の支承部における水平力ー変位関係である。P₁橋脚の鋼製支承(可動支承)や水平反力分散支承において、移動制限装置に衝突した後、非常に大きな水平力を生じている。免震支承においては履歴ループを描き、エネルギー吸収がなされていること



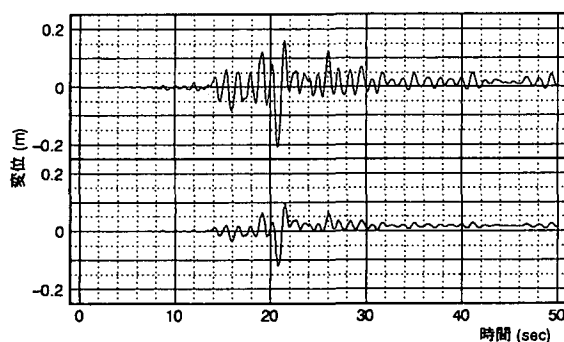
(a) 鋼製支承



(b) 水平反力分散支承

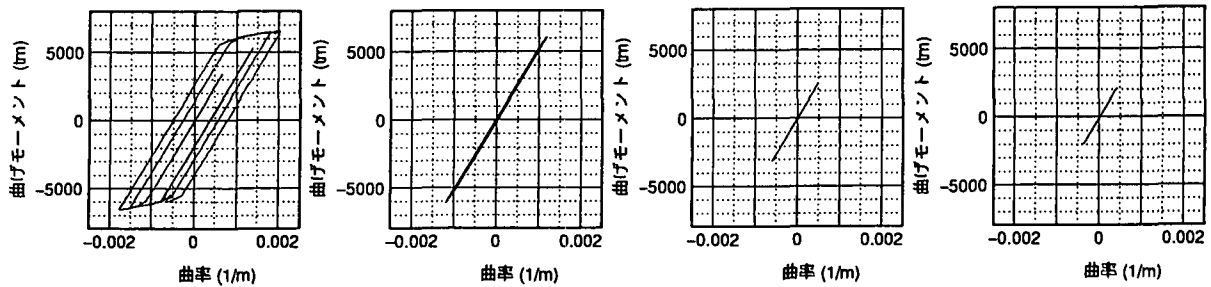


(c) 免震支承(橋脚上部)

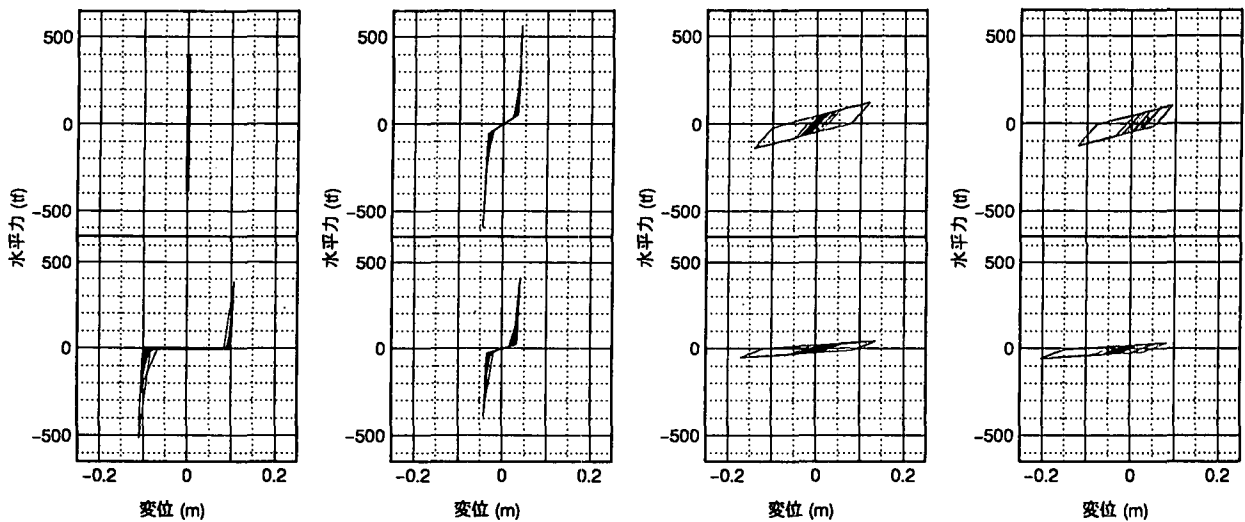


(d) 免震支承(橋脚下部)

図-4 応答変位(上段: 支承上部、下段: 支承下部)



(a) 鋼製支承 (b) 水平反力分散支承 (c) 免震支承(橋脚上部) (d) 免震支承(橋脚下部)
図-5 支承部の水平力と変位の関係(上段：中央橋脚、下段：左側橋脚)



(a) 鋼製支承 (b) 水平反力分散支承 (c) 免震支承(橋脚上部) (d) 免震支承(橋脚下部)
図-6 支承部の水平力と変位の関係(上段：中央橋脚、下段：左側橋脚)

がわかる。また、支承部における水平力は小さくなるものの、水平変位は他の支承よりも大きくなる傾向がある。

5. あとがき

本研究では、異なる支承条件を有する2径間連続高架橋の大地震時挙動について比較検討を行った。その結果、鋼製支承を用いた場合、橋脚下端において塑性が発達し残留変位を生ずることが確認された。橋脚の塑性化を抑制するのに水平反力分散支承や免震支承を用いることは有効な手段であり、特に免震支承はエネルギー吸収能力も備えていることから有用であることが確認された。免震支承

を橋脚下部に設置した場合には、橋脚上部に免震支承を設置した場合よりも、支承部の応答変位が同程度かやや大きくなる傾向が見られた。

参考文献

- 1) 鋼構造委員会鋼構造動的極限性状研究小委員会：鋼構造物の弾塑性性状と耐震設計法，土木学会論文集，No. 489/I-27，pp. 1-16，1994. 4
- 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) 土木研究センター：道路橋の免震設計法マニュアル(案)，1992. 10

NON-LINEAR BEHAVIOR OF VIADUCT WITH DIFFERENT BEARING SUPPORTS UNDER GREAT EARTHQUAKE MOTION

Toshiro HAYASHIKAWA, Goshi MUKUHIRA, Atsuo OHTAKE and Akinori NAKAJIMA

In this study, the dynamic behavior of two-span continuous viaduct with different bearing supports of movable and fixed steel bearings, rubber bearings and seismic isolated bearings is investigated. A numerical example is presented for the evaluation of the dynamic response of structural viaduct systems with material and geometrical nonlinearities. As numerical results, it is seen that the viaduct with steel bearings has a tendency to produce residual displacements due to the plastic yielding of base end of piers. On the other hand, in the case of the rubber and seismic isolated bearings, the lateral earthquake force applied to the piers is found to become smaller.