

機能分離型支承を有する曲線格子高架橋の地震応答性状に関する研究

Study on Seismic Response of Curved Grillage Girder Viaduct with Integrated Sliding Bearings

北海道大学大学院工学院	学生員	○吉野 絢人 (Kento Yoshino)
北海道大学大学院工学研究院	F 会員	林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	松本 高志 (Takashi Matsumoto)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	何 興文 (Xingwen He)

1. まえがき

1995 年に発生した兵庫県南部地震により、交通および物流にかかわる重要な社会基盤構造物の 1 つである橋梁構造物の多数が被害を受け、橋脚や支承、桁に多くの損傷が見られた¹⁾。この地震のようなレベルⅡ地震動を受けた場合、個々の部材耐力のみで抵抗するには物理的、経済的に限界がある。その後改訂された道路橋示方書の耐震設計編²⁾に記述されているように、上部構造、支承、橋脚の各構造要素を 1 つの構造部材として捉え、高架橋の全体系が大地震を受けた場合の動的挙動を調べる必要がある。

支承部は高架橋の上部構造の荷重を下部構造へ伝達させる重要な部材であり、地震の振動エネルギーを吸収し地震力を低減させる働きもある。従来の高架橋では鋼製支承が数多く使われていたが、兵庫県南部地震以降、耐震性能向上を目的とした免震支承が広く採用されるようになった。免震支承を用いた免震構造では、橋梁の長周期化・高減衰化により地震力の低減が可能となったが³⁾、地盤条件や構造条件などから適用範囲が限定されることや、鋼製支承よりもコストが掛かるなどの問題がある。そのため、近年ではコスト縮減を目的とした機能分離型の支承構造として、鉛直荷重を支持するすべり支承と水平力を受け持つゴム支承を組み合わせた支承構造が注目されている⁴⁾。

そこで、本研究では3径間連続曲線格子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材料非線形性を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析を用いて3次元動的応答解析を行い、すべり支承とゴム支承の組み合わせが高架橋の地震応答に与える影響を比較検討する。具体的には、上部構造、支承部、橋脚基部の応答に注目して、その動的非線形挙動について考察する。

2. 解析モデル

本研究で対象とした橋梁は 3 径間連続曲線格子高架橋である。解析モデルと全体座標系(X-Y-Z 座標系)は図-1 に示すように設定する。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 62 要素に、橋脚を 7 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。

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)、幅員 15m、総重量約 8.82MN の曲線格子桁を使用する。橋脚は震度法および許容応力度設計法に基づき設計し、断面幅 2.4m、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する。橋脚の配置方向は各橋脚とも支承の設置方向を考慮し支承方向と同様にし、橋脚基礎は十分に剛である場合を考え固定とする。また、各橋脚を左側から P1、P2、P3、P4 とする。

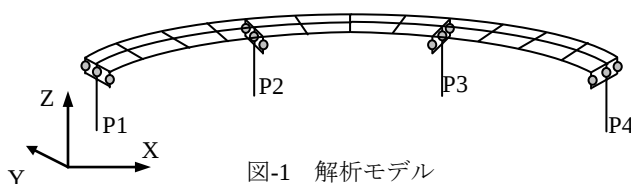


図-1 解析モデル

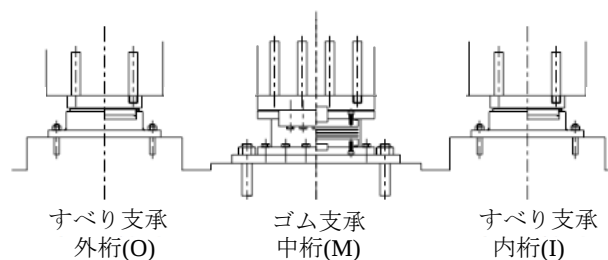


図-2 すべり支承とゴム支承の配置

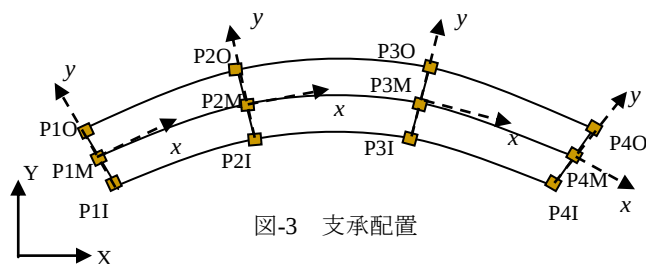


図-3 支承配置

2.2. 支承部

本研究で用いた機能分離型支承構造はすべり支承と免震ゴム支承から成るものであり、図-2 に示すように外桁(O)と内桁(I)にすべり支承、中桁(M)に免震ゴム支承を配置する。すべり支承は摩擦材料の摩擦係数により低摩擦すべり支承、中摩擦すべり支承、高摩擦すべり支承の3 種に分類され、本研究ではそれぞれを「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計マニュアル(案)」⁵⁾を参考に非線形ばね要素でモデル化する。免震ゴム支承は、大規模地震時にハードニングが生じるため⁶⁾、水平2 方向に関してはハードニングを考慮した非線形のばね要素特性を設定する。支承の配置方向については図-3 に示すように曲線桁の接線方向に支承を配置し、支承の接線方向をx 軸、その直角方向をy 軸とする局所座標系(x-y 座標系)を設定する。

支承モデルを図-4、支承条件を表-1、すべり支承特性を表-2、免震ゴム支承特性を表-3 に示す。免震ゴム支承のモデル化に関して、ハードニングを表現するため3 次勾配を設け、ハードニング開始ひずみを200%とする。また、1 次剛性と2 次剛性の比は一般的に用いられる6.5:1、3 次剛性と等価剛性の比は2.59:1 とし、ハードニング発生時の除荷勾配は1 次剛性と同一とする⁷⁾。

3. 解析方法・入力地震波

本研究では、幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮したはり柱要素の有限要素法と Newmark β 法($\beta=0.25$)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を3 次元的に拡張した解析方法を用いる。入力地震波には兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録を用いる。

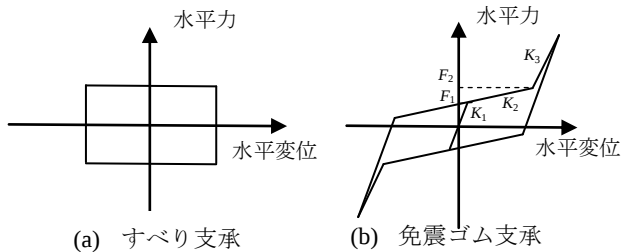


図-4 支承モデル

表-1 支承条件

	低	← ゴム剛性 →	高
低 ↑ すべり 摩擦係数 ↓ 高	L26-S12	L39-S12	L50-S12
	L26-S17	L39-S17	L50-S17
	L26-S21	L39-S21	L50-S21
	L26-S30	L39-S30	L50-S30
	L26-S39	L39-S39	L50-S39

4. 動的応答解析結果

4.1. 上部構造の応答

上部構造の応答について、P3 上部構造の時刻歴水平変位(X 方向)を図-5 に示す。グラフは表-1 と同順である。

支承部での剛性が高くなると変位が小さくなることがわかり、剛性が最も高い L50-S39 の最大変位は、剛性が最も低い L26-S12 の最大変位と比較し約 0.5 倍となっている。また、すべり支承 S12、S17 を用いた支承構造では比較的大きな変位が生じていることから、中摩擦すべり支承を組み合わせる際には、大きな水平変位に伴う桁端部の損傷などに注意が必要である。

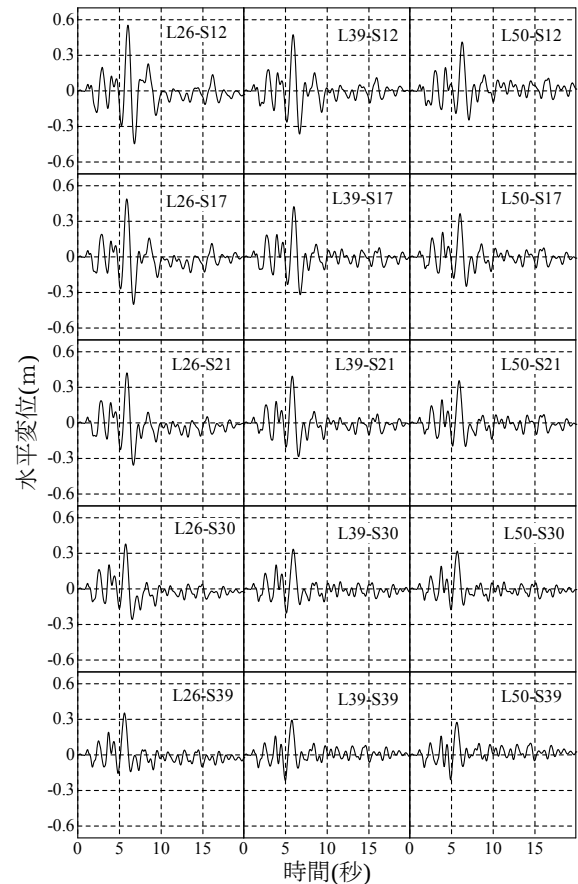


図-5 P3 上部構造 時刻歴水平変位

表-2 すべり支承特性

すべり支承	摩擦係数	分類
S12	0.12	中摩擦
S17	0.17	
S21	0.21	高摩擦
S30	0.30	
S39	0.39	

表-3 免震ゴム支承特性

免震ゴム支承	K_1 (MN/m)	K_2 (MN/m)	K_3 (MN/m)	F_1 (MN)	F_2 (MN)
L26	26.31	4.05	18.72	0.66	1.37
L39	39.20	6.03	27.89	0.98	2.04
L50	50.00	7.69	35.58	1.25	2.60

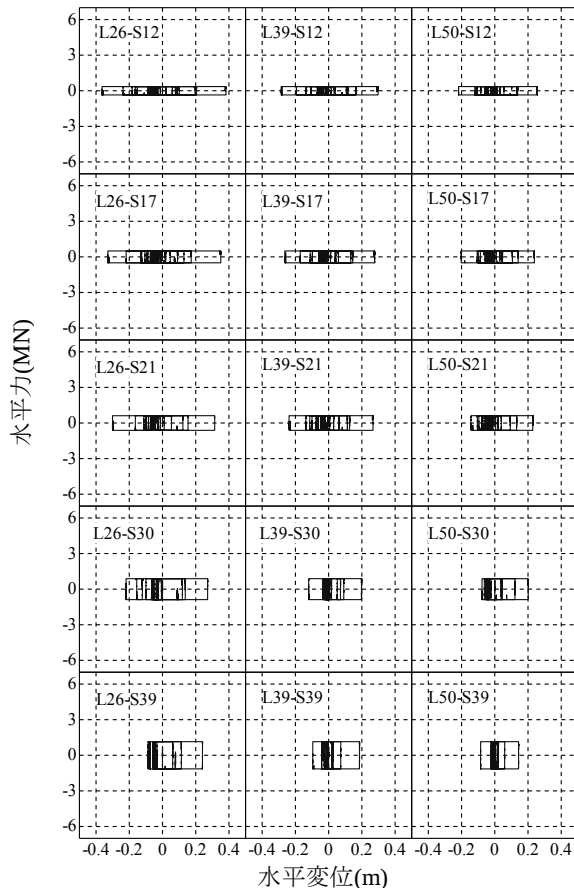


図-6 支承部 P3O 水平力-水平変位関係

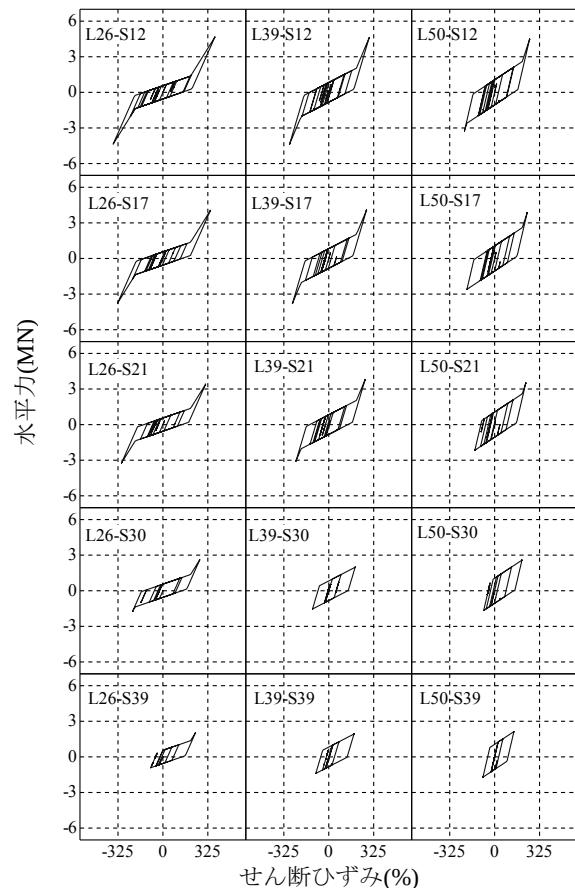


図-7 支承部 P3M 水平力-せん断ひずみ関係

4.2. 支承部の応答

支承部の応答について、すべり支承の水平力 - 水平変位関係(x 方向)を図-6、免震ゴム支承の水平力 - せん断ひずみ関係(x 方向)を図-7 に示す。グラフは表-1 と同順であり、いずれも橋脚 P3 上の支承の応答である。

すべり支承の応答に着目すると、すべり支承の摩擦係数が大きくなると水平力が大きくなり水平変位が小さくなることからわかる。これより、高摩擦すべり支承を用いると支承部での変位を抑える効果が期待できるが、水平力が過大にならないよう十分な検討が必要である。

免震ゴム支承の応答では、L26-S12 と L26-S17 のときせん断ひずみが 325%を超えており、ゴムが破断する可能性がある⁸⁾。S12、S17、S21 と組み合わせた際にはゴムのハードニングにより大きな水平力が生じているが、S30、S39 と組み合わせた免震ゴム支承の水平力は比較的小さく、L39、L50 に関してはゴムのハードニングが生じなかった。これは、すべり支承で生じる摩擦によって免震ゴム支承のせん断ひずみが抑えられたことによるものだと考えられる。よって、機能分離型の支承構造において免震ゴム支承を用いる際、支承部での水平力を抑えるためには高摩擦すべり支承と組み合わせることが効果的であると考えられる。また、免震ゴム支承について、

せん断ひずみがハードニング開始ひずみ 200%を超えると水平力の増大が顕著になることがわかる。L26 と L50 を比較すると、L26 は低剛性だがハードニングにより水平力が増大し、L50 は高剛性だがせん断ひずみが小さいため水平力の増大はわずかである。両者の最大水平力を比較すると、同程度のケースが多くみられることから、免震ゴム剛性の大小と応答水平力の大小が一致するとは限らない。大きなせん断ひずみに伴うゴム破断も考慮すると、高剛性の免震ゴム支承と高摩擦のすべり支承を組み合わせることが望ましいと考えられる。しかし、高剛性と高摩擦の組み合わせでは、両者の水平力を合計した支承部全体での水平力が大きくなる可能性があるため、橋脚基部に作用する曲げモーメントなど橋脚の応答には注意が必要である。

4.3. 橋脚の応答

橋脚の応答について、P3 橋脚基部に作用する曲げモーメント - 曲率関係(y 軸まわり)を図-8 に示す。グラフは表-1 と同順である。

ほぼ全ての組み合わせで曲げモーメントが降伏曲げモーメント $84.8 \text{ MN} \cdot \text{m}$ に到達しており橋脚が塑性化していることが確認できる。特に、S12 と S17 を用いた組み

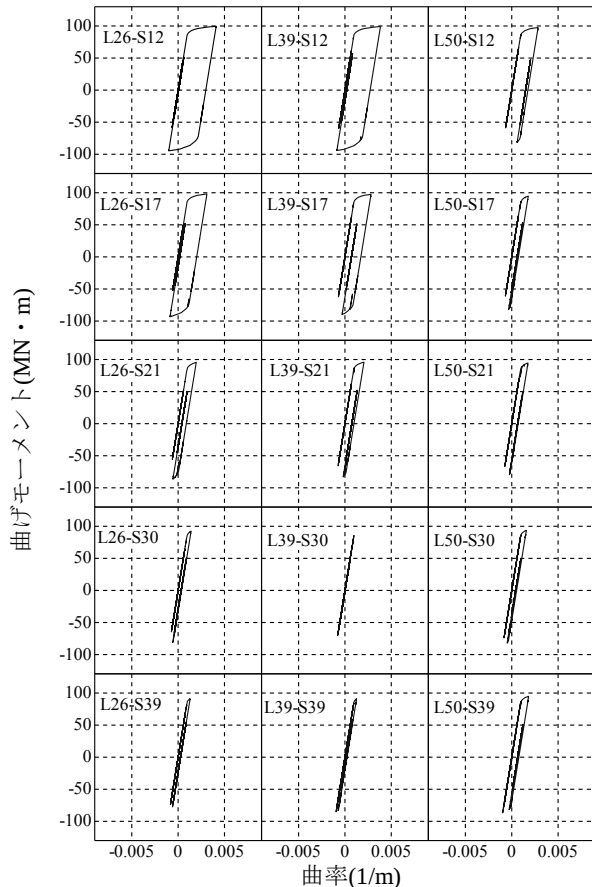


図-8 P3 橋脚基部 曲げモーメント-曲率関係

合わせでは比較的大きな履歴ループがみられ、他の組み合わせと比べ橋脚損傷の程度が大きいとえられる。S21、S30、S39 を用いた組み合わせでは L39-S30 を除く全てで橋脚の塑性化が確認できるが、履歴ループが比較的小さいことから橋脚損傷の程度は小さいとえられる。

橋脚基部に作用する曲げモーメントは支承部で生じる水平力に大きな影響を受ける。S12、S17 を用いた組み合わせでは免震ゴム支承のハードニングに伴う大きな水平力が生じたため、橋脚基部に作用する曲げモーメントも増大し橋脚の履歴ループが大きくなったとえられる。一方、高剛性と高摩擦の組み合わせでは支承部での水平力が抑えられたため履歴ループが小さくなり、L39-S30 では弾性域に留まる結果が得られた。しかし、より剛性の高い免震ゴム支承、より摩擦係数の高いすべり支承を用いた L50-S30、L39-S39、L50-S39 では再び橋脚の塑性化が生じている。これは、それぞれの支承部において免震ゴムのハードニングは生じていないが、変位、ひずみを抑えるために用いた高剛性免震ゴム支承と高摩擦すべり支承により、支承部全体での水平力が増大したためだと考えられる。これより、橋脚の損傷を防止するためには、個々の支承だけではなく支承部全体の応答にも注目した検討が必要である。

5. あとがき

本研究では、機能分離型支承を有する曲線格子高架橋の地震応答において、支承の組み合わせが与える影響の把握を目的とし、動的応答解析を実施し比較検討した。結論は以下のとおりである。

- 1) 比較的剛性の低い免震ゴム支承と中摩擦すべり支承の組み合わせは、桁端損傷や免震ゴムの破断、橋脚損傷などの可能性が大きくなるため、実用には好ましくない組み合わせである。
- 2) 高摩擦すべり支承を用いた組み合わせは、上部構造の応答変位や免震ゴムのせん断ひずみを抑え、橋脚損傷などを抑制する効果が期待できる。
- 3) 高摩擦すべり支承を組み合わせる際、高剛性の免震ゴム支承を用いることで上部構造の応答変位をより抑えることができるが、支承部の水平力が増大し橋脚が塑性化する可能性がある。
- 4) 支承部の応答を検討する際は、すべり支承と免震ゴム支承を個々にみるだけでなく、支承部全体の応答にも注目する必要がある。
- 5) 高剛性免震ゴム支承と高摩擦すべり支承の組み合わせにおいて、それぞれ単に剛性、摩擦係数が高いものを採用するのではなく、支承部全体での水平力が小さくなるようバランスよく組み合わせる必要がある。

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、第1章橋梁、丸善、1996.12.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編、2002.
- 3) 高橋良和ら：滑り型免震支承の軸力変動が連続桁橋の地震応答に及ぼす影響、第26回地震工学研究発表会講演論文集、pp1077-1080、2001.8.
- 4) 土木学会：道路橋支承部の改善と維持管理技術、第2章支承の変遷、丸善、2003.5.
- 5) (独)土木研究所耐震研究グループほか：すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計マニュアル(案)、2006.10.
- 6) 足立幸郎ら：免震支承のハードニング特性に着目した免震支承と橋脚に塑性化が生じる免震橋梁の地震応答性状に関する研究、構造工学論文集 Vol. 47A、pp905-916、2001.3.
- 7) 足立幸郎ら：免震支承の等価剛性および等価減衰定数のばらつきが免震橋梁の地震応答特性に及ぼす影響、第4回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム公演論文集、pp455-462、2002.12.
- 8) 森下宣明ら：都市内高架橋に用いる支承の動的特性実験とその応用、橋梁と基礎、pp39-46、2002.3.