

隣接桁の影響を考慮した高架橋システムの 大地震時応答性状について

中島章典¹・庄司泰啓²・安波博道³

¹正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科建設工学コース (〒321 宇都宮市石井町 2753)

²学生員 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

³正会員 工修 新日本製鐵(株) 建材開発技術部 (〒100-71 東京都千代田区大手町 2-6-3)

1. はじめに

1995年1月の兵庫県南部地震を契機として、高架橋の耐震設計に際しては、高架橋の各構造要素が必要な強度を満足するだけでなく、高架橋のシステムとしての挙動を考慮することの必要性が指摘されて^{1),2),3)}、この点に着目した研究も盛んに行われるようになってきている⁴⁾。また、兵庫県南部地震時には、上部構造同士の衝突が高架橋の大きな損傷を起こしたと考えられる例もあり¹⁾、この点から、高架橋の耐震性状を把握するためには、各構造要素の組み合わせを考慮したシステムとしての挙動に加えて、桁の衝突等を含む隣接した高架橋の相互作用をも考慮したシステムとしての耐震性状を把握する必要があると考えられてきている^{5),6)}。

そこで本研究では、高架橋の支承条件の差異、落橋防止装置、桁の衝突および橋脚の非線形性を考慮した高架橋システムに、隣接高架橋の影響を簡易に考慮できる解析モデルを考案し、これを用いて弾塑性地震応答解析を行って、多径間高架橋システムの橋軸方向大地震時挙動を検討した⁷⁾。ただし、ここでは、可動支承の移動制限装置や落橋防止装置は平成2年度の道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編⁸⁾に基づいて設計されている既設の高架橋システムを対象とした。

2. 解析モデル

本研究では、図-1に示すような単純桁が多径間連続した高架橋の一部(破線で囲まれた部分)を対象とし、図-2に示すように、隣接径間の中央で切断した上部構造両端部を相互に剛な水平ばねで連結して、多径間の高架橋の耐震挙動を模擬することとした。このような解析モデルを用いることにより、地震時には、 P_1 橋脚および P_2 橋脚とそれぞれの上部構造の挙動が左右から相互に影響することになり、隣接桁の影響を簡易に模擬することができると考えられる。

さらに、高架橋システムの各部分を次のようにモデル化する。

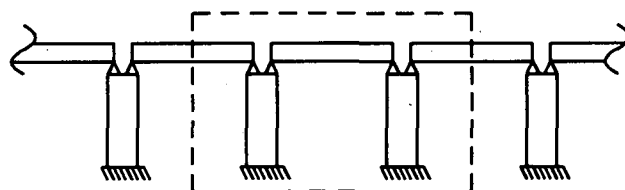


図-1 多径間高架橋

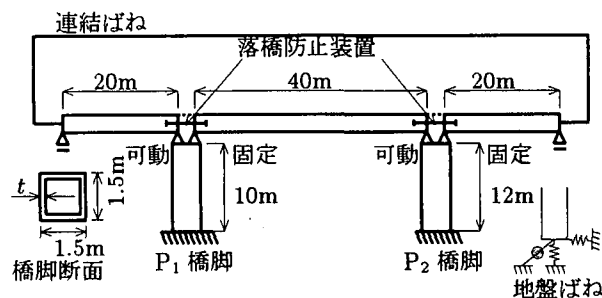


図-2 高架橋システムの解析モデル

(1) 上部構造・橋脚

解析に用いた高架橋システムの有限要素解析に際しては、橋脚(要素分割数10, 12)および上部構造(1スパン要素分割数4)をはり柱要素にモデル化した。

橋脚は鋼製橋脚で、図-2に示すように、 P_1 橋脚の高さを10m、 P_2 橋脚の高さを12mとした。それぞれの高さを持つ橋脚断面は、震度法(設計水平震度0.2)と許容応力度法に基づき P_1 および P_2 橋脚断面の板厚を3cmおよび3.5cmとした^{8),9)}。上部構造は、断面2次モーメントと総重量が等価な鋼断面に換算してモデル化し、上部構造の1スパン40mの重量を2.94MNとした。つまり、2本の橋脚には、それぞれ2.94MNの支点反力が作用することになる。

桁端と支承の間には桁高の影響を考慮し、また、橋脚断面の中心から支承の中心までの距離を考慮して、それぞれ図-3のようなオフセット部材を配置した。

(2) 支承

支承は鋼製の可動支承と固定支承、ゴム支承あるいは免震支承を有する場合を対象とし、1つの支承を水平、鉛直、回転の3方向のばね要素にモデル化した。そ

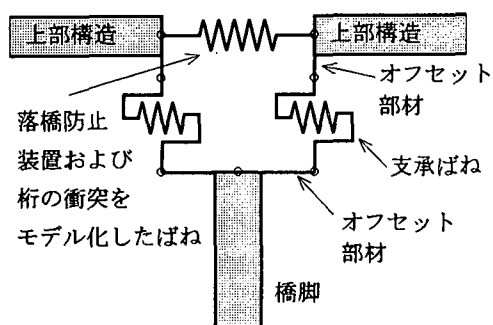


図-3 橋脚天端付近のモデル化の詳細

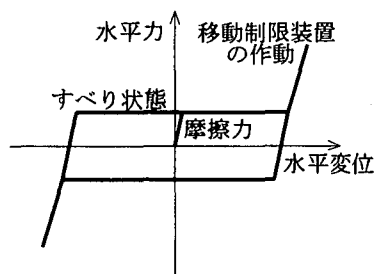


図-4 鋼製可動支承モデル

して、水平方向のばね特性により、可動支承、固定支承、ゴム支承および免震支承を模擬している。

可動支承をモデル化する場合の水平方向ばねには移動制限等を考慮した図-4に示すような復元力特性を仮定した。その復元力特性のうち、最大摩擦力以下のばね定数、すべりの状態のばね定数および移動制限装置に到達後のばね定数を、それぞれ、 49MN/m 、 9.8kN/m 、 9.8MN/m とした⁵⁾。ここで用いた可動支承は、移動制限装置としてサイドブロックを有する密閉ゴム支承板支承タイプと考えた。同タイプの可動支承が移動制限装置に接触してからのばね定数は、最近の実験研究によれば、可動支承4基分として約 98MN/m であると報告されている¹⁰⁾。しかし本研究では、可動支承が移動制限装置に到達後、落橋防止装置の作動や桁の衝突が起こること考えて、そのばね定数として 9.8MN/m を用い、移動制限量は 5cm とした。ただし、固定支承の水平ばねは弾性ばねとし、そのばね定数を 980GN/m とした。その他の鉛直、回転ばねのばね定数は文献5)と同じ値としている。

ゴム支承を表す水平ばねも弾性ばねとし、ばね定数は同じ大きさの地震力が作用した場合に両方の橋脚上の上部構造変位が同じ大きさになる条件より、 P_1 橋脚上のばね定数を 9.8MN/m 、 P_2 橋脚上のばね定数を 11.2MN/m とした。

一方、免震支承を表す水平ばねは一般的なバイリニア型の復元力特性を有するものとし、 P_1 および P_2 橋脚とも、1次剛性は 9.8MN/m 、2次剛性は 2.94MN/m 、降伏変位を 3cm と仮定した。

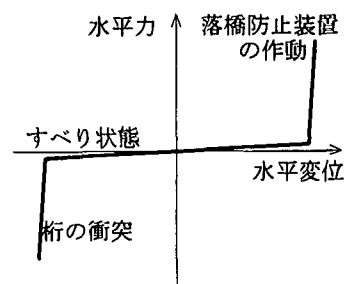


図-5 落橋防止装置と桁の衝突のモデル

(3) 地盤ばね

基礎地盤の影響は水平、鉛直、回転の3方向のばね要素を用いることによって考慮したが、ここでは、基礎の耐力が橋脚の耐力よりも十分大きいものと考え、地盤ばねはすべて弾性ばねとした。各地盤ばね定数は、道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁸⁾を参考にして、水平方向、鉛直方向、回転方向に対してそれぞれ 2.38GN/m 、 7.13GN/m 、 59.4GNm の値を用いた。

(4) 落橋防止装置および桁の衝突

本研究では、落橋防止装置および桁の衝突現象をモデル化するために、上部構造の桁端に図-2、図-3に示すように、水平、鉛直、回転の3方向のばね要素を取り付けた。このうち鉛直、回転方向のばねは弾性ばねとし、そのばね定数はそれぞれ 9.8kN/m 、 9.8kNm とした。水平方向のばねには図-5に示すように、圧縮側の剛性変化で桁の衝突を、引張側の剛性変化で落橋防止装置の作動を考慮した。ここでは、すべりの状態のばね定数を 9.8kN/m 、落橋防止装置の作動および桁の衝突後のばね定数を 588MN/m とし、落橋防止装置の作動および桁の衝突は相対変位が 6cm で起こるものとした。

3. 解析方法および入力地震波

ここでは、材料非線形性および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、ニューマークの β 法($\beta=1/4$)および修正ニュートンラフソン法を併用した平面骨組のための弾塑性地震応答解析プログラムを用いている。鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、減衰としては、1次固有振動モードに対する減衰定数が2%となるような質量比例型の減衰マトリックスを採用した。解析方法の詳細は文献10)を参照されたい。

入力地震波は、兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台観測記録のN-S成分を使用し、これを解析モデルの橋軸方向に作用させた。

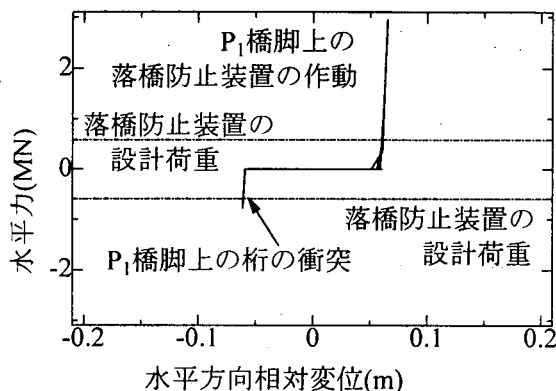


図-6-a 落橋防止装置および桁の衝突のばねの水平力-水平方向相対変位関係 (P₁橋脚)

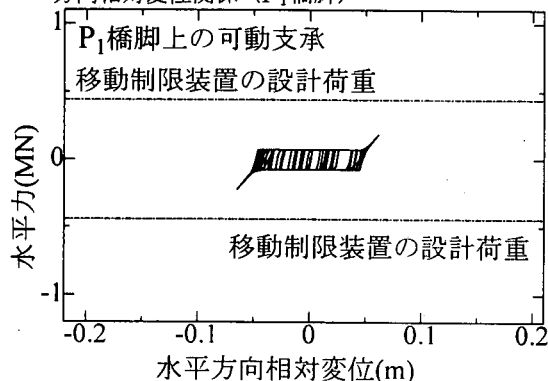


図-6-b 可動支承の水平力-水平方向相対変位関係 (P₁橋脚)

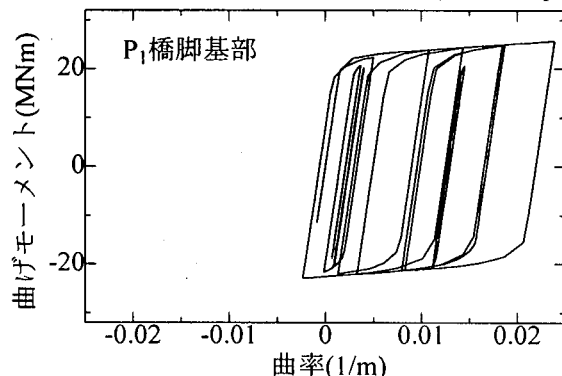


図-6-c P₁橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係

図-6 鋼製の可動・固定支承をもつ場合

4. 解析結果

地震応答解析に先立って、高架橋モデルが鋼製の可動と固定支承をもつ場合、ゴム支承をもつ場合および免震支承をもつ場合のそれぞれについて固有値解析を行った結果、それぞれの1次固有周期は、0.709, 0.988, 1.005秒となった。ただし、可動支承および落橋防止装置あるいは桁の衝突を表す水平ばねにはすべり状態のばね定数を、免震支承には1次剛性を適用している。

以下には、橋脚の非線形挙動に加えて、支承条件の差異、落橋防止装置の作動と桁の衝突の影響を考慮した高架橋システムの神戸海洋気象台観測記録のN-S成分に対する地震応答解析結果を示す。

(1) 鋼製の可動・固定支承をもつ場合

図-2に示す高架橋モデルの桁が鋼製の可動支承と固

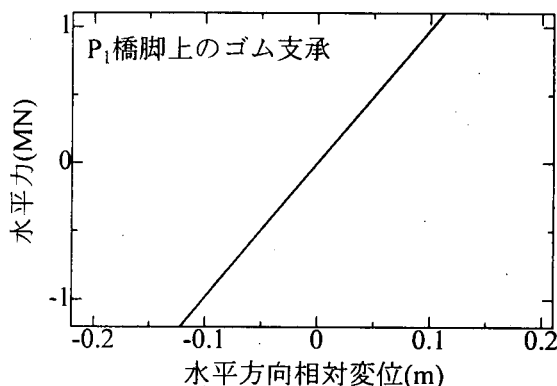


図-7-a ゴム支承の水平力-水平方向相対変位関係 (P₁橋脚)

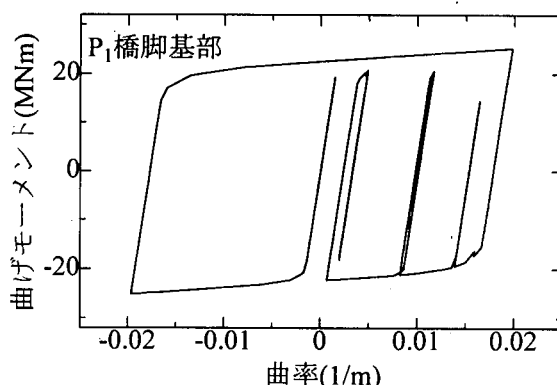


図-7-b P₁橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係

図-7 ゴム支承をもつ場合

定支承を持つ場合について、可動支承の摩擦や移動制限の影響および落橋防止装置の作動あるいは桁の衝突を考慮した場合の解析結果を図-6に示す。図-6-aはP₁橋脚上の落橋防止装置および桁の衝突をモデル化したばねの水平力と水平方向相対変位の関係を、縦軸にばねに作用する水平力を、横軸にそのばねの水平方向相対変位をとって示している。また、図-6-bはP₁橋脚上の可動支承に作用する水平力と水平方向相対変位の関係を、縦軸には可動支承に作用する水平力を、横軸には可動支承の水平方向相対変位をとって示している。図-6-aおよび図-6-bから、このモデルでは、落橋防止装置の作動あるいは桁の衝突や可動支承の移動制限装置が作動していることがわかる。ただし、この解析例では、可動支承に作用する水平力はあまり大きくならないが、落橋防止装置に作用する引張力は平成2年度の道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁸⁾に規定される落橋防止装置の設計荷重よりも大きく、落橋防止装置が破壊する可能性を示唆している。また、図-6-cはP₁橋脚基部の曲げモーメントと曲率の関係を示しているが、この場合橋脚基部は大きく塑性化していることがわかる。

(2) ゴム支承をもつ場合

高架橋の支承がすべてゴム支承である場合の結果を図-7に示す。ここでは、両方の橋脚に同じ大きさの地震力が作用した場合に、両方の橋脚上の上部構造の変位が同じ大きさとなるようにゴム支承のばね定数を仮

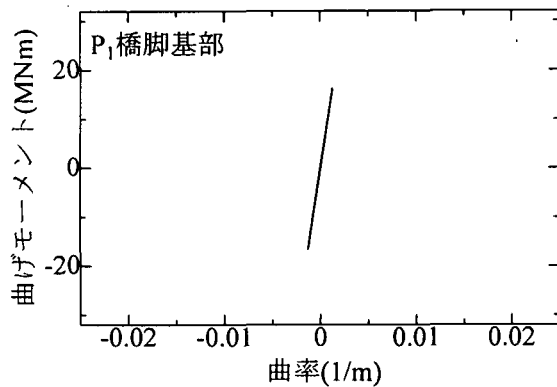


図-8-a P_1 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係

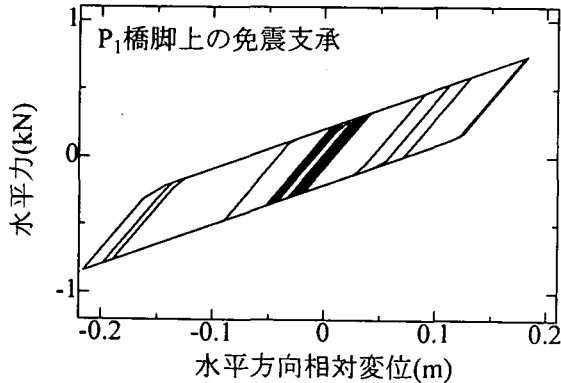


図-8-b 免震支承の水平力-水平方向相対変位関係 (P_1 橋脚)

図-8 免震支承をもつ場合

定している。

図-7-a は P_1 橋脚上の 1 つのゴム支承に作用する水平力と水平方向相対変位の関係を、縦軸にはゴム支承に作用する水平力を、横軸にはゴム支承の水平方向相対変位をとって示している。この図から、ゴム支承に作用する水平力は比較的大きいことがわかり、結果的に橋脚に作用する水平力が大きいので、図-7-b に示す P_1 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係においてもわかるように橋脚基部は大きく塑性化している。以上のことは、ここで用いた高架橋モデルがゴム支承を有する場合には、橋脚に作用する地震力が必ずしも小さくならないことを示している。ただし、この場合には落橋防止装置の作動や桁の衝突は起こっていない。

(3) 免震支承をもつ場合

高架橋モデルが免震支承をもつ場合の結果を図-8 に示す。ここでは、免震支承の効果を概念的に示す観点から、両方の橋脚上にまったく同じ復元力特性を有する免震支承を仮定した。

図-8-a および図-8-b には、それぞれ P_1 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係および免震支承に作用する水平力と水平方向相対変位の関係を示している。

図-8-a に示すように、この場合の橋脚基部はまったく塑性化していないことがわかる。これは、図-8-b に示す P_1 橋脚上の免震支承に作用する水平力と水平方向相対変位の関係からわかるように、免震支承が地震による入力エネルギーの一部を吸収するためであり、こ

れが免震支承の効果である。この場合も、落橋防止装置の作動や桁の衝突は起こっていない。以上のことから、改めて大地震に対する免震支承の効果が確認できる。

5. おわりに

本研究では、高架橋の支承条件の差異、落橋防止装置と桁の衝突、橋脚の非線形性を考慮した高架橋システムに、隣接高架橋の影響を簡易に考慮できる解析モデルを用い、高架橋システムの橋軸方向の大地震時挙動を検討した。その結果、鋼製の可動支承と固定支承をもつ場合には、可動支承の移動制限装置と落橋防止装置の作動あるいは桁の衝突が生じる桁間の相対変位の大きさによって、橋脚のみではなく、可動支承の移動制限装置あるいは落橋防止装置に大きな水平力が作用することになり、また、ゴム支承をもつ場合には、落橋防止装置の作動や桁の衝突は起こり難いが、橋脚に作用する地震力は必ずしも小さくならないことがわかった。これに対して、免震支承を有する場合には、落橋防止装置の作動あるいは桁の衝突も起こらず、しかも、橋脚に作用する地震力を低減できることが改めて確認された。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会鋼構造新技術小委員会：鋼構造物の安全性の調査報告—阪神大震災における鋼構造物の被害報告と今後の耐震設計について，土木学会，1995.5.
- 2) 北田俊行・加藤正晴他：阪神・淡路大震災における支承・伸縮継手・桁間連結装置の被害と今後の設計のあり方，土木学会，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.359-366，1996.1.
- 3) 日本道路協会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様および復旧仕様の解説（案），1995.6.
- 4) 例えば，庄司学・藤野陽三・阿部雅人：高架道路橋システムにおける地震時損傷配分の最適化の試み，土木学会論文集，No.563/I-39，pp.79-94，1997.4.
永田和寿・渡邊英一・杉浦邦征：基礎-構造物系の非線形動的相互作用に関する研究，構造工学論文集，Vol.42A，pp.593-602，1996.3.
- 5) 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.
- 6) 矢部正明・武村浩志・川島一彦：直橋および斜橋の桁間衝突とその影響，構造工学論文集，Vol.43A，pp.781-791，1997.3.
- 7) 中島章典・庄司泰啓・安波博道・小野寺理：簡易モデルを用いた多径間高架橋システムの大地震時応答解析，鋼構造年次論文報告集第5巻，pp.313-320，1997.11.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1990.2.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋編，1990.2.
- 10) 山本泰幹・森健太郎・谷中聡久・岩崎雅紀：支承の移動制限装置の設計法の提案，構造工学論文集，Vol.43A，pp.985-994，1997.3.
- 11) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，土木学会，pp.264-300，1996.7.