

多径間連続ダブルデッキラーメン高架橋の 免震化に関する検討

栗木 茂幸¹・大塚 久哲²・鈴木 泰之³・土田 貴之⁴

¹ 学生会員 九州大学大学院工学研究科 修士課程 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

² フェロー会員 工博 九州大学大学院教授 大学院工学研究科 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

³ 正会員 工修 株式会社 建設技術研究所 技術第四部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

⁴ 正会員 博(工) 株式会社 建設技術研究所 技術第四部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

従来の鋼ダブルデッキ形式橋梁は、上部構造と橋脚さらに基礎構造とを全て剛結合しているため、多径間の連続化が困難なことに加えて、大規模地震に対して主要部材や基礎構造が大規模化すること等により経済的な優位性が見出せない傾向にある。本論文では、橋脚基部に免震支承を配置した構造形式を提案するとともに、鋼多径間連続ダブルデッキラーメン高架橋を対象として3次元骨組モデルを用いた地震応答解析を実施し、従来の構造形式と比較することによって本構造の構造的・経済的な有用性を検討した。検討の結果、橋軸直角方向の地震動に対して、免震構造形式では従来構造形式に比べて主要部材の断面力が大幅に低減され、免震支承に作用する負反力は実用上差し支えない範囲に抑制できることが確認できた。

Key Words : *Steel Double Deck Rigid Frame Bridge, Base Isolation, 3-Dimensional Seismic Response Analysis, Tensile Reaction of Seismic Isolator*

1. はじめに

ダブルデッキ形式橋梁は、広幅員の道路を上下線に分割して2階建てにした構造形式であり、用地幅に制約を受ける架橋地点では有用な構造形式である。従来の鋼ダブルデッキ形式橋梁は、上部構造と橋脚とを剛結合したうえで、アンカーフレームによりフーチングとも固定していることから立体ラーメン構造となり、桁橋等と比べて橋全体の剛性が高くなる傾向にある。その結果、温度変化による応力度は増大し連続化が困難となる。また、大規模地震動による断面力はほぼ全ての主要部材で増大し、脆性的な破壊を防止するために断面を大きくする必要がある。このような背景から鋼ダブルデッキラーメン高架橋は、多径間を連続化した場合には経済的な優位性が見出せない傾向にある。以上の問題の解決策として、最近では免震構造の採用事例が増えつつある。

2. 研究の目的

著者らは、これまでに連続径間数が少ない4径間連続の鋼ダブルデッキラーメン高架橋を対象に、基礎的な動的特性を確認するとともに、免震支承の設置位置

やその特性あるいは経済的な側面から、免震化の有用性に関する研究を進めてきた。その結果、橋脚基部に配置した免震支承の最適特性や本構造形式の構造的・経済的優位性が明らかになりつつある¹⁾。また、阪神高速3号線弁天工区でも既に震災復旧として橋脚基部に免震支承を配置した構造形式が採用されている²⁾。この事例にもみられるように、本構造の特徴は、橋脚基部に設置された免震支承により、ほぼ全ての主要鋼部材は塑性化しない範囲で十分に経済的な断面が設計可能であることに加えて、基礎構造に対しても有利な耐震設計が可能になることである。さらに、温度変化による反力も免震支承のせん断変形によって吸収されることから主部材に過度な温度応力が作用せず多径間の連続化が可能となる。この断面構成や基礎寸法の縮小、あるいは連続化による支承や伸縮装置の減少によって橋全体としての経済性は向上する。このような免震化の優位性が認められる一方で、構造物の長周期化にともなう大規模地震時の水平変位は増大し、さらに橋脚基部に配置した免震支承には負反力が作用する問題が確認された。この負反力に対しては免震支承の等価剛性を小さくして発生する転倒モーメントを抑制し、実用上問題のない範囲に免震支承の負反力を低減できる可能性があることが確認できた³⁾⁴⁾⁵⁾。

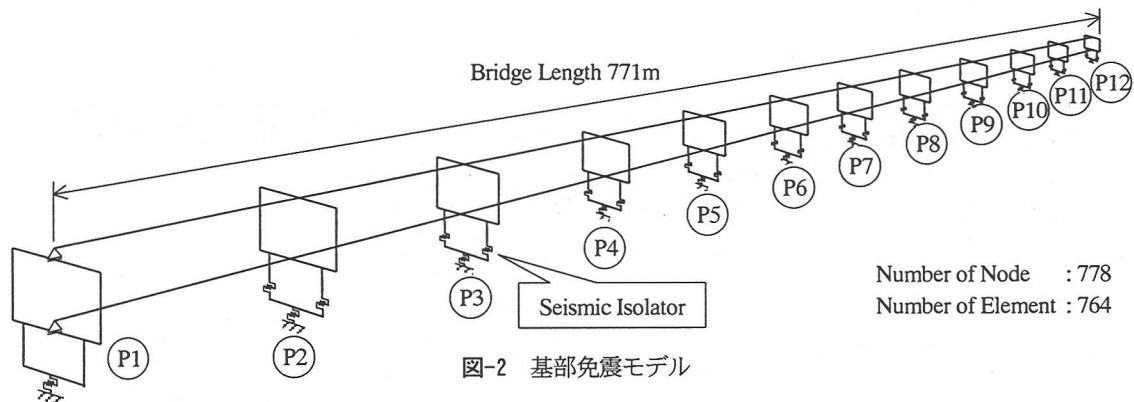


図-2 基部免震モデル

本論文では、これまでの研究で対象としてきた鋼 4 径間連続ダブルデッキ高架橋を 11 径間の連続橋に拡張し、橋軸直角方向の大規模地震に対して、橋脚基部に免震支承を配置した構造形式の構造的・経済的な優位性を確認することを目的とした。検討では橋脚基部に免震支承を配置した解析モデルと橋脚基部を固定とした解析モデルとを比較し、本構造の基本的な動的特性を把握するとともに、橋脚基部に配置した免震支承の負反力の発生状況を確認した。

3. 対象橋の概要

対象橋は、橋長 771m の鋼 11 径間連続ダブルデッキラーメン高架橋である。径間長は、概ね 70m であり交差条件等により若干のばらつきをもち非対称となっている。上部構造は、図-1 に示すように上下線とも幅員 11.15m の鋼箱桁である。それぞれの上部構造は、高さ 21.6~26.4m の下部構造の横梁に剛結合されている。従来の構造形式では、鋼製橋脚はアンカーフレームによって鉄筋コンクリートフーチングに剛結合されることが一般的であるが、本論文では、耐震性と連続化による構造的向上を目的として橋脚基部に免震支承を設置した新しい構造形式を提案する。

架橋地点の地盤条件は軟弱地盤であり、道路橋示方書 V⁶⁾ による耐震設計上の地盤種別はⅢ種地盤とした。また、基礎構造は杭長 60m 程度の鋼管杭基礎とした。

4. 解析手法

(1) 解析モデル

解析モデルは、図-2 に示すように節点数 778、部材数 764 の 3 次元骨組モデルである。橋脚基部の結合条件を剛結としたモデルと、橋脚基部に免震支承を配置したモデルを作成し、それぞれ基部固定モデル、基部免震モデルとした。

免震支承は LRB (鉛プラグ入積層ゴム支承) とし、水平方向にはバイリニア型の履歴特性をもつ非線形要素でモデル化した。また、免震支承の負反力の問題が予想されたため鉛直方向の非線形特性に関しても非線

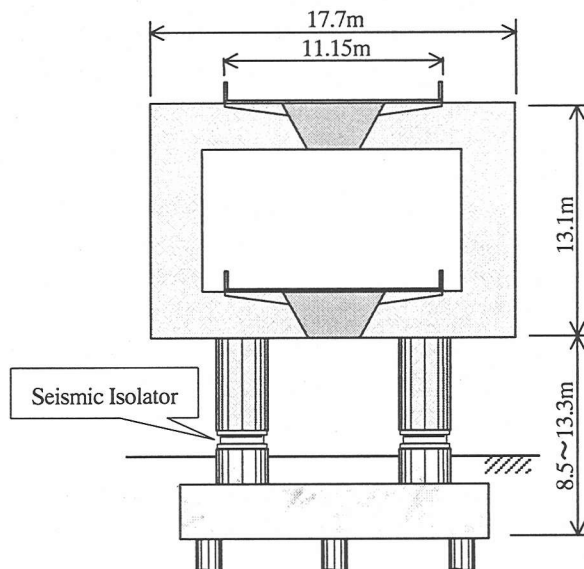
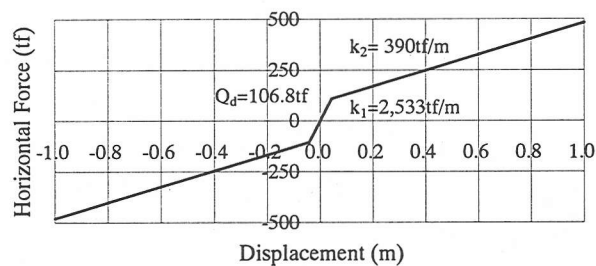
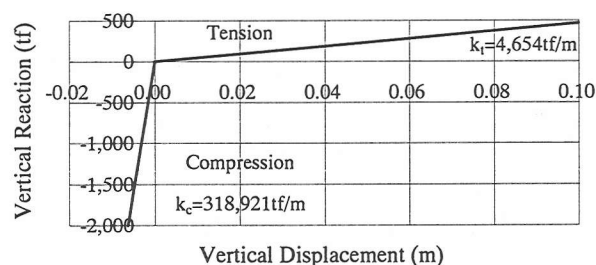


図-1 橋脚の構造概要



(1)水平方向



(2)鉛直方向

図-3 免震支承の特性

形弾性モデルとしてモデル化した。免震支承の水平方向および鉛直方向の特性を図-3 に示す。なお、本論文で採用した免震支承の特性は、文献 3)を参考に予め 4

表-1 橋軸直角方向の主要振動モード

解析モデル	モード次数	固有周期 (sec)	モード減衰定数 (%)	有効質量	有効質量比 (%)
基部免震モデル	2	2.35	2.03	622	41
	3	2.28	2.03	703	47
基部固定モデル	7	0.55	4.37	456	20
	9	0.50	10.20	517	28

径間連続橋の解析結果から得られた最適特性を考慮して、上部構造の転倒モーメントを抑制するために等価剛性を低くしたものを採用している。採用した免震支承の形状は直径 165cm（設計寸法）、ゴム総厚 40.8cm の円形の LRB である。ゴムのせん断弾性係数は 10kgf/cm²、鉛プラグの断面積は 1256.6cm²である。これらの免震支承を各橋脚の地表面付近に 1 基ずつ配置した。

上部構造の桁端部の境界条件は、鉛直方向と橋軸直角方向の変位および橋軸回りの回転のみを拘束しており、橋軸方向の変位とその他の回転については自由とした。鋼部材の断面定数は、両解析モデルとも橋脚基部に免震支承を配置した 11 径間連続橋として静的設計を行った結果に基づいて算定した値を採用した。大規模地震動が作用した場合には、鋼部材が塑性領域に達することが考えられるものの、両モデルとも鋼部材の塑性化の影響は考慮せず、本論文では弾性部材とみなして解析を行うこととした。各構造要素の減衰定数は鋼上部構造および橋脚は 2%、基礎構造は 20%である。また、基礎の境界条件には基礎の地盤バネを考慮した。

(2) 固有値解析

対象橋梁の基本的な振動性状を把握するために固有値解析を実施した。橋軸直角方向に関する主要な結果を表-1 に整理する。なお、基部免震モデルの固有値解析では、免震支承の水平方向および鉛直方向のバネ定数は初期剛性を用いた。

基部免震モデルでは、1 次振動モードが橋軸方向の卓越振動である。橋軸直角方向に対しては、2 次と 3 次の振動モードが主要振動モードである。これらの固有周期は $T_2=2.35$ 秒、 $T_3=2.28$ 秒と接近している。2 次の振動モードは、けた端部の水平変位が拘束されたうえで橋梁の起点側約半分が橋軸直角方向に大きく変位する振動モードであり、3 次振動モードは同様に終点側が変位する振動モードである。両振動モードとも免震支承のせん断変形のみが卓越するものであり、それぞれの有効質量比は 41%、47%である。基部免震モデルでは、この 2 つの振動モードの寄与率が極めて大きいものであることがわかる。なお、本橋は非対称の径間割りであるため、単純桁の 1 次振動モードに類似するような橋梁中心付近が橋軸直角方向に大きく変位する振動モ

ードは顕在しなかった。

基部固定モデルでは、基部免震モデルと同様に橋全体として単純桁の 1 次振動モードのように変形する振動モードは顕在せず、橋梁の起点側約半分が橋軸直角方向に変位する 7 次振動モード、同様に終点側が変位する 9 次振動モードが支配的であった。しかしながら、それぞれの有効質量比は、僅かに 20%、28%であった。固有周期は、 $T_7=0.55$ 秒、 $T_9=0.50$ 秒である。基部免震モデルと比較すると基部固定モデルは高次振動モードの影響が大きいといえる。

(3) 地震応答解析

大規模地震に対する耐震性の検討にあたって、両モデルに対して橋軸直角方向の地震応答解析を行った。数値解析法は、地震による強制振動の運動方程式を直接積分して 2 階の連立微分方程式を解く Newmark β 法を用いた。積分間隔は 1/100 秒とした。減衰マトリックスは、固有値解析より算出した歪みエネルギー比例型減衰からレーリー減衰を定義することとした。

入力地震動は、道路橋示方書 V⁶⁾に規定される標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振幅調整されたⅢ種地盤用の標準地震動（タイプⅡ）のうち、TypeⅡ-Ⅲ-2（最大加速度：557.4cm/sec²）を使用した。

5. 解析結果および考察

解析の結果、基部免震モデルは、基部固定モデルと比較して主要部材の最大応答断面力は大幅に低減されることが確認された。図-4 は、橋脚上部の最大応答曲げモーメントの比較であるが、図-5 に示した上層上部構造重心での最大応答加速度分布の傾向とほぼ一致する。また、図-6 は、橋脚基部の最大応答軸力と免震支承の鉛直反力とを比較したものである。基部固定モデルでは、P2 橋脚基部に最大 2,580tf の引張軸力が作用していることを示している。この引張軸力は死荷重反力 760tf に対して 4 倍以上の変動量に相当している。これに対して、基部免震モデルでは、最も引張軸力が大きい P3 橋脚でも橋脚基部に配置される免震支承の負反力は 260tf である。この負反力は、免震支承の有効断面積 20,126cm² に対して応力度に換算すると 13kgf/cm² で程度であり、実用上問題のない範囲であるといえる。

また、免震支承を配置することによって主部材の断面力は低減する一方で、応答変位は大幅に増大することが確認された。図-7 に示す上層上部構造重心での最大応答変位は、基部固定モデルでは 20cm であり、P2 橋脚付近で発生している。一方、基部免震モデルでは P4 橋脚付近で 81cm である。同橋脚の免震支承のせん断変形は 67cm であり、上部構造重心と免震支承のせん断変形との差は 14cm である。これが転倒モーメントによる変形量に相当している。本論文で採用した免震支承の特性では、上部構造の回転による変位が抑制され、橋軸直角方向の水平変位はほぼ免震支承のせん断変形によって発生していることがわかる。このことは基部免震モデルにおける免震支承の鉛直反力の変動が小さいことと一致しており、免震支承の特性の選択が妥当であることを示している。

6. 結 論

本論文では、上部構造の重心位置が高く橋軸直角方向の地震動に対して転倒モーメントが作用しやすい鋼多径間連続ダブルデッキ高架橋に対して橋脚基部に免震支承を配置した構造形式を提案し、3 次元骨組モデルを用いた地震応答解析を行った。その結果、免震支承の負反力を実用上問題のない範囲に抑制しつつ大規模地震による慣性力を効果的に低減でき、経済的な鋼製部材断面や基礎形状の設計が可能であることが明らかになった。さらに、多径間の連続化が可能になったことによる走行性や維持管理性および経済性の向上が期待できる。

今後は、橋軸直角方向の過大な最大応答変位に関する対応策、免震支承の製作性を考慮するとともに、鉛直方向の地震動や鋼製部材の終局耐力を考慮した解析等を行う必要がある。

参考文献

- 1) J. Park, H. Otsuka, A. Komiya and Y. Suzuki: Dynamic Characteristics of Isolated Bridges Considering Different Location of Seismic Isolation, Journal of Structure Engineering, Vol.44A, pp.743~751,1998.3
- 2) 林 秀侃, 川北 司郎: 阪神高速 3 号線弁天工区の復旧事例, 橋梁と基礎, Vol.30, No.8, pp.48~56, 1996.8
- 3) 大塚 久哲, 栗木 茂幸, 朴 禎根, 鈴木 泰之, 土田 貴之: 鋼製ダブルデッキラーメン高架橋の免震化に関する考察, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.869~878, 1999.3
- 4) H. Otsuka, S. Kuriki, J. G. Park, Y. Suzuki and T. Tsuchida: Study on the Seismic Isolation of High-elevated Rigid Frame Bridge with Double Deck, Earthquake Resistant Engineering Structure, 1999.7
- 5) 栗木 茂幸, 大塚 久哲, 鈴木 泰之, 土田 貴之: 免震化した 11 径間連続鋼ダブルデッキラーメン橋の地震応答解析, 土木学会第 54 回年次学術講演会, 1999.9
- 6) 道路橋示方書, V 耐震設計編, 日本道路協会, 1996.12

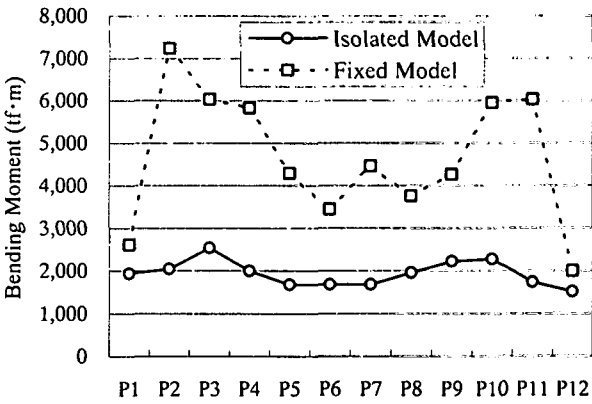


図-4 橋脚上部の最大応答曲げモーメントの比較

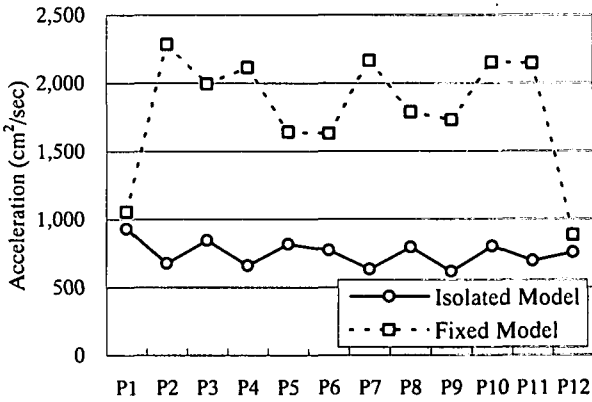


図-5 上層上部構造重心の最大応答加速度の比較

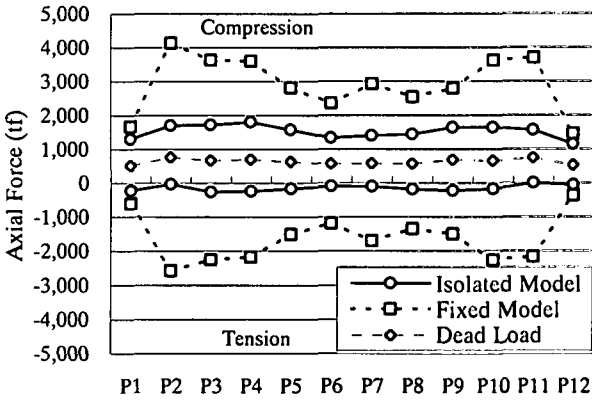


図-6 橋脚基部および免震支承の最大応答軸力の比較

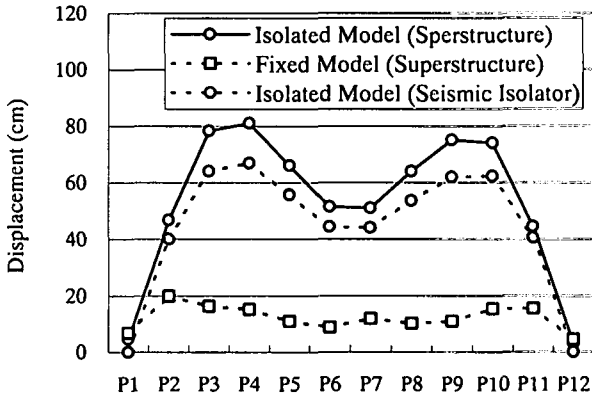


図-7 上層上部構造重心の最大応答変位の比較