

特集：道路橋保全の新たな取組み ～臨床研究を中心として～

2009年静岡県駿河湾地震による免震橋の地震応答とその分析

崔 準祐* 星隈順一** 張 広鋒***

1. はじめに

近い将来に発生が懸念されている首都直下地震や東海地震等の大規模地震により、現在の耐震設計レベルを超える地震動や長周期地震動の発生が懸念されている中、地震時における橋梁の実挙動を精度良く推定する技術が求められている。地震時における橋梁の挙動の推定精度を検証する手法の一つとして、地震観測記録を用いた検討が有効であるが、一般に橋梁に地震観測装置が設置されている例は少なく、地震観測記録を用いた地震時挙動の検討事例は少ない。

こうした中、2009年8月にマグニチュード6.5の静岡県駿河湾地震が発生し、震央から約50kmの位置にある29径間連続免震橋に設置した地震観測装置から観測記録データが得られた。本免震橋は1997年に完成しており(写真-1)、免震設計固有の内容については道路橋の免震設計法マニュアル(案)¹⁾が適用されている。本橋は29径間という本格的な多径間連続橋に免震設計を適用した日本で最初の事例でもあることから、当初から地震観測装置が取り付けられていたものである。地震観測装置の設置状況を写真-2に示す。本橋では完成して以降、これまでに大きな地震の影響を受けていなかったが、今回の駿河湾地震により観測記録が得られた。そこで、本検討ではこの貴重な地震観測記録を活用して、本免震橋の地震時挙動の推定精度の検討を行った。

なお、免震橋^{*}の地震時挙動を検討する上で、

免震支承の特性をどう評価するかが重要な位置付けとなるため、本検討ではこの点に着目して分析を行った。

2. 解析対象とした免震橋と解析条件

2.1 対象免震橋及び地震観測記録

本検討で対象とした免震橋は、橋長725mを有する29径間連続高架橋であり、上部構造はPC中



写真-1 対象免震橋の全景

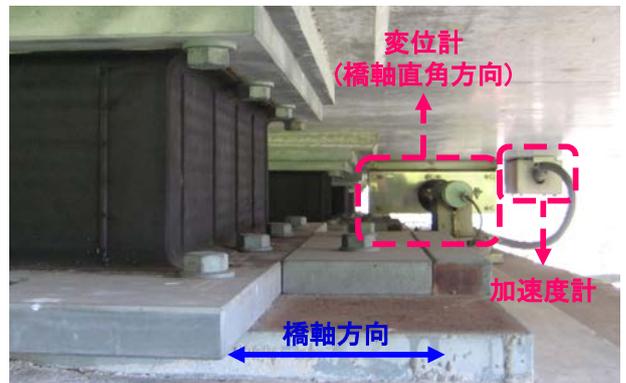


写真-2 地震観測装置の設置状況

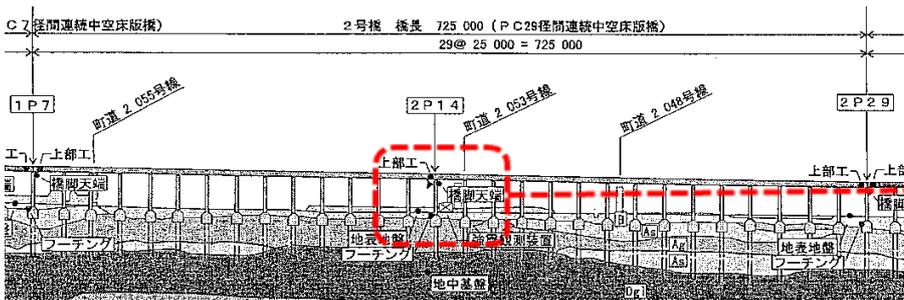
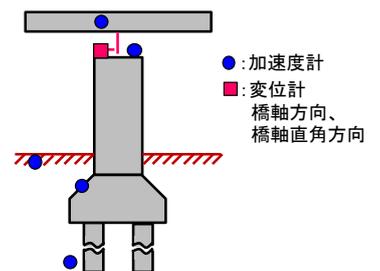


図-1 対象橋梁の側面図および強震観測装置の設置位置図



空床版構造、橋脚は壁式RC橋脚である。免震支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)である。

図-1に本免震橋の側面図および地震観測装置の設置位置を示す。上部構造、橋脚天端、フーチング、地表地盤、地中地盤にそれぞれ地震観測装置が設けられており、加速度や変位が記録されている。図-2は、2P14橋脚における橋脚の地表地盤で観測された加速度波形の加速度応答スペクトルを道路橋示方書²⁾に示されている標準波形(レベル1、レベル2)の加速度応答スペクトルと比較して示したものである。これより、対象とした地震動は、固有周期0.5秒近傍で1000gal程度の加速度応答スペクトルとなっているが、それ以降の周期帯ではスペクトルが低下しており、1.0秒付近で200gal程度となっている。

2.2 免震支承の解析モデル

本免震橋の解析モデルは、桁、橋脚、フーチングは線形はり要素、基礎-地盤系はフーチング底面位置の線形バネ要素(水平、回転、鉛直)としてモデル化を行った。

免震支承は線形バネ要素とし、等価線形法によりモデル化を行った。等価線形法とは、免震支承が有する非線形履歴特性と等価な剛性と減衰定数を線形部材に与えてモデル化する方法である。等価剛性と等価減衰定数の算定にあたっては、免震支承のせん断変形に伴い剛性や減数特性が変化する特性、いわゆるひずみ依存性を適切に考慮する必要がある。本免震橋では、免震支承の特性を把握するために、併用開始前に現地で起振機実験と自由振動実験、また免震支承については工場性能試験が行われており³⁾、これらの実験および試験結果を基に免震支承に生じる変位に応じた等価剛性および等価減衰定数を設定した。図-3および図-4は、これらの試験結果に対してひずみ依存性の関係を直線回帰で表した結果を示したものである。図中には、道路橋の免震設計法マニュアル(案)¹⁾および道路橋支承便覧⁴⁾に基づいて求められる免震支承の等価剛性と等価減衰定数も参考に併せて示している。

本検討では、静岡県駿河湾地震により観測された免震支承の最大相対変位を用いて、図-3と図-4に示した直線回帰式に基づいて免震支承の等価剛性と等価減衰定数を算定した。今回の地震による観測変位は、橋軸方向で37.6mm、橋軸直角方向

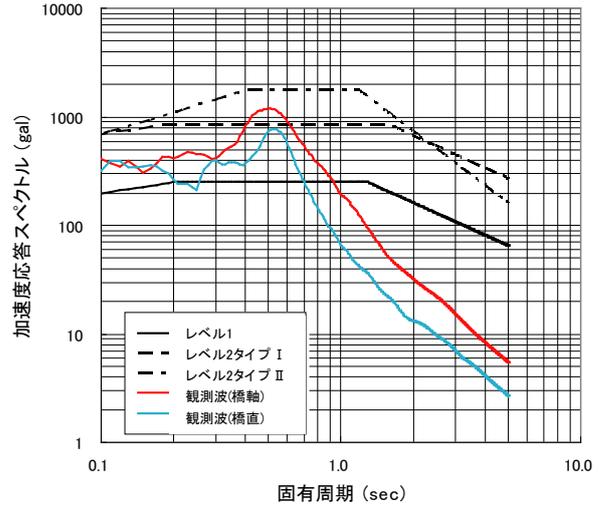


図-2 加速度応答スペクトル

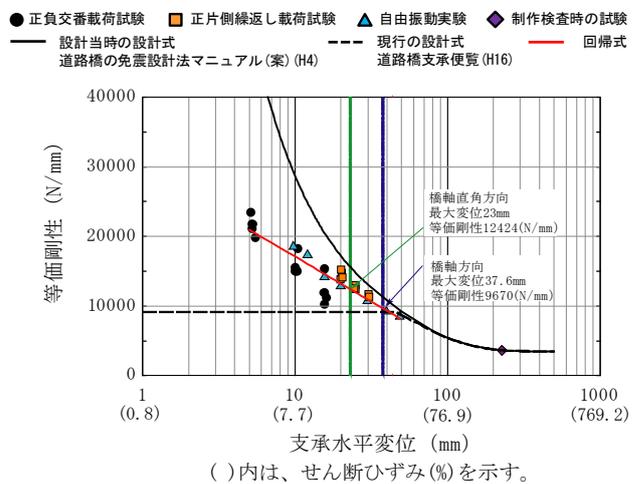


図-3 免震支承の等価剛性と支承変位の関係

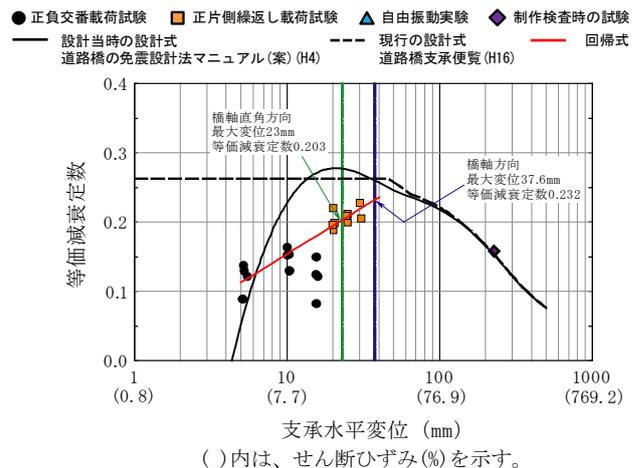


図-4 免震支承の等価減衰定数と支承変位の関係

表-1 免震支承の等価剛性および等価減衰定数

項目	方向	直線回帰式から推定した値
等価剛性 (N/mm)	橋軸方向	9670
	橋軸直角方向	12424
等価減衰定数	橋軸方向	0.232
	橋軸直角方向	0.203

で23.0mmであり、それぞれの方向に対する免震支承の等価剛性と等価減衰定数を算出すると表-1の通りである。

2.3 解析手法

本解析では、モード解析法を用いた線形時刻歴応答解析を行った。ここで、橋梁の地震応答解析に一般的に用いられる直接積分法ではなく、モード解析法を用いた理由は、対象とする地震動に対する橋梁の応答が弾性領域で挙動することが今回の解析により明らかになったことや免震支承を等価剛性と等価減衰定数でモデル化した等価線形解析でも十分に応答を評価できること、またモード解析は各部材の減衰の影響を明確に把握できるためである。

入力地震動は2P14橋脚の地表地盤で観測された加速度データを用い、橋軸方向と橋軸直角方向にそれぞれ単独加震を行った。

3. 解析結果と観測記録の比較

3.1 橋軸方向の応答

図-5は、2P14橋脚位置の桁の加速度応答に対し、観測記録と解析結果を時刻歴でプロットしたものである。また、この橋脚位置における支承部の相対変位の時刻歴を図-6に示す。応答振幅が小さい領域においては観測記録と解析結果の応答傾向が若干異なるものの、最大振幅発生領域においては観測記録に近い解析結果が得られており、最大振幅発生領域に関しては、本免震橋の実地震挙動が地震応答解析により精度良く評価できている。

また、各応答の最大値を比較したところ、応答加速度、支承部の相対変位ともに、観測記録に対する解析結果の差が3%~6%であることが確認できた。

3.2 橋軸直角方向の応答

2P14橋脚位置の桁の加速度応答に対し、観測記録と解析結果を時刻歴でプロットしたものを図-7に、この橋脚位置における支承部の相対変位の時刻歴を図-8に示す。橋軸直角方向応答に関しては、解析結果と観測記録の最大応答比率で見ると橋軸方向に比べ少し差異が出ているものの、最大振幅発生領域において時刻歴応答が両者でおおむね一致している。また、応答振幅が小さい領域においては、橋軸方向と同様、減衰定数の設定の影響により観測記録と解析結果の応答差が生じてい

ると考えられる。

3.3 免震支承のモデル化に関する考察

桁の加速度および支承部の相対変位の最大応答値については、橋軸方向、橋軸直角方向ともに解析結果と観測記録が近くなっていることから、表-1に示した免震支承の等価剛性および等価減衰定数は、今回の地震で生じた変形レベルの範囲では実勢値に近い値であったのではないかと推測される。

また、桁の加速度、支承部の相対変位ともに振幅の小さいところにおいては、解析結果と観測記録の応答波形が異なっている。この原因としては、

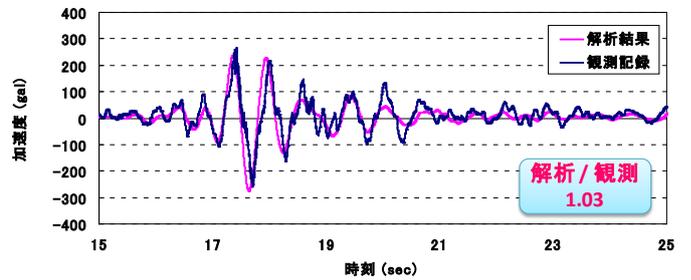


図-5 桁の加速度応答の比較（橋軸方向）

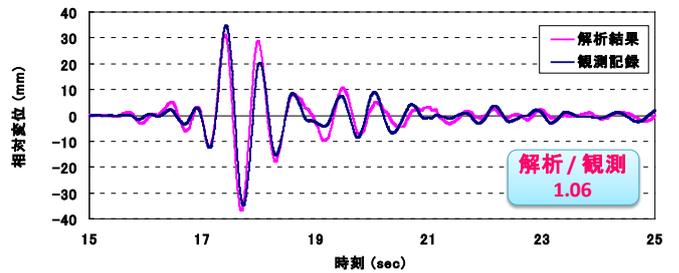


図-6 支承部の相対変位の比較（橋軸方向）

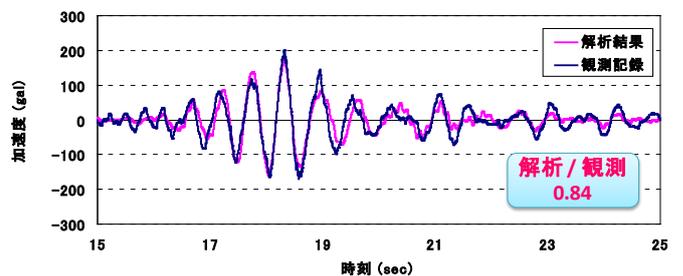


図-7 桁の加速度応答の比較（橋軸直角方向）

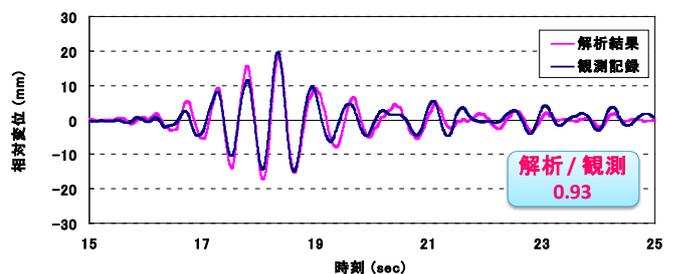


図-8 支承部の相対変位の比較（橋軸直角方向）

免震支承はひずみ領域によって等価減衰定数が変動するが、解析モデルで設定した減衰定数は支承最大変位に基づいて一律に算定したため、結果的に減衰を大きく評価したためと考えられる。

4. まとめ

本検討では、2009年静岡県駿河湾地震により、29径間連続免震橋に設置されていた地震観測装置から得られた実地震観測記録を用いて再現解析を行い、解析結果と観測記録の比較を行った。今回の地震により本橋に生じた免震支承の応答変位は非常に小さいレベルではあったが、本検討により得られた知見は以下の通りである。

- ・桁の加速度や支承部の相対変位の応答を照査したところ、橋軸方向、橋軸直角方向ともに、最大振幅が生じる領域では解析結果が観測記録に近い結果となっており、最大応答特性については今回の解析手法により精度良く再現できた。
- ・本検討では、本橋に対して実施された過去の実験および試験結果に基づいて免震支承の等価剛性と等価減衰定数を評価したが、今回の地震による変形レベルの範囲内ではこれらの免震支承の特性値が実勢値に近いものと推測される。

なお、今後の課題として、今回の地震では免震支承に生じた応答が小さかったため、その範囲内での検証となっているが、免震支承により大きな応答変位が生じた場合の特性やその時の地震時挙動の推定精度については、本検討結果を踏まえて発展的に検討していく必要がある。

謝 辞

本検討で用いた地震観測データは、静岡県建設部道路整備室の多大な協力を得て提供いただきました。ここに、関係各位に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (財)土木研究センター：道路橋の免震設計法マニュアル(案)、1992年
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2002年
- 3) 山野辺慎一、安藤祐副、榊原正彦、大保直人：免震橋(大仁高架2号橋)の実橋振動実験、第10回日本地震工学シンポジウム、pp.2795～2800、1998年
- 4) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧、2004年
- 5) 大住道生、運上茂樹、横山功一：超多径間連続免震橋の地震応答特性と耐震設計法、構造工学論文集、Vol.44A、pp.719～724、1998年

崔 準祐*



独立行政法人土木研究所構造物
メンテナンス研究センター橋梁
構造研究グループ 専門研究
員、博(工)
Dr. Joon-Ho CHOI

星隈順一**



独立行政法人土木研究所構造物
メンテナンス研究センター橋梁
構造研究グループ 上席研究
員、博(工)
Dr. Jun-ichi HOSHIKUMA

張 広鋒***



独立行政法人土木研究所構造物
メンテナンス研究センター橋梁
構造研究グループ 研究員、博
(工)
Dr. Guangfeng ZHANG