

論文 免震技術の鉄道橋りょうへの適用性とその効果

渡辺 勉^{*1}・曾我部 正道^{*2}・長谷川 淳史^{*3}・金森 真^{*4}

要旨：2つの4径間連続鉄道橋りょうについて、動的非線形解析を用いた照査により免震技術の適用性を検討した。その結果、等価固有周期 1.2 秒（橋軸方向）、1.6 秒（橋軸直角方向）の A 橋りょう、同じく 0.9 秒（両方向）の B 橋りょうともに、水平力分散設計後に免震支承を適用することにより、部材の変形を弾性範囲前後に抑えられることがわかった。また、上部工の建設費にも依存するが、免震支承により構造諸元の縮小を図った場合、橋軸方向のみ免震の場合には工事費を 2% 低減できること、橋軸方向及び橋軸直角方向ともに免震の場合には工事費を 7% 低減できることなどを示した。

キーワード：免震技術，復旧性，経済性，動的非線形解析

1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震以降、道路橋や建築分野において、経済的な耐震デバイスとしての免震技術の導入が各所で進められている。

鉄道橋りょうの免震技術の導入に関しては、通常の水
平力分散設計を行い、その支承として鉛プラグ入り積層
ゴム支承（以下、LRB）を用いる手法が採用されてきた¹⁾。この場合、その履歴減衰は設計上考慮せず、余裕代
として取り扱うよう、鉄道構造物等設計標準・同解説（以
下、耐震標準という²⁾）は規定している。

また、鉄道橋りょうでの導入実績の多くは、橋軸方向
への免震化を狙ったものであるが、これは、列車走行性
に関する厳しい変位制限から橋軸直角方向への免震構
造の適用は困難と考えられてきたためである。しかし近年、もともと長周期でかつ相対的に角折れが生じにくい
長大橋りょうにおいては、列車走行性の向上が可能であ
るとの報告もなされており^{3), 4)}、橋軸直角方向への導入
も実現性が高まってきた。

一方で、鉄道橋りょうへの適用性やその効果を統一的
かつ定量的に述べた文献は少なく、一般化が困難な問題
の特質上、具体的な橋りょうや、具体的な適用性に関す
る技術文献の蓄積が今後も重要であると考えられる。

このような背景から、本研究では橋軸直角方向を含む
免震化技術の適用性とその効果の検証を行うことを研
究の目的とした。具体的には、二つの 4 径間連続鉄道橋
りょうを検討対象橋りょうとして、復旧性及び経済性向

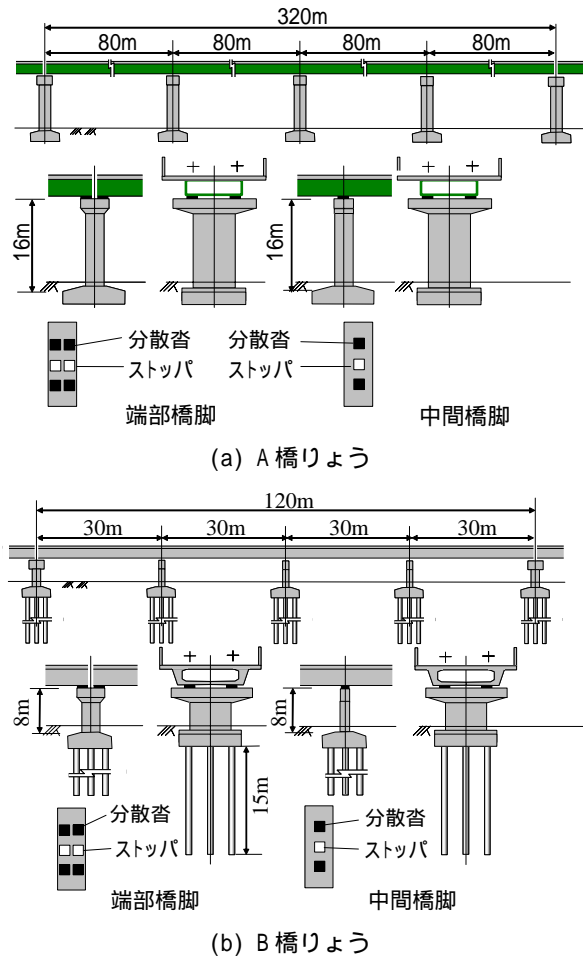


図 - 1 検討対象橋りょうの構造一般図

表 - 1 検討対象橋りょうの概要

名称	桁形式	スパン長(m)	橋脚 高さ(m)	基礎形式	地盤種別	固有周期(sec)	
						橋軸方向	橋軸直角方向
A 橋りょう	合成桁	4@80	16	直接基礎	G1	1.55	1.21
B 橋りょう	PC 箱桁	4@30	8	杭基礎	G3	0.94	0.88

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部構造力学 研究員 工修 (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部構造力学 主任研究員 工博 (正会員)

*3 元 日本交通技術(株) 技術開発部

*4 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部 設計技術第一課 総括課長補佐 (正会員)

上の観点から定量的な評価を行った。

2. 復旧性の向上に関する検討

2.1 検討対象橋りょう

図 - 1 に対象構造物の構造一般図を、表 - 1 に対象構造物の概要を、それぞれ示す。二つの鉄道4径間連続桁橋りょうを対象とし、免震支承の適用性に関する検討を行った。表中の固有周期は全体系をモデル化して降伏点までの割線剛性により算定した場合の1次モードであり、等価固有周期に相当する。A橋りょうは、等価固有周期1.6秒(橋軸方向)、1.2秒(橋軸直角方向)と比較的長く、B橋りょうは、等価固有周期が0.9秒と比較的短く設定した。

表 - 2 に支承条件を示す。Case2 では従来の鉄道橋りょうにおける橋軸方向のみの免震化を想定した。Case3 は隣接構造物との境界部での軌道面の目違い防止のため、端部橋脚の橋軸直角方向のみ非免震とした。Case4 は上記目違いを隣接構造物との橋軸直角方向桁間連結により防ぐ方式として全方向を免震化した方式である。なお、非免震とは、支承を固定支持の条件で設定したものである。

2.2 検討方法

まず検討のベースとなる基本断面を設定した。具体的には、橋脚単体で、断面形状、基礎形状、杭本数を変化させた静的非線形解析を多数行い、基礎をSRばねとした全体系モデルを用いて動的非線形解析を実施して、最適な断面形状を決定した。図 - 2 に全体系の動的非線形解析に用いた解析モデルの概念図を示す。減衰定数は、L1地震動に対する数値解析結果を左右する重要なファクターとなるが、部材別減衰としてコンクリート部材に対して2%、基礎ばねに対して10%を考慮した。これにより1次モードの減衰定数を算定すると概ね5~7%程度の値となった。表 - 3 に免震支承に用いたばね定数を示す。ばね定数は、地震時に応答が想定される変形レベルに応じて算出した。

図 - 3 に、検討に用いた設計地震動と弾性応答スペクトルを示す。解析には、内陸型地震を対象として、既往の地震観測記録に基づいて統計解析等により設定されたL2地震動(スペクトル)及び100年に数回程度の地震を想定したL1地震動を用いた²⁾。

2.3 検討結果

図 - 4 に、非免震の状態におけるA橋りょう及びB橋りょうの橋脚の決定断面形状をそれぞれ示す。この非免震の決定断面に対して、免震支承を橋軸方向及び橋軸直角方向に適用して、復旧性の向上効果を検討した。

図 - 5 にA橋りょうP3橋脚におけるL1地震動(橋軸方向)の時刻歴波形の例を示す。免震の解析結果は、Case4

表 - 2 検討条件

検討ケース	橋軸方向		橋軸直角方向	
	端部	中間部	端部	中間部
Case 1	非免震	非免震	非免震	非免震
Case 2	免震	免震	非免震	非免震
Case 3	免震	免震	非免震	免震
Case 4	免震	免震	免震	免震

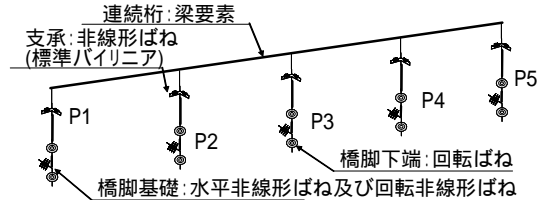
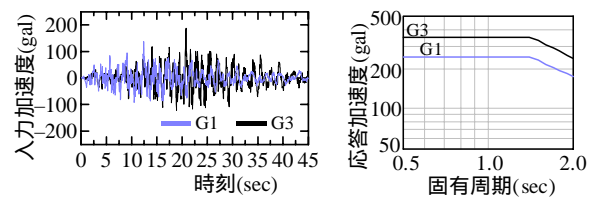


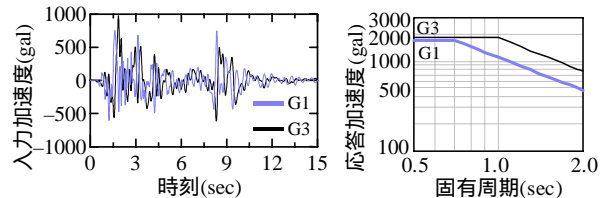
図 - 2 動的的非線形解析モデル

表 - 3 免震支承に用いたばね定数

	地震動	端部 (kN/m)	中間部 (kN/m)
A橋りょう	L2SP	4.96×10^4	1.27×10^5
	L1	6.04×10^4	1.68×10^5
B橋りょう	L2SP	5.08×10^4	1.27×10^5
	L1	3.35×10^4	8.09×10^5

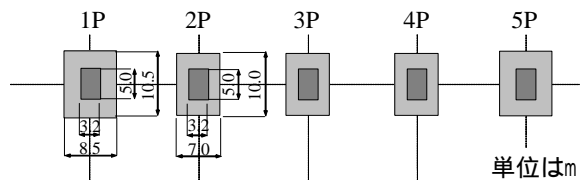


(a) L1地震動

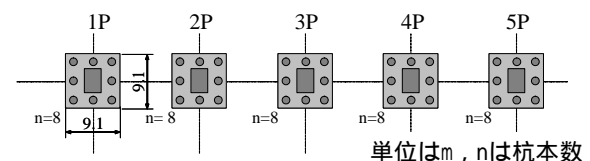


(b) L2地震動(スペクトル)

図 - 3 検討に用いた設計地震動と弾性応答スペクトル

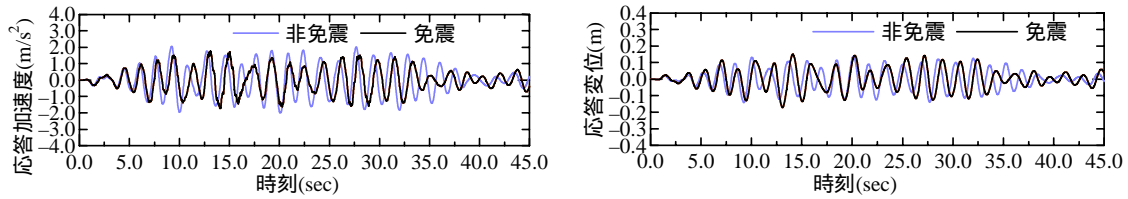


(a) A橋りょうの決定断面(Case1, 非免震)



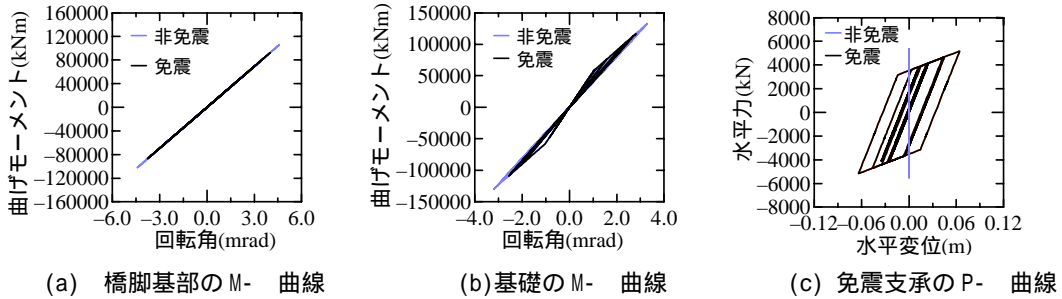
(b) B橋りょうの決定断面(Case1, 非免震)

図 - 4 橋脚の決定断面形状



(a) 桁天端における応答加速度

(b) 桁天端における応答変位

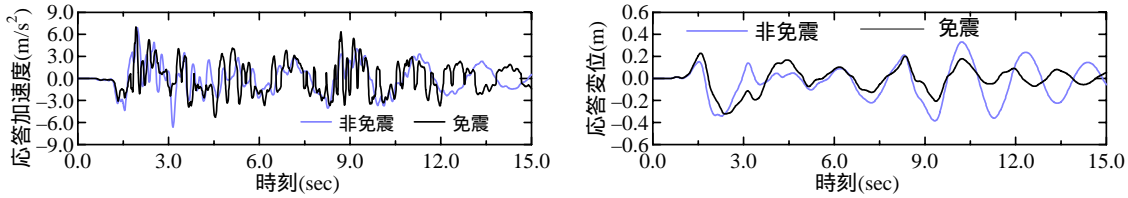


(a) 橋脚基部のM- 曲線

(b) 基礎のM- 曲線

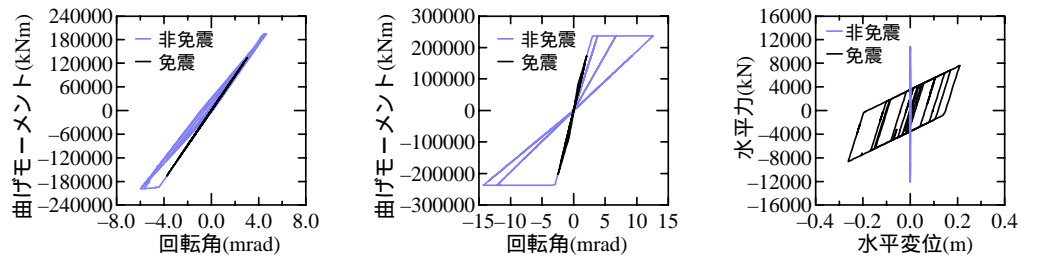
(c) 免震支承のP- 曲線

図 - 5 L1地震動（橋軸方向）に対する時刻歴波形の例（A橋りょう）



(a) 桁天端における応答加速度

(b) 桁天端における応答変位



(a) 橋脚基部のM- 曲線

(b) 基礎のM- 曲線

(c) 免震支承のP- 曲線

図 - 6 L2地震動（橋軸直角方向）に対する各種応答の免震と非免震の比較結果の一例（A橋りょう）

のものである。免震支承の履歴減衰等により、橋脚基部の回転角及び基礎の回転角が若干低減されていることがわかる。

図 - 6 に A 橋りょう P3 橋脚における L2 地震動スペクトル（橋軸直角方向）の時刻歴波形の例を示す。免震の解析結果は、Case4 のものである。免震支承の履歴減衰等により、とくに基礎の回転角が大幅に低減されていることがわかる。

図 - 7 及び表 - 4 に、A 橋りょうにおける橋脚、及び基礎に生じる回転角の応答値と限界値の関係を示す。図中の凡例 θ_{yd} は部材降伏時の回転角、 θ_{md} は最大曲げモーメントを維持できる最大の回転角、 θ_{nd} は降伏曲げモーメントを維持できる最大の回転角を表し、 θ_{i} 及び θ_{i} ($i=1,2,3$) は基礎の安定レベルに対応した塑性率の限界値から求められる回転角及び水平変位の限界値を表す。これらから、L1 地震動及び L2 地震動に対して、免震化することにより応答値が低減されたことがわかる。特に、L2 地震動の橋軸直角方向の入力に対しては、回転角の減

少により、基礎の安定レベルが 2 から 1 に改善され、免震化による復旧性の向上効果を確認することができた。

また、等価固有周期が長周期化されており、これによる地震力の寄与も復旧性向上に寄与していると考えられる。図 - 3 に示した弾性応答スペクトルから A 橋りょうの等価固有周期は下り勾配に入った領域で推移しており、有利な結果が得られたと推定される。

図 - 8 及び表 - 5 に、B 橋りょうにおける橋脚の回転角及び基礎の水平変位の応答値と限界値の関係を示す。B 橋りょうでは特に、L2 地震動の橋軸直角方向の入力に対しては、橋脚の損傷レベルが 3 から 1 に改善され、免震化による復旧性の大幅な向上効果を確認することができた。

図 - 3 に示した弾性応答スペクトルから、B 橋りょうの等価固有周期は、長周期側にシフトしてもフラットな領域にあるが、A 橋りょうよりも低い震度で免震支承が塑性化するように設定されており、これによる慣性力の低減と長周期化を図っている。B 橋りょうの振動特性は

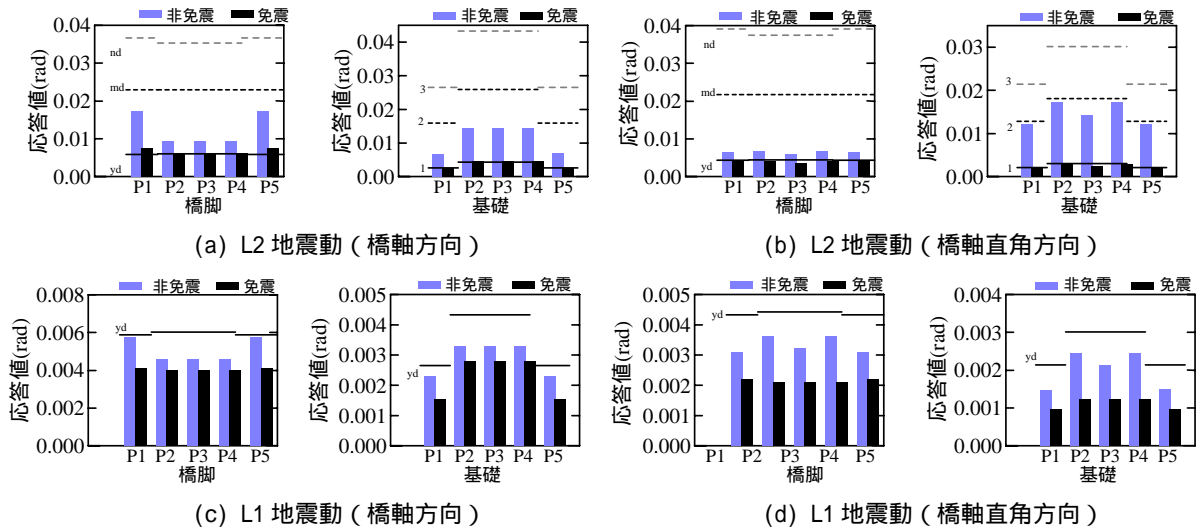


図-7 橋脚，基礎の回転角の応答値と限界値の関係（A橋りょう）

表-4 A橋りょうの復旧性の向上検討結果

(a) L2地震動に対する検討

入力		等価固有周期 (sec)	躯体の回転角 (rad)			基礎の回転角 (rad)			支承	
			応答値	塑性率	損傷レベル	応答値	塑性率	安定レベル	照査結果	塑性率
L2 橋軸方向	非免震	1.55	0.0172	2.9	2	0.0144	3.3	2	-	-
	免震	1.82	0.0076	1.1	2	0.0045	1.0	2	0.455	6.6
L2 橋軸直角方向	非免震	1.21	0.0068	1.5	2	0.0123	5.8	2	-	-
	免震	1.55	0.0042	0.9	1	0.0021	1.0	1	0.544	8.1

(b) L1地震動に対する検討

入力		等価固有周期 (sec)	躯体の回転角 (rad)		基礎の回転角 (rad)		支承	
			応答値	照査結果	応答値	照査結果	照査結果	塑性率
L1 橋軸方向	非免震	1.55	0.0058	0.95	0.0023	0.87	-	-
	免震	1.76	0.0041	0.61	0.0015	0.53	0.156	2.6
L1 橋軸直角方向	非免震	1.21	0.0036	0.82	0.0025	0.82	-	-
	免震	1.48	0.0021	0.47	0.0012	0.41	0.164	2.2

特に免震支承の降伏震度に大きく影響を受けており，躯体の降伏震度に比べてある程度小さな値を設定しなければ，十分な免震効果は得られなかった。

A,B 両橋りょうとも免震支承の変形は限界値である層厚の250%に対して十分に余裕のある値であった。

3. 経済性の向上に関する検討

3.1 検討対象橋りょう

経済性の検討で検討対象とする橋りょうは，3章の復旧性の検討で用いた橋りょうと同様とする。

3.2 検討方法

3章で検討した断面に対してA橋りょうは橋脚躯体断面及びフーチング断面の縮小で，B橋りょうは杭本数とフーチング断面の縮小で，コストダウンが図れるかを検討した。具体的には，非免震時と同等の損傷レベルとなるように上記手法により断面を定め，建設費を概算した。

3.3 検討結果

図-9に橋脚の決定断面形状を示す。A橋りょうは，橋軸方向のL1地震動で断面が決定されたため，Case2と

Case3及びCase4は同じ断面形状となった。また，B橋りょうは各Caseが橋軸直角方向L1地震動で断面が決定した。以上の結果に基づいてA橋りょう及びB橋りょうに対して，経済性の比較を行った。

表-6，表-7及び図-10に，それぞれの検討ケースに対して直接工事費の概算及び合計金額を示す。同表に示すように，A橋りょうでは，免震支承を適用することにより非免震に対して約1.9%の経済性の向上効果，B橋りょうでは，非免震に対して最大（Case4）では約6.6%の経済性の向上効果を確認することができた。

4. 免震支承の適用性に関する考察

4.1 復旧性の向上

復旧性の向上を目的として免震支承を適用する場合には，従来の耐震標準の概念に準じた考え方で，通常の積層ゴムを用いた水平力分散設計を行った後に，支承をLRBまたは高減衰ゴム支承（以下，HDR）に置き換える手法となると考えられる。長周期化，低降伏点化，LRBまたはHDRの履歴減衰等による応答加速度（慣性力）

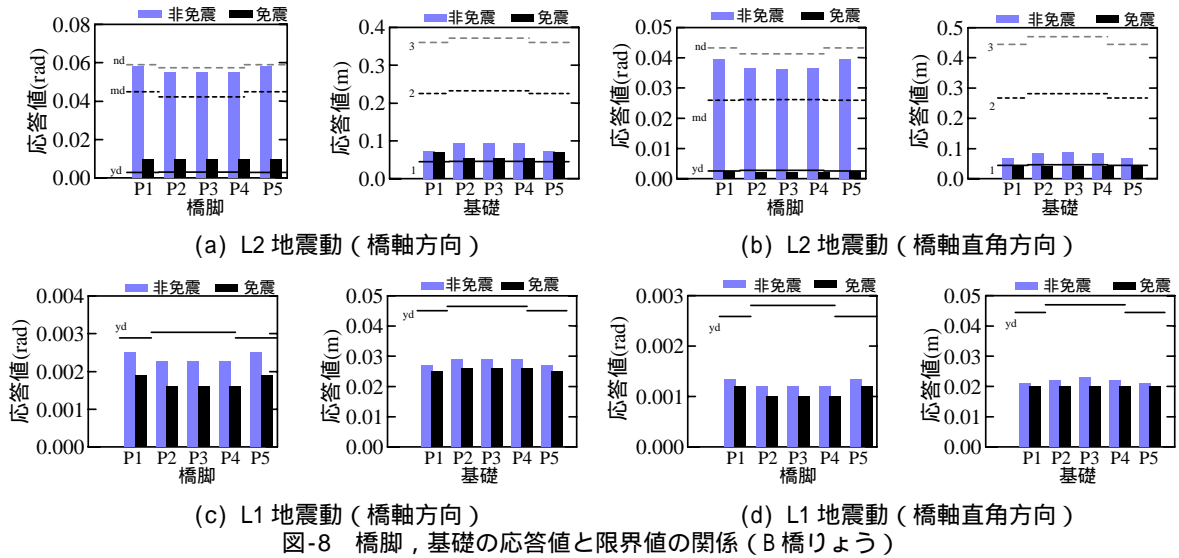


表 - 5 B 橋りょうの復旧性の向上検討結果

(a) L2 地震動に対する検討

入力		等価固有周期 (sec)	躯体の回転角 (rad)			基礎の水平変位 (m)			支承	
			応答値	塑性率	損傷レベル	応答値	塑性率	安定レベル	照査結果	塑性率
L2 橋軸方向	非免震	0.94	0.0579	20.0	3	0.0930	2.0	2	-	-
	免震	1.28	0.0098	3.4	2	0.0470	1.5	2	0.486	14.0
L2 橋軸直角方向	非免震	0.88	0.0395	15.2	3	0.0890	1.9	2	-	-
	免震	1.25	0.0025	0.9	1	0.0440	0.9	1	0.506	14.6

(b) L1 地震動に対する検討

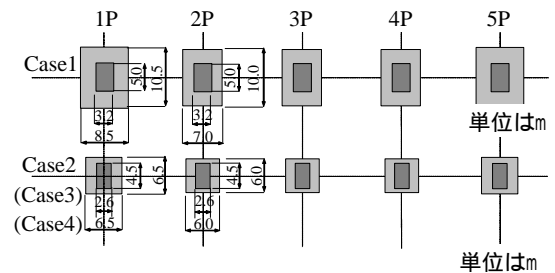
入力		等価固有周期 (sec)	躯体の回転角 (rad)		基礎の水平変位 (m)		支承	
			応答値	照査結果	応答値	照査結果	照査結果	塑性率
L1 橋軸方向	非免震	0.94	0.0025	0.87	0.0290	0.62	-	-
	免震	1.21	0.0019	0.65	0.0260	0.56	0.110	4.1
L1 橋軸直角方向	非免震	0.88	0.0013	0.51	0.0230	0.48	-	-
	免震	1.17	0.0012	0.45	0.0200	0.44	0.097	3.6

の低減は設計上の余裕代として取り扱い照査には反映しない手法である。あるいは応答加速度(慣性力)の低減効果を照査に考慮し、重要構造物などで損傷レベルを抑え、陽な形で照査に反映する手法も考えられる。ベースとなる構造物の断面や配筋量は通常の水平力分散設計と同等であるが、ライフサイクルコストの点から見れば経済的であると考えられる。

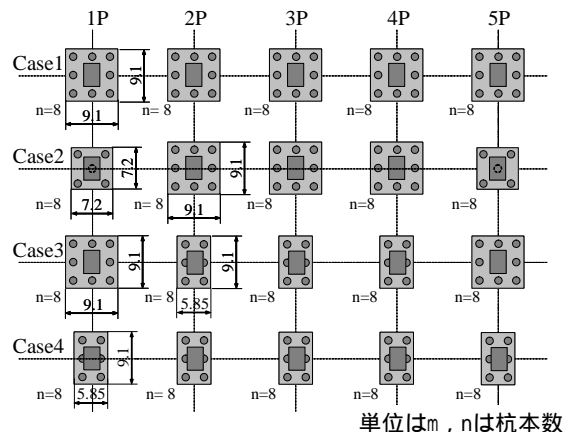
設計上の留意点としては、橋軸方向に適用する場合に、軌道構造物が応答値の算定結果に及ぼす影響の明確化を行うとともに、橋軸方向桁間の遊間確保を行う必要がある⁵⁾。橋軸直角方向に適用する場合は、列車走行安全性への配慮を行う必要があると考えられる。

4.2 経済性の向上

経済性の向上を目的とした場合には、免震支承を用いて応答加速度(慣性力)を低減し、構造物の断面や配筋を減らすことによって経済性の向上を図る手法である。実質的には、配筋量の低減だけでは十分な経済性は得られないため躯体断面や杭本数の低減を図る必要がある



(a) A 橋りょう



(b) B 橋りょう

図 - 9 断面決定形状

表 - 6 A 橋りょうの経済性の向上検討結果 (100 万円)

	桁架設	橋脚躯体	フーチング	支承	合計	1m あたり
非免震	1920	97.98	52.05	156	2226.03	6.96
免震 (Case4)	1920	82.12	26.13	156	2184.24	6.83
コストダウン	0.0%	16.2%	49.8%	0.0%	1.9%	

算出条件は、合成桁押出架設、橋脚躯体単価 7.0 万/m³、フーチング単価 4.5 万/m³、沓 (RB, LRB 共に) 端部 1155 万/個、沓 (RB, LRB 共に) 中間部 1830 万/個

表 - 7 B 橋りょうの経済性の向上検討結果 (100 万円)

	桁架設	橋脚躯体	フーチング	杭	支承	合計	1m あたり
非免震	264	35.02	44.71	62.40	69.90	476.03	3.97
免震 (Case2)	264	35.02	40.53	56.55	69.90	466.00	3.88
免震 (Case3)	264	35.02	32.74	50.70	69.90	452.36	3.77
免震 (Case4)	264	35.02	28.75	46.80	69.90	444.47	3.70
コストダウン (最大値)	0.0%	0.0%	35.7%	25.0%	0.0%	6.6%	

算出条件は、PC 箱桁総足場架設、橋脚躯体単価 7.0 万/m³、フーチング単価 4.5 万/m³、杭 (1.3m) 13.0 万/m、沓 (RB, LRB 共に) 端部 525 万/個、沓 (RB, LRB 共に) 中間部 815 万/個

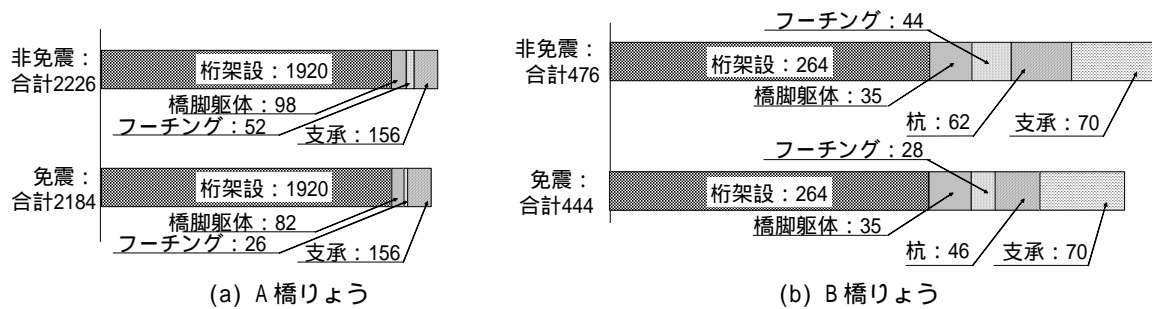


図 - 10 経済性の向上検討結果 (単位: 100 万円)

と考えられる。設計上の留意点としては、低降伏点化、それによる履歴減衰、長周期化の効果を考慮するためには、構造系全体をモデル化して時刻歴動的応答解析 (L1 地震動を含む) を行うのが望ましい。ただし、各部材に対して設計水平震度や変形性能の下限値等は必要になると考えられる。また、経済性を求めるために橋軸直角方向の免震化が必要不可欠となる場合には、列車走行性に関する検討が必要となる。さらに、経済性は上部工の架設方法に大きな影響を受ける。いずれにしても、免震化による、全体工事費への削減効果は数パーセント程度になると考えられる。なお、経済性の評価については工種単価、材料費 (特に支承)、積算手法にも依存する。本検討は、あくまで表注釈に示した単価を用いた設計検討のための試算の 1 つであることを明記しておく。

5. まとめ

本論文では、二つの 4 径間連続鉄道橋りょうについて、免震技術による復旧性や経済性の向上効果を検討した。(1)等価固有周期 1.2 秒、1.6 秒と比較的長い A 橋りょう及び等価固有周期が 0.9 秒と比較的短い B 橋りょうに対して、動的非線形解析により復旧性の向上効果を確認した。両橋りょうとも応答塑性率等が大幅に低減しており、大規模地震においても損傷を軽微にとどめられることがわかった。

(2)上記橋りょうについて、動的非線形解析及び概算工事費の積算により経済性の向上効果を定量的に示した。上部工の建設費にも依存するが、橋軸方向のみ免震の場合、工事費を 2% 低減できること、橋軸方向及び橋軸直角方向ともに免震の場合、工事費を 7% 低減できることなどを示した。

本研究は、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの委託を受けて実施された。

参考文献

- 1) 岩田秀治ほか：鉄道の免震構造化と、軌道拘束力の影響を考慮した地震時の動的挙動、鉄道力学論文集、No.4, pp.61-66, 2000.6
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - 耐震設計、丸善、1999
- 3) 曾我部正道ほか：線路直角方向にすべり支承を用いた高架橋の地震時列車走行性解析、コンクリート工学年次論文集、vol.29, No.3, pp.1075-1080, 2007
- 4) 曾我部正道ほか：高橋脚・長スパン鉄道橋梁の地震時列車走行性とその可視化、応用力学論文集、Vol.10, pp.1037-1046, 2007
- 5) 池田学ほか：軌道構造が免震橋梁の地震時挙動に及ぼす影響、鉄道総研報告、Vol.19, No.3, pp.23-28, 2005.3