

5. 発表論文

1. 土木学会第50回年次学術講演会

- 1) 内田・長嶋・田中・増田：鋼製橋脚を有する免震橋の動特性に関する研究，
概要集 I-B785, pp. 1570~1571, 平成7年9月
- 2) 大丸・長嶋・岩塚・竹ノ内：鋼製橋脚の免震化に関する一考察，
概要集 I-B786, pp. 1572~1573, 平成7年9月

2. 日本鋼構造協会年次論文報告集

- 竹ノ内・長嶋・岩塚・大丸・内田：鋼製橋脚連続橋の免震化に関する基礎的研究，
JSSC年次論文報告集第4巻, pp. 1~8, 1996年11月

鋼製橋脚を有する免震橋の動特性に関する研究

東京都立大学	学生員○内田 光彦
東京都立大学	正会員 長嶋 文雄
(株)オリエンタルコンサルタンツ	正会員 田中 努
武蔵工業大学	正会員 増田 陳紀

1.はじめに 鋼製橋脚はコンクリート橋脚に比較して内部減衰は小さいが、その剛度は低い。本研究では免震設計された鋼製橋脚橋とコンクリート橋脚橋の時刻歴応答解析をとおして、特に橋脚の剛度の低さが橋梁全体の免震特性にどのような影響を及ぼすのかを調べるために、橋脚高さなどをパラメータとしたケーススタディを行った。

2.想定モデル 想定したのは図1および図2(a),(b)に示す5径間連続鋼橋で、①橋脚材質はコンクリート製(C)と鋼製(S)の2種類、②橋脚高は10、20、30mの3種類、③それらを免震化した場合と非免震の場合、④入力地震波が震度法レベル(L1)と水平耐力レベル(L2)の2種類であり、全組合せは24通りである。上部構造は1径間50m、総重量3250tfの鋼箱桁であり全ケースにおいて共通とする。地盤はⅠ種地盤とし、地震波は橋軸方向に入力する。免震支承にはLRB(鉛プラグ入り積層ゴム支承)を想定する。また、想定した橋脚剛性については表3にまとめて示す。

3.FEMモデルと解析方法 各想定モデルに対して、文献1)に沿った、LRBの設計を行ったところ、コンクリート橋脚橋と鋼製橋脚橋の支承は表2に示すように殆ど同じ仕様になった。また、橋脚剛性の違いにもかかわらず、設計水平震度も殆ど同じ値になるという結果が得られた。免震支承は有効等価剛性を有するばねとしてモデル化し、橋脚は梁要素を用いてモデル化した。FEMモデルの全体系略図を図3に示したが、Ⅰ種地盤を想定したため、基礎端部は固定端と仮定した。減衰はモード減衰としてコンクリート橋脚橋5%、鋼製橋脚橋3%、また免震支承には有効等価減衰定数を有する集中減衰を定義した。非免震モデルは免震支承の剛性を十分大きくすることで対処した。応答計算はモーダルアナリシスで行い、地震波はL1レベルとして文献2)のⅠ種地盤用波形を、L2レベルとして文献1)のⅠ種地盤用波形を用いた。解析後の評価は、図3に示すように上部構造としてA点、橋脚天端としてB点で行う。

4.時刻歴応答解析結果 図4に、L2レベルの鋼製橋脚30m(S-30)の場合と、コンクリート製橋脚(C-30)の場合の加速度(a)~(d)、変位(e)~(h)の時刻歴応答波形を例示する。また、変位・速度・加速度応答の最大値(L1, L2レベル)を表3に示す。さらに、免震化した場合の変位・加速度応答の最大値を図5(a),(b)に示す。橋脚剛性の差が現れ、鋼製(S)はコンクリート製(C)の変位よりも大きく、長時間揺れが続くが、加速度の最大値は小さくなっている。ただし、鋼製橋脚橋においても最大変位は免震支承設計時の制約条件(L1で15cm)以内となっている。また、上部構造の変位と橋脚天端の相対変位、すなわち免震支承の変形量の最大値(表3の免震装置の欄)は橋脚高10m、20mでは殆ど差がないが、30mで鋼製の方が小さくなっている。一方、L2レベルの入力に対する加速度応答の最大値は、図5に示すように橋脚高さ30mでは鋼製橋脚橋はコンクリート橋脚橋よりも加速度はかなり小さく抑えられている。特に、橋脚天端の応答加速度が小さい。また、ピークの現れる時刻に差があり、コンクリート橋の方が早くピークが現れる。脚長が20mから30mに変化する間に鋼製橋脚橋の系の動特性が変わっているのではないかと思われる結果が得られた。

図6は本解析に用いた地震波の加速度応答スペクトル上に加速度応答の最大値をプロットしたものである。コンクリート橋脚橋は非免震時の周期が短いため免震化することで2倍以上の周期としやすいが、加速度応答スペクトルが下降する範囲まで長周期化することは難しく、主に内部減衰が大きいことで免震効果をもたらしている。他方、鋼製橋脚橋は長周期を計りやすいが、内部減衰が小さいため、免震化の効果を十分に活かし難いことがわかった。

5.まとめ 文献1)に基づいたLRBの設計では鋼製橋脚橋、コンクリート橋脚橋ともに設計震度は殆ど同じになった。しかし、動的応答解析の結果では、鋼製橋脚橋は橋脚高さが30m程度になるとその剛性が低くなり始め、長周期化が容易になり、コンクリート橋脚橋に比較して、変位はやや大きくなるが、加速度はかなり小さくなることがわかった。

[参考文献] 1)建設省、道路橋の免震設計法マニュアル(案)。2)日本道路協会、道路橋示法書・耐震設計編

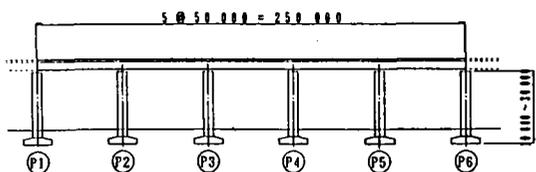


図1 橋梁モデル図(5径間連続鋼箱桁橋)

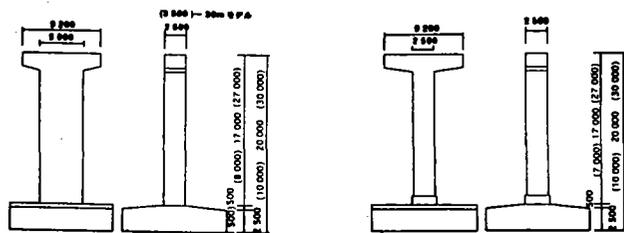


図2 (a) コンクリート橋脚図

(b) 鋼橋脚図 (tf/a)

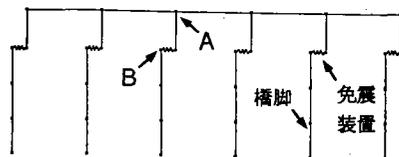


図3 FEMモデル

橋脚種類	弾性剛性	降伏剛性	
鋼製橋脚	S-10M	31,400	31,400
	S-20M	4,200	4,200
	S-30M	1,075	1,075
コンクリート橋脚	C-10M	95,000	95,000
	C-20M	9,900	9,900
	C-30M	6,800	6,800

表1 橋脚剛性

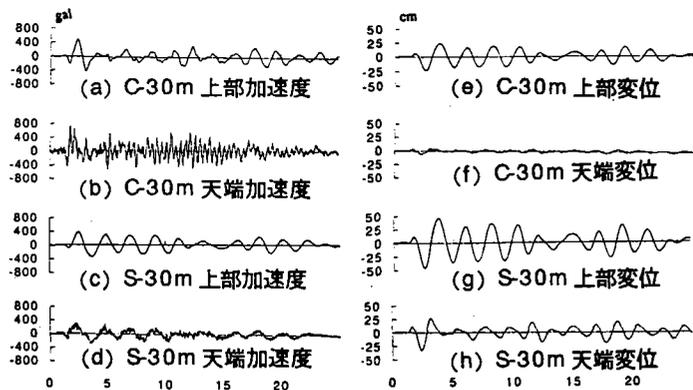
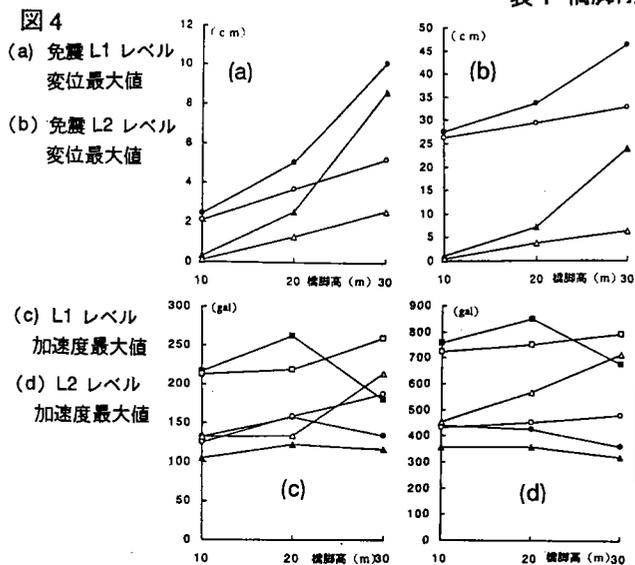


図5 応答波形(免震・L2レベル)

仕様諸元	端支用①	端支用②	中間支用
計算寸法 a × b (mm)	580 × 580	630 × 630	830 × 830
ゴム厚 × 層数 (mm)	13 × 15層	14 × 19層	19 × 7層
船プラグ φ × n (mm)	80 × 4本	80 × 4本	105 × 4本
ゴム体積 (m³)	0.0656	0.1056	0.0916

注1) S-30Mの端支用支承のみ端支用②を使用する。
 2) ゴム体積は船プラグを控除しない値である。

表2 免震支承の仕様

	部位	L1レベル			L2レベル		
		変位 (cm)	速度 (cm/s)	加速度 (gal)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	加速度 (gal)
S-10m	上部	2.44	14.4	133.0	27.57	101.5	439.9
	天端	0.28	1.9	104.8	0.97	3.6	357.9
	免震装置	2.17		115.7	26.65		530.8
	非免震	0.46	7.8	215.8	1.60	29.1	756.5
C-10m	上部	2.09	13.2	125.6	26.19	94.1	432.6
	天端	0.10	1.0	132.9	0.35	2.9	455.5
	免震装置	2.01		154.0	25.89		711.1
	非免震	0.17	5.0	212.2	0.59	14.8	723.1
S-20m	上部	5.04	23.4	157.1	33.76	123.5	427.3
	天端	2.56	11.9	122.6	7.10	27.4	359.7
	免震装置	2.55		74.2	26.83		478.3
	非免震	4.21	33.5	262.8	13.62	105.1	850.2
C-20m	上部	3.68	17.8	158.5	29.46	107.5	453.9
	天端	1.29	6.9	133.7	3.82	25.5	570.0
	免震装置	2.54		136.2	26.83		688.9
	非免震	1.87	16.5	218.9	6.49	55.8	752.5
S-30m	上部	10.10	35.3	133.2	46.45	137.1	363.8
	天端	8.64	30.2	115.7	23.87	71.7	321.9
	免震装置	1.48		30.1	22.92		314.6
	非免震	11.17	41.7	179.7	42.53	164.1	680.9
C-30m	上部	5.18	23.7	187.1	32.84	119.1	485.3
	天端	2.61	12.4	213.4	6.41	35.8	719.5
	免震装置	2.92		152.3	28.52		837.7
	非免震	3.53	28.2	258.6	12.11	82.4	799.3

表3 応答最大値

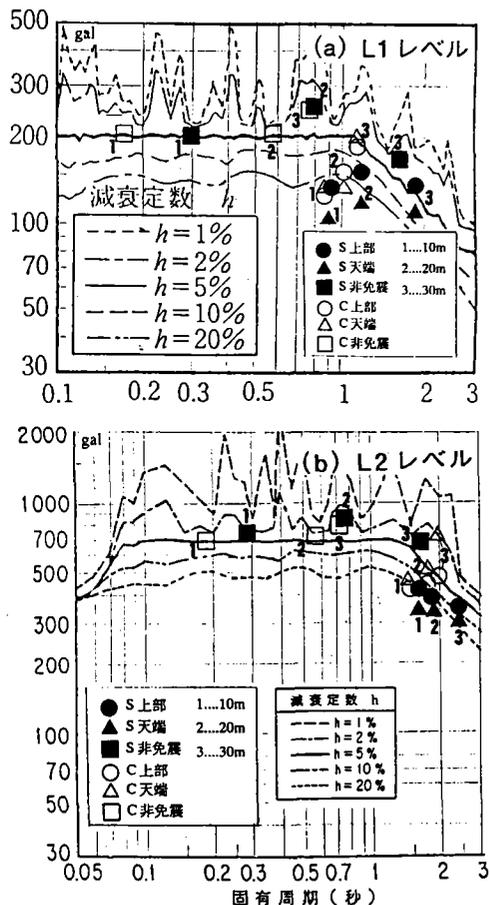


図6 応答スペクトル上を示す加速度応答

鋼製橋脚橋の免震化に関する一考察

○(株)建設技術研究所	正	大丸 隆
東京都立大学	正	長嶋 文雄
(株)巴コーポレーション		岩塚 由雄
オイレス工業(株)		竹ノ内 勇

1.はじめに 鋼製橋脚の剛度がコンクリート橋脚にくらべて低いことは、橋梁の免震を考える場合に構造全体系の長周期化につながるため有利であると思われる。しかし、免震設計の実施例はコンクリート橋脚橋のみで、都市交通等で多用されている鋼製橋脚橋での実施例はない。本研究では、比較的剛性の低い鋼製橋脚を持つ橋梁を免震化した場合の特性を、道路橋の免震設計法マニュアル(案)¹⁾に基づいた免震支承の設計手法を用いて、ケーススタディ(橋脚材質、橋脚高さの違い)をとおして明らかにする。また、実地震波記録による動的応答解析も行なう。

2.設定橋梁モデル 橋梁モデルは、図1に示すように、すべてのケースで支間長50mの5径間連続橋とした。図2に上部工断面概略図を示したが、上部工もすべてのケースで等しい鋼箱桁(総重量3250tf)とした。また、地盤はI種地盤とした。橋脚は、図3(a),(b)にそれぞれ示すようにコンクリート製(C)と鋼製(S)の2種類、橋脚高は10m, 20m, 30mの3種類とし、計6種類の橋梁を想定した。また、下部工剛性、降伏剛性を表1に示すように設定した。

3.免震支承設計条件 免震支承の設計条件は次のように設定した。(1)免震装置はLRB(鉛プラグ入り積層ゴム支承)とする。(2)免震時の周期は非免震時の2倍程度を目標とする。(3)地震時の上部工移動量はL1レベルで15cm程度以下とする。(4)端支点のL1レベルでの地震水平力は中間支点の地震水平力の1/2とする。(5)桁の回転角は端支点1/150,中間支点1/300とする。(6)ゴムのせん断弾性係数は $G=10\text{kgf/cm}^2$ とする。(7)形状係数は $S=10$ を目標とする。(8)ゴムの平面寸法は50mm刻みの正方形で設定する。(9)鉛プラグはゴム平面面積の約5%の面積として設定する。(10)支圧応力その他の許容値は文献1)に従う。その他の設計条件等を表2に示した。以上のような設計条件に基づき、図4に示すような簡易解析モデルを用いる文献1)の手法により、免震支承の設計を行った。

4.免震支承設計結果 鋼製橋脚橋とコンクリート橋脚橋について、また、それぞれ3通りの橋脚高さについて免震支承の設計をした結果を表3,4に示す。中間支点用支承の外形寸法は、鉛直最大反力から計算される支圧応力で決定され、ゴム厚と層数は地震時(L2レベル)のせん断ひずみで決定された。従って、鉛直最大反力は各検討ケースで同一であるため、橋脚剛性(材質・高さ)にかかわらず外形寸法は同一となった。端支点用支承は、外形寸法は鉛直最大応力から計算される支圧応力で決定され、ゴム厚と層数は桁端の回転(1/150)から決定された。以上の算定結果より、文献1)に基づいた支承設計を行うと、コンクリート橋脚橋と鋼製橋脚橋では殆ど同じ免震支承が設計されることになることがわかった。また、橋脚剛性の相違により両者の変位は多少異なってくるが、設計条件で上部工移動量の上限をあらかじめ設定しているために、免震支承の変位は各ケースであまり変化がなく、せん断ひずみも相違が少ないため、ゴム厚と層数もほぼ同一となることがわかった。

5.実地震記録波による動的応答解析 試みに、上記の検討に用いた設定橋梁モデルの中の橋脚高さ20mの免震橋のFEMモデル(鋼製; S20M, コンクリート製; C20M)に対し、本年1月17日に発生した阪神・淡路大地震の加速度記録波(神戸NS成分; 最大820.6 gal; 卓越周波数1Hz~3Hz付近)²⁾(図5)を入力して等価線形化手法による動的応答解析を行った。上部工(太線)と橋脚天端(細線)の変位応答波形と加速度応答波形をそれぞれ図6、図7に示す。ここで、(a)はコンクリート橋脚橋、(b)は鋼製橋脚橋である。応答変位は鋼製橋脚橋のほうがやや大きい、応答加速度は鋼製橋脚橋のほうが、特に橋脚天端でかなり低下しており、明らかに低剛性橋脚の影響が現れた。

6.おわりに 比較的剛性の低い鋼製橋脚を免震システムの一部と考えることにより、免震支承の設計に変化が生じるかを検討したが、文献1)の設計法に基づいた場合にはコンクリート製橋脚との差は殆どないという結果が得られた。設計水平震度の差もあまりなかったが、実地震記録波による動的応答解析では明らかに鋼製橋脚の応答加速度が低くなっており、今後両者の整合性をとることについて検討すべきであると思われる。

参考文献: 1)建設省、道路橋の免震設計法マニュアル(案)。2)気象庁、平成7年兵庫県南部地震の気象庁87型磁気式強震計の記録。

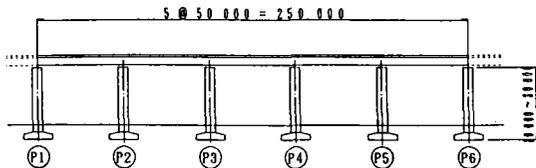


図1 橋梁モデル図(5径間連続鋼箱桁橋)

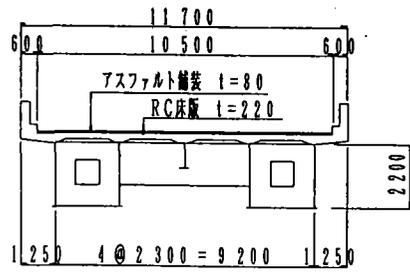


図2 上部工断面図

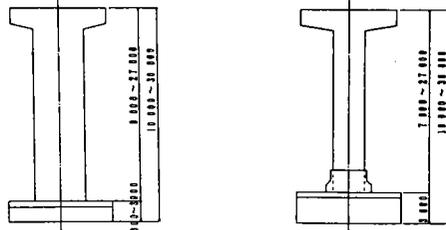


図3 (a)コンクリート橋脚概略図 (b) 鋼製橋脚概略図

(t/m)		弾性剛性	降伏剛性	種別	端支点	中間支点	
鋼製橋脚	S-10M	31,400	31,400	上部構造重量 (t/m)	3.250		
	S-20M	4,200	4,200		免震装置の種類	LRB	
	S-30M	1,075	1,075			免震装置の個数(支点当り)	2
コンクリート橋脚	C-10M	95,000	95,000	鉛直 最大反力 R _{max} (t)	230		500
	C-20M	9,900	9,900		反力 死荷重反力 R _d (t)	130	330
	C-30M	6,800	6,800			支承温度変化移動量 (cm)	3.8

表1 下部工剛性 表2 免震支承設計条件

図4 免震設計上の解析モデル

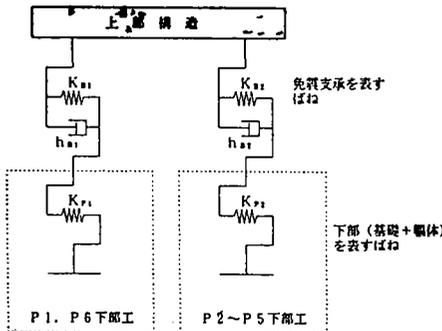


図4 免震設計上の解析モデル

種別	C-10M				C-20M				C-30M				許容値
	L1レベル		L2レベル		L1レベル		L2レベル		L1レベル		L2レベル		
	端脚	中間脚	端脚	中間脚	端脚	中間脚	端脚	中間脚	端脚	中間脚	端脚	中間脚	
上部構造変位 U _r (cm)	4.01		30.42		4.98		32.21		5.47		32.67		
支承の設計変位 U _a (cm)	3.95	3.89	30.31	30.10	4.38	3.80	31.07	29.17	4.58	3.76	31.00	28.36	
支承の有効等価剛性 K _{aa} (t/m)	928.2	1001.4	216.4	543.1	863.4	1930.0	213.4	548.0	836.4	1943.5	213.6	552.7	
支承の有効等価減衰定数 h _{aa} (%)	27.0	27.5	21.2	15.4	27.5	27.6	21.0	15.7	27.6	27.6	21.0	15.0	
地震水平力(鉛脚当り) F _a (t)	57.3	117.6	111.3	310.0	58.2	116.6	113.2	300.9	60.1	116.2	113.0	292.9	
慣性力の分担率	0.098	0.201	0.076	0.212	0.101	0.199	0.081	0.215	0.103	0.199	0.081	0.210	
固有周期 T (sec)	0.847		1.593		0.905		1.673		1.020		1.686		
()内は非免震フレームモデル	(0.265)		(0.265)		(0.652)		(0.652)		(0.991)		(0.991)		
設計水平震度 Kh	0.18		0.45		0.18		0.44		0.18		0.43		
減衰定数 h (%)	26.7		16.2		21.8		15.5		20.2		15.4		
支持応力 σ (kg/cm ²)	78.2	78.7	—	—	78.2	78.7	—	—	78.2	78.7	—	—	≦ 80
ゴムの局部せん断ひずみ	20.3	20.2	155.4	226.3	22.5	28.6	159.3	218.3	23.5	28.3	15.0	213.2	≦ 150/250
合計 γ (%)	74.6	85.0	268.9	327.5	77.3	94.3	276.5	318.7	78.6	94.0	275.9	310.9	≦ 278/417

鋼製橋脚

仕様諸元	端支点用①	端支点用②	中間支点用
計算寸法 a × b (mm)	580 × 580	630 × 630	830 × 830
ゴム厚×層数 (mm)	13 × 15層	14 × 19層	19 × 7層
鉛プラグ φ × n (mm)	80 × 4本	80 × 4本	105 × 4本
ゴム体積 (m ³)	0.0656	0.1056	0.0916

注1) S-30Mの端支点用支承のみ端支点用②を使用する。
2) ゴム体積は鉛プラグを控除しない値である。

表4 免震支承の仕様

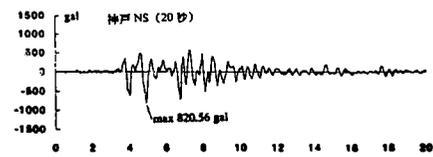


図5 入力加速度波形[文献2])

種別	S-10M				S-20M				S-30M				許容値
	L1レベル		L2レベル		L1レベル		L2レベル		L1レベル		L2レベル		
	端脚	中間脚	端脚	中間脚	端脚	中間脚	端脚	中間脚	端脚	中間脚	端脚	中間脚	
上部構造変位 U _r (cm)	4.24		31.04		6.43		39.53		10.56		50.20		
支承の設計変位 U _a (cm)	4.06	3.87	30.68	30.05	4.07	3.69	36.40	31.76	5.11	1.96	46.08	30.24	
支承の有効等価剛性 K _{aa} (t/m)	911.3	1008.5	214.9	543.3	791.4	1908.0	196.6	535.5	729.6	3045.9	172.4	542.3	
支承の有効等価減衰定数 h _{aa} (%)	27.2	27.5	21.1	15.4	27.8	27.7	18.6	14.8	27.3	25.3	18.0	15.3	
地震水平力(鉛脚当り) F _a (t)	57.8	117.4	112.2	309.5	61.7	115.4	120.7	403.0	58.0	102.6	172.4	542.3	
慣性力の分担率	0.099	0.201	0.077	0.212	0.106	0.197	0.196	0.148	0.120	0.190	0.092	0.203	
固有周期 T (sec)	0.870		1.610		1.121		1.780		1.636		2.210		
()内は非免震フレームモデル	(0.371)		(0.371)		(0.907)		(0.907)		(1.768)		(1.768)		
設計水平震度 Kh	0.18		0.45		0.18		0.48		0.15		0.46		
減衰定数 h (%)	25.3		16.0		17.7		13.8		8.49		11.1		
支持応力 σ (kg/cm ²)	78.2	78.7	—	—	78.2	78.7	—	—	65.2	78.7	—	—	≦ 80
ゴムの局部せん断ひずみ	20.8	20.1	157.3	101.1	25.5	27.7	187.1	238.8	10.2	14.7	173.3	227.4	≦ 150/250
合計 γ (%)	75.3	84.8	272.6	327.0	80.9	83.4	339.0	343.5	64.7	78.8	254.4	328.8	≦ 278/417

表3 免震支承設計結果

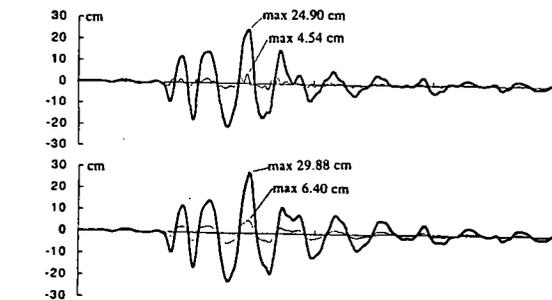


図6 変位応答波形 [(a)コンクリート製橋脚橋、(b)鋼製橋脚橋]

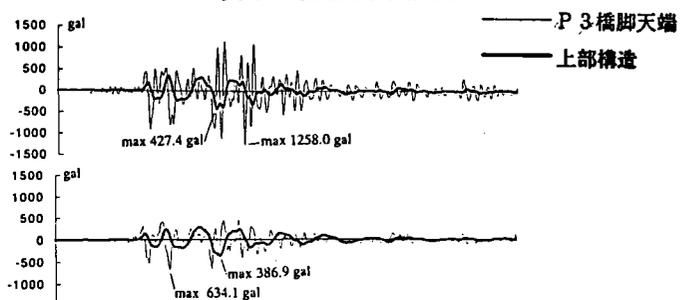


図7 加速度応答波形

鋼製橋脚連続桁橋の免震化に関する基礎的研究
A Study on Dynamic Behavior of the Seismic-Isolation System
of Continuous Girder Bridges Supported by Steel Piers

○竹ノ内勇* 長嶋文雄** 岩塚由雄*** 大丸隆**** 内田光彦*****

Isamu TAKENOUCI, Fumio NAGASHIMA, Yoshio IWATUKA, Takashi OHMARU and Teruhiko UCHIDA

ABSTRACT The purpose of this study is to obtain the fundamental dynamic behavior of seismic-isolated continuous girder bridges with steel piers utilizing the analytical method. The analytical study is composed of a case study applying design criteria in the Manual (draft) for Seismic Isolation Design Method of Highway Bridges¹⁾ and a comparative study between the types of steel and concrete piers based on a dynamic response analysis by using standard seismic wave^{1), 2)} of level 1 and level 2 and the actual seismic wave records of Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake³⁾. As a results of the former study, difference of pier rigidity hardly give influence to both the dimensions of seismic isolation devices and seismic design intensity. The latter study shows that the response acceleration of steel pier bridges of 20 m from 10 m high remains at the level of the response acceleration of concrete pier bridges, and there is not the difference. But, the response acceleration of steel pier bridges becomes smaller than that of concrete pier bridges when pier becomes more than 30 m high.

Key Words: 免震システム、鋼製橋脚橋、耐震設計、動的応答解析

seismic isolation system, bridges with steel piers, seismic design, dynamic response analysis

1. はじめに

橋梁の免震設計の実施例は、RC橋脚橋のみであり、都市交通などで多用されている鋼製橋脚橋では前例が殆どない。この原因として考えられるのは、(1) 都市部の高架橋では免震化が不向きであるとされる軟弱地盤に建設されることが多いため、(2) 鋼製橋脚の曲げ剛性がRC橋脚にくらべて低く、その変形量が大きいため、地震時の変形が免震装置に集中せず、免震効果が十分に発揮されないと考えられているため、(3) 鋼製橋脚橋における地震時の保有水平耐力特性が明らかにされていないためなどであろう。

しかし、鋼製橋脚はRC橋脚にくらべて軽量であり、さらに曲げ剛性が低いので、免震設計法における長周期化が容易であるという特性を有する。また、免震設計を行った場合は、一般に上部工の加速度応答は低下するが橋脚の加速度応答は増加する傾向があるため、RC橋脚よりも軽量の鋼製橋脚は、その基部に及ぼすせん断力の影響を軽減させることができるとされる。

他方、鋼製橋脚は、免震装置内部に高減衰機能を持たせているために全体系としての減衰特性にはあまり大きな変化がないが、RC橋脚にくらべて多少内部減衰が小さいという面を持っている。

本研究は、(1) 従来は詳しく検討されてこなかった鋼製橋脚を有する免震橋の基礎的な動特性を明らかにすること、(2) 阪神・淡路大震災でも見られたような鋼製橋脚の耐震性能に着目し、その軽量性、低剛性を免震支承とともに橋梁全体系の免震システムとして考えることが可能であるかを検討することなどを目的としている。

従って、ここでは基礎的な免震システムの特性を得るために第I種地盤を想定することにし、免震支承は標準的な鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)を用いることにした。

* オイレス工業(株) 第2技術設計1課 (〒105 東京都港区芝大門1-3-2 芝細田ビル)
** 工博 東京都立大学助教授 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)
*** (株) 巴コーポレーション 橋梁設計部 (〒135 東京都江東区豊洲3-4-5)
**** (株) 建設技術研究所 技術第4部 (〒103 東京都中央区日本橋本町4-9-11 第9中央ビル)
***** 東京都立大学大学院 工学研究科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)

本論文ではまず、軽量で比較的剛性の低い鋼製橋脚を持つ橋梁を免震化した場合の特性を、道路橋の免震設計法マニュアル(案)¹⁾に基づいた免震支承の設計手法を用いて、ケーススタディを通して明らかにする。このような解析方法は、動的応答解析を実際に行わないので、便宜上本論文では以後「静的解析」と呼ぶことにする。

次に、免震設計された鋼製橋脚橋とRC橋脚橋両者の、橋脚高さなどをパラメータとした時刻歴応答解析を通して、特に鋼製橋脚の軽量かつ低剛性という性質が橋梁全体の免震特性にどのような影響を及ぼすのかを調べる。ここで用いた地震入力波形は文献2)の標準加速度波形例であるレベル1(L1)と文献1)のレベル2(L2)を用いた。また、この「動的解析」結果と「静的解析」結果を比較し、両解析法の整合性などについて検討を加える。

さらに、上記の動的応答解析結果を確認するために、この度の阪神・淡路大震災で記録された強震計波形データ(神戸)を用いた実地震波記録による動的応答解析を行なう。

なお、本論文は文献4)と5)および、その後新しく得られた解析結果などを加えて再検討し、まとめたものである。

2. 橋梁の事例解析モデル

ケーススタディ用の橋梁モデルとして、全てのケースで図-1に示すような橋脚の高さが等しい支間長50mの5径間連続高架橋を想定し、①橋脚材質はRC製(C)と鋼製(S)の2種類、②橋脚高は10, 20, 30, 40mの4種類、③それらを免震化した場合と非免震の場合、④入力地震波が震度法レベル(L1)と水平耐力レベル(L2)の2種類であり、全組合せは32通りとした。

なお、端部橋脚を記号P1, P6、中間橋脚をP2-P5で表す。地震波は橋軸方向に入力するものとし、免震支承にはLRB(鉛プラグ入り積層ゴム支承)を想定する。

図-2に上部構造断面概略図を示したが、上部構造は全てのケースで等しい断面を有する鋼箱桁とした。

橋脚は、図-3(a), (b)にそれぞれ示すように、RC製と鋼製ともに矩形断面を有するT型の1本柱形式とした。

鋼製橋脚で橋脚高さ30m, 40mはあまり現実的なものではないが、RC橋脚との直接的な比較をするために、さらに工学的興味に基づいて試設計したものである。また、橋脚が次第に高くなる場合の免震特性のみの変化に着目するために、その他の要因、特に杭基礎などの基礎の剛性による影響が動特性に現われないように、ここでは地盤をI種地盤とした。

上部構造と下部構造の主な諸元をまとめると以下の通りである。

(1) 上部構造：上部構造は、一般的な桁橋である

上記鋼橋を対象にモデル化を行った。断面諸元や重量は道路橋示方書⁶⁾に従い、検討計算を行って設定した。全てのケースで次のような諸元を持たせた。

- ・形式：5径間連続RC床版非合成鋼箱桁(道路橋：B活荷重)
- ・支間割り：5 @ 50.000 m = 250.000m
- ・重量：総重量 W=3250tf、単位長さ重量 w=13.0tf/m

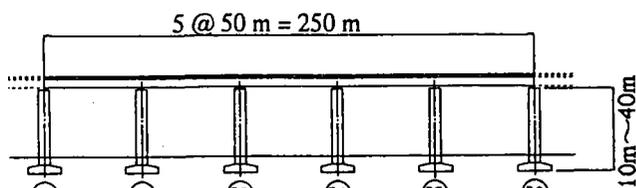


図-1 橋梁全体系モデル図(5径間連続鋼箱桁橋)

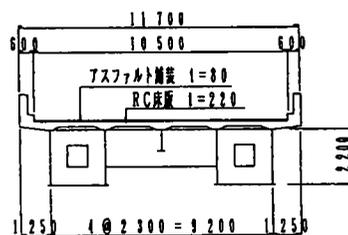


図-2 上部構造断面図

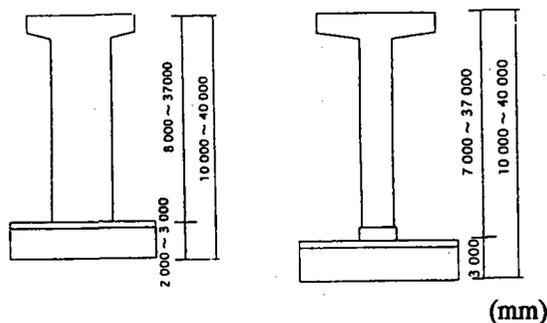


図-3 (a) RC橋脚概略図 (b) 鋼製橋脚概略図

(2) 下部構造：鋼製橋脚断面は使用材質SM490材、RC橋脚断面は使用鉄筋SD345,D35の二段配筋を上限として断面計算を行って設定した。図-4に橋脚高さ30mの鋼製橋脚断面形状を例示するように、各橋脚について、数回の断面変更を行い、最適設計を行っている。

- ・脚柱形式：鋼製橋脚、RC橋脚ともT型1本柱形式
- ・橋脚全高：H=10m、20m、30m、40mの4ケース
- ・基礎形式：直接基礎

鋼製橋脚の基礎フーチング厚は、脚基部アンカーフレーム構造の埋め込み深さを配慮して、全て3.0mとした。また、RC橋脚のフーチング厚は、実際にはフーチング平面寸法との関連で剛体としての厚さを確保することで決定される。すなわち、支持地盤との相対的な剛性により変化するものだが、ここではRC橋脚の一般的な事例を参考に設定することとし、H=10mのケースは2m、H=20m以上は鋼製橋脚との脚柱高の統一も配慮して3mとした。

想定した橋脚剛性については表-1にまとめて示す。橋脚(橋梁)種別を記号で表すことにし、Sは鋼製橋脚を、CはRC橋脚を、またハイフン以後の値は橋脚高さを示す。

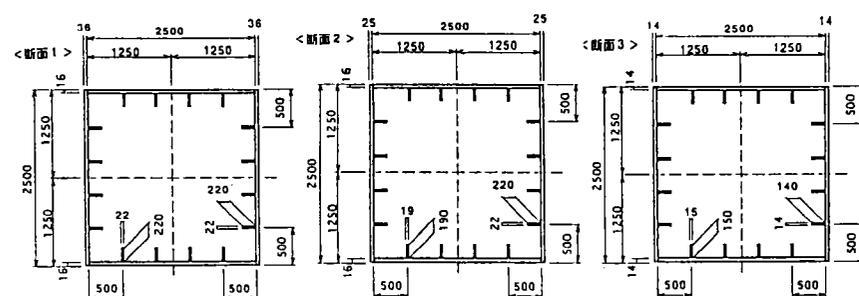


図-4 鋼製橋脚断面形状 (H=30m)

表-1 鋼製橋脚とRC製橋脚の剛性の比較

		(tf/m)	
	橋脚種類	弾性剛性	降伏剛性
鋼製橋脚	S-10M	31,400	31,400
	S-20M	4,200	4,200
	S-30M	1,075	1,075
	S-40M	470	470
コンクリート製橋脚	C-10M	95,000	95,000
	C-20M	9,900	9,900
	C-30M	6,800	6,800
	C-40M	3,168	3,168

3. 免震支承設計条件

免震支承はLRB(鉛プラグ入り積層ゴム)を用いるものとし、その形状を決定するための設計条件を以下のように設定した。

- ①免震は橋軸方向のみ考慮する。
- ②端支点のL1レベルでの地震水平力は中間支点の地震水平力の1/2とする。
- ③橋梁構造物の立地条件は、地域区分A、I種地盤、重要度1級とする。
- ④1橋脚に2つの免震装置を設置する。また、端橋脚(P1,P6)と中間橋脚(P2~P5)でそれぞれ1種類の免震支承形状を設定し、端橋脚を支承種類1、中間橋脚を支承種類2とする。
- ⑤免震支承を用い免震化した場合の橋梁の固有周期は文献1)に基づき非免震の場合の2倍程度の周期を目標とする。
- ⑥地震時の上部工移動量を震度法レベルで15cm程度以下とする。
- ⑦端部橋脚は上部工が掛け違いになっていることを想定し、この橋脚の震度法レベル地震時に分担する慣性力は、支承の受ける鉛直反力比と同一とし、中間橋脚の分担する慣性力の1/2となるように慣性力分散比を調整する。
- ⑧ゴムのせん断弾性係数は、最も一般的に用いられる値として $G = 10\text{kg/cm}^2$ を採用する。
- ⑨ゴムの平面寸法は50mm刻みの正方形で設定する。
- ⑩ゴムの耐久性(主に疲労特性)に関与する形状係数(ゴム製品の接着面の拘束の程度を表すもので受圧面積と自由表面積の比)は一般的に用いられる値として $S = 10$ 程度を目標とする。
- ⑪「道路橋支承便覧」の規定により、桁に回転が生じた場合でも常にゴム支承の全面積で圧縮応力を受けた状態にするためにゴム支承の回転ひずみ量より圧縮ひずみ量が大きくなるようにゴム厚さを決定する。またこのときの桁に生じる回転角は、端部橋脚で $1/150$ 、中間部橋脚で $1/300$ とする。
- ⑫鉛プラグの大きさはゴム平面面積の約5%の面積となるよう設定した。

⑬ 支圧応力その他の許容値は「道路橋支承便覧」および文献1) に基づくものとした。

⑭ 常時の支承変位は上部工の温度膨張係数より、P1,P6で3.8 cm、P2,P5で2.3 cm、P3,P4で0.8 cmとする。

その他、鉛直反力などの免震設計条件は表2に示す通りである。

種 別	端支点	中間支点
上部構造重量 (t/f)	3.250	
免震装置の種類	LRB	
免震装置の個数 (支点当り)	2	
鉛直 最大反力 $R_{max}(t)$	230	500
反力 死荷重反力 $R_d(t/f)$	130	330
支承温度変化移動量 (cm)	3.8	2.3, 0.8

表-2 免震支承設計条件

4. 簡易モデルを用いた静的解析

前章の設計条件に基づき、図-5に示すような免震橋梁の簡易モデルに対し地震時慣性力が水平方向に静的に加えられるものとして、そのときの力のつりあいから免震支承に生じる変位を求める。

すなわち地震時の上部工慣性力 F は

$$F = W \cdot k_h \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 W : 上部工重量、 k_h : 設計水平震度である。

このとき構造系全体の剛性は、

$$\Sigma k = \frac{1}{\frac{2}{k_{B1} + k_{P1}} + \frac{4}{k_{B2} + k_{P2}}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

従って上部工の変位は、

$$u_i = \frac{F}{\Sigma k} \quad \dots\dots\dots (3)$$

これより各支承の変位 u_{Bi} が次のように得られる。

$$u_{Bi} = u_i \frac{k_{Bi}}{k_{Bi} + k_{Pi}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

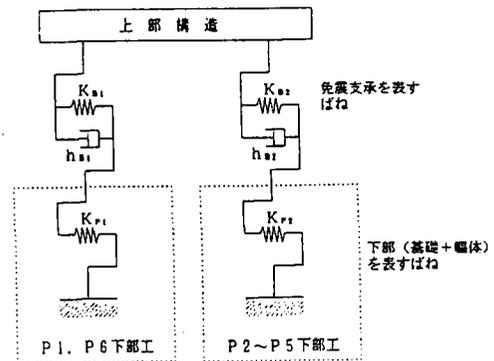


図-5 免震設計上の「静的解析」モデル

しかし、LRB支承は鉛の変形抵抗力の非線型性のために、支承形状が決まってもその剛性値 k_{Bi} は一義的には決定されない。

鉛のせん断応力度は実験式よりゴムのせん断ひずみに対する2次式で表される。

$$\begin{aligned} q &= -283.6\gamma^2 + 138.3\gamma + 85.0 & (0 \leq \gamma \leq 0.5) \\ q &= 28.3\gamma^2 - 128.1\gamma + 163.0 & (0.5 \leq \gamma \leq 2.0) \\ q &= 20 & (2.0 \leq \gamma \leq 2.5) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 q : 鉛のせん断応力度 (kg/cm^2)、 γ : ゴムのせん断ひずみ $\gamma = u_{Bi} / \Sigma t_e$ 、またここで Σt_e : ゴムの層厚 (cm) である。

支承の剛性値 (等価剛性) は次式で示される。

$$k_{Bi} = \frac{A_R \cdot G \cdot \gamma_i + A_P \cdot q}{u_{Bi}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 A_R : ゴムの支圧面積で鉛の断面積を控除した内部補強板面積 (cm^2) である。また、 G : ゴムのせん断弾性係数 (kg/cm^2)、 A_P : 鉛の断面積 (cm^2) である。

すなわち式(6)より γ_i が決まらなければ k_{Bi} が決まらず、また γ_i を決めるためには式(4)より k_{Bi} が決定していなければならない。これを解くためには γ_i の初期値を仮定し、繰り返し計算によって u_{Bi} および k_{Bi} を収束させて決定する手順をとる。

地震力としては文献1)に基づき、震度法レベルと保有水平耐力レベルの地震について算出した。

表-3はこうして鋼製橋脚橋とRC橋脚橋について、また、それぞれ4通りの橋脚高さについて免震支承の設計をして得られた結果を整理したものである。また、最終的な免震支承の仕様として表-4に示すような4種類の免震支承を必要とすることがわかった。ただし、端支点用の2と3はそれぞれ鋼

製橋脚橋の橋脚高さが30mと40mのものであり、その他は各ケースで端部用支承、中間橋脚用支承とも全く同一形状の支承が選定される結果となった。

表-3 (a) 鋼製橋脚橋免震支承設計結果

種別	S-10m				S-20m				S-30m				S-40m				
	L1		L2		L1		L2		L1		L2		L1		L2		
	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	
上部構造変位 U_d (cm)	4.24		31.04		6.43		39.53		10.56		59.20		16.85		83.07		30.24
支承の設計変位 U_d (cm)	4.06	3.87	30.68	30.05	4.97	3.69	36.49	31.76	5.11	1.96	46.08	30.24	3.84	1.96	41.92	30.24	
支承の有効等価剛性 K_e (t/m)	911.3	1908.5	214.9	543.3	791.4	1968.0	196.6	535.5	729.6	3045.9	172.4	542.3	1003.6	572.2	245.8	570.5	
支承の有効等価減衰定数 b_{eq} (%)	27.2	27.5	21.1	15.4	27.8	27.7	19.6	14.8	27.3	25.3	18.0	15.3	27.7	3.8	14.2	16.8	
地震水平力(1橋脚当たり) F_d (t)	57.8	117.4	112.2	309.5	61.7	115.4	129.7	403.0	58.6	92.6	172.4	542.3	61.1	92.6	193.4	269.8	
慣性力の分担率	0.099	0.201	0.077	0.212	0.106	0.197	0.196	0.148	0.120	0.190	0.092	0.203	0.144	0.190	0.132	0.184	
固有周期 T (sec)	0.876	1.601			1.121	1.980			1.636	2.210			2.258		2.688		
1内は非免震フレームモデル	[0.371]	[0.371]			[0.907]	[0.907]			[1.768]	[1.786]			[2.687]		[2.687]		
設計水平変位 K_h	0.18	0.45			0.18	0.48			0.15	0.46			0.13		0.45		
減衰定数 b (%)	25.3	16.0			17.7	13.8			9.5	11.1			3.1		8.7		
支承圧力 q (t/cm ²)	78.2	78.7			78.2	78.7			65.2	78.7			55.2	78.7			
ゴムの層数 水平変位 γ (%)	20.8	29.1	157.3	101.1	23.5	27.7	187.1	238.8	19.2	14.7	173.3	227.4	19.2	6.6	209.6	194.4	
せん断ひずみ 合計 γ (%)	75.3	94.8	272.6	327.0	80.9	93.4	339.6	343.5	64.7	78.8	354.4	328.8	68.3	69.9	340.0	287.5	

表-3 (b) RC橋脚橋免震支承設計結果

種別	C-10m				C-20m				C-30m				C-40m				
	L1		L2		L1		L2		L1		L2		L1		L2		
	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	端橋脚	中間橋脚	
上部構造変位 U_d (cm)	4.03		30.42		4.98		32.21		5.47		32.67		6.48		40.91		
支承の設計変位 U_d (cm)	3.95	3.89	30.31	30.10	4.18	3.80	31.07	29.17	4.58	3.76	31.00	28.36	4.58	3.07	36.85	30.88	
支承の有効等価剛性 K_e (t/m)	928.2	1901.4	216.4	543.1	863.4	1930.0	213.4	548.0	836.4	1943.5	213.6	552.7	836.2	222.0	195.8	539.3	
支承の有効等価減衰定数 b_{eq} (%)	27.0	27.5	21.2	15.4	27.5	27.6	21.0	15.7	27.6	27.6	21.0	15.9	27.6	27.8	19.5	15.1	
地震水平力(1橋脚当たり) F_d (t)	57.3	117.6	111.3	310.0	59.2	116.6	113.2	300.9	60.1	116.2	113.0	292.9	60.1	108.1	128.4	217.7	
慣性力の分担率	0.098	0.201	0.076	0.212	0.101	0.199	0.081	0.215	0.103	0.199	0.081	0.210	0.109	0.196	0.084	0.208	
固有周期 T (sec)	0.847	1.593			0.965	1.673			1.020	1.686			1.169		1.829		
1内は非免震フレームモデル	[0.265]	[0.265]			[0.632]	[0.632]			[0.991]	[0.991]			[1.179]		[1.179]		
設計水平変位 K_h	0.18	0.45			0.18	0.44			0.18	0.43			0.17		0.47		
減衰定数 b (%)	25.7	16.2			21.8	15.5			20.2	15.4			15.6		13.5		
支承圧力 q (t/cm ²)	78.2	78.7			78.2	78.7			78.2	78.7			78.2	78.7			
ゴムの層数 水平変位 γ (%)	20.3	29.2	155.4	226.3	22.5	28.6	159.3	219.3	23.5	28.3	15.9	213.2	23.5	23.1	189.0	232.2	
せん断ひずみ 合計 γ (%)	74.6	95.0	268.9	327.5	77.1	94.3	276.5	318.7	78.6	94.0	275.9	310.9	78.6	88.2	344.5	335.0	

これは、外形寸法については、経済的設計を行うために鉛直最大反力から計算される支圧応力度を許容値80kg/cm²にできるだけ近づけることを試みたが、上部工の鉛直最大反力は、当然橋脚剛性(材質・高さ)などに無関係で、各検討ケースで同一であるために外形寸法が同一となったと解釈される。

表-4 免震支承の仕様

仕様諸元	端支点用1	端支点用2	端支点用3	中間支点用
計算寸法 $a \times b$ (mm ²)	580 × 580	630 × 630	680 × 680	830 × 830
ゴム厚×層数 (mm)	13 × 13層	14 × 19層	20 × 10層	19 × 7層
鉛プラグ $\phi \times n$ (mm)	80 × 4本	80 × 4本	80 × 4本	105 × 4本
ゴム体積 (m ³)	0.0656	0.1056	0.0925	0.0916

また、ゴム厚と層数については地震時(保有水平耐力レベル)のせん断ひずみが形状決定の要因となったが、免震支承の変位は各ケースであまり変化がなく、結果として殆ど同じゴム厚と層数になったものと思われる。このことは支承に変形を集中させるという免震支承の効果が30m程度までの橋脚の橋梁に対しては有効に働いており、比較的剛性の柔らかい鋼製橋脚橋に対しては免震装置が機能する可能性を示すものである。

5. 動的応答解析

5.1 有限要素解析モデル

各想定モデルに対して、文献1)に沿ったLRBの設計を行ったところ、RC橋脚橋と鋼製橋脚橋の支承は表4に示すように殆ど同じ仕様になった。また、設計水平震度も殆ど同じ値になるという結果が得られ、「静的解析」によれば、鋼製橋脚はRC橋脚橋と同程度の免震効果は得られるという結果となった。

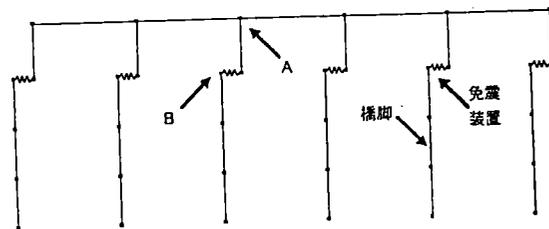


図-6 有限要素解析モデル略図

しかし、鋼製橋脚橋はRC橋脚橋にくらべて確実に長周期化しており、免震性が期待できたため、「静的解析」で用いた各ケースについてL1, L2の標準地震波形を用いて等価線形化手法を用いた動的解析を行うことにした。

免震支承は等価剛性を有するばねとしてモデル化し、橋脚は梁要素を用いてモデル化した。有限要素モデルの全体系略図を図-6に示したが、I種地盤を想定したため、基礎端部は固定端と仮定した。

解析はモーダルアナリシス手法を用いて行ったが、そのときのモード減衰はRC橋脚橋で5%、鋼製橋脚橋で3%とし、また免震支承については等価減衰定数を有する集中減衰を定義した。非免震モデルは免震支承の剛性を十分大きくすることで対処した。解析後の評価は、図-6に示すように上部構造としてA点、下部構造は橋脚の天端のB点で行うことにした。

5.2 動的応答解析結果

図-7に、L2波入力時の鋼製橋脚30m (S-30) の場合と、RC製橋脚 (C-30) の場合の加速度 (a) ~ (d)、変位 (e) ~ (h) の時刻歴応答波形を例示する。また、変位・速度・加速度応答の最大値 (L1, L2) を表-5に示す。さらに、L2波入力に対する、免震化した場合と非免震の場合の変位・加速度応答の最大値を図-8 (a), (b) に示す。

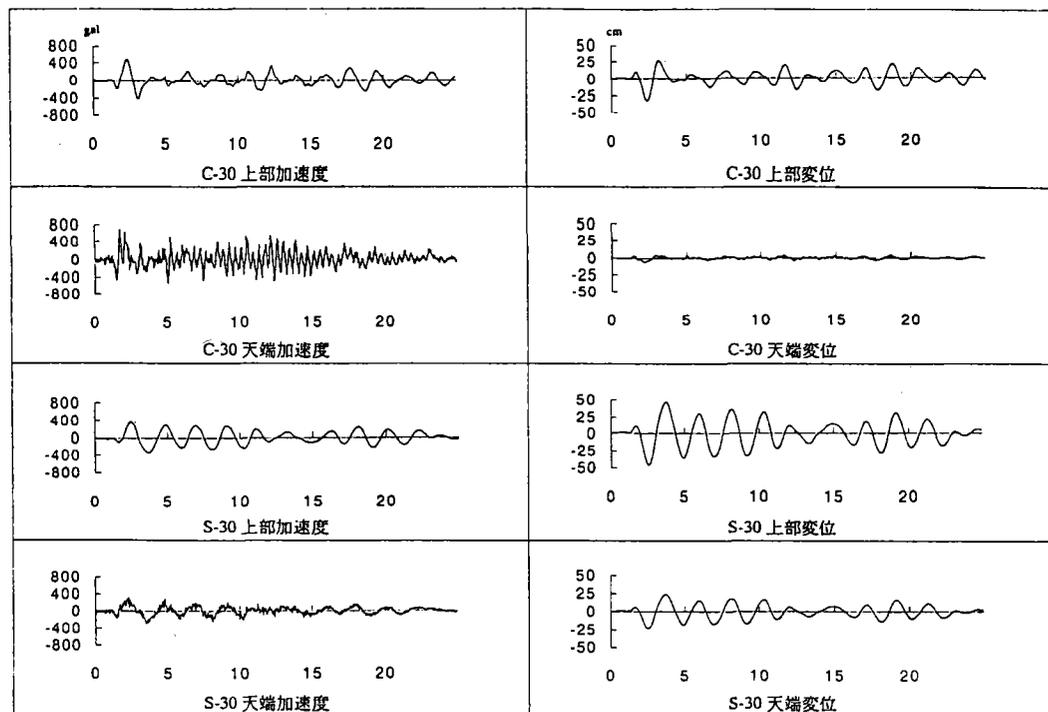


図-7 応答波形例 (橋脚高さ 30 m の免震橋, L2 波入力)

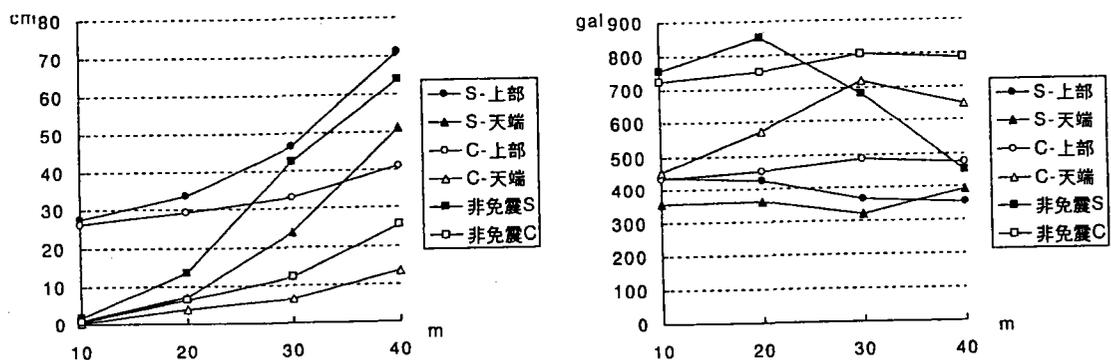


図-8 (a) 最大応答変位 (L2波入力)

(b) 最大応答加速度 (L2波入力)

橋脚剛性の差が現れ、鋼製 (S) は RC 製 (C) の変位よりも大きく、長時間揺れが続くが、加速度の最大値は小さくなっている。ただし、鋼製脚橋においても最大変位は免震支承設計時の制約条件 (L1 で 15cm) 以内となっている。また、上部構造の変位と橋脚天端の相対変位、すなわち免震支承のせん断変形量の最大値 (図-9 または表-5 の免震装置の欄) は橋脚高 10m, 20m では殆ど差がないが、30~40m で

鋼製の方が小さくなっている。

一方、L2波入力に対する加速度応答の最大値は、図-8(b)に示すように橋脚高さ30~40mでは鋼製橋脚橋はRC橋脚橋よりも加速度はかなり小さく抑えられている。特に、橋脚天端の応答加速度が小さく、30mでの橋脚天端の最大加速度は321.9galである。また、変位、加速度応答波形のピークの現れる時刻に差があり、RC橋脚橋の方が鋼製橋脚橋よりも早くピークが現れる。鋼製橋脚橋で脚長が20mから30mにかけて応答値に変化が現われているのは、系の固有周期がこの点で入力波の卓越周期を越えたためと思われる。

図-10はL2入力波(I種地盤)の加速度応答スペクトル上に加速度応答の最大値をプロットしたものである。

RC橋脚橋は非免震時の周期が短いため免震化することで2倍以上の周期としやすいが、加速度応答スペクトルが下降する範囲まで長周期化することは難しく、主に内部減衰が大きいことで免震効果をもたらしている。他方、鋼製橋脚橋は長周期を計りやすい構造になっていることがわかる。

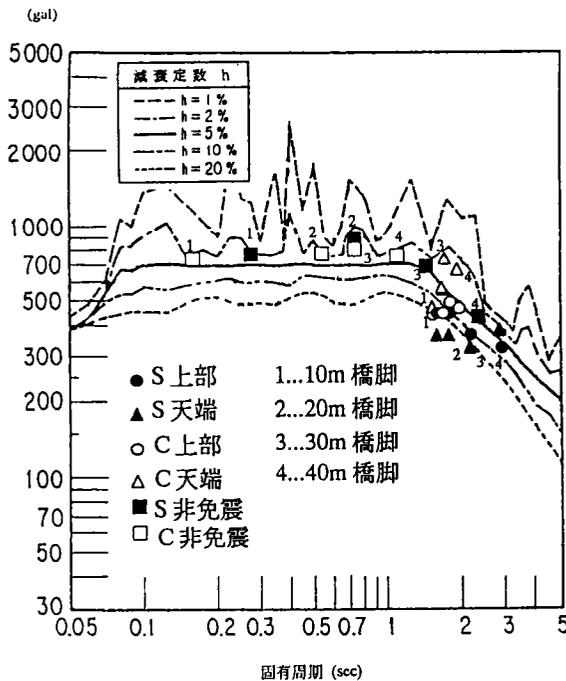


図-10 応答スペクトル上に示す加速度応答

5.3 実地震記録波による動的応答解析結果

前述の事例解析橋梁モデルの中の橋脚高さ20mの免震橋のFEMモデル(鋼製;S20M,RC製;C20M)に対し、本年1月17日に発生した阪神・淡路大地震の加速度記録波(神戸NS成分;最大820.6gal;卓越周波数1Hz~3Hz付近)³⁾(図-11)を入力して等価線形化手法による動的応答解析を行った。

上部工(太線)と橋脚天端(細線)の変位応答波形と加速度応答波形をそれぞれ図12、図13に示す。ここで、(a)はRC橋脚橋、(b)は鋼製橋脚橋の応答結果である。応答変位は、鋼製橋脚橋の方がやや大きい、応答加速度は特に橋脚天端でかなり

		L1レベル		L2レベル	
		変位 (cm)	加速度 (gal)	変位 (cm)	加速度 (gal)
S-10M	上部	2.44	133.0	27.57	439.9
	天端	0.28	104.8	0.97	357.9
	免震装置	2.17		26.65	
	非免震	0.46	215.8	1.60	756.5
C-10M	上部	2.09	125.6	26.19	432.6
	天端	0.10	132.9	0.35	455.5
	免震装置	2.01		25.89	
	非免震	0.17	212.2	0.59	723.1
S-20M	上部	5.04	157.1	33.76	427.3
	天端	2.56	122.6	7.10	359.7
	免震装置	2.55		26.83	
	非免震	4.21	262.8	13.62	850.2
C-20M	上部	3.68	158.5	29.46	453.9
	天端	1.29	133.7	3.82	570.0
	免震装置	2.54		26.83	
	非免震	1.87	218.9	6.49	752.5
S-30M	上部	10.10	133.2	46.45	363.8
	天端	8.64	115.7	23.87	321.9
	免震装置	1.48		22.92	
	非免震	11.17	179.7	42.53	680.9
C-30M	上部	5.18	187.1	32.84	485.3
	天端	2.61	213.4	6.41	719.5
	免震装置	2.92		28.52	
	非免震	3.53	258.6	12.11	799.3
S-40M	上部	15.97	105.4	71.22	354.2
	天端	15.35	144.4	51.09	392.6
	免震装置	0.63		20.34	
	非免震	18.53	128.8	63.89	449.1
C-40M	上部	7.73	179.1	40.91	473.8
	天端	5.31	179.4	13.38	647.5
	免震装置	2.55		29.54	
	非免震	7.16	223.5	25.46	779.6

表-5 最大応答変位と加速度

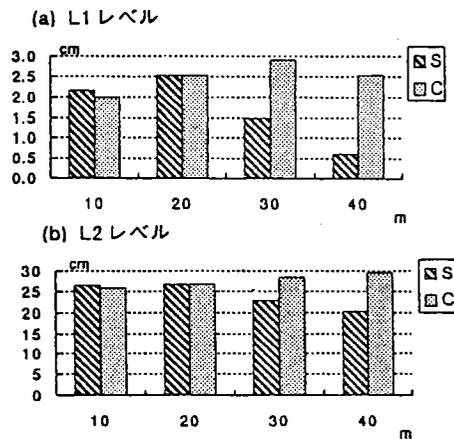


図-9 免震支承のせん断変形量の比較

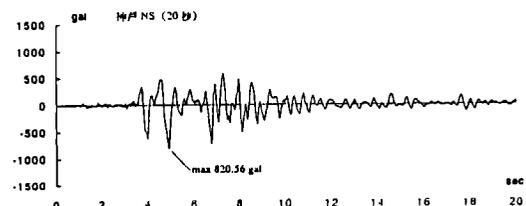


図-11 入力加速度波形 [文献3])

低下しており、明らかに鋼製橋脚橋の低剛性の影響が現れている。以上の結果は5.2 (L2波入力)の結果と合っており、鋼橋脚の軽量・低剛性を免震システムに組み込める可能性を示すものである。

6. まとめ

現行の道路橋の免震設計法マニュアル(案)は、設計例として一例のみ鋼製橋脚橋の免震化について述べている程度に留められており、大部分がRC橋脚橋の免震を主眼として記述されている。また、鋼製橋脚橋で免震設計された事例は殆どないことなどから、その基本的な動特性を明らかにし、さらに一步進んで鋼製橋脚の軽量・低剛性という特性を考慮したシステム免震の可能性について検討した。

免震支承に関する「静的解析」より、文献1)に基づいた支承設計を行うと、RC橋脚橋と鋼製橋脚橋では殆ど同じ形状の免震支承が設計されることになることがわかった。

また、橋脚剛性の相違により両者の変位は多少異なってくるが、設計条件でL1レベルにおける上部工移動量の上限をあらかじめ設定しているために、免震支承の変位は各ケースであまり変化がなく、せん断ひずみも相違が少ないため、ゴム厚と層数もほぼ同一となることがわかった。さらに、「静的解析」によれば設計震度は鋼製橋脚橋の方が若干小さいが、RC橋脚橋と殆ど変わらず同程度の免震効果が期待できるという結果が得られた。

しかし、動的応答解析を用いて橋脚高さなどをパラメータとしてケーススタディを行った結果では、鋼製橋脚橋は橋脚高さが20m~30m程度以上になるとその剛性低下の影響が現れ始め、長周期化が容易になり、RC橋脚橋に比較して変位はやや大きくなるが、特に橋脚天端の加速度はかなり小さくなることがわかった。

また、実地震記録波による動的応答解析でも明らかに相対的に鋼製橋脚橋の応答加速度が低くなっており、今後「静的解析」と動的応答解析の両者の整合性をとることについて検討すべきであると思われる。今回の動的応答解析は支承を除いては線形計算をしており、L2波入力と兵庫県南部地震波入力に対しては適用限界を越えている部分がある。従って、今回は両者の概略的な動特性を比較したということであり、今後、橋脚と基礎部の材料非線形性を考慮し、また他の地盤種に関する応答解析を行い、さらに詳しく両者の比較を行う必要があると考えている。

【謝辞】 本研究を行うにあたり、貴重なデータをご提供いただき、また貴重なご助言をしていただいた鋼橋技術研究会、耐震・免震研究部会の構成員各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：道路橋の免震設計法マニュアル(案)、1992年3月。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編。
- 3) 気象庁：平成7年(1995年)兵庫県南部地震の気象庁87型磁気式強震計の記録。
- 4) 内田光彦・長嶋文雄・田中努・増田陳紀：鋼製橋脚を有する免震橋の動特性に関する研究、土木学会第50回年次学術講演会 概要集I-B785、平成7年9月。
- 5) 大丸隆・長嶋文雄・岩塚由雄・竹ノ内勇：鋼製橋脚橋の免震化に関する一考察、土木学会第50回年次学術講演会概要集I-B786、平成7年9月。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説II鋼橋編、平成6年2月。

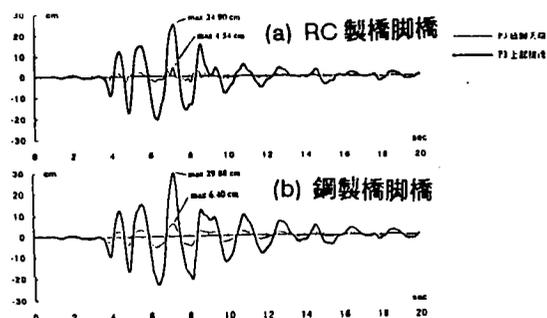


図-12 変位応答波形 (神戸NS成分入力)

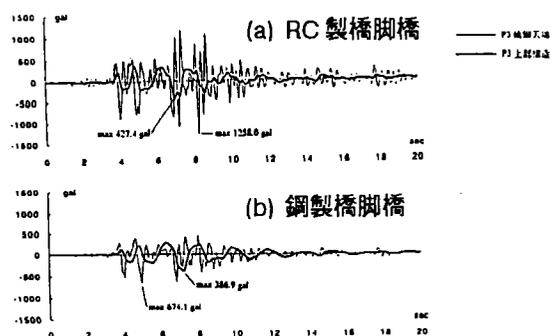


図-13 加速度応答波形 (神戸NS成分入力)