

鋼製橋脚を有する既設橋の免震化による耐震効果
SEISMIC EFFECTS OF RETROFITTING EXISTING BRIDGES WITH STEEL PIERS
BY INTRODUCING SEISMIC ISOLATION

長嶋 文雄*、田中 努**、大丸 隆***、小林 義明****
Fumio NAGASHIMA, Yoshiaki KOBAYASHI, Tsutomu TANAKA and Takashi OHMARU

- * 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) オリエンタルコンサルタンツ (〒213 川崎市高津区久本 3-5-7 ニッセイ溝の口ビル)
- *** (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)

The purpose of this study is to obtain the fundamental dynamic behavior of seismic-isolated continuous girder bridges with steel piers using numerical analyses. The analytical studies are composed of static case studies applying design criteria in the Manual (draft) for Seismic Isolation Design Method of Highway Bridges¹⁾ and dynamic case studies evaluating seismic performance of two types of bridges with steel piers and RC piers to the standard seismic waves²⁾ of level 2 and three waves recorded during the Kobe Earthquake in 1995^{2),3)}.

The analytical model is a bending-shear model consisting mainly of beam, mass and spring, and the moment and curvature relationships of the piers, $M-\phi$ curves are calculated by the method of dissection.

To evaluate the seismic performance, a coefficient of composite stress, root mean square of the stress ratio of maximum shear stress and fiber stress to those of ultimate stress, is used in this paper.

The results of the numerical analyses showed that the coefficients of composite stresses of the steel bridge piers of 10 m ~ 20 m were at the same levels of those of the RC bridges piers.

Key Words: seismic isolation, retrofitting existing bridge, steel piers, seismic design

1. はじめに

鋼製橋脚橋は免震に不向きとされる軟弱地盤上に建設されることが多いこと、大規模地震時における高度の非線形域における耐荷力の照査方法が確立されていないことなどから、免震支承を設置された事例はほとんど見られない。また、鋼製橋脚橋はRC橋脚橋よりも弾性域での曲げ剛性が小さく、RC橋脚橋と比較すると免震支承に変形が集中しにくい橋であり、免震化の効率が悪いと考えられてきた。

しかし、兵庫県南部地震を契機にメタル支承の使用例が減り、免震支承や反力分散支承などのゴムを材料の一部に用いた支承が多く用いられており、鋼製橋脚橋についても、軟弱地盤を含めた各地盤種に対する反力分散化および免震化による長周期化の影響を十分検討する必要がある。また、鋼製橋脚橋にとっても免震化が耐震性向上の有効な手段になる可能性がある。

以上のような背景に基づき、本研究では、鋼製橋脚とRC橋脚の5径間連続桁橋を例にとり、非線形時刻歴解析を通して橋脚の剛性や地盤種と応答の関係などを検討し、鋼製橋脚に対する免震化の効果などについて検討した。

また、検討対象とする橋梁について免震と非免震の2

通りの状態を考慮し、橋脚基部の断面力係数(最大曲げモーメントと最大せん断力の、それぞれの終局耐力に対する比を合成した値)を比較することにより免震の効果を検討した。

2. 解析モデル

橋梁モデルとして、図-1に示すような5径間連続桁橋を選んだ。橋脚高さ10、20、30、40mの4種類、鋼製橋脚橋(STEEL)とRC橋脚橋(RC)の2種類、免震橋と非免震橋の2種類、組み合わせ合計16ケースについて検討を行うことにした。

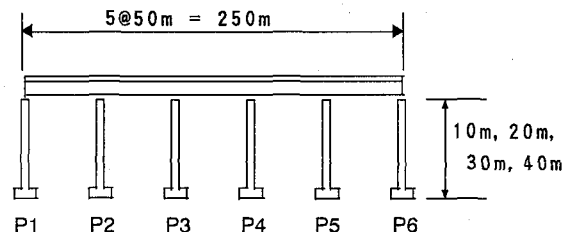


図-1 5径間連続桁橋

上部構造は5径間で3250tfの鋼箱桁(図-2)とし、これは全ケースで共通とする。橋脚は鋼製、RCともに矩形

断面を有するT型の1本柱形式としている。鋼製橋脚、RC橋脚ともに設計水平震度0.25に対し震度法による設計を行い、RC橋脚に関しては復旧仕様⁹⁾に沿った地震時保有水平耐力法の照査を行っている。

以上の条件で設計した橋梁に対して、免震設計法マニュアル(案)¹⁾に従い免震支承(LRB)を設計した。

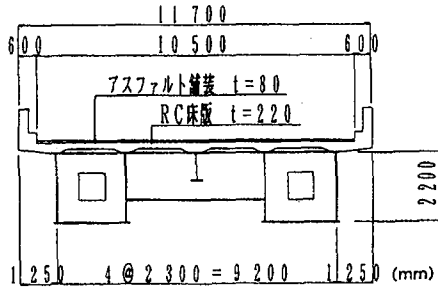


図-2 上部構造図

各ケースの橋梁に対し、免震設計法マニュアル(案)に沿って、支承体積を最小にするという条件のもとで免震支承を設計した結果、固有周期はそれぞれ図-3に示すような値となった(図中の数字は固有周期を示す)。

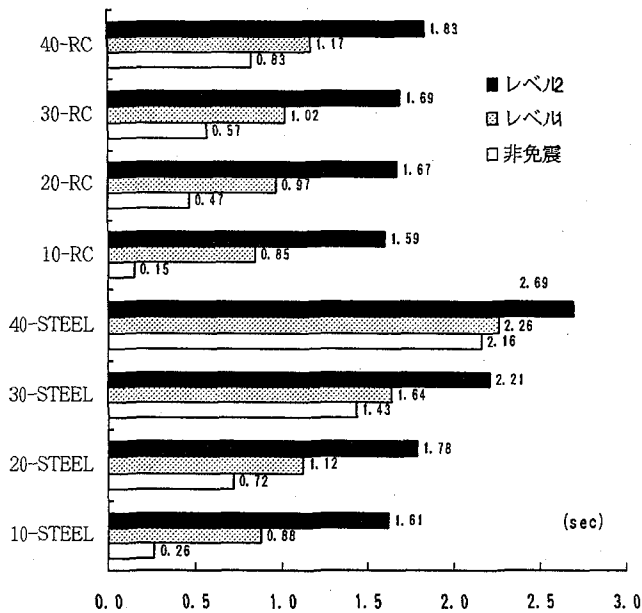


図-3 免震設計による固有周期の変化

橋脚高さ10mの場合、鋼製の非免震での固有周期はRCの0.15秒に対して0.26秒と約1.7倍になっているが、免震した場合はレベル1で0.03秒差、レベル2で0.02秒差と橋脚の剛性の差が現われにくくなっている。

免震設計法マニュアル(案)では、免震時の固有周期は非免震時の2倍程度とするのがよいとの条項があるが、鋼製橋脚30、40m程度の低剛性橋脚では、非免震時にも長周期性を有しており、レベル2においても2倍にすることは難しい。

図-4に一例として橋脚高さ20mの鋼製橋脚断面図を示す。また表-3に免震支承の形状寸法を示す。橋脚高さが同じ場合、鋼製橋脚とRC橋脚の剛性の違いにかかわらず免震支承はほぼ同一の寸法となる。

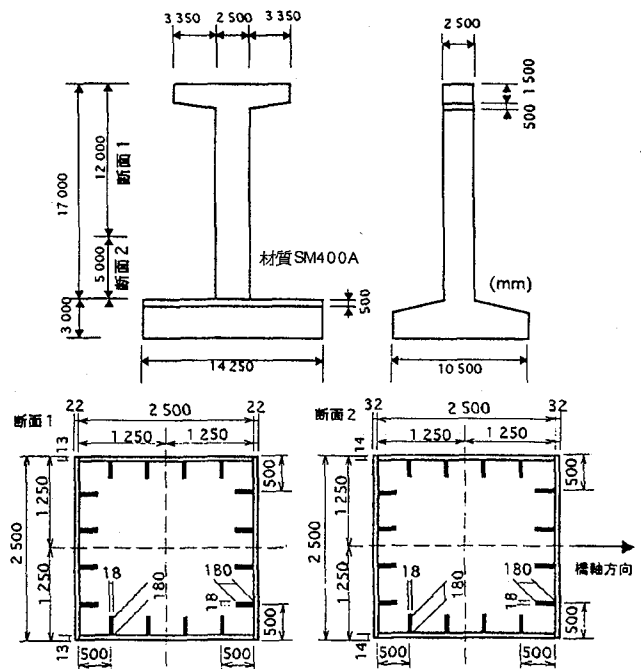


図-4 橋脚高さ20mの鋼製橋脚概略図

表-3 20m 鋼製橋脚橋の免震支承形状寸法

橋脚	P1・P6	P2~P5
平面寸法 a×b(mm ²)	580×580	830×830
ゴム厚×層数 (mm)	13×15層	19×7層
鉛プラグ φ×n(mm)	80×4本	105×4本

3. 解析手法

3.1 時刻歴応答解析モデル

各ケースについて、橋脚の曲げに関する非線形性を考慮した時刻歴応答解析を行い、橋脚基部の合成断面力係数などから免震の効果を検討する。合成断面力係数については4章で詳述するが、最大曲げ応力と最大せん断力の、それぞれの終局耐力に対する比を合成したものである。解析は5径間連続桁橋の中からP3の下部構造と、それが負担している上部構造について行う。解析モデルは図-5に示すように梁、質点、ばねからなる曲げせん断モデルである。支承に当たるばねは、レベル2の地震を想定したときの有効設計変位¹⁾に基づいた等価剛性と等価減衰定数を持つ等価線形ばねとする。また、支承を表わすばねの剛性を十分大きくすることにより非免震橋モデルとした。橋脚は曲げに関して非線形性を持たせているため、部材の減衰は履歴減衰として解析にとり入れられている。そのため非線形履歴モデルを用いて表わした部材の粘性減衰定数はRC部材は0.02、鋼部材0.01としている。また基礎のばねは、良質な地盤に対するばね定数を用い、その減衰定数は、並進、回転ともに0.3とした。

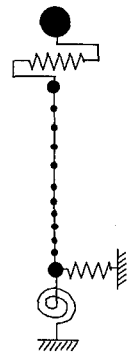


図-5 非線形解析モデル

3.2 橋脚のM-φ関係

鋼製橋脚の曲げモーメント-曲率関係(M-φ関係)は図-6に示すバイリニアモデルとする。

部材の圧縮と引張りの降伏応力が同じである場合、上部構造重量と橋脚自重による圧縮力が作用している鋼製断面に曲げが加わると、初めに圧縮端が降伏し、さらに曲げが加わると引張り端が降伏する。本解析では圧縮端の降伏時の値を(ϕ_y, M_y)とする。そして引張り側降伏のあとは耐力と変形の増加はあまり望めないため、引張り端降伏時を終局耐力(ϕ_u, M_u)とする。(ϕ_y, M_y)と(ϕ_u, M_u)を結ぶ直線の傾きを2次剛性とし、解析によってそれ以上の値が生じたときは、終局状態に達したとみなすこととする。(ϕ_u, M_u)は、この時断面内に一部非線形域に達している部分があるため、図-7の圧縮側劣化型[例えば道路橋示方書(8年版)⁹⁾、10章など]の応力度と歪みの関係を用いた断面分割法により算出する。ただし σ_{sy} は鋼材の基準降伏点としている。

また時刻歴解析においては、橋脚基部の中詰めコンクリートの影響は考慮していないが、解析後の結果に関しては、橋脚基部と共に中詰めコンクリートがある場合のコンクリート上面にあたると思われる基部から2m高い断面に関しても検討を加えている。

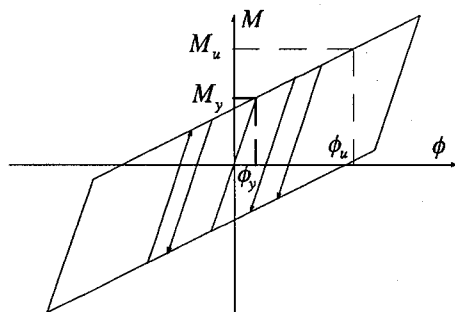


図-6 鋼製橋脚のバイリニアモデル

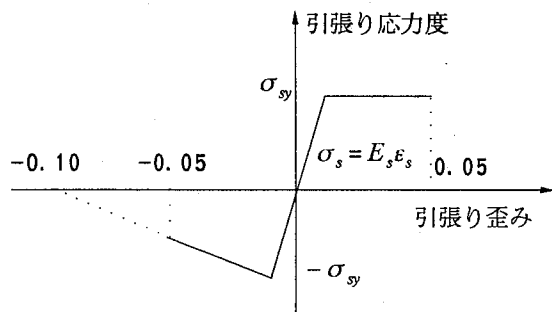


図-7 鋼材の応力度歪み関係

RC橋脚断面のM-φ関係は図-8のようにトリリニア(武田モデル)で表わす。ここで(ϕ_c, M_c)はコンクリートの引張り縁に亀裂が生じる状態、(ϕ_y, M_y)は鉛直軸方向引張り鉄筋が降伏する状態、(ϕ_u, M_u)はコンクリート圧縮縁が破壊歪みに達する状態をそれぞれ表わすものであり、断面分割法によりこれらの値を求める。

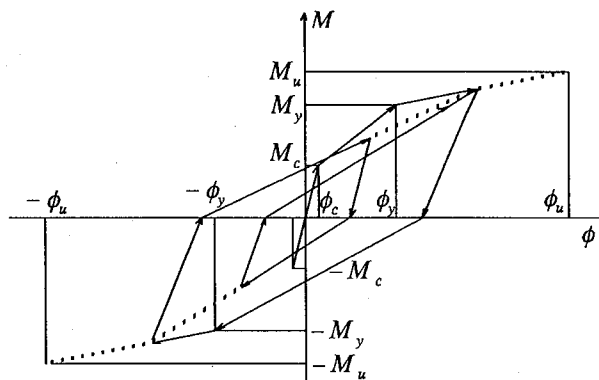


図-8 RC橋脚のトリリニアモデル

3.3 橋脚のせん断耐力

橋脚は鋼製橋脚、RC橋脚ともに、せん断力に関しては線形関係を有すると仮定している。

鋼製橋脚のせん断耐力 Q_U は von Mises-Hencky の降伏条件から求められる純せん断時の降伏応力と断面積の積で与えられるものとした。

$$Q_U = A_S \tau_y / 1000 \quad (1)$$

$$\tau_y = \frac{\sigma_{sy}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Q_U : せん断耐力 (tf)

τ_y : 純せん断の降伏応力 (kgf/cm²)

A_S : 断面積 (cm²)

σ_{sy} : 鋼材の基準降伏点 (kgf/cm²)

RC橋脚のせん断耐力 Q_U は道路橋示方書(2年版)⁹⁾V耐震設計編5.4.3により求めた。従って、現示方書に比べて、せん断耐力を幾分大きめに設定することになる。

図-9に実験⁹⁾によって得られた荷重-変位曲線と断面分割法により得られた降伏耐力と終局耐力を重ねて示す。断面分割法による値は、実験結果と比較すると1サイクル目の δ_y に対する荷重がほぼ等しいが、初期勾配がやや大きい。この理由として、供試体の加工時の初期不整や残留応力などの影響があるため計算よりも勾配が小さくなると考えられる。実験では $2\delta_y \sim 3\delta_y$ 程度まで耐力を保持しているといえるが、本解析では1.25を終局状態としており、安全側の仮定となっている。

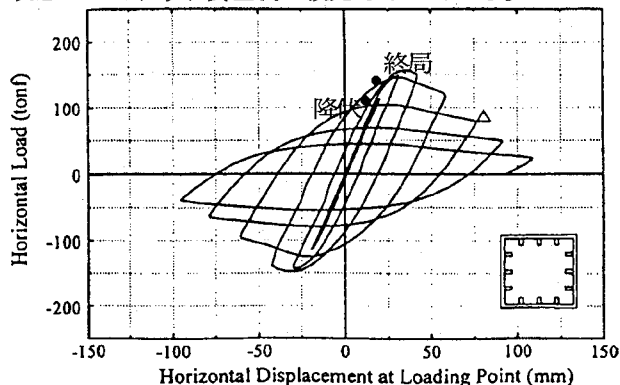


図-9 荷重-変位曲線(実験)と断面分割法による降伏耐力と終局耐力の比較

3.4 入力地震加速度波形

入力地震波には免震設計法マニュアル(案)で地震時保有水平耐力法レベルの設計・照査用に示されている3つの地震波(I種地盤用・II種地盤用・III種地盤用)と兵庫県南部地震における実地震波(神戸海洋気象台NS方向・JR鷹取駅EW方向・東神戸大橋NE方向)の計6波を用いた。解析は接線剛性法による増分形式で定式化した直接積分法により行った。時間刻みは0.002秒としている。

入力地震加速度波	最大加速度 (gal)	解析時間 (sec)
免震設計法	360	24.96
マニュアル(案)	I種地盤用	417
	II種地盤用	443
	III種地盤用	49.96
兵庫県南部地震	神戸海洋気象台	818
	JR鷹取駅	657
	東神戸大橋	327

表-4 入力地震加速度波

4. 非線形動的応答解析結果

結果の一例として20mの免震鋼製橋脚橋にIII種地盤用の地震波を入力したときの応答を示す(図-10)。

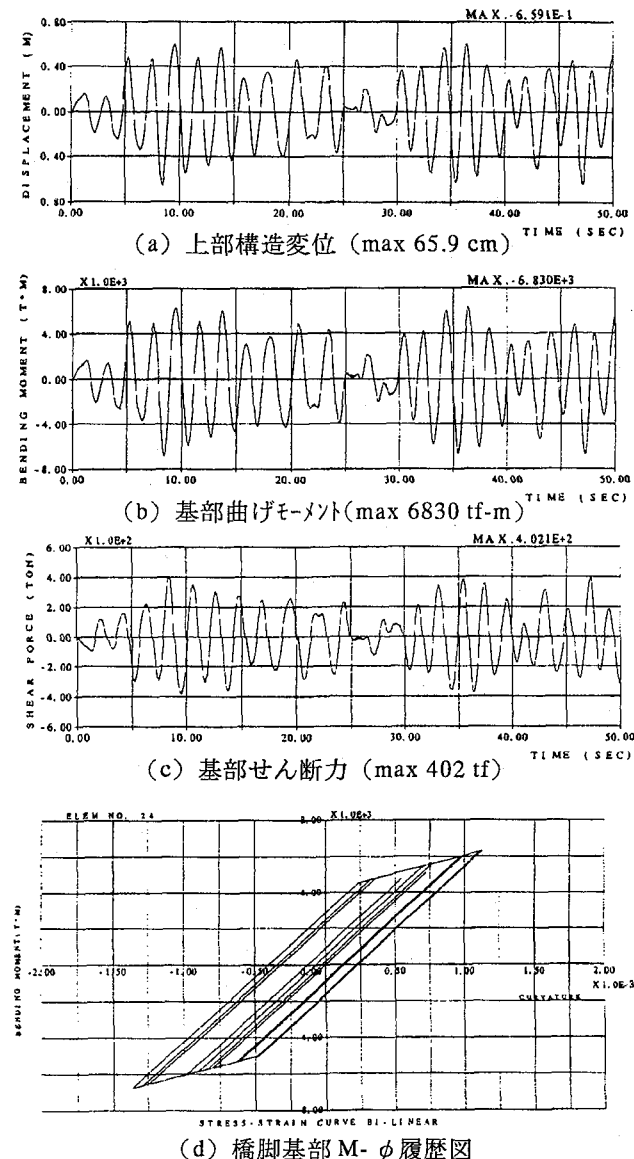


図-10 免震20m鋼製橋脚橋の応答(III種地盤用)

このケースでは免震化の効果はあまりなかったが、免震することが逆効果にはなっていない。非線形応答解析で得られた最大応答加速度波には鋭いピークの現われることがあるため、地震被害の相関性は必ずしも良いとはいえず、本解析では橋脚基部の断面力を耐震性評価の指標とした。全ケースの解析結果として、各入力地震波に対する最大応答値などを表-5~表-10に示す。

表には上部構造と橋脚天端にあたる節点の最大変位・最大加速度、免震支承のせん断変形量の最大値、橋脚基部の最大曲げモーメント M_{max} ・最大曲率 ϕ_{max} ・最大せん断力 Q_{max} などを示した。また M_{max} と Q_{max} に関してはそれぞれの終局耐力に対する比 ψ_M 、 ψ_Q を示し、 ϕ_{max} については降伏曲率 ϕ_y 、終局曲率 ϕ_U に対する比を示した。

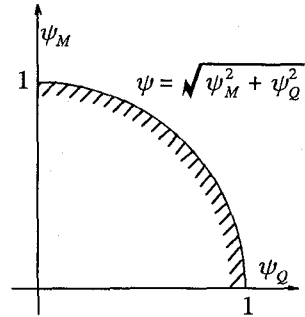


図-11 合成断面力係数の終局判定

4.1 合成断面力係数^{7),8)}

橋脚基部の損傷状況を表わす量として、曲げとせん断の合成断面力係数 ψ を用いることとした。 ψ は ψ_M と ψ_Q の2乗和の平方根で表わされる(図-11)。従って ψ は四分円を終局条件の判定基準とした時の半径を示し、1を超えた場合に終局に達したと判断する。なお、 M_{max} と Q_{max} は図-10に示されているようにほぼ同時に生じており、ここでは両者をそのまま合成することにした。橋脚基部の最大曲率 ϕ_{max} をもとに橋脚基部の損傷状況についても表示している。鋼製橋脚の場合、M-φ関係はバイリニアで、RC橋脚はトリリニアでモデル化しており、 ϕ_{max} によって図-12(a)(b)の条件に基づき、鋼製では elastic・yield・ultimate の3つに、RCでは elastic・crack・yield・ultimate の4つに損傷状況を分類することとした。

鋼製橋脚は、橋脚基部から2m高い位置の断面力を()内に示している。本解析のモデルでは、鋼製橋脚基部の中詰めコンクリートはないものとしてしているが、実橋脚ではある場合も多いため、充填高さが2mであると仮定し、中詰めコンクリートの直上の断面についての結果も示すこととした。

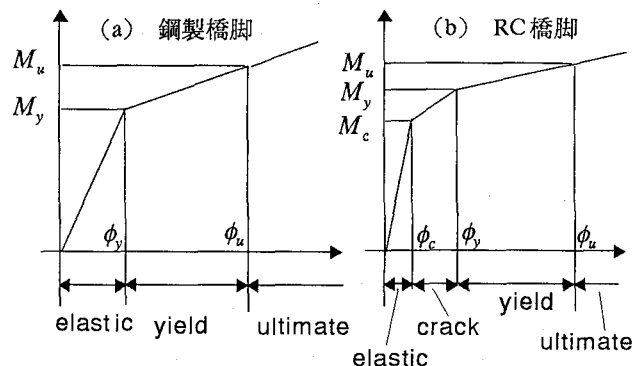


図-12 橋脚基部の状態判定

表一五 I種地盤用波形に対する応答値

入力 I種地盤用	最大変位		最大加速度		橋脚基部断面力							LRB最大 変形量 (cm)			
	上部 (cm)	天端 (cm)	上部 (gal)	天端 (gal)	曲げモーメント					せん断力			合成断面力		
					M_{max} (tf・m)	ϕ_M (= M_{max}/M_u)	ϕ_{max} (1/m)	ϕ_{max}/ϕ_y	ϕ_{max}/ϕ_u	状態	Q_{max} (tf)		ϕ_o (= Q_{max}/Q_u)	ϕ	
10-STEEL	(1) 免震	26.9	1.8	473	501	2106 (1504)	0.58 (0.41)	5.75E-04 (4.18E-04)	0.75 (0.55)	0.43 (0.32)	elastic (elastic)	302 (301)	0.12 (0.12)	0.59 (0.43)	25.2
	(2) 非免震	2.6	2.6	604	604	2953 (2109)	0.81 (0.58)	8.61E-04 (5.68E-04)	1.13 (0.74)	0.651 (0.43)	yield (elastic)	423 (423)	0.17 (0.17)	0.83 (0.61)	-
20-STEEL	(1) 免震	41.3	18.8	391	900	4353 (3841)	0.68 (0.60)	6.12E-04 (5.44E-04)	0.76 (0.68)	0.51 (0.46)	elastic (elastic)	256 (256)	0.07 (0.07)	0.68 (0.60)	22.5
	(2) 非免震	35.3	35.3	656	656	7401 (6530)	1.15 (1.01)	1.65E-03 (1.24E-03)	2.06 (1.54)	1.382 (1.04)	ultimate (ultimate)	441 (441)	0.11 (0.11)	1.16 (1.02)	-
30-STEEL	(1) 免震	50.8	30.7	355	730	6404 (5930)	0.57 (0.53)	7.71E-04 (7.17E-04)	0.61 (0.57)	0.50 (0.47)	elastic (elastic)	240 (239)	0.03 (0.03)	0.57 (0.53)	20.2
	(2) 非免震	57.5	57.5	648	648	11740 (10870)	1.04 (0.96)	1.65E-03 (1.46E-03)	1.31 (1.16)	1.08 (0.96)	ultimate (yield)	438 (438)	0.06 (0.06)	1.04 (0.96)	-
40-STEEL	(1) 免震	85.2	70.8	273	752	7031 (6651)	0.54 (0.51)	7.60E-04 (7.22E-04)	0.58 (0.55)	0.52 (0.49)	elastic (elastic)	206 (206)	0.02 (0.02)	0.54 (0.51)	14.7
	(2) 非免震	88.2	88.2	351	351	8728 (8256)	0.67 (0.64)	9.44E-04 (8.96E-04)	0.72 (0.68)	0.65 (0.61)	elastic (elastic)	248 (248)	0.02 (0.02)	0.67 (0.64)	-
10-RC	(1) 免震	26.1	1.1	473	512	2599	0.75	4.87E-04	0.58	0.01	crack	354	0.33	0.82	25.1
	(2) 非免震	1.3	1.3	449	449	2776	0.80	5.86E-04	0.70	0.02	crack	399	0.37	0.88	-
20-RC	(1) 免震	30.9	7.7	448	632	5513	0.67	7.79E-04	0.79	0.04	crack	381	0.23	0.71	23.4
	(2) 非免震	11.5	11.5	493	493	6755	0.83	3.31E-03	3.36	0.16	yield	512	0.31	0.88	-
30-RC	(1) 免震	36.8	14.3	434	715	9940	0.69	5.53E-04	0.83	0.06	crack	495	0.33	0.77	22.6
	(2) 非免震	23.6	23.6	486	486	12167	0.85	2.86E-03	4.28	0.32	yield	685	0.46	0.97	-
40-RC	(1) 免震	45.9	26.3	406	556	10426	0.65	6.10E-04	0.79	0.01	crack	385	0.25	0.70	21.1
	(2) 非免震	39.1	39.1	388	388	12265	0.77	4.00E-03	5.20	0.08	yield	480	0.32	0.83	-

表一六 II種地盤用波形に対する応答値

入力 II種地盤用	最大変位		最大加速度		橋脚基部断面力							LRB最大 変形量 (cm)			
	上部 (cm)	天端 (cm)	上部 (gal)	天端 (gal)	曲げモーメント					せん断力			合成断面力		
					M_{max} (tf・m)	ϕ_M (= M_{max}/M_u)	ϕ_{max} (1/m)	ϕ_{max}/ϕ_y	ϕ_{max}/ϕ_u	状態	Q_{max} (tf)		ϕ_o (= Q_{max}/Q_u)	ϕ	
10-STEEL	(1) 免震	31.9	2.1	563	564	2484 (1774)	0.68 (0.49)	6.78E-04 (4.93E-04)	0.89 (0.65)	0.51 (0.37)	elastic (elastic)	355 (355)	0.15 (0.15)	0.70 (0.51)	29.8
	(2) 非免震	2.8	2.8	679	679	3143 (2245)	0.86 (0.62)	9.89E-04 (6.24E-04)	1.30 (0.82)	0.747 (0.47)	yield (elastic)	451 (450)	0.18 (0.18)	0.88 (0.64)	-
20-STEEL	(1) 免震	52.8	24.2	496	1074	5593 (4935)	0.87 (0.77)	7.87E-04 (7.00E-04)	0.98 (0.87)	0.66 (0.59)	elastic (elastic)	331 (331)	0.08 (0.08)	0.87 (0.77)	28.7
	(2) 非免震	45.4	45.4	730	730	8251 (7280)	1.28 (1.13)	2.07E-03 (1.61E-03)	2.59 (2.01)	1.737 (1.35)	ultimate (ultimate)	493 (491)	0.13 (0.13)	1.29 (1.14)	-
30-STEEL	(1) 免震	59.9	36.2	428	723	7571 (7010)	0.67 (0.62)	9.12E-04 (8.48E-04)	0.73 (0.68)	0.60 (0.56)	elastic (elastic)	283 (281)	0.04 (0.04)	0.67 (0.62)	23.8
	(2) 非免震	69.5	69.5	729	729	13172 (12196)	1.17 (1.08)	2.07E-03 (1.80E-03)	1.65 (1.43)	1.36 (1.18)	ultimate (ultimate)	496 (495)	0.07 (0.07)	1.17 (1.08)	-
40-STEEL	(1) 免震	115.2	95.3	376	1008	9342 (8937)	0.72 (0.68)	1.01E-03 (9.59E-04)	0.77 (0.73)	0.69 (0.66)	elastic (elastic)	266 (265)	0.03 (0.03)	0.72 (0.68)	20.1
	(2) 非免震	144.7	144.7	565	565	13989 (13233)	1.08 (1.02)	1.62E-03 (1.50E-03)	1.24 (1.14)	1.11 (1.03)	ultimate (ultimate)	387 (387)	0.04 (0.04)	1.08 (1.02)	-
10-RC	(1) 免震	30.4	1.5	548	627	2988	0.86	7.08E-04	0.85	0.02	crack	396	0.37	0.94	29.0
	(2) 非免震	1.7	1.7	547	547	3141	0.90	7.94E-04	0.95	0.02	crack	444	0.42	0.99	-
20-RC	(1) 免震	34.7	9.0	504	730	6071	0.74	8.92E-04	0.90	0.04	crack	404	0.24	0.78	26.4
	(2) 非免震	12.9	12.9	565	565	6835	0.84	4.24E-03	4.29	0.21	yield	505	0.30	0.89	-
30-RC	(1) 免震	41.6	15.9	527	571	10643	0.74	6.12E-04	0.91	0.07	crack	573	0.38	0.84	28.4
	(2) 非免震	22.0	22.0	555	555	12033	0.84	2.52E-03	3.76	0.29	yield	700	0.47	0.96	-
40-RC	(1) 免震	42.8	24.6	445	840	10305	0.65	5.98E-04	0.78	0.01	crack	390	0.26	0.70	24.8
	(2) 非免震	38.1	38.1	486	486	12154	0.76	2.67E-03	3.47	0.05	yield	555	0.37	0.85	-

表一七 III種地盤用波形に対する応答値

入力 III種地盤用	最大変位		最大加速度		橋脚基部断面力							LRB最大 変形量 (cm)			
	上部 (cm)	天端 (cm)	上部 (gal)	天端 (gal)	曲げモーメント					せん断力			合成断面力		
					M_{max} (tf・m)	ϕ_M (= M_{max}/M_u)	ϕ_{max} (1/m)	ϕ_{max}/ϕ_y	ϕ_{max}/ϕ_u	状態	Q_{max} (tf)		ϕ_o (= Q_{max}/Q_u)	ϕ	
10-STEEL	(1) 免震	29.8	2.0	528	548	2325 (1661)	0.64 (0.46)	6.35E-04 (4.61E-04)	0.83 (0.61)	0.48 (0.35)	elastic (elastic)	333 (332)	0.14 (0.14)	0.65 (0.48)	27.9
	(2) 非免震	3.5	3.5	834	834	3810 (2721)	1.05 (0.75)	1.39E-03 (7.56E-04)	1.83 (0.99)	1.051 (0.57)	ultimate (elastic)	545 (545)	0.22 (0.22)	1.07 (0.78)	-
20-STEEL	(1) 免震	65.9	30.7	616	1031	6830 (6027)	1.06 (0.94)	1.37E-03 (9.86E-04)	1.70 (1.23)	1.14 (0.83)	ultimate (yield)	402 (402)	0.10 (0.10)	1.07 (0.94)	35.4
	(2) 非免震	52.4	52.4	778	778	8780 (7747)	1.36 (1.20)	2.34E-03 (1.85E-03)	2.92 (2.30)	1.958 (1.55)	ultimate (ultimate)	522 (521)	0.13 (0.13)	1.37 (1.21)	-
30-STEEL	(1) 免震	93.5	56.7	651	896	11614 (10754)	1.03 (0.95)	1.61E-03 (1.37E-03)	1.28 (1.09)	1.05 (0.90)	ultimate (yield)	429 (430)	0.06 (0.06)	1.03 (0.95)	36.8
	(2) 非免震	81.1	81.1	799	799	14392 (13326)	1.27 (1.18)	2.43E-03 (2.13E-03)	1.94 (1.70)	1.59 (1.40)	ultimate (ultimate)	540 (529)	0.08 (0.08)	1.28 (1.18)	-
40-STEEL	(1) 免震	173.4	144.0	553	789	13967 (13212)	1.06 (1.02)	1.62E-03 (1.50E-03)	1.23 (1.14)	1.11 (1.03)	ultimate (ultimate)	389 (388)	0.04 (0.04)	1.08 (1.02)	29.8
	(2) 非免震	194.0	194.0	709	709	17574 (16624)	1.35 (1.28)	2.22E-03 (2.07E-03)	1.69 (1.57)	1.52 (1.41)	ultimate (ultimate)	484 (483)	0.05 (0.05)	1.35 (1.28)	-
10-RC	(1) 免震	29.1	1.3	527	639	2792	0.80	5.94E-04	0.71	0.02	crack	393	0.37	0.88	27.8
	(2) 非免震	2.0	2.0	580	580	3220	0.93	1.59E-03	1.90	0.05	yield	479	0.45	1.03	-
20-RC	(1) 免震	35.8	10.7	519	746	6673	0.82	2.41E-03	2.44	0.12	yield	485	0.29	0.87	27.1
	(2) 非免震	13.2	13.2	553	553	6834	0.84	4.30E-03	4.36	0.21	yield	516	0.31	0.89	-
30-RC	(1) 免震	47.6	21.0	519	689	11901	0.83	2.19E-03	3.27	0.25	yield	653	0.44	0.94	28.0
	(2) 非免震	26.5	26.5	576	576	12332	0.86	3.33E-03	4.98	0.38	yield	703	0.47	0.98	-
40-RC	(1) 免震	60.1	38.7	470	626	12217	0.77	3.39E-03	4.39	0.06	yield	514	0.34	0.84	25.0
	(2) 非免震	52.4	52.4	444	444	12484	0.78	6.87E-03	8.91	0.13	yield	469	0.31	0.84	-

表一 8 神戸海洋気象台の波形に対する応答値

入力 神戸海洋気象台	最大変位		最大加速度		橋脚基部断面力							LRB最大 変形量 (cm)		
	上部 (cm)	天端 (cm)	上部 (gal)	天端 (gal)	曲げモーメント					せん断力			合成断面力	
					M_{max} (tf · m)	ϕ_M (= M_{max}/M_u)	ϕ_{max} (1/m)	ϕ_{max}/ϕ_y	ϕ_{max}/ϕ_u	状態	Q_{max} (tf)		ϕ_Q (= Q_{max}/Q_u)	ϕ
10-STEEL (1) 免震	23.7	1.7	445	822	1849 (1321)	0.51 (0.36)	5.05E-04 (0.000367)	0.66 (0.48)	0.38 (0.28)	elastic (elastic)	266 (265)	0.11 (0.11)	0.52 (0.38)	22.2
	(2) 非免震	7.3	7.3	1406	1406	6489 (4635)	1.79 (1.28)	3.05E-03 (0.001949)	4.00 (2.56)	2.304 (1.48)	ultimate (ultimate)	935 (932)	0.38 (0.38)	1.83 (1.33)
20-STEEL (1) 免震	31.2	13.7	317	1045	3235 (2854)	0.50 (0.44)	4.55E-04 (0.000405)	0.57 (0.50)	0.38 (0.34)	elastic (elastic)	182 (185)	0.05 (0.05)	0.50 (0.45)	17.5
	(2) 非免震	38.3	38.3	686	686	7708 (6801)	1.20 (1.06)	1.12E-03 (0.001374)	2.25 (1.71)	1.510 (1.15)	ultimate (ultimate)	460 (459)	0.12 (0.12)	1.20 (1.06)
30-STEEL (1) 免震	32.2	19.3	230	898	4032 (3733)	0.36 (0.33)	4.86E-04 (0.000452)	0.39 (0.36)	0.32 (0.30)	elastic (elastic)	153 (151)	0.02 (0.02)	0.36 (0.33)	13.2
	(2) 非免震	44.3	44.3	521	521	9269 (8582)	0.82 (0.76)	1.12E-03 (0.001038)	0.89 (0.83)	0.73 (0.68)	elastic (elastic)	332 (336)	0.05 (0.05)	0.82 (0.76)
40-STEEL (1) 免震	30.6	24.3	119	972	2354 (2227)	0.18 (0.17)	2.54E-04 (0.000242)	0.19 (0.18)	0.17 (0.17)	elastic (elastic)	96 (93)	0.01 (0.01)	0.18 (0.17)	6.3
	(2) 非免震	37.9	37.9	165	165	3506 (3317)	0.27 (0.26)	3.79E-04 (0.00036)	0.29 (0.27)	0.26 (0.25)	elastic (elastic)	130 (129)	0.01 (0.01)	0.27 (0.26)
10-RC (1) 免震	22.9	1.1	453	898	2551 (2321)	0.73 (0.64)	4.57E-04 (0.000405)	0.55 (0.48)	0.01 (0.01)	crack (elastic)	369 (369)	0.35 (0.35)	0.81 (0.81)	22.3
	(2) 非免震	7.4	7.4	862	862	3404 (3117)	0.98 (0.98)	1.99E-02 (0.00199)	23.84 (2.38)	0.60 (0.60)	yield (yield)	583 (583)	0.55 (0.55)	1.12 (1.12)
20-RC (1) 免震	26.6	9.8	455	1387	6552 (6095)	0.80 (0.80)	1.10E-03 (0.00110)	1.11 (1.11)	0.05 (0.05)	yield (yield)	509 (509)	0.31 (0.31)	0.86 (0.86)	22.9
	(2) 非免震	19.3	19.3	763	763	7025 (6578)	0.86 (0.86)	6.43E-03 (0.00643)	6.52 (6.52)	0.32 (0.32)	yield (yield)	558 (558)	0.33 (0.33)	0.92 (0.92)
30-RC (1) 免震	33.0	12.9	486	1341	9800 (9180)	0.68 (0.68)	5.40E-04 (0.00054)	0.81 (0.81)	0.06 (0.06)	crack (crack)	705 (705)	0.47 (0.47)	0.83 (0.83)	24.1
	(2) 非免震	23.3	23.3	639	639	11769 (11069)	0.82 (0.82)	1.88E-03 (0.00188)	2.82 (2.82)	0.21 (0.21)	yield (yield)	689 (689)	0.46 (0.46)	0.94 (0.94)
40-RC (1) 免震	30.2	15.2	388	1306	8518 (7918)	0.53 (0.53)	4.16E-04 (0.000416)	0.54 (0.54)	0.01 (0.01)	crack (crack)	504 (504)	0.33 (0.33)	0.63 (0.63)	21.0
	(2) 非免震	27.1	27.1	480	480	10824 (10124)	0.68 (0.68)	6.49E-04 (0.000649)	0.84 (0.84)	0.01 (0.01)	crack (crack)	536 (536)	0.35 (0.35)	0.77 (0.77)

表一 9 JR 鷹取駅の波形に対する応答値

入力 JR 鷹取駅	最大変位		最大加速度		橋脚基部断面力							LRB最大 変形量 (cm)		
	上部 (cm)	天端 (cm)	上部 (gal)	天端 (gal)	曲げモーメント					せん断力			合成断面力	
					M_{max} (tf · m)	ϕ_M (= M_{max}/M_u)	ϕ_{max} (1/m)	ϕ_{max}/ϕ_y	ϕ_{max}/ϕ_u	状態	Q_{max} (tf)		ϕ_Q (= Q_{max}/Q_u)	ϕ
10-STEEL (1) 免震	41.8	2.7	748	1099	3250 (2321)	0.89 (0.64)	1.05E-03 (0.000645)	1.37 (0.85)	0.79 (0.49)	yield (elastic)	464 (464)	0.19 (0.19)	0.91 (0.67)	39.1
	(2) 非免震	5.6	5.6	1208	1208	5483 (3916)	1.51 (1.08)	2.43E-03 (0.001498)	3.19 (1.96)	1.833 (1.13)	ultimate (ultimate)	786 (786)	0.32 (0.32)	1.54 (1.12)
20-STEEL (1) 免震	66.9	31.2	626	2167	6908 (6095)	1.07 (0.95)	1.41E-03 (0.001021)	1.75 (1.27)	1.18 (0.86)	ultimate (yield)	408 (408)	0.10 (0.10)	1.08 (0.95)	35.6
	(2) 非免震	62.4	62.4	851	851	9550 (8427)	1.48 (1.31)	2.72E-03 (0.002186)	3.39 (2.73)	2.279 (1.83)	ultimate (ultimate)	568 (568)	0.15 (0.15)	1.49 (1.32)
30-STEEL (1) 免震	73.3	44.3	515	1759	9257 (8571)	0.82 (0.76)	1.11E-03 (0.001037)	0.89 (0.83)	0.73 (0.68)	elastic (elastic)	345 (345)	0.05 (0.05)	0.82 (0.76)	29.0
	(2) 非免震	74.2	74.2	761	761	13676 (12663)	1.21 (1.12)	2.23E-03 (0.001936)	1.77 (1.54)	1.46 (1.27)	ultimate (ultimate)	508 (508)	0.07 (0.07)	1.21 (1.12)
40-STEEL (1) 免震	75.9	62.8	248	1564	6077 (5749)	0.47 (0.44)	6.57E-04 (0.000624)	0.50 (0.48)	0.45 (0.43)	elastic (elastic)	159 (160)	0.02 (0.02)	0.47 (0.44)	13.6
	(2) 非免震	89.2	89.2	352	352	8781 (8306)	0.68 (0.64)	9.50E-04 (0.000902)	0.72 (0.69)	0.65 (0.62)	elastic (elastic)	244 (245)	0.02 (0.02)	0.68 (0.64)
10-RC (1) 免震	39.9	2.9	728	1319	3261 (3261)	0.84 (0.84)	6.57E-03 (0.00657)	7.88 (11.02)	0.20 (0.28)	yield (yield)	453 (521)	0.42 (0.49)	* 1.03 (1.07)	37.5
	(2) 非免震	3.5	3.5	756	756	3298 (3298)	0.95 (0.95)	9.19E-03 (0.00919)	11.02 (11.02)	0.28 (0.28)	yield (yield)	521 (521)	0.49 (0.49)	1.07 (1.07)
20-RC (1) 免震	45.8	11.1	668	1636	6666 (642)	0.82 (0.82)	2.41E-03 (0.00241)	2.44 (10.96)	0.12 (0.54)	yield (yield)	527 (572)	0.32 (0.34)	0.87 (0.97)	35.2
	(2) 非免震	27.3	27.3	642	642	7425 (7425)	0.91 (0.91)	1.08E-02 (0.0108)	10.96 (10.96)	0.54 (0.54)	yield (yield)	572 (572)	0.34 (0.34)	0.97 (0.97)
30-RC (1) 免震	54.6	20.4	661	1020	11478 (11478)	0.80 (0.80)	1.14E-03 (0.00114)	1.70 (7.85)	0.13 (0.80)	yield (yield)	727 (909)	0.49 (0.61)	0.94 (1.10)	35.6
	(2) 非免震	45.6	45.6	677	677	13046 (13046)	0.91 (0.91)	5.25E-03 (0.00525)	7.85 (7.85)	0.60 (0.60)	yield (yield)	909 (909)	0.61 (0.61)	1.10 (1.10)
40-RC (1) 免震	64.1	33.1	585	935	12119 (12119)	0.76 (0.76)	2.03E-03 (0.00203)	2.64 (4.91)	0.04 (0.07)	yield (yield)	604 (729)	0.40 (0.48)	0.86 (0.91)	31.7
	(2) 非免震	49.0	49.0	545	545	12220 (12220)	0.77 (0.77)	3.79E-03 (0.00379)	4.91 (4.91)	0.07 (0.07)	yield (yield)	729 (729)	0.48 (0.48)	0.91 (0.91)

表一 10 東神戸大橋の波形に対する応答値

入力 東神戸大橋	最大変位		最大加速度		橋脚基部断面力							LRB最大 変形量 (cm)		
	上部 (cm)	天端 (cm)	上部 (gal)	天端 (gal)	曲げモーメント					せん断力			合成断面力	
					M_{max} (tf · m)	ϕ_M (= M_{max}/M_u)	ϕ_{max} (1/m)	ϕ_{max}/ϕ_y	ϕ_{max}/ϕ_u	状態	Q_{max} (tf)		ϕ_Q (= Q_{max}/Q_u)	ϕ
10-STEEL (1) 免震	24.8	1.7	431	423	1937 (1383)	0.53 (0.38)	5.29E-04 (3.65E-04)	0.69 (0.48)	0.40 (0.28)	elastic (elastic)	278 (277)	0.11 (0.11)	0.55 (0.40)	23.1
	(2) 非免震	3.3	3.3	783	783	3603 (2573)	0.89 (0.71)	1.26E-03 (6.79E-04)	1.65 (0.89)	0.952 (0.51)	yield (elastic)	517 (516)	0.21 (0.21)	1.01 (0.74)
20-STEEL (1) 免震	64.6	30.2	598	657	6730 (5933)	1.05 (0.92)	1.32E-03 (8.39E-04)	1.65 (1.05)	1.11 (0.70)	ultimate (yield)	399 (399)	0.10 (0.10)	1.05 (0.93)	34.4
	(2) 非免震	32.1	32.1	615	615	7029 (6194)	1.09 (0.96)	1.47E-03 (9.65E-04)	1.83 (1.20)	1.231 (0.81)	ultimate (yield)	418 (417)	0.11 (0.11)	1.10 (0.97)
30-STEEL (1) 免震	101.7	62.9	691	641	12410 (11480)	1.10 (1.02)	1.84E-03 (1.44E-03)	1.46 (1.15)	1.20 (0.94)	ultimate (yield)	464 (463)	0.07 (0.07)	1.10 (* (1.02))	38.8
	(2) 非免震	59.3	59.3	657	657	11970 (11060)	1.06 (0.98)	1.71E-03 (1.32E-03)	1.36 (1.05)	1.12 (0.87)	ultimate (yield)	453 (451)	0.06 (0.06)	1.06 (* (0.98))
40-STEEL (1) 免震	107.7	88.7	353	358	8587 (7918)	0.66 (0.61)	9.29E-04 (8.35E-04)	0.71 (0.64)	0.64 (0.57)	elastic (elastic)	222 (226)	0.02 (0.02)	0.66 (0.61)	19.0
	(2) 非免震	133.9	133.9	521	521	13010 (11960)	1.00 (0.92)	1.46E-03 (1.26E-03)	1.11 (0.96)	1.00 (0.86)	ultimate (elastic)	350 (351)	0.04 (0.04)	1.00 (0.92)
10-RC (1) 免震	24.1	9.6	433	475	2443 (2360)	0.70 (0.68)	3.97E-04 (3.46E-04)	0.48 (0.41)	0.01 (0.01)	crack (crack)	327 (341)	0.31 (0.32)	0.77 (0.75)	14.5
	(2) 非免震	9.3	9.3	381	381	2360 (2360)	0.68 (0.68)	3.46E-04 (3.46E-04)	0.41 (0.41)	0.01 (0.01)	crack (crack)	341 (394)	0.32 (0.24)	0.75 (0.75)
20-RC (1) 免震	30.3	8.2	426	514	5796 (5796)	0.71 (0.71)	8.35E-04 (5.49E-03)	0.85 (5.56)	0.04 (0.27)	crack (yield)	394 (537)	0.24 (0.32)	0.91 (0.91)	-
	(2) 非免震	14.9	14.9	607	607	6951 (6951)	0.85 (0.85)	5.49E-03 (5.49E-03)	5.56 (5.56)	0.27 (0.27)	yield (yield)	537 (537)	0.32 (0.32)	0.91 (0.91)
30-RC (1) 免震	39.7	17.9	438	669	11580 (11580)	0.81 (0.81)	1.32E-03 (3.21E-03)	1.97 (4.80)	0.15 (0.36)	yield (yield)	599 (661)	0.40 (0.44)	0.90 (0.97)	21.8
	(2) 非免震	25.3	25.3	495	495	12290 (12290)	0.86 (0.86)	3.21E-03 (3.21E-03)	4.80 (4.80)	0.36 (0.36)	yield (yield)	661 (661)	0.44 (0.44)	0.97 (0.97)
40-RC (1) 免震	63.2	38.9	456	518	12220 (12220)	0.77 (0.77)	3.50E-03 (3.50E-03)	4.54 (4.54)	0.07 (0.07)	yield (yield)	423 (446)	0.28 (0.30)	0.82 (0.83)	24.3
	(2) 非免震	43.5	43.5	383	383	12350 (12350)	0.78 (0.78)	5.19E-03 (5.19E-03)	6.74 (6.74)	0.10 (0.10)	yield (yield)	446 (446)	0.30 (0.30)	0.83 (0.83)

各ケースについての ϕ_M と ϕ_Q との相関図を図-13に示す。合成断面力係数は中心から各点までの距離で表わされる。ここでプロットしたものはいずれも橋脚基部から2m高い断面に関する値(表-5~表-10までの合成断面力係数欄の括弧内の値)である。したがって、橋脚基部の中詰めコンクリートのない橋脚には適用出来ず、場合によっては危険側の値を与える可能性がある。

ほとんどのケースで、非免震の時よりも免震の時の合成断面力係数が小さくなっている。しかし、III種地震地震波に対して40m鋼製橋脚橋を免震しても合成断面力係数は非免震時よりも2割程度改善されてはいるが、1を少し超えている(表-7に*を付けて示した)。JR鷹取駅地震波に対して10mのRC橋脚橋を免震化しても、 $\phi_M=0.94$ であるが $\phi_Q=0.42$ であり、合成断面力係数 ϕ は1を超える(表-9に*を付けて示した)。

東神戸大橋地震波に対して30mの鋼製橋脚橋を免震化した場合は、非免震時よりもかえって耐震性が劣る結果となった。これは、東神戸大橋地震波の長周期成分に卓越部分が2箇所あり、30mの鋼製橋脚橋の基本周期がそれに近くなったためであると思われる(表-10に*を付けて示した)。

この東神戸大橋地震波における一例を除けば、程度の差はあるが入力地震波、橋脚高さによらず免震により耐震性が向上している。軟弱地盤のIII種地盤用波形に対しても10~20mの橋脚高さでは、免震により合成断面力係数が1.0以下に抑えられるなど、免震の効果を示す結果が得られた。

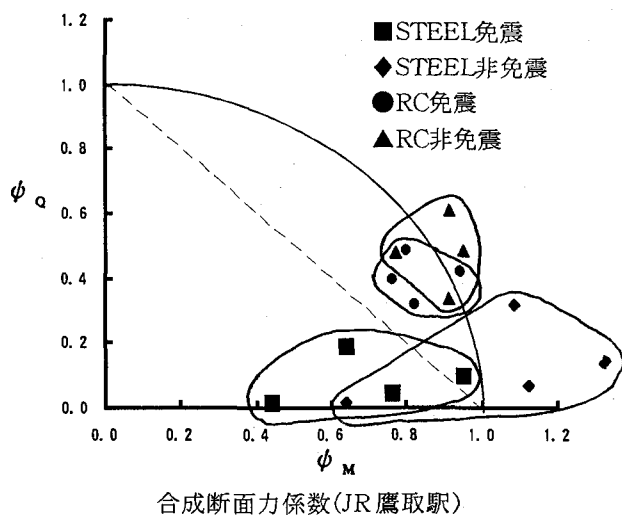
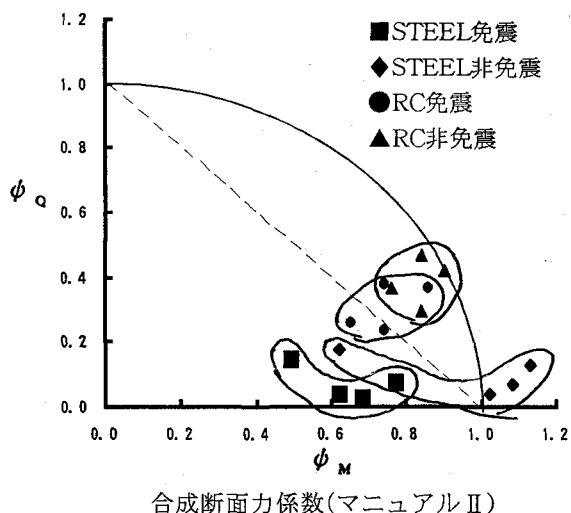
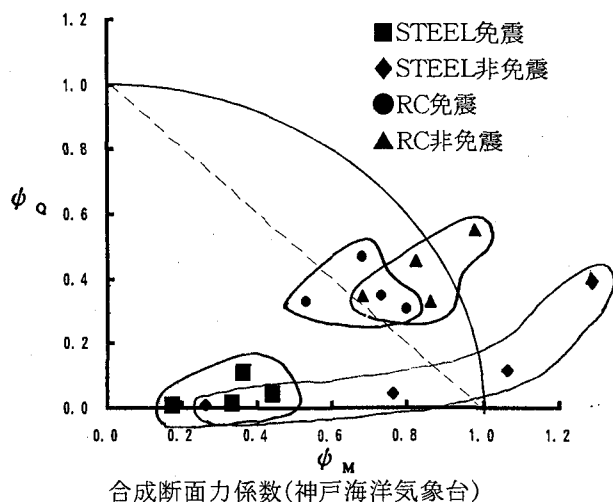
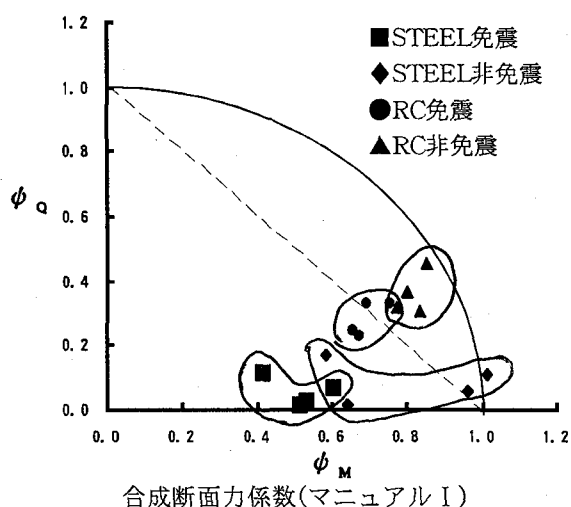
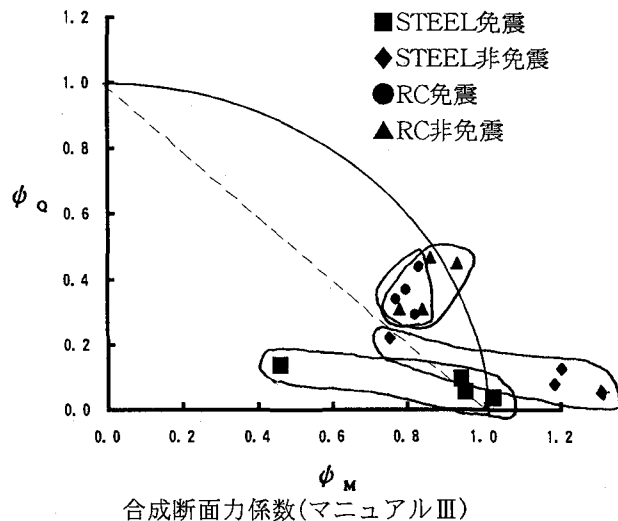


図-13 合成断面力係数

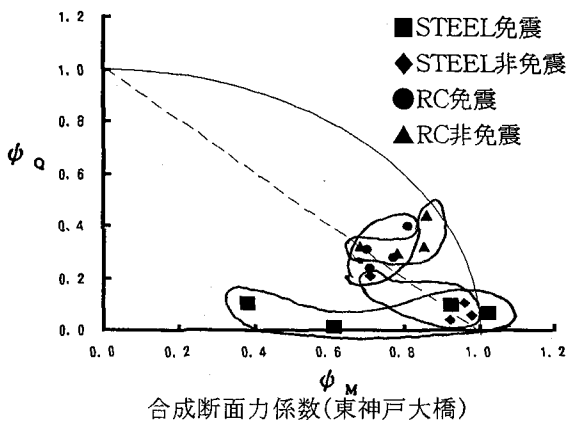


図-13 合成断面力係数

4.2 上部工最大変位

図-14に入力地震波毎に上部工の応答最大変位値を示す。鋼製橋脚とRC橋脚では鋼製橋脚の応答変位の方が殆どの場合大きい。橋脚高さ10mではいずれの地震波に対しても鋼製とRCでは変位は同程度である。免震設計法マニュアル(案)の3種類の地震波のように海洋型地震波に対しては橋脚が高くなるにつれて鋼製橋脚とRC橋脚との差は大きくなるが、神戸海洋気象台地震波やJR鷹取駅地震波のように大きな加速度が短時間作用する(直下型)地震波に対しては、橋脚の種類や高さが変化しても上部構造の変位にはあまり差が生じない。ただし、直下型地震波であっても軟弱地盤である東神戸大橋地震波に対する応答変位は海洋型のものと同傾向が似てくる。

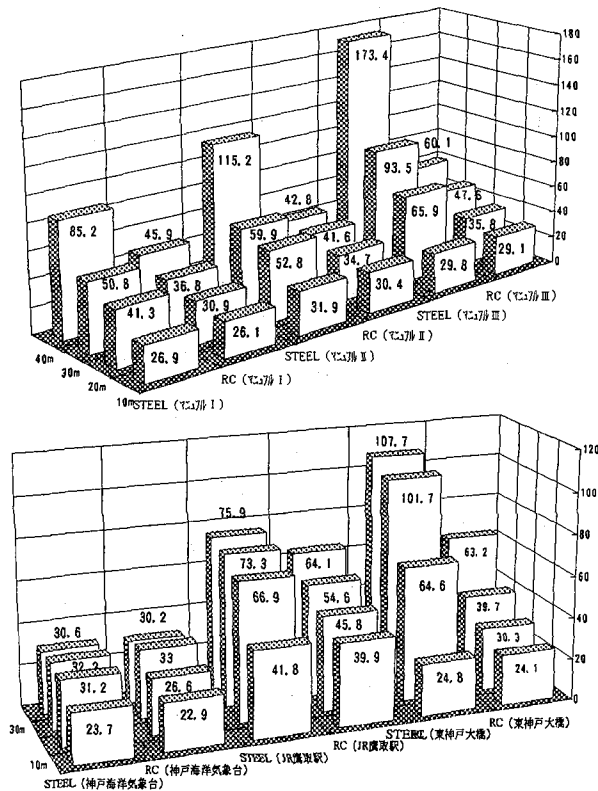


図-14 上部構造変位最大値

5. まとめ

既設橋梁を対象とし、橋脚高さが異なる4種類の鋼製橋脚橋およびRC橋脚橋に対して非線形時刻歴応答解析を行い、免震化の効果をも橋脚基部の合成断面力係数などを用いて調べたところ、次に示すことなどが分かった。

- ・本論文で用いた地震波においては、東神戸大橋地震波に対する橋脚高さ30mの鋼製橋脚橋のみ免震化すると逆効果となった。このケース以外は、いずれの橋脚高さにおいても、程度の差はあるが、鋼製橋脚橋、RC橋脚橋ともに免震化に橋脚基部の断面力が低減され、耐震性能が向上する。
- ・RC橋脚橋を免震化してもφが1を超える神戸海洋気象台の地震波に対しても、鋼製橋脚橋は免震化することによってφを1以下に抑えることができる。
- ・特にI、II種地盤に対しては、橋脚高さが20m以下であればRC橋脚橋と同程度の免震効果が得られる。また、このときの鋼製橋脚橋の上部工の応答最大変位はRC橋脚橋と殆ど変わらない。

なお、上記の結論は橋脚基部から上部の構造系モデルを用いた数値解析で得られたものであり、より詳しくは地盤や基礎も加えた全体系の解析を行う必要がある。また、一般に鋼製橋脚はRC橋脚に比べて耐力が急減する傾向があり、この点に関する安全性の確保の問題や設計手法などについては今後も議論されなければならない。

謝辞

本研究を行うにあたり、貴重なデータを提供いただき、また熱心な討議をしていただいた鋼橋技術研究会、耐震・免震研究部会のメンバー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) 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。
- 3) 中村・上半・井上：1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II)、JR地震情報No.23d、財団法人鉄道総合技術研究所ユレダス開発推進部、1996年。
- 4) 建設省道路局：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、平成7年。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(鋼橋編、耐震設計編)、平成2年2月および平成8年12月。
- 6) 建設省土木研究所他：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(I)-鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験-(No2供試体)、平成9年4月。
- 7) 長嶋・内田・大丸・小林：鋼製橋脚の免震化に関する事例研究、土木学会第52回年次学術講演会、平成9年9月。
- 8) 長嶋・内田：既設の鋼製橋脚連続桁橋の免震化に関する研究、鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集、平成9年5月。