

既設の鋼製橋脚連続桁橋の免震化に関する研究

長嶋 文雄*、内田 光彦**

* 工博 東京都立大学工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)

** 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、既設の鋼製橋脚橋に対して耐震補強の目的で免震支承を設置した場合、どのような免震効果が得られるのかを検討している。非免震橋として設計された橋脚高さ10、20、30、40mの4種類の橋梁に対して5径間連続桁橋として免震支承を設計し、その中間部の橋脚に関して免震と非免震の2つの状態で非線形時刻歴応答解析を行い、橋脚基部の損傷状況などを比較している。その結果、本論文で用いた地震波に対しては、免震によりすべてのケースで断面力が減少し、III種地盤波の入力に対しても免震が逆効果になることはないなど、免震化は鋼製橋脚の耐震性向上に有効な手段になることが分かった。

Key Words : seismic isolation system, bridges with steel piers, dynamic response analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、橋梁の補修または耐震補強を目的として橋桁の連続化を行うと共に免震支承を設置するケースが多くなっているが、そのほとんどがRC橋脚橋であり、都市内高架橋などで数多く建設されている鋼製橋脚橋への適用例はほとんど見られない。

その理由として、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、大規模地震時に達する可能性が高い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が挙げられる。しかも鋼製橋脚はRC橋脚よりも弾性域での曲げ剛性が小さく、RCと比較すると免震支承に変形が集中しにくい橋といえる。

しかし、兵庫県南部地震を契機に鋼製橋脚も耐震性向上を迫られている現在、免震化は鋼製橋脚橋の耐震性向上の有効な手段になることが予想される。

このような理由から本論文では、鋼製橋脚5径間連続桁橋を例にとり、鋼製橋脚橋に免震設計を適用するにあたり明らかにしておかなければならないこととして、橋脚の剛性が応答に及ぼす影響、地盤種と応答の関係、免震化の効果や問題点などを検討することとした。

本論文では、検討対象とする橋梁について免震と非免震の2つの状態で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、橋脚基部の断面力の比較などを通して免震の効果を検討している。また免震橋として多用されているRC橋脚橋についても同様の条件での検討を行い鋼製橋脚橋との応答特性の比較を行っている。

2. 検討モデル

2.1 設計条件

事例検討の橋梁モデルとして、図-1に示すような橋脚の高さが等しい支間長50mの5径間連続桁橋を設計した。

橋脚高さ10、20、30、40mの4種類について設計し、鋼製橋脚橋 (STEEL) と共に、比較検討のためRC橋脚橋 (RC) についても同条件での設計を行う。

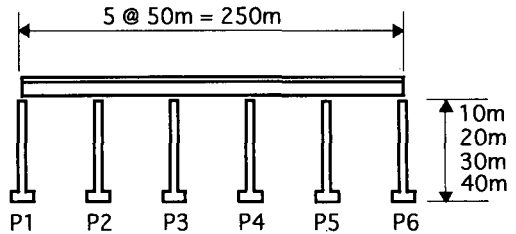


図-1 5径間連続桁橋

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「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」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) に従い免震支承 (LRB) を設計する。即ち、本論文では非免震橋として設計された既設の橋梁を免震化により耐震性向上を図るケースを想定していることになる。

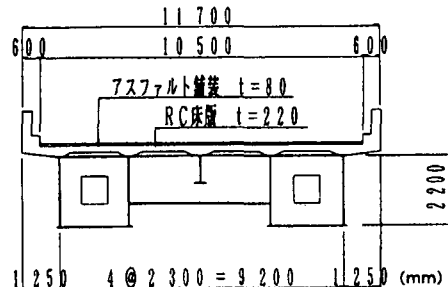


図-2 上部構造図

2.2 橋脚の特性と固有周期

以上のように設計した橋梁に関して、橋脚の曲げに対する変形性能を表わすために、橋脚の曲げに関するばね定数 K_p を算出した。これは、橋脚基部を固定端とし橋脚天端に橋軸水平方向の単位の荷重を載荷したときの載荷方向の変位の逆数をとった値である。なお、算出の際には橋脚の曲げ剛性は初期の値で一定とする。その結果、各橋脚の K_p は表-1 のようになる。

表-1 橋脚の曲げに関するばね定数

橋脚高さ	10m	20m	30m	40m
STEEL	31400	3856	1075	470
RC	95000	9939	6807	3168

(tf/m)

また、各橋脚1本当たりの重量は表-2に示す。鋼製橋脚は橋脚基部の中詰めコンクリートの重量は考慮していない。40mのRC橋脚は中空断面になっているので30mより重量は少なくなっている。

表-2 橋脚の重量

橋脚高さ	10m	20m	30m	40m
STEEL	19.6	41.6	63.3	106.4
RC	295.9	577.2	1245.6	1104.5

(tf)

このような特性を持つ橋脚からなる5径間連続桁橋に対し、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、各橋梁の固有周期は図-3に示すような値となった。

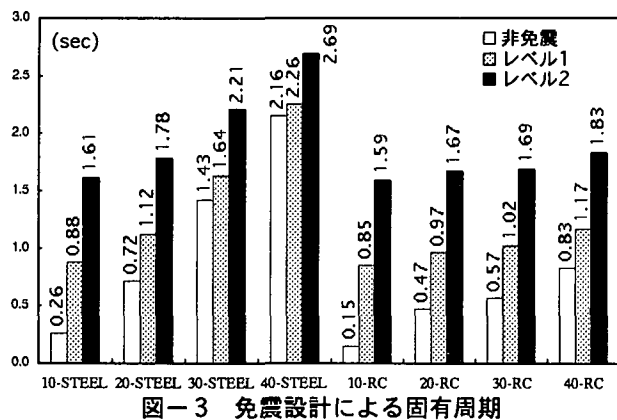


図-3 免震設計による固有周期

図-3に示すように、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 K_p 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といえる。

図-4には一例として橋脚高さ20mの鋼製橋脚を示した。これに対する免震支承の形状を表-3に示した。

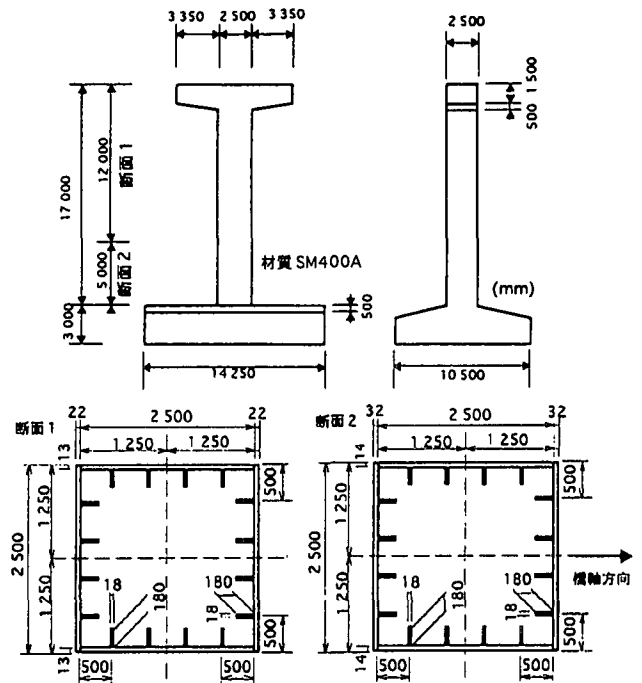


図-4 橋脚高さ20mの鋼製橋脚

表-3 20m鋼製橋脚橋の免震支承形状

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

以上の橋梁について、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、橋脚基部の損傷状況などから免震の効果などを検討する。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する。

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

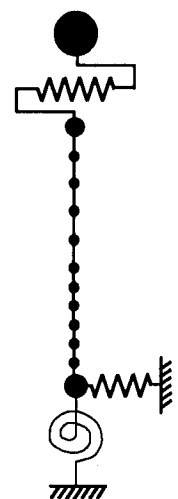


図-5 非線形解析モデル

減衰定数は、並進、回転ともに0.30としている。

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。ここでσ_y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2 m 高い断面に関しても検討を加えている。

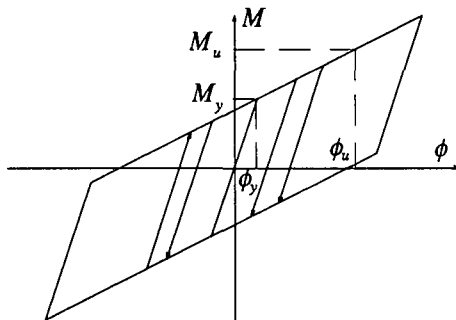


図-6 鋼製橋脚のバイリニアモデル

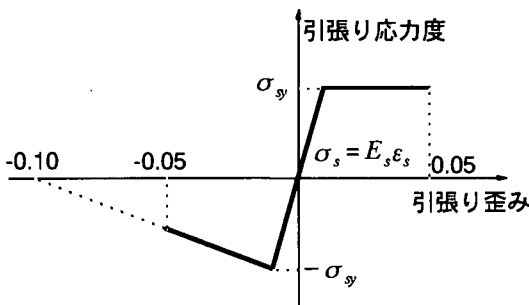


図-7 鋼材の応力度歪み関係

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。

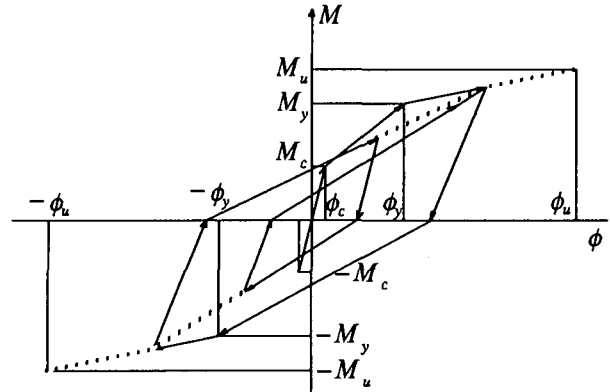


図-8 RC橋脚のトリリニアモデル

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_V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。

$$Q_V = A_s \tau_y / 1000 \quad (1)$$

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

Q_V: 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_y: 鋼材の基準降伏点 (kgf/cm²)

RC橋脚のせん断耐力Q_Vは道路橋示方書(2年版) V 耐震設計編 5.4.3 に従い以下のように求めた。

$$Q_V = S_C + S_S \quad (3)$$

$$S_C = 10 \cdot \tau_c \cdot b \cdot d \quad (4)$$

$$S_S = \frac{A_w \cdot \sigma_y \cdot d (\sin \theta + \cos \theta)}{10 \times 1.15 \cdot a} \quad (5)$$

Q_V: せん断耐力 (tf)

S_C: コンクリートが負担できるせん断耐力 (tf)

τ_c: コンクリートが負担できる平均せん断応力度 (kgf/cm²)

b: 部材断面幅 (m)

d: 部材断面の有効幅 (m)

S_S: 斜め引張り鉄筋が負担するせん断耐力 (tf)

A_w: 間隔aおよび角度θで配筋される斜め引張り鉄筋の断面積 (cm²)

σ_y: 斜め引張り鉄筋の降伏点 (kgf/cm²)

θ: 斜め引張り鉄筋と部材軸方向とのなす角 (度)

a: 斜め引張り鉄筋の部材軸方向の間隔 (cm)

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¹⁾(I種地盤用・II種地盤用・III種地盤用)と兵庫県南部地震の際に観測された2つの地震波(神戸海洋気象台NS方向²⁾・JR鷹取駅EW方向³⁾)の計5波を用い

る。これらの地震波を地盤に入力する。

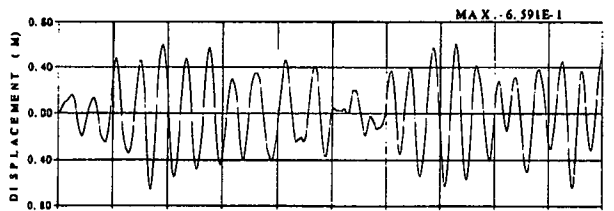
解析は接線剛性法による増分形式で定式化した直接積分法により行った。時間増分は0.002秒としている。

表-4 入力地震加速度波

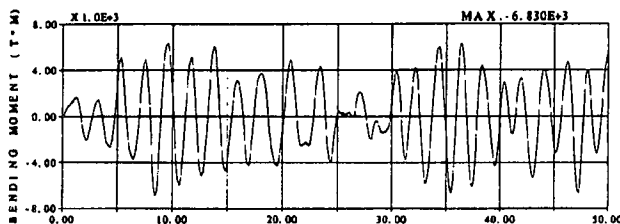
入力地震加速度波		最大加速度 (gal)	解析時間 (sec)
免震設計法 マニュアル(案)	I種地盤用	360	24.96
	II種地盤用	417	30.00
	III種地盤用	443	49.96
兵庫県南部地震	神戸海洋気象台	818	15.00
	JR鷹取駅	657	20.00

4. 解析結果

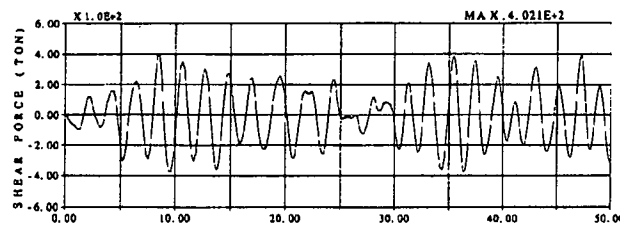
結果の一例として20mの鋼製橋脚橋にIII種地盤用の地震波を入力したときの(a)上部構造の変位、(b)橋脚基部の曲げモーメント、(c)橋脚基部のせん断力、(d)橋脚基部のM-φ履歴図を示す。免震と非免震の両者について同じ項目を示しているため、両状態の比較を行うことができる。



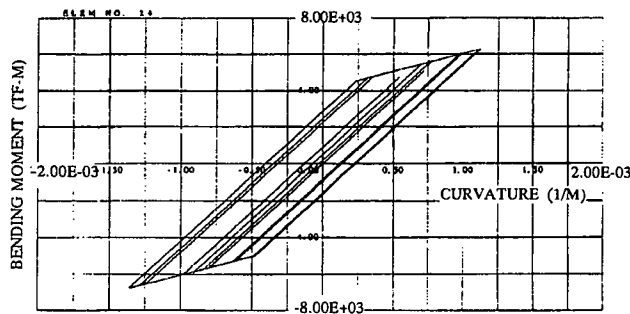
(a) 上部構造変位 (max 65.9 cm)



(b) 基部曲げモーメント (max 6830 tf-m)

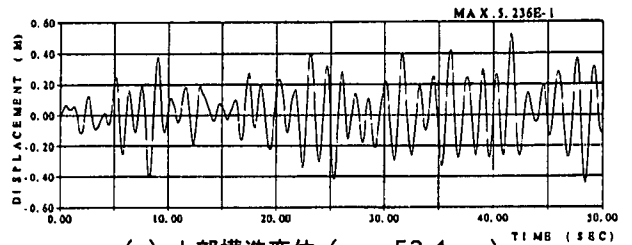


(c) 基部せん断力 (max 402 tf)

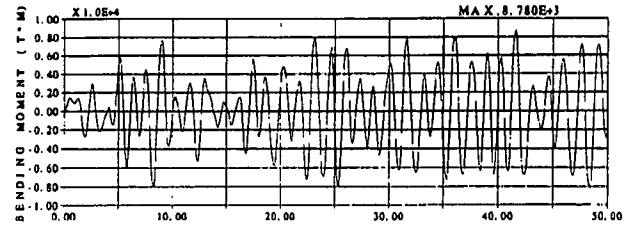


(d) 橋脚基部M-φ履歴図

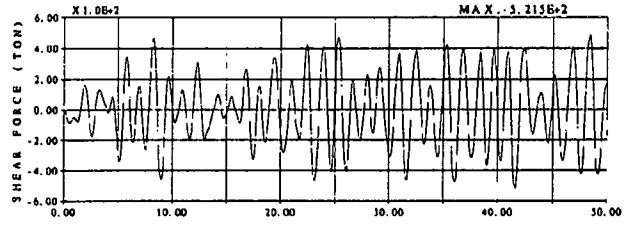
図-9 免震20m鋼製橋脚橋の応答 (III種地盤用)



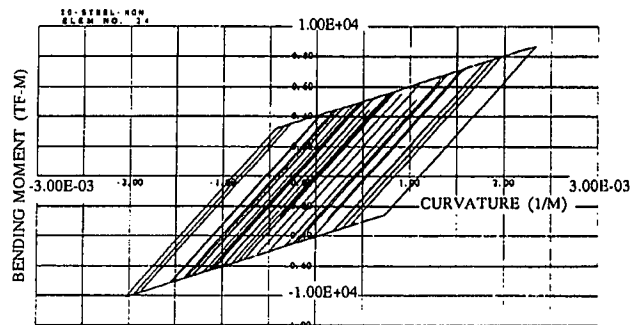
(a) 上部構造変位 (max 52.4 cm)



(b) 基部曲げモーメント (max 8780 tf-m)



(c) 基部せん断力 (max 522 tf)



(d) 橋脚基部M-φ履歴図

図-10 非免震20m鋼製橋脚橋の応答 (III種地盤用)

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-9に示す。

この表で示しているもの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} である。 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} に関しては降伏曲率 ϕ_y 、終局曲率 ϕ_U に対する比を示した。

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、図-11に示

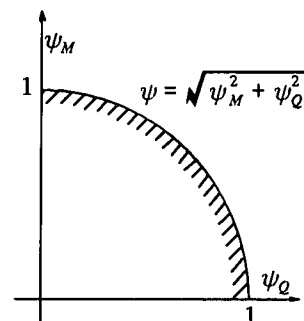


図-11 合成断面力係数の終局判定

すような四分円を終局条件の判定基準とした時の半径を示す。 ψ が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、 $M-\phi$ 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2 m高い位置の断面力などを()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、実橋脚ではコンクリートにより耐力が増加しているため基部が損傷を受けることは少なく、むしろ中詰めコ

ンクリートの上面に当たる断面が最も損傷を受けやすくなる。そこで中詰めコンクリート充填高さが2 mであると仮定し、中詰めコンクリート上面断面についての結果も示すこととした。

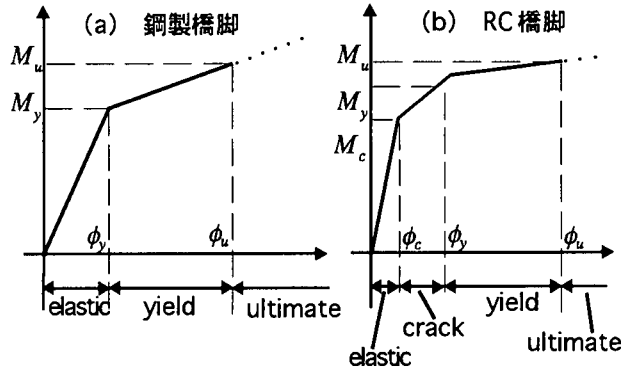


図-12 橋脚基部の状態判定

表-5 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						せん断力 Q_{max} (tf)	ψ_0 (= Q_{max}/Q_u)	合成断面力 ψ	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				状態					
					M_{max} (tf・m)	ψ_M (= M_{max}/M_u)	ϕ_{max} (1/m)	ϕ_{max}/ϕ_y		ϕ_{max}/ϕ_u				
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-6 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						せん断力 Q_{max} (tf)	ψ_0 (= Q_{max}/Q_u)	合成断面力 ψ	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				状態					
					M_{max} (tf・m)	ψ_M (= M_{max}/M_u)	ϕ_{max} (1/m)	ϕ_{max}/ϕ_y		ϕ_{max}/ϕ_u				
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 (8837)	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-7 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							せん断力		合成断面力	LRB最大 変形量 (cm)
	上部 (cm)	天端 (cm)	上部 (gal)	天端 (gal)	M _{max} (tf・m)	ψ _M (=M _{max} /M _U)	φ _{max} (1/m)	φ _{max} /φ _v	φ _{max} /φ _u	状態	Q _{max} (tf)	ψ ₀ (=Q _{max} /Q _U)	ψ		
														ψ	
10-STEEL(1)免震	29.8	2.0	528	548	2325	0.64	6.35E-04	0.83	0.48	elastic	333	0.14	0.65	27.9	
	(2)非免震	3.5	3.5	834	834	3810	1.05	1.39E-03	1.83	1.051	ultimate	545	0.22	1.07	-
20-STEEL(1)免震	65.9	30.7	616	1031	6830	1.06	1.37E-03	1.70	1.14	ultimate	402	0.10	1.07	35.4	
	(2)非免震	52.4	52.4	778	778	8780	1.36	2.34E-03	2.92	1.958	ultimate	522	0.13	1.37	-
30-STEEL(1)免震	93.5	56.7	651	896	11614	1.03	1.61E-03	1.28	1.05	ultimate	429	0.06	1.03	36.8	
	(2)非免震	81.1	81.1	799	799	14392	1.27	2.43E-03	1.94	1.59	ultimate	540	0.08	1.28	-
40-STEEL(1)免震	173.4	144.0	553	789	13967	1.08	1.62E-03	1.23	1.11	ultimate	389	0.04	1.08	29.8	
	(2)非免震	194.0	194.0	709	709	17574	1.35	2.22E-03	1.69	1.52	ultimate	484	0.05	1.35	-
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-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							せん断力		合成断面力	LRB最大 変形量 (cm)
	上部 (cm)	天端 (cm)	上部 (gal)	天端 (gal)	M _{max} (tf・m)	ψ _M (=M _{max} /M _U)	φ _{max} (1/m)	φ _{max} /φ _v	φ _{max} /φ _u	状態	Q _{max} (tf)	ψ ₀ (=Q _{max} /Q _U)	ψ		
														ψ	
10-STEEL(1)免震	23.7	1.7	445	822	1849	0.51	5.05E-04	0.66	0.38	elastic	266	0.11	0.52	22.2	
	(2)非免震	7.3	7.3	1406	1406	6489	1.79	3.05E-03	4.00	2.304	ultimate	935	0.38	1.83	-
20-STEEL(1)免震	31.2	13.7	317	1045	3235	0.50	4.55E-04	0.57	0.38	elastic	182	0.05	0.50	17.5	
	(2)非免震	38.3	38.3	686	686	7708	1.20	1.80E-03	2.25	1.510	ultimate	460	0.12	1.20	-
30-STEEL(1)免震	32.2	19.3	230	898	4032	0.36	4.86E-04	0.39	0.32	elastic	153	0.02	0.36	13.2	
	(2)非免震	44.3	44.3	521	521	9269	0.82	1.12E-03	0.89	0.73	elastic	332	0.05	0.82	-
40-STEEL(1)免震	30.6	24.3	119	972	2354	0.18	2.54E-04	0.19	0.17	elastic	96	0.01	0.18	6.3	
	(2)非免震	37.9	37.9	165	165	3506	0.27	3.79E-04	0.29	0.26	elastic	130	0.01	0.27	-
10-RC(1)免震	22.9	1.1	453	898	2551	0.73	4.57E-04	0.55	0.01	crack	369	0.35	0.81	22.3	
	(2)非免震	7.4	7.4	862	862	3404	0.98	1.99E-02	23.84	0.60	yield	583	0.55	1.12	-
20-RC(1)免震	26.6	9.8	455	1387	6552	0.80	1.10E-03	1.11	0.05	yield	509	0.31	0.86	22.9	
	(2)非免震	19.3	19.3	763	763	7025	0.86	6.43E-03	6.52	0.32	yield	558	0.33	0.92	-
30-RC(1)免震	33.0	12.9	486	1341	9800	0.68	5.40E-04	0.81	0.06	crack	705	0.47	0.83	24.1	
	(2)非免震	23.3	23.3	639	639	11769	0.82	1.88E-03	2.82	0.21	yield	689	0.46	0.94	-
40-RC(1)免震	30.2	15.2	388	1306	8518	0.53	4.16E-04	0.54	0.01	crack	504	0.33	0.63	21.0	
	(2)非免震	27.1	27.1	480	480	10824	0.68	6.49E-04	0.84	0.01	crack	536	0.35	0.77	-

表-9 JR鷹取駅の波形に対する応答値

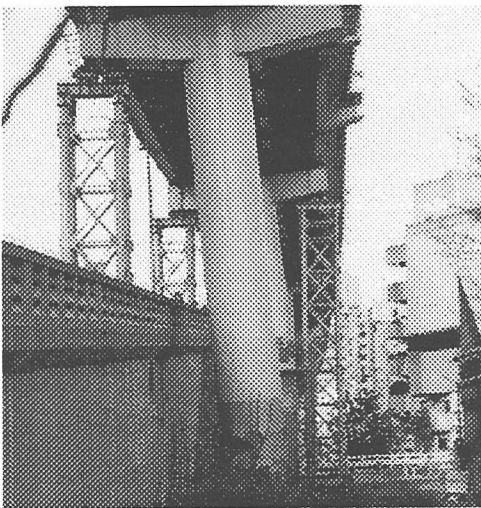
入力 JR鷹取駅	最大変位		最大加速度		橋脚基部断面力							せん断力		合成断面力	LRB最大 変形量 (cm)
	上部 (cm)	天端 (cm)	上部 (gal)	天端 (gal)	M _{max} (tf・m)	ψ _M (=M _{max} /M _U)	φ _{max} (1/m)	φ _{max} /φ _v	φ _{max} /φ _u	状態	Q _{max} (tf)	ψ ₀ (=Q _{max} /Q _U)	ψ		
														ψ	
10-STEEL(1)免震	41.8	2.7	748	1099	3250	0.89	1.05E-03	1.37	0.79	yield	464	0.19	0.91	39.1	
	(2)非免震	5.6	5.6	1208	1208	5483	1.51	2.43E-03	3.19	1.833	ultimate	786	0.32	1.54	-
20-STEEL(1)免震	66.9	31.2	626	2167	6908	1.07	1.41E-03	1.75	1.18	ultimate	408	0.10	1.08	35.6	
	(2)非免震	62.4	62.4	851	851	9550	1.48	2.72E-03	3.39	2.279	ultimate	568	0.15	1.49	-
30-STEEL(1)免震	73.3	44.3	515	1759	9257	0.82	1.11E-03	0.89	0.73	elastic	345	0.05	0.82	29.0	
	(2)非免震	74.2	74.2	761	761	13676	1.21	2.23E-03	1.77	1.46	ultimate	508	0.07	1.21	-
40-STEEL(1)免震	75.9	62.8	248	1564	6077	0.47	6.57E-04	0.50	0.45	elastic	159	0.02	0.47	13.6	
	(2)非免震	89.2	89.2	352	352	8781	0.68	9.50E-04	0.72	0.65	elastic	244	0.02	0.68	-
10-RC(1)免震	39.9	2.9	728	1319	3261	0.94	6.57E-03	7.88	0.20	yield	453	0.42	1.03	37.5	
	(2)非免震	3.5	3.5	756	756	3298	0.95	9.19E-03	11.02	0.28	yield	521	0.49	1.07	-
20-RC(1)免震	45.8	11.1	668	1636	6666	0.82	2.41E-03	2.44	0.12	yield	527	0.32	0.87	35.2	
	(2)非免震	27.3	27.3	642	642	7425	0.91	1.08E-02	10.96	0.54	yield	572	0.34	0.97	-
30-RC(1)免震	54.6	20.4	661	1020	11476	0.80	1.14E-03	1.70	0.13	yield	727	0.49	0.94	35.6	
	(2)非免震	45.6	45.6	677	677	13046	0.91	5.25E-03	7.85	0.60	yield	909	0.61	1.10	-
40-RC(1)免震	64.1	33.1	585	935	12119	0.76	2.03E-03	2.64	0.04	yield	604	0.40	0.86	31.7	
	(2)非免震	49.0	49.0	545	545	12220	0.77	3.79E-03	4.91	0.07	yield	729	0.48	0.91	-

5. 考察

5.1 兵庫県南部地震被害との比較

兵庫県南部地震の際、阪神高速神戸線のJR和田岬線跨線橋部の鋼製円形断面橋脚（神P-585橋脚）では写真一1に示すように、基部から数mの断面で局部座屈が生じた。この断面は中詰めコンクリートの上面付近であると思われる。この橋脚は基部から天端まで16mであり、断面形状は異なるが本研究での鋼製20m橋脚（基部から天端まで17m）とほぼ同じ高さの橋脚である。またここはJR鷹取駅に近い場所であるため、本解析での20mの鋼製橋脚橋をJR鷹取駅の波形で解析した状況に近いものと思われる。解析ではこの場合、中詰めコンクリート上面で $1.83\phi_u$ の変形が生じ、断面端部が引張りによっても降伏するという結果となっているが、写真一1を見ると、傾いた橋脚の引張り側において

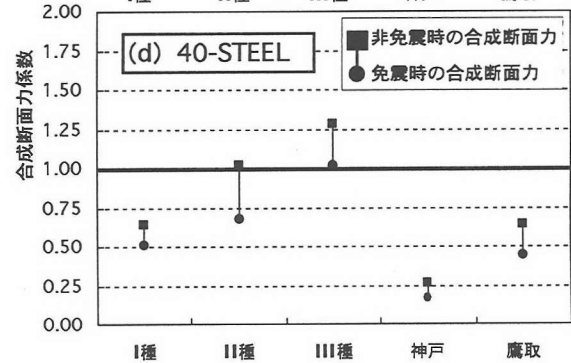
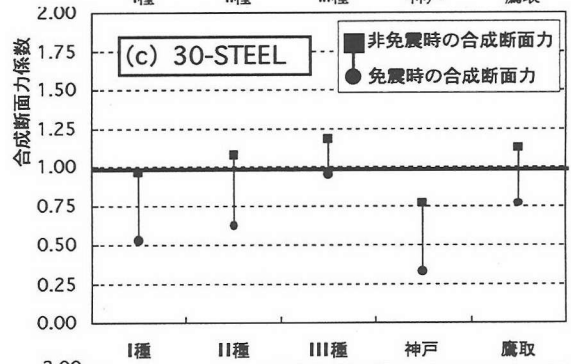
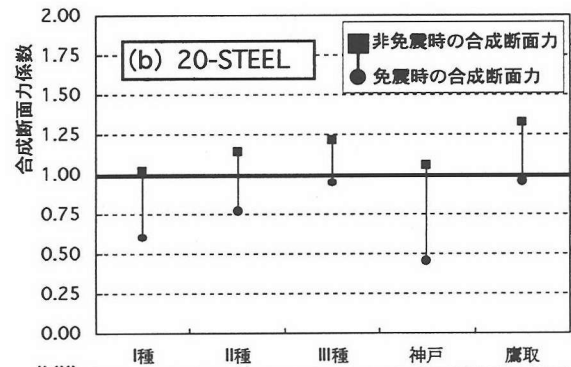
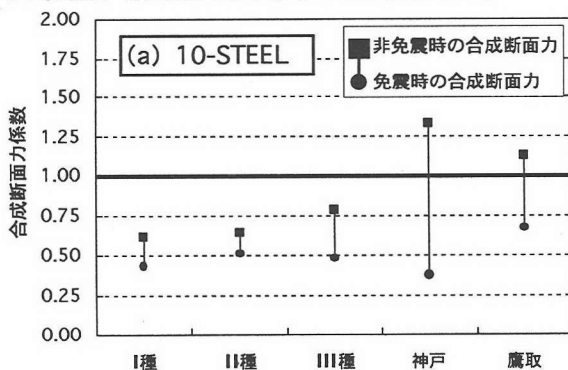
も塗装が一部はがれているなど降伏に達したと見られる跡があり、本解析は実現象を比較的良好に再現しているのではないかとと思われる。



写真一1 阪神高速神戸線・神P-585橋脚の被害

5.2 合成断面力係数

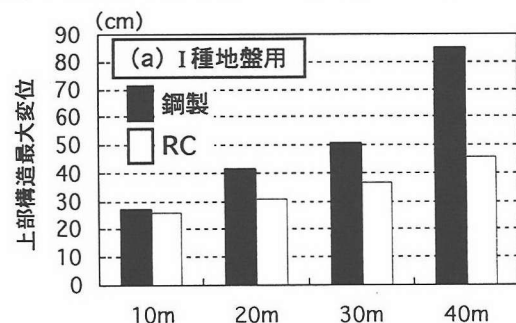
図一13には、鋼製橋脚に関して各橋脚高さ毎に免震と非免震での合成断面力係数について示している。いずれも橋脚基部から2m高い断面に関する値である。すべてのケースで、非免震の時よりも免震の時の合成断面力係数が小さく、程度の差はあるが入力地震波、橋脚高さによらず免震により耐震性が向上していることが分かる。軟弱地盤のIII種地震用波形に対しても10~30mの橋脚高さでは、免震により合成断面力係数が1.0以下に抑えられるなど免震が特に効果的であることが分かった。



図一13 非免震時と免震時の合成断面力

5.3 上部構造変位最大値

図一14には入力地震波毎に上部構造の変位最大値を示す。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ことが分かった。免震設計法マニュアル（案）の3つの地震波のように長い時間揺れが続く（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、橋脚の種類や高さを変化しても上部構造の変位にはあまり差が生じないことが分かった。



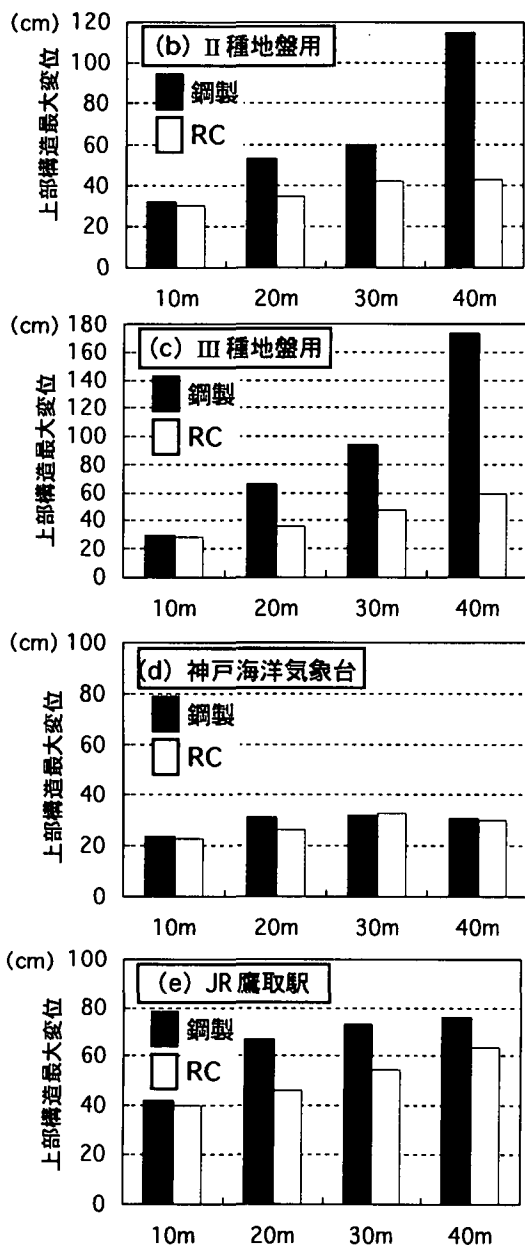


図-14 上部構造最大変位

6. 結論

4種類の鋼製橋脚橋に対して非線形時刻歴応答解析を行い橋脚基部の損傷状況などを調べたところ、以下のこと

が分かった。

- 本論文で用いた地震波に対しては、いずれの橋脚高さにおいても、程度の差はあるが、免震化により橋脚基部の断面力が低減され、耐震性能が向上した。
- 特にI、II種地盤用と神戸海洋気象台の地震波に対しては、すべての橋脚高さで、免震化により橋脚を線形域 (elastic) に抑えられるなど、大きな効果が得られた。
- 軟弱地盤のIII種地盤用の地震波に対しても免震化が逆効果になることはなかった。
- III種地盤用の地震波に対して、40mの橋脚高さでは、免震化のみでは、合成断面力を1.0以下にできなかった。このケースで、安全性を保つためには、免震化とともに断面を増加させるなどの手段を併用する必要がある。
- 神戸海洋気象台のように大きな加速度が短時間に作用するような(直下型)地震波に対しては、上部構造の変位に橋脚の剛性の差はあまり表われない。
- これに対してマニュアルの3つの地震波のように主要動が繰り返し作用する(海洋型)地震波に対しては、20m以上の橋脚高さでは鋼製はRCよりも大きな変位が生じる。ただし10mでは鋼製とRCとの変位の差はほとんどない。

参考文献

- 1) 土木研究センター：建設省 道路橋の免震設計法マニュアル(案)、平成4年。
- 2) 気象庁：平成7年(1995年)兵庫県南部地震の気象庁87型電磁式強震計の記録。
- 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。波形はJR警報地震計(鷹取駅、FDシリアル番号R-048)による。
- 4) 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。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(案)(耐震設計編)、平成8年。
- 6) 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。

Case Studies on Seismic Behavior of Isolated Continuous Girder Bridges with Steel Piers

TOKYO, JAPAN, 14-15 MAY, 1997

Fumio NAGASHIMA and Teruhiko UCHIDA

The seismic behavior of isolated continuous girder bridges with steel piers and the same girder bridges with reinforced concrete piers is compared utilizing nonlinear dynamic response analyses. Standard seismic waves of three types of level 2 and two observed ground motions from the Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) Earthquake are considered. Ultimate performance of isolated bridges with steel piers, designed according to design criteria in the Manual (draft) for Seismic Isolation Design Method of Highway Bridges, is evaluated using composite cross sectional stress coefficient (ratio of Composite stress of shear stress and fiber stress).