

鋼製橋脚・RC橋脚が混在する高架橋の地震時応答性状に関する研究

渡邊英一^{*}, 杉浦邦征^{**}, 永田和寿^{***}, 北沢正彦^{****}, 堀江佳平^{*****}^{*} Ph. D., 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)^{**} Ph. D. 京都大学助教授 大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)^{***} 工修 京都大学大学院博士後期課程 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)^{****} 阪神高速道路公団課長 (〒541 大阪市中央区久太郎町 4-1-3 大阪センタービル)^{*****} 阪神高速道路公団係長 (〒541 大阪市中央区久太郎町 4-1-3 大阪センタービル)

兵庫県南部地震において十分な耐震性を有しているといわれていた高架橋もその例に漏れず甚大な被害を受けた。そこで本研究は鋼製橋脚とRC橋脚の隣接部に発生した損傷を検討するため、これらの橋脚が混在する高架橋をバネ-質点系によりモデル化し、固有振動解析および弾塑性応答解析を行った。その結果、鋼製橋脚とRC橋脚の隣接部付近において橋脚単独の応答結果と大きな差異を生じ、橋脚本数、異種橋脚の組み合わせや橋脚、桁、支承などの構造要素の履歴性状の違いなどによって、高架橋の応答性状は著しく異なり耐震設計に注意する必要があることが明らかになった。特に、橋軸直角方向の応答に対しても、橋脚相互の地震分担を考え、設計を行う必要がある。

Key Word: Steel pier, RC pier, elevated bridge, seismic response

1. はじめに

都市内高速道路/鉄道網は人や物資の迅速な輸送を可能にし、快適な市民生活や活発な経済活動を支える重要なインフラストラクチャの一つである。兵庫県南部地震により、これらのインフラストラクチャは甚大な被害を受けた。十分な耐震性を有しているといわれていた高架橋もその例に漏れず、阪神高速道路3号神戸線ビルツ形式高架橋の倒壊に代表されるように非常に大きな被害を受けた。その結果、高架橋の耐震設計に関しても問題点が明らかになったとともに、都市の大動脈として都市高速道路等がいかに重要であるかが改めて認識されることとなった。

これまでの高架橋の構成は、経済性の面からRC橋脚が用いられるのがほとんどであるが、軟弱地盤上での建設、交差点上における大スパンの採用などの立地条件から鋼製橋脚が採用される。そのため、高架橋はこれら2つの応答特性の異なった橋脚からなる異種橋脚群として挙動する。その結果、兵庫県南部地震ではこのような異種橋脚からなる高架橋において異種橋脚を連結した箇所に被害が多く発生し、異種橋脚群の相互作用が問題視されるようになった。したがって、今後は橋脚間の動的相互作用を考慮した非線形動的解析を行い、終局限界状態に基づいた設計を行っていく必要がある。

我が国の橋梁の耐震設計の問題点の一つとして、橋全体系という観点からの安全照査が行われていないことが挙げられる。鋼製橋脚とRC橋脚、上部構造と下部構造、支承などが個々の構造要素として取り扱われ、とも

すると十分な情報が伝達されないまま設計が行われている。例えば、地盤条件や構造条件が大きく異なっている場合に、単純桁をつなげるのか、あるいは連続構造にした方がよいのか、地盤液状化や流動化が生じる個所ではどのような構造形式がよいのか、橋脚高さが異なり、橋脚ごとに異なったじん性の応答が生じることが想定される場合に、どのような上部構造形式、径間割り、支承構造がよいのかなど、耐震設計では総合的に地震力に抵抗する構造系を探っていくことが必要である。

そこで、本研究では異種橋脚群を1つの大規模構造システムとしてとらえ、そのシステムの地震時応答性状を固有振動解析と動的弾塑性解析の両面から明らかにすることを目的とした。また、構造要素の復元力特性および高架橋に対するモデル化が高架橋の地震時応答性状に与える影響についても検討した。

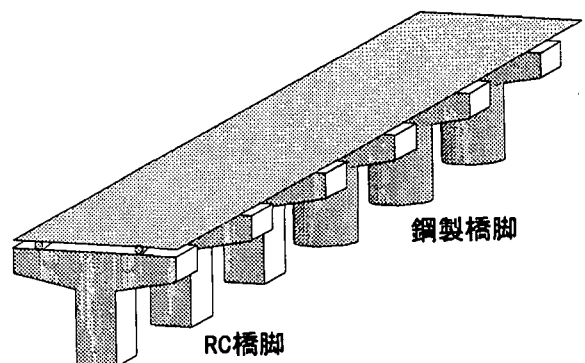


図-1 研究対象

2. 解析方法および解析モデル

本研究では、図-1に示すような鋼製橋脚とRC橋脚の異種橋脚群からなる高架橋の橋軸直角方向の応答を評価するため、高架橋をバネ-質点系によりモデル化を行った。以下にそのモデル化について示す。図-2(a)に示すように橋脚と上部構造物が一体となって挙動する1自由度系の橋脚とそれぞれの橋脚を桁で連結したモデル(以下、モデル1と呼ぶ)、および図-2(b)に示すように橋脚と上部構造物がそれぞれ異なる挙動をする2自由度系の橋脚とそれぞれの橋脚を桁で連結したモデル(以下、モデル2と呼ぶ)である。なお、モデル化を行う上で、橋脚、桁、支承それぞれの動的特性をバネとダッシュポットで表現した。

はじめにモデル1を用いて鋼製橋脚とRC橋脚の異種橋脚群からなる高架橋の応答性状を固有振動解析と弾性および弾塑性解析により検討するが、ここでは橋脚本数、桁の剛性、鋼製橋脚とRC橋脚の組み合わせを変化させて解析を行った。次にモデル1を用いて復元力特性の異なる鋼製橋脚とRC橋脚が連結された高架橋の解析を行った。さらに、モデル2を用いて応答解析を行い、モデル1の結果との比較からモデル化の違いが応答結果に与える影響について検討を行った。なお、応答解析はNewmarkの β 法($\beta: 1/6$, 時間増分: 0.002秒)により行った。

阪神高速道路・3号線神戸線において鋼製橋脚とRC橋脚が隣接している神P353(鋼製橋脚)と神P534(RC橋脚)に着目し、これらの橋脚および桁の諸元を参考に解析モデルを設定した。その高架橋の概形を図-3に示し、鋼製橋脚およびRC橋脚と桁の諸元を表-1に示す。鋼製橋脚とRC橋脚の単独での振動に対する固有周期はそれぞれ0.720秒、0.612秒であった。また、支承の形状寸法と諸元をそれぞれ表-2および表-3に示す¹⁾。

鋼製橋脚に対しては、降伏復元力の1.1倍で橋脚基部に局部屈曲が生じると想定し劣化直線部を有するTri-linear型の復元力モデル²⁾(図-4(a))と、剛性が劣化することなく硬化し続けるbi-linearモデル(図-4(c))を採用した。また、RC橋脚に対しては繰返しによる剛性の劣化を表現することができるDegrading Tri-linearモデル³⁾(図-4(b))を用いた。支承に対してはその復元力モデルを線形モデルと、繰返しの履歴によってエネルギーを吸収できるbi-linearモデル(図-4(c))を用いた。なお、本解析では桁は降伏しないものとした。入力波形は、兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測されたNS成分を用いた。この加速度の時刻歴波形とそのフーリエ振幅スペクトルをそれぞれ図5-(a), (b)に示す。その特徴は、最大加速度が818galで主要動が非常に短く、それぞれの橋脚の固有周期にほぼ一致しており0.7秒付近に卓越周期を持っていることがわかる。

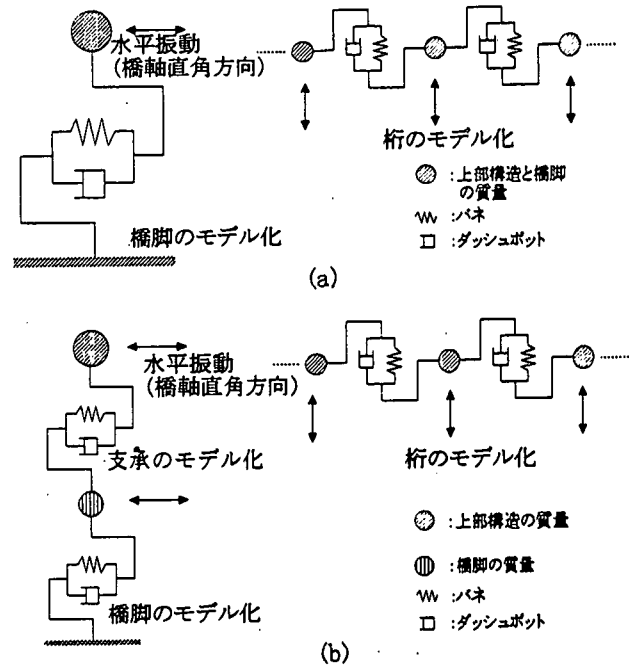


図-2 高架橋のモデル化

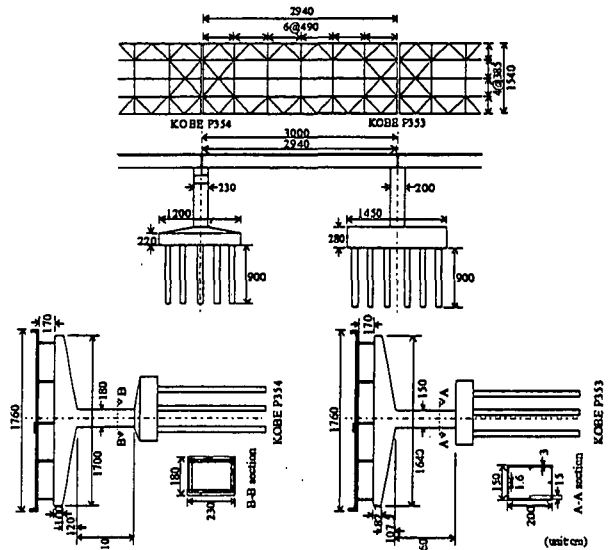


図-3 解析対象とした高架橋

表-1 桁と橋脚の諸元

	桁	鋼製橋脚	RC橋脚
重量 (tonf)	528	30	225.7
バネ定数 (tonf/cm)	43.3	43.3	81
減衰定数 (%)	3	5	5
復元力 (tonf)	ひび割れ	—	56.7
	降伏	—	339.4

表-2 支承の形状寸法

平面形状	62cm×62cm
有効形状	60cm×60cm
ゴム厚	1.4cm×8層
支承数	5基

表-3 支承の諸元

バネ定数 (tonf/cm)	48.5
減衰定数 (%)	0
降伏復元力(tonf)	79

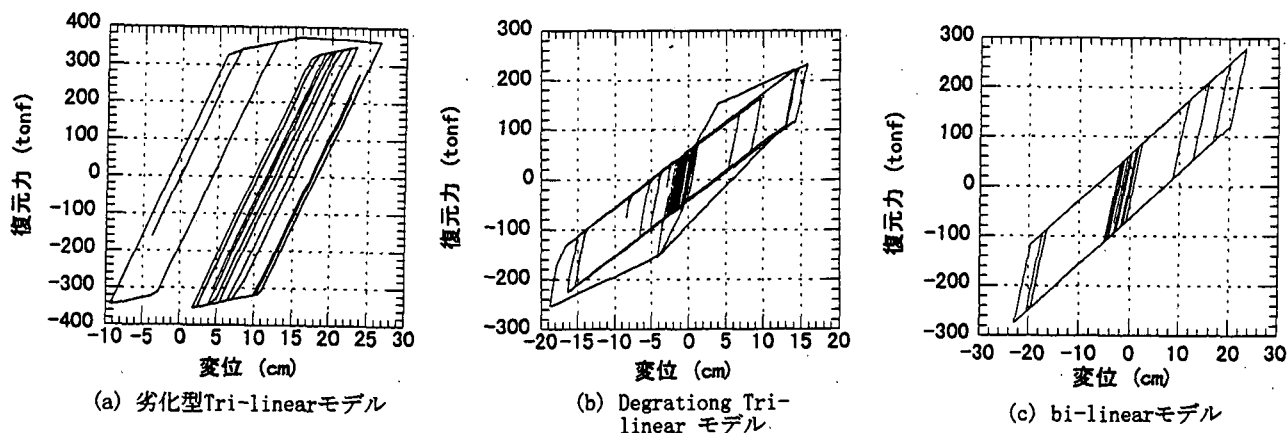


図-4 復元力モデル

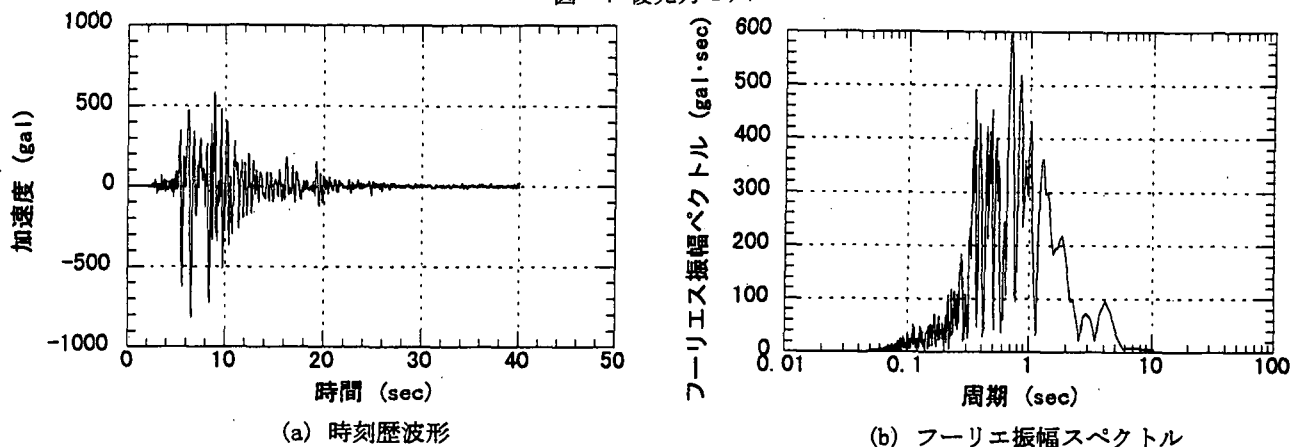


図-5 入力波形

3. 解析結果および考察

3.1 固有振動解析結果

鋼製橋脚とRC橋脚からなる高架橋の基本振動性状を明らかにするため、固有振動解析を行い、得られた1次から5次の固有周期と振動モードをそれぞれ図-6(a)~(d)に示す。なお、振動モードは最大振幅で正規化した。

(1) 同一種類の橋脚からなる高架橋の振動性状

鋼製橋脚12本およびRC橋脚12本からなる高架橋の固有周期と振動モードをそれぞれ図-6(a), (b)に示す。その結果、1次固有周期はそれぞれの橋脚単独の固有周期と一致していた。また、それぞれの橋脚の振動モードはお互いに一致していることがわかる。

(2) 異種橋脚からなる高架橋の振動性状

鋼製橋脚12本とRC橋脚12本からなる高架橋の固有周期と振動モードを図-6(c)に示す。低次の振動モードではRC橋脚部の振幅が非常に小さく、その橋脚単独の固有周期に近い4次モードで初めて大きな振幅を有することがわかる。

(3) 橋脚本数の影響

鋼製橋脚とRC橋脚の橋脚本数を6本、12本、24本と変え、固有振動解析を行った。その結果、振動モードは図-6(c)に示す振動モードと同様に低次モードでは鋼製橋脚のみが振動するモードが現れた。また、橋脚本

数が多くなるにしたがってRC橋脚部の振幅が大きくなるモードは高次モードとなる。これは橋脚数を多くすることにより固有周期が長周期化したためであると考えられる。

(4) 桁の剛性の影響

桁の剛性を変化させ、それが振動性状に及ぼす影響を調べてみた。その結果、この解析ケースでも同様に振動モードは図-6(c)に示す振動モードと同じように低次モードでは鋼製橋脚部のみが振動するモードが現れた。しかし、剛性を高くすることにより低次のモードにおいてもRC橋脚部が振動するモードが現れた。これは桁の剛性を高くすることにより上部工が一体で振動する傾向が高まるためであると考えられる。

(5) 異種橋脚の組み合わせの影響

RC橋脚22本の中央に鋼製橋脚2本を配置した高架橋の固有周期と振動モードを図-6(d)に示す。1次の振動モードに鋼製橋脚とその周辺のRC橋脚のみが振動するモードが現れ、2次モード以降は高架橋全体で揺れるモードが現れた。

以上のことより、異種橋脚からなる高架橋の振動モードは同一種類橋脚からなる高架橋と明らかに異なっており、異種橋脚連結の影響が本固有振動解析からうかがえる。橋脚数、桁の剛性、異種橋脚の組み合わせなどに

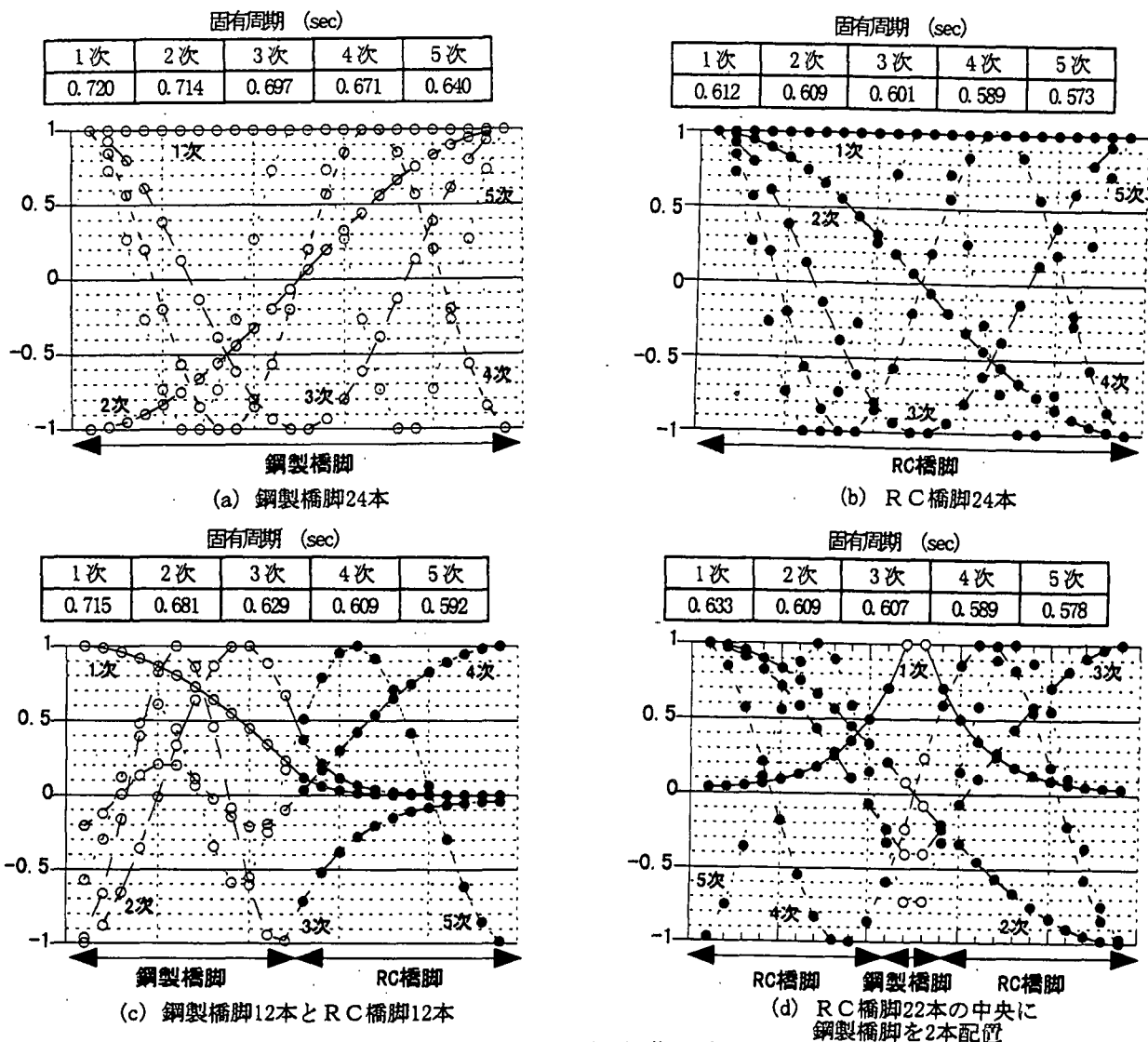


図-6 固有周期と振動モード

よって振動モードは異なり、各々の橋脚に対して十分な耐震設計を行ったとしても高架橋の真の安全性を保証しているものではない。

3. 2 応答解析結果

はじめに鋼製橋脚単独とRC橋脚単独の応答解析を行った。その結果、図-7に示すように弾性および弾塑性応答においても鋼製橋脚の応答がRC橋脚の応答を上回っており、RC橋脚の0.88cmに対し鋼製橋脚は11.5cmという大きな残留変形を生じていた。

(1) 異種橋脚からなる高架橋の応答性状

鋼製橋脚12本およびRC橋脚12本からなる高架橋に対し応答解析を行った。弾性応答解析および弾塑性応答解析により得られた各上部構造物の最大応答変位をそれぞれ図-7に示す。鋼製橋脚とRC橋脚の隣接部からそれぞれ10橋脚あたりでそれぞれ単独橋脚の最大応答変位に漸近していることがわかる。また、弾塑性応答では隣接部付近において鋼製橋脚の応答は弾性応答にくらべさらに低減し、RC橋脚の応答は弾性応答とは逆に

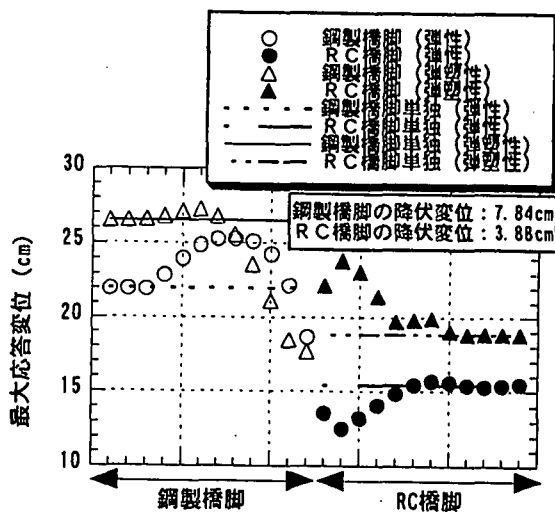


図-7 異種橋脚からなる高架橋の応答性状

増加していることがわかる。

(2) 橋脚本数の影響

鋼製橋脚とRC橋脚の橋脚本数をそれぞれ、6本、12

本, 24本と変え応答解析を行った. その結果を図-8に示す. 6本, 12本の場合はほぼ同じ応答を示したが, 24本の場合はそれらと異なる応答性状を示した.

(3) 桁の剛性の影響

桁の剛性を变化させた応答解析を図-9に示す. 桁の剛性を上げると異種橋脚隣接付近の応答変位に対する影響は低減し, 広範囲の橋脚に影響が及んでいるとわかる. 実際の被害が隣接付近でみられることを考慮すると, 桁の剛性は小さいと考えられる.

(4) 異種橋脚の組み合わせの影響

RC橋脚22本の中央に鋼製橋脚2本を配置した高架橋の応答を図-10に示す. その結果, 弾性と弾塑性では異なる全く異なる結果が得られた. 弾性応答ではほぼ振動モードの1次の波形が現れ, 鋼製橋脚の応答がRC橋脚の応答よりも大きくなった. ところが, 弾塑性応答では鋼製橋脚の応答は橋脚単独の応答よりも減少し, RC橋脚は鋼製橋脚との隣接部付近で応答が増大した.

(5) 持続硬化型復元力モデルによる応答性状

劣化を伴わない復元力モデルを用いた鋼製橋脚単独の最大応答変位は劣化を伴う復元力モデルを用いた応答変位に対し僅かに減少し, 残留変形は0.329cmと大きく改善された. その劣化を伴わない復元力モデルを用いて鋼製橋脚12本RC橋脚12本からなる高架橋に対し応答解析を行った結果が図-11である. 鋼製橋脚はわずかであるが全体的に応答が低減され, RC橋脚は隣接部において応答の増加がみられた.

(6) モデル化の影響

モデル1とモデル2の鋼製橋脚とRC橋脚のそれぞれの単独応答結果を表-4に示す. モデル2を用いて解析を行った場合モデル1を用いて解析を行った場合に比べてどちらの橋脚も上部構造物の応答が大きくなっている. また, 支承の復元力モデルにbi-linearモデルを用いた場合は線形モデルを用いた場合と比較して応答が低減していることがわかる. これは, bi-linearモデルが繰り返しの履歴によってエネルギーを吸収したためであると思われる. つぎに, 鋼製橋脚12本RC橋脚12本からなる高架橋に対しモデル2を用いて支承の復元力モデルが高架橋の応答性状に与える影響を調べた. その結果が図-12である. 全体的に支承の復元力モデルbi-linearを用いた場合最大応答変位は線形モデルに対して減少しているが, 接続部付近では逆に応答が上回る箇所もみられた.

したがって, 異種橋脚からなる高架橋の応答性状は特に隣接部付近においてそれぞれの単独応答と大きな差異を生じるといえる. 橋脚本数, 桁の剛性, 異種橋脚の組み合わせ, 復元力モデルや高架橋のモデル化によって高架橋の応答性状は異なる. したがって, 異種橋脚が混在する高架橋の設計ではこれらの影響を十分検討する必要がある.

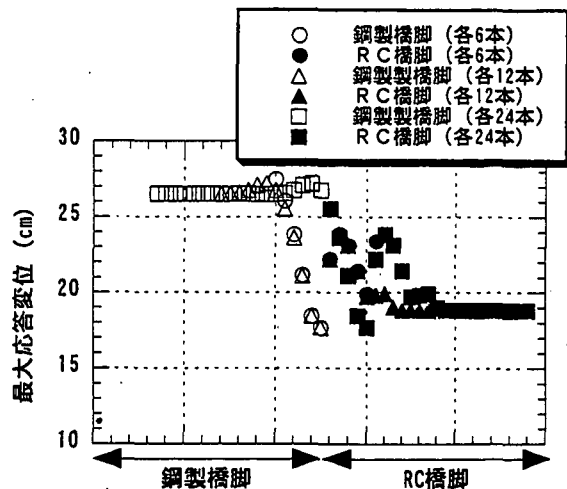


図-8 応答性状 (橋脚本数の影響)

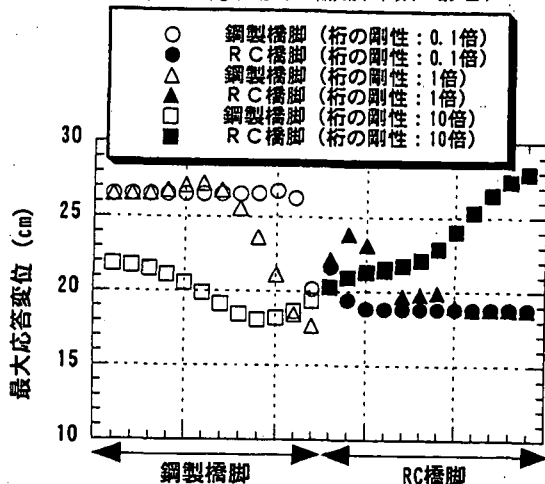


図-9 応答性状 (桁の剛性の影響)

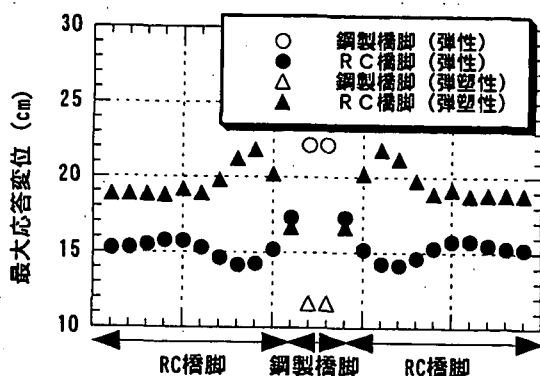


図-10 応答性状 (組み合わせによる影響)

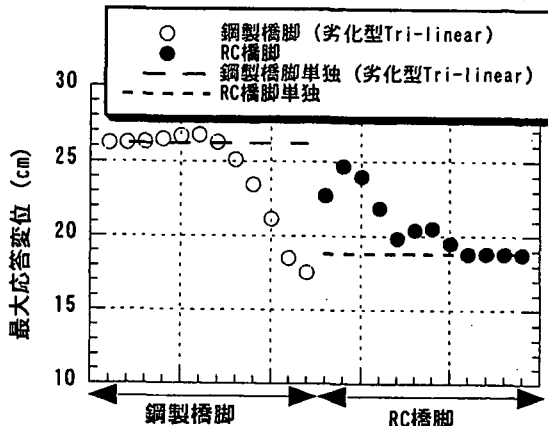


図-11 応答性状 (復元力モデルによる影響)

表-4 単独橋脚の最大応答変位

解析モデル	鋼製橋脚		RC橋脚	
	モデル1	モデル2	モデル1	モデル2
支承の復元力モデル	—	linear bi-linear	—	linear bi-linear
最大応答変位 (cm)	26.5	32.1 30.1	18.8	27.4 24.9

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 鋼製橋脚とRC橋脚は履歴性状、固有周期、応答変位などの応答性状は一般的に異なる。本解析ケースではそれらの橋脚が混在した高架橋において異種橋脚が隣接している付近からそれぞれ10橋脚目までの橋脚にその影響がみられた。また、隣接部付近において鋼製橋脚の最大応答変位はその単独橋脚の応答よりも低減し、RC橋脚の最大応答変位は逆に増大した。
- 2) 高架橋の規模、すなわち橋脚本数によって発生する振動モードは大きく異なる。このことから耐震設計においては適切な路線長を考慮して高架橋システムをとらえ安全性を検討する必要がある。
- 3) 桁の剛性を上げることにより異種橋脚隣接付近の応答変位に対する影響は低減し、広範囲の橋脚に影響が及ぶ。実際の被害が隣接付近でみられることを考慮すると、桁の剛性は小さいと考えられる。したがって、設計時には、桁の剛性すなわち支承条件に関しても慎に決定する必要がある。
- 4) 応答解析に用いる復元力モデルやモデル化によって高架橋の応答性状は異なる。したがって、高架橋の耐震性の照査を行う際これらのモデル化に対しては十分な検討を行う必要がある。

本研究は、鋼製橋脚とRC橋脚の異種橋脚群からなる高架橋の地震時応答性状を明らかにした。異種橋脚の橋脚本数、桁の剛性、組み合わせ方などによって高架橋は

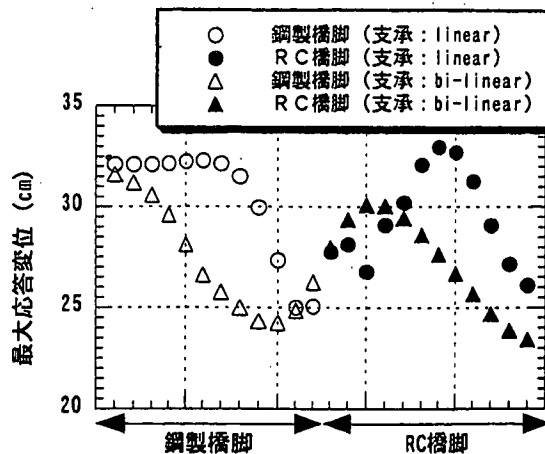


図-12 応答性状 (モデル2)

実に複雑な挙動をする。したがって、実際の高架橋の設計においてもこれらを十分考慮し、高架橋を各要素からなる構造システムとして捉えた設計設計法の確立が望まれる。

(平成9年3月31日受付)

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，pp. 5-1-5-36, 1997年3月
- 2) 渡辺英一，前川義男，杉浦邦征，北根安雄：鋼橋の被害と耐震性，土木学会誌，pp54-62, 1995年7月
- 3) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)，pp423-425, 1990年10月

SEISMIC RESONSE OF ELEVATED BRIDGE SYSTEMS CONSISTING OF STEEL AND RC PIERS

Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA, Kazutoshi NAGATA, Masahiko KITAZAWA, Yoshihira HORIE

Described herein are brief descriptions on the lesson of the performance and damage of steel bridges and viaducts by the Great Hanshin-Awaji Earthquake and a prediction of seismic response of elevated bridge system of hybrid piers, i.e., and reinforced concrete piers, by a numerical simulation. A particular emphasis is placed on the global performance of bridge system consisting of the main girders, piers focusing on the dynamic interaction of hybrid piers.