

# 異種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<sup>1</sup>・杉浦邦征<sup>2</sup>・永田和寿<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー 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)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 京都大学助教授 大学院工学研究科土木システム専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>学生会員 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)

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、固有振動解析と弾性応答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橋脚の異種橋脚からなる高架橋の振動モードは固有周期が等しい橋脚からなる高架橋と明らかに異なることがわかった。また、固有周期や復元力特性が異なる橋脚間に相互作用が生じ、高架橋は複雑な挙動をすることがわかった。したがって、実際の高架橋の設計においてはこれらを十分考慮し、高架橋を構造システムとして捉えた設計法の確立が必要である。

**Key Word :** steel pier, RC pier, elevated bridge, natural period, 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号神戸線ピ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て被害が多く発生し、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。

そこで、本研究では鋼製橋脚とRC橋脚の異種橋脚群からなる高架橋を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弾性応答解析および弾塑性応答解析から明らかにした。

## 2. 解析方法および解析モデル

本研究では、復元力特性の異なる鋼製橋脚と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性状を明らかにすることを目的とし、固有振動解析と弾性および弾塑性応答解析により検討を行った。なお、応答解析は高架橋をバネ-質点系によりモデル化し、Newmarkの $\beta$ 法( $\beta:1/6$ , 時間増分:0.002秒)を用いて行った。図-1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である。なお、橋脚、桁それぞれの動的特性をバネとダッシュポットで表した。

本研究では、図-2に示すような阪神高速道路・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)に着目した。そして、これらの橋脚および桁の諸元を参考に表-1に示すような解析モデルの設定を行った。その結果得られた鋼製橋脚とRC橋脚の

固有周期はそれぞれ 0.720 秒, 0.612 秒であった。なお、すべての橋脚が支持する上部構造の重量はすべて等しいものとした。また、高架橋を構成する鋼製橋脚と RC 橋脚の諸元はすべて等しいものとした。

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座屈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<sup>1)</sup> (図-3 (a)) を採用した。また、RC 橋脚には繰り返しによる剛性の劣化を表現することができる Degrating Tri-linear モデル<sup>2)</sup> (図-3 (b)) 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 4-(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する 0.7 秒付近に卓越周期を持っていることである。

### 3. 解析結果および考察

はじめに固有振動解析結果について述べ、そのつぎに応答解析結果について述べる。

#### (1) 固有振動解析結果

はじめに鋼製橋脚と RC 橋脚からなる高架橋の固有振動解析を行った。つぎに、橋脚の固有周期をパラメータとして固有振動解析を行い高架橋の固有周期を求め、橋脚の固有周期と高架橋の固有周期の関係について検討した。

#### 1) 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 本の異種橋脚からなる高架橋の 1 次から 5 次の固有周期と振動モードを図-5 に示す。なお、各振動モードの振幅は各振動モードの最大振幅で正規化を行っている。1 次の固有周期は鋼製橋脚の固有周期 (0.720 秒) とほぼ一致しており、その振動モードは鋼製橋脚部のみが大きく揺れ、RC 橋脚部は異種橋脚の隣接部付近の橋脚でわずかに振動するもののほとんど振動しないモ

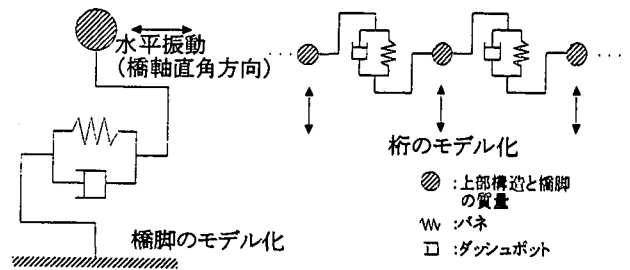


図-1 高架橋のモデル化

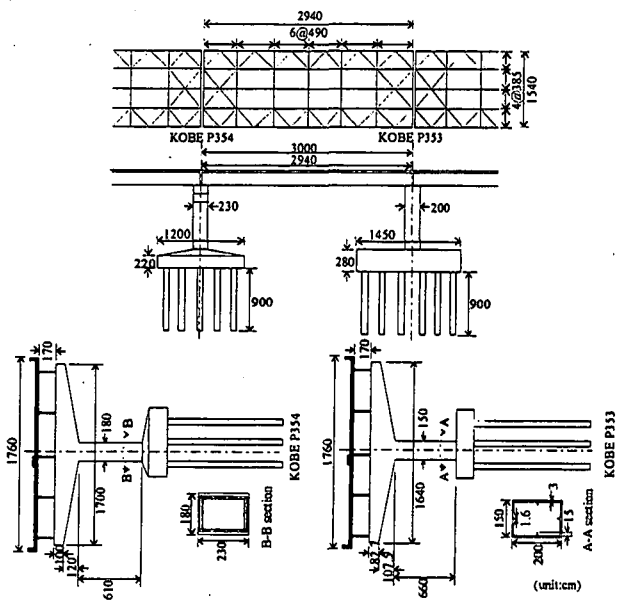
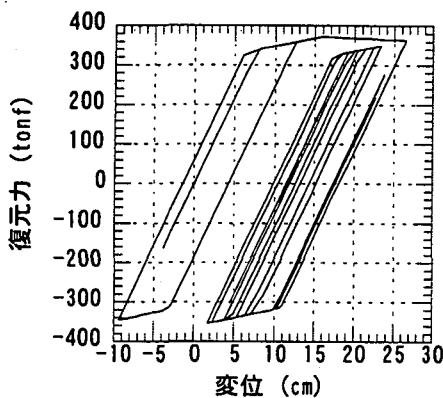


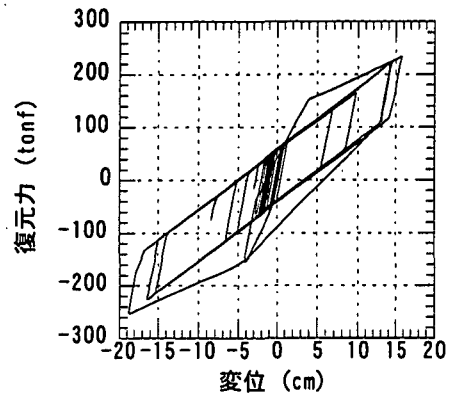
図-2 解析対象とした高架橋

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	-	152.5

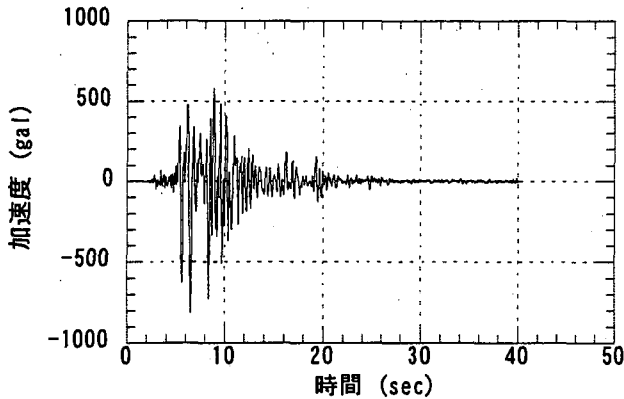


(a) 劣化型 Tri-linear モデル

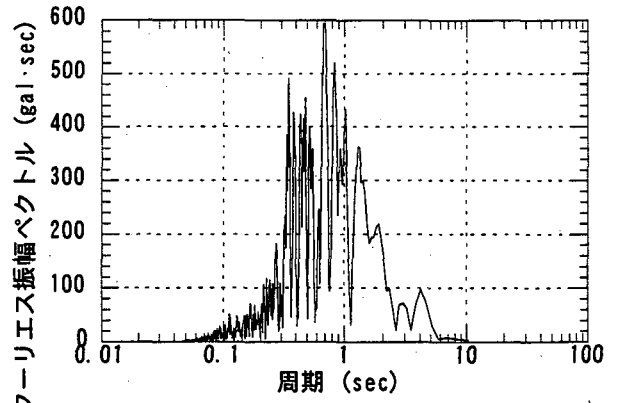


(b) Degrating Tri-linear モデル

図-3 復元力モデル



(a) 時刻歴波形



(b) フーリエ振幅スペクトル

図-4 入力波形

ードであった。また、そのような傾向は3次まではほぼ同様であり、RC橋脚部が初めて大きな振動を示すモードは4次モードであった。そして、その固有周期はRC橋脚の固有周期(0.612秒)にほぼ等しかった。このことから、高架橋の耐震設計を行ううえで橋脚の固有周期は非常に重要なパラメータであるといえる。また、このような固有周期の異なる異種橋脚からなる高架橋では高架橋全体を振動単位として耐震設計をする必要があるといえる。

## 2) 橋脚の固有周期と高架橋の固有周期の関係

異種橋脚からなる高架橋の振動性状はそれぞれの橋脚の固有周期によって変わること考えられる。そこで、鋼製橋脚の固有周期( $T_s$ )をRC橋脚の固有周期( $T_{rc}$ )に対して大きい場合( $T_s / T_{rc} = 1.17$ )、等しい場合( $T_s / T_{rc} = 1.00$ )、小さい場合( $T_s / T_{rc} = 0.832$ )の3通り的高架橋に対して固有振動解析を行った。得られた各高架橋における5次までの固有周期を図-6に示す。なお、鋼製橋脚の固有周期は橋脚の剛性を変えることにより求めた。鋼製橋脚の固有周期をRC橋脚に対して長くすることにより、高架橋の各モードにおける固有周期は大きくなっていることがわかる。また、鋼製橋脚とRC橋脚の固有周期が等しいケースでは、他の2ケースに比べ高架橋の各モードにおける固有周期の間隔が狭いこともわかる。さらに、高架橋の1次の固有周期は鋼製橋脚とRC橋脚のうちで大きな固有周期とほぼ等しくなることもわかった。

## (2) 応答解析結果

はじめに図-2に示す鋼製橋脚とRC橋脚の応答解析を行った。つぎに、鋼製橋脚12本およびRC橋脚12本からなる高架橋に対して弾性応答解析および弾塑性応答解析を行った。その際固有振動解析と同様、橋脚の固有周期をパラメータとして応答解析を行い、橋脚の固有周期と高架橋の応答性状の関係について検討した。なお、本研究では各橋脚の最大応答変位を用いて高架橋の応答性状を表した。

### 1) 鋼製橋脚とRC橋脚の応答解析

弾性応答解析および弾塑性応答解析においても鋼

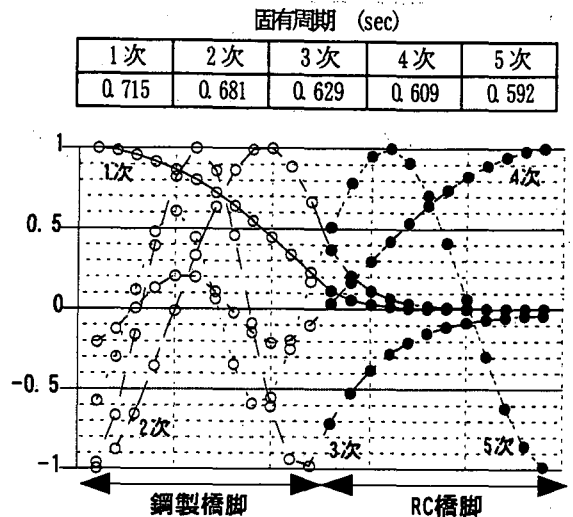


図-5 固有周期と振動モード

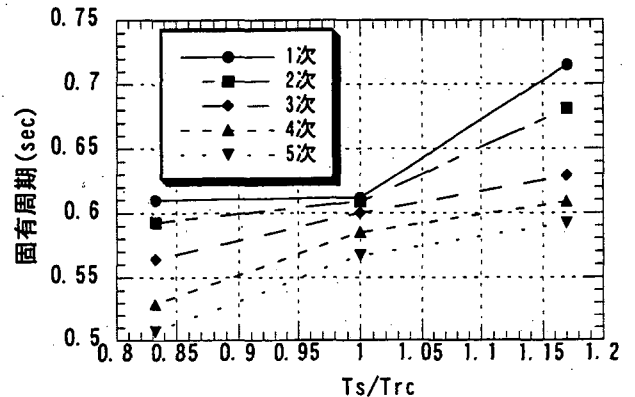


図-6 固有周期の変化

製橋脚の応答がRC橋脚の応答を上回っていた。また、RC橋脚の0.88cmに対し鋼製橋脚は11.5cmという非常に大きな残留変形を生じていた。したがって、これらの橋脚が混在する高架橋では橋脚間に相互作用が生じると考えられる。

### 2) 高架橋の弾性応答解析結果

鋼製橋脚の固有周期をパラメータとした高架橋の弾性応答解析結果を図-7に示す。ここで、解析ケースは鋼製橋脚の固有周期( $T_s$ )をRC橋脚の固有周期( $T_{rc}$ )に対して大きい場合( $T_s / T_{rc}$ )

=1.17), 等しい場合 ( $T_s / T_{rc} = 1.00$ ), 小さい場合 ( $T_s / T_{rc} = 0.832$ ) の3通りとした。なお, 鋼製橋脚の固有周期は橋脚の剛性を変えることにより求めた。鋼製橋脚とRC橋脚の固有周期が等しい場合においては, すべての橋脚において最大応答変位は等しかった。また, すべての時刻においてすべての橋脚の応答変位は等しかった。したがって, 異種橋脚からなる高架橋であっても固有周期をほぼ等しくすることで, 高架橋が弾性の応答を示す限り橋脚間の相互作用を小さくすることが可能であるといえる。一方, 鋼製橋脚とRC橋脚の固有周期が異なる2つのケースでは, 異種橋脚の隣接部付近の橋脚において橋脚単独の最大応答変位と異なっていることがわかる。そして, 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。このことから, 異種橋脚が混在する高架橋の耐震設計ではこの影響を十分に検討する必要があるといえる。

### 3) 高架橋の弾塑性応答解析結果

鋼製橋脚の固有周期をパラメータとした高架橋の弾塑性応答解析結果を図-8に示す。なお, 解析ケースおよび固有周期の変え方は弾性応答解析の場合と同じである。この解析では鋼製橋脚とRC橋脚の固有周期が異なる2つのケースに限らず固有周期が等しい場合においても, 異種橋脚の隣接部付近において, 橋脚の最大応答変位は橋脚単独と異なっていることがわかる。また, 鋼製橋脚の最大応答変位は橋脚単独よりも低減され, RC橋脚の最大応答変位は増加させられていることがわかる。このことは, 図-3に示すように鋼製橋脚とRC橋脚の復元力特性が異なっているためであると考えられる。したがって, 橋脚間の相互作用の影響を小さくするためには高架橋が弾塑性応答を示す場合, 異種橋脚の固有周期を合わせるだけでなく, 復元力特性のよく似た橋脚にする必要がある。

## 4. 結論

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に対し固有振動解析と弾性応答解析および弾塑性応答解析を行い, その地震時応答性状を明らかにした。結論を以下に示す。

- 1) 鋼製橋脚とRC橋脚の異種橋脚からなる高架橋の振動モードは固有周期が等しい橋脚からなる高架橋と明らかに異なることがわかった。また, 橋脚の固有周期は非常に重要なパラメータであることが改めて明らかとなった。したがって, 固有周期の異なる異種橋脚からなる高架橋では高架橋全体を振動単位として耐震設計を行う必要がある。
- 2) 固有周期や復元力特性が異なる橋脚間に相互作用が生じることにより高架橋は複雑な挙動をすること

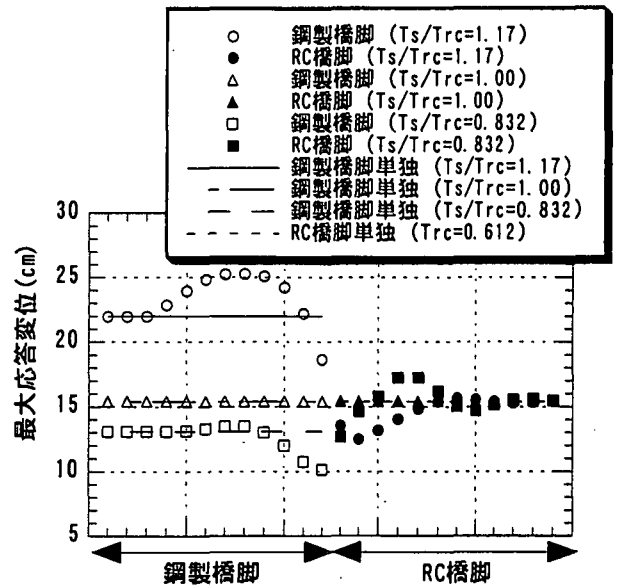


図-7 弾性応答結果

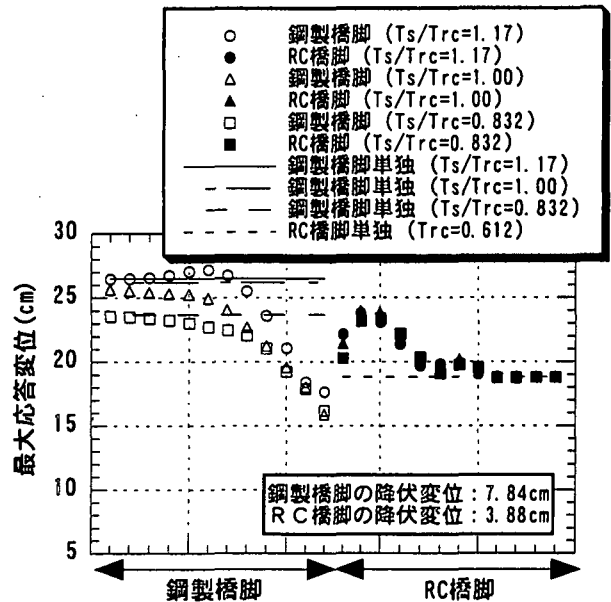


図-8 弾塑性応答結果

がわかった。また, 一般的に鋼製橋脚とRC橋脚は履歴性状, 固有周期, 応答変位などの応答は一般的に異なる。したがって, 実際の高架橋の設計においては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法の確立が望まれる。

なお, 本研究は, 平成8年度の文部省・科学研究費補助金・重点領域研究(研究代表者: 小谷俊介)として補助を受け行ったものである。

### 参考文献

- 1) 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
- 2) 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