

## 鋼製橋脚の被害に及ぼす隣接RC橋脚の影響に関する考察

立命館大学大学院理工学研究科 学生員 馬場 正成\*

立命館大学理工学部土木工学科 正会員 伊津野和行\*\*

阪神・淡路大震災では、RC橋脚が続く場所から鋼製橋脚が続く場所へと変化する箇所において、RC橋脚と隣接した鋼製橋脚に被害が発生した。また、RC橋脚に挟まれて数本の鋼製橋脚が存在する箇所においても、端部の鋼製橋脚に被害が発生した。本研究では、鋼製橋脚の被害に及ぼす隣接RC橋脚の影響に着目して数値シミュレーションを行ない、鋼製橋脚の耐震設計に関して検討をした。数本のRC橋脚と数本の鋼製橋脚が桁によって連結されたモデルを用い、非線形時刻歴応答解析を行なった。その結果、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚は、RC橋脚の振動の影響によって、鋼製橋脚のみが存在する場合よりも大きな地震応答を示し、耐震設計上考慮する必要があることがわかった。さらに全ての橋脚上に免震支承を取り付けることによって相互作用の影響が減少し、耐震安全性を確保できることが明らかとなった。

### 1. はじめに

兵庫県南部地震の構造物被害から我々が学んだことの一つに、振動の伝達をいかにスムーズにするか、ということが挙げられる。その被害箇所は、建築物のSRCからRCに接される部分、橋脚における鉄筋の段落とし部分、コンクリートの打ち継ぎ部分、等である。さらに高速道路高架橋についても同じことがいえる。つまり高速道路を支える橋脚の種類は材料や構造によって異なり、それらは混合されて並んでいる。また、それらを結ぶ橋桁も様々な形式のものが存在している。そのため異種橋梁が隣接している箇所では、橋桁が落橋防止装置で結ばれているために隣接している橋脚の振動の影響を受けることが、今回の地震前から指摘されていた。1) 本論文では橋桁を同種のものとし、RC橋脚域と鋼製橋脚域を連結したモデルについて免震支承がある場合とない場合(図-1①)。RC橋脚群内に鋼製橋脚が含まれるモデルについて免震支承がある場合とない場合(図-1②-(a)(b)(c))。の橋軸方向および橋軸直角方向について時刻歴応答解析を行ない、RC橋脚と鋼製橋脚の互いに与える影響を検討した。

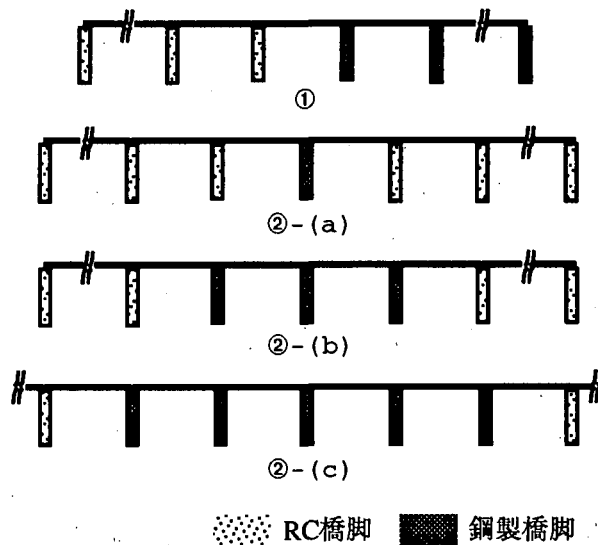


図-1 解析モデル

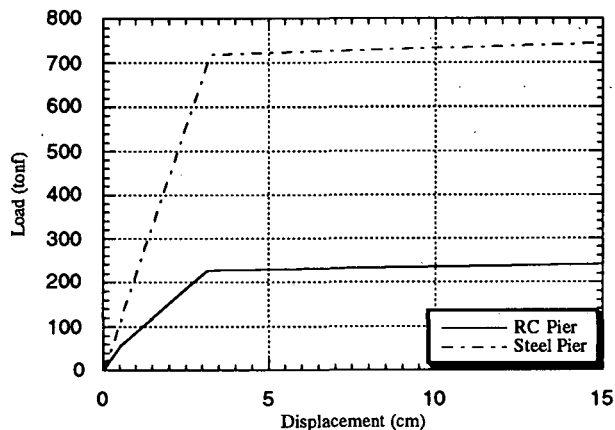


図-2 非線形履歴骨格曲線

Keywords: 異種橋梁の相互作用, 地震応答解析, 免震化による補強

\* 立命館大学大学院理工学研究科, 0775-66-1111

\*\* 立命館大学理工学部土木工学科, 0775-61-2728

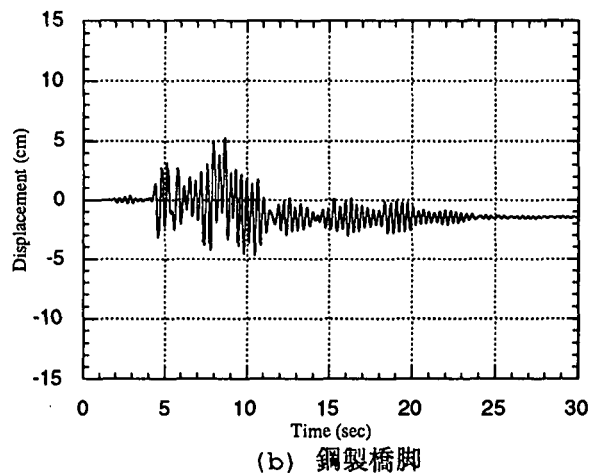
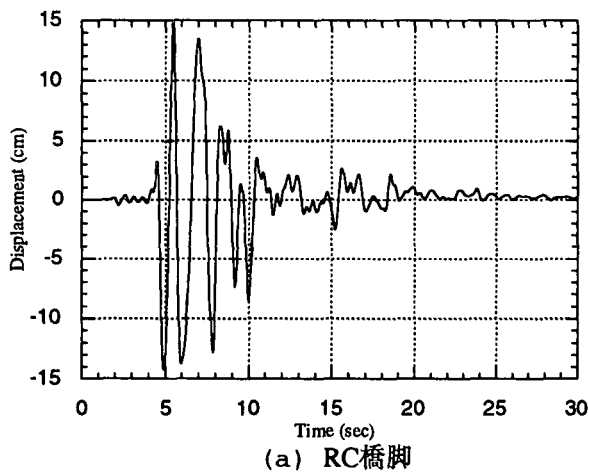


図-3 橋脚単体の時刻歴応答変位

表-1 橋脚単体の応答特性

	固有振動数(Hz)	最大応答加速度(gal)	最大応答変位(cm)	総履歴エネルギー吸収量(tonf・cm)
RC橋脚	1.7	562.0	14.8	13900
鋼製橋脚	3.2	1580	5.08	4470

## 2. 解析モデルと入力地震動

解析モデルは、橋脚単体についての橋脚の高さを7.20m、支間長を30.0m、橋脚が受け持つ死荷重を476tfの柱式RC橋脚および鋼製橋脚支持の高速道路高架橋をモデルとした。両橋脚は非線形応答を仮定し、橋桁および免震支承は線形応答を仮定した。非線形履歴骨格曲線(図-2)をもとにして、RC橋脚では劣化型トリリニア型復元力モデル、鋼製橋脚ではバイリニア型復元力モデルを用いた。

本解析に用いたモデルとして、①RC橋脚域と鋼製橋脚域を連結したモデルを図-1-①に示す。このモデルに用いた橋脚数はRC橋脚15本、鋼製橋脚15本の計30本である。②RC橋脚群内に鋼製橋脚が含まれるモデルを図-1-②-(a)、(b)、(c)に示す。このモデルに用いた橋脚数は計33本である。そのうち鋼製橋脚を中央部分に(a)は1本、(b)は3本、(c)は5本とし、それ以外をRC橋脚とした。各桁は耐震連結装置または連続桁の使用により、全て連結されているものと仮定し、支承部は全て固定されているものと仮定した。これは地震時に設計時と異なる動きをした場合を想定して解析を行なうものである。

解析モデルへの入力地震動として、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台観測の地震動NS成分(最大加速度818gal)を用いた。地震動の入力方向は橋軸方向および橋軸直角方向の水平二方向についてそ

れぞれ別々に解析した。なお解析モデルに使用した両橋脚の単体モデルに同地震動を入力したときの時刻歴非線形応答解析による応答変位を図-3に記しておく。また橋脚単体の初期剛性から得られる固有周期と非線形時刻歴応答解析の主な結果を表-1に記す。地震応答の特徴として、図-3(a)のRC橋脚単体の応答は約5秒で最大応答変位を示し、振動の中心軸がずれることなく減衰している。図-3(b)の鋼製橋脚単体の応答は約7秒で最大応答変位を示し、振動の軸は約10秒以降マイナス側にずれたまま減衰し、残留変形が残る。また表-1より、RC橋脚の方が加速度は小さいが変形が大きいく。これは質量が大きく固有振動数が低いためである。

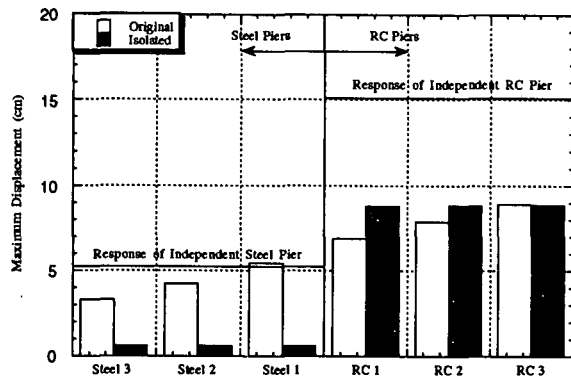
## 3. 解析結果

①RC橋脚域と鋼製橋脚域を連結した場合の解析結果を図-4-7に、②RC橋脚群内に鋼製橋脚が含まれる場合の解析結果を図-8-13に記す。

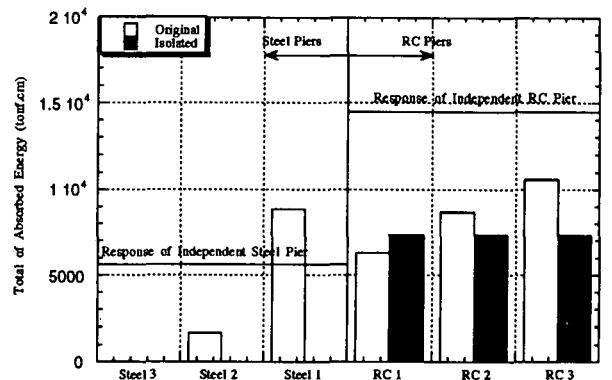
### (1) RC橋脚域と鋼製橋脚域を連結した場合

#### a) 橋軸直角方向

最大応答変位を表わした図-4(a)はRC橋脚と鋼製橋脚が隣接する箇所の周辺橋脚に重点を置いて記した。中央部がRC橋脚と鋼製橋脚の境界で左側が鋼、右側がRCを示している。RC1とSteel1は直接隣接している橋脚とした。各図の白棒グラフは通常の

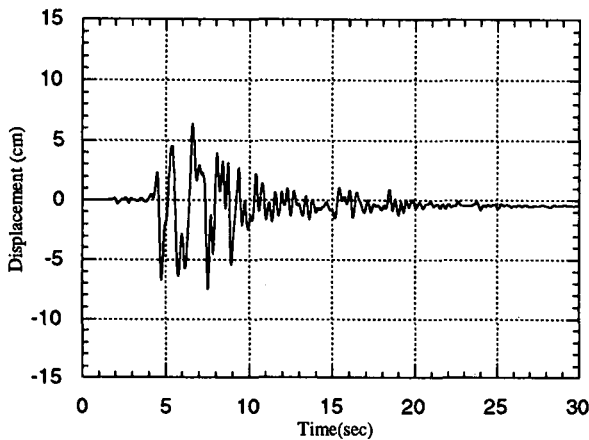


(a) 最大応答変位

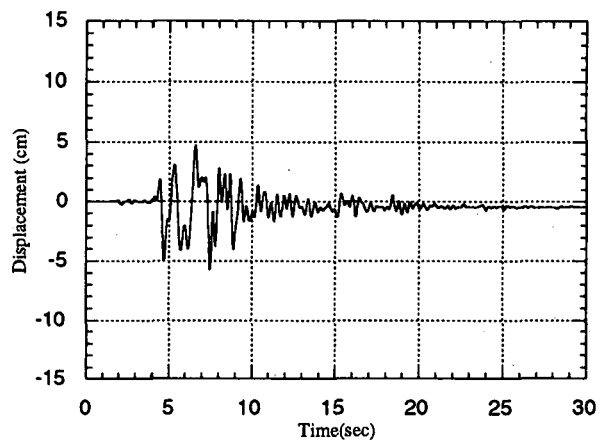


(b) 総履歴エネルギー吸収量

図-4 RC橋脚域と鋼製橋脚域を連結した場合の応答量 (橋軸直角方向)

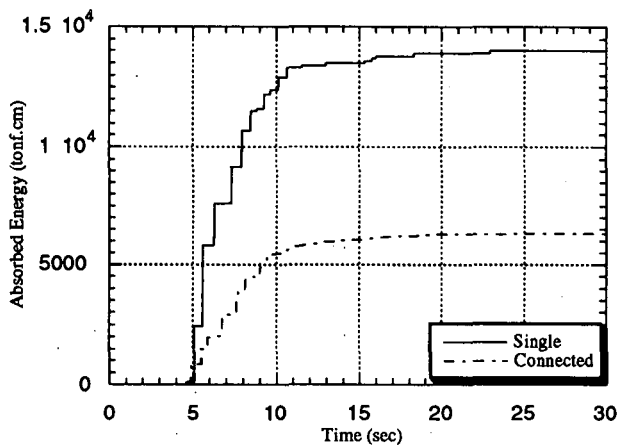


(a) 鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1)

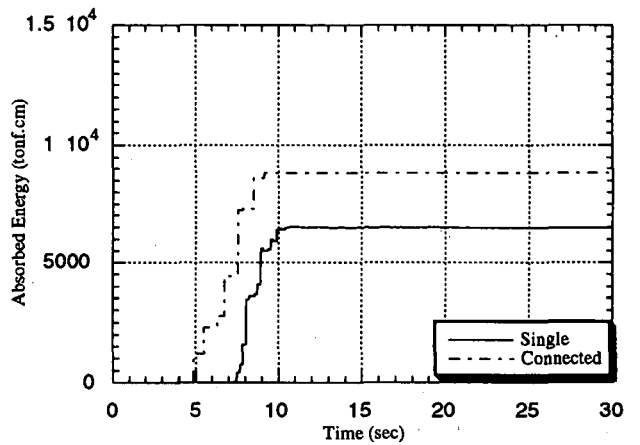


(b) RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1)

図-5 RC橋脚域と鋼製橋脚域を連結した場合の橋脚の時刻歴応答変位 (橋軸直角方向)



(a) RC橋脚

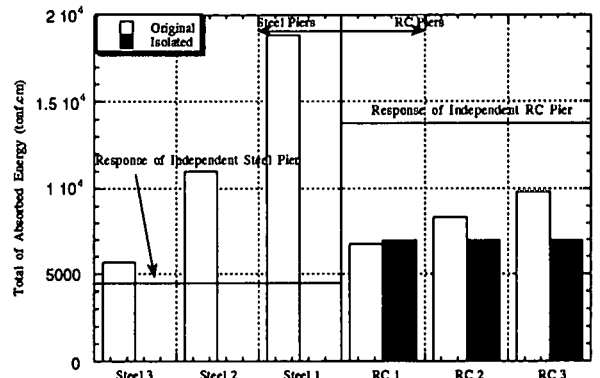
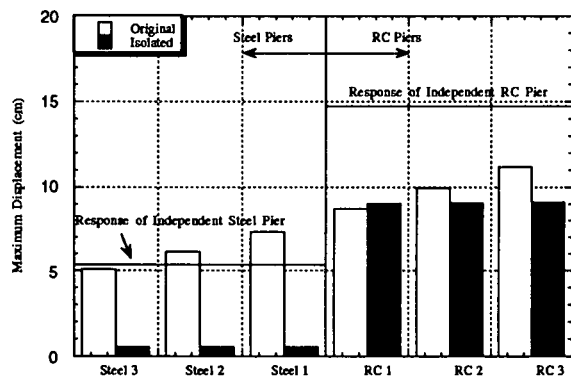


(b) 鋼製橋脚

図-6 RC橋脚域と鋼製橋脚域を連結した場合の時刻歴履歴エネルギー吸収量 (橋軸直角方向)

橋脚、黒棒グラフは4章で述べる免震化した橋脚の応答量を示している。また、実線は各橋脚単体の応答量を示している。鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約1/2倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析とほぼ同値であった。総履歴エネルギー吸収量では図-4 (b) のように、鋼製橋脚に

隣接しているRC橋脚 (RC1) については単体の解析値の約1/2倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約1.5倍に大きくなった。図-5 (a) のRC橋脚の波形と同図 (b) の鋼製橋脚の波形は、同位相で振動している。これは図-3 (a) のRC橋脚単体の波形と相似形である。このように、鋼製橋脚がRC橋脚の振動に影響されて、正負



(a) 最大応答変位

(b) 総履歴エネルギー吸収量

図-7 RC橋脚域と鋼製橋脚域を連結した場合の応答量 (橋軸方向)

の変形で非線形域に達する回数が増したことで、図-6 (b) (図中の一点破線) のように鋼製橋脚がRC橋脚に隣接することによって鋼製橋脚の振動がRC橋脚の振動に強制されて、鋼製橋脚単体の応答 (図中の実線) に比べて早い時間に非線形域に達したからため、総履歴エネルギー吸収量が多くなった。

#### b) 橋軸方向

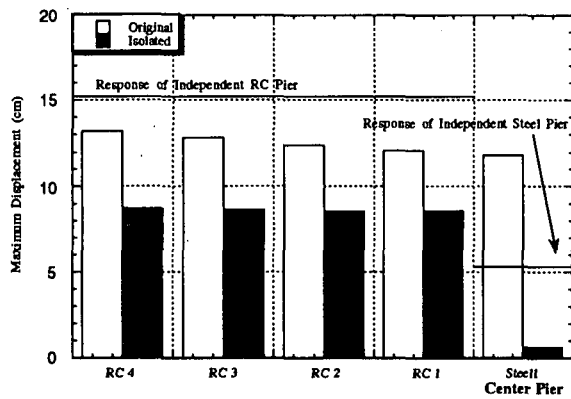
最大応答変位では図-7 (a) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約2/3倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約1.4倍に大きくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-4 (b) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約1/2倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約4.2倍に大きくなった。原因はa) の橋軸直角方向解析のときと同じである。

#### (2) RC橋脚群内に鋼製橋脚が含まれる場合

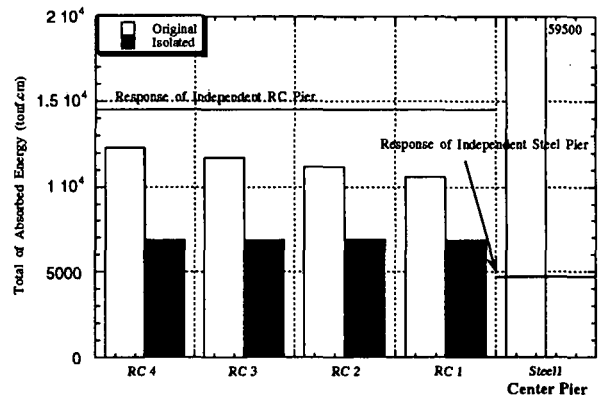
##### a) 橋軸直角方向

まず鋼製橋脚が1本するとき、最大応答変位では図-8 (a) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約4/5倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約2.3倍に大きくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-8 (b) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚

(RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約3/4倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約10倍に大きくなった。また、鋼製橋脚が3本するとき、最大応答変位では図-9 (a) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約3/5倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については、鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約2倍に大きくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-9 (b) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約1/2倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約5.3倍に大きくなった。さらに、鋼製橋脚が5本するとき、最大応答変位では図-10 (a) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約3/5倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については、鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約1.5倍に大きくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-10 (b) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約2/5倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約2.5倍に大きくなった。これは鋼製橋脚が1本、3本、5本のいずれの場合も、鋼製橋脚が

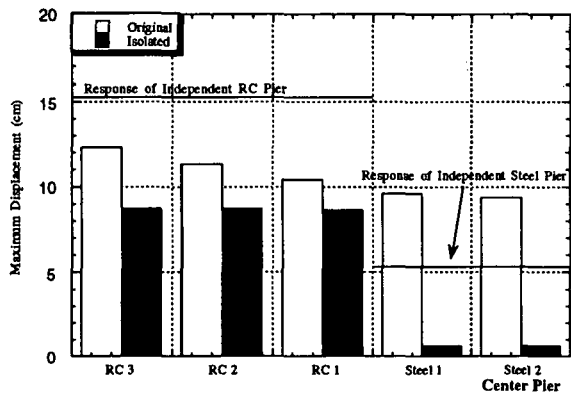


(a) 最大応答変位

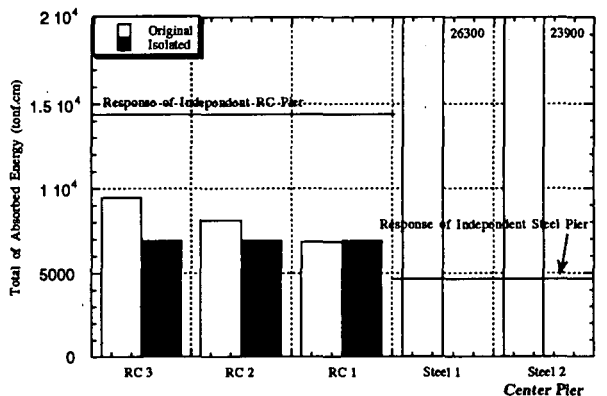


(b) 総履歴エネルギー吸収量

図-8 RC橋脚群内に鋼製橋脚支持が1本含まれる場合の応答量 (橋軸直角方向)

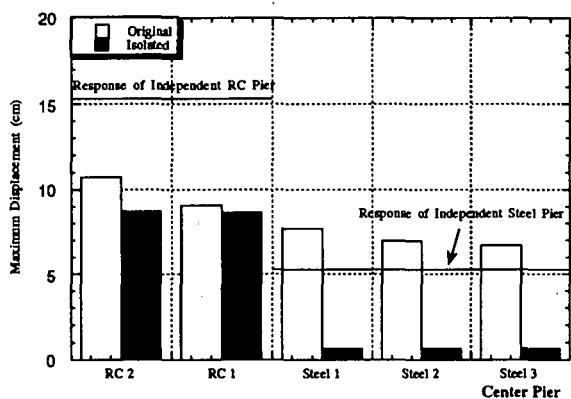


(a) 最大応答変位

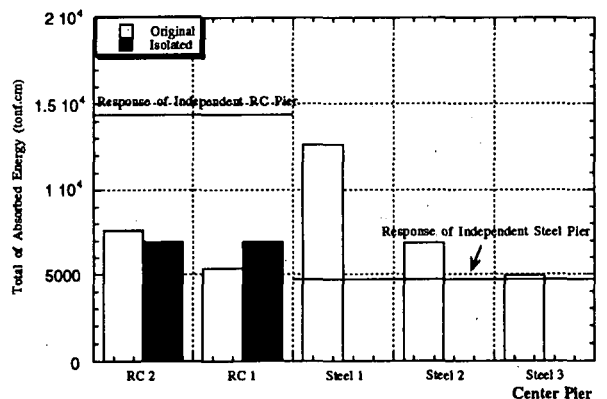


(b) 総履歴エネルギー吸収量

図-9 RC橋脚群内に鋼製橋脚支持が3本含まれる場合の応答量 (橋軸直角方向)



(a) 最大応答変位



(b) 総履歴エネルギー吸収量

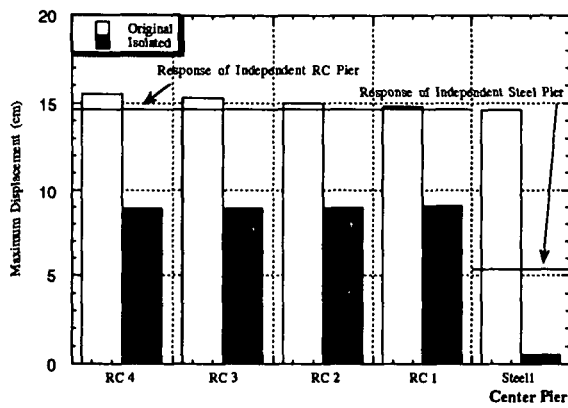
図-10 RC橋脚群内に鋼製橋脚支持が5本含まれる場合の応答量 (橋軸直角方向)

RC橋脚に隣接することによって鋼製橋脚の振動がRC橋脚の振動に強制されて応答変位が大きくなり、鋼製橋脚単体の応答に比べて早い時間に非線形域に達したため、総履歴エネルギー吸収量が多くなった。これらの傾向として、RC橋脚群に含まれる鋼製橋脚が少ないほど鋼製橋脚のRC橋脚の振動による影響が大きい。したがって、RC橋脚に隣接する鋼製橋脚の設計は十分に検討する必要がある。

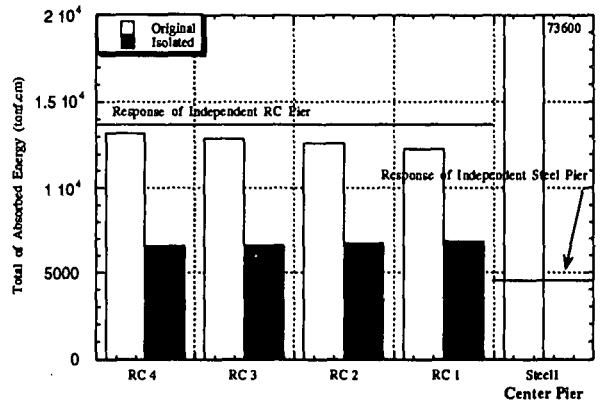
b) 橋軸方向

まず鋼製橋脚が1本のとき、最大応答変位では図-

11 (a) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析とほぼ同値となった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約2.7倍に大きくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-11 (b) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析 (図中の左側実線) とほぼ同値となった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の

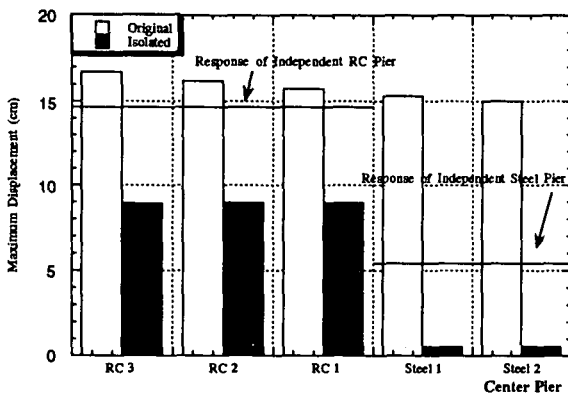


(a) 最大応答変位

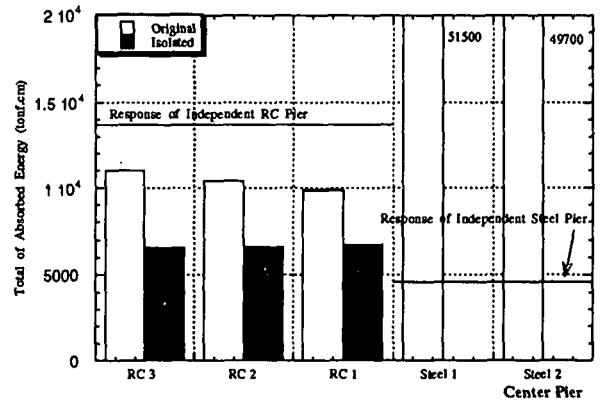


(b) 総履歴エネルギー吸収量

図-11 RC橋脚群内に鋼製橋脚支持が1本含まれる場合の応答量 (橋軸方向)

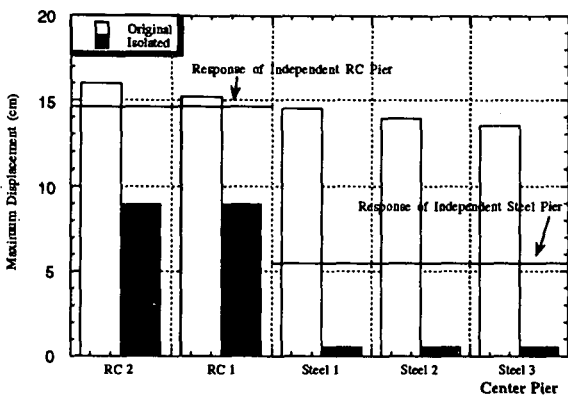


(a) 最大応答変位

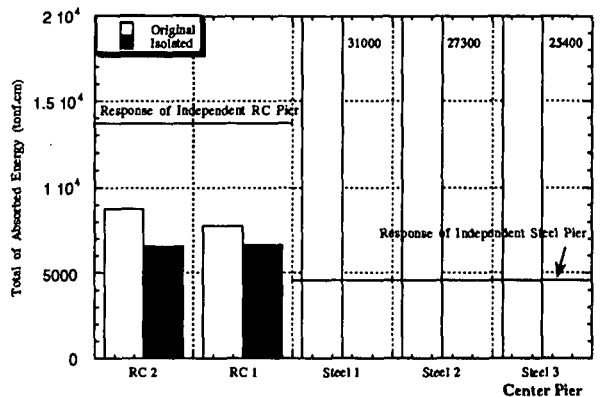


(b) 総履歴エネルギー吸収量

図-12 RC橋脚群内に鋼製橋脚支持が3本含まれる場合の応答量 (橋軸方向)



(a) 最大応答変位

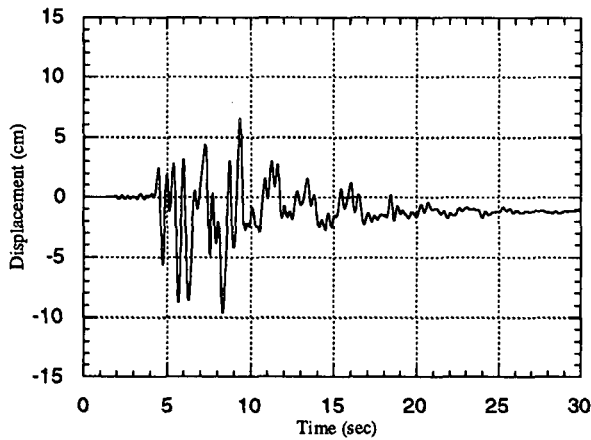


(b) 総履歴エネルギー吸収量

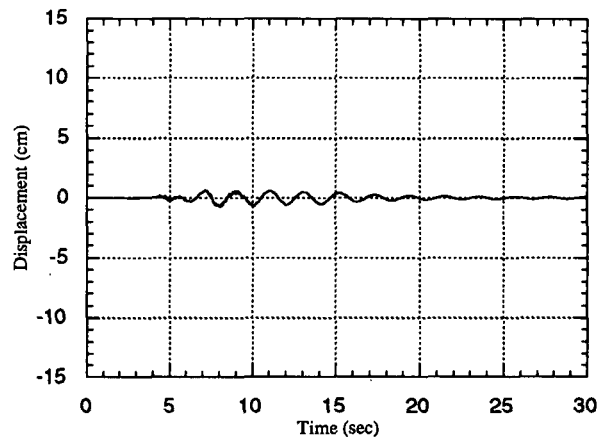
図-13 RC橋脚群内に鋼製橋脚支持が5本含まれる場合の応答量 (橋軸方向)

約16倍に大きくなった。また、鋼製橋脚が3本のとき、最大応答変位では図-12 (a) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析とほぼ同値となった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については、鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約3倍に大きくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-12 (b) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) の約2/3倍に小さくなった。しかし、RC橋

脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約10倍に大きくなった。さらに、鋼製橋脚が5本のとき、最大応答変位では図-13 (a) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚 (RC1) についてはRC橋脚単体の解析値 (図中の左側実線) とほぼ同値となった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚 (Steel1) については、鋼製橋脚単体の解析値 (図中の右側実線) の約3倍に大きくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-13 (b) のように、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚



(a) RC橋脚



(b) 鋼製橋脚

図-14 免震橋脚単体の時刻歴応答変位

表-2 橋脚単体の応答特性

	固有振動数(Hz)	桁の最大応答加速度(gal)	最大応答変位(cm)	総履歴エネルギー吸収量(tonf.cm)
RC橋脚	0.5	360.0	9.62	7440.0
鋼製橋脚	0.5	415.0	0.748	0

(RC1) についてはRC橋脚単体の解析値（図中の左側実線）の約1/2倍に小さくなった。しかし、RC橋脚に隣接している鋼製橋脚（Steel1）については鋼製橋脚単体の解析値（図中の右側実線）の約6.5倍に大きくなった。これらの傾向として、RC橋脚群に含まれる鋼製橋脚の数にかかわらず鋼製橋脚のRC橋脚の振動による影響は大きい。

#### 4. 免震化による補強

鋼製橋脚の応答がRC橋脚の振動に影響される問題の対策として、ここでは免震化を考えた。そこで①②の解析モデルに全橋脚について全て同じ免震支承を取り付けたものとした。免震支承はRC橋脚単体の固有周期が約2秒になるように設定した。そのときの時刻歴応答変位を図-14に記す。また橋脚単体の初期剛性から得られる固有周期と非線形時刻歴応答解析の主な結果を表-2に記しておく。

##### (1) RC橋脚域と鋼製橋脚域を連結した場合

###### a) 橋軸直角方向

最大応答変位では図-4 (a) のように、全てのRC橋脚については免震化していない通常のRC橋脚単体の解析値（図中の右側実線）の約3/5倍に小さくなった。また全ての鋼製橋脚についても通常の鋼製橋脚単体の解析値（図中の左側実線）の約1/8倍に小さくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-4 (b) の

ように、全てのRC橋脚については通常のRC橋脚単体の解析値（図中の右側実線）の約1/2倍に小さくなった。また全ての鋼製橋脚については線形応答であり総履歴エネルギー吸収量はゼロであった。そして、これらは免震化した各橋脚単体の解析とほぼ同じ応答であった。

###### b) 橋軸方向

最大応答変位では図-7 (a) のように、全てのRC橋脚については通常のRC橋脚単体の解析値（図中の右側実線）の約3/5倍に小さくなった。また全ての鋼製橋脚についても通常の鋼製橋脚単体の解析値（図中の左側実線）の約1/10倍に小さくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-7 (b) のように、全てのRC橋脚については通常のRC橋脚単体の解析値（図中の右側実線）の約1/2倍に小さくなった。また全ての鋼製橋脚については線形応答であり総履歴エネルギー吸収量はゼロであった。そして、これらは免震化した各橋脚単体の解析とほぼ同じ応答であった。

##### (2) RC橋脚群内に鋼製橋脚が含まれる場合

###### a) 橋軸直角方向

鋼製橋脚が1本、3本、5本のいずれの場合も、最大応答変位では図-8-10の (a) のように、全てのRC橋脚については通常のRC橋脚単体の解析値（図中の左側実線）の約3.5倍に小さくなった。また全ての鋼製橋脚についても通常の鋼製橋脚単体の解析値（図中

の右側実線)の約1/8倍に小さくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-8-10の(b)のように、全てのRC橋脚については通常のRC橋脚単体の解析値(図中の左側実線)の約1/2倍に小さくなった。また全ての鋼製橋脚については線形応答であり総履歴エネルギー吸収量はゼロであった。そして、これらは免震化した各橋脚単体の解析とほぼ同じ応答であった。

#### b) 橋軸方向

鋼製橋脚が1本、3本、5本のいずれの場合も、最大応答変位では図-11-13の(a)のように、全てのRC橋脚については通常のRC橋脚単体の解析値(図中の左側実線)の約3/5倍に小さくなった。また全ての鋼製橋脚についても通常の鋼製橋脚単体の解析値(図中の右側実線)の約1/8倍に小さくなった。総履歴エネルギー吸収量では図-11-13の(b)のように、全てのRC橋脚については通常のRC橋脚単体の解析値(図中の左側実線)の約1/2倍に小さくなった。また全ての鋼製橋脚については線形応答であり総履歴エネルギー吸収量はゼロであった。そして、これらは免震化した各橋脚単体の解析とほぼ同じ応答であった。

したがって、地震による免震化していない通常のRC橋脚と鋼製橋脚の連結箇所の危険性は全ての橋脚を免震化することによって解消される。

#### 5. まとめ

- (1) 鋼製橋脚とRC橋脚を隣接させることにより、RC橋脚は応答変位が小さくなり、それに伴い総履歴エネルギー吸収量が減少する。一

方、鋼製橋脚は最大応答変位は鋼製橋脚単体の解析とほぼ同値である。しかし、RC橋脚の振動の影響を受けて早い時間に非線形域に達し、その結果過大なエネルギー吸収を余儀なくされることとなった。

- (2) 鋼製橋脚支持がRC橋脚群内に含まれることにより、鋼製橋脚に隣接しているRC橋脚の応答変位は抑制される。しかし、隣接している質量の大きなRC橋脚の応答変位の影響を受ける鋼製橋脚の応答変位は大きくなるだけでなく、非線形域に達する時間を早め過大に履歴エネルギーを吸収することになる。
- (3) RC橋脚および鋼製橋脚ともに免震化することによって、応答変位はどちらの橋脚も大幅に小さくさせることができる。特に鋼製橋脚では線形応答内に抑えることが可能である。
- (4) 免震化したRC橋脚と鋼製橋脚が隣接しても互いの橋脚は隣接している橋脚の応答の影響を受けず各免震化した橋脚単体の解析と同じ応答である。したがって、地震による免震化していないRC橋脚と鋼製橋脚の連結箇所の危険性は全ての橋脚を免震化することによって解消される。

#### [参考文献]

- 1) 渡部泰介・亀田弘行・南莊淳：異種橋梁の動的作用を含む都市高速道路の地震応答，土木学会関西支部平成6年度関西支部年次学術講演概要，I-2，平成6年5月

## Effect of Adjacement RC Piers on Seismic Response of Steel Piers.

Kazuyuki IZUNO and Masanari BABA

The highway bridges linked with the earthquake-resistant connecting bars behaved like a multi-span continuous girder bridge during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake. The steel pier adjacent to the RC piers showed more severe damage than the other steel piers, because the seismic response of it was affected by the adjacent heavy RC piers. The numerical simulations verified that the responses of the steel piers among the RC piers were much larger than the case of the independent steel pier. Moreover, the seismic isolation could reduce the seismic responses of both the steel piers and the RC piers.