

鋼製橋脚と隣接RC橋脚との地震時相互作用に関する研究

伊津野和行* 中村公信**

*工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525-77 滋賀県草津市野路東1-1-1)

**工修 日本鋼管(株) 橋梁・港湾建設部橋梁設計室 (〒230 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

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。本研究では、支承が破壊して隣接する橋脚が桁によって連結された場合を想定し、異種橋脚の地震時相互作用について、非線形地震応答解析によって検討したものである。同じ条件でRC橋脚と鋼製橋脚とを試設計した荷重-変位特性を元に、固有周期や終局耐力を変化させた数ケースについて、シミュレーションを行った。その結果、鋼製橋脚が、隣接するRC橋脚と連結された場合、その固有周期によっては相互作用が大きくなる可能性を示した。

Key Words: Highway viaduct, Interaction between adjacent piers, Steel pier adjacent to RC pier

1. はじめに

都市部における高速道路の高架橋は、地盤条件や用地の制限、あるいは設計条件によって、種々の橋脚が用いられている。異種橋梁が隣接している箇所では、その地震時挙動の違いによって、相互作用の問題が生じることが指摘されていた。渡辺・亀田・南荘ら¹⁾は、異種橋梁が隣接することによって、単独で解析した場合と比較して、固有周期や、最大断面力の発生位置が変化する可能性があることを示した。そして、1995年1月17日の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）では、隣接橋梁の影響を受けたと考えられる被害が、実際に観察されるに至った。

耐震設計にあたっては、振動単位が考慮され、その単位ごとに地震時挙動を考慮して設計される^{2),3)}。しかし、平成2年発行の道路橋示方書までは、基本設計の後に構造細目として、耐震連結装置など落橋防止構造が検討されていた。そのため、別の振動単位と考えられて設計された隣接橋脚も、桁間が連結されることによって、相互作用を及ぼすことも考えられる。また、可動支承として設計した支承が、大地震時には摩擦や機器破壊で固定条件となることもある。このような設計条件と異なる支承条件や、桁間連結装置の影響、あるいは隣接桁の衝突等

が発生する可能性があることは、過去の地震時において応答を実橋で観測した例からも報告されている⁴⁾。

また、複数の橋脚が連動すると、個々の橋脚における地盤条件の違いや、個々の橋脚に入力される地震波動の違いによって、設計で考慮していたものと異なった動きとなりやすい。阪神淡路大震災後の研究でも、主に剛性の異なる橋脚間の応答特性の違いについて検討されており^{5),6)}、高架橋を全体系で解析することの重要性も指摘されている⁷⁾。

阪神・淡路大震災では、鋼製橋脚の地震被害に関する特徴的な事柄として、隣接するRC橋脚の影響があったのではないかと考えられる被害が見受けられた。数本だけ鋼製橋脚がRC橋脚に挟まれている場合、鋼製橋脚のなかでは、RC橋脚と隣接した鋼製橋脚の被害が目立った。例えば、RC橋脚が基部で曲げ破壊を受け、支承が破壊して桁が橋脚上に落ちたある地点では、そのRC橋脚と隣接した鋼製橋脚に局部座屈が生じた。また、RC橋脚が連続する地域から鋼製橋脚が連続する地域へと変化する地点で、RC橋脚と隣接した鋼製橋脚のみに、マンホール部付近での局部座屈が発生した例もあった⁸⁾。

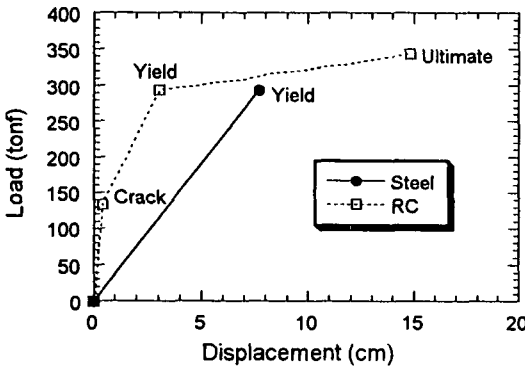
このような例から、鋼製橋脚の地震時挙動には、隣接

するRC橋脚の影響が無視し得ない場合があるものと考えられる。これを検証するために、著者らは、30本程度の橋脚が連成して振動する場合について、数値シミュレーションを行った⁹⁾。その結果、支承が破壊して桁によって連結されてしまうと、異種橋脚が隣接している区間において、設計時に想定していた以上の力が作用する場合があることを示した。しかし、ある高架橋の、実際に隣接するRC橋脚と鋼製橋脚を例として、荷重－変位曲線を求めたため、その区間特有の様々な要因が影響し、定量的な評価がなしえなかった。

本研究は、同条件による試設計を元にした、隣接する橋脚の特性の違いによって、相互作用にどのような影響が出るのかを、数値シミュレーションによって検証するものである。

2. 解析モデルと入力地震動

本研究では、阪神・淡路大震災以前に設計された、一柱式T型RC橋脚および一柱式T型钢製橋脚で支持された高架橋について検討した。まず、平成2年度の道路橋示方書V耐震設計編²⁾に、地震時水平保有耐力の照査例として記載されているRC橋脚を、RC橋脚の解析モデルとして選んだ。この橋脚と同じ条件（表－1）で鋼製橋脚を試設計し、鋼製橋脚の断面と荷重－変位関係を計算した。ただし、鋼製橋脚に対しても、平成2年度の道路橋示方書によって設計し、コンクリートは充填しないものとした。また、降伏点までの弾性領域のみを考えている。RC橋脚と鋼製橋脚の荷重－変位曲線を図－1に示す。RC橋脚に比べ、鋼製橋脚の剛性は低く柔らかいことがわかる。



図－1 同条件で試設計された橋脚の変位－荷重関係

表－1 仮定した橋脚の概要

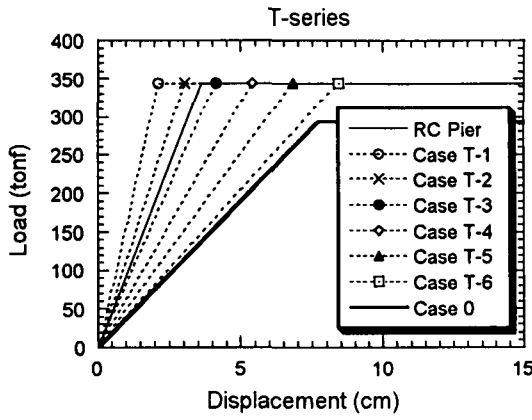
死荷重反力	$R_d=364\text{tonf}$
上部構造重量	$W_U=990\text{tonf}$
RC橋脚躯体重量	$W_{PR}=347\text{tonf}$
鋼製橋脚躯体重量	$W_{PS}=50\text{tonf}$
設計水平震度	$k_h=0.2$
	$c_z=1.0, c_g=0.8, c_f=1.0$
橋脚高	10m
上部構造重量作用高	12m
T字部張り出し長さ	11.2m

表－2 解析ケース

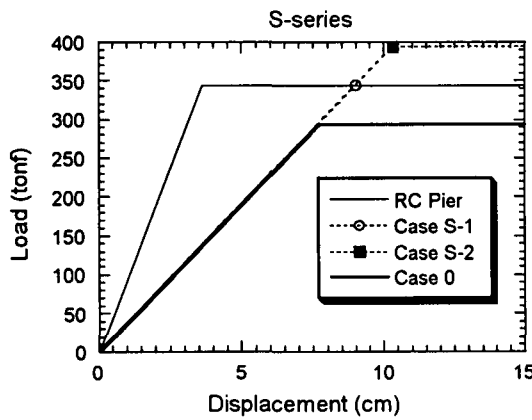
シリーズ	ケース番号	備考
基本ケース	0	図－1により設定
固有周期を変化 (Tシリーズ)	T－1	固有周期0.5秒
	T－2	固有周期0.6秒
	T－3	固有周期0.7秒
	T－4	固有周期0.8秒
	T－5	固有周期0.9秒
	T－6	固有周期1.0秒
耐力を変化 (Sシリーズ)	S－1	RCと同耐力
	S－2	RCより高耐力

同じ荷重で設計される場合、鋼製橋脚とRC橋脚が混在することは考えにくい。RC橋脚では建設が困難な箇所や、交差点部のようにスパンが長くなって荷重が大きくなる箇所と断面を他の橋脚とそろえる場合などで、鋼製橋脚が用いられる場合が多いと考えられる。そのため、ここでは同条件で考えられた上図の関係を元に、鋼製橋脚の荷重－変位関係の骨格曲線を変えた9ケースについて検討した。固有周期の及ぼす影響を検討するために、鋼製橋脚の初期剛性を変化させたケース（これをTシリーズと表記する）と、耐力の及ぼす影響を検討するために、鋼製橋脚の終局耐力を変化させたケース（これをSシリーズと表記する）の2通り考えた。Tシリーズとしては、鋼製橋脚の固有周期が0.5～1.0秒になるよう、初期剛性を変化させた6ケース、Sシリーズとしては、RC橋脚よりも終局耐力が大きいケース、等しいケース2ケースを考え、RC橋脚よりも終局耐力が小さいケース

0との比較を考えた。表-2に各ケースの説明を、図-2に各ケースで仮定した骨格曲線を示す。



(a) Tシリーズ



(b) Sシリーズ

図-2 解析ケース別の骨格曲線

RC橋脚に対しては平成8年道路橋示方書³⁾の手法によって、降伏時剛性を初期剛性とし、終局耐力までその直線を延長して新たに降伏点と仮定した完全弾塑性の骨格曲線を設定した。履歴復元力特性は、Clough型の剛性劣化型モデルによってモデル化した。

鋼製橋脚に対しては、基本ケース（ケース0）として、図-1の鋼製橋脚の降伏点を用い、降伏点以降の第2剛性を0として完全弾塑性の骨格曲線を設定した。鋼製橋脚の履歴復元力特性は、すべてのケースに対してバイリニア型のモデルを用いた。Tシリーズのケースでは、終局耐力をRC橋脚と等しくし、所定の初期固有周期が得られるように初期剛性を変化させた。Sシリーズのケースでは、基本のケース0と初期剛性を等しくし、終局耐力をRC橋脚と等しくしたケースS-1と、ケース0と

ケースS-1との耐力差だけRC橋脚よりも終局耐力を大きくしたケースS-2とを考えた。

連続高架橋を解析する場合、どれだけの区間を対象とするかが重要な問題である。ここでは、基本的な特性を把握することを目的として、その最小単位である2本の橋脚と1本の桁からなるシステムを考えた。これらの橋脚は、耐震連結装置または連続桁の使用によって、完全に連結されている最悪の状態を設定した。支承部もすべて固定されているものと仮定した。これは、大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。図-3のように、2本の橋脚を水平方向に動く非線形バネで表し、桁は線形梁部材でモデル化して質量1と質量2を結んだ。水平方向の地震応答のみを考え、2自由度系として解析した。減衰定数は、RC橋脚に対しては $h=0.05$ 、鋼製橋脚に対しては $h=0.02$ を与えた。入力地震動としては、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録のNS成分を用いた。

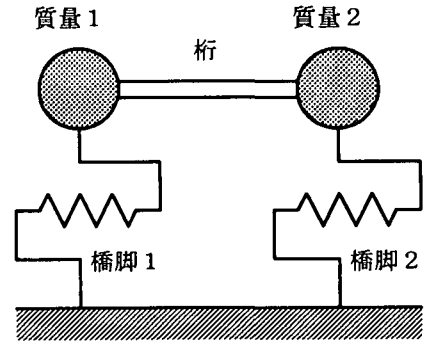


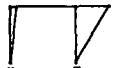
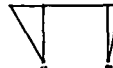
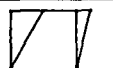
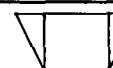
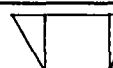
図-3 解析モデル

3. 隣接異種橋脚の地震時相互作用

3.1 振動モード

まず、各ケースに対して振動モード解析を行った。結果を表-3に示す。1次振動モードでは、長周期の橋脚の方がよく揺れる。ケースT-1、T-2では、RC橋脚、それ以外のケースでは鋼製橋脚がよく揺れるモード形状である。2次振動モードは、その逆で、短周期の橋脚の方がよく揺れる。揺れ幅の差は、それぞれの橋脚の固有周期が離れているほど大きい。また、有効質量比をみると、2次振動モードの影響の大きさも、固有周期が離れるほど大きくなることわかる。

表-3 振動モード解析結果

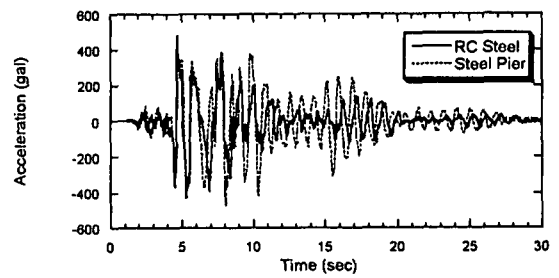
ケース		1次振動	2次振動
0,	振動モード		
S-1,	固有周期	0.94秒	0.63秒
S-2	有効質量比	73%	27%
T-1	振動モード		
	固有周期	0.66秒	0.45秒
	有効質量比	75%	25%
T-2	振動モード		
	固有周期	0.67秒	0.53秒
	有効質量比	89%	11%
T-3	振動モード		
	固有周期	0.70秒	0.58秒
	有効質量比	100%	0%
T-4	振動モード		
	固有周期	0.76秒	0.61秒
	有効質量比	92%	8%
T-5	振動モード		
	固有周期	0.84秒	0.62秒
	有効質量比	81%	19%
T-6	振動モード		
	固有周期	0.91秒	0.63秒
	有効質量比	75%	25%

3. 2 同条件で試設計された橋脚を考えた場合

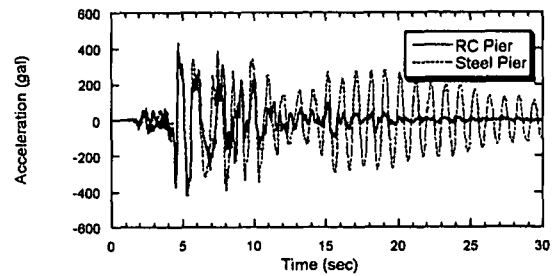
(ケース0)

図-3のモデルの橋脚1がRC橋脚、橋脚2が鋼製橋脚の場合と、どちらもRC橋脚あるいは鋼製橋脚の場合の3通りに対して、地震応答解析を行った。図-4に加速度応答波形を、図-5に変位応答波形を、図-6に履歴エネルギー吸収量の時刻歴波形を示す。それぞれ(a)が異種橋脚の組み合わせに対する結果、(b)が同種の橋脚の組み合わせに対する結果である。同種の橋脚を組み合わせた場合の応答は、この場合、各橋脚が単独で振動す

る場合と同じであり、設計で想定している応答を示すものと考えられる。

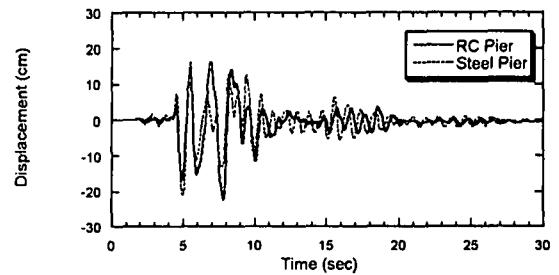


(a) 異種橋脚の組み合わせ

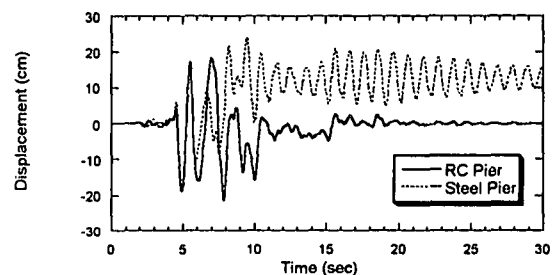


(b) 同種橋脚の組み合わせ

図-4 加速度応答波形(ケース0)



(a) 異種橋脚の組み合わせ

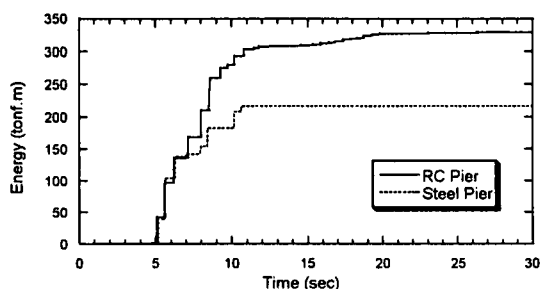


(b) 同種橋脚の組み合わせ

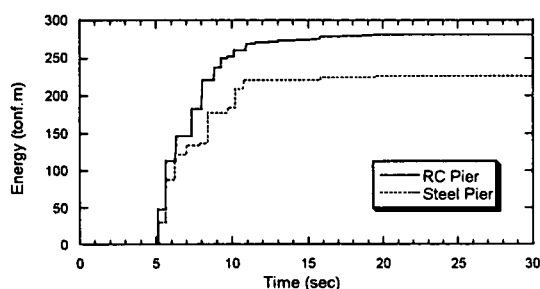
図-5 変位応答波形(ケース0)

それぞれ、実線がRC橋脚、点線が鋼製橋脚の応答を表している。このケースでは、鋼製橋脚どうしが連結された場合より、RC橋脚と連結された場合の方が、加速度応答は大きくなるものの、変位応答は最大値も残留変

位も小さくなる。また、履歴エネルギー吸収量は4%ほどわずかに小さくなる。逆に、RC橋脚は鋼製橋脚と連結されることによって、大きな応答を示すことになる。以前の数値シミュレーション⁹⁾では、隣接RC橋脚によって鋼製橋脚の応答に悪影響が現れたが、設定する条件によって、どちらが不利になるかは異なるものと考えられる。



(a) 異種橋脚の組み合わせ



(b) 同種橋脚の組み合わせ

図-6 履歴エネルギー吸収量(ケース0)

また、これには、履歴復元力特性の骨格曲線として、どちらの橋脚にも完全弾塑性型を仮定し、しかも終局状態を設定しなかった影響も大きい。図-1のRC橋脚の荷重-変位曲線をみれば、終局変位が15cm程度であり、ここでの最大応答変位は終局変位を越えている。図-1におけるRC橋脚の終局状態は、かぶりコンクリートの圧壊であり、この後コアコンクリートの破壊あるいは引張り鉄筋の破断へと進んでいく。大変形時の耐力の低下や破壊を考慮すれば、そして、鋼製橋脚の終局変位がRC橋脚よりも大きければ、RC橋脚と連結される場合の方が、最大応答値が大きくなることも予想される。

このケース0では、RC橋脚どうしが接続された場合には1次固有周期0.7秒、鋼製橋脚どうしの場合1.0秒、これがRC橋脚と鋼製橋脚とが接続された場合0.9秒になる。鋼製橋脚にとっては、隣接するRC橋脚と連結さ

れることによって、単独あるいは鋼製橋脚どうしが連結される場合よりも固有周期が短くなる。短周期になることによって、より大きな加速度応答を示し、変位応答は小さくなったものと考えられる。

そこで次に、鋼製橋脚の固有周期を変化させて、その影響を検討することを目的に、表-2のTシリーズのシミュレーションを行った。

3. 3 固有周期の違いが相互作用に与える影響

(Tシリーズ)

ここでは、鋼製橋脚の固有周期を0.5秒から1.0秒まで変化させるため、橋脚重量はそのまま、初期剛性を変化させて、T-1～T-6までのケースについて検討した。いずれのケースも、RC橋脚の特性はケース0と同じとした。また、RC橋脚と鋼製橋脚との耐力の違いが及ぼす影響が現れないように、耐荷力はRC橋脚と等しくなるよう仮定した。鋼製橋脚は、一般にRC橋脚よりも柔らかい構造になっているが、コンクリートを充填しない場合には躯体重量が軽く、そのため固有周期は必ずしも長いとは言えない。

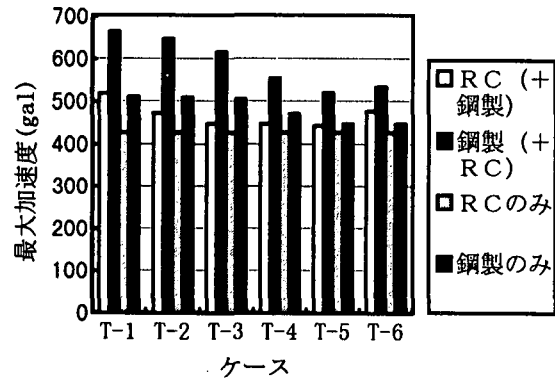
応答結果をまとめて、図-7～図-9に示す。図-7が最大加速度応答値、図-8が最大変位応答値、図-9が履歴エネルギー吸収量のグラフである。それぞれ、異種橋脚と連結した場合のRC橋脚、鋼製橋脚、そしてRC橋脚のみの場合と鋼製橋脚の場合をプロットしている。いずれのケースも、RC橋脚の条件は同じにしているため、RC橋脚のみの場合の応答値は同じである。ケース3は、どちらの橋脚もほぼ同じ固有周期を持っており、ケース1と2は、鋼製橋脚の方が短周期、ケース4～6は鋼製橋脚の方が長周期になっている。

鋼製橋脚どうしが連結された場合、最大応答値は500gal程度である。これがRC橋脚と連結されることによって、2次振動モードの影響で加速度応答値は大きくなる。特に短周期のケースほど大きくなり、ケースT-1では約30%増大する。RC橋脚の加速度応答値は、連結されてもそれほど変化しないが、多少は大きくなる傾向がある。

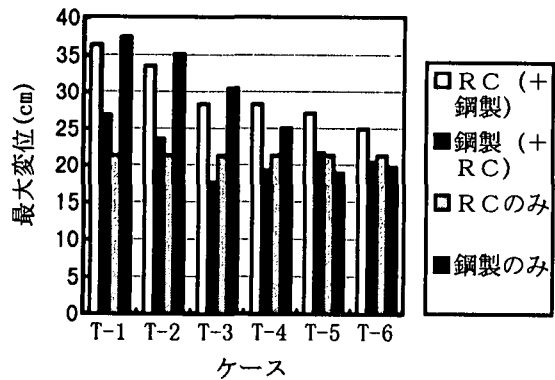
変位応答に対しては、鋼製橋脚の周期が長くなるほど、RC橋脚と連結された場合の応答値が大きくなる。RC

橋脚より0.2秒以上固有周期が長くなると、明確な差が現れる。RC橋脚は、いずれのケースも応答が大きくなる。振動モードの変化による影響が大きいと考えられる。また、地震波の卓越周期も影響していると考えられ、定量的な評価には、他の地震波を用いた解析も必要であろう。

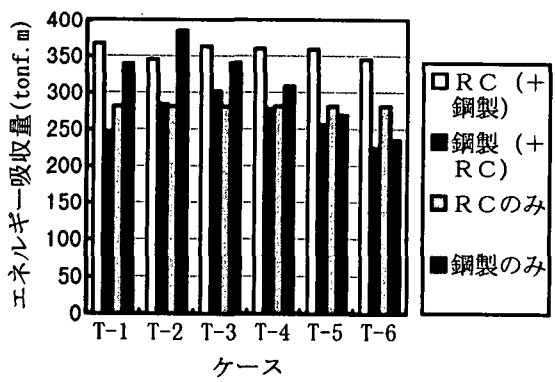
履歴エネルギー吸収量の結果は、変位応答と似た傾向にある。しかし、鋼製橋脚の履歴エネルギー吸収量は、RC橋脚と連結されることによって、いずれのケースでも小さくなっている。バイリニア型と剛性劣化(Clough)型との差が現れている。



図－7 最大加速度応答（Tシリーズ）



図－8 最大変位応答（Tシリーズ）



図－9 履歴エネルギー吸収量（Tシリーズ）

3. 4 終局耐力の違いが相互作用に与える影響

(Sシリーズ)

ケース0の場合、鋼製橋脚の終局耐力が、RC橋脚よりも50tonf低い。そこで、ケースS－1としては、鋼製橋脚の終局耐力をRC橋脚と同じ値に設定し、ケースS－2としては、鋼製橋脚の方がRC橋脚よりも50tonf高い終局耐力を持つよう設定した。その結果を表－4に示す。

表－4を見ると、ケースS－1とS－2は、傾向としてはケース0の場合と同じである。50tonfという値は、終局耐力の約15%にあたる。この程度の差は、あまり応答に影響しないと言える。以前のシミュレーション⁹⁾では、鋼製橋脚とRC橋脚との耐力差が2倍程度あった。どの程度の差があれば、大きな影響があるのか明確にすることも今後の課題である。

表－4 応答解析結果（Sシリーズ）

ケース			最大 加速度 (gal)	最大 変位 (cm)	エネルギー 一吸収量 (tonf.m)
0	異種橋	R C	483	22.2	329
	脚連結	鋼製	471	21.2	217
	同種橋	R C	428	21.3	281
	脚連結	鋼製	399	24.0	226
S － 1	異種橋	R C	483	24.3	343
	脚連結	鋼製	544	19.2	212
	同種橋	R C	428	21.3	281
	脚連結	鋼製	448	21.5	225
S － 2	異種橋	R C	483	25.3	364
	脚連結	鋼製	619	21.1	205
	同種橋	R C	428	21.3	281
	脚連結	鋼製	496	24.1	222

4. 終局時における隣接橋脚の影響を考慮した設計

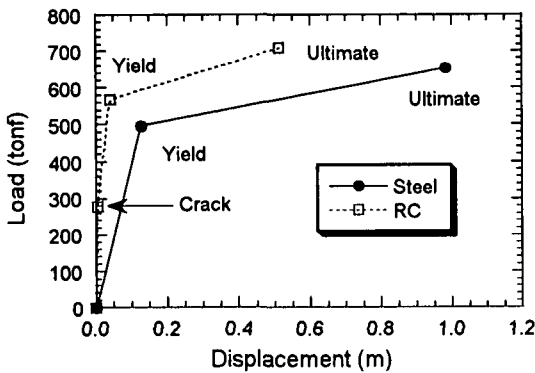
阪神・淡路大震災における道路橋の被災を考慮した平成8年度の道路橋示方書³⁾では、支承が破壊しないような設計を行うよう規定された。支承が破壊しなければ、適切な耐震連結装置を用いて設計振動単位が変化しないよう配慮することにより、地震時における隣接橋脚の相互

作用は小さくなるものと考えられる。

また、コンクリートを充填した鋼製橋脚が増えると、RC橋脚と動的特性が似通ってくる。図－10は、復旧仕様に基づいて試設計されたRC橋脚と鋼製橋脚の、変位－復元力特性の例である。復旧仕様に例示されていたRC橋脚の設計条件を元に、同じ条件で鋼製橋脚を試設計して求めたものである。表－5に仮定した橋脚の条件等、概要を示す。

表－5 仮定した橋脚の概要（復旧仕様）

死荷重反力	$R_d=1,000\text{tonf}$
上部構造重量	$W_U=1,000\text{tonf}$
RC橋脚躯体重量	$W_{PR}=930\text{tonf}$
鋼製橋脚躯体重量 (含：充填コンクリート)	$W_{PS}=240\text{tonf}$
設計水平震度	$k_h=0.24$ $c_2=1.0, c_G=1.0, c_f=1.0$
橋脚高	15m
上部構造重量作用高	17m
T字部張り出し長さ	20m



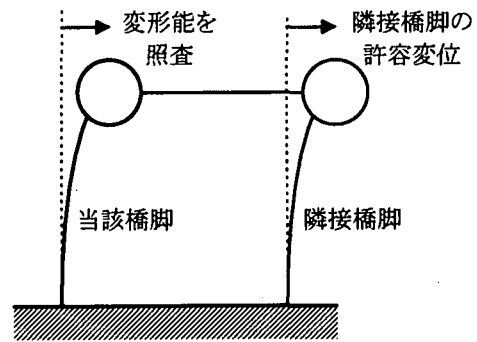
図－10 復旧仕様に基づいた橋脚の
変位－復元力特性の例

コンクリートを充填しているため躯体重量が重くなり、図－1の例ではRC橋脚の1／7程度であった鋼製橋脚が、図－10の例では1／4程度になっている。剛性の差も少なくなっており、固有周期も近づく傾向にあると考えられる。従って、相互作用の影響は、古い橋脚よりも少なくなることが予想される。

しかしながら、将来、支承が絶対破壊しないとは言え

ず、また、コンクリートを充填しない鋼製橋脚も存在する。終局的な地震時における隣接橋脚の相互作用には、ある程度設計段階で考慮することが望ましい。

高架橋のように連続したシステムの、どの部分を取り出して考えるのかという問題はあるが、まずは、隣接する2本の橋脚を考えることから始めるのが、实际的であろう。支承が完全固定の状態を考え、図－11のように隣接橋脚が許容変位を示したとき、その変形に対して当該橋脚がもつかどうかを照査する。あるいは、連結された系を振動単位として、動的応答の照査を行う。といった照査方法を確立することも、必要ではないかと考える。



図－11 相互作用を考慮した変形能照査法

5. まとめ

本研究では、支承が破壊して隣接する橋脚が桁で連結された場合を想定して、鋼製橋脚の地震応答における隣接RC橋脚の影響を、数値シミュレーションによって評価した。得られた主な結果は、以下の通りである。

- (1) 隣接橋脚と連結された場合の振動モードを求めれば、連結による隣接橋脚の相互作用の傾向を把握することができる。
- (2) 連結によって系の固有周期が変化し、地震応答が連結前と異なることがある。地震動の卓越周期との兼ね合いもあるが、一般的には、周期が長い方の橋脚の加速度応答が増し、変位応答が小さくなる。連結による履歴エネルギー吸収量の変化には、仮定する履歴復元力モデルの差が与える影響も大きい。連結される橋脚の固有周期が0.2秒以上異なると、連結された場合の影響が大きい。
- (3) 終局耐力の差が15%程度であれば、その影響は少なかった。

(4) 隣接橋脚の影響を考慮した設計手法の確立が必要である。

謝辞：本研究の実施にあたっては、土木学会関西支部阪神大震災調査研究委員会鋼構造分科会の方々にお世話になった。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 渡部泰介・亀田弘行・南荘淳：異種橋梁間の動的相互作用に注目した都市高速道路橋の地震応答，土木学会第49回年次学術講演概要集，第1部，pp. 1694～1695，平成6年9月。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，1990年2月。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，1996年12月。
- 4) Malhotra, P. K., Huang, M. J. and A. F. Shakal: Seismic Interaction at Separation Joints of an Instrumented Concrete Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 1055～1067, 1995.
- 5) 中島章典・山崎正治・深山大介：兵庫県南部地震による高架橋橋脚の損傷についての一考察、第23回地震工学研究発表会，pp. 249～252，1995年7月。
- 6) 金子誉・勝川藤太：高架橋の橋軸直角方向の地震力分担に関する一考察，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 325～331，1996年1月。
- 7) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書，1995年12月。
- 8) 土木学会：阪神大震災震災調査緊急報告会資料，1995年2月。
- 9) 馬場正成・伊津野和行：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，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 591～598，1996年1月。
- 10) 山田善一・家村浩和・伊津野和行・藤澤悟：履歴復元力モデルの差異がRC構造物の耐震安全性評価に及ぼす影響，構造物の安全性および信頼性（JCROSSAR'91論文集），Vol. 2, pp. 121～128，1991年11月。

(1997年3月31日受付)

EFFECT OF ADJACENT RC PIER ON SEISMIC RESPONSE OF STEEL PIER

Kazuyuki IZUNO and Kiminobu NAKAMURA

The highway bridges with destroyed shoes behaved like a multi-span continuous girder bridge during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake. The steel pier adjacent to the RC pier showed more severe damage than the other steel piers because of the interaction with the adjacent heavy RC piers. The numerical simulations verified that the responses of the steel piers could be affected by the adjacent RC piers dependent on their natural periods.