

# 論文 兵庫県南部地震で被災した RC ラーメン橋脚の損傷評価

田中 克典<sup>\*1</sup>・幸左 賢二<sup>\*2</sup>・藤井 康男<sup>\*3</sup>

**要旨:** 兵庫県南部地震により被災した阪神高速道路 3 号神戸線 RC 橋脚の補修・補強による復旧工事の際、地中部も含めた詳細な損傷調査が行われている。その調査結果を用いてこれまで RC 単柱の様々な損傷要因分析を行い、いくつかの知見を得ている。ここでは、RC ラーメン橋脚に着目し、その損傷状況を整理、分析し、簡便な耐力評価による橋脚耐力と損傷状況との相関性について検討を行った。その結果、RC 単柱に比べて損傷を受けている橋脚が圧倒的に少ないと、橋軸方向のせん断耐力相当加速度  $\alpha_{su}$  と実際の損傷状況に相関性があることが解った。直角方向については明確な要因を見いだせなかった。

**キーワード:** RC ラーメン橋脚、損傷度、損傷方向、耐震設計

## 1. はじめに

1995 年 1 月 17 日早朝に発生した兵庫県南部地震は、阪神地方を中心に甚大な被害を与えた。阪神高速道路においても例外ではなく、特に 3 号神戸線の兵庫県域の区間においては、5カ所で落橋に至るなどの大きな被害を被った。これまで、RC 単柱については、復旧工事の際に行われた詳細な損傷調査をもとに、損傷要因分析を行っており、柱のせん断耐力と損傷度の相関性、直角方向における橋脚の残留傾斜と上下部工偏心量との相関など様々な知見が得られていて

る<sup>1)2)</sup>。ここでは、これまで要因分析等の検討が行われていない RC ラーメン橋脚に着目し、その損傷状況の整理を行うとともに、簡便な耐力計算による要因分析を行った。

## 2. 損傷分析

### 2.1 RC ラーメン橋脚の概要

図-1 に示すとおり、阪神高速道路 3 号神戸線の被災区間（武庫川～月見山）における本線 RC ラーメン橋脚は、摩耶ランプ以西の限られた区間に採用されており、しかも入出路に近接

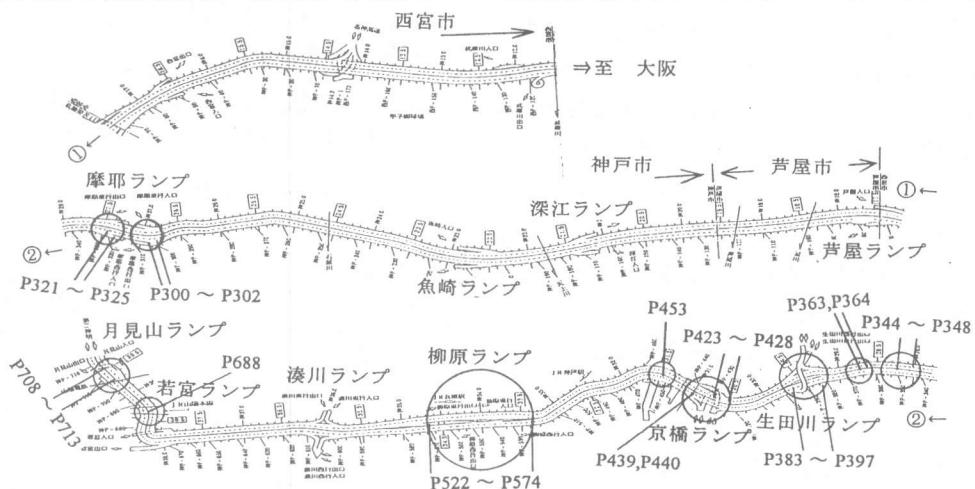


図-1 3号神戸線 RC ラーメン橋脚の分布

\*1 八千代エンジニアリング(株) 大阪支店

\*2 阪神高速道路公団 工務部 Ph.D

\*3 阪神高速道路公団 工務部

した区間に多く分布している。これは、路下条件上の制約や、上部工幅員等の関係でラーメン形式が採用されたためと考えられる。その基數は、図-2に示すとおり 92 基で、本線部全橋脚の約 11 %、RC 単柱の 1/6 程度である。図-3は、RC ラーメン橋脚の構造形式を示したものであり、全て 1 層形式で、全体の 90 % は柱の本数が 2 本の 1 層 1 径間構造である。また、柱の断面形状は、図-4に示すように、正方形、長方形を合わせて 85 % 程度が矩形断面となっており、国道 43 号線中央分離带上に多く採用されている RC 単柱が景観に配慮した円形断面が多いのと異なった傾向を示している。柳原ランプ付近の特殊形状（高さが変化するランプ部と本線部を 1 つのラーメン橋脚で受けているため）を除いた標準的な 1 層 1 径間構造 68 基について、脚高  $h$  と柱間隔  $B$  の関係を図-5 に示す。RC ラーメン橋脚の平均脚高は 10m 弱で、支持する上部工の標準幅員が 20 数 m である。RC ラーメン橋脚の柱間隔は、上部工死荷重反力により柱基部に曲げモーメントが生じないこと等に配慮して決められていると考えられる。したがって、梁部両端張り出し構造で  $h/B=0.6 \sim 0.7$  の橋脚が半数以上を占める結果となっている。表-1 に RC ラーメン橋脚と RC 単柱における橋脚の高さ、柱断面積、上部工死荷重反力およびせん断スパン比の平均値を比較した。RC 単柱と比べると、1 橋脚当たりの柱断面積  $A$  および上部工死荷重反力  $Rd$  は、RC ラーメン橋脚の方が小さく、 $Rd/A$  も若干ではあるが小さくなっている。これは、RC ラーメン橋脚が採用されている区間の上部工支間長が、平均して短いことが主たる原因であり、地震時における下部工の負担も RC ラーメン橋脚の方が若干少なかったものと考えられる。また、RC 単柱に比べて脚高が平均して低いものの柱断面寸法が小さく、せん断スパン比が大きいため、橋軸方向のせん断損傷を受けにくい構造と考えられる。

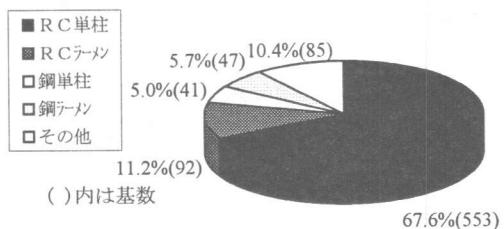


図-2 被災区間の本線橋脚形式の内訳

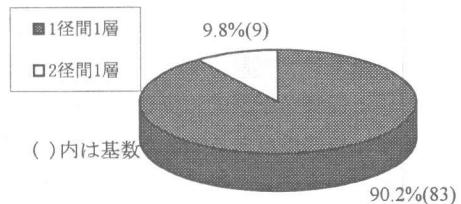


図-3 RC ラーメン橋脚の構造形式

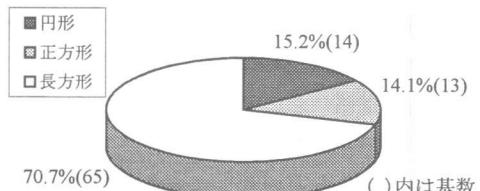


図-4 RC ラーメン橋脚の柱断面形状

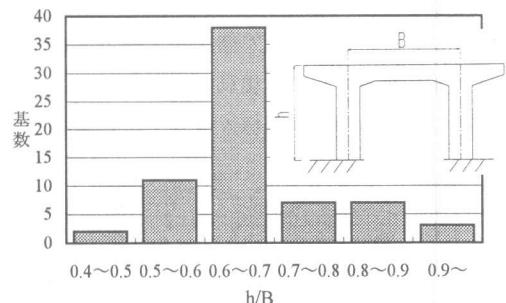


図-5 柱高と柱間隔の比

表-1 構造諸元平均値

橋脚形式	RC ラーメン	RC 単柱
平均値		
高さ $h$ (m)	8.614	11.211
断面積 $A$ ( $m^2$ )/1 橋脚当り	6.595	6.899
上部工死荷重 $Rd$ (tf)/1 橋脚当り	699.71	760.552
$Rd/A$ (tf/ $m^2$ )	106.097	110.241
橋軸方向せん断スパン比 $h/d$	4.64	4.03

## 2.2 損傷状況の概要

RC単柱と同様に震災直後の外観調査（地上部の目視調査）により、比較的軽微な損傷であったBランク以下の橋脚については、復旧工事に伴い、地中部も含めた詳細な損傷調査が行われている。損傷度ランクは、外観調査でBランク以下であった橋脚に対して、詳細調査をもとに8段階に区分した。撤去再構築されたAs・Aランクの橋脚については、緊急で鋼板巻き立てなどの応急対策が実施された<sup>3)</sup>ため、詳細調査は行われておらず、震災直後の判定ランクは変更していない。詳細調査では、Bランク以下の橋脚について、座屈損傷を受けた外周軸鉄筋の取り替え率によるランク区分(B1,B2,B3)、かぶりコンクリートの剥離、ひび割れ等によるランク区分(C1,C2,D)を新たに行った。図-6は、RCラーメン橋脚とRC単柱の損傷度ランクの内訳を示している。RC単柱の場合では、損傷がないか軽微なひび割れ程度であるDランクは、10%程度しかなく、再構築となったAランクが約31%を占める。これに対しRCラーメン橋脚では、損傷しているものが極端に少なく、約85%がDランクとなっている。このように、全体的にはRCラーメン橋脚の損傷度はRC単柱に比べて低かったと言える。RCラーメン橋脚においてCランク以上の橋脚は14基あり、特に甚大な被害を受けたAs・Aランク

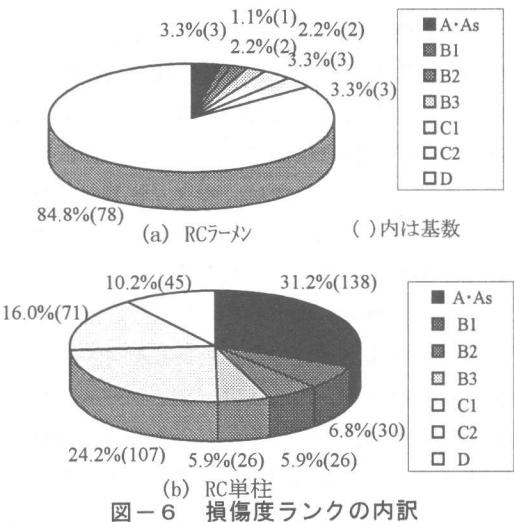


図-6 損傷度ランクの内訳

の橋脚が3基ある。これらCランク以上の橋脚についてさらに考察を加えることとする。

## 2.3 代表的な損傷橋脚(1層1径間ラーメン)

詳細調査による橋脚ひび割れ図や、損傷写真から確認できたCランク以上の橋脚は表-2に示す14基である。その内訳は、As・Aランクが3基、B1～B3ランクが5基、C1・C2ランクが6基であり、残り78基は、軽微な損傷もしくは損傷がないDランク橋脚である。表-2の損傷方向は、Lが橋軸方向、Tが直角方向、LTが柱全周を示している。表中損傷位置に示した記号は、図-7の模式図に対応している。梁部

表-2 Cランク以上の損傷状況

	損傷度ランク	損傷形態	損傷位置	損傷方向	h	D	h/D	
①	A	曲げせん断	柱基部	A	T	6.320	2.0	3.16
②	A	せん断	梁下端	C	T	8.296	2.0	4.15
③	As	せん断	柱中間部	B	L	8.600	3.5	2.46
④	B1	曲げせん断	柱基部	A	LT	8.400	2.0	4.20
⑤	B2	曲げ	柱基部	A	L	8.800	2.0	4.40
⑥	B2	曲げ	柱基部	A	L	8.300	2.0	4.15
⑦	B3	曲げせん断	柱基部	A	LT	8.850	2.0	4.43
⑧	B3	曲げ	柱基部	A	T	8.900	2.0	4.45
⑨	C1	曲げ	柱基部	A	T	9.200	2.0	4.60
⑩	C1	曲げ	柱基部 梁下端	A, C	T	9.000	2.0	4.50
⑪	C1	せん断	全高		L	6.300	1.5	4.20
⑫	C2	曲げ	柱基部	A	LT	12.500	2.5	5.00
⑬	C2	せん断	全高		T	8.291	1.6	5.18
⑭	C2	せん断	全高		T	8.291	1.6	5.18

D, E に損傷を受けたものではなく、全て主たる損傷は柱部である。C ランクでは柱全高に亘ってひび割れが生じている橋脚も認められるが、鉄筋が座屈する様な破壊面が生じるまでには至っていない。B ランクでは、すべて柱基部（損傷位置 A）で鉄筋が座屈している曲げあるいは曲げせん断損傷である。それに対して、A ランクの 3 基はそれぞれ損傷位置が異なり、せん断的な破壊状況を示している。また、A ランクの橋脚でせん断スパン比  $h/D$  は、RC ラーメン橋脚の平均値 4.64 よりも小さく、せん断的な損傷が大きな破壊に至る可能性が高いことを示している。特に③の橋脚は柱断面寸法が大きいため、橋軸方向せん断スパン比が非常に小さく、実際の損傷も橋軸方向にせん断破壊している。図-8 は、撤去再構築となつた As・A ランク 3 基の損傷写真である。特徴的なのは、前述したように 3 基それぞれで損傷形態、損傷位置、損傷方向が異なることである。(a) は柱基部の直角方向曲げせん断破壊、(b) は梁下端の直角方向せん断破壊、(c) は 2 本の柱ともに同じ箇所における、橋軸方向のせん断破壊である。これに対して、図-9 は図-8 の(b)と同位置である梁下端の損傷であるが、せん断破壊ではなく、曲げによるかぶりコンクリートの剥離は生じたものの、鉄筋は座屈しておらず C ランクと判定している。

### 3. 簡便な手法による要因分析

3 号神戸線における本線部 1 層 1 径間 RC ラーメン橋脚 83 基のうち、特殊形状を除く 1 層 1 径間の標準的な RC ラーメン橋脚 68 基を対象にせん断耐力相当加速度  $\alpha_{su}$  について分析を行つた。

橋軸方向および直角方向それぞれでせん断耐力相当加速度  $\alpha_{su}$  を算出し、橋脚の損傷状況との相関性を検討した。ここでせん断耐力相当加速度  $\alpha_{su}$  とは、着目断面において、作用水平力が柱のせん断耐力  $S_u$  に達するような慣性力を生じさせる加速度のことである。対象とし

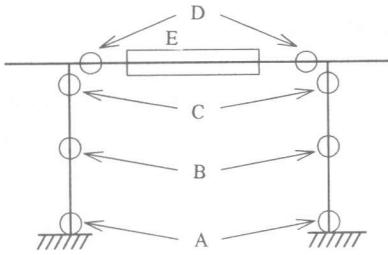
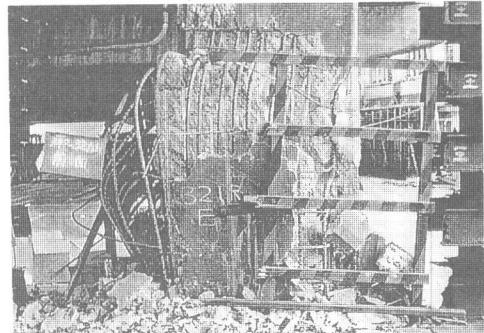
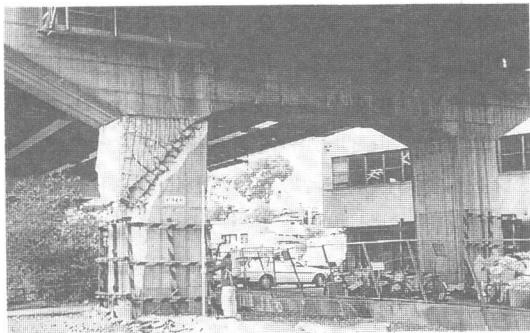


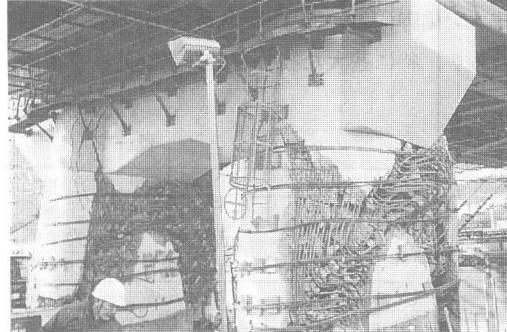
図-7 損傷位置模式図



(a) 〈表-2の①〉



(b) 〈表-2の②〉



(c) 〈表-2の③〉

図-8 As・Aランク橋脚の損傷状況

た橋脚 68 基は、全て左右同寸法、同配筋の 1 径間ラーメン橋脚であり、上下部工間の偏心はわずかであるので式(1)より、せん断耐力相当加速度  $\alpha_{su}$  を計算した。

$$\alpha_{su} = \frac{980 \times Su}{0.5Wu + Wp} \quad (\text{gal}) \quad \dots \dots \quad (1)$$

Su: 着目位置の柱 1 本当りのせん断耐力 (tf)

Wu: 橋脚 1 基が負担する上部工重量 (tf)

Wp: 着目位置より上方の柱 1 本分相当の重量 (tf)

$$Su = Sc + Ss \quad \dots \dots \quad (2)$$

Sc: コンクリートが負担するせん断耐力 (tf)

Ss: 帯鉄筋が負担するせん断耐力 (tf)

$$Sc = 10 \cdot \tau_c \cdot b \cdot d \quad \dots \dots \quad (3)$$

$$Ss = \frac{A_w \cdot \sigma_{sy} \cdot d}{10 \times 1.15 \cdot a} \quad \dots \dots \quad (4)$$

$\tau_c$ : コンクリートが負担できる平均せん断応力度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

b : 断面幅 (m)

d : 断面有効高 (m)

$A_w$ : 帯鉄筋の断面積 ( $\text{cm}^2$ )

$\sigma_{sy}$ : 帯鉄筋の降伏応力度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

a : 帯鉄筋の間隔 (cm)

ここで、式(1)のせん断耐力  $Su$  は、図-10に示す柱基部せん断耐力  $Su^B$  を、柱重量  $Wp$  は、斜線部を対象として  $\alpha_{su}$  を計算した。ただし、柱主鉄筋に段落としがある場合、せん断耐力  $Su$  は段落とし後の  $Su'$  とし、段落とし部より上方の橋脚重量  $Wp$  との組み合わせで算定した  $\alpha_{su}$  と、柱基部を対象とした  $\alpha_{su}$  との小さい方を採用した。

図-11 は橋軸方向と直角方向の  $\alpha_{su}$  の関係を示したものである。また、図中破線および一点鎖線は、それぞれRC単柱、RCラーメン橋脚における直角方向  $\alpha_{su}$  の平均値である。RC単柱の 368gal に対して、RCラーメンは 436gal であり、約 20 % RCラーメン橋脚の方が大きくなっている。これは、RC単柱に比べRCラーメン橋脚では損傷橋脚の割合が少ないと整合している。一方、損傷方向が判定できたCランク以上の橋脚では、橋軸方向に損傷している3基は、いづれも直角方向より橋軸方向の  $\alpha_{su}$  が小さく、損傷方向との相関が認められる。特に図中③(表-2 参照)の橋脚は、



図-9 Cランク橋脚の損傷状況 (表-2の⑩)

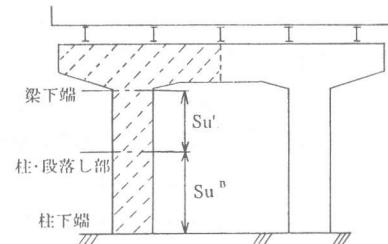


図-10 せん断耐力  $Su$  の算出位置

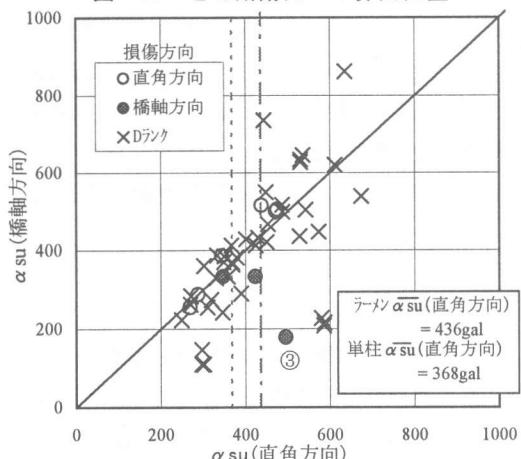


図-11 橋軸方向・直角方向の  $\alpha_{su}$

支持する上部工が 64m+84m+64m の 3 径間連続鋼箱桁橋の中間固定橋脚であり、橋軸方向において負担する上部工重量が非常に大きいため、橋軸方向  $\alpha_{su}$  が小さくなっている。また、脚高が低く断面寸法が大きいため ( $\phi 3500$ )、せん断スパン比の小さいせん断破壊を起こしやすい橋脚でもある。実際にこの橋脚は、橋軸方向にせん破壊している As ランクの橋脚である(図-8(c))。図中、橋軸方向  $\alpha_{su}$  が 200gal 以下であるにも拘わらず、Dランクの橋脚が見受けられる。これらは、橋脚③と同様 3 径間連続橋の固定橋脚であり、橋脚③と同じ理由で  $\alpha$

$\alpha_{su}$  が小さくなっている。ただし、橋脚③と比べて上部工支間長が短いため、負担する上部工重量  $W_u$  が小さく（橋脚③  $W_u=4580t$ ,  $W_u=1400t$ ），作用した地震力の大きさが異なる。また、せん断スパン比も  $I/D=5.18$  と大きく（橋脚③  $I/D=2.46$ ）せん断破壊しにくい構造であったこと等が考えられるが、その他、上部工慣性力を橋脚に伝達する支承の損傷状況、場所による地震動の大きさや方向の違い等  $\alpha_{su}$  以外にも複雑な要因が存在すると推定される。図-12 は C ランク以上の橋脚について、橋軸方向と直角方向の関係をその損傷方向と損傷度ランク別に示したものである。図より、橋軸方向の  $\alpha_{su}$  が 350gal 以上で、橋軸方向に損傷を受けている橋脚ではなく、相関性が認められる。一方、直角方向では、 $\alpha_{su}$  が 400gal を越える直角方向で損傷した A ランクの橋脚がある。これは R C ラーメン橋脚の直角方向においては、地震時荷重による柱の軸力変動の影響等、橋軸方向や R C 単柱に見られない複雑な要因が考えられ、今後の検討課題である。

#### 4.まとめ

ここで得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 3号神戸線の本線部に採用されている R C ラーメン橋脚は、1層1径間で梁両端張り出し構造が標準であり、脚高と左右柱間隔の比率は 0.5 ~ 0.8 の範囲にほとんどの橋脚が含まれる。
- 2) R C 単柱と比べ、柱断面積および橋脚が負担する上部工重量はやや小さく、橋軸方向のせん断スパン比は 10 % 程度大きくなっている。したがって、橋軸方向にせん断破壊を起こしにくい構造と考えられる。
- 3) 実際の損傷状況を見ると、多くの橋脚において主たる損傷は柱部であり、C ランク以上の損傷を受けた橋脚 14 基はすべて主たる損傷が柱部である。
- 4) 破壊された A ランク以上の橋脚 3 基は、それぞれ特徴的な壊れ方をしている。橋軸方向

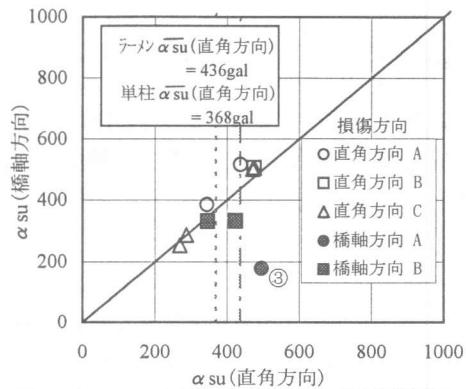


図-12  $\alpha_{su}$  と損傷度ランク（損傷橋脚）

柱中間部でせん断破壊した橋脚は、鉄道を跨ぐ長スパンの 3 径間連続橋の固定脚であり、橋軸方向における上部工負担重量が大きいこと、柱断面寸法が他の R C ラーメン橋脚に比べ極端に大きく、橋軸方向せん断スパン比も小さいことが、この様な破壊に至った原因と考えられる。他の 2 基はいづれも直角方向の破壊であるが、それぞれ梁下のせん断および柱基部の曲げせん断と異なる損傷となっている。今後、詳細な配筋状態を調べ、解析を含む検討を行う予定である。

- 5) 上記 A ランクの橋脚を含め 68 基について橋軸方向および直角方向のせん断耐力相当の加速度  $\alpha_{su}$  を比較した結果、橋軸方向で損傷している橋脚は、直角方向よりも橋軸方向の  $\alpha_{su}$  の方が小さく損傷方向と一致する。また、R C 単柱の  $\alpha_{su}$  よりも平均的に大きな値となっており、全体的な損傷度が低い一因と考えられる。
- 6) 橋軸方向のせん断耐力  $\alpha_{su}$  が 350gal 以上では、橋軸方向に破壊している橋脚ではなく、 $\alpha_{su}$  との相関性が認められた。一方、直角方向ではせん断耐力が 400gal 以上であっても、A ランクの橋脚が見られ、今後の検討課題としたい。

#### 参考文献

- 1) 田中、林、幸左、安田：R C 橋脚損傷度の定量的評価、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19, No.2 pp.393-398, 1997
- 2) 田中、林、幸左、安田：残留変位に着目した地震被災橋脚の検討、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20, No.3 pp.973-978, 1998
- 3) 林 秀侃：阪神高速道路 3 号神戸線の復旧設計の概要、土木施工, Vol.36, No.12, pp.71-76, 1995.11