

## 論文 損傷形態に着目した被災 RC 橋脚分析

幸左賢二\*<sup>1</sup>・藤井康男\*<sup>1</sup>・田中克典\*<sup>2</sup>

**要旨:** 被災した 3 号神戸線 RC 橋脚の詳細な損傷状況調査を行い, 外観調査と比較するとともに, これらの結果を用いて損傷形態, 段落とし部の有無, 損傷位置に着目した分析を行い, これらが損傷程度に与える影響を分析した. その結果, 段落とし部の有無が損傷の程度に与える影響が大きいことや段落とし部を有しない橋脚の柱中間部で大きな損傷ランクとなった 11 基はせん断耐力相当加速度の小さいものであることが明らかとなった.

**キーワード:** RC 橋脚, 要因分析, せん断耐力, 損傷モード

## 1. まえがき

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 箇所で落橋に至るなどの大きな被害を被った. このうち, RC 橋脚の損傷度は震災直後に実施した主として地上部の外観調査および写真判定に基づき As から D までの 5 ランクに区分している. 判定区分は道路震災対策便覧(震災復旧編)による構造物別被災度の判定手法に基づいている. 西宮市と尼崎市境の武庫川から, 神戸市須磨区月見山間対象 RC 橋脚 943 基のうち, その 15% の 142 基が比較的損傷が大きな As, A ランク, 35% の 327 基が比較的軽微な損傷の B, C ランクであった.

補強・補修の可否の判定は, 緊急性を有することから外観調査により判定せざるを得ないが, 損傷要因や損傷程度の分析には, できうだけより詳細な調査結果を用い定量的に評価することが望ましいと考えられる. そこで, 本研究では外観調査が B, C, D ランクで補修・補強となった RC 橋脚について, 補強工事に伴いコンクリートのひびわれ量や鉄筋の座屈長などの詳細な損傷状況調査を行い, 外観調査と比較するとともにこれらの結果を用いて損傷形態, 段落とし部

の有無, 損傷位置に着目した分析を行い, これらが損傷程度に与える影響を分析した. ついで, 損傷ランクの特に大きな A, As ランクに着目して, その損傷形態の特徴分析を行った.

## 2. 詳細損傷調査

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, 補修・補強工事に伴い, 地中部も含めたかぶりコンクリートの剥離, ひび割れ状況, 柱軸方向鉄筋の損傷状況(座屈, はらみ出し量等)の詳細な調査が実施された. ただし, B ランク以下の橋脚であっても, 残留傾斜が大きく撤去・再構築となった橋脚の詳細調査は行われていない.

## ① 損傷度ランク判定

外観調査および B ランク以下で実施した詳細調査をもとに損傷度を 8 段階に区分した (As, A, B1, B2, B3, C1, C2, D). 撤去・再構築された As, A ランクの橋脚については危険度が高いことから, 緊急で鋼板巻き立てなどの応急対策を実施したため, 詳細調査は実施されておらず, 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以下に示す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

\*1 阪神道路公団工務部設計課(正会員)

\*2 八千代エンジニアリング(株)大阪支店(正会員)

区分 (B1, B2, B3) およびかぶりコンクリート剥離、ひび割れ等によるランク区分 (C1, C2, D) を新たに行った。

B1: ほぼ全周に亘って軸鉄筋のはらみ出しが認められ鉄筋を取り替えたもの

B2: 外周軸鉄筋の取り替えが1/2程度のもの

B3: 外周軸鉄筋の取り替えが1/4程度のもの

C1: 軸鉄筋が一部露出しているが、はらみ出しは認められず取り替えなしのもの

C2: 軸鉄筋の露出は認められないが、ひびわれ損傷が大きいもの

D: ひびわれ損傷が小さいか、損傷が認められないもの

また、分析対象橋梁は形状の影響をできるだけ少なく統一するために、本線部RC単柱形式とした。図-1に、本線RC単柱のうち分析対象とした443基について、当初実施された外観調査と詳細調査結果の対比を示す。また、図-2に損傷ランクが上昇した橋脚のランク変化と主たる損傷位置を示す。図-1より、外観調査でBランク以下の橋脚がより詳細なデータをもとに細分化されていることがわかるが、特に外観調査でC, Dランクであった橋脚で鉄筋屈曲による取り替えが必要となったBランクがかなり発生している。図-2より、外観調査でC, Dランクであったものが、詳細調査でB3ランク以上となった橋脚は、それぞれ46基および11基あるが、そのほとんどが新たに発見された地中部の損傷が卓越していたためであることがわかる。

### 3. 段落とし部有無の影響分析

詳細な損傷図および写真を基に橋脚の損傷位置を調べ、元設計の配筋図によって軸鉄筋の段落とし位置を確認した。表-1に段落としの有無と損傷位置の関係を示す。段落とし無しの場合は234基(83%)が基部で損傷しており、そのほとんどが曲げあるいは曲げせん断の損傷形態を示している。また、段落とし無しであるにもかかわらず、柱中間部で損傷しているものが44基あるが、その損傷形態はすべて曲げせん断ある

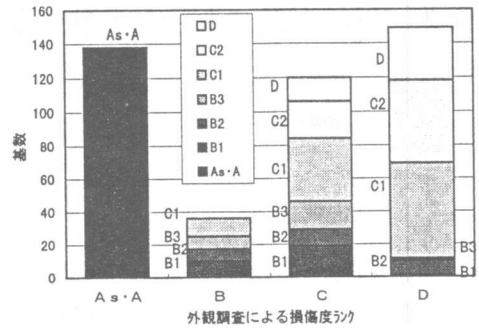


図-1 外観調査結果と詳細調査結果の対比

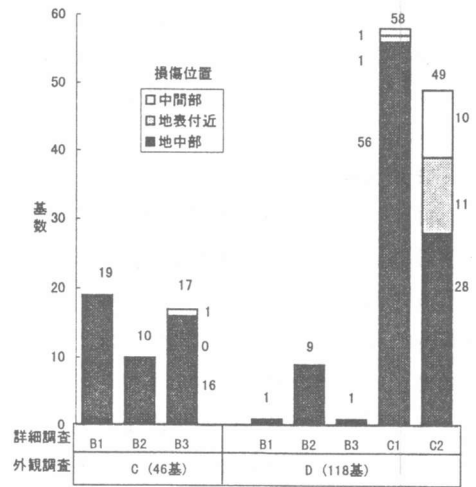


図-2 橋脚の損傷位置

表-1 段落としの有無と損傷形態

段落とし	損傷位置	中間	損傷形態			合計
			曲げ			
			曲げせん断	せん断		
有	中間	19	83	3	105	
	基部	41	4	0	45	
	合計	60	87	3	150	
無	中間	0	30	14	44	
	基部	158	73	3	234	
	合計	158	103	17	278	

表-2 段落としの有無と損傷ランク

段落とし	損傷位置	中間	損傷度ランク			合計
			A・As・B1			
			B2・B3	C1・C2・D		
有	中間	71	4	36	111	
	基部	2	9	34	45	
	合計	73	13	70	156	
無	中間	13	2	38	53	
	基部	82	37	115	234	
	合計	95	39	153	287	

いはせん断に分類されている。これは作用せん断力が動的応答により中間部で大きくなることやせん断抵抗がa/dの影響により中間部で小さくなることなどにより、中間部でのせん断損傷となったものと考えられる。表-2は段落としの有無と損傷位置および損傷度の関係を示す。中間部損傷で段落とし無し橋脚のうちB1ランク以上の大きな損傷が13基あり、そのうち11基がA・Asランクの橋脚である。これらは後述のように交差点部の矩形大断面橋脚である。また、段落とし無し橋脚で基部損傷タイプは234基あり、その損傷形態は曲げタイプが多いが、損傷ランクの高いB1以上では82基のうち52基が曲げせん断に分類されている。図-3、-4にそれぞれ段落とし無しと有りの損傷度分布を示す。段落とし無しでは23%が、段落とし有りでは46%がAs, Aランクに分類されている。また、図-3からも分かるように段落とし部があっても約半数がC, Dランクであるが、Bランク損傷は少ない。これは段落とし有りの場合、段落とし部での曲げせん断やせん断タイプの損傷となりやすく、いったん損傷が発生すると急激に大きな損傷となることが多いためと考えられる。これに対して図-4に示す段落とし無しの場合は、損傷ランクが分散しているが、基部での曲げ損傷タイプが多いためと考えられる。このように段落としの有無によって、損傷程度、損傷モード、損傷位置に大きな差異を生じることが分かる。

#### 4. 損傷位置分析

##### 4.1 分析概要

橋脚基礎付近に舗装や路盤コンクリートがある場合には、地盤の抵抗剛性が大きくなり、損傷位置がフーチング付近の橋脚基部からフーチングより1.5m程度上面の地盤面に变化する可能性が考えられる。そこで、段落としの有無、路下条件と損傷位置について詳細な分析を行った。分類は地中部、地表付近、柱中間部の3種類とした。ここで、地中部とは主たる損傷位置が地中部で地上付近に損傷が現れていない状態であ

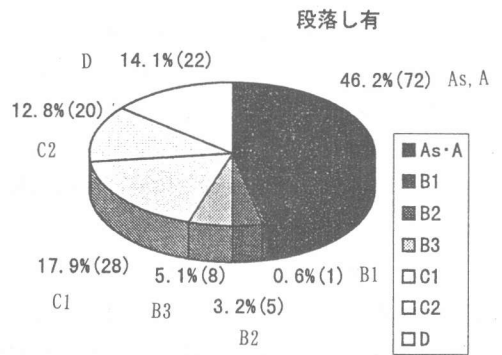


図-3 段落とし有りの損傷度区分

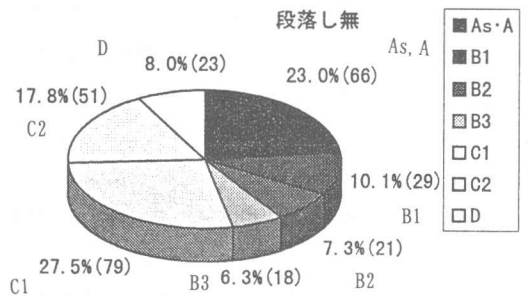


図-4 段落とし無しの損傷度区分

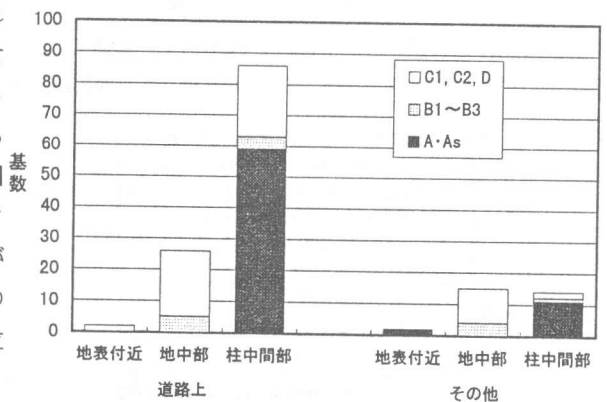


図-5 段落とし有り橋脚の損傷ランクと路下条件

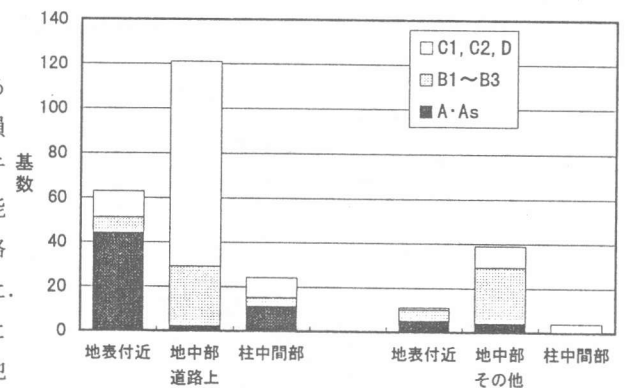


図-6 段落とし無し橋脚の損傷ランクと路下条件

る。図-5は段落とし有り橋脚の損傷ランクと路下条件を示したものであり、図-6は段落とし無し橋脚の損傷ランクと路下条件を示したものである。図-5よりほとんどの大きな損傷は段落とし付近で生じており、基部付近の損傷度は軽微なものが多い。また、段落とし有りの橋脚では路下条件によって損傷位置や損傷ランクに大きな差異は認められない。これに対して図-6では路下条件が道路上以外であるその他の地域では損傷度が比較的小さいのに対して、43号や2号などの道路上では段落とし無しにも関わらず、地表付近で損傷したものが多い。そこで、以下に示す分析を実施した。

#### 4.2 解析概要

2次元非線形FEM解析を用いて、橋脚の損傷に及ぼす地盤抵抗の影響について解析する。解析対象としては標準的な既存T型RC橋脚を選定した。本橋脚は、支間60mと39mの鋼I単純桁を支持する直径3.5m、高さ12.66mの円形橋脚で、フーチング天端より6.45mで主鉄筋の1/5が段落

としされている。また、根入れ長は1.5mで、地表付近0.5mがコンクリート、残りの1.0mはN値15相当の土である。解析は、橋軸直角方向に着目し、フーチング天端より上面を解析対象とし、橋脚下端を固定としている。橋脚は下記の条件で2次元にモデル化し、コンクリートを平面ひずみ要素、鉄筋をトラス要素とした。

- ①段落とし位置は実橋脚の段落とし位置よりコンクリート標準示方書に基づく定着長(80cm)を考慮し、フーチング天端より5.65mとした。
- ②帯鉄筋：せん断補強成分の面積を分配して帯

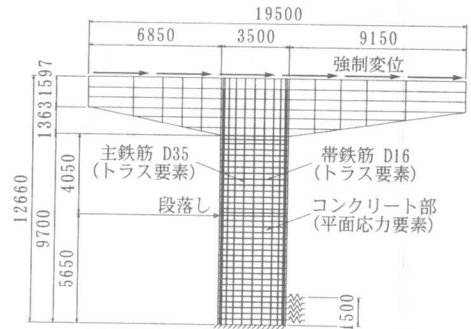


図-7 解析モデル

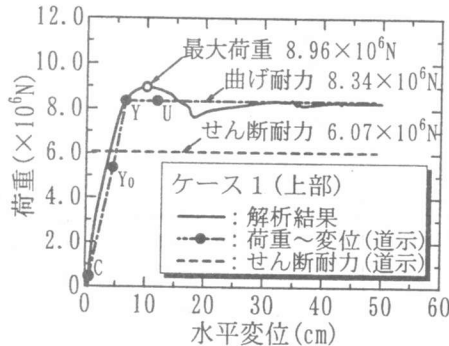


図-8 荷重-変位およびせん断ひずみ分布 (地盤抵抗考慮せず)

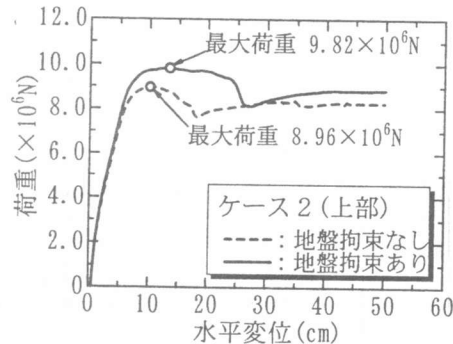
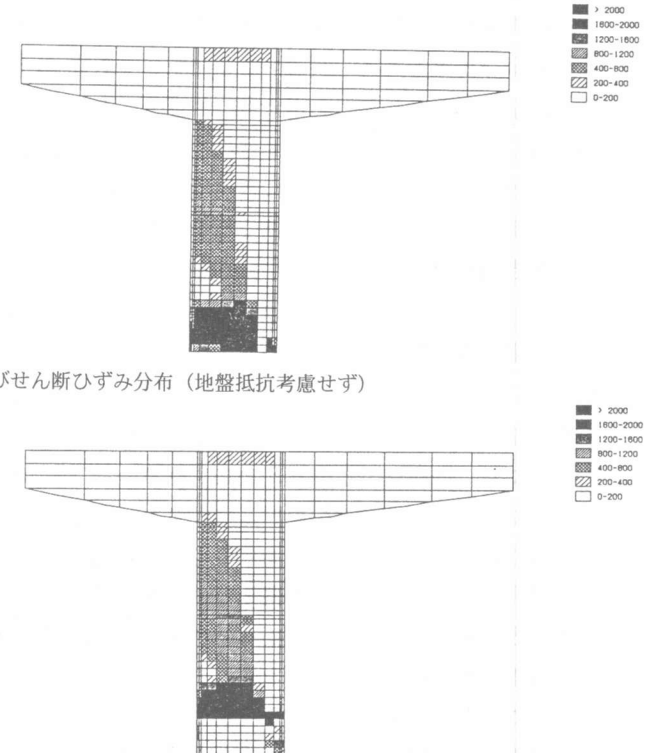


図-9 荷重-変位およびせん断ひずみ分布 (地盤抵抗考慮)



鉄筋の効果を考慮した。

③根入れ部の地盤抵抗：弾性バネとして考慮し、バネ値は、道路橋示方書に基づき設定した。

上述した条件により2次元有限要素分割した解析モデルを図-7に示す。解析に用いる物性値は、実橋脚から採取した試料の室内強度試験結果をもとに設定した。材料の非線形特性は以下のモデルを用いた。

- ①圧縮時の応力～ひずみ関係：Saenzモデル
- ②圧縮ひずみ軟化特性：Darwin-Pecknoldモデル
- ③ひびわれ後のせん断伝達：Al-Mahaidiモデル
- ④鉄筋：バイリニアモデル

また、解析における荷重は、自重解析を行った後、主桁部の節点に50cmの強制変位を与えた。

### 4. 3解析結果

①地盤抵抗を考慮しない場合：ケース1

図-8に荷重～変位関係および7 $\delta y$ 時点（ $\delta y$ ：主鉄筋のうち断面引張側45度範囲の鉄筋が降伏したときの変位）でのせん断ひずみ分布を示す。図から分かるように最大荷重は $8.96 \times 10^6 \text{N}$ となる。図には道路橋示方書に基づく曲げ耐力およびせん断耐力を示しているが、解析結果は示方書の曲げ耐力に概ね対応している。またせん断ひずみは、橋脚基部で卓越領域が広がり基部での破壊形態を示している。

②地盤抵抗を考慮した場合：ケース2

図-9は同様に地盤抵抗を考慮した場合でケース1と比較したものである。最大荷重は $9.82 \times 10^6 \text{N}$ とケース1を上回っている。ケース1と比較すると、埋め戻し上端付近で鉛直ひずみの降伏領域が広がり、せん断ひずみの卓越領域も埋戻し上端付近から段落とし位置付近に集中している。地盤抵抗により曲げスパンが短くなるため、曲げ耐力は10%程度増加しているが、地表面付近にせん断ひずみの卓越領域が集中し、せん断破壊モードが助長されていると考えられる。

## 5. As, Aランク損傷の分析

### 5. 1段落とし有りの橋脚

ここでは3号神戸線で特に大きな被害を生じ

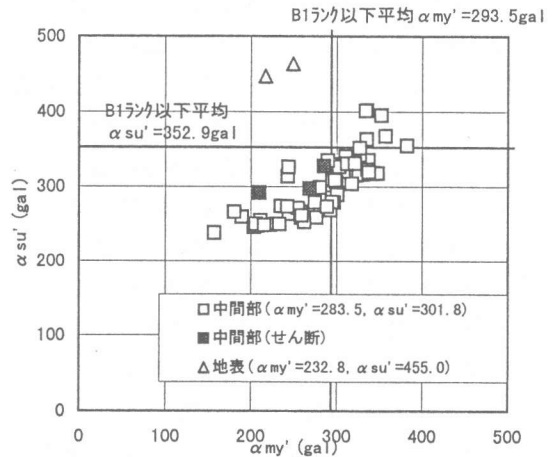


図-10 せん断耐力加速度と曲げ降伏相当加速度の関係 (ダッシュは段落とし部の値を示す)

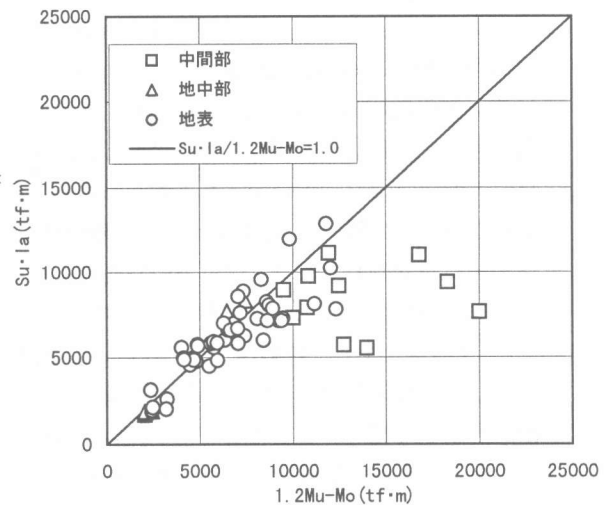


図-11 せん断耐力と曲げ耐力の関係

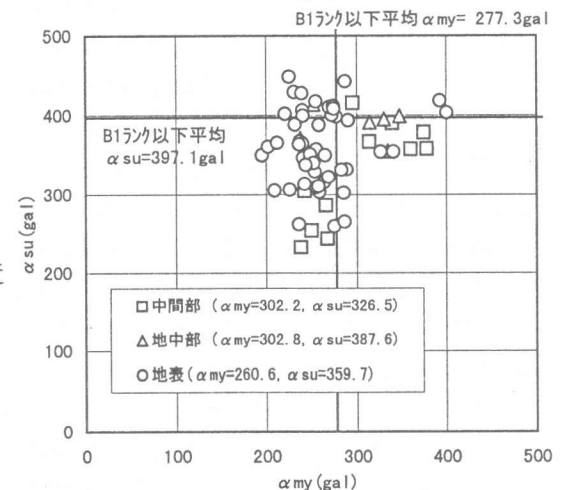


図-12 せん断耐力加速度と曲げ降伏相当加速度の関係

たAs, Aランクの橋脚を対象をしぼりその損傷要因を分析する。As, Aランク損傷橋脚の段落とし有りの橋脚は72基, 段落とし無しの橋脚は66基である。段落とし有りの橋脚のうち, 損傷位置が柱中間部と判定されるものは70基あるが, 配筋図から推定するとこれらの橋脚の損傷はほぼすべて段落とし位置に対応している。また, 柱地表部と判定されるものが2基あるが, 段落とし位置が柱基部から約2mの位置にあり, これらの橋脚も段落とし位置での損傷と考えられる。72基についてせん断耐力相当加速度( $\alpha_{su}$ )と曲げ降伏相当加速度( $\alpha_{my}$ )の関係<sup>2)</sup>を図-10に示すが, 地表部損傷に分類される2基は2段から1.5段の段落としであることからせん断耐力の低下が生じないこともあり, 計算上せん断耐力相当加速度が450 gal程度と比較的大きいが曲げ降伏相当加速度が200~250 galと小さく, 基部に近い段落とし付近の曲げびびわれが進行し, 曲げせん断の大きな損傷に至ったと考えられる。その他の70基は図-10に示すようにせん断耐力相当加速度が302galとB1ランク以下の353galよりもかなり小さい。以上より段落とし有りで, As, Aランク損傷を生じた橋脚はすべて段落とし部で損傷しており段落とし部の曲げ耐力およびせん断耐力が他の箇所よりも相対的に小さいためにこのような大きな損傷に至ったと考えられる。

## 5. 2段落とし無しの橋脚

段落とし無しの橋脚のうち, 損傷位置が柱中間部と判定されたものは11基, 柱基部(地表部および地中部を含む)と判定されたものは55基ある。これら11基はすべて交差点などの矩形大断面橋脚であり, 大きな死荷重を支えるために断面幅が大きくa/dが相対的に小さい。図-11に曲げ耐力とせん断耐力の関係, 図-12に曲げ降伏耐力相当加速度とせん断耐力相当加速度との関係を示す。図に示すように段落とし無しで中間部で損傷した橋脚はせん断耐力曲げ耐力比が1以下になるとともに, 平均せん断耐力相当加速度が327galとB1ランク以下の平均値の397galに比べて小さい。すなわち, せん断耐力曲げ耐

力比が小さく, また極端にせん断耐力が小さいものは中間部でもせん断損傷が生じることを示している。以上の結果は, たとえ段落とし部がない橋脚でもせん断耐力は基部のみならず柱中間部も十分余裕を確保することが望ましいことを示している。また, 地表部および地中部損傷の55基はせん断耐力相当加速度が363galとB1ランク以下の平均値の401galよりもやや小さい。これに対して曲げ降伏相当加速度は大きくばらついており, 定性的な傾向は認められなかった。また, 地表部損傷と地中部損傷タイプに耐力的な差異は認められなかった。

## 6. まとめ

3号神戸線RC橋脚を対象とした詳細分析により得られた結果を以下にまとめる。

- ①外観調査に比べて詳細調査によりC, DランクからBランクとなった57基のうち, 56基は新たに発見された地中部による損傷であった。
- ②段落としの有る橋脚はAs, Aランク損傷が多いがBランク損傷は少ない。これは段落とし有りの場合, いったん損傷が発生すると急激に大きな損傷となることが多いためと考えられる。
- ③特に大きな損傷のAs, A橋脚のうち, 段落とし有りが72基, 段落とし無しが66基であった。このうち, 段落とし有りの橋脚の損傷はすべて段落とし位置であった。
- ④As, Aランクで段落とし無しにも関わらず中間部で損傷した11基はせん断耐力曲げ耐力比が1以下で平均せん断耐力相当加速度が327galと小さなものが多かった。また, 地中部および地表部で損傷した橋脚55基は, せん断耐力相当加速度が363galとやや小さいものが多かった。

## 参考文献:

- 1) 大内一・林秀侃・幸左賢二・田坂幹雄: 数値解析によるRC橋脚の破壊メカニズムに関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, 1997.
- 2) 幸左賢二・藤井學・林秀侃・中田恒和: RC単柱式橋脚のマクロ的損傷分析, 土木学会論文集 No. 592/V-39, pp. 73-82, 1998. 5.