

論文 震害を受けた RC 橋脚の損傷分析と特徴

松本 典人*¹・香川 尚史*²・豊福 俊英*³・眞嶋 光保*⁴

要旨：阪神・淡路大震災で比較的被害の多かった一路線の道路高架橋の RC 橋脚の被災状況を独自に調査し、その結果に基づいてデータベースを作成した。データベースを基に橋脚の損傷程度と構造形式、せん断スパン比および基礎形式等との関係を統計分析した結果、損傷・破壊メカニズムを推定する上で基礎的な要因を調べた結果を報告する。

キーワード：兵庫県南部地震、道路高架橋、RC 橋脚、被災調査、統計分析

1. はじめに

阪神・淡路大震災の被害調査が進むにつれて、道路や橋梁に関するコンクリート構造物が広範囲にわたって多様な損傷が発生していることが明らかになってきた。今回の地震が予想をはるかに超える大きなものであったことが損傷の主な原因であるが、個々の構造物の損傷調査をすると種々の要因が重複していることが分かった。そこで、比較的被害の多かった 1 路線の道路高架橋の RC 橋脚に注目して、被害状況の調査を行った。調査に当たっては、高架橋の RC 橋脚（下部工）を全線にわたり独自の方法で行い、損傷・破壊のメカニズムを推定していく上で基礎的な要因を抽出することに努めた。これらのデータベースを基に統計分析を行い、工学的な評価を展開していく。

2. RC 橋脚の被害調査

2. 1 被害の調査方法

被害の大きかった 1 路線の高速道路高架橋の RC 橋脚 1 基毎に、被害発生後の記録写真や現地被害調査資料等を参考に調査を行った。被害をほとんど受けていない橋脚に対しても、損傷・破壊が発生した原因を推定する上で有用と考え、調査・分析を行った。これらの被害調査結果の一覧表を作成し、データベース化を行った。被害の調査方法、調査項目を下記に示す。

(1) 調査範囲：尼崎市近辺～神戸市須磨区近辺の高速道路の橋脚

(2) 調査方法：記録写真および現地踏査等による損傷・被害調査

(3) 調査項目：①橋脚番号

②構造型式（上部工・下部工）

③被害状況

・破壊の形態

破壊形態：せん断・曲げせん断・曲げ破壊の区分

場 所：橋脚の柱上部・中間部・基部の区分

方向方位：軸方向・軸直角方向および方位の区分

*1 東洋建設(株)鳴尾研究所材料研究室研究員、(正会員)

*2 大阪ガス(株)技術部都市開発チーム係長、(正会員)

*3 関西大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

*4 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

- ・被害の損傷度判定（４段階評価；X、A、B、C）

なお、損傷度の判定は、「損傷程度の尺度」で提案したものによる。

- ・被害の推定原因

④橋脚の構造データ

- ・橋脚（下部工）高さ、橋脚断面形状、せん断スパン比

⑤損傷に対する特記事項他

2. 2 損傷程度の尺度

RC柱が大変形を受けた場合の実験結果によれば、降伏点変位（ δy ）程度の変位ではほぼ弾性範囲にあり、構造的には健全であることが知られている。また、 $2\delta y$ 程度の変位状態では、ひび割れもそれほど顕著ではなく、構造的にもかなりの健全性を保っているため、軽微な損傷と考えられる。次に、 $3\delta y$ 程度の変位になると、フーチングとの付け根にひび割れの発生が見られるようになり、繰り返し変位の影響で劣化現象も現れる。さらに、 $4\delta y$ 程度の変位になると、ひび割れが顕著となり、損傷が大きく、残留変位も目立つようになる。

土木学会コンクリート標準示方書の耐震に関する条項では、被災の程度を、健全維持、軽微な損傷、中程度の損傷、かなりの損傷に分類し、地震時の最大応答変位が降伏点変位のそれぞれ $1\delta y$ 、 $2\delta y$ 、 $3\delta y$ 、 $4\delta y$ に相当するとしている。

そこで、上記の状況および阪神高速道路公団「コンクリート橋脚被災度判定基準(案)」を参考にして、今回の損傷の尺度として、表-1および表-2に示すように損傷の程度に応じて、ランクA、B、Cを設定した。この場合、損傷ランクA、Bは、曲げ（せん断）に対して、Aは $3\delta y$ 程度以上（ $2\delta y$ 程度以上）、Bでは $1\delta y \sim 3\delta y$ 程度（ $1\delta y \sim$

表-1 曲げによる損傷程度の尺度(RC橋脚)

ランク	模式図	内容	最大応答変位	必要な対応策
X (崩壊、倒壊)		被りコンクリートは完全に剥落し、内部コンクリートは、かなり圧壊されている。主筋は全て座屈しており、破断しているものもある。破壊部の圧壊などにより、部材軸線のズレが生じている。	終局状態	
A (大きな損傷)		被りコンクリートの剥離は全面的であり、ひび割れは部材を貫通し、内部コンクリートはブロック状に細分化されている。主筋は座屈しているものもあり、フープ筋は一部破断しているものもある。残留変位が生じている。	$3\delta y$ 程度以下	撤去・再構築または補強
B (軽微な損傷～中程度の損傷)		ひび割れが広範囲で観察され、ひび割れ幅も大きい。被りコンクリートの剥離は部分的である。内部コンクリートはひび割れが生じているが、部材を貫通していない。主筋は、ほぼ直線性を保っている。残留変位は、ほとんど生じていない。	$1\delta y \sim 3\delta y$ 程度	補強
C (軽微な損傷以下)		外見的な損傷はなく、曲げひび割れが観察される場合があるが特に目立たない。	$1\delta y$ 程度以下	補修

表-2 せん断による損傷程度の尺度(RC橋脚)

ランク	模式図	内容	最大応答変位	必要な対応策
X (崩壊、倒壊)		斜めひび割れ面付近の内部コンクリートが圧壊されている。主筋はせん断面の上下でズレが生じ、破断しているものもある。部材軸線のズレが生じている。	終局状態	
A (大きな損傷)		はっきりした斜めひび割れが形成されており、コンクリートの剥離・剥落も生じている。主筋が見えているものもある。	$2\delta y$ 程度以下	撤去・再構築または補強
B (軽微な損傷～中程度の損傷)		斜めひび割れがほぼ形成されている。部材を貫通している。	$1\delta y \sim 2\delta y$ 程度	補強
C (軽微な損傷以下)		微細な斜めひび割れが不連続に観察されることがあが、部材を貫通はしていない。	$1\delta y$ 程度以下	補修

2δy程度)の最大応答変位を受けて大きなあるいはかなりの損傷をしているが、ほとんどの場合、適切な補強工法を選定することによって補強が可能で再利用できると考えられる損傷の程度に対応する。一方、Cは外見上の損傷は僅かで、補修にて供用可能な損傷の程度である。また、今回の被害において、主部材が終局状態を超え、構造系全体として崩壊・転倒したもの(補強が不可能で再利用に耐えなく、撤去・再構築しなければならないと思われるもの)をXとした。

3. 調査結果の分析と工学的評価

3.1 概説

大きな被害を受けた高速道路橋脚967基について実施した調査結果に基づいて、調査対象橋脚全体の約84%を占めるコンクリート製橋脚840基のうち、特殊橋脚を除いた808基について、橋脚の損傷に影響を及ぼしたと考えられる種々の要因について、損傷メカニズムとの関係を明らかにすることを目的として検討した。なお、損傷モードはせん断、曲げせん断および曲げの3モード、損傷位置は柱上部、柱中間部および柱基部の3部位とした。

調査をおこなった地域のコンクリート製橋脚は、構造形式別に分類すると図-1に示すように8種類に分類することができる。図-1に示した8種類の分類のうち、RC単柱が構成比率73%(内訳はRC角単柱27%およびRC丸単柱46%)を占めており、比較的広い地域に分布していた。そこで、このRC単柱を中心に検討を行った。

3.2 構造形式と損傷の関係

(1) 橋脚の構造形式の影響について

a) 橋脚の構造形式と損傷度の関係

コンクリート製橋脚の損傷度分布は、図-2に示すように、損傷がXおよびAを合計すると26%、BおよびCはそれぞれ18%および56%であった。

次に、それぞれの構造形式について損傷度分布を調べた。これは橋脚の損傷度が構造形式によって有意な差があるものと考えられ、それぞれの構造形式について種々の分析が必要と思われるからである。

図-1に示したように、RC角単柱およびRC丸単柱の損傷度XおよびAの百分率合計はそれぞれ20%および36%であり、損傷度Cはそれぞれ60%および40%であった。すなわち、RC角単柱では全体の約5分の1、またRC丸単柱では全体の約3分の1が損傷を受けていることがわかる。RCラーメン角柱およびRCラーメン丸柱は、損傷度Cの百分率がそれぞれ83%および96%と高く、損傷程度が低いことがわかる。RC特殊角単柱は、損傷度XおよびAの比率が高い。この損傷度が高い理由として、構造形式が原因であるだ

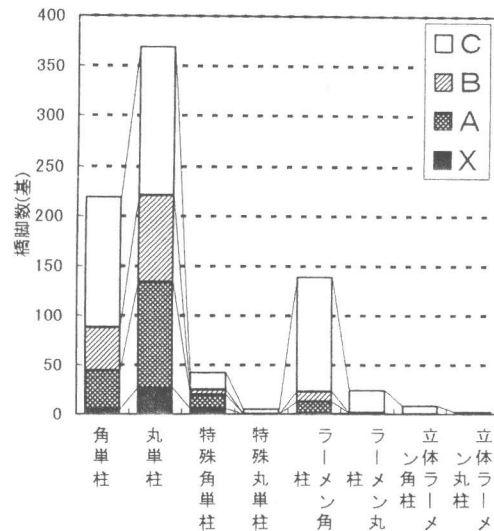


図-1 コンクリート製橋脚の構造形式による分類

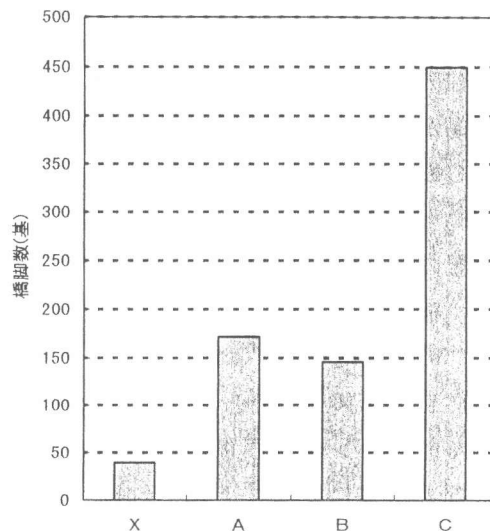


図-2 コンクリート製橋脚の損傷度分布

けでなく、その構造形式が多く設置されている地域的な立地条件も考えられる。

b) 損傷モードと損傷度との関係

RC角単柱およびRC丸単柱に対して各破壊モード別の損傷度を、それぞれ図-3および図-4に示す。RC角単柱は、図-3に示したようにせん断破壊モードの損傷度Xの損傷が約50%あり、損傷度Aを含めた比率は約75%に達する。これに対して、曲げ破壊はAおよびBの破壊モードの合計が54%であり、せん断破壊と比較して、比較的損傷は軽微な損傷度が多かった。RC丸単柱は、図-4に示したように、せん断破壊は約25%が損傷度Xで、損傷度Aを合計すると約65%に達した。また、曲げ破壊は損傷度XおよびAを合計すると約30%と、RC角単柱とほぼ同程度を示した。

c) 損傷モードと損傷位置との関係

図-3に示したRC角単柱の損傷度Aに対して、各損傷モードがどの位置に生じたかを図-5に示す。図よりいずれも柱基部に曲げ損傷モードの損傷が生じている割合が高いことがわかる。図-4に示したRC丸単柱の損傷度Aに対して、各損傷モードがどの位置に生じたかを図-6に示す。この場合も角単柱の場合と同様に、図よりいずれも柱基部に曲げ損傷が生じている割合が高いことがわかる。ただしRC丸単柱の場合、柱中間部の曲げせん断モードの損傷もかなり認められた。なお、柱基部とは地表面位置の柱部分である。

(2) 橋脚のせん断スパン比 (a/d : 橋軸方向) の影響について

a) せん断スパン比と損傷度との関係

せん断スパン比と損傷度との関係をRC角単柱および丸単柱に対してそれぞれ図-7および図-8に示した。ここで、せん断スパン比とは、橋脚の高さaを橋脚の橋軸直角方向の断面寸法dで除した値である。せん断スパン比は、RC角単柱およびRC丸単柱ともに、4前後の値が比較的多かった。RC角単柱(図-7)において、せん断スパン比3および4の場合の損傷度XおよびAの合計の比率はそれぞれ7%および17%であった。また、RC丸単柱(図-8)において、せん断スパン比3および

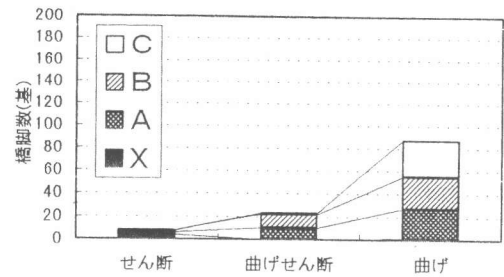


図-3 角単柱橋脚の損傷モード別の損傷度分布

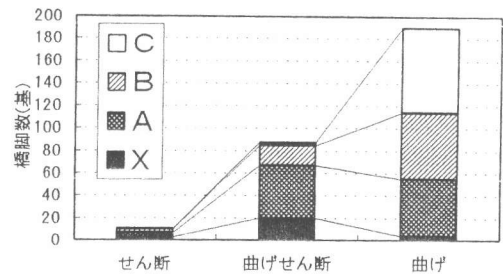


図-4 丸単柱橋脚の損傷モード別の損傷度分布

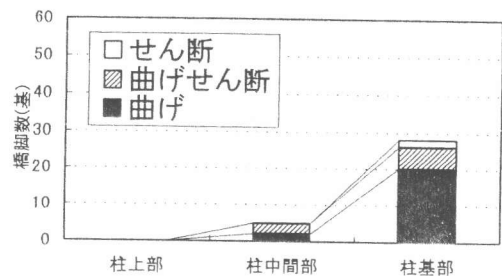


図-5 角単柱橋脚の損傷位置別の損傷モード分布 (損傷度A)

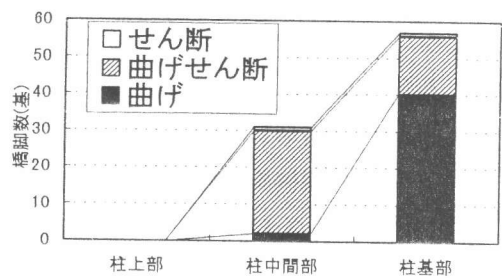


図-6 丸単柱橋脚の損傷位置別の損傷モード分布 (損傷度A)

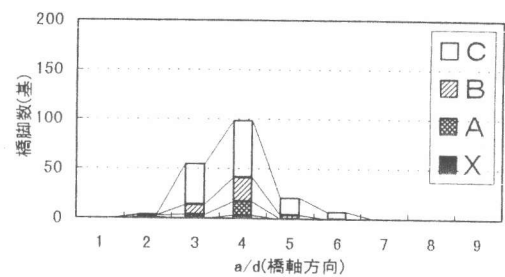


図-7 角単柱橋脚のa/d別の損傷度分布

4 の場合の損傷度 X および A の合計の比率はいずれも 40% 程度と比較的損傷比率が高かった。高架道路の設計高さおよび路下一般道路の建築限界等の制約でせん断スパン比 3 ~ 4 の RC 橋脚が多くなっているものと思われるが、そこに被害が集中した原因も今後解明していく必要がある。

b) せん断スパン比と損傷モードとの関係

せん断スパン比と損傷モードとの関係を RC 丸単柱に対して図-9 に示した。RC 丸単柱においてせん断スパン比 4 の場合曲げ損傷モードが約 70% で最も多く、次に曲げせん断およびせん断損傷モードの割合がそれぞれ 26% および 4% であった。せん断スパン比 1 においては 4 基すべて曲げせん断破壊を、またせん断スパン比 2 において 2 基すべて曲げ損傷モードを示した。RC 角単柱においても、丸単柱と同様の傾向を示した。

c) せん断スパン比と損傷位置との関係

せん断スパン比と損傷位置との関係を RC 角単柱および丸単柱に対してそれぞれ図-10 および図-11 に示した。RC 角単柱においてせん断スパン比の変化に関わらず、すべてのせん断スパン比でほとんどが柱基部で損傷が発生していた。これに対して RC 丸単柱においてせん断スパン比が小さくなるとそれに伴って柱基部で損傷の発生する割合が小さくなり、柱中間部で損傷が発生した割合が高くなる。せん断スパン比 1 において 4 基全部が柱中間部で損傷が発生していた。

(3) 基礎構造形式の影響について

a) 基礎構造形式について

基礎構造形式の構成は、RC 角単柱において、杭基礎が約 96%、ケーソンが約 4% でほとんどが杭基礎であった。また RC 丸単柱において、杭基礎が約 85%、直接基礎が約 15% であった。

b) 基礎構造形式の損傷モードと損傷度との関係

基礎構造形式と損傷度との関係を、RC 角単柱および丸単柱に対してそれぞれ図-12 および図-13 に示した。RC 角単柱および RC 丸単柱の損傷度 X および A の合計の比率はそれぞれ 21% および 32% であった。また RC 丸単柱の直接基礎において

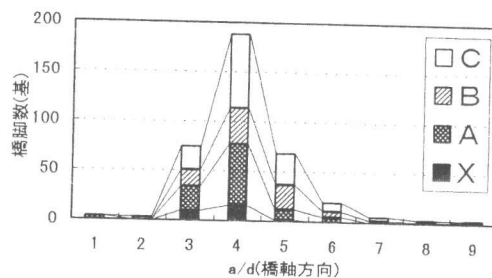


図-8 丸単柱橋脚の a/d 別の損傷度分布

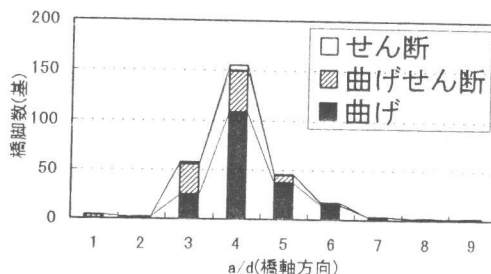


図-9 丸単柱橋脚の a/d 別の損傷モード分布

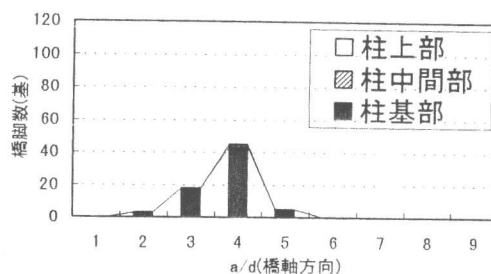


図-10 角単柱橋脚の a/d 別の損傷位置分布

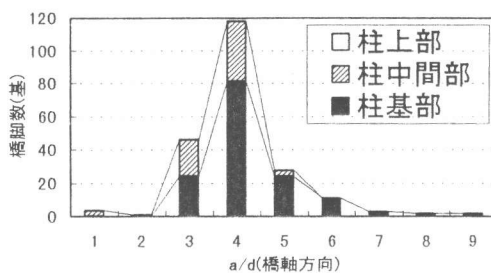


図-11 丸単柱橋脚の a/d 別の損傷位置分布

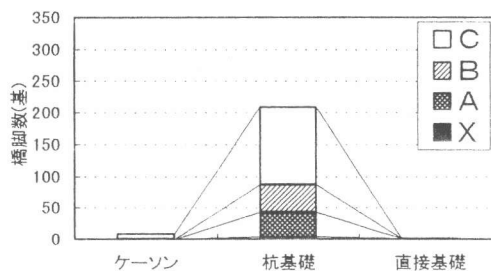


図-12 角単柱橋脚の杭構造別の損傷度分布

損傷度XおよびAの比率の合計は約62%であった。

c) 基礎構造ごとの損傷モードと損傷度との関係

RC丸単柱における杭基礎構造の場合の損傷モードと損傷度との関係を、図-14に示した。損傷モードは曲げが多い。曲げせん断およびせん断損傷モードと比較して、曲げ損傷モードは損傷度Cの比率が高い。RC角単柱においても、丸単柱と同様の傾向を示した。

また、直接基礎構造の場合の損傷モードと損傷度との関係をRC丸単柱に対して図-15に示した。

d) 損傷位置別と損傷モードとの関係

RC丸単柱における基礎構造と損傷位置の関係を図-16および図-17で比較した。杭基礎構造の場合、柱基部に損傷が多く、また直接基礎の場合、柱中間部に損傷が多く発生しており、RC橋脚の損傷・破壊メカニズムを検討していく上で基礎を含めた系での検討が必要になると思われる。

4. まとめ

現在までに得られた道路高架橋の被災調査結果の一次元的統計的解析を実施し、損傷・破壊に影響を与える要因を抽出することに努めた。さらに、上部工・支承部形式、固有値、耐力および基礎・地盤等の特性との関連についても今後検討し、損傷・破壊メカニズムのシミュレーションとも整合させていく必要があると考えられる。なお、本論文は「JCI近畿支部「土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会（委員長：藤井 學）」での活動を基に作成したことを付記する。

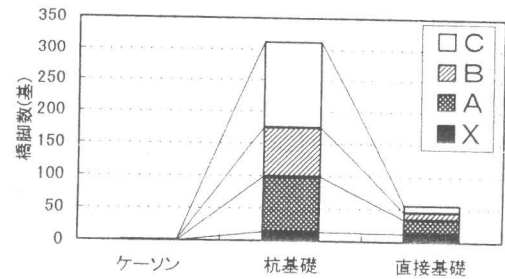


図-13 丸単柱橋脚の杭構造別の損傷度分布

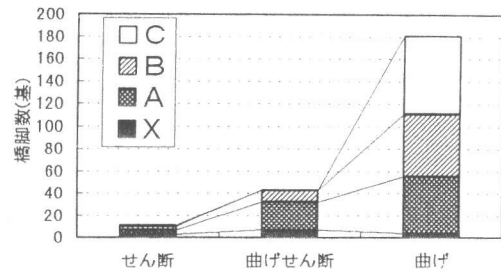


図-14 杭基礎丸単柱橋脚の損傷モード別の損傷度分布

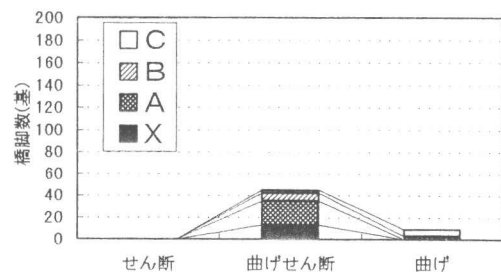


図-15 直接基礎丸単柱橋脚の損傷モード別の損傷度分布

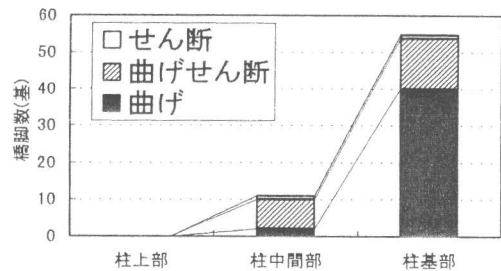


図-16 杭基礎丸単柱橋脚の損傷位置別の損傷モード分布 (損傷度A)

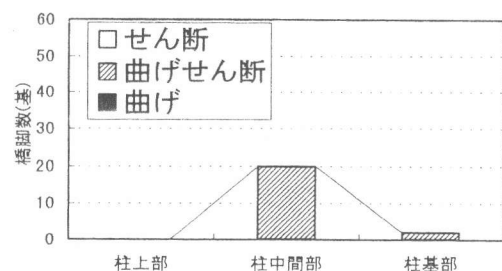


図-17 直接基礎丸単柱橋脚の位置別の損傷モード分布 (損傷度A)