

RC橋脚被災度の定量的評価

保安施設部付 林 秀 侃
工務部 設計課 幸 左 賢 二
工務部 工務第一課 安 田 扶 律

要 約

被災度を定量的に評価するために、復旧工事において損傷状況調査図を作成し、コンクリートおよび鉄筋の損傷状況を調査した。次に、各橋脚に対して道路橋示方書に基づく地震時保有水平耐力照査を実施し、損傷程度、損傷方向、段落し部などに対する耐震性能と損傷程度との関係を把握した。その結果、損傷程度や損傷方向とせん断耐力余裕度には一致した傾向が認められた。また、段落し有りの橋脚のうち損傷の大きな橋脚は、せん断耐力指標および終局曲げ耐力指標が小さいものが多いことが明らかとなった。

キーワード：耐震、損傷メカニズム、せん断耐力、じん性、終局曲げ耐力

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。RC橋脚の被害原因としては圧倒的に大きな地震力の作用が挙げられる。これを別にすれば、構造的な原因としては、余裕のなかった許容せん断応力度、不十分な主鉄筋段落し部の定着長、じん性の不足などが挙げられる¹⁾。これまで、被災地域内の多数の橋梁や建物などを対象とした被災度調査においては、外観調査で被災度を評価したものが一般的であるうえ、個別の構造物に対して詳細な数値解析を実施したものは多いものの、高架橋などの多数の同一構造系に対して統一的な手法で保有耐力照査を実施した例はきわめて少ない。そこで、著者らは、被災度を詳細にかつ定量的に評価するとともに、各橋脚に対して道路橋示方書に基づく地震時保有水平耐力照査を実施し、耐力と被災度との関係について定量的な検討を実施した²⁾。本稿は、これらの一連の検

討のうち、以下の項目について述べるものである。

- ①橋軸直角方向に対する耐震性能と損傷程度との関係
- ②橋軸方向に対する耐震性能と損傷程度との関係
- ③段落し部に対する耐震性能と損傷程度との関係

1. 評価手法

1-1 詳細被災度調査

RC橋脚の損傷は震災直後に実施した外観調査および写真判定に基づき、被災度を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)³⁾による構造物判定手法に基づいている。対象のRC橋脚943基のうち、その15%が比較的損傷の大きなAs、Aランク、35%が比較的軽微な損傷のB、Cランクであった。橋脚の復旧は、フーチング以下は健全であったことからすべて既存のものを再利用し、外観調査結果に基づく橋脚の被災度に応じて、As、Aランクのものは既存橋脚を撤去して再構築し、B、C、Dランクのものは既存橋脚を補修・補強している。補

修・補強工事に伴い外観調査判定がB, C, Dランクの構造物の損傷状況を詳細に調査し、その結果に基づき損傷部位の取替え、補修を実施している。具体的には、図-1に示すような損傷状況調査図を作成し、コンクリートおよび鉄筋の損傷状況を調査した。コンクリートについてはかぶりコンクリートのはく離範囲、ひび割れの大きさや密度を測定した。また、鉄筋については定規などを用いて各軸鉄筋の座屈範囲、はらみ出し量を測定した他、外周の軸鉄筋の取替え率も算出した。被災度の分類は、3号神戸線武庫川ランプから月見山ランプ間(27.7km)の本線部全RC橋脚を対象とした。これらの調査結果を基に以下に示すような分析を実施した。

(1) 詳細被災度判定

外観調査および詳細被災度調査を基に、以下に示す分類で被災度をより詳細に分類した。なお、ランク判定においては、地中部の損傷状況を加味したもとしているが、As, Aランクの橋脚については緊急で鋼板巻立てなどの応急対策を実施したこと、および危険度が大きく被災度調査は困難であった。このため、外観調査で判定したランクの変更は行わず、B, C, Dランクをより詳細に区分したものとなっている。すなわち、外周の軸鉄筋の取替え率によりBランクを3段階に、また、コンクリートの被災度を目安にC₁, C₂, Dの3段階に区分した。

- As: 倒壊に近いか倒壊した橋脚
- A: 柱全面にわたって鉄筋の座屈損傷が著しいもの
- B₁: ほぼ柱全周にわたって軸柱鉄筋のはらみ出しが認められ鉄筋を取り替えたもの
- B₂: 柱軸鉄筋の取替えが全鉄筋の1/2程度のもの
- B₃: 柱軸鉄筋の取替えが全鉄筋の1/4程度のもの
- C₁: 柱軸鉄筋が一部露出しているが、柱軸鉄筋のはらみ出しのないもの
- C₂: 柱軸鉄筋の露出はないが、ひび割れの大きなもの
- D: ひび割れの小さいもの、あるいは損傷のないもの

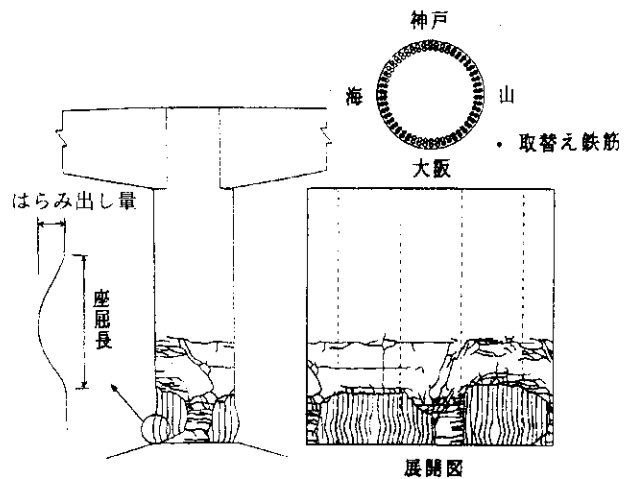


図-1 損傷状況調査図

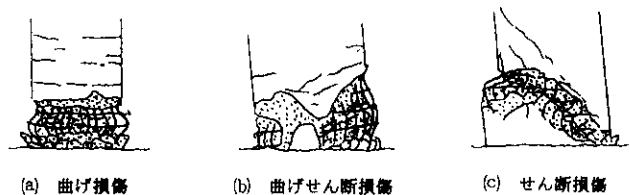


図-2 損傷模式図

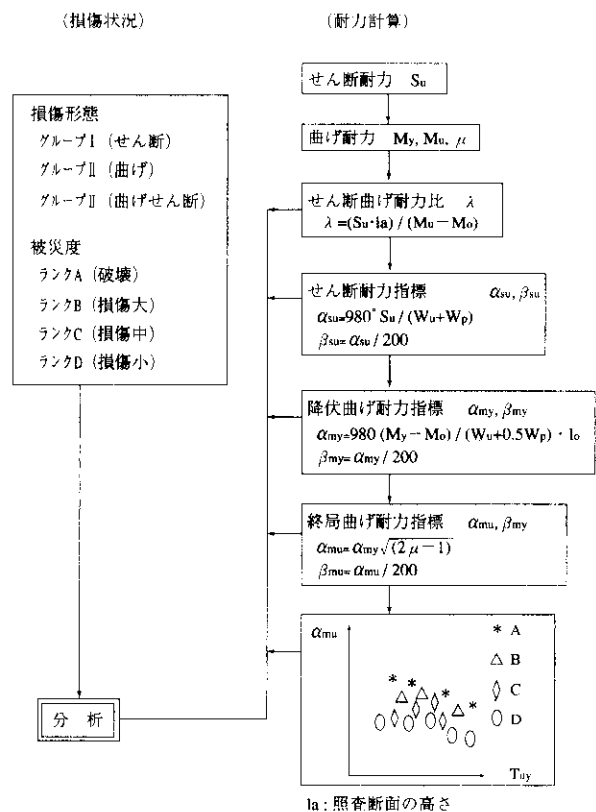


図-3 耐力照査フロー

(2) 損傷形態の分類

外観調査および詳細被災度調査に基づき、せん断、曲げ、曲げせん断、の3形態に分類した。損傷の進行に従って損傷形態が移行することや、損傷が大きく形態分類が困難な橋脚も多く、明確に3形態に分類することは困難であったが、おおむね以下の状況と図-2の模式図を目安に分類している。

せん断：被災度が低い橋脚では、主たるひび割れ角度が水平に対して45度程度であり、被災度の高い橋脚では、損傷面の角度が水平に対して45度程度である。コアコンクリートの損傷面も比較的明確に認められ、場合によっては損傷面の上下部材間に大きなずれが認められる。

曲げ：被災度が低い橋脚では主たるひび割れ角度が水平であり、被災度の高い橋脚では軸鉄筋が外側に座屈している。

曲げせん断：複合的な損傷状況で判定が難しいが、せん断と曲げの中間的な損傷状況のものを曲げせん断と判定する。したがって、軸鉄筋が全面外側に座屈していても座屈範囲が水平に対して斜めであったり、対称でないものは曲げせん断に分類している。

1-2 解析手法

神戸線の本線RC単柱橋脚を対象とし、平成2年道路橋示方書による地震時保有水平耐力照査に基づくRC単柱橋脚の耐力と損傷状況との関連性などを評価した。損傷分析は図-3の耐力照査フローに基づき実施する。橋脚のせん断耐力(S_u)の算定には道路橋示方書式を用いている。せん断耐力指標(a_{su})は、部材のせん断耐力を構造物重量で除したもので、せん断耐力相当の加速度(gal)を示す。せん断耐力余裕度係数(β_{su})はせん断耐力指標を昭和39年鋼道路橋設計示方書(旧道路橋示方書)に基づく設計加速度(200gal)で除したもので、せん断耐力の余裕度を示している。曲げ耐力、じん性率は復旧仕様^③により算出している。復旧仕様では、コンクリートの応力-ひずみ曲線において、帯鉄筋による拘束効果を考慮し、拘束鉄筋により曲線形状や終局ひずみに変化する

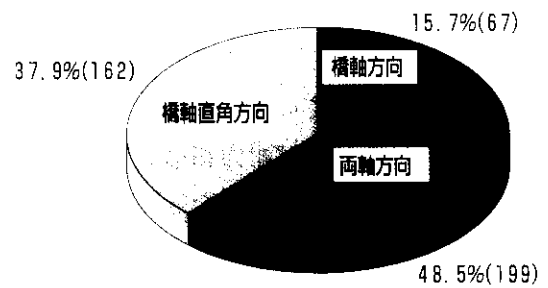


図-4 損傷方向

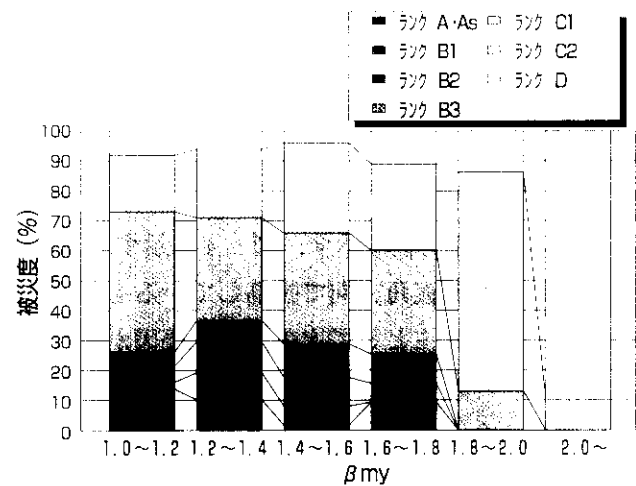


図-5 降伏曲げ耐力余裕度係数分布図

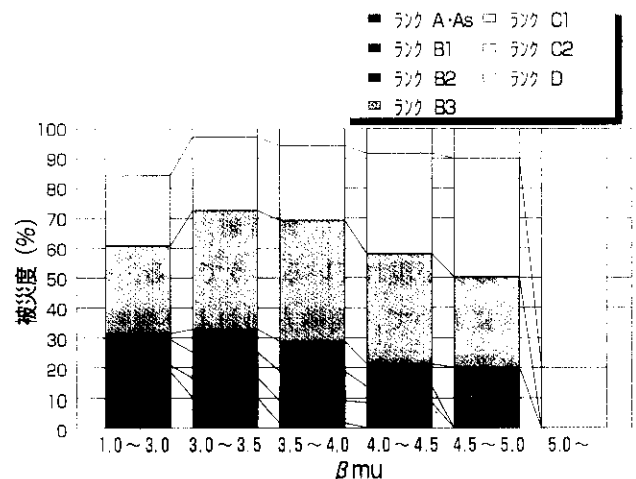


図-6 終局曲げ耐力余裕度係数分布図

る。降伏曲げ耐力指標 (a_{my}) は物理的には一定軸力のもとで最外縁軸鉄筋が降伏応力 ($\sigma_{sy} = 3000\text{kgf/cm}^2$) に達する曲げモーメントを生じさせる地震加速度を示している。降伏曲げ耐力余裕度係数 (β_{my}) は降伏曲げ耐力指標を旧道路橋示方書に基づく設計加速度で除したもので、曲げ降伏耐力の余裕度を示している。また終局曲げ耐力指標 (a_{mu}) は物理的にはエネルギー一定則を仮定することにより、構造物が弾性振動すると仮定した場合の加速度応答値を示している。終局曲げ耐力余裕度係数 (β_{mu}) は、終局曲げ耐力指標を旧道路橋示方書に基づく設計加速度で除したもので、終局曲げ耐力の余裕度を示している。

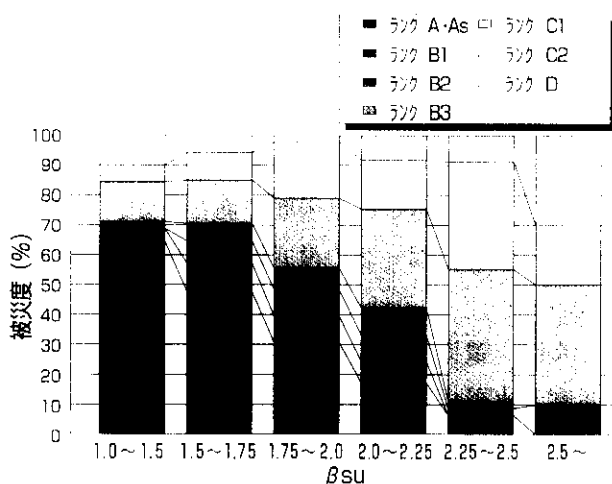


図-7 せん断耐力余裕度係数分布図 (全損傷対象)

2. 損傷方向に関する検討

2-1 損傷方向

図-4に損傷方向を示す。図-4に示すように、全体的には橋軸直角方向で損傷しているものが多いが、これには主として次のような要因が考えられる。

①橋軸直角方向の保有水平耐力が橋軸方向に比べて小さい。

②神戸線は主として東西方向に位置する路線であり、地震力は南北方向の方が東西方向に比べて大きく作用した。

③橋軸方向には単径間形式であっても橋脚は連成系として抵抗するため、橋軸直角方向に比べて抵抗が大きいことなどが考えられる。

これらの要因を比較するため、橋軸方向が南北に位置する他の高架橋と損傷方向を比較した。損傷方向には差異が認められ、神戸線は明らかに橋軸直角方向の被害が多く、保有耐力の相違あるいは地震動の影響が現れているようである。そこで、本章2-3において、橋軸方向および橋軸直角方向の保有水平耐力の対比を実施した。

また、損傷の程度と方向を比較すると、損傷が大きくなるにつれて橋軸直角および橋軸の向軸方向の損傷が多くなっている。これは、地震動の方向が向軸方向であったこと、および軸鉄筋が座屈

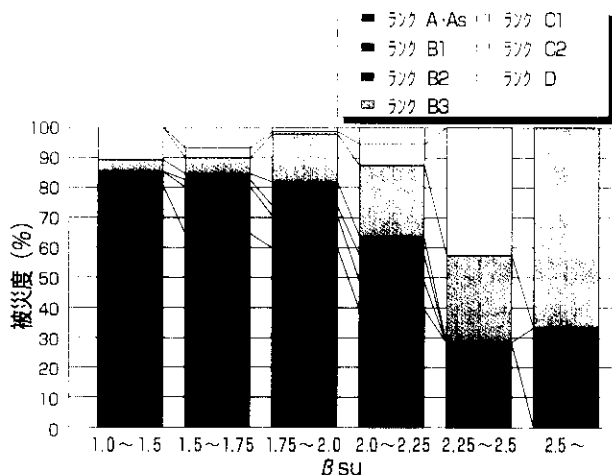


図-8 せん断耐力余裕度係数分布図 (曲げせん断およびせん断損傷を対象)

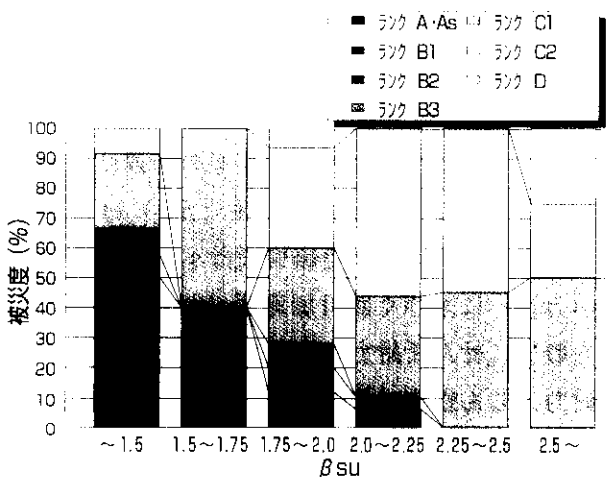


図-9 せん断耐力余裕度係数分布図 (橋脚方向)

するにつれて、荷重を支えることができず、側面鉄筋方向に損傷が拡がるためと考えられる。

2-2 橋軸直角方向保有耐力照査

曲げ損傷タイプにおける降伏曲げ耐力余裕度係数分布を図-5に示す。降伏曲げ耐力余裕度係数が大きくなるにつれて損傷程度がやや小さくなる傾向が読みとれ、降伏曲げ耐力余裕度が損傷に影響を与えていることがうかがえる。曲げ降伏余裕度係数はすべて1を超えており、当時の設計値を満足していることがわかる。また、全橋脚の7割程度は1.25を超えており、現行基準の設計水平震度0.25に対しても満足している。図-6に曲げ損傷タイプにおける終局曲げ耐力余裕度係数分布を示す。図-5に比べると、終局曲げ耐力余裕度係数が大きくなるにつれて、As, A, B₁などの大きな損傷が少なくなる傾向が明確に読み取れる。これに対してCランク損傷はすべての範囲にわたっている。これはじん性の向上が曲げ降伏後の終局変位近傍において有効となることから、じん性の高い橋脚ではA, Bランクの割合が小さくなっている。これに対してC, Dランク損傷分布に有意差が認められないのは、軽微な損傷の範囲ではじん性の向上が影響しないためと考えられる。

図-7にすべての損傷タイプを、図-8に曲げせん断およびせん断損傷を対象とした損傷レベルとせん断余裕度係数の関係を示す。せん断耐力余裕度が大きくなるにつれて、損傷が小さくなる傾向が読みとれる。すべての橋脚が1.0を超えており、旧道路橋示方書（昭和39年度）の設計加速度を満足していることがわかる。全橋脚の9割程度は1.25を超えており道路橋示方書震度法の設計加速度を満足している。また、せん断余裕度は、1.0から2.5程度の範囲にわたって分布している。

以上のように全損傷形態を対象とした解析においても、被災度とせん断余裕度とは明確な相関が認められた。

2-3 橋軸方向保有耐力照査

主たる方向が橋軸方向と判定された67基について、その橋軸方向のせん断余裕度と被災度の関係を求めた。図-9に結果を示す。全体的には橋軸

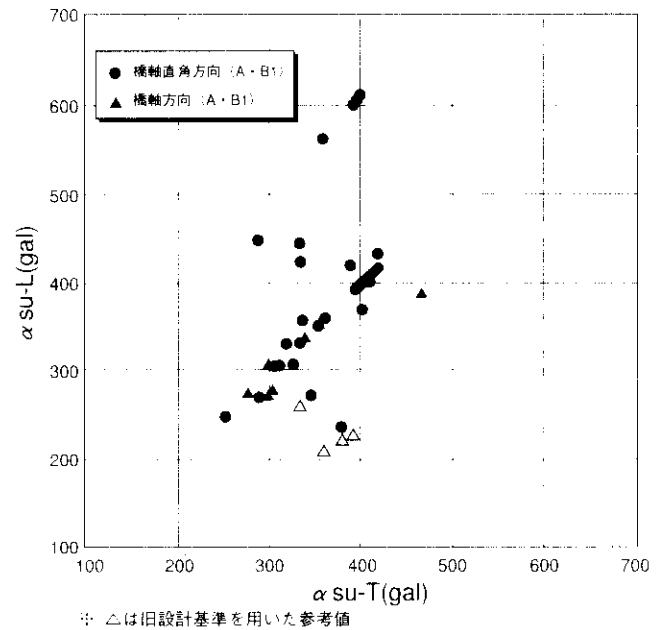


図-10 橋軸および橋軸直角方向せん断耐力分布

表-1 段落しの有無と損傷位置

段落し	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		21	84	3	108
	基部		39	3	0	42
有	合計		60	87	3	150
段落し無	中間		0	34	14	48
	基部		158	69	3	230
段落し無	合計		158	103	17	278

・損傷無し15基を除く

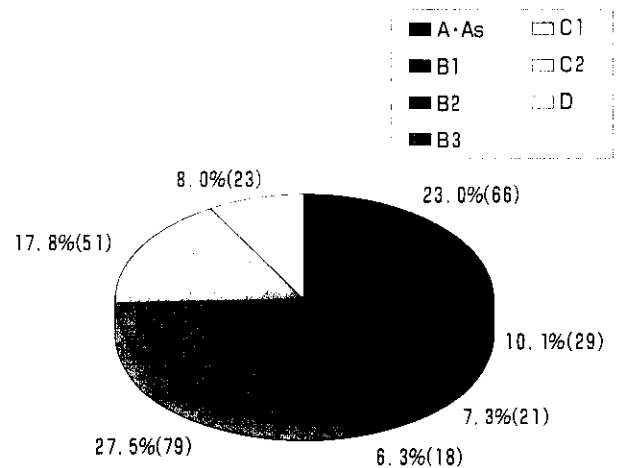


図-11 段落し無しの被災度区分

直角方向と同様に，せん断余裕度と被災度にはかなり明確な相関が認められる．特に，せん断耐力余裕度が2.25（450gal）以上であれば，軽微な損傷に留まっていることが分かる．また，同一のせん断耐力余裕度であれば，橋軸直角方向の方が損傷度が高くなっている．たとえば， β_{su} が1.0～1.5についてAs・Aランクの割合を比較すると，橋軸直角方向が70%程度，橋軸方向では50%となっている．

2-4 両方向せん断耐力の比較

橋脚のせん断耐力と損傷方向の関係について考察を加える．図-10は横軸を直角方向のせん断耐力の計算値，縦軸を橋軸方向のせん断耐力の計算値として被災度の高い橋脚（A・B1）の損傷方向をプロットしたものである．橋軸直角方向のせん断耐力が小さな橋脚はすべて直角方向に損傷している．しかしながら，橋軸方向のせん断耐力が小さな橋脚では，本来橋軸方向に損傷を生じるはずであるが，橋軸方向と橋軸直角方向の損傷が認められる．これらのことから，前述2-1の損傷方向に差異を生じた要因としては，地震動の方向の影響が大きいと考えられる．

3. 段落し部に対する検討

3-1 損傷位置と損傷形態

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柱軸方向鉄筋の段落し位置を確認し，段落しの有無に分けて表-1に損傷位置別の基数を示した．段落しを有する橋脚の損傷位置が中間部にあるものはすべて段落し部の損傷であった．表-1より，段落しを有しない橋脚では約80%が基部で損傷しており，そのほとんどは曲げあるいは曲げせん断の損傷形態を示している．これに対し，段落し有りの橋脚では70%近くが中間部の段落し部で損傷しており，損傷形態もせん断あるいは曲げせん断が多数を占めている．これは，段落し無しの橋脚では基部の曲げ損傷が先行するのに対し，段落し有りでは段落し部が曲げおよびせん断の弱点になっているた

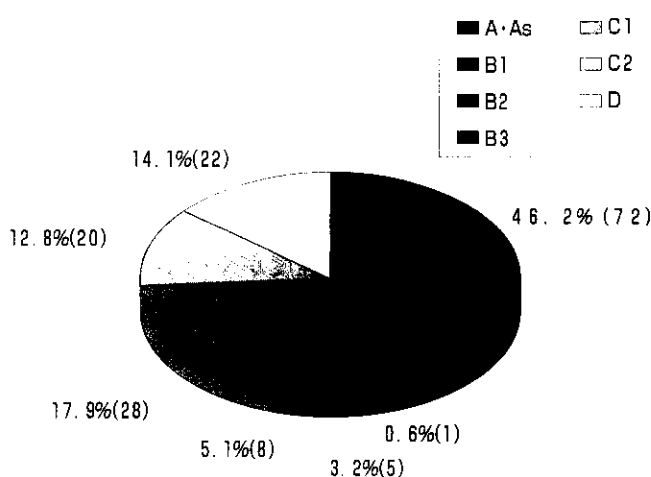


図-12 段落し有りの被災度区分

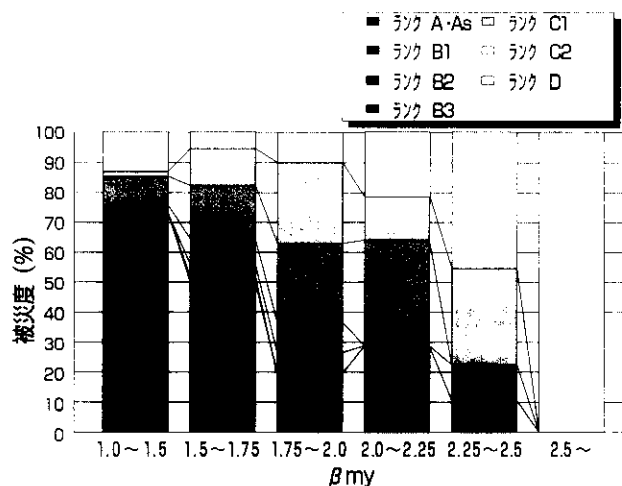


図-13 せん断耐力余裕度分布

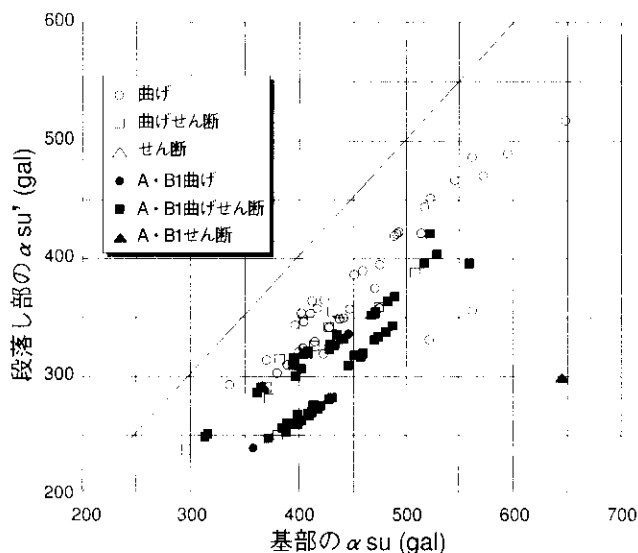


図-14 段落し部と基部のせん断耐力の関係

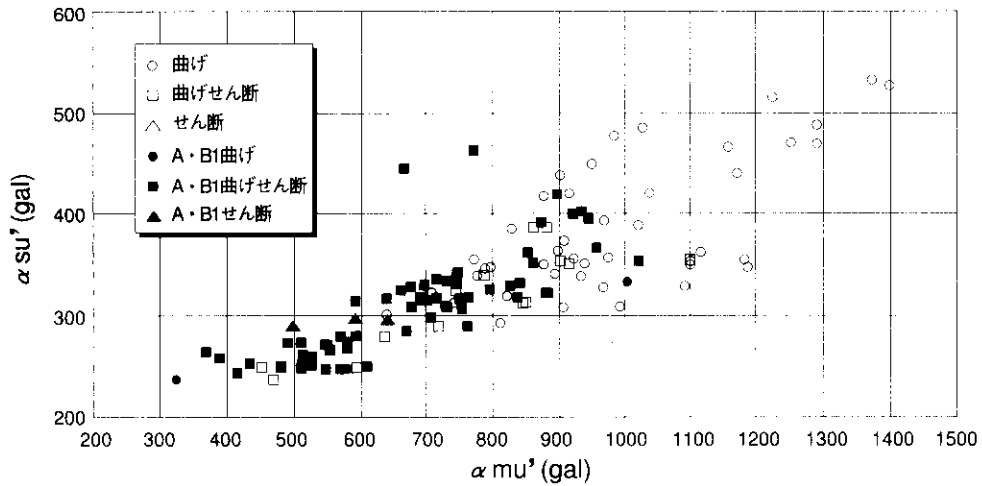


図-15 段落し部の終局曲げ耐力指標とせん断耐力指標の関係

め、中間部の損傷に分類される橋脚が多くなっているためと考えられる。一方、段落し無しの橋脚でも中間部での損傷に分類される橋脚が認められるが、これらはせん断や曲げせん断タイプであり、柱高さ方向でその大きさがほとんど変わらないせん断力の影響を受けた結果であり、曲げのように必ずしも基部で損傷しない場合があることを示している。

3-2 段落し部と被災度

図-11と図-12にそれぞれ段落し無しと有りの損傷分布を示す。段落し無しの場合では約1/4が、段落し有りの場合では約1/2がAsあるいはAランクに分類されており、中間部における曲げせん断あるいはせん断タイプの損傷は、基部の曲げ損傷に比べ損傷度が高く、撤去・再構築になった橋脚の割合が高いことがわかる。

3-3 保有耐力と被災度

すべての段落し有り判定された橋脚を対象としたせん断耐力余裕度分布を図-13に示す。図からわかるとおり、損傷度とせん断耐力余裕度にはかなり明確な相関が認められる。図-14に段落し部のせん断耐力と基部のせん断耐力との相関図を示す。前述のように段落し部のせん断耐力の小さいものに損傷の大きなものが多いが、同じようなせん断耐力指標であっても、基部のせん断耐力に比べて、段落し部のせん断耐力の小さいもの ($\alpha_{su}' / \alpha_{su}$ の小さいもの) に、損傷が多く認められる。これは、基部に比べて段落し部のせん断耐力

が小さいことにより、より中間部の脆弱な損傷が生じやすくなりやすいことを示している。次に、図-15は段落し部の曲げ終局耐力指標 (α_{mu}') とせん断耐力指標 (α_{su}') との関係を示す。損傷の大きなものはせん断耐力指標が小さくなるとともに、終局曲げ耐力指標も小さくなっている。これは、段落しにより外側軸方向鉄筋がなくなるとともに、外側帯鉄筋もなくなる。このため、せん断耐力およびじん性率が減少すると考えられる。

4. まとめ

阪神高速道路3号神戸線のRC橋脚を対象とし、損傷程度を地震時保有水平耐力照査により定量的に評価し、以下のような結果が得られた。

(1) 損傷程度とせん断耐力指標には相関が認められた。

(2) 損傷方向とせん断耐力余裕度には一致した傾向が認められた。しかしながら、橋軸方向よりも余裕度が大きいにも係わらず、橋軸直角方向に損傷したものが認められた。これは地震作用力に差異があったためと考えられる。

(3) 軸鉄筋の段落しを有する橋脚では、中間部における曲げせん断あるいはせん断タイプの損傷が多く、また約50%がAsおよびAランクに分類されており、段落し部が構造上の弱点となっていることが明らかとなった。

(4) 段落し部で損傷の大きな橋脚は、せん断耐

力指標および終局曲げ耐力指標が小さいものが多かった。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会：コンクリート工学，pp.178 - 187.1996.3.
- 2) 林・丸居・幸左・安田・中田：RC橋脚損傷度の評価解析，土木学会阪神淡路大震災第2回耐震シンポジウム，1997.1.
- 3) 日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編），1988.2.
- 4) 日本道路協会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様の準用に関する参考資料（案），1995.6.