

R C 橋脚損傷度の評価解析

阪神高速道路公団 林秀侃* 丸居保*
阪神高速道路公団 幸左賢二* 安田扶律**
八千代エン지니어リング 中田恒和***

地震により被災した阪神高速道路3号神戸線RC橋脚の損傷度を定量的に評価するために、外観調査、コンクリート損傷調査、鉄筋損傷度調査などの結果や地震時保有水平耐力照査、せん断耐力解析などの手法を用いて検討した。その結果、実橋のBランク損傷橋脚の平均的な鉄筋取替え率(47%)、はらみ出し量(3.4D)は、実験により $5\delta_y$ まで載荷した試験体の損傷程度(鉄筋取替え率:70%, はらみ出し量:2.5D)にほぼ対応していた。

また、実橋の曲げせん断耐力比と損傷タイプには相関が認められること、特に損傷程度とせん断余裕度係数にはかなり明確な相関が認められた。

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とし部の定着長、じん性の不足などが挙げられる¹⁾。ここでは、被害の大きかった3号神戸線RC橋脚について、地震時保有水平耐力照査およびせん断耐力解析などにより、その耐震性能と損傷程度について検討を加えたので、その概要について報告する。

2. 神戸線構造物の概要

神戸線の兵庫県域のうち武庫川-深江間(27.7km)の大部分の橋脚は昭和39年(1964年)制定の鋼道路橋設計示方書に基づいて1960年代後半に設計されている。国道43号および2号上を占有することからRC単柱形式が比較的多く、設計地盤種別は砂層または砂礫層地盤から構成されるII種地盤が多い。基礎形式は全体の84%が杭基礎であり、12%が直接基礎である。

キーワード：曲げ，せん断，耐震

* 復旧建設部，078-331-9801

** 工務部，06-252-8121

***大阪支店，06-945-9214

設計水平震度は0.2が採用されている。また、当時のコンクリート許容せん断応力度は 7kgf/cm^2 程度と昭和55年以降の道路橋示方書(以下道示という)の 4.2kgf/cm^2 に比べて大きく、一般にコンクリート断面のみで十分なせん断耐力を有していると考えられていた。このため、帯鉄筋は最小鉄筋量の規定に基づきD16が15~30cmピッチ程度に配筋されていた。

損傷は震災直後に実施した外観調査および写真判読に基づき、損傷度をA_s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)²⁾による構造物別被災度の判定手法に基づいている。分類結果の一覧を表-1に示す。対象RC橋脚943基のうち、その15%が比較的損傷の大きなA_s、Aランク、35%が比較的軽微な損傷のB、C、Dランクであった³⁾。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損傷レベルに応じて、A_s、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。

3. 評価手法

1) 詳細損傷度調査

補修・補強工事に伴い、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剥離範囲、ひびわれの大きさや密度を測定した。また、鉄筋については軸鉄筋の座屈範囲、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。損傷度の分類は、阪神高速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。

a) 詳細損傷度ランク判定

外観調査および詳細損傷度調査を基に、以下に示す分類で損傷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のであるとしているが、As, Aランクの橋脚については緊急で鋼板巻き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損傷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、コンクリートの損傷度を目安に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: 柱全面に亘って鉄筋の座屈損傷が著しい
- B₁: ほぼ柱全周に亘って軸柱鉄筋のはらみ出しが認められ鉄筋を取替えたもの
- 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、ひびわれの大きなもの
- D: ひびわれの小さいものあるいは損傷のないもの

b) 損傷形態の分類

外観調査および詳細損傷度調査に基づき、せん断、曲げせん断、曲げの3形態に分類した。また、分類にあたっては次の項目に着目して区分した。

- ・ 損傷部を境に上下部材のずれ量
- ・ 損傷ひびわれなどの方向性(水平・斜め)
- ・ 損傷部の位置(柱基部・中間部・段落とし部)
- ・ 損傷範囲

表-1: 外観調査による橋脚損傷分類

	As	A	B	C	D	合計
鋼製橋脚	3	8	12	112	28	163
R C 橋脚	64	78	102	225	474	943
合計	67	86	114	337	502	1106

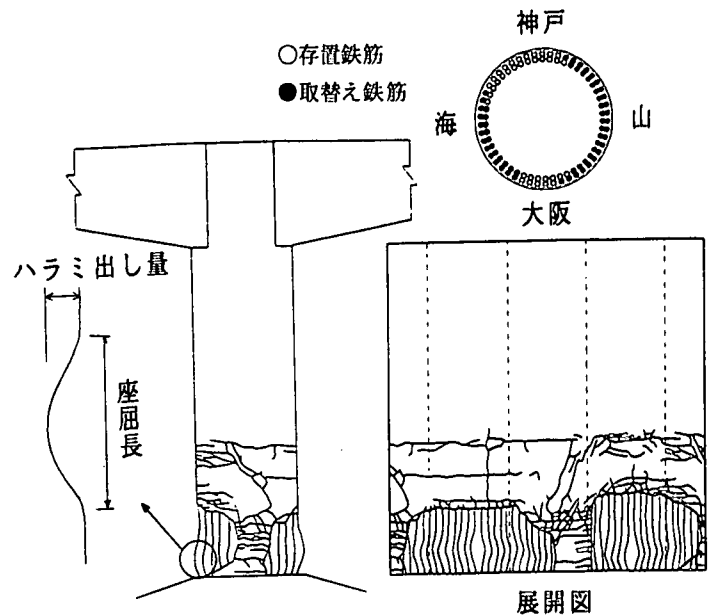


図-1: 損傷状況調査図

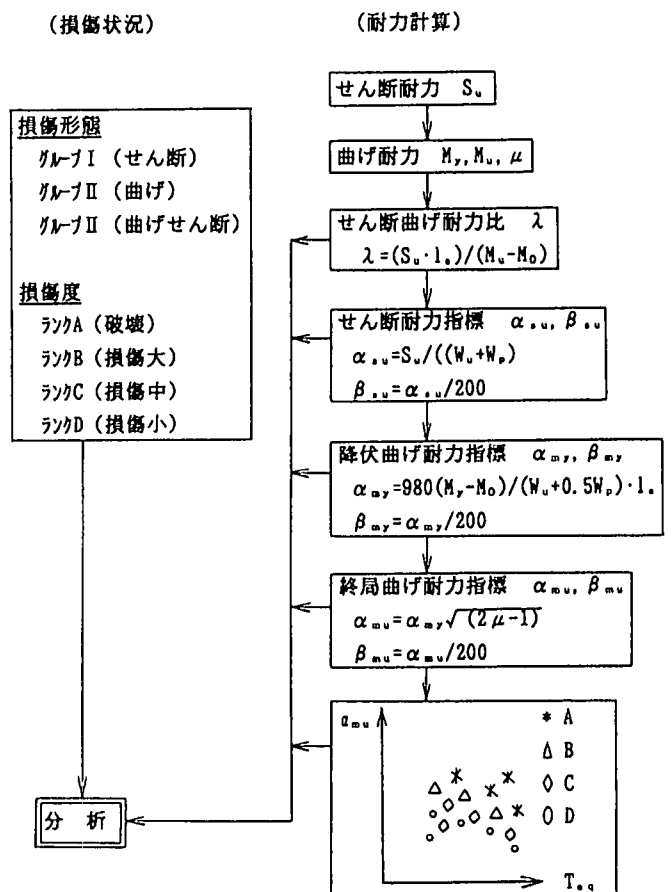


図-2: 耐力照査フロー図

- ・鉄筋の損傷状況
- ・コンクリートの損傷状況

2) 解析手法

神戸線の本線RC単柱橋脚を対象とし、現行道示(平成2年度版)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の関連性などを評価した^{4), 5)}。

損傷分析は図-2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)の算定には現行道示を基本とし、コンクリート標準示方書式による比較も実施している。

せん断耐力指標(α_{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。せん断余裕度係数(β_{su})はせん断耐力指標を旧道示(昭和39年度版)に基づく設計加速度で除したもので、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により算出している。降伏曲げ耐力指標(α_{mv})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。曲げ降伏余裕度係数(β_{mv})は降伏曲げ耐力指標を旧道示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(α_{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最大応答値を示している。終局曲げ耐力余裕度係数(β_{mu})は、終局曲げ耐力の余裕度を示している。

3. 損傷度評価

1) 損傷形態の分類

対象橋脚817基のうち、RC単柱橋脚は67.7%(553基)を占めている。その断面形状は円形が70.7%(391基)、小判型を含めた矩形が29.3%(162基)となっている。図-3にRC橋脚の損傷形態、図-4に損傷度ランクの高い(A_s, A, B_1, B_2, B_3)橋脚のみを対象としたRC橋脚の損傷形態を示す。図-3に示すように、全損傷においては曲げ損傷が全体の54.0%を占め、曲げせん断が41.4%、明らかにせん断とみなせるものは4.7%であった。これに対して損傷度の高い場合は、せん断および曲げせん断の比率が増加し、

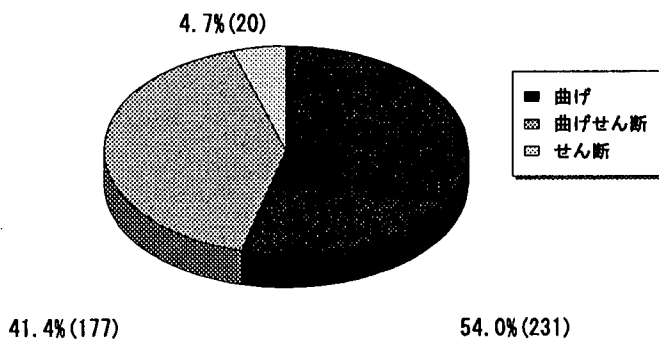


図-3: RC単柱橋脚の損傷形態

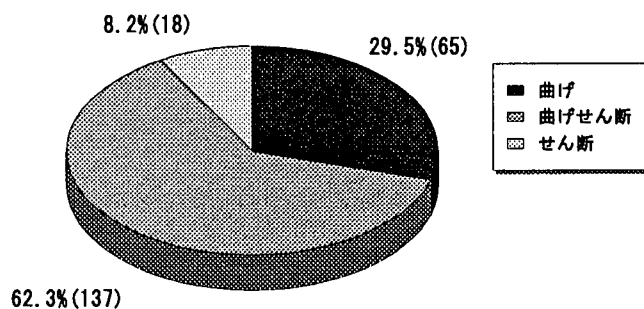


図-4: RC単柱橋脚の損傷形態(A_s, A, B ランク)

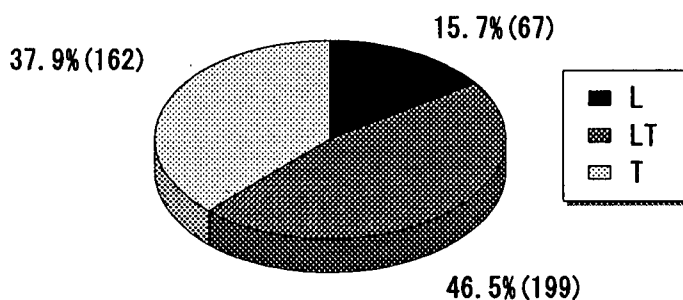


図-5: 損傷方向分類図

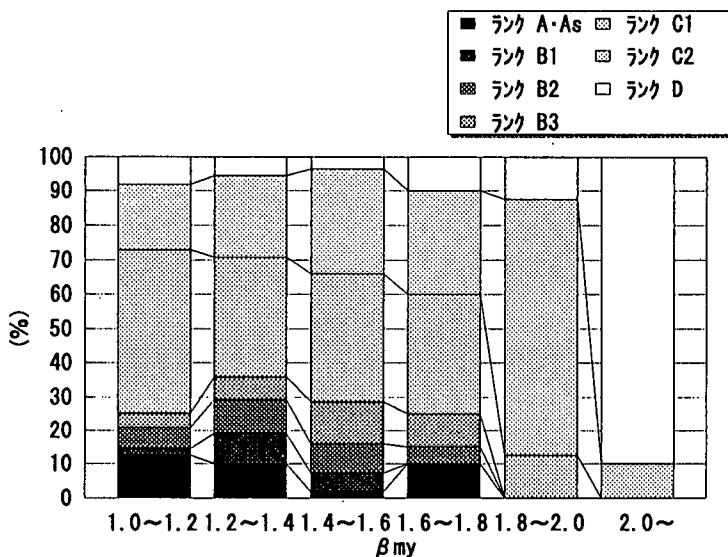


図-6: 曲げ損傷タイプの曲げ降伏余裕度分布図

曲げの比率が大幅に減少する。曲げの損傷形態はAsおよびA:7.8%, B:20.4%, C:61.9%, D:10.0%と広範囲に亘って分布している。これは曲げ損傷の場合塑性化後もエネルギー吸収を発揮し、急激な破壊に至ることがないこと、および損傷の大きな曲げせん断へ移行する以前の曲げ降伏程度の比較的軽微な損傷が多いためと考えられる。これに対してせん断および曲げ・せん断損傷橋脚ではAsおよびA:61.4%, B 17.3%, C:17.8%, D:3.6% と損傷度の高いAおよびBランクが多数を占めている。これはせん断損傷タイプでは急激に損傷が進行するために、比較的軽微な損傷が少ないためと考えられる。

2) 損傷形態と損傷方向

図-5に損傷形態と損傷方向を示す。図-5に示すように、全体的には橋軸直角方向(T)で損傷しているものが多い。これは、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ため、南北(橋軸直角)方向の被害が大きかったこと、あるいは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。

これらの要素を比較するため、南北方向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、地震動の影響が現れているようである。また、損傷が大きくなるにつれて橋軸直角および橋軸の両軸方向の損傷が多くなっている。これは、鉄筋損傷が大きくなるにつれて、側面鉄筋方向に損傷が広がるためと考えられる。

4. 保有水平耐力評価

1) 曲げ耐力係数と損傷度

曲げ損傷タイプと曲げ降伏余裕度係数の関係を図-6に示す。曲げ降伏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、曲げ余裕度が損傷に影響を与えていることが窺える。曲げ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。

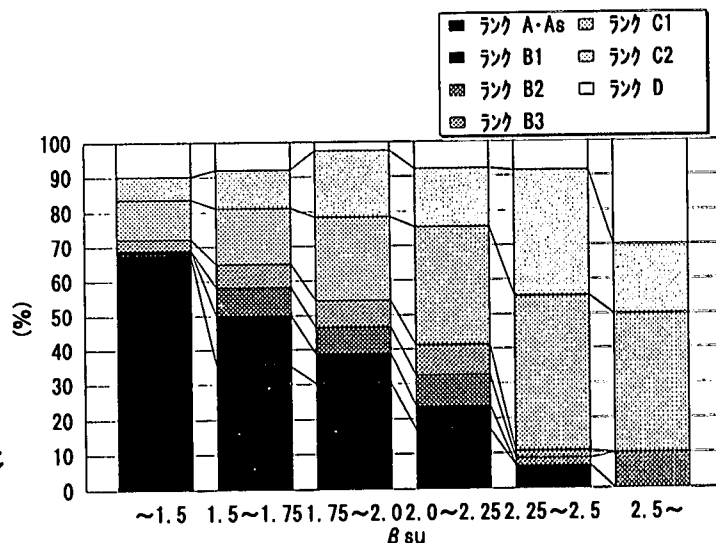


図-7: せん断余裕係数分布図

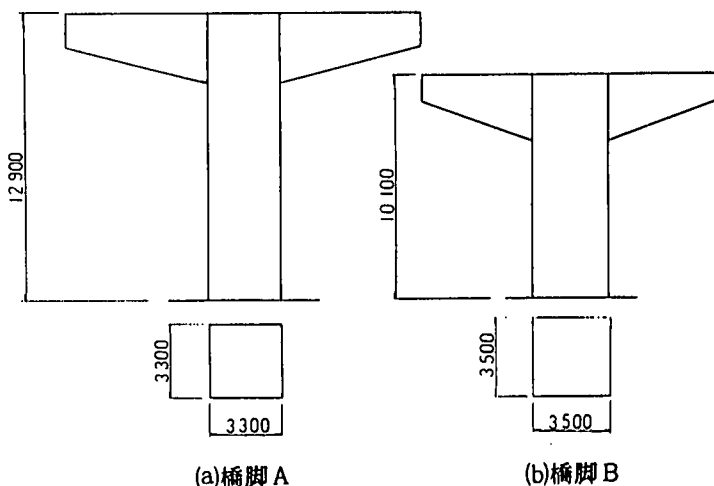


図-8: 橋脚模式図

表-2: 照査結果

		橋脚 A	橋脚 B	許容値
損傷度		Aランク	C ₂ ランク	
配筋状況	軸鉄筋	D32*2段	D32*1段	
	帯鉄筋	D16@300*1段	D16@250*3段	
せん断スパン l _s (m)		14.9	13.9	
重量	上部工 W _u (t)	1228	1356	
	橋脚 W _p (t)	536	432	
元設計 (k _s 0.20)	σ _s (kg/d)	8.7	9.3	13.5
	σ _c (kg/d)	15.25	21.27	27.00
	τ _c (kg/d)	3.4	3.0	6.3
現行基準 (k _s 0.25)	σ _s (kg/d)	10.6	11.7	13.5
	σ _c (kg/d)	23.81	35.42	27.00
	τ _c (kg/d)	4.2	3.8	6.3
平成2年 道示 保有水平耐力	せん断耐力 P _v (t)	545	923	
	曲げ耐力 P _m (t)	622	765	
	破壊形態の判定	せん断破壊	曲げ破壊	
	照査 K _s ・W ≤ P _v	NG	OK	
	せん断耐力余裕度 β _v	1.5	2.5	

2) せん断余裕係数と損傷度

図-7にすべての損傷を対象とした損傷レベルとせん断余裕係数の関係を示す。せん断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、旧道示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を超えており現行道示震度法の設計加速度を満足していることがわかる。また、せん断余裕度は、1.0から2.5程度の範囲に亘っている。

これについて図-8の設計例を用いて若干の考察を加える。図-8のAおよびB橋脚はいずれも表-2に示すように旧道示の値を満足している。B橋脚は固定橋脚となっており、帯鉄筋が3段配筋となっている。このため、B橋脚はせん断余裕度が2.5となるとともに、曲げ破壊先行型で地震時保有水平耐力照査を満足する結果となっている。これに対してA橋脚はせん断余裕度が1.5、せん断破壊先行型で、現行道示の地震時保有水平耐力照査を満たさない。以上のように、A、B橋脚は旧道路橋示方書を満足しているが、せん断余裕度には差が生じる傾向が認められる。

橋軸直角方向を対象に、30基程度を抽出し、軸鉄筋比、偏心の有無をパラメータとしてせん断余裕度係数をプロットしたものを図-9に示す。また、せん断余裕度係数と上部工重量の関係を図-10に示す。ばらつきが大きいものの軸鉄筋比、上部工重量が大きくなるにつれて相対的にせん断余裕度が低下することがわかる。これは作用外力が大きい場合、曲げ耐力を増加させるために、主鉄筋の増加で対応させることが多く、このため外力に比べて相対的に断面積が小さくなり、せん断余裕度が低下したためと考えられる。また、偏心を有する橋脚の方が偏心を有しない橋脚よりもせん断余裕度が大きい。これは偏心橋脚は作用曲げモーメントが大きいため必要断面積が大きくなる。これに対して、せん断耐力には偏心荷重の影響が少ないことから、相対的にせん断余裕度が大きくなるためと考えられる。このように、各橋脚は当時の道路橋示方書を満足していたが、橋脚形状、上部工重量、配筋上の差異、偏心量などによりせん断余裕度に差異が生じたと考えられる。

3) せん断スパン比と損傷形態

せん断スパン比（橋脚高さ／柱幅）は3～7の範囲

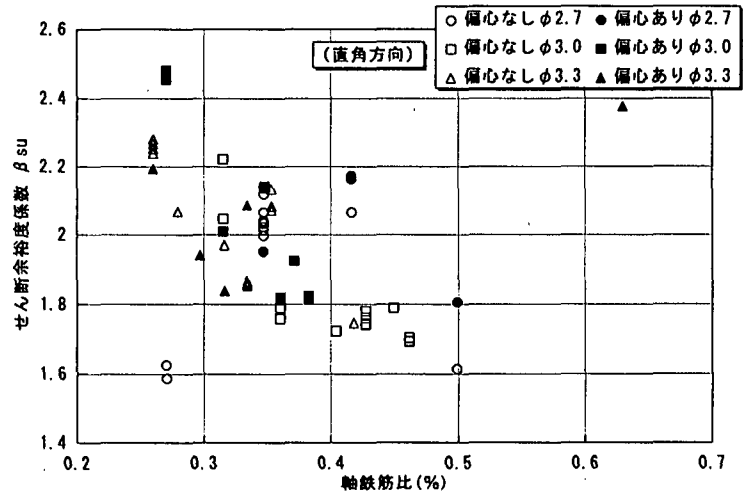


図-9：せん断余裕度－軸鉄筋比関係

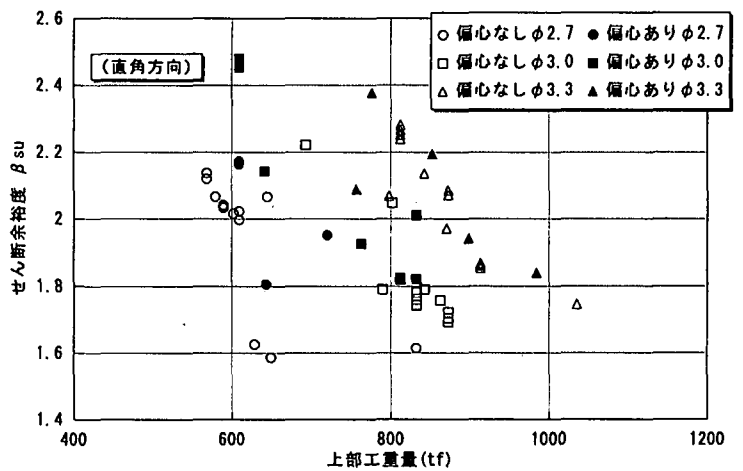


図-10：せん断余裕度－上部工重量関係

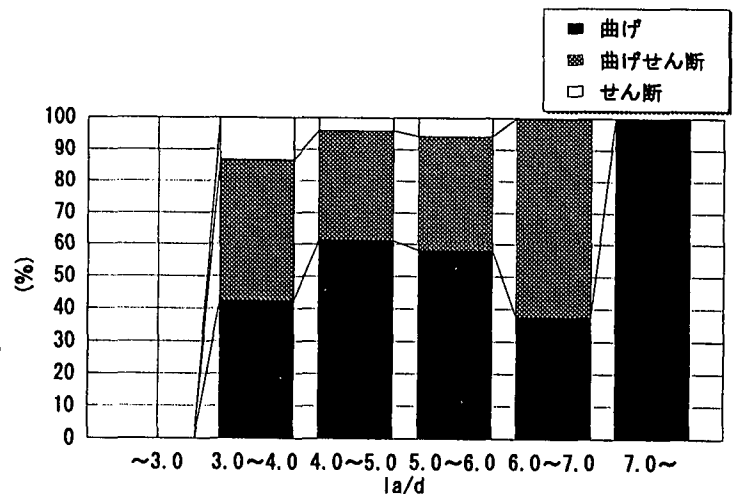


図-11：せん断スパン比と損傷形態

に亘っているが、4~5程度の橋脚が最も多く約 65%を占めている。図-11にせん断スパン比と損傷形態の関係を示すが、せん断スパン比が3.0~4.0と小さくなるとせん断損傷が認められ、せん断スパン比が7以上では曲げ損傷となっている。

4) せん断耐力に関する検討

図-12, 13に現行道示とコンクリート標準示方書式の対比を示す。比較的断面が小さくせん断耐力も小さい領域では、現行道示式はコンクリート標準示方書式とほとんど差異はない。これに対して橋軸方向のせん断耐力が大きな領域では、現行道示式は1~2割程度大きくなる傾向が見られる。両式の差異はコンクリートせん断耐力算定法の差異であり、断面が大きくなるとこの影響が大きくなるためと考えられる。すなわち、断面寸法が大きく、柱鉄筋比が小さい領域では、コンクリート標準示方書式は現行道示式に比べて小さくなり、その影響が顕著となる。また、せん断耐力が大きいものは矩形断面が多いが、これは交差点部などのスパン長が比較的長く作用外力が比較的大きい場合や断面寸法に制約がある場合に多く用いられるためと考えられる。

5) せん断曲げ耐力比と損傷形態

図-14にせん断曲げ耐力比と損傷形態の関係を示す。曲げモーメントについては、一般的に鉄筋やコンクリートの材料強度が設計基準強度よりも2~3割程度高い値であることから、終局設計曲げ耐力を2割割り増して評価している。図に示すように、せん断損傷はせん断耐力が曲げ耐力に比べて小さいものに多く、また損傷ランクも比較的高いものが多い。これに対してせん断耐力が曲げ耐力よりも大きなもの、すなわちせん断曲げ耐力比が1よりも余裕のあるものは比較的損傷が軽微であることが分かる。図-15は曲げせん断タイプのせん断曲げ耐力比と損傷形態の関係を示す。図に示すように曲げせん断損傷タイプでは曲げせん断耐力比が1近傍に分布していることがわかる。また、損傷度の低いものはせん断余裕係数が2.0以上のものが多い。このように神戸線RC橋脚は許容応力度的には当時の設計基準を満足しているが、損傷の大きなものは、せん断破壊が先行するもの、あるいはせん断曲げ耐力比が1程度であっても地震時の繰返し荷重によってせん断耐力が低下し、曲げせん断破壊に移行しやすいものに多く

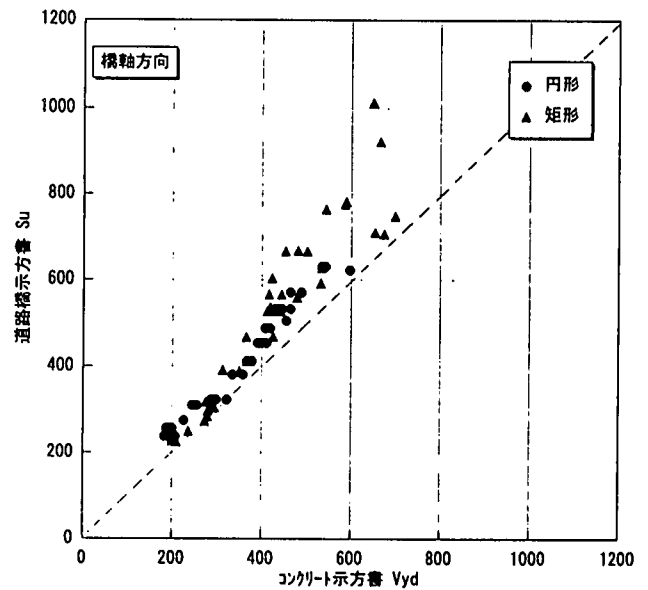


図-12: 道路橋示方書式-コンクリート示方書式関係

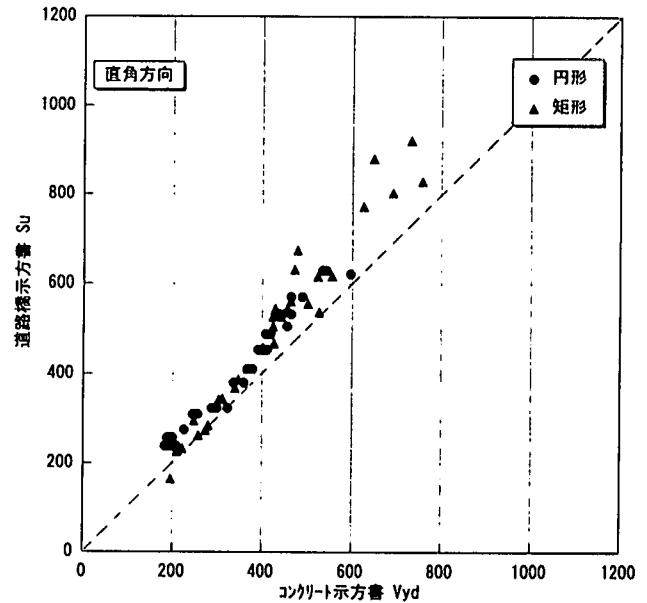


図-13: 道路橋示方書式-コンクリート示方書式関係

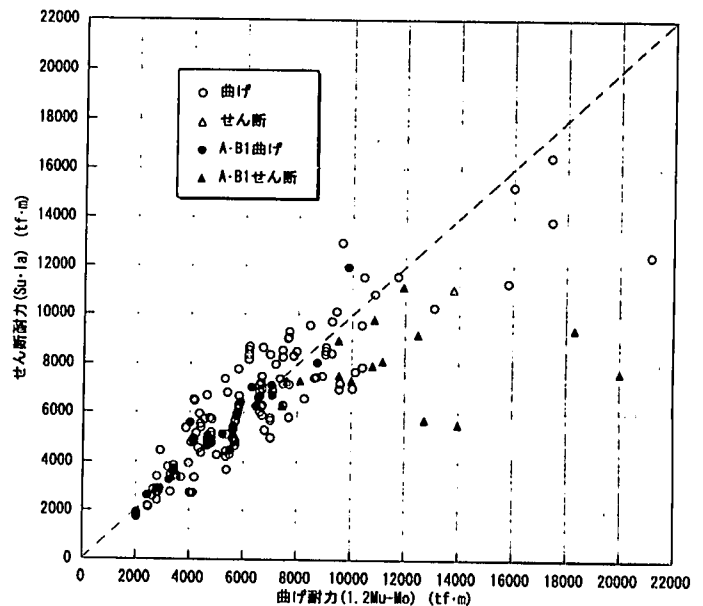


図-14: せん断耐力と曲げ耐力(曲げおよびせん断タイプ°)

認められる。

5. 損傷度の定量的評価

各ランク別に、10基程度抽出し、鉄筋損傷度やひびわれ程度の定量的評価を行った。表-3に各ランク別の損傷程度を示す。表-3に示すように外側鉄筋の取替え量は、 B_1, B_2, B_3 になるにつれて鉄筋取替え率は86, 36, 19%と減少するが、軸鉄筋の平均的はらみ出し量の差は小さい。この要因としては鉄筋の損傷がある程度進むと荷重分担ができなくなるため、側方鉄筋に荷重分担が移行するなどが考えられる。また、表-4に損傷橋脚を対象とした試験体実験結果を示す。実験は各ランクの損傷状態に対して補強後載荷試験を実施し、十分な補強効果があることを確認している。ここで、Bランクは終局状態の $5\delta_y$ 程度まで載荷したものであり、Cランクは中程度損傷の $3\delta_y$ 程度まで載荷したものである。実橋脚の平均Bランク損傷（平均取替え率47%、はらみ出し量3.4D）は実験におけるBランク損傷（取替え率70%、はらみ出し量2.5D）に比較的对応しており、実橋脚Bランク損傷は終局状態近傍に達していたと考えられる。また、実橋脚のCランクも鉄筋の座屈が伴わないことからほぼ実験における中程度損傷のCランクにほぼ対応していると考えられる。

6. まとめ

阪神高速道路神戸線のRC橋脚を対象に、損傷程度を地震時保有水平耐力およびせん断耐力解析により定量的に評価し、以下のような結果が得られた。

- 1)各損傷レベルに対して、鉄筋はらみ出し量、鉄筋取替え率、コンクリートはつり量について定量的評価を実施した。その結果、実橋Bランク損傷（平均取替え率47%、はらみ出し量3.4D）は試験体Bランク損傷（取替え率70%、はらみ出し量2.5D）に比較的对応しており、終局近傍の損傷であると考えられる。
- 2)曲げせん断耐力比と曲げ、曲げ・せん断、せん断の損傷パターンには相関が認められた。すなわち、耐力比の小さいものにせん断タイプの損傷が、1程度のものに曲げ・せん断タイプのものが多く認められる。
- 3)損傷程度とせん断余裕度係数には相関が認められた。各橋脚は当時の道示の設計加速度を満足して

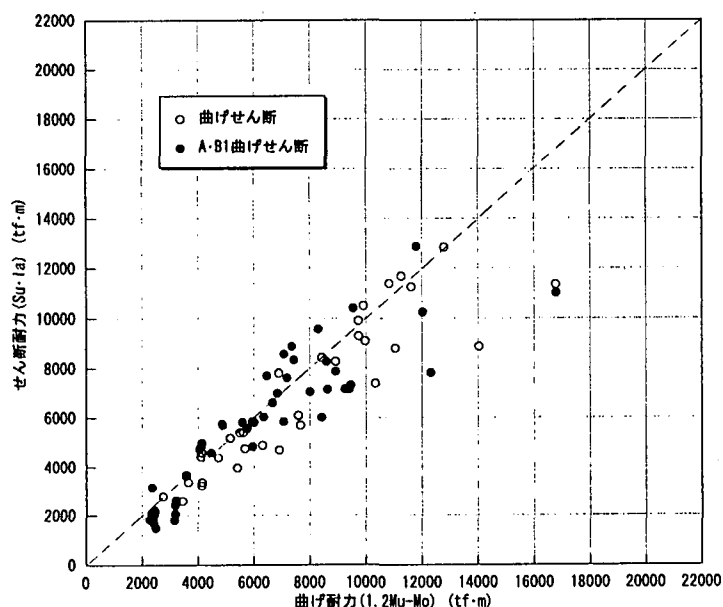


図-15: せん断耐力と曲げ耐力(曲げ・せん断タイプ°)

表-3: 実橋における構造物損傷程度

損傷ランク	コンクリートはつり量 m^3	外側軸鉄筋取替え率 %	軸鉄筋はらみ出し量 cm
B_1	6.7	86	1.4 (4.0·D)
B_2	2.6	36	1.2 (3.4·D)
B_3	2.0	19	1.0 (2.9·D)
C_1	1.0	—	—
C_2	0.08	—	—
D	0.0	—	—

表-4: 試験体における損傷程度

損傷ランク	コンクリートはつり量 m^3	柱鉄筋取替え率 %	柱鉄筋はらみ出し量 mm
A	0.24	100	4.0 (4.0·D)
B	0.10	70	2.5 (2.5·D)
C	—	—	0

いるが、橋脚形状、上部工重量、配筋上の差異、偏心量などによりせん断余裕度に差異が認められた。

参考文献：

- 1) コンクリート工学協会：コンクリート工学学会誌，PP. 178～187. 1996年3月
- 2) 林秀侃：阪神高速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.
- 3) 日本道路協会：道路橋震災対策便覧（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わる仕様の準用に関する参考資料（案），1995. 6.

- 5) 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.

- 6) 幸左・大塚・星隈・中島：RC橋脚の補強手法に関する実験的検討，コンクリート工学年次報告集，18-2, 1996年7月.

Evaluation of earthquake-damaged RC piers by the ultimate bearing capacity procedures

Hidenao Hayashi, Tamotu Marui, Kenji Kosa, Furitu Yasuda and Tunekazu Nakata.

To investigate the failure mechanism and damage level, RC piers on the Hanshin Expressway Kobe Route damaged by the Great Hanshin Earthquake were evaluated using the ultimate bearing capacity procedures in accordance with the Specifications for the Design of Highway Bridges, Part V Seismic Design. Results found that the average replacement ratio of reinforcements (47%) and average bulging amount of reinforcements ($3D$: D = diameter of reinforcements) on the piers ranked as B damage level were roughly in agreement with those of tested specimen (replacement of reinforcements: 70%, bulging amount: $2.5D$) loaded up to $5\delta_y$.

It was also found that the failure type of the RC piers roughly coincides with that shown in the classification by the moment-shear ratio. Especially, considerable relationship was found between the damage level and the shear capacity of the piers.