

論文 RC 橋脚損傷度の定量的評価

田中 克典*¹・林 秀侃*²・幸左 賢二*³・安田 扶律*⁴

要旨：兵庫県南部地震において被災したRC橋脚の損傷分析に必要な損傷度および損傷形態の評価方法を示すとともに、柱軸鉄筋の座屈状況等損傷細部の定量的な調査結果と損傷度評価について考察を加えた。さらに、柱軸鉄筋の段落とし位置と実際の損傷位置あるいは損傷形態や損傷度についてのマクロ的な解析による相関性を検討した。

キーワード：損傷度、損傷形態、鉄筋座屈長、鉄筋段落とし、マクロ解析、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箇所で落橋に至るなどの大きな被害を被った。RC橋脚の復旧は、震災直後に実施した地上部の外観調査および写真判定に基づいた損傷度評価を目安に、撤去・再構築あるいは補修・補強の判定を行って実施している。補修・補強による復旧の場合には、地中部を含めた詳細な調査結果をもとにより精度の高い損傷度評価を行い損傷分析の基礎資料とするとともに、代表橋脚を抽出して軸鉄筋の座屈状況と評価した損傷度ランクとの考察を行った。ついで、軸鉄筋の段落とし等、柱の配筋状況と損傷との関連性についてマクロ的な検討評価を行った。

2 損傷評価

震災直後の外観調査により、比較的軽微な損傷であったBランク以下（B, C, D）¹⁾の橋脚については補修・補強工事に伴い、図-1に示すような損傷状況調査図に基づくかぶりコンクリートの剥離範囲、ひびわれ状況、軸鉄筋の損傷状況（座屈範囲、はらみ出し量等）を、3号神戸線武庫川ランプから月見山ランプ間（27.7km）の本線部全橋脚に対して実施した。これらの調査結果をもとに以下に示す損傷評価を行った。

(a) 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段階にランク区分（A_s, A, B₁, B₂, B₃, C₁, C₂, D）した。A_s, Aランクの橋脚については危険度が大きいことから、緊急で鋼板巻き立てなどの応急対策を実施した。したがって、詳細調査は実施しておらず、震災直後の外観調査をもとにした判定ランクは変更して

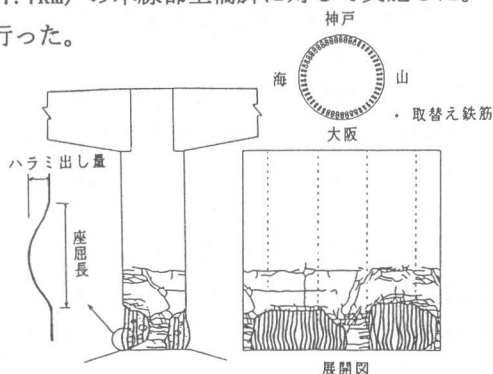


図-1 損傷状況調査図

- * 1 八千代エンジニアリング(株) 大阪支店
- * 2 阪神高速道路公団神戸管理部
- * 3 阪神高速道路公団復旧建設部
- * 4 阪神高速道路公団工務部

いない。したがって、詳細調査を実施している 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剥離、ひびわれ等によるランク区分 (C₁, C₂, D) を新たに追加した。概ね以下に示す規定に従って判定した。

A_s : 倒壊に近いか倒壊したもの

A : 軸鉄筋の座屈が著しく傾斜・ずれが見られるもの

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、損傷の認められないもの

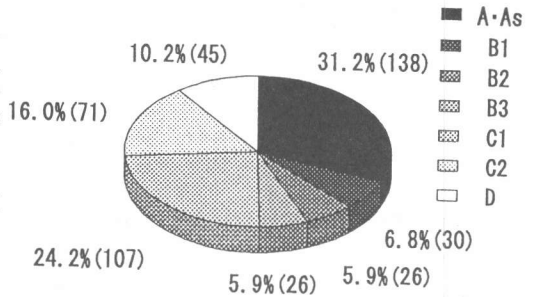


図-2 詳細調査による損傷度

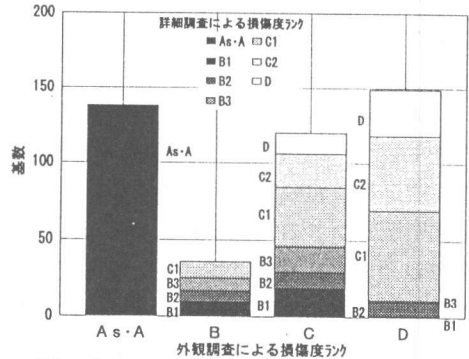


図-3 詳細調査による外観調査の損傷ランク変更

上記の規定に基づき、RC橋脚の損傷度評価を行った結果を図-2に、震災直後の外観調査による損傷度²⁾からの変更を図-3に示す。図-2より、50%強はC₁ランク以下の軽微な損傷であるが、B₁ランク以上の損傷と評価されたものも1/3程度に及んでいる。図-3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のがわかるが、特に外観調査で C、D ランクであった橋脚で鉄筋の座屈による取り替えが必要となったもののがかなり発生しているのがわかる。これは、地上部の外観調査でひびわれ程度の損傷であった橋脚が、地中部で鉄筋の座屈損傷が発見されたためである。

(b) 損傷形態の分類

外観調査および詳細調査に基づき、〈曲げ〉、〈曲げせん断〉、〈せん断〉の3形態に分類した。損傷程度に従って損傷形態が移行したり、複合的な破壊過程が推察される状況の橋脚も多く、明確に3形態に分類することは困難であるが、概ね以下の状況と図-4の模式図を目安に分類した。

〈せん断〉：損傷度が低い橋脚では、主たるひびわれ角度が水平に対して45度程度以上であり、損傷度の高い橋脚では、破壊面の角度が水平に対して45度程度以上である。コアコンクリートの破壊面も比較的明確に認められ、場合によっては破壊面の上下部材間に大きなずれが認められる。

〈曲げ〉：損傷度が低い橋脚では主たるひびわれ角度が水平であり、損傷度の高い橋脚では軸鉄筋が全周外側に座屈している。

〈曲げせん断〉：複合的な破壊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。



図-4 損傷形態の模式図

上記を目安に判定した損傷形態とせん断スパン比 (l_a/d , l_a :上部工慣性力作用位置～柱下端, d :柱断面寸法) の関係を図-5に示す。図-5より、せん断スパン比は3～7程度の間分布するが、4～5が全体の1/2以上を占めている。また、損傷形態が〈せん断〉である橋脚基数は少なく、〈曲げ〉と〈曲げせん断〉がほぼ同数を占め、せん断スパン比が6以上で損傷形態が〈せん断〉である橋脚は見られない。なお、橋軸方向よりも直角方向の損傷が卓越する傾向にあるため、ここに示すせん断スパン比は直角方向の値であり、耐力の計算値等特に断りがなければ直角方向の値を示している。

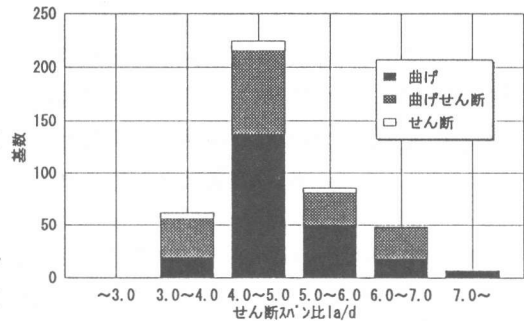


図-5 損傷形態とせん断スパン比

3 柱軸鉄筋の損傷程度についての検討

3.1 軸鉄筋の損傷調査

復旧工事では、軸鉄筋の損傷程度によって取り替えの要否を図-6に示す鉄筋のはらみ出し部の長さとはらみ出し量によって判定している。すなわち鉄筋径の3倍以上のはらみ出し量が発生している場合を取り替えの目安とし、はらみ出し部の長さが短い範囲では3倍以下でも鉄筋を取り替えている。ここで、はらみ出し部とは目視で鉄筋の曲がりが見られる範囲の長さであり、もとの位置からはらみ出しの頂点までの長さをはらみ出し量として計測し、すべての軸鉄筋について取り替えの要否を判定している。なお、実際の取り替え範囲ははらみ出し部の上下それぞれ鉄筋径の5倍を含む長さとしている。以下、軸鉄筋のはらみ出し部の長さを軸鉄筋の座屈長と呼ぶこととする。

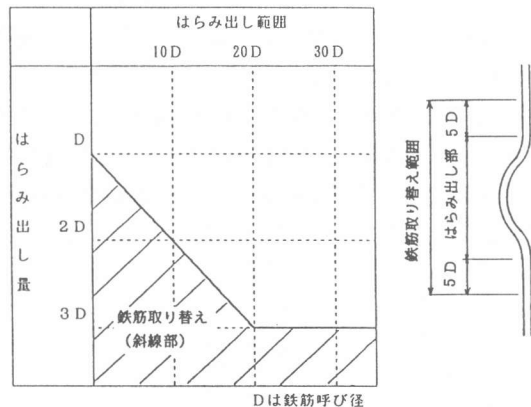


図-6 軸鉄筋の損傷調査

3. 2 軸鉄筋のはらみ出し量

Bランクの損傷度評価は、対象基数が多いため2に示したように外周鉄筋の取り替え率によって3段階に区分したが、取り替えは補強工事に伴って調査した軸鉄筋のはらみ出し量等で判定している。そこで、はらみ出し量等実際の損傷程度を表-1に、軸鉄筋のはらみ出し量と座屈長の関係を図-7に示し、定量的な損傷程度について考察した。表-1より、鉄筋の取り替え率の平均値はB₁、B₂、B₃になるにつれて86%、36%、19%と大きく減少するが、はらみ出し量は比較的差が小さい。これは、ある程度鉄筋の座屈損傷が進んだ段階で側方へ荷重分担が移行し、座屈範囲が拡大していく現象が考えられ、その各段階をB₃、B₂、B₁の損傷度として評価していることに相当している。このような荷重分担の移行と座屈範囲の拡大は、実験室における載荷実験でも認められる現象であるが、実際には地震の方向は一方向ではなく作用地震力も各橋脚によって異なり、複雑な地震時挙動による要因も考えられる。図-7において、ほぼ全面に亘って軸鉄筋を取り替えているB₁ランクの橋脚では、はらみ出し量が20cmを超えるものもありばらつきは大きい。

表-1 軸鉄筋の損傷程度

	外軸鉄筋の取り替え比率	軸鉄筋のはらみ出し量
B 1	86%	1.4cm (4.0D)*
B 2	36%	1.2cm (3.4D)*
B 3	19%	1.0cm (2.9D)*

* : 主鉄筋径をD35と仮定

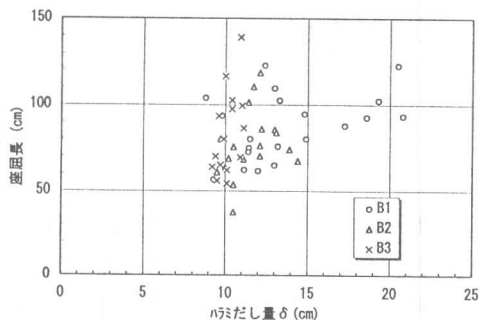


図-7 はらみ出し量と座屈長

3. 3 軸鉄筋の座屈長

図-8は、Bランクの実橋および既往の模型実験結果の断面寸法と軸鉄筋座屈長の関係をプロットしたものである。ここで、座屈長は図-6に示したように鉄筋が曲がっている範囲の長さであり厳密な意味での塑性ヒンジ長とは異なるが、塑性ヒンジ長についての既往の研究³⁾で提案されている(塑性ヒンジ長)=0.5Dと、実橋断面寸法の範囲まで考慮して最小二乗法で求めた線を記入している。なお、D₀は模型実験の断面寸法の平均値としてD₀=55cmとしている。柱断面寸法が200cmを超える実橋の場合には、断面寸法が大きくなっても軸鉄筋の座屈長は増加せず、(塑性ヒンジ長)=0.5Dを下回る傾向にある。これは柱断面寸法が100cm程度以下で小さい範囲では、柱寸法に比例して軸鉄筋の座屈長は長くなるが、道路橋の実橋のように柱断面寸法が大きくなると座屈長は頭打ちに近い状況にあることを示している。

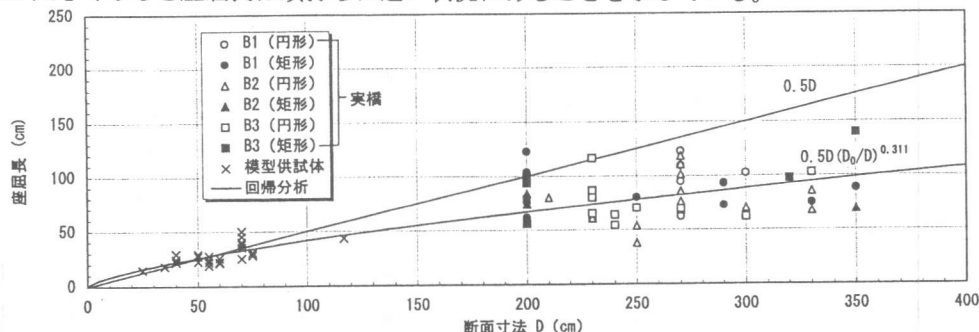


図-8 柱断面寸法と軸鉄筋の座屈長

4 軸鉄筋の段落としに関する検討

4.1 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鉄筋の段落とし位置を確認し、段落としの有無に分けて表-2に損傷位置別の基数を示した。段落とし有りの損傷位置が中間部であるものはすべて段落とし部の損傷であった。表-2より、段落とし無しの橋脚では約80%が基部で損傷しており、その殆どは<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、段落とし有りの橋脚では70%近くが中間の段落と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、段落とし無しの橋脚では基部の曲げ損傷が先行するのに対し、段落とし有りでは段落とし部が曲げおよびせん断の弱点になっていたため中間部での損傷が多くなることが考えられる。一方、段落とし無しでも中間部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ることから、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損傷結果であり、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。

表-2 段落としの有無と損傷位置

			損傷形態			合計
			曲げ	曲げせん断	せん断	
段落とし有	損傷位置	中間	21	84	3	108
		基部	39	3	0	42
	合計		60	87	3	150
段落とし無	損傷位置	中間	0	34	14	48
		基部	158	69	3	230
	合計		158	103	17	278

・損傷無し15基を除く

4.2 段落としと損傷度

図-9と図-10にそれぞれ段落とし無しと有りの損傷度分布を示す。段落とし無しの場合では約1/4が、段落と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。なお、当時の設計基準からは、宮城県沖地震の被害を踏まえて段落とし位置を上方に延ばすように改訂されており⁴⁾、さらに新しい道路橋示方書(平成8年版)⁵⁾では段落としを設けないことを原則としている。したがって、今後新設される橋脚については、ここに示したような段落とし部に関する問題点は解消されるが、せん断耐力に余裕をもたせた曲げ破壊先行の設計が望まれる。

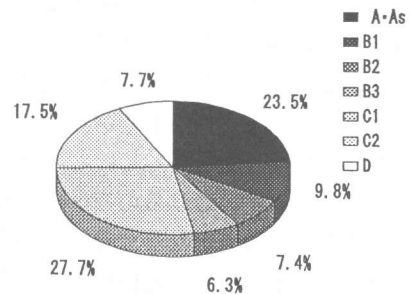


図-9 段落とし無しの損傷度区分

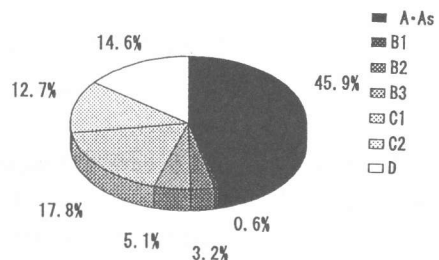


図-10 段落とし有りの損傷度区分

4.3 計算耐力と損傷状況

図-11に基部および段落とし部の降伏曲げ耐力指標 $\alpha_{m\gamma}$ と実際の損傷状況との関係を示す。図-11より、損傷位置が基部である橋脚はすべて基部よりも段落とし部の $\alpha_{m\gamma}$ が上回っており、段落と

し部が弱点とならずに基部の損傷が先行する結果となっている。一方、基部よりも段落とし部の α_{my} が大きい橋脚であっても中間部（段落とし部）で損傷している橋脚も多いが、基部で損傷している橋脚に比べると相対的に段落とし部の α_{my} が小さい傾向にある。また、基部で損傷している橋脚の損傷形態が殆ど<曲げ>であるのに対して、中間部で損傷している橋脚はせん断的な要素が加わった<曲げせん断>が多い。なお、降伏曲げ耐力指標 α_{my} は着目断面に曲げ降伏モーメントを生じさせる加速度であり、式(1)で算定されるものである。

$$\alpha_{my} = My / (W \cdot la) \quad \text{---- (1)} \quad la : \text{着目断面} \sim \text{上部工慣性力作用位置 (m)}$$

W : 着目断面より上方の曲げに寄与する重量 (tf)

5 まとめ

ここで実施した検討結果を以下にまとめる。

- ① 損傷度評価に伴い柱軸鉄筋の座屈状況について調査した結果、200cmを超える実橋の柱断面寸法においては、座屈長は0.5D(D:柱断面寸法)をやや下回る傾向が認められた。なお、今回調査した橋脚においては、せん断曲げ耐力比($Su \cdot la / Mu$)や引張鉄筋比、せん断スパン比(la/d)と鉄筋座屈長との相関性はほとんど認められなかった。
- ② 軸鉄筋の段落とし有りの橋脚では、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かった。ただし、柱基部に比べて段落とし部の曲げ耐力が十分大きな橋脚では柱基部の曲げ損傷となっているものが多かった。
- ③ 軸鉄筋の段落としを行っていない橋脚であっても、柱基部以外の中間部で損傷しているものも認められるが、これらの損傷形態は純粋な曲げではなくせん断あるいは曲げせん断である。柱中間部に弱点がなくてもせん断的な損傷は中間部で生じる場合がある。今後、段落としを設けない場合にも、損傷程度が高くなるせん断破壊を生じさせないよう、せん断耐力に余裕を持たせた設計が望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編），1988. 2
- 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) M. J. N. Priestley and R. Park: Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading, ACI STRUCTURAL JOURNAL, 1987. 1
- 4) 日本道路協会：道路震災対策便覧（震災対策編），1988. 2
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書 V耐震設計編，1996. 12

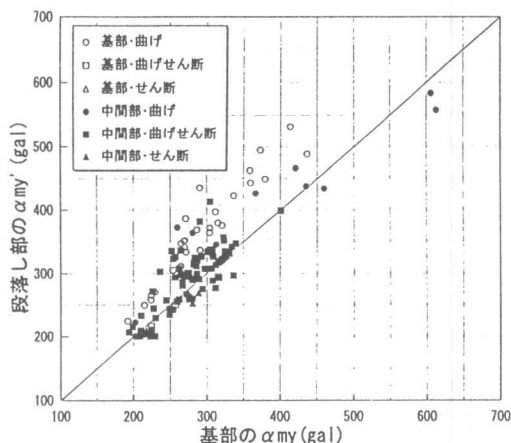


図-11 段落とし部の曲げ耐力と損傷位置