

Ⅱ - 1 阪神・淡路大地震における鋼橋の被害の総括と復旧

要 旨

阪神・淡路大震災における鋼製橋脚の被害について、代表的な鋼製橋脚の個別の被害状況とその原因を概説するとともに、被害の総括を行う。また、適用示方書の変遷と被害の関係を明らかにする。特に、圧縮補剛板の設計基準が道路橋示方書に設けられたのは昭和46年であり、それ以前については規定がなく、縦補剛材の幅厚比が現在の規定からすると大きすぎたことを明らかにする。最後に、震災から得られた教訓と阪神高速道路の復旧の基本方針をまとめる。

1.1 はじめに

鋼橋の内、鋼製橋脚を対象を絞って阪神・淡路大震災による被害の総括と震災から得た教訓などについて述べる。改めて述べるまでもなく、橋脚は橋梁構造物の耐震設計を考えるとKeyとなる部材であり、地震終了後の橋の機能保持に最も大きな影響を与える。ところが、鋼製橋脚の終局耐震設計に関する研究の歴史は浅く、設計示方書の中に、大地震に対する照査法は現在でもまだない。このような現状にもかかわらず、阪神高速道路3号神戸線および5号湾岸線だけでも総計306本の鋼製橋脚が震災までに建設されていたが、このうちの1割強が被災した。しかし、これらの被災した橋脚の大半が古い設計法で設計されているのもかわらず、兵庫県南部地震の巨大さを考えれば総じて良く耐えたと考えて良い。

なお、鋼製橋脚以外の被害については、参考文献[5]～[7]などに詳しく書かれているので、それらを参照願いたい。

1.2 阪神高速道路の建設と道路橋耐震設計の変遷

まず、道路橋の設計基準の変遷について述べる。図1-1[1]から分かるように、阪神高速道路3号神戸線の大多数(約83%)の橋梁は昭和39年以前の基準、残りは昭和46年の基準で設計されている。また、5号湾岸線の84%は昭和55年の基準、残りは平成2年の基準で設計されている。震度法(中小地震対象の耐震設計法)適用時の許容応力の割り増しは、昭和55年の示方書から、従来までの1.7(安全率=1.0)から1.5(安全率=1.14)に引き下げられている。したがって、許容応力の割り増しは3号神戸線では1.7、5号湾岸線では1.5となっており、湾岸線の方が安全度は高くなっている。震度法における標準設計水平震度は、両線共ほぼ同じ程度の値(0.2)であり、設計鉛直震度は、湾岸線では考慮されていないが、神戸線では0.1が用いられているようである。大地震を対象とした地震時保有水平耐力照査は、鋼製橋脚に対しては、現行示方書にも規定されていない。

圧縮補剛板の設計基準が道路橋示方書に取り入れられたのは昭和46年であり、限界幅厚比パラメータ R_c (全断面降伏圧縮力が期待できる幅厚比パラメータ R)は

0.7と規定されている。縦補剛材の必要剛比 γ_{req} は、 $R \geq R_{cr}$ の補剛板の場合、線形座屈理論から得られる最適剛比 γ^* （すなわち、補剛材の位置で座屈モードが節となるような最小の剛比）に等しいが、 $R \leq R_{cr}$ のときには、 γ^* より小さくなるような、わが国独自の基準が設けられた。その後、海外でボックスガーダーの相次ぐ事故が起こり、それを契機にわが国でも補剛板の設計基準の見直しがはかられ、昭和55年の基準では限界幅厚比 R_{cr} が0.5と改められ、より厳しい基準となった。しかし、補剛材剛比に関する考え方は、前基準と同じである。なお、大多数の神戸線の鋼製箱形断面橋脚は補剛板の基準が整備される前に建設されたものであるが、どの規準を基に設計されたのかは不明である。

また、パイプ断面部材の設計基準が整備されたのも昭和46年示方書であり、現在まで同じ基準が用いられている。ただし、縦方向に補剛されたパイプ断面部材の局部座屈に対する設計基準はまだ無い。箱形断面橋脚と同様に、基準整備前に建設された橋脚がどの規準を基に設計されたのかは定かでない。

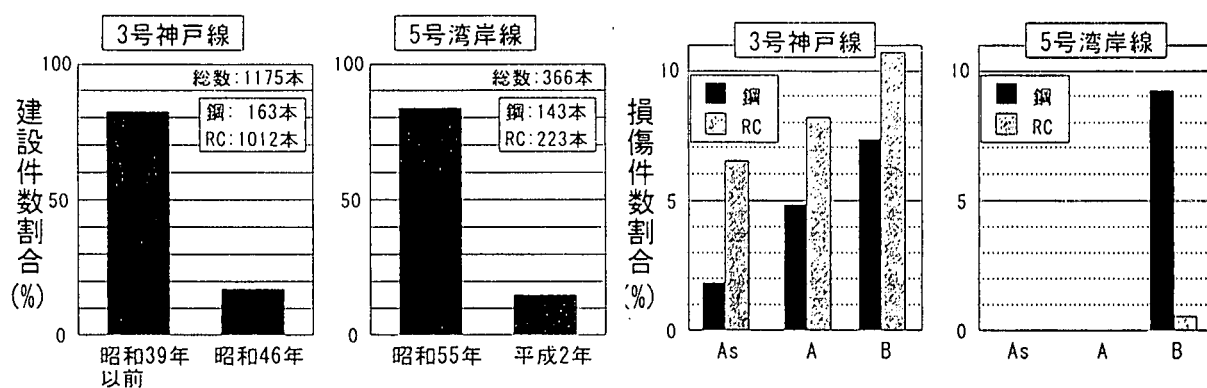


図1-1 橋脚の準拠示方書による分類

図1-2 損傷度B以上の橋脚

表1-1 被災度の定義

被災度	定義
A _s	倒壊したもの 損傷変形が著しく大きなもの
A	亀裂、座屈、鉄筋の破断等の損傷、または 変形が大きなもの
B	鋼材の座屈や部材の変形が部分的にみられるもの 鉄筋の一部の破断やはらみだし及び部分的なかぶり コンクリートの剥離や亀裂がみられるもの
C	鋼材の座屈や変形が局部かつ軽微なもの ひび割れの発生や局部的なかぶりコンクリートの 剥離がみられるもの
D	損傷がないか、あっても耐荷力に影響のない きわめて軽微なもの

1.3 鋼製橋脚の被災統計

損傷直後の応急調査およびその後の詳細調査の結果を「道路震災対策便覧（震災復旧編）道路協会」による構造物別被災度の判定区分に対応させて大きな損傷（判定区分A_s、A）、中規模の損傷（判定区分B）、小規模の損傷（判定区分C）、軽微な損傷または損傷無し（判定区分D）に分類している（表1-1）。なお、この定義は本報告書の第1編に示されている許容損傷度の分類と同じ記号を使っているが直接的な関係はない。阪神高速道路3号神戸線、5号湾岸線の分類結果を表1-2および表1-3にそれぞれ示す。

表1-2 3号神戸線（兵庫県域）の被災度判定結果

部 材 名		被 災 度					計
		A _s	A	B	C	D	
橋 脚	鋼製	3 (2%)	8 (5%)	12 (7%)	112 (69%)	28 (17%)	163
	RC	64 (7%)	78 (8%)	102 (11%)	225 (24%)	474 (50%)	943
支 承		-	371 (18%)	274 (13%)	383 (18%)	1090 (51%)	2118
上部構造		26 (2%)	67 (5%)	243 (19%)	215 (16%)	753 (17%)	1304

表1-3 5号湾岸線（兵庫県域）の被災度判定結果

橋脚材質		被 災 度					計
		A _s	A	B	C	D	
鋼製橋脚	形式						
	単柱	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	6 (100%)	6
	その他	0 (0%)	0 (0%)	13 (9%)	21 (15%)	103 (75%)	137
小計		0 (0%)	0 (0%)	13 (9%)	21 (15%)	109 (76%)	143
鉄筋コンクリート橋脚	形式						
	単柱	0 (0%)	0 (0%)	1 (1%)	2 (2%)	93 (97%)	96
	その他	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	20 (19%)	86 (81%)	106
小計		0 (0%)	0 (0%)	1 (1%)	22 (11%)	179 (89%)	202
合計	形式						
	単柱	0 (0%)	0 (0%)	1 (1%)	2 (2%)	99 (97%)	102
	その他	0 (0%)	0 (0%)	13 (5%)	41 (17%)	189 (78%)	243
小計		0 (0%)	0 (0%)	14 (4%)	43 (12%)	288 (83%)	345

図1-2に、阪神高速道路高架橋橋脚について、B以上の損傷を受けた橋脚数の総橋脚数に対する割合を鋼製と鉄筋コンクリート(RC)製に分けて示す。鋼製橋脚については、A、BおよびCの区別が必ずしも明確ではないが、A_s損傷およびA損傷の一部は撤去・建て替えが必要な橋脚であり、他はすべて補修して再使用可能な損傷と考えられる。さらに、定義に記載されている損傷を受けた鋼製とRC製橋脚がどのような理由で同じ被災度にクラス分けされているのかといったところが必ずしも明確でない。従って、被災度別の数によって鋼製、RC製橋脚の優劣を論ずることは意味がない。A_sおよびA損傷を受けた橋脚は3号神戸線に集中し、5号湾岸

線には見られない。この理由として、3号神戸線の橋梁が比較的古い基準、5号湾岸線の橋梁が新しい基準に準拠していたからである、という意見がある。確かに、前述のように、基準が新しくなることにより補剛板の設計などにおいて厳しい条件で耐震設計されるようになってきているが、大地震に対する照査をしていないという意味で、本質的な変化はない。むしろ、今回の地震の特色として、比較的短周期（1秒以下）の橋脚に与える損傷は、5号湾岸線の地盤（Ⅲ種地盤）より3号神戸線の地盤（Ⅰ，Ⅱ種地盤）が大きかったという事実に注目すべきであろう。このことについては、後で橋脚の地震応答解析によって実証する。

今回の地震による、阪神高速道路3号神戸線および同湾岸線等における鋼製橋脚の主たる損傷事例は次のように集約されよう。

- (1) T形橋脚の柱の圧壊（神戸線建石交差点および国道43号線岩屋高架橋）
- (2) ラーメン橋脚柱頭部の溶接部および母材の割れ（ハーバーハイウエー）
- (3) パイプ断面柱の局部座屈および破断（3号神戸線，浜手バイパス）
- (4) 箱形断面柱の局部座屈（神戸線橋脚の断面変化部，マンホール部に多数）
- (5) ラーメン橋脚のはり部のせん断による局部座屈（湾岸線に多数）
- (6) 橋脚基部の脆性的な割れ（1橋脚のみ）
- (7) アンカーボルトの伸び

その他、厚肉の遠心鑄鋼管よりなるラーメン構造物の柱頭の脆性破壊（中央区神戸高速鉄道高架橋）があるが、材料が鑄鋼であるためここでは触れない。

(1)の破壊モードは2カ所で見られたが、鋼製橋脚にとって最も重大と考えられる損傷であり、被災度はAsである。いずれも、交差点を跨ぐ比較的スパンの長い桁(60~70m)を支持する橋脚で、強烈な橋軸直角方向の水平動によって、橋脚の板パネルの座屈および角溶接部の損傷が生じた状態で鉛直動が加わって橋脚が圧壊したように考えられる。ただし、岩屋高架橋の橋脚柱の連結板上下では縦方向補剛材が不連続な構造になっていたため、このことが柱の圧壊を加速したとも考えられる。いずれにしても、角溶接部の割れは橋脚の圧壊につながる可能性があるため、十分注意する必要がある。これらの橋脚の崩壊メカニズムについては文献[1]に詳しい。これら2つの橋脚に共通した特徴として次の点が上げられる。

- ① 幅厚比が比較的大きい（幅厚比パラメータ $R=0.6$ 程度）
- ② 細長比が比較的小さい（細長比パラメータ $\lambda=0.2$ 前後）
- ③ 縦補剛材の剛比は γ^* の1.3~2.0程度で比較的大きい。
- ④ 横梁張出部が非常に長い
- ④ 橋脚が支える左右の桁のスパン長がアンバランスである。
- ⑤ 上部工による軸力の全塑性軸力に対する軸力比が大きい。

これらの橋脚は、比較的背が低くかつ上部工重量が大きいため固有周期が短い橋脚であるが、後述のように、今回の地震はこのような橋脚にとっては非常に厳しい地震であった。しかも、幅厚比および軸力比が比較的大きいため、変形能は大きくなく、局部座屈変形が進展していった時点で角溶接部の割れが生じて崩壊に至ったものと思われる。

(2)は、水平動によって生じた柱頭部、隅角部下の内側フランジの溶接線（柱と

はりのフランジの接合部)のクラックが進展して生じた破壊モードと考えられる。これは、A被災に分類されようが、補修・再使用が可能である。

(3)のパイプ断面橋脚の局部座屈(提灯形座屈)および局部座屈を起こした部分の母材の破断は、柱中間部に生じたものが多かった。パイプの径厚比(半径/板厚)は、大きく局部座屈した断面では、限界径厚比(SS400材で50, SM490材で40)前後のものが多く、縦方向に2m程度の間隔で断面変化させていたようである。柱中間部の局部座屈は、コンクリート充填部の上または断面変化部のように局部座屈強度が急変する部分の座屈であり、柱基部に中詰めされている車両衝突防止用のコンクリートのため、柱基部の作用モーメントが鋼断面だけの抵抗モーメントより大きくなり、断面変化あるいはマンホールにより局部座屈強度が急減した断面部に過大なモーメントが作用して局部座屈したものと考えられる。このような局部座屈は繰り返し水平動によって生じたシェルとしての座屈(提灯座屈)が鉛直動によって押しつぶされ、ある場合にはその部分が再度引張を受けた時に破断した破壊モードのように思われる。被災度はAからBにクラス分けされよう。

(4)は、神戸線に多数見られた損傷で、パイプ断面橋脚とおなじような理由で生じたもので、被災度は局部座屈の程度によりAからCにクラス分けされよう。

(5)は鋼製橋脚にとって好ましい損傷モードで、補修もし易い。

(6)は、現在までの所、例外的な損傷であるが、発見が難しいなど好ましい損傷ではない。

(7)も、比較的例外的な損傷と考えられる。

以上述べてきたように、鋼製橋脚の損傷は同時期に建設された鉄筋コンクリート橋脚に比べ比較的軽微であった。その理由の1つとして、橋脚基部に中詰めされている車両衝突防止用のコンクリートの存在が挙げられる。中詰コンクリートの強度は 160kgf/cm^2 程度と低い、柱基部の構成板要素の局部座屈の発生を防止することにより耐震性能(強度と変形能)の向上に大いに寄与をしたと考えられる。

1.4 鋼製橋脚の個別の被害

ここでは、被害の様子を阪神高速道路神戸線を東から西へ順に、被害の程度を橋脚ごとに説明する。なお、鋼製橋脚を特定するために位置と鋼製橋脚のピア番号を明示する。

(a) 西宮市、甲子園付近(神P-160)

甲子園前の交差点で一般国道43号の立体交差の高架部分があるため、阪神高速道路は中央分離帯で左右に分離している。そのため南北方向にスパンの長いラーメン型鋼製橋脚が複数ある。写真1-1と図1-3に示すように、1部のラーメン橋脚の基部(中詰めコンクリートの上)に縦補剛材間を半波モードとした局部座屈が発生している。これは、橋軸方向の繰り返し荷重による曲げモーメントの大きな基部に局部座屈が発生したと考えられる。橋脚全体としての傾きは、ほとんどない。桁形式は、単純桁および連続桁が混在している区間である。落橋防止装置に

は損傷はない。ただし、ほとんどの支承で橋軸方向に支承が損傷し、それにより桁端のずれが多数発生している。

(b) 西宮市今津，名神西宮 I. C. 西（神 P-6）

張り出しはりを持った鋼製ラーメン橋脚の中柱の基部において、写真1-2と図1-4に示すように鋼製橋脚の基部に局部座屈が発生している。中柱の基部において縦方向の外形断面形状が変わるが、この断面が変化する部分で、フランジ及びウェブパネルの局部座屈が発生している。フランジ側にマンホールがあり、これが弱点になった可能性がある。マンホールのあるフランジ面は内側にへこむ局部座屈が確認できる。また、ウェブは外側へ座屈している。このように、フランジ及びウェブの4パネルは、連続条件を満足する半波の座屈形状を示し、縦補剛材の間の局部座屈変形は見られない。溶接割れも派生していない。

(c) 西宮市，阪神高速西宮出入口西，建石交差点（神 P-55）

この付近は阪神高速西宮入出路があるため、国道43号建石交差点をまたぐ高架橋は、本線部4車線とランプ部2車線を支持している。そのためT型鋼製橋脚（フランジ幅2800mmXウェブ幅3000mmの箱形断面）は長いはり（45.5m）を持つので、その両端をそれぞれコンクリート柱でピン支持している。写真1-3と図1-5に示すように、T型橋脚の柱部分のフランジとウェブの4隅の角溶接線が全て破断して中詰めコンクリートの位置まで圧壊している。充填コンクリートは根巻きコンクリートの高さ程度（1m強）までしか入っていない。橋軸及び橋軸直角方向とも橋脚の移動はほとんど見られず、T型橋脚のはりの両端部は、支承からはずれ、かろうじて両端のコンクリート柱に支えられている。そのため、上部構造は真下に沈下したのみで、交差点下の通行に支障はなかった。これは、この橋脚の圧壊が地震後1時間程度後に生じたという地元民の証言とよい一致をする。

フランジ側の鋼板は内側に巻き込むような形状になっている。鉛直地震動だけによる鉛直荷重で降伏または局部座屈したとは考えにくく、短周期成分の多い水平地震動により、想定していた以上の曲げが作用し、中詰めコンクリートの上端付近で角溶接の割れと局部座屈が発生し、鉛直耐力が小さくなり、ショートニングが次第に発生し、その後、はりの座屈により上部構造の自重を全て受け持つようになり圧壊したのではないかと考えられる。

このT型橋脚のはりは長いため、はりの張り出した部分の中間点（桁の幅の両端）で左右2カ所の塑性ヒンジができ折れ曲がっている。また、それを支えているコンクリート製橋脚の支承は破損し梁は完全に橋脚から飛び出して、今にも落下しそうである。

この橋脚のすぐ西側の橋脚もT型鋼製橋脚であるが、損傷は受けていない。さらに、もう1つ西の橋脚はT型コンクリート製橋脚であるが、せん断破壊を起こしている（ここでも鉄筋は圧接部での破断が多い）。東側はT型コンクリート製橋脚（基部に損傷）と逆L字型コンクリート製橋脚である。

(d) 西宮市川西町，阪高芦屋出入口東（神P-68）

補剛箱形断面T型鋼製橋脚で，片端をコンクリート柱でピン支持されている。写真1-4と図1-6に示すように，柱基部に鋼製橋脚の典型的な局部座屈が観察できる。縦補剛材を節にした半波の座屈モードが観察される。この橋脚の寸法は2700mm x 2900mmの箱形断面である。局部座屈の発生しているパネルのダイヤフラム間隔は1400mmである。補剛材はフランジ，ウェブにそれぞれ5本である。断面寸法は図面に示す。基部の根巻きコンクリートにもクラックが観察できる。

この付近の阪神高速芦屋出入口のランプの1本柱コンクリート製橋脚が傾いたり，コンクリート製ラーメン橋脚の横梁部分にクラックが入った入りしている。そのため，一部では落橋防止装置や支承の破損が見られ，落橋寸前の桁もある。

(e) 神戸市東灘区，阪神高速道路深江出入口，青木交差点付近（神P-169～P-171付近）

この付近もランプがあるため，建石交差点で圧壊した橋脚と同様なT型で長いはりを持ちその先端をコンクリート柱でピン支持されるといった形式を持った鋼製橋脚がある。しかし，ここでは倒壊には至らず局部座屈や支承の破損，といった程度で落橋も発生していない。

(f) 神戸市東灘区，阪神高速道路魚崎出入口，覚浄寺交差点付近

この付近もランプがあるため，建石交差点や青木交差点付近のような鋼製橋脚と同様なT型で長い梁を持ちその先端をコンクリート製柱で支えるといった形式を持った鋼製橋脚が有る。しかし，ここでも倒壊には至らず局部座屈や支承の破損，といった程度でかろうじて落橋をしていない。ただし，逆L字型の橋脚を用いている阪神高速出入口のランプの一部で落橋しかかっている桁があるが，連続桁であるためその前後の桁や橋脚によって支えられている。

(g) 神戸市中央区，脇浜町付近（神P-351～P-353）

阪神高速神戸線，神戸市中央区脇浜町付近の1層1スパンラーメン鋼製橋脚（P-351）の隅角部に写真1-5に示すようにクラックが発生している。クラックの大きな進展は見られない。単純梁ばかりであるが，桁の落下はない。しかし，ほぼすべての桁が支承から落ちて海側へ移動している。

この橋脚のすぐ西側の片側の梁が極端に長いT型の鋼製橋脚（P-352，図1-7）は，海側に大きく傾いており，基部を掘削して観察した結果，写真1-6のように南北のアンカーボルトが伸びていることが分かった。一方，そのすぐ西のほぼ同一型式のP-353は，海側のウェブの基部で，中詰めコンクリートの直上で，写真1-7に示すようにパネル全体の局部座屈が見られる。

(h) 神戸市兵庫区，松原交差点西付近，阪神高速神戸線（神P-580～P-585）

阪神高速神戸線，JR兵庫駅南西，松原交差点から西のP-580～P-585の円形断面を柱とするT型鋼製橋脚に大きな被害が見られる。JR和田岬線が南北に通

っており、東西に国道2号が横切るため立体交差となっている。そのため国道2号にそって走る阪神高速道路神戸線が国道2号の南北の両側に上下線が分離する形となり、約14m～17mという背の高いパイプ断面の鋼製橋脚が使用されている。径は $\phi 1800\text{mm}$ と $\phi 2200\text{mm}$ （神P-232～234）である。写真1-8のように、この部分のほぼすべての橋脚で柱基部ではなく柱長さの中間点付近に種々の損傷を受けた。すなわち、塑性域に入った様子が塗料のはがれで分かるもの、小さな局部座屈が発生しているもの、比較的大きな局部座屈変形が生じ橋脚が傾いてしまったもの、局部座屈変形が円周に全てに渡り提灯座屈変形形状になり、さらに大きなクラックが生じているものなどがある。損傷を受けた部分は、径厚比30～60であり、材質はSS41材とSM50材である。上下線の同じ位置にある橋脚は、ほぼ同じ形状であり、損傷を受けた部分もほぼ同じである。径厚比が大きな板厚変化点に被害は集中しているようである。

神下P-580（海側）の橋脚は、小さな局部座屈が発生しており、その部分にクラックが発生している。このクラックの位置は、ダイヤフラムの間であり、SM50材の21mmと24mmの板厚変化点の溶接部である。径厚比は42.9と37.5である。

神下P-584（海側）の橋脚は、図1-8(a)に示すように柱の中間位置で、提灯座屈形状を示し、その局部座屈の部分で全断面に破断クラックが発生している。上部構造が連続形式であるため、落橋には至っていないが、破断面から山側に大きく傾いている（写真1-9）。座屈位置は、ダイヤフラム間の中間であり、板厚21mmと28mmの溶接継手のすぐ上の断面が小さくなっている部分であり、径厚比は52である。材質はSS41材である。

同じ位置の神上P-584（山側）の橋脚では、図1-8(b)に示すように神下P-584とほぼ同じ位置で、提灯座屈変形の一部が、さらに押しつぶされたような変形を示し、その押しつぶされた部分で大きな破断クラックが発生している（写真1-10）。19mmと25mmの板厚変化点であり、径厚比は60である。

(i) 神戸市長田区、大橋町2丁目付近、阪神高速神戸線（神P-617、P-618）

背の低い $\phi 2500$ の円形断面T型鋼製橋脚の基部に、橋軸直角方向の曲げにより、山側（北側）に大きな局部座屈が発生し、橋脚自体が大きく傾いている（写真1-11）。

(j) その他

写真1-12にベースプレートと橋脚柱との接合部にクラックが現在までに確認された唯一の例を示す。この部分は、根巻きコンクリートによって覆われているため、検査が難しい。基部に設けられた三角リブの溶接部からクラックがスタートし脆性的な破壊が生じたと思われるが、溶接部に地震により低サイクル疲労クラックが発生したのか、それ以前に高サイクル疲労や応力腐食などによりクラックが生じていたかは不明である。

また、写真1-13は神戸三号線の例ではないが、コーナー部に曲率を有する補剛

箱形断面橋脚柱の補剛板パネルが座屈した例を示す。同じような断面で、マンホールのある断面だけで局部座屈が発生した事例も複数観測されている。

1.5 震災から得た教訓

今回の震災から得た鋼製橋脚の耐震設計に関する教訓をまとめる。
まず、主眼点を挙げると下記のようなものである。

- ① 橋脚の変形能を高めること。
- ② 橋脚に入力する地震動を軽減する工夫をすること。
- ③ 橋梁構造物全体についてバランスのとれた耐震設計を行うこと。
- ④ 可能な限り動的解析を行う。

より具体的には次のようになろう。

- (1) 中埋コンクリートによる耐震性能の向上効果を積極的に利用する。
- (2) 局部座屈による損傷を可能な限り小さくする。
 - ・ 板パネルの幅厚比を小さくする。
 - ・ 縦方向補剛材の剛性を高める。
 - ・ ダイアフラム間隔または横リブ間隔を小さくして補剛材の細長比を小さくする。
- (3) 断面変化部、マンホール部の局部座屈強度に余裕を持たせる。
- (4) 全断面とけ込みグループ溶接にするなどにより、角溶接部の割れを防ぐ工夫をする。
- (5) 可能な限り不静定構造物（ラーメン）にし、隅角部、または、はり部材の降伏によりエネルギーを吸収をさせ、柱部の負担を減らす構造にする。
- (6) 厚肉の遠心鑄鋼管は、製造法に工夫をするなどにより、変形能に影響を及ぼす内部欠陥が生じないようにする必要がある。
- (7) 免震支承またはゴム支承を積極的に利用し、水平反力を分散する工夫をする。
- (8) 橋梁構造物を1つの構造システムとして捉え、耐震設計を総合的に考える。

1.6 復旧の基本方針

阪神高速道路の復旧にあたっては、平成7年2月27日付け建設省通達による「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」に適合するように全ての構造物について耐震性の向上をはかっている。

さらに、路線の重要性に鑑み、早期復旧を目指しさまざまな工夫により工事の進捗を図る必要があることや路下国道の安全性確保および交通処理に十分配慮しなければならないことから、鋼構造物については以下を基本方針とした。

- 1) 既設構造物の損傷状況を調査の上、できるだけ既設部材の再利用を図る。
- 2) 原形状に再構築・補強するのが原則とする。

以上の考え方のもとに、損傷度の判定結果に基づき構造物単位で復旧方法を「再構築」あるいは「補修・補強」に区別した。

1.7 鋼構造物の再構築

落橋した鋼桁や倒壊して使用不能と判定された鋼製橋脚は撤去して再構築することにしたが、損傷がそこまで至らなくても、調査の結果、補修や再利用が困難なものについても撤去して再構築することにした。表1-4に復旧区分別設計の標準的な考え方を示す。

表 1 - 4 復旧区分別設計の標準的な考え方

種 別		再 構 築	補 強
復旧区分の考え方		既設構造物を撤去し、復旧仕様に適合する構造物を再構築する	復旧仕様に適合するように耐震性の向上を図るための構造物を補強する。
基 礎 工		損傷の程度により、必要があれば再構築する。	損傷状況および復旧仕様に基づいて照査し、必要があれば増杭する。
下 部 工 (橋脚)	鉄筋コンクリート	柱断面は円形・矩形とも原形状を基本とし復旧仕様に適合するように断面を決定する。	原形状を基本とし、損傷部を補修して、コンクリート巻立て(厚さ20~30cm)により補強する。また、損傷状況・構造要因および立地条件等により鋼板巻立て工法を採用する。
	鋼 製	柱断面は円形・矩形とも原形状を基本とし復旧仕様に適合するように断面を決定する。柱部にコンクリートを充填する。	割れ、座屈等の損傷部を補修し、柱部にコンクリートを充填して補強する。
上 部 工 (橋桁)	鋼 製 桁	原形状を基本として、連続化する。	<ul style="list-style-type: none"> ・可能な限り既設部材を再利用して補修する。必要に応じて桁端部の損傷箇所は切断・撤去し新しい部材に置き替える。 ・必要に応じて桁端部等の部材を補強する。 ・可能な限り連続化する。
	コンクリート桁	鋼桁により連続化する。	損傷部を補修する。
床 版		鋼床版を採用する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ等の損傷箇所を補修し、鋼板接着工法により補強する。 ・撤去再利用桁については鋼床版を採用する。
支 承		免震支承を全面的に採用する。	可能な限り免震支承に取り替える。

表 1 - 5 は鋼製橋脚の損傷ランク別の再構築基数を示したものである。Bランクの2基はラーメン橋脚ではりと柱に複数の損傷箇所があり、再構築が工期的に有利と判断されたものである。Cランクの1基は、その後の調査で地中部に柱の亀裂が見つかったもので、実質Aランク相当の損傷であったと判断される。

鋼製橋脚の再構築においては、既存の基部アンカーボルトを使用するために原形状に復帰するのを基本としたが、必要に応じて基部の補強も行った。鋼製橋脚の断面形状は、変形性能の改善された断面構成(フランジ、ウェブ、縦補剛材の幅厚比、縦補剛材の剛比制限)を採用した。

表 1 - 5 鋼製橋脚の損傷度ランク別の再構築基数

損傷ランク	A _s	A	B	C	D	計
対象基数	3	8	12	112	28	163
再構築基数	3	6	2	1	0	12

1.8 鋼構造物の補修・補強

鋼構造物の補修では、変形量が修復限界を超えたものについては、損傷部位を輪切り状に切断・除去し、新規部材に取り替えることにした（写真1-14）。座屈変形で許容値を超えているが、程度の軽いものに対しては（写真1-15）、プレスまたは加熱矯正した後、補強板を取り付ける方法あるいは損傷部を部分的に取り替える補修・補強をすることにした（写真1-16）。

割れについても、軽微なものには溶接で修復するが、補修限界を超えたものについては変形損傷と同様に、損傷部位を輪切り状に切断・除去して、新規部材に取り替えることにした。

変形の修復の目安としては、以下の通り考えた。

- 1) 縦補剛材の塑性変形を伴う座屈は矯正できない。
- 2) 板厚程度以下の板パネルの変形は矯正できる。

また、これらの補修・補強対象としては、損傷度Bランク以上のものが主な対象となっており、損傷度Cランクで多く見られた塗料の剥離程度の変形のものに対しては、対象とはなっていない。すなわち、塗料の剥離程度のものについては、再塗装を行うことで対処した。

一方、鋼製橋脚の地震時保有水平耐力を向上させる方法としては、鋼部材による補強も考えられるが、今回の被災構造物については、早期復旧の観点から、復旧仕様通りに鋼製柱内にコンクリートを充填して補強することになっている。

参考文献

1. 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震による道路橋の震災に関する調査（中間報告書），1995年3月
2. 土木学会鋼構造委員会・鋼構造動的極限性状小委員会：鋼構造物の弾塑性性状と耐震設計法，1992年3月.
3. 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会：鋼構造の新技術に関する調査研究・報告書（中間報告），同資料集，1993年3月.
4. 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会：鋼構造の新技術に関する調査研究・報告書（中間報告），同資料集，1994年3月.
5. 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会：鋼構造の安全性の調査報告，1995年5月.
6. 土木学会：阪神大震災調査緊急報告会資料，1995年2月.
7. 土木学会：阪神大震災における鋼構造物の被害報告と今後の耐震設計について，1995年5月.

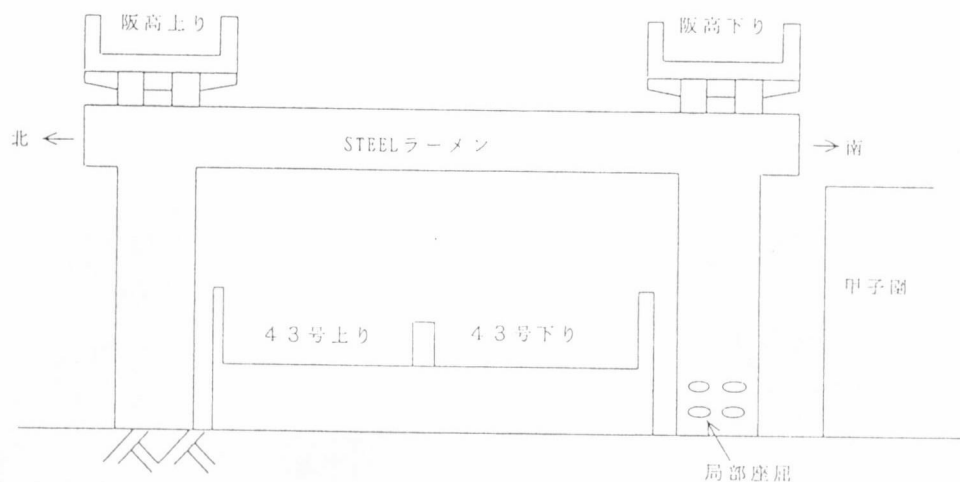


図1-3 鋼製ラーメン橋脚基部の局部座屈

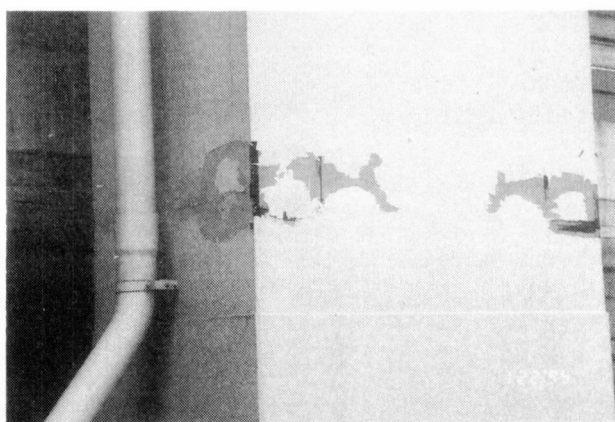


写真1-1 鋼製ラーメン橋脚基部の局部座屈

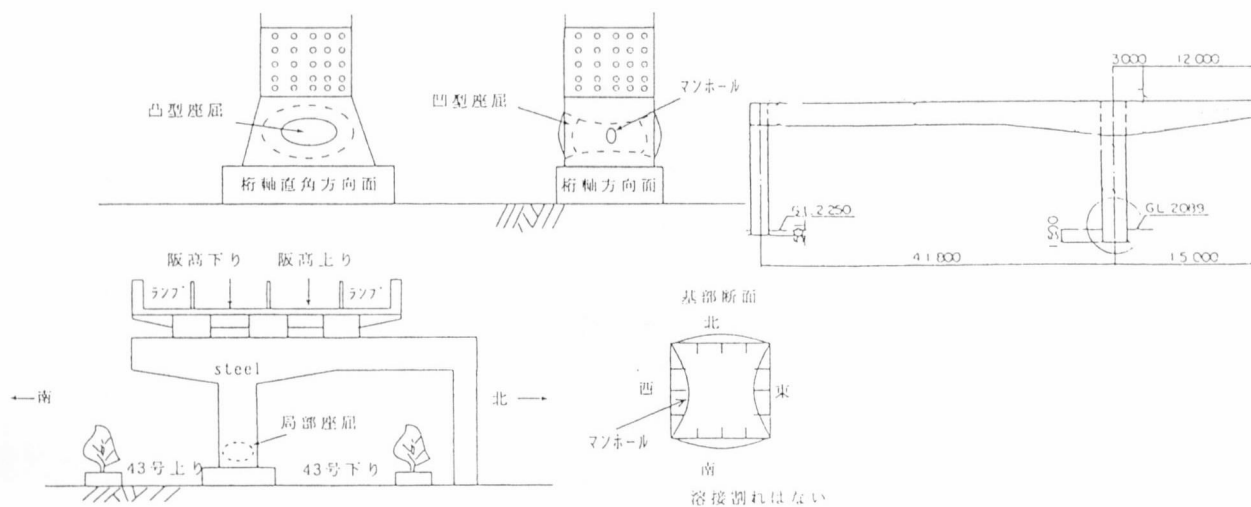


図1-4 橋脚基部におけるパネル全体の局部座屈

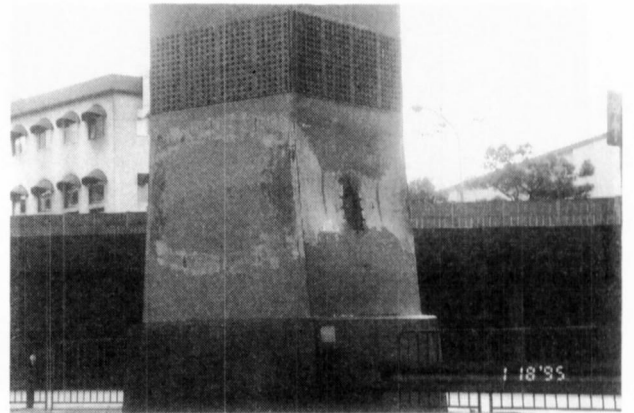
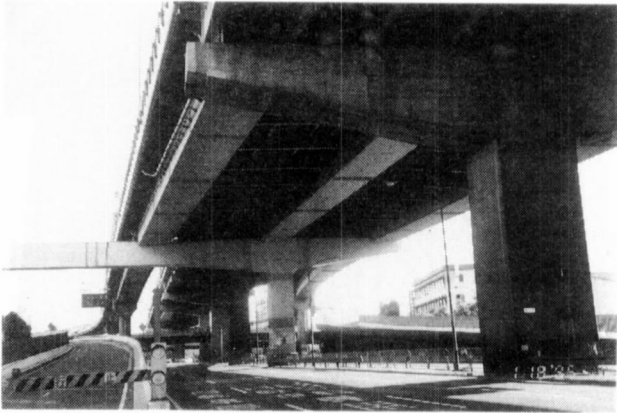
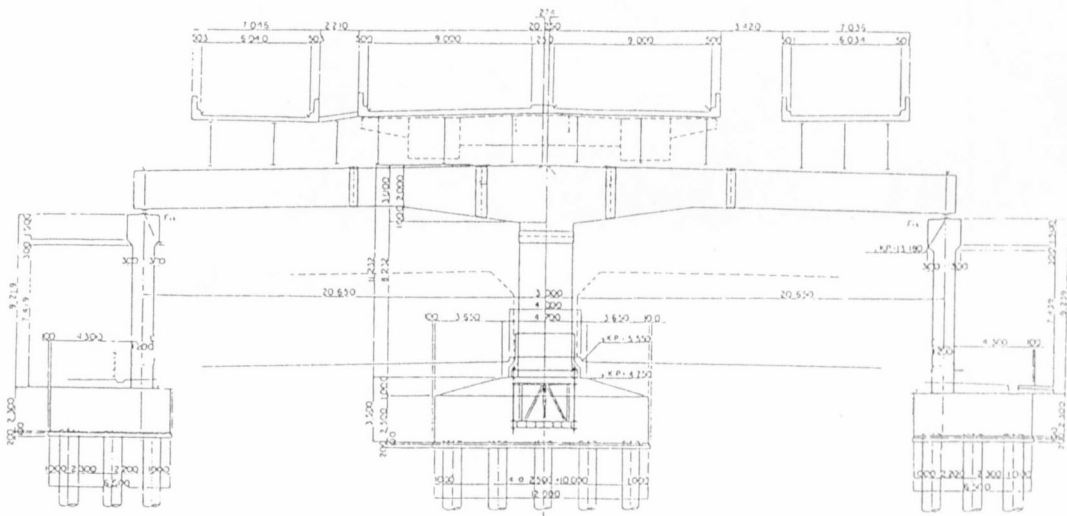
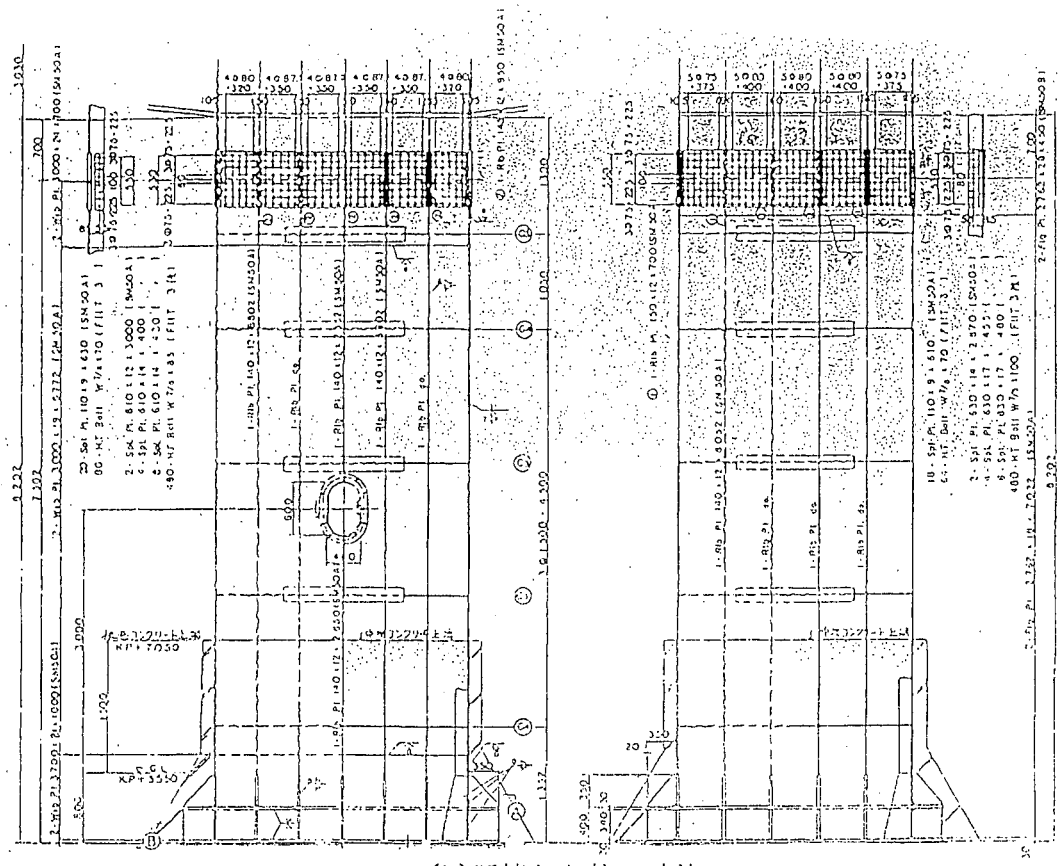


写真1-2 橋脚基部におけるパネル全体の局部座屈

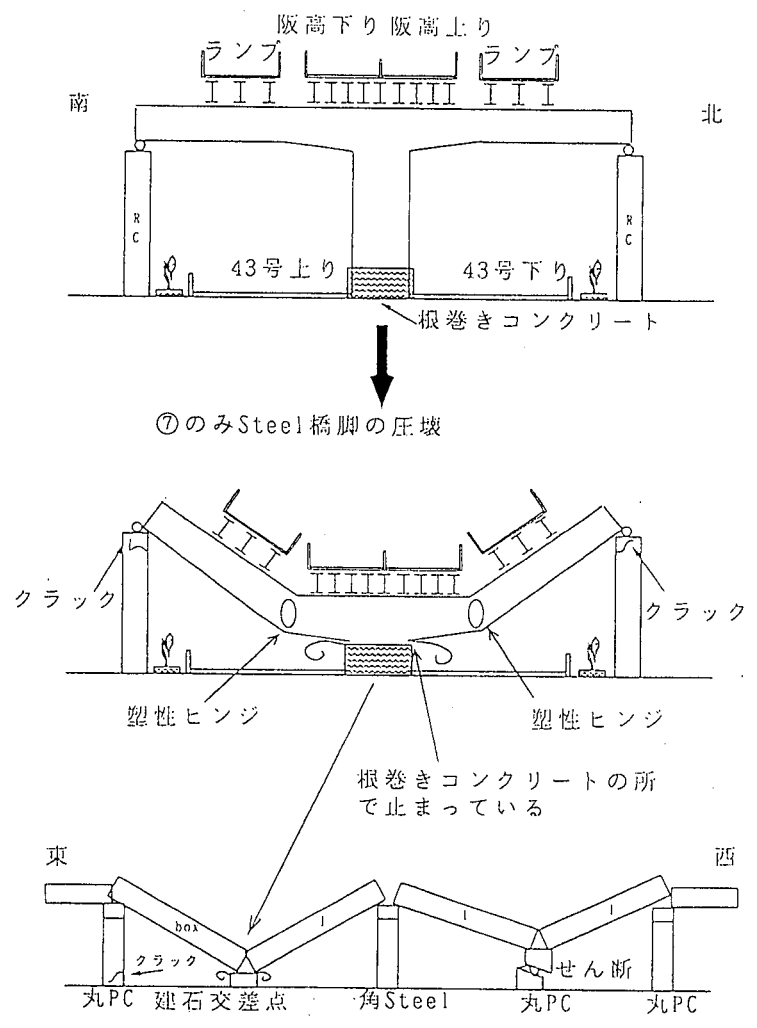


(a) 圧壊したT型鋼製橋脚の一般図

図1-5 T型鋼製橋脚の圧壊



(b) 圧壊した柱の寸法



(c) 圧壊のメカニズム

図1-5 T型鋼製橋脚の圧壊

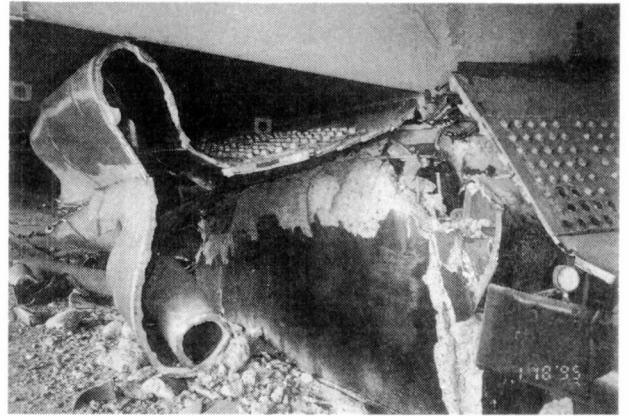
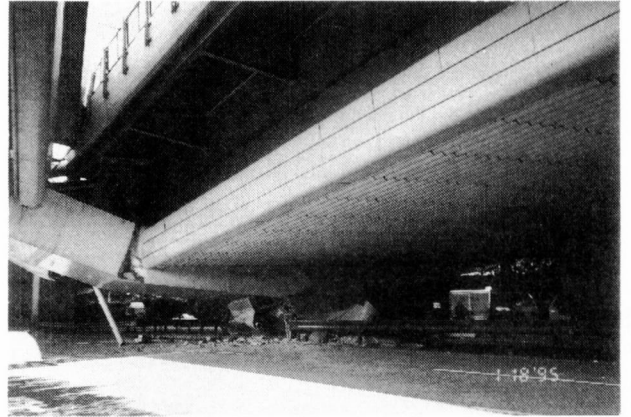
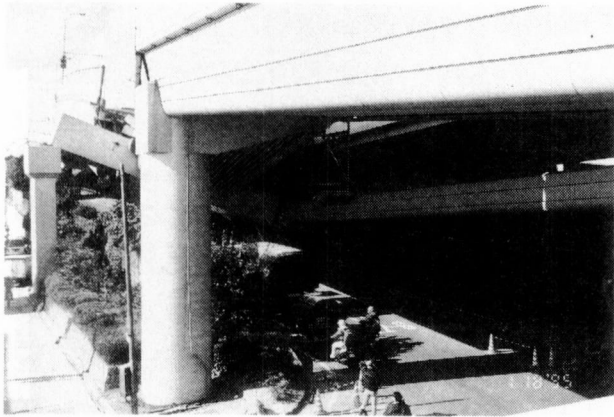


写真1-3 建石交差点の圧壊した鋼製橋脚

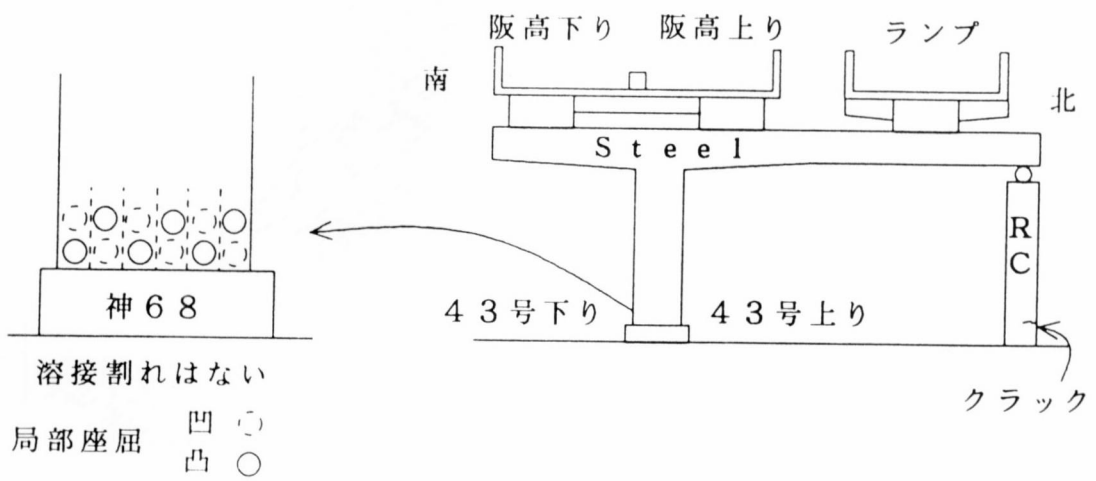


図1-6 T型鋼製橋脚の局部座屈

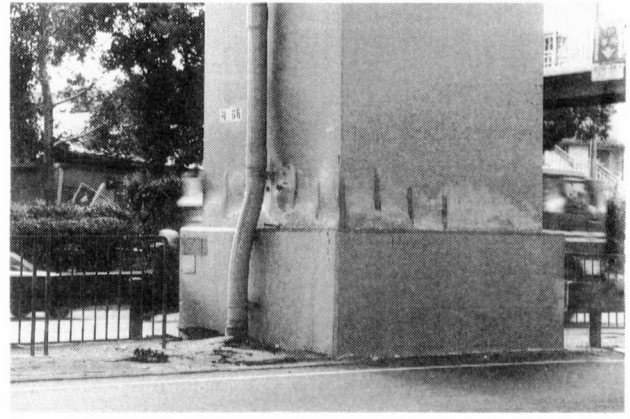


写真1-4 T型鋼製橋脚の基部の局部座屈



写真1-5 鋼製ラーメン橋脚の隅各部のクラック

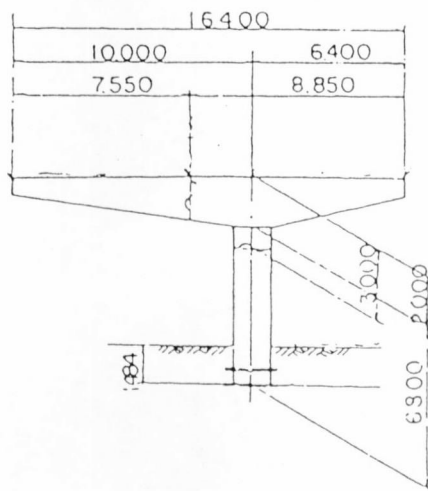


図1-7 片側に張り出しの長い変形T型橋脚

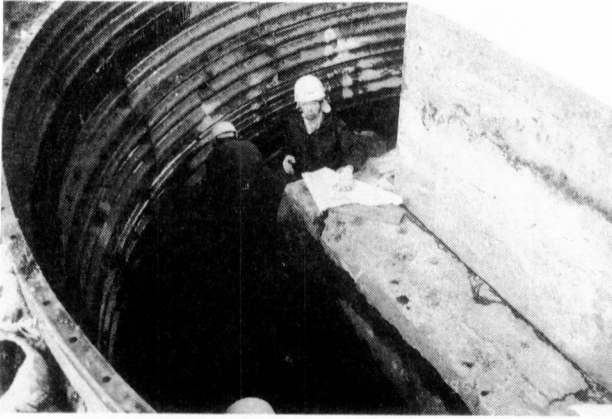


写真1-8 鋼製橋脚のアンカーボルトの抜けだし

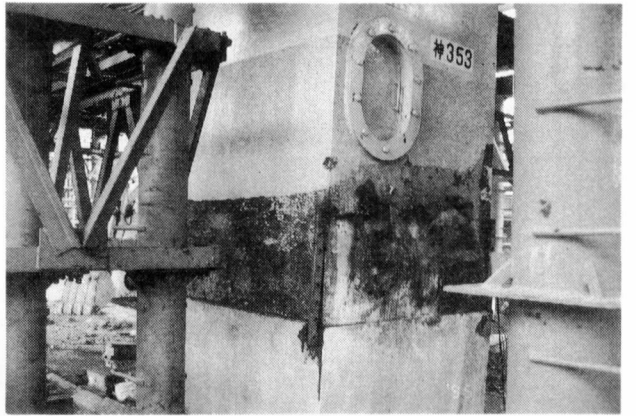
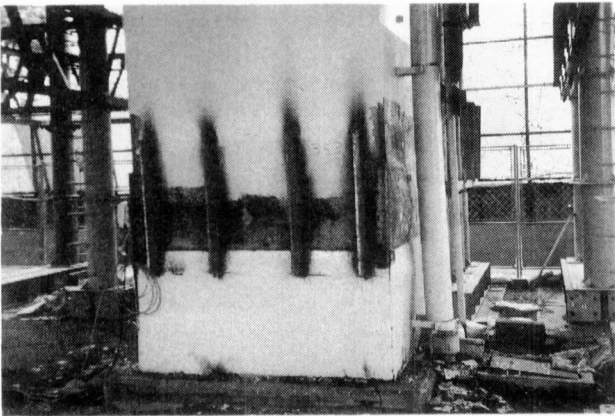
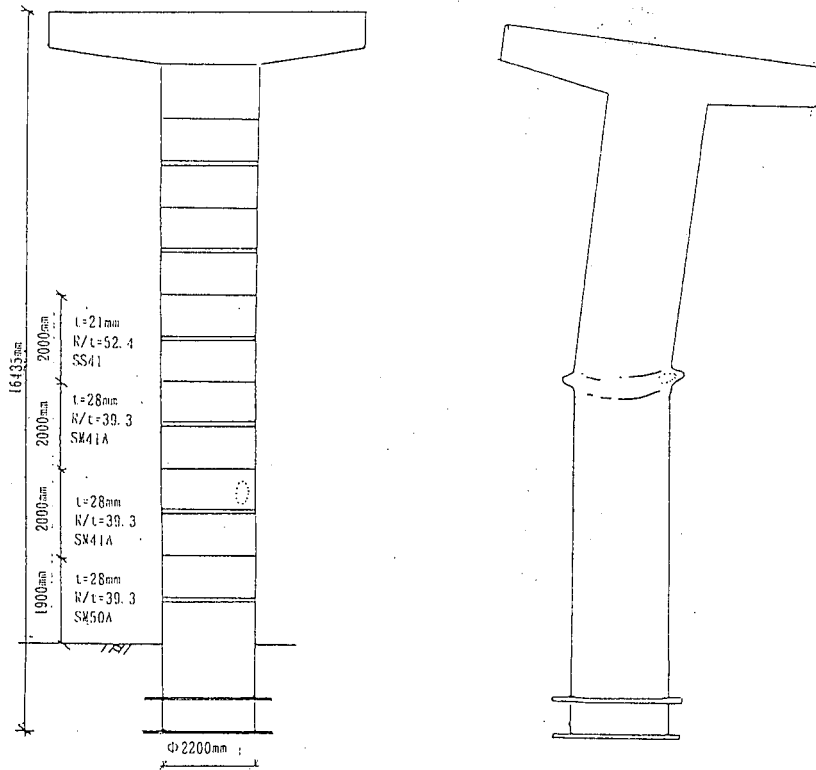


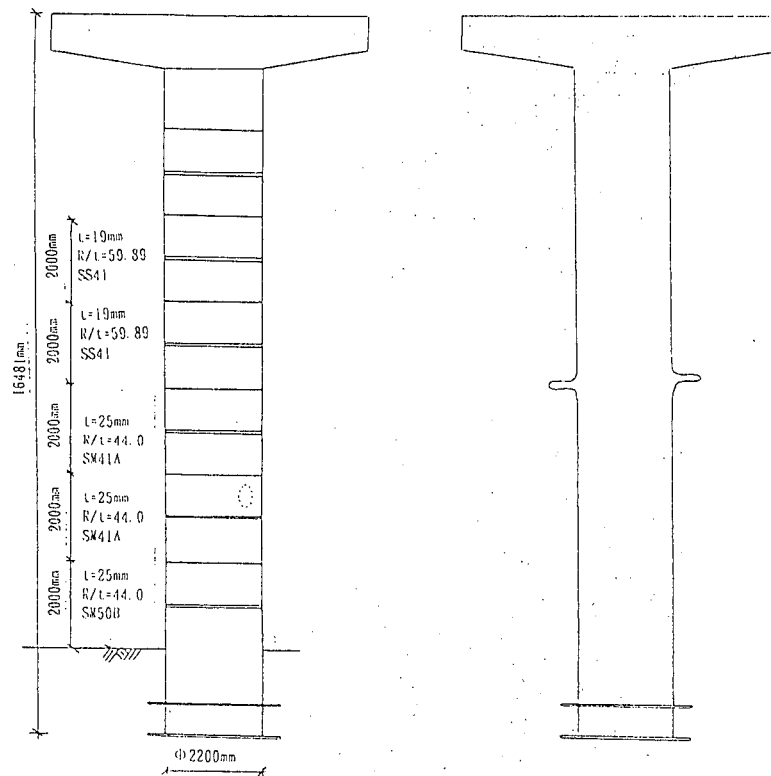
写真1-7 張り出しの長いT型鋼製橋脚の基部のパネルの座屈変形



写真1-8 背の高い円形断面T型鋼製橋脚の被害



(a) 神下 P - 5 8 4



(b) 神上 P - 5 8 4

図1-8 座屈変形とクラックが生じた橋脚

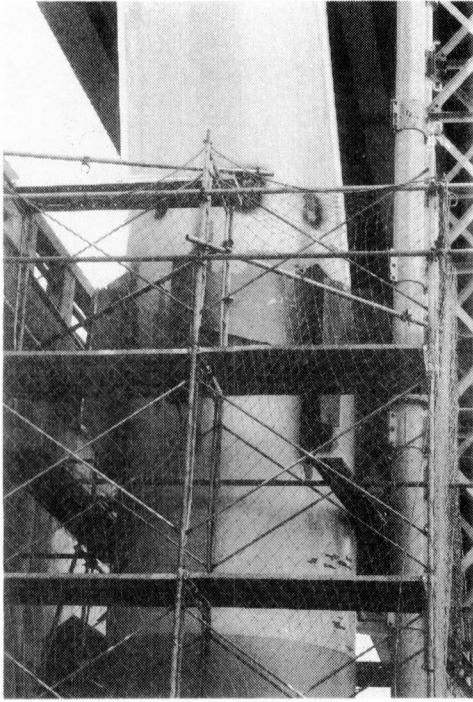


写真1-9 局部座屈と破断クラックが生じ大きく傾いた橋脚

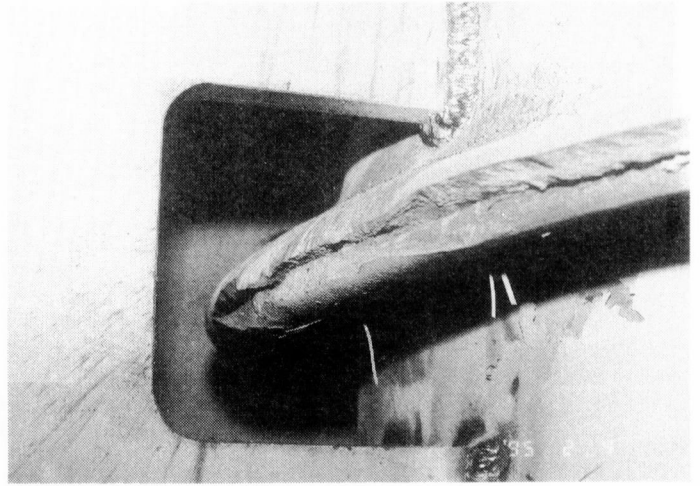


写真1-10 提灯座屈がさらにつぶれ破断した損傷



写真1-11 橋脚基部の橋軸直角方向の片側の大きな曲部座屈



写真 1 - 1 2 ベースプレートと橋脚柱の接合部のクラック



写真 1 - 1 3 コーナー部に曲率をもつ鋼製橋脚の座屈

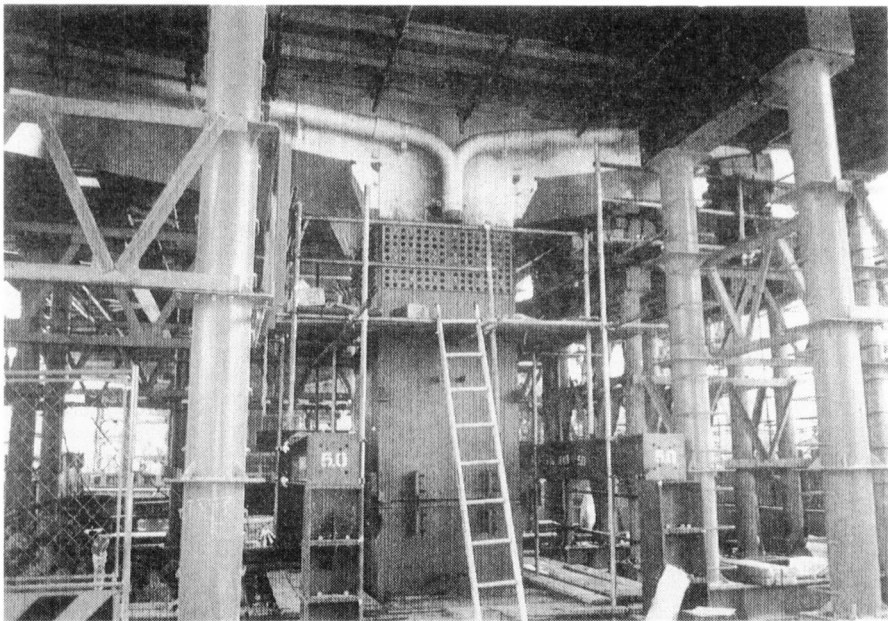
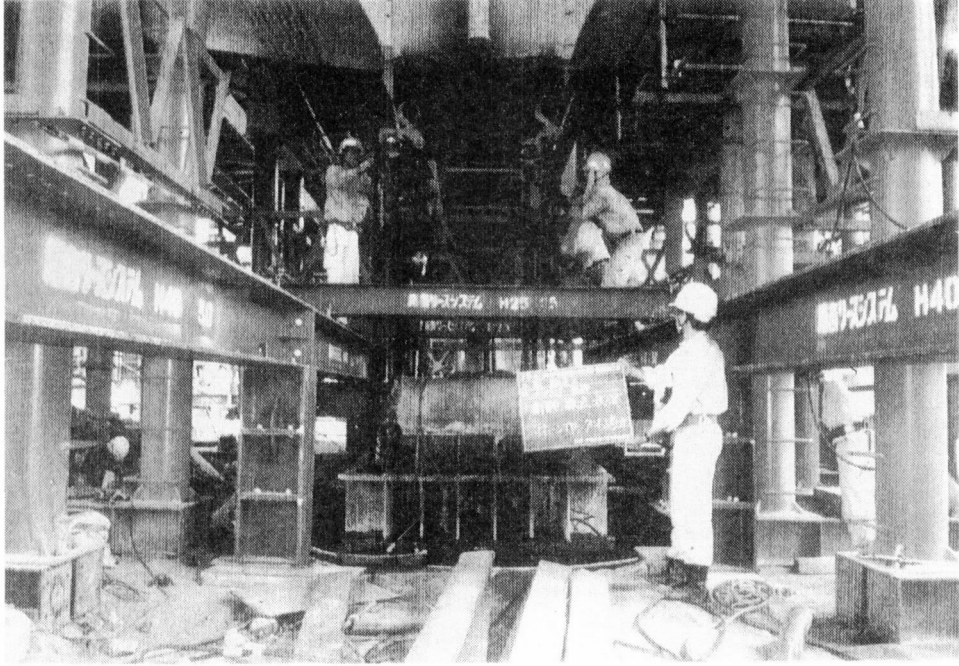


写真 1 - 1 4 損傷部位を輪切りして新規部材に取り替える

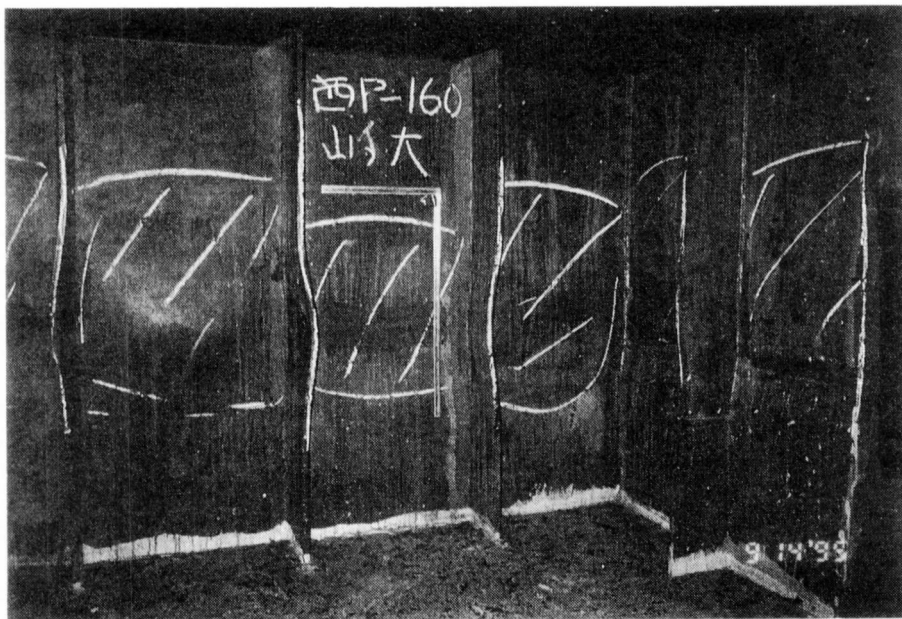
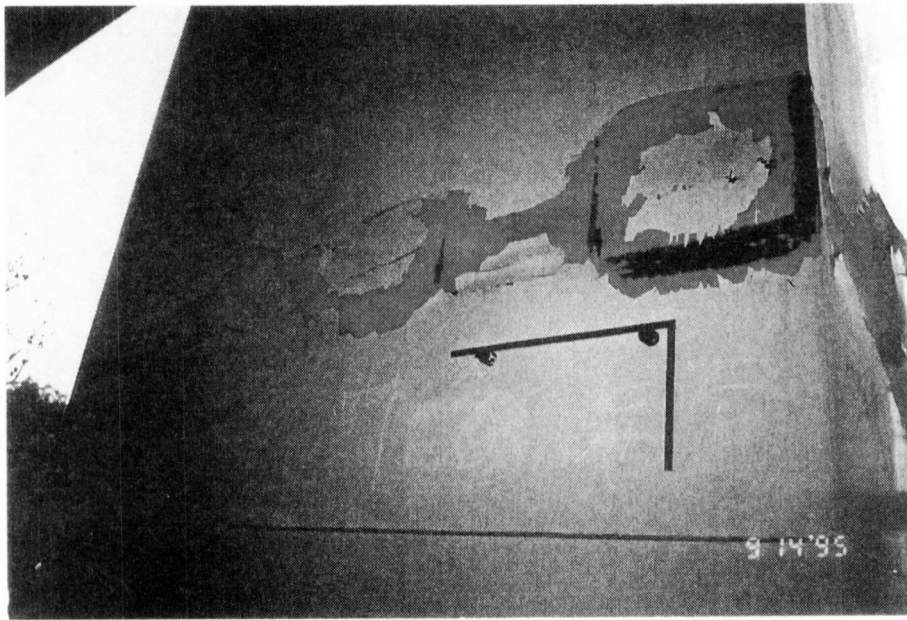


写真 1 - 1 5 程度の軽い局部座屈



写真 1 - 1 6 損傷部の部分的取り替えと縦補剛材の追加