

2. 構造部材別被害報告

ここでは、平成7年1月17日の兵庫県南部地震による鋼構造物の崩壊・損傷事例を、橋脚、上部構造、支承、落橋防止装置、伸縮継手、および添接部に分けて整理してみた。また、その原因が推定できるものについては、できるだけ原因を記述するようにした。

2.1 鋼製橋脚

(1) 破壊

写真-2.1に示すように、鋼製橋脚が完全に崩壊したものが、2体あった。明確な原因は不明であるが、他のRC橋脚が崩壊したことなどのために作用荷重が大きくなり、地震後に、角溶接部がバナナの皮をむくように剥がれ、崩壊した。いずれも二次的な崩壊であるが、鋼製橋脚の耐震設計法を改良する上で参考となる点があるかどうかについて、詳しく調べる必要がある。

写真-2.2には、RC橋脚の崩壊事例を示している。図-2.1に示すように、桁間長 Δ が小さかったり、あるいは桁間連結装置が桁の変位を拘束したりして、上部構造が橋脚の変位を拘束すると、特に剛性の大きいRC橋脚では、地盤の変動変位を吸収できず、せん断破壊する場合がある。さらに、鉄道の高架橋では、レール、および道床などの拘束もあり、この種の崩壊が発生する傾向が強かったように思われる。

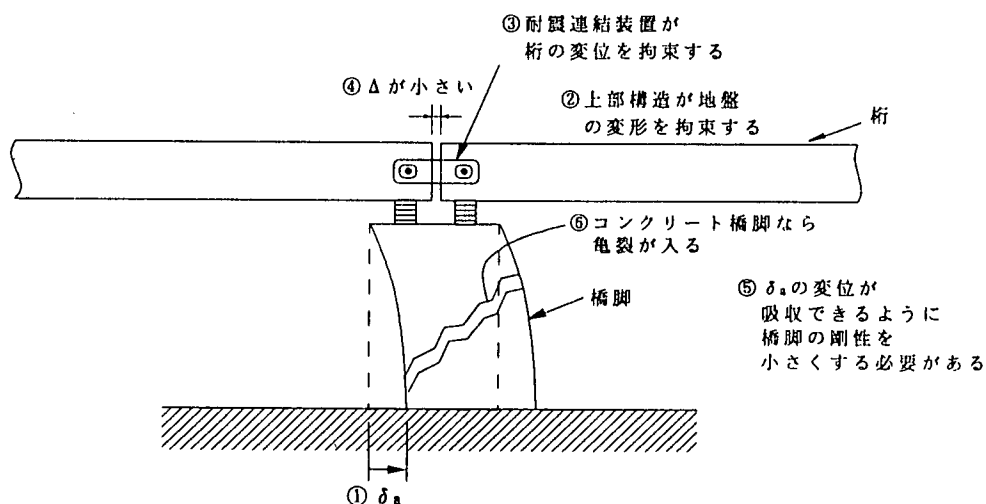


図-2.1 上部構造による変位拘束に起因する橋脚の破壊

写真-2.3には、化粧板で覆われた地下鉄の鋼製柱を示している。このように、化粧板で覆うと、維持管理、および震災復旧対策上、損傷の発見が難しくなり、二次災害の原因となる場合もある。

(2) 基礎の移動による剛体変形

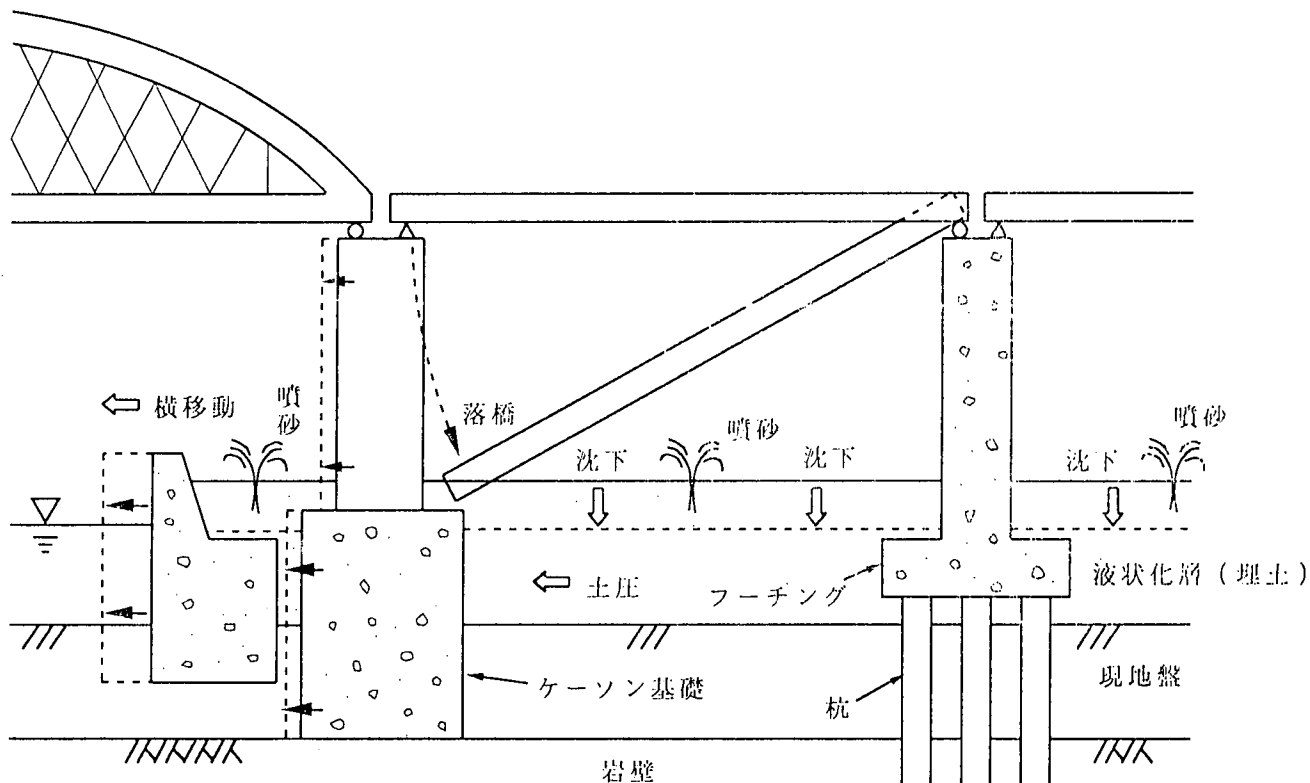


図-2.2 岸壁に近い橋脚の移動メカニズム

写真-2.4には、液状化による側方流動によって、岸壁側に移動した橋脚の例を示す。橋脚が移動することによって、アプローチ側の桁が落ちる寸前に至った。この例のように、岸壁に近い橋脚基礎においては、図-2.2に示すように、岸壁側の土圧が期待できなくなり、岸側の土圧によって、橋脚基礎が岸壁側に移動する例がかなり見られた。岸壁に近い橋脚に対しては、今後、何らかの対策が必要である。

(3) 局部座屈

1) 橋脚柱 (円形断面, 矩形断面) 基部

写真-2.5には、橋脚基部の中埋コンクリートの少し上の鋼断面の局部座屈波形を示している。内部に設けられている補剛材の間の板パネルの座屈が発生しているのがわかる。この座屈から、橋軸方向にかなり大きな地震力が作用したことがわかる。しかしながら、補剛材間の板パネルの座屈のみが発生し補剛板パネル全体の座屈の発生に至っていない。したがって、強度の低下が少ない状態で橋脚の剛性が低下し、そのために、作用地震荷重が小さくなり、崩壊に至らなかったものと思われる。今回の地震では、このように補剛材間の板パネルの座屈のみが発生し補剛板パネル全体の座屈の発生に至らない場合がほとんどであった。実験では補剛板パネル全体の座屈が発生する場合が多いのに、実橋脚では、なぜ発生しなかったのかについて、詳しく調査する必要がある。

写真-2.6には、コーナー部に曲率を有する箱形断面の橋脚基部の補剛板パネルが座

屈した事例を示している。この断面においても、上記の箱形断面の場合と同じことといえる。

2) 橋脚柱（円形断面，矩形断面）中間部

写真-2.7には、円形断面の橋脚中間部に発生した局部座屈の例を示している。基部ではなく中間部に座屈が発生した理由としては、以下の点が考えられる。

- ①その位置で板厚が薄くなっているため。
- ②死荷重と衝撃的な上下振動とによる圧縮力，および水平振動による曲げモーメントが連成したため。

衝撃座屈という現象があるが、写真-2.7に示した座屈にその影響がなかったかどうか、今後、検討する必要がある。逆に、RC橋脚の場合、衝撃による引張破壊，すなわちスポーリング（spalling）破壊の現象がなかったかどうかについて検討することも必要である。

3) 横梁

写真-2.8には、2層ラーメン橋脚の1層めの横梁中央付近の腹板がせん断座屈した事例を示している。橋軸直角方向，すなわちラーメン構造の面内方向の地震に対しては、この部位が最も弱く、そこが座屈している。それによって、強度の低下が少ない状態で橋脚の面内剛性が低下した。その関係で、地震荷重が低下し、この橋脚は崩壊に至らなかったものと思われる。

（4）脆性破壊（低サイクル疲労）

1) 橋脚柱（円形断面，矩形断面）基部

ベース・プレートと橋脚柱との接合溶接部には、低サイクル疲労に起因する脆性破壊の可能性がある。しかし、この部分は、根巻きコンクリートにより覆われているため、検査が難しい。しかしながら、この事例も、そのうち発見される可能性がある。

2) 橋脚柱（円形断面，矩形断面）中間部

写真-2.9には、基部ではなく中間部に発生した低サイクル疲労に起因する脆性破壊の事例を示している。これは、大きな座屈変形に伴う材料硬化に起因する脆性破壊である。これ以外に、溶接部の低サイクル疲労を発端とする脆性破壊の事例も発生する可能性がある。

写真-2.10には、遠心力鋳造法による溶接構造用高張力鋼管柱（Gコラム）の橋脚柱の脆性破壊の事例を示している。Gコラム素管には、図-2.3に示すものがある。Gコラムは、図-2.4に示すように、部材軸回りの回転による円心力を利用して鋳造されるが、その際、内面の仕上げが完全でなくなるとともに、冷却が外面から始まり、内面が冷える際に拘束を受けるなどの原因で、内面付近に欠陥が生じやすい。この欠陥が引き金となって、脆性破壊を起こしたものと考えられる。Gコラムは、土木、および建築分野の構造物の柱として、かなり用いられている。したがって、今後、Gコラムの製造方法について、何らかの改良が必要であると考えられる。

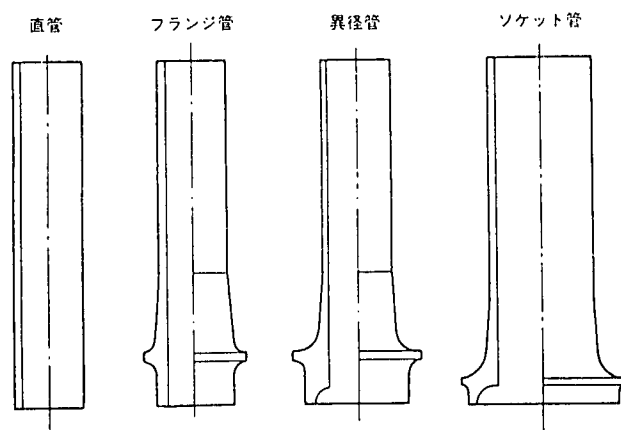


図-2.3 Gコラム素管の種類

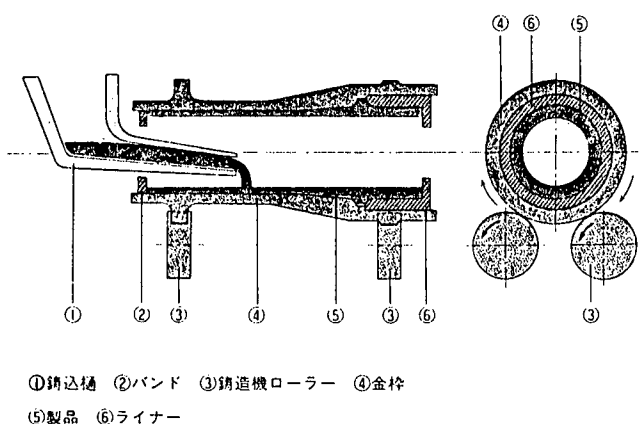


図-2.4 遠心力鑄造法

3) 橋脚隅角部

写真-2.11には、ラーメン橋脚の柱と横梁との交差部である隅角部の内側の低サイクル疲労に起因すると思われる脆性破壊の事例を示している。大きな地震力によって、応力集中部に延性亀裂、あるいは低サイクル疲労による亀裂が発生し、それが引き金となって、脆性破壊が起ったと考えられる。

一般に、この部位は、自動車荷重による高サイクル疲労が問題となる。したがって、高サイクル疲労により亀裂が生じ、それが引き金となって、脆性破壊が発生する可能性も考えられる。ただし、写真-2.11のラーメン橋脚は、比較的に新しいもので、高サイクル疲労により亀裂が既に発生していた可能性は少ないと考えられる。

(5) 開口部の座屈

写真-2.12に示すように、橋脚柱の開口部に座屈が発生した事例がかなりみられた。一般に、開口部においては、その位置における内側の縦補剛材が切断されている場合が多い。開口部の補強方法について、現在ところ十分な設計基準が設けられていないので、今後、検討することが必要である。

(6) 橋脚上部のクリッピング

支承位置の移動によって発生した橋脚上部のクリッピングの事例を、写真-2.13に示す。大地震時にも、支承が移動しないようにすれば発生しない損傷である。

2.2 上部構造

(1) 落橋

1) 橋脚から桁が外れて落ちた場合

写真-2.14には、橋脚から桁が外れて落橋した事例を示している。橋脚から桁が外れるのは、以下の理由による。

- ① 桁がかり長が、橋脚の振動水平変位をカバーできない場合
- ② 桁間長が小さく隣の桁の水平振動により押されて落橋する場合、特に、道路や河川を越える長大橋に隣接するアプローチ橋で、この事例がよく見られた。

2) 橋脚が崩壊して落橋した場合

R C 橋脚の崩壊により落橋した橋梁の事例を写真-2.15に示す。橋脚が崩壊すると、当然、上部構造も崩壊する。また、上部構造、橋脚、フーチング、基礎杭と、下部の構造物が破壊するほど、被害が大きくなる。したがって、下部の構造物ほど破壊確率が小さくなるように設計するのがよいと考えられる。

(2) 移動

1) 桁間の拡大・橋軸方向への移動

上記の2.2(1)1)②の理由により、橋軸方向へ移動したが、なんとか落橋を免れた橋梁の例を写真-2.16に示す。

2) 橋軸直角方向への移動

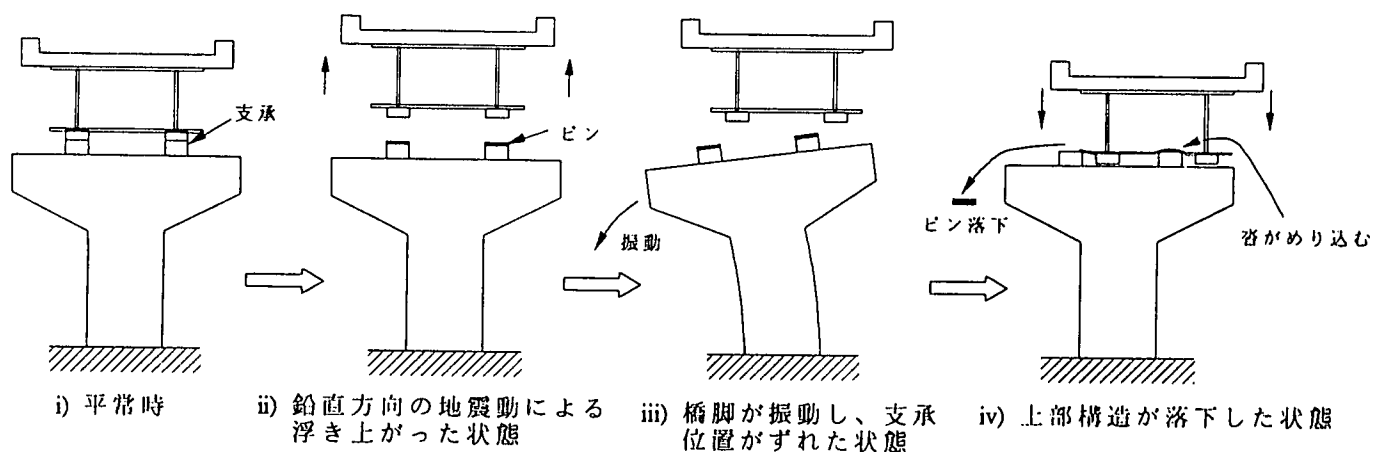
橋軸直角方向へ移動した橋梁の事例を、写真-2.17に示す。

橋梁が橋軸方向、およびそれに直角横方向に移動する原因として、以下の理由が考えられる。

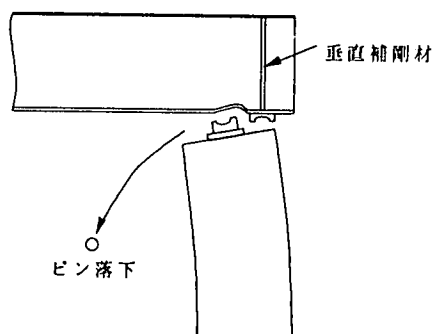
- ① 水平横振動により支承が破壊した場合
- ② 鉛直振動により支承が破壊した場合（図-2.5参照）

(3) 傾き

写真-2.18には、支承が抜け落ちて、橋全体が横方向に傾いた斜張橋の例を示している。これも支承を十分に設計しておけば問題がなくなる事例である。



(a) 支承位置における横断面（橋軸直角方向にずれた場合）



(b) 側面図（橋軸方向にずれた場合）

図-2.5 負反力に対する支承の強度が十分でない場合の主桁の移動

（４）破損

１）桁の折れ曲がり

連続箱桁橋を支持する１つのＲＣ橋脚の崩壊により、設計荷重をはるかに上回る曲げモーメントが作用し、座屈した箱桁の例を、写真-2.19に示す。この箱桁の座屈は、ＲＣ橋脚の崩壊による二次的なものである。このような点までを考慮して、上部構造を設計する必要はないと考えられる。しかし、このような崩壊が発生しても、それが、隣接道路の機能を妨害したりすることのないように配慮することは必要であると考えられる。

２）桁端部

桁端部の破損の事例を、写真-2.20～2.24に示す。これらの事例に示すように、桁端部の破損には、以下の事例が見られた。

- ①主桁の変形
- ②隣接桁、あるいは橋脚との衝突による破損
- ③亀裂

- ④ 支承位置の移動に起因する下沓の主桁内部への貫入，あるいはクリッピング
- ⑤ 垂直補剛材の座屈

3) 横構の折れ曲がり

並列 I 桁橋の横構が折れ曲がった事例を，写真-2.25に示す．これは，並列 I 桁の 1 つの外主桁が，桁の横移動により橋脚から外れ落ちて，並列 I 桁に大きなねじりモーメントが作用したためである．

4) ニールセン・ローゼ橋のケーブルの破損

写真-2.26には，ニールセン・ローゼ橋のケーブルが破損した事例を示している．2 本のケーブルが抜け，1 本のケーブルが緩んでいる．地震による補剛桁の振動が大きいと，ケーブルのいくらかが緩み，ケーブル端部のソケットを支持する金具が抜け落ちるためと考えられる．下側の金具が抜けるとケーブルが緩み，上側の金具が抜け落ちるとケーブルも抜け落ちることになる．

5) アーチ橋の上横繫材の座屈

写真-2.27には，アーチ橋の上横繫材が座屈した事例を示している．これは，1 つの橋端の 2 つの支承の 1 つが外れ，アーチ橋に大きなねじりモーメントが作用したためである．

6) 斜張橋のペンデル沓の破壊

写真-2.28には，斜張橋の端部のペンデル沓が破壊した事例を示す．この斜張橋では，ウィンドウ沓で橋軸直角方向の水平力を取る構造になっていた．しかし，それを支えるボルトが破断し，水平力が取れなくなり，ペンデル沓のピンが抜けてしまった．これも，ウィンドウ沓の破壊による，二次的な破壊である．

2.3 支承

写真-2.29，および写真-2.30には，支承が抜け落ち，橋が，それぞれ橋軸直角方向，および橋軸方向へ移動した事例を示している．また，写真-2.31，および写真-2.32には，落下した支承を示している．写真-2.33には，落ちそうになっている支承を示している．支承が壊れて抜け落ちると，上部構造に大きなダメージを与えると同時に，下の構造物，自動車，および人に被害を及ぼす．今後，大地震下の支承の設計法について，十分な検討が必要である．

写真-2.34には，水平，および鉛直上方向の変位が拘束できない支承で支持された P C 桁が横移動したり，落橋している事例を示している．このような支承は，橋脚の地震動を桁にあまり伝えないので，落橋の可能性はあるが，橋脚の被害は比較的少ない．この事例が，今後，支承の設計法を確立する上で，参考になると考えられる．

2.4 落橋防止装置

(1) 桁間連結装置

写真-2.35には、桁間連結装置のボルトが破断した事例を示している。桁間連結装置の破断には、以下の3ケースがある。

- ①連結ボルトの破断
- ②連結板の破断
- ③取り付けられている腹板の破断
- ④連結板を取り付けている溶接部の破断（写真-2.36参照）

(2) 落橋防止装置

写真-2.37には、建設後に桁がかり長を広くするために設置された落橋防止装置が破壊された事例を示している。どういう構造であったか不明であるが、大地震に対して、桁間連結装置、桁間長、および桁がかり長を含む落橋防止装置の設計法について、再検討することが必要である。

同じく、写真-2.38には、橋軸直角方法への落橋を防止するために増設された装置が破壊した事例を示している。

2.5 伸縮継手

写真-2.39、および写真-2.40には、それぞれ鋼製、およびゴム製の伸縮継手の破断事例を示している。伸縮継手は、支承の破壊によって二次的に破壊する。したがって、伸縮継手の設計は、支承、桁間連結装置、桁間長、および桁がかり長の設計とも関連してくる。今後、桁端部全体を1つの構造としてどう耐震設計するのかについて検討することが必要である。

2.6 添接部

(1) 滑り

写真-2.41には、添接板の周辺の塗装が剥がれている事例を示している。このような事例が沢山見られた。その原因としては、以下の点が考えられる。

- ①添接板の滑り
- ②添接板の周囲の大きな塑性変形
- ③ボルトの緩み

このような添接部のボルトを、新しくセットしなおす必要があるかどうかの判定方法を確立する必要がある。

(2) ボルトの破損

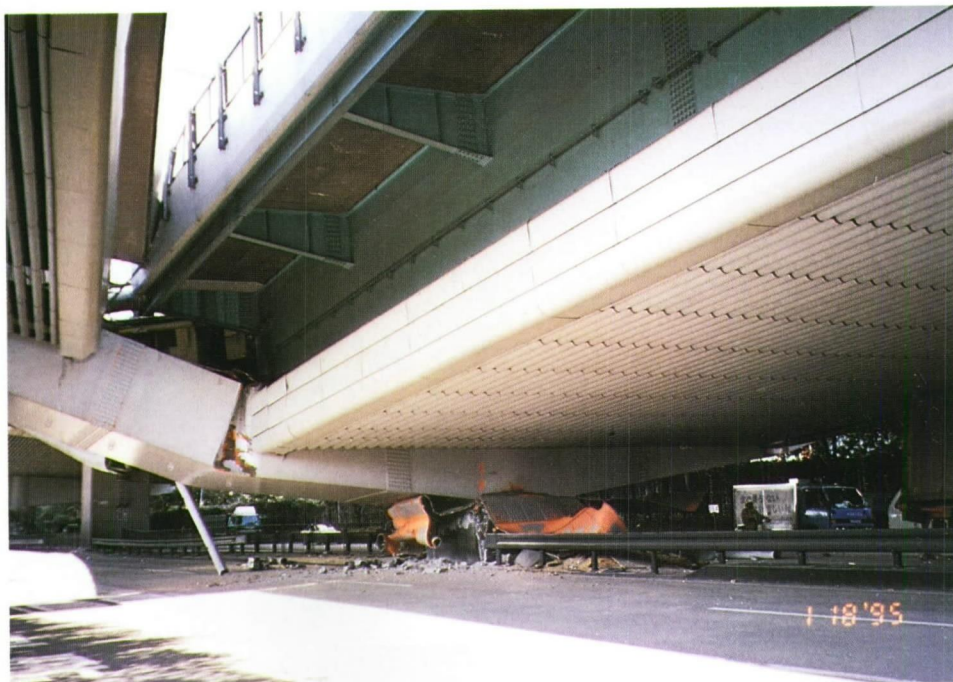
当然ボルトが破断した事例もあると考えられる。

(3) 添接部の付近の補剛板の座屈

写真-2.42には、添接部の付近の補剛板が座屈した事例を示している。添接部では、断面性能が急変するので、その周辺における座屈設計について、何か改良する点があるかどうかについて、今後、検討する必要がある。

2.7 まとめ

以上、今回の地震による鋼構造物の被害状況を、構造部材別に整理し、原因が推定できるものは、それを記述した。今後は、さらに、新しい事例があれば、追加したり、すべての事例の原因を明らかにすることが必要である。また、その後、それらのデータに基づき、改良案について、検討することが必要である。



写真－２．１

鋼製橋脚の崩壊事例



写真－２．２

R C 橋脚の崩壊事例



写真－２．３

化粧板で覆われた地下鉄
の鋼製柱



写真－２．４ 岸壁に近い橋脚の移動



写真－２．５ 箱形断面の橋脚基部
の補剛板パネルの座屈



写真－２．６ コーナー部に曲率を有する
箱形断面の橋脚基部の
補剛板パネルの座屈



写真－２．７ 円形断面の橋脚中間部の局部座屈

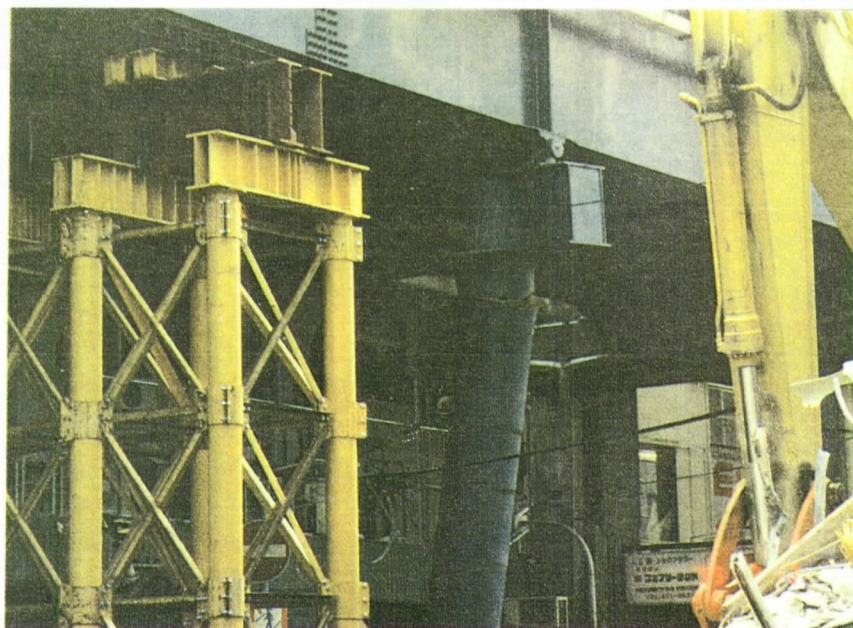


写真－２．８ ラーメン橋脚の横梁中央付近の腹板のせん断座屈



写真－２．９

円形断面の橋脚柱の座屈
変形に伴う割れ



写真－２．１０

G コラムの橋脚の脆性
破壊



写真－２．１１

ラーメン隅角部の低サイ
クル疲労に起因する脆性
破壊



写真－ 2 . 1 2

開口部の座屈の事例



写真－ 2 . 1 3

支承位置の移動による
橋脚上部のクリッピング



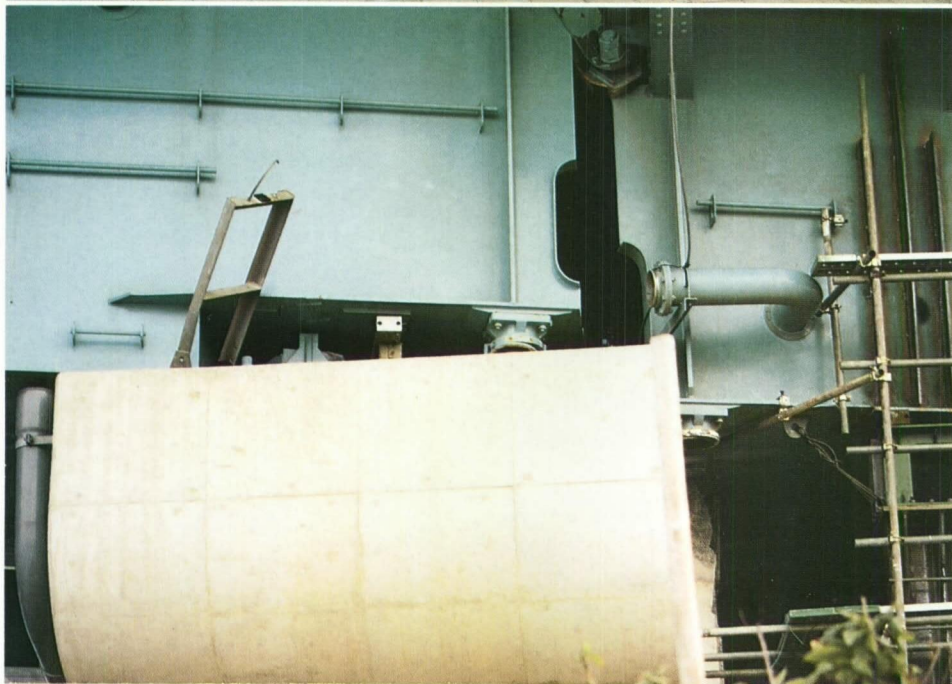
写真－ 2 . 1 4

橋脚から外れて落橋した
事例



写真－２．１５

R C 橋脚の崩壊により
落橋した曲線橋



写真－２．１６

橋軸方向へ移動したが
落橋を免れた橋梁



写真－２．１７

橋軸直角方向へ移動した
橋梁



写真－２．１８

横方向に傾いた斜張橋



写真－２．１９

箱桁の曲げ座屈



写真－２．２０

主桁端部の変形と割れ



写真 - 2.2 1

主桁端部の変形

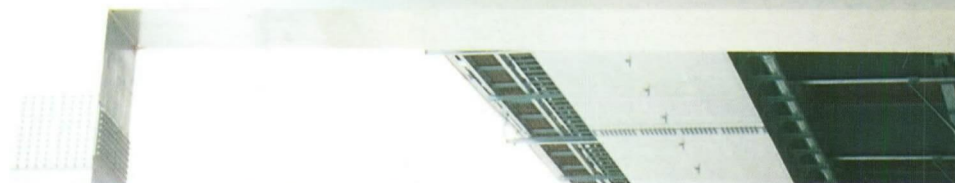


写真 - 2.2 2

橋脚との衝突による
桁端部の変形と割れ



写真 - 2.2 3

垂直補剛材の座屈



写真 - 2.24

支承位置の移動に起因するクリッピング（ただし、中間支点部）



写真 - 2.25

横構の折れ曲がり

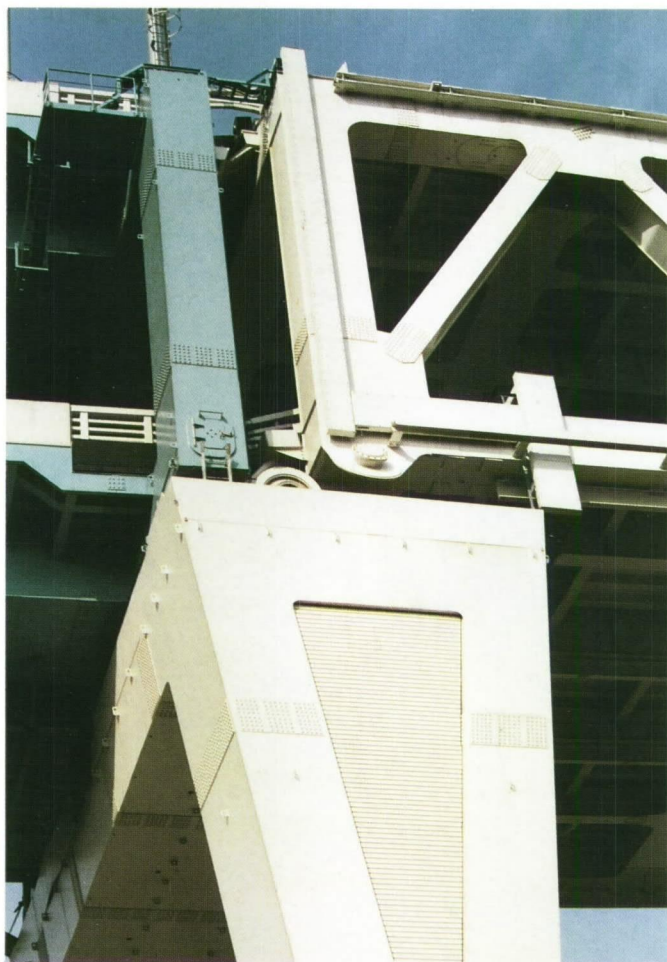


写真 - 2.26

ニールセン・ローゼ橋の
ケーブルの破損



写真－２．２７ アーチ橋の上横繫材の座屈



写真－２．２８ 斜張橋のペンデル沓の破壊



写真 - 2.29

支承が抜け落ちた事例



写真 - 2.30

支承位置がずれた事例



写真 - 2.31

抜け落ちたピボット沓



写真－２．３２

抜け落ちたローラー沓



写真－２．３３

落ちそうになっている
固定支承



写真－２．３４

水平変位を拘束できない
支承を有する桁および橋
脚の被害



写真 - 2.35

桁間連結装置のボルトの
破断

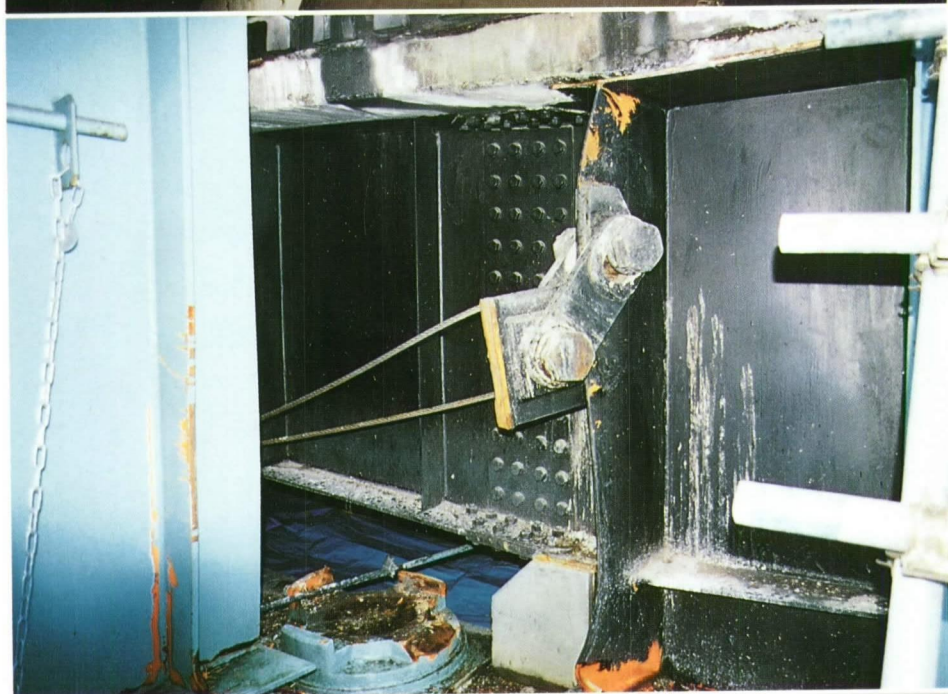


写真 - 2.36

桁間連結装置の取付け板
の溶接部の破断



写真 - 2.37

増設された落橋防止装置
の破壊



写真－ 2 . 3 8

橋軸直角方法への落橋を防止するために増設された装置の破壊



写真－ 2 . 3 9

破損した鋼製の伸縮継手



写真－ 2 . 4 0

破損したゴム製の伸縮継手

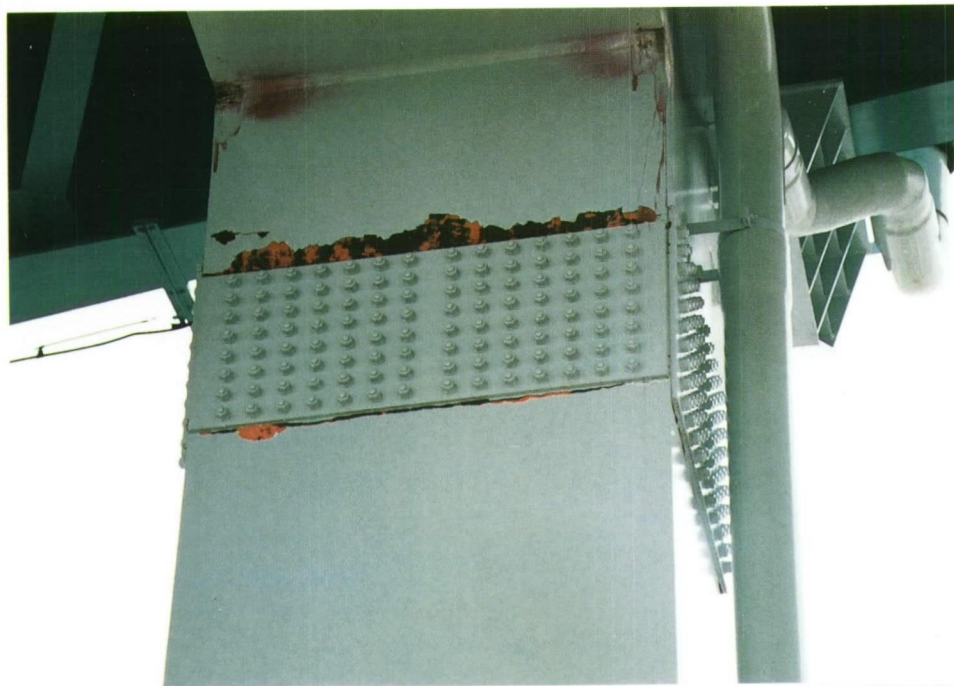


写真 - 2 . 4 1

添接板の周辺の塗装の
剥がれ



写真 - 2 . 4 2

添接部の付近の補剛板の
座屈