

## 4章 鋼構造分科会報告

### 4.1 鋼構造分科会の調査研究の概要

福山大学 福本 昉士

#### 4.1.1 調査研究の目的と分科会の構成

鋼構造分科会は阪神・淡路大震災において鋼構造物（主として鋼橋）が受けた被害損傷、応急復旧工事および恒久補強対策実施例などのデータを収集、分析することにより、鋼橋を中心とした耐震設計法および構造法のあり方を検討することを目的としている。

我が国における鋼橋の設計・製作技術は世界に冠たるものがある。特に鋼製橋脚は他国の地震地帯にはほとんど例を見ないもので、日本固有の構造形式として発達してきた。今回の地震被害から現行の鋼橋耐震設計法のいくつかの盲点が指摘されている。設計上、地震荷重が支配的となる橋脚、支承、桁端部などの部材や構造要素については、許容応力度設計的な考え方は通用せず、強度のみならず変形能とリダダンシーに関する配慮が必要となる。現行の設計法や構造法を適切に改善し、鋼橋の耐震機能を確保するための調査研究が求められている。

この調査研究作業を効率的に実行するために、分科会に以下の5つのワーキング・グループを編成した。

第1WG：被害・健全度調査ワーキング、主査 井元 泉（IHI）

第2WG：補修・補強対策ワーキング、主査 迫田治行（川崎重工業）

第3WG：損傷評価ワーキング、主査 西村宣男（大阪大学）

第4WG：原因究明ワーキング、主査 中井 博（大阪市立大学）

第5WG：耐震設計ワーキング、主査 北田俊行（大阪市立大学）

第1および第2ワーキングは大震災以来、損傷調査や復旧工事に直接携わってきた橋梁業界のエキスパートを中心として編成し、鋼橋の被害データおよび補修・補強の実施データを整理している。今回の中間報告会ではこれら2つのワーキング・グループの調査研究成果を発表する。

また、これらグループによって纏められたデータは第3～第5ワーキングの調査研究のバックデータとして活用する。第3～第5ワーキングの活動内容は次節以下で紹介するが、それぞれのワーキングが目指している調査研究の概要は以下の通りである。

第3ワーキングは主として都市高架桁橋を対象とし、桁構造、支承、落橋防止装置、鋼製橋脚、アンカーボルト・フレームの包括的損傷度評価法を数値シミュレーションを中心とした分析によって確立するべく調査研究を進めている。

第4ワーキングは数値シミュレーションにより長大橋梁の損傷メカニズムの再現、隣接橋梁の地震時動的相互作用の評価、脆性割れの原因究明を行っている。

第5ワーキングは第1～第4ワーキングの調査研究成果を総合し、示方書の改訂や他組織の活動なども参考にしながら、鋼橋の耐震設計法に関する新しい提言を行う。

#### 4. 1. 2 第3ワーキング・グループ「損傷評価」

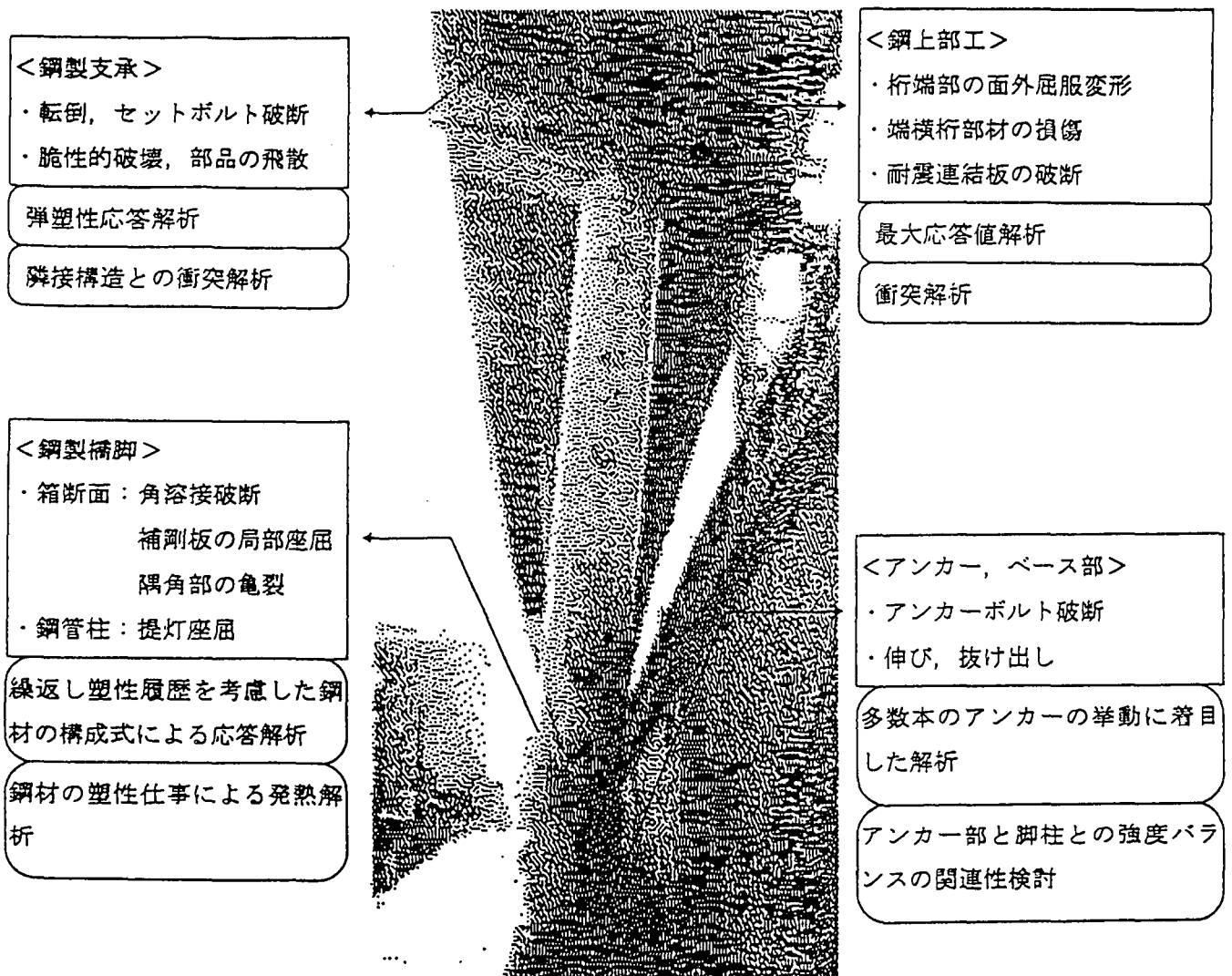
### テーマ「都市高架橋損傷の評価」

＜作用した地震力と既存構造物が保有する耐力の検討＞

#### (1) 研究の目的と対象構造物

都市内に数多くみられる、一般的な高架橋の鋼上下部工を対象として、構造物が損傷に至ったストーリーを推定し、作用力と構造物の耐力の関係を明らかにする。この結果から、想定される地震力レベルによって生じる損傷を評価し、より安全な構造設計を目指すことができるよう、設計データの蓄積を計ることを目的として調査および研究を実施する。

#### (2) 都市高架橋の代表的な損傷と調査研究の方法



#### (3) 評価結果のとりまとめ（方針）

- ・上部工桁端部の地震時損傷原因と終局強度の評価
- ・耐震連結装置の終局強度評価
- ・橋脚柱の損傷原因究明
- ・地震時にアンカーボルトに作用する外力の同定
- ・脚柱とアンカー部の強度バランスと損傷度の関係

#### 4. 1. 3 第4ワーキング・グループ「原因究明」

### 鋼構造分科会・第4WG（原因究明）の活動状況

原因究明WG主査  
中井 博

#### 1. 第4WG（原因究明）の研究テーマ

- (1) 異種隣接橋梁の動的相互作用による影響の究明
- (2) 鋼製橋脚の脆性的なき裂発生原因の究明
- (3) 大規模橋梁（鋼製橋脚も含む）の損傷のケーススタディ
- (4) 鋼製橋脚アンカーボルトの被害の原因究明
- (5) 既設橋梁の弱点補強、および新設橋梁への対策の検討

注) 一般的な橋梁の原因究明は、損傷評価WGで取りまとめる。しかし、一部分、当WGとラップする  
場合がある。

#### 2. 活動状況

##### (1) 異種隣接橋梁の動的相互作用による影響の究明

###### 1) 大阪モノレールを対象としたケーススタディ（担当：西村）

鋳鋼製突起物（桁と沓とのはめ込み式固定部品）の溶接接合部における損傷の原因究明

- ・実体破面調査から、延性破壊が生じ、その後、脆性的破壊に転じたことを確認。
- ・FEM解析により、き裂起点部に極端に大きな応力集中の生じることが判明。
- ・隣接する橋脚、および連続する桁を考慮した地震応答解析を実施。可動支承がその遊間を超え、ストッパーに衝突したことが解明できた。損傷は、衝突時の衝撃力によることが判明。

###### 2) 鋼製橋脚の被害に及ぼす隣接RC橋脚の影響（担当：伊津野）

大規模地震に対する非線形時刻歴応答解析を行った結果、以下のことが判明。

- ・RC橋脚が隣接する場合には、鋼製橋脚のみが存在する場合に比較し、鋼製橋脚の地震応答が大きくなる場合がある。
- ・RC橋脚が隣接する場合でも、全ての橋脚上に免震支承を取り付けることにより、相互作用の影響を減少することができる。

##### (2) 鋼製橋脚の脆性的なき裂発生原因の究明

###### 1) 低サイクル疲労の観点からき裂損傷の原因究明（担当：坂野）

- ・鋼製橋脚基部の隅肉溶接継手部を対象とし、超低サイクル疲労試験（降伏たわみの8～12倍の繰返し強制変位载荷）を実施。数回の繰返しで、き裂の発生することを確認。
- ・試験モデルのFEM解析から求めたき裂発生箇所の塑性ひずみと疲労寿命との関係は、鋼素材の塑性ひずみとき裂発生寿命との関係から得られる曲線と良好に一致した。

###### 2) 脆性破壊的な様相を呈した橋脚のき裂の原因究明（担当：大南、迫田）

き裂の生じた特定の橋脚について、材料・破面調査、および解析的検討を実施中。

##### (3) 大規模橋梁（鋼製橋脚も含む）の損傷のケーススタディ

###### 1) アーチ橋、ニールセン橋、斜張橋、および鋼製橋脚の損傷のメカニズムの解明

(担当：中井、北田)

- ・被害のあった長大アーチ橋を対象に、損傷を再現するための弾塑性有限変位解析を実施。
- ・その橋梁の損傷した6箇所の部材の損傷原因が、ほぼ明らかにされた。

###### 2) 大規模橋梁の非線形時刻歴応答解析による損傷原因の究明（担当：頭井）

既開発プログラムの改良を実施中。

##### (4) 鋼製橋脚アンカーボルトの被害の原因究明（担当：秋山）

被害調査、および原因を調査中。

##### (5) 既設橋梁の弱点補強、および新設橋梁への対策の検討（担当：中村）

調査・検討を実施中。

#### 4. 1. 4 第5ワーキング・グループ「耐震設計法」

鋼橋の耐震設計にあたっては、阪神・淡路大震災の経験を踏まえ、鋼製橋脚の特性を活かした設計法、および設計照査法の開発が必要である。本ワーキング・グループでは、鋼橋の将来的な理想の耐震設計法について模索するため、討議・検討を進めている。

本ワーキング・グループの検討項目としては、以下のようなものが挙げられる。

##### ○対象構造物

上部構造（鋼構造、合成構造）、支承（ゴム、鋳鋼）、伸縮継手、耐震連結装置、橋脚、アンカーボルト、アンカーフレーム、塗装、高力ボルト継手部、ラーメン隅角部

##### ○設計コンセプト

ヒューズ・メンバーの採用の妥当性、免震か耐震か、適切な桁間隔の決定法、適切な桁かかり長の決定法、数本の柱部材にせん断パネルを貼る橋脚など新しい構造の検討、

上部構造・伸縮継手・耐震連結装置・支承・橋脚を含めたシステムとしての桁端部の合理的設計法の検討、隣接橋脚との相互作用を考慮した免震・耐震設計法の検討

##### ○限界状態の明確化

重要度の考え方の整理・検討、地震レベルに対応した重要度の異なる構造物の限界状態の明確化

##### ○作用地震力（関西地区を中心とした）

水平・鉛直、および、振動・衝撃などの地震動特性の影響の把握

##### ○解析モデルと解析法

終局状態付近における支承条件の変化の考慮、詳細解析法に基づく簡易解析法の開発、全体系モデルと部分構造モデルとの解析結果の比較・検討、断面力に基礎をおいた構成則の開発、

履歴特性の評価、弾塑性域における減衰定数の設定法の検討、支承破壊のシミュレーション

##### ○地震に強い構造詳細の検討

変形性能の大きい構造・部材・断面の検討、割れが発生しないラーメン隅角部・支承構造の検討

##### ○新素材の採用

極低降伏点鋼、高減衰ゴム

##### ○既存橋脚の耐震性向上設計

##### ○補修・補強した耐震構造部材の維持管理

##### ○損傷構造物の補修・補強設計

##### ○今後の課題

これらの中からテーマを絞り、できる項目から示方書の改訂版や他グループの報告書等の動向を考慮しつつ、具体的な検討を進めている。

## 4.2 鋼橋の被害調査と分析

被害・健全度調査ワーキング 主査 井元 泉 (IHI)

1995年1月17日午前5時46分、阪神淡路大地震が世界で初めて大都市の直下で発生した。そして鋼構造物の代表である橋梁も、阪神高速道路公団神戸3号線や建設省浜手バイパス等を中心にいまだ経験したことの無い被災を受けた。この9月には、最も激しい被災を受けた神戸3号線も全線開通が予定されており、基幹路線の復旧は完了することになる。この間の道路管理者、施工業者他関係者の努力には敬服するものがある。

今回の地震による被害の特徴は、阪神高速道路公団神戸3号線（月見山～西宮間）のように、類似の構造形式を持つ数多くの橋梁が、設計荷重を越える過大な地震荷重を受けたと判断されることにある。さらに、発生する確率が高い比較的長い時間ゆっくり揺れるプレート型地震（阪神淡路大地震発生以前の設計荷重対象）ではなく、比較的短い周期で激しい揺れと地盤自身の移動を伴う直下型地震であったことである。研究者や技術者に直下型地震の怖さ突き付けた稀有の例である。そして、このような地震に対しては、一般的な高架橋であっても、従来のように“慣性力”を基本とした震度法で設計するのではなく、橋梁間－上部工－支承－橋脚－基礎－地盤等の相互作用（すなわち橋梁システム）を考慮した“変位”“変形”“慣性力”を基本に設計する必要性をも示したものである。

したがって、地震による被害やその要因分析にあたっては、個々の橋梁の局部のみに着目するのではなく、橋梁システムとしての構造要素と、それらの関連に着目することにした。現段階では、十分な被災状況の把握、分析までには至っていないが、被災要因分析を主体に概要を報告する。

### 4.2.1 全体概要

一般の都市内高架橋は、図-4.2.1に示すように、基礎（杭、フーチング）、橋脚（鉄筋コンクリート、以後RCと呼ぶ、または鋼製）、支承および鋼桁から構成されている。橋脚と基礎はアンカーボルトにより連結され、鋼桁は橋脚の横梁上の支承を支点として設置されている。

まず、地震力と橋梁の関係についてであるが、地震により地盤が水平および垂直に動くことによって、荷重および変位として基礎から橋脚、支承、上部工へと伝達される。地盤動の橋梁に与える影響は、地盤の動く方向、振動特性、個々の基礎の位置、地盤の性質、時間的なずれ、橋梁の性質等により異なり複雑なものとなる。特に都市内高架橋のように広範囲に連続している場合に顕著となる。現在、一般の高架橋の設計荷重は、地盤動の加速度から弾性応答加速度を求め加速度に比例した静的荷重に置き変えている。しかし、地盤動の加速度の大きさと橋梁の損傷程度はかなり相関があるが、必ずしも加速度に比例して橋梁の損傷程度が大きいわけではない。震災後、観測された地震波を使用して地震時の挙動が解析されている。結果によれば、今回記録された最大加速度を持つ神戸海洋気象台の南北方向の地震波より、他地区での記録による解析結果の方が、より厳しい結果を与え

ている例がある。また、神戸海洋気象台（南北方向）の記録が最大であったと保証出来るものでなく、地震荷重、変位の設定、地盤動（水平、垂直）と橋梁システム関係について詳細な検討を必要とする。

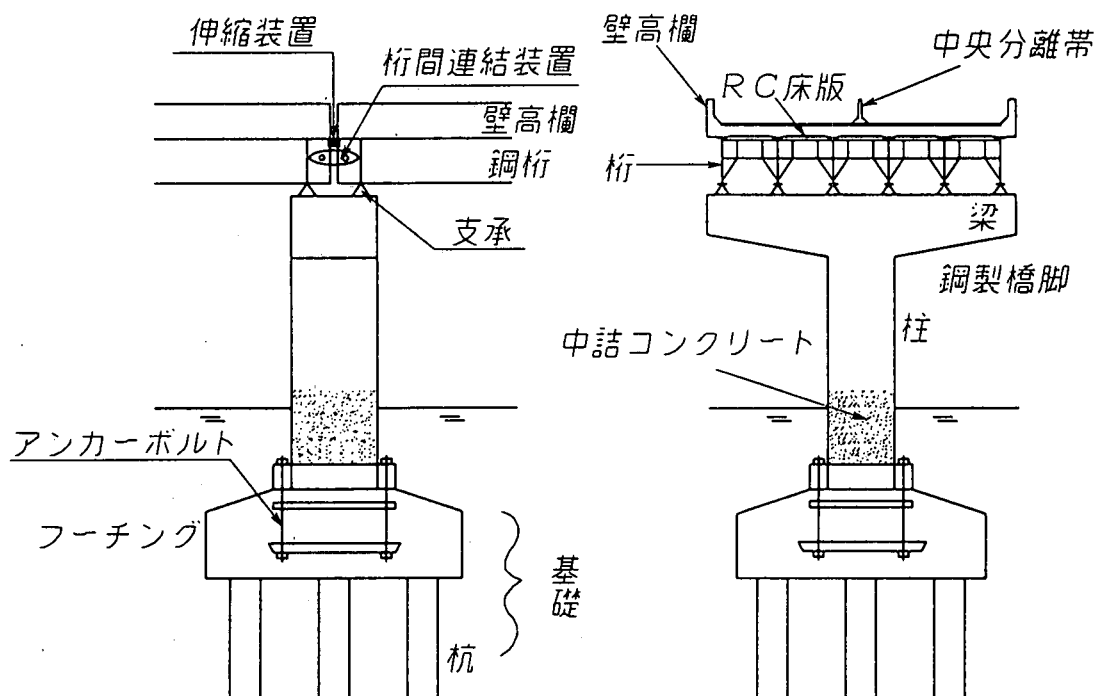


図-4.2.1 高架橋の概念図

次に、今回の地震で生じた代表的損傷例を構造要素別に表-4.2.1に示す。表に示すように高架橋にとってほとんどの損傷形式が発生したと考えられる。各構造要素には、設計上（約30年前）想定された以上の荷重、変位、変形が生じたと考えられ、構造要素によっては損傷程度が高いものになっている。

上部工は鋼桁とRC床版等から構成されることが多い。上部工では、一部に橋脚崩壊、破損、移動による落橋、支承崩壊による路面の段差、通りの異状が生じていたが、本体そのものは全体的に損傷が少なかった。損傷も支点（桁端部、中間支点）に集中しており、橋脚や支承との関連が注目される。また、上部工を支持する支承は最も損傷が激しく、支承から上部工が分離した後、橋脚上で上部工の複雑な動きを誘発し、支点上での損傷を加速させたと思われる。

支承は上部工を支持すること、桁温度変化による変位、変形の吸収、地震時の移動制限（水平、鉛直）等の多くの機能を持ち、上部工や橋脚に劣らない重要な構造要素である。今回の地震で最も被害の多かった構造要素であり、前述のように支承の損傷が全体の損傷度に大きな影響を与えたと判断される。このため、支承の機能分散も含め全面的な見直しが必要と考えられる。

表-4.2.1 構造要素別代表的損傷事例

| 構 造 要 素 | 代 表 的 損 傷   |
|---------|---|
| 鋼 桁     | 桁端部の変形、座屈、端横桁、横構の破損（本体、継手）<br>高力ボルトの滑り、塗膜の剥離<br>支承破損および橋脚移動、傾斜に伴う路面段差、通り異状<br>橋脚崩壊、破損、移動による落橋 |
| 桁間連結装置  | 連結板、連結ピンの破損、取付け部の破損   |
| 伸 縮 装 置 | 取付けボルトの破損、フェースプレートの変形、脱落<br>遊間異状、止水樋の破損   |
| 床版、壁高欄等 | 端部のコンクリート滑落、ひび割れ  |
| 支 承     | 崩壊、移動制限装置の破損、セットボルトの破損<br>杓座コンクリートの破損、アンカーボルトの伸び、破断   |
| 鋼 製 橋 脚 | 脚柱パネルの座屈、支承付近の横梁の変形、座屈<br>角溶接部のクラック、隅角部のクラック、塗膜の剥離<br>高力ボルトの滑り、アンカーボルトの伸び、破断                  |
| 基 礎     | フーチングのひび割れ、杭のひび割れ、基礎の傾斜、移動  |

鋼製橋脚は、RCでは構造が成り立たないか施工困難な箇所に採用されることが多い。このため、元来、厳しい条件下にある構造物であり、阪神高速道路公団神戸3号線でも全橋脚数の約15%程度と少ない。

鋼製橋脚が全く機能を失った例は、3号線で168脚中の1脚のみである。他機関を含めても2脚であった。3号線の脚は、梁の両端をRCの柱で支持した構造であり、特殊ラーメンと呼ばれている形式である。崩壊の原因は、RC柱上の支承が崩壊し構造系が変化することにより鋼製橋脚に負担が集中したために生じたと考えられる。この形式は、従来の弾性設計上は非常に優れた物であるが、過大地震時の変形、移動に対しては対応困難な場合があることを示唆した例と思われる。

この特殊な例を除けば、鋼製橋脚は基部付近のパネル座屈（全体および局部）や支承付近の梁の変形が生じていた程度である。一部に過大な座屈変形の進行とともに、角溶接等に割れが生じた例もあったが、地震前に想定していた以上によく抵抗したと考えられる。

基礎については、その損傷報告が少ない。しかし、上部工や橋脚の損傷が比較的少なくても、橋脚が傾斜している例も多々あり基礎の損傷や移動があったことを示唆している。また、基礎の傾斜により橋脚が傾斜し損傷度合を増したと思われるケースも多く、基礎も含めた橋梁システムの検討の必要性を示している。

なお、以上のように種々の損傷があるが、被災状況の把握にあたっては、独自の現地調査および震災直後に各機関で調査判定されたものを利用した。被災程度の評価は、(社)日本道路協会発行の道路震災対策便覧（震災復旧編）等で規定されており、各機関で判定さ

れたもので、具体的には次のように規定されている。

- A s : 落 橋 落橋、崩壊、倒壊
- A : 大被害 耐荷力の低下に著しい影響のある損傷を生じており、落橋等致命的な被害の可能性がある場合
- B : 中被害 耐荷力の低下に影響のある損傷であるが、余震、活荷重等による被害の進行がなければ、当面の利用が可能な場合
- C : 小被害 短期間には耐荷力の低下に影響のない場合
- D : 被害無 耐荷力に関しては特に異常が認められない場合

この評価は個々の要素に対して行われ、その中で最も損傷度が高いもので橋梁全体が評価されている。これらの評価は、震災直後で詳細な検討ができなかったこと、耐荷力の定量的評価（特に鋼製橋脚）が明確でないこともあり、現在までの検討によれば、構造要素にもよるが、やや安全側の評価であったようである。このため、これらの結果は同種の構造物の相対評価と考える必要があり、他の材質の構造物と直接比較する場合には注意が必要となる。いずれにしても、震災直後に容易に計測可能な指標を基本とした定量的評価基準は今後の研究を待つとともに、再度被災の評価、分析を行う必要がある。

#### 4.2.2 被災状況と要因分析

ここでは、各構造要素（上部工、橋脚、支承、継手、桁間連結装置、アンカーボルト、塗装）、およびそれらの関係に着目して、損傷状況と分析を概観する。

##### (1) 上部工

神戸3号線は全線にわたり、激しい地震動にみまわれた地域にある。上部工の落橋も生じたが、これは下部工の崩壊により誘発されたものと思われる。上部工を支える支承や橋脚に損傷がなく、上部工単独で損傷した事例がないことから理解される。また、桁の支承からの脱落により路面に段差および橋軸直角方向のずれが生じたが、落橋以外に緊急車両の走行が不可となるような被害はなかった。

I桁の特徴的な損傷は支承からの脱落による桁端部、端横桁等の局所的な変形であり、箱桁では支承の崩壊により下沓等が桁に食い込んでいる局所的な損傷が多く見られた。また、隣接橋梁が相対的に動いたことを示す桁の移動や伸縮装置、桁間連結装置の損傷が多くみられたが、上部工全体として見た場合、桁端部を除き桁やRC床版本体にはほとんど損傷は発生していない。

これらのことから、上部工としては、RC床版（設計上は考慮していない）が有効に働き、RC床版と端横桁（支点上横桁）および支承で抵抗していたと類推される。このためか、設計上は水平荷重に対応させている横構は2次的にしか抵抗していないようである。

上部工形式別損傷程度を図-4.2.2に示す。図によれば、興味深い現象となっている。すなわち、一般に耐震性が良いと言われる連続桁形式の損傷程度が必ずしもよくないことで



ある。これは、上部工としての損傷程度を局所的な損傷で評価したことに原因がある。実際、一部の取替え（例えば、桁端部）を行うことにより復旧された上部工が多いことから理解される。現状の構造要素に着目した損傷評価と地震後の橋梁が、使用可能かどうかを判定する基準とは、必ずしも一致しないことを示しており、新たな定量的評価基準を必要としていると思われる。

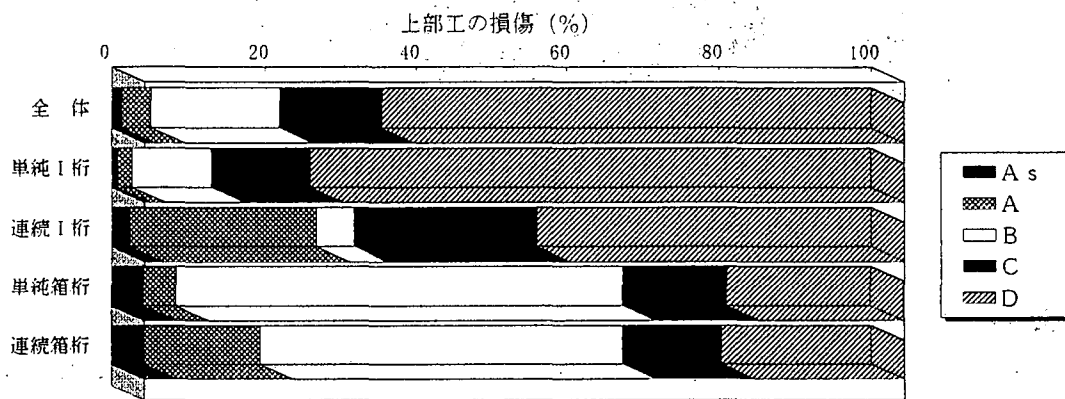


図-4.2.2 上部工形式別損傷ランク

次にサンプル数の多い単純I桁の損傷程度に及ぼすスパンの影響を図-4.2.3に、橋脚高さの影響を図-4.2.4に示す。結果によれば、スパンが40m～45mクラスの橋梁および橋脚高さが5～10mの時の上部工の損傷程度が高い傾向にある。このことから、地盤動による上部工や橋脚の振動との関係（共振等）が予想されるが、あまり大きな要因ではないようである。また、上部工反力（スパンとほぼ比例）と上部工の損傷程度とには相関が少ないことも分かる。これは、上部工反力に応じた支承が設置されており、各支承の地震荷重に対する余裕度がほぼ一定であることを考慮すると、支承の損傷が上部工の損傷の主要因であることを示唆している。

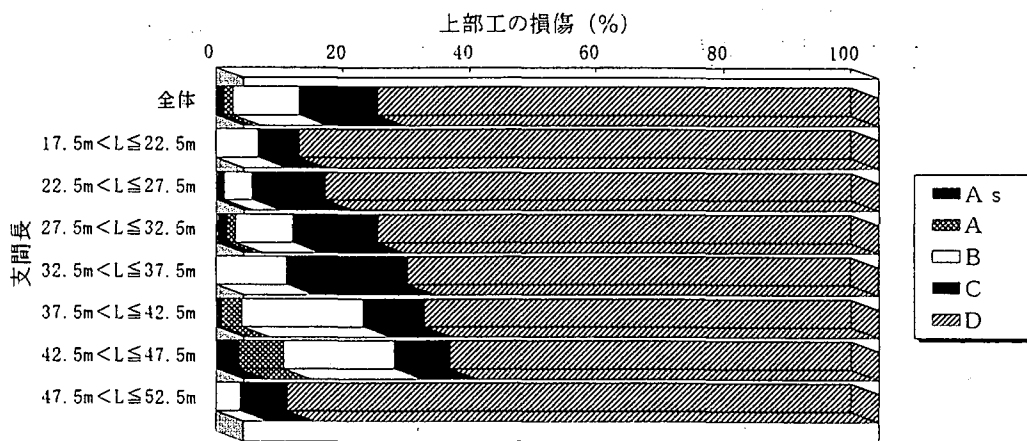


図-4.2.3 単純I桁の損傷程度に及ぼすスパンの影響

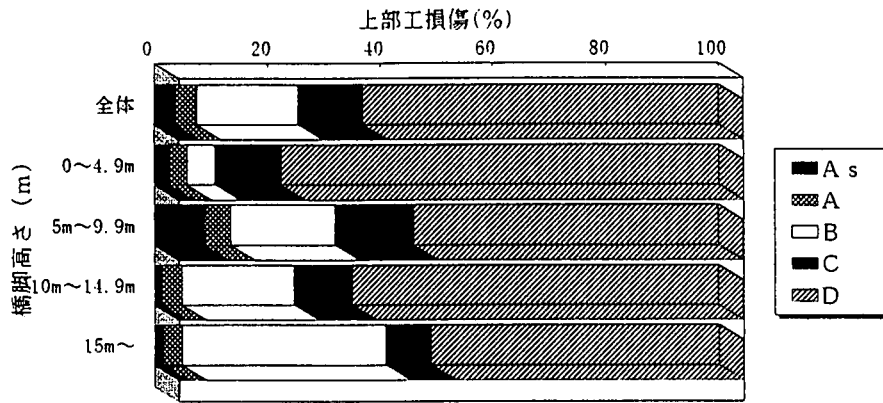


図-4.2.4 上部工の損傷程度に及ぼす橋脚高さの影響

## (2) 鋼製橋脚

鋼製橋脚は、今回世界で初めて直下型地震に遭遇し注目をあびた。鋼製橋脚の主な形式は、単柱、ラーメン、特殊ラーメンの3種類である(図-4.2.5)。また、その断面形状は角形と円形がある。これらは、橋脚の設置される路下条件により決定されている。一般に鋼製橋脚はRC橋脚では施工困難な箇所や、軟弱地盤上のように軽い構造物が必要とされる箇所に設置され、元々条件の厳しい構造物である。このため、RCのように地震荷重が決定条件にならないこともある。

鋼製橋脚の損傷例としては、脚柱パネルの座屈、支承付近の横梁の変形や座屈、角溶接部のクラック、隅角部のクラック、塗膜の剝離、高力ボルトの滑り等がある。

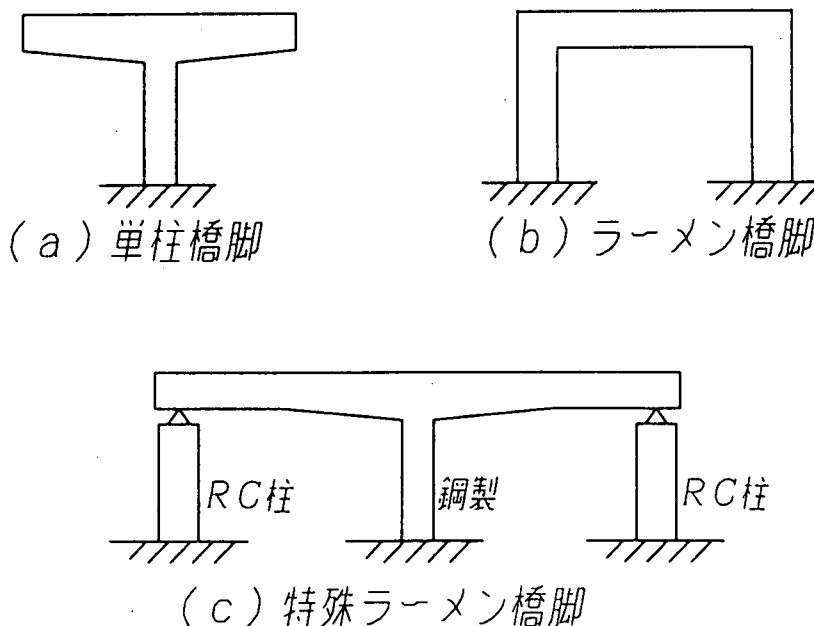


図-4.2.5 主な鋼製橋脚形式概念図

鋼製橋脚の形式別、断面形状別、形式断面別の損傷程度を図-4.2.6に示す。また、損傷度の大きい(A s、A)橋脚における形式別損傷程度を図-4.2.7に断面形状別の損傷程度図-4.2.8に示す。

形式別の観点から損傷状況を見ると、単柱橋脚および特殊ラーメン橋脚の損傷が顕著であり、ラーメン橋脚にはほとんど損傷が発生していない。これは構造形式に依存していると思われる。損傷のほとんどないラーメン橋脚は、不静定次数が最も高い安定した構造物である。特殊ラーメン橋脚は弾性設計上はラーメン橋脚に近いが、弾性設計を大幅に上回る地震荷重が作用する場合、梁両端の支承が損傷すると事実上単柱となり、荷重の再配分を受けるようである。このことは、柱の座屈損傷程度(図-4.2.9)からも類推される。単柱橋脚においては、地震力は柱基部に集中するためである。また、単柱橋脚の円形断面を持つ形式が損傷程度が大きい。これは、円柱断面を持つ場合、弾性設計上は理想的な断面構成が可能であるため(例えば、2mごとに断面変化)、弾性設計を大幅に上回る地震荷重が作用する場合、損傷が大きくなる可能性が高いと推定される。

これらのことは、一般高架橋であっても、従来の弾性設計を基本とした設計法が、過大な地震時のように変位や変形が大きくなる場合には、必ずしも適切ではないことを示唆している。今後、今回の地震のように弾性限を越える荷重や変形が生じることが想定される場合には、設計思想そのものを変更する必要がある。

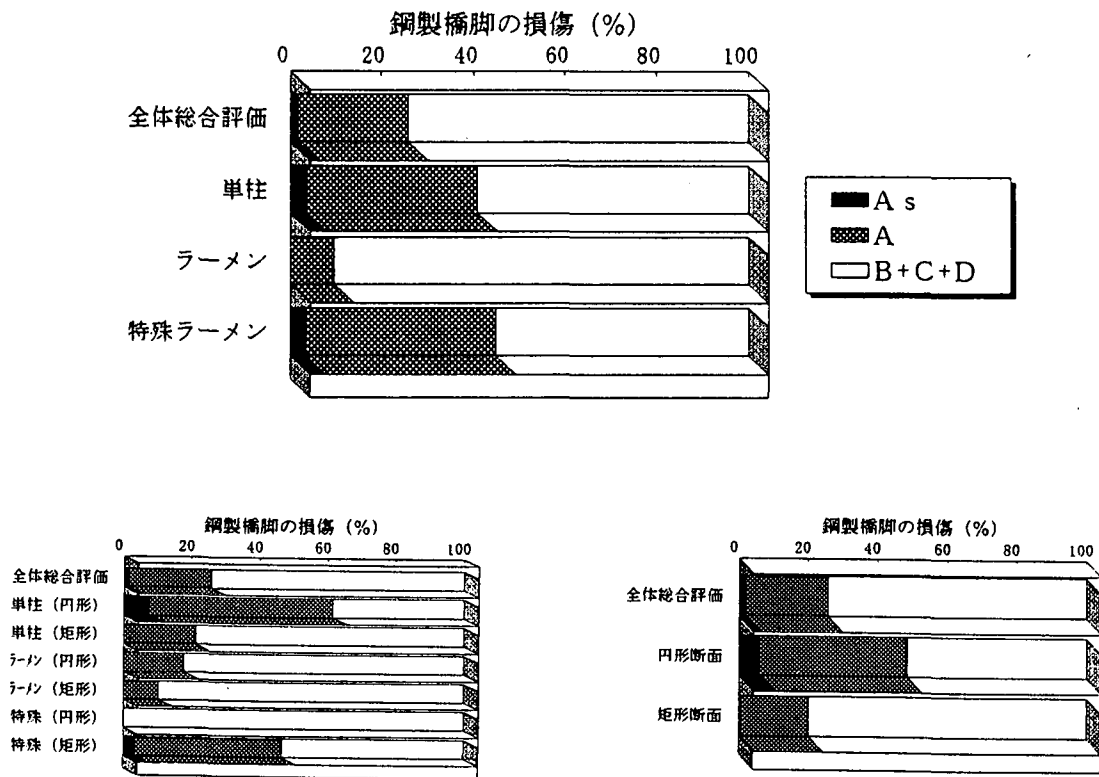


図-4.2.6 鋼製橋脚の形式別、断面別損傷程度

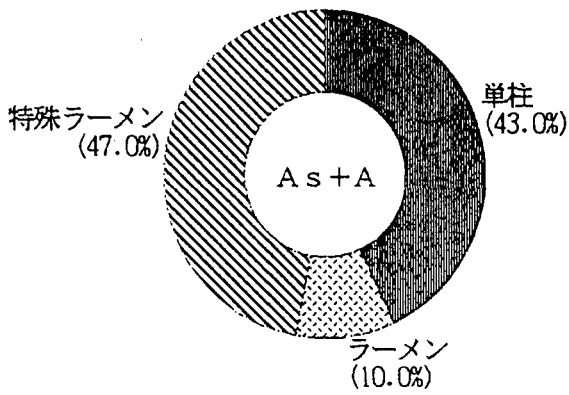


図-4.2.7 形式別損傷 (As+A)

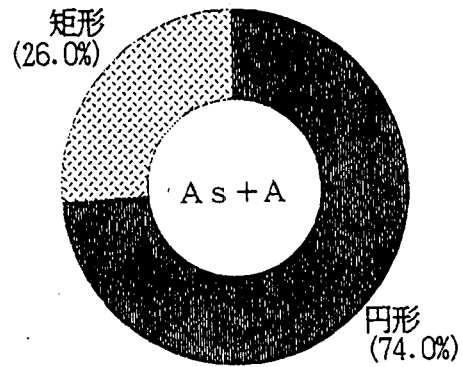


図-4.2.8 断面別損傷 (As+A)

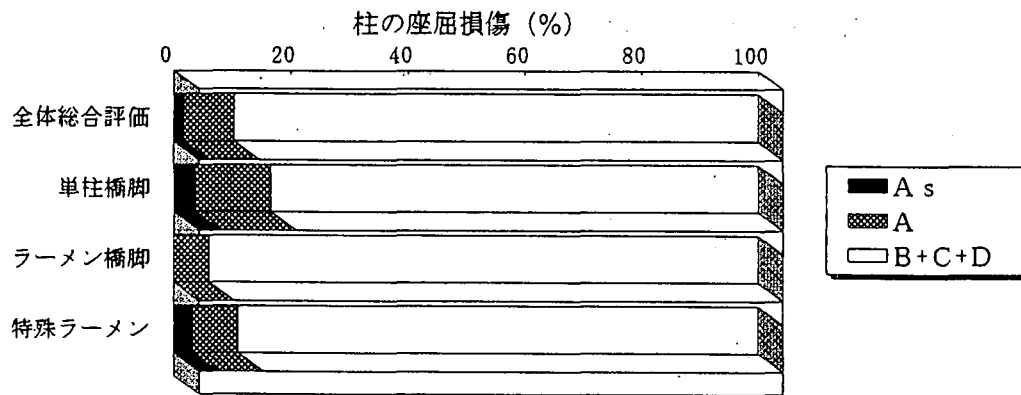


図-4.2.9 橋脚の柱の座屈損傷程度

次に、橋脚の梁の座屈に注目すると、ラーメン橋脚の梁にせん断座屈の繰り返しが生じた例が認められている。このせん断座屈は上部工の支承間で生じていた。このことは、上部工から鉛直方向に力が交互に作用した可能性が高いことを示している。単柱橋脚上の上部工が同様の挙動をしたとすれば、柱部に作用する地震力は水平力に加えて上部工の鉛直方向の挙動も考慮する必要があることになる。ラーメン橋脚に比べて単柱の損傷が大きかった原因のひとつと思われる。また、実設計上、橋脚に対して動解析や保有水平耐力の検討が行われている例もあるが、上部工の影響については、単に1質点系の質量としてしか評価していないため、上部工の挙動を設計レベルで如何に評価するかについて検討を必要とすると思われる。

橋としての機能を損なう主要な橋脚損傷として柱の倒れ、基部の倒れがある。この観点から橋脚形式別に見てみる。それぞれ図-4.2.10、図-4.2.11に示す。

まず、柱の倒れについてであるが、単柱橋脚では橋軸直角方向の倒れが顕著であり、橋軸方向も比較的多い。特殊ラーメン橋脚では橋軸方向の倒れが顕著である。ラーメン橋脚は全体に倒れは少ないが橋軸方向の倒れが比較的多い。この結果は、柱の座屈とも強い相

関があり（図-4.2.6参照）、座屈が柱の倒れの主要因であることを示している。特に、橋脚としての損傷度がAsとなるのは、柱の座屈損傷度がAsの場合であり、鋼製橋脚の損傷にとって座屈が最も主要な因子であることを示している。

次に柱基部の倒れは柱の倒れほどは多くないが、1/100以上（高さ10m程度の橋脚頂部で100mm以上）の大きな倒れでも橋脚数の4%程度ある。中でも特殊ラーメンでは、20%を越えている。また、倒れの方向は、単柱ではあまり差はないが、特殊ラーメンでは橋軸方向が顕著であり、ラーメン橋脚では橋軸直角方向が顕著である。この差は構造形式に起因するものか、地盤動の方向によるものかは検討が必要である。

柱基部の倒れが生じる要因は、橋脚とフーチングを接合するアンカーボルトが伸びているか、フーチングや杭に損傷を受け基礎そのものが傾くか、両者の複合と考えられる。実際に別項で示すように、柱部が健全で柱基部の傾きが大きい場合には、アンカーボルトに残留伸びもしくは破断したものがある。

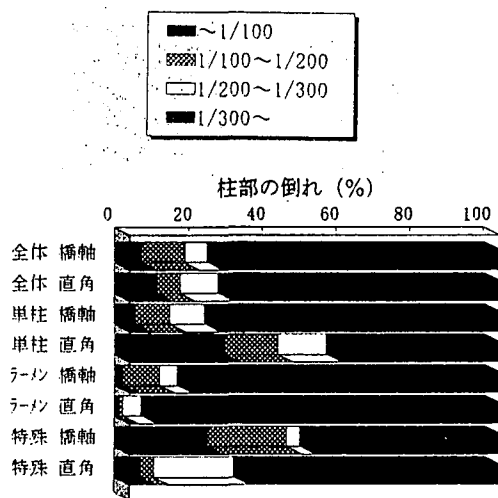


図-4.2.10 鋼製橋脚柱部の倒れ

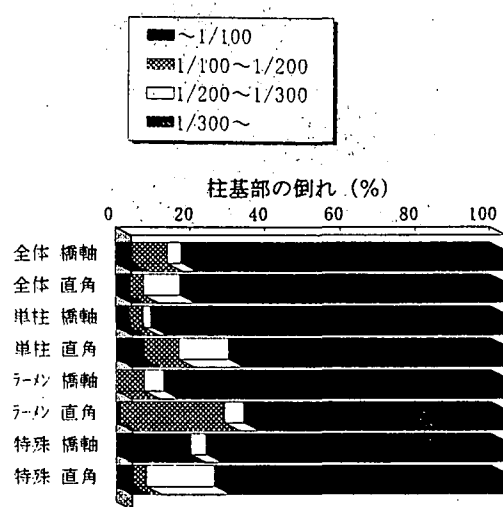


図-4.2.11 鋼製橋脚柱基部の倒れ

### (3) 支 承

支承は上部工や橋脚に劣らない重要な構造要素である。特に、地震時には、桁間連結装置、桁かかり長と共に落橋を防止するシステムを構成している。

支承の損傷状況は、他の構造要素と比較して最も損傷程度が高いと思われる。また、支承の損傷が他の構造物へ与えた影響は大きく今後の検討が重要な構造要素である。特に、鋼橋では支承には種々の機能が付加されているため、コンクリート橋の支承システムのように機能分散も含め、検討を早急にする必要がある。

支承形式別の損傷程度を図-4.2.12に示す。図によれば、ピンおよびピンローラ沓の損傷程度が大きく、続いて線支承、BP沓の順である。ピンおよびピンローラ沓では、上沓と下沓が分離し桁（特に箱桁）に食いこんでいるものが多数あった。このため、上部工全体としては、損傷が少ないにも関わらず上部工損傷がひどくなる場合があった。このような差は支承の構造形式に依存しており、地震時のように過大な荷重（変形）が作用する場

合に有利な支承構造を示唆している。

また、固定査、可動査の損傷程度についてであるが、その損傷程度には有意な差はなく支承条件に依存していなかった。これは、地盤動の南北方向（橋軸直角方向）であることによる可能性も高いが、今後、支承損傷の要因分析を行う場合や支承を検討する上で留意するべきと思われる。

次に、B P 査の設計反力による損傷程度の状況を図-4.2.13に示す。単純 I 桁においては、上部工反力と上部工の損傷程度とは相関が少なかったが、B P 査では、反力が大きい程その損傷程度がひどくなっており強い相関関係がある。

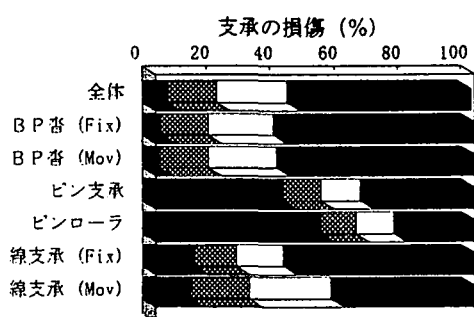


図-4.2.12 支承形式別の損傷程度

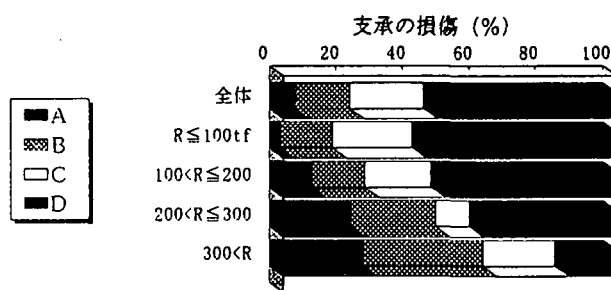


図-4.2.13 B P 査の反力別損傷程度

#### (4) 鋼製橋脚のアンカーボルト

鋼製橋脚のアンカーボルトは、橋脚基部において基礎（フーチング）と橋脚を連結するものである。アンカーボルトの損傷には、ボルトの残留延び、曲がり、破断等がある。

アンカーボルトの損傷に影響を与える代表的因子として、①橋脚柱の保有水平耐力（橋脚がアンカーより強いと最終的にはアンカーボルトに負担が集まる）、②橋脚基部の倒れ（橋脚の倒れが大きいとアンカーボルトが延びているか、フーチングそのものが傾いている）、③橋脚柱の座屈（橋脚の座屈が先行するとアンカーボルトへの負担は小さくなる。さらに過大な荷重が作用すると、アンカーボルトも延びる）等が考えられる。これらに着目しアンカーボルトの損傷を整理した例を図-4.2.14に示す。

結果によれば、アンカーボルトに残留延びがある場合は、[柱>アンカーボルト]の範囲であり、[柱<アンカーボルト]の範囲では残留延びは確認されていない。また、残留延びが大きいものは柱基部の傾きが大であり、柱の傾きが中程度になると残留延びが小さくなっている。さらに柱の傾きは大であるが、柱の座屈が大であるものも残留延びが小さくなっている。これらの結果から、少なくとも [柱≤アンカーボルト] になるようにする方が、地震直後に目視点検も不可能であることもあり、橋脚柱の健全性確保の面か

らは良いと思われる。

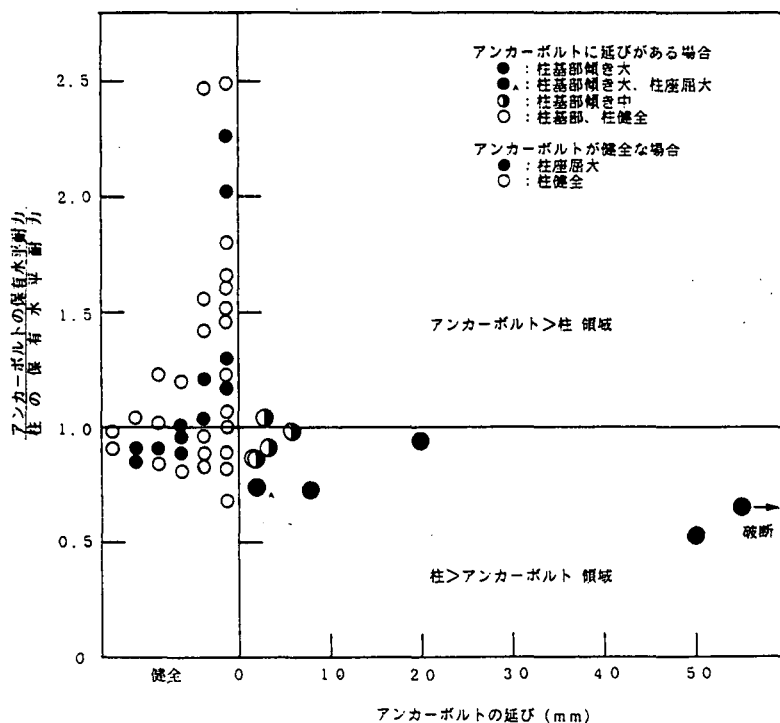


図-4.2.14 アンカーボルトの損傷に及ぼす保有耐力の影響

アンカー部の耐力の評価方法は、現在のところ3種類（杭方式、RC単鉄筋、RC複鉄筋）があるが、過大地震時の最終耐荷力評価の精度は必ずしもよくない。このため、アンカーボルトの終局ひずみの設定、フーチングのコンクリートの応力-ひずみ関係の設定等、検討する必要がある。

また、一般に、アンカーボルトは、丸鋼からねじを切削するために、一般部の径に比べてねじ部の有効径が小さい構造であった。このため、残留伸びや破断位置はねじ部に集中していた。さらに、アンカーボルトへの作用力は、かなり早いひずみ速度をあたえているようであるため、静的強度だけでなく動的な強度にも強い材質が必要と思われる。このため、形状、材質ともに検討が必要と思われる。

#### (5) 桁間連結装置

一般の高架橋において落橋防止対策は、支承の移動制限装置、桁かかり長の確保、桁間連結装置の設置により行われている。その内、桁間連結装置はタイパー形式（所謂、眼鏡タイプ）が大部分を占めている。これは、桁遊間が広がる場合に隣接する桁の重量を利用して落橋を防止するように設計されている（図-4.2.15参照）。

桁間連結装置の損傷は、桁遊間が広がろうとした結果、桁間連結装置取付け部の主桁ウェブそのものが引きちぎれたもの、逆に、桁遊間が狭まろうとした結果、桁間連結装置取付け部の主桁ウェブが座屈していたものもある。また、桁間連結装置連結板にはほとんど変形はないが、連結用ピンが折損しているものがあり、橋軸直角方向の動きの関与を示唆

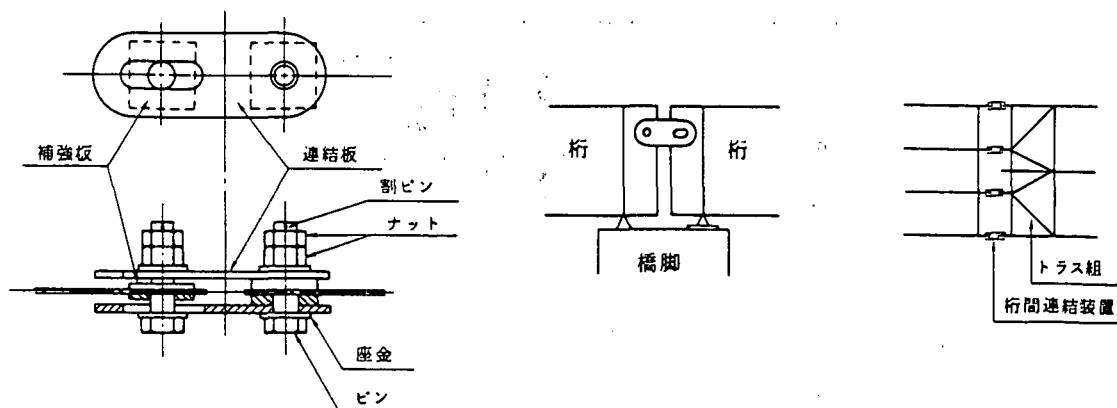


図-4.2.15 桁間連結装置例（タイバー方式）

している。さらに、隣接する桁が橋軸方向、直角方向に相対的に移動することにより、連結板が面外に変形するとともに連結用ピンも大きく曲がっている例などである。

このような大被害を受けた桁間連結装置は、箱桁とI桁との架け違い部で、隣接橋梁の重量差が大きい箇所に多い。特に取り合い主桁間の橋軸方向の移動に、支承が破損したため生じる鉛直方向の変位および橋軸直角方向の動きが加わった場合に損傷が著しい。隣接橋梁の重量差が少ない単純I桁の架け違い部でも一部で大被害が生じていたが、この場合は、下部工および支承の損傷により誘発されたものが多いと考えられる。また、桁間連結装置は、支承が健全で桁間連結装置が損傷している例が見当たらないことから、支承が崩壊した後に桁が大きく移動し損傷したと思われる。

以上のように、桁間連結装置の損傷は、支承の移動制限装置が破損したために生じる隣接橋梁間の複雑な動きに起因している。支承から分離した桁は、橋脚の上下左右の動きのために、極端に言えば跳びはねた状態となっていたと推定される。

このような状態では、桁間連結装置が1次的に有効に作用したか否かの疑問も残る。また、桁間連結装置が有効に作用するためには、かなり大きな構造物となり、桁間連結装置そのものが成りたたなくなる可能性がある。さらに、橋台間に架けられている単純桁形式橋梁では、構造上、橋台は変形せず変位しても前面にしかしないことが多い。この場合、都市内の高架橋のように変形しやすい橋脚上に連続して上部工がある場合の地震時の挙動とは明らかに異なると思われる。

このような観点から、橋梁システム全体として桁間連結装置を含む落橋防止設備が保有すべき機能を再検討する必要がある。詳細な検討を必要とするが、落橋を防止する立場からは橋脚の梁幅（橋台）をある程度以上広くすることが最も有効と思われる。

#### (6) 現場継手

継手の損傷は、添接部の隅部の塗装剝離とボルト頭部の塗装剝離が大半であるが、今回



の損傷程度はC～Dと考えてよいようである。

現在、現場継手には摩擦接合型高力ボルトが使用されているが、塗装の剥離から、摩擦が切れボルトが滑ったものが、極一部認められた。これは地震時に摩擦が切れるほどの過大な力が作用したことを示している。この場合、継手の耐荷力が問題となるが、継手が過大な繰り返し荷重を受けた場合、ボルト軸力が減少するが、長期間経過した継手摩擦面のすべり係数が錆の影響により増加する傾向にあるため、継手部の耐力の低下は少ないと思われる。なお、ボルトそのものの損傷は、端横桁、桁端部等において過大な変形が生じたために、一部の高力ボルトがせん断破壊して欠落している例があったに留まっている。

## (7) 塗 装

塗装の損傷は、塗膜に生じた割れと塗膜の剥離で、後者が大半である。塗膜の剥離は塗装系や下地の状態で異なっているが、ほとんどは鋼材素地と下塗りの層内で生じている。塗膜の割れは、塗装の種類と経時によって異なるが、ある一定以上のひずみが与えられると発生する。例えば、被災した橋梁から採取した鋼材で単調圧縮および単調引張載荷試験を実施したところ、1%程度のひずみで塗膜に割れが生じ、ひずみの増加とともに剥離が広がった。なお、塗装系は油性鉛丹サビ止めペイントと合成樹脂調合ペイントの組合せで10年以上経時したものである。これは、塗膜の剥離は鋼材の伸縮が塗膜の伸び以上になった部分で生じたと判断され、間接的に鋼材に生じたひずみの大きさを評価する指標になるようである。実際、塗装の損傷が生じていた箇所は、外的な物理的損傷以外は鋼製橋脚の座屈した箇所や隅角部等の変形の大きな箇所やひずみが集中しやすい箇所であったことから理解される。

## (8) 上部工と支承と橋脚の関係

基本的な構造要素間の関係については、各構造要素の項目でも多少触れているが、ここでは、特に上部工、支承、橋脚との関係について見てみる。

まず、上部工と支承の関係について着目する。上部工の損傷程度と支承の損傷程度との関係を図-4.2.16に、支承形式別の上部工の損傷程度を図-4.2.17に示す。結果によれば、支承と上部工の損傷関係には強い相関が見られ、支承が健全である場合には、上部工に大被害は生じていない。このことは、上部工の損傷が支承の損傷に大きく影響されていることを示すものであり、注目すべき点である。また、支承形式がピンあるいはピンローラの場合に上部工の損傷が大きい傾向があり、特に上部工の中程度の損傷が多い。ただし、重大損傷については支承形式との相関はあまり強くないようである。さらに、支承が固定査か可動査かの条件にも依存していない。これは、今回の地震の方向が橋軸直角方向（南北方向）に揺れが大きかったことと関連がある可能性が高い。

次に、支承と橋脚の関係についてであるが、支承と上部工との関係に比べて、支承と橋脚の損傷の関係には強い相関が見られない（図-4.2.18）が、支承、橋脚共に損傷程度が大きい場合には、可動査の方が損傷が大きい傾向にある。

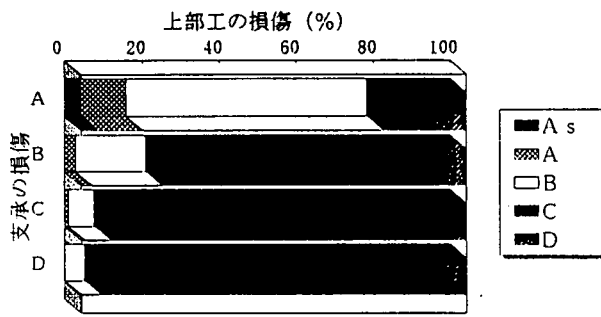


図-4.2.16 支承と上部工の損傷程度

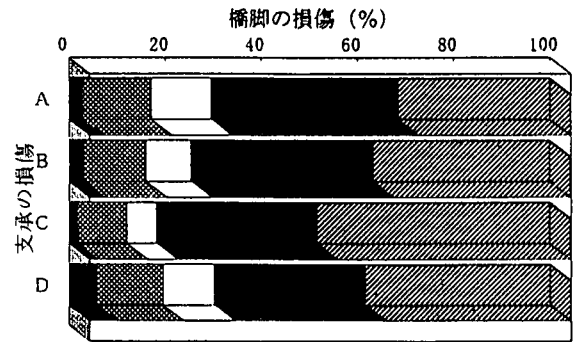


図-4.2.17 支承と橋脚の損傷程度

上部工の損傷度と橋脚の損傷度との関係を図-4.2.19に示す。これによれば、橋脚の損傷度が高いほど上部工の損傷度が高い。また、橋脚の損傷度が中程度以下の場合には、上部工の損傷程度に差が少ないようである。これは、橋脚の中程度以下の損傷は上部工に影響を与えないことを示していると思われる。

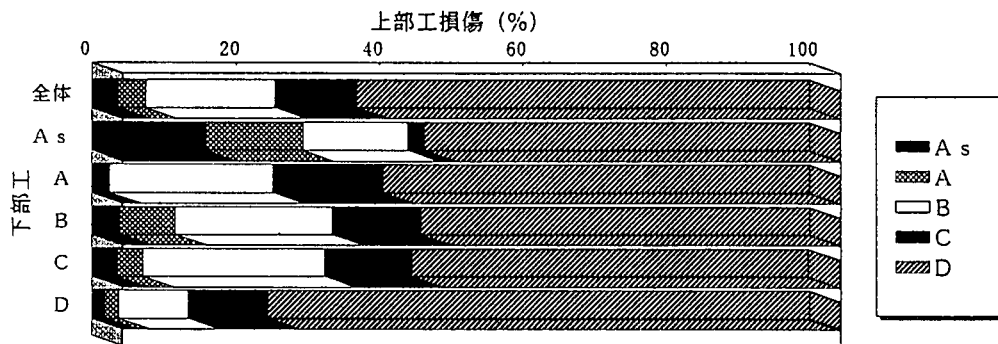


図-4.2.19 上部工と橋脚の損傷程度

全体的に言えば、支承や下部工の損傷がなければ、上部工の損傷は大幅に軽減出来た可能性が高い。また、上部工本体の設計手法や構造に起因した損傷事例は少なく、上部工の設計手法に大きな改善を行う必要性は少ないと考えられるが、支承、鋼製橋脚等に関しては、作用荷重や許容変位（変形）も考慮して、構造や設計法を再検討する必要がある。

#### 4.2.3 まとめおよび今後の課題

鋼構造分科会において行っている鋼橋の被害調査と分析および課題について、簡単にまとめると次のようになる。

- 1) 今回の地震は、現状想定されているプレート型の地震ではなく、直下型の地震であったため、設計上考慮されていない橋梁の挙動が生じた。このため、一般的な高架橋であっても、従来のように“慣性力”を基本とした震度法で設計するのではなく、橋梁間－上部工－支承－橋脚－基礎－地盤等の相互作用（すなわち橋梁システム）を考慮した“変位”“変形”“慣性力”を基本に設計する必要がある。
- 2) 鋼橋全体としては、特殊な事例を除き、鋼構造が1次要因となる落橋等の致命的な被災はなかったと判断される。ただし、局部構造に改善すべき点がある。
  - ① 上部工全体としては健全であるものが多く、損傷は、支承の崩壊が要因となった桁端部や中間支点上に集中している。また、桁の支承からの脱落により路面に段差および橋軸直角方向のずれが生じたが、落橋以外に緊急車両の走行が不可となるような被害はなかった。落橋そのものは下部工の崩壊により誘発されたものである。
  - ② 鋼製橋脚では、全く機能を失った2例を除き、基部付近のパネル座屈や支承付近の梁の変形が生じていた程度である。一部に過大な座屈変形の進行とともに、角溶接等に割れが生じた例もあったが、地震前に想定していた以上によく抵抗したと考えられる。ただし、崩壊した橋脚のひとつは、梁両端をRC柱で支持された特殊ラーメン形式であった。この形式は、従来の弾性設計上は優れた形式であるが、必ずしも適切ではなかった。今回の地震のように弾性限を越える荷重や変形を想定する場合、設計思想そのものを変更する必要がある。
  - ③ 支承の損傷状況は、他の構造要素と比較して最も損傷程度が高い。また、支承の損傷が他の構造物へ与えた影響は大きく今後の検討が重要な構造要素である。特に、鋼橋では支承には種々の機能が付加されているため、コンクリート橋の支承システムのように機能分散も含め、全面的な見直しを早急にする必要がある。
- 3) 現在、落橋防止に対しては支承、桁間連結装置、梁幅確保で対応していたが、今回の地震で有効性、必要機能を再度確認し、橋梁システムに応じた落橋防止システムを確立する必要がある。
- 4) 震災直後に容易に計測可能な指標を基本とした定量的評価基準は今後の研究を待つとともに、再度被災の評価、分析を行う必要がある。

## 4.3 鋼橋の補修・補強事例

補修・補強対策ワーキング 主査 迫田 治行（川崎重工業）

### 4.3.1 復旧一般

鋼橋（鋼げた、および鋼製橋脚）の復旧作業は地震発生直後から各所で精力的に続けられ、平成8年9月末の阪神高速道路・3号神戸線の全線開通（予定）をもって、ほぼ主要幹線道路の復旧が完了する予定である。もちろん、主要幹線道路以外の路線および歩道橋等では、未だ完全に復旧されていない鋼橋もあり、今後とも復旧が継続されることになる。

鋼橋の復旧は、地震直後の2次災害防止のための『緊急措置』、車両通行を可能とさせるための暫定措置である『応急復旧』、緊急措置または応急復旧からの『本復旧』と、段階的にみれば3種類に区別できる。また、本復旧の方法は、大きく分けて以下の2種類に区分できる。

1) 補修（補修部の補強も含む）

2) 再構築

補修は、前節で示された各種の損傷を局部的に修復・補強、あるいは取り替えるという形でなされたものであり、その補修対象となる損傷項目を表4.3.1に示す。一方、再構築は、一般に被災度が大きいものについて適用された復旧方法であり、損傷した構造物を撤去のうえ、新たに鋼橋を再構築するものである。

鋼橋の本復旧の方法は画一的ではなく、被災の度合い、および現地の施工環境等に応じて、いろいろな復旧方法が採用されている。また、耐震性という観点からみれば、被災前よりも耐震性を向上させた復旧と、交通解放を優先するということから取り敢えず原形に復旧することを目的としたものの2通りがある。耐震性を向上させた復旧とは、地震直後の平成7年2月に建設省通達<sup>1)</sup>（以下、復旧仕様と記す）として指導された改善項目を復旧にあたって反映するというものであり、鋼橋では具体的に下記の点を改善するということになる。

1) 今回の地震の規模にも鋼橋が耐えられるように、鋼橋の各部位の地震時保有耐力を確保する。

2) 鋼製橋脚の変形性能、靱性を向上させ、地震時保有水平耐力を確保する。

3) 複数の落橋防止装置を設置する。

4) 可能な限り、免震構造とする。

5) 支承はなるべくゴム系支承とし、可能なら免震設計を可能とする免震ゴム支承を用いる。

6) 鋼げたの桁掛かり長を改善する。

7) 再構築にあたってはなるべく連続げたを採用する。また、単純げたが連続する高架橋では、可能な限り、主げたの腹板を連結したノージョイント化を図る。

結果として、復旧にあたっては、損傷部位の補修だけではなく、各構造部位の強度増大のための部材追加・取り替え、免震ゴム支承への取り替え、および落橋防止装置の追加などの新たな措置が必要となる。これらの耐震性向上対策（グレードアップ）のうち、どの範囲を取り込むかによって、また、どのような方法で取り込むかによって、同種類の被害でも復旧の方法が種々異なっており、今回の震災復旧の方法が多種・多様化したひとつの要因となっている。

本報告書では、一般的な鋼橋（ただし、道路橋）の本復旧方法、および耐震性の向上対策を各構造ごとに簡単に紹介することとする。もちろん、大型橋梁（例えば、トラス橋、アーチ橋、ニールセン橋、斜張橋、大型箱げた橋、大型ゲルバー橋、大型ラーメン橋など）も今回の地震で少なからず損害を被り、復旧がなされている。しかしながら、この種の大型橋梁の復旧方法については、各種論文および工事報告等でその概要を把握することが可能なので、ここでの報告は省略する。ただし、大型橋梁の復旧といえども、下記のような特徴を除けば、その復旧内容は一般の鋼橋の場合と基本的に変わらないと考えてよい。

- 1) 復旧の規模が一段と大きくなっていること。
- 2) フローティングクレーンなどの大型重機械も使用されていること。
- 3) ケーブルなど特殊な構造の復旧がなされていること、 等々。

表一4.3.1 鋼橋の損傷と修復箇所

| 損傷の部位     | 損傷の種類（修復箇所と一致）   |
|-----------|--|
| 伸縮継手      | 1) 取り付けボルトの破損<br>2) フェースプレートの変形<br>3) 遊間の異状  |
| 床版        | けた端の床版コンクリートの滑落、ひび割れ   |
| 壁高欄、中央分離帯 | けた端部での破損   |
| 桁間連結装置    | 1) 連結板、および連結ピンの破損<br>2) 取り付け部の主げた本体（特にウェブ）の破損  |
| 排水装置      | けた端での排水管の破損  |
| 検査路       | けた端部での破損   |
| 上部鋼桁      | 1) けた端のフランジおよびウェブの変形、破損、および座屈<br>2) けた端の横げたの破損<br>3) けた端の横構の破損<br>4) 高力ボルトの滑り<br>5) 塗膜の剥離<br>6) 下部構造の傾斜・移動および支承破損に伴う路面の段差と通りの異状  |
| 鋼製支承      | 1) 沓座コンクリートの破損、およびアンカーボルトの破断、伸び<br>2) 移動制限装置の破損<br>3) セットボルトの破損  |
| 鋼製橋脚      | 1) 柱の補剛板の全体座屈、または局部座屈<br>2) 溶接部のクラック<br>3) 沓座近傍の横ばりの局部座屈<br>4) 高力ボルトの滑り<br>5) 塗膜の剥離<br>6) マンホール近傍のクラック<br>7) アンカーボルトの伸び<br>8) フーチングコンクリートのひび割れ<br>9) コンクリート杭のひび割れ<br>10) 橋脚全体の異常な傾斜、および液状化などに因る基礎の移動 |

（注意）トラス、アーチ系橋梁、斜張橋などの大型橋梁は除く。

### 4.3.2 鋼げたの復旧方法

鋼げたの復旧方法を、補修、耐震性向上対策、および再構築という観点から整理してみると以下のとおりである。なお、鋼げたについては、損傷の大きいもの（被災度<sup>3)</sup>でA s, Aに区分されるもの）はおおむね撤去・再構築され、損傷の小さいもの（被災度B, C, Dに区分されるもの）はおおむね補修・補強という措置が講じられた。ただし、復旧期間の短縮、および路下の各種制約条件等によっては、被災度Bでの撤去・再構築、および被災度Aでの補修・補強の復旧方法が採られている場合もある。

#### (1) 鋼げたの補修

鋼げたの補修は、加熱矯正、または補修溶接による軽微な補修から、連続箱げたの中間支点部材の取り替えなどの大規模なものまで、多種・多様である。鋼げたの補修にあたって実際に採用された補修方法を、損傷との関連で整理してみると、おおむね、表-4.3.2に示すとおりである。また、これらを図化したものを図-4.3.1に示す。

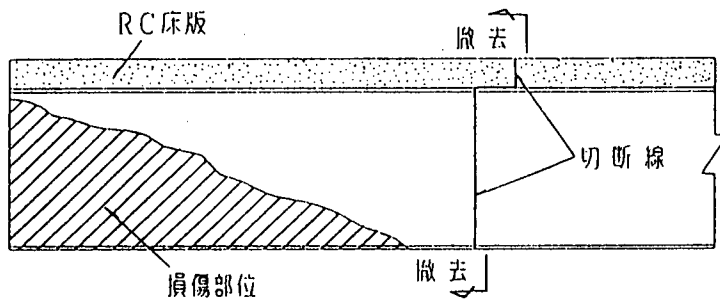
表-4.3.2 鋼げたの補修方法

| 区分  | 損傷の度合い                    | 補修方法  |
|-----|---------------------------|---|
| I   | 損傷が広範囲にわたり、損傷度合いの大きいもの。   | 1) 損傷部位を含む鋼げた（床版含む）を切断・撤去して、新規部材と取り替える方法（部分的な再構築）。<br>2) 新旧部材の接合は高力ボルト継手、または溶接継手による。                              |
| II  | けた端の座屈、変形などで、損傷が大きいもの。    | 1) 鋼げたのウェブ、または下フランジ等の損傷部位を部分的に撤去し、新規部材と取り替える方法。<br>2) 新旧部材の接合は高力ボルト継手、または溶接継手による。                                 |
| III | けた端の座屈、変形などで、比較的損傷が軽微なもの。 | 1) 損傷部位の撤去・取り替えは行わず、変形等を加熱矯正、またはプレス矯正する方法。<br>2) 補修後、変形部に添え板を当て、ボルトまたはスポット溶接により接合し、補強した場合もある。また、補修部をリブで補強した場合もある。 |
| IV  | 溶接部等のクラックを対象。             | 溶接埋め戻しによる補修。  |

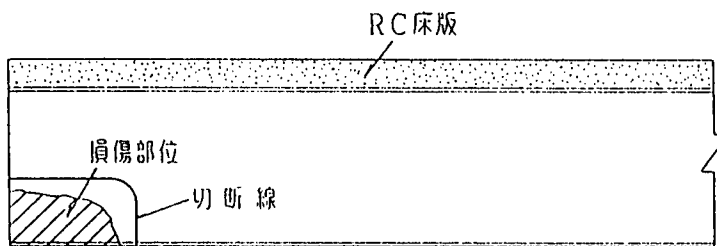
鋼げたの損傷はけた端、および端支点・中間支点近傍に多く発生していることから、表中に示した補修、取り替えの大部分は、これらの部位を対象として施工されたと言っても過言ではない。また、下部工の再構築のための作業空間を確保するために、鋼げたを切断した例もある。

主げた部材の取り替えは、けたをベントで仮受けして応力解放を行った後、損傷部位を切断・撤去して新設部材と取り替えているのが一般的であり、加熱矯正・溶接による軽微な補修はベント等での応力解放を行わず、応力作用下で行われた場合が多い。

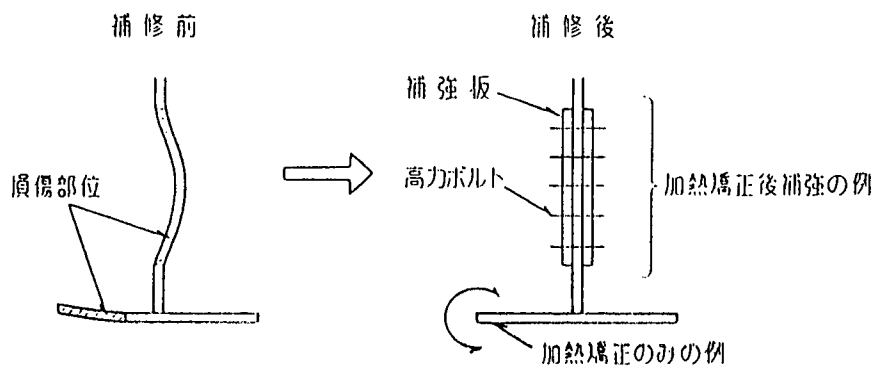
橋脚の破損・傾斜、および支承の破損などにより、鋼げたが橋軸方向、橋軸直角方向、および鉛直方向へ移動している場合の復元も大きな鋼げたの復旧作業となった。路面の「通り」、「連続性」を確保するためのこれらの復元は、ジャッキによる鋼げたの縦押し、横押し、あるいはジャッキアップによる沓座高さの変更などにより個別に対処されたが、路線全体の線形まで変更しなければならない場合も発生した。



(a) 区分Ⅰの補修



(b) 区分Ⅱの補修



(c) 区分Ⅲの補修

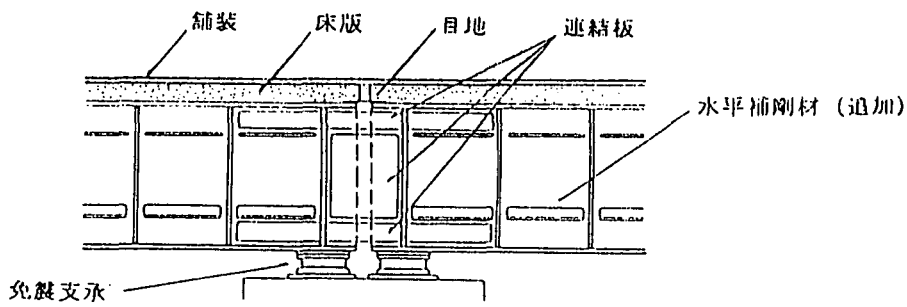
図一4.3.1 鋼げたの補修方法

## (2) 鋼げたの耐震性向上対策

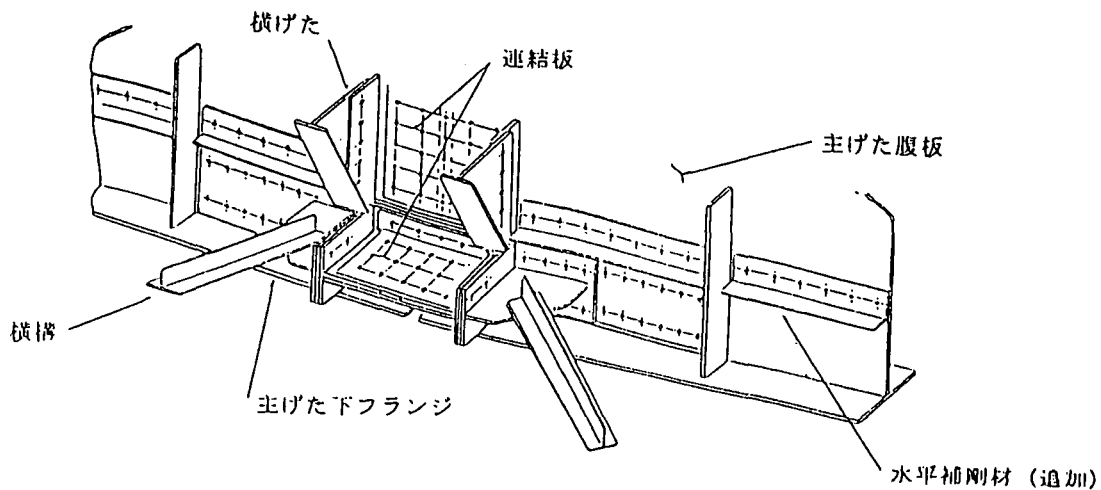
橋梁全体としての耐震性を向上させるために、復旧にあたって、以下のような構造変更が実施されている場合もある。

- 1) けた連結による連続化
- 2) 端横げたの補強
- 3) 既設げたの鋼床版化

けた連結による連続化は、隣接する鋼単純Iげたの腹板を高力ボルトで相互に連結し、ジョイントレス橋梁として復旧を行ったものである。もちろん、この措置は、車両走行性を改善するという意味もあるが、耐震性、特に落橋防止効果をも期待している。その構造概要の一例を図-4.3.2に示す。この場合、免震ゴム支承に取り替えて、上部工の橋軸方向の地震時慣性力を各支承に分散・低減させている。



(a) 連結構造の概要 (全体)



(b) 連結構造の詳細 (下フランジ側)

図-4.3.2 ノージョイントの構造詳細 (一例)



端横げたの補強は、損傷が多く視られたニーブレス形式の端支点上横げたを充腹構造に改造するものである（図-4.3.3 参照）。大地震に対しても、支承等の破損で主げた端部、および横げたが破損しないように、端支点上横げたの剛性を高めている。充腹構造への構造変更方法としては、既設の端横げたや主げたの損傷の有無や度合い、および補修方法によって、下記の2種類の方法が採用されている。

- 1) 既設の端横げたを撤去して新設の充腹形式に取り替える。
- 2) 既設の端横げたのニーブレス部のみ取り替える（新旧部材の接合は溶接継手、または高力ボルト継手による）。

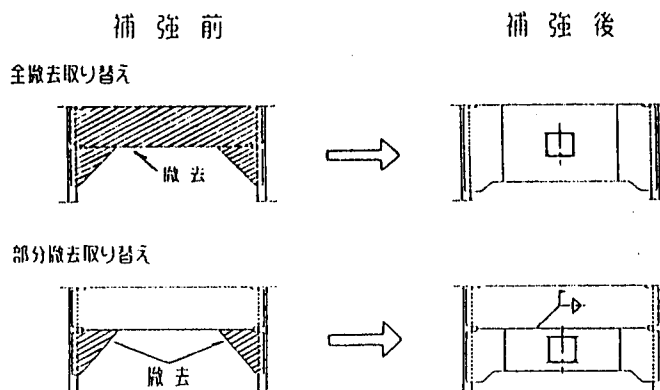


図-4.3.3 ニーブレス形式の端横げたの充腹構造化

既設げたの鋼床版化の実施例は少ないが、死荷重を軽減するために、RC床版を撤去し、既設の主げたの上に新設の鋼床版を現地で搭載・接合して鋼床版橋として復旧したものである（図-4.3.4 参照）。もちろん、その意図は地震時の上部工の慣性力の低減にある。鋼床版化の要領・手順の一例を以下に示す。

- 1) 既設のRC床版を撤去する。
- 2) 主げたの上フランジ上面を整形した後、主げた上フランジ上面に、鋼床版パネルを搭載し、溶接で固定する。
- 3) 既設の床組部材のうち横げた以外は全て撤去して、主げた間の鋼床版パネルを搭載し、高力ボルトで接合する。

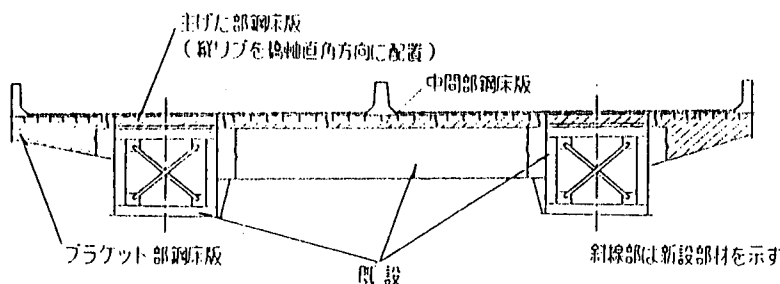


図-4.3.4 既設げたの鋼床版構造への変更

### (3) 鋼げたの再構築

損傷が激しかった鋼げたは、おおむね撤去され、新たに再構築されている。また、下部工の損傷が激しく撤去せざるを得なかった鋼げたも新たに再構築されている。再構築にあたっては、原形で復旧されたものもあるが、下記に示すような耐震性向上対策を取り入れたものも数多い。

1) 連続げたの採用。

2) 免震ゴム支承の採用による免震化、またはゴム支承の採用による地震力の分散化。

3) 慣性力低減を目的とした鋼床版構造の採用。

後者のふたつは、既存の基礎をなるべく再利用したいという要請にもよっている。

再構築げたが特に連続する区間では、各種の制約条件を考慮して、また上記の耐震性向上対策も取り入れて、まったく新たな構造形式に変更している場合もある。例えば、阪神高速道路・3号神戸線の神戸市東灘区のピルツの崩壊区間では、コンクリートげたに替えて、免震支承を用いた9径間連続鋼床版箱げた（2連）で復旧が行われている。また、神戸市中央区の国道2号線上にあった独立単柱に支持された支間30m前後の鋼1げたは、基礎を除いて全面撤去の後、橋脚下端に免震ゴム支承を配置した19径間連続鋼床版立体ラーメン橋として再構築されている（図-4.3.5 参照）。

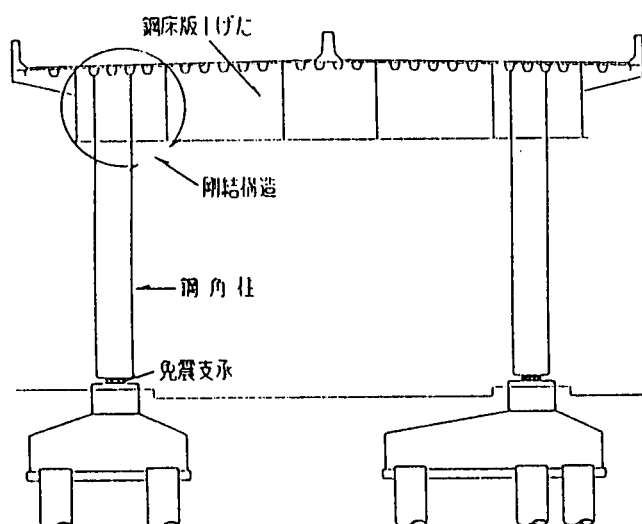


図-4.3.5 19径間連続鋼床版立体ラーメン橋

### 4.3.3 支承および沓座の復旧

#### (1) 支承の復旧

鋼げたの大部分は鋼製の支承で支持されていたが、地震により支承も甚大な被害を受けた。また、この支承の崩壊・破損が、鋼げたの縦移動・横移動、および主げたの端部の損傷を招いた大きな要因ともなっている。支承の復旧にあたっては、これらの教訓も踏まえて、鋼製支承

からゴム支承（免震ゴム支承、反力分散ゴム支承、固定・可動ゴム支承、あるいは密閉ゴム支承など）に取り替えた例も多々ある。しかしながら、ゴム支承は大反力に耐え得ないので、大型橋梁では依然として鋼製支承（例えば、ピボット沓、ピボットローラー沓、大型の支承板支承など）で復旧されている場合も多い。ただし、その際、各部品の強度を可能な限りアップさせている。

支承の補修は、破損したセットボルトの取り替え、移動制限装置の取り替えなどの部分的な補修から、主げたをジャッキアップしての上沓部の取り替え、支承全体の取り替えなどまで、被災状況に応じて種々の方法が採用された。また、特にゴム支承を採用した場合には、既設のソールプレートの取り替えや、新たなソールプレートの追加などの措置も講じられた。

復旧仕様では、免震設計を行うことを推奨しており、耐震性の向上と言う観点から鋼製支承を免震ゴム支承（あるいは反力分散ゴム支承）に取り替えた場合も多い。

## (2) 沓座の復旧

支承の損傷に伴い、沓座コンクリートのひび割れ・滑落、アンカーボルトの異常な伸びも数多く観察されている。RC橋脚上の沓座で比較的健全なものについては、樹脂モルタル注入、およびアンカーボルトのナットの締め直しなどの簡易な修復がなされた。しかしながら、主げたが縦移動、または横移動を起こしている場合、および従来の鋼製支承を設置面積の大きいゴム支承に取り替える場合などでは、既設のアンカーボルト、および増し打ちアンカーボルトの上端にベースプレートを溶接し、この上に支承の下沓を溶接・固定する構造変更が一般的に採用された（図-4.3.6(a) 参照）。この際、地震時水平力に対処するために、ベースプレート下面にスタッドを設置している場合もある。なお、これらの作業は主げたのジャッキアップを行って実施されている。また、橋脚が橋軸直角方向に傾斜を生じている場合には、上記のベースプレート上に鋼製の沓座を設置し、この上に支承を固定することで路面高さを確保・調整することも行われた（図-4.3.6(b) 参照）。橋脚が鋼製の場合も、上記と同様の復旧がなされているが、修復作業は溶接によって行われた。

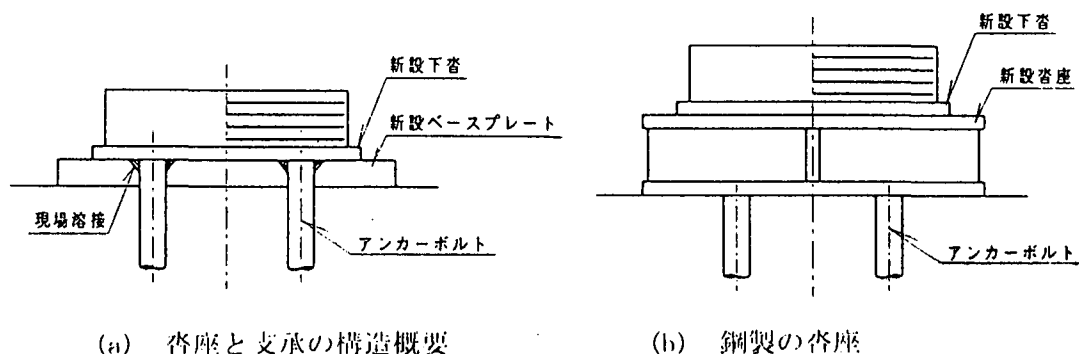


図-4.3.6 沓座の復旧（一例）

#### 4.3.4 鋼製橋脚の復旧方法

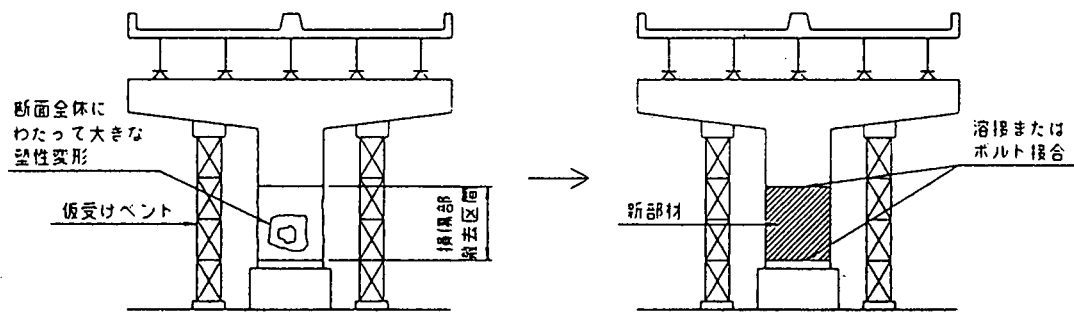
本節では、鋼製橋脚の補修方法、再構築方法、耐震性向上対策、およびアンカーボルト・基礎の復旧方法について簡単に説明する。損傷した橋脚のうち、特に、座屈崩壊や大変形が生じた橋脚（被災度<sup>3)</sup>でAs、Aに相当するもの）はおおむね、再構築され、損傷の小さいものは補修・補強が施された。また、大きく傾斜した橋脚で上部構造の修復だけでは路面線形が保たれないものについても撤去・再構築された場合がある。

##### (1) 鋼製橋脚の補修

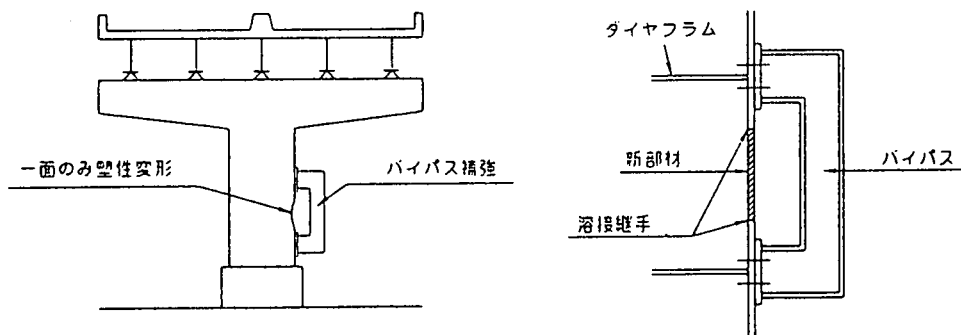
鋼製橋脚の補修方法を損傷との関連で整理してみたものを表-4.3.3 に示す。また、これらを図化したものを図-4.3.7 に示す。

表-4.3.3 損傷の度合いと補修方法

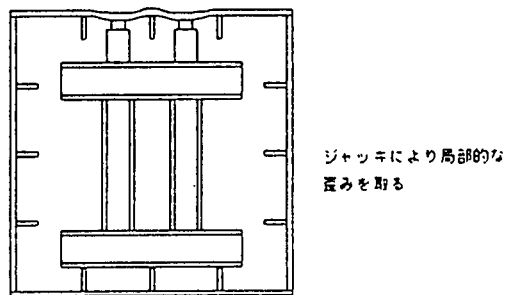
| 区分  | 損傷の度合い                              | 補修方法   |
|-----|-------------------------------------|--|
| I   | 柱の局部座屈で、断面全体にわたって大きな塑性変形が認められるもの。   | 1) 損傷部位を含む脚柱の一部を、全断面、切断・撤去して、新しい部材に取り替える。取り外し位置として既存の現場添接を利用している場合もある。<br>2) 新旧部材の接合は、溶接接合または高力ボルト接合による。<br>3) 上部鋼げた、および橋脚の横ばりをベントで支持して、部材の取り替えを実施している。<br>4) 路下の交通制約条件、施工上の制約条件から、座屈部を外側から添板で補強した場合もある（バイパス補強）。 |
| II  | 柱の局部座屈で、補剛パネルの一面のみに大きな塑性変形が認められるもの。 | 1) 損傷部位を含む補剛パネルを局部的に切断して新しい部材に取り替える。<br>2) 新旧部材の接合方法は、一般的に溶接継手による。<br>3) 上部鋼げた、および橋脚の横ばりをベントで支持して取り替えを実施している。損傷部位にバイパス補強を施し、これに鉛直荷重を負担させて損傷部位の取り替えを実施している場合もある。  |
| III | 柱、および梁の局部座屈で、変形がさほど大きくないもの。         | 1) 加熱矯正、またはプレスにより変形を修復する。<br>2) 修復部の補強のため、補強縦リブ、あるいは添板で補強した場合もある。添板補強の取り付けは、高力ボルト接合、またはスポット溶接接合による。  |
| IV  | 軽微な変形。                              | 1) 特に補修は施されていないが、美観のために、加熱矯正による変形の矯正を実施した場合もある。  |
| V   | 局所的な溶接われ。                           | 1) 補修溶接を実施。  |
| VI  | 橋脚の傾斜。                              | 1) 傾斜の復元のための工事は一般的に実施されていないが、柱などの損傷部位の取り替え時に建ち調整を行ったり、柱基部にて建ち調整を行って、傾斜を修復した場合もある。  |



(a) 区分Ⅰ



(b) 区分Ⅱ



(c) 区分Ⅲ

図一4.3.7 鋼製橋脚の補修方法

## (2) 橋脚の再構築

撤去された鋼製橋脚の再構築にあたっては、ほとんどの場合、再度、鋼製の橋脚で復元されている。その際、復旧仕様に基づく耐震性向上対策が何らかの形で採用されている。

一方、大きく損傷したRC橋脚の再構築にあたっては、基礎への負担力を軽減すること、および地震時慣性力を緩和することを目的として、鋼製橋脚に構造変更して再構築されたものもある。その際、いずれも既存の基礎・フーチングを再利用したケースが多く、どの部位から鋼製橋脚に変更するかによって、以下の3種類の方法が採用された（図-4.3.8参照）。

- 1) 基礎・フーチングの直上から鋼製橋脚として再構築する。
- 2) 柱の下部をRC構造、上部を鋼構造で再構築する。すなわち、脚柱の中間部でRC構造と鋼構造を接合する。
- 3) 柱部をRC構造で再構築し、橋脚のはり部のみ鋼構造とする。すなわち、隅角部で両者を接合する。

1)の方法は、既設のRC橋脚をフーチングのすぐ上で切断・全面撤去し、フーチングの既存鉄筋（RC柱の軸方向鉄筋）に新たな鉄筋を接合し、これらを通した鋼製橋脚の柱内部に差し込み、この部位にコンクリートを充填してフーチングと鋼製橋脚とを結合させたものである。もちろん、耐力が不足すれば、必要に応じてフーチングに後打ちの増しアンカー鉄筋を設置している。2)の方法は、見方によれば柱基部で結合したとも言えるものであるが、既設のRC柱を基部から高さ2～3mの位置で切断し、主鉄筋が出るまでコンクリート外面をはつり、主鉄筋を接合・延長し、スタッドを配置した新設鋼製橋脚の側板を柱基部の位置まで被せ、RC柱と側板との隙間にコンクリートを充填して両者を接合するものである。3)の方法は、フーチングの既存鉄筋（RC柱の軸方向鉄筋）を利用して、再度、RC柱を構築し、これに鋼製の横ばりをかぶせ、柱と横ばりの交差部（隅角部）内にコンクリートを充填することで両者を結合しようとするものである。

なお、図には示さないが、RC柱の断面を大きくせざるを得なかったことから、RC柱の上部にアンカーフレームを埋設し、通常のアンカーボルト形式で、RC柱と鋼構造（ただし、柱の一部と横ばり）とを接合した例もある。

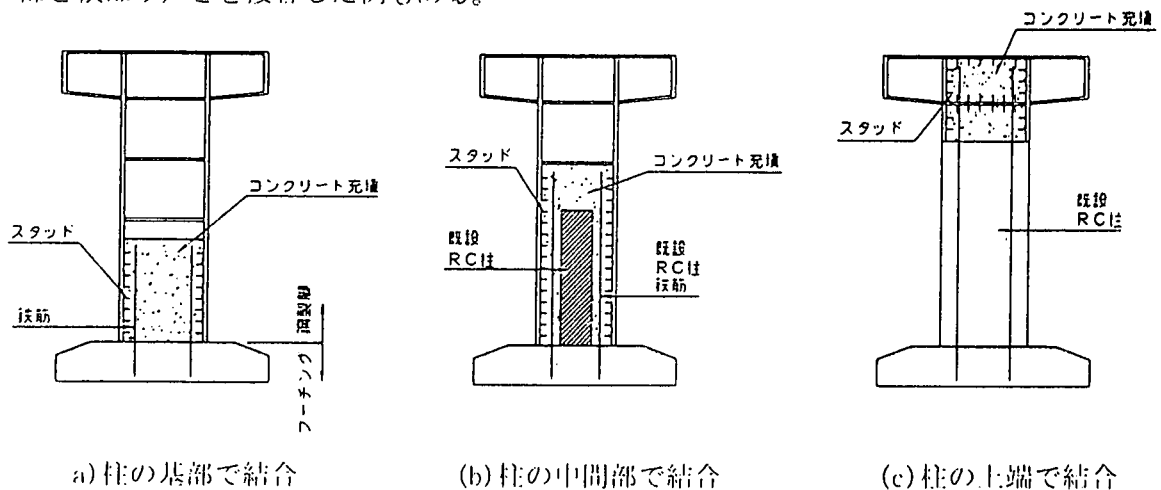


図-4.3.8 RC橋脚の再構築における鋼構造の適用

### (3) 鋼製橋脚の耐震性向上対策

復旧仕様に基づき、既設、および再構築を問わず、数多くの橋脚について地震時保有水平耐力の照査が実施された。照査結果、所要の耐力・靱性が不足している場合には、以下に示すような対策が講じられた。

- 1) 橋脚の柱内部にコンクリートを充填する（既設の鋼製橋脚、および再構築橋脚）。
- 2) 橋脚の柱の断面をアップするとともに、補剛板の幅厚比、縦リブ剛性を厳しく制限する（特に、再構築された橋脚）
- 3) 柱の側板の内面（または外面）に補剛用縦リブを追加する（特に、既設の橋脚、および円形断面を有する橋脚）。

損傷を受けなかった橋脚に対しても、旧示方書で設計・施工され、補剛板の応力が現行の道路橋示方書<sup>6)</sup>の許容応力を満足していない場合には、縦リブ、あるいは補強カバープレート等で補強した後、地震時保有水平耐力を確保するために、必要に応じて柱内部にコンクリートが充填された。

### (4) アンカーボルト・基礎の復旧

アンカーボルト・基礎の損傷としては、アンカーボルトの残留伸びやフーチングコンクリートのひび割れなどが挙げられる。計測結果では、アンカーボルトの伸び量は多くても2～3%程度であり、アンカーボルトそのものの耐力には問題が少ない場合がほとんどであった。このため、アンカーボルトに対する補修・補強は特に行わず、ほとんどの場合は、ナットの増し締めのみを実施している。

アンカーボルトに損傷はないが、橋脚基部の柱断面に比べてアンカーボルト部分の保有水平耐力が小さい場合、既設のアンカーボルトの外面に、新設のアンカーボルト（後打ち）を増設・設置して耐力増を図る措置が講じられた場合もある。その一例を図-4.3.9に示す。この場合、橋脚は再構築されたものであり、増設アンカーボルトにはD51の鉄筋を使用している。またフーチングへの定着は、樹脂アンカーを用いて定着している。

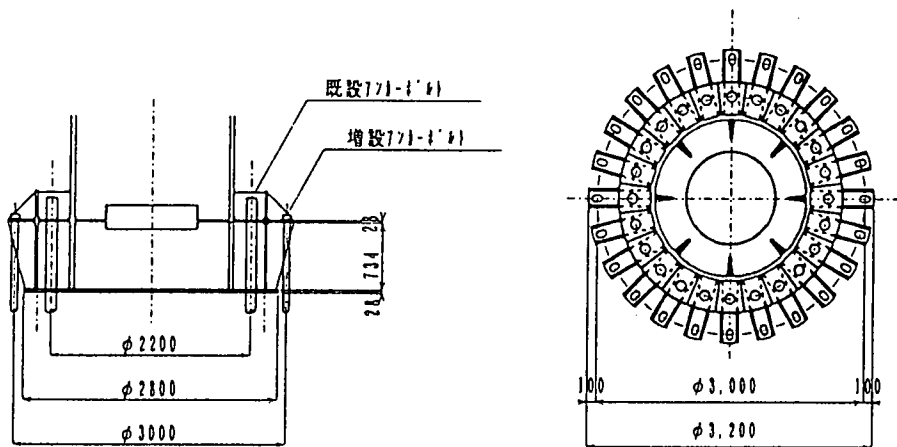


図-4.3.9 アンカーボルト増設の一例

### 4.3.5 落橋防止装置

今回の地震による被害に鑑み、耐震性向上対策（落橋防止対策）として下記の改善を行うことが、復旧仕様<sup>1)</sup>で強く要請された。

- 1) けた掛かり長を確保する。
- 2) 複数の落橋防止装置を設置する。

なお、これらの改善は、震災復旧のみならず、既設の道路橋全部について、実施されることが求められているものである。以下に、震災復旧におけるこれらの改善事例を示す。

#### (1) けた掛かり長の確保

震災地域には旧基準で設計・施工された鋼橋も多く、復旧仕様が要求しているけた掛かり長を満足していないものが数多くある。このため、橋脚あるいは橋台の上面を全面的、または局部的に拡幅して所要の桁掛かり長を確保する工事が各所で行われている。橋脚あるいは橋台がRC構造の場合は、一般的に、差し筋を利用したRC構造、または、後打ちアンカーボルトによる鋼製ブラケットの取り付けで拡幅しており、橋脚が鋼製の場合は、溶接、または高力ボルトで鋼製ブラケットの取り付けを行っているのが一般的である（図-4.3.10 参照）。

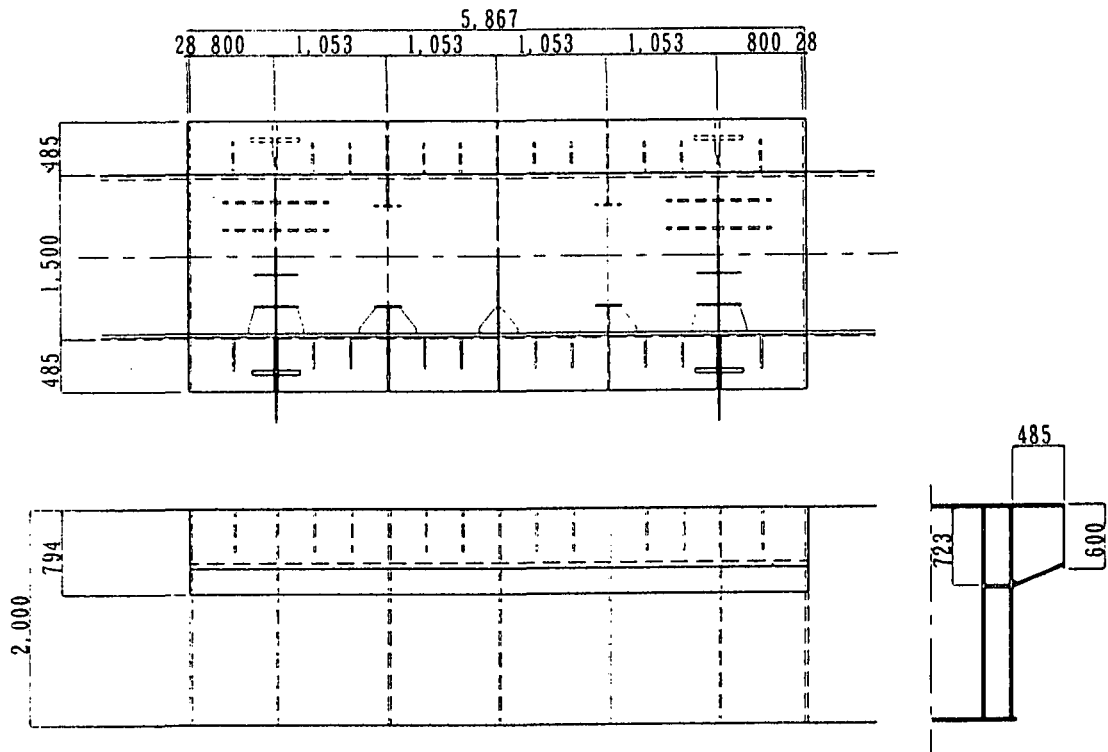


図-4.3.10 けた掛かり長の確保のための橋脚、橋台の拡幅方法（一例）



## (2) 落橋防止装置

従来、落橋防止装置としては、隣接する鋼げたの腹板をプレートで結合したタイププレート方式のけた間連結装置が一般的に用いられてきた。しかしながら、この度の地震で、この方式の装置が数多く破損・崩壊した。その教訓に鑑み、復旧仕様では、より強固で、かつ複数の落橋防止装置を設置することを推奨している。この趣旨に沿って、震災復旧では以下のような落橋防止装置も採用された（図-4.3.11 参照）。

- 1) 隣接する鋼げたをPCケーブルで連結する方法（ケーブル連結装置）。
  - 2) 鋼げたと下部工（橋台または橋脚）をPCケーブル、またはチェーンで直接的に連結する方法。
  - 3) 上部工、または下部工に突起を設ける方法（橋軸方向ストッパー）。
  - 4) 橋台の背面壁にPC鋼棒またはPCケーブルを定着させ、これらを鋼げたと連結する方法。
- 1)の装置は、鋼げたの腹板に架台を設置し、架台間にPCケーブルを張り渡すことで隣接する鋼げたを相互に連結するものである。2)の装置は、鋼げたと下部工とをPCケーブルやチェーンで連結し、地震時に鋼げたが移動しても、鋼げたが下部工から外れて落ちないようにしたものである。3)の装置は、下部工または上部工に突起となる架台を設け、この突起をストッパー代わりにすることで、鋼げたの地震時移動に対応しようとするものである。4)の装置は、特に橋台と鋼げたとを連結するもので、橋台のパラペットを利用して鋼げたの移動を制限しようとするものである。

なお、原形復旧を基本とした復旧では、従来のタイププレート方式のけた間連結装置を強度アップして適用している場合もある。また、単柱で支持された鋼橋や斜角の大きい鋼橋では、橋軸直角方向にも落橋防止用ストッパーが設置された例もある。

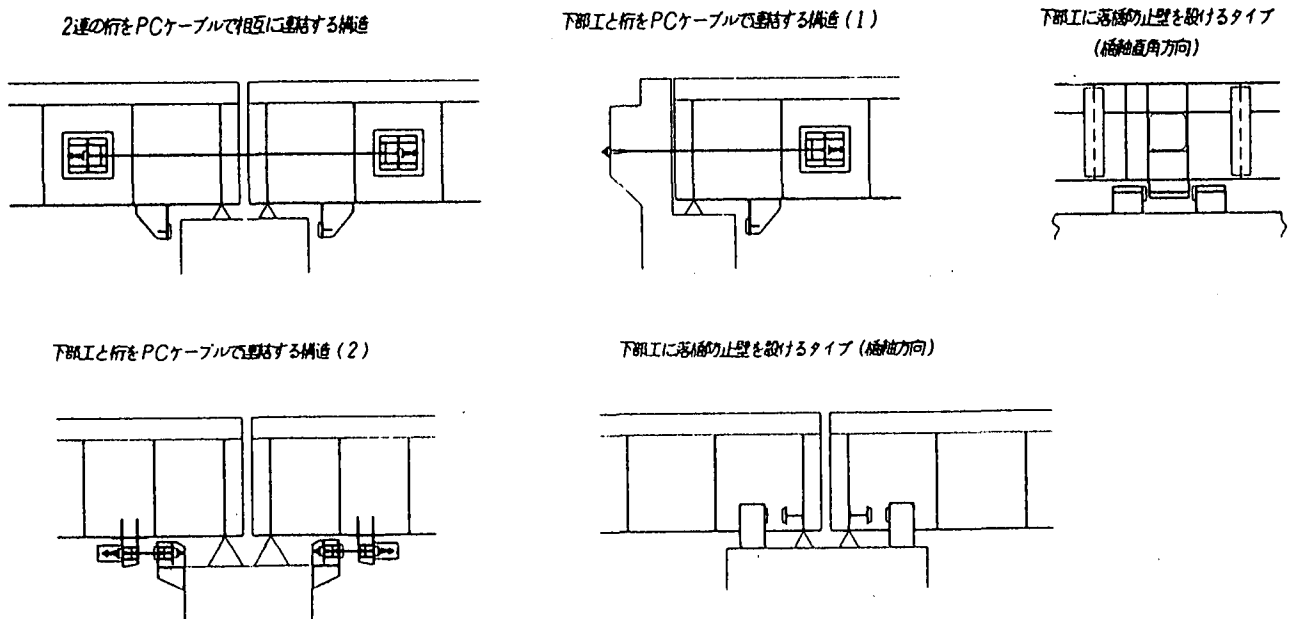


図-4.3.11 復旧で用いられた各種の落橋防止装置（一例）

#### 4.3.6 あとがき

以上、鋼橋の復旧の事例を簡単に紹介した。もちろん、伸縮装置、RC床版、高欄、検査路、および排水設備なども破損し、復旧がなされているが、ここでは主構造をとりあげるということで、その説明は省略した。また、鋼製橋脚の基礎（杭基礎、フーチングなど）も、液状化などの影響で被害を受けているが、他の分科会で紹介されるので、ここではあくまで鋼構造に焦点を絞って記述した。なお、具体的な施工手順、構造詳細という観点からは、ここに記述した以外の復旧方法もあるかと思う。これらについては、今後、さらに調査していく予定である。紙面の都合上、方法を羅列しただけになったが、この点、ご了解願いたい。

最後に、本節は、鋼構造分科会の第2WGで担当・調査した結果の一部を、中間報告という形でまとめたものである。資料を提供していただいた関係各位の御協力に感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 建設省道路局：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、平成7年2月
- 2) 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）、平成7年6月
- 3) 日本道路協会：道路橋震災対策便覧（震災復旧編）、昭和63年2月
- 4) (財)道路保全技術センター：既設橋梁のノージョイント工法の設計施工手引き（案）、平成7年1月
- 5) 阪神高速道路公団：3号神戸線の設計復旧要領（案）、既設上部工の補修・補強設計及び施工要領（案）、既設鋼製橋脚の補修・補強設計及び施工要領（案）、平成7年5月
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、平成2年2月
- 7) (財)土木研究センター：道路橋の免震設計法マニュアル（案）、平成4年12月
- 8) 土木学会：阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、1996年1月