

## IV. 鋼 構 造

名古屋大学工学部土木工学科 宇佐美勉

### 1 まえがき

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、震災から得た教訓、耐震設計の最近の研究動向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、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、地震動の巨大さを考えれば総じて良く耐えたと考えて良い。

### 2 被災の総括と震災から得た教訓

#### 2.1 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て述べる。図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 $R_{cr}$ (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。縦リブの必要剛比 $\gamma_{req}$ 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 $\gamma^*$ (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、 $\gamma^*$ 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タ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図られ、昭

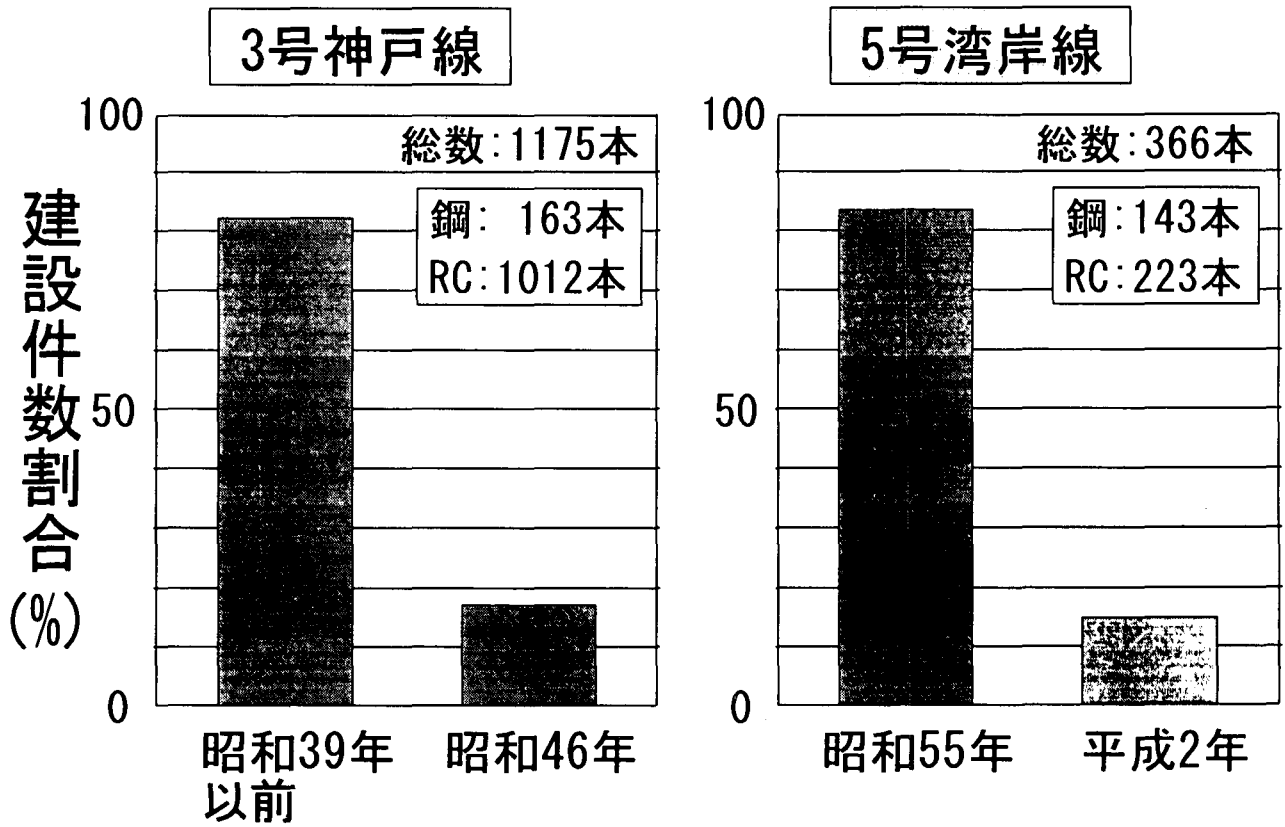


図-1 橋脚の準拠基準による分類

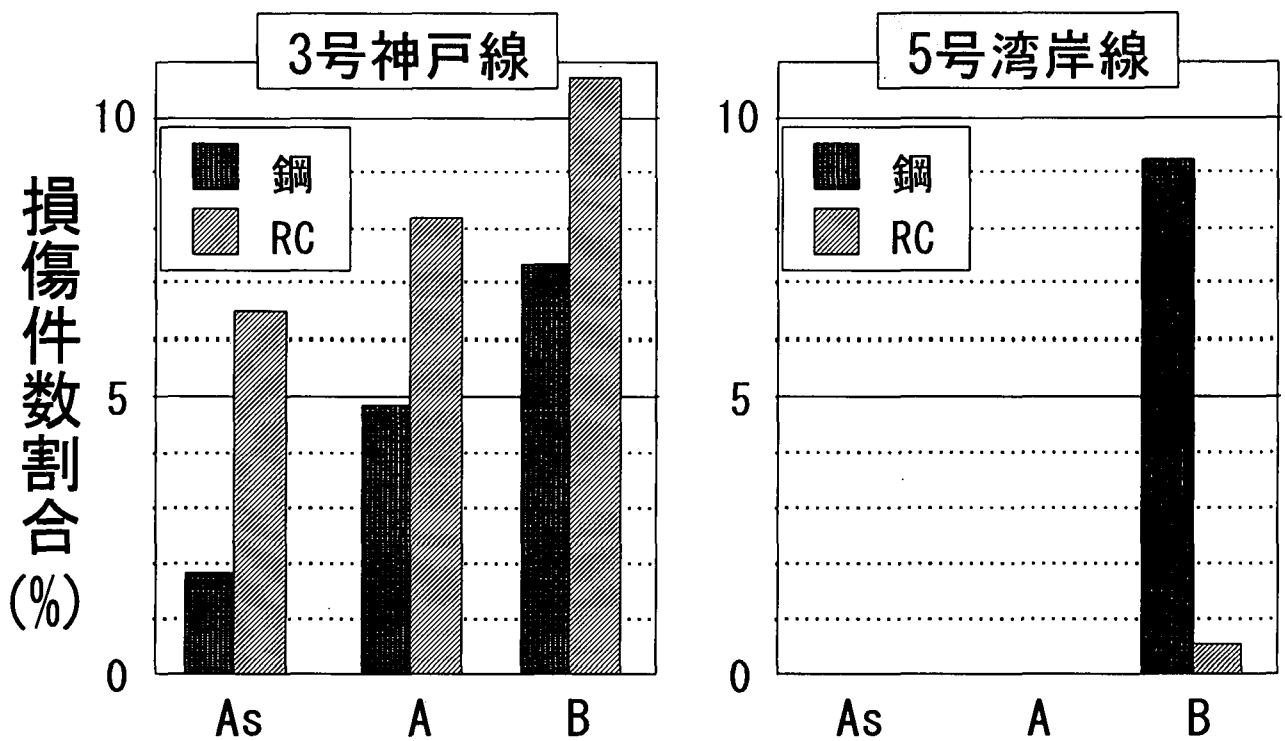


図-2 B以上の損傷を受けた橋脚

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。

## 2.2 鋼製橋脚の被災

図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。被災度のクラス分けは文献[1]によるもので、橋脚についての定義は表1に示すとうりである。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、As損傷およびA損傷の1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。As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

表 1 被災度の定義

被災度	定義
As	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

(道路橋震災対策委員会)

る。確かに、前述のように、基準が新しくなることにより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）

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。いづれも、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。いづれにしても、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 縦リブの剛比は $\gamma^*$ の1.3～2.0程度で比較的大きい。
- ③ 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。

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。

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 $160\text{kgf/cm}^2$ 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。

### 2.3 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。

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>① 橋脚の変形能を高めること。</li><li>② 橋脚に入力する地震動を軽減する工夫をすること。</li><li>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。</li></ul> |
|---|

より具体的には次のようになる。

- (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) 厚肉の遠心鋳鋼管は、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。

### 3 鋼製橋脚の耐震設計に関する最近の研究動向

#### 3.1 概要

土木鋼構造物の耐震設計に関する研究の歴史は浅い。最も早くにこの種の研究の必要性に着目し、昭和60年頃より繰り返し荷重下での薄肉鋼部材の弾塑性挙動に関する研究を行ったのは福本（当時名古屋大学、現在大阪大学）であった。しかし一般にはその重要性が良く理解されなかった。所が、平成2年に道路橋示方書・V耐震設計編が改訂され、鉄筋コンクリート橋脚について地震時保有水平耐力の照査法が整備されたが、鋼製橋脚については研究が不十分ということで基準化が見送られるという事態が生じた。以来、鋼構造、特に耐荷力関係の研究者の間でこの種の研究の必要性が認識されるようになり、現在では多くの研究者により従来の静荷重下での座屈・耐荷力だけでなく、準静的荷重および動的荷重下での鋼構造物の強度および変形能に関する研究が盛んに行われるようになってきた。そして、鋼製橋脚に対する終局耐震設計法の試案の作成間近の時点で、兵庫県南部地震が発生した。この地震は、それまでの研究で想定していた地震（建設省土木研究所のレベル2地震波で、最大加速度440ガル程度）をはるかに越える巨大な地震で、試案の再検討を余儀なくさせられた。以来、大学、土木学会、建設省土木研究所等で鋼製橋脚の耐震設計に関する研究が精力的に行われてきている。この章では、鋼製橋脚の地震時の基本性状について述べた後、建設省土木研究所、土木学会、名古屋大学、および名古屋高速道路公社の取り組みについて紹介する。

#### 3.2 鋼製橋脚の耐震性能を支配する力学的パラメータ

鋼製橋脚の耐震性能を支配する主要な力学的パラメータとして次のような項目が考えられる：①構成板要素の幅厚比（箱形）または径厚比（パイプ）、②柱の細長比、③軸圧縮力、④固有周期、⑤断面形状、⑥補剛材剛比、⑦補剛材の細長比、⑧角溶接、⑨コンクリート充填高さ、など。以下これらのパラメータの影響について簡単な説明を加える。

- ・幅厚比または径厚比が小さいほど局部座屈が生じづらいので耐震性能が良くなるが、厚肉となり鋼重が増すことになる。幅厚比は少なくとも現行道路橋示方書の限界幅厚比以下（幅厚比パラメータ $R \leq 0.5$ ）にしておくのが望ましい。
- ・細長比は大きいほどP- $\Delta$ 効果により最高荷重後の劣化勾配が大きくなり不利になる。ただし、細長比は固有周期と比例関係にあり、細長比が大きくなると固有周期も長くなるため、橋脚に劣化域が生じないように設計すると、細長比の大きい橋脚は固有周期が大きくなるため細長比の小さい橋脚よりもかえって安全になる場合がある。このことは、後に示す兵庫県南部地震で観測された神

戸海洋気象台の地震波に顕著に現れる。

- ・ 軸圧縮力も細長比と同様最高荷重後の劣化勾配に影響を及ぼし、軸圧縮力が大きくなれば不利になる。与えられた橋脚に対する軸圧縮力の大きさは、設計水平震度（現行では標準値0.2）および安全率（現行では1.14）によって決まってくるため、これらの値を大きくすれば必然的に軸圧縮力は小さくなり、安全度は増す。今回の地震では鉛直動の大きさが問題になっているが、この影響については軸圧縮力の増大という観点から研究しておく必要がある。
- ・ 補剛板に対しては補剛材が重要な役目を果たし、これが座屈すると補剛板の耐荷力が無くなり、変形能が低下する。そのため、補剛材の剛性は高くしておく必要があるが、補剛材剛比を、少なくとも、線形座屈解析から求められる最適剛比以上、出来れば3倍以上とすること、および補剛材のダイアフラム間の細長比を小さくしておくのがよい。後者は新技術小委員会耐震設計WGでの家村（京都大学）の提案[4]であるが、筆者は数値計算により補剛板の変形能を求め、補剛材の細長比が最も重要なパラメータであることを示している[6]。

### 3.3 鋼製橋脚の弾塑性挙動および限界状態

鋼製箱形断面橋脚の準静的実験から得られる水平荷重(H)－水平変位( $\delta$ )曲線の包絡線は、概略図3のようになる。水平荷重のピーク(M点)辺りで、局部座屈が発生し、荷重を繰り返すごとに局部座屈が進展して柱の損傷が拡大し、荷重が低下していく。しかし、局部座屈後も復元力が急速になくなるわけではなく、耐震性能の良い橋脚はエネルギー吸収能力はかえって増加してゆき、概略Y'点（包絡線が再び降伏荷重 $H_y$ と交わる点）辺りで最大となる。またY'点よりさらに荷重が低下

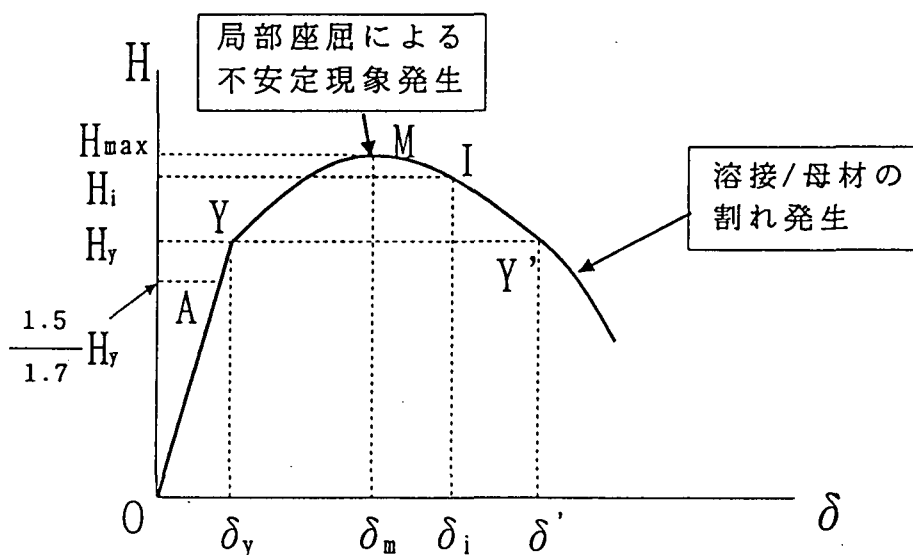


図3 水平荷重－水平変位履歴曲線の包絡線

すると、角溶接部の割れまたは母材の破断が生じ、急激に復元力を失う。水平荷重のピークまでは水平荷重の繰り返し回数にあまり依存しないが、劣化域の勾配はこれに大きく依存するため、この領域での復元力特性を外力に無関係に定めるのは難しい。震度法における設計荷重はA点であるので、可能ならY'点までを耐震設計で利用するのが合理的である[2]。しかし、上述の理由により、この点を終局状態と設定すると、劣化域での損傷を的確に評価するモデルを考案し、地震応答解析を実施する必要があるため、まだ実用的な段階になっていない。

コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の挙動も上記と大差はない。但し、コンクリートを適切な高さまで部分充填することにより、降伏荷重点Yから最高荷重点Mまでの強度および変形は、コンクリートを充填しない橋脚に比べ、格段に大きくなる。これは、コンクリート充填により柱基部の局部座屈の発生が生じないか、または遅らされるからである。また、コンクリート充填長が十分に中空断面部に局部座屈が生じないような橋脚の多くは、ピーク荷重後Y'点まで荷重が低下するに以前に、柱基部で角溶接部の割れまたは母材の破断が生じ、次第に復元力を失っていく。角溶接部の割れは、充填コンクリートの存在により、鋼板が橋脚断面内部に局部座屈変形できず、4枚とも外側に変形するために生じる角溶接部の付加的応力に起因する。また、母材の破断は、充填コンクリートにより柱基部の局部座屈発生が遅らされるため、ピーク荷重近辺で既にかなり大きい塑性ひずみが鋼板に生じているためである。従って、コンクリート部分充填鋼製橋脚の終局状態はピーク点(M点)またはその点から荷重が少し低下した点(例えばピーク荷重の95%荷重点)をとるのが現実的である。この考えによる鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の試案は文献[5]に記載されている。

上記は、橋脚部のみを取り出して実験を行ったときに得られる挙動であるが、実際の橋脚に見られる限界状態は、阪神・淡路大震災の事例を含めると次のようなものが考えられよう。

- (1)脚部の過度の塑性変形
- (2)脚部の過度の局部座屈変形
- (3)脚部の母材の破断
- (4)脚部の角溶接部の割れ
- (5)脚基部とベースプレートの溶接部の割れ
- (6)不静定構造物の場合の隅角部の溶接割れ
- (7)フーチングの破壊
- (8)橋脚定着部のアンカーボルトの破断あるいは過度の伸び
- (9)基礎の損傷

想定大地震動の元でこれらの限界状態が生じないように橋脚を設計するのが、終局耐震設計である。

### 3.4 建設省土木研究所橋梁研究室の取り組み

建設省土木研究所では、震災後、付録1に示すような研究体制で鋼製橋脚の耐震設計に関する研究に取り組んでいる。当面は既設鋼製橋脚の最適な補強方法を



見いだすための実験を行い、その後、終局耐震設計法の確立のための研究を行う予定である。実験は、縮尺1/3程度の大型供試体を用いての準静的実験およびハイブリッド地震応答実験であるが、準静的実験についてはかなりの数の実験が既に終了している。現在の所、箱形断面についてはコーナー部を補強した橋脚、円形断面については断面外部への変形を拘束した橋脚が既設橋脚の耐震性能向上策として有力であるという。その他、横リブを柱基部に外部から取り付け補強した橋脚についても現在実験が行われている。準静的実験で耐震性能に優れていると判定された橋脚についてはハイブリッド地震応答実験を実施するが、この実験には名古屋大学も協力する予定である。

### 3.5 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会での取り組み

この委員会の内部に、耐震設計ワーキンググループがあり、筆者が主査を務め平成3年から活動を行っている。このWGでは、当初から鋼製橋脚の耐震設計法の確立のための調査研究を行っており、平成4、5年の研究成果は文献[3,4]に記載され、平成6年度の研究成果の1部は文献[5]の阪神大震災に関する調査報告書に含まれている。本年度は、この委員会の最終年度であり、付録2に示すような内容の報告書を予定している。最終報告書では、コンクリート部分充填および無充填鋼製橋脚、橋脚定着部、落橋防止装置、支承などの終局耐震設計法の試案の提示を行い、さらに、準静的実験およびハイブリッド地震応答実験の標準化、鋼製橋脚の弾塑性地震応答解析に用いる復元力特性、鋼材の繰返し塑性構成則の提案などについても触れる予定である。

### 3.6 名古屋大学での取り組み

名古屋大学では、平成元年度より鋼製橋脚の耐震設計に関する研究を行い、準静的実験、ハイブリッド地震応答実験、コンクリート部分充填鋼製橋脚の保有水平耐力照査法の提案[6]、弾塑性地震応答解析[7]、等に関する研究を行ってきた。震災後は、鋼製橋脚およびコンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚に、兵庫県南部地震で観測された3種類の地盤に対するレベル3標準地震波（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ種地盤に対して、それぞれ、神戸海洋気象台、JR鷹取駅、東神戸大橋で観測された地震波）を用いたハイブリッド地震応答実験、および弾塑性地震応答解析を行い、鋼製橋脚の破壊メカニズムの解明および終局耐震設計法の開発に関する研究を行っている。ここでは、それらの研究で得られた結果の一部[8]について述べる。

図4は神戸海洋気象台(JMA)NS成分（最大加速度818ガル）、JR鷹取駅NS成分（最大加速度615ガル）および東神戸大橋N168E成分（最大加速度326ガル）の記録波を基に計算した、減衰定数5%に対応する加速度応答スペクトルを建設省土木研究所(PWRI)のレベル2地震波（地盤種Ⅰ～Ⅲ）の応答スペクトルと比較したものである。図からわかるように、神戸海洋気象台の地震波の応答加速度は、固有周期1.0秒以下の構造物に対しては、土木研究所の地震波の最大3倍までの大きさになるが、それより長周期構造物に対しては応答が急速に小さくなる。JR鷹取駅の地震波の応答は神戸海洋気象台ほど大きくはないが、それでも土木研究所の地震波の

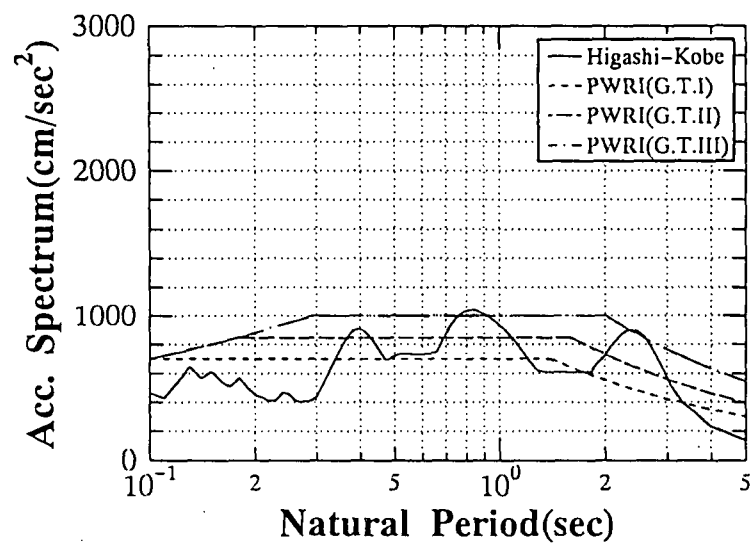
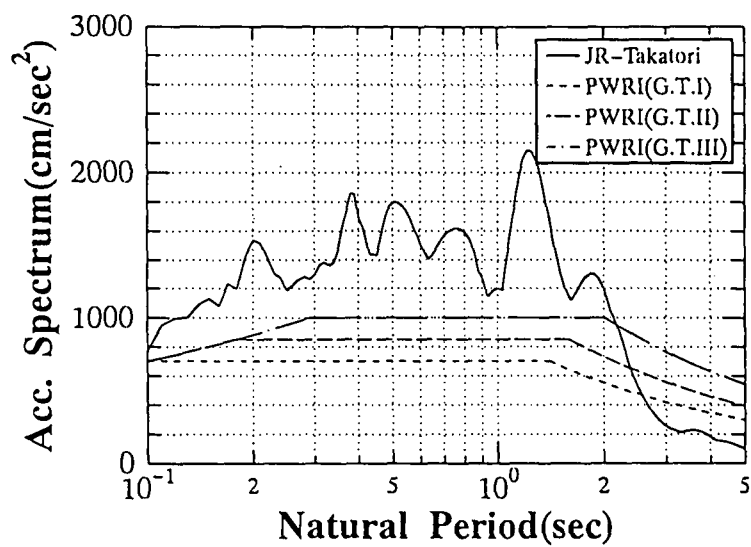
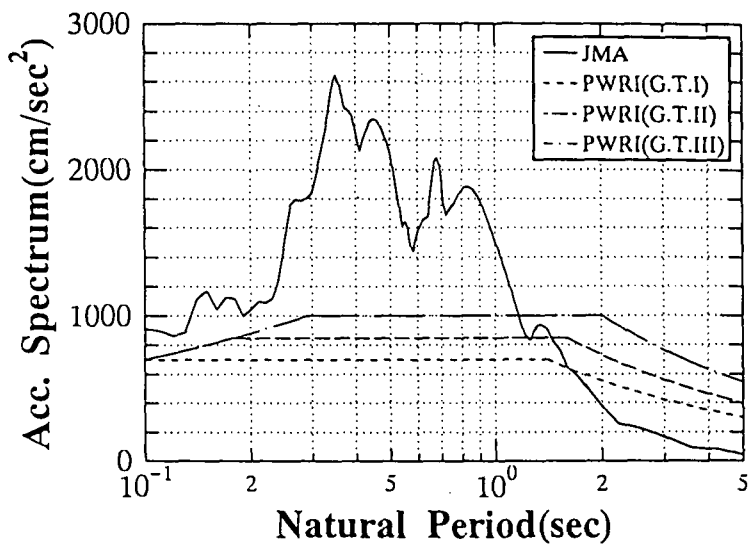


図4 加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）  
 （JMA：神戸海洋気象台，PWRI：建設省土木研究所）

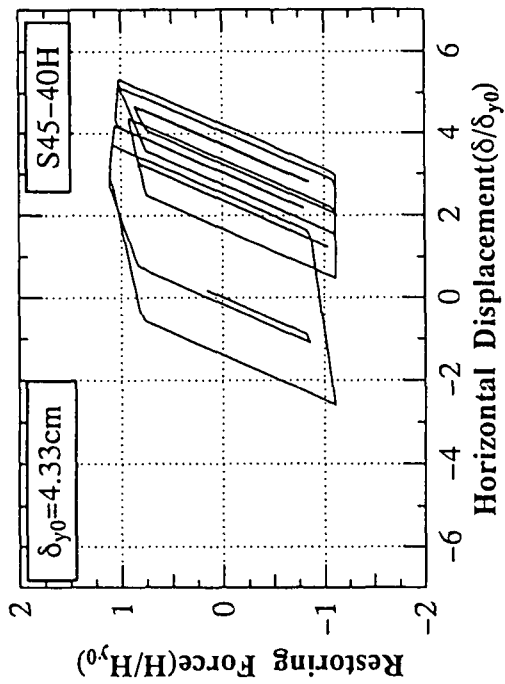
2倍程度の加速度応答を示し、1.2秒前後で加速度応答が最大となる。また、東神戸大橋の応答スペクトルは土木研究所のⅢ種地盤の応答スペクトルで包絡されるような形となっている。

図5～7は、それぞれ、神戸海洋気象台(JMA)、JR鷹取駅、東神戸大橋の地震波に対する単柱式鋼製橋脚（フランジ幅厚比パラメータ $R_f=0.45$ 、細長比パラメータ $\lambda=0.3\sim 0.6$ の補剛箱形断面で、コンクリート無充填）の弾塑性応答解析[7]から得られた復元力の履歴曲線(H- $\delta$ 曲線)を示したものである。鋼製橋脚は、現行道路橋設計示方書の震度法に基づき、与えられた力学的パラメータに適合するように設計されたものであり、上部工質量を頂部に持つ1自由度系構造物にモデル化して応答解析をした。ただし、神戸海洋気象台地震に対しては地盤種Ⅰ、JR鷹取駅に対しては地盤種Ⅱ、東神戸大橋に対しては地盤種Ⅲとして設計している。復元力特性は準静的実験結果から得られたものを使用しているが、これは土木研究所のレベル2地震波を用いたハイブリッド地震応答実験により検証がしてある。結果は、軸力が零のときの降伏水平力 $H_{y0}$ 、対応する水平変位 $\delta_{y0}$ で無次元化されている。この結果を見ると、神戸海洋気象台の地震波は細長比が比較的小さい短周期橋脚にとっては非常に厳しい地震波であることが分かる。細長比パラメータが0.3の橋脚は固有周期が0.52秒であるが、この橋脚はほぼ崩壊していると考えても良い。細長比パラメータ $\lambda$ が0.4のものは局部座屈が発生するが、荷重低下率はほぼ5%で復元力はまだ十分あり、補修をすれば再使用が可能な程度の損傷である。それより長い橋脚には損傷はほとんど見られないと考えて良い。JR鷹取駅の地震波も非常に厳しい地震波で、 $\lambda$ が0.3,0.4の橋脚は共に崩壊しているとみなしても良い。 $\lambda$ が0.5の橋脚は局部座屈が発生し、残留変位も大きく使用性に支障を来す可能性がある。 $\lambda$ が0.6の橋脚には軽い局部座屈が発生するものの、補修をすれば再使用は十分可能な程度の損傷であろう。JR神戸東大橋の地震波に対しては、応答は劣化域に到達していない、または劣化域に入ってもほんのわずかであるので、局部座屈は肉眼ではほとんど識別できない程度あると考えられる。

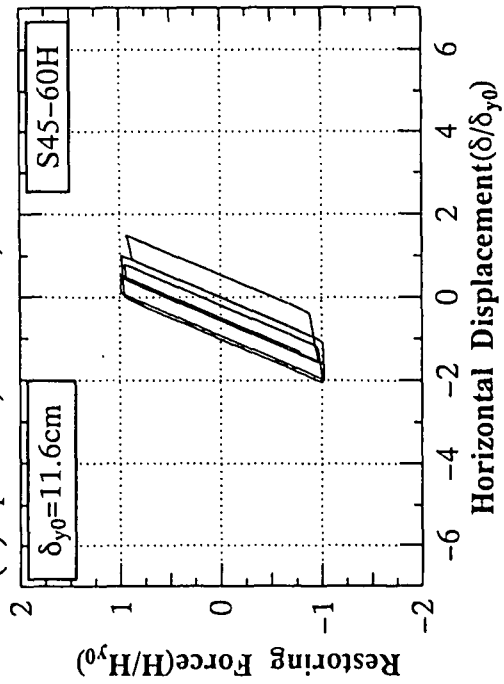
以上の考察により、今回の地震はⅠ、Ⅱ種地盤上に建設された、固有周期が1秒以下の橋脚（大部分の鋼製橋脚）に対しては、非常に大きな損傷を与える地震波であることが分かる。

次に、充填コンクリートの効果を明白に示す実験結果[8]を紹介する。図8は、フランジ幅厚比パラメータ $R_f=0.45$ で細長比パラメータ $\lambda=0.35$ の補剛箱形断面で、無充填コンクリート供試体S45-35Hと柱の長さの20%だけコンクリートを充填した供試体SC45-35-20Hを用いたハイブリッド地震応答実験より得られた時刻歴応答、および復元力特性を比較したものである。この図より、コンクリートの充填効果は明らかで、コンクリート充填供試体には劣化域が存在せず、従って局部座屈は発生せず、且つ残留変位もコンクリート無充填の供試体に比べ1/2程度に減少している。

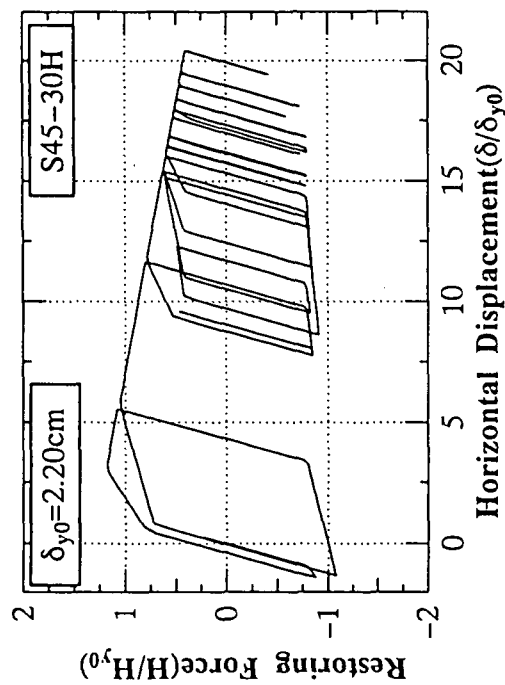
今回の地震で、大きく被災した建石交差点および岩屋交差点の橋脚の幅厚比パラメータ $R$ の値は0.6前後であり、固有周期は0.5から0.7秒程度と推定される。それらの橋脚は、Ⅱ種地盤上に建設され、耐震性能は、中埋めコンクリートの効果



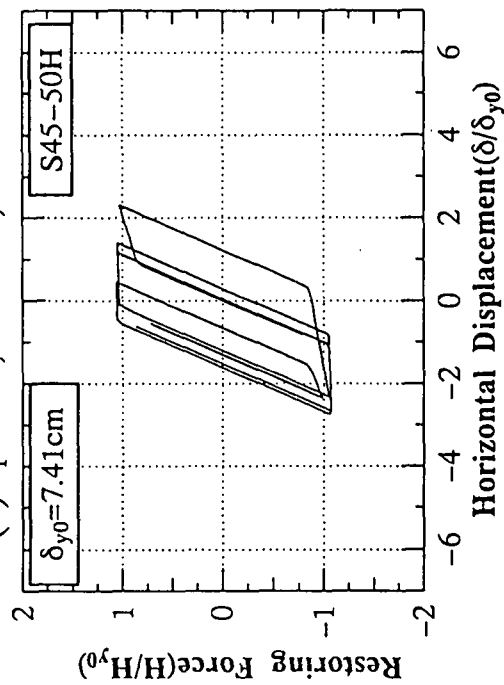
(b)  $R_f=0.45$ ,  $\bar{\lambda}=0.40$ ,  $T=0.757\text{sec}$



(d)  $R_f=0.45$ ,  $\bar{\lambda}=0.60$ ,  $T=1.281\text{sec}$

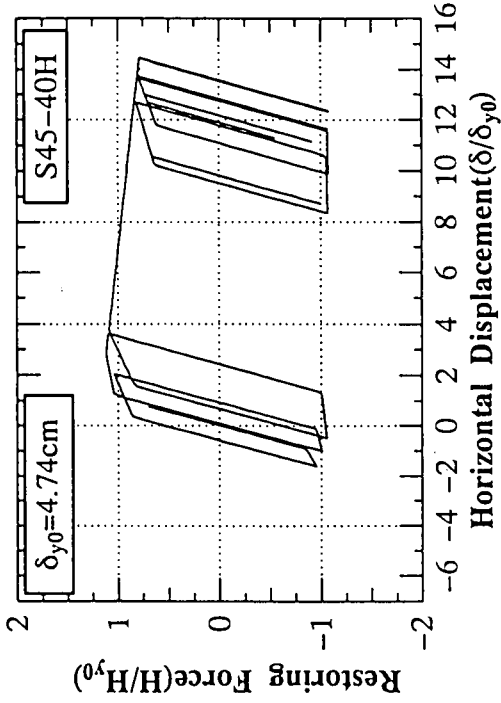


(a)  $R_f=0.45$ ,  $\bar{\lambda}=0.30$ ,  $T=0.516\text{sec}$

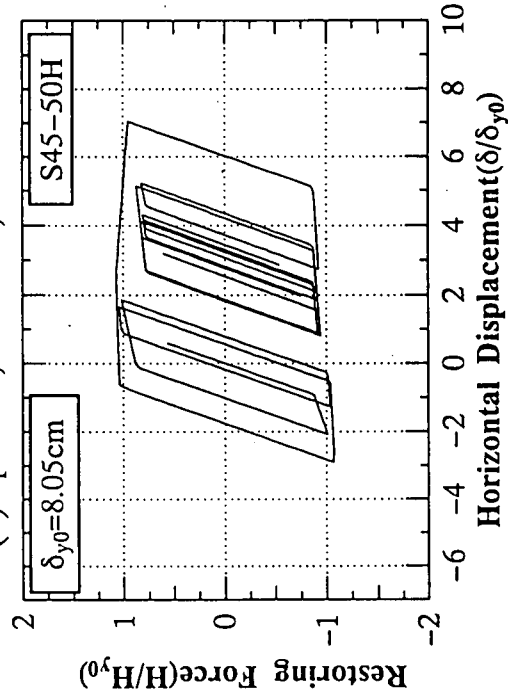


(c)  $R_f=0.45$ ,  $\bar{\lambda}=0.50$ ,  $T=1.014\text{sec}$

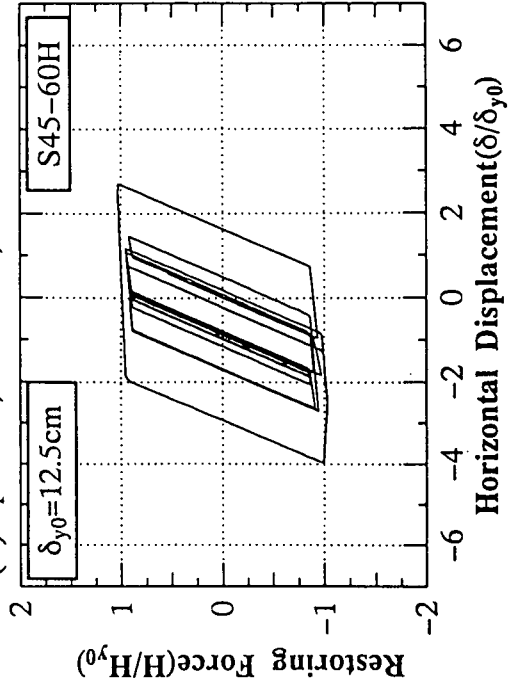
図5 鋼製橋脚の地震応答解析結果（神戸海洋気象台地震波）



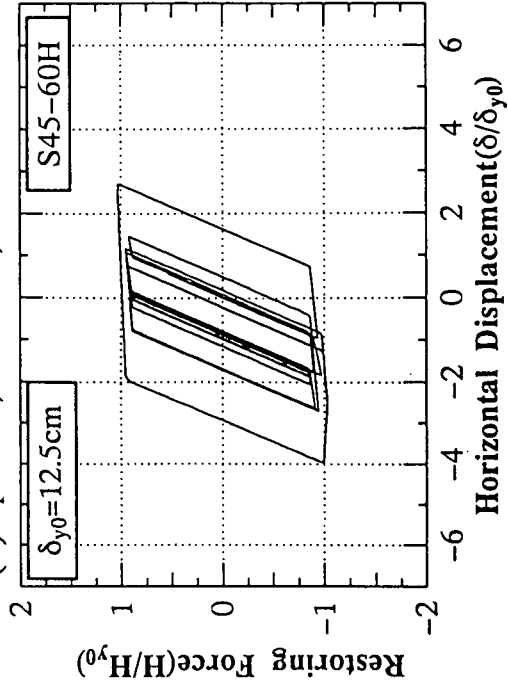
(a)  $R_f=0.45$ ,  $\bar{\lambda}=0.30$ ,  $T=0.536\text{sec}$



(b)  $R_f=0.45$ ,  $\bar{\lambda}=0.40$ ,  $T=0.752\text{sec}$



(c)  $R_f=0.45$ ,  $\bar{\lambda}=0.50$ ,  $T=0.997\text{sec}$



(d)  $R_f=0.45$ ,  $\bar{\lambda}=0.60$ ,  $T=1.255\text{sec}$

図6 鋼製橋脚の地震応答解析結果 (JR西日本鷹取駅地震波)

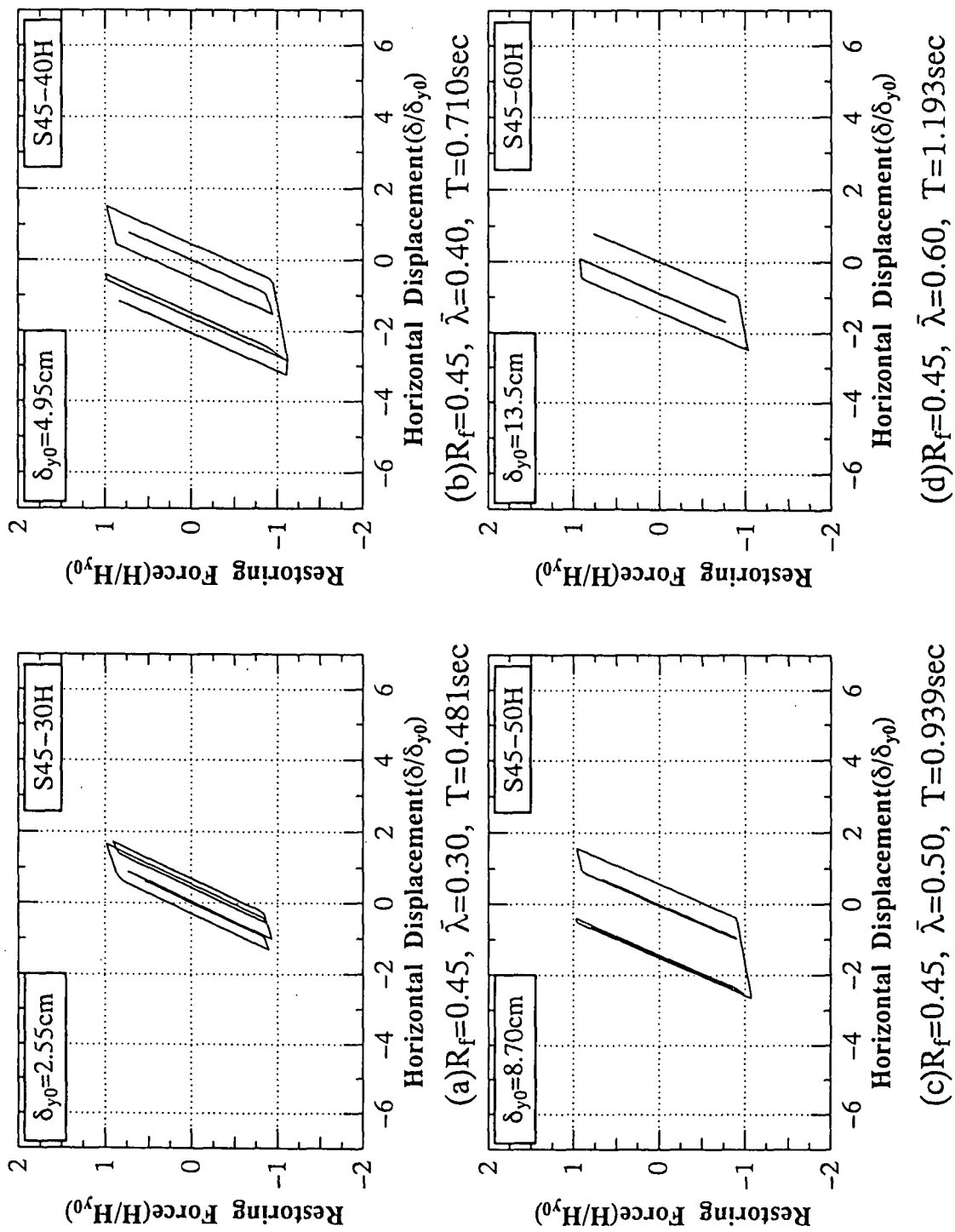


図7 鋼製橋脚の地震応答解析結果 (東神戸大橋地震波)

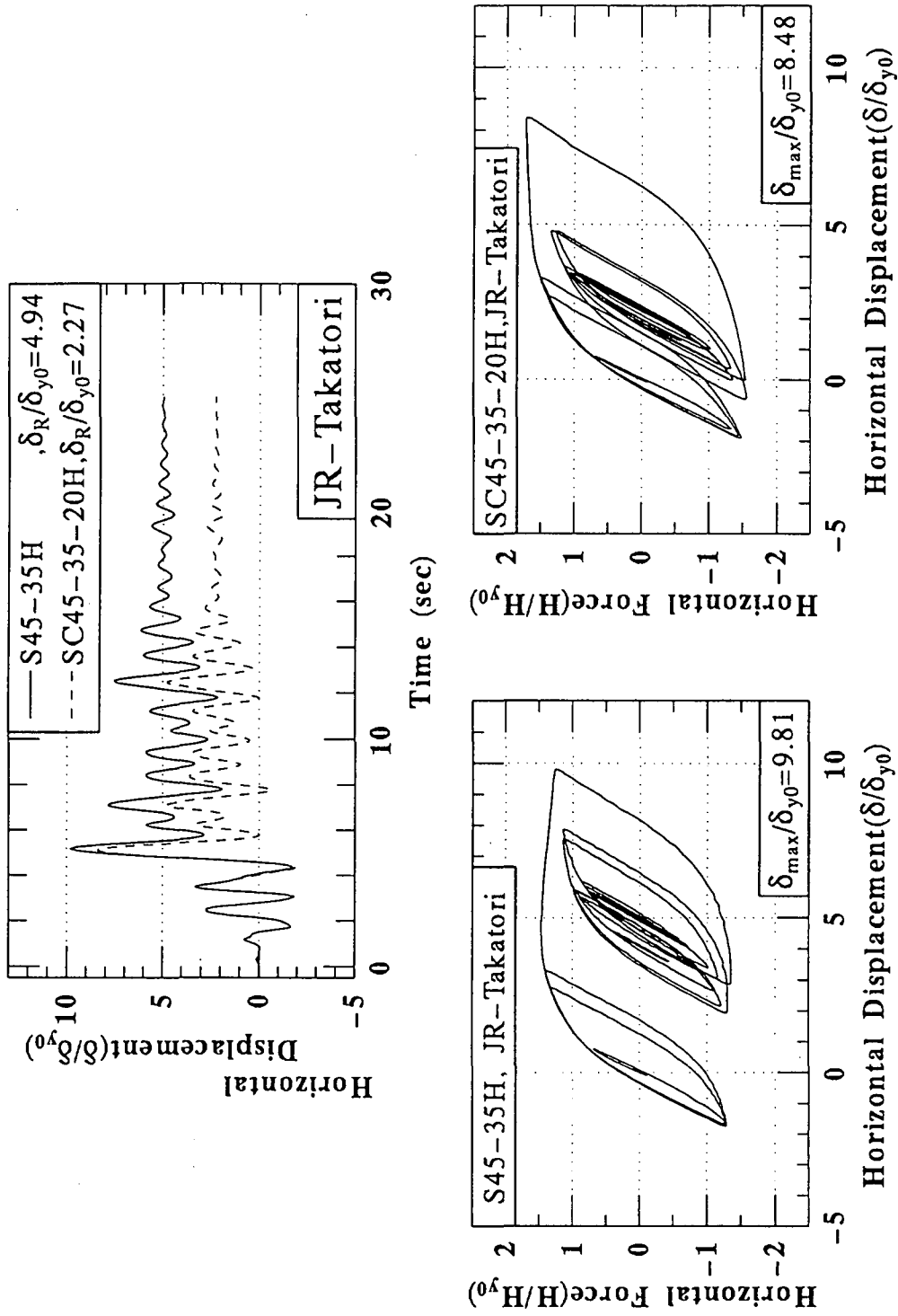


図8 コンクリート部分充填供試体 (SC45-35-20H) と無充填供試体 (SC45-35) のハイブリッド地震応答実験結果の比較 (地震波: JR西日本鷹取駅)

を考えなければ、数値計算で使用した橋脚より劣る。阪神高速道路神戸3号線の単柱式橋脚の多くは、この程度の特徴を持つと推察されるが、今回の地震はこれらの橋脚にとっては非常に厳しい地震であったことが分かる。それでも、多くの橋脚は耐えたが、それは前述のように中埋コンクリートの存在により、ある程度橋脚の耐震性能が上昇したためと筆者は見ている。今後は、次節に紹介する名古屋高速道路公社の試みのように、充填コンクリートの効果を積極的に利用した鋼製橋脚の耐震設計法を確立する必要がある。

### 3.7 名古屋高速道路公社での取り組み

名古屋高速道路公社は、筆者らのコンクリート部分充填鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の考え方[6]を、名濃道路修正設計・耐震設計マニュアル(案)[9]に採り入れ、その結果、図9の左側の図に示すような従来の設計案に代わって、右側の図に示すような設計案が考え出されている。この橋脚の特徴として、下記が挙げられる。

- (1)断面変化がなく一様断面である。
- (2)中埋めコンクリートの上部にダイヤフラムが設けられている。
- (3)角溶接が、完全とけ込み溶接相当になっている。
- (4)縦リブの剛性が大きくなっている。
- (5)アンカーボルトが4隅に追加されている。
- (6)支承が反力分散型ゴム支承になっている。

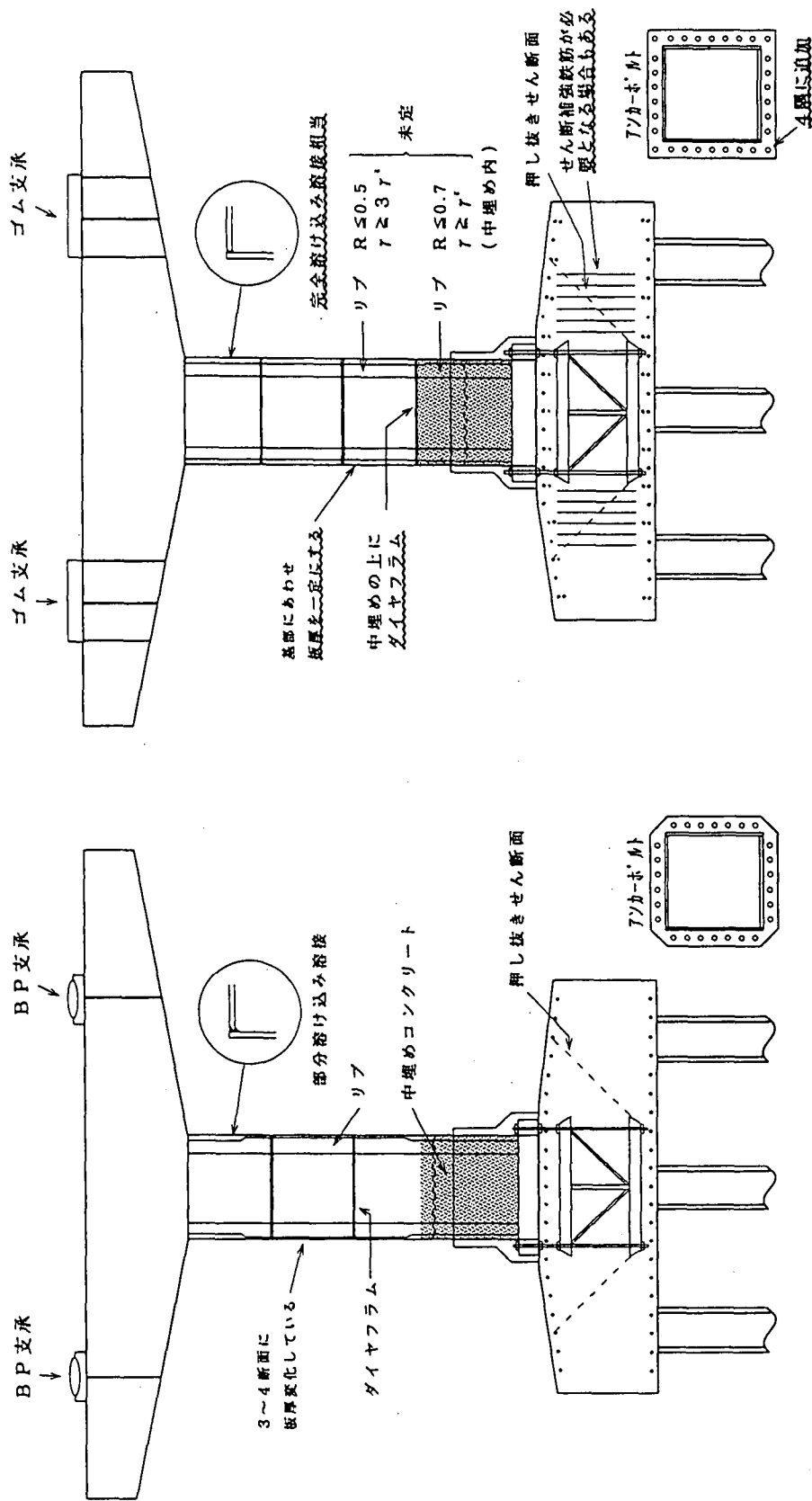
このような設計変更により、この橋脚の耐震性能が格段に向上すると同時に、橋脚に入力する地震動も軽減されると考えられる。

## 4. 今後の研究課題

阪神・淡路大震災の教訓を踏まえ、鋼橋の耐震設計に関する今後の研究課題を纏めると次のようになる。

- (1)鋼製橋脚の終局耐震設計法の整備。
  - ・コンクリート充填及び無充填鋼製橋脚の終局耐震設計法の細部の検討。
  - ・地震時保有水平耐力照査法の標準電算プログラムの開発。
  - ・パイプ断面橋脚の地震時保有水平耐力照査法の開発
- (2)レベル3地震動に対する鋼製橋脚の動的挙動に関する実験的研究。
  - ・種々のパラメータをもつ鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験
  - ・水平地震動と鉛直地震動を同時に受ける橋脚の動的挙動
  - ・コンクリート部分充填橋脚に対する寸法効果の検証(大型供試体と小型供試体の挙動の相違)
  - ・免震支承を持つ鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験
  - ・振動台実験とハイブリッド地震応答実験の結果の比較
- (3)鋼製橋脚の弾塑性地震応答解析手法の整備





復旧仕様  
耐震設計マニュアル(名高速)に基づく設計

H6.2道示(鋼橋編)  
H2.2道示(耐震設計編)に基づく設計

### 鋼製橋脚の主な変更点

図9 名古屋高速道路公社における取り組み (左: 設計変更前, 右変更後)

- ・鋼製橋脚およびコンクリート部分充填鋼製橋脚の復元力モデルの開発
- ・動的解析の標準プログラムの開発。

(4)鋼橋の耐震設計法の総合化

- ・上部，下部，基礎，支承，落橋防止装置など橋梁構造物全体を総合的に考え、バランスのとれた耐震設計法の開発。

(5)最低限機能保持設計のための基準づくり。

- ・重要構造物に対しては、損傷は許すものの、最低限の機能を保持させる耐震設計法[5]を考えていく必要があるが、そのためにはどのような基準を設けるべきかに関する検討。

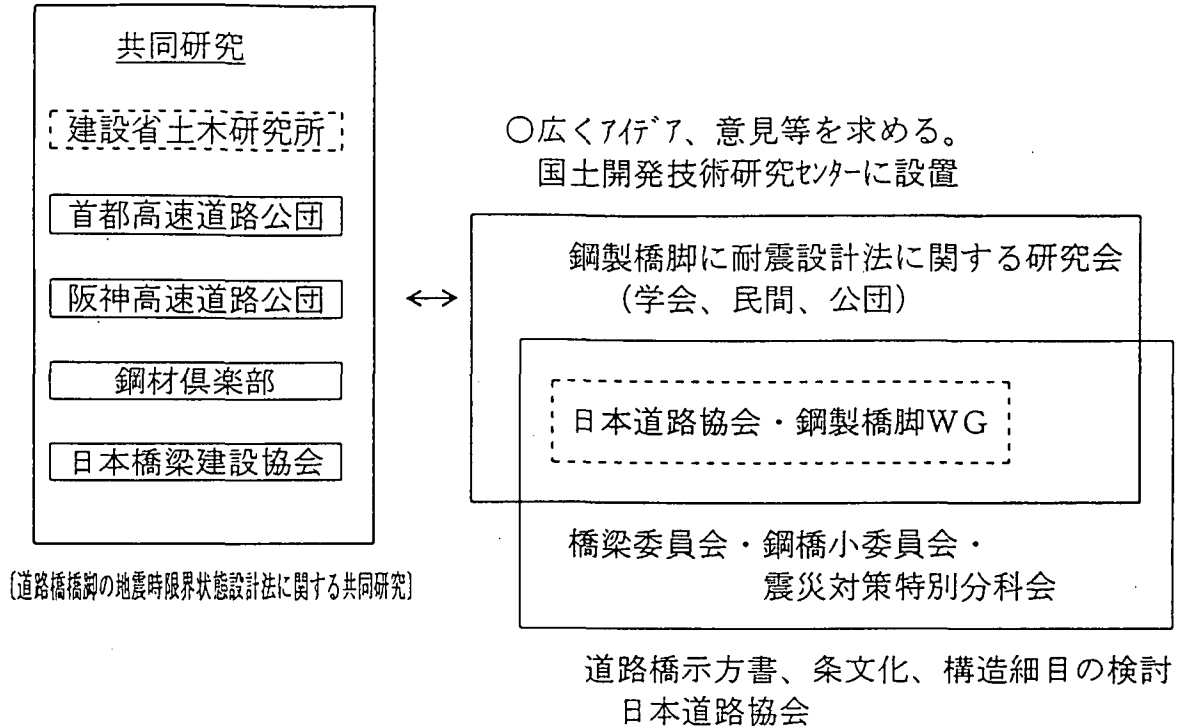
上記に関する研究の多くは、現在各機関で鋭意研究が進められている。近い将来、世界に誇れるような鋼橋の終局耐震設計法が確立されるものと期待される。

### 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. 宇佐美勉・鈴木森晶・I. H. P. Mamaghani・葛漢彬：コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案，土木学会論文集，No.525/I-33, pp.69-82, 1995年10月。
7. 鈴木森晶・宇佐美勉：鋼製橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析，土木学会論文集に投稿中。
8. 才塚邦宏・宇佐美勉・鈴木森晶・伊藤義人：兵庫県南部地震で観測された地震波を用いたハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の激震時挙動，阪神・淡路大震災に関する学術講演会講演論文集，土木学会，1996年1月。
9. 名古屋高速道路公社：名濃道路修正設計・耐震設計マニュアル（案），1995年9月。

## 鋼製橋脚に関する研究の概要

### ○研究体制



### ○検討課題

1. 補強方法の前提条件
  - ・ じん性の向上が期待できること
  - ・ 剛性及び耐荷力の大幅な上昇がないこと (応答・基礎への影響を考慮)
  - ・ コスト面で問題がないこと
  - ・ 現場での施工に重大な困難が生じないこと
  - ・ 施工後、断面寸法・美観など、周囲への影響が小さいこと
2. 検討の対象
  - ・ 新設橋脚、既設橋脚の補強
    - 断面……矩形、円形
    - 方法……コンクリート充填、角補強、二重鋼管等
  - ・ アンカー部の設計
3. 明確にすべき事項
  - ・ 降伏後のエネルギー吸収メカニズム、終局限界状態
  - ・ じん性率、保有水平耐力の目標
  - ・ 現場施工の実現性

## ○検討内容（次ページに関連図添付）

### 1. 鉄筋コンクリート橋脚の保有水平耐力照査法の準用

- 1) 終局状態（コーナー割れ、局部座屈の集中）を招かないこと。
- 2) 靱性が十分であること。
- 3) 変位量の制限を充たしていること（ $P \sim \delta$ 、 $\mu$ の制限、使用上の制限）。

- ・対象とする構造を特定、細目について規定する。
  - （新設：□→コーナープレート＋溶接、  
○→二重管、径厚比、縦リブ  
コンクリート充填も可）
  - （既設：□→コーナープレート＋ボルト＋横リブ  
○→二重鋼管  
コンクリート充填も可）

- ・実験結果から  $P_u$ 、 $\delta_u$  の推定式を与える。
- ・影響因子の評価係数（死荷重応力 etc.）
- ・断面変化部の対処法（既設）
- ・アンカー部の設計法（既設、新設）

→以上を道路橋示方書改訂に反映、引き続き以下の検討を進める。

### 2. 動的解析法

ハイブリッド実験、動的解析

↓

- ・動的解析用剛性低下モデル
- ・解析結果の評価法

### 3. 鋼製橋脚の保有水平耐力照査法（仮称）

- ・簡易設計を可能とするパラメータを選択
- ・エネルギー一定則、変位一定則、その他の指標による判定法

# 鋼製橋脚に関する研究の枠組み

当面の対応

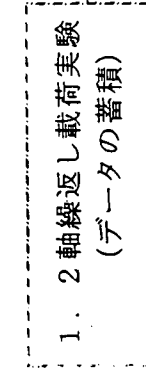
継続して検討

将来の方向

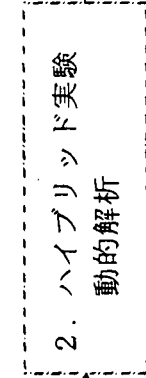
R C 橋脚の保有水平耐力  
照査に準じた設計法

動的解析による設計法

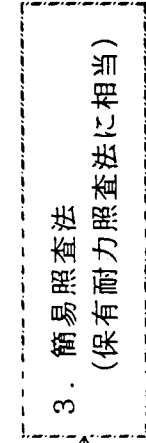
鋼製橋脚の保有水平耐力照査法



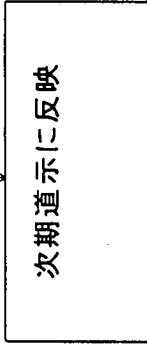
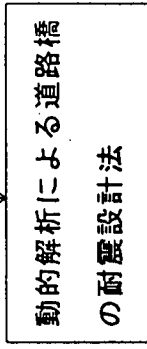
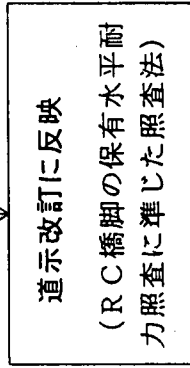
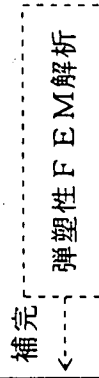
- ・ 終局限界状態の再現と回避する方法
- ・ 十分なじん性の確保
- ・ 残留変位の限界値の評価



- ・ 載荷方法(縦しきり等)妥当性検証
- ・ 波形の影響(名大, 橋建協, 土研)
- ・ 構造の影響(土研, 新日鐵)



- ・ 簡易設計のためのパラメータ選択
- ・ エンゲージ一定則等、その他の指標による判定法



研究成果蓄積

## ○ハイブリッド実験について

### 1. 目的

#### (1) 繰り返し載荷試験（スケルトンカーブの評価法）の妥当性検証

- ・ハイブリッド試験により各種地震波形に対する鋼製橋脚の挙動を検証する。
- ・2軸載荷試験の試験方法を検証する。
  - 単調載荷、部分片振り、完全片振り、完全両振り（ $n = 1, 3, 10$ ）
- ・鉄筋コンクリート橋脚の挙動との相違の検討。

#### (2) 動的解析に用いる剛性低下型モデルの設定

- ・種々のヒステリシスをもっともよく近似する剛性低下モデルを探し出す。
  - 動的解析法の確立
  - 鋼製橋脚の靱性照査法に

### 2. 試験の種類

#### (1) 小型試験（名大、橋建協、土研）

- ・入力波形（波形、ピーク値、長さ、周期特性etc.）を変化させて鋼製橋脚の挙動を調べる。
- ・静的繰り返し試験も同じ供試体で行う（単調載荷、両振り、片振り、部分片振り）

#### (2) 大型試験（土研、新日鐵）

- ・構造の違いによる影響（補強構造、補剛材剛度、○、□）
- ・鉄筋コンクリートとの相違

## 鋼橋の終局耐震設計法

### 第I編 鋼橋の終局耐震設計法の考え方と指針案

1. 土木構造物の耐震設計の基本的枠組み
  - ・土木学会の提言
  - ・想定地震動・スペクトル
2. 鋼製橋脚の準静的および動的弾塑性挙動
  - ・研究の現状
  - ・鋼製橋脚の損傷と限界状態
3. 鋼橋の終局耐震設計指針案
  - 3.1 鋼橋の耐震設計法の基本的考え方
    - ・無損傷耐震設計法
    - ・機能保持耐震設計法
    - ・3段階設計法(震度法, 保有水平耐力照査法, 動的解析法)
  - 3.2 鋼製橋脚
    - ・地震時保有水平耐力照査を行う方法
    - ・地震時保有水平耐力照査を行わない方法
    - ・動的解析法
  - 3.3 橋脚定着部
  - 3.4 落橋防止装置
  - 3.5 支承
  - 3.6 構造細目
4. 既存構造物の耐震診断と補強

### 第II編 鋼製橋脚の耐震設計のための新技術と基礎データ

1. 阪神・淡路大震災における鋼橋の被害の総括
2. 実験手法の標準化
  - ・実験装置
  - ・準静的実験方法(載荷プログラムなど)
  - ・相似則を考えたハイブリッド地震応答実験手法
  - ・実験結果の整理方法(強度, 塑性率, 吸収エネルギーなど)
3. 実験結果の総括
  - ・準静的実験, ハイブリッド地震応答実験, 振動台実験
  - ・鋼製橋脚(コンクリート充填を含む)

- ・断面形状（箱形，パイプ，R付箱形，その他）の影響
  - ・強度，変形能の推定式
  - ・橋脚定着部
  - ・落橋防止装置
  - ・ラーメン橋脚
4. 地震応答解析およびハイブリッド実験用標準地震波
- ・土木研究所レベル1，2地震波
  - ・神戸海洋気象台，東神戸大橋，JR鷹取駅
  - ・地震波の特徴，応答スペクトル図
5. 動的弾塑性解析手法及び結果
- ・鋼製橋脚の復元力特性
  - ・コンクリート部分充填鋼製橋脚の復元力特性
  - ・損傷度評価法
  - ・鋼製橋脚の動的解析結果とハイブリッド地震応答実験結果の比較
  - ・鉛直地震動の影響を考えた解析
  - ・免震支承を有する橋脚の動的解析
  - ・構造物－基礎－地盤の連成動的解析
6. 鋼製橋脚の損傷度評価
- ・局部座屈
  - ・低サイクル疲労と脆性破壊
  - ・準静的実験およびハイブリッド実験による検証
7. 鋼製橋脚の耐震性能向上のための新技術
- ・委託者）
  - ・新規橋脚，既設橋脚
  - ・首都公，阪公の例
  - ・土研－新日鉄の実験
8. 無損傷耐震設計法による橋脚の設計
9. 断面形状の相違による鋼製橋脚の経済性の比較
10. 鋼材の繰り返し弾塑性構成則とその応用
11. 鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析用標準プログラム

### 第Ⅲ編 今後の研究課題と発表論文リスト

1. 今後の研究課題
2. 発表論文リスト