

# PC桥梁の耐震技術における最近の進展と これからの課題

大塚 久哲<sup>\*1</sup>

## 1. 1995年阪神大震災からの教訓

1995年の阪神大震災では、多くの高架桥梁が大地震の洗礼を受け、未曾有の被害を出した。今でも思い出す象徴的な被災としては、トップヘビーな18径間RCピルツ橋の横倒し被害、桁同士の衝突や金属沓・落橋防止装置破壊による単純鋼桁橋の落橋、帯鉄筋の不足や主鉄筋段落しによる

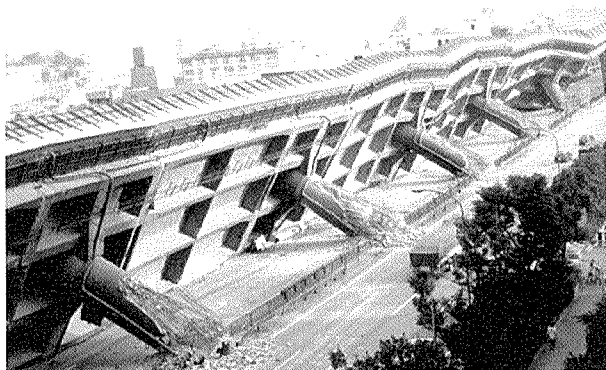


写真-1 ピルツ橋の転倒



写真-2 RC橋脚のせん断破壊



<sup>\*1</sup> Hisanori OTSUKA  
九州大学 大学院  
工学研究院 教授

RC橋脚のせん断破壊、鋼製橋脚の隅角部溶接線沿いの鉛直方向割れ、斜橋・曲線橋の落橋などである。

ただし、この地震におけるPC上部構造の損傷事例としては、上部構造以外の支承や橋脚の損傷に起因する間接的なもの、および隣接する桁や橋台との衝突による桁端部や伸縮装置周辺の損傷があげられる程度である。

コンクリート系桥梁の改善点としてはせん断破壊を防止するための曲げ破壊先行型の橋脚の設計、帯鉄筋の十分な配置による橋脚のじん性の増加、上部構造重量の軽減などが緊急の課題になった。また、設計地震力の大幅な増加による弾塑性設計の必要性、非線形動的解析の積極的導入により、とくにPC部材の復元力特性の明確化も認識され、研究課題として浮上した。

本文では、このような現状を受けて行った著者らの研究の一端を概観し、阪神大震災以後の耐震技術の発展を振り返る。同時に、これからの桥梁設計の方向性とあり方について私見を述べたい。

## 2. 耐震設計のキーワード：じん性

### 2.1 じん性に富む橋脚

RC橋脚の耐震設計に関しては1978年宮城県沖地震を受けての主鉄筋段落し部の延長（道路橋示方書下部構造編1980年版）、1992年版道示での弾塑性設計法（地震時保有水平耐力法）の導入などにより、それ以前のRC橋脚と比べて耐荷力・じん性ともに増強が図られていたが、被害の集中した阪神高速3号神戸線の橋脚のうち、80.5%が1964年道示以前の設計であったため、被害が大きかった<sup>1)</sup>。

これを機に、原則として段落しの禁止、コンクリートのせん断強度の見直し、曲げ破壊先行型の橋脚の設計などが1996年版道示で取り入れられた。それとともに、震災直後から、降伏強度が大きいPC鋼線・鋼棒をそれぞれ帯鉄筋と主鉄筋に用いたPC橋脚が新設橋脚のみならず補強用にも提案され、実証実験を経て、実際に採用されていった。杭基礎も同様な傾向であったといえる。

### 2.2 PC桁のエネルギー吸収能力

桥梁の上部構造に関しては、以前よりRC桁に変わって軽量かつコンパクトなPC桁が多用されていたが、復元力特性に関しては原点指向性のため残留変位は小さくなるものの、エネルギー吸収能力に関してはどのような復元力特性を有するか、どの程度まで塑性化を許容しうるかどうかの知見が不十分であった。このような時期に、著者らはたとえば文献2)～5)などの研究を行った。その一部を以下に紹介する。

文献2)では、張出し部を有する1室箱桁単純桁12体

(桁高 500 mm, 上フランジ幅 1 200 mm, 下フランジ幅 650 mm) の鉛直方向交番载荷による復元力特性が示されている。実験パラメータは、プレストレス量・PC 鋼材の本数と配置位置・外ケーブルの比率である。たとえば、箱桁内に PC 鋼材 6 本を上下対称配置とした場合の復元力特性は図 - 1 のようであった。理論による  $M-\phi$  骨格曲線と実験中に観察されたひび割れ、鉄筋降伏、PC 弾性限界、PC 降伏、コンクリート圧壊などの現象は良く対応している。さらに、たとえば PC 鋼材を下縁配置した桁では、下縁側引張となる曲げ耐力が増加し、また、復元力曲線が指向する原点は耐力が大きい方にシフトすることなどが分かった。このような実験パラメータの違いを考慮した復元力特性を文献 3), 4) で数式化して、非線形動的解析に利用できるような形で提示した。

さらに、文献 5) では文献 2) と同一断面を用いた RC と PC 箱桁の橋軸直角方向の復元力特性に関する実験結果を比較している。それによれば、RC 桁では張出し床版圧壊により直ちに荷重は減少するが、PC 桁では初期導入軸応力にもよるが、PC 降伏近傍まで荷重低下を防ぐことができることなどを明らかにしている。

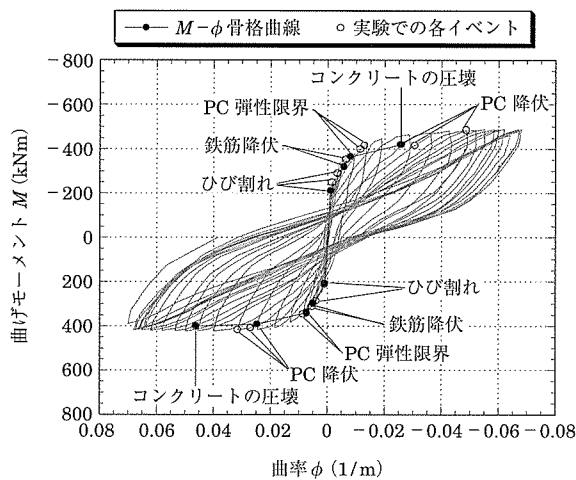


図 - 1 PC 桁の復元力 (PC 鋼線上下対称配置)<sup>2)</sup>

このような研究結果を根拠に、PC 上部構造の塑性化を許容した耐震照査に踏み切ることが可能となったといえ、一連の研究成果の一部は文献 6), 7) の規準類に反映されている。

### 2.3 複合構造の耐震性

最近では複合構造が盛んに用いられるようになっており、複合トラス橋、波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋、鋼製ストラット付き PC 箱桁橋など多種多様な上部構造が実用化され、合理化が進んできている。これらはその開発にあたって常時荷重に対しては十分な安全性が検証されたものと思われるが、大地震時の挙動を十分に想定した慎重な荷重変位曲線の確認を行うことも必要である。

ここで、写真 - 3 に示す格点部を有する複合トラス橋の荷重実験結果を紹介する<sup>8)</sup>。この研究では写真 - 4 に示すように終局まで荷重され、荷重実験と解析より得られた荷

重変位曲線が図 - 2 のように得られた。図の解析値はファイバーモデルを用いた非線形解析より算出した荷重変位曲線で、コンクリートの圧縮ひずみが 3 500  $\mu$  に達した時点で解析上の終局状態としている。実験では、約 1 400 kN 付近で荷重が一定となるが、変位は順調に増加した。その後、载荷点変位が約 190 mm 程度となった時点で、上床版支間中央上縁のコンクリートが圧壊に至り終局に達した。

ファイバーモデルによる非線形解析によって複合トラス構造の終局挙動を精度良く評価可能であることと、格点部が降伏した状態であっても、終局状態はコンクリート床版

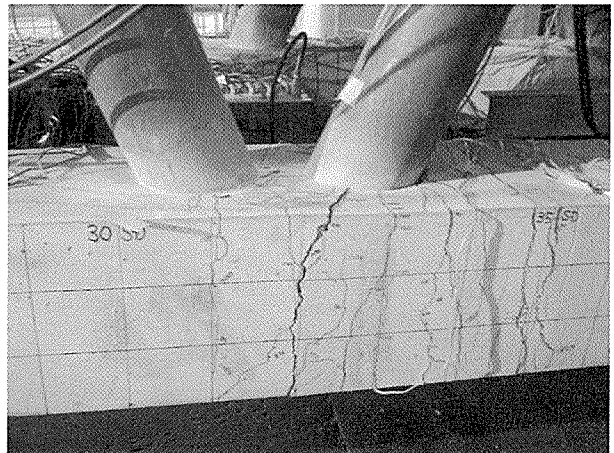


写真 - 3 トラス格点部とひび割れ



写真 - 4 複合トラス桁終局荷重実験<sup>8)</sup>

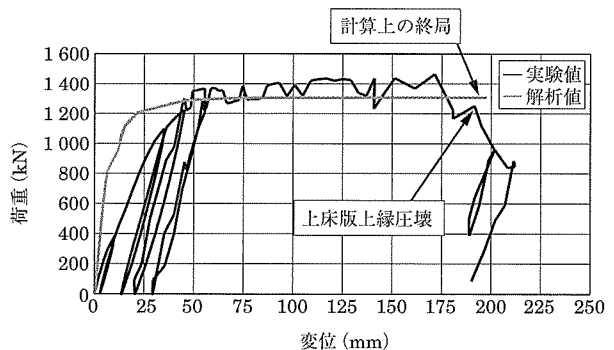


図 - 2 荷重変位曲線<sup>8)</sup>

の圧壊となることから、本格点構造を有する複合トラス橋は十分なじん性を有していることが知られる。

### 2.4 セグメント構造のせん断耐力

PC 構造の場合、セグメント工法が多用されている。PC 橋脚もセグメント工法が使用されるであろうが、その場合の参考に供するため、セグメント桁のせん断耐力に焦点をあてた著者らの研究<sup>9)</sup>を紹介したい。

この研究ではせん断キーの有無およびその形状、緊張材としてのケーブルの配置位置(内・外)に着目し、比較のための一体型供試体も含めて9種類の供試体を製作し、実験を行った。せん断キーは多段型とし、その長さは下フランジまで設置したS-7供試体を除いて、全てウェブ内における設置とした。載荷スパンは1.5 m、載荷方向は橋軸鉛直方向、桁の断面はI型である。図-3は一体型S-2(全数外ケーブル)とセグメント桁S-6(全数外ケーブル)のせん断ひび割れの違いを示している。セグメント桁では、中間支点側セグメント継目部近傍にひび割れが集中している様子が分かる。

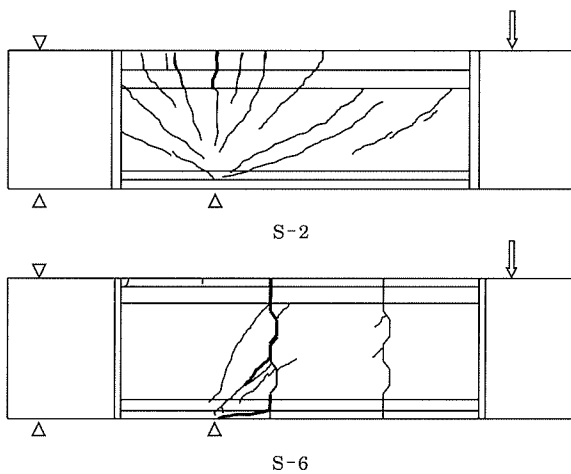


図-3 一体打ち桁とセグメント桁のせん断ひび割れの違い<sup>9)</sup>

図-4は桁の荷重-変位曲線であり、桁の種類により最大耐力およびじん性の違いが明らかとなっている。

この研究より、以下のような知見を得ている。

- ① 全外ケーブルを使用したセグメント桁のせん断耐力は内ケーブル場所打ち桁の65%程度となり、せん断耐力が大きく低下する。
- ② 内ケーブルを用いたセグメント桁あるいは外ケーブルを用いた場所打ち桁のせん断耐力は内ケーブル場所打ち桁のそれぞれ92%、88%程度であり、せん断耐力の低下が少ない。

これらの結果を基に著者らは外ケーブルを用いたセグメント桁に対するせん断耐力式を提案し、合わせて提案式による試設計を行った結果、道路橋示方書で設計した桁では、10~20%のせん断耐力不足が生じることを示している<sup>10, 11)</sup>。さらに、このせん断耐力不足に対する対策として、① 支点付近では、内ケーブルと外ケーブルとを併用する、② 終局時に支点付近の目地開きを避けるため、プレストレス量を

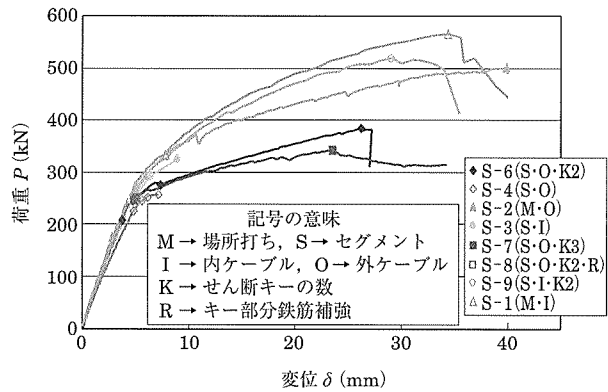


図-4 荷重-変位曲線<sup>9)</sup>

通常より多く導入する、③ ケーブルによるせん断分力を増やし、逆せん断を作用させる、などの実用的な方法を提案している。

これらの結論は、かぎられた数の供試体による実験結果から導かれたものであるが、じん性に富んだPC橋脚を実現するために参考とすべき知見も含まれていると思われる。

### 3. ねじりを受ける構造物の設計

曲げじん性を増加させるためには帯鉄筋が効果的であることは広く知られているが、ねじりを受ける部材の復元力特性を改善するためにも帯鉄筋は非常に有効である。

著者の研究室では図-5に示すような供試体を用いて、これまで多数の複合応力載荷実験を行ってきた。その結果のいくつかを紹介する<sup>12~14)</sup>。

ねじりを受ける部材では帯鉄筋の降伏が生じると、それ以後は荷重が低下していく。図-6では帯鉄筋比が異なる2つの供試体の純ねじり交番載荷実験による復元力特性を示しているが、それぞれ帯鉄筋の降伏後は荷重が減少している。したがって、ねじりが卓越する部材や、ねじりに関しての補強に降伏強度が大きいPC鋼線・鋼棒は有効に利用できるのではないかと考えられる。

また、一般に橋梁の動的解析を行う場合、ねじりひび割れ発生後にねじり剛性が大幅に低下することから曲げおよ

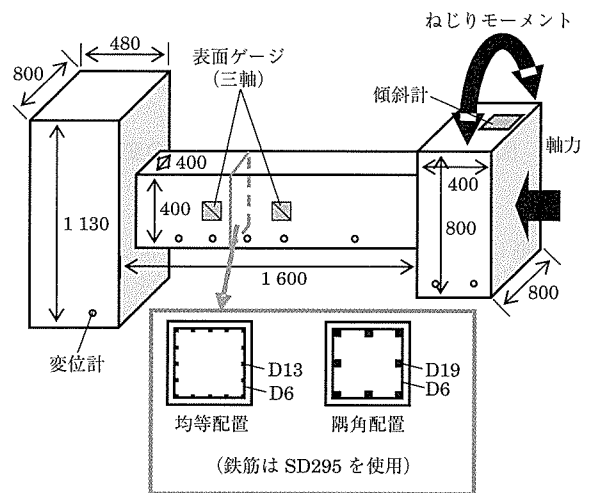
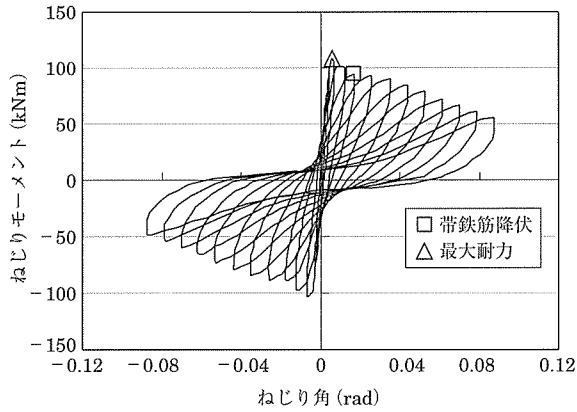
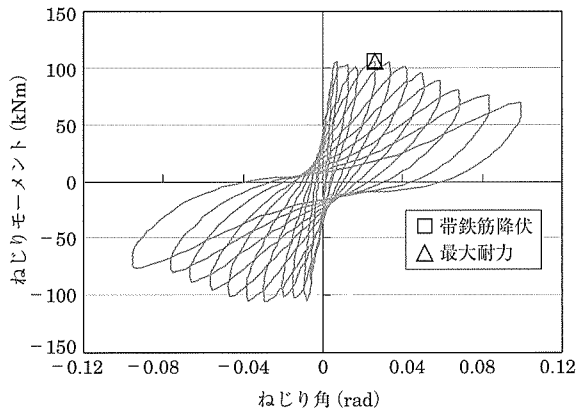


図-5 複合応力載荷実験の供試体<sup>12)</sup>



(a) 帯鉄筋間隔 60 mm (帯鉄筋比 0.58%)



(b) 帯鉄筋間隔 30 mm (帯鉄筋比 1.16%)

図 - 6 ねじりモーメント-ねじり角曲線  
(初期軸力は設計強度の 10% (= N))

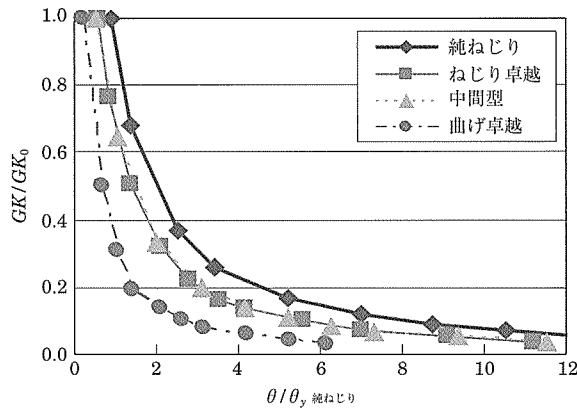


図 - 7 複合載荷時のねじり剛性比の変化<sup>15)</sup>  
(N=10%, ctc 30)

びせん断に対し安全側の設計を行うため、ねじり剛性を初期剛性の 1/10 ~ 1/20 程度に設定して解析を行っている。著者らは、軸力、曲げおよびねじりの複合荷重を受ける RC 部材の実験結果に基づき、ねじり剛性低下を軸力とコンクリート強度の比、帯鉄筋量、曲げとねじりの荷重比率をパラメータとしてまとめ (図 - 7)、定式化した。さらに、提案式より得られるねじり剛性低下を用いた橋梁の非線形動的解析手法を提案し、一般的な PC 連続ラーメン橋を対象にした解析事例を示している<sup>15)</sup>。

#### 4. 免震橋のキーワード：長周期化とエネルギー吸収

阪神大震災やその前年のノースリッジ地震では免震建物の優位性が証明されたことにより、その後免震建物の需要は増大している。橋梁に関しても、1996 年版道示で免震橋梁の設計が示されたことにより、確実に施工実績を増やしている。免震橋は免震支承による橋梁全体構造の長周期化による設計地震力の低減と、エネルギー吸収能力 (減衰) の増大により、橋梁の地震時安全性を高め、コスト縮減を目指したものである。

ただし、長周期化により変位が増大することから、伸縮継ぎ手が大きくなるデメリットや、免震ゴム支承は金属支承に比較して許容面圧が小さいため、寸法が大型化し、設計・コスト面で難点があること、さらに場所によっては自動車走行による周辺地盤の振動などの問題も指摘されている。適材適所の設計が望まれる。

#### 5. ダンパー付き橋梁の普及

上部構造と橋台間や、橋脚内にダンパーを設置した橋梁なども耐震補強のみならず新設橋梁としても提案されており、今やダンパーは橋梁用装置としての位置を確立したように見える。ここでダンパーはエネルギー吸収能力を期待されているわけであるから、必ずしも液体封入型のダンパーに限る必要はなく、材料の塑性変形によってエネルギーが吸収できる装置を付加しても良く、各種の装置が開発されていることは周知のとおりである。

橋軸方向にフリーな主桁を有する斜張橋などでダンパーを使用する場合には、固有周期が短くなるが、エネルギー吸収能力の増大のメリットが短周期化によるデメリットを上回れば合理的構造として成り立つことになる。

#### 6. 低摩擦すべり支承を有する橋梁の開発

摩擦係数の小さいすべり支承を用いれば、地震時に桁は自由に振動でき、桁から下部構造に伝達される慣性力をきわめて小さくすることができる。既往のすべり材は高速になると摩擦係数が大きくなる欠点があったが、従来のすべり支承と比較して、高速時の摩擦係数が 1/10 程度である低摩擦すべり支承 (繊維強化熱硬化樹脂を素材とし、地震動としては高速の 2 m/s においても摩擦係数は 2% 程度) が開発された<sup>16)</sup>。しかも、この支承は耐荷重性が良好で、従来のすべり材に比べ約 2 倍の許容面圧を有しているため、支承の小型化が可能で支承部のコスト縮減が期待できる。

このような低摩擦すべり支承を用いれば、地震時に桁と下部構造の縁を切り、下部構造の耐震性向上、下部構造と支承部のコスト縮減を目的とした新しい橋梁システムの開発が可能となる。この新しい橋梁システムの橋脚を、これまでの耐震設計された橋脚、免震橋梁の橋脚と比較したものが図 - 8 である。この図から分かるように低摩擦すべり支承を有する橋脚は、ほとんど上部構造からの慣性力を受けないのである。

文献 16) では、3 径間連続桁橋を解析対象として、低摩

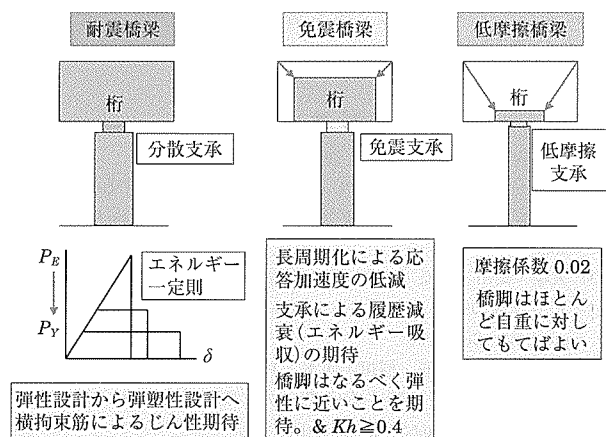


図 - 8 耐震橋梁・免震橋梁・低摩擦橋梁の比較概念図<sup>16)</sup>

擦橋梁の挙動を示しているの以下で紹介する。

表 - 1 は橋台・橋脚上の支点の拘束条件と移動可能否の場合の摩擦係数を示している。モデル 1 あるいはモデル 2 を既設橋梁に見立てており、一つの橋脚を固定、それ以外の支承は中程度の摩擦係数を有するすべり支承とした。モデル 3, 4, 5 はすべての支承にそれぞれ、低摩擦、中摩擦、高摩擦すべり支承を使用している。モデル 6, 7 は橋台に高摩擦すべり支承を配し、橋脚上にそれぞれ中摩擦、低摩擦すべり支承を配したモデルである。すべり支承は、ばね要素によって復元力を与え、力学特性は剛塑性に近い骨格曲線をもったバイリニア型とする。

表 - 1 3 径間連続桁橋支点条件 (数値は摩擦係数)

	A 1	P 1	P 2	A 2
モデル 1	0.1	0.1	ピン	0.1
モデル 2	0.1	0.1	0.1	ピン
モデル 3	0.02	0.02	0.02	0.02
モデル 4	0.1	0.1	0.1	0.1
モデル 5	0.4	0.4	0.4	0.4
モデル 6	0.4	0.1	0.1	0.4
モデル 7	0.4	0.02	0.02	0.4

鉄筋量が多い P 2 橋脚基部の曲げモーメントと曲率の関係を図 - 9 に示す。モデル 1 の P 2 (固定部) 橋脚基部では、大きな曲げモーメントが生じているのに対し、低摩擦すべり支承を有するモデル 3 の最大曲率はモデル 1 (固定部) の 0.9 % と大幅に低減されている。

このシステムの懸念は、桁端で桁と橋台の衝突が発生することであるが、衝突速度は 1 ~ 2 m/s と低速であり、致命的な損傷をコンクリート系の上部構造に与えるおそれはなく、耐衝撃性のゴムパッドなどの利用による損傷抑制が可能である。あるいはどうしてもある変位以内に桁の移動を制限して衝突を避けたいければ、ダンパーの設置も考えられる。

たとえば、先ほどの 3 径間連続桁橋の各モデルに対し、両橋台にダンパーを設置するとして、橋台 1 基あたりのダンパー抵抗力と応答最大変位を求めれば図 - 10 を得る。これによれば、たとえば最大変位量を 0.25 m に制限したときの各モ

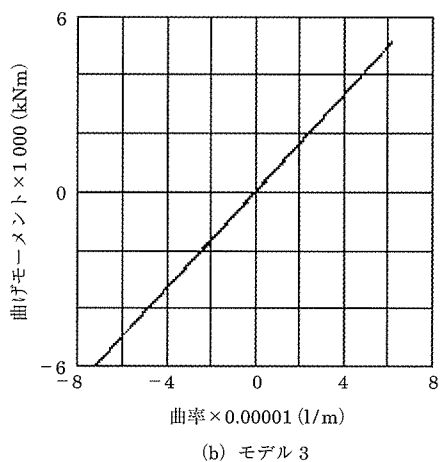
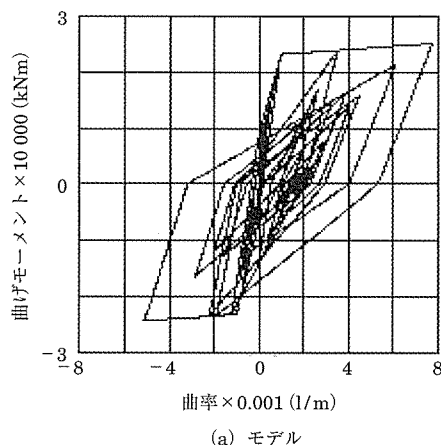


図 - 9 橋脚の曲げモーメント-曲率関係<sup>16)</sup>

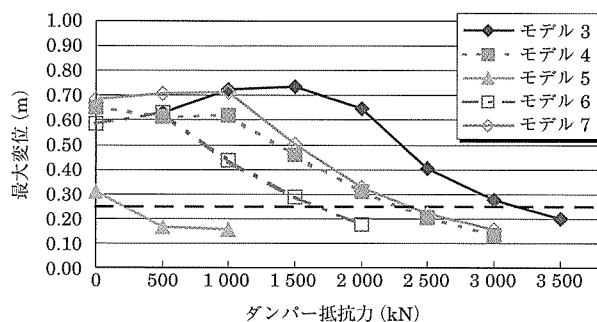


図 - 10 ダンパーの抵抗力による桁の最大変位の変化 (0.25 m における破線は仮定の許容変位量を示す)<sup>16)</sup>

デルが必要とされるダンパー抵抗力を知ることができる。

### 7. 変位に対応した耐震技術の必要性

1999 年の台湾集集地震やトルココジャエリ地震では地表面に現れた断層変位によって橋梁が大きな被害を受けた。そこで、橋梁はこのような変位にどの程度対応できるのか、あるいはどのような構造が有利であるか、どのような対策が可能であるかなどの研究が行われた<sup>17)</sup>。

そこでは、まず加速度波形を積分して所要の残留変位を有する変位波形を多数用意し、それらを断層を挟んで入力して行った非線形動的解析を通じて、地震時の動的応答と地震後に残留する変位の両方を正しく評価することの重要

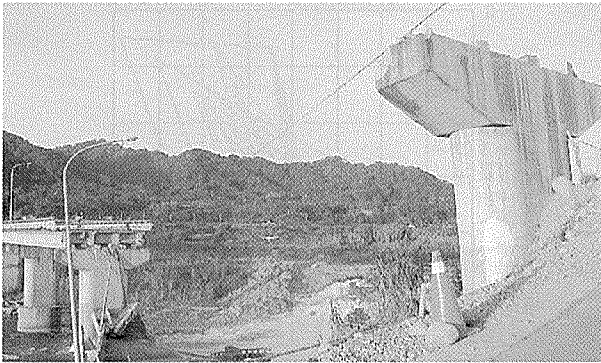


写真-5 台湾集集地震で断層変位を受け橋脚が転倒し、桁が落下した橋

性を指摘している。

また、種々の構造形式の橋梁に対して耐震性の照査を行っている、上記の疑問に対する知見をまとめている。たとえば、断層変位の生じる地震に対しては、支間長の長い斜張橋は他の構造形式に比べ有利な構造であることや、あらかじめ断層の位置が判明している場合には、支間長の長い径間を断層の位置に設けることで耐震性を向上させることができることなどを指摘している。

断層調査の蓄積にともない、将来における断層変位発生の可能性を等閑にできない地点が多くなっている。構造部材そのものの耐震性の向上に関する技術はほぼ完成の領域に達しつつあるのに比べ、構造部材間の相対変位に対応できる装置の開発が不十分であり、この方面での今後の技術開発が望まれる。

また、軟弱地盤上の構造物の施工が増大することに伴う変位対応技術も望まれる。たとえば、ギリシャのリオン・アンティリオン橋<sup>18)</sup>で採用されたコンセプト（軟弱地盤上に設置した浮かぶ基礎と、基礎と橋脚間の滑りを許容した断層変位への対応）に基づく耐震設計なども今後わが国で真剣に議論されることを期待したい。

## 8. おわりに

構造物が大地震に耐えうるかどうかは、地震時に何が起こるかを的確に予想し、それに対応できる構造物を苦心して設計したか否かによって決定される。

したがって、その解に至る思考の段階で、PC技術がどのように利用できるかを真剣に考えていけば、期待される耐震的なPC構造を生み出すことができると考える。今後の技術開発を期待したい。

本文では、阪神大震災以後のコンクリート系構造の耐震性能向上に関する技術開発に関し、著者が行った研究を中

心に述べており、参考文献も著者の論文を中心に記載していることにご寛容を賜りたい。

## 参考文献

- 1) 大塚久哲：実践耐震工学，共立出版，2004
- 2) 大塚・岡田・角本・堤：PC箱桁の復元力特性に関する交番載荷実験，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.2，pp.90-97，Mar. 2000
- 3) 大塚・岡田・石原・角本・堤：交番載荷実験に基づくPC箱桁の復元力特性の提案，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.5，pp.18-24，Sep. 2000
- 4) 大塚・矢葺・石原・浦川・角本：PC鋼材が偏心配置されるPC箱桁の復元力特性に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.44，No.1，pp.65-72，Jan. 2002
- 5) 大塚・岡田・矢葺・角本・堤：PC箱桁橋軸直角方向の復元力特性に関する交番載荷実験，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.2，pp.124-131，Mar. 2001
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002
- 7) プレストレストコンクリート技術協会：PC構造物耐震設計規準（案），1999
- 8) 吉川・野呂・大塚：ラーメン構造に用いる複合トラス橋の格点部の研究開発，プレストレストコンクリート，Vol.49，No.2，pp.68-74，Mar. 2007
- 9) 大塚・矢葺・若狭・藤本：外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁のせん断耐力に関する実験的研究，プレストレストコンクリート，Vol.45，No.3，pp.44-56，May. 2003
- 10) 大塚・若狭・篠原：外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁のせん断耐力の評価に関する研究，第13回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2004.10
- 11) 若狭・大塚・篠原：外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁のせん断耐力の評価提案式にもとづく試設計，第13回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2004.10
- 12) 大塚・王・高田・吉村：純ねじりを受けるRC部材の履歴特性に影響を及ぼすパラメータに関する実験的研究，土木学会論文集，No.739/V-60，pp.93-104，2003
- 13) 浦川・大塚・竹下：軸力，曲げおよびねじりを同時にうけるRC部材の挙動に関する研究，構造工学論文集，Vol.51A，pp.885-892，2005
- 14) 大塚・竹下・浦川：軸力，曲げ/せん断，及びねじりの複合荷重を同時に受けるRC部材の耐震性能と相関特性，土木学会論文集，Vol. 2005，No. 801，pp.123-139，2005
- 15) 大塚・秦・宇山：RC柱部材のねじり剛性低下の定式化と動的解析への適用の研究，構造工学論文集，Vol.55A，2009.3（掲載予定）
- 16) 大塚・西田・田中：低摩擦すべり支承を有する連続桁橋の地震時挙動及び変位制御に関する考察，構造工学論文集，Vol.53A，2007.3
- 17) 土木学会地震工学委員会：断層変位を受ける橋梁の計画・耐震設計に関する研究小委員会報告書，2008.7
- 18) 森元峯夫：思い出の構造物 呼子大橋・リオン・アンティリオン橋，プレストレストコンクリート，Vol.48，No.6，pp.44-47，Nov. 2006

【2009年1月15日受付】