

鋼橋の被害と耐震性

Damages and Seismic Performance of Steel Bridges

フェロー会員 工博 Ph.D. 京都大学教授 工学部土木工学科	渡邊 英一	Eiichi WATANABE
フェロー会員 阪神高速道路公団大阪第一建設部次長	前川 義男	Yoshio MAEKAWA
正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学部土木工学科	杉浦 邦征	Kunitomo SUGIURA
学生会員 京都大学大学院工学研究科修士課程 土木工学専攻	北根 安雄	Yasuo KITANE

はじめに

「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」¹⁾(以後道示 V と略称する)は平成 2 年 2 月に、昭和 55 年に制定されたものをもとにして橋の支持地盤の振動特性、橋の地震応答特性、鉄筋コンクリート橋脚等についての新しい知見を取り入れて刷新されたものである。「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(案)」(以後復旧仕様と略称する)は、この度の阪神・淡路大震災の経験をもとにして、兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会の審議を経て建設省道路局長名で通達された。鋼製橋脚については、水平地震力により面板の局部座屈が生じ、耐力が低下したり、劣化域での剛性が負となる結果、履歴吸収エネルギーが期待しにくい場合があるとしている。今後の技術開発を期待しつつ、当面、コンクリートを充填し、合成柱として必要なじん性およびエネルギー吸収性能を確保することとした。橋脚の耐震性はレベル I, II, III の基準により検討されることになる²⁾。レベル I とは中小地震に対する「道示 V」に基づく震度法による許容応力度設計、レベル II とは「復旧仕様」および「道示 V」に基づく大地震時保有水平耐力の照査、そしてレベル III とは今回の地震時最大加速度の観測地点での地盤上地震記録を用

いた動的非線形解析により、今回程度の大地震にも余裕をもって耐えうるかを照査する。

鋼橋脚の震災の事例

今回の地震では、特に 1971 年以前の旧耐震設計基準により設計されていた橋梁の本体の多くはそれ以後の新基準によるものより、甚大な被害を受けたようである³⁾。たとえば、阪神高速道路 3 号線(神戸線)や山陽新幹線高架橋がそうである。これらは基本震度 0.2 に対して設計されていたが、以後は修正震度法が採用され、設計震度も基本震度 0.2 に補正係数をかけ 0.1~0.24 の幅を持たせた⁴⁾。また、昭和 55 年制定の変形性能照査もしくは平成 2 年制定の地震時保有水平耐力照査を規定した基準の適用を受けた阪神高速道路 5 号線(湾岸線)では、西宮港大橋東詰め側径間鋼箱桁の落橋を例外として、本体は比較的軽度の損傷しか受けなかったと考えられる。

地震によって最も影響を受ける構造物の筆頭として橋脚が挙げられる。まず、鋼橋脚の座屈等については、実験などによって予測されてはいたものの、おそらく史上初めて実際に被害を経験したといえる。これは、世界的にも橋脚の大多数がコンクリート製であること、日本の大都市のように比較的軟弱な沖積層上に立地したところでは支持



写真-1 矩形断面鋼橋脚の座屈例1



写真-2 矩形断面鋼橋脚の座屈例2

力の観点から、軽量の鋼製のもの随所で建設されてきてはいるものの、これまで大都市には阪神・淡路地震のような大きな地震がなかったことなどの理由による。鋼製橋脚に見られた被災例を整理すると (a) 座屈破壊, (b) 脆性破壊, (c) 低サイクル疲労破壊, に分類できそうである。

まず, (a) 座屈については鋼製薄肉中空断面の宿命ともいえるが, 多くの局部座屈の事例が見られた。局部座屈とは平面あるいは曲面部が面内圧縮力を受けて面外にはらみ出す現象をいうが, 一本柱の橋脚には特に大きな局部座屈が見られた。橋脚の脚柱部では通常その圧縮降伏荷重の15%程度の軸圧縮力が上部工から下向きに作用しているが, さらに大きな水平地震力による交番

曲げを受けた結果このような局部座屈が生じたものと考えられる。写真-1は神戸のハーバーハイウェイにおける矩形断面の局部座屈事例を示している。座屈箇所では塗料が剥げ, また, 曲面状に凹凸が生じるのですぐわかる。写真-2は阪神高速道路3号線(神戸線)の脇浜での事例であり, やはり, 矩形断面の局部座屈例を示している。後者については後から検討を加えてみるが, 局部座屈は板の幅と厚さの比がある程度以上であれば大きな地震に対しては起こりうる現象といえる。写真-3は阪神高速道路3号線(神戸線)の明治工区で見られた円形断面脚柱の, いわゆる「象の足」座屈と呼ばれる局部座屈現象の事例であり, 橋脚の基部, 板厚変化点(ここではこれに相当), マンホール孔周辺など最弱部で生じる可能性がある。座屈波形を矩形と円形断面で比較すれば, 矩形のものが軸方向に比較的長い波長で変形するのに較べて, 円形では短い波長で起こることがわか



写真-3 円形断面鋼橋脚の座屈例1



写真-4 円形断面鋼橋脚の座屈例2

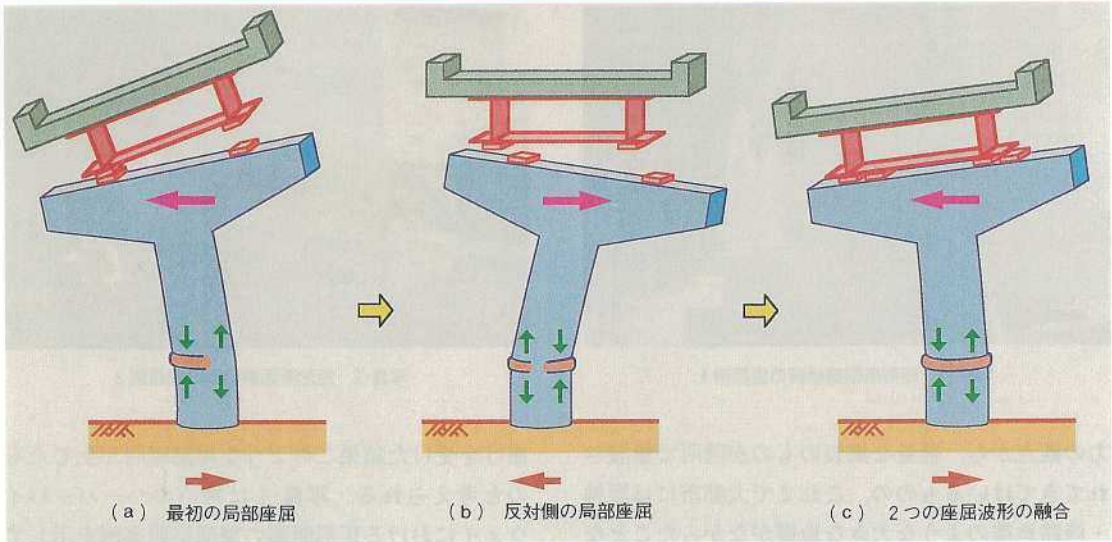


図-1 「象の足」座屈

る。写真-4は神戸の三宮の税関通りの港湾幹線道路合流部でみられた、やはり円形断面柱の「象の足」座屈であり、これは基部で生じている。

このような「象の足」座屈のメカニズムについては以前より実験室において観察されていた。まず、地震力により大きな交番曲げモーメントを受けると、圧縮側に最初の局部座屈が図-1(a)のように生じる。つぎに、曲げモーメントの符号が変わり、このとき逆方向に曲げられ、もと引っ張り側であった部分が圧縮を受け、図-1(b)のように新たに座屈する。そして、再度符号が逆転すると両側の座屈波形が図-1(c)のようにひとつにつながる。こうして、円形断面をぐるりと一周

するような輪が生じるのである。軸圧縮力が作用すると座屈しやすくなる。

つぎに、(b)脆性破壊の例について述べる。通常、橋梁の溶接部などには頻繁な通行車両などによって微小な疲労亀裂が進展することがある。また、過去の大地震の際、継ぎ手などに脆性破壊が認められている。しかし、今回の地震ほど顕著な脆性破壊が生じた例はないのではないかとと思われる。地盤の最大加速度が800 galを超えたといわれているが、いままでの巨大な地震の値と比較しても特に際立っているわけでもない。しかし、地盤の最大速度が90 kine以上であったともいわれており、これが大きな衝撃力を与える原因にも



写真-5 門型ラーメンの脆性破壊例1

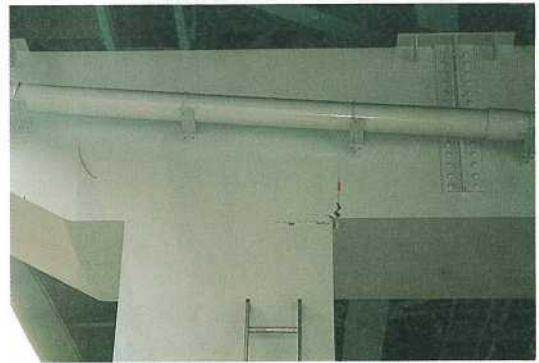


写真-6 門型ラーメンの脆性破壊例2



写真-7 高層鉄骨建物の脆性破壊例

なったようだ。写真-5は神戸ハーバーハイウェイの摩耶埠頭近くの門型ラーメン橋脚の片方の脚部と梁部の交差部であるラーメン隅角部において発見された脆性破壊の事例である。この一帯では液状化が認められたところでもあり、当脚部に引っ張り力が生じ、さらに、0℃の低温の下、水平および鉛直方向の加速度成分が不幸な組み合わせで衝撃的に作用した結果といえるようである。巨大なハンマーで殴られたように、一気に亀裂が走っているが、表面の凹凸は見受けられないので引っ張りが卓越していたように思える。また、他方の脚柱と橋脚のはりには座屈が生じた。写真-6は阪神高速道路神戸線の脇浜区で認められた事例であり、やはり門型ラーメンの隅角部から亀裂が



写真-8 鋳鉄製橋脚の脆性破壊例

走っている。さらに、写真-7は芦屋浜の高層鉄骨マンションの柱部における脆性破壊の事例を示しているし、また、写真-8は神戸高速鉄道の三宮駅付近の高架橋の鋳鉄製の橋脚の事例を示しており、いずれも衝撃的な力の作用の跡が見受けられる。

さて、上述の座屈と脆性破壊の中間的な被害も見受けられる。これは(c)(極)低サイクル疲労と呼ばれる破壊に分類できるものと思われる。写真-9は阪神高速道路神戸線の明治工区の下りの高架橋の円形断面橋脚の事例である。数サイクルの反復曲げにより、座屈を生じ顕著な凹凸を生じた後、亀裂を生じている。写真-10は同じ工区であるが、上りの高架橋における事例である。いわゆる、「象の足」座屈が発展した後、座屈波形がさらに軸方向に押し潰され、疎となった引っ張り部分に沿って円周状に亀裂が進展し、一周して完全にスパッと切断されてしまったものである。



写真-9 低サイクル疲労の例1



写真-10 低サイクル疲労の例2



写真-11 単純支持箱桁橋の落橋例

このような諸破壊に対する対策としては、(a) 座屈と (c) 低サイクル疲労については面板の厚さを大きくし、リブの剛性を必要最小限度の数倍程度に高めるとともに軸圧縮応力度を圧縮降伏強度の10%以内に制限し、マンホール孔を補強したりすることが効果的であるが、当面コンクリート充填で対処せざるを得ない。(b) 脆性破壊と (c) 低サイクル疲労に対しては構造のディテールを改善し、容易にこれらの引き金となる微小亀裂が発生しないように設計し、また微小な疲労亀裂に対する日常の点検を怠らないことが大切であろう。

橋桁の震災の事例

橋脚と比較して橋桁は一般には耐震上問題は少ないと考えられている。しかし、橋脚の破壊時には落下の危険性があるし、橋脚が安全でも支承が破壊されれば、ずれ落ちて損傷を受けるし、支承が過度に踏ん張れば桁端部に損傷が発生することもある。写真-11は阪神高速道路湾岸線の西宮港大橋の橋台基礎地盤の側方流動による側径間の隣接单純支持鋼箱桁の落橋の事例を示している。側径間と主橋のニールセンアーチの間には耐震連結装置があったが、連結していた側径間の桁橋のウェブが引きちぎられた。また、対岸にある、同主橋の西側橋台上の鋳物製の上部ピボット沓が真っ二つに割れてそのひとつが地面に落下している。写真-12は同じく湾岸線にかかる斜張橋の東



写真-12 斜張橋のペンデル沓の破壊例

神戸大橋の最西側にある引っ張り反力を支えているペンデル沓がはずれ、そのため斜張橋のトラス桁の西端部が浮き上がった事例を示している。これは橋軸直角方向の水平地震力を受け、ウィンド沓が取り付けボルトのせん断破壊によりずれ落ち、ペンデル沓に過大な水平変位が強制され、その接合ピンが抜け落ちたためである。ここではさらに、ダンパー沓や耐震連結装置もはずれてしまった。

さらに、写真-13はダブルデッキアーチの六甲アイランド大橋のあわや落橋という事例を示す。これは橋軸直角方向に作用した地震力により、アイランド側橋台のピボット沓台座から主構が沓も



写真-13 ダブルデッキアーチ橋の損壊



写真-14 アーチリブ連結支材の座屈



写真-15 連続鋼箱桁橋の曲げ座屈



写真-16 座屈した連続鋼箱桁橋の内部

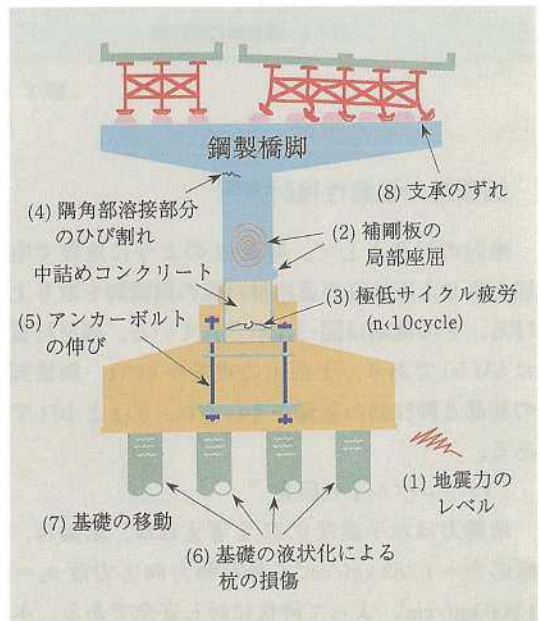


図-2 鋼橋脚の地震による損傷の事例

るとも横へ3m程度ずれ落ちたためである。ただし、この橋台上には2個のジャッキアップ用の台が設置されており、これらに横構が乗り上げ停止したようである。支承がずれて主桁が橋軸直角方向にずれた例は非常に多いが、この原因については図-1(a), (b), (c)のように橋脚の回転運動とか上方向への衝撃力などが考えられるが今後の検討に待つところが少なくない。なお、六甲アイランド大橋では写真-14のように2つのアーチリブを連結している支材が座屈し、ねじり変形をも受けた。

また、写真-15は阪神高速道路神戸線の浜中交差点での連続鋼箱桁の局部曲げ座屈の事例を示し

ている。この原因は交差点西詰めのコンクリート橋脚がせん断破壊をしてずり落ちたため、連続桁の支承条件が大きく狂ったためである。箱桁の内部も写真-16のように、大きく座屈変形し、補剛材は横倒れ、場所によっては大きく亀裂を生じていた。橋梁の損傷事例をまとめると図-2のようになる。以上に述べた損傷の他、アンカーフレームやアンカーボルトの損傷、ならびに杭の損傷があるが橋梁の耐震性はこのような全体系のバランスを考えなければならない。

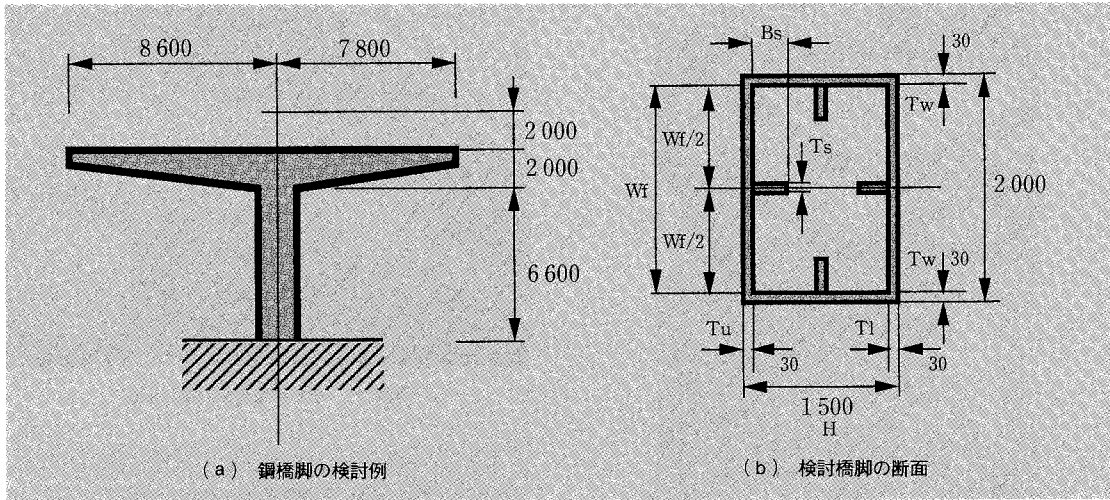


図-3 橋脚の検討例

鋼橋脚の耐震性検討の例

検討の対象として、写真-2のように地震で座屈を生じた阪神高速道路神戸線の鋼橋脚を取り上げる。その概略は図-3に示されている。鋼材材質はSM 50であり、上部工の重量が482t、鋼橋脚の梁部と脚柱部の重量がそれぞれ、20tと10tである。

(1) レベルⅠの照査

地震力は水平震度0.25を考えれば、結論は、縁応力 $=1382 \text{ kgf/cm}^2 < \text{許容軸方向応力度 } \sigma_a = 1900 \text{ kgf/cm}^2$ 。よって降伏に対し安全である。本橋脚ではもともと、地震荷重は支配的なものではなかったので余裕があった。

(2) レベルⅡの照査

既存の鋼単独橋脚は鋼板部分の一般化幅厚比が $R_p=0.68$ なので座屈破壊した。もし、座屈を防止するためにはコンクリートを脚柱部に充填するのが一方法である。初期降伏に対応する降伏モーメントは $M_y=3417 \text{ tonf}\cdot\text{m}$ となる。なお、終局状態としては低サイクル疲労により亀裂を生じたときとして、実物大試験の結果を参考にして、引張り側のひずみの限界値 $\epsilon_u=0.015$ を想定すると終局曲げモーメントは $M_u=3803 \text{ tonf}\cdot\text{m}$ となる。応答加速度が1Gのとき、エネルギー等価則に基

づく、等価水平震度は $K_{he}=0.545$ となる。外力モーメントを計算すれば、橋脚基部に作用する曲げモーメントは $M=5294 K_{he}=2885 \text{ tonf}\cdot\text{m}$ となる。したがって、曲げモーメント： $M=5294 K_{he}=2885 \text{ tonf}\cdot\text{m} \leq M_u=3802.7 \text{ tonf}\cdot\text{m}$ 。

よって、レベルⅡの地震時保有水平耐力は十分に確保されていることがわかる。

(3) レベルⅢの照査

冒頭に述べたように、橋脚が地震動入力を受けた場合、その系の応答は橋脚上端部の水平復元力 H と水平変位 δ により代表されるものとみなす。ここでは簡単のため、橋脚の動的モデルとして1

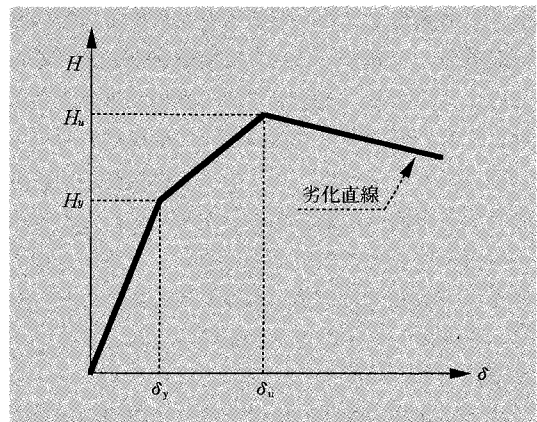


図-4 水平復元力と水平変位の骨格曲線

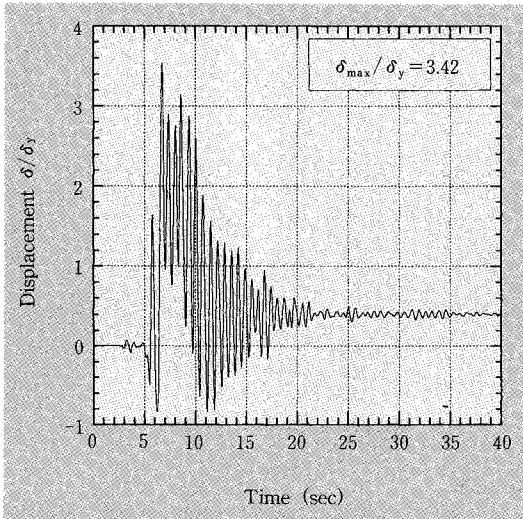


図-5 水平変位の応答時刻歴

自由度バネ一質点系を考える。 H と δ の関係は図-4 に一般的に示されるように、鋼単独柱としたとき trilinear、中埋めコンクリートを脚柱に充填した場合 bilinear モデルを用いて簡略化するものとする。というのは、中埋めコンクリートの存在によって鋼橋脚面板の局部座屈が阻止されると考え、そのような場合は最大耐力以後の劣化勾配は存在せず、耐力が保持されるものと想定するからである。また、地震波は今回神戸海洋気象台で測定された地盤の記録加速度 NS 成分（最大 818 gal）を用い、運動方程式の数値積分は中央差分法に依った。

図-5 は中埋めコンクリートを充填した鋼橋脚について、水平変位 δ を初期降伏時の水平変位 δ_y で無次元化した時刻歴応答結果を示し、図-6 は水平復元力 H を初期降伏時の値 H_y で無次元化したものと水平変位 δ/δ_y の履歴曲線を示している。 $\delta/\delta_y = 2.78$ のとき低サイクル疲労亀裂の可能性があるが ($\epsilon_u = 0.015$ に相当)、水平変位応答値 δ が最大 $3.42\delta_y$ 、残留変位は $0.4\delta_y$ であるから、若干の低サイクル疲労に起因する亀裂が生じるかも知れないがこの程度では甚大な損傷には至らないものと推定できる。したがって、このようにコンクリート充填された橋脚は今回のような地震に対しても崩壊することなく、十分に余裕を

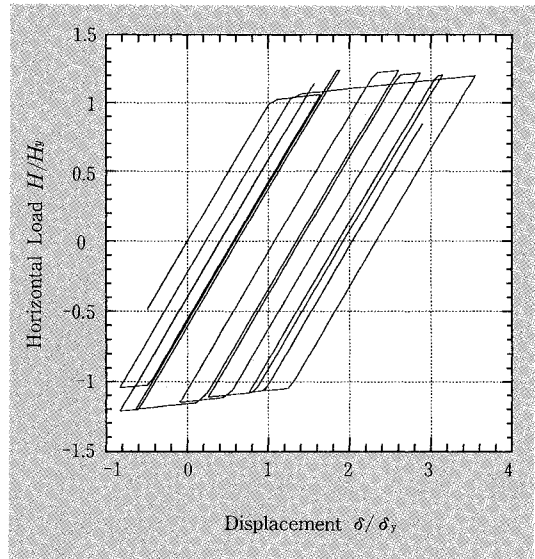


図-6 水平力と水平変位の応答履歴

もって耐えることができるものと考えられる。

(4) 鋼単独橋脚の動的非線形解析 (比較のデータ)

鋼単独では今回の地震により座屈損傷を受けたが、前述と全く同じ手法によりレベルⅢの動的非線形解析を行い検証をしてみた。水平力 H と水平変位 δ の骨格曲線については簡単のため、コンクリート充填の場合と同じく最大水平耐力は $H_u = 1.11 H_y$ を維持するが、幅厚比の大きな既設の鋼単独橋脚では劣化直線部をも想定した trilinear 型の復元力特性を持つものと仮定した。図-7 は前述の地盤加速度記録を用いた動的非線形解析による水平変位 δ の時刻歴応答曲線を、そして、図-8 は水平復元力 H と水平変位 δ の履歴を示している。鋼単独の橋脚では最大水平変位 δ がほぼ $5\delta_y$ 、残留変位も $4.4\delta_y$ と、大きく変位しているが、コンクリート充填のものは $0.4\delta_y$ 程度の残留変位に止まり改善がみられることがわかる。

むすび

構造物の耐震設計では個々の部材の強度を独立に確保するだけでは解決にならない。液状化など周囲の地盤条件と構造物全体系の強度・変形能を

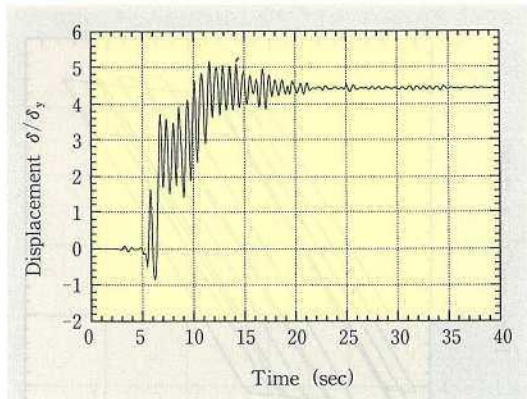


図-7 鋼橋脚単独の水平変位の応答

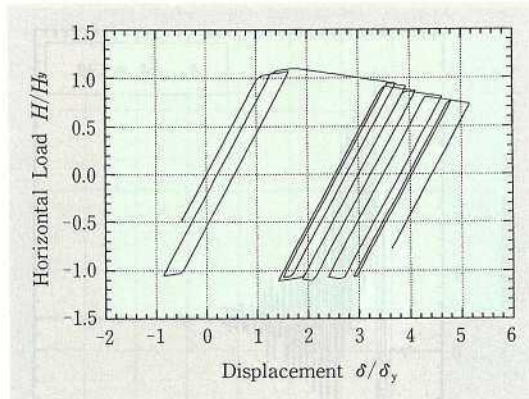


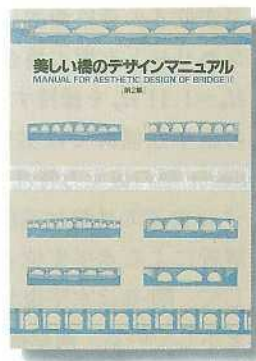
図-8 鋼橋脚単独の水平力と水平変位の応答履歴

考慮したバランスのとれた設計により、リダンダンシー（余裕度）を確保することが望まれる。なお、本論文の作成にあたり、阪神高速道路公団より多大の取材の便宜と資料の提供を受けた。記して謝意を表明する。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，平成2年2月
- 2) 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り被災した道路橋の復旧に係わる仕様（案），平成7年2月27日
- 3) 現地レポート：阪神大震災一壊滅した土木構造物の全容一，日経コンストラクション2-24，1995，pp.36-90
- 4) 阪神大震災震害調査緊急報告会資料，土木学会，平成7年2月8日

BOOK PICK UP



美しい橋のデザインマニュアル〈第1集・第2集〉

昭和57年6月、故田原保二委員長のもとに「美しい橋のデザインマニュアル」を刊行して12年になる。当時は橋梁景観に関する手引き書として先鞭となるものであった。それは、62項目を4つに分類して、美しい橋を建設する場合に考えるべき各要素を明らかにしたものである。

平成5年6月、その第2集を刊行した。第1集が数多くの要素を順序立てて説いたのに対し、この第2集は、橋の美しさの基本は「連続性」にあり、このキーワードのもとに、300余の写真、図版を用いて、橋桁の連続性、桁と橋脚、橋台のつながり、付則として遮音壁その他の付属品について、日本の橋の実例を用いて具体的に解説した。

ここに述べられた留意点は、美しい橋とするための最も基本となる事項である。

第1集は平成5年12月に、初版の誤植を訂正し、僅かな改訂を行った上で第2刷として発売された。なお、第2集は全てカラーである。第1、2集ともに、美しい橋を作るための基本的な手引きとして、おおいに活用されることを希うものである。

■〈第1集〉定価5,000円(平4,800円)
 ■〈第2集〉定価8,500円(平4,800円)／会員特価7,650円

●お問い合わせ先

出版元：土木学会・出版事業課

TEL.03-3355-3445(ダイヤルイン) FAX.03-5379-2769

発売元：丸善(株)・出版事業部

TEL.03-5684-5571 FAX.03-5684-2456