

地震時破損後に補修した橋脚モデルの耐震載荷実験と耐震設計の考え方

青木徹彦*、山田将樹**、林 幸司***

* 工博 愛知工業大学 土木工学科 (〒470-03 豊田市八草町)

** 愛知工業大学 土木工学科 (〒470-03 豊田市八草町)

*** 瀧上工業(株) 設計部 (〒475 半田市神明町)

都市内高架高速道路は地震時にこそ、その機能を発揮しなければならない。本論文では構造物を社会システムの中の一要素として捉え、システム的全損失コスト最小の観点から、安全係数を決定することの合理性を述べた。機能回復が極短期間であれば部分的破壊を生じて都市防災上の問題はほとんどない。一例として地震で破損した橋脚モデルとして繰り返し載荷後の八角形断面鋼製橋脚の試験体を簡単に補修し、再度繰り返し載荷実験を行った。耐震性能を調べたところ、実用上十分な結果が得られた。

Key Words : Seismic Design Concept, Repair, Steel Pier, Octagonal Section, Earthquake Resistance Test

1. はじめに

阪神大震災以後、国内各地で道路、鉄道用高架構造物等の耐震補強が進められている。特に壊滅的なせん断破壊を生じた鉄筋コンクリート製単柱式橋脚には、鋼板接着や炭素繊維接着等の補強が、また鋼製橋脚には中詰めコンクリート等が施されている。しかしこれらのほとんどは地震力を受ける前のもので、一度被災した構造物の補修方法の検討や補修後の強度-変形特性の調査、研究については時間的余裕がないこともあるためか、今日までに十分に行われていないようである。

大規模な耐震補強の実施や新しい耐震設計法の確立によって、次にくる都市型大地震では、阪神大震災ほどの被害は生じないと思われるが、地震直後に構造物に損傷が生じたときの対応も含め、耐震設計の基本をどこに置くかについての議論は十分とは思われない。

本報告では耐震設計の考え方の基本的な概念を構造物の機能または性能の面から検討し、それに関係した鋼製橋脚の被災後の補修とその繰り返し載荷耐震実験について述べる。

2. 機能維持に基礎を置く耐震設計の考え方

構造物は使用されるためにある。したがって限界状態設計法といえども設計の基本は「強度」ではなく、文献1)で述べたように、「機能維持」に置くべきであろう。耐震設計でも同様であり、建築の分野では性能照査型設計と呼んでいる。川島の最近の論調²⁾にも最重要構造物に対して「機能保持に近い状態」にとどめる必要性が述べられている。

以下では土木構造物の社会システム要素という観点から見た耐震設計のあり方について述べる。

2.1 システム論的アプローチと土木構造物に要求される耐震性能水準

土木構造物は社会システムの重要な構成要素である。このことはよく知られているが、阪神大震災までの数十年、都市型大地震に見舞われなかったこともあり、構造物の耐震設計の中に社会システム論的アプローチを積極的に取り入れた形跡は従来少なかったと思われる。

システムとは複数の要素が集まって元の要素とは異なった高度の機能を発揮するものと定義される。たとえば都市内高速道路は都市システムの一要素にすぎない。要素の設計はシステム全体の機能をいかに保持するかの観点から行われるべきである。土木構造物の場合、強度や変形と言った構造物固有の要素特性に基本を置くのではなく、使用性を第一に考えるべきであろう。

都市内高速道路の場合、通常はトラック、乗用車等の輸送路としての働きがあるが、地震直後には特別に重要な機能が要求される。すなわち地震後の数時間レベルでは消防車や、けが人を病院に運ぶための救急車を通さねばならないし、地震後、数日レベルでは救援物資を、また数ヶ月レベルでは再建資材等を届ける重要な役割を果たす。耐震設計ではこうした都市システム機能の一部としての構造要素の役割の重要性を考える必要があり、地震直後に構造物が強度を保有していたとしても、使うことが出来なければ実際上の意味はあまりなく、大きな変形を生じて機能が損なわれるような事態はなんとしても避けねばならない。すなわち非常時の都市機能維持のために、水平保有耐力は言うまでもなく、構造物の耐震安全度を格段に高める必要がある。これが都市内高速道路構造物に対して要求される性能水準と言える。

2.2 部分的破壊を許す設計

しかし、構造物の安全度を相当高めたとしても、地震外力の不確実性は大きく、また不均質な地盤や応答の不規則性があるから、被災地域のいずれかの構造物の、どこかに部分的破壊が生ずることは否定できず、むしろこれを想定し、その対処法を考えておくことが望ましい。阪神大震災前にこのような設計思想はあっただろうか。

利用者の立場に立った構造物の設計、すなわち機能維持に基礎を置く設計、または性能設計では構造物の強度や破壊レベルが重要ではなく、構造物が使用できるかどうか重要なのであるから、たとえ構造物に局所的な破壊が生じたとしても、緊急用に取りあえずは使用できるならば、あるいは簡単な補修で元の構造物と同程度の強度が回復できるのであれば、使用者にとっては破壊を意識する必要はほとんどない。よって今後重要な研究課題は様々な破壊形式ごとの迅速な補修方法の検討であろう。

望ましいのは予め破壊箇所を特定しておき、そこに外力エネルギーを吸収させ、構造本体の致命的破壊を避けることである。このような考えは電気エネルギーまたは供給システムではヒューズまたはブレーカーとして古くから用いられている。これにより損害が最小に押さえられ、復旧が著しく早くなる。土木構造物に「ヒューズの考え」というと、どこかを壊してそれっきりとなる状態を想定する者もいるが、ヒューズの基本的考えは、あくまで異常時に1) 本体の破壊を防ぎ、2) 復旧が容易というシステム論的発想であり、皮相的にこれを捉える場合があるのは、いかに土木構造物にシステム論的発想が浸透していないかの現れとも考えられる。土木構造物では、代表的には免震支承がこれに当たるといえよう。これも簡単に交換可能であることが望ましい。

2.3 耐震安全性レベル評価のためのシステム損失コストの算定

構造物の耐震安全性レベルを高めるにはコストがかかるから、安全性レベルを評価するには構造物が破壊したときのシステム全体の損失コストを算出する必要がある。損失コストは次の3つからなる。1) 人命の損失、2) 構造物の機能停止に伴う社会的損失コスト、3) 構造物自体の補修費、または再建費。

1)の人命の損失をコスト評価することは異論があるかもしれないが、実際に過去にあった航空機事故、自動車事故等での補償額や判例等を考えれば、社会的に認められる範囲のコスト評価が可能と考えられる。たとえば社会人一人の人命が失われた場合の損失を1億円と定める。これによって従来曖昧にされていた人命に関わる構造物破壊の損失がより正確になると同時に、場合によっては逆に人命軽視となっていた例が明らかになることであろう。たとえば現在、新幹線の鉄道高架と高速道路高架構造ではほぼ同じ安全率でつくられていると思わ

れるが、人命に関わるコストを計算に入れれば、新幹線（1列車1000-1600人）の構造の方をはるかに安全につくる必要がある。事故になってこれを議論するのでは遅い。人命の貨幣価値換算については文献3)にも提案されており、社会的にも浸透してきている。

2)の機能停止による社会的損失コストの評価に関しては、土木の構造技術者がやろうとすると不慣れで困難を伴うと思われるから、損害保険会社等の調査機関に委託すればよい。

そもそもはじめに構造物をつくる計画段階で、建設主体は交通量や経済効果の予測を行ってその存在価値を算定しているはずであり、建設後は実状に応じてその修正を行うということになろう。阪神大震災後約1ヶ月で、イギリスの船舶保険会社ロイドが震災による被害額を算出していた。神戸市も同様である。国内の関係諸団体がこれを算出できないはずはあるまい。

東名や名神高速道、都市内高速道などの幹線道では、機能停止による一日の損失コストは莫大なものになるであろうから、構造安全度は必然的に上がる。すなわち機能損失に伴う損失コストの大きいものほど重要構造物と言えるから、「構造物の重要度」またはそれに関わる係数も損失コストの計算で自動的に定まることになる。

2.4 局部的破壊と復旧期間

先に述べたように、地震直後の異常事態に対処するための都市内高架高速道路の役割はとりわけ大きい。はじめの数時間または数日間は通常の100倍程度の価値があると考えられる。その後の数ヶ月でも10倍程度の価値はあろう。これらは通常の交通料金の何倍を支払って、消防車や人命救助のための救急車を走らせるかということ考えると比較的わかりやすい。人命の価値は非常に大きいというのであれば、地震で高速道路は機能停止にすべきではない。しかし局部的破壊は確率、統計論的に避けることは出来ないであろうから、破壊のレベルに応じた残存耐力の算定を予め実験的、解析的に定めておくのがよい。これにより外見から緊急車両を地震直後から走らせることが出来るかどうかわかる。たとえば矩形断面橋脚ではリブ間の局部座屈のレベルであれば、普通には緊急車両は問題なく通行できるであろうし、鋼管柱のリング座屈は危険といえる。

問題となる局部的破損を生じたときには、これを出来るだけ短期間で補修し、機能回復を早める必要がある。補修期間は当然、社会システム損失コストの重要な決定要因となる。

地震後、橋脚に目に見えるほどの残留変形が生じた場合、図-1に示すように、H型鋼などによりトラスを形成してジャッキでもとの位置まで戻し、補修する。その際ジャッキの加圧力より橋脚の水平残存耐力が計測できる。鉄筋コンクリート製橋脚に比べ、鋼製橋脚は補修

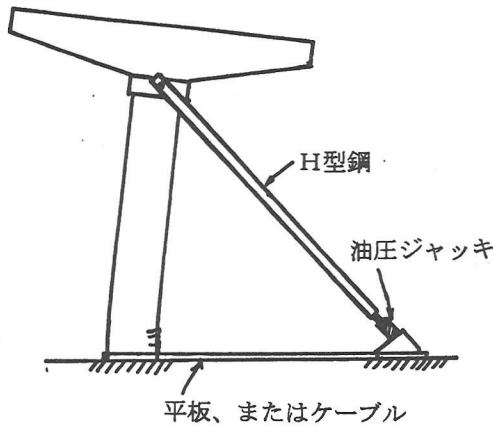


図-1 傾いた橋脚の立て起こし工の例

が早くて容易と考えられるから、初期建設時に復旧時のコスト低減効果も含めたトータルコストから判断すれば、鋼構造が有利となる場面が多くなる。このような総合的判断のためには鉄筋コンクリート、鋼構造とも、補修方法、経費、補修期間、補修後の強度-変形特性等の基礎的研究が今後さらに必要と思われる。以下に八角形断面鋼製橋脚をモデルとした例を示す。

3. 鋼八角形断面橋脚の繰り返し載荷破損後の補修と載荷実験

3.1 はじめに

鋼八角形断面は性能的には矩形断面と円形断面の中間に位置し、同じ板厚、断面積の場合、矩形断面に比べて構成要素の幅厚比が小さいため、局部座屈が生じにくく、強度増が期待できる。円形断面は曲げ加工により素材そのものの強度増がかなりあり、またシェル効果により局部座屈を生じにくい有利な断面であるが、径厚比の大きな部材ではちようちん座屈を生じ、その後の耐荷力はほとんど期待できない。また局部座屈後の補修も容易ではない。

八角形断面を橋脚に用いると部材方向に複数の光による陰影が生じ、これが錯視現象により部材を細長くスマートに見せるため、美観上優れた構造形式となる。イタリア等では谷間にかかるRC製高橋脚に多く用いられ、美しい景観デザインを提供している。よってこれを我が国で今後建設される予定の第2東名高速道他に使用すれば、耐震上、および景観上優れたものが建設される可能性がある。

本研究では地震によって損傷を受けた八角形断面鋼製橋脚モデルを補強し、その後の耐震強度変形能を明らかにする目的で行われた実験とその結果について述べる。

3.2 実験計画

実際の橋脚は、陸上輸送の問題から断面を分割し、現場でこれらをボルト結合する計画である。実験供試体で

はこれをモデル化し、材質 SS400、板厚 6mm の鋼板を 100R で折り曲げて、正八角形断面の半分をつくり、これを 2 体、高力ボルトで結合する。断面幅は 900mm、基部から載荷位置までの高さは 3500mm である。八角形断面の各辺の内側には板厚 6mm の縦リブを各 3 本設け、部材長さ方向に 450mm おきにダイアフラムをセットした。断面寸法の詳細を図-2 に示し、断面諸元を表-1 に示す。

これらの供試体の下端を固定し、上端部に水平繰返し力を加えた実験結果は文献4)に述べられている。その時の実験は、降伏変位 δy の整数倍ごとに 3 サイクルづつ変位制御で載荷し、6 ないし 7 サイクルまで達したときに、試験体下端の基部付近に局部座屈の繰返し曲げに伴う亀裂が、断面幅の約半分ほどに達した時点、または耐力の低下が著しくなった時点で実験を終了している。破損の様子を写真1に示す。今回はそのうちの 2 体を外側から鋼板を溶接することによって補強し、前回と同様の水平力繰返し載荷を行って、荷重-変位履歴曲線を求め、補強前の実験結果と比較検討する。

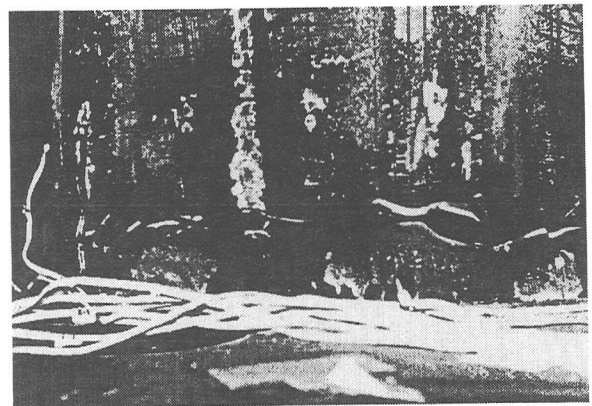


写真1 局部座屈変形状態(補強前 Type-2)

3.3 実験方法

(1) 補強方法 補強方法は、はじめに試験体下部の局部座屈を生じ、破損した部分の凸部を加熱して外からハンマーで叩き込み、平坦にした後、図-2 に示すように側方ウェブを除くフランジ側の平板部に各一枚、コーナー部に各 1 枚の 6 mm 厚リブ付き補強板 (材質 SS400) を当て、各補強板の 4 周を溶接する簡単なものである。なおリブ下端はベースプレートに溶接して固定する。

(2) 載荷方法 載荷は補強前と同じとする。すなわち鉛直力は作用させず、頭頂部に水平繰返し力を油圧サーボ式アクチュエータにより載荷する。補強前の試験体の降伏変位 δy の整数倍ごとに 3 サイクルの繰返し載荷を行う。

(3) 変位およびひずみの測定 補強板およびその上部試験体にひずみゲージを張り付け、試験体の高さ方向 5 カ所に水平変位測定用変位計を、基部 4 点に浮き上がり量測定用変位計を取り付ける。

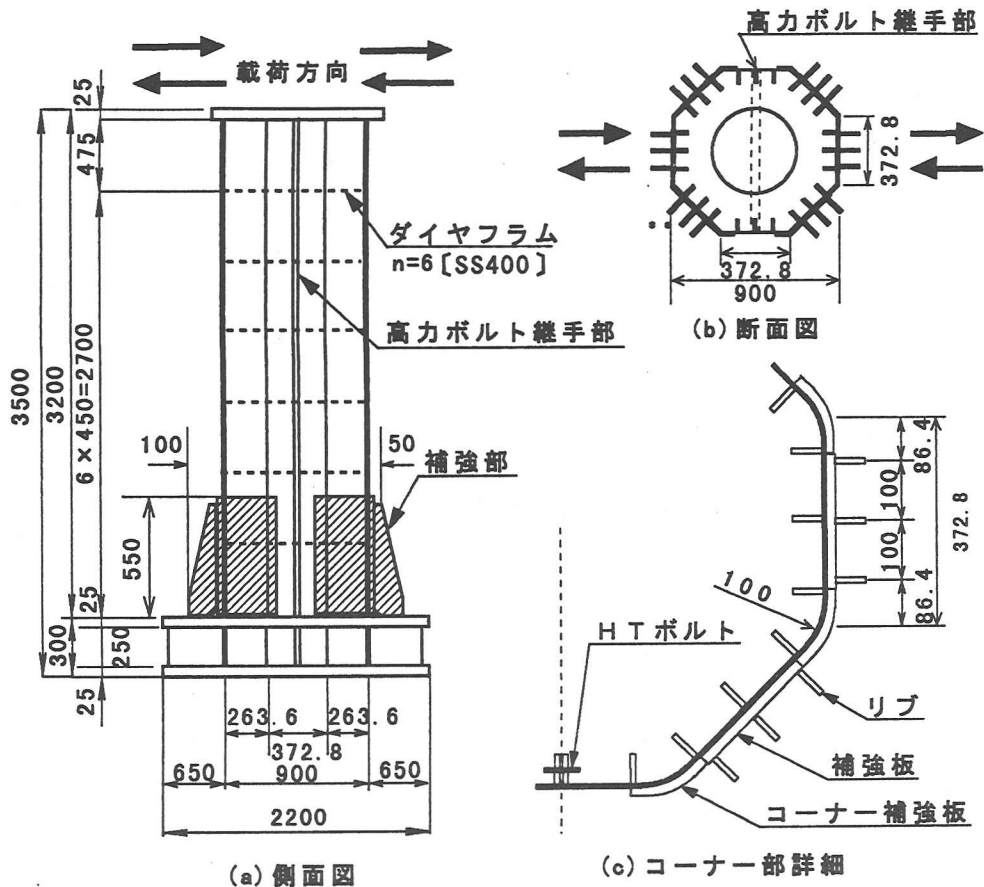


図-2 供試体寸法(Type-2)

表-1 断面諸元

断面積	A (cm ²)	272.6
断面2次モーメント	I (cm ⁴)	274300
断面係数	W (cm ³)	6136
降伏モーメント	M _v (tf·m)	147.3
降伏水平荷重	H _v (tf)	42.1
降伏水平変位	δ _v (mm)	19.36

3.4 実験結果とその考察

(1) 水平荷重—変位履歴曲線 実験により得られた水平荷重—変位履歴曲線を図-3 および図-4 に示す。同図(a)は補修前、(b)は補修後である。縦軸は水平降伏強度 $H_v = 42.1$ tf で、また横軸は対応する降伏変位 $\delta_v = 19.36$ mm で無次元化している。図の各サイクルごとの履歴曲線の包絡線を図-5 に示す。

同図および図-3、図-4 の(a),(b)の比較からわかるように、今回の補修によってほぼ補修前の荷重—変形履歴が得られたが、変形能は補修前には約 6~7 δ_v まで耐えたのに対し、補修後には約 5~6 δ_v と若干低下している。逆に最大荷重は補修後の方が補修前より Type-1 で 30%、Type-2 で 16% 上昇している。Type-1、Type-2 いずれの供試体でも 3 δ_v で外側のリブが曲がり始め、4 δ_v から補強板より上 5~25cm の部分で凹凸の明瞭な局部座屈が観察された。これを写真2 に示す。その後、試験体 Type-1 では 5 δ_v の 3 サイクル終了時あたりで

補強板の上部の局部座屈位置に割れを生じた。また Type-2 では 6 δ_v の 1 サイクル目で基部と補強板リブとの溶接部で割れを生じ、耐力が低下したため実験を終了した。

Type-2 の試験体の最大荷重は Type-1 より約 15% 低い値であった。これは Type-2 の試験体のはじめの試験終了時に基部にかなり大きな亀裂を生じており、ほぼ補強板のみで荷重を支えたのに対し、Type-1 では破損がやや少なく、元の部材と補強板の両方で荷重分担をしたためと思われる。実際の構造物でも破壊の程度は様々であるので、元の部材の破損箇所をガスでカットするなどして、

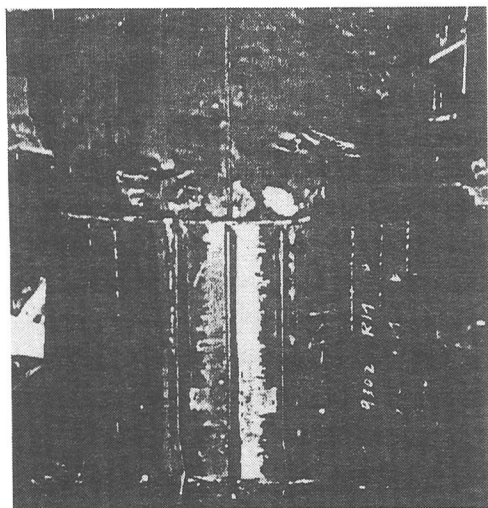
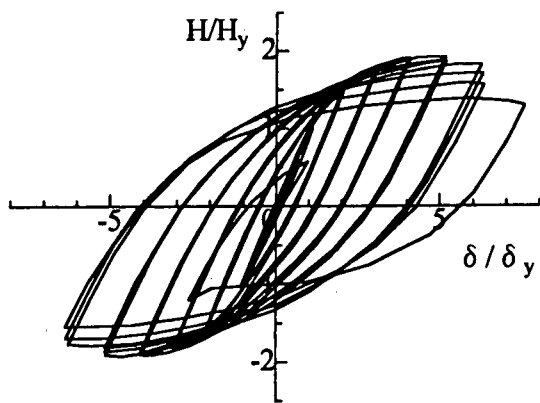
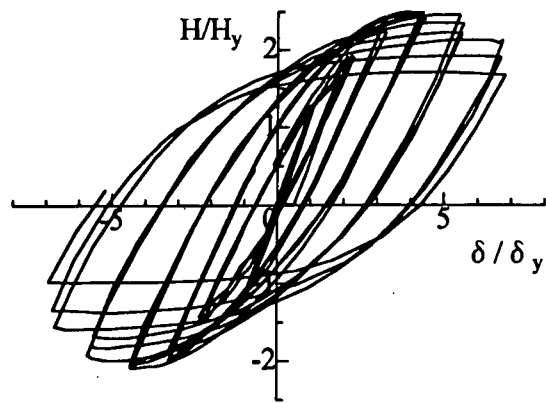


写真2 局部座屈変形状態(補修後 Type-1)

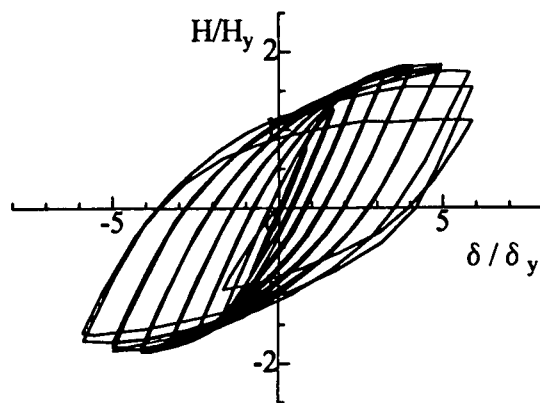


(a)補修前

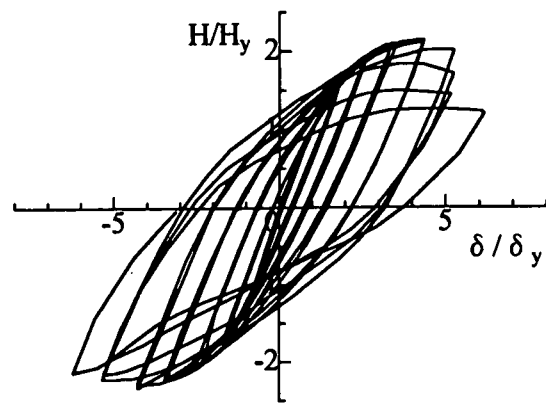


(b)補修後

図-3 水平荷重-変位履歴曲線(Type-1)



(a)補修前



(b)補修後

図-4 水平荷重-変位履歴曲線(Type-2)

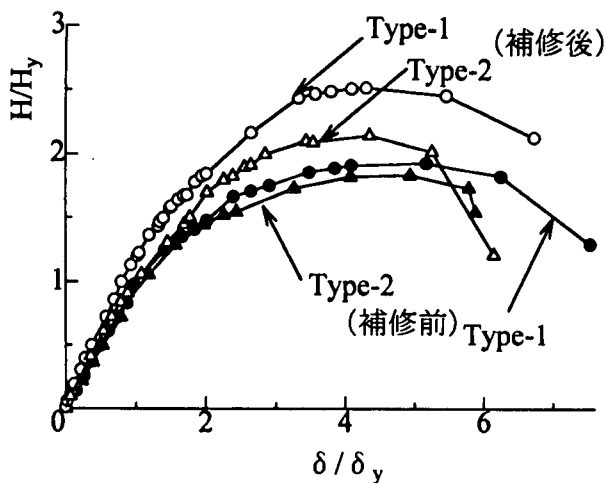


図-5 包絡線

補強による強度増を押さえ、力の流れの明確化と均質化を行う方がよいと思われる。

千年に一度程度の巨大地震が 100 年ほどの構造寿命の間に 2 度襲う確率は極めて低いと思われるが、2 度目の地震で杭などの地中構造物を破壊させないためには、余分な強度増は押さえた方がよかろう。リブをなくし、補強板の板厚を大きくするのも、強度を押さえ、変形能を大きくする別の方法かもしれない。

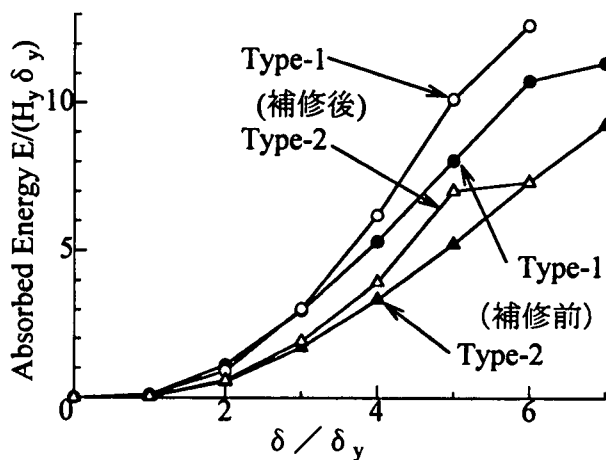


図-6 エネルギー吸収曲線

(2) エネルギー吸収性能

図-3、図-4 に示す水平荷重-変位履歴曲線の各サイクルごとのループ面積がそのサイクルでのエネルギー吸収量を示す。これを構造物の破壊と見なされる載荷点まで累積したエネルギー吸収性能を各サイクルごとに求めると図-6 のようになる。同図の縦軸は $H_y \delta_y$ で無次元化している。6 δ_y までの累積エネルギー吸収量は Type-1, Type-2 とともに補修後のほうがやや大きい。

4. 結論

阪神大震災では、都市が壊滅状態にあるときに、救助活動に用いるべき主要交通路自体が壊滅的破壊を生じた。社会活動をシステムと考えると、都市内高速道路は1ランク信頼度の高い要素として設計しなければならない。その評価基準は人命のコスト換算を含めた社会システムの損失コストの算定に基づくべきことを述べた。

地震直後では、都市内高速道路の価値は人命の救助等を考えると、特別高いはずであり、通常の例えば100倍程度と定め、それが機能しないことによる損失コストをはじかねばならない。構造物に局所的な損傷を生じた場合でも、機能できる場合や短時間に補修可能であればシステム全体の損失コストは大きくはならない。よって補修のしやすさや、完工時間が安全性評価に加味される必要がある。

地震被災後の補修の例と補修後の試験体の繰り返し載荷耐震特性を八角形断面鋼製橋脚モデルを用いて実験的に明らかにした。鋼板を溶接接着するという比較的簡単な補修工法で、はじめの部材強度特性に近い効果が

得られた。今後この種の実験データをさらに集積する必要がある。

参考文献

- 1) 青木徹彦、“機能損失に基礎をおいた鋼構造物設計法の概念”、第44回応用力学連合会、平成7年1月
- 2) 川島一彦、“兵庫県南部地震と今後の耐震設計”、特集：最近の耐震設計と施工例、土木技術、土木技術社、pp25-32,第52巻・第2号
- 3) 土木学会鋼構造委員会、“構造物の破壊時コストの明確化と設計問題における意志決定”、一阪神大震災の提起する構造物のコストと安全性の問題一、平成7年度土木学会全国大会研究討論会資料、1995年9月
- 4) 林 幸司、西澤 正博、青木 徹彦、山田 将樹、“鋼八角形断面橋脚の繰り返し載荷耐震実験”、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第1部(B)、pp.566-567、1996年

(1997年3月31日受付)

CYCLIC LOADING TESTS OF REPAIRED STEEL PIER MODELS SUSTAINED EARTHQUAKE DAMAGE AND SEISMIC DESIGN PHILOSOPHY

Tetsuhiko AOKI, Masaki YAMADA and Kouji HAYASHI

Highway structures in urban area should work effectively just at the time when earthquake occurs in order to rescue the damaged urban area. The seismic design philosophy that the safety coefficients are determined based on the minimum total cost of loss of social system is proposed. Simple and quick repair of the partially damaged structure may also be considered the important factor of the functional design. The octagonal section steel pier models that sustained seismic loading previously were simply repaired and tested again in cyclic loading. Test results showed good recovery in the load-deflection hysteric curves.