

簡易補修後鋼製ラーメン橋脚の耐震性能に関する実験的研究

Experimental study on seismic resistance capacity of simply retrofitted rigid frame steel bridge pier

鈴木 森晶*, 青木 徹彦**, 野村 和弘***
Moriaki SUZUKI, Tetsuhiko AOKI and Kazuhiro NOMURA

- * 工博 愛知工業大学講師 工学部土木工学科 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)
** 工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)
*** 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

This paper introduced a procedure of retrofit of damaged steel bridge piers. Experimental study on the seismic resistance capacity of retrofitted rigid frame steel bridge pier is presented. Before this experiment, two different purpose experiments have carried out. Then the specimen has retrofitted and cyclic loading experiment has carried out in this paper. We obtained very good seismic resistance capacity with simple retrofit.

Key Words : rigid frame steel pier, simple retrofit, seismic resistance capacity
キーワード : ラーメン橋脚, 簡易補修, 耐震性能

1. 序論

極大地震に対して十分な耐震性能を有する構造物を構築することは社会的使命であるが、同時にこれらの地震により局部的に損傷を生じた構造物に対して、極早期に補修を施し、緊急車両を通行させる必要があろう。

兵庫県南部地震で被災したRC橋脚等の補修にはクラックに樹脂注入し、鋼板を巻き立てる等の方法が採られた。鋼製橋脚に対しては支保工を設置の後、ジャッキアップし、損傷部分を切り取り交換する方法や、外側から補修リブ等を追加、またはガス加熱して座屈形状を整形するなどの方法が損傷の大小に応じて施された。また、これらの手法は理論的な裏付けがあるわけでもなく、経験と勘に頼る部分が多かった。しかし一部の橋脚は上記の方法での補修では完全な復旧とは言えず撤去後再構築を余儀なくされた。

従来、既設橋脚の耐震性能を把握するための繰返し載荷実験および新設橋脚の耐震性能向上のための実験などは数多くなされてきたが^{1)~5)}、一度損傷を生じた橋脚に対して補修を施した上で再度同様な外力を与えて実験を行った例はわずかしかない⁶⁾。

本研究では、はじめに繰返し載荷実験を行い損傷を生じたラーメン橋脚に対して、加熱整形、鋼板溶接、コンクリート充填により簡易的に補修を施した。その後、このラーメン橋脚に対して、補修前と同様の繰返し載荷実験を行いその耐震性能について検討した。なお、本研究で対象としている補修方法も完全な復旧ではなく、仮復旧の段階での耐震性能について述べたものである。

2. 試験体概要

2.1 実験履歴

本研究で使用した試験体は文献 2) および文献 7) で実施されたラーメン橋脚の繰返し載荷実験と同一の試験体を用いて行った。今回の簡易補修後の実験を行うまでに、以下の図-1のフローチャートに示す経緯をたどっている。また、この試験体断面諸元を表-1に示す。

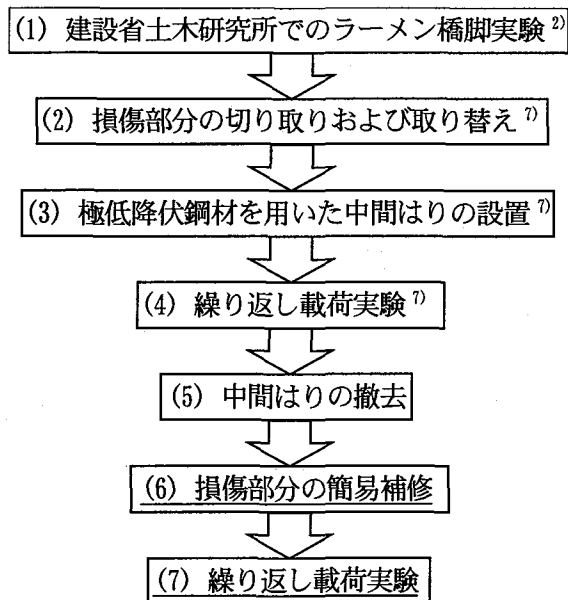


図-1 試験体使用履歴

図- 1の(1)は大型鋼製ラーメン橋脚を用いた繰返し載荷実験(文献 2) 参照)であり、(2)~(4)はこの実験で損傷の大きかった部位を断面ごと切断し、同一材質、同一板厚の新材に取り替え(図- 2(a)参照)、さらに極低降伏鋼ウェブを持つ中間はりを取り付けて、同様の載荷実験を行ったものである(図- 2(b)参照)。実験の詳細は文献 7) に示されている。

本研究では、前実験で行ったような損傷部分を輪切りにして丸ごと取り替えるのではなく、実構造物が震災直後に短時間で現場補修される状況を想定して、できるだけ簡便に補修するということを目指している。また、激震時の橋脚には一般に大きな残留変位が生じるが、ラーメンではフレーム面内に斜材を入れジャッキ等で押し戻すことや、単柱では外部から斜材を当てる等で一旦もとの位置に戻す必要がある。本研究ではそのような処置をした後の補強を対象としている。

表- 1 試験体断面諸元²⁾

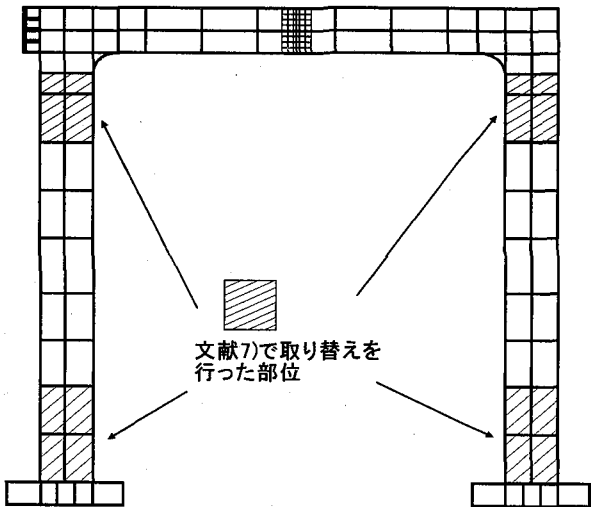
	柱	梁
外形寸法(mm)	600×600	600×600
板厚(mm)	Flg :6 Web :6	Flg :8 Web :6
幅厚比パラメータ R_R	0.49	Flg :0.50 Web :0.49
幅厚比パラメータ R_F	0.38	Flg :0.29 Web :0.38
断面2次モーメント(cm^4)	102,200	123,700
補修鋼板板厚(mm)	6	6
山形鋼寸法(mm)	6×65×65	—

2.2 試験体の損傷状況

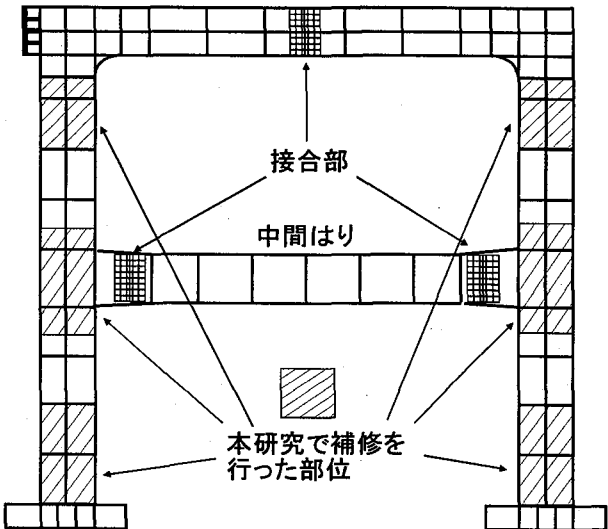
中間はりを付した2回目の実験では、 $7\delta y$ までの繰返し載荷実験を行って実験を終了した。損傷が最も激しかったところは、左側の柱の基部外側フランジで、フランジ全体が外側に全体座屈変形を生じており、変形量はフランジ幅のおおよそ1/10程度(60~70mm)に達していた。その他の箇所は柱の上、下部で目立った局部座屈が見られ、中間はり取り付け部付近の柱中央部にもわずかな局部座屈変形が観察された。また柱基部のフランジ下端には大きな亀裂が見られた。このレベルの損傷は実構造物では極大地震によるものであり、重大な損傷レベルといえる。

3. 簡易補修方法

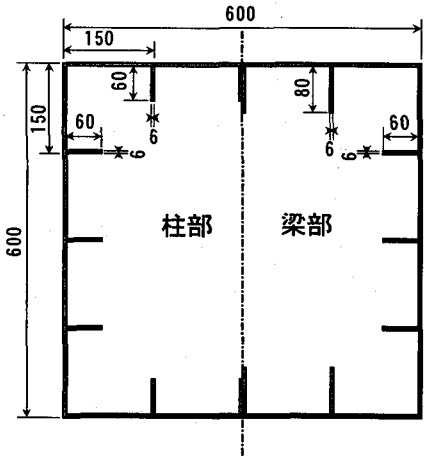
兵庫県南部地震では多くの高速道路橋脚が被災したが、仮復旧のためにとられた補修方法は、鋼製橋脚の場合、損傷の大小によって以下の方法などが施された。



(a) 文献 2) で使用した試験体



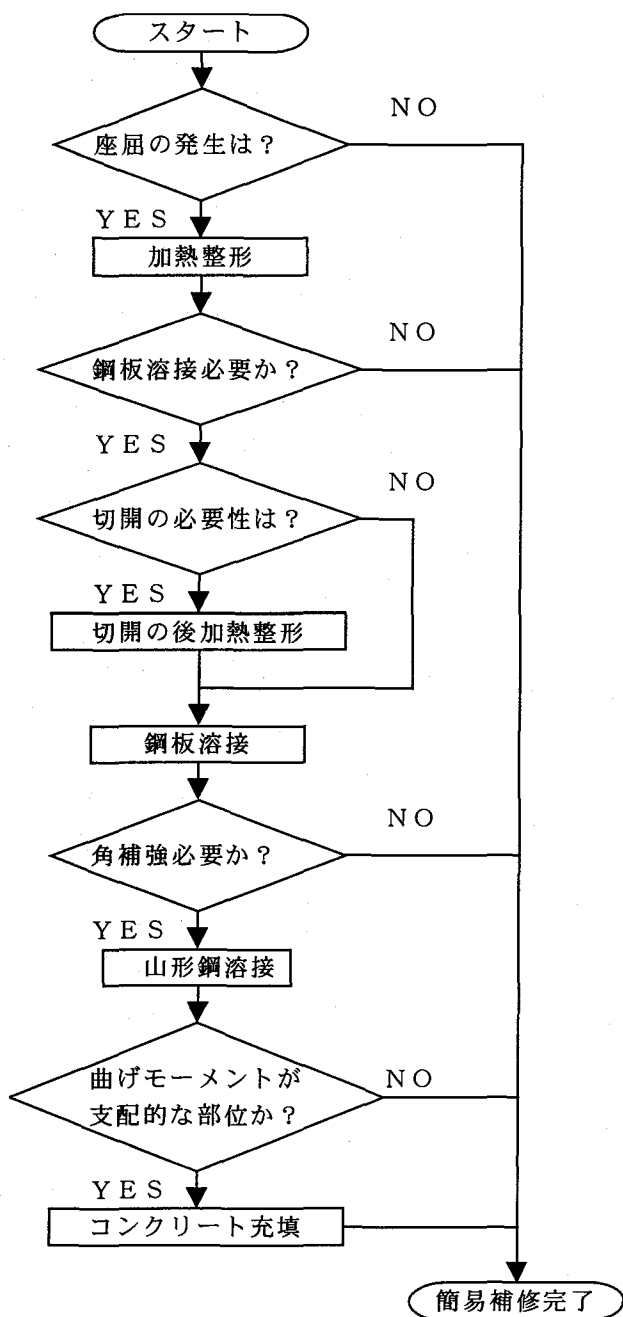
(b) 文献 7) で使用した試験体



(c) 断面形状略図(単位 mm)

図- 2 試験体概略形状

- (a) 損傷部分を切り取り交換する
- (b) 外側から補修リブ等を追加する
- (c) ガス加熱して座屈形状を整形する
- (d) 撤去後再構築



図－ 3 簡易補修のフローチャート

しかし一部の橋脚はその後に撤去、再構築された。これは2次災害を防止する緊急的なものが多く、また仮復旧後の強度が不明確であったこと、さらに美観上問題となるものが多かったことによると考えられる。

本研究では、震災直後の救急車両や、復旧車両の通行を可能にするため早期の補修を目的として、激しい損傷を受けた試験体の簡易補修を試みる。

以下に図－ 3に示したフローチャートに従って行った補修方法の詳細を述べる。

- ① 軽微な局部座屈が発生した部位等は何も補修をせず放置する。ただし、ここで言う軽微な局部座屈とは補剛材間でのフランジパネルの凹凸が発生する

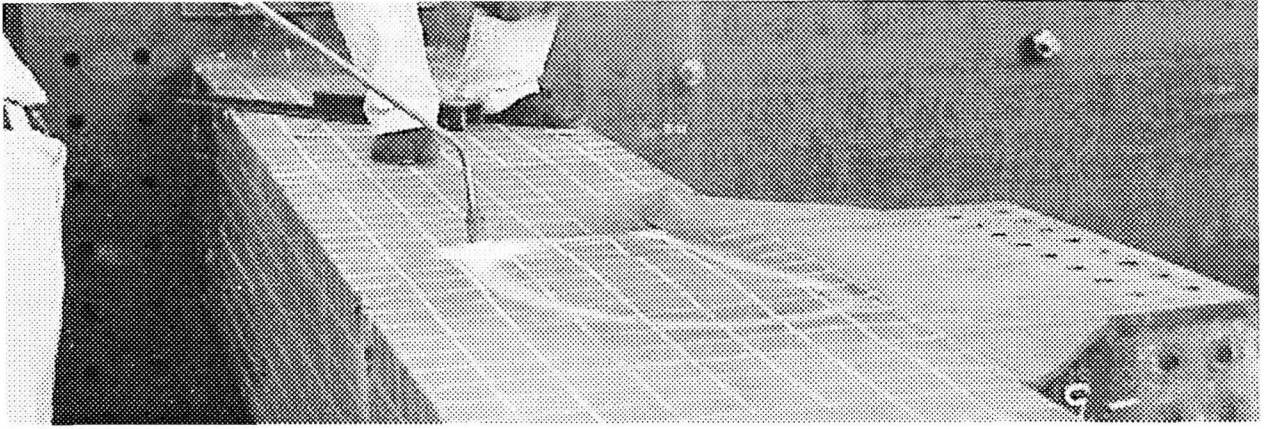
レベルの変形状態をさし、目視により確認出来る限界程度のことである。実際には凹凸の頂点が1～2mm程度、つまり補剛材間隔の1/100程度以上変形がある場合を意味する。言い換えると、補剛材そのものは部分的に塑性化はしているものの、座屈変形を生じておらず補剛材そのものの耐力は最大値付近で健全であると判断される場合である。

- ② 上記以外の目視により容易に局部座屈確認できる箇所は加熱整形を行った。実際の補修では加熱整形を行った部位は、補剛材にも若干の座屈が生じていると判断されたため後述する鋼板溶接を行った。
- ③ 加熱整形とは図－ 4(a)に示すように、ガスバーナで座屈部分を加熱し、ジャッキやハンマーを使用し膨らんだ座屈形状を元の状態に戻す作業のことを言う。今回は座屈が発生した全ての部位に対して加熱整形を施した。
- ④ 鋼板を溶接するか否かは局部座屈の進展程度および加熱整形の際に、母材をどの程度傷めたかによって強度低下が予想されると判断できる部分に施した。また、鋼板は母材と同一材質、同一板厚のものを外側から当て、外周をすみ肉溶接した(図－ 4(b)参照)。
- ⑤ 切開とは局部座屈によるフランジおよびウェブの変形が著しいものについて、加熱整形だけでは座屈形状を修正しきれない場合に、図－ 4(c)に示すようにフランジ面を一字または十字に切開し、ガス加熱の後ジャッキやハンマーを使用し、押し込む方法である(図－ 5参照)。
- ⑥ 角補強は、母材およびフランジとウェブの角溶接部分に亀裂などが見られた場合に行った。これは鋼板を外側から溶接するだけでは、十分な角部分の強度が得られないと判断される場合に行った。
- ⑦ コンクリートを充填するか否かは補修後の実験において損傷部位に大きな曲げモーメント等が作用する可能性の有無を判断基準とした。今回の補修ではラーメン橋脚基部がその部位に相当する。
- ⑧ 補修に際してかかった所要時間は2人で8時間程度であった。

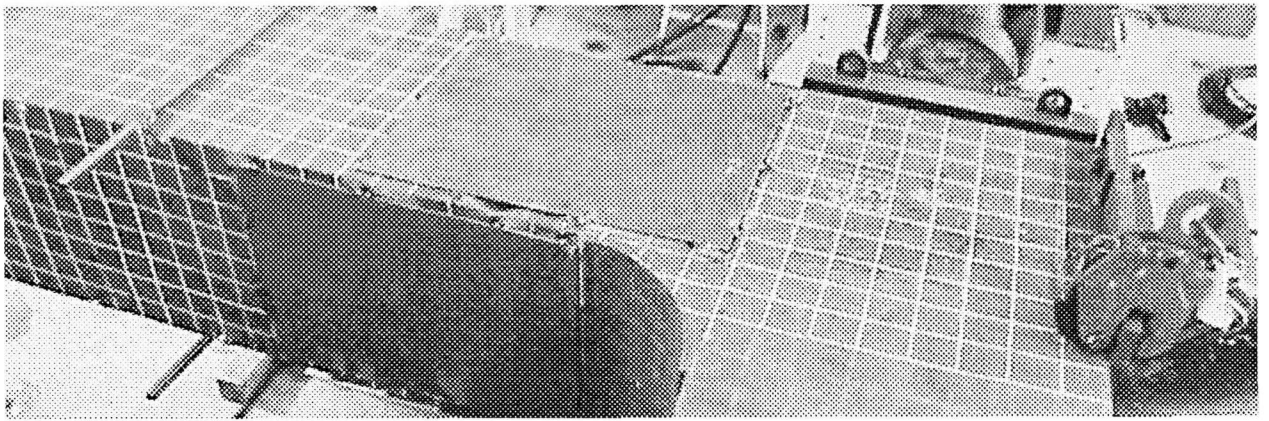
以上の手順により、今回の試験体に対して行った補修事例を図－ 6に示す。図－ 2(b)中の斜線部分が簡易補修を施した部分である。

隅角部付近の斜線部は、幅10cm程度の局部座屈変形が見られた。加熱整形後、鋼板を当て、4周をすみ肉溶接している。

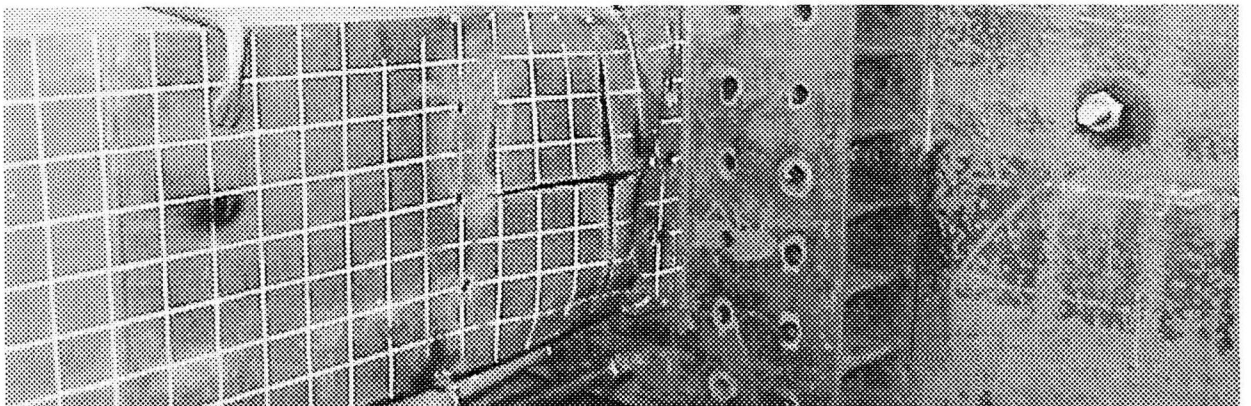
前回の試験で中間はりが設置してあった場所付近では、局部的に高さ数mm程度の座屈変形が発生し、僅かな割れも見られた。この部分も隅角部と同様、加熱整形後、鋼板溶接した。中間はりを取り除いた1層ラーメンでは、柱の中間はり取り付け部分は水平荷重によるモーメントがほぼ0となるためであり、今回の実験では問題とならない箇所である。



(a) 加熱整形（中間はり付近）



(b) 鋼板溶接（隅角部付近）



(d) 座屈部分の切開（ラーメン橋脚基部付近）

図- 4 補修作業状況

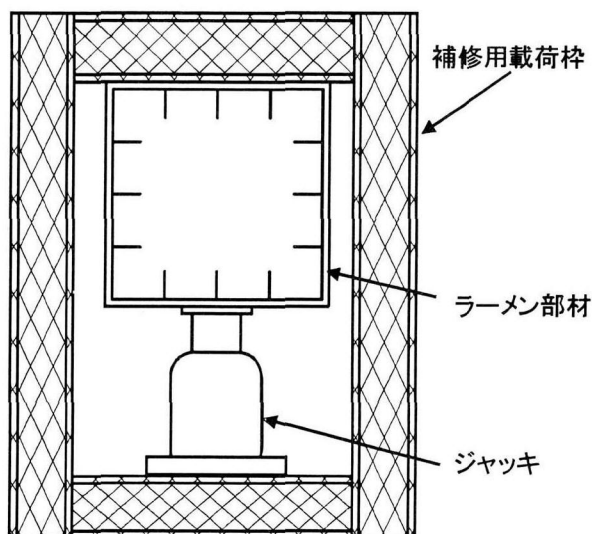


図-5 補修用載荷枠による補修方法概念図

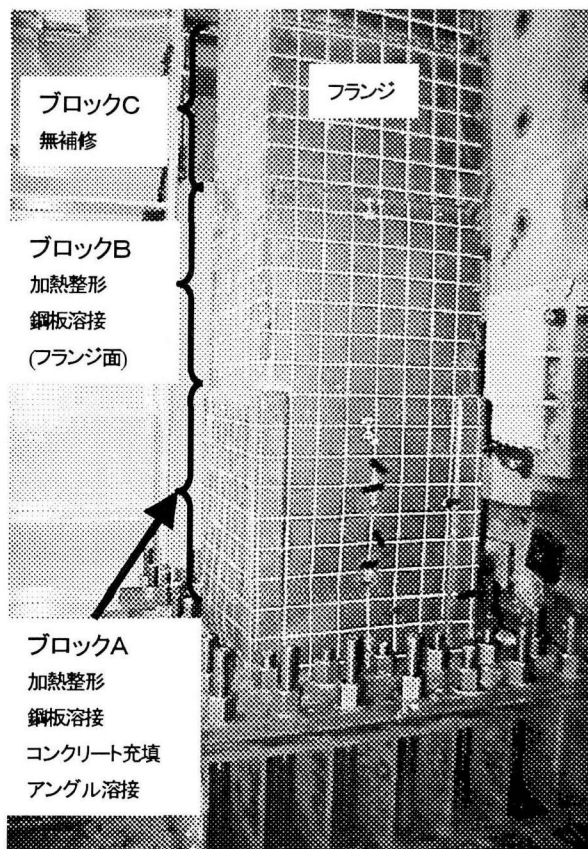
橋脚基部は、前回の実験（文献7）参照）で破壊損傷が最も大きくなっていた部分であり、左柱の外側フランジ板を十文字にガスカット後、ジャッキを用いて押し込んだ。鋼板は、ダイヤフラム間を1パネルとすると、フランジ側で基部から2パネル分、ウェブ側で1パネル分の長さとし、基部のアンカプレートとはすべて完全溶け込み溶接接合し、柱部にはすみ肉溶接した。鋼板の最後の1枚（ウェブパネル）を溶接する前に、基部から1パネル分の区間にコンクリートを充填した。コンクリートの圧縮強度は 225 kgf/cm^2 (22.1 MPa) である。さらに4隅に角補強として山形鋼 ($6 \times 65 \times 65 \text{ mm}$) を1パネル分の長さ溶接した。

補強後の様子を図-6(a), (b)に示す。写真からもわかるように、補修後の仕上がりは大変きれいで、仮復旧とはいえ、景観上は長期の使用状態に十分耐えられるものである。

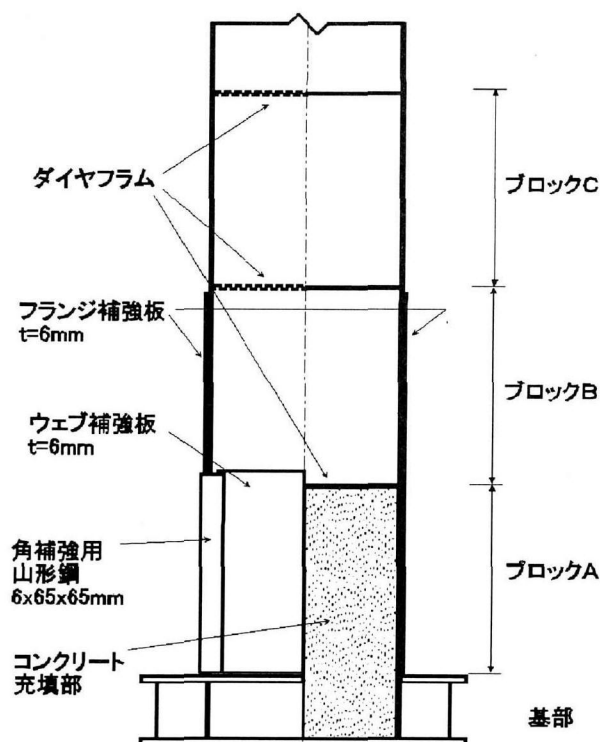
今回補強鋼板に外リブを付かなかった理由は、文献6)でコンクリート充填はないものの、八角形断面単柱に対して今回と同様の補修後実験を行ったところ、強度の過剰増加と変形能の減少が見られ、補強板の強度が過剰と考えられたためである。

4. 簡易補修ラーメン橋脚の繰返し載荷実験

載荷装置は文献7)と全く同様であり、詳細は省略する。図-7に示すように、上部工重量を想定した一定軸力 $0.15N_y = 1310 \text{ kN}$ (N_y : 降伏軸力) を 2000 kN 油圧ジャッキにより載荷した後に、地震力を想定した水平力を 4000 kN 油圧ジャッキにより繰返し載荷した。載荷方法も文献2)および文献7)と同じであり、水平載荷は変位制御で行い（図-8参照）、降伏変位の整数倍の振幅を順次増加させて載荷した。各振幅における繰返し回数は文献2)と同様1回とした。



(a) 補修後形状



(b) 補修方法模式図

図-6 ラーメン橋脚基部補修事例

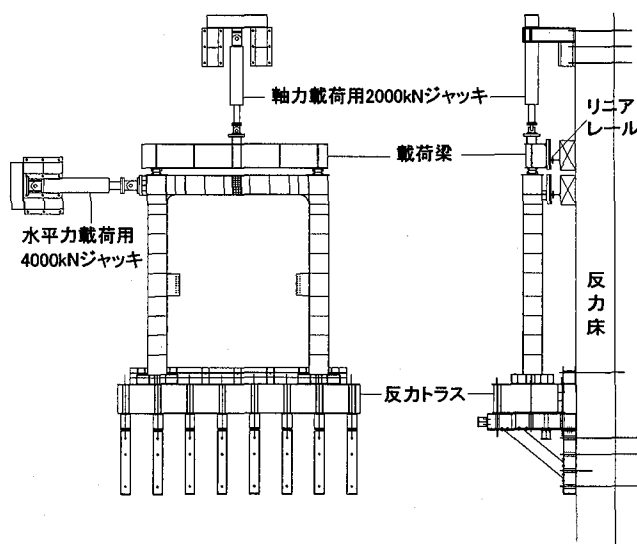


図-7 載荷装置概念図

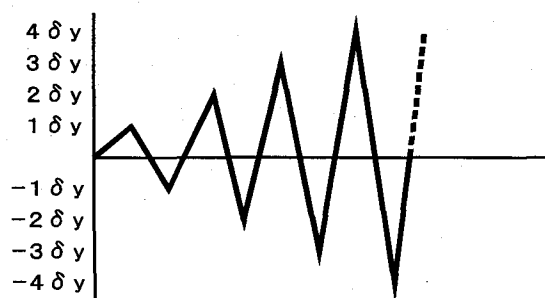


図-8 載荷概念図

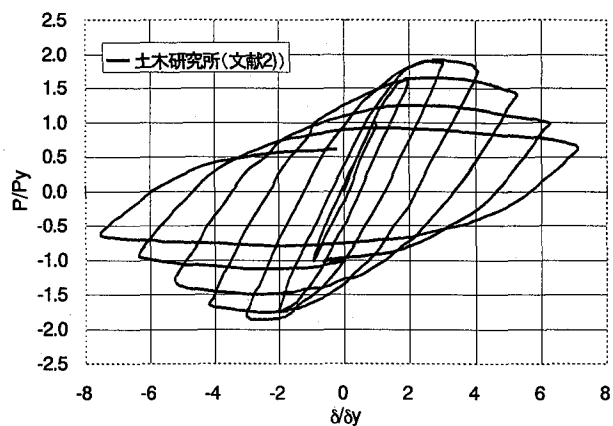
5. 簡易補修後耐震性能実験結果とその考察

簡易補修後の荷重-変位復元力履歴を図-9に、各サイクルでのエネルギー吸収量を図-10に示す。また、実験終了時の座屈および座屈形態を図-11に示す。

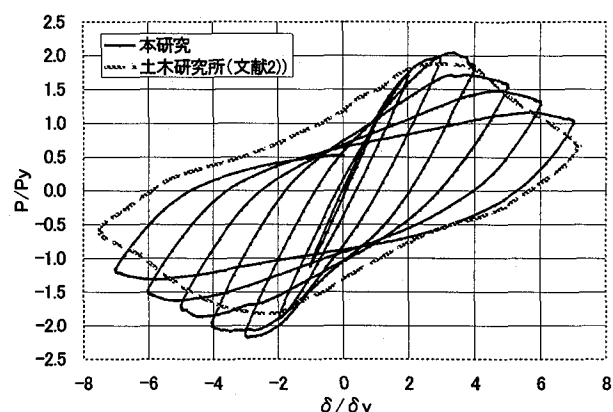
(1) 荷重-変位履歴曲線

ラーメン橋脚頂部の水平荷重-水平変位履歴曲線を図-9(a), (b)に示す。図中 P_y は降伏水平荷重である。同図(a)は文献2)によるものとのラーメン試験体によるもので、同図(b)は今回の実験結果である。図中破線で示した曲線は図-9(a)の履歴曲線の包絡線である。今回の試験体の最大強度は引き側が押し側より約4%大きく、また文献2)のものとの試験体に対して平均16%高い値を示した。

図-9(a), (b)の両実験結果の比較より、簡易補修後の今回の試験体は、最大荷重後の伸び能力が旧試験体より若干大きく、極めて大きな損傷を受けた構造には予想以上の好成績を示した。しかしながら、荷重反転後の荷重上昇は逆に旧試験体より低下し、包絡線には中央部で若干のくびれが現れている。



(a) 文献2)の荷重-変位関係



(b) 本研究の荷重-変位関係

図-9 荷重-変位関係

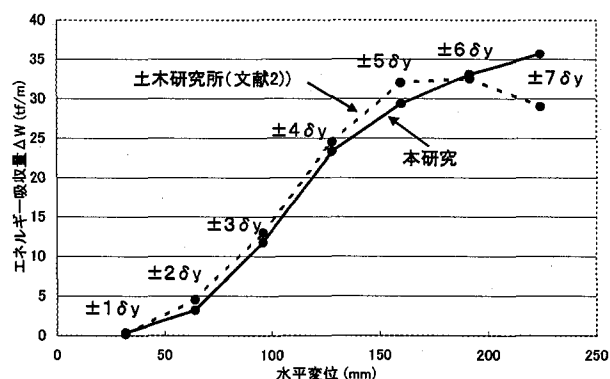


図-10 各サイクルにおけるエネルギー吸収量

原因としては、補修の際に内部にコンクリートを充填したことにより、鉄筋コンクリートと同様の挙動を示したと考えられる。また、一旦鋼材が降伏し、局部座屈等が発生すると、引張および圧縮に対する抵抗力は大幅に減少するが、復元力履歴などから新品時の30%~50%の残存耐力があると仮定した。そして、これに鋼板を溶接して損傷部分を補修する事により、ほぼ100%に回復すると仮定した。ただし、これは最高荷重が発生するまでの仮定で、それ以後はバウシinger効果などの影響などにより、耐力の低下が促進されたと考えられる。

(2) エネルギー吸収量

各サイクル毎のエネルギー吸収量を図-10に示す。図中の破線は前と同様、旧試験体の結果である。旧試験体では、 $5 \sim 6 \delta y$ 以降の荷重低下が急であったために、エネルギー吸収量の増加が頭打ちから低下しているのに対し、実線で示す補修後試験体では、エネルギー吸収量が $6 \delta y$ 以降もさらに増加している。 $5 \delta y$ で今回の実験の荷重が低下しているのは、図-9(b)における履歴曲線の腰の部分でくびれが見られるためである。

(3) 載荷試験後の破損状況

載荷試験後の破損状況を図-11に示す。外側から観察される局部座屈の発生は、柱上部（隅角部直下）および柱下部のモーメント最大位置で集中的に生じることなく、わずかな局部座屈変形が柱上部および図-6の柱部の3つのブロックすべてにわたってほぼ均等に発生していた。

(4) 簡易補修方法の考察

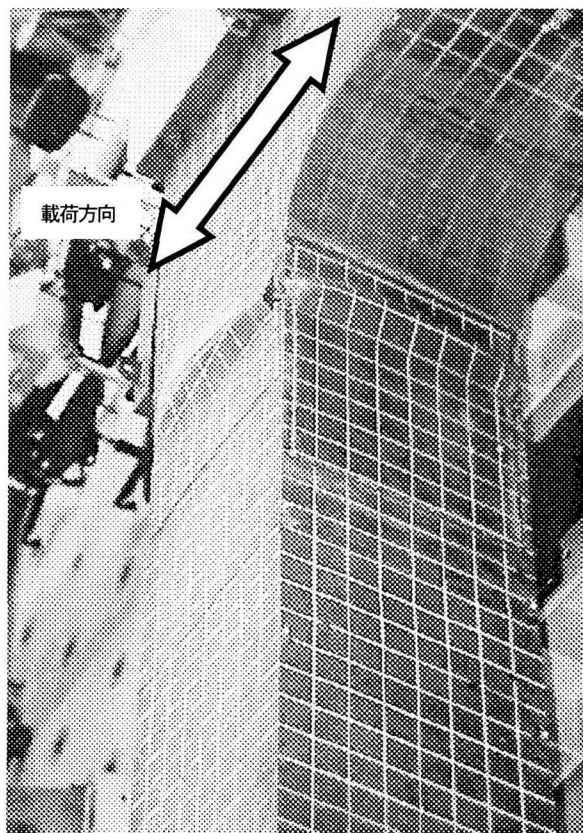
今回の簡易補修によって荷重-履歴曲線およびエネルギー吸収量において補修後試験体で優れた結果が得られたが、この要因は次のとおりである。補修方法が、図-6に示すモーメントの最も大きい柱基部ブロックAが補強鋼板溶接、コンクリート充填および山形鋼溶接、第2ブロックBがあまり損傷のないもとの鋼板に補強鋼板溶接、第3ブロックCはもとの無損傷部材となっており、作用モーメントに対して断面の抵抗モーメントが均等に配置され、モーメント勾配に応じたバランスのよい変断面構造が形成されたためであると考えられる。

損傷の最も著しい柱基部における力の伝達のメカニズムは、補修前の損傷後残存耐力が前述のように最大荷重の30~50%あると仮定し、残りの作用力のうち、圧縮力はコンクリートが受け持ち、引張り力をリブのない補強鋼板が受け持ったと想定される。したがって亀裂や大きな座屈変形を生じた箇所では、コンクリート充填による補強が望ましい。これによりリブ無し鋼板が使用でき、補修後も永久構造物としての使用が可能となる。

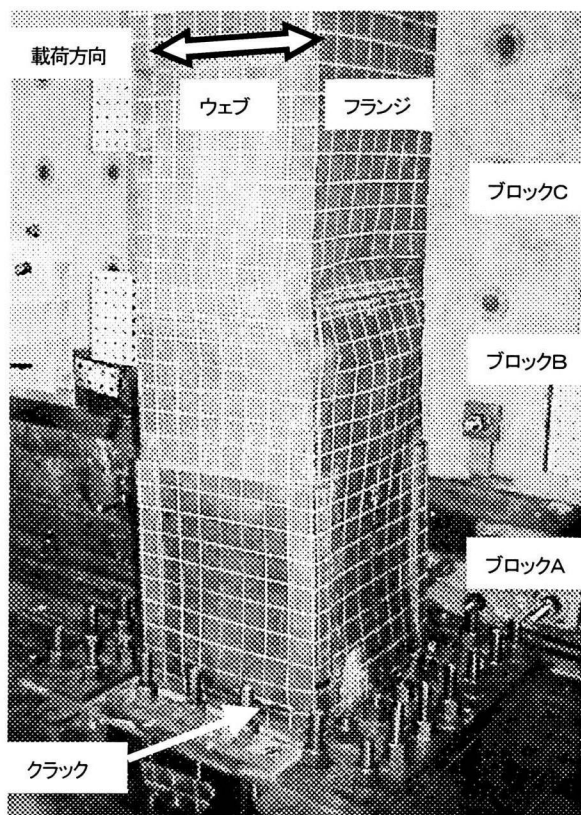
6. 結論

大都市が震災を受けたとき、高架高速道路の早期復旧は、人命および都市機能の早期復旧のために極めて重要な要件である。

本研究は、巨大地震を受けた後の鋼製ラーメン橋脚の復旧を想定し、載荷実験後の試験体を利用して、その補修方法の検討と再度の繰り返し載荷実験を行い、地震耐力の確認を行ったものである。本研究により得られた結論は以下のようにまとめられる。



(a) 隅角部付近の座屈



(b) 橋脚基部付近の座屈

図-11 実験終了後の損傷状況

- (1) 載荷実験後の損傷した試験体の補修は以下のように行った。局部座屈し、凸状態となった箇所をガスで加熱、ハンマーでたたいた。補剛板全体の变形が大きく凸状態となったところは、パネルを十文字にガスカット後、押さえ込んだ。ハンマーが研削かないところはジャッキで押した。凸部をなくした後、基部2パネル（ウェブは1パネル）分を鋼板溶接し、基部1パネル分にコンクリートを充填した。
- (2) 今回の補修作業に要した時間は、作業員2人で正味延べ約8時間であった。実構造物では板厚が一般に22mm程度以上で、加熱しにくく、またハンマーで凸部をたたいて凹ませることは困難と考えられるため、今回実験で用いたような載荷枠とジャッキを用いて整形するとよいと思われる（図-5参照）。
- (3) 早期の簡易補修では一般に美観に配慮して行っていない。今回の補修後の試験体は鋼板溶接のため、若干の膨らみを感じられるものの、仕上がりがきれいで、一見すると補修後とは思われないものであった。この種の補修を行えば、早期の簡易補修といえども外観上、長期間、実用に十分耐えうるものである。外リブがないことも美観をよくした一因であろう。
- (4) 荷重-変形履歴曲線をもとの試験体と比較すると、強度は約16%上昇し、 $6\delta y$ 以降の変形能も向上した（図-9(b)）。エネルギー吸収量も $6\delta y$ 以降の低下はなく、さらに上昇傾向を示した（図-10）。しかし荷重の再上昇過程では、もとの試験体より荷重の増加量が少なく、荷重-変形履歴の包絡線には中央部で若干のくびれが現れた。
- (5) 簡易補修試験体を $7\delta y$ まで繰り返し載荷試験した後の破損状況は、もとの試験体に見られるような柱上、下部で集中的な局部座屈が現れることはなく、柱上部および基部から3パネル分がほぼ一様に軽微に局部座屈変形していた。また最下部の溶接補強鋼板に割れが生じていた。
- (6) 今回のような簡易補修によっても、もとの試験体と同等またはそれ以上の耐震性能が得られた理由は、柱基部から上部にかけてのモーメント勾配に応じて、パネル間毎に段階的な強度を持つバランスのとれた補強がなされたことによると思われる。これにより塑性変形が部材の長い区間で分担され、構造全体のエネルギーが吸収された。補強鋼板には母材と同程度の厚さを用いればよく、また外リブは不要と思われる。
- (7) 亀裂や座屈変形の著しい損傷部位にはコンクリート充填させる補強が望ましい。コンクリートに圧縮力を持たせることにより、補強鋼板には引っ張り力のみを分担させることができ、リブ無し鋼板が使用できる。外にリブがないことは美観に優れ、断面寸法の増加を防ぐことができる。また強度、変形能が保証できれば、美観上永久構造物としての使用も可能となる。

なお、実験は愛知工業大学 耐震実験センター（ハイテク・リサーチ・センター）にて行った。

謝辞

今回の実験試験体は日本橋梁建設協会と愛知工業大学との共同研究「中間はりを有する鋼ラーメン橋脚の変形性能」の耐震実験後（文献7）の試験体を頂いたものである。補強方法について名古屋高速道路公社工務部前野裕文氏の助言を受けた。実験には本学土木工学科構造研究室の多数の学生に協力してもらった。ここにこれらの方々に対して深く感謝するものである。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，1996. 7.
- 2) 西川和廣，村越潤，高橋実，岡本隆，池田茂，森下泰光：鋼製ラーメン橋脚の耐力と変形性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 235-244，1999. 3.
- 3) 宇佐美勉，戸谷和彦，鈴木森晶，是津文章：繰り返し荷重を受ける鋼製門形ラーメンの強度と変形性能に関するパイロット実験，構造工学論文集，Vol. 41A，pp. 289-300，1995. 3.
- 4) 酒造敏廣，事口寿男：鋼製ラーメン隅角部の崩壊性状と変形性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 121-134，1991. 3.
- 5) 宇佐美勉，垣内辰雄，水野克彦：鋼ラーメン構造物の合理的設計式の一提案，土木学会論文集，No. 404/I-11，pp. 331-340. 1989. 4.
- 6) 青木徹彦，山田将樹，林幸司：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，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，土木学会・構造工学委員会，pp. 101-106，1997. 3.
- 7) 森下泰光，高久達将，青木徹彦，福本秀士，岡本隆，松井鋭一：中間はりを有する鋼ラーメン橋脚の変形性能，構造工学論文集，Vol. 46A 投稿中

（1999年9月17日受付）