

論文

[1224] RC橋脚の震害損傷度と補修後の復元力特性との関係

正会員 ○横井克則 (徳島大学大学院)
 正会員 水口裕之 (徳島大学工業短期大学部)
 正会員 島 弘 (徳島大学工学部)
 正会員 秋 林鎬 (徳島大学大学院)

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚 (以下、RC橋脚と呼ぶ) が地震によって損傷を受けた場合、復旧物資運搬などの必要性から、早期の復旧が望まれる。また、損傷が軽微なものに対しては、再建設することに比した経済性の面から、補修が行われる。そのため、道路震災対策便覧¹⁾では、軽微な損傷に対してエポキシ樹脂による補修を指示している。これは、エポキシ樹脂が接着性に優れ硬化時に収縮しないこと、耐久性や防水性等の性能が優れていること、さらに構造部材の耐力や変形性能の回復も十分期待できることなどの理由によるものである。

エポキシ樹脂によって補修されたRC橋脚の性能回復については、これまでにいくつかの研究^{2), 3)}がなされているが、まだ多くの問題点が残っている。その1つに、補修後の復元力特性を明らかにすることがある。著者らは⁴⁾、1次地震による損傷度が補修後の復元力特性におよぼす影響を実験的に調査し、補修後の復元力特性の違いを示す良い損傷度指標は、1次地震における塑性率 μ ($\mu = \delta_{max} / \delta_y$:ここで、 δ_{max} =最大応答変位、 δ_y =降伏変位)であることを示し、塑性率をパラメータとした劣化復元力モデルを提案した。しかし、この実験は実地震波形を用いているため、補修前後の復元力特性を明確に比較するには困難がある。また、RC橋脚の復元力特性に影響する要因には、①せん断支間比、②主鉄筋比、③帯鉄筋比、④軸方向応力度などがあるが、これらが与える影響についても考慮されていない。

そこで本研究では、曲げ破壊型を対象とし、エポキシ補修によるRC橋脚の復旧の可否を判定する資料を得るために、1次地震における損傷度と補修後の復元力特性との関係を実験的に調べた。また、供試体の主鉄筋比を3種に変え、主鉄筋比の違いが、この関係に及ぼす影響を調べた。載荷方法は地震に対する正確な荷重変位曲線を得るために動的載荷とし、入力波形は増幅波を用いた。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は単一柱式RC橋脚の模型とした。供試体寸法および使用材料は、模型の実物に対する縮尺率を約1/8とし、相似

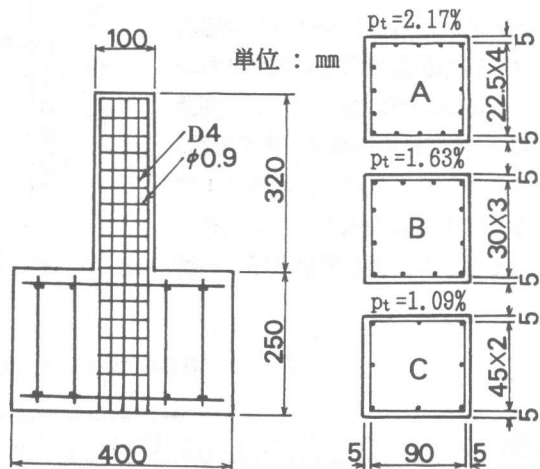


図-1 供試体

則および寸法効果を考慮して決定した。その断面形状および寸法を図-1に示す。主鉄筋比は、実物のRC橋脚で一般的である3種類とし、2.17% (Aシリーズ、7体作成)、1.63% (Bシリーズ、3体)、1.09% (Cシリーズ、6体)とした。帯鉄筋比は0.049%、せん断スパン比は4.00とした。

鉄筋としては、主鉄筋にD4の異形棒鋼 (降伏強度=377MPa、引張強度=524MPa)、帯鉄筋に直径0.9mmの鉄線 (引張強度=395MPa)を用いた。コンクリートとしては、骨材の最大寸法が2.5mmのモルタルを用いた。コンクリート強度は、各供試体とも37~40MPaの範囲内とした。

柱頭部には合計1000kgfの荷重がかかるように重錘を取り付け、軸応力は0.98MPaとした。

2.2 荷重方法および測定項目

荷重は、図-2で示すように振動台に取付けた供試体頭部に重錘を載せ、この頭部をアクチュエータに接続して固定し、振動台で入力して行なった。振動台への入力波は、供試体躯体下端部の引張側の主鉄筋が降伏するときの天端変位 (= δy : 降伏変位) を基準として、図-3に示すように、順次、変位振幅がその整数倍に増加するすなわち $m \delta y$ ($m=1, 2, 3, \dots$) となるような正弦波の増幅波を用いた。降伏変位は、鉄筋降伏時の躯体変位とフーチングからの主鉄筋の引抜けによる変位をそれぞれ計算で求め、その和とした。

1次地震による損傷度は、曲げひび割れのみからコンクリート剝離および鉄筋座屈まで広く変化させた。このため m の値は表-1に示す範囲に変え、補修後の再荷重 (再来地震) では、各シリーズの1次荷重 (1次地震) での最大の m より少し大きい値までとした。同じ変位振幅での繰

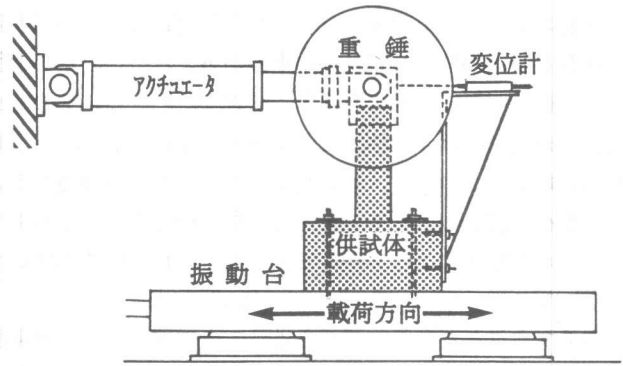


図-2 実験装置

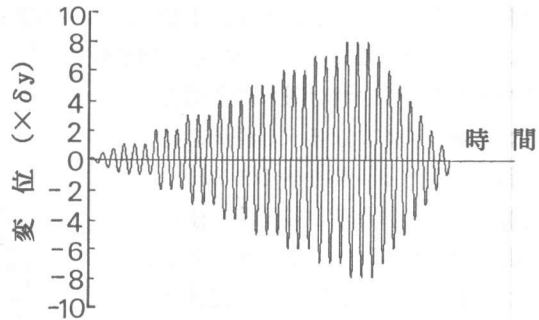


図-3 入力波形 (最大変位が $8 \delta y$ の場合)

表-1 各供試体への入力レベル ($m \times \delta y$)

| シリーズ名 | A | | | | | | | B | | | C | | | | | |
|---------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 供試体番号 | A-1 | A-2 | A-3 | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | B-1 | B-2 | B-3 | C-1 | C-2 | C-3 | C-4 | C-5 | C-6 |
| 主鉄筋比 (pt) | 2.17% | | | | | | | 1.63% | | | 1.09% | | | | | |
| 降伏変位 (δy) | 1.5mm | | | | | | | 1.3mm | | | 1.0mm | | | | | |
| 1次地震 (m) | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 4 | 6 | 8 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 10 |
| 再来地震 (m) | 10 | | | | | | | 10 | | | 12 | | | | | |

り返し回数は3回とし、1 δy までは漸増波を入力した。また、最大変位入力後は、供試体に残留変形を残さないように、振動台の変位が0になるまでmの値を順に小さくした（図-3参照）。

載荷速度は、実物と模型供試体との絶対応答加速度がほぼ同じになるように決定した。なお、絶対応答加速度は、実物および模型供試体の固有周期から求め⁵⁾、Aシリーズのm=8の場合で最大約400galとした。

測定項目としては、図-2のように取付けた摺動型変位計を用いた供試体天端の応答変位およびアクチュエータで測定した荷重とし、加震開始から連続的にデジタルデータレコーダに収録した。また、載荷中の供試体の状況を2方向からビデオで記録した。

1次地震における損傷状況の一例として、Aシリーズのものを図-4に示す。1次地震によって損傷させた供試体は、専門家に依頼して補修した。補修方法は、まず、かぶりコンクリートの剝離による断面欠損部をパテ状エポキシ樹脂接着剤で補修した。その後、すべてのひび割れにグラウト材として液状エポキシ樹脂接着剤を圧入するものとした。また、主鉄筋が座屈して断面からはみ出した場合は、これらの鉄筋を断面内まで入れた後この作業を行なった。用いた2種のエポキシ樹脂は、それぞれ圧縮強度が約80MPa、引張強度が約35MPa、圧縮弾性係数が約3GPaのものとした。

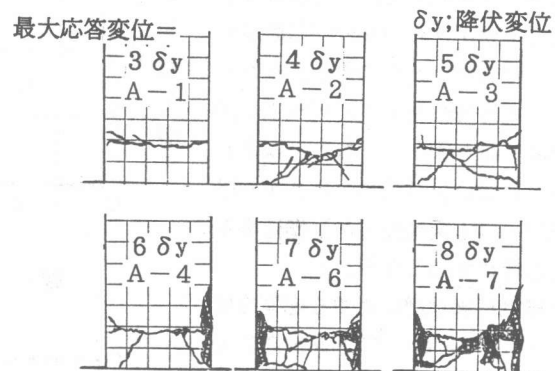


図-4 供試体の損傷状況（Aシリーズ）

3. 実験結果および考察

3.1 補修前後の復元力特性の比較

(1) 復元力パラメータ

補修前後の復元力特性の違いは、次の4つのパラメータで検討した。復元力特性を表すパラメータとしては、①最大耐力比、②エネルギー吸収能、③剛性、④靱性を用いた。各パラメータを求めた荷重変位曲線は、荷重および変位の測定値をフーリエスペクトル解析を用いて、電気的ノイズなどの雑音をカットしたものを使用した。その荷重変位曲線の一例（供試体番号B-3のもの）を図-5に示す。

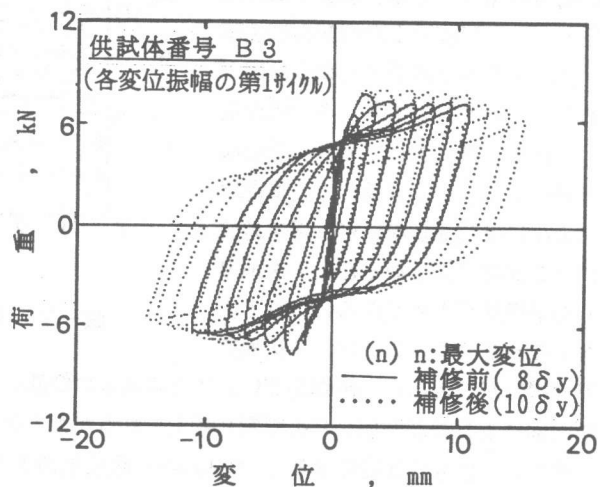


図-5 荷重変位曲線（供試体B-3のもの）

(2)最大耐力比

最大耐力比は、補修後の最大耐力を補修前の最大耐力で除して求めた。その結果を図-6に示す。

図-6に示されているように、補修前後の最大耐力比はすべての供試体ともほぼ1となっており、最大耐力は1次地震での損傷度に関係なくほぼ回復している。すなわち、1次地震での損傷が曲げひび割れのみのもので軽度のもので、最大耐力は、補修によって十分回復することが示されている。

(3)エネルギー吸収能

エネルギー吸収能は、交番繰り返し変位1サイクルのループに囲まれる面積で表すことができる。補修前後の復元力特性をエネルギー吸収能で比較すると図-7となる。損傷を受けていない供試体のエネルギー吸収能は、(1次地震での)塑性率が0のときのものとなる。

実線は再来地震に対する応答変位が $8\delta_y$ のときのもので、再来地震によってかぶりコンクリートの剝離および鉄筋が座屈するような損傷を受けた場合の結果であり、破線は $4\delta_y$ のときのもので、破壊がひび割れ程度の場合の結果である。破線はほぼ水平となり、実線は1次地震の塑性率が大きくなると若干大となる傾向がある。すなわち、エネルギー吸収能は、再来地震によって大きく壊れない場合には、1次地震による損傷度の大小には関係しないが、再来地震による破壊が大となると、1次地震での損傷度が大きくなるにつれて大きくなっている。これは、1次地震

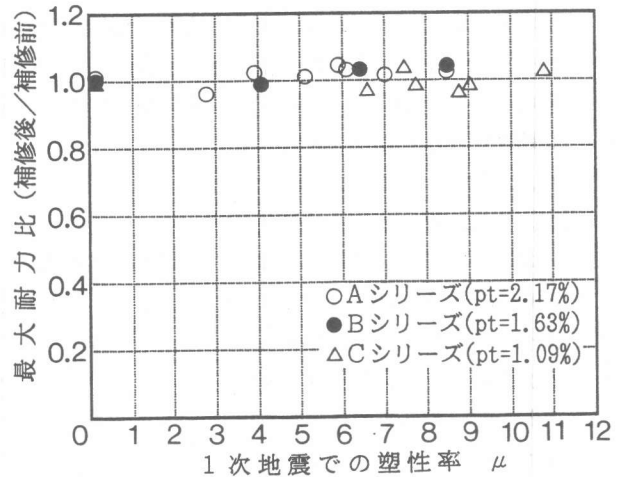


図-6 損傷度と最大耐力比との関係

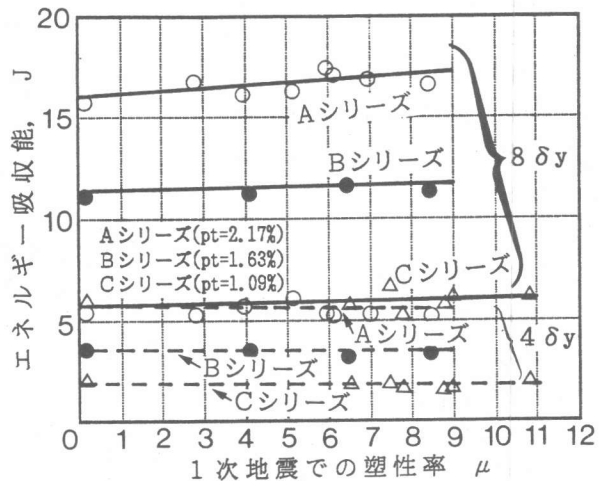


図-7 損傷度とエネルギー吸収能との関係

での損傷が大きいと、補修期間における降伏後の鉄筋の強度上昇(時効効果)⁶⁾、エポキシ補修断面部による強度増加などの影響と考えられるが大きな差とはいえない。

また、主鉄筋比が変化すると、エネルギー吸収能の大きさは主鉄筋比によってかなり異なるが、1次地震での塑性率に対する直線の傾きは同じ傾向にある。

(4)剛性

本実験では、剛性を最大変位点と原点を結ぶ直線の勾配と定義する。この剛性と1次地震での

損傷度との関係を図-8に示す。

実線は、再来地震に対する応答変位が $8\delta_y$ で再来地震によって供試体が大きく破壊している場合のものを示し、破線は $4\delta_y$ のときのもので、破壊が小さい場合を示す。剛性は、エネルギー吸収能の結果とは逆に、破壊が小さい場合の破線は少し傾きがあるが実線はほぼ水平である。これは補修に用いたエポキシ樹脂の量に関係すると考えられる。すなわち、1次地震での損傷度が大きいほど、コンクリートよりも強度の大きいエポキシ樹脂の使用量が増えることになる。したがって、主鉄筋がエポキシ樹脂でより多く覆われることや、フーチングからの主鉄筋の引抜き量が少なくなり、剛性も大きくなったと考えられる。また、鉄筋の時効効果の影響⁶⁾があるとも考えられる。

この場合も、主鉄筋比の違いは、剛性の大きさ自身には影響するが、1次地震の塑性率に対する直線の傾きは同じ傾向にある。

(5) 靱性

靱性の定義は多くあるが、本実験では耐力低下点での塑性率で評価する。耐力低下のきっかけは主鉄筋の座屈であるとの報告⁷⁾があるので、鉄筋の座屈時点を調べた。座屈時点は、録画したビデオをコマ送りで再生して、コンクリート表面にふくらみが観察できる点とした。

各シリーズにおける鉄筋座屈点と1次地震での損傷度との関係を図-9に示す。損傷を全く受けていない供試体の鉄筋座屈点は、1次地震での塑性率が0のときとして表わされる。図に見られるように、主鉄筋比に関係なくほとんどのものが、 $7\delta_y$ で鉄筋が座屈し始めている結果となっている。すなわち、1次地震での損傷度は、補修後の靱性に影響しないということである。

また、主鉄筋比の違いは、鉄筋の座屈時点には影響を及ぼしていない。

3.2 実地震波による結果との比較

著者らは⁸⁾、実地震波形(エルセントロ波形)を用いた動的実験の結果から、補修後のRC橋

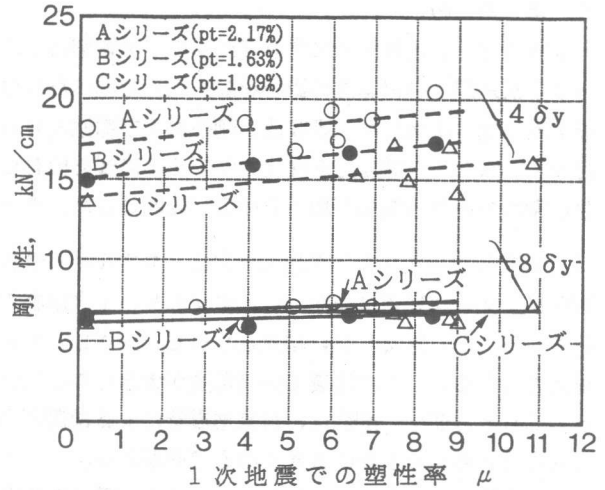


図-8 損傷度と剛性との関係

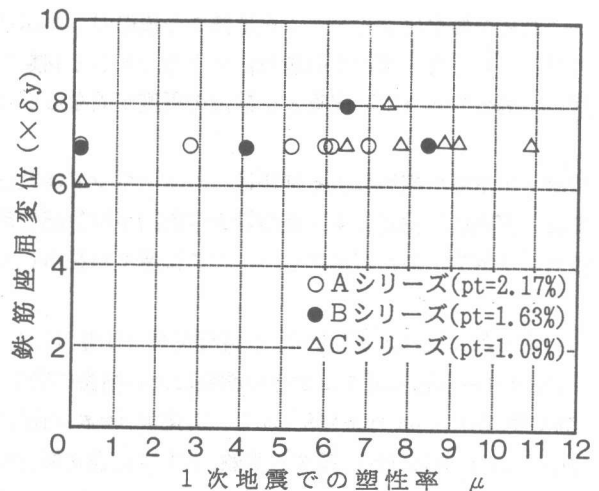


図-9 損傷度と鉄筋座屈変位との関係

脚の再来地震に対する応答は、その1次地震による損傷度によって異なることを報告した。しかし、本実験の結果では、再来地震に対する復元力特性はほぼ同じになっている。これは、エルセントロ波が非常に特徴的な波形をもつ波であるためとも考えられ、実地震波を用いた実験と増幅波を用いた実験との比較が今後必要である。

4. ま と め

本研究は、1次地震での損傷度が異なる震害補修したRC橋脚の再来地震時の復元力特性に及ぼす1次地震での損傷度の影響を動的載荷で調べたものである。補修前後の復元力特性の比較は、最大耐力比、エネルギー吸収能、剛性および靱性といった復元力特性を表すためのパラメータで行った。また、主鉄筋比を変化させてその影響を検討した。1次地震の損傷度の大きさは、曲げひび割れのみから鉄筋座屈までの広い範囲とした。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 復元力特性を表わす最大耐力比、エネルギー吸収能、剛性、靱性などのパラメータは、補修前後で大きな変化はなかった。すなわち、1次地震での損傷度の大きさは、補修前後の復元力特性には大きく影響しない結果となった。ただし、エネルギー吸収能は、再来地震時による損傷が大きくなると、1次地震での損傷度が大きくなるにつれて若干ではあるが大きくなる傾向がある。これとは逆に、剛性は、再来地震時による損傷が小さい範囲では、1次地震の損傷度が大きくなるとともにわずかに大きくなる傾向がある。

(2) 主鉄筋比を変化させると、エネルギー吸収能や剛性自身の値は変化する。しかし、1次地震での損傷度に対する傾向は(1)と同様になった。

これらの結果によると、1次地震での損傷が、かぶりコンクリートの剝離および鉄筋座屈の域に達していてもエポキシ樹脂補修で十分であると判断できる。しかし、本実験は小型の供試体を用いた場合であって、実物とは補修の程度が異なることも考えられ、今後検討する必要がある。

謝辞：エポキシ樹脂による補修は、ショーボンド建設(株)徳島営業所に行っていただきました。また、実験には徳島大学工業短期大学部助手神原紀仁氏(現在：(株)エイトコンサルタント)に多大のご協力をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

[参考文献] 1)日本道路協会：道路震災対策便覧、1988。 2)境、田才、小谷、青山：震害を受けた鉄筋コンクリート造部材のエポキシ樹脂による補修に関する研究、コンクリート工学年次講演会講演論文集、Vol. 9, pp. 263-268, 1987。 3)尾坂、鈴木、石田、宮本：RC部材の付着破壊とエポキシ樹脂注入による補修効果に関する実験、土木学会論文集、No. 372/V-5, pp. 121-130, 1986。 4)H. Shima, H. Mizuguchi, N. Kanbara and V. Rungrojsaratis : Hysteresis Model of Repaired Reinforced Concrete Bridge Piers Damaged by Earthquake, Proc. of the Asia-Pacific Structural Analysis Conference, Malacca, pp. III-1-1~III-1-15, 1989。 5)土木学会：地震動・動的物性、技報堂出版, pp. 58-61, 1989。 6)田才、山田、小谷、青山：鉄筋コンクリート造曲げ部材の補修後の耐力に関する研究、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol. 7, pp. 653-656, 1985。 7)島、伊藤、北西、水口：RC橋脚における主鉄筋座屈と靱性に及ぼす帯鉄筋配置の影響、コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集、1990年5月。 8)島、水口、神原、横井：震害補修されたRC橋脚の再来地震に対する応答予測、構造工学論文集、Vol. 36A, pp. 1167-1174, 1990。