

論文 曲げ破壊した RC 橋脚の補修工法の検討

山本 翔吾*1・木下 幸治*2・林 承燦*3・新家 一秀*4

要旨：著者らはこれまでに曲げ破壊した RC 橋脚を対象として、ひずみ硬化型セメント系複合材料である SHCC を補修材に用いた RC 橋脚の補修性能の検討を実施してきた。本研究は、補修性能の向上を目的に、曲げ破壊した RC 橋脚を対象に SHCC による断面修復と補強材を追加した 1/5 縮小 RC 橋脚試験体の再正負交番載荷実験を実施した。その結果、補修部上部で生じた曲げ破壊により、最大耐力以降の大きな耐力低下による靱性の低下は見られたものの、初期剛性の回復と最大耐力といった耐荷性能の向上効果が確認できた。

キーワード：RC 橋脚, 補修工法, SHCC, 正負交番載荷実験

1. はじめに

地震により被災した土木構造物、特に、道路や鉄道橋は、救援の人や物資などの輸送基幹であり、震災後の社会復興には重要な役割を担う。このため、地震により被災した RC 橋脚の早期復旧が望まれており、これまでに RC 橋脚の補修・補強工法の開発がされている^{1)~6)}。梅田ら⁷⁾は、地震などにより損傷を受けた RC 柱の早期復旧工法の開発を目的として、かぶりコンクリートが剥落し軸方向鉄筋がはらみ出す程度まで損傷させた RC 柱に、超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料である UHP-SHCC により断面修復し、材齢 7 日で再載荷を行い補修前後の構造性能を比較された。その結果、最大荷重、最大荷重時の変位及びエネルギー吸収量のいずれも初期載荷時のそれらと同程度まで回復可能であることを示された。加藤ら⁸⁾は、梅田らの既往研究⁷⁾で検討されていない軸力や鉄筋比、損傷度の違いが補修後の柱部材の力学特性に与える影響を明らかにした。その結果、軸力や鉄筋比、損傷度に関係なく初期載荷時程度の耐荷性が確保された。また、補修材の UHP-SHCC により、軸方向鉄筋の座屈抑制効果を示した。著者ら⁹⁾も、早期復旧の観点から、かぶりコンクリートが剥落し軸方向鉄筋がはらみ出す程度まで損傷させた 1/5 縮小試験体¹⁰⁾を対象に、ひずみ硬化型セメント系複合材料である SHCC により断面修復し、再載荷実験を実施した。その結果、最大荷重と靱性は補修前と同程度まで回復した。また、補修材の剥離抑制効果により、補修材は剥離しにくく、軸方向鉄筋が破断するまで急激な荷重低下は生じず、SHCC による補修性能を把握した。一方で、はらみ出した軸方向鉄筋をそのままとしていたことと補修材による吹付け施工を鉄筋背面まで実施していないことにより、初期剛性の回復には至らなかった。また、補修部であった一度損傷を受けた箇所においてははらみ出した軸方向鉄筋により、補

修材が徐々に剥離し、再度損傷を受けたことで早期に荷重低下を示した。

本研究では、著者らの既往研究⁹⁾での補修性能をさらに向上させるために、曲げ破壊した RC 橋脚を対象に SHCC による断面修復と補強材を追加した 1/5 縮小試験体の再正負交番載荷実験を実施した。実験結果と既往研究⁹⁾との比較により、補修性能を明らかとした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に本研究での試験体一覧を示す。試験体の名称は、使用した軸方向鉄筋の呼び径と試験体番号の順番に示した。試験体番号は既往研究⁹⁾で補修した試験体を 1、本研究で補修する試験体を 2 と示した。補修後試験体の名称は試験体番号に補修後という意味の R を追加した(例：D10-2R)。図-1 に試験体の形状と寸法、並びに損傷部を示す。試験体は実大円形 RC 橋脚¹³⁾の 1/5 縮小試験体であり、橋脚高さは 1350 mm、断面寸法は直径 400 mm の円形断面である。D10-2 と D13-2 の軸方向鉄筋の本数はそれぞれ 16 本と 10 本とし、軸方向鉄筋は 1.0% とした。帯鉄筋は φ3.2 の鉄線を使用し、帯鉄筋間隔は 65 mm とした。表-2 に使用したコンクリートと鉄筋の材料特性を示す。コンクリートの圧縮強度は両試験体の試

表-1 試験体一覧 (呼び径-試験体番号)

補修前試験体	D10-1 ¹⁰⁾	D13-1 ¹⁰⁾	D10-2 ¹²⁾	D13-2 ¹²⁾
軸方向鉄筋	D10	D13	D10	D13
軸力 (kN)	150		60	
補修後試験体	D10-1R ⁹⁾	D13-1R ⁹⁾	D10-2R	D13-2R
軸方向鉄筋	D10	D13	D10	D13
軸力 (kN)	150		60	

*1 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 博士課程 (学生会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 工博 (正会員)

*3 (株)デーロス・ジャパン 企画開発本部材料研究室室長 工博 (正会員)

*4 トーヨーマテラン (株) 技術部技術開発グループ 工博 (正会員)

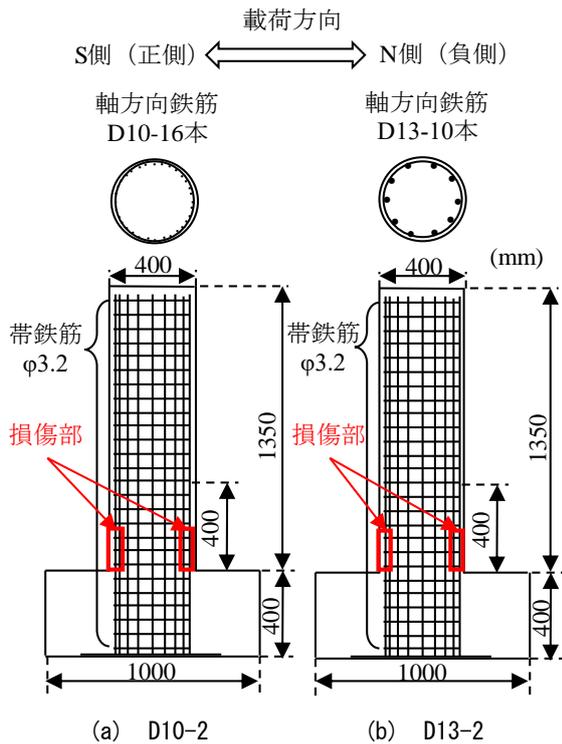


図-1 補修前試験体の形状と寸法¹²⁾

表-2 材料特性

(a) コンクリート材料

試験体	粗骨材最大寸法 (mm)	圧縮強度(N/mm ²)
D10-2	15	35.0
D13-2	15	37.3

(b) 鉄筋材料

呼び径	降伏強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)
D10	351	485
D13	320	456
φ3.2	-	450



(a) D10-2 (左: S側, 右: N側)



(b) D13-2 (左: S側, 右: N側)

図-2 補修前試験体の損傷状況

験日(2016年11月)の圧縮強度を示す。帯鉄筋に使用したφ3.2の鉄線の降伏強度は引張試験において明瞭な降伏点を確認できなかったため、降伏強度を示していない。試験体の損傷部は荷重方向のS側とN側の橋脚基部に位置している。図-2に補修前試験体の損傷状況を示す。D10-2のS側では、橋脚基部から高さ130mm、幅280mmの範囲でかぶりコンクリートが剥落し、4本の軸方向鉄筋が見える状況であった。D10-2のN側では、S側と同様の高さで、幅300mmの範囲でかぶりコンクリートが剥落し、5本の軸方向鉄筋が見える状況であった。D13-2のS側では、高さ30mm、幅150mmの狭い範囲でかぶりコンクリートが剥落し、2本の軸方向鉄筋が見える状況であった。D13-2のN側では、S側とは異なり、高さ195mm、幅250mmの範囲でかぶりコンクリートが剥落し、3本の軸方向鉄筋が見える状況であった。両試験体ともかぶりコンクリートが剥落し軸方向鉄筋がはらみ出す程度まで損傷しているが、終局には至っていない。本研究では、試験体の最大荷重以降において最大荷重の80%程度まで荷重低下した時点を試験体の終局とした。

2.2 補修工法

本研究では、著者らの既往研究⁹⁾での補修性能の向上を目的に、SHCCによる断面修復と補強材を追加した。図-3に試験体の補修フローを示す。全6工程により、曲げ破壊した1/5縮小試験体2体(D10-2, D13-2)の補修を実施し、補修後試験体(D10-2R, D13-2R)とした。

(1) コンクリートの研り

図-4にD10-2のコンクリートの研り後の状況を示す。ハンドブレイカーにより橋脚基部から300mmの高さまで、コンクリートを研った。橋脚基部の塑性ヒンジ区間を断面修復するために、道示のV耐震設計編¹⁴⁾で算出した270mmを参考とし、研り高さを300mmとした。既往研究⁹⁾での研り深さは、鉄筋径を含んだかぶり厚と

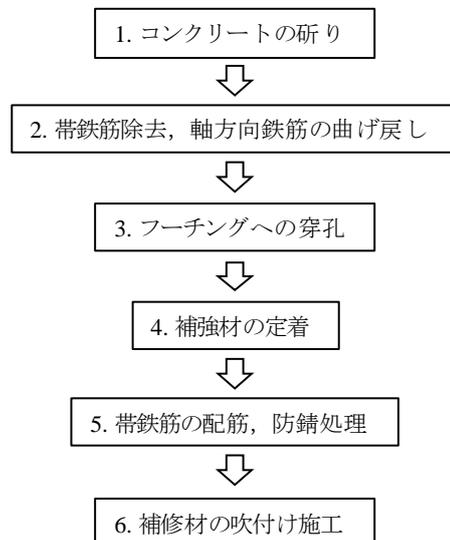


図-3 補修フロー

しており、補修材と軸方向鉄筋の一体化が課題であった。本研究では、補修材と軸方向鉄筋が一体化できるように研り深さを鉄筋背面から 10 mm 以上とした。

(2) 帯鉄筋の除去と軸方向鉄筋の曲げ戻し

コンクリートの研り後の試験体の帯鉄筋は鉄筋背面までの研り作業により、破断や変形が顕著であったため、研り範囲の帯鉄筋を全て除去した。既往研究⁹⁾では、研りによる帯鉄筋の変形は比較的軽微であったためそのままとした。図-5 に D10-2 の帯鉄筋の除去と軸方向鉄筋の曲げ戻し後の状況を示す。本研究では、既往研究⁹⁾で生じたはらみ出したままの軸方向鉄筋が曲がりやすかったことによる早期耐力低下の改善を目的に、軸方向鉄筋の曲げ戻しの実施と、損傷した軸方向鉄筋を補うため、補強材を追加した。ただし、橋脚基部のはらみ出しを曲げ戻すことで、研り範囲の中間部では軸方向鉄筋が断面内側に変形した。なお、実大規模の橋脚では、軸方向鉄筋の曲げ戻しは困難と考えられることから、実施工では既存の断面外にはらみ出した軸方向鉄筋の切断、その後切断箇所へ新規部材を挿入する事が想定される。

(3) フーチングへの穿孔

図-6 にフーチングへの穿孔状況と穿孔箇所を示す。既往研究⁹⁾では、はらみ出した軸方向鉄筋をそのままとしたことで、はらみ出し量が最大となる箇所では軸方向鉄筋が破断した。本研究では、軸方向鉄筋の破断の回避を目的に荷重方向の S 側と N 側に補強材として新規の軸方向鉄筋を追加した。補強材の定着のため、フーチングを穿孔した。穿孔深さと穿孔径はそれぞれ 20D、D+10 mm とした (D：鉄筋の直径)。穿孔位置は、荷重方向である S 側と N 側の軸方向鉄筋の隣とし、D10-2 と D13-2 の穿孔箇所はそれぞれ 10 箇所と 6 箇所とした。穿孔穴はフーチング上面に対し垂直に開けることが困難であったため、フーチング中央に斜めに穿孔した。

(4) 補強材の定着

図-7 に補強材 (D10 鉄筋) の定着方法を示す。本研究では、損傷した RC 橋脚のはらみ出した軸方向鉄筋を補うために「補強材」として新たに鉄筋を挿入した。フーチング側はエポキシ樹脂により定着し、研り範囲の上部ではフレアー溶接により、元の軸方向鉄筋と一体化させた。エポキシ樹脂とフレアー溶接による定着長はそれぞれ 20D、10D とした¹⁵⁾。

(5) 帯鉄筋の配筋、防錆処理

図-8 に帯鉄筋の配筋後と防錆処理後を示す。再荷重時に軸方向鉄筋のはらみ出しを回避し、再度同じ箇所では損傷が生じさせないために、軸方向鉄筋のはらみ出しが大きい箇所から上下 30 mm の位置に、帯鉄筋を追加した。

(6) 補修材の吹付け施工

図-9 に吹付け施工後の補修後試験体を示す。補修材



図-4 研り後状況

図-5 曲げ戻し後状況

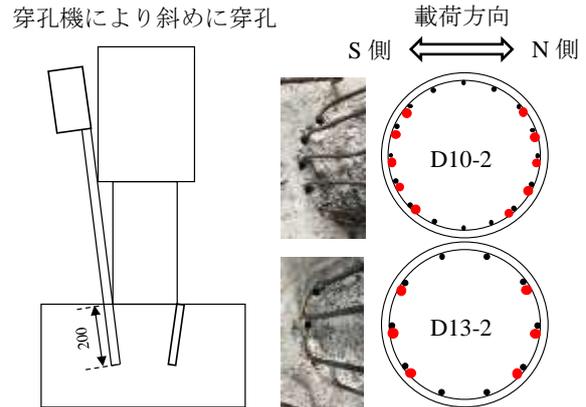


図-6 フーチングへの穿孔状況と穿孔箇所

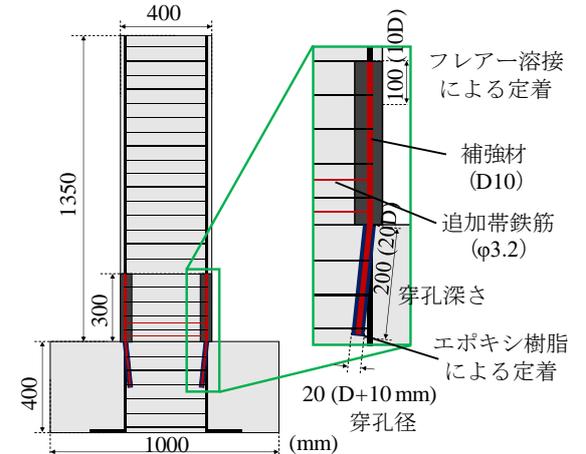


図-7 補強材の定着方法



図-8 防錆処理後

図-9 吹付け施工後

表-3 SHCC の配合

水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	繊維混入率 (% vol)	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)
40	335	2.0	12	0.04

の吹付けは湿式吹付け工法により断面修復した。補修材はひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ効果を持つひずみ硬化型セメント系複合材料 (SHCC) を使用した。表-3 に SHCC の配合を示す。使用繊維はポリビニルアルコール (PVA) 繊維とし、既往研究⁹⁾と同様の配合とした。既往研究⁹⁾では、3回の吹付け施工により、打ち継ぎ界面が生じ、補修部は層状に破壊し、早期に断面減少した。本研究では、1回の吹付け施工により軸方向鉄筋の周りに打ち継ぎ界面を生じないように改善した。表-4 に SHCC の圧縮強度と引張強度、図-10 に引張強度試験結果を示す。ただし、引張強度試験はダンベル型試験体による一軸引張強度試験を材齢 14 日で実施した。一方、圧縮強度試験は、橋脚の載荷試験日 (材齢 14 日程度) に実施することができず、その後、材齢 150 日で実施した。このため、試験日の圧縮強度よりも高いことから参考値とした。SHCC の引張強度の平均値は 4.4 N/mm² であり、既往研究⁹⁾で使用した SHCC と同程度であった。一方、SHCC の圧縮強度については、上述のように参考値ではあるが、その平均値は 50.4 N/mm² と既往研究⁹⁾で使用した SHCC の圧縮強度よりも 2 倍程度高い結果となった。これは、本研究における吹付け施工を気温が高い時期 (7 月実施) に実施したために、既往研究⁹⁾ (1 月実施) よりも補修材の圧縮強度が発現したと考えられる。

2.3 正負交番載荷実験

図-11 に実験システムを示す。2本の油圧ジャッキを試験体上部の載荷ブロックに接続し、試験体にそれぞれ軸力と水平力を載荷した。軸力ジャッキはリニアスライダに固定されているため、水平方向に移動が可能となっている。本研究では、補修前後、並びに、既往研究^{9),10)}との比較により補修性能を把握するために試験体の軸力を以下のように設定した (表-1)。なお、既往研究^{9),10)}において、試験体により軸力を変更していたことから、D10-2R は高軸力下で検討した既往研究^{9),10)}と同様の試験条件にするため、軸力を 150 kN とした。一方、D13-2R は補修前の D13-2 と同様の試験条件にするため 60 kN とした。D10-2R, D13-2R の載荷基準変位 δ_y はそれぞれ D10-1 ($\delta_y=4.44$ mm), D13-2 ($\delta_y=2.96$ mm) と同様とし、変位制御により $\pm 1.0 \delta_y$ から始めて $\pm 0.5 \delta_y$ ずつ増加させ、各 1 サイクル載荷した。D10-2R では、 $\pm 8.0 \delta_y$ 以降は $\pm 1.0 \delta_y$ ずつ増加させた。

3. 実験結果および考察

3.1 履歴曲線

図-12 に D10-2R の履歴曲線を示す。載荷基準変位 δ_y は 4.44 mm とし、 $1.0 \delta_y$ 時の荷重は 41.3 kN であった。水平変位 δ と水平荷重 P は上昇していき、 $5.5 \delta_y$ 時 ($\delta=24.42$ mm) に最大荷重 83.3 kN に到達した。最大荷重以降の

表-4 SHCC の強度

	1	2	3	4	5	6	平均
圧縮強度(N/mm ²)	45.9	45.2	50.7	56.9	53.4	-	50.4
引張強度(N/mm ²)	4.1	4.6	4.5	4.5	4.4	4.1	4.4

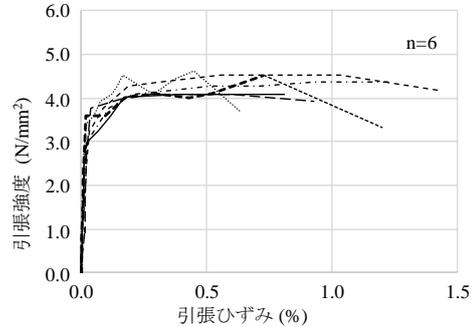


図-10 SHCC の引張試験結果

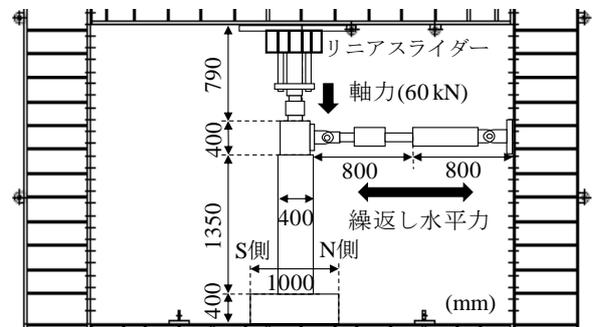


図-11 実験システム (D13-2R)

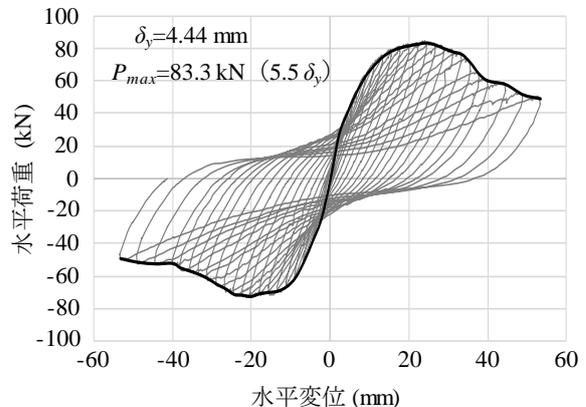


図-12 D10-2R の履歴曲線

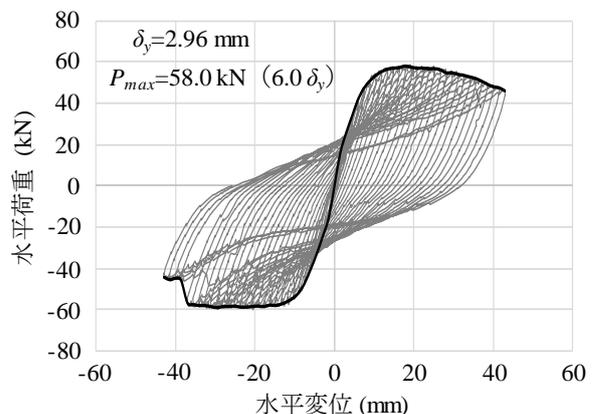


図-13 D13-2R の履歴曲線

6.0 δ_y 以降からかぶりコンクリートの剥離に伴い、荷重が徐々に低下した。9.0 δ_y 時 ($\delta=39.96$ mm) の荷重が試験体の最大荷重の80%程度まで荷重低下し、終局に到達した。終局後は10.0 δ_y から11.0 δ_y にかけて荷重低下を確認した。±12.0 δ_y を最終ループとして載荷終了した。図-13にD13-2Rの履歴曲線を示す。載荷基準変位 δ_y は2.96 mmとし、1.0 δ_y 時の荷重は25.8 kNであった。水平変位 δ と水平荷重 P は上昇していき、6.0 δ_y 時 ($\delta=17.76$ mm) に最大荷重58.0 kNに到達した。最大荷重以降の正側では、かぶりのコンクリートの剥離に伴い、荷重が徐々に低下した。負側では、最大荷重を維持していたが、-13.0 δ_y 時 ($\delta=-38.48$ mm) に急激な荷重低下を示した。14.5 δ_y 時 ($\delta=42.92$ mm) の荷重が試験体の最大荷重の80%程度まで荷重低下し、終局に到達した。終局後は±15.0 δ_y を最終ループとして載荷終了した。

3.2 損傷状況

図-14にD10-2RとD13-2Rの試験後の損傷状況を示す。両試験体とも、橋脚基部から高さ300 mmの範囲の補修部での損傷は見られず、補修部上部において曲げ破壊が生じた。D10-2RのS側では、補修部上部から高さ80 mm、幅350 mmの範囲でかぶりコンクリートが剥落し、5本の軸方向鉄筋が見える状況であった。D10-2RのN側では、S側と同様の損傷状況であった。D13-2RのS側では、補修部上部から高さ30 mm、幅80 mmの狭い範囲でかぶりコンクリートが剥落し、1本の軸方向鉄筋が見える状況であった。D13-2RのN側では、S側とは異なり、補修部上部から高さ130 mmの範囲で軸方向鉄筋周辺のかぶりコンクリートが剥落し、3本の軸方向鉄筋が見える状況であった。橋脚基部から高さ600 mmの範囲を研った所、補修部の上端で両試験体の軸方向鉄筋が1本ずつ破断していることが分かった。

3.3 既往研究⁹⁾との比較と補修性能の把握

(1) 包絡線比較

図-15に既往研究⁹⁾との比較を示す。D10-2Rの初期剛性はD10-1と同程度まで回復した。これは、軸方向鉄筋の追加と吹付け施工方法の改善により、軸方向鉄筋が載荷初期段階において抜け出さないこと、軸方向鉄筋と補修材が一体化したことで、初期剛性が向上したといえる。D10-2Rの最大耐力は正側において、D10-1より1.1倍、D10-1Rよりも1.3倍向上した。この耐力向上は、損傷箇所が上部に移動したことで柱が変形できる長さ(可撓長さ)が短くなったことに起因したといえる。水平変位30~40 mm付近でのD10-2Rの耐力低下は、補修部上部のかぶりコンクリートの剥離と軸方向鉄筋の座屈が要因であるといえる。一方、D10-2Rの負側の最大耐力は正側のような耐力向上は見られず、D10-1と同程度であった。従って、本研究での補修工法は、最大耐力以降



(a) D10-2R (左: S側, 右: N側)



(b) D13-2R (左: S側, 右: N側)

図-14 試験後の損傷状況

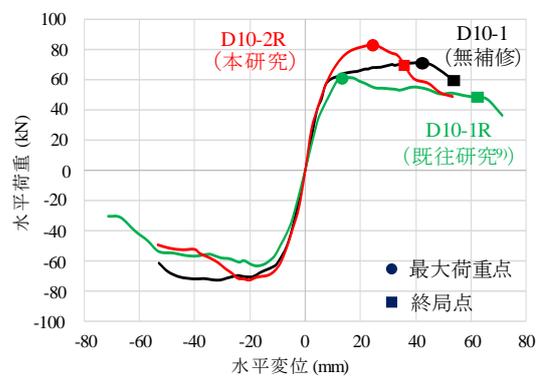


図-15 既往研究⁹⁾との比較

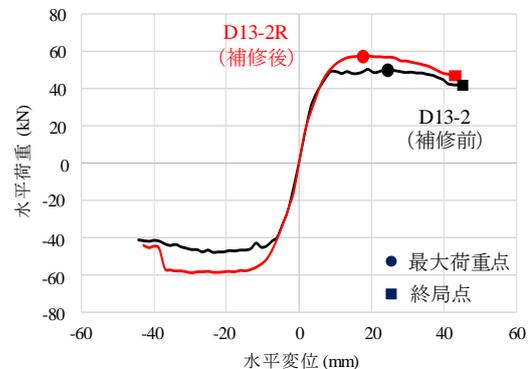


図-16 補修前後比較

の急激な耐力低下により靱性は向上しないが、補修後試験体の初期剛性の回復と最大耐力の向上が見られ、耐荷性能の向上効果を示した。図-16に補修前後の比較を示す。D13-2Rの初期剛性はD13-2と同程度まで回復した。D13-2Rの最大耐力は、D13-2よりも1.2倍向上した。D13-2Rの負側での耐力低下は、軸方向鉄筋の座屈とかぶりコンクリートの剥離に起因したといえる。D13-2Rの靱性は補修前と同程度まで回復可能であった。これは、D13-2Rの軸方向鉄筋間隔が広く、かぶりコンクリートの損傷範囲が減少したこと、太径の軸方向鉄筋により座屈強度が高いことが要因であるといえる¹²⁾。

(2) 損傷状況比較

図-17に損傷状況の比較を示す。D10-1RとD13-1Rで

は、補修部にて損傷が生じていたのに対し、D10-2R と D13-2R では補修部での損傷は生じず、補修部の上部で曲げ破壊が生じた。以上より、本研究での補修工法により、追加した軸方向鉄筋と帯鉄筋は初期載荷で生じた軸方向鉄筋の座屈によるはらみ出しを抑制することで補修部の損傷を低減させた。この結果、補修部の上部で曲げ破壊が生じ、最大耐力以降に大きな耐力低下が見られたものの、初期剛性と最大耐力の耐荷性能は向上した。

4. まとめ

本研究では、既往研究⁹⁾の補修性能を向上させるために、SHCCによる断面修復と補強材を追加した1/5縮小試験体の再正負交番載荷実験を実施した。その結果、本研究で検討した補修工法により、補修部上部にて曲げ破壊が生じ、最大耐力以降の大きな耐力低下、並びに靱性の低下が見られたが、補修後試験体の初期剛性の回復と最大耐力の向上効果が得られた。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 津吉毅, 小林薫, 小林将志: 大変形正負交番載荷を受ける RC 柱の損傷状況及び補修効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.55-69, 2000.5
- 2) 堺淳一, 運上茂樹: 地震により曲げ破壊した鉄筋コンクリート橋脚に対する緊急復旧工法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.65, No.1, pp.306-316, 2009
- 3) 幸左賢二, 小川敦久, 合田寛基, 脇田和也: 高靱性セメント巻き立て厚に着目した耐震補強実験, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1024-1035, 2009.3
- 4) 鬼木浩二, 井上崇雅, 中尾尚史, 篠原聖仁, 岡田太賀雄, 星隈順一: 橋脚の RC 巻き立て補強における高強度鉄筋の適用がアンカー定着と補強効果に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.289-300, 2017.3
- 5) 松枝修平, 田所敏弥, 岡本大, 谷村幸裕: 損傷を受けた鋼板巻き立て補強 RC 柱の補修効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1021-1026, 2010.7
- 6) 鈴木将充, 小島文寛, 伊藤正憲, 加藤佳孝: 迅速復旧工法開発のための TST-FiSH の基礎物性と補修効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2197-2202, 2009.7
- 7) 梅田靖司, 国枝稔, 中村光, 玉越隆史, 森井直治: 超高強度ひずみ型セメント系複合材料で補修された RC 柱の補修効果, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.10, pp.349-356, 2010.10



(a) 本研究 (左: D10-2R, 右: D13-2R)



(b) 既往研究⁹⁾ (左: D10-1R, 右: D13-1R)

図-17 損傷状況比較

- 8) 加藤貴裕, 国枝稔: 地震により被災した RC 柱の早期復旧工法の適用性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.15, pp.371-376, 2015.10
- 9) 山本翔吾, 矢野義知, 木下幸治, 林承燦, 新家一秀: ひずみ硬化型セメント複合材料を用いた RC 橋脚の補修性能の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.569-574, 2017.10
- 10) 山本翔吾, 木下幸治: 円形 RC 橋脚縮小試験体の寸法効果の実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.668-672, 2017.7
- 11) 仁平達也, 渡邊忠明, 谷村幸裕, 岡本大: 地震による損傷と修復を繰り返した RC 部材の性能に関する一考察, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.2, pp.121-132, 2012
- 12) 木下幸治, 山本翔吾: RC 橋脚縮小試験体の履歴特性に及ぼす軸方向鉄筋寸法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.673-678, 2017.7
- 13) 岩田秀治, 関雅樹, 上月隆史, 阿知波英彦: 載荷実験による RC 円形橋脚の実大モデルと 1/2 縮小モデルの損傷度比較, 土木学会第 66 回年次学術講演概要集, 第 I 部門, pp.765-766, 2011.9
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 2002.3
- 15) 社団法人日本建設業連合会設計委員会: 鉄筋コンクリート配筋標準図 (2), 2013