

# 論文 丸鋼鉄筋を補強筋として用いて補修した RC 橋脚の耐震性

山本 翔吾\*1・深見 亮介\*2・木下 幸治\*3・林 承燦\*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、最近の補修工法であるひずみ硬化型セメント系複合材料 (SHCC) を吹付け施工した補修後 RC 橋脚の補修性能の検討を実施してきた。本研究では、RC 橋脚の塑性ヒンジ区間の損傷低減を目指し、著者らの既往研究に引き続いて、SHCC を吹付け施工した塑性ヒンジ補修部を対象に、丸鋼鉄筋を補強筋として用いた効果について、正負交番載荷実験により検討している。その結果、丸鋼鉄筋と SHCC により補修した試験体では、補強筋挿入による耐力上昇を抑えつつ、変形性能は補修前と同程度以上に回復すること、並びに丸鋼挿入区間では、補修部の損傷低減効果が示された。

**キーワード：**丸鋼鉄筋, 補強筋, RC 橋脚, 正負交番載荷, 補修性能, SHCC

## 1. はじめに

強震動を受けた曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚 (以下、RC 橋脚とする。) のポストピーク挙動は、主筋のはらみ出しに伴い、かぶりコンクリートの剥離・剥落が生じ、主筋が座屈することで急激な耐力低下を示し、終局に至る。地震時の RC 橋脚の塑性変形性能を向上させるためには、塑性ヒンジ区間の損傷を低減することが重要である。RC 橋脚の塑性ヒンジ区間の損傷低減を目的に、主筋に丸鋼鉄筋やアンボンド鉄筋を採用することの優位性が報告されている<sup>1-3)</sup>。著者らも、主筋に丸鋼鉄筋を用いた RC 橋脚の載荷実験により、塑性ヒンジ区間の損傷低減、並びに塑性変形性能が向上するといった既往の研究成果と同様のことを示している<sup>4)</sup>。

他方、近年ではコンクリート、またはモルタルに短繊維を混入した材料である繊維補強セメント系複合材料 (FRCC<sup>5)</sup>: Fiber Reinforced Cement Composite) の構造利用が検討されている<sup>6-8)</sup>。例えば、梅田ら<sup>6)</sup>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、損傷した RC 柱に超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料により断面修復された橋脚の載荷実験により、最大荷重、最大荷重時の変位、及びエネルギー吸収

量は初期載荷時と同程度まで回復可能であることを示された。著者らも、曲げ破壊した RC 橋脚を対象として、最近の補修工法であるひずみ硬化型セメント系複合材料 (SHCC<sup>5)</sup>: Strain Hardening Cement Composite) の吹付けにより補修した橋脚の載荷実験により、耐荷性能は補修前と同程度まで回復可能であること、SHCC の繊維の架橋効果により、補修部の剥落が抑制されることを明らかにしている<sup>9-11)</sup>。

以上より、SHCC を吹付け施工した塑性ヒンジ補修部を対象に、塑性ヒンジ区間の損傷低減効果を示す丸鋼鉄筋を補強筋として用いることで、補修後の RC 橋脚の塑性変形性能が向上すると考えられる。そこで、本研究では、既往研究<sup>11)</sup>に引き続き、丸鋼鉄筋を補強筋として用いた効果について補修後の RC 橋脚の正負交番載荷実験により明らかにしている。

## 2. 試験体概要

### 2.1 補修試験体

図-1 と表-1 に本研究の補修試験体の位置づけ、並びに補修試験体の一覧を示す。試験体名称は、使用した主筋、載荷軸力、補修回数の順に示している。著者らの

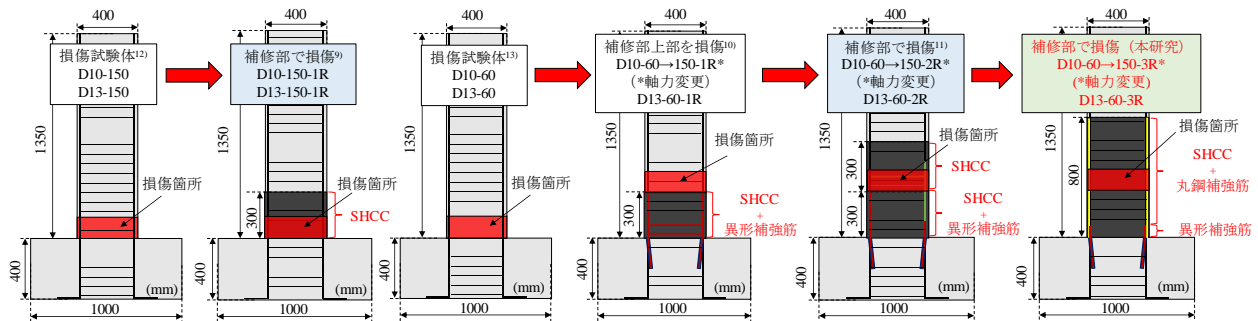


図-1 本研究の補修試験体の位置づけ

\*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 博士後期課程 (学生会員)

\*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (学生会員)

\*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 工博 (正会員)

\*4 (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)

表-1 補修試験体一覧

試験体名称	主筋	帯筋	軸力 (kN)	補修部高さ (mm)
D10-150-1R <sup>9)</sup>	D10	φ3.2	150	300
D13-150-1R <sup>9)</sup>	D13			
D10-60→150-1R <sup>10)</sup>	D10	φ3.2	150	300
D10-60→150-2R <sup>11)</sup>				600
D10-60→150-3R				800
D13-60-1R <sup>10)</sup>	D13	φ3.2	60	300
D13-60-2R <sup>11)</sup>				600
D13-60-3R				800



写真-1 これまでの実験による損傷状況と補修方法

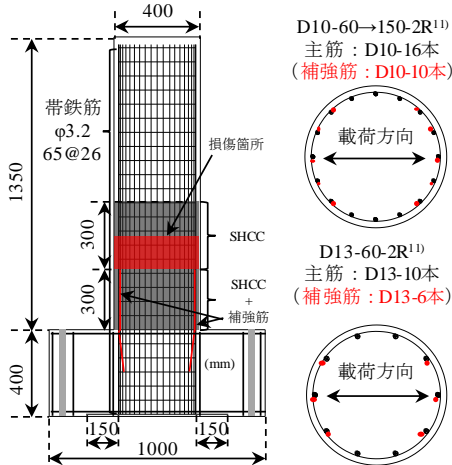


図-2 D10-60→150-2R<sup>11)</sup>の形状と寸法

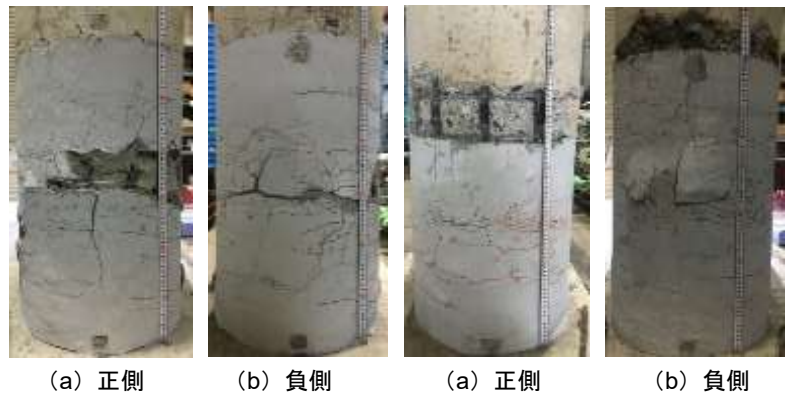


写真-2 D10-60→150-2R<sup>11)</sup>の損傷状況

写真-3 60-2R-D13<sup>11)</sup>の損傷状況

既往研究<sup>12-13)</sup>での損傷試験体を対象とし、文献<sup>9)</sup>では、SHCCを塑性ヒンジ補修部へ吹付け施工した補修試験体(D10-150-1R, D13-150-1R)により、補修部の破壊性状を把握した。文献<sup>10)</sup>では、複数回の補修実験を実施するために、補修部に異形補強筋を挿入した試験体(D10-60→150-1R, D13-60-1R)により、損傷部位をコントロールした。なお、D10を使用した試験体においては、D10-150-1R<sup>9)</sup>との比較を可能とするために軸力を変更した(60→150)。文献<sup>11)</sup>では、損傷部への吹付け施工方法を改善した補修試験体(D10-60→150-2R, D13-60-2R)により、補修部の破壊性状を把握した。本研究の補修試験体(D10-60→150-3R, D13-60-3R)は、3回目の補修であり、丸鋼を補強筋として用いた効果を検討した。

写真-1に本研究での補修試験体に対するこれまでの載荷実験による損傷状況と補修方法を示す。写真-1(a)にD10-60の損傷状況、並びに補修方法を示す。かぶりコンクリートの剥離・剥落、並びに主筋がはらみ出す程度まで損傷させた試験体を対象とし、橋脚基部から高さ300mmを補修範囲とした。写真-1(b)に補強筋の挿入と定着状況を示す。補修範囲のコンクリートの研り、並びに補強筋をフーチングに定着させるための穴の削孔を実施した。補強筋の上端と下端はそれぞれ、フレアー溶接とエポキシ樹脂により定着した。写真-1(c)にD10-

60→150-1Rの損傷状況を示す。補強筋を挿入した補修範囲での損傷は軽微であり、補修部上部で曲げ破壊を生じさせることで、再度補修実験を可能とした。写真-1(d)にD10-60→150-2Rの吹付け施工前の状況を示す。D10-60→150-1Rのコンクリートを研り、破断した主筋を補う目的で補強筋、並びにはらみ出しを抑制するために帯筋を追加した。

図-2に本研究の補修の対象となるD10-60→150-2Rの形状と寸法、並びに写真-2, 3にD10-60→150-2RとD13-60-2Rの損傷状況を示す。試験体は実大円形RC橋脚<sup>12)</sup>の1/5縮小試験体であり、橋脚高さは1350mm、断面寸法は直径が400mmの円形断面としている。D10-60→150-2RとD13-60-2Rの主筋は、それぞれD10異形鉄筋を16本、D13異形鉄筋を10本とし、軸方向鉄筋比を1%としている。橋脚基部から高さ300mmにおいて補強筋はそれぞれ、D10異形鉄筋を10本、D13異形鉄筋を6本挿入している。D10-60→150-2Rの損傷状況は、正負側両側において橋脚基部から高さ300~400mmでの補修材の剥離、主筋の破断が生じている(写真-2)。D13-60-2Rの正側の損傷状況は、橋脚基部から高さ450mmまでの補修部では損傷は生じず、補修部上部でのかぶりコンクリートの剥離損傷が生じている(写真-3(a))。D13-60-2Rの負側の損傷状況は、橋脚基部から高さ300~400mmで

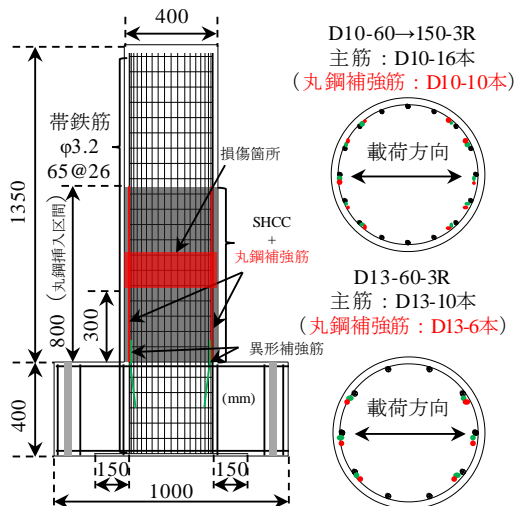
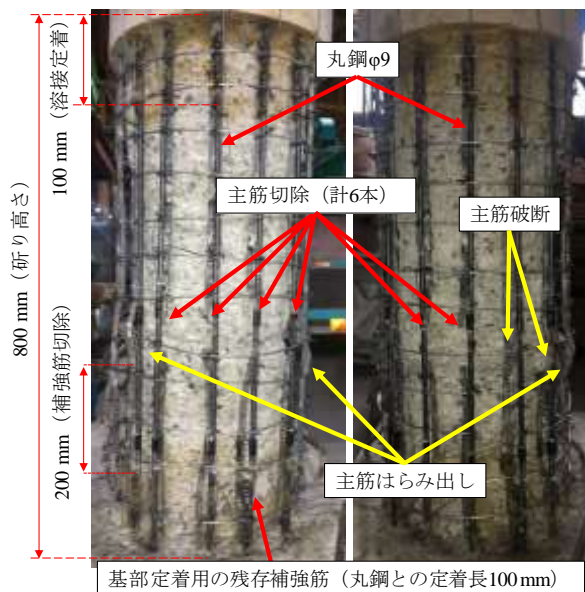
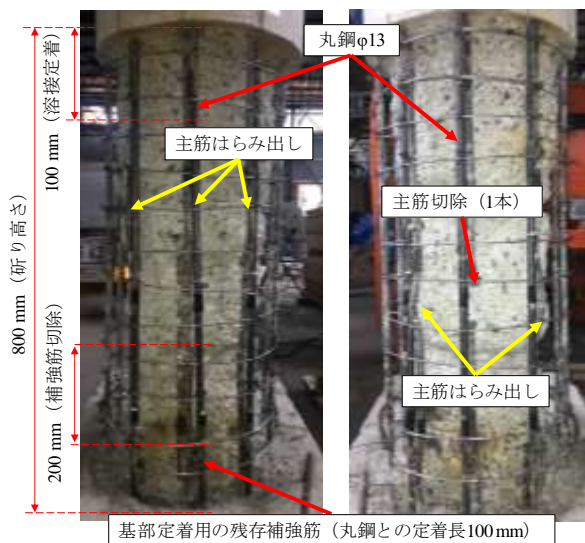


図-3 補修概要図 (D10-60→150-3R)



(a) 正側 (b) 負側

写真-4 D10-60→150-3R



(a) 正側 (b) 負側

写真-5 D13-60-3R

表-2 SHCC の配合

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

の補修材の剥離、並びに、補修部上部でのかぶりコンクリートの剥離損傷が生じている (写真-3 (b))。

## 2.2 補修方法

図-3 に補修概要図、並びに写真-4、5 に吹付け施工前の試験体 (D10-60→150-3R, D13-60-3R) を示す。本研究では文献 11) で損傷した試験体を対象に、橋脚基部から高さ 800 mm の範囲でかぶりコンクリートの研りを実施した。研り深さは主筋と SHCC を一体化させるため、鉄筋背面から 20 mm 程度とした。

挿入していた異形補強筋は主筋のフーチングからの拔出し対策のため、橋脚基部から 100 mm だけ残し、異形補強筋に沿うように新たに丸鋼鉄筋を挿入した。D10-60→150-3R では、φ9 丸鋼鉄筋を正負側 5 本ずつの計 10 本、D13-60-3R では、φ13 丸鋼鉄筋を正負側 3 本ずつの計 6 本を使用した。丸鋼鉄筋の上端と下端をそれぞれフレア溶接により、元の主筋と異形補強筋に定着した。

D10-60→150-3R の主筋は、正負側とも 4 本ずつ橋脚基部から高さ 325 mm 付近で破断しており、はらみ出しが顕著であった。断面寸法を変えずに断面修復をするために、はらみ出しが顕著であった主筋を計 6 本切除した。

D13-60-3R の主筋は、負側において 1 本のみ橋脚基部から高さ 325 mm 付近で破断しており、はらみ出しについては、D10-60→150-3R と比較して軽微であった。このため、はらみ出しが顕著であった破断した主筋 1 本のみ切除した。

補修材の吹付け施工は、文献 11) と同様に湿式吹付け工法により断面修復を実施した。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-2 に SHCC の配合を示す。使用繊維はポリビニルアルコール (PVA) 繊維とした。材料強度試験は荷重試験日に行い、圧縮強度と引張強度はそれぞれ 39.3 N/mm<sup>2</sup>、4.0 N/mm<sup>2</sup> であった。

## 3. 正負交番荷重実験

### 3.1 実験概要

図-4 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荷重ブロックに接続し、試験体にそれぞれ軸力と水平力を荷重した。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。D10-60→150-3R と D13-60-3R の荷重軸力と荷重基準変位  $\delta_y$  は、既往研究<sup>9-10)</sup>との比較のために、D10-60→150-3R は 150 kN、4.44 mm、D13-60-3R は 60 kN、

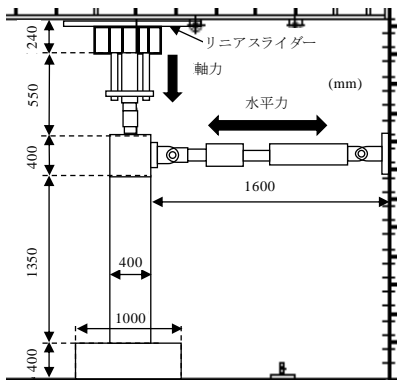


図-4 実験システム

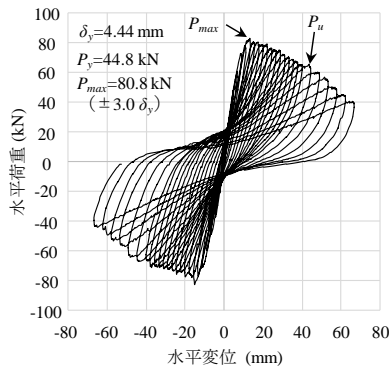


図-5 荷重変位関係 (D10-60→150-3R)

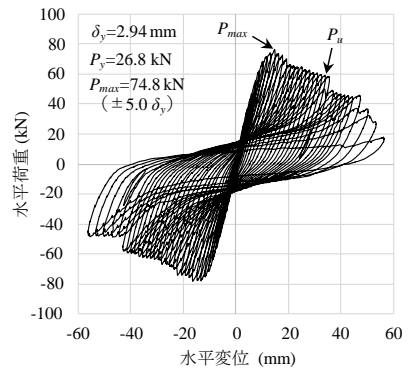


図-6 荷重変位関係 (D13-60-3R)



(a) 正側 (b) 負側 (a) 正側 (b) 負側

写真-6 損傷状況  
(D10-60→150-3R)

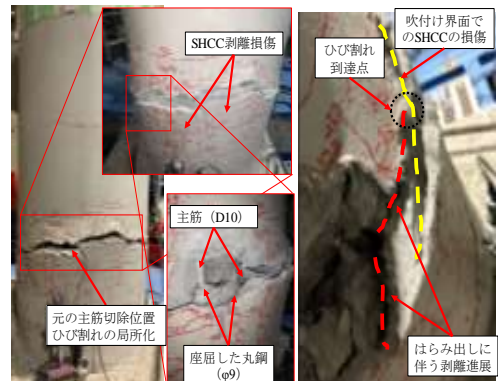


写真-8 損傷部観察  
(D10-60→150-3R)

2.94 mm とした。荷重基準変位  $\delta_y$  は、既往研究<sup>9-10)</sup>と同様の降伏変位であり、引張最外縁の主筋が降伏時の橋脚天端の水平変位を降伏変位  $\delta_y$  としている。また、降伏変位  $\delta_y$  時の荷重を降伏荷重  $P_y$  としている。荷重方法は、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 サイクル荷重した。なお、D10-60→150-3R は既往研究<sup>9-10)</sup>と同様に  $\pm 8.0 \delta_y$  以降は  $\pm 1.0 \delta_y$  ずつ増加させた。

### 3.2 水平荷重－水平変位関係

図-5 に D10-60→150-3R の履歴曲線を示す。荷重基準変位  $\delta_y$  は 4.44 mm とし、 $1.0 \delta_y$  時の荷重は 44.8 kN を示し、最大耐力は、 $3.0 \delta_y$  時 ( $\delta=13.38$  mm) に 80.8 kN を示した。最大耐力以降は徐々に耐力低下を示しながら、 $10.0 \delta_y$  時 ( $\delta=44.38$  mm) の荷重が試験体の最大耐力の 80% 程度まで耐力低下し、終局に到達した。終局後は丸鋼鉄筋のはらみ出し損傷が見られ、主筋の切除箇所の下端 (橋脚基部から高さ 300 mm の付近) の補修材が剥離した。 $\pm 15.0 \delta_y$  を最終ループとして荷重終了した。

図-6 に D13-60-3R の履歴曲線を示す。荷重基準変位  $\delta_y$  は 2.94 mm とし、 $1.0 \delta_y$  時の荷重は 26.8 kN を示し、最大耐力は  $5.0 \delta_y$  時 ( $\delta=14.86$  mm) に 74.8 kN を示した。最大耐力以降は徐々に耐力低下を示しながら、 $11.0 \delta_y$  時 ( $\delta=32.56$  mm) の荷重が試験体の最大耐力の 80% 程度まで耐力低下し、終局に到達した。終局後は主筋の破断とともに急激な耐力低下を示し、 $\pm 19.0 \delta_y$  を最終ループと

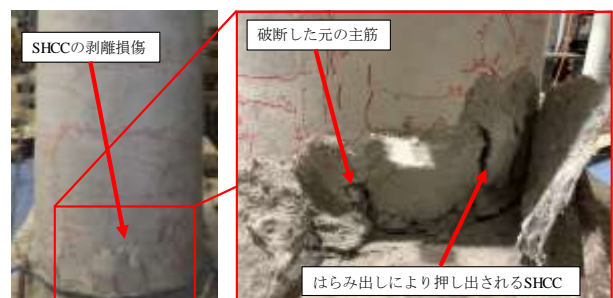


写真-9 損傷部観察 (D13-60-3R)

して荷重終了した。

### 3.3 損傷状況

写真-6 と写真-7 に試験後の D10-60→150-3R と D13-60-3R の損傷状況を示す。D10-60→150-3R では、曲げによる水平ひび割れと、水平ひび割れが進展して形成された斜めひび割れが複数微細ひび割れとして生じた。最大耐力付近にて主筋の切除箇所の下端 (橋脚基部から高さ 300 mm の付近) において水平ひび割れが局所化した。最大耐力以降では、局所化した水平ひび割れの開閉により、ロッキング挙動を示した。終局以降、圧縮側の補修材は丸鋼鉄筋のはらみ出しにより剥離が生じたが、橋脚基部や補修部上部の損傷が軽微であったことから、主筋の切除位置に損傷が集中したものの、補修部補強筋としての丸鋼を用いたことにより損傷低減効果を示したといえる。

D13-60-3R では、曲げによる水平ひび割れや斜めひび

割れの形成を確認したが、D10-60→150-3R で見られたひび割れの局所化が橋脚基部にて生じ、ロッキング挙動を示した。負側の橋脚基部の圧縮部では、SHCC の剥離を示したが(写真-7(a)), 正側では、試験終了時でも SHCC の損傷はほとんどみられなかった(写真-7(b))。D13-60-3R の補修前の主筋のはらみ出しは軽微であり、主筋の切断は、負側の最外縁の主筋の1本のみとしていたことから、損傷は負側の橋脚基部で生じたと考えられる。

写真-8 に D10-60→150-3R の正側の剥離片を剥がした後の状況を示す。元の主筋の切除箇所である橋脚基部から高さ 300 mm 付近では、ひび割れが局所化し、それより上部での損傷は軽微であることから、補修部補強筋として挿入した丸鋼の効果が示された。剥離している SHCC を剥がした後、丸鋼は、座屈損傷を示していた。また、丸鋼のはらみ出しにより、SHCC は剥離していた。ひび割れが局所化した損傷部の観察から、SHCC の圧縮縁では、最大耐力以降において、圧縮荷重により黄色の点線で示されるひび割れの損傷が生じたと推察した。これは、仕上げ時の吹付け界面に相当していると考えられる。座屈した丸鋼鉄筋による SHCC の剥離損傷は、終局以降において、丸鋼鉄筋のはらみ出しにより、SHCC は丸鋼鉄筋位置から、赤色の点線で示した経路をかぶり表面に向かって剥離が進展したと推察した。なお、この SHCC の内部からの損傷進展が、吹付け界面へ到達した後、かぶり表面の SHCC が広範囲に剥離したといえる。

写真-9 に D13-60-3R の負側にて橋脚基部の剥離片を剥がした後の状況を示す。橋脚基部にて元の主筋は座屈し、破断していた。SHCC は、はらみ出した鉄筋により押し出されて剥離していた。剥離面の観察により、吹付け界面では、こて塗り仕上げにより吹付け面が平坦となっていることが考えられる。このため、SHCC の繊維の配向が断面の円周方向となることで、吹付け界面を架橋する繊維の本数が少なく、弱点となる可能性を示した。

### 3.4 既往研究<sup>10-11)</sup>との比較

ここでは、各試験体の荷重変位関係を降伏荷重  $P_y$  と降伏変位  $\delta_y$  により正規化した包絡線により比較を実施している。図-7、図-8 に文献 10, 11), 及び本研究において検討してきた試験体の包絡線の比較を示す。各試験体の包絡線の比較により、本節の丸鋼を補修部補強筋として用いた補修工法の補修効果を検討した。図-7 の包絡線の比較に用いた試験体は、D10-60→150-1R, D10-60→150-2R, 丸鋼を補修部補強筋として挿入した D10-60→150-3R とした。図-8 の包絡線の比較に用いた試験体(載荷軸力 60kN 下)は、D13-60-1R, D13-60-2R, 丸鋼を補修部補強筋として挿入した D13-60-3R とした。

図-7 の包絡線の比較により、丸鋼を挿入した D10-60→150-3R の初期剛性は、D10-60→150-1R, D10-60→150-

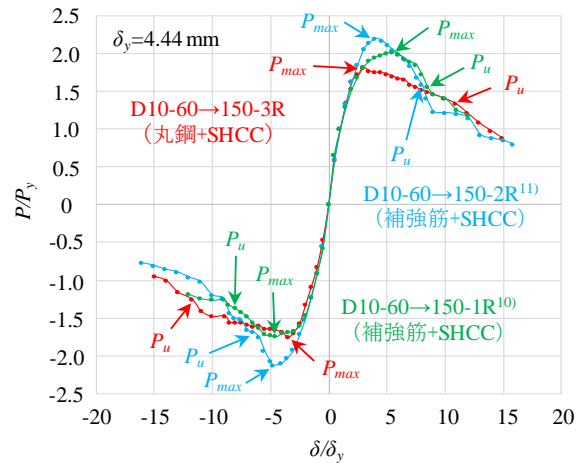


図-7 D10 試験体

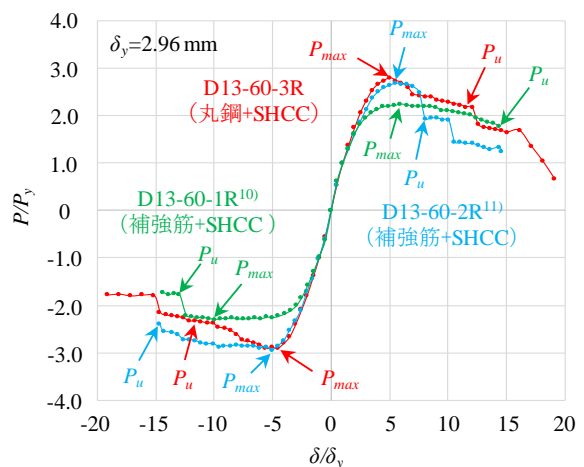


図-8 D13 試験体

2R と同程度であることを示した。D10-60→150-3R は、D10-60→150-1R, D10-60→150-2R と比較して早期に最大耐力到達後、荷重低下を示した。D10-60→150-3R の最大耐力は、D10-60→150-1R, D10-60→150-2R と比較して低いことを示しており、主筋に丸鋼を用いた挙動と類似している傾向が示された<sup>3)</sup>。D10-60→150-3R の終局変位については、D10-60→150-1R, D10-60→150-2R と比較して大きく、塑性変形性能の向上を示した。これは、丸鋼鉄筋によるロッキング挙動、並びに SHCC が有する剥離抑制効果による丸鋼のはらみ出しの抑制によるものと考えられる。

図-8 の包絡線の比較により、丸鋼を挿入した D13-60-3R の初期剛性は、D13-60-1R, D13-60-2R と同程度であることを示した。D13-60-3R は、同様に D13-60-1R, D13-60-2R と比較して早期に最大耐力到達後、荷重低下を示した。D13-60-3R の最大耐力は、D13-60-1R よりも高く、D13-60-2R と同程度であることから、最大耐力の回復が可能であった。D13-60-3R の終局変位は、D13-60-1R と比較して小さいが、D13-60-1R の耐力程度を保持しており、塑性変形性能の回復が示された。D13-60-3R の最大耐力の向上は、D13-60-2R の主筋の損傷状況が軽微であった

こと、はらみ出しが顕著であった負側の主筋1本のみの切除としたため、引張鉄筋比が高かったことが要因として考えられる。最大耐力以降については、はらみ出しが生じていた橋脚基部の元の主筋に損傷が集中し、低サイクル疲労破断が生じたが、水平変位が40mm付近まで補修前の試験体の耐力を下回ることはなかった。

#### 4. まとめ

本研究では、RC橋脚の塑性ヒンジ区間の損傷低減を目指し、SHCCを吹付け施工した塑性ヒンジ補修部を対象に、丸鋼鉄筋を補強筋として用いた効果について、正負交番載荷実験により検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

1. 丸鋼鉄筋を補修部の補強筋として用いた実験の結果、補強筋挿入による耐力上昇を抑えつつ、変形性能が補修前の橋脚と同程度以上に回復することを明らかにした。
2. 丸鋼挿入区間における主筋の切除箇所においてひび割れ損傷が局所化し、丸鋼は座屈損傷を示したが、橋脚基部や補修部上部の損傷が軽微であった。

以上より、丸鋼を補強筋として用いて、SHCCにより補修した試験体では、補強筋挿入による耐力上昇を抑えつつ、補修部の損傷低減による補修部材の変形性能の向上が可能であることが示された。なお、著者らは補強筋とコンクリートの付着切れを考慮した解析により、本実験の丸鋼補強筋の効果の解析的検討を進めている。

#### 参考文献

- 1) 川島一彦, 細入圭介, 庄司学, 塚淳一: 塑性ヒンジ区間で主鉄筋をアンボンドした鉄筋コンクリート橋脚の履歴特性, 土木学会論文集, 土木学会, No.689, I-57, pp.45-64, 2001.10
- 2) 陸好宏司, 牧剛史, Govinda, R. P., 杉田清隆: 鉄筋の付着を制御することによるRC柱部材の耐震性状改善に関する研究, 土木学会論文集, 土木学会, No.802, V-69, pp.155-169, 2005.11
- 3) 澤松俊寿, 三田村浩, 西弘明, 松本高志, 加保勇介: 柱部の鉄筋に丸鋼を用いた鉄筋コンクリート橋脚

の履歴特性, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.58A, pp.333-342, 2012.3

- 4) 山本翔吾, 木下幸治: RC橋脚の履歴曲線に及ぼす鉄筋とコンクリートの付着性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.79-84, 2018.7
- 5) 土木学会: 繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会(第2期)委員会報告書 繊維補強コンクリートの構造設計とその課題, コンクリート技術シリーズ No.119, 2018.9
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 市川翔太, 張鋭, 佐々木智大, 川島一彦, Mohamed, E., 松崎裕, 山野辺慎一: UFCセグメントを用いた橋脚の耐震性, 土木学会論文A1, Vol.68, No.4, I\_533-I\_542, 2012.3
- 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: 曲げ破壊したRC橋脚の補修工法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1273-1278, 2019.7
- 11) S. Yamamoto, K. Kinoshita, S. Lim and K. Shinya: Unilateral Cyclic Loading Tests on Repaired 0.2-scale RC Column Models Using SHCC, The Third International Bridge Seismic Workshop - 3rd IBSW, Oct. 2019
- 12) 岩田秀治, 関雅樹, 上月隆史, 阿知波秀彦: 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, 第66回年次学術講演概要集, 土木学会, 第I部門, pp.765-766, 2011.9