

ひずみ硬化型セメント複合材料で補修された RC橋脚の補修性能

山本 翔吾¹・矢野 義知²・高橋 雅宗³・木下 幸治⁴
林 承燦⁵・新家 一秀⁶

¹学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

²学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科環境社会基盤工学（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

³非会員 岐阜大学 工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

⁴正会員 工博 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

⁵正会員 工博 株式会社デーロス・ジャパン 企画開発本部（〒921-8005 石川県金沢市間明町2-70）

⁶正会員 工博 トーヨーマテラン株式会社 技術部（〒480-0303 愛知県春日井市明知町1512）

1. はじめに

RC橋脚の耐震補強・補修に関して、これまでに多くの研究^{1)~6)}が実施されている。例として、文献3)では、超高強度ひずみ硬化型モルタルによる補修を対象として、縮小試験体を用いた検討を行い、座屈が生じた主鉄筋をそのままに補修した場合であっても、初期剛性は低下するが、最大耐力や変形性能は、補修前と補修後で同程度であることを明らかにしている。また、その実験の損傷領域は、文献5)により解析的に概ね再現可能であることが示されている。しかし、既往の研究の多くは相似則を満足していない縮小試験体の使用に留まっているため、実橋脚に適用した場合の補修性能は十分に把握できているとは言い難い。

著者らは、これまでにRC橋脚の寸法効果に関する研究として、既往の研究で実施された実大橋脚⁷⁾の1/10と1/5縮小試験体を製作して繰返し載荷試験を行い、実大橋脚の履歴曲線を概ね再現可能であることを明らかにしている^{8),9)}。そこで、本研究では、著者らの研究^{8),9)}を基に、実大円形RC橋脚の再現性が高い円形RC橋脚縮小試験体を用いた補修性能の検討を行った。ここでは、ひずみ硬化型セメント複合材料（SHCC）による補修を対象とし、補修した円形RC橋脚縮小試験体の再載荷試験により、履歴特性の比較だけでなく補修部や鉄筋の損傷状況の観察から補修性能を検討した。

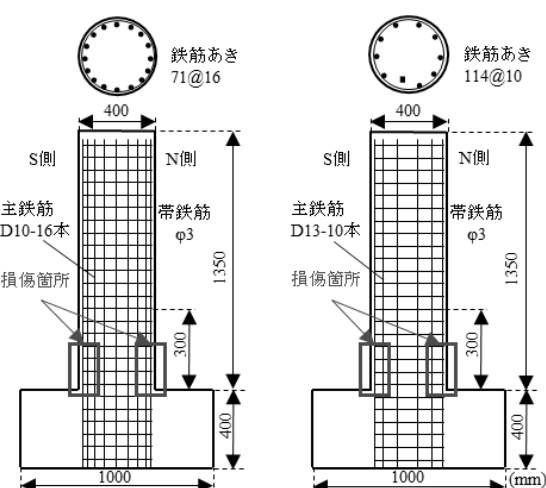
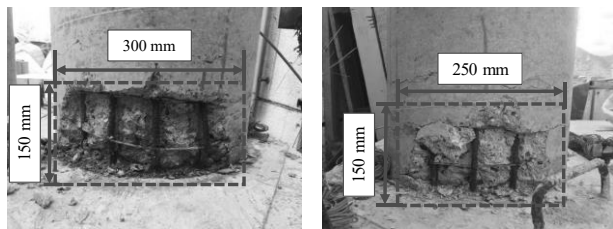


図-1 円形 RC 橋脚試験体

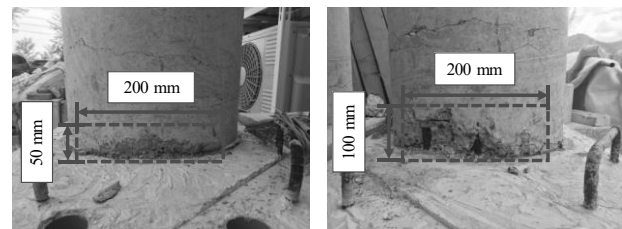
2. 試験体の概要

図-1に試験体の形状と寸法、ならびに損傷箇所を示す。既往の研究⁹⁾により損傷した円形RC橋脚に対して補修を施し、再度繰返し載荷試験を実施した。円形RC橋脚縮小試験体の高さは1350 mm、断面寸法は直径が400 mmの円形断面とした。主鉄筋に異形鉄筋D10、D13を使用し、同じ鉄筋比（1.0 %）とした縮小試験体をそれぞれD10試験体、D13試験体とする。帯鉄筋は橋脚基部から65 mmごとに使用した。図-2にD10試験体の損傷状況を示す。S側では橋脚基部から高さ150 mm、幅300 mmの範囲（図-2（a））、N側では橋脚基部から高さ150 mm、幅250 mmの範囲（図-2（b））においてかぶりコンクリー



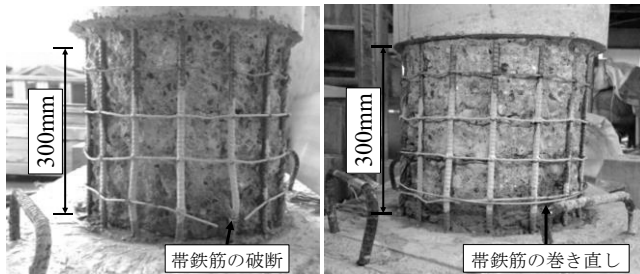
(a) S側 (b) N側

図-2 D10 試験体の損傷状況



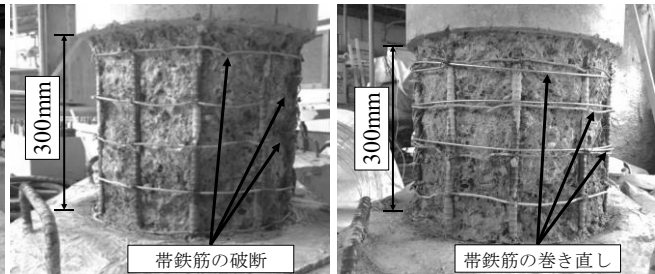
(a) S側 (b) N側

図-3 D13 試験体の損傷状況



(a) S側 (b) N側

図-4 D10 試験体の研り状況



(a) S側 (b) N側

図-5 D13 試験体の研り状況

トが剥離していた。また、S側の主鉄筋は座屈によりはらみ出しており、橋脚基部から1段目の帯鉄筋が破断していた。図-3にD13試験体の損傷状況を示す。S側では橋脚基部から高さ150 mm、幅300 mmの範囲（図-3（a））、N側では橋脚基部から高さ150 mm、幅250 mmの範囲（図-3（b））においてかぶりコンクリートが剥離していた。D10試験体はD13試験体と比較して損傷範囲が広く、主鉄筋の座屈がみられた。図-4、図-5に損傷した試験体のコンクリートの研り状況を示す。橋脚の基部から300 mmの範囲のかぶりコンクリートをチップングにより研った。研り深さは主鉄筋径を含めたかぶり深さを目標とし、D10試験体の一番深い箇所では35 mm、一番浅い箇所では21 mm、D13試験体の一番深い箇所では52 mmであった。研り後、D10試験体は載荷試験により帯鉄筋が破断していた箇所以外に帯鉄筋の破断は確認できなかった。一方でD13試験体は新たに橋脚基部から2段目、3段目、4段目の箇所に帯鉄筋の破断が確認できた。既往の研究^{3), 6)}を基に、座屈した主鉄筋の曲げ戻しと緩んだ帯鉄筋の取り替えは行っていない。しかし、帯鉄筋が破断した箇所については橋脚製作時と同様の帯鉄筋を新たに巻きなおした。補修材にはSHCCを用いた。SHCCはひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ効果を持つ材料である。既往の研究^{3), 6)}において、超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料を補修材として用いた結果、終局に至るまで補修材の剥離が認められていないことから、本研究でも高い剥離抑制効果が期待できる。SHCCの配合は水結合材比40 %、単位水量335 kg/m³で長さ12 mm、直径0.04 mmのポリビニルアルコール（PVA）繊維を2 vol%混入させた。既往の研究⁶⁾では、橋脚のコンク

リートよりも高強度な補修材を用いたRC部材の補修前後の耐荷力、変形性能について検討された。その結果、補修後は補修前に比べ曲げ耐力が回復したが、損傷発生位置は補修した橋脚基部の上部に移動することが確認された。実橋を考慮した場合、橋脚の耐力増加に伴う橋脚基礎のアンカーの損傷が懸念されることから、補修後も橋脚躯体が損傷することが望ましい。そこで、本研究では補修部が再度損傷するように補修材の圧縮強度を小さくした。補修に用いたSHCCの圧縮試験とダンベル型試験体による一軸引張試験は地震後の橋脚に対する早期補修^{3), 6)}を想定し、材齢14日で強度試験を行った。表-1に補修に用いたSHCCの圧縮強度と引張強度を示す。図-6に橋脚のコンクリートとSHCCの圧縮側の応力-ひずみ関係、図-7にSHCCの引張側の応力-ひずみ関係を示す。SHCCの圧縮強度の平均値は23.1 N/mm²、引張強度の平均値は4.5 N/mm²であった。橋脚のコンクリートの圧縮強度の平均値は43.6 N/mm²であった。なお、D10試験体は材齢10日時、D13試験体は材齢15日時に載荷試験を実施したため、圧縮強度試験時と材齢が若干異なる。このため、D10試験体では、経験的ではあるが圧縮強度が2 N/mm²程度小さいと思われる。試験体の補修は、既往の研究⁴⁾を基に、残留変位が荷重-変位関係に及ぼす影響を避けるため、水平変位、および水平荷重をゼロに戻した状態で補修を施した。また、断面の拡大による曲げ耐力の上昇を避けるために損傷前の断面と同一の寸法とした。研り箇所の補修は練り混ぜを行った材料をポンプにより圧送し吹付けを行った。吹付けは3層に分けて実施し表面はコテ塗仕上げで行った。図-8、図-9に載荷システムと載荷方法を示す。2本の

表-1 SHCC の強度

(N/mm ²)	圧縮強度	引張強度
1	22.5	5.04
2	23.3	4.44
3	23.5	4.36
4	-	4.19
5	-	4.70
Ave.	23.1	4.54

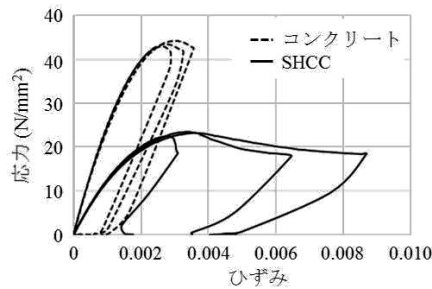


図-6 圧縮試験結果

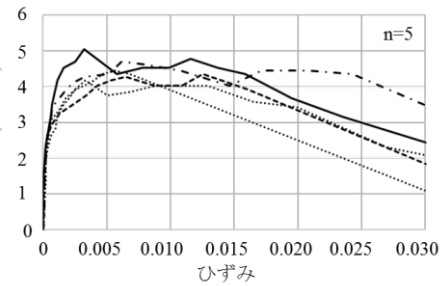


図-7 引張試験結果

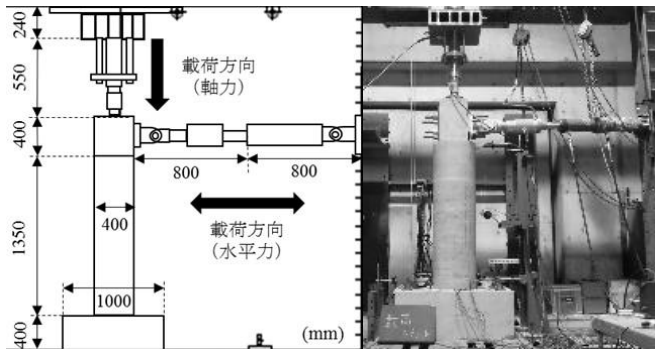


図-8 荷重システム

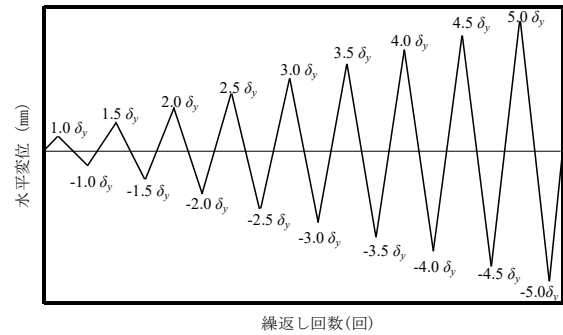


図-9 繰返し荷重方法

油圧ジャッキによりそれぞれ軸力、水平力を荷重した。軸力は150 kNを荷重している。軸力用ジャッキはスライダー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。水平力用ジャッキはピン結合されているため回転が可能となっている。また、水平力用ジャッキの最大ストロークは±150 mmである。荷重システムと荷重方法は損傷状況と履歴特性を比較するため補修前⁶⁾と同様とした。補修前の降伏変位 δ_y を基準にD10試験体では±16.0 δ_y 、D13試験体では±18.0 δ_y で最大荷重の50 %程度までの荷重低下を確認したため荷重を終了した。

3. 試験結果

図-10、図-11にD10試験体、D13試験体の補修前後のP - δ 曲線を示す。D10試験体は補修後の最大荷重は±3.5 δ_y ($\delta=15.5$ mm) 付近で62.5 kNとなり、補修前の最大荷重71.8 kN (±9.0 δ_y , $\delta=40.0$ mm) の90 %程度に回復したことが確認できた。D13試験体は補修後の最大荷重は±5.5 δ_y ($\delta=21.4$ mm) 付近で64.0 kNとなり、補修前の最大荷重70.3 kN (±9.0 δ_y , $\delta=35.0$ mm) の90 %程度に回復したことが確認できた。補修後の最大荷重までの荷重増加は補修前の荷重増加に比べて大きいことが確認でき、最大荷重以降では補修後の耐力の低下が補修前に比べ早いことが確認できた。早期耐力低下が起きた要因の一つとして補修前の荷重実験で受けた主鉄筋の座屈損傷を

そのままとしていることで、主鉄筋が曲がりやすかったことが考えられる。

図-12、図-13にD10試験体、D13試験体の±1.0 δ_y 、±3.0 δ_y 、±5.0 δ_y を抜き出した補修前後の履歴曲線を示す。これらは伸び出しによる水平変位の補正を行った履歴曲線である。補修前後の履歴曲線の形状はD10試験体では±1.0 δ_y から±3.0 δ_y までは類似しており、D13試験体では±1.0 δ_y から±5.0 δ_y までは類似していることが確認できた。D10試験体の補修後の初期剛性は低いことが確認できるが、±3.0 δ_y 、±5.0 δ_y では剛性が概ね同定であることがわかる。一方、D13試験体も同様に、±1.0 δ_y では補修後の剛性が低くなっているが、±3.0 δ_y 、±5.0 δ_y では概ね剛性が一致していると言える。以上より、補修後のD10試験体とD13試験体の初期剛性は補修前と比べ低いことが確認できたが、それ以降最大耐力までは概ね一致することがわかった。これは、補修に用いたSHCCの複数微細ひび割れ効果とひずみ硬化特性により、引張側において補修に用いたSHCCが引張力を分担したためではないかと考えられる。

図-14、図-15に補修後のD10試験体、D13試験体の試験後の損傷状況を示す。補修後は補修前に比べて補修材に使用したSHCCの複数微細ひび割れ効果により、ひび割れ本数が非常に多くなっていることがわかる。D10試験体は、補修部の1/3の100 mm程度の範囲に小さく浅いひび割れが複数個所に発生した。一方、D13試験体は補修部の1/2の150 mm以上の範囲

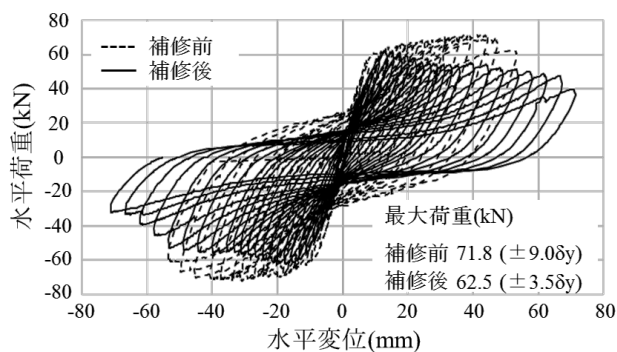


図-10 D10 試験体の $P-\delta$ 曲線

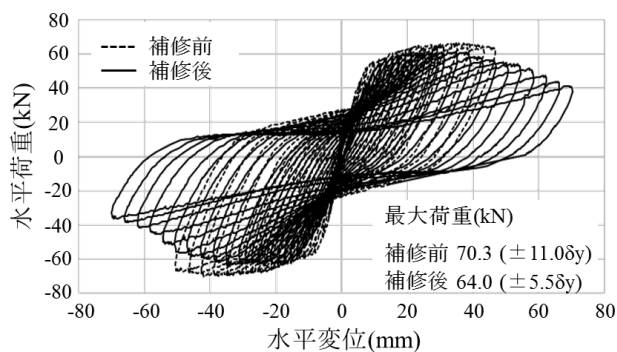
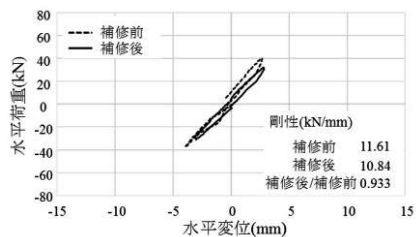
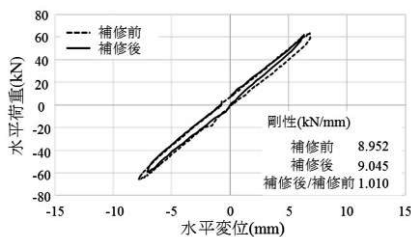


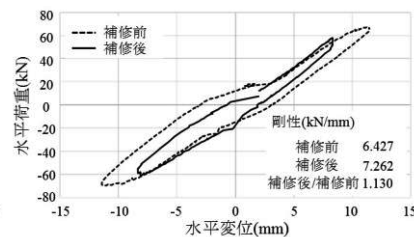
図-11 D13 試験体の $P-\delta$ 曲線



(a) $\pm 1.0 \delta_y$

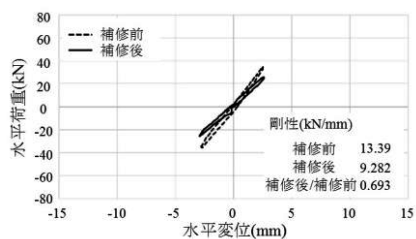


(b) $\pm 3.0 \delta_y$

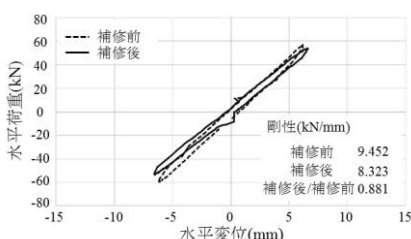


(c) $\pm 5.0 \delta_y$

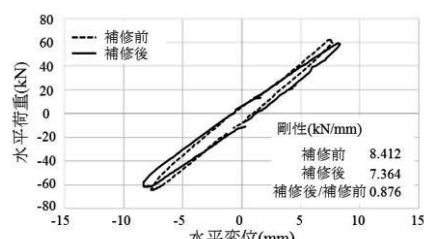
図-12 D10 試験体の履歴曲線



(a) $\pm 1.0 \delta_y$



(b) $\pm 3.0 \delta_y$



(c) $\pm 5.0 \delta_y$

図-13 D13 試験体の履歴曲線

に大きく深いひび割れが一つに連なって発生した。
また、D10試験体の方がD13試験体より主鉄筋本数が多いことから主鉄筋に沿ったひび割れが多く確認できた。かぶりコンクリートの剥離については、補修前では主鉄筋の外側のかぶりコンクリートが大きく剥離するのに対して、補修後はひび割れに沿って剥離するとともに、3層に吹き付けた補修部が層ごとに剥離し、特に外側の1層目が大きく剥離する損傷形態であった。

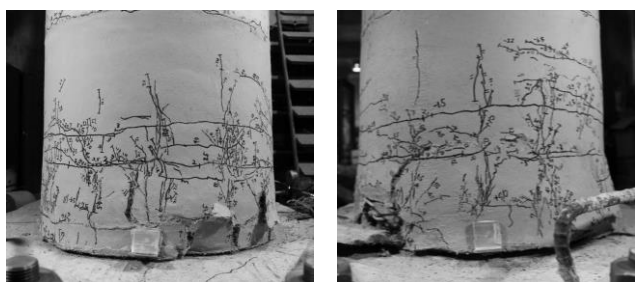
図-16、図-17にD10試験体、D13試験体の補修部を剥がした後の状況を示す。どちらの試験体においても、水平荷重載荷方向（S側、N側）の最外縁付近で帯鉄筋が破断していたことが確認でき、コアコンクリートでも損傷が発生していたことが確認できた。また、D10試験体においてはN側の最外縁とその左右の主鉄筋3本が1段目の帯鉄筋の高さで破断していた。破断箇所は主鉄筋が最もはらみ出した箇所の節間で確認できた。最外縁の左右の主鉄筋は、最外縁の主鉄筋と比べ破断面の角度が大きく、はらみ出した箇所の内側に亀裂がみられた。

4. 損傷部の観察

ここでは、補修部や主鉄筋の損傷部の観察から補修後のRC橋脚の補修部付近の破壊現象を推察した。

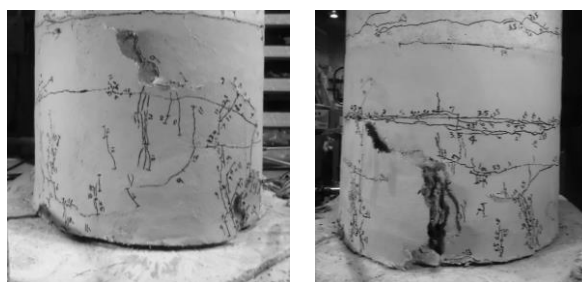
(1) X線CTシステムによる補修部の観察

補修部付近の破壊現象をより明確にするため、X線CTシステムを用いて補修部の観察を行った。このX線CTシステムは対象物にX線を照射することにより、対象物の断面画像を作成する非破壊試験機である。図-18は観察した補修部の位置と補修部の観察方向、並びに、観察結果を示す。観察対象はD10試験体のN側の剥がされた最外縁の補修部とした。観察方向は橋脚基部から高さ方向とし、補修部の断面を観察した。図-18 (b) は橋脚基部から高さ100 mmでの補修部の断面の観察結果を示す。断面上部は橋脚の最外縁である。また、断面下部はコアコンクリート側（以下、コア側）である。図-18 (b) より、主鉄筋周辺に発生したひび割れを確認した。こ



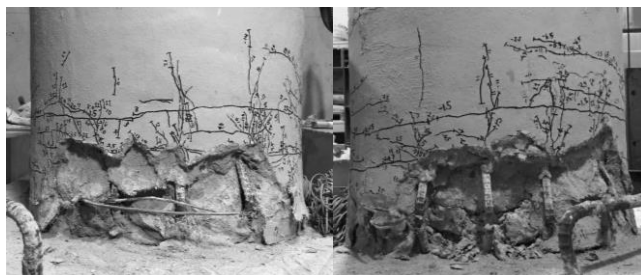
(a) S側 (b) N側

図-14 試験後の D10 試験体



(a) S側 (b) N側

図-15 試験後の D13 試験体



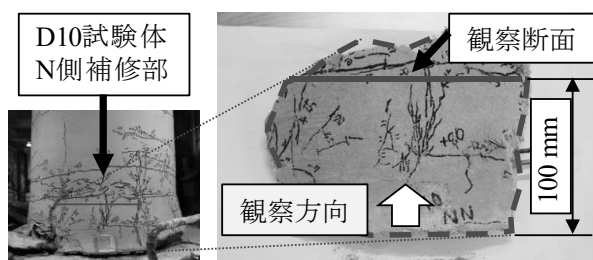
(a) S側 (b) N側

図-16 補修部を剥がした後の D10 試験体



(a) S側 (b) N側

図-17 補修部を剥がした後の D13 試験体



(a) 観察した補修部の位置と観察方向



(b) X線 CT システムによる観察結果

図-18 補修部の観察結果

のひび割れは断面上部の最外縁には進展せず、円周方向にひび割れが進展し、隣り合う主鉄筋から発生したひび割れが合体したことがわかり、すなわち、かぶりコンクリート外側のひび割れ分布と大きく異なった損傷が橋脚内部で生じていることがわかった。このひび割れの円周方向への進展経路は、SHCCを吹付け施工した際の層間に概ね一致しており、吹付け施工を各層に分けたことが一つの要因と考えられる。さらに、このひび割れの進展により、補修部の内部でコア部と剥離が生じることで、橋脚自体の断面が早期に減少することに繋がるため、補修後のD10試験体の最大荷重以降の耐力低下の要因の一つとして考えられるのではないかと推察できる。以上のように、補修後の载荷試験では補修部の内部の破壊現象は外部から確認できないが、X線CTシステムを用いた補修部の観察により補修部の内部の破壊現象は確認できた。なお、X線CTシステムによる繊維の配向の観察は今後の課題としている。

(2) SEMによる主鉄筋の破断面の観察

主鉄筋の破断は、既往の研究¹⁰⁾で示されるようにポストピーク領域後半における低サイクル疲労破断と考えられる。そこで、図-19に示すように最外縁の主鉄筋の破断面(図-19(b))を走査型電子顕微鏡(SEM)により観察した。なお、図-19(b)中の破断面の内側と外側は、それぞれコアコンクリート側、かぶり側を示しており、図-19(b)より内側では、破面に多少の凹凸があり鈍い光沢がみられるが、外側では破面は平面で金属光沢がみられるなど、内側と外側で破面の特徴が異なることが確認できた。図-19(b)に示す点A付近をSEMにより観察した結果、延性破壊に多くみられるディンプル¹¹⁾が確認できた。ただし、点Aにおいてディンプルが確認できたが、破面に残される繰り返し载荷の痕跡については更なる破面解析が必要である。以上より、主鉄筋は低サイクル疲労により破断した可能性が高いと言える。ただし、試験中において、D10試験体では、-13.0 δ 時に大きい金属音が発生した以降、耐力の急激な低下が確認できたことから、主鉄筋が低サイクル疲労破壊に至るまでは、安定した耐力低下を示す

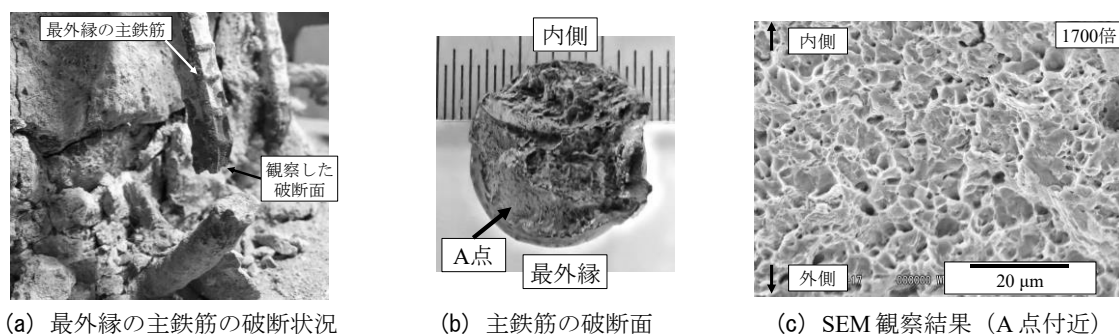


図-19 破断した主鉄筋とその SEM による破断面の観察結果

ことがわかった。

5. まとめ

本研究では、著者らの既往の研究⁹⁾を基に、実大円形RC橋脚の再現性が高い円形RC橋脚縮小試験体を用い、SHCCによる補修を施した上で再載荷試験を行いSHCCの補修性能について検討した。本研究により得られた結果を以下に示す。

1. 補修後の最大耐力は補修前の最大耐力の90 %程度まで回復することが可能である。
2. 吹付け施工を用いたSHCCによる補修による初期剛性の回復には至らなかったものの、SHCCの複数微細ひび割れ効果とひずみ硬化特性から補修後の $\pm 3.0 \delta_y$, $\pm 5.0 \delta_y$ において最大耐力以下では剛性の低下が抑えられることが確認できた。また、最大耐力以降のかぶりの剥離が抑制されることが確認できた。
3. X線CTシステムによる補修部の観察の結果、かぶりコンクリート外側のひび割れ分布と大きく異なった損傷が橋脚内部で生じていた。また、補修部内の主鉄筋周辺に発生したひび割れの進展に伴うコア部との剥離が補修後の最大荷重以降の耐力低下に影響を及ぼした。
4. SEMによる破断面の観察の結果、試験最中に破断した主鉄筋の破壊は、破断面のディンプルの観察結果より、低サイクル疲労破壊の可能性が高いと推察された。

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.
- 2) 渡邊一悟, 畑山朗, 岸徳光, 長谷川正: 正負交番載荷を行った壁式 RC 橋脚の補修効果に関する実験的研究,

コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, 2003.

- 3) 梅田靖司, 国枝稔, 中村光, 玉越隆史, 森井直治: 超高強度ひずみ硬化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.
- 4) 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 E, Vol.68, No.2, pp.121-132, 2012.
- 5) 上田尚史, 張永興, 中村光, 国枝稔: 繰返し荷重を受ける RC 柱の損傷領域評価と補修効果に関する解析的検討, 土木学会論文集 A, Vol.68, No.2, pp.663-671, 2012.
- 6) 稲熊唯史, 奥西淳一, 国枝稔, 加藤貴裕: RC 部材の変形性能に関する実験的研究, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016.
- 7) 岩田秀治, 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, 土木学会第 66 回年次学術講演概要集, 第 I 部門, pp.765-766, 2011.
- 8) 山本翔吾, 杉森克成, 木下幸治, 内田裕市: 円形 RC 橋脚の曲げ復元力特性における寸法効果の実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp.655-660, 2015.
- 9) 山本翔吾, 木下幸治: 異なる軸方向鉄筋径により製作した円形 RC 橋脚縮小試験体の正負交番載荷実験, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.215-220, 2016.
- 10) 瀧口将志, 池永貴史, 北原武嗣, 梶田幸秀: 鉄筋座屈による低サイクル疲労破断への適用を考慮したふし谷部平均ひずみ振幅の断面内分布評価, 構造工学論文集, pp.834-846, 2017.
- 11) 塩谷義, 松尾陽太郎, 服部敏雄, 川田宏之: 最新フラクトグラフィ各種材料の破面解析とその事例, 株式会社テクノシステム, 2010.