

論文 丸鋼鉄筋を補強筋として用いて補修した RC 橋脚のファイバー要素解析

深見 亮介*1・岩田 隆弘*2・木下 幸治*3・山本 翔吾*4

要旨：RC 橋脚において、塑性ヒンジ区間の損傷を低減させ、塑性変形性能の向上を図ることは重要である。本研究では、補修後の RC 橋脚の塑性変形性能の向上を目的に、丸鋼鉄筋を補強筋として用いて補修した RC 橋脚を対象に、補強筋とコンクリートの付着を考慮したファイバー要素解析を実施した。ファイバー要素解析の結果、実験の初期剛性、最大耐力、並びに、補強筋の付着切れに伴う最大耐力以降の耐力低下の再現性が高いことを示した。

キーワード：RC 橋脚, ファイバー要素解析, 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、軸方向鉄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、軸方向鉄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、軸方向鉄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^{1),2),3)}。山本らも、軸方向鉄筋に丸鋼鉄筋を用いた RC 橋脚の荷重実験により、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可能性を示している⁴⁾。

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（FRCC⁵⁾：Fiber Reinforced Cement Composite）の構造利用が検討されている^{6),7),8)}。例えば、梅田ら⁶⁾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荷重実験により、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荷重時と同程度まで回復可能であることを示した。山本らも、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（SHCC⁵⁾：Strain Hardening Cement Composite）の吹付けにより補修した橋脚の荷重実験により、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^{9),10),11)}。

以上より、補修部に架橋効果により剥落の抑制効果のある SHCC と、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、SHCC を吹付け施工した塑性ヒンジ補修部を対象に、補強筋として丸鋼を用いることによる効果について別報¹²⁾の実験

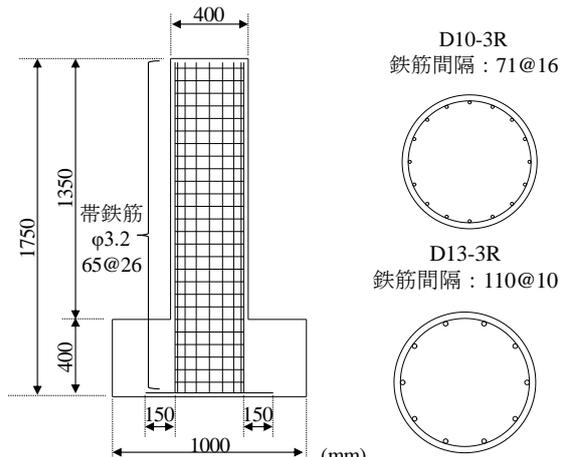


図-1 試験体寸法

表-1 試験体構造パラメータ

試験体名称	軸方向鉄筋	帯鉄筋	軸力 (kN)	SHCCによる補修部の高さ (mm)
D10-3R	D10	φ3.2	150	800
D13-3R	D13		60	800

表-2 使用鉄筋の材料強度

呼び径	降伏強度(N/mm ²)
D10	351
D13	320
φ9	339
φ13	320

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (学生会員)

*2 岐阜大学大学院 工学研究科工学専攻 博士課程 (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 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)

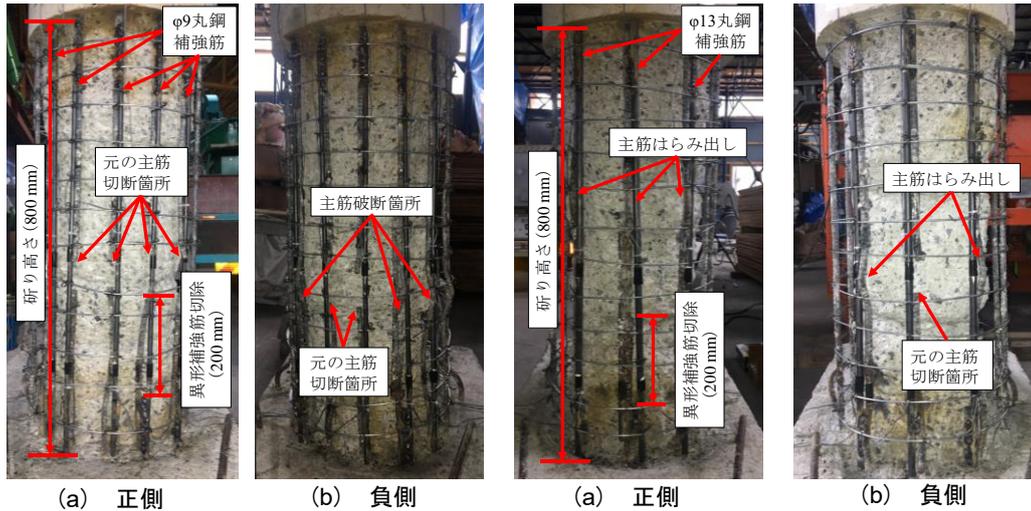


図-2 コンクリート研り状況 (D10-3R)

図-3 コンクリート研り状況 (D13-3R)

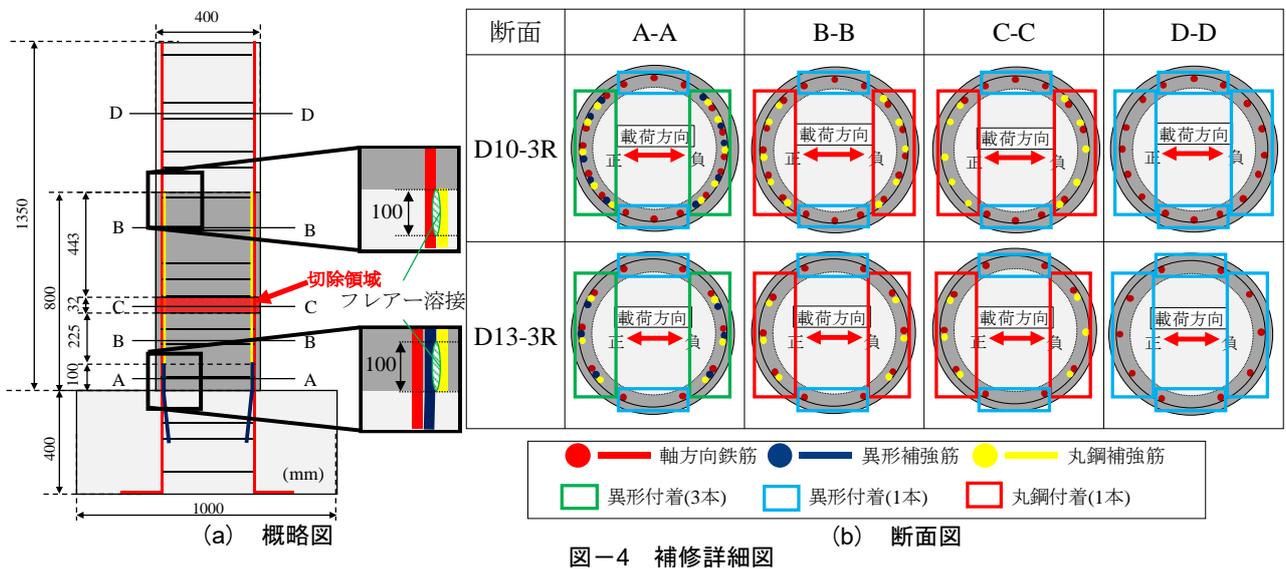


図-4 補修詳細図

結果を基に解析的に検討する。

2. 解析対象

図-1 および表-1 に本解析で対象とする試験体概要と試験体の構造パラメータを示す。試験体は、1/5 スケールの RC 橋脚縮小試験体の載荷実験の後に、補修として損傷部に SHCC の吹付けと鉄筋の抜け出しを抑制する補強筋を追加した試験体 (1R とする) の載荷実験を行い、さらに再度同補修 (2R とする) を行った試験体に対し SHCC の吹付けと補強筋として丸鋼鉄筋を利用した試験体 (3R) である。この内、軸方向鉄筋が D10 のものを D10-3R、D13 のものを D13-3R としている。なお、使用鉄筋の材料強度は表-2 の通りである。

図-2 および図-3 に 2R 試験体の載荷実験後のコンクリート研り状況を示す。2R の試験体の内、D10-2R は載荷試験後に、高さ 325mm 付近で、正側で 1 本、負側で 3 本、D13-2R は負側では 1 本の軸方向鉄筋の破断が生じていた。高さ 325mm 付近で D10-2R は正側で 4 本、負側

で 2 本はらみだしが顕著なものが見られたため、これら全てを切除した。D13-2R は正側で 3 本、負側で 2 本、軸方向鉄筋の座屈によるはらみだしが顕著なものが見られたが、負側の最外縁の 1 本のみ切除した。

図-4 に補修詳細図を示す。本研究では補修区間の軸方向鉄筋にかぶりコンクリートの損傷低減ができる丸鋼を用い、コンクリートに軸方向鉄筋の座屈抑制効果を持つ SHCC を適用した。挿入していた异形鉄筋の補強筋は主筋の抜け出し対策のため、橋脚基部から 100 mm だけ残し、100 mm 残された補強筋と元の主筋に沿うように新たに長さ 800mm の丸鋼を挿入した。D10-3R には φ9 丸鋼鉄筋を正負側 5 本ずつの計 10 本、D13-3R には φ13 丸鋼鉄筋を正負側 3 本ずつの計 6 本を使用した。丸鋼はフレアー溶接により定着長を確保し、補強筋もしくは軸方向鉄筋と接合させた。補修材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。図-5 に載荷システムを示す。

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。D10-3RとD13-3Rの荷重軸力と荷重基準変位 δ_y は、既往研究⁹⁾¹⁰⁾と比較が可能となるようにそれぞれD10-3Rは150kN、4.44mm、D13-3Rは60kN、2.96mmとした。荷重方法は、変位制御により $\pm 0.5\delta_y$ から始めて $\pm 0.5\delta_y$ ずつ増加させ、各1サイクルとした(図-6)。

図-7、図-8にそれぞれD10-3R、D13-3Rの損傷状況を示す。D10-3Rにおいては、軸方向鉄筋の破断が生じていた高さ300mmにおいて水平ひび割れが集中した。終局以降、補修材の剥離損傷が進行した。D13-3Rにおいては橋脚基部で水平ひび割れが局所化し、補修部の損傷は軽微であった。

3. 解析モデル

3.1 モデルの概要

図-9に解析モデルを示す。解析モデルは軸方向鉄筋とコンクリートの付着性状を考慮可能な解析モデルを使用して検討を行う。具体的には、Ichikawa¹³⁾らの解析モデルを参考に、補修部のコンクリートと軸方向鉄筋を別々のファイバー要素でモデル化し、帯鉄筋間隔の1/2ごとの高さに設けた剛体梁要素で結び、ばね要素は帯鉄筋間隔の1/2ごとの高さに軸方向鉄筋に設けた節点と剛体梁要素の軸方向鉄筋側の節点を二重節点としてその間に追加している。なお上下端は躯体により拘束されているものとし、剛結とした。ばね要素は、剛体梁要素の軸方向には軸方向鉄筋の変形に対してコアコンクリートとカバーコンクリート、帯鉄筋が抵抗する抵抗ばね、軸方向鉄筋の軸方向には軸方向鉄筋とコンクリートの付着を表現する付着ばねを与えた。なお、解析ソフトには、UC-win/Frameを使用した。

3.2 材料特性

図-10にコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。コンクリートにはHoshikumaモデル¹⁴⁾を採用し、コアコンクリートは横拘束材による拘束効果を考慮して残留強度を考慮し、カバーコンクリートは残留強度を考慮していない。図-11に軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係は、降伏棚を考慮したトリリニア型の移動硬化モデルとし、降伏棚以降の三次勾配を $E/100$ (E は軸方向鉄筋の弾性係数)とした。

3.3 ばね特性の概要

(1) コア・カバーコンクリートおよび帯鉄筋の抵抗ばね

図-12に軸方向鉄筋の変形に対するコンクリートおよび帯鉄筋の抵抗ばね特性を示す。軸方向鉄筋のコアコンクリート側(負側)への変形に抵抗するばねの剛性は

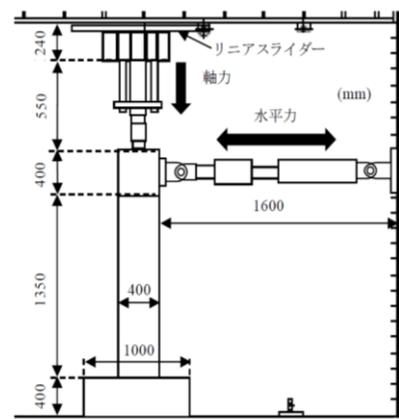


図-5 荷重システム

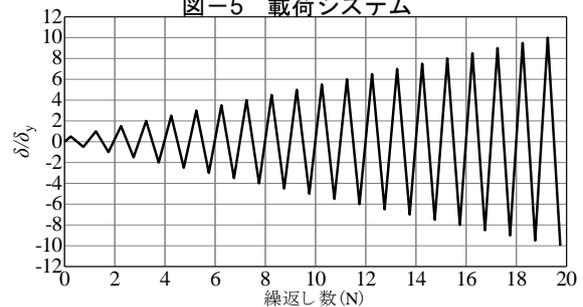
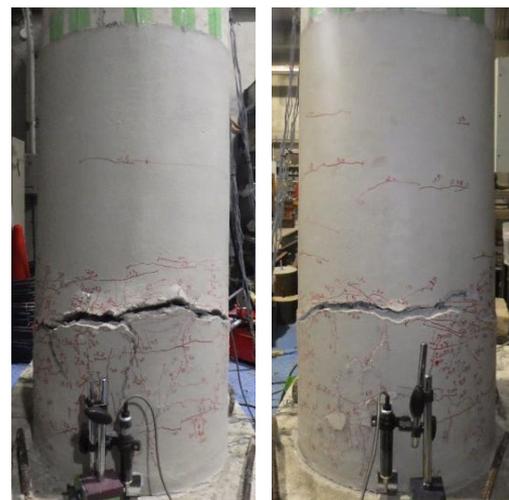


図-6 繰返し荷重方法



(a) 正側 (b) 負側
図-7 D10-3Rの損傷状況



(a) 正側 (b) 負側
図-8 D13-3Rの損傷状況

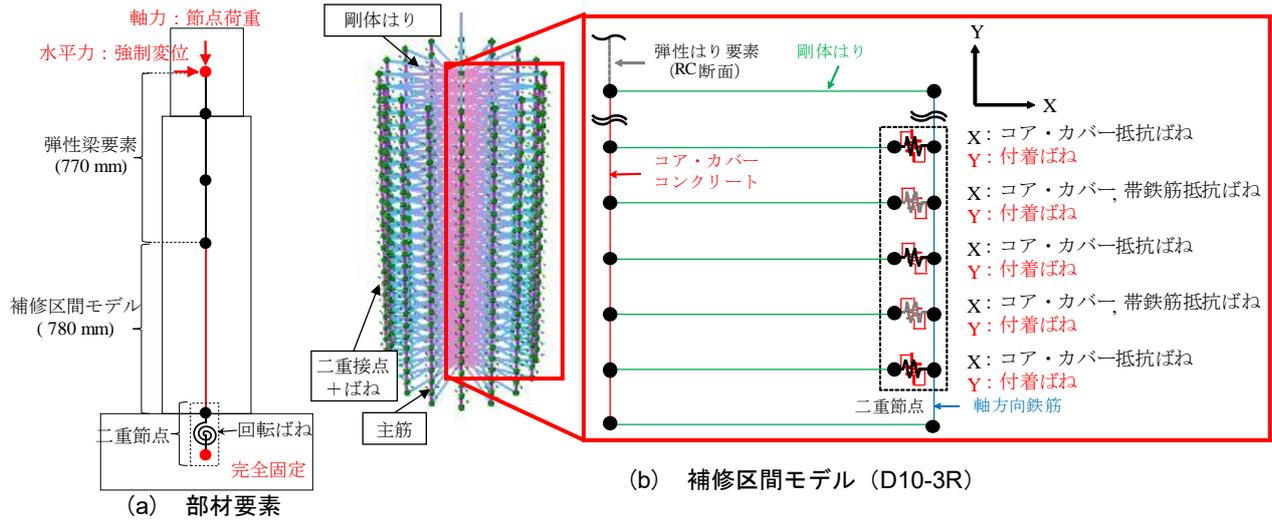


図-9 解析モデル

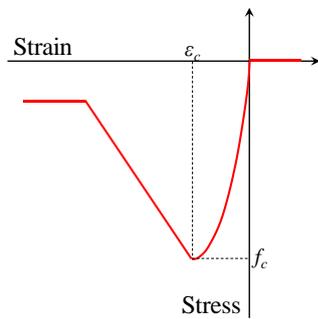


図-10 コンクリートの応力-ひずみ関係

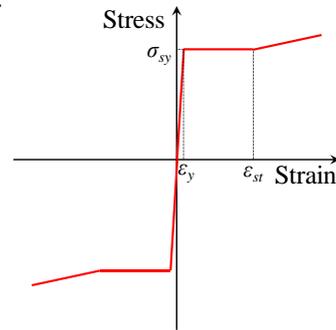


図-11 軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係

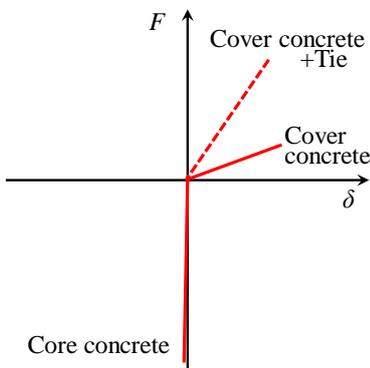


図-12 抵抗ばねの骨格線

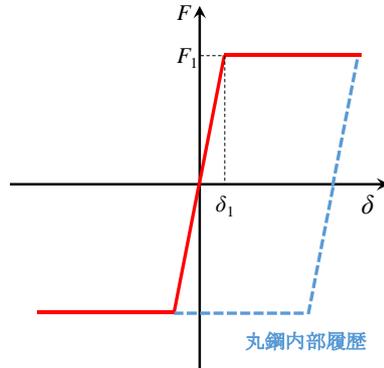


図-13 付着ばねの骨格線

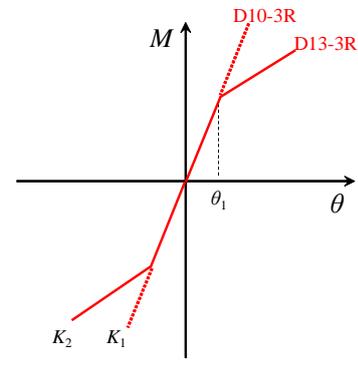


図-14 回転ばねの特性

無限大とし、カバーコンクリート側（正側）への変形に抵抗するばねの剛性は、浅津ら¹⁵⁾の提案に基づき次式で与えた。

$$K_c = k_0 c_0 s \quad (1)$$

ここで、 k_0 はかぶりコンクリートのばね算出係数 0.01、 c_0 は軸方向鉄筋の純かぶり、 s は横拘束筋間隔である。浅津らの提案式は、かぶりコンクリートのひび割れの進展から剥落までも含む平均的な挙動を表すばねとして仮定されている。

一方で、帯鉄筋は曲げ剛性により抵抗する状態と考え、次式で与えた。

$$K_s = 48E_s I_t / l_t^3 \quad (2)$$

ここで、 E_s は横拘束筋の弾性係数、 I_t は横拘束筋の断面二

次モーメント、 l_t は軸方向鉄筋間隔の横拘束筋の長さである。帯鉄筋が位置する抵抗ばねの剛性は、(1)式のカバーコンクリートの抵抗ばねの剛性との足し合わせで表現している。

(2) 軸方向鉄筋とコンクリートの付着ばね

図-13 に軸方向鉄筋とコンクリートの付着ばね特性を示す。異形鉄筋の付着ばねは島ら¹⁶⁾、丸鋼の付着ばねは松岡ら¹⁷⁾により提案された次式の付着応力-すべり関係を荷重-すべり関係に換算して与えた。

$$\text{(異形)} \quad \tau = 0.9f'_c \frac{2}{3} (1 - \exp(-40(S/D)^{0.6})) \quad (3)$$

$$\text{(丸鋼)} \quad \tau = 0.17 \times 0.9f'_c \frac{2}{3} (1 - \exp(-40(S/D)^{0.5})) \quad (4)$$

ここで、 f'_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 S はすべり量、 D は軸方向鉄筋径である。付着応力-すべり関係は等式から分かる様に曲線となり、また付着が切れた後は一般に負剛性となるが¹⁷⁾、本モデルでは計算の簡易化のため付着ばねの骨格はバイリニア型とし、最大付着強度以降は剛性をゼロとした。また、各断面の付着性状を図-4(b)に示す。フレア溶接部のA-A断面において補強筋を挿入した鉄筋においては、異形鉄筋3本の付着を与えた。B-B断面、C-C断面の補強筋を挿入した鉄筋においては、鉄筋の損傷、破断により丸鋼のみに力が伝達されると考え、丸鋼鉄筋1本の付着を与えた。

(3) 軸方向鉄筋の抜け出しを表現する回転ばね

図-14に回転ばねの骨格線、表-2に回転ばねの特性を示す。軸方向鉄筋の抜け出しを表現する回転ばねは、実験結果より算出したモーメント-回転角関係から非線形ばねを与えた。

3.4 荷重方法

節点荷重および強制変位は、実験と同様に橋脚頂部にD10-3Rには150kN、D13-3Rには60kNの軸力を節点荷重で与え、水平方向に繰り返し強制変位を与えた。

4. 解析結果

(1) D10-3R 試験体

図-15にD10-3Rの解析結果、表-3に最大耐力および変位の比較を示す。初期剛性はおおむね一致し、最大耐力については、正側の耐力が10%低く、負側の耐力は一致している。また、最大耐力時の変位は負側では一致しているものの、正側では一致していない。図-16に、D10-3Rの解析における最外縁の軸方向鉄筋のひずみ分布を示す。正側、負側ともに $2.0\delta_y$ 時に高さ300mmから400mmが降伏ひずみに達し、荷重ステップが進むにつれてひずみが増加する。高さ300mmから400mmは軸方向鉄筋が切除された位置であり、ひずみの増加につながったと考えられる。また、実験時の試験体は同様の位置で損傷していることから、切除位置より鉄筋が降伏し、その後損傷が進展したと考えられる。

(2) D13-3R 試験体

図-17にD13-3Rの解析結果を示す。表-4に最大耐力および変位の比較を示す。初期剛性と最大耐力はおおむね一致し、また最大耐力時の変位は正負どちらも一致しない結果となった。図-18に、D13-3Rの解析における最外縁の軸方向鉄筋のひずみ分布を示す。正側では $4.0\delta_y$ にて高さ100mmから200mmの区間が降伏ひずみに達し、負側では $3.0\delta_y$ にて高さ300mmから400mmの区間が降伏ひずみに達する。これは負側の最外縁の軸方向鉄筋のみ切除を行ったため、降伏箇所および降伏時の荷重ステップに差異が生じたと考えられる。

表-2 回転ばねの特性

	$K_{rotation1}$ (kN・m/rad)	θ_1 (mrad)	$K_{rotation2}$ (kN・m/rad)
D10-3R	3.8×10^4	—	—
D13-3R	3.3×10^4	2.5	2.0×10^4

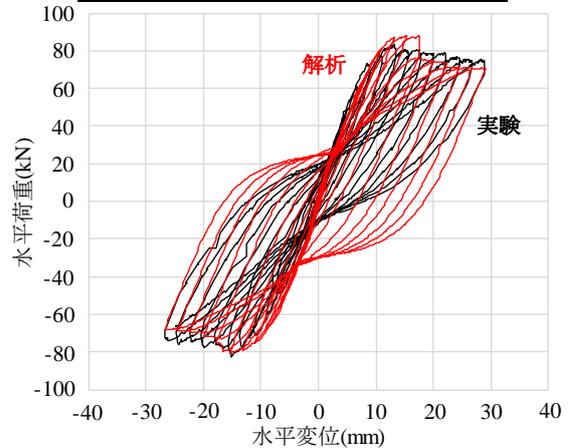


図-15 D10-3Rの解析結果

表-3 D10-3Rの最大耐力と変位の比較

	正側		負側	
	最大耐力(kN)	変位(mm)	最大耐力(kN)	変位(mm)
実験結果	83.25	13.2	-83	-15.12
付着考慮解析	88	17.44	-80.6	-15.43

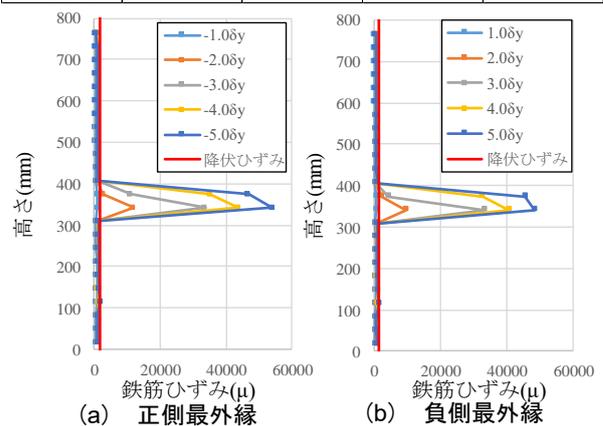


図-16 軸方向鉄筋のひずみ分布(D10-3R)

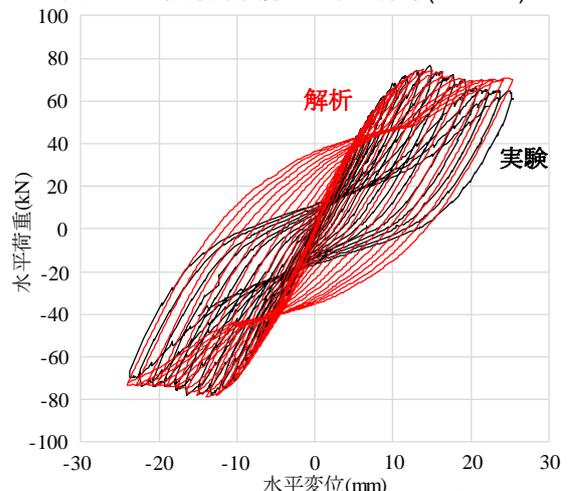


図-17 D13-3Rの解析結果

表-4 D13-3Rの最大耐力と変位の比較

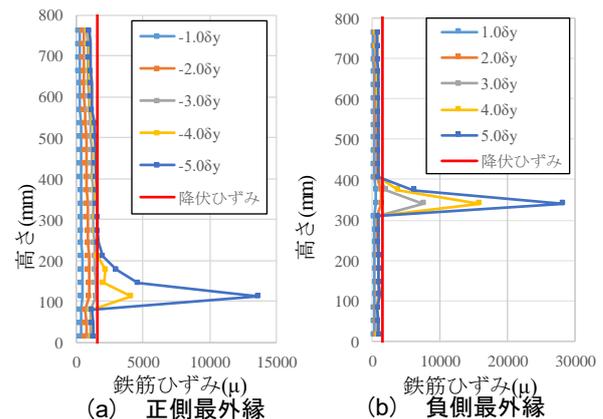
	正側		負側	
	最大耐力(kN)	変位(mm)	最大耐力(kN)	変位(mm)
実験結果	76.5	14.76	-78.25	-16.46
付着考慮解析	74.6	13.9	-78.3	-13.9

5 結論

本研究では、丸鋼鉄筋を補強筋として用いて補修した RC 橋脚を対象に、補強筋とコンクリートの付着を考慮したファイバー要素解析により、実験の再現性を検討した。その結果、実験の初期剛性、最大耐力、並びに、補強筋の付着きれに伴う最大耐力以降の耐力低下の再現性が高いことを示した。履歴ループの形状については現状の解析では、再現性は低く、今後の課題としており、軸方向鉄筋の付着切れが十分に表現できていないことが考えられる。

参考文献

- 川島一彦, 細入圭介, 庄司学, 堺淳一: 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
- 睦好宏司, 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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,



図一18 軸方向鉄筋のひずみ分布(D13-3R)

アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.569-574, 2017.10

- 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
- 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
- 山本翔吾, 深見亮介, 木下幸治, 林承燦: 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, コンクリート工学年次論文集 (投稿中)
- S. Ichikawa, T. Sasaki and K. Kawashima: Analytical idealization of local buckling of longitudinal bars for analyzing the seismic performance of RC columns, *Proc. 13th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.3247-3254, 2010
- 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.1-11, 1995.8
- 浅津直樹, 運上茂樹, 星隈順一, 近藤益央: 軸方向鉄筋の座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する研究, 土木学会論文集, No.682/I-31, pp.177-194, 2001.7
- 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, Vol.378/V-6, pp.165-174, 1987.2
- 松岡由高, 中村光, 国枝稔, 河村精一: 有限要素解析による主筋に丸鋼を用いた RC 部材の力学挙動評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.595-600, 2011.7