

論文 RC はりの曲げ圧縮損傷領域と断面修復後性能の評価

河合 真樹*1・中村 光*2・上田 尚史*3・国枝 稔*4

要旨: 曲げ損傷した RC はりに断面修復を行い、その後再載荷することで補修後の RC はりの性能を実験的に評価した。載荷により荷重保持能力が極端に低下した場合でも、圧縮部を断面修復することで耐力を回復させ、ある程度の変形能を持たせることができた。また、2次元有限要素解析を用いて、実験において観察された損傷領域ならびに補修後の力学挙動の解析的評価を行った。

キーワード: 補修後挙動, 最大平均化ひずみ, 損傷領域, 断面修復

1. はじめに

RC 構造物の耐震設計においては、大地震に対し、構造物にはある程度の損傷は許容し、損傷を受けた後に補修・補強して使用し続けるという考え方が一般的となってきた。例えば土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では、RC 構造物の耐震性能は、早期の機能回復を目標とし、復旧性を考慮して定義されている。そのため、損傷の程度を予測する手法と損傷を受けた構造物の補修・補強後の性能評価手法の確立が重要となってきた。

地震による被災構造物の補修の基本はひび割れ注入と断面修復であり、このうち断面修復はコンクリートの圧縮負担能力の回復行為でもあり、補修後の RC 構造物の構造性能に大きな影響を与えるものと考えられる。断面修復後の性能を評価するためには、断面修復領域に含まれるコンクリートの圧縮損傷領域の予測ならびに断面修復材の特性と補修後性能の関係の定量化を適切に行う必要がある。

補修後の性能評価に関する既往の研究は、主として実験的に行われている^{2),3)}。それに対し、解析的にはほとんど検討が行われていないのが現状である。しかしながら、解析的手法に基づく地震や経時劣化による損傷を受けた RC 構造物の補修・補強後の性能評価手法が確立さ

れば、将来的には LCC を考慮した性能設計体系の高度化を可能にするとともに、補修材料に要求される力学性能を明確にすることができると考えられる。

そこで本研究では、曲げ圧縮損傷した RC はりに断面修復を行い、その後再載荷することで補修後の RC はりの性能を実験的に評価した。また、2次元有限要素解析を用いて、実験において観察された損傷領域ならびに補修後の力学挙動の解析的評価を試みた。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体概要を図-1 に、使用したコンクリートおよび軸方向鉄筋の材料諸元を表-1 に示す。供試体は等曲げ区間で曲げ破壊をするものであり、圧縮領域のコンクリートの破壊に注目するため、圧縮鉄筋は配置していない。また、等曲げ区間外にはスターラップを配置した。等曲げ区間長は、既往の研究⁴⁾によりコンクリートの圧縮破壊領域が 300mm 程度であると予測されるため、圧縮破壊領域の倍程度となる 600mm とした。供試体は後述するように断面修復材が異なる 2 体である。

2.2 載荷履歴および補修作業

載荷は健全供試体の終局までの単調載荷を初期載荷とし、初期載荷した供試体の圧縮領域の損傷部を断面修

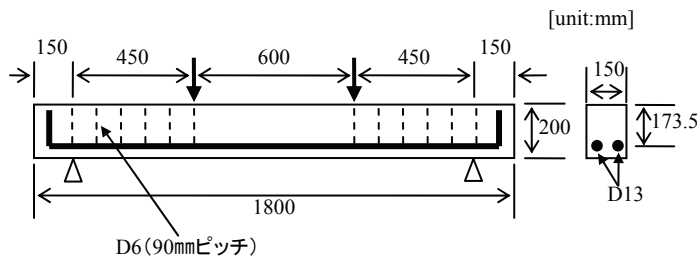


図-1 供試体概要

表-1 材料特性

コンクリート	
圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)
23.3	22.0
鉄筋	
降伏強度(MPa)	弾性係数(GPa)
364.2	203.6

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工) (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 修士(工) (正会員)
 *4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士(工) (正会員)

表-2 補修材配合表

(a) モルタル

W/B (%)	繊維量 (%)	単位量(kg/m ³)				
		水 W	セメント C	フライ アッシュ	細骨材 S	繊維 (PVA 12mm)
60	0.5	310	395	119	1180	6.5

(b) UHP-SHCC

W/B (%)	繊維量 (%)	単位量(kg/m ³)						
		水 W	セメント C	シリカ フューム	細骨材 S	繊維 (PE 6mm)	混和剤1* ¹ (g)	混和剤2* ² (g)
18	1.0	265	1346	336	168	9.7	33.6	7.4

*1: 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

*2: 消泡剤

復した補修後供試体を再載荷した。初期載荷は材齢 14 日で行い、翌日に補修作業を行った。

補修作業は初期載荷時の圧縮損傷領域に対して、除荷後に圧壊および剥離したコンクリートをハンマー等を使用して取り除いた後、型枠を設置して断面修復を行った。なお、塑性変形は残存した状態のままとした。また、地震時の応急復旧を想定して、補修材との界面には特別な処理はしていない。断面修復材には、モルタルおよび超高強度ひずみ硬化型セメント系材料 (Ultra High Performance - Strain Hardening Cementitious Composites 以下、UHP-SHCC) の 2 種類を用いた。各材料の配合を表-2 に示す。表に示すように、圧縮靱性を向上させることを目的として、モルタルにも体積率 0.5% の PVA 繊維を混入した。モルタルの圧縮強度は 17.2MPa とコンクリートと比較して低く、一方 UHP-SHCC は圧縮強度 95.9MPa を有する非常に高強度かつ高靱性な材料である。なお、ひび割れ注入による補修は行わなかった。

2.3 初期載荷時の損傷領域と力学挙動

図-2 に実験供試体の初期載荷後の損傷状況を示す。なお、図中斜線部分はコンクリートの圧壊が生じた部分を示している。

図-3 に実験より得られた初期載荷時の荷重-載荷点変位関係を示す。なお、変位は左右の載荷点の変位を平均したものを表示している。2 体の供試体についてばらつきは認められるものの、いずれの供試体についても、等曲げ区間内において載荷板近傍のコンクリートが圧壊することにより荷重が低下し始めた。その後、圧壊部分から等曲げ区間内を横切る形でひび割れが進展することにより、等曲げ区間内のコンクリートが剥離して耐力が急激に低下した。したがって損傷領域の挙動としては、コンクリートの圧壊と圧縮応力下のコンクリートの剥離に分類できる。なお、それぞれの供試体の残留変位

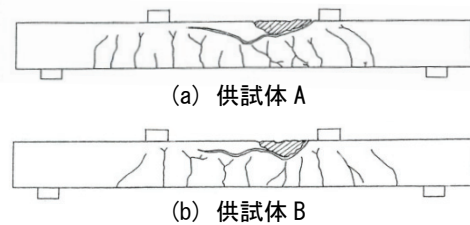


図-2 初期載荷後損傷状況

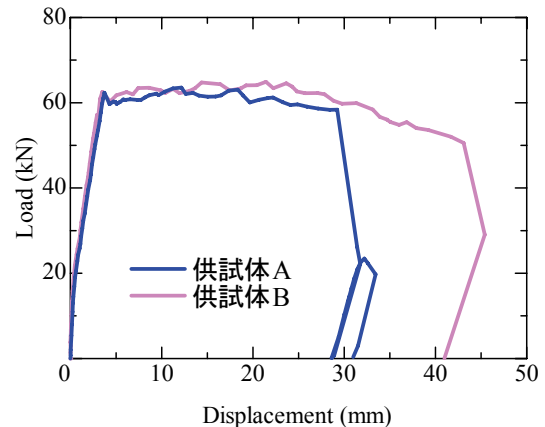


図-3 荷重-載荷点変位関係 (初期載荷)

は、供試体 A では 31mm、供試体 B では 41mm であった。

2.4 補修後の力学挙動

初期載荷終了時の供試体には残留変形が認められるが、これを補修供試体の初期変位としては扱わず、再載荷開始点を原点とすることで、補修による影響を評価した。図-4 に補修供試体の概要を示す。図中黒塗り部が断面修復部を示している。図-5 に補修後の荷重-載荷点変位関係を初期載荷時のものとあわせて示す。図中、青の実線は供試体 A をモルタルで補修した場合を、赤の実線は供試体 B を UHP-SHCC で補修した場合を、点線は初期載荷時を示している。モルタルで補修した場合、

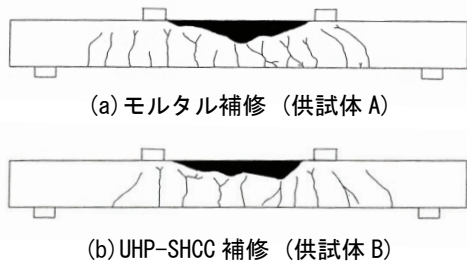


図-4 補修状況

初期剛性は初期載荷時と比較して低下しているものの、耐力は同程度まで回復している。UHP-SHCC により補修を行った場合も初期剛性の低下が認められるが、耐力は初期載荷時と比較して増加している。補修により健全時の性能を回復させることを考えると、モルタルの場合のように母材のコンクリートと比較してある程度強度の低い材料を用いた場合でも、十分な耐力の回復が認められることが示された。変形性能については、モルタルで補修した場合は、健全供試体よりも小さくなったが、UHP-SHCC で補修した場合は、健全供試体と同程度であった。最終的な荷重の低下は、いずれの材料により補修を行った場合も、断面修復部と既存コンクリートの界面ならびに界面近傍の既存コンクリート内のひび割れが連続的に生じて、断面修復部が剥離することで生じた。写真-1 にそれぞれの供試体の等曲げ区間近傍の破壊状況を示す。今回の実験では、初期載荷時に荷重は耐力の 50%程度以下まで低下し、ほぼ荷重保持能力を失った状態とみなせる。今回の実験に限れば、荷重保持能力が極端に低下した場合でも、圧縮部を断面修復することで耐力を回復させ、ある程度の変形能を持たせられる結果となった。

3. 有限要素解析による損傷領域ならびに補修後性能の評価

2 章において示した実験供試体を対象として 2 次元有限要素解析を行い、損傷領域ならびに補修後の力学挙動の解析的評価を試みた。

3.1 解析手法

本研究では、4 節点アイソパラメトリック要素を用いた非線形有限要素解析を行った。RC 構成則には、格子等価連続体モデル⁵⁾を用いた。格子等価連続体モデルは、コンクリートおよび補強筋の耐荷機構と、ひび割れ面におけるせん断伝達を等価な格子成分によりモデル化し、各格子成分に一軸の応力-ひずみ関係を用いることで RC 構成則を構築する手法である。

圧縮を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮強度までは Saenz の式を用い、その後は応力が直線的

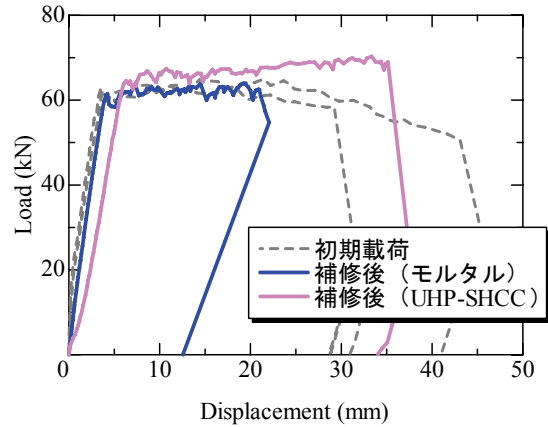
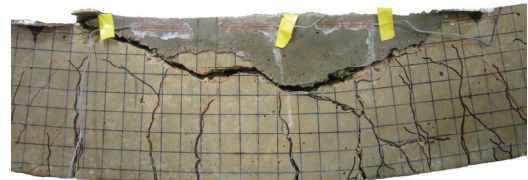
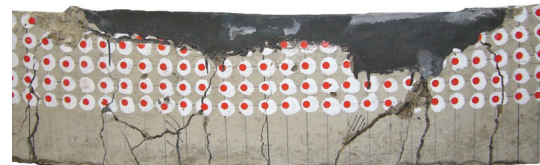


図-5 荷重-載荷点変位関係 (補修後)



(a) モルタル補修 (供試体 A)



(b) UHP-SHCC 補修 (供試体 B)

写真-1 補修後損傷状況

に減少するものとした。なお、軟化領域には解の要素寸法依存性を低減することを目的として、Nakamura ら⁴⁾が提案した圧縮破壊エネルギーを考慮した。また、ひび割れたコンクリートの応力-ひずみ関係は、引張破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデルを仮定した。

鉄筋は、軸方向鉄筋は離散鉄筋モデルとし、トラス要素でモデル化し、せん断補強筋は分散鉄筋モデルとし、RC 要素でモデル化した。軸方向鉄筋は付着応力-すべり関係により付着を考慮した。鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとし、降伏後の剛性は初期剛性の 1/100 とした。

3.2 解析条件と補修材料のモデル化

解析に用いたモデルを図-6 に示す。解析に用いた材料諸元は基本的には実験より得られたものを用い、得られていない場合にはコンクリート標準示方書⁶⁾に準じた。解析は実験と同様の載荷履歴、補修手順で行い、除荷後、解析により評価された損傷領域を断面修復材に置き換え、再載荷を行った。これにより、再載荷時には、初期

ひずみを有しない補修材料と損傷の蓄積したコンクリートのそれぞれの力学特性を妥当に評価することができる⁷⁾。補修材であるモルタルおよび UHP-SHCC の応力-ひずみ関係は実験より得られた非線形な関係を再現するように、以下のようにであると仮定した。

(a) モルタルの応力-ひずみ関係

圧縮応力下では、通常のコンクリートの場合と同様に圧縮強度時のひずみ(2000 μ)までは Saenz の式を用い、その後は応力が直線的に減少するものとした。なお、圧縮破壊エネルギーはコンクリートと比較して半分程度であると仮定した。引張応力下においては、PVA 繊維の架橋効果によるひずみ硬化挙動を再現するために、引張強度までは線形弾性体とし、その後の応力はひずみの値によらず引張強度で一定であると仮定した。

(b) UHP-SHCC の応力-ひずみ関係

圧縮応力下では、圧縮強度時のひずみを 4000 μ として Saenz の式を用い、その後は応力が直線的に減少するものとした。なお、圧縮破壊エネルギーは通常のコンクリートと同程度であると仮定した。引張応力下においてはモルタルと同様に、引張強度までは線形弾性体とし、その後の応力はひずみの値によらず引張強度で一定であると仮定した。

3.3 最大平均化ひずみ分布による圧縮損傷領域の評価

有限要素解析においては、局所情報として得られるひずみにより損傷の程度を評価することが有用であると考えられる。しかしながらコンクリートのようなひずみ軟化材料を用いた場合、解析より得られる局所ひずみの値や分布は要素寸法に依存する。そこで著者らは、局所ひずみを要素寸法とは別の寸法により領域平均することで得られる平均化ひずみを用いて、損傷を評価することを提案している⁸⁾。本研究でも既往の成果に基づき、

過去に受けた損傷の履歴を考慮して、各時点までに経験した平均化ひずみのうちの最大値を損傷を評価する指標とした⁷⁾。なお、平均化領域は圧縮・引張の両者を統一的に扱える楕円形と仮定し、短径・長径がそれぞれ、圧縮応力下においては 250mm、引張応力下においては 50mm を範囲として変化するものとした。

3.4 初期荷重時の挙動評価

図-7 に解析より得られた初期荷重時の荷重-載荷点変位関係を実験値とあわせて示す。図中実線は解析値を、点線は実験値を示している。また、図中に●印で示した各時点(変位 35mm, 38mm, 40mm)における主ひずみ分布性状を図-8 に示す。荷重-変位関係は、終局時に

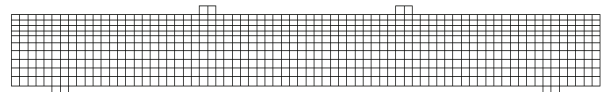


図-6 解析モデル

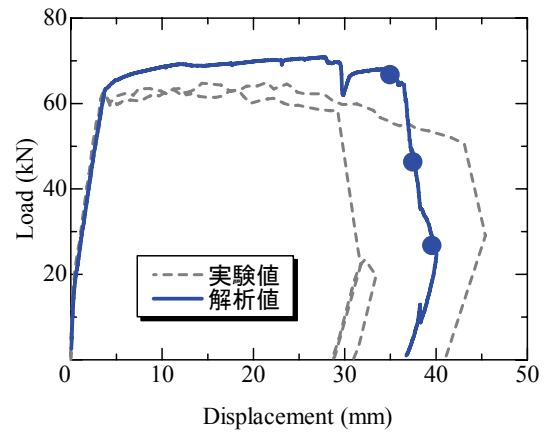
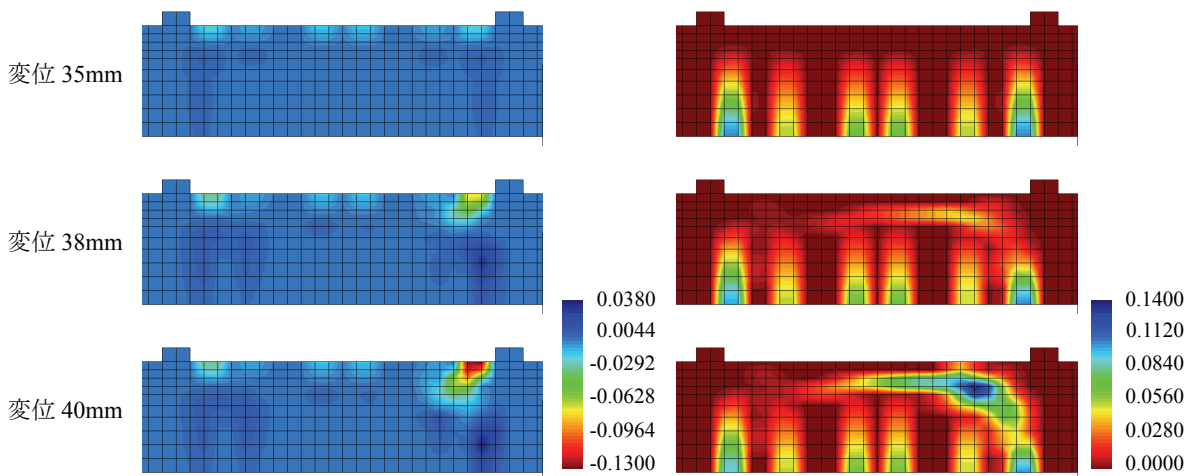


図-7 初期荷重 荷重-載荷点変位関係(解析)



(a) 主圧縮ひずみ分布

(b) 主引張ひずみ分布

図-8 初期荷重時主ひずみ分布性状

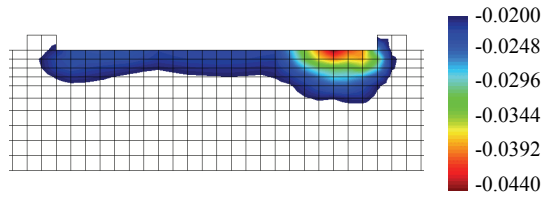


図-9 最大主圧縮平均化ひずみ分布

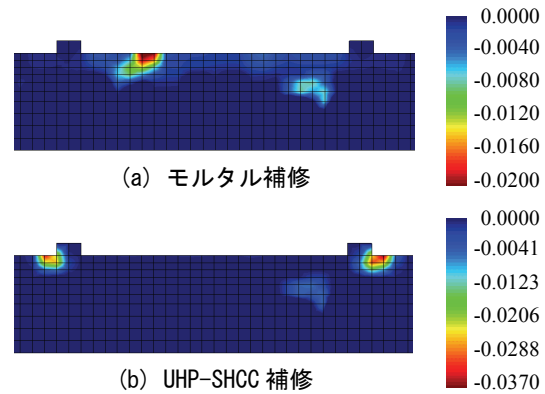
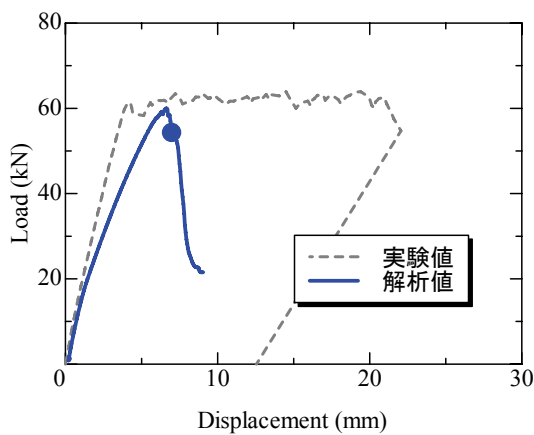
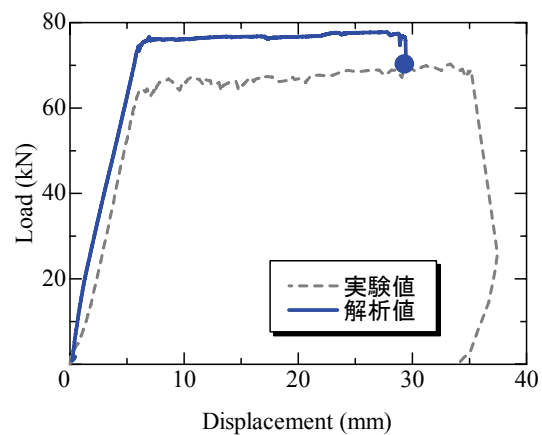


図-11 補修後荷重低下時主圧縮ひずみ分布



(a) モルタル



(b) UHP-SHCC

図-10 補修後 荷重-変位関係 (解析)

至るまで実験結果をよく捉えている。主ひずみ分布については、主圧縮ひずみ分布は、荷重低下直前では等曲げ区間に何箇所かひずみが卓越した領域が見られるが、荷重が低下するにつれて載荷点近傍に局所化しており、コンクリートが圧壊した現象を示している。一方、主引張ひずみ分布は、荷重が低下し始めると圧壊部近傍の中立軸高さ付近から軸方向に卓越した領域が進展し始める挙動が示されている。この分布性状は、圧縮応力下のコンクリートの剥離現象に対応するものと考えられる。これらの現象は実験結果と同様であり、実験において観察された破壊の進行を解析的に再現することができた。破壊に至る性状は再現されているが、主圧縮ひずみ分布を見れば、ひずみは最終的に載荷点近傍の要素に局所化し、その値も非常に大きなものであり、図-2 に示したような実験で観察された圧壊領域とは必ずしも対応していない。そこで、最大平均化主圧縮ひずみ分布と破壊領域の関係について検討する。

図-9 に除荷時点において得られた最大主圧縮平均化ひずみ分布を示す。ただし、平均化ひずみ分布は 2000μ 以上の領域のみを表示している。最大平均化主圧縮ひ

ずみの分布は、その値がある程度大きな載荷点近傍の領域と約 2000μ 程度の等曲げ区間に広がる領域に分けることができる。載荷点近傍の領域の大きさは、図-2 に示した、実験で観察された圧壊領域と概ね対応している。また等曲げ区間に広がる領域については、圧縮応力下のコンクリートの剥離領域と一致している。このことは、最大応力レベルの圧縮損傷を受けたことで、圧縮応力下のコンクリートが剥落しやすくなったとも推測できる。著者らはある時点における圧縮損傷領域は、最大平均化ひずみが 2000μ 程度を超える領域で評価できることを提案しており⁷⁾、今回の解析においても実験での損傷領域を概ね妥当に評価しており、本指標が適用可能であることが示された。

3.5 再載荷時の挙動評価

最大主圧縮平均化ひずみが 2000μ を超えた領域が実験での破壊領域と概ね一致したことから、その領域を補修領域と仮定し、断面修復による補修を考慮した解析から得られた荷重-載荷点変位関係を図-10 に実験値とともに示す。図中実線は解析値を、点線は実験値を示している。なお、実験値・解析値ともに再載荷開始時点

原点としている。また、図中●印時点での主圧縮ひずみ分布を図-11に示す。モルタルによって補修を行った場合は、耐力の回復は認められるものの、補修後の変形性能は実験と比較して非常に小さく、ぜい性的な破壊挙動を示した。破壊形態も実験で観察されたような補修材部分の剥離とは異なり、補修材であるモルタル部の損傷により急激な破壊に至った。一方、UHP-SHCCにより補修を行った場合は、耐力の回復と変形能の向上はともに認められるものの、主圧縮ひずみ分布に示されるように、載荷点外側の健全なコンクリート部においてひずみの局所化が生じており、こちらの場合も実験で観察された破壊形態とは異なるものとなった。

今回の実験では、断面修復部と既存コンクリート部は特に処理をしなかったため、構造的な弱点となった可能性がある。一方、解析では、両者の境界面の特性をモデル化していないため、実験で観察された補修部分の剥離現象を再現できなかったと考えられる。したがって、今後は補修境界面までをモデル化した解析を行う必要があると考えられる。

4. 結論

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 今回の実験では、載荷により荷重保持能力が極端に低下した場合でも、圧縮部を断面修復することで耐力を回復させ、ある程度の変形能を持たせられる結果となった。特にUHP-SHCCを用いた場合は、健全時と同等の性能を示した。
- (2) RCはりの曲げ破壊における損傷領域の挙動は、コンクリートの圧壊と軸方向へ進展するひび割れに起因する圧縮応力下のコンクリートの剥離に分類することができる。解析においては、主ひずみ分布性状に着目することで、このような破壊過程を評価することができた。

- (3) 曲げ圧縮損傷領域は最大平均化主圧縮ひずみ分布から推定が可能であると考えられる。
- (4) 実験においては、補修材と既存コンクリートの境界面は構造的な弱点となる可能性がある。実現現象を適切に捉えるためには、補修境界面までをモデル化した解析を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書耐震性能照査編，2002.
- 2) 日本コンクリート工学協会：被災建造物の補修補強後の耐力変形性状研究委員会報告書，2005.
- 3) 伊藤睦，水野英二，小林孝一：曲げ破壊するRCはり部材の復旧性能評価に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.259-264，2006.
- 4) H. Nakamura and T. Higai：Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete，Modeling of Inelastic Behavior of RC Structure under Seismic Load，ASCE，pp.471-487，2001.
- 5) 田辺忠顕編著：初期応力を考慮したRC建造物の非線形解析法とプログラム，技報堂出版，2004.
- 6) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書構造性能照査編，2002.
- 7) 河合真樹，上田尚史，中村光，国枝稔：曲げ損傷したRCはりの断面修復後の力学挙動解析に関する基礎的研究，コンクリート建造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第7巻，pp.121-128，2007.
- 8) 上田尚史，権庸吉，中村光，高木康宏，国枝稔：非線形有限要素解析による曲げ破壊するRC部材の損傷指標の検討，構造工学論文集，Vol.52A，pp.925-934，2006.