

# 論文 超高性能繊維補強コンクリートで断面修復した RC 部材の曲げ耐荷性能に関する研究

角間 恒\*1・岡田 慎哉\*2・西 弘明\*3・松井 繁之\*4

**要旨:** 本研究では、超高性能繊維補強コンクリート (UHPFRC) で断面修復した RC 部材の基礎的な力学的特性を把握することを目的として、断面修復位置および補修深さをパラメータとした UHPFRC-RC 合成梁の曲げ載荷実験および断面分割法による曲げ挙動の評価を行った。その結果、圧縮域および引張域を補修した場合ともに補修前と比較して耐力が向上すること、ならびに、補修深さによっては脆性的な破壊モードに移行し、変形性能を著しく低下させる場合があることを示した。

**キーワード:** 超高性能繊維補強コンクリート, 断面修復, 曲げ耐荷性能

## 1. はじめに

近年、橋梁を始めとするコンクリート構造物の劣化損傷が顕在化し、とりわけ積雪寒冷地においては、凍害や凍結防止剤散布による塩害等の劣化損傷が著しく進行している。2012 年に閣議決定された国土交通省の社会資本整備重点計画<sup>1)</sup>では、社会資本ストックの戦略的な維持管理・更新を行う上で高い耐久性が期待できる素材・構造を活用していくことを掲げており、劣化因子の侵入を抑制できる高性能材料を用いた補修・補強技術の構築が求められている。

150N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度に加え、高い引張強度と引張変形性能を有する超高性能繊維補強コンクリート (以下、UHPFRC) は、緻密なマトリックスを形成することで遮水性や遮塩性などに優れ、積雪寒冷地の構造物への適用可能性が高い材料と考えられる。これらの材料は、所定の特性を発揮するために給熱養生を要することから主にプレキャスト部材として使用されてきたが、近年では常温硬化型材料の開発<sup>2), 3)</sup>が進み、既設構造物の補修・補強材としての展開が図られていくことが予想される。実際に、欧州においては RC 床版の補強材や壁高欄の表面被覆材として適用された例もある<sup>4)</sup>。

UHPFRC (あるいは、類似した力学的性能を有する超高強度ひずみ硬化型セメント系材料、UHP-SHCC) の既設構造物への適用に関しては、引張補強材として使用したときに曲げ耐力およびせん断耐力の向上に寄与することが示されている<sup>5), 6), 7)</sup>。しかしながら、これらは主に増厚補強を想定したものであり、断面修復材として使用する場合の挙動については十分な検討がなされていない。また、本材料の適用可能箇所を明確にするためには、より多様な荷重下における力学的特性の把握が必要である。

表-1 実験ケース

供試体名	断面修復位置	補修深さ (mm)
B-0	なし	—
BU-20	上面	20
BU-40		40
BU-60		60
BL-20	下面	20
BL-40		40
BL-60		60

本研究では、UHPFRC をコンクリート構造物の断面修復材として使用した場合の基礎的な力学的特性を把握することを目的に、断面修復位置や補修深さを変化させた UHPFRC-RC 合成部材の曲げ載荷実験および断面分割法による挙動の検証を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 概要

本研究では、UHPFRC による断面修復位置および補修深さをパラメータとした梁供試体 7 体について曲げ載荷実験を実施した。表-1 には実験ケースの一覧を示しており、上面あるいは下面を断面修復するケースについて、それぞれ補修深さを 20, 40, 60mm に変化させた。ここで、補修深さ 20mm は既設コンクリートの表面を薄層補修する場合、60mm は補修時に鉄筋を露出させ UHPFRC とコンクリートを一体化する場合を想定したものである。

### 2.2 供試体

図-1 に実験供試体の形状・配筋図を、表-2 に基準

\*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム  
 \*2 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム  
 \*3 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム  
 \*4 (一財) 災害科学研究所 研究員 工博 (正会員)

研究員 博(工) (正会員)  
 主任研究員 博(工) (正会員)  
 上席研究員 博(工) (正会員)

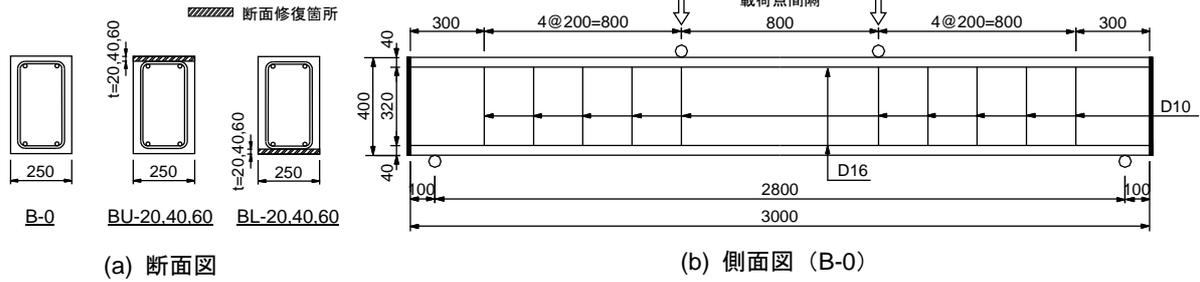


図-1 実験供試体

表-2 供試体諸元

幅	高さ	有効高さ	せん断スパン比	鉄筋種別	引張鉄筋比	せん断補強鉄筋比	せん断耐力	曲げ耐力	せん断余裕度
mm	mm	mm	—	—	%	%	kN	kN	—
250	400	360	2.8	SD345	0.50	0.28	252.4	92.6	2.7

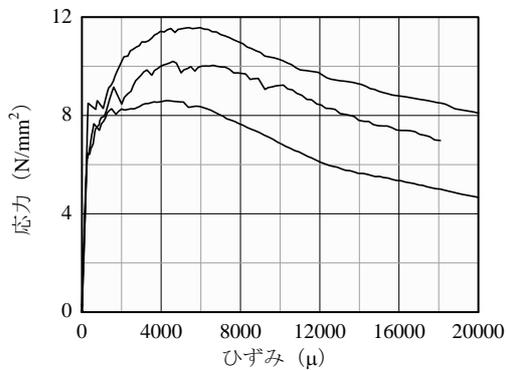


図-2 UHPFRC の引張挙動

供試体 B-0 の諸元を示す。実験には幅 250mm、高さ 400mm の矩形断面を有する長さ 3,000mm の梁供試体を使用した。支間は 2,800mm、せん断スパン比は 2.8 であり、せん断スパン内にはせん断補強筋を 200mm 間隔で配置している。無補修の B-0 は、せん断余裕度 2.7 とする曲げ破壊型として設計されている。

### 2.3 使用材料

コンクリートには、普通ポルトランドセメントと 20mm 以下の粗骨材、5mm 以下の細骨材を使用した。実験開始時（材齢 186 日）の圧縮強度は 29.7N/mm<sup>2</sup>、弾性係数は 24.3kN/mm<sup>2</sup> である。

本実験に使用した UHPFRC は、プレミックス材に鋼繊維、スチールウール、減水剤、消泡剤が配合されたものであり、実験開始時（材齢 42 日）の圧縮強度は 156.3N/mm<sup>2</sup>、弾性係数は 34.6kN/mm<sup>2</sup> である。また、図-2 にはダンベル型供試体による直接引張試験から得た応力-ひずみ関係を示しており、供試体 3 体による降伏応力、最大応力、終局ひずみの平均値は、それぞれ 7.5N/mm<sup>2</sup>、10.1N/mm<sup>2</sup>、4,750μ であった。

鉄筋には、軸方向鉄筋に D16 (SD345)、せん断補強筋に D10 (SD345) を使用した。

表-3 および表-4 に各材料の材料特性値をまとめる。

表-3 コンクリート、UHPFRC の材料特性

種別	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	186	29.7	24.3
UHPFRC	42	156.3	34.6

表-4 鉄筋の機械的性質 (ミルシート)

種別	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
軸方向鉄筋 (D16, SD345)	386	546	24
せん断補強筋 (D10, SD345)	376	519	28

### 2.4 供試体製作方法

供試体製作は、既設コンクリートの打設後、コンクリートの圧縮強度が所定の値に達した材齢で UHPFRC を打設した。既設コンクリートと UHPFRC の境界部においては、既設コンクリート打設時に遅延剤を散布し、高圧水洗浄により洗い出すことでコンクリート表面に骨材を露出させた。なお、断面修復位置によらず UHPFRC の打設は全て下向きで実施している。

### 2.5 荷重方法

荷重は、曲げスパン 800mm、せん断スパン 1,000mm とする 4 点曲げにより実施し、油圧ジャッキを用いて供試体が破壊あるいは荷重変位がジャッキストロークの上限に至るまで荷重を単調増加させた。

### 3. 断面分割法

UHPFRC-RC 合成断面の基本的な曲げ挙動を検討するため、断面分割法に基づき荷重-変位関係を算出した。

図-3 に、計算に用いた各材料の応力-ひずみ関係を

示す。コンクリートは引張側の応力負担を無視し、圧縮側はコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>に準ずる放物線モデルとした。UHPFRCは、引張応力下でのひずみ硬化挙動を考慮できるようにし、図-2の直接引張試験結果を踏まえトリニア型の応力-ひずみ関係を定義した。ただし、初期ひび割れ発生後の応力増加は考慮せず、終局ひずみに達するまでは一定の応力を保持するものとした。圧縮側はコンクリートと同様である。鉄筋は降伏後のひずみ硬化係数0.01とするバイリニアモデルとし、応力が引張強さに達した時点を鉄筋破断と判定する。

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 荷重-変位関係

図-4に、補修供試体に関する荷重-供試体中央変位関係（以下、荷重-変位関係）を示す。図中には、断面

分割法による計算結果とともにB-0の実験結果を併記している。また、表-5に実験および断面分割法から得た最大荷重および破壊モードをまとめ、図-5には最大荷重と補修深さの関係を図示する。ここで、BU-60については供試体破壊の兆候が見られる前に実験を終了したため、参考値として実験の範囲内で得られた最大荷重を記載している。

##### (1) 基準供試体

B-0では、荷重30kN程度のときにコンクリートのひび割れ発生に伴い剛性が低下する。また、変位85mmでは曲げスパン内において上縁コンクリートの圧壊が生じて荷重-変位関係の勾配が緩やかとなる。ただし、その後も荷重を保持したまま変位は増加し、ジャッキストロークが上限に達した時点で実験を終了した。本検討においては、上縁コンクリートの圧壊が生じた荷重113.5kN

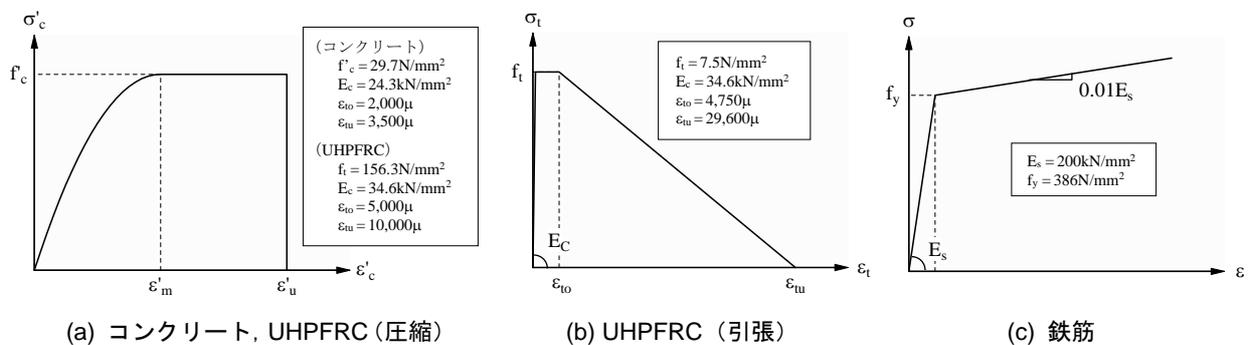


図-3 応力-ひずみ関係

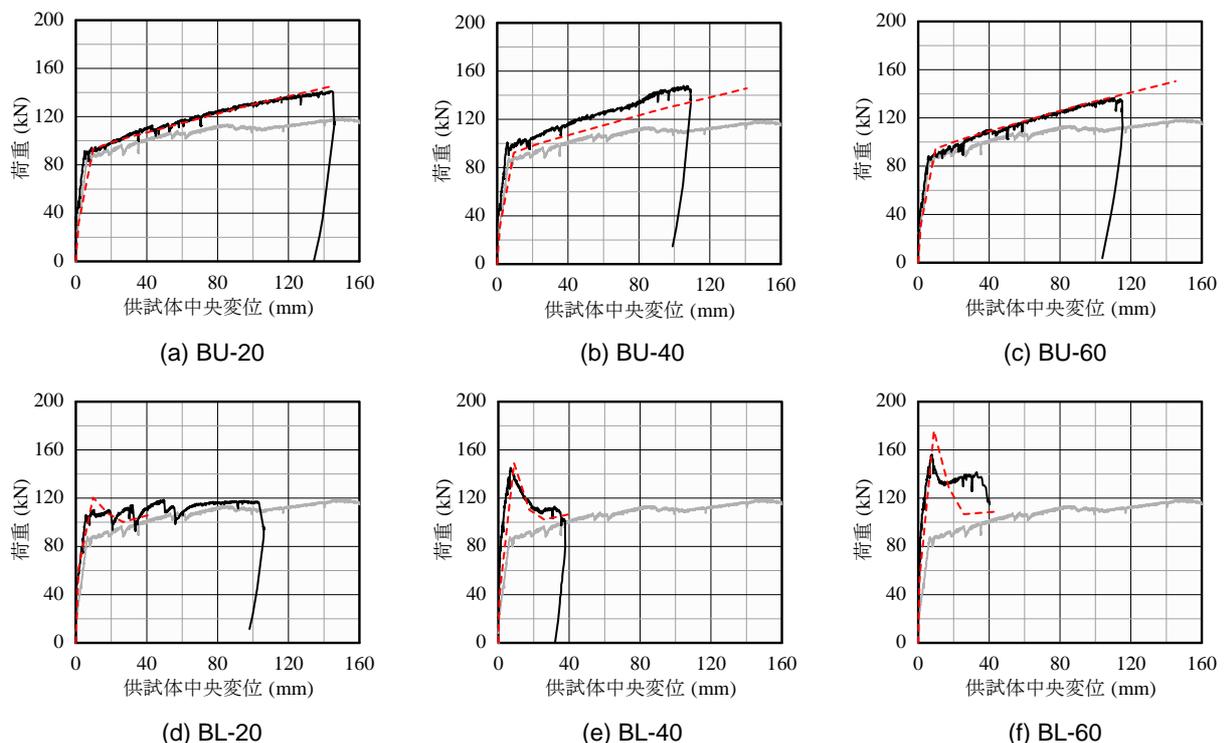
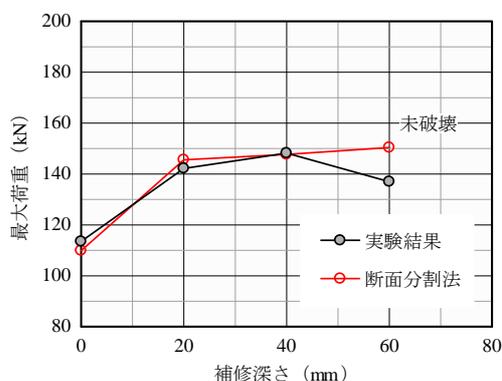


図-4 荷重-供試体中央変位関係 ( — 実験 - - - 断面分割法 — B-0 )

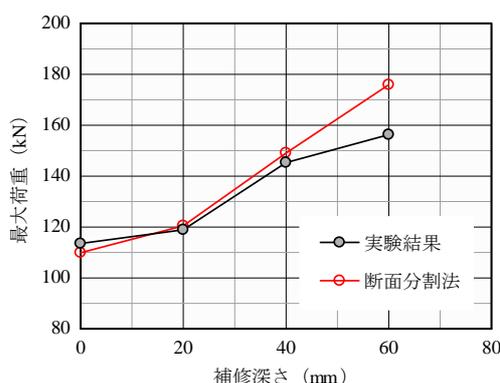
表-5 実験および計算結果の一覧

供試体	実験		断面分割法	
	最大荷重 (kN)	破壊モード	最大荷重 (kN)	破壊モード
B-0	113.5	CC	109.7	CC
BU-20	142.2	UC	145.6	R
BU-40	148.2	R	147.7	R
BU-60	137.0	—	150.4	R
BL-20	118.9	CC	120.5	CC
BL-40	145.3	R	149.1	CC
BL-60	156.3	R	175.9	CC

破壊モード R：鉄筋破断、CC：コンクリート圧壊  
UC：UHPFRC 圧壊



(a) 上面補修シリーズ



(b) 下面補修シリーズ

図-5 最大荷重-補修深さ関係

を B-0 の耐力と見なし、耐力評価の基準とする。

### (2) 上面補修シリーズ

上面を補修した BU-20, BU-40, BU-60 は B-0 と同様の荷重-変位関係を呈するが、鉄筋降伏後の荷重増加勾配が大きくなる。図-5(a) より上面の一部を UHPFRC に置き換え、さらに補修深さを増すことで曲げ耐力は増加する傾向があるが、補修深さが 0mm から 20mm に増

加したときの耐力増加に対し 20mm 以降での耐力増加は小さく、補修深さの耐力向上への寄与は大きくないことがわかる。

### (3) 下面補修シリーズ

下面を補修した BL-20, BL-40, BL-60 では、UHPFRC の引張抵抗性により最大荷重が増加し、その値は補修深さに比例する傾向が見られる。一方で、最大荷重後の挙動は補修深さにより大きく異なり、B-0 と概ね同様の荷重-変位関係を呈する BL-20 に対し、BL-40 および BL-60 では最大荷重に達した後、変位の増加とともに荷重が大きく低下して B-0 の挙動に漸近していく様子が見られる。これは、引張域の増厚補強を想定した Kamal らの実験<sup>9)</sup>においても見られていた挙動である。

### 4.2 破壊性状

図-6 に実験終了時における供試体側面の損傷状況を示しており、図中の黒塗り箇所は圧壊箇所を指す。

#### (1) 基準供試体

B-0 では、供試体下縁に概ね等間隔に曲げひび割れが発生し、荷重の増加とともに開口していった。その後、明確な荷重低下には至っていないが、最終的な破壊モードは、上縁コンクリートの圧壊による曲げ引張破壊であると推察される。

#### (2) 上面補修シリーズ

上面補修シリーズでは、全ての供試体で B-0 と同様の曲げひび割れの進展が見られる。載荷位置では UHPFRC の角欠けが進行したが、UHPFRC が載荷位置における支圧破壊を抑制することで、降伏後も剛性を保持し B-0 と比較して荷重増加勾配が大きくなったと考えられる。最終的には、BU-20 では載荷位置において UHPFRC が圧壊し荷重が低下したのに対し、BU-40 では鉄筋破断に至る兆候と考えられる荷重低下が見られ実験を終了した。BU-20 においては実験結果と断面分割法による計算結果で破壊モードが異なっているが、これは載荷点の支圧の影響が大きいと考えられる。BU-60 においては、荷重が低下する前に実験を終了したが、計算結果は BU-40 と同様に鉄筋破断により破壊に至ることを示唆している。

なお、BU-20 の実験終了時には、UHPFRC 圧壊箇所の直下において、既設コンクリート側から進展した斜め方向のひび割れが UHPFRC を貫通していたが、既設コンクリートとの境界部においてひび割れは連続しており、両者の一体性が十分に保持されていたと考えられる。

#### (3) 下面補修シリーズ

下面補修シリーズでは、曲げひび割れの進展性状が B-0 と同様であるが、ひび割れの発生範囲が狭くなる傾向がある。本シリーズでは、比較的早期に UHPFRC の損傷が局所化することで局所化位置におけるひび割れ開口が全体挙動に対して支配的となっており、ひび割れの

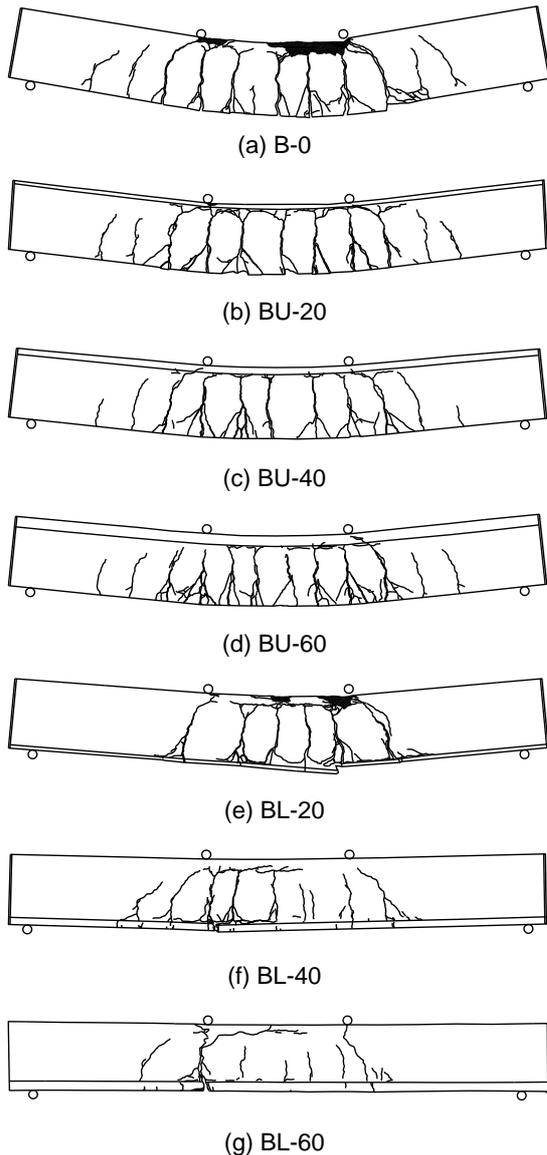


図-6 供試体の損傷状況

分散性が低下したと考えられる。最終的な破壊モードには補修深さの影響が現れ、上縁コンクリートの圧壊により破壊に至った BL-20 に対し、BL-40 および BL-60 では鉄筋破断あるいはその兆候を示唆する荷重低下に至ったため実験を終了した。BL-40 および BL-60 では実験と計算で破壊モードが異なっているが、実験においては鉄筋降伏時点で UHPFRC のひび割れ開口が 1 本のひび割れに集中しており、局所化したひび割れ面間の短い区間で鉄筋が伸びたことにより鉄筋破断に至ったと推察される。

なお、BL-20 においては UHPFRC の損傷が局所化位置から供試体中央に向かってかぶりの剥離が進行していた。しかしながら、この剥離は既設コンクリート内で生じたものであり、UHPFRC とコンクリートの付着破壊は発生していなかった。

#### 4.3 中立軸位置の変化

図-7 に断面分割法から算出された荷重と中立軸位置

の関係を、図-8 に断面内の応力分布の例として BU-60 および BL-60 の応力分布を示す。

##### (1) 上面補修シリーズ

上面補修シリーズにおいては、B-0 と比較して全体的に中立軸位置が上方にあり、破壊時には全ての供試体で中立軸が上側表層 20mm 以内に位置する。図-8(a) からは、破壊時には上側鉄筋までも降伏域に達するとともに、中立軸が UHPFRC 層内にあることで中立軸の下側で UHPFRC が引張抵抗性を発揮する応力性状であったと考えられる。ただし、中立軸周りの曲げモーメントのうち引張域の UHPFRC が負担する割合は、BU-60 においても 2.5% 程度であり、曲げ耐力増加への寄与は小さく、これは図-5(a) において補修深さの増加に対して最大荷重の増加が鈍くなったことを説明するものである。

##### (2) 下面補修シリーズ

下面補修シリーズにおいては、UHPFRC が引張力を負担することから、B-0 と比較して全体的に中立軸位置が下方にあり、鉄筋降伏時においてその差は 10~30mm 程度である。また、図-8(b) では、最大荷重時には UHPFRC 全厚が塑性域で引張力を負担するのに対し、破壊時には UHPFRC 全厚が応力解放域に達することで鉄筋のみが引張力を負担する通常の RC 断面となっており、中立軸は B-0 と同じ位置となることがわかる。

#### 4.4 考察

##### (1) 上面補修シリーズ

上面補修シリーズでは、曲げ損傷の進行とともに中立軸が上面表層に移動し、補修前に対して曲げ耐力は増加する。しかしながら、鉄筋の引張特性に対して圧縮特性が過剰に向上する場合には、破壊モードが変化する可能性がある。既設構造物の補修・補強を考える場合、対策の前後で破壊モードが変化することは好ましくなく、特に鉄筋破断のような脆性的な破壊となることは避けなければならない。したがって、UHPFRC が負担する最大圧縮合力に対して十分な量の鉄筋が配置されていることを照査した上で補修・補強量を決める必要があると考えられる。

##### (2) 下面補修シリーズ

下面補修シリーズでは、補修深さの増加とともに降伏荷重および最大荷重が大きくなるが、鉄筋降伏と概ね同時に UHPFRC のひび割れ局所化による応力解放が開始するために、最大荷重後には鉄筋のみで引張力を負担する RC 断面と同様の曲げ挙動を呈する。また、補修深さが大きく UHPFRC 内に鉄筋を配置する場合には、鉄筋の局所的な伸びにより早期に破断に至り、合成部材とすることで変形性能が低下する可能性がある。以上より、適用部材の要求性能に応じて補修・補強量を適切に決める必要があると考えられる。

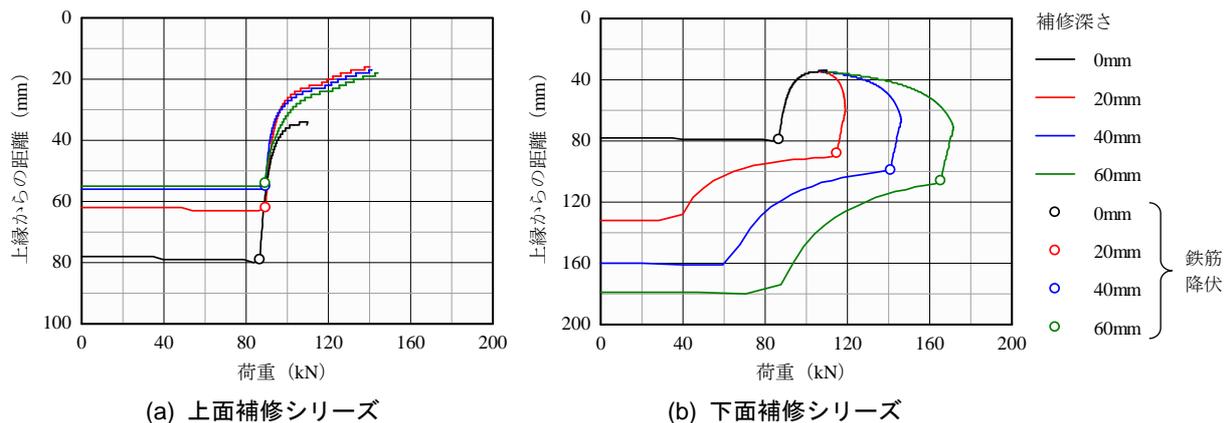


図-7 中立軸位置-荷重関係 (断面分割法)

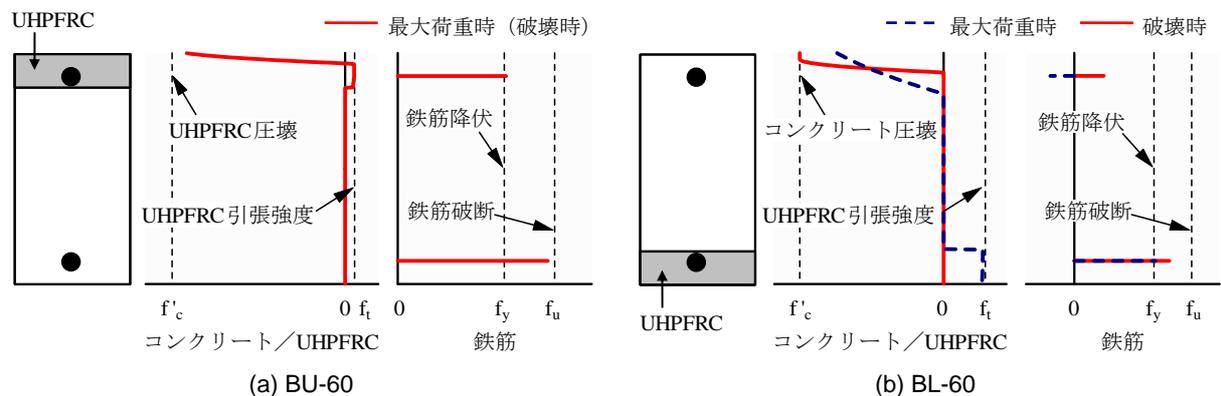


図-8 断面内の応力分布 (断面分割法)

## 5. おわりに

本研究では、UHPFRCを既設コンクリート構造物の断面修復材として使用することを想定し、UHPFRC-RC合成部材の曲げ挙動を検討した。その結果、UHPFRCを圧縮域および引張域に配置する両ケースともに補修前と比較して曲げ耐力は向上するが、補修深さによっては破断モードが変化し、変形性能を著しく低下させる可能性があることを示した。

今後は、補修・補強材としてUHPFRCの性能を有効に活用できる構造部材を検討するとともに、適用箇所を想定した部材レベルでの補修・補強効果の検証を行う。具体的には、適用可能性の高い箇所の一つとして、凍害による劣化損傷が著しい積雪寒冷地における道路橋RC床版の上面補修を考えており、輪荷重走行試験などによる耐久性評価を実施する。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：社会資本整備重点計画，2012
- 2) Denarié, E.: Recommendations for the Tailoring of UHPFRC Recipes for Rehabilitation, Deliverable ARCHES D06, 2009
- 3) 武田篤史，平田隆祥，石関嘉一，丹羽博則，淵田安

浩，渡辺哲巳：常温硬化型高じん性高強度モルタル「スリムクリート」の屋内ブリッジへの適用，大林組技術研究所報，No.74，pp.1-10，2010

- 4) Brühwiler, E.: Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures using Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III, pp.72-79, 2012
- 5) Habel, K., Denarié, E. and Brühwiler, E.: Structural Response of Elements Combining Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes and Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.132, No.11, pp.1793-1800, 2006
- 6) Kamal, A., Kunieda, M., Ueda, N. and Nakamura, T.: Assessment of Strengthening Effect on RC Beams with UHP-SHCC, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.30, No.3, pp.1483-1488, 2008
- 7) Noshiravani, T. and Brühwiler, E.: Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Composite Beams subjected to Combined Bending and Shear, ACI Structural Journal, Vol.110, No.2, pp.251-261, 2013
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書，2012