

超高性能繊維補強コンクリートで断面修復した RC 梁の曲げ挙動について

Flexural behavior of reinforced concrete beams with UHPFRC retrofitting

(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○正 会 員 角 間 恒 (Ko Kakuma)
 (独)土木研究所 寒地土木研究所 正 会 員 岡 田 慎 哉 (Shin-ya Okada)
 (独)土木研究所 寒地土木研究所 正 会 員 西 弘 明 (Hiroaki Nishi)
 (一財)災害科学研究所 名誉会員 松 井 繁 之 (Shigeyuki Matsui)

1. はじめに

積雪寒冷地におけるコンクリート構造物は、凍害や凍結防止剤散布による塩害等の劣化損傷の進行が厳しい条件にある。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¹⁾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/mm²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^{2), 3)}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 床版の上面増厚材や壁高欄の表面被覆材として適用されている⁴⁾。

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、UHPFRC-RC 合成部材の曲げ載荷実験および数値解析を行った。

2. 実験方法

2.1 概要

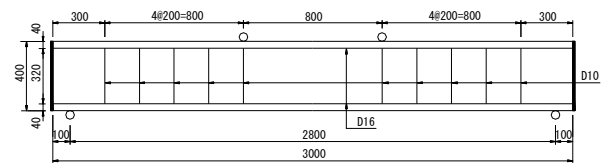
本研究では、UHPFRC による断面修復位置および補修厚さをパラメータとした梁供試体 7 体について曲げ載荷実験を実施した。表-1 には実験ケースの一覧を示しており、上面あるいは下面を断面修復するケースについて、それぞれ補修厚さを 20、40、60mm に変化させた。ここで、補修厚さ 20mm は既設コンクリートの表面を薄層補修する場合、60mm は補修時に鉄筋を露出させ UHPFRC とコンクリートを一体化する場合を想定したものである。

2.2 供試体

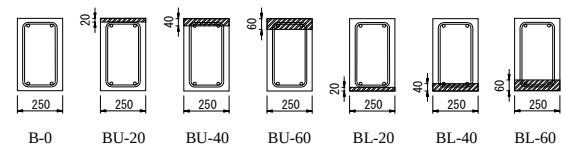
図-1 に実験供試体を示す。実験には幅 250mm、高さ 400mm の矩形断面を有する長さ 3,000mm の梁供試体を使用した。支間は 2,800mm、せん断スパン比は 2.8 であり、せん断スパン内にはせん断補強筋を 200mm 間隔で配置している。無補修供試体である B-0 は、せん断余裕度 3.1 とする曲げ破壊型として設計されている。

表-1 実験ケース

供試体名	断面修復位置	補修厚 (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



(a) 側面図 (B-0)



(b) 断面図

図-1 実験供試体

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/mm²、弾性係数は 24.3kN/mm²である。

本実験に使用した UHPFRC は、プレミックス材に鋼繊維、スチールワール、減水剤、消泡剤が配合されたものである。実験開始時（材齢 42 日）の圧縮強度は 156.3N/mm²、弾性係数は 34.6kN/mm²である。また、図-2 はダンベル型供試体による直接引張試験から得た応力-ひずみ関係であり、引張ひずみ 5,000~6,000μ で応力が低下するまでひずみ硬化挙動を呈する。

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

表-2 および表-3 に各材料の材料特性値をまとめる。

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

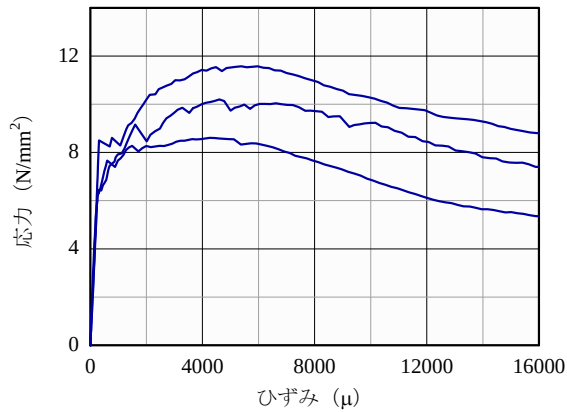


図-2 UHPFRC の引張挙動

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 載荷方法

載荷は、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または載荷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、断面分割法により荷重-変位関係を算出した。

コンクリートは引張側の応力負担を無視し、圧縮側は道路橋示方書・コンクリート橋編⁵⁾に準ずるモデルとした。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に基づきトリリニア型の応力-ひずみ関係を定義した。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

図-3 に補修供試体に関する荷重-供試体中央変位関係を、図-4 に実験終了時における供試体側面の損傷状況を示す。図-3 の各図には、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-4 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、実験の範囲内で得られた最大荷重を記載している。

4.1 基準供試体

B-0 では、30kN 程度で曲げスパン内に発生した曲げひび割れが徐々に進展していき、変位 80mm のときに載荷点近傍でコンクリートの圧壊が生じた。その後、変位が増加するにつれて曲げスパン内においても上縁コンクリートの圧壊が生じ、荷重-変位関係の勾配が緩やか

表-2 コンクリート、UHPFRC の材料特性

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

表-3 鉄筋の機械的性質 (ミルシート)

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

となるが、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ため実験を終了した。このときの荷重 118.9kN を B-0 の耐力と見なし、補修供試体の耐力評価の基準とした。

4.2 上面補修シリーズ

BU-20 では、B-0 と同様に曲げひび割れが進展するが、変位 70mm において既設コンクリートと UHPFRC の境界部に達した後は、最終の破壊に至るまでひび割れが停留する様子が見られた。その後、載荷点における支圧破壊が抑制されることで荷重-変位関係の勾配が概ね一定に保たれたまま荷重が増加し、142.2kN のときに左側載荷点付近で UHPFRC の圧壊が生じ荷重の低下に至った。最大荷重は B-0 の 1.20 倍であった。実験終了時には、UHPFRC 圧壊箇所の近傍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の不連続性は見られず、両者の一体性が十分に保持されていたと推察される。鉄筋破断により終局に至る断面分割法による計算結果とは破壊モードが異なるが、これは載荷点の支圧応力の影響が大きいものと考えられる。

BU-40 および BU-60 の荷重-変位関係やひび割れ状況は基本的に BU-20 と同様であり、載荷点近傍では荷重の増加とともに支圧による UHPFRC の角欠けが進行した。しかしながら、荷重低下には至らず、BU-40 では変位 110mm 程度から鉄筋破断に至る兆候と考えられる荷重低下が見られたため実験を終了した。BU-40 の最大荷重は 148.2kN であり、B-0 に対して耐力が 1.25 倍に向上する結果であった。BU-60 においては、供試体破壊の兆候が見られる前に実験を終了したが、断面分割法による計算結果からは、BU-40 と同様に鉄筋破断により破壊に至ると推察される。

図-5(a) には、断面高さ方向の応力分布の例として、断面分割法から得られた BU-40 における最大荷重時の応力分布を示す。BU-40 の破壊時には、上側表層 20mm 程度の範囲で UHPFRC が圧縮力を負担し、引張領域では下側鉄筋だけでなく上側鉄筋も降伏域に達し、さらに中立軸の下側で 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。また、下側鉄筋の破断時点で圧縮縁の応力が圧縮強度の 95%に達しており、BU-40

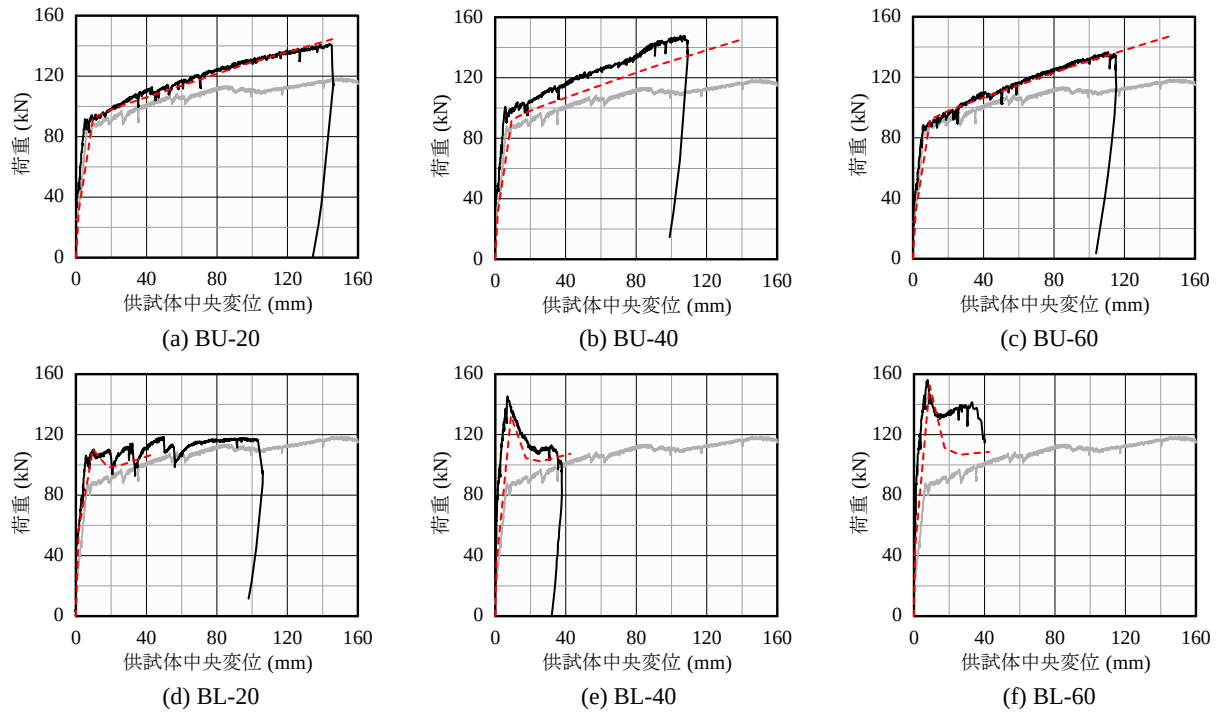


図-3 荷重－供試体中央変位関係（—— 実験 --- 断面分割法 — B-0）

表-4 実験結果の一覧

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	118.9	CC	109.7	CC
BU-20	142.2	UC	145.6	R
BU-40	148.2	R	147.7	R
BU-60	137.0	—	149.0	R
BL-20	118.9	CC	116.9	CC
BL-40	145.3	R	144.6	CC
BL-60	156.3	R	170.6	CC

※ CC：コンクリート圧壊、UC：補修材圧壊
R：鉄筋破断

は UHPFRC の圧縮特性および鉄筋の引張特性が概ね最大限に生かされる断面であったと言える。

以上より、UHPFRC を圧縮域に配置する場合、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。また、中立軸より下方の UHPFRC が引張力を負担することから、補修厚さが増すにつれて耐力が増加する傾向が実験および断面分割法の両者から示唆される。一方で、鉄筋の引張特性に対して圧縮特性が過剰に向上することで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

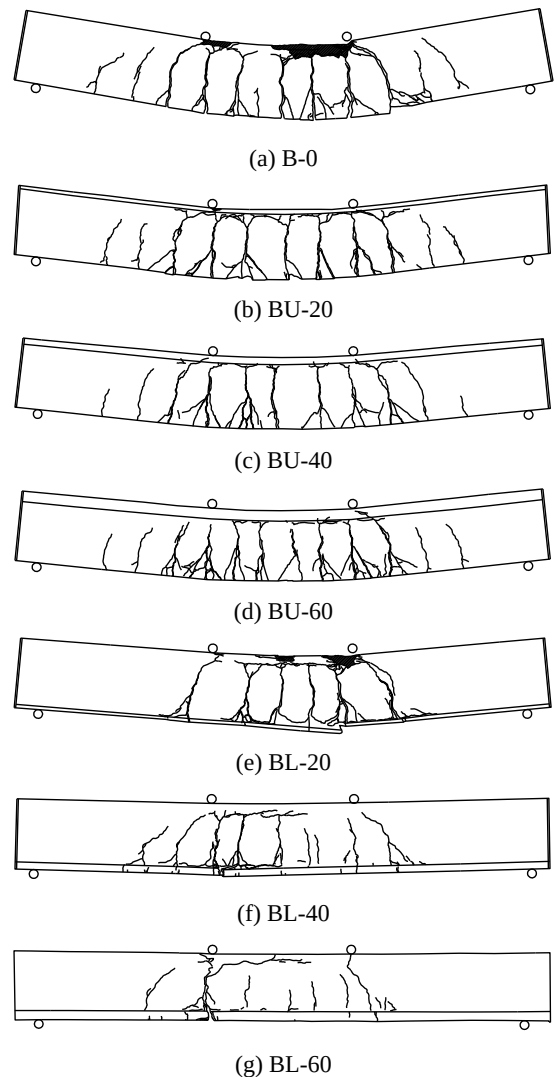


図-4 供試体の損傷状況

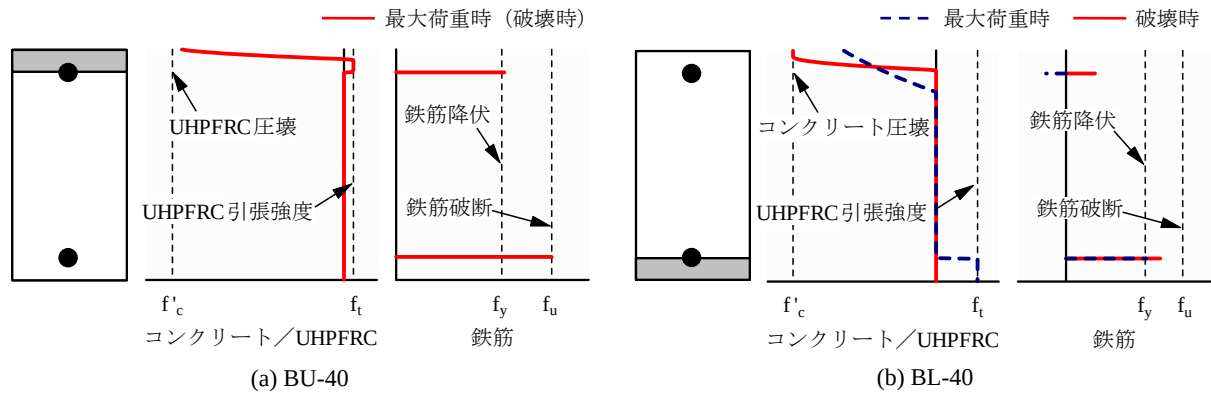


図-5 断面高さ方向の応力分布（断面分割法）

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。

4.3 下面補修シリーズ

BL-20 では、変位 10mm までに荷重位置の下縁で UHPFRC のひび割れ開口が局所化した後、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た。ただし、この剥離は既設コンクリート内で生じており、UHPFRC とコンクリートの付着破壊は発生していなかった。その後、荷重の増加とともに既設コンクリートのひび割れが開口し、荷重 118.9kN のときに上縁コンクリートの圧壊により荷重の低下に至った。

BL-40 および BL-60 では、UHPFRC の引張抵抗性により降伏荷重が B-0 に対し BL-40 で 1.5 倍、BL-60 で 1.6 倍に増加したが、鉄筋降伏の直後に荷重が急激に低下し、若干の変形増加が見られた後、鉄筋破断あるいはその兆候を示す荷重低下に至ったため実験を終了した。両供試体とも、鉄筋降伏時点で UHPFRC のひび割れ開口が 1 本のひび割れに局所化しており、荷重-変位関係からは、変形の増加とともにひび割れ面での伝達応力が減少し、鉄筋の塑性硬化挙動が支配的になる様子が見られる。図-5(b) は、断面分割法から得られた BL-40 の断面高さ方向の応力分布であり、最大荷重時（鉄筋降伏時）には UHPFRC 全厚がひずみ硬化域で引張力を負担するのに対し、破壊時には鉄筋のみが引張力を負担する RC 断面となっていることがわかる。なお、実験と断面分割法で破壊モードが異なるが、実験においては、局所化した 1 本のひび割れ面間の短い区間で鉄筋伸びによるエネルギー吸収が行われることで鉄筋破断に至ったと考えられる。

以上より、UHPFRC を引張域に配置する場合、補修厚さの増加とともに降伏荷重および最大荷重は大きくなる。一方で、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、降伏後には RC 断面と同様の曲げ挙動を呈することになる。また、

補修厚が大きく 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エネルギー吸収性能が低下する可能性がある。したがって、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。

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、補修厚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、本研究の結果や追加実験等を踏まえ、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の検討を行っていく。

参考文献

- 1) 国土交通省：社会資本整備重点計画、2012.
- 2) E. Denarié: 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) E. Brühwiler: Rehabilitation and strengthening of concrete structures using Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III, pp.72-79, 2012.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、2012.