

超高性能繊維補強コンクリートを用いた補修・補強技術に関する基礎研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 27

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西 弘明、今野 久志

佐藤 孝司、西城 能利雄

角間 恒

【要旨】

劣化損傷が深刻化している橋梁を始めとするコンクリート構造物の戦略的な維持管理を行うために、高い耐久性を期待できる新素材・新工法を用いた補修・補強技術の構築が求められている。本研究では、強度・変形特性に加え、遮水性や遮塩性、流動性に優れる常温硬化型の超高性能繊維補強コンクリート（Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete、以下、UHPFRC）に着目し、基礎的な材料および力学的特性の評価を行い、本材料の既設コンクリート構造物の補修・補強材としての適用性を検討した。また、各種試験結果を基に、補修・補強材として UHPFRC の性能を有効に活用できる橋梁部材について検討した。

キーワード：超高性能繊維補強コンクリート、橋梁、補修・補強

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第 3 次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・更新を重点目標の一つとし、その中では高い耐久性が期待できる素材・構造を活用していくことが掲げられた。また、2015 年に閣議決定された第 4 次社会資本整備重点計画²⁾においても、効果的かつ効率的な社会資本の維持管理・更新を実現するため、技術研究開発の促進、円滑な現場展開など、新技術の開発・導入を推進することを掲げている。こうした社会資本ストックの維持管理を巡る社会情勢の下、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（Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete、以下、UHPFRC）は、緻密なマトリックスを形成することで遮水性、遮塩性等にも優れ、積雪寒冷地の構造物への適用可能性が高い材料である。従来、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し、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^{3),4)}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。また、高流動性で材料分離抵抗性にも優れ狭隘部での施工が可能になることも、補修・補強材として使用する場合の利点となる。実際に、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が国内外に存在する^{5),6)}。

本研究では、既に適用事例が存在する部材だけでなく、より広範な橋梁部材を対象に UHPFRC の補修・補強材としての適用性を検討することを目的に、各種材料試験および載荷実験による UHPFRC の基礎的な材料特性および力学的特性の評価を行った。具体的には、補修・補強材としての性能を評価する材料試験、鉄筋と UHPFRC を組合せた部材の挙動を把握する鉄筋引抜実験および曲げ載荷実験、ならびに、UHPFRC を既設コンクリート部材の断面修復に使用した場合の基礎的な補修効果の評価する UHPFRC-RC 合成梁の曲げ載荷実験を実施した。また、それらの結果を基に、補修・補強材として UHPFRC の性能を有効に活用できる橋梁部材の抽出を行った。

2. UHPFRC の材料特性試験

本章では、UHPFRC の基本的な物性値を確認するために各種材料試験を実施した。

2.1 使用材料

本研究に使用した UHPFRC は、早強ポルトランド

セメント、石灰石フィラー、シリカヒュームで構成されるプレミックス材に、鋼繊維、スチールウール、減水剤、消泡剤を配合したものである。

2.2 試験項目および結果

表-1 に試験の項目および方法を示す。本研究における UHPFRC は粗骨材を含まない配合であるため、基本的には JIS A 1171 「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準じて試験を実施した。

表-1 に試験結果を併記する。試験結果より、本材料の特長として、15 打フローが 300mm 以上にもなる高流動性、材齢 28 日で圧縮強度 180N/mm² 程度および曲げ強度 32N/mm² に達する強度特性、材齢 1 日で圧縮強度 100N/mm² 以上を発揮する早期強度発現性が挙げられる。また、凍結融解試験による耐久性指数は 99%、塩化物イオン浸透深さおよび中性化深さはともに 0.0mm であり、凍結融解および塩害環境に曝される積雪寒冷地においても十分な耐久性を期待できる。

3. 鉄筋と UHPFRC の鉄筋引抜実験

コンクリート部材の補修・補強において、例えば RC 桁や RC 床版に対し鉄筋背面までのコンクリートをはつり取った後に断面修復を行う場合のように、補修・補強後の断面が鉄筋との組合せにより構成されるとき、その挙動を適切に評価するためには、材料単体の挙動に加え、材料内に鉄筋を配置した場合の挙動を把握することが重要になる。

本章では、UHPFRC 内に鉄筋を配置した断面（以下、R-UHPFRC）を対象に、鉄筋と UHPFRC の付着特性を把握することを目的に、鉄筋引抜実験を実施した。なお、補修・補強対象の構造物の中には丸鋼鉄筋を使用した構造物が多く含まれることを踏まえ、本実験では異形鉄筋だけでなく丸鋼鉄筋も検討の対象とし、R-UHPFRC の挙動における鉄筋種類の影響も検証した。

3.1 実験方法

3.1.1 実験ケース

鉄筋引抜実験は表-2 に示す鉄筋種類をパラメータとした 2 ケースについて実施する。各ケースの供試体数は 3 体である。

3.1.2 供試体

図-1 に供試体図を示す。UHPFRC は断面寸法 150mm×150mm、高さ 250mm の角柱形状とし、鉄筋には D13 (SD295A) あるいはφ13 (SR235) を使用した。鉄筋の定着長は 200mm であり、非定着部

表-1 材料試験の項目、方法および結果

項目	方法	結果	
		落下前	落下後
流動性 (フロー)	JIS R 5021	落下前	281mm
		落下後	>300mm ^{※1}
凝結時間	JIS A 1147	始発	127 分
		終結	277 分
圧縮強度	JIS A 1171	1 日	110.2N/mm ²
		7 日	144.5N/mm ²
		28 日	177.7N/mm ²
静弾性係数	— ^{※2}	28 日	36.7kN/mm ²
曲げ強度	JIS A 1171	28 日	32.1N/mm ²
付着強度	JIS A 1171	28 日	1.7N/mm ²
		温冷繰返し 30 サイクル	1.4N/mm ²
寸法安定性 (長さ変化率)	JSCE-K 561-2013	28 日	-684×10 ⁻⁶
線膨張係数	JSCE-K 561-2013	28 日	13×10 ⁻⁶ /°C
塩化物イオン 浸透深さ	JIS A 1171	28 日	0.0mm
凍結融解抵抗性 (耐久性指数)	JIS A 1148	300 サイクル	99%
中性化深さ	JIS A 1171	28 日	0.0mm

※1：テーブル直径以上のフローにより測定不能

※2：圧縮強度測定時の応力-ひずみ関係から算出

表-2 実験ケース（鉄筋引抜実験）

ケース名	鉄筋種類	定着長 (mm)
D200	D13 (SD295A)	200
φ200	φ13 (SR235)	

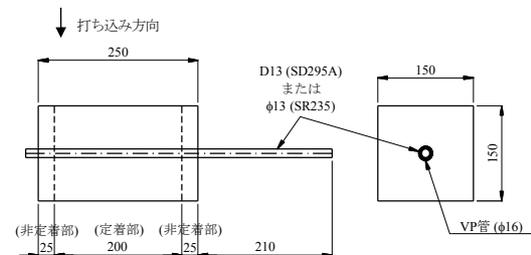
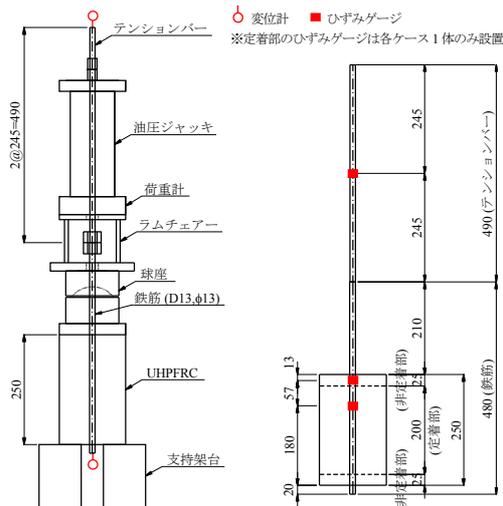


図-1 供試体図（鉄筋引抜実験）

では径 16mm の VP 管により鉄筋と UHPFRC との付着を排除した。UHPFRC の打ち込みは、供試体を水平にした状態で鉛直方向に行った。表-3 に UHPFRC の圧縮試験結果を、表-4 に鉄筋の引張試験結果を示す。

3.1.3 载荷および計測方法

図-2 に载荷概要および計測位置を示す。供試体は鉛直に設置し、機械式継手で連結したテンションバー (PC 鋼棒) をセンターホールジャッキにより緊張した。载荷は、荷重制御による単調载荷プログラムの下、鉄筋の破断あるいはテンションバー上端の



(a) セットアップ (b) ひずみゲージ位置
 図-2 载荷概要および計測位置 (鉄筋引抜実験)

表-3 UHPFRC の圧縮試験結果

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
28	156.9	34.0

表-4 鉄筋の引張試験

種別	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
D13 (SD295A)	346.8	455.9	13.9
φ13 (SR234)	316.5	453.4	29.2

変位がジャッキストロークの上限に至るまで実施した。

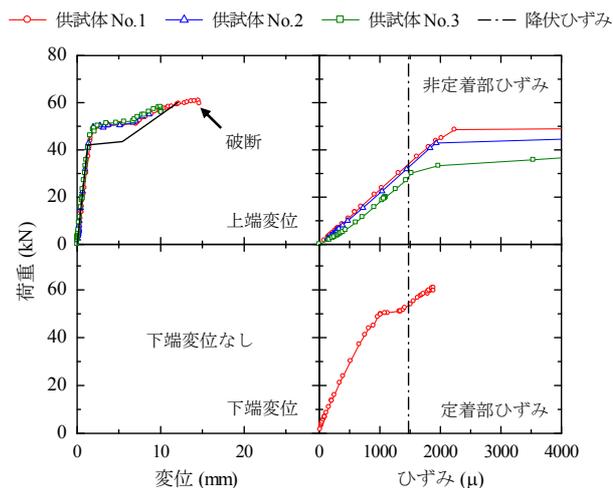
計測項目は、荷重、テンションバー上端の変位、鉄筋下端の変位、载荷側非定着部の鉄筋およびテンションバーのひずみを基本とし、各ケースにつき1体では定着部における鉄筋ひずみも計測した。

3.2 実験結果

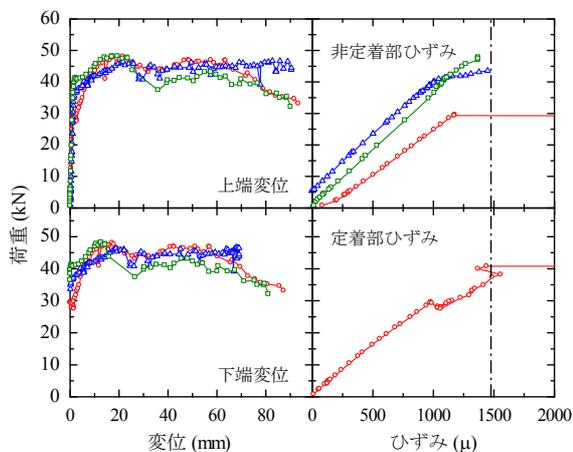
図-3 に、鉄筋引抜実験から得られた荷重と上下端変位の関係および荷重と鉄筋ひずみの関係を示す。

3.2.1 ケース D200

異形鉄筋を使用したケース D200 では、普通鋼の引張試験で見られる降伏棚を有する弾塑性挙動を呈した後、鉄筋の破断あるいは破断の兆候と判断できる荷重低下に至った。実験を通して下端変位は生じておらず、異形鉄筋と UHPFRC の付着破壊が生じることなく、定着部より上側の自由部鉄筋およびテンションバーの伸びにより上端変位が決まる。図中の黒色の実線は、定着部を固定条件とした計算により



(a) ケース D200



(b) ケース φ200

図-3 鉄筋引抜実験の結果

求めた荷重-上端変位関係である。計算結果は、実験結果と比較して鉄筋とテンションバーの連結部での荷重損失によると推察される荷重低下があるが、挙動の概略は一致しており、付着破壊が生じていないことを裏付けるものである。

なお、本実験とは別に定着長 70mm の場合についても実験を実施したが、定着長 200mm の場合と同様に付着破壊が生じる前に荷重 60kN 程度で鉄筋破断に至る結果であった。このとき、次式から得られる平均付着応力度は鉄筋破断時点で 20N/mm² であり、異形鉄筋と UHPFRC の間には少なくとも 20N/mm² 以上の付着強度があると考えられる。

$$\tau = \frac{P}{\pi RL} \quad (1)$$

ここに、 τ : 平均付着応力度、 P : 荷重、 R : 鉄筋径、 L : 定着長である。

3.2.2 ケース φ200

丸鋼鉄筋を使用したケース φ200 では、载荷開始直

後は荷重増加に対して線形的な応答を示すが、荷重 30~40kN で上端変位が増大するのとほぼ同時に下端変位が生じ、この時点で鉄筋のすべりが生じている。定着部での鉄筋ひずみの計測値は、下端変位が生じる荷重 30kN まで線形の荷重-ひずみ関係が成り立つことから、僅かな荷重増加の間に非定着部と定着部の境界から下端側に付着破壊が急激に進展していたと推察できる。式(1)で計算される最大荷重時の平均付着応力度は 3.6~4.8N/mm² であり、丸鋼鉄筋と普通コンクリートとの組合せとした場合の 2~10 倍程度の付着強度となった。

鉄筋すべりの開始後には変位が 20mm 程度に達するまで荷重が増加するスリップハードニング挙動を呈し、その後も一定荷重を保持する。これは、すべり開始直後に荷重低下が開始する普通コンクリートを用いた丸鋼鉄筋の引抜実験とは異なる挙動である。短繊維補強セメント複合材料における繊維の引抜きでは、繊維の種類によって繊維表面の擦り傷等により抜出し開始後も荷重が増加するスリップハードニング挙動を呈することが報告されており^{8) 9)}、繊維と鉄筋の違いがあるが、本実験においても同様の現象が生じていた可能性がある。ただし、この機構は既往の研究からの推察であり、別途詳細な検証を要する。

3.3 まとめ

鉄筋引抜実験の結果、異形鉄筋を使用した場合において、極めて高い付着強度が得られる結果となった。コンクリート標準示方書¹⁰⁾では、例えば、端部にフックを設けずに鉄筋とコンクリートとの付着により定着する場合、コンクリートから鉄筋が拔出さないよう少なくとも鉄筋径の 20 倍以上の定着長を確保する必要があるとしているが、UHPFRC 内に鉄筋を定着する場合には必要定着長を大幅に低減できる可能性がある。

一方、丸鋼鉄筋と UHPFRC の組合せにおいては、異形鉄筋と比較すると付着強度が小さいものの、本実験で得られた付着強度 3.6~4.8N/mm² は、コンクリート標準示方書¹⁰⁾における異形鉄筋と普通コンクリートの付着強度特性値の上限 4.2N/mm² と同程度である。このことより、丸鋼鉄筋を UHPFRC 内に定着する場合には、異形鉄筋を普通コンクリートに定着する場合と同様の考え方を準用できると言える。

4. UHPFRC の曲げ載荷実験

本章では、曲げモーメントを受ける場合の

表-5 実験ケース (曲げ載荷実験)

ケース名	鉄筋種類
UHPFRC	なし
Rd-UHPFRC	D13 (SD295A)
Rr-UHPFRC	φ13 (SR235)

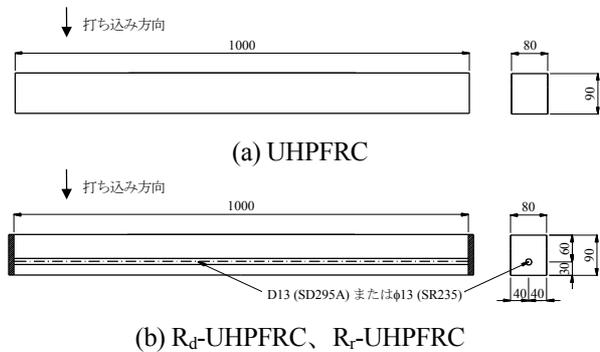


図-4 供試体図 (曲げ載荷実験)

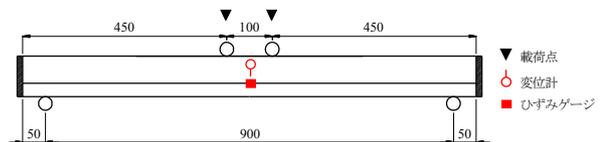


図-5 載荷概要および計測位置 (曲げ載荷実験)

R-UHPFRC の基礎的挙動を検証するために曲げ載荷実験を実施した。併せて、断面分割法による荷重の計算を行い、R-UHPFRC の曲げ耐力を計算する方法についても検討した。なお、前章で実施した鉄筋引抜実験において、鉄筋と UHPFRC の付着特性が鉄筋種類の影響を強く受ける結果であったことより、異形鉄筋および丸鋼鉄筋の両者を実験対象とした。

4.1 実験方法

4.1.1 実験ケース

曲げ載荷実験は、表-5 に示す鉄筋の有無および鉄筋種類をパラメータとした 3 ケースについて実施した。各ケースの供試体数は 3 体である。

4.1.2 供試体

図-4 に供試体図を示す。実験には、幅 80mm、高さ 90mm の矩形断面を有する長さ 1,000mm の梁供試体を使用した。鉄筋は鉄筋引抜実験と同様、異形鉄筋は D13 (SD295A)、丸鋼鉄筋はφ13 (SR235) であり、端部に設置した鋼板に溶接して定着した。UHPFRC の打設は鉄筋引抜実験の供試体と同時に実施し、供試体を水平にした状態で鉛直方向に行った。

4.1.3 載荷および計測方法

図-5 に載荷概要および計測位置を示す。実験は、

等曲げスパン 100mm、せん断スパン 400mm の 4 点曲げにより実施した。載荷には油圧ジャッキを用い、初期曲げひび割れ発生までは荷重制御、その後は変位制御による単調載荷プログラムの下、供試体の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実験を実施した。

計測項目は、荷重、供試体中央の鉛直変位（以下、中央変位）および鉄筋ひずみである。

4.2 断面分割法による最大荷重の計算

耐力等の算出手法を検討するため、断面分割法により最大荷重等を計算した。計算に使用した応力-ひずみ関係を図-6 に示す。UHPFRC の引張側ではひずみ硬化挙動を考慮し、直接引張試験結果を踏まえたトリリニア型の応力-ひずみ関係とした。ただし、初期ひび割れ後の応力増加は考慮せず、終局ひずみに達するまで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標準示方書¹⁰⁾を参考に放物線型の応力-ひずみ関係とした。鉄筋は弾完全塑性モデルとした。

4.3 実験結果

図-7 に曲げ載荷実験から得られた荷重と中央変位の関係およびケース R_d-UHPFRC に関する荷重と鉄筋ひずみの関係を、図-8 に供試体損傷状況の一例を示す。図-7 中の破線および一点鎖線は断面分割法による計算結果であり、破線は UHPFRC の引張挙動を考慮した計算による最大荷重を、一点鎖線は UHPFRC の引張断面を無視した計算による鉄筋降伏荷重を表す。

4.3.1 ケース UHPFRC

鉄筋を配置しないケース UHPFRC では、荷重の増加とともに目視できる曲げひび割れが数本発生するが、初期ひび割れ後も UHPFRC が引張力を負担するために無筋構造であっても荷重が増加する。供試体 3 体における最大曲げ応力の範囲は 18.6～

27.6N/mm²であった。2章の結果（表-1）と比較して曲げ強度が小さくなったが、これは供試体寸法の差異によるものと考えられる。

4.3.2 ケース R_d-UHPFRC および R_r-UHPFRC

鉄筋を配置したケース R_d-UHPFRC およびケース R_r-UHPFRC では、目視できる曲げひび割れの発生、鉄筋降伏を経て最大荷重に到達する。その後は、変位の増加とともに 1 本のひび割れが大きく開口して荷重が低下し、荷重が概ね一定となる。実験終了後の損傷状況において鉄筋種類による明確な差異は見られず、両ケースともに等曲げ区間内で上縁の圧壊

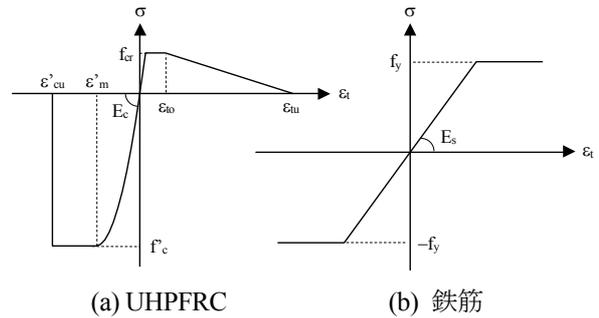


図-6 UHPFRC および鉄筋の応力-ひずみ関係

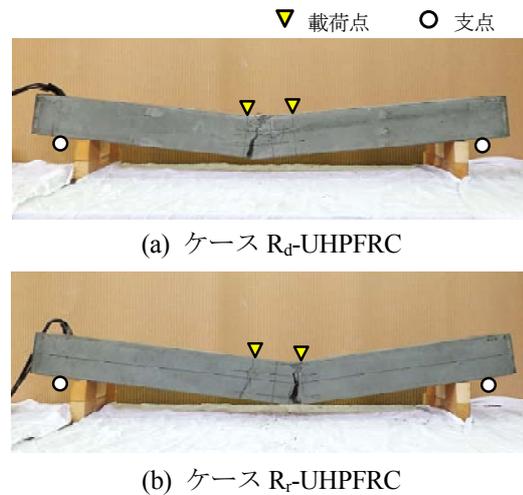


図-8 供試体損傷状況の例（曲げ載荷実験）

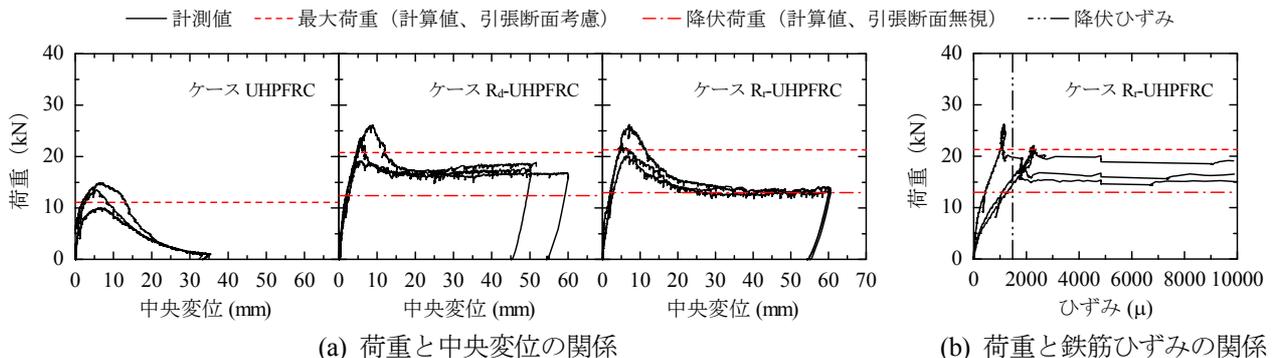


図-7 曲げ載荷実験の結果

が生じていた。

最大荷重までの挙動に着目すると、鉄筋の種類による明確な差は見られず、最大荷重およびそのときの中央変位の平均値は、 R_d -UHPFRC でそれぞれ 23.0kN および 6.53mm、 R_r -UHPFRC でそれぞれ 22.8kN および 6.02mm であり概ね一致する。また、断面分割法による計算結果と比較すると、供試体毎に最大荷重のばらつきはあるが、計算結果は実験結果を概ね再現できており、材料特性を考慮した簡易計算手法により耐力の計算できることを示す。最大荷重後のポストピークにおいても基本的な挙動は鉄筋種類によらないが、 R_r -UHPFRC において荷重低下の勾配や程度が大きくなるのが、ポストピーク後に漸近する荷重値や計算結果との比較から明らかである。 R_r -UHPFRC における供試体中央での鉄筋ひずみの計測値では、最大荷重から荷重が低下する過程で既に鉄筋が降伏域に達しており、鉄筋には 40kN 以上の引張力が作用していることになる。前述の鉄筋引抜実験において、丸鋼鉄筋を使用したケース $\phi 200$ では、引抜荷重 30~40kN 程度のときに付着破壊が開始したことを踏まえると、鉄筋引抜実験との定着長の違いはあるものの、 R_r -UHPFRC では鉄筋と UHPFRC の付着切れを生じさせるのに十分な引抜荷重がひび割れ面間の鉄筋に作用していたと推察できる。この付着切れによりひび割れ近傍では UHPFRC への引張力の伝達が低下し、ポストピーク挙動における荷重低下が大きくなったものと考えられる。

4.4 まとめ

曲げ載荷実験では、曲げ耐力までの挙動が鉄筋種類に依存しない結果を得た。通常、丸鋼鉄筋を使用した RC 部材では、鉄筋すべりの影響により異形鉄筋を使用した RC 部材と比較して曲げ剛性が低下するが、 R -UHPFRC では丸鋼鉄筋であってもある程度の付着を確保できることから鉄筋種類の影響は小さ

い。ただし、鉄筋種類は最大荷重後の荷重低下に影響するため、偶発荷重等に対する復旧性が求められる部材に UHPFRC を適用する場合にはポストピーク挙動を適切に評価することが要求される。

5. 断面修復した RC 梁の曲げ載荷実験

UHPFRC を使用した補修・補強技術の一つとして、既設コンクリート部材の断面修復が考えられる。この場合の補修深さは、表面かぶり部分を置換する軽微な補修から、鉄筋背面までのコンクリートをはつり取った後に置換する補修まで、対象部材の劣化損傷の状況によって大きく異なる。したがって、本材料の適用可能箇所を明確にするためには、様々な補修条件に対して補修効果を明らかにする必要がある。

そこで本章では、UHPFRC による断面修復の位置や深さを变化させた梁供試体について曲げ載荷実験を実施し、UHPFRC により断面修復した RC 梁の基礎的な挙動や補修効果を検証する。

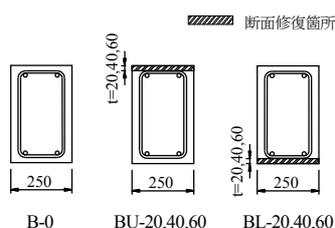
5.1 実験方法

5.1.1 実験ケース

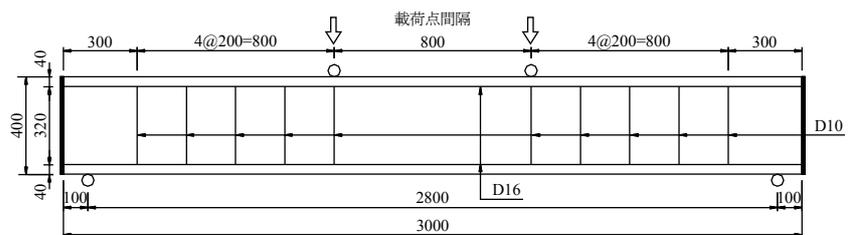
本実験は表-6に示す7ケースについて実施した。ここでは、UHPFRC による断面修復位置および補修深さをパラメータとしており、補修深さ 20mm は既

表-6 実験ケース
(断面修復した RC 梁の曲げ載荷実験)

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



(a) 断面図



(b) 側面図 (B-0)

図-9 供試体図 (断面修復した RC 梁の曲げ載荷実験)

設コンクリートの表面かぶり部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。

5.1.2 供試体

図-9 に供試体図を示す。基準供試体 B-0 は曲げ耐力 92.6kN、せん断耐力 252.4kN、せん断余裕度 2.7 の曲げ破壊型として設計した。表-7 に実験時材齢におけるコンクリートおよび UHPFRC の圧縮試験結果を、表-8 に鉄筋の機械的性質を示す。

UHPFRC の打設は、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後に実施した。既設コンクリートと UHPFRC の境界部で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。UHPFRC の打設方向は断面修復位置によらず全て下向きとした。

5.1.3 載荷および計測方法

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あるい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。

計測項目は、荷重および供試体中央変位とする。

5.2 実験結果

図-10 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、表-9 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。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する。また、図-11 は実験終了時における供試体側面の損傷状況であり、図中の黒塗り箇所は圧壊箇所を指す。

5.2.1 基準供試体 (B-0)

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 では等曲げ区間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。本検討では、上縁コンクリートの圧壊が生じた荷重 113.5kN を B-0 の耐力と見なす。

5.2.2 上面補修シリーズ (BU-20、40、60)

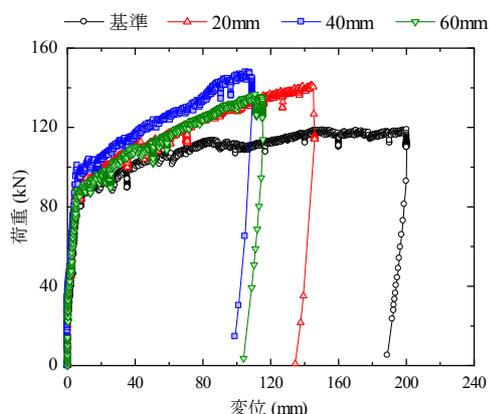
上面を補修した供試体では、B-0 と同様の荷重-変位関係を呈するが、鉄筋降伏後の荷重増加勾配が大きくなる。表-9 より上面一部を UHPFRC に置き

表-7 コンクリート、UHPFRC の圧縮試験結果

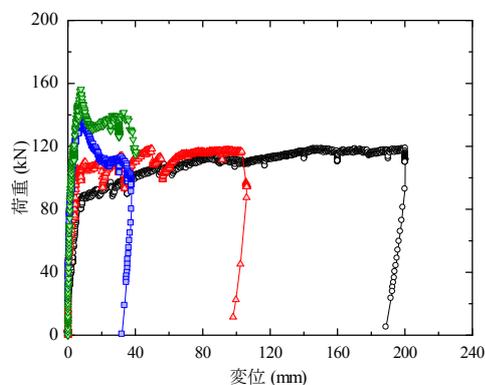
材料種別	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
コンクリート	186	29.7	24.3
UHPFRC	42	156.3	34.6

表-8 鉄筋の機械的性質 (ミルシート)

鉄筋種別	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



(a) 上面補修シリーズ



(b) 下面補修シリーズ

図-10 断面修復したRC梁の曲げ載荷実験の結果

換えることで耐力が増加するが、補修深さの増加に対する感度は低く、補修深さの耐力向上への寄与は大きくない。

損傷状況を見ると、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

表-9 最大荷重、破壊モードの一覧

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

*BU-60 は破壊前に実験を終了したため参考値として記載

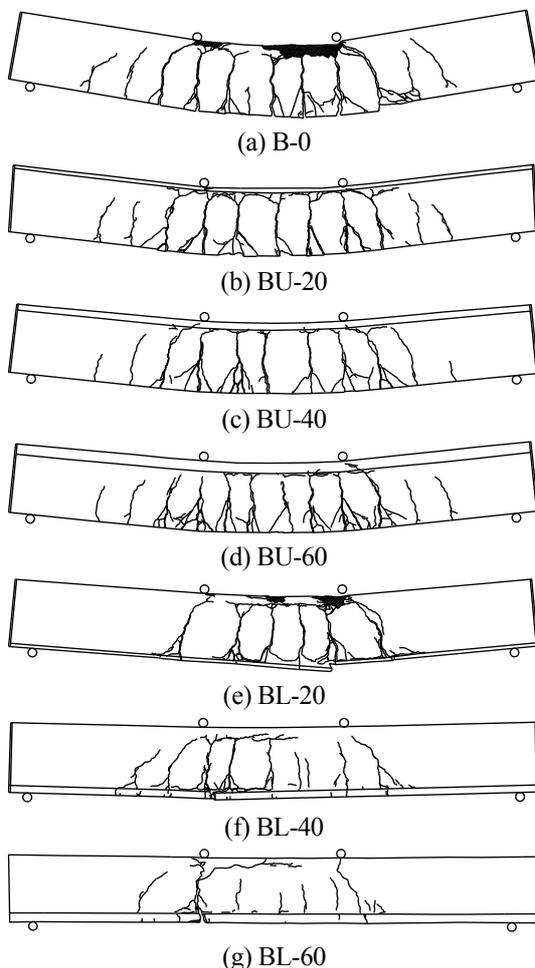


図-11 供試体の損傷状況
(断面修復した RC 梁の曲げ載荷実験)

る。最終的には、BU-20 では荷重位置における UHPFRC の圧壊により、BU-40 では鉄筋破断に至る兆候と考えられる荷重低下により実験を終了した。

なお、全ての供試体で既設コンクリートと UHPFRC の剥離は生じておらず、両者の一体性は保持されていた。

実験結果と断面分割法による計算結果を比較すると、最大荷重はよく一致していることから、4 章の曲げ載荷実験と同様に、補修断面についても材料特性を考慮した断面計算により耐力を算出できると言える。ただし、BU-20 では、計算において荷重位置での支圧破壊を取扱っていないために実験と計算で破壊モードが異なる結果となっている。

5.2.3 下面補修シリーズ (BL-20、40、60)

下面を補修した供試体では、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概ね比例する。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、BL-40 および BL-60 では最大荷重後に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。

損傷状況を見ると、基準供試体と比較して曲げひび割れ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り、ひび割れの分散性は低下する。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り実験を終了した。

実験と計算の比較では、最大荷重は両者で概ね一致するが、破壊モードは BL-40 および BL-60 で一致していない。BL-40 と BL-60 に対する実験では、鉄筋降伏時に UHPFRC のひび割れ開口が 1 本のひび割れに集中していたが、3 章で得られた異形鉄筋と UHPFRC の高い付着強度により、鉄筋-UHPFRC 間の付着破壊がひび割れ面から進展していなかった可能性がある。このことより、局所化したひび割れ面間の短い区間で鉄筋が伸びることになり鉄筋破断に至ったと推察される。

5.3 まとめ

以上より、既設コンクリート部材の断面修復では、UHPFRC を上面側 (圧縮側) および下面側 (引張側) に配置する両ケースともに補修前に対して曲げ耐力は向上するが、補修深さによっては破壊モードが変化することがある。耐力・破壊モードの計算においては、材料特性を考慮した断面分割法により十分な精度で最大荷重の算出が可能であるが、破壊モード推定のためには計算手法の改善が必要になる。

6. 適用可能性の高い部材の抽出

前章までの検討に基づき、補修・補強材として特に UHPFRC の特性を有効に発揮できる橋梁部材を抽出した。また、設計・施工時の留意点を整理した。

6.1 適用可能性の高い部材の抽出

6.1.1 沓座モルタル

支承部に作用する荷重を下部構造に伝える沓座モルタルや台座コンクリートは、伸縮装置からの漏水や上部構造の繰返し振動等に曝されるために劣化損傷が生じやすい。沓座モルタルや台座コンクリートのひび割れや欠損は、橋台コンクリートへの水の浸入によるアンカーボルトの定着不足、支承の荷重支持機能の低下、支承の傾斜・沈下と桁の沈下に繋がることから、支承が確実に機能するために劣化損傷を受けにくい材料を使用することが求められる。

沓座モルタルや台座コンクリートの要求性能には、施工性に優れ狭隙部への充填が確実にできること、アンカーボルトが確実に固定されること、支承下面の支圧応力により損傷せず下部構造に鉛直力を伝えることが挙げられる。流動性、鉄筋との付着特性、圧縮強度特性に優れる UHPFRC は上記の要求性能を満たすものであり、また、積雪寒冷地において懸念される冬季の凍結融解に対する抵抗性に優れることから、適用可能性が非常に高い箇所と評価できる。

6.1.2 伸縮装置部における RC 床版の部分打替え

道路橋の伸縮装置は橋梁部位の中でも劣化損傷を受けやすく、取替え等の補修工事が多い箇所である。伸縮装置前後の RC 床版部についても、道路線形に起因する輪荷重による大きな衝撃荷重の作用と伸縮装置との境界から浸入した水の滞留が相まって一般部と比較して劣化損傷が生じやすく、床版コンクリートの抜け落ちに至ることもある。伸縮装置に加えて近傍の RC 床版が著しく劣化損傷している場合には、伸縮装置取替えと同時に RC 床版の部分的な打替えが行われるが、このときの打替え材料としては、衝撃荷重の作用に抵抗するとともに環境作用に対する長期耐久性に優れる材料を使用する必要があることから、UHPFRC の適用可能性が高いと考えられる。

なお、部分打替えに使用する場合、既設部と打替え部では剛性の違いが生じやすいため、打継部を起点とした補修部の再劣化には留意が必要である。したがって、単に UHPFRC の材料特性に期待するだけでなく、打継部の健全性が長期的にわたって確保されるよう確実に一体化を図ることが不可欠になる。

6.2 設計・施工時の留意点

6.2.1 収縮によるひび割れについて

本材料では硬化時にひび割れ発生ひずみを超える収縮が生じることから、高い水密性が要求される箇所へ適用する場合には収縮によるひび割れ発生に留意する必要がある。また、引張抵抗性を見込める場合であっても、変形性能の評価に当たっては収縮の影響を適切に取り扱わなければならない。この他、UHPFRC とともに新たに鉄筋を追加した補修・補強を検討する場合には、異形鉄筋により収縮が拘束されることを防ぐために、補強鋼材として丸鋼や PC 鋼棒を使用することが有効になると考えられる。

6.2.2 断面修復による破壊モードの変化について

5 章の結果より、断面修復に本材料を使用するときには、補修深さが大きくなることで破壊モードが鉄筋破断に移行する可能性がある。既設構造物の補修・補強においては、対策の前後で破壊モードが変化すること、特に鉄筋破断のような脆性的な破壊となることは好ましくない。したがって、補修・補強断面の検討に当たっては、十分な鉄筋量が配置されていることを照査することが求められる。また、引張領域に UHPFRC を配置し、さらに引張鉄筋が UHPFRC 内にある場合には、耐力後の荷重低下や変形性能の低下が生じる可能性があり、適用部材の要求性能に応じて本材料の適用性を判断する必要がある。

7. まとめ

本研究では、超高性能繊維補強コンクリート (UHPFRC) の既設コンクリート構造物の補修・補強材としての適用性を検討するため、各種材料試験および載荷実験を実施した。また、その結果を基に、補修・補強材として本材料の性能を有効に活用できる橋梁部材を抽出した。得られた知見を以下に示す。

- 1) R-UHPFRC における鉄筋引抜実験では、異形鉄筋と UHPFRC の間には極めて高い付着強度があることを示した。また、丸鋼鉄筋においても、RC 構造物の設計に用いられる異形鉄筋と普通コンクリートの付着強度と同等の付着強度が得られる。従って、既設橋梁部材の補修・補強では、鉄筋定着長確保の容易さが工法選定時の評価指標になることが多いが、UHPFRC 内に鉄筋を定着する場合には、定着長の低減が期待できる。
- 2) R-UHPFRC の曲げ載荷実験では、曲げ耐力までの挙動が鉄筋種類に依存しないことを示した。一方、最大荷重後の挙動には鉄筋種類の影響が現れる

ことから、ポストピーク挙動の評価が求められる場合には、付着特性を考慮した適切な評価手法を選択する必要がある。また、材料特性を考慮した簡易計算により曲げ耐力の算出が可能であることを示した。

- 3) UHPFRC で断面修復した RC 梁の荷重実験では、圧縮側および引張側を補修する場合ともに補修後に曲げ耐力は増加することを示した。ただし、補修深さによっては破壊モードの変化や変形性能の低下が生じる場合があり留意が必要になる。
- 4) 補修・補強材として UHPFRC の性能を有効に活用できる橋梁部位・工法として、(1) 支承部の沓座モルタル、(2) 伸縮装置部における RC 床版の部分打替えを挙げた。これらの例に限らず、強度特性とともに水密性や凍結融解抵抗性といった環境作用に対する長期耐久性が求められる部位の補修・補強においては、UHPFRC の適用可能性が十分に高いものとする。

Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.13, No.6, pp.399-406, 2001.

- 10) Wille, K. and Naaman, A. E.: "Bond Stress-Slip Behavior of Steel Fibers Embedded in Ultra High Performance Concrete", Proceedings of 18th European Conference on Fracture Damage of Advanced Fiber-Reinforced Cement-Based Materials, pp.99-111, 2010.

参考文献

- 1) 国土交通省：「社会資本整備重点計画」、2012.
- 2) 国土交通省：「社会資本整備重点計画」、2015.
- 3) Denarié, E.: "Recommendations for the Tailoring of UHPFRC Recipes for Rehabilitation", Deliverable ARCHES D06, 2009.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 国枝稔、柳井修司、渡邊有寿、青山達彦、鎌田修、林信也：「岐阜大学「大学西橋の施工」 超高強度ひずみ硬化型モルタル (UHP-SHCC) を用いて高耐久床版の施工」、セメント・コンクリート、No.816、2015.
- 7) 西弘明、岡田慎哉、澤松俊寿、角間恒：「RC 構造物における丸鋼の定着強度に関する実験的検討」、平成 24 年度土木学会北海道支部論文報告集、第 69 号、A-56、2013.
- 8) 土木学会：「コンクリート標準示方書」、2012.
- 9) Redon, C., Li, Victor C., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T. and Ogawa, A.: "Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix",

STUDY ON APPLICATION OF ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE TO REHABILITATION OF BRIDGE STRUCTURES

Budgeted: Grants for operating expenses
General account

Research Period: FY2013-2015

Research Team: Structures Research Team

Author: NISHI Hiroaki

KONNO Hisashi

SATO Koji

SAIJO Norio

KAKUMA Ko

Abstract: In order to prolong the life of severely deteriorated concrete structures, the adoption of the repair or reinforcement methods with high durable materials or structures are strongly demanded. This study focused on ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) which has ambient curability, self-compact ability and low permeability as well as high strength, and evaluated the fundamental material and structural characteristics of UHPFRC to investigate the applicability of the material to the rehabilitation of existing bridge structures. The typical findings are as follows: (1) the extremely high bond strength between deformed bars and UHPFRC introduces the reduction of bond length to the design on maintenance when reinforcing bars are fixed within UHPFRC; and (2) the partial replacement of concrete section with UHPFRC improves flexural load carrying capacity independent on repair position and thickness. However, it is necessary to pay attention to the change of failure modes and the decrease in deformation capacity brought by the increase in repair thickness for the determination of repair or reinforcement cross-section.

Key words: UHPFRC, bridge structures, rehabilitation