鉄筋を配置した UHPFRC の基礎的な挙動について

Fundamental behavior of UHPFRC containing reinforcing bar

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 正 会 員 角間 恒 (Ko Kakuma) (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○正 会 員 佐藤孝司 (Koji Sato) (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 正 会 員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

1. はじめに

積雪寒冷地におけるコンクリート構造物では、凍害や 凍結防止剤散布による塩害等の劣化が著しく進行してい る。これらの構造物の維持管理を行う上で、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 確立が求められている。

超高性能繊維補強コンクリート(以下、UHPFRC)は、強度・変形特性に加え、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の物質透過抵抗性にも優れ、積雪寒冷地の構造物への適用可能性が高い材料と考えられる。従来、これらの材料はプレキャスト部材として使用されてきたが、常温硬化型材料の開発 ^{D, 2)}により現場打ちが可能となり、既設構造物の補修・補強材として積極的に展開されていくものと予想される。

著者らはこれまでに、UHPFRCを曲げ破壊型RC部材の断面修復材として使用する場合の補修効果について検討してきた³。その中で、UHPFRCを引張領域に配置し、さらに引張鉄筋がUHPFRC内にあるときには、鉄筋とUHPFRCの強固な付着特性に起因して鉄筋破断による脆性的な破壊モードを呈することを示唆している。

本研究では、鉄筋を配置した UHPFRC (以下、R-UHPFRC) の基礎的な力学的挙動を把握することを目的に、鉄筋引抜実験および R-UHPFRC 梁の曲げ載荷実験を実施した。なお、本研究では、補修・補強工事の対象となる構造物に依然として丸鋼鉄筋を使用した構造物が多く含まれることから、異形鉄筋および丸鋼鉄筋の両者を検討の対象とした。

2. 実験方法

2.1 鉄筋引抜実験

(1) 実験ケース

鉄筋引抜実験は、表-1 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体とする。

(2) 供試体

図-1 に供試体図を示す。UHPFRC は断面寸法 150mm \times 150mm、高さ 250mm の角柱形状とし、鉄筋には D13 (SD295A) あるいは ϕ 13 (SR235) を使用する。 鉄筋の定着長は 200mm とし、非定着部では径 16mm の VP 管により鉄筋と UHPFRC との付着を排除する。 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-2 に材齢 28 日における UHPFRC の圧縮強度試験 結果を、表-3 に鉄筋の引張試験結果を示す。

表-1 鉄筋引抜実験の実験ケース

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

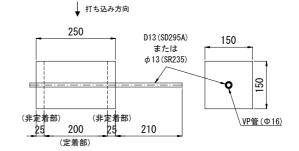


図-1 供試体図(鉄筋引抜実験)

表-2 UHPFRC の圧縮試験結果

	材齢	圧縮強度	弹性係数
	(日)	(N/mm²)	(kN/mm²)
ŀ	28	156.9	34.0

表-3 鉄筋の引張試験結果

種別	降伏強度 (N/mm²)	引張強さ (N/mm²)	伸び (%)
D13 (SD295A)	346.8	455.9	13.9
φ13 (SR235)	316.5	453.4	29.2

(3) 載荷および計測方法

図-2 に載荷・計測方法の概要図を示す。実験は油圧 ジャッキを用いた単調載荷プログラムにより実施する。

計測項目は、荷重、上下端の変位、載荷側自由部の鉄 筋ひずみ、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を計測する。

2.2 曲げ載荷実験

(1) 実験ケース

曲げ載荷実験は、表-4 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する。各 ケースの供試体数は 3 体とする。

(2) 供試体

図-3 に供試体図を示す。実験には、幅 80mm、高さ

平成27年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第72号

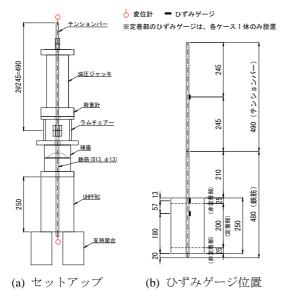


図-2 載荷概要および計測位置(鉄筋引抜実験)

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) である。

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打ち込みを行った。

(3) 載荷および計測方法

図-4 に載荷概要および計測位置を示す。載荷は、等曲げスパン 100mm、せん断スパン 400mm とする 4 点曲げにより実施し、油圧ジャッキを用いて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とした。計測項目は、荷重、鉛直変位、鉄筋ひずみである。

3. 結果および考察

3.1 鉄筋引抜実験

図-5 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。ケースD200 の図中には、鉄筋埋込部の付着が極めて強固で付着破壊が一切生じないとの仮定の下、次式から求めた荷重-上端変位関係の計算値も併記する。

$$\Delta_{\rm u} = \delta_{\rm db} + \delta_{\rm t} \tag{1}$$

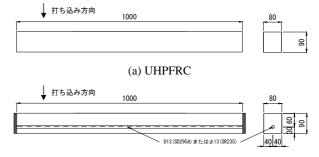
ここに、 Δ_u : 上端変位、 δ_{db} : 自由部鉄筋の伸び、 δ_t : テンションバーの伸びであり、 δ_{db} および δ_t は、引張試験から得た鉄筋およびテンションバーの応力 – ひずみ関係に基づいて計算した。

(1) ケース D200

異形鉄筋を使用したケース D200 においては、普通鋼の引張試験で見られるような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ため実験を終了した。実験を通して下端の変位は生じておらず、異形鉄筋と UHPFRC の付着破壊が生じないほどに付着強度が大きいため、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。実験結果と式 (1) による計算結果

表-4 曲げ載荷実験の実験ケース

ケース名	鉄筋種類	
UHPFRC	なし	
R _d -UHPFRC	D13 (SD295A)	
R _r -UHPFRC	φ13 (SR235)	



(b) R_d-UHPFRC、R_r-UHPFRC

図-3 供試体図(曲げ載荷実験)

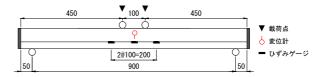


図-4 載荷概要および計測位置(曲げ載荷実験)

を比較すると、荷重-上端変位関係の概略は一致するものの、実験で荷重が大きくなる傾向がある。これは鉄筋-テンションバー接続部での荷重損失によるものと推察される。

(2) ケース 6200

丸鋼鉄筋を使用したケース¢200では、載荷開始直後 は荷重の増加に対して線形的な応答を示すが、荷重 30 ~40kN 以降で上端変位が増大するのとほぼ同時に鉄筋 下端にも変位が生じており、この時点で鉄筋のすべりが 生じたことがわかる。定着部のひずみ計測値では、下端 変位が生じる荷重 30kN までは線形の荷重-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一 定着部境界から下端に向かって付着破壊が急激に進展し ていたと推察できる。鉄筋のすべりが開始した後には、 変位が 20mm 程度に達するまでは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。この間、上下端の変位差が徐々に大きくなってお り、摩擦力が引抜荷重に抵抗しながらも自由部鉄筋の伸 びが増加したことを表す。これは、すべり開始と同時に 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 4 とは異なる挙動である。スリップハード ニング挙動の機構としては、二つの可能性が考えられる。 一つは、鋼繊維が鉄筋に絡むことによる拘束効果である。 本実験では、荷重が低下しながら鉄筋が引抜かれる過程 で断続的に甲高い異音が発生していたが、これは鉄筋と 鋼繊維の相対位置が大きくなったときに鋼繊維が弾かれ て拘束効果が失われていたことを示唆するものであり、 異音の発生前までは鋼繊維による拘束効果が働いていた 可能性がある。もう一つは引抜けの過程で生じる鉄筋表

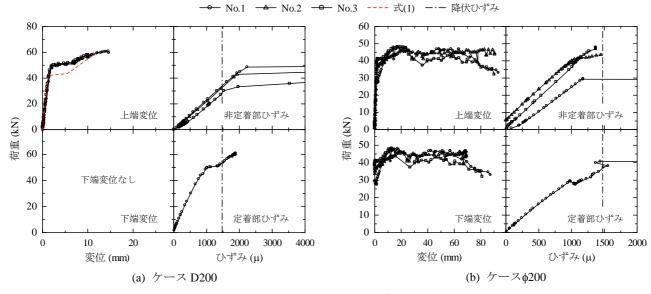


図-5 鉄筋引抜実験の結果

面の擦り傷の影響である。短繊維補強セメントにおける 繊維の引抜きでは、繊維の種類によっては繊維表面の擦 り傷等により抜出し開始後に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あり 50、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、 これらの機構は実験状況や既往の研究から推察したもの であり、別途詳細な検証が必要である。

3.2 曲げ載荷実験

図ー6(a)に、曲げ載荷実験から得られた荷重と供試体中央の鉛直変位の関係を示す。図中には、断面分割法による計算結果を図示しており、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示す。なお、断面分割法における応力ーひずみ関係には、UHPFRC は圧縮強度試験および直接引張試験から、鉄筋は引張試験から得られた関係を使用した。

(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観察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。その後、最大荷重に達したときに曲げスパン内で1本のひび割れが大きく開口し、変位の増加とともに荷重が低下していく。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) ケース R_d-UHPFRC およびケース 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、目視観察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。荷重が一定となっている 状態では、供試体の曲げ挙動を鉄筋の降伏挙動が支配し ていたものと考えられる。

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、最大荷重および最大荷重時中央変位の平均値についても、Ra-UHPFRCで 23.0kN および

6.53mm、Rr-UHPFRCで22.8kN および6.02mm となり概ね一致する。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があるものの、計算結果は実験結果を概ね再現するものである。

一方、最大荷重に達した後では鉄筋の種類により異な る挙動が見られ、Rd-UHPFRC では実験値が UHPFRC の 引張断面を無視したときの鉄筋降伏荷重をやや上回って 荷重が一定になるのに対し、Rr-UHPFRC では実験値が 鉄筋降伏荷重に漸近する。図-6(b)に示す R_r -UHPFRC における供試体中央での鉄筋ひずみの変化を見ると、全 ての供試体で最大荷重から荷重が低下する過程で鉄筋が 降伏域に達しており、降伏強度から鉄筋の軸力を計算す ると 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ϕ200 では、引抜荷重 30~40kN 程度のときに自由端からの付 着破壊が開始した結果であることを踏まえると、鉄筋引 抜実験との定着長の違いがあるものの、Rr-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 に引張力が伝達されず、計算値に対する実験値の比が R_d-UHPFRC と比較して R_r-UHPFRC で小さくなったも のと考えられる。

図-7 に、実験終了時の R_d-UHPFRC と R_r-UHPFRC の損傷状況の一例を示す。両者に明確な差異は見られず、ともに荷重が最大値から低下して一定値になった後に、曲げスパン内で上縁 UHPFRC の圧壊が生じていた。また、一部の供試体では、一定荷重を保持したまま変位が増加する過程において付着割裂破壊が進行していた。これは、既往の実験 ³⁾ で確認されている曲げ応力下で鉄筋が破断する R-UHPFRC の破壊性状とは異なるものである。鉄筋の付着強度は、鉄筋径やかぶり、母材の強度等に依存することから、付着破壊の機構を詳細に検討する必要があるが、本研究では鉄筋の付着特性に起因すると考えられる曲げ挙動の違いも見られており、鉄筋引抜実験で得られた異形鉄筋を使用した場合の強固な付着強

平成27年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第72号

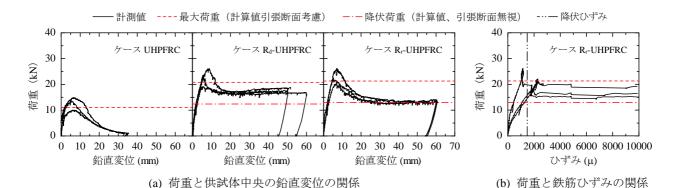


図-6 曲げ載荷実験の結果



(a) ケース R_d-UHPFRC



(b) ケース R_r-UHPFRC

図-7 供試体の損傷状況(曲げ載荷実験)

度を踏まえると、断面諸元や応力状態によっては終局状態が鉄筋破断により決まる場合があると言える。超高強度繊維補強コンクリートでは、収縮が異形鉄筋により拘束されひび割れが発生することを防ぐ観点から、引張鋼材として PC 鋼棒を使用することを原則としているのが、UHPFRC では終局時に鉄筋破断による脆性的な破壊を回避する観点から、強度特性に優れ、母材とのすべりを過度に拘束しない PC 鋼材の使用が望ましいと言える。一方で、既設構造物の断面修復工のように引張鋼材の種類を選ぶことができない場合も多い。この場合、鉄筋の種類や鉄筋量によっては脆性的な破壊に至る可能性があることに留意した上で、適切に補修・補強断面を決める必要がある。

4. おわりに

本研究では、鉄筋と UHPFRC の付着特性を把握することを目的とした鉄筋引抜実験、ならびに、付着特性が曲げ挙動に与える影響を把握することを目的とした曲げ

載荷実験を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 定着長 200mm とした鉄筋引抜実験の結果、異形鉄筋では、UHPFRC との強固な付着強度により付着破壊が生じることなく鉄筋破断に至る。丸鋼鉄筋では、鉄筋の引抜け開始後にも荷重が増加または保持されるスリップハードニング挙動が観察された。
- 2) 曲げ載荷実験の結果、鉄筋破断による脆性的な破壊には至らなかった。ただし、異形鉄筋と丸鋼鉄筋を使用した場合で鉄筋の付着特性に起因すると考えられる曲げ挙動の相違が見られ、丸鋼鉄筋の場合に最大荷重後の荷重低下が大きくなる。

参考文献

- Denarié, E.: Recommendations for the Tailoring of UHPFRC Recipes for Rehabilitation, Deliverable ARCHES D06, 2009.
- 2) 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.
- 3) 角間恒、岡田慎哉、西弘明、松井繁之: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、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No.2、pp.1219-1224、2015.
- 4) 例えば、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.
- 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, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.13, No.6, pp.399-406, 2001.
- 6) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・ 施工指針(案)、2004.