

論文 鉄筋を配置した UHPFRC の曲げ挙動に及ぼす鉄筋種類の影響

角間 恒*1・佐藤 孝司*2・西 弘明*3

要旨: 本研究では、鉄筋を配置した超高性能繊維補強コンクリート (R-UHPFRC) の曲げ挙動に及ぼす鉄筋種類の影響を把握するため、異形鉄筋あるいは丸鋼鉄筋を使用した R-UHPFRC について、鉄筋引抜実験および曲げ載荷実験を実施した。また、パラメトリック解析により鉄筋付着特性と曲げ挙動の定性的関係を検証した。鉄筋引抜実験では、異形鉄筋を使用した場合と丸鋼鉄筋を使用した場合で付着特性に明確な違いがあること、曲げ載荷実験およびパラメトリック解析では、鉄筋種類の影響はポストピーク挙動に現れ、付着強度が小さい場合にポストピーク域での荷重低下勾配および荷重低下の程度が大きくなることを示した。

キーワード: 超高性能繊維補強コンクリート, 付着, 曲げ

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化損傷が深刻化する中、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が掲げられ、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優れる材料である。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、UHPFRC を既設コンクリート部材の断面修復材として使用することを想定し、表面かぶり部分を置換する比較的軽微な補修から、鉄筋背面までのコンクリートをはつきり取った後に置換する補修まで、広範な補修深さを対象として断面修復の効果を検討している³⁾。これまでに実施した曲げ破壊型の梁供試体に関する載荷実験では、UHPFRC を用いた断面修復により曲げ耐力が向上する一方で、UHPFRC を引張領域に配置し、さらに引張鉄筋が UHPFRC 内にある場合には、鉄筋破断による脆性的な破壊モードを呈する可能性があることを示している。これは、鉄筋と UHPFRC の強固な付着強度に起因するものと考えられ、補修深さが鉄筋背面に達する場合には、補修断面の設計において付着特性の影響を考慮すべきであることを示唆する。また、補修・補強対象の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を踏まえると、異形鉄筋だけでなく丸鋼鉄筋が配置された UHPFRC の挙動の評価も必要になる。

そこで本研究では、鉄筋を配置した UHPFRC (以下、R-UHPFRC) の曲げ挙動に及ぼす鉄筋種類の影響を把握することを目的に、異形鉄筋あるいは丸鋼鉄筋を使用した R-UHPFRC について二つの実験を行った。一つ目は、鉄筋と UHPFRC の付着特性 (以下、鉄筋付着特性) を検証する鉄筋引抜実験である。通常の RC では異形鉄筋と比較して丸鋼鉄筋で付着強度が劣るが、UHPFRC については鉄筋種類と付着強度の関係が明らかではないため、本論文の主目的である曲げ挙動の評価に先立って、本実験により鉄筋種類による付着特性の違いを明確にする。二つ目は、R-UHPFRC 梁の曲げ載荷実験であり、鉄筋引抜実験で得られた結果を踏まえ鉄筋種類による曲げ挙動の違いを考察する。併せて、鉄筋付着特性の違いを付着切れ範囲により簡易的に模擬した解析モデルを用いてパラメトリック解析を実施し、R-UHPFRC における鉄筋付着特性と曲げ挙動の関係の定性的評価を行った。

2. 鉄筋引抜実験

2.1 実験方法

(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 体である。

(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 とし、非定着部では径 16mm の VP 管により鉄筋と UHPFRC との付着を排除した。UHPFRC の打ち込みは、図-1 中に示すように、供試体を水平にした状態で鉛直方向に行った。表-2 に UHPFRC の圧縮試

*1 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム
*2 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム
*3 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム

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

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)	

表-2 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-3 鉄筋の引張試験結果

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 (SR235)	316.5	453.4	29.2

験結果を、表-3 に鉄筋の引張試験結果を示す。

(3) 載荷および計測方法

図-2 に載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。載荷は、荷重制御による単調載荷プログラムの下、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、載荷側非定着部の鉄筋ひずみ、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も計測した。

2.2 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。ケース D200 の荷重-上端変位の関係には、鉄筋定着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。

$$\Delta_u = \delta_{db} + \delta_t \quad (1)$$

ここに、 Δ_u : 上端変位、 δ_{db} : 定着部より上側での鉄筋の伸び、 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 では、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。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。実験結果と計算結果を比較する

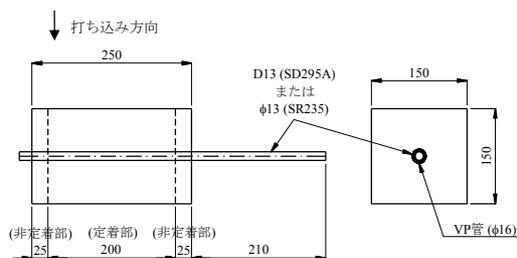


図-1 供試体図 (鉄筋引抜実験)

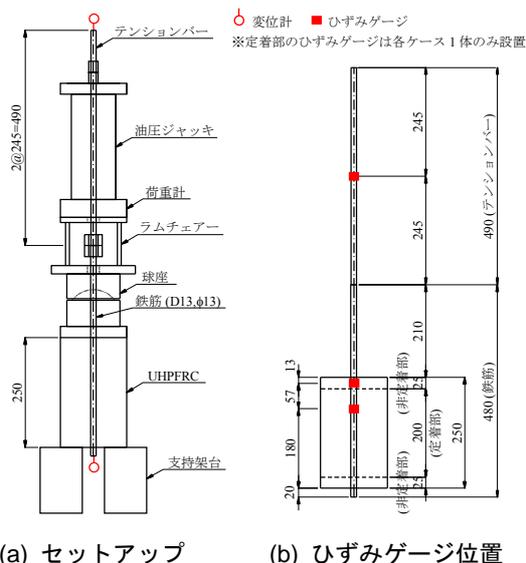


図-2 載荷概要および計測位置 (鉄筋引抜実験)

と、荷重-上端変位関係の概略は一致するが、実験で荷重が大きくなる傾向がある。これは、鉄筋とテンションバーの連結部での荷重損失によるものと推察される。

(2) ケース φ200

丸鋼鉄筋を使用したケース φ200 では、載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。

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⁴⁾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拔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報告されており⁵⁾、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推察したものであり、別途詳

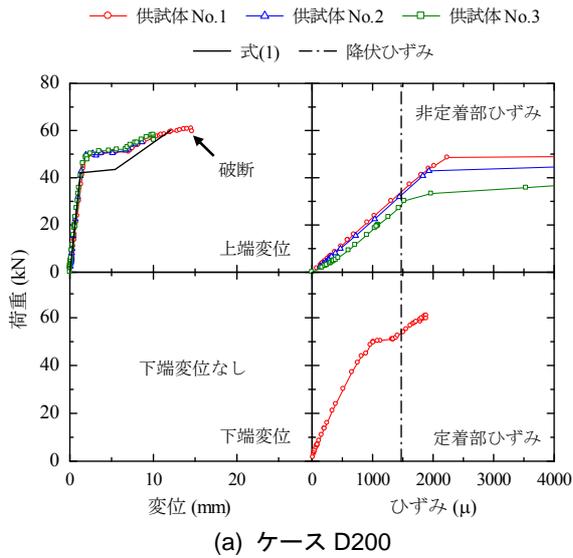


図-3 鉄筋引抜実験の結果

細な検証が必要である。

3. 曲げ載荷実験

2章の鉄筋引抜実験では、R-UHPFRCではRCと同様に鉄筋種類により鉄筋付着特性が異なることを示した。この結果を受け、本章ではR-UHPFRC梁の曲げ載荷実験により、鉄筋種類が曲げ挙動に与える影響を検証する。

3.1 実験方法

(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した。各ケースの供試体数は3体である。

(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、供試体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

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)

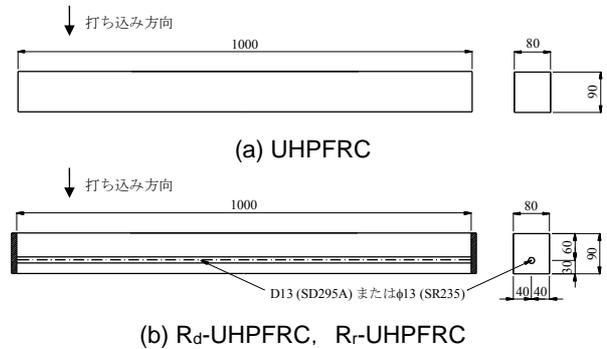


図-4 供試体図 (曲げ載荷実験)

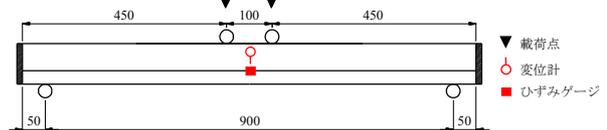


図-5 載荷概要および計測位置 (曲げ載荷実験)

施し、図-4中に示すように、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-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。

3.2 断面分割法

実験結果の妥当性を検討するため、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UHPFRCおよび鉄筋の応力-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⁶⁾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。

3.3 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_r-UHPFRCに関する荷重と鉄筋ひずみの関係を示す。図中の破線および一点鎖線は断面分

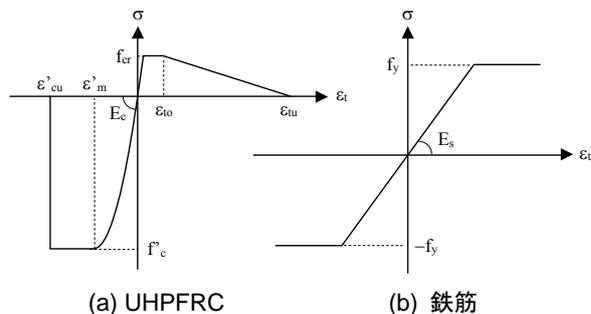


図-6 UHPFRC および鉄筋の応力-ひずみ関係

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。

(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。その後、最大荷重に達すると曲げスパン内で 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 $18.6 \sim 27.6 \text{ N/mm}^2$ 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。

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があるものの、計算結果は実験結果を概ね再現できている。

一方、最大荷重後のポストピーク挙動は鉄筋の種類により若干異なり、R_d-UHPFRC では UHPFRC の引張断面

を無視した場合の鉄筋降伏荷重計算値をやや上回って荷重が一定になり、R_r-UHPFRC では荷重が鉄筋降伏荷重の計算値に漸近する。図-7 (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では、全ての供試体で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、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ケースφ200 では、引抜荷重 30~40kN 程度のときに定着部と非定着部の境界から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こそあるものの、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いて、計算に対する実験の荷重比が 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-8 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。損傷状況には鉄筋種類による明確な差異は見られず、両ケースともに荷重が最大値から低下して一定値になった後に、等曲げスパン内で上縁 UHPFRC の圧壊が生じていた。また、R_d-UHPFRC のうち一部の供試体では、ポストピーク挙動において、一定荷重を保持したまま変位が増加する過程で供試体下面に鉄筋に沿ったひび割れが発生する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が、鉄筋径やかぶりの変化により付着破壊の機構が変化したものと考えられる。

4. パラメトリック解析による鉄筋付着特性がポストピーク挙動に与える影響の定性的評価

前章の R-UHPFRC の曲げ載荷実験より、鉄筋の種類によって最大荷重後のポストピーク挙動が異なることを示した。本章では、2次元有限要素法による鉄筋付着特性に着目したパラメトリック解析を実施し、R-UHPFRC の

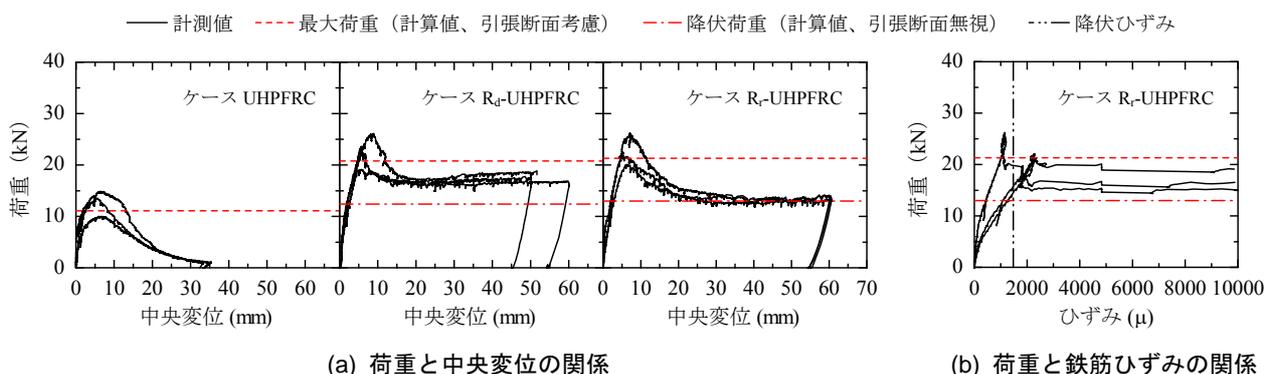
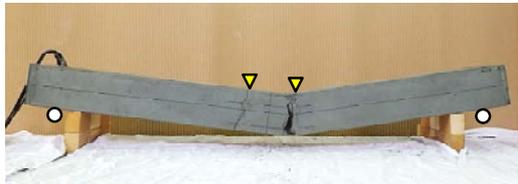


図-7 曲げ載荷実験の結果



(a) ケース R_d-UHPFRC



(b) ケース R_r-UHPFRC

図-8 曲げ載荷実験の供試体損傷状況

ポストピーク挙動に与える鉄筋付着特性の影響を定性的に評価した。

4.1 解析方法

(1) 解析モデル

図-9 に解析モデルの要素分割図を示す。解析には供試体および載荷の対称性を考慮して 1/2 モデルを採用し、UHPFRC には平面応力要素を、鉄筋にはトラス要素を使用した。また、ポストピーク挙動では UHPFRC の曲げ挙動が局所化した 1 本のひび割れの挙動に代表されることから、供試体中央の対称面に局所化ひび割れを表すための離散ひび割れ要素を配置した。さらに、鉄筋と UHPFRC の間に鉄筋付着特性を考慮するためのインターフェース要素を配置した。前章までの結果では、鉄筋種類によって付着挙動および曲げ挙動が異なることが明らかであるが、鉄筋引抜実験が一つの条件下で実施されたものであり付着破壊の進行を再現する付着モデルの導出には至っていない。そこで本研究では、供試体中央においてある程度の付着破壊が進行している状態を想定し、解析モデルに予め付着切れ領域を設け、その範囲を解析パラメータとすることで付着特性(付着破壊のしやすさ)の違いを簡易に表現した。付着切れ範囲は最大を 80mm とし、60, 40, 20mm に徐々に低下させた。これは、曲げ載荷実験において観察されたひび割れの発生間隔が概

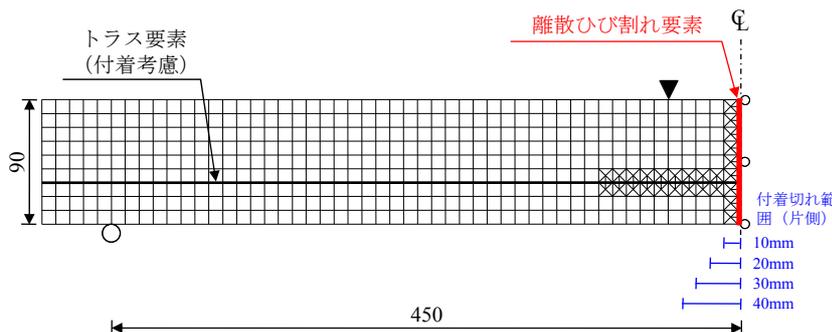


図-9 要素分割図

ね 80mm 程度であったこと、また、曲げモーメントが卓越する断面力下では隣接するひび割れ間の概ね中心位置で鉄筋の付着応力が 0 となり、ひび割れ面から隣接するひび割れまでの距離の半分の範囲で付着破壊の生じる可能性があるとの仮定により設定したものである。

(2) 材料構成則

UHPFRC は弾塑性モデルとし、引張側および圧縮側の応力-ひずみ関係は図-6(a) とした。離散ひび割れ要素の挙動は伝達応力と相対変位により表され、開口方向には図-10 に示すバイリニア型の結合応力-開口幅関係を、ずれ方向には非常に大きな剛性を与えた。ここで、図-10 の関係は、鉄筋を配置しない UHPFRC の曲げ載荷実験結果の逆解析により決定した。鉄筋は、図-6(b) と同様に弾完全塑性モデルとした。また、鉄筋付着特性を表すインターフェース要素は、付着切れ範囲には付着破壊を仮定した極端に小さい剛性を、その他の範囲には完全付着を仮定した極端に大きい剛性を与えた。

4.2 解析結果および考察

(1) 解析結果

図-11 には、実験および解析から得られた R-UHPFRC の荷重と中央変位の関係を比較する。ここで、実験結果は、解析から得られた最大荷重とそのときの中央変位を用いてピークが解析結果と一致するように図-7 の結果を補正したものである。

解析結果は、実験と同様に、鉄筋降伏および損傷局所化による荷重低下を経て荷重が一定となる荷重-中央変位関係を示す。また、最大荷重までの挙動に付着切れ範囲の影響は見られないが、付着切れ範囲が大きいほど最大荷重後の荷重低下勾配が大きく、漸近する荷重も小さくなる。図-12 には、ポストピーク挙動において荷重が概ね一定となったときの荷重として中央変位 50mm のときの荷重に着目し、最大荷重に対する比を計算した。図より、解析結果では付着切れ範囲の増加に比例して荷重低下の割合が大きくなる傾向がある。また、実験結果では R_r-UHPFRC と比較して R_d-UHPFRC で全体的に荷重低下が小さく、解析結果と比較した場合、R_d-UHPFRC では荷重低下が最も大きい供試体であっても本検討の範囲で

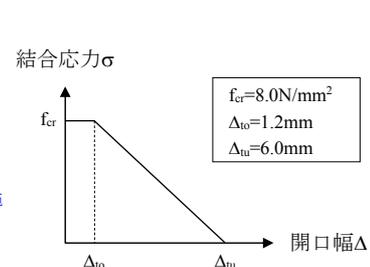


図-10 離散ひび割れ要素の構成則

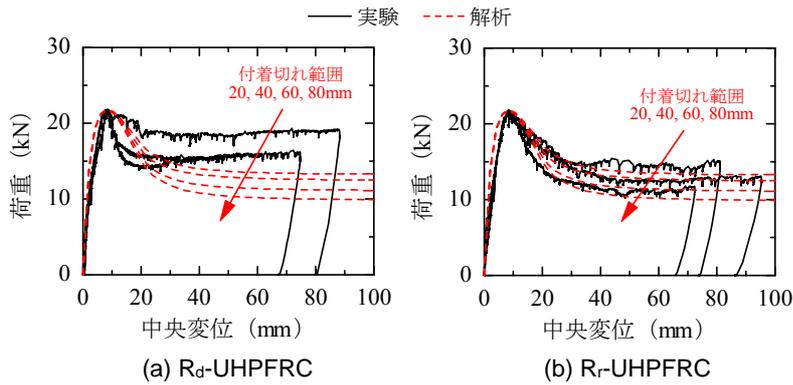


図-11 実験結果と解析結果の曲げ挙動の比較

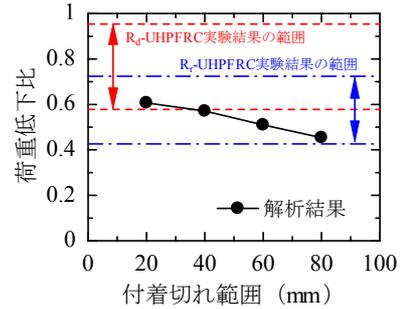


図-12 荷重低下比と付着切れ範囲の関係

最も付着切れ範囲が小さい20mmの解析結果と同程度の荷重低下になっている。

以上より、鉄筋付着特性がR-UHPFRCのポストピーク挙動に大きく影響を与えると示唆できる。ただし、本検討は鉄筋付着特性の違いを付着切れ範囲で考慮した簡易なモデルにより曲げ挙動を定性的に評価したものであり、ポストピーク挙動を適切に取り扱う手法として、鉄筋付着モデルの導入等を検討する必要があると考えられる。

(2) 考察

R-UHPFRCの曲げ載荷実験では、既往の実験³⁾で得られた鉄筋破断による破壊とは異なる損傷形態となった一方で、ポストピーク挙動には鉄筋付着特性に起因すると考えられる曲げ挙動の違いが見られた。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、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考えられる。

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⁷⁾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も、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。このことから、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、適用部材の作用荷重や応力・変形性状を適切に評価し、補修・補強断面を決めることが重要になる。

5. おわりに

本研究では、鉄筋を配置したUHPFRCの曲げ挙動における鉄筋種類の影響を把握するため、異形鉄筋あるいは丸鋼鉄筋を使用したR-UHPFRCについて、鉄筋引抜実験による鉄筋付着特性の検証ならびに曲げ載荷実験および

鉄筋の付着切れ範囲をパラメータとした2次元有限要素解析による曲げ挙動の検証を実施した。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(D13, SD345)を使用した場合、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($\phi 13$, SR235)を使用した場合には、鉄筋の引抜け開始後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) 曲げ載荷実験および鉄筋の付着切れ範囲をパラメータとした有限要素解析の結果、付着特性の影響はポストピーク挙動の変化に表れ、付着強度が小さく付着切れ範囲が大きくなるほどポストピーク挙動の荷重低下勾配および荷重低下の程度が大きくなる。

参考文献

- 1) 国土交通省：社会資本整備重点計画，2012
- 2) 例えば，Denarić, E.: Recommendations for the Tailoring of UHPFRC Recipes for Rehabilitation, Deliverable ARCHES D06, 2009
- 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，松岡由高，中村光，国枝稔，河村精一：有限要素解析による主筋に丸鋼を用いたRC部材の力学挙動評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.595-600, 2011
- 5) 例えば，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：コンクリート標準示方書，2012
- 7) 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