

論文 超高強度繊維補強コンクリートパネルを側面接着した RC 梁のせん断補強効果に関する研究

佐藤 あゆみ*1・坂上 友紀*2・武田 浩二*3・村上 聖*4

要旨：本研究では、超高強度繊維補強コンクリートパネルを側面接着した RC 梁のせん断補強効果について実験による検討を行った。その結果として、無補強の RC 梁との比較で超高強度繊維補強コンクリートパネルの側面接着によって大きなせん断補強効果が得られることが確認できた。また、3次元有限要素解析による検討を行った結果、解析結果は実験結果を妥当な精度で再現することができ、さらに主筋に用いた CFRP ロッドの圧縮構成則の仮定が RC 梁の耐荷力の計算結果に大きく影響することが明らかになった。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート, せん断補強, 有限要素解析, 接着, RC 梁

1. はじめに

RC 建造物の長寿命化には、劣化した構造部材の補修・補強が必要である。実用化されている技術として、軽量・高強度である連続繊維シート接着工法や鋼板接着工法があるが、連続繊維シート接着工法には繊維の異方性、鋼板接着工法には腐食や施工性などの課題があり、より効果的な手法の開発が期待されている。

本研究は、超高強度繊維補強コンクリート¹⁾(以下、本研究では UHPFRC と呼ぶ)で作製したパネルによって、RC 構造部材のせん断補強を行うことを目的とする。実験では、UHPFRC パネルを側面接着した RC 梁を作製し、曲げ載荷試験を行った。同時に有限要素解析による解析的検討を行うことで、UHPFRC パネルを用いた RC 梁のせん断補強効果を評価した。

2. 実験方法および実験結果

2.1 試験体概要および使用材料

図-1 に RC 梁の試験体形状寸法、配筋および載荷形式を示す。試験体はあばら筋を配筋せずにせん断破壊が先行するようにした RC 梁 (以下、無補強試験体)、厚さ 20mm の UHPFRC パネルを両側面に接着することでせん断補強した RC 梁 (以下、UHPFRC パネル補強試験体) の 2 体とした。2 体の配筋は同一とした。

RC 梁の作製に使用した材料を表-1 に示す。コンクリートには、レディーミクストコンクリート、主筋およびあばら筋には、CFRP ロッドおよびみがき棒鋼φ 5 を用いた。主筋に CFRP ロッドを用いたのは、比較としてせん断補強を施していない RC 梁においてせん断破壊が先行して生じるようにするためである。なお、CFRP ロッ

ドの付着強度を高めるために、プライマーを使用して CFRP ロッド表面に珪砂を付着した。また、せん断補強用パネルに用いた UHPFRC の使用材料および調査表を表-2 および表-3 にそれぞれ示す。表-4 に RC 梁の作製に使用した材料の素材試験結果を示す。UHPFRC のひび割れ発生強度と引張強度は、図-2 に示すダンベル型

表-1 使用材料

コンクリート	レディーミクストコンクリート (普通-24-18-20-N) 呼び強度 24N/mm ² 指定スランブ18cm, 空気量4.5% 実測スランブ:11.5cm, 実測空気量:4.0%
主筋	CFRPロッド, 公称断面積:76.7mm ²
あばら筋	φ5みがき棒鋼
せん断補強用 パネル	UHPFRC (超高強度繊維補強コンクリート)
接着剤	エポキシ樹脂

表-2 UHPFRC の使用材料

記号	名称および種類	物性
C	低熱ポルトランドセメント	密度:3.21g/cm ³
SF	シリカフューム	密度:2.20g/cm ³
BFS	高炉スラグ微粉末	密度:2.89g/cm ³ , 比表面積:6,000cm ² /g
Gy	二水石膏	密度:2.23g/cm ³
S8	珪砂8号	密度:2.50g/cm ³
S6	珪砂6号	密度:2.59g/cm ³
Ad	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物, 密度:1.05~1.09g/cm ³
F13	鋼繊維	ストレートタイプ, 長さ:13mm, 直径:0.2mm, 引張強度:2,000N/mm ²

表-3 UHPFRC の調査表

W/B	単位量 (kg/m ³)									
(%)	W	C	SF	BFS	Gy	S8	S6	Ad	F13	
20	222	598	66	430	83	186	745	13	158	

*1 熊本大学大学院 先端科学研究部物質材料科学部門 助教 工博 (正会員)
*2 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生工学専攻 博士前期課程
*3 熊本大学大学院 先端科学研究部物質材料科学部門 准教授 工博 (正会員)
*4 熊本大学大学院 先端科学研究部物質材料科学部門 教授 工博 (正会員)

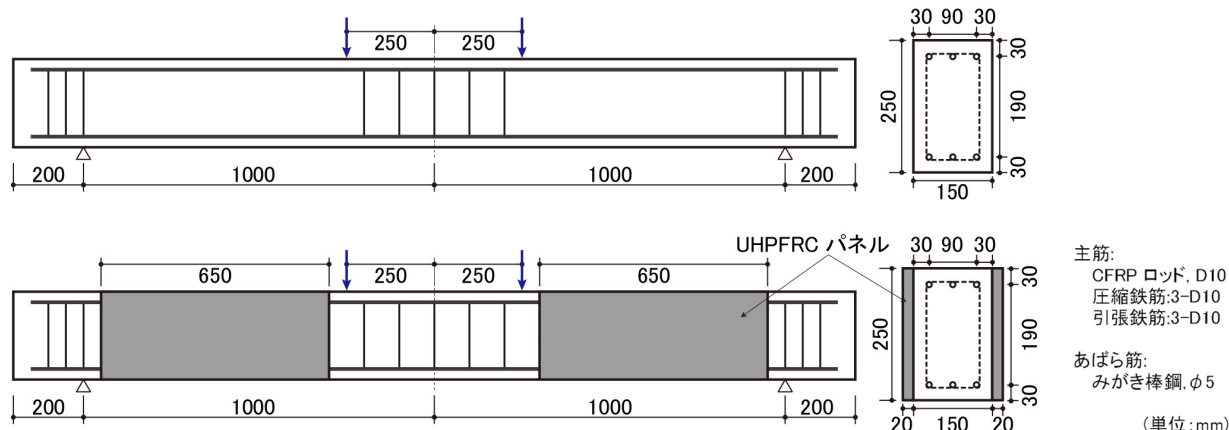


図-1 RC 梁試験体形の形状寸法, 配筋および荷形式 (上: 無補強試験体, 下: UHPFRC パネル補強試験体)

供試体による一軸引張試験²⁾によって測定した。図-3 は 3 体のダンベル型供試体の引張応力-ひずみ関係である。

2.2 RC 梁試験体作製および荷試験方法

(1) RC 梁試験体作製

鋼製型枠に主筋およびあばら筋を配置した後, コンクリートを打設した。コンクリートの打設後, 材齢 28 日まで現場湿布養生とし, その後, 荷試験まで現場気中養生とした。

UHPFRC パネルは, 表-3 の調合を用いて容量 30L のオムニミキサーで混練し, 図-1 に示す通り 650×250×20mm のパネル形状に打設した。打設は室温 20 度の恒温室内で行い, 打設したパネルは恒温室内で 24 時間の気中養生を行った後に脱型した。脱型した UHPFRC パネルは, 耐熱容器の中に入れ温度 20 度の水に浸漬した。UHPFRC パネルは水に浸漬した状態で恒温器内に設置し, 48 時間の熱養生 (恒温器庫内の温度 90 度) を行った。熱養生開始時の恒温器の庫内温度は 29 度であり, 昇温開始後 30 分で庫内温度は 90 度に達した。なお, 養生開始後 24 時間で計測した浸漬水の水温は 85 度であった。熱養生終了後, UHPFRC パネルを再び恒温室に移動し, コンクリートに接着するまで気中養生を行った。

熱養生を終えた UHPFRC パネル補強試験体は, UHPFRC パネルをエポキシ樹脂によって梁両側面に接着した。その際, UHPFRC パネルおよびコンクリート躯体の接着面に, グライNDER 処理を行った。

(2) RC 梁の荷試験方法

RC 梁の荷試験は, 図-1 に示すとおりスパン長さ 2000mm, 荷点間隔 500mm の単純曲げ荷とし, 荷重およびスパン中央変位を測定した。

2.3 実験結果

(1) 破壊性状

実験によって得られた RC 梁の最終的なひび割れ図を 図-4(a) ~ (c) に示す。図-4(a) より, 無補強試験体では, 曲げひび割れが発生した後, 片側せん断スパン内に斜張

表-4 素材試験結果

(a) コンクリート (RC 梁の荷試験時: 材齢 123 日)

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度時 ひずみ度(μ)	引張強度 (N/mm ²)
38.1	26.5	2542	3.22

φ 100×200mm の円柱供試体を各3体ずつ作製

(b) UHPFRC (RC 梁の荷試験時: 材齢 56 日)

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ひび割れ 発生強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
150	45.0	6.74	10.1

圧縮強度試験: φ 50×100mm の円柱供試体を3体ずつ作製

一軸引張試験: ダンベル型供試体を3体ずつ作製

(c) 主筋およびあばら筋

	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
CFRP ロッド	-	2830	174	-
みがき棒鋼	618	693	-	12.4

CFRP ロッドの結果は公称値

みがき棒鋼の試験片を6体作製, 降伏強度は, 0.2%耐力

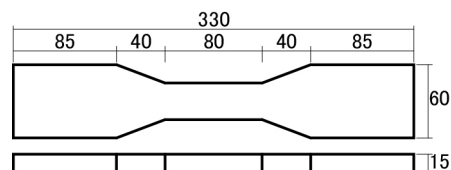


図-2 一軸引張試験に用いたダンベル型供試体

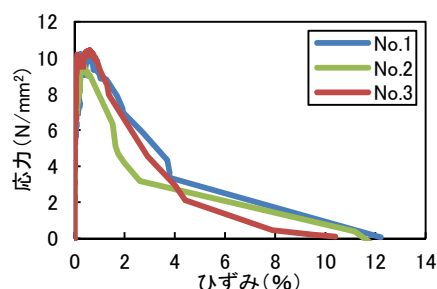


図-3 UHPFRC の引張応力-ひずみ関係

力による斜めひび割れが発生し、脆性的なせん断破壊を生じたことが分かる。図-4(b)より、UHPFRC パネル補強試験体は、純曲げ区間に曲げひび割れが分散的に発生した後、UHPFRC パネルを接着した接合面に沿って局所的なひび割れの発生・拡大が生じ、最終的に圧縮側のコンクリートが圧壊して曲げ圧縮破壊を起こした。最終的破壊に至るまで UHPFRC パネルの剥離は生じず、外観上は、UHPFRC パネルに損傷は見られなかった。なお載荷試験後、UHPFRC パネルを加熱処理によって RC 梁から除去した。UHPFRC パネルを除去した後の RC 梁のひび割れ図が図-4(c)であり、UHPFRC パネルを接着した部分のコンクリートにせん断ひび割れが発生していた。

(2) 荷重－変位関係

図-5 に各 RC 梁の荷重－スパン中央変位関係の測定値の比較を示す。図-5 より、無補強試験体は最大荷重 57.9kN の時点で脆性的なせん断破壊を起こしているのに対し、UHPFRC パネル補強試験体は最大荷重が 151kN と無補強試験体の約 2.6 倍まで増大し、せん断破壊を起こさず曲げ圧縮破壊を起こしている。以上のように、荷重－スパン中央変位関係より UHPFRC パネルによる優れたせん断補強効果が認められた。

3. 有限要素解析

3.1 解析モデル

(1) 要素の分割と種類

本研究では、表-5 に示すとおり、せん断補強（UHPFRC パネル接着の有無）および CFRP ロッドの圧縮構成則を変更した 6 ケースについて解析を行った。CFRP ロッドの圧縮構成則については、次節 3.2(4)で説明する。

図-6 に解析モデルの要素分割図を示す。解析モデルは RC 梁の対称性を考慮してスパンおよび断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。コンクリートおよび UHPFRC パネルは 8 節点 6 面体要素で統一した。主筋およびあばら筋は、鉄筋要素と周囲のコンクリート要素との完全付着を仮定している埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化した。コンクリートと UHPFRC パネルの間にはインターフェイス要素を設けず、完全付着とした。コンクリートと UHPFRC パネルを完全付着とした理由は、次節 3.2(5)で説明する。

(2) 境界条件と載荷手法

境界条件は、1/4 モデルであることを考慮して、対称切断面部に対してはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部の節点は鉛直方向変位成分を拘束した。載荷は、図-6 に示す矢印の位置に強制変位を与える手法とした。

(3) 解析条件

有限要素解析の計算には汎用非線形構造解析ソフト

DIANA9.6 を利用した。ひび割れ軟化特性として要素の応力－ひずみ関係を用いる分散ひび割れモデルに回転ひび割れモデルを適用した。収束計算はニュートンラフソン法を用い、収束判定はエネルギーノルムで行った。

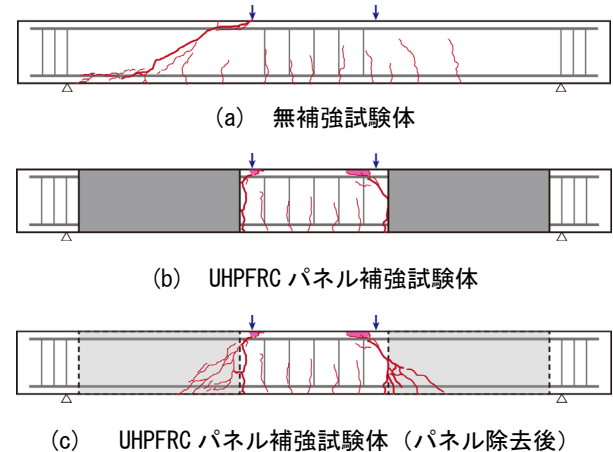


図-4 各試験体のひび割れ図

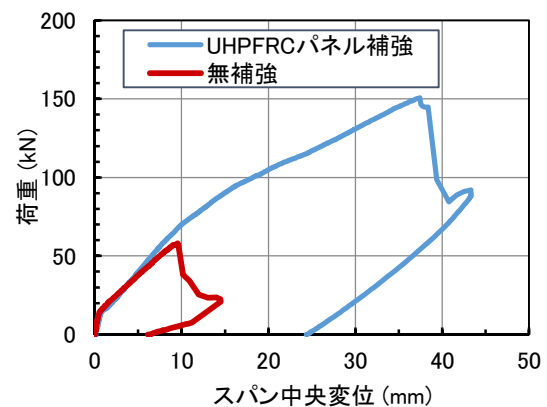


図-5 荷重－変位関係(実験結果)

表-5 解析ケース

解析ケース	せん断補強	CFRPロッドの 圧縮強度(N/mm ²)
N-CFRP0	無補強	0
N-CFRP566		566
N-CFRP2830		2830
U-CFRP0	UHPFRC パネル	0
U-CFRP566		566
U-CFRP2830		2830

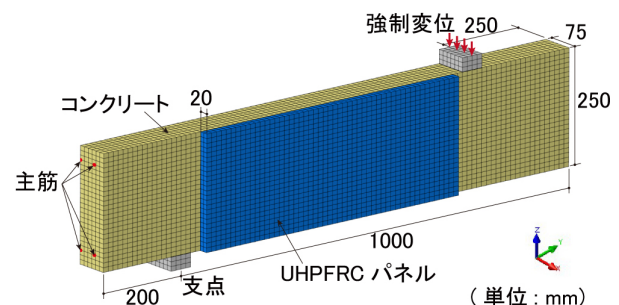


図-6 要素分割図 (UHPFRC パネル補強試験体)

3.2 材料構成則

(1) コンクリートの構成則

図-7(a)はコンクリートの要素に適用した構成則であり、圧縮側の構成則に関しては、式(1)で示される Popovics 式によって求まる圧縮応力-ひずみ関係を用いた。なお、圧縮強度、ヤング係数および圧縮強度時のひずみには表-4(a)に示す測定値を用いた。

$$\sigma = F_c \frac{n(\varepsilon/\varepsilon_{co})}{n-1+(\varepsilon/\varepsilon_{co})^n} \quad (1)$$

ここに、 σ : 圧縮応力(N/mm²)、 ε : 圧縮ひずみ、 F_c : 圧縮強度(N/mm²)、 ε_{co} : 圧縮強度時のひずみ、 n : 実験定数

また、引張側には表-4(a)の引張強度と Hordijk ら³⁾により定式化された軟化モデルを適用した。図中で h は要素の等価長さ、 GF はコンクリートの引張破壊エネルギーを示しており、本研究では GF を 0.1 N/mm とした。

(2) UHPFRC の構成則

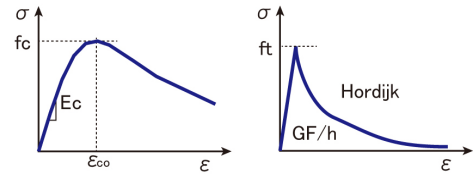
UHPFRC の圧縮構成則として表-4(b)の圧縮強度およびヤング係数を用い、圧縮強度に達するまでは線形弾性、圧縮強度に到達した後は応力が一定値となるモデルとした。UHPFRC の引張構成則には図-7(b)の引張応力-ひずみ関係を適用した。図-7(b)は、図-3 に示す引張応力-ひずみ関係の実験結果を基に決定した。

(3) あばら筋の構成則

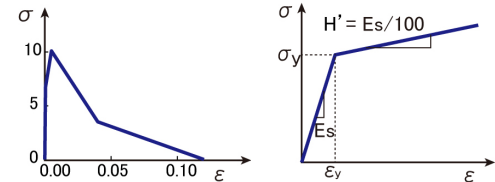
図-7(c)にあばら筋に用いた構成則を示す。図中で E_s はあばら筋のヤング係数であり、塑性領域のひずみ硬化係数は $E_s/100$ と設定し、あばら筋の降伏は von Mises の降伏条件に従うものとした。あばら筋の降伏強度 σ_y には表-4(c)の値を適用した。

(4) CFRP ロッドの構成則

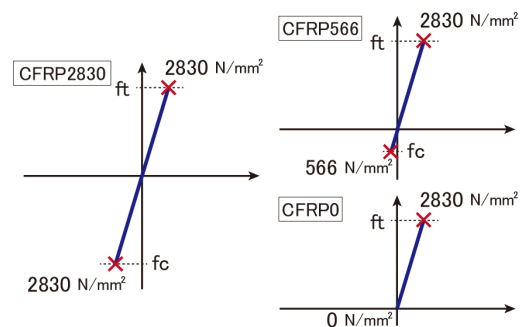
CFRP ロッドは一方方向に引き揃えられた炭素繊維を樹脂で固めたものであり、ロッド単独で圧縮を受けると炭素繊維の座屈により引張強度に比べて圧縮強度はかなり小さくなる。日本建築学会の連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案⁴⁾では、連続繊維補強材を用いた RC 部材の曲げモーメントに対する設計を行う際に、圧縮を受ける連続繊維補強材の圧縮抵抗は計算上無視してもよいとされているが、せん断設計に対しては不明である。そこでケーススタディとして、連続繊維補強材である CFRP ロッドの圧縮構成則を変数とした。本研究では、図-7(d)に示す 3 種類の CFRP ロッドの構成則を仮定した。3 種類すべての引張構成則は同じであり、表-4(c)に示した CFRP ロッドの引張強度とヤング係数を使用して完全脆性とした。圧縮構成則もすべての解析ケースで完全脆性とした。表-5 の N-CFRP2830 と U-CFRP2830 に適用した CFRP ロッドの圧縮強度は 2830 N/mm² とし



(a) コンクリート(左: 圧縮側, 右: 引張側)



(b) UHPFRC(引張側) (c) 鉄筋



(d) CFRP ロッド

図-7 材料構成則

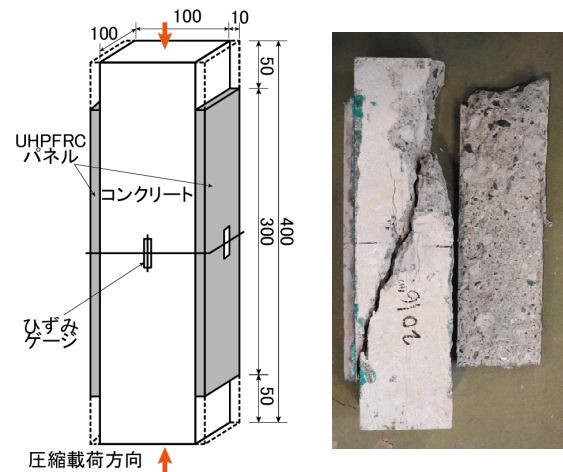


図-8 部分圧縮試験方法(左)と試験後の試験体(右)

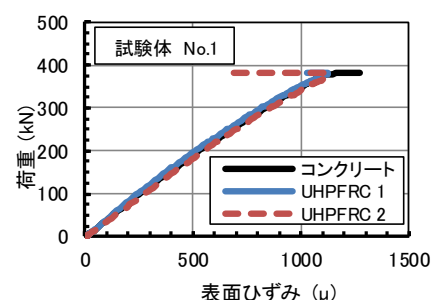


図-9 部分圧縮試験で得られた荷重-表面ひずみ関係

た。また、N-CFRP566 と U-CFRP566 に適用した CFRP ロッドの圧縮強度は 2830 N/mm^2 の $1/5$ の値である 566 N/mm^2 とした。同様に、N-CFRP0 と U-CFRP0 に適用した CFRP ロッドの圧縮強度は 0 N/mm^2 とした。

(5) 接着面のモデル化

UHPFRC パネルとコンクリートとの接着面を有限要素解析用にモデル化するために、RC 梁の載荷試験と並行して、図-8 に示す部分圧縮試験⁵⁾を実施した。試験体は長さ 400mm のコンクリート角柱の両側面に長さ 300mm の UHPFRC パネルをエポキシ樹脂で接着したものであり、材料は RC 梁と全て同じとした。載荷試験は、上下面から圧縮載荷する試験であり、荷重と試験体中央のコンクリートおよび UHPFRC パネル表面の軸方向ひずみを測定した。なお、試験体は 3 体作製した。

部分圧縮試験後の試験体の最終的な破壊性状を図-8 に示す。図-8 より、UHPFRC パネルとコンクリートとの接着面ではなく、コンクリート部が破壊していることが分かる。また、図-9 は部分圧縮試験より得られた代表的な荷重-コンクリートおよび UHPFRC の表面ひずみ関係であり、図-9 ではコンクリート本体と UHPFRC パネルの表面ひずみが最大荷重まで完全に一致していることが分かる。このことから、本研究では UHPFRC パネルとコンクリートとの接着面にインターフェイス要素は設定せず、完全付着とした。

4. 解析結果および考察

4.1 ひび割れ性状

有限要素解析によって得られた解析モデルの最大荷重時ひび割れ図を図-10 と図-11 に示す。図-10 は無補強試験体を対象とした解析ケースであり、全ての解析結果で実験結果と同様に斜めひび割れが発生し、せん断破壊を生じたことが分かる。また、CFRP ロッドの圧縮強度を $566, 2830 \text{ N/mm}^2$ と設定した N-CFRP566, N-CFRP2830 の場合には、純曲げ区間のコンクリートの圧壊や、定着端部まで引張鉄筋に沿った付着破壊が進展していることが分かる。このように、無補強試験体の解析結果では、CFRP ロッドの圧縮強度を高くするにつれて、破壊領域が大きくなる傾向にあった。

図-11 は UHPFRC パネル補強試験体を対象とした解析ケースであり、図-11 (a)～(c) はパネルを表示した状態、図-11 (d)～(f) はパネルを非表示とした状態のひび割れ図である。全ての解析結果で実験結果と同様に UHPFRC パネルを接着した接合面に沿って局所的なひび割れの発生・拡大が見られる。CFRP ロッドの圧縮強度を $566, 2830 \text{ N/mm}^2$ と設定した U-CFRP566, U-CFRP2830 の場合には、載荷点付近に実験と同様のコンクリートの圧壊が確認できた。また、CFRP ロッドの圧

縮強度を高くするにつれて、UHPFRC を接着していた部分のコンクリートの破壊領域が拡大していた。さらに、U-CFRP2830 に限り UHPFRC パネルにも僅かだがひび割れが発生していた (図-11 (c))。

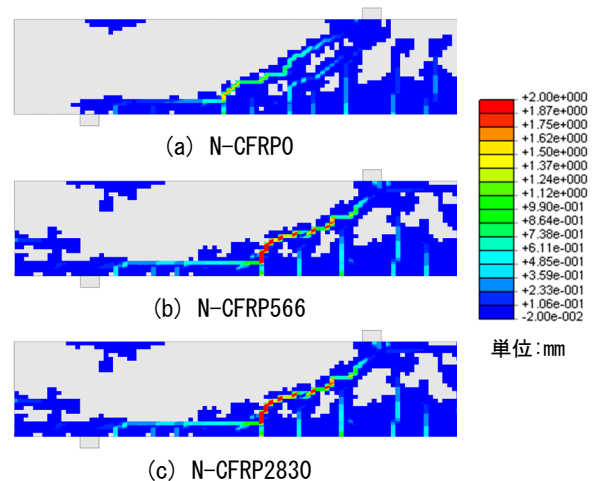


図-10 解析結果のひび割れ図
(無補強試験体, 最大荷重時)

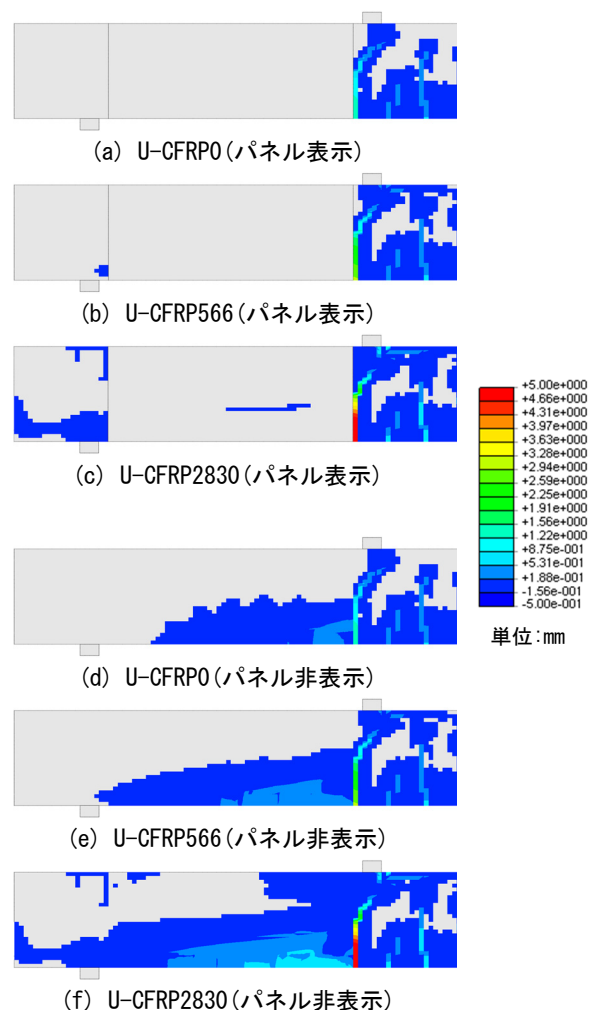
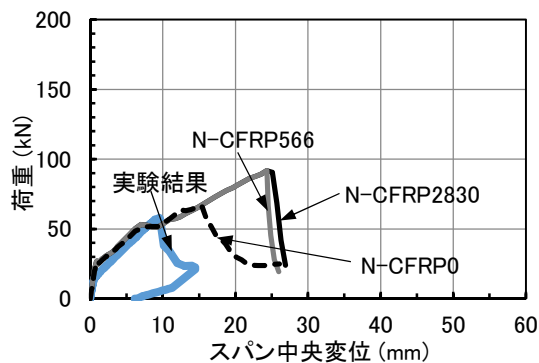
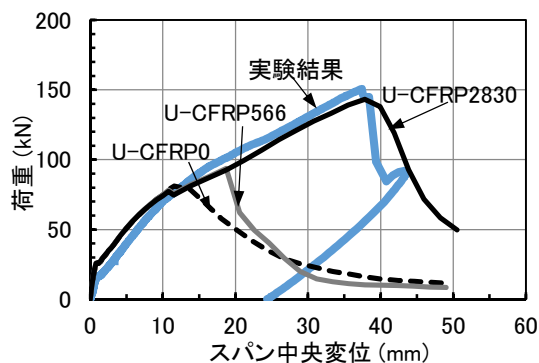


図-11 解析結果のひび割れ図
(UHPFRC パネル補強試験体, 最大荷重時)



(a) 無補強試験体



(b) UHPFRC パネル補強試験体

図-12 荷重-変位関係に関する実験結果と解析結果との比較

4.2 荷重-変位関係

有限要素解析によって得られた荷重-変位関係を図-12(a), (b)に示す。図-12(a)より、無補強試験体の解析結果は N-CFRP0 の解析結果が最も実験結果に近い結果となり、最大荷重は 66.5 kN となった。一方で、N-CFRP566, N-CFRP2830 は最大耐力が 91.8 kN となり、CFRP ロッドの圧縮構成則によって解析結果は異なった。

図-12(b)より、UHPFRC パネル補強試験体の解析結果は U-CFRP2830 の解析結果が実験結果をほぼ再現できている。一方で、U-CFRP0, U-CFRP566 の最大耐力を見ると U-CFRP0 は 81.1 kN, U-CFRP566 は 93.8 kN と実験結果の 151kN より明らかに低い結果となった。

なお、各解析結果の最大荷重時において、圧縮ロッドの応力状態を確認した結果、無補強試験体の場合、いずれも CFRP ロッドの応力は圧縮強度以下であった。UHPFRC パネル補強試験体の場合、U-CFRP566 では CFRP ロッドの応力は圧縮強度に達していた。一方、U-CFRP2830 では CFRP ロッドの応力は圧縮強度に達しておらず、CFRP ロッドの座屈の前にコンクリートの圧壊が生じる結果となった。

以上の結果より、無補強試験体では、CFRP ロッドの圧縮強度は 0 N/mm² とした場合に最も実験結果に近く、UHPFRC パネル補強試験体では、CFRP ロッドの圧縮強

度は 2830 N/mm² とした場合に最も実験結果に近いことが分かる。RC 梁の曲げモーメントに対する設計⁴⁾では、CFRP ロッドの圧縮構成則は無視することが出来るが、本研究の有限要素解析の結果より、せん断破壊を対象とする場合には、CFRP ロッドの圧縮構成則が解析結果に大きく影響することが明らかになった。

ロッド単独で圧縮を受けると炭素繊維の座屈により圧縮強度は低下するが、コンクリート内部に埋め込まれたロッドの場合には、周囲のコンクリートの拘束度に応じて圧縮強度は大きくなると考えられる。UHPFRC パネルで側面接着することによって、圧縮ロッド周囲のコンクリートの拘束度が増し、それに伴い CFRP ロッドの圧縮強度が大きくなったと推察される。このことについては、さらに実験および解析的検討を行う必要がある。

6. まとめ

本研究では、UHPFRC パネルを両側面に接着した RC 梁のせん断補強効果について実験および解析的検討を行い、次のような結論が得られた。

- (1) UHPFRC パネルを側面接着することによりせん断補強を行った RC 梁の場合、無補強試験体に比べて耐力の大きな増加が実験的に確認できた。
- (2) 有限要素解析によって、実験結果の荷重-変位関係とひび割れ・終局破壊性状を再現することができた。

謝辞

本実験にあたっては、熊本大学工学部の戸田善統技術専門職員、濱崎ありさ技術職員、同大学建築材料・施工研究室の協力をいただいた。また、三菱樹脂インフラテック(株)からは資材および技術支援の提供をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会編：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 167pages, 2004
- 2) 新家一秀, 佐藤あゆみ, 林承燦, 六郷恵哲：ダンベル型供試体を用いた一軸引張試験によるコンクリート U カット補修部のひび割れ挙動の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1888-1893, 2014
- 3) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991
- 4) 日本建築学会編：連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 505pages, 2002
- 5) 佐藤あゆみ, 佐脇開, 御手洗駿ほか：UHPFRC パネルとコンクリートとの界面における付着剥離性状に関する FEM 解析, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系 (55), pp.45-48, 2016