論文　超高強度繊維補強コンクリートを用いた合成構造に関する研究

一宮　利通[*1]・河野　哲也[*2]・スンワリパン　シャンヤコン[*3]・平　陽兵[*1]

要旨：超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を有効に利用する構造として，UFC を構造体全体に使用するのではなく，プレテンション版部材を製作し，これを引張材として利用する構造が考えられる。本研究では，UFC を用いたプレテンション版部材とコンクリートの合成構造について，曲げおよびせん断実験を行い，破壊モードについて検討した。また，補強鋼材の降伏前にずれを伴うせん断破壊に至った試験体についてずれせん断応力ーずれ変位曲線を考慮した FEM 解析を行い，耐力を評価できる可能性を示した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，合成構造，プレテンション，曲げ耐力，せん断耐力

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート（UFC）[1)]は，通常のコンクリートと比較して格段に優れた力学特性と耐久性を有している。この高い力学特性および耐久性を活用することにより，構造物の軽量化，長スパン化，長寿命化などが可能となる。しかしながら，通常のコンクリートと比較して UFC の材料および製作コストが高いため，通常のコンクリートでは実現が困難な特殊な条件の場合にのみ UFC を適用するメリットが得られるのが現状である。

UFC を有効に利用する方法として，優れた耐久性能を発揮できる埋設型枠として適用する方法が考えられる。また，UFC は引張強度が高いため引張抵抗材として考慮することができ，UFC と普通コンクリートの合成構造について研究されている例[2), 3)]もある。さらに，プレストレスを導入したプレテンション版を引張抵抗材として設計に考慮することにより，より高い引張強度を有する版部材を用いた合成構造として利用することが考えられる。そこで，本研究では，エアキャップで凹凸を設けた UFC 部材とコンクリートの付着特性，ならびに UFC 製プレテンション版とコンクリートの合成構造の曲げおよびせん断特性を確認するための実験を行い，耐力評価手法について検討した。

2. 付着に関する検討

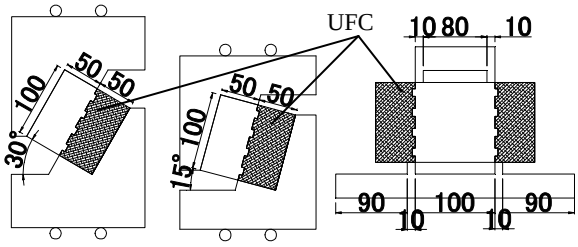
2.1 試験の概要

埋設型枠とコンクリートの付着は，目荒しやエアキャップによって凹凸を設ける方法が採用されることが多い。ここでは，比較的付着強度が高いと考えられるエアキャップを用いた方法を採用し，その強度特性について試験により検討した。エアキャップは，直径 10mm，高さ 5mm の円形の突起が縦横とも 15mm 間隔で配置されたもの（面積率 35%）を使用した。

いずれの試験体もせん断面は 100mm×100mm とし，エアキャップによって凹部を設けた UFC のテストピースを先行して製作し，早強セメントを用いたコンクリートを後打ちして一体化させた。この製作方法では強度が低いコンクリートの断面積が小さくなってせん断強度には不利になるが，UFC 版の製作しやすさを優先してこの構造とした。

試験方法は，**図ー1** に示すようにせん断面の角度をパラメータとした一面せん断（30°，15°）および二面せん断試験とし，各 4 体ずつ試験を行った。載荷は，いずれの試験もせん断応力度の増加が 0.06N/mm^2/秒となるように行った。

UFC およびコンクリートの強度試験結果を**表ー1** に示す。本研究では，エトリンガイト生成系の UFC[4)]を使用した。なお，UFC のひび割れ発生強度および引張強度は曲げ試験結果から土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」[1)]（UFC 指針）に準拠して換算したものである。



図ー1　せん断試験方法

表ー1　試験に用いた UFC とコンクリートの材料特性

	圧縮強度 N/mm^2	ひび割れ発生強度 N/mm^2	引張強度 N/mm^2	弾性係数 kN/mm^2
UFC	190.3	11.3	12.8	44.3
コンクリート	37.8	3.1	ー	30.6

*1 鹿島建設（株）　技術研究所上席研究員　工修　(正会員)
*2 鹿島建設（株）　土木管理本部課長代理　(正会員)
*3 Thai Kajima Co., Ltd.　Kajima Design Asia, Structural Engineer　工博

2.2 試験結果および考察

試験結果として，直応力度とせん断強度の関係を図－2に示す。すべての試験結果を直線で近似すると，直応力度 σ_n とせん断強度 τ_c の関係として式(1)に示す式が得られた。

$$\tau_c = -1.37\sigma_n + 2.13 \qquad (1)$$

直応力が作用しない二面せん断試験によるせん断強度の平均値は 1.67N/mm^2 であった。阿部らは，本研究と同様に直径 9mm，高さ 5mm のエアキャップによって面積率 40%の凹部を有する UFC 製埋設型枠とコンクリートのせん断強度 τ_0 を，直応力を作用させない一面せん断試験から求め，コンクリートの圧縮強度 f'_c との関係として式(2)を提案している [2)]。

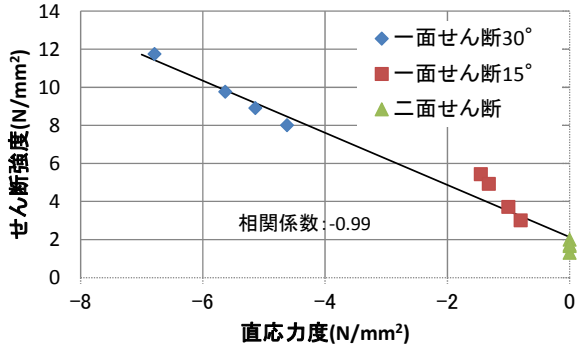
$$\tau_0 = 0.248 f'^{\,0.610}_c \qquad (f'_c \le 80N/mm^2) \qquad (2)$$

式(2)を用いて二面せん断試験体のせん断強度を求めると 2.27N/mm^2 となり，本試験結果の方が若干小さい。一方，式(1)を用いて求めた直応力度が 0 の場合のせん断強度は 2.13N/mm^2 となり，式(2)で求められるせん断強度と近い値である。本研究の二面せん断試験では，せん断面に作用する曲げが影響して強度が小さくなった可能性があるが，式(1)は概ね妥当であると考えられる。

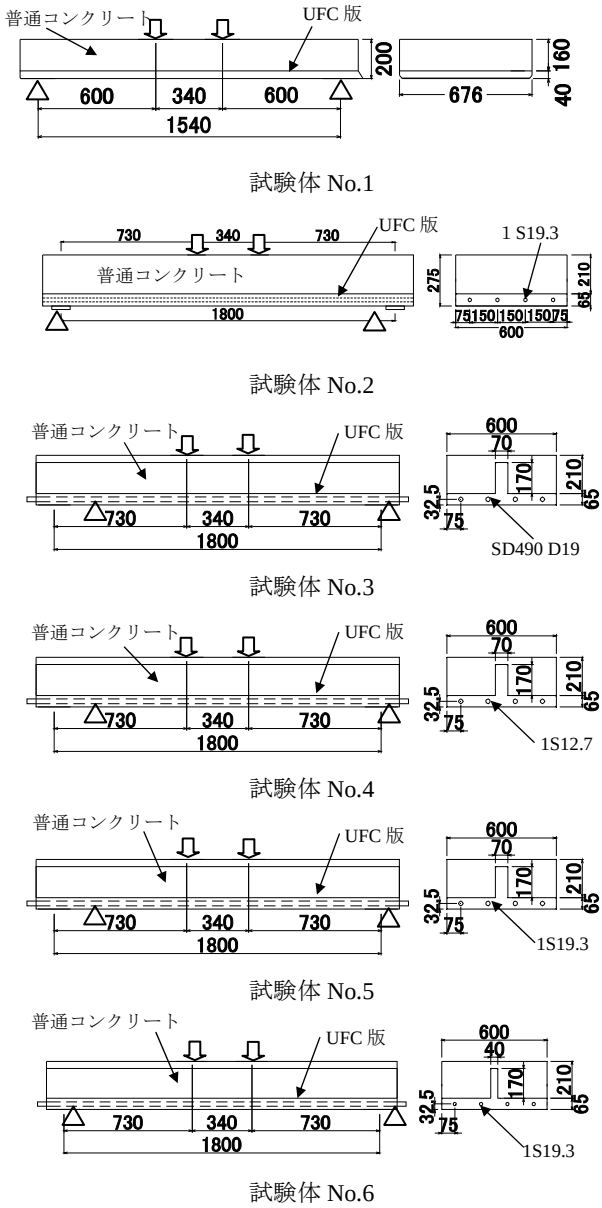
3. 曲げおよびせん断実験による検討

3.1 実験の概要

プレテンション方式でプレストレスを導入した UFC 版を引張抵抗材として使用した場合の曲げおよびせん断挙動，ならびにコンクリートとの境界面におけるずれせん断挙動を把握するために，曲げおよびせん断実験を行った。基本性能を把握するために，プレストレスを導入しない UFC 版についても実験を行った。また，ずれせん断に対する抵抗面積を大きくするためにリブを設けた UFC 版についても実験を行った。試験体 No.1 は深さ 9mm，試験体軸方向の幅 44mm の普通コンクリートが凸となるせん断キーで，No.2～6 試験体は前章のエアキャップで，



図－2　直応力度とせん断強度の関係



図－3　曲げおよびせん断試験体

表－2　曲げおよびせん断実験の試験体

試験体	補強鋼材				UFC			コンクリート	
	配置	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	有効プレストレス (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	リブの有無	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂引張強度 (N/mm^2)
No.1	－	－	－	－	231	11.1	無	21.0	2.4
No.2	1S19.3×4本	1793	1970	8.9	198	8.9	無	42.5	3.5
No.3	SD490D19×4本	538	714	－	219	11.2	有	31.2	2.9
No.4	1S12.7×4本	1783	1955	8.3	201	12.1	有	31.6	3.0
No.5	1S19.3×4本	1793	1970	8.7	204	9.0	有	40.1	3.2
No.6	1S19.3×4本	1793	1970	9.2	203	10.5	有	40.5	2.8

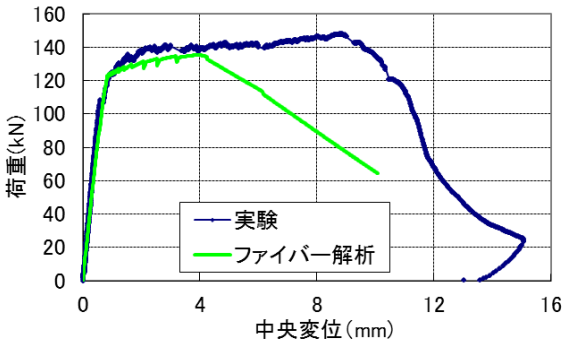
コンクリートと接するすべての面に凹凸を設けた。

試験体の一覧を**表－2** に，試験体の概要を**図－3** に示す。UFC 版内部の補強鋼材の有無，プレストレス導入の有無，リブの有無をパラメータとして６体の試験体について実験を行った。なお，**表－2** に示す有効プレストレスは，本試験で計測した緊張力，ならびに別途行った収縮とクリープ試験結果を用いて，変形の適合条件および力の釣合いから求めた [5]。プレストレスを導入する試験体では，一次養生後にプレストレスを導入し，直ちに 85℃で 24 時間の二次養生を行った。

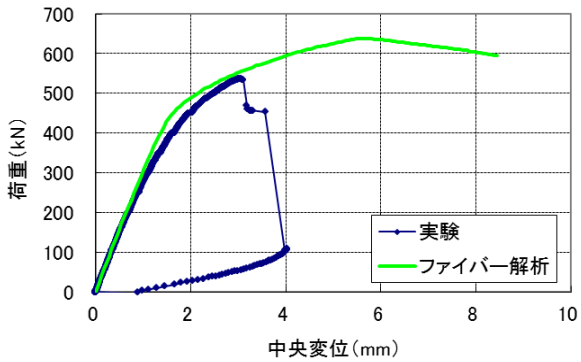
載荷は，試験体を単純支持して２点載荷で行い，単調に荷重を増加させた。載荷開始から終了まで，載荷荷重をロードセルにより，試験体中央のたわみを変位計により，補強鋼材のひずみをひずみゲージにより計測した。

3.2 実験結果および考察

内部に補強鋼材を配置していない UFC 版を用いた試験体 No.1 の実験結果を**図－4** に示す。荷重 78kN でコンクリートにひび割れが，85kN で UFC にひび割れが発生した。その後，UFC には無数の微細なひび割れが生じて変形が進行した。最大荷重 148kN に達した後，１本のひび割れのひび割れ幅が増加して UFC 版が破断することによって徐々に荷重が低下した。UFC 版の破断による曲げ破壊と考えられる。コンクリートには約 100mm ピッチでひび割れが生じており，UFC 版との一体性は良好であったと考えられる。



図－4　実験結果（試験体 No.1）

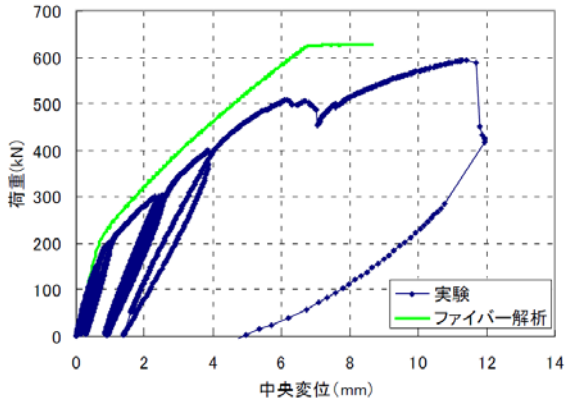


図－5　実験結果（試験体 No.2）

図－4 には，ファイバーモデルによる解析結果も併せて示す。コンクリートは土木学会コンクリート標準示方書に従って圧縮側は二次曲線と直線でモデル化し，引張側は割裂引張強度に達すると応力伝達が０となる直線でモデル化した。UFC は UFC 指針に準拠して一定の引張強度を保持した後，徐々に引張応力度が低下するモデルとした。すべて材料強度試験結果を用いて安全係数は 1.0 とした。なお，部材中央変位は，部材要素中央の曲げモーメントから M-φ関係を用いて曲率を算出し，曲率と節点変位との関係から求めた。実験と解析を比較すると，実験の方が変形性能は大きいものの両者はよく一致しているといえる。このことから，UFC 版が破断する曲げ破壊モードの場合，平面保持を仮定したファイバーモデルにより曲げ耐力を評価できるといえる。

1S19.3 を４本配置してプレストレスを導入した UFC 版を用いた試験体 No.2 の実験結果を**図－5** に示す。荷重 201kN で UFC とコンクリートにひび割れが発生し，荷重の増加とともに No.1 と同様に UFC およびコンクリートのひび割れが分散して発生した。その後，変形が進行する前に最大荷重 536kN においてコンクリートに斜めひび割れが発生してその下端から試験体端部に向かって UFC とコンクリートの界面でずれが生じ，急激に荷重が低下した。補強鋼材を追加することによって曲げ耐力が高くなり，補強鋼材の降伏前にせん断破壊に至ったものと考えられる。

D19（SD490）鉄筋を４本配置した UFC 版を用いた試験体 No.3 の実験結果を**図－6** に示す。荷重 152kN で UFC にひび割れが，189kN でコンクリートにひび割れが発生した。その後，UFC には無数の微細なひび割れが生じて変形が進行した。荷重 487kN においてコンクリートに斜めひび割れが発生して若干荷重が低下した。その後，荷重は増加し，荷重 591kN において鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した。その直後に最大荷重 594kN に達したところで UFC とコンクリートの界面でずれが大きくなり，急激に荷重が低下した。破壊モードは曲げ降伏後のせん断



図－6　実験結果（試験体 No.3）

破壊と考えられる。実験後にコンクリートをはつって内部の UFC 版を観察した状況を**写真－1** に示す。UFC 版のリブに斜めひび割れが生じており，UFC リブがせん断力を負担したと考えられる。なお，試験体 No.3 では途中で除荷して残留変位を確認しながら載荷したが，斜めひび割れ発生前であったため，最大耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

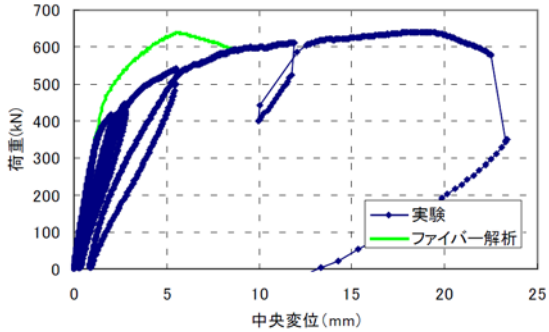
図－6 には，ファイバーモデルによる解析結果も併せて示す。鉄筋はコンクリート標準示方書に準拠しバイリニアでモデル化した。実験と解析を比較すると，曲げ耐力は評価できているといえるが，変形は実験の方が大きくなっている。これは，UFC 版とコンクリートのずれによって変形が大きくなったことによるものと考えられる。

1S12.7 を 4 本配置してプレストレスを導入した UFC 版を用いた試験体 No.4 の実験結果を**図－7** に示す。荷重 188kN でコンクリートにひび割れが，285kN で UFC にひび割れが発生した。その後，UFC には無数の微細なひび割れが生じて変形が進行した。荷重 582kN において PC 鋼材のひずみが降伏ひずみに達し，荷重変位曲線の勾配が小さくなった。その後も荷重は漸増し，最大荷重 639kN に達した後，コンクリートの斜めひび割れから生じた UFC とコンクリートの界面でずれが大きくなり，徐々に荷重が低下した。破壊モードは曲げ降伏後のせん断破壊と考えられる。実験後に内部の UFC 版を観察したところ，**写真－1** と同様に UFC 版のリブに斜めひび割れが生じており，UFC リブがせん断力を負担したと考えられる。なお，試験体 No.4 では途中で除荷して残留変位を確認しながら載荷したが，最大耐力は PC 鋼材の降伏が支配的であると考えられるため，最大耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

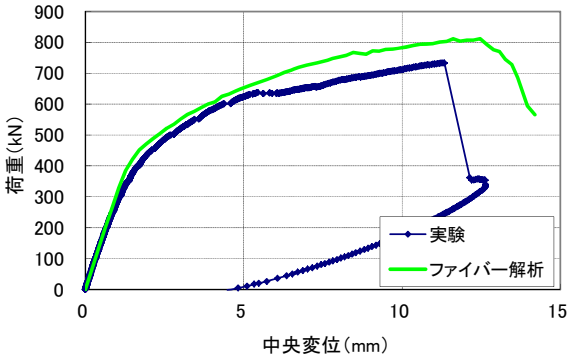
図－7 には，ファイバーモデルによる解析結果も併せて示す。PC 鋼材はコンクリート標準示方書に準拠しトリリニアでモデル化した。実験と解析を比較すると，曲げ耐力は評価できているといえるが，実験の方がひび割れ発生後の剛性が小さくなっている。これは，UFC 版とコンクリートのずれによって変形が大きくなったこと，有効プレストレスを過大評価したことが原因として考えられる。

試験体 No.4 に対して PC 鋼材量を増加させた試験体 No.5 の実験結果を**図－8** に示す。荷重 250kN でコンクリートにひび割れが，荷重 300kN で UFC にひび割れが発生し，荷重の増加とともに UFC およびコンクリートのひび割れが分散して発生した。荷重 635kN からコンクリートの斜めひび割れ先端からの UFC 版とコンクリートの界面のずれが増加し始めて最大荷重 733kN に達して急激に荷重が低下した。破壊モードはせん断破壊と考えられる。実験後に内部の UFC 版を観察したところ，UFC 版には斜めひび割れが分散して生じていたが，試験体 No.3 のようにひび割れが開いていなかったため，UFC リブのせん断力負担は試験体 No.3 よりも小さかったと考えられる。

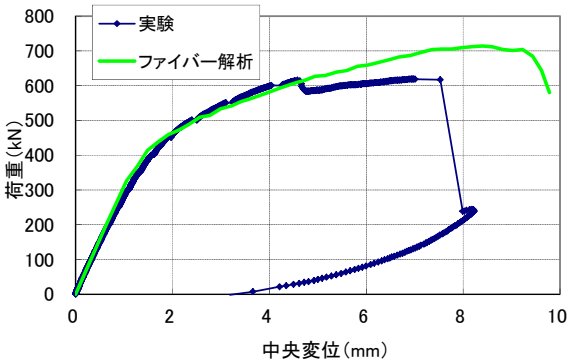
写真－1　UFC 版の斜めひび割れ（試験体 No.3）



図－7　実験結果（試験体 No.4）



図－8　実験結果（試験体 No.5）



図－9　実験結果（試験体 No.6）

試験体 No.5 に対してリブを 70mm から 40mm と薄くした試験体 No.6 の実験結果を**図－9** に示す。荷重 250kN で UFC にひび割れが，荷重 300kN でコンクリートにひび割れが発生し，荷重の増加とともに UFC およびコンクリートのひび割れが分散して発生した。その後，荷重 450kN においてコンクリートに斜めひび割れが発生し，最大荷重 618kN に達した後，UFC とコンクリートの界面でずれが生じ，急激に荷重が低下した。実験後にコンクリートをはつって内部の UFC 版を観察したところ，**写真－1** と同様に UFC 版のリブに斜めひび割れが生じていた。最終破壊モードは，せん断破壊と考えられる。なお，ほかの試験体では見られなかったが，PC 鋼材の試験体端面からの引込みが生じていた。

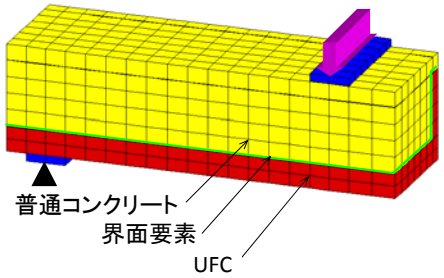
図－8 および**図－9** にはファイバーモデルによる解析結果も併せて示すが，曲げ耐力に達する前にせん断破壊したことがわかる。

4. 解析による検討

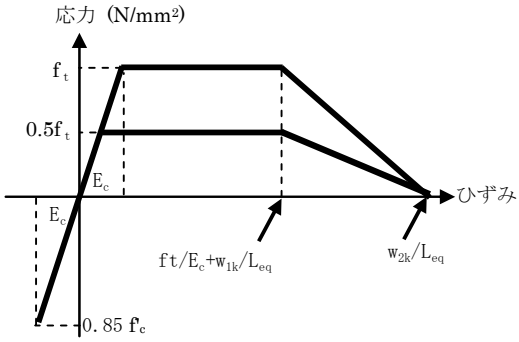
4.1 解析の概要

補強鋼材が降伏に達する前にずれを伴うせん断破壊に至った試験体 No.2 および No.5 について FEM 解析を行い，ずれせん断挙動の再現を試みた。

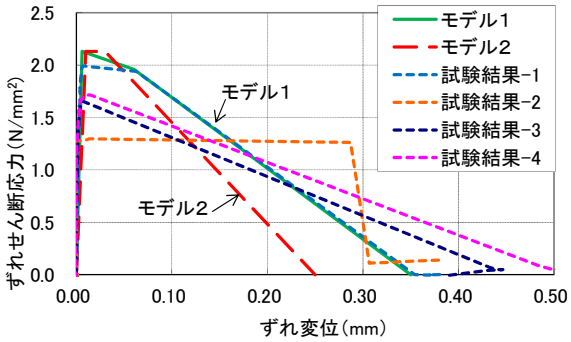
図－10 に解析モデルの例として試験体 No.5 の解析モデルを示す。解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA を用いた。いずれの解析モデルも対称性を考慮して 1/4 をモデル化した。UFC の応力－ひずみ曲線を**図－11** に示す。UFC の引張強度 f_t，圧縮強度 f'_c およびヤング係数 E_c は実測値を用い，UFC 指針に準拠し，等価検長 L_{eq}，一定応力を保持できる開口変位 w_{1k} および応力が 0 となる開口変位 w_{2k} を用いてモデル化した。コンクリートの圧縮軟化特性は圧縮破壊エネルギーに基づいて定式化される Feenstra による放物線モデル [6]を，引張軟化特性には引張破壊エネルギーを考慮した Hordijk モデル [7]を用いた。鋼材のモデル化はコンクリート標準示方書に準拠し，鉄筋はバイリニアで，PC 鋼材はトリリニアでモデル化した。UFC とコンクリートの界面要素は，線形モデルとクーロンの破壊基準を考慮したモデルを用いた。線形モデルでは，面に垂直方向およびせん断方向の剛性を，コンクリートのヤング係数およびせん断剛性とした。クーロンの破壊基準を考慮したモデルでは，**図－2** から粘着力を 2.13N/mm^2，内部摩擦角を 53.9° とした。クーロンの破壊基準到達後のせん断応力とずれ変位の関係を**図－12** に示す。モデル 1 は 2 面せん断試験のせん断応力とずれ変位の関係を参考に設定し，モデル 2 は応力－変位の形状が与える影響を検討するためモデル 1 に対して応力が 0 となる変位を若干小さくした。



図－10　解析モデル



図－11　UFC の応力－ひずみ曲線



図－12　せん断応力とずれ変位の解析モデル

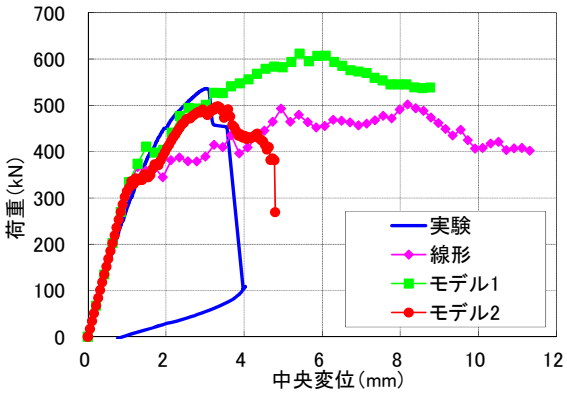
4.2 解析結果および考察

試験体 No.2 について，界面要素を線形モデル，モデル 1 および 2 とした場合の解析結果を**図－13** に示す。モデル 2 を用いた場合が最も実験に近いが，界面要素モデルのわずかな違いによって曲線の軟化領域の勾配が大きく異なっており，斜めひび割れ発生後の挙動を再現するためにはずれせん断－ずれ変位曲線のモデル化が重要であるといえる。

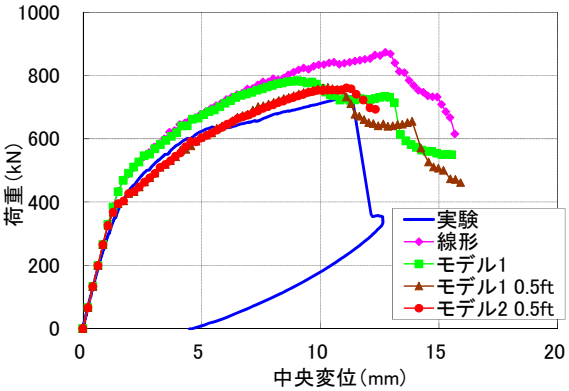
試験体 No.5 について，界面要素を線形モデル，モデル 1 とした場合，ならびにモデル 1 および 2 を用いてさらに UFC の引張側応力－ひずみ曲線の第 1 折れ点を実強度 f_t の半分とした場合の解析結果（モデル 1　0.5f_t，モデル 2　0.5f_t）を**図－14** に示す。試験体 No.5 では，界面要素モデルの違いの影響は小さく，モデル 1 で概ね再現できているが，解析の方が耐力は若干大きい結果となった。第 1 折れ点を実強度の半分，すなわち引張強度を 4.5N/mm^2 小さくしたモデルの方が実験に近くなってい

る。これは，有効プレストレスが想定よりも小さく見かけの引張強度が小さくなったことや引張縁が打設面であったため引張強度が小さくなったことなどが要因と考えられるが，今後さらに検討が必要である。

本研究では，ずれせん断挙動を再現する試みを行う目的で限られた範囲での検討を行ったが，今後，引張鋼材の降伏や斜め引張破壊からずれを伴うせん断破壊に移行する場合などについても検討する必要がある。



図－13　解析結果（試験体 No.2）



図－14　解析結果（試験体 No.5）

5. おわりに

本研究では，UFC 製プレテンション版とコンクリートの合成構造について，ずれせん断試験，曲げおよびせん断実験を行い，耐力を評価する手法について検討した。その結果，以下のことが明らかとなった。

(1) 一面せん断試験および二面せん断試験により UFC とコンクリートの境界面に作用する直応力とせん断強度の関係が得られた。

(2) 曲げ破壊する場合，平面保持を仮定したファイバーモデルによって耐力を評価できる。

(3) クーロンの破壊基準を考慮したずれせん断－ずれ変位曲線で実験結果を概ね評価できたが，曲線の軟化領域の勾配に大きく依存する場合がある。

参考文献

1) 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），2004.9

2) 阿部忠，木田哲量，新見彩，高野真希子，田中敏嗣：UFC 埋設型枠 RC 床版の合成面のせん断強度および理論押抜きせん断耐力式, 構造工学論文集, Vol.55A, , pp.1478-1487，2009

3) 川口哲生，森香奈子，河野克哉，田中敏嗣：収縮低減剤を添加した UFC と普通コンクリートの複合 RC はりに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.1273-1278，2011

4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo.3, 2006.11

5) 一宮利通，曽我部直樹，本田智昭，日紫喜剛啓：超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレテンション部材の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.505-510，2006

6) FEENSTRA, P. H. : Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1993.

7) HORDIJK, D. A. : Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.