

論文 繊維補強コンクリートの FEM 解析における繊維配向のモデル化

奥西 淳一^{*1}・内田 裕市^{*2}・國枝 稔^{*3}・稲熊 弘^{*4}

要旨：本研究は、繊維の配向をモデル化した FEM 解析を用いて、超高強度繊維補強コンクリートにおける引張軟化特性の異方性を考慮した部材耐力の評価を目的とした。FEM 解析では繊維の架橋効果を埋め込み鉄筋で表現し、1 要素モデルによるパラメータ解析により、引張挙動に対する埋め込み鉄筋の条件設定や配向角度等の影響を把握した。更に、配向が既知な曲げ供試体の再現解析を実施し、曲げ応力とひび割れ肩口開口変位(CMOD)を概ね再現出来ることを把握した。

キーワード：繊維補強コンクリート, FEM 解析, 繊維配向, 異方性

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート (UFC) は、繊維の配向や分散により異方性が生じる材料である。そのため、構造物の設計時は部材実験で得られた配向係数で引張軟化曲線を補正する方法が提案されている¹⁾。

異方性を考慮した部材耐力の解析手法として、一つひとつの骨材や繊維を有限要素や剛体パネ要素でモデル化することで異方性を直接的に取り込む方法²⁾があるが、解析対象の寸法によっては解析モデルの自由度が莫大になり、モデル化ならび求解のプロセスにおいて大きな労力を要する。

一方、通常の FEM 解析では、等方性の材料モデルを用いることが多く、応力の作用方向が既知で一定であれば、その方向に応じた異方性 (配向性) を考慮した材料特性を与えることで近似的に解析することも可能である³⁾。しかし、応力方向が破壊の進展とともに変化するような場合にはそのような近似解析を用いることができない。

そこで本研究では、繊維の配向にともなう異方性を考慮するために、繊維の架橋効果を埋め込み鉄筋でモデル化することとし、コンクリートの立体要素内に繊維の配向を考慮した直交 3 方向に配置する方法について検討した。この方法の妥当性を確認するために、1 要素モデルによるパラメータ解析ならびに曲げ供試体の再現解析を実施した。

2. 埋め込み鉄筋を用いた FEM 解析モデルの概要

本研究では要素内の繊維の配向は、繊維の方向と量で規定できると考え、配向の主たる方向 (以下、主配向方向と呼ぶ) を局所座標系の X 軸方向とし、それに直交する方向を Y 軸方向、Z 軸方向として、それぞれ量を与えることとした。繊維による架橋効果は埋め込み鉄筋でモ

デル化することとし、局所座標系の X, Y, Z 軸方向に埋め込み鉄筋を配置し、各方向の鉄筋量を与えることで繊維の配向にともなう異方性をモデル化することとした。

図-1 には、X 線マイクロ CT で観察した繊維配向⁴⁾と本研究の配向モデル化方法を示す。

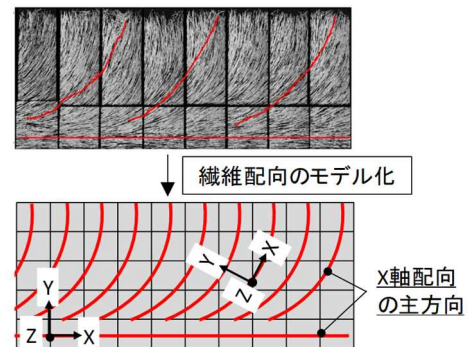


図-1 配向のモデル化

3. 1 要素モデルによる FEM 解析モデルの検討

3.1. 再現する引張軟化曲線の設定

解析で再現する引張軟化曲線は、X 線マイクロ CT で得られた繊維の 3 次元情報から、引張軟化曲線を推定するために、引張軟化曲線と有効繊維本数との関係性で整理された式(1)を用いた。式(1)は、流動方向に規則的な配向を有する UFC の曲げ供試体の逆解析⁵⁾で得られた引張応力-開口変位関係⁶⁾に、同一マトリクスで繊維量を変化させた試験を追加し、試験結果を回帰して求めた式である。なお、試験では長さ 15mm 繊維の鋼繊維を使用し、繊維混入率は体積比で 1~2% としている。式(1)はひび割れ幅 0.5mm 以上の引張応力が軟化する範囲で適用し、ひび割れ発生から幅 0.5mm までの範囲は、引張応力を一定とした。引張軟化曲線の推定結果を図-2 に示す。

$$\sigma = (-0.16 A) \omega + (0.61 A + 0.9) \quad (1)$$

*1 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 土木事業部 (正会員)

*2 東海国立大学機構 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 特任教授 博士(工学) (正会員)

*3 東海国立大学機構 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*4 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 土木事業部 博士(工学) (正会員)

ここに、 σ ：引張軟化曲線の応力(N/mm²)、 ω ：ひび割れ幅(mm)、 A ：単位面積当たりの有効繊維本数(本/cm²)

3.2. 検討内容および解析ケース

埋め込み鉄筋で引張軟化特性を再現する解析モデルについて、1要素の解析モデルを用いた検証を実施した。解析の目的および解析ケースの一覧を表-1に示す。「T-0～T-4」では、図-2に示す引張軟化曲線を再現する埋め込み鉄筋の条件を設定した。「T-5～T-7」では、部材にひび割れが発生した際に、その近傍の応力は低下することから、除荷剛性や再載荷後の挙動を把握するために引張力と除荷を繰り返し載荷した。「T-8～T-10」では、引張方

向に直交する副配向方向の埋め込み鉄筋が、引張軟化曲線に与える影響を把握した。「T-11～T-19」では、部材解析において主配向方向と引張応力方向が一致しないことがあることから、鉄筋量と配向角度が引張軟化曲線に与える影響を把握した。更に「C-0～C-4」では、埋め込み鉄筋が圧縮特性に与える影響を把握した。

3.3. 解析条件

本解析には、汎用FEM解析コードDIANA10.8を用いた。解析モデルは、図-3に示すように1辺25mmの立方体のコンクリート要素内に、主配向方向(X軸方向)およびそれに直交する副配向方向(Y軸方向、Z軸方向)に埋

表-1 1要素モデルの解析ケース

解析 ケース	解析の目的	コンクリート要素 の引張特性	埋め込み鉄筋								主配向 方向の 角度	載荷 方法
			鉄筋 本数	鉄筋量(mm ²)			鉄筋比(%)					
				主配向方向	副配向方向		主配向方向	副配向方向				
					X方向	Y方向		Z方向	X方向	Y方向		
T-0	引張軟化曲線を再現する埋め込み鉄筋の設定	べき乗数 軟化モデル f _t =8.0 N/mm ²	0本	—	—	—	—	—	—	—	90°	引張
T-1			1本	0.33	—	—	0.05	—	—			
T-2				1.00	—	—	0.16	—	—			
T-3				1.33	—	—	0.21	—	—			
T-4				2.33	—	—	0.37	—	—			
T-5	除荷剛性と再載荷剛性の把握	UFC引張軟化	1本	1.00	—	—	0.16	—	—	90°	引張と 除荷の 繰返し	
T-6			0本	—	—	—	—	—	—			
T-7			— (引張軟化特性をコンクリート要素で再現した)									
T-8	副配向方向の鉄筋が引張軟化曲線に与える影響の把握	べき乗数 軟化モデル f _t =8.0 N/mm ²	3本	1.00	0.33	0.33	0.16	0.05	0.05	90°	引張	
T-9				1.00	1.00	1.00	0.16	0.16	0.16			
T-10				1.00	2.33	2.33	0.16	0.37	0.37			
T-11	鉄筋量と配向角度が引張軟化曲線に与える影響の把握			1.00	1.00	1.00	0.16	0.16	0.16	75°	引張	
T-12				1.00	1.00	1.00	0.16	0.16	0.16	60°		
T-13				1.00	1.00	1.00	0.16	0.16	0.16	45°		
T-14				1.00	0.33	0.33	0.16	0.05	0.05	75°		
T-15				1.00	0.33	0.33	0.16	0.05	0.05	60°		
T-16				1.00	0.33	0.33	0.16	0.05	0.05	45°		
T-17				2.33	0.33	0.33	0.37	0.05	0.05	75°		
T-18				2.33	0.33	0.33	0.37	0.05	0.05	60°		
T-19				2.33	0.33	0.33	0.37	0.05	0.05	45°		
C-0	埋め込み鉄筋が圧縮特性に与える影響の把握		0本	—	—	—	—	—	—	90°	圧縮	
C-1			1本	0.33	—	—	0.05	—	—			
C-2				1.00	—	—	0.16	—	—			
C-3				1.33	—	—	0.21	—	—			
C-4				2.00	—	—	0.32	—	—			

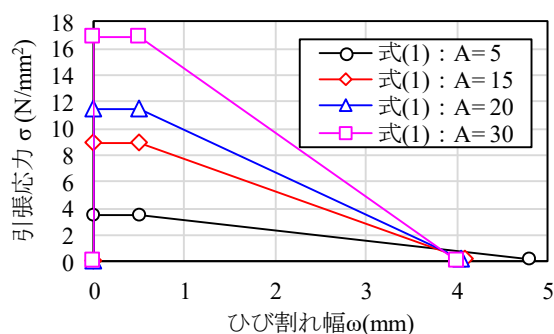


図-2 引張軟化曲線の推定式

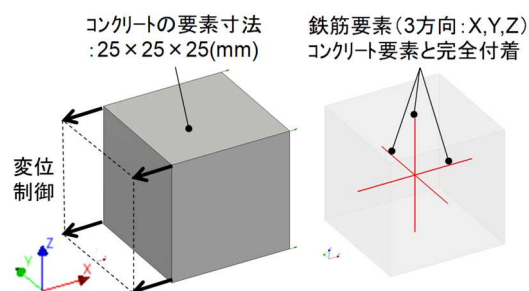


図-3 1要素の解析モデル

め込み鉄筋を配置することで材料の異方性を再現した。埋め込み鉄筋はコンクリート要素に完全付着させ、Von-Mises の塑性モデルを用いて応力ひずみ関係を定義した。コンクリート要素の圧縮側は UFC を想定して圧縮強度は 160N/mm^2 、弾性係数は 47kN/mm^2 、ポアソン比は 0.2 とし、コンクリート標準示方書 7 の構成則を用いることとした。なお、応力ひずみ関係の履歴特性も示方書の特性が適用される。解析の制御方法は、1 辺 25mm の立方体の 1 面に垂直な方向に変位で制御した。

3.4. 引張軟化曲線を再現する埋め込み鉄筋の設定

材料の非線形特性を図-4、図-5 に示す。コンクリート要素の引張側は、引張強度 8N/mm^2 に到達後は終局変位 5mm 、終局ひずみ 20% (25mm の要素長に対して 5mm) に至るまで、べき乗数 0.1 で軟化する非線形モデルとした。埋め込み鉄筋は、図-2 に示す UFC の引張軟化特性に対して、コンクリート要素の不足分を補うように、図-5 に示すようマルチリニア型で定義した。なお、図-4、図-5 は、横軸を引張変位(mm)で表したが、解析では要素長で除したひずみを入力した。

図-2 に示す引張軟化特性と解析結果の比較を図-6 に示す。コンクリート要素の引張強度が 8.0N/mm^2 に到達後も埋め込み鉄筋が抵抗し、設定した引張軟化特性を再現できることが確認できる。

鉄筋量は、式(2)に示す繊維本数と埋め込み鉄筋の断面積の線形関係式とした。式(2)は、繊維本数 A が 30本/cm^2 の場合、鉄筋量 A_{r1} は 2mm^2 となり、1 辺 25mm のコンクリート要素に対する鉄筋比は 0.3% となる。要素寸法を変更する場合は、1 要素当たりの鉄筋比を同一とする必要があることから、式(3)、式(4)に示す換算式を用いて鉄筋量を調整することとした。

$$A_{r1} = 1/15 \times A \quad (2)$$

$$p_t = A_{r1}/A_{c1} \quad (3)$$

$$A_{r2} = p_t \times A_{c2} \quad (4)$$

ここに、 A_{r1} 、 A_{c1} ：本検討の 1 要素モデルにおける埋め込み鉄筋の断面積(mm^2)とコンクリート要素 1 面の表面積(625mm^2)、 A ：単位面積当たりの繊維本数(本/cm^2)、 p_t ：鉄筋比、 A_{r2} 、 A_{c2} ：解析対象における埋め込み鉄筋の断面積(mm^2)とコンクリート要素 1 面の表面積(mm^2)

3.5. 除荷剛性と再載荷剛性の把握

除荷剛性と再載荷剛性の把握では、埋め込み鉄筋のある「T-5」と、コンクリート要素単体の「T-6」、コンクリート要素に引張軟化特性を直接入力した「T-7」を比較した。解析は、引張変位 0.5mm 増加毎に除荷・再載荷を繰り返した。

解析結果を図-7 に示す。埋め込み鉄筋の無い「T-6」、「T-7」と比較して、「T-5」は除荷後の残留変位が大きく残る特性を示した。これは、埋め込み鉄筋に適用し

た Von-Mises の塑性モデルでは、除荷剛性が初期剛性と同一であるためである。また、再載荷後は図-6 の「T-2」における単調載荷の引張軟化特性を通る応答を示すことが確認できる。なお、除荷剛性をキャリブレーションできる適切な実験結果が無いことから、ここでは「T-5」に示す履歴特性を有する解析モデルとするが、材料構成則の変更等による除荷剛性の改良は今後の課題とする。

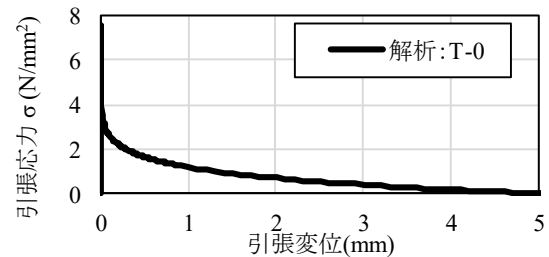


図-4 コンクリート要素の引張特性 解析ケース T-0

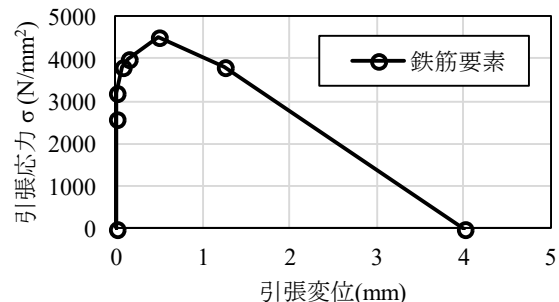


図-5 埋め込み鉄筋の引張特性

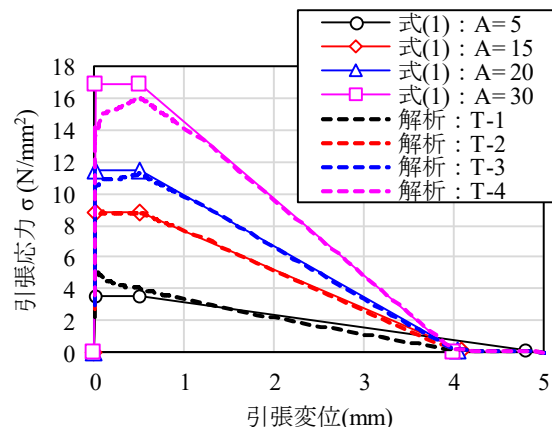


図-6 引張軟化特性と解析結果の比較

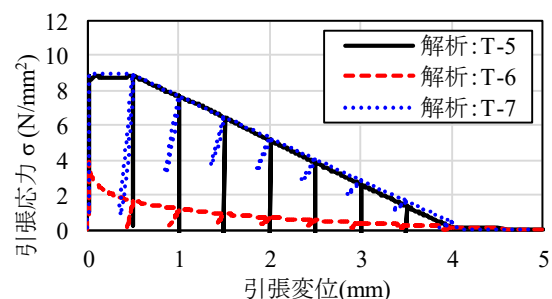


図-7 除荷剛性と再載荷剛性の比較

3.6. 副配向方向鉄筋の影響検討

副配向方向の鉄筋が引張軟化特性に与える影響を把握するために、引張方向である主配向方向に直交する埋め込み鉄筋の鉄筋量を変化させ、引張軟化特性を比較した。図-8に示す解析結果の比較から、副配向方向の鉄筋を引張方向に直交して配置しても引張軟化特性は変化しないことを把握した。

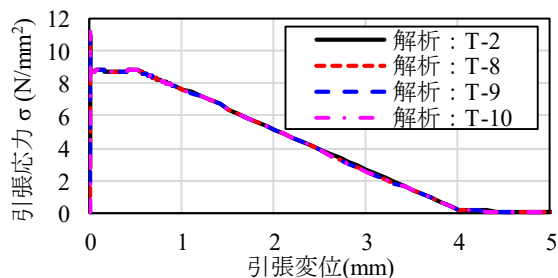


図-8 副配向方向の鉄筋量を変えた解析結果の比較

3.7. 鉄筋量と配向角度の影響検討

配向角度が引張軟化特性に与える影響を把握するために、図-9に示すように埋め込み鉄筋の局所座標系を回転させた解析を実施した。配向角度は引張方向と埋め込み鉄筋の主配向方向が一致する90°、75°、60°および45°とした。加えて、鉄筋量の感度を把握するために主配向方向と副配向方向の鉄筋量も解析パラメータとした。

引張軟化特性の比較を図-10に示す。図-10(a)には、鉄筋量を等方配置した「T-11,12,13」を比較した。配向角度が45°の「T-13」は、90°の「T-2」よりも高い強度を示している。これはX、Y両方向の埋め込み鉄筋の45°方向分力の合力が、1軸方向の埋め込み鉄筋の軸引張力よりも大きいためである。一方で、図-10(b)に示す副配向方向の鉄筋量を低減した「T-14,15,16」では、配向角度45°の「T-16」が最も低い強度を示し、副配向方向の鉄筋量の影響が明確に表れている。更に、図-10(c)に示す主配向方向と副配向方向の鉄筋量の差を大きくした「T-17,18,19」では、埋め込み鉄筋の負担分が増加し、主配向方向の角度の影響がより顕著に表れている。

なお、図-10に示す解析において、配向角度が90°から小さくなるほど、ひび割れ幅5mm時の引張応力が大きく残る。これは、引張方向に対する埋め込み鉄筋の角度が大きいくほど、埋め込み鉄筋の軸方向のひずみが小さくなるためと考えられる。

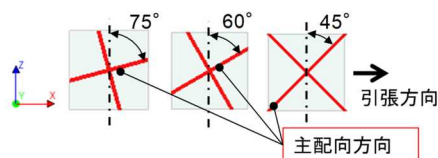
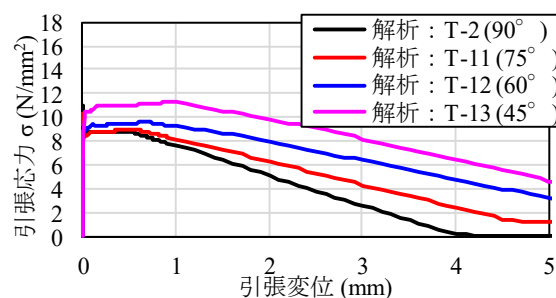
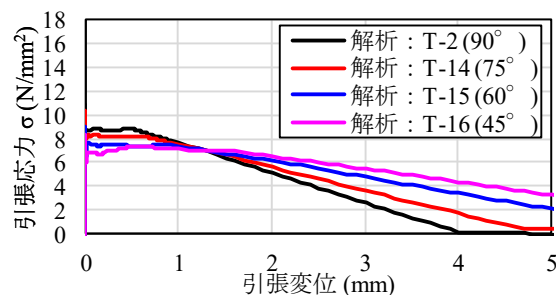


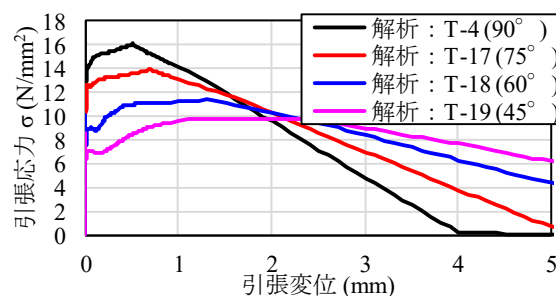
図-9 配向角度



(a) 鉄筋量等方配置 (1mm²)



(b) 主配向方向 1mm², 副配向方向 0.33mm²



(c) 主配向方向 2.33mm², 副配向方向 0.33mm²

図-10 鉄筋量と配向角度を変えた解析結果の比較

3.8. 埋め込み鉄筋が圧縮特性に与える影響検討

埋め込み鉄筋の軸方向に圧縮応力を载荷した解析結果を図-11に示す。埋め込み鉄筋を有する解析条件では、埋め込み鉄筋が応力負担することで、最も鉄筋量の多い「C-4」では鉄筋の無い「C-0」と比較して圧縮応力が最大で約8% (約13N/mm²) 増加する結果となった。

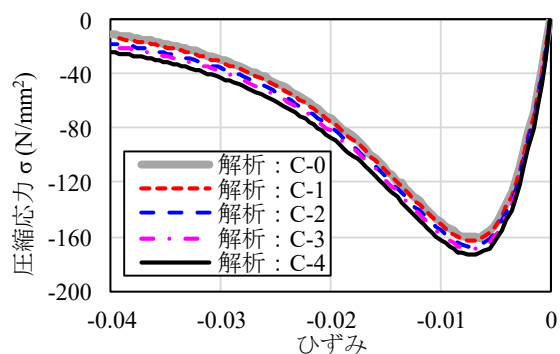


図-11 圧縮応力-ひずみ関係の解析結果の比較

4. 配向が既知の部材に対する適用性の検討

繊維の配向が既知の部材に対して、本解析モデルの適用性を検討した。解析対象は、配向角度と曲げ耐力の関係が明確である円形パネルから切り出した曲げ試験結果⁸⁾とした。配向角度は図-12に示すように、同心円状に配向する円形パネルに対して曲げ試験体を切出す位置で定められており、本解析では中心から 500mm 位置で切り出した 0°、30°、60° および 90° の試験体を解析の比較対象とした。

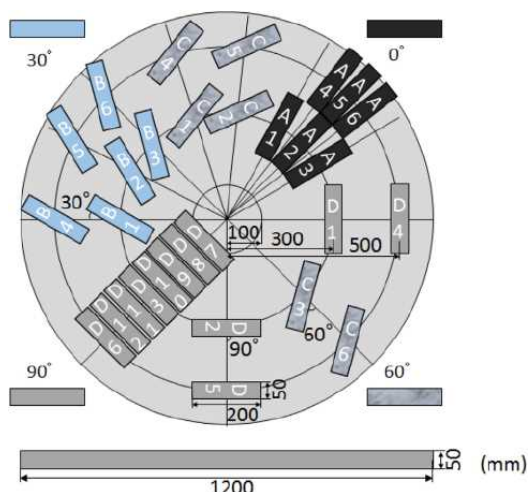


図-12 円形パネルの切り出し位置と配向角度⁸⁾

4.1. 解析条件

解析モデルは梁の幅方向に対称条件を設けた 1/2 モデルとし、図- 13 に示すように梁高さ 50mm、梁幅 25mm でスパン 150mm の梁の中央に、深さ 10mm、切り欠き幅 2.5mm の切り欠きを設けた。載荷方法は、スパン中央部の節点 1 列を変位で制御した。コンクリート要素は 1 辺 2.5mm の立方体ソリッド要素とし、埋め込み鉄筋は図- 14 に配向角度 30° の例を示すように、主配向方向とそれと直交する 2 方向の副配向方向に配置した。埋め込み鉄筋の間隔は要素寸法と合わせて 2.5mm 間隔とした。

解析ケースは、表- 2 に示すように、配向角度 $0^\circ \sim 90^\circ$ の 4 ケースとした。主配向方向の繊維本数は、 90° の解析ケースの耐力の再現性から定めた。副配向方向の繊維本数は、主配向方向を固定して比較検討した 30° と 60° の耐力の再現性から定めた。鉄筋量は、式(2)，式(3)，式(4)を用いて算定した。

コンクリート要素は回転ひび割れモデルとし、圧縮強度と弾性係数は、実験結果に合わせて 185N/mm^2 、 50.9kN/mm^2 とした。引張強度とポアソン比は、3 章に示す 1 要素の解析モデルと合わせて、それぞれ 8N/mm^2 、 0.2 とした。コンクリート要素と埋め込み鉄筋の材料非線形は、図- 4、図- 5 の変位を要素長 2.5mm で除したひずみに換算して用いた。

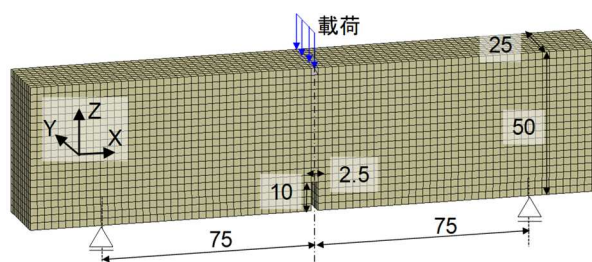


図-13 解析モデル図

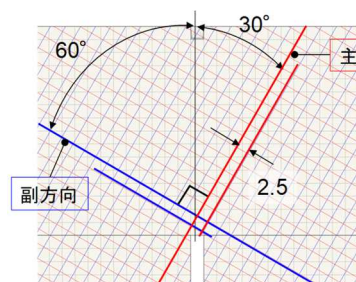


図-14 埋め込み鉄筋の配置（配向角度 30° の例）

表-2 解析ケース

主配向方向 の角度	繊維本数の設定 (1要素当たりの鉄筋量)	
	主配向方向	副配向方向
0°	35(本/cm ²)相当 (0.02667mm ²)	5(本/cm ²)相当 (0.00333mm ²)
30°		
60°		
90°		

4.2. 解析結果

曲げ応力一ひび割れ肩口開口変位(CMOD)関係の試験結果と解析結果を、図- 15 に示す。試験結果は角度毎で3 体の平均値である。解析結果の曲げ応力は式(5)により算定し、CMOD は肩口の2 節点の相対変位とした。解析結果では、配向角度に応じた最大耐力の変化を概ね再現することが出来た。

$$\sigma = 3pl/2bh^2 \quad (5)$$

ここに、 σ は曲げ応力(N/mm²)、 p は載荷荷重(N)、 l はスパン(150mm)、 b は部材幅(50mm)、 h は切り欠き部の断面高さ(40mm)

また、CMOD が 2mm 時の最大主ひずみコンター図を図-16 に示す。同図中には主配向方向の角度を併記した。ひずみ分布の比較から、埋め込み鉄筋の主配向方向にひずみが分散する傾向となった。ひび割れ状況は、図-17 に示す 60° の解析ケースにおけるひび割れ図のように、配向により引張強度が低い向きと直交するようなひび割れが進展する様子が確認でき、梁幅方向のひずみ分布は一樣であった。なお、3.7 節では 1 要素モデルを同一方

向に引張载荷した配向角度の影響検討を実施したが、部材での応答は図-17に示すように、主配向方向の埋め込み鉄筋の角度でひび割れの角度や進展方向、主ひずみ方向が変化すると考えられる。

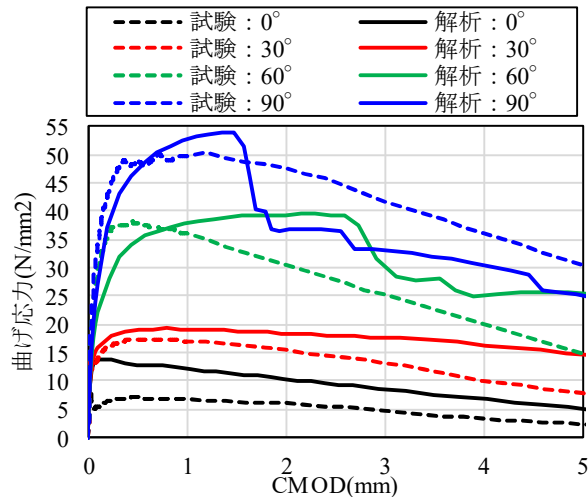


図-15 試験結果と解析結果の比較
(曲げ応力-CMOD 関係)

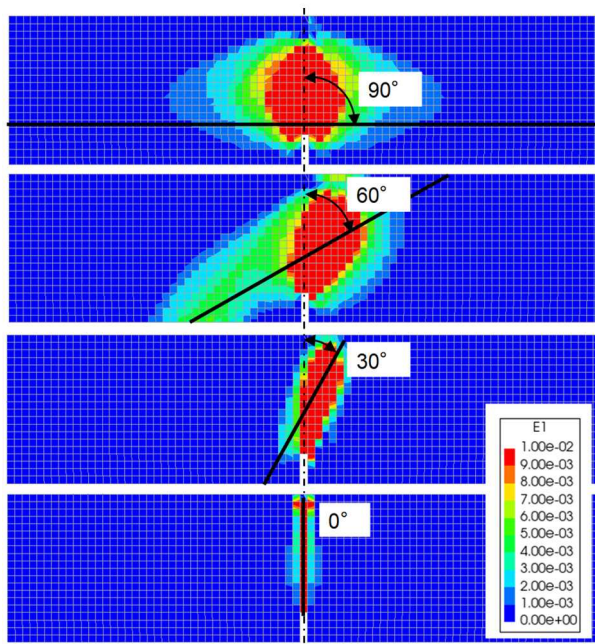


図-16 CMOD 2mm 時の最大主ひずみコンター図

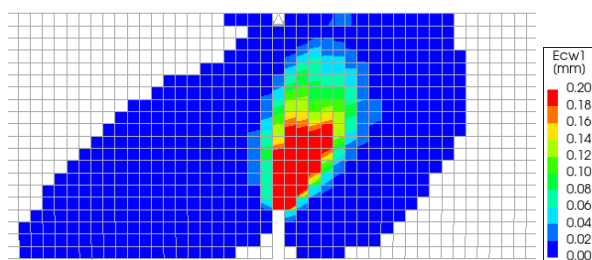


図-17 60°の解析ケースのひび割れ幅コンター図

5. まとめ

本研究では繊維混入量が1～2%のUFCを対象に、繊維の分散は均一であることを仮定した条件において、埋め込み鉄筋を用いてFEM解析で繊維の配向をモデル化した。FEM解析モデルの検討では、引張軟化特性を再現し、各種応力条件に対する応答を把握した。更に、配向が既知な曲げ供試体に対する再現解析を実施し、配向をモデル化することで、配向角度毎の耐力を概ね再現できた。また、主配向方向と副配向方向の鉄筋量の設定が解析精度の向上に対する今後の課題であり、配向角度分布の定量的な把握が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：高強度繊維補強セメント系複合材料の設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー166，2024
- 2) 小倉大季，國枝稔，中村光：鉄筋補強した繊維補強セメント系複合材料の引張破壊解析と架橋力に着目した破壊挙動評価，土木学会論文集 E2, Vol.72, No.3, 249-267, 2016
- 3) 奥西淳一，稲熊弘，田中章，内田裕市：軸方向鉄筋を有する超高強度繊維補強コンクリート梁の曲げ耐力と繊維配向，コンクリート工学年次論文集，Vol.46, No.2, 2024
- 4) 矢野和輝，田中章，岩崎雄也，内田裕一：高流動繊維補強コンクリート梁部材中の繊維の配向，コンクリート工学年次論文集，Vol.44, No.1, 2022
- 5) 内田裕市，六郷恵哲，小柳洽：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，第426号/V-14 1991.2
- 6) 石河義希，伊藤穂高，内田裕市：超高強度繊維補強コンクリート中の繊維の配向と引張軟化曲線，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1, pp273-278, 2018
- 7) 土木学会：2020年制定 コンクリート標準示方書(設計編)，2020.3
- 8) Zhou.Bo and Uchida.Y：Relationship between fiber orientation/distribution and post-cracking behaviour in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC)，Cement and Concrete Composites 83(2017) 65-75