

論文 超高強度繊維補強コンクリート部材のひび割れ分散性に関する研究

川口 哲生^{*1}・片桐 誠^{*2}・前堀 伸平^{*1}・兵頭 彦次^{*3}

要旨：超高強度繊維補強コンクリートを用いた RC 部材のテンションスティフニング効果とひび割れ分散性（ひび割れ幅，ひび割れ間隔）の検討を行った。短繊維種類，および混入量を試験水準として，両引き試験と RC はりの曲げ試験を行った。両引き試験では，テンションスティフニング効果および，ひび割れ幅の把握を行い，RC はりの曲げ試験では，鋼材応力の変化にともなうひび割れ幅，ひび割れ間隔および剛性を把握した。同時に既往のひび割れ幅の算定式との比較を行った。さらに，両引き試験より得られた平均応力-平均ひずみ関係を近似的に組み込んだ非線形 FEM 解析を行った。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，テンションスティフニング効果，非線形 FEM 解析

1. はじめに

近年開発された超高強度繊維補強コンクリート⁽¹⁾⁽²⁾（Ultra high Strength Fiber reinforced Concrete：以下 UFC と略記）は，非常に緻密な硬化体組織を有し，短繊維を含む材料である。そのため，非常に高い圧縮強度，耐久性と短繊維補強による高い変形能力を有することが特徴である。これらの特徴を活用することにより，断面の縮小，構造物の自重の低減などを可能とする非常に有用な材料であると言える。一般に短繊維補強の効果として，架橋効果に起因する短繊維の荷重負担やひび割れ分散性が挙げられる⁽³⁾⁽⁴⁾。これらの要因と鋼材間の付着により，高いテンションスティフニング効果が存在する。UFC においては，従来の短繊維補強コンクリートと比べて，引張に対して高い抵抗力を示すため，極めて高いテンションスティフニング効果が期待できると考えられる。しかし，短繊維の荷重負担分の評価を含めて定量的評価のためのデータはいまだ不十分である。また，UFC を構造部材に適用し，その特性を活かした大変形能力に期待するためには，FEM 解析などの手法により，終局状態等を精度良く推定できることが

重要となる。そのような，変形を数値解析的に推定するためにも，テンションスティフニング効果のモデル化は必要不可欠である。

一般的な鉄筋コンクリートでは，鋼材の腐食による劣化を防ぐために，かぶりコンクリートに生じるひび割れ幅を引張補強材やかぶり厚さによって，制御することが重要である。しかし，UFC を用いた部材において，劣化に影響すると考えられる範囲でのひび割れ幅，ひび割れ間隔等によって示されるひび割れ分散性については，十分な検討がなされていないのが現状である。そこで，本研究では，鋼繊維と PVA 繊維を混入した UFC を対象として，両引き試験を行い，テンションスティフニング効果の把握，ひび割れ幅の把握を行った。さらに，RC はりの曲げ試験を行い，部材におけるひび割れ分散性と短繊維が有するひび割れ幅の抑制効果を把握した。ここでは，既往の評価手法である土木学会標準示方書式⁽⁵⁾の算定結果と比較を行い，両引き試験より得られた UFC の平均応力-平均ひずみ関係を近似的に組み込んだ非線形 FEM 解析を行った。

*1 太平洋セメント（株）中央研究所 研究開発部 RPC 設計技術チーム 工修（正会員）

*2 太平洋セメント（株）中央研究所 研究開発部 RPC 設計技術チームリーダー 工博（正会員）

*3 太平洋セメント（株）中央研究所 研究開発部 RPC 設計技術チーム（正会員）

2. 実験概要

2.1 両引き試験概要

表-1 に両引き試験概要を示す。UFC に用いた短繊維は、鋼繊維と PVA 繊維であり、ここでは、繊維種類と繊維混入量を試験水準とした。

図-1 に両引き試験の概要図を示す。試験体寸法は、 $100 \times 100 \times 2000$ (mm)の角柱試験体とし、試験区間は 1800mm とした。試験体断面中心位置に、呼び名 22 (C 種 1 号)の異型 PC 鋼棒を配置し、軸方向鋼材比は 3.79%、かぶりは 39mm とした。また、軸方向鋼材の試験体中央部に、ひずみゲージを貼り付け、打設時から継続的に鋼材ひずみの計測を行った。

荷重状況を写真-1 に示す。荷重は反力台上に組み立てた荷重フレームを介して行った。ここでは、油圧ジャッキにより、静的単調に鋼材を引張ることで、試験体に引張力を加えた。また、試験体自重の影響は無視した。荷重に際しての計測項目は、荷重荷重、試験体の平均ひずみ、ひび割れ幅、軸方向鋼材ひずみとした。試験体の平均ひずみは、図-1 に示す位置の水平変位を高感度変位計によって計測し、得られた試験体の伸びを、試験区間長で除することで算出した。ひび割れ幅の計測は、試験体長手方向に π ゲージを千鳥状に貼付けることによって各区間内の標点間距離の計測を行った。なお、全ケースと

も荷重が 200kN に達するまで荷重を行った。

2.2 RC はりの曲げ試験概要

表-2 に RC はりの曲げ試験概要を示す。ここで用いる試験体は、 100×200 (mm)の矩形断面を有する。ここでは試験体が曲げ破壊するように、軸方向鉄筋として D16 (SD345)を 3 本使用した。主鉄筋の下縁からのかぶりは、両引き試験のかぶりと同様になるように、39mm とした。有効高さ d は 154.5mm、せん断スパン a は 550mm、せん断スパン有効高さ比 a/d は 3.56 とした。試験体中央部の軸方向鋼材には、ひずみゲージを貼付け打設時から継続して、鋼材ひずみの計測を行った。

図-2 に RC はりの曲げ試験概要、写真-2 に荷重状況を示す。RC はりの曲げ試験は、荷重スパン 200mm、せん断スパン 550mm の 2 点荷重試験である。荷重方法は、200kN の万能試験機を用いて静的単調に荷重を行った。荷重時の計測項目は、荷重荷重、たわみ、軸方向鋼材ひずみ、荷重スパン内のひび割れ開口変位とした。荷重荷重は、試験機のロードセルにより計測した。変位は高感度変位計により、はり中央部と支点の鉛直変位を計測し、たわみを算出した。試験体底面に π ゲージを貼付けて区間内の標点間距離

表-1 両引き試験概要

試験体名称	繊維種類	繊維混入量 (vol.%)	試験区間 (mm)	断面形状 高さ×幅(mm)	かぶり (mm)	使用鋼材	軸方向 鋼材比(%)
FM 2%	鋼繊維	2.0	1800	100×100	39	異型PC鋼棒 呼び名22 C種1号	3.79
FM 3%	鋼繊維	3.0					
FO 3%	PVA	3.0					
NF	繊維なし	0.0					

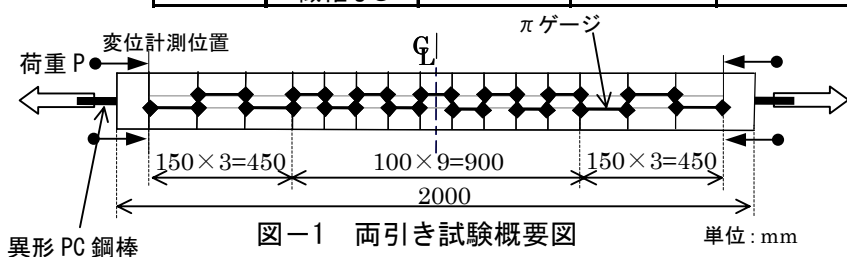


図-1 両引き試験概要図

単位: mm

写真-1 両引き試験状況



表-2 RC はりの曲げ試験概要

試験体名称	繊維種類	繊維混入量 (vol.%)	試験体長さ(mm)	せん断スパン(mm)	断面形状 高さ×幅(mm)	有効高さ (mm)	使用鋼材	軸方向 鉄筋比(%)
RC-FM 2%	鋼繊維	2.0	1,500	550	200×150	154.5	D16 (SD345)	1.77
RC-FO 3%	PVA	3.0						
RC-NF	繊維なし	0.0						

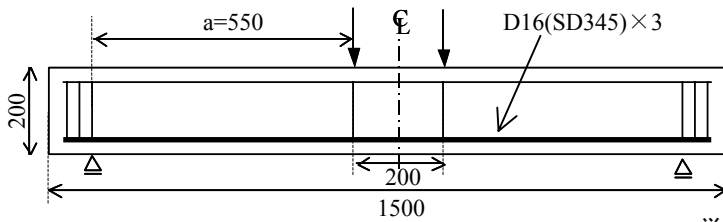


図-2 RCの曲げ試験概要図

単位 mm



写真-2 RCはりの曲げ試験状況

表-3 短繊維の諸特性

	単位	PVA	鋼繊維
直径	(mm)	0.3	0.2
標準長	(mm)	15	15
アスペクト比	(mm)	50	75
密度	(g/cm ³)	1.3	7.8
引張強度	(MPa)	900	2700

表-5 配合とフレッシュ性状

繊維混入量	配合				フレッシュ試験結果		
	単位量 (kg/m ³)				フロー (mm)	200mm到達 時間(sec.)	練上り 温度(°C)
	水	標準配合粉体	繊維量	減水剤			
FM 2%	157	2254	157	23	255	16"61	24.8
FM 3%	155	2225	235.5	25	240	26"85	25.8
FO 3%	155	2225	39	25	250	16"20	24.2
NF	158	2310	0	22	252	14"52	25.2

表-4 使用した鋼材の諸特性

試験名称	種類	材質	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	静弾性係数 (×10 ⁵ MPa)
両引き	呼び名22	C種1号	1198	1294	1.9
RCはり	D15	SD345	365	420	2.0

3. 試験結果

3.1 両引き試験結果

表-6に両引き試験の結果を示す。ここで示すひび割れ本数は、鋼材応力が300MPaにおいて、目視観察により確認したものである。また、打設面の影響を考慮して、試験体の3面に生じているひび割れを1本としている。図-3に実験より得られたUFCの平均応力-平均ひずみ関係を示す。ここで示すUFCの平均応力とは、全荷重から鋼材が負担する荷重を差し引いて、UFCの断面積で除したものである。ここでは、事前に、鋼材のみを引張り、鋼材に生じるひずみより鋼材が負担する荷重を算出した。そのため、この応力-ひずみ関係は本実験条件におけるUFCのテンションスティフニング効果を表すと考えられる。ただし、荷重フレームの容量不足により、200kNまでしか荷重出来ていないので、FM 2%、FM 3%のケースは定常状態まで至っておらず、さらにこれ以上の応力を負担できると考えられる。FM 2%、FM 3%では、平均ひずみの増加とともに、UFCの平均応力は漸増していくことがわかる。よって、今回の実験のひずみ範囲では、NF、FO 3%に比べて、ひび割れに対する抵抗能力が非常に優れていることがわかる。また、引張強度と同様に、NF、FO 3%、FM 2%の順でひび割れ発生荷重が小さくなっていることが分かる。FM 2%とFM 3%を比較すると、同一ひずみ

離の計測を行い、曲げひび割れ開口変位を算出した。載荷に際して、支点部はローラー支点とし、試験体と支圧板の間に、テフロンシートを挿入し、支点部による拘束を取り除いた。

2.3 使用材料

UFCは、セメント、シリカフェーム、珪石等からなる標準配合粉体⁽²⁾と上水道水、減水剤、鋼繊維あるいはPVA繊維により構成されるセメント系材料である。表-3に使用した短繊維の諸特性を示す。表-4に使用した鋼材の力学的特性を示す。

2.4 配合

表-5に配合とフレッシュ試験結果を示す。フレッシュ試験として、フロー試験(JIS R 5201, 0打)、200mm到達時間、練上り温度の計測を行った。練混ぜは容量100リットルの強制パン型ミキサーを用いた。練混ぜに際し、減水剤添加量を調整することで、フロー値を、250±10(mm)の範囲内となるように、フレッシュ性状の管理を行った。打設は、型枠に流し込み成形を行った。養生は一次養生として、20°C48時間の気中養生を行い、その後90°C48時間の蒸気養生を行った。

表-6 両引き試験の実験結果

名称	ひび割れ発生荷重(kN)	最大ひび割れ間隔 (mm)	平均ひび割れ間隔 (mm)	ひび割れ本数(本)*1	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	静弾性係数 $\times 10^4$ (MPa)
FM 2%	80.9	—	—	21	216.5	10.80	5.2
FM 3%	118.4	—	—	18	224.5	11.78	5.6
FO 3%	68.9	133	60	26	175.8	7.56	4.9
NF	50.6	188	73	23	173.6	8.91	4.9

*1 鋼材応力が 300MPa 時のひび割れ本数

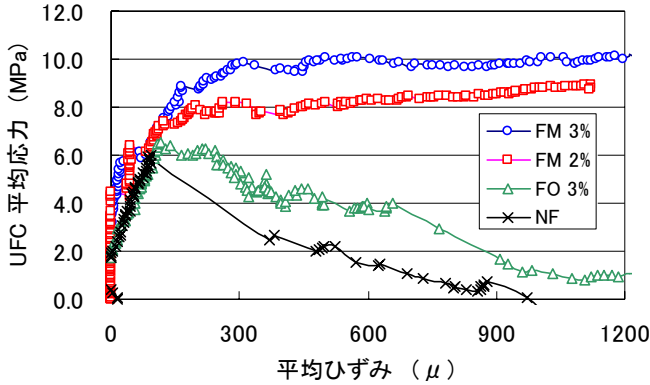


図-3 UFC 平均応力-平均ひずみ関係

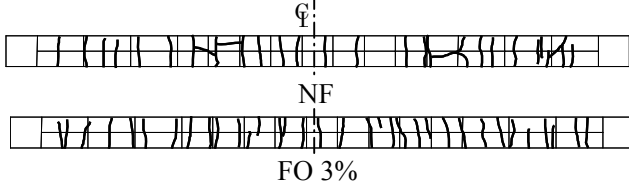


図-4 ひび割れ性状図 (両引き試験)

下で平均応力が 25%程度上昇している。FO3%では、NF と同様の傾向を示し平均ひずみの増大に伴い、漸減する傾向があるが、NF と比べると、最大平均応力以降の挙動が PVA 繊維混入により大きく異なることがわかる。

図-4 に目視観察によるひび割れ性状を示す。ただし、FM 2%、FM 3%は定常状態まで荷重出来ていないので、NF と FO 3%のケースのみ示す。同図より、いずれのケースにおいても、試験区間内ではほぼ等間隔にひび割れが生じている事がわかる。両ケースをひび割れ本数で比較すると NF が 23 本であるのに対し、FO3%では 26 本と増加した。それにもなると平均ひび割れ間隔は、NF が 73 (mm)に対し、FO 3%が 60 (mm)となり、PVA 繊維混入によりひび割れが分散していることがわかる。図-5 に鋼材応力が 300MPa 時における短繊維混入量-ひび割れ幅の関係を示す。ただし、ここでのひび割れ幅は、各πゲージで得られた標点間距離を、ひび割れ本数で平

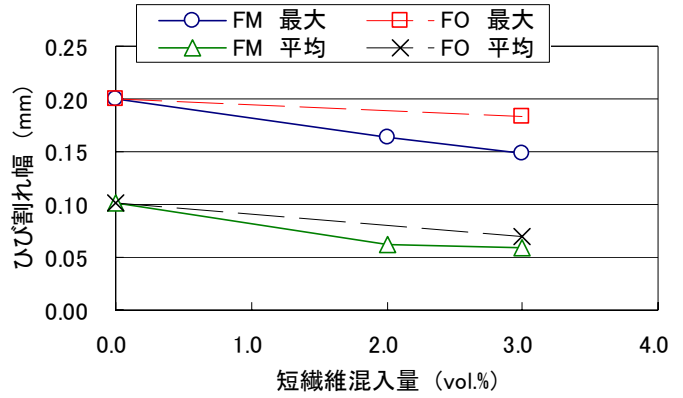


図-5 短繊維混入量-ひび割れ幅の関係

均化したもので、マイクロクラック等の微細なひび割れは対象としていない。平均ひび割れ幅は、全区間のπゲージより得られた変位の総和を、ひび割れ本数で除したものである。同図より、最大ひび割れ幅は、平均ひび割れ幅の 2~3 倍程度となっていることがわかる。また、いずれのケースにおいても、繊維混入量の増加によって、最大ひび割れ幅、平均ひび割れ幅がともに減少し、有機繊維に比べて鋼繊維の方がひび割れ幅の抑制効果が優れている傾向が確認された。

3.2 RC はりの曲げ試験結果

表-7 に RC はりの曲げ試験結果を示す。試験の結果、RC-FM 2%と RC-FO 3%は、軸方向鉄筋が降伏し、徐々に耐荷力を失う曲げ破壊となった。また、最大荷重以降に等曲げ区間に生じた一本のひび割れに破壊が局所化して耐力を失った。RC-NF では、軸方向鉄筋が降伏した後に、急激に耐力を失う斜め引張破壊となった。

図-6 に RC はりの曲げ試験より得られた鋼材応力-曲げひび割れ幅の関係を示す。比較のために、圧縮強度を 200MPa としたときの算定式による結果を併せて示す。算定式としては(1)式を用いた。これは、RC はりの曲げひび割れ幅を算

表-7 RC はりの曲げ試験結果

名称	ひび割れ発生荷重(kN)	最大荷重(kN)	最大荷重時たわみ(mm)	ひび割れ本数(本)	平均ひび割れ間隔(mm)	最大ひび割れ間隔(mm)	圧縮強度(MPa)	引張強度(MPa)	静弾性係数 $\times 10^4$ (MPa)
RC-FM 2%	80.00	169.81	6.12	12	43	80	210.0	10.90	5.2
RC-FO 3%	49.07	125.02	13.86	21	47	90	178.1	10.03	4.8
RC-NF	43.64	59.09	2.08	7	69	130	174.4	8.84	4.9

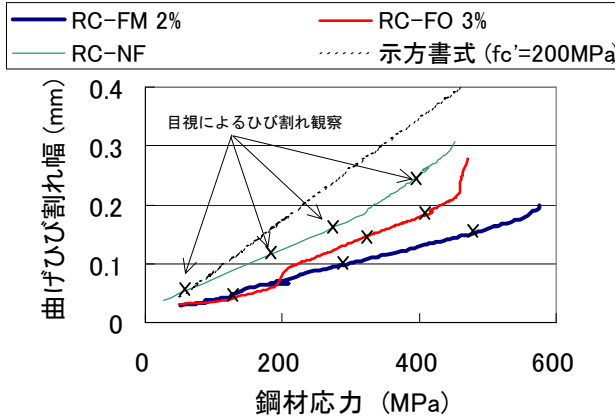


図-6 曲げひび割れ幅-鋼材応力関係(RC はり)

出できる土木学会標準示方書式⁽⁵⁾である。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (1)$$

ここで、 $k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$ 、 $k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$
 k_1 : 1.0, f'_c : 圧縮強度, ϕ : 鋼材径, c_s : かぶり, c_s : 鉄筋間隔, σ_{se} : 鋼材応力度, E_s : 鋼材のヤング係数, ε'_{csd} : 収縮・クリープ等によるひずみ, n : 引張鋼材の段数

また、ここでの曲げひび割れ幅の値は、各 π ゲージより得られた標点間距離を、区間内に生じたひび割れ本数で除したものである。

同図より、RC-NF では、初期の段階からひび割れが開き、鋼材応力の増加にともないひび割れ幅が増加するのに対して、RC-FM 2%、RC-FO3%が優れたひび割れ幅の抑制効果を有することがわかる。また、鋼材応力が 200MPa に達するまでの範囲では、RC-FO 3%と RC-FM 2%は同等のひび割れ幅の抑制効果を有することがわかる。また、(1)式の算定結果と比較すると、全ケースとも算定式はひび割れ幅を過大評価することがわかる。これは UFC が緻密であり、鋼材との優れた付着性状のため、ひび割れ幅が抑制されていると考えられる⁽⁵⁾。さらに推定精度を高めるためには、この要因と繊維補強効果を考慮する必要がある、更なるデータの蓄積が必要で

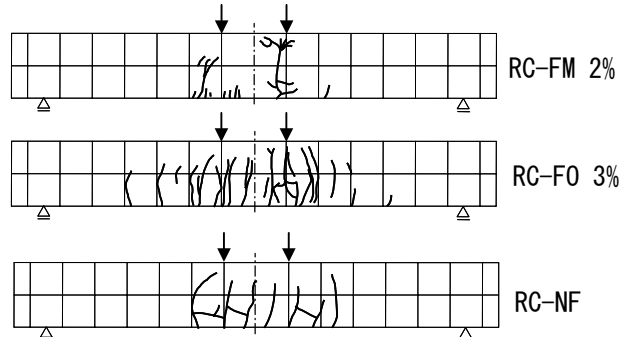


図-7 ひび割れ性状 (RC はり)

ある。図-7に RC はりの目視観察によるひび割れ性状図を示す。ここで、RC-NF のケースは鋼材降伏時のものであり、他のケースは試験終了時のものである。これより、目視で観察できたひび割れ本数は、RC-FO 3%のケースが最も多いことが分かる。しかし、ひび割れ幅の抑制効果が RC-FM 2%では高いので、目視では確認できない非常に微細なひび割れが多数生じていると考えられる。

図-8に荷重-たわみ関係を非線形 FEM 解析結果と併せて示す。実験結果における初期剛性については、全てのケースでほぼ同等であることが分かる。しかし、ひび割れ発生以降の剛性は RC-FM 2%、RC-FO 3%、RC-NF の順に小さくなり、鋼繊維の補強効果が最も高いことがわかる。ここで、本研究内でのテンションスティフニング効果を近似的に考慮して非線形 FEM 解析を行った。対象は、想定通り曲げ破壊した RC-FM 2%と RC-FO 3%である。解析に用いたコードは汎用非線形有限要素プログラム ADINA ver.8.1 である。図-9に UFC の構成則を示す。UFC の構成則として、圧縮側は ADINA 特有のコンクリートモデルを使用した。このモデルは、コンクリートの圧縮軟化現象を表している。また、引張側では両引き試験より得られた UFC の平均応力-平均ひずみ関係を 2 直線近似して組み込んだ。ただし、両引き試験では、FM2%では鋼材応力が

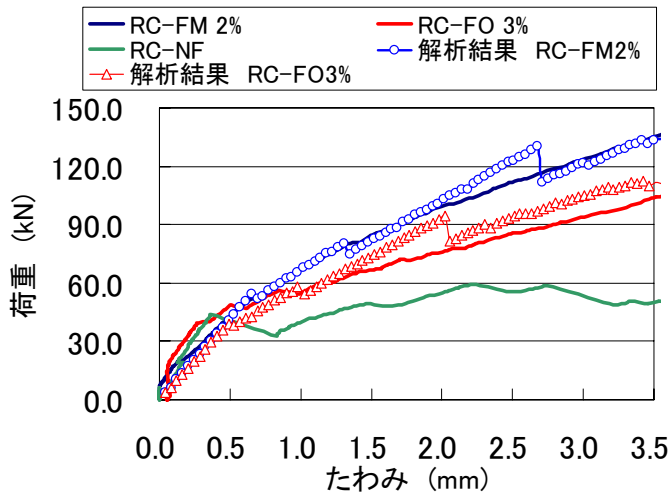


図-8 荷重-たわみ関係 (RC はりの曲げ試験)

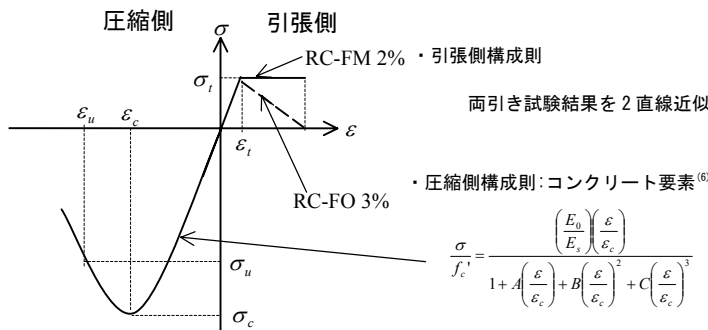


図-9 UFC の構成則

450MPa, FO3%では鋼材応力が 550MPa の範囲までしか載荷できていないため、解析もその時点まで行った。また、両引き試験と RC はりの曲げ試験では、使用している鋼材種類や鋼材配置方法が異なるため、厳密にはテンションステイフニング効果が変化すると考えられるが、今回はその影響を無視して解析を行った。

鋼材要素の構成則は、Von Mises の降伏基準による完全弾塑性体とし、UFC 要素との付着は完全一体とした。ここで、UFC の圧縮強度などの材料特性は実験結果、鋼材の特性値は表-4 の値を用いた。UFC 要素は、2 次元 9 節点アイソパラメトリック要素、鋼材はトラス要素を用いた。ひび割れモデルは、分布ひび割れモデルであり、収束計算は擬似 Newton 法⁽⁶⁾を用いた。

図-8 より、両引き試験より求めた平均応力-平均ひずみ関係を近似的に組み込むことにより、本研究での範囲内において、実験結果と解析結果は概ね一致していることがわかる。

4. 結論

- (1) 両引き試験より、UFC のテンションステイフニング効果を表す平均応力と平均ひずみ関係を把握した。その結果、FM 2%、FM 3% は、NF や FO 3% に比べて、荷重負担分が極めて高いことが確認された。
- (2) 両引き試験より、繊維混入量とひび割れ幅の関係を把握した。その結果 FM2%、FM3%、FO3% 繊維ともに、NF と比較して高いひび割れ幅の抑制効果が確認された。
- (3) RC はりの曲げ試験より、鋼材応力と曲げひび割れ幅の関係を把握した。また、初期ひび割れ発生以降の剛性は、RC-FM 2%、RC-FO 3%、RC-NF の順に小さくなり、短繊維補強効果が確認された。
- (4) 今回求めた近似的なテンションステイフニング効果を組み込んだ非線形 FEM 解析結果は、本研究での範囲内で、実験結果と概ね一致した。

参考文献

- (1) 佐川康貴, 松下博通, 鶴田浩章, 下山善秀: 鋼繊維補強高強度モルタルの力学的性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.199-204, 2001.6
- (2) 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), コンクリートライブラリー113, 2004.9
- (3) 柳博文, 松岡茂, 武田康司, 松尾庄二: 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散効果に対する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.1225-1230, 1998.6
- (4) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘: PVA 繊維で補強したコンクリートのひび割れ分散性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1549-1554, 2004.6
- (5) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], pp.100-102, 2002
- (6) ADINA.R & D ,Inc. : Theory and Modeling Guide, Volume.1, ADINA,1997