

メゾスケール解析手法による鉄筋補強した繊維補強セメント複合材料の引張破壊シミュレーション

小倉 大季

(技術研究所)

Tensile Fracture Simulation of Fiber-Reinforced Cementitious Composites with Rebar by means of Mesoscale Analysis

Hiroki Ogura

本研究では、繊維1本1本を離散的にモデル化したメゾスケール解析手法を用いて、鉄筋で補強した繊維補強セメント複合材料の引張破壊を検証した。ひずみ軟化型とひずみ硬化型の繊維補強セメント複合材料を対象に、繊維の混入率、鉄筋比ならびに繊維の分布状態を変動させた解析を行い、引張破壊挙動を検証した結果、各パラメータの組合せによっては鉄筋降伏後にひび割れが局所化して進展する場合があることを確認した。そして、そのメカニズムとそれを抑制する方策を架橋力に着目することによって明らかにした。ひずみ硬化型の材料においては、繊維分布のばらつきによって力学特性が低下した場合でも、鉄筋との併用によって部材としての変形能を向上できることを解析的検討から提示した。

Tensile fracture of fiber-reinforced cementitious composites (FRCC) with rebar was investigated via a mesoscale analysis using discretized short fibers. Herein, the effects of fiber volume fraction, steel reinforcement ratio, and fiber distribution on tensile fracture behavior were investigated. In some cases, localized crack was observed in the post-yield range of rebar. The localization mechanism was numerically explained and then inhibited by focusing on the bridging forces of the fibers and rebar. The effectiveness of steel reinforcement in enhancing the strain capacity of strain-hardening cement-based composites (SHCC) was confirmed.

1. はじめに

セメントコンクリートの脆弱な引張特性を材料的に改善する手法の一つに短繊維補強がある。短繊維をセメント硬化体に混合することにより、硬化体にひび割れが発生しても繊維の架橋によって外力に抵抗でき、曲げ強度や靱性を飛躍的に向上できる。この繊維補強セメント複合材料 (Fiber-Reinforced Cementitious Composites、以下 FRCC) は、コンクリート構造物に新たな可能性を与える材料として世界的にその適用の検討が進められている。わが国においても、FRCC に適用される短繊維の種類が多様化と相まって、近年、様々な性能を有する新しい FRCC が開発され、実構造への適用が進められている。

FRCC は、ひび割れ後も繊維の架橋によって引張力を伝達できるため、FRCC 単独で適用される事例もあるが、多くの場合は鉄筋や PC 鋼材などの補強材と併用して用いられる。鋼繊維補強コンクリートに代表されるひずみ軟化型の FRCC では、従来の RC 構造と同じように、鉄筋補強して適用されることが多い。初期ひび割れ発生後に擬似ひ

ずみ硬化特性を呈する材料 (本研究ではひずみ硬化型の FRCC と呼ぶ) でも、その設計・施工指針 (案)¹⁾では鉄筋補強せずに用いる部材を適用範囲外としており、基本的には鉄筋と併用して実構造に適用されている。また、超高強度繊維補強コンクリート²⁾の場合は、PC 鋼材と併用して適用されることが多い。

したがって、FRCC を実構造物で合理的に活用していくためには、FRCC 単体の力学性能評価だけでなく、鋼材で補強した場合の力学性能を評価することが求められる。特に、引張力を分担できる FRCC の持ち味を活かして部材の鉄筋量を減じた設計にするような場合は、耐力の算定だけでなく、そのリスクを把握するために、変形性能やひび割れ進展挙動、さらには破壊モードを含めた終局挙動までを明らかにすることが求められる。

鉄筋補強した FRCC のひび割れ進展挙動を報告した既往研究は、いくつかの実験研究がある。一軸引張応力下の挙動に焦点を絞ると、ひずみ軟化型の FRCC については、Deluce *et al.*^{3),4)}による研究があり、鉄筋降伏前に分散して発生したひび割れが鉄筋降伏後に1本に局所化し (図-1)、荷重

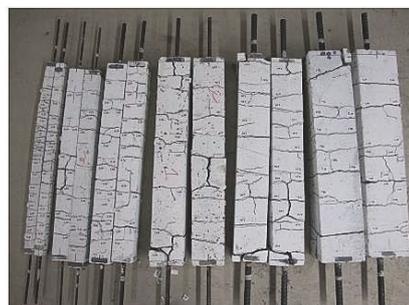
が低下する場合があることを報告している。Noghabai⁵⁾は、6種類の繊維を用いて実験を行い、鉄筋降伏後にひび割れが分散して進展する場合と局所化する場合があることを報告している。ひずみ硬化型のFRCCについては、Kunieda *et al.*⁶⁾や坂井ら⁷⁾による研究があり、いずれの場合も鉄筋と併用することでひび割れ分散性が向上することを報告している。

ひび割れが局所化する現象については、部材のじん性や修復性の低下につながる可能性があるため、設計時に定量評価できることが望ましいが、この現象を含めた前述のいくつかの引張応力下の現象は統一的に説明されるには至っていないのが現状といえる。これらの現象は、ひずみ軟化型と硬化型の違いだけではなく、鉄筋比、繊維の種類および混入率などが異なった様々な材料や条件から得られたものであり、統一的な整理が難しい。また、FRCCの場合はひび割れ部でも繊維が引張力を負担するため、実験では繊維と鉄筋それぞれの補強効果を分離して評価することが難しい点も、RC部材と比べて現象の理解を困難にしている一因といえる。

これに対して、各種パラメータを容易に変動できる数値解析手法を用いて破壊挙動を考察すれば、FRCCの破壊現象を統一的に理解できる可能性があると考えられる。筆者らが開発した繊維1本1本をモデル化した解析手法は、FRCCのひび割れ進展や分散を表現できることが確認されており^{8),9)}、実験では計測が難しい鉄筋と繊維による補強効果を分離して評価することも可能である。

そこで本論文では、この解析手法を用いて鉄筋補強したFRCCの一軸引張破壊挙動について検証を行った。まず、解析手法を用いることにより、鉄筋降伏後にひび割れが局所化する現象を表現できることを示す。そして、そのメカニズムと局所化を抑制する方策を架橋力に着目して考察する。次に、繊維の混入率と鉄筋比を変動させた種々の数値実験を行い、各パラメータの組合せによってはひび割れが局所化する場合と局所化しない場合があることを示す。さらに、繊維分布に伴う材料不均一性が鉄筋補強したFRCCに及ぼす影響を議論する。解析対象としては、ひずみ軟化型とひずみ硬化型の材料を取りあげる。既往研究では両材料を別々に検討している場合が多いが、本研究では統一的に現象を理解するために、両材料について連続した検討を試みた。なお、本論文は文献¹⁰⁾に

すでに掲載されたものを再構成、加筆修正したものである。



(a) 鉄筋補強したコンクリート



(b) 鉄筋補強したFRCC

図-1 既往研究³⁾で報告された引張試験後のひび割れ性状

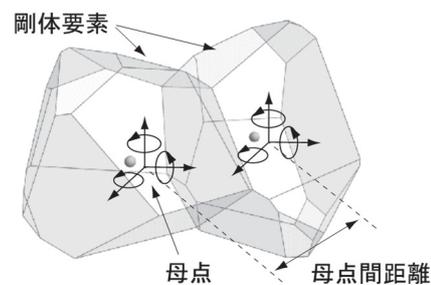


図-2 RBSMにおける剛体要素と自由度

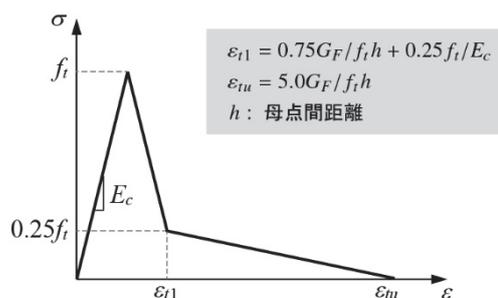


図-3 セメントマトリックスの構成則

2. 解析手法

2.1 Rigid-Body-Spring Model (RBSM)

本研究では、セメントマトリクス（以下、マトリクス）のひび割れの発生と進展を表現するために、解析手法として3次元 Rigid-Body-Spring Model (RBSM) を用いた。RBSM は、塑性変形や破壊の本質はすべりにあるという基本概念に基づき、Kawai¹¹⁾により開発された数値解析モデルである。RBSMの要素剛性マトリクスを構成する1組の要素の例を図-2に示す。この要素を剛体と仮定し、それぞれの要素の重心（以下、母点）に6自由度を設定する。各要素の境界面上には、境界面と垂直、平行ならびに回転方向に3種類のばね（垂直ばね1個、平行ばね2個、回転ばね3個の計6個）を配置する。

垂直ばねの引張領域の構成モデルには、図-3に示すように、引張強度 f_t までを線形挙動として、その後は軟化曲線に破壊エネルギー G_F を考慮した1/4モデル¹²⁾を用いた。ひび割れ後の徐荷および再載荷の経路については、原点指向型とした。平行ばねには、RBSMの構成モデルとしてよく用いられているモール・クーロン型の破壊基準を導入するとともに、ひび割れ面においてはひび割れ開口に伴うせん断剛性の低下モデルを導入した¹³⁾。回転ばねの力学特性は既往文献¹⁴⁾を参考に設定した。

2.2 短繊維による補強のモデル化

2.2.1 モデル化の概要

短繊維による補強効果の表現には、繊維1本1本をモデル化する手法を用いた。本手法は、Bolander & Yip¹⁵⁾が提案した手法に、繊維の引抜き挙動を定量的に表現できるモデルなどを追加し、短繊維、マトリクスおよび両者の界面を考慮できる3次元解析手法に発展させたものである^{16),17)}。これまでの研究によりFRCCの破壊解析への適用性が示されるとともに、以下の特徴を有するため本研究に適した手法といえる。

- ・ 繊維1本1本をモデル化するため、繊維分布に偏りを付与したモデルを容易に作成できる。すなわち、繊維分布のばらつきに起因する材料不均一性を考慮したモデル化が可能であり、その影響を検証できる。
- ・ モデル化する繊維本数の増減によって繊維混入率を容易に変更可能であり、異なる力学特性を示す材料モデルを作成できる。よって、ひずみ軟化型やひずみ硬化型など、様々な材料を連続的に検証できる。

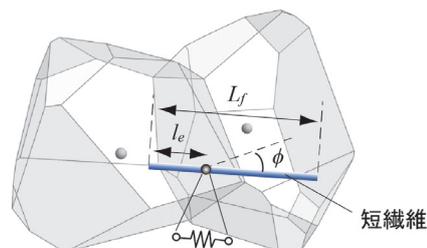


図-4 短繊維の配置と長さ0のばね

- ・ 離散型の解析手法であるRBSMをベースに開発した手法であるため、ひび割れ幅を直接的に求められ、ひび割れ幅とひび割れを跨ぐ繊維による伝達力との関係に着目できる。

本手法では、解析対象となる領域内に、所定の長さ、直径の繊維を所定の混入率になるように1本1本モデル化する。そして、すべての繊維に対して剛体要素の境界面（ひび割れ面に相当）からの埋込み長 l_e 、境界面との角度 ϕ （以下、配向角度）を算出する。繊維による補強効果は、図-4に示すように要素境界面を跨ぐ繊維位置に長さ0のばねを配置し、このばねに繊維による伝達力を作用させることで表現する⁸⁾。

2.2.2 短繊維による伝達力の算定方法

マトリクスに生じたひび割れを跨ぐ繊維の伝達力は、解析の各ステップで逐次計算した繊維の拔出し量と、各繊維の埋込み長 l_e および付着特性を用いて算定する（詳細は既報⁹⁾参照）。このとき、繊維の拔出し量は、マトリクスのひび割れ幅を基に算出する。この算定方法が可能となるのは、RBSMが剛体要素間の相対変位からひび割れ幅を直接的に算出できる手法であるためである。また、繊維はひび割れ面に対してランダムに配向するため、この繊維の配向角度 ϕ を考慮する必要がある。配向角度を有する繊維が引抜かれる場合、引抜き抵抗力が向上する効果が確認されているため、この配向角度に伴う伝達力の向上効果を考慮した⁹⁾。

なお、マトリクスにひび割れが発生する以前では、一般的には繊維とマトリクスの界面に弾性せん断応力が作用する。このマトリクス中の短繊維の応力伝達については、Cox¹⁸⁾が解析的な検討を行っている。そこで、ひび割れ発生前については、Coxが提案した式を用いて繊維による伝達力を算出した。Coxの提案式に必要なパラメータ B （繊維の材料定数などによって決まる）については、本研究では1.0を用いた。

2.3 鉄筋による補強のモデル化

2.3.1 離散鉄筋モデル

鉄筋のモデル化には、Bolander & Saito¹⁹⁾によって提案された離散鉄筋モデルを用いた。本モデルでは、図-5に示すように鉄筋を一連のはり要素でモデル化する。マトリクス要素分割によらず、鉄筋を部材中の自由な位置に配置できる点に特徴がある。はり要素に導入した鉄筋の応力-ひずみ関係には、図-6に示した島ら²⁰⁾が提案したモデルを用いた。本研究では、硬化開始ひずみ ϵ_{sh} を 1.5%、引張強度 f_u を $1.2f_y$ と仮定した。

はり要素は、各要素節点に長さ 0 のリンク要素を配置して、マトリクス要素と結合した¹³⁾。リンク要素は、はり要素とマトリクス要素の相対変位(はり軸方向の1成分と軸直交方向の2成分)に抵抗するばねで構成される。軸直交方向のばねには、はり要素と剛体要素が軸直交方向にずれないように十分大きな剛性を設定した。はり軸方向のばねには、図-7に示した付着応力-すべり関係を適用した。このモデルは、澤部ら²¹⁾がRC部材の解析への適用性を示したものであり、付着強度 τ_{max} に至るまでは以下の式²²⁾によって付着応力を算出し、付着強度に至った後は軟化域を有するモデルである。

$$\tau = 0.4 \cdot 0.9 f_c^{2/3} [1 - \exp\{-40(s/D)^{0.5}\}] \quad (1)$$

ここで、 f_c はセメントマトリクスの圧縮強度(MPa)、 s はすべり量(mm)、 D は鉄筋の直径(mm)である。

2.3.2 RC部材の一軸引張解析による基礎検討

RBSM および鉄筋による補強のモデル化の妥当性を確認するために、玉井ら²³⁾による一軸引張試験を対象とした解析を行った。玉井らが用いた試験体は、断面 $200 \times 150 \text{mm}$ のコンクリート角柱の中心に鉄筋1本を配置したものである。

図-8に、解析モデルを示す。ここでは、マトリクス要素分割として、断面を1要素で分割して要素間隔を20mmに設定したModel (a)、およびヴォロノイ分割¹⁹⁾を用いたModel (b)の2種類を用いた。鉄筋は、はり要素を用いてモデル化し、断面中央に配置した。荷重は、両端部のはり要素節点を変位制御することで行った。

表-1に、Model (a)を用いる場合に使用した材料パラメータを示す。Model (b)の場合は、平均要素サイズが20mmのヴォロノイ分割を用いており、材料特性値をそのまま要素の構成モデルとして用いることができないため、山本²⁴⁾の研究を参考にして、表

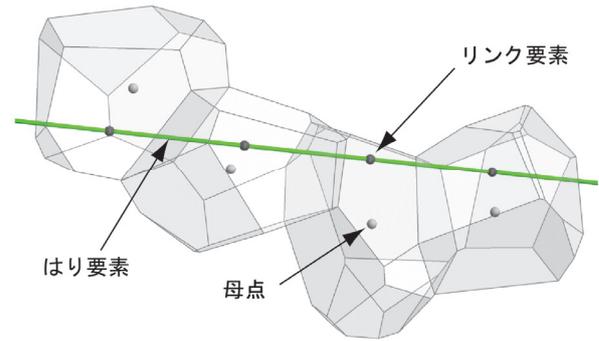


図-5 はり要素およびリンク要素

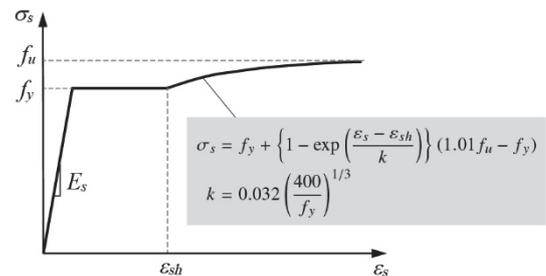


図-6 鉄筋の応力-ひずみ関係

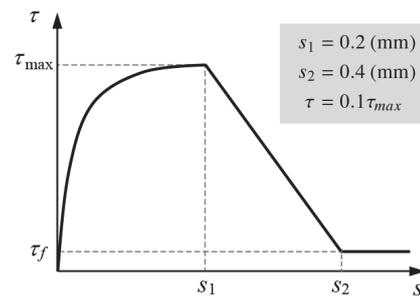


図-7 鉄筋とマトリクス間の付着応力-すべり関係

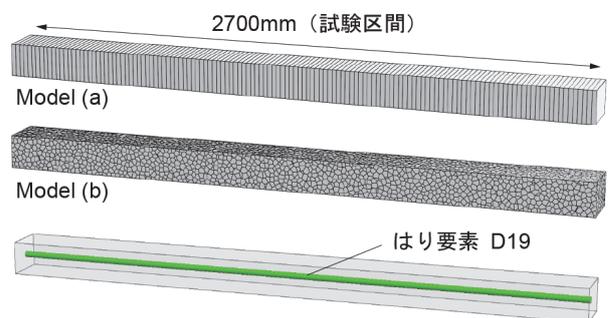


図-8 セメントマトリクスと鉄筋のモデル化

に示した f_t を 0.8 倍、 G_F を 0.5 倍とした値を使用した。

図-9に、解析と実験から得られた荷重-平均ひずみ関係を示す。平均ひずみ ϵ_{ave} は、試験区間の伸

表-1 Model (a)の解析に使用したパラメータ

マトリクス	引張強度 f_t	2.9 MPa
	破壊エネルギー G_F	100 N/m
	圧縮強度 f'_c	45.0 MPa
	弾性係数 E_c	32.0 GPa
鉄筋	降伏強度 f_y	610 MPa
	引張強度 f_u	732 MPa
	弾性係数 E_s	190 GPa

び量を区間長で除した値である（以降に示す平均ひずみも同一の方法で算出）。初期剛性、ひび割れ発生後のテンションスティフニング効果および鉄筋降伏後の挙動は、実験値との対応が良いことがわかる。また、要素分割の差が結果に与える影響は小さい。

図-10 は平均ひずみ 1%時の部材長さ方向の鉄筋応力とひずみの分布、図-11 はひび割れ性状である。併記した実験値²³⁾と比較すると、ひび割れ発生位置（分布の凸部）で鉄筋がひずみ硬化域に達している挙動やひび割れの発生間隔はおおむね一致している。また、これらの結果も要素分割の差が結果に与える影響は小さい。以上の結果から、Model (a)と(b)のどちらを用いても一軸引張破壊挙動を妥当に表現できており、本研究で着目したいひび割れ進展挙動を評価可能であることがわかる。本研究では様々なパラメータを変動させた多数ケースの解析を実行するため、計算時間短縮の観点から以降の解析ではModel (a)を用いることにした。

3. ひずみ軟化型 FRCC の引張破壊解析

本章では、前章で示した解析手法を用いて鉄筋補強したひずみ軟化型 FRCC の一軸引張解析を実行し、鉄筋の降伏以降にひび割れが局所化して進展する挙動について検討する。

3.1 解析概要

3.1.1 セメントマトリクスと鉄筋のモデル化

図-12 に、使用した解析モデルを示す。前章の解析に用いた試験体を基準として、試験体の両端部に D19 の鉄筋 4 本を配置した部材を解析対象とした。したがって、試験体全長は 2700mm であるが、両端部の補強区間を除いた 2100mm が本解析対象の試験区間となる。マトリクスの要素分割は、前章の Model (a)と同様に母点間距離を 20mm として分割し、載荷は試験体の両端部に位置するはり要素の節点を変位制御して行った。

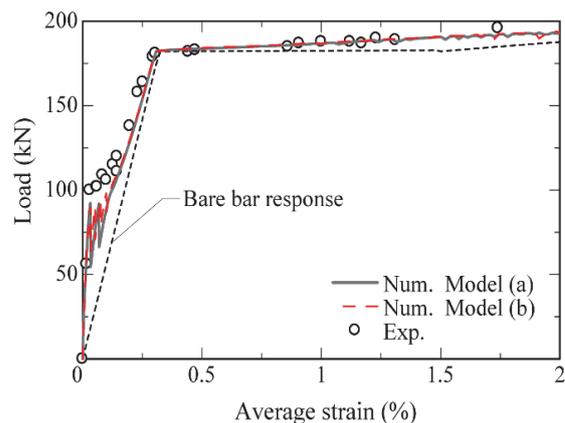


図-9 引張荷重-平均ひずみ関係

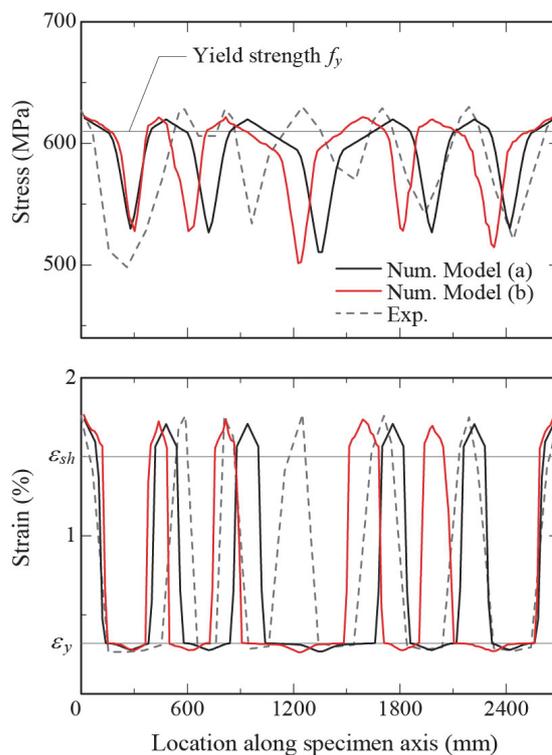


図-10 鉄筋の応力とひずみの分布

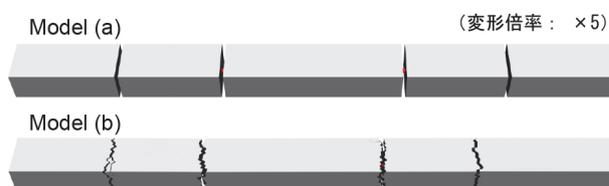


図-11 ひび割れ性状 ($\epsilon_{ave} = 1.0\%$ 時)

解析に使用したマトリクスと鉄筋のパラメータは、前章と同様に表-1 を使用した。なお、これまでの研究⁸⁾から、FRCC を対象とする場合は、マトリクスの引張強度に分布を考慮することで実現象により近い破壊挙動を表現できることがわかっている。

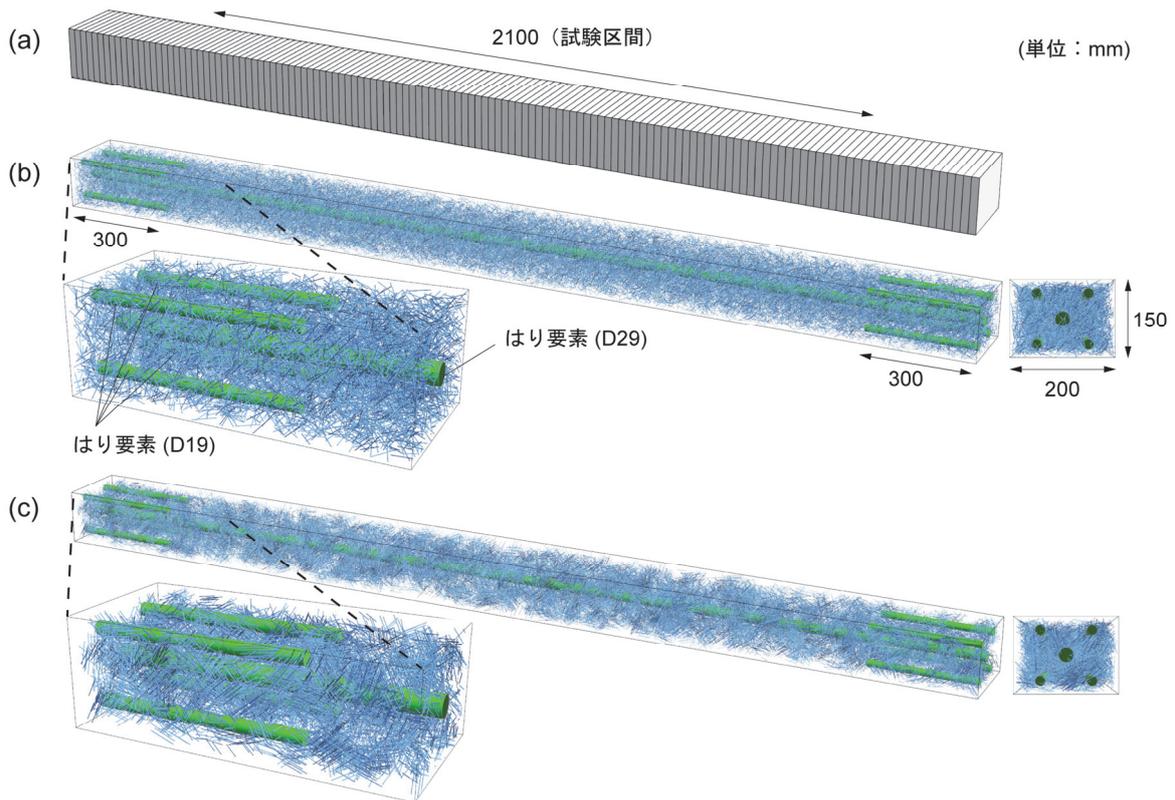


図-12 引張試験体のモデル化 ($V_f=0.5\%$) : (a)マトリクスの要素分割 ; (b)繊維分布の基準モデル (均一分布モデル) ; (c)繊維分布にばらつきを付与したモデル

そこで、マトリクス (RBSM の垂直ばね) の引張強度の分布が平均値 2.9MPa、標準偏差 0.3MPa の正規分布に従うと仮定して、正規乱数を用いて各ばねの強度を設定した。

3.1.2 短繊維のモデル化

繊維は所定の体積混入率 V_f (本節では 0.5%) となるように、試験体中にランダムに分散させてモデル化した。具体的には、繊維の重心位置 (x、y、z 座標値) および傾斜角をそれぞれ擬似乱数によって決定し、試験体中に 1 本ずつ繊維を生成した。このとき、繊維の一部が試験体領域の外側に出た場合は、繊維全長が試験体領域に収まるまで擬似乱数を用いて傾斜角の再設定を繰り返した。

図-12(b)は $V_f=0.5\%$ のときの繊維の分布状態であり、モデル化した繊維数は 47746 本となる。この均一分布モデルが本研究で用いた基準モデルである。一方、図-12(c)は同一の繊維混入率であるが、施工時に繊維分布にばらつきが生じた場合を想定して、繊維の生成条件に偏りを付与したモデルである。

図-13 に、両モデルに対して要素間の境界面を跨ぐ繊維の本数 (以下、架橋本数) を示す。試験区間に存在する要素間の境界面数は 106 であり、すべて

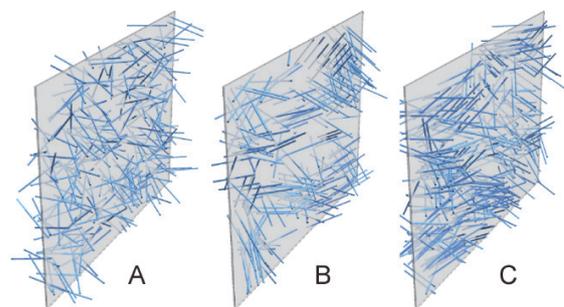
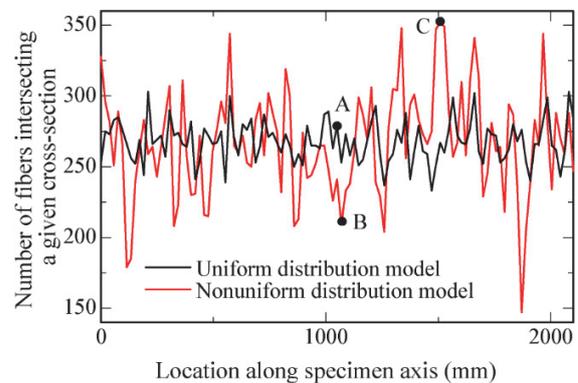


図-13 要素間の境界面を跨ぐ繊維本数と断面 A、B、C の架橋繊維

の面に対して架橋本数を算定した結果である。ばらつき付与モデルは架橋本数のばらつきが大きく、架

表-2 解析に用いた短繊維のパラメータ

短繊維	繊維長 L_f	30 mm
	繊維径 d_f	0.6 mm
	弾性係数 E_f	200 GPa
	破断強度 σ_{fu}	1078 MPa
繊維-マトリクス 界面	摩擦付着強度 τ_i	9.5 MPa
	化学付着強度 τ_s	10.0 MPa
	付着剛性 G	700 MPa/mm

橋本数が最も多い面が 352 本、最も少ない面が 147 本となるモデルであることがわかる。また、基準モデルにおいても架橋本数が一様ではないことがわかる。これは繊維 1 本 1 本をモデル化しているために生じたばらつきであり、基準モデルのように擬似乱数を用いてランダムに分布させても完全には均一にはならない。それぞれのモデルに対して架橋本数の平均値および変動係数を算出したところ、基準モデルでは 268.1 と 0.056、ばらつき付与モデルでは 267.5 と 0.140 になった。本モデル化は、材料の不均一性を大なり小なり内包するが、このようなばらつきは実現象でも確認されており²⁵⁾、このばらつきに着目する場合には都合が良い。繊維補強におけるばらつきの存在は、鉄筋補強との違いの一つといえ、これを考慮することは FRCC の破壊挙動を理解するための重要な手段であると考えられる。なお、マトリクスがコンクリートの場合は、粗骨材の存在により繊維分布のばらつきがさらに大きくなる可能性があるが、現段階ではこれを議論するための定量的なデータが不足しているため、本解析ではこの影響を考慮しなかった。

表-2 に、解析に使用した短繊維の材料特性を示す。このパラメータは、直径 0.6mm の鋼繊維を参考に設定している。表中の化学付着強度は付着すべり関係の線形性が失われる時点の強度、摩擦付着強度は繊維の拔出し過程における付着強度である（詳細は既報参照¹⁶⁾）。本パラメータを使用した一軸引張解析から得られた引張応力-ひび割れ幅関係を図-14 に示す。この結果は、繊維混入率を 1.0% とし、繊維をランダムに分布させてモデル化した解析から得られたものである。Uchida & Ozawa²⁶⁾ によって得られた実験結果を併記したが、この挙動をおおむね表現できていることがわかる。

3.2 解析結果

3.2.1 巨視的な応答挙動

図-15 に、 $V_f = 0.5\%$ および $V_f = 0$ のケースの一軸引張解析から得られた荷重-平均ひずみ関係を示

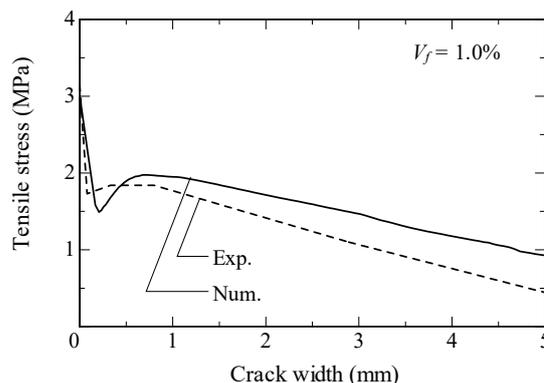


図-14 既往実験²⁶⁾と解析から得られた FRCC の引張応力-ひび割れ幅関係

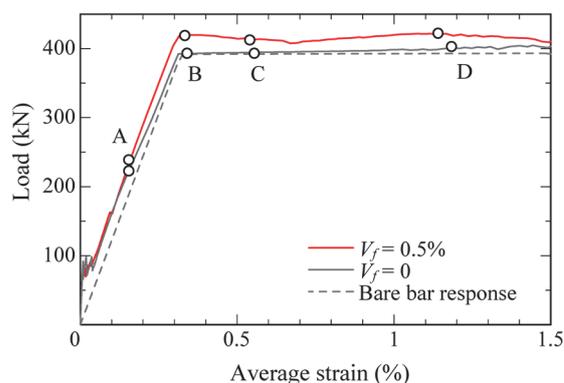


図-15 引張荷重-平均ひずみ関係

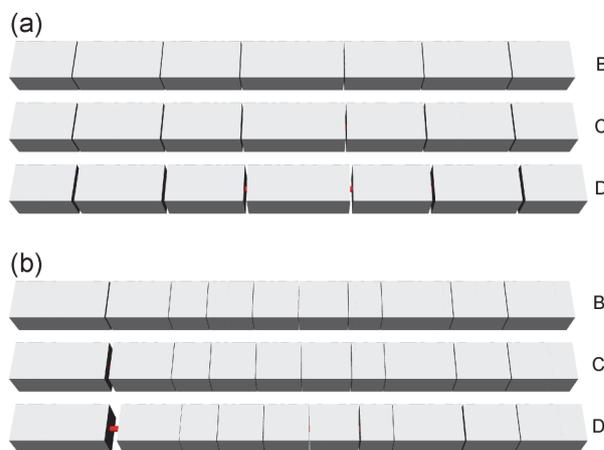


図-16 ひび割れ性状：(a) $V_f = 0$ ；(b) $V_f = 0.5\%$

す。 $V_f = 0$ の場合、ひび割れ後に部材の剛性が低下し、徐々に鉄筋単体の挙動に漸近するが、 $V_f = 0.5\%$ の場合、ひび割れ後も鉄筋単体の挙動に漸近せず、降伏荷重の増加が確認できる。

図-16 に、解析より得られたひび割れ性状を示す。それぞれ図-15 の○印 (B~D) の時点の結果を 5 倍の変形倍率で描画した図である（以降に示す変形図も同一の変形倍率を使用）。鉄筋降伏時 (B 点)

におけるひび割れ本数は、 $V_f=0$ の6本に対して $V_f=0.5\%$ では9本となり、繊維の混入によりひび割れ分散性が向上していることがわかる。 $V_f=0.5\%$ のケースの鉄筋降伏後に着目すると、荷重-平均ひずみ曲線においては降伏直後のB点からC点に向けて荷重が徐々に低下していく挙動が認められる。ひび割れ進展挙動においては、降伏前に発生したひび割れがほぼ均等に開口していく $V_f=0$ のケースと比べて、1か所のひび割れのみが開口していく挙動が確認できる。このように降伏後に荷重が低下する挙動やひ

び割れが局所化する挙動は、既往の研究²⁷⁾で報告されている破壊挙動と一致する。

図-17(a)に、鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を示す。平均応力は試験区間に位置するはり要素の応力を平均した値である。鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線において、1) 降伏点が鉄筋単体の降伏点よりも低くなること、2) 降伏後ただちにひずみ硬化域のようにひずみの増加に応力の増加が伴うことは、従来から知られている現象²³⁾であり、解析で表現できていることがわかる。 $V_f=0.5\%$ の場合も同様の傾向が認められた。ここに示した鉄筋の平均応力に鉄筋の断面積を乗じることによって、引張荷重のうち鉄筋が負担している部分を求めることができる。図-15から鉄筋負担分を差し引き、部材の断面積で除したものが図-17(b)に示すFRCCの平均応力である。 $V_f=0.5\%$ の場合、鉄筋とFRCC間の付着作用によるテンションスティフニング効果に加え、ひび割れを跨ぐ繊維が引張力を伝達する効果が働き、平均応力が $V_f=0$ よりも向上している。この結果も既往研究²⁸⁾の実験結果と符合する。

以上の結果から、既往研究で報告されている引張破壊挙動を本解析手法で表現できることが確認される。

3.2.2 鉄筋とFRCCの応力分布

図-18は、鉄筋のひずみ分布とひび割れを架橋する繊維を描画した図である。ここでは、図-15のC点の時点を描画した。繊維は、青色の線が引張力を負担している繊維、緑色の線が引抜かれて(繊維の引抜き量=埋込み長)引張力を負担していない繊維に相当する。 $V_f=0$ の場合、鉄筋ひずみはひび割れ面6か所で同程度であり、硬化開始ひずみ ϵ_{sh} に至っ

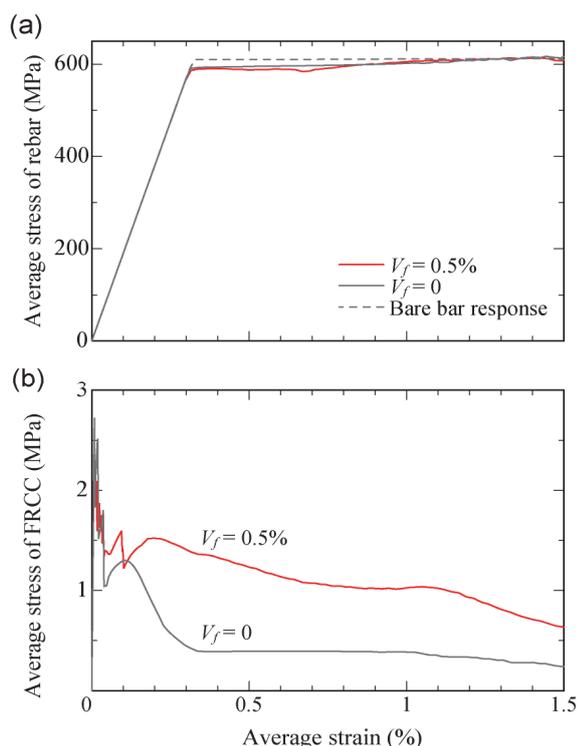


図-17 鉄筋(a)とFRCC(b)の平均応力-平均ひずみ関係

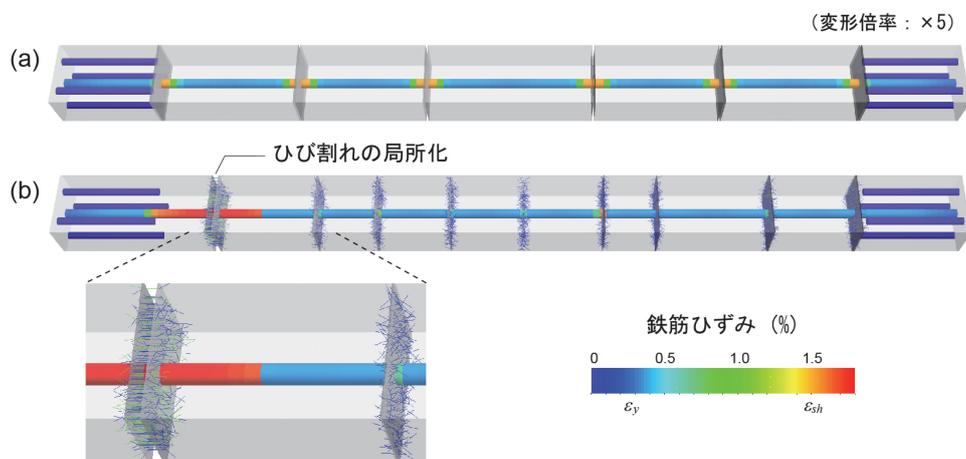


図-18 平均ひずみ 0.57%時の鉄筋のひずみ分布とひび割れを架橋する繊維 : (a) $V_f=0$; (b) $V_f=0.5\%$

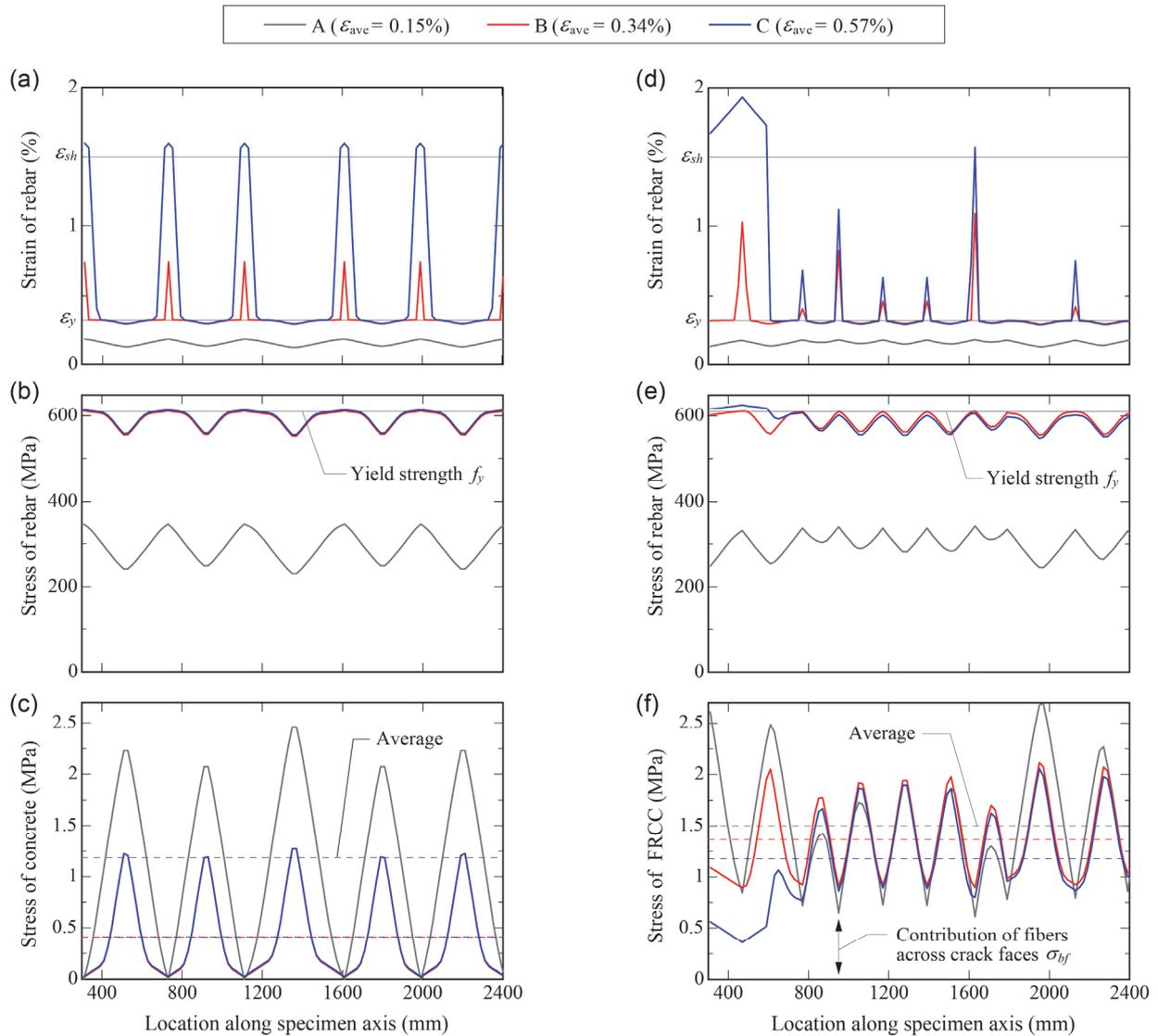


図-19 鉄筋のひずみ、応力および FRCC 応力の鉄筋軸に沿った分布 : (a-c) $V_f=0$; (b-f) $V_f=0.5\%$

ている。また、各ひび割れ面の開口幅は同程度である。一方、 $V_f=0.5\%$ の場合、ひび割れが局所化した面では鉄筋ひずみが1.8%に達しているが、それ以外の面では ϵ_{sh} 以下であり、鉄筋ひずみに差異が認められる。また、ひび割れが局所化した面では架橋繊維の半分程度が引抜けていることがわかる。

図-19は、鉄筋のひずみ、応力およびFRCC応力の鉄筋軸に沿った分布である。ここでは、図-15のA~C点の時点の結果を示した。図-19(a)-(b)および(d)-(e)における分布の凸部はひび割れ発生位置に相当する。 $V_f=0$ では凸部の鉄筋ひずみがおおむね均等に増加しているが、 $V_f=0.5\%$ では差異が生じている。 $V_f=0.5\%$ の場合、C点の時点でひび割れ面の1か所の鉄筋ひずみが急増している。

図-19(c)、(f)に示したコンクリート応力およびFRCC応力に着目すると、 $V_f=0.5\%$ の場合の分布は、

$V_f=0$ の場合とは異なり、次のような特徴をもっている。

- 1) 凹部（ひび割れ位置に相当）においても応力は0にならない。そして、平均ひずみの増加に伴い、この凹部の応力は増減する。
 - 2) $\epsilon_{ave}=0.57\%$ (C点) のとき、凹部の1か所で応力の低下が顕著に生じ、そのほかの領域との応力の差異が大きくなる。
- 1) については、以下のように説明することができる。ひび割れ位置において、 $V_f=0$ の場合は作用する全引張力に対して鉄筋のみが抵抗するが、 $V_f=0.5\%$ の場合はひび割れを跨ぐ繊維も応力を伝達し、鉄筋と繊維が分担して引張力を負担する。凹部の応力は、この繊維による負担分である。繊維による負担分はひび割れの開口に伴い変動するため、平均ひずみが大きくなると凹部の応力は増加または低下す

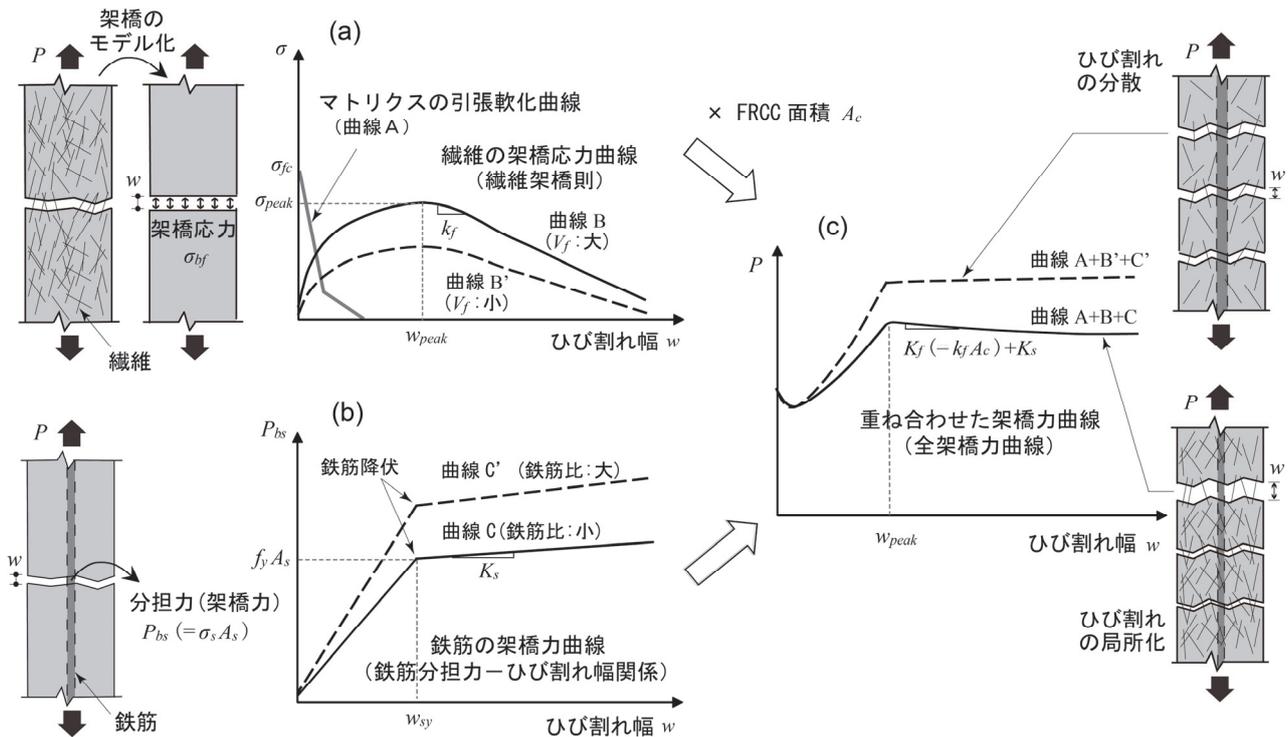


図-20 繊維架橋応力曲線(a)と鉄筋架橋力曲線(b)およびそれらを重ね合わせた曲線(c)の概念図

ることになる。荷重初期の段階 (A 点) から、各ひび割れ位置 (凹部) の応力に差異が認められる理由は、前節で示したようにひび割れ面を跨ぐ繊維の本数に差異があること、つまり材料の不均一性に起因する。

また、2) については以下のように生じたと説明できる。

- ・ あるひび割れ面で繊維による伝達力が低下し始めると、それを補うために鉄筋応力が上昇する。
- ・ 鉄筋応力の増加は、ひび割れ位置での鉄筋の付着すべりを増加させるため、ひび割れはさらに開口する。
- ・ ひび割れ幅の拡大は、繊維による伝達力の低下をさらに助長させる。

このようにして、あるひび割れ面で繊維による伝達力の低下が起こり始めると、その位置の鉄筋応力ならびにひび割れ幅が急増し、ひび割れの局所化が生じるようになった。

3.2.3 ひび割れが局所化するメカニズム

本項では、局所化のメカニズムを検討するために、架橋力に着目して考察する。図-20(a)に模式的に示したのは、マクロな繊維架橋性能の表現である架橋応力 σ_{bf} とひび割れ幅との関係であり、繊維架橋則

と呼ばれるものである。この繊維架橋則は、コンクリートの破壊力学で広く使われている引張軟化曲線 (図中の曲線 A) と類似のものであり、架橋繊維による補強効果を定量化するためによく用いられている。引張軟化曲線がマトリックスの破壊進展領域の挙動を 1 本の仮想的なひび割れ幅の開口と架橋応力 (結合応力) との関係で表現したものであるのに対し、繊維の架橋応力曲線は、ひび割れ間を伝達する架橋応力が繊維のみによりもたらされると仮定して、マトリックス自身の結合応力を無視したものである。マトリックスの引張軟化曲線の場合はひび割れの開口に伴い応力が減少するが、繊維の架橋応力曲線の場合は w_{peak} に至るまでは応力が上昇する正の勾配を有し、その後負の勾配に転じることが特徴である。

一方、鉄筋についても、繊維と同様にひび割れの架橋という観点で捉えると、その架橋性能を図-20(b)のようにひび割れ位置の鉄筋分担力 (架橋力) - ひび割れ幅関係として表現できる。この曲線 (以下、鉄筋架橋力曲線と呼ぶ) は、マトリックスのひび割れ面の間を伝達する架橋力が鉄筋のみによりもたらされることを仮定したものであり、本研究で定義する鉄筋架橋力 P_{bs} は、ひび割れ位置の鉄筋応力 σ_s に鉄筋の断面積 A_s を乗じた値である。このように整理することによって、繊維架橋力と直接比較することが可能になる。なお、本研究では、繊維架橋応力

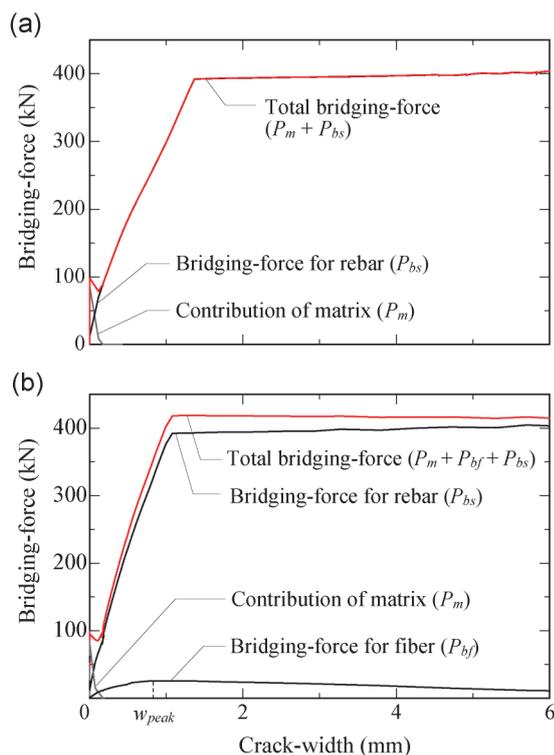


図-21 架橋力ーひび割れ幅関係：(a) $V_f = 0$ ；
(b) $V_f = 0.5\%$

P_{bf} に FRCC の面積 A_c を乗じた値を繊維架橋力 P_{bf} として定義する。

既往の研究²⁹⁾では、マトリクスの引張軟化曲線と繊維架橋則に着目することにより、ひずみ硬化型の FRCC を定量的に材料設計できることが示されているが、鉄筋補強した FRCC の場合は、これら 2 つの曲線と鉄筋架橋力曲線の重ね合わせが全体の架橋力曲線になるといえる。よって、図-20(c)に着目することで現象を捉えられる可能性がある。

図-21 は、図-18 の矢印で示したひび割れ面の架橋力曲線を算出した結果である。 $V_f = 0$ の場合、ひび割れ発生後にマトリクス応力は減少し、ひび割れ幅が 0.17mm に至ると負担分が 0 となるため、それ以降は鉄筋が引張力をすべて負担する。部材の降伏後は、ひび割れ位置の鉄筋がひずみ硬化域に至るため、ひび割れの開口に伴い鉄筋の架橋力は漸増し、ひび割れ幅が大きくなっても重ね合わせた架橋力曲線（全架橋力とひび割れ幅との関係）は正の勾配を保持する。

一方、 $V_f = 0.5\%$ の場合、繊維の架橋力はマトリクス応力が 0 に至った後も残存する。本研究で対象とした FRCC の場合、ひび割れ幅 0.9mm （軟化開始ひび割れ幅 w_{peak} ）でピークを迎えた後、架橋力は徐々に低下していくものの幅 6mm に至っても 0 に

はならない。このため、全架橋力ーひび割れ幅関係は、繊維と鉄筋の架橋力の足し合わせで決まる。本解析では、鉄筋架橋力曲線の降伏後の正の勾配よりも、繊維架橋力曲線の負の勾配のほうが大きい（図-21(b)）。したがって、重ね合わせた架橋力曲線は、鉄筋降伏後の勾配が負の勾配になる。

このように重ね合わせた架橋力曲線が軟化域を有する場合、一旦軟化域に入るとこのひび割れ面ではそれ以上の荷重を負担できず、荷重が低下しながらひび割れ幅が急増する現象となって現れる。一方、そのほかのひび割れ面は徐荷状態となり、ひび割れ幅が減少する。このようにして、最初に w_{peak} まで開口したひび割れ面に損傷が集中することになる。これが、 $V_f = 0.5\%$ のケースで、鉄筋降伏後に荷重が低下し、ひび割れが局所化したメカニズムであると考えられる。

3.3 各種パラメータを変動させた解析

本節では、繊維の混入率、鉄筋比ならびに繊維の分布状態を個別に変動させた解析による種々の数値実験を行い、各種パラメータが引張破壊挙動に及ぼす影響について検討する。変動させたパラメータ以外の解析条件は、前節と同様のものを用いた。

3.3.1 繊維混入率の影響

鉄筋比 p を前節と同様の 2.2% として、繊維混入率 V_f を 0.3 、 1.0 、 1.5% と変動させた解析を行った。繊維は、所定の V_f となるように試験体中に 1 本 1 本モデル化した。配置した繊維本数は、それぞれ $28,647$ 本、 $95,492$ 本、 $143,239$ 本である。

図-22 に、引張荷重および最大ひび割れ幅と平均ひずみとの関係を示す。鉄筋が降伏するまでは、 V_f が大きいほど荷重増加分は大きく、最大ひび割れ幅は小さくなる傾向が認められる。鉄筋の降伏以降に着目すると、 V_f の違いによって挙動が大きく異なることがわかる。 $V_f = 0.3\%$ では、繊維補強による荷重増加分は平均ひずみ 1.5% まで保持され、最大ひび割れ幅の変化は $V_f = 0$ と近い挙動を示した。一方、 $V_f = 1.0\%$ では、平均ひずみ 0.6% に至ると最大ひび割れ幅の急増とともに荷重低下が生じ、そのほかのケースとの差異が認められた。 $V_f = 1.5\%$ では、鉄筋降伏後も荷重は漸増し、最大ひび割れ幅の増加はほかのケースと比べて緩やかである。

図-23 に、各ケースのひび割れ性状を示す。ここでは、 $V_f = 1.0\%$ のケースで荷重が低下した後の平均ひずみ 1.2% の時点を描画した。また、前節で示した $V_f = 0.5\%$ のケースも併記した。図から、 V_f の増加

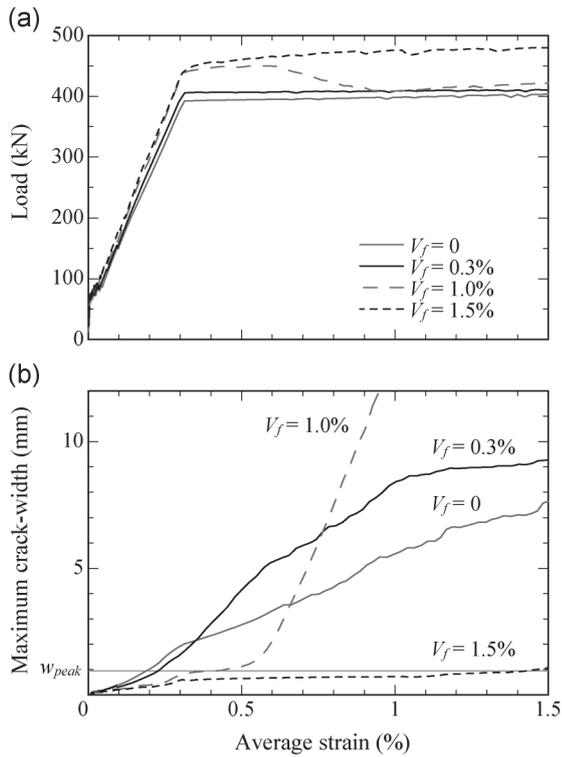


図-22 引張荷重(a)および最大ひび割れ幅(b)と平均ひずみとの関係

に伴いひび割れ発生間隔が狭くなり、ひび割れ本数が増加する傾向が認められる。ひび割れが局所化する現象に着目すると、 $V_f = 0.5, 1.0\%$ の場合はひび割れの1か所がほかと比べて開口幅が大きいことが確認できるが、 $V_f = 0.3\%$ の場合はこの局所化現象が緩和する傾向にある。 $V_f = 1.5\%$ の場合は、ほかと比べてひび割れ間隔が半分以下であり、この時点では局所化が認められない。

図-24に、平均ひずみ1.2%のときのひび割れ本数を整理した。図には、荷重状態にある(すなわち現状の開口幅が過去に経験した最大開口幅よりも大きい)ひび割れ本数と全ひび割れ本数を併記している。ここでは、開口幅が0.1mm以上となったひび割れをカウントした。全ひび割れ数と荷重状態のひび割れ数との差異に着目すると、 $V_f = 0.5, 1.0\%$ の場合は荷重状態にあるひび割れ面がそれぞれ2本と1本であり(図-23の局所化した面と対応)、多くのひび割れ面は徐荷状態にある。一方、 $V_f = 0, 1.5\%$ の場合はすべてのひび割れ面が荷重状態にあることがわかる。以上の結果から、ここで検討した条件下では鉄筋の降伏後にひび割れが局所化して進展する繊維混入率の範囲が存在するといえる。

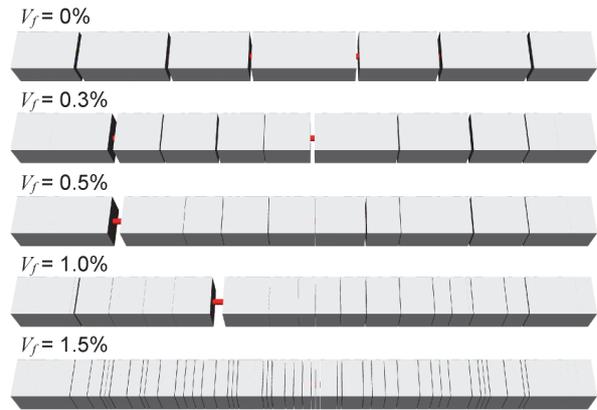


図-23 繊維混入率の変動に伴うひび割れ性状の変化 ($\epsilon_{ave} = 1.2\%$ 時)

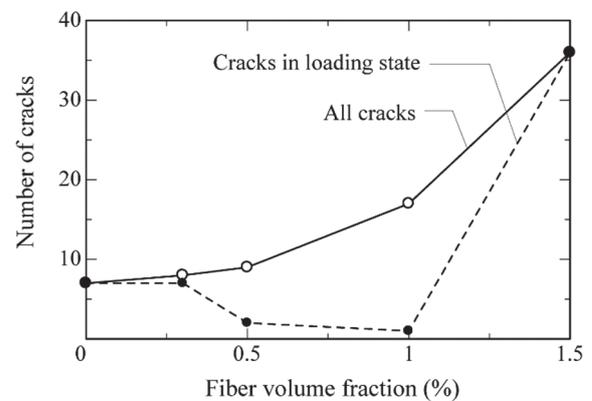


図-24 ひび割れ本数と繊維混入率との関係 ($\epsilon_{ave} = 1.2\%$ 時)

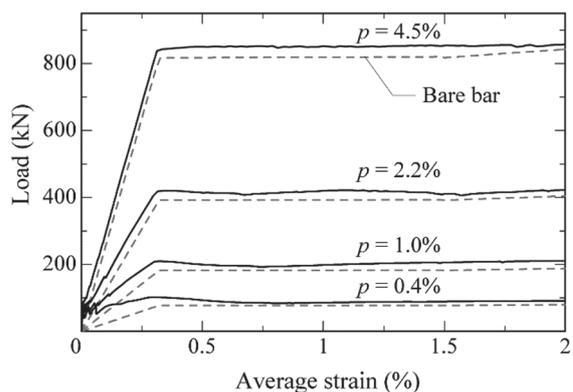


図-25 鉄筋比を変動させた試験体の荷重-平均ひずみ関係

3.3.2 鉄筋比の影響

鉄筋比 p の変動による破壊挙動の変化を調べるために、繊維混入率 V_f を 0.5% の一定として、試験体の断面中央に位置する鉄筋を D13、D19、D29 および D41 となるように変動させた解析を行った。鉄筋比は、それぞれ 0.4、1.0、2.2 および 4.5% となる。

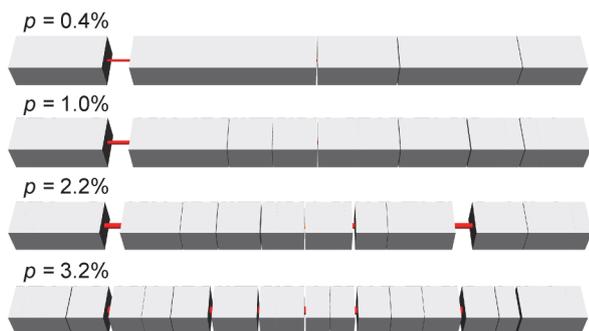


図-26 鉄筋比の変動に伴うひび割れ性状の変化 ($\epsilon_{ave} = 2.0\%$ 時)

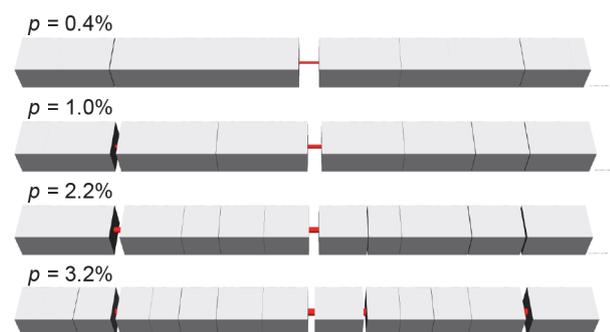


図-27 繊維分布にばらつきを考慮した試験体のひび割れ性状 ($\epsilon_{ave} = 2.0\%$ 時)

図-25 に、解析から得られた引張荷重-平均ひずみ関係を示す。 $p = 0.4\%$ の場合、鉄筋降伏後に荷重が低下し、鉄筋単体の挙動に漸近する傾向が認められる。この降伏後の荷重低下は、鉄筋比が大きいほど緩和される傾向にあり、 $p = 4.5\%$ では平均ひずみ 2%に至っても荷重を保持している。

図-26 に、平均ひずみ 2.0%時のひび割れ性状を示す。 $p = 4.5\%$ のケース以外では、鉄筋降伏前に分散して発生したひび割れが降伏後に局所化して進展する挙動を示した。 $p = 4.5\%$ の場合、ひび割れの明確な局所化は認められず、鉄筋降伏前に分散して発生したひび割れがそのまま開口していることがわかる。なお、鉄筋比が大きいほどひび割れ発生本数が増加する傾向が認められるが、これは通常の RC 部材で確認される傾向²³⁾と同様である。

3.3.3 繊維分布の影響

繊維分布のばらつきの影響を検証するために、繊維のモデル化に図-12(c)で示したばらつきを付与したモデルを用いて解析を行った。

図-27 に得られたひび割れ性状を示す。 $p = 4.5\%$ のケースでは、図-26 に示した基準モデルよりも各ひび割れの開口幅にばらつきが生じる傾向を示した

表-3 検証したパラメータとひび割れの局所化現象との関係

パラメータ	鉄筋降伏後にひび割れが局所化する現象
繊維混入率 V_f	小さくするほど抑制される
鉄筋比 p	大きくするほど抑制される
繊維の分布のばらつき	小さくすることで抑制される場合がある

が、そのほかのケースは基準モデルと比較して大きな差異は認められない。また、荷重-平均ひずみ関係についても、基準モデルとの明確な相違は確認できなかった。以上の結果から、ここで検討した材料特性や鉄筋比の範囲では、繊維分布のばらつきが破壊挙動に及ぼす影響は小さいことが確認された。なお、 $p = 4.5\%$ のケースにおいて、開口幅が大きくなったひび割れ位置は架橋する繊維本数が相対的に少ない位置と一致した。したがって、繊維分布のばらつきがさらに大きくなると、ひび割れの局所化が助長される可能性があるといえる。

3.3.4 局所化挙動に影響を及ぼすパラメータ

本節の検討の範囲で得られた各パラメータとひび割れ進展挙動との関係を表-3 に整理する。鉄筋降伏後にひび割れが局所化する現象には、繊維混入率 V_f と鉄筋比 p のパラメータがそれぞれ影響することが解析的検討から確認された。

4. ひずみ硬化型 FRCC の引張破壊解析

4.1 解析概要

前章までは、主としてひずみ軟化型の FRCC を対象とした。本章では、引張応力下において初期ひび割れ発生後も複数のひび割れが継続的に形成されるひずみ硬化型 FRCC を対象として、これを鉄筋補強した場合の解析を実行する。

FRCC がひずみ硬化特性を示すようにするために、本章では繊維混入率 V_f を 1.5% に設定した。そのほかの解析条件は、すべて 3 章と同様のものを用いて、鉄筋比 p を 0、0.4、1.0、2.2% と変動させて解析を行った。

4.2 解析結果と考察

4.2.1 巨視的な応答挙動

図-28(a) に、解析より得られた荷重-平均ひずみ関係を示す。図中の▲印は、最大荷重に至った時

点である。 $p=0$ （無筋の場合）に着目すると、平均ひずみ 0.01% でひび割れが発生した後、新たなひび割れが継続して形成され、平均ひずみが 0.6% のときに最大荷重に至った。本解析で設定したパラメータを用いることにより、ひずみ硬化特性を呈する FRCC の挙動を表現できていることが確認される。

これを鉄筋で補強すると、最大荷重時の平均ひずみ（以下、終局ひずみ）は鉄筋補強していない場合の $1.8\sim 2.6$ 倍に向上したことがわかる。終局ひずみに至った後は、いずれのケースも鉄筋単体の挙動に漸近する挙動を示した。前述したひずみ軟化型材料の場合、鉄筋比が巨視的な挙動に与える影響は大きかったが、ひずみ硬化型材料の場合、鉄筋の降伏以降も繊維による荷重増加が保持される挙動はいずれの鉄筋比でも同様であった。換言すれば、ひずみ硬化型材料の場合は低鉄筋比でも鉄筋による補強効果が有効に働き、繊維補強と鉄筋補強の相乗効果が発揮される結果が得られたといえる。

4.2.2 ひび割れ進展挙動

図-28 (b) に、ひび割れ本数と平均ひずみとの関係を示す。ひび割れ本数は、開口幅が 0.01mm 以上となったひび割れをカウントした。ひずみ軟化型の場合とは異なり、鉄筋降伏以降でもひび割れ本数が増加しており、新たなひび割れが継続して形成されていることがわかる。これにより、ひび割れ幅の増加が緩やかになり、繊維の架橋応力曲線が軟化し始めるひび割れ幅 w_{peak} に至るのが遅くなった。また、鉄筋比が大きいほど、ひび割れ本数は増加した。

図-28 (c) は、最大ひび割れ幅と平均ひずみとの関係である。いずれのケースも降伏後の変形が比較的小さい段階で最大ひび割れ幅が急増しなかったことは、先に示したひずみ軟化型材料との大きな違いといえる。平均ひずみが 1% を超えてひび割れ幅が w_{peak} に至ると、一つのひび割れに損傷が集中して最大ひび割れ幅は急増した。この時点は最大荷重点と対応しており、ひび割れの局所化に起因して荷重低下したことがわかる。

図-28 (a) における ▲、● 時点のひび割れ性状を図-29 に示す。FRCC 単体 ($p=0$) の場合はひび割れ間隔が様ではないが、 $p=0.4, 2.2\%$ では試験体全域にひび割れが分散して、間隔がより均等になっていることがわかる。鉄筋補強によってひび割れ間隔が均等になることは、既往の実験でも観察されている現象^{6),7)}であり、この傾向を解析がよく捉えている。

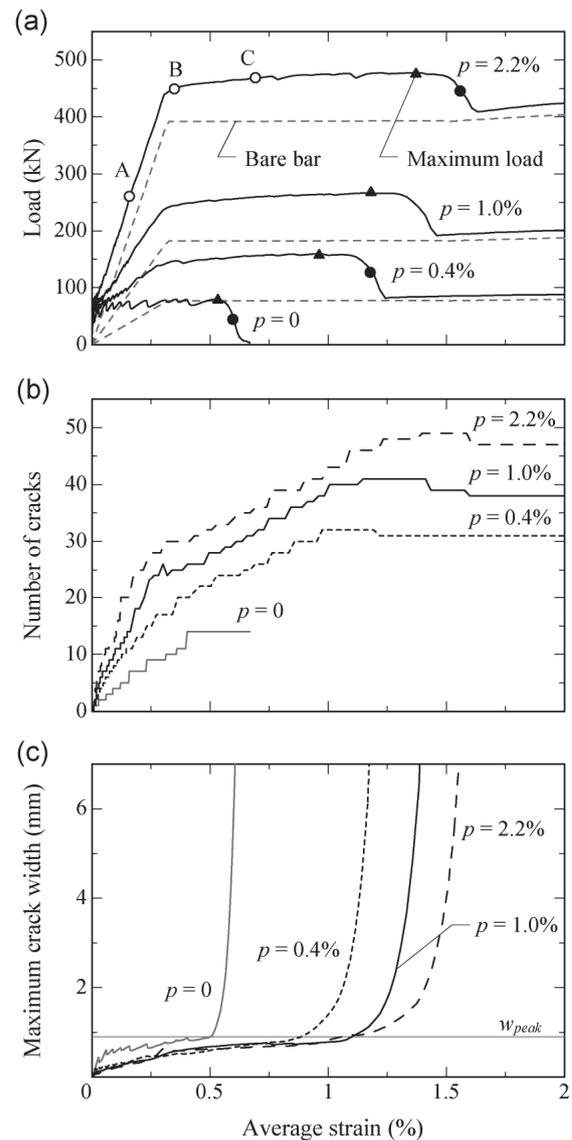


図-28 引張荷重(a)、ひび割れ本数(b)および最大ひび割れ幅(c)と平均ひずみとの関係 ($V_f = 1.5\%$)

4.2.3 鉄筋と FRCC の応力分布

図-30 は、 $p=2.2\%$ の場合の鉄筋ひずみ、鉄筋応力および FRCC 応力の鉄筋軸に沿った分布である。図には、図-28 (a) に示した○印の A~C の時点の結果を示した。前章で示したひずみ軟化型材料と比べると、ひび割れ位置のほとんどが硬化開始ひずみ ϵ_{sh} に至っていること、ならびに繊維の貢献分 σ_{br} が大きいことに違いがある。また、鉄筋降伏後 (B 点以降) もひび割れ本数 (凹凸の数) が増加していることも、ひずみ軟化型材料との違いである。

図-30 下段に示した FRCC の応力に着目すると、鉄筋との付着作用によって、繊維の架橋応力に相当するひび割れ位置 (凹部) の応力よりもひび割れ間

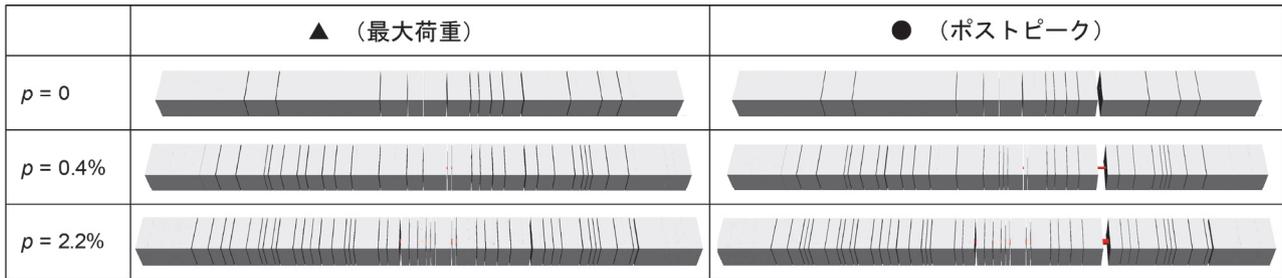


図-29 鉄筋比 p の変動に伴うひび割れ性状の変化 ($V_f = 1.5\%$)

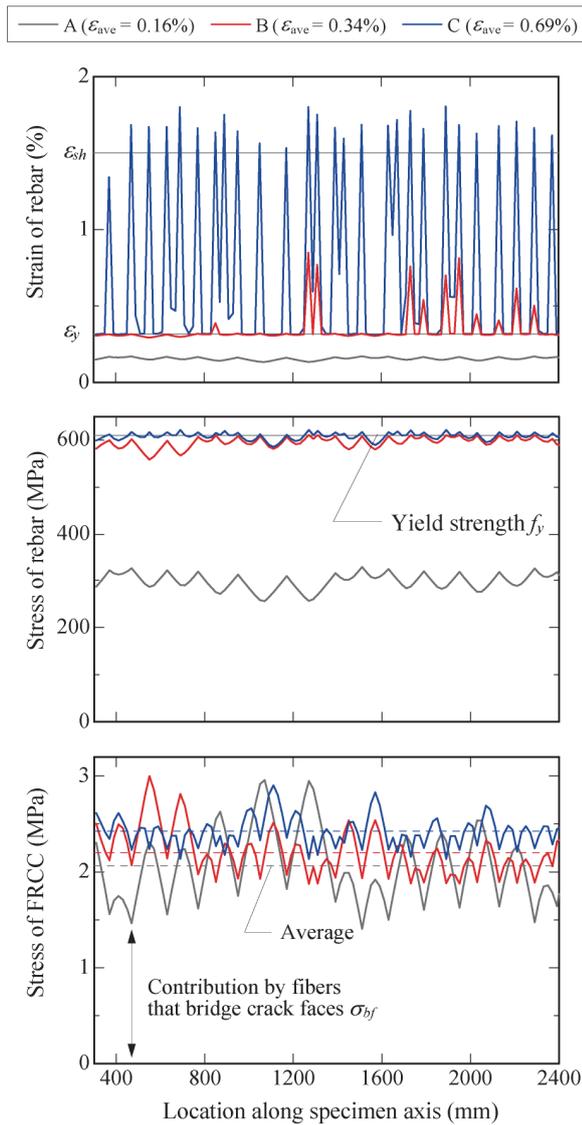


図-30 鉄筋のひずみ、応力およびFRCC応力の分布 ($V_f = 1.5\%$ 、 $p = 2.2\%$)

(凸部)の応力が大きくなっている。これにより、平均応力が引張強度よりも低い時点でも凸部が引張強度に達し、新たなひび割れが発生することになり、結果として、鉄筋補強したケースでひび割れの分散性が向上するとともに発生間隔が均等化した。

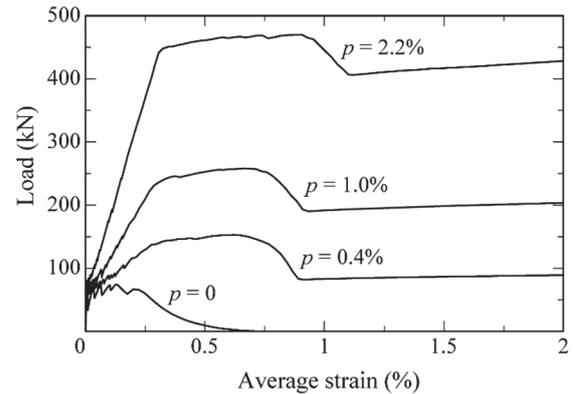


図-31 引張荷重-平均ひずみ関係(繊維分布にばらつきを付与したモデル、 $V_f = 1.5\%$)

4.3 繊維分布の影響

繊維分布のばらつきの影響を検証するために、鉄筋比 p および繊維混入率 V_f は前節と同様として、図-12(c)で示したばらつき付与モデルを用いて解析を実行し、基準モデルと比較した。

図-31は、解析から得られた荷重-平均ひずみ関係である。また、表-4には、最大荷重時のひび割れ本数と終局ひずみ ϵ_{cu} を整理した。ばらつきを付与した無筋のケース ($p = 0$) の ϵ_{cu} は 0.13% であり、繊維分布のばらつきによりFRCC単体としての性能が大きく低下したことがわかる。また、鉄筋と併用したケースでも、基準モデルと比較して ϵ_{cu} が低下する傾向が認められた。終局ひずみが低下した原因は、表からわかるようにひび割れ分散性が低くなったためである。前章で検討したひずみ軟化型材料の場合、繊維分布のばらつきが引張破壊挙動に及ぼす影響が明確ではなかったが、ひずみ硬化型材料の場合は繊維分布のばらつきの影響が顕在化した。

表-4において特筆すべきもう一つの点は、繊維分布のばらつきにより材料性能が低下したFRCCでも鉄筋を併用することにより、終局ひずみが大幅に向上したことである。 $p = 0.4$ 、 2.2% のときの終局ひずみは、無筋のケースと比べて5~7倍に向上し

表-4 最大荷重時のひび割れ本数と終局ひずみ

	基準モデル		ばらつき付与モデル	
	ひび割れ 本数	ϵ_{cu} (%)	ひび割れ 本数	ϵ_{cu} (%)
p = 0	13	0.52	4	0.13
p = 0.4%	32	0.95	21	0.62
p = 1.0%	41	1.15	30	0.67
p = 2.2%	49	1.35	38	0.91

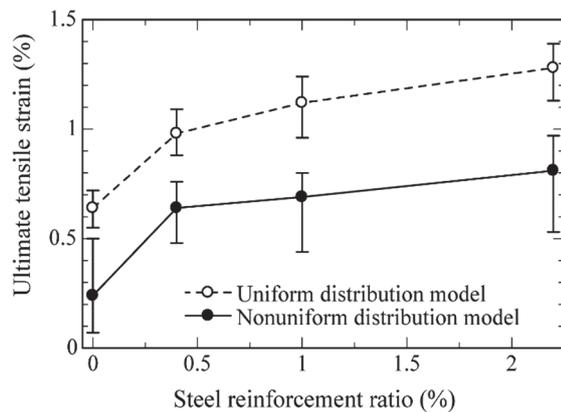


図-32 終局ひずみ-鉄筋比関係 (エラーバーはデータ区間を示す)

ている。この結果は、施工時に生じる繊維分布の偏りによって FRCC 単体の終局ひずみが低下した場合でも、鉄筋との併用により部材としての引張変形能は向上できることを示唆する。すなわち、材料不均一性によって生じる変形能の低下を抑制する役割として、鉄筋との併用が有効であるといえる。

最後に、繊維をモデル化するときを使う擬似乱数だけを変化させて、5つの異なる繊維分布モデルを生成し、それらを用いた場合の終局ひずみを調べた。発生させる擬似乱数を変化させると、生成される繊維1本1本の位置や角度を変化させたモデルが作成できる。ここでは、基準モデル(図-12(b))と繊維分布にばらつきを付与したモデル(図-12(c))のそれぞれに対して5つの異なる繊維分布モデルを作成し、鉄筋比を変動させて解析を行った。

図-32に解析から得られた終局ひずみを示す。図中のエラーバーはデータ区間を示すが、いずれのケースも鉄筋補強により終局ひずみが向上していることがわかる。向上効果は、平均値に着目すると、基準モデルの場合が1.5倍以上、ばらつき付与モデルの場合が2.6倍以上である。また、鉄筋比が大きくなるほど、終局ひずみが大きくなる傾向が認められた。なお、本解析では、5つの繊維分布モデルから得られた終局ひずみのばらつき(エラーバーの長さ)

が大きい結果となったが、解析における繊維分布のモデル化を議論するためには、FRCCの材料不均一性を定量化するための実験および実施工でのデータの蓄積が望まれる。

5. おわりに

本研究では、繊維1本1本をモデル化した解析手法を用いて、鉄筋補強したFRCCの引張破壊挙動を検証した。繊維混入率や鉄筋比などのパラメータを変動させた種々の解析を行った結果、ひずみ軟化型のFRCCを対象とした場合に、以下の結論を得た。

- 1) 提案した解析手法を用いることにより、既往の研究で報告されていた鉄筋降伏後にひび割れが局所化する挙動を表現できた。
- 2) 繊維と鉄筋の架橋力-ひび割れ幅曲線の重ね合わせに着目することによって、鉄筋降伏後にひび割れが局所化する現象のメカニズムを説明できることが確認された。
- 3) 繊維と鉄筋の架橋力-ひび割れ幅曲線に着目した検討から、ひび割れが局所化する現象を抑制するには、繊維混入率を小さくすること、および鉄筋比を大きくすることが有効であることが明らかとなった。

また、ひずみ硬化型のFRCCを対象とした場合に、以下の結論を得た。

- 4) 鉄筋比の違いによらず、鉄筋補強により部材としての変形能が向上する効果が認められ、鉄筋の降伏直後にひび割れが局所化することはなかった。本研究の範囲では、鉄筋比0.4%でも変形能を向上させる効果は有効に機能した。
- 5) 繊維分布のばらつき(材料不均一性)によって、FRCC単体の終局ひずみが低下した材料でも、鉄筋比0.4~2.2%の鉄筋補強によって終局ひずみが5~7倍に向上する効果が認められた。この結果は、材料不均一性によって生じる変形能の低下を抑制する役割として、鉄筋との併用が有効であることを示唆する。
- 6) 繊維分布のばらつきに起因する材料不均一性が与える影響は、ひずみ軟化型よりもひずみ硬化型の材料のほうが顕在化することが解析から示された。

謝辞

本論文をまとめるにあたって、岐阜大学 国枝稔教授および名古屋大学 中村光教授から貴重な意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 土木学会：“複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案）”，コンクリートライブラリー127，2007
- 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
- 3) Deluce, J., Lee, S. C. and Vecchio, F. J.: “Crack formation in FRC structural elements containing conventional reinforcement, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC6)”, Proc. of the 6th Int. RILEM Workshop, pp.271-278, 2012
- 4) Deluce, J. and Vecchio, F. J.: “Cracking behavior of steel fiber reinforced concrete members containing conventional reinforcement”, ACI Structural Journal, Vol.110, No.3, pp.481-490, 2013
- 5) Noghabai, K.: “Behavior of tie elements of plain and fibrous concrete and varying cross sections”, ACI Structural Journal, Vol.97, No.2, pp.277-284, 2000
- 6) Kunieda, M., Hussein, M., Ueda, N. and Nakamura, H.: “Enhancement of crack distribution of UHP-SHCC under axial tension using steel reinforcement, J. of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.1, pp.49-57, 2010
- 7) 坂井謙太郎, 森井直治, 井口裕介, 内田裕市: “鉄筋補強した SHCC の引張挙動に関する研究”, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.11, pp.155-162, 2011
- 8) Kunieda, M., Ogura, H., Ueda, N. and Nakamura, H.: “Tensile fracture process of strain hardening cementitious composites by means of three-dimensional meso-scale analysis”, Cement and Concrete Composites, Vol.33, No.9, pp.956-965, 2011
- 9) Ogura, H., Kunieda, M., Ueda, N. and Nakamura, H.: “Meso-scale modeling for fiber reinforced concrete under mixed mode fracture”, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proc. of FraMCoS-8, pp.1422-1429, 2013
- 10) 小倉大季, 国枝稔, 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 (材料・コンクリート構造), Vol.72, No.3, pp.249-267, 2016
- 11) Kawai, T.: “New element models in discrete structural analysis”, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.141, pp.174-180, 1977
- 12) 土木学会: “2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2012
- 13) Saito, S. and Hikosaka, H.: “Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring network models”, 土木学会論文集, Vol.1999, No.627, pp.289-303, 1999
- 14) Bolander, J. E. and Berton, S.: “Cohesive zone modeling of fracture in irregular lattices, Fracture Mechanics of Concrete Structures”, Proc. of FraMCoS-5, pp.989-994, 2004
- 15) Bolander, J. E. and Yip, M.: “Numerical modeling of fiber reinforced cement composites subject to drying”, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Proc. of the 4th Int. RILEM Workshop, pp.7-20, 2003
- 16) 小倉大季, 国枝稔, 上田尚史, 中村光: “メソスケール解析による短繊維補強セメント系複合材料の力学特性の評価”, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.309-314, 2007
- 17) 小倉大季: “繊維を離散化したメソスケール解析手法による繊維補強セメント系複合材料の破壊挙動評価に関する研究”, 博士論文, 名古屋大学, 2016
- 18) Cox, H. L.: “The elasticity and strength of paper and other fibrous materials”, British J. of Applied Physics, Vol.3, No.3, pp.72-78, 1952
- 19) Bolander, J. E. and Saito, S.: “Fracture analyses using spring networks with random geometry”, Engineering Fracture Mechanics, Vol.61, No.5-6, pp.569-591, 1998
- 20) 島弘, 周礼良, 岡村甫: “異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性”, 土木学会論文集, Vol.1987, No.378, pp.213-220, 1987
- 21) 澤部純浩, 上田尚史, 中村光, 国枝稔: “せん断補強筋に定着不良が生じた RC はりのせん断破壊挙動解析”, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.444-461, 2006
- 22) 菅満宣, 中村光, 檜貝勇, 斉藤成彦: “RC はりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響”, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.295-300, 2001
- 23) 玉井真一, 島弘, 出雲淳一, 岡村甫: “一軸引張部材における鉄筋降伏後の平均応力-ひずみ関係”, 土木学会論文集, Vol.1987, No.378, pp.239-247, 1987
- 24) 山本佳士: “準微視的力学モデルによるコンクリート構造部材の静的および動的破壊挙動評価”, 博士論文, 名古屋大学, 2010
- 25) 小倉大季, 高橋圭一, 栗田守朗: “短繊維の配向に伴う繊維補強セメント系材料の曲げ性能のばらつき”, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.280-285, 2014
- 26) Uchida, Y. and Ozawa, M.: “Tension stiffening effect in RC beams with steel fiber”, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, pp.521-535, 2001
- 27) Bischoff, P. H.: “Effect of shrinkage on tension stiffening and cracking in reinforced concrete”, Canadian J. of Civil Engineering, Vol.28, No.3, pp.363-374, 2001
- 28) 塩永亮介, 佐藤靖彦, Walraven, J. C.: “高性能繊維補強モルタルを適用した RC 部材の一軸引張挙動に関する研究”, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp.366-379, 2010
- 29) Li, V. C. and Leung, K. Y.: “Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites”, J. of Engineering Mechanics, Vol.188, No.11, pp.2246-2264, 1992