## 論文 メゾ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

小倉 大季<sup>\*1</sup>·国枝 稔<sup>\*2</sup>·上田 尚史<sup>\*3</sup>·中村 光<sup>\*4</sup>

要旨:本論文では,不連続体力学に基づいた解析手法である 3 次元 RBSM を用いて,離散 化した短繊維,マトリクスおよび両者の界面をモデル化したメゾスケール解析手法を提案し, その適用性について検討を行った。単繊維付着試験,および複数微細ひび割れと 2%を超え る高い終局引張ひずみを得る材料を対象とした解析により,提案モデルの妥当性を示した。 また,繊維配向性の影響が大きく現れる場合の解析を行い,繊維配向性などのメゾスケール における力学挙動を再現できることを示し,提案したモデルの可能性を検討した。 キーワード:短繊維補強セメント系複合材料,3次元 RBSM,メゾスケール解析

### 1. はじめに

近年,短繊維補強セメント系複合材料の高性 能化が進み,所定の力学性能を得るために様々 な材料設計方法が提案されている<sup>1)</sup>。例えば, Bolander は,各短繊維をはり要素で離散化した 2 次元解析を行い,繊維の分散性が力学性能に 与える影響などを,定性的ではあるがパラメト リックに解析している<sup>1)</sup>。繊維を離散化した解 析が3次元に発展できれば,現状の繊維補強材 料のメカニズムを解明できるだけでなく,新し い材料開発の可能性が広がることが期待される。

本研究では,各短繊維を3次元的に離散化した数値解析を3次元 Rigid-Body-Spring Model<sup>2)</sup>

(RBSM, 剛体-ばねモデル)を用いて行い, 複数微細ひび割れを生じる材料の解析を通して, その適用性を明らかにした。

### 2. 提案モデルの概要

### 2.1 RBSM の概要

図-1に、3 次元 RBSM において、要素剛 性マトリクスを構成する1組(2個)のヴォロ ノイセルの例を示す。ここで示されるヴォロノ イセルを剛体と仮定し、各セルの母点に並進変 位3、回転3の6自由度を設定した。各セルの 境界面上には、境界と垂直、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)を配置した。垂 直ばね、平行ばねの力学特性には、マトリクス の材料特性(引張強度、弾性係数、破壊エネル ギー)を用い、回転ばねの力学特性は既往の文 献を参考にして設定した<sup>2)</sup>。破壊は、垂直ばね と平行ばねの合力について評価した<sup>3)</sup>。なお、 ヴォロノイセルの寸法ならびに形状がひび割れ 性状に与える影響を低減するため、母点間距離 *h*を基準としたクラックバンドを用いて評価を 行った。

### 2.2 短繊維による架橋応力のモデル化

### (1) 短繊維の配置

解析対象となる供試体寸法を想定した要素中 に,所定の長さの繊維を所定の体積混入率とな るようにランダムに配置した。図-2に示すよ うに,ヴォロノイセルの境界面(セメントマト リクスのひび割れに相当)を跨ぐ繊維位置に, 長さ0のバネを配置し,このバネに当概繊維の 架橋応力を作用させることとした。また,各繊 維に対して,埋込み長*1*,境界面の垂線方向か

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 学生 (正会員)
\*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 助教授 博士(工) (正会員)
\*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 研究員 工修 (正会員)
\*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士(工) (正会員)



図-1 ヴォロノイセルと母点での自由度



図-2 繊維の離散モデル

らの角度¢(以下,配向角度)を算定した。な お,配向角度は境界面の法線ベクトルと繊維配 向方向のベクトルとの内積から求めた。

### (2) ひび割れ発生前

ひび割れ発生前の繊維の分担応力は, Cox の シアーラグ理論をもとに算定した。Cox は,マ トリクス中の繊維に作用する引張応力分布を以 下の式で表わしている。そこで,式(1)を用い てマトリクスのひずみから繊維の引張応力の分 担分を算出することで,ひびわれ発生前の繊維 の補強効果を表現した。

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_m \left\{ \frac{1 - \cosh \beta (l/2 - x)}{\cosh \beta (l/2)} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_f$ :繊維の引張応力(MPa)、 $E_f$ :繊維の弾性係数(MPa)、 $\epsilon_m$ :マトリクスのひずみ、l:埋込み長(mm)、x:繊維端部からの距離(mm)、 $\beta$ :繊維の材料定数などによって決まる定数(本研究では1とした)である。

### (3) ひび割れ発生後

セメントマトリクス(以下,マトリクス)に 生じたひび割れ間での繊維の応力伝達は,図-3に示す手順で算定した。ひび割れ幅の1/2を ひび割れ面における繊維の抜出し量と仮定し, すべり分布の形状を決定する。すべり分布の形 状がわかれば,付着応力-すべり関係から付着



応力分布が求まり、その付着応力分布を繊維軸 方向に積分することでひび割れ間の繊維架橋力 を算出することができる。

ここで必要となるのが、繊維抜出し量とすべ り分布の関係、および付着応力-すべり関係で ある。そこで、次節における単繊維引抜き付着 試験<sup>4)</sup>を対象とした解析を通して、それらの関 係を同定した。

### 3. 引抜き挙動の解析と提案モデルの妥当性

# 3.1 はり要素を用いた単繊維引抜き付着試験

### (1) 付着応カーすべり関係の同定

付着応力-すべり関係を同定するために、単 繊維引抜き付着試験<sup>4)</sup>をはり要素を用いて解析 した。付着試験は、マトリクスに埋め込められ た繊維1本を、図-4のような試験方法で引抜 き、荷重-変位関係を測定している。繊維の埋 込み長は 0.8mm,試験体と繊維固定用板の距 離は 1.0mm である。繊維径 0.037mm の PVA 繊維を用いた実験について解析をした。

図-5に解析モデルを示す。繊維は,はり要素の集合として離散的に扱い,マトリクスを表わす剛体要素にリンク要素を介して結合させた。 繊維とマトリクス間の付着応力-すべり関係は, リンク要素で表現した。境界条件は,左端のマ トリクス要素を完全拘束とし,右端のリンク要素に強制変位を与えた。





図-5 解析モデル

図-6に実験によって得られた引抜き荷重-変位関係を点線で示す。実験結果には大きなば らつきが生じていることが分かる。図-7に示 される付着応力-すべり関係を仮定した場合に おける解析結果を図-6に実線で示す。実験で は引抜き過程において荷重が再上昇するような 2次ピークを呈する結果もあったが、実験結果 のばらつきが大きい点と、FRCの終局挙動がそ れぞれの繊維における付着特性の下限値に依存 すると推察されることを考慮し、図-6の実験 結果の下限値側が表現できるよう、図-7のパ ラメータを同定した。

### (2) すべり分布の定式化

前項の解析において、繊維埋込み長 *l* を変動 要因として数値実験をすることで、すべり分布 の定式化を行った。埋込み長を 2mm, 4mm, 6mm と変化させた場合の引抜き応力-変位関 係を図-8に示す。また、埋込み長 4mm と 6mm の場合のすべり分布を図-9(a), (b)に 示す。それぞれの線は、抜出し変位が 0.42mm まで(0.06mm 増分毎に示す)のすべり分布で



図-7 付着応力---すべり関係

ある。図-9の実線は、図-7の S<sub>1</sub>を示すも のであり、実線より上に位置している部分は摩 擦付着が卓越している領域(付着劣化と呼ぶ) となる。埋込み長の半分程度が付着劣化した後 に、急激に繊維全長に付着劣化が起こり、抜出 し過程へと移行している様子が見られる。

ひび割れ部での抜出し量から一意的にすべり 分布を算定できるよう,埋込み長と抜出し量を 変数として,以下の式を仮定した。

$$S = 0.1S_0 \left( \frac{x^2}{l - l} + 10 \right)$$
(2)

ここで、 $S_0$ :繊維の抜出し量 (mm)、l:埋込 み長 (mm)、x:埋込み先端部を原点とする繊 維軸方向の位置(0 < x < l) (mm)、S:各位置 におけるすべり量 (mm) である。

式(2)を用いて, すべり分布を計算した結果 が図-9(a), (b)の点線となる。抜出し開始前 までは, およそのすべり分布を精度よく表現し ていることがわかる。

### 3.2 提案モデルの妥当性の検討

前節で定式化したすべり分布の式を用いて,



図-3の繊維負担力計算フローに従い,単繊維 引抜き付着試験解析を行った。なお,ここでは 繊維の破断については考慮していない。図-10 に,はり要素を用いた解析と提案モデルにより 求まった引抜き応力-変位関係を示す。提案モ デルによる結果は,はり要素による数値実験の 結果を精度良く推定することができ,提案モデ ルの妥当性が確認された。

### 4. 複合材料を対象とした解析例

### 4.1 複数微細ひび割れを生じる材料の解析

### (1) 解析概要

本解析手法の妥当性を示すため, PVA 繊維 (繊維長:12mm, 繊維径:0.037mm)が 1.5% 混入された供試体の一軸引張試験<sup>5)</sup>を解析対象 として検討した。実験は,30×13mmの断面を 有するドックボーン供試体を用い,試験区間 80mm においてひずみを計測している。複数の 微細ひび割れが観察され,2%を超えるような 高い終局ひずみが得られている。

解析モデルを図-11 に示す。供試体の試験 区間 30×13×100mm を取り出してモデル化し, 実験と同様に 80mm の区間でひずみを求めた。 RBSM では,ひび割れの発生,進展がコンク リートの要素分割に大きく依存する。そこで, マトリクスの要素分割はランダムに配置された 母点を基にヴォロノイ分割することで,要素分 割依存性を低減した。平均要素寸法は,供試体 の長軸方向にはひび割れ発生間隔を考慮して 2mm とし,供試体奥行き方向には計算時間短



縮のため 1 要素で分割した(2 次元的な分割)。 繊維は、図-11 のようにマトリクス中にラン ダムに分散させて、モデル化した。境界条件は、 供試体両端の要素を完全固定とし、水平方向へ 強制変位を与えた。

解析に使用した繊維,マトリクス,繊維・マ トリクス界面の物性を表-1 に示す。見かけの 繊維強度は,繊維メーカーのカタログ値より小 さくなるという実験上の知見<sup>6</sup>に基づいた値で



図-11 解析モデル

ある。さらに、破断強度は式(3)のように繊維 の配向角度が大きくなるほど減少することが実 験で確認されている<sup>の</sup>。そこで、ひび割れ面に 対しての配向角度を求め、各繊維の破断強度を それぞれ算出し、破断の判定を行った。

$$\sigma_{fu} = \sigma^n{}_{fu} e^{-f'\phi} \tag{3}$$

ここで、 *σ<sub>fu</sub>*:繊維の破断強度(MPa), *σ<sup>n</sup><sub>fu</sub>*: 配向角度 0°の時の見かけの破断強度(MPa), *φ*:繊維の配向角度(rad), *f*':強度減少係数 (0.03)である。繊維・マトリクス界面におけ る付着応力-すべり関係は, **図-7**の値を使用

した。なお、マトリクスの引張強度  $\sigma_{mu}$ については文献に記載されていないため、3、4、5MPa と変化させて検証した。

### (2) 解析結果

図-12 にマトリクスの引張強度を 4MPa と した場合の応力--ひずみ関係を示す。初期ひび 割れの発生と共に応力の上昇と下降を繰り返し, ひずみが 3%を超えるような高い終局引張ひず みを再現していることがわかる。2.5%程度の ひずみ時から,さらに単調に応力が増加してい る様子が確認できるが,これはマトリクスに生 じるひび割れが飽和した後にも繊維の架橋能力 に余裕があり,繊維が十分に架橋しているため であると推察される。図-13 はひずみが 0.3%, 2.5%時におけるひび割れ図であり,終局時直 前にはひび割れが供試体全面に分散して発生し

#### 表一1 材料諸元

繊維	繊維長 $L_f(mm)$	12
	繊維径 $d_f(mm)$	0.037
	弹性係数 E <sub>f</sub> (GPa)	40.2
	見かけの繊維強度 <sup>σ<sup>n</sup><sub>fu</sub>(MPa)</sup>	1343
	繊維混入率 V <sub>f</sub> (%)	1.5
マトリクス	弹性係数 $E_m$ (GPa)	15.9
	破壊エネルギー $G_{ft}$ (N/m)	20
繊維・マト リクス界面	摩擦付着強度 $\tau_i$ (MPa)	3.2
	化学付着強度 $\tau_s$ (MPa)	5.8
	付着剛性 G (MPa/mm)	27.0



ている様子が確認できる。

図-14 にマトリクスの引張強度を 3,4, 5MPa と変化させた場合の応力-ひずみ関係を 示す。なお、付着に関するパラメータは変化さ せていない。図から、応力-ひずみ関係の形状 がマトリクス強度に依存していることがわかる。 マトリクス強度が 3MPa の場合には、1.7%程度 のひずみ時から、さらに単調に応力が増加して いる様子が確認でき、繊維の架橋能力に十分な 余裕があるとことが推察される。一方、強度が



5MPa の場合には、ひび割れ発生時の高い応力 時に繊維の抜け出しがより卓越し、終局ひずみ が小さくなっていると考えられる。なお、マト リクスにおけるひび割れの飽和の程度は、本解 析では要素寸法に依存するため、適切な要素寸 法の決定方法が今後の課題である。

### 4.2 繊維の配向性の影響

供試体厚さの変化に伴う繊維の配向性の影響 を確認するために,前節の引張試験体の奥行き を4倍,2倍,1/2倍(52,26,6.5mm)とし て解析を行った。諸条件は,前節と同様である。 図-15 にそれぞれの場合における応力--ひず み関係を示す。長さ12mmの繊維を混入して いるため,奥行きを6.5mmとしたメッシュで は繊維配向が2次元に近い状態へと移行しやす い。そのため,繊維の架橋が卓越し,引張特性 を過大に評価する結果となったと考えられる。

このように、各繊維を離散化している本解析 においては、繊維配向性など、メゾスケールに おける力学挙動を表現することが可能であり、 本解析手法のメリットを確認できた。 5. まとめ

本研究では,短繊維を離散化した3次元解析 手法を提案し,解析モデルの妥当性ならびに適 用性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 複数微細ひび割れを生じる材料を対象とし た解析を行い、応力-ひずみ関係を概ね妥 当に示すことを示した。
- (2)本解析手法を用いることで、繊維配向性な どのメゾスケールにおける力学挙動を表現 できることを確認した。

今後,更なるモデルの改善を行い,繊維補強 材料の材料開発に役立てたいと考えている。

### 参考文献

- 国枝稔:短繊維補強セメント系複合材料の 高靭性化に向けた材料設計に関する研究の 動向,コンクリート工学,43(6),pp.57-62, 2005
- 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
- Jeffrey, T. and Bolander, J.E. and Minoru, K.: Reducing Mesh Bias on Fracture within Rigid-Body Spring Networks, Journal of Structure Mechanics and Earthquake Engineering,
- 4) 清田雅量ほか:セメント系複合材料における繊維の付着特性に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.187-192, 2001
- 5) 閑田徹志, Li, V.C., 浜田敏裕:ビニロン繊 維を用いた高靱性 FRC の材料設計と開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.229-234, 1998
- 6) Kanda, T. and Li, V. C.: Interface Property and Apparent Strength of High-Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.10, No.1, pp5-13, 1998