

# 論文 3次元個別要素法による短繊維補強材料の流動解析モデルの構築

加藤 勝秀<sup>\*1</sup>・国枝 稔<sup>\*2</sup>・上田 尚史<sup>\*3</sup>・中村 光<sup>\*4</sup>

**要旨:** フレッシュなセメント系材料中の鋼繊維の流動性状を予測するために、不連続体解析手法の一つである3次元個別要素法を用いた解析モデルを構築し、流動解析を行った。さらに、解析の妥当性を検証するために、珪酸アルカリ溶液に少量の水を加えた無色透明な粘性流体と、鋼繊維やPP繊維などの短繊維を用いた小型Lフロー実験を実施し、短繊維の配向角度を調べた。その結果、解析、実験の両方において、短繊維は概ね流動方向に向くことが確認でき、フレッシュな短繊維補強モルタルの流動性状を、構築したモデルにより定性的に評価可能であることが示された。

**キーワード:** 流動解析, 個別要素法, 短繊維, 可視化実験, 繊維配向性

## 1. はじめに

鋼繊維や有機繊維などを混入したセメント系材料 (FRCC: Fiber Reinforced Cement Composites) の性能評価技術と部材への適用技術の進歩により、これらがトンネル覆工を中心として幅広く適用されつつある。これらFRCCは、フレッシュ時の性状、とりわけ繊維の配向が硬化後の品質に影響を及ぼす場合があるため、その流動性状を数値解析的に予測可能な手法の開発が望まれる。また、国枝ら<sup>1)</sup>は、短繊維を離散化した3次元メソスケール解析手法の開発に取り組んでおり、解析対象の短繊維の分布に流動解析結果を反映できれば、より高精度な破壊現象がシミュレートできる。

フレッシュコンクリートの流動解析手法は数多く提案されており、例えば、解析対象を格子で区切り、要素ごとの計算により流体の変形を表現するLagrange的手法や、計算格子を固定し、その格子上で流体の界面位置を補足するEuler的手法などがある。前者の代表例としては、有限要素法 (Finite Element Method) や格子を用いないMPS法 (Moving Particle Semi-implicit Method)、SPH法 (Smoothed Particle Hydrodynamics Method) などに代表される粒子法が挙げられ、後者では、VOF法 (Volume of Fluid Method) やLevel Set法、CIP法 (Constrained Interpolated Profile Method) などが挙げられる。この中でも、特に粒子法やCIP法は流動解析の分野で多くの実績があり、共にフレッシュなセメント系材料への適用性が示されている<sup>2), 3)</sup>。これらの既往の解析手法では、流動する材料を均質な材料として扱う場合に特に有効であるが、コンクリートにおける粗骨材や短繊維など、特性長さを持つ異種材料が混入している場合には、そのモデル化が難しいのが現状である。

そこで本研究では、フレッシュな繊維補強モルタルおよびコンクリート中の繊維の挙動を解析することを目的に、3次元個別要素法 (Distinct Element Method) を用いた解析モデルを開発し、その適用性について基礎的な検討を行った。また、解析結果の妥当性を確認するために、流動中の繊維の動き方や配向角度を調べることができるよう水ガラスと短繊維を使用した可視化実験を行い、解析結果と比較検討した。

## 2. 数値解析手法

### 2.1 個別要素法

本研究では、流動解析から構造解析まで幅広く適用できる、3次元個別要素法を用いた。解析で用いたプログラムは、松島ら<sup>4)</sup>が開発した2次元個別要素法プログラムを、3次元に拡張したものである。この手法では、個々の要素ごとに式(1)、式(2)、式(3)に示す2階微分方程式をたて、これを差分近似することで要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動を解析するものである<sup>5)</sup>。ここで、式(1)、式(2)、式(3)はそれぞれ、2個の要素に対する法線方向の並進運動方程式、せん断方向の並進運動方程式、要素中心に対する回転運動方程式である。

$$m \frac{d^2 u_n}{dt^2} + c_n \frac{du_n}{dt} + k_n u_n = 0 \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 u_s}{dt^2} + c_s \frac{du_s}{dt} + k_s u_s = 0 \quad (2)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + c_r r^2 \frac{d\theta}{dt} + k_r r^2 \theta = 0 \quad (3)$$

ここで、 $m$ は要素の質量、 $I$ は慣性モーメント、 $r$ は要素半径、 $u_n$ は法線方向の変位、 $u_s$ はせん断方向の変位、 $\theta$ は回転角度、 $k_n$ は法線方向のばね定数、 $k_s$ はせん断方向

---

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)  
 \*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 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助教 博士(工) (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)

のばね定数,  $c_n$  は法線方向の粘性係数,  $c_s$  はせん断方向の粘性係数,  $t$  は時間である。

図-1 に個別要素法の解析フローを示す。個別要素法では、別の要素との接触点を通して要素間の力の伝達が行われる。本研究では、要素の接触判定を容易にするために、球形要素を用いた。個別要素法では、図-2 に示すような法線、せん断方向にそれぞれ弾性ばねとダッシュポットを有する要素間モデルを接触要素ごとに考える。また、せん断方向には、摩擦係数  $\mu$  を意味するスライダを設置する。

## 2.2 解析モデル

### (1) 解析対象

本解析では、図-3 に示す小型 L フロー実験を対象とした流動解析を行った。図中のハッチングされた部分が、短繊維補強材料の初期状態である。

### (2) 材料のモデル化

本解析では、短繊維についても球形要素を用いて表現する。図-4 のように、球形要素を一直線に配置し、それぞれの要素を剛結させて線分形状が変形しないようにした。マトリクスは直径 5mm の球形要素であり、7400 個使用した。また短繊維 1 本は、直径 0.5mm の球形要素を 60 個直列に剛結したもので、長さは 30mm である。全体の体積の 0.1% の繊維混入率とするために、当該繊維を 132 本使用した。図-6 および図-7 中の、水色の球体がモルタル、赤色の線分が短繊維、緑色の領域は仕切り板と底面を表している。

### (3) 要素のパッキング

図-3 に示すような初期状態を作成するために、小型 L フロー試験器の形状に合わせて各要素をパッキングした。まず、短繊維補強材料の初期状態の 200×100×40mm の解析領域を用意し、その中にマトリクスをモデル化した単一の球形要素と短繊維をモデル化した要素（図-4 のように複数の球形要素を結合した要素）を、所定の繊維混入率となるように 3 次元的にランダムに発生させ、自由落下させる。図-5 に、要素が落下し、最終的に動きが止まった状態を示す。図-5 (c) を要素の初期状態とし、図-6、図-7 のような解析モデルを作成した。

## 3. 小型 L フロー実験

解析結果の妥当性を検証するために、流動中の短繊維の動きを観察できる可視化実験を行った。使用する材料は、モルタルマトリクスに見立てた、無色透明な珪酸アルカリ溶液（密度：2.5g/cm<sup>3</sup>）に水を加えたもの（以下、水ガラス）と、長さ 30mm、直径 0.35mm のポリプロピレン繊維（密度：0.91g/cm<sup>3</sup>、以下、PP 繊維）および長さ 30mm、直径 0.6mm の鋼繊維（密度：7.85g/cm<sup>3</sup>、ただし、両端フック付き）を使用した。なお、便宜上、これらを

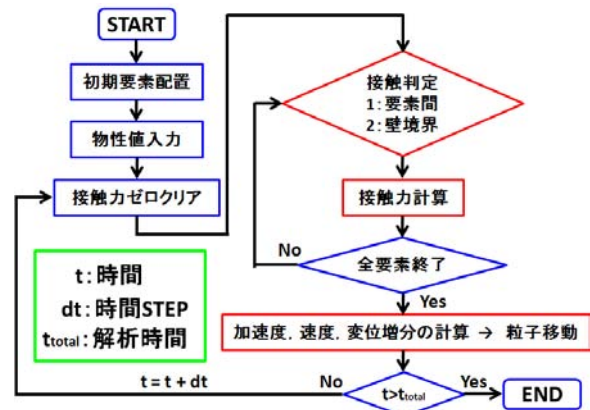
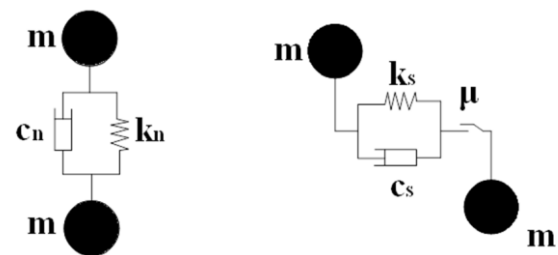


図-1 個別要素法の解析フロー



(a) : 法線方向

(b) : せん断方向

図-2 個別要素法の要素間モデル

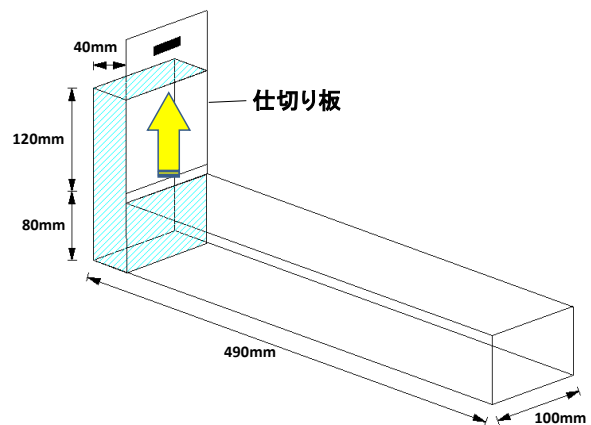


図-3 小型 L フロー試験器

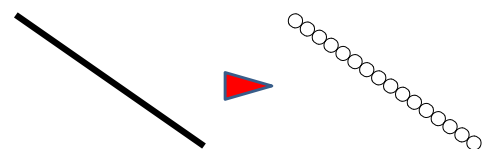


図-4 球形要素による短繊維のモデル化

モデルモルタルと呼ぶ。ここで、水と珪酸アルカリ溶液の比率は 1:8 とし、これは水ガラスが一般的なセメントモルタルと同程度の流動性（モルタルフロー値で 200mm 程度）を示すようにするためである。本実験で使用した水ガラスは、190mm のフロー値を示した。また、水ガラ

スは、フロー性状がセメントモルタルと同程度であるが、小型Lフロー実験においては流動速度が大きいという特徴がある。

短繊維については、視認性を高めるため、赤いラッカーで着色した。モデルモルタルを図-3に示す小型Lフロー試験器に投入し、仕切り板を引き上げて流動させ、その様子をデジタルカメラとビデオカメラで撮影した。

## 4. 結果

### 4.1 初期条件

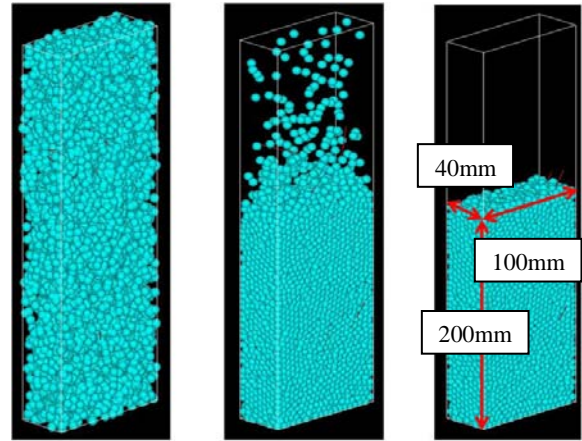
解析と実験が同程度の初期条件の下で行われたことを確認するために、図-8、図-9にモデルモルタル部を拡大した、解析モデルと実験時の写真を示す。なお、図-8は小型Lフロー試験器の側面から見た図であり、図-9は背面から見た図である。図-8(a)、図-9(a)はモルタル部を除き、繊維のみを可視化した解析モデルである。図-8、図-9より、解析、実験共に、繊維がほぼ均等に分布し、配向角度もランダムに分散していることが確認できた。また、いずれにおいても短繊維の沈降や浮上などは確認されず、解析と実験の初期条件はほぼ同程度といえる。

### 4.2 解析条件

表-1に、解析で用いたパラメータを示す。ばね定数と粘性係数は、既往の研究<sup>9)</sup>から推定された値を参考とした。実際には、モルタルと短繊維ではこれらの材料定数は異なると考えられるが、それを証明する実験的な知見がないため、本解析においてはモルタル、短繊維ともに同じ値とした。また、要素間と、要素と壁境界間の摩擦係数は0とした。

### 4.3 鋼繊維を用いたモデルモルタル

図-10に、短繊維の種類を鋼繊維として解析したモデルモルタルの流動性状を示す。図-10は、モデルモルタルが10cmと22cmに達したときの解析結果と実験結果である。図-10より、解析と実験の両方の場合で、鋼繊維が流動方向に向くことが確認できた。また、実験ではモデルモルタルの流動速度が次第に小さくなる様子も観察



(a) : 初期 (b) : 落下中 (c) : 落下後

図-5 要素のパッキング

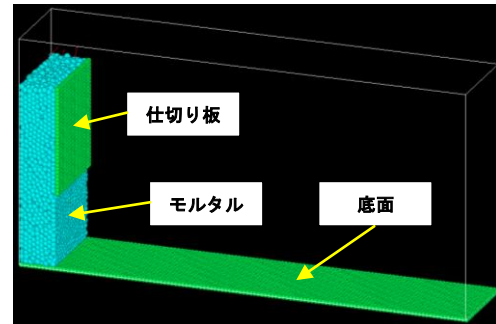


図-6 解析モデル

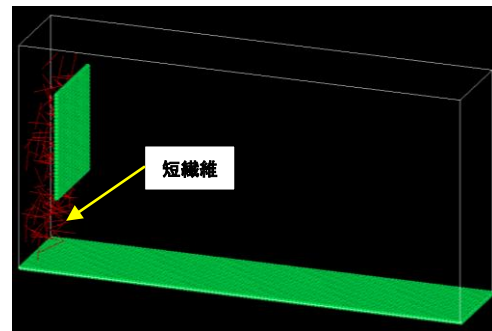
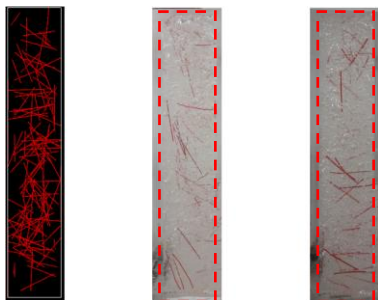
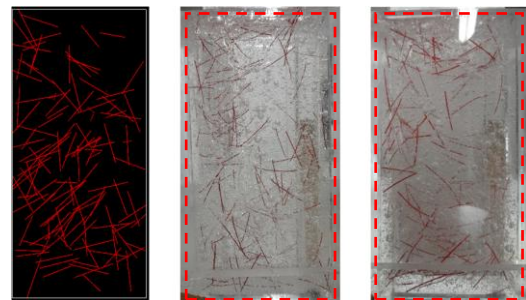


図-7 解析モデル (短繊維のみ可視化)



(a) : 解析 (b) : 鋼繊維 (c) : PP 繊維

図-8 繊維の配向状況 (側面図)



(a) : 解析 (b) : 鋼繊維 (c) : PP 繊維

図-9 繊維の配向状況 (背面図)

表-1 解析パラメータ

材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ばね定数 (N/mm)		粘性係数 (N・s/mm)		重力加速度 (m/s <sup>2</sup> )	時間ステップ (s)
		法線方向	せん断方向	法線方向	せん断方向		
水ガラス (鋼繊維)	2.5	0.236	0.059	0.001	0.001	9.81	1.0×10 <sup>-6</sup>
水ガラス (PP 繊維)				0.0001			
鋼繊維	8.0			0.001			
PP 繊維	0.91			0.0001			



図-10 モデルモルタルの流動性状 (鋼繊維) (左: 解析結果 右: 実験結果)

することができ、解析でもその傾向が見られたため、3次元個別要素法により、流動中の鋼繊維の動きを定性的に評価可能であることが示された。今後はパラメータやモデルモルタルのフレッシュ性状の検討を行い、壁面との摩擦も考慮することで、実験の条件をより正確に再現する必要がある。

#### 4.4 PP 繊維を用いたモデルモルタル

図-11に、短繊維の種類をPP繊維として解析したモデルモルタルの流動性状を示す。表-1に示すようにPP繊維の場合、法線方向の粘性係数を鋼繊維の値である0.001以上にすると計算が破綻するため、より小さい値として、鋼繊維の値の1/10とした。

短繊維の種類を変えても、繊維は流動方向に向いて移動することが確認された。実験では、何本かのPP繊維はモデルモルタルからの流体力を受け、一時的に大きく変形することもあったが、それが他の繊維の流動を阻むようなことはなかった。このことから、繊維の物性値や形状が、モデルモルタルの流動性状に特段大きな影響を及ぼすことはないと推察される。以上の

ことから、3次元個別要素法により、流動中のモデルモルタル中の短繊維の挙動や配向性は、定性的には十分に評価可能であるといえる。

しかし、本解析および実験では、繊維の本数が比較的小さいため、繊維混入率をさらに増加させた場合は、繊維同士が干渉し合い、モデルモルタルの流動性状に影響が表れるものと予想される。よって、今後は繊維混入率が流動性状に及ぼす影響についても検討する必要がある。

#### 4.5 短繊維の配向性

小型Lフロー試験器の側面から観察する限りでは、解析、実験共に短繊維は流動方向に向くことが確認できたが、流動中のモデルモルタルの平面図から、短繊維の流動方向に対する配向角度を調べることで、3次元個別要素法の妥当性を検証した。

図-12、図-13にモデルモルタルの平面図を示す。実験結果を見ると、いずれの短繊維の場合も、側面図と同様に流動方向に向いていることが確認できる。初期状態はランダムに配向していたものが、流動開始と

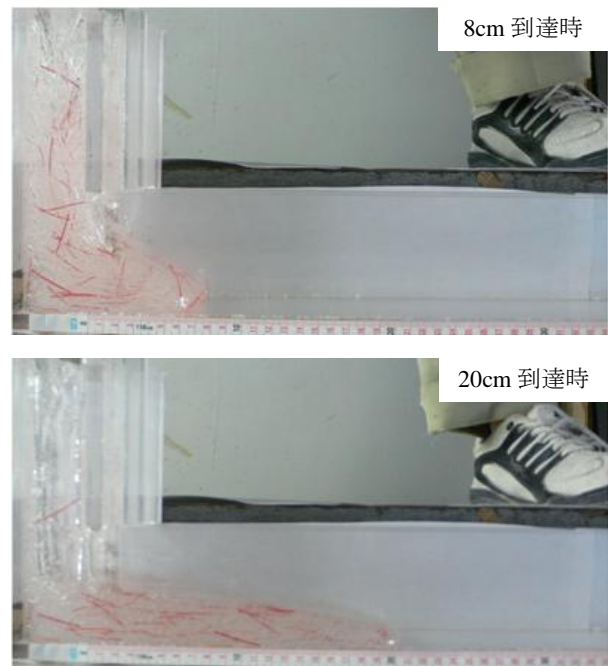
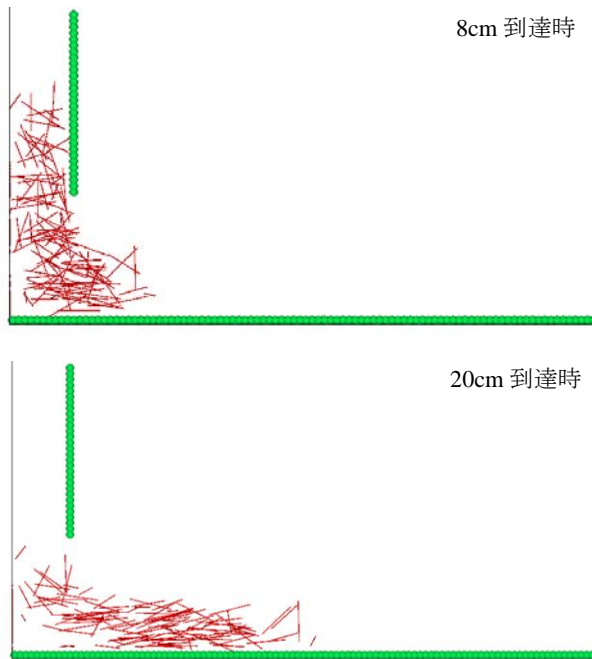


図-11 モデルモルタルの流動性状 (PP 繊維) (左: 解析結果 右: 実験結果)

同時にモデルモルタルに引っ張られることでその配向を変えはじめ、流動方向に対してほぼ水平となったものと推察される。一方解析結果を見ると、ある程度短繊維は流動方向に向いているものの、流動方向に対してほぼ水平とはいえない。これは、前述のようなパラメータ等の影響の他に、短繊維のモデル化の方法が適切でなかったことが原因として考えられる。本解析では、短繊維はすべて球形要素でモデル化しており、実際の短繊維の表面形状を正確に再現しているとは言い難い。また、要素間の摩擦係数を0としても、短繊維要素の周りのモルタル要素はほとんど流動方向にしか動かないため、短繊維も初期状態の配向をあまり変化させずに流動したのと考えられる。

図-14、図-15は、図-12、図-13で示した短繊維の配向角度のヒストグラムである。なお、角度が小さいほど、流動方向に短繊維が配向していることを意味する。鋼繊維の場合、解析では30~40°付近の配向角度が最も多く、実験ではそれよりも小さい1~20°の配向角度が半数近くを占め、30~40°付近のものは少なかった。PP繊維の場合、解析結果は鋼繊維のものと同様分布を示し、実験結果も1~10°の範囲については鋼繊維同様かなり多い結果となった。その他の範囲では、特に70~90°のものが解析と実験で、比較的良い一致を示した。異なる短繊維を用いた場合でも、実験では配向角度が1~10°のものが多いということが明らかとなり、これはモデルモルタルの粘性が非常に強いためと考えられる。しかし、ピーク位置が異なるものの、解析と実験の両方の場合において、ヒ

ストグラムの形状は山型を示し、ある角度の短繊維が多く存在するという傾向が確認できた。ただし、短繊維の配向の定量的な評価については、今後の課題としたい。

## 5. まとめ

3次元個別要素法を用いた短繊維補強モルタルの流動解析手法を構築し、可視化実験により、解析の妥当性の検証を試みた。以下に本研究で得られた知見と今後の課題を示す。

- (1) 3次元個別要素法により、セメント系材料を模擬した粘性材料中の短繊維の動きを、定性的にはあるがシミュレートすることができた。
- (2) 水ガラスと短繊維 (PP 繊維, 鋼繊維) を用いた可視化実験により、粘性材料中の短繊維の流動性状や配向性を確認することができた。

今後、セメント系材料のレオロジー定数と個別要素法の各パラメータとの関係の検証、ならびに短繊維の変形などを再現できるモデルの高度化などが必要である。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究 (B) 「離散化された繊維補強材料のライフスパン解析手法の構築と新材料開発への応用」(代表者: 国枝稔) により実施したものである。ここに記して謝意を表す。



図-12 モデルモルタルの流動性状(鋼繊維, 平面)  
(上: 実験結果 下: 解析結果)



図-13 モデルモルタルの流動性状(PP 繊維, 平面)  
(上: 実験結果 下: 解析結果)

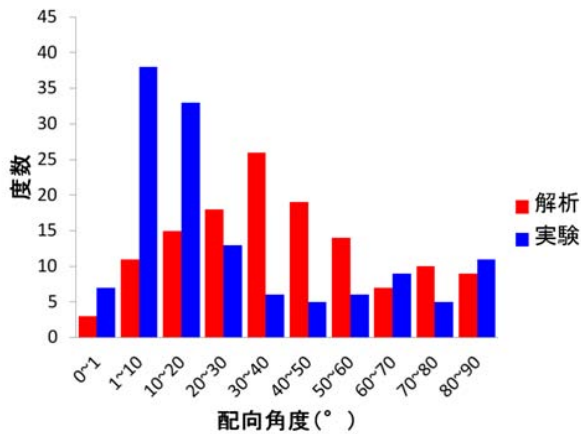


図-14 鋼繊維の配向角度 (132 本)

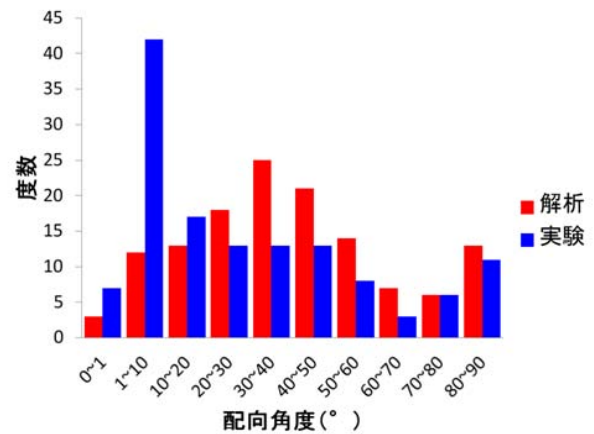


図-15 PP 繊維の配向角度 (132 本)

参考文献

- 1) 国枝稔, 小澤国大, 小倉大季, 上田尚史, 中村光: 短繊維を離散化した3次元メソスケール解析手法によるひずみ硬化型モルタルの引張破壊解析, 土木学会論文集E, Vol.66, No.2, pp.193-206, 2010.6
- 2) 遠山裕一, 国枝稔, 上田尚史, 中村光: セメントモルタルの流動解析へのCIP法の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1423-1428, 2009.6
- 3) 富山潤, 入部綱清, 山田義智, 伊良波繁雄: ビンガム流体の流動解析におけるMPS法の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.43-48, 2007.6

- 4) Matsushima, T. and Saomoto, H.: Discrete Element Modeling for Irregularly-shaped Sand Grains, Proc. NUMGE2002: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat(ed.), pp.239-246, 2002.
- 5) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション—拡張個別要素法で破壊を追う—, 森北出版, pp.14-38, 1997.10
- 6) 平野優, 白岩誠史, 中島有一, 町田篤彦: 個別要素法による高流動コンクリートの流動性状評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.907-912, 2000.6