

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656319

研究課題名(和文) 流体力学的アプローチによる ECC の繊維配向性の評価

研究課題名(英文) Evaluation of fiber orientation of ECC considering fluid mechanics

研究代表者

金久保 利之 (Kanakubo, Toshiyuki)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：90261784

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000 円

研究成果の概要(和文)：マトリックスの粘性が大きい ECC (Engineered Cementitious Composite) では、打設の方向、型枠の形状および大きさにより繊維の配向性が影響を受け、さらに繊維混入率によっても配向性が異なる。繊維配向角分布を楕円関数で近似することによって、配向強度および主配向角により繊維配向を定量的に表現した。繊維配向を制御することを目的とし、髪をとかす「くし」を模した器具を作製し、繊維がくしの歯の間を通過することで繊維を強制的に配向させる打設方法を提案した。可視化実験および曲げ試験を通して、配向制御の有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The fiber orientation distribution is affected by casting direction, formwork geometry, and fiber volume fraction in Engineered Cementitious Composite (ECC), in which the cement matrix has a high viscosity aiding the random distribution of the fine fibers. To evaluate the fiber orientation distribution quantitatively, an approximation methodology using an elliptic function was introduced. The elliptic distribution is characterized by the principal orientation angle and the orientation intensity.

For the purpose of controlling fiber orientation, a new device like a comb is set in the mold of specimen. It is expected that fibers are rearranged along the axial direction by passing through the teeth of the comb. The results of the visualization simulation using water glass solution and bending test of notched beam specimens indicate the effectiveness for fiber orientation control.

研究分野：建築材料・構造

キーワード：繊維補強セメント複合材料 配向性 可視化 流動解析 配向強度 楕円分布 くし

1. 研究開始当初の背景

ECC (Engineered Cementitious Composite) とは、粘性の高い均質なモルタルに高性能な短繊維を 1~2%程度練混ぜ、硬化後、一軸引張応力下で微細な複数ひび割れ (マルチプルクラック) を伴いながら数%の歪に至るまで引張応力が增大する (疑似歪硬化) 性状を示す、非常にユニークなセメント系複合材料である。ECC の利用としては、日本において世界で始めて鉄筋コンクリート造集合住宅の境界梁に使用されるなど、大変形を受ける耐震要素に適用されており、材料特性を生かした ECC の利用拡大が期待されている。

ECC におけるひび割れの発生と開口、およびひび割れが局所化することで決定される引張性能は、繊維の分散性と配向性および繊維とマトリックスの付着性能 (これらを含めたものは、架橋性能といわれる) に支配される。マクロ的な架橋性能を論じるときの繊維の配向性はランダムであると仮定されることが多く、また、単繊維の引抜実験により付着性能を得た例は少ない。特に繊維の架橋性能は、ひび割れ開口に対して繊維が角度を有することにより付着力が増加するスナッピング効果に影響を受けると考えられており¹⁾、ECC のひび割れ性状および引張性能を評価する上で、繊維の配向性を把握することが重要である。

硬化後の ECC の繊維配向性の把握を試みた研究²⁾の結果の一例を図 1 に示す。曲げ試験を行った供試体からコア抜きした直径 10mm のシリンダーのマイクロフォーカス X 線 CT システムによるスキャン画像である。打設方向は裏方向からであり、図中 X 方向が供試体の軸方向である。マトリックスが軸方向に流れることによって、繊維が配向する傾向が見られる (繊維の直径は 0.04mm、長さは 12mm)。

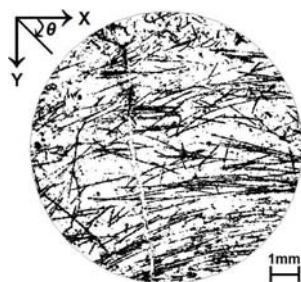


図 1 硬化後の ECC における繊維配向性

2. 研究の目的

本研究では、ECC のフレッシュ時の性状を、粘性の大きい流体 (マトリックス) およびその中を流れる繊維によるものと見なし、流体力学的アプローチによる実験的および解析的な流れ場の把握を通して、打ち込み時における繊維の配向性を評価する。さらに、配向性の評価と ECC の引張性能を関連づけ、施工性および力学性能の両者を考慮した ECC の打設方法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 繊維の配向性可視化実験と定量的評価

①実験の概要

実際の ECC と同様の繊維配向挙動を模擬するためには、短繊維混入前におけるフレッシュモルタルと同等な流動性を有する透明な液体の選定および調整が必要である。模擬 ECC の使用材料を表 1 に示す。ECC のマトリックスに相当する部分には珪酸ナトリウム溶液 (以下、水ガラス) を用い、繊維には PVA (Polyvinyl Alcohol) 繊維を用いた。

流動性の調整には、土木学会標準「PC グラウトの流動性試験方法」に準拠し、JP 漏斗を用いたフレッシュモルタルの流下時間を指標とした。参考とするモルタルの調合を表 2 に示す。本研究では、水ガラスと純水の質量比を 12 : 1 とすることを原則とした。

繊維配向性の観察を容易にするため、混入する PVA 繊維と同様の配向性になるという仮定の下、ターゲットとなる色のついたナイロン繊維を体積混入率で 0.05% 混入し、ターゲット繊維の配向を観察した。

引張試験体と曲げ試験体 (断面 100mm×100mm : 大、40mm×40mm : 小) の計 3 種類の試験体 (図 2) を想定し、打設

表 1 模擬 ECC の使用材料

種類	名称	物性・寸法
マトリックス	珪酸ナトリウム溶液	密度 : 1.71g/cm ³
練混ぜ水	純水	—
繊維	PVA 繊維	径 : 0.10mm 長さ : 12mm 密度 : 1.30g/cm ³

表 2 モルタルの調合 (kg/m³)

W	C	S	F	Ad	増粘剤
380	678	484	291	6	1.91

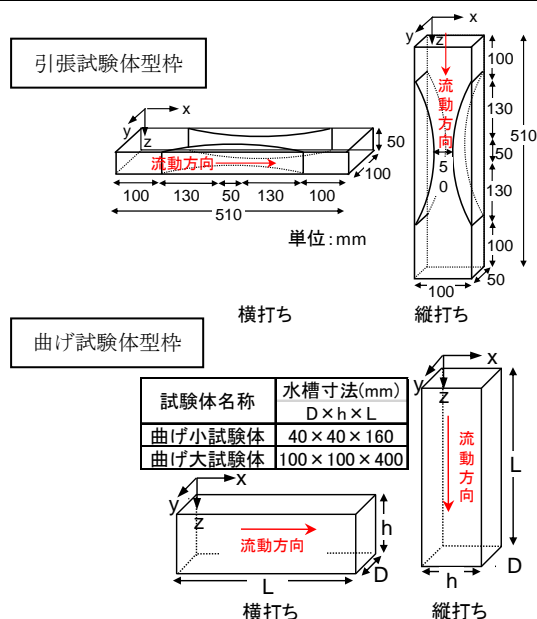


図 2 試験体型枠

方向(縦、横)と繊維体積混入率 5 水準(0.1%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%) を実験要因とした。型枠は透明なアクリル板で作製し、型枠の開口部端部から水ガラスを流し込んだ。それぞれの側面に設置したデジタルカメラで流動時と打設後の様子を撮影した。

②繊維配向の評価

繊維配向角分布を定量的に評価する手法として、配向強度 k と主配向角 θ_r ($-90^\circ \leq \theta_r \leq 90^\circ$) を採用する。配向角分布の各階級の相対度数に対して、配向角を偏角とする平面座標に変換し、差の二乗が最小になるように楕円による近似を行い、楕円の径 (a および b) と、径と座標軸のなす角 θ_r を得る。 k は楕円の長径と短径の比である。繊維配向角の分布が一樣な場合 $k=1$ となり、 $k>1$ の場合は θ_r について配向性が強いことを示す。この近似を全ての実験結果に対して行い、主配向角—繊維体積混入率の関係(図 3) および配向強度と繊維体積混入率の関係(図 4) を得た。

図 3 より、引張試験体ならびに曲げ試験体(大)では、より試験体軸方向に繊維が配向している様子が確認できる。図 4 より、引張試験体では繊維体積混入率が増加すると配向強度は顕著に減少するが、曲げ試験体では縦打ちの場合を除いて配向強度に大きな変化がない。繊維体積混入率が 2.0% の配向強度を比較すると、引張試験体では縦打ちと横打ちの場合で 5 以上の差があり、打設方向の違いが繊維配向に影響を及ぼしていることが確認できる。

③楕円近似における実験結果の扱い

楕円近似における配向分布の総度数が少ない場合、度数の少ない区間において精度よく近似できない恐れがある。そこで級間隔を検討対象として、楕円近似の精度を検討する。

検討の対象とする分布は、総度数が少ない曲げ試験体(小)、総度数が多い曲げ試験体(大)、試験体軸方向に顕著に配向が見られた引張試験体から得られた分布の計 3 種類と

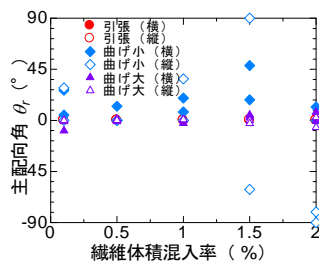


図 3 主配向角—繊維体積混入率関係

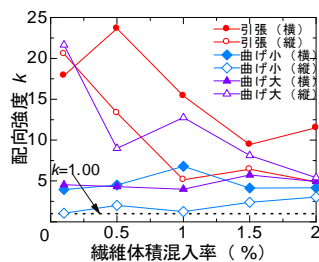


図 4 配向強度—繊維体積混入率関係

する。それぞれの試験体につき打設方向が横打ちの 5 種類の繊維体積混入率(0.1%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%) について、級間隔を変動因子として検討を行った。各試験体から得られた分布の総度数の平均値を表 3 に示す。

配向角の級間隔の違いを比較するために、各級間隔における繊維体積混入率ごとの配向強度および主配向角を図 5 に示す。曲げ試験体(小)では、配向強度、主配向角ともに他の試験体と比較して級間隔の違いによるばらつきが大きい。曲げ試験体(大)では、配向強度、主配向角ともに級間隔の違いによる差は大きくなく、総度数が十分大きければ、 15° の級間隔でも評価可能であると考えられる。引張試験体では、級間隔 10° までは配向強度の違いは大きくないが、級間隔 12° では配向強度の増減がみられる。精度よく楕円近似を行うためには、ある程度小さい級間隔を用いる必要がある。

表 3 各試験体の総度数の平均値

曲げ試験体(小)	曲げ試験体(大)	引張試験体
106	488	260

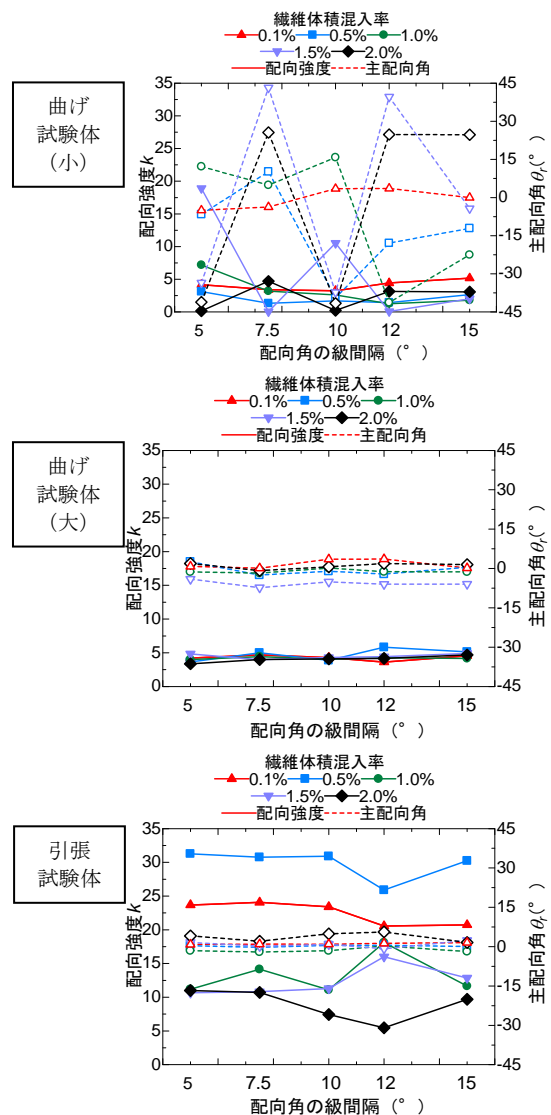


図 5 級間隔と配向強度

(2) 硬化 ECC の引張および曲げ試験

① 実験の概要

引張および曲げ試験に用いた試験体形状は、図 2 (曲げ試験体は大) と同一形状である。繊維配向性に差異を生じさせるため、試験体の打設方向は縦打ち (V) および横打ち (H) とした。

② 実験結果

引張試験体の引張応力-ひび割れ幅関係および曲げ試験体の曲げモーメント-曲率関係を図 6 に示す。TV20 は TH20 に比べひび割れ発生以降の引張応力が小さい。BV20 と BH20 を比較すると、横打ちである BH20 の曲げモーメントの方が BV20 より大きい。

(3) 打設時の ECC の流動解析

① 解析手法

コントロールボリュームによる有限差分法 FDM (Finite Difference Method) に基づく、汎用 3 次元数値流体力学ソフトウェアを用いて、流体中の繊維を大きさ 1 の方向ベクトルとして置き換え、数値解析を行った。繊維の方向ベクトルの時間的変化を求め、ベクトルの X、Y、Z 成分を出力し、繊維配向角を算出した。

② 解析条件

可視化実験でモルタルの粘性の指標とした JP 漏斗の流下時間を利用し、同一の境界条件で解析を行って、流下時間 (37s) と等しくなるように粘性係数を決定する。流下時間 37s となる際の粘性係数は $4.07\text{Pa}\cdot\text{s}$ であった。モルタルマトリックスの流込み完了時間は、実際の打設を参考に、曲げ試験体 (大) では 42s、曲げ試験体 (小) では 15s、引張試験体では 23s とした。

③ 解析結果

繊維配向角分布を定量的に評価するため、可視化実験と同様に、配向強度 k および主配向角 θ_r を用いた。各試験体の配向強度 k と主配向角 θ_r の関係を図 7 に示す。各試験体の横打ちの場合の配向強度 k は縦打ちの場合

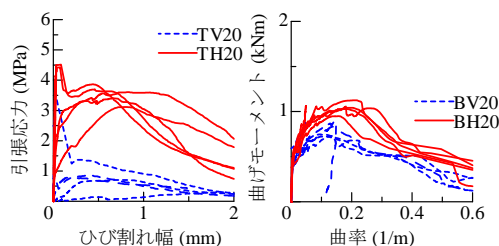


図 6 引張試験・曲げ試験結果

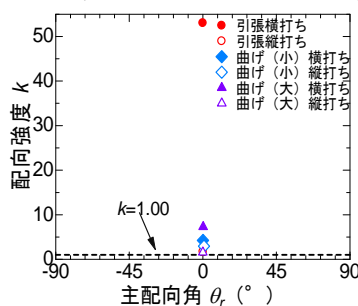


図 7 配向強度と主配向角

より大きく、横打ちの場合は繊維がより流動方向に配向し、各試験体の主配向角 θ_r がほぼ同じことが確認できる。横打ちの場合、引張試験体では曲げ試験体に比べ、配向強度 k の違いが顕著である。

④ 流体速度と繊維配向角の関係

流体速度と繊維配向角の関係を検討するために、打込み時間 (流速) を因子とした解析を行った。対象とした試験体は、引張試験体および曲げ試験体 (大) で、打込み方法は横打ちとした。

計算メッシュごとの代表流体速度を出力し、隣り合うメッシュの流体速度の大きさの差 Δv および平均流動方向 θ_v を算出する。解析による繊維配向角 θ_f と θ_v の差の絶対値である $|\theta_f - \theta_v|$ と Δv の関係を検討する。 $|\theta_f - \theta_v|$ の値が小さいと流動方向に沿う繊維の配向性が強いことを示す。

引張試験体における $|\theta_f - \theta_v|$ と Δv の関係を図 8 に示す。XY 平面においては、 Δv の分布による $|\theta_f - \theta_v|$ の値に曲げ試験体のような傾向はみられず、最大でも繊維角度の差は $20\sim 30^\circ$ であった。

(4) 繊維配向性を考慮した新しい打設方法

本研究で提案する打設方法の模式図を図 9 に、くしの詳細を図 10 に、打設方法を図 11 に示す。「流込み (N)」を基準とし、試験体端部から 150mm の位置に歯 2 本のくしを設置して流し込む「歯 2 本・固定 (C2)」、同じ位置で歯 3 本のくしを設置する「歯 3 本・固定 (C3)」および流込み後に歯 2 本のくしを 200mm 移動する「歯 2 本・移動 (CM)」を行った。

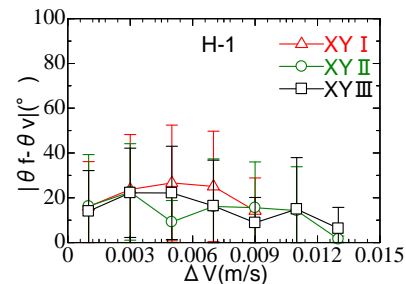


図 8 引張試験体の解析結果

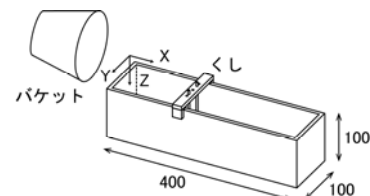


図 9 打設方法の模式図 (単位: mm)

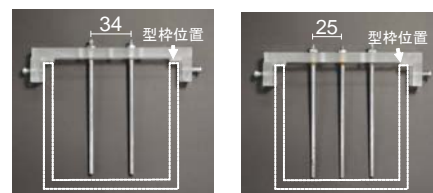


図 10 くし (左: 歯 2 本、右: 歯 3 本)

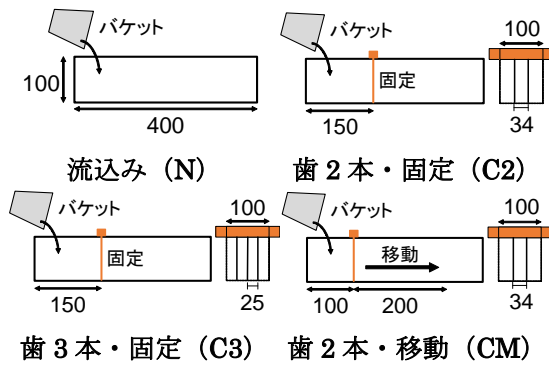


図 11 打設方法 (単位: mm)

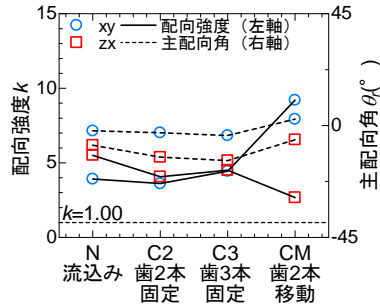


図 12 配向強度および主配向角の比較

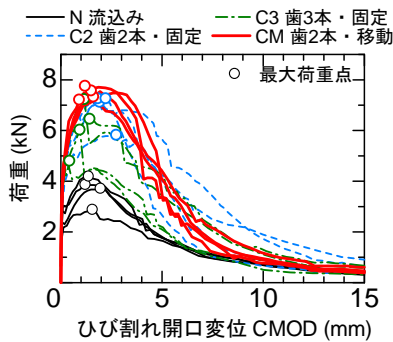


図 13 荷重一ひび割れ肩口開口変位関係

①可視化実験

くしを用いることによるマトリックス中の繊維挙動を把握するため、水ガラスを用い、打設時のマトリックス中の繊維を型枠上面(xy平面)と側面(zx平面)から撮影し、画像解析を行った。

打設方法による配向強度および主配向角の比較を図 12 に示す。xy 平面では、歯 2 本・移動 (CM) 試験体の配向強度の値が大きく、かつ主配向角も 0° 近傍であることから、試験体軸方向に繊維配向が強まる傾向が確認できる。

②切欠き梁の 3 点曲げ試験

荷重一ひび割れ肩口開口変位 (CMOD) 関係を図 13 に、各試験体の破壊エネルギーの比較を図 14 に示す。なお、CMOD で 15mm までの曲線下の面積により破壊エネルギーを求めた。くしを用いた C2、C3、CM 各試験体の最大荷重は、いずれも流込み (N) 試験体よりも大きい。その一方で、くしを固定した C2 および C3 試験体では最大荷重のばらつきが大きい。破壊エネルギーに関しては、C2 および CM 試験体の破壊エネルギーが大きく、特に CM 試験体ではばらつきが小さ

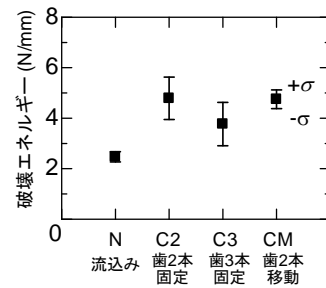


図 14 破壊エネルギーの比較

い。くしを移動させることで、試験体断面全域にわたって繊維の配向性が試験体軸方向に揃う傾向が強くなり、ひび割れの架橋性能が向上してばらつきも小さくなると考えられる。

4. 研究成果

可視化実験の結果より：

- (1) 曲げ試験体では、試験体寸法が大きい場合の方がより試験体軸方向への配向が強まる。
- (2) 引張試験体では、繊維混入率に大きく影響を受け、繊維混入率が増加すると配向強度は顕著に減少する。
- (3) 曲げ試験体よりも引張試験体の方が打設方向の違いによる影響を受ける。
- (4) 繊維配向角分布を楕円近似によって評価する場合、総度数が 500 程度以上の分布では級間隔を 15° としても評価可能である。
- (5) 総度数が 250 程度の場合、級間隔を大きくするとばらつきが見られるようになり、級間隔を 10° 以下とするべきである。

硬化 ECC の引張および曲げ試験より：

- (6) 横打ち試験体の方が強度、変形能が大きく、打設方向が繊維の配向性に影響を与えていると考えられる。

ECC の流動解析の結果より：

- (7) 各試験体において、横打ちの方が縦打ちに比べてより流動方向に対して強く配向する。
- (8) 横打ちの場合、引張試験体は曲げ試験体に比べ、配向強度の違いが顕著であった。
- (9) 曲げ試験体では、計算メッシュの流体速度の大きさの差が大きくなるほど、平均流動方向と繊維配向角との差が小さくなり、流動方向に沿う繊維の配向性が強まる傾向があった。
- (10) 引張試験体では、最大でも平均流動方向と繊維配向角との差は 20~30° であった。試験体の形状の違いにより、繊維の配向性が影響を受けると考えられる。

くしを用いた新しい打設方法の検討より：

- (11) 可視化実験では、くしを移動させた場合に最も高い配向強度を示した。
- (12) 切欠き梁の 3 点曲げ試験では、くしを設置した試験体の最大荷重および破壊エネルギーが増大した。特に、くしを移動した試験体では、最大荷重と破壊エネル

ギーが増大し、試験体間のばらつきが小さくなった。

繊維の分散性を担保するためにマトリックスの粘性が大きい ECC では、打設方向、型枠の形状および大きさにより繊維の配向性が影響を受け、さらに繊維混入率によっても配向性が異なる。繊維配向角分布を楕円関数で近似することによって、配向強度および主配向角により繊維配向を定量的に表現した。

繊維の配向性は、このように種々の影響を受けるため、むしろ、本研究で提案したような配向性を制御する手法を見いだし、繊維の架橋効果を有効に引き出せる方法を検討するべきであると考えられる。本研究では材料試験レベルの大きさでの検討のみであるため、今後、実部材を想定した大きさの部材実験によって、繊維配向性および架橋性能に及ぼす影響を検討する必要がある。

<引用文献>

- 1) Li, V.C.: From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol.10, No.2, pp.37-48, 1993
- 2) 浅野浩平, 金久保利之: X線 CT スキャンを用いた可視化による ECC 内部での繊維配向性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.537-538, 2011.8

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ①浅野浩平, 金久保利之: HPFRCC における繊維の配向性が引張性状に及ぼす影響 - 繊維配向角分布の評価と曲げ性状における寸法効果, 日本建築学会構造系論文集, 第 692 号, pp.1673~1678, https://www.jstage.jst.go.jp/browse/aijs/78/692/_contents/char/ja/, 2013.10 (査読あり)

[学会発表] (計 9 件)

- ①宮口 大, 金久保利之: HPFRCC における繊維配向角分布の評価方法に関する考察, 日本建築学会大会, 2015.9.6, 東海大学 (神奈川県)
- ②万 子銘, 月崎良一, 宮口 大, 金久保利之: HPFRCC の打込みにおける繊維の流動解析, 日本建築学会大会, 2015.9.6, 東海大学 (神奈川県)
- ③渡邊 啓介, 宮口 大, 月崎良一, 金久保利之: 繊維配向性を考慮した HPFRCC の新しい打設方法, 日本建築学会大会, 2015.9.6, 東海大学 (神奈川県)
- ④月崎良一, 宮口 大, 万 子銘, 浅野浩平, 金久保利之: HPFRCC における繊維の配

向性に関する研究 (その 1: 引張および曲げ試験結果), 日本建築学会大会, 2014.9.14, 神戸大学 (兵庫県)

- ⑤宮口 大, 月崎良一, 万 子銘, 浅野浩平, 金久保利之: HPFRCC における繊維の配向性に関する研究 (その 2: 繊維の配向性可視化実験), 日本建築学会大会, 2014.9.14, 神戸大学 (兵庫県)
- ⑥万 子銘, 月崎良一, 宮口 大, 浅野浩平, 金久保利之: HPFRCC における繊維の配向性に関する研究 (その 3: 流動解析結果), 日本建築学会大会, 2014.9.14, 神戸大学 (兵庫県)
- ⑦浅野浩平, 金久保利之: 高性能繊維補強セメント複合材料における繊維配向性を考慮した架橋則に関する研究, 日本建築学会大会, 2014.9.14, 神戸大学 (兵庫県)
- ⑧金久保利之, 浅野浩平: 高性能繊維補強セメント複合材料における繊維の配向性に関する研究 (可視化実験による繊維配向性の検討), 日本建築学会大会, 2013.9.1, 北海道大学 (北海道)
- ⑨浅野浩平, 金久保利之: 高性能繊維補強セメント複合材料における繊維の配向性に関する研究 (繊維配向角分布の定量的評価と寸法効果), 日本建築学会大会, 2013.9.1, 北海道大学 (北海道)

[その他]

ホームページ

<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2ffc.htm>

<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2ffc-e.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金久保 利之 (KANAKUBO, Toshiyuki)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号: 90261784