

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289188

研究課題名(和文) 配向性を考慮したHPFRCCの繊維架橋則の構築と構造性能の評価

研究課題名(英文) Evaluation of Bridging Law and Structural Performance of HPFRCC Considering Fiber Orientation

研究代表者

金久保 利之 (KANAKUBO, Toshiyuki)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：90261784

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,500,000円

研究成果の概要(和文)：短繊維をセメント系マトリックスに分散混入した高性能繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)の架橋則(ひび割れを繋ぎ止める性能)は、使用する繊維種類に応じて、配向性、スナビング効果および強度低減効果の3者のバランスによって決定される。HPFRCCを打ち込む際にバイブレータや櫛を用いて繊維を再配向させることによって架橋力が増加し、梁の曲げ性能や柱梁接合部のせん断性能が向上する。繊維の配向性を配向強度で評価し架橋則のモデル化を行うことによって、部材の性能を評価することが可能である。

研究成果の概要(英文)：The bridging law of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC), in which short discrete fibers are mixed into cementitious matrix, can be determined by the balances of fiber orientation, snubbing effect, and fiber strength degradation due to orientation angle to crack surface. The bridging force increases by the rearrangement of fiber orientation produced by a vibration rod or device like comb. This increment causes the large effectiveness for improvement of structural performance of beams and beam-column joints. The structural performance of HPFRCC members can be evaluated by the models of bridging law that is characterized by the orientation intensity in the orientation distribution function.

研究分野：建築構造材料

キーワード：繊維補強セメント材料 架橋則 配向強度 配向制御 柱梁接合部 バイブレータ 構造性能 繊維種類

### 1. 研究開始当初の背景

短繊維をセメント系マトリックスに分散混入した高性能繊維補強セメント複合材料 (High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite : HPFRCC) は、引張応力下における複数微細ひび割れと数%に及ぶ引張変形能力で特徴付けられる。この引張性能は、マトリックス中に分散した繊維の架橋則によって決定され、架橋則は、単繊維とマトリックスの付着特性、繊維の分散および配向性、配向角によって架橋能力が変化するスナッピング効果および配向角によって破断強度が低下する有効強度係数で表現される。

しかしながら、HPFRCC の実構造物への利用はあまり進んでいない。その一因として、性能の定量的評価の難しさ、および材料特性のばらつきが大きいことが指摘されよう。特に繊維の配向性は実際は打設時の状況に強く影響され、架橋則を正確に評価することはできていない現状がある。

### 2. 研究の目的

HPFRCC のマトリックス中における繊維の配向性を確率密度関数で表現し、スナッピング効果および有効強度係数を含めて架橋則を正確に評価し、HPFRCC の引張性状および構造性能の評価の構築を行う。特に、配向性分布関数に及ぼす境界条件、すなわち部材の大きさ、HPFRCC の流込みの場所・向き、補強筋 (鉄筋) の有無・向きなどの影響を評価し、HPFRCC 部材の能力を最大限発揮し得る作製方法を提言し、加力実験をともに行って部材の構造性能を評価する。

### 3. 研究の方法

研究の手法は、 $\mu$ CT : ケイ酸ナトリウム水溶液 (水ガラス) を利用した繊維配向性の可視化、 $\mu$ CT : 有限差分法 (FDM) による 3 次元流体解析ソフトを用いた繊維配向性解析、 $\mu$ CT : 同一条件による実際の HPFRCC 試験体の作製と加力実験を 3 つの柱とし、これら 3 つの検討結果の橋渡しを行うものが、配向性を考慮した架橋則である。

対象とした繊維は、HPFRCC としての使用実績がある PVA (ビニロン) 繊維と、さらに繊維種類が配向性と架橋則に及ぼす影響を検討するため、鋼繊維、アラミド繊維、PP (ポリプロピレン) 繊維とした。後者の 3 繊維に関しては、架橋則の構築に必要な単繊維とマトリックスの付着特性を求めるために、単繊維の引抜実験も行った。

### 4. 研究成果

(1) 鋼、アラミド、PP 繊維の引抜性状と架橋則の構築

架橋則の構築のためには、単繊維とマトリックスの付着特性をモデル化し、配向性を考慮してそれらを総和する必要がある。3 種の繊維について、配向角および付着長を変動因

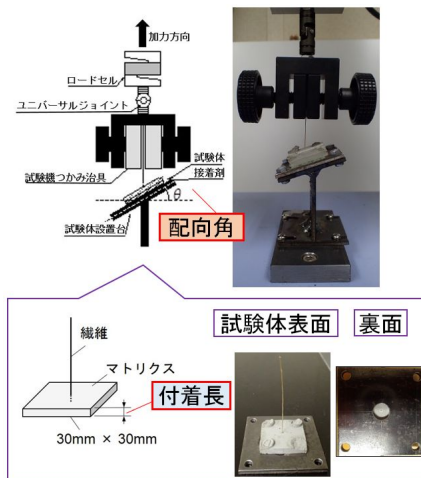


図 1 単繊維引抜試験

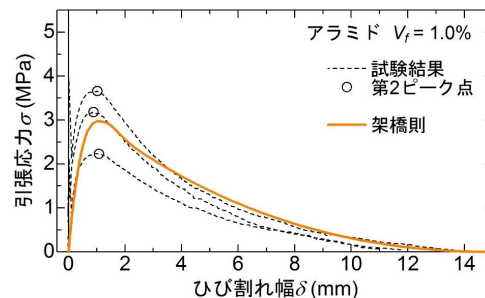


図 2 架橋則の計算結果の例

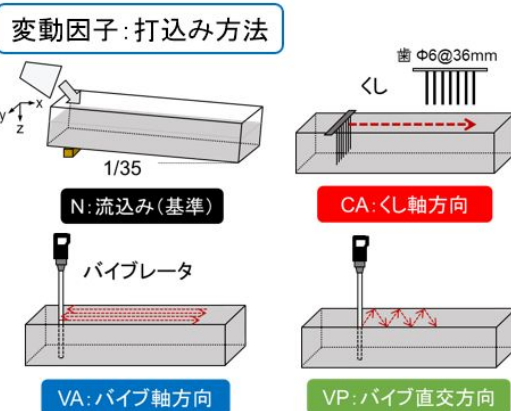


図 3 繊維の配向性を制御する打込み

子とし、図 1 に示す試験体、加力装置を用いて引抜試験を行った。引抜試験結果をパイリニアモデルでモデル化し、研究者らの既往の研究と同様の方法で架橋則を計算した結果、図 2 に示すように、計算結果と HPFRCC の引張試験結果は良好に対応した。したがって、PVA 繊維以外の繊維においても、架橋則の構築が可能となった。

(2) 繊維配向性を考慮した打込みによる部材の性状

繊維配向性の制御を積極的に行うことを目論み、図 3 に示すような棒状パイプレータや櫛を利用した HPFRCC の打込みにより、梁試験体および柱梁接合部試験体を作製した。梁試験体では、棒状パイプレータおよび櫛を軸方向に移動させた試験体において耐力と変形能の向上が見られ、断面観察の結果

から繊維が軸方向に配向する傾向が伺えた。同様の打込み方法で行った水ガラスの可視化実験(図4)においても、パイプレタおよび櫛を軸方向に移動させた試験体において繊維配向が軸方向に強まることが確認でき、流動解析により試験体内部の繊維配向(図5)を把握した。図6に示すように試験体断面位置ごとに配向性の異なる架橋則モデルを導入した断面解析を行い、配向性の強さを示す配向強度( $k$ )によって各試験体の耐力の差異を示した。

柱梁接合部試験体では、パネルゾーンにおけるHPFRCCの打込み方向と棒状パイプレタの向きを変動因子として、図7に示す繊維配向性を变化させた試験体を作製した。流動解析により繊維の配向性を把握した結果、棒状パイプレタによる繊維の再配向を確認することができた(図8左)とともに、打込み位置によっては鉄筋が繊維の流れを抑制する(図8右)ことも確認した。加力実験により得られた梁入力荷重と層間変形角の関係を図9に示す。パイプレタの効果は若干みられたものの、打込み方向の違いによる差異は大きくなかった。パイプレタにより繊維が2次元状に再配向され、打込み方向にかかわらず加力梁に対して繊維架橋の効果と同程度となったと考えられる。ただし、実構造物で直交梁が存在する場合には、縦打ちの方が有効であることが想定される。

### (3) 繊維種類が部材性状に及ぼす影響

柱梁接合部において、繊維種類の違いが構造性能に及ぼす影響を検討することを目的として、PVA繊維試験体に加えて、さらに鋼、アラミド、PP繊維をパネルゾーンに用いた柱梁接合部試験体を作製し、加力実験を行った。繊維体積混入率は、いずれも1%である。実験の結果得られた梁入力荷重と層間変形角の関係を図10に、最大荷重の比較を図11

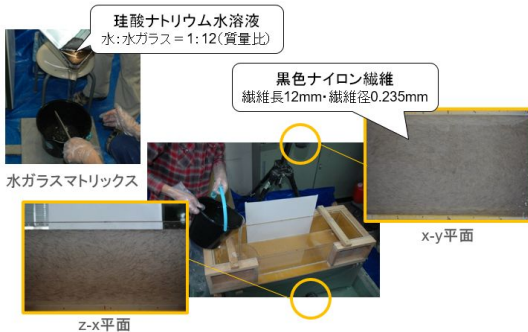


図4 水ガラスによる繊維の可視化実験

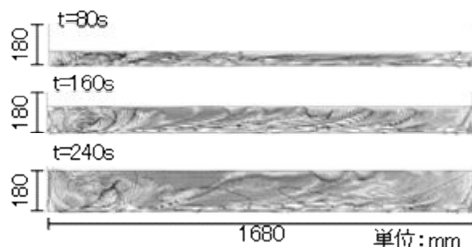


図5 流動解析による打込み時の繊維配向

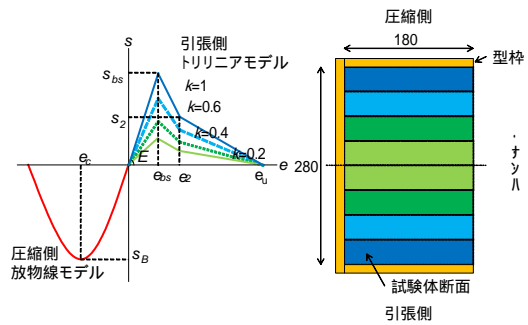


図6 配向性を断面位置で考慮した断面解析

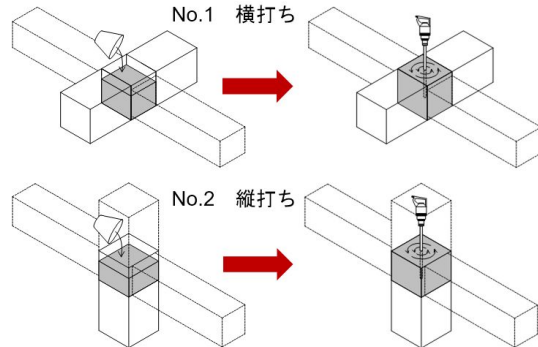


図7 配向性を变化させた柱梁接合部試験体

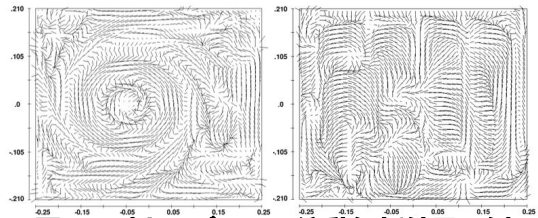


図8 パネルゾーンの流動解析結果の例

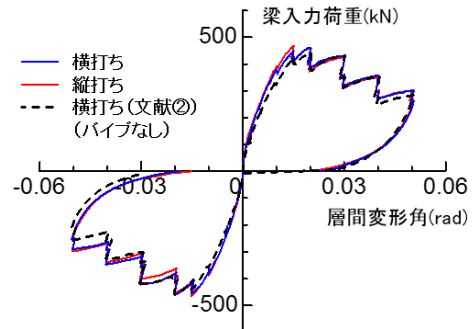
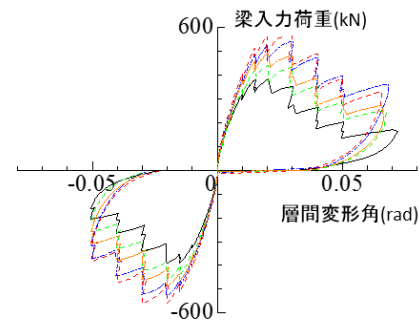


図9 柱梁接合部打込み方向の比較



— 繊維なし    - - - PVA    - - - 鋼  
- - - アラミド    — PP

図10 柱梁接合部繊維種類の比較



に示す。繊維種類による差が明瞭であり、基本的には弾性係数が大きい繊維を用いた試験体の方が最大荷重が大きい。しかしPP繊維の弾性係数はPVA繊維よりも小さく、これはすなわち、架橋則の違いによるものであることを示している。

(4) 架橋則に及ぼす配向強度の影響の定量化

架橋則を梁の曲げ解析や柱梁接合部の強度評価に利用するためには、計算された架橋則そのものをモデル化した方が簡易である。繊維の配向性を示す配向強度によって架橋則がどの程度影響を受けるかを検討する感度解析もあわせて、PVA繊維および鋼繊維を対象として、架橋則のモデル化を行った。

PVA繊維に対して、配向強度  $k$  を 0.1 ~ 10 まで変化させて計算した架橋則を、**図 12** に示す。PVA繊維の場合、配向角の影響は、引抜力が増大するスナッピング効果より強度低減効果の方がかなり大きく、ひび割れ面に対して配向角が大きい繊維が多くなる ( $k$  が小さくなる) ほど、顕著に応力は低下した。

鋼繊維の場合の同様の結果を**図 13**に示す。鋼繊維の場合は強度が十分大きいので、繊維は破断せず、強度低減効果は関係ない。配向強度  $k$  が大きくなるとひび割れを架橋する繊維が多くなるため応力は増加するが、配向角

が大きい繊維が少なくなるのでスナッピング効果が小さくなる。 $k=6$  の時に架橋強度が最大となった。

いずれの繊維においても、架橋則をトリリニアでモデル化し、各特性点を架橋強度で与えるモデルを構築した。感度解析により、繊維種類に応じて、1.配向が軸方向に弱くなることによってひび割れを架橋する繊維本数が減少、2.配向角が大きくなることによって引抜力が増大するスナッピング効果、3.配向角が大きくなることによって破断しやすくなる強度低減効果、の3者のバランスによって架橋性能が決定される。

<引用文献>

T. Kanakubo, M. Miyaguchi, K. Asano: Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composite, Materials Journal, American Concrete Institute, Vol.113, No.2, pp.131-141, 2016

佐野直哉, 八十島章, 山田大, 金久保利之: 接合部にDFRCCを用いたPCa柱梁接合部の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1105-1110, 2015

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

橋本裕子, 山田大, 八十島章, 金久保利之: スチールワイヤの拔出し挙動と架橋則の構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.249-254, 2016 (査読有)

渡邊啓介, 大圖友梨子, 宮口大, 金久保利之: 繊維配向性を考慮した打込み方法がDFRCCの曲げ性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.273-278, 2016 (査読有)

大圖友梨子, 渡邊啓介, 八十島章, 金久保利之: 架橋則に基づくDFRCCの曲げ性状における寸法効果の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1321-1326, 2016 (査読有)

山田大, 八十島章, 佐野直哉, 金久保利之: DFRCCを用いたPCa柱梁接合部のせん断性能における繊維種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1327-1332, 2016 (査読有)

H. Yamada, M. Ando, A. Yasojima, T. Kanakubo: Effect of Fiber Types on Shear Performance of Precast Concrete Beam-Column Joints Using DFRCC, ACF 2016, The 7th International Conference of Asian Concrete Federation, 3. Concrete structures, Paper No.46, 2016 (査読有)

K. Watanabe, Y. Ozu, M. Miyaguchi, T.

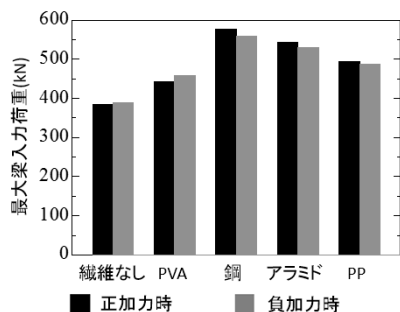


図 11 柱梁接合部最大荷重の比較

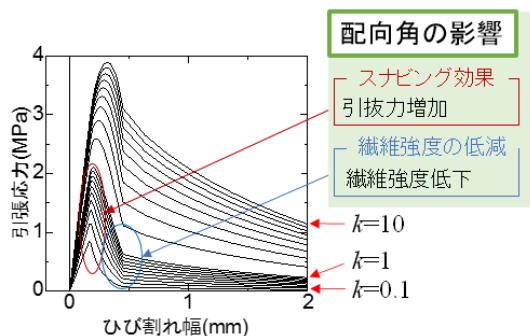


図 12 PVA 繊維架橋則の配向強度の影響

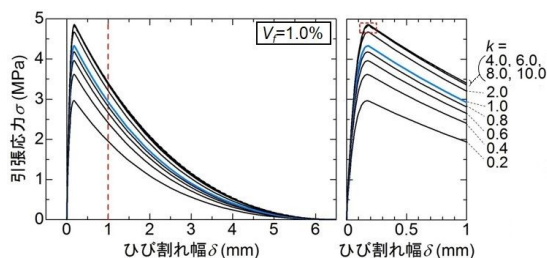


図 13 鋼繊維架橋則の配向強度の影響

Kanakubo: Influence of Placing Method Considering Fiber Orientation to Bending Characteristics of DFRCC, ACF 2016, The 7th International Conference of Asian Concrete Federation, 1. Concrete materials and technologies, Paper No.43, 2016 (査読有)

Y. Ozu, K. Watanabe, A. Yasojima, T. Kanakubo: Evaluation of Size Effect in Bending Characteristics of DFRCC Based on Bridging Law, ACF 2016, The 7th International Conference of Asian Concrete Federation, 3. Concrete structures, Paper No.32, 2016 (査読有)

N. Sano, H. Yamada, M. Miyaguchi, A. Yasojima, T. Kanakubo: Structural Performance of Beam-Column Joint using DFRCC, 11th Canadian Conference on Earthquake Engineering -Facing Seismic Risk-, Paper ID 94163, 2015 (査読有)

宮口 大, 渡邊啓介, 金久保利之: 繊維配向性を考慮した棒状パイプレーターによる HPFRCC の打込み方法, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.265-270, 2015 (査読有)

[学会発表](計 14 件)

山田大: 超高強度鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の配向性が曲げ性能に与える影響, 土木学会年次学術講演会, 2016.9.9, 東北大学(宮城県・仙台市)

金久保利之: 超高強度鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の配向性と架橋則の関係, 土木学会年次学術講演会, 2016.9.9, 東北大学(宮城県・仙台市)

橋本裕子: 超高強度鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の配向性を考慮した曲げ性能の評価, 土木学会年次学術講演会, 2016.9.9, 東北大学(宮城県・仙台市)

大圖友梨子: 繊維配向性を考慮した架橋側モデルに基づく DFRCC の曲げ性状の評価, 土木学会年次学術講演会, 2016.9.9, 東北大学(宮城県・仙台市)

渡邊啓介: 繊維配向性を考慮した打込み方法が DFRCC 部材の曲げ性状に与える影響, 土木学会年次学術講演会, 2016.9.9, 東北大学(宮城県・仙台市)

大圖友梨子: DFRCC の繊維配向性を考慮した架橋則のモデル化, 日本建築学会大会, 2016.8.26, 福岡大学(福岡県・福岡市)

橋本裕子: 超高強度繊維補強コンクリートにおけるスチールワイヤの拔出し挙動, 日本建築学会大会, 2016.8.26, 福岡大学(福岡県・福岡市)

宮口大: 繊維配向性を考慮した打設方法が HPFRCC 部材のせん断性状に及ぼす影響, 日本建築学会大会, 2016.8.26, 福

岡大学(福岡県・福岡市)

渡邊啓介: 繊維配向性を考慮した打込みによる DFRCC 部材の繊維可視化実験, 日本建築学会大会, 2016.8.26, 福岡大学(福岡県・福岡市)

安藤麻衣: 繊維架橋則に基づく DFRCC 柱梁接合部のせん断強度に関する研究(柱梁接合部の実験概要および結果), 日本建築学会大会, 2016.8.26, 福岡大学(福岡県・福岡市)

佐野直哉: 繊維架橋則に基づく DFRCC 柱梁接合部のせん断強度に関する研究(繊維配向性を考慮した MCFT によるせん断強度評価), 日本建築学会大会, 2016.8.26, 福岡大学(福岡県・福岡市)

月崎良一: HPFRCC の引張性状におけるウォールエフェクトに関する実験的研究, 日本建築学会大会, 2015.9.6, 東海大学(神奈川県・平塚市)

山田大: 接合部に DFRCC を用いた PCa 柱梁接合部のせん断性能(実験概要および結果), 日本建築学会大会, 2015.9.6, 東海大学(神奈川県・平塚市)

佐野直哉: 接合部に DFRCC を用いた PCa 柱梁接合部のせん断性能(繊維負担接合部せん断力の検討), 日本建築学会大会, 2015.9.6, 東海大学(神奈川県・平塚市)

[その他]

ホームページ等

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

<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2fr cs.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・教授  
研究者番号: 90261784

(2) 研究分担者

八十島 章(YASOJIMA, Akira)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号: 80437574