

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06164

研究課題名(和文) 超高強度繊維補強コンクリートにおける繊維の配向と力学特性の評価

研究課題名(英文) Evaluation of Fiber Orientation and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete

研究代表者

内田 裕市 (UCHIDA, Yuichi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20213449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)： 超高強度繊維補強コンクリート(UHPC)の繊維の配向と機械的性質の関係を定量的に評価した。UHPC曲げ供試体のひび割れ後の挙動を3点曲げ試験により評価し、X線CTにより繊維の配向を評価した。UHPCの曲げ強度は、破断面の有効繊維本数と線形関係にあることが示された。また、引張軟化特性も有効繊維本数に依存することが示された。繊維が圧縮軸に垂直に配向した供試体は、延性的な圧縮破壊挙動を示した。

研究成果の概要(英文)：The relationship between fiber orientation and mechanical properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPC) was quantitatively evaluated. The post-cracking behavior of the prismatic specimen was assessed with three-point bending tests, and fiber orientation was evaluated using image analysis of fiber orientation based on X-ray CT. The flexural strengths of the specimens indicated perfect linear dependence on the effective number of fibers at the ligament. The tension softening property also depended on the effective number of fibers. The specimen with fibers oriented perpendicular to compression loading axis showed the ductile compression failure behavior.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート 繊維の配向 X線CT 曲げ特性 引張軟化特性 圧縮特性

1. 研究開始当初の背景

現在、我が国では大手建設会社とセメントメーカーで構成される3グループにより超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC: Ultra high strength Fiber reinforced Concrete)実用化されている。一般に、短繊維補強コンクリートでは内部の繊維の配向が硬化コンクリートの力学特性に大きく影響することが知られているが、配向を計測することが難しく、また施工時に配向を制御する方法もないことから研究は大きくは進んでいない。特にUFCは自己充填型のコンクリートであり型枠中をコンクリートが流動するため、繊維の配向性が顕著に現れ、力学特性に大きな影響を与える。

そこで、内部の繊維を肉眼で観察できる無色透明の可視化コンクリートによって繊維の配向を予測するとともに、X線マイクロCT(以下X線CT)によって実際のUFCでの配向を観察することで両手法の有効性を確認することとした。

次に、この観察技術を用いることにより、打込み後のUFCに対して繊維の配向を制御することを目的として、突き棒でUFCをかき乱した場合にコンクリート内部で繊維がどのように動き、配向するかを観察することとした。

さらに、繊維が一定方向に配向する打込み方法を見出し、これにより繊維の配向が制御された供試体を作製し、繊維の配向と力学特性の関係を明らかにすることとした。

2. 研究の目的

本研究ではUFC中の繊維の配向と力学特性に関して以下の3点を明らかにすることとした。

- (1) 可視化コンクリートにより繊維の配向を観察するとともに、実際のUFCについてX線CTにより配向を観察することで、配向を予測・評価するうえでの両手法の有効性を明らかにする。
- (2) 打込み後の突き棒等によるかき乱しの操作による繊維の配向の変化を観察することで、配向に対する操作の有効性を明らかにするとともに、繊維の配向を制御することの可能性を検討する。
- (3) 繊維の配向が制御された供試体を用いて、繊維の配向と力学特性(圧縮、引張)の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

3.1 可視化コンクリートおよびX線CTによる繊維の配向の観察

可視化コンクリートとして、既往の研究に基づき高吸水性高分子材料にPVA繊維を混入したものを用いた。可視化コンクリートを用いた試験体と同一寸法の試験体を実際のUFCを用いて製作し、硬化後に所定の位置から供試体を切出し、X線CTにより繊維の配向を観察した。

3.2 かき乱しによる繊維の配向

可視化コンクリートを用いて型枠内を突き棒でかき乱した場合に繊維がどのように動くかを観察した。特に、可視化コンクリートによりかき乱しの効果が確認された方法について、実際のUFCを用いX線CTにより観察して検証を行った。

3.3 繊維の配向と力学特性の関係

繊維の配向角度が一定の方向に制御された供試体を作製した。配向角度をパラメータとして、切欠きはりの曲げ試験、および圧縮載荷試験を実施する。曲げ試験では荷重-ひび割れ開口変位を計測し、逆解析により引張軟化曲線を推定する。また、圧縮試験では荷重-変形関係を計測し、特に軟化域における荷重-変形関係に及ぼす配向角度の影響を検討した。

4. 研究成果

4.1 可視化モデルコンクリートとX線CTによる繊維の可視化

UFCをはり、スラブおよび壁状の型枠に打込んだ場合の繊維の配向を可視化モデルコンクリートと3DのX線CTにより観察を行った。その結果、可視化モデルコンクリートで観察される繊維の配向はX線CTにより観察される結果と定性的には一致しており(図-1,2)、打込み中の繊維の配向の状況を観察するうえで有効な方法であることが示された(図-3)。一方、X線CTによる観察は、繊維の配向を定量的に評価することが可能であり、硬化後のコンクリートの配向と力学特性の関係を求めるために有効かつ必須の手法であることが示された。



図-1 可視化コンクリートによる繊維の観察

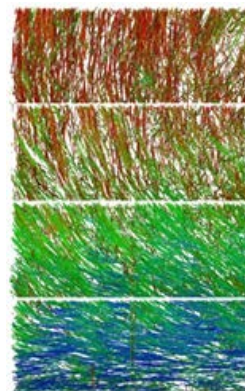


図-2 X線CTによるはり中央部の繊維の配向

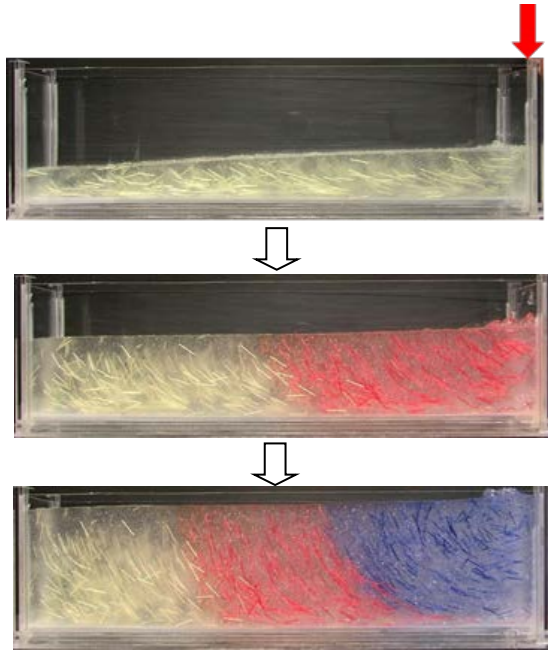


図-3 可視化コンクリートによる打込み中の繊維の配向状況の観察

4.2 かき乱しによる繊維の配向の変化

UFC をはり状の型枠に打込んだ後、突き棒で突く・混ぜるといった操作が繊維の配向にどのような変化を及ぼすかについて検討した。実験の結果、突き棒を移動させることで突き棒近傍の繊維は突き棒の移動方向に配向することが示された。一方、突き棒を往復移動させると繊維は試験体幅方向の中央付近では鉛直に配向する（配向が元に戻る）傾向が確認された。（図-4）

4.3 繊維の配向と引張特性の関係

図-5 に示すように、幅 70mm、高さ 500mm、厚さ 50mm のパネル状の型枠を用いて型枠底部に設けた噴出し口から打ち込むことで、配向の規則性のあるパネル状の部材を製作できることを見出した。硬化後にこの部材を切断することで、繊維の配向が一樣な供試体を作製した。切り出された供試体について X 線 CT による繊維の配向の評価と切欠きはりの 3 点曲げ試験を行った（図-6）。

X 線 CT で観察した結果、切り出し位置によって方向は異なるが、図-5 中の赤線で示すように規則的な配向を示し、各供試体内では概ね一樣な配向であることを確認した。

図-7 には曲げ試験で得られた最大荷重とリガメント断面（供試体の破断面）の有効繊維本数の関係を示す。ここで有効繊維本数は、リガメント断面を交差する繊維本数と平均配向角度の正弦値の積であり、繊維を軸力のみで抵抗するトラス部材として考えた場合の繊維によるリガメント垂直方向の抵抗度合いを表している。なお、ここでの最大荷重は、初期ひび割れ発生後の最大荷重とした。同図より、有効繊維本数と曲げ試験時の最大荷重には明確な線形関係があることが明らかとなった。

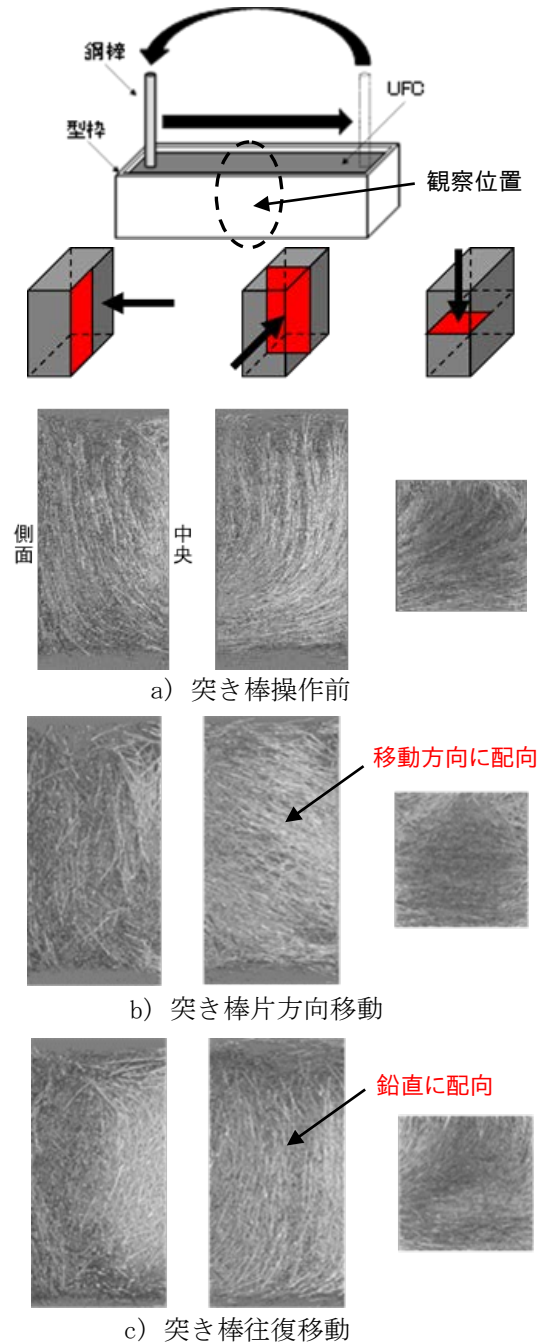


図-4 突き棒による繊維の配向の変化

曲げ試験で得られた荷重-切欠き肩口開口変位 (CMOD) 関係から引張軟化曲線の推定を行った。推定方法として修正 J 積分法を適用した。有効繊維本数と引張軟化曲線の関係を検討するため、各繊維混入率において供試体を有効繊維本数 (100 本) ごとにグルーピングし、引張軟化曲線をグループごとに平均化することで有効繊維本数ごとの引張軟化曲線を求めた。

有効繊維本数ごとに平均した引張軟化曲線すべてにおいて、ひび割れ幅 0.5mm 付近で最大となり、直線的に軟化する傾向が見られた。そこで、ひび割れ幅 0.5mm 時の応力と 2.5mm 時の応力をプロットし、直線で結んだ

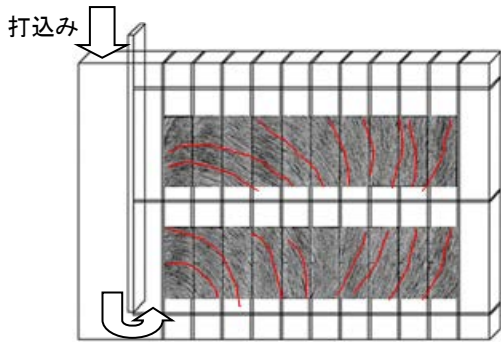


図-5 パネルの打込みと繊維の配向

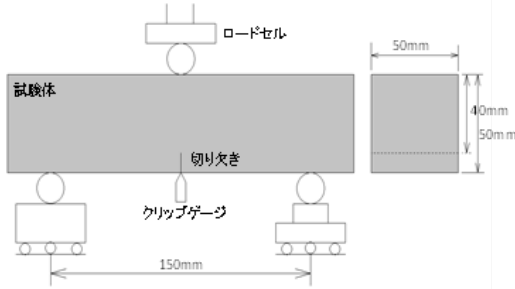


図-6 切り欠きはりの3点曲げ試験

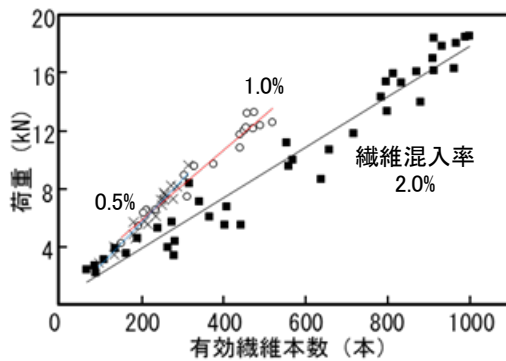


図-7 有効繊維本数と曲げ試験時の最大荷重

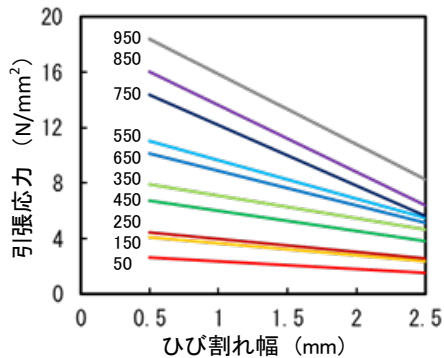


図-8 有効繊維本数と引張軟化曲線

引張軟化曲線を図-8に示す。繊維混入率によって値は異なるが、有効繊維本数が増えると引張軟化曲線の応力が高くなることが確認された。

4.4 繊維の配向と圧縮特性の関係

繊維の配向が圧縮破壊挙動に及ぼす影響を検討するため、前項の曲げ試験後の供試体の圧縮試験(図-9)を行い、試験後の供試体中

のひび割れをX線CTを用いて観察した。

供試体の寸法は断面が50×50mm、高さ75mmであり、繊維が圧縮軸方向に平行に配向したものと垂直に配向した2種類とした。

圧縮試験により得られた、荷重-圧板間変位を図-10に示す。圧縮軸方向に平行に配向した供試体では、最大荷重後、急激な荷重低下が見られた。一方、圧縮軸に垂直に配向した供試体では、最大荷重後に緩やかな荷重低下が見られた。最大荷重に大きな差はなく、繊維の配向は最大荷重後の軟化域に影響を及ぼすことが確認された。

X線CTで得られた断面画像を図-11に示す。画像内の青線は視認できるひび割れを強調して示したものである。圧縮軸方向に平行に配向した供試体では、圧縮軸方向に伸びるひび割れが確認できる。一方、圧縮軸方向に垂直に配向した供試体では、ひび割れが少なく、ひび割れの方法は斜め方向となっている。

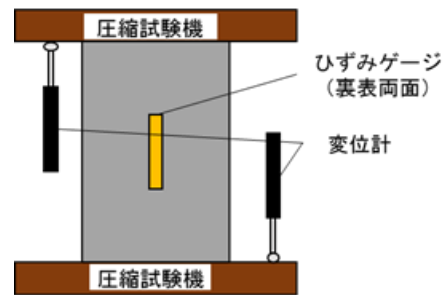
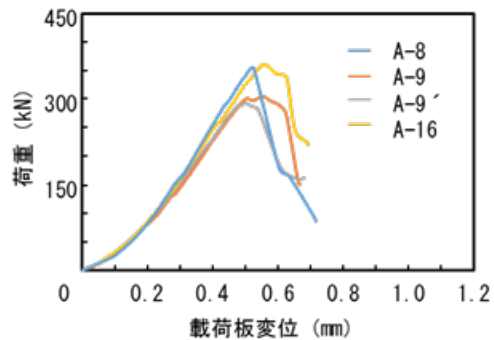
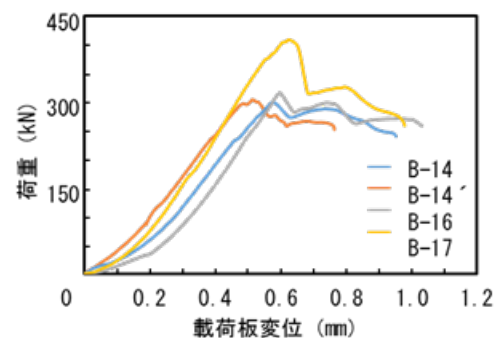


図-9 圧縮試験

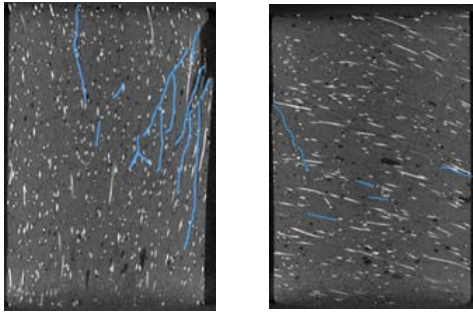


a) 圧縮軸に平行方向に配向



b) 圧縮軸に垂直方向に配向

図-10 繊維の配向が異なる場合の圧縮荷重-変位曲線



a) 平行方向に配向 b) 垂直方向に配向
 図-11 圧縮供試体の X 線 CT 画像

このように、繊維が圧縮軸方向に伸びるひび割れを拘束することによって、供試体の圧縮破壊時の靱性が向上するものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① 石河義希, 伊藤 穂高, 内田裕市, 超高強度繊維補強コンクリート中の繊維の配向と引張軟化曲線, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 第 40 巻, 2018
- ② B. Zhou and Y. Uchida, Relationship between fiber orientation/distribution and post-cracking behavior in ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPRFC), Cement and Concrete Composites, 査読有, Vol.83, 2017, 66-75
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.007>
- ③ B. Zhou and Y. Uchida, Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPRFC, Cement and Concrete Research, 査読有, Vol.95, 2017, 164-177
<http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.017>
- ④ 河村有紀, 周波, 石河義希, 内田裕市, 超高強度繊維補強コンクリートの流動性が繊維の配向に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 第 38 巻, 2016

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① 石河義希, 伊藤 穂高, 内田裕市, 超高強度繊維補強コンクリート中の繊維の配向角度が力学挙動に及ぼす影響, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017
- ② 石河義希, 河村有紀, 周波, 内田裕市, 繊維補強コンクリート中の繊維の配向に及ぼす流動性の影響, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016
- ③ 河村有紀, 石河義希, 周波, 内田裕市, 超高強度繊維補強コンクリート中の繊維

の配向と曲げ破壊挙動の関係の検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 裕市 (UCHIDA, Yuichi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 20213449