

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02220

研究課題名（和文）実大超高強度繊維補強コンクリート部材中の繊維の配向の定量評価と破壊解析

研究課題名（英文）Evaluation of fiber orientation and failure analysis of full scale ultra-high-strength fiber reinforced concrete members

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） 5,900,000円

研究成果の概要（和文）： UFCを用いた実大規模の梁，スラブ，およびパネル部材中の繊維の配向をX線CTシステムと可視化モデルコンクリートを用いて計測，評価を行った。またスラブ部材の破壊耐力を計測された繊維の配向を考慮したFEM解析により予測し，実験結果と比較した。その結果，繊維の配向はUFCの打込み方法，型枠の形状に依存していることが示された。また，繊維の配向を考慮したFEM解析により部材の破壊耐力を定性的には予測できたが，現状のモデルでは解析の方が実験値より高くなる傾向となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我国では既に多くのUFC部材が建設されてきたにもかかわらず，これらの部材中での繊維の配向を観察した事例は少なく，配向が打込み方法および部材形状に依存していることを示した本研究のデータは極めて貴重であると考えている。また，部材の耐力が繊維の配向に依存していることを載荷試験ならびにFEM解析により確認されたことも重要である。現在，土木学会で作成中の高強度繊維補強セメント複合材の設計施工指針(案)では繊維の配向の扱いについて検討されており，本研究の成果が参考にされている。以上のことから，本研究の成果は学術的，社会的意義は十分に高いものと考えている。

研究成果の概要（英文）： Fiber orientation in full-scale beam, slab, and panel members using UFC was measured and evaluated using the X-ray CT system and the visualized model concrete. The ultimate capacity of slab members was predicted by FEM analysis considering the measured fiber orientation and compared with the experimental results. The results show that the fiber orientation depends on the casting method of UFC and the geometry of the member. Although the FEM analysis considering the fiber orientation qualitatively predicted the ultimate capacity of the members, the analytical value tended to be higher than the experimental value in the present model.

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 引張軟化特性 せん断特性 有限要素解析

様式 C - 19 , F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超高強度繊維補強コンクリート (UFC : Ultra-high strength fiber reinforced concrete) は、圧縮強度が 150N/mm^2 以上と超高強度でありながら、短繊維を混入することで、引張荷重下においてひび割れ発生後も脆性的に破壊することのない靱性に富んだセメント系材料である。またマトリクスが極めて緻密な構造を有していることから、鋼材の腐食因子がほとんど侵入しないため、超高耐久な構造物の実現を可能としている。

我国では約 20 年前に UFC を用いた橋梁が初めて建設され、これまでに 20 橋を越える実績がある。また、羽田空港 D 滑走路拡張工事では栈橋形式の滑走路に $3.6 \times 7.8\text{m}$ の UFC プレキャスト床版が 7000 枚用いられ、これは現在でも UFC を用いた世界最大規模の工事とされている。このように、UFC の適用に関しては現在、我国は世界の中でも先導的な立場にある。さらに最近では、劣化した道路橋床版の取替えを想定した、UFC を用いたプレキャスト床版の試験施工も進められている。

UFC は硬化後の高い性能を得るために、セメント、シリカヒュームなどの結合材を大量に用い、しかも 10% 台の低水結合材比の配合となっている。そのため、フレッシュ時の UFC は自己充填性を有するいわゆる高流動コンクリートであり、打込み時に型枠内を流動する。その結果、打込み直前は繊維の配向がランダムであっても、型枠内を流動することにより繊維が一定方向に配向する現象が現れる。型枠内の UFC の流動は型枠の形状寸法、打込み方法 (位置、速度など) 補強鋼材の配置状態などの影響を受け、繊維の配向もそれらの影響を受けることになる。繊維の配向が硬化後の UFC の力学特性、特にひび割れ発生後のひび割れ面における繊維の架橋効果に大きく影響することは容易に推測でき、UFC が開発された当初から問題として指摘されてきた。ところが、コンクリート中の繊維の配向を観察することは難しく、また繊維の配向を制御する打込み方法も存在しないため、現在でも繊維の配向は重要な問題として認識はされてはいるものの、未解決の課題となっている。なお、現状では、UFC を実際に適用する場合には実大の試験体を作製し、供試体を切り出して材料試験を行うか、載荷試験を行うことで繊維の配向の影響を含めた部材特性として性能を照査しているのが実態であり、実際の UFC 部材中の繊維の配向は未知であり、直接的には評価されていない。

2. 研究の目的

本研究では UFC 中の繊維の配向と硬化後の力学特性の関係を明らかにすることを目的として、主に以下の 3 点について検討した。

(1) 実大 UFC 部材中の繊維の配向と部材耐力の確認

実大寸法のスラブ試験体および梁試験体を対象として、打込み位置を変化させた場合の部材の耐力を載荷試験により確認する。さらに、載荷試験後の試験体からコア供試体を抜き取り、X 線 CT システムを用いて部材中の繊維の配向を定量的に明らかにする。従来、コンクリート中の繊維の配向を確認すること自体が困難であったため、繊維の配向に関連した研究は進んでこなかったが、X 線 CT システムを用いることで配向の定量化が可能となり、この点が本研究の特徴である。

(2) 繊維の配向を考慮した実大 UFC 部材の破壊解析

繊維の配向を考慮した引張軟化モデルを有限要素モデルに組み込み、繊維の配向を考慮した実大 UFC 部材の破壊解析を行う。これによりモデルの妥当性ならびに繊維の配向が部材耐力に及ぼす影響を明らかにする。

(3) ひび割れ面のせん断特性に対する繊維の配向の影響

ひび割れ面にせん断力が作用する場合に繊維の配向がどのような影響を与えるかを直接せん断試験により確認する。

3. 研究の方法

(1) 実大 UFC 部材中の繊維の配向と部材耐力の確認

実大試験体として、図 1 に示すような梁試験体やスラブ試験体を対象として、製品工場において、打込み方法をパラメータ (試験体の片端から打込む場合と試験体中央から打込む場合) として製作した。これらの試験体について載荷試験を行い破壊耐力を確認するとともに、載荷試験後、破壊断面付近から供試体を切出し、X 線 CT システムにより繊維の配向 (本数、位置、配向方向) を計測した。

(2) 繊維の配向を考慮した実大 UFC 部材の耐力の予測

繊維の配向を考慮した引張軟化モデルを有限要素モデルに組み込み、実大 UFC 部材中の繊維の配向を直接的にモデル化して部材の破壊解析を行い、載荷試験の結果と比較することによりモデルの妥当性ならびに繊維の配向が部材耐力に及ぼす影響を定量的に明らかにした。

(3) ひび割れ面のせん断特性に対する繊維の配向の影響

所定の配向の繊維を埋め込んだ供試体の直接せん断試験 (梁供試体の逆対称載荷試験) を行い、繊維の配向がせん断力-ずれ変位関係に及ぼす影響を明らかにした。

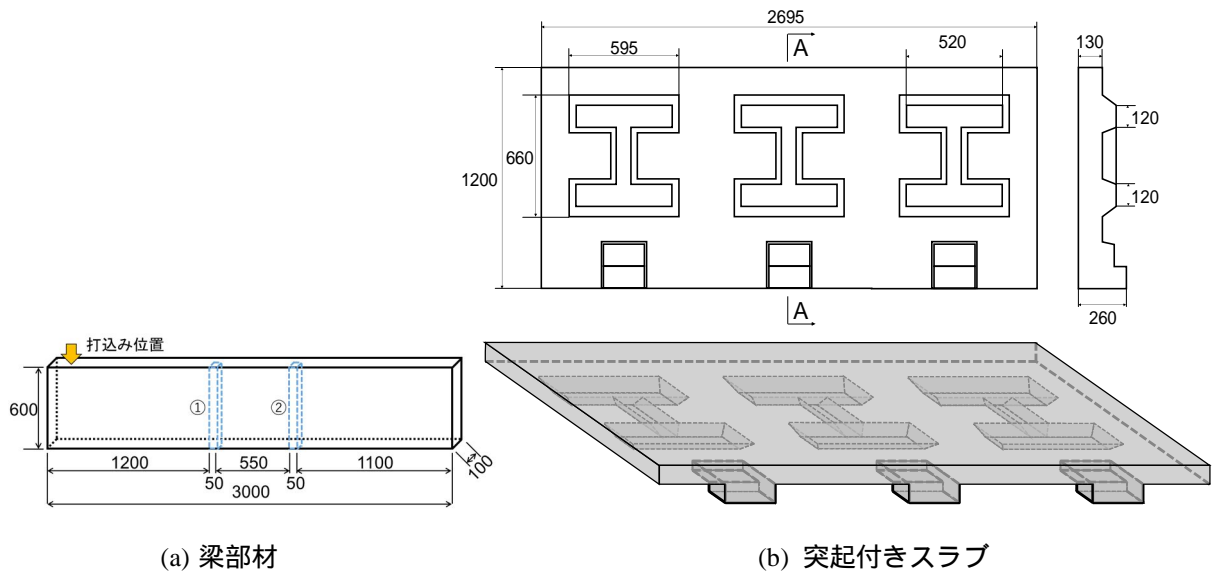


図 1 配向観察を行った試験体の例

4. 研究成果

(1) UFC 部材中の繊維の配向

1200×1200×100mm のスラブ試験体を対象として UFC を斜めシュートを用いて試験体中央と型枠端から打ち込んだ場合の繊維の配向を X 線 CT により観察した。その結果、スラブの上部では打込み位置を中心とした同心円状に繊維は配向するが、下部では一方向に配向することが観察された。また、上下部で配向が異なる原因を明らかにするため、可視化コンクリートを用いた配向の観察を行った。その結果、打込み方法（斜めシュートと円形パイプ）によって配向が異なり、斜めシュートを用いた場合には実際の UFC の場合と同様、下部では一方向に配向することが観察され、円形パイプを用いた場合には上下部とも同心円状に配向することが観察され、繊維の配向に対して打込み方法が影響することが明らかとなった。

図 1 に示す実大規模の長さ 2695mm、幅 1200mm、厚さ 130mm のスラブに I 型の突起（最深部の深さ 260mm）を設けた試験体を対象として、長手方向の片端から UFC を打ち込んだ場合の繊維の配向を観察した。その結果、突起内部では型枠に沿ってコンクリートの流動方向に配向し、試験体の上部では梁状型枠における繊維の配向と同様に、コンクリートの流動方向に対して斜め上方に配向することが観察された。可視化コンクリートを用いた配向の観察も行い、実際の UFC の配向と概ね一致することが示された。

図 1 に示す大型梁部材（高さ 600mm、梁幅 100mm、長さ 3000mm）について、打込み位置を部材中央と部材端部とした場合の 2 ケースを対象として繊維の配向について検討した。計測結果の一例を図 2 に示す。部材中の繊維の配向をマイクロ X 線 CT を用いて観察した結果、部材端部から打ち込んだ場合は底部では水平方向、その上部では斜め上方もしくは鉛直方向に配向することが確認された。一方、中央から打ち込んだ場合は打込み位置を中心とした半円状の配向になることが示された。また、このことを可視化モデルコンクリートを用いて観察した結果、マイクロ X 線 CT で観察された配向と一致することが確認された。

UFC を用いた鉛直パネル部材（高さ 1200mm、幅 1200mm、厚さ 100mm）について、打込み位置を上部部材端とした場合との幅方向に一樣に打ち込んだ場合の 2 ケースを対象として繊維の配向について検討した。マイクロ X 線 CT による観察の結果、上部部材端から打ち込んだ場合には底部では水平方向に配向し、上部では斜め上方あるいは鉛直方向に配向することが確認された。一方、幅方向に一樣に打ち込んだ場合場合には、パネルの正面から見た場合にはほぼ鉛直方向、高さ方向の断面から見た場合には V 字型の配向が確認された。このような配向のメカニズムを解明するために可視化コンクリートを用いた実験を行った。その結果、打込まれるコンクリートが既

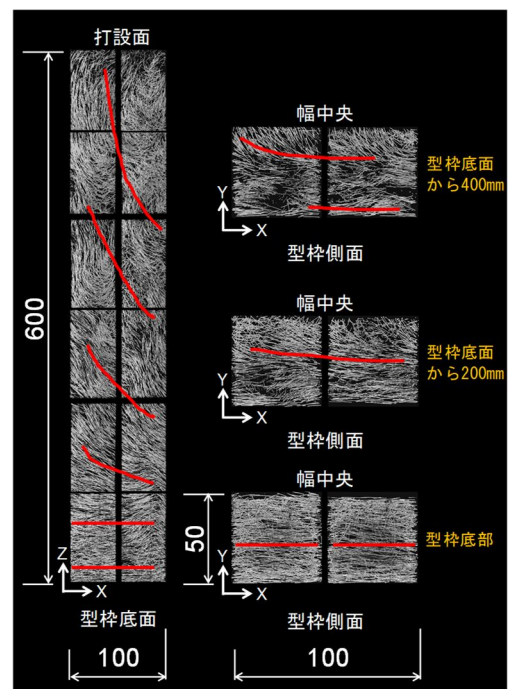


図 2 梁試験体内の繊維の配向

に打込まれたコンクリート中に自由落下することで、その運動エネルギーにより既に打込まれたコンクリート中の繊維が鉛直方向に引き込まれるためであることが明らかとなった。

(2) 繊維の配向を考慮した UFC 部材の耐力の予測

図 3 にスラブ部材の荷重試験結果の一例を示す。X 線 CT を用いて観察された繊維の配向を考慮した FEM モデルを用いて破壊解析を実施した。荷重試験で確認されたスラブの端部と中央部で耐力に差があり、中央部の方が耐力が低いこと、また、打込み面側から荷重した場合に比べ、底面側から荷重した場合に耐力が低下することについて、耐力の大小関係については解析で再現することができた。しかしながら、耐力の解析結果は実験値より高くなる傾向が見られ、モデル化に用いた繊維の配向と引張軟化特性の関係式の特徴が原因であり、現状では引張軟化特性が高め評価されていることが原因であると推察された。

実際の UFC 部材を想定した突起を有するパネル部材を対象として、突起部の破壊性状について有限要素解析によるシミュレーションを実施した。その結果、突起部の破壊耐力についても繊維の配向を考慮することで定性的には実験結果を再現できたが、繊維の配向と引張軟化特性の関係式の特徴が原因で破壊耐力が実験結果より高めに評価される結果となった。また、突起部周辺の繊維の配向は 3 次元的に急変するため、破壊断面を事前に想定することができず、1 方向の構成モデルでは部材のモデル化が困難であり、繊維の配向と材料特性の 3 次元モデルの構築が必要であることが示された。

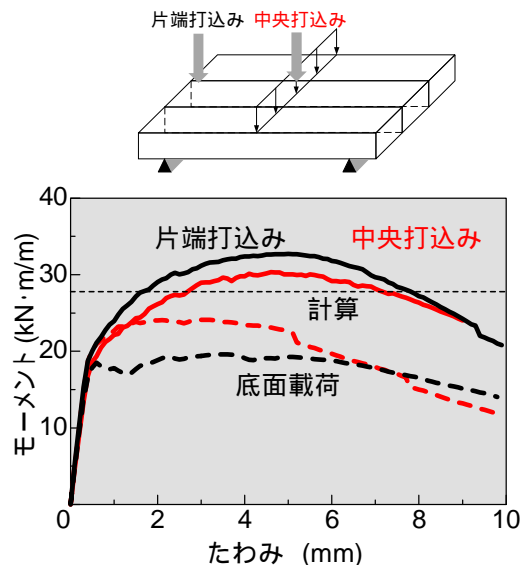


図 3 スラブの荷重試験結果の一例

(3) ひび割れ面のせん断特性に対する繊維の配向の影響

ひび割れ面のせん断強度に対する繊維の配向の影響を検討するために、一軸圧縮試験および梁供体を用いた直接せん断試験を行った。一軸圧縮試験では、ひび割れ面に対する繊維の交差角度が 100° を越えるとせん断強度が低下し、直接せん断試験では、繊維の交差角度が $60^\circ \sim 80^\circ$ の範囲でせん断強度が高くなり、せん断強度に対して繊維の配向が影響すること示された。

繊維を所定の角度で埋め込んだ供試体を用いて直接せん断試験を実施した。実験結果の一例を図 4 に示す。これより、ひび割れ面における繊維のせん断力-ずれ変位関係は、繊維の配向角度により大きく変化し、配向角度が 45° の場合には引き抜けモードが卓越し、 135° の場合には繊維が折れ曲がり、押し込みから引き抜けモードに転じることが原因であると推察された。

また、合成繊維のせん断分担力は鋼繊維に比べ、かなり小さいことが示された。

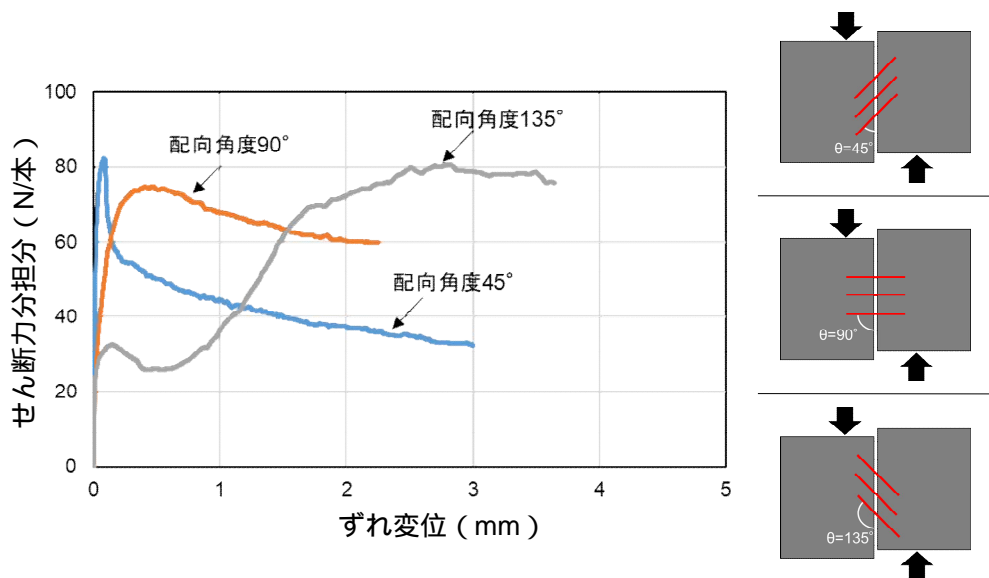


図 4 配向が異なる場合のせん断力分担分 - ずれ関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 中村 裕亮, PEN I UOY, 内田 裕市	4. 巻 45
2. 論文標題 高流動繊維補強コンクリートパネル部材中の繊維の配向	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 矢野和輝, 田中 章, 岩崎雄也, 内田裕市	4. 巻 44
2. 論文標題 高流動繊維補強コンクリート梁部材中の繊維の配向	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 矢野和輝, 田中章, 横井晶有, 内田 裕市	4. 巻 43
2. 論文標題 高流動繊維補強コンクリートスラブ中の繊維の配向	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 堀田翔司, 内田 裕市	4. 巻 43
2. 論文標題 繊維補強コンクリートにおける配向がひび割れ面のせん断挙動に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩崎雄也, PEN I UOY, 内田裕市
2. 発表標題 高流動繊維補強コンクリートを用いたパネル試験体中の繊維の配向
3. 学会等名 土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安達貴紀, 内田裕市
2. 発表標題 FRCのひび割れ面のせん断特性に対する繊維の配向の影響
3. 学会等名 土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------