論文　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

石河　義希[*1]・伊藤　穂高[*2]・内田　裕市[*3]

要旨：本研究では規則的な配向を有する超高強度繊維補強コンクリートの曲げ供試体を作製し，X 線マイクロ CT を用いて繊維の配向を，曲げ試験の結果から修正 J 積分法を用いて引張軟化曲線を評価し，両者の関係について検討した。その結果，切欠き断面内の繊維本数と繊維の配向角度の積として求めた有効繊維本数と修正 J 積分法で求めた引張軟化曲線との間に明確な相関性のあることが明らかとなった。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，X 線マイクロ CT，繊維の配向，引張軟化曲線，修正 J 積分法

1. はじめに

繊維補強コンクリート（FRC : Fiber Reinforced Concrete）については古くから研究，開発が行われており，特に近年では圧縮強度が 180N/mm^2 を超える超高強度繊維補強コンクリート（UFC : Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete）や高靭性のひずみ硬化型セメント系複合材料（SHCC : Strain Hardening Cement Composite）などの高性能な FRC が橋梁部材をはじめとする様々な構造物に使用されている。しかし，繊維の配向が及ぼす力学特性への影響に関して今日まで重要な課題として認識されてきたが，未だ十分には明らかになっていない。その原因としては，FRC 中の繊維の観察，評価が困難であること，繊維の配向を制御する技術が存在しないことがあげられる[1),2),3)]。

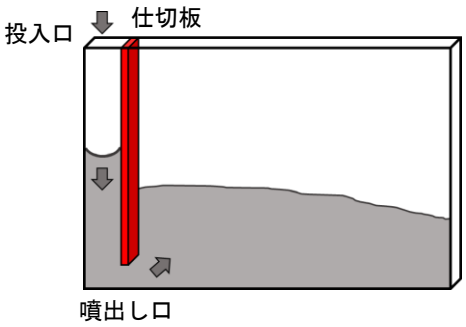
そこで，本研究では配向と力学挙動の関係を明らかにすることを目的とし，自己充填性を有し，打込み方法によって配向が変化する UFC を対象として，配向性の強い曲げ供試体を製作し，繊維の配向と引張軟化曲線の関係を求めた。実験では角度の異なる一様な配向を持つ供試体を作製し，X 線マイクロ CT により繊維の配向の評価し，曲げ試験結果から修正 J 積分法により引張軟化曲線を求めた。

2. 実験概要

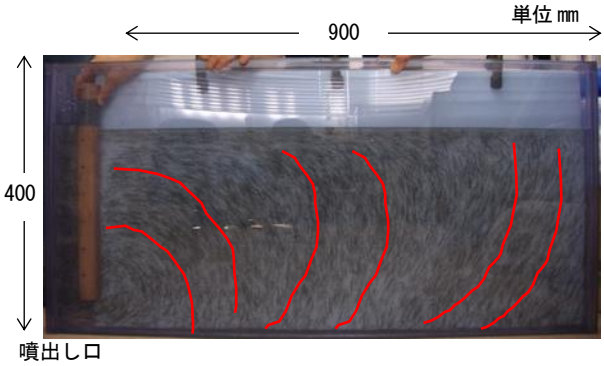
2.1 一様な配向を有する供試体の作製

繊維が一様に配向した供試体は，規則的な配向を有する大型供試体内から切り出すことで作製することとした。まず，大型供試体において繊維が規則的な配向となる打込み方法を検討するために可視化モデルコンクリートを用いた試験を行った。可視化モデルコンクリートは高吸水性高分子樹脂に水を添加し，PVA 繊維を混入させた無色透明の粘性流体である。UFC と比べ粘性が小さいなどのレオロジー特性の違いはあるが打込み方法による配向の特徴は概ね再現できることが確認されている[4)]。

通常の打込み方法で容器（バケット）からコンクリートを落下させるとその直下で繊維の配向が乱れること，また，型枠近傍ではせき板効果で内部と異なった配向となることが経験的にわかっている。そこで薄肉（50mm）のパネル状の型枠を用いることで型枠近傍と内部の配向の差を低減することとした。また，打ち込みは供試体の上部から流下させる方法ではなく，供試体の底部からコンクリートを噴き上げる方法とした。そのため，**図-1** のように供試体の端に仕切板を底面から離して設け，その端部にコンクリートを打ち込むことで仕切り板の底からコンクリートを噴き上げるようにした。このような方法で可視化モデルコンクリートを打ち込んだ場合の観察結果を**図 - 2** に示す。図中赤線で示すように放物線状の規則性のある配向となることが明らかとなった。そこで，同様の方法で実際の UFC 供試体を作製することとした。



図－1　打込み方法



図－2　可視化モデルコンクリートの繊維の配向

*1 岐阜大学大学院　工学研究科社会基盤工学専攻　（学生会員）
*2 岐阜大学大学院　自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻
*3 岐阜大学　工学部社会基盤工学科教授　工博　（正会員）

2.2 供試体作製

表－1 に UFC の基本配合を示す。本研究で用いた UFC は市販のプレミクスタイプの物であり，主に結合材からなるプレミクス材 A（PRA），細骨材からなるプレミクス材 B（PRB），専用減水剤（Ad），鋼繊維（SF：引張強度 2700N/mm²；直径 0.2mm；長さ 15mm）で構成されている。繊維混入率は体積比で 2.0%とし，0 打フロー値を 280mm となるように減水剤量を調整した。

図－3 に型枠寸法，供試体切断位置および番号を示す。可視化モデルコンクリートによる実験と同様に，型枠底部の高さ 50mm の位置に噴出し口を設けて打ち込んだ。切り出した供試体は 50×50×200mm であり，この供試体を用いて X 線マイクロ CT による繊維の配向の評価と曲げ試験を行った。

2.3 X 線マイクロ CT による配向の評価

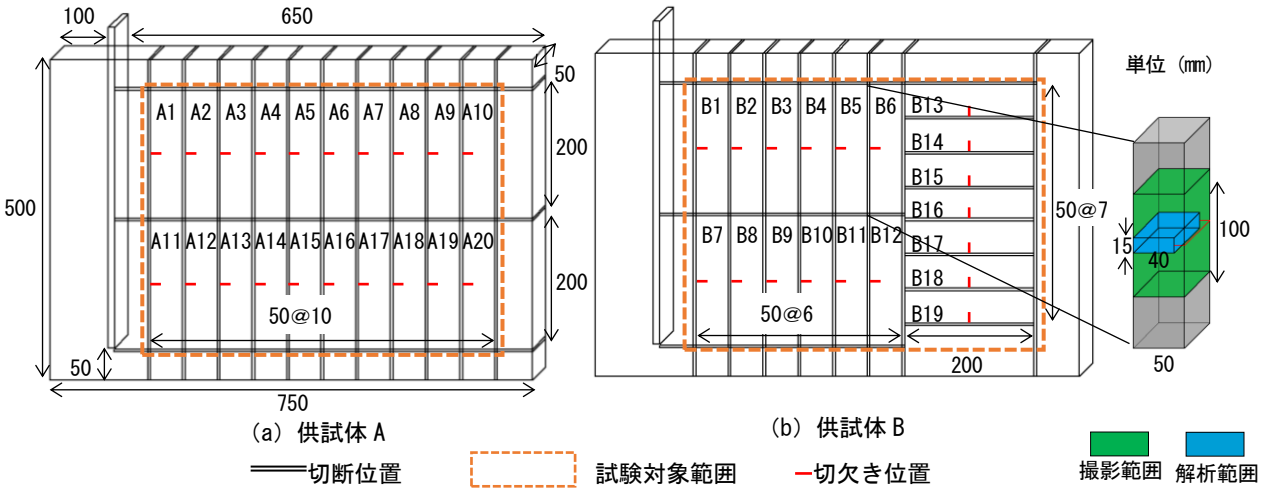
(1) X 線マイクロ CT の概要

切り出した供試体について X 線マイクロ CT 装置を用いて配向の評価を行った。X 線マイクロ CT により，コンクリート内部を観察することが可能であり，これまでにコンクリート中の骨材の寸法や分布の研究などに用いられている[5) 6)]。

UFC はモルタルマトリクスと鋼繊維から構成されており，その密度により，X 線吸収能に差があり，その差を利用して，色調に勾配を与えることで**図－4**（a）のように，UFC の断面や繊維の観察が可能になる。断面画像は密度が大きな物質ほど白く，小さいほど黒くなるようなグレイバリューで表示されるため，図中の黒い部分は UFC 内の空隙もしくは周囲の空間であり，グレー部はモルタル，白い部分は繊維となっている。また，X 線マイ

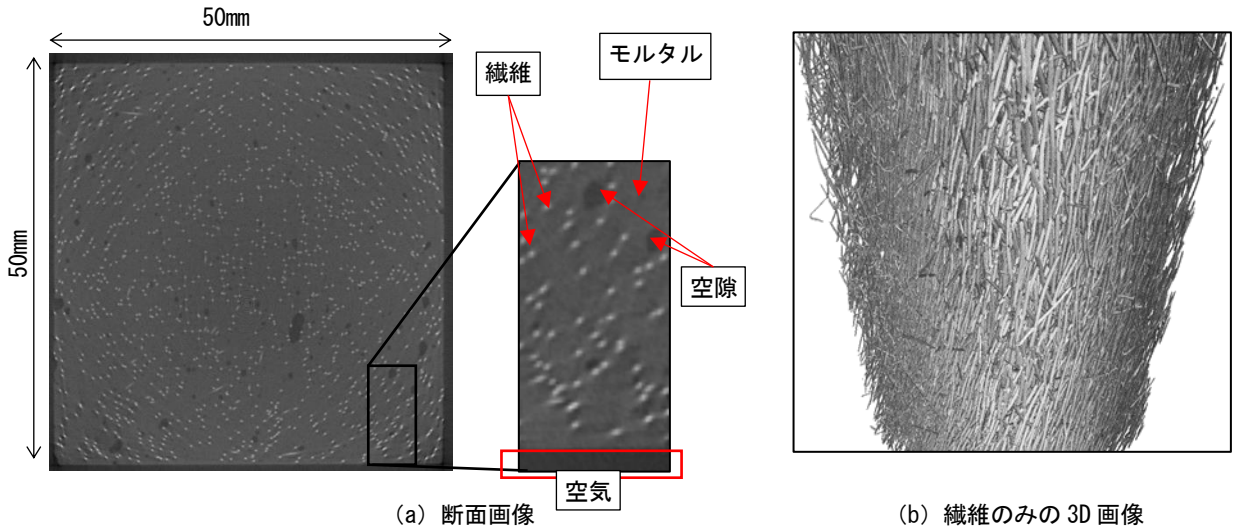
表－1　使用材料および配合

単位量(kg/m³)				
W	PRA	PRB	Ad	SF
164	1278	934	16	157



(a) 供試体 A　(b) 供試体 B

図－3 試験体概要　　図－5　配向解析範囲



(a) 断面画像　(b) 繊維のみの 3D 画像

図－4　X 線マイクロ CT で得られる画像

クロ CT は断面画像を再構成することにより，断面画像のほか 3D 画像を作製することができ，適当な閾値を設けることで**図－4**（b）のように観察したい物質のみを表した画像を作製できる。今回はモルタル部を透過し，繊維のみの 3D 画像を用いた。なお，本試験で用いた X 線マイクロ CT 装置で得られる断面画像の解像度は 0.143mm×0.143mm であり，繊維径 0.2mm の鋼繊維を 1 本 1 本検知することが可能である。また，本試験では X 線マイクロ CT による撮影範囲を各供試体中央の 50×50×100mm の領域のみとした。

（2） 配向の評価方法

配向を定量化するため，リガメント面を交差する繊維本数とリガメント面に対する平均配向角度を求めた。繊維本数は X 線マイクロ CT で得られたリガメントの断面画像を画像解析ソフトで処理することで求めた。また，配向角度は CT データの解析ソフトの配向解析モジュールを用いた。3D 画像を構成するピクセルの 3 次元的な値であるボクセルが方向データを有しており，各配向角のボクセル数をカウントすることで平均配向角度が求まる。配向角度は**図－6** に示すようにリガメントに対して垂直に配向する繊維を 90°，平行に配向する繊維を 0° となる三次元的な角度とした。平均配向角度の解析範囲は切欠きを中心として繊維長である 15mm の区間とした（**図－5**）。

2.4 力学特性の評価

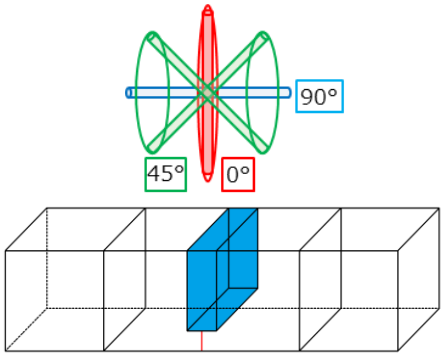
力学特性の評価として切欠きはりの 3 点曲げ試験を行い，荷重-切欠き肩口開口変位（CMOD）を計測した。**図－7** に曲げ試験の載荷方法を示す。供試体の断面寸法は 50×50mm であり，載荷スパンは 150mm とした。切欠きは**図－2** に示す位置に設け，深さはリガメントが 40mm となるように調整した。荷重検出には容量 100kN のロードセル，CMOD の検出には測定範囲 5mm，感度 1/1000mm のクリップゲージを用いた。

曲げ試験で得られた荷重-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。修正 J 積分法は数値解析を必要とせず，微分計算のみで推定可能であることから大変位領域まで安定に推定できるという特徴がある。なお修正 J 積分法では，CMOD ではなく切欠き先端開口変位（CTOD）を計測する必要があるが，ここでは供試体の変形モードを，圧縮縁を回転中心とした剛体回転として幾何学的関係から換算して求めた。**図－8** に CMOD と CTOD の幾何学的関係を示す。

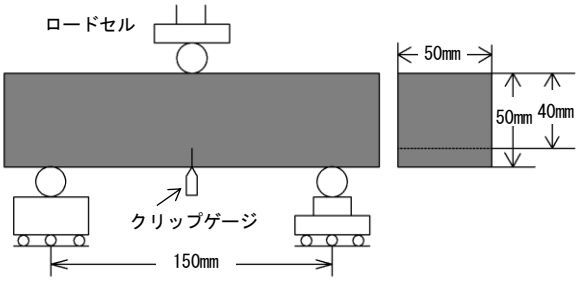
3. 実験結果

3.1 X 線マイクロ CT による配向の評価

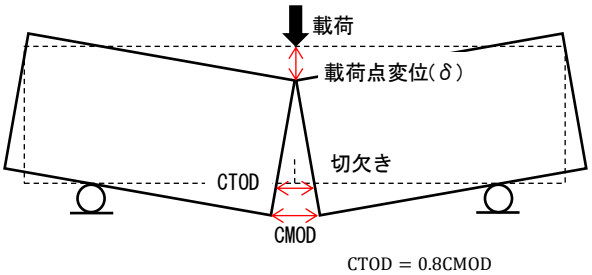
X 線マイクロ CT で得られた供試体中央面厚さ 15mm の 3D 画像を**図－9** に示す。図中では繊維がグレーで表されており，**図－2** で示した可視化モデルコンクリートと同様の規則的配向が見られ，切断後の各供試体中央部は，それぞれ配向角度が異なることが観察できる。**図－10** に各供試体のリガメントの繊維本数と中央部 15mm 長さの平均配向角度の関係を示す。同図より，配向角度と繊維本数の間には明確な線形関係があることが確認された。



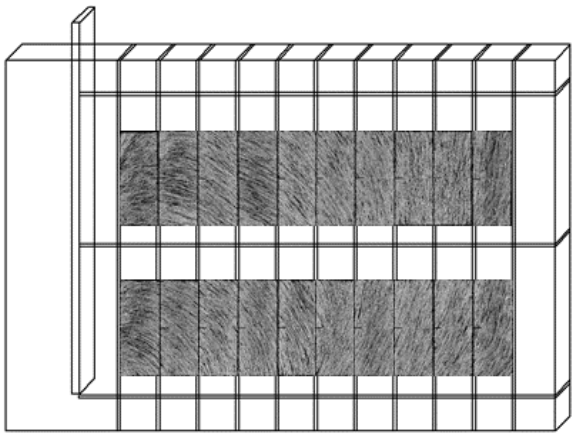
図－6 配向角度の定義



図－7 載荷方法



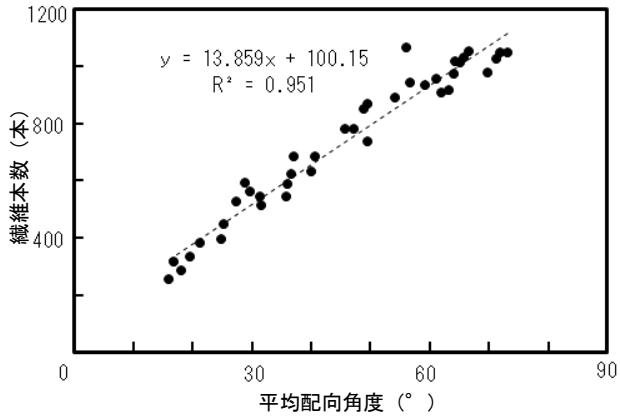
図－8 CMOD と CTOD の幾何学的関係



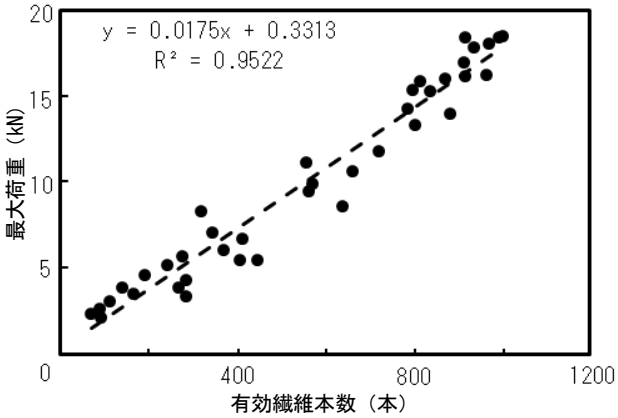
図－9 X 線 CT で得られた中央面 15mm 厚の 3D 画像

3.2　配向と曲げ試験結果の比較

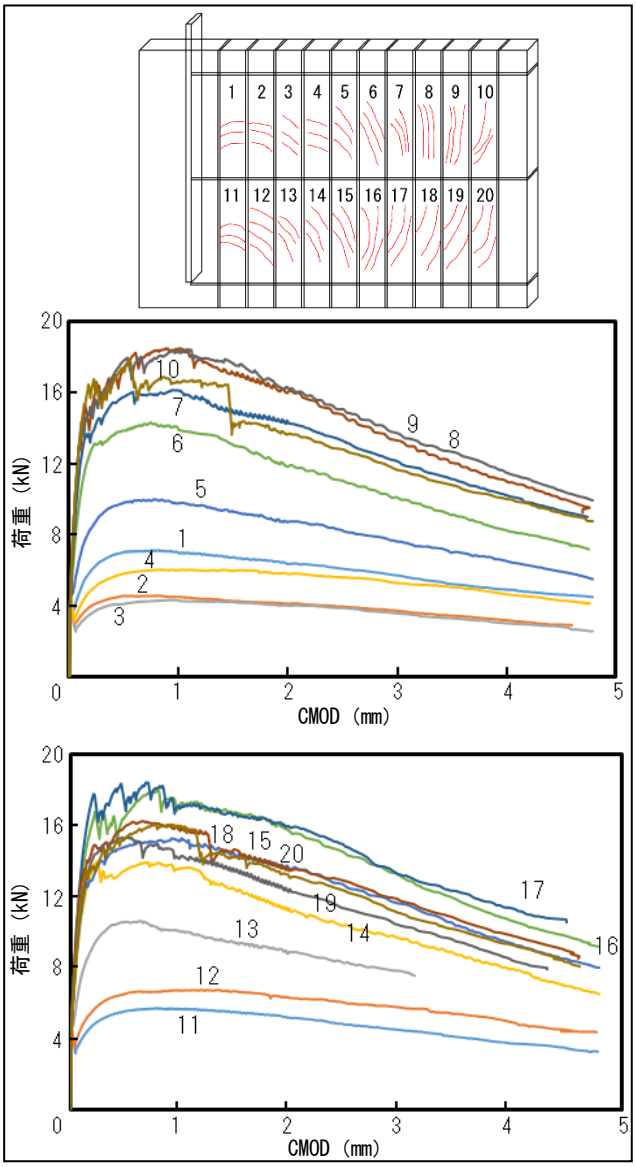
曲げ試験結果を**図－11** に示す。3D 画像から得られた繊維の配向の概要図を併記しており，図中の数字は供試体番号を示している。配向角度が大きい供試体では，最大荷重が高く，初期ひび割れ発生後も荷重が増加するひずみ硬化挙動が見られた。一方，配向角度の小さいすなわち供試体軸に対して垂直の繊維が多く観察できる供試体では，初期ひび割れ発生後，軟化挙動を示したが，脆



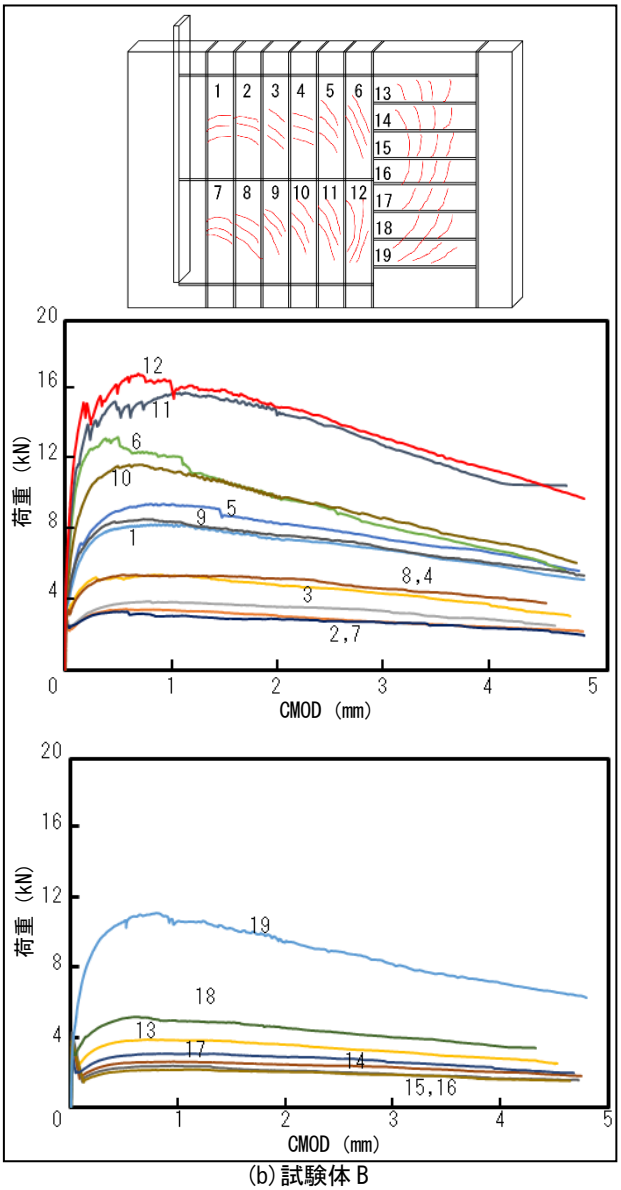
図－10　各供試体繊維本数と配向角度の関係



図－12　各供試体の最大荷重と有効繊維本数の関係



(a) 試験体 A



(b) 試験体 B

図－11　曲げ試験結果

性的な破壊は見られなかった。

次に，各供試体の曲げ試験時の最大荷重と有効繊維本数の関係をプロットしたグラフを**図－12** に示す。ここで有効繊維本数は，リガメント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，繊維を軸力のみに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，繊維の架橋効果を評価するため，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。

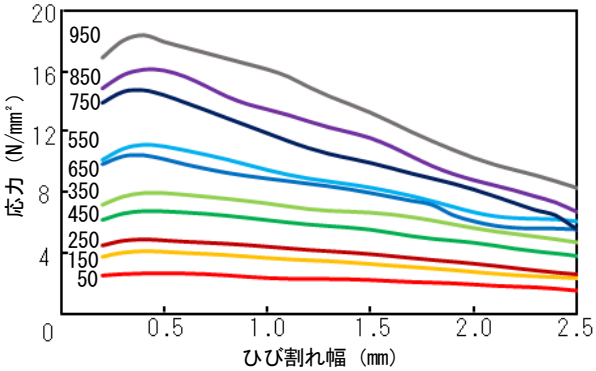
3.3　有効繊維本数と引張軟化曲線の関係

各供試体の曲げ試験結果から修正 J 積分法によって引張軟化曲線を推定した。ここでは前節の結果より引張軟化曲線と有効繊維本数の関係を検討することとした。すなわち，供試体を有効繊維本数（100 本）ごとにグルーピングし，各供試体から得られた引張軟化曲線をグループごとに平均化をすることで有効繊維本数ごとの引張軟化曲線を求めた。供試体のグルーピングを**表－2** に示す。グループによって供試体本数に差があるものの，いずれも 2 体以上となった。**図－13** に有効繊維本数ごとの引張軟化曲線を示す。一部逆転しているところもあるが，有効繊維本数が多くなると応力が高くなることが確認できる。また，有効繊維本数ごとの引張軟化曲線はいずれもほぼ直線的で互いに交差することなく軟化している。そこで，各軟化曲線の最大値（ひび割れ幅 0.5m 時）と最小値（ひび割れ幅 2.5mm 時）を結んだ直線を**図-14** に示す。同図中には土木学会の「超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針（案）」[7]（以下，UFC 指針）に示されている引張軟化特性の平均値と特性値を併記した。その結果，UFC 指針の平均値は有効繊維本数 500～600 本程度，特性値は 400～500 本程度の軟化曲線とほぼ一致する結果となった。

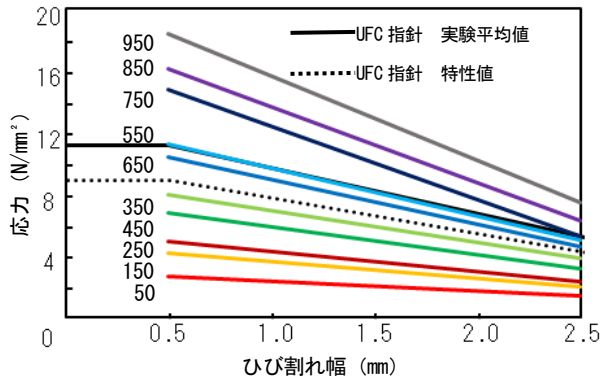
同図より，UFC 中の有効繊維本数を求めることができれば，その位置での引張軟化曲線を推定することが可能であると考えられる。

表－2　有効繊維本数によるグルーピング

グループ名	有効繊維本数	供試体名
50	～100	B14,15,16
150	100～200	A2,B2,13,17
250	200～300	A3,11,B3,7,18
350	300～400	A4,B1
450	400～500	A1,12,B4,8
550	500～600	A5,B5,19
650	600～700	A13,B9
750	700～800	A19,6,B10
850	800～900	A14,20,15,B11,6
950	900～	A7,8,9,10,16,17,18,B12



図－13　各有効繊維本数の引張軟化曲線（平均）



図－14　有効繊維本数の引張軟化曲線（単純化）

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

(1)　UFC を型枠底部に設けた口から噴上げるように打ち込むことで繊維の方向性の強い供試体を作製することができた。

(2)　配向角度と繊維本数は線形関係にあり，繊維が供試体軸方向を向くほど断面に存在する繊維が多く，軸直交を向くほど少なくなる。

(3)　繊維本数に配向角度の正弦値を乗じた有効繊維本数と引張軟化曲線の関係を検討した結果，有効繊維本数が多いほど引張軟化曲線全体の応力が高くなることが明らかになった。

本研究の結果，試験室レベルでは UFC 中の繊維の配向と引張軟化特性の関係が明らかとなったが，部材あるいは構造物レベルでの繊維の配向を評価する方法が確立されておらず，今後の課題としたい。

参考文献

1） Stahli P, Custer R, Van Mier JGM: On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behavior of FRC, Mater Struct, Vol.41, No(1), pp.189-196, 2008

2） Kang ST, Park JJ, Ryu GS, Kim SW: Investigation of fibre of 8th international symposium on utilization of high-strength and high-performance concrete, Tokyo, pp.709-714, 2008

3） Barnett S.J, Lataste J.F, Parry T, Millard S.G, Soutsos M.N: Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength, Mater Sruct, Vol(43), No.(7), pp.1009-1023, 2010

4） 周波，Ha Duy Nhi，内田裕市：超高強度繊維補強コンクリート曲げ供試体中の繊維の配向, コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.268-273，2012

5） 岩木伸也，高橋良和，澤田純男：X 線 CT 法を用いたコンクリート円柱供試体の内部構成情報の抽出, 土木学会論文集，Vol.65，No.1，pp.399-405，2009

6） 天明敏行，伊藤剛，濱崎大志，尾原祐三：X 線 CT 法を用いたコンクリートの材料構成定量化法の提案, コンクリート年次論文集，Vol.30，No.2，pp.739-744，2008

7） 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，200