

論文 一軸引張試験による超高強度繊維補強コンクリートの引張軟化特性の評価に関する研究

青木 正雄^{*1}・内田 裕市^{*2}・稲熊 唯史^{*3}・森本 博昭^{*4}

要旨：本研究では近年開発された圧縮強度 200N/mm²級の超高強度繊維補強コンクリートを対象として一軸引張試験と切欠きはりの曲げ試験より引張軟化曲線の推定を行った。試験結果より一軸引張試験において供試体のリガメント面積が大きくなるにつれ、引張軟化曲線の応力が低下する傾向が見られた。また一軸引張試験において偏心が生じた供試体と偏心が生じない供試体では、引張軟化曲線の形状が異なることが分かった。超高強度繊維補強コンクリートの一軸引張試験では繊維の配向が引張軟化曲線に影響する結果となった。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，引張軟化曲線，一軸引張試験

1. はじめに

一般的にコンクリートにひび割れが生じ破壊に至る場合、その破壊現象にはひび割れ進展に伴う軟化挙動が大きく関係する。そのためコンクリート構造物の破壊現象を明らかにするには、コンクリートの引張軟化特性の把握が重要となる。近年フランスにおいて開発された超高強度繊維補強コンクリート (ultra high strength fiber reinforced concrete : 以下 UFRC) が我国にも導入され、実構造物への適応がなされている。UFRC の圧縮強度は一般に 200N/mm²程度で通常コンクリートの約 5 ~ 10 倍、曲げ強度は 30N/mm²以上で通常コンクリートの約 10 ~ 15 倍を示す。また繊維混入により高い靱性を有する材料である。しかし UFRC の引張軟化特性に関するデータの蓄積は未だ乏しいのが現状である¹⁾。

2. 研究目的

UFRC は通常の FRC に比べ強度が著しく高く、靱性も高い。このような材料に引張軟化曲線を材料特性とした仮想ひび割れモデ

ルが適用できるかどうかについては検討の余地があるが、フランスで提案されている UFRC のモデルコード²⁾では引張軟化曲線が材料特性として取り入れられている。

現在コンクリートの引張軟化特性の評価方法として、引張試験から直接、引張軟化曲線を求める方法と、曲げ試験などにより、間接的に引張軟化曲線を求める方法がある。曲げ試験による方法は、作業は簡便ではあるが、破壊面にひずみ (ひび割れ幅) 勾配が存在することや、圧縮破壊を伴うなどの問題がある。そこで本研究では、圧縮破壊の影響を受けない一軸引張試験と切欠きはりの曲げ試験をおこない、試験法が引張軟化曲線に及ぼす影響について検討をおこなった。また、一軸引張試験を行なう場合、特に軟化域において、供試体に偏心が生じる問題がある³⁾。本研究では、一軸引張試験において、偏心を制御した場合としない場合でどのような差が生じるのかを明らかにするとともに、リガメントの大きさが引張軟化曲線に及ぼす影響についても併せて検討することとした。

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教授 工博 (正会員)

*3 東海コンクリート工業 (株) 技術部技術グループ (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

3. 試験方法

3.1 コンクリート

研究で対象とするコンクリートの配合を表 - 1 に示す。コンクリートはUFRC と一般の SFRC の 2 種類とした。SFRC は水セメント比を 60% , 繊維混入率を 1 % とし , 両端フック付の公称径 0.5 mm , 繊維長 30 mm の鋼繊維を使用した。養生方法は供試体打設後 , 翌日に脱型を行い , その後室温 20 で水中養生を 28 日間行なった。

UFRC は結合材と骨材 (細骨材のみ) をあらかじめ混ぜたプレミックス材料を使用し , 公称径 0.2 mm , 繊維長 15 mm のストレート鋼繊維を体積比で 2 % 混入したものである。図 - 1 に UFRC 供試体の打設方法を示す。UFRC は自己充填性を有するコンクリートであり , 本研究では図に示すように一軸引張試験 , 曲げ試験ともに供試体の軸方向側面より流し込んだ。養生方法は打設後封緘の上 , 20 60% の恒温室で湿空養生を 48 時間行い , 脱型後 90 で 48 時間蒸気養生を行なった。表 - 2 にコンクリートの力学特性を示す。

表 - 1 配合表

SFRC (kg/m ³)					
水	セメント	細骨材	粗骨材	鋼繊維	Ad
191	319	1025	757	78	4.65

UFRC (kg/m ³)				
水量	プレミックス	鋼繊維	高性能減水剤	
180	2254	157	28	

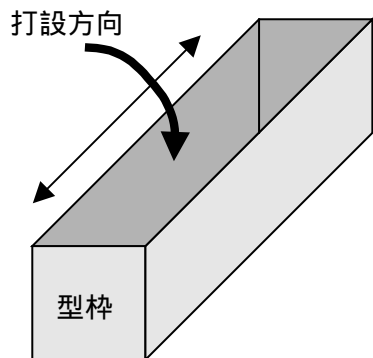


図 - 1 UFRC 供試体の打設方法

表 - 2 コンクリートの力学特性

種類	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
SFRC	57.0	-	30.1
UFRC	204.8	11.16*	52.1

* 割裂試験におけるひび割れ発生強度

3.2 一軸引張試験 (T シリーズ)

(1) 供試体

本実験で用いる供試体 (100 × 100 × 400 mm) を図 - 2 に示す。図に示すように供試体の両端に載荷装置と供試体を接続するための直径 12 mm , 長さ 200 mm のネジ棒を 4 本ずつ配置した。供試体の中央の相対する 2 面に切欠きを設け , リガメント寸法が異なる供試体を 3 種類作製した。表 - 3 に供試体名および寸法諸元を示す。表においてリガメント寸法 50 × 100 mm については偏心を制御するケースとしないケースの 2 ケースを行なった。その他の供試体ではすべて偏心制御を行なった。なお供試体数はそれぞれ各 4 本ずつとした。

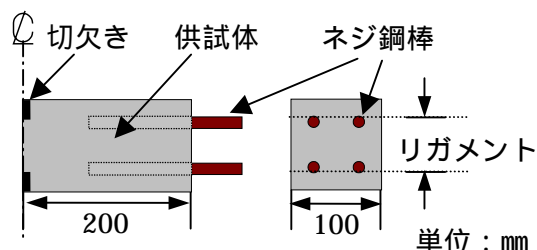


図 - 2 一軸引張供試体

表 - 3 一軸引張供試体一覧

Tension Test (T シリーズ)				
リガメント寸法 (mm)	30 × 100	50 × 100	70 × 100	
偏心制御	有	有	無	有
SFRC 供試体名	S-30	S-50e	S-50ne	S-70
UFRC 供試体名	U-30	U-50e	U-50ne	U-70

(2) 載荷および計測方法

一軸引張試験の概略図を図 - 3 に示す。実験では図に示すように供試体の 3 側面に高感度変位計 (感度 1/500 mm) およびクリップゲージ (感度 1/1000 mm) を設置した。また供試体の両側には容量 100 kN の手動油圧ジャッキを設置し , 供試体の前後には偏心を制御するためのネジ鋼棒を取り付けた。ネジ鋼棒にはひずみゲージを貼り付け , 計測されるひずみよりネジ鋼棒の荷重を求めた。偏心を制御する試験では , ひび割れ幅の小さい領域では 3 つの切欠き肩口開口変位 (以下 CMOD) を , またひび割れ幅が大きい領域では 3 つの変位が等しくなるように , ジャッキおよび鋼

棒の荷重を調整した。偏心を制御しない試験では供試体の両側に設置したジャッキの荷重のみを等しくなるように調整した。計測結果の整理にあたっては両ジャッキおよびネジ鋼棒の荷重の合計を引張荷重として、リガメント面積で除したものを引張応力とした。またひび割れ幅は3側面のCMOD もしくは変位の平均とした。

3.3 曲げ試験 (F シリーズ)

(1) 供試体

供試体寸法は、 $100 \times 100 \times 400$ mm、リガメント長さを 70 mm (切欠き有り) とした。なお、UFRC においては切欠き無しの供試体も作製した。表 - 4 に供試体名および寸法諸元を示す。なお供試体数は各 4 本ずつとした。

表 - 4 曲げ供試体一覧

Flexure Test (F シリーズ)			
リガメント長さ (mm)	70		100
コンクリート	SFRC	UFRC	UFRC
供試体名	S-70	U-70	U-100

(2) 実験および解析概要

図 - 4 に曲げ載荷試験装置を示す。載荷試験には容量 100 kN の手動メカニカルジャッキを使用し、水平方向の拘束を取り除くために両支点ともローラー支持とした。載荷には SFRC 供試体は 3 点載荷、UFRC 供試体では荷重が大きくなるため試験装置の都合上、3 等分点載荷を採用した。荷重の検出は、SFRC の場合には容量 10 kN、UFRC の場合には容量 100 kN のロードセルを用いた。計測項目は、切欠きの有る供試体では荷重、載荷点変位および CMOD の 3 項目、切欠きの無い供試体では荷重、載荷点変

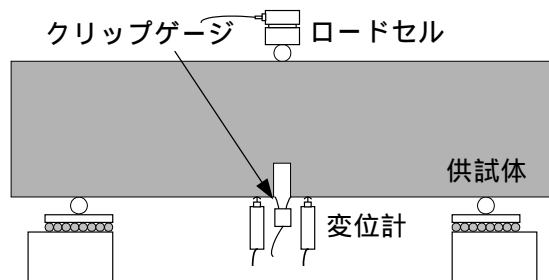


図 - 4 曲げ載荷試験装置

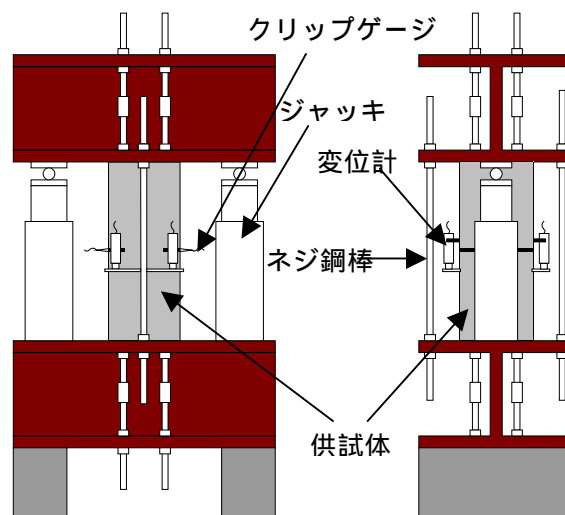


図 - 3 一軸引張試験装置

位の 2 項目とした。これより多直線近似解析法⁴⁾および修正 J 積分法⁵⁾を用い、引張軟化曲線の推定を行なった。なお修正 J 積分法を適用する場合のひび割れ先端開口変位は供試体の変形モードを剛体変形として、CMOD もしくは載荷点変位から換算したものをを用いた。

4. 試験結果および考察

4.1 供試体の破壊状況

(1) 一軸引張試験

一軸引張試験での供試体の破断面を写真 - 1 に示す。写真に示すように SFRC ではほとんどの供試体が両切欠き間を結ぶ一平面で破壊した。一方 UFRC の場合、供試体中央の切欠き間では壊れず、破壊面が凹凸のものや曲面状になるものが多く見られた。また UFRC ではひび割れ発生直後のひび割れ進展が非常に速い供試体があり、そのため初期ひび割れ部分でのひび割れ計測に困難な場合があった。

(2) 曲げ試験

曲げ試験における供試体の破壊状況を写真 - 2 に示す。曲げ試験では SFRC、UFRC とともにひび割れが切欠きから載荷面に向かい、ジグザグ状に進展した。また写真のように UFRC では SFRC に比べ供試体の圧縮縁において圧壊ひびわれが顕著に現れた。

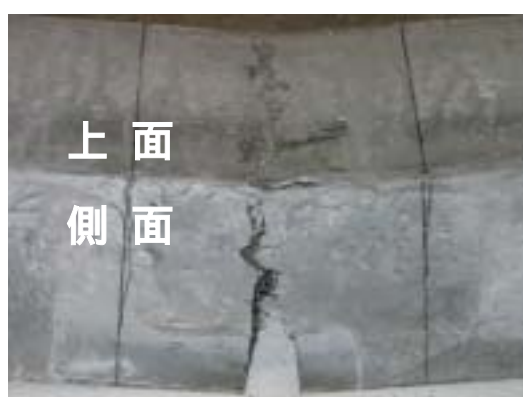


UFRC



SFRC

写真 - 1 一軸引張供試体の破壊状況



UFRC



SFRC

写真 - 2 切欠きはりの供試体の破壊状況

4.2 引張軟化曲線の比較

(1) SFRC

SFRC の引張軟化曲線を図 - 5 に示す。図中の引張軟化曲線は 4 本の供試体から求めた平均値である。また S-Jint70 および S-soft70 は修正 J 積分法および多直線近似解析法により求めたもの

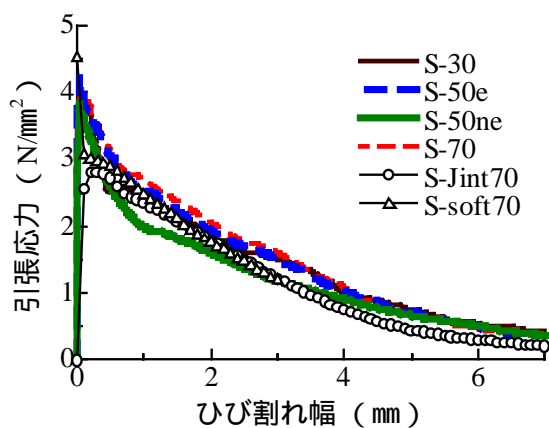


図 - 5 SFRC の引張軟化曲線

である。図に示すように一軸引張試験において偏心の制御を行なったケースでは、引張軟化曲線がほぼ一致しており、リガメントの寸法の影響はほとんどないと考えられる。また曲げ試験より多直線近似解析法、修正 J 積分法を用い推定した引張軟化曲線はどちらも、ひび割れ幅が小さい初期の部分を除き、一軸引張試験から求めた同曲線とほぼ一致することが明らかとなった。

(2) UFRC

図 - 6 に UFRC の引張軟化曲線を示す。一軸引張試験において偏心を制御した場合ではリガメント寸法が大きな供試体ほど引張軟化曲線の応力は小さくなった。このことは引張軟化曲線が材料特性ではなく構造特性となっていることを示していると考えられる。曲げ試験では切欠きの有無に関わらず、多直線近似解析法と修正 J 積分法ではほ

ほぼ同じ引張軟化曲線が推定された。一軸引張試験と曲げ試験の結果を比較すると、曲げ試験から推定した引張軟化曲線は U-30, U-50e とは異なったが、リガメント寸法が最も大きい U-70 では応力は小さくなったが全体としては近い曲線を示した。

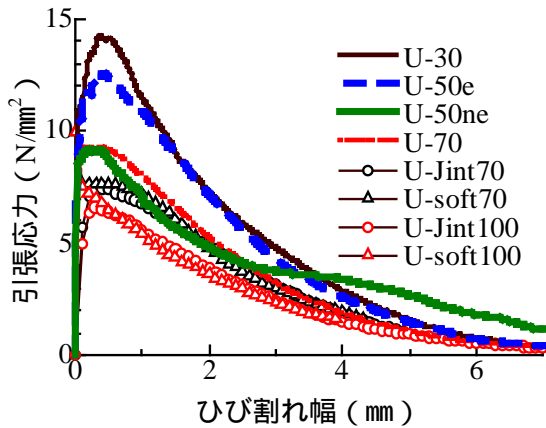


図 - 6 UFRC の引張軟化曲線

4.3 偏心の影響

(1) SFRC

図 - 7 に偏心を生じる引張供試体の変形の模式図を示す。図 - 8 に S-50e と S-50ne 供試体の相対する 2 面の CMOD とその平均値の関係を示す。図より S-50ne では平均 CMOD がおよそ 1 mm の部分より 2 本の線が離れている。これは平均ひび割れ幅 1 mm 以降において供試体に偏心が生じていることを表している。しかし S-50e では 2 本の直線が分かれることなく、制御されていることがわかる。図 - 5 の引張軟化曲線において、偏心が生じ始めたひび割れ幅 1 mm 付近を注目すると、この付近で曲線の勾配が

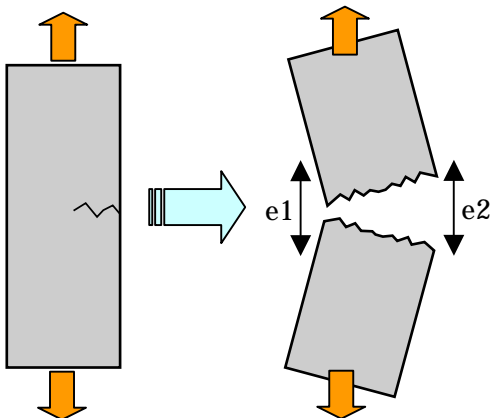


図 - 7 偏心を受ける供試体の変形

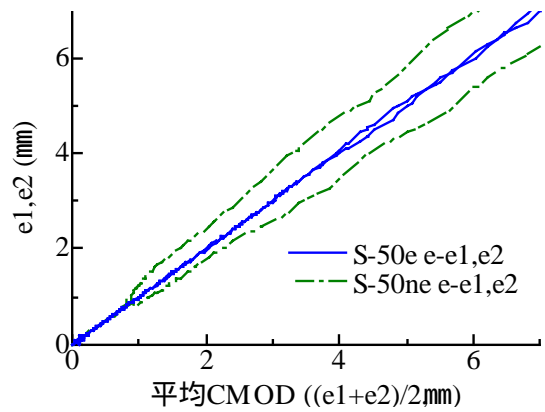


図 - 8 SFRC での供試体相対面の CMOD

急激に変化しており軟化曲線の傾きの変化と偏心が対応しているものと考えられる。

(2) UFRC

図 - 9 に U-50e と U-50ne の供試体の相対面における CMOD とその平均値の関係を示す。図に示すように U-50ne では平均 CMOD 2 mm 以降から偏心が生じ始め、ひび割れ幅 6 mm 以降では偏心がなくなっていることが分かる。図 - 6 においてこの区間の引張軟化曲線を見ると、U-50ne においてひび割れ幅 2 mm 以降では曲線の勾配が変化している。またこの区間では U-50e の引張軟化曲線が凹型であるのに対し、U-50ne では凸型になっている。

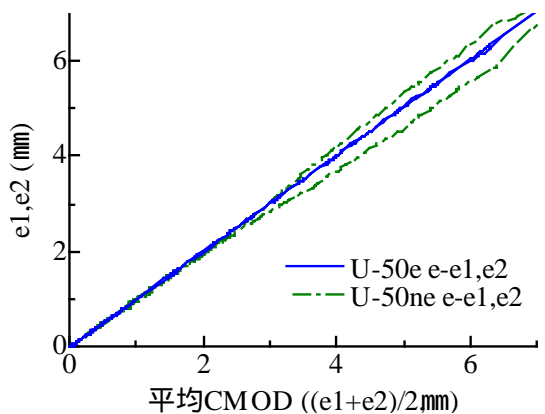


図 - 9 UFRC での供試体相対面の CMOD

5. UFRC における破断面での繊維が引張軟化曲線に及ぼす影響

UFRC の一軸引張試験において、引張軟化曲線のばらつきが大きいケースがみられた。こ

では破断面での繊維の本数と配向が引張軟化曲線に与える影響について検討を行なった。

5.1 破断面での繊維本数が引張軟化曲線に及ぼす影響

図 - 10 に引張軟化曲線にばらつきが生じた一例としてケース U-50e の引張軟化曲線を示す。図のように U-50e では no4 供試体のみ他の 3 つの供試体に比べ大きな引張応力が推定された。同図の凡例カッコ内に各供試体の破断面での繊維本数を示す。繊維本数は破断面において 10×10 mm の範囲を 4 箇所定め、その範囲内の繊維本数を数え、その平均をリガメント面積分に換算したものである。図より引張応力が最も多い no4 供試体の繊維本数が一番多くなった。しかし繊維本数の最も少ない no3 供試体から推定した引張軟化曲線の応力は必ずしも低くはならなかった。このことから破断面での繊維本数と引張軟化曲線に関連はあるものの、繊維本数が多くなるほど応力が高くなるとは必ずしもいえないことが分かった。

5.2 繊維の配向が引張軟化曲線に及ぼす影響

図 - 10 に示した供試体の破断面の繊維状況について観察を行った。その結果、引張軟化曲線の応力にばらつきが見られない 3 つの供試体では、破断面において 50% 程度の繊維しか軸方向に向いていなかった。それに対し、引張応力が最も高くなった no4 供試体では、破断面にある繊維の 70 ~ 80% が軸方向にまっすぐ引き抜けていた。このことから破断面での繊維の配向性は、引張軟化曲線に大きな影響を与える可能性があることが分かった。

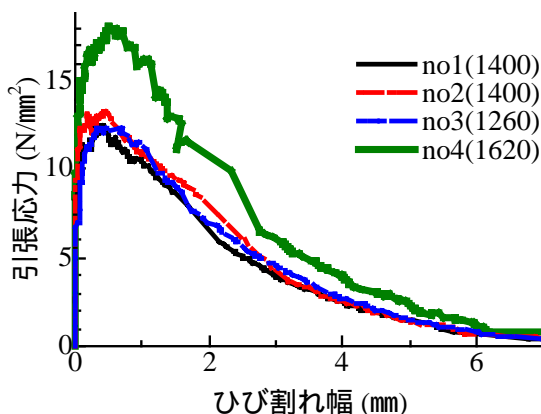


図 - 10 U-50e の引張軟化曲線

6. まとめ

本研究より以下のことが明らかとなった。

- (1) UFRC の一軸引張試験において引張軟化曲線を推定する場合、リガメント寸法の大きい供試体ほど引張軟化曲線の応力は小さくなった。このことは UFRC の引張軟化曲線が材料特性ではなく構造特性となっていることを示していると考えられる。
- (2) 曲げ試験より引張軟化曲線を推定する場合、軟化曲線初期部分を除けばコンクリートの違いや切欠きの有無に関わらず、多直線近似解析法と修正 J 積分法ではほぼ同じ引張軟化曲線が推定できる。
- (3) 一軸引張試験において偏心が生じた供試体と生じていないものでは引張軟化曲線の形状が異なる。
- (4) UFRC では破断面の繊維の配向が引張軟化曲線に大きな影響を与える可能性がある。

なお、引張軟化曲線を材料特性とした仮想ひび割れモデルが UFRC に適用可能かどうかについては、供試体の破壊挙動に関する詳細な検討や、仮想ひび割れモデルを部材耐力等の推定に用いた場合の推定精度からの検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 掛井孝俊, 川口哲生, 二羽淳一郎, 兵頭彦次: 超高強度鋼繊維補強セメント系複合材料の破壊力学特性, 第 57 回セメント技術大会講演要旨 2003, pp.230-231 (2003)
- 2) Groupe de travail BFUP, "Ultra high performance fiber-reinforced concrete," Interim recommendations, Documents scientifiques et techniques, AFGC/SETRA, Jan., 2002
- 3) 秋田宏, 小出英夫, 孫銅基, 外門正直: コンクリート工学論文集, 第 12 巻第 2 号, pp.105-112, (2001.5)
- 4) 橋高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造計論文集, 第 435 号, pp.15-25 (1993.11)
- 5) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳治: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, 第 426 号, Vol.14, pp.13-22 (1992)