

論文 SFRC の引張軟化曲線の推定法に関する一研究

松尾 庄二*¹・松岡 茂*²・益田 彰久*¹・柳 博文*¹

要旨：鋼繊維補強コンクリートの引張軟化曲線を推定するために直接引張試験を行った。試験結果から2直線モデルの引張軟化曲線を仮定し、これを用いた非線形有限要素解析を行ったところ、曲げ試験の実験結果をよく再現できた。次に、曲げ試験結果を利用して引張軟化曲線を推定する方法を提案した。この方法は、曲げ試験の荷重-変位曲線と引張軟化曲線の相関性に着目し、ひびわれ断面のつりあい式から引張軟化曲線を導出するものである。

キーワード：SFRC、引張軟化曲線、直接引張試験

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) はプレーンコンクリートと比較すると数倍から数十倍の靱性を有する。SFRCの高靱性は、ひびわれ面に架橋された繊維が引張応力を伝達することにより、ひびわれ開口抵抗性が向上することに由来する。したがって、SFRCのこのような特性を活かすためにはひびわれ発生後の伝達応力を把握する必要がある。ひびわれ発生後の伝達応力とひびわれ開口幅との関係は引張軟化曲線と呼ばれるものであり、コンクリートの破壊力学において重要なパラメータの一つとなっている。引張軟化曲線の推定方法としては、引張試験により直接求める方法 [1]、曲げ試験等の実験結果に対し最適なパラメータを求める逆解析法 [2]、J積分に基づく方法 [3] [4] 等が提案されている。本研究においては、直接引張試験により引張軟化曲線を求めた。またその評価は、非線形有限要素解析による3等分点荷重の曲げ試験のシミュレーションを行い、実験結果と比較することにより行った。さらに、引張試験結果と曲げ試験結果の比較から、新たな引張軟化曲線の推定法を提案した。

2. 実験概要

2.1 供試体の製作

実験に使用した繊維は、表面にインデント加工を施された公称径 0.6 mm、繊維長30mmのもので、混入率 (コンクリート中の体積百分率) は 0.5・1.0・1.5%の3種類

表-1 SFRCの配合表

繊維混入率 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
			繊維	水	セメント	細骨材	粗骨材
0.5	50.3	56.9	39.3	197	392	947	718
1.0	50.3	60.9	78.5	202	402	992	638
1.5	50.3	68.9	117.8	212	421	1084	490

とした。SFRCの配合は表-1に示すとおりであり、普通ポルトランドセメントを使用した。また、最大骨材寸法は繊維長との関係から20mmとした。供試体は、JCI-SF 2「繊維補強コンクリートの強度及びタフネス試験用供試体の作り方」に準拠し、10cm×10cm×40cmの直方体供試体を製作した。打設後24時間湿潤養生した後脱型し、実験日まで水温20℃で水中養生を行った。実験前に供試

*1 鉄建建設(株)エンジニアリング本部技術研究所研究第二部 (正会員)

*2 鉄建建設(株)エンジニアリング本部技術研究所研究第二部主任研究員 (正会員)

体の両端を各5cmずつ切り落とし長さ30cmに成形して実験に供した。また、ひびわれ開口変位を測定するために供試体の相対する2面の中央部に深さ10mmの切欠き（ノッチ）を入れた。

2. 2 実験概要

直接引張試験は、Wangら[1]の方法を参考にして図-1に示す方法で行った。供試体をエポキシ系の接着剤により鋼製の治具に固定し、ユニバーサルジョイントを介して試験機に取り付けた。荷重は万能試験機のクロスヘッドの変位速度を制御して行った。計測項目としては、供試体切欠き部をまたいで取り付けられたクリップ型変位計によるひびわれ開口変位をとった。実験終了後、破断面の断面積をノギスにより測定し引張応力を算出した。なお、供試体数は1回の試験につき3本とした。また、比較のために3等分点荷重による曲げ試験をJCI-SF 4「繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」に準拠して行った。ただし、供試体は下面中央部に深さ10mmのノッチを入れた15cm×15cm×53cm（スパン＝45cm）のものを用い、計測項目としてクリップ型変位計によるひびわれ開口変位を付け加えた。

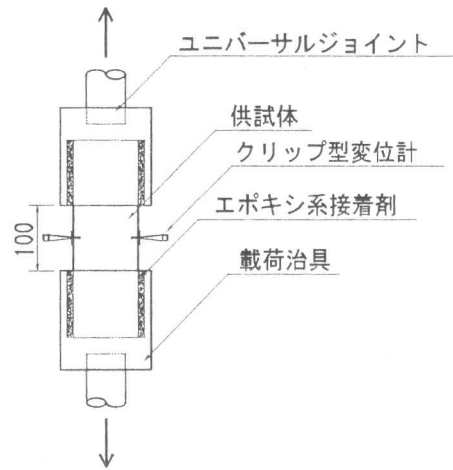


図-1 直接引張試験方法

3. 実験結果および考察

図-2に直接引張試験結果を示す。実験結果を見ると、伝達応力（引張応力度）は最大になった直後に急激に低下するが、やがて緩やかな勾配に転じて減少していく傾向が共通して見られる。しかし、その低下の度合いは繊維混入率により異なる。すなわち、繊維混入率が小さいものほどピーク直後の伝達応力の低下は大きくなっている。この実験結果に基づき、ひびわれ発生後の伝達応力とひびわれ開口変位との関係すなわち引張軟化曲線を2直線モデルで近似した（図-3）。2直線モデルの引張軟化曲線は軟化開始点 f_t 、折れ点 γf_t および折れ点以降の勾配 λ の3つの要素で表される。ただし、引張軟化曲線の初期勾配（軟化開始点より折れ点までの勾配）は、プレーンコンクリートと同じと考え、文献[5]を参考にして図-3に示す値に決めた。

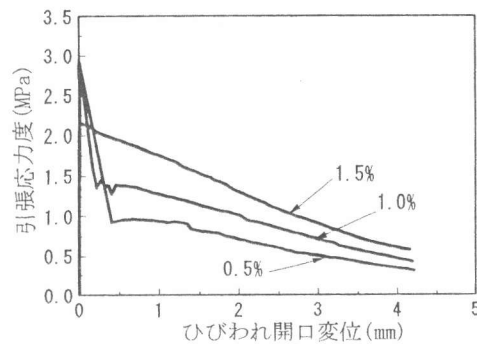


図-2 直接引張試験結果

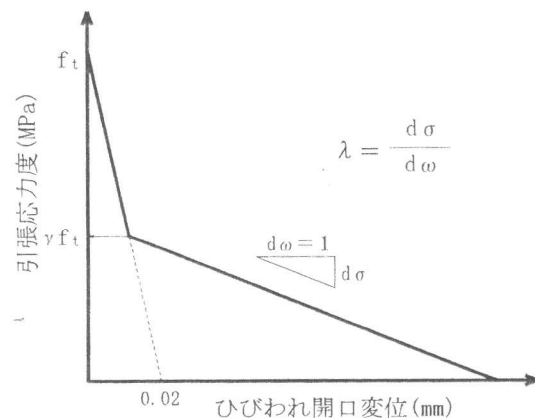


図-3 引張軟化曲線モデル

3. 1 軟化開始点 f_t

SFR C 供試体に一軸引張応力が作用した場合、ひびわれ発生以前の段階では応力は直線的に増大する。局所的に見ると、作用応力が破壊基準に達

するとひびわれが発生し応力が低下する。しかし巨視的に見ると、微細ひびわれが分散的に発生することから、ひびわれ発生後も多少の伝達応力の上昇が見られる。開口変位が進み応力（作用荷重を破断面の投影面積で除したものと定義する）が最大になると引張軟化状態に移行する。この巨視的な軟化開始点を引張強度とする。引張軟化曲線のモデル化にあたっては、軟化開始点以前の段階は開口変位量が小さいため無視した。

3. 2 折れ点 γf_t

六郷ら[6]によれば、引張軟化曲線の折れ点は引張応力に対するマトリックスの抵抗限界点であり、これ以降繊維の補強効果が発揮される。したがって、ひびわれ発生後の破壊靱性によりSFRCの性能を評価する場合、引張強度 f_t よりも折れ点強度 γf_t が問題となる。引張強度と折れ点強度との比 γ を残留強度率と定義したとき、 γ を圧縮強度により整理した結果を図-4に示す。残留強度率 γ は繊維混入率により異なり、圧縮強度にはよらない。

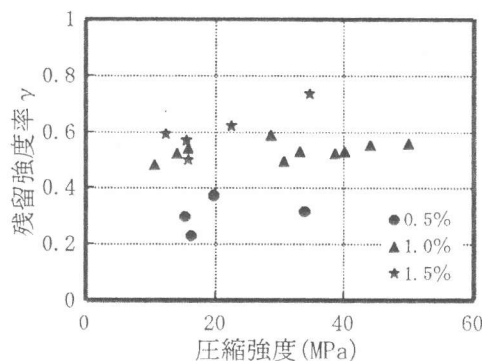


図-4 残留強度率

3. 3 折れ点以降の勾配 λ

引張軟化曲線の折れ点以降の勾配 λ もSFRCの性能を左右する要素である。すなわち、折れ点強度が等しい場合、緩勾配 (λ :小)のものほど軟化曲線下の面積 (=破壊エネルギー) が大きく、したがって、破壊靱性が大きいことを意味するからである。 λ をひびわれ開口変位の増分 1mmあたりの伝達応力の低下分

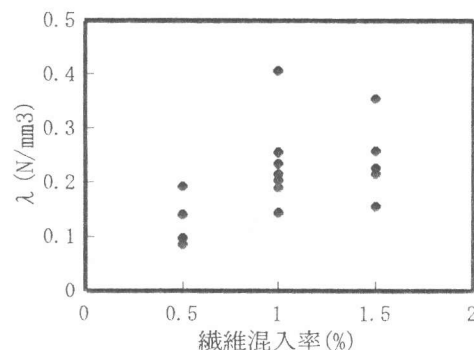


図-5 折れ点以降の勾配 λ

(図-3参照)と定義したとき、 λ と繊維混入率との関係を図-5に示す。繊維混入率が 1.0%の場合、0.5%に比べると λ の値は大きい。しかし、1.5%との

間には顕著な差は見られなかった。前項の結果と合わせると、繊維混入率が小さいと軟化開始点直後の強度低下率が大きく折れ点以降の勾配は小さい、また繊維混入率が高い場合逆の傾向が見られる。同種の繊維においては、引張軟化曲線の終端部すなわち限界開口幅が等しいと考えられるため、結局繊維混入率が高いほど破壊靱性が大きくなる。

4. 非線形 FEM 解析

4. 1 解析概要

実験より得られたSFRCの引張軟化曲線を評価する手段として、破壊力学的考え方に基づくアプローチを試みた。すなわち、引張軟化曲線を組み込んだ非線形有限要素解析により曲げ試験のシミュレーションを行い、その妥当性を確認した。解析モデルはDahlblomタイプの分布ひびわれモデルを用い、ひびわれが発生した要素は直交異方体要素とした。なお、引張軟化曲線を解析上ではひずみ軟化として取り扱うが、その際文献[7]に示すような等価長さの概念を導入することにより、要素寸法の影響を除いた。

4. 2 引張軟化曲線と応力-ひずみ曲線

解析に用いる引張軟化曲線を図-3に示す2直線モデルで表す。ただし、繊維混入率 1.0%の実験結果より引張強度 $f_t = 3.1$ (MPa)、残留強度率 $\gamma = 0.50$ 、折れ点以降の勾配 $\lambda = 0.20$ (N/mm³)とした。ひびわれの局所化を表現するため、ひびわれ発生後開口幅が減少する方向に変形が生じる場合には、原点に指向する除荷経路に従うものとした。一方、圧縮側の応力-ひずみ関係についてはプレーンコンクリートと同じ二次曲線タイプの応力-ひずみ曲線を使用した。

4. 3 解析結果

図-6に2直線モデルの引張軟化曲線を用いた解析結果を示す。ただし、図中の実線はFEMによる解析結果を、また点線は繊維混入率 1.0%について行った3等分点荷重の曲げ試験結果を示す。解析結果は、曲げ試験結果として得られた荷重-変位曲線(変位としてはひびわれ開口変位を採用した。以下、すべて同様)をよく再現している。すなわち、本研究で行った直接引張試験により、比較的精度の良い引張軟化曲線が得られることが確認された。ただし、直接引張試験は必ずしも安定した実験結果を得られる方法とは言えず、また実験装置に多少の工夫を必要とする。したがって、簡単な試験方法とは言い難く、より容易に引張軟化曲線を決定する方法が必要とされる。そこで、次章において荷重-変位曲線を利用した引張軟化曲線の推定法を提案した。

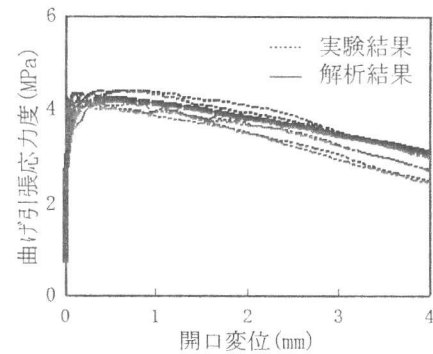


図-6 曲げ試験結果

5. 引張軟化曲線の推定法の提案

2直線モデルの引張軟化曲線のうち、軟化開始点から折れ点までの第1直線は主としてコンクリートマトリックスにより定まる部分である。これに対して、折れ点以降の第2直線は繊維の補強効果が発揮されることから、SFRCの靱性に寄与する部分と見てよい。したがって、引張軟化曲線を推定する場合、第2直線を決めることが重要となる。前述したように、第2直線は折れ点強度 γf_t と勾配 λ により記述される。本研究においては γf_t および λ を引張軟化曲線(直接引張試験結果)と荷重-変位曲線(3等分点荷重の曲げ試験結果)との関係から導き出した。

5. 1 引張軟化曲線と荷重-変位曲線の比較

実験から得られた引張軟化曲線と荷重-変位曲線の比較を行った。Nanakorn[8]は、繊維混入率 1.0%の実験結果より、荷重-変位曲線における最大荷重時からひびわれ開口変位が 1mmに達するまでの直

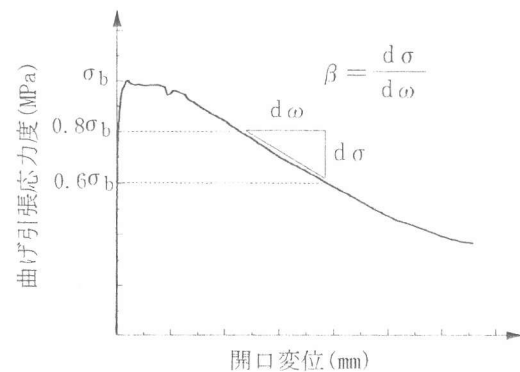


図-7 荷重-変位曲線の代表勾配 β

線の傾きと引張軟化曲線の折れ点以降の勾配とが直線関係をなすことを示した。しかし、ひびわれ開口変位が 1mm前後あるいは以降に最大荷重に到達する場合や、第1ピークと第2ピークの落差が大きいものについては、得られた傾きが荷重-変位曲線の勾配を代表するとは言い難い。したがっ

て、荷重-変位曲線の代表勾配として図-7に示すように、第2ピーク荷重の80%から60%までの直線の傾き β をとった。なお、この場合、荷重-変位曲線の縦軸は曲げ引張応力度とした。 β と引張軟化曲線の折れ点以降の勾配 λ とを比較した結果を図-8に示す。 β と λ の相関関係を最小自乗法で計算すると式(1)の回帰曲線で表される。また、図中の破線は4章のFEM解析を利用した計算結果を表す。

$$\beta = 2.20\lambda - 0.13 \quad (1)$$

この時の相関係数は0.915であり、 β と λ の間には非常に強い相関関係が成立する。この関係を用いると β から λ が推定可能となる。

5. 2 ひびわれ断面のつりあい式

3等分点荷重の曲げ試験において、ひびわれ発生断面のひずみ分布をひびわれ先端より上側(圧縮側)で直線分布と仮定した[8]。圧縮側の応力-ひずみ関係は4章と同じく二次曲線タイプの応力-ひずみ曲線を用い、引張側の応力-ひずみ関係については文献[8]に示す直線とした。また、ひびわれ部の応力分布は引張軟化曲線の第2直線部に従うものとし、第1直線部は無視した。ただし、ひびわれの形状としては、開口変位を最大としひびわれ先端(ひびわれ深さ αh)で変位が0になる直線形状を仮定した。以上より定まるひびわれ発生断面の応力・ひずみ分布を図-9に示す。このとき、断面力のつりあい式は次式(2)および(3)で表される。

$$M_{ud} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot y \cdot b \cdot dy \quad (2)$$

$$N_{ud} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot b \cdot dy \quad (3)$$

ここに、 $M_{ud} \cdot N_{ud}$: ひびわれ発生断面の図心に作用する曲げモーメント・軸力

h : 断面高さ、 b : 断面幅、 αh : ひびわれ深さである。

ひびわれ発生断面においては、荷重と開口変位の関係は荷重-変位曲線で表される。ある開口変位 ω (荷重 P) の時点で考えると、曲げモーメント M_{ud} は荷重 P より計算される。また、軸力 N_{ud} は0である。すなわち、上式(2)(3)における未知数は応力分布 $\sigma(y)$ であり、これは圧縮縁の応力 σ_c 、ひびわれ先端の引張応力 γf_t 、ひびわれ深さ αh および引張軟化曲線の直線勾配 λ で表される。このうち λ は式(1)を用いると、荷重-変位曲線の代表勾配 β から推定される。また、 γf_t は本章における解析目標そのものだから、つりあい式を解き応力分布 $\sigma(y)$ を決定するためには、 σ_c 、あるいは αh のいずれかを定める必要がある。ひびわれ深さ αh の測定については、現段階ではあまり適切な方法が見当たらないが、圧縮縁の応力 σ_c については本節の仮定を用いると圧縮側の縁ひ

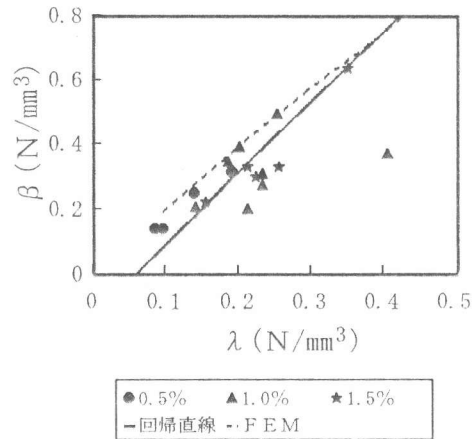


図-8 β と λ の関係

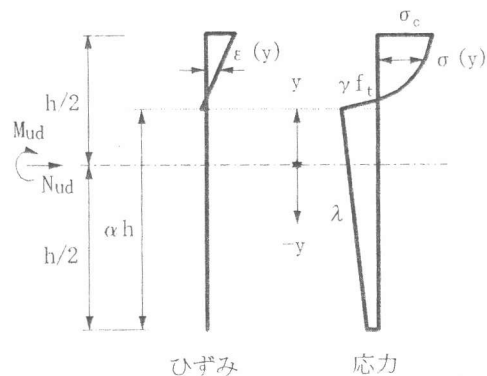


図-9 応力・ひずみ分布図

ずみ ϵ_c より決定される。 ϵ_c の測定についてはひずみゲージにより直接測定可能であり、取り扱いも簡単である。結局、3等分点荷重の曲げ試験において、ノッチ部におけるひびわれ開口変位とともに圧縮縁の縁ひずみを測定することにより、引張軟化曲線の第2直線部が推定可能である。

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に記す。

- (1) 鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の引張軟化曲線を、直接引張試験により求めた。
- (2) 得られた引張軟化曲線を組み込んだ非線形有限要素解析により、3等分点荷重による曲げ試験のシミュレーションを行ったところ、実験結果と良く一致した。すなわち、直接引張試験により比較的精度の良い引張軟化曲線が得られた。
- (3) 3等分点荷重による曲げ試験結果から引張軟化曲線を推定する方法を提案した。この方法は、曲げ試験の荷重-変位曲線の勾配およびひびわれ断面のつりあい式から2直線モデルの引張軟化曲線の第2直線部を推定するものである。

参考文献

- 1) Wang, Y., Li, V.C. and Backer S.: Experimental Determination of Tensile Behavior of Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol.87, No.5, pp.461-468, 1990.
- 2) 野村希晶ほか: 非線形破壊力学手法に基づく高強度コンクリートの脆性化機構の考察、日本建築学会構造系論文報告集、No.416、pp.9-16、1990.10
- 3) Li, V.C., et al.: Experimental Determination of the Tension Softening Curve in Cementitious Composites, Cement and Concrete, Vol.17, pp.441-452, 1987.
- 4) 内田裕市・六郷恵哲・小柳 洽: 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、No.426/V-14、pp.203-212、1991.
- 5) Nanakorn, P. and Horii, H.: A FRACTURE MECHANICS-BASED DESIGN METHOD FOR SFRC TUNNEL LINING, Proceeding of South East Asian Symposium on Tunneling and Underground Space Development, Japan Tunnelling Association, Bangkok, pp.71-78, January 1995.
- 6) 六郷恵哲ほか: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状と引張軟化曲線、土木学会論文集、No.460/V-18、pp.57-64、1993.
- 7) Cervenka, V. and Pukl, R.: SBETA analysis of size effect in concrete structures, Size Effect in Concrete Structures, Mihashi, H. Okamura, H. and Bazant, Z.P. eds., Proceedings of the Japan Concrete Institute International Workshop, Sendai, Japan, pp.323-333, 31 October-2 November 1993.
- 8) Nanakorn, P.: Fracture Mechanics Based Design Method of SFRC Tunnel Lining, Doctor's Theme, University of Tokyo, December, 1993.