

論文 SFRC の曲げ試験による引張軟化曲線の推定

武田 康司*¹・松岡 茂*¹・松尾 庄二*¹

要旨：鋼繊維補強コンクリート（SFRC）の引張特性に関して、鋼繊維混入率が 1.5 %以下の SFRC における引張軟化曲線は 2 直線でモデル化することによりひび割れ発生後の挙動を精度良く近似することができるかと報告されている。そこで本研究では、引張軟化曲線を推定するために曲げ試験を実施し、その結果から推定された直線と直接引張試験から得られた引張軟化曲線を比較することにより、提案した推定法の妥当性を検証した。

キーワード：SFRC、引張軟化曲線、曲げ試験

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート（SFRC）は、ひび割れ分散性、曲げ靱性に優れている特性を有しており、この特性に注目してトンネル覆工等を対象とした SFRC の設計法が提案されている。このような特性を設計に反映するためには、SFRC の引張破壊特性を表す指標である引張軟化曲線を評価することが必要である。SFRC の特性を考慮した設計を行うためには、引張軟化曲線の算定方法及び施工サイドで簡単な装置を使用した強度管理手法を確立することが重要である。SFRC の引張軟化曲線を求めるために各種の方法が提案されている。例えば、Wang ら[1]が提案している直接引張試験、Li[2]らが提案している切り欠きはりの曲げ試験から J 積分を介してコンクリートの引張軟化曲線を求める試験法や六郷ら[3]が提案している修正 J 積分法がある。しかしながら、直接引張試験では高剛性で高精度の変位制御が可能な試験機が必要であり、J 積分法は切り欠き長さがわずかに異なる 2 体の曲げ供試体の計測結果の差を用いて引張軟化曲線を推定するため、計測値のばらつきの影響を受けやすい。また、修正 J 積分法ではひび割れ発生強度である軟化開始強度が明確でなく、引張軟化曲線が急激に変化するような場合には誤差が生じる可能性が指摘されている。最近では、栗原ら[4]による曲げ試験で得られた荷重-変位曲線から、供試体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだ FEM を用い、橘高ら[5]の提案した多直線近似法により引張軟化曲線を推定する方法が提案されている。これによると、引張軟化曲線全体を推定する上では影響はないが、軟化開始点応力は推定時の許容誤差により若干変動すると報告している。

以上のように、過去に提案された引張軟化曲線を推定する手法は、高性能の試験機や解析を必要とするために、SFRC の強度管理手法として施工サイドで実施することは困難である。そこで、本研究では SFRC の引張破壊特性である引張軟化曲線により、SFRC の強度管理を行うことを目的に、一般的な SFRC の強度試験法として行われる曲げ試験から引張軟化曲線を推定する手法を検討した。

2. SFRC の強度試験方法

2. 1 曲げ試験

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 0.6mm、繊維長 30mm のもので、

* 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）

混入率（コンクリート中の体積百分率）は 1.0%とした。S F R Cの配合を表-1に示す。最大骨材寸法は繊維長との関係から 20mmとした。

曲げ試験に用いる供試体は「繊維補強コンクリートの強度およびタフネス試験用供試体の作り方」に準拠し、15cm×15cm×53cm（スパン=45cm）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、実験当日まで水温 20℃で水中養生を行った。試験方法は、土木学会規準「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法」に準拠した方法により行った。なお、ひび割れ発生位置を限定する目的で、供試体には下面中央に深さ 10mm の切り欠きを設けた。

曲げ試験は、図-1に示すように3等分点载荷とし、供試体中央部の切り欠きにクリップ型変位計を取り付け、ひび割れ開口幅を測定した。変位は支承点の沈下を考慮し、高感度変位計を供試体中央、载荷点下および支承点上に取り付け測定した。また、供試体中央の载荷側表面に長さ 10mm のひずみゲージを 7 枚貼付して、圧縮ひずみを測定した。

表-1 S F R Cの配合

Vf (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
1.0	50.3	60.9	202	402	992	638

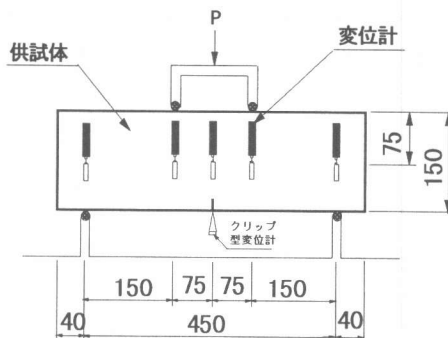


図-1 曲げ試験方法

2. 2 直接引張試験

直接引張試験は Wang ら[1]の方法を参考にして図-2に示す方法で行った。供試体は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器に取り付けた。载荷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。供試体は 10cm×10cm×30cm の直方体で、ひび割れ開口変位を計測するため供試体の相対する2面の中央部に深さ 10mm の切り欠きを設けた。S F R Cの配合は曲げ試験のものと同じとした。計測項目としては、供試体切り欠き部にクリップ型変位計を取り付けひび割れ開口変位をとった。

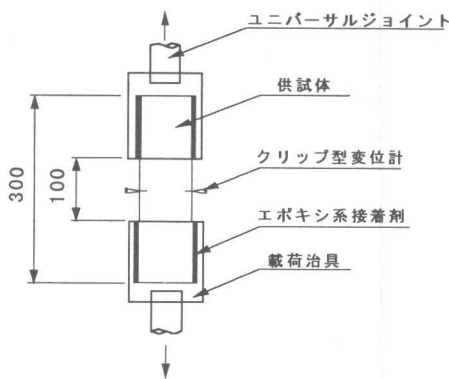


図-2 直接引張試験方法

2. 3 曲げ試験時のひずみゲージの選定

圧縮側の縁ひずみは、ひび割れの発生によりひび割れ断面におけるひずみ量が増加し、ひび割れ断面から離れた部分のひずみは減少するひずみの局所化が生じることが知られている。このようなひずみの局所化の影響を防ぐために、長さ 10mm のひずみゲージにより測定を行うものとした。図-3に、曲げ試験でひび割れ開口幅が 1.5mm に達した時に測定したひずみ分布と破壊力学に基づいた F E Mで解析したひずみ分布を示す。F E M解析結果は、直接引張試験から得られた引張軟化曲線を考慮したもので、仮想ひび割れモデルを用いて解析[7]を行っている。図に示すように、計算値と解析値とはほぼ良い対応を示しており、長さ 10mm のひずみゲージにより圧縮側のひずみ

分布を測定することができる。また、ひずみゲージの長さによる測定値に対する影響を把握するために、円柱供試体（ $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ ）にいろいろな長さのひずみゲージを貼付して圧縮強度試験を行った。図-4に圧縮強度試験結果の荷重と各ひずみゲージの測定値との関係を示す。最大圧縮荷重以下では、ひずみゲージの長さに関わらず測定値はほぼ一定であった。以上のことから、曲げ試験では長さ10mmのひずみゲージを使用した。

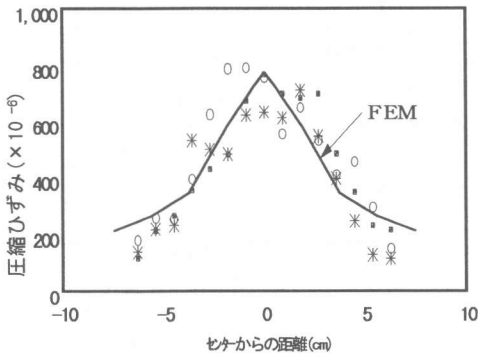


図-3 圧縮側縁ひずみ分布

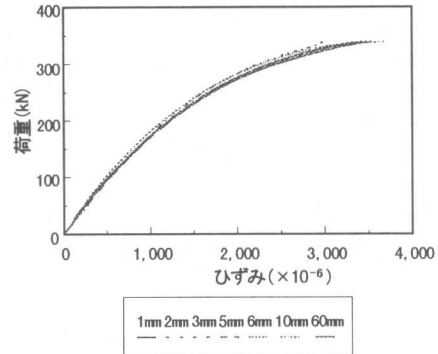


図-4 圧縮試験結果

3. 引張軟化曲線の推定法

Nanakornら[6]は、鋼繊維の混入率が1.5%以下のSFRCにおける引張軟化曲線は2直線モデルにより近似することができるとしている。SFRCの引張軟化曲線の2直線モデルを図-5に示す。図のように2直線モデルの第1直線（ひび割れ発生後の直線）は、SFRCの母材である無筋コンクリートの特性を表し、第2直線（変曲点以降の直線）は鋼繊維による引張応力の伝達を示している。また、Nanakornら[6]は、引張軟化曲線を第2直線のみでモデル化することにより、SFRCの最大荷重およびひび割れ発生後の挙動を精度よく近似することを指摘している。そこで、SFRCの引張特性としてNanakornら[6]が指摘している引張軟化曲線の第2直線を求めるものとした。第2直線は、図-5のように残留強度 γf_t と直線の勾配 λ により定義される。よって、以下に残留強度 γf_t と第2直線の勾配 λ を導く手法を述べる。

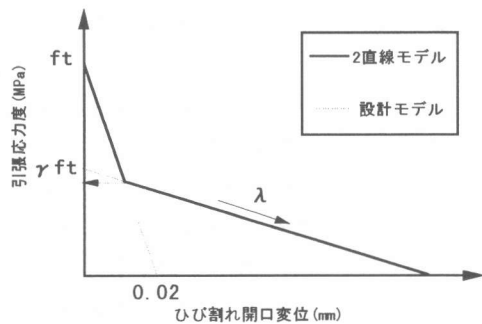


図-5 SFRCの引張軟化曲線

引張軟化曲線は、式(1)により定義されるものとする。

$$\sigma_t(\omega) = \gamma \cdot f_t - \lambda \cdot \omega \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_t(\omega)$ ：開口幅 ω における引張応力（引張軟化曲線）、 $\gamma \cdot f_t$ ：残留強度、 λ ：直線の勾配、 ω ：ひび割れ開口幅である。したがって、式(1)に示すように引張軟化曲線は、残留強度と勾配に2つのパラメーターで決まる。

勾配 λ と曲げ試験結果の荷重-ひび割れ開口幅曲線との関係について Nanakorn ら[6]は、曲げ試験で測定された荷重-ひび割れ開口幅曲線の勾配 β と引張軟化曲線の勾配 λ に図-6に示すように相関があるとし、式(2)により $\beta-\lambda$ 関係を定義することができることを指摘している。図中には(40cm×40cm×160cm)による曲げ試験結果で得られた測定値もプロットしている。荷重-ひび割れ開口幅曲線の勾配 β は、図-7に示すように最大荷重の80%~60%区間の勾配である。

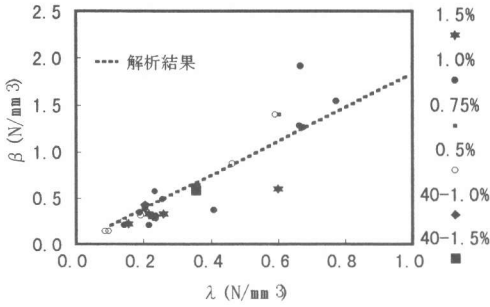


図-6 勾配 $\beta-\lambda$ 関係[6]

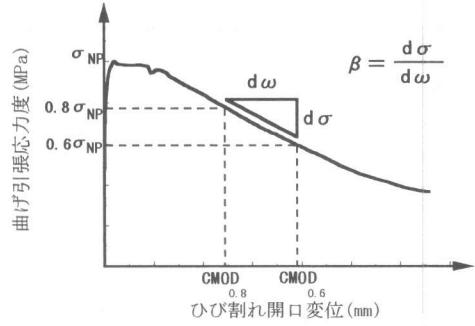


図-7 β の定義

$$\beta = 1.85\lambda$$

(2)

したがって、曲げ試験の荷重-ひび割れ開口幅曲線より引張軟化曲線の勾配が式(2)により計算される。

ひび割れ断面におけるひずみ分布を図-8のようにひび割れ先端から直線分布しているものとする。ひずみ分布は式(3)により表せられる。応力-ひずみ曲線は、無筋コンクリートと同様に図-9のコンクリート標準示方書の2次曲線に従うものとする、ひび割れ断面における応力分布は式(4)により表せられる。ひび割れ断面における応力分布は、式(1)から式(5)のようになる。

$$\varepsilon'(y) = \frac{\varepsilon'_{cm}}{h - \alpha h - C} \cdot y \quad (3)$$

$$\sigma'_c(y) = 2 \cdot f'_c \left(\frac{\varepsilon'_{cm}}{0.002 \times (h - \alpha h - C)} \right) y$$

$$- f'_c \left(\frac{\varepsilon'_{cm}}{0.002 \times (h - \alpha h - C)} \right)^2 y^2$$

$$0 \leq \varepsilon'(y) \leq 0.002$$

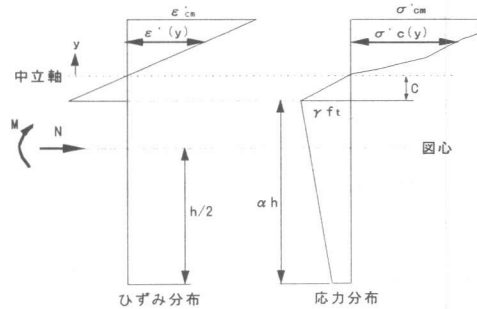


図-8 ひび割れ断面の応力・ひずみ分布[6]

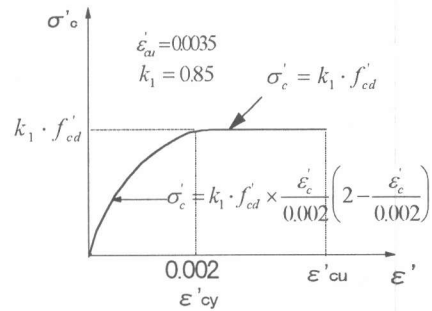


図-9 応力-ひずみ曲線

$$\sigma'_c(y) = f'_c \quad (4)$$

$$0.002 \leq \varepsilon'(y) \leq 0.0035$$

$$\sigma_t(y) = \gamma \cdot f_t + \frac{\omega \cdot \lambda}{\alpha h} (y + C) \quad (5)$$

ここに、 $\varepsilon'(y)$ ：中立軸から距離 y におけるひずみ、 $\varepsilon'_{\text{max}}$ ：ひび割れ直上の圧縮側縁ひずみ、 y ：中立軸からの距離、 h ：断面高さ、 α ：断面高さに対するひび割れ深さの割合、 C ：ひび割れ先端から中立軸までの距離、 f'_c ：圧縮強度、 $\sigma'_c(y)$ ：中立軸から距離 y の圧縮応力、 $\sigma_t(y)$ ：ひび割れ先端から中立軸における引張応力である。ひび割れ断面における断面力は、式(6)、(7)により計算される。

$$M = \int_0^{h-\alpha h-C} \sigma'_c(y) \left(y + \alpha h + C - \frac{h}{2} \right) b dy - \frac{1}{2} \gamma \cdot f_t C \left(\alpha h - \frac{h}{2} + \frac{C}{3} \right) b \quad (6)$$

$$- \int_{-(\alpha h+C)}^{-C} \sigma_t(y) \left(y + \alpha h + C - \frac{h}{2} \right) b dy = P \cdot L / 6$$

$$N = \int_0^{h-\alpha h-C} \sigma'_c(y) b dy - \frac{1}{2} \gamma \cdot f_t C b - \int_{-(\alpha h+C)}^{-C} \sigma_t(y) b dy = 0 \quad (7)$$

ここに、 N ：軸力、 M ：曲げモーメント、 b ：部材幅、 P ：荷重、 L ：曲げ試験のスパンである。

曲げ試験では、軸力は作用しておらず、曲げモーメントは荷重から算定することができる。また、曲げ試験で測定された荷重、ひび割れ開口幅、圧縮側縁ひずみにより、式(3)～(7)から残留強度 γf_t が算定される。

4. 本推定法による結果と実験結果との比較

図-10に、曲げ試験結果から本推定法により推定した引張軟化曲線(第2直線)と直接引張試験から得られた引張軟化曲線を示す。図のように曲げ試験から推定した引張軟化曲線は、直接引張試験の引張軟化曲線のうち、引張応力度が最大に達してから急激に低下した点以降の挙動(鋼繊維による引張応力の伝達)とほぼ一致している。また、曲げ試験から算定した引張軟化曲線(図-10中の実線)を用いて曲げ試験をFEM解析により計算した結果を図-11に示す。曲げ試験で得られた荷重-変位曲線の平均値と解析結果の荷重-変位曲線はほぼ一

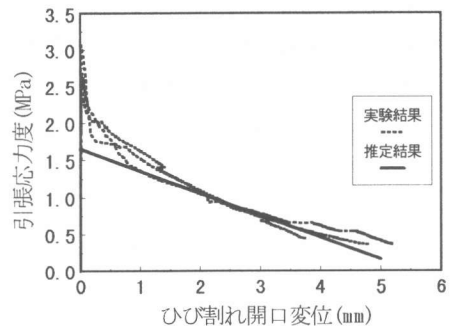


図-10 近似結果

致しており、本論文の推定法によりSFRCの引張軟化曲線を精度良く近似することができる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 曲げ試験結果から本論文で提案した手法により推定された引張軟化曲線は、直接引張試験より得られた引張軟化曲線のひび割れ発生直後(変局点以降の挙動)を精度良く近似している。
- (2) 本論文で提案した手法により、曲げ試験からSFRCの引張破壊特性である引張軟化曲線を近似することができる。
- (3) 本推定法から引張軟化曲線を導き出し、鋼繊維で受け持たれる残留強度を求めることで、施工サイドにおけるSFRCの強度管理を比較的簡単に行うことができるものと考えられる。

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]Li, V.C., et al. : Experimental Determination of the Tension Softening Curve in Cementitious Composites, Cement and Concrete, Vol.17, pp.441-452, 1987.
- [3]六郷恵哲, 内田裕市, 加藤英徳, 小柳 洽 : 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.
- [4]栗原哲彦, 安藤貴宏, 国技 稔, 内田裕市, 六郷恵哲 : 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.119-129, 1996.
- [5]橘高義典, 上村克郎, 中村成春 : コンクリートの引張軟化曲線の多曲線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, pp15-25, 1993.
- [6]Nanakorn, P., Horii, H. and Matsuoka, S. : A FRACTURE MECHANICS-BASED DESIGN METHOD FOR SFRC TUNNEL LINING, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, No.532/V-30, pp.221-233, February 1996.
- [7]松岡 茂, 益田彰久, 峯本 守, 梶原雄三 : トンネル覆工の破壊プロセスに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.1317-1322, 1995.

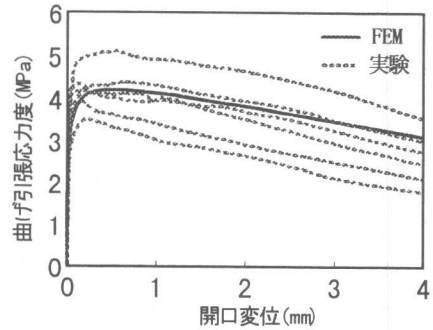


図-1.1 曲げ試験結果