

鋼繊維補強コンクリートの引張特性試験法 に関する研究

松岡 茂¹・松尾庄二¹・益田彰久¹・柳 博文¹

¹正会員 鉄建建設株式会社 技術研究所 (〒286 千葉県成田市新泉9-1)

鋼繊維補強コンクリートを覆工材料として使用したトンネル覆工の新しい設計方法では、鋼繊維補強コンクリートの引張破壊特性を鋼繊維により伝達される引張強度と引張軟化曲線の傾きの2つのパラメータで規定している。この設計方法では、曲げ試験結果に基づいて引張破壊特性を表す2つのパラメータを定め、このパラメータから設計に用いる鋼繊維補強コンクリートの引張強度を求めている。そこで、本研究では、鋼繊維補強コンクリートの引張破壊特性を算定するための曲げ試験方法について検討を行った。さらに、直接引張試験から求めた引張特性と提案した曲げ試験から求めた結果を比較することにより、提案した試験法の妥当性を検証した。

Key Words: tunnel lining, steel-fiber-reinforced concrete, fracture mechanics

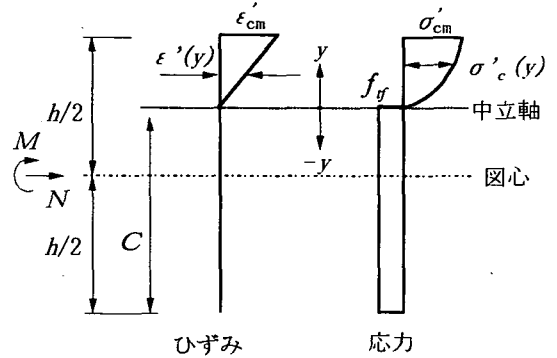
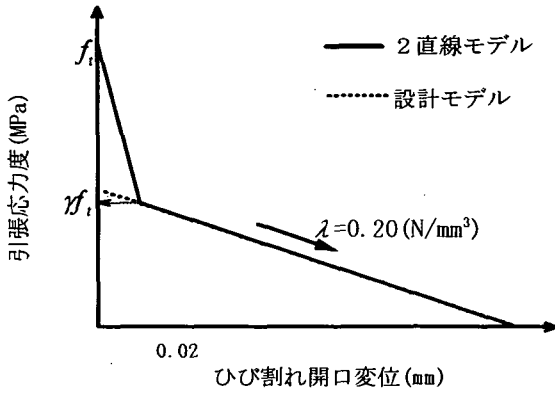
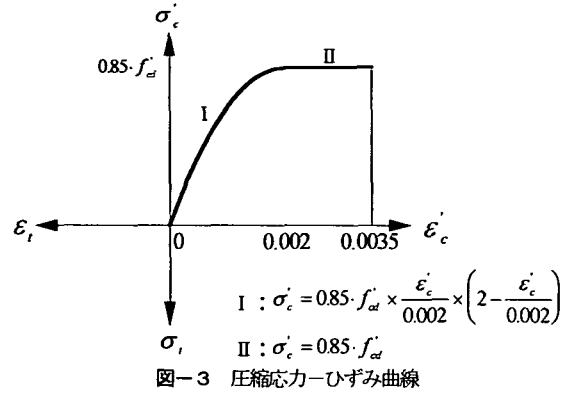
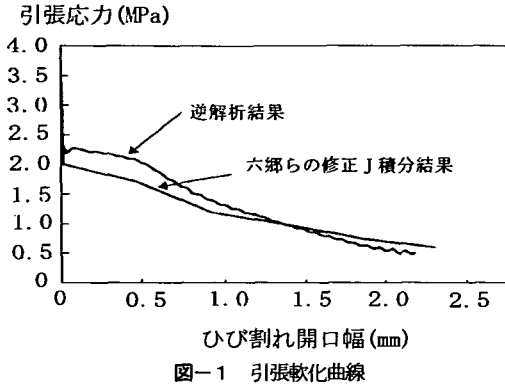
1. まえがき

コンクリート中に鋼繊維を混入した鋼繊維補強コンクリート(steel fiber reinforced concrete: SFRC)は、プレーンコンクリートに比べて高い破壊靱性を有している。この特性に着目して、近年土木構造物・建築構造物へのSFRCの適用が増加しつつある。これに対応して、破壊力学の考え方に基いて鋼繊維により伝達される引張応力を考慮した新しい設計方法¹⁾が提案された。コンクリートの引張破壊特性は引張軟化曲線(ひび割れ発生後の伝達応力とひび割れ開口変位との関係)によって表されるが、提案された設計方法の対象となるSFRCでは、引張軟化特性は鋼繊維が受け持つ引張強度と引張軟化曲線の傾きの2つのパラメータで規定される。この設計方法では、曲げ試験によりSFRCの引張特性を表すパラメータである引張軟化曲線勾配と引張強度を求め、この勾配に応じて部材の曲げ耐力を算定する際のひび割れ深さを定めている。SFRCの引張特性は直接引張試験により求めることができるが、直接引張試験は高剛性でかつ高精度の変位制御が可能な試験機が必要であり、現場の品質管理等の一般的な試験項目とすることは困難である。SFRCの曲げ試験では、最大荷重以降の変形挙動を比較的安定して測定することが可能なことから、設計方法では、曲げ試験によりSFRCの引張特性を定めるものとしている。SFRCや無筋コンクリートの曲げ試験では、ひび

割れ発生によりひずみの局所化が生じることが知られている。提案した設計方法を用いるためにはひび割れによるひずみの局所化等の影響を考慮した曲げ試験方法が必要となる。そこで、本研究では引張特性試験法の詳細を提示し、実際に試験を行い得られたパラメータと直接引張試験の結果を比較することにより試験法の妥当性を検討した。

2. 設計方法の概要

SFRCの引張破壊特性を表す引張軟化曲線は、直接引張試験により得られる²⁾。しかしながら、ひび割れが発生するとSFRCの引張応力が急激に低下することから、変位速度を一定に保持した変位制御による直接引張試験を行うことは困難である。六郷³⁾は、直接引張試験の代わりに曲げ試験結果の荷重-変位曲線からJ積分法を用いてSFRCの引張軟化曲線を算定する方法を提案している。また、Nanakornら⁴⁾は、曲げ試験結果から引張軟化曲線を求める逆解析手法を提案し、曲げ試験結果から逆解析手法により得られた引張軟化曲線が六郷らがJ積分により求めた結果と図-1に示すように良く一致することを報告している。この論文によると曲げ試験のひび割れ発生後の変形挙動は、引張特性である引張軟化曲線により決定されること、また、SFRCの引張破壊特性を表す引張軟化曲線は、ひび割れ発生直後に引張応力が急激



に低下する領域とその後緩やかに引張応力が低下する領域に分けることができ、緩やかに引張応力が低下する領域と曲げ試験の最大荷重以降の変形挙動と相関関係があることを指摘している。そこで、設計方法¹⁾では、曲げ試験のひび割れ発生後の変形挙動が引張軟化曲線に依存していることから、SFRCの引張特性を引張強度 f_t と図-2に示す引張軟化曲線の傾き λ の2つのパラメータを定め、部材の曲げ耐力を算定するものとしている。設計方法をまとめると以下ようになる。

- (a) 維ひずみは中立軸からの距離に比例する。
- (b) 圧縮側の応力-ひずみ曲線は、図-3に示す二次曲線モデルを用いる。
- (c) ひび割れ面には、鋼繊維で伝達される引張強度 f_{ft} が一様に分布しているものとする。
- (d) ひび割れ深さは、曲げ試験における荷重-ひび割れ開口幅曲線の最大荷重以降の傾きと断面高さから定めるものとする。

図-4にひび割れ断面におけるひずみ・応力分布を示す。ひび割れ断面における軸方向の力の釣り合いは式(1)、図心を回転中心と考えた曲げモーメントは式(2)により表される。

$$N/b = \int_0^{h-C} \sigma'_c(y) dy - f_{ft} C \quad (1)$$

$$M/b = \int_0^{h-C} \sigma'_c(y) \left(y + C - \frac{h}{2} \right) dy + f_{ft} C \left(\frac{h}{2} - \frac{C}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、 N : 軸力、 M : 曲げモーメント、 C : ひび割れ深さ、 b : 断面の幅、 $\sigma'_c(y)$: 中立軸から距離 y の応力である。

圧縮域の応力は、ひずみ量から式(3)のように求められる。

$$\sigma'_c(y) = 0.85 \cdot 2 \cdot f'_{cd} \cdot \left\{ \frac{\epsilon'_{cm}}{0.002 \cdot (h-C)} \right\} \cdot y - 0.85 \cdot f'_{cd} \cdot \left\{ \frac{\epsilon'_{cm}}{0.002 \cdot (h-C)} \right\}^2 \cdot y^2 \quad (3)$$

ここに、 ϵ'_{cm} : ひび割れ開口幅が1.5mm時のひび割れ断面の圧縮側の上縁ひずみ、 f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度である。提案された設計方法が対象としている覆工厚は40cm以下であり、この範囲で想定される最大ひび割れ開口幅は1.5mm以下である¹⁾。そこで、ひび割れ開口幅が1.5mm時の曲げ試験結果を用いて、鋼繊維により伝達される引張強度を算定するものとしている。したがって、引張強度を算定する曲げ試験の荷重は、最大荷重ではない。ひ

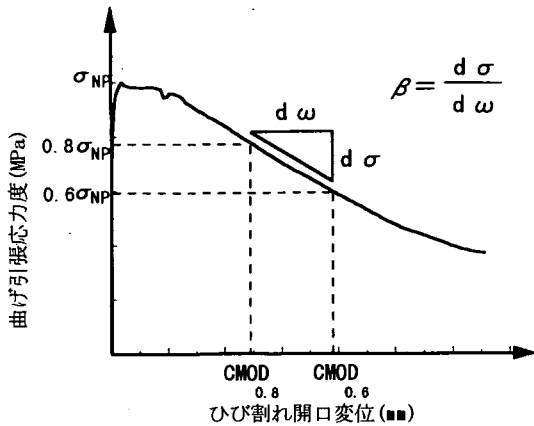


図-5 βの定義

表-1 ひび割れ深さの部材断面高さに対する割合 α

	h=200mm	h=300mm	h=400mm
0 ≤ β ≤ 0.46	0.84	0.82	0.80
0.46 < β ≤ 0.92	0.80	0.77	0.73
0.92 < β ≤ 1.85	0.74	0.68	0.66

ひび割れ断面内のひずみ分布は、中立軸からの距離に比例することから圧縮側の上縁ひずみにより式(4)のように表される。

$$\varepsilon'(y) = \frac{\varepsilon'_{cm}}{h - C} \cdot y \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon'(y)$: 中立軸から距離 y の圧縮ひずみである。

したがって、曲げ試験でひび割れ直上の圧縮側縁ひずみを測定することにより、式(1)~(4)で引張強度 f_f が算定される。

設計方法では、曲げ試験結果から算定された引張強度を用いてトンネル覆工の部材耐力を式(1)、(2)から求め、部材の設計を行うことになっている。式(1)、(2)に示すように覆工部材の断面耐力算定では、設計断面におけるひび割れ深さが必要となる。Nanakorn¹⁾は、最大断面力におけるひび割れ深さが引張軟化曲線の傾き λ と部材高さに相関があることと、引張軟化曲線の傾き λ は曲げ試験結果の最大荷重以降の荷重-ひび割れ開口幅曲線の傾きと相関があることを報告している。特に、引張軟化曲線の傾き λ と荷重-ひび割れ開口幅曲線の傾き β との関係は式(5)により表すことができることを有限要素法の解析結果に基づいて報告している。

$$\beta = 1.85\lambda \quad (5)$$

ここに、 β : 荷重-ひび割れ開口幅曲線の傾きである。

荷重-ひび割れ開口幅曲線の傾きは図-5に示すように最大荷重以降の傾きとし、荷重-ひび割れ開口幅曲線の傾きは式(6)のように定めている。

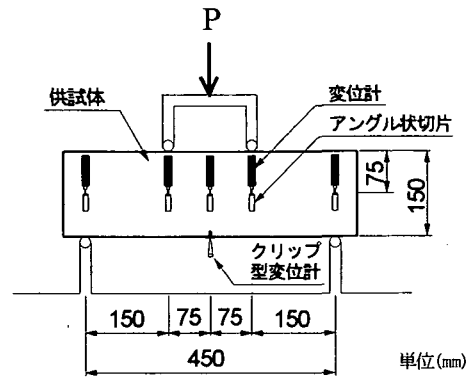


図-6 曲げ試験方法

表-2 コンクリート配合表

Vf (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)
1.0	50.3	60.9	202	402	992	638

$$\beta = \frac{0.8\sigma_{NP} - 0.6\sigma_{NP}}{CMOD_{0.6} - CMOD_{0.8}} \quad (6)$$

ここに、 β : 曲げ試験の荷重-ひび割れ開口幅曲線の傾き、 σ_{NP} : 曲げ試験の最大曲げ引張応力、 $CMOD_{0.6}$: 最大荷重の60%におけるひび割れ開口幅、 $CMOD_{0.8}$: 最大荷重の80%におけるひび割れ開口幅である。

設計方法では、ひび割れ深さが引張軟化曲線の勾配と部材高さにより決定されることに注目して、表-1に示すように曲げ試験結果の荷重-ひび割れ曲線勾配 β の大きさと部材高さにより部材耐力算定で使用する最大ひび割れ深さを定めている。

3. 曲げ試験

設計方法では、ひび割れ面の引張強度を直方体供試体(供試体寸法 15cm×15cm×53cm)の曲げ試験結果から求めるものとしている。曲げ試験では、「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)」に準拠して、スパンの三等分点に載荷することとなっている。ただし、曲げ試験においてひび割れ開口幅と圧縮側縁ひずみを測定することが「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)」と異なっている。

(1) 曲げ試験方法

SFRCの引張強度 f_f を算定するために曲げ試験を行った。試験に用いた鋼繊維は、表面にインデント加工をした長さ 30mm (公称径 0.6mm) のものである。繊維混入率(コンクリート中の体積百分率)は 1.0%とした。表-2に曲げ試験に使用した配合を示す。なお、粗骨材の最大

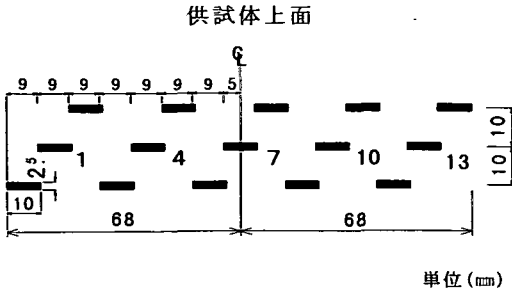


図-7 ひずみゲージ配置位置

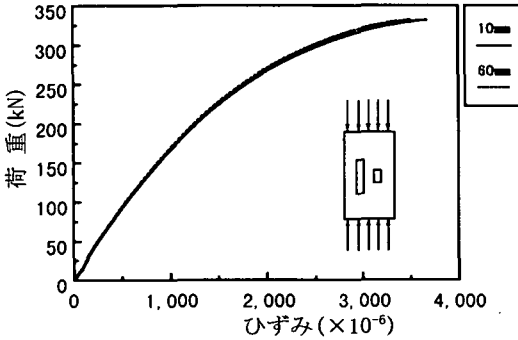


図-8 圧縮試験結果

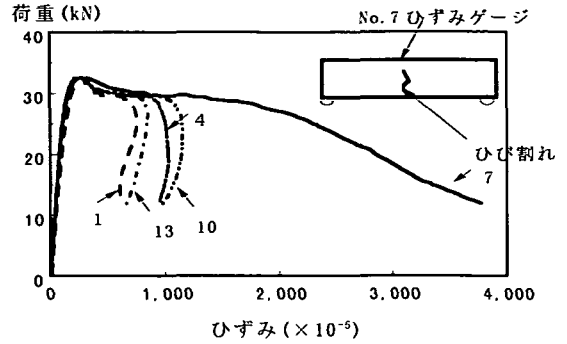


図-9 荷重-ひずみ曲線

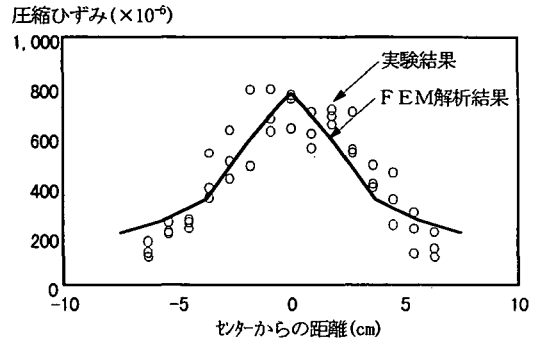


図-10 圧縮縁のひずみ分布

寸法は繊維長との関係から20mmとした。供試体は、土木学会規準「鋼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」(JSCE-F552-1983)に準拠して作製した。また、供試体は打設後24時間の湿潤養生後に脱型し、実験前日まで水温20°Cで水中養生を行った。

曲げ試験では、ひび割れ発生位置を限定する目的でスパン中央の下面に深さ10mmの切り欠きを設けた。この切り欠きは、試験直前にコンクリートカッタにより入れた。なお、曲げ試験では、切り欠きによる影響を把握する目的で、切り欠きが無い供試体についても試験を行った。载荷は、変位制御(载荷速度0.5mm/min)により行った。計測項目としては、ひび割れ開口幅と支承点・载荷点・供試体中央の鉛直変位および圧縮縁ひずみとし、デジタル動ひずみ測定器を用いて測定した。ひび割れ開口幅の測定は、切り欠き部分に設置したクリップ型変位計により行った。圧縮側の縁ひずみの測定には、図-7に示すように長さ10mmのひずみゲージを用い、供試体中央を中心にゲージを15枚設置して測定した。長さ10mmのひずみゲージを用いたのは、ひび割れ発生によるひずみの局所化の影響をできるだけ小さくするためである。

(2) 試験結果の概要

ひび割れ発生・進展に伴って、ひび割れ断面周辺においてひずみが局所化することが知られている。したがって、

曲げ試験においてもひび割れ進展に伴って圧縮側の縁ひずみも局所化が生じ、このひずみの局所化の影響により測定値がひずみゲージ長およびゲージ貼付位置に依存する可能性が予想される。そこで、ひずみゲージの長さによる測定値への影響を把握する目的で、円柱供試体(φ100mm×200mm)に長さの異なるひずみゲージ(長さ60mmと10mm)を貼付して圧縮強度試験を行った。図-8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。最大圧縮荷重付近では、ひずみゲージの長さにより測定値は異なるが、最大圧縮荷重以下ではひずみゲージ長による差異は見られない。SFRCの曲げ試験では、圧縮の縁ひずみは最大圧縮応力時のひずみ以下であるので、長さ10mmのひずみゲージで圧縮側の縁ひずみを測定することができると判断した。

図-9に曲げ試験結果の圧縮縁ひずみと荷重との関係および試験終了時のひび割れ発生状況を示す。図中の番号は、図-7のひずみゲージ設置位置図の番号と同じである。ひずみは、最大荷重までは設置した位置に関係なく荷重が増加するのに伴って増加する。しかし、最大荷重以降は、ひび割れ直上に位置する供試体中央部の縁ひずみ(7番のひずみゲージ)が荷重の低下に関わらず増加している一方、その他箇所のひずみは低下していることから、ひび割れ発生によりひずみの局所化が生じているものと考えられる。

曲げ引張応力/最大曲げ引張応力

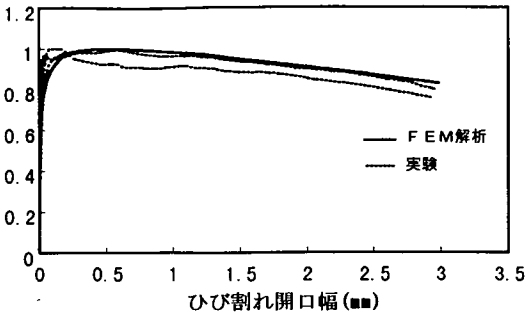


図-11 荷重-ひび割れ開口幅曲線

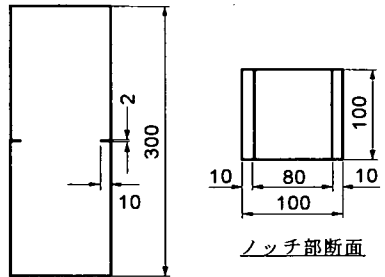


図-13 直接引張試験供試体

表-3 引張強度一覧表

供試体番号	σ_{NP} CMOD=1.5mm (MPa)	ϵ'_{cm} CMOD=1.5mm	引張強度 f_y (MPa)	勾配 β (N/mm ²)
(1)	2.85	0.0021	0.98	0.49
(2)	3.14	0.0019	1.09	0.42
(3)	3.77	0.0018	1.33	0.52
(4)	3.83	0.0016	1.35	0.52
(5)	4.11	0.0024	1.44	0.49
(6)	4.78	0.0021	1.70	0.69

表-4 鋼繊維諸元

略称	形状	長さ	断面寸法	比重
De	インデント加工	30mm	公称径0.6mm	7.85
W	波形加工	30mm	0.2mm×1.25mm	7.85
H	フック付	30mm	公称径0.5mm	7.50
D b	ドッグボーン型	30mm	公称径0.5mm	7.70
Ch	フック付	30mm	0.3mm×2.2mm	7.85
St	短冊状	30mm	1.6mm×25 μ m	7.20

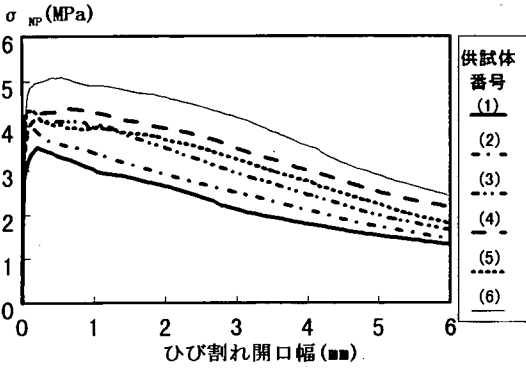


図-12 曲げ試験結果

図-10にひび割れ開口幅が1.5mmに達した時の圧縮縁ひずみ分布を示す。図中のFEM解析結果は、後述の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あり、仮想ひび割れモデルを用いて解析⁵⁾を行っている。曲げ試験では、ひび割れ先端の位置により最大ひずみが発生する位置が多少異なるが、ひずみの大きさおよび分布形状がFEM解析結果とほぼ一致している。以上のことから、長さ10mmのひずみゲージを用いることにより、圧縮縁のひずみを精度良く測定できるものと考えられる。

曲げ引張応力とひび割れ開口幅との関係を図-11に示す。なお、ひび割れは切り欠きから発生したことから、供試体下面中央に設けた切り欠きに設置したクリップ型変位計の測定値を試験におけるひび割れ開口幅とした。図中の縦軸は、最大荷重から算定した最大曲げ引張応力で除して無次元化している。切り欠き部分の開口変位は、図中に示すようにFEM解析結果とほぼ一致していることから、切り欠き部分に設置したクリップ型変位計によりひび割れ開口幅を測定することができるものと判断された。

(3) 引張強度算定

設計方法に準じて曲げ試験結果から引張強度を算定した。なお、ひび割れ開口幅については、切り欠き部に設置

したクリップ型変位計の測定結果を用い、圧縮側の縁ひずみについては、ひび割れ先端位置を限定することが困難であるため図-7に示すように供試体中央を中心に載荷点間に長さ10mmのひずみゲージを数枚貼付し、その中で最大の測定値を引張強度の算定に用いるものとした。図-12に示す6供試体の曲げ試験結果から引張強度を算定した。なお、図中の凡例中の番号は供試体番号であり、表-3の番号と対応している。図-12の縦軸は曲げ引張応力 σ_{NP} である。

設計方法に従って引張強度を算定した結果を表-3に示す。曲げ試験の最大荷重と同様に引張強度にもバラツキが見られるが、曲げ試験結果から引張強度を算定することができる。しかしながら、部材の曲げ耐力算定においては引張強度のバラツキを考慮する必要があるものと考えられる。

SFRCの引張強度を算定する曲げ試験方法をまとめると次のようになる。

①載荷方法は、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3等分点載荷とする。

②ひび割れ発生位置を限定する目的で供試体中央底面に

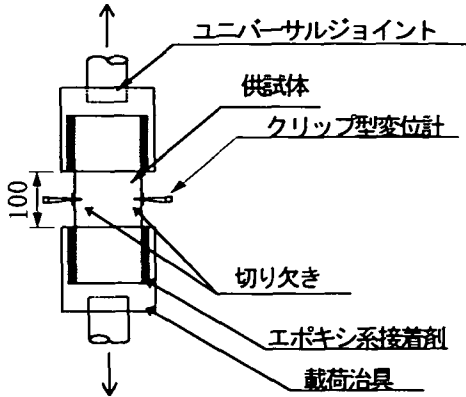


図-14 直接引張試験

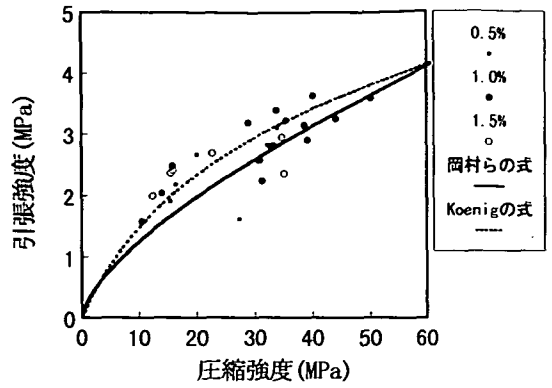


図-16 引張強度と圧縮強度

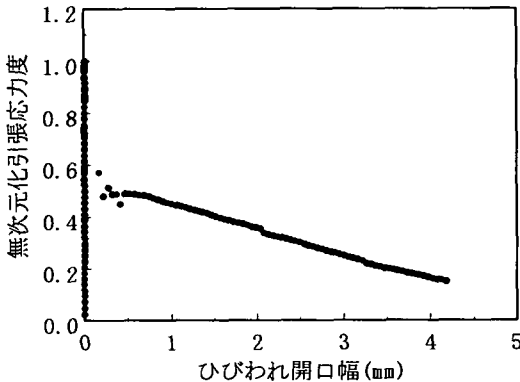


図-15 直接引張試験結果

表-5 直接引張試験一覧表

繊維種類	混入率(%)	残留強度率 γ	軟化曲線勾配 λ (N/mm ²)
De	0.5	0.32	0.14
De	1.0	0.53	0.24
De	1.5	0.57	0.24
W	1.0	0.31	0.66
H	1.0	0.51	0.23
H	1.5	0.87	0.60
Db	0.5	0.28	0.46
Db	0.75	0.38	0.60
Db	1.0	0.60	0.73
Ch	1.0	0.33	0.67
St	0.5	0.35	0.59

深さ10mmの切り欠きを設ける。この切り欠き部分にクリップ型変位計を設置し、ひび割れ開口幅を測定する。

③ 載荷点間の圧縮側には、SFRCの圧縮縁ひずみ分布を測定する目的で、長さ10mmのひずみゲージを5枚程度貼付する。

4. 曲げ試験方法の検証

(1) 直接引張試験

設計に用いる引張強度を算定する曲げ試験方法を検証する目的で、直接引張試験により得られるSFRCの引張特性と曲げ試験で得られる特性について検討を行った。直接引張試験は、Wangら²⁾の方法を参考にして図-13に示す直方体供試体で行った。なお、引張試験はフィードバック機能が無い万能試験機(容量200tonf)により行った。

供試体は、曲げ試験と同様に土木学会規準 JSCE-F552-1983に準拠して作製した。引張試験には、表-4に示す6種類の鋼繊維を使用した。また、鋼繊維の長さは30mmとし、繊維混入率(コンクリート中の体積百分率)は0.5~1.5%とした。コンクリートの配合は表-1を基準とし

て、鋼繊維混入率に応じて細骨材率を「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)」に基づいて調整した。粗骨材の最大寸法は、曲げ試験と同様に20mmとした。供試体端部および表面付近は、コンクリートのブリーディング等の影響により弱面となり易いことから、直接引張試験では供試体両端部をコンクリートカッタにより約5cmづつ切り落とした。引張試験は、図-14に示すように供試体両端をエポキシ系の接着剤により鋼製治具に固定して行った。なお、鋼製治具は供試体に曲げが導入されないようにユニバーサルジョイントを介して試験機に取り付けている。供試体には、ひび割れ発生位置を限定するために図-14に示すように深さ10mmの切り欠きをコンクリートカッタにより入れた。この切り欠きに曲げ試験と同様にクリップ型変位計を設置し、ひび割れ開口幅を測定した。試験終了後、破断面の断面積を測定して破断面に作用している引張応力を算出した。

図-15に直接引張試験結果の内、繊維種類Deの繊維を1.0%混入した供試体の引張応力とひび割れ開口幅との関係を示す。図中の引張応力は、ひび割れが発生する軟化開始強度により無次元化している。直接引張試験では、フィードバック機能が無い試験機を用いているためにひ

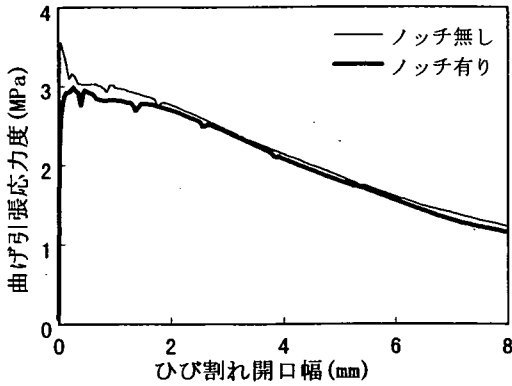


図-17 切り欠きの有無によるひび割れ開口幅の差違

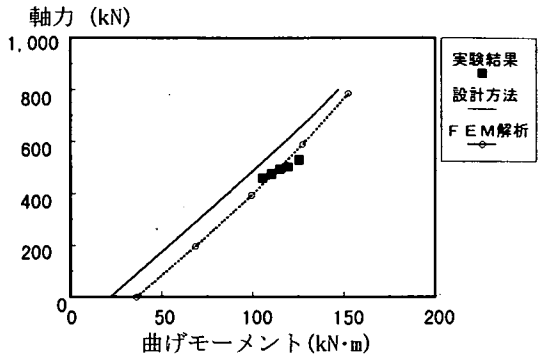


図-19 断面高さ40cmの断面耐力図

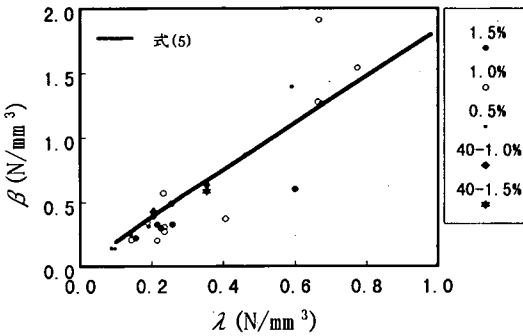


図-18 β - λ 関係

ひび割れ直後に発生する応力が急激に低下する領域の挙動を測定することができなかった。しかし、ひび割れ発生後急激に応力が低下する領域以降の変形挙動は精度良く測定することができた。直接引張試験結果によると、SFRCの引張軟化曲線はひび割れ発生直後に応力が急激に低下し、その後は応力の低下は緩やかになる傾向を示した。ただし、繊維種類や混入率によりひび割れ発生直後の応力低下の割合と、その後の軟化の傾きは異なっている。ひび割れ発生直後に急激に応力が低下し、その後は緩やかに応力が低下するSFRCの引張特性は、Nanakornら⁴⁾と六郷ら³⁾がSFRCの曲げ試験結果から逆解析で求めた引張軟化曲線の傾向と一致しており、SFRCのひび割れ面における引張特性である引張軟化曲線は、図-2に示すような2直線モデルで近似することができるものと判断される。

図-16に直接引張試験で得られた軟化開始強度である引張強度と圧縮強度との関係を示す。なお、この試験結果は、表-4に示す鋼繊維により行ったものである。図中の実線と破線は、プレーンコンクリートに対して岡村⁶⁾およびKoenigら⁷⁾が提案している引張強度と圧縮強度の関係である。ただし、岡村が提案している式については筆者らがSI単位系に換算したものである。SFRCの引張強度は、プレーンコンクリートの引張強度と圧縮強度

の関係式にほぼ一致しており、鋼繊維は軟化開始強度に対して影響を与えないものと判断され、本実験の範囲ではSFRCのひび割れ開始強度はプレーンコンクリートの引張強度と等しいと考えられる。SFRCの引張特性は、プレーンコンクリートの引張強度に相当する軟化開始強度 f_t と応力の低下率が変化する図-2に示す折れ点強度(以下残留強度と呼ぶ) $\gamma \cdot f_t$ および残留強度以降の勾配 λ の3つのパラメーターで定められる。表-5に、直接引張試験結果に基づいて、残留強度以降の鋼繊維による特性と考えられる領域を設計方法に準じて表した引張特性の一覧を示す。鋼繊維の混入率および種類により残留強度率および勾配が異なっており、試験を行った範囲では鋼繊維は繊維が受け持つ引張強度である残留強度と残留強度以降の引張軟化曲線勾配に影響を与えるものと判断される。この特性は、鋼繊維の種類に依存しないものと考えられる。

(2) 切り欠きの影響

曲げ試験では、ひび割れ発生位置を限定するために供試体中央に切り欠きを設けている。切り欠きの有無による影響を把握するために、切り欠きを設けない曲げ試験を行った。なお、試験に用いたSFRCの配合および鋼繊維等は切り欠きを設けた供試体と同一である。試験に用いた鋼繊維は表面にインデント加工したものであり、繊維長は30mmで混入率は1%とした。図-17に曲げ試験結果の曲げ引張応力とひび割れ開口幅との関係を示す。切り欠きの無い供試体のひび割れ開口幅は、載荷点間に Ω 型変位計(標点間距離15cm)を設置して測定した。切り欠きが無い場合では、ひび割れ発生直後に荷重が低下するために曲げ引張応力も急激に低下するが、その後は曲げ引張応力の低下は緩やかになる。切り欠きを設けた供試体では、曲げ引張応力の急激な低下は測定されていない。切り欠き有無による違いは、最大荷重と曲げ引張応力の急激な低下領域のみであり、ひび割れ開口幅が1mm以上の領域では両者の違いはほとんど見られない。このこ

引張応力 (MPa)

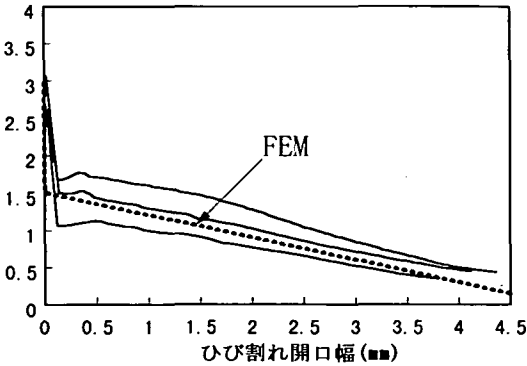


図-20 直接引張試験結果

とから、SFRCの特性である曲げ靱性については切り欠きの影響はないものと判断される。

(3) 曲げ試験と引張軟化曲線

曲げ試験における最大荷重以降の挙動は、SFRCの引張特性に影響されることが指摘されている。そこで、曲げ試験の荷重-ひび割れ開口幅曲線の勾配 β と直接引張試験で得られた引張軟化曲線の比較を行った。図-18に曲げ試験結果の荷重-ひび割れ開口幅の勾配 β と引張軟化曲線の勾配 λ との関係を示す。図中の実線は、Nanakorn¹⁾がFEM解析により定めた β と λ の関係である式(5)を示したものである。実験結果は多少のパラツキがあるが、FEM解析結果の関係式とほぼ一致しており、曲げ試験結果から引張軟化曲線の勾配を推定できると考えられる。Nanakornらが提案した設計方法では、引張軟化曲線勾配のパラツキを考慮して表-1に示すように部材の曲げ耐力算定に用いるひび割れ深さを制限している。図中には40cm角の直方体供試体(40cm×40cm×150cm)による曲げ試験結果で得られた測定値(凡例の40-)をプロットしている。なお、40cm角供試体の曲げ試験は、15cm角供試体と同様にスパン(120cm)の3等分点に載荷した。供試体の数は少ないが、Nanakornらが提案した式(5)は断面高さの影響を受けないことが試験により確認された。また、図-18には本研究で用いた表-4に示す鋼繊維の試験結果をプロットしており、本研究で試験した範囲では式(5)は鋼繊維種類に依存しないものと考えられる。

(4) 設計断面耐力算定法

筆者らは、設計断面耐力算定方法を検証する目的で、トンネル覆工とほぼ同等の断面高さを有する直方体供試体(40cm×40cm×150cm)による曲げ実験を行った。曲げ実験では、実際のトンネル覆工部材を想定して軸力と曲げモーメントを加えた。なお、実験に用いたSFRCの配合

は15cm角の供試体による試験に用いたものと同じであり、表面にインデント加工した鋼繊維を使用し、その混入率は1.0%である。荷重制御の油圧ジャッキにより載荷を行った。15cm角の直方体供試体による曲げ試験から設計方法に準拠して求めた引張強度と荷重-ひび割れ開口幅曲線勾配 β を表-3に示す。この曲げ試験結果から、設計方法に従って断面高さ40cmの部材断面耐力を算定した。断面耐力算定時に用いるひび割れ深さは、15cmの供試体による曲げ試験の荷重-ひび割れ開口幅曲線勾配 β が0.50前後であることから表-1に従って0.73と定めた。

図-19に40cmの供試体による曲げ実験で得られた最大断面耐力を示す。図中のFEM解析結果は、直接引張試験から得られた引張軟化曲線を用いて計算した結果である。直接引張試験結果は、図-20に示すようにパラツキが見られ、特に、ひび割れ発生直後に応力が急激に低下した残留強度のパラツキが大きく、残留強度以降の引張軟化曲線勾配のパラツキは小さい。15cm角供試体の曲げ試験結果も同様に、引張軟化曲線の勾配に相関がある荷重-ひび割れ開口幅曲線の勾配 β のパラツキが少なく、引張強度 f_y のパラツキが大きくなっており、直接引張試験結果とほぼ同様の傾向を示している。FEM解析に用いた引張軟化曲線は、図-20に示すように直接引張試験結果の平均的な曲線としたことから、FEMにより求められた断面耐力は、実験で得られた最大断面耐力の中間値付近となっている。

設計方法の断面耐力算定では、引張強度のパラツキは圧縮強度と同様に正規分布しているものとして、断面耐力に用いる設計引張強度 f_{yd} を定めている。設計引張強度は、平均値(表-3から1.32MPa)から 2σ (標準偏差、 $\sigma=0.23$)を差し引いた値としている。設計引張強度を用いて算定した断面耐力は、実験結果を上回ることなく良い近似を与えており、実験結果の断面耐力を越えることは無かった。

実験数が少ないが、提案されたSFRCの設計方法により精度良くかつ安全側の部材断面耐力を算定することができるものと考えられる。

5. まとめ

破壊力学の考え方に基いて提案された鋼繊維補強コンクリートの設計方法を構造物に適用することを目的として、鋼繊維補強コンクリートの引張特性試験方法について検討を行った。その結果をまとめると以下のようになる。

①本研究で行った直接引張試験の範囲(鋼繊維の混入率1.5%以下)では、鋼繊維の形状に関わらずSFRCの引張軟化曲線は2直線モデルで近似することができ、Nanakornら¹⁾が提案しているようにSFRCの引張破壊

特性を引張強度と引張軟化曲線勾配の2つのパラメータで規定できることを確認した。さらに、本論文で提案した引張特性試験方法により、鋼繊維が受け持つ引張強度と引張軟化曲線の傾きの2つのパラメータを精度良く求めることができる。

②引張特性試験方法により求めたパラメータから設計方法に準拠して算定した引張強度を用いて部材断面耐力を推定できることが明らかになった。

③SFRCの引張破壊特性を規定する引張強度と引張軟化曲線勾配にはバラツキがある。したがって、SFRCの部材の曲げ耐力算定では、引張破壊特性の分散を考慮してひび割れ面で鋼繊維により伝達される設計引張強度を定める必要がある。

本論文で提案した試験方法を用いて、SFRCの引張強度を算定することにより、Nanakorn らが提案した手法によりSFRCを用いたトンネル覆工の設計が可能になるものと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたって東京大学堀井秀之教授から終始有益なご指導を賜りました。また、鋼材倶楽部からは鋼繊維の提供を受けました。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

1) Nanakorn, P., Horii, H. and Matsuoka, S.: A fracture mechanics-based design method for SFRC tunnel

linings, *J. Materials, Conc. Struct., Pavements*, No.532 IV-30, 221-233, February 1996

- 2) Wang, Y., Li, V. C. and Backer, S.: Experimental of ensile behavior of fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.87, No.5, pp. 461-468, 1990.
- 3) 六郷恵哲, 岩佐正徳, 鈴木泰生, 小柳 洽: 各種コンクリートの破壊力学パラメータ, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, pp.247-252, 1989.
- 4) Nanakorn, P. and Horii, H.: Back analysis of tension softening relationship of concrete, *J. Materials, Conc. Struct., Pavements*, JSCE, No.544/IV-32, 265-275, 1996 August.
- 5) 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.
- 6) 岡村 甫: コンクリート構造の限界状態設計法, 共立出版, 1984.
- 7) Koenig, G., Grimm, R. and Rømmel, G.: Shear behavior of longitudinally reinforced concrete members of HSC, *Proceedings of the JCI International Workshop, Sendai*, Mihashi, H., Okamura, H. and Bazant, Z.P. eds., Japan, pp.79-92, 31 October-2 November 1993.

(1996. 4. 18 受付)

A TEST METHOD FOR TENSILE PROPERTY OF STEEL-FIBER-REINFORCED CONCRETE

Shigeru MATSUOKA, Shoji MATSUO, Akihisa MASUDA and Hirofumi YANAGI

In the new design practice for tunnel lining with steel-fiber-reinforced concrete, its tensile failure characteristics are defined by two parameters, i.e., tensile stress transmitted by steel fibers and the gradient of the tension-softening curve. The two parameters are determined on the basis of bending test results, then from the parameters the tensile strength of steel-fiber-reinforced concrete is calculated. This paper discusses the study on the method of bending tests for obtaining the tensile failure characteristics. By comparing the tensile strengths determined directly from tensile tests and those calculated from bending test results, the validity of the proposed test method was verified.