

[107] 鋼繊維補強コンクリートの引張試験法

正会員 森田 司郎 (京都大学 工学部)
 正会員 ○徐 商教 (韓国 忠北大学 工科大学)
 小松 勇二郎 (京都大学 工学部)

1. 序論

鋼繊維補強コンクリート (以下 SFR C と略記) の力学的挙動に関する既往の研究の大部分は強化機構や強度に着目したもので、SFR C の靱性改善の根源である引張ひびわれ後、または最大引張応力以後の挙動に関しては充分研究されていない。単軸引張応力下でのこの領域の評価は、試験方法の技術的困難さのために、曲げ試験による靱性の定量化で代用されており、これ以外には明確な評価法がない。

RC 部材中の鉄筋が引張力をうけた場合、コンクリートに多数の横断ひび割れが発生した後でも、ひび割れ間のコンクリートの引張協力によって鉄筋の剛性が見かけ上増大する効果を Tension-Stiffening 効果 (以下 TS 効果と略記) と言う。SF 体積比 2% 程度では SFR C の引張強度の増加はほとんど期待できないが、SFR C に埋め込まれた鉄筋の TS 効果は著しく増大する。特に鉄筋の降伏以後の効果が著しいことが特色である。従来この効果の定量的評価はされなかった。

本報では SFR C の最大引張応力以後の力学的挙動を明らかにすることを目的として、著者等が考案した直接引張試験法を実際に適用した結果を報告し、また SFR C の TS 効果を RC についての森田の手法¹⁾²⁾によって定量化した結果を報告する。

2. SFR C の直接引張試験
 2-1 供試体の製作および養生
 コンクリートの調合を表 1 に示す。SFR C の調合は、ベースコンクリート (A00, B00) の調合比を変えずに、異形 SF 0.5φ×30mm, 0.6φ×50mm の 2 種を A, B シリーズ共、体積比で 0%, 1%, 2% 混入したものである。練混ぜは強制練りミキサーで行いファイバーフィーダーを用いた。A31, A52, B31, B52 を除く各調合に対して横打ち (H) 引張供試体を 3 体ずつ製作した。また、打設方向の違いによるファイバーの配向性の差異が引張強度に及ぼす影響を知るために A32, B32 については、縦打ち (V) 供試体を 3 体ずつ製作し、合計 24 体とした。各調合について 1 バッチで製作した。打設後 48 時間で脱型、20°C 水中にて試験材令 (27~35日) まで養生した。

2-2 供試体形状および引張試験法

図 1 に供試体形状および寸法を示す。引張力はコンクリート軸線を通るネジ異形鉄筋 (D25) の突出部に引張試験機で加力することにより与えられる。試験区間である平行部では、鉄筋とコンクリートの間が塩ビフィルムで絶縁されているので、鉄筋に与えられた引張力の一部は供試体両端の拡大部分での

表 1 コンクリートの調合

Designation	Series	Fiber length (mm)	Volume fraction of fiber (%)	W/C (%)	S/A (%)	Proportion by weight (kg/m ³)					Slump (cm)	Air Contents (%)
						Water	Cement	Sand	Gravel	Fiber		
A00	A	—	0	50	60	227	454	909	633	0.0	24	4.5
A31		30	1			225	450	900	626	78.5	18	4.6
A32		30	2			222	445	891	621	157.0	2	5.5
A51		50	1			225	450	900	626	78.5	13	4.5
A52		50	2			222	445	891	621	157.0	1	6.0
B00	B	—	0	65	60	227	349	960	667	0.0	24	4.8
B31		30	1			224	346	950	660	78.5	20	4.6
B32		30	2			222	342	941	653	157.0	3	5.5
B51		50	1			224	346	950	660	78.5	7	6.0
B52		50	2			222	342	941	653	157.0	2	6.5

- Notes.
 1) Cement ; Portland cement
 2) Gravel ; Crushed stone, maximum size = 10 mm, F. M. = 5.0, Specific gravity = 2.64, Water absorption = 0.8 %
 3) Sand ; River sand, F. M. = 2.94, Specific gravity = 2.53, Water absorption = 1.6 %
 4) Admixture ; Pozzolith No. 70 (250 cc per 100 kg of cement)
 5) Fiber ; 0.5φ x 30 mm, 0.6φ x 50 mm deformed fiber

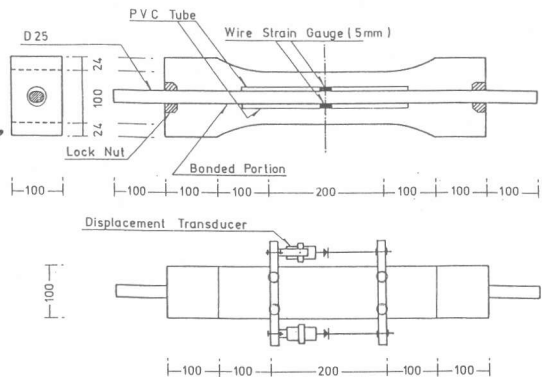


図 1 直接引張試験用供試体 (mm)

図 1 に供試体形状および寸法を示す。引張力はコンクリート軸線を通るネジ異形鉄筋 (D25) の突出部に引張試験機で加力することにより与えられる。試験区間である平行部では、鉄筋とコンクリートの間が塩ビフィルムで絶縁されているので、鉄筋に与えられた引張力の一部は供試体両端の拡大部分での

付着力によってコンクリートに伝えられる。異形鉄筋は供試体の最大耐力以後の補剛材としても機能する。異形鉄筋の中央部分の両側にワイヤーストレインゲージが接着されており、前もって引張試験を行って較正曲線が求められている。供試体平行部のコンクリートの平均軸方向歪みは検長20cmとなるように取り付けた測定棒間の伸びを連続的に記録することにより求めた。また、コンクリートの乾燥収縮によって生じる拘束応力を極力避けるため湿潤状態で試験した。測定された鉄筋端引張力を T_e 、鉄筋中央部の引張力を T_c 、コンクリート断面を A_c とすると、SFR Cの引張応力は $(T_e - T_c) / A_c$ によって求められる。

2-4 実験結果および考察

シリンダーの圧縮試験と割裂試験の結果を表-2に示す。圧縮強度はファイバー混入率の増加による差はなかったが、割裂強度はファイバー混入率の増加に伴って増大している。引張試験の結果を表-3に示す。供試体総数24体中、縦打ちの中の2体とA51の1体だけが検長外で破壊したことから、試験に用いた供試体の形状は直接引張試験法として有効であると言える。

水平打ちの引張強度はプレインコンクリートに対して、A32、A51でそれぞれ1.04倍、1.09倍、そしてB32、B51でそれぞれ1.04倍、0.94倍となっている。A、Bシリーズ共縦打ちが横打ちより低い強度を示している。特にBシリーズで著しくA32V/A32H = 0.95に対して、B32V/B32H = 0.76であった。この原因はファイバーの配向性の差の他にブリージングの差、締め固めの差等が考えられる。引張応力-歪度曲線を図-2に示す。A、Bシリーズ共最大耐力以後の歪み軟化域が安定して得られているのが特筆される。

表-2 圧縮および割裂強度

Series	Fiber length (mm)	Volume fraction of fiber (%)	Strength by control cylinder test (kgf/cm ²)	
			Comp. f'c	Split. tens.
A	—	0	423	34.4
	30	1	437	46.4
		2	490	69.5
	50	1	420	59.4
2		371	74.4	
B	—	0	310	25.7
	30	1	294	43.5
		2	353	52.0
	50	1	307	47.3
2		313	67.1	

表-3 引張試験の結果

示している。特にBシリーズで著しくA32V/A32H = 0.95に対して、B32V/B32H = 0.76であった。この原因はファイバーの配向性の差の他にブリージングの差、締め固めの差等が考えられる。引張応力-歪度曲線を図-2に示す。A、Bシリーズ共最大耐力以後の歪み軟化域が安定して得られているのが特筆される。

Designation of specimen	Series	Fiber length (mm)	Volume fraction of fiber (%)	Tensile strength (kgf/cm ²)		Strain at strain (x10 ⁻⁶)		Modulus of elasticity (x10 ³ kg/cm ²)		Sustaining tensile strength at the strain (x10 ⁻⁵)			
				F _t		ε _{t, max}		E _t		F _s at 400		F _s at 2000	
				Test data	Average	Test data	Average	Test data	Average	Test data	Average	Test data	Average
A00	A	30	2	34.8 <c>	35.9	154	161	2.92	3.04	—	25.0	29.9	27.0
34.3 <c>				158		3.14		—					
38.3 <c>				170		3.05		—					
38.6 <c>				178		3.27		27.2					
36.2 <c>	37.4	131	152	3.46	3.39	22.6	23.0	25.0	(0.67F _t)	28.0	(0.72F _t)		
37.4 <c>		146		3.44		—							
33.7 <c>		158		3.23		20.6							
33.9 <c>		156		2.97		17.0							
38.6 <E>	35.4	176	163	2.95	3.05	—	16.3	18.8	(0.53F _t)	14.3	15.3		
41.3 <E>		170		3.12		—							
39.4 <c>		171		3.29		22.0							
37.0 <c>		153		3.72		23.0							
33.3 <c>	32.0	170	158	2.77	2.79	—	—	—	—	—	—		
31.5 <c>		151		2.86		—							
31.0 <c>		152		2.73		—							
32.6 <c>		156		2.88		15.6							
33.0 <c>	33.5	154	160	3.05	2.88	18.7	18.1	17.8	(0.54F _t)	22.5	(0.53F _t)		
34.9 <c>		170		2.71		—							
24.1 <c>		118		2.39		6.4							
26.3 <c>		159		2.86		9.5							
25.4 <E>	25.3	150	142	2.65	2.63	—	—	—	—	—	—		
31.7 <c>		154		2.80		19.9							
29.1 <c>		140		2.88		18.5							
29.8 <c>		132		2.86		23.0							
30.2	30.2	142	142	2.88	2.85	20.5	20.5	23.6	(0.68F _t)	19.8	23.4		
—		—		—		—							
—		—		—		—							
—		—		—		—							

Notes. Symbols in < > denote the location of the tensile crack; < c > = cracking within the gage length of 20cm. < E > = out of the gage length of 20cm. * ; The last letter "V", if any, denotes the specimen cast in the vertical position

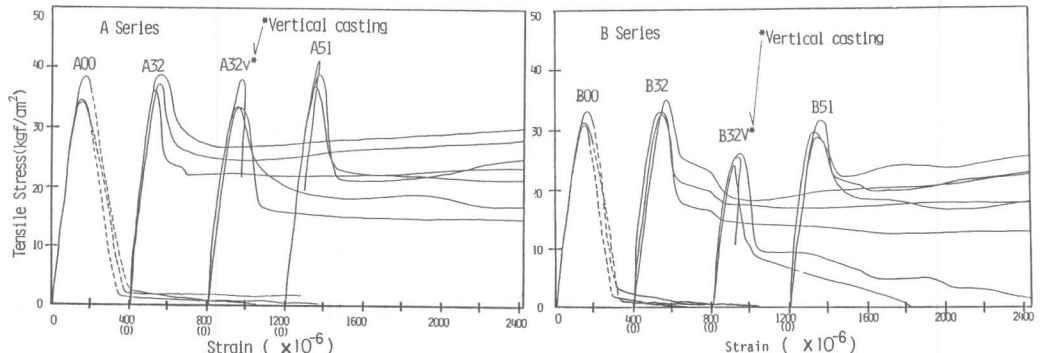


図-2 引張応力-歪度曲線

表-4 鉄筋の機械的性質

Steel Grade	Nominal cross-section (cm ²)	Yield point (kgf/cm ²)	Strain at yield point (%)	Modulus of elasticity (x10 ⁶ kgf/cm ²)	ϵ_p^* (%)	E_{SH}^{**} (x10 ⁶ kgf/cm ²)
SD35 (D19)	2.865	4010	0.205	2.019	1.25	0.0438

* Strain at the commencement of strain hardening
 ** Approximate value in the range between the strains of ϵ_p and 0.027

しかし、この場合の伸びは検長内で一様に生じているのではなく、1, 2箇所の大きなひび割れが次第に成長し、伸びがこの部分に集中しているのが特徴である。

引張歪み 2000 μ 時の残存強度の最大引張強度に対する割合に注目すると、横打ちの方が縦打ちより高い値が得られ、長い鋼繊維を用いた方が小さい混入率で高い値が得られる。

3. Tension Stiffening 効果試験

3-1 実験方法

実験装置を図-3に示す、120×120×1500mmのSFRCプリズムの材軸に沿って埋め込まれたD19鉄筋に、引張力を加える長い両引試験である。D19の性質を表-4に示す。コンクリートの調査は表-1と同一で、A, Bシリーズそれぞれについて各1体ずつ、総数10体の供試体を製作し、載荷直前まで湿潤養生して乾燥収縮の影響を除いた。

図-3に示す方法で鉄筋の伸びを測定し、裸部分(片側50mmずつ)の伸びを補正して、埋め込み部分の伸びを全長1500mmで除して平均歪み ϵ_{av} を求め、引張力Pに対してプロットすると図-4のような関係を得る。裸鉄筋のP- ϵ 曲線からの差がTS

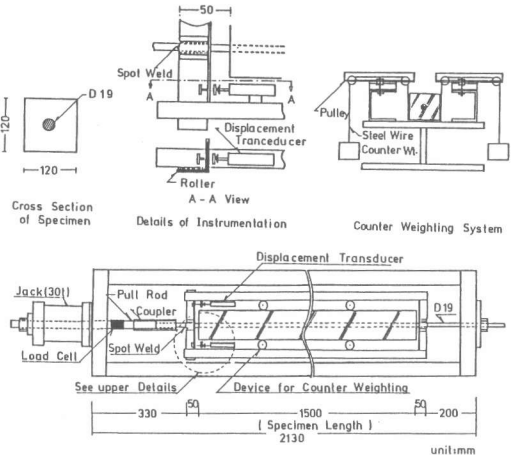


図-3 Tension Stiffening 試験装置

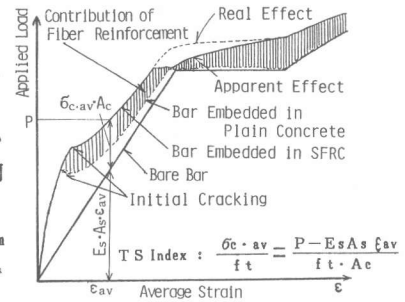


図-4 Tension Stiffening 効果の説明図

図-3に示す方法で鉄筋の伸びを測定し、裸部分(片側50mmずつ)の伸びを補正して、埋め込み部分の伸びを全長1500mmで除して平均歪み ϵ_{av} を求め、引張力Pに対してプロットすると図-4のような関係を得る。裸鉄筋のP- ϵ 曲線からの差がTS効果を表す。図-4の降伏点近くの性状は後に説明を加える。

3-2 実験結果および考察

全供試体についての荷重Pと ϵ_{av} の関係を図-5に示す。初ひび割れまでは両端近くは付着による伝達域があり、中央部では平面歪み域となるので、この影響を図-5の中に挿入した説明図のように、SFRCの引張ひび割れ歪みを、表-3の引張試験の結果から得た値、即ち 1.5×10^{-4} として補正してある。このように補正

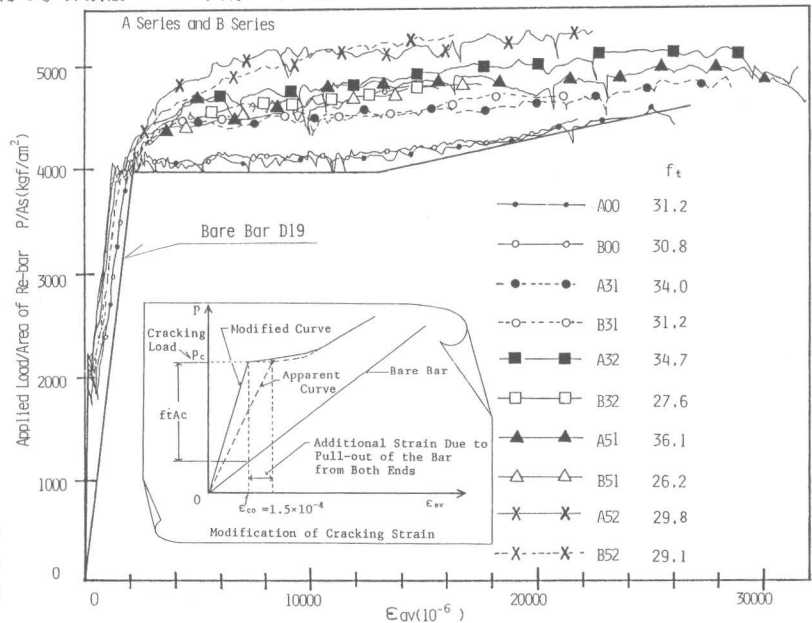


図-5 荷重-平均歪度曲線

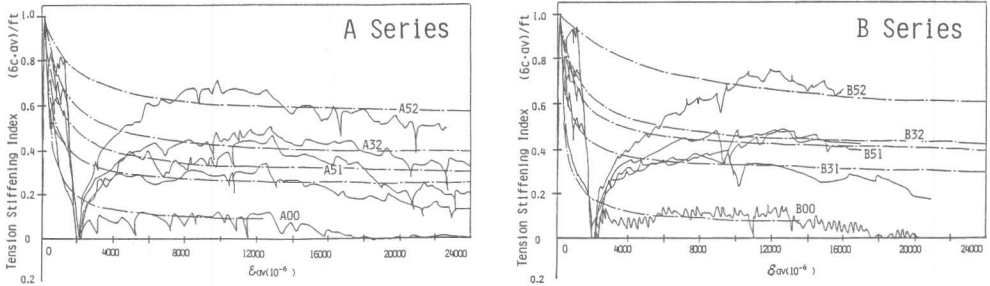


図-6 Tension Stiffening Index (弾塑性域)

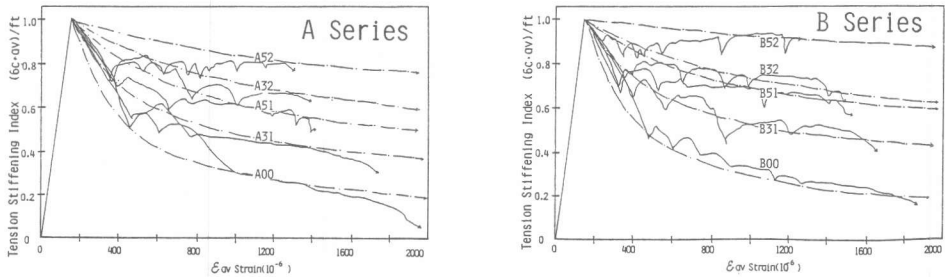


図-7 Tension Stiffening Index (弾性域)

した結果からSFRCの引張強度 f_t が得られるが、それを 図-5 中に示してある。この f_t は表-3の直接引張試験の結果と比較すると、やや小さいが、良く対応している。図-5の各曲線と裸鉄筋の $P-\epsilon$ 線間の縦軸方向の差を求め、これをコンクリート断面積 A_c で除して平均引張応力 $\sigma_c \cdot av$ の形で表現し、それを f_t で無次元化した値(これを 図-4に示すように TS Index と称す。つまり、ある ϵ_{av} 時のひび割れ間でのコンクリート引張応力の軸方向分布の平均値の引張強度に対する比を意味する)を ϵ_{av} に対してプロットしたのが 図-6 である。図-6の鉄筋降伏以前の部分を拡大したものが 図-7 である。図-6の降伏点近くの谷間を無視して次の(1)式の形で近似曲線を求め、図-6、図-7にそれぞれ記入してある。

表-5 実験式(1)の係数

	a	b	c
A00	4000	0.44	0.07
A31	3500	0.77	0.24
A32	1500	1.32	0.36
A51	2000	1.10	0.29
A52	1500	1.98	0.55
B00	4000	0.44	0.06
B31	3500	0.88	0.30
B32	1500	1.43	0.40
B51	2000	1.32	0.39
B52	400	1.98	0.51

$$\frac{\sigma_c \cdot av}{f_t} = \frac{1}{a \cdot \epsilon_{av} + b} + c \quad \text{-----(1)}$$

(1) 式の係数を表-5に示す。図-6の降伏点近くの谷間は両端断面ではSFの架橋がないことによるものであり、材長を充分長くするとこの谷間は無くなり、鉄筋の降伏点も見かけ上上昇して Stiffening に加えて Strengthening にもなると予想している。

4. 結論

- (1) 著者等が考案した直接引張試験法をSFRCに適用した結果、応力減退域における引張応力-歪度曲線を安定して求めることができた。
- (2) ひび割れ後の残存強度は長い鋼繊維を用いた方が、小さい混入率で大きい値を得ることができる。
- (3) SFRCのTS効果は鉄筋の降伏以後でも著しい。
- (4) TS効果はSFの混入率が増すほど、かつSFが長くなるほど著しい。
- (5) TS効果の降伏点での谷間は見かけの現象であると予想されるが、確認を要する。
- (6) ファイバー長さと同試験法での断面寸法の適正な比率については検討を要する。

[本研究内容は昭和59年および昭和60年度日本建築学会大会において口頭発表した。]

<参考文献> 1) 森田, 角: 「鉄筋コンクリート部材の引張試験による附着効果の研究」セメント技術年報 XⅧ(昭和 39 年) 2) 六車, 森田: 「鉄筋コンクリートの附着についての基礎的研究(Ⅱ)」日本建築学会論文集第 134 号(昭和 42 年 4 月)