

論文

[1110] 鋼繊維補強鉄筋コンクリートのせん断伝達に関する
実験的研究

正会員 望月 重 (武蔵工業大学工学部)

正会員 ○松本智夫 (武蔵工業大学工学部)

1. はじめに

耐震壁のようにせん断力の過半を負担し、せん断破壊することが避け難い鉄筋コンクリートせん断抵抗部材に対して、これを鋼繊維混入コンクリートで補強した場合のひび割れ面でのせん断伝達に関する基礎的な考察を行うため、SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) のS字型供試体による間接一面せん断試験を実施した。本実験で対象とした変動因子は、1)せん断補強筋比 (p)、2)鋼繊維混入率 (V_f)、3)鋼繊維の形状、4)鋼繊維の長さ (l_f) の4項目であり、変動因子別に実験結果の比較を行って、鉄筋とともに鋼繊維が引張応力を負担していることを明らかにした。さらに、鋼繊維の抵抗を鉄筋と同様なせん断補強効果として累加した極限解析との照応によって実験結果を検証した。

2. 実験概要

2.1 試験体および材料特性

試験体は、図-1に示すように全高55cm、全幅50cm、厚さ12.5cm、せん断面の面積 $A=b \times h=12.5 \times 19.5 \text{cm}^2$ であり、せん断面に対して直交する方向に引張力の载荷が可能な形状とした。せん断面のせん断補強筋(以下、単に「鉄筋」という)は4.1mmなまし鉄線またはD6鉄筋をフープ状に加工して用いた。各試験体の構造諸元は表-1に示す通りであるが、本実験でとりあげた変動因子は先に述べた4項目からなり、合計16体に関する実験を行った。試験体名は、鉄筋比(%) - 繊維混入率(%) - 繊維長(mm)の順に数値で示し、最後に試験体番号を付した。ただし、異形繊維を混入した試験体のみ繊維長を示す数値の前に記号「D」を入れた。

混入した鋼繊維(以下、「SF」という)はせん断ファイバーで、断面はいずれも $0.5 \times 0.5 \text{mm}^2$ 、長さが20mm、30mm、40mmの3種類である。繊維の形状は、長さ30mm

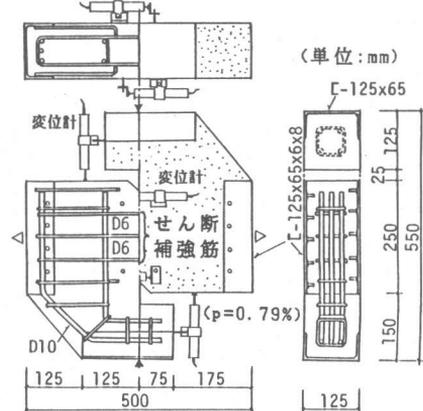


図-1 試験体の形状および配筋

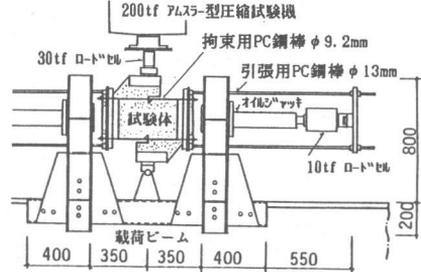


図-2 加力装置の概要 (単位:mm)

表-1 試験体の変動因子一覧

試験体名	p(鉄筋比(%))	V_f	形状	l_f
0.32-0.0-001,2	0, 32	0.0	—	—
0.32-1.5-301,2	(6-4.1mm)	1.5	フラット	30
0.79-0.0-001,2	0.79 (6-D6)	0.0	—	—
0.79-0.75-301,2		0.75	フラット	30
0.79-1.5-301,2		1.5	フラット	30
0.79-1.5-D301,2		1.5	異形	30
0.79-1.5-201,2		1.5	フラット	20
0.79-1.5-401,2		1.5	フラット	40

V_f : 繊維体積混入率(%), l_f : 繊維長(mm)

表-2 使用材料の機械的性質

種類	σ_y	σ_t	伸び(%)
鉄筋 D6 (SD30)	3125~3330	5230~5245	16~17
鉄線 4.1mm	1990~2090	3220~3370	27~29
(鋼繊維)			
繊維長(mm)	20	30	40
繊維形状	フラット	フラット	異形異形
σ_t	3800	7800	3620
			7730

σ_y : 降伏点(kgf/cm²), σ_t : 引張強さ(kgf/cm²)

についてはフラット形と波形異形の2種類を用いた他は、すべてフラット形のみとした。表-2に鉄筋および混入したSFの機械的性質を示す。

SF混入コンクリートの練り混ぜは、強制練りコンクリート・ミキサを用いて、普通ポルトランドセメント、15mm以下の粗骨材および2.5mm以下の細骨材により、W/C=55%でマトリクスとなるプレーンコンクリートを練り上げた。その後、ただちにミキサの回転を止めることなく、0.75ないし1.5% (体積比) のSFを手によってできるだけ均一になるように分散投入した。打込みは木製型わくの試験体に横打ち、突き棒詰めとし、随時木槌による振動を型わくに加えた。

2.2 加力および測定方法

加力方法はその装置の概要を図-2に示すように、ひび割れ面を介したSFRCのせん断伝達作用を考察する目的から、あらかじめせん断面に引張りひび割れを生じさせる(以下、「初期ひび割れ」という)ための直接引張力を、10tf容量の油圧ジャッキ2台およびφ13mmPC鋼棒(以下、「引張用PC鋼棒」という)4本を用いて行い、その後初期ひび割れ時の引張力を一定に保持した状態で、200tf容量のアムスラー型耐圧試験機によりせん断荷重を漸増載荷するpush-off形式で破壊に至らしめた。この際、特に鉄筋比が小さい試験体の場合には、初期ひび割れが生じた直後の過度なひび割れ幅の拡大を抑制するため、図-2に示すような試験体のせん断面と平行に2枚の9mm厚鋼板をローラを介して並べ、PC鋼棒φ9.2mm(以下、「拘束用PC鋼棒」という)4本によって、これを試験体のせん断面にはさみ付けるように設置した。初期ひび割れの発生を容易に目視観測することが困難なため、各試験体とも鉄筋の平均ひずみ度が 500×10^{-6} を超えた時点でせん断荷重載荷に移行するよう計画した。

表-3 引張加力時および最大せん断力時の強度、変位の一覧

試験体名	$f_c'(f_t')$	$c_r \sigma'$	$c_r \epsilon_s$	$p f_s$	σ''	$\sigma''/\sqrt{f_c}$	$c_r \bar{\delta}_w$	$m_{\max} \tau$	$m \tau/\sqrt{f_c}$	$m \bar{\delta}_s$	$m \bar{\delta}_w$
0.32-0.0-001	292(22.9)	6.91	*	6.47	0.44	0.026	1.780	14.95	0.875	4.322	2.845
2	288(18.5)	7.40	*	6.47	0.93	0.055	1.994	17.42	1.027	4.137	3.278
平均	290(20.7)	7.16	*	6.47	0.69	0.041	1.887	16.19	0.951	4.230	3.062
0.32-1.5-301	274(29.5)	18.89	886	5.67	13.21	0.798	0.109	17.42	1.053	4.291	3.072
2	285(28.4)	21.50	646	4.14	17.36	1.028	0.065	15.23	0.902	4.071	2.820
平均	280(29.0)	20.20	766	4.91	15.29	0.913	0.087	16.33	0.978	4.181	2.946
0.79-0.0-001	218(16.9)	16.47	912	10.92	5.55	0.376	0.056	39.96	2.707	0.724	0.436
2	284(22.3)	16.42	794	9.76	6.66	0.395	0.073	46.54	2.762	0.675	0.450
平均	251(19.6)	16.45	853	10.34	6.11	0.386	0.064	43.25	2.735	0.700	0.443
0.79-0.75-301	321(27.5)	22.06	576	6.90	15.16	0.846	0.037	52.27	2.917	0.725	0.385
2	314(26.7)	22.53	833	9.98	12.55	0.708	0.053	45.41	2.562	0.660	0.434
平均	318(27.1)	22.30	705	8.44	13.86	0.777	0.045	48.84	2.740	0.693	0.410
0.79-1.5-301	291(30.8)	25.60	568	6.98	18.62	1.092	0.058	56.49	3.312	0.770	0.454
2	313(29.6)	24.54	506	6.22	18.32	1.036	0.029	53.41	3.019	0.678	0.339
平均	302(30.2)	25.07	537	6.60	18.47	1.064	0.044	54.95	3.166	0.724	0.397
0.79-1.5-D301	269(27.1)	23.96	513	6.31	17.66	1.076	0.049	55.80	3.402	0.916	0.516
2	260(29.4)	23.16	527	6.48	16.68	1.034	0.054	59.05	3.662	0.902	0.357
平均	265(28.3)	23.56	520	6.40	17.17	1.055	0.051	57.43	3.532	0.909	0.437
0.79-1.5-201	252(23.8)	22.75	525	6.29	16.47	1.037	0.054	46.14	2.906	0.654	0.395
2	247(22.8)	23.39	772	9.25	14.14	0.900	0.083	37.61	2.393	0.513	0.342
平均	250(23.3)	23.07	649	7.77	15.31	0.969	0.068	41.87	2.650	0.584	0.369
0.79-1.5-401	370(40.4)	31.38	502	6.01	25.37	1.319	0.037	63.36	3.294	0.910	0.703
2	374(40.8)	28.78	514	6.16	22.63	1.170	0.048	65.47	3.385	0.810	0.431
平均	372(40.6)	30.08	508	6.09	24.00	1.245	0.043	64.42	3.340	0.860	0.567

* 降伏ひずみ度

[記号] $f_c'(f_t')$: (SF)コンクリートの圧縮(割裂ひび割れ)強度(kgf/cm²), $c_r \sigma'$: 引張用PC鋼棒に作用している引張力から拘束用PC鋼棒のそれを差引いた、初期ひび割れ時の試験体の全負担引張応力度(kgf/cm²), $c_r \epsilon_s$: 初期ひび割れ時のせん断面の鉄筋の平均ひずみ度($\times 10^{-6}$), $p f_s$: 初期ひび割れ時のせん断面の鉄筋の実測応力(kgf/cm²), $\sigma'' = c_r \sigma' - p f_s$: 初期ひび割れ時の試験体の鉄筋以外が負担している引張応力度(kgf/cm²), $c_r \bar{\delta}_w$: 初期ひび割れ時のせん断面の平均ひび割れ幅(mm), $m_{\max} \tau$: 最大せん断応力度(kgf/cm²), $m \bar{\delta}_s$ ($m \bar{\delta}_w$): 最大せん断応力度時の平均せん断ずれ変位(平均ひび割れ幅)(mm)

測定方法は、試験体のせん断面から両側35mmの位置にあらかじめ埋込んだねじ棒間のせん断面に直交する方向の変位をひび割れ幅とみなし、せん断力によるひび割れ面のすべり方向の変位とともに、いずれも高感度型変位計(感度=500×10⁻⁶/mm)によって測定した(図-1参照)。また、せん断面の鉄筋およびPC鋼棒にもストレインゲージを貼付して、それぞれの負担応力の算定に供した。

3. 実験結果および検討

3.1 変動因子別のSFRCの性状

表-3は、せん断面に直交する引張加力によって、鉄筋の平均引張ひずみ度が500×10⁻⁶を超えた時点での各強度およびひび割れ幅、さらに最大せん断力時におけるせん断応力度、せん断ずれおよびひび割れ幅変位の値を、全試験体について一覧にした。また、図-3(a)~(c)は、各試験体のせん断応力度をコンクリート圧縮強度の平方根で除した値($\tau/\sqrt{f_c'}$)と平均せん断ずれ変位($\bar{\delta}_s$)との関係を、変動因子別に示した。ただし、鉄筋比が0.32%の場合、SF無混入の試験体では初期ひび割れの発生時にSFを1.5%混入した試験体でも引張加力からせん断加力に移行したきわめて初期の段階において、鉄筋が降伏応力に達したため、せん断ずれ変位の増加とともにせん断力が漸増するピークのない曲線を呈した。そこで、このような場合には、せん断ずれ変位が4mmを超えた時点でのせん断応力度を最大せん断応力度として表-3に示し、以下の検討対象からは除外した。

表-3から、せん断面に直交する方向の引張加力による初期ひび割れの発生方法において、変動因子の差異にかかわらず、全試験体一律に鉄筋の平均引張ひずみ度500×10⁻⁶をひび割れ発生を目安としている。これにより、初期ひび割れ時の試験体の引張応力は、SFの混入率および繊維長さに比例して大きくなっており、これを図-4に示した。試験体の全引張応力のうち、図中の斜線部は鉄筋が負担している応力であり、残る部分をコンクリートまたはSF混入コンクリートが負担している。この後、各試験体は図-4に示すような引張応力の作用した状態で、せん断荷重が漸増载荷され、せん断ずれ変位が生ずるとともにひび割れ幅も徐々に拡がりをみせる。また、鉄筋の応力は降伏点に達するまで上昇し、SF混入コンクリートはひび割れ面でSFが引抜けることより、せん断面に直交する方向の引張力を負担できなくなる。図-3は、せん断面に直交する方向の引張力が、試験体の変動因子ごとに異なっている上での比較ではあるが、おおむねSFの混入率および繊維長さに比例して、せん断応力度も大きくなっているといえる。

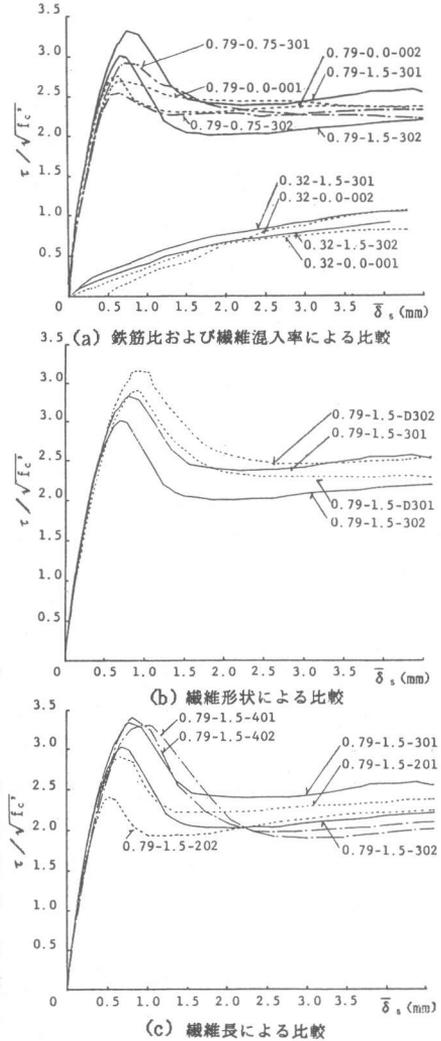


図-3 $\tau/\sqrt{f_c'} - \bar{\delta}_s$ 関係

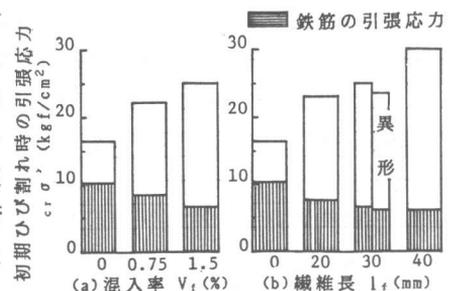


図-4 $\sigma_c' - V_f, l_f$ 関係

3.2 極限解析による実験結果の検証

前項において、鉄筋とともにSFがせん断面に直交する方向の引張力を負担しており、その割合はSFの混入率(V_f)および繊維長(l_f)にほぼ比例していることを実験結果から示した。本項では、コンクリートを完全塑性材料とした極限解析を行って、本実験で得られた最大せん断応力度と比較する。

極限解析は平面応力場における上界の解を求めるものであるが¹⁾、ここでは内力のなす仕事のうち鉄筋の寄与分にSFの寄与分を累加し、ともにだぼ作用は無視した。また、本実験は、せん断面に沿って初期ひび割れを生じさせた状態での実験であるため、ひび割れ面に直交する方向のコンクリートの引張強度 $f_t' = 0$ とする。実験の破壊状況からみて、せん断面のSFの耐力はマトリクス・コンクリートとの付着強さで決められており、試験体における鉄筋補強率 $\phi_1 = A_s f_y / (b h f_c')$ に、SFを混入した場合には $\phi_2 = \beta B_f l_f V_f / (4 A_f f_c')$ (ただし、SFの平均埋込み長さを $l_f/4$ とする)²⁾を累加することでせん断補強効果を表現した。

記号は以下に示す通りである。 A_f =SFの断面積、 A_s =鉄筋の全断面積、 B_f =SFの単位長さ当りの付着強さで、SFの形状とマトリクス・コンクリートの圧縮強度によりきまる³⁾。フラット形SFで $0.30 \sim 0.35 \sqrt{f_c'}$ 、異形SFで $0.35 \sim 0.45 \sqrt{f_c'}$ 、 f_c' =コンクリートの圧縮強度、 f_y =鉄筋の降伏強度、 β =SFの配向係数で、ここでは0.5 (3次元ランダム)とした。

図-5の実線は、コンクリートの引張強度 $f_t' = 0$ 、また有効低減係数を $\bar{v} = 0.45$ (Hofbeckらの実験結果⁴⁾との適合性より得られた)として行った平面応力場の極限解析による解を示したものであり¹⁾、実験結果については、SFを混入した場合、鉄筋補強率 ϕ_1 に ϕ_2 を累加した値をプロットした。実験値がいずれも実線で示した解析結果をわずかに下回る傾向にあることについては、本実験がせん断面に対して直交する方向に、初期ひび割れ発生時の引張荷重を一定に保持したままの状態、せん断荷重の載荷を行っていることから、有効低減係数が上記の値よりさらに1割程度低い値となると考えられる。

4. 結 び

本実験は、せん断面に直交する方向の引張加力を初期ひび割れが発生するまで行い、そのままの荷重状態でせん断力を載荷するという方式により、鋼繊維補強鉄筋コンクリートのせん断伝達作用を考察した。その結果、鉄筋とともに鋼繊維が、せん断面に直交する方向の引張力を一部負担しており、その寄与分は鋼繊維のコンクリートとの付着強さを考慮して、鉄筋補強率に累加することで評価できることが明らかとなった。

なお、本研究の一部は、(社)鋼材倶楽部から日本建築学会に対する委託研究「スチールファイバーの実用化に関する調査研究」(委員長 小倉弘一郎)によるものである。

[参考文献] 1) Chen, W. F.: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill, 1982 (色部, 河角, 安達監訳: コンクリート構造物の塑性解析, 丸善(株), 1985, pp. 305~358), 2) 日本建築学会: 鋼繊維補強コンクリート設計・施工指針案, 日本建築学会スチールファイバーの実用化に関する調査研究小委員会, 1986, pp. 95~97, 3) 坂井正美: 鋼繊維の形状・材質が鋼繊維補強コンクリートの力学的特性に及ぼす影響に関する研究, 東学位論文, 1984, pp. 41~51, 4) Hofbeck, J. A. et al.: Shear Transfer in Reinforced Concrete, ACI Jour, Vol. 66, No. 2, 1969, pp. 119~

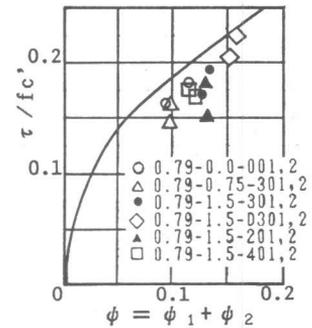


図-5 極限解析の結果と実験値との比較