

[131] 鋼繊維混入鉄筋コンクリート柱のせん断耐力に関する 実験的研究

正会員 永坂具也(東海大学工学部)
正会員 ○柳瀬高仁(佐藤工業中央技研)
安藤 充(東海大学大学院)

1. 序

鋼繊維補強コンクリート(SFRC)は、普通コンクリートに比べ引張強度が高く、ひび割れ抵抗性靱性に富んだ複合材料である。

近年、SFRCを構造部材へ適応する研究が種々行われているが、本研究もその一つで、この優れた材料特性を反映する上で特に効果的と考えられる鉄筋コンクリート短柱に適応して、そのせん断耐力に及ぼす鋼繊維の混入効果を模型実験を通じて定量的に検討し、その効果を評価するせん断耐力式を提案したものである。

2. 実験概要

鋼繊維の混入効果を鋼繊維の体積混入率(Vf)、帯筋比(pw)及び軸力(N)の大きさを変動因子として検討するために表1に示すh/D=3の柱試験体を用意し、原則として各2体ずつ制作した。ここで曲げ補強筋量は、鋼繊維無混入のものが、せん断体力を大きく上回る曲げ耐力を有するようにならざるを得ない。

試験体の概略を、pw=0.23%の場合について図1に示す。調合表を表2に示す。ここでSFRCのワーカビリティを向上させるために、単位水量、単位セメント量を増大したが、それによる悪影響は、見出せなかった。鋼繊維は、0.25x0.5x25mmのクリンプ状のものをを用いた。打設は、縦打ちとした。

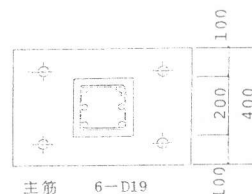
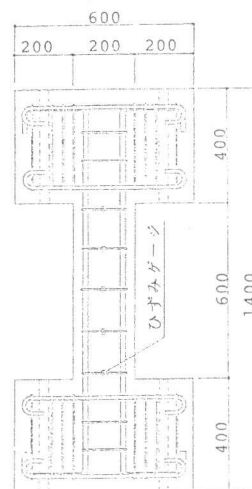
図2に示す載加条件のもとで、図3に示す載加過程に従って繰り返し水平載加を行なった。

各試験体について、柱頭、柱脚の相対水平変位、及び各帯筋の歪を測定した。また各種2体のうち1体について、柱頭、柱脚の4隅の主筋の歪を測定した。ひび割れ

表1 試験体の種類

試験体名	主筋	帯筋	軸力: σ_n (kg/cm ²)	Vf (%)
RC02	3-D19 pt=2.14%	D6 @140	0	0
SFRC02-10		pw=0.23%		1.0
SFRC02-15				1.5
SFRC02-20				2.0
RC04	3-D19 pt=2.14%	D6 @70	0	0
SFRC04-10		pw=0.46%		1.0
SFRC04-15				1.5
SFRC04-20				2.0
SFRC00-10	-	-	1.0	1.0
SFRC12-10	D6 @140	37.5		
SFRC22-10	D6 @140	pw=0.23%	75.0	

$\sigma_n = N/bD$



主筋 6-D19
帯筋 D6 @140
主筋被り厚さ 26mm
帯筋被り厚さ 20mm
pt=2.14%
pw=0.23%
シラスパン比 1.82

図1 試験体概略

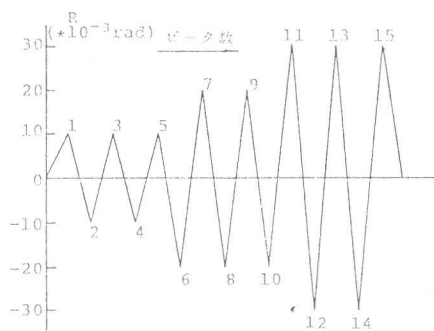


図3 載荷過程

図2 載荷条件

表2 調合表

Vf (%)	W/C (%)	S/A (%)	1m ³ 当り				空気量 (%)		
			W	C	S	G			
0	60	65	44	200	334	772	1001	0	1.0
1.0			267	446	874	495	78.5		
1.5			266	443	870	493	118.0		
2.0			265	441	865	490	157.0		

観測については、適宜行った。

3. 実験結果とその検討

3-1. 試験体の諸耐力, 変位

使用した鉄筋の力学的特性を表3に示す。

表3 鉄筋の力学的特性

	σ_y (kg/cm ²)	σ_{max} (kg/cm ²)	E (t/cm ²)	伸び (%)
D19	3855	5958	1750	20.7
D6	3744	5169	1630	15.6

SFRCの力学的性質及び試験体の諸体力, 変位を表4に示す。ここでは, F_c , F_t , Q_{cr} , sQ_{cr} , Q_y , wQ_y , Q_{max} , δ_{max} , Q^* はそれぞれ, 圧縮強度, 引張強度, 初曲げひび割れ荷重, 初せん断ひび割れ荷重, 主筋降伏時荷重, 帯筋降伏時荷重, 最大荷重, 最大荷重時の変位, 最終ピーク時 ($R=30 \times 10^{-3}$ rad) 荷重を示す。ここで主筋降伏荷重とは, 引張主筋が全て降伏歪 (2200×10^{-6}) に達した時の荷重とし, 帯筋降伏荷重とは, いずれかの帯筋が初めて降伏歪 (2300×10^{-6}) に達した時の荷重とした。

表4 実験結果

試験体名	F_c (kg/cm ²)	F_t (kg/cm ²)	bQ_{cr} (ton)	sQ_{cr} (ton)	Q_y (ton)	wQ_y (ton)	Q_{max} (ton)	δ_{max} ($\times 10^{-3}$ rad)	Q^* (ton)
PC02-1	373	25.5	2.0	3.5	-	8.0	-9.5	-6.5	3.0
PC02-2	383	23.3	1.5	5.0	-	8.5	9.5	10.0	4.2
SFRC02-10-1	392	31.8	2.0	6.0	-	11.5	12.1	10.0	4.2
SFRC02-10-2	369	28.3	1.0	6.0	-	10.6	-12.5	-20.0	5.0
SFRC02-10-3	367	26.5	1.0	5.0	-	10.8	-11.7	-10.0	5.8
SFRC02-10-4	365	25.8	1.0	6.5	-	11.0	11.5	10.0	5.0
SFRC02-15-1	406	26.0	1.0	6.0	-	13.0	13.7	10.0	6.9
SFRC02-15-2	392	23.6	1.5	5.0	-	13.0	13.5	8.3	5.6
SFRC02-20-1	389	26.1	1.5	7.0	13.5	14.5	14.9	10.0	5.6
SFRC02-20-2	335	23.8	0.5	7.5	-	14.0	-14.1	-7.5	5.7
RC04-1	382	16.3	1.0	5.5	-	12.0	-13.7	-10.0	5.9
RC04-2	364	18.9	1.5	4.5	-	10.0	-13.5	-10.0	5.6
SFRC04-10-1	402	22.2	0.5	7.0	13.5	13.5	-15.2	-13.3	8.1
SFRC04-10-2	389	20.4	-	6.0	-	13.5	15.4	16.7	7.1
SFRC04-15-1	351	24.8	1.0	9.0	14.5	15.5	18.0	18.3	6.8
SFRC04-15-2	359	24.3	1.5	6.0	-	16.4	17.6	18.3	8.3
SFRC00-10-1	367	22.8	1.5	6.5	-	-	-11.4	-8.3	3.2
SFRC00-10-2	378	28.1	1.5	6.5	-	-	10.9	10.0	4.1
SFRC12-10-1	257	25.7	4.5	10.5	-	12.5	-14.2	-20.0	5.2
SFRC12-10-2	367	24.2	3.5	8.0	-	12.0	-13.4	-10.0	4.5
SFRC22-10-1	352	27.2	5.0	9.5	-	12.5	-15.0	-10.0	6.3
SFRC22-10-2	353	27.4	5.0	10.0	-	13.2	-14.9	-10.0	4.5

曲げ降伏が確認されたのは, SFRC02-20-1, SFRC04-10-1とSFRC04-15-1であるが, いずれも, その後耐力を増し, 帯筋の降伏を経て, 最大耐力に達した。

なお, 文献(1)による鋼繊維混入の曲げ耐力の計算値は, 軸力0, 15.30tのものについてそれぞれ, 14.5, 19.0, 22.5tである。

3-2 ひび割れ, 破壊性状

図4に正負処女サイクル終了時 ($R=10 \times 10^{-3}$ rad) におけるひび割れ図を示す。

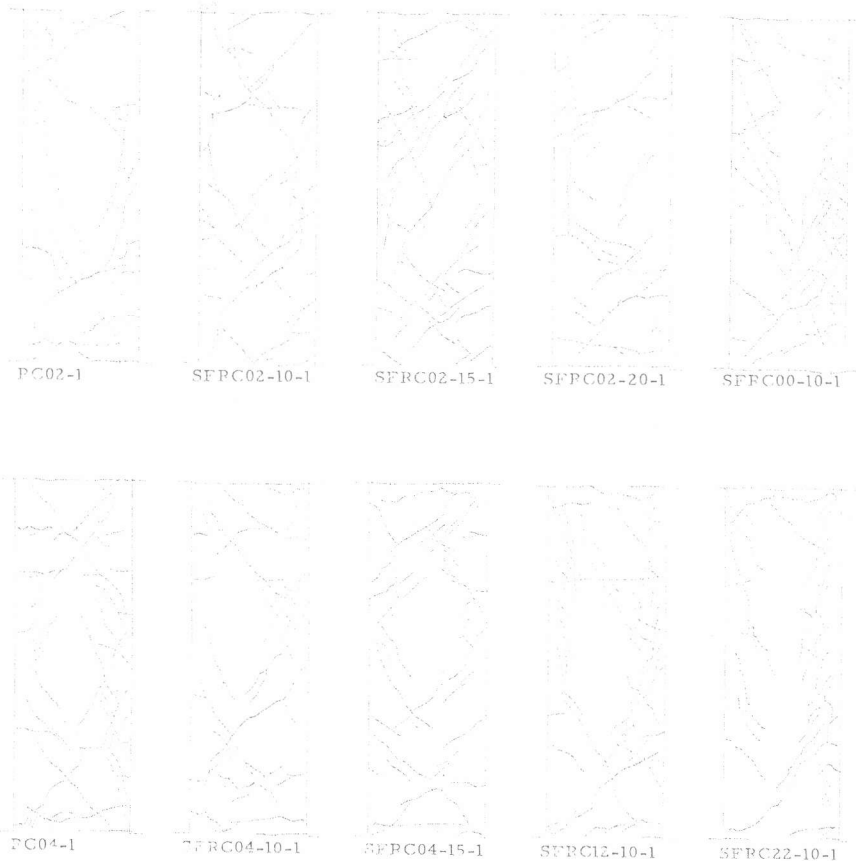


図4 ひび割れ図

全般的にみれば、どの試験体においてもほぼ同様の過程で柱頭、柱脚部から45°に傾くせん断ひび割れが入り、次いで主筋ぞいに付着割裂ひび割れを生じ、両者が進展して耐力に達した。その後繰返し数及び振幅の増大にしたがい付着割裂ひび割れが顕著となり、次第に耐力低下をしていった。

$p_w = 0.23\%$ では、付着割裂ひび割れは主筋ぞいに貫通し、 $p_w = 0.46\%$ では、それが見られず、主筋ぞいに分散した。しかし鋼繊維の混入率を増大すると、 $p_w = 0.23\%$ でも主筋ぞいに分散した。

ひび割れは、鋼繊維の混入によって短く、細かく分散し、鋼繊維がひび割れの進展を防ぐ効果、すなわちひび割れ拘束性に富んでいることが確認された。

4. 考察

4-1 諸耐力に及ぼす鋼繊維の混入効果

表4で見られる様に、曲げひび割れ耐力については、鋼繊維の混入による有意な効果は、見出せなかった。

せん断ひび割れ耐力 $s\tau_{cr}$ 、帯筋の降伏時耐力 $w\tau_y$ 、最大耐力 τ_{max} と V_f との関係を図5、6に示す。ここで、 $\tau = Q/bj$ である。同図中の実線は、同種試験体の実験結果の平均を結んだものである。せん断ひび割れ耐力については、図5、6より鋼繊維の混入によってほぼ直線的に増大する傾向を示している。また、帯筋降伏時耐力や最大耐力も同図より鋼繊維の混入量によってほぼ直線的に増大する傾向をしめした。

以上より、せん断ひび割れ耐力、帯筋降伏時耐力、最大耐力の鋼繊維混入量による変化率として、ほぼ次のような値が求められる。

$$\begin{aligned} \Delta s\tau_{cr} / \Delta V_f &= 5.54 \text{ kg/cm}^2 / \% \\ \Delta w\tau_{cr} / \Delta V_f &= 10.0 \text{ kg/cm}^2 / \% \\ \Delta \tau_{max} / \Delta V_f &= 8.64 \text{ kg/cm}^2 / \% \end{aligned}$$

図5、6中に $V_f = 0\%$ の値を基点として上記の変化量を用いた直線を点線で示した。

4-2 鋼繊維混入鉄筋コンクリート短柱のせん断耐力式

慣用の広沢による修正大野荒川せん断耐力式²⁾を次に示す。

$$Q_{su} = [0.115k_u k_p (180 + f_c) / (M/Qd + 0.115) + 2.7 p_w w\tau_y + 0.1 \sigma_c] b j \quad (1)$$

この式によると、せん断耐力は、コンクリートの圧縮強度、帯筋比、軸力によって決定されることになる。表4及び文献(3)より鋼繊維は、

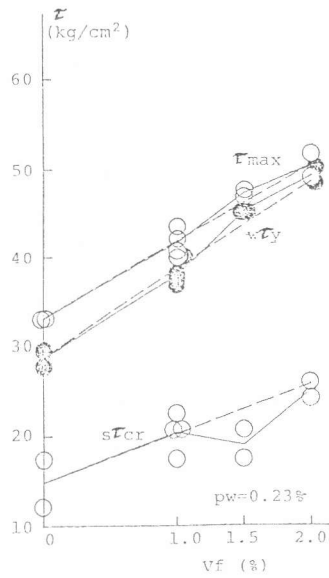


図5 τ - V_f 関係

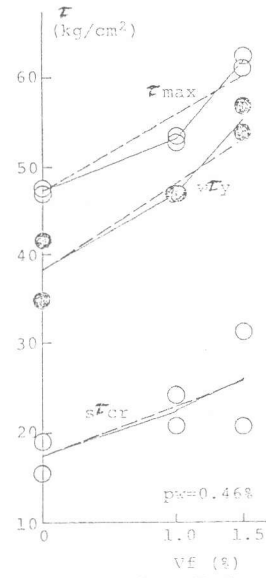


図6 τ - V_f 関係

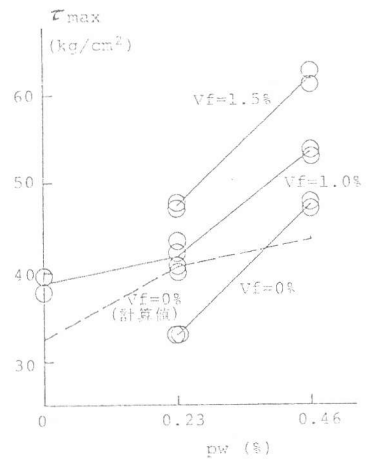


図7 τ_{max} - p_w 関係

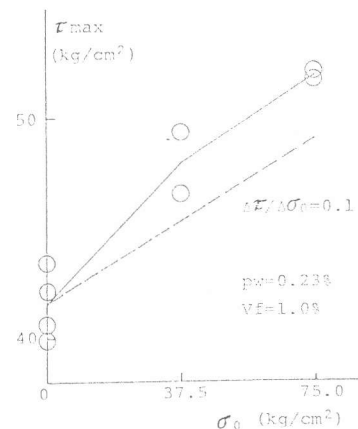


図8 τ_{max} - σ_c 関係

4) 圧縮強度に貢献しないとすれば、[] 内の圧縮斜材としての第 1 項は、繊維の混入量には無関係のものとみなせる。帯筋比の項に関しては、図 7 に p_w と最大応力度との関係を V_f をパラメータとして示したが、同図の $p_w = 0.23 \sim 0.46\%$ の関係より、 V_f の差による傾きの変化は見られず、帯筋の貢献度は V_f と独立であることが考えられる。同図中に、鋼繊維無混入のものについて (1) 式により計算値を求め、 p_w による変動を点線で示した。これより、 $p_w = 0.46\%$ の場合は、実験値の方がやや高めとなる程度であるが、 $p_w = 0.23\%$ の場合は、著しく実験値が下まわり、 $p_w = 0$ の場合とほとんど変わらない結果となっている。これは、本試験体の場合、 $p_w = 0.23\%$ では、帯筋間隔が 45° 以下のせん断ひび割れに対しては、場合によっては、有効に働かない程度に大きくされているためであると考えられる。

次に図 8 に軸力と最大応力度との関係を示した。同図より、軸力の増大による最大応力度の変化率は (1) 式の 0.1 よりやや高めとなっているが、両者にほぼ直線的な関係が認められる。

したがって、以上より、軸力の効果は鋼繊維の混入量とは無関係と考え、4-1 による鋼繊維の混入率に対する最大耐力の変化率 $8.64 \text{ kg/cm}^2/\%$ を用いて次式のような S F R C 短柱のせん断耐力式を導くことができる。

$$Q_{su} = [0.115 k_u k_p (180 + F_c) / (M / Q_d + 0.115) + 2.7 \sqrt{p_w w \sigma_y} + 8.64 V_f + 0.1 \sigma_a] b j$$

V_f : 鋼繊維の体積混入率(%)

本式による計算値と実験値との比較を図 9 に示す。これより、本式の精度は 20% の範囲にある。 (1) 式の精度と同程度の結果を与えることになる。

5. まとめ

鋼繊維の混入は、せん断耐力、帯筋降伏時耐力最大耐力に対して V_f によってほぼ直線的に増大することが認められた。一方、鋼繊維の混入量と帯筋量との相乗効果は認められず、それぞれの効果は独立で帯筋降伏後も鋼繊維はせん断力に抵抗

できるとの結果を得た。これにより鋼繊維混入鉄筋コンクリート短柱のせん断耐力式提案を試みた。しかしこの提案式は、 $b \times D = 20 \times 20 \text{ cm}$ 、 $h_o / D = 3.0$ の短柱で、帯筋量が比較的小さく、鋼繊維が $0.25 \times 0.5 \times 25 \text{ mm}$ のクリンプ状を使用したものによっており、その他の部材寸法や、鋼繊維については修正されていない。この点を今後の課題として考える。

参考文献

- 1) 日本建築学会 "鉄筋コンクリート構造計算基準、同解説" 1982年
- 2) 日本建築学会 "鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料 シリーズ 18" 昭和55年10月
建築雑誌
- 3) 小林 一輔 "繊維コンクリート 特性と応用" オーム社 1981年
- 4) 服部 高重他 "鉄筋コンクリート部材のせん断耐力機構に関する考察"
建築学会論文報告集第200号
- 5) 永坂 具也, 柳沢 学 "鋼繊維混入による鉄筋コンクリート短柱のせん断補強に関する実験的研究"
鋼繊維補強に関するシンポジウム論文集 昭和59年2月

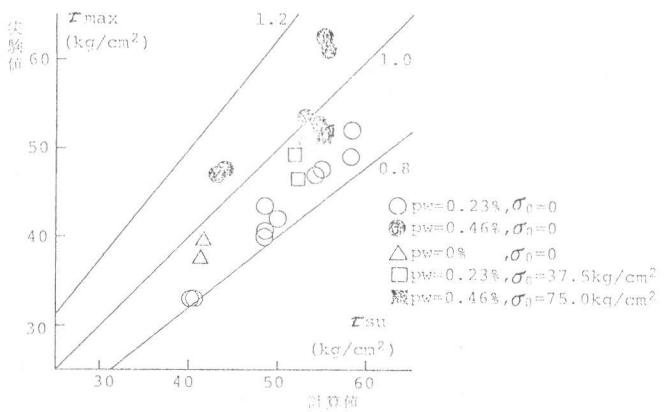


図 9 計算値と実験値との比較