

[132] 鋼繊維を用いた鉄筋コンクリートはりのせん断挙動に関する実験的研究

正会員 ○坂井 正美(日本鋼管技術研究所)
 重信 恒雄(横浜国立大学工学部)
 佐藤 康雄(横浜国立大学工学部)
 正会員 中村 信行(日本鋼管技術研究所)

1. はじめに

鋼繊維(SF)を鉄筋コンクリート(RC)部材に混入することによって、はりのせん断耐力が向上することは、すでにいくつかの報告で示されている¹⁾。しかし、これまでの研究では極めて定性的な段階にとどまっており、その基本的な挙動にも不明な点が多い。また鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の材料としての力学的特性は、近年かなり定量化できるところまで進んできたものの、部材段階での研究資料はまだまだ不十分である。そこで本研究はSFの種類(形状・材質)・混入率、せん断スパン比さらにはせん断補強筋との組合せが、はりのせん断耐力、変形状および破壊性状とどのような関連性を有するかを検討するため、実験的に研究したものである。

2. 実験概要

(1) 試験体 表-1に各試験体での変動因子を示す。実験は全く同じものを2体ずつ行っており、19種各2体合計38体実施した。図-1に代表的な試験体の形状詳細を示す。主筋はせん断破壊を確実に生じさせるため、高強度鉄筋D22を上下各3本($P_t = 2.15\%$)配置し、はりが最大耐力に達しても曲げ降伏しないように計画した。各試験体に用いたSFの詳細を表-2に、鉄筋を表-3に各々示す。またコンクリート・マトリックスは一定にするため、表-4の配合のものとした。SFRCの打設はシリーズ1と2で分けて2日間で行った。SFRCの製造は、生コン・プラントで練ったベース・コンクリートを、所定量ごと可傾式ミキサーに移し、ミキサーを回転させながらSFを投入する方法とした。またSFRCの材料特性を調べるため、各種のテストピース(圧縮用 $10\phi \times 20\text{cm}$ 、曲げ・直接せん断用

表-1 試験体一覧

試験体 No.	鋼繊維(SF)		剪断スパン比 (a/d)	剪断補強筋比* Pw(%)
	記号	混入率Vf(%)		
I-0	—	0	1.0	*印; 鉄筋は4φを使用 SFの混入率はVol. %
1	FL 40	1.0	1.0	
2	FL 70	1.0	1.0	
3	FL110	1.0	1.0	
4	IN _s 70	1.0	1.0	
5	IN110-1	1.0	1.0	
6	IN110-2	1.0	1.0	
7	IN110-3	1.0	1.0	
II-1	FL 40	0.5	2.0	/
2	FL 70	1.5	2.0	
3	IN110-1	0.5	2.0	
4	FL 70	1.5	2.0	
III-1	FL 40	1.0	3.0	/
2	FL 70	1.0	3.0	
3	IN110-1	1.0	3.0	
4	FL 70	1.0	3.0	
IV-1	FL 4	1.0	0.1	/
2	FL 70	1.0	0.2	
3	IN110-1	1.0	0.2	

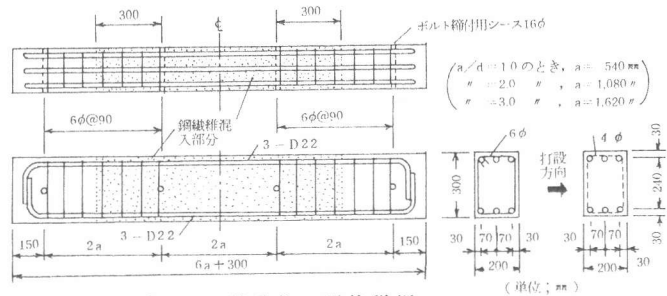


図-1 試験体の形状詳細

表-2 鋼繊維の特性

記号	SF		断面積 (mm ²)	降伏値 (Kg/mm ²)	引張強さ (Kg/mm ²)	伸び (%)	アスペクト比(L _f /d)
	公称寸法(mm)	形状					
FL 40	0.5×0.5×30	フラット・タイプ	0.280	34.0	37.3	7.5	53
FL 70	0.5×0.5×30	フラット・タイプ	0.246	66.3	70.4	1.0	—
FL110	0.5×0.5×30	フラット・タイプ	0.259	123.3	134.7	3.7	—
IN _s 70	0.5×0.5×30	小さい突起のあるインデント・タイプ	0.246	65.8	72.5	1.4	—
IN110-1	0.5×0.5×30	普通のインデント・タイプ	0.270	120.3	133.0	3.0	—
IN110-2	0.5×0.5×40	普通のインデント・タイプ	0.240	122.0	135.1	2.5	71
IN110-3	0.5×0.5×50	普通のインデント・タイプ	0.234	111.0	125.1	2.1	89

(注) 1. SFの製造は全てせん断形で、記号は次のことを示す。
 FL……フラット・タイプ
 IN_s……小さい突起のあるインデント・タイプ
 IN……普通のインデント・タイプ
 2. SFの引張試験方法は、文献2)による。
 3. アスペクト比は公称寸法の全長(L_f)を換算径(d)で除したものである。

表-3 鉄筋の特性

種別	断面積 (mm ²)	降伏点 (Kg/mm ²)	引張強さ (Kg/mm ²)	伸び (%)
4φ	12.3	22.1	37.5	37.5
6φ	28.5	40.1	54.2	26.3
D22	387.1	46.7	67.4	18.3

(注) 試験方法はJIS Z2201による。

表-4 ベースコンクリートの配合

水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量 (Kg/m ³)			
		セメント	水	細骨材	粗骨材
62	55	308	191	975	814

セメント; 普通ポルトランド(比重3.15)
 細骨材; 木更津産(FM270), 表乾比重2.60
 粗骨材; 砕石, 最大粒径20mm(FM660), 表乾比重2.65

10×10×40 cm, 各3体)を採取した。

(2) 実験方法 図-2に示すように、200tのアムスラー型試験機を用い、連続ばり方式で静的単調載荷とした。各載荷点でははりの材軸が回転中心となるピンもしくはピンローラーを使用した。変形測定は中央部試験区間の相対変位(図-3参照)を求めるため、両載荷点の材軸中心から互にアームを出し、中央点で変位計を取りつけて行った。その際のアームの固定はシースを通したボルトのナットを強く締めつけ、試験体との一体化をはかった。また鉄筋各部にはWSGを貼付し歪を測定した。

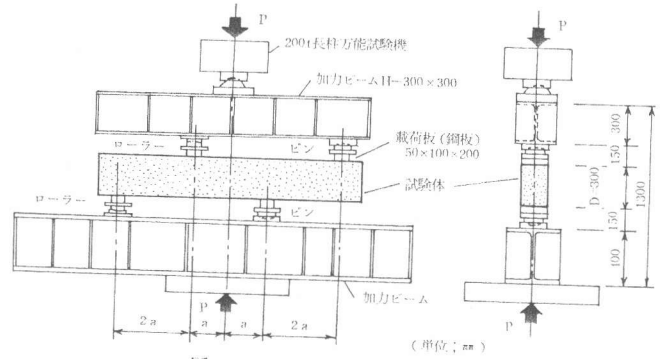


図-2 実験方法

(3) 実験結果 SFRCの標準養生(20℃水中)時の比重および力学的性質を表-5に、またはりのせん断実験結果を同表にそれぞれ示す。表中の曲げタフネス(Tb)や各種強度の評価法はJCI規準によるものであり、せん断亀裂類型は図-4の分類に従ったものである。また試験区間のせん断応力度(τ)と相対変形角(r)との関係を図-5に示す。図中には最大値(▼)、せん断補強筋の降伏開始点(+さ)らには亀裂類型を各々記入してある。なお初亀裂の発生はせん断スパン比の2と3に曲げ亀裂がみられた以外、全てせん断亀裂であり、主筋

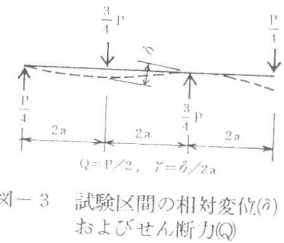


図-3 試験区間の相対変位(δ)およびせん断力(Q)

表-5 実験結果の一覧

試験体名	スパン(cm)	SFRC標準養生の性質 (Kg/cm ² , Kg-cm)						材料	圧縮強度 Fc (Kg/cm ²)	剪断初亀裂時				最大耐力時				剪断亀裂類型	耐力計算値		
		割合	比重	片縮	曲げ	曲げタフネスTb	直接引張強度 σ_c			剪断力 Qc (t)	剪断応力度 τ_c (Kg/cm ²)	τ_c/Fc	変形角 $r_c \times 10^3$ (rad)	剪断力 Qu (t)	剪断応力度 τ_u (Kg/cm ²)	τ_u/Fc	変形角 $r_u \times 10^3$ (rad)		cQc (t)	cQu (t)	cQby (t)
I-0-1	22.8	32	2.26	231.4	27.5	18	25.4	40	255.7	8.13	17.2	.067	0.7	12.20	25.8	.101	6.2	(b)	8.47	13.42	47.4
	-2	19.5	48	2.26	271.4	38.2	48	32.8	48	311.3	8.88	18.8	.060	0.5	23.10	48.9	.157	9.5	(c)	9.10	15.13
I-1-1	17.7	32	2.28	211.5	39.9	118	43.4	49	221.8	10.25	21.7	.098	2.5	12.15	25.7	.116	9.3	(b)	8.09	12.37	"
	-2	14.2	48	2.12	218.5	38.2	120	34.3	56	264.3	8.50	18.0	.068	0.4	13.73	29.1	.110	8.7	(b)	8.57	13.68
I-2-1	13.5	33	2.27	231.9	39.5	162	39.9	39	230.2	13.00	27.5	.119	2.0	17.70	37.5	.163	4.9	(b)	8.19	12.63	"
	-2	11.3	48	2.26	260.7	47.3	190	43.0	47	283.1	9.75	20.6	.073	0.2	25.45	53.9	.190	17.4	(b)	8.78	14.26
I-3-1	18.3	33	2.27	212.3	39.1	130	44.5	38	215.1	8.50	18.0	.084	0.3	16.10	34.1	.159	5.4	(b)	8.02	12.17	"
	-2	9.8	48	2.27	250.5	44.5	110	53.3	47	281.5	11.38	24.1	.086	0.4	25.40	53.8	.191	10.6	(b)	8.76	14.21
I-4-1	14.7	33	2.26	209.3	35.7	146	39.5	39	224.6	10.25	21.7	.097	0.3	20.53	43.4	.193	8.6	(c)	8.13	12.46	"
	-2	16.2	48	2.28	245.0	48.5	210	45.8	47	267.7	10.50	22.2	.083	0.5	17.55	37.1	.139	5.0	(b)	8.61	13.79
I-5-1	15.3	33	2.25	218.7	37.1	166	43.5	50	225.8	13.00	27.5	.122	0.8	15.93	31.8	.141	6.4	(a)	8.14	12.50	"
	-2	11.6	48	2.27	270.9	49.1	242	51.0	56	299.9	8.75	18.5	.062	0.4	20.83	44.1	.147	6.5	(b)	8.97	14.78
I-6-1	15.7	34	2.25	224.2	47.5	264	54.5	41	230.9	10.95	23.2	.100	0.5	21.35	45.2	.196	5.5	(b)	8.20	12.65	"
	-2	13.5	48	2.25	248.4	57.1	302	66.8	49	269.3	10.25	21.7	.081	0.6	18.58	39.3	.146	5.6	(b)	8.63	13.84
I-7-1	5.2	34	2.22	194.7	41.2	202	41.2	33	205.0	16.50	34.7	.170	1.5	20.13	42.6	.208	4.5	(c)	7.91	11.86	"
	-2	3.1	48	2.32	274.7	51.5	306	66.7	44	286.8	13.00	27.5	.096	1.5	16.85	35.7	.124	6.7	(a)	8.82	14.30
II-1-1	17.2	33	2.25	237.3	32.3	66	33.2	33	235.5	7.80	16.5	.070	0.4	14.50	30.7	.130	5.7	(b)	8.25	12.80	"
	-2	11.1	48	2.24	262.8	42.9	130	45.5	44	279.1	10.15	21.5	.077	0.1	17.23	37.5	.134	8.7	(b)	8.74	14.14
II-2-1	13.5	33	2.27	203.0	34.5	118	38.2	40	214.9	10.75	22.8	.106	0.2	20.78	44.0	.205	11.0	(b)	8.02	12.16	"
	-2	10.4	48	2.34	284.5	57.3	170	59.0	48	329.0	9.00	19.0	.058	0.3	24.00	50.8	.154	9.5	(b)	9.30	15.67
II-3-1	18.6	33	2.24	221.0	34.5	132	39.8	36	238.6	9.00	19.0	.080	0.3	22.00	46.6	.195	7.4	(c)	8.28	12.89	"
	-2	17.9	48	2.26	259.6	37.5	96	43.3	46	272.1	9.00	19.0	.070	0.5	24.23	51.3	.189	8.7	(c)	8.66	13.92
II-4-1	12.1	33	2.25	215.7	45.7	224	50.1	34	217.9	11.63	24.6	.113	0.4	20.38	43.1	.198	6.1	(a)	8.05	12.25	"
	-2	13.5	48	2.25	239.5	55.3	282	63.2	46	260.2	11.75	24.9	.096	0.5	15.55	32.9	.126	6.1	(a)	8.53	13.56
III-1-1	17.7	33	2.28	211.5	39.9	118	43.4	49	221.8	7.63	16.1	.073	0.7	11.35	24.0	.108	8.9	(b)	5.91	6.54	23.7
	-2	14.2	48	2.12	218.5	38.2	120	34.3	56	264.3	7.00	14.8	.056	1.0	10.83	22.9	.087	8.1	(b)	6.26	7.23
III-2-1	17.7	32	2.28	211.5	39.9	118	43.4	49	221.8	6.00	12.7	.057	1.1	8.68	18.4	.083	3.5	(b)	4.65	4.44	15.8
	-2	14.2	48	2.12	218.5	38.2	120	34.3	56	264.3	6.50	13.8	.052	1.4	7.82	16.6	.063	2.0	(b)	4.92	4.91
III-3-1	15.3	32	2.25	218.7	37.1	166	43.5	50	225.8	6.00	12.7	.056	0.6	10.95	23.2	.103	5.2	(b)	5.94	6.60	23.7
	-2	11.6	48	2.27	270.9	49.1	242	51.0	56	299.9	7.00	14.8	.049	0.9	11.73	24.8	.083	4.8	(b)	6.55	7.81
III-4-1	15.3	33	2.25	218.7	37.1	166	43.5	50	225.8	5.50	11.6	.051	1.1	8.65	18.3	.081	2.5	(b)	4.68	4.49	15.8
	-2	11.6	48	2.27	270.9	49.1	242	51.0	56	299.9	6.70	14.2	.047	1.4	7.60	16.1	.054	1.7	(b)	5.15	5.31
IV-1-1	17.7	32	2.28	211.5	39.9	118	43.4	49	221.8	11.25	23.8	.107	0.3	23.90	50.6	.228	16.3	(c)	8.09	14.25	47.4
	-2	14.2	48	2.12	218.5	38.2	120	34.3	56	264.3	11.25	23.8	.090	0.7	20.30	43.0	.163	9.2	(c)	8.57	15.56
IV-2-1	17.7	32	2.28	211.5	39.9	118	43.4	49	221.8	11.00	23.3	.105	0.2	16.50	34.9	.157	10.3	(b)	8.09	15.03	"
	-2	14.2	48	2.12	218.5	38.2	120	34.3	56	264.3	12.25	25.9	.098	0.8	19.30	40.8	.154	5.8	(b)	8.57	16.34
IV-3-1	15.7	34	2.25	224.2	47.5	264	54.5	41	230.9	10.50	22.2	.096	0.3	24.78	52.4	.227	7.1	(c)	8.20	15.31	"
	-2	13.5	48	2.25	248.4	57.1	302	66.8	49	269.3	11.50	24.3	.090	0.7	26.40	55.9	.208	7.8	(c)	8.63	16.50

(注) 試験体名: I-0-1 ↑ シース名
 $\tau_c = Q_c/bj$, $\tau_u = Q_u/bj$ (耐力計算式)
 cQc; せん断亀裂耐力 = $c\tau_c bj$
 cQu; せん断最大耐力 = $c\tau_u bj$ (但し, $c\tau_c, c\tau_u$ は(1)式)
 cQby; 曲げ降伏耐力 = $a_1 \sigma_y j/a$
 (記号) b(はり幅), d(有効高さ), a(せん断スパン)
 j(応力中心間距離で(7/8)d), a_1 (引張側主筋断面積)
 σ_y (主筋降伏点)

の歪も全て降伏歪を下廻った。比較のためせん断・曲げ耐力計算値を表-5に示す。

3. 結果の検討

(1) SFRCの材料特性 標準養生後の比重と圧縮強度との関係は、材令の違いによりシリーズ1と2とで異なり、ほぼ同一の比重(2.26)ながら約40 kg/cm² 後者の強度が高い。これはブレンの場合と合致する。また圧縮強度と曲げ強度、直接せん断強度の関係はともにほぼ比例関係にある。曲げタフネスは各々の圧縮強度で除してみると、図-6のようになりSFの特性差が明確である。はりの試験体と同一養生を施した圧縮強度(Fc)は、標準養生のもの(σc)とほぼ対応しており、シリーズ1で約3%、同2で約9% Fcの方が大きかった。(図-7参照)

(2) はりのせん断耐力 表-5のτc/Fcおよびτu/Fcをパラメータごとにプロットすると図-8のようになる。図中には平均値を破線で示してあり、またブレンの場合、荒川mean式(1)で求めた値をFcで除して比較してある。

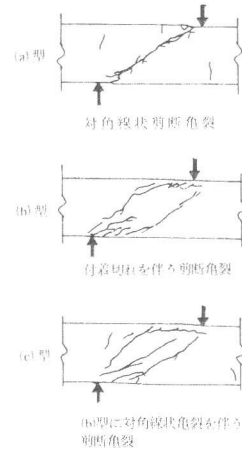


図-4 せん断亀裂類目の分類

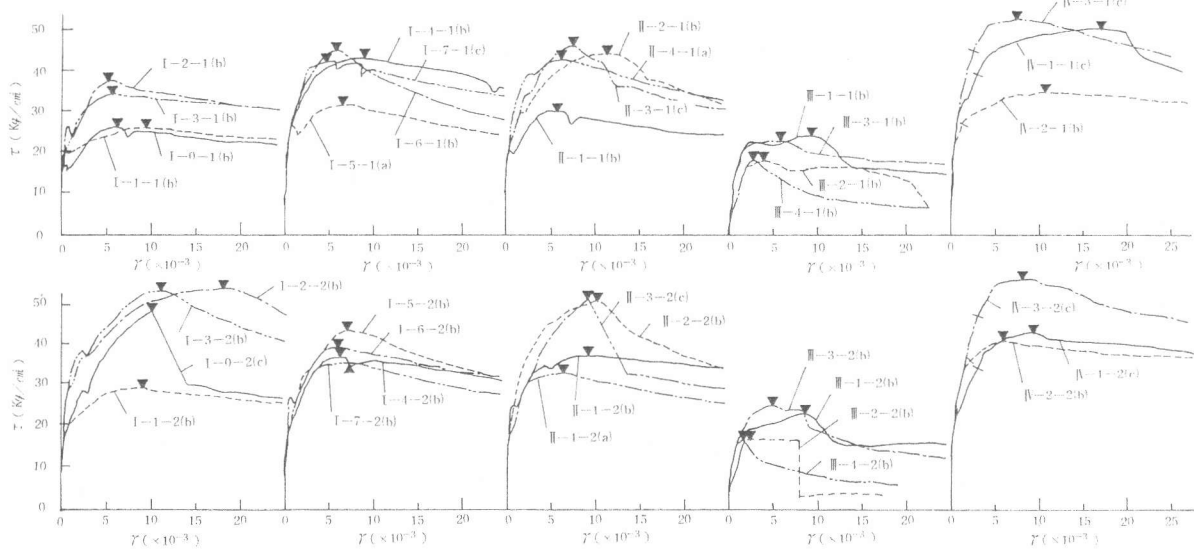


図-5 せん断応力度(τ)・変形角(γ)関係

$$c\tau_c = \frac{0.085 kc (500 + F_c)}{\frac{a}{d} + 1.7}$$

$$c\tau_u = \frac{0.12 ku kp (180 + F_c)}{\frac{a}{d} + 0.12} + 2.7 \sqrt{Pw \cdot s\sigma_y}$$

ここに、 $c\tau_c$ 、 $c\tau_u$ ⇒せん断亀裂・最大応力度(kg/cm²)、 $\frac{a}{d}$ ⇒せん断スパン比、 $kc=0.754$ 、 $ku=0.811$ 、 $kp=0.975$ 、 Pw ⇒せん断補強筋比、 $s\sigma_y$ ⇒補強筋の降伏点(2.210 kg/cm²)をそれぞれ用いた。

これらの結果で明らかのように、全体的に値の変動が大きい。とくに τ_u/F_c にこの傾向がみられるが、これは最大耐力に至るまでの亀裂発生パターンやSFの配向・分散状態によるものと思われる。図-8の結果を平均的に促えた場合、 τ_c/F_c はSFの種類に関係なく V_f にほぼ比例して上昇し、 $l_f=30mm$ 、 $a/d=1$ 、 $V_f=1\%$ のとき、35%程高くなっている。 a/d の変化については、 $c\tau_c/F_c$ に対しほぼ一定の差で高い値となっており、 Pw との組合せではほとんど変わらない。またSFの長さ変化では30~40mmがほぼ同等で、50mmで大きくなっている。一方 τ_u/F_c では亀裂パターンにより(a)<(b)<(c)の傾向がある。しかしこのパターン決定要因は不明で

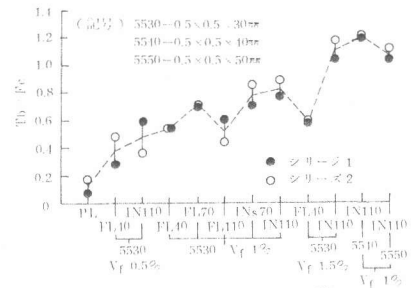


図-6 SFRCの曲げタフネスの比較

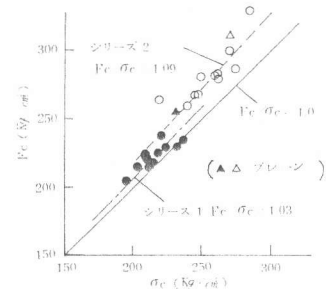


図-7 SFRC圧縮強度の比較

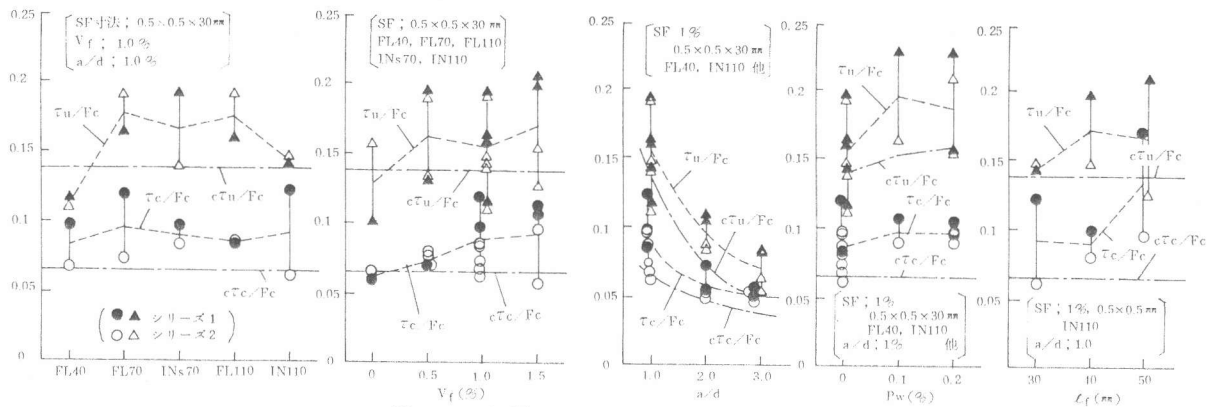


図-8 亀裂および最大応力度の比較

今後の課題である。SFの種類ではFL40の軟いもの、インデントの大きいものに効果の小さい傾向がある。これはSFの曲げ剛性が小さいとダウエル効果を減じるためとみられる。またa/dの変化では τ_c/F_c の場合と同様であり、SFの長さの違いでは40~50mmが30mmよりも大きくなっている。Pwとの組合せではPwによる増加分以上に τ_u/F_c は上昇しており、SFとの相乗効果の可能性がある。

(3) はりのせん断靱性 一般にSFRCにはブレンと異なり高い靱性を有するが、本実験の場合主筋は高強度で太いためダウエル効果が大きく、ブレンのI-0-2と、 V_f 0.5%のII-3-2(いずれも亀裂は(c)パターン)に急激な耐力低下をみるにすぎない。こ

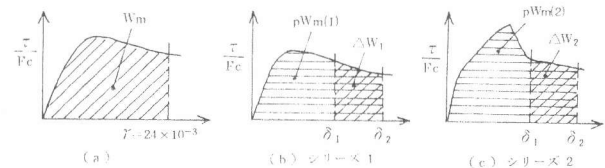


図-9 吸収エネルギーの求め方

では各試験体の靱性評価方法として、図-5の τ - γ 関係から図-9(a)に示す

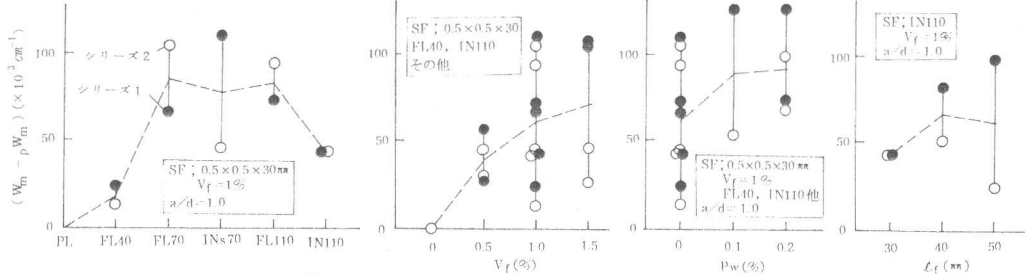


図-10 吸収エネルギーの比較

(ここでは測定

結果の最大値)までの吸収エネルギー(Wm)を求め、ブレン(pWm)の場合との差で比較することにした。その際基準となるpWmはシリーズ1と2で亀裂パターンが異なるので、図-9(b),(c)のように ΔW_1 と ΔW_2 の比($\delta_1 = 7.5\text{mm}$, $\delta_2 = 12.5\text{mm}$)をもとに(2)式で補正した。

$$pWm(1) = pWm(2) \cdot \Delta W_1 / \Delta W_2 \quad pWm(2) = pWm(1) \cdot \Delta W_2 / \Delta W_1 \quad (2)$$

また同時に各試験体の亀裂パターンを(a),(b)と(c)に2分し、シリーズごとに(Wm - pWm)を求め、図-10にプロットした。これらの結果ではSFの混入によってWmは τ_u/F_c とほぼ同様の傾向で大きくなるのが判る。ただせん断靱性はSFRCの曲げタフネス(図-6)に比べ、その上昇度合は低くしかもSFの種類で若干異なる。

4. むすび

本実験の結果、次のことが明らかとなった。①SFの種類によるせん断挙動の違いは、部材寸法の効果を割引いたとしても、SFRCの曲げ挙動ほど明確でない。②SFの混入により、せん断亀裂耐力は上昇し、混入率にほぼ比例する。一方最大耐力は亀裂発生パターンに支配されるものの、総体的にはかなり上昇し、しかも靱性(部材角約1/40までの吸収エネルギー)は大きく増加する。(謝辞)横浜国大・末永保美教授、同卒論生・中林伸治君他、ならびに足利工大・新藤忠徳講師にご指導・ご協力を得たので謝意を表す。

- (参考文献) 1) 例えば、G.Batson et al; Steel fibre as Shear Reinforcement in Beams, J. of ACI, Oct., 1972
 2) 坂井, 中村; 鋼繊維補強コンクリートにおける鋼繊維の特性と曲げ挙動に関する研究, JCI, FRCシンポ 1984.2
 3) JCI; 繊維補強コンクリートに関する試験方法, 1984.2
 4) 大野, 荒川; 鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗に関する研究, AIJ, 論報 No.66, 1960
 5) 他省略