

正会員 〇兵戸 薫 (東京都土木技術研究所)
 正会員 猪狩 旦夫 (東京都土木技術研究所)
 正会員 関口 幹夫 (東京都土木技術研究所)

1. まえかき

近年、鋼繊維補強コンクリート(以下SFRCと記す)が研究開発され、コンクリート舗装や吹付けコンクリートなどに実用化もされつつある。従来のコンクリートに比べ、SFRCは引張・曲げ・せん断強度など静的諸特性がすぐれているのみならず、衝撃荷重や耐疲労性状など動的特性にもすぐれた性質を有する新しいコンクリート系複合材料である。このSFRCを道路橋床版のように、繰返し荷重や衝撃荷重を受ける部材に適用すれば、その力学的諸特性から、剛性が大きく、疲労などに対する耐久性のすぐれた鉄筋コンクリート部材になると考えられる。しかし、SFRCを鉄筋コンクリート部材に適用した場合の曲げ特性、ひびわれ特性などを論じた報告は少なく、鋼繊維の混入効果は定性化されていない。本報文では、鋼繊維の混入率を変化させた鉄筋コンクリート梁の曲げ破壊試験(Iシリーズ)を行い、その曲げ性状、ひびわれ性状について実験的検討を加えた。また、各種の形状の鋼繊維についても曲げ破壊試験と両引き試験(IIシリーズ)を行い、ひびわれ発生以後の鋼繊維混入効果について定量的な把握を試みた。

2. 実験方法

(1) 使用材料

セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。細・粗骨材とも河川産のものを使用し、粗骨材は最大寸法が15mmとなるように粒度調整した。鋼繊維はアスペクト比がほぼ60となる5種類(A~Eタイプ)を選定した。なお、Iシリーズの実験には、Eタイプだけを使用した。各タイプの形状寸法を表-1に示す。梁供試体と両引き供試体に用いた鉄筋は、降伏点応力 $3,800 \text{ kgf/cm}^2$ のSD30-D16を使用し、スターラップおよび組立筋はSD30-D10を使用した。

(2) SFRCの配合と混合

配合は、W/Cを一定(W/C=52%)とし、スランプが8±2cmとなるように、高性能減水剤の添加量とS/aを調整した。また、各実験シリーズ内では単位水量を一定とした。配合例を表-2に示す。ただし、IIシリーズについては、鋼繊維混入率1.5%だけを示した。

SFRCの混合は、粗骨材、細骨材、セメントを空練りし、水を加えて1分間練混ぜ、その後鋼繊維を手でほぐしながら投入し、3分間混合した。供試体の作製は、型枠にバイブレータをあて、鋼繊維が均一に分散されるように締固めた。

(3) 試験梁の載荷方法

梁供試体の種類と形状寸法を表-3に示す。なお、IIシリーズでは主鉄筋2本のタイプで比較した。載荷方法は、スパン150cmの単純支持とし、1・2サイクルは最大ひびわれ幅0.2mmを上限荷重とした。測定項目は、ひびわれ幅、たわみ、ひびわれ進行状況などである。

表-1 鋼繊維の形状・寸法

種類	記号	形状寸法	mm	製造方法
A	○		φ0.5×30	カット
B	●		0.5×0.5×30	せん断
C	△		0.6×0.35×30	せん断
D	▲		0.5×0.5×30	せん断
E	×		0.25×0.5×25	せん断

表-2 SFRCの配合例

実験シリーズ	配合種別	W/C	S/a	単 位 量 kg/m^3					実測	
				W	C	S	G	Fiber	混入率	スランプ
I	Plain	52	51	194	373	893	852	0	0	9.2
	E0.5	52	60	192	373	1,051	694	39.3	2.98	6.8
	E1.0	52	67	191	373	1,164	569	78.5	4.66	7.8
	E1.5	52	75	190	373	1,294	427	117.8	6.34	9.5
	Plain	52	48	190	365	841	918	0	0	7.0
II	A1.5	52	70	186	365	1,199	518	117.8	6.65	7.3
	B1.5	52	67	186	365	1,148	570	117.8	6.21	8.5
	C1.5	52	68	186	365	1,165	553	117.8	6.58	9.0
	D1.5	52	68	186	365	1,165	553	117.8	6.21	9.0
	E1.5	52	69	186	365	1,182	535	117.8	6.87	7.5

表-3 試験梁の形状・寸法

梁名称	鋼繊維混入率%	主鉄筋本数	断面諸元
PI-2B	0	2	
E0.5-2B	0.5	2	
E1.0-2B	1.0	2	
E1.5-2B	1.5	2	
PI-4B	0	4	
E0.5-4B	0.5	4	
E1.0-4B	1.0	4	
E1.5-4B	1.5	4	

(*) PI-4B 単位 mm

3. 曲げ性状

(1) たわみと剛性

SFRC梁の梁中央におけるたわみと荷重の関係を図-1に示す。PL-2Bは鉄筋比が1.2%と比較的小さな値であるため、ひびわれ発生以後のたわみの増加割合が急激に大きくなる。しかし、鋼繊維を混入することでその割合は減少する。たとえば、E1.0-2Bのたわみ性状がPL-4Bと同等であることから、鋼繊維を混入することは、あたかも鉄筋比を増加したのと同じ効果と有する。このことは、鋼繊維の混入によって曲げ剛性(EI)が増加したことを示すものである。EIの変化は中立軸位置の変化として表わすことができる。図-2は、PL-4BとE1.5-4Bの中立軸の変化を示したものである。これからあきらかのように、鋼繊維の混入によって、梁上縁からの中立軸位置が増加する。終局荷重の60%の荷重で中立軸位置を推定すると、プレーンでは8.7cm、E1.5では10.8cmとなる。

一般のRC梁では、ひびわれが生じるとその断面のコンクリート応力は解放され、引張領域のコンクリートは応力的に意味を持たなくなる。しかし、SFRC梁ではひびわれが生じても、ひびわれをさむコンクリートは鋼繊維で連結され、引張応力が伝達される。このような応力伝達は、鋼繊維とコンクリートマトリックスとの付着力に起因すると考えられる。この応力伝達機構によって、コンクリートの有効断面積は増加し、ひびわれ発生以後の曲げ剛性が大きくなるものと考えられる。

また、この性状は一度0.2mmのひびわれが生じた梁についてもいえる。図-3はひびわれの深さと断面欠損と仮定したときの単位荷重によるたわみと示したものである。ここに、各梁のサイクル目のたわみと荷重の関係から得た単位たわみ量をプロットした。これからも、鋼繊維の混入が梁の有効断面積を増加する働きを有することがわかる。

(2) ひびわれ

ひびわれ発生荷重は、超音波パルス伝播速度の変化でとらえた初期ひびわれ荷重と、目視ひびわれ荷重の2通りの方法で測定した。ひびわれ荷重と鋼繊維混入率の関係を図-4に示す。目視ひびわれ荷重は混入率の増加に伴い大きくなるが、初期ひびわれ荷重は同一鉄筋比であれば大差ない。したがって、鋼繊維がひびわれの発生荷重を抑制する効果は小さいが、初期ひびわれ発生以後、ひびわれが目視で発見されるまでに進展する速度が遅くなる。また、0.2mmのひびわれ幅に達する荷重(P_{0.2})も鋼繊維の混入によって著しく増加する。

とくに、PL-4BのP_{0.2}/P_uが60%であるのに対し、E1.5-4BのP_{0.2}/P_uは90%にも達し、そのときの主鉄筋ひずみは鉄筋の降伏ひずみを上まわっている。一方、SFRC梁のひびわれ分布状況は、写真-1に示すようにその本数が増し、各ひびわれの深さも浅くはっている。

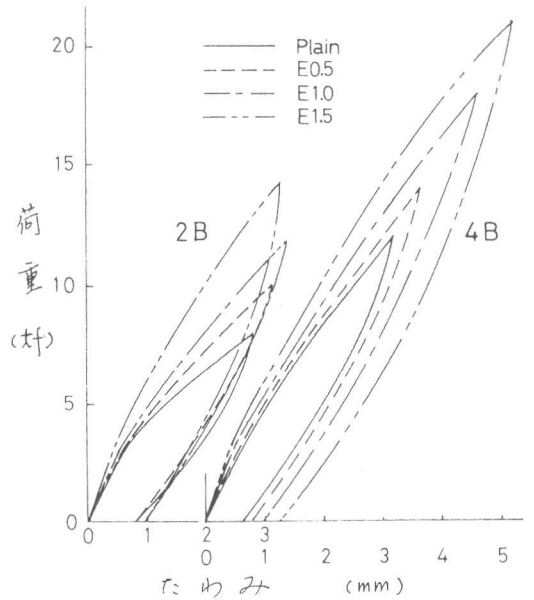


図-1 たわみと荷重の関係 (Iシリーズ)

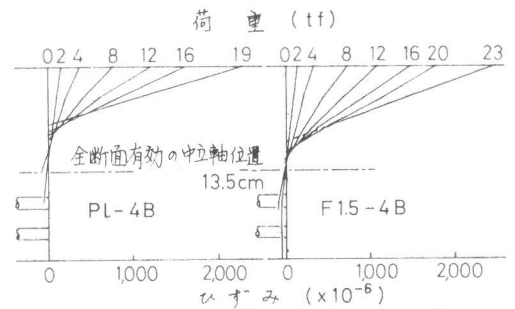


図-2 中立軸の変化 (Iシリーズ)

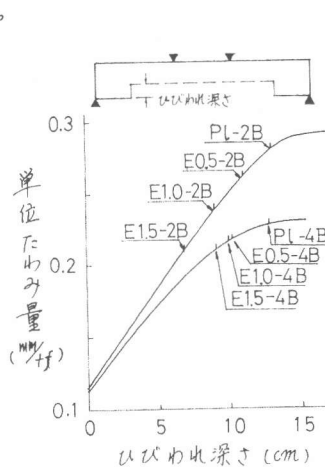


図-3 仮想ひびわれ深さと単位たわみ量

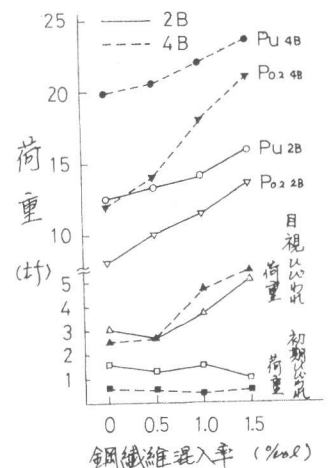


図-4 鋼繊維混入率とひびわれ荷重、破壊荷重 (Iシリーズ)

ひびわれの進展状況の観察から、鋼繊維の混入効果を述べると、目視ひびわれ本数は混入率にかかわらず大差ないが、微視的なひびわれ（アセトン塗布し、その乾燥の差から判定する）本数は混入率の増加に伴って増加し、1.5%の梁では約2倍の本数となる。また、ひびわれの進行が枝分かれ状となり、ひびわれの進展速度は緩慢となる。

曲げスパン内での最大ひびわれ幅と主鉄筋ひずみの関係を図-5に示す。これによると、ある一定の主鉄筋ひずみに達する最大ひびわれ幅は、鋼繊維の混入によって小さくなる。このことから、主鉄筋の許容応力度に対する最大ひびわれ幅は、7°レーンの梁で0.14mmであるのに対し、A, C, Dの鋼繊維を1.5%混入したSFRC梁では0.08~0.10mmとなる。このことは、ひびわれ幅に対して、SFRC梁が7°レーンの梁よりすぐれた安全性を有することを示している。

これらのひびわれ性状から、鋼繊維の混入効果は、ひびわれ幅の増加を抑制する効果とひびわれを分散する効果を持つといえる。この効果によって、個々のひびわれ深さを浅くし、梁上縁からの中立軸位置を深くすることが可能となる。このことが、たわみの項で述べたように、たわみの減少や曲げ剛性の増大をもたらしている。

4. 両引き試験

3. で述べたように、SFRC梁ではひびわれ分散効果が著しい。この効果を定量的に評価するのを目的として、両引き試験を試みた。供試体は5×5×40cmで、その中心に梁と同一形状・品質の鉄筋を配した。表-4に試験結果の一覧を示す。これから、定常状態における平均ひびわれ間隔(l_{sc})は鋼繊維の混入に伴って減少し、7°レーンの51~64%となる。

両引き試験における定常ひびわれ状態の応力分布を図-6の様に仮定する。すなわち、SFRCでひびわれ間隔が小さくなるのは、ひびわれをばらばらコンクリートと鋼繊維が連結し、それによって引張応力が伝達されるためと仮定した。その伝達応力を σ_{ft} とする。一般に l_{sc} は次式で表わせる。

$$l_{sc} = \frac{A_c \sigma_{ct}}{C \cdot u \cdot \tau_{max}} \quad \dots (1) \quad (A_c: \text{コンクリート断面積}, u: \text{鉄筋周長})$$

ここで、 C (τ の分布関数から求まる定数)と τ_{max} (付着強度)は一定と考えると、SFRCの $l_{sc, f}$ は、

$$l_{sc, f} = \frac{A_c (\sigma_{ct, f} - \sigma_{ft})}{C \cdot u \cdot \tau_{max}} \quad \dots (2) \quad (\sigma_{ct, f}: \text{SFRCの引張りひびわれ強度})$$

で表わせる。(2)式に、 $\sigma_{ft} = \alpha \cdot \sigma_{ct, f}$, $\sigma_{ct, f} = \beta \cdot \sigma_{ct}$ とおくと、(2)式は

$$l_{sc, f} = l_{sc} \cdot \beta \cdot (1 - \alpha) \quad \dots (3)$$



写真-1 ひびわれ状況 (Eシリーズ)

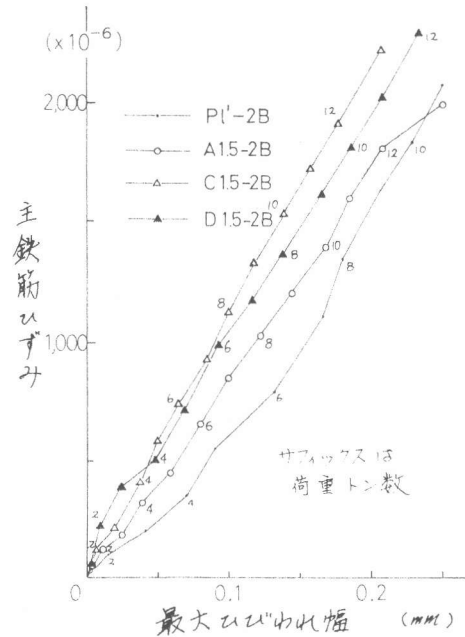


図-5 最大ひびわれ幅と主鉄筋ひずみ (Eシリーズ)

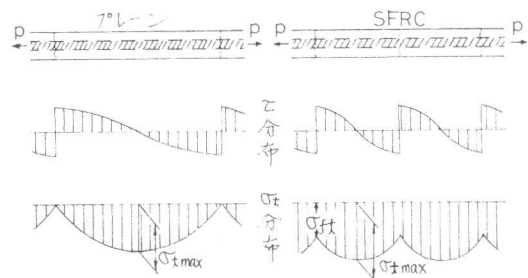


図-6 両引き試験における σ_c, σ_s 分布
 $\sigma_{ft, max} = \sigma_{ct} (\sigma_{ct, f})$ でひびわれを生じる。Pを増加しても $\sigma_{ft, max} < \sigma_{ct} (\sigma_{ct, f})$ であれば定常ひびわれ状態となる。

表-4 両引き試験解析結果

種類	混入率 %	σ_c kgf/cm ²	σ_s kgf/cm ²	β	l_{sc} cm	α	σ_{ft} kgf/cm ²	初期ひびわれ
Plain	0.5	373	32.4	1.022	5.61	0.226	7.32	1.50
	1.0	383	37.0	1.167	4.69	0.434	16.06	1.49
	1.5	396	37.0	1.167	3.59	0.566	20.95	1.49
A	0.5	374	36.6	1.154	6.21	0.242	8.86	1.07
	1.0	387	35.8	1.129	5.43	0.326	11.54	1.07
	1.5	392	38.2	1.205	4.56	0.466	17.81	1.41
B	0.5	362	35.9	1.132	5.82	0.276	9.89	1.32
	1.0	362	32.6	1.028	4.41	0.369	12.90	1.43
	1.5	366	37.5	1.183	3.85	0.541	20.30	1.55
C	0.5	381	33.9	1.069	5.71	0.247	8.36	1.28
	1.0	379	33.0	1.041	4.69	0.365	12.06	1.27
	1.5	371	37.2	1.174	4.51	0.458	17.03	1.44
D	0.5	367	36.4	1.148	6.11	0.250	9.09	1.39
	1.0	373	37.3	1.177	4.95	0.406	15.16	1.50
	1.5	384	38.9	1.227	4.23	0.514	20.01	1.59

と変換される。(3)式に実験定数を代入し、 α, β を求め $\sigma_{ft} (= \alpha\beta\sigma_{ct})$ を求めると、図-7のとおりである。これから、ひびわれ断面には、鋼繊維混入率に比例した σ_{ft} が作用することになる。本実験では、5種類の鋼繊維について行ったが、とくに鋼繊維の形状・寸法による差は認められない。最少目録法によると、鋼繊維混入率1%volあたり、Aタイプは 14.6 kgf/cm^2 、Bは 12.2 kgf/cm^2 、Cは 13.8 kgf/cm^2 、Dは 11.9 kgf/cm^2 、Eは 14.2 kgf/cm^2 の伝達応力をもつと考えられる。

5. 終局荷重

すべての梁は圧縮縁のコンクリートの圧壊による曲げ破壊を起した。また、曲げ破壊状況は、鋼繊維混入率の増加に伴い圧縮領域が深くなり、終局時でも鋼繊維によって中立軸位置が深くなる。終局荷重(P_u)は鋼繊維の混入率に比例して増加し(図-4参照)、1.5%volの混入によって、約2.6tf(71,500kgf・cm)の増加量となる。

SFRC梁の終局モーメント(M_u)はACI基準などの M_u 算定方法に鋼繊維の引抜け抵抗力を付加することで解析できよう。この引抜け抵抗力として、両引き試験で得た σ_{ft} を用いて解析する。終局時の応力とひずみと図-8のように仮定し、 M_u 算定式を

$$M_u = A_s \sigma_{sy} \left(d - \frac{a}{2}\right) + \sigma_{ft} b (h - e) \left(\frac{h + e - a}{2}\right) \quad \text{---- (3)}$$

といた。一方、力の釣合式

$$0.85 \sigma_c a b = A_s \sigma_{sy} + \sigma_{ft} b (h - e) \quad \text{---- (4)}$$

に、 $e = \frac{\sigma_{ct} f / E_c + 0.003}{0.003} x$ と $a = kx$

(k はACI 318-71による)を代入し

e と a を求め、(3)式によって終局モーメントを算定した。結果を表-5に示す。この結果、実験値と算定値の比($P_{u \text{ test}} / P_{u \text{ calc}}$)はすべて1以上であり、実用的には(3)式を用いて M_u を算定し得ると思われる。

一方、鋼繊維を1.5%vol混入したI, IIシリーズの梁をプレーンの梁と比較すると(2Bのグループ)、計算値では平均2.8tf増加するのに対し、実験値では2.6tfの増加となり、(3)式の右辺第2項に示される鋼繊維による付加モーメント量は実験値と良く整合している。ただし、鋼繊維による付加量は、 σ_{ft} に大きく影響を受けるため、 σ_{ft} を適切に決定する必要がある。この点からも、SFRCの両引き試験が重要な意味をもち、 σ_{ft} の値は、ひびわれ発生後のSFRCを論じるうえで重要なファクターとなる。

6. あとがき

SFRCをRC構造物の曲げ部材に適用した場合、鋼繊維の混入効果は次に示すとおりである。

- ① たわみ量の減少が可能で、曲げ剛性が増大する。
- ② ひびわれ幅の拡大を抑制でき、ひびわれ間隔が小さく、ひびわれを分散できる。
- ③ 終局耐力を増加することが可能である。

これらの効果のなかでも、最も顕著な点は②の効果である。このことから、SFRCをRC部材に用いれば、高張力鋼の使用やひびわれ幅に対する主鉄筋の許容応力を低減することが可能となり、剛性の大きな部材となるであろう。今後、SFRCの耐疲労性能やタフネス、耐せん断性能などについても明らかにする必要がある。

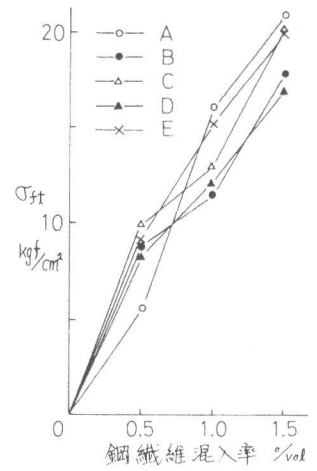


図-7 鋼繊維混入率と σ_{ft}

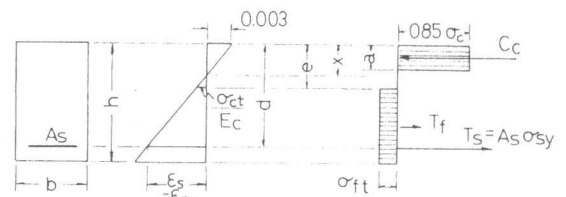


図-8 終局荷重時の応力・ひずみモデル

表-5 終局荷重算定結果

実験シリーズ	梁名称	鋼繊維混入率 %vol	σ_c kgf/cm ²	σ_{ct} kgf/cm ²	α cm	$h-e$ cm	M_u calc kgf・cm	P_u calc tf	P_u test tf	$\frac{P_u \text{ test}}{P_u \text{ calc}}$	
I	PL-2B	0	430	27.3	3.71	—	303,700	10.96	12.6	1.15	
	E0.5-2B	0.5	393	28.1	4.47	20.10	326,900	11.79	13.3	1.13	
	E1.0-2B	1.0	450	31.7	4.63	19.92	355,700	12.84	14.2	1.11	
	E1.5-2B	1.5	488	40.6	4.88	19.46	383,000	13.83	16.0	1.16	
	PL-4B	0	430	27.3	7.41	—	505,500	18.29	19.8	1.08	
	E0.5-4B	0.5	393	28.1	8.27	15.94	516,100	18.68	20.5	1.10	
	E1.0-4B	1.0	450	31.7	8.05	16.16	548,300	19.85	22.1	1.11	
	E1.5-4B	1.5	488	40.6	8.08	15.83	575,200	20.83	23.6	1.13	
	II	PL-2B	0	370	25.6	4.07	—	300,400	10.83	12.6	1.16
		A1.5-2B	1.5	435	31.9	5.23	19.28	380,400	13.74	15.1	1.10
C1.5-2B		1.5	381	29.8	5.55	18.89	370,500	13.38	15.3	1.14	
D1.5-2B		1.5	447	30.1	5.11	19.39	379,600	13.71	14.3	1.04	