

# 論文 長さ60mmの鋼繊維を用いた鋼繊維補強コンクリートの諸性状に関する研究

羽生 賢一\*1 水越 陸視\*2 内田 美生\*3 上東 泰\*4

**要旨**：鋼繊維補強コンクリート (SFRC) において、繊維形状は力学的性能およびフレッシュ性状に大きな影響をおよぼす。本研究では、近年多様化する繊維形状の中から、長さ 60mm の鋼繊維を用い、繊維長さ及び部材形状との関係が、SFRC の諸性状におよぼす影響について、長さ 30mm の繊維と比較することにより検討した。その結果、繊維長さの影響は極めて大きく、耐疲労性状やじん性能の変動が問題となる可能性があることが確認された。

**キーワード**：鋼繊維補強コンクリート、鋼繊維長さ、部材形状、曲げ強度、曲げ疲労強度

## 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート (以下 SFRC) の力学的性能には、コンクリートマトリックスや鋼繊維の力学的性能、鋼繊維混入量のみならず、鋼繊維の配向性が大きく影響する。鋼繊維の配向性に対しては、鋼繊維の形状、打設部の形状、鉄筋の存在、振動締固めの方法や方向が影響し、結果的に鋼繊維の補強効果に異方性が生ずるものと予想される。従って、鋼繊維の補強効果を合理的に利用するためには、繊維の配向性を含めて、その補強効果を定量的に把握することが必要となる。

一方、SFRC は従来長さ 25~40mm 程度の鋼繊維が使用されてきたが、近年鋼繊維長さを 50~60mm と長尺化した鋼繊維の使用が増加しつつある。この種の鋼繊維を薄層で使用した場合、繊維は 2 次的に配向する傾向を示し、曲げ強度や靱性が改善され、使用鋼繊維量を低減することが期待できる。同時に、鋼繊維の形状が変化することで、SFRC のフレッシュ性状に影響を及ぼすことも予想される。

本研究では、部材形状に応じた合理的な設計方法を確立することを最終的な目標とし、鋼繊維長さ (以下 SF 長さ) や単位鋼繊維量 (同 SF 量) に着目し、SFRC の配合および力学的性状

に関して基礎的な検討を行った。さらに、SFRC の適用事例を考慮して作製した供試体で、疲労性状を含めた力学的性状を確認した。本稿では、これらの検討結果について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。ここで超速硬セメントを使用したのは、鋼繊維との付着性能が高く、繊維自身の性能が換算曲げ強度等の曲げ性能の差として現われ易いこと、および SFRC の適用例として採り上げた上面増厚工法で使用されるケースが多いことを考慮したためである。また、長さ以外の影響因子を排除するため、30,60mm とも同一断面、引張強度の鋼繊維を使用した。

表-1 使用材料

セメント	超速硬セメント $\rho=3.04$
水	水道水
細骨材	陸砂 $\rho=2.51, FM=2.37$
粗骨材 (Gmax20mm)	碎石 $\rho=2.73, FM=6.69$
粗骨材 (Gmax40mm)	碎石 $\rho=2.67, FM=7.27$
鋼繊維 : A	$\phi 0.8 \times 30\text{mm}$ $\rho=7.85$
鋼繊維 : B	$\phi 0.8 \times 60\text{mm}$ $\rho=7.85$
高性能減水剤	ナフレンスルホン酸塩系
凝結遅延剤	専用凝結遅延剤

### 2.2 検討因子と実験手順

\*1 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 研究員 (正会員)

\*2 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 研究員 工修 (正会員)

\*3 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 副主任研究員 工博 (正会員)

\*4 日本道路公団 試験研究所 主任研究員 (正会員)

今回の検討では、後述する上面増厚工法で標準的に使用される SF 長さ 30mm、粗骨材最大寸法（以下 Gmax）20mm、スランプ 5cm、鋼繊維量 100kg/m<sup>3</sup> とした鋼繊維補強超硬コンクリートを評価の基準とした。

検討の手順を図-1 に示す。検討因子は表-2 に示すとおりで、SF 長さを 30mm から 60mm に変更し、これに応じて SF 量を変化させ、各 SF 量毎の最適配合を決定した。

次いで、SF 量、SF 長さおよび Gmax と静的曲げ性能との関係について検討した。曲げ試験は 10×10×40cm の供試体を用い、スランプ 30cm で実施したが、SF 長さ 30mm と 60mm では、供試体形状と SF 長さとの関係で、鋼繊維の配向状態が異なることが予想されたため<sup>2)</sup>、SF 長さ 60mm に対しては、20×20×80cm の供試体（スランプ 60mm）も使用した。同時に配向係数<sup>2)</sup>も一部の供試体で測定した。試験は JCI SF-4 「曲げ強度および曲げタフネス試験」に準じ、材齢 7 日で実施した。また、鋼繊維の混入による補強効果は SF 長さ と Gmax の影響を受ける。このため、SF 長さを 60mm とした場合の一部の供試体では Gmax を 20mm から 40mm とし、その影響を把握することとした。

長さ 60mm の鋼繊維を用いた場合、その配向性状による改善効果はより薄層で施工された場合に生じ易いと考えられる。このため、SFRC

の適用例として「上面増厚工法」を採り上げ、同工法で想定される施工形状（厚さ 6～10cm、無限平面）における曲げ性状に対する鋼繊維長さの影響について検討を加えた。ここでは表-2 に基づき、同工法の締固め装置を模した表面振動機で作製した供試体を用いて、曲げ試験を実施し、SF 長さ 30mm、SF 量 100kg/m<sup>3</sup> の場合と同等の静的曲げ性能を得られる SF 長さ 60mm の場合の SF 量を決定した。この時、供試体は、幅 40cm×長さ 60cm で作製し、厚さは 60mm、100mm の 2 種類とした。この供試体の両側面を切断し、幅 20cm として、側版の影響を排除した。曲げ試験は、スランプ 45cm の 3 等分点荷重とし、材齢 7 日で実施した。

最後に、ほぼ同等の静的曲げ性能を有する SF 長さ 30mm および SF 長さ 60mm の SFRC で両者の曲げ疲労性状を比較した。供試体は前述の表面振動機を用いて、幅 50cm×長さ 60cm×厚さ 6cm に成形し、両側面を 10cm ずつ切断し、幅 30cm とした。疲労試験には、動的能力 50tf の油圧式サーボ試験機を用い、試験開始材齢は SFRC の強度増進の影響が小さくなる 7 日以降とした。なお、静的試験と疲労試験で供試体の幅が異なるのは、使用する試験装置の能力を勘案して、決定したものである。

疲労試験時の基本的な設定条件は、表-3 に示すとおりであるが、上限荷重に関しては静的曲げ強度に対する比率で設定し、各シリーズ毎の静的曲げ強度の平均値を基に決定した。

表-2 検討因子

		単位鋼繊維量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		100	80	60	40
繊維長 (mm)	60	○	○	○	○
	30	○			

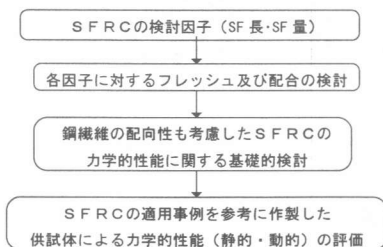


図-1 検討手順

表-3 疲労試験の設定条件

波形	サイン波
周波数	5 Hz
下限荷重	3.92kN
上限荷重	静的強度の50～90%となる荷重
繰り返し回数	200万回

### 3. フレッシュコンクリートの諸性状への影響評価

図-2 には、スランプ 5cm となる SFRC の単位水量および最適細骨材率と SF 量との関係を示す。図より、SF 量 100kg/m<sup>3</sup> で SF 長さを 60mm とした場合、30mm に対し単位水量で 20kg/m<sup>3</sup>、

最適細骨材率で10%程度増加する。

しかしながら、SF長さ60mmの場合であっても、SF量の増減に対して、単位水量・最適細骨材率はほぼ直線的に変化する傾向を示す。このことから、SF長さ60mmの場合、SF量を50~60kg/m<sup>3</sup>程度もしくはそれ以下に設定すれば、SF長さ30mm、SF量100kg/m<sup>3</sup>とほぼ同等の配合を選定することが可能であると言える。

表-4には、今回選定した示方配合を示す。後述する検討では、下記の配合を基に供試体を作製し、試験を実施した。

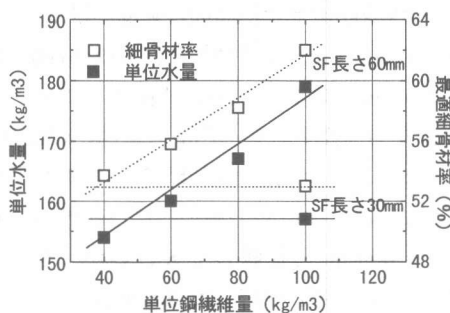


図-2 単位水量および最適細骨材率とSF量の関係

表-4 各検討因子に対する選定配合

No	SF長	SF量	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					Add (cx%)
					C	W	S	G	SF	
1		100		62.0	459	179	979	653	100	2.5
2	60	80		58.2	428	167	955	746	80	
3		60	39	55.8	410	160	937	807	60	
4		40		53.7	395	154	920	863	40	
5	30	100		53.0	403	157	891	859	100	

※Add: 高性能減水剤

#### 4. 繊維長さの異なるSFRCに関する試験結果

図-3には、標準供試体(10×10×40cm)でのSF量と曲げおよび換算曲げ強度との関係を示す。図より、SF量100kg/m<sup>3</sup>で比較した場合、SF長さを30mmから60mmに変更することで、曲げ強度および換算曲げ強度は改善される。また、SF長さ60mmの場合であっても、一般的な鋼繊維と同様、SF量の増加に伴い曲げ強度は改善される傾向を示す。この試験結果のみから判断すれば、SF長さ60mmの場合、

SF量を40~60kg/m<sup>3</sup>程度に設定すれば、SF長さ30mm、SF量100kg/m<sup>3</sup>と同等の曲げ強度および換算曲げ強度を期待することが可能となる。

さらに、図にはSF長さを60mmとし、供試体の断面を20×20cmとした場合の試験結果を併記した。図より、供試体の断面寸法を変更することで、曲げ強度および換算曲げ強度は大きく低下することが明らかである。このケースではSF長さを60mmとした場合、SF量を100kg/m<sup>3</sup>としても、SF長さ30mmでの標準供試体の試験結果よりも、低い曲げ強度、換算曲げ強度しか得ることができなかった。

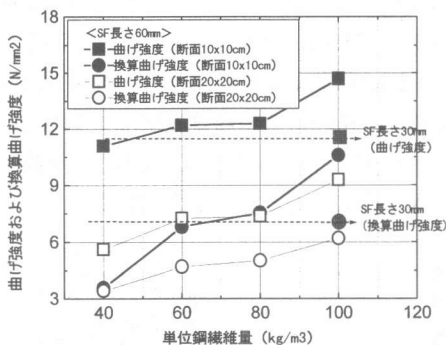


図-3 SF量・SF長さで曲げおよび換算曲げ強度との関係

表-5には、配向係数の測定結果を示す。表より、SF長さ30mm、断面10×10cmの場合とSF長さ60mm、断面20×20cmの場合を比較すると、SF長さ30mmの2次、3次元配向領域(βb, βc)での配向係数が比較的高く、SF長さ60mmで断面形状を拡大しても、30mmと同等の配向状態を得るには至らなかった。しかしながら、各条件における配向係数は、SF

表-5 配向係数の測定結果

断面形状	10×10cm		20×20cm	*供試体物面領域区分	
	SF長さ	60mm	30mm	1/2	L: SF長さ
配向係数	0.821	0.792	0.721	βa	βb
βa領域	0.836	0.843	0.813	βb	βc
βb領域	0.803	0.807	0.745	βa	βb
βc領域	0.781	0.769	0.683		

長さ、断面形状の影響を反映しており、静的曲げ試験結果を裏付けることが出来た。

図-4には、 $G_{max}$ と曲げ強度および換算曲げ強度の関係を示す。図より、供試体断面およびSF長さを $G_{max}$ に対する比率で一定とした場合、 $G_{max}$ を40mmから20mmに低下させることで曲げおよび換算曲げ強度は増加する。

また、 $G_{max}=20\text{mm}$ でSF長さと供試体断面の比率を一定に保ち、SF長さ30mmと60mmを比較した場合、SF長さ60mmの曲げ強度および換算曲げ強度は、30mmに対して若干低下する傾向にある。SFRCでは、SF長さを $G_{max}$ の2.0倍程度に設定した場合、曲げ強度が最大となると言われている<sup>3)</sup>。このことを勘案しつつ、今回の試験結果を考えれば、 $G_{max}=20\text{mm}$ でSF長さ60mmの鋼繊維を使用することは、 $G_{max}=40\text{mm}$ で使用するよりも、若干高い補強効果が期待できるものと思われる。

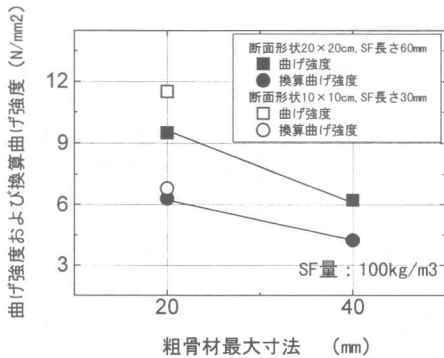


図-4 粗骨材最大寸法と曲げ強度および換算曲げ強度の関係

## 5. 実施工におけるSFRCの断面形状とした場合の曲げ性状の評価

### 5.1 静的曲げ性能

図-5には単位鋼繊維量と曲げ強度および換算曲げ強度との関係を示す。図より、施工厚60mmの場合、SF長さを60mmとすることで曲げ強度は改善される傾向にある。すなわち、SF長さ60mmの場合、SF量を $40\text{kg/m}^3$ 程度とすれば、SF長さ30mm、SF量 $100\text{kg/m}^3$ の場合とほぼ同等の曲げ強度が得られる。また、

換算曲げ強度も同様の傾向を示し、SF量を $40\sim 50\text{kg/m}^3$ 程度で使用すれば30mmの場合とほぼ同等、 $60\text{kg/m}^3$ 以上で使用すればそれ以上の曲げ性能が得られていることがわかる。しかしながら、SF量の増加に伴う曲げ強度の改善程度は、標準供試体の場合と比較して僅少である。この理由は、標準供試体の繊維の配向性は側版の影響により、無限平面が想定される今回の施工部形状に対して高くなるためと考えられる。

また、部材厚100mmの場合、SF長さ60mm、SF量 $40\text{kg/m}^3$ であっても、SF長さ30mm、SF量 $100\text{kg/m}^3$ を上回る曲げ強度が得られる。しかしながら、SF量の増加に伴う改善程度は、施工厚60mmの場合と同様、極めて小さい。また、換算曲げ強度については、SF量 $40\text{kg/m}^3$ 程度でSF長さ30mmとほぼ同等の性能が得られる。さらに、SF量の増加に伴う改善程度も部材厚60mmと比較して大きい、SF量 $100\text{kg/m}^3$ となると頭打ちの傾向を示す。

このように、部材厚により曲げ性状の改善傾向が異なるのは、部材厚さが60mmから

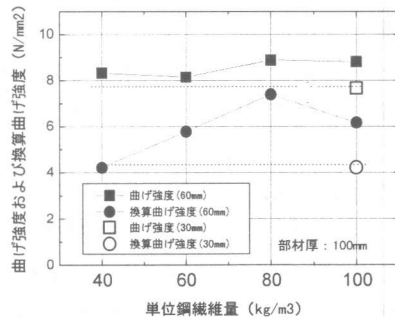
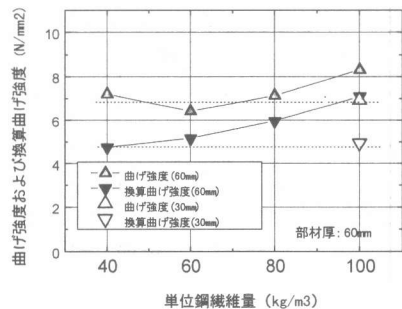


図-5 SF量・SF長さと曲げおよび換算曲げ強度との関係

100mmへ増加した場合、SF長さ30mmよりも60mmの方が、より2次元状態に近い配向状態を示すためと判断される。

図-6には、曲げおよび換算曲げ強度の変動係数とSF量の関係を示す。図より、SF長さを60mmとした場合の曲げ強度の変動係数は、部材厚60mmで2~5%程度、部材厚100mmで2~10%程度と、一部のケースを除いて5%程度に収まる。SF長さ30mm(SF量100kg/m<sup>3</sup>)での変動係数が5%程度であることを考えれば、SF長さを60mmとすることで、曲げ強度が特に大きく変動することは無いと判断できる。

一方、換算曲げ強度の変動係数は、SF長さやSF量により大きく異なる。すなわち、SF長さ30mmの場合の換算曲げ強度の変動係数は5~8%程度であるが、SF長さ60mmでは一部のケースを除き増加する傾向にあることがわかる。特に、SF量の少ない領域(40,60kg/m<sup>3</sup>)での変動係数は著しく増大する。図-7には、この時の換算曲げ強度の分布の状況を、SF長さ30mm

の場合と比較して示す。この図からも、換算曲げ強度が著しく変動している状況が明らかである。これは、SF長さの増加や鋼繊維量の減少により、ひびわれ面に存在する繊維の本数が減少していることに起因するものと判断される。

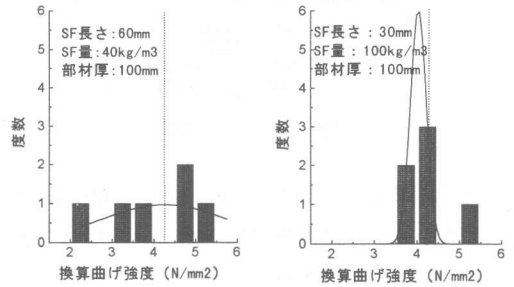


図-7 換算曲げ強度の分布状況の例

### 5. 2 曲げ疲労特性

曲げ疲労試験では、SF長さ60mmでのSF量として、SF長さ30mm(SF量100kg/m<sup>3</sup>)とほぼ同等の静的曲げ性能が得られるSF量60kg/m<sup>3</sup>を選定し、両者の疲労試験を実施した。

表-6には、疲労試験結果の一覧表を示す。また、これらのデータを基に作成したS-N曲線を図-8に示す。なお、図中に表記した非破壊データを除いた直線近似式から、200万回疲労強度を算出すれば、SF長さ30mmでは77.1%であるのに対し、60mmでは64.1%となった。この試験結果より、たとえ静的曲げ強度や換算曲げ

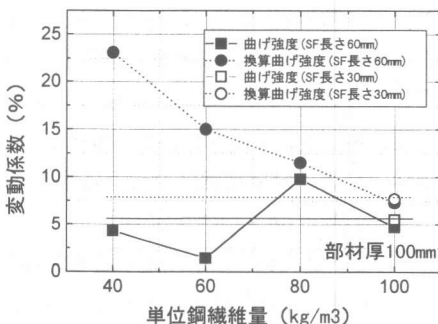
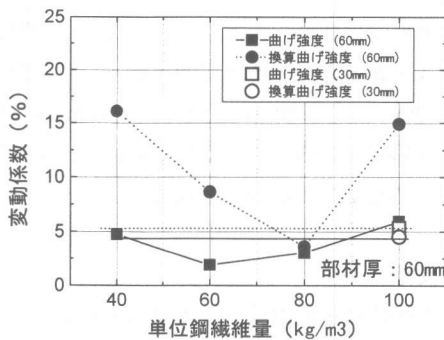


図-6 曲げ強度および換算曲げ強度の変動係数

表-6 疲労試験結果一覧

応力比 s	順序 統計量 r	繊維長さ 60mm		繊維長さ 30mm	
		疲労寿命 N	生存確率 P	疲労寿命 N	生存確率 P
90%	1			1496	0.677
	2			772606	0.333
80%	1	5761	0.750	126892	0.750
	2	6247	0.500	268505	0.500
	3	65988	0.250	612750	0.250
75%	1			544160	0.800
	2			898644	0.600
	3			1880505	0.400
	4			2000000	0.200
70%	1	82292	0.800	2000000	
	2	698586	0.600	2000000	
	3	821342	0.400	2000000	
	4	1332630	0.200		
62.5%	1	420169	0.800		
	2	615029	0.600		
	3	1227750	0.400		
	4	2000000	0.200		
55%	1	2000000			
50%	1	2000000			
	2	2000000			

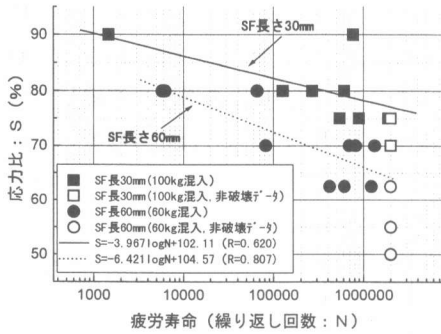


図-8 S-N曲線

強度が同等であっても、SF長さを60mmとした場合の曲げ疲労強度は、30mmの場合と比べて低下するものと考えられる。

疲労試験結果をより適確に評価するため、データ整理手法として、各応力比における繰返し回数の分布を確率過程として取り扱う順序統計量の理論<sup>4)</sup>を用い、応力比毎の生存確率(P)を算出し、平均疲労寿命を求めた。また、200万回で破壊しなかったデータについても、SFRCの1つの特性とし、これらを含めて評価した。

平均疲労寿命と応力比との関係を図-9に示す。この図から200万回疲労強度を算出すると、静的曲げ強度、換算曲げ強度が同等であるにも関わらず、SF長さ30mmで73.2%であるものが、60mmでは62.6%に低下し、結果的には統計処理以前の直線式と同様の傾向が示された。

SFRCの疲労破壊形態は普通コンクリートとは異なり、鋼繊維による優れたエネルギー吸収能力で、弱点部のひび割れ進展は止められ、徐々に破壊が

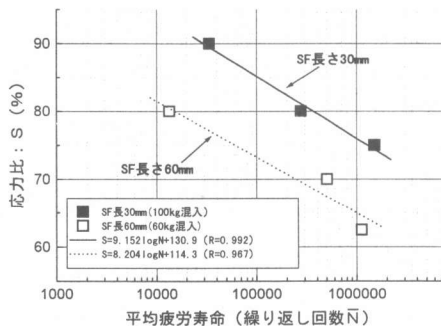


図-9 S-N曲線 (平均疲労寿命)

進行する傾向を示す。従って、SF長さを60mmとした場合、曲げ疲労性能が低下するのは、SF長さを60mmとしたこと、および鋼繊維混入量を低下させたことにより、部材断面内で引張力に対し有効に抵抗する鋼繊維本数が減少するためであると考えられる。このため、ひび割れの進行が阻止される頻度が低下し、破壊が進行するものと推測される。

## 6. 結論

(1) SF長さを30mmから60mmとすることで、SFRCの配合は大きく変動する。配合上の変動や経済性を考慮すれば、長さ30mm、SF量100kg/m<sup>3</sup>に対して、60mmではSF量60kg/m<sup>3</sup>程度もしくはそれ以下で使用することが望ましいものと思われる。

(2) 曲げ性状に関しては、部材形状との兼ね合いで、SF長さを変更した場合の曲げ性状の改善効果は大きく異なる。また、比較的薄層で打設され、長さ60mmの鋼繊維を用いると、30mmと同等の静的曲げ性状が得られていても、換算曲げ強度の変動は大きくなり、同時に曲げ疲労強度は低下する傾向を示す。このため、長さ30mmの鋼繊維に代えて、60mmの鋼繊維を使用する場合には、これらの点を十分に検討する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 峰松敏和・銀山功・松崎邦彦・橋本孔成：超速硬セメントと鋼繊維との付着特性と曲げ性状について、セメント技術年報37, pp.413-416, 1983
- 2) 小林一輔・陸好宏史：繊維の分散と配向を考慮したコンクリート部材の強度と変形、土木学会論文集, No.299, pp.101-112, 1980.7
- 3) 小林一輔著：繊維補強コンクリート特性と応用 - オーム社, pp.84-85, 1981
- 4) 松下博通・徳光善次：生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究、土木学会論文集, No.284, pp.127-138, 1979.4