

鋼繊維補強コンクリートにおけるファイバー性状と補強効果

Reinforcing Effect of SFRC Using Steel Fibers With Various Configulations Produced by Machining.

中川 威雄*・小林 一輔**・内田 貴之***

Takeo NAKAGAWA, Kazusuke KOBAYASHI and Takayuki UCHIDA

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) は、コンクリートの脆弱さを補う複合材料として脚光を浴び、最近、施工例も多くなってきた。¹⁾ 著者らは、SFRC のより広範囲な普及を目指し、切削加工を利用した製造法による切削ファイバーの開発を進めてきたが、最近になってファイバーの製造条件とファイバー特性間の関係もほぼ明らかにされてきた。²⁾ したがって、本報告では、肝心の補強効果について検討するため、今まで試作された種々の切削ファイバーを用いて、ファイバー性状と補強効果の関係を明らかにし、より優れた補強効果を持つファイバーの製造に関する指針をまとめた。³⁾

2. 供試ファイバーの特性

切削ファイバーは、鋼塊を図1のようにフライス平刃で切削し、生じた針状チップをファイバーとする方法である。その断面形状は、基本的には三角形を呈するが、切削条件を変化させることによって、種々の寸法、形状のファイバーを容易に得ることができる。

表1は、本報告で補強効果比較試験に供したファイバーの諸特性をまとめたものである。また、同時に比較の標準として用いた表面凹凸のないストレートなせん断ファイバーの諸元も示した。

3. 補強効果試験方法

SFRC の特性比較の方法として種々のものが提示されているが、ここでは、実用性の点で最も重要であると考えられる曲げ試験によって強化特性を調べた。

表2に示されているような寸法の試験片を用い、3等分2点曲げ載荷法を採用した。曲げ強度の計算は、弾性梁としての公式、 $\sigma_b = M / Z$ を用い、いわゆる Modulus of Rupture を求めた。コンクリートの配合としては、表2に示されているように、SFRCとして一般的なものを用いた。セメントは早強ポルトランドセメント、粗骨材は砕石を用いた。

4. ファイバー性状と補強効果

4.1 製造条件が不適当な切削ファイバー(#1)

ファイバー#1は、切削条件が不適当な場合の例で、表1に示されているように、引張強度が低い。また、曲げ剛性が不十分のため、混練時に折れたファイバーがかなりあったものと思われ、補強効果がせん断ファイバーに比べ劣っている。(図2)

4.2 製造条件が不適当な切削ファイバー(#2)

ファイバー#2は、切削条件自体には問題はなかったが、チップに継目のあるカッターを用いて切削したためほとんどのファイバーに一方所ずつ継目が生じた。したがって、混練時や曲げ負荷時に継目を切欠きとして折れたファイバーが多かったと思われる、このため補強効果が低くなったと考えられる。(図3)

4.3 せん断ファイバーに類似した形状を持つ切削ファイバー(#3)

この結果は、試験方法が他のものと異なり、ヒューム管に鋼繊維を管の円周方向に配向させた場合の圧壊曲げ試験の結果である。ここで用いたファイバー#3は最もせん断ファイバーに近い表面形状をしており、両者間に引張強度の差があるにもかかわらず、互いにはほぼ等しい補強効果の傾向を示している。(図4) このことから、ファイバーが一樣な強度を持っているならば、補強効果はむしろ表面形状に影響を受けるということが予想される。

4.4 表面に波状凹凸が走っている切削ファイバー(#4)

ファイバー#4は、長手方向に対し若干傾いた波状凹凸が走っていることを特徴とするファイバーで(図5)、せん断ファイバーを凌ぐ補強効果を示しており、波状凹凸の存在が補強効果を高めていることが推測される。(図6)

4.5 表面の波状凹凸が強調された切削ファイバー(#5, #6)

図7は、波状凹凸の比較のために、切削ファイバーの表面をSEMにより拡大した写真である。図に示されるように、ファイバー#5および#6の表面には、波状凹凸が深くはっきりと走っている。#4のファイバーに比べ、より高い補強効果が得られており、このことから波状凹凸の存在が有利であることがわかる。#5と#6とで

* 東京大学生産技術研究所 複合材料技術センター, 第2部

** " 第5部

*** " 第2部

表1 補強効果試験に供したファイバーの特性

	切 削 フ ェ イ バ ー						せん断ファイバー	
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	A	B
断面積 A (mm ²)	0.18	0.29	0.25	0.28	0.26	0.23	0.25	0.25
長さ l (mm)	24.9	30.6	29.2	29.2	29.3	32.9	31.2	30.1
アスペクト比 l/d	52.1	50.4	51.8	49.1	57.2	57.6	53.3	53.2
引張強さ (kg/mm ²)	41.2	30.3 (83.7)	87.6	84.8	70.9	72.1	71.6	46.0
断面形状								
特 徴	引張強度が低い ネジレがある	継目がある (内径の異なる部分) の強度	せん断ファイバーに類似	波状凹凸がある	波状凹凸が強調されている 材料が異なる #5はSS41相当 #6は0.04%Cの軟鋼			

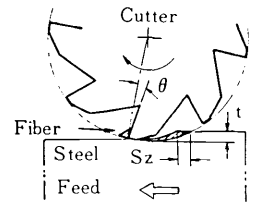
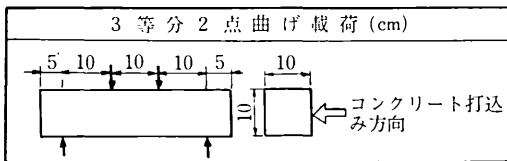


図1 切削ファイバーの製造法

表2 補強効果試験方法とコンクリート配合表



(a) 曲げ試験方法 (4.3の結果を除く)

		単位セメント量 (kg/m ³)	鋼繊維混入量 (kg/m ³)	粗骨材の最大寸法: Gmax=10mm 水セメント比: W/C=0.50 細骨材率: S/a=0.60
鋼繊維混入率 (%)	Vf	1.0	444	
		1.8	480	141
		2.5	510	196

(c) 配合表 (4.2, 4.4の場合)

		細骨材率 S/a (%)	コンクリート 1 m ³ 当り (kg/m ³)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
鋼繊維混入率 (%)	Vf	0.0	190	380	903	935
		1.0	210	420	981	764
		2.0	230	460	1260	388

粗骨材最大寸法 Gmax=15mm
水セメント比 W/C=0.50
スランブ 8 ± 1 cm

(b) 配合表 (4.1, 4.5の場合)

1. 供試体仕様			
内径300mm 管厚30mm 長さ400mm			
2. 配合			
セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	マイティ150 (kg/m ³)
665	1330	242	3.3
3. 外圧試験方法			
JIS A 5303に順じ行う。(5 tonロードセルを使用)			

(d) 4.3の結果の試験方法と配合表

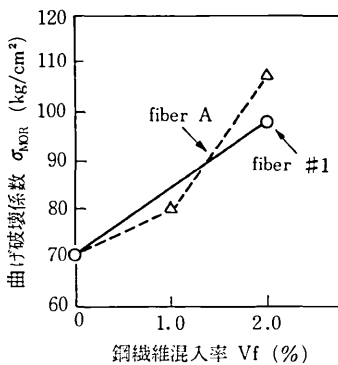


図2 切削ファイバーの補強効果(1)

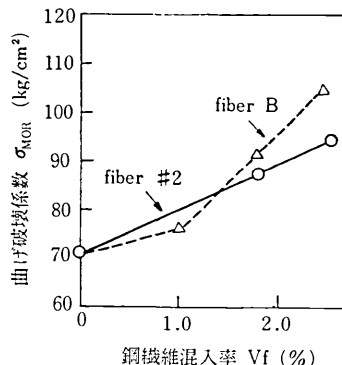


図3 切削ファイバーの補強効果(2)

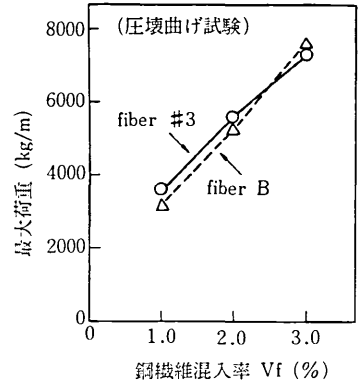


図4 切削ファイバーの補強効果(3)



図5 波状凹凸のあるファイバー(#4)

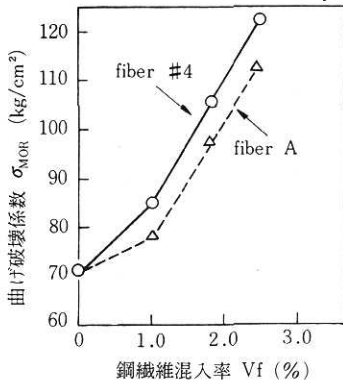


図6 切削ファイバーの補強効果(4)

は、切削条件がほぼ等しいものの、若干の補強効果の差が生じているが、これは、両者の用いた原材料が異なっているため、硬質の材料から得られた#5のファイバーに切削機械剛性不足による性状のばらつきが大きかったのが原因と思われる。(図8)

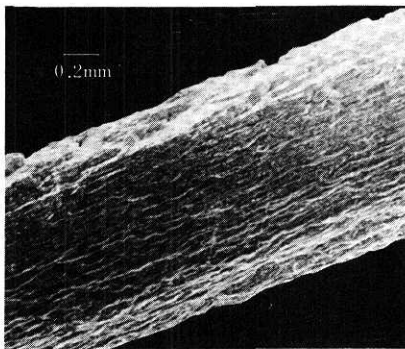
5. 考 察

上で示された結果を順に見ていくと、#を大きくつけたファイバー程、補強効果が大きくなっているのがわかる。こういった補強効果の差異が生じた理由について、ファイバーの特性に基づきながら考察を行った。まず、SFRCの強度特性に大きな影響を及ぼすファイバーの特性としては、

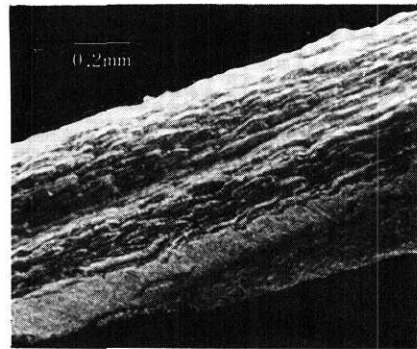
- ① ファイバーの強度特性
 - ② ファイバーの寸法 (アスペクト比等)
 - ③ ファイバーの付着性状
 - ④ ファイバーの分散性
- が挙げられる。したがって、これらの因子それぞれについてまとめを行う。

5.1 切削ファイバーの強度特性

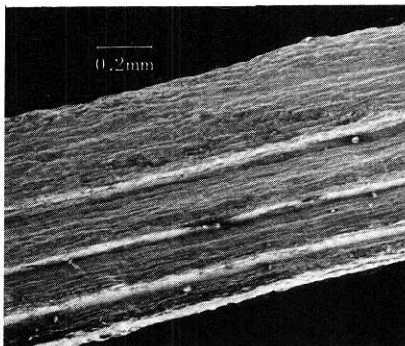
切削ファイバーは、極めて大きな加工硬化を受けているため、引張強度が原材料に比べかなり大きくなっており、せん断ファイバーと同等か、それ以上の強度を示した。しかし、#1のファイバーのように、製造条件が不相当であると引張強度は低くなり、このため良好な補強効果は得られなくなる。特にストレートなせん断ファイバーのように付着力が低い場合には、引張強度が高い必要はないが、良好な切削ファイバーのように付着力が高い



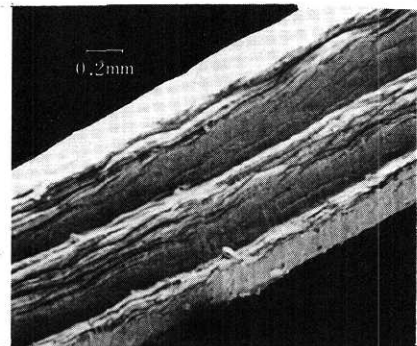
(a) 波状凹凸のない切削ファイバー(#2)



(b) 波状凹凸のある切削ファイバー(#4)



(c) 波状凹凸の強調された切削ファイバー(#5)



(d) 波状凹凸の強調された切削ファイバー(#6)

図7 切削ファイバーの表面形状 (SEM)

ものでは、それに応じてファイバー自体の引張強度も高くなければならない。

5.2 切削ファイバーの寸法

ファイバーのアスペクト比は、補強効果と作業性のかねあいから60付近が最適とされており、切削ファイバーの場合も、その値にほぼ一致するように断面積や長さが決められてきており、寸法による補強効果の影響について特に実験的検討はなされていない。それだけに、この寸法が切削ファイバーにとっても最適であるとは言えないわけで、従来と異なった寸法で優れた補強効果を持つファイバーが得られる可能性もある。すなわち、一般には、アスペクト比を大きくすると、分散の一樣性が極度に失われた状態(例としてファイバーボール)が生じ易くなり、かえって補強効果を低下させることになるが、切削ファイバーでは、十分な曲げ剛性を有しているため2%混入程度ではこの問題は生じない。したがって、切削ファイバーは、引張強さや引抜き抵抗が大きいこととあいまって、より細いファイバーの使用が可能となる。このほかにも、アスペクト比を大きくできれば、ファイバー使用量の減少、作業性の向上、モルタル等への混入など、新たな用途が開発される利点が期待できる。

5.3 切削ファイバーの付着性状

ファイバーの補強特性は、それ自体の付着性状によるところが大きく、従来から付着性状を高めるため、いろいろな工夫がなされてきた。例えば、ファイバーを波状に加工したものや、両端を肥大させたり(図9)、突起を設けたりといったようなことも試みられたが、必ずしも期待されたような効果は得られていない。また、#2のファイバーのように、ノッチがあると、逆に強化能を低下させる原因となる。一方、切削ファイバーの場合は、切削条件を選択すれば、ファイバー表面に数条の凹凸を与えることができる。ファイバーの断面形状と表面積比が図10に示されているが、凹凸の数が増し、起伏が顕著になる程、表面積が増し、補強効果上有利になる。またうねは斜めに走っているので、さらに付着性状を向上さ

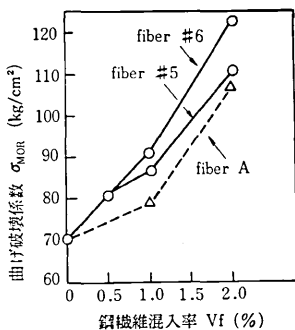
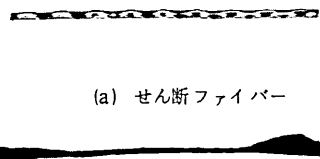


図8 切削ファイバーの補強効果(5)



(b) メルトエクストラクトッドファイバー

図9 他の製造法による異形ファイバー

せているものと思われる。

5.4 切削ファイバーの分散性

図3、図4、図6の結果に共通して言えることであるが、切削ファイバーの場合、ファイバー混入量が増大するにつれて、曲げ強度がほぼ直線的に増大していくのに対し、せん断ファイバーでは、混入量が増していくと急激に強度が増加する傾向がある。これは、ファイバーの配向によるものと考えられる。すなわち、切削ファイバーの方が、3次元的にランダム配向状態になっていることを示すものであると推測される。この特性を有する理由として、切削ファイバーが高い硬度と降伏点をもつことに加え、滑らかな面を片側にもち、その面が若干反っており、滑り易いことがあげられよう。もし、これが確認できれば、ファイバーとして優れた特性を有していることになり、例えば、実用的な鋼繊維の混入率の上限をより高められる可能性も考えられる。

6. おわりに

以上の結果をまとめると、より優れた補強効果を得るには、二つの方針が考えられる。一つは、十分な強度をもつより優れた付着状を持つファイバーを得ることであり、もう一つは優れた分散性を活かすために、切削ファイバーにおける最適アスペクト比を再検討すること、つまり具体的にはより細いファイバーの使用可能性を確認することであろう。(1979年1月13日受理)

参考文献

- 1) 小林ほか, 特集繊維補強コンクリート, コンクリート工学, 15-3, (1977.3)
- 2) 中川, 内田, 鈴木, SFRC用切削ファイバーの製造条件, 生産研究, 31-1, (1979.1)
- 3) 中川, 小林, 内田, 鋼繊維補強コンクリートにおける切削ファイバーの補強効果, 生産研究, 30-5, (1978.5), p.39
- 4) T. Nakagawa, T. Uchida and K. Suzuki, New manufacturing process of steel fiber for reinforced concrete, Proceedings of the Second International Conference on Composite Material, 16-20 May 1978, pp. 189-208

	カットワイヤー	せん断ファイバー	切削ファイバー	
断面形状				
表面積比	1.0	1.2	1.5	1.8

図10 ファイバーの表面積比