

# コンクリート補強用“切削ファイバー”とその経済性

New Steel Fiber for Reinforced Concrete Produced by Machining and its Economical Feasibility

中川 威雄\*・小林 一輔\*\*

Takeo NAKAGAWA and Kazusuke KOBAYASHI

本所複合材料技術センターで生まれたフライス切削法による新しいコンクリート補強用鋼繊維“切削ファイバー”はようやく基礎研究の段階を終り、実用化へと進んでいる。本文では切削ファイバーの特徴とその経済性について概説する。

## 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートもようやく試験施行段階を脱し、本格的な実用段階に達した模様である。我が国で鋼繊維が1973年に市販されて以来、1976年までは2～3百トンにすぎなかった年間使用量が、一昨年には千トンに達し、昨年は2千トンに達するまでの勢いで伸びていると言われる。この技術の開発のきっかけをつくったのは米国であるが、現在は研究開発および実際施工においても、質量共に我が国が欧米諸国をリードしている。<sup>1)</sup>

これは、我が国が山岳・地震国でトンネル・耐震構造物等鋼繊維補強コンクリートの適用分野を多くかかえていることにもよるが、研究機関およびゼネコン各社等の積極的な研究開発の努力のたまものであるといえよう。特に基本素材である鋼繊維の優れたものが、鉄鋼メーカーで開発市販され、容易に入手できることが大きく貢献しているのは見逃せない点である。鋼繊維の品質と供給の点から見れば、我が国で生産されているものは世界的にみても一流品であり、何ら劣る点はないが、需要家側からみれば、価格の問題を含めてより安価で扱い易い鋼繊維が望まれるわけで、“鋼繊維補強コンクリートも良いが、あのように値段が高くては……”とか“もう少し鋼繊維が安ければ使える範囲は飛躍的に増えるのだが……”とか、“鋼繊維をませると、余計な設備や手間がかかって……”といった要望や不満は、関係者ならばしばしば耳にしているはずである。

“切削ファイバー”は、このような需要家の要望に応えるべく、1976年に本所で新たな製造法で作られたものである。<sup>2)</sup> その後の開発研究の結果その優れた諸特性が明らかとなるに至って、まもなく本格的な量産が開始されようとしている。本文では、この新しい鋼繊維補強コンクリート用“切削ファイバー”について、経済性の面をも含めたその特徴を取り上げる。

## 2. これまでに市販されている鋼繊維の種類とその製造法<sup>3)</sup>

鋼繊維補強コンクリートに使われる鋼繊維は、直径0.3～0.6mm、長さは25～40mm程度の寸法を持ち、重さ25～60mgの鋼繊維であり、寸法的にも重量的にも家庭用縫針に近いものである。通常これが容積で1～2%混入されるが、わずか2%でもコンクリート1m<sup>3</sup>中の繊維数は2～3百万本となり、莫大な数の鋼繊維が分散混入されることとなる。このような鋼繊維を製造するには、これまでに3種の方法が考えられたが、鋼繊維の種類とその特性は、その製造法と密接な関係をもっている。

3種の鋼繊維とは、鋼線を切断した“カットワイヤ”と、薄鋼板をせん断した“せん断ファイバー”と、溶鋼より引き出す“メルトエクストラクションファイバー”(MEファイバー)である。このうち主流はなんといってもせん断ファイバーであり、世界的にみてもその使用実績は抜きん出ている。我が国でも現在入手できるのはこのせん断ファイバーのみで表1のように大手鉄鋼4社で量産体制ができています。MEファイバーは、米国バッチル研究所が開発したものであるが、我が国では日本冶金工業(株)が実施権をもち、炉材用のステンレスファイバーがこの方法で生産されている。

せん断ファイバーは、0.25～0.5mm厚の薄鋼板をファイバー長と同じ幅にスリットした後、図1のような回転刃またはプレス機械を使って切りきざんだもので、断面は図2のように正方形または長方形をしている。せん断ファイバーの強度は、原料の薄鋼板の強度に依存するが、付着強度を増すため表面に凹凸をつけることもある。

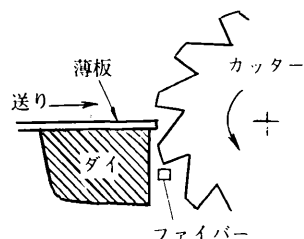
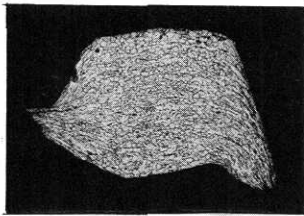


図1 せん断ファイバーの製造法

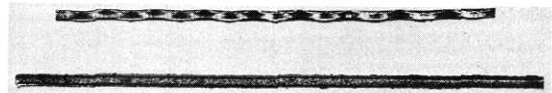
\* 東京大学生産技術研究所 複合材料技術センター、第2部  
\*\* “ ” 第5部

表1 わが国において市販されている鋼繊維の諸元

メーカー	商品名	形状寸法	重量 (mg)	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	備考
サンゴ (日本鋼管)	テスサ (TESUSA)	0.5×0.5×30mm	58	45以上	薄板せん断方法, 形状はストレート
イケダ鋼板 (住友金属工業)	ISファイバー	0.25×0.5×25mm	24	78以上	薄板せん断方法, 形状は波形異形
川崎製鉄	ファイバークリート	0.5×0.5×30mm	59	53以上	薄板せん断方法, 形状は端部波形
新日本製鉄	STIEBER	0.35×0.6×30mm	49	56以上	薄板せん断方法, 形状はストレート
アイダエンジニアリング	CUTファイバー	0.3×1.1×30mm	56	70以上	鋼塊切削方法, 東大生研で開発されたもの
神戸製鋼	シンコーファイバー	0.5φ×30mm 0.5×0.5×30mm	45 58		鋼線切断方法, 表面は異形 薄板せん断方法
日本冶金	NASファイバー	0.4φ×30mm (換算平均直径)	32	(SUS 430)	メルトエクストラクション方法による ステンレスファイバー キャスト耐火物



(a) 断面形状



(b) 外観

図2 せん断ファイバー

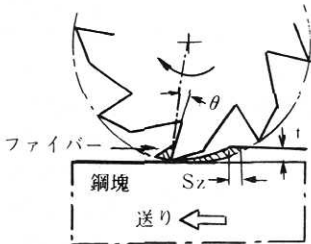


図3 切削ファイバーの製造法

3. 切削ファイバーの製造法<sup>2),4)</sup>

さて、切削ファイバーの製造法であるが、原料としては鋼のスラブまたはイゴットを使用する。これを図3のようにフライス平刃で切削を行い、生ずるチップが鋼繊維となる。したがって、紙面に垂直な方向が繊維軸となる。通常のプロセス切削の条件を多少変更し、例えば切刃のすくい角とねじれ角を少なくすれば切削ファイバーが得られる。切削ファイバーの長さは原料鋼塊の厚さまたはカッター幅で決まるが、生産能率を上げるため多数のカッターを並列にして、同時に多数の繊維を製造することになる。寸法は比較的自由に変わることができ、極めて細い。例えばモルタル用繊維を作ることも容易である。

4. 切削ファイバーの補強効果<sup>5),6)</sup>

鋼繊維補強コンクリートの特徴をひと言で言えば、ひび割れに対する強度が高く、引張り、曲げ、せん断強度

表2 鋼繊維補強コンクリートの諸特性—繊維混入率=せん断ファイバー2%の場合

諸元	ブレンコンクリートとの対比
初期ひびわれ強度	1.5~2.0倍
引張及び曲げ強度	1.5~1.8倍
伸び能力	約2倍
圧縮強度	1.0~1.3倍
せん断強度	1.5~1.8倍
靱性	40~200倍
疲労強度	改善される
耐衝撃性	5~10倍
耐摩耗性	?
耐熱性	著しく改善される
凍結融解作用に対する低抗性	同上

等が改善される点である。表2はせん断ファイバーを使った例であるが、改善の程度が極めて大きいことに特徴がある。特に衝撃強度が高く、靱性のあるコンクリートとなっている。最近の調査結果によると、切削ファイバーの方がせん断ファイバーよりも補強効果が優れていることがわかっている。図4は本所小林研究室での比較例であるが、これによると、切削ファイバーを使った場合の方が曲げ強度はかなり高くなっている。同様な結果は各所で得られており、補強効果が高いことが切削フ

ファイバーの特徴であることがはっきりしてきた。このように切削ファイバーの補強効果が優れている理由として①切削時には、図5に示すように、鋼塊の数十 $\mu$ の表面薄層が三角形断面に束ねられる。そのため、軟鋼を原料にしているにかかわらず、切削時に生ずる大きな塑性変形による加工硬化により繊維強度が高い。

②切削条件を適当に遊ぶと、図6に示すように、繊維を

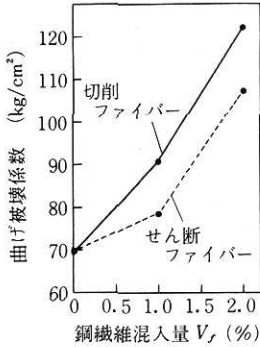


図4 曲げ強度における切削ファイバーとせん断ファイバーの比較

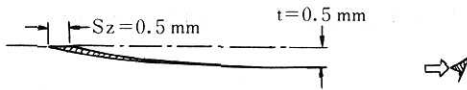
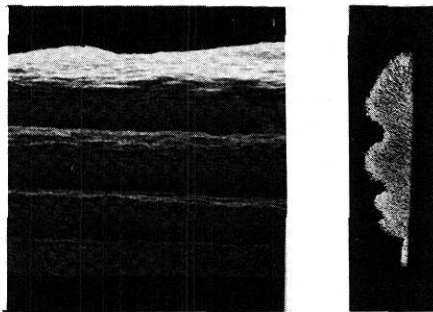


図5 切削ファイバーの製造過程 (左の斜線部がまとめられ右のような断面をもつファイバーとなる)

種類	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	1.8

図6 各種ファイバーの断面形状と表面積比



(a) 外表面 (b) 断面  
図7 切削ファイバーの波状凹凸

薄くしその一面に複数の凹凸をつけることができる。そのため鋼繊維の表面積は増大するが、その値は、円形断面ファイバーに比べて1.8倍、せん断ファイバーに比べて1.5倍の表面積をもつ。

③また、表面の凹凸は、図7のように繊維軸にそって走っているが、この凹凸を軸に多少傾けることができる。鋼繊維補強コンクリートでは、破壊時に繊維が引き抜けることによって靱性が高まることがわかっているが、このように切削ファイバーでの表面積が大きいことと、その表面凹凸が激しいことは、付着力を増し補強効果を高めるのに役立っている。特に表面凹凸が繊維軸にそってしていることによって、他種ファイバーのように意識的につけた表面凹凸により繊維の切断が生ずることも少ない。

④切削ファイバーは、後述するように繊維の分散性が良いため、部分的に弱い個所が生じにくく、混入ファイバーを効率的に使える。

以上のように、繊維の補強効果が高いことは、経済性とは決して無縁ではない。例えば、上述のデータによれば、せん断ファイバー1.5%混入強度は、切削ファイバー1.0%混入強度と対応しており、このことは、混入繊維量を約30%も節約できることを意味する。鋼繊維の高価格が鋼繊維補強コンクリート普及のネックとなっているといわれている現状では、この混入量の節約の意味するところは極めて大きい。さらに、鋼繊維混入量の減少は、施工設備や施工法の簡略化、さらにはセメント量の減少にも結びつき、繊維量節約のみならずその波及経済効果は少なくない。

ここで注意を要する点は、切削ファイバーは製造条件によって、かなり特性の異なる繊維ができる点である。筆者らも経験したことであるが、不適当な製造条件で製造された切削ファイバーでは、前述のような補強効果も期待できないから、場合によってはせん断ファイバーより劣るものもあり得る。

### 5. 切削ファイバーの施工性能

現在使われている鋼繊維の寸法は、補強効果からばかりでなく、施工性の面からも決まっている。つまり、ミキサーで混練したとき、ファイバーボールを作らず均等にコンクリート中に分散できるという条件を満たす必要がある。

また、鋼繊維の混入量が2%を限界とするというのも、価格上昇を抑えることも一つの理由ではあるが、これより増すとファイバーボールの生成をはじめとして、施工性が急速に劣ることが重要な理由となっている。

切削ファイバーの施工性は、これまで使われてきたせん断ファイバーに比べて極めて優れていることが、最近いくつかの現場実験によって明らかとなってきた。

まず第一に挙げられるのは、鋼繊維補強コンクリートの施工における最も重要なチェックポイントを意味する

が、切削ファイバーではファイバーボールを発生しにくい点である。さらに、一般の鋼繊維を用いる場合に必要分散機を切削ファイバーでは必要としないことも明らかにされている。この点は鋼繊維補強コンクリートの施工上の主要な問題点の一つを除去したことを意味する。

一方、ファイバーボールを作りにくいことは、ファイバーの分散性が良いことにも通ずる。分散性は前述のように補強効果にも関係するが、ミキサの繊維混入による負荷の増大も軽減され、混練時間も短縮される。これらのことは施工設備に特別なものを必要としないとか、あるいは簡略化ができるというように設備上の経済性に結びつくほか、労働力および労働量の削減にもなり、その経済効果は少なくはない。

このような切削ファイバーの優れた作業性の特徴は、ファイバーの形状、硬さ、腰の強さ等によるものとみられているが、その理由の詳細についてはまだ明らかにされてはいない。また、切削ファイバーが、加工硬化の故に脆くて混練時や吹き付け時に折損し易いと懸念されていた点は、少なくともこれまでの試験例では問題になっていない。このほか、切削ファイバーはまた、切削熱により高温で空中にさらされ、表面が青い酸化皮膜でおおわれ、いわゆるテンパーカラーがついている。この皮膜は防錆効果があり、その点でも取扱いが簡便となる。

#### 6. 切削ファイバーの製造コスト<sup>9)</sup>

鋼繊維コンクリートの難点のうち最大なもの、現在の繊維価格が高いため適用範囲に限られる点であるといわれている。いずれ鋼繊維の需要増大とともに、量産効果等によって価格は低下すると思われるが、上記のような切削ファイバーも他種ファイバーに比べて高価であれば、せっかく優れた特徴があったとしても、余り意味がなくなる。

元来切削ファイバーは、せん断ファイバーより製造コストが低くなることに着目して開発されたものである。この点ではMEファイバーの製造法も同様の意図で開発されたと聞いている。鋼繊維の製造コストとしては、原料鋼材費と繊維への加工費とその他の費用(こん包、運賃、利益等)の和として考えられる。ここで大きげに量産化(年間千ton程度の規模)した場合の製造コストを試算してみた結果、表3のようになった。

このコスト分析でも明らかなように、製造コストに占める原料費の割合は極めて大きく、各繊維の価格差は原材料コストの差とほぼ一致する。溶鋼、鋼スラブ、薄鋼板、鋼線とゆくに従って、繊維化に必要な加工度は減少し、製造技術上の問題点は減るものの、原材料の加工度が増し、最終製品では高くなる。

その意味で、例えばスクラップの有効利用により、原料鋼の価格を大幅に減少させることが考えられる。溶鋼は元来、スクラップをそのまま利用するものであるが、

表3 各種鋼繊維の製造コストの試算値  
(1トン当たりのコスト、単位:万円)

鋼繊維の種類	原料鋼費	繊維への加工費	その (こん包・運賃・利益等)	合計
① カットワイヤー	12	3	5	20
② せん断ファイバー	9	4*	5	18
③ 切削ファイバー	5	4	5	14
④ MEファイバー	3	4	5	12**

\*スリッティングを含む \*\*年間1万t以上の規模

薄板せん断では、圧延の耳材や、プレスの抜きかすや、スクラップカッターの利用を、切削では、厚板クロップ材や端材を利用することも考えられる。しかしながら、実際生産でこのような繊維の製造に合致した良質のスクラップが、果して大量に入手できるものであるかは疑問である。

#### 7. おわりに

思えば4年前に切削ファイバーの開発にとりかかり、試作品ができるまでの不安、また全くファイバーとはいえない切削屑ができていた時代があり、ようやく今日のようにどこからみても優れた鋼繊維を出現させることができた。これらの結果は、必ずしも開発初期より予想されたところではなく、その後の開発過程で偶然に発見された特性も幸いしている。

また開発初期より研究面で援助いただいた新技術開発事業団、ならびに実用化に当って困難な製造上の諸問題を解決され量産化に成功されたアイダエンジニアリング(株)に負う点も極めて大きい。開発に当たった筆者らとしては、切削ファイバーが安価で良質の鋼繊維の供給の一助となり、鋼繊維補強コンクリートの普及に役立てば幸いであると同時に、今後共、この切削ファイバーをより改善すると共に、より広い応用の可能性を追求したいと考えている。

(1979年1月18日受理)

#### 参考文献

- 1) 小林一輔, 繊維補強コンクリート, 土木施工, 19巻, 4号, (1978.4), p. 90
- 2) T. Nakagawa, K. Suzuki, Production of steel fiber by machining for reinforced concrete, 生産研究, Vol. 28 No 11, (1976.11), p. 44
- 3) 中川威雄, コンクリート工学, コンクリート補強用鋼繊維の種類と製造, コンクリート工学, Vol. 15, No 3, (1977.3), p. 31
- 4) 中川威雄, 内田貴之, 鈴木清, 切削ファイバーの製造条件 生産研究, Vol. 31, No 1, (1979.1), p. 33
- 5) 中川威雄, 小林一輔, 内田貴之, 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, Vol. 30, No 5, (1978.5), p. 197
- 6) 中川威雄, 小林一輔, 内田貴之, 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, 生産研究, Vol. 31 No 3, (1979.3), p. 200