

コンクリート補強用鋼繊維の製造法について

Manufacturing Processes of Steel Fiber for Reinforced Concrete

中川 威雄*

Takeo NAKAGAWA

本格的普及が間近な鋼繊維補強コンクリートに用いられる鋼短繊維について、必要とされる諸性質、各種製造法とその特徴を解説した。特に本所において開発された新しい鋼短繊維“切削ファイバー”については、現在用いられているせん断ファイバーと比較検討を行った。

1. はじめに

最近コンクリートの引張に対する脆弱さを改善する目的で、鋼の短繊維を混入した鋼繊維補強コンクリート(SFRC)が話題となっている。^{1)~3)} 補強されたコンクリートの優れた諸特性が明らかとなるにつれ、その施行技術や用途の開発が盛んに行われるようになったが、同時に強化特性が優れかつ安価な鋼繊維の供給も重要な問題となってきた。鋼繊維としては数種のものがあるが、それらの鋼繊維の諸特性は、その製造法と密接な関係をもつものである。各種鋼繊維の製造法は必ずしも明らかにされてはいないので、筆者の推測を交えながら、各種鋼繊維の製造法と、その諸特性について解説してみたい。

2. 鋼繊維の備えるべき諸条件

2.1 鋼繊維の強度

繊維補強コンクリートでは、図1のように破壊時には繊維が抜け、その引抜き抵抗のために靱性が向上するとされている。繊維が抜ける限りにおいては、鋼繊維の引張強度をむやみに大きくすることは余り意味がないであろう。むしろ、引張強度を高くしても、例えば焼入れたもの、加工硬化の激しいものでは、脆弱過ぎて混合

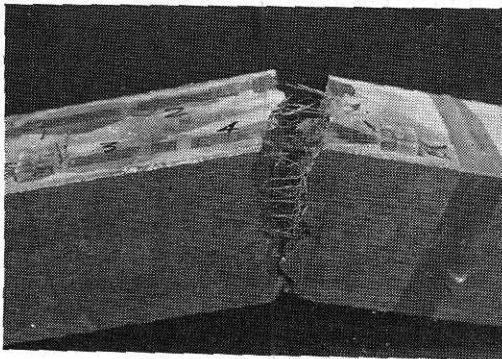


図1 鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊状況
(第5部 小林研究室提供)

時に繊維が折れ、かえって強化特性が劣ることにもなる。従って、混合時に繊維が折れない程度にねばくて強い繊維が最適といわれている。

2.2 鋼繊維の寸法・形状

鋼繊維の寸法は、主としてその強化性能と施工時の作業性によって決まると言ってもよいであろう。例えば、短過ぎるものとか太過ぎるものは強化性能が十分でなく、長過ぎるものや細過ぎるものは混合時にボール状の塊を作ってしまう。適当な寸法は、おおよそ断面積で0.1~0.3mm²、長さ20~40mmの範囲といわれている。

一方、鋼繊維の断面および表面形状は各製造法によりまちまちであるが、鋼繊維の表面積とコンクリートとの付着強度を増すため、余りに薄くしたり細くしたりすると混合時に折れ曲がり易くなるばかりでなく、一般的には高価となる。また表面の凹凸についても、繊維を一方に配向できない場合にはその効果はそれ程期待できないといわれている。

2.3 鋼繊維の価格

鋼繊維はコンクリート中に体積で約2%混入される。例えば、現在生産されている薄板せん断による鋼繊維の価格は1t当り21~28万円といわれており、混入する鋼繊維だけでもコンクリート1m³当り3.3~4.3万円にも達する。この鋼繊維が高価格なるがゆえに、実際の適用範囲も限られ、その普及のネックになっている。鋼繊維の価格が1t当り20万円とすれば、随分と高価な繊維にみられるが、1t中に2,000~4,000万本の繊維が含まれることを考えれば、1本当り、0.5~1銭の価格となる。繊維価格の1/4が鋼材原料より繊維に加工する費用とすれば、繊維1本当り、0.13~0.25銭の加工費しか許されないことになり、相当の高効率の生産方式を採用しなければならない。

3. 鋼繊維の製造法

鋼繊維の製造法としては今のところ4種あり、以下にその製造法の概略を述べる。

3.1 鋼線切断によるカットワイヤー

製造法としては最も単純で、圧延・引抜きされた鋼線

*1 東京大学生産技術研究所 付属複合材料技術センター・
東京大学生産技術研究所 第2部

を刃物で所定の長さに切断するものである。切断はプレスによる往復運動でも可能であるが、能率を上げるため通常は回転刃を使用する。つまり、細いダイス穴より出てきた線材を、線材の軸と平行な回転軸に取り付けられた複数の切刃をもつ回転刃によりせん断する。原料線材は一般に円形断面であるため、切断前に線材送りローラで部分的に圧延して、表面に凹凸をつけることが行われる。また切刃部分に工夫をこらし、繊維両端に引っかかりを生じさせるような切断を行う場合もある。この方法で能率よく生産するには、多数の鋼線を一つの回転刃で同時に切断し、しかも線材の送りをかなり早くしなければならない。また、このカットワイヤーの性質上の特徴としては、冷間引抜き材をそのまま使えるので引張強度が極めて高いことと、原料段階で繊維表面の大部分の表面処理が行えることである。

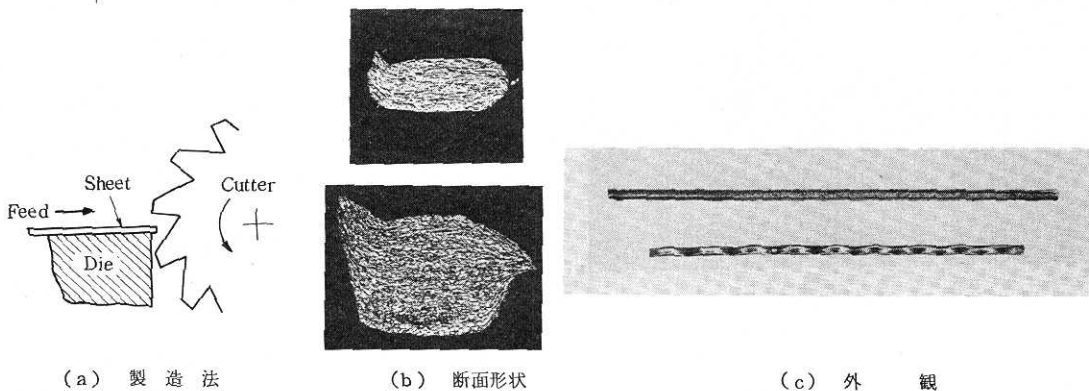
3.2 薄鋼板せん断によるせん断ファイバー

冷延薄鋼板をせん断することによりファイバーを製造するもので、現在国内ではこの種のものが鉄鋼各社で生産販売されている。通常は、ファイバー長さとも一致する幅にあらかじめスリッティングしたコイル材が連続的に送られ、1刃の送り分だけ板厚方向にせん断される。また、このスリッティング工程を省くため、広幅コイルをせん断刃を使って単位カット幅に切断しながら繊維を製造することも行われている。通常のアプレス機械によってせん断される場合もあるが、多くの場合能率を上げるため、図2(a)のように回転刃を使ってせん断されている。この場合、回転刃の軸はカットワイヤーの場合と同様に配置することも可能であるが、通常は薄板の送り方向と直角になるように配置されている。原材料としては焼純した冷延軟鋼板が用いられるが、強度を上げるため未焼鈍冷延材や炭素鋼板を用いることも行われる。また、原料として亜鉛メッキ鋼板を用いれば、耐食性の高い鋼繊維が得られる。一般に板の送り量は板厚以上とするので、図2(b)のように断面形状は正方形または長方形となり、繊維の両側でせん断加工による加工硬化面を持つ。しかし、送り量が板厚以下となると、この形状はか

なりくずれ、板厚の1/2以下となると三角形断面に近いものとなる。また、板厚程度の送りでも、両切刃間のすきま(クリアランス)が大であったり、切刃が摩耗すると大きなバリが生じてひし形に近い形状となる。また、切刃面を相当に傾けてせん断すると、いわゆるシヤ角をつけたせん断となり、ファイバーは多少のわん曲とねじれんを持つ。これらのバリ・変形・ねじれと言ったものは一見形状的に見劣りするが、引抜き低抗を増す効果は期待できる。シヤ角をつけたせん断では加工能率は多少低下するが、刃に対する衝撃は緩和され騒音発生も少なくなる。この方法においても、図2(c)の下のファイバーのように薄板の送り圧延ローラで表面に凹凸をつけたり、両切刃に工夫をこらし、せん断時に繊維両端に引っかかり部を成形したものもある。量産においては、せん断工具の寿命を長くするため、超硬合金製の刃を使用し、また、コイル材を何列も同時に送り、生産能率を上げるというような種々の工夫がこらされている。

3.3 鋼塊切削による切削ファイバー⁴⁾

原材料に鋼のスラブまたはインゴットを用い図3(a)のようにフライス平刃による切削を行い、紙面に垂直な方向の繊維を得るものであり、東京大学生産技術研究所で研究開発が進められている。この繊維はいわゆる切削加工時に生ずる切削屑(チップ)であり、通常のフライス切削条件を多少変更し、例えば切刃のすくい角とねじれ角を少なくすれば鋼繊維が得られる。この方法は図4のように原材料の薄い層を大きなせん断変形を与えて、図3(b)のような三角形断面にもっていくもので、ファイバーはかなり大きな塑性変形を受けており、加工硬化により強さが増すと同時に脆くもなっている。そのため、原材料としては比較的延性の高い軟鋼が適している。切刃は超硬合金製であり、乾式切削が行われるので、切削熱により表面は多少焼けて青味がかかった酸化皮膜で覆われる。この酸化皮膜は繊維の保管中の防錆に役立つ。切削ファイバーの長さは、原料ブロック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原料とカッターを並列して同時に多数の繊維を製造することになる。



(a) 製造法

(b) 断面形状

(c) 外観

図2 せん断ファイバー

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。この繊維は軸方向にねじれをもたせたり、ねじれをもった何条もの凹凸をつけることが可能であり、そのため表面積が大で付着が大きく抜けにくい繊維をつくることのできる。この切削ファイバー製造上の問題点としては、きびしい変形を与えて繊維を作るので、カッター寿命が短いと予想される点である。

3.4 Battelle 方式によるメルトエストラクショナルファイバー (MEファイバー)

このファイバーはアメリカの Battelle Memorial Institute が開発したもので、我が国では日本冶金(株)が実施権を持ち、現在実用化開発が進められている。図5 (a) のように溶鋼の表面に先端がねじ山状になっているディスクを接するように回転させ、ディスクに接し

た溶鋼を瞬間的に凝固させて溶鋼から引き出し、遠心力によりディスクから飛ばす方法である。冷却のためディスクは内部より水冷され、短繊維とするため、ディスクには切欠きが入っている。ディスク先端はとがっている。出来た繊維の断面は図5 (b) のようにやや三日月状となっている。さらに、ディスクの先端及びノッチ部の形状に工夫をこらすことにより、図5 (c) の下のように両端を太くし抜けにくくした繊維を作ることができる。原材料としてはどんな鋼種でも可能であるが、炭素鋼では急冷され焼入れ状態となり、脆くなり過ぎるため後で焼戻し処理をしなければならない。そのために表面は酸化皮膜で覆われている。安定したファイバーを製造するためには、溶鋼の温度と液面高さの正確なコントロールが大切である。量産化に当たっての技術的問題は、溶鋼の温度が1,500~1,600℃にも達するので、長時間

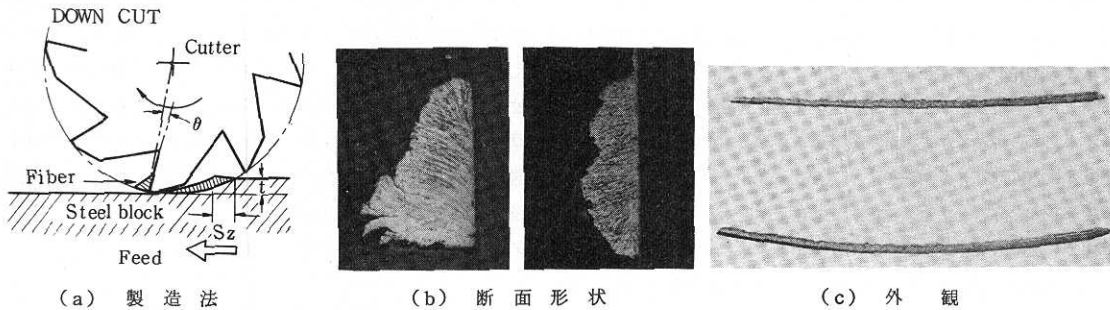


図3 切削ファイバー

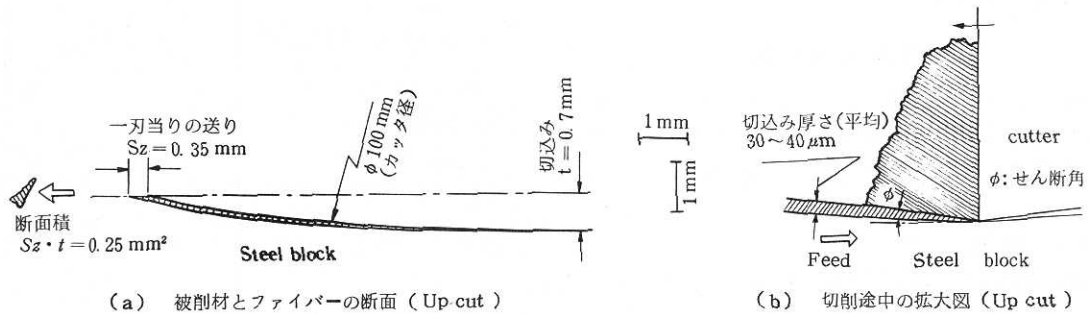


図4 切削ファイバーの製造過程

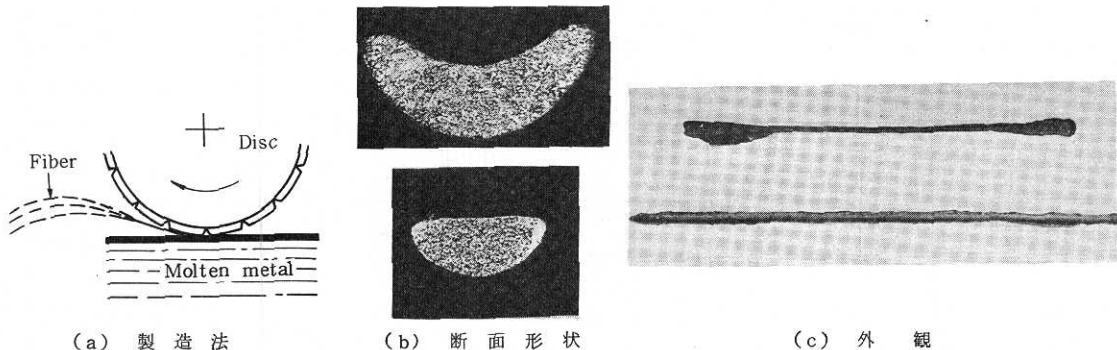


図5 メルトエクストラクションファイバー

の使用に耐える適当な炉材の選択にあると言われている。

4. 鋼繊維の生産の現状

これらの各種鋼繊維の生産の現状は以下の通りである。

4.1 カットワイヤー

大量に使用され比較的安価なタイヤコードに凹凸をつけ切断したものが米国で販売されているといわれるが、その使用量については明らかではない。我国では鉄鋼1社で生産が検討されている。

4.2 せん断ファイバー

米国をはじめ全世界で使用実績のある鋼繊維である。我国でも大手鉄鋼4社で製造販売しており、国内での使用例は全てこのせん断ファイバーと考えてよい。国産のせん断ファイバーは、板厚0.25～0.5mmの鋼コイル材を0.5mm幅にきざんだ長さ25～30mmのものが主体で、引抜け防止のため凹凸をつけたものもある。昭和51年までの国内の使用実績はわずかに数10tであったものが、52年度には急上昇し、1,000t以上と急速に伸びている。

4.3 切削ファイバー

いまだ研究開発中であるが、その優れた強化能と生産コストの低さを生かして企業化が進められている。

4.4 MEファイバー

ステンレスファイバーについてはこの方法で製造販売されているが、コンクリート用鋼繊維については、国内外を含め生産実績はない。製造設備が大がかりなので、当分製造販売される見込みはないが、鋼繊維の大量使用時代が到来すれば再検討される可能性はある。

5. 各種鋼繊維の特徴

鋼繊維を使用する立場からみると、強化能と作業性に関係する繊維の諸性質が優れ、しかも安価に入手できることが重要である。以下に4種の鋼繊維の特徴をまとめ、その生産コストの比較を行った。

5.1 特性

各種鋼繊維のうち、いくつかのものはいまだ開発中

であり、それらの特性も確立していないものもある。しかし、作業性、強化能等には差があるものの、いずれのファイバーもコンクリート補強用として使用可能であることは確かめられている。表1は、各種鋼繊維の特徴をまとめたものである。

5.2 製造コスト

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。ここで大ざっぱに量産化(年間1,000t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2のようになった。このコスト分析でも明らかのように、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、鋼線といくに従って、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、最終製品では高価となる。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、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、実用段階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かは疑問である。

表2 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	その他(こん包・運賃・利益等)	合計
① カットワイヤー	16	3	5	24
② せん断ファイバー	8	4*	5	17
③ 切削ファイバー	5	4	5	14
④ MEファイバー	3	4	5	12**

(注) *スリッピングを含む。 **年間1万t以上の規模

表1 各種鋼繊維の特徴

	基本断面形状	表面形状	抜け防止	表面	強度	問題点
① カットワイヤー	円形	引抜き面	つぶし 折曲げ	脱脂 表面処理可	大	原材料コスト大
② せん断ファイバー	正方形 又は 長方形	圧延面 せん断破壊面	つぶし ねじれ 折曲げ	脱脂 一部表面処理可	45～80kg/㎡ 母材強度に応じて (主として軟鋼)	カッター寿命短
③ 切削ファイバー	三角形 又は 三角薄片状	せん断変形面 凹凸粗面	表面凹凸 ねじれ	酸化皮膜	70～80kg/㎡ 加工硬化大 (軟)	カッター寿命短
④ MEファイバー	三カ月形	凝固面	両端肥大	酸化皮膜	焼戻し処理材 (炭素鋼)	炉材の耐久性

6. 切削ファイバーとせん断ファイバー

以上の考察の如く、各種鋼繊維のうち、現在広く市販されているのはせん断ファイバーであり、これに新たに切削ファイバーが進出しようとしているのが現状であろう。ここでは切削ファイバーについて、せん断ファイバーとの比較において、より詳細に検討をしてみたい。

6.1 ファイバー特性の比較

ファイバー特性としては、コンクリート打込み時の作業性、ファイバー保管中の耐蝕性、および強化能と比較されよう。作業性については、ファイバーの寸法形状と剛性によって決まるといわれているが、いずれのファイバーについても製造条件が適当であれば、問題はないことが確かめられている。しかし、作業性は強化能との関連で検討されるべきで、例えば、細くて薄いせん断ファイバーの一部のものは、強化能は優れていても、作業性がやや劣るといわれている。また、耐蝕性については、せん断ファイバーが圧延油を脱脂してさび易いものに対し、切削ファイバーは薄い酸化膜に覆われさびにくい利点があるといわれている。強化能に影響を与える因子として、ファイバー強度に関しては、せん断ファイバーは母材強度を上げることに、かなり高くできるが、それと共にカッタ寿命は短縮する。しかしながら、異形断面のファイバーを除いては、コンクリート破壊時にファイバーは抜けており、軟鋼でも十分の強度をもっているといえよう。切削ファイバーに関しては、加工硬化により $70\sim 80\text{ kg}/\text{mm}^2$ の強度が出るので、軟鋼を原料としても十分である。附着性に影響を与える因子としては、ファイバーの表面形状をあげることができよう。この点に関しては、図6のように表面に適度の凹凸があり、しかも表面積も大である切削ファイバーの方が優れているはずである。最近行われた強化能の比較試験では、切削ファイバーの一部のものが、せん断ファイバーよりかなり優れた強化能を示しているのは、このような理由によるものと考えられる。

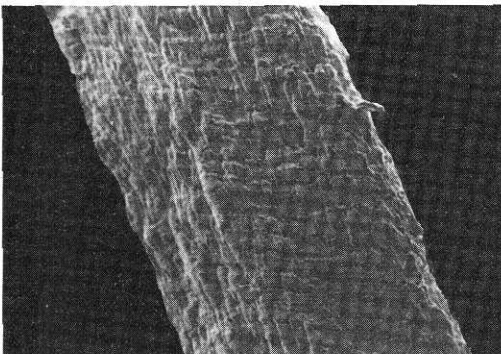


図6 切削ファイバーの表面拡大写真
(断面積 0.26 mm^2)

6.2 生産コストの比較

a 生産速度の比較：せん断ファイバーも切削ファイバーも回転刃を使用するため、両者の比較は容易にできる。両者共歯数 $Z=20$ 、回転数 $N=250\text{ rpm}$ で行えば、毎分5,000本、毎時間30万本の生産が可能である。1日5時間の稼動で90kg、10時間稼動で180kgであるが、これを10連の設備で行えば、 $900\sim 1,800\text{ kg}/\text{day}$ の生産が見込まれる。つまり、1日、 $1\sim 2\text{ t}$ の生産能力、つまり、年間 $200\sim 400\text{ t}$ の生産量が見込まれる。この条件下の切削の場合、 200ϕ のカッタを用いれば切削速度は約 $150\text{ m}/\text{min}$ となるが、切削速度を2倍にすることができれば生産速度はこの2倍となる。この条件下の生産は両ファイバー共可能のようであり、その意味で両者の生産速度には大差ないと思われる。

b 生産コストの比較：鋼繊維の製造コストに占める包装、運賃の割合が大きいことはよく知られている。しかし、これは全てのファイバーで共通するものであり、純粹にせん断費と切削費で比較すると、その内訳は、工具費、人件費、償却費となる。この内、両者共自動化された機械を使用するので人件費は等しいものとして、残るは工具費と設備の償却費である。aで述べた条件下での切削ファイバーの生産設備は $2,000\sim 3,000$ 万円と考えられるが、せん断ファイバーがこれより大幅に安くなる見込みはなさそうである。この償却費は、切削ファイバー1t当り1万円程度であろう。一方、工具費に関しては、まだ正確な工具寿命が明らかとなっていないのであるが、安全をみて切削ファイバー1t当り、2万円をみておけば十分と考えられる。せん断ファイバーの工具費が、もし切削ファイバーの半分とすれば、設備償却費を含めても、高々1t当り、1万5千円だけせん断ファイバーの方が有利となる。この有利さは、ちょうどコイル材をスリットする費用と、圧延油を洗う脱脂処理費に相当し、両者の生産コストの差はほとんどないものと考えられる。

c ファイバーの価格：上記の両ファイバーの生産コストは、人件費、償却費、工具費、その他の管理費を含めて(せん断ファイバーの場合はスリッピング費用も含めて)、1t当り5万円程度となろう。この見積り価格は、米国産せん断ファイバーが約 $12\text{ 万円}/\text{t}$ で出荷されていることからみて妥当なものとする。これらの見積りは、年間の生産を 400 t 程度を基準としたものであり、生産量の増加と、加工技術の進歩によりあと $1\sim 2$ 万円/tの合理化は不可能ではないと考えている。したがって、せん断ファイバーと切削ファイバーを比較する上で、両者の価格は主として使用する原料鋼材の価格にあり、安価な鋼スラブまたはインゴットが原料となる切削ファイバーの方がその分だけ有利と考えられる。ファイバー価格を低下させるには、このように安価な原料を

入手することが重要であることは勿論であるが、梱包・輸送費の占める割合が大きいことを考えれば、今後はこのあたりの合理化が課題となろう。

7. おわりに

鋼繊維補強コンクリートも、ようやく試験使用段階を脱して本格的普及段階に入ろうとしている。いうまでもなく、周りを海にとり囲まれて地震の多い山国である我国では、海洋構築物、耐震構築物およびトンネルと鋼繊維補強コンクリートの用途は広い。現在のコンクリートの0.1%に使用されるとしても、年間10万tの鋼繊維の供給を必要とするといわれている。切削ファイバーの開発を手がけている著者としては、そのような発展を期待すると共に、安価で高品質のファイバーの製造技術確立

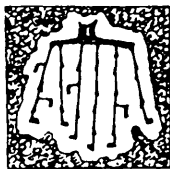
に向って努力を続けたいと思っている。

おわりに本文を草するに当り、貴重な資料や情報をい教示いただいた、本所第5部小林一輔教授に厚くお礼申し上げます。

(1977年12月27日受理)

参考文献

- 1) 小林一輔, 繊維補強コンクリート, コンクリート工学 Vol. 13, No. 8, (1975, 8,) P. 21
- 2) 小林一輔 ほか, 特集繊維補強コンクリート, コンクリート工学, Vol. 15, No. 3, (1977, 3.)
- 3) 日本コンクリート工学協会, 鋼繊維補強コンクリートに関するシンポジウム発表報文集, (1977, 11)
- 4) T. Nakagawa and K. Suzuki, Production of steel fiber by machining for reinforced concrete, 生産研究, Vol. 28 No. 11, (1976, 11,) P. 44



東京大学生産技術研究所報告刊行予告

第27巻 第2号 (和文)

大野進一著

円筒研削における自励振動の研究

本報告は円筒研削における自励振動についての実験的および理論的な研究の結果を述べたものである。研削加工においては、旋削加工などの場合とは異なり、自励振動の存在自体が必ずしも明白ではないので、はじめに2台の円筒研削盤を用いて実験的に研究を進め、その結果、円筒研削加工においては、加工物速度を大きくし、切込みまたは切込送りを小さくし、さらにトラバース研削では送りを砥石幅に較べて小さくすると、振幅の大きい振動が発生することを見出し、いくつかの特徴からこの振動が自励振動であると結論づけている。理論的研究に当っては、研削機構に関する考察に基づき、振動中の研削抵抗は単位時間当りの加工体積に比例すると仮定して振動の発生機構と発生条件について解析を進め、理論的解析の結果は実験的に得られた結果と本質的に一致すると述べている。

(1978年3月発行予定)