

UDC 666.983

# 鋼繊維補強コンクリート

—新しい省資源志向型複合材料—

Fiber Reinforced Concrete

— A New Resourcesaving Composite Material —

小林 一 輔\*

Kazusuke KOBAYASHI

鋼繊維補強コンクリートは、従来のコンクリートの脆性材料としての弱点を克服し、靱性を著しく高めた複合材料であって、最近我国においてはトンネル、舗装・橋梁・住宅などの分野における利用が目立っており、また耐震構造物や防爆構造物への適用も検討され初めている。本文では鋼繊維補強コンクリートが強化系複合材料としての特性を有しているのみでなく、省資源志向型複合材料としての機能をも有していることを、トンネルその他の構造物に適用する場合を例にとりて解説する。

## 1. は し が き

我国においてコンクリート補強用鋼繊維が市販されてから今年ちょうど5年目に当る。この間に鋼繊維補強コンクリートの開発研究は急ピッチで進展し、同時に鋼繊維の製造技術も長足の進歩をとげた。適用対象も舗装、橋梁、ダム、トンネル、キャストブル耐火物、コンクリート工場製品などのほか、仕上げモルタルや間仕切壁、耐火・遮音壁など建築の分野にも拡大しつつある。とくにトンネルのライニングに関しては鋼繊維補強コンクリートが極めて効果的に適用できる対象であることが明らかになっており、すでに補修・補強工事には適用例があるが、最近では軟弱地盤を通過する鉄道トンネルなどの施工を当初から鋼繊維補強コンクリートによって実施しようとする機運が高まりつつある。鋼繊維補強コンクリートを用いてトンネルのライニングを行うとその厚さを大幅に減じることが可能となるが、このことは単に省資源につながるのみでなく掘削断面の減少をとまうので省エネルギーともなり、工期の短縮とあいまって施工費が著しく安くなるという経済効果を生み出すのである。

鋼繊維補強コンクリートが上述のように急速に実用化段階に入った理由の第一は従来のコンクリートでは全く期待できなかったすぐれた特性と構造材料としての応用の自由度が大きいという点にある。

## 2. 鋼繊維補強コンクリートの機能

鋼繊維補強コンクリートには従来のコンクリートでは全く期待できなかったすぐれた機能があり、これを利用することによって各種の構造物をより合理的につくるた

めの設計及び施工方法が検討されている。その結果従来はアスファルトや鋼材が占めていた分野にまで進出することが予想されている。

### 2・1 構造材料としての基本的特性

鋼繊維補強コンクリートの構造材料としての基本的特性はそのひびわれに対する抵抗性と靱性が従来のコンク

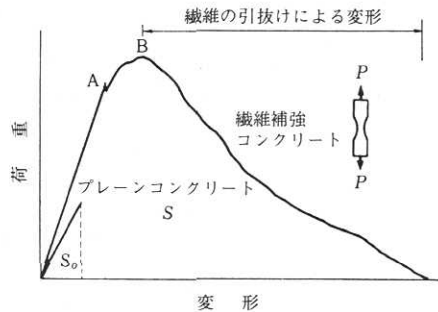


図1 鋼繊維補強コンクリートの引張荷重-変形曲線

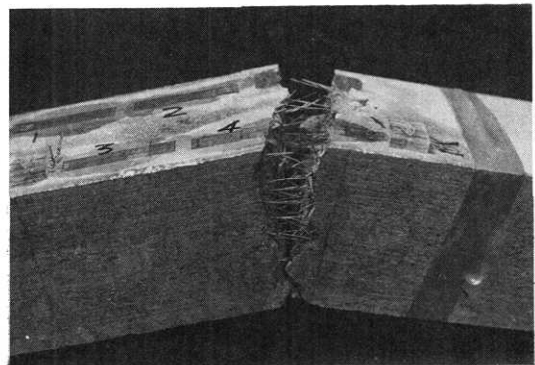


写真1 鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊後の状況

\*東京大学生産技術研究所 第5部

リートに比べて格段にすぐれている点にある。これらの特性によって曲げ強度や引張強度が著しく改善され、しかも破壊時までの変形能の大きいコンクリートが得られるのである。図-1は鋼繊維補強コンクリートの引張荷重-変形曲線を示したものであって、この図より最初にひびわれを生ずるA点に相当する荷重(初期ひびわれ荷重)がプレーンコンクリートの値(破壊荷重)に比べて著しく増大すること、この点をこえると荷重は繊維とセメント硬化体との界面で付着破壊を生ずるまで繊維によ

って伝達され最大荷重(B点)に達するが、その後も鋼繊維が引き抜けつつ外力に抵抗し、これを破断させるには極めて大きい仕事量を必要とすること(写真-1)、などが明らかである。すなわち、容積百分率で2%程度の短い鋼繊維を分散せしめて複合材料とすることにより、脆性材料の一種であったコンクリートを靱性材料に変えたと言ってよいであろう。表-1は鋼繊維補強コンクリートの強度その他の諸性能を従来のコンクリートを尺度として示したものである。

表-1 鋼繊維補強コンクリートの諸特性  
—繊維混入率=2%の場合

諸元	プレー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	2.5~3.0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抵抗性	同上

2・2 構造材料から構造部材へ

—鋼繊維の強制配向と施工方法—

鋼繊維補強コンクリートが構造材料である限り、鋼繊維はコンクリート中に均等にしかもランダム配向状態で分散していなければならない。しかし、たとえミキサから排出された後、打ち込む場所、運搬されるまではその状態を保ったとしても、こと配向に関しては打込み・締固めの段階で加えられる外力の作用と成形される部材または構造物の形状寸法によって変化し、鋼繊維はコンクリート中においてある特定の方向に配向する傾向がある。このような状態は構造材料としては自然発生的に異方性を生

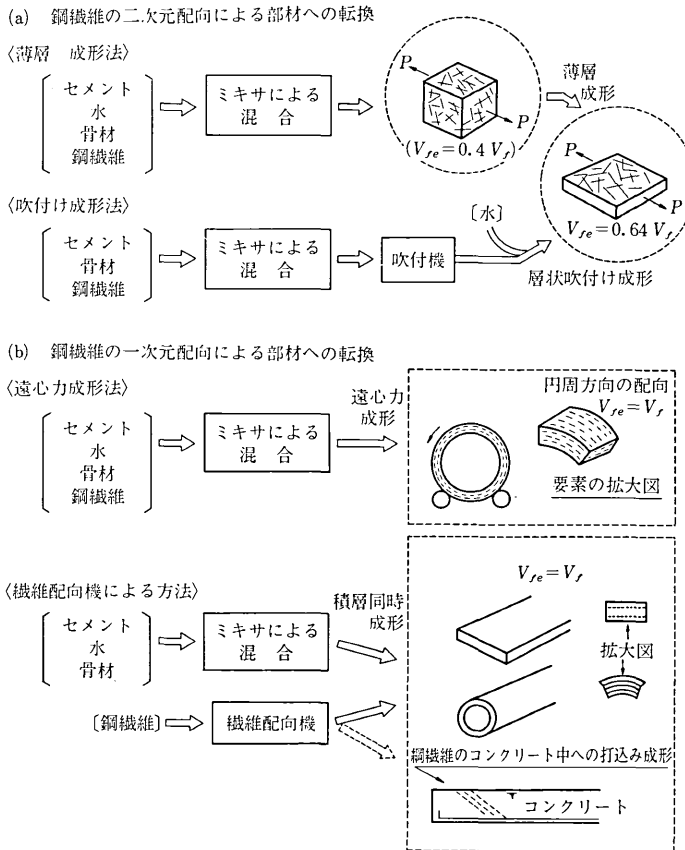


図2 各種成形法による鋼繊維補強コンクリートの構造部材化

じたことになって好ましくないが、実際の構造部材または構造物においては主として作用する外力の方向がたいていの場合には定まっている。従って、上記のような施工ともなう特定方向の配向は、これが構造部材に発生する応力に対して特に不利なものでない限り問題にはならないし、場合によっては三次元ランダム配向状態の場合よりも有利な配向状態となるケースも生じてくる。

鋼繊維がコンクリート中で三次元ランダム配向状態にある場合、ある特定方向の引張力に対して有効に働く繊維は理論的には全繊維量の40%に過ぎないが、二次元ランダム配向状態の場合にはこの値が64%となり、一次元に配向させた場合には使用した全繊維が有効に働くことになる。<sup>1)</sup> このことは、前述のようにコンクリート中において鋼繊維が配向しやすいという特性を利用し、鋼繊維を人為的に配向させることによって、その強度を大幅に増すことができることを意味するものである。また構造部材または構造物の種類や断面寸法によっては鉄筋等の補強を必要とせず、そのままの状態で使用に耐えるものを製造できることを示唆するものである。

図-2はこれを実現するための手段を示したものである。この中でとくに二次元配向の場合には従来の成形技術をそのまま適用できるので、すでに実用化されているものが多い。例えば薄層成形法の場合にはオーバーレイ<sup>(注)</sup>や防音壁、プレハブの階段および歩道板などのプレキャストコンクリート製品などである。また、吹付け成形法は軟弱地層を掘削するトンネルの一次ライニングなどに適用されている。<sup>2)</sup> 鉄筋コンクリートと同様な性能を有する部材を構造材料としての鋼繊維補強コンクリートの成形を通じて得た例としては、遠心力による一次元配向を利用した遠心力成形コンクリート管がある。<sup>3)</sup>

一次元配向による鋼繊維補強コンクリートの部材化を図る目的で現在開発中の手法としては繊維配向機を用いる手法がある。この方法の特徴は鋼繊維を予めコンクリートに混入せず、成形時に繊維配向機を用いて任意の個所に任意量の鋼繊維を任意方向に配置できる点にある。この方法は鉄筋コンクリート部材において主鉄筋以外の補強筋、例えばせん断補強筋の機能を鋼繊維によっておきかえる場合にも適用できる。

以上のように、鋼繊維補強コンクリートは成形を通じて、これを材料から部材へ転換させることが可能である。

このことは、コンクリート部材または構造物の製造における自動化のネックとなり、最も多くの人力を要する鉄筋の加工や組立の工程が不要となることを意味するものであって、とりもなおさず省力化、生産の合理化につながるものである。

## 2・3 変形能に富むコンクリートの誕生

コンクリートは元来脆性材料の1種であるから、その変形能は他の工業材料に比べて著しく小さい。たとえばその引張変形に追従できるひずみはたかだか $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度に過ぎず、このために鉄筋コンクリート部材の設計では使用荷重状態において引張を受ける部分のコンクリートに対してある大きさのひびわれを許容している。図-3は鋼繊維補強コンクリートの引張変形特性をプレーンコンクリートと対比して示したものである。

この図から明らかなように、鋼繊維補強コンクリートの特性は強度よりも変形能において顕著に表われている。

すなわち、ひびわれ発生時のひずみがプレーンコンクリートの約2倍以上となるのみでなく、それ以降もひびわれをブリッジしている鋼繊維による応力の伝達作用によって、外力に抵抗しつつ大きい変形に耐えるのである。

鋼繊維を2%程度混入した鋼繊維補強コンクリートのマトリックスにポリマーディスページョンを約20%程度混入すると、そのひびわれ発生時のひずみはプレーンコンクリートの約20倍程度にも達する。<sup>4)</sup>

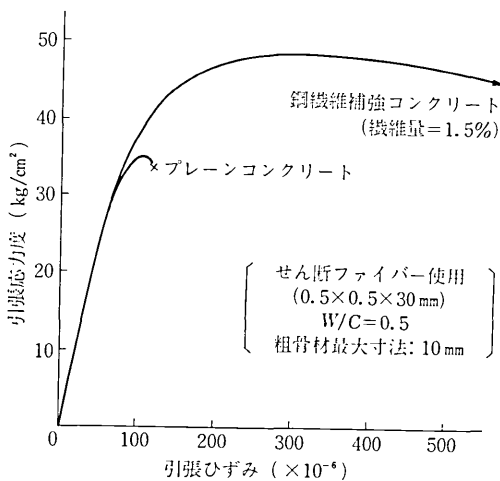


図3 鋼繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ曲線

## 3. 鋼繊維の製造とその高機能化

—スクラップから新しい複合素材へ—

現在市販されている鋼繊維は全て冷延薄鋼板をせん断して製造するものであるが、そのコストが高いことが鋼繊維補強コンクリートの利用に対する障害となっている。

当研究所第2部の中川助教授は、鋼繊維のコスト高が上記の製造方法における薄鋼板の使用に帰因すると考え薄板に圧延する前のより安価な軟鋼材である厚板またはブロックを切削して鋼繊維を製造する方法を開発した。

その製造方法は図-4に示すような回転するフライス平刃による切削を行ない、紙面に垂直方向の長さを持つ繊維を得るものであって、繊維は切削時に極めて大きい

注) 舗装などが摩耗したり破損したりした場合、その上に薄層の舗装をかぶせて補修すること。

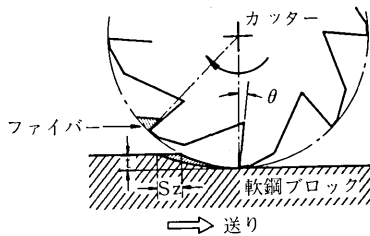


図4 厚板切削法による鋼繊維の製造方法

塑性変形を受けて製造されることが本方法の特徴である<sup>5)</sup> (図-5における細長いハッチ部分の断面が切削によって塑性変形し、その左上部の三角形のハッチ部分の断面となる)。従って普通の軟鋼材を原料とするが得られる繊維は加工硬化によって元の2.5倍程度の高強度の繊維を得ることが可能であり、しかも切削加工によって繊維の表面に繊維軸に対してゆるい傾きを有する複数の線索が形成されるので、コンクリートに対する付着強度は著しく高くなっている。すなわち、この製造方法では、1) スラブを圧延するさいに生ずる端材(普通はこれをスクラップとして転炉に戻している)を利用できるので、薄鋼板を用いる場合に比べてその1トン当りの製造単価を約3万円引き下げることが可能となること、2) それ自体の引張強度やコンクリートに対する付着強度が高いので、これを用いたコンクリートの曲げ強度や引張強度もより高くなり、従って所要の強度を得るのに必要な繊維の使用量が少なく済むこと、などの二重の利点が見られるのである。<sup>6)</sup> 要するに、このような鋼繊維(切削ファイバー)を用いることによって鋼繊維補強コンクリートが経済的に製造できることになったわけである。この切削ファイバーを使用して得られる利点はこれにとどまらない。その一つは従来の鋼繊維を用いる場合に比べてその使用量が減ること(約30%減ずる)によって生ずるコスト減以外の種々の利点である。一般に鋼繊維補強コンクリートでは鋼繊維の混入によって生ずる流動性の減少を補うためにセメントや水分の使用量が大幅に増加するが、これらの成分の増加は一般にコンクリートの乾燥収縮の増大、水密性の低下または耐久性の減少をもたらす。従って鋼繊維の使用量の減少はこれらの派生的な悪影響を減ずることになる。一方、鋼繊維補強コンクリートにおいては鋼繊維の使用量を増す程、ミキサによる練り混ぜのさいに余分の労力と時間を要し、運搬や成形にさいしても普通コンクリートに比べて種々の制約がでてくると共にコンクリート中への均等な分散が難しくなる(すなわち、ファイバーボールが発生し易くなる)。鋼繊維の使用量が少なければ鋼繊維補強コンクリートの

注) トンネルでは材料費に比べて施工費の占める比率が大きい。

製造やこれを用いて構造物を施工する場合にも有利になるのである。

切削ファイバーのもう一つの利点は切削時の発生熱によって表面が多少焼けて青味がかかる現象、いわゆるテンパーカラーを生ずることである。この状態では鋼は発錆しにくいと言われており、また油分の付着もないのでこれを除去する手間も不要である。

この切削ファイバーの本格的な生産は本年秋頃から開始される。

#### 4. 省資源・省エネルギーと鋼繊維補強コンクリート

##### 4.1 トンネル工事の適用

—力学的特性の活用による省資源・省エネルギー—

我国では年間約200kmの山岳トンネルが掘進されており、そのライニングに使用されるコンクリート量は240万 $m^3$ に達すると推定されている。<sup>7)</sup> 一方、我国は火山国であるためにその地質条件は全般的にみて不良であり、従ってトンネルの一次ライニングにはアーチとして機能するために必要な圧縮強度のほかに、大きい曲げモーメントに抵抗できることが要求され、一般にライニング巻厚は後者によって決まってくる。鋼繊維補強コンクリートはすでに述べたように曲げ強度や靱性が普通コンクリートに比べて格段にすぐれているので、これを採用することによりライニングの巻厚を減ずると共に掘削断面積を縮小することが可能である。このことは、単にライニングの施工に要する費用の低減にとどまらず、掘削とこれによって生じる“ずり”搬出に要するエネルギーの節減をもたらすと共に工期が短縮されるのでトンネルを極めて経済的に施工できる<sup>注)</sup>ことを意味する。換言すれば、鋼繊維補強コンクリートを用いることにより、省資源・省エネルギーを図ることが可能になるのである。

鋼繊維補強コンクリートをトンネルに適用して最も顕著な効果を期待できるのは、掘削直後に地山が膨張するような軟弱地帯を掘進するトンネルの一次ライニングであって、この場合鋼繊維補強コンクリートによるライニングはロックボルトと併用して吹付け工法によって施工される。

元来、上記のような地帯におけるトンネルの施工は非常にやっかいであって、二次ライニングがその施工後まもなく地山の圧力によって変状を生じ、これを補修・補強するための再工事に追い込まれることも決して珍らしいことではない。

従来はこのような地山に対しては、1) 掘削後、一次ライニングとして直ちに鋼アーチ支保工を建て込むと同時に、20cm程度の厚さの吹付けコンクリートを施工し、初期の膨張性地圧に抵抗させると共に風化やゆるみの進行を防止して地山の変形を最小限にとどめ、2) 変形が落ち着いた後に二次ライニングを施工する、という方法が

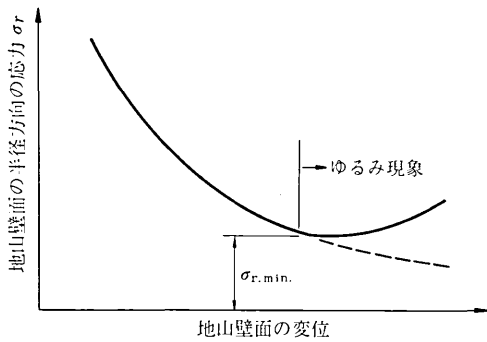


図5 地山壁面の変位と壁面半径方向の応力の関係

行われてきた。

しかし、このようにして地山の変形を大きく拘束すると図-5に示すようにライニングには著しく大きい応力を発生し、極端な場合には土かぶり圧に近い値となるため、かぶりの深いトンネルではどのように頑丈なライニングを施工しても抵抗できない場合も生ずるのである。そこで、もし地山の変位をある程度許せばライニングに生ずる応力は急激に減少し、しかも応力が最小値をとる変位量が存在することが図-5より明らかである。この関係を利用した工法が軟弱地帯におけるトンネルの施工法として最近注目されている新オーストリア工法(NATM)である。すなわち、鋼製支保工の代りにロックボルトを用い、地山と密着した薄肉の吹付けコンクリート層によって可縮可撓構造の一次ライニングを形成せしめ、地山の変形速度が十分に小さくなった時点において二次ライニングを施工するものである。この場合、薄肉のライニングに要求される条件としては変形能またはひびわれ後の耐力とせん断抵抗力の大きいことであるが、すでに述べたように鋼繊維補強コンクリートはこの条件を十分に満足するので、ライニングの厚さを普通コンクリートを用いて吹付け付けた場合(一般に20cm前後)に比べて大巾に減ずることが可能になるのである。

鋼繊維補強コンクリートを用いた NATM によるトンネルの施工はすでに西ドイツなどで実績があるが、我国では最近その適用が検討され初めている。

#### 4・2 舗装、機械基礎、ダム等への適用

—耐久性の改善による省資源・省エネルギー—

鋼繊維補強コンクリートの適用例が最も多い構造物は舗装であろう。鋼繊維補強コンクリートを舗装に用いることによって得られる最大の利点は、舗装の寿命が長くなることである。このことは建設や補修のための費用やエネルギーの節減をもたらすのみでなく、骨材や石灰石

注) スポーキングと呼ばれ強風、気象作用、構造物内部の膨張などにより、構造体からブレイク状の破片が剥離すること。

資源の潤渇化対策上からも望ましく、さらに補修や打ちかえのための交通止めによって生ずる直接または間接的なロスが避けられることを意味する。

例えば米国の Fort Hood 補給しようにおける戦車ヤードのためのオーバーレイの例では、オーバーレイに鋼繊維補強コンクリートを用いると、インシヤルコストではアスファルトコンクリートの場合の約2.5倍高くなるが、後者の寿命が3~4年であるのに対して鋼繊維補強コンクリートは25年間使用に耐えるとして設計されているので、費用のみを考慮しても鋼繊維補強コンクリートの方が有利であると報告されている。

舗装と同様なケースとしては、道路橋の鉄筋コンクリート床版への適用がある。すなわち、道路橋の鉄筋コンクリート床版は交通荷重によって損傷しやすく、鉄筋間のコンクリートが抜け落ちて床版に大きい孔を生ずることも決して珍しいことではない。その主な原因としては近年、交通荷重の方は増大する一方であるにも拘らず、床版の断面は自重の関係で増すことができないこと、寒冷地ではこれに加えて凍結融解作用による損傷を受けることなどがあげられている。橋梁によっては施工後数年には上記のような損傷のため補修を要する状態に至ると言われており、日本全体の道路橋ではその補修費が数百億円に上ると推定されている。1977年8月には、建設省中部地建の高山国道工事事務所によって山間にかかる鋼アーチ橋の鉄筋コンクリート床版に鋼繊維補強コンクリートが適用されているが、その目的はあくまでも床版の補強効果と耐久性の改善を通じてその寿命の増大を図ることにある。

一方、製鉄所の圧延機テーブルの基礎コンクリートは重量の大きい鋼塊の移動によるくり返し荷重、振動及び衝撃などを受け、さらに高温の鋼塊による高熱と散水による冷却というきびしい条件にさらされるので建設後2~3年で補修をくり返しているのが現状である。また、その補修に当っては圧延機の長時間にわたる停止を要するのみでなく、多額の補修費を要する。鋼繊維補強コンクリートをこのような個所に適用すれば補修までの期間の大幅な延長が期待できるのですでに適用された例がある。<sup>9)</sup>

なお、ダムの水叩きや取水口部分への適用もやはり寿命の増大を目的としたものである。

以上にかかげたケースはいずれも鋼繊維補強コンクリートの特性を活用して構造物の寿命の増大を図ることにより、経済性や工期の短縮とともに省資源・省エネルギーを図ったケースであるとみることができる。

#### 5. 鋼繊維補強コンクリートの将来と課題

鋼繊維補強コンクリートの我国における有望な適用分野として将来期待されているものに耐震構造物がある。

鉄筋コンクリート建築の場合には十勝沖地震以来、柱材のぜい性的なせん断破壊が問題となってきたが、最近鉄筋コンクリート柱に鋼繊維を混入することによってその耐震性の向上を図ることを目的とした研究が建設会社や鉄鋼メーカーにおいて進められている。大型試験体によるこれらの実験結果はいずれも鋼繊維の混入が鉄筋コンクリート柱の耐震性向上に効果的であることを示しているので、今後この分野に鋼繊維補強コンクリートが適用される可能性が大きいと言える。

其地、化学工場などにおける防爆壁や原子炉の压力容器などへの適用も効果的であると考えられるが、将来における有望な適用分野として検討に値するものとして海洋構造物がある。

すなわち、海洋環境下に構築される鉄筋コンクリート構造物に鋼繊維補強コンクリートを適用することによってひびわれを抑制し、鉄筋の腐食を防止できることが明らかになれば、今後はこの分野においても大きい発展が期待できる。

鋼繊維補強コンクリートにおける今後の検討課題としてはその諸特性の試験方法の確立、鋼繊維をコンクリート中により均等に分散させるための技術の開発、施工方法の合理化及び構造物の非破壊検査方法の確立などがあげられるが、これらはいずれも目下検討が進められている課題であるので、近い将来にはその解答が与えられるものと確信している。 (1958年3月3日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 小林一輔：鋼繊維補強コンクリートとその適用，セメントコンクリート，No. 345，1975，11
- 2) 小林一輔：鋼繊維補強コンクリートの吹付け工法への適用，セメントコンクリート，No. 373，1978，3
- 3) 小林，平沢，森橋：遠心力成形された鋼繊維補強コンクリート管の研究，鋼繊維補強コンクリートに関するシンポジウム発表論文集，日本コンクリート工学協会，1977，11
- 4) 小林一輔，来海豊：鋼繊維とポリマーディスパージョンによるコンクリートの引張変形特性の改善，土木学会論文報告集，No. 269，1978，1
- 5) T.Nakagawa and K.Suzuki; Production of Steel Fiber by Machining for Reinforced Concrete, Seisan Kenkyu, Vol. 28, No. 16, 1976, 11
- 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切削ファイバーの補強効果，生産研究，Vol. 30 No. 5，1978，5
- 7) 長友成樹，島田巖乃：山岳トンネルへの適用，コンクリート工学(繊維補強コンクリート特集)，Vol. 15, No. 3, 1977, 3
- 8) 岡行彦，菅原勝彦：新しい覆工の設計方法—新オーストリア工法—，「地下構造物の設計と施工」，土木学会，pp.1～19
- 9) 松尾，佐藤，小林：鋼繊維補強コンクリートの機械基礎への適用について，鋼繊維補強コンクリートに関するシンポジウム発表論文集，1977，11

