

[56] 鋼繊維補強コンクリートの吹付け工法への応用に関する諸検討

正会員 中原 康 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 中里 吉明 (")
 正会員 西村 計一 (")
 正会員 〇須藤 英明 (")

I. まえがき

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の用途の1つに吹付け工法によるトンネル一次ライニングやトンネルライニング補修などへの応用が挙げられる。吹付け工法では、付着したコンクリートの配合が練りませ時と異なるのが一般的であり、吹付けSFRCの適用にあたっては、単に施工が可能であるのみでなく、所要の鋼繊維付着率を確保し、優れた強度や靱性が得られるよう、使用吹付け機の種類や鋼繊維の形状寸法、混入率、マトリックスの配合などに関する事前の十分な検討が必要である。

筆者らはこれまで吹付け方式としての湿式の有意性に着目し、湿式による吹付けSFRCに関する一連の開発研究を進めてきたが、近年、乾式でも吹付け機の機構や吐出性能の向上が図られ、SFRCの施工例も発表されている。また最近、各種の鋼繊維も市販されるようになってきている。

こうした状況から、今回、吹付け機の種類並びに鋼繊維の形状寸法を要因として取上げ、吹付けSFRCの施工性や物性について乾式を主体とした一連の実験を行った。ここではその検討結果について報告する。

II. 実験内容

1. 実験条件

実験因子と水準を表-1に示す。実験条件は次のとおりである。

(1) 使用吹付け機

これまでの開発研究及びトンネル補修工事で実績のある湿式K、並びに最近のトンネル施工で比較的使用実績の多い乾式A、R、Mの3機種を選定した。吹付け機からノズル先端までの圧送距離は約60mとした。

(2) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂、粗骨材は6号砕石 (Gmax=15mm) を用いた。急結剤は乾式、湿式のいずれも一般に使用されている銘柄を使用し、添加率はいずれも対セメント量の3%とした。

鋼繊維は断面0.25~0.5×0.5mm、長さ1.25~3.2mmの異形(波形)及びフラットな鋼繊維を合計9種類試作し、計画配合における混入率(以下単に「混入率」と記す)を容積率で0~2%とした。

2. 実験概要

上述の吹付け機の種類、及び鋼繊維の形状寸法と混入率を組合わせた合計約30ケースの配合について、幅4m、高さ3m、長さ5mの模擬トンネル、並びに70×50×15cmのパネル型わくに約0.5~1m²の吹付けを行い、施工性を調査するとともに物性試験用供試体を作製した。

調査及び試験項目は次のとおりである。

- (1) 吹付け状況の調査
- (2) はね返り率の測定
- (3) 鋼繊維の付着率の調査

表-1 実験因子と水準

使用吹付け機		(湿式) K, (乾式) A, R, M
鋼繊維の 形状寸法	形状	異形, フラット
	断面(mm×mm)	0.25×0.5 ; 0.5×0.5
	長さ(mm)	1.25, 2.0, 2.5,
水セメント比 (%)		60 (乾式は目標値)
スランプ(cm)または単位セメント量(kg/m ³)		(湿式) 目標スランプ 8±2, (乾式) 単位セメント量 400, 450
細骨材率 (%)		80, 100
鋼繊維混入率 (°/vol)		0, 1, 2

(4) 鋼繊維の配向状態の調査

(5) 硬化コンクリートの強度（曲げ，圧縮，せん断）

なお，コンクリートの練りまぜは，湿式の場合は市中の生コンプラントの強制練りミキサ（容量1.5m³）を用い，鋼繊維は実験場でアジテータトラックに分散機により投入した。また乾式の練りまぜは実験場に設置した可傾式ミキサ（容量0.16m³）を用い，鋼繊維は人力で投入した。

Ⅲ. 実験結果及び考察

1. 施工性について

吹付け機の圧送状況に関する試験結果を表-2に示す。この表に示したように，乾式吹付け機においては，機種による圧送状況の相違は特にみられず，鋼繊維混入率1%では長さ32mmの鋼繊維を用いた場合でも支障なく圧送が可能であった。また混入率2%の場合，筆者らが以前に施工能力の小さい機種により実施した実験結果¹⁾では圧送吹付けができなかったのに対し，今回の長さ20mmの鋼繊維を用いた結果では，混入率1%に比べて吹付け機の負荷が幾分増加し，脈動を生ずるなどの傾向はみられたが，大きなトラブルもなく施工が可能であった。これは，前回の吹付け機の場合，ドライミックス材料の送り装置であるロータ部のカートリッジの径が今回の80mm/比べ50mmと小さく，上部ホップ内の攪拌翼も小型であったことなどのために材料の安定した供給ができなかったが，今回はこれらの吹付け機の機構や能力が相違することによるためと考えられる。

一方，湿式Kについては，鋼繊維混入率1%では乾式と同様に長さ32mmの場合でも支障は認められず，混入率2%についても，長さ20mmの鋼繊維を用いた今回の結果では支障なく圧送，吹付けが可能であった。

2. 鋼繊維の付着率

図-1に示すように，乾式吹付けにおける鋼繊維の付着率は，吹付け機の吐出量が3.5m³/h程度以上の場合には計画配合の約8~9割の値であり，これは過去における湿式Kでの結果と同様であった。しかし0.25×0.5×25mmの異形鋼繊維を用いて吹付け機の吐出量を変化させたところ，同図に示したように吐出量の低下に伴って鋼繊維の付着率が減少する傾向がみられた。この結果は，筆者らが以前に実施した乾式吹付け実験¹⁾において，鋼繊維の付着率が計画配合の約2割程度しか得られなかったときの吐出量が実質1~1.5m³/h前後であったことと比較的良く一致している。このことは，一般の吹付けコンクリートの施工でいわれていると同様，吹付けSFRcにおいても吐出量が低下すると材料のはね返りが増加するが，このとき鋼繊維は他の材料に比べてはね返るものの割合がさらに大きいことを示していると考えられる。ただしこの吐出量と鋼繊維付着率の関係については，今回

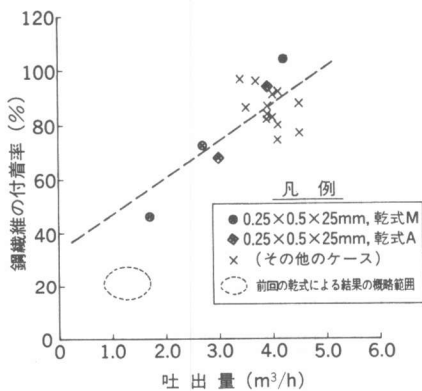


図-1 吹付けコンクリートの吐出量と鋼繊維の付着率との関係

表-2 鋼繊維混入率と吹付け機の圧送状況

鋼繊維混入率 (%)	使用吹付け機	鋼繊維の形状寸法		圧送状況
		形状, 断面(mm)	長さ (mm)	
0	乾式 ARM	—	—	○
1	及び	異形, 0.25×0.5	125, 20, 25	○
	湿式 K	異形及びフラット	20, 25, 32	○
2	乾式 A	異形, 0.5×0.5	20	△
	湿式 K			○

(判定) ○ 特に問題なし
△ やや脈動を生ずるなどの傾向あり

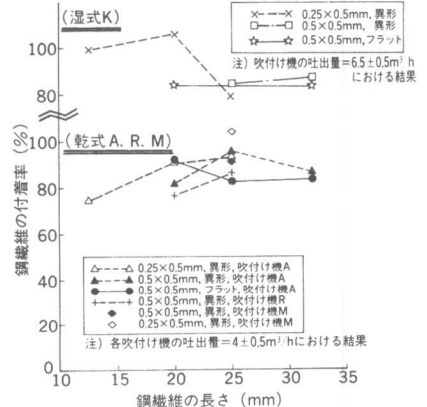


図-2 鋼繊維の形状寸法と付着率との関係

の実験は上述のように1種類の鋼繊維のみのものであり、他の鋼繊維を用いた場合、さらに検討が必要であろう。

また鋼繊維の形状寸法が付着率に及ぼす影響については、アスペクト比の小さい鋼繊維のほうが付着率が增加するという既往の報告⁹⁾がある。しかし今回の実験ではそのような傾向は認められず、乾式、湿式のいずれにおいても、吐出量をほぼ一定(前者で約4m³/h、後者で約6.5m³/h)とした場合、図-2に示すように鋼繊維の付着率も約8~9割であり、付着率の差に一定の傾向はみられなかった。

これらの結果から実際の工事について考えてみると、実際の工事で吹付けコンクリートを大量に施工する場合、乾式吹付けではドライミックス材料が吐出口付近や配管内に徐々に残積し、口径を縮小して吐出量の低下を招くこともある。この点、吹付けSFR Cでは上述のように、吐出量が鋼繊維の付着率を大きく左右する可能性があり、吹付け機や配管条件などの選定が実施工にあたって重要になると考えられる。

3. 鋼繊維の配向及び分散状態

付着したコンクリート内の鋼繊維は、これまでの結果と同様、吹付け方向(ノズルの軸方向)に配向するものに比べて平面方向(軸方向に直角な方向)に配向するものが多くなった。しかし平面方向における繊維密度の実測値は、鋼繊維の付着率や配向状態を仮定して得られる理論値¹⁰⁾の範囲に必ずしも含まれず、長さの相違(またはアスペクト比の相違)などによる配向状態の差にも一定の傾向はみられなかった。

今後、SFR Cの強度や靱性の検討にあたっては、鋼繊維の分散やそのバラツキの評価などさらに検討する必要があると思われる。

4. 圧縮強度及び圧縮変形特性について

吹付けSFR Cの圧縮強度及び圧縮変形特性には、前述した鋼繊維の2次元的な配向状態の影響のために載荷方向の相違による異方性があり、吹付け方向に載荷を行った場合、平面方向に載荷した場合に比べて最大応力(圧縮強度)とそのときのひずみ量が大きくなる¹¹⁾。今回の実験における吹付け方向載荷での圧縮強度は、乾式の場合約170~270kg/cm²、また湿式の場合には配合の関係もありこれまでの結果より強度レベルが低く約130~270kg/cm²となったが、平面方向載荷の場合との異方性に関してはこれまでとほぼ同様であった。しかし鋼繊維の形状寸法や混入率の相違が圧縮強度に及ぼす影響については、特に一定の傾向は認められず、これは湿式Kの場合に、アジテータトラックから排出したコンクリートにより通常の打込み方法で作製した急結剤無混入のφ10×20cm供試体(圧縮強度約190~280kg/cm²)においてもほぼ同様であった。

一方、湿式と乾式を全般的に比較した場合、図-3に示すように湿式のほうが乾式に比べて最大応力(圧縮強度)に達した後の耐力の低下が緩やかになる傾向にあった。この傾向については、吹付け方式の相違による鋼繊維とマトリックスとの付着機構の差や、マトリックスの強度レベルの相違による差などの種々の原因が考えられるが、今回の実験からは明らかでなく、今後、さらに検討が必要と思われる。

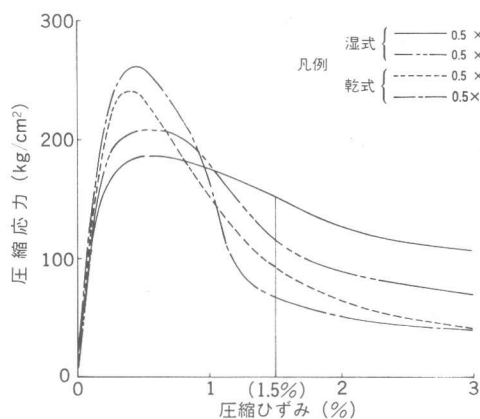


図-3 剛性試験における圧縮応力～ひずみ曲線の例

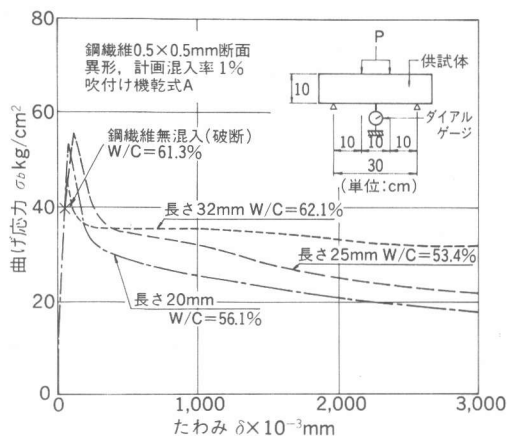


図-4 曲げ応力～たわみ曲線の例

5. 曲げ強度及び曲げ変形特性

鋼繊維無混入の場合(マトリックス)の曲げ強度は、乾式では約35~40kg/cm²、湿式では約25~30kg/cm²であり、鋼繊維混入率1%の場合の曲げ強度は、乾式、湿式のいずれも5~15kg/cm²程度増加したが、この補強効果に対する鋼繊維の形状寸法の影響は特に認められなかった。一方、曲げ変形特性については、曲げ応力~たわみ曲線(一例を図-4に示す)からSFRCの曲げタフネスを定量的に評価する方法としてACIが提唱したToughness Index(以下「T.I.」と記す)を求め、吹付け機や鋼繊維の形状寸法との関連を検討した。この結果、乾式の場合、図-5に示すように鋼繊維混入率と長さの積 $V_f \cdot L$ との間に比較的良好な相関が認められ、T.I.を向上させる上では長さの長い鋼繊維を用いること、鋼繊維の混入率を増すことが有利であることを示している。しかし、両者の効果の割合についてや、鋼繊維の断面寸法の相違による影響がほとんど認められなかった理由については明らかでなく、今後の検討が必要と思われる。また、今回の実験で用いたフラットな鋼繊維は異形の鋼繊維に比べてT.I.が小さく、鋼繊維の形状も曲げタフネスを大きく左右する要因であることを表わしているが、マトリックスとの引抜き抵抗性に優れた鋼繊維の形状については、今後もさらに検討の余地が残されていると思われる。なお湿式吹付けにおいては、上述のような $V_f \cdot L$ とT.I.との関係はあまり顕著には認められなかった。

6. せん断強度及びせん断変形特性

2面せん断試験での荷重方向の相違による異方性についてはこれまでの報告で触れたとおりであるが、今回は吹付け方向荷重の場合について試験を行った。鋼繊維無混入の場合におけるせん断強度は乾式で約60~70kg/cm²、湿式で約40~50kg/cm²であり、鋼繊維1%の混入によりいずれも約20~40kg/cm²向上した。しかし鋼繊維の形状寸法の相違による差には一定の傾向がみられなかった。せん断変形特性に関しては、図-6のせん断応力~荷重板相対変位量曲線に示すとおり、鋼繊維無混入の場合には相対変位量1.5~2mm程度で残留応力比(最大応力に対する割合)がほとんど0になるのに対し、混入率1%では相対変位量2mmで約80~100%の残留応力が得られた。しかしこの残留応力に対しては、乾式、湿式の差や鋼繊維の形状寸法の影響には一定の傾向が認められなかった。

IV. あとがき

以上、吹付けSFRCの施工性や物性に影響を及ぼす要因として吹付け機の種類及び鋼繊維の形状寸法を取り上げ、一連の実験検討の結果を報告した。しかし、一般に吹付け工法によるコンクリートの物性は今回取り上げた吹付け機の種類や材料(今回は鋼繊維のみであるが)のほか、ノズルと吹付け面との距離や角度、吹付け圧力、水量調節の適否等の施工時の条件によっても異なるものであり、これらの施工時の条件が吹付けSFRCの物性に与える影響についても、今後、さらに検討を進めていく必要がある。

- 〈参考文献〉
- 1) 中原他, SFRCに関する開発研究(その2~4) 鹿島技研年報 第24~26号, 1976~1978
 - 2) 日本コンクリート工学協会編, SFRCに関するシンポジウム 1977.11
 - 3) 高木, 超早強セメントを用いたSFRCの基礎実験と実施工, セメント・コンクリート 6389, July. 1979

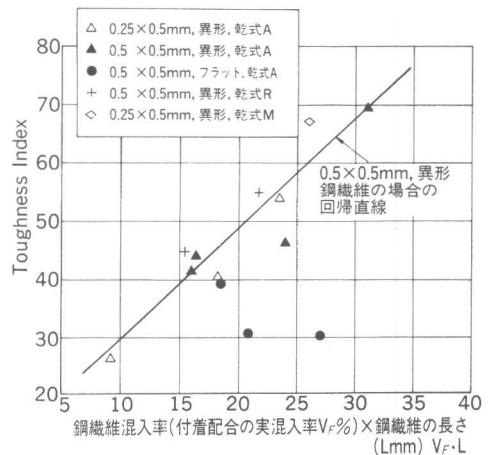


図-5 鋼繊維の混入率及び長さとの関係

Toughness Index との関係

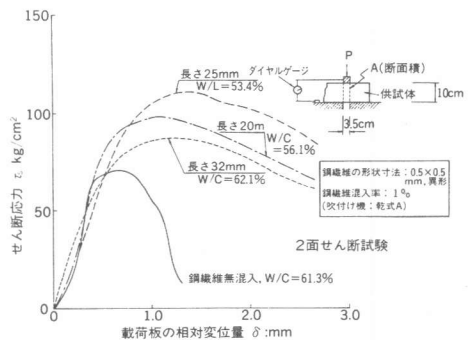


図-6 せん断応力~荷重板相対変位量 の関係の例