

正会員 中内 博司 (株) 間組 技術研究所
 松垣 光威 (" ")
 ○竹内 恒夫 (" ")

1. まえがき

膨張性地山におけるトンネル掘削では、掘削直後に大きな地圧が支保工に作用するため、一次ライニングに普通コンクリートを用いる場合、膨大なライニング厚を要したり、特殊な工夫が要求されることがある。

鋼繊維補強コンクリート(以下SFRCと略す)は、普通コンクリートに比べて、曲げやせん断強度が強いなどの利点をもっており¹⁾、特に掘削直後のトンネルの一次ライニングにSFRCを用いると、その特長を十分に活かすことができる²⁾³⁾。また安全面でもSFRCは、普通コンクリートのひび割れに対して大巾な改善が可能であるなどの優れた特長がある他、SFRCを吹付けに用いるとトンネルに作用する外力に対し、鋼繊維が最も効率よく配置されることがわかっている⁴⁾。しかしながらSFRCは普通コンクリートや鉄筋コンクリートに比べて、材料が高価であるため特殊な事情を有する場合を除いて、あまり積極的に用いられず、これがSFRCの普及に大きな障害となっているのが現状である。

本報文は、普通コンクリートの弱点にSFRCを局部的に利用することによって、SFRCのもつ優れた特長を損うことなく、しかも経済的な施工が可能かどうかを検討するために行なった室内実験について、その結果と二・三の考察を述べたものである。

2. 実験方法

(1) 実験計画

実験では、普通コンクリートとSFRCを層状に打設し、それぞれの層厚とその組合せおよび鋼繊維混入率を変化させた場合の強度特性を調査することにした。実験の種類を図-1に示す。

鋼繊維の混入量の実用的な限界は、コンクリート容積に対して約2% (以下 $0\%vol$ と略す)程度であるが、SFRCの吹付けでは約 $1\%vol$ 程度のもので一般的である。したがって実験では、鋼繊維混入率の上限を $1.5\%vol$ とし、その混入率を $0, 0.9, 1.2\%vol$ として計画した。また、SFRCの局部的な利用について検討するため、供試体は図-1に示したよう

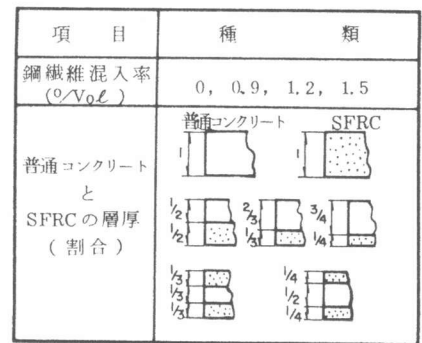


図-1 実験の種類

にSFRCを引張り側のみに入れたものと、圧縮側にも入れた横層状サンドイッチタイプ(以下サンドイッチタイプと略す)のものを作成し、その強度特性を調査することにした。

(2) 使用材料と配合

実験に使用した材料を以下に示し、コンクリートの示方配合を表-1に示す。

セメント： 普通ポルトランドセメント，日本セメント社製，比重 3.17

粗骨材： 最大寸法 10mm，荒川産川砂利，比重 2.63

細骨材： 粗粒率 2.60，荒川産川砂，比重 2.6

混和剤： M_5L ，ポゾリス物産製

あと添加用高性能減水剤： NP-20

ポゾリス物産製

鋼繊維： テッサ，日本鋼管製

$0.5 \times 0.3 \times 20 \text{ mm}$ ，アスペクト比 46

表-1 コンクリート示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S_a (%)	単 位 量 (Kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (c%)
10	10+2	3+1	49	60	196	400	1026	692	0.25

(3) 供試体の作製方法

普通コンクリートとSFRCを同時に層状に打設するため、90ℓの可傾胴式と20ℓの強制練りミキサーを用いて混練を行なった。練り混ぜは、空練りした後所定の水を加えて3分練りとした。

なお、鋼繊維の投入は手によって行ない、スランブの調整は、あと添加用高性能減水剤を用いた。

供試体寸法は、曲げ・せん断用として10×10×40cmの型枠を用い、締固めは、普通コンクリートは突棒で行なったが、SFRCは、テーブルバイブレータ（振動数2,850rpm）で15秒間の振動締固めを行なった。

異なった二種類のコンクリートを層状に打設する方法として、ここでは型枠の下層から上層へ順次所定の厚さだけ打設する方法を採用した。このため強度試験時の載下面が打設面となるので、仕上面はコテで入念に仕上げた。

強度試験は、養生を脱型後水中での標準養生を3週間行ない、その後恒温恒湿室（温度20±3℃，湿度80%以上）で1週間行なった供試体を使用して実施した。写真-1に普通コンクリートとSFRCを同時に打設した供試体の切断面を示す。

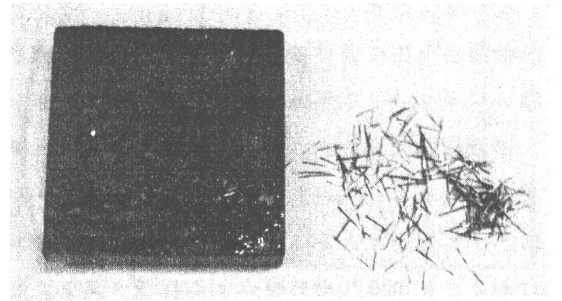


写真-1 同時打設後の供試体切断面と鋼繊維

(4) 試験方法

試験項目と方法を以下に示す。

- 1) 曲げ試験 : 曲げ強度試験はJISA 1106に準じて行なった。
- 2) せん断試験 : せん断強度試験は図-2に示すような二面せん断試験方法で行なった。
- 3) 荷重～変形量 : 曲げ強度試験時の変形量を供試体の中央にダイヤルゲージを取付け測定を行なった。

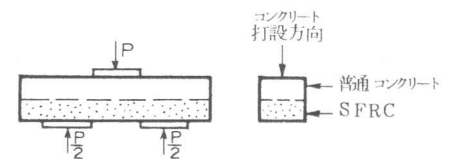


図-2 二面せん断試験

3. 試験結果および考察

普通コンクリートとSFRCを層状に打設した供試体のうち、引張側のみSFRCを打設したものと圧縮側にも打設したサンドイッチタイプのもの強度試験結果を表-2に示した。なお、普通コンクリートの強度を基準にした場合の各強度比についても併記した。

(1) 鋼繊維混入率と強度比の関係

曲げおよびせん断強度比と鋼繊維混入率との関係を図-3に示した。これによると曲げ強度では鋼繊維混入率とSFRCの層厚による変化について、あまり顕著な差はないが、鋼繊維の混入率が増すに従って強度の増加が認められ、鋼繊維混入率1.2%volで普通コンクリートの1.1～1.2倍程度であった。

また、せん断強度では鋼繊維混入率が1.2%volで普通コンクリートの約1.3～2.1倍を示したが、供試体の全層厚に鋼繊維を混入したもの（Aシリーズ）と、引張側のみ層状に混入したものとの比較では、鋼繊維の混入率が低く、層厚が薄くなるに従って強度低下が見られた。一方圧縮側にもSFRCを打設したサンドイッチタイプのもの（E、Fシリーズ）の曲げ強度は、積層打設の効果が認められないが、せん断強度の比較では、鋼繊維混入率0.9%volで普通コンクリートの約2～3.5倍を示し、著しい補強効果が認められた。

以上のような結果から、鋼繊維混入率と強度の関係では鋼繊維の

表-2 強度試験結果

シリーズ	形状寸法	鋼繊維混入率 (Vol%)	強度 (kg/cm ²)			
			曲げ	強度比	せん断	強度比
A	1	0	62.1	1.00	49.2	1.00
		0.9	64.8	1.04	98.4	2.00
		1.2	75.6	1.22	105.4	2.14
		1.5	73.7	1.19	94.7	1.92
B	1/2	0.9	63.8	1.03	70.2	1.43
		1.2	70.4	1.13	72.7	1.48
		1.5	74.3	1.20	83.3	1.69
C	2/3	0.9	61.8	1.00	49.2	1.00
		1.2	70.1	1.13	62.3	1.27
		1.5	70.0	1.13	49.5	1.01
D	3/4	0.9	66.2	1.07	54.5	1.11
		1.2	67.6	1.09	65.3	1.33
		1.5	70.7	1.14	72.1	1.46
E	1/3	0.9	65.7	1.06	103.1	2.10
		1.2	72.4	1.17	166.1	3.38
		1.5	74.0	1.19	176.5	3.59
F	1/4	0.9	67.3	1.08	170.8	3.47
		1.2	71.4	1.15	186.9	3.80
		1.5	72.8	1.17	125.1	2.54

混入率が増すに従って強度増の傾向が認められた。しかし供試体本数が少ないこと、実験に用いた鋼繊維が一種類であること、試験方法を筆者らが定めたことなど多くの問題があり、一口に結論を言及することはできないが、SFRCを層状に打設しても補強効果があるものと思われる。

(2) SFRCの層厚と強度比の関係

図-4は、SFRCを供試体の全層厚に打設したもの(Aシリーズ)の強度を基準として、普通コンクリートをSFRCを層状に打設したもの(B~Fシリーズ)との強度比の関係を示したものである。これによると曲げ強度はSFRCの層厚にあまり影響されず、SFRCの層厚が $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{2}{3}$ になっても強度比の低下は、1割程度である。しかし、せん断強度ではSFRCの層厚が $\frac{1}{2}$ になると1~3割、また $\frac{1}{3}$ になると2~5割程度の低下がある。これは前項にも述べたように実験に種々の問題があると思われるが、SFRCを層状打設する場合は、打設層厚と鋼繊維の長さの関係が強度特性に影響を及ぼすものと思われる。特に、SFRCを薄層打設する場合は鋼繊維の分散や配向が問題となるようで、鋼繊維の長さや供試体作成方法などを慎重に検討して対処すれば、強度の低下率をさらに小さくできると思われる。

(3) 曲げタフネス

図-5に鋼繊維混入率1.5%volの時の荷重~変形量の一例を示した。また、図-6は荷重~変形量の関係から求めた変形曲線がx軸と変形量1mm(曲げ試験時の支点間距離30cmの $\frac{1}{300}$ とした)までで囲まれる面積の曲げタフネスを求め、普通コンクリートとの比率を相対タフネスとして表わした。これによると相対タフネスは、鋼繊維混入率が増加するにしたがってほぼ直線的に増加し、さらにSFRCの層厚が厚くなるほど増加した。ちなみに、鋼繊維混入率1.5%volで供試体の全層厚に鋼繊維を混入したもの(Aシリーズ)の相対タフネスは、普通コンクリートの約9倍を示した。

一方、圧縮側にもSFRCを打設したサンドイッチタイプ(E, Fシリーズ)でも、相対タフネスは同様な傾向を示し、E, FシリーズはほぼBシリーズに類似した値を示した。

このことから、今回のようにSFRCを層状に打設する場合の相対タフネスは、鋼繊維混入率一定の時SFRCの打設位置にあまり関係なく、打設層厚の厚さが最も影響するものと思われる。

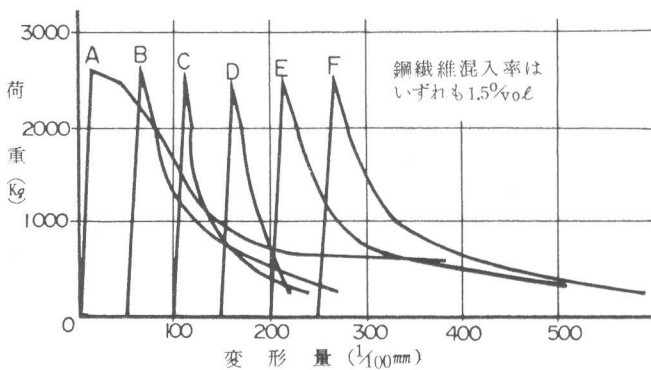


図-5 荷重~変形量の一例

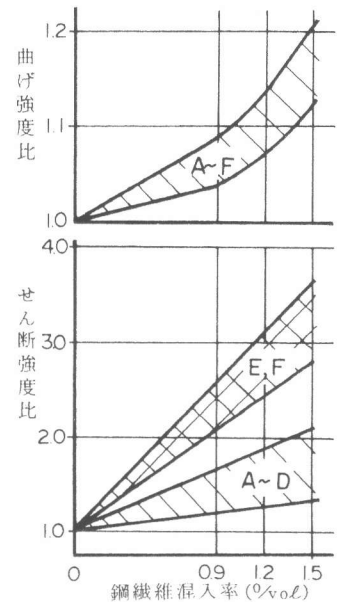


図-3 鋼繊維混入率と強度比の関係

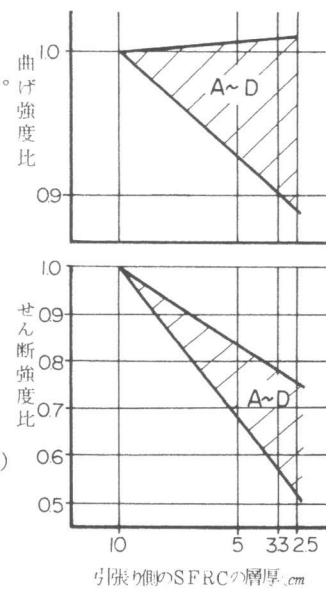


図-4 SFRCが全面に入ったものの強度を基準としたときのSFRCの層厚と強度比の関係

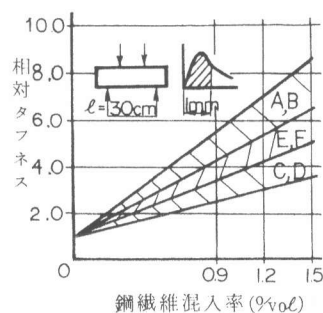


図-6 鋼繊維混入率と相対タフネスの関係

4. まとめ

以上、実験の結果と二・三の考察を述べたが、もともとSFRCの強度特性は、鋼繊維の形状寸法や混入率、締固め方法、コンクリートマトリックスなどの他、部材の寸法によっても鋼繊維の補強効果が異なる。なかでも鋼繊維の配向と分散は、SFRCの力学的性質に対して著しい影響を及ぼし¹⁾、部材寸法が薄くなればなるほど鋼繊維の配向は、二次元ランダム状態になる傾向を示すので、今回の実験ではこれらの点を考慮して、使用する鋼繊維の寸法を $0.5 \times 0.3 \times 20 \text{ mm}$ (アスペクト比46)とした。しかし、SFRCの一層当たりの層厚が、 3.3 cm 以下のものについては、データのバラツキが多かった。このことは、鋼繊維長とSFRCの層厚に何らかの関係があることを示しており、SFRCの強度特性に三次元ランダム状態を期待する場合は、SFRCの層厚を鋼繊維長の2倍以上にする必要があるものと思われる。

近年技術導入されたトンネルの掘削方法にNATM工法があるが、この工法は、掘削直後の地山の変形を許しながら施工していくもので、これに用いられる吹付けコンクリートは、せん断抵抗とひび割れ後の耐力の大きいものが求められる。SFRCは、これらの要求をある程度満足することが可能な材料であり、特に今回の実験から普通コンクリートとSFRCをサンドイッチタイプにしたもの(E, Fシリーズ)が、全層厚にSFRCを打設したもの(Aシリーズ)よりせん断強度比で上まわった値を示したことは興味があり、意義あるものと思われる。

5. あとがき

一般にトンネル掘削直後の壁面は凹凸が多く、このような面に直接コンクリートを吹付けると、初期の状態ではコンクリート中の粗骨材のはね返りが極めて多く不経済である。同様にSFRCの吹付けについても同じことが言え、初期の状態では鋼繊維のはね返り率が高い。しかし、これらの状態も吹付け厚 5 cm 程度を境にはね返り率が極耐に少なくなることがわかっている⁵⁾。したがって、トンネル掘削後の壁面の凹凸による応力集中を防止する意味と、SFRCの吹付けによるはね返り率を低減する意味から、初期の状態では、はね返り率の比較的小さい普通コンクリートを吹付けた後、引続いてSFRCを吹付けるような施工法、すなわちサンドイッチタイプによるトンネルのライニングを行えば、SFRCのもつ特性を活かし、かつ経済的な施工が可能になるものと思われる。

本報文は、文中にも述べたように特定の実験方法で行ない、しかも少ない実験データから結果を述べている。したがって、今後、この種の実験を続けていく上で内容を修正することがあるかも知れないが、筆者らはSFRCの局所的な使用、特にトンネルへの適用についてある程度の傾向がえられたものと思っているので、賢明な各位の卒直な意見を賜りたいと考えている。

おわりに、この実験を行なうに当たり、材料面の御協力をいただいた建設ファスナー(株)とボゾリス物産(株)の各位に、紙上を借りて御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 小林一輔・和泉意登志・趙力采：鋼繊維補強コンクリート—一般的性質・強化機構・繊維の配向と分散—、コンクリート工学, Vol.15, №3, March. 1977
- 2) 中原 康：吹付コンクリートへの適用, コンクリート工学, Vol.15, №3, March 1977
- 3) 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, №373, Mar. 1978
- 4) 福光健二, 他5名：鋼繊維補強吹付けコンクリート, 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, 昭和52年11月
- 5) H.W. Parker : A Practical New Approach to Shotcrete Rebound Losses, Shotcrete for Ground Support, A C I sp-54