

報 告

[1213] TBM用繊維補強吹付モルタルの開発

尾島 晃 (東京電力蛇尾川水力総建設所)

小西 守 (奥村組東京支社)

正会員 ○藤田早利 (奥村組東京支社)

1. はじめに

小孔径の急傾斜トンネルボーリングマシン (TBM) 掘削にともなう支保部材として、吹付厚 2-4cm の超薄肉で若材令 1 時間でせん断強度 15kgf/cm^2 以上の吹付支保力が要求された。これに応じるものとして新素材系繊維一種であるポリアクリルニトリル繊維と、カルシウムサルホアルミネート系の急結剤をもちいた超薄肉繊維補強モルタル吹付工法を開発した。本報文はこの施工システムと部材特性について報告するものである。

2. 開発条件

TBM の規模、支保設計思想および施工性から下記の要求条件が示された。

- a. 材令 1 時間で 15kgf/cm^2 以上のせん断強度を有すること
- b. 吹付厚 2~4 cm 以内であること
- c. 骨材のはね返りを生じないこと
- d. 粉じんの発生が少ないこと
- e. コンパクトな設備であること

これらの要求に沿うものとして繊維補強モルタル吹付工法を新たに開発することとした。

3. 材料の選定

(1) 繊維

急傾斜、狭小断面での材料運搬を考慮して繊維をあらかじめセメント骨材等とプレミックスした袋詰め製品として使用することを前提としたためスチールファイバーでは袋を破損する恐れがあることから、新素材系繊維をもちいることとし、経済性とセメントマトリックスとの機械的結合性にすぐれた断面形状を有する点からポリアクリルニトリル繊維をもちいることにした。

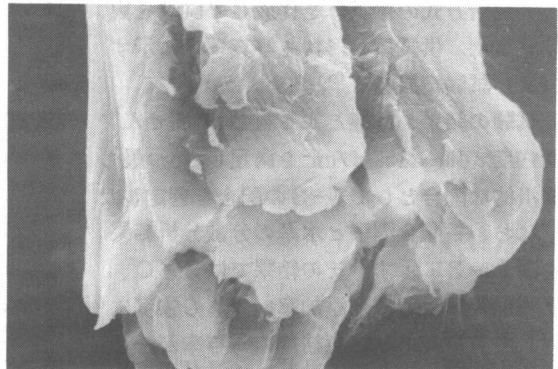


写真-1 繊維の断面形状

繊維の断面形状を写真-1 に示す
また、繊維の諸元を表-1 に示す。

(2) 急結剤

従来のセメント鉱物系およびアルミン酸塩系の急結剤では若材令での必要強度の確保が困難と考えられたため、新たにカルシウムサルホアルミネートを主成分とする急結剤を開発した。この急結剤は水溶性でペースト状として使用することの特徴とし、ペーストのハンドリングタイムは約 1 時間に調整した。

表-1 繊維の諸元

項目	諸元
直径	18 μm
長さ	6mm
比重	1.18
引張強度	96 kgf/cm ²
破断伸度	11%

(3) セメント、骨材

セメントは早強性を求めるため早強ポルトランドセメントを使用することとした。細骨材については、各材料を袋詰製品とすることから含水性のないケイ砂を用いることにした。

4. 配合試験

(1) 試験項目

配合試験の因子と水準を表-2に示す。ここにW/Cは流動性の確保のため一定とした。試験項目としては圧縮強度試験、曲げ強度試験、せん断強度試験、純引張試験およびフレッシュモルタルのテーブルフロー試験(目標値200mm)を実施した。各強度試験の供試体の形状は下記のとおりである。

a. 圧縮強度試験

φ50×100mm円柱供試体(JIS A 1108)

b. 曲げ強度試験

10×10×40mm(JIS A 1106)

c. せん断強度試験

トンネル技術協会より提示されている指針案に準拠して一面せん断供試体を作成し試験を実施した。供試体の形状を写真-2に示す。

d. 純引張試験

建研方式の供試体を作成して試験を実施した。供試体の形状を写真-3に示す

(2) 試験結果

試験の結果、目標とする材令1時間せん断強度 τ 1hr $\geq 15\text{kgf/cm}^2$ を満足し、かつ最も経済的な配合として表-3の配合を選定した

なお、各配合因子と水準の分散分析結果を図1~3に示す。その結果ではS/C、繊維混入率、急結剤添加率いずれも強度に対して有意であり、急結剤の寄与率が一番大きく、繊維については0.5%から0.75%にかけて強度増加に寄与するが0.75%以上では強度の増加はさほど見られない。

また、S/Cはほぼ比例的に強度増加に寄与している。

表-2 実験因子と水準

因子	水準		
W/C	50%		
S/C	0.5	0.75	1.0
F (Vol%)	0.5%	0.75%	1.0%
Ac(C%)	25%	27.5%	30%

F : 繊維 Ac : 急結剤

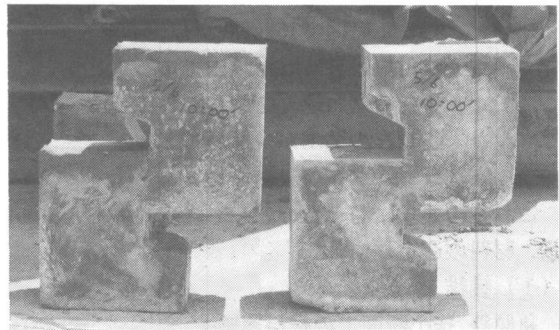


写真-2 せん断試験供試体

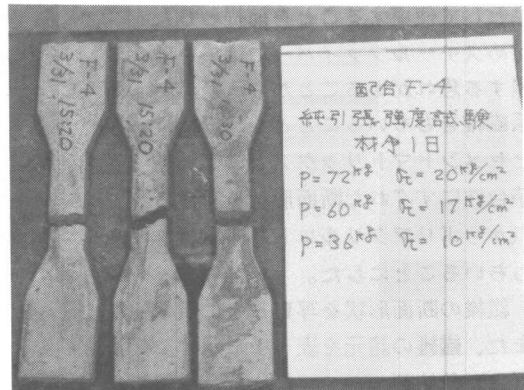


写真-3 純引張試験供試体

表-3 配合表

S/C	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
		C	W	S	F	SP	Ac
0.75	50	903	452	677	8.63 V×0.75%	4.5 V×0.5%	248 C×27.5%

SP : 高性能減水剤

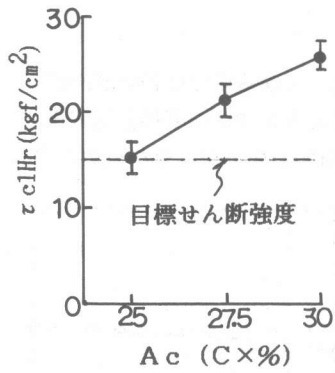


図-1 急結剤と強度

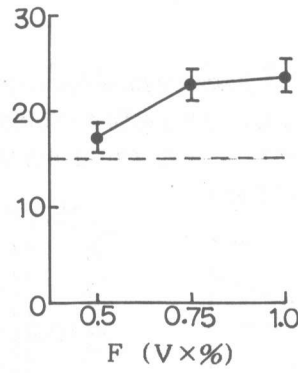


図-2 繊維と強度

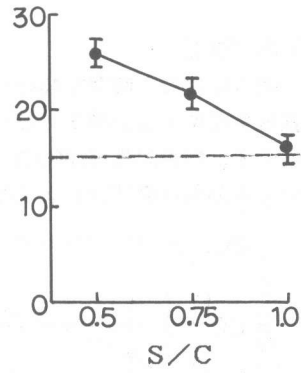


図-3 S/Cと強度

5. 強度特性

(1) 圧縮強度

圧縮強度を図-4、図-5に示す。圧縮強度は材令1時間で80kgf/cm²に達し、その後材令24hrまでは直線的な増加を示し300kgf/cm²に達する。4週強度では500kgf/cm²に達し一般の吹付コンクリートに比べて大幅に上回る強度を示している。

(2) 圧縮弾性係数

圧縮弾性係数を図-6に示す。一般の吹付コンクリートと同様の傾向がみられ、直線的な相関を示す。

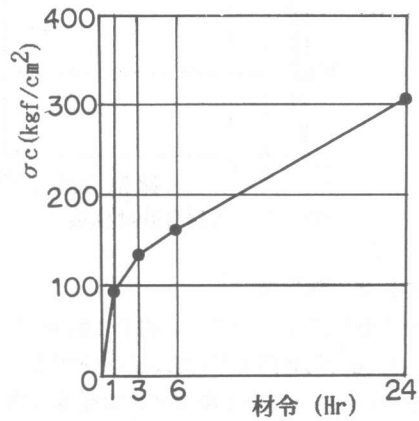


図-4 若材令圧縮強度

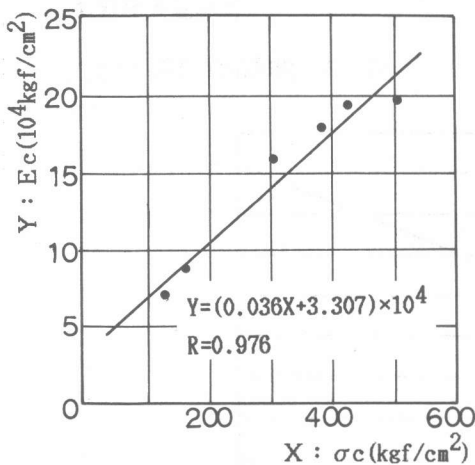


図-6 圧縮弾性係数

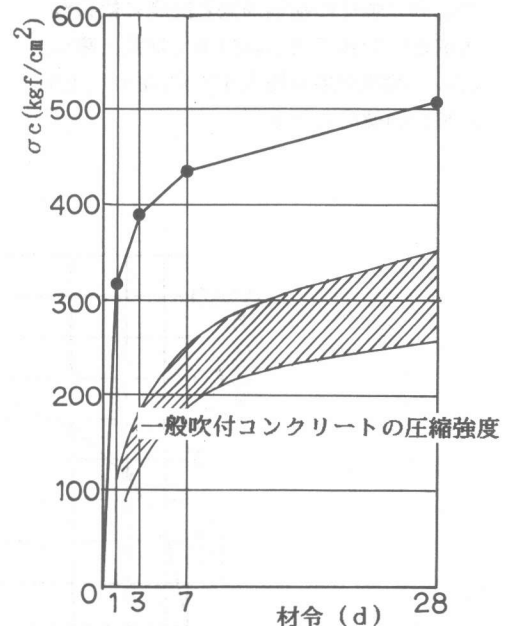


図-5 長期圧縮強度

(3) 曲げ強度

曲げ強度は材令1時間で40kgf/cm²、24時間で70kgf/cm²に達し、4週強度では100kgf/cm²の曲げ強度を発現する。(図7~8) また、材令1時間での繊維混入率と曲げ強度補強効果を図-9に示す。繊維混入率が0.5%でプレーンモルタルの1.6倍の強度となるが、それ以上の混入率では補強効果は横ばいとなる傾向を示す。

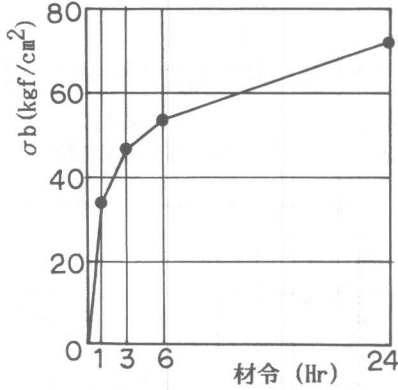


図-7 若材令曲げ強度

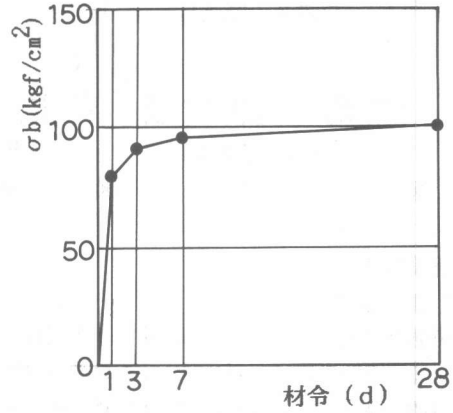


図-8 長期材令曲げ強度

(4) せん断強度

せん断強度については、材令1時間で20kgf/cm²、24時間で80kgf/cm²に達する。(図-10) 材令1時間での繊維混入率とせん断強度の補強効果は図-2の通りで、曲げ強度の補強効果と同様に繊維混入率が0.5~0.75%(×Vol)までは混入率に応じて補強効果が增大するが、それ以上では横ばい傾向を示す。

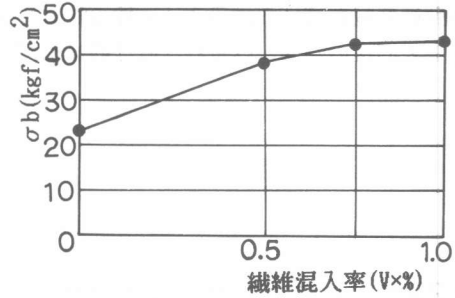


図-9 繊維補強効果 (1)

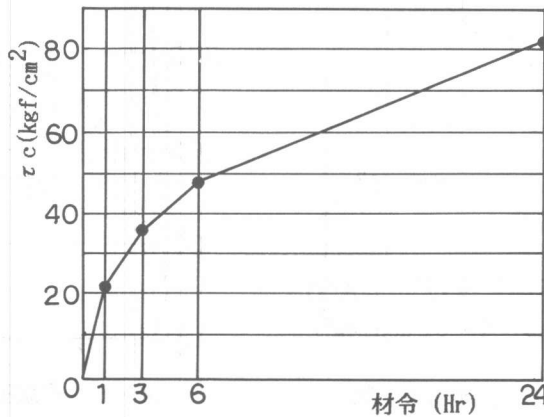


図-10 せん断強度

(5) 純引張強度

純引張強度を図-11に示す。材令1日では 23kgf/cm^2 、材令4週強度では 35kgf/cm^2 程度の値を示し、材令1日以降の強度の伸びはさほどみられない。

(6) 強度比

若材令における圧縮強度に対する各強度の比を表-4に示す。

曲げ強度は圧縮強度に対して0.4~0.3倍程度の比率を示し、せん断強度は0.3~0.25倍程度の比率を示す。なお、材令が長くなるに従い一般のコンクリートと同様に強度比が低下する傾向がみられる。

6. 施工システム

施工システムを図-12に示す。各パーツとも軽量、小型であることを特徴とし、断面積 4m^2 程度の狭小な空間に設置し施工することが可能である。

システムはモルタルの混練、圧送ラインと急結剤ペーストの混練、圧送ラインとに別れており、ノズル手前の混合管で合流し圧縮空気により吹付けられる。

施工能力は $0.7\text{m}^3/\text{min}$ を標準とし、必要に応じて吐出量の増減が可能である。

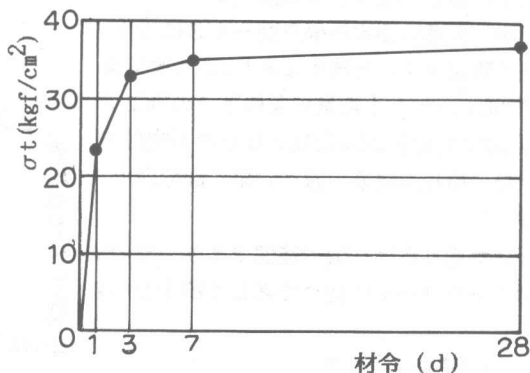


図-11 純引張強度

表-4 強度比

材令	1Hr	3Hr	6Hr
曲げ強度比	0.375	0.344	0.298
せん断強度比	0.235	0.321	0.206
引張強度比	0.161	0.122	0.124

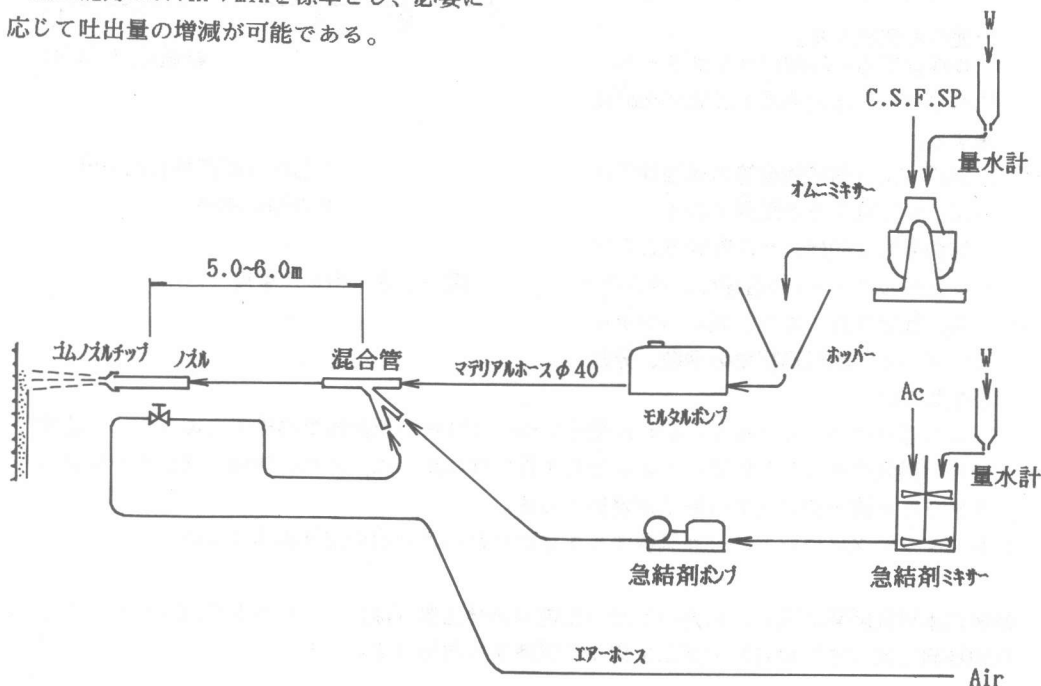


図-12 吹付システム

7. 施工性

(1) 粉じん濃度、はね返り率

粉じん濃度測定結果を図-13に示す。施工断面が 4m^2 と狭小であり、かつ換気量が $150\text{m}^3/\text{min}$ と小容量の条件下での施工であるため、比較的高濃度となったが吹付終了後の粉じん濃度の減衰は早く数分間であった。

はね返り率は1-5%の範囲であり一般の吹付コンクリートに比べて著しく微少といえる。

(2) 繊維の分散性

あらかじめ配合材料中に繊維がプレミックスされているため、吹付過程でのファイバーボールや繊維の飛散分離もなく吹付面に平行に均質な二次元ランダム配向されている結果を得た。

8. まとめ

本研究開発の結果をまとめると下記のとおりである。

- (1) 若材令での強度発現が大きく材令1時間で、圧縮強度で $80\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、曲げ強度で $40\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、せん断強度で $20\text{kgf}/\text{cm}^2$ の強度を発現する。

長期強度も一般吹付コンクリートに比べて高く、4週強度で $500\text{kgf}/\text{cm}^2$ に達する。

- (2) 繊維による曲げ強度等の補強効果は $V \times 0.5 \sim 0.75\%$ までが限界である。

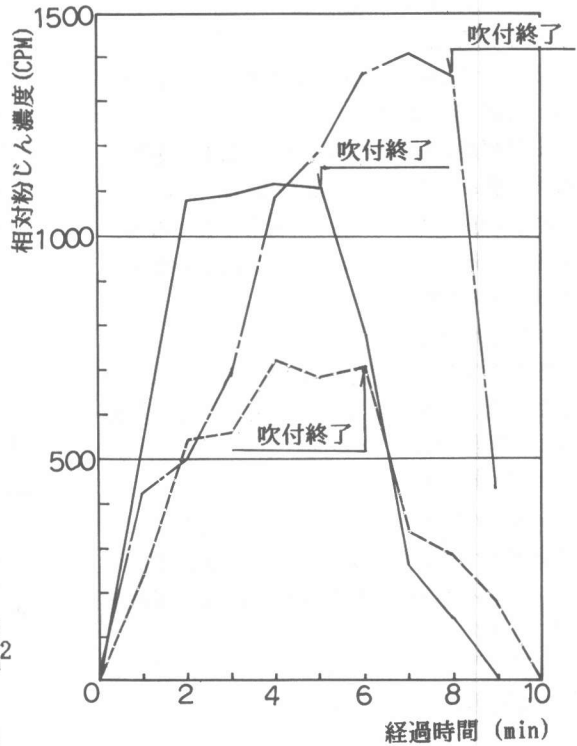
補強効果は曲げ、せん断強度ともプレーンモルタルの1.6倍程度の値を示す

- (3) 施工性は良好であり、繊維のファイバーボール、吹付過程での飛散、分離を生じない。

はね返りはほとんどなく、粉じん発生については狭小断面内での施工であったため比較的高い濃度を示したが作業に支障をきたす程ではなかった。また、吹付システムがコンパクトであり狭小空間内での施工が容易である。

なお、タフネスについては今回試験するまでにいならず今後の実験課題である。

最後に本研究開発に際し、協力いただいた電気化学工業(株)、ヘキスト合成(株)および千代田技研工業(株)の各社に誌上を借りて感謝する次第です。



TBM (断面積 4.15m^2)
での測定結果

図-13 粉じん濃度