

# シリカフェームを混和した 高強度吹付けコンクリートの物性と適用例

田沢雄二郎<sup>1</sup>・本橋賢一<sup>2</sup>・横関康祐<sup>2</sup>・岡田浩司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 鹿島建設(株) 土木技術本部技術部 (〒107 東京都港区元赤坂1-2-7)

<sup>2</sup>正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 (〒182 東京都調布市飛田給2-19-1)

吹付けコンクリートの高強度化と高靱性化の達成を目的として、シリカフェームおよび鋼繊維を混和した吹付けコンクリートの品質と施工性を実験的に検討した。その結果、シリカフェーム 25kg/m<sup>3</sup>を混和して適切な配合を選定することにより、従来の吹付けコンクリートの強度レベルを大きく超える、コア強度で35MPaおよび50MPaの品質が比較的容易に実現できること、SFRCとすることで高強度領域においても通常の方法で打ち込まれるコンクリートと同様に圧縮タフネス、曲げタフネスおよびせん断強度が効果的に増大すること、粉塵およびばね返りが低減することが明らかとなった。さらに、最大土被り900mのトンネルの支保の増強対策の柱として高強度吹付けコンクリートを適用した結果、ほぼ期待通りに変状が抑制され、トンネルを構築できた。

*Key Words: high-strength shotcrete, silica fume, steel fiber, accelerator, toughness, tunnel lining*

## 1. はじめに

ロックボルト・吹付けコンクリートによるトンネル支保工法は1970年代半ばにヨーロッパから紹介されて以来、急速に広まり、既にわが国山岳トンネル工事の中心的施工法になっている。この工法は、掘削に伴う地山の変形をある程度許容しつつ地山内にグランドアーチを形成させ、地山が本来持っている耐荷能力を積極的に活用しながら、ロックボルトと吹付けコンクリートで、場合により鋼アーチ支保工を加えて周辺地山を補強し、トンネル空洞を安定させるものである。吹付けコンクリートは支保耐力の大半を負担する重要な構造部材である。

同工法のトンネルや地下大空洞掘削への普及に伴って、吹付けコンクリートに関する技術開発が精力的に進められ、硬化コンクリートの品質の安定、施工能力の向上、施工環境の改善等を目的として、新しい材料、施工機械、施工方式が開発されてきている(例えば1), 2)。

しかし、大半のトンネル工事においては、一次覆工に用いられる吹付けコンクリートのほとんどが設計基準強度18MPaで設計され、その配合は単位セメント量が350~360kg/m<sup>3</sup>、細骨材率が55~65%で、どちらかと言えば画一的なものであった。その技術面での主な理由は、①吹付けコンクリートの品質は通

常の方法で打ち込まれるコンクリートに比べてバラツキが大きく、使用材料・練混ぜ装置はもちろんのこと、吹付け方式・機械、地山の状態等施工場所の条件、さらにはノズルマンの技量等に大きく影響される。したがって、既往の研究成果や施工実績が水平展開しにくいこと、②バラツキはあるものの、従来用いられていた配合であれば現場条件に関わらず設計基準強度18MPaはほぼ達成可能であること、③一般に二次覆工コンクリートが施されることが多いため吹付けコンクリートの品質への関心が薄かったこと等が考えられる。

一方、地下構造物におけるニーズの多様化は目覚ましく、トンネル断面の大型化や吹付けのみによる永久覆工が思考され始め、吹付けコンクリートにはより高い強度・靱性・耐久性が要求されてきている。すなわち、トンネル断面の大型化や土被りの増大に伴い一次覆工の厚さが増大するが、高強度化による吹付け厚の抑制が掘削断面積の増大抑制とあいまってコスト低減と工程短縮に寄与すること、また、耐久性に富む吹付けコンクリートが施工できれば地山が比較的良好な場所では永久覆工として適用可能と考えられ、これが大幅なコスト低減に寄与すると推測される。これらの観点から吹付けコンクリートの性能改善が期待されているのである。

近年、コンクリートの高強度化や高耐久化に有用

表-1 シリカフュームの物性

比重	平均粒径 (μm)	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	主成分	その他
2.2	0.15	200,000	SiO <sub>2</sub> 90%以上	非造粒型

表-2 実験ケースとコンクリートの配合

実験 ケース	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			高性能 AE減水剤	粉塵 低減剤	急結剤
			W	C	SiF			
1	10±2	60	225	360	-	-	-	C×6.0%
2	20±2	80				C×0.55%		
3	10±2	60				C×0.15%		
4	20±2	80	25	25	25	C×0.80%	-	C×4.0%
5						C×0.80%		
6						C×1.00%		

な混和材として“シリカフューム”が注目され、吹付けコンクリートはその有効な適用分野の一つと考えられている<sup>3)</sup>。シリカフュームに関する研究と適用実績の蓄積で先行する欧米では、これを混和した吹付けコンクリートの施工実績<sup>4), 5)</sup>が増加しつつあり、わが国でも施工実験と試験施工の報告<sup>6), 7), 8)</sup>が散見されるがその数は少なく、シリカフュームの吹付けコンクリートへの有用性の評価は定まっていないのが実状である。

本研究はシリカフュームを混和した高強度吹付けコンクリートの開発に関するものである。まず、一つ目の現場施工実験でシリカフュームの混和による吹付けコンクリートの性能改善効果を予備的に検討し<sup>9)</sup>、次に、二つ目の施工実験で実用的な配合範囲における吹付けコンクリートの強度の上限を把握するとともに、鋼繊維を併用した吹付けコンクリートの靱性向上効果を確認した<sup>10)</sup>。続いて、土被りが極めて大きいトンネル現場に支保の変状抑制対策（支保工増強対策）の一つとして高強度吹付けコンクリートを全面的に使用し、その有効性を確認した。本報文はこれら一連の開発研究の結果について述べるものである。

なお、ここでいう高強度吹付けコンクリートとは、ヨーロッパの基準<sup>11), 12)</sup>を参考に材齢28日圧縮強度で35MPa以上を、最終的には50MPa以上を目標とした。

吹付け方式は、シリカフュームのコンクリート中での均一な分散が確保しやすいと判断される湿式方式、つまり、水、セメント、骨材、混和材、および急結剤を除く混和剤を混合・練り混ぜ、このコンクリートを圧送し、ノズル部で急結剤と混合して吹き付ける方式を対象とした。

## 2. シリカフュームの吹付けコンクリートの性能改善効果に関する予備的検討

### (1) 概要

本章では、シリカフューム（以下SiFと略記）の混和が吹付けコンクリートの物性と施工性に及ぼす効果について概略を把握することを目的として、施工実験を行った。通常の吹付けコンクリートの配合（単位セメント量 360kg/m<sup>3</sup>）にSiFを25kg/m<sup>3</sup>外割りで混和した場合の影響を調べたもので、さらに、細骨材率、スランプ、粉塵低減剤の有無、および急結剤量を変化させてそれらの影響を検討した。コンクリートの目標強度は材齢28日コア強度で35MPaとした。吹付け実験は北陸新幹線用トンネルの作業横坑（高さ6.0m、幅7.6m、断面積41.0m<sup>2</sup>）で実施した。

### (2) 実験方法

使用したコンクリート材料は、普通ポルトランドセメント、碎石（G<sub>max</sub> 15mm）、砕砂、SiF（物性を表-1に示す）、ポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤、セメント鉱物系急結剤およびセルロース系粉塵低減剤である。

吹付け機は最新型の空気圧送式湿式吹付け機（公称最大吹付け能力20m<sup>3</sup>/hr.、スランプが8cm程度以上で安定圧送が可能とされている機械）で、吹付けロボットを用いて、吹付け速度（単位時間当たりの吹付け量）11~15 m<sup>3</sup>/hr.、吹付け距離1.5~2.0mの条件で実施した。コンクリートは坑外のプラントで練り混ぜ、トラックアジテータで実験場所であるトンネル切羽まで運搬した。

実験に使用したコンクリートの配合は表-2に示

す6ケースである。ケース1は吹付けコンクリートとして通常用いられている標準的な配合である。ケース2～6は単位セメント量と単位水量をケース1と同一条件とし、ケース2は細骨材率を変えかつ高性能AE減水剤によりスランブを大きくした配合で、ケース3は粉塵低減剤を使用した配合である。ケース4～6がSiFを混和した配合で、ケース5は急結剤添加量を通常に比べて少なくしたもの、ケース6は粉塵低減剤併用の影響を検討したものである。なお、セルロース系粉塵低減剤を混和すると、スランブが低下するため、ケース6では高性能AE減水剤の添加量をケース4に比べて増加し、目標スランブを確保した。SiFの混和量は過去の事例、経済性、取扱い易さ（荷姿が25kg/袋）から25kg/m<sup>3</sup>（SiF置換率=25/(360+25)×100=6.5%）とした。

従来から、吹付け工法は施工時のはね返りと粉塵が多く、改善すべき課題とされてきた。一般に、粒子の径が大きいものはね返りやすいことから、細骨材率を大きくすればはね返りは少なくなるが、同一スランブを得るために必要な単位水量が大きくなり、単位セメント量の増大につながる。また、スランブが大きいほどはね返りと粉塵は少ないが、スランブが大きいと壁面に一度付着したコンクリートが剥離しやすく急結剤を多く必要とする。これらのジレンマがあって、従来は吹付け機の種類にもよるがスランブは10cm程度のもが多く使用されてきた。一方、SiFを混和するとコンクリートの見掛けの粘性が増し、剥離は抑制されると推測されることから、今回の実験ではSiFを混和した配合ははね返りと粉塵の低減をも期待して、細骨材率を80%とし、高性能AE減水剤を使用して単位水量を増やさずにスランブを20cmとした。

試験項目は、はね返り率、粉塵濃度および圧縮強度である。はね返り率はスプリングから天端までの片側断面に1m<sup>3</sup>のコンクリートを吹付け、その時はね返った材料を集めて吹き付けた材料との重量比として求めた。粉塵濃度は4m<sup>3</sup>のコンクリートを連続して吹き付けた時にローボリューム粉塵計で測定した。その計測方法は換気を停止した状態で切羽から10m離れた左右の2地点で吹付けの開始から終了まで1分間隔で測定した。初期強度は引き抜き方法（J SCE-G561）により材齢3時間と24時間で測定した。長期強度はJIS A 1107に準拠してパネルから切り出したコアについて材齢7日、28日および91日で試験した。試験体の寸法はφ10cm×h20cmで、その養生方法はコアを切り出すまでの3日間はビニールシートを被せて屋外に置き、コア切り出し後は所定の材齢

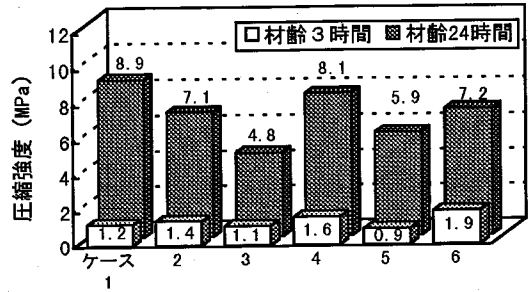


図-1 初期強度の比較

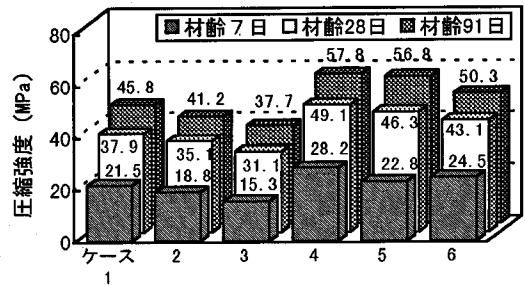


図-2 長期材齢強度の比較（品質管理用試験体）

まで20℃水中養生とした。また、コンクリートの品質管理試験として、吹付け機に投入する前にコンクリート試料を採取し、これを用いて試験体を作製して圧縮強度試験を行った。

### (3) 実験結果および考察

#### a) 初期強度

各配合の初期強度試験結果を比較して図-1に示す。材齢3時間強度は急結剤量が少ないもの（ケース5）がやや小さいが、SiFの混和の有無等配合による明確な差異は見られない。一方、材齢24時間強度は、SiF無混和の場合で、スランブが大きいもの（ケース2）と粉塵低減剤を添加したもの（ケース3）は基本配合（ケース1）に比べて減少している。SiF混和の場合、いずれも基本配合に比べて小さく、特に急結剤量を抑えたもの（ケース5）が小さくなっている。全般的には、材齢1日までの初期強度は主に急結剤量に支配され、SiFの混和による増大効果は見られず、むしろ併用する高性能AE減水剤や粉塵低減剤の影響でやや低下する傾向がある。

#### b) 長期強度

長期材齢での圧縮強度試験結果を図-2, 3に示す。図-2は品質管理用試験体について示したもので、細骨材率とスランブが等しい条件であるケース2とケース4, 5を比較すると、SiFの混和により圧縮

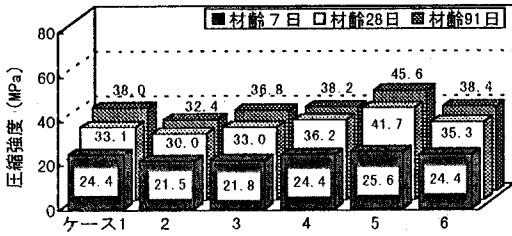


図-3 長期材齢強度の比較 (コア試験体)

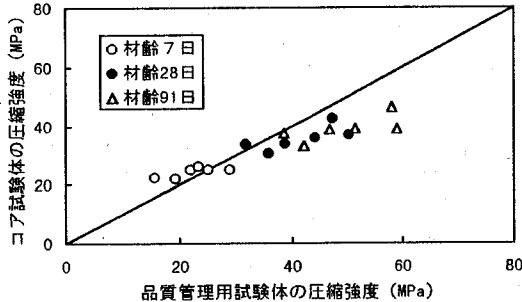


図-4 品質管理用試験体とコア試験体の強度比較

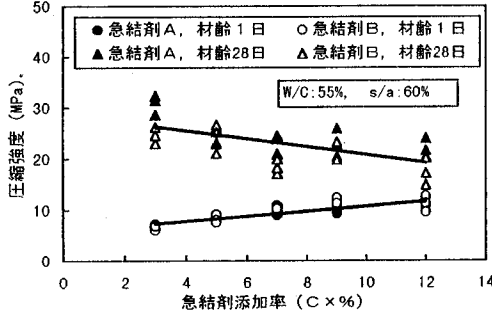


図-5 急結剤添加量とコンクリート強度の関係

強度が材齢28日で約35%、91日で約40%増加しており、SiFの長期強度増大効果が極めて大きいことが確認された。粉塵低減剤を添加した場合、SiFの混和の有無に関わらず若干の強度低下が見られた。なお、ケース4、5において同一配合であるにも関わらず材齢7日強度に若干の差異が認められるのは、品質管理用試験体は供試体作製後、全ての実験が終了するまでの3日間現場養生を行ったことによる影響と推察される。

次に、図-3から、コア試験体の圧縮強度は品質管理用試験体ほど配合間に顕著な差異は見られず、特に材齢28日以後の強度増進が小さいことが分かる。図-4は、品質管理用試験体とコア試験体の圧縮強度を比較したものである。両者は材齢7日ではほぼ同等であるのに対して、材齢91日ではコア試験体の方が小さく、高強度の配合ほど両者の強度差が拡大す

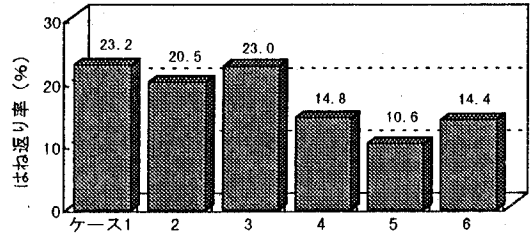


図-6 はね返り率の比較

る傾向が見られる。すなわち、SiFの混和による長期強度の増大効果に対して急結剤が悪影響を及ぼすと推察される。

急結剤は吹付け直後のダレや剥離の抑制と短期強度の発現を助長する反面、その添加率の増加に伴い長期強度の増進を阻害することは筆者らも別の実験で確認している(図-5参照)。したがって、急結剤量を施工性に支障のない範囲で抑制すれば長期強度に対する悪影響は緩和されるものと予測され、図-3においてケース5(急結剤量4%)の材齢28日および91日コア強度がケース4(急結剤量が6%と異なる以外はケース5と条件が同等)に比べて約15%大きいことはこの予測が正しいことを裏付けている。

目標とした材齢28日コア強度35MPa以上という条件はSiFを混和した場合に満足し、また、SiFの長期強度増進効果を引き出すには急結剤量の抑制が不可欠であることが確認された。

### c) 施工性

各実験ケースのはね返り率の比較を図-6に示す。SiFを混和しないケース1~3でははね返り率が20~23%であったのに対して、混和したケース4~6では10~15%で顕著に減少した。ケース5は急結剤量を通常の6%から4%に抑制したもので、吹付け直後の剥離が懸念されたが、その現象は見られず、はね返り率は全ケースで最も小さい値であった。筆者らの実験と経験によれば、はね返り率は配合のみならず、吹付け機械、吹付けの方向と壁面までの距離、空気圧力、ノズル操作の稚拙、吹付け面の凹凸の程度等によって微妙に変化するもので、繰り返して測定しても測定値はバラツキやすい。したがって、同種の実験データのさらなる蓄積が必要であるが、今回の実験でSiFの混和と高性能AE減水剤の併用、さらには細骨材率の増加の複合効果により、コンクリートの見掛けの粘性が増大し、これがはね返りの減少につながったものと考えられる。

各実験ケースにおける粉塵濃度の経時変化を図-

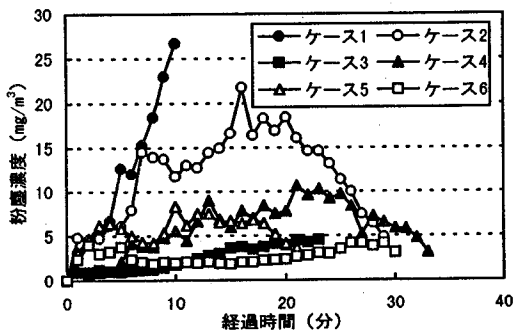


図-7 粉塵濃度の経時変化

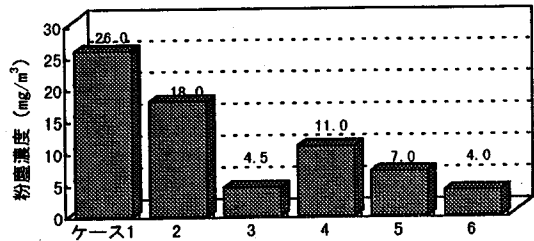


図-8 安定したときの粉塵濃度の比較

表-3 実験ケースとコンクリートの配合

コカートの種類	ケース No.	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/(C+S+SF)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)				高性能 AE減水剤	急結剤						
						W	C	S+SF	SF								
プレコン	1	10±2	4±1	61.4	60	215	350	-	-	C×0.4%	C×6.0%						
	2	20±2		57.3						70	400	25	-	C×2.5%	C×4.0%		
	3			50.6										450		-	C×1.8%
	4			45.3													C×2.0%
コン	5	10±2		61.4	70	215	350	-	80	C×0.9%	C×6.0%						
	6	20±2		57.3						400	25	-	C×2.5%	C×4.0%			
	7			50.6									450		-	C×2.0%	
	8			45.3												C×1.8%	

7に、粉塵濃度が安定した時点での値を図-8に示す。S i Fおよび粉塵低減剤を添加していないケース1, 2では吹付けの開始とともに粉塵濃度が急激に増加し、粉塵濃度は約20mg/m³まで増加した。これに対し、S i Fを混和したケース4, 5では粉塵濃度が約1/2に、粉塵低減剤を使用したケース3, 6では約1/5になった。つまり、粉塵低減剤はその効果が極めて大きい。しかし、粉塵低減剤を用いなくとも、S i Fの混和によってもある程度粉塵は減少し、その理由はS i Fを混和した配合はね返りが少なく、したがって空气中に飛散するセメント等の粉塵源が少なくなること、また粘性がやや大きいことで粉塵低減剤を少量使用した配合と類似した効果が現れるものと推察される。

以上のように、S i F 25kg/m³の混和による吹付けコンクリートの性能改善効果として、高性能AE減水剤の併用と細骨材率の適度な増加と複合してはね返りと粉塵が減少すること、急結剤量の抑制により長期強度が顕著に増大することが明らかになった。

### 3. シリカフェームによる高強度化と鋼繊維による高靱性化の検討

#### (1) 概要

本章では、実用的な配合の範囲において達成でき

る吹付けコンクリートの強度の上限を把握することを目的として、施工実験を行なった。S i F混和量は25kg/m³一定とし、単位セメント量を変化させて水結合材比の低減による高強度化の効果を調べたものである。また、トンネルの支保材の性能として重要な靱性の向上を図るため、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)についても検討した。コンクリートの目標強度は材齢28日コア強度で50MPaとした。なお、吹付け実験は建設中の地下発電所内の横坑で実施した。

#### (2) 実験方法

使用したコンクリート材料は、前章とメーカーと産地が異なるものの普通ポルトランドセメント、砕石(Gmax 15mm)、砕砂であり、高性能AE減水剤と急結剤は前章と同じものである。鋼繊維は先端フック付きの形状で、直径0.80mm、長さ30mmである。

吹付け機は前章とメーカーが異なる乾式湿式両用の空気圧送式吹付け機(公称最大吹付け能力18m³/hr.)であり、湿式方式で、吹付けロボットを用いて、吹付け速度約12m³/hr.、吹付け距離1.0~1.5mの条件で施工した。吹付け機械の配置、コンクリートの製造と運搬、パネルの製造と圧縮強度試験体の養生方法は前章とほぼ同様である。

コンクリートの配合を表-3に示す。ケース1は実

表-4 フレッシュコンクリートの性状と施工時の測定結果

ケース No.	フレッシュコンクリートの性状			吹付け 時間 (分-秒/m <sup>3</sup> )	実 測 急結剤 添加率	はね返り率 (%)	
	スランプ (cm)	空気量 (%)	単重 (kg/m <sup>3</sup> )			コンクリート	鋼繊維
1	10.5	2.3	2285	8-06	C×8.6%	29.4	—
2	21.5	1.9	2280	4-40	C×4.8%	17.0	—
3	19.5	1.2	2300	4-40	C×3.2%	22.9	—
4	21.5	2.3	2295	5-00	C×4.0%	16.7	—
5	10.5	2.8	2335	7-00	C×5.3%	20.9	32.3
6	17.5	2.2	2335	5-00	C×4.6%	23.9	—
7	17.0	3.0	2335	6-00	C×4.5%	20.0	37.5
8	15.5	3.0	2345	5-00	C×3.6%	14.3	—

験場所の工事で使用中の配合であり、単位セメント量350kg/m<sup>3</sup>で一次覆工用の吹付けコンクリートとして一般的な範疇のものである。ケース2～4は単位セメント量を350、400および450kg/m<sup>3</sup>に段階的に変化させ、S i F混和量は25kg/m<sup>3</sup>一定とした。その理由は前章で述べたとおりであるが、特に経済性を考慮したためであって、今回の実験ではS i F置換率 [ SiF / (C + SiF) ] は5.3～6.7%であって、既往の研究および施工事例の範囲内 (5～10%) でやや少なめの所にある。ケース5～8は鋼繊維混入率1.0容積% (80kg/m<sup>3</sup>) のSFRCで、他の配合要因はケース1～4に準じている。単位水量は一定とし、目標スランプが得られるように高性能AE減水剤の添加量で調整した。また、S i Fを混和したケースでは急結剤量を抑制して4%とした。

試験項目は、初期強度 (JSCE-G561に準拠した引き抜き試験法、材齢6時間と24時間)、圧縮強度と圧縮タフネス (JSCE-G551に準拠、材齢7日と28日)、曲げ強度と曲げタフネス (JSCE-G552に準拠、材齢28日)、およびせん断強度 (JSCE-G553に準拠、材齢28日) である。一次覆工の応力状態を考慮して、圧縮試験用のコアは吹付け方向と直角方向に採取し、曲げまたはせん断試験用のものは長手方向が吹付け方向と直交するように切り出した。

### (3) 実験結果および考察

フレッシュコンクリートの試験結果および施工時の測定結果を表-4に示す。スランプが目標範囲よりやや小さいものがあつたが、吹付け施工は順調で閉塞等のトラブルはなかつた。吹付け速度は10～15m<sup>3</sup>/hr. (平均12m<sup>3</sup>/hr.) であり、SFRCの場合でも吹付け速度の低下は見られなかつた。はね返り率はプレーンコンクリートで17～29% (平均21.5%)、SFRCで14～24% (平均21.0%) であつた。全般的には、S i Fを混和したものやセメン

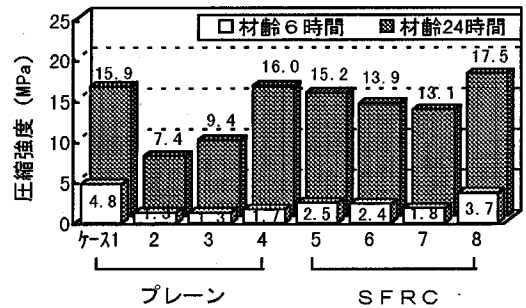


図-9 初期強度の比較

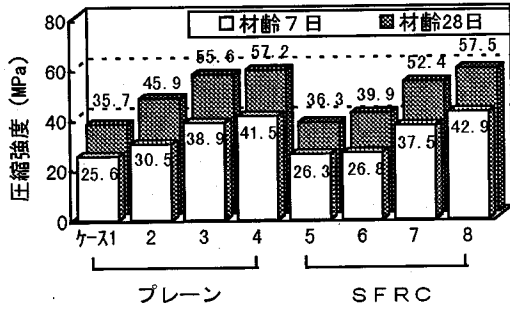
ト量が多い富配合ほどはね返りが小さい傾向が伺える。また、鋼繊維のはね返り [ (鋼繊維のはね返り率) = (1m<sup>3</sup>吹付けた時の鋼繊維のはね返り量) / (1m<sup>3</sup>中の鋼繊維の量) × 100 ] がコンクリートに比べて多いのは、鋼繊維のはね返り係数が大きいことに起因するものと推察された。

#### a) 初期強度

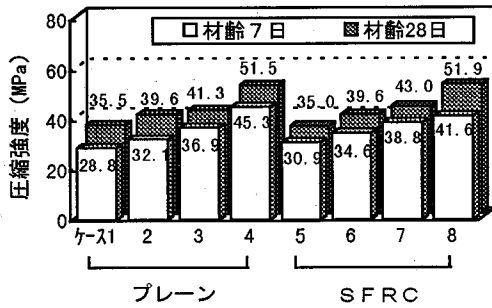
初期強度試験結果を配合別に対比して図-9に示す。鋼繊維無混入の場合、材齢6時間および24時間強度ともケース1 (C=350kg/m<sup>3</sup>, S i F無混和) が他のケース2～4 (C=350～450kg/m<sup>3</sup>, S i F=25kg/m<sup>3</sup>) に比べて大きい値を示した。これはケース1の配合はスランプが小さくて吹付け速度が低下し、実際の急結剤量が計画した6%を超えて8.6%になったことによるもので、初期強度が急結剤量に大きく影響されることを示していると考えられる。S i F混和の場合、単位セメント量が増加すると材齢6時間強度はほとんど変化しないが、材齢24時間強度は顕著に増加した。SFRCではプレーンの場合ほど配合間の差とその明確な傾向は見られず、総じてプレーンに比べてやや大きい値を示した。

#### b) 圧縮強度と圧縮タフネス

圧縮強度試験結果を図-10に示す。品質管理用試



(a) 品質管理用試験体



(b) コア試験体

図-10 圧縮強度の比較

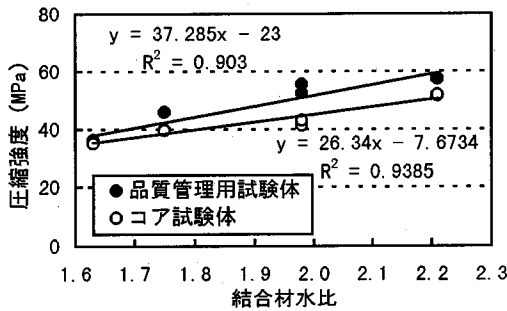
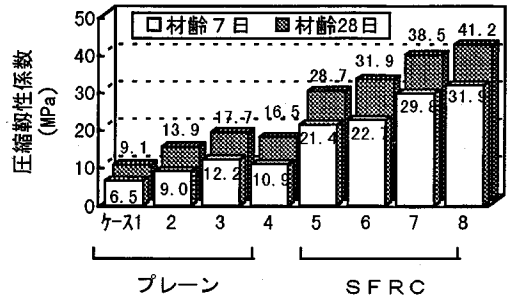
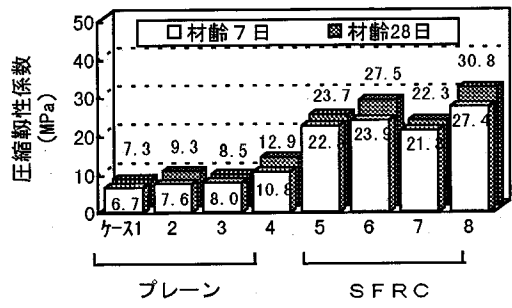


図-11 結合材水比と圧縮強度の関係

験体およびコア試験体とも、S i Fの混和およびセメント量の増加に伴って圧縮強度が増加しており、また、マトリクスが同一の条件ではプレーンコンクリートとSFRCの圧縮強度はほぼ同様の値を示した。コア試験体の圧縮強度は品質管理用試験体に対して材齢7日ではやや大きく、材齢28日では逆にやや小さい値であって、コア試験体の品質管理用試験体に対する材齢28日強度比はおおむね85%である。これは前章で述べたように急結剤の影響が現れていると推察される。結合材水比と圧縮強度の関係は図-11に示すとおりであり、品質管理用試験体はもちろんのことコア試験体においても両者は正の一次相関を示し、相関係数は0.94である。したがって、今回の使用材料で材齢28日コア強度で50MPaを満足する

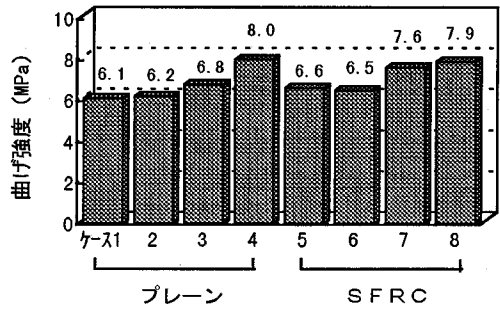


(a) 品質管理用試験体

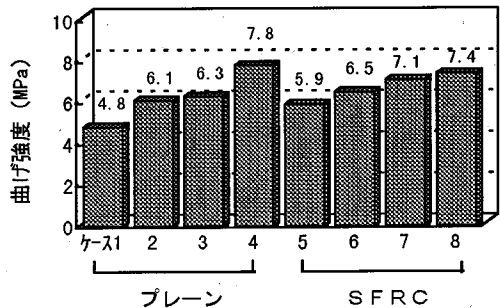


(b) コア試験体

図-12 圧縮タフネスの比較



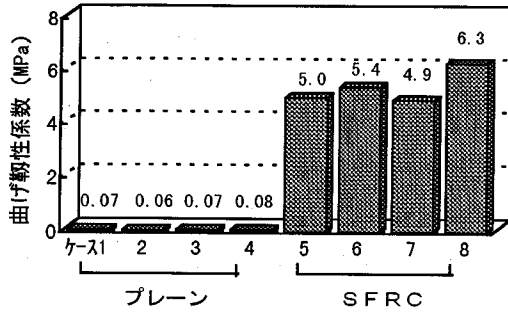
(a) 品質管理用試験体



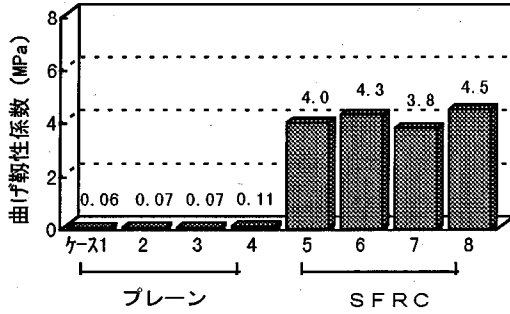
(b) コア試験体

図-13 曲げ強度の比較

ことが十分可能であり、ケース4 (単位セメント量450kg/m<sup>3</sup>, S i F混和量25kg/m<sup>3</sup>, 水結合材比45.



(a) 品質管理用試験体



(b) コア試験体

図-14 曲げタフネスの比較

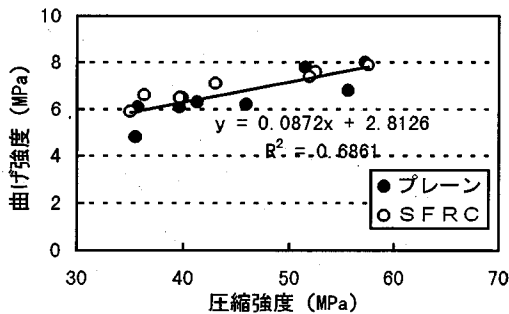


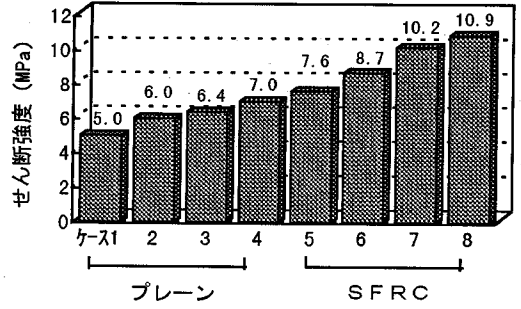
図-15 圧縮強度と曲げ強度の関係

2%, 急結剤量C×4%)がそれに対応する。

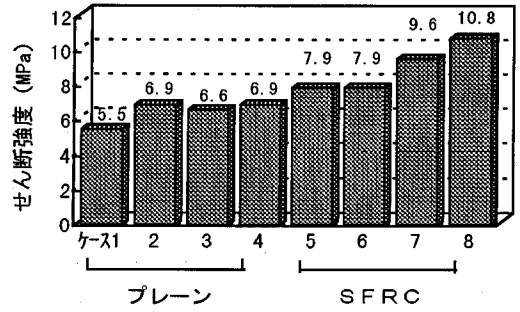
圧縮タフネス試験結果を図-12に示す。圧縮強度と同様にS i Fの混和およびセメント量の増加に伴って圧縮タフネスは増大しており、また当然のことながらSFRCはマトリクスが同一であるプレーンコンクリートに比べて大きく2～3倍の値を示した。

### c) 曲げ強度と曲げタフネス

曲げ強度試験結果を図-13に、曲げタフネス試験結果を図-14に示す。曲げ強度はケース1を除いて品質管理用試験体とコア試験体の差は小さく、また鋼繊維を混入したものとししないものとの差もほとんど認められない。ケース1は急結剤量がやや多かったことがコア試験体の曲げ強度に悪影響を及ぼした可能性が考えられる。圧縮強度と曲げ強度の関係



(a) 品質管理用試験体



(b) コア試験体

図-16 せん断強度の比較

は図-15に示すとおりで、両者は正の一次相関を示し(相関係数0.83)、同一圧縮強度では曲げ強度はSFRCの方がわずかに大きい傾向を示した。

曲げタフネスは当然のことながらSFRCがプレーンコンクリートに比べて格段に大きい。SFRCの曲げタフネスはS i Fの混和およびセメント量の増加に伴って増加するが、その増加割合は品質管理用試験体に比べてコア試験体はやや小さく、この原因として表-4に示したように鋼繊維は他の材料に比べてはね返り易いことが影響したものと考えられる。

### d) せん断強度

せん断強度試験結果を図-16に示す。S i Fの混和とセメント量の増加による高強度化と鋼繊維の混入によってせん断強度が効果的に増大することが分かる。せん断強度においては、品質管理用試験体とコア試験体とに明確な差異は認められない。

以上のとおり、材齢28日コア強度50MPaという目標品質に対して、これを満足する吹付けコンクリートを作り得ることが明らかとなった。従来の吹付けコンクリートの一般的な配合(ケース1)、目標品質を満足する配合(ケース4)および目標品質を満足するSFRC(ケース8)について、コア試験体の物性を比較して表-5に示す。高強度化にともなって圧縮タフネスと曲げ強度が増大し、さらにSFR



表-5 従来配合と高強度配合の力学的性質の比較（コア試験体，材齢28日）

ケースNo.	項目	圧縮強度 (MPa)	圧縮タフネス (MPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げタフネス (MPa)	せん断強度 (MPa)
ケース1 (7°レソコソクリート, C=350kg/m <sup>3</sup> )		35.5 (1.0)	7.2 (1.0)	4.8 (1.0)	0.06 (1.0)	5.5 (1.0)
ケース4 (7°レソコソクリート, C=450kg/m <sup>3</sup> , SiF=25kg/m <sup>3</sup> )		51.5 (1.4)	12.9 (1.8)	7.8 (1.6)	0.1 (1.8)	6.9 (1.2)
ケース8 (SFRC, C=450kg/m <sup>3</sup> , SiF=25kg/m <sup>3</sup> , SF=80kg/m <sup>3</sup> )		51.9 (1.5)	30.8 (4.3)	7.4 (1.5)	4.5 (75.0)	10.8 (2.0)

(注) カッコ内の数値はケース1を1.0とした時の比率を示す。

表-6 コンクリートの試験配合

実験 ケース	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	W/(C+SiF) (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			高性能 AE減水剤	急結剤	
					W	C	SiF			
1	10±2	4±1	62	59.7	215	360	-	C×0.7%	C×6.0%	
2										400
3										450
4										360
5	20±2	70	50.6	400	25	C×2.5%				
6							450	C×2.0%		

表-7 コンクリートの練混ぜ試験結果

ケース No.	コンクリート温度 (°C)	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)			備考
				材齢3日	材齢7日	材齢28日	
1	18.0	9.0	3.0	16.5	25.7	42.2	SiF無混和
2	19.0	10.0	3.2	19.5	31.6	46.9	
3	19.0	11.0	3.0	24.8	36.6	54.9	
4	18.0	18.5	4.0	19.3	31.5	50.9	SiF混和
5	18.0	21.0	4.2	23.2	36.4	55.7	
6	18.0	21.5	4.2	28.7	45.7	66.3	

Cとすることで圧縮タフネス、曲げタフネスおよびせん断強度の改善が著しいことが分かる。

#### 4. 実工事への適用例

##### (1) 概要

最大土被りが900mに達するトンネル工事において、土被り400mを超えた区間より著しい支保の変状が生じ始めた。原因と対策を検討した結果、土被り600m以奥では計画時の標準支保パターンのままでは更に大きな変状が予想されたため、土被りに応じて増強した特殊支保パターン（鋼製支保工のランクアップ、ロックボルトの本数の増加、覆工厚さの割増しおよび高強度吹付けコンクリートの使用）を採用することとし、この対策の結果無事トンネルを構築できたものである。

検討の手順は、①現場コンクリートプラントにおける高強度コンクリートの練混ぜ試験、②延長80mの試験施工区間における高強度吹付けコンクリートの品質および施工性の確認並びにトンネルの変

状計測、③解析に基づいた土被り別の新支保パターンを採用した実施工である。

##### (2) 高強度吹付けコンクリートの現場試験施工

###### a) コンクリートの練混ぜ試験

試験施工に供する配合を選定するため、現場コンクリートプラントで現地材料を用いて練混ぜ試験を行った。コンクリート材料は、普通ポルトランドセメント、砕石 (Gmax 15mm)、砕砂で、SiF、高性能AE減水剤および急結剤は前章と同じものである。

配合は表-6に示す6種類であり、その試験結果を表-7に示す。SiFを25kg/m<sup>3</sup>混和したコンクリートは無混和のものに比べて材齢7日で4～9MPa、材齢28日で8～11MPaの強度増加が認められた。

###### b) 試験施工

トンネル内に80mの試験施工区間を設け、それを20m毎の4区画に分けて配合No.4と配合No.5（表-6参照）を交互に用いて吹付けを行った。吹付け機は前章と同じもので、ロボットを用いて吹付けた。

表-8 試験施工におけるコンクリートの圧縮強度試験結果

ケース No.	材齢 (日)	試験体の 種類	圧縮強度 (Mpa)					平均	標準偏差	変動係数 (%)
			①	②	③	④	⑤			
4	7	コア	25.1	26.3	25.3	30.8	25.3	26.5	2.42	9.1
		品質管理	28.3	25.0	27.6	28.4	27.3	27.3	1.38	5.0
	28	コア	34.3	35.2	38.1	36.4	33.7	35.5	1.76	4.9
		品質管理	46.8	39.1	46.6	45.5	39.8	43.6	3.79	8.7
5	7	コア	26.2	28.4	31.5	31.9	29.9	29.6	2.34	7.9
		品質管理	31.7	34.2	38.0	38.3	33.5	35.1	2.90	8.3
	28	コア	37.3	42.4	39.9	40.0	39.1	39.7	1.84	4.6
		品質管理	51.6	51.7	58.4	53.2	49.9	52.9	3.26	6.2

参考：従来の配合 (表-6 配合No.1の強度試験結果)  
 品質管理用試験体：σ 7=21.1MPa σ 28=31.5MPa  
 コア試験体：σ 7=21.1MPa σ 28=21.5MPa

表-9 試験施工におけるトンネル断面の変位量計測結果

支保 パターン	測点	コンクリート 配合	最大 変位速度 (mm/日)	変位量		切羽 距離 (m)	計測 日数 (日)	備考 (土被り)
				水平変位 (mm)	天端沈下 (mm)			
D II	No. 178+00	従来配合	9.1	112	60	190	142	インポート有 (600m)
D II	No. 177+05	従来配合	14.0	94	58	170	121	インポート有 (590m)
D II	No. 175+10	従来配合	9.7	66	40	140	109	インポート有 (600m)
D II	No. 174+15	従来配合	6.9	64	31	176	150	インポート有 (600m)
D IV	No. 173+15	⑤	3.1	46	30	153	118	インポート有 (600m)
D IV	No. 172+15	④	13.3	80	42	133	106	インポート有 (600m)
D IV	No. 171+05	⑤	17.0	144	40	103	93	インポート有 (590m)
D IV	No. 169+08	④	7.7	60	27	136	111	インポート有 (600m)

試験施工区間においてトンネル壁面の5ヶ所から採取したコンクリートコアの強度試験結果を表-8に示す。コア強度の平均値は配合No. 4が材齢7日及び28日でそれぞれ26MPa, 35MPaであり、配合No. 5が同様に29MPa, 39MPaであった。コア強度の変動係数は5~9%で、バラツキは比較的小さかった。品質管理用試験体とコア試験体の強度を比較すると、材齢7日では差が小さいが、材齢28日ではその差が大きくコア強度は配合No. 4で19%、配合No. 5で25%小さい値を示した。この強度差は前章までに示した施工実験の結果とほぼ同様の傾向であった。

試験施工区間において計約800m<sup>3</sup>の吹付け施工を行った結果、両配合とも吹付け機からの吐出は順調で壁面への付着も良好であった。ただし、配合No. 5の方がセメント量が多い分コンクリートの粘性が大きく、ノズルからの吐出が間欠的になる場合があったが、全般的には両配合とも十分施工可能であった。

はね返り率は測定回数が配合毎に1回ずつと少ないものの、配合No. 4が14%、配合No. 5が20%であった。また、目視観察による粉塵量も両配合間では配合No. 4の方が少なかった。前述したとおり、配合No. 4の方が吐出がスムーズで、これがはね返りと粉塵量の低減にむすびついたものと考えられる。

試験施工区間 (支保パターンD IV) とその直前の区間 (標準支保パターンD II) でのトンネル断面のNo. 1からNo. 4へ) と鋼製支保工の種類 (H-150か

らH-200へ) を変更している。表-9から、新しい支保パターン (D IV) のインポート完了時の水平変位量は40~80mm程度であり (ただし、測点 No. 171+05は断層部のため変位が大き)、標準支保パターン (D II) 区間の60~110mm に比べて小さく、また、天端沈下量も同様に30~40mmと30~60mmであって (D IV) の方が小さい。試験施工区間はわずか80mであり、この間においても破碎帯の分布状況など地山条件は微妙に変化するため支保パターン変更の効果を定量的に判断することは難しいものの、新しい支保パターン (D IV) で支保に顕著な変状は見られず、したがって、配合変更を含めた新しい支保パターン (D IV) が変状の抑制に適していると判断された。

### (3) 新支保パターンによる実施工

解析により求めた土被り別の必要支保圧に対応した新しい支保パターンを表-10に示す。土被り別の吹付けコンクリートの仕様を表-11に示す。ここで、高土被り条件の下ではトンネル掘削後大きな地山荷重が作用するため早期強度が特に重要と考え、吹付けコンクリートの設計基準強度を材齢7日で規定し、25MPaと29MPaの2種類とした。これらはそれぞれ配合No. 4とNo. 5が相当し、材齢7日コア強度試験結果 (表-8参照) を基に設定したものである。試験施工区間を含めて土被り600m以奥に関して新支保パターンを採用することで、最大土被り900mの地点を無事通過することができた。この間の計測

表-10 土被り別の新支保のパターン

土被り (m)		特殊支保パターン				標準支保パターン (参考)
		600~700		700~800		800~900
総延長 (m)		160		230		260
支保パターン		D IV	D IV'	D V	D V'	D VI
覆工厚さ (cm)		40 (470 <sup>h</sup> -t) 50	同左	40 (470 <sup>h</sup> -t) 50	同左	40 (470 <sup>h</sup> -t) 50
吹付けコンクリート※ (cm)		30 $\sigma 7=25\text{MPa}$	35 同左	30 $\sigma 7=29\text{MPa}$	40 同左	35 $\sigma 7=29\text{MPa}$
金網		上下半	同左	上下半	同左	上下半
ロック ボルト	ボルト長 (m)	L=4.0 耐力 18 t	同左	L=4.0 耐力 18 t	同左	L=4.0 耐力 18 t
	間隔 [延長方向 ×周方向] (m)	1.0×1.2 (17本)	同左	1.0×1.0 (21本)	同左	1.0×1.0 (21本)
鋼製 支保 工	種類	H-200	同左	H-200	同左	H-250
	ピッチ (m)	1.0	同左	1.0	同左	1.0
支保 耐力	場所	全断面	同左	全断面	同左	全断面
	吹付けコンクリート※	1.46	1.72	1.75	2.07	2.03
	ロックボルト	0.15	同左	0.18	同左	0.18
	鋼製支保工	0.32	同左	0.32	同左	0.46
合計 (MPa)		1.93	2.19	2.25	2.61	2.67
土被り別推定内圧 (MPa)		1.78 土被り 700m	同左	2.15 土被り 800m	同左	2.51 土被り 900m

※ D IV', D V' の数値は、一部地山の弱層部において増し吹付けを考慮した場合の支保耐力である。

表-11 土被り別吹付けコンクリートの仕様

土被り (m)	吹付けコンクリートの仕様				摘要
	厚さ (cm)	設計基準強度 (MPa)	ワット量 (kg/m <sup>3</sup> )	SiF量 (kg/m <sup>3</sup> )	
600~700	30	$\sigma 7 \geq 25$	360	25	配合④
700~800	30	$\sigma 7 \geq 29$	400	25	配合⑤
800~900	35	$\sigma 7 \geq 29$	400	25	配合⑤

結果によれば、局部的な悪質部の地層 (CM, CL 級) では新支保パターンでも大きな支保の変状を生じた箇所があって、増し吹付けコンクリート (t = 5~10cm) による補強を余儀無くされた。しかし、全般的には支保の変位は天端沈下量で約30mm (天端沈下量0.6%)、最大内空変位量で約70mm (内空変位率 0.7%) までに抑えられ、高強度吹付けコンクリートの使用を含めた支保の増強対策がほぼ期待したように効果を発揮したものと判断された。

## 5. 結論

シリカフェームを混和した高強度吹付けコンクリートについて2回の施工実験を行い、さらに実現場に適用した。シリカフェーム混和量は経済性と取扱いの簡便さを考慮して25kg/m<sup>3</sup>一定とし、その条件で得られた結論は以下のとおりである。

(1) シリカフェームを混和した吹付けコンクリートの圧縮強度は無混和に比較して大きくなり、材齢28日コア強度で35MPa以上を得るにはセメント量360kg/m<sup>3</sup>にシリカフェームを混和し、かつ急結剤量

を出来るだけ少なくする必要がある。吹付けられたコンクリートは品質管理用試験体ほど長期の強度増進が見られず、これは急結剤が影響し、その量が多いほど長期の強度発現を阻害するためである。

(2) 吹付けコンクリートの材齢1日までの初期強度は主に急結剤量に支配され、シリカフェームの混和による増大効果は見られず、むしろ併用する高性能A E減水剤の影響で低下する傾向がある。鋼繊維の混入は初期強度の増進にある程度寄与している。

(3) 圧縮強度はセメント量 (セメント水比) の増加によって大きくなり、材齢28日コア強度で50MPaを得るにはセメント量450kg/m<sup>3</sup>、シリカフェーム量25kg/m<sup>3</sup>を用いた配合である。

曲げ強度は圧縮強度と同様にセメント量の増加とともに大きくなるが、鋼繊維の混入の影響は特に認められない。圧縮タフネスおよび曲げタフネスは鋼繊維の混入により顕著に増大し、セメント量の増加によってさらに大きくなる。

せん断強度はシリカフェームの混和およびセメント量の増加による高強度化並びに鋼繊維の混入により効果的に増大する。

(4) 土被りの大きいトンネルの支保の変状抑制対策 (支保工増強対策) としてシリカフェームを混和した高強度吹付けコンクリートの使用を含む新支保パターンを採用した結果、天端沈下量および内空変位量を抑制することができ、最大土被り900mのトンネルを過度の変状もなく施工できた。この場合の吹付けコンクリートの設計基準強度は材齢7日で規定し、25MPa (土被り600~700m) と29MPa (土

被り700m以奥)である。

吹き付けられた壁面から採取したコア試験体の強度は配合A(セメント量 $360\text{kg}/\text{m}^3$ , シリカフューム量 $25\text{kg}/\text{m}^3$ )で材齢7日が $26\text{MPa}$ , 28日が $35\text{MPa}$ , 配合B(セメント量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ , シリカフューム量 $25\text{kg}/\text{m}^3$ )で同様に $29\text{MPa}$ と $39\text{MPa}$ であり, 両配合を土被りに応じた新支保パターンに取り入れたものである。

(5)シリカフュームを混和した吹付けコンクリートは無混和の場合に比べて粉塵およびはね返り量が少ない。これにはシリカフュームの混和とともに細骨材率の適度な増加と高性能AE減水剤の併用とが複合してコンクリートの粘性が適度に増加することが影響していると推察される。

#### 参考文献

- 1) 中原康, 田沢雄二郎: 新しい湿式吹付けコンクリート システムの施工性とコンクリートの物性, セメント・コンクリート, No. 483, pp. 36~43, 1983. 8.
- 2) 田沢雄二郎: 吹付けコンクリートの技術現状と今後の課題, コンクリート工学, Vol. 30, No. 6, pp. 18~26, 1992. 6.
- 3) 土木学会コンクリートライブラリー80, シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案), 1995. 10.
- 4) JTA北欧技術調査団: 北欧における地下空間技術の現状—90北欧技術調査報告—, トンネルと地下, 第21巻11号, pp. 57~65, 1991. 11.
- 5) 小野紘一: 欧米におけるトンネル支保の吹付けコンクリート, セメント・コンクリート, No. 543, pp. 13~19, 1992. 5.
- 6) 末永充弘, 羽根良雄, 久湊豊, 橋本進: 耐久性に富む高強度吹付けコンクリートの施工—北陸新幹線加越トンネル—, トンネルと地下, 第22巻12号, pp. 15~23, 1991. 12.
- 7) 岡田喬, 川原一則, 加藤勝彦: シリカフュームを混入した高品質吹付けコンクリート工法の開発, 熊谷技報第50号, pp. 53~61, 1991. 8.
- 8) 原田耕司, 松井健一, 前田一行, 寺本勝三: シリカフュームを混入した吹付けコンクリートの強度物性, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, pp. 156~157, 1992. 9.
- 9) 岡田浩司, 本橋賢一, 横関康祐, 田沢雄二郎: シリカフュームを混和した吹付けコンクリートの現場施工実験, シリカフュームを用いたコンクリートに関するシンポジウム論文報告集, pp. 139~144, 1993. 11.
- 10) 本橋賢一, 田沢雄二郎, 横関康祐, 岡田浩司: 高強度・高靱性吹付けコンクリートの現場施工実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 1, 273~1, 278, 1995. 6.
- 11) ITA SHOTCRETE: SHOTCRETING TECHNOLOGY First Draft, 1990. 1.
- 12) W. Lucas: ヨーロッパにおける吹付けコンクリートの現状, 日本トンネル技術協会吹付けコンクリートに関するフォーラム, pp. 1~52, 1991. 5.

(1996. 2. 27受付)

## PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH SHOTCRETE INCORPORATING SILICA FUME AND AN APPLICATION FOR TUNNEL LINING

Yujiro TAZAWA, Kenichi MOTOHASHI, Kosuke YOKOZEKI and Koji OKADA

This study presents the field test results of high-strength shotcrete containing silica fume. By selecting proper mix with silica fume of  $25\text{kg}/\text{m}^3$  and by adding accelerator as little as possible, the strength of core specimen at the age of 28days could be achieved upto  $50\text{MPa}$  and dust and rebound effectively reduced.

In the construction of a tunnel in which the depth of overburden reaches about 900m, special support patterns including the use of high-strength shotcrete were introduced. As a result, it was possible to construct it without any particular large deformation.