

論文 高強度・高靱性吹付けコンクリートの現場施工実験

本橋賢一*¹・田沢雄二郎*²・横関康祐*³・岡田浩司*³

要旨：シリカフュームを混和することによる吹付けコンクリートの高強度化を施工実験を行って検討した結果、単位セメント量450kg/m³、シリカフューム混和量 25kg/m³、高性能A E減水剤の適量使用及び急結剤量の抑制により、材齢28日において500kgf/cm²を超える高強度が得られた。さらに鋼繊維を1容積%混入することで、靱性及びせん断強度が大きく改善されることを確認した。

キーワード：吹付けコンクリート、シリカフューム、鋼繊維、高強度コンクリート、靱性

1. はじめに

トンネル工事及び大規模地下空洞工事において吹付けコンクリートは重要な支保材料であり、その高強度化や高耐久化が模索されている。シリカフューム（以下 SiFと略記）はこれらの観点から有用性の高い混和材料として注目されており、わが国でも研究報告が増加している。筆者らもこの分野の研究を実施しており、はね返り及び粉塵の低減、強度増加に対してシリカフュームが有効であることをすでに報告した [1]。

ここでは、コア圧縮強度500kgf/cm²以上という目標を定めて吹付けコンクリートの配合を検討したものであり、さらに支保材料の性能として重要な靱性の向上を図るため、SFRCについても検討した。

2. 実験方法

施工実験は現在建設中である地下発電所内の横坑で実施した。

2. 1 使用材料及び使用機械

使用材料及び使用機械を表-1に示す。

SiFはノルウェー産の非造粒型（undensified）のものを、鋼繊維（以下SFと略記）は両端フック付のものを使用した。吹付け機は空気圧送式の乾湿式両用型であり、今回は湿式方式で、吹付け速度約12m³/hr、ノズル先端から壁面までの吹付け距離 1.0~1.5mの条件で吹付けた。

2. 2 コンクリート配合

比較検討したコンクリートの配合は表-2に示すとおりで、SFを混入しない配合（便宜上、以下プレーンコンクリート

表-1 使用材料及び使用機械

セメント	普通ポルトランドセメント 比重 ; 3.16
細骨材	甲州産砕砂 表乾比重 ; 2.63, FM ; 3.03
粗骨材	甲州産碎石 Gmax ; 15mm 表乾比重 ; 2.66, FM ; 6.27
シリカフューム SiF	非造粒型, SiO ₂ 90%以上 比重 ; 2.20, 比表面積 ; 200,000cm ² /g
鋼繊維 SF	フック付き 直径 ; 0.80mm, 長さ ; 30mm 比重 ; 7.85
混和剤	ホリカルボノ酸系高性能A E減水剤
急結剤	セメント鉱物系粉末タイプ
吹付け機	N社製空気圧送式吹付け機
急結剤添加装置	N社製

* 1 鹿島建設（株）技術研究所第二研究部第2研究室長（正会員）

* 2 鹿島建設（株）土木技術本部技術部次長（正会員）

* 3 鹿島建設（株）技術研究所第二研究部第2研究室研究員（正会員）

表-2 コンクリートの配合

コンクリートの種類	ケース No.	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)	急結剤* (C×%)				
						水 W	セメント C	シリカフェーム SiF	鋼繊維 SF						
プレーン	1	10±2	4±1	61.4	60	215	350	-	-	0.4	6.0				
	2	20±2		61.4			25	80		400		450	2.5		
	3			53.8							1.8		4.0		
	4			47.8							2.0				
SFRC	5	10±2		61.4			70	215	350	-	80	0.9	6.0		
	6	20±2		61.4					25	80		400		450	2.5
	7			53.8									2.0		4.0
	8			47.8									1.8		

*急結剤添加量は目標値を示す。

と呼ぶ)が4種類(ケース1~4), SFRCが4種類(ケース5~8)である。

ケース1は工事で使用中の配合であり, トンネルの一次覆工用吹付けコンクリートの配合としてわが国で標準的と見なしうるものである。ケース2~4は SiFをセメントに対して外割りで25 kg/m³混和したもので, 単位セメント量を350, 400及び450kg/m³に変化させた。SiF混和量を25 kg/m³に固定した理由はその荷姿が25kg袋となっていて取扱いが簡便であることによる。なお, 既往の研究及び施工事例では, 吹付けコンクリートにおける SiF置換率 [SiF / (C + SiF)] は5~10%の範囲が多く採用されており, 今回の実験では SiF置換率は5.3~6.7%であって, やや少なめの領域にある。また, ケース2~4でははね返り低減を期待して, 細骨材率及び目標スランプをそれぞれ70%, 20±2cmに設定した。

ケース5~8はSF混入率 1.0容積%のSFRCで, 他の配合要因はプレーンコンクリートのケース1~4に準じている。

単位水量は固定し, 高性能AE減水剤の添加量によりスランプを調整した。急結剤添加量はケース1及び5でC×6%に, 他のケースでC×4%に設定した。実工事における急結剤添加量はコンクリートの配合, 吹付け機械, 地山の状況, 吹付け方向等により大きく変動するようであり, 筆者らの経験と情報では湿式で粉体急結剤

使用の場合で大略5~9%の範囲にあり, 平均的には6~7%程度である。急結剤は吹付け直後のダレや剥落の抑制と初期強度の確保の点で有効であるが, 一方, 図-1に示すように急結剤添加量の増加につれてその銘柄によらず長期強度は確実に減少する。

SiFは初期強度よりもむしろ長期強度の増進に寄与する効果が大きく, この特徴を活かすには急結剤添加量の抑制が好ましいことはすでに指摘したところであり[1], これが上述した急結剤添加量を設定した理由である。

2. 3 試験項目及び試験方法

試験項目はスランプ, 空気量, はね返り

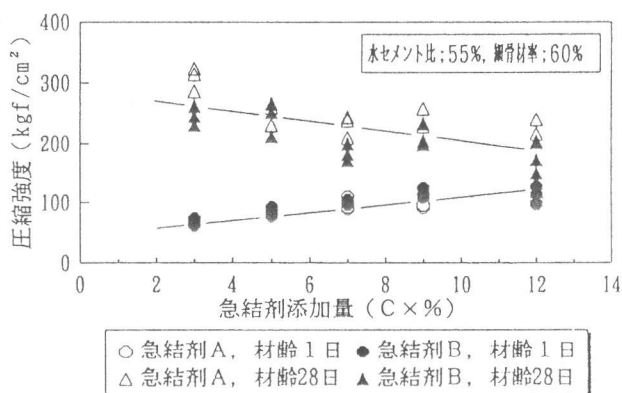


図-1 急結剤添加量が圧縮強度に及ぼす影響

注) コンクリートと急結剤を手早く混合し, それをφ10×20cmの鋼製型枠中に振動タンパを用いて締固めて, 供試体を作製した。

及び硬化コンクリートの試験である。はね返りは、吹付け時にはね返った試料を回収し、その重量を吹付けたコンクリート重量で除して算出した。硬化コンクリートの試験は初期強度（日本道路公団のプルアウト方式の試験法に準拠）と、圧縮強度及び圧縮靱性係数、曲げ強度及び曲げ靱性係数並びにせん断強度（いずれも、土木学会「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）」に記載される土木学会規準に準拠）である。圧縮、曲げ及びせん断試験は、吹付け機投入前に試料を採取して作製した急結剤の添加されていないモールド供試体と、吹付けパネルからコアまたははりを切り出して実施した切り出し供試体の両者について実施した。圧縮試験用のコアは吹付け方向と直角方向に採取した。供試体の養生は、運搬及び加工に要した材齢3日までは気中養生で、その後は強度試験時まで20℃水中養生とした。吹付けは、各ケースにおいて1.5m³と0.5m³の2回に分けて行い、1.5m³の吹付けでモールド供試体と強度試験用パネルを作製し、0.5m³をスプリングから天端に吹付けてはね返りの測定を行った。

3. 実験結果及び考察

吹付け前のコンクリート温度は27～31℃で、スランプは目標範囲を満足した。空気量は目標範囲に比べてやや小さく、2.5±1%であった。急結剤添加量はトラックアジテータ1車毎に使用した量を急結剤タンクに補充する方法によりチェックしたが、その測定値はほぼ目標値 ±1%であった。

3. 1 はね返り

はね返り率の比較を図-2に示す。

はね返り率はプレーンコンクリートで約17～29%（平均21.5%）、SFRCで約14～24%（平均20.0%）であった。プレーンコンクリートについて配合間の相違を比較すると、SiF無混和のケース1に比べてこれを混和したケース2～4でははね返り率は約2/3に低減した。表-2の配合条件から分かるとおり、今回の実験では細骨材率はケース1のみ60%で、他は70%に設定している。はね返り率の測定はバラツキの大きい試験であって、したがってデータ数を増す必要があるものの、今回の結果からははね返り率は細骨材率の増加とSiFの混和により減少することが推測される。

なお、一部のケース（ケース5と7）についてははね返り試料からSFを分別回収してSFのはね返り率を求めたが、その測定値は前者で32%、後

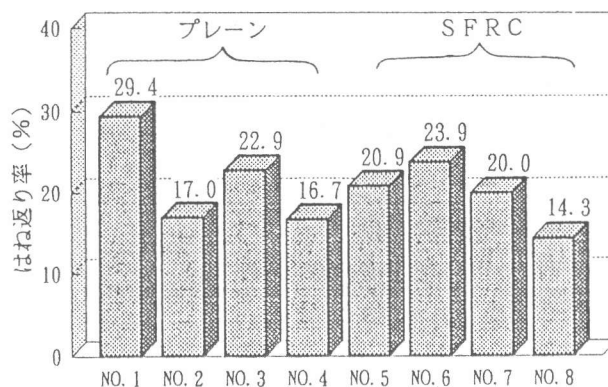


図-2 はね返り率の比較

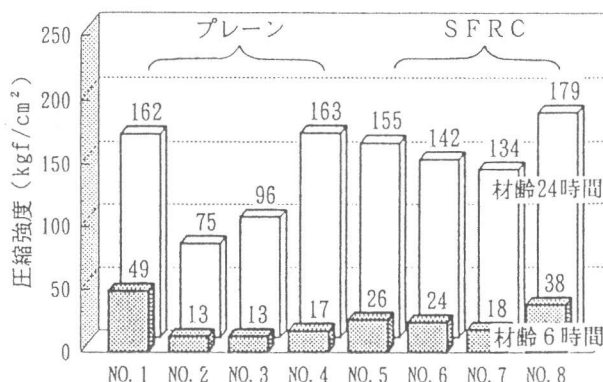


図-3 初期強度の比較

者で37%であって、SiFの混和の有無にかかわらずSFは他の構成材料に比べてはね返りが多いという結果であった。

3. 2 初期強度

初期強度の比較を図-3に示す。

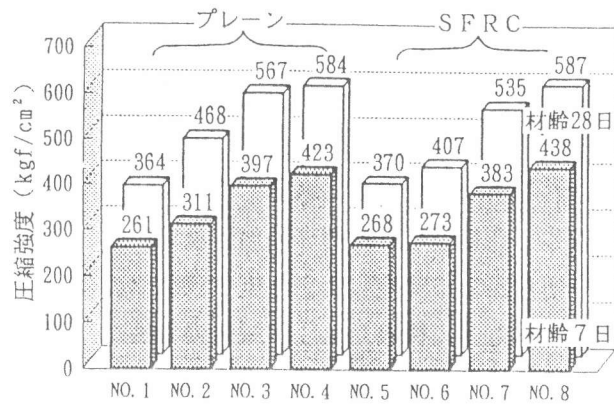
プレーンコンクリートの初期強度は急結剤添加率に大きく影響される傾向が認められ、添加率がC×6%で他のケース(C×4%)に比べ大きいケース1が初期強度が最も大きくなった。SiFの混和は直接的には初期強度に大きな影響を及ぼさないようであり、また単位セメント量の増加により材齢6時間強度はあまり変化しないものの、材齢24時間強度は顕著に増大した。

SFRCの初期強度はプレーンコンクリートほど配合間の差は見られず、材齢6時間で18~38kgf/cm²、24時間で134~179kgf/cm²であった。

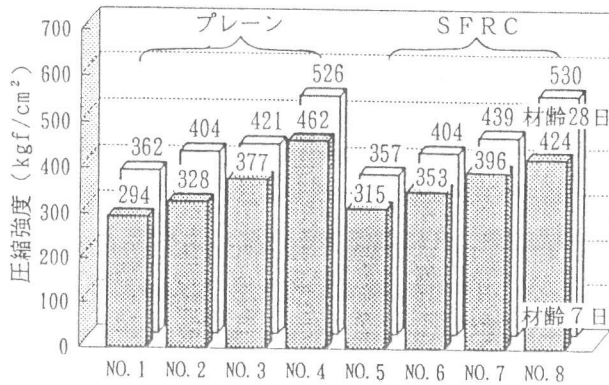
3. 3 圧縮強度と圧縮靱性係数

圧縮強度の比較をモールド供試体と切り出し供試体別に図-4(a)(b)に示す。同様に圧縮靱性係数の比較を図-5(a)(b)に示す。

図-4(a)から、モールド供試体の圧縮強度は、プレーンコンクリート及びSFRCにかかわらず、材齢7日から28日にかけて順調に増加しており、その伸び率は約40%であった。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ており、SiFの混和あるいは単位セメント量の増大に伴って圧縮強度は顕著に増加した。結合材量が最も多い単位セメント量450kg/m³、SiF混和量25kg/m³の配合(ケース4と8)では材齢28日圧縮強度は約580kgf/cm²の高強度を示

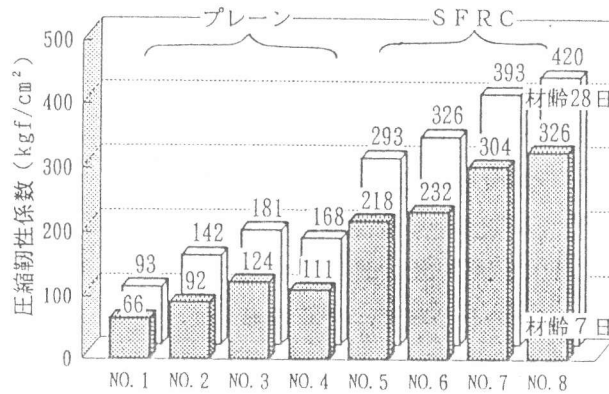


(a) モールド供試体

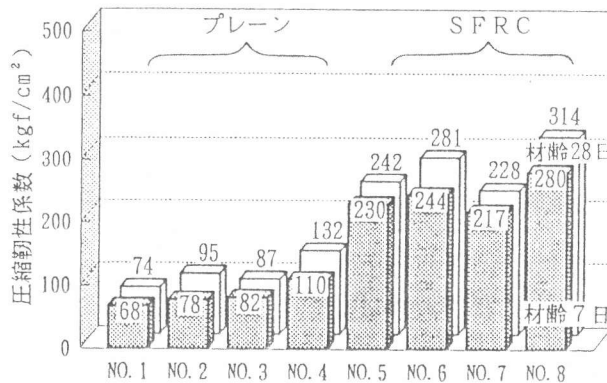


(b) 切り出し供試体

図-4 圧縮強度の比較



(a) モールド供試体



(b) 切り出し供試体

図-5 圧縮靱性係数の比較

した。一方、図-4 (b) から、切り出し供試体の圧縮強度はモールド供試体に比べて材齢7日はやや大きく、材齢28日は逆にやや小さい値を示した。これは、急結剤が初期強度を増加させ、逆に長期強度発現を阻害する両効果によるものと推察される。切り出し供試体強度はモールド供試体強度に比べて配合間の差異が若干小さい傾向があるものの、プレーンコンクリート及びSFRCにかかわらず、材齢28日圧縮強度はSiF25kg/m³の混和により約10%増加し、単位セメント量450kg/m³のケースでは約530kgf/cm²が得られた。

図-5 (a) (b) から、圧縮靱性係数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大きく、マトリクスが同一の条件ではプレーンコンクリートの約2.5~3.0倍であった。切り出し供試体の圧縮靱性係数はモールド供試体のそれほど SiFの混和あるいは単位セメント量の増加によって増大していない。

3. 4 曲げ強度と曲げ靱性係数

切り出し供試体の曲げ強度の比較及び曲げ靱性係数の比較を図-6、7に示す。曲げ強度と圧縮強度の関係を図-8に示す。図-6及び8から曲げ強度は圧縮強度と正の一次相関を示し、同一圧縮強度では曲げ強度はSFRCの方がプレーンコンクリートに比べて僅かに大きい傾向を示した。図-7から当然のことながらSFRCの曲げタフネスはプレーンコンクリートに比べて格段に増大した。SFRCの曲げ靱性係数は圧縮強度の増加に伴って増大するが、その増加割合は圧縮靱性係数に比べて小さいことが伺える。

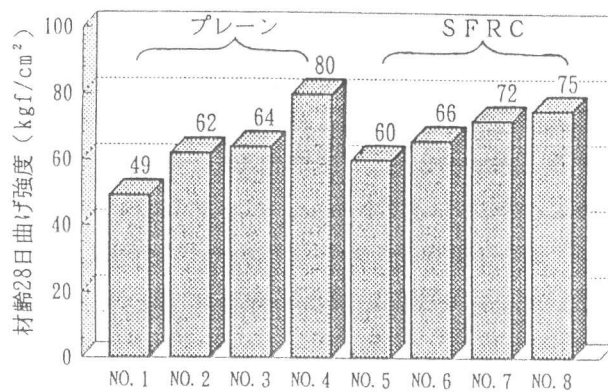


図-6 曲げ強度の比較 (切り出し供試体)

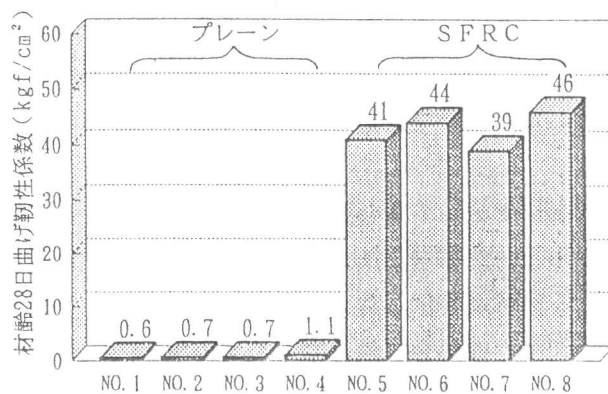


図-7 曲げ靱性係数の比較 (切り出し供試体)

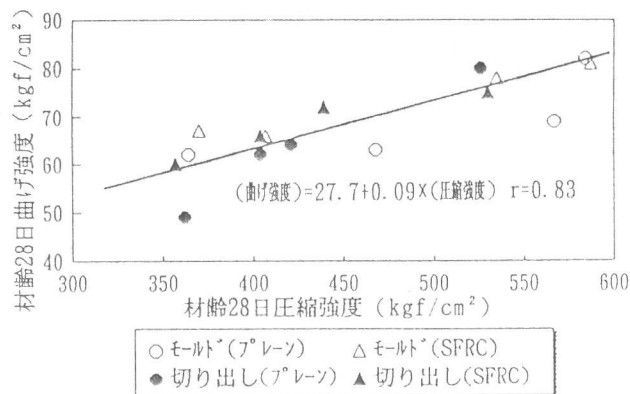


図-8 圧縮強度と曲げ強度の関係

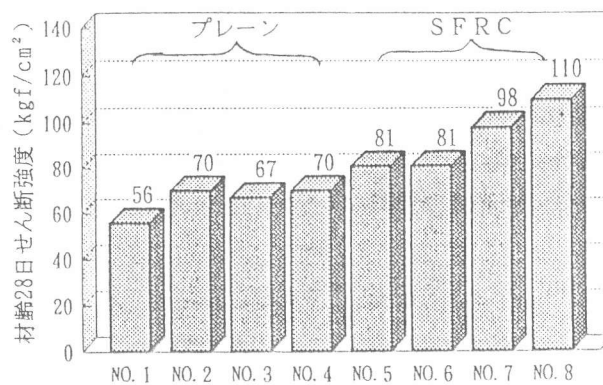


図-9 せん断強度の比較 (切り出し供試体)

3. 5せん断強度

切り出し供試体のせん断強度の比較を図-9に示す。同図から、せん断強度はプレーンコンクリートに比べてSFRCが大きく、特にSFRCではSiFの混和及び単位セメント量の増加につれて顕著に増大することが分かる。

ちなみにケース1（プレーン、 $C = 350\text{kg/m}^3$ ）、ケース5（SFRC、 $C = 350\text{kg/m}^3$ ）及びケース8（SFRC、 $C = 450\text{kg/m}^3$ 、 $\text{SiF} = 25\text{kg/m}^3$ ）のせん断強度はそれぞれ 56kgf/cm^2 、 81kgf/cm^2 及び 110kgf/cm^2 でケース8では従来の標準的な吹付けコンクリート配合に比べて約2倍のせん断強度を示した。

4. まとめ

吹付けコンクリートを対象としてシリカフュームの混和及び単位セメント量の増大により達成し得る高強度化のレベルを検討するとともに、鋼繊維の混入による靱性改善効果を施工実験を行って検討した。結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 単位セメント量 450kg/m^3 、シリカフューム 25kg/m^3 の混和、高性能A E減水剤の適量使用及び急結剤添加量の抑制により、コア供試体の材齢28日圧縮強度は 500kgf/cm^2 を超える高強度を示した。
- (2) (1)の配合に鋼繊維を1.0容積%混入したコンクリートは、吹付けパネルから切り出した供試体の材齢28日強度で、圧縮強度 530kgf/cm^2 、圧縮靱性係数 314kgf/cm^2 、曲げ強度 75kgf/cm^2 、曲げ靱性係数 46kgf/cm^2 及びせん断強度 110kgf/cm^2 を示した。これらの値は従来標準的に用いられているSFRC（単位セメント量 $= 350\text{kg/m}^3$ 、鋼繊維 $= 1.0$ 容積%）に比べて、圧縮強度約1.5倍、圧縮靱性係数約1.3倍、曲げ強度約1.3倍、曲げ靱性係数約1.1倍、せん断強度約1.4倍に増加した。
- (3) 材齢6時間及び24時間の初期強度はプレーンコンクリートでは急結剤添加率に大きく依存し、SFRCでは今回の実験の範囲では配合間の差は小さかった。
- (4) はね返り率は細骨材率の増加及びシリカフュームの混和により減少する傾向を示した。

今回の実験により、従来の吹付けコンクリートの性能を大きく上回る高強度・高靱性吹付けコンクリートが達成できる見通しが得られたと考える。今後、変形量の大きい地山の支保やライニング厚さに制限のある既設トンネルの補強等、実工事に発展させたい。

参考文献

- [1] 岡田, 本橋, 横関, 田沢; 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, 土木学会, 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講演論文報告集, pp. 139~144, 1993. 11