

V-23

高強度吹付けコンクリートに関する実験結果

清水建設北海道支店 正員 新谷 義行
 清水建設北海道支店 正員 蔵田 忠廣
 旭川開発建設部 杉山 純

1. はじめに

吹付けコンクリート工法は、昭和50年頃にトンネルの新工法として紹介されたNATM (New Austrian Tunneling Method) の採用とともに著しい技術開発が進められた。NATMでは、空洞を支持する主要支保メンバーは、吹付けコンクリート、ロックボルト、軽量鋼製支保工が用いられ、とくに吹付けコンクリートの役割は重要なものとなる。トンネルを設計する場合、土被りが高くトンネル掘削時に大きな土圧が発生する場合や断層帯でトンネル変状が予想される場合には、高強度の吹付けコンクリートが支保部材として必要になって来る。また、今後トンネルの覆工コンクリートへの適用など永久構造物として高強度吹付けコンクリートの採用も考えられる。最近コンクリートの高強度化、高耐久化への要請からシリカフュームをコンクリート用混和材として活用する研究が注目を集めており、吹付けコンクリートへの応用も十分考えられる。しかし、吹付けコンクリートにシリカフュームを添加した場合の施工性や強度・耐久性向上については、まだ明確なものとはなっていない。

本報告は、シリカフュームを混和した吹付けコンクリートの強度特性やその施工性などを調査するために実施した、試験練りやトンネル現場での試験吹付けの結果について報告するものである。

2. 試験練り方法と結果

(1) 試験練りの配合

試験練りの配合は、一般国道39号銀河トンネル工事で採用している吹付け配合を基準 (No.1、No.2) に、高強度目標として材令28日で 400kgf/cm²を目標に配合を検討した。表-1に試験練り使用材料、表-2に試験練りの配合表を示した。シリカフュームは、シリコンやフェロシリコンなどのけい素合金を電気炉で製造する際に、排ガスに浮遊して発生する副産物の総称である。形状は、球形で平均直径が0.15μm程度と超微粒なため、所要の

表-1 試験練り使用材料

材 料	セメント	シリカフューム	細骨材	粗骨材	混和剤
	普通	早強	(SF)	陸砂	陸砂利
比 重	3.16	3.14	2.20	2.58	2.58
					(AD)
					1.03

表-2 試験練り配合表

表-3 シリカフュームの品質規格

化学成分	含有量 (%)
SiO ₂	min 90
H ₂ O	max 1.0
LOI	max 3.0
Fe ₂ O ₃	max 3.0
Al ₂ O ₃	max 1.5
CaO	max 2.0
MgO	max 3.0
K ₂ O	max 3.0
Na ₂ O	max 2.5

No	配 種	合 別	W/C (%)	S/a (%)	スランプ (cm)	示 方 配 合 (kg/m ³)					
						W	C	SF	S	G	AD
1	C=360	7- 									

The Result of Test Related Hight Strength Shotcrete

by Yosiyuki SHINTANI, Tadahiro KURATA and Kiyosi SUGIYAMA

スランブを得るために単位水量の調整や高強度の面から減水剤の使用も必要となる。これらの点を考慮して、単位セメント量を360, 400, 450 kgf/m³を基準に11ケースの配合を設定し、スランブや圧縮強度結果などから判断して試験吹付けの配合を決定する。なお、表-3に今回使用したシリカフェュームの品質規格を示した。

(2) 試験練りの方法

試験練りの方法は、ミキサーに砂利を除く全材料を投入し60秒空練りを行い、その後砂利を投入してさらに120秒の練り混ぜを行った。練り混ぜ量は、30ℓとした。

圧縮強度試験用の供試体は、φ10×20cmのモールドで作製し、圧縮強度試験は、材令1、7、28、91日で行い、1日の供試体は脱型後直ちに試験を行った。その他の供試体は、モールド脱型後20℃の水中養生を行った。なお、供試体作製時には、スランブやエア量などの測定も実施した。

(3) 試験練りの結果

表-4には、試験練りの結果一覧表を示した。この結果から次のようなことが言える。

- ・圧縮強度の一番高い配合はNo.11であり、単位セメント量の増加と単位水量の低下により高強度が得られる。図-2のW/Cの変化からも言える。
- ・目標強度は、400kgf/cm²としているが、実際の吹付け時には強度低下が30%程度（銀河トンネルの実績）考えられることから、No.9以降の配合が必要と思われる。
- ・図-1からは、各ケースの材令間

表-4 試験練りの結果一覧表

No.	配 合 種 別	フレッシュ時の性状			圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)				使 用 記 号	
		スランプ (cm)	空気量 (%)	温 度 (℃)	1日	7日	28日	91日		
1	C=360	ブレン	13.5	2.0	23.0	39±0	162±1	325±7	409±9	□
2		ブレン	9.5	2.8	23.0	48±2	215±3	381±5	457±6	▢
3		SF=5%	8.0	2.8	23.0	57±3	225±7	432±5	517±8	▣
4		SF=10%	9.5	1.4	23.0	54±3	217±2	444±11	502±23	▤
5		SF=5% AD	10.5	5.2	23.0	71±3	260±4	445±6	526±12	■
6	C=400	ブレン	11.0	3.1	23.0	57±2	230±6	432±7	514±6	○
7		SF=5%	9.0	2.7	23.0	71±2	266±6	480±7	581±9	⊙
8		SF=10%	9.0	2.2	23.0	73±2	262±5	508±4	540±9	⊖
9		SF=5% AD	11.0	4.0	23.0	92±1	333±1	524±24	616±12	●
10	C=450	SF=5%	11.0	2.7	23.0	87±3	322±2	536±7	640±4	△
11		SF=5% AD	13.0	3.7	23.0	109±2	366±4	552±13	670±23	▲

試験練り条件 ① 練り混ぜ量 30ℓ
② 練り混ぜ時間 120秒

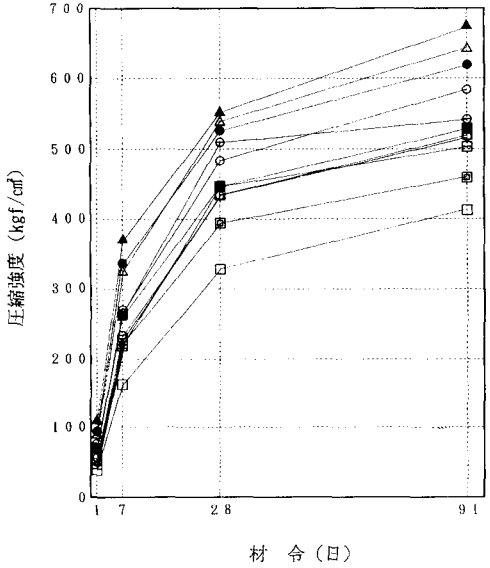


図-1 材令と圧縮強度の関係

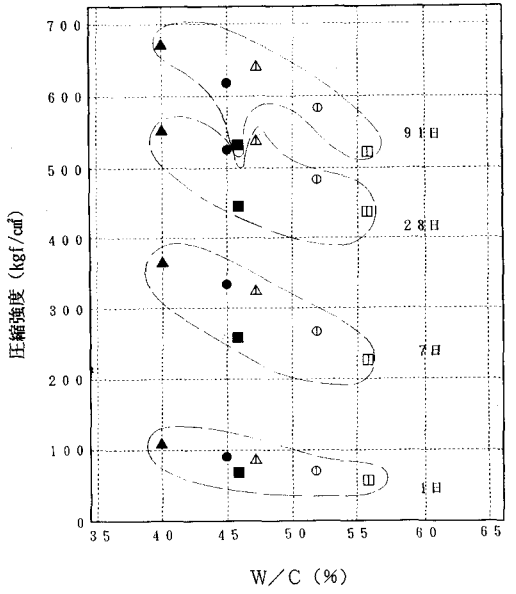


図-2 W/Cと圧縮強度の関係

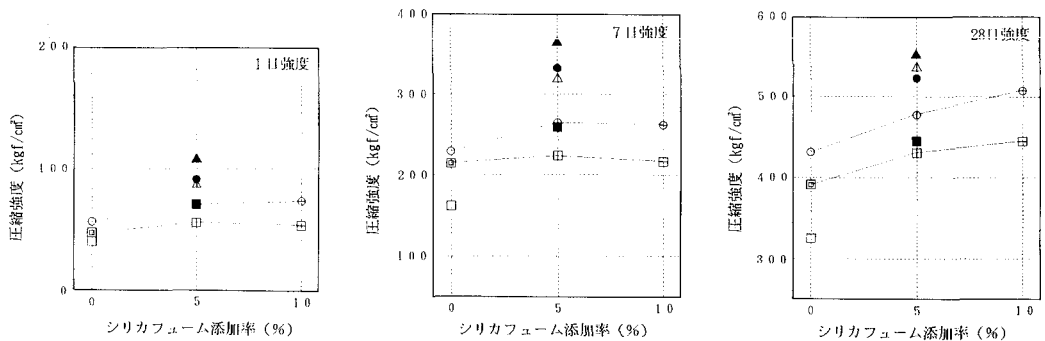


図-3 シリカフューム添加率の変化による強度特性

の強度上昇変化量は、最大でも10%程度の違いであり極端な強度上昇とはなっていない。

次に、図-3には、シリカフューム (SF) の添加率の違いによる圧縮強度の変化を示した。この結果からは、次のようなことが言える。

- ・ 1日、7日強度では、SF = 5%から10%への効果は見られないが、28日強度では5%程度の強度上昇が見られる。しかし、傾向としては、この程度の添加率の違いでは、ほとんどその効果が見られない。
- ・ 吹付けコンクリートでとくに重要となる1日強度は、シリカフュームの混和により15~20%の強度上昇がある。
- ・ SF = 5%において、単位セメント量360, 400, 450 kgf/m³の違いによる28日強度の向上は、それぞれ50 kgf/cm²程度の上昇となっている。
- ・ SF = 5%の添加により28日強度で、単位セメント量360, 400 kgf/cm²では、SF = 0%に比べて40~50 kgf/cm²の圧縮強度向上があり、約10%の強度改善となっている。

3. トンネル現場における試験吹付けの結果

(1) 試験吹付けの方法

試験吹付けは、前述した銀河トンネルで実施した。

吹付けコンクリートは、現場にあるバッチャープラント (横二軸 0.5m²練り) で練り、シリカフュームは、手作業でミキサーに投入した。トンネル坑内での吹付け方法を図-4に示した。この内、吹付けは、最大13m³/hrの吹付け能力を持つコンクリートポンプ式吹付け機を使用した。

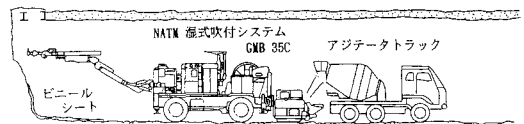


図-4 吹付け方法

表-5 試験吹付けの配合表

No.	配 合 種 別	W/C (%)	S/a (%)	スラッグ (㎝)	示 方 配 合 (kg/m³)						使用 記 号	
					W	C	SF	S	G	AD		
9	C=400	SF= 5 % AD	45.0	52.0	10	180	400	20	919	849	4.0	●
10		SF= 5 % AD	47.8	52.5	10	218	450	22.5	862	780	0	△
11	C=450	SF= 5 % AD	40.0	51.0	10	180	450	22.5	880	847	4.5	▲
12		SF=10 % AD	42.2	51.0	10	190	450	45.0	854	820	4.5	▲

※コンクリート練り混ぜ時間

No.9 生コンクリート練り混ぜ1分、SF混入後1分練り上げ 計2分00秒

No.10~12 生コンクリート練り混ぜ1分、SF混入後1分30秒練り上げ 計2分30秒

(No.9練り上がり時の性状が、SFを混入した時の特有の粘りが無いため、

No.10~12は、SF混入後の練り混ぜ時間を1分30秒とした)

圧縮強度試験用の供試体は、縦50cm×横50cm×深さ30cmの供試体箱に吹付けし、吹付け後3日で供試体箱からφ55×110mmでコアリングして供試体を作製した。なお、材令1日は、プルアウト試験により実施した。これらの供試体の養生は、現場養生とした。また、練り上がった吹付けコンクリートは、φ10×20cmのモールドにも取り標準養生を行った。

(2) 試験吹付けの配合

試験吹付けの配合は、前述した試験練りの圧縮強度試験結果から、吹付け時の強度低下分を考慮して表-5に示すNo.9~No.11 (このNo.は、試験練り時と同様) とした。また、No.12は比較検討のため新たに追加した

配合である。この他、吹付け時には、セメント系の粉体急結剤を添加している。

(3) 試験吹付けの結果

試験吹付けの結果を表-6の一覧表に示した。この内、コア採集方式による強度結果から、主に次のようなことが言える。

- ・目標強度を満足している配合は、No11とNo12であり、単位セメント量の増大とともに、減水剤を用いて単位水量をおさえる必要があると言える。
- ・試験練りの結果からも判断できるように、シリカフェームを混和しなければNo11、12ともに目標強度を満足しないことが予想できる。(50kgf/cm²程度の低下が考えられる。)
- ・図-5からもNo11、12が、材令7日以降から他に比べて強度増加が高いことが良くわかる。
- ・図-6に示すように、試験練りの結果でもそうであるが、シリカフェームの添加量が5%、10%で7日、28日強度では、ほとんど圧縮強度に差がない。ただし、1日強度では、有意な差となっている。このような強度特性については、今後ともデータを収集して検討して行く必要がある。
- ・図-7に示した強度比率は、バラツキが大きいいため明確には言えないが、28日強度で試験練り時の強度の60%程度が吹付け時の強度と考えられる。ただし、この比率には、供試体のスケール効果や養生条件の違いなどの影響も含まれている。
- ・また、テストピースでの圧縮強度試験結果からも、同様にその強度の60%程度が吹付け強度となっている。

4. おわりに

試験計画当初は、単位セメント量の増加とシリカフェームの混和による粘性の増加で、吹付け時に脈動を起し吹付けがうまく行かないかと思ったが、スランブを11cm程度に調整すれば吹付けがスムーズに行くことが確認できたことは施工上大きな収穫であった。今回の試験では、シリカフェームを用いた高強度吹付けコンクリートの強度特性について有効なデータを得たが、データ数も少ないため今後も同様な試験を行い、より精度の高い強度特性を調査していく予定である。

<参考文献>

長瀧重義：シリカフェームのコンクリートへの応用の現状と展望、コンクリート工学、Vol. 29、No. 4、April. 1991、PP5-16.

表-6 試験吹付けの結果一覧表

項目	No	9	10	11	12
セメント量	kg	400	450	450	450
W/C	(%)	43.0	47.3	40.0	42.2
S/A	(%)	52.0	52.5	51.0	51.0
シリカフェーム	(%)	5.0	5.0	5.0	10.0
急結剤	(%)	5.5	5.5	5.5	5.5
減水剤	(%)	1.0	0	1.0	1.0
スランブ	cm	9.0	11.5	10.5	11.5
空気量	(%)	3.5	1.8	3.2	2.7
コンクリート温度	℃	18.0	18.0	18.0	18.0
吹付け量	kg	3.0	3.0	2.0	2.0
単位吹付け量	kg/hr	6.0	7.5	7.0	—
吹付け割合	(%)	10.4	7.0	6.6	5.6
リハウンズ率	(%)	39.4	22.4	—	—
1日	平均	90	60	78	144
	1	90	51	80	109
	3	90	75	84	99
	5	89	62	84	131
7日	平均	230	215	243	253
	1	230	211	243	274
	3	230	204	243	274
	5	229	227	246	254
28日	平均	381	350	455	434
	1	385	365	430	389
	3	366	327	437	445
	5	374	398	408	416
平均		546	555	616	655

注 プルアウト …… 若令吹付けによる(現場養生)
コア …… φ50mm×L110mm(現場養生)
TP …… テストピース φ100mm×L200mm(標準養生)

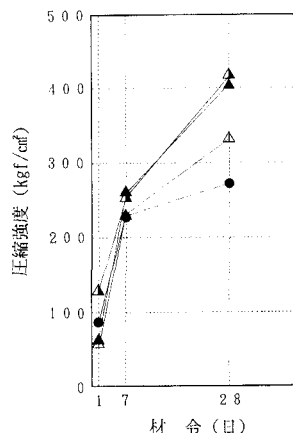


図-5 材令と圧縮強度 (TP強度)の関係

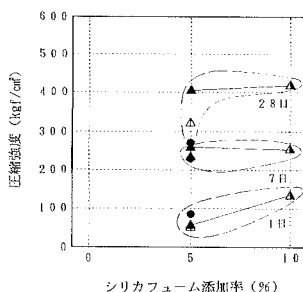


図-6 シリカフェーム添加率の変化による強度特性 (TP強度)

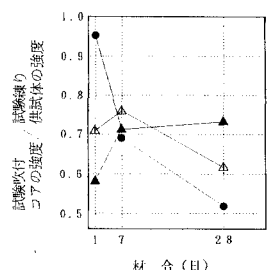


図-7 試験練り強度と吹付けコア強度との比率