

高強度・高品質吹付けコンクリートを用いた大断面トンネルの試験施工

APPLICATION OF HIGH STRENGTH SHOTCRETE FOR LARGE SCALE TUNNEL

長沢教夫*・石川敏博**・岡田正男***・福留和人****

Norio NAGASAWA, Toshihihiro ISHIKAWA, Masao OKADA and Kazuto FUKUDOME

In recent years high strength shotcrete containing silica fume have been developed. However it is not always effective in cost to use high strength shotcrete for tunnel supports because silica fume is expensive material.

In this study in site tests of high strength shotcrete containing various materials have been done in order to develop high strength shotcrete with economical efficiency. From the results of these tests we selected the high strength shotcrete considering economical efficiency and applied for construction of NIHONSAKA TUNNEL whose area of cross section is about 130m².

From the results of application it is clear that construction cost of tunnel can be down by using high strength shotcrete because tunnel supports, thickness of shotcrete, length of rock bolt and size of steel support, can be reduced.

1. まえがき

社会・経済の進歩に伴いトンネルの大断面化の要求が高まっており、合理的で経済的なトンネル施工法の確立が大きな課題となっている。この中で、高強度・高品質吹付けコンクリートを有効に利用していくことが検討されている。このような背景から、近年、シリカフュームを用いた高強度吹付けコンクリートが開発され実用化されているが、シリカフュームは我国では高価な材料であるため、高強度化・高品質化によるコンクリート単価の上昇が大きくなり、経済的なトンネル施工法の確立の妨げになることも懸念される。

以上のことから、現状に即した効果的で経済的な高強度・高品質吹付けコンクリート技術の確立を目的として、各種材料を用いた吹付けコンクリートの現場実験を行った。さらに、実験の結果から経済性・性能を考慮して選定した高強度吹付けコンクリートを大断面トンネルである東名高速道路（改築）日本坂トンネル西工事（掘削断面 130 m²）で一部試験施工を行い、支保部材の低減の可能性を検討した。その結果、高強度吹付けコンクリートを用いることで大断面トンネル施工のコストダウンの可能性があることが確認できた。

本報告では、現場試験の結果と日本坂トンネルでの試験施工結果について述べる。

2. 現場実験

2・1 使用材料

実験に用いた材料の種類および仕様を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント（OPCと略記）とし、高強度用混和材として、シリカフューム（ノルウェー産の非造粒タイプ、SiFと略記）1種類およびカルシウムサルホアルミネート系の混和材2種類（エトリンガイト系、EtI、EtIIと略記）を用いた。細骨材および粗骨材は、通常の吹付けコンクリートに用いられているものとし、粗骨材最大寸法は、15mmとした。高性能減水剤は、ポリエチレングリコール系の吹付けコンクリート用高性能減水剤（SPと略記）を用いた。急結剤は、粉末タイプとし、現在一般的に用いられているセメント鉱物系急結剤を1種類（QCと略記）とカルシウムサルホアルミネート系急結剤を2種類（QEtI、QEtIIと略記）を用いた。

* 正会員 （株）間組土木本部トンネル統括部

*** ハザマ・東急JV日本坂トンネル作業所所長

** 日本道路公団静岡建設局焼津工事事務所工事長

**** 正会員（株）間組 技術研究所 技術研究部

2・2 コンクリートの配合

種々の材料を組合せた配合で実験を行い、材料・配合条件が吹付けコンクリートの特性に及ぼす影響を調べた。実験に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。各配合の概要は以下のとおりである。

①配合No. 1 : NATMの一次吹付けコンクリートに用いられている標準的な配合である。

②配合No. 2～4 : 急結剤は、セメント鉱物系とし、水セメント比を低減した配合である。

③配合No. 5, 6 : ②の2配合でカルシウムサルホアルミネート系急結剤を用いた配合である。

④配合No. 7, 9 : 混和材としてシリカフュームを用い、水結合材比を製造・施工上限界と考えられる値まで低減した配合である。急結剤は、2種類使用した。

⑤配合No. 8, 10 : ④と同様の考え方で、混和材としてカルシウムサルホアルミネート系混和材を用いた配合である。急結剤は、④と同様2種類用いた。

⑥配合No. 11 : 材齢1時間以内の極初期の強度を改善することを目的に開発された材料を組合せた配合である。

表-1 使用材料

	種 類	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント	比 重 : 3.15 比表面積 : 3,250 cm ² / g
混 和 材	シリカフューム (SiF)	比 重 : 2.20 比表面積 : 20 m ² / g SiO ₂ : 92.2 %
	カルシウムサルホアルミネート系 (Et I)	比 重 : 2.60 比表面積 : 4,050 cm ² / g
	カルシウムサルホアルミネート系 (Et II)	比 重 : 2.60 比表面積 : 4,000 cm ² / g
細 骨 材	陸砂 静岡県丸子産	比 重 : 2.615 吸水率 : 1.17 %
粗 骨 材	砕石 静岡県丸子産	比重 : 2,680.Gmax:15mm 吸水率 : 1.46
混 和 剤	高性能減水剤	ポリエレンクマール系
急 結 剤	セメント鉱物系 (QC)	
	カルシウムサルホアルミネート系 (QE I)	
	カルシウムサルホアルミネート系 (QE II)	

表-2 コンクリートの配合

配合 No.	配 合 条 件				単 位 量 (k g / m ³)							混和剤添加率 (対結合材 %)					
	水結 材比 (%)	細骨 材率 (%)	混和 材の 種類	急結 剤の 種類	水 W	セメ ント C	シリ カ フュー ム SiF	カルシウムサル フアルミネート系		細骨 材 S	粗骨 材 G	高性能減 水剤 S P	急 結 剤				
								Et I	Et II				QC	QE I	QE II		
1	6 0	6 2	—	QC	217	360	—	—	—	1053	662	—	7.0	—	—		
2	5 0				180	360				1114	699	1.1		—	—		
3	4 0	6 0			180	450				1032	705	1.1		—	—		
4	3 5				175	500				1017	691	1.3		—	—		
5	5 0	6 2	—	QE I	180	360	—	—	—	1114	699	1.1	—	10.0	—		
6	4 0	6 0			180	450				1032	705	1.1	—		—		
7	3 5	6 0	SiF	QC	173	450	45	—	—	1011	691	1.3	7.0	—	—		
8	3 7		Et		178	450	—	32	—	1017	694	—		—	—		
9	3 5		SiF	QE I	173	450	45	—	—	1011	691	1.3	—	10.0	—		
10	3 7		Et I		178	450	—	32	—	1017	694	—	—		—		
11	3 7		Et II		183	450	—	—	45	1001	683	—	—		—	10.0	

2・3 コンクリートの製造・運搬および吹付け機械・吹付け方法

コンクリートの製造には、容量0.5 m³の2軸強制練りミキサを用い、1回当たりの吹付け量は、2 m³とした。コンクリートの運搬には、容量4.5 m³のアジテータトラックを使用した。

吹付けには、ローター型の空気圧送方式の吹付け機械（アリバ285）を用いた。吹付け能力は、最大20 m³ / h rである。試験時の吹付け速度は、8 m³ / h r程度とした。

2・4 試験項目および試験方法

フレッシュコンクリートの試験として、スランプ、スランプフロー、空気量およびコンクリート温度を出

荷時および現着時に測定した。初期強度は、ブルアウト試験により材齢 1, 3, 8 および 24 時間に、長期強度は、木製の型枠に吹付けられた試験体から採取したコア供試体 (Φ 50 × 100mm) を用いて材齢 7, 28 および 91 日に試験を行った。比較のために、ベースコンクリートの圧縮強度も同一材齢で試験を行った。

2・5 実験結果および考察

(a) 初期強度発現特性

図 - 1 および図 - 2 に材齢と換算圧縮強度の関係を示す。O P C 単味でセメント鉱物系の急結剤を用いた場合、水セメント比を低減することによって初期材齢 (材齢 1 ~ 8 時間) の強度発現性を改善することができる。しかしながら、材齢 8 時間から 24 時間の強度増進はほとんど見られない。O P C 単味で急結剤にカルシウムサルホアルミネート系の急結剤を用いた場合も初期強度の発現性は良好である。

シリカフュームやカルシウムサルホアルミネート系の混和材を用いた場合、水結合材比を低減した配合とすることで材齢 1 ~ 8 時間における強度発現性は改善されるが、セメント単味の場合とほぼ同程度であり、その効果は顕著ではない。材齢 24 時間においては、セメント単味の場合に比べて高い強度が得られており、強度改善効果が見られる。カルシウムサルホアルミネート系混和材および急結剤を組み合わせた場合、1 時間以内の極初期材齢の強度発現性を大幅に改善することができる。

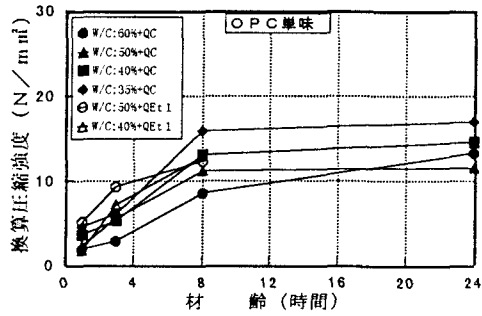


図 - 1 初期強度発現特性 (O P C 単味)

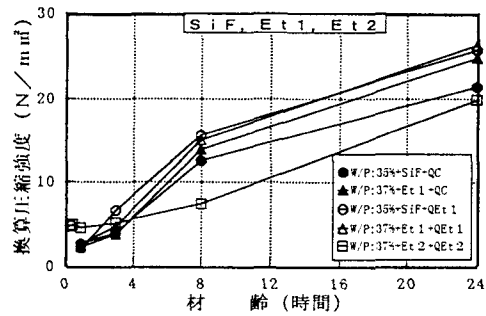


図 - 2 初期強度発現特性 (SiF, Et1, Et2)

(b) 長期強度発現特性

図 - 3 および図 - 4 に材齢と圧縮強度の関係を、図 - 5 に水結合材比と材齢 28 日における圧縮強度の関係を、図 - 6 に水結合材比と圧縮強度比 (ベースコンクリートの圧縮強度に対する比) の関係を示す。

O P C 単味でセメント鉱物系急結剤を用いた場合、材齢 7 日以降の圧縮強度の伸びは小さく、また、水セメント比を低減する効果は見られず、低水セメント比ほどベースコンクリートに対する比率が低下している。

O P C 単味で急結剤にカルシウムサルホアルミネート系の急結剤を用いた場合、長期強度の発現性は良好であり、材齢 28 日で 39 ~ 48N/mm² と高い強度が得られている。また、ベースコンクリートに対する比率も 70 ~ 80 % 程度と高く、また、水セメント比を低減してもその比率はほぼ一定である。

高強度用混和材を用いた場合、O P C 単味に対して強度改善効果が見られる。また、カルシウムサルホアルミネート系急結剤を用いた場合、材齢 28 日で 60N/mm² 程度と高い強度が得られている。

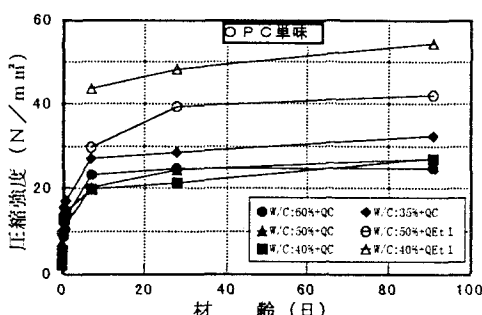


図 - 3 材 齢 と 圧 縮 強 度 の 関 係 (O P C 単 味)

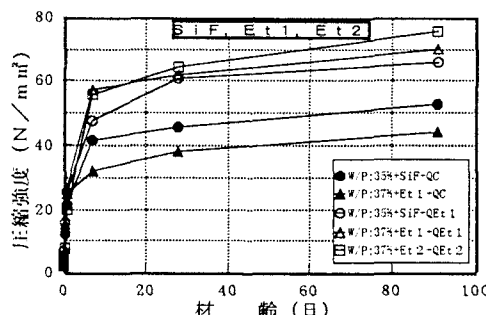


図 - 4 材 齢 と 圧 縮 強 度 の 関 係 (SiF, Et1, Et2)

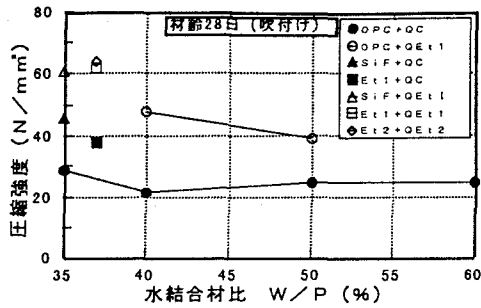


図-5 水結合材比と圧縮強度の関係

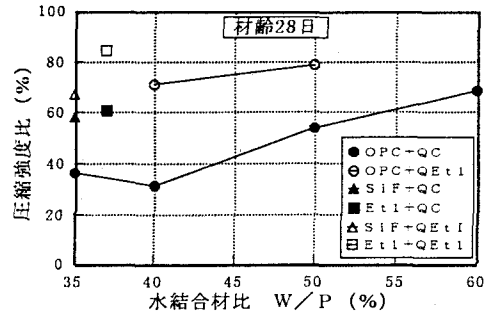


図-6 水結合材比と圧縮強度比の関係

3. 試験施工

吹付けコンクリートの高強度化による施工サイクルの短縮およびコストダウンの可能性を検討するために、D1パターンの一部で高強度吹付けコンクリートの試験施工を行った。

表-3にD1パターンの支保パターンの変更案を示す。

3・1 吹付けコンクリートの要求品質および配合選定

吹付けコンクリートの要求品質を表-4のように選定した。ここで、フレッシュコンクリートの品質については、現場実験の結果から施工性を考慮して暫定的に選定した。使用材料およびコンクリートの配合は、品質の変動による割り増し係数を乗じた品質を満足する結果が得られたように選定した。すなわち、材齢8時間では割り増し係数を2.0として 10N/mm^2 、材齢28日では1.3として 46.8N/mm^2 を満足する結果が得られた配合の中で経済性を考慮して現場実験の配合No.6(表-5)を選定することとした。

表-3 支保パターン変更案

支保部材	原設計	変更案
掘削長(m)	1.0	1.0
コック長さ(m)	6.0	4.0
ボルトピッチ(m)	1.0	1.0
鋼製支保工	H-200	H-150
吹付け厚(cm)	2.0	1.5

表-4 吹付けコンクリートの要求品質

項目	目標品質
スランプ	$20 \pm 2.0\text{cm}$
スランプフロー	$35 \sim 45\text{cm}$
圧縮強度	8時間: 5N/mm^2 24時間: 15N/mm^2 28日: 36N/mm^2

表-5 吹付けコンクリートの配合

水結合材比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤添加率	
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤 (%)	急結剤 QEt1 (%)
40	60	180	450	1032	705	1.1	10.0

3・2 FEM解析結果

(a) 地盤および各部材のモデル化

3.1で示した支保パターンの妥当性を検証するためにFEM解析を行った。解析においては、地盤全体は、平面ひずみ要素に、ロックボルトは、軸力のみを受け持つトラス要素に、吹付けコンクリートと鋼製支保工は、合成して軸力と曲げを受け持つビーム要素としてモデル化し、すべて線形弾性体と仮定した。

(b) 地盤および各部材の物性値

解析に用いた地盤定数を以下に示す。

・単位容積質量 γ : $2.00 (\text{ton/m}^3)$ 、変形係数 E : $1.00 \times 10^3 (\text{N/mm}^2)$ 、ポアソン比: 0.35、粘着力 C : $1.00 (\text{N/mm}^2)$ 、内部摩擦角 Φ : $30 (\text{deg})$

吹付けコンクリートの弾性係数は、圧縮強度から下式により算定した。

$$E = 4500 \times \rho^{1.5} \times F_s^{0.5} \quad (1)$$

ここで、 ρ : 比重、 F_s : 圧縮強度である。

なお、解析においては若材齢であることを考慮して、上記から算定された値の $1/2$ に低減した。すなわち、通常の場合 $1.00 \times 10^4 (\text{N/mm}^2)$ 、高強度の場合 $1.50 \times 10^4 (\text{N/mm}^2)$ とした。

(c) 解析ステップ

掘削施工段階を考慮するために、①初期応力、②上半部掘削、③上半部支保部材施工後、④下半部掘削、⑤下半部支保部材施工後、⑥インパート部掘削の6ステップにおいて解析を行った。

ここで、各施工段階における切羽の進行を考慮するために1回の掘削についてその掘削相当外力の55%を素掘りの状態(②、④)に、残りの45%を支保部材を施工した状態(③、⑤)にそれぞれ作用させた。

(d) 解析結果

解析においては、①内空変位、②ロックボルト軸力、③吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の発生応力、④周辺地盤の発生歪み、の4点に関して原設計および変更案の比較を行った。

解析結果を表-6に示す。解析の結果、高強度吹付けコンクリートを用いて支保部材を低減しても構造的機能はほぼ同等であり、変更案の妥当性が確認された。

表-6 解析結果一覧

Case	内空変位 (mm)		ロックボルト 軸力最大値 (10^3 N)	発生応力 (N/mm^2)		地盤周辺 の歪み
	天端沈下	水平変位		吹付け	鋼製支保工	
原 設 計	20.6	8.0	12.37	13.1	274.7	両者の歪み 分布に大き な差はない
変 更 案	20.9	8.6	14.44	19.5	272.7	

3・3 試験施工結果

(a) 品質管理試験結果

表-7に品質管理試験結果を示す。フレッシュコンクリートの品質は、暫定的に選定した目標品質を満足しない値も得られたが、この範囲では特に問題なく施工できた。硬化コンクリートの品質は、いずれも目標品質を十分満足した。初期強度は、いずれの材齢においてもばらつきは大きい。長期強度のばらつきは小さく、良好な強度発現性を有していると言える。

表-7 品質管理試験結果一覧

	フレッシュコンクリート			初期強度 (N/mm^2)			長期強度 (N/mm^2)	
	コンクリート温度	スランブ	スランブフロー	3 h	8 h	24 h	7日	28日
目 標 品 質	————	20.0 ± 2.0	35 ~ 45	————	5 <	15 <	————	36 <
平 均 値	25.2	21.1	40.9	5.3	14.8	22.1	46.6	56.1
最 大 値	30.0	25.0	58.0	10.4	22.7	30.1	51.7	64.6
最 小 値	21.0	19.0	27.5	3.0	11.7	20.9	38.7	47.4
標 準 偏 差	————	1.7	9.3	1.9	3.0	7.3	3.6	6.5
変動係数 (%)	————	7.9	27.5	35.8	20.3	33.0	7.7	11.6

(b) 計測結果

支保パターン変更案の妥当性を確認するために地山挙動の計測(AおよびB計測)を現在実施している。最終的な結論は得られていないが、現時点では大きな変化・差異は観測されていない。

4. まとめ

(1) カルシウムサルホアルミネート系の急結剤を用い、水セメント比を低減することで、初期強度、長期強度とも高い強度を確保することができ、また、試験施工においても安定した品質が得られた。

(2) 高強度吹付けコンクリートの適用により、大断面トンネル施工の合理化・コストダウン・工期短縮を図ることができる可能性がある。

謝辞：実験および試験施工にあたり、電気化学工業(株)、デンカグレース(株)、木部建設(株)の関係者の方々には多大な御協力および御指導を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート、1996.2
- (2) ジェオフロンテ研究会：高強度吹付けコンクリートの開発報告書、1995.12