

各種高強度吹付けコンクリートの強度特性 および大断面トンネルにおける試験施工

福留和人¹・長沢教夫²・杉山律³・喜多達夫⁴・笹川幸男⁵

¹正会員 株式会社間組 技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市苅間字西向515-1)

²正会員 株式会社間組 土木本部 トンネル統括部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

³正会員 株式会社間組 土木本部 技術設計部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

⁴正会員 工修 株式会社間組 技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市苅間字西向515-1)

⁵正会員 電気化学工業株式会社 (〒100-8455 東京都千代田区有楽町1-4-1)

高強度吹付けコンクリートを適用することによる大断面トンネル施工の合理化・コストダウンの可能性を検証することを目的に大断面トンネルの一部区間で試験施工を行った。なお、試験施工に先だて、適用する高強度吹付けコンクリートの材料・配合を選定するための吹付け実験および高強度吹付けコンクリートの適用による支保部材の低減の妥当性を検証するためのFEM解析を実施した。その結果、使用材料・配合を適切に選定すれば経済的に高強度化が可能であること、高強度吹付けコンクリートによる支保部材の低減が妥当性であること確認された。また、試験施工時の地山挙動の計測の結果、大きな変状は見られず、高強度吹付けコンクリートによる支保部材の低減の可能性が高いことが確認された。

Key Words : high-strength-shotcrete, tunnel support, accelerator, high strength cement additive, super-plasticizer, large-scale tunnel, site trial

1. はじめに

山岳トンネルの施工において吹付けコンクリートとロックボルトを主要な支保部材とするNATM工法が我国に導入されてから数十年が経過し、山岳トンネルの標準工法として定着している。吹付けコンクリートは、型枠を用いることなく施工できることから地山条件等に応じた柔軟な施工が可能であり、また、岩盤へ直接吹付けるため岩盤との付着性が高く、支保部材として有効な材料・工法と位置づけられる。このようなNATM工法の普及に伴い、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てきた^{1,2)}。機械的には、施工能力の向上、吹付け作業のロボット化等が進められ、また、材料的には、セメント鉱物系の急結剤の開発、粉塵低減剤の開発等が挙げられ、施工の効率性の向上、吹付けコンクリートの品質向上に大きく貢献している。

以上のように吹付けコンクリート技術自体には大きな進歩が見られるものの、現在使用されている吹付けコンクリートの設計基準強度は、 18 N/mm^2 としているのがほとんどである。配合的には、単位セメント量 360 kg/m^3 の混和材料を使用しないプレーンコ

ンクリートが基本であり、地山等の施工条件にかかわらず同一の品質の吹付けコンクリートが長年に渡って使用されているのが現状である³⁾。

一方、近年の社会・経済の進歩にしたがってトンネル断面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。これらの検討の中で高強度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。これは、トンネルの大断面化に伴い吹付けコンクリート厚さが増大することになるが、吹付けコンクリートの高強度化により吹付け厚さの低減、掘削断面の低減、ロックボルト・鋼製支保工の低減の可能性があり、これらによるコストダウンおよび工期短縮が期待されていることによる。

以上のような我国の状況に対し、ヨーロッパ諸国では、吹付けコンクリートの高強度化・高品質化の研究が進んでおり、高性能減水剤、シリカフェーム、鋼繊維等の混和材料を用いた高強度・高品質の吹付けコンクリートが施工条件に応じて標準的に使用されている³⁾。近年、我国においても、シリカフェームを用いた高強度吹付けコンクリートが開発され、いくつかの現場で適用されている^{4)~12)}。しかしな

がら、その他の材料を用いた場合と比較検討した研究は十分に行われておらず、シリカフェームがセメントに比べて高価な我国においてシリカフェームを用いた高強度吹付けコンクリートが経済的に優位であるかどうかの検討は不十分であると思われる。

以上のような背景から、本研究では、高強度吹付けコンクリートを適用することによる大断面トンネル施工の合理化・コストダウンの可能性を検証することを目的に試験施工を実施した。なお、試験施工に先立って、我が国の現状に即した経済的な高強度吹付けコンクリートの目標強度および材料・配合を選定するために、各種材料を組み合わせた配合で吹付け実験を実施し、使用材料および配合が初期強度および長期強度発現性に及ぼす影響を調査した。また、事前にFEM解析を行い、高強度吹付けコンクリートの適用による吹付け厚さの低減、支保部材低減の妥当性を検証した。試験施工は、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:130m²)のD Iパターンの一部区間で実施し、その時の地山挙動を計測することによって変更した支保パターンの妥当性を確認した¹³⁾。

本論文では、吹付け実験の結果、FEM解析結果および日本坂トンネルにおける試験施工、計測結果について報告する。

2. 各種材料を用いた高強度吹付けコンクリートの強度発現特性に関する実験

(1) 概要

試験施工に先立って、我が国の現状に即した経済的な高強度吹付けコンクリートの使用材料および配合を選定することを目的に、材料を種々組み合わせた配合で吹付け実験を行い、使用材料および配合条件が初期強度・長期強度の発現特性に及ぼす影響を調べた。実験は、日本坂トンネルの下半切羽において実施した。

(2) 実験概要

a) 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、細骨材および粗骨材は、吹付けコンクリートに一般的に用いられているものと同様とした。すなわち、セメントは、普通ポルトランドセメント(以下 OPCと略記)とし、粗骨材の最大寸法は、15mmとした。高強度用混和材として、シリカフェーム(非造粒タイプ、以下 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(以下 CSA系混和材と呼ぶ。CSA I, IIと略記)の混和材2種類を用い

表-1 使用材料

材 料	種 類	仕 様
セメント C	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	シリカフェーム (S i F)	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 混和材(CSA I)	比 重: 2.60 比表面積: 4,000 cm ² /g
	カルシウムサルホアルミネート系 混和材(CSA II)	比 重: 2.60 比表面積: 4,000 cm ² /g
細 骨 材 S	陸砂 静岡県丸子産	比 重: 2.62, F.M.: 2.78 吸水率: 1.17 %
粗 骨 材 G	砕石 静岡県丸子産	比 重: 2.68 吸水率: 1.46 %
混和剤	高性能減水剤(SP)	ポリエチレングリコール系
	急 結 剤	カルシウムアルミネート系 (QCA)
		カルシウムサルホアルミネート系 (QCSA I)
	カルシウムサルホアルミネート系 (QCSA II)	

た。高性能減水剤は、ポリエチレングリコール系の高性能減水剤(以下、SPと略記)を用いた。急結剤は、セメント鉱物系とし、カルシウムアルミネート系急結剤1種類(以下、CA系急結剤と呼ぶ。QCAと略記)とカルシウムサルホアルミネート系急結剤2種類(以下、CSA系急結剤と呼ぶ。QCSA I, IIと略記)を用いた。なお、CA系急結剤は、現在汎用的に使用されている急結剤であり、一般にセメント鉱物系急結剤と呼ばれている。

ここで、CA系急結剤は、主成分であるC₃Aによるセメント中のC₃S、C₂Sの水和の促進および急結剤自体の水和によるエトリングaitあるいはC₂AH₆の急激な生成により急結性を付与させている。CA急結剤は、セメントの水和反応の促進によるところが大きいため、標準添加量においても無添加のコンクリートより材齢7日程度以降において若干強度低下が見られ、また、添加量の増大とともに初期強度は改善されるものの長期強度が低下する傾向にある¹⁴⁾。

一方、CSA系急結剤は主成分のCaO-SO₃-Al₂O₃自体の水和反応により急激にエトリングaitが生成することにより急結性を付与させている。この急結剤は、急結剤自体が水和反応するため長期強度の発現性に優れ、また、添加量の増大とともに初期強度、長期強度とも改善される。ただし、CA系急結剤と同等の急結性を確保するためには、1.5倍程度の添加量が必要となる¹⁴⁾。ここに、C、S、AおよびHは、それぞれCaO、SiO₂、Al₂O₃およびH₂Oである。

b) コンクリートの配合

実験に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。細骨材率は、結合材量 450kg/m³以下の場合62%、

表-2 コンクリートの配合

配合 No	配合条件				単 位 量 (kg/m ³)						添加率 (対結合材重量%)				
	水結合材比 W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	混和材の種類	急結剤の種類	水 W	セメント C	シリカフェーム SiF	カルシウム系セメント系		細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤 SP	急 結 剤		
								CSA I	CSA II				QCA	QCSA I	QCSA II
1	60	62	—	QCA	217	360	—	—	—	1053	662	—	7.0	—	—
2	50				180	360				1114	699	1.1		—	—
3	40				180	450				1032	705	1.1		—	—
4	35				175	500				1017	691	1.3		—	—
5	50	62	—	QCSA I	180	360	—	—	—	1114	699	1.1	—	—	
6	40	60			180	450				1032	705	1.1	—	10.0	—
7	35	60	SiF	QCA	173	450	45	—	—	1011	691	1.3	7.0	—	—
8	37		CSA I		178	450	—	32	—	1017	694	—		—	—
9	35		SiF	QCSA I	173	450	45	—	—	1011	691	1.3	—	—	
10	37		CSA I		178	450	—	32	—	1017	694	—	—	10.0	
11	37		CSA II	QCSA II	183	450	—	—	45	1001	683	—	—	—	10.0

*) P : 単位結合材量を示す。すなわち、 $P = C + SiF + CSA I + CSA II$ である。

450kg/m³以上の場合60%とした。スランプの目標値は、水結合材比の低減に伴う粘性の増大を考慮して水結合材比に応じて設定し、高性能減水剤の添加量により調整した。すなわち、水結合材比60%の場合8±2cm、50%の場合18±2cm、40%以下の場合20～25cmを目標とした。空気は特に連行させず、1.0～3.0%を目標とした。

急結剤の添加量は、長期強度だけでなく初期強度も高強度化を図るため、すべての配合で結合材量に対する添加量を一定とし、CA系の場合7%、CSA系の場合10%とした。

それぞれの配合の概要は、以下のとおりである。

①配合No. 1 (OPC+QCA)

現在のNATMの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。すなわち、単位セメント量を360kg/m³とし、高性能減水剤を用いることなく単位水量で所要のスランプを調整した配合である。急結剤は、CA系である。

②配合No. 2～4 (OPC+SP+QCA)

急結剤は、CA系とし、高性能減水剤を用いて、水セメント比を低減した配合である。水セメント比は、50、40および35%の3水準とした。

③配合No. 5, 6 (OPC+SP+QCSA I)

②の2配合(水セメント比50および40%)で、急結剤にCSA系を用いた。

④配合No. 7, 9 (OPC+SiF+SP)

混和材としてシリカフェームを用い、高性能減水剤により水結合材比を製造・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、CA系とCSA系の2種類の急結剤を用いた。

⑤配合No. 8, 10 (OPC+CSA I)

④と同様の考え方で、混和材としてCSA系混和材を用いた配合である。なお、この混和材には、減水剤成分が含まれているため高性能減水剤は、用いていない。急結剤は、④と同様2種類用いた。

⑥配合No. 11 (OPC+CSA II+QCSA II)

材齢1時間以内の極初期の強度発現性および長期強度を大幅に改善させることを目的に開発された材料の組合わせである。

c) コンクリートの製造および運搬

コンクリートは、吹付けコンクリート専用のコンクリートプラント(坑口)で製造した。ミキサは、容量0.5m³の2軸強制練りミキサである。1回当りの吹付け量は、2.0m³とし、1バッチの練混ぜ量0.5m³として、計4バッチ製造した。材料は、一括投入し、水、セメントおよび骨材以外の材料は、各バッチ毎に人力投入した。練混ぜ時間は、全材料投入後60秒間とした。コンクリートの運搬には、容量6m³のアジテータトラックを使用した。コンクリートプラントから実験場所までの運搬時間は、10分程度であり、製造から吹付けまでの時間は、最短で10分、最長で30分程度であった。

d) 吹付け機械および吹付け方法

吹付けには、ローター型の空気圧送方式の吹付け機械を用いた。公称最大吹付け能力は、20m³/hr.であり、試験時の吹付け速度は、8.0m³/hr.を目標とした。コンクリートの圧送には、内径2.5インチのマテリアルホース(20m)を用い、ノズルと吹付け面の距離は、1.5m程度、角度は、90°程度とした。急結剤は、ノズルから2.0mの位置で角度45°のY字により混合した。実験時は、実吹付け速度を把握するために、吹付けに要する時間を測定した。

表-4 品質管理試験結果および吹付け状況

配合 No	配合条件				品質管理試験結果								吹付け性状	
	水結 合材 比 (%)	細骨 材率 (%)	混和 材の 種類	急 結 の 種 類	プラント			現場				吹付け 時間 (分:秒)	吹付け 速度 (m ³ /hr)	
					コンクリート 温度 (°C)	スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	スラ ンプ (cm)	スラン プフ ロー (cm)	空気 量 (%)			
1	60	62	—	QCA	24.0	7.5	1.3	24.5	9.5	—	1.5	14:40	8.2	
2	50				21.0	16.0	1.0	25.0	17.0	25.0	1.2	16:00	7.5	
3	40	60			22.0	21.0	1.8	25.0	19.5	30.5	1.3	14:50	8.0	
4	35				25.0	24.0	0.9	26.0	24.0	47.5	0.9	15:00	8.1	
5	50	62	—	QCSA I	22.0	18.0	1.7	23.0	20.5	33.0	1.7	23:00	5.2	
6	40	60			23.5	21.0	1.3	24.5	20.5	34.0	1.5	19:20	6.2	
7	35	60	SIF	QCA	20.0	23.0	1.3	21.5	24.5	45.0	1.2	15:00	8.0	
8	37		CSA I		21.0	23.5	4.5	22.0	24.0	43.0	5.3	15:00	8.0	
9	35		SIF	QCSA I	24.5	18.0	2.5	25.5	13.0	—	2.3	15:00	8.0	
10	37		CSA I		23.5	20.5	2.5	25.5	16.0	—	1.9	14:40	8.2	
11	37		—	CSA II	QCSA II	24.0	25.5	2.5	25.0	25.0	56.5	2.0	15:00	8.0
				—		—	—	—	—	—	—	—	—	—

表-3 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
フレックシ ビリティ	スランプ	JIS A 1101(出荷時, 吹付け前)
	スランプ フロー	JSCE F 503-1990による. (吹付け前)
	空気量	JIS A 1118(出荷時, 吹付け前)
	温度	棒状温度計による.
初期強度		JSCE G561(引抜き試験)による. (材齢 1,3,8,24 時間)
圧縮	ベース	JIS A 1108(材齢 7,28,91 日)
強度	吹付け	コア供試体(材齢 7,28,91 日)
細孔径分布		水銀圧入式ポロシメーターによる

e) 試験項目および試験方法

表-3に試験項目および試験方法を示す。

①初期強度試験

JSCE G561に準じて引抜き試験によりせん断強度を引抜き強度として求め、換算係数4.0として、圧縮強度に換算した。

②圧縮強度試験

ベースコンクリートは、φ10×20cmの型枠を用い、コンクリートプラントでJIS A 1132に準じて突き棒を用いて作製した。吹付けコンクリートの供試体は、JSCE F561に準じて作製した。型枠は、50×50×15cmの木製型枠(板厚:15mm)とし、角度70°程度で岩盤に立てかけた。材齢1日後φ5×10cmの供試体

をコアボーリングにより採取した。1材齢当たりの供試体数は、3本とした。コア供試体の養生は、20°Cの標準水中養生とした。

③細孔径分布

材齢28日においてコア供試体のモルタル部分から2.5~5.0mmの試験片を採取し、アセトン侵せき後減圧乾燥させて測定に供した。

(3) 実験結果および考察

a) フレッシュコンクリートの性状および施工性

表-4にフレッシュコンクリートの品質管理試験結果および吹付け速度の測定結果を示す。吹付け速度は、設定した吹付け速度より若干小さいものが2ケースあったが、ほぼ目標通りの吹付け速度となっている。なお、水結合材比の低減に伴うコンクリートの粘性の増加により吹付け時の圧送負荷が増大し、施工不能となることが懸念されたため、水結合材比の小さい配合では、あらかじめスランプの設定値を大きくした。すなわち、水結合材比40%以下では、スランプの目標値を20~25cmとした。このことによりいずれの配合においても吹付け可能であった。しかしながら、水結合材比が40%を下回る配合では、若干脈動を起こす配合も見られた。これらの配合を実施工に適用する場合には、大量施工となるため吹付け速度の低下、閉塞等を引き起こすことも懸念されるため、実施工に適用する場合には、吹付け機械を含めた全体的なシステムの検討も必要と考えられる。

b) 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。図-3および図-4にそれぞれ水結合材比と材齢3および24時間における換算圧縮強度の関係を示す。

OPC単味でCA系急結剤を用いた場合、高性能減水剤を用いて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可能である。しかしながら、材齢8から24時間の強度増進は、ほとんど見られない。OPC単味で急結剤にCSA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。また、水セメント比によって若干差が見られるが、CA系急結剤に比べて材齢8時間から24時間の強度増進も大きい。

シリカフェームあるいはCSA系混和材を用いた場合、材齢8時間以内の強度発現性において水結合材比を低減した効果は見られるが、その効果はセメント単味の場合とほぼ同程度であり、混和材添加の効果はほとんど見られない。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。また、CSA系急結剤の方がやや高い強度が得られているが、その差はほとんど見られない。

CSA系混和材およびCSA急結剤を組合せた場合（配合No. 11, CSA II + QCSA II），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。ただし、材齢3～24時間は、他の配合に比べて優位性は見られない。

以上の結果をまとめると以下ようになる。

- ①材齢8時間以内の強度発現性は、水結合材比に大きく影響され、急結剤の種類、高強度用混和材の有無の影響は小さい。
- ②材齢24時間においては、使用材料の影響が大きくなり、CSA系急結剤および高強度用混和材の効果がみられる。

c) 長期強度発現特性

図-5および図-6に材齢と圧縮強度の関係、図-7に水結合材比と圧縮強度の関係、図-8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吹付けコンクリートの圧縮強度の比率）の関係を示す。

OPC単味でCA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、水セメント比の低減による強度改善効果はほとんど見られない。したがって、ベースコンクリートに対する圧縮強度比は、水セメント比の低減に伴って徐々に低下する傾向が見られる。

一方、CSA系の急結剤を用いた場合、OPC単味も強度発現性は良好であり、材齢28日において39～48

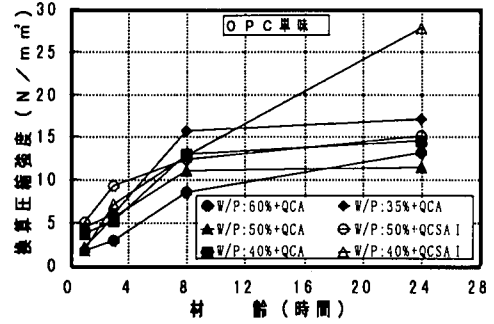


図-1 材齢と換算圧縮強度の関係 (OPC単味)

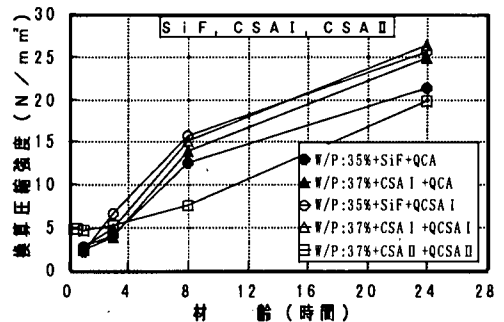


図-2 材齢と換算圧縮強度の関係 (高強度用混和材: シリカフェーム, エトリンガイト系混和材)

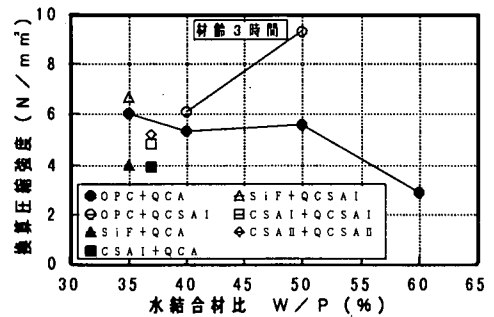


図-3 水結合材比と換算圧縮強度の関係 (3時間)

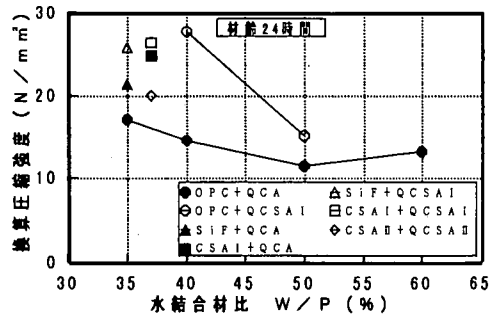


図-4 水結合材比と換算圧縮強度の関係 (24時間)

N/mm²と高い強度が得られている。また、水セメント比を低減する効果も見られる。圧縮強度比も水セメント比に関わらず70~80%と高い値となっている。

シリカフェームやCSA系混和材を用いた場合、OPC単味に対して強度改善効果が見られる。CA系急結剤を使用した場合、材齢28日で38~46 N/mm²、さらに、CSA系急結剤を用いた場合には、材齢28日で60 N/mm²を越えるレベルまで高強度化が可能である。

以上の結果をまとめると以下ようになる。

①CA系急結剤を用いた場合、水セメント比を低減しても強度改善はほとんど見られない。これは、水セメント比の低減効果が初期の水和促進に大きく現れ、そのことが長期的な水和の進行を阻害するためではないかと推察される。

②CSA系急結剤を用い、水セメント比を低減することで高強度用混和材を用いた場合と同等のレベルまで高強度化が可能である。

③高強度用混和材を用いることで高強度化が可能であり、CSA系急結剤と組合せるとさらに高強度化が可能である。

d) 細孔径分布

コンクリートの力学的特性や耐久性は、微細組織と密接な関係があることが知られている。しかしながら、吹付けコンクリートに関しては、ほとんど検討されていない。そこで材齢28日においてコア供試体から採取したモルタル部分を試料として細孔径分布の測定を行った。

図-9に水結合材比と半径5nm以上の細孔量の関係を示す。

OPC単味でCA系急結剤を用いた場合、他の材料の組合せに比べて組織が粗であり、また、水セメント比の低減による組織の緻密化がほとんど見られない。シリカフェーム、CSA系混和材の添加により総細孔量は低減されているが、その効果はさほど大きくない。それに対し、OPC単味の場合、高強度用混和材を用いた場合いずれも、CSA系急結剤を用いることで総細孔量は大幅に低減しており、微細組織の緻密化が見られる。

図-10に半径5nm以上の細孔量と材齢28日の圧縮強度の関係を示す。通常のコンクリートと同様¹⁵⁾、半径5nm以上の細孔量と圧縮強度の間には高い相関関係が見られる。

以上の結果から、以下のことが考察される。

①OPC単味でCA系急結剤を用いた場合、材齢初期で急激に水和反応が生じるため、その後の材齢の経過に伴う水和の進行に影響を与える。この傾向は、水セメント比が小さくなるほど大きく、初期強度が、改善される反面、長期強度の発現性が小さくなる。

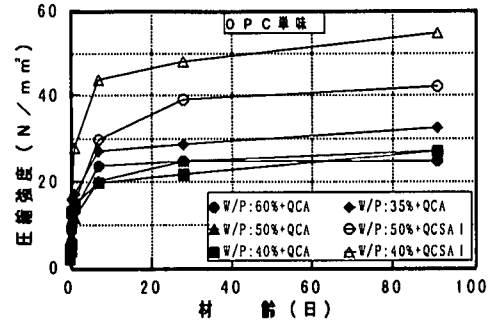


図-5 材齢と圧縮強度の関係 (OPC 単味)

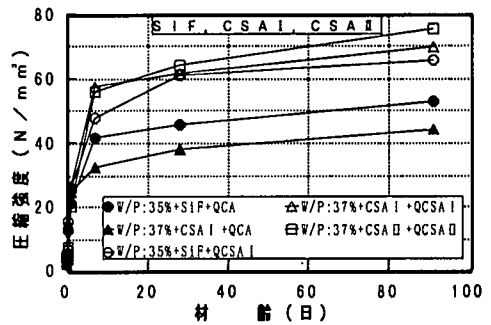


図-6 材齢と圧縮強度の関係 (高強度用混和材)

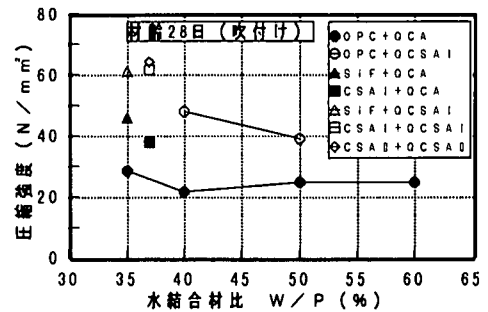


図-7 水結合材比と圧縮強度の関係 (材齢 28 日)

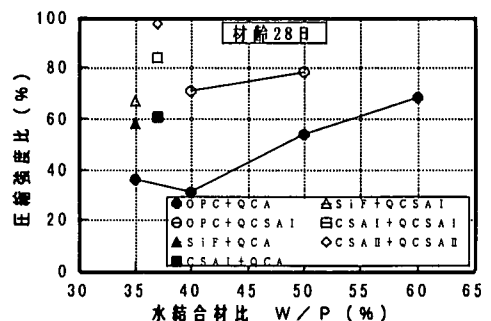


図-8 水結合材比と圧縮強度比の関係 (材齢 28 日)

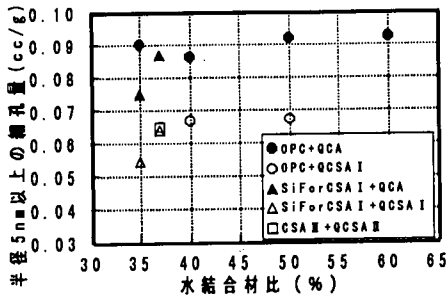


図-9 水結合材比と半径5nm以上の細孔量の関係

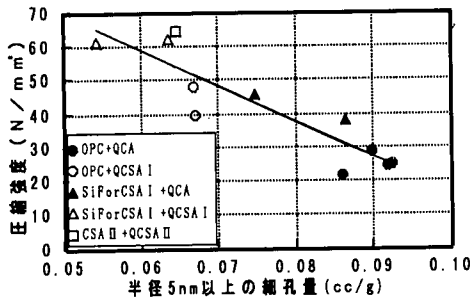


図-10 半径5nm以上の細孔量と圧縮強度の関係

- ② シリカフューム、CSA系混和材を用いることで微細組織の緻密化により強度が改善される。
- ③ CSA系急結剤を用いた場合、微細組織が緻密化し、圧縮強度が大幅に改善される。これは、エトリンガイトの針状結晶の形成によるものと考えられる。

3. 高強度吹付けコンクリートの目標強度および使用材料・配合の選定

(1) 概要

2. の吹付け実験の結果をもとに、試験施工に用いる高強度吹付けコンクリートの目標強度および使用材料・配合を経済性・施工性を考慮して選定した。

(2) 高強度吹付けコンクリートの要求品質

吹付け実験の結果、材料・配合を適切に選定することによって材齢28日において60N/mm²を越えるレベルまで高強度化できることがわかった。しかしながら、この強度は、現状の技術における限界の強度レベルであり、コストおよび施工性の観点から現状では実用化のメリットは小さいと言える(表-6参照)。このことから、ここでは設計基準強度として、現状の吹付けコンクリートの2倍である36N/mm²に設定することとする。なお、初期強度は、従来の吹付けコンクリートでは、材齢24時間についてのみ規定される場合が多いが、吹付けコンクリートの支保効

表-5 吹付けコンクリートの要求品質

項目	目標品質	
スランブ	20 ± 2.0 cm	
スランブフロー	35 ~ 45 cm	
圧縮強度	材齢 8 時間	5 N/mm ²
	材齢 24 時間	15 N/mm ²
	材齢 28 日	36 N/mm ²

果を考慮した場合、材齢24時間以内の強度発現性が重要である。このような観点から材齢8時間における初期強度についても規定することとした。なお、初期強度の設定に当たっては、厳密な検討を要するが、ここでは、材齢28日における設計基準強度を確保できる強度レベルにおいて達成可能な強度およびオーストリアのガイドラインにおける若材齢での強度規準³⁾を参考に暫定的に目標強度を設定した。

フレッシュコンクリートの要求品質は、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。

表-5に吹付けコンクリートの要求品質を示す。

(3) 高強度吹付けコンクリートの配合選定

一般的なコンクリートの配合設計では、設計基準強度および品質のばらつきを考慮して設計基準強度を下回る確率がある値以下となるように配合強度を定め、それを満足するように使用材料、水セメント比等を選定するという手順を踏む。これに対し、現状の吹付けコンクリートでは、ほとんどの場合設計基準強度は18N/mm²であり、単位セメント量が先に規定され、施工性を満足するように単位水量および細骨材率を適切に選定するという手順が一般的となっている。しかしながら、今後、吹付けコンクリートの高強度化によるトンネル施工の合理化を進めるためには、品質保証の観点のみならず経済性を考慮した配合設計手法を確立することが望まれる。現時点では、高強度吹付けコンクリートの施工事例は少なく、品質変動に関する資料は十分に得られていないが、ここでは、これまでの施工例¹⁾を参考に暫定的に変動係数14%として配合を選定することとする。コンクリート標準示方書から割増し係数 α は、以下の式により算定した。ここで、一般のコンクリートと同様、設計基準強度を下回る確率は、5%以下とした。

$$\alpha = 1 / (1 - 1.64 \cdot V / 100) \quad (1)$$

ここで、 α : 割り増し係数、V : 変動係数 (%)

表-6 各配合の経済評価

配合 No	配合条件			コスト増 (増分/No.1 配合のコスト)					圧縮強度特性		経済評価*
	水結材比 (%)	混和材の種類	急結剤の種類	セメント	混和材	高性能減水剤	急結剤	合計	圧縮強度 (28日) (N/mm ²)	No.1 に対する圧縮強度比	
1	60	—	QCA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	24.7	1.000	1.000
2	50			0.000	0.000	0.088	0.000	0.088	24.5	0.992	0.912
3	40			0.069	0.000	0.110	0.097	0.277	21.4	0.866	0.679
4	35			0.108	0.000	0.145	0.151	0.403	28.4	1.150	0.819
5	50	—	QCSA I	0.000	0.000	0.088	0.305	0.393	39.1	1.583	1.136
6	40			0.069	0.000	0.110	0.478	0.657	47.9	1.939	1.170
7	35	SiF	QCA	0.069	0.554	0.144	0.097	0.864	45.6	1.846	0.991
8	37	CSA I		0.069	0.606	0.000	0.097	0.772	37.8	1.530	0.864
9	35	SiF	QCSA I	0.069	0.554	0.144	0.477	1.244	60.9	2.466	1.099
10	37	CSA I		0.069	0.606	0.000	0.478	1.153	61.7	2.498	1.160
11	37	CSA II	QCSA II	0.069	0.865	0.000	0.478	1.412	64.1	2.595	1.075

*) 経済評価 = (No.1 配合の圧縮強度に対する比) / (No.1 配合のコストに対する比)

表-7 吹付けコンクリートの配合

水結材比 (%)	細骨材 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤添加率 (C×%)	
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤 SP	急結剤 QCSA I
40	60	180	450	1032	705	1.1	10.0

割り増し係数を算定すると1.30となり、配合強度は、46.8N/mm²となる。

表-6に各配合の経済評価を行った結果を示す。ここで、水セメント比の低減および高強度用混和材の添加に伴うコンクリートの粘性の増加によりはね返りが低減する^{9), 12)}ことが明らかとなっているが、測定上のばらつきが大きく、現状ではコスト評価の上で妥当な数字を与えることは困難と考えられる。そのため、リバウンド率は一定として材料費のみの比較を行うこととした。この結果から、上記配合強度を満足する配合、すなわち配合 No. 1 に対する圧縮強度比で2倍程度を満足し、かつ、コストパフォーマンスの高い配合を選定した。選定した配合は、表-2のNo. 6 であり、OPC単味で水セメント比を40%とし急結剤に CSA系急結剤を使用した配合である。本配合によれば、高性能減水剤の添加装置を設置するだけで対応可能であり、プラント設備の観点からも有利であると言える。

表-7に選定したコンクリートの配合を示す。

4. FEM解析による高強度吹付けコンクリートの断面トンネルへの適用性の検証

(1) 概要

高強度吹付けコンクリートの適用による大断面ト

ンネルの支保部材の低減の可能性を検証するためにFEM解析を行った。

(2) 支保パターン変更案の選定

吹付けコンクリートの設計基準強度を18N/mm²から36N/mm²に高強度化したときの支保部材の低減について検討した。変更案の選定に当たったの方針は、以下のとおりである。

- ①吹付けコンクリート厚さを20cmから15cmに低減する。吹付けコンクリートの厚さに合わせて鋼製支保工をH-150にランクダウンする。
- ②ロックボルトについては、その延長が支保機構に及ぼす効果を厳密に評価する必要があるが、延長6mのロックボルトは、モルタルの充填性の観点、施工サイクルの大幅な遅延等、施工上の問題点も多い。このような観点から、ロックボルト長を6mから4mに低減することの可能性を検討することとした。

表-8に選定した支保パターンの変更案を示す。

(3) 変更支保パターンの経済性評価

表-9に変更支保パターンの経済性の評価結果を示す。ここで、コスト増減の算定には、各支保部材の直接工事単価の増減のみを考慮し、トンネル掘削断面の低減およびズリ処理費の低減は考慮していない。すなわち、吹付けコンクリートは、材料費の増減、鋼製支保工は、1基当たりの材料費および設置費の

表-8 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
ロックボルト	長さ (m)	6.0	4.0
	ピッチ (m)	1.0	1.0
鋼製支保工		H-200	H-150
吹付け厚 (cm)		20	15

表-9 変更支保パターンの経済性評価

支保部材	コスト増減 (増分/m当りの単価)
吹付けコンクリート	+0.027
鋼製支保工	-0.037
ロックボルト	-0.034
合計	-0.044

増減, ロックボルトは, 1m当たり25本の材料費および施工費の増減を考慮した. m当たりの単価の合計は, 掘削から二次覆工までの直接工事単価の合計とした. なお, 吹付けコンクリートのはね返り率は, 一定とした.

表に示すように, 高強度吹付けコンクリートを用いることで吹付けコンクリート自体の施工コストは増加するが, 他の支保部材を低減することで全体的には, コストダウンを図ることが可能である. さらに, 吹付け厚さの低減, それに伴う掘削断面の低減および他の支保部材の低減に伴う施工サイクルの短縮も可能であり, トンネル施工の工期短縮の上でも有効であると言える.

(4) FEM解析による妥当性の検証

a) 概要

(2) 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¹⁷⁾.

厳密には, 変更した支保パターン自体の妥当性を検証する必要がある, そのためには, 地山の亀裂による不連続性を考慮した厳密な解析 (UDE C等) が必要となると考えられる. しかしながら, 地山の条件等を正確に把握し, 解析に反映するのは, 現状では困難である. そこで, 原設計の支保パターンが支保部材として設計上妥当であることを前提とし, 変更案が同等の支保効果を有しているかどうかの確

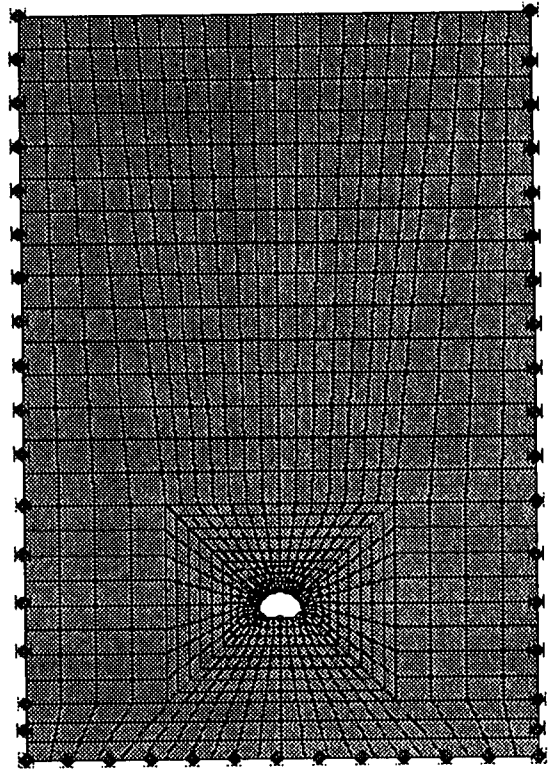


図-11 解析モデル

認を行うことを主目的に解析を行うこととした. 解析手法は, 原設計と変更案の比較であることから, 解析の容易性を考慮して岩盤を連続体と仮定した線形FEM解析とした.

b) 解析モデル, 地盤および各部材の物性値

図-11に解析モデルを示す. また, 表-10に解析上の岩盤および各部材のモデルを, 表-11に地盤定数および各部材のヤング係数を示す.

解析は, 平面2次元モデルとし, 解析範囲は, トンネル上部は土被り全体, 下部は4D, 側部は5Dとした (D: トンネル直径).

ここで, 吹付けコンクリートのヤング係数は, 圧縮強度から式(2)により算定した. なお, 解析においては若材齢であることを考慮して, 算定された値の1/2に低減した値を用いた.

$$E = 1,409 \times \rho^{1.5} \times F_c^{0.5} \quad (2)$$

ここで, E: ヤング係数 (N/mm²), ρ: 比重, F_c: 圧縮強度 (N/mm²) である.

表-10 地盤および各部材のモデル化

部材・境界	モデル化	備考
周辺地盤	平面ひずみ要素	線形弾性体と仮定
ロックボルト	トラス要素	
コンクリート	合成した	
鋼製支保工	ビーム要素	
地山とロックボルト間のすべり	考慮せず	
鋼製支保工の継手	剛結合と仮定	

表-11 地盤定数および各部材のヤング係数

地盤定数	単位容積質量 γ (ton/m ³)	2.00	
	変形係数 E (N/mm ²)	1.00×10^4	
	ポアソン比	0.35	
	粘着力 C (N/mm ²)	1.00	
	内部摩擦角 Φ (deg)	30	
ロックボルト	ヤング係数 (N/mm ²)	1.94×10^4	
鋼製支保工	ヤング係数 (N/mm ²)	2.10×10^4	
吹付けコンクリート	ヤング係数 (N/mm ²)	原設計	1.00×10^4
		高強度	1.50×10^4

c) 解析ステップおよび荷重条件

解析に当たっては、施工による切羽の進行を考慮するため、以下に示す6 STEPで解析を行った。

- ①STEP1：初期応力解析
- ②STEP2：上半部掘削後
- ③STEP3：上半部支保工施工後
- ④STEP4：下半部掘削後
- ⑤STEP5：下半部支保工施工後
- ⑥STEP6：インバート部掘削後

なお、各STEPにおける切羽の進行を考慮するために、掘削相当外力の55%を掘削直後の素掘りの状態(STEP2および4)に、残りの45%を支保工施工後の状態(STEP3および5)に作用させた。

d) 解析結果

解析においては、内空変位、ロックボルト軸力、吹付けコンクリート応力、鋼製支保工応力および周辺地盤の発生ひずみ、の4点に関して原設計と変更案の比較を行った。解析結果を表-12に示す。

高強度化に伴って吹付けコンクリートの剛性が高くなることから吹付けコンクリートの発生応力が高くなっており、吹付けコンクリートの荷重負担の割合が相対的に大きくなっていることが伺える。内空変位、ロックボルト軸力、鋼製支保工応力および周

表-12 解析結果一覧

項目		原設計	変更案
内空変位 (mm)	天端変位	20.6	20.9
	水平変位	8.0	8.6
ロックボルト最大軸力(10 ⁴ N)		12.37	14.44
発生応力 (N/mm ²)	吹付けコンクリート	13.1	19.5
	鋼製支保工	274.7	272.7
周辺地盤のひずみ		最大0.4%程度で両者のひずみ分布に大きな差はない。	

辺地盤のひずみは、いずれも原設計と変更案で大きな差は見られず、変更案の妥当性が確認された。

5. 大断面トンネルにおける試験施工

(1) 概要

経済性評価およびFEM解析の結果、支保パターン変更案の妥当性が確認されたことから、変更支保パターンによる高強度吹付けコンクリートの試験施工を実施した。試験施工は、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(3車線、掘削断面積:130m²)のD1パターンの一部区間(施工区間:20m、坑口から約1,350m位置)で実施した。試験施工では、高強度吹付けコンクリートの施工性および品質を確認するとともに地山挙動計測により変更支保パターンの妥当性を確認した。

(2) 施工性および品質管理試験結果

高強度吹付けコンクリートの品質のばらつきを確認するために、フレッシュコンクリートの品質、初期強度および長期強度の測定を行った。採取したデータ数は、n=12個である。表-13に品質管理試験結果の一覧を、図-12、図-13に初期強度および長期強度の品質管理試験結果を示す。図-14に材齢と圧縮強度の変動係数の関係を示す。

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結果も得られたが、この範囲において問題なく施工することができた。硬化後の品質は、いずれの材齢においても目標品質を満足する結果が得られた。硬化後の品質変動は、若材齢時ほど大きく、材齢の経過にしたがって小さくなる傾向が見られる。これは、試験方法自体の精度の差異および環境温度の影響と考えられる。図-15に練上り温度と材齢8時間における換算圧縮強度の関係を示す。図に示すように、若材時の圧縮強度と練上り温度の間には高い相関が見られる。今回は、夏

表-13 品質管理試験結果一覧 (データ数: n = 12)

項目	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 (°C)	スランプ (cm)	スポンフロー (cm)	3時間	8時間	24時間	7日	28日
目標品質	————	20.0 ± 2.0	35 ~ 45	————	5.0 <	15.0 <	————	36.0 <
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	20.0	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	2.7	3.6	6.5
変動係数 (%)	————	7.9	27.5	36.5	20.1	12.4	7.7	11.6

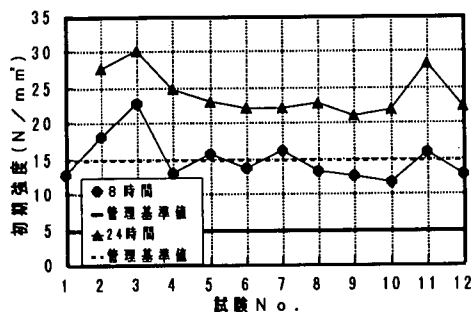


図-12 品質管理試験結果 (初期強度)

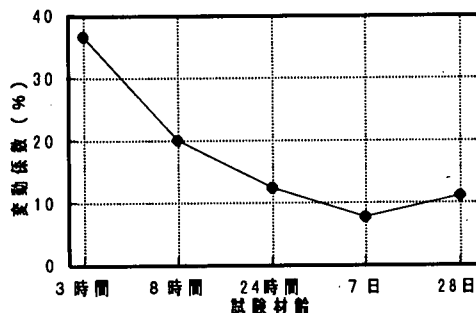


図-14 試験材齢と変動係数の関係

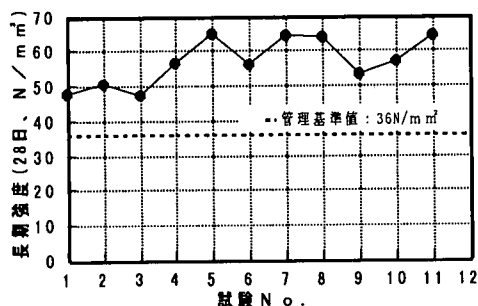


図-13 品質管理試験結果 (長期強度, 材齢 28 日)

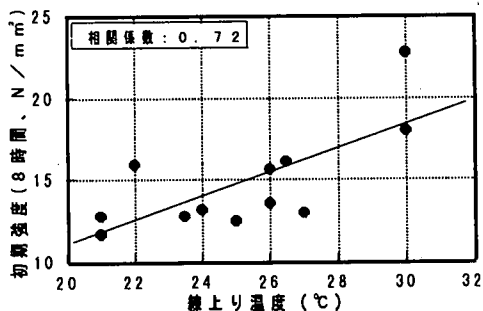


図-15 練上り温度と初期強度の関係 (材齢 8 時間)

季から秋季にかけての試験データであり、冬季においてはさらに品質のばらつきが大きくなる可能性がある。したがって、品質の安定化を図るためには、季節毎の材料・配合選定の検討も必要となると考えられる。ここで、材齢28日における変動係数は、11.6%であり、吹付けコンクリートとしては、比較的小さい。これは試験施工のため良好な管理ができたことによると考えられ、配合強度算定時に設定した変動係数 (14%) は、実際の施工時の管理状態を考慮した場合、ほぼ妥当な値と考えられる。

(3) 計測概要

変更した支保パターンの妥当性を確認するために計測を行った。図-16に計測位置図を示す。測定位置は、天端、肩部2箇所および側部2箇所の計5箇

所とした。以下、各計測概要を示す。

a) 天端沈下および内空変位

計測断面の所定位置に設置したターゲットの変位を3次元測定装置を用いて測定した。

b) ロックボルト軸力

溝を加工したロックボルトにひずみゲージを深度方向に5断面 (0.5, 1.5, 2.5, 3.5および3.9m)、各断面2枚貼付し、ロックボルトの発生ひずみ、断面積およびヤング係数から軸力を算定した。

c) 吹付けコンクリートおよび鋼製支保工応力

吹付けコンクリートの応力は、有効応力計により測定した。設置位置は、鋼製支保工の中立軸位置とした。鋼製支保工の応力は、ウェブの両面の対称位置に貼付したひずみゲージ (中立軸から地山側および内空側に50mmの位置) により計測されるひずみお

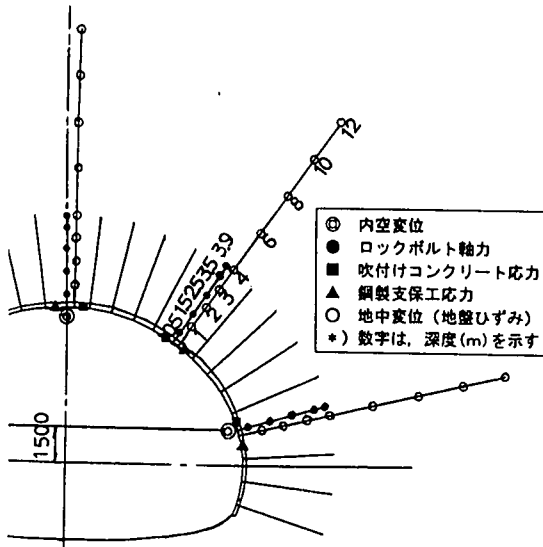


図-16 計測位置図

よび鋼製支保工のヤング係数から算定した。

d) 周辺地盤のひずみ

地山内に挿入したノギス型の多点式地中変位計で計測される深さ方向の変位分布から地盤のひずみ分布を算定した。変位の測定位置は、深度方向に8カ所(1, 2, 3, 4, 6, 8, 10および12m)とした。

(4) 計測結果および考察

表-14に計測結果のまとめを示す。

ここで、上半切羽の進行は、3~4m/日であり、34日後に工期終点(計測位置から115m)に到達した。また、上半掘削開始から30日後に下半掘削を開始し、45日後に工期終点に到達した。

a) 天端沈下および内空変位

図-17に天端沈下および水平変位の経時変化を示す。計測開始から約30~35日後まで切羽の進行とともに徐々に増加しているが、上半掘削が終点へ到達した時点で、天端沈下量15mm、水平変位10mmでほぼ収束している。

b) ロックボルト軸力

図-18にそれぞれロックボルト軸力最大値の経時変化を、図-19にロックボルト軸力終局値の深さ方向の分布を示す。右側部を除いて深さ1~3mの位置に最大軸力が作用しており、長さ4mのロックボルトとして理想に近い軸力分布となっている。いずれの位置も、掘削後数日で収束している。右側部は、ボルト頭部に近い位置で最大となっており、また、一部若干圧縮力が作用している。これは、局所的な地盤のゆるみの影響と思われる。なお、側部のロックボルト軸力が20~40日にかけて増大しているのは、

下半掘削(30日後に開始)の影響である。

c) 吹付けコンクリートおよび鋼製支保工応力

図-20および図-21にそれぞれ吹付けコンクリート応力および鋼製支保工応力の経時変化を示す。

吹付けコンクリートには、天端において最大14 N/mm²程度の圧縮応力が発生している。鋼製支保工には、右側部を除いて全体に圧縮応力が作用しており、その最大値は、350N/mm²程度である。ここで、右肩部は、内側に引張応力が発生しており、ロックボルトの軸力の測定結果と同様、局所的な地盤のゆるみの兆候が見られる。

d) 周辺地盤のひずみ

図-22にひずみの最大値の経時変化を図-23にひずみの終局値の深さ方向の分布を示す。上半および下半の切羽進行に伴うひずみの増大は、いずれも約10日程度で収束している。右肩部は、表面近くにおいてひずみ量が最大となっているが、その他は深度2~3mにおいて最大となっており、全体的な地盤のゆるみ領域は、3~4m程度と推定される。右側部は、部分的に地盤のゆるみが生じている兆候が見られ、この傾向は、前述のロックボルト軸力および鋼製支保工応力の測定結果にも現れている。ただし、いずれの位置も上半・下半掘削後10日程度で収束しており、上記の地盤のゆるみは、部分的なものであり、トンネル全体の安定性状は特に問題となるほどのゆるみではないと考えられる。

e) 計測結果のまとめ

部分的な地盤のゆるみの影響は見られたが、各測定値の絶対値あるいは経時的な収束傾向において危険な兆候は見られなかった。また、FEMによる解析結果(表-12参照)と現場における計測結果は、オーダー的におおよそ一致している。

(5) 試験施工のまとめ

試験施工において、適用した高強度吹付けコンクリートの品質は、ばらつきも小さく目標品質を十分満足し、また、現場計測の結果もおおよそ妥当な結果であった。しかしながら、地山条件の変動、現場計測のばらつき、岩盤を連続体と仮定したFEM解析の精度の信頼性の問題等から、今回の結果から高強度吹付けコンクリートの適用による支保部材低減の妥当性を結論付けることはできない。今後、さらに現場におけるデータの収集を行うとともに、精度の高い解析による検証を行うことが必要である。

いずれにせよ、高強度吹付けコンクリートの適用によるトンネル施工の合理化・コストダウンの可能性は、高いと言え、今後さらに検討を進めていくことが望まれる。

表-14 計測結果のまとめ

計測項目		計測結果
内空変位	天端変位	15mm ほぼ収束
	水平変位	10mm ほぼ収束
ロックボルト最大軸力		7.5 ~ 17.4 (10 ⁴ N)
発生応力	吹付けコンクリート	最大 13.3 (N/mm ²)
	鋼製支保工	200 ~ 300 (N/mm ²)
周辺地盤	ゆるみ領域	3.0 m 程度
のひずみ	ひずみ	0.08 ~ 0.66 %

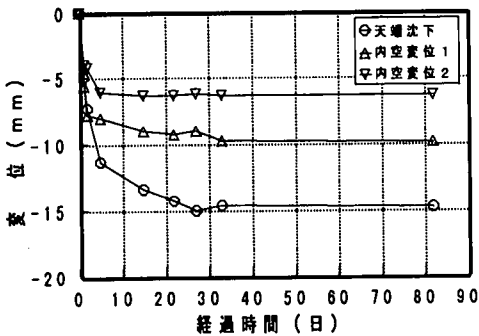


図-17 天端沈下および内空変位の経時変化

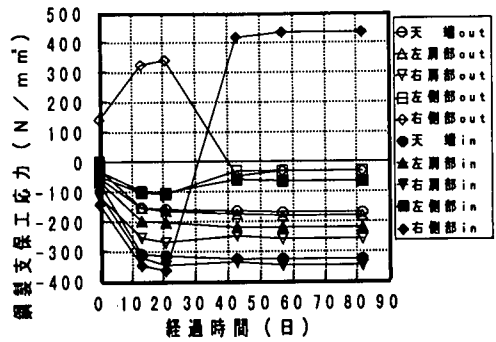


図-20 鋼製支保工応力の経時変化

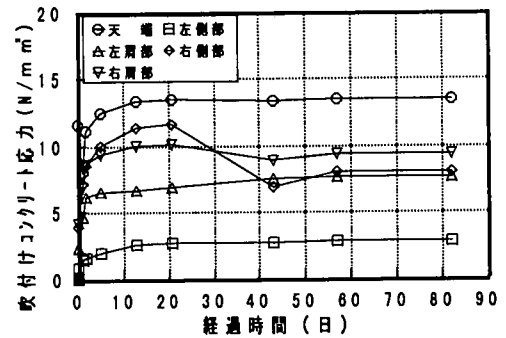


図-21 吹付けコンクリート応力の経時変化

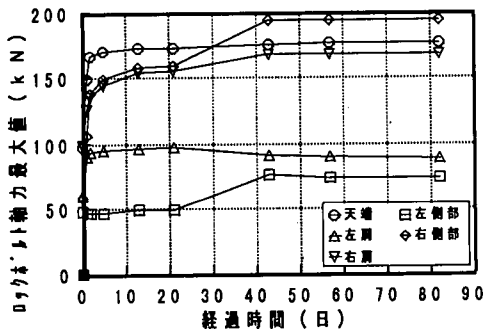


図-18 ロックボルト軸力最大値の経時変化

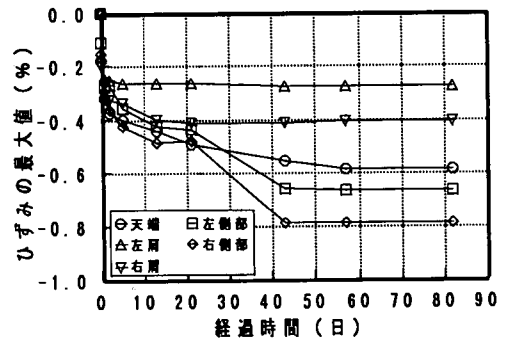


図-22 周辺地盤ひずみの最大値の経時変化

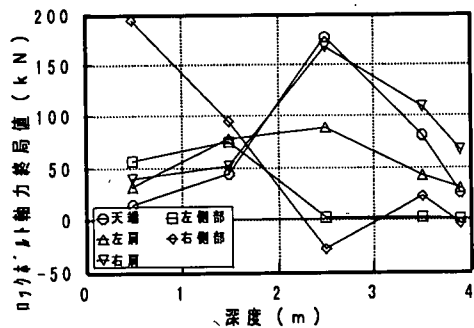


図-19 ロックボルト軸力終局値の深さ方向の分布

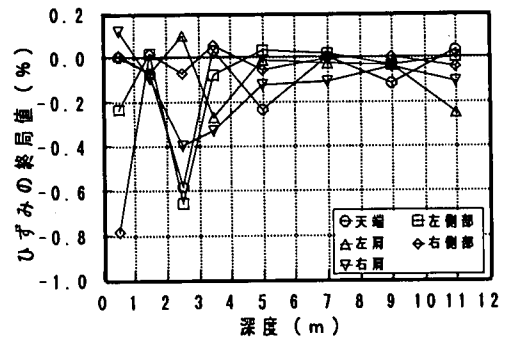


図-23 周辺地盤ひずみの終局値の深さ方向の分布

6. 結論

高強度吹付けコンクリートを適用することによる大断面トンネル施工の合理化・コストダウンの可能性の検証を行うことを目的に試験施工を行った。試験施工に用いる高強度吹付けコンクリートの材料・配合を選定するための吹付け実験、高強度吹付けコンクリートの適用による支保部材の低減の妥当性を検証するために実施したFEM解析および大断面トンネルの一部区間で実施した試験施工で得られた結論をまとめると以下のようになる。

(1) OPC単味で、CA系の急結剤を用いた場合、水セメント比の低減により初期強度は改善されるが、長期強度は、ほとんど改善されない。これは、水セメント比の低減により初期の C_3S 、 C_2S の水和が促進され、そのことが長期の水和の進行に影響を与えるためであると考えられる。

(2) CSA系の急結剤を用いることで経済的に初期および長期強度の高強度化が可能である。セメント単味の場合でも、水セメント比を40%に低減することで材齢28日において48 N/mm²の圧縮強度が得られ、さらに、シリカフュームやCSA系混和材と組合せることで60 N/mm²程度の圧縮強度が得られる。

(3) 材齢8時間以内における強度発現性は、主として水結合材比の影響を受け、急結剤の種類および高強度用混和材の添加の影響は小さい。材齢24時間においては、使用材料の影響が現れ、CSA系急結剤および高強度用混和材の効果が見られる。

(4) 高強度吹付けコンクリートを適用することで吹付け厚さおよび他の支保部材を低減した支保パターンの変更案を選定し、FEM解析および試験施工における現場計測によりその妥当性を検証した。その結果、解析上原設計と同等の支保効果を有し、また、現場計測において危険な兆候は見られなかった。また、高強度吹付けコンクリートを用いた変更支保パターンの経済性を評価した結果、掘削から二次覆工までの施工の直接工事単価の合計で約4.4%のコストダウン効果があることが確認された。

FEM解析の信頼性、地山条件の変動、現場計測のばらつき等から、今回の結果のみで高強度吹付けコンクリート適用による支保部材低減の妥当性を結論付けることはできないが、高強度吹付けコンクリートの有効な利用がトンネル施工の合理化・コストダウンに繋がる可能性は、高いと言える。

(5) 試験施工において品質の変動の程度を確認するため、データ数 $n=12$ 個のデータを採取した。その結果、材齢3および8時間においては、環境温度の影響を受けることから変動係数20%以上と若干

変動が大きかったものの、いずれの材齢においても目標強度を満足した。材齢24時間以降は、変動係数8~12%程度と比較的小さく、良好な品質管理が行えた。ただし、今回のデータは、試験施工による良好な管理のもとで得られたものであり、実際の施工への適用に当たっては、今回得られた値より若干高めの変動係数を与える必要があると言える。以上の点から、配合設計に当たって設定した変動係数14%は、ほぼ妥当な値であったと考えられる。

謝辞：本実験および試験施工は、日本道路公団東名高速道路（改築）日本坂トンネル西工事において実施したものであり、実施に当たり日本道路公団焼津工事事務所の関係者の方々には多大なご協力およびご指導をいただいた。また、実験および試験施工の実施に際し、ハザマ・東急建設共同企業体、電気化学工業（株）、デンカグレース（株）、木部建設（株）の関係各位には多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田沢雄二郎：山岳トンネルの新技术，トンネルと地下，Vol. 19, No. 4, pp. 69-75, 1988. 4.
- 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) 日本トンネル技術協会：山岳トンネルの吹付けコンクリート，1996. 2.
- 4) 本橋賢一，山毅彦：シリカフュームを混和した吹付けコンクリートの物性に関する一実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14, No. 1, pp. 347-350, 1992. 6.
- 5) 岡田喬，川原一則，加藤勝彦：連続式スラリートイブシリカフューム混入方式でのトンネル用吹付けコンクリートの開発：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，土木学会，pp. 139-144, 1993. 11.
- 6) 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講演論文報告集，土木学会，pp. 139-144, 1993. 11.
- 7) 鬼頭誠，末永充弘，広中義昭，伊藤伸一郎：シリカフュームを混和した吹付けコンクリートの性能，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，土木学会，pp. 145-152, 1993. 11.
- 8) 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. 1273-1278, 1995. 6.
- 9) 原田耕司，松井健一，手塚裕紀，佐伯好治：高耐久性吹付けコンクリートの研究・開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No. 1, pp. 1013-1018, 1995. 6.
- 10) 田中一雄，佐藤重知，一条勝：膨張性トンネルにおけるシリカフューム添加した吹付けコンクリートの

- 実験と考察—東北新幹線岩手トンネル—戸工区—, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第6部, pp. 176-177, 1995. 9.
- 11) 岡林信行, 田沢雄二郎, 松川久俊, 今田徹: 高土被りトンネルへの高強度吹付けコンクリートの適用に関する一考察, 土木学会論文集No. 546/VI-32, pp. 145-156, 1996. 9.
- 12) 田沢雄二郎, 本橋賢一, 横関康祐, 岡田浩司: シリカフェュームを添加した高強度吹付けコンクリートの物性と適用例, 土木学会論文集No. 546/V-33, pp. 173-184, 1996. 11.
- 13) 長沢教夫, 石川敏博, 岡田正男, 福留和人: 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, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 13-17, 1997. 1.
- 14) 日本コンクリート工学協会編: コンクリート便覧, pp. 91-92, 1996.
- 15) 日本コンクリート工学協会: 反応モデル解析研究委員会報告集(Ⅰ), pp. 111-185, 1996. 5.
- 16) 平間昭信, 藤本晃生, 原田進, 岩城圭介: 高強度吹付けコンクリートの品質変動について, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第5部, pp. 142-143, 1995. 9.
- 17) 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, pp. 73-82, 1995. 12.

(1997. 6. 24受付)

PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH SHOTCRETE MADE WITH VARIOUS MATERIALS AND AN APPLICATION FOR LARGE SCALE TUNNEL

Kazuto FUKUDOME, Norio NAGASAWA, Tatsuo KITA, Ritsu SUGIYAMA
and Yukio SASAGAWA

In this study, high-strength shotcrete were partially applied for the large scale tunnel in order to certificate the effect of high-strength shotcrete for down of construction cost of large scale tunnel. Prior to the application of high-strength shotcrete, field tests were carried out to chose the materials and mixture proportion of high-strength shotcrete and FEM analysis were done to certificate the property of the reduction in thickness of shotcrete, length of rock bolts and size of steel supports by using high-strength shotcrete.

From the field tests, it is clear that the strength of 30 ~ 60N/mm² can be obtained economically choosing materials and mixture proportions properly. And from the results of FEM analysis and the measurement data during tunnel excavation, it is possible to down the construction cost and term of large scale tunnel by using high-strength shotcrete.