

高強度吹付けコンクリートの耐久性改善に関する研究

三 浦 律 彦 竹 田 宣 典

Study on the Improved Durability of “High-Strength Shotcrete”

Norihiko Miura Nobufumi Takeda

Abstract

Shotcrete is usually used for primary tunnel supporting, because long-term durability is not needed for shotcrete, owing to the secondary supporting cover used. A new type of supporting system was recently proposed, known as a Single Shell structure. In this case, shotcrete is directly exposed to severe environmental conditions. Abrasion resistance is also required for shotcrete used in the tunnels channeling the sediment runoff from dams. Thus, the estimation of the durability of shotcrete is an important research theme. High-strength shotcrete has been developed, and shooting experiments have been used to estimate the durability of shotcrete. Its durability has been tested under freezing and thawing, abrasion, water tightness, salt permeability, and carbonation conditions. In conclusion, high-strength shotcrete was found to be highly durable in the long term.

概 要

吹付けコンクリートはトンネルの一次支保工に用いられ、通常は二次覆工で保護されるため、耐久性が問題となることはなかった。しかし、近年、吹付けコンクリートのみで覆工を構築する「シングルシェル構造」が提案され、凍結融解による坑口での劣化が課題となっている。一方、ダム の排砂トンネルでは、構造の合理化のため吹付けコンクリート自体にすり減り抵抗性が要求される場合もあり、吹付けコンクリートの耐久性が重要なテーマになっている。筆者らは、これまでの第二東名仕様($F_c=36\text{N/mm}^2$)を上回る $F_c=50\text{N/mm}^2$ 程度の「高耐久・高強度吹付けコンクリート」の開発を進めてきた。その一環として、高強度吹付けコンクリートの耐久性評価のための吹付け実験を実施した。検討項目は、耐凍結融解性、すり減り抵抗性、水密性、遮塩性、中性化である。試験の結果、開発した高強度吹付けコンクリートの耐久性は良好で、本設構造への適用性も高いことが実証された。

1. はじめに

トンネル覆工用の吹付けコンクリートには、掘削土量の低減や工期短縮の観点から、さらなる高強度化が求められ、特に初期強度を求められる事例²⁾が多くなってきた。トンネルの覆工では、一般に二次覆工を伴うことから、一次覆工である吹付けコンクリートに対しては、必ずしも耐凍結融解性やすり減り抵抗性などの耐久性は求められていないのが現状である。このようなことから、吹付けコンクリートの耐久性についてはこれまで十分な検討がなされていないのが現状である^{3), 4)}。

しかしながら、二次覆工を行わず、一次覆工のみでトンネル覆工構造とする、いわゆる「シングルシェル構造」の場合には、一次覆工である吹付けコンクリートに対して、種々の耐久性が要求性能として求められる場合がある。

例えば、寒冷地の坑口部では、耐凍結融解性が求められ、水路トンネルなどでは、すり減り抵抗性³⁾が求められる。また、吹付けコンクリートの断面内に、支保工などの鋼材が設置されている場合には、中性化や塩化物イオンの浸透に対する耐久性も必要となると考えられる。

本報では、高耐久・高強度吹付けコンクリートの開発¹⁾の過程で実施した耐凍結融解性、すり減り抵抗性、中性化抵抗性、遮塩性、水密性等の耐久性評価、およびそれらの改善手法について述べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 吹付けコンクリートの配合 吹付け実験を行ったコンクリートの配合をTable 1に示す。本報では、第二東名で使用されている高強度配合(設計基準強度 36N/mm^2)を「基準配合」と呼称し、さらに高強度が得られる配合を「高強度配合」の吹付けコンクリートと呼称することとした。

高強度配合は、基準配合に比べて単位セメント量や混和剤添加量を多くし、水セメント比を35%とすることにより、高強度化を図った。また、耐凍結融解性を向上させる目的で、ベースコンクリートにAE剤を添加してエントレインドエアを混入させ、目標空気量を $7.5\pm 1.5\%$ とやや高めに設計した。

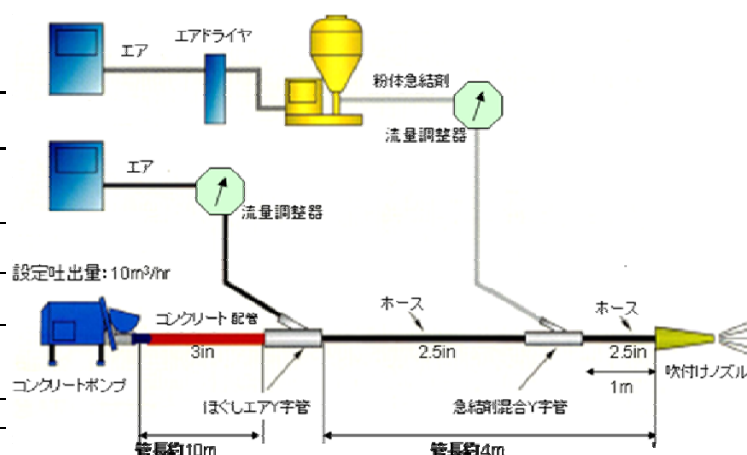
さらに、ベースコンクリートの施工性の改善と長期強

Table 1 吹付けコンクリートの配合
Mix Proportions of Shotcrete

	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	水セメ ント 比 (%)	細骨 材率 (%)	目標 空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)							
					水 W	セメント C	フライ アッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE 減水剤 SP (C×%)	AE剤 AE (C×%)	急結剤 Q (C×%)
基準配合	13	45	65	4.0 ± 1.5	203	450	0	1081	593	0.8	0	7.0
高強度①	13	35	60	7.5 ± 1.5	195	557	111	877	596	1.3	0.06	7.0
高強度②	13	35	50	7.5 ± 1.5	195	557	111	731	745	1.3	0.06	7.0

Table 2 使用材料
Materials

分類	種別	仕様等	密度 (g/cm ³)	略号
セメント	普通ポルトランドセメント	D社製	3.15	C
フライアッシュ	JISII種規格品	T社製	2.23	F
水	水道水	糸魚川市	1.00	W
細骨材	川砂	新潟県姫川水系砂 FM=2.90	2.62	S
粗骨材	6号砕石	Gmax:13mm	2.67	G
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	1.05	SP
	空気量調整剤	陰イオン系	1.04	AE
急結剤	CSA系粉体急結剤	D社製 高強度用	2.7~2.9	Q

Fig. 1 吹付けシステムの概要
Shotcrete SystemTable 3 硬化コンクリートの試験項目
Testing Method of Hardened Concrete

試験項目	試験方法	試験内容
ピン貫入試験	JIS-726-2008 貫入深さから強度算定	材齢：1hr, 3hr, 24hr (N=10~15) 現場気中養生
ブルアウト試験	JSCE-G 561-2010 引抜き力から強度算定	材齢：3hr, 24hr (N=3) 現場気中養生
コアの圧縮強度試験	JIS A 1107-2002 (φ 5.5×h11cm供試体)	材齢7日, 28日, 91日 吹付け2日後にコア採取し、20℃水中養生(N=3)
凍結融解試験	JIS A 1148-2010 B法：水中凍結融解 10×10×40cm供試体	切り出し後材齢28日まで 20℃水中養生(N=3)
すり減り試験	電中研方式 (0式すり減り試験 ³⁾) 炭素鋼φ20×48mm ×25個、水量20L/min	試験開始材齢28日、 回転数60rpmで2hr, 4hr, 6hr後のすり減り減量から係数を算定(N=3)
中性化促進試験	JIS A 1153 - 2003 CO ₂ 5%, 30℃, RH50%	材齢28日から3ヶ月間暴露し中性化深さを計測(N=3)
透水試験	インプット法 5MPa×48hr加圧 (φ15×15cm供試体)	透水深さから拡散係数、透水係数を算定 (縦抜き、横抜きで各N2)
塩分浸透試験	JSCE-G572-2010 NaCl10%水溶液、20℃ (φ15×15cm供試体)	6ヶ月間浸漬し呈色法により浸透深さを計測(N=2)

の一部に置換して使用)でセメントの 20%だけ添加した。高強度配合は、細骨材率が60%の配合(高強度①)と、50%の配合(高強度②)の2種類とした。

(2) 使用材料 使用材料を Table 2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、フライアッシュは JISII 種規格品を使用した。粗骨材は最大寸法が 13mm の 6 号砕石を用いた。品質安定性を考慮してポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用し、空気量調整剤として陰イオン系の AE 助剤を併用した。また、急結剤は、カルシウムサルフォアルミニート系の高強度吹付け用急結剤を用いた。

2.2 吹付け方法

吹付けシステムを Fig. 1 に示す。急結剤を添加する前のベースコンクリートは近隣のレディーミクストコンクリート工場で製造し、約 15 分で吹付け現場まで運搬し、フレッシュ性状の確認後吹付け施工試験を行った。



Photo 1 箱型枠に吹付けしたブロック試験体
Block Specimen of Shotcrete in a Box

Table 4 フレッシュコンクリートの試験結果
Test Results of Fresh Concrete

配合	温度 (°C)		空気量 (%)	スラブ (cm)	スラブ厚 (mm)	O漏れ 流下時間 (sec)
	コンクリート	気相				
基準配合 (s/a=0%)	14.0	15.0	3.8	16.0	390×390	10.3
高強度① (s/a=0%)	16.0	12.0	8.9	26.0	630×630	5.1
高強度② (s/a=50%)	18.0	14.0	6.0	25.0	560×560	9.8

2.3 試験方法

(1) 試験項目および試験方法 試験項目および試験方法を Table 3 に示す。このうち、ピン貫入試験、プルアウト試験はコア採取前の極初期材齢の圧縮強度を判定する試験である。また、耐久性試験のうち、凍結融解とすり減り試験の供試体は角柱あるいは平板状に切り出し、それ以外は円柱のコアを採取して試験に供した。

(2) 供試体の作製方法 ベースコンクリートの供試体は現場にてフレッシュ性状確認後に $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 型枠に採取し、翌日脱型して 20°C 水中養生を行い、所定材齢で試験に供した。一方、吹付けコンクリートは、 $50 \times 50 \times 25 \text{cm}$ の木製箱型枠に吹付けを行い (Photo 1 参照)、硬化確認後にコア採取と試験体の切り出しを行った。プルアウト試験では直接試験用鋼製枠に吹付けを行った。なお、すり減り試験と凍結融解試験の試験体切り出し、および中性化促進試験、透水試験、塩分浸透試験のコア採取は材齢 28 日から各試験が開始できるよう材齢 3 週程度で実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 ベースコンクリートのフレッシュ性状

吹付けコンクリートの吹付け前のベースコンクリートの試験結果を Table 4 に示す。基準配合のスラブは 16.0cm 、高強度配合①はスラブフロー 635mm 、高強度配合②はスラブフロー 545mm であった。高強度配合は

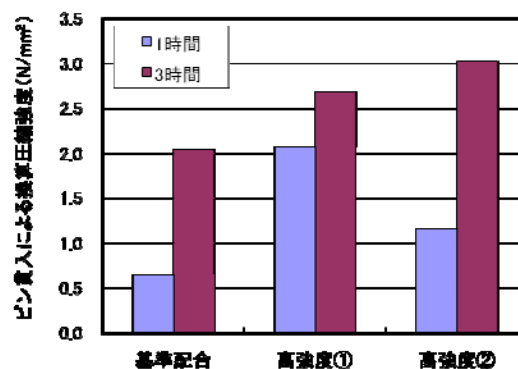


Fig. 2 ピン貫入試験による吹付け試験体の換算強度
Converted Strength from Depth of Pin Penetration

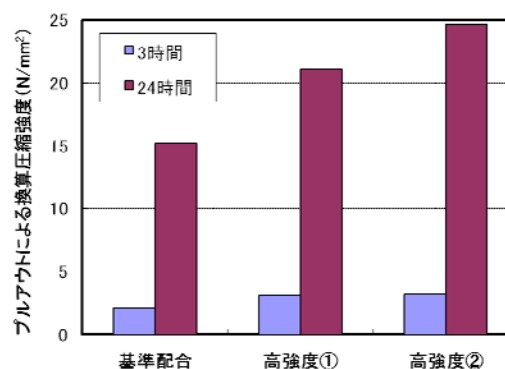


Fig. 3 プルアウト試験による吹付け試験体の換算強度
Converted Strength from Pull-Out Resistance

粘性が高いため、高性能 AE 減水剤を多く使用し、流動性を高めた配合に調整してある。また、空気量は、基準配合では AE 助剤を併用していないが 3.8% が計測されており、AE 助剤を併用した高強度配合①では 8.9% 、高強度配合②では 6.0% と目標通りの空気量が得られた。

3.2 吹付けコンクリートの施工性

基準配合および高強度配合ともに、吐出量 $9 \sim 10 \text{m}^3/\text{hr}$ 程度、急結剤使用量 $5 \sim 7 \text{kg}/\text{min}$ の条件下で、良好な吹付け施工が可能であった。高強度配合①は、基準配合に比べて若干粉塵量が多くなったものの、吹き付け・付着性状は良好であり、高強度配合②は、急結剤の混合状態や付着状態などの吹付け性状が基準配合よりもやや優れていた。高強度配合は総粉体量が極めて多く、粘性が高い配合のため、細骨材率を通常 ($60 \sim 65\%$) より少し低減した方が急結剤の混合状態も良くなり、より安定した吹付け施工が可能になると考えられる。

3.3 圧縮強度

(1) 極初期強度 剤添加率 (対セメント重量) を一定に調整したが、材齢 3 時間後の圧縮強度の換算値は、基準配合では $2.1 \text{N}/\text{mm}^2$ 、高強度配合①では $2.7 \text{N}/\text{mm}^2$ 、高強度配合②では $2.7 \text{N}/\text{mm}^2$ 、高強度配合②では

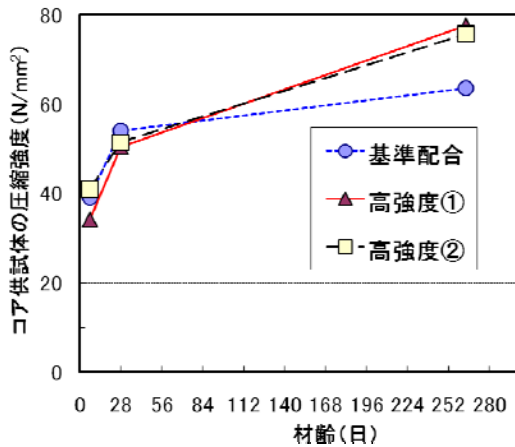


Fig. 4 コア供試体の圧縮強度の発現性状
Strength Development of Shotcrete

3.0N/mm²で、高強度配合が高くなった。

次に、Fig.3 にプルアウト試験による換算圧縮強度を示す。材齢3時間後の圧縮強度の換算値は、基準配合では2.1N/mm²に対して、高強度配合①では3.1N/mm²、高強度配合②では3.2N/mm²であり、ピン貫入試験の圧縮強度の換算値と同等であった。吹付けコンクリートの水セメント比を基準配合から10%低減することにより、3時間強度を30～50%程度増加させることができた。

プルアウト試験による材齢24時間後の圧縮強度の換算値は、基準配合15.2N/mm²に対して、高強度配合①では21.1N/mm²、高強度配合②では24.7N/mm²であり、水セメント比を10%低減することにより、24時間強度を40～60%程度増加させることができた。

以上のように高強度吹付けコンクリートは従来の基準配合より極初期材齢から高い強度が得られることが確認できた。

(2) コアの圧縮強度(長期強度) 吹付け試験体(ブロック、以下略)から採取したコア供試体の圧縮強度の推移を Fig.4 に示す。高強度配合の材齢7日、28日までの圧縮強度は、基準配合に比べて同等かやや低い結果であったが、材齢9ヶ月における圧縮強度は、細骨材率に問わず75N/mm²以上の高強度が得られ、基準配合に比べて20%程度高い値となった。これは、フライアッシュをセメントの外割で20%添加した配合としているため、長期材齢での強度増進が生じた結果と思われる。

3.4 耐久性

(1) 耐凍結融解性 吹付け試験体から切り出した供試体の凍結融解試験における相対動弾性係数(試験開始時からの弾性係数の残存率)の変化を Fig.5 に示す。空気量が3.8%の基準配合では、240サイクルで相対動弾性係数が60%未満となり、300サイクルの耐凍結融解性は満足しない結果であったが、空気量を7.5±1.5%とした

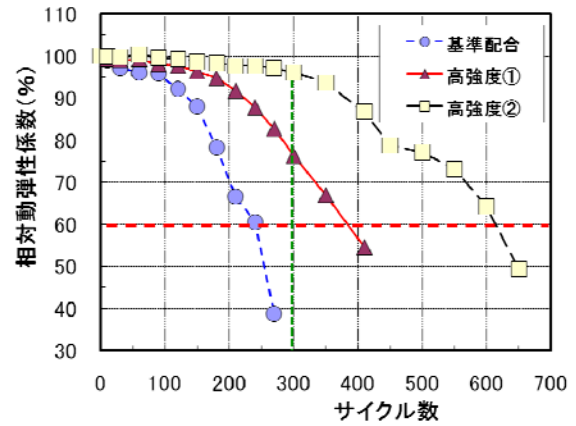


Fig. 5 吹付け試験体の凍結融解試験結果
(相対動弾性係数)
Test Result of Freezing and Thawing of Shotcrete

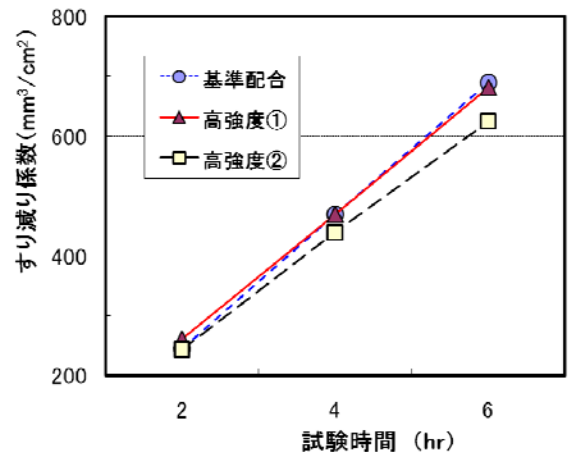


Fig. 6 吹付け試験体のすり減り試験結果
Abrasion Resistance of Shotcrete Specimen

高強度配合は、300サイクルの凍結融解の繰り返し後においても75%以上の高い耐久性が確認された。

吹付け施工によってコンクリート中の空気量はベースコンクリートよりも低下すると考えられるが、AE 助剤を併用してベースコンクリートの空気量を7.5±1.5%程度まで高めておくことにより、吹付け施工後のコンクリートにおいても、高い耐凍結融解性を確保できることが確認された。

なお、別の吹付け試験¹⁾において、空気量15%程度のベースコンクリートを空気圧で吹付け処理した後に空気量を計測したところ(この場合、急結剤は無添加)、空気量が5.3%まで低下しているのが確認された。このように、配合によっては吹付け施工により急激な空気量の低下が生じる場合があるので、あらかじめ施工に伴う空気量の低下の程度を確認しておくことが望ましい。

(2) すり減り抵抗性(耐摩耗性) 吹付け試験体から切り出した供試体のすり減り試験の結果をFig. 6に示

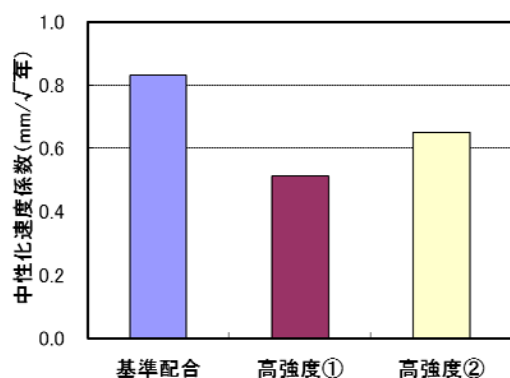


Fig. 7 吹付けコンクリートの中性化速度係数
Carbonation Rate Factor of Shotcrete Specimen

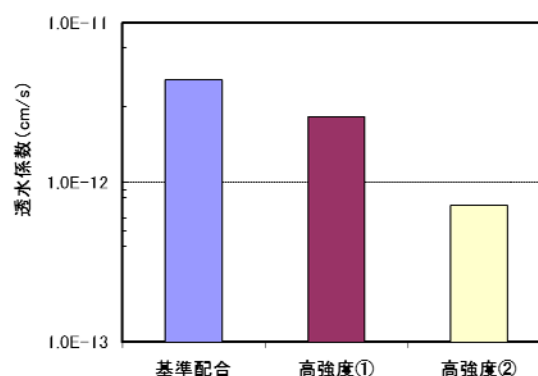


Fig. 8 吹付け試験体の透水係数の算定結果
Water Permeability of Shotcrete Specimen

Table 5 吹付け試験体の塩分浸透深さ
Salt Permeability of Shotcrete Specimen

配 合		基準配合	高強度①	高強度②
浸漬6か 月後の 塩分浸 透深さ (mm)	底型枠側面	19.4	9.3	7.5
	上側切断面	18.0	9.3	8.9
	平均	18.7	9.3	8.2

す。高強度配合①のすり減り係数は、基準配合と大差ない結果であったが、高強度配合②のすり減り係数は基準配合に比べて約 8%低減し、すり減り抵抗性の改善が確認された。高強度配合①は、基準配合に比べて細骨材率が 5%小さいものの、単位粗骨材量や圧縮強度はほぼ同等となったため、すり減り係数に差異が生じなかったと考えられる。一方、高強度配合②は、基準配合に比べて細骨材率が 15%小さく、単位粗骨材量は 1m³ 当り 152kg(≒57 リッター)も多いために、圧縮強度がほぼ同等であってもすり減りに対する抵抗性が改善されたと考えられる。

一般に吹付けコンクリートでは、跳ね返りを低減するために細骨材率を 60~65%程度と通常のコンクリートより大きく設計することが多いが、高強度吹付けコンクリートの配合では粉体総量が多く、粘性も高いため、細骨材率を 50%程度に低減した場合でも、吹付け時の施工性や品質を阻害することなく、すり減り抵抗性を向上することが可能である。

(3) 中性化速度係数 Fig. 7に吹付け試験体から採取したコア供試体の促進中性化13週間後の中性化深さから算定した中性化速度係数を示す。促進倍率を60倍と仮定して計算した中性化速度係数は、水セメント比45%の基準配合では0.83mm/√年であるが、水セメント比35%の高強度配合①は0.51mm/√年、高強度配合②は0.65mm/√年となり、水セメント比を35%とした高強度配合を用いた吹付けコンクリートにおいても、通常の打込みを行なった場合と同様に中性化の進行速度は遅いことが確認された。この値は水セメント比45~46%の現場打ちコンクリートに匹敵するものであった。この結果より、単位セメント量が多い高強度配合では、アルカリ性の急結剤が多量に混合されていることもあって、吹付け施工した硬化体でも中性化に対する抵抗性は比較的高いと考えられる。

(4) 水密性 Fig. 8に吹付け試験体から採取したコ

ア供試体の透水試験より得られた浸透深さから算定した透水係数を示す。5MPaの水圧を吹付け表面側から48時間作用させた場合の結果であるが、水セメント比45%の基準配合では、 $4.4 \times 10^{-12} \text{cm/s}$ 、水セメント比35%の高強度配合①は $2.6 \times 10^{-12} \text{cm/s}$ 、高強度配合②は $7.2 \times 10^{-13} \text{cm/s}$ となり、吹付けコンクリートにおいても通常の打込み・締固めを行なった場合(水セメント比45%の高強度配合で $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{cm/s}$ 程度⁵⁾)に近い水準になることが確認された。また、良好な吹付け施工が行える粘性の範囲内であれば、水セメント比を低減することで水密性もさらに向上できることが確認された。すなわち、吹付けコンクリートでも、配合選定と施工管理を適切に行えば、十分良好な水密性を有する構造体が構築できると考えられる。

(5) 遮塩性 6か月間の塩水浸漬試験における塩分浸透深さの測定結果をTable 5に示す。浸漬水の塩分濃度は10%、20℃である。基準配合の塩分浸透深さに比べて、高強度配合では半分以下まで低減しており、塩分浸透に対する抵抗性は極めて高いことが確認された。これは水セメント比を10%低減した効果と、フライアッシュを多量に外割混合している効果が大きいと思われる。また、細骨材率の小さな高強度配合②の方がさらに小さくなっていることから、粗骨材量の多少の影響もあると思われる。

今回の試験結果は、土木学会基準 JSCE-G572_2010の

表1に記載されている浸透深さの目安値(水セメント比40%のOPC配合で20~25mm)に比べて著しく小さな値となっており、高強度吹付けコンクリートは塩分浸透に対する抵抗性は極めて高いと考えられる。

以上のことから、中性化速度が小さくなった結果と合わせて考えると、トンネル支保工における鉄筋やロックボルト、鋼材等の防食性に関しては、良好な性能が期待できると思われる。

4. まとめ

以上に示した高強度吹付けコンクリートの耐久性評価実験の結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 高強度吹付けコンクリートは、従来の吹付け配合(第二東名仕様)に比べて水セメント比が小さく粉体総量が多いため、コンクリートの粘性が高くなるので、ベースコンクリートのスランプは通常より大きめに、スランプフローで50cm以上に設定することで良好な施工性が得られた。
- 2) 細骨材率は従来の吹付け配合の標準値「60~65%」から低減することが可能である。粉体総量によっては、50%程度まで低減しても良好な吹付け性能、付着性状が得られた。
- 3) 極初期強度は、1時間で1.2~2.2N/mm²程度、3時間で2.5~3.2N/mm²程度、24時間で21~25N/mm²程度の高い強度が得られた。
- 4) 長期強度は、材齢28日で50~55N/mm²程度、材齢9カ月で75N/mm²以上の高強度が得られた。これはフライアッシュの外割混入の効果と考えられる。なお、別の実験で空気量を標準の3~4%とした場合には、材齢91日で75N/mm²以上の高強度が確認された。
- 5) 耐凍結融解性は、ベースコンクリートの空気量を6~8%程度まで高めることで、耐久性指数で75%以上の良好な性状が得られた。この場合、細骨材率を50%まで低減した配合の方がより良好な耐凍結融解性を示した。
- 6) すり減り抵抗性(耐摩耗性)は、細骨材率を50%まで低減させて単位粗骨材量を多くした配合で改善できた。吹付け施工で構築した壁体でも、十分なすり減り抵抗性が期待できる。

- 7) 水密性は、良好な吹付け施工ができた場合には相対的に高くなり、密着度の高い岩着部付近での透水係数は $10^{-13} \sim 10^{-14} \text{cm/sec}$ 程度である。なお、場所的な変動は締固めを行う現場打ちコンクリートより大きくなるので、設計上は配慮が必要である。
- 8) 高強度吹付けコンクリートの中性化に対する抵抗性は極めて高い。これは水セメント比が低いことと急結剤の混入効果と考えられ、フライアッシュの外割混合による長期間のボゾラン反応の進展も好影響を与えていると思われる。
- 9) 高強度吹付けコンクリートの塩分浸透に対する抵抗性は基準配合の2倍以上ときわめて高い。上記の中性化に対する抵抗性と合わせて、鉄筋やロックボルト、鋼材等の防食性も高いと考えられる。

以上のことから総合的に判断すると、高強度吹付けコンクリートの耐久性は非常に良好であり、水セメント比45%程度の打ち込み・締め固め施工したコンクリートと同等の高耐久性が期待できると考えられる。従って、高強度化による効果と相まって、二次覆工のないシングルシェル構造などの本設トンネル覆工構造への適用性⁶⁾も高いと結論付けることができる。

参考文献

- 1) 三浦，竹田：高強度吹付けコンクリートの耐久性に関する研究，大林組技術研究所調査報告書，(2011)
- 2) 久湊，登坂，石井，石田：短時間高剛性吹付けコンクリートの施工試験(北陸新幹線 第2魚津トンネル)，トンネルと地下第38巻12号，pp.8~13，(2007)
- 3) 岩附，浅野，小林，木村：吹付けコンクリートの耐久性に関する考察，電力土木 No.183，pp.60~67，(1983)
- 4) 原田，松井，手塚，佐伯：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)
- 5) 三浦，尾崎，庭瀬，平川：放射性廃棄物処分施設の埋戻し材(セメント系材料)の特性について(その2)，土木学会第61回年次学術講演会 CS05-44，(2006)
- 6) 三浦，石関，竹田：高強度吹付けコンクリートの耐久性評価，土木学会第66回年次学術講演会 第V部門，(2011)