

長大トンネルで施工された 急硬性セメント注入材の長期材料特性

秋田 勝次¹・村上 明²・平野 健吉³・荒木 昭俊⁴

¹正会員 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 新幹線部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)
E-mail:k.akita@jrtt.go.jp

²正会員 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 新幹線部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

³正会員 電気化学工業株式会社 特殊混和材事業部 (〒103-8338 東京都中央区日本橋室町2-1-1)

⁴正会員 電気化学工業株式会社 無機材料研究部 (〒949-0393 新潟県糸魚川市大字青海2209)

急硬性セメント注入材は、青函トンネルで開発され実用化された材料であるが、強度が高く、硬化体からの有害成分の溶出もなく、環境性に優れた材料でもあることから、現在トンネルのみならず、地盤を改質する材料として広範に使用されている。

本論文では急硬性セメント注入材の基本特性について述べ、注入施工後の掘削で採取された急硬性セメント硬化体を長期養生した青函トンネル試料（材齢27年）および新潟県鍋立山トンネル試料（材齢17年）について、長期強度および化学的分析による特性評価を実施した。その結果、新たな知見が得られたので報告する。

Key Words : *rapid-hardening grouting material, long-term aging strength, chemical analysis, Seikan tunnel, Nabetachiyama tunnel*

1. はじめに

注入工法は、従来からトンネルの補助工法として山岳や都市のトンネルを問わず地盤改質に広範に使用されてきている^①。注入材料の大半は、水ガラスを主材とした希釈率の大きな低粘度の材料であることから長期的な安定性に乏しく、仮設材料と位置付けされやすい傾向があった。

最近、都市土木においては、例えば、構造物の基礎の補強および大深度地下工事等に用いる注入材料に長期的な安定性が求められる場合が増加しており、恒久的な注入材料が開発されている^{②,③}。

山岳トンネルにおいては、高圧湧水および軟弱破碎帯対策として従来から相応の強度が求められたことより、セメント系またはセメント水ガラス系注入材料が使用されており、比較的硬化後の安定性は保持されている場合が多いと考えられる。一方、急硬性セメント注入材は、青函トンネルで開発され実用化された材料であるが、強度が高く、凝固後の硬化体からの有害成分の溶出はなく、環境安全性の高い注入材料である。また、耐久性にも優

れた材料であることから、現在トンネルのみならず地盤を改質する材料として広範に使用されている。

注入材料の長期材料特性を検討した例としては、青函トンネルにおいて開発された低モル比のケイ酸ナトリウム溶液とセメントスラリーを別々に圧送し、注入直前でそれらを合流混合して地盤内に注入する1.5ショット注入材料（以下、LWと称する。）の長期材料特性を扱ったものが最初とよい^④。青函トンネルでは、海底トンネルという特殊性から、高圧湧水の止水材料として、かつ破碎帯等の改良材料として、LWが凝固時間を適度に調整でき、硬化後の安定性を有する材料として採用されている。しかしながら、材齢については1年までの報告^⑤はあるが、さらに長期的な材齢における特性に関する報告は極めて少ないのが実情である。一例としては、急硬性セメント注入材を使用した補強グラウチングの特性を確認した報告^⑥があり、施工16年後においてもその品質が保持されていることが示唆されている。しかしながら、実際に地山に注入して掘削によって採取した硬化体について、長期間（10年以上）養生した試料の材料特性について評価した例はほとんど報告されていない。

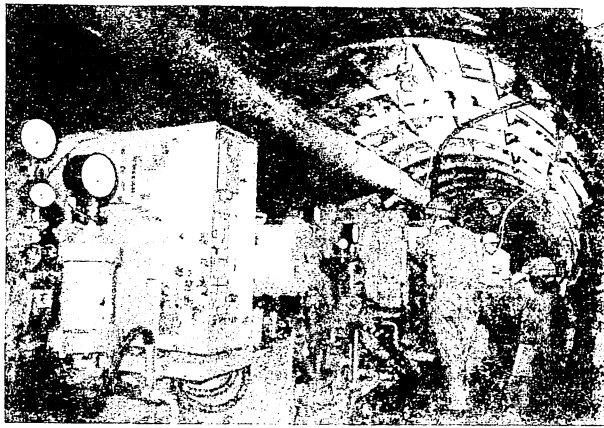


写真-1 青函トンネルでの注入施工の様子



写真-2 鍋立山トンネルでの注入施工後の様子

従って、注入凝固後の長期に渡る硬化体の強度等の性質に関する知見は極めて重要になる。

本論文では、急硬性セメント注入材の基本特性について述べ、青函トンネルで注入施工（写真-1）後に掘削によって採取し、27年間水中養生を続けた硬化体と、鍋立山トンネルで注入施工後（写真-2）に掘削によって採取し、17年間地中で湿空養生を続けた硬化体について、強度および化学的分析による材料特性の評価を行った結果について述べる。

2. 急硬性セメント注入材の基本特性

急硬セメント注入材の長期特性について議論するのに先立ち、過去の実験結果（文献 17）参照）を引用し基本特性について説明する。

(1) 硬化メカニズム

急硬性セメント注入材は、セメント類に急硬性を付与するカルシウムサルホアルミネート系混和材（以下、RCSA混和材）に水を加え懸濁状にした混和材スラリー（A液）と、普通セメント、高炉セメント、微粒子セ

メント等のセメント類に水を加え懸濁状にしたセメントスラリー（B液）とを混合することで早期にエトリンガイトを多量に生成し、短時間で硬化体を形成する注入材である。硬化時間は、凝結遅延剤の使用量を調整することで、数十秒～数時間の範囲でコントロールできる。表-1にRCSA混和材の化学組成と粉体特性を示す。RCSA混和材は、急硬性を付与するためCaO分に対して Al_2O_3 分の割合が比較的多い組成のカルシウムアルミネートと、セッコウを主成分とする急硬性混和材である。RCSA混和材自体は水硬性を示すので、セメント類と混合しなくても硬化する特徴がある。表-2に、セメントの化学組成と粉体特性を示す。青函トンネルでは、高炉スラグを含有する微粒子セメントを使用し、鍋立山トンネルでは普通セメントを使用している。図-1に急硬性セメント注入材の硬化メカニズムを示す。RCSA混和材を混和した急硬性セメントの水和メカニズムは既に報告されている^{7,8)}のでここでは簡単に説明する。

通常、急硬性セメントは、凝結遅延剤を併用しないと注水後数十秒で凝固する性質を持っている。従って、実施施工では適度な可使時間を確保するために凝結遅延剤を使用する。凝結遅延剤の作用機構は、一般に、セメントから溶出するカルシウムイオンと反応して錯体を形成し、カルシウムイオンの溶解を抑制することから凝結遅延を起こすと考えられている。この溶存する錯体は、pHが中性からアルカリ性領域では不安定であり、さらにカルシウムイオンとの反応が進行すると不溶性錯体となり沈殿し凝結遅延剤濃度が低下する。すると、遅延効果は消失し水和反応が進行する。通常、遅延効果の大小（時間の調整）は凝結遅延剤の使用量でコントロールしている。

凝結遅延剤の効果が消失すると水和反応が進行し凝固と同時にエトリンガイトを生成する。エトリンガイトは、1モルあたり32モルという多量の水分子を取り込み微細な針状結晶を生成し、水を失った細孔空隙内で三次元的に大きく結晶成長することで空隙を満たすので早期の強度発現に寄与する。写真-3に硬化1時間後のエトリンガイトの走査型電子顕微鏡（SEM）写真を示す。次に、注水後数時間でセメント類の水和反応が始まり、カルシウムシリケート水和物と水酸化カルシウムが生成する。カルシウムシリケート水和物もエトリンガイトと同様に細孔空隙内を満たすので強度発現に寄与する。さらに時間が経過すると、数分レベルで生成したエトリンガイトの一部がモノサルフェートへ転化するが2～3週間で平衡に達し、通常のポルトランドセメントの水和反応も同時に進行しているため、その後も長期に渡って強度が増加する。高炉スラグを含有する微粒子セメントの場合は、セメントのアルカリ刺激によるスラグの水和反応も並行して進行する。

表-1 RCSA 混和材の化学組成 (%) および粉体特性

Ig-loss	In-sol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	密度 (g/cm ³)	ブレーン比表面積 (cm ² /g)
0.6	0.8	2.2	23.9	0.7	42.6	0.2	28.3	2.9	5500

表-2 セメントの化学組成 (%) および粉体特性

セメント	Ig-loss	In-sol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	密度 (g/cm ³)	ブレーン比表面積 (cm ² /g)
BFC	0.5	0.1	28.5	11.0	1.8	54.3	2.3	2.2	3.0	6100
OPC	1.1	0.1	22.2	5.6	2.5	63.1	2.1	1.6	3.15	3320

BFC (高炉微粒子セメント) : 青函トンネルで使用, OPC (普通ポルトランドセメント) : 鍋立山トンネルで使用

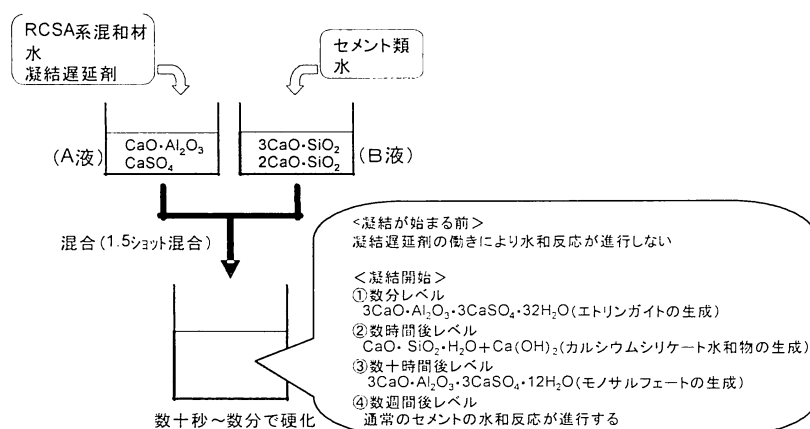


図-1 RCSA 混和材を用いた急硬性セメント注入材の硬化メカニズム

写真-3 急硬性セメント注入材の硬化体のSEM写真

(2) 凝固時間

RCSA混和材は、セッコウとカルシウムアルミネートを主成分とする組成物であるので注水すると凝結遅延剤を併用しない場合は数十秒以内に凝固する。従って、施工する場合は、凝結遅延剤（オキシカルボン酸－アルカリ金属炭酸塩系）を練混ぜ水に溶解してからRCSA混和材を混合し混和材スラリーを調整する。図-2には、A液単液の凝結遅延剤添加率と凝固時間の関係の水/RCSA混和材比別に示す。水/RCSA混和材比が大きいほど、凝結遅延剤の添加率が大きいほどA液単液の凝固時間を延長できることが明らかになっている。図-3には、A液にB液を混合したときの凝結遅延剤の添加率と凝固時間の関係を示す。混合比率はA液：B液＝1：1（容積比）である。A液に含まれる凝結遅延剤の添加率が大きいほど、凝固時間が長くなる。凝固時間の調整については、前述したA液中の凝結遅延剤量や水/RCSA混和材比の調整以外に、B液の水/セメント比を調整することでも可能であり、地盤の状態や改良目的に応じ選定することができる⁹⁾。また、BFCはセメントが高炉スラグで50～60%置換されているため、セメントに対する凝結遅延剤量が増加するこ

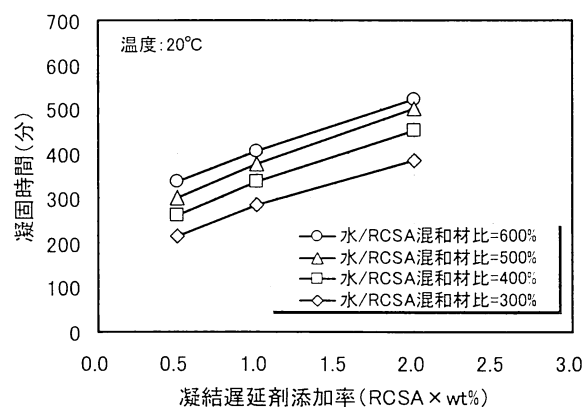


図-2 凝結遅延剤添加率と凝固時間の関係 (A液)

とから同一添加量とした場合は凝固時間がOPC使用時よりも長くなる。

このように、RCSA混和材を用いる急硬性セメント注入材は、A液単液では凝結遅延剤の添加率と水/RCSA混和材比を調整することで、凝固時間を数時間程度まで調整でき、それをB液と混合した場合は数十秒レベルまで凝固時間を短縮できる特徴を有する。例えば、図-2より

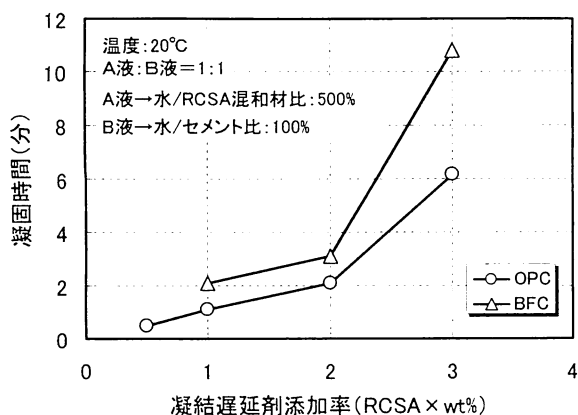


図-3 凝结遅延剤添加率と凝固時間の関係 (A液+B液)

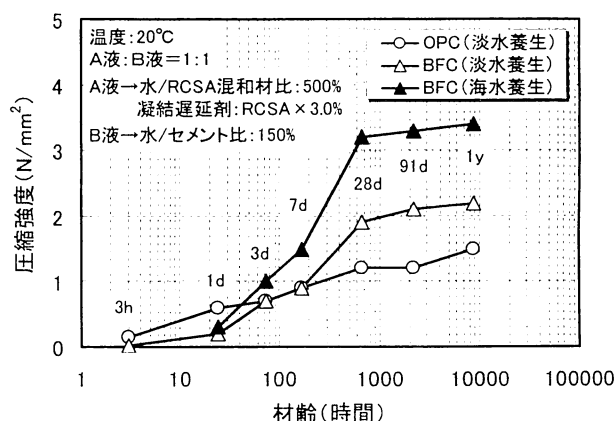


図-4 ホモゲルの材齢と圧縮強度

370分程度の凝固時間を示すA液（セメント：OPC，凝结遅延剤：1.0%，水/RCSA混和材比：500%）に，図-3に示す配合のB液を混合すると，凝固時間は30秒程度になることがわかる．A液単体では，凝结遅延剤の作用により比較的安定的な溶存錯体を形成し遅延効果を発揮していると考えられる．そこに，急速にカルシウムイオンを溶出するセメントスラリーが混合すると，カルシウムイオンをさらに補充し不安定な錯体を形成して沈殿することから短時間に凝固が進行する．

(3) 強度発現性

RCSA混和材を用いた急硬性セメント注入材の強度発現性は，数時間レベルではRCSA混和材の水和反応で生成するエトリンガイトの寄与が大きく，中長期強度はセメントの水和反応による寄与が大きくなるので，初期および長期的な強度発現を期待できる．図-4には，ホモゲル（A液とB液を混合したスラリーを凝固直前に型枠に流込み作製した硬化体）の材齢と圧縮強度の関係を示す．OPC使用時はBFCに比べ数時間から1日までの強度発現性が向上している．一方，長期的には，BFC使用時が強度発現に優れている．これは，高炉スラグを含有するセメントの強度発現傾向と同じである．一般に，セメント系硬化体は，水合反応によって生成する水酸化カルシウムと海水中に含まれる硫酸塩類が反応し二水セッコウを生じ，エトリンガイトを再形成することで体積膨張によって損傷を受ける．特に硫酸マグネシウムとの反応では，セッコウの生成と同時に水合したカルシウムシリケートを分解する作用があるため，海水中では淡水に浸漬したときより浸食作用が大きい．この浸食作用は，セメント中に含まれるカルシウムアルミネート（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）を少なくしたり，ポゾラン物質と併用することで低減できることが知られている¹⁰⁾．

青函トンネルでは，海底下のトンネルであることから海水の浸食作用を受けることを想定し，注入による補強

表-3 溶出成分分析結果

項目	基準	分析結果
カドミウム	0.01mg/ℓ 以下	0.001mg/ℓ 未満
全シアン	検出されないこと	0.01mg/ℓ 未満 (測定限界)
有機リン	検出されないこと	0.1mg/ℓ 未満 (測定限界)
鉛	0.01mg/ℓ 以下	0.005mg/ℓ 未満
六価クロム	0.05mg/ℓ 以下	0.02mg/ℓ 未満
ヒ素	0.01mg/ℓ 以下	0.005mg/ℓ 未満
総水銀	0.0005mg/ℓ 以下	0.0002mg/ℓ 未満
ハウ素	1mg/ℓ 以下	0.1mg/ℓ 未満
セレン	0.01mg/ℓ 以下	0.001mg/ℓ 未満
フッ素	0.8mg/ℓ 以下	0.5mg/ℓ 未満

分析機関：（財）上越環境科学センター

表-4 溶出成分分析用の試験体配合

A 液 Kg/0.5m³			B 液 Kg/0.5m³		凝固 時間 (秒)	圧縮 強度 (N/mm²)
RCSA	W	R	C	W		
75	474	0.75	300	405	120	1.7

C：普通セメント R：凝结遅延剤

効果を延命化できることを期待して高炉スラグ微粉末を含む混合セメントを用いている．図-4に示すとおり，海水中で養生したBFCを用いた注入材は，淡水養生に比べ強度発現性に優れており，1年間の養生期間では，強度の低下を示さないことから海水に含まれる硫酸塩類による膨張破壊が起こっていないと考えられる．

(4) 硬化体からの溶出成分

表-3には，硬化した急硬性セメント注入材からの有害物の溶出成分を分析した結果を示す．試験体の配合を表-4に示す．溶出成分の試験方法は，環境省告示第46号付表に準じた．溶出成分を分析した結果，環境省の基準

表-5 建設当時の急硬性セメント注入材の標準配合

トンネル名	セメント種類	W/C (%)	W/RCSA (%)	A 液 Kg/0.5m ³			B 液 Kg/0.5m ³			凝固時間 (秒)	圧縮強度 (N/mm ²)
				RCSA	W	遅延剤 (RCSA×%)	C	W	減水剤 (C×%)		
青函トンネル	BFC	200	500	100	465	2.5	214	429	—	300～540	1.5
鍋立山トンネル	OPC	93	500	100	465	0.5	319	399	1.0	40～60	3.4

凝結遅延剤：オキシカルボン酸－炭酸塩系凝結遅延剤

減水剤：アルキルアリルスルホン酸塩系減水剤

圧縮強度：ホモゲルの材齢 28 日圧縮強度

※W/C=200%の配合を最も多く使用したが注入開始時は W/C=300%、注入終了時は W/C=100%の W/C の配合を併用している。

を表に示す項目で満足している（全シアンおよび有機リンの分析結果は測定機器の定量限界未満を意味し、検出されていないことと同義。）ことから、有害物質の溶出のない環境負荷の低い注入材であるといえる。

3. 長期材料特性の評価

第 2 章では、RCSA 混和材を用いた急硬性セメント注入材の基本特性について説明した。本章では、実際のトンネル掘削工事において、地盤に注入して掘削した後に新たに採取した硬化体を、乾燥および海水の影響を受けない所定の方法で養生を続け、27 年後（青函トンネル）と 17 年後（鍋立山トンネル）の長期材料特性について評価した結果についてまとめる。

詳細な工事内容については、青函トンネル^{11), 12), 13)}および鍋立山トンネル^{9), 14), 15), 16)}に関する既往の工事報告を参照願いたい。

(1) 急硬性セメント注入材の配合

青函トンネルでは、高圧湧水の止水と軟弱破碎帯の改質を目的に注入材を検討した。その際、浸透性に優れ効率的な改良ゾーンを形成させるために凝固時間を調整でき、永久的に維持されるような耐久性を有する注入材が求められた。昭和 41 年より、普通セメントスラリーによる注入を開始し、1 年後には、セメントスラリーと硬化材としてケイ酸ナトリウムを用いる LW を注入し、さらに改良を加えながら、より浸透性の良好な高炉微粒子セメントを用いた LW を注入するに至った。ところが、排水処理などの困難な問題が浮上した。そこで、LW と同等の性状を有し従来の排水処理施設で処理可能な注入材として RCSA 混和材を用いた急硬性セメント注入材を適用するに至った。配合は、各工区（算用師工区、畏内工区、吉岡工区第 12 本坑）の地質状態および注入中の圧力によって、浸透性および強度を考慮しながら注入材の配合を切り替えている（W/C=100～300%、W/RCSA=500 又

は 600%、凝結遅延剤 1～4%×RCSA）。鍋立山トンネルでは、対象地盤が超膨張性を有する地山であり、きわめて軟弱な粘性土である。従って、トンネル内空の変位および切羽の押出し量を低減することを目的とし、注入範囲を拡大するよりはトンネル断面周囲に数多くの強固な改良地盤に置き換えることを目標に、青函トンネルの B 液配合よりも高濃度のセメントミルクを用い、凝固時間を 1 分程度にした単一の高強度配合としている。表-5 に、建設当時の各現場で使用した注入材の標準配合を示す。青函トンネルは吉岡工区第 12 本坑の配合である。

(2) 評価項目

長期間養生した硬化体の材料特性について表-6 に示す項目で評価した。また、各項目の調査した部位の一例を図-5 に示す。

(3) 硬化ブロックの状態

注入・掘削後に採取してからの硬化体ブロックの養生は、青函トンネルおよび鍋立山トンネルともに、注入した地盤の環境に近づけるため乾燥を受けない状態とした。すなわち、青函トンネルで採取した硬化体は、屋内で水道水を満たした容器中で水中養生状態で 27 年間保存した。一方、鍋立山トンネルで採取した硬化体は、ポリエチレン製袋内に詰めて湿空状態とし屋外で深さ 1m の地中に 17 年間保存した。写真-4 および写真-7 に各トンネルから採取した硬化体の保存方法を示す。写真-5、写真-6、および写真-8 には、各トンネルにおいて、注入・掘削後に採取した硬化体を所定期間養生（青函トンネル：27 年、鍋立山トンネル：17 年）した後に硬化体を切断した状況を示す。写真-5 は急硬性セメント注入材自体が固結した硬化体である（ホモゲル）。写真に示すホモゲルのサイズは縦 150×横 120×奥行 100mm 程度であり、加圧注入によって脆弱部が押し広げられるように注入され比較的広い空間ができたことで発生したものと推定している。写真-6 は、砂質泥岩内を脈状に注入された割裂注入硬化体との複合体である。いずれの硬化

表-6 試験項目と方法

評価項目	試験方法又はメーカー	試験内容
硬化体の密度	JIS R 5201	硬化体を粒子径 1 mm 程度に粉砕しルシヤトリエフラスコにて測定した。
硬化体の含水率	JSF T 121-1990	硬化体を 110℃ で一昼夜乾燥後測定した。
硬化体の脱水率	- 含水率からの算出 - 加圧脱水試験装置で測定	<含水率から算出する方法>→表-7 参照 $\text{脱水率} = (\text{練混ぜ配合中の含水率} - \text{硬化体中の含水率}) / \text{硬化体体積}$ <加圧脱水試験>→図-7 参照 加圧脱水試験は、専用の加圧容器に急硬セメント注入材を流し込み、凝固直後に加圧し脱水して作製した。脱水した水は回収し容積を測定し脱水率を算出した。加圧後の硬化体は脱水から 1 日後に取り出し 20℃ の水中で養生し、加圧後の圧縮強度を求めた。載荷は一定加圧下で脱水しなくなるまでを目安に行なった。試験装置を図-6 に示す。 加圧条件：0, 0.98, 2.94, 4.91 (MPa) $\text{脱水率} = \text{脱水量 (cm}^3\text{)} / \text{硬化体容積 (cm}^3\text{)}$
pH 試験	pH メーター測定	試料を容器に入れ固液比 1：10 となるように純水で満たし 1 時間後の浸漬水の pH を測定した。試験体形状：4×4×4cm
圧縮強度	JIS R 5201	採取した硬化体ブロックから切り出して測定した。 青函トンネル採取硬化体の試験体サイズ：2×2×6～8cm 鍋立山トンネル採取硬化体の試験体サイズ：4×4×10～22cm
X 線回折分析	理学電機工業社製	水和物の同定 試料は 40℃ で一昼夜乾燥後の粉砕物
蛍光 X 線分析	理学電機工業社製	化学成分の定量 試料は 40℃ で一昼夜乾燥後の粉砕物
SEM 観察	キーエンス社製	水和物の形態観察 試料は 40℃ で一昼夜乾燥後の粉砕物
超音波伝播速度	開発電子測定研究所社製	採取した硬化体ブロックから切り出して測定した。 試験体サイズ：4×4×7～10cm

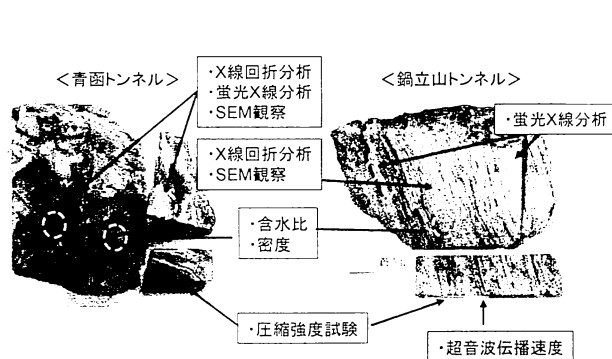


図-5 各評価試験のサンプリング部位

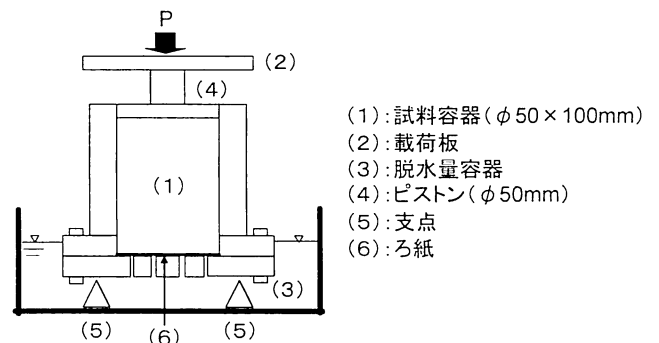


図-6 加圧脱水試験装置

a) 青函トンネルで採取した硬化体ブロック（水中養生 27 年後）

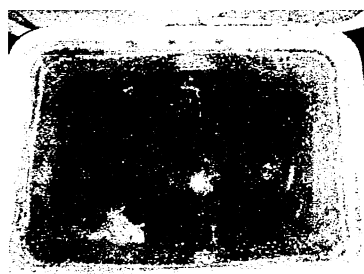
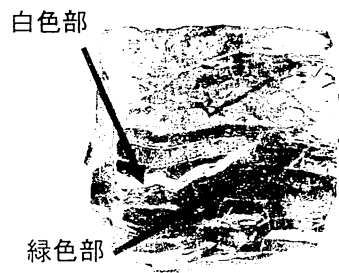
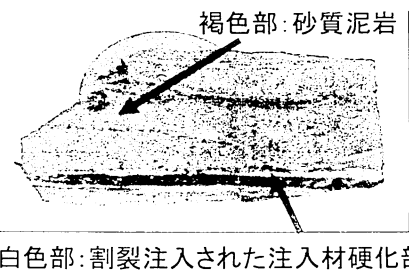


写真-4 養生状態

写真-5 硬化体 A (ホモゲル)
の一例写真-6 硬化体 B (岩盤との複合体)
切断面の一切断面

体も、長期間の養生によって崩壊した形跡はなく、注入・掘削直後に採取したときと同じ形状を維持しており、切断面には筋状（縞状）の模様が確認できる。写真-5に示す青函トンネルの硬化体Aは、全体的に高炉スラグが水和反応し硬化したときの特徴である緑色に変化しており、白色部と緑色部の筋状模様が明確に観察できる。一方、写真-8に示す鍋立山トンネルから採取した硬化体でも青函トンネルで採取した硬化体と色合いが異なるが筋状の模様が確認できる。尚、黒色部は注入によって巻き込んだ岩石である。

(4) 硬化体の長期強度特性

硬化体の圧縮強度、密度、含水率、および脱水率を測定した結果を表-7に示す。表-7に示すホモゲルおよび注入・掘削時のデータは、建設当時の現場試験結果をまとめた報告書²⁾より抜粋した。青函トンネルおよび鍋立山トンネルで注入・掘削後に採取した硬化体の材齢28日の圧縮強度は、それぞれ21.7N/mm²、6.2N/mm²であり、ホモゲルに比べて青函トンネルで17倍程度、鍋立山で2倍程度の値を示した。長期間保存した硬化体の圧縮強度は、材齢27年の青函トンネルで採取した硬化体で29.1N/mm²、材齢17年の鍋立山トンネルで採取した硬化体で7.6N/mm²である。注入・掘削時と比べて、強度低下がなく、むしろ上昇していることを確認できる。地山に注入することで、ホモゲルに比べ硬化体の密度が大きくなり、含水率が小さくなっている。これは、地山へ注入したことで加圧脱水の作用を受けたためである。青函トンネルで採取した硬化体では、脱水率が平均で44.2%、鍋立山トンネルで採取した硬化体では、平均で25.2%の脱水率であった。脱水率が大きいほど、ホモゲルに対する脱水後の圧縮強度の差は大きくなり、地山から採取した

b) 鍋立山トンネルで採取した硬化体ブロック
(地中で湿空養生17年後)



写真-7 養生場所



写真-8 切断面の一例

硬化体の圧縮強度は大きくなる傾向を示している。加圧脱水の度合いは、地山の状態で異なり、青函トンネルで採取した硬化体は、砂質泥岩への浸透性を考慮し凝固時間を5～9分に設定したが、7.5N/mm²（湧水圧の3倍）の高圧注入を行なっているため脱水率が大きくなり、地山に注入した硬化体とホモゲルの強度差が大きくなったと考える。一方、鍋立山トンネルで採取した硬化体は、超膨張性を有する粘性土地山への置換を前提とした高濃度注入としたことから凝固時間を1分程度に設定したことで、注入圧も3N/mm²であることにより、脱水率は青函トンネルに比べ小さくなり、ホモゲルとの強度差もそれほど

表-7 硬化体の圧縮強度、密度、含水比、および脱水率

トンネル	No.	ホモゲル			掘削後に地山中から採取した硬化体					
					注入・掘削時		青函トンネル：材齢27年 鍋立山トンネル：材齢17年			
		圧縮強度 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	脱水率 (%)
青函	1	1.3	1.21	74.0	21	38.1	30.3	1.83	31.9	37.6
	2				24	36.8	28.1	2.43	19.6	48.6
	3				20	33.7	28.8	2.43	22.2	46.3
	平均				21.7	36.1	29.1	2.23	24.6	44.2
鍋立山	1	3.4	1.28	67.3	6.2	39.1	8.1	1.54	45.5	18.8
	2						5.5	1.58	33.0	29.6
	3						8.9	1.64	41.1	22.6
	4						8.6	—	38.2	25.1
	5						7.1	—	32.7	29.9
	平均						7.6	1.59	38.1	25.2

表-8 超音波伝播速度（鍋立山トンネル採取硬化体，材齢 17 年）

No.	縦波（P 波）		横波（S 波）		動ポアソン比	動せん断弾性係数 (GN/m ²)	動弾性係数 (GN/m ²)
	伝播時間 (10 ⁻⁶ sec)	速度 (km/sec)	伝播時間 (10 ⁻⁶ sec)	速度 (km/sec)			
1	31.4	2.27	57.7	1.24	0.290	2.36	6.09
2	32.4	2.59	63.6	1.32	0.325	2.76	7.31
3	40.5	2.42	71.3	1.37	0.262	3.10	7.82

ど大きくなかったと考えられる。図-7 には、青函トンネルで注入した注入材の配合を用いて実験室で表-6 に示す加圧脱水試験をおこなって求めた脱水率と、青函トンネルで注入・掘削時に採取し 27 年間水中養生を続けた硬化体の脱水率（表-6 に示す硬化体の含水率から算出する方法）を示す。青函トンネルでは 7.5N/mm² までの高圧注入を実施しており、注入・掘削後に採取し 27 年間水中養生を続けた硬化体の脱水率は平均で 44.2%であった。一方、実験室において加圧脱水試験で求めた圧力と脱水率の関係を用いて 7.5N/mm² の圧力まで外挿した場合は、37%程度の脱水率であることが想定できる。概ね実験室の加圧脱水試験の結果を再現できていると考えられる。掘削で採取した硬化体が 7%程度大きい脱水率を示す理由としては、加圧脱水試験では注入材が凝固してから加圧を開始しているが、実際の地盤中では、凝固するまでの間も加圧作用を受けて分離し脱水したこと、注入開始・終了時に BFC 濃度を W/C200%以外の B 液（100%, 300%）を用いた注入材配合でも施工していることが挙げられる。表-8 には、鍋立山トンネルから採取した硬化体の超音波伝播速度を測定した結果を示す。注入硬化体の伝播速度は 2.27~2.59km/sec を示し、固結度の高い軟岩地山に近い状態といえる。

以上のことより、青函トンネルにおいて注入・掘削によって採取し 27 年間水中養生した硬化体と、鍋立山トンネルにおいて注入・掘削によって採取し 17 年間地中にて湿空養生した硬化体は、掘削直後の圧縮強度と比較して同等以上を示していることが明らかであり、外観上崩壊もなく健全な状態で保たれている。従って、急硬性セメント硬化体は長期間に渡って安定した強度特性を示すと考えることができる。

(5) 長期間養生した硬化体の化学的分析

a) X線回折分析

図-8 に、青函トンネルおよび鍋立山トンネルから採取した硬化体の X線回折パターンを示す。青函トンネルで採取した硬化体については、写真-5 に示す硬化体の白色部と緑色部について解析した。RCSA 混和材を用いた急硬性セメント注入材は、硬化後に特徴的な水和生成物としてエトリンガイト (AFt)、モノサルフェート

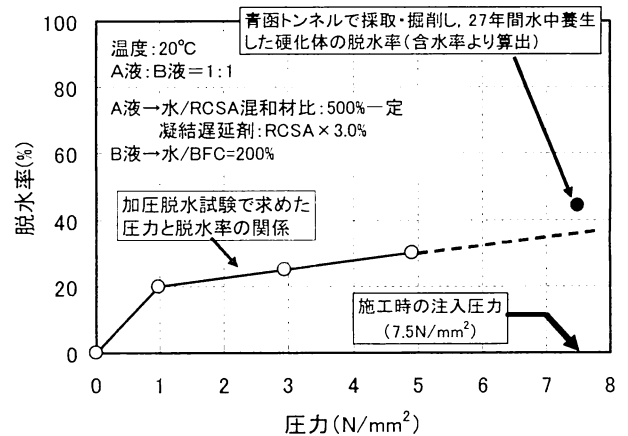


図-7 加圧脱水試験で求めた脱水率と地山から掘削した硬化体の脱水率

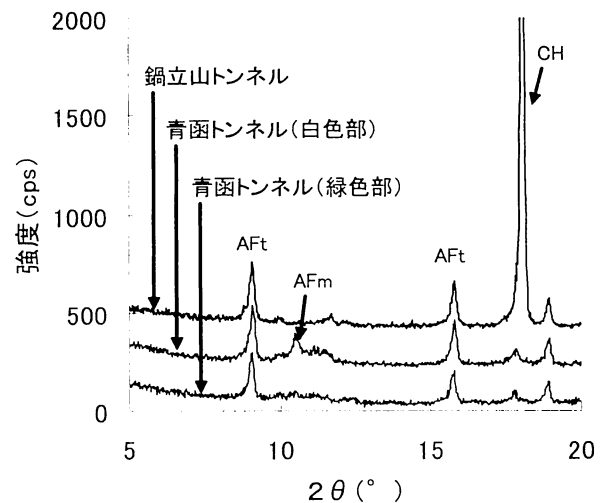


図-8 長期間養生した硬化体の X線回折パターン

(AFm)、水酸化カルシウム (CH) などの回折パターンを確認できる。何れの回折パターンでもエトリンガイトを観察できる。青函トンネルの硬化体（白色部）は、緑色部に比べエトリンガイト以外にモノサルフェートが明瞭に観察できることからセメントに対して RCSA 混和材の割合が標準配合である W/C=200%のセメントスラリーの等量配合に近い、または、それ以上に混合された箇所と推定できる。逆に、青函トンネルの硬化体（緑色部）

は、セメントに対して RCSA 混和材の割合が少ない箇所と推定できる。一方、鍋立山トンネルの硬化体は、青函トンネルに比べ水酸化カルシウムが明瞭に観察できる。これは、青函トンネルで使用した高炉スラグを 50～60% 含有するセメントよりも、水酸化カルシウムの生成量が多い普通セメント用いたことや、青函トンネルの硬化体のように長期間水中養生をしなかったことで水酸化カルシウムの溶出が少なかったことが影響していると考えられる。以上のことから、配合や養生期間に違いはあるが、乾燥を受けない条件下では、長期間経過しても硬化体中の水和生成物は安定して存在することを確認できた。

b) SEM観察

写真-9 および写真-10 は、青函トンネルにおいて、注入・掘削後に採取して 27 年間水中養生を続けた硬化体の白色部と緑色部の SEM 画像である。写真-11 は、鍋立山トンネルにおいて、注入・掘削後に採取して 17 年間で湿空養生を続けた硬化体の SEM 画像である。写真-9 および写真-11 では、針状結晶であるエトリンガイトが明瞭に観察される。写真-10 に示す青函トンネルの緑色部では、他の画像に比べ明瞭な針状の結晶形態は観察されなかった。これは、X 線回折の分析結果と同様に、エトリンガイトを多量に生成する RCSA 混和材のセメントに対する配合割合が少ないことを反映していると思われる。

c) 蛍光 X 線分析

蛍光 X 線分析法は、注入材硬化体中の化学成分を定量できる分析手法である。従って、RCSA 混和材およびセメントに特徴的な化学成分の割合を比較することで A 液と B 液の混合割合の情報を得ることができる。本報告では、セメントの化学成分として CaO を除いて最も含有割合が多く、RCSA 混和材に含有する割合が少ない SiO_2 と、RCSA 混和材の化学成分として CaO を除いて最も含有割合が多く、セメントに含有する割合が少ない Al_2O_3 と SO_3 に着目し、 SO_3 、 SiO_2 、および Al_2O_3 の合計に対する割合を求めることで各注入材硬化体の A 液と B 液の混合割合を推定した。CaO は、セメントと RCSA 混和材で含有割合の差が小さいため除いた。図-9 および図-10 には、注入材硬化体の蛍光 X 線分析で求めた化学成分 (SO_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3) の割合を示す。セメント単体および RCSA 混和材単体の化学成分 (SO_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3) は表-1 および表-2 の化学組成から計算で求め、A 液と B 液を等量混合した場合の注入材硬化体の化学成分 (SO_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3) は、上記で求めたセメントおよび RCSA 混和材の化学成分と表-5 に示す練混ぜ配合より計算で求め、図-9 に計算値として記述した。その結果、青函トンネル硬化体 A の白色部は A 液と B 液が等量混合されたときの化学成分に近似している。一方、緑色部は高炉微粒子セメントの化学



写真-9 青函トンネル
(白色部)



写真-10 青函トンネル
(緑色部)



写真-11 鍋立山トンネル

組成に近似している (図-9)。緑色部の化学成分の割合から RCSA 混和材の使用量を推定すると、B 液配合は変わらないとすれば A 液中の RCSA 混和材量は 40～50kg/0.5m³ となり、標準配合より減少していることが示唆された。また、青函トンネル硬化体 B の割裂入部も、図-9 に示すとおり A 液の混合割合が小さい。これは、加圧注入によって A 液と B 液が均一に混合されずに分離して硬化したことと、実施工においては、注入開始時は W/C=300% の B 液、注入終了時は W/C=100% の B 液を調整して、BFC 濃度を変えて注入施工したことが影響していると考えられる。加えて、割裂入部が白色であるにも関わらず、等量混合に近い化学成分の割合を示さない理由は、 SiO_2 が主体の砂質泥岩を巻き込んで硬化体を形成したためと考えられる。RCSA 混和材の配合割合が少ない部分では、初期強度発現性は低下する傾向を示す。RCSA 混和材が 50kg/0.5m³ 程度の配合割合では、等量混合のおよそ 1/3 のホモゲル強度 (材齢 28 日) となる¹⁷⁾。しかし、実際の地山に注入されたものは、加圧脱水の作用を受けているので未加圧条件よりも強固な硬化体を形成していると考えられる。緑色部の SEM 観察で明瞭なエトリンガイトの針状結晶が観察されなかった理由は高炉微粒子セメントが主体の硬化体であるためと考えられる。

一方、鍋立山トンネルの硬化体でも、青函トンネルの硬化体に比べ色合いが異なるが縞状の模様 (灰白色部と灰黒色部) が認められる。図-10 に示す蛍光 X 線分析の結果では、灰白色部および灰黒色部ともに等量混合の化

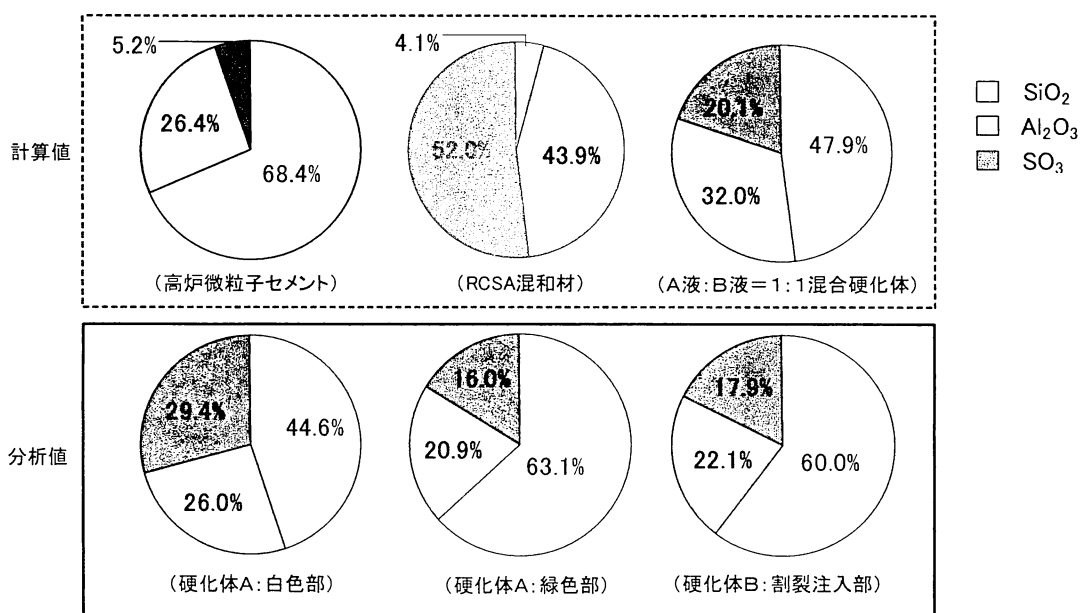


図-9 青函トンネルで採取した硬化体の化学組成

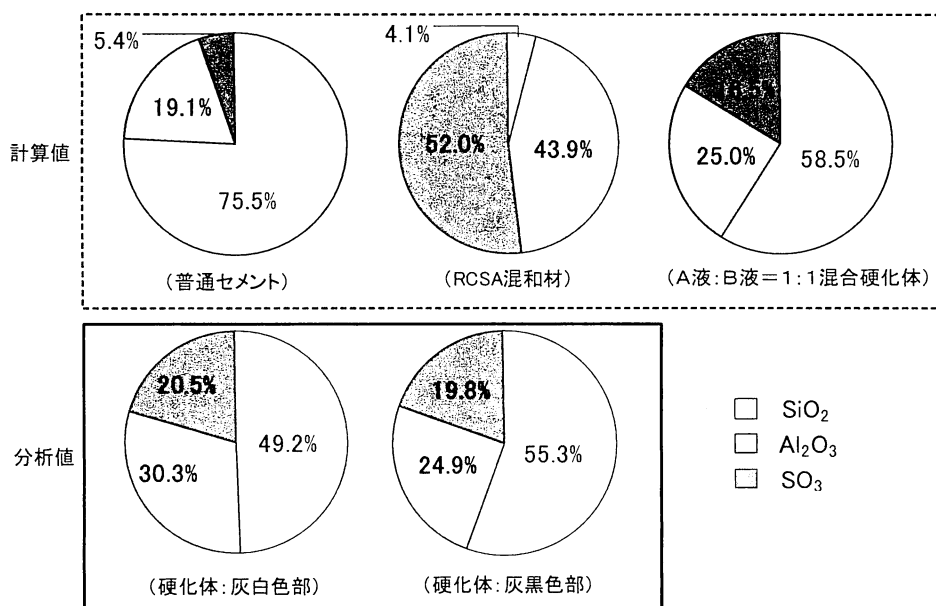


図-10 鍋立山トンネルで採取した硬化体の化学組成

学組成に近似している。(灰黒色部の方がより等量混合時の組成に近い。)尚、今回の調査した硬化体からは、RCSA 混和材主体で硬化した部位は確認できなかった。

青函トンネルから採取した硬化体のように、成分が大きく偏った注入硬化体は、7.5N/mm²もの高圧注入下での1.5 ショット注入による施工方法であるため、加圧され注入材スラリーが分離して硬化したこと、およびW/C=200%のB液を用いた注入が大勢であるが、注入の初期および最終段階ではW/C=300%、100%のB液を使用したこととあいまって形成されたと考えられる。

以上の結果から、加圧注入により地盤内で硬化した硬

化体は、A液とB液が必ずしも設計どおりに均一および等量混合していないことが示唆された。混合割合が変化したときの硬化体の材料特性については、A液とB液が等量付近で均一に混合した場合は、初期および長期的にも優れた強度特性を示す。B液に対してA液の割合が極端に大きい場合は、初期強度発現性は向上するが、長期的な強度の伸びは低減し脆い硬化組織を形成しやすい。一方、A液に対してB液の割合が増加するほど初期強度発現性は低下するが、長期的な強度の伸びは大きくなる。しかし、今回確認できた硬化体では、青函トンネルおよび鍋立山トンネルいずれにおいてもRCSA混和材が極端

に過剰で硬化した部分は認められなかった。よって、急硬性セメント注入材としての補強効果を十分発揮しているものとする。

(6) 硬化体浸漬水の pH

注入・掘削後に採取して所定期間養生した硬化体を水道水に浸漬したときの 1 時間後の pH を測定し、長期間経過後のアルカリ成分の溶出のしやすさを評価した。青函トンネルから採取し養生した硬化体の結果を表-10、鍋立山トンネルから採取し養生した硬化体の結果を表-11 に示す。急硬性セメント注入材は、水和反応で生じる水酸化カルシウムによって、その浸漬水はアルカリ性を示す。一般に、セメント系材料は、硬化体組織が緻密化していないほどアルカリ成分が浸漬水に溶出しやすいため浸漬直後に高い pH を示す。表-10 および表-11 には、青函トンネルおよび鍋立山トンネルにおいて、注入・掘削後に採取して所定期間養生を続けた硬化体と、各トンネルでの練混ぜ配合を基に新たに作製したホモゲル（ホモゲル 1）と、各トンネルでの注入・掘削時に採取した硬化体強度と同等の圧縮強度を示すホモゲル（ホモゲル 2）の pH を示した。浸漬するまでのホモゲルの養生は 20℃の水中で 28 日間とした。表-10 より、27 年間水中養生した青函トンネルで採取した硬化体とそれに相当する圧縮強度を有するホモゲル 2 は、圧縮強度が小さいホモゲル 1 に比べ、pH の上昇が抑制されている。一方、表-11 に示す 17 年間地中で湿空養生した鍋立山トンネルで採取した硬化体についても青函トンネルの硬化体と同様な傾向を示した。ただし、青函トンネルの硬化体に比べ普通ポルトランドセメントを用いた高濃度配合であることから pH は高い値を示した。青函トンネルの硬化体の pH が低い理由は、低濃度配合にもかかわらず、大きな加圧脱水作用を受けたことによって硬化体組織が緻密化したこと、高炉スラグ微粉末を含有する混合セメントを用いたことより硬化体中のセメントの割合が少ないことにより、アルカリ成分の溶出性が小さくなったためと考えられる。そのため、青函トンネルの施工では、初期段階からアルカリ成分の溶出性は大きくなかったと推定する。また、長期間水中養生した現在においても、中性の水に硬化体を浸漬することでアルカリ性を呈することは、硬化体自体にアルカリ成分が残存しており健全な状態を維持しているものとする。

4. まとめ

注入・掘削後、長期間に渡って養生した急硬性セメント注入材の硬化体について材料特性を評価した結果を以

表-10 硬化体浸漬水の pH（青函トンネル）

硬化体種類	圧縮強度 (N/mm ²)	pH
27 年間養生した硬化体 A	29.1	8.9
ホモゲル 1 (σ 28)	1.5	10.8
ホモゲル 2 (σ 28)	29.4	9.0

表-11 硬化体浸漬水の pH（鍋立山トンネル）

硬化体種類	圧縮強度 (N/mm ²)	pH
17 年間養生した硬化体	7.6	10.1
ホモゲル 1 (σ 28)	5.7	11.5
ホモゲル 2 (σ 28)	8.2	10.7

下にまとめる。

- 1) 青函トンネルおよび鍋立山トンネルで注入・掘削後に採取した硬化体は、所定期間養生後も硬化体自体の崩壊もなく採取時の形状を維持しており、圧縮強度（青函トンネル：27 年、鍋立山トンネル：17 年）は、注入・掘削時に測定した圧縮強度と同等以上の強度を維持していた。ただし、青函トンネルの硬化体は、実注入箇所では長期に渡って海水の作用を受けている。本論文のデータは、水道水中で長期間養生した結果であり実態とは異なる。
- 2) 青函トンネルおよび鍋立山トンネルで注入・掘削して採取した硬化体ともに、ホモゲルに比べ大きな圧縮強度を示した。これは、注入時の圧力によって地山内で加圧脱水されたためと考えられる。青函トンネルで掘削後に採取した硬化体のホモゲルとの強度差が大きい理由は、青函トンネルでは高圧湧水下での注入であり、鍋立山トンネルでは大きな圧力をかけない置換工法が主体であったため、加圧脱水の度合いに違いが生じたためと考えられる。
- 3) 青函トンネルおよび鍋立山トンネルで注入・掘削後に採取した硬化体ともに、長期間養生後も水和生成物であるエトリンガイトが X 線回折分析および走査型電子顕微鏡によって確認できた。よって、乾燥を受けない条件であれば水和生成物は長期間に渡って硬化体中に安定して存在できることを確認した。
- 4) 27 年間水中養生した青函トンネルで採取した硬化体の切断した面には、筋状の模様（白色部と緑色部）が明確に確認できた。X 線回折分析や蛍光 X 線分析の結果、白色部は RCSA 混和材スラリー（A 液）とセメントスラリー（B 液：W/C=200%）が等量（A 液：B 液=1:1）に近い状態か、RCSA 混和材が多く混合し硬化した部分であることを確認できた。

一方、緑色部は、RCSA 混和材スラリー（A 液）が
少ない配合割合で混合し硬化した部分であることを
確認できた。これは、高圧注入で加圧され分離
されること、およびセメントスラリー（B 液）の
W/C は平均 200%であるが、注入開始時の濃度が
300%、注入終了時の濃度が 100%の場合も混在して
地山内に注入されるためと考えられた。

- 5) 17 年間地中にて湿空養生した鍋立山トンネルで採
取した硬化体の切断した面でも、灰白色部と灰黒
色部の筋状の模様が認められた。両部位ともに等
量混合に近い化学組成を示した。

以上より、青函トンネルおよび鍋立山トンネルにおけ
る急硬性セメント注入材の硬化体は、水中および乾燥の
影響を受けない条件下では 17～27 年以上に渡って安定
した硬化性状を保持していると結論付けられる。

参考文献

- 1) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会編集：最新地盤
注入工法技術総覧，産業技術サービスセンター発行，
1997，10
- 2) 米倉亮三，島田俊介，木下吉友：恒久グラウト注入工
法，山海堂発行，2000，8
- 3) 米倉亮三，島田俊介，大野康年：恒久グラウト・本設
注入工法 理工図書発行，2008，6
- 4) 足立貞彦：長大海底トンネル用グラウトの耐久性に関
する研究，セメント技術年報 XXX，pp. 233-236，1976
- 5) 古川 裕：青函トンネルにおける ES 注入の施工につ
いて，鉄道建設公団第 17 回技術研究会記録，1981，11
- 6) 角江俊昭，石井清，吉越洋：高透水性岩盤への急硬性
グラウトの適用性評価，土木学会論文集，vol. 735，
No. 6-59，pp. 75-91，2003

- 7) 三宅信雄，中川晃次，磯貝純：カルシウムサルホアル
ミネート系セメント混和材の基礎性状，セメント技術
年報，XXIX，pp. 121-126，1975
- 8) 中川晃次，渡辺芳春，大門正機：非晶質カルシウムア
ルミネート-無水セッコウ-ポルトランドセメント系
の水和と急硬機構，Gypsum & Lime，No. 218，
pp. 12-17，1989
- 9) 平野健吉，川内敏夫，寺島勲：地盤改良技術（6）デ
ンカ E S（セメント系急硬性混和材）デンカ E S の概
説と施行例，建設機械，vol. 31，No. 11，pp. 67-70，
1995
- 10) 岡田清編著：コンクリートの耐久性，pp. 55-64，朝
倉書店，1986
- 11) 末永充弘，元木暉里：本州方算用師工区における破
砕帯の施工，土木施工，vol. 21，No. 1，pp. 42-57，
1980
- 12) 玉木稔，末永充弘：出水断層部の施工，鉄道土木，
vol. 25，No. 3，pp. 177-191，1983
- 13) 松尾昭吾，松下芳亮，末永充弘：青函トンネルにお
ける E・S 注入，土木学会年次学術講演会講演概要
集 第 3 部，vol. 38，pp. 135-136，1983
- 14) 土居則夫，服部修一，林淳：膨張性地山への挑戦
（続報）北越北線鍋立山トンネル，トンネルと地下，
vol. 21，No. 7，pp. 7-12，1990
- 15) 小暮誠，木村裕俊：超膨圧トンネル掘削完了 北越
北線鍋立山トンネル，トンネルと地下，vol. 26，
No. 7，pp. 7-12，1995
- 16) 秋田勝次，木村裕敏，佐藤和義：高圧ガスを有する
超膨張性地山の掘削，土木施工 34 巻 2 号 (1993. 2)
- 17) 電気化学工業株式会社：デンカ E S 技術資料，1995

LONG-TERM PROPERTIES OF RAPID-HARDENING GROUTING MATERIAL BASED ON CEMENT AND CALCIUM SULFOALUMINATE (RCSA) GROUTED DURING LONG TUNNEL CONSTRUCTION

Katsuji AKITA, Akira MURAKAMI, Kenkichi HIRANO, and Akitoshi ARAKI

The rapid-hardening grouting material based on cement and calcium sulfoaluminate (RCSA) was developed to improve the property of the ground around the Seikan tunnel during construction.

In this paper, fundamental properties of the grouting material based on cement and RCSA are explained. In addition, strength and chemical properties of the hardened grouting material are discussed on specimen cured for 27years(Seikan tunnel) and 17years(Nabetachiyama tunnel).