

セメント系薬液注入材の 耐久性に関する研究

2011 年

秋田 勝次

セメント系薬液注入材の耐久性に関する研究

目 次

第1章 序 論	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究の目的と構成	3
第2章 注入の設計と注入材について	7
2.1 注入の目的と設計	7
2.1.1 注入の目的	7
2.1.2 注入の設計	11
2.2 薬液注入材の分類	14
2.3 セメント系薬液注入材	16
2.3.1 セメント水ガラス注入材	16
1) セメント水ガラス注入材の硬化のメカニズム	16
2) セメント水ガラス注入材の変遷	16
2.3.2 急硬性セメント注入材	18
1) 急硬性セメント注入材の硬化のメカニズム	18
2) 急硬性セメント注入材の変遷	20
2.4 結論	21
第3章 セメント系薬液注入材の耐久性に関する既往の研究	23
3.1 セメント水ガラス注入材の耐久性について	23
3.1.1 概要	23
3.1.2 耐久性	24
3.2 急硬性セメント注入材の耐久性について	25
3.3 結論	28
第4章 セメント系薬液注入材の施工事例	31
4.1 セメント系薬液注入材の施工事例に関する調査	31
4.2 断層を伴う高圧湧水下の海底トンネルの施工事例：青函トンネル	32
4.3 未固結で断層を伴う高圧湧水下の陸上トンネルの施工事例：中山トンネル	38
4.4 崩落後の復旧施工事例 : 飯山トンネル	46
4.5 地盤改良の施工事例 : 鍋立山トンネル	61
4.6 後向き止水注入の施工事例 : 葛老山トンネル	70
4.7 結論	77

第5章 セメント水ガラス注入材の耐久性に関する研究	83
5.1 セメント水ガラス注入材の材料特性	83
5.1.1 基本特性	83
1) ゲルタイム	84
2) 圧縮強度	86
5.1.2 長期材料特性	87
5.1.3 耐久性の劣化原因および耐久性向上対策	90
5.1.4 海底下の注入状況を考慮した各種試験	92
1) グラウト飽和海水による耐久性試験	92
2) 密封養生試験	93
3) 海水の接触条件の相違による崩壊性	94
5.2 セメント水ガラス注入材の施工後の評価	96
5.2.1 青函トンネル供用後のセメント水ガラス注入材の長期材料特性	96
1) 施工後 30 年経過したセメント水ガラス注入材の観察と物理試験	96
2) セメント水ガラス注入材の化学分析結果の経年変化	97
3) 化学分析結果に対する考察	100
5.2.2 セメント水ガラス注入材で施工された青函トンネルの注入域の評価	102
1) 注入域に関する各種計測データの経年変化	102
2) 注入域の湧水圧の状況	102
3) 注入域の湧水量の状況	103
4) 注入域の透水係数	104
5) 注入域の湧水化学分析結果の経年変化	105
6) 注入を実施した海底部の坑内湧水量の経年変化	105
7) 本坑における坑内内空変位の経年変化	107
5.3 セメント水ガラス注入材の今後の展開	109
5.3.1 高炉スラグの活用について	109
5.3.2 シリカ量と強度について	112
5.3.3 遅延剤の開発について	120
5.3.4 超微粒子セメントの適用について	135
5.4 結論	140
第6章 急硬性セメント注入材の耐久性に関する研究	145
6.1 急硬性セメント注入材の材料特性	145
6.1.1 基本特性	145
1) ゲルタイム	145
2) 強度発現性	147
3) 硬化体からの溶出成分	148
6.1.2 長期材料特性	150

1) 室内養生における長期材料特性·····	150
2) 注入後の掘削切羽で採取した硬化体の長期材料特性·····	154
6.2 急硬性セメント注入材の今後の展開·····	166
6.2.1 二重管ダブルパッカー方式への適用と1ショット注入について·····	166
6.2.2 超微粒子セメントの適用について·····	167
6.2.3 セメント系薬液注入材の適用範囲について·····	170
6.3 結論·····	173
 第7章 結論·····	 179
 謝 辞·····	 189

第1章 序論

1.1 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、山岳部、都市部を問わずトンネル工事に広範に使用されているが、昭和48年、49年に薬液注入工事に起因する井戸水の汚染事故が発生し、昭和49年7月に「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針」が建設事務次官通達により発せられた以降、セメントおよび水ガラスを主剤とした材料が主流となり現在に至っている。注入材料は、浸透性を保持するため希釈率の大きい低粘度材料となることが避けられないという特性から、これまで仮設材料として位置付けられる傾向にあったが、最近、都市土木においては注入後、数年を経てから開削する例、構造物基礎の補強および大深度地下工事等に注入材料の長期耐久性が要求されつつあり恒久グラウトとしての研究¹⁾も報告されている。

山岳トンネルにおける注入工法は、従来から高圧湧水および断層破砕帯等の対策として用いられることが多く、骨格を成す注入材料は相応のホモゲル強度を要求されるため、懸濁型注入材料のセメント系薬液注入材であるセメント水ガラス注入材が多く採用されてきた。また、注入工法が適用されるような山岳トンネルの地山は一般に地質が悪いため、覆工を鉄筋コンクリート等で補強するケースが多いことから、掘削するための補助工法として主眼がおかれ、注入材料の耐久性について検討することは少なかった。

山岳トンネルにおいて使用事例の多いセメント水ガラス注入材の場合、一般に低粘度で低強度の溶液型グラウトとは違い、セメントが混入されていることで強度があり耐久性も相応に保持されるものとして、研究対象にならなかったものと推察される。

このため、希釈率の大きい低粘度材料であるセメント系、セメント水ガラス注入材の長期的な品質がどのように評価され、性能をどのように考えるべきかについては文献も少なく、未知となっている現状にある。近年、構造物のライフサイクルコストの視点が大きく取り上げられてきており、維持管理の側面からセメント系薬液注入材の耐久性について明確にすることは、トンネル構造物を始めとした今後の構造物設計のあり方に大きく寄与するものと考ええる。

本論文は、これまで比較的注入材料の強度が高いこと、および仮設材料の位置付けが強いこと等により、深度化されてこなかったセメント系薬液注入材の耐久性について着目し、これらの注入材について各種試験を行うことで、長期材料特性について分析し、耐久性につい

て評価を行った。

セメント系薬液注入材の耐久性を検討し深度化した例としては、青函トンネルにおいて開発されたモル比 2.2 の水ガラスと高炉スラグ混入のセメント水ガラス注入材の耐久性を扱った報告「長大海底トンネル用グラウトの耐久性に関する研究²⁾」が、日本では最初といっても良い。このなかで海底トンネルという特殊性から、高圧湧水（海水）の止水材料として、かつ破砕帯等の改良材料としても有効として開発されたセメント水ガラス注入材が、耐久性のある注入材料として報告されている。

このセメント水ガラス注入材により青函トンネル本坑において本格的な注入施工が実施され、無事、青函トンネルを完成させることが出来、その後、青函トンネルは、20 年以上にわたり、海底下という厳しい環境条件にもかかわらず、鉄道の大動脈として安全に運行されている。

今回、セメント系薬液注入材の耐久特性を論述するにあたり、海底下の重要構造物である青函トンネルでは、完成後も長年にわたり、施工後のトンネル維持管理に関するデータを定期的に採取していること、およびトンネルの注入域を形成する注入材料についてもボーリングにより 30 年近く経過した試料の採取を行っていることに着目し、セメント系薬液注入材の淡水における耐久性だけではなく海水における耐久性についても評価するものとした。

前述した「長大海底トンネル用グラウトの耐久性に関する研究」は、セメント水ガラス注入材の 1 年材齢の供試体による一軸強度等の報告であり、当時としては極めて貴重な注入材料のデータおよび知見ではあったが、長期的に注入域がどのような状況となるかについては、推測の域を出ていない。今回、青函トンネルの各種データからトンネル建設当初に考慮された材料特性に比べ、注入施工後 30 年が経過した現状の注入材料がどのような状況にあるか、また、海底下の注入域が構造体としてどのような状況にあるかについて評価を行うものとした。その結果、セメント水ガラス注入材料における性能についての知見を取りまとめることができた。

また、セメント水ガラス注入材以上の耐久性と環境に配慮した材料を目指し、開発されたセメント系薬液注入材のなかのひとつである急硬性セメント注入材についても、青函トンネルおよび鍋立山トンネルの現地切羽から採取した試料で実施した試験から、注入材料の耐久性について評価を行い、取りまとめたのであわせて論述するものである。

1.2 本研究の目的と構成

本研究は、主にトンネルにおいて地山注入に適用されるセメント系薬液注入材の材料特性に着目し、セメント系薬液注入材の長期的な材料特性から、その耐久性について淡水の場合のみならず、より厳しい条件である海水の場合においても明らかにし、その耐久性について評価し、論述するものである。特に海水の場合においては、青函トンネルでのセメント水ガラス注入材の30年にもわたる長期の材料特性に関するデータを活用することで、注入材料および注入域について評価・考察し、今後の展開についてまとめている。また、セメント系薬液注入材の一つである急硬性セメント注入材についても、その材料特性と耐久性について評価し、セメント系薬液注入材の今後の展開についてあわせてまとめている。

本論文の構成は、図-1.2.1に示すように7章より成る。

第2章では、注入の設計と注入材について、注入での一般的な考え方を述べ、セメント系薬液注入材の硬化メカニズムと使用されてきた変遷を述べる。

第3章では、セメント系薬液注入材の耐久性に関する既往の研究を述べる。

第4章では、セメント系薬液注入材の施工について、その使用目的ごとに、断層を伴う高圧湧水下、崩落による復旧、地盤改良および後向き止水に分類し、その事例を述べる。

第5章では、セメント水ガラス注入材の耐久性について、その基本的な材料特性および長期材料特性について分析し、耐久性の中でも特に耐海水性を考慮した注入材料について論述し、トンネルの注入域の評価を行った。また、セメント水ガラス注入材の応用として、高炉スラグの活用について、必要となるシリカ量と強度について、遅延材の開発ならびに超微粉末セメントの適用について分析および考察することで、セメント水ガラス注入材の今後の展開について論述する。

第6章では、急硬性セメント注入材について述べる。本章では、青函トンネルにおいて急硬性セメント注入材を施工した際に切羽から採取された硬化体の試料と、鍋立山トンネルから採取された硬化体の試料について、長期間養生した材料試験を実施し、その分析結果に基づき、耐久性の評価を行った。また、急硬性セメント注入材の応用として、二重管ダブルパッカー方式への適用と1ショット注入、および浸透性の向上を図るべく開発された超微粉末セメントの適用について取り上げ、その適用範囲とともに急硬性セメント注入材の今後の展開について論述する。

第7章では、各章で得られた知見をまとめ、本論文の結論とする。

第1章 序論

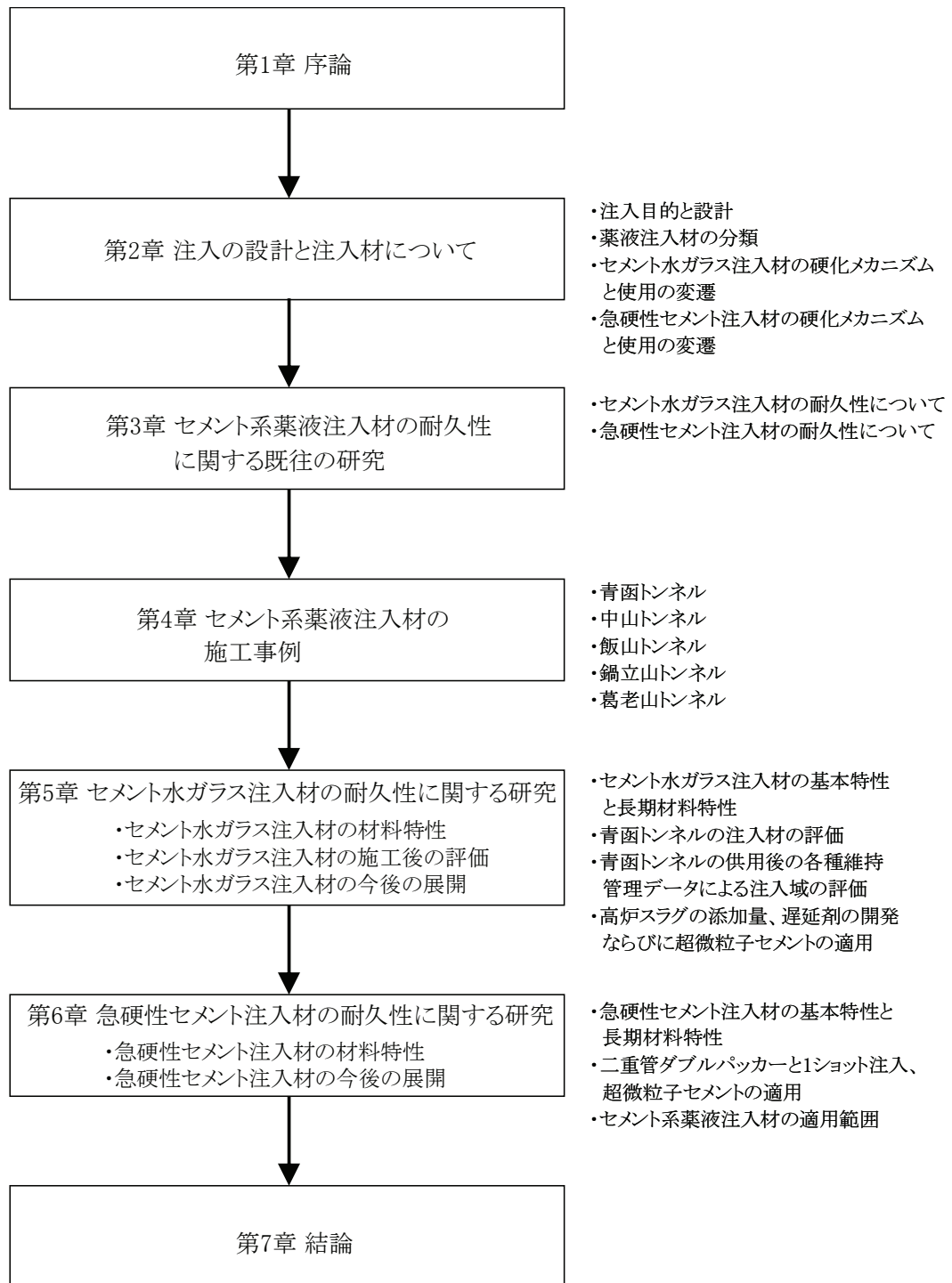


図-1.2.1 本研究の構成

第1章 序論

参考文献

- 1) 米倉亮三、島田俊介：恒久グラウト、土木施工、1999年7～9月号、山海堂
- 2) 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、東京大学学位論文、1976.

第2章 注入の設計と注入材について

2.1 注入の目的と設計

2.1.1 注入の目的

地盤の改良工法のなかで、改良する材料に圧力をかけて地盤へ注入あるいは圧入することによって地盤を改良する工法を、一般に注入工法と称している。地盤の中の亀裂や土質等の間隙にゲルタイムをコントロールしながら注入材を注入することによって、土粒子間隔等を埋めている水を追い出し、その代わりにその土粒子の間隙中を薬液で埋め、それが固化することによって、地盤を改良することを主たる目的としている工法が、薬液注入工法である。

薬液注入により改良された地盤の特性の最も特徴的なものは、土の内部摩擦角（ ϕ ）が殆ど変化せずに、粘着力（ C ）が増加することによって地盤の強度が増加するものである。また土粒子等の間隙中に流動しない固化した薬液が埋まることによって、地盤の透水性が低下して、結果として難透水性の地盤が形成されていく。そのため、機械攪拌または噴射攪拌等によるセメント系固化工法のような高い改良強度が得られないことや、均質性にかけるなどの問題はあるものの、薬液注入材を使用した注入工法には、下記に示すように他の固化工法にはない優れた特徴も持っている。

- ①主に使用する材料が、水ガラス（珪酸ソーダー）であるため、安全かつ環境にやさしい。
- ②薬液は透水性の大きい部分から順次浸透していくことから、結果として比較的均等な改良体を形成する。
- ③適切な凝固時間を持つ薬液注入材を選定することで、湧水のある場所や地下水が流動しているところでも地盤改良ができる。
- ④細いパイプから一定範囲の改良体を形成するので、既設の構造物等の密着性が良い。

以上のように薬液注入材による注入工法は、その目的に応じた使い方を考慮することで実効性の高い工法として期待できる特徴を持っている。

注入の目的としては、大別すると次のようになる。

- ①止水（あらかじめ湧水を防ぐ注入）
- ②地盤強化（あらかじめ地盤の崩壊やゆるみを防ぐ注入）
- ③その他
 - ・液状化対策
 - ・後向き止水（出ている水を止める）

・環境汚染対策

一般にトンネル構造物に用いられる薬液注入工法は、トンネルの掘削を可能とするための補助工法であり、一般にこの注入を「トンネル地山注入」と称している。注入の目的としては上記の①および②が最も一般的である。また、多くはないが③の中の掘削後に出ている湧水を止めるための後向き止水もある。トンネル構造物に適用される薬液注入工法は、これらの目的に適合した薬液注入材の性能が要求される。

トンネル構造物以外のその他の構造物に薬液注入工法が用いられる場合には、その後に掘削を実施することは少ないが、各々の対象構造物の目的に即した形で薬液注入工法が実施されるが、一般にこの注入を「地盤注入」と称している。

地盤注入の場合、①の止水の目的としては、掘削土留工・線路横断工の止水、高規格堤防や河川堤防の遮水・漏水対策および護岸の止水工およびダムのカートングラウト等、②の地盤強化の目的としては、直接基礎および杭基礎の地盤強化、構造物の沈下防止、ダムの地盤強化を目的としたコンソリデーショングラウト等がある。また、その他の例としては耐震性能を向上させるため液状化防止対策や産業廃棄物の環境汚染防止対策が挙げられ、それぞれの地盤注入の目的に適合した薬液注入材の性能が要求される。

注入の目的は地盤を改良することにより対象となる構造物の安全を確保することであるが、注入の目的により調査項目や設計方法が異なるため、また効率的な注入計画を立てるためにも注入目的を明確にする必要がある。近年では、従来から実施されている本体構造物の建設中の安全の確保を目的とする「仮設注入」とは別に、本体構造物の完成後の安定および耐久性を考慮した「恒久注入」の性能も求められており、注入の目的を明確化することは重要となっている。

本論文では、薬液注入工法のなかでも、高圧湧水下の止水注入や断層破碎帯等の地盤強化注入を主たる目的とするトンネル地山注入に対し焦点を当て、そこに適用される注入工法の骨格である注入材料のうち、セメント系薬液注入材の耐久性について論述するものである。

トンネル地山注入は、前述したとおり、トンネルを安全に掘削する目的で、地山の止水・強化を図るために用いられるが、表-2.1.1に示すような各種補助工法の特徴を的確に把握し、安全性、経済性、施工性等を比較したうえで、その適用について総合的に判断されるものである。

一般にトンネルを掘削する場合のトンネル地山注入として、薬液注入工法が採用される条件としては、下記が挙げられる。

- ①高圧で大量の湧水が出現するが、水抜き工法および水位低下による方法が湧水等で採用不可能な場合（止水）
- ②地盤が軟弱で掘削が困難な場合（地盤強化）
- ③トンネル崩壊後の復旧対策（止水および地盤強化）
- ④掘削されたトンネルの止水（止水）

上記の特に①、②のケースにおいては、トンネルを安全に掘削する目的で、トンネルの補助工法として用いられる。トンネルの建設のために使用される注入工法は、表-2.1.1 のような代表的な湧水対策および地山補強の補助工法の特徴を的確に把握し、安全性、経済性、施工性等を比較した上で、その適用について総合的に判断されるものである。

表-2.1.1 代表的な湧水対策および地山補強の補助工法

工法	主な効果	主な適用地山条件
水抜きボーリング	地下水位の低下	硬岩・軟岩・土砂地山
ウェルポイント		土砂地山
ディープウェル		土砂地山
水抜き坑		硬岩・軟岩
地山注入	止水・地盤強化	硬岩・軟岩・土砂地山
遮断壁	止水	土砂地山
垂直縫地	地盤強化	土砂地山

トンネル地山注入の特徴としては、高圧で大量の湧水が出現することが多く、殆どの場合、坑内の切羽からの注入となるため、狭隘作業となること、地下水面下のリスクの伴う作業であること等、制約の非常に多い状況の中での施工となる。地上からの注入と違い、削孔作業は、切羽から扇状に実施されるので注入範囲の確保や孔曲がり対策の必要性、また削孔時に多量の湧水や土砂の噴出等もあるので、事前に十分な配慮が必要となる。トンネル地山注入は厳しい環境下での施工となり易いが、水面下であり注入経過とともに削孔時に湧水量が減少してくるため、注入効果が把握しやすいという利点がある。

図-2.1.1、2.1.2 に平成 21 年 3 月に鉄道総合研究所が実施したトンネル地山注入の注入対象の地質構造および注入目的の内訳を示すが、地質構造としては、砂（38%）、礫（33%）、砂・粘性土（14%）および泥岩（10%）と続き、全体としての注入目的は、止水が 43%、地盤強化が 24%、止水および地盤強化が 33%となっている。また、二重管ダブルパッカー方式において使用された薬液注入材について図-2.1.3 に示すが、一次注入は懸濁型注入材料のみであり、二次注入材についても溶液型注入材料よりも懸濁型注入材料の使用が多い。このことはトンネル地山注入の場合、要求性能としてホモゲル強度や耐久性が強く求められていることに起因している。

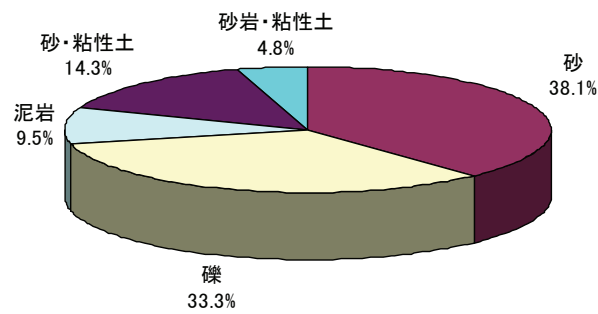


図-2.1.1 注入対象の地層構造の内訳 (21 例) ¹⁾

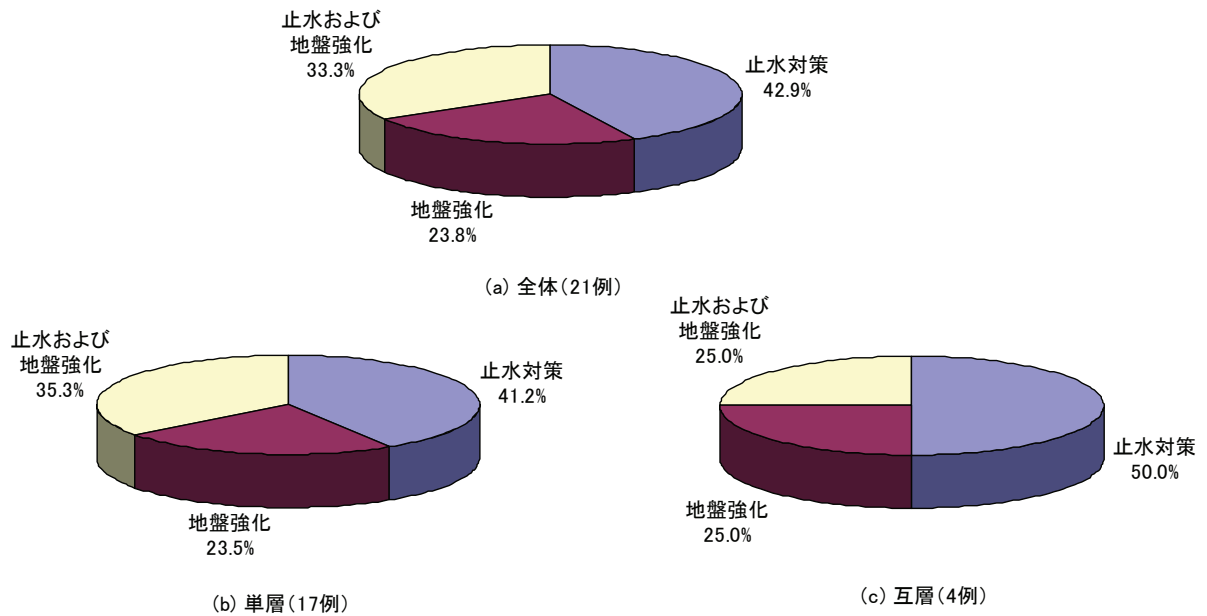


図-2.1.2 注入目的の内訳 (トンネル地山注入) ¹⁾

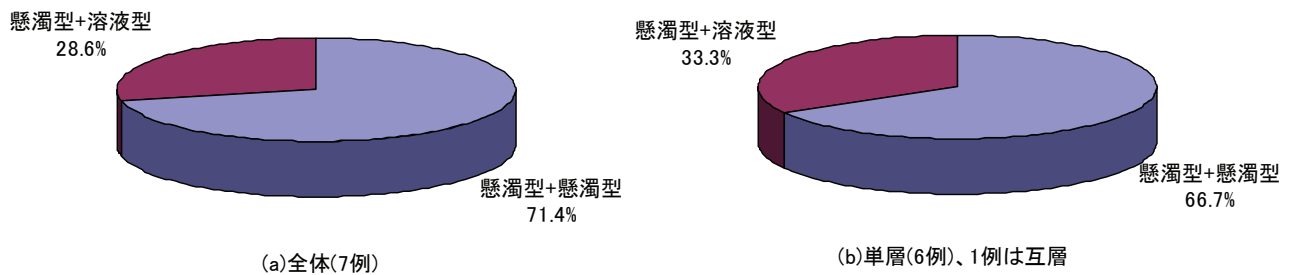


図-2.1.3 注入対象の地層構造と使用薬液：二重管ダブルパッカー (トンネル地山注入) ¹⁾

2.1.2 注入の設計

注入の設計は、事前調査の結果から、地質、湧水の状況、トンネル掘削時の応力分布、ゆるみ範囲等を考慮し決定するが、特にトンネル地山注入における設計においては、高圧湧水下の切羽注入となることが多いため、改良目的を十分満足するような設計とすることが重要である。一般に注入範囲の設計は、図-2.1.4に示すように注入範囲とトンネル断面の半径比(R/r)が2~3を超えてもトンネル壁面の接線方向応力に大きな差が見られず、2程度を標準的に考えてよい。ただし、断層や軟岩等の場合には、掘削時のゆるみを考慮して範囲を大きくとる必要がある。

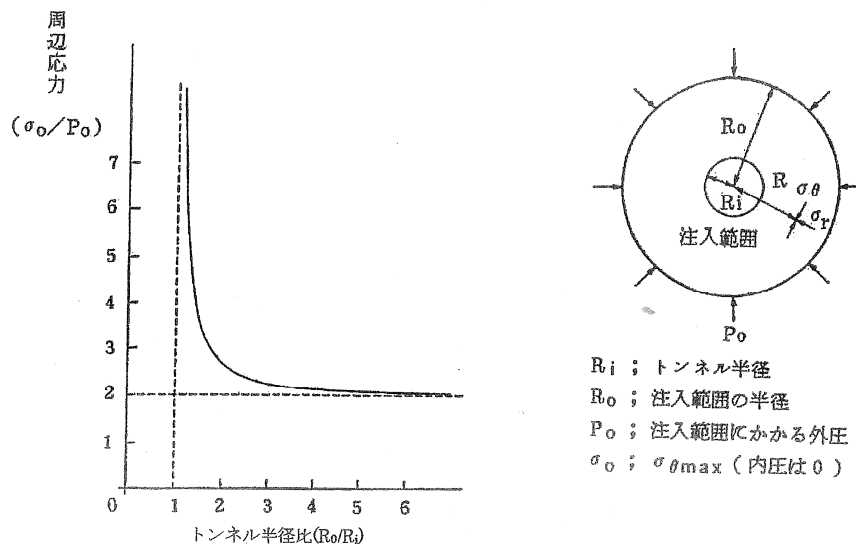


図-2.1.4 注入範囲とトンネル半径比(R_0/R_i)²⁾

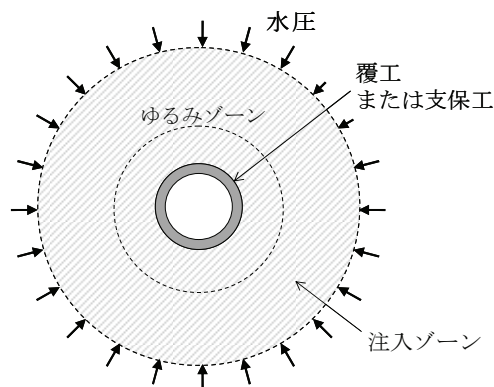


図-2.1.5 青函トンネルにおける注入ゾーンの概念図³⁾

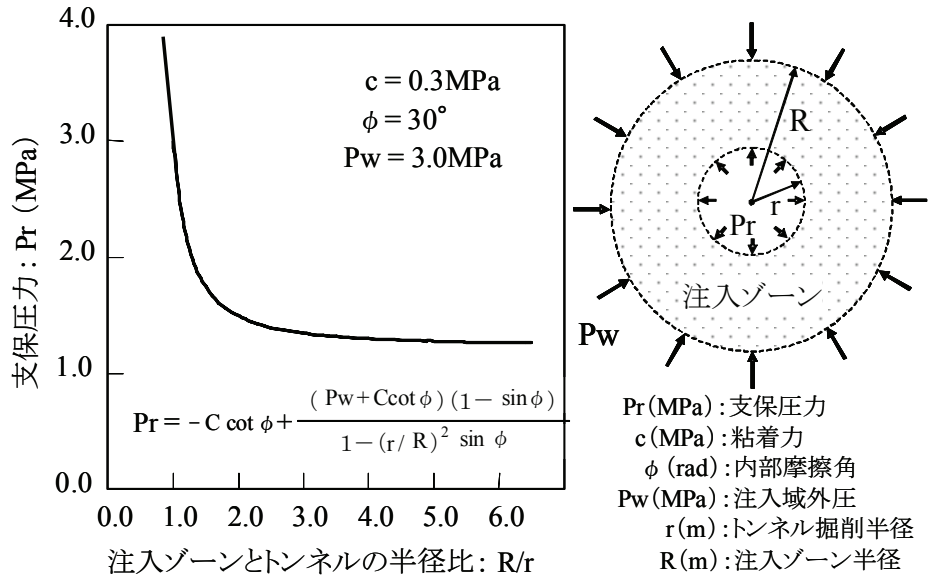


図-2.1.6 注入範囲とトンネルの支保圧力の関係(青函トンネルの例)⁴⁾を加筆

図-2.1.5、2.1.6に青函トンネルの例を示すが、海底トンネルということを十分考慮して、注入ゾーン内に緩みゾーンを包含し標準的な注入範囲を3程度、断層破碎帯等では4～6程度としている。

青函トンネルは、最深部で海水面下240mに位置しており、2.4MPaの高水压下の条件下であったため、青函トンネル土圧研究委員会を設置し、1970年～1985年にかけて、適切な注入範囲等の海底トンネル工事に関連する諸問題を検討している。その中で、注入ゾーンをモール・クーロンの破壊基準を満たす弾塑性体と考え、注入ゾーンの内で破壊が生じると仮定すると、注入ゾーン弾性域となり、安定条件として図-2.1.6に表記する式-2.1が成り立つ。

$$P_r = -C \cot \phi + \frac{(P_w + C \cot \phi)(1 - \sin \phi)}{1 - (r/R)^2 \sin \phi} \quad (\text{式-2.1})$$

式-2.1よりトンネルの径と注入ゾーンのとの比(R/r)が大きくなれば支保圧力 P_r が次第に小さくなることが分かる。図-2.1.6の注入範囲と支保圧力の関係を見ると注入ゾーンは必要以上に大きくしても効果は向上せず、 R/r は2～3程度のところに実用的な値があるとして報告している⁵⁾。この成果を基本に青函トンネルの注入の設計がなされた。

一般的に注入範囲の決定を計算結果のみで行うことは、対象地山の特性の把握が困難なこと、改良地盤が均質とはなり難いこと等から、計算から求めた結果をまずは指標とし、過去の実績例を十分参考にして注入範囲の設計を決めることが望ましいと判断される。表-2.1.2 に著名なトンネル等における注入範囲の実績を示すが、鉄道の新幹線トンネルである青函トンネル、中山トンネルおよび新関門トンネルは、断面が大きいことや湧水圧が高いことから注入半径と掘削の半径比は 2.35～4.00 と大きい。鍋立山トンネルは 4.5 地盤改良の施工事例で詳述するが、メタンガスを抜き、地盤改良を目的とした単線トンネルであり、2.0 を使用している。また、旧日本道路公団(JH)においては、掘削半径 4.0m 程度の先進導坑や作業坑においては断面の大きさやその目的から 1.75～2.75 程度を採用している。

表-2.1.2 トンネルにおける岩盤注入の注入範囲についての実績（掘削半径 4m 程度以上）⁶⁾

名 称			掘削半径 Ra (m)	注入半径 R (m)	R/Ra	平均R/Ra
青函トンネル	本坑		5.50	16.50	3.00	Ra=5.5m以上のとき 平均 2.97
	本坑		5.50	22.00	4.00	
中山トンネル			5.75	14.50	2.52	
新関門トンネル			5.93	13.93	2.35	Ra=4m程度のとき 平均 2.29
鍋立山トンネル	本坑		3.90	7.80	2.00	
JH資料	先進導坑	1	4.00	9.00	2.25	
		12	4.00	10.80	2.70	
		13	4.00	11.00	2.75	
	作業坑	ずり出し運搬坑	4.00	7.00	1.75	
		ポンプ車P1・P2	3.85	8.85	2.30	
Ra=4m程度以上のときの平均R/Ra					2.56	

2.2 薬液注入材の分類

現在、地盤改良を目的として使用される注入材料は、表-2.2.1に示すとおり薬液系の急硬材を使用したセメント系、水ガラス系、特殊シリカ系および高分子系があるが、昭和49年7月の「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針⁷⁾」通達により、現在、高分子系は使用されていない。非薬液系は、セメント、粘土等があるが、一部、ベントナイトの使用も見られる。本論文で着目しているのは、この中のトンネル地山注入に適用実績が多い薬液系の水ガラス系（懸濁型：セメント、スラグセメント）とセメント系（懸濁型：セメント＋急硬材）の材料である。

一般にトンネルを掘削する場合に注入工法が採用される場合の条件については前述したように、①高压で大量の湧水が出現するが水抜き工法および水位低下による方法が渇水等で採用不可能な場合、②地盤が軟弱で掘削が困難な場合、③崩壊後の復旧対策等が一般的である。これらのケースでは、止水・地盤強化のどちらにも対応可能なホモゲル強度の高い材料を要求されることが比較的多い。図-2.2.1はサンドゲルにおけるグラウト強度を示したものであるが、溶液型材料単体のホモゲル強度はサンドゲルより小さいため、セメント懸濁型材料を骨格の注入材料として採用し、浸透性をより考慮する必要のあるところについて溶液型材料を使用する併用した複合注入の事例が一般的となっている。

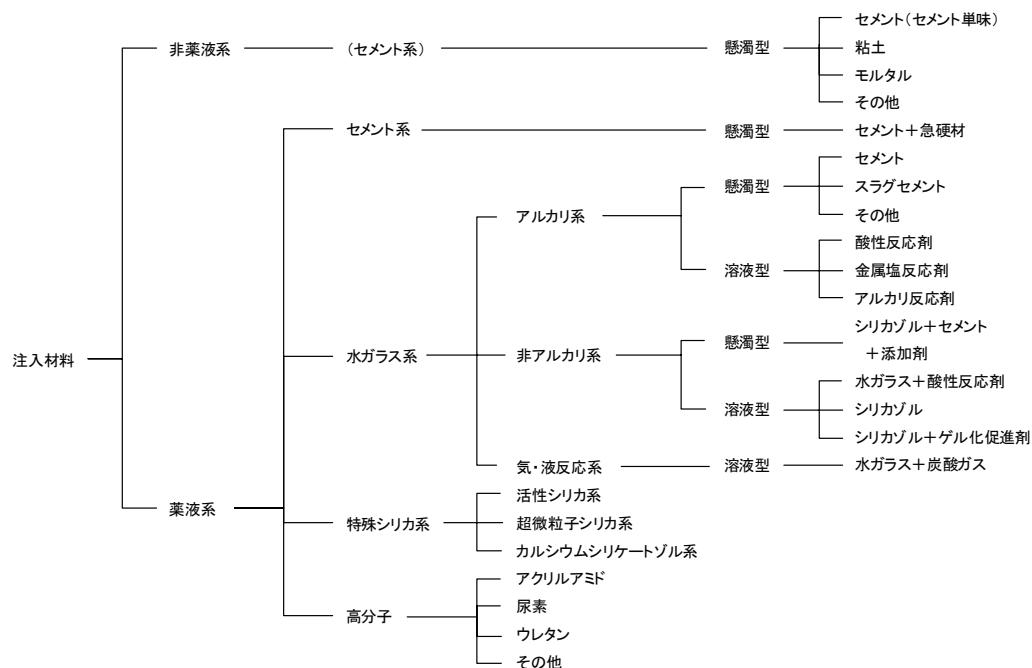


表-2.2.1 注入材の分類⁸⁾

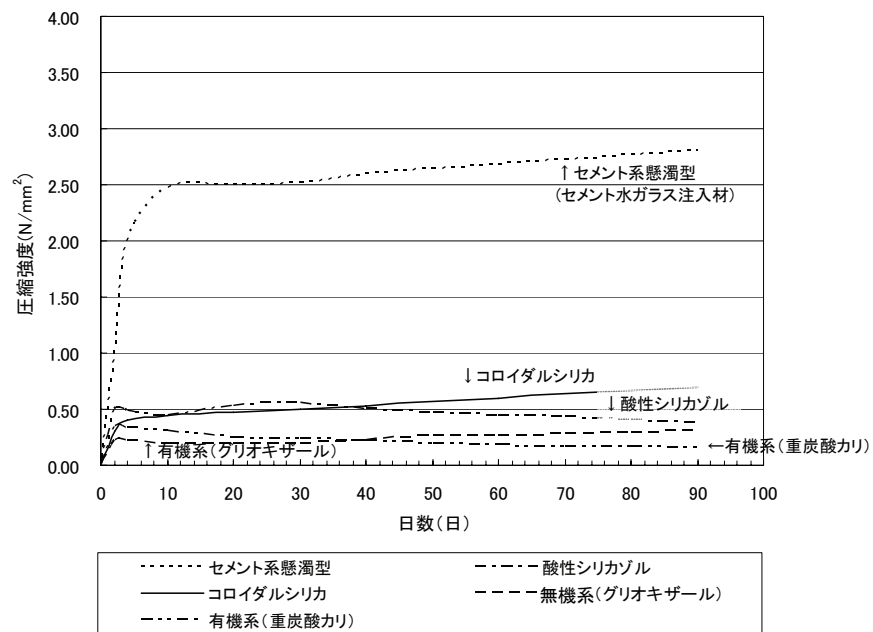


図-2.2.1 グラウトによる長期強度 (サンドゲル)⁹⁾

2.3 セメント系薬液注入材

2.3.1 セメント水ガラス注入材

1) セメント水ガラス注入材の硬化のメカニズム

セメント水ガラス注入材のゲル化機構については、不明な点が多いとされているが、一般には、式-2.2のようなゲル化反応が考えられている。

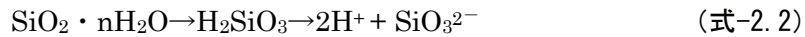


図2.3.1のように水ガラス水溶液中の珪酸コロイド粒子は普通、負（－）に帯電し、懸濁液中のセメント粒子は正（＋）に帯電しているため、これらを混合すると放電して（電荷を失わない荷電置換）不安定化し、凝固する反応を起こす。この荷電置換は、セメントの種類、量、水ガラスのモル比によって大きく左右される。また、セメント主成分の珪酸三石灰と水ガラスの珪酸とが結合して珪酸水和物となり、ゲルとして分離する反応も起こすといわれている。

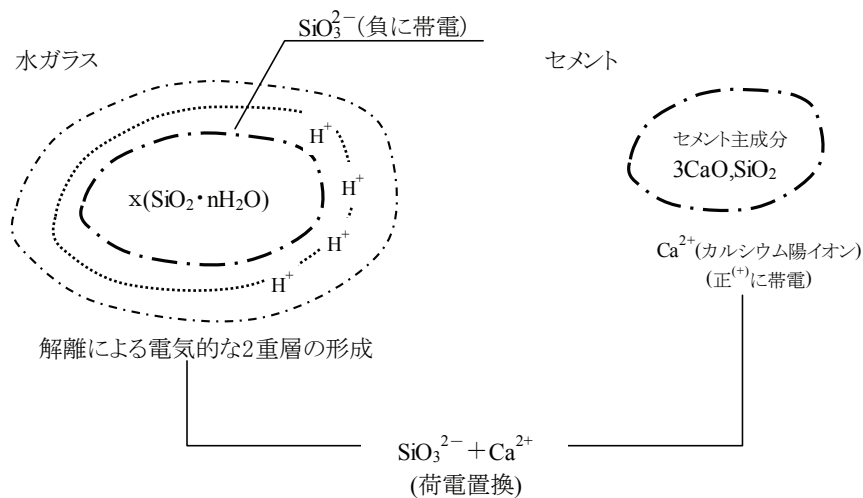


図-2.3.1 水ガラス－セメント系ゲル化機構¹⁰⁾

2) セメント水ガラス注入材の変遷

表-2.3.1に主な注入材料の変遷を示すが、水ガラスと無機材料のセメントを混合し反応を利用する方法は、不安定水ガラス工法と称され旧東独のイエーデ（Jahde）によって開発されたものであり、この方法は薄い水ガラス水溶液をセメント懸濁液で処理し、一定時間経過後、不安定となった上澄み液のみ使用していた。LW工法のLWとはこの「不安定水ガラス」

の意味で **Labils Wasser Glass** の略である。しかし、この不安定水ガラス工法によって生成されたゲルは強度が小さいことから改良研究が進み、水ガラス水溶液とセメント懸濁液を混合したままで使用する方法を日本技術研究所が開発し、これを **LW-1号**¹¹⁾といい、鉄道技術研究所の樋口芳朗博士の研究が、セメント水ガラス注入材粒子の沈降を防ぐため、ベントナイトを適量加える方法を提案したものを **LW-2号**¹¹⁾といい、ともに「改良不安定水ガラス」(**iLW**)といわれる工法である。その後、丸安隆和博士等がセメント水ガラス注入材にスラグを混和する工法 (**MS 工法**)を提案し、凝固時間も伸び耐久性も良好なグラウトが開発されることとなった。この高炉スラグは耐海水性が大きいことから青函トンネルの注入に微粉末の高炉コロイドセメントとして採用され、低モル比の水ガラス(モル比 **2.2**)を合わせて使用することで凝固時間を伸ばした低モル比セメント水ガラス注入材が開発されることとなった。

表-2.3.1 主な注入材料の歴史 ^{11)一部加筆}

種 類	1800年	1850年	1900年	1950年	2000年
(国 外)					
粘土・石灰	1802				
ポルトランドセメント	1824				
水ガラス+塩化カルシウム等 (ヨースチン工法)			1887		
水ガラス系注入材					
高分子系(アクリルアミド)注入材				1950頃	
(国 内)					
ポルトランドセメント					
水ガラス系(無機硬化剤,セメントスラリー)注入材				1951(MI), 1961(LW)	
水ガラス系(セメントスラリー:高炉スラグ使用)注入材					1972(MS)
低モル比水ガラス系(セメントスラリー)注入材					1971
水ガラス系(有機硬化剤)注入材					1965頃(GS)
シリカゾル系(PH中性化)注入材					
高分子系(アクリルアミド)注入材					～1974(暫定指針)
高分子系(リグニン)注入材					～1974(暫定指針)
高分子系(ウレタン)注入材					緊急時に可
高分子系(尿素)注入材					～1974(暫定指針)
急硬性セメント注入材					1974
耐久性グラウト					
超微粒子セメント注入材					

2.3.2 急硬性セメント注入材

1) 急硬性セメント注入材の硬化のメカニズム

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 混和材という）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-2.3.2 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、石膏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-2.3.3 に、セメントの化学組成と粉体特性を示す。図-2.3.2 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^{12),13)}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

表-2.3.2 RCSA 混和材の化学組成（%）と密度およびブレン値

Ig-loss	In-sol	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	密度 (g/cm^3)	ブレン値 (cm^2/g)
0.6	0.8	2.2	23.9	0.7	42.6	0.2	28.3	2.9	5500

表-2.3.3 セメントの化学組成（%）と密度およびブレン値

セメント	Ig-loss	In-sol	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	密度 (g/cm^3)	ブレン値 (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（高炉コロイドセメント）、OPC（普通セメント）

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-2.3.1 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。

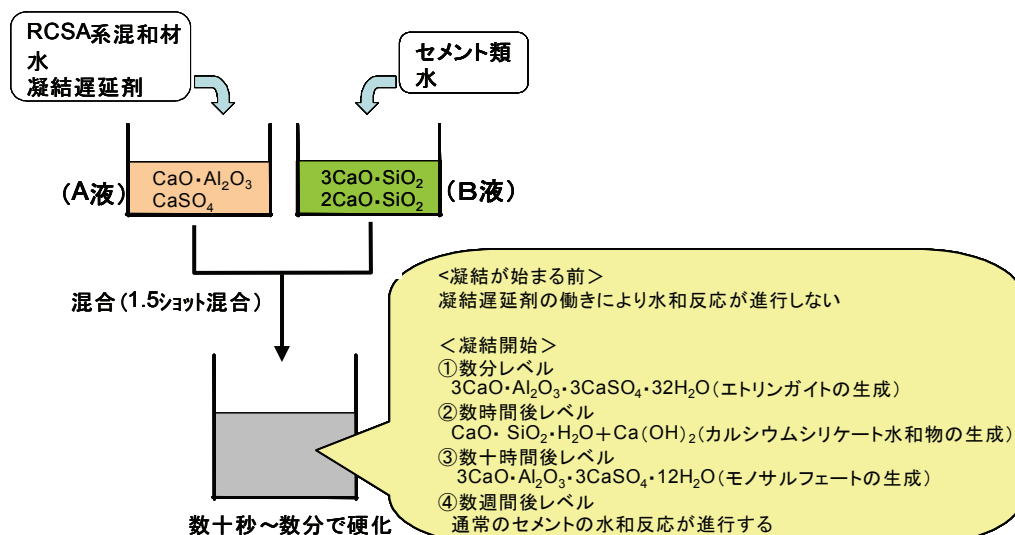


図-2.3.2 RCSA 混和材を用いた急硬性セメント注入材の硬化メカニズム ^{12) 13)}



写真-2.3.1 急硬性セメント注入材の硬化体の SEM 写真

2) 急硬性セメント注入材の変遷

1970 年頃に出現したジェットグラウト工法の一つに CCP 工法があるが、この工法の材料として、カルシウムアルミネートと石膏をセメントに添加しエトリンガイトを生成させることで急結・急硬性の高いセメントが開発され適用されていた。

昭和 48 年（1972 年）にアクリルアミドによる注入材料による井戸水の汚染事故の問題が起り、安全面からセメント系、水ガラス系材料が着目された時期でもあった。青函トンネルでは、海底部だけではなく陸上部の算用師工区においても大量の湧水に悩まされており注入を余儀なくされていたが、当時開発され海底部に使用され始めていた高炉コロイドセメントとモル比 2.2 を使用したセメント水ガラス注入材は、海底部においては海水と混合した状態での排水処理のため、海水の金属イオン（Ca、Mg 等）が凝集材の働きを呈するため排水処理が容易であったが、陸上部のように淡水の排水処理の場合は、水ガラスに含まれる珪酸分の処理が極めて難しいものであった。地元漁民から漁業に影響を与えない工事用排水処理について強い要望もあり、簡便で安全な排水処理のためには、セメント系の薬液注入材が望まれていた。

また、海底部で適用されたセメント水ガラス注入材は、他の材料に比べ耐久性は大きいものの、耐海水性について室内実験では一定の評価が得られたが、実施工においては将来的に必ずしも確信をもてる状況でないこともあり、耐久性を保持する新しい注入材料の開発の必要性があった。

このことから日本鉄道建設公団青函建設局が中心となりトンネル地山注入に適した急硬性セメント注入材の開発が始まり、カルシウムアルミネートと石膏をセメントに添加しエトリンガイト生成させる急硬性セメント注入材が生まれた。セメントも海底部で使用していた微粉末の高炉コロイドセメントと急硬材との組み合わせが、互いのブレン値に近いこともあり品質もよく、算用師工区では昭和 53 年から大々的に適用され、海底部においても本坑で一部施工がなされている。

2.4 結論

以上、注入工法の特徴を示すとともに、一般的な注入の目的と設計について概説し、薬液注入材の分類および本研究の主題であるセメント系薬液注入材（セメント水ガラス注入材、急硬性セメント注入材）について述べた。要約すると以下のとおりである。

- (1) 注入の目的としては、近年、従来から実施されてきた本体構造物の建設中の安全確保を目的とする「仮設注入」とは別に、本体構造物の安定および耐久性を考慮した「恒久注入」としての性能が求められている。
- (2) トンネル地山注入の場合、止水および地盤強化を目的として、セメント系薬液注入材の使用例が多いが、要求性能としてセメント系薬液注入材のホモゲル強度が大きいことおよび耐久性が優れていることに期待されている。
- (3) トンネルの注入範囲については、注入効果と経済性から、掘削半径(R_a)と注入半径(R)の比(R/R_a)は、青函トンネルを始めとして2～3を基本として設計されている。
- (4) 青函トンネルの注入材料として、モル比2.2の水ガラスと高炉コロイドセメントを使用したセメント水ガラス注入材が開発され、海底部に適用されたが、その後、より耐久性に優れ、かつ排水処理が容易な注入材料として、急硬性セメント注入材が開発されている。

参考文献

- 1) 財団法人 鉄道総合研究所 鉄道技術推進センター：薬液注入工法実施例集、2009. 3.
- 2) 日本国有鉄道：注入の設計施工指針 3-3-2 設計注入範囲、1986. 12.
- 3) 北川修三、石川文夫、服部修一、秋田勝次、上田昭二三他：青函トンネル技術のすべて、pp. 157-164, 鉄道界図書出版株式会社, 1986. 2.
- 4) 鈴木和也、児玉安彦：青函トンネルの施工(4)本州側海底部, トンネルと地下, Vol. 5, No. 4, pp. 20-31, 1974. 4.
- 5) 土木学会：青函トンネル土圧委員会研究報告書（昭和51年度～53年度）, 1977-1979.
- 6) 社団法人日本トンネル技術協会：薬液注入工事による環境汚染防止に関する調査研究報告書、1978. 2

- 7) 薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針：旧建設省官技発第 160 号、1974. 7.
- 8) 島田俊介、佐藤武、多久実：最先端技術の薬液注入工法、理工図書、1989. 6.
- 9) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会：最新地盤注入工法技術総覧，株式会社産業技術サービスセンター，pp. 32，1997. 10.
- 10) 草野一人編：薬液注入工法ハンドブック、吉井書店、p. 70、1983. 7.
- 11) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会：最新地盤注入工法技術総覧，株式会社産業技術サービスセンター，p. 88・p. 128，1997. 10.
- 12) 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.
- 13) 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ー無水セッコウー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.

第3章 セメント系薬液注入材の耐久性に関する既往の研究

3.1 セメント水ガラス注入材の耐久性について

3.1.1 概要

従来から注入材料は、水分が多い低粘性材料であるため仮設材料との認識が強く注入材料に関し耐久性を研究した報告はきわめて少ない状況にあった。近年、地盤の液状化防止対策や産業廃棄物の環境汚染防止対策等として永久構造物としての地盤改良の必要性が多くなり、耐久性を有した溶液型注入材料の開発¹⁾がなされている。図-3.1.1に溶液型注入材料のグラウトによる固結砂の長期強度を示すが、有機系や酸性シリカゾルは一軸強度が低下傾向を示すが、1,000日を経過しても近年開発されたコロイダルシリカの強度は増加している。ここでは、セメント系薬液注入材については扱っていないが、図-2.2.1で前述したようにセメント懸濁型(セメント水ガラス注入材)との比較試験を行っているなかでセメント懸濁型材料は、100日ではあるが、溶液型材料に比べきわめて強度の高い注入材料となっている。このため、セメント系薬液注入材は、比較的耐久性があるものと想定して、特段、研究がなされてこなかったのが実状と考えられる。

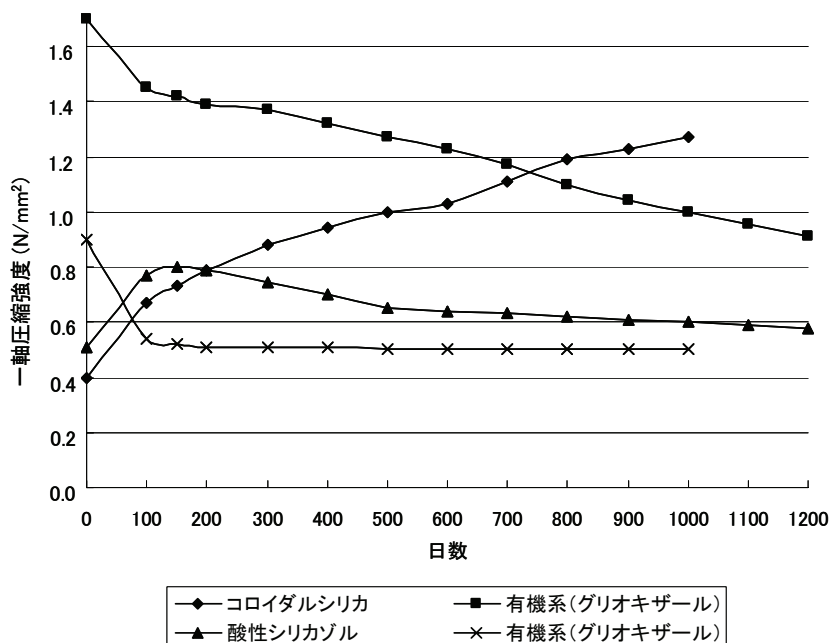


図-3.1.1 グラウトによる固結砂の長期強度（サンドゲル）¹⁾

3.1.2 耐久性

セメント系薬液注入材の耐久性を検討した事例としては前述したが、青函トンネル建設において、特に対海水性に重点を置き、セメント水ガラス注入材の耐久性を扱った報告²⁾が、日本では最初といってよい。この報告では、海底トンネル掘削のため、高压湧水下で適用される注入材料としてセメント水ガラス注入材に着目し、材齢1年までであるがセメント側、水ガラス側から耐久性について検討を加え、高炉スラグを55%添加した高炉コロイドセメントとモル比2.2の水ガラスの組合せが良好との結果を得ている。(4.2 断層を伴う高压湧水下の海底トンネルの施工事例：青函トンネル参照)

また、シールドトンネルに使用するシールド注入グラウトとして、普通セメントおよびスラグ・セメント系等のセメント水ガラス注入材の耐久性試験を実施した報告³⁾がある。普通セメント系水ガラス材料は、図-3.1.2に示すように清水中の養生においても1年以上経過すると強度が低下傾向を示すが、スラグ・セメント系材料は清水中では5年経過しても強度は低下せず、海水で養生（供試体を砂に埋め海水で満たした）した場合の例では、図-3.1.3に示すように3年経過しても耐久性が低下していない結果が報告されている。

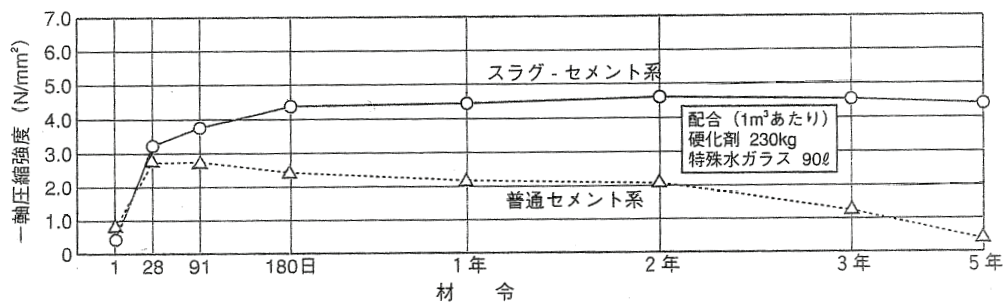


図-3.1.2 清水中における長期強度（耐久性）³⁾

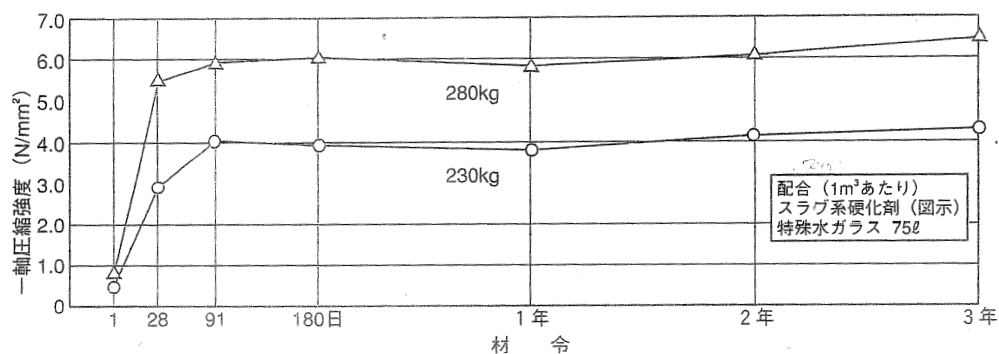


図-3.1.3 海水中における長期強度（耐久性）³⁾

3.2 急硬性セメント注入材の耐久性について

急硬性セメント注入材については、古川の研究において報告⁴⁾されているように、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、耐久性にも優れている。図-3.2.1に材齢1年までの高炉コロイドセメントの耐海水性長期強度に関する試験結果を示すが、十分な強度を保持している。

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角江らの報告⁵⁾があり、施工16年後における透水性試験においてもその品質が保持されていることが示されている。

図-3.2.2に調整池の基礎岩盤に対し、急硬性セメント注入材を使用してグラウトカーテンを施工した後に湛水した結果を示す。急硬性セメント注入材での補強直後に比べて補強後10～15年経過したのちの貯水位と浸透流量にはほとんど変化が認められず安定している。また、補強グラウチング完了後16年経過した原位置において、急硬性グラウトの耐久性を確認するためボーリングコアを採取したところ、写真-3.2.1に示すように岩の割れ目に密着して白灰色の急硬性セメント注入材が充填されていた。

写真-3.2.1のボーリングコアについて、X線回折法(XRD)とX線マイクロアナライザー法(EPMA)により、急硬性セメント注入材の耐久性を確認する試験を実施した。XRDによる分析結果として、図-3.2.3に割れ目と密着した境界部および図-3.2.4に充填されたグラウト内部を示す。いずれもグラウトの結合化合物成分としてエトリンガイトが優勢であり、急硬性グラウトの水和特性を密実に反映したものとなっている。

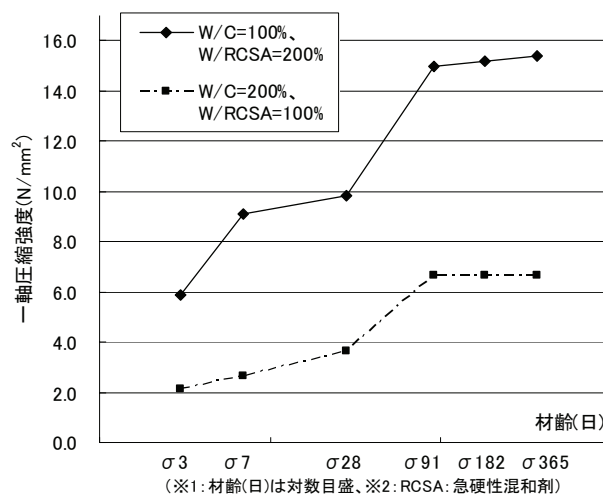


図-3.2.1 高炉コロイドセメントの耐海水性長期強度に関する試験結果⁴⁾

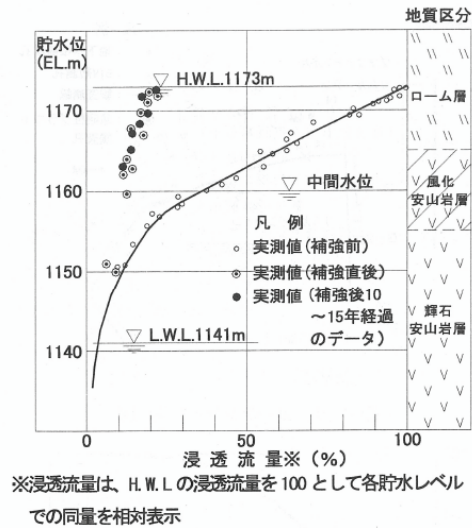


図-3.2.2 貯水位と浸透水量との関係⁵⁾



写真-3.2.1 補強グラウチング完了後16年経過した現位置から採取したコアの拡大写真⁵⁾

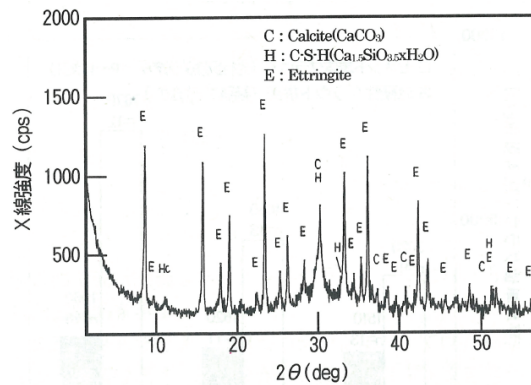


図-3.2.3 XRD 分析結果 (境界部)⁵⁾

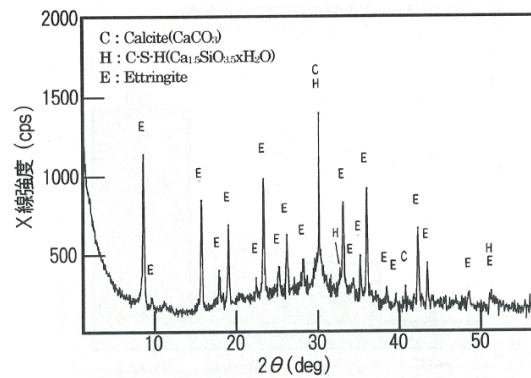


図-3.2.4 XRD 分析結果 (内部)⁵⁾

また、EPMA により充填グラウトを構成する元素濃度を分析した結果を写真-3.2.2(1)～3.2.2(4)に示す。グラウト内部の一部に注入時のグラウトの配合や地下水の混連と思われる部分はあるが、エトリンガイトを構成する主元素のいずれも割れ目境界部から内部に至り、元素濃度が変化する傾向が認められない。このため XRD による分析結果と同様に、構成元素の面からもどの部位においても変質や劣化がなく、注入後、水位変動の影響を受けながらも耐久性が保持されていると判断される。

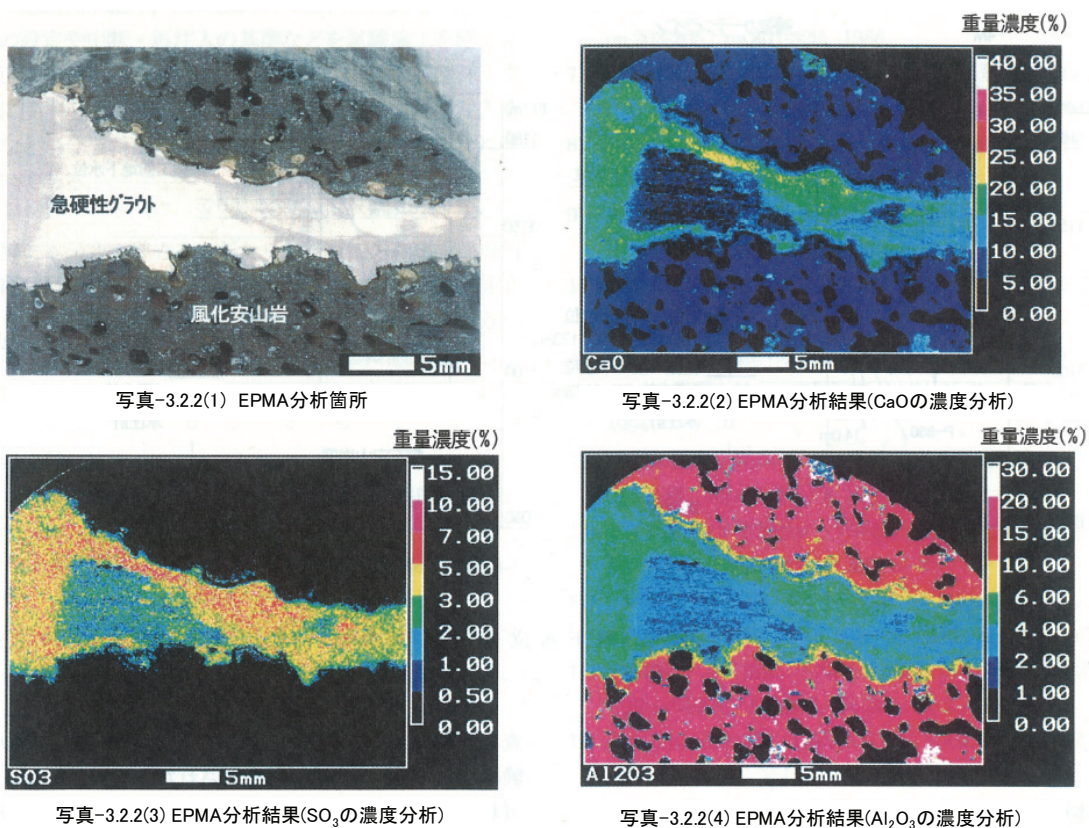


写真-3.2.2 X線マイクロアナライザー法(EPMA)による分析結果⁵⁾

また、青函トンネルおよび鍋立山トンネルで施工され採取した急硬性セメント注入材の長期材料特性についてきわめて耐久性が良好であることを既報⁶⁾により報告している。

3.3 結論

本章では、セメント系薬液注入材の耐久性に関する既往の文献から研究事例を示したが、要約すると以下のとおりである。

1) セメント水ガラス注入材について

- ① セメント水ガラス注入材については、溶液型材料に比べて強度の高い材料であるため、比較的耐久性があるものと想定され、注入材料の耐久性に関する既往の研究事例は少ない。
- ② 青函トンネル建設時には、材齢1年ではあるが、セメント水ガラス注入材の耐久性に関する調査・研究がなされ、高炉スラグを55%添加した高炉コロイドセメントとモル比2.2の水ガラスの組合せの配合が良好との報告がある。また、清水中では5年、海水中において3年経過しても高炉スラグを使用したスラグ・セメント系のセメント水ガラス注入材の圧縮強度は低下しないという結果が報告されている。しかしながら、いずれも供試体における室内試験結果の報告であり、実際に施工された試料における経年後のデータではない。

2) 急硬性セメント注入材について

- ① 急硬性セメント注入材は、配合を適正にとることで強度が高く、固結後の硬化体からの有害成分の溶出もなく、室内試験における材齢1年ではあるが、耐久性に優れているという報告がある。
- ② 調整池の基礎岩盤に対し、急硬性セメント注入材を使用して補強グラウチングを完了後、16年経過した原位置においてボーリングコアを採取し観察した報告では、岩の割れ目に密着して急硬性セメント注入材が充填されており、化学分析(X線回折法、X線マイクロアナライザー法)の結果においても急硬性セメント注入材の結合化合物成分としてエトリンガイトが優勢で急硬性グラウトの水和特性を密実に反映しており、EPMAによる分析結果でも構成元素の面からどの部位においても変質や劣化が見当たらず耐久性が保持されていると判断される。
- ③ ①および②において、注入された原位置での一軸圧縮強度等の物理試験結果データの報告はない。

参考文献

- 1) 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, pp. 27, 2008. 6.
- 2) 日本鉄道建設公団青函建設局: 長大海底トンネル用グラウトの耐久性に関する研究, 1976.
- 3) 三木五三郎, 下田一雄: 可塑状グラウト注入工法, 日刊工業新聞社, pp. 54-55, 2001. 7.
- 4) 古川裕: 青函トンネルにおける ES 注入の施工について, 日本鉄道建設公団第 17 回技術研究会記録, 1981. 11.
- 5) 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, 2003. 6.
- 6) 秋田勝次, 村上 明, 平野 健吉, 荒木 昭俊: 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, 土木学会トンネル工学論文集 第 19 巻, 2009. 11.

第4章 セメント系薬液注入材の施工事例

4.1 セメント系薬液注入材の施工事例に関する調査

本章では、過去の鉄道トンネルにおけるセメント系薬液注入材を使用した代表的な注入施工事例について述べる。調査の対象とした注入事例は、表-4.1.1 に示すように、それぞれセメント系薬液注入材について特徴のある5件の工事をとりあげるものとした。

青函トンネルでは、断層を伴う高圧湧水下の海底トンネルの止水および地盤強化のための注入について、セメント系薬液注入材の施工実績を示す。以下、中山トンネルにおいては、未固結で断層を伴う高圧湧水下の陸上トンネルの止水および地盤強化のための注入、飯山トンネルでは、3万m³にも及んだ大規模崩落の復旧のための注入、鍋立山トンネルでは、高圧ガスを含んだ超膨張性地山に対する注入、および葛老山トンネルでは、トンネル完成後の近隣ダム貯水の影響による増加湧水に対する止水注入（一般に後向注入と称している）について、セメント系薬液注入材の施工実績を示す。

表-4.1.1 鉄道トンネルにおけるセメント系注入材を使用した代表的な施工事例

路線名	トンネル名称	施工時期	注入工事の概要
津軽海峡線	青函トンネル	S39.5～S61.3	海底下の高圧湧水に対する止水 および地盤強化
上越新幹線	中山トンネル	S47.2～S57.3	高圧湧水を伴う未固結層に対す る止水および地盤強化
北陸新幹線 (長野・金沢間)	飯山トンネル (上倉・富倉工区)	H10.6～H19.12	大規模崩落部の復旧
ほくほく線	鍋立山トンネル	S48.12～S57.3 S60.3～H7.3	超膨張性地山に対する地盤強化
野岩線	葛老山トンネル	S48.12～S57.3 S58.3～S59.11(止水)	トンネル完成後の近隣ダム貯水 の影響による増加湧水に対する 止水

4.2 断層を伴う高圧湧水下の海底トンネルの施工事例：青函トンネル

青函トンネルの縦断面図を図-4.2.1に示す。青函トンネルの地質は、一帯が東北日本グリーンタフ地域に属し、新第3紀層の訓縫層、八雲層および黒松内層から成り、安山岩、流紋岩、玄武岩等の火山岩脈を伴っており、その中に多くの断層が介在している。また本坑における注入施工の概要¹⁾を図-4.2.2に示す。注入は先行掘削する側壁導坑から、その前方のトンネル断面部分全体を対象として実施し、手前側の注入ゾーンの不足が生じないように、傘状の3ステージ配置としている。この傘状配置の最も狭い範囲であっても、トンネル半径の3倍以上の注入範囲を確保することを基本としている。

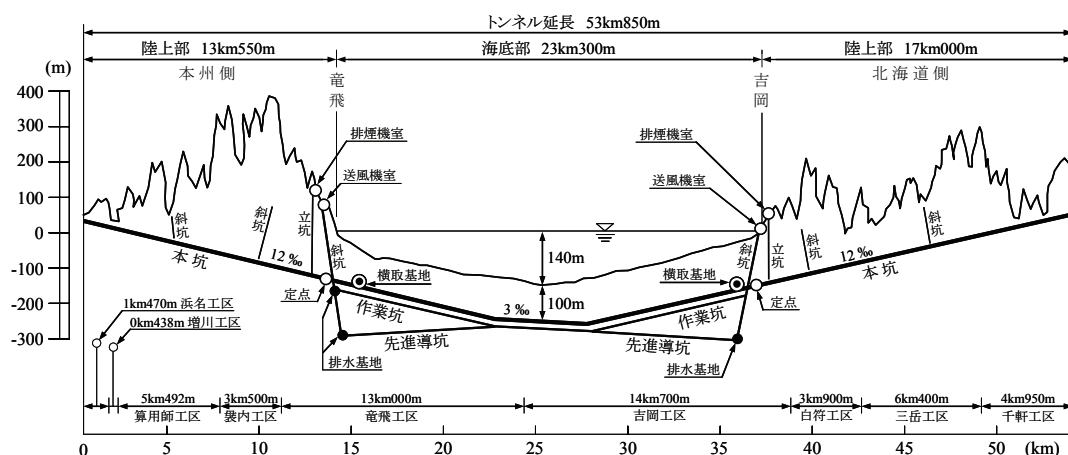
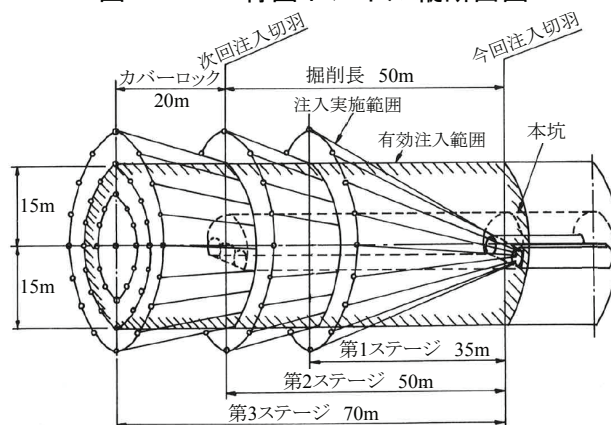


図-4.2.1 青函トンネル縦断面図

図-4.2.2 青函トンネルにおける注入施工の概要¹⁾

青函トンネルを掘削可能とする注入工法については、津軽海峡の地質を把握するための調査技術と同様、重要な技術と位置づけられ、昭和33年から青函トンネルの事前調査の一環として、北海道渡島大野で瀬棚層に対し、普通セメント、コロイドセメントを使用したセメント注入や溶液型注入材のクロームリグニン、ケミゼクト、ハイドロック等

の注入試験を開始し、セメント水ガラス(LW)やヨーステンの注入も明石市（明石層）や神戸市（神戸層）で実施されている。昭和34年には、セメントおよびセメント水ガラス注入が渡島当別の黒松内層で実施され、注入の効果が確認されている。このように昭和33年～昭和36年にかけて、表-4.2.1に示す青函トンネル事前調査注入試験が実施され、その結果、セメント注入を主としLWも併用すれば青函トンネルを建設することが可能であるとの想定がなされた。しかし、建設当初は最適な注入材料がまだ確立されておらず、調査坑の掘削を進める中で模索することとなった。

昭和39年5月には北海道方の調査斜坑の掘削が開始され、翌昭和40年1月には初めて普通セメントを用いた注入が実施された。また、昭和41年3月には本州方の調査斜坑の掘削が開始され、同年8月には普通セメントを用いた注入が実施された。昭和44年2月には、本州方の調査斜坑1,223mの断層において異常出水(16t/min)が発生したが、普通セメントおよびコロイドセメントを用いたセメント注入を主とし、一部にセメント水ガラス注入を実施することで、出水箇所を突破した。

こうした中で、ゲルタイム、強度および耐久性の改善を目的として高炉水砕スラグを混和したLW工法が次第に確立されてゆき、高炉コロイドセメントとモル比1.8の水ガラスを用いたLW注入の試験施工を経て、昭和49年からは高炉コロイドセメントとモル比2.2の水ガラスを用いたLW注入が青函トンネルの海底部へ本格的に適用された。

表-4.2.1 青函トンネルの事前調査注入試験²⁾

施工時期	対象地質	場 所	使用材料	備 考
① 昭和33年	新第三紀最上部層 (瀬棚層)	渡島大野	1. 普通セメント 2. コロイドセメント 3. クロームリグニン 4. ケミゼクト (水ガラス+アルミン酸ソーダ) 5. ハイドロック (水ガラス+重曹+ケイフ化ソーダ)	コロイドセメントの有効性 10m - 0.59N/mm ² 15m - 0.78N/mm ² で破壊
② 同 上	同 上 (明石層)	明石市大蔵谷	上記に加えて、 6. セメント水ガラス(LW)	バッカー（エクスパンション、エア）両方の試験 2. 0.6N/mm ² の耐圧止水壁の形成可能
③ 同上	新第三紀中上部層 (神戸層)	神戸市垂水人取 神戸市垂水下草	上記に加えて、 7. Joosten (水ガラス+塩化カルシウム)	岩盤の試験 バッカー
④ 昭和34年	同 上 (黒松内層)	渡島当別	セメント セメント水ガラス(LW)	LWの有効注入孔間隔3m 15m - 2 - 1.47N/mm ² 20m - 2 - 1.57N/mm ² で破壊
⑤ 同上	新第三紀火山岩類 (竜飛安山岩類)	竜飛	セメント	注入試験の効果確認 ダブルバッカー 注入孔間隔4m
⑥ 同上	新第三紀最上部層 (明石層)	神戸市垂水	②と同様	注入試験 材料の最終比較
⑦ 昭和35年	新第三紀中上部層 (神戸層)	淡路島岩屋	セメント水ガラス(LW) アクリルアミド(AM9)	高分子系注入材 凍結試験と併用
⑧ 昭和35～36年	新第三紀火山岩類 (竜飛安山岩類)	秋田県八森	④と同様	全断面注入

また、急硬性セメント注入材による注入は、陸地部の算用師工区において多量の湧水に遭遇した際、排水処理が簡易に行うことができ、耐久性が良いことから初めて採用され、同じ本州方の陸地部である婁内工区でも実施された。その後、青函トンネルの海底中央部に黒松内層とこれに挟在する砂層が出現したため、これら軟弱層に対し、止水および地盤強化の向上を図ることを目的として、補助的に急硬性セメント注入材による注入を実施した。

非粒子系溶液型注入材料の使用も、先進導坑等において多数実施されたが、いずれも固結強度が低いため、ゲル化した硬化体は大きな湧水圧に耐えることができずに破壊されて流されるなど、十分な止水効果が得られず、本格的に採用されるまでには至らなかった。

図-4.2.3に青函トンネルの調査坑の施工時から本坑掘削時までの注入材料の使用経緯を示す。注入材料は、当初、普通セメントやコロイドセメントを使用したセメント注入に加え一部薬液系の使用もみられたが、最終的には主に青函トンネルで開発された高炉コロイドセメント(ブレン値 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$)と低モル比(2.2)の水ガラスの組合せであるセメント水ガラス注入材が適用された。

また、一般部における代表的な注入の実施基準¹⁾を図-4.2.4に示す。削孔時に確認された湧水量に応じて注入開始時の水セメント比を決定し、その後の累計注入量に応じた注入圧を基本とした管理によって、段階的にセメント濃度を増加させる合理的な基準としている。しかしながら、慎重な施工を心掛けたものの、先進導坑および作業坑において、表-4.2.2に示すように異常出水によりトンネルは4回の水没を余儀なくされたが、本坑についての出水事故は一度もない。

昭和		39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	記 事
材料	セメント注入	普通セメント				コロイド																		
	LW注入	普通セメント				高炉コロイド																		
	セメントスラリー																							
	水ガラス																							
	その他																							

図-4.2.3 注入材料の使用経緯 ²⁾を加筆修正

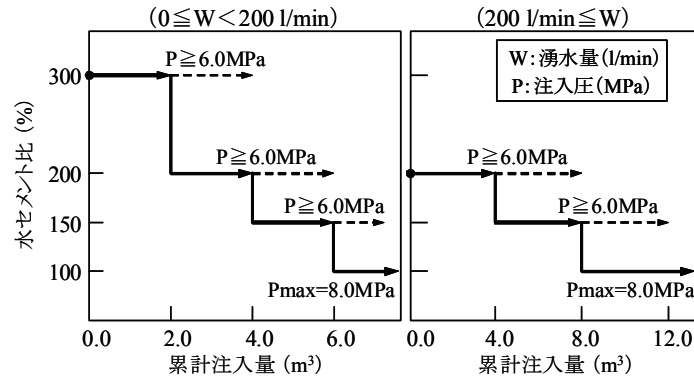


図-4.2.4 代表的な注入の実施基準（一般部）

青函トンネルでの注入施工実績を表-4.2.3に示す。先進導坑および作業坑で約25万 m^3 、本坑で約48万 m^3 、総量約73万 m^3 という膨大な規模の注入が実施されている⁴⁾。また、本坑における坑道1m当り湧水量と注入量の実績を図-4.2.5に示す。

表-4.2.2 青函トンネルにおける異常出水

工 区	竜 飛		吉 岡	
坑 道	斜坑	作業坑	作業坑	作業坑
出水切羽キロ程(水深、土かぶり)	1,223m(25m・215m)	16k890m00(78m・102m)	32k746m85(58m・134m)	31k667m95(76m・128m)
発 生 日	昭和44年2月13日	昭和49年12月5日	昭和49年1月8日	昭和51年5月6日
湧水量(m^3/min)	最大時	11	11	70
	最終時	5.3	0.3	16
総 湧 水 量 (m^3)	183,468	188,224	12,764	1,845,000
湛 水 量 (m^3)	5,300	1,600	9,000	121,000
土 砂 量 (m^3)	300	1,300	1,100	1,000
湛 水 区 間 (m)	196	130	880	作業坑3,015・本坑1,493
土砂埋没区間(m)	15	70	60	74
出水前の掘削工法	全断面発破工法、左側土平を縫地。支保工1.3m間隔。	全断面発破工法、ピック掘り併用縫地。1部増枠。150H馬蹄型インバート付支保工0.7～1.3m間隔。	150H馬蹄型インバート付支保工0.7m間隔を200Hイング支保工0.5m間隔に縫返し。	全断面発破工法、ピック掘り併用縫地。150H馬蹄型インバート付支保工0.7m間隔。
復 旧 対 策	止水注入・周壁導坑・直進	迂回坑	注入固結・直進	迂回坑
地 質	安山岩 破碎帯	凝灰岩、玄武岩の貫入により破碎	凝灰岩(砂質)破碎帯	破碎された凝灰岩

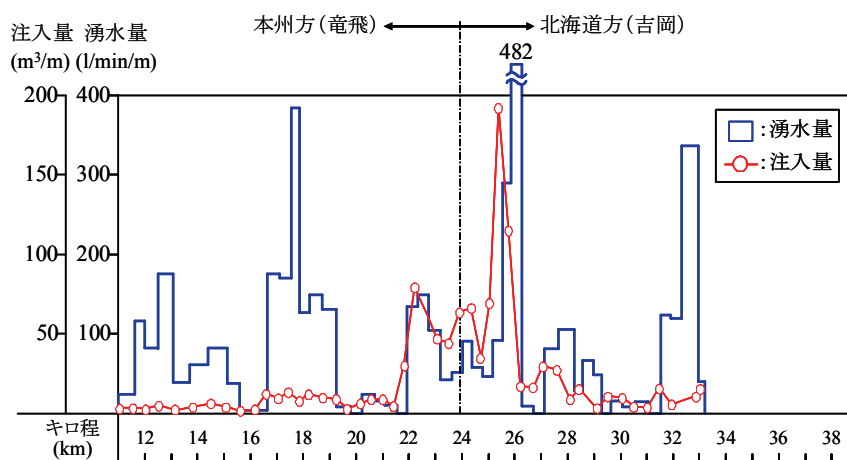
表-4.2.3 青函トンネルにおける注入施工実績³⁾

名称	工区	注 入 坑道延長 (m)	施工期間	注入回数 (回)	所要日数 (日)	所要方数 (方)	削 孔		注 入		
							孔数 (孔)	孔長 (m)	孔数 (孔)	注入量 (m ³)	平均 充填率 (%)
先進導坑	竜飛	10,313.8 (11,363.8)	1970.1.30 ～1982.12.15	216	2,141	5,842	7,681	379,590	7,553	100,952	2.38
	吉岡	8,988.2 (11,012.2)	1969.7.15 ～1982.12.10	159	1,673	4,738	4,546	346,064	4,375	78,831	2.44
作業坑	竜飛	8,821.3 (8,843.4)	1971.1.19 ～1979.9.9	164	1,040	2,711	3,783	229,533	3,693	27,755	0.76
	吉岡	6,910.5 (8,966.0)	1970.7.24 ～1980.1.30	124	899	2,422	3,723	235,485	3,720	38,662	1.11
本坑	竜飛	13,000.0 (13,000.0)	1972.10.16 ～1983.12.17	307	4,485	11,189	17,984	1,092,498	17,978	178,673	1.36
	吉岡	9,308.8 (14,700.0)	1976.2.12 ～1984.9.6	226	4,240	9,944	17,405	1,108,377	17,372	306,714	2.53

※（ ）内は坑道総延長を示す。

トンネルの掘削が最深部に向かうにつれ、地質が訓縫層、八雲層、黒松内層の順に新しい年代に変化し砂層の介在が顕著となった。そのため、注入の効果が発揮されにくい状況となり、特に砂層が顕著に介在したトンネル中央部では多量の注入を要していることがわかる。最大湧水量は、本坑最深部の北海道側において坑道1m当り482 l/min/mを記録している。

青函トンネルの注入の施工と効果については、先進導坑での実績から図-4.2.6に総注入量と総湧水量、および図-4.2.7に注入前と注入後を比較した透水係数分布について評価しているが、湧水量が多いと注入量が多くなるという相関関係がよく認められる。また、注入前のさぐり削孔時の透水係数は、地質等の違いによりばらつきはあるものの、注入後のチェック孔の削孔時には大きく改善されていることがわかる。

図-4.2.5 坑道1m当り湧水量と注入量の実績（本坑）³⁾

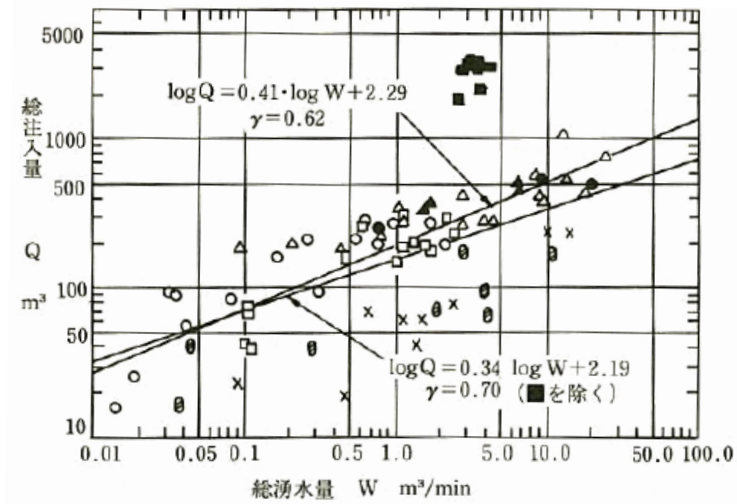


図-4.2.6 総注入量と総湧水量³⁾

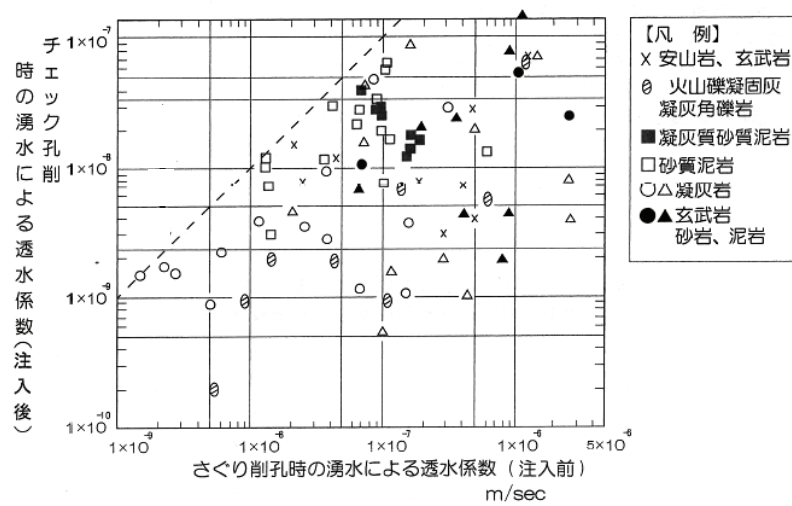


図-4.2.7 透水係数分布図（施工前と施工後の比較）³⁾

4.3 未固結で断層を伴う高圧湧水下の陸上トンネルの施工事例：上越新幹線、中山トンネル

4.3.1 概要

上越新幹線中山トンネルは、延長 14.83 km の長大山岳トンネルであり、第三紀から第四紀に活動した子持山、小野子山の標高 400～650m の鞍部を土被り 200～400m で貫いている。昭和 47 年 2 月に工事に着手したが、地形上の制約から 5 工区中 3 工区が鉄道トンネルでは例のない約 350m の深い立坑を作業坑として採用せざるを得なかったことや、極めて複雑な地質分布と高被圧多量地下水を伴う未固結な火山噴出物堆積層等に遭遇したことから、これまでの経験のない大出水事故が発生するなど難工事を強いられた。施工中における一部区間のルート変更や地盤注入等による困難な条件を克服し、約 10 年の歳月を要して完成した。

中山トンネルの地質概要を図-4.3.1 に示す。トンネルの地質は、基盤をなす第三紀層と同時期に貫入した安山岩、閃緑玢岩の貫入岩類およびこれらの上部に堆積した第四紀の火山噴出物堆積層からなる。火山噴出物堆積層は、下位から八木沢層群、綾戸安山岩類、古子持火砕岩層等に区分されるが、大部分が未固結であり約 250m の水頭を有する多量の地下水で飽和されている。

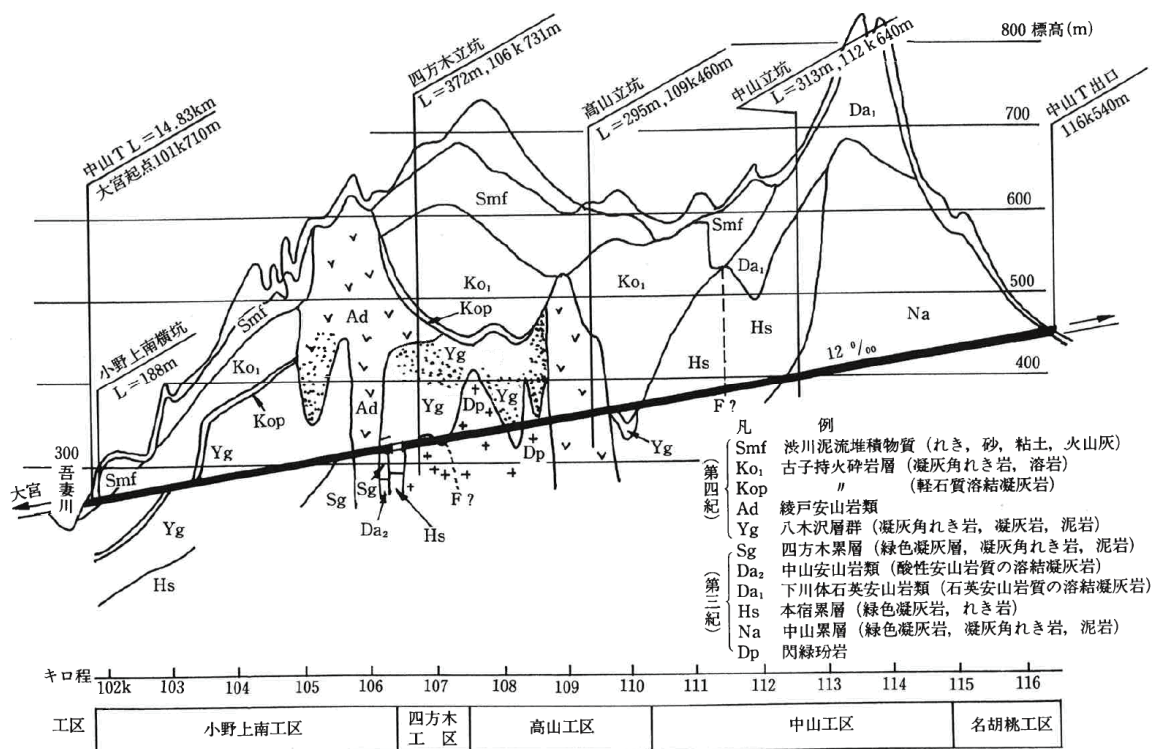


図-4.3.1 中山トンネルの地質概要 5)に一部加筆

特に本坑付近に広く分布する八木沢層群は、凝灰角礫岩を主体として安山岩溶岩、火山礫凝灰岩を挟在する未固結な地質であり、高水頭の多量の地下水で飽和されていることから、最も容易に崩壊流出する性状となっている。四方木、高山工区では、八木沢層群の透水性にばらつきがあることと、立坑のため揚水能力にも限界があることから、水抜き坑の適用が難しいと判断し、薬液注入による止水および地盤改良が掘削のための補助工法として全面的に採用された。

4.3.2 中山トンネルにおける注入工事

四方木工区では、八木沢累層が本坑ルートにわたって分布することと、本線右には閃緑玢岩の分布が確認されたことから、薬液注入を全面的に採用した本坑を施工すると同時に迂回坑等を進めていた。昭和54年3月に至って、閃緑玢岩を破って瞬間最大190m³/minの異常出水に遭遇し、坑道全てが水没した。この復旧にあたっては、出水箇所直上の地表部から出水坑道の閉塞や周辺地盤の止水注入を行い対応した。

一方、高山工区は、本坑到達後、堅硬な地盤に恵まれて順調に進捗したが、大宮方108km000m付近の400m間に四方木工区と同様の八木沢累層が確認され、薬液注入による全体工期の延びを短くすべく迂回坑を経て起終点両側から掘削を進めることとした。大宮方からの掘削中、108km125m切羽で、層厚の漸減する閃緑玢岩を破って八木沢累層からの大量湧水が発生し、既に貫通していた下流側の四方木工区を含めて水没する事態となった。

両工区の工程が大幅に遅延するところとなり、八木沢累層を極力迂回するためのルート変更を行うとともに、本坑に残る八木沢累層区間に対する復旧後の本坑切羽での注入時間を短縮すべく、四方木工区出水事故で効果的であった地表部からの注入工事の経験を踏まえ、予め地表部からの地盤注入を行い止水と地山改良を目的とする地上注入が計画された。

4.3.3 注入計画

地上注入は、四方木、高山両工区の出水事故復旧のために地表から実施した坑道を閉塞するための注入に引き続き、トンネルの完成までの工程をできるかぎり短縮するため事前に本坑直上地表部から大型ボーリング機で鉛直に注入孔を削孔し、対象地山を注入する特殊な工事であった。注入の効果については、本坑切羽到達後に本坑をブロック区分して止水の状況をチェックし、必要によりさらに地盤補強注入を行って掘進することとした。

1) 注入範囲および注入孔配置

復旧後の本坑掘削工法は、出水以前からの側壁導坑先進上部半断面工法を基本とし、国内で初めて中山工区においてNATMを注入地山に適用することとしたため、注入範囲は、ロックボルトの打設を可能とすることと、注入孔間隔を考慮して、幅30m、高さ23mの矩形断面とした。図-4.3.2に注入範囲と注入孔配置図を示す。

孔間隔は、坑内注入時点での孔配置や立坑での孔配置を踏まえ、さらに地質分布が水平堆積傾向にあることと、坑内注入に比べて注入材の浸透範囲が大きくなると想定されたことから、削孔機械の配置も考慮し3mを標準とした。

注入孔は360mの深さとなるため、500～1,000m級の試錐機を用い、孔壁保持のためにケーシングを注入上端まで挿入した。また、孔曲がりを抑制するため、75～150mまでをトリコンビットで、それ以深をワイヤーライン工法で削孔することとした。また、注入孔の正確な位置把握のため、ジャイロスコープによる孔曲がり測定を実施した。

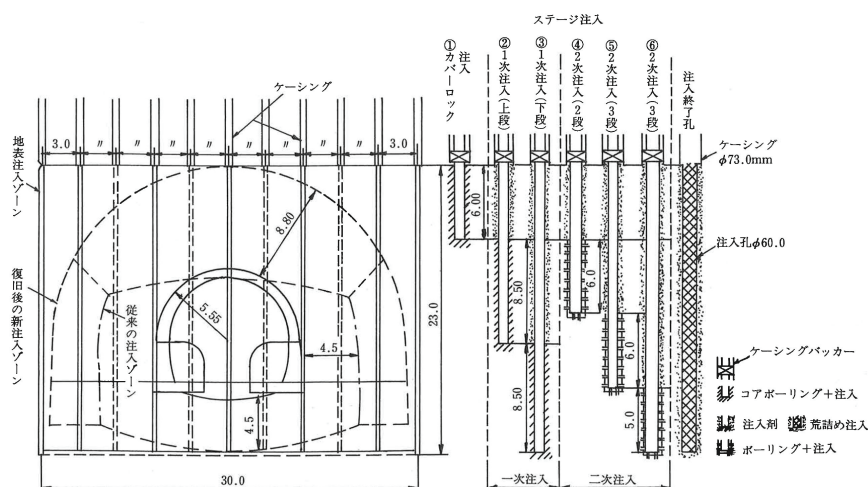


図-4.3.2 注入範囲および注入孔配置図⁶⁾

2) 注入材料の選定

注入材の標準配合を表-4.3.1に示す。注入は、所定の注入圧が確保できるよう、ケーシング周りの充填を図る目的のカバーロック注入をセメント水ガラス注入材(LW)と溶液型注入材を用いて行い、次いでLWでの脈状注入を目的とした1次注入、そして溶液型での浸透注入による止水性を確保するための2次注入に区分することとした。

表-4.3.1 注入材の標準配合 ⁷⁾を加筆修正

(a) 懸濁型注入材 (配合 1m³あたり)

材料名	W/C (%)	A液(500ℓ)			B液(500ℓ)		ゲルタイム (20℃)	一軸 圧縮強度 (N/mm ²)	使用セメント他	記 事
		セメント (kg)	水 (ℓ)	混和剤	水ガラス (ℓ)	水 (ℓ)				
3号LW	200	215	430	-	375	125	1分	0.5	普通ポルトランドセメント、混和剤マイティ150R	水ガラス (モル比 3.2)
㊟LW	200	215	430	-	375	125	3分	1.0	同 上	水ガラス (モル比 2.2)
CLW	200	215	430	2.2	375	125	3分	1.5	高炉コロイトセメント、混和剤マイティ150R	—
MC-LW	200	215	430	4.3	375	125	3分	5.9	マイクロロイトセメント、混和剤MCヘルパー	高山工区

(b) 溶液型注入材 (配合 1m³あたり)

材料名	A液(500ℓ)		B液(500ℓ)				ゲル タイム (20℃)	一軸圧縮強度 (N/mm ²)		有機 無機 の区 分	記 事
	水ガラス (kg)	水(ℓ)	硬化剤	促進剤	添加剤 (ℓ)	水 (ℓ)		ホモゲル	サントゲル		
CW-3	375	125	100 ℓ	11.3 ℓ	0.2	388.5	10分30秒	0.3	0.8	有機	四方木
LG-3	250	250	10 kg	22~25 kg	-	410	10	0.1	0.4	無機	高山

注1) CW-3…硬化剤：グリジオサル、促進剤：リン酸

2) LG-3…硬化剤：硫酸マグネシウム、促進剤：重炭酸ナトリウム

ただし、LG-3の場合、硬化剤、促進剤の区分は便宜上であり、両者の反応でゲル化する。

3) 注入管理

各注入材の切換えは、図-4.3.3に示すフローに従って実施した。懸濁型注入材のセメントミルク濃度は、注入時間、注入量と注入圧の変化により適宜変更したが、全体としては概ねW/C=200%程度とした。

注入終了の判断については、坑内からの注入時のように残湧水量や湧水位置の直接的な確認が困難であることから、各ステージの2次注入終了段階で注水試験を行い、 7.3 N/mm^2 （箇所によっては 7.8 N/mm^2 ）以上に改良されていることを確認することとした。地表注入の施工管理としては、注入量を目安とし、注入圧による管理を主体的に実施した。

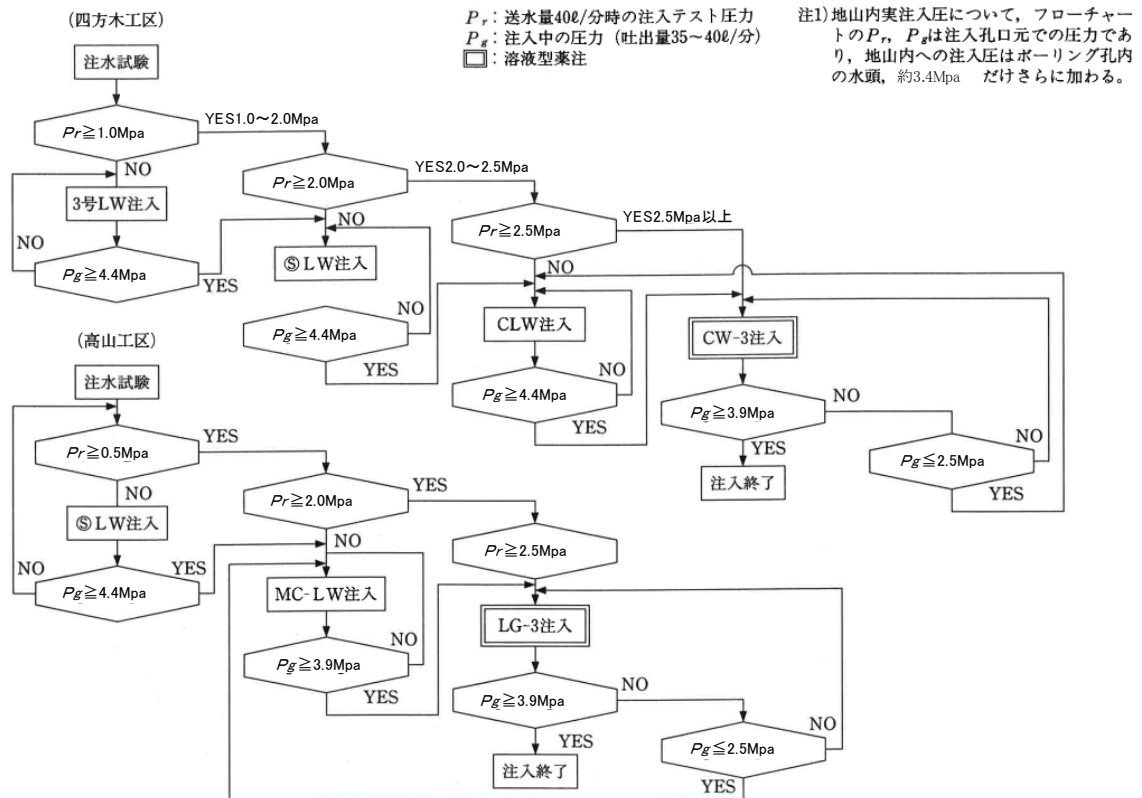


図-4.3.3 注入材料と注入圧力フロー図⁷⁾

4.3.4 注入実績

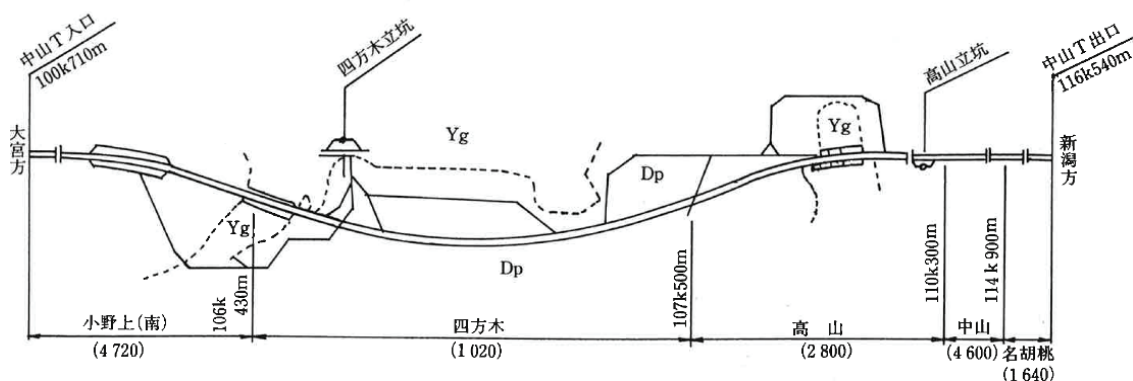
地表注入は約1年以上にわたり実施され、最終的な総注入量は約158,760m³であった。

表-4.3.2に地表注入の実績を示す。

地表注入の止水性の確認は、本坑切羽からのチェック孔によることとし、本坑延長を6mのステージに分割し、各ステージの断面毎に約20孔を配置した。チェック孔の基準は、0.5ℓ/min/m以上、または1箇所集中湧水量5ℓ/min以上を不合格とし、不合格のステージ周辺に補強注入を行った。坑内における注入実績を表-4.3.3に示す。坑内におけるチェックの結果、四方木工区および高山工区における不合格ステージ数の率は最大でも17%であり、地表注入が効果的に実施されたことが確認できた。従来の切羽からの注入では4～5ヶ月程度の注入期間を要するものが、地表注入ではチェックも含め2ヶ月以下の期間で掘削可能となったことから、地表注入は工程短縮にも寄与したと考えられる。

表-4.3.2 地表注入実績一覧表⁵⁾

区 間	始 点	側 側		106k422m 106k566m	106k638m 106k692m	108k052m 108k079m	108k079m 108k121m	108k100m 108k151m	108k151m 108k299m	計	
	延 長	m		144m	54m	27m	42m	51m	78m		
注入対象地山量			m³	坑道閉塞	129,800	37,800	5,500	30,200	44,700	73,000	255,300
ボーリング本数			本	29	258	73	16	71	105	120	643
注 入 量	モルタル		m³	(354)				(2,812)		(2,812)	
	懸 濁 型	CM・CB	〃	(3,890)	41	292		253	6,528		7,114
		AG	〃								
		CG-3	〃	(26)							
	L W 型	LW	〃	(489)	1,566	1,071	14	290	1,171	1,133	5,245
		CLW	〃	(761)	372	563			830		1,765
		SFLW	〃	(102)	487	95					582
溶 液 型	MCLW	〃				1,842	7,719	10,128	14,207	33,896	
	LG-3	〃									
	CW-3	〃	(89)	41,600	13,072					54,672	
	ES-3	〃	(184)					(527)		(527)	
計			〃	(5,895)	44,036	15,123	3,165	18,306	(3,339) 36,205	41,925	(3,339) 158,761
注 入 量			%		33.9	40.0	57.5	60.6	81.0	57.4	



中山トンネルの注入においては、透水性の小さい八木沢累層等への注入施工を考慮し、注入材料を懸濁型のセメントスラリー、セメント水ガラス注入材および溶液型注入材と注水試験の結果から、注入材料の使用を適切に区分している。このことは、必要以上に注入量が過大になることを避けて経済的な施工に努めるとともに、注入材料の強度をできるだけ大きいものとし、地山の補強を図っている。また地上から 360m の長孔への注入であるにもかかわらず、良好な注入効果を上げた点は特筆すべきものがある。

このように中山トンネルの施工における注入工法への貢献は、地盤条件にあった注入材料や施工方法の採用等、技術的に極めて大きいものがあるが、注入に関する技術的観点以外にも中山トンネルは大規模なプロジェクトを計画する際に行われる事前の地質調査とルート選定の重要性を改めて示す事例でもあった。上越新幹線の建設以前に計画された鉄道整備計画の中には、事前の調査がほとんどなされず、2つの拠点間をほとんど直線で結んで計画された路線もみられたが、中山トンネルはそのような路線を象徴するような直線ルートとなっている。

図-4.3.4 に当初計画ルートの掘削を開始してから得られたデータにより、最終的に決定したルートを示すが、ルート選定時に的確な事前調査に基づく情報が得られていれば、実際よりも工程の短縮や工事費の縮減が図られたと考えられる。

中山トンネルの最終決定ルートは、図-4.3.4 に示すように曲線半径 1,500m を使用し、注入工事を必要とする八木沢累層区間を通過する延長を短縮したものであるが、結果的に設計速度を 160km/h に低下させざるを得ないこととなった。最終的に 10 年もの工期および 1km あたりの工事費が 90 億円以上を要した。そのため、当時、中山トンネルと地質条件が類似していた榛名山麓等におけるトンネル工事費が 35 億円/km であったことを考えると、著しく高いものであった。

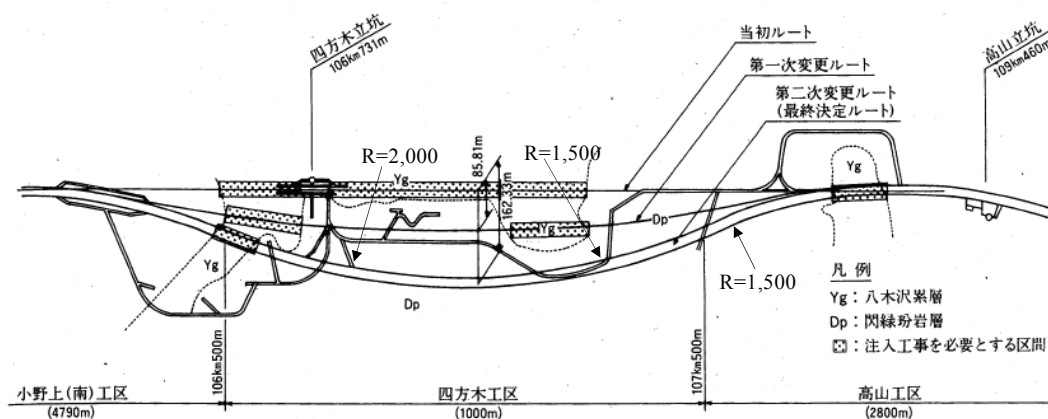


図-4.3.4 概略地質平面図⁷⁾

工 区 名		小野上(南)工区		四 方 木 工 区				高 山 工 区					
注 入 位 置 名		T-1	S-1	S-2-1	S-3	0-2-1	0-2-2	0-3	0-4	0-6			
注 入 範 囲		全 断 面	全 断 面	全 断 面	上 半	上 半	上 半	上 半	全 断 面	全 断 面			
注 入 種 別		チェック+補強	チェック+補強	チェック+補強	新規+チェック+補強	チェック+補強	チェック+補強	チェック+補強	チェック+補強	チェック+補強			
注 入 区 間	杆 程	106km410m0	106km548m0	106km566m0	106km620m0	108km985m6	108km085m6	108km100m0	108km134m0	108km190m0			
		106km462m0	106km500m0	106km548m0	106km692m0	108km120m6	108km120m6	108km134m0	108km168m0	108km230m0			
	延 長 ・ 切 羽	52.0m, 注入基地	48.0m, 左右導坑・上半	18.0m, 注入基地	72.0m, 注入基地	35.0m 旧左導坑	35.0m右導坑	34.0m, 左右導坑	34.0m, 左右導坑	40.0m, 左右導坑			
使 機	機 種	L-24, SN-76	L-24, SN-76	L-24, SN-76	L-24, SN-76	ビューラー	ビューラー	ビューラー	ビューラー	ビューラー			
用 量	台 数	3, 8	12	7, 7	7, 5	3	2	6	6	8			
注 入 対 象 地 山 土 量		10,500m ³	26,400m ³	9,900m ³	8,170m ³	6,300m ³	4,200m ³	10,500m ³	19,340m ³	21,820m ³			
① 新面 規注 入受 入受 数定 量の 毎 全合	孔 数	(300孔)	(340)	(170)	(162)	(82)	(58)	(140)	(317)	(372)			
	さ く 孔 延 長	(12,903m)	(17,380)	(3,090)	(7,532)	(2,330m)	(2,185)	(3,545)	(13,100)	(15,848)			
	ス テ ー ジ 数	(971)	(1,580)	(510)	(903)	(185)	(150)	(335)	(1,075)	(1,268)			
	注 入 量	(2,100m ³)	(5,280)	(1,980)	(2,696)	(1,260m ³)	(840)	(2,100)	(3,870)	(4,364)			
② チック補 強工 工 量	チック補強 計	39	54	21	35	19	17	33	53	51			
	チック補強 計	179	—	54	47	12	9	26	89	123			
	さ く 孔 延 長	1,676	1,865	381	3,521	527	464	702	2,065	3,150			
	ス テ ー ジ 数	150	234	63	78	141	264	11	275	41			
注 入 量	61	550	611	685	171	194	365	454	18	472			
不 合 格 孔 数		31孔	4	13(11)	2	3	2	12	(10)	14			
不 合 格 孔 数 率		79%	4/ 54=7	52	6	16	2/13=15	36	10/28=36	27			
不 合 格 ス テ ー ジ 数		90	5	13(11)	2	3	2	16	10	30			
不 合 格 ス テ ー ジ 数 率		60%	5/234=2	17	1	5	2/37=5	13	10/147=7	13			
地 山 注 入 率		(5.8%)	2.6	3.7	33.0	1.8%	(3.9)	6.1	(6.9)	9.7			

表-4.2.3 坑内注入実績一覧表⁷⁾

4.4 崩落後の復旧施工事例：北陸新幹線、飯山トンネル

4.4.1 概要

飯山トンネルは、平成26年度末完成予定の北陸新幹線（長野・金沢間）の飯山駅と上越駅（仮称）の間に位置する延長約22.2kmの山岳トンネルである。図-4.4.1に位置平面図を示す。平成15年9月、図-4.4.2に示すように、最も起点側の工区である上倉工区において、施工中に大規模なトンネル崩落事故が発生した。

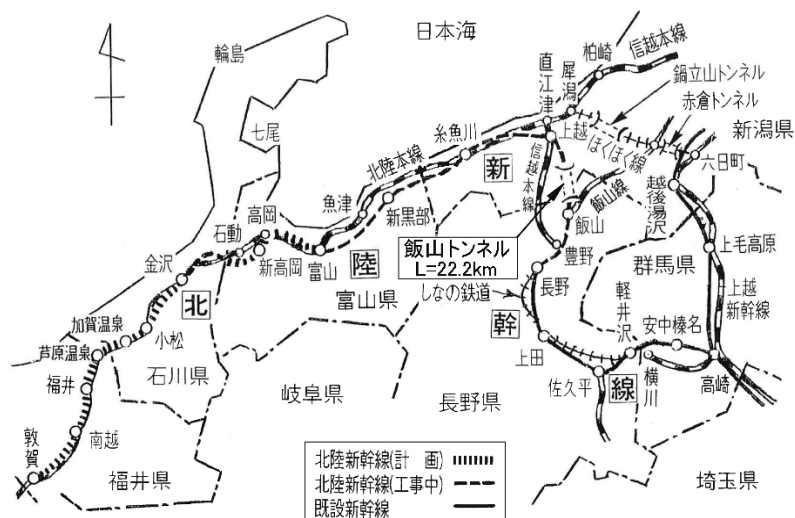


図-4.4.1 位置平面図 8)を加筆修正

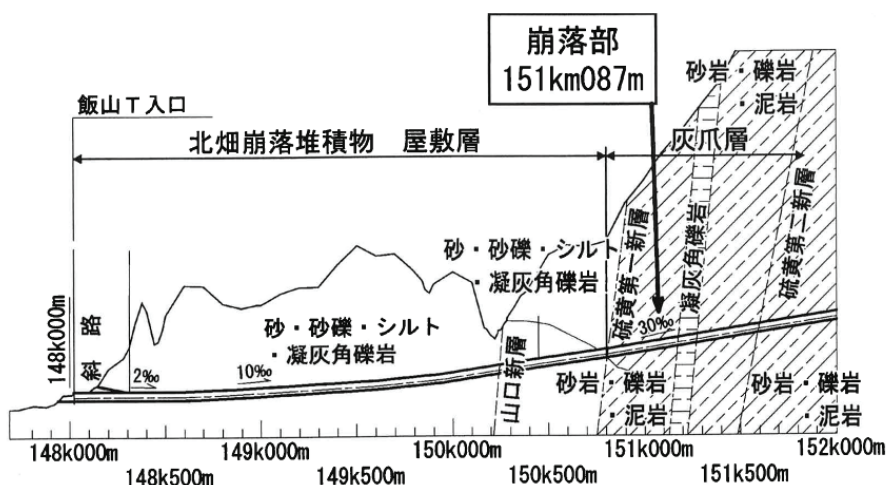


図-4.4.2 地質縦断面図 9)

崩落発生箇所の状況としては、図-4.4.3に示すように土被りが190mと大きいにもかかわらず、地表面が直径50mもの範囲で陥没し、坑内へ約3万m³の土砂が流出するという甚大な崩落事故であった。

飯山トンネル付近の地質は、北部フォッサマグナと呼ばれる地帯に位置し、褶曲構造が発達し変形が顕著な箇所が多いだけでなく、図-4.4.2に示したように地層がほぼ垂直に立って高压湧水を胚胎している箇所も多い。崩落した第四紀更新世の屋敷層から第三紀鮮新世に属する灰爪層（泥岩・砂岩・礫岩）に入った箇所においては、その後のボーリング調査により、図-4.4.4に示すように崩落部付近の2つの泥岩質の断層（F1、F2）とそれに挟まれた未固結の砂岩層の存在が確認された。また、未固結の砂岩層は、約100mの高水頭の地下水を有することも判明した。

事故原因については、泥岩質のF1、F2断層により遮蔽された高水頭の地下水が、トンネル掘削により薄くなったF1断層を最初に破壊し、F1～F2断層間の未固結状となっていた砂岩層が高压地下水とともにF1断層を突き破ることによって突発的な事故が発生したものと推定された。

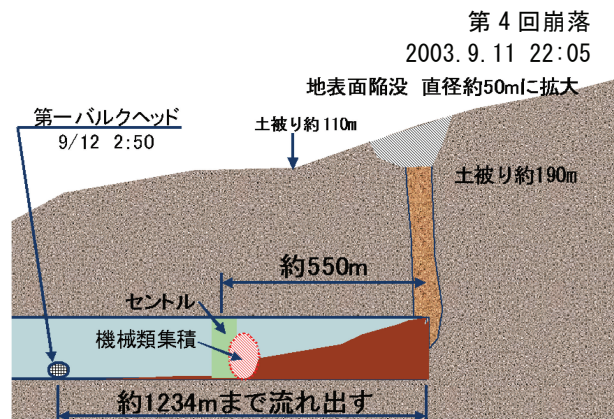


図-4.4.3 崩落発生状況（模式図）⁹⁾

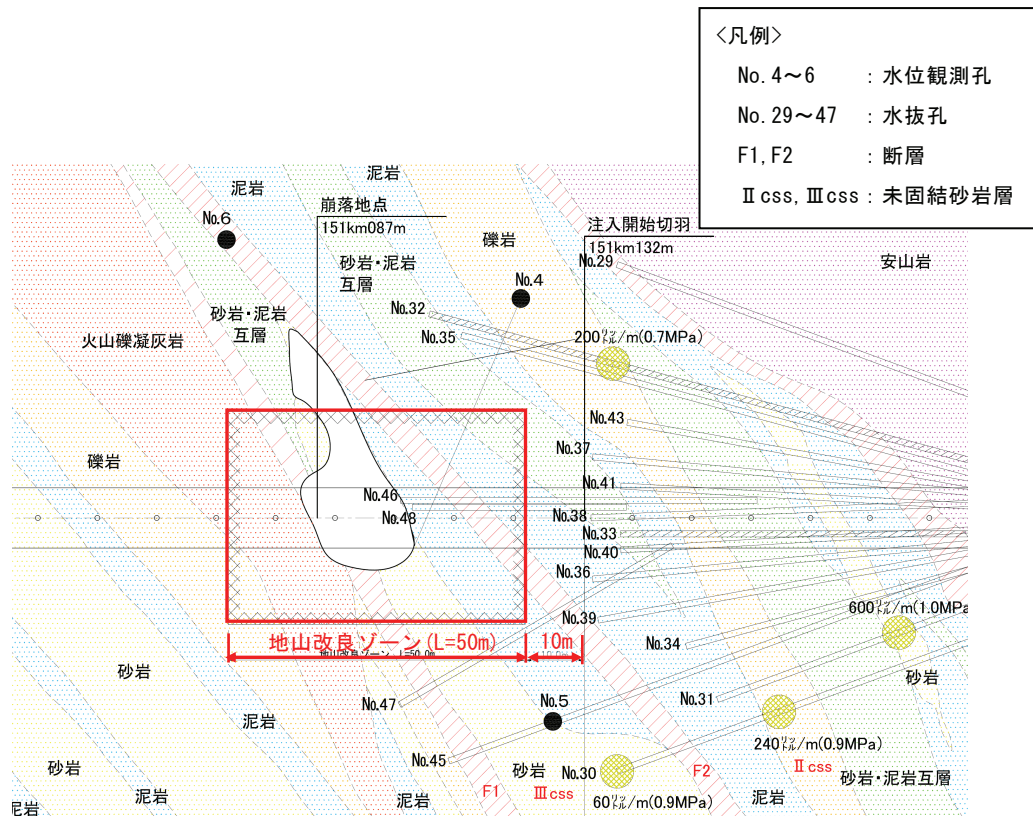


図-4.4.4 崩落部付近の地質平面図⁹⁾を加筆修正

4.4.2 崩落部の復旧

崩落部の復旧上の最大の問題としては、高圧湧水を伴った砂岩・泥岩互層の複雑な地層が、トンネル直上において土被り 190m にわたり地表に達するまで陥没して緩んでいることである。このため、まず陥没箇所をエアモルタルで埋め戻すとともに、水位低下を目的とした水抜きボーリングと、緩んだ地山の強化とトンネル周辺の止水性向上を目的とした地山注入を主要な復旧対策工とした。

注入を実施する工区については、崩壊切羽側の上倉工区から実施するよりもトンネルの貫通が近い隣接の富倉工区からの方が、崩壊土の削孔が不要であり削孔長が短いことおよび切羽からのカバーロックを安定して確保できるなどの利点が多いため、図-4.3.5 に示すように本格的注入は富倉工区から基本的に実施するものとし、上倉工区からは支援する形で崩壊部分の粗詰注入を行うものとした。

4.4.3 注入の設計と注入材料の選定

注入範囲については、大きく崩壊し地山が緩んでいることから、上半部、下半部ともにトンネル半径の 3 倍の範囲を注入するものとし、注入材料についてもホモゲル強度が高く、耐久性のあるセメント系薬液注入材を主に考慮するものとした。

上倉工区からの粗詰注入は、地山の崩壊状況を考慮し止水性と充填の効率が高いセメント水ガラス注入材を主に考え、富倉からの注入は、強度があり耐久性の良好な急硬性セメント注入材を主に注入を実施するものとした。

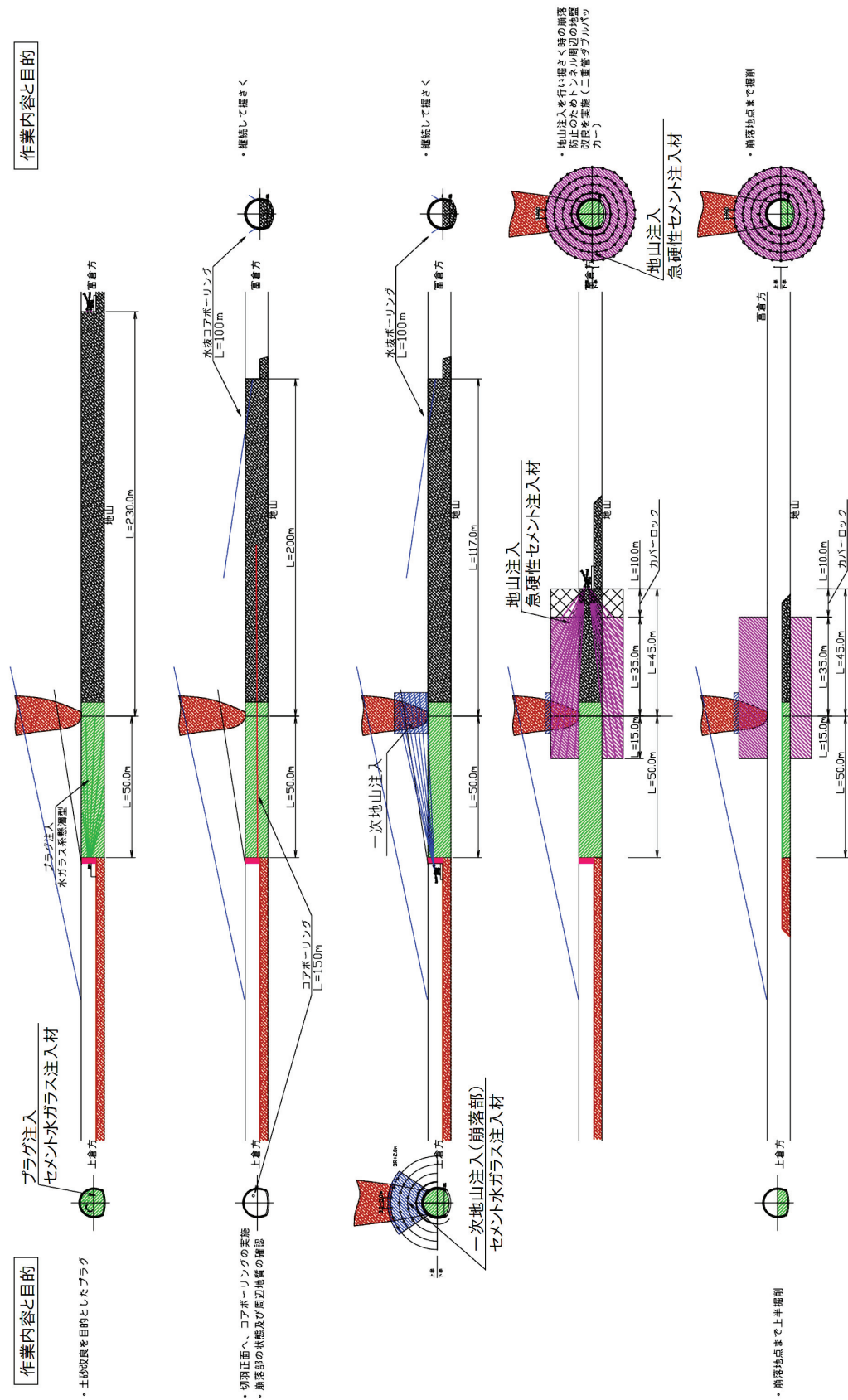


図-4.4.5 崩落部の施工順序⁹⁾を加筆修正

4.4.4 注入材料の配合と注入モード

上倉工区から崩壊箇所への注入は、まずグラウトのリーク防止のためにバルクヘッドを築造しトンネル坑内の流出土砂を固結させるプラグ注入を実施した。プラグ注入は、エアーモルタルでバルクヘッドの背面を充填したのち、水ガラス 3 号と高炉セメントとの組み合わせたセメント水ガラス注入材を用いて、表-4.4.1 に示すⅠ配合を主に注入し所定注入量が得られない場合はⅡ配合を使用するものとした。粗詰注入は、表-4.4.2 に示すⅡ配合を標準に注入し、状況に応じ高炉セメントの W/C を可変させたⅠ配合、Ⅲ配合を使用しゲルタイムを適度にとったセメント水ガラス注入材を用いるものとした。注入最終圧力は、湧水圧力の 3 倍を標準とし概ね 3.0MPa とした。

富倉工区からは、崩壊箇所の本格的な注入ということで、将来のトンネルの品質を考慮してホモゲル強度が大きく耐久性もある急硬性セメント注入材を基本とした。注入方式は、きめ細かい品質の確保のために、2 重管ダブルパッカー方式を採用することとした。表-4.4.3 に注入材の標準配合を、図-4.4.6 に注入の管理基準を示す。

表-4.4.1 セメント水ガラス注入材の配合表

注入材料		Ⅰ 配合 (1m ³ あたり)	Ⅱ 配合 (1m ³ あたり)
A 液	水ガラス 3 号	200 リットル	200 リットル
	水	300 リットル	300 リットル
B 液	硬化促進剤	50kg	—
	高炉セメント (B 種)	187.5kg	187.5kg
	水	405.5 リットル	438.5 リットル
ゲルタイム		1 分 30 秒	3 分 30 秒
ホモゲル強度 (σ_{28})		4.0N/mm ²	4.0N/mm ²

表-4.4.2 1次地山注入の配合表

注入材料		I 配合 (1m ³ あたり)	II 配合 (1m ³ あたり)	III 配合 (1m ³ あたり)
A 液	水ガラス 3 号	200 リットル	200 リットル	200 リットル
	水	300 リットル	300 リットル	300 リットル
B 液	高炉セメント (B 種)	312.5kg	187.5kg	125.0kg
	水	397.5 リットル	438.5 リットル	459.0 リットル
ゲルタイム		1 分 30 秒	3 分 30 秒	4 分 30 秒
ホモゲル強度 (σ 28)		6.0N/mm ²	4.0N/mm ²	—

表-4.4.3 急硬性セメント注入材の標準配合

高炉コロイド セメント量 (kg/500ℓ)	急硬材 混和量 (kg/500ℓ)	セッター 添加率 (対急硬材)	ゲルタイム	圧縮強度 (N/mm ²)	
				7 日	28 日
250	50	1.0%	27 分	平均 0.5	平均 0.9

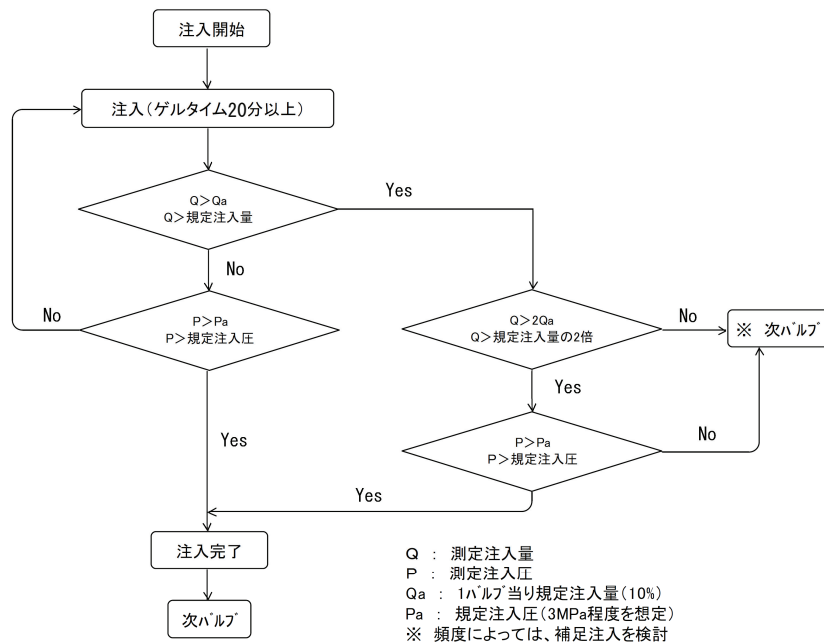


図-4.4.6 注入の管理基準

注入孔については、図-4.4.7 に示すように先端で 3m ピッチとし 50m の注入域に 305 本の注入孔を設計配置した。施工順序としては、第 1 段階として 154 本の 1 次孔削孔後、崩壊部の 0 次孔を先行して注入し、引き続き 1 次孔を注入した。第 2 段階では残りの 151 本の 2 次孔を削孔し注入した。2 次注入についても注入効果を逐次確認しながら施工を行うため、図-4.4.8 のようにブロックで分割しながら施工に当たるものとした。

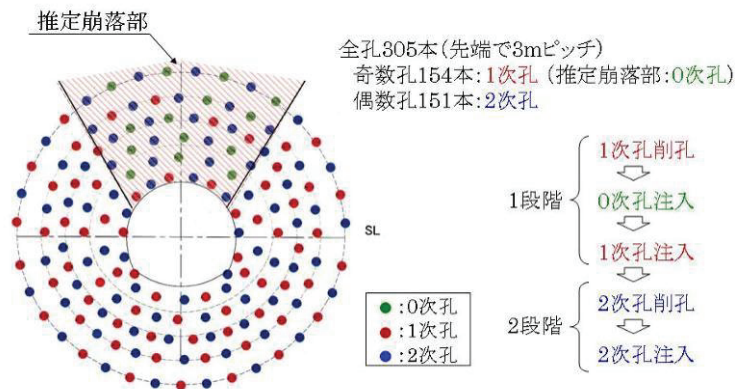


図-4.4.7 注入の施工順序図

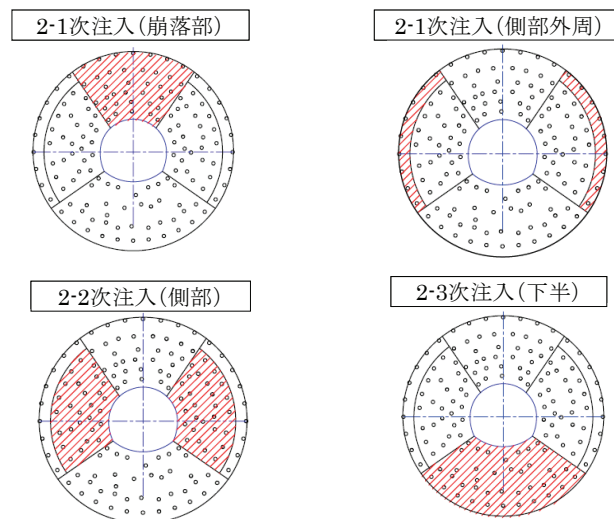


図-4.4.8 2次注入の施工順序

4.4.5 注入実績

削孔時には、写真-4.4.1 に示すように高圧水とともに土砂流出が多く発生した。1 次削孔の段階においては、1 孔あたり 0.5m³ 以上の土砂流出の遭遇が全体の削孔数の 17%にも及ぶものであった。その後の注入により土砂流出は収束傾向となり、削孔の施工速度も各注入段階で次第に向上している。表-4.4.4 に削孔時の土砂流出の結果を、図-4.4.9 に各注入段階における削孔速度を示す。



写真-4.4.1 削孔時の土砂流出状況

表-4.4.4 削孔時の土砂流出※の発生割合

削孔段階	土砂流出の発生割合
1 次削孔	16.8%
2-1 次削孔	0.5%
2-2 次削孔	12.5%
2-3 次削孔	0.0%

※土砂流出：1 孔あたり 0.5m³ 以上の規模を対象

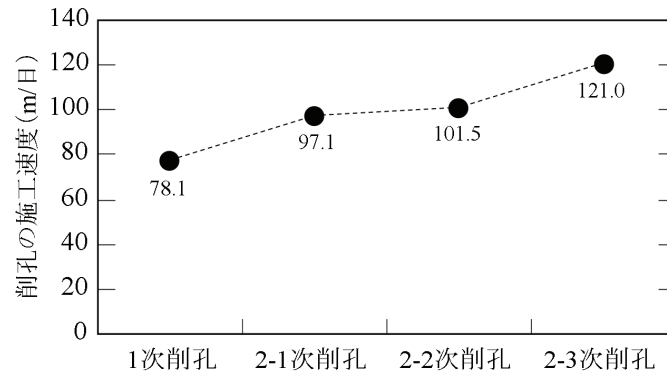


図-4.4.9 削孔の施工速度

注入率の実績について図-4.4.10に示す。崩落部の0時注入は42.4%と大きな注入率を示しているが、こちらも各注入段階で注入率が徐々に低下しており、注入効果が次第に向上していることがうかがえる。

注入の最終段階で注入効果の確認ボーリングを実施したところ、表-4.4.5に示す結果となり、概ね注入効果は良好であった。しかしながら、砂岩部についてはコアが採取不能で孔壁も自立しない結果が見られたため、砂岩部については図-4.4.11のように安全を期して無機溶液型注入材できめ細かく注入を実施することとした。その結果、表-4.4.6に示すように止水性および強度等に問題ない地山状況がボーリングによって確認された。

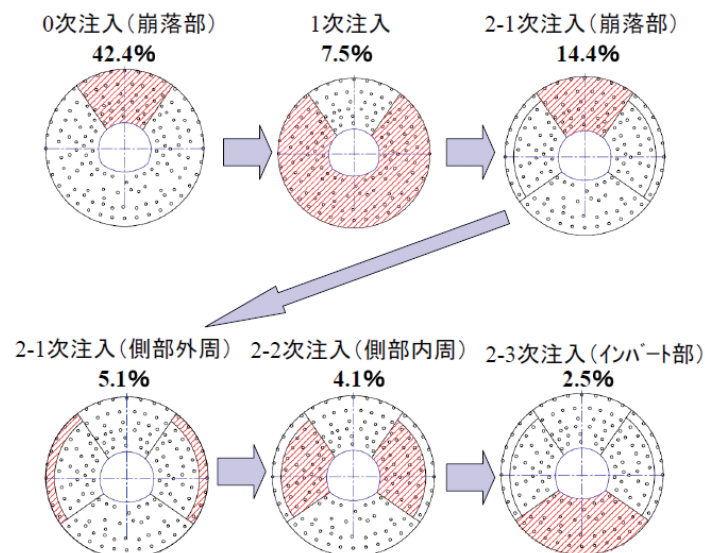
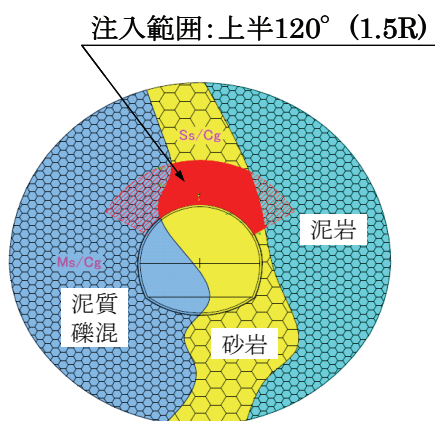


図-4.4.10 注入率の実績

表-4.4.5 注入効果確認ボーリング

確認項目		火山礫	泥質岩	砂岩	泥岩
強度特性	コア性状	コア採取可能	コア採取可能	コア採取不可	コア採取可能
	孔内水平載荷試験	155.8～	127.1～	測定不能	297.1～
	(変形係数)	297.3 MN/m ²	751.5 MN/m ²	(孔壁自立せず)	580.7 MN/m ²
止水性	針貫入試験	(注入前) 1.59 N/mm ²	(注入前) 0.03 N/mm ²	測定不能	(注入前) 1.15 N/mm ²
	(一軸圧縮強度)	(注入後) 1.23 N/mm ²	(注入後) 0.92 N/mm ²	(コア採取不可)	(注入後) 0.95 N/mm ²
	湧水量、湧水圧	湧水量：数リットル程度 湧水圧：ほぼゼロ			
注入材 充填状況	透水試験	0.78～	ほぼゼロ	4.82～	ほぼゼロ
	(ルジオン値)	1.07 Lu		29.43 Lu (ばらつきあり)	
フェノール反応		泥質礫混じりや砂岩で主に発色あり			



【注入の概要】

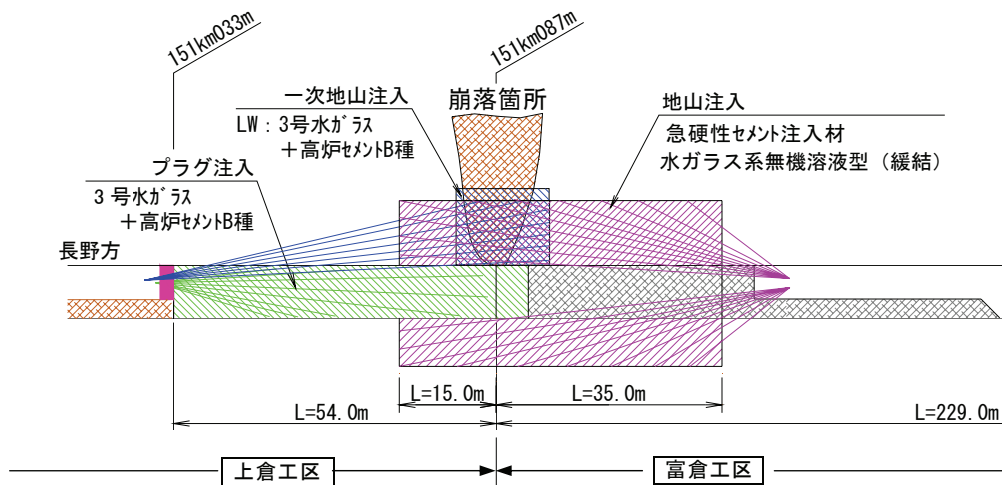
- ・ 注 入 材 ：無機溶液型シリカゾルグラウト
- ・ 削 孔 ：27 本, ピッチ約 2m(砂岩層限定)
- ・ 注 入 方 法 ：2 重管ダブルパッカー工法
- ・ 注 入 速 度 ：10ℓ/分程度
- ・ ゲルタイム：20 分以上
- ・ 注 入 管 理 ：定量・定圧管理
- ・ 最大注入圧：3.0MPa
- ・ 最大注入率：30%

図-4.4.11 溶液型補足注入

表-4.4.6 砂岩部再確認ボーリング

確認項目		セメント系注入後	溶液型注入後
コア性状	コア観察	コア採取不可 (スライム状)	コア採取可能
	注入材充填状況 (フェノール反応)	スライム状コア に一部反応あり	反応あり
強度特性	孔内水平載荷試験 (変形係数)	測定不能 (孔壁自立せず)	81.5 MN/m ² 120.7 MN/m ²
	針貫入試験 (一軸圧縮強度)	測定不能 (コア採取不可)	0.68 N/mm ²
止水性	湧水量、湧水圧	湧水少量	湧水無し
	透水試験 (ルジオン値)	4.82 Lu 29.43 Lu	1.5 Lu 2.2 Lu

崩壊箇所における最終的な注入実績を図-4.4.12に、注入の状況を写真-4.4.2に示す。



種 類	総注入量(m ³)	種 類	総注入量(m ³)
セメント水ガラス注入材 (一次地山注入)	1,006.8	急硬性セメント注入材	3,426.8
水ガラス系懸濁型 (プラグ注入)	762.8	水ガラス系無機溶液型	153.2

図-4.4.12 飯山トンネル崩壊箇所における注入実績



写真-4.4.2 注入の施工状況

(左：一次地山注入およびプラグ注入、右：地山注入)

崩落原因については、前述した図-4.4.4 に示すように、当初は地層が立った F1、F2 断層沿いの泥岩等により遮へいされた高水頭の地下水が、トンネル掘削によって薄くなった F1 断層を最初に破壊し、F1、F2 断層に挟まれた未固結状の砂岩層(Ⅲ_{css})が F1 断層を地下水とともに突き破って発生したものと考えられた。水抜き、調査ボーリングおよび注入の削孔等においては、この砂岩層からの大量の湧水および土砂の噴発が顕著であった。

注入後の掘削時において、崩落部周辺は剥落しやすい鏡肌の F1 断層とせん断帯である F2 断層が事前の想定よりも薄いことが確認され、F1、F2 断層内にはほとんどが破碎し未固結状の砂岩層(Ⅲ_{css})が存在していた。この切り立った砂岩層が F1 断層を突き破り、崩壊切羽まで達していた。図-4.4.13 に崩落後の調査で事前に想定した地質図を、図-4.4.14 に掘削後に判明した地質図を示す。崩落の範囲は掘削後のほうが事前に想定した崩落部の規模よりも幾分大きいものではあったが、注入後の掘削のため、ゆるみ域は明確ではなかった。崩落のメカニズムは、「地層が立った F1、F2 断層に挟まれた未固結状の砂岩層(Ⅲ_{css})が、F1 断層を地下水とともに突き破って発生したもの」という事前の想定どおりと考えられた。

掘削中、崩落事故前に予見可能であったかという点であるが、崩落の主要因である砂岩層(Ⅲ_{css})は、非常に切り立った形状の F1、F2 断層の間に挟まれた小さな範囲に限定されており、掘削時に計画的に実施していた先進ボーリング調査では問題箇所として把握できていなかった。

この事故後の掘削では、特に今回のように地層が立った箇所においては、切羽前方に

おける地質確認、水抜き、湧水圧管理を目的として図-4.4.15に示す先進ボーリングの長尺、中尺、短尺のボーリング実施により、湧水圧および地山特性を評価することで、安全な切羽の管理に努めた。

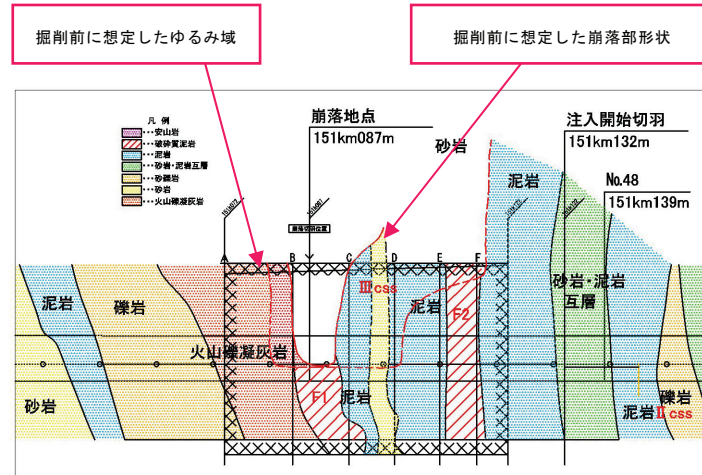


図-4.4.13 崩落後の調査による地質図

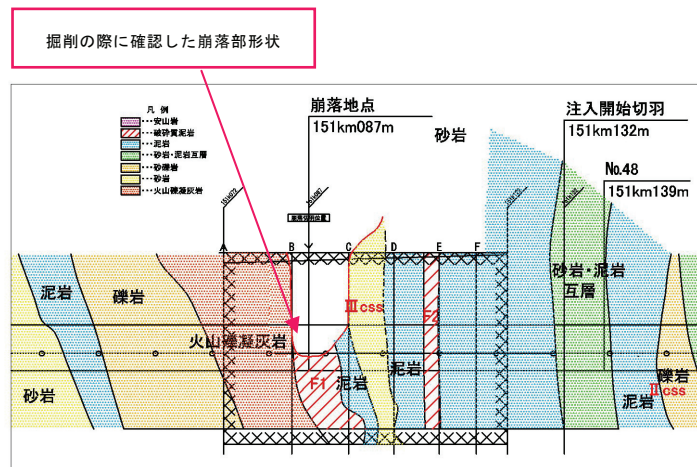


図-4.4.14 掘削後の地質図

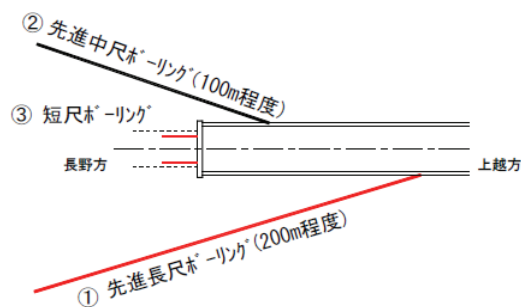
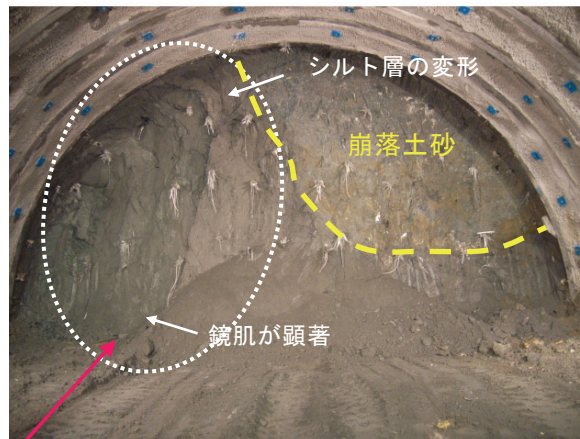


図-4.4.15 先進ボーリングの概略図

写真-4.4.3 に掘削時の未固結状の砂岩層の切羽を示すが、特に砂層部においては、脈状に注入された急硬性セメント注入材と砂に浸透した溶液型注入材がよく固結され、安定した切羽となっている。

崩落した箇所への注入は、セメント水ガラス注入材で粗詰注入を実施し、その後、主に急硬性セメント注入材を使用して、注入の骨格を形成することで、地盤の強化と止水をはかるという2つの目的を達成した。砂岩層(Ⅲcss)については、急硬性セメント注入材と溶液型注入材を併用することで、十分な止水効果を得ることができた。



F-1断層。F-1断層周辺部で剥落が顕著である。また、断層によるシルト層の変形構造が確認される。F-1断層に近接し、崩落土砂が分布。

写真-4.4.3 F-1断層付近

4.5 地盤改良の施工事例：ほくほく線、鍋立山トンネル

4.5.1 概要

鍋立山トンネルは、図-4.5.1に示すように首都圏と北陸圏を最短で結ぶほくほく線（単線電化、延長 59.4km）の中央部に位置している 9,116m の鉄道トンネルである。従来、首都圏から金沢市等へ行く場合、上越新幹線長岡駅での乗換えの必要が生じていたが、ほくほく線の開業後は、上越新幹線の越後湯沢で乗り換え、ほくほく線を 160km/h で走行することにより、約 30 分の時間短縮が図られるようになった。

鍋立山トンネルは、図-4.5.2に示すように新第三紀の泥岩の互層のなかに高圧のメタンガスを胚胎した低固結で超膨張性を呈する特殊地山であり、着工から完成まで 22 年という歳月を要した。特に難航した中央工区の 645m の地山物性値を表-4.5.1に示すが、岩の一軸圧縮強度が $0.2 \sim 0.3 \text{ N/mm}^2$ 程度、地山強度比が 0.1 程度と極めて低い値となっており、図-4.5.3に示すように、150m のトンネル土被りの全土圧がそのまま背面土圧として計測されている。また、地山中には図-4.5.4に示すように、最大 1.6 N/mm^2 に及ぶガス圧が潜在しており、50cm のピッチを掘削した後、切羽が 60cm も押し出されるなど、50cm の掘削に 2 日以上も要し、掘削は困難を極めた。

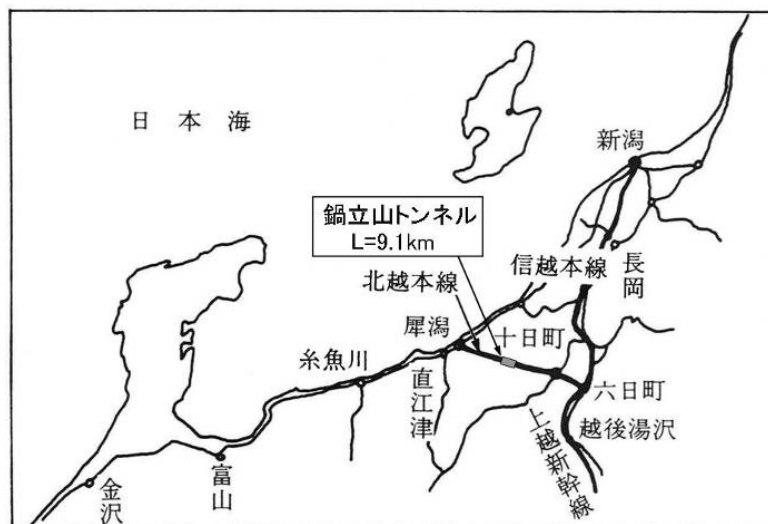
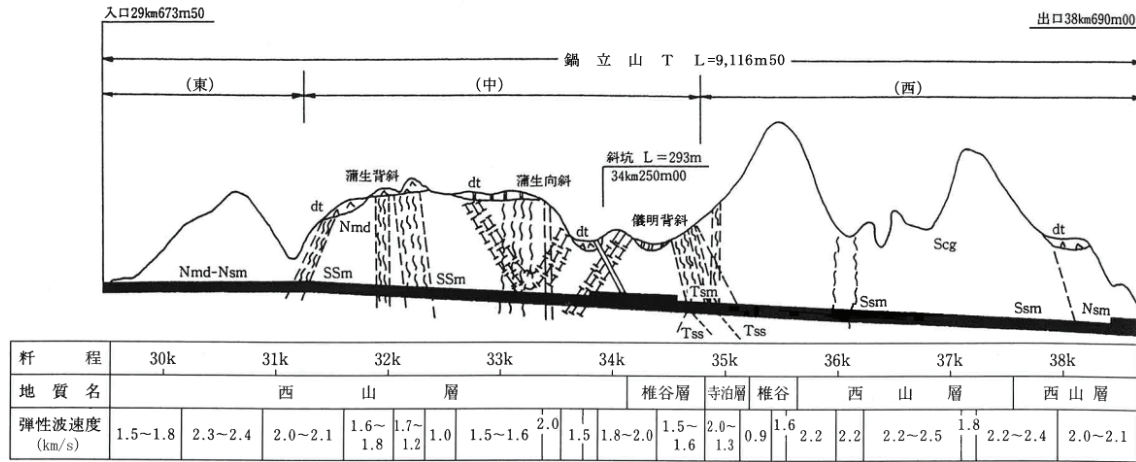


図-4.5.1 位置平面図¹⁰⁾

第4章 セメント系薬液注入材の施工事例



地質凡例

第四紀	沖積層	dt	崖錐性堆積物
第三紀	新鮮中新世	西山層	Nss : 無粒礫灰質砂岩 Nmd : 塊状泥岩 Nsm : 泥岩 (砂岩と互層)
		椎谷層	Scg : 礫岩 Ssm : 泥岩 (一部礫灰岩・砂岩をはさむ)
		寺泊層	Tsm : 泥岩 (砂岩と互層) Tss : 塊状中粒砂岩
	中新世		

図-4.5.2 地質縦断面図¹⁰⁾

表-4.5.1 第三紀泥岩地帯の地山物性値¹⁰⁾

トンネル名	線名	単位体積重量 (kN/m³)	粒度分布(%)				一軸圧縮強度 (N/mm²)	コンシステンシー(%)			土かぶり	地山強度比
			砂分	シルト分	粘土分	2μ以下		液性限界	塑性限界	塑性指数		
六日町	上越新幹線	19.4	10.0	10.0	50.0	37.0	1.3	47	27	23	50	1.29
赤倉		20.8	2.0	12.5	55.5	43.0	4.2	92	20	72	130	1.58
鍋立山(東口)(32km770m)	北陸北線	18.8	0.0	29.0	71.0	54.0	0.3	143	23	120	150	0.11
鍋立山(斜坑口)(32km850m)		19.1	0.0	41.0	59.0	49.0	0.2	133	22	111	150	0.08
飯山(調査坑)	北陸新幹線	22.6	-	-	-	30.3	6.9	92.6	-	70.1	250	1.22

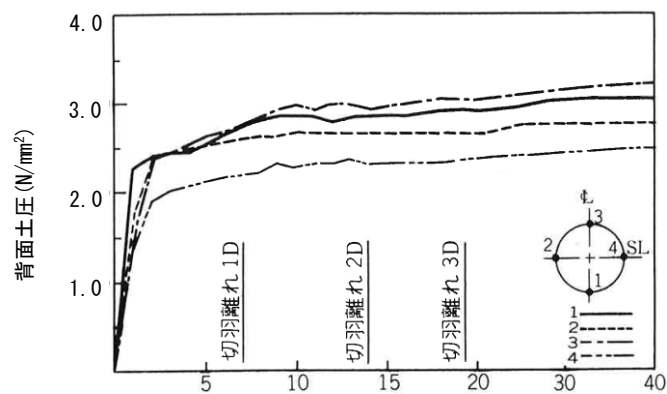
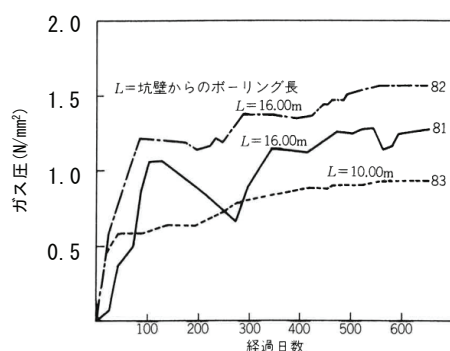


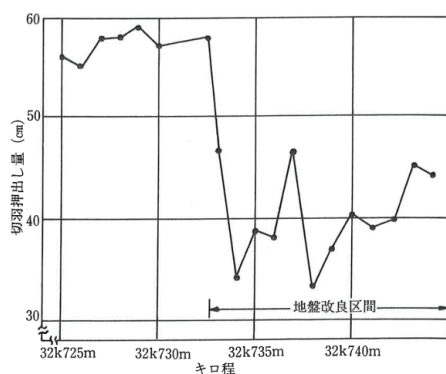
図-4.5.3 背面土圧の測定結果 (32km775m 付近)¹¹⁾


図-4.5.4 ガス圧の測定結果 ¹¹⁾

4.5.2 注入工法の選定

本トンネルは、当初、矢板工法の底設導坑先進工法で掘削を開始したが、膨張性が増すにつれ断面を馬蹄形から卵型、さらに円形へと変化させ、掘削工法も NATM で多段ベンチ工法を採用するなど、一時的には掘削可能となったものの、切羽からの大きな押し出し量が常態として出現し掘削不能に陥った。本坑断面の掘削から掘削径 3m 断面の中央導坑を先進させて掘削し、まず切羽を貫通させる方針に変更したものの、中央導坑も破壊されるに至った。その後、3m 断面の TBM の採用も試みられたが、メタンガスの噴出とともに TBM が導坑から本坑へ 100m も押し返され、TBM も断念せざるを得ない結果となった。

最後に残された工法として、注入工法、高圧ジェット工法、凍結工法の検討が進められたが、工期と工費がかかることは避けられないが、地山内のガスを可能な限り削孔で抜き、地盤を改良する注入工法が最も確実な工法として採用するものとした。試験注入による切羽の押し出し量の結果を図-4.5.5 に示すが、押し出し量に顕著な差が見られたため、本格的に注入工法を掘削の補助工法の基本として施工するものとした。


図-4.5.5 試験注入による切羽押し出し量 ¹⁰⁾

4.5.3 注入計画

1) 注入材料の選定

強度の高い材料で注入域を形成させることを目的として、ホモゲル強度が高いこと、ゲルタイムの調整が容易なことおよび地山との付着強度が高い材料として、急硬性セメント注入材を採用するものとした。配合については、表-4.5.2 に示すように W/C が 93% という高濃度配合でゲルタイムも 53 秒と短いものを採用した。

表-4.5.2 急硬性セメント注入材の標準配合 ¹⁰⁾を加筆修正

(温度 20℃、2000あたり)

A 液 (100ℓ)		B 液 (100ℓ)		ゲルタイム	圧縮強度
急硬材	20.0kg	普通セメント	80.0kg	53 秒	$\sigma_{28}=3.0\text{N/mm}^2$
セッター	0.1kg (0.5%)	減水剤	0.8kg (1.0%)		
水	93.2ℓ	水	74.2ℓ		

2) 注入域と注入長等

鍋立山トンネルにおける注入設計の概要を表-4.5.3 に示す。また、図-4.5.6 および図-4.5.7 に中央導坑と本坑における注入域と注入長を考慮した注入標準図を示す。注入域については、中央導坑は青函トンネル等と同様な考え方の基に掘削半径の 3 倍の値を採用し、本坑は経済性も考慮のうえ掘削半径の 2 倍強の注入域を採用した。注入長については、可能な限り地盤改良の効果を向上させるため前回注入範囲と重ねることを念頭において計画し、中央導坑では 25.5m の 2 ステージ、本坑では 40m の 3 ステージとして計画した。注入最終圧は、削孔で湧水とガスを抜き注入材で置き換えるためには、潜在土圧の 3.0N/mm^2 以上の圧力が必要であり、試験注入の成果から考慮して 4.9N/mm^2 を基準値として施工した。注入管理は、定圧による管理を基本としたが、注入量については、導坑の注入効果の実績から、導坑ではトンネル 1m 当たり 72m^3 、本坑ではトンネル 1m 当たり 100m^3 を基準注入量とした。

表-4.5.3 鍋立山トンネルにおける注入設計の概要

項 目	設 計 値
注 入 管 理	原則として定圧注入
注 入 量	基準値〈導坑〉 72m ³ /トンネル m 〈本坑〉 100m ³ /トンネル m
ゲルタイム	基準値 60 秒 (最小 50 秒)
注 入 圧	基準値 4.9N/mm ²
注 入 速 度	2 液合計 20～40ℓ/min (最小 15ℓ/min)
配 合 強 度	$\sigma_{28}=3.0\text{N/mm}^2$

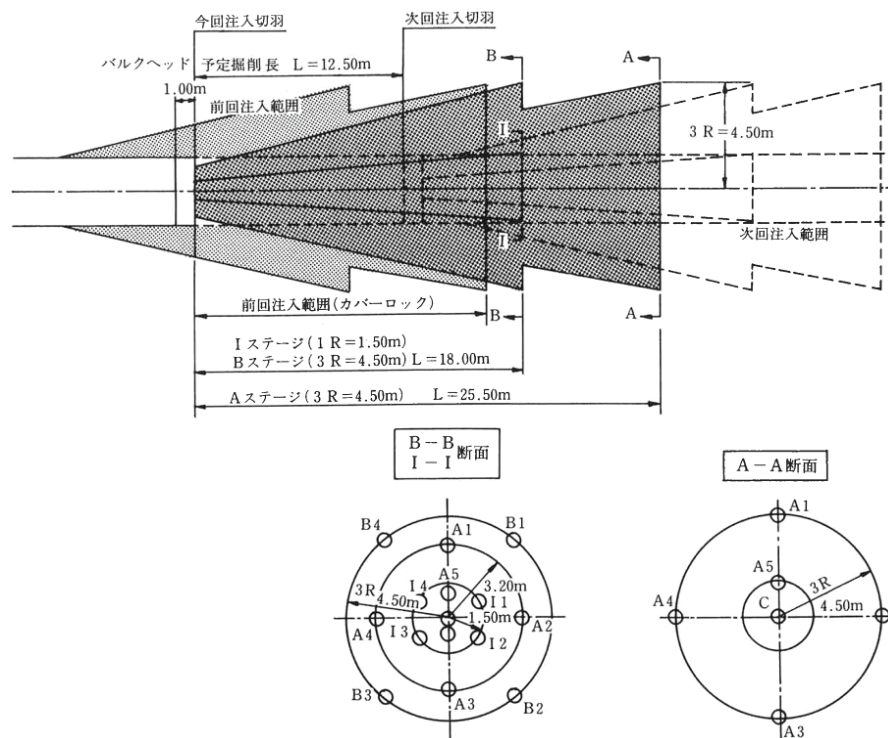


図-4.5.6 中央導坑注入標準図¹⁰⁾

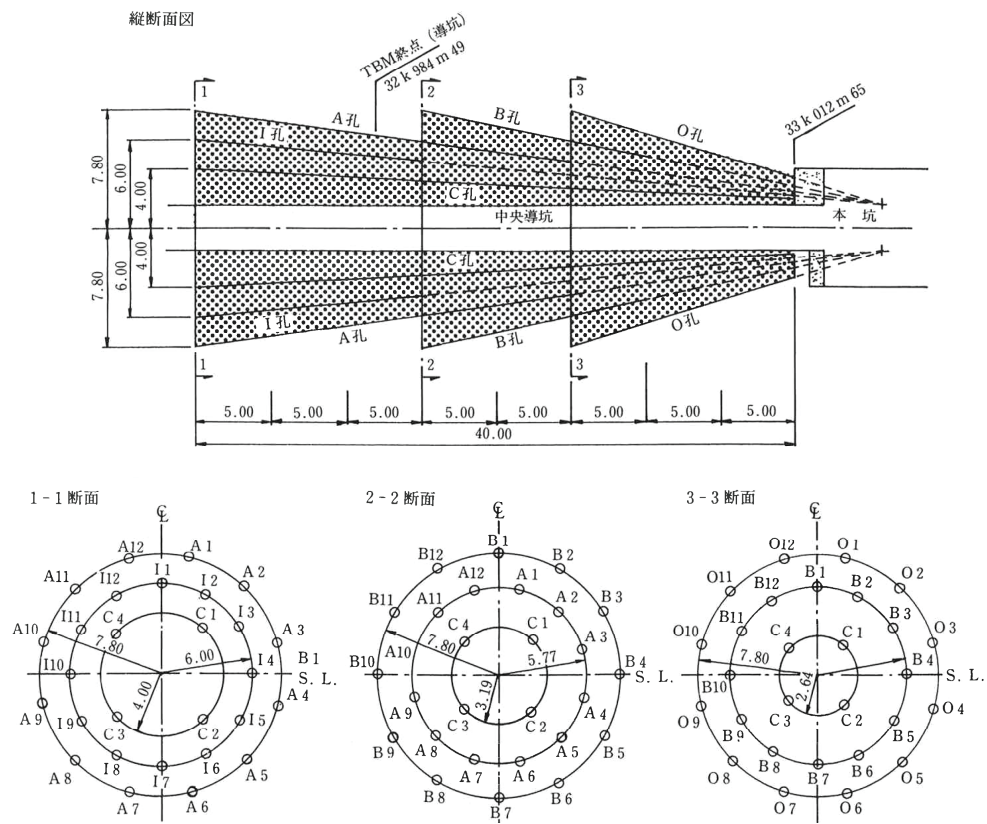


図-4.5.7 本坑切詰め・切羽注入標準図¹⁰⁾

4.5.4 注入実績

注入実績を図-4.5.8に示す。中央導坑からの注入は六日町方から5回、直江津方から18回実施し、それぞれ6,316 m^3 と14,727 m^3 の注入量実績であった。また、本坑からの注入は六日町方から8回、直江津方から3回実施し、それぞれ23,772 m^3 と25,090 m^3 の注入量実績であった。導坑と本坑の総注入量は、48,800 m^3 という膨大な施工実績であった。



図-4.5.8 鍋立山トンネルにおける注入施工実績¹²⁾

注入量は膨大な施工数量であったが、図-4.5.9 に示す注入実施後における導坑セグメントの背面土圧の測定結果から見て取れるように、図-4.5.3 と比較しトンネル背面土圧が大きく低減されていることから、注入による明らかな地盤改良効果が認められる。また、図-4.5.10 に切羽の押し出し量とサイクルタイムを示すが、注入を実施していない切羽の押し出し量が 60cm 程度であったものが、注入実施後の切羽では 10cm 以下と改善している。さらに、本坑の掘削時間は 45 時間以上要していたものが、注入実施後は 24 時間と半分のサイクルタイムに低減し、掘削進捗が大きく向上したことがわかる。

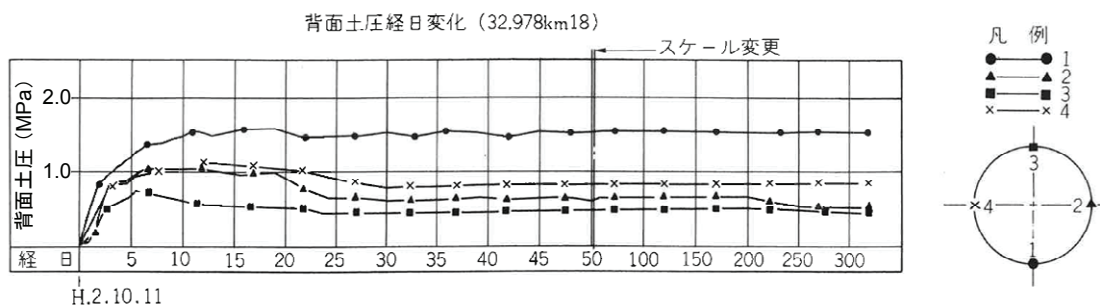


図-4.5.9 斜坑口導坑セグメント計測結果¹¹⁾

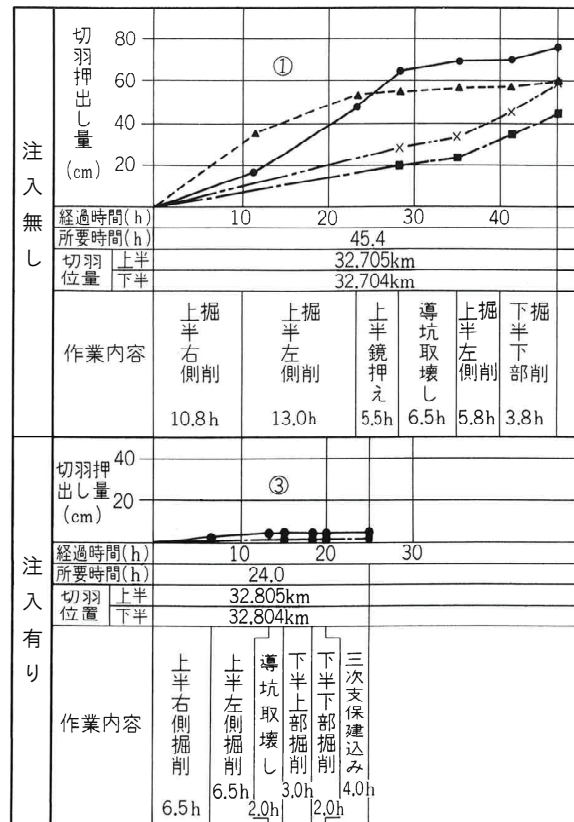


図-4.5.10 本坑切掘げ所要時間の比較¹¹⁾を加筆修正

鍋立山トンネルは、高圧のメタンガスが掘削することで切羽から大量に放出されるため、切羽の大きな変形を起こす超膨張性地山となっている。このため、掘削することで高圧ガスをできるだけ抜き（水抜き工法ならぬガス抜き工法）、その後に低固結地山を高強度の急硬性セメント注入材で地盤改良することで、図-4.5.10に示したように、切羽の変形を抑え、掘削可能としたものである。

鍋立山トンネルは、湧水がなく、高圧なガスが間隙に胚胎しており、一般の山岳トンネルの場合における高圧湧水が高圧ガスに置き換わっていると考えてよい。高圧ガスを持つ地山の掘削の困難な点は、高圧湧水であれば水を抜くことで水位を低下させ、あわせて地山の圧密を促進できるが、高圧ガスの場合、切羽に出現する際にボイル=シャルルの法則が示すとおり、何倍、何十倍にも膨張し、可燃性ガス対策も重大な課題であるばかりではなく、切羽の大変形を引き起こす。このため、対策として最終的には、注入工法により、削孔してできるだけガスを抜き、地盤改良を行う方法が適切であったと考えている。

ほくほく線のルートは、昭和43年の工事実施計画の認可時において、貨物列車の運行が前提であったことから、線形に直線が多用されている。鍋立山トンネルのルートについても、中山トンネルのルート選定と同様、事前調査が十分ではなく、事前調査の情報が適度に得られていれば、「高圧ガスの胚胎ゾーン」を回避したルート選定は可能であったものと判断され、工期および工費の縮減が図られたものと考えられる。

4.6 後向き止水注入の施工事例：野岩線、葛老山トンネル

4.6.1 概要

野岩線葛老山トンネルは、栃木県塩谷郡川治温泉の近くに位置する全長 4,250m の鉄道単線トンネルである。建設中は凝灰角礫岩を主体とした層に花崗閃緑岩が貫入した亀裂の多い地質とともに、23km850m 付近においては東側に位置する五十里ダムに起因すると考えられる多量の湧水に悩まされ、施工は極めて難航した。

昭和 52 年のトンネル完成後も坑内の湧水は減少することなく継続し、昭和 56 年頃からは西側に建設された川治ダムの貯水の影響による坑内湧水が増加し、その範囲も 21km750m～24km150m 間の約 2,400m に拡大した。このため、鉄道構造物の保護および水資源の有効活用の観点から、現状のトンネル周辺地山に止水注入を実施し坑内湧水の低減を図ることとした。

4.6.2 注入計画

1) 注入区間

図-4.6.1 に示すとおり、葛老山トンネルは五十里ダムおよび川治ダムに囲まれるように位置している。また、トンネルの縦断面図と横断面図を図-4.6.2 および図-4.6.3 に示す。両ダムの満水位は葛老山トンネルの大部分よりも上位に位置している。このため、季節的な変動はあるものの最大で 60～70m³/min の坑内湧水量となり、特に川治ダムの貯水の影響が顕著であった。しかし、湧水の状況は岩質および亀裂の状況により変化しており、トンネルの下流区間、上流区間、中流区間の順に延長 m あたり湧水量が減少し、最も水圧が大きいと想定される最下流区間では湧水はほとんど確認されていない。また、最上流部も同様である。

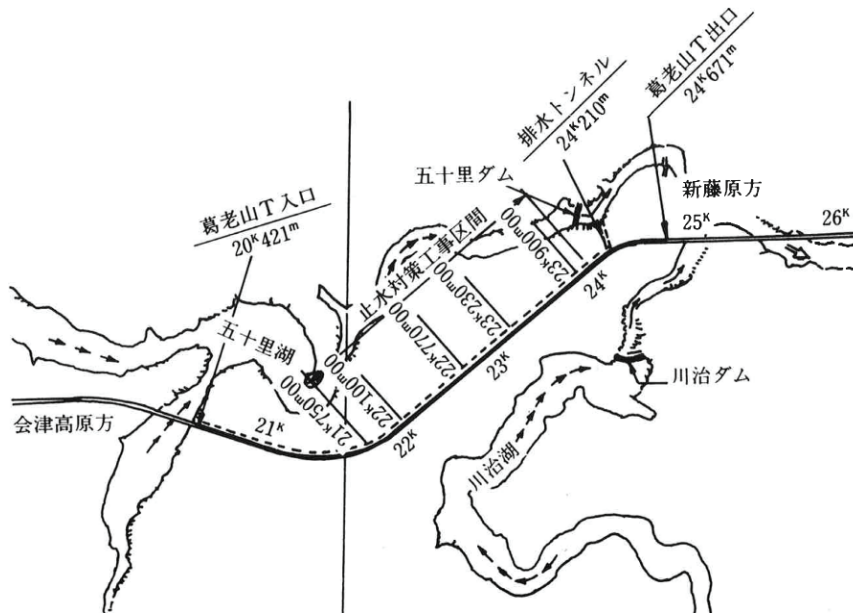


図-4.6.1 位置平面図¹³⁾

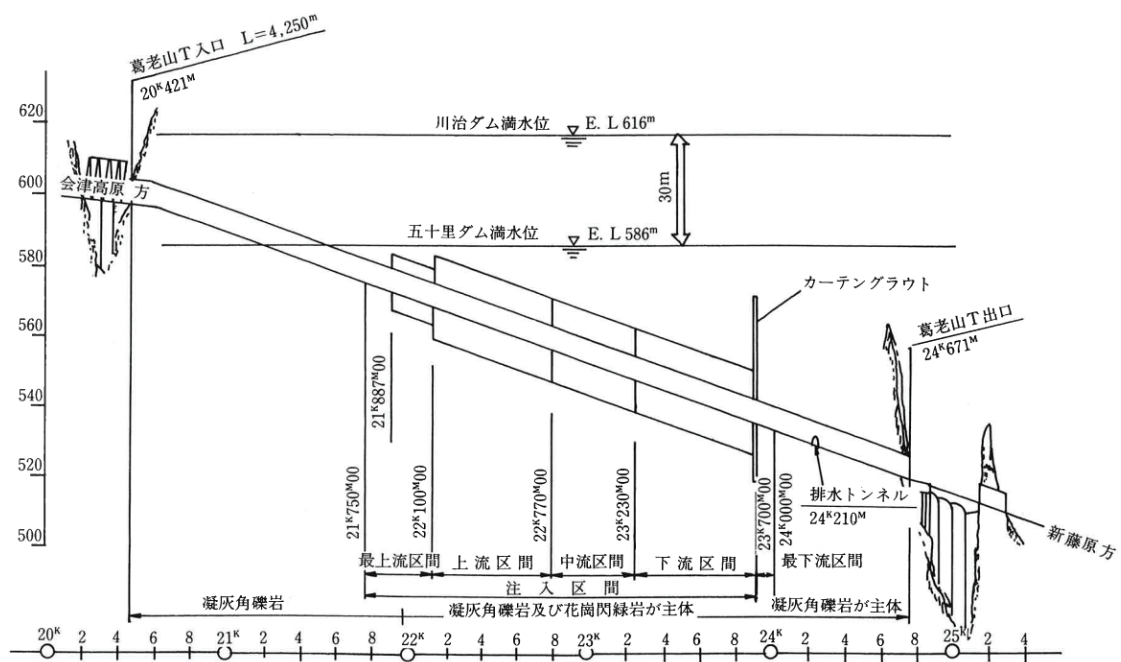


図-4.6.2 縦断面図¹³⁾

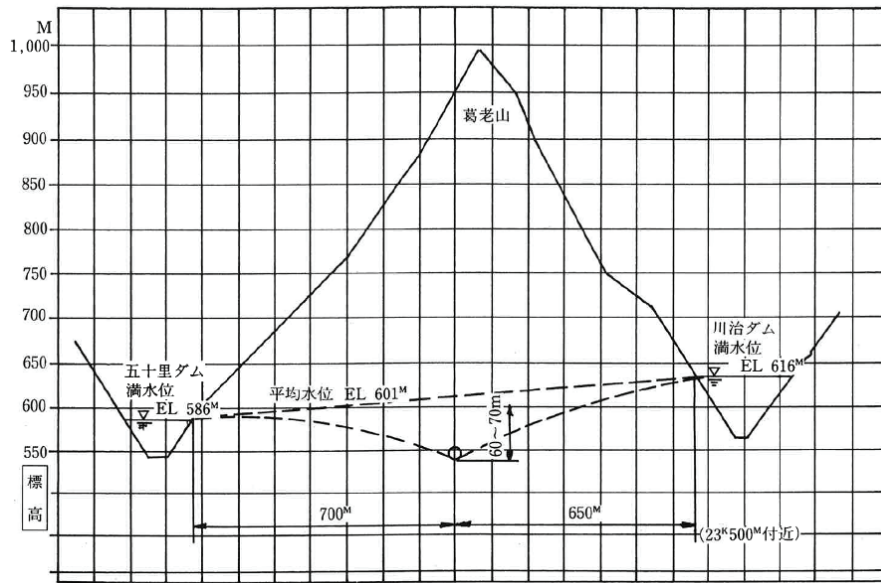


図-4.6.3 横断面図¹³⁾

以上のことから、注入区間は 21km750m～23km700m 間の $L=1,950\text{m}$ とした。また、注入ゾーン形成後のトンネル縦断方向下流側への湧水の回り込みを防止するため、23km700m 付近には、堅硬な地山にまで到達するカーテングラウトを施工することとした。

2) 注入範囲

注入範囲は、トンネル周辺を弾性体として考えた場合の安定条件から検討を実施するとともに、青函トンネルの施工実績を参考として、最上流区間とカーテングラウト部を除く一般区間（上・中・下流区間）については、掘削半径の3倍程度の8mとして設計した。

本トンネルにおける止水注入の場合、既に覆工が構築されており、注入圧力による覆工への悪影響が予想された。このため、覆工に近い周辺部分4mはゲルタイムの調整が容易なLW注入を低圧で施工し、その外周4mは耐久性に優れ、廉価なセメントミルクを高圧で注入することとした。一方、下流区間からさらに下流側への水の回り込みを防止するために施工するカーテングラウトの範囲は、地質調査の結果から亀裂の少ない領域までカバーするものとして上半30m、下半15mとした。また、トンネル軸方向の長さは20mとした。図-4.6.4に止水注入範囲図を示す。また、表-4.6.1に使用した注入材を示す。

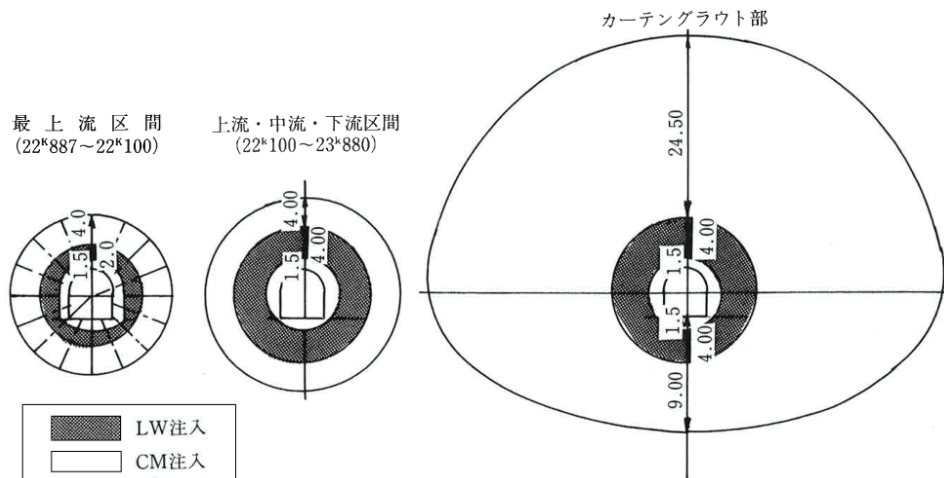


図-4.6.4 止水注入範囲図¹³⁾

表-4.6.1 注入材料

注入種別	注 入 材 料
セメント水ガラス注入 (LW 注入)	高炉セメント (C 種) 水ガラス (モル比 3.2)
セメント注入 (CM 注入)	普通セメント

3) 注入方式

本トンネルでは、2つの注入方式を採用した。

1つは、坑壁に直角に削孔し注入する方式であり、上流区間および中流区間で実施した。本方式は湧水量がそれほど多くない箇所に採用したものであり、地山の亀裂が集中しているところを重点的に削孔、注入できる利点がある。孔間隔は最大でも6mを孔尻で超えないよう配孔した。

他方は、トンネルにほぼ平行、放射状にゾーン注入する方式である。これは亀裂がほぼ連続しており湧水量が多い下流区間で採用している。施工手順は、100～120m間隔で坑内に拡幅位置を設け、その拡幅部を注入切羽としてトンネル軸方向にほぼ平行に約55～65mの削孔、注入を実施するものである。この方法の利点は、トンネル方向に注入範囲が連続する点にあり、湧水がトンネル全周から湧出しトンネル縦断方向にも連続している下流区間に適した方式であった。

4) 注入管理

地山の透水性、あるいは注入効果の判断等の指標として、透水テストによるルジオン(Lu)値を採用した。

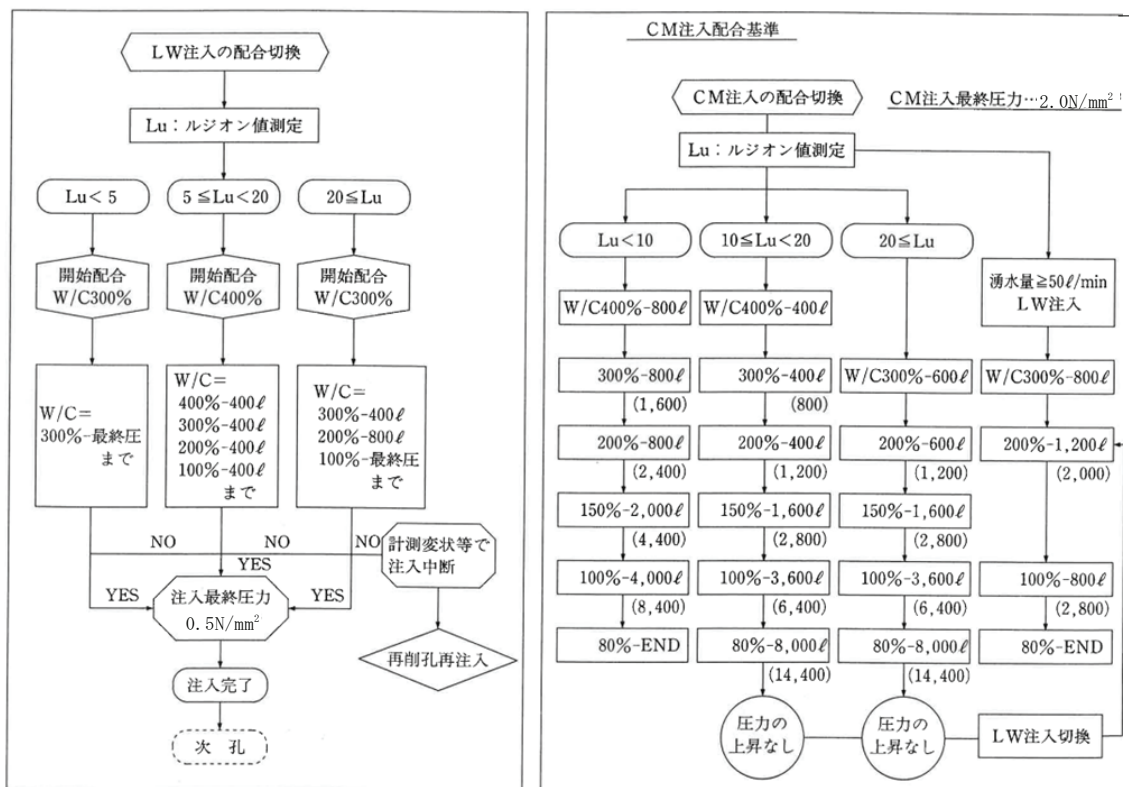
改良前の地山の透水状況については、各施工ブロックでさぐり削孔によってLu値を測定する。この後、注入作業に移るが、その間適宜Lu値を測定し地山の止水効果を確認しながら注入モード等を必要に応じて修正する。最終段階では、1断面4孔のチェック孔において、注入孔全長にわたって改良目標Lu値を満足していることを確認することとした。一部でも満足しない場合、無条件にその孔の両側に追加孔を施工し、同様の手順で追加注入を実施する。なお、改良目標値は、トンネル全体の止水率80%に相当する $Lu=5$ を採用し、 $5Lu$ 以下と定めた。

5) 注入圧

注入圧は、LW注入を 0.5N/mm^2 、CM注入を 2.0N/mm^2 とした。LW注入の注入圧については、覆工コンクリートの変位を計測して適宜変更するものとし、ケーシングパイプを使用するほか、断続注入、再削孔による注入を行うなど、覆工に悪影響を与えないような計画とした。一方、CM注入は、最大水圧の3倍を目安として最大圧 2.0N/mm^2 と決定した。なお、これらの注入圧は、覆工の変位計測結果の状況によって、注入効果を高めるために適宜増加させることとした。

6) 濃度切替え基準

濃度切替え基準を図-4.6.5に示す。基本的な考え方は、濃度を薄いものから注入を開始し、注入の終盤にかけては濃度を濃いものにして注入圧を高め、最終注入圧を確認して終了するものとした。

図-4.6.5 注入材の濃度切替え基準¹³⁾

4.6.3 注入実績

施工にあたっての留意点は、以下のとおりであった。

- ① 透水試験を確実に精度よく実施する。
- ② 覆工コンクリートに変状を与えないよう注入圧力を管理する。
- ③ 注入効果を常に確認し、適切な注入計画への修正を行う。

施工時における計測の結果、CM注入の最終注入圧力は原則として 3.0 N/mm^2 に変更した。また、覆工への注入背圧による影響を軽減することと、口元からの注入材のリークを防止するため、口元ケーシングを全孔 2.75～8.25m 挿入し、覆工の安全と注入量の管理に留意した。

注入の施工実績を表-4.6.2に示す。CM注入が約 $17,800 \text{ m}^3$ 、LW注入が約 $4,350 \text{ m}^3$ 、総注入量は約 $22,150 \text{ m}^3$ であった。注入後の Lu 値は、ほぼ $5Lu$ 以下となっており、目標とした止水率 80%は概ね達成されている。また、懸念された覆工への注入による影響については、注入完了後のクラック補修延長が 153m と注入延長に対してわずかであったことから、適切な計測管理が実施されたものと考えられる。

葛老山トンネルは、後向止水注入として、最大で $60\sim 70\text{m}^3/\text{min}$ の坑内湧水量を 80% 止水することを目標に掲げ、注入後の注入効果の判定指標（改良目標値）として、ルジオン透水試験により 5Lu 以下とした。覆工後の注入であり、注入圧力の管理を慎重に実施することで、覆工コンクリート補修についても最小限（クラック補修 153m）にとどめるとともに、注入後の Lu 値は、ほぼ 5Lu 以下を達成し、目標止水率 80%（坑内湧水量 $14\text{t}/\text{min}$ 以下）を達成することができた。

葛老山トンネルは、国鉄の新線として昭和 52 年に完成しており、昭和 56 年頃からの川治ダムの貯水により坑内湧水が増加し、後向止水注入対策を余儀なくされたが、一度トンネル内に発生した湧水を事後に止水するためには、多大な工事費と工期が必要であり、覆工に与える影響も大きい。それぞれのプロジェクトの認可時期の関係で難しい面があるが、トンネル掘削前に他機関との計画調整が可能であれば、ダム本体のカーテングラウトの改良レベルの検討やトンネル掘削時に必要な透水係数を満たすトンネル注入域の改良を図ることが得策であったものとする。

表-4.6.2 注入の施工実績

項 目		施工数量
総削孔長		6,061 m
注入種別	LW 注入	$4,349 \text{ m}^3$
	CM 注入	$17,797 \text{ m}^3$
	合 計	$22,146 \text{ m}^3$

4.7 結論

4.2 から 4.6 の施工事例で示したように、セメント薬液注入材が適用された特徴を要約して述べると下記のとおりである。

①青函トンネル

海底トンネルという特殊環境の下で、断層を伴う高圧湧水（2.4MPa）に対抗し掘削可能とさせるための注入域を形成させる注入材料としては、昭和33年～36年にかけて、セメント系および溶液型注入材料を用いた各種注入試験を実施し、セメント注入を主とし、セメント水ガラス注入材も併用することで青函トンネルを建設することが可能と想定された。これを受け、青函トンネルの調査坑時代にはセメント注入とセメント水ガラス注入材を主に各種注入材料の海底下での試験注入が実施され、その施工実績等から、セメント水ガラス注入材を改良することによりホモゲル強度が高く凝固時間を適度に調整が可能であり、かつ耐久性も相応にあるセメント水ガラス注入材（モル比 2.2 の水ガラスと高炉スラグを 55%混合した高炉コロイドセメントの組み合わせ）が得られ、この材料を全面的に使用することで海底部の掘削を可能としている。

また、青函トンネルの陸地部においては、セメント水ガラス注入より排水処理を簡易に行うことが可能で耐久性のよい急硬性セメント注入材を開発し使用して、よい効果を上げている。昭和30年代～40年代にかけては、非粒子系の溶液型注入材料についても多くの試験注入が実施されたが、大きな湧水圧によって硬化体が破壊され流されるなどして、十分な止水効果が得られず、本格的な採用まで至らなかった。

②中山トンネル

高圧湧水（2.5MPa）を伴う未固結な崩壊流出しやすい八木沢層群の火山噴出物堆積層等に対する注入であるため、骨格をなす注入にはセメント水ガラス注入材を適用し、セメントについては注水試験により普通セメント（ブレン値 3,000cm²/g 程度）、微粒子セメント（ブレン値 6,000cm²/g 程度）および超微粒子セメント（ブレン値 8,000cm²/g）とし、水ガラスについては、透水性に応じてモル比 3.2 とモル比 2.2 の水ガラスの使い分けを行った。

八木沢層群においてより浸透性が求められた箇所については、有機系および無機系の溶液型注入材を適用し掘削を可能とした。異常出水により坑道すべてが水没したために、

工期短縮のため、削孔長さ 360m に及ぶ地上からの注入を行わざるを得ない事態となったが、削孔の孔曲がり管理、透水度に応じ多種の注入材料を適用することおよび施工管理を行うことで良好な注入効果を上げている。

しかしながら、中山トンネルはルート選定時に事前調査がほとんどなされず、2つの拠点間をほぼ直線で結んだルートとなっている。このため、的確な事前調査の情報が得られていれば、適正なルート選定により異常出水の回避だけではなく、工期の短縮や工事費の縮減が図られたと考える。

③飯山トンネル

トンネル工事史上、例を見ない 3 万 m^3 もの土砂流出事故であったが、セメント水ガラス注入材で崩落付近のプラグ注入と粗詰め注入を行い、本格的な地山注入は、セメント水ガラス注入材よりも耐久性が良好で二重管ダブルパッカー方式により注入可能と判断された急硬性セメント注入材により施工している。一部砂層については、止水性を向上させるために溶液型注入材料により補足注入を実施して、無事崩壊箇所を突破した。

地山の崩壊メカニズムとしては「地層が立った大きな断層の F1、F2 に挟まれた高压湧水を伴った未固結の砂岩層が F1 断層を突き破って発生したもの」であるが、掘削時において計画的に実施していた先進ボーリング調査でも問題箇所として把握することが困難であった。

このように極めて地層が立っている箇所では、長尺の先進ボーリングだけではなく、中尺、短尺のボーリングを実施するとともに、湧水圧および地山特性を評価し、切羽の安全管理に留意する必要がある。飯山トンネルでは、その後の掘削において長尺～短尺のボーリングを実施し、湧水圧を入念に管理することで無事掘削を完了させている。

④鍋立山トンネル

最大 1.6N/mm^2 にも及ぶ高压メタンガスが潜在し、一軸圧縮強度が $0.2\sim 0.3\text{N/mm}^2$ 程度の超膨張性を呈する地山に対し、削孔して高压ガスを抜き、低固結の地山について急硬性セメント注入材を使用した注入工法により、大きく地盤を改良することで掘削が可能状態としている。

鍋立山トンネルは、着工してから完成するまで高压ガスによる超膨張性地山に難渋し、青函トンネル並みの 22 年の歳月を要した。直線ルートである鍋立山トンネルについても

中山トンネルのルート選定と同様ではあるが、事前調査の情報が十分得られていれば、「高圧ガスの胚胎ゾーン」を回避したルート選定は可能と考えられ、工期および工費の縮減が図られたものとする。

⑤葛老山トンネル

トンネル完成後に建設されたダムの影響による坑内湧水の増加のため、トンネルの保護および水資源の有効活用の観点から、現状のトンネル周辺地山に止水注入（一般に後向き止水注入と称する）を実施したものであるが、覆工に近いところをセメント水ガラス注入材とし、その外周は注入材料の耐久性からセメントミルクを使用することで目標とした 5Lu 以下の止水効果を達成している。

一度、トンネル内に発生した湧水を止水するためには、多くの工期と工費を要し、覆工への悪影響も大きいため、トンネル掘削前にトンネル注入域の改良について関係他機関と計画および設計の事前調整ができれば得策と考える。

セメント系薬液注入材による注入工法は、青函トンネルのような高圧海水の海底トンネルという特殊環境下や中山トンネルのような未固結で断層を伴う高圧湧水下のトンネルおよび飯山トンネルのように大崩落による復旧施工、更には鍋立山トンネルのように置換するほどの大量注入により掘削可能とするための最後の補助工法としての位置づけで適用されているところがある。

このため、注入材料としてはサンドゲル強度ではなく、ホモゲル強度でも相応の強度があるものが強く要求され、部分的に砂層においては浸透性を考慮し溶液型注入材料を補完的に併用している。いずれのトンネルも耐久性に関して考慮しており、特に耐海水性に配慮せざるをえなかった青函トンネルは、耐久性の良好な高炉コロイドセメント（高炉スラグ 55%混入）を使用したセメント水ガラス注入材を開発して使用している。中山トンネルにおいても青函トンネルで適用された高炉スラグを混入したセメント水ガラス注入材を基本の注入材料として使用している。

飯山トンネルにおいては、粗詰め注入等は止水性の良いセメント水ガラス注入材を使用した。骨格をなす注入は耐久性がより良いと判断された急硬性セメント注入材を使用している。鍋立山トンネルにおいては、湧水のない箇所であり、対象地山を地盤改良するため、すべての箇所において急硬性セメント注入材により施工している。また、葛

老山トンネルにおいては、耐久性を考慮した材料とするため覆工近くの湧水を止水する範囲についてはセメント水ガラス注入材を使用した。が、耐久性を要求した箇所においてはセメントミルクで対応するものとしている。

以上のことから耐久性を考慮しているとはいえ、室内における一軸圧縮強度等の材料試験結果を主に判断していることが多く、1年以上もの長期的な材料特性を把握し、かつ注入施工後の原位置での注入材料および注入域を長期的な視点から評価を実施した報告は殆どない。

上記に示したトンネルは何れも幹線鉄道の極めて重要な位置を占めるトンネルであり、セメント系薬液注入材の耐久性の評価がどのようなものであるかについては、トンネル構造物の健全性を評価するためにも有効な知見であるものと判断される。

参考文献

- 1) 北川修三，石川文夫，服部修一，秋田勝次，上田昭二三他：青函トンネル技術のすべて，「注入」，pp.157-164，鉄道界図書出版株式会社，1986.2.
- 2) 日本鉄道建設公団青函建設局：津軽海峡線工事誌（青函トンネル）第4編 技術研究開発 pp.400-401，1990.3.
- 3) 松尾昭吾，樋口芳朗，秋田勝次，北川修三，大久保進，吉見憲一，先山友康，吉川大三：青函トンネルの注入技術ーその歩みと明日への展開ー，pp.66-79，土木学会トンネル工学委員会・土木施工研究委員会，1986.11.
- 4) 日本鉄道建設公団青函建設局：青函トンネル技術誌第3編注入，pp.201-207，1990.
- 5) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会：最新地盤注入工法技術総覧，株式会社産業技術サービスセンター，pp.625-633，1997.10.
- 6) 大貫富夫，北川修三：地上360mからの薬液注入工事，トンネルと地下，vol.13，No.2，pp.25-31，1982.2.
- 7) 日本鉄道建設公団東京新幹線建設局：上越新幹線工事誌（大宮・水上間），pp.668-824，1983.10.
- 8) 竹津英二，小島隆，森田隆三郎：膨張性地山を多重支保工法で克服 北陸新幹線飯山トンネル木成工区，トンネルと地下，vol.34，No.8，pp.7-14，2003.8.

- 9) 都築保勇, 黒岩清貴, 福入博文, 杉本憲一: 高水頭未固結砂岩層の大崩落とその克服 北陸新幹線飯山トンネル(上倉工区・富倉工区), トンネルと地下, vol. 39, No. 8, pp. 7-14, 2008. 8.
- 10) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会: 最新地盤注入工法技術総覧, 株式会社産業技術サービスセンター, pp. 641-649, 1997. 10.
- 11) 秋田勝次, 木村裕俊, 佐藤一義: 高圧ガスを有する超膨張性地山の掘削 北越北線鍋立山トンネル, 土木施工, vol. 34, No. 2, pp. 53-63, 1993. 2.
- 12) 日本鉄道建設公団東京支社・関東支社: 北越北線工事誌(六日町～犀潟間), pp. 155-239, 1998. 3.
- 13) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会: 最新地盤注入工法技術総覧, 株式会社産業技術サービスセンター, pp. 634-641, 1997. 10.

第5章 セメント水ガラス注入材の耐久性に関する研究

5.1 セメント水ガラス注入材の材料特性

5.1.1 基本特性

昭和46年度～昭和50年度に日本鉄道建設公団青函建設局において、セメント水ガラス注入材の基本特性をセメントに関する因子(W/C；水ガラスに対するセメントスラリーの混合比、セメントの種類、高炉スラグ添加量、粉末度)、および水ガラスの因子（水ガラスの SiO_2 に対する Na_2O のモル比）について詳細に試験を実施している。青函トンネルに適した注入材料を開発することを目的として実施したものであるが、必要な注入材料の特性について次のように考慮した。

高水圧海底下の注入材料であり、軟弱破碎帯の改良材料であることから強度があり耐久性に問題のないこと、凝固時間を適度にとることができ、硬化体として周辺への影響がなく、かつ経済的な材料が望まれる。具体的な特性値として、強度としては青函トンネルに出現する黒松内層等の軟岩相当の 4.0N/mm^2 以上が望まれ、また、海水に対する耐久性があるものが要求された。ゲルタイムは、調査坑施工時以来の実績から考慮して3分以上が必要であった。注入材料は浸透性が大きな要素であり、低粘度のものが要求されるため、材料の大半（60～70%）が水分とならざるを得なく乾燥による劣化が欠点となる。その中で程よく強度を高めようとする、グラウトが高濃度かつ高粘度となりやすく、一般にゲルタイムも短くなるため浸透性に影響し、かつ高価な材料となりやすい。

このため、青函トンネルの海底下の注入は、その施工数量も膨大であることから、経済性および環境性（硬化体の周辺環境への影響がないこと）等から総合的に考慮して、無機系のセメント水ガラス注入材の改良が最も適合性が高いと判断された。

このことを受けて、セメント水ガラス注入材について、表-5.1.1に示す因子と水準で実験計画法にもとづき試験を実施した。

表-5.1.1 セメント水ガラス注入材の基本特性試験の因子と水準

特性値	因 子	水 準
ゲルタイム および 圧縮強度 (σ_3 , σ_7 , σ_{28})	水ガラスのモル比	$A_1=1.7$, $A_2=2.2$, $A_3=2.7$, $A_4=3.2$ (粘度= $0.08\text{Pa}\cdot\text{S}$)
	セメントスラリーの W/C	$B_1=100\%$, $B_2=150\%$, $B_3=200\%$
	水ガラスのセメントスラリー に対する混合比	$C_1=0.6$, $C_2=0.8$, $C_3=1.0$
	セメントの種類	普通ポルトランドセメント 高炉セメント (B 種) 高炉コロイドセメント

※ σ_7 は高炉コロイドセメントのみ実施

その結果、セメント水ガラス注入材は、図-5.1.1～図-5.1.5に示すような基本特性を有していることが判明した。また、セメントに対する高炉スラグの配合比およびブレン値とゲルタイムの関係についての試験結果を表-5.1.2に示す。なお、図-5.1.1～図-5.1.5は、実験計画法の分析手法に基づき、それぞれ着目する因子と水準以外の影響を平均化して実験結果を示したものである。

1) ゲルタイム

ゲルタイムについて、以下の傾向が確認できる。

- i) 水ガラスのケイ酸分とナトリウム分とのモル比が、1.7～3.2の範囲においては、モル比が小さいと顕著にゲルタイムは長くなる。（図-5.1.1）
- ii) セメントスラリーの水セメント比が大きいとゲルタイムは長くなる。（図-5.1.2）
- iii) 水ガラスのセメントスラリーに対する混合比（体積比）が大きいとゲルタイムが長くなる。（図-5.1.3）
- iv) セメントの粉末度が大きいと、ゲルタイムは短くなる。（表-5.1.2）
- v) セメントに混入する高炉スラグの配合比が大きいとゲルタイムは長くなる。（表-5.1.2）

表-5.1.2 高炉スラグの配合比とゲルタイムの関係

セメント		セメントスラリーの水セメント比 (%)			水ガラスのモル比
高炉スラグ配合比	目標粉末度 (cm ² /g)	100	150	200	
60:40	4,000	44 秒	1 分 05 秒	1 分 18 秒	3.2
	5,000	37 秒	56 秒	1 分 10 秒	
	6,000	32 秒	45 秒	53 秒	
45:55	4,000	51 秒	1 分 11 秒	1 分 54 秒	
	5,000	48 秒	1 分 04 秒	1 分 32 秒	
	6,000	34 秒	49 秒	1 分 03 秒	
30:70	4,000	1 分 16 秒	2 分 08 秒	3 分 23 秒	
	5,000	44 秒	1 分 17 秒	2 分 05 秒	
	6,000	33 秒	53 秒	1 分 17 秒	

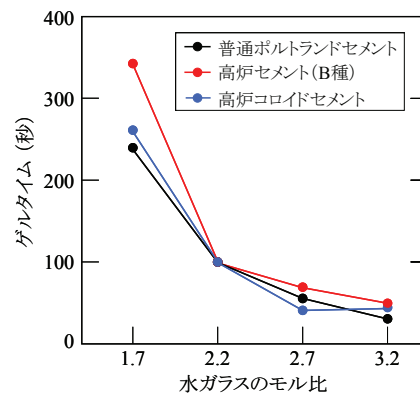


図-5. 1. 1 水ガラスのモル比とゲルタイムの関係

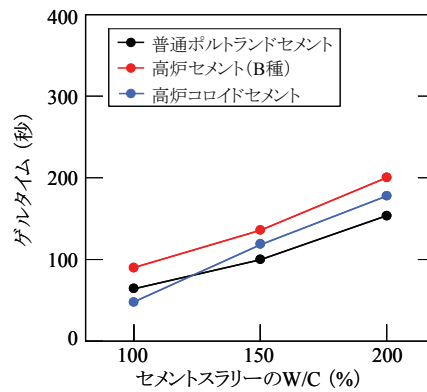


図-5. 1. 2 セメントスラリーのW/Cとゲルタイムの関係

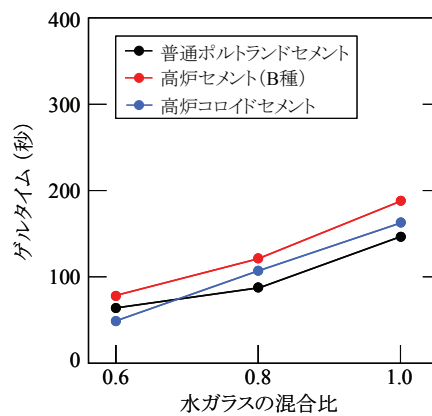


図-5. 1. 3 水ガラスの混合比とゲルタイムの関係

2) 圧縮強度

圧縮強度について、以下の傾向が確認できる。

- i) 水ガラスのモル比が小さいほど、初期強度(σ_3, σ_7)が高い傾向を示す。(図-5.1.4)
- ii) セメントスラリーの水セメント比が小さくなると強度が高くなる。また、水ガラスのセメントスラリーに対する混合比が小さくなると強度が高くなる。(図-5.1.5)

以上の結果から、ゲルタイム3分以上で圧縮強度が 4.0N/mm^2 以上という要求性能を満たすためには、モル比2.2以下の水ガラスでセメントスラリーの水セメント比と混合比を小さくすることが重要と判断された。

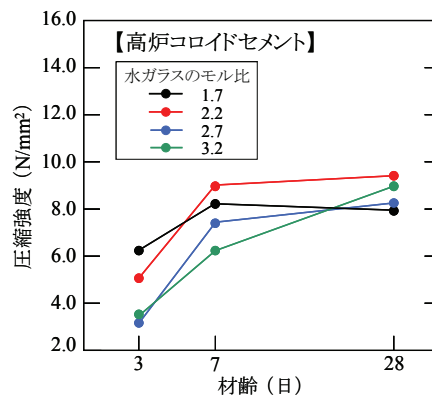


図-5.1.4 水ガラスのモル比と圧縮強度の関係（淡水養生）

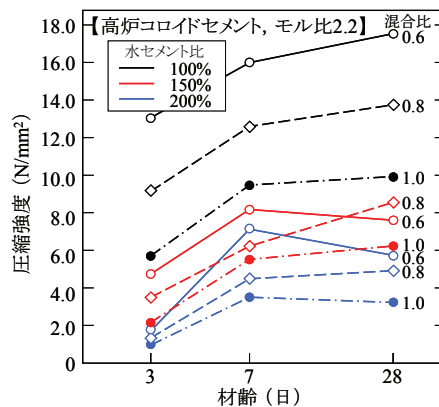


図-5.1.5 材齢と圧縮強度の関係（淡水養生）

5.1.2 長期材料特性

セメント水ガラス注入材の基本特性から、青函トンネルの注入工法に適合した性能を有する注入材料を見出せることが示唆されたため、淡水養生ならびに海水養生による耐久性試験を1年間にわたり実施した。その結果を図-5.1.6～図-5.1.10に示す。なお、図-5.1.6～図-5.1.10は、実験計画法に基づき表-5.1.1に示すような因子と水準で長期材齢(σ_{91} , σ_{182} , σ_{365})の圧縮強度について試験を実施したものであり、それぞれ着目する因子と水準以外の影響を平均化して実験結果を示したものである。

図-5.1.6に示すように淡水養生では、普通セメント、高炉セメント(B種)、高炉コロイドセメントのいずれも強度低下が見られないが、海水養生による試験結果では、図-5.1.7に示すように普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント(B種)の91日以降の強度低下が顕著である。しかし、高炉コロイドセメントは91日材齢が低下しているものの、182日材齢では強度が増加し、1年材齢でやや低下傾向を示すものの、普通セメントおよび高炉セメント(B種)よりも高い強度を維持している。なお、高炉コロイドセメントの91日材齢における強度が一旦低下しているのは、海水養生のまま容器に入れ運搬することを基本としていたが、この材齢の試料のみ運搬時に気中に曝してしまったため風化の影響が生じたものである。

海水中で養生した場合、強度低下ばかりでなく、供試体の破壊も発生し、以下のよう傾向が確認された。

- i) 普通ポルトランドセメントの強度低下が著しい。(図-5.1.7)
- ii) セメントスラリーの水セメント比が小さいほど強度低下が大きい。(図-5.1.8)
- iii) 水ガラスのモル比が小さいほど強度低下が大きい。(図-5.1.9)
- iv) 水ガラスのセメントスラリーに対する混合比が小さいほど強度低下が大きい。(図-5.1.10)

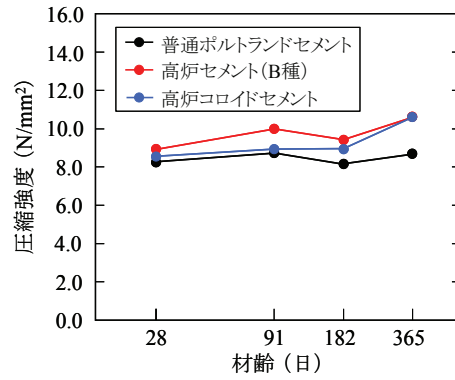


図-5.1.6 長期材齢と圧縮強度の関係（淡水養生）

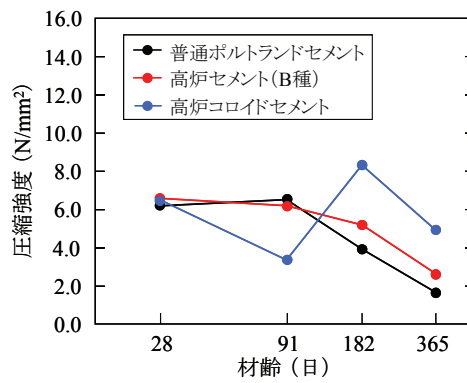


図-5.1.7 長期材齢と圧縮強度の関係（海水養生）

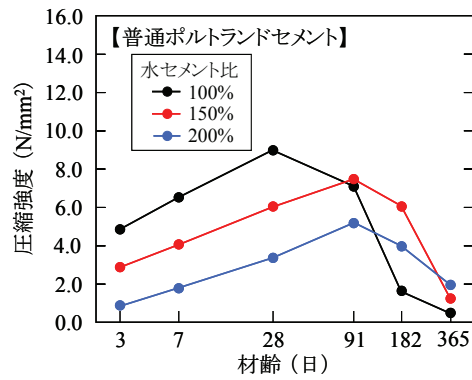


図-5.1.8 材齢と圧縮強度の関係（海水養生）

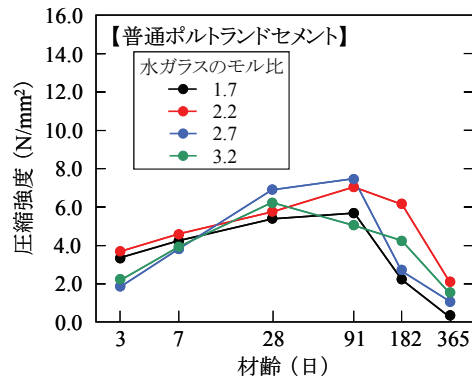


図-5.1.9 長期材齢と圧縮強度の関係（海水養生）

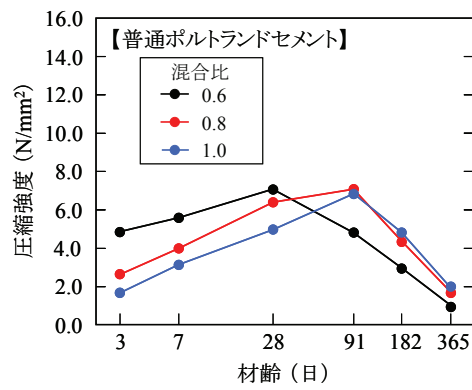


図-5.1.10 長期材齢と圧縮強度の関係（海水養生）

5.1.3 耐久性の劣化原因および耐久性向上対策

セメント水ガラス注入材の海水中における主な劣化原因は、各種の劣化原因追求試験を実施した長大海底トンネル用グラウトの耐久性に関する研究¹⁾によると以下のように判明している。

- i) セメント水ガラス注入材のアルカリ成分（特に水ガラス中の酸化ナトリウム(Na_2O)）の溶出によりグラウト硬化体が疎になること。
- ii) 疎になったグラウト硬化体中に海水養生水中のマグネシウムイオン(Mg^{2+})が侵入し、水酸化マグネシウム($\text{Mg}(\text{OH})_2$)を形成し、ひび割れを拡大させること。
- iii) 海水養生水中の硫酸イオン(SO_4^{2-})が硬化体中の微細なひび割れに侵入し、セメント成分中のアルミン酸三カルシウム($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)と反応し、エトリンガイド($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)を生成して膨張し、グラウト硬化体のひび割れを拡大すること。
- iv) セメント水ガラス注入材が硬化する過程で生じる水和反応時に、成分中のアルミン酸三カルシウム($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)が同じくセメント成分中の石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)と反応し、エトリンガイド($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)を生成して膨張し、グラウト硬化体のひび割れを拡大すること。

なお、上記の劣化原因のうち、i) および iv) は淡水中と海水中の双方で生じる現象であり、(2) ii) および iii) は海水中のみで生じる現象である。(2) i) および ii) の対策としては、セメント水ガラス注入材のアルカリ溶出を抑制することであり、(2) iii) および iv) の対策としては、グラウト硬化体のエトリンガイド生成を抑制することにある。したがって、耐久性向上対策としては、以下の2点が考えられる。

- i) 注入材中のアルカリ量を低減するには、水ガラス中の酸化ナトリウム(Na_2O)を減らすことが考えられ、そのために高モル比の水ガラスを使用するのが良い。さらに、溶出アルカリ量を減らすには、グラウト中のポルトランドセメントを減らし高炉スラグを混合したセメントを使用するのが良い。この高炉スラグは、アルカリと反応して水硬性を発現することによって溶出アルカリ量を抑制する効果がある。
- ii) グラウト硬化体中のエトリンガイドの生成を少なくするためには、グラウト中のポルトランドセメントの割合を減らすことが必要であるが、このことは高炉スラグを適度に混合したセメントの使用により達成される。

また、セメントスラリーに対する水ガラスの混合比を大きくすることは、グラウト中の骨格成分であるシリカ(SiO_2)量を増加させることにつながると同時に、ポルトランドセメントの割合を減らすことにもなるため、アルミン酸三カルシウム($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)の含有量を減少させ、エトリンガイト($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)の生成を抑制することから、表-5.1.3に示すように混合比1.0以上の場合は崩壊が生じていない。

これらの耐久性向上対策およびゲルタイムを考慮し、青函トンネルの注入材料として開発されたのが、高炉コロイドセメントとモル比2.2程度の水ガラスを用いたセメント水ガラス注入材である。実際の施工に用いられた最適配合は、セメントスラリーと水ガラスの混合比を1.0とした表-5.1.4に示すものであり、青函トンネル海底部の先進導坑、作業坑および本坑で採用された。

表-5.1.3 混合比の変化と崩壊日数（海水養生）

試料 No.	水ガラス の モル比	セメントスラリー の 水セメント比(%)	混合比	崩壊日数
			$\frac{\text{水ガラス}}{\text{セメントスラリー}}$	
A	2.2	148	0.24	18 日
B		147	0.42	18 日
C		145	0.66	20 日
D		142	1.01	※
E		137	1.56	※
F		130	2.54	※
G		116	4.76	※

※ 150 日経過後も崩壊の兆候が確認されなかったもの。

【試験条件】

- ・セメント: 普通ポルトランドセメント
- ・供試体: $\phi 2.0\text{cm} \times 3.5\text{cm}$
- ・150 日経過時点までの崩壊の有無を確認
- ・配合「G」は作製困難なため、供試体は作製せず。

表-5.1.4 青函トンネルで使用した注入材の最適配合と特性

水ガラス の モル比	セメント		混合比	ゲルタイム	圧縮強度 σ_{28} (N/mm^2)
	種 別	セメントスラリーの 水セメント比(%)	$\frac{\text{水ガラス}}{\text{セメントスラリー}}$		
2.2	高炉コロイド セメント (スラグ55%)	200	1.0	3 分 40 秒	4.48

5.1.4 海底下の注入状況を考慮した各種試験

1) グラウト飽和海水による耐久性試験

グラウトは、主に海水下の数ミリオーダーの細かい岩盤中のクラックに圧入されるが、海水と接する部分はグラウト全体量の中ではわずかな量と推察される。また、グラウトと局所的に接する海水は、グラウトの溶出成分で飽和された状態、あるいは部分的に崩壊したグラウトを含んだ環境にあると考えられる。このような状態を想定し、砕いたセメント水ガラス注入材の硬化体を入れたグラウト飽和海水の中に試験体を養生し耐久性試験を実施した。その結果を図-5.1.11に示す。供試体を直接海水に浸して養生した場合と違いを見せ、養生水がグラウトの溶出成分で飽和された状態ではグラウト硬化体の劣化は進行していないことが確認された。

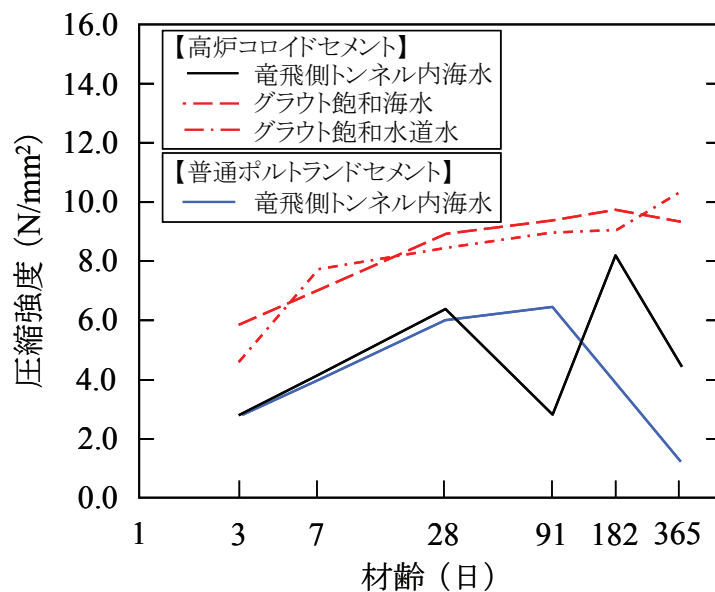


図-5.1.11 グラウト飽和海水による耐久性試験結果

2) 密封養生試験

高圧で岩盤中の細かいクラックに注入されたセメント水ガラス注入材は、岩盤に密封されている状態であると考えられるため、そのような条件で存在するグラウトの耐久性について試験を行った。試験は、 $\phi 5.0 \text{ cm} \times 10.0 \text{ cm}$ のモールド内にセメント水ガラス注入材の供試体を作製し、脱型せず上下面に鉄板を当てシャコ万力で軽く押さえた状態で海水養生を行った。その結果を図-5.1.12に示すが、密封された条件においては、圧縮強度の低下が認められず、劣化が進行しないことが判明した。

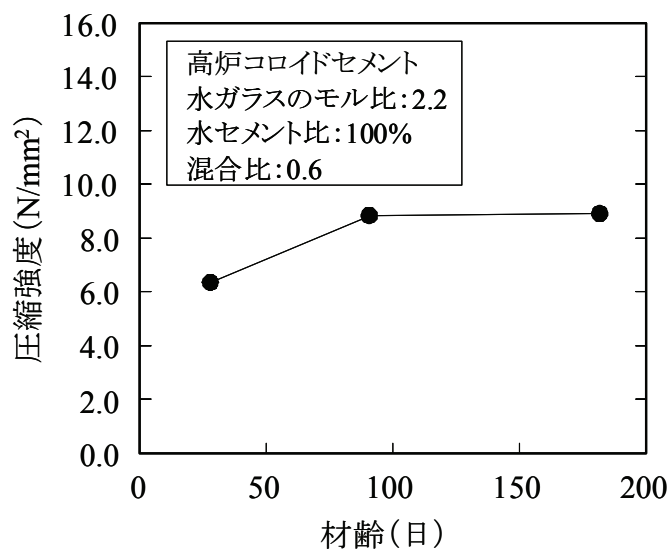
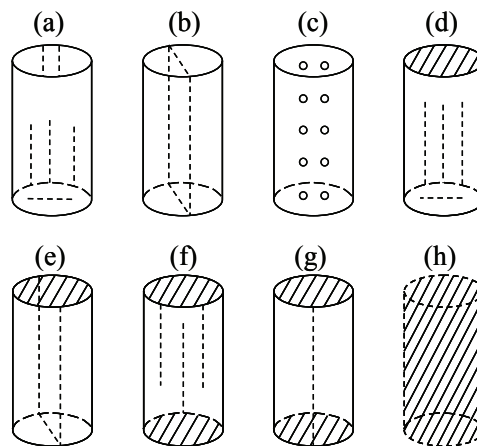


図-5.1.12 密封養生試験における材齢と圧縮強度の関係

3) 海水の接触条件の相違による崩壊性

青函トンネル海底部の岩盤内におけるグラウト状況から、グラウトに接触する海水の量は少なく、また海水に接触するグラウト表面積も小さく、しかも密封された状態にあると考えられることから、海水に接触するグラウト表面積や接触状態の相違による崩壊性の差について試験を行った。

供試体は崩壊しやすい条件の配合を考え、水ガラスのモル比は1.7、セメントは普通ポルトランドセメント、W/C=100%、混合比0.6とした。また、供試体はポリエチレン容器の中に作製した。各供試体と海水との接触条件を図-5.1.13に、崩壊日数の結果を表-5.1.5に示す。この結果から、海水との接触面積が大きいほど、また密封されないほど崩壊しやすいという傾向が確認できる。特に、接触状態によって崩壊性に差が見られるようである。



※ 破線箇所およびハッチング面を海水に接触させている。

図-5.1.13 各供試体と海水との接触条件

青函トンネルの注入材料の要求性能（ゲルタイム3分以上、圧縮強度 4.0 N/mm^2 以上）を満足する配合としては、表-5.1.4に示すように、水ガラスのモル比2.2でセメントスラリー（高炉コロイドセメント）の水セメント比が200%であり、これを適用することで注入域が保持されると判断した。また、ゲルタイムをより短くする場合に150%およ

び100%の水セメント比のセメントスラリーを適用するものとした。さらに、一般に注入材としては、経済性からもJIS規格の水ガラス原液を50%に希釈することが多いが、青函トンネルの場合、水ガラス原液（粘性 $0.08 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 程度）をそのまま使用することでシリカ(SiO_2)量を18%程度と多く設定し、セメント水ガラス注入材の耐久性の向上を図るものとした。

表-5.1.5 各供試体の海水との接触条件と崩壊日数

試料	接触面積	崩壊日数
(a)	線の部分	※
(b)	線の部分	※
(c)	20cm^2	※
(d)	20cm^2 (上面), 線の部分	※
(e)	20cm^2 (上面), 線の部分	62 日
(f)	32cm^2 (上面, 下面), 線の部分	※
(g)	32cm^2 (上面, 下面), 線の部分	39 日
(h)	138cm^2 (全面)	25 日

※ 100 日経過後も崩壊の兆候が確認されなかったもの

5.2 セメント水ガラス注入材の施工後の評価

5.2.1 青函トンネル供用後のセメント水ガラス注入材の長期材料特性

1) 施工後30年経過したセメント水ガラス注入材の観察と物理試験

注入域におけるセメント水ガラス注入材の長期材料特性を把握することを目的として、青函トンネル海底部の作業坑において側壁部からボーリング調査を実施し、採取したコアを用い、各種試験を実施した。

a) 目視観察

注入施工後30年経過した箇所において実施したボーリングのコアから採取した直後の試料の状況を写真-5.2.1に示す。コアからは、岩盤の亀裂に脈状に密着した堅硬なグラウトが観察された。トンネル地山内のグラウトは大半が岩盤の亀裂に存在し密封され湿潤状態であるため、当初から想定されたとおりグラウトは崩壊することなく、安定した固結物となっている。

また、注入施工から10年経過後に採取し、その後青函トンネル坑内において20年間コア箱に保存していた試料を観察したところ、コア自体の乾燥はかなり進んではいたものの、一般に乾燥に弱いセメント水ガラス注入材ではあるが、写真-5.2.2に示すようにグラウトの固結状況は良好であった。



写真-5.2.1 施工30年後に採取した直後の試料の状況

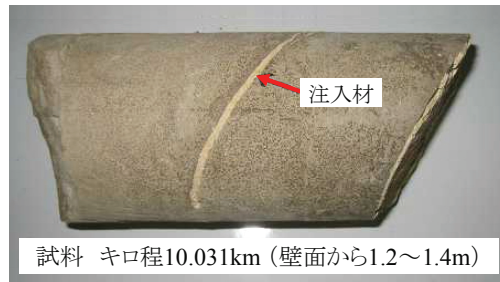


写真-5.2.2 施工10年後に採取した後コア箱で20年間保管した試料の状況

b) 物理試験

ボーリングコアから採取した試料中のグラウト部分を対象に、針貫入試験による強度推定を実施した。針貫入試験は、軟岩ペネトロ計を用いてグラウト部分に針を貫入し、その際の貫入長と貫入抵抗値の勾配から圧縮強度を推定する方法である。針貫入試験結果を表-5.2.1に示す。その結果、試料採取直後に試験を実施したものでは、注入材の要求性能である 4.0 N/mm^2 を上回る圧縮強度を有していることが確認できた。ただし、試料採取から長期間経過したものでは 1.5 N/mm^2 の結果を示しており、乾燥による表面劣化の影響が生じているものと考えられる。

表-5.2.1 針貫入試験結果

No.	針貫入試験の実施時期	コアリング位置	圧縮強度 (N/mm^2)	備 考
1	試料採取直後	15.520km (壁面から 1～2m)	5.3	
2		15.520km (壁面から 2～3m)	9.7	
3		15.520km (壁面から 8～9m)	8.7	
4	試料採取から 約 20 年後	10.031km (壁面から 1.2～1.4m)	1.5	試料の乾燥による 劣化の影響

2) セメント水ガラス注入材の化学分析結果の経年変化

セメント水ガラス注入材の経年による変化を検討するため、ボーリングコアからセメント水ガラス注入材を採取し、その組成の変化から劣化生成物の有無を調査した。

ボーリングは青函トンネル海底部における作業坑ならびに先進導坑の注入ゾーン（壁面から最大15 m）内で全て実施しており、長さ10 mのコアを採取した中に観察されたグラウト硬化体の化学組成を分析した。セメント水ガラス注入材の配合組成の計算値および経年後（0.1年、10年、12年、17年、19年、30年）に採取したコアからグラウトの組成を分析した結果を図-5.2.1に示す。図中には、注入材の設計配合から算定した配合計

算値を併せて示している。実施工で使用した高炉コロイドセメントおよび水ガラスの化学成分と物性をそれぞれ表-5.2.3と表-5.2.4に示す。

この結果を見ると、青函トンネルで注入されたセメント水ガラス注入材においては、注入直後からグラウトの骨格成分であるシリカ分(SiO_2)およびアルミナ分(Al_2O_3)が、実際に注入された平均的な配合 ($\text{W/C}=150\%$, 200%) の配合計算値より30%程度大きい値を示し、特にシリカ量は30年経過しても25%程度で変動せず安定している。一方、経年とともに Na_2O および CaO 量が減少し、 MgO 量が増加する組成変化が認められる。このことから、セメント成分である Ca^{2+} と海水中の Mg^{2+} の置換が注入実施後の早い段階から始まっているといえる。注入直後 (0.1年) においては、 CaO と Na_2O の含有率は高い位置にあるが、10年経過以降のセメント水ガラス注入材の組成は、 MgO が増加傾向を示すものの概ね安定した組成となっている。なお、 MgO が増加傾向を示しているものの、前述のとおり表-5.2.1に示す針貫入試験結果からは、注入材は十分な圧縮強度を保持していることが確認されている。

青函トンネル海底下におけるセメント水ガラス注入材と海水との反応は、通常認められる程度の反応であり、現在のところ特に問題となるものではないものと判断してよい。

また、図-5.2.2にセメント水ガラス注入材の粉末X線回折結果を示す。セメント水ガラス注入材が海水と反応して生じるエトリンガイト、フリーデル氏塩、水酸化マグネシウム等の劣化に影響を与える生成物は認められておらず、地山岩石成分の他に低結晶質スメクタイト様物質および石膏（硫酸カルシウム）が極めて微量に認められる程度であった。

表-5.2.2 注入材成分分析結果の経年変化

採取時期	経過 年数	各組成の含有率(%)							
		SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Cl
1980.10～11	0.1 年	24.27	—	10.44	—	4.46	—	—	—
1991.9	10.1 年	24.40	1.97	3.72	3.61	2.31	—	—	—
1992.8	10.5 年	25.11	2.06	3.12	6.10	1.86	—	—	—
1994.3	11.8 年	22.00	1.90	1.45	4.49	3.47	0.29	0.45	2.29
1994.3	12.0 年	24.54	2.24	2.84	3.65	2.07	0.35	0.37	0.73
1999.10	17.3 年	24.47	3.24	1.21	7.75	1.47	0.20	0.32	0.68
1999.12	18.8 年	25.49	2.92	1.59	7.05	1.29	0.20	0.32	0.64
2007.10	29.8 年	25.99	3.48	1.67	4.16	1.70	0.55	0.52	0.61
配合計算値($\text{W/C}=150\%$)		19.10	2.14	10.40	0.60	6.62	0.00	0.34	—
配合計算値($\text{W/C}=200\%$)		18.42	1.73	8.42	0.49	6.80	0.00	0.32	—

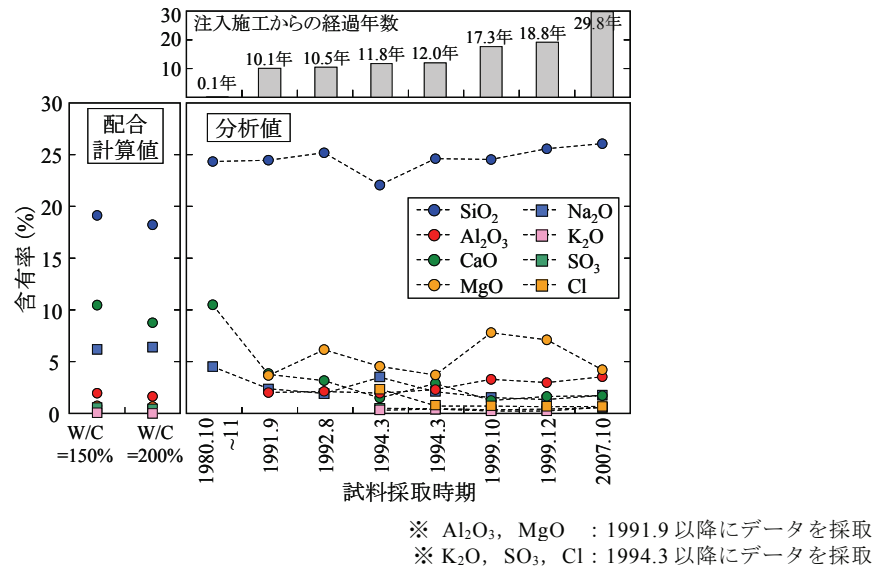


図-5. 2. 1 注入材成分分析結果の経年変化

表-5. 2. 3 高炉コロイドセメントの化学成分と物性

化学成分(%)								
ig. loss	insol.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO	SO_3
0.4	0.1	27.3	10.6	1.6	0.4	53.3	3.1	1.9

※ 比重:3.02, プレーン値:6,430 (cm^2/g)

表-5. 2. 4 水ガラスの化学成分と物性

化学成分(%)		モル比	粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
SiO_2	Na_2O		
24.31	11.36	2.21	0.08

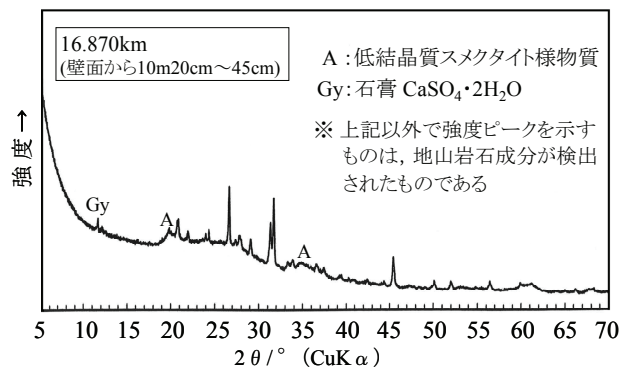


図-5. 2. 2 セメント水ガラス注入材の粉末 X 線回折結果

3) 化学分析結果に対する考察

セメント水ガラス注入材の骨格成分(SiO_2 , Al_2O_3 等)が、30%程度多く分析されていることは注目されるが、これは青函トンネルの注入が高压湧水下での注入であり、最終注入圧が湧水圧の3倍程度 ($2.5\text{MPa} \times 3 \text{倍} \approx 7.5 \sim 8.0\text{MPa}$) もの高压で注入されていることから、グラウトが加圧され脱水現象が生じているためと推察される。

セメント水ガラス注入材の加圧脱水現象を再現するため、図-5.2.3に示す加圧脱水試験装置²⁾を用いて、ゲル化直後のグラウトを加圧し脱水させる試験を実施した。その結果を図-5.2.4に示す。水セメント比が150%の配合よりも200%の配合の方が脱水率は大きく、3.0MPa以上の高压条件下では、水セメント比が150%の場合で25～27%程度、200%の場合で30～35%程度の脱水作用が確認できる。このことから、ボーリングコアから採取されたグラウトのシリカ(SiO_2)分が配合計算値より30%程度大きくなった原因として、加圧脱水作用の影響が生じていることが挙げられる。加圧前後の化学成分の変化を表-5.2.4に示す。この結果から、加圧脱水作用によって水ガラスの成分であるシリカ(SiO_2)分が増加していることが確認できる。一方、 Na_2O については、試験中に一部が水と一緒に溶脱したため、加圧の前後における変化は小さい結果となっている。また、セメント成分であるアルミナ(Al_2O_3)およびCaOに増加傾向が見られるが、図-5.2.1で示したように実トンネルにおいては、 Ca^{2+} と海水中的 Mg^{2+} の置換が注入実施後の早い段階で始まっており、CaOは長期的には減少傾向を示している。

加圧脱水時の圧縮強度の測定結果を図-5.2.5に示す。5MPaの加圧条件において、セメントスラリーの水セメント比が150%の場合で10～25%程度、水セメント比が200%の場合で25～60%程度の圧縮強度の増加が確認できる。

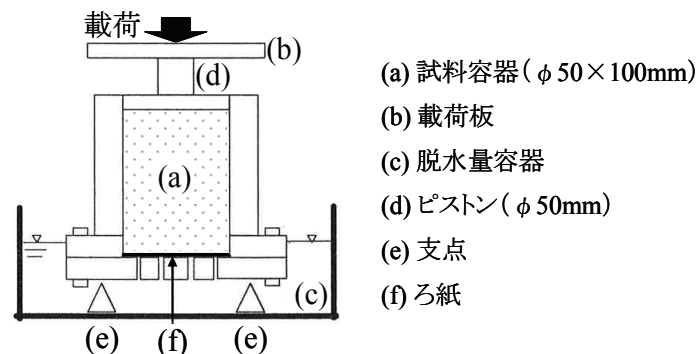


図-5.2.3 加圧脱水試験装置²⁾

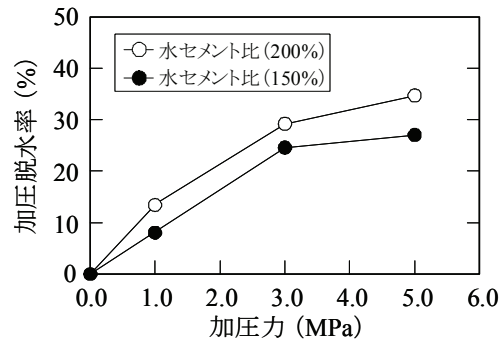


図-5.2.4 セメント水ガラス注入材の加圧脱水試験結果

表-5.2.4 加圧前後の化学成分の変化 (W/C=200%)

加圧力	化学成分 (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl	その他
0MPa	18.9	1.5	8.1	0.6	6.1	0.1	0.4	0.0	64.3
5MPa	22.8	2.4	13.5	0.9	5.8	0.1	0.4	0.01	54.0

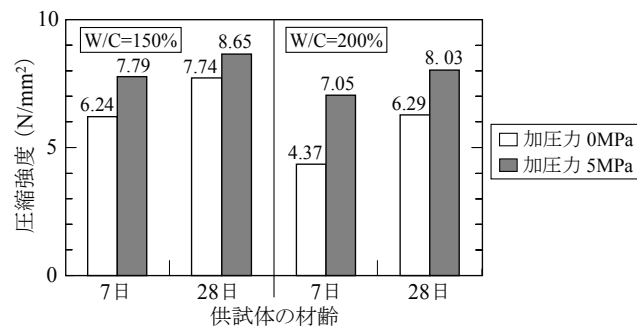


図-5.2.5 加圧脱水時の圧縮強度の測定結果

セメント水ガラス注入材の化学分析結果に対する考察は以下のとおりである。

- a) 高压条件下で注入されたグラウトは、加圧脱水されて骨格成分(SiO₂, Al₂O₃等)が増量され密実な構造を形成しており、30年経過後であっても注入域を安定して維持していると考えられる。
- b) 注入域内で採取された硬化体のどの部位においても、海水との反応によるグラウトの成分変化に、10年～30年経過後も顕著な進行が認められない。
- c) 30年経過後であっても、グラウトと海水との反応で生じる劣化生成物がほとんど認められない。

また、上記に加え、目視観察からもグラウトと岩盤との接合状態が密実で良好であることから、海底部におけるセメント水ガラス注入材の性状は特に問題がないものと推察される。

5.2.2 セメント水ガラス注入材で施工された青函トンネルの注入域の評価

1) 注入域に関する各種計測データの経年変化

青函トンネル海底部においては、維持管理業務の一環として、各種計測が供用開始時から継続的に実施されている。図-5.2.6に青函トンネル海底部における各種計測の実施箇所を示す。

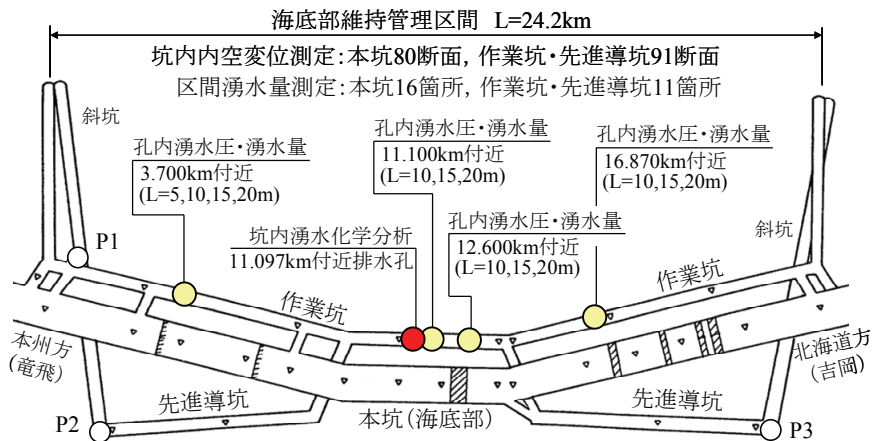


図-5.2.6 青函トンネル海底部における各種計測の実施箇所

2) 注入域の湧水圧の状況

青函トンネル海底部の作業坑において、注入域およびその外側の地山部分における湧水圧の分布を測定した。測定方法は、壁面から地山側にボーリング孔（長さ5m、10m、15m、20m）を設け、壁面の口元管周囲を閉塞したうえで各孔に水圧計を設置するものである。

図-5.2.7および図-5.2.8に、作業坑の注入域における湧水圧測定を最大15年間測定した結果を示す。注入範囲は、3～4Rが多く、その次に5R、一部に6Rで設計されたが、湧水圧測定ボーリングにおいて3R(作業孔壁から5m)までは湧水がほとんどなく、湧水測定はようやく10mで観測可能であり、孔壁から0～10mの注入範囲の注入効果は非常に大きいものであった。

測定開始時点から現在まで概ね湧水圧の変動は小さく、注入域内の湧水圧は、海底下における本来の最大湧水圧である2.4MPaと比較し極めて小さく、注入効果が良く発揮されていることを示している。また、注入域を超え注入半径の2倍近い深度となっても、湧水圧はさほど大きくない。このことは、設計注入域を超えて注入材料が入っ

ており、止水性が高いことを示しており、トンネルとしては安全側の構造体となっているものといえる。青函トンネルの注入施工においては、圧力管理を主体とした注入方式をとっていたため、所定の最終注入圧になるまで、換言すれば、注入対象領域が所定の透水係数になるまで安全側に注入されたものと考えてよい。

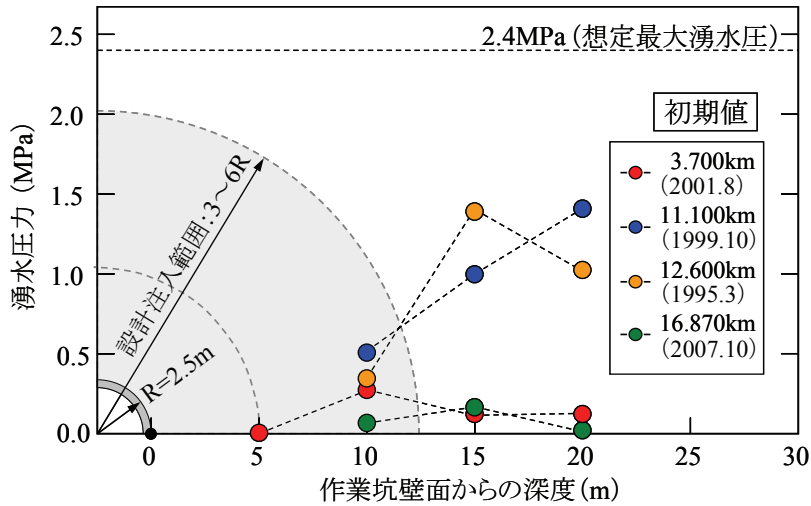


図-5.2.7 注入域における湧水圧の分布（初期値）

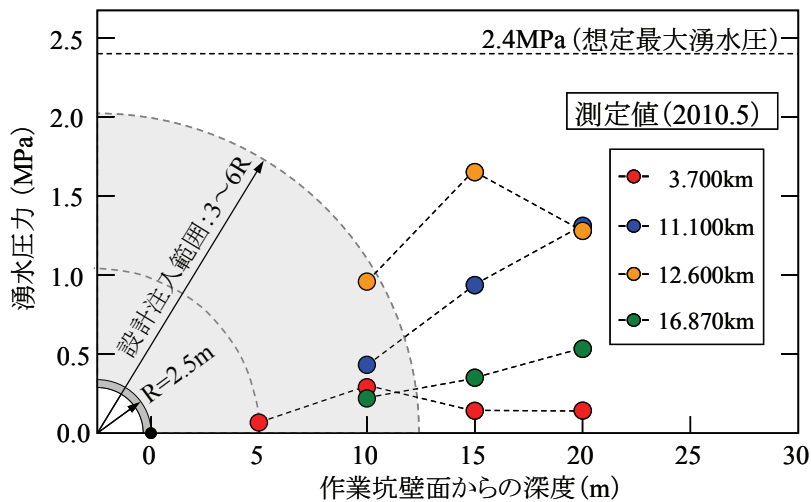


図-5.2.8 注入域における湧水圧の分布（2010.5時点）

3) 注入域の湧水量の状況

湧水圧測定に使用したボーリング孔からの湧水量の経年変化について、作業坑2箇所（16km870m付近、11km100m付近）の状況を図-5.2.9に示す。注入域内の湧水量は数 ℓ /minオーダーと小さく、10年経過後も湧水量の変動は微量であり、注入域は健全性を保持しているものと考えられる。

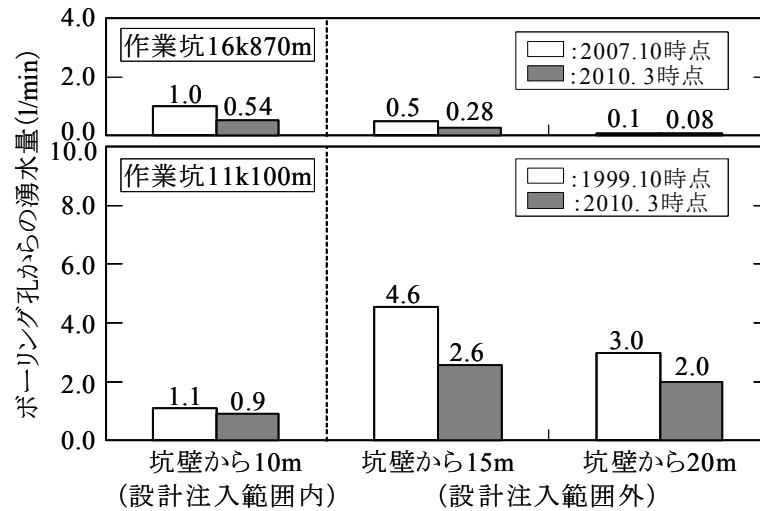


図-5.2.9 注入域における湧水量の変化

4) 注入域の透水係数

作業坑15k500m付近において注入試験を行い、透水係数を求めた。その結果、 $7.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ と $8.7 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ であった。青函トンネルにおける注入域の透水係数は、注入後に削孔する確認孔により把握可能である。図-5.2.10に青函トンネルの先進導坑および作業坑で得られた注入前のさぐり削孔時と注入後の確認孔の透水係数を示す。注入試験を実施した地質は、凝灰質砂質泥岩と砂質泥岩が卓越したところであり、建設当時の注入後の透水係数の範囲内と判断できる。

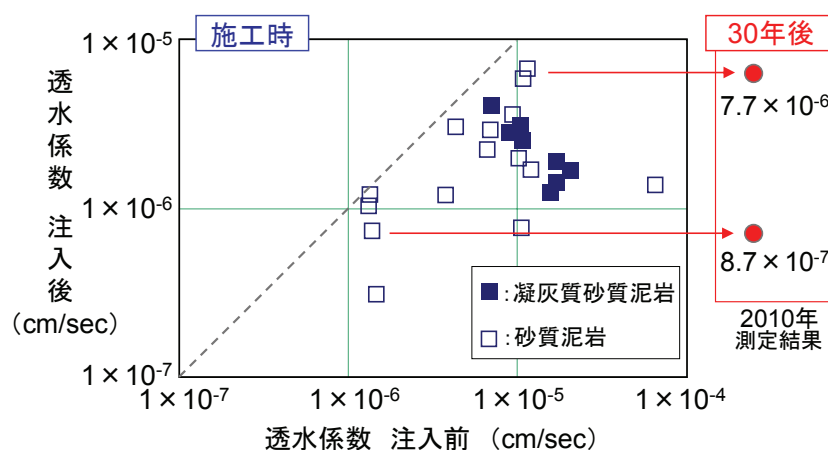


図-5.2.10 透水係数分布図（施工前と施工後の比較）

5) 注入域の湧水化学分析結果の経年変化

青函トンネル作業坑壁面からの坑内湧水の化学分析を継続的に実施している。図-5.2.11に坑内湧水化学分析結果の経年変化を示す。図中には、津軽海峡で採取した海水の分析結果も併せて示している。供用開始後20年経過しても湧水温度、湧水量、電気伝導率、pHの変化は微少であり、また各化学成分の含有量もほぼ一定の傾向となっていることが確認できる。また、坑内湧水の化学成分には、海水成分と比較し顕著な差は確認されていない。これらのことから、トンネル坑内への湧水とともに注入材の成分が溶脱しているような現象は生じていないことが想定され、注入域は長期的に安定した状態を保持しているといえる。

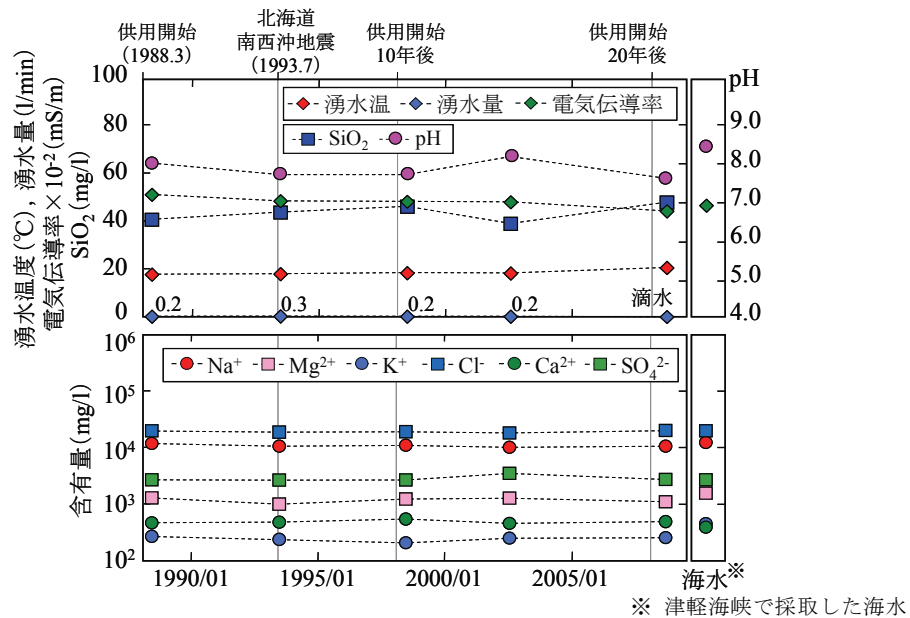


図-5.2.11 透水係数分布図（施工前と施工後の比較）

6) 注入を実施した海底部の坑内湧水量の経年変化

図-5.2.12に海底部の坑内湧水検知箇所と排水経路を示す。青函トンネルは、P1、P2、P3のポンプ座から全湧水を排水している。青函トンネル供用20年後までの湧水量の経年変化を図-5.2.13に示す。海底部の合計湧水量は、供用開始時に12 m³/min程度であったものが、最近では8 m³/min程度に減少している。1993年7月の北海道南西沖地震の際に、一時的に全体湧水量が12 m³/min程度に増加してはいるものの、供用開始以降、継続的な減少傾向を示している。

箇所別の湧水量に着目すると、作業坑海底部は $2 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度で長期的な変化は微小であるが、先進導坑および本坑の海底部については、先進導坑が $5.6 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度から $4.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度、本坑が $3.4 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度から $2.3 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度と、それぞれ約3割の減少を示している。

このように、坑内湧水量が長期的に増加傾向を示していないことから、グラウト硬化体は劣化や破壊を生じておらず、注入域として健全な状態を保っていると考えられる。なお、トンネルの坑内湧水量が減少傾向を示す場合、トンネル構造物に作用する水圧が増加することが懸念されるが、土谷の研究⁴⁾によれば、青函トンネルの坑内湧水量の長期的な減少は、注入域の透水性が全体的に低下することに起因するものであり、覆工背面の導水機能を確保することによりトンネルに水圧を作用させなければトンネル構造物の健全性は保持されとの知見が示されている。

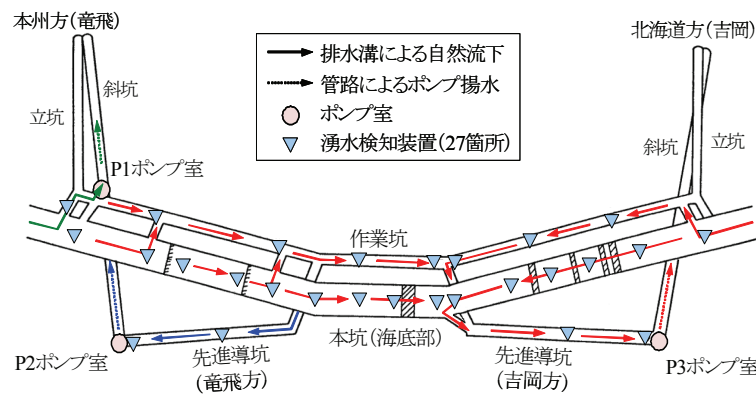


図-5.2.12 青函トンネル海底部湧水量測定箇所

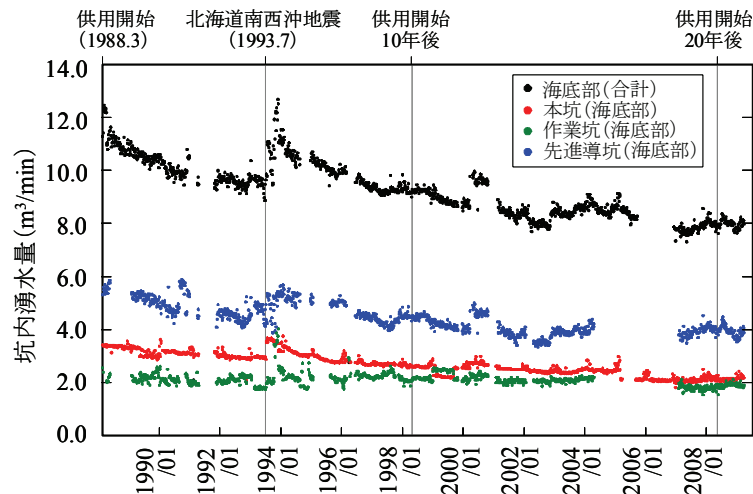


図-5.2.13 海底部における坑内湧水量の経年変化

7) 本坑における坑内内空変位の経年変化

青函トンネル本坑では、海底部を含む80断面において坑内内空変位測定を供用開始時から約20年間にわたり2回/年の頻度で継続的に実施している。本坑における坑内内空変位測定結果の経年変化の一例を図-5.2.14に示す。また、坑内内空変位の実績（4-1測線）を図-5.2.15に示す。これらの結果より、坑内内空変位は長期的にはごく緩やかな縮小傾向となっているものの、出水断層部をはじめとする地質不良箇所であっても最大で±3mm程度の範囲内で推移しており、長期的に安定した挙動を示していると考えられる。

また、2003年～2005年の坑内内空変位測定の結果から算定した本坑海底部の内空変位速度の実績³⁾を図-5.2.16に示す。4-1測線の一部を除き、ほとんどの測定断面で内空変位速度は1mm/年以下の目安⁴⁾を下回っており、維持管理上問題となるような傾向は認められていない。

青函トンネル海底部における各種計測データの経年変化から、注入域の劣化等を示すような結果は確認されておらず、注入域は長期的に健全な状態を保持している。

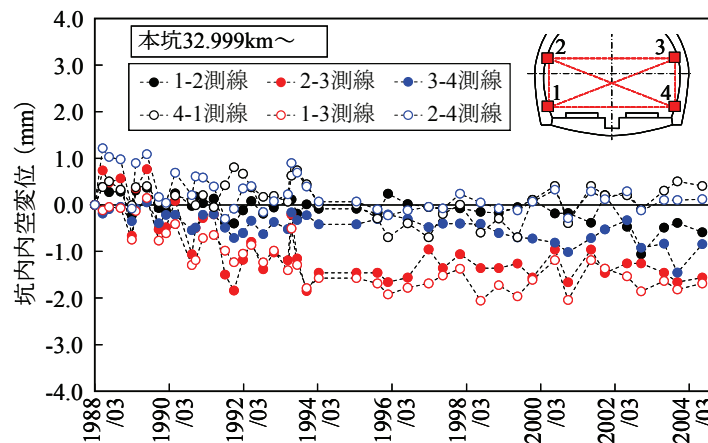


図-5.2.14 本坑における坑内内空変位測定結果の経年変化³⁾

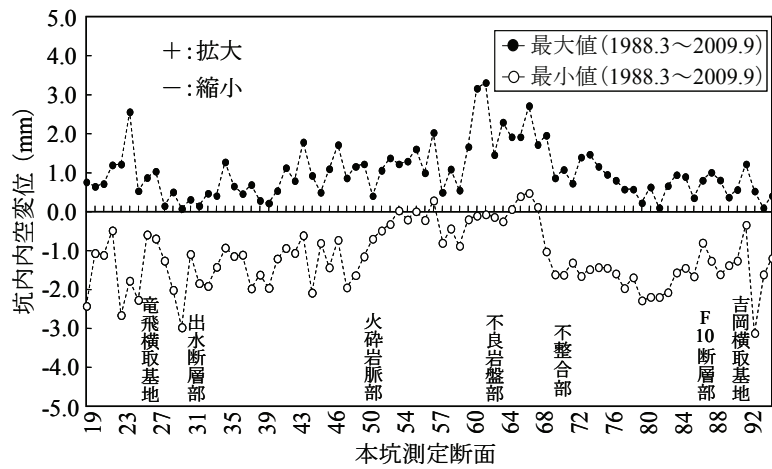
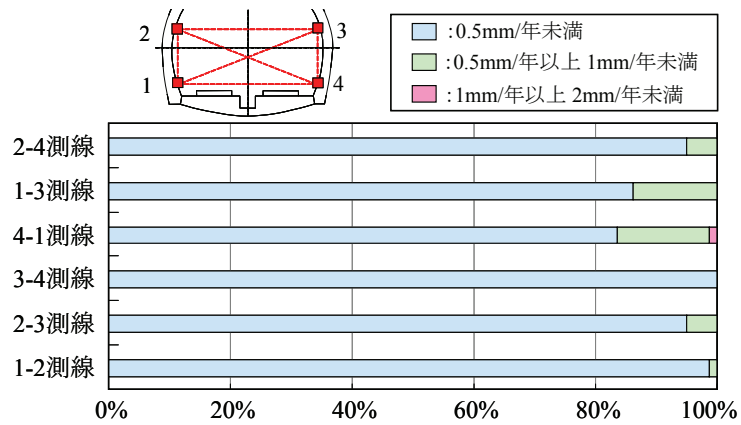


図-5.2.15 本坑における坑内内空変位の実績（4-1 測線）³⁾



※ 2003～2005 年の計測結果より算出

図-5.1.16 本坑における坑内内空変位速度の実績³⁾

5.3 セメント水ガラス注入材の今後の展開

5.3.1 高炉スラグの活用について

2.3.1の2)で述べたように丸安博士ほかのMS工法の開発⁵⁾により高炉スラグの添加でゲルタイムを長くすることができ、かつ耐久性の大きい注入材料として取り上げられたことで、青函トンネルの建設において更に改良・研究され、高炉スラグが55%添加された高炉コロイドセメントが昭和48年から本格的に使用された。高炉セメントについては、平成13年度に「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」（グリーン購入法）で、公共工事の資材としてセメント製造時に二酸化炭素排出量の少ない高炉セメントが品質指定され、国等の機関でその使用が増加している。また、京都議定書が平成17年2月に発効されたことにより、わが国は2008年から2012年までの間に温室効果ガスを1990年比で6%削減することが、国際公約となっており、これを達成するために「京都議定書目標達成計画」が策定されたが、このなかにも「高炉スラグ等を混合したセメントの利用拡大する」ことが明記された。それより遡ること30年以上前の昭和40年代後半（1970年代）より、青函トンネル等で大量の高炉スラグの使用がなされたことは、日本の建設界が地球温暖化の防止に向け、大きく貢献したといえる。

セメント水ガラス注入材のゲルタイムだけではなく長期強度（材齢182日）も考慮した場合、セメントスラリーに対してどの程度のスラグ添加率が最適かという点について、昭和50年度に青函トンネル注入材料開発委員会で次のような試験計画により試験を行っている。

高炉スラグの分量：55%、70%、85%

水ガラスのモル比：1.7、2.2、2.7、3.2（20℃の粘度が0.08Pa・S）

セメントスラリーの水セメント比：100、150、200%

水ガラスのセメントスラリーに対する混合比：0.6、0.8、1.0

養生方法：水中養生、海水（トンネル坑内水養生）

その結果について、ゲルタイムと材齢182日までの強度を図-5.3.1、5.3.2に示す。また、表-5.3.1に浸食促進試験として硫酸マグネシウム溶液（0.5モル）中で供試体が浸食されるまでの浸漬日数を、表-5.3.2に塩化マグネシウムならびに硫酸ナトリウム

(0.5 モル) 中でセメント水ガラス注入材が浸食されるまでの浸漬日数を、それぞれ 100 日まで観察した結果を示す。

この試験から、水ガラスのモル比が小さくなる、また水ガラスの混合比および水セメント比が大きくなると、ゲルタイムが長くなるという特性は、5.1.1 に述べたとおりであるが、高炉スラグの分量を 55%から 70%および 85%と多くしていくとゲルタイムは長くなり、海水に対する耐浸食性も向上している。添加量が多くなると短期強度(3 日,7 日)は小さいが、長期強度(182 日)は、水中養生および海水養生で高炉スラグの添加量が 70%程度までは変りが少ないので高炉スラグの分量は 70%まで拡大しても問題なく、85%添加した場合についても、材齢とともに強度が増加し、55%、70%添加における強度までは達していないが十分な品質が得られている。

また、硫酸マグネシウム溶液、塩化マグネシウム溶液および硫酸ナトリウム溶液中での浸食促進試験においても、高炉スラグの添加量を 55%、70%および 85%と増量したほうが、浸食され破壊にするまでの日数が長くなる傾向を示している。

今後、耐久性に主眼を置いた場合のセメント水ガラス注入材の展開としては、青函トンネルに適用した高炉コロイドセメント(高炉スラグ添加量 55%)より、それ以上の高炉スラグ添加量である 70%や 85%の適用を考えることが有効であり、このことは地球環境への貢献もあわせ持っている。

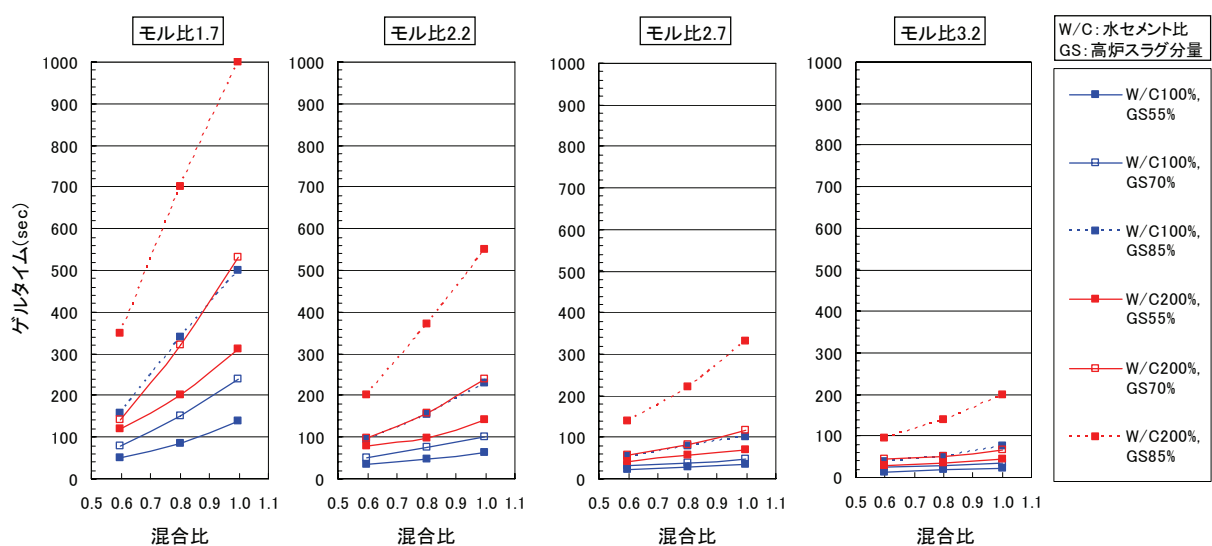


図-5.3.1 ゲルタイムにおよぼす高炉スラグの分量の影響

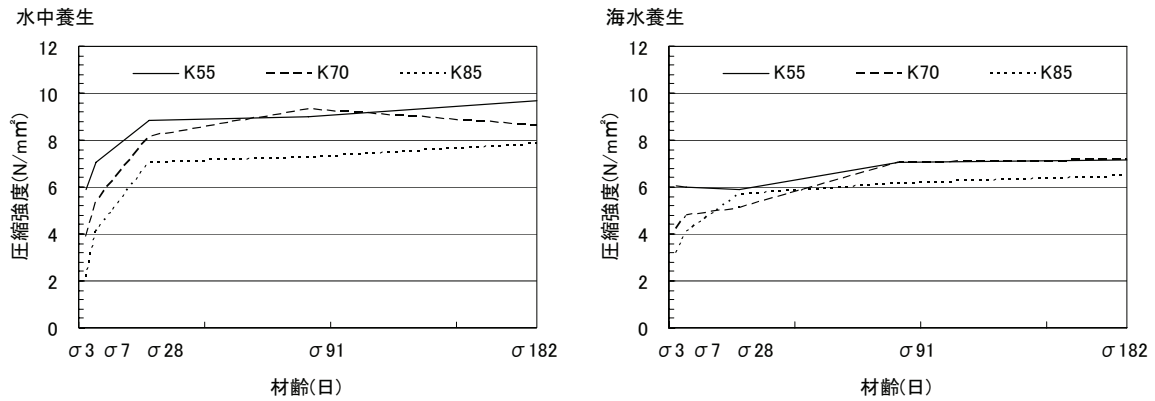


図-5.3.2 圧縮強度に及ぼす高炉スラグの分量の影響

表-5.3.1 硫酸マグネシウム溶液（0.5 モル）中で供試体が浸食されるまでの浸漬日数

水ガラスの モル比	水セメント 比(%)	水ガラスの 配合比	K55系			K70系			K85系		
			破壊 開始	全供試 体破壊	完全 崩壊	破壊 開始	全供試 体破壊	完全 崩壊	破壊 開始	全供試 体破壊	完全 崩壊
1.7	100	0.6	20	20	61	20	20	71	12	20	
		1.0	20	20		20	20		12	20	30
	200	0.6	12	12		12	12		12	12	
		1.0	12	12		12	12		50	59	
2.2	100	0.6	12	20	40	12	12	71	12	20	
		1.0	12	12		12	20		20	20	
	200	0.6	12	12		12	12		12	12	
		1.0	12	12		12	12		12	12	
2.7	100	0.6	20	20	40	12	12	71	12	12	
		1.0	12	12		12	12		12	12	
	200	0.6	12	12		12	12		12	12	
		1.0	12	12		12	12		12	20	
3.2	100	0.6	20	20	40	12	12	90	12	12	
		1.0	12	12		12	20		30		
	200	0.6	12	12		12	12		20	80	
		1.0	12	12		20	120		180		

※ 表中の K○○系は高炉スラグの分量(55%、70%、85%)を示す。

※ 破壊開始とは、供試体にクラックが入り破壊の兆候が見られた時点、全供試体破壊とは、全体にクラックが入った時点、完全崩壊とは、供試体が完全に崩れ崩壊した時点をいう。

表-5.3.2 塩化マグネシウムならびに硫酸ナトリウム中で供試体が浸食されるまでの浸漬日数

浸漬液 の種類 (0.5モル)	水セメント 比(%)	水ガラスの 配合比	水ガラスの モル比	K55系			K70系			K85系		
				破壊 開始	全供試 体破壊	完全 崩壊	破壊 開始	全供試 体破壊	完全 崩壊	破壊 開始	全供試 体破壊	完全 崩壊
MgCl ₂	100	0.6	1.7	40	69	129	90	129	—	150	—	—
			3.2	65	129	—	140	—	—	—	—	—
Na ₂ SO ₄	200	0.6	1.7	140	180	—	—	—	—	—	—	—
			3.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—

※ 表中の K○○系は、高炉スラグの分量(55%、70%、85%)を示す。

※ 表中の — は、150 日間浸漬しても崩壊していないことを示す。

5.3.2 シリカ量と強度について

1) シリカ量について

セメント水ガラス注入材は、主にセメントで強度が支配されるため、ホモゲル強度が高いことから、一般に耐久性を保持している注入材料として考えられている。

図-5.3.3、5.3.4 に溶液型注入材料のサンドゲルにおけるシリカの溶脱率とサンドゲルの体積変化率を示す^{6),7)}が、無機反応剤系水ガラスでは、シリカの溶脱が大きく 50 日後で 100%溶脱しており、有機系においても 200 日で約 25%溶脱している。無機系のシリカゾルにおいては、溶脱が若干みられるが比較的安定しており溶脱は少ない。しかしながらゲルの体積変化については比較的強度のある有機系は体積変化が 5 %前後と、まだ小さいが、無機系は極めて大きく、シリカゾル系も 200 日を超えると 20%以上の体積変化を示している。このように溶液型材料では、材料により SiO_2 の溶脱や体積変化が大きいが、この試験の際にセメント水ガラス注入材におけるサンドゲルのシリカ溶脱量も測定しており、溶脱は 0 であったとしている。この見解としてセメント水ガラス注入材は、混合されたグラウトの初期段階では、水ガラス等のゲル化によって硬化するが、その後はセメントによる結晶形成反応やケイ酸塩物質のポゾラン反応を利用するので、淡水中では化学的に安定しており、ゲルの破壊のような現象は起こらないとしている。

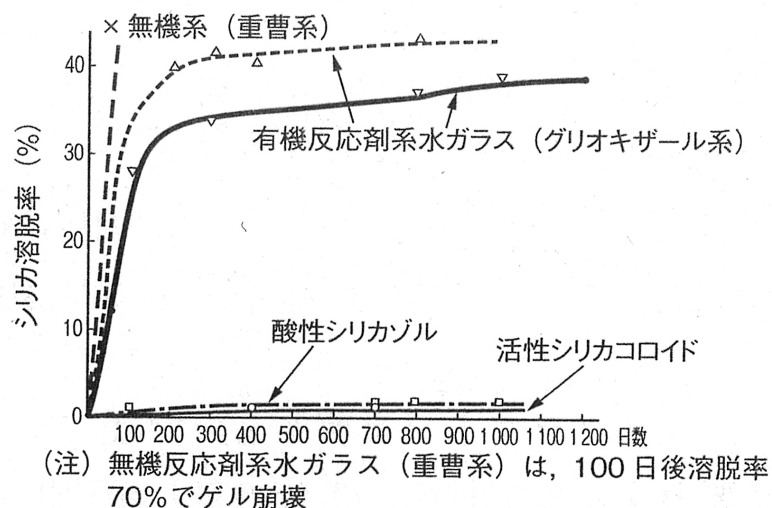


図-5.3.3 ゲルからのシリカ溶脱率 (米倉らによる)⁶⁾

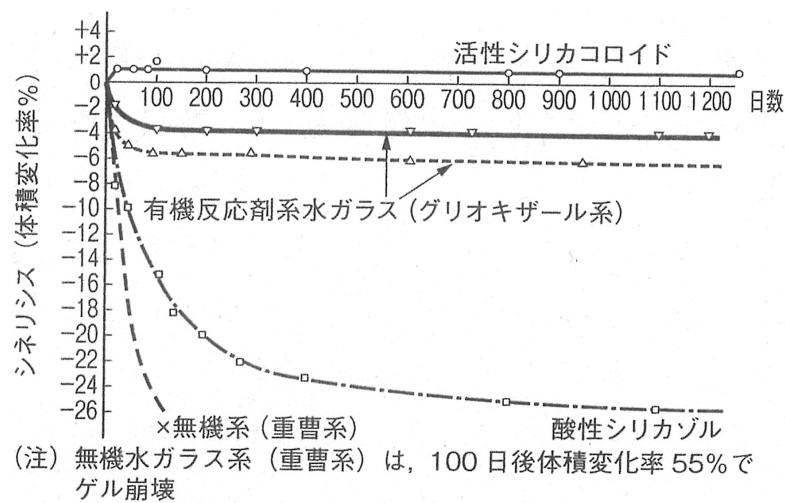


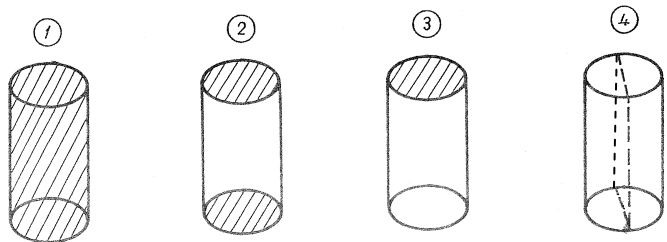
図-5.3.4 ゲルの体積変化⁶⁾ (米倉らによる)

表-5.3.3 セメント水ガラス注入材の海水養生液の化学分析

分析項目	養生日数	3日	20日	30日	90日	海水の組成
	No.					
pH	①	9.4	9.3	11.3	11.4	
	②	9.2	9.4	9.4	9.2	
	③	8.8	8.8	8.6	8.6	
	④	8.2	9.1	8.6	9.1	
Ca ²⁺ (ppm)	①	270	373	1300	13000	pH 8.5
	②	260	233	650	2600	SO ₄ ²⁻ 0.26(%)
	③	260	290	700	900	Ca ²⁺ 400(ppm)
	④	280	285	670	700	Mg ²⁺ 1380(ppm)
Mg ²⁺ (ppm)	①	840	430	認めず ^a	認めず ^a	分析法
	②	880	960	860	190	
	③	860	1120	1370	150	
	④	850	990	930	150	
SiO ₂ (ppm)	①	5	20	30	10	
	②	6	10	30	認めず ^a	pH pHメーターにより測定
	③	4	20	20	10	Ca ²⁺ 原子吸光分析
	④	2	20	20	認めず ^a	Mg ²⁺ 原子吸光分析
						SiO ₂ 比色分析

＜養生方法＞

120cc のポリエチレン製容器にグラウトを流し込み、グラウト固化後、下記のとおり養生水と接触される加工を行い、これを 3ℓの海水に浸漬して養生した。

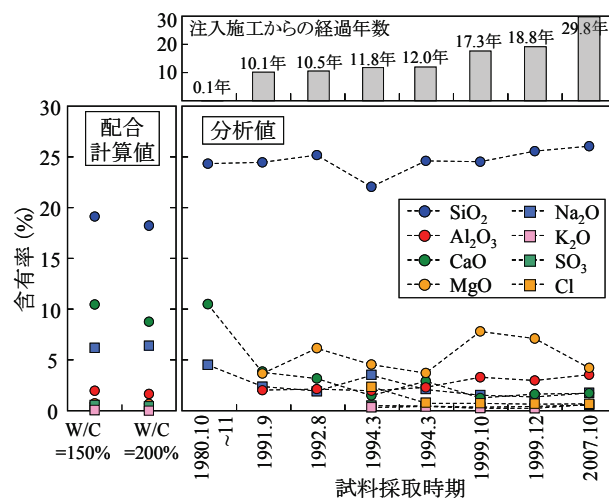


※ 点線の部分および斜線の面が海水に接触している。

表-5.3.3に、セメント水ガラス注入材を海水との接触面積を変化させたときの溶出状況を調査した化学分析結果を示す。モル比 2.2 の水ガラス、普通セメントで W/C100 %、混合比 0.6 という崩壊しやすい配合のセメント水ガラス注入材の供試体を作製し、海水養生した溶出試験であるが、養生条件による差異は大きいものの養生日数の増加とともに Ca^{2+} は大きく増加し、 Mg^{2+} は減少するが、養生条件のいずれも微量の SiO_2 の溶出があった程度のものであった。セメント水ガラス注入材は、水中と異なりより過酷な海水条件下においても SiO_2 の溶脱はあまり問題ないと考えて良く、一般の溶液型材料に比べても耐久性は大きいものと考えてよい。

また青函トンネルの場合 5.2.2 の青函トンネルの注入域と考察で示したように、高压注入によりグラウトに加圧脱水作用が加わり、グラウト硬化体の SiO_2 分が大きくなっていることが判明したことから、グラウトの性能は十分保持されているものと考えてよい。

図-5.3.5（図-5.2.1の再掲）に青函トンネルにおいて使用されたセメント水ガラス注入材のシリカ量は、19%程度が標準であるが、実際に採取されたコアは 25%にもなっており、一般に薬液注入材料として使用されているシリカ量は低粘性かつ低濃度であり、細砂に注入された薬液注入材では図-5.3.6に示すように 5%程度であるので、青函トンネルの注入域の注入材料は極めて濃縮された硬化体を形成していることとなる。水ガラスのシリカ分の大小が、セメント水ガラス注入材の崩壊性に対してどのような影響を与えるかについて、次のような考えのもとにセメント水ガラス注入材の試験を行った。



※1 Al_2O_3 , MgO : 1991.9以降にデータを採取、※2 K_2O , SO_3 , Cl : 1994.3以降にデータを採取

図-5.3.5 注入材分析結果の経時変化（図-5.2.1の再掲）

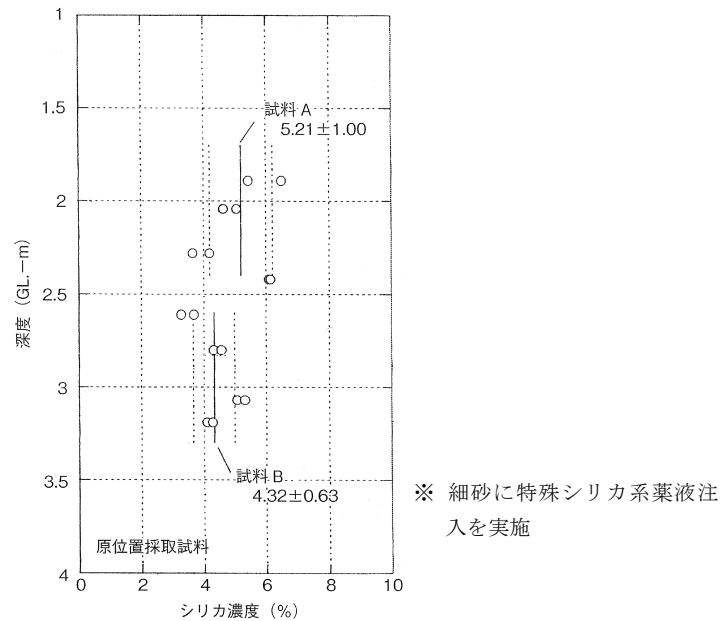


図-5.3.6 シリカ濃度深度分布（社本、風間による）⁷⁾

セメント水ガラス注入材の耐久性については、5.1.2 長期材料特性で述べたようにモル比、水セメント比および水ガラスに対するセメントスラリーの混合比の因子がいずれも低い場合のほうが、海水養生下においては崩壊しやすいという知見が得られている。グラウトの実施工においては、モル比、W/C、混合比の因子は分かりやすい概念ではあるが、解析上においてはセメント水ガラス注入材の成分をセメント、水、水ガラスのそれぞれを3成分で表示したほうが評価しやすいため、下記に示す条件で、海水養生によりセメント水ガラス注入材の崩壊性の確認試験を実施した。その結果を表-5.3.4、5.3.5に、セメント水ガラス注入材の各成分の割合と崩壊日数の関係について図-5.3.7に三角図表で表示した。

確認試験条件

セメント	： 普通セメント
水ガラス	： モル比；2.2、3.1
W/C	： 100%～300%
混合比	： 0.4～1.4
供試体寸法	： 2cm×4 cm
養生	： 海水養生

表-5.3.4 セメント水ガラス注入材の配合別の崩壊日数（Ⅰ）

No.	W/C(%)	混合比	水ガラスのモル比	
			2.2	3.1
1	100	0.4	113	18
2	〃	0.6	10	20
3	〃	0.8	10	18
4	〃	1	20	—
5	〃	1.2	58	—
6	〃	1.4	—	—
7	200	0.4	20	14
8	〃	0.6	46	—
9	〃	0.8	—	—
10	〃	1	—	—
11	〃	1.2	—	—
12	〃	1.4	—	—
13	300	0.4	18	—
14	〃	0.6	—	—
15	〃	0.8	—	—
16	〃	1	—	—
17	〃	1.2	—	—
18	〃	1.4	—	—

※ 表中の — は、150 日間浸漬しても崩壊していないことを示す。

表-5.3.5 セメント水ガラス注入材の配合別の崩壊日数（Ⅱ）

No.	水ガラスのモル比 2.2			水ガラスのモル比 3.1		
	W/C(%)	混合比	崩壊日数 (日)	W/C(%)	混合比	崩壊日数 (日)
A	147	0.42	18	141	0.47	14
B	145	0.66	20	136	0.75	—
C	142	1.01	—	129	1.18	—
D	137	1.56	—	118	1.89	—
E	130	2.54	—	100	3.35	—
F	116	4.76	作成不可	64	7.80	作成不可
G	42	2.34	—	29	3.00	—
H	86	1.48	—	73	1.80	—
I	213	0.72	—	200	0.82	—
J	308	0.52	—	295	0.58	—

※ 表中の — は、150 日間浸漬しても崩壊していないことを示す。

三角図表の結果から、150 日までのセメント水ガラス注入材の崩壊の傾向としては、モル比で差があり、モル比が高いほうが崩壊性は少ないが、概ねセメント分が 20%～25%以上と多いほど、また水ガラスが 15%～20 %以下と少ないほど崩壊性が大きい。また水分については概ね 60%以下と少ないほうが崩壊しやすい傾向を示す。反対に、崩壊が少ない傾向の範囲としては、セメント 20%～25%以下、水ガラスが 15%～20%以上で水分は概ね 60%以上である。注入の目的により必要となる強度との関係があり、セメ

ント量を単純に減らすことはできないが、 SiO_2 については、一定量を維持し減らさない方向が耐久性については良好であることが三角図表から読み取れる。崩壊せず耐久性が保持できる側面から考慮すると、あまりセメント量を多くしないで（強度を程々とするW/C；例えば200%~400%）、 SiO_2 を極力減らさず適切にとることが耐久性の面で、その品質を向上させることとなる。

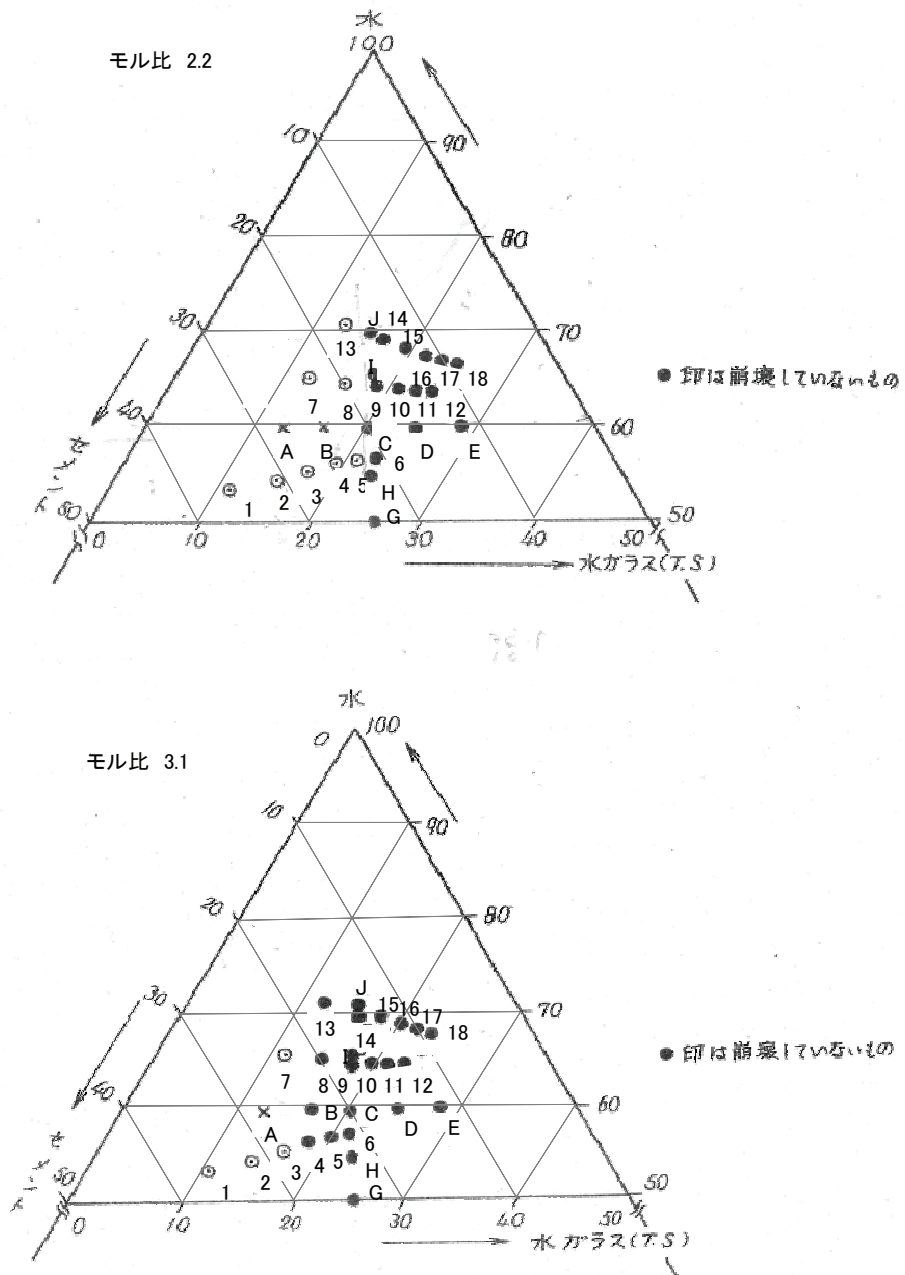


図 6.1.7 三角図表による耐久性の解析結果

2) 必要強度について

青函トンネルの注入材料は、海底トンネルという厳しい条件下の注入を考慮して、当初の開発目標として一軸圧縮強度を 4.0N/mm^2 以上として設定したため、注入材料の浸透性以上に物理的な品質を優先していた。

耐久性を考慮するにあたっては、5.1.2 で前述したようにセメント量を大きくすると短期強度は大きいものの半年以上の長期になると崩壊性が大きくなる傾向があり、前項の1)シリカ量で述べたように水ガラスのシリカ量とのバランスをとることが極めて大切である。これからのセメント水ガラス注入材における展開としては、強度を優先させた W/C が 100%~200% の配合だけではなく、耐久性能を考慮して W/C を 200%~400% の配合もできるだけ採用したほうが、セメント分が少ないだけ経済的であり、W/C が大きいためにゲルタイムも伸びる方向にありメリットがある。また、強度が小さくなることについては、断層破碎帯等の破碎された箇所や青函トンネルの黒松内層に多く見られた低強度の地山における一軸強度は $1.0\sim 2.0\text{N/mm}^2$ 程度であった箇所も多く、必ずしもトンネル地山以上にグラウトの強度をあげる必要性はなく、適度な強度の下でゲルタイムや浸透性を重視しながら、注入材料の選定を考える必要がある。

青函トンネルのグラウト施工において、注入材料が地山に入った注入率は数パーセントが標準であり、注入率が高い場合でも 10% 程度であることを考えると、全体のトンネル地山の強度以上にグラウト強度を上げて施工することが重要なのではなく、グラウトでしっかりと高圧湧水を止水し、地山の弱点部を補強し、あわせて充填された注入材料の耐久性が確実に保持されることが重要であると考え。セメント水ガラス注入材料の強度をより高く目指すことに捉われセメント量が多くなり、結果的にグラウトの浸透性を阻害することになりかねない恐れがあり、適切な強度の確保については、耐久性および浸透性とあわせて総合的に判断する必要がある。

一般的な砂質土や洪積層における注入の設計強度や注入改良後の強度（サンドゲル強度）について、図-5.3.8、5.3.9 に示すが、サンドゲルの一軸強度としては 1.0N/mm^2 前後となっている。表-5.3.6 にモル比 2.2 の水ガラス($0.08\text{Pa}\cdot\text{S}$)と高炉コロイドセメントを使用し、W/C を変化させた場合のセメント水ガラス注入材のゲルタイムとホモゲルの強度を示す。W/C を 600% まで薄めていくとゲルタイムは急激に長くなるが、強度も

低下する。しかしながら、W/C400%においてもホモゲル強度は σ_{28} での 0.9N/mm^2 を保持しており、図-5.3.8に示すサンドゲル強度に近い値を示している。セメント水ガラス注入材を使用する際は、W/Cを200%から400%と大きくしてもホモゲル強度が他の薬液注入材料に比べ高いので、注入地山に応じた必要強度が確保可能と考える。

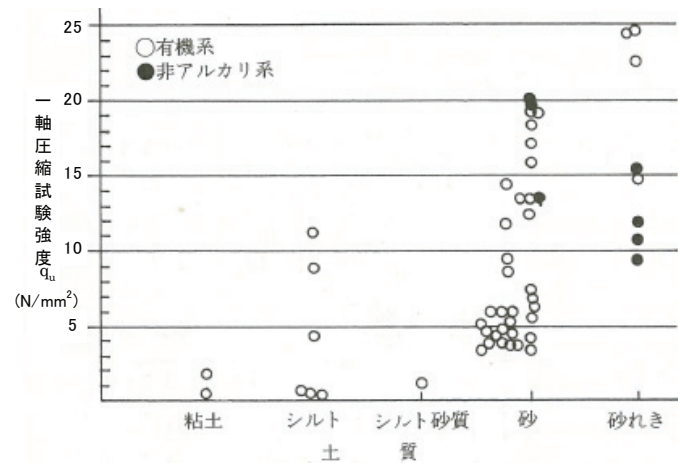


図-5.3.8 砂質土での設計強度（注入率40%以上）⁸⁾

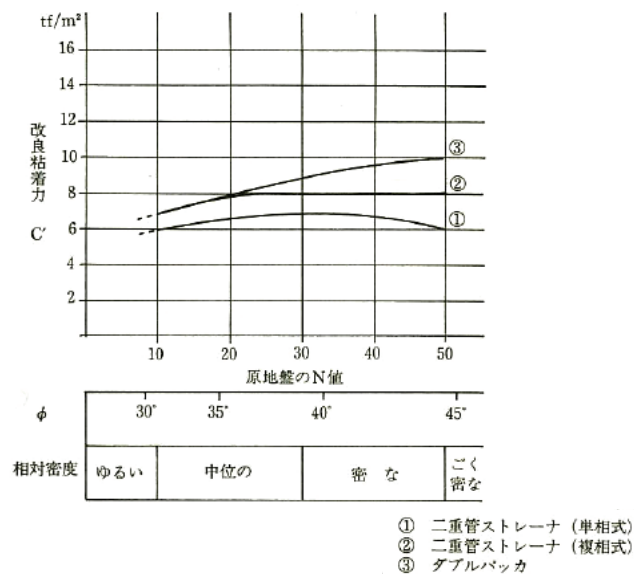


図-5.3.9 洪積層地盤における注入改良後の強度定数⁸⁾

表-5.3.6 高炉コロイドセメントのW/Cの変化によるゲルタイムと圧縮強度

W/C(%)	100	200	300	400	600
ゲルタイム	2'22"	4'59"	8'12"	12'31"	22'27"
圧縮強度 (N/mm^2)	σ_1	3.1	1.5	1.0	0.6
	σ_3	5.0	2.0	1.2	0.7
	σ_7	5.5	2.6	1.4	0.9
	σ_{28}	6.5	3.1	1.8	0.9

5.3.3 遅延剤の開発について

セメント水ガラス注入材の施工に当たっては、図-5.3.10 に青函トンネルの注入圧の変更パターンの例に示すように、湧水量と注入の初期圧との関係からセメントスラリーの注入開始濃度（W/C）を 300%あるいは 200%と定め、注入対象地山の透水の状況から注入濃度を上げていく方式をとっている。このようにセメント水ガラス注入材は、ゲルタイムのやや長いものから短いものへ変化させるのが一般的であるが、このことは適切な遅延材がないためにセメント水ガラス注入材スラリーの濃度を変える以外に適度にゲルタイムをコントロールできないというセメント水ガラス注入材の特性から来ている。

このため、強度等の品質を確保しながらゲルタイムの自在な管理が可能なセメント水ガラス注入材の遅延剤の開発は、重要な課題の一つであった。

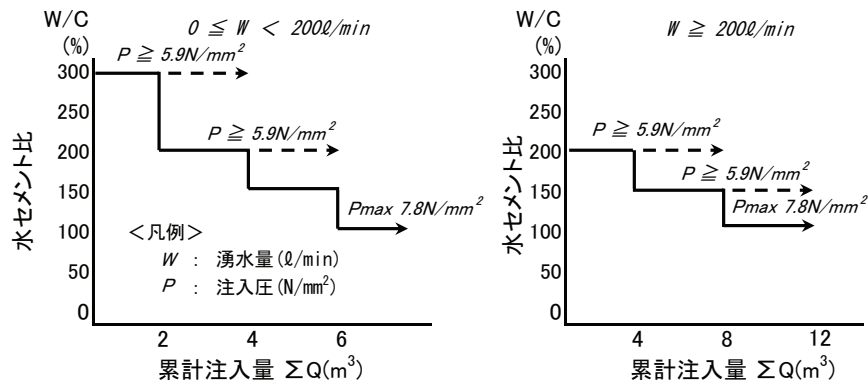


図-5.3.10 注入圧の変更パターン（青函トンネルの例）

1) 適合する遅延剤

コンクリートの硬化に際し、リン酸塩系材料等が難溶性のカルシウム塩を形成してセメント粒子を被覆し、水和反応を遅らせる効果を発揮するという知見⁹⁾から、セメント水ガラス注入材に遅延効果の可能性があると考えられた無機系混和材料について、予備試験を実施した。

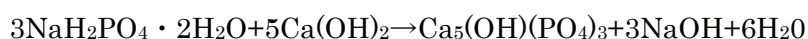
その結果、グルコン酸やホウ酸ナトリウムについては効果がなく、リン酸系のリン酸アンモニウムやリン酸カリウムは効果が小さく、リン酸ナトリウム系のうちリン酸 3 ナトリウムよりもリン酸 1 ナトリウムおよびリン酸 2 ナトリウムが大きな遅延効果があることが判明した。

リン酸ナトリウム系は、食品添加物としても使用されているものであり、安全性の高

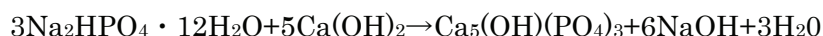
いものであるという利点もあわせて持っている。ここでは、リン酸ナトリウムのなかで、特に著しい効果があったリン酸 1 ナトリウムおよびリン酸 2 ナトリウムに着目して、セメント水ガラス注入材の遅延剤としての効果について述べる。

リン酸 1 ナトリウムおよびリン酸 2 ナトリウムの遅延効果¹⁰⁾については下記のとおりセメントスラリーと反応し、ハイドロキシアパタイト ($\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$) が生成され、未反応のセメント粒子を被覆することで、水和反応が遅れると考えられている。

リン酸 1 ナトリウムでは、



リン酸 2 ナトリウムでは、



2) 遅延剤（リン酸塩）を添加してゲルタイム、強度の影響を調べる試験

セメント水ガラス注入材の遅延剤として、ゲルタイムを所要の範囲で変えることができ、しかも適切な強度を保持することができるかどうかについて、リン酸 1 ナトリウム、2 ナトリウムを用いて次の試験を行った。なお、リン酸ナトリウムには多くの水和化合物が存在するが、すべて無水換算して試験を実施している。

a) 試験内容

水ガラスのモル比 2.2、3.2(粘度 0.08Pa・S)

W/C : 100%、200%

混合比 : 1.0

水温 : 20℃

セメント : 普通セメント

添加剤 : リン酸 1 ナトリウム(2 水塩)、リン酸 2 ナトリウム(12 水塩)

添加量(%) : (セメント重量に対して無水換算)

水ガラス 2.2 については、0.0, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0

水ガラス 3.2 については、0.0, 0.7, 1.5, 1.75, 2.0

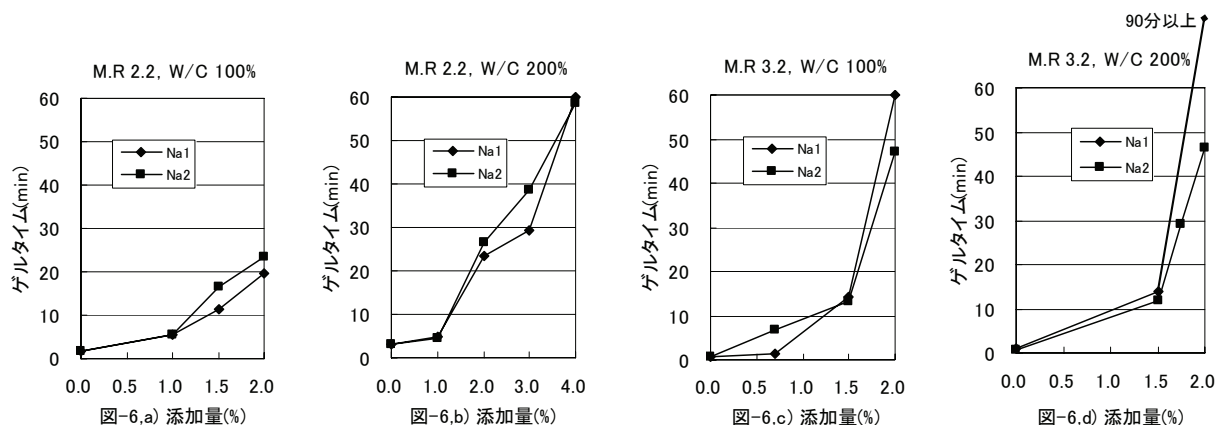
(※最大で60分程度のゲルタイムを得るべく予備試験を実施して確認した結果、水ガラス2.2と3.2で添加量を変更している。)

ゲルタイムと圧縮強度を特性値とし、供試体は $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ を3本、材齢は淡水養生で28日、91日、182日とした。結晶のリン酸ナトリウムを水で溶解してからセメントに入れ、セメントスラリーをつくり水ガラスと混合する。

b) 試験結果と考察

セメント水ガラス注入材は、水ガラスの粘度が $0.08\text{Pa}\cdot\text{S}$ 、普通セメントのW/Cが100～200%の場合でグラウト粘度は $0.01\sim 0.02\text{Pa}\cdot\text{S}$ という特性を有し、ゲル化するまで低粘性で流動性は変化しない。注入材はゲル化することで急激に粘性が変化して固結するものであり、ゲルタイムが長い、すなわち低粘性の状態が長く継続することは注入量の確保に重要な要素であることから、ゲルタイムに着目した。

ゲルタイムの試験結果は、図-6.1.11のとおりである。モル比2.2の水ガラスに添加した場合、リン酸1ナトリウム、2ナトリウムどちらもW/C100%、200%ともに1.0%添加まではゲルタイムの遅延効果は少ないが、1.0%を超えると急激に延び始め添加量2%では20分以上となる。遅延剤の効果はW/C100%および200%も同様な傾向を示すが、一部実施した200%の4.0%添加の場合、ゲルタイムは60分にも達する。モル比3.2の水ガラスに添加した場合、W/C100%、200%に対して、リン酸1ナトリウム、2ナトリウムとも1.5%添加まではゲルタイムは徐々に長くなるが、1.5%以上になると急激に延び、特に1ナトリウムでは2.0%添加付近で60分以上になる。

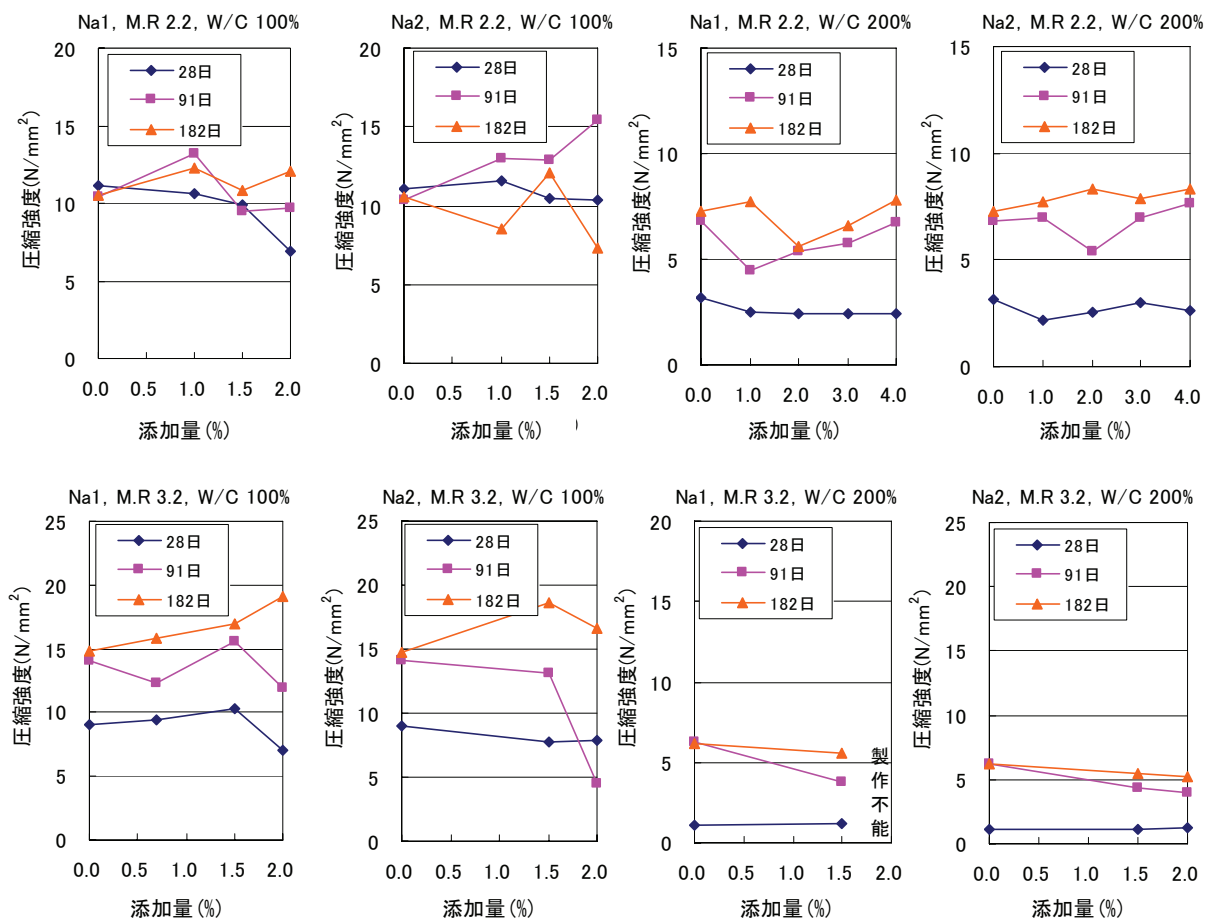


(※ 図中の記号は、Na1；リン酸1ナトリウム、Na2；リン酸2ナトリウム、M.R；モル比)

図-5.3.11 添加量とゲルタイムの変化（普通セメント）

圧縮強度は、図-5.3.12 のとおりである。リン酸 1 ナトリウム、リン酸 2 ナトリウムどちらを添加した場合でも、無添加のものと同様に材齢 28 日、91 日と養生日数の経過につれて、ばらつきはあるが概ね強度が増加しており、また、添加量が多くなるにしたがい数値のばらつきがみられ、強度は材齢によっては低下したり変動はあるものの、概ね無添加のものと変わらない傾向にある。

材齢 182 日においてもばらつきはあるが概ね強度低下はみられず、モル比 2.2、W/C200%などでは添加しない場合よりも多少増加傾向にある。他のものについてもばらつきはあるが概ね無添加のものと同等かそれ以上の強度を示しており、遅延剤添加による有意な影響はみられない。



(※ 図中の記号は、Na1 ; リン酸 1 ナトリウム、Na2 ; リン酸 2 ナトリウム、M.R ; モル比)

図-5.3.12 添加量と圧縮強度（普通セメント）

3) 実用化に向けたリン酸 2 ナトリウムの基礎試験

セメント水ガラス注入材の遅延剤としてリン酸ナトリウムの効果が認められたが、実用化に際し、リン酸 2 ナトリウムについてさらに、ブレーン値が $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ と高く、高炉スラグを 55%添加し耐久性の高い高炉コロイドセメントを主に用いて、次の配合条件で種々の基礎試験を行った。

配合条件

水ガラスのモル比 : 2.2(粘度 $0.08\text{Pa}\cdot\text{S}$)

W/C : 100%、(一部の試験で)200%

混合比 : 1.0

セメント : 高炉コロイドセメント

(1) セメントスラリーと結晶の遅延剤を同時混合した場合のゲルタイム

セメント重量に対して 1%(無水換算)のリン酸 2 ナトリウム(7 水塩)の結晶をセメントと同時に水の中で混合し、攪拌時間によるゲルタイムの変化を調べた。

攪拌時間を 20 分、40 分、60 分、80 分、120 分と設定し、セメントスラリーを汲み取り、水ガラスを加えてゲルタイムを測定する。攪拌機は往復反転式とした。その結果を表-5.3.7 に示す。

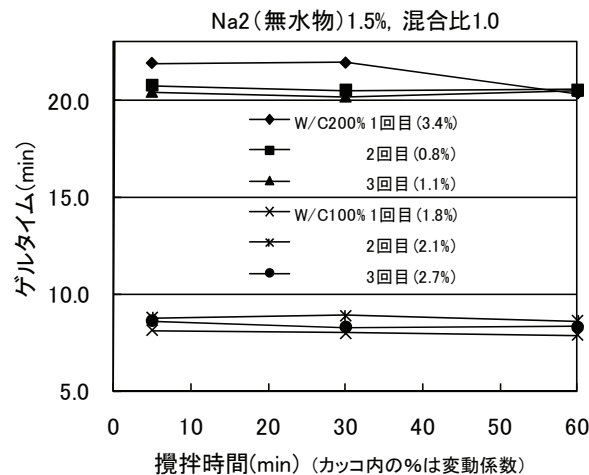
表-5.3.7 セメントスラリーの攪拌時間とゲルタイム

攪拌方法	攪拌時間 (min)	ゲルタイム(min_sec)			
		1回目	2回目	3回目	平均
遅延剤とセメントを同時混入	0	1'26"	1'20"	1'24"	1'23"
	20	1'46"	1'40"	1'44"	1'43"
	40	1'50"	1'45"	1'54"	1'50"
	60	1'58"	1'59"	1'56"	1'58"
	80	2'03"	2'05"	2'03"	2'04"
	120	2'15"	2'16"	2'15"	2'15"
遅延剤を溶解後、セメントを混入	0	4'35"	4'29"	4'25"	4'30"

試験の結果、遅延剤を水で溶解してからセメントを入れたゲルタイム(4'30")に比べ小さく、半分以下のゲルタイムとなっている。

(2) 遅延剤水溶液にセメントを混合した場合の安定性

3ℓ入り容器の中にリン酸2ナトリウムを溶解させた遅延剤水溶液を入れ、攪拌しながらセメントを徐々に仕込み、セメントスラリー状になった状態から、攪拌時間を5分、30分、60分の時にスラリーを汲み取り（この時、攪拌機は停止しない）水ガラスと混合しゲルタイムを測定した。



(※ 変動係数は3回のゲルタイムの平均値に対する変動を示す。)

図-5.3.13 セメントスラリー攪拌時間とゲルタイム

仕込みごとに攪拌時間を5分、30分、60分について各3点ずつ試験を実施した。試験は1日に1回ずつ3日にわたって行い、その結果を図-5.3.13に示す。試験によるばらつきと攪拌時間によるばらつきは共に変動係数が5%以内に収まっており、安定したゲルタイムとなっている。

(3) 攪拌機の違いによる溶解時間

リン酸2ナトリウム無水物と7水塩を用いて、攪拌機の種類による溶解時間の違いについて試験を行った。溶解時間の計測は、攪拌機を回転させながらの計測のため、分単位で確認するものとした。その結果を表-5.3.8に示す。

遅延剤 : リン酸2ナトリウム(無水物、7水塩)

表-5.3.8 攪拌機の種類と溶解時間

攪拌機の種類	リン酸 2ナトリウム	溶解量 (%)	溶解 時間
往復反転式	無水物	1.0	5分
	7水塩	1.0	2分
回 転 式	無水物	1.0	8分
	7水塩	1.0	4分

温度は20±1℃, 溶解水は200ml, 繰返し回数は3回

(4) 遅延剤水溶液の安定性

リン酸 2 ナトリウム 7 水塩(1.5%無水換算)の水溶液をつくり、1 週間放置させてゲルタイムを測定した。その結果を図-5.3.14 に示す。

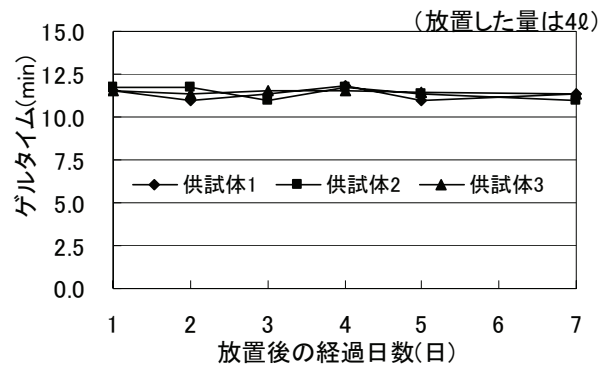


図-5.3.14 放置後の経過日数とゲルタイム

リン酸 2 ナトリウムは、ゲルタイムが安定しており、品質は十分確保できるが、図-5.3.13 に示すとおりリン酸 1 ナトリウムと比べ溶解度^{11),12)}が低いので、現場施工にあたっては、溶解度を考慮した使用を考える必要がある。

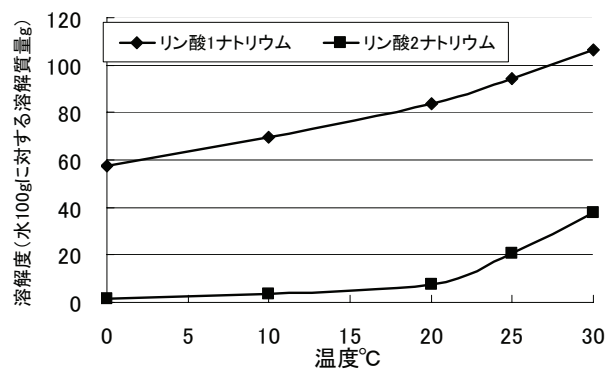


図-5.3.15 リン酸 1 ナトリウム、リン酸 2 ナトリウムの溶解度^{11), 12)}

(5) 考察

- a) セメントスラリーと結晶のリン酸 2 ナトリウムを同時混合した場合においては、結晶が溶解しにくく遅延効果が十分発現せず、攪拌時間を 120 分に延ばしても遅延効果は小さい。
- b) 遅延剤水溶液にセメントを混合した場合の遅延効果は、5 分、30 分、60 分のどの攪拌時間においても変動係数が小さく安定しており、3 日間にわたり試験した結果も安定した遅延効果が得られている。
- c) 攪拌機の違いによる溶解時間は、回転式より往復反転式の機械のほうが溶解時間は概ね半分で済むが、無水物と含水塩では大きな差があり、無水物を現場で溶解させるには手間がかかることが推察される。また、無水物は水分を吸収し固化しやすいのでトンネル内での保存にも問題となりやすく、含水塩を使用したほうが得策である。
- d) リン酸 2 ナトリウム水溶液を 1 週間放置させ試験した結果では、1 日目から 7 日目まで 1 週間経過してもゲルタイムの変動は小さく安定している。また、図-5.3.15 に示すように、リン酸 2 ナトリウムの溶解度はリン酸 1 ナトリウムの溶解度に比べ低いので、遅延剤水溶液として現場で使用する場合には、溶解度に留意する必要がある。

4) 実用化に向けたリン酸 1 ナトリウムの基礎試験

図-5.3.15 に示すようにリン酸 1 ナトリウムは溶解度が高く遅延剤水溶液としての活用方法もあるため、その実用化について次の配合条件で試験を行った。

配合条件

- 水ガラスのモル比 : 2.2、一部 3.2(粘度 0.08Pa・S)
- W/C : 100%
- 混合比 : 1.0
- セメント : 高炉コロイドセメント(一部試験で普通セメント、高炉(A 種)、高炉(B 種))
- 遅延剤 : リン酸 1 ナトリウム 30%水溶液(無水換算)

リン酸 1 ナトリウム(2 水塩)30%水溶液(無水換算)を作り、必要な量だけピペットに採り、水と混合してからセメントを投入し、セメントスラリー状になってから水ガラスを

加えてゲルタイムを測定する。

(1) 遅延剤水溶液にセメントを配合した場合の安定性

3ℓ入りの容器の中にリン酸1ナトリウム30%水溶液を2%入れ、往復反転式の攪拌機を用いて水と混合してからセメントを投入し、セメントスラリー状になってから所定の攪拌時間になったらセメントスラリーを汲み取り、水ガラスを加えてゲルタイムを測定する。汲み取り中は攪拌機を停止しない。汲み取り時間は、0分、5分、15分、30分、60分と設定した。その結果を表-5.3.9に示す。

表-5.3.9 セメントスラリーの攪拌時間とゲルタイム

攪拌時間	0分	5分	15分	30分	60分
ゲルタイム	3'24"	3'24"	3'22"	3'31"	3'24"
変動係数	1.2%	2.5%	1.0%	1.5%	1.6%

溶液濃度30%、セメントスラリー量に対し2%、温度25℃、ゲルタイムは3回の平均値、変動係数は3回のゲルタイムの平均値に対する変動を示す

混合水に作製済みのリン酸1ナトリウム30%水溶液を入れ、セメントを混合した場合のゲルタイムは、リン酸2ナトリウムと同様、攪拌直後(0分)から5分、15分、30分、60分とも安定した遅延効果が得られた。

(2) 遅延剤水溶液の添加方法の違いによる遅延効果

リン酸1ナトリウム30%水溶液とセメントとの添加方法について下記のとおり方法①～③を設定し、添加方法の違いによるゲルタイムの相違を調べる試験を行った。

添加方法

- ①セメントスラリーにリン酸1ナトリウム30%水溶液を添加する。
- ②リン酸1ナトリウム30%水溶液を水に添加後、セメントを加える。
- ③リン酸1ナトリウム30%水溶液を水に添加後、その液をセメントに入れる。

遅延剤水溶液の添加方法の違いによる試験結果は、表-5.3.10のとおりである。リン酸1ナトリウム30%水溶液をセメントスラリーに直接添加すると、ゲルタイムの遅延効果は小さい(方法①)。リン酸1ナトリウム30%水溶液を水に添加後にセメントを加え

る方法（方法②）と、リン酸 1 ナトリウム 30%水溶液を水に添加後、その液をセメントに入れる方法（方法③）のどちらも遅延効果が安定して得られた。現場施工を考えると、方法②が現実的であると考えられる。

表-5.3.10 添加方法によるゲルタイムの差

溶液濃度30% 溶液温度20℃	添加方法	ゲルタイム	変動係数
セメント スラリー量 に対し3%	方法 ①	4'09"	5.1%
	方法 ②	10'08"	1.3%
	方法 ③	9'44"	3.5%

ゲルタイムは3回の平均値、変動係数は3回のゲルタイムの平均値に対する変動を示す

(3) セメントの種類による遅延効果

前項(2)の方法②により、セメントの種類（高炉コロイド、普通セメント、高炉(A 種)、高炉(B 種)）の違いによるゲルタイムの試験を行った。

その結果、表-5.3.11 のとおりセメントの種類によるゲルタイムの遅延効果について、普通セメント、高炉コロイド、高炉(A 種)、高炉(B 種)の順に効果が大きいことを確認した。

表-5.3.11 セメントの種類とゲルタイム

溶液濃度30% 溶液温度20℃	特性値	高炉 コロイド	普通 セメント	高炉(A種)	高炉(B種)
セメントスラリー量 に対し2%	ゲルタイム	3'24"	3'18"	5'16"	5'19"
	変動係数	1.2%	3.9%	6.7%	5.1%
セメントスラリー量 に対し3%	ゲルタイム	10'08"	9'33"	11'18"	14'08"
	変動係数	1.3%	3.8%	1.6%	7.0%

ゲルタイムは3回の平均値、変動係数は3回のゲルタイムの平均値に対する変動を示す

(4) 考察

リン酸 1 ナトリウム 30%水溶液を用いて種々の試験を行った結果、次のことが明らかとなった。

- a)遅延剤を添加したセメントスラリーは、表-5.3.9 から攪拌時間が 1 時間経過しても安定したゲルタイムの遅延効果が得られることを確認した。
- b)遅延剤水溶液をセメントスラリーに直接添加した場合、遅延剤水溶液を水に添加する方法と比べてゲルタイムが短くなり遅延効果が小さい。これは遅延剤水溶液とセメントが局部的にしか反応しないためと考えられる。
- c)セメントの種類によるゲルタイムの遅延効果について、普通セメント、高炉コロイド、

高炉(A種)、高炉(B種)の順に効果が大きいことを確認した。

W/C100%、混合比 1.0 の条件下においてゲルタイムを 3～10 分程度に遅延させるために必要なリン酸 1 ナトリウム 30%水溶液は、セメントの種類により多少の違いはあるが、セメントスラリー量に対し 2～3%であり、溶解時間も不要なので実用化に適切と考えられる。

5) 遅延剤を使用した原位置試験

平成 19 年に北陸新幹線飯山トンネル（板倉）工事において切羽が土砂流出した箇所の復旧注入として、二重管ダブルパッカー方式により遅延剤を使用したセメント水ガラス注入材の試験施工を行った。

(1) 試験内容

調査ボーリングの結果から土砂流出した飯山トンネル切羽付近には断層帯が複数確認されており、地山の一体固結改良が必要と考えられた。トンネル外周 16.8m(3R)から 22.4m(4R)の範囲については、緩んだ地盤を地山程度の強度まで改良することを目的に固結後の強度が高い懸濁型薬液による緩んだ地盤の粗詰め注入が必要であると判断された。

そこで粗詰め注入に使用する注入材について表-5.3.12 に示すようなセメント水ガラス注入材について試験注入を行った。計画注入量は、トンネル外周 3R から 4R の注入範囲に対し注入率 20%（1 ステップ(30cm)の注入量は 1,400ℓとなる）を目標とした。二重管ダブルパッカー方式での注入によりグラウトの品質を確保するため、ステップ注入を実施した。1 ステップ長を 30cm と設定し、手前からステップ番号をつけて施工管理を行った。最終注入圧は、土砂流出箇所への注入であることから漏水圧の 3 倍程度である 4N/mm²を目安として考慮し、入念な施工が可能となるよう単位注入量等を管理するものとした。

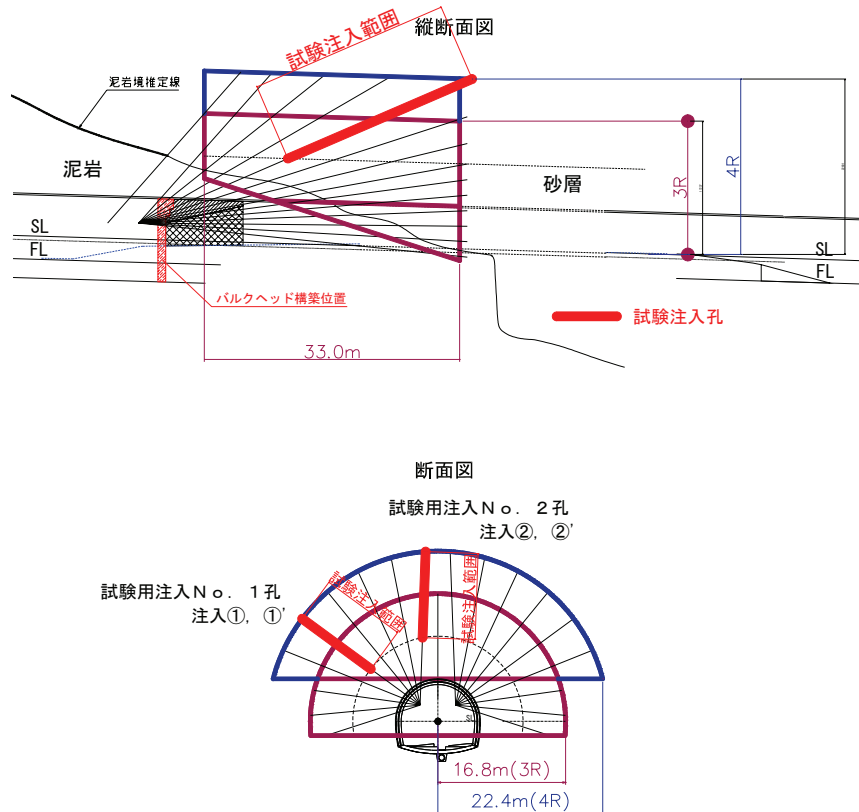
配合は、一軸圧縮強度で $q_u=1.5、5.0\text{N/mm}^2$ 相当の W/C=300、167%の 2 パターンと、この配合に遅延剤を使用しゲルタイムを 9 分、10 分程度に延ばした 4 配合とした。遅延剤としては、本試験では溶解しやすいリン酸 1 ナトリウム(2 水塩)を使用した。

表-5.3.12 セメント水ガラス注入材の配合(1m³ 当り)

注入材	A 液			B 液		W/C	σ_{28} 圧縮 強度	ゲル タイム
	高炉 セメント (B種)	水	遅延剤	水ガラス (モル比 3.2)	水			
	(kg)	(L)	(kg)	(L)	(L)	(%)	(N/mm ²)	(min)
①	250	418	—	250	250	167	5.0	1.5
①'	250	418	2.25	250	250			9.0
②	150	450	—	250	250	300	1.5	2.5
②'	150	450	1.3	250	250			10.0

試験位置は図-5.3.16 に示すように試験注入用の No.1 孔、No.2 孔で緩んだ地盤の粗詰め注入を必要とする区間を含むトンネル外周 2R から 4R の範囲とした。注入材は No.1 孔では先端から 14m 区間について①の注入材、No.2 孔については、先端から 15m 区間に対して、②の注入材を使用することとし、注入圧の上昇により注入不能となった場合について、その後は遅延剤を加えた配合 (①→①'、②→②') を使用することとした。

試験孔の注入は、試験注入範囲(14、15m 区間)について手前から 30cm ずつを 1 ステップとしてステップ番号をつけて、実施した。



(2) 試験結果

試験結果は No.1 孔の①注入では、図-5.3.17 に示すように 4、5 ステップで注入圧力が上昇し計画注入量（注入率 20%）を実施できなかったため、6 ステップで遅延剤を加えた①' を注入した。その結果、注入圧力が下降し計画量の注入を実施することができた。

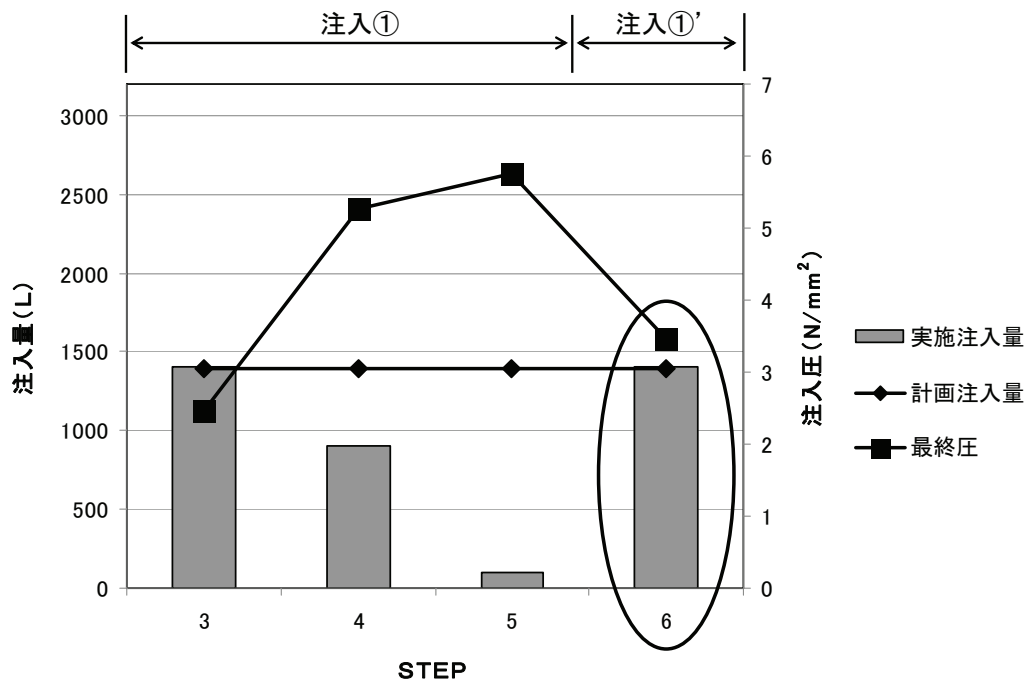


図-5.3.17 No.1 孔(注入①, ①')の注入結果：3～6 ステップ

左縦軸：ステップ当り注入量(L)（1 ステップは 30cm）

右縦軸：注入圧 (N/mm²)

横軸：ステップ番号（丸囲みは遅延剤の効果）

No.2 孔の②については、図-5.3.18 に示すように 6、7、8 ステップと注入圧力の上昇がみられ 8 ステップで計画量を大きく下回ったため、9、10 ステップで遅延剤を加えた②' を注入した。9 ステップでは 8 ステップの影響を受けたためか注入圧力に変化は無く高い状態であったが、10 ステップでは注入圧力は下降し計画量を上回る注入が可能となった。

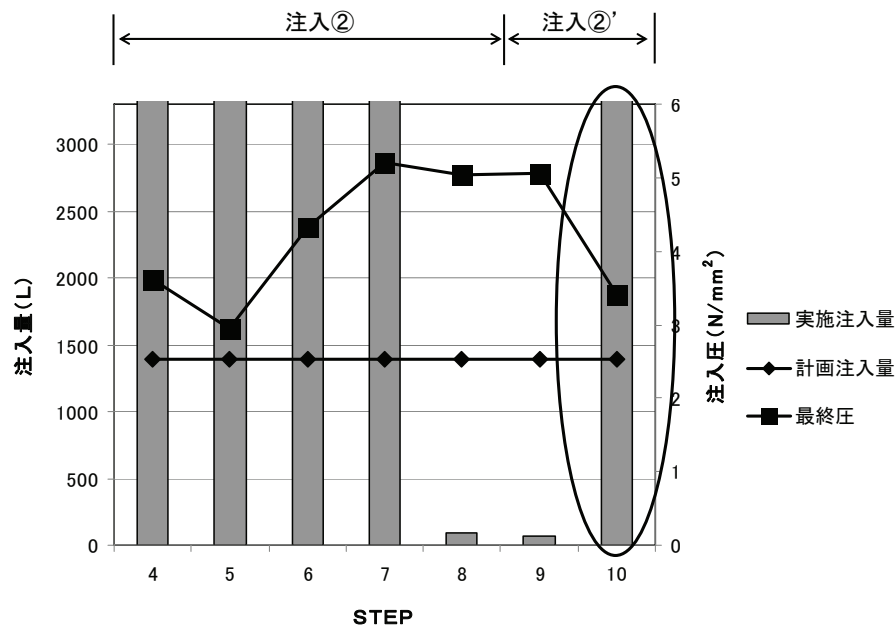


図-5.3.18 No.2 孔(注入②, ②')の注入結果：4～10 ステップ

左縦軸：ステップ当り注入量(L) (1ステップは30cm)

右縦軸：注入圧(N/mm²)

横軸：ステップ番号(丸囲みは遅延剤の効果)

(3) 考察

本試験では、緩んだ地盤の注入材料としてセメント水ガラス注入材の W/C とゲルタイムを変更した配合の材料について注入量の比較を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

ゲルタイムが 1.5 分の①配合は、ステップ毎で早期に注入量が低下し注入圧が上昇したが、遅延剤を使用したゲルタイムが 9.0 分の①' 配合では計画注入量を十分に満足し最終注入圧も低下した。

ゲルタイムが 2.5 分の②配合は、ステップ毎の注入で当初計画注入量を満足していたが、数ステップ後には注入圧が高くなり、注入できない状態となった一方、遅延剤を使用した②' の配合に変えることで計画注入量を確保することができた。

注入時に高压となる原因としては、セメント水ガラス注入材の粘度上昇または固結強度が高いことに起因する部分が大きく、遅延剤を使用することによるゲルタイムの延長は、注入材の粘度を抑制し、初期強度の発現も抑えられることから計画注入量の確保に良い影響を与えているものと考えられる。

よって、セメント水ガラス注入材は遅延剤を使用しゲルタイムを制御することで、注入量の広範な制御が十分可能であると推定できる。

6) セメント水ガラス注入材の遅延剤に関する考察

(1) 遅延剤として、リン酸ナトリウムを使用することでセメント水ガラス注入材のゲルタイムは数分から1時間以上という広範囲にコントロールが可能である。

セメント水ガラス注入材は、モル比を小さくしたり、水ガラスのセメントスラリーに対する混合比を大きくすることでゲルタイムを延ばすことは可能であるものの、配合にもよるが5分以上確保することは難しい。このため、所要の注入量を入れようとするとセメントスラリーの濃度を薄くさせゲルタイムを延ばす必要があるため、グラウト強度が低下する。しかし、遅延剤としてリン酸ナトリウムを少量使用することで、ゲルタイムを大きく設定可能である。

(2) 圧縮強度については、遅延剤を添加しない場合と比べ、遅延剤の添加量、配合条件および材齢によってばらつきはあるものの、概ね無添加のものと変わらない傾向にある。

(3) ゲルタイムを30分～1時間でも設定することが可能であるため、注入方式が二重管ダブルパッカー方式の場合や1ショット注入の場合においても施工可能であると考えられ、高品質の注入材料の確保が可能である。

(4) リン酸1ナトリウム、リン酸2ナトリウムは、ともに遅延効果が大きい。しかし、表-6.1.8に示すように現場では回転式のみキサーが多用されており、添加量が少ない場合には溶解時間について問題はないものの、現場使用においてゲルタイムを30分以上必要とする際の添加量(セメントスラリー量に対し3%以上)を溶解する場合には、結晶品を溶解するのに手間どることが考えられるため、溶液タイプとしたほうが得策である。

溶液タイプとする場合、リン酸2ナトリウムは溶解度が低いため、リン酸1ナトリウムのほうが溶液添加としては実用性が高い。

(5) トンネルの原位置で注入施工試験を実施した結果、遅延剤を使用しないセメント水ガラス注入材に比べ、遅延剤を使用した場合、より低圧で問題なく注入可能であった。懸濁型材料のセメント水ガラス注入材ではあるが、二重管ダブルパッカー方式の注入で順調に施工できることが確認できた。

5.3.4 超微粒子セメントの適用について

セメント粒子の大きさで浸透度に違いが出てくることは一般的な知見であるが、懸濁粒子の代表径と地盤土粒子の代表径の関係について多くの実験結果をまとめ、グラウタビリティ比⁹⁾が示されている。

グラウタビリティ比とは、懸濁粒子が浸透可能な条件を示したものであり、土粒子の10%粒径 D_{10} あるいは15%粒径 D_{15} と懸濁粒子85%粒径 G_{85} あるいは95%粒径 G_{95} との関係について、次の(1)および(2)の式の両方が満足される場合であるとされている。

$$N_1 = D_{15}/G_{85} \geq 15 \quad (1)$$

$$N_2 = D_{10}/G_{95} \geq 8 \quad (2)$$

N_1, N_2 = グラウタビリティ比

D_{10}, D_{15} : 土粒子の10%、15%粒径

G_{85}, G_{95} : 注入材粒子の85%、95%粒径

図-5.3.19に各種セメントの粒径曲線と表-6.1.13に各種セメントの G_{85}, G_{95} を示す。浸透可能な土粒子の粒径 D_{10} と D_{15} について、普通セメント、コロイドセメント（微粒子セメント）、超微粒子セメントの場合で比較すると、表-5.3.13のようになる。

表-5.3.13 浸透可能な土粒子の粒径 (D_{10}, D_{15})

普通セメント	$D_{15} \geq G_{85} \times 15 = 0.0460 \times 15 = 0.690 \text{ mm}$	ブレーン値
	$D_{10} \geq G_{95} \times 8 = 0.0700 \times 8 = 0.560 \text{ mm}$	3,000cm ² /g程度
高炉コロイドセメント	$D_{15} \geq G_{85} \times 15 = 0.0150 \times 15 = 0.225 \text{ mm}$	ブレーン値
	$D_{10} \geq G_{95} \times 8 = 0.0250 \times 8 = 0.200 \text{ mm}$	6,000cm ² /g程度
超微粒子セメント	$D_{15} \geq G_{85} \times 15 = 0.0052 \times 15 = 0.078 \text{ mm}$	ブレーン値
	$D_{10} \geq G_{95} \times 8 = 0.0080 \times 8 = 0.064 \text{ mm}$	9,000cm ² /g程度

浸透可能な土粒子の粒径(mm)=懸濁粒子の粒径(mm)×グラウタビリティ比

これらから考慮して、セメントの粒子が小さいほど良く、粉末度の出来るだけ大きい方向、すなわち普通セメントよりはコロイドセメントが、さらに超微粒子セメントが望まれ、コロイドセメントの6000cm²/g程度のブレーン値のものからもっと超微粒子セメント（ブレーン値9,000cm²/g程度）をより適用するほうが浸透性は良い。

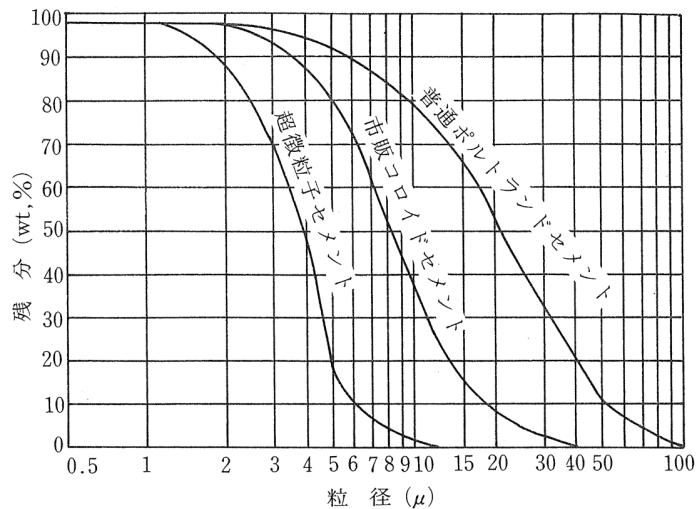


図-5.3.19 各種セメントの粒径曲線 ((株)小野田：超微粒子注入技術資料より抜粋)⁹⁾

表-5.3.14 懸濁型注入材の G_{85} 、 G_{95} の値 (μm)⁹⁾

種 類	G_{85}	G_{95}
普通セメント	46	70
早強セメント	25	34
フライアッシュ	47	52
コロイドセメント	15	25
超微粒子セメント	5.2	8
ベントナイト	1.5	7

これを裏付けるために、下記に示す方法で超微粒子セメント、微粒子セメント、普通セメントの各スラリーを模擬砂層へ浸透させた時の浸透長を試験した。

配 合 W/C = 400、分散剤(FT-80) (セメント重量に対して) 0%、2.0%

模擬砂の特性 : 比重 2.63、粒度 0.15~0.60mm、間隙率 43.7%

模擬砂の容量 : $\phi 5cm \times 34cm$

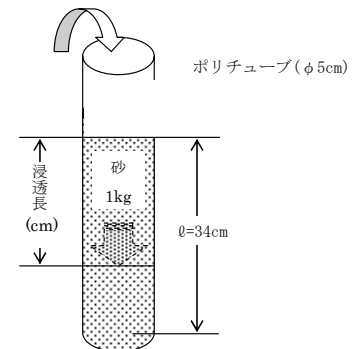
試験方法 ポリチューブ($\phi 5cm$)に砂 1kg($l=34cm$)を充填し、セメントミルク 200cc を静かに入れた。硬化後、チューブを切り、浸透長を測定した。

表-5.3.15 に普通セメント(ブレン値 $3,200cm^2/g$)、微粒子セメント($6,000cm^2/g$)、超微粒子セメント($9,000cm^2/g$)の模擬砂層を作り浸透度を試験した結果を示しているが、明確にセメント懸濁粒子の大きさの違いである粉末度の大きさに応じた浸透長となっている。

表-5.3.15 模擬砂層中での超微粉末セメントの浸透度¹³⁾

セメントスラリー200cc (W/C=400)

セメントの種類	分散剤 (FT-80) (%)	浸透長 (cm)	固結容積 (cm ³)	セメントスラ リー残量高さ (cm)
超微粒子セメント	0.0	19.3	379	1.8
	2.0	27.0	530	0.0
微粒子セメント	0.0	11.7	230	5.1
	2.0	15.2	298	3.6
普通セメント	0.0	2.7	53	9.0



しかしながら、表-5.3.16 および図-5.3.20 に示すようにセメントスラリーの粘性が大きくなってくるので、確実に分散剤を使用するとともに必要とする強度との関係はあるがセメントスラリーの W/C については、大きく（薄く）したほうが浸透性は良好となる。

超微粒子セメントの場合、W/C が 150%~200%において、微粒子セメントに比べて 1 時間経過後の粘度の上昇が大きいため、注入施工管理に留意する必要がある。

表-5.3.16 超微粒子セメントの粘性¹³⁾

W/C (%)	単位量(kg/m ³)		粘度(単位:Pa・S)			
	W	C	経過時間(min)			
150	818	545	0	30	60	120
			0.342	0.422	0.515	0.590
200	856	428	0.310	0.320	0.365	0.380
			0.115	0.140	0.170	0.225
300	900	300	0.055	0.065	0.065	0.069
			0.043	0.051	0.060	0.066
500	935	187	0.028	0.036	0.033	0.040
			0.015	0.018	0.020	0.026
			0.012	0.013	0.015	0.025

※ 上段(標準):超微粒子セメント、下段(斜字):微粒子セメント

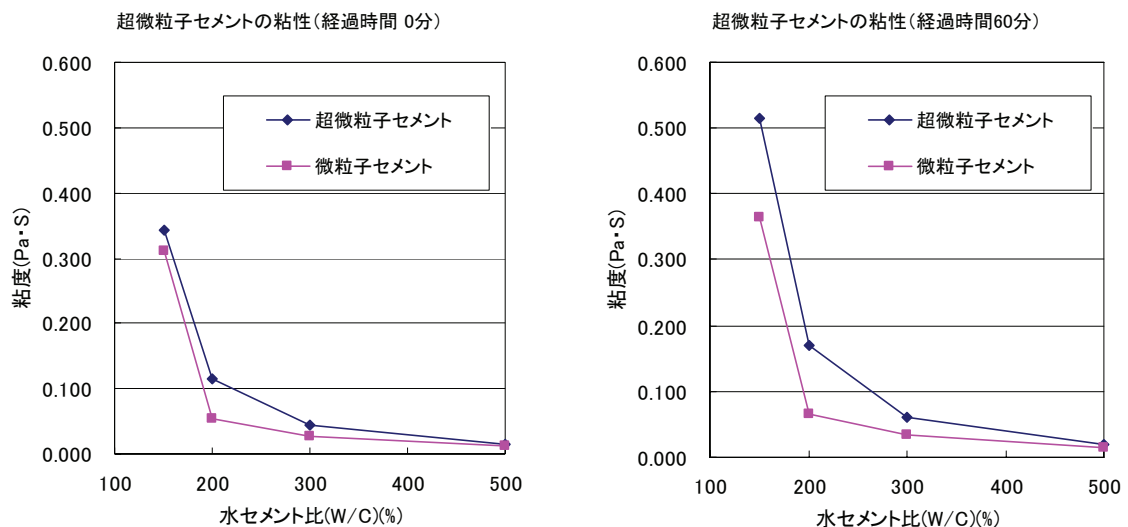


図-5.3.20 超微粒子セメントの粘性¹³⁾

セメント水ガラス注入材のコストは、一般に水ガラスのコストで支配されるので、粉末度が大きいと高価な超微粒子セメントを使用したとしてもセメントスラリーとした注入材料としての単価が大きくは変わらないので、注入対象地盤によっては検討に値する材料と考えてよい。

表-5.3.17 および図-5.3.21 に超微粒子セメントを使用した場合のセメント水ガラス注入材のゲルタイムと圧縮強度について、下記に示す試験方法により実施した試験結果を微粉末セメントと比較して示す。超微粒子セメントのゲルタイムは多少短くなるものの一軸圧縮強度については、材齢 7 日、28 日のいずれも大きな違いはないが、W/C が 100%に近づくにつれ、微粒子セメントが高く、W/C が 300%に近づくにつれ、超微粒子セメントが高くなっている。

配 合 : A 液 (3 号水ガラス(モル比 3.2) 50%希釈液)
 : B 液 (W/C) 150、200、300%
 温 度 : 20℃
 材 齢 : 7 日、28 日
 養 生 : 3 時間まで型枠内で気乾養生、以後、水中養生。
 試験方法 : A・B 液は体積比で 1 : 1 に混合し、ゲルタイムおよび強度を測定した。(供試体 : 4×4×16cm)

表-5.3.17 超微粒子セメントを使用した場合のゲルタイムと圧縮強度¹³⁾

温度 (℃)	B 液		ゲルタイム	一軸圧縮強度(N/mm ²)	
	W/C(%)	kg/100ℓ		7 日	28 日
20	150	54.5	0'41''	4.7	5.0
			0'52''	4.9	6.4
	200	42.8	1'00''	3.1	3.3
			1'04''	2.7	3.3
	300	30.0	1'32''	1.4	1.6
			1'45''	0.4	1.9

※ 上段(標準):超微粒子セメント、下段(斜字):微粒子セメント

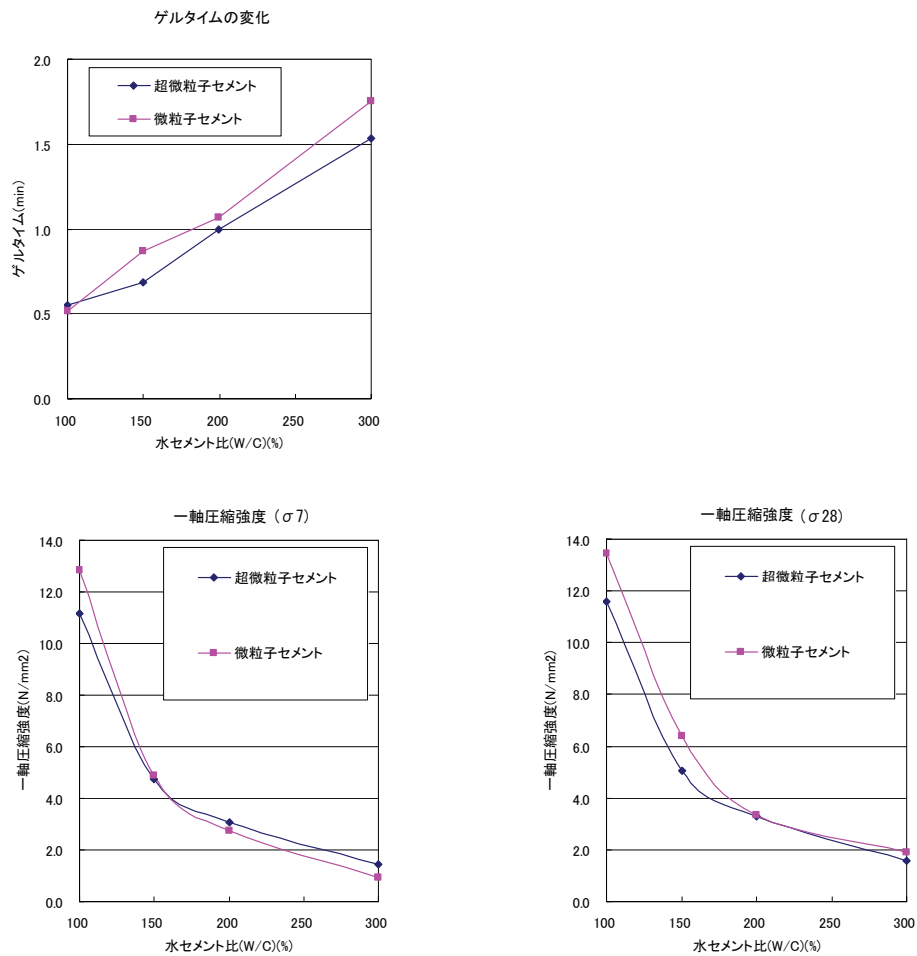


図-5. 3. 21 超微粒子セメントを使用した場合のセメント水ガラス注入材のゲルタイムと圧縮強度¹³⁾

上越新幹線中山トンネル高山工区では、図-4. 2. 3 の注入のフローチャートで示したように、表-5. 3. 18 に示す超微粒子セメントによるモル比 2.2 の水ガラスを使用したセメント水ガラス注入材の配合により施工した報告がある。

表-5. 3. 18 上越新幹線中山トンネル高山工区におけるセメント水ガラス注入材の配合¹⁴⁾

W/C (%)	A液(500ℓ)			B液(500ℓ)		ゲルタイム (20℃)	強度 (N/mm ²)	注入実績	使用材料
	セメント(kg)	水(ℓ)	混和剤	水ガラス(ℓ)	水(ℓ)				
300	150	450	3.0	375	125	5分	1.3	33,896m ³	超微粒子セメント 分散剤 MCヘルパー
200	215	430	4.3			3分	6.0		
100	377	377	7.5			1分30秒	14.0		

※ 水ガラスはモル比2.2を使用

5.4 結論

本章においては、青函トンネルの止水および地盤改良において適用されたセメント水ガラス注入材を対象として、室内試験やトンネルにおける長期的な計測および分析結果に着目し、基本特性（ゲルタイム、圧縮強度等）の把握および長期材料特性の検討を実施した。その結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 耐海水性に着目してセメント水ガラス注入材の耐久性試験を行った結果、高炉コロイドセメントを使用した場合には、1年材齢においても強度低下が見られず、他のセメントと比較し耐海水性が高いことが判明した。
- (2) 青函トンネルに適用されたセメント水ガラス注入材は、モル比2.2の水ガラスと高炉コロイドセメントの組合せとし、それぞれを混合比1.0で使用することで要求性能（ゲルタイム3分以上、圧縮強度4.0N/mm²以上）を満足するものとなり、注入材の長期的な耐久性の確保にも寄与している。
- (3) 注入域に存置される注入材料の固結状況を考慮し、グラウトが海水接触部においてグラウト溶出成分で飽和された状態と岩盤内で密封された状態を模擬した耐久性試験を実施した。その結果、グラウト硬化体の劣化は進行しないことが判明した。また、グラウトの海水と接触する表面積を変化させた条件で、注入されたグラウトの状況を再現した室内試験を実施した結果、海水の接触面積が大きい状況では崩壊が進行するが、海水の接触面積が小さい条件においては崩壊しないことが判明した。
- (4) 青函トンネル供用開始後に坑内のボーリングコアからセメント水ガラス注入材を採取した結果、施工から30年経過したグラウト硬化体であっても、岩盤の亀裂に脈状に密着した堅硬な固結物となっており、注入材の要求性能である圧縮強度4.0N/mm²以上を保持していることを確認した。
- (5) 注入材を化学分析した結果では、グラウトの骨格成分であるシリカ(SiO₂)分およびアルミナ(Al₂O₃)分は、実際に注入された配合計算値より30%程度大きい値を示し、特にシリカ(SiO₂)量は当初からほぼ一定で、30年経過後も25%程度と安定していることが確認された。その一方で、長期的にはCaOおよびNa₂Oの減少とMgOの増加が確認されており、Ca²⁺が海水中のMg²⁺と置換している傾向が認められたが、セメント水ガラス注入材のX線回折結果から、生成物の中に劣化生成物の存在は認められなかった。

- (6) セメント水ガラス注入材の加圧脱水試験を実施した結果、高圧条件下において25%～35%程度の脱水作用があることと、10%～60%の圧縮強度の増加効果があることが確認された。このことから、加圧脱水作用によりセメント水ガラス注入材のグラウト骨格成分が増量され性能を大きく向上させているものと判断される。
- (7) 青函トンネル坑内における長期的な各種計測結果を分析評価した結果、トンネル周囲の湧水圧分布、ボーリング孔内の湧水量および坑内湧水の化学分析結果には顕著な変化は生じておらず、長期的に安定した状態を保持していることが確認された。その一方で、海底部における坑内湧水量の緩やかな減少傾向と坑内内空変位測定結果の微小な縮小傾向が経年変化として確認されていることから、注入域全体の透水性が長期的に低下傾向にあることがうかがえるが、現状ではトンネル構造物および注入域は健全な状態にあるといえる。

以上の結果から、青函トンネル海底部において施工されたセメント水ガラス注入材は、施工から最長約30年間に渡って安定した性状を維持しているものと結論付けられる。

青函トンネルにおいては、海底下に位置するという特殊条件に鑑み、今後も坑内における計測監視や注入材の成分化学分析等を継続的に実施することにより、トンネル構造物と注入域双方の健全性を評価していくことが肝要と考える。

また、セメント水ガラス注入材をより有効に活用するための今後の展開について要約すると下記のとおりである。

- (1) 高炉スラグの分量をセメント量の70%、85%と多くしていくとゲルタイムは長くなり、坑内水養生における短期強度 (σ_3 、 σ_{28}) は小さいが、材齢とともに強度は確実に増加し、長期強度 (σ_{182}) は55%の高炉スラグ添加量とあまり変わらず、海水に対する耐久性は向上している。また、硫酸マグネシウム水溶液、塩化マグネシウム水溶液および硫酸マグネシウム水溶液での浸食促進試験においても高炉スラグの添加量を55%から70%、85%と増量したほうが、耐久性が向上している。今後のセメント活用としては、青函トンネルで実用化された高炉スラグが55%添加されたセメントよりも添加量が多い70%や85%の高炉セメントの適用が望まれる。このことは、地球温暖化への貢献も併せ持っている。

- (2) セメント水ガラス注入材の耐久性を考慮する場合には、必要強度の範囲内でセメント量を極力抑え、 SiO_2 を適切にとることが重要である。青函トンネルでは、W/C100%～200%の配合が多く用いられたが、注入対象地山によっては、より耐久性を保持する観点から SiO_2 の量を維持しながら W/C200%～400%の配合の使用も有効である。
- (3) セメント水ガラス注入材の遅延剤として、リン酸ナトリウムを使用することにより、ゲルタイムを数分から 1 時間以上という広範囲にコントロールが可能である。現場での使用を考えた場合に遅延剤を溶液タイプとした方が得策であるため、溶解度の高いリン酸 1 ナトリウムの方が実用性は高い。リン酸 1 ナトリウムを使用し、二重管ダブルパッカー方式で注入施工試験を実施した結果、遅延剤を使用しないセメント水ガラス注入材に比べ、より低圧で所定の注入量が注入可能となったことを確認した。
- (4) セメント水ガラス注入材に超微粒子セメント ($9,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度)を使用する場合は、コロイドセメント (微粒子セメント ; $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度)に比べ、粘度上昇が大きいことおよびゲルタイムが多少短くなるという欠点もある。そこで、その欠点を克服する方法として、分散剤を確実に使用するとともにセメントスラリーの W/C を適切にとることにより、浸透性のよさを発揮でき、注入対象地山に応じて適切に使用すれば有効なセメント水ガラス注入材の一つとなる。

参考文献

- 1) 足立貞彦：長大トンネル用グラウトの耐久性に関する研究，東京大学学位論文，1976.
- 2) 秋田勝次、村上明、平野健吉、荒木昭俊：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，トンネル工学論文集，第 19 巻，pp.1-12，2009.11.
- 3) 土谷幸彦：青函トンネルの覆工の長期挙動と健全度評価手法に関する研究，東京大学博士論文，pp.57-62，2007.12.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，pp.158-162，2007.1.

- 5) 草野一人編：薬液注入工法ハンドブック、吉井書店、p. 70、1983. 7.
- 6) 米倉、島田、大野；恒久グラウト・本設注入工法，pp. 24，理工図書，2008. 6.
- 7) 米倉、島田、大野；恒久グラウト・本設注入工法，p. 153，理工図書，2008. 6.
- 8) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会：最新地盤注入工法技術総覧，p. 33、pp. 106-107，株式会社産業技術サービスセンター，1997. 10.
- 9) 笠井芳夫，小林正几：セメントコンクリート用混和材料，技術書院，1986. 5.
- 10) 高橋泰弘，吉田佳子，秦野正人：下水汚泥焼却灰からのリン酸カルシウムとしてのリン回収実験，第12回廃棄物学会研究発表会論文概要集，2001.
- 11) 岩波理化学辞典：岩波書店，1985. 2.
- 12) 化学便覧基礎編改定3版：丸善株式会社，1988. 1.
- 13) 電気化学工業：デンカ ES 技術資料 No. 28-1, 29，1995.
- 14) 日本鉄道建設公団：上越新幹線工事誌（大宮・水上間），p. 817，1983. 10.

第6章 急硬性セメント注入材の耐久性に関する研究

6.1 急硬性セメント注入材の材料特性

6.1.1 基本特性

急硬性セメント注入材の長期材料特性および耐久性について論じる前段として、本材料の基本特性についてゲルタイム、強度発現性および硬化体からの溶出成分について述べる。

1) ゲルタイム

急硬性セメント注入材は、2.3.2の硬化のメカニズムで述べたように、セメントスラリーに急硬性を付与するカルシウムサルホアルミネート混和剤（RCSA混和材）は、石膏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

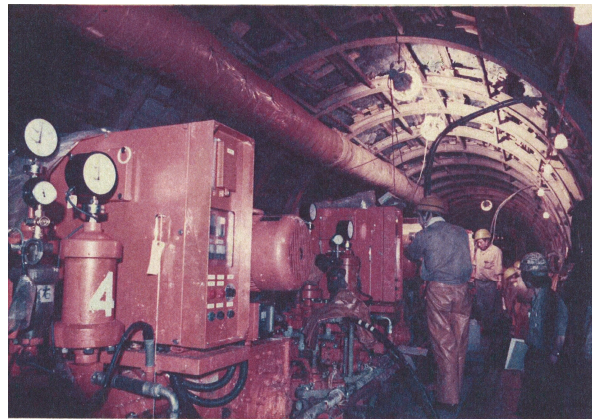


写真-6.1.1 青函トンネルでの注入施工の様子



写真-6.1.2 鍋立山トンネルでの注入施工後の様子

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-6.1.1には、A液単液の凝結遅延剤添加率とゲルタイムの関係を示す。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液単液のゲルタイムを長くできることが明らかになっている。

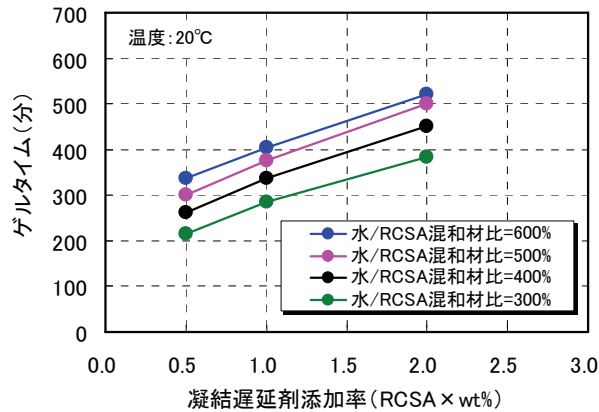


図-6.1.1 凝結遅延剤添加率とゲルタイムの関係 (A液)

図-6.1.2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ゲルタイムの関係を示す。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、ゲルタイムが長くなる。ゲルタイムの調整については、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¹⁾。また、高炉コロイドセメント(BFC)はセメントが高炉スラグで55%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とから同一添加量とした場合はゲルタイムが普通セメント(OPC)使用時よりも長くなる。

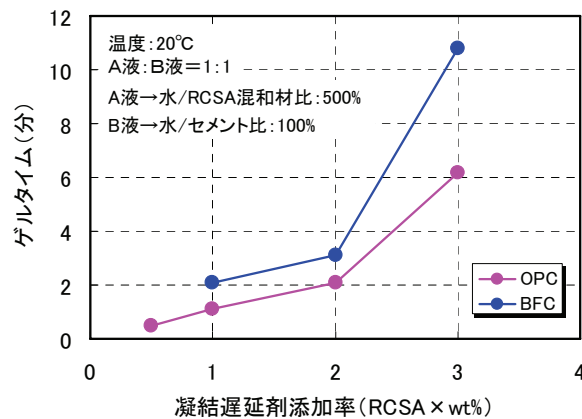


図-6.1.2 凝結遅延剤添加率とゲルタイムの関係 (A液+B液)

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、ゲルタイム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ゲルタイムを短縮できる特徴を有する。例えば、図-6.1.1より370分程度のゲルタイムを示すA液（凝結遅延剤：1.0%、水/RCSA混和材比：500%）に、図-6.1.2に示す配合のB液（普通セメント（OPC）のW/C100%）を混合すると、ゲルタイムは30秒程度になることが分かる。A液単体では、凝結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する。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。

2) 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-6.1.3にホモゲル（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。普通セメント使用時は高炉コロイドセメントに比べ数時間から1日までの強度発現性が向上している。一方、長期的には、高炉コロイドセメント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、水和反応によって生

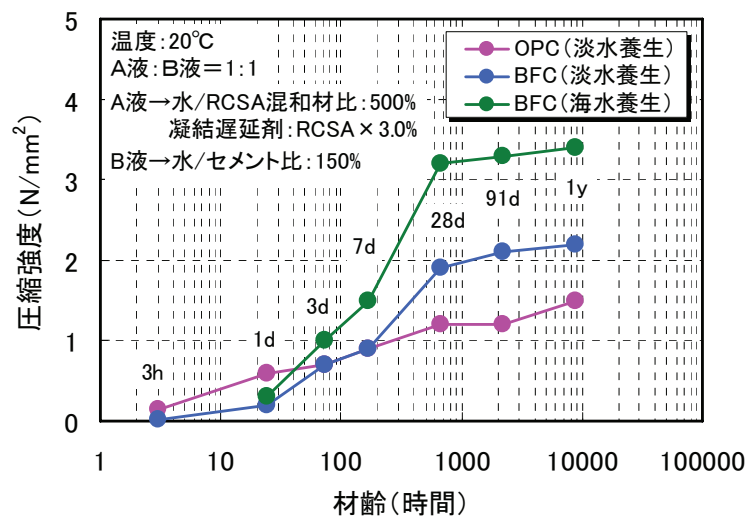


図-6.1.3 ホモゲルの材齢と圧縮強度

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2水石膏を生じ、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、石膏の生成と同時に水和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²⁾。

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-6.1.3に示すとおり、海水中で養生した高炉コロイドセメントを用いた注入材は、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判断できる。

3) 硬化体からの溶出成分

表-6.1.1に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。また、試験体の配合を表-6.1.2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。

表-6.1.1 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
ホウ素	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-6.1.2 溶出成分分析用の試験体配合

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	R	C	W		σ_{28}
75	474	0.75	300	405	120	1.7

C : 普通セメント R : 遅延剤

6.1.2 長期材料特性

6.1.1 では、急硬性セメント注入材の基本特性について説明したが、本節では、急硬性セメント注入材の室内養生における長期材料特性と注入後の掘削切羽で採取した硬化体の長期材料特性を圧縮強度で把握した試験結果を述べる。

1) 室内養生における長期材料特性

急硬性セメント注入材の長期材料特性を把握するため、下記のとおり水中養生試験および耐海水性試験により、長期間にわたって圧縮強度試験を実施した結果を示す。

a) 水中養生試験¹¹⁾

使用材料

セメント : 普通セメント
 急硬材 : 急硬性セメント(RCSA)
 遅延剤 : セッター
 使用水 : 水道水

試験方法

A、B液を等量混合し、4cm×4cm×16cm 供試体により圧縮強度を測定した。

表-6.1.3 急硬性セメントの配合条件

配 合	A液(200ℓ)			B液(200ℓ)	
	急硬性セメント (kg)	セッター (kg)	水 (kg)	セメント (kg)	水 (kg)
配合-1	30.0	0.3	187.9	120.0	161.3
配合-2	40.0	0.6	186.2	160.0	148.4

表-6.1.4 圧縮強度試験結果

20℃水中養生 (N/mm²)

材令 配合	3時間	12時間	1日	3日	7日	14日	28日	6ヶ月	1年	2年	5年	10年
配合-1	0.5	0.8	1.1	1.6	1.8	2.3	2.9	3.2	3.3	3.4	3.5	3.7
配合-2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7

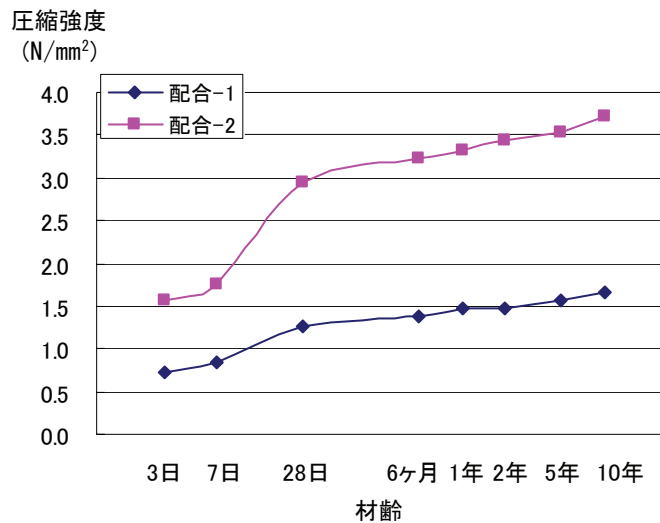


図-6.1.4 圧縮強度試験結果 (材齢：対数目盛)

試験の結果、水中養生試験では配合 1 および配合 2 とともに、材齢 2 年、5 年および 10 年においても強度は増加傾向にあり十分な耐久性が保持されている。

b) 耐海水性試験¹¹⁾

耐海水性についても下記に示す配合により、海水に直接養生した試験と 5%の MgSO_4 水溶液中で養生した浸食促進試験を実施した結果を表-6.1.5、6.1.6 に示す。 MgSO_4 水溶液を使用したのは、第 5 章 5.1.3 において、セメント系薬液注入材は海水中に多く存在する Mg^{2+} イオンと SO_4^{2-} イオンにより浸食され、劣化されやすいためである。試験の結果を図-6.1.5、6.1.6 に示すが、材齢 2 年までの耐海水試験では、強度増加がみられ、十分な耐久性は保持されている。また、5%の MgSO_4 水溶液における促進試験においても、材齢 2 年まで一部の配合条件では強度低下があるものの、概ね強度は保持されており、耐海水性が大きい注入材料であると判断される。

配合条件

耐海水	: A液(W/RCSA)	300, 400, 500, 600 (%)
	: B液(W/C)	100, 150, 200 (%)
耐 MgSO_4 (5% MgSO_4 水溶液)	: A液(W/RCSA)	300, 400 (%)
	: B液(W/C)	100, 150, 200 (%)
セッター	: 2.5% (対RCSA×%)	
	: 高炉コロイドセメント	

試験方法

上記配合の A・B 液を体積比で 1 対 1 に混合し、ゲル直前に型詰めし強度測定した。
養生は 3 時間後、海水および $MgSO_4$ 水溶液中にて各材齢まで養生を行った。（材齢：3 時間～2 年、養生温度：20℃）

表-6.1.5 耐海水性の圧縮強度試験結果

A液 (W/RCSA)	B液 (W/C)	20℃海中養生 (N/mm ²)						
		1日	3日	7日	28日	3ヶ月	1年	2年
300	100	1.2	3.3	5.0	7.8	11.2	11.3	11.5
	150	0.7	2.6	3.8	6.2	6.9	6.9	6.9
	200	0.7	2.2	3.1	4.3	6.0	6.1	6.2
400	100	0.7	2.5	3.8	6.7	8.1	8.1	8.3
	150	0.3	1.5	2.0	3.8	4.5	4.5	4.6
	200	0.3	1.0	1.9	2.8	3.8	3.8	3.8
500	100	0.7	1.6	3.1	6.7	6.9	7.2	7.4
	150	0.3	1.0	1.5	3.1	3.2	3.3	3.4
	200	0.2	0.6	1.0	1.9	2.2	2.4	2.4
600	100	0.6	1.4	2.2	4.0	5.7	6.9	7.1
	150	0.2	0.7	1.0	2.2	2.6	2.8	2.9
	200	0.1	0.5	0.5	1.7	1.9	2.0	2.0

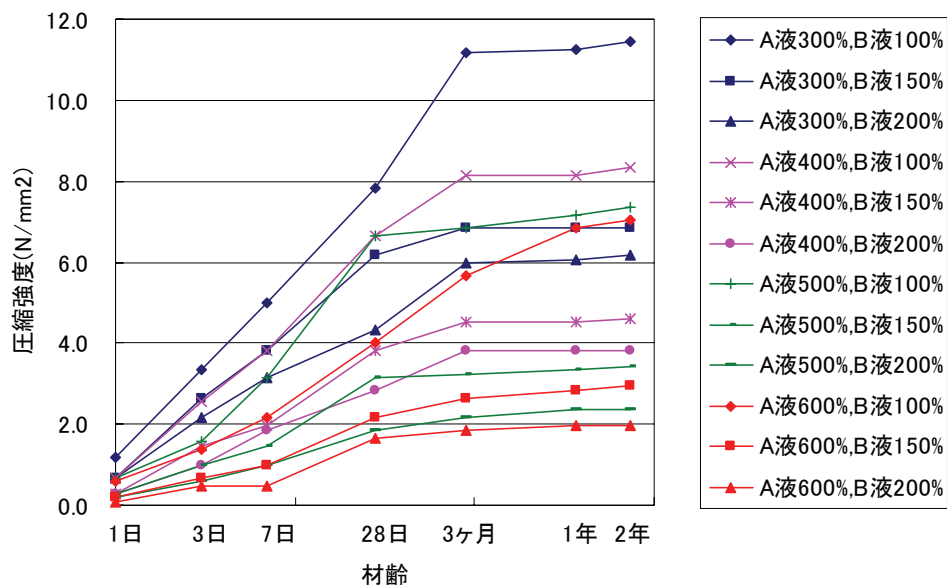


図-6.1.5 耐海水性の圧縮強度試験結果（材齢：対数目盛）

表-6.1.6 耐 MgSO_4 の圧縮強度試験結果

		5% MgSO_4 水溶液20℃ (N/mm ²)						
A液 (W/RCSA)	B液 (W/C)	1日	3日	7日	28日	3ヶ月	1年	2年
300	100	1.2	2.8	5.0	8.3	8.8	8.3	8.3
	150	0.9	2.2	2.8	5.2	6.1	6.1	4.9
	200	0.6	1.7	1.9	2.6	2.7	2.8	3.0
400	100	1.1	1.9	3.8	5.0	6.5	6.4	6.5
	150	0.5	1.2	2.2	2.9	3.1	3.1	3.2
	200	0.3	0.7	1.7	2.5	2.5	2.7	2.8

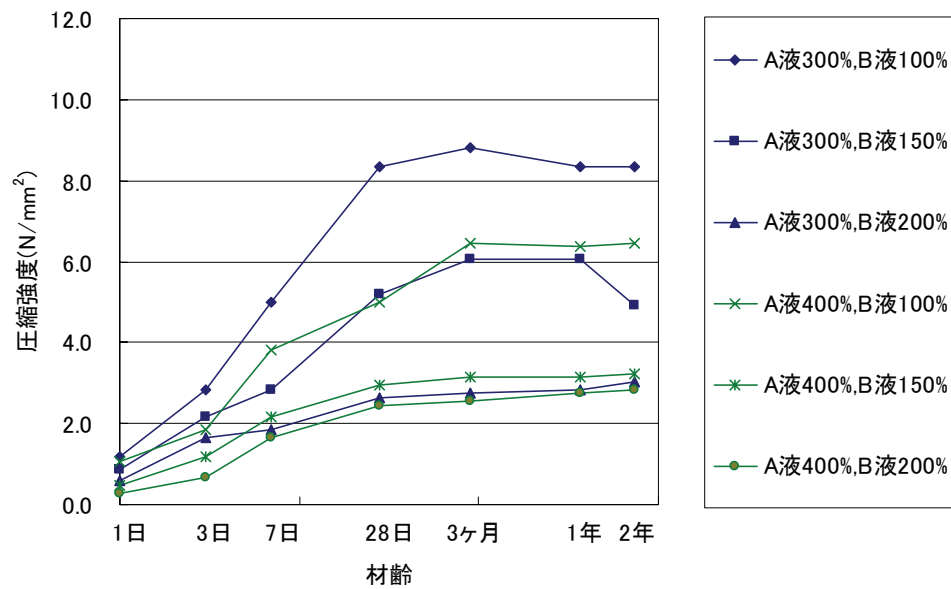


図-6.1.6 耐 MgSO_4 の圧縮強度試験結果（材齢：対数目盛）

2) 注入後の掘削切羽で採取した硬化体の長期材料特性

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、4.2 青函トンネル^{3), 4), 5)}および4.5 鍋立山トンネル^{6), 7), 8), 9)}に関する既往の工事報告を参照されたい。

a) 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良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ゲルタイムを調整でき、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水ガラスを用いるセメント水ガラス注入材を注入し、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セメント水ガラス注入材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、セメント水ガラス注入材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（ $W/C=100\sim300\%$ 、 $W/RCSA=500$ または 600% 、凝結遅延剤 $1\sim4\%\times RCSA$ ）。

鍋立山トンネルは、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、ゲルタイムを1分程度にした単一の高強度配合としている。表-6.1.7に、建設当時の各現場で使

表-6.1.7 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) σ_{28}
				RCSA	W	遅延剤 (RCSA×%)	C	W	減水剤 (C×%)		
青函トンネル	高炉コロイドセメント	200	500	100	465	2.5	214	429	—	300～540	1.3
鍋立山トンネル	普通セメント	① 125	500	100	465	0.5	319	399	1.0	40～60	3.4
		② 93	500	100	465	0.5	400	370	1.0	40～60	3.9

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。

b) 評価項目

長期間養生した硬化体の材料特性について表-6.1.8 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-6.1.7 に示す。

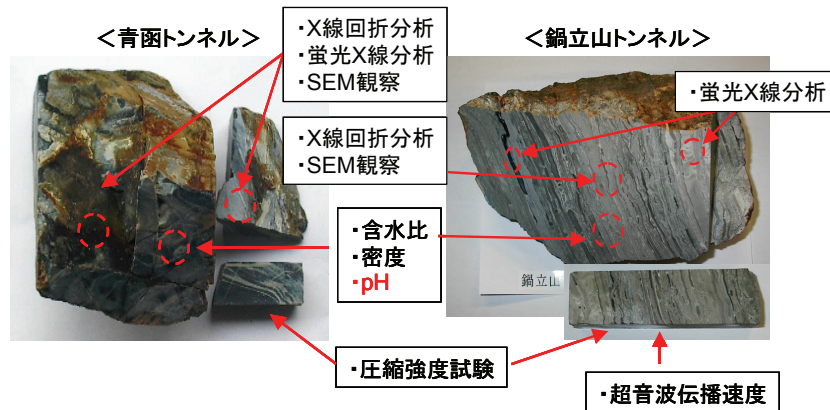


図-6.1.7 各評価試験のサンプリング部位

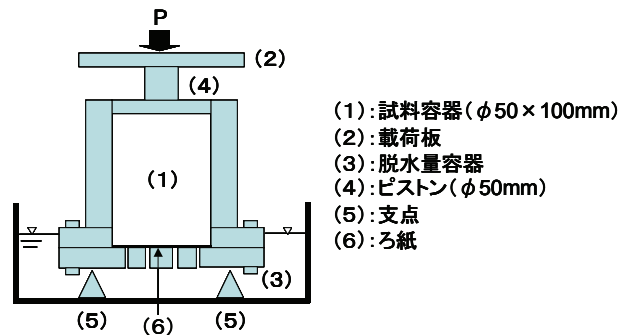


図-6.1.8 加圧脱水試験装置

c) 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-6.1.4 および写真-6.1.7 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-6.1.5、写真-6.1.6、および写真-6.1.8 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-6.1.5 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硬化体と考えている。

表-6.1.8 試験項目と方法

評価項目	試験方法又は 試験機器メーカー	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	・含水比からの算出 ・加圧脱水試験装置 で測定	<含水率から算出する方法>→表-6.1.9 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-6.1.9 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-6.1.8 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

写真-6.1.6 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-6.1.5 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-6.1.8 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。なお、黒色部は注入によって巻き込んだ岩石である。

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-6.1.4 養生状態



写真-6.1.5 硬化体 A (ホモゲル)



白色部：割裂注入された注入材硬化部

写真-6.1.6 硬化体 B

（岩盤との複合体）の一例

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-6.1.7 養生場所



写真-6.1.8 切断面の一例

d) 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-6.1.9 に示す。

表-6.1.9 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¹⁰⁾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/mm^2 、 6.2N/mm^2 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/mm^2 、材齢 17 年の鍋立山トンネルで採取した硬化体で 7.6N/mm^2 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。地山に注入することで、ホモゲルに比べ硬化体

表-6.1.9 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	74.7
	2				24	36.8	28.1	2.43	19.6	81.8
	3				20	33.7	28.8	2.43	22.2	80.4
	平均				21.7	36.1	29.1	2.23	24.6	79.0
鍋立山	1	① 3.4 ② 3.9	1.28 1.33	67.3 62.6	6.2	39.1	8.1	1.54	45.5	51.4
	2						5.5	1.58	33.0	65.8
	3						8.9	1.64	41.1	57.2
	4						8.6	—	38.2	60.5
	5						7.1	—	32.7	66.0
	平均						7.6	1.59	38.1	60.2

※ 表の①, ②は表-6.1.7 の①, ②の配合と同一

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、含水率が平均で24.6%、鍋立山トンネルで採取した硬化体では、平均で38.1%の含水率であった。含水率が小さいほど、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ゲルタイムを5～9分に設定したが、 7.5N/mm^2 （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ゲルタイムを1分程度に設定したことと、注入圧も 3N/mm^2 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大きくなかったと考えられる。

図-6.1.9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-6.1.8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-6.1.8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/mm^2 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79.0%という高い値であった。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/mm^2 の圧力まで外挿した場合は、40%程度の脱水率であることが想定できるが、掘削で採取した硬化体の脱水率は非常に大きな値を示している。

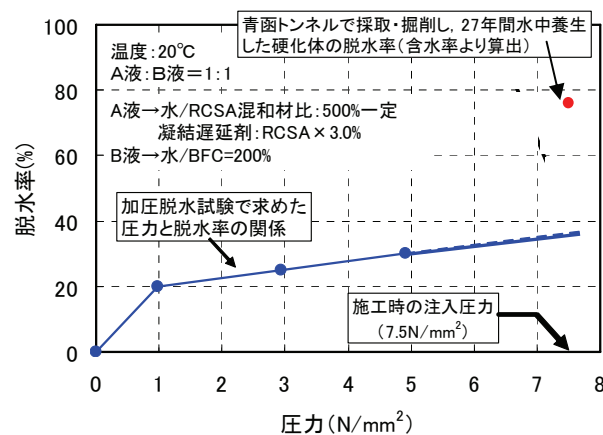


図-6.1.9 加圧脱水試験で求めた脱水率と地山から掘削した硬化体の脱水率

差が大きい理由としては、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・終了時にセメントスラリー濃度を 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-6.1.10 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。

表-6.1.10 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

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しているといえる。

e) 長期間養生した硬化体の化学的分析

(1) X線回折分析

図-6.1.10 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-6.1.5 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（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が、または、それ以上に混合された箇所といえる。逆に、青函トンネルの硬化体（緑色部）は、セメ

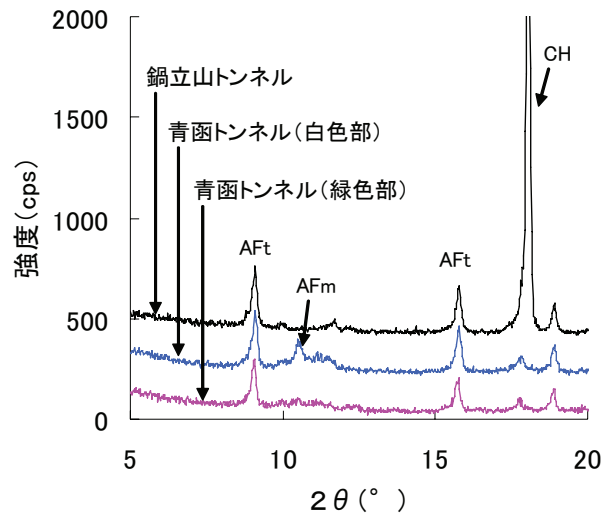


図-6.1.10 長期間養生した硬化体のX線回折パターン

ントに対して RCSA 混和材の割合が少ない箇所と考えることができる。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。

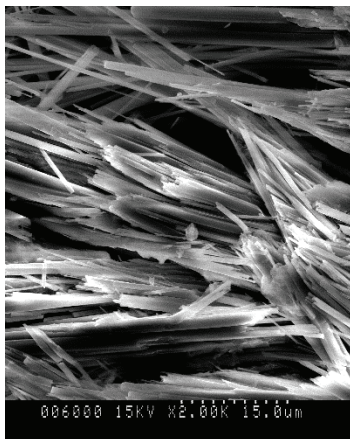


写真-6.1.9 青函トンネル(白色部)

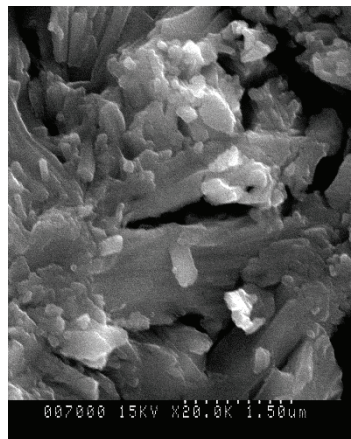


写真-6.1.10 青函トンネル(緑色部)

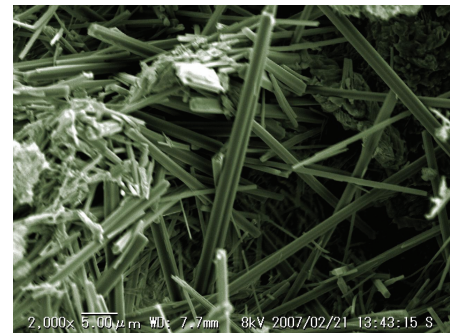


写真-6.1.11 鍋立山トンネル

(2) SEM観察

写真-6.1.9 および写真-6.1.10 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-6.1.11 は、鍋立山トンネルにおいて、注入・掘削後に採取して 17 年間地中で湿空養生を続けた硬化体の SEM 画像である。写真-6.1.9 および写真-6.1.11 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-6.1.10 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。

(3) 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-6.1.11 および図-6.1.12 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-2.3.2 および表-2.3.3 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-6.1.7 に示す練混ぜ配合より計算で求め、図-6.1.11 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、緑色部は高炉コロイドセメントの化学組成に近似している（図-6.1.11）。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 $40 \sim 50 \text{ kg} / 0.5 \text{ m}^3$ となり、標準配合より減少しているといえる。また、青函トンネル硬化体 B の割裂入部も、図-5.3.8 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

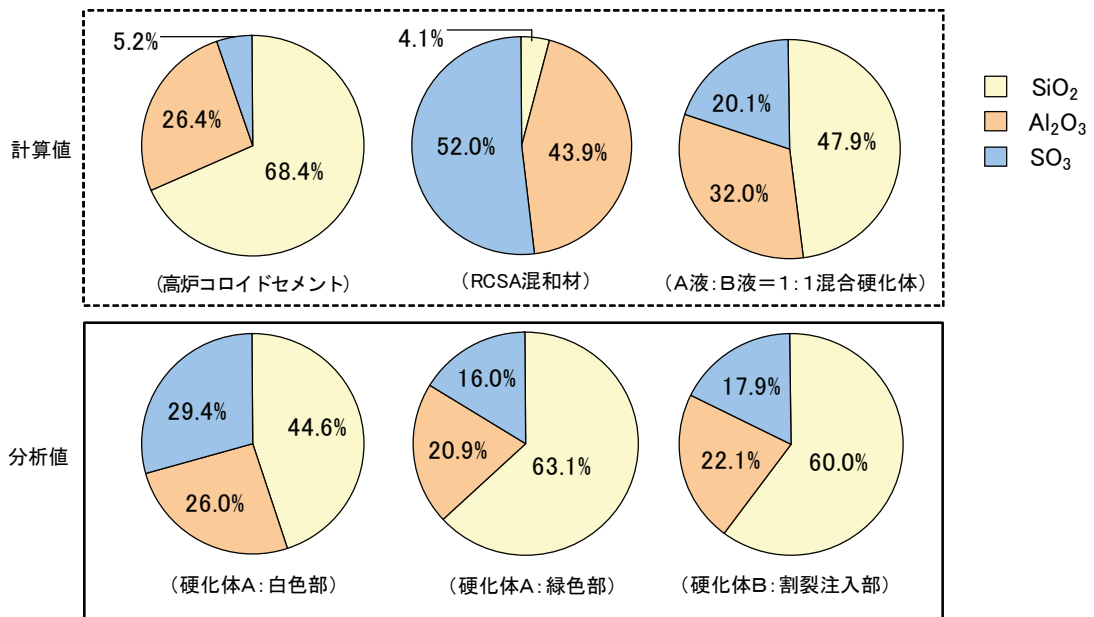


図-6.1.11 青函トンネルで採取した硬化体の化学組成

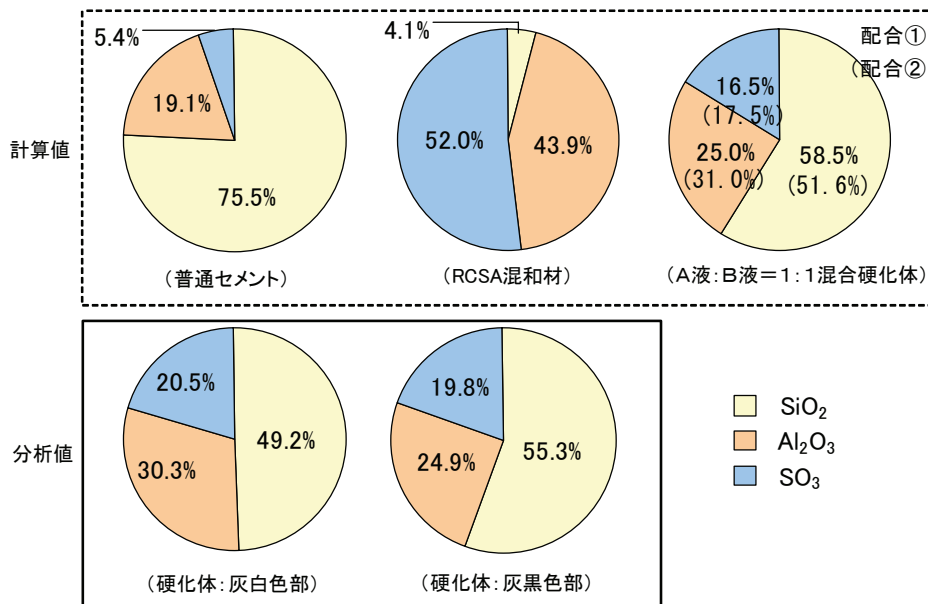


図-6.1.12 鍋立山トンネルで採取した硬化体の化学組成

※ 図の配合①, ②は表-6.1.7 に示す配合である

W/C=100%の B 液を調整して、高炉コロイドセメントの濃度を変えて注入施工したことが影響している。加えて、割裂入部が白色であるにもかかわらず、等量混合に近い化学成分の割合を示さない理由は、SiO₂ 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

向を示す。RCSA 混和材が $50\text{kg}/0.5\text{m}^3$ 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¹¹⁾。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-5.3.9 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。）なお、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、 $7.5\text{N}/\text{mm}^2$ 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 液を用いた注入が多くあるが、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ている。

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わかった。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といえる。

f) 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-6.1.11、鍋立山トンネルから採取し養生し

た硬化体の結果を表-6.1.12 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-6.1.11 および表-6.1.12 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-6.1.11 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-6.1.12 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いえる。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判断している。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。

表-6.1.11 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-6.1.12 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

6.2 急硬性セメント注入材の今後の展開

6.2.1 二重管ダブルパッカー方式への適用と1ショット注入について

二重管ダブルパッカー方式の注入は、最近特にグラウトの良好な品質を確保するため適用が多くなっており、特に溶液型注入の施工において再注入が容易ということもあり、特に都市土木における注入では主流となっている。セメント系薬液注入材の場合には、ゲルタイムが比較的短いことおよびグラウトのホモゲル強度が大きいことから注入管の注入口が固結し再注入が出来づらいことも多く、二重管ダブルパッカー方式における採用は少ない状況にあった。しかしながら急硬性セメント注入材は、遅延材を適切に用いることで数十秒から1時間程度のゲルタイムの設定が容易であるため、30分程度のゲルタイムを設定することで二重管ダブルパッカー方式でも注入は可能となる。特にセメント系薬液注入材の使用例の多いトンネル地山注入の場合、従前からゲルタイムを長くするためにW/Cの薄いもの(400%、300%等)から注入を開始したり、単管ロッドの施工を余儀なくされていたりしていたが、急硬性セメント注入材は適切な遅延材を採用することで、W/Cを変化させることなく注入材料の品質を一定に保つことができる。

4.3で前述したように飯山トンネルにおいては、急硬性セメント注入材による注入で大崩落箇所を突破したが、注入材料は基本的にはグラウトの品質を良好に管理可能な二重管ダブルパッカー方式による急硬性セメント注入材とすることで注入を実施し、良い効果をあげることができた。急硬性セメント注入材における今後の注入方式として、溶液型注入材と同様、二重管ダブルパッカー方式の注入を基本に設計が進められていっても問題ない施工が可能と判断できる。

また、山岳地山注入の場合、注入材料を一液で施工する1ショット注入を適用可能であれば、注入設備を小さく軽減することが出来、狭隘なトンネル内施工となる注入作業には大きな利点となる。1ショット注入の欠点としては、注入時に急に最終圧となったり、切羽でグラウトのリークが発生したりして、ミキサー等に残存している注入材料が硬化するため廃棄を余儀なくされる点である。しかし、セメント系注入材料である急硬性セメント注入材は、1ショット注入が可能なロングゲルタイム(1時間程度)を確保可能であり、排水処理が容易で周辺環境にも影響を与えない材料であるため、今後一層の活用が期待される。

6.2.2 超微粒子セメントの適用について

浸透性を向上させる目的で、ブレン値が $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の微粒子セメントを一段と粉末度を向上させたブレン値が $9,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の超微粒子セメントを使用した急硬性セメント注入材について、ゲルタイムと一軸圧縮試験の室内試験を行った結果を表-6.2.1 および図-6.2.1 に示す。ゲルタイムについては、W/C が 100%~200%では超微粒子セメントが長く、300%では微粒子セメントが長い傾向を示す。圧縮強度については、超微粒子セメントのほうが7日、28日強度ともに微粒子セメントに比べ2倍以上の大きな値を示している。

このように粒子を極めて微細とした超微粒子セメントを使用し品質を向上させた急硬性セメントの注入の適用性について、北陸新幹線、飯山トンネルにおいて微粒子セメントと比較しながら試験施工を実施した。試験施工箇所の地質概要図について、図-6.2.2 に示す。

崩落箇所のトンネル上半部に配置した注入試験孔へ微粒子セメントと超微粒子セメントを使用した表-6.2.2 に示す配合で急硬性セメント注入材の試験注入を実施した。注入最終圧力は $3.0\text{N}/\text{mm}^2$ を基準とし、注入量は試験孔の注入対象範囲の 30%を標準とするが、超微粒子セメントについては 40%を考慮するものとした。試験結果について、表-6.2.3 に示す。

この結果、F1 断層の破碎質泥岩（礫・砂混じり）の箇所は、微粒子セメントと超微粒子セメントに注入量に大きな違いは少ないが、未固結の砂岩層（礫・砂混じり）については超微粒子セメントが良く注入されている結果となっている。

注入対象地山により、注入材料を適切に考慮することは重要なことであり、超微粒子セメントを使用した急硬性セメント注入材についても礫・砂混じりの地層についても適用性があり、新しい注入材料の一つとして有効と考えられる。

現在、急硬性セメント注入材の急硬材のブレン値は $5,500\text{cm}^2/\text{g}$ と微粒子セメント ($6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度) と同程度であり、粒子の大きさの均衡がとれている。今後、超微粒子セメントを本格的に使用する場合、急硬材も超微粒子セメントと同様のブレン値 ($9,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度) が望まれるが、急硬材の粉末度を上げた場合には、現状では非常に高価となるため、必要箇所に限定した使用となるものの、注入の浸透性が大きく向上されることとなるので、注入対象地山に応じて有効な注入材料の一つとして考えてよい。

表-6.2.1 急硬性セメントの配合条件およびゲルタイム、一軸圧縮強度試験結果¹⁰⁾

			(水温20℃)				
A 液			B 液		ゲルタイム	一軸圧縮強度(N/mm ²)	
W/RCSA(%)	kg/100ℓ	遅延剤	W/C(%)	kg/100ℓ		7日	28日
600	15.8	RCSA の 2%	100	75.1	2'21''	4.2	8.8
					1'59''	2.0	4.0
			150	54.6	3'04''	2.7	4.1
					2'15''	0.7	1.5
			200	42.9	3'38''	1.4	2.3
					3'07''	0.6	0.9
			300	30.0	4'16''	0.9	1.1
					5'20''	0.5	0.6

※ 上段(標準):超微粒子セメント、下段(斜字):微粒子セメント
供試体寸法:4cm×4cm×16cm

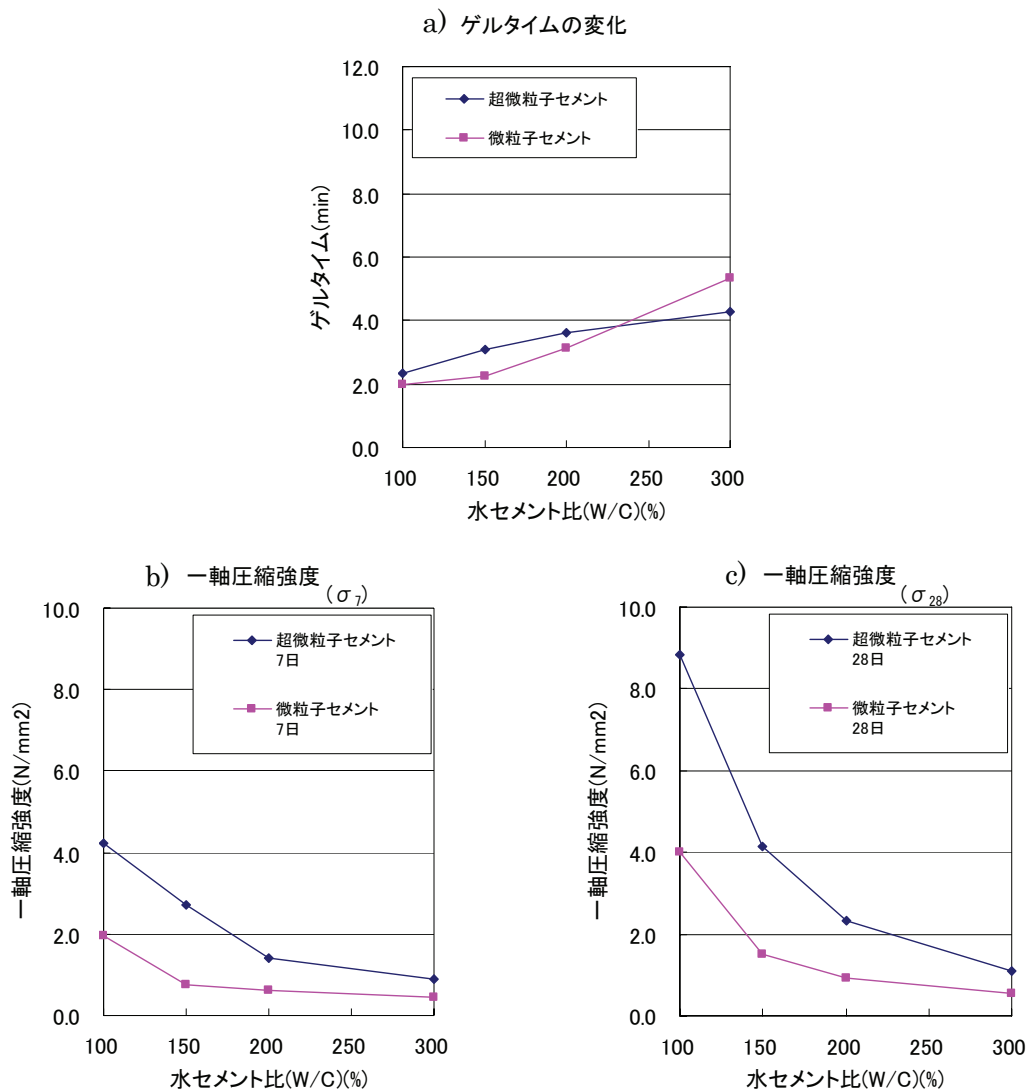


図-6.2.1 ゲルタイムおよび一軸圧縮強度試験結果¹⁰⁾

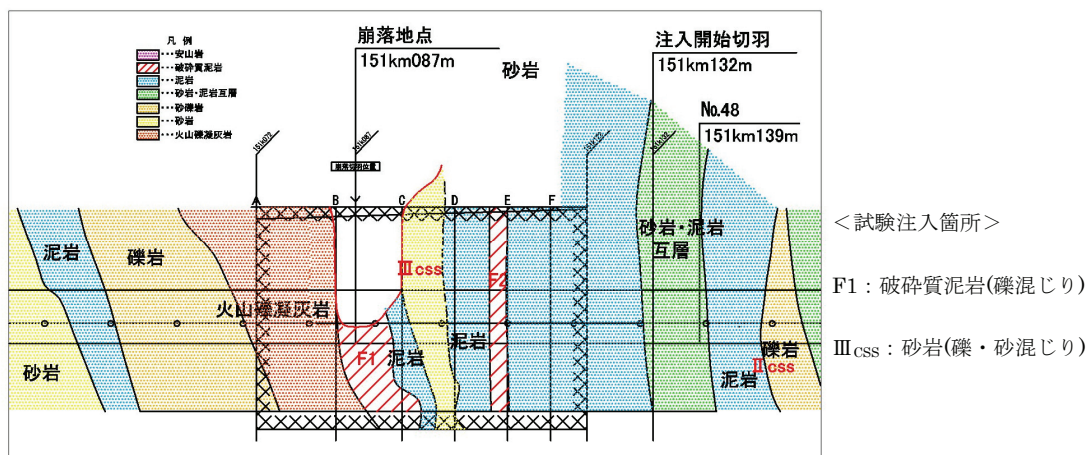


図-6.2.2 飯山トンネルの地質概要図

表-6.2.2 急硬性セメントの標準配合(ゲルタイム 60 分程度、1,000ℓあたり)

	A液(500ℓあたり)		B液(500ℓあたり)	
微粒子セメント	急硬性セメント	50kg	微粒子セメント	250kg
	遅延剤	1.0kg		
	水	483ℓ	水	415ℓ
超微粒子セメント	急硬性セメント	50kg	超微粒子セメント	250kg
	遅延剤	1.5kg	分散剤 FT-50	2.5kg
	水	483ℓ	水	414ℓ

表-6.2.3 急硬性セメントの注入施工試験

材 料	孔番号	破碎質泥岩 (礫混じり)		バルブ数	砂岩 (礫・砂)		バルブ数
		注入率(%)			注入率(%)		
		設計	試験結果		設計	試験結果	
微粒子 セメント	B-13	30	14.4	14	30	22.3	12
超微粒子 セメント	B-9	40	12.0	20	40	38.8	8

6.2.3 セメント系薬液注入材の適用範囲について

急硬性セメント注入材およびセメント水ガラス注入材のセメント系薬液注入材は、セメントが混入された懸濁型注入材であり、溶液型注入材料とは違い、注入対象地山については、注入材料としての適用範囲があることは、5.3.4の超微粒子セメントの適用について述べたとおりである。特に砂が介在した地山の場合にはその適用に留意する必要がある。土木研究所における砂層の人工地盤を対象とした注入実験¹²⁾を普通ポルトランドセメント、微粒子セメントを硬化剤に用いた懸濁型薬液、無機系溶液型薬液および有機系溶液型薬液を使用して二重管ストレーナー複相注入工法で実施した結果を図6.3.1、6.3.2、6.3.3に示すが、均一地盤における実験によるとPC系（普通セメント系）の懸濁型注入材による固結物は、注入孔から太い脈が発達しており、固結物はこの脈に沿って形成されている。これは注入孔近傍ではセメント粒子の圧入によって脈が発達するが、注入管から離れるにしたがって地盤中の圧力が低下するとともに粒子径の大きな材料が濾過され、脈から周囲に粒子径が小さな注入材が浸透する形態をとるためと考えられる。これに対して、MC系（微粒子系）の注入材の場合、注入管を中心とした円形状に近い形状を呈し、また、脈もかなり細く比較的良好な浸透性を示している。

溶液型注入材のうち、無機系は、ゲル化時間が数分程度であるため十分な浸透時間をとることができず、また、ゲル化が他の注入材と比べると不安定であることからその固結物は均質になりにくく、この実験においてもその傾向がうかがわれた。これに対して有機系はゲル化時間が数十分と長く、低粘性であることから浸透性に優れ、注入孔を中心とした注入設計範囲まで概ね達した状態で固結している。

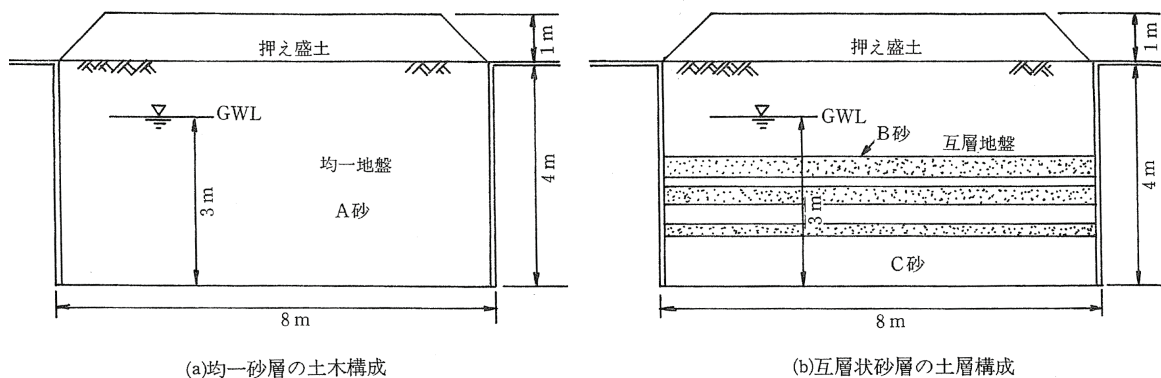


図 6.3.1 注入実験時の土木構造および土層構成（土木研究所）⁵⁾

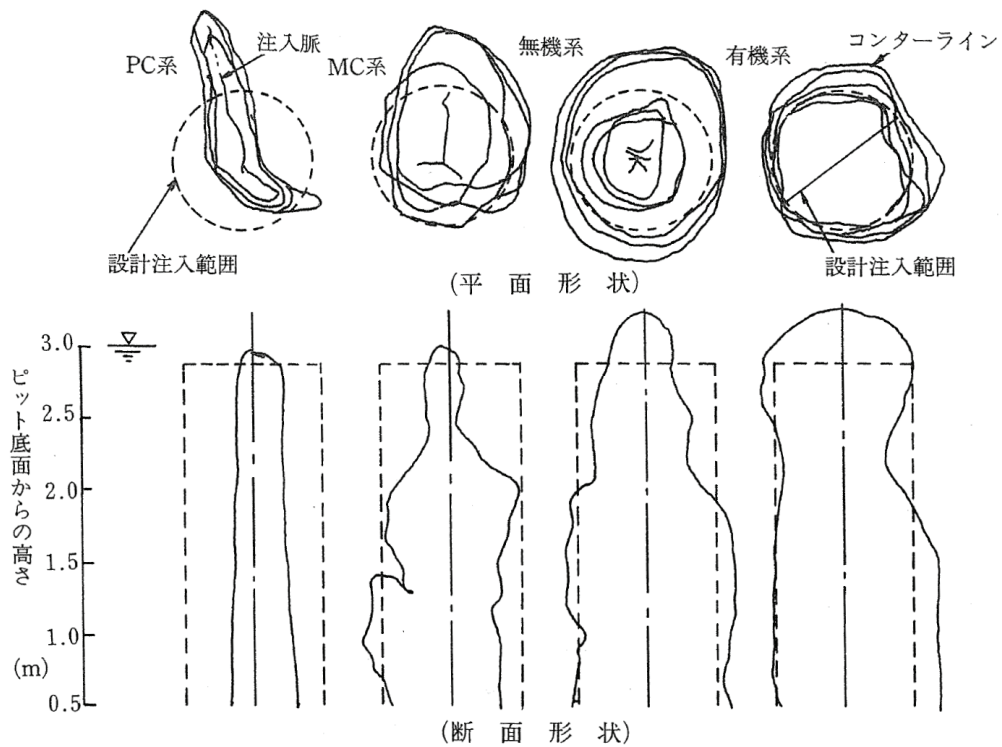


図 6.3.2 均一細砂層における各種薬液の固結状況に関する実験例（土木研究所）⁵⁾

（細砂層：透水係数 10^{-2} cm/sec、地下水位以下の注入、注入モニター：バイモード工法）

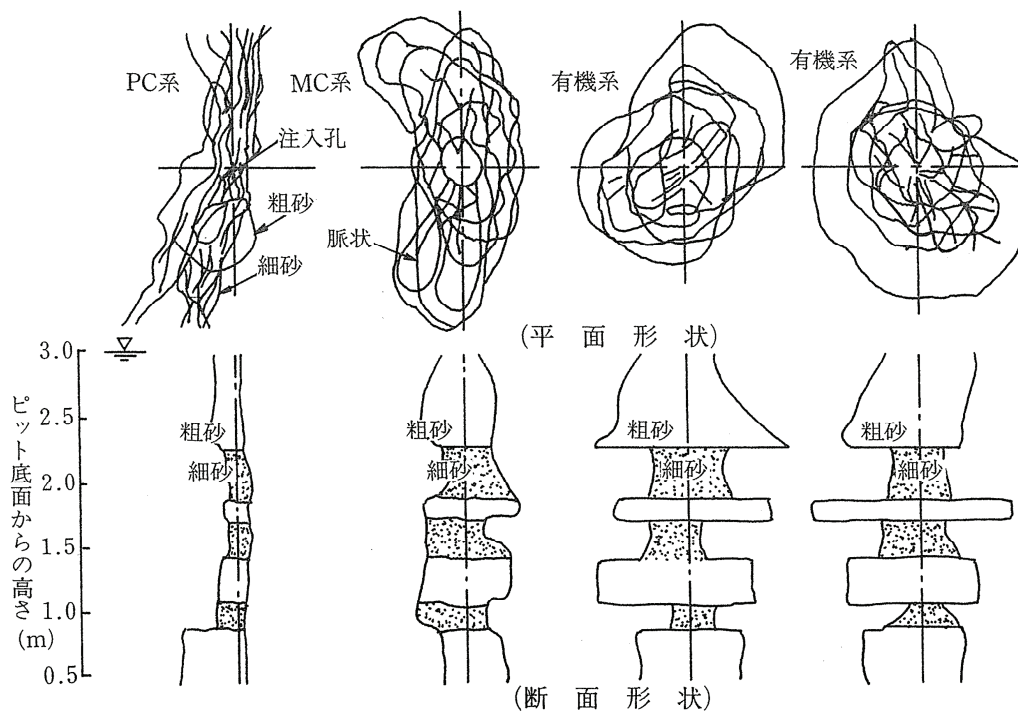


図 6.3.3 互層地盤における各種薬液の固結状況に関する実験例（土木研究所）⁵⁾

（細砂層：透水係数 10^{-2} cm/sec、地下水位以下の注入、注入モニター：バイモード工法）

また、細砂と粗砂の互層人工地盤における注入実験においては、普通セメント系懸濁型注入材は壁状、微粒子セメント系注入材は楕円形、有機系は円形状を呈しており、互層地盤においても均質地盤と同様の傾向が認められた。各条件とも細砂層でくびれた固結状態となっており、本実験においてはほぼ全体の80%の注入材が粗砂層に流入していた。

この試験結果から懸濁型薬液注入材は、ホモゲル強度は大きいがセメント粒子の影響で砂層への浸透性については、過度の期待について留意する必要がある、使用にあたっては超微粒子セメントの検討や十分なゲルタイムをとることを考慮する必要がある。このことは、飯山トンネルにおける急硬性セメント注入材で実施した注入の止水効果の確認時においても同様の傾向が見受けられる。4.4.5で前述したように飯山トンネル本坑にて遭遇した大崩壊箇所を注入で突破する際の注入効果の結果（表-4.4.5）によると、崩落地山の補強は十分となったものの急硬性セメント注入材の注入の場合でも砂層の透水性の向上には限界があり、溶液型薬液注入材料を組み合わせることで止水効果を確保し、無事突破することが出来た。

このことから、特に砂層や未固結地盤の場合は、中山トンネルの注入の施工事例でも示されているように、骨格注入として先行してセメント系薬液注入材を実施した後、溶液型材料で止水をするという懸濁型材料と溶液型材料を複合して注入する形を採用することが極めて効果的であることを示すものである。青函トンネルにおいても海底中央部に泥岩である黒松内層の中に広範囲に砂層が介在した地層が出現したが、図-4.1.3に示すように、基本的にはセメント水ガラス注入材のみで施工したが、他の施工箇所と比べ極めて大きな注入量を実施したにもかかわらず止水効果がなかなか上がらない結果となった。この砂層の注入については、セメント系の懸濁型注入材料の一つであるセメント水ガラス注入材の浸透性の適用限界と思われ、この箇所の注入については、超微粒子セメントの使用や、溶液型注入材料との組み合わせとした複合注入の適用がより止水性を向上させたものと考えている。しかしながら、青函トンネル建設当時においては溶液型注入材料の耐久性について、特に耐海水性については、当時、十分な知見がなく、セメント水ガラス注入材の適用に頼らざるを得なかったのも事実である。

6.4 結論

本章においては、急硬性セメント注入材の長期材料特性を把握するため、水中、海水中および MgSO_4 水溶液中で養生した供試体の長期材齢にわたる一軸圧縮強度試験と、注入・掘削後、急硬性セメント注入材の硬化体について長期間にわたって養生し、各種試験により長期材料特性を評価した。これらの結果を以下にまとめる。

- (1) 水中養生で 10 年経過した急硬性セメント注入材は強度が増加し、十分な強度が保持されている。
- (2) 海水養生された急硬性セメント注入材の材齢 2 年については、すべての配合について、3 ヶ月、1 年より強度の増加がみられ、安定した強度が保持されている。
- (3) MgSO_4 水溶液中に浸漬した急硬性セメント注入材の材齢 2 年については、苛酷な促進試験のため、一部の配合に強度低下がみられるが、全体的には強度が保持されている。
- (4) 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。
- (5) 表-6.4.1 に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の性状に関するまとめを示すが、どちらのトンネルも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压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いえる。
- (6) 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。

- (7) 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ている。
- (8) 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。

表-6.4.1 硬化体の性状に関するまとめ

トンネル名	青函トンネル (27 年)	鍋立山トンネル (17 年)
硬化体の形状	崩壊なく採取時と同等	崩壊なく採取時と同等
一軸圧縮強度等	①ホモゲルの 22 倍 (1.3N/mm ² →29N/mm ²)	①ホモゲルの 2 倍 (3.7N/mm ² →7.6N/mm ²)
	②採取時より 1.3 倍 (22N/mm ² →29N/mm ²)	②採取時より 1.2 倍 (6.2N/mm ² →7.6N/mm ²)
	③脱水作用大 (含水率:74.0%→24.6%)	③脱水作用大 (含水率:67.3%、62.6%→38.1%)
	④密度 (1.21g/cm ³ →2.23g/cm ³)	④密度 (1.31g/cm ³ →1.59g/cm ³)
超音波速度	-	2.3～2.6km/sec
水和生成物	エトリンガイトを明瞭に確認	エトリンガイトを明瞭に確認
硬化体浸漬水の pH	8.9	10.1

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。

また、急硬性セメント注入材の今後の展開として要約すると下記のとおりである。

- (1) 溶液型注入材料は、ゲルタイムが長く設定でき、再注入もしやすいことから、良好な品質を確保するために、二重管ダブルパッカー方式の注入が多用されてきているが、セメント系薬液注入材はゲルタイムが比較的短いことから二重管ダブルパッカー方式の適用が難しいという欠点を有していた。しかし、急硬性セメント注入材は遅延剤を適切に用いることにより、30 分以上のゲルタイムを容易に設定でき、二重管ダブルパッカー方式の適用が可能であるため、北陸新幹線の飯山トンネルでは、二重管ダブルパッカー方式の注入により、グラウトの品質を良好に保ち、良い効果を上げた。
- (2) 急硬性セメント注入材は、遅延剤を適切にとることでロングゲルタイム（1 時間程度）の確保が可能であり、かつ排水処理が容易であるため、一液で施工する 1 ショット注入に有効な注入材料である。
- (3) 急硬性セメント注入材に使用するセメントとして超微粒子セメント（ブレーン値 $9,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度）を使用した室内試験結果では、微粒子セメントに比べゲルタイムに大きな違いはないが、一軸圧縮試験強度が σ_7 、 σ_{28} とも超微粒子セメントが微粒子セメントに比べ 2 倍以上の高い値を示している。飯山トンネルの崩壊箇所において、微粒子セメントと超微粒子セメントを用いて、急硬性セメントの注入施工試験を実施したところ、未固結の砂岩層（礫・砂混じり）箇所において、超微粒子セメントが微粒子セメントに比べ良く注入される結果となっており、超微粒子セメントを使用した急硬性セメントについては、注入地山によっては有効な注入材料として活用可能と考える。

また、急硬性セメントについても超微粒子化（ブレーン値 $9,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度）することで、現状では高価であるが、注入対象地山によっては有効な注入材料として考えてよい。

- (4) 急硬性セメント注入材が包含されるセメント系薬液注入材は、土木研究所における人工地盤を対象とした注入試験、飯山トンネルの未固結の砂岩層への注入実績および青函ト

ンネルの海底中央部における砂層への注入実績から判断して、セメント粒子径の影響による砂層への浸透性について留意する必要がある。特に、砂層の場合にはセメント系薬液注入材による透水性には、セメント粒子径からくる適用範囲があり、超微粒子セメントの使用の検討および溶液型薬液注入材を補完して使用する等、複合して注入することが有効で効果的である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 岡田清編著: コンクリートの耐久性, pp.55-64, 朝倉書店, 1986.
- 3) 末永充弘, 元木暉里: 本州方算用師工区における破碎帯の施工, 土木施工, vol.21, No.1, pp.42-57, 1980.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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 の概説と施工例, 建設機械, vol.31, No.11, pp.67-70, 1995.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 秋田勝次, 木村裕敏, 佐藤和義: 高压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.
- 10) 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.
- 11) 電気化学工業株式会社: デンカ ES 技術資料 No. 28-1, 29, 1995.

- 12) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会：最新地盤注入工法技術総覧，pp. 33，株式会社産業技術サービスセンター， 1997. 10.
- 13) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会：最新地盤注入工法技術総覧，第 2 章調査・設計 pp. 41-43，株式会社産業技術サービスセンター， 1997. 10.

第7章 結論

注入工法は、トンネルの補助工法として広範に使用されているが、骨格を成す注入材料は浸透性を保持するため希釈率の大きい低粘度材料となることが避けられないため、従来から仮設材料として位置づけられる傾向にあったが、近年、本体構造物の安定および耐久性を考慮した注入材料の性能が求められている。

特にトンネル地山注入の場合、止水および地盤強化を目的として、セメント系薬液注入材（セメント水ガラス注入材、急硬性セメント注入材）の使用例が多いが、要求性能としてセメント系薬液注入材のホモゲル強度が大きいことおよび耐久性が優れていることに期待されている。

本論文では、近年、構造物のライフサイクルコストや維持管理の面からも使用例の多いセメント系薬液注入材の耐久性に着目し、室内試験のみならず注入施工後における各種の試験によりその性能を評価した。以下、各章の概要および結論をとりまとめる。

第1章では、序論として本研究の背景について述べ、研究の目的および論文の構成を示した。

第2章では、一般的な注入の目的と設計について概説し、薬液注入材の分類および本研究の主題であるセメント系薬液注入材についての硬化メカニズムと開発の変遷を述べた。

第3章では、セメント系薬液注入材に関する既往の研究では、溶液型注入材料に比べ強度（短期強度）の高い材料であると位置づけられるセメント系薬液注入材について、耐久性に関する既往の研究事例が極めて少ないことを示した。青函トンネル建設時に、材齢1年ではあるが、セメント水ガラス注入材の耐久性に関する調査・研究がなされた報告等があるものの、いずれも供試体における室内試験結果の報告であり、注入施工してから経年後に採取した試料における物理試験等のデータはないことを述べた。急硬性セメント注入材についても研究事例は少なく、室内試験で材齢1年ではあるが耐久性に優れているという報告と、調整池の基礎岩盤に急硬性セメント注入材による注入施工後、16年経過した原位置においてボーリングコアを採取した結果に関する報告がある。後者では、グラウトが密着して充填されている状態の観察と密実なグラウト性状を示す化学分析結果が述べられている。しかしながら、

注入された原位置試料による一軸強度等の物理試験結果データに基づいた耐久性の評価・報告はない。

第4章では、主要なトンネルのセメント系薬液注入材による注入施工事例を述べたが、青函トンネルのような高圧海水の海底トンネルという特殊環境下の施工や中山トンネルのような未固結で断層を伴う高圧湧水下のトンネルおよび飯山トンネルのように大崩落による復旧注入の施工、更には鍋立山トンネルのように対象地山を置換するほどの大量注入の施工がなされており、セメント系薬液注入材による注入工法は、トンネルを掘削可能とするための最後の補助工法としての位置づけで適用されている場合が多い。このため、注入材料としてはなかでも強度があり耐久性があるものとしてセメント系薬液注入材が採用されているものの、室内試験による一軸圧縮強度等の材料試験結果を主に判断しており、1年以上もの長期的な材料特性を把握し、かつ注入施工後の原位置での注入材料および注入域を長期的な視点で評価を実施した報告は殆どない。施工事例で示したトンネルは、何れも幹線鉄道の極めて重要なトンネルであり、適用されたセメント系薬液注入材の耐久性の評価がどのようなものであるかについては、トンネル構造物の健全性を評価するためにも有効な知見である。

第5章では、青函トンネルの止水および地盤改良において適用されたセメント水ガラス注入材を対象として、種々の室内試験ばかりではなく、苛酷な青函トンネル海底下における長期的な計測および分析結果に着目し、長期材料特性の検討を実施した。その結果については以下に結論づけられる。

- (1) 青函トンネルに適用されたセメント水ガラス注入材は、モル比2.2の水ガラスと高炉コロイドセメントの組合せとし、それぞれを混合比1.0で使用することで注入材の要求性能（ゲルタイム3分以上、圧縮強度 4N/mm^2 以上）を満足するものとなり、注入材の長期的な耐久性の確保にも寄与している。
- (2) 注入域に存置される注入材料の固結状況を考慮し、グラウトが海水接触部においてグラウト溶出成分で飽和された状態と岩盤内で密封された状態を模擬した耐久性試験を実施した。その結果、グラウト硬化体の劣化は進行しないことが判明した。また、グラウトの海水と接触する表面積を変化させた条件で、注入されたグラウトの状況を再現した室内試験を実施した結果、海水の接触面積が大きい状況では崩壊が進行するが、海水

の接触面積が小さい条件においては崩壊しないことが判明した。

- (3) 青函トンネル供用開始後に坑内のボーリングコアからセメント水ガラス注入材を採取した結果、施工から30年経過したグラウト硬化体であっても、岩盤の亀裂に脈状に密着した堅硬な固結物となっており、注入材の要求性能である圧縮強度 4.0 N/mm^2 以上を保持していることを確認した。
- (4) 注入材を化学分析した結果では、グラウトの骨格成分であるシリカ(SiO_2)分およびアルミナ(Al_2O_3)分は、実際に注入された配合計算値より30%程度大きい値を示し、特にシリカ(SiO_2)量は当初からほぼ一定で、30年経過後も25%程度と安定していることが確認された。その一方で、長期的にはCaOおよび Na_2O の減少とMgOの増加が確認されており、 Ca^{2+} が海水中の Mg^{2+} と置換している傾向が認められたが、セメント水ガラス注入材のX線回折結果から、生成物の中に劣化生成物の存在は認められなかった。
- (5) セメント水ガラス注入材の加圧脱水試験を実施した結果、高圧条件下において25%～35%程度の脱水作用があることと、10%～60%の圧縮強度の増加効果があることが確認された。このことから、加圧脱水作用によりセメント水ガラス注入材のグラウト骨格成分が増量され性能を大きく向上させているものと判断される。
- (6) 青函トンネル坑内における長期的な各種計測結果を分析評価した結果、トンネル周囲の湧水圧分布、ボーリング孔内の湧水量および坑内湧水の化学分析結果には顕著な変化は生じておらず、長期的に安定した状態を保持していることが確認された。その一方で、海底部における坑内湧水量の緩やかな減少傾向と坑内内空変位測定結果の微小な縮小傾向が経年変化として確認されていることから、注入域全体の透水性が長期的に低下傾向にあることがうかがえるが、現状ではトンネル構造物および注入域は健全な状態にあるといえる。

以上の結果から、青函トンネル海底部において施工されたセメント水ガラス注入材は、施工から最長約30年間に渡って安定した性状を維持しているものと結論付けられる。

青函トンネルにおいては、海底下に位置するという特殊条件に鑑み、今後も坑内における計測監視や注入材の成分化学分析等を継続的に実施することにより、トンネル構造物と注入域双方の健全性を評価していくことが肝要と考える。

また、セメント水ガラス注入材をより有効に活用するための今後の展開について要約すると下記のとおりである。

- (1) 高炉スラグの分量をセメント量の 55%から 70%、85%と多くしていくとゲルタイムは長くなり、坑内水養生における短期強度 (σ_3 、 σ_7) は小さいが、材齢とともに強度は確実に増加し、長期強度 (σ_{182}) は 55%の高炉スラグ添加量とあまり変わらず、海水に対する耐久性は向上している。また、硫酸マグネシウム水溶液、塩化マグネシウム水溶液および硫酸マグネシウム水溶液での浸食促進試験においても高炉スラグの添加量を 55%から 70%、85%と増量したほうが、耐久性が向上している。今後のセメント水ガラス注入材の活用としては、青函トンネルで実用化された高炉スラグが 55%添加されたセメントよりも添加量が多い 70%や 85%の高炉セメントの適用が望まれる。このことは、CO₂削減という地球温暖化防止への貢献という側面も併せ持っている。
- (2) セメント水ガラス注入材の耐久性を考慮する場合には、必要強度の範囲内でセメント量を極力抑え、SiO₂ を適切にとることが重要である。青函トンネルでは、W/C100%~200%の配合が多く用いられたが、注入対象地山によっては、より耐久性を保持する観点から SiO₂ の量を維持しながら W/C200%~400%の配合の使用も有効である。
- (3) セメント水ガラス注入材の遅延剤として、リン酸ナトリウムを使用することにより、ゲルタイムを数分から 1 時間以上という広範囲にコントロールが可能である。現場での使用を考えた場合に溶液型とした方が得策であるため、溶解度の高いリン酸 1 ナトリウムの方が実用性は高い。リン酸 1 ナトリウムを使用し、二重管ダブルパッカー方式で注入施工試験を実施した結果、遅延剤を使用しないセメント水ガラス注入材に比べ、より低圧で所定の注入量を注入可能となったことを確認した。
- (4) セメント水ガラス注入材に超微粒子セメント (9,000cm²/g 程度)を使用する場合は、コロイドセメント (微粒子セメント ; 6,000cm²/g 程度)に比べ、粘度上昇が大きいことおよびゲルタイムが多少短くなるため、分散剤を確実に使用するとともにセメントスラリーの W/C を適切にとることにより、浸透性の良さを発揮でき、注入対象地山に応じて適切に使用すれば有効なセメント水ガラス注入材の一つとなる。

第6章では、急硬性セメント注入材の長期材料特性を把握するため、水中、海水中および MgSO₄ 水溶液中で養生した供試体の長期材齢にわたる一軸圧縮強度試験と、青函トンネルおよび鍋立山トンネルで注入・掘削後に採取した急硬性セメント注入材の硬化体を長期間にわたって養生した各種試験により、その長期材料特性を評価した。これらの結果を以下にまとめ、結論を示す。

- (1) 水中養生で10年経過した急硬性セメント注入材は強度が増加し、十分な強度が保持されている。
- (2) 海水養生された急硬性セメント注入材の材齢2年については、すべての配合について、3ヶ月、1年より強度の増加がみられ、安定した強度が保持されている。
- (3) MgSO_4 水溶液中に浸漬した急硬性セメント注入材の材齢2年については、苛酷な促進試験のため、一部の配合に強度低下がみられるが、全体的には概ね強度が保持されている。
- (4) 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、実注入箇所では長年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。
- (5) 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いえる。
- (6) 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。
- (7) 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ている。

- (8) 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。

また、急硬性セメント注入材をより有効に活用するため、今後の展開について要約すると下記のとおりである。

- (1) 溶液型注入材料は、ゲルタイムが長く設定でき、再注入もしやすいことから、良好な品質を確保するために、二重管ダブルパッカー方式の注入が多用されてきているが、セメント系薬液注入材はゲルタイムが比較的短いことから二重管ダブルパッカー方式の適用が難しいという欠点を有していた。しかし、急硬性セメント注入材は遅延剤を適切に用いることにより、30 分以上のゲルタイムを容易に設定でき、二重管ダブルパッカー方式の適用が可能であるため、北陸新幹線の飯山トンネルでは、二重管ダブルパッカー方式の注入により、グラウトの品質を良好に保ち、良い効果を上げた。
- (2) 急硬性セメント注入材は、遅延剤を適切にとることでロングゲルタイム（1 時間程度）の確保が可能であり、かつ排水処理が容易であるため、一液で施工する 1 ショット注入に有効な注入材料である。
- (3) 急硬性セメント注入材に使用するセメントとして超微粒子セメント（ブレーン値 $9,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度）を使用した室内試験結果では、微粒子セメントに比べゲルタイムに大きな違いはないが、一軸圧縮試験強度が σ_7 、 σ_{28} とも超微粒子セメントが微粒子セメントに比べ 2 倍以上の高い値を示している。飯山トンネルの崩壊箇所において、微粒子セメントと超微粒子セメントを用いて、急硬性セメントの注入施工試験を実施したところ、未固結の砂岩層（礫・砂混じり）箇所において、超微粒子セメントが微粒子セメントに比べ良く注入される結果となっており、超微粒子セメントを使用した急硬性セメントについては、注入地山によっては有効な注入材料として活用可能と考える。
- (4) 急硬性セメント注入材が包含されるセメント系薬液注入材は、土木研究所における人工地盤を対象とした注入試験、飯山トンネルの未固結の砂岩層への注入実績および青函ト

ンネルの海底中央部における砂層への注入実績から判断して、セメント粒子径の影響による砂層への浸透性について留意する必要がある。特に、砂層の場合にはセメント系薬液注入材による透水性には、セメント粒子径からくる適用範囲があり、超微粒子セメントの使用の検討および溶液型薬液注入材を補完して使用する等、複合して注入することが極めて有効で効果的である。

最後に本研究をまとめるにあたり得られた今後の課題について述べる。

注入材料のうち、セメント系薬液注入材（セメント水ガラス注入材および急硬性セメント注入材）に着目して論述するなかで、特に青函トンネルの場合、高圧海水という過酷な条件下ではあったが、注入施工後 30 年に渡りセメント水ガラス注入材は安定した性状を維持しており、青函トンネルの注入域が健全な状態であることは特筆すべきものであった。

また、急硬性セメント注入材については、淡水中、海水中の室内試験や青函トンネル・鍋立山トンネルの注入施工後の結果から考慮して、17 年～27 年以上に渡って安定した硬化性状を示しており、耐久性能は十分保持されていると考えてよい。

ただし、本研究で取り扱った青函トンネルや鍋立山トンネルにおける注入は、一般的な注入施工と比較し高い注入圧力での施工であったという点、また、注入された材料が高水圧あるいは大土被りといった拘束圧が大きい環境下に長期間置かれたものであるという点は、特殊な条件として認識する必要がある。本研究から得られた知見を今後活用していく際には、検討の前提条件を十分に考慮し、注入材の施工条件や注入後に置かれる応力レベル等を加味したうえでの検討が不可欠といえる。

本研究で得られた知見から、セメント系薬液注入材は耐久性に優れているということを考慮すると、セメント系薬液注入材をトンネル地山注入等だけではなく、ダム基礎等のカーテングラウトやコンソリデーショングラウトへの適用を図るというのは一つの方向性であると考えられる。現在、ダム基礎等の注入は、セメント注入が主体であり、試験的に急硬性セメント注入材の使用例もあるが極めて少ない現状にある。ダム基礎が湿潤と乾燥が繰り返される等のような過酷な条件下でなければ、カーテングラウトにはセメント水ガラス注入材の適用で浸透性を更に向上させ工期短縮を図る、或いはコンソリデーショングラウトには急硬性セメント注入材の適用によりゲルタイムを制御することでセメント注入のように注入材料を逸脱させることなく適正な注入範囲にグラウトの確保が可能と思われる。

ダムは治山治水のため極めて重要な構造物であるため、当然、安易な注入材料の変更には

慎重となるべきであるが、本研究の成果から考慮して、ダム等においても条件が良く整っている箇所においてはセメント系薬液注入材の適用を推進していくことは有効と考える。ただし、前述したように、本研究の前提条件は、施工時の注入圧、注入後の拘束圧の応力レベル等の点で、ダムを対象とする注入とは設計条件や施工環境等が大きく異なることが想定されるため、これらを念頭に置いたアプローチが必要である。

セメント系薬液注入材が広範に使用されている理由の一つにはセメントが経済的であることが挙げられるが、セメントを微粉末および微粉末化することはかなり高価となっていくため、注入対象地山に応じて適切なセメント粉末度を選択する必要がある。

また、微粉末にすることでセメントは極めて風化しやすい性状となるので、耐風化性を向上させるため、青函トンネルで初めて実施されたが特殊な粉砕助剤を使用した耐風化セメントを適用する等の方策に配慮する必要がある。

水ガラスについても、 SiO_2 を適正に保つことが耐久性能を保持することになるので、水ガラスをあまり希釈させないことは重要なことである。水ガラスを薄めると粘度が小さくなり強度は低下するものの浸透しやすく安価になることから、現状でもこのような配合の施工例は多いが、セメント水ガラス注入材の品質を保持するためには、強度と耐久性とのバランスを考慮し、過度に水ガラスを希釈せず SiO_2 量を適切に設定した注入材料の配合を考慮する必要がある。

注入工法は、材料のみならず注入方式によりその品質は変わるので、注入材料に適した注入方式を選定していく必要がある。最近では、二重管ダブルパッカー方式できめ細かく注入する注入方式の採用も多いが、一般に高価であり注入対象地山の性状を十分把握して、注入目的に適合する注入方式を採用する必要がある。

また、注入工法を適用するための設備は大掛かりのものとなり易いため、特にトンネルのような坑内注入の場合は、コンパクトで機動力のある設備とする必要がある。そのため、1ショット注入や一台で2液注入可能な注入機械等の採用が可能であれば注入設備をコンパクト化することが可能である。

注入工法を施工する場合、排水処理についても怠りなく配慮する必要がある、排水処理しやすい注入材料の適用は重要な要素である。一般にセメント系薬液注入材は無機系材料であり処理しやすい材料の範疇にあるが、注入時に出来るだけグラウトをリークさせず、かつグラウトを排水に廃棄しない対策を講じる必要がある。

セメント系薬液注入材は、微粒子セメントの適用が増したとはいえ、粒子系材料であり、

注入対象地山に対しては適用限界があるため、溶液型注入材料と組み合わせて使用する例が多い。この際には、溶液型注入材料との相性を検討しておく必要があり、材料の組み合わせではセメント系薬液注入材のアルカリにより溶液型材料が硬化しない場合もあるので、事前に予備試験により硬化の程度を確認しておき、適切な溶液型材料の選定をしておく必要がある。

謝 辞

筆者は、1969年に日本鉄道建設公団（現（独）鉄道・運輸機構）に入社し、青函トンネル調査坑の直轄工事を皮切りに青函トンネル（L=54,850m）の建設に14年4ヶ月、本社海峡線部（青函トンネル担当）を含め、17年4ヶ月の間、青函トンネルに携わる光栄にあずかりました。その後、北越北線（現 北越急行ほくほく線）鍋立山トンネル（9,117m）で7年間、超膨張性地圧のトンネルを担当する機会に恵まれました。

また、九州新幹線では、湧水に極度に弱いシラスの薩摩田上トンネル（3,302m）や高圧湧水と膨張性を呈する北陸新幹線飯山トンネル（22,251m）および高丘トンネル（6,944m）を担当させていただきました。日本の高度成長期のなかで、若いときから難攻不落なトンネルを数多く経験させていただき、トンネル建設の一担当者として限りなく幸せに思います。

本研究は、注入工法の骨格をなす注入材料のうち、セメント系薬液注入材の耐久性に着目し、青函トンネルの調査坑時代（昭和40年代）に「青函トンネル海底部の高圧湧水をいかにして止水するか」について青函トンネルの直轄工事のなかで調査・研究した「セメント系薬液注入材（セメント水ガラス注入材、急硬性セメント注入材）」を軸として、その長期材料特性と性能の評価、あわせて注入施工後の長期的な地山の評価を試みまとめたものであります。

現在、主に仮設材料として使用されている注入材料ではありますが、本論文が着目したセメント系薬液注入材の耐久性能の評価が、広範に使用されている注入工法にとって、ささやかながらも発展・進歩の一助となれば幸いです。

本研究を進めるにあたっては、京都大学大学院工学研究科 朝倉俊弘教授に長期にわたり懇切丁寧なご指導を賜り、また、本論文のとりまとめにあたりましては暖かな励ましと多くのご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

本論文の作成に当たりましては、京都大学大学院工学研究科 宮川豊章教授、同 木村亮教授からは論文の内容など細部にわたり適切なご指導とご助言をいただきました。さらに本論文の作成のとりまとめにあたりましては、京都大学大学院工学研究科 岸田潔准教授、同 西藤潤准教授には大変有益なご教示をいただきました。ここに厚くお礼を申し上げます。

また、本論文の取りまとめにあたりましては、青函トンネル建設時代からご指導をいただいた宮崎大学名誉教授 丸山俊朗氏、筆者の上司である鉄道・運輸機構の金澤博氏、宮林秀次氏、高津俊司氏には、本研究について常に督励をいただきました。また、鉄道・運輸機構の木村宏氏、服部修一氏、深沢成年氏、村上明氏、井浦智実氏、西村直樹氏、電気化学工業株式会社の平野健吉氏、石田秀朗氏、荒木明俊氏の絶大なるご協力をいただきました。とりわけ深沢成年氏、井浦智実氏、西村直樹氏には論文執筆の当初から多大なご協力を頂きました。皆様には心から感謝申し上げます。

そして、本論文の完成にいたるまでの長い間、様々なご支援をいただいた多くの方々に深く感謝申し上げます。ありがとうございました。

2011 年
秋田 勝次