



瑞浪超深地層研究所におけるグラウト技術の  
開発及び高度化

(委託研究)

Development and Enhancement of Grouting Technologies  
in the Mizunami Underground Research Laboratory  
(Contract Research)

延藤 遵\* 見掛 信一郎

Jun NOBUTO\* and Shinichiro MIKAKE

地層処分研究開発部門  
結晶質岩工学技術開発グループ

Crystalline Environment Engineering Group  
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

瑞浪超深地層研究所におけるグラウト技術の開発及び高度化  
(委託研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット  
延藤 遵\*, 見掛 信一郎

(2008年1月31日受理)

日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」)東濃地科学センターでは、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として超深地層研究所計画を進めている。

地層処分の概念は、「安定な地質環境に、性能に余裕を持たせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築する」というものである。安定な地質環境の評価については、地質学的な特徴を踏まえ今後実施されていくと思われるが、処分場を建設するための工学技術の基盤整備として、グラウト技術の高度化が必要と考えられる。

そこで、本研究では、平成16年度に引き続いて、地下坑道掘削時に遭遇する水みちに対して、長期間の耐久性を有する止水及び緩み領域の修復を目的としたグラウト技術の研究開発を行った。

具体的な項目としては、①止水性能に着目したグラウト注入方法の整理、②高圧注入時の浸透性能確認試験方法の検討、③より微小な亀裂に浸透可能なグラウト材料の調査、を実施した。このうち、浸透性能確認試験方法については、高圧注入可能となる試験装置について検討し、具体的に試作品を作成して予備的な実験を実施した。

---

本報告書は、清水建設株式会社が日本原子力研究開発機構との契約により実施した研究成果に関するものである。

東濃地科学センター(駐在): 〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64

\*清水建設株式会社 土木技術本部

**Development and Enhancement of Grouting Technologies  
in the Mizunami Underground Research Laboratory  
(Contract Research)**

Jun NOBUTO\* and Shinichiro MIKAKE

Tono Geoscientific Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency  
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received January 31, 2008)

In the Tono Geoscience Center of Japan Atomic Energy Agency (hereafter, JAEA), Mizunami Underground Research Laboratory project is being advanced to develop a scientific and technological basis for geological disposal.

The concept of geological disposal is based on a multi-barrier system which combines a stable geological environment with an engineered barrier system (EBS). In order to develop an engineering basis for the construction of disposal system, the enhancement of grouting technologies among engineering technologies is needed.

In this study, the comprehensive performance of suspension type grouting materials to seal rock fractures encountered in excavation works at deep underground has been checked, and the clogging phenomenon at the entrance of rock fractures has been investigated following the previous year.

Research issues are as follows; Study on grouting concept to secure high-level water sealing, study on the test method to check grout clogging under high injection pressure, study on grouting material which can penetrate into finer fractures. Among these, in the study on penetrability test method, prototype test instruments were made and a series of preliminary tests were conducted.

Keywords: High Injection Pressure, Infiltration Characteristics of Grouting Materials

---

This work was performed by Shimizu Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

\* Civil Engineering Technology Division, Shimizu Corporation

## 目次

1. 研究の目的	1
2. 研究の概要	3
2.1 止水性能に着目したグラウト注入方法の整理	3
2.2 高圧注入時の浸透性能確認試験方法の検討	3
2.3 より微小な亀裂に浸透可能なグラウト材料の調査	3
3. 止水性能に着目したグラウト注入方法の整理	4
3.1 検討フロー	4
3.2 施工実績調査	5
3.2.1 海外の施工実績	5
3.2.2 国内の施工実績	32
3.2.3 施工方法の比較	67
3.3 放射性廃棄物地層処分（研究）におけるグラウト研究	70
3.3.1 研究の概要	70
3.3.2 NUMO-SKB-Posivaによる低pHグラウト研究	70
3.3.3 SKBによるセメントグラウト注入方法に関する研究	103
3.3.4 JAEAによる低pHグラウト研究	115
3.3.5 エタノールベントナイト研究	117
3.3.6 塩水ベントナイト研究	133
3.4 放射性廃棄物地層処分におけるグラウト方法	139
3.4.1 検討方法	139
3.4.2 放射性廃棄物地層処分事業における適用形態と要求性能の整理	139
3.4.3 止水性の観点からの施工方法の検討	144
3.4.4 経済性の検討	157
3.5 まとめ	175
第3章参考文献	176
4. 高圧注入時の浸透性能確認試験方法の検討	179
4.1 検討の目的	179
4.2 既往の試験方法	182
4.2.1 フィルターポンプ試験	182
4.2.2 NES試験	185
4.2.3 サンドコラム	186
4.2.4 平行平板試験	186

4.3	高圧目詰まり試験装置の考案	187
4.3.1	要求仕様	187
4.3.2	試験装置	187
4.4	予備試験の実施	189
4.4.1	予備試験全体フロー	189
4.4.2	試験材料及び試験装置、機器	189
4.4.3	試験装置性能確認試験	193
4.4.4	グラウト材基本物性確認試験	199
4.4.5	目詰り特性確認試験	203
4.5	本試験基本計画の作成	219
4.5.1	予備試験における反省点	219
4.5.2	基本計画案の作成	222
4.6	まとめ	223
	第4章参考文献	224
5.	より微小な亀裂に浸透可能なグラウト材料の調査	225
5.1	懸濁型材料	225
5.1.1	セメント	226
5.1.2	ベントナイト	227
5.2	溶液型材料	234
5.2.1	酸性シリカゾル	234
5.2.2	コロイダルシリカ	234
5.2.3	低アルカリ水ガラス	235
5.3	まとめ	237
	第5章参考文献	238
6.	まとめ	239
6.1	止水性能に着目したグラウト注入方法の整理	239
6.2	高圧注入時の浸透性能確認試験方法の検討	239
6.3	より微小な亀裂に浸透可能なグラウト材料の調査	239

## CONTENTS

1. OBJECTIVES.....	1
2. OUTLINE.....	3
2.1 Study on grouting concept to secure high-level water sealing.....	3
2.2 Study on test method to check grout filtration under high injection pressure.....	3
2.3 Study on finer grout material.....	3
3. STUDY ON GROUTING CONCEPT TO SECURE HIGH-LEVEL WATER SEALING.....	4
3.1 Study flow.....	4
3.2 Review of grouting execution.....	5
3.2.1 Foreign cases.....	5
3.2.2 Domestic cases.....	32
3.2.3 Comparison of grouting methodologies.....	67
3.3 Review of researches on grouting in high-level nuclear waste disposal.....	70
3.3.1 Brief overview.....	70
3.3.2 Research on low-pH grout by NUMO, SKB and Posiva.....	70
3.3.3 Research on cement grout by SKB.....	103
3.3.4 Research on low-pH grout by JAEA.....	115
3.3.5 Research on ethanol bentonite.....	117
3.3.6 Research on saline water bentonite.....	133
3.4 Grouting methodology in high-level nuclear waste disposal.....	139
3.4.1 Study method.....	139
3.4.2 Study on application and requirement for grouting.....	139
3.4.3 Study on sealing effect.....	144
3.4.4 Study on economy.....	157
3.5 Summary.....	175
Reference of Chapter 3.....	176
4. STUDY ON TEST METHOD TO CHECK GROUT FILTRATION UNDER HIGH INJECTION PRESSURE.....	179
4.1 Objective.....	179
4.2 Existing filtration tests.....	182
4.2.1 Filter pump.....	182
4.2.2 NES test.....	185
4.2.3 Sand column.....	186

4.2.4 Parallel plate test .....	186
4.3 Filtration test under high-injection pressure .....	187
4.3.1 Requirement.....	187
4.3.2 Test apparatus.....	187
4.4 Preliminary test .....	189
4.4.1 Test flow.....	189
4.4.2 Test material and equipment.....	189
4.4.3 Performance confirmation of test apparatus .....	193
4.4.4 Test for grout properties .....	199
4.4.5 Filtration test .....	203
4.5 Plan for main test .....	219
4.5.1 Problems in preliminary test .....	219
4.5.2 Basic plan for main test.....	222
4.6 Summary.....	223
Reference of Chapter 4 .....	224
5. STUDY ON FINER GROUT MATERIAL.....	225
5.1 Suspension-type grout material.....	225
5.1.1 Bentonite.....	226
5.1.2 Cement.....	227
5.2 Liquid-type grout material.....	234
5.2.1 Silica sol.....	234
5.2.2 Perma Rock.....	234
5.2.3 Low Alkali Sodium Silicate .....	235
5.3 Summary.....	237
Reference of Chapter 5 .....	238
6. SUMMARY .....	239
6.1 Study on grouting concept to secure high-level water sealing.....	239
6.2 Study on test method to check grout filtration under high injection pressure .....	239
6.3 Study on finer grout material.....	239

## 1. 研究の目的

地層処分の概念は、「安定な地質環境に、性能に余裕を持たせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築する」というものである。安定な地質環境の評価については、地質学的な特徴を踏まえ今後実施されていくが、処分場の建設に必要な工学技術の基盤整備に向け、グラウト技術の高度化が必要と考えられる。グラウト技術に関して本件では、処分場の建設時、作業時の湧水を低減するグラウト技術の基盤を整備することを念頭に、工学的な観点からの研究を行う。

平成 16 年度は、国内、海外の研究成果について文献調査を行い、地層処分におけるグラウト技術の適用形態、及びその要求性能について整理した。さらに整理した要求性能に対してグラウト材料に関する適用性の評価を行い、技術的課題を明確にした。技術的課題としては「高水圧下における高い止水性能を有したグラウト技術の確立」、「天然材料の適用性の確認及びその打設方法の確立」に着目し、瑞浪超深地層研究所における今後のグラウトに関する研究計画について検討した。

これらの検討に引き続き、平成 17 年度は高い止水性能を有するグラウト技術の確立に向けて以下の項目について研究を実施する（図 1.1-1 参照）。

- 止水性能に着目したグラウト注入方法の整理：国内外の施工実績及び放射性廃棄物地層処分に関連したグラウト注入方法に関する既往研究を調査し、地下深部において微小亀裂を止水注入するための技術的課題を明確にし、高い止水性能を確保するためのグラウト注入概念を整理する。さらに、整理したグラウト注入概念に対して、止水性能及び経済性の観点から評価を実施する。
- 高圧注入時の浸透性能確認試験方法の検討：グラウト材料に対して高圧注入時における浸透性能を評価できる室内試験方法について検討し、具体的に試験装置を試作して、その適用性を評価する。さらに、次年度以降の試験計画を立案する。
- より微小な亀裂に浸透可能なグラウト材料の調査：より高い止水性能を確保するためには、 $100\mu\text{m}$  以下の極めて微小な亀裂まで浸透可能なグラウト材料が必要となる。そこで、このような微小な亀裂へ浸透可能な材料に関する現状の技術レベルを調査する。

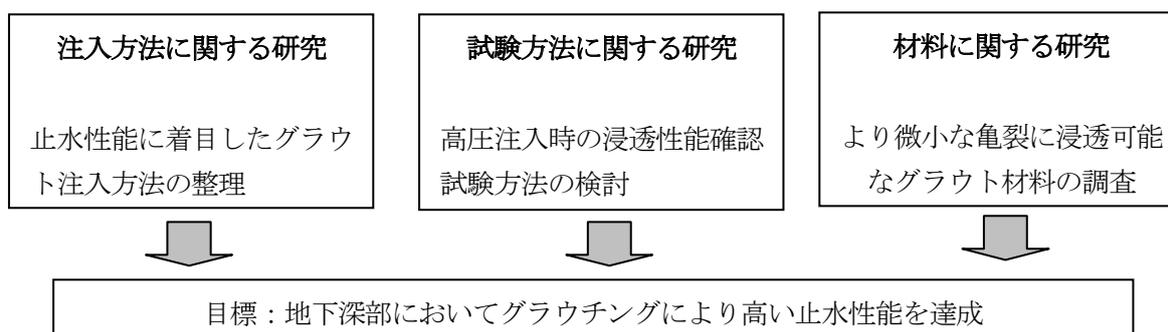


図 1.1-1 研究の目的と今年度の研究項目の関係

また、瑞浪深地層研究所におけるグラウト研究全体と今年度の研究項目との関係を図 1.1-2 に示す。

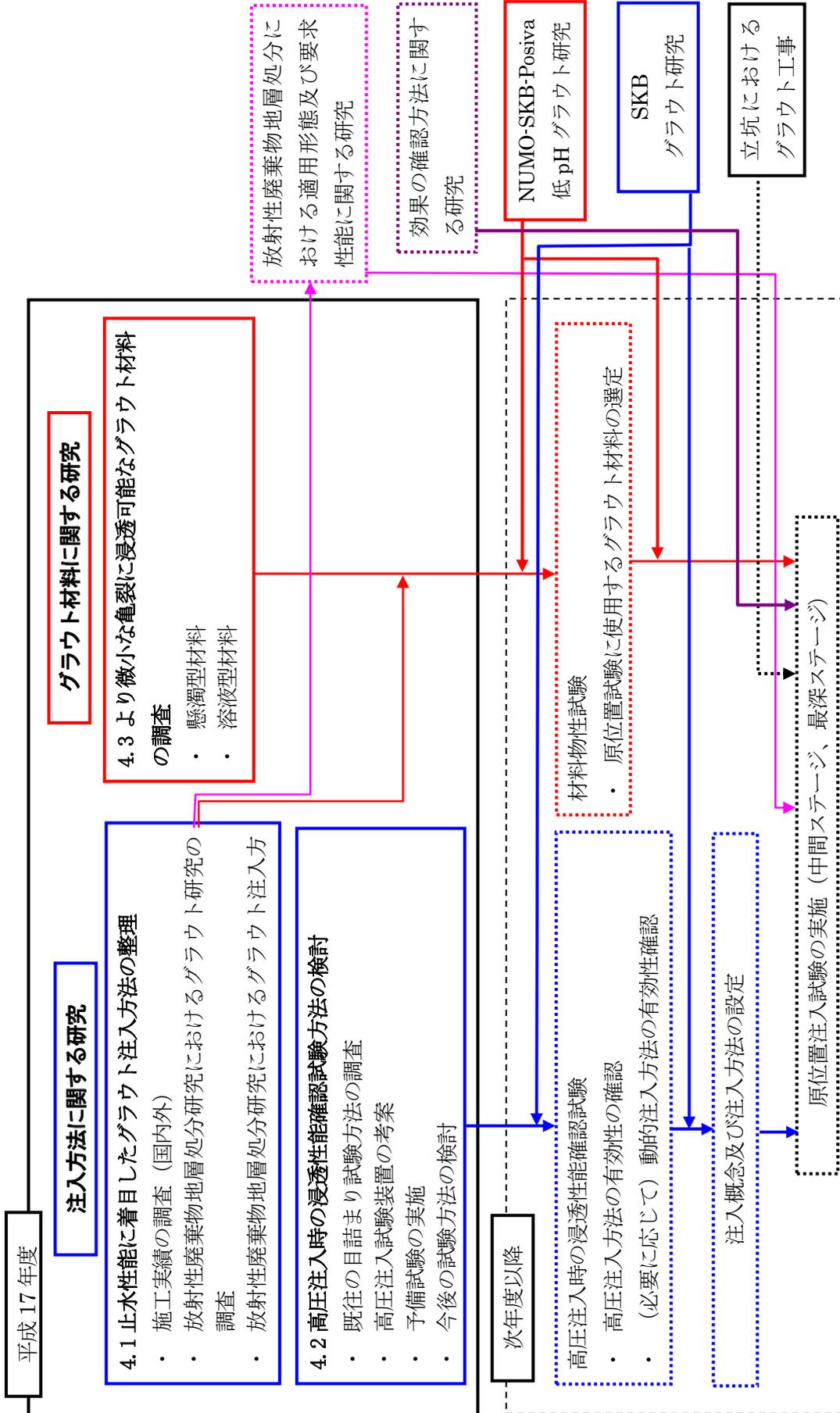


図 1.1-2 瑞浪深地層研究所におけるグラウト研究全体における今年度研究項目の位置付け

## 2. 研究の概要

### 2.1 止水性能に着目したグラウト注入方法の整理

既往の研究では、高水圧下において高い止水性能を確保するためのグラウト注入方法及び浸透メカニズムは明確に示されていない。特に国内においては、ダムにおけるグラウト技術を中心として技術開発されてきたため、地層処分施設のような大深度の坑道掘削工事を対象とした研究事例は極めて少ない。そこで、特に、地層処分に関する研究開発を対象に海外の施工実績及び研究成果を幅広く調査し、高水圧下において高い止水性能を確保するためのグラウト技術の確立に向けて、その技術的課題を明確にする。次に、浸透メカニズムを考慮して、地下深部において高い止水性能を確保するためのグラウト注入方法についてその考え方を整理する。

### 2.2 高圧注入時の浸透性能確認試験方法の検討

セメント系グラウト材料の浸透性能については、これまでは標準砂を用いた簡易試験装置や平行平板試験装置等により実施されてきているが、国内ではダムにおけるグラウトを対象としているため、一般的に低圧力で試験が行われてきている。そこで、高水圧下における微小亀裂への浸透性能を確認するための室内試験方法について検討し、具体的な試験計画を提案する。

### 2.3 より微小な亀裂に浸透可能なグラウト材料の調査

既往の研究においては、高い止水性能を確保するためには、亀裂開口幅  $100\ \mu\text{m}$  程度の極めて微小な亀裂に浸透可能なグラウト材料を用いることが有効と考えられている。この要求性能を満足するグラウト材料としては、「超微粒子セメント+分散剤」、「超微粒子セメント+特殊シリカ混合物」、「塩水/エタノールベンツナイト」等の材料が候補として考えられている。そこで、これらの材料を基本として、より微小な亀裂へ浸透可能となる材料の可能性について調査する。

### 3. 止水性能に着目したグラウト注入方法の整理

#### 3.1 検討フロー

国内外の施工実績及び研究実績を調査し、極めて高い止水性能を確保するための注入方法（注入仕様等）の確立に向けてその方向性を整理する。

施工実績については、グラウト工のみにより極めて高い水密性を確保している北欧の環境配慮型トンネルにおけるグラウト工事を中心に調査を実施する。

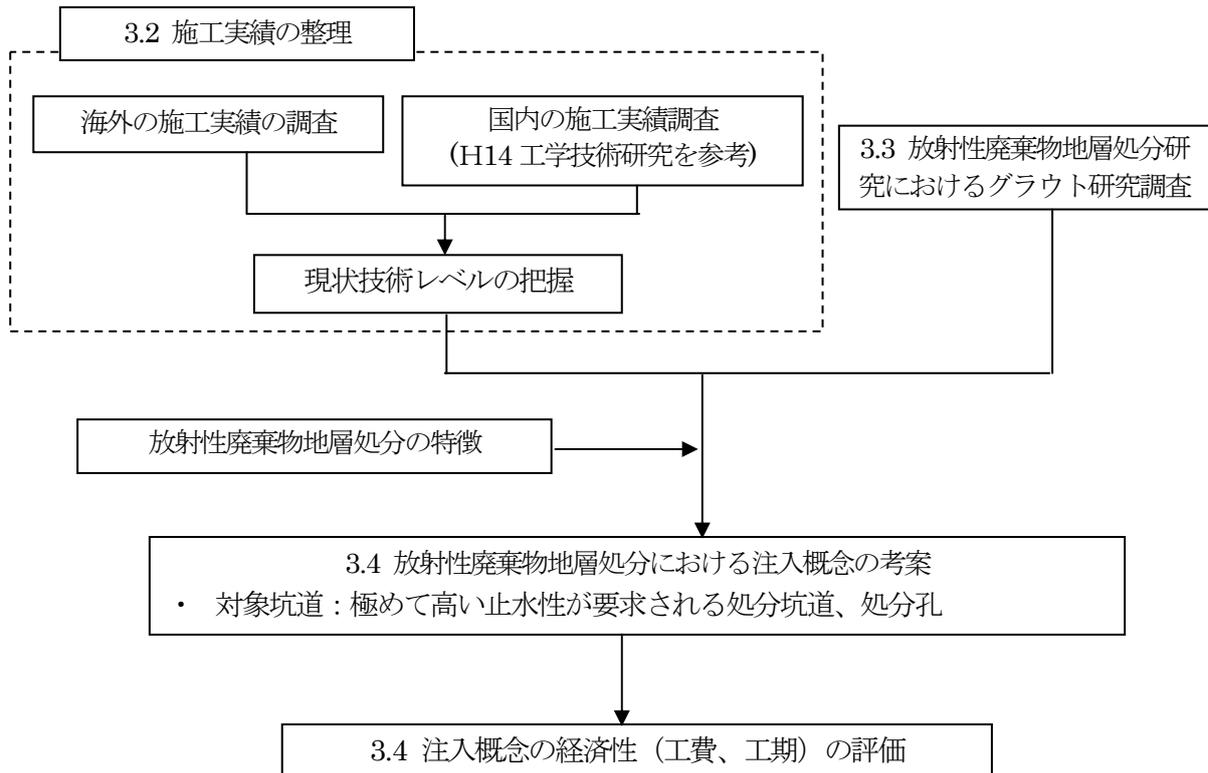


図 3.1-1 検討フロー

### 3.2 施工実績調査

#### 3.2.1 海外の施工実績

海外のグラウト施工実績としては、良好な岩盤条件を利用してグラウト技術のみによりトンネル掘削時及び完成後のトンネル坑道内への湧水量を抑制している北欧諸国のウォータータイトトンネルにおけるグラウト技術を取り上げることにする。

一般的に日本では、大都市が軟質な沖積平野の上に広がっていることが多いため、都市部におけるトンネル工事においては主にシールド工法が採用されている。一方、ノルウェー、スウェーデンにおいては、オスロ、ストックホルム等の大都市においても地下浅部に岩盤が出現しているため、都市部の地下掘削工事においても NATM 工法が一般的である。また、これらの岩盤の上には薄い堆積層が存在しているため、トンネル掘削に伴う地下水の低下が堆積層の圧密現象を引き起こし、地表の建物の不等沈下につながる場合がある<sup>1)</sup>。このため、施工中においては地下水の低下を防止するために、雨水による涵養量から算定した大変厳しい湧水基準を設定していることが多い。

日本においては、NATM 工法によるウォータータイトトンネルの恒久的な止水は、基本的にコンクリート覆工と止水シートにより担保しているが、これらの北欧のトンネルでは、セメント系材料を使用したシステムチックなグラウトを実施することにより、コンクリート覆工に頼ることなく、恒久的な止水性を実現している。

上記のような理由により、極めて高い止水性能を長期間確保することが要求される放射性廃棄物地層処分プロジェクトにおいては、これらの北欧におけるウォータータイトトンネルのグラウト実績が大変参考になるものと考えられる。

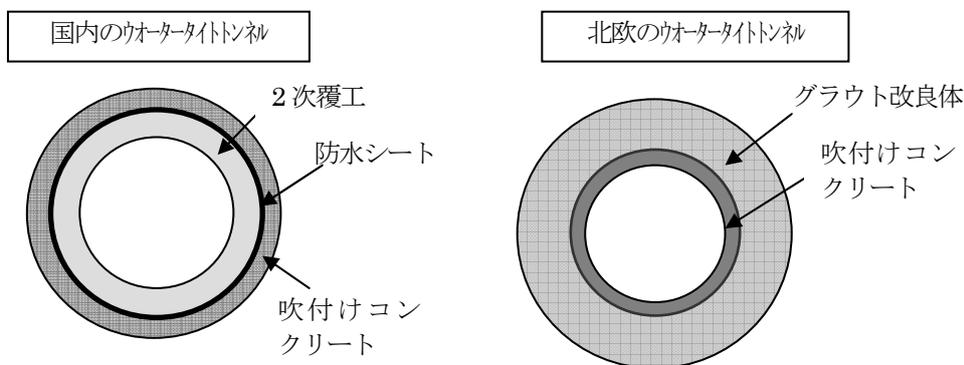


図 3.2-1 ウォータータイトトンネルの比較

これらのウォータータイトトンネルのうち、特に技術的に重要である以下のトンネルについてその概要を記述するものとする。

- ◆ スウェーデン
  - ・ Lundby road tunnel
  - ・ Hallandsås railway tunnel
- ◆ ノルウェー
  - ・ Sandvika-Asker railway tunnel
  - ・ Romeriksporten tunnel
- ◆ フィンランド

・ Turku-Naantali District Heating Tunnel

(1) Lundby road tunnel<sup>2)</sup>

(i) 工事概要

Gothenburg に建設された Lundby トンネルは、スウェーデンで最も湧水を抑制することに成功した長大な道路トンネルである。非常に厳しい許容湧水量に応じるため、3クラスのグラウトパターンを使用している。また、トンネル掘削についても、掘削影響領域を極力抑えるために綿密なスムーズブラスティングが行われている。以下に、Bäckblom の報告書<sup>2)</sup>を基にまとめて示す。

表 3.2-1 にトンネルの諸元を示す。

表 3.2-1 Lundby トンネルの諸元一覧

項目	内容
建設地	Gothenburg, Sweden
用途	道路
建設期間	1994 - 1998
トンネル延長	2,060 m
トンネル断面	86 m <sup>2</sup> (北トンネル), 92 m <sup>2</sup> (南トンネル)
トンネル幅	10m
土被り	5 - 40 m

(ii) 地質状況

片麻岩と花崗岩から成り、塊状の緑色岩、ペグマタイト、アプライトの貫入がある。垂直亀裂が支配的であり、特定の走向の亀裂は開口しているか方解石の充填が見られる。また、わずかに傾斜 (45 ~ 75°) した葉状構造を有し、それに沿って変質粘土を伴うマイロナイトが存在し、変質粘土が少ない場合に湧水が認められる。なお、地質状況を把握するために 150m × 3 本のコアボーリングが実施されている。

(iii) 改良目標

周辺地下水への影響を最小限にするために、地下水位低下量に関する計算に基づいて施工区間毎に許容湧水量を設定されている。表 3.2-2 に許容湧水量を示す。

表 3.2-2 施工区間毎の許容湧水量

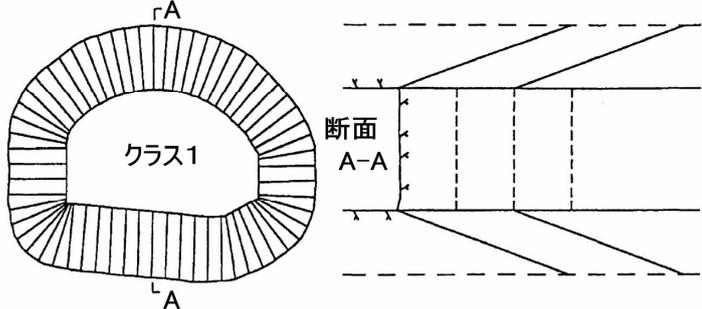
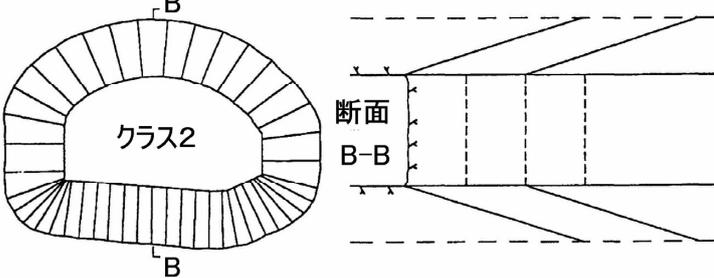
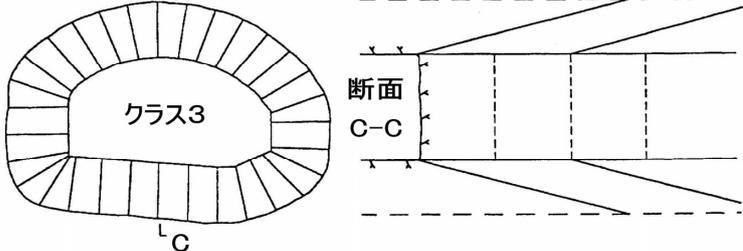
施工区間	許容湧水量 (L/min/100m)	グラウトパターン
600 - 1,190m	2.5	クラス 3
1,190 - 1,780m	1	クラス 2
1,780 - 2,040m	2	クラス 2
2,040 - 2,660m	0.5 (再計算では 0.8)	クラス 1

(iv) 注入仕様

(a) 注入範囲と注入孔配置

注入範囲はロックボルトの影響を考慮して坑壁から4 m以上とし、カバーロックの厚さ4 mと2回分の掘削長（クラス1及び2が4 m、クラス3が5 m）の合計から注入長を決定する。注入パターンは、許容湧水量に応じて3クラス設定されている。設定された注入パターンを表 3.2-3に示す。

表 3.2-3 許容湧水量に応じた注入パターン  
(参考文献1)をもとに作成)

<p>クラス1 許容湧水量： 0.5～1.0 L/min/100m</p> <p>削孔パターン： 66 孔、削孔長 10～13m 削孔ピッチ 1 m</p>	
<p>クラス2 許容湧水量： 2.0 L/min/100m</p> <p>削孔パターン： 44 孔、削孔長 13m 削孔ピッチ 2 m（アーチ部）、 1 m（踏前部）</p>	
<p>クラス3 許容湧水量： 2.5 L/min/100m</p> <p>削孔パターン： 30 孔、削孔長 17m 削孔ピッチ 2 m</p>	

なお、注入孔の削孔については厳しい出来形管理がなされ、5～20%の孔で削孔後の直線性の確認試験が実施された。許容誤差は注入孔入り口で0.1 m、先端で0.5 mである。

## (b) 注入材料

水押し試験の結果により、表 3.2-4のように材料を使い分けられている。

表 3.2-4 グラウト注入材料

(参考文献2) をもとに作成

水押し試験時の逸水量 (L/min/m/MPa)	注入材料
10 以上	ポリウレタンフォーム (商品名 : TACSS)
1~10	普通セメント (2~5 %ベントナイト添加) 一部、グラウト用セメント Injekering30 を使用
1 以下	アクリルアミド系高分子材料 (商品名 : Rhoca Gil)

## (c) 注入圧力

通常の注入圧力は2 MPa であるが、土被りが小さい場合は0.5 MPa である。

## (v) 注入方法

クラス1でのセメントミルクの注入方法は以下のとおりである。

- ・ 調査孔は天端から5 m 上で3 m ピッチとなるように削孔し、水押し試験を実施する。
- ・ 各断面では、1 孔おきに半分の孔を削孔・水押し・注入し、2 時間以上経過した後に残りの半分の削孔・水押し・注入するという2 段階でグラウトを実施する。
- ・ 水押し試験は、地下水圧+ 0.5 MPa の圧力で流量安定後5 分間の注入量を測定する。
- ・ 水押し試験の結果に基づき逸水量の大きい孔、連結した注入孔から注入を開始する。
- ・ W/C = 3.0 のセメントミルクを20 分間注入し、規定圧に達しない場合はW/C を2.0 に低減する。W/C = 2.0 を30 分間注入し、圧力が増加しない場合はW/C を1.0 に低減する。
- ・ グラウト注入後は注入孔にW/C < 0.35 のセメントミルクを充填する。
- ・ 効果の確認孔は少なくとも4 本(長さ10 m) とし、水押し試験結果より再注入の可否を判定

クラス2、3でも同様の注入方法であるが、注入孔の間隔が異なる。また、クラス2では確認孔は適宜実施する。

## (vi) 注入結果

表 3.2-5にグラウト注入量、表 3.2-6に改良結果を示す。必要に応じてポストグラウトを実施することで、許容湧水量が0.5 L/min/100m 以外の区間については許容値が満足されている。なお、0.5 L/min/100m 以上の湧水がある区間については、許容湧水量を再計算したところ0.8 L/min/100m で十分であることが判明しているため、実質的にはほとんどの区間で許容値が満足されていることになる。但し、2,340-2,450mの施工区間については破碎帯と風化帯を含む弱層部であり複雑な地質のため、許容湧水量を満足していない。

表 3.2-5 グラウト注入量

使用材料	全注入量	平均注入量
セメント	2,343 ton	570 kg/m tunnel
TACSS	52,735 L	
Rhoca Gil	650 L	

表 3.2-6 許容湧水量と達成湧水量

施工区間	許容湧水量 (L/min/100m)	達成湧水量 (L/min/100m)
600 - 1,190m	2.5	1.1
1,190 - 1,780m	1	0.9
1,780 - 2,040m	2	1.5
2,040 - 2,660m	0.5 (再計算では 0.8)	0.85
2,070 - 2,190m		0.8
2,190 - 2,340m		0.8
2,340 - 2,450m		1.3
2,450 - 2,575m		0.5

## (vii) その他

高い止水性が確保できた要因として以下の項目が挙げられている。

- ・ 地質条件を正確に予測して施工に反映
- ・ 発注者による強い監理及びグラウト作業の適切な施工管理
- ・ ポストグラウト実施前のインバート清掃による湧水の発見
- ・ ポストグラウト実施前の TACSS によるトンネル内側への止水カーテンの構築（グラウトが困難であった 2/400 付近の施工区間で実施）

(2) Hallandsås railway tunnel<sup>2),3)</sup>

Hallandsås railway トンネルは、スウェーデン南部の Gothenburg と Malmö 間に建設中の高速鉄道の一部となる双設トンネルである。1992年にTBMにより建設が始まったが施工不能に陥り、建設会社の変更と同時に発破工法への変更を行っている。地質不良や多量湧水のため止水が困難であり、様々なセメント系グラウトやケミカルグラウトが試験された。しかしながら、最終的に選定された高分子系グラウト材（商品名：Rhoca Gil）の使用が労働者の健康を害し、流出したアクリルアミドにより家畜が死ぬ等の環境に深刻な影響を与え、社会問題となり工事は中断した。

現在はTBM工法を採用し、工事が再開している（表 3.2-7参照）。

表 3.2-7 Hallandsås トンネルの主な経緯

発生年	出来事
1992年	クラフトビッガーナ社がオープンタンプのTBMにより掘削開始
1993年	TBMが地質不良部に陥り、工事中断
1996年	スカンスカ社が発破工法により工事を引き継ぐ
1997年	湧水対策として使用した高分子系グラウト材（RhocaGil）からアクリルアミドが流出し、環境問題（家畜に被害）が発生し、工事中断
2004年	スカンスカ・ヴィンシJVにより凍結シールド工法を採用し工事再開
2012年	開通予定

表 3.2-8にトンネル諸元を示す。

表 3.2-8 Hallandsås railway トンネルの諸元一覧

項目	内容
建設地	Båstad, Sweden
用途	鉄道
建設期間	1992 -
トンネル延長	8,600 m
トンネル断面	62・88m <sup>2</sup>
トンネル形状	直径 10.6mの円形形状
土被り	最大 150 m

(i) 地質状況

Hallandsås ridge は断層活動の繰り返しに起因するホルスト（地塁）であり、細粒の片麻岩を主体とする。多くの角閃岩と稀に花崗岩質岩石を含み、輝緑岩脈が貫入する。

岩質は表 3.2-9に示す Q システムによって分類されている。図 3.2-2にトンネルの北坑口付近の Q 値の分布を示すが、トンネルの広範囲において地質条件が非常に悪い。特に、トンネル北側には Mülleback Zone と呼ばれる 300mに及ぶ風化変質帯が存在する（図 3.2-3）。

なお、参考として Q 値と他の岩盤分類の関係を図 3.2-4に示す。

表 3.2-9 Q 値と岩質の関係  
(参考文献2) をもとに作成)

Q-value	Rock Quality
400 - 1000	Exceptionally good rock
100 - 400	Extremely good rock
40 - 100	Very good rock
10 - 40	Good rock
4 - 10	Fairly good rock
1 - 4	Poor rock
0.1 - 1	Very poor rock
0.01 - 0.1	Extremely poor rock
0.001 - 0.01	Exceptionally poor rock

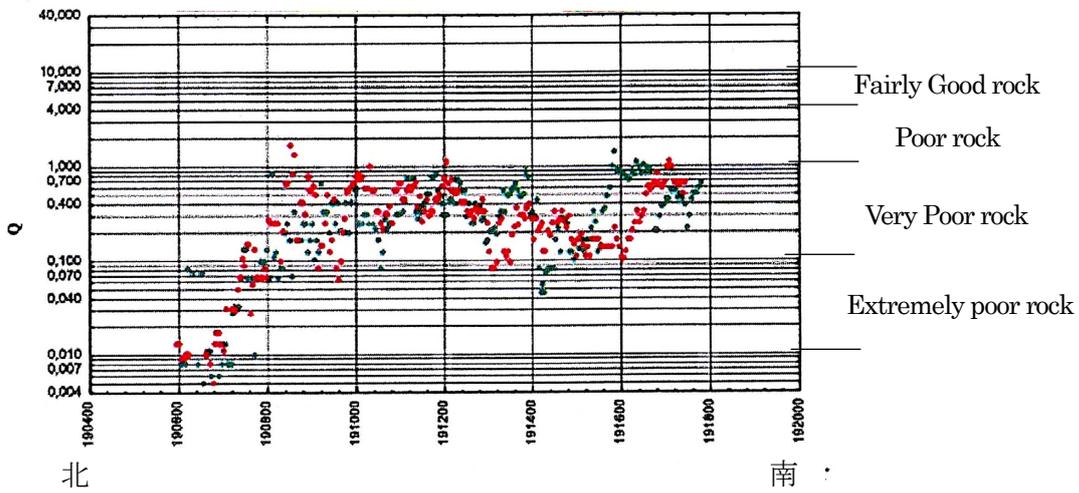


図 3.2-2 北トンネルのQ 値  
(参考文献2) に加筆)

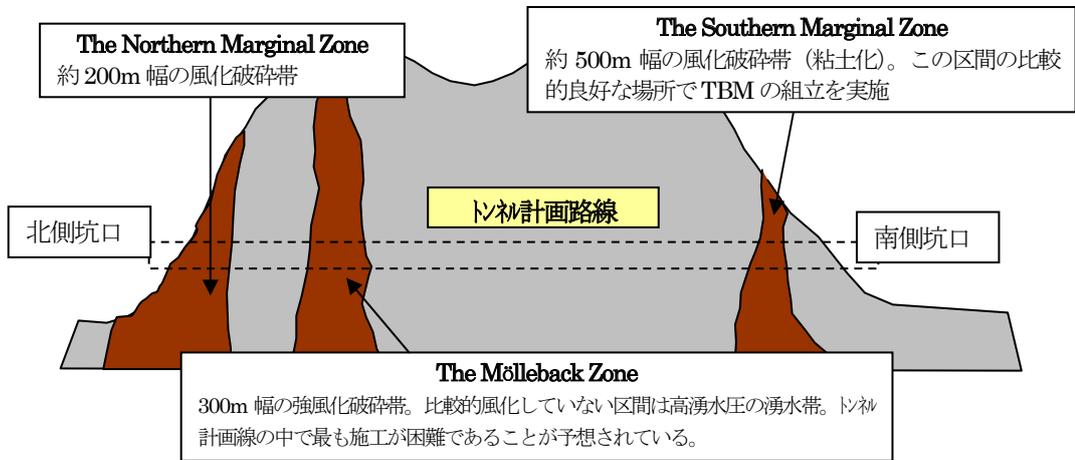


図 3.2-3 Hallandsås railway tunnel の地質状況  
(Skanska-Vinci JV の工事パンフを基に作成)

日本道路 公団*	電力中央研究所 (菊地・斉藤)**	鉄建公団	RSR*	RMR*	Q**
A	CH~B	VN	100~75	非常に良好 100~81	普通 10以上
B		IVN	75~59	良好 80~61	悪い 2.0~10
C I	CM	III N	58~44	普通 60~41	かなり悪い 0.1~2.0
C II		II N	43~29	悪い 40~21	非常に悪い 0.1~0.04
D I	CL	I L, I S	28以下	非常に悪い 20以下	
D II		特S, 特L			
E	D				極端に悪い 0.004以下

\*「全段面掘削工法に関する調査研究(その3)報告書」平成4年2月 日本トンネル協会  
\*\*「BartonのQ値と日本の岩盤分類および弾性波速度との関係」谷本親伯 第37回土木学会年次学術講演会 1966

図 3.2-4 Q値と他の岩盤分類との関係<sup>4)</sup>

北坑口における透水量係数Tは $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーであり、Hallandsås ホルスト(地塁)中央部で部分的に $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ に達する。南坑口においても北坑口と同様のオーダーであり、ホルスト(地塁)の直行方向と破碎帯内では $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーと計算されている。

地下水位は高い場所では地表面から5m、急傾斜地では15~20m以下であり、部分的に被圧されている。

(ii) 改良目標

改良目標を設定するために発注者は地下水問題を取り扱う裁判所に以下の調査結果を報告している。

- ・ 透水性の高い割れ目のみを止水した場合の湧水量はおよそ 6～30L/s/km (36～180 L/min/100m)と見込まれる。
- ・ トンネルから 1.5 km 圏内の地下水位低下を 1 m 以内に抑えるためには、湧水量を 3.5 L/s/km (21 L/min/100m)、トンネル全長で 33 L/s にする必要がある。

上記の結果、許容湧水量は表 3.2-10のように定められ、グラウト範囲の透水係数を  $1 \times 10^{-9}$  m/s 以下にする必要があった。

表 3.2-10 許容湧水量

許容湧水量 (L/min/100m)	備考
21	2本のトンネルの合計

(iii) 注入仕様（当初の施工業者）

当初の注入仕様と、施工業者を変更した後の注入仕様とでは両者は大きく異なる。ここでは当初の施工業者の注入仕様を記載する。また、地質条件が当初想定していた以上に悪かったため、注入仕様は施工の進展に応じ変更されている。以下にはその概要を示す。

(a) 注入範囲と注入孔配置

当初は、注入範囲は坑壁から 5 m、注入長は 20 m、カバーロック厚 5 m であり、注入孔ピッチが 2 m となるように注入孔数 (12～20 孔) を設定するとともに、切羽にも 4～10 孔の注入孔を設けている。その後、注入孔数 16～20 孔、注入長 14 m に変更し、更に注入孔数を 20～25 孔に増加している。

(b) 注入材料

当初は、超微粒子セメント（商品名：Cementa 社製 Ultrafin 16）に 4% の高性能減水剤（V33）を W/C = 0.8 で使用していた。その後、注入パターンの変更に合わせ、ケミカルグラウト（Glyoxal）を使用している。配合は、Na-K シリケート（50%）、glyoxal（8%）、酢酸（8%）、残りが水（34%）である。更にグラウト用セメントによる低濃度のグラウトも実施している。

(c) 注入圧力

地下水圧+1.0 MPa で実施。（地下水圧は最大で 1.2 MPa）

(d) 注入方法

- ・ 地下水圧+1.0 MPa で注入を行い、注入終了基準は 1 孔あたり、セメント量が 1000 kg 以上、または注入時間が 1 時間以上、注入速度が 3 L/min 以下となった場合である。
- ・ 確認孔は注入孔と同じ長さで 3 孔削孔する。水押し試験は実施しないが、確認孔からの湧水が合計で 1.6 L/min 以上で再グラウトを実施する。また、発破孔からの湧水についても同様である。

(iv) 注入仕様（変更後の施工業者）

ここでは変更後の施工業者の注入仕様を記載する。グラウトは岩盤分類に応じ7クラスに分類されている。

(a) 注入範囲と注入孔配置

クラス1では、注入範囲は坑壁から5m、注入長は17.5mであり、注入孔ピッチが天端と側壁では2m、インバートでは1m、注入孔数が36孔である。カバーロック厚は一発破進行長または3mを最低とする。その他のクラスの注入パターンを含め一覧を表3.2-11に示す。

表 3.2-11 クラス別の注入パターン

クラス	注入パターン
クラス1	36孔×17.5m
クラス2,3,4	2段×18孔×13.2m
クラス5,6	2段×18孔×8.6m
クラス7	4段×18孔×8.6m

(b) 注入材料

クラスに応じ5種類のグラウト材料を使用する。表3.2-12に発注者が示した注入材料の仕様を、表3.2-13に施工業者が選んだ注入材料を示す。また、クラス別の注入材料を表3.2-14に示す。

表 3.2-12 注入材料の仕様

種類	仕様
微粒タイプ	$\tau_0 = 1 - 5 \text{ Pa}$ , $d_{95} < 16 \mu\text{m}$ , ブリーディング(2h) < 5%
一般タイプ	$\tau_0 = 5 - 10 \text{ Pa}$ , $d_{95} < 64 \mu\text{m}$ , ブリーディング(2h) < 5%
高粘タイプ	$\tau_0 = 10 - 15 \text{ Pa}$ , $d_{95} < 64 \mu\text{m}$ , ブリーディング(2h) < 5%
早強タイプ	$\tau_0 = 1 - 5 \text{ Pa}$ , $d_{95} < 16 \mu\text{m}$ , ブリーディング(2h) < 5% 硬化促進剤添加により $\tau_0 = 15 - 20 \text{ Pa}$ (15・20分後)
ケミカルタイプ	シリケート溶液、ウレタン

表 3.2-13 選定された注入材料

種類	仕様
微粒タイプ	超微粒子セメント (Cementa Ultrafin 16), W/C = 0.8 高性能減水剤 4% (V66)
一般タイプ	グラウト用セメント (Cementa Injekteringscement), W/C = 0.6
高粘タイプ	グラウト用セメント (Cementa Injekteringscement), W/C = 0.6
早強タイプ	超微粒子セメント (Cementa Ultrafin 16), W/C = 0.8 水酸化ナトリウム 2%
ケミカルタイプ	Gecedral または グラウト用セメント、ベントナイト、シリケート混合注入材

表 3.2-14 クラス別の注入材料種類

クラス	注入材料
クラス 1	微粒タイプ
クラス 2,3	微粒タイプ (注入量 40 kg/孔まで) 高粘タイプ (注入量 40 kg/孔以降)
クラス 4	早強タイプ
クラス 5,6	早強タイプ ケミカルタイプ (粘土部)
クラス 7	ケミカルタイプ

## (c) 注入圧力

地下水圧よりも少なくとも+1.0 MPa 以上かつ 5.0 MPa 以下で注入。(地下水圧は最大で 1.2 MPa)

## (d) 注入方法

- ・ 調査孔は注入孔と同じ長さで 4 孔削孔する。なお、水押し試験は実施しない。
- ・ 注入終了基準は 1 孔あたり、注入速度が 3 L/min 以下または注入量が 50 kg/m 以上となった場合である。
- ・ 注入後は、硬化促進剤を添加した低 W/C のセメントミルクで注入孔を閉塞する。
- ・ 確認孔は注入孔より 2 m 短い長さで 3 孔削孔する。確認孔からの湧水が合計で 0.12 L/min/m 以上もしくは 1 孔でも 0.007 L/min/m 以上の湧水があれば再グラウトを実施する。

(v) 注入結果

最初の施工業者と同様に、変更後の施工業者も許容湧水量を満足することができず、様々なセメント系グラウトやケミカルグラウトを試験している。その中でも改良効果の高かったのが Glyoxal である。しかしながら、Glyoxal は長期安定性に劣ることから、最終的に Rhoca Gil が選定された。Rhoca Gil は止水性に優れていたが、環境影響上危険なケミカルグラウトであった。その危険性を把握せず多量に使用した結果、労働者の健康を害し、流出したアクリルアミドにより家畜が死ぬ等の環境に深刻な影響を与え、社会問題となり工事は中断した（現在は、新たに契約し建設中）。図 3.2-5にこれまでの施工範囲の概略図を示す。また、表 3.2-15、表 3.2-16にそれまでのグラウト注入量を示す。

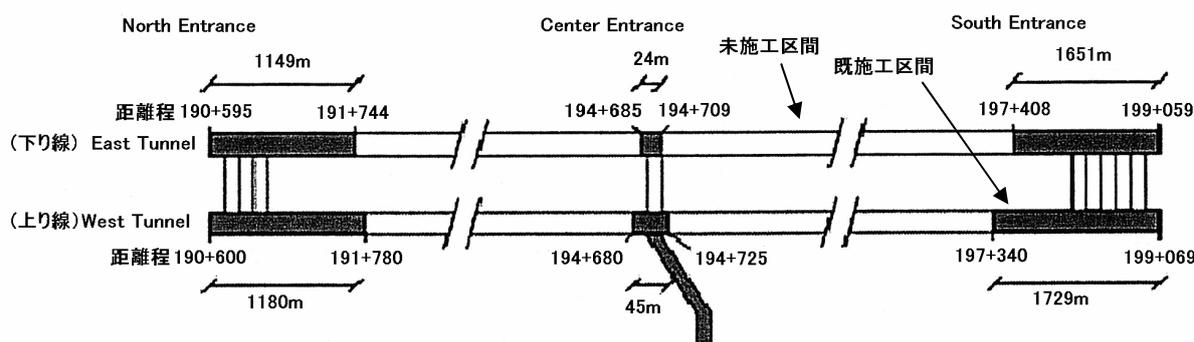


図 3.2-5 既施工範囲の概略図

(参考文献2) に加筆

表 3.2-15 グラウト注入量 (セメント系材料)

使用材料	トンネル延長あたり注入量	1孔あたり注入量
セメント	2,000 kg/tunnel m	25 - 50 kg/孔 m

表 3.2-16 グラウト注入量 (ケミカルグラウト)

使用材料	主要成分	注入量 (tf)
Glyoxal	酢酸, Glyoxal, シリケート	2,693
Bevedol/Bevedan	イソシアン酸塩	4
Gecedral	シリケート, Na アルミナート	13
TACCS	複合イソシアン酸塩	6
Meyco	ヒドロキシメタルアクリエート	80
Rascoflex	メタアクリルアミド	99
Rheoca Gil	アクリルアミド, シリケート	1,408

グラウトは地質のよい南トンネルのほうが北トンネルより容易であり、再グラウトも 14~20%であった。使用材料別の湧水量減少率の推定値を表 3.2-17に示す。

表 3.2-17 使用材料別湧水量減少率の推定値

使用材料		有効グラウト回数	湧水量減少率推定値
セメント系	超微粒子セメント(高 W/C), 2 %SP*	60	73 %
	同上 + グラウトエイド	17	81 %
	超微粒子セメント(低 W/C), 2 %SP	8	48 %
	グラウト用セメント(高 W/C), 2 %SP	8	30 %
	グラウト用セメント、ベントナイト、シリケート混合注入材	5	21 %
	微粒子セメント (Rheocem650) (高 W/C), 2 %SP	5	80 %
ケミカル	Rheoca Gil	49	98 %
	Glyoxal	17	95 %
混合	超微粒子セメント(低 W/C), 2 %SP + Glyoxal	7	93 %
	超微粒子セメント(低 W/C), 2 %SP + Gecedral	5	15 %
	超微粒子セメント(高 W/C), 2 %SP + Gecedral	5	69 %

\*SP : 高性能減水剤

#### (vi) その他

Hallandsås railway トンネルでは、施工中に様々なグラウト試験が実施されている<sup>4)</sup>。

#### (a) グラウト結果分析

グラウト結果と地質情報の関係について研究されている。研究に使用した地質データは以下のとおりである。

- ・ RQD
- ・ 亀裂配置
- ・ 亀裂長
- ・ 亀裂構造
- ・ 亀裂方向
- ・ 亀裂介在物
- ・ 岩質
- ・ 調査孔からの湧水量

しかしながら、グラウト結果とこれらの地質情報との間にはほとんど相関がないことが分析の結果判明している。

#### (b) グラウト材料試験

作業トンネルを利用したグラウト材料試験が実施されている。対象とする区間は延長 83 m であり、グラウトを行わなかった場合の湧水量 1,300 L/min に対し、グラウト後の湧水量は 100 L/min と 92 % の減少となっている。また、調査孔や確認孔からの湧水は、一度実施した再グラウトを含めるとグラウト前後で 73~100 % (平均 89 %) の減少となっている。この 16 回の試験施工により明らかになっ

たことは以下のとおりである。

- ・ 超微粒子セメント (Cementa Ultrafin 16) による止水効果は 70 %。
- ・ 同上にグラウトエイドを加えたものによる止水効果は 90 %。
- ・ 微粒子セメント (Rheocem 650) による止水効果は 98 %。
- ・ 同上にグラウトエイドを加えても効果に影響なし。
- ・ (超) 微粒子セメントは  $1\mu\text{m}$  以下の粒子が多いため、反応性が高く、早期に凝集してしまう。また、温度や混練後の時間に敏感なため、厳密な施工が必要となる。
- ・ ポストグラウトで微粒子セメント (Cementa  $30\mu\text{m}$ ) を使用したところよい結果であり、超微粒子セメント (Cementa  $16\mu\text{m}$ ) より効果がある可能性もある。
- ・ セメント系グラウト材料において浸透性と硬化時間の両方を最適化することは難しい。

(3) Sandvika-Asker railway tunnel (Skaugum tunnel, Tanum tunnel) <sup>5),6)</sup>

(i) 工事概要

Sandvika-Asker トンネルはオスロ南西部の Sandvika と Asker 間の人口密集地において、既存の鉄道路線を地下化する目的で建設されたものであり、Solstad-Asker 間の Skaugum トンネル、Sandvika(Jong)-Solstad 間の Tanum トンネルという 2 組のトンネルから構成される。2 次元及び 3 次元の水理モデルを作成し、許容湧水量についてそれぞれ 3 クラスの許容値を設定している。Asker 側では 3~5m という低土被りであったが (図 3.2-6)、高度なグラウト技術の使用と、トンネル技術者と地質学者の密接な協力により、問題を起こすことなく計画通りの結果を達成している。表 3.2-18 にトンネル諸元を示す。



図 3.2-6 Asker 側の坑口部

表 3.2-18 Sandvika-Asker トンネルの諸元一覧

項目	内容
建設地	Oslo, Norway
用途	鉄道
建設期間	2001 - 2005
トンネル延長	3.6 km (Skaugum tunnel), 2.6 km (Tanum tunnel)
トンネル断面	114 m <sup>2</sup>
トンネル幅	13 m
土被り	3 - 120 m (Skaugum tunnel)

(ii) 地質状況

カンブリア~シルル紀の堆積岩からなり、片岩、石灰岩、砂岩を主体とし、一部に粗粒玄武岩 (輝緑岩) の貫入がある。一部には Q 値 0.03 という弱層部も存在する。

(iii) 改良目標

許容湧水量は環境に与える影響と地盤沈下を考慮し、表 3.2-19に示すように3クラスの許容湧水量が定められている。クラス分類に関する平面図を図 3.2-7に示す。

表 3.2-19 許容湧水量

クラス	許容湧水量 (L/min/100m)
クラス1	16
クラス2	8
クラス3	4

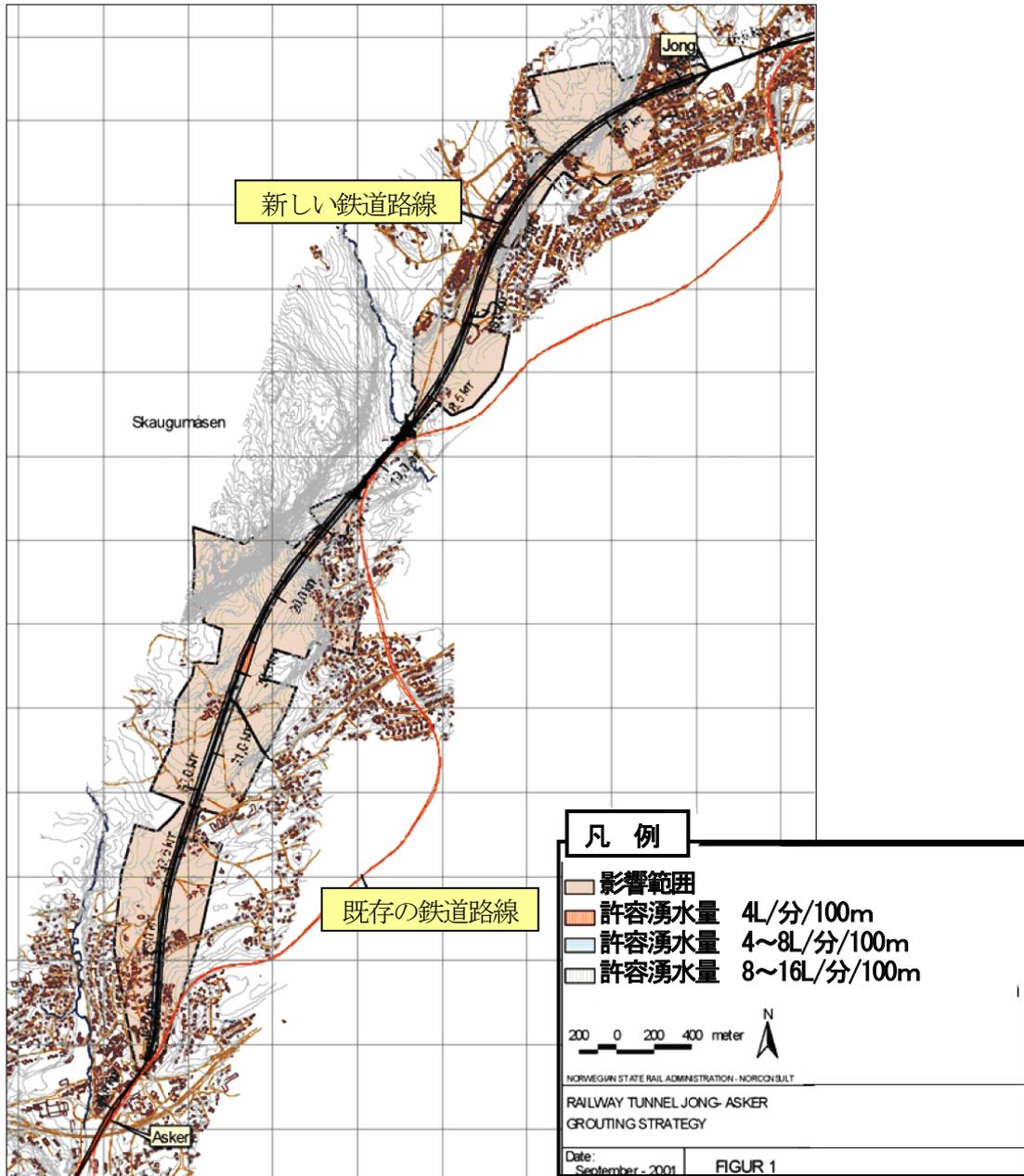


図 3.2-7 許容湧水量のクラス分類平面図

(参考文献5) をもとに作成

## (iv) 注入仕様

Skaugum トンネルでは、許容湧水量のクラス分類にかかわらず施工の効率化と止水改良効果を確保するために、トンネル全延長でクラス3の注入仕様を使用している。これは、探り削孔における水押し試験を実施し、プレグラウトの要否及び仕様を判断することは精度が劣る上に、試験実施に伴い手待ち作業が発生し工期が増大するためである。むしろ水押し試験を省略し、システムチックにクラス3のプレグラウトをトンネル全線にわたって実施する方が、品質及び経済性の点で優れていると判断されたためである。

## (a) 注入孔配置

クラス3では、注入孔数は切羽面で1m間隔となる48孔（トンネル外周に39孔、トンネル切羽内に9孔）、注入長は24m、ラップ長（カバーロック厚）は6mであり、一般的には3回の発破毎にグラウト注入が実施されている。注入工と掘削工の関係を図3.2-8に示す。なお、1回の発破長は5~6mの長孔発破である。なお、注入範囲については、不明である。

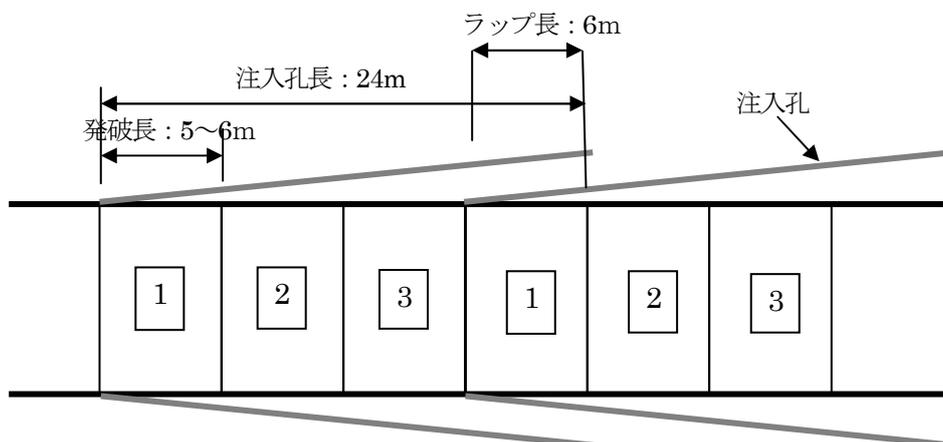


図 3.2-8 注入工と掘削工の関係（一般部）  
（施工業者からのヒアリングをもとに作成）

## (b) 注入材料

超微粒子セメントにグラウトエイド（シリカフューム）を添加した注入材料を用いている。

## (c) 注入圧力

通常は、6~9MPaの注入圧としており、最大注入圧は10MPaである。

## (v) 注入方法

W/C = 1.1~1.5のセメントミルクにより注入を開始する。注入順序はインバート中央部から外側そ

して上部の順である。注入圧力はゆっくりと 6~8 MPa まで上昇させる。なお、トンネル切羽や孔壁から注入材がリークしてきた場合は、mauring という硬化促進剤を少量使用するとともに注入圧力を減少する。

#### (vi) 注入結果

Skaugum トンネルでは、最大で 30 L/min の湧水が 1 断面の注入孔からグラウト実施前に観測されたが、プレグラウトにより通常 5~40 t/断面 (1 回の注入量) のセメントを注入することにより、90~100%の湧水量が減少している。注入セメント量をトンネル全延長で平均すると 1,200 kg/m/tunnel になる。通常の削孔時間は 10 時間、注入時間も 10 時間であった。

湧水量はトンネル全延長で平均すると 5 L/min/100m 以下であり、改良目標はほぼ達成されている。一部、輝緑岩脈または褶曲した石灰岩と砂岩の向斜のある箇所では 3~4 L/min の湧水が集中しており、ポストグラウトが計画されている。

#### (vii) その他

グラウト計画時には以下の項目が考察されている。

- ・ トンネル掘削に伴う周辺地下水環境への影響を最小限にすることがグラウトの目的であることから、坑内への湧水量も重要なパラメータであるが、継続的な地下水位の記録が最も重要である。
- ・ 地下水位の低下を防ぐためにはプレグラウトが効果的である。
- ・ 超微粒子セメント及び添加材 (シリカフェーム) の使用と高圧力 (最大 10MPa) での注入が必要である。
- ・ 地下水モデルの構築と計算は、地下水位に影響を与える要因分析が可能であり調査に含まれるべきである。

また、グラウト実施後には以下の項目が考察されている。

- ・ グラウト効率を上昇させるためには正確な削孔が必要である。
- ・ 止水以外のグラウト効果として弱層部や破碎帯部の改良といった岩盤の安定性の向上がある。

(4) Romeriksporten tunnel <sup>7),8)</sup>

(i) 工事概要

Romeriksporten トンネルはオスロ市内と新空港を結ぶ高速鉄道の一部である<sup>5)</sup>。広範囲なプレグラウトを実施したが、地質不良と高水圧のため一部区間で許容値をはるかに上回る湧水があったため、大規模なポストグラウトを実施している。また、地下水位の低下とアクリルアミドの使用が大きな環境問題を引き起こしている。

表 3.2-20にトンネル諸元を示す。

表 3.2-20 Romeriksporten トンネルの諸元一覧

項目	内容
建設地	Oslo, Norway
用途	鉄道
建設期間	1995 - 1999
トンネル延長	13.8 km
トンネル断面	102 m <sup>2</sup>
トンネル幅	11.9m
土被り	100 - 250 m

(ii) 地質状況

先カンブリア時代の片麻岩を主体とし、部分的に石灰岩と頁岩を含む。隣接する大断層の影響で粘土を含む広範囲な節理性岩盤帯が存在する。図 3.2-9に地質縦断図を示す。

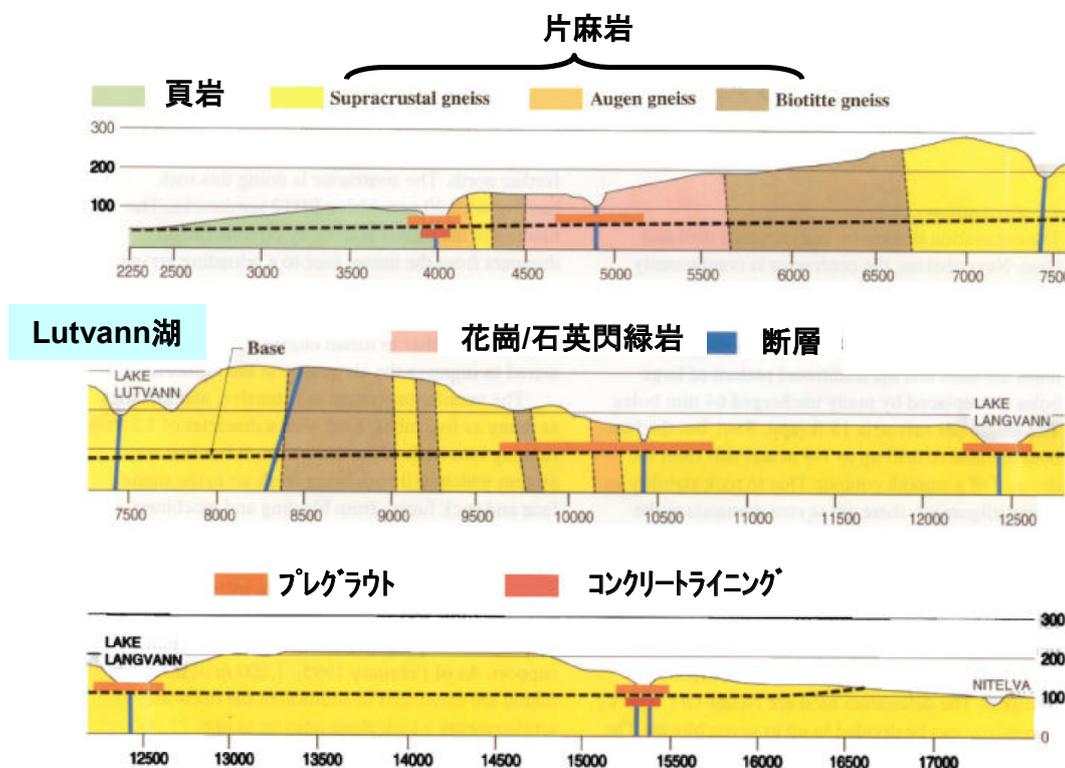


図 3.2-9 地質縦断図 (参考文献5) をもとに作成)

## (iii) 改良目標

許容湧水量は森林部と都市部に分けて設定している。森林部では Oslo 地域での他のトンネルの実績に基づき、都市部では粘土部の間隙水圧の低下を 2 m 以内に抑えることから算出している。表 3.2-21 に許容湧水量を示す。

表 3.2-21 許容湧水量

施工区間	許容湧水量 (L/min/100m)
森林部	20~30 (再計算では 25・30)
都市部	10~15

## (iv) 注入仕様 (プレグラウト)

## (a) 注入範囲と注入孔配置

標準的な注入孔数は 30 孔、注入長は 23 m、オーバーラップ長 (カバーロック厚) は 8 m であり、1 段階または 2 段階で注入を行う。

## (b) 注入材料

普通セメント、急硬性セメント、超微粒子セメント、アクリルレジジン (Siprogel、後の RochGil (スウェーデンの Hallandsås railway トンネルでも使用)) が使用されている。なお、止水性の確保が困難な区間では超微粒子セメント、アクリルレジジンが使用された。

## (c) 注入圧力

少なくとも 5 MPa 以上で注入可能なポンプを使用する。

## (d) 注入方法

- ・ 調査孔は孔数 3~6、削孔長 23 m を標準とし、トンネル全延長で実施する。
- ・ 調査孔からの湧水量が 5 L/min 以上であればグラウトを実施する。なお、調査孔では水押し試験は行わない。
- ・ 注入後に確認孔を削孔し、湧水量を測定する。

## (v) 注入結果 (プレグラウト)

Lutvann 森林部 (図 3.2-10参照) では、複雑で多数の亀裂からなる断層の影響と高水圧のため止水性の確保が困難であり、注入は最大で 4 次注入まで達している。また、使用材料についても頻りに普通セメントの代わりに超微粒子セメントを使用し、それでも良好な結果が得られない場合は多量のアクリルレジジンを使用している。

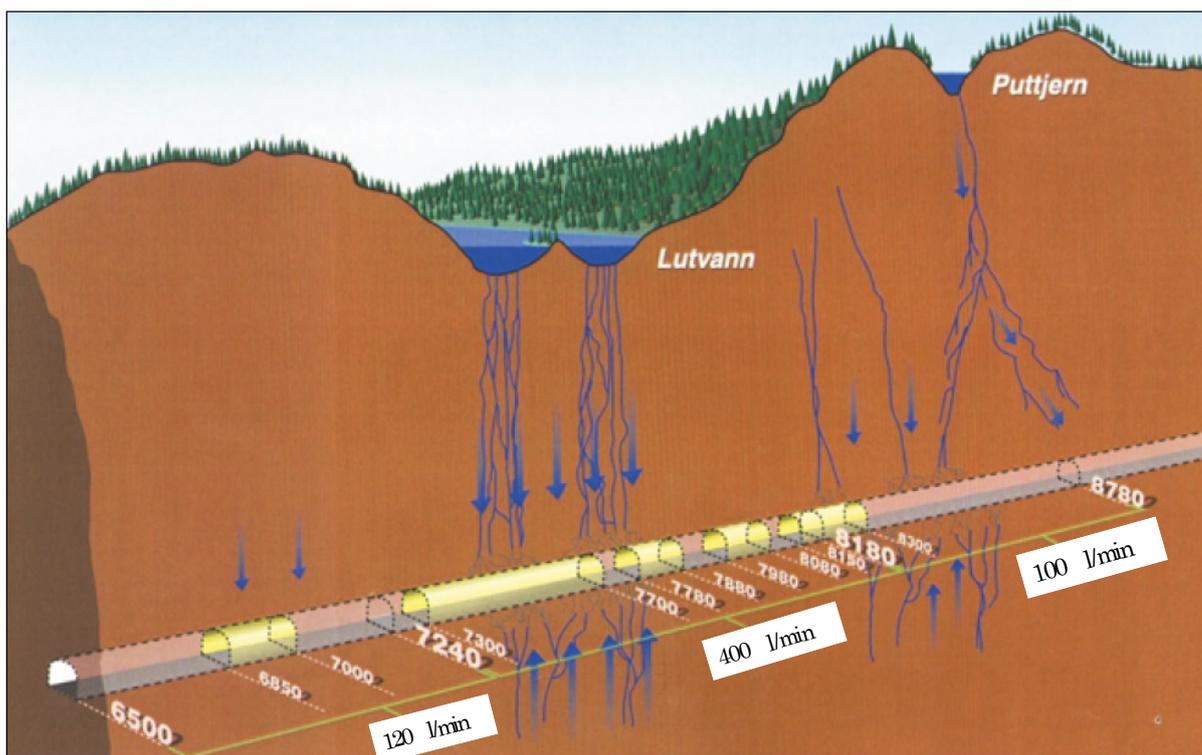


図 3.2-10 Lutvann 湖近傍の地下水流れのイメージ図  
(参考文献 8) に加筆

表 3.2-22 グラウト注入量

使用材料	全注入量
普通セメント	5,400 ton
超微粒子セメント	1,300 ton
アクリルレジジン	340 ton

しかしながら、施工中は都市部の井戸水位の低下や森林部の湖沼の水位低下を招くとともに、アクリルレジジンを含むアクリルアミドの多量の使用により社会的な環境問題を引き起こした。そのため、都市部での民家への補償、森林部へ湧水を再供給、観測の強化といった対策を講じるとともに、グラウトの専門家が集められ、2.2 km の延長（プレグラウト後の湧水量が 2,500 L/min 以上）を対象にポストグラウトが検討された。

全体としてトンネル延長の 37% でプレグラウトを実施し、表 3.2-22 に示すように相当量の材料を使用しているが、一部区間で許容湧水量をはるかに上回る結果となった。

(vi) 注入仕様（ポストグラウト）

(a) 注入範囲と注入孔配置

トンネル孔壁から 4~10 m の止水ゾーンを構築するために、5 m ピッチで削孔する。

(b) 注入材料

数種類の超微粒子セメントが使用されたが、具体的な注入方法については不明である。

#### (vii) 注入結果（ポストグラウト）

施工は困難を極めた。特にインバート部分の施工に問題があり、孔壁崩れ、パッカーの不具合、注入材の逆流等が生じた。トンネル総延長の掘削と同等の費用をかけ 2.2 km の延長でポストグラウトを行い、区間湧水量を 300 L/min 程度まで減少させたが、許容湧水量を満足したのはその 2/3 の区間のみであった。最終的にはグラウトによる止水をあきらめ、トンネル湧水を自動的に汲み上げ再供給するシステムを導入している。

なお、ポストグラウト後の湧水量から逆算すると、グラウト改良範囲の透水係数は、それ以前のトンネルのセメントグラウトによる改良と同等で  $10^{-7}$  m/s オーダーであった。

#### (viii) その他

今回のプレグラウト、ポストグラウトを通して以下のことが考察されている。

- ・ プレグラウト後もインバートから多くの湧水があることが判明したが、その原因として、プレグラウト孔配置が不足していることや排水溝のための後発破の影響が考えられる。
- ・ プレグラウトの成功にはトンネル切羽で得られる情報が重要である。
- ・ 同じ透水性を確保するためにはポストグラウトよりプレグラウトが 20 倍も費用が安い。
- ・ 超微粒子セメントを用いた安定グラウト（ブリーディングの少ないグラウト材料）により亀裂開口幅 0.1 mm、透水係数で  $5 \times 10^{-8}$  m/s まで改良可能である。
- ・ 超微粒子セメントグラウト材の性質は不安定であり、攪拌した後すぐに凝集を始める。
- ・ グラウト材の性質は水セメント比、岩盤の温度により大きな影響を受けるが、北欧の岩盤温度は 7~8°C と低温であるため、ほとんど影響を受けないセメントもある（このような低温ではポルトランドセメントによるクリンカーが適切であるようである）。
- ・ 今後のセメント系グラウトの改良目標としては亀裂開口幅 50  $\mu$ m が現実的だが、ただセメントの粒形を小さくするだけでなく新しくセメントと添加剤を開発する必要がある。
- ・ トンネルに対する社会的な関心が高まっているため技術者、水理地質学者、環境専門家の協力が必要であり、また社会に対する広報活動が重要である。（この後、ノルウェーでは“Tunnels for the Citizen”という活動が開始され、より環境に優しいトンネルグラウト注入方法の研究が開始された。）

また、今後の注入方法や注入材料の開発について、以下のような項目の必要性が挙げられている。

- ・ （注入ライン毎に制御可能な）10MPa 以上の注入能力を持つグラウトポンプの開発
- ・ グラウト孔を正確な位置に削孔する技術
- ・ グラウト注入方法としては、a)掘削時に弱層部の崩壊を防ぐための外周部のグラウト注入方法、b)粗い割れ目を先行注入することにより高圧のグラウトを可能にする外周部のグラウト注入方法
- ・ 混練りしたグラウト注入材の継続的な品質管理（浸透性能あるいは経過時間や岩盤温度に影響を受ける性質）
- ・ 硬化促進剤を均等に添加する方法

(5) Turku-Naantali District Heating Tunnel<sup>9)</sup>

(i) 工事概要

Turku-Naantali District Heating トンネルは、Naantali 石炭火力発電所から周辺地域への熱供給を目的として、フィンランド南西部の Naantali から Turku Luolavuori 間に 80 年代に建設された 14km に及ぶ長大トンネルである。海底や河川底、谷部を通過するため地質は複雑であり、地表沈下等の環境問題を引き起こす可能性が懸念された。このため、地下水位を低下させないための許容湧水基準を設定して施工が実施された結果、問題なくトンネル掘削が終了している。しかしながら、工期短縮のため調査孔を省略し目視観察に頼った施工を行ったため、逆に多量のポストグラウトを実施する結果となっている。表 3.2-23 にトンネルの諸元を示す。

表 3.2-23 Turku-Naantali District Heating トンネルの諸元一覧

項目	内容
建設地	Turku, Finland
用途	熱供給
建設期間	1980's
トンネル延長	14 km
トンネル断面	約 15 m <sup>2</sup> (図 3.2-11 より算出)
トンネル幅	約 4m(図 3.2-11 より算出)
土被り	最大 90 m

(ii) 地質状況

急峻な岩山と粘土質の谷部からなり、氷河による堆積物と粗粒土がまばらに広がっている。基盤は片麻岩と花崗岩を主体とし、トンネル軸に沿って基盤地形は非常に急峻であり 50~60 m の高低差がある。トンネル軸上の主要な塊状の岩種は石英閃緑岩 (29%)、閃緑岩 (9%)、花崗岩 (6%) である。これらは全体の地質構造と同方向の割れ目 (ほぼ垂直) や片理を有する傾向があり、この傾向は雲母片麻岩 (51%) の割れ目や片理において顕著である。

また、トンネルは 316 箇所の亀裂帯を横切っており、半分以上の亀裂帯の幅は 1m 以下であるが、Turku 市内においては 150m に及ぶ亀裂帯が存在している。これらの亀裂帯は、フィンランドの岩盤分類システムにより 4 種類に分類されている。

(iii) グラウト注入工

(a) プレグラウト

- 改良目標：地下水位低下と坑内湧水量の関係をもとに、表 3.2-24 に示すように 3 クラスの許容湧水量が定められている。

表 3.2-24 許容湧水量

許容湧水クラス	許容湧水量 (L/min/100m)
クラス 1	3
クラス 2	5
クラス 3	10

- グラウト注入の要否判定: 地質調査、物理探査、ボーリングといった事前調査の結果からは、トンネル延長の約 21 % でプレグラウトが必要との計画であった。また、グラウトの要否は、切羽における水押し試験結果より表 3.2-25 に示すように判定することが推奨されていた。しかしながら、工期に追われて水押し試験が省略されたため、実際にはプレグラウトは以下の場合に実施している。
  - ・ 許容湧水クラス 1、2 : 坑道内やボーリング孔内への流量が多い場合
  - ・ 許容湧水クラス 3 : 掘削や支保に影響を及ぼすほど湧水が著しい場合
  - ・ その他 : 地質不良部において

表 3.2-25 調査孔によるグラウト判断基準

水押し試験結果		グラウト実施の有無
インバート部調査孔	天端部調査孔	
2 L/min/m/MPa 以下	-	グラウトは行わない
2 L/min/m/MPa 以上	2 L/min/m/MPa 以下	インバート部のグラウト実施
2 L/min/m/MPa 以上	2 L/min/m/MPa 以上	全周のグラウト実施

- 注入範囲と注入孔配置: 標準的な注入孔数は 13~14 孔、注入長は 5~12 m である。図 3.2-11 に注入パターンを示す。

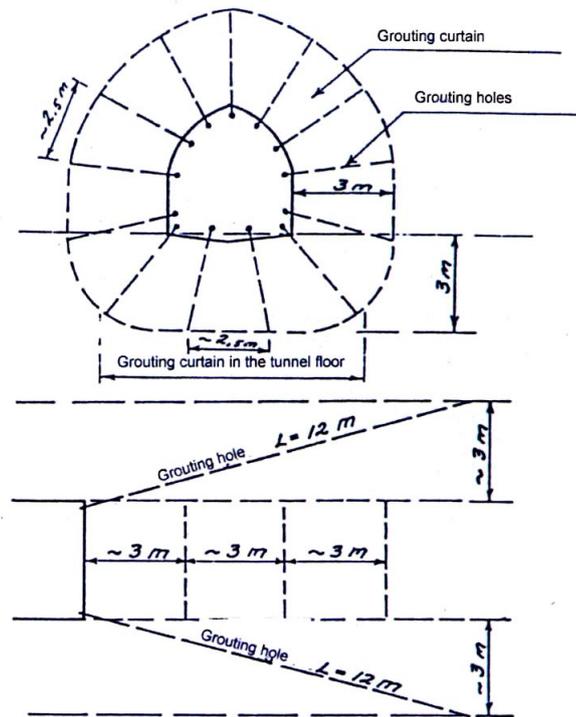


図 3.2-11 注入パターン<sup>9)</sup>

- 注入材料
  - ◆ 材料は早強セメントとし、水セメント比は 2 : 1 から 4 : 1 が典型的であった。また、ベントナイト、注入補助材が混和されることもあり、グラウトが多量に入り過ぎる地山においてはモ

ルタルが使用された。ケミカルグラウトについても部分的に使用されている。

- 注入圧力：通常は1~1.5 MPa で注入を開始し、最大注入圧は3.0 MPa としている。
- 注入終了基準：15 分間の注入量が3~5 L/min/孔となった時点で注入終了とする。

(b) ポストグラウト

ポストグラウトはプレグラウト後に許容湧水量を満足しなかった場合や湧水が機械や作業に支障を及ぼす場合に実施している。

- グラウト注入の要否判定：表 3.2-26に示すポストグラウトの要否判定が推奨されているが、実際には坑道内における湧水状況の目視観察結果からグラウトの要否が判定されている。

表 3.2-26 ポストグラウト実施基準

水押し試験結果	グラウトの要否及びグラウト材料
0.2 L/min/m/MPa 以下	ポストグラウトは行わない
0.2 - 2 L/min/m/MPa	ケミカルグラウトによりグラウト実施
2 L/min/m/MPa 以上	セメントグラウトによりグラウト実施

- 注入材料：セメントグラウトとケミカルグラウトが使用されている。ケミカルグラウトとしては、シリケート系材料（商品名：Stabilodur）やレジン系材料（商品名：Geoseal）が使用されている。

(c) 注入結果

トンネル延長の約10%でプレグラウトを実施し、プレグラウトを行った区間の50%以上の区間でポストグラウトを実施した。表 3.2-27に注入量を、表 3.2-28に改良結果を示す。

表 3.2-27 グラウト注入実績量

使用材料	平均注入量	
	セメント	プレグラウト
ポストグラウト		38 kg/borehole/m

表 3.2-28 許容湧水量と達成湧水量

許容湧水クラス	許容湧水量 (L/min/100m)	達成湧水量 (L/min/100m)		
		湧水範囲	平均*	備考
クラス1	3	0.5 - 4	2.5	一区間で達成せず (10 L/min/100m を記録)
クラス2	5	1 - 6	3.5	一区間で達成せず
クラス3	10	1 - 8	3.5	数区間で達成せず

\*平均湧水量は許容湧水量を超えた区間を除いた平均値

掘削当初はあまりグラウトを実施する必要がなかったが、土被りが増すにつれてグラウトが必要と

なるとともに、グラウトの難易度が増した。特に谷部では地下水圧が高いことに加え許容湧水基準が厳しいため、グラウト設備の能力が不足することもあった。

なお、Turuku 市内においてはグラウトが大規模に実施されたが、地下水位が低下しており、最終的な地下水位低下量は0.5～1.5 m であり、地表面沈下量は数 mm から 150mm である。但し、このうちトンネル掘削の影響がどれくらいであったかは不明である。

#### (d) その他

地質とプレグラウト結果の関係が研究されている。地質については岩質と割れ目、プレグラウト結果としては注入量と注入時間をそれぞれ比較検討している。その結果、以下のことが分かっている。

- ・ 岩盤亀裂の多いところで注入量が多い
- ・ 岩盤亀裂の指向性の有無は注入時間には無関係だが、注入量には明確な影響を与える。
- ・ 亀裂に指向性のある岩盤よりも指向性のない岩盤のほうが、亀裂の種類が注入量に影響を及ぼす傾向にある。
- ・ 岩盤亀裂の指向性のある岩盤に比べると指向性のない岩盤への注入量は全体で2倍である。
- ・ 岩盤亀裂の数と亀裂内部の粘土の介在が、注入時間が増加する要因となる。
- ・ 指向性のない岩盤に開口亀裂が多いと推測される。
- ・ プレグラウトを実施したトンネル延長のうち 2/3 は事前調査で予測された箇所であったが、残りの 1/3 では事前調査では予測不可能な個々の岩盤亀裂からの湧水であった。

また、工程短縮のためプレグラウト後に早期に掘削を実施したこと、調査孔、水押し試験を省略したことにより、以下のような問題が発生したと分析している。

- ・ プレグラウトを行った区間の 50%以上でポストグラウトが必要であった。
- ・ 湧水箇所の十分に手前で掘削を停止することが出来ず、湧水箇所に近づきすぎたり貫通したりしたために、ポストグラウトの必要箇所が増えた結果、プレグラウトに比したポストグラウトの注入量が 82%と高くなっている。
- ・ 岩盤の亀裂状態に応じた適切な W/C を選定することが出来なかったことが、再グラウトやポストグラウトを招き、注入時間を増大させた。
- ・ プレグラウト後の早期の掘削は、未硬化のグラウト材の坑内への流出や、グラウト材の流出防止のため低圧力での注入を余儀なくされるという問題を引き起こした。
- ・ グラウト設備、注入方法については効率的な方法を導入したにもかかわらず、削孔数、注入量、注入時間は計画をはるかに超えるものであった。

調査孔と水押し試験を省略したことによる弊害の例として、調査孔による水押し試験を計画通り実施し、グラウト注入長を 15 m とした区間ではポストグラウトはトンネル延長のわずか 2.6%で実施したのに過ぎなかったが、水押し試験をほとんど実施せず、グラウト長を 5～9 m とした区間では、トンネル延長の 81.5%でポストグラウトが必要であったことが挙げられている。

また、ポストグラウトの問題点として以下のことが挙げられている。

- ・ 1 箇所を止水しても浸出箇所が移動する。

- ・ ケミカルグラウトにより一度グラウトした亀裂が6ヶ月後には再び開き湧水が生じた。原因は、化学的劣化や薬液の混合上の問題が考えられている。

### 3.2.2 国内の施工実績

日本国内においては、止水を目的とした岩盤グラウトは基本的にダム工事において適用されてきた。一方、トンネル工事に関しては、主に破碎帯等における大量湧水に伴う切羽の安定対策として、短期間の止水を目的として適用されてきた。このため長期的な止水を目的としたグラウト注入は青函トンネル等の海底トンネルにおいて湧水を抑制することにより、ポンプ排水量を低減し、工事の安全性と経済性の向上を図る場合等に限られてきた。他方、トンネル工事以外については、岩盤に高い恒久的な止水性が要求される石油備蓄基地における適用例がある。

表 3.2-29 岩盤グラウトの主な適用対象

対象	適用目的	特徴
ダム	カーテングラウト等 (ダム基礎地盤の高透水路部の遮水性改良)	恒久的止水 高い止水性 ( $10^{-7}$ m/s オーダー) 地表からのステージ注入が基本
トンネル	海底トンネルにおける恒常湧水の低減 突発湧き水の予防 (防止) (トンネル周りに難透水路層を形成)	長期間の止水 高い止水性 ( $10^{-7}$ m/s オーダー) トンネル切羽からのプレグラウトが基本
	破碎帯における瞬大量湧水対策 (水抜き対策との併用等により切羽の安定性を確保)	短期間の止水 ある程度の止水性 (切羽が安定する程度) トンネル切羽、注入坑道からのプレグラウトが基本
石油備蓄基地	恒久的な止水性の向上	恒久的止水 高い止水性 ( $10^{-7}$ m/s オーダー) 坑道内からのステージ注入が基本

そこで、特にグラウト工事という観点から重要である以下のトンネル及び岩盤空洞掘削工事について調査し、その概要を表 3.2-30に、また詳細については次頁以降に記述する。

- 海底トンネル
  - ・ 青函トンネル
  - ・ 志賀原発取放水路海底トンネル
- 一般的なトンネル
  - ・ 塩嶺トンネル
  - ・ 吉田導水路トンネル
- 岩盤空洞
  - ・ 串木野石油備蓄基地

表 3.2-30 止水を目的とした国内グラウト施工実績調査結果一覧表

区分	名称	注入の目的	注入材料	注入方法	注入圧力	注入仕様	備考
鉄道トンネル (海底トンネル)	青函トンネル (旧国鉄)	止水+地山補強(長期間の止水) 改良目標： 150L/分/100m 改良効果： 10 <sup>7</sup> ~10 <sup>9</sup> m/sec <sup>2</sup> を達成	異常出水前：LW-1 普通ボルト・ナット・セメント S-1号水ガラス マイナ-150R 異常出水時：LW-1 高炉コロイドセメント S-1号水ガラス	切羽からのプレグラウト(前方注入) (パッカー注入)	湧水圧力(約1.4MPa)の3倍 (5MPa~8MPa)	孔間隔：3m(先端) 注入長：70m(パッカー20mを含む) 改良範囲：2~3R(一般部) 4~6R(破砕部)	LWグラウトの開発 グラウトの対象 未固結砂層、破砕帯軟弱層 透水性の高い火山岩層
水路トンネル (海底トンネル)	志賀原発取 放水路	止水 (長期間の止水) 改良目標：3Lu 改良効果： 10 <sup>7</sup> m/secオーダーを達成	高炉コロイドセメント S-1号水ガラス	切羽からの前方注入	限界圧(約2.5MPa)+α (3MPa)	孔間隔：3m(先端) 注入長：40~55m(パッカー10mを含む) 改良範囲：改良半径13.5m (3R程度)	グラウト対象 安山岩の岩盤
鉄道トンネル (高被圧地下水)	塩嶺トンネル (旧国鉄)	止水(仮設)	LW アロンSR	切羽からの前方注入	湧水圧(約0.7MPa)の4倍(3MPa)	孔間隔：3m(先端) 注入長：42~50m(パッカー15mを含む) 改良範囲：改良半径10m(2R程度)	グラウト対象 第三紀火山噴出物堆積層(塩嶺累層)安山岩質の角礫を点在させマトリックスは剥離性で硬質だがもろいクッキーな地山
水路トンネル (高被圧地下水)	吉田導水路 トンネル	止水(仮設)	セメントミルク LW	切羽からの前方注入	湧水圧(約2MPa)の2倍(5MPa)	孔間隔：3m(先端) 注入長：15~40m 改良範囲：改良半径8~12m(4R程度)	グラウト対象 破砕帯(凝灰岩混じり粘土)
石油備蓄	串木野石油 備蓄基地	湧水防止 地下水位維持 改良目標：1~4Lu	セメントミルク 高炉セメント主体 一部仕上げに 超微粒子セメント	切羽からの前方注入 インポート部からのボルトグラウト (放射状配置) 側壁・アーチ部のボルトグラウト	湧水圧+0.4~1.5MPa	改良範囲：改良厚5~40m	グラウト対象 安山岩類の岩盤を対象

\*) チェック孔の透水係数

(1) 青函トンネル<sup>10)~15)</sup>

(i) 工事概要

青函トンネルは、本州と北海道を結ぶ全長 53.85km の海底トンネルで、その中央部の約 23.3km が海底部分で、最深部は海面下 240m（最大水深 140m）に位置している。しかも、そのルート地盤は、数多くの破碎帯をもつ新第三紀の軟弱な堆積岩と亀裂の多い火成岩から構成されている。このような条件のもとで海底部を安全かつ効率よく掘削するためには、海水が起源である高圧大量の湧水を確実に止水し、さらに軟弱な地盤の改良を行うことが不可欠であった。また、海底トンネルでは最深部が海底区間に位置するため、流入する湧水を坑外に強制排水する必要がある。この永続的な揚水費を低減するためには湧水量を極力少なくしなければならない。このようなことからトンネル周辺に地盤注入を行い、透水性が小さくかつ十分な地山強度を有する止水ゾーンを形成したうえでトンネルをその中に構築する方針が採用された。表 3.2-31 にトンネル諸元を、図 3.2-12 及び図 3.2-13 にトンネル縦断面図、海底部標準断面図を示す。

表 3.2-31 青函トンネルの諸元一覧

項目	内容
建設地	青森県、北海道
用途	鉄道
建設期間	1964 - 1987 年
トンネル延長	53.85km（このうち海底部 23.3km）
トンネル断面	本坑：約 86m <sup>2</sup> 、作業坑：約 14~21m <sup>2</sup> 、先進導坑：約 20m <sup>2</sup>
トンネル幅	本坑：11.0~11.4m、作業坑：4~5m、先進導坑：3.6~5m
土被り	最小 100 m、水深は最大 140 m（水面下 240m）

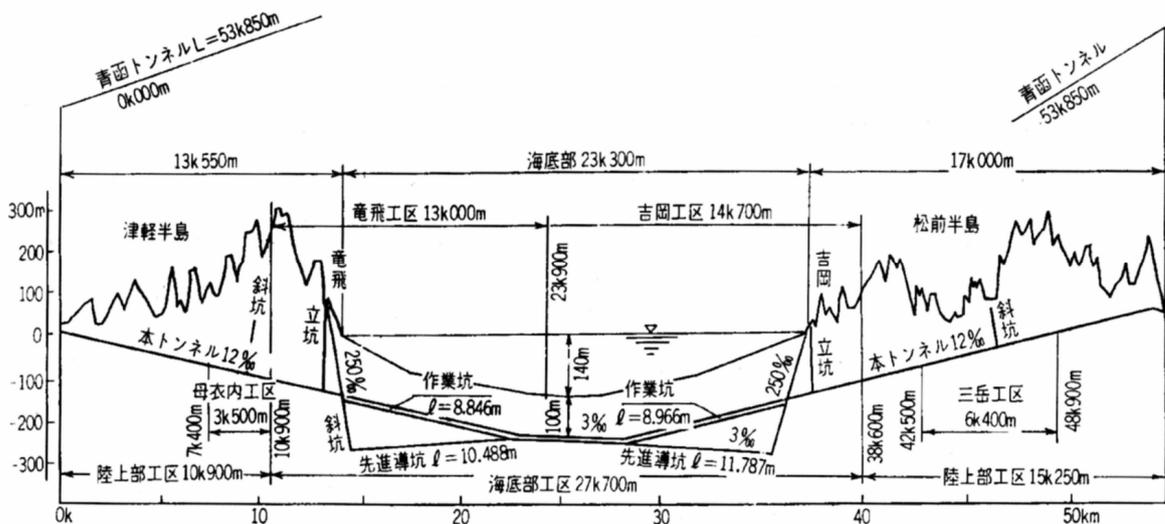


図 3.2-12 トンネル縦断面図<sup>10)</sup>

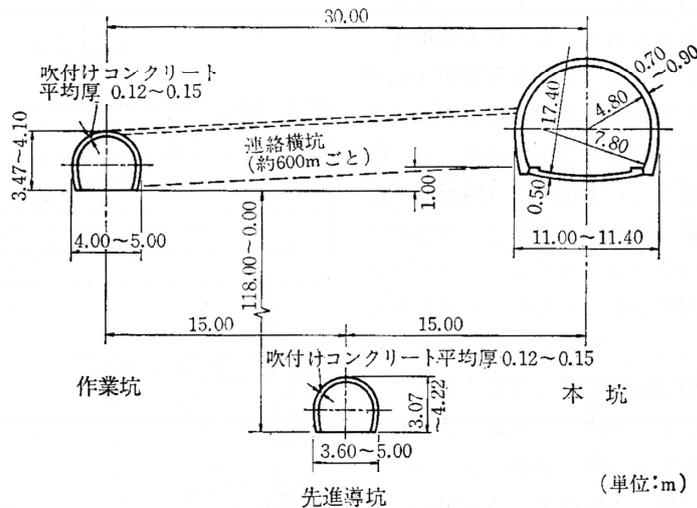


図 3.2-13 海底部標準断面図<sup>1)</sup>

(ii) 地質状況

地質条件は、本州側は、安山岩と凝灰角礫岩を主体とし、この中を多数の玄武岩、流紋岩の岩脈が貫入しており、亀裂、湧水帯が多く、複雑な地形を呈している。海底中央部は、硬質頁岩、シルト岩、細粒砂岩からなる堆積岩である。北海道側は、火山礫凝灰岩、シルト岩からなっており、断層破碎帯を除いては、亀裂、湧水が少なく、比較的安定している。

また、地質縦断面図を図 3.2-14に示す。この図中に示された各地層の特徴は以下の通りである。

・訓縫層 (本州側)

火山碎屑岩類、泥岩類からなる。全般的に硬質 (200kgf/cm<sup>2</sup>程度) だが亀裂が多い。玄武岩の岩脈が随所に見られ多量の湧水を伴っている。

・八雲層

訓縫層の上位にあり、黒色硬質ケツ岩層が主体である。亀裂多く、多量の湧水が見られる。

・黒松内層

海峡中央部に位置する。砂質泥岩を主体とし、強度は低い (30~50kgf/cm<sup>2</sup>) が、透水性が小さく比較的安定している。一部には未固結の砂層を挟んでいる。

・訓縫層 (北海道側)

主として泥岩ないし凝灰岩よりなる (200kgf/cm<sup>2</sup>程度)。透水性が小さく陸上部に近いところでは止水注入を必要としない区間もあったが、断層等の地山が破碎されているところでは大量湧水を伴う。

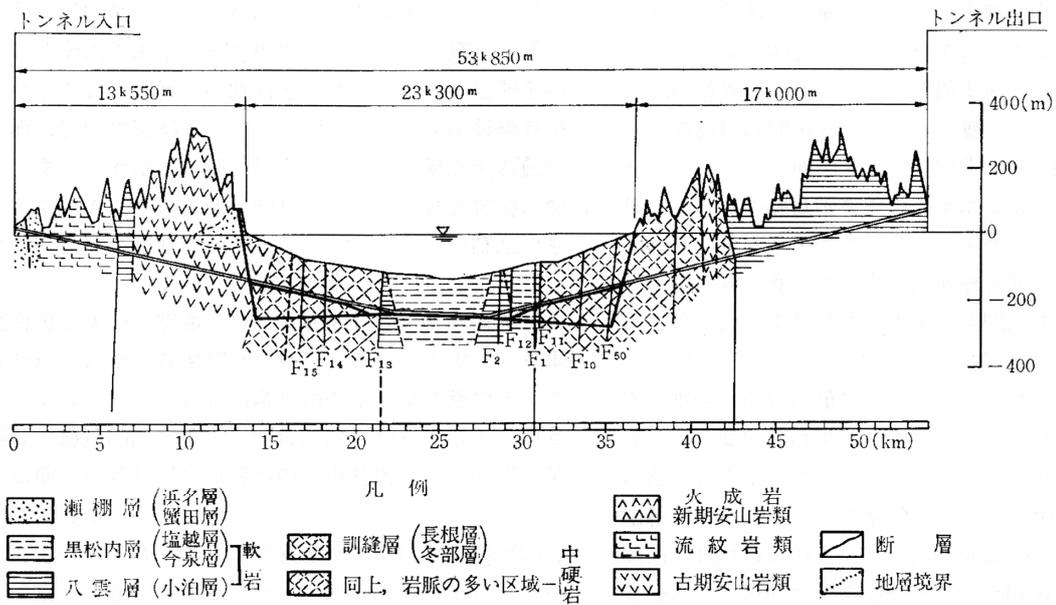


図 3.2-14 地質縦断面<sup>1)</sup>

(iii) 改良目標

許容湧水量は工事中の排水設備規模及び掘削作業上支障のない程度として 150L/分/100m と定められた。この基準を満足させるために掘削区間が止水された区間の掘削断面内に数孔のチェック孔を削孔し、その湧水量から堅岩部と破碎帯部に分けて表 3.2-32 に示す基準値を標準に判定し、適合しない場合は、さらに追加の注入孔を設けて慎重に施工された。

表 3.2-32 チェック孔の管理基準値  
(参考文献 12)をもとに作成)

項目	内容
堅岩部	削孔 1m 当り湧水量 0.4L/min 以下または湧水個所 10L/min/個所以下
破碎帯部	削孔 1m 当り湧水量 0.2L/min 以下または湧水個所 10L/min/個所以下

(iv) 注入仕様

(a) 注入範囲の理論解析

青函トンネルにおいては、注入範囲はトンネルの径と関連付けて決定された。

注入ゾーンを図 3.2-15 に示す厚肉の中空円筒とモデル化し、注入ゾーンを弾性体と考えると、トンネルにかかる圧力 (支保圧力)  $P_a$  と注入ゾーン外側に作用する外力  $P_r$  との関係として、次式が成り立つ。

$$P_a = -C \cdot \cot \phi + \frac{(P_R + C \cdot \cot \phi)(1 - \sin \phi)}{\left(1 - \frac{\sin \phi}{\left(\frac{R}{a}\right)^2}\right)} \quad (\text{数式 3.2-1})$$

ここに、

- a : トンネル半径
- R : 注入ゾーン半径
- C : 注入ゾーンの岩盤の粘着力
- $\phi$  : 注入ゾーンの岩盤の内部摩擦角

破碎帯部を想定して注入ゾーンの岩盤強度を  $10\text{kgf/cm}^2$  ( $c=2.9\text{kg/cm}^2$ 、 $\phi=30^\circ$ ) とした場合における  $P_a$  と  $R/a$  の関係を図 3.2-16に示す。この結果より、 $R/a$  が 3～4 より大きくなると  $P_a/P_R$  を小さくする効果は小さくなることがわかる。

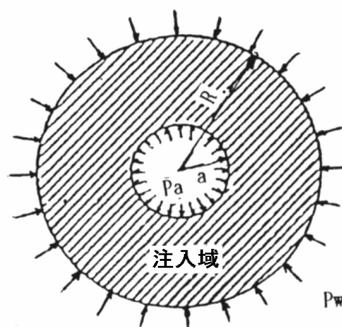


図 3.2-15 注入域と外力の関係<sup>12)</sup>

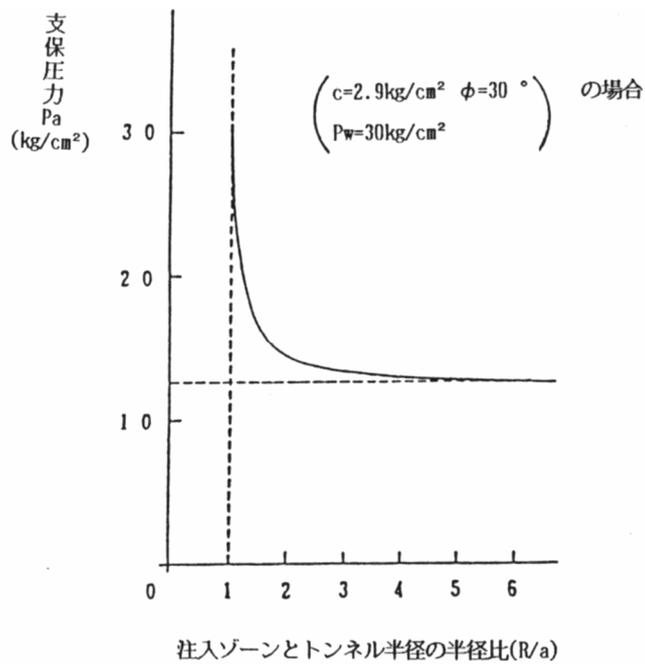


図 3.2-16 注入半径と支保反力の関係<sup>12)</sup>

上記より、トンネル半径方向の注入域の半径は掘削半径の3倍程度を基本とし、破碎帯等の不良地山では地山のゆるみを考慮して安全をみて4～6倍に設定された。

(b) 注入範囲と注入孔配置

本坑における一般的な注入範囲と注入孔配置の注入概念図を図 3.2-17に示す。

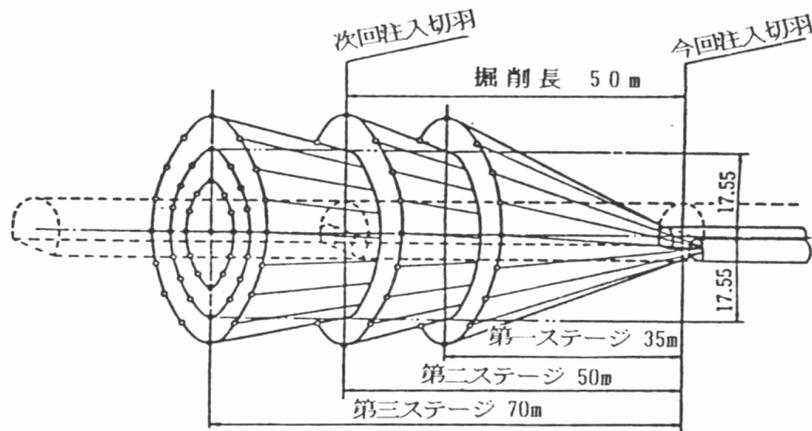


図 3.2-17 注入概念図 (本坑の例)<sup>12)</sup>

注入長は先進導坑及び作業坑では70～85m、本坑では70m、カバーロックは先進導坑では10m、本坑20mが標準とされた。削孔間隔については、各リングにおける孔間隔はおおむね3mとしているが、リング間隔は必ずしも3mにこだわらず、3～6mとなっている。

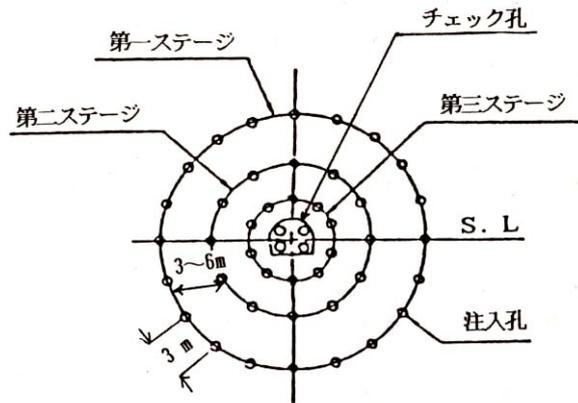


図 3.2-18 注入孔の配置例<sup>12)</sup>

注入孔配置は、各孔の注入有効範囲で注入対象地山を埋め尽くすという考え方ではなく、リング状の止水帯を数リング造ってトンネル内への海水を防ごうとするものである。なお、施工にあたっては、隣接孔はつづけて施工しないこととし、注入孔削孔時の湧水状況によっては中抜きを行って注入孔を削減する措置を講じている。破碎部においては、リング数が多くなるとともに各リングにおける孔間隔も 1.5～3 m 程度にまで縮められている。

注入パターンの例として、図 3.2-19 に竜飛工区の第 11 本坑の標準パターンを示す。

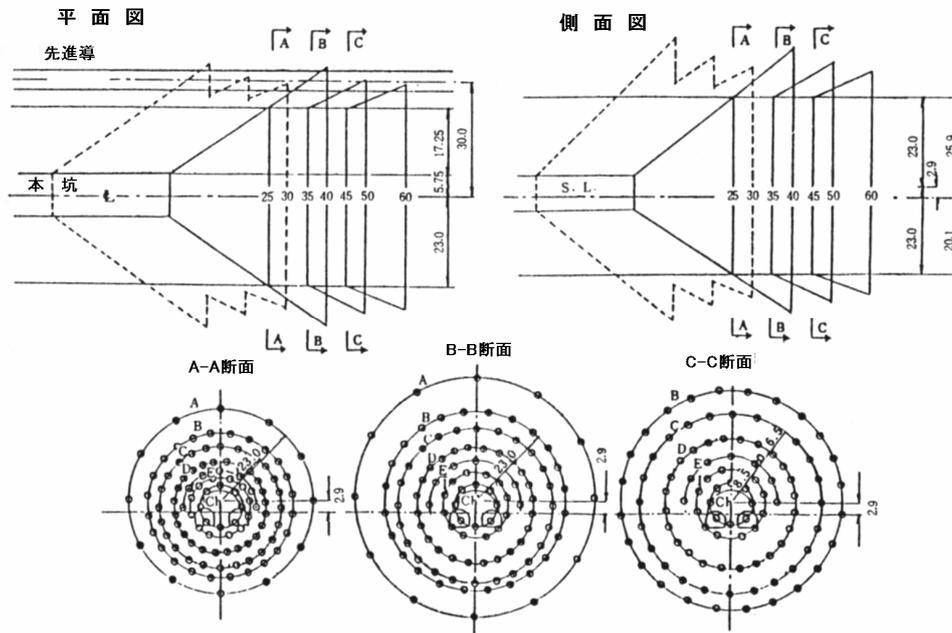


図 3.2-19 竜飛方作業坑の注入範囲

(参考文献 12)に加筆)

(c) 注入材料

注入材料は、当初は普通ポルトランドセメントによるセメントミルクが使用されたが、微細な亀

裂に対する浸透性に問題があったことと、固結に長時間を要することより見直す必要が生じた。注入材料に要する以下の要求性能を考慮した結果、最終的には高炉コロイドセメントとS1号水ガラスによるLWが標準材料と選定された。注入材料の変遷を表3.2-33に示す。

- ・ 固結後（ホモゲル）の強度が高いこと
- ・ ゲルタイムが適当に確保されること
- ・ 粘度が低いこと
- ・ 耐久性（特に耐海水性）が大きいこと
- ・ 排水処理が容易であること
- ・ 取り扱いが簡単で作業性が良いこと
- ・ 経済的であること

最終的に注入材と判断されたLWグラウトの配合と特性を表3.2-34に、水ガラスの規格を表3.2-35に、高炉コロイダルセメントの規格を表3.2-36に示す。

表 3.2-33 注入材料の変遷  
(参考文献14)をもとに作成)

区分	年 度					
	S39年～41年	41年～43年	44年～45年	46年～47年	47年～49年	49年～
セメント	普通セメント	普通セメント	コロイドセメント	普通セメント	高炉コロイドセメント	改良高炉コロイドセメント
水ガラス		3号水ガラス (モル比3.2)		⑤-1号水ガラス 75%液(モル比2.2)	SK水ガラス (モル比1.8)	⑤-1号水ガラス 75%液(モル比2.2)

表 3.2-34 LWグラウトの配合と特性  
(参考文献14)をもとに作成)

けい酸ナトリウム	セメントミルク		混合比	ゲルタイム	圧縮強度
モル比	セメント種別	水セメント比 (%)	けい酸ナトリウム セメントミルク	分-秒	$\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )
2.2	高炉コロイドセメント (高炉スラグの分量50%)	100	1.0	1-31	77.6
		150	1.0	2-27	21.6
		200	1.0	3-40	13.3

表 3.2-35 水ガラスの規格

(参考文献 14)を基に作成

項 目	⑤けい酸ソーダ 1 号
比重(15°C Be)	52.5~53.5
モル比(MR)	2.1~2.3
二酸化けい素 (SiO <sub>2</sub> )	% 31~33
酸化ナトリウム (Na <sub>2</sub> O)	% 15~16
鉄 (Fe)	% 0.02 以下
水不溶分	0.2 以下

表 3.2-36 高炉コロイドセメントの規格

(参考文献 14)を基に作成

項 目		種 別	高炉コロイドセメント
比重			3,000 以上
高炉スラグの分量(質量 %)			50~60
粉末度	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)		5,600 以上
	限界粒子径	40 μ	2 以下
	残分 (%)	15 μ	30 以下
凝 結	始 発		1.00 時間以後
	終 結		5.00 時間以内
強 度	曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	3 日	30 以上
		7 日	45 以上
		28 日	60 以上
	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	3 日	140 以上
		7 日	200 以上
		28 日	400 以上

(d) 注入圧力

段階的注水試験により臨界圧力を見極めて、臨海圧力よりやや大きめである湧水圧力 (2.4MPa~2.7MPa) の 2~3 倍程度を標準として、7.0~8.0MPa を標準の最終注入圧としている。

(v) 注入方法

注入方式は、岩盤状況によりパッカー方式 (硬岩) ないしケーシングパッカー方式 (軟岩) が標準的に用いられた。また、注入孔に長尺の注入管 (LGパイプ) を所定の位置まで挿入して注入することによって、孔奥部の注入効果を高め、注入の効率を向上させる方式も一部採用し、良い効果を上げている。

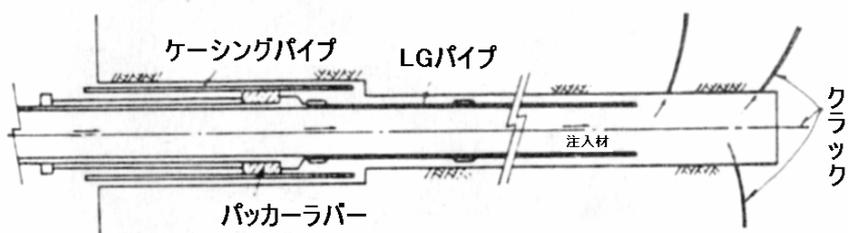


図 3.2-20 LGパイプの使用方法  
(参考文献 12)に加筆

注入順序は、注入材の対象地山への逸出防止と、削孔時の湧水量追跡による止水効果の確認が容易なことから、外側孔から内側孔への注入を基本とした。

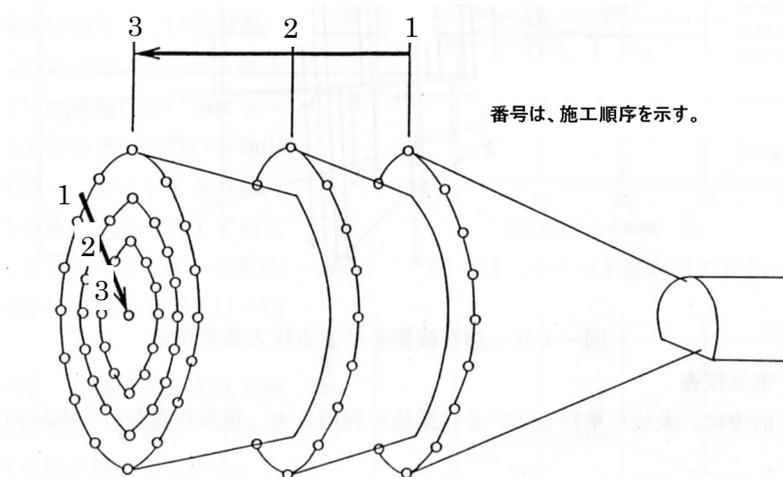


図 3.2-21 注入順序概念図  
(参考文献 12)に加筆

(vi) 注入結果

青函トンネル海底部の、全坑道（先進導坑・作業坑・本坑）掘削に要した地盤注入総量は73万 $m^3$ 、注入に要した削孔数55,000本、削孔総延長は3,390kmと報告されているから平均削孔延長61m、海底部区間（23,300m）1m当りにして31 $m^3$ の注入を要したことになる。

表 3.2-37 青函トンネルの注入施工数量実績<sup>12)</sup>

名称	工区	坑道延長 注入 (m)	施工期間	注入回数 (回)	所要日数 (日)	所要方数 (方)	削孔		湧水量累計 (l/min)	注入		
							孔数 (孔)	孔長 (m)		孔数 (孔)	注入量 (m <sup>3</sup> )	充填率 (%)
先進導坑	竜飛	10,313.8 (11,363.8)	45. 1.30 ~ 57.12.15	216	2,141	5,842	7,681	379,590	944,894	7,553	100,952	2.38
	吉岡	8,988.2 (11,012.2)	44. 7.15 ~ 57.12.10	159	1,673	4,738	4,546	346,064	319,323	4,375	78,831	2.44
作業坑	竜飛	8,821.3 (8,843.4)	46. 1.19 ~ 54. 9. 9	164	1,040	2,711	3,783	229,533	272,880	3,693	27,755	0.76
	吉岡	6,910.5 (8,966.0)	45. 7.24 ~ 55. 1.30	124	899	2,422	3,723	235,485	146,912	3,720	38,662	1.11
本坑	竜飛	13,000.0 (13,000.0)	47.10.16 ~ 58.12.17	307	4,485	11,189	17,984	1,092,498	1,023,471	17,978	178,673	1.36
	吉岡	9,308.8 (14,700.0)	51. 2.12 ~ 59. 9. 6	226	4,240	9,944	17,405	1,108,377	826,491	17,372	306,714	2.53

( )内は坑道総延長を示す。

海底部本坑の施工長当りの湧水量と注入量を見ると、湧水量は本州方第1本坑、第4~7本坑、海底中央付近、北海道方第6~7本坑に集中が見られるのに対して、注入量では海底中央部の数量が卓越している。これは中央部に出現する地質年代の若い八雲層、黒松内層が困難な施工条件下にあったことを良く示している。

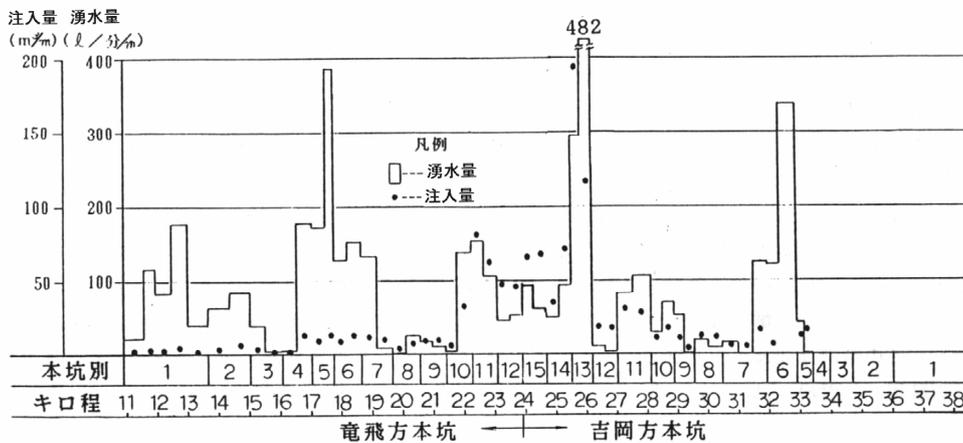


図 3.2-22 坑道1mあたり湧水量と注入量<sup>12)</sup>

注入効果について、湧水量はマスカットの公式に従うものとし、注入前の地山の透水係数および注入後の湧水量を既知量とし、注入により注入域の透水係数および湧水量がどの程度減少したかが分析されている。その結果、注入域の想定透水係数は区間によりバラツキが大きい、1/10~1/100以下に改善されている。

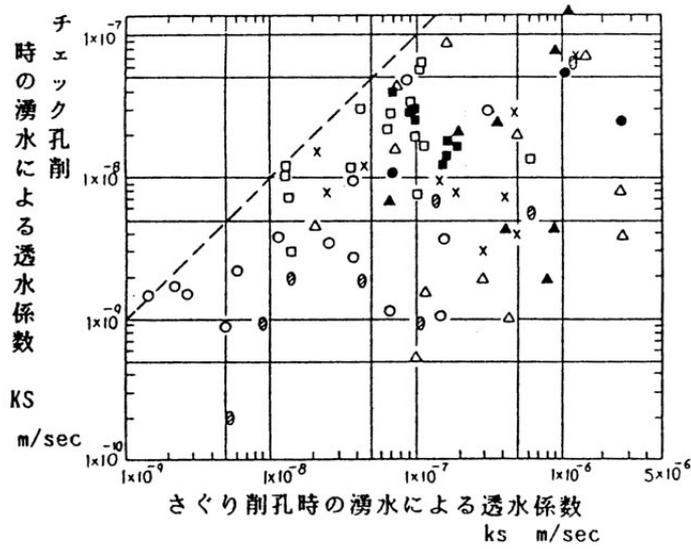


図 3.2-23 注入後と注入前透水係数<sup>12)</sup>

(vii) その他

(a) ポストグラウト

青函トンネルでは、覆工完成後にも湧水が多かった区間に対してはLWによるポストグラウトが実施された。標準工法は、湧水源に向かって最初に導水孔を削孔して水抜きを行うとともに周辺水圧を軽減したのち、導水孔内側ゾーンに注入する方法で実施された。この方法をもって40～80%の止水実績があったと報告されている。

(2) 志賀原発電取水路海底トンネル<sup>16)~19)</sup>

(i) 工事概要

北陸電力(株)志賀原発電取水路トンネルは環境保全等の観点から海底トンネル形式が採用された。この海底トンネルは、海面下の土被りが浅く（最小25m程度）、また地質は堅硬であるが節理が多く、透水性が比較的高いことから、1号取水路トンネルは地盤注入工法により透水係数を改良し発破工法により掘削された。また、2号取水路トンネルの施工については、近年の機械化施工の急速な発展および経済性の追及を背景にシールド工法の採用が検討され、施工延長が長い放水路トンネルは岩盤対応型シールド工法で、施工延長の短い取水路トンネルは1号機の施工時と同様に地盤注入工法を併用した発破工法により掘削された。



図 3.2-24 発電所レイアウト図<sup>16)</sup>

地盤注入工法が採用された1号取水放水路トンネル及び2号取水路トンネルを抜粋して、トンネル諸元の一覧を表 3.2-38に、トンネル縦断面図、断面図、地質縦断面図を図 3.2-25～図 3.2-26に示す。

表 3.2-38 志賀原発電取水路トンネルの諸元一覧

項目	内容
建設地	石川県
用途	水路
建設期間	1988-1993 (1号機)、1999-2006 (2号機)
トンネル延長	1号取水路トンネル：430m、1号放水路トンネル：750m、 2号取水路トンネル：340m (2号放水路トンネルは岩盤シールド工法を採用)
トンネル断面	27～36m <sup>2</sup>
トンネル幅	1号取水放水路 4.5m(仕上り幅) 2号取水路 8.6m(掘削幅)
土被り	25～40m(水深は最大14m)

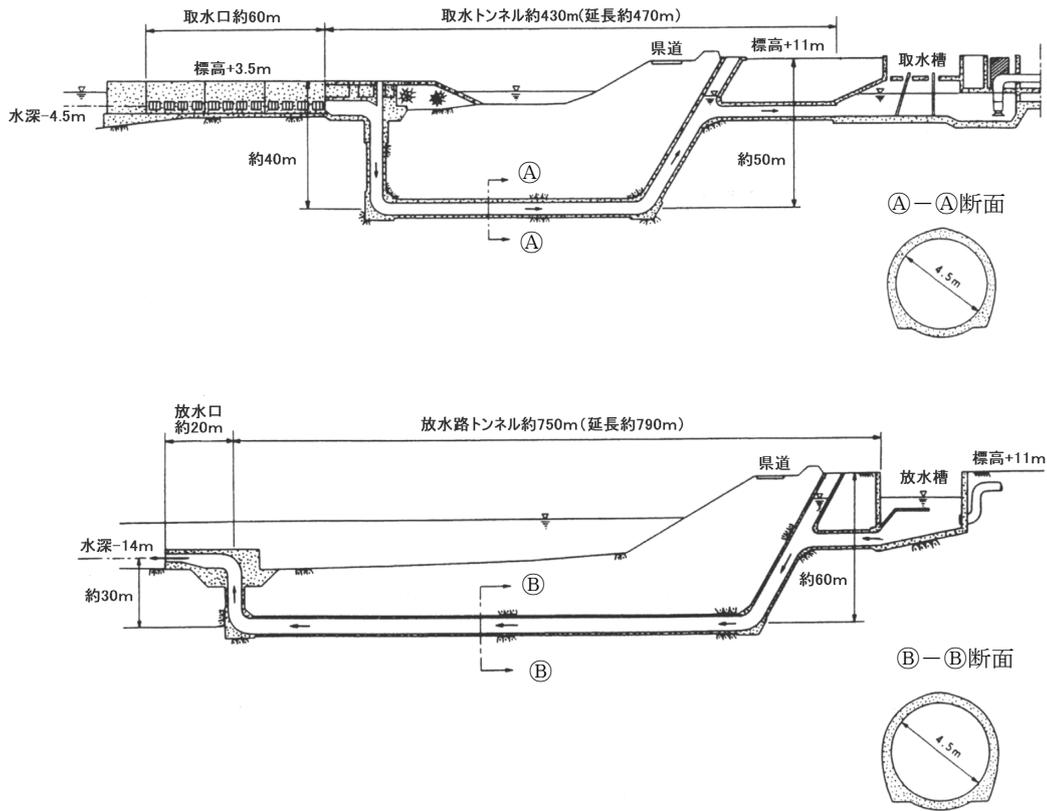


図 3.2-25 1号取放水路トンネルの縦断面図・断面図  
 (上図：取水路トンネル、下図：放水路トンネル)  
 (参考文献 17)に加筆)

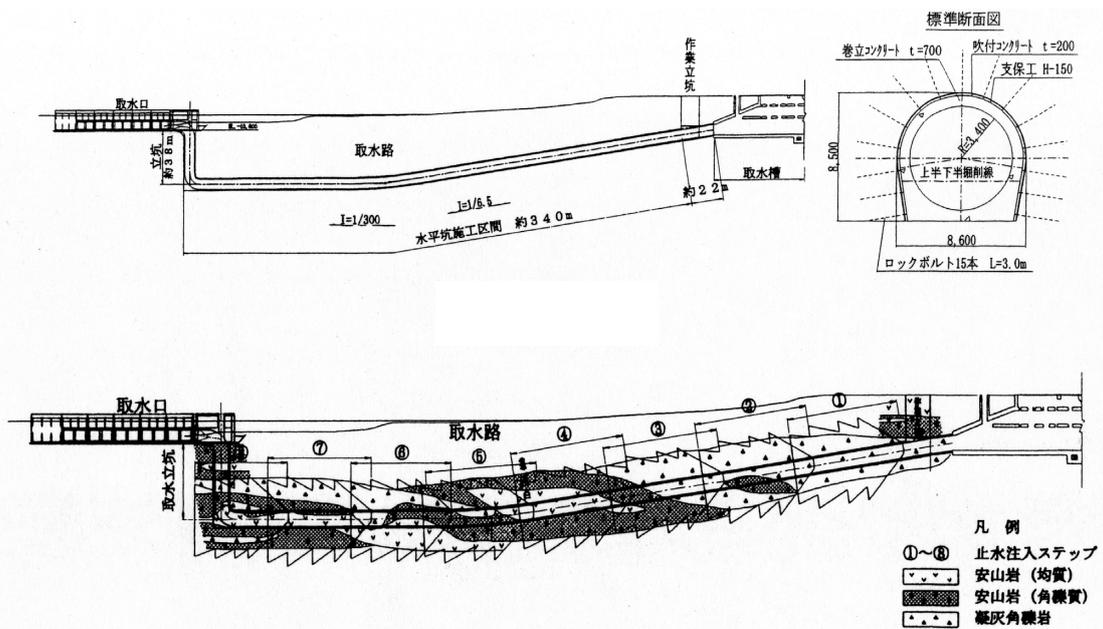


図 3.2-26 2号取水路トンネルの縦断面図・断面図(上)と地質縦断面図(下)  
 (参考文献 16)に加筆)

(ii) 地質状況

対象とする地質は、堅硬・緻密で節理のやや多い安山岩（均質）と角礫岩状で節理の少ない安山岩（角礫質）、及び安山岩の礫を含み節理が少ない凝灰角礫岩からなる。一軸圧縮強度の平均値は、安山岩（均質）が約 150N/mm<sup>2</sup>、安山岩（角礫質）が約 15N/mm<sup>2</sup>、凝灰角礫岩が約 16N/mm<sup>2</sup>であり、透水係数は 10<sup>-5</sup>~10<sup>-6</sup>m/sec のオーダーである（図 3.2-26参照）。

(iii) 改良目標

施工に支障のない程度に透水性を改良するという目的で、透水係数の改良目標は 10<sup>-7</sup>m/s 程度（3 Lu）と設定された。

(iv) 注入仕様

(a) 注入範囲と注入孔配置

注入範囲は事前に実施した注入試験の結果に基づきトンネル径の3倍程度（直径約20m）とし、注入孔間隔は先端において3m程度とされた。また1回あたりの注入長は40~55mとし、次回注入のためのカバーロックは10mとされた。注入概念図および注入パターンを図 3.2-27、図 3.2-30に示す。

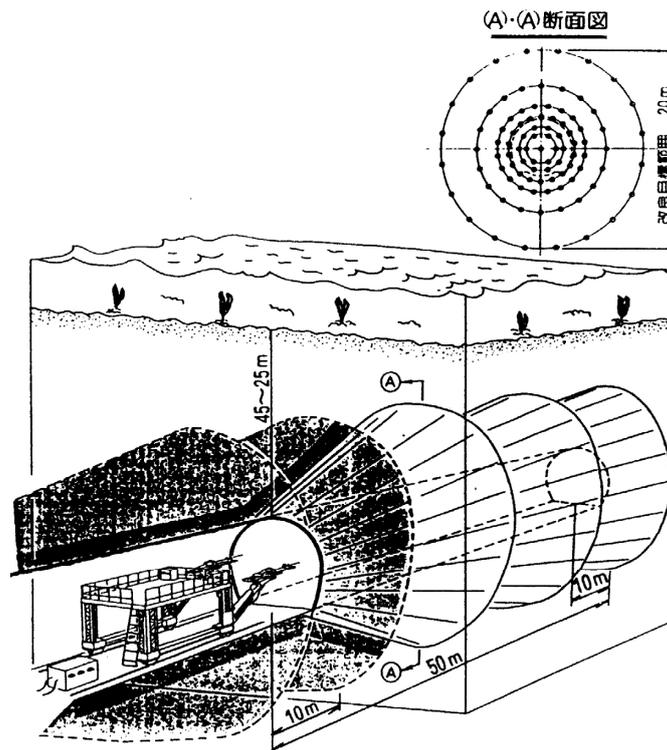


図 3.2-27 注入概念図（1号取放水路トンネル）<sup>17)</sup>

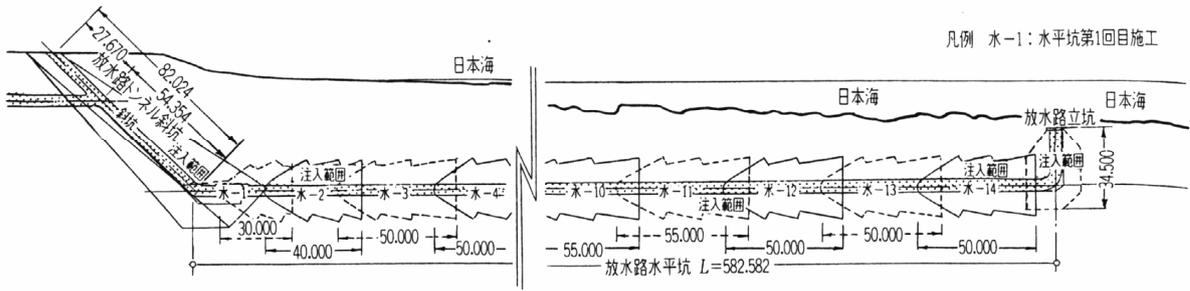


図 3.2-28 放水路注入範囲縦断面図 (1号放水路トンネル) 19)

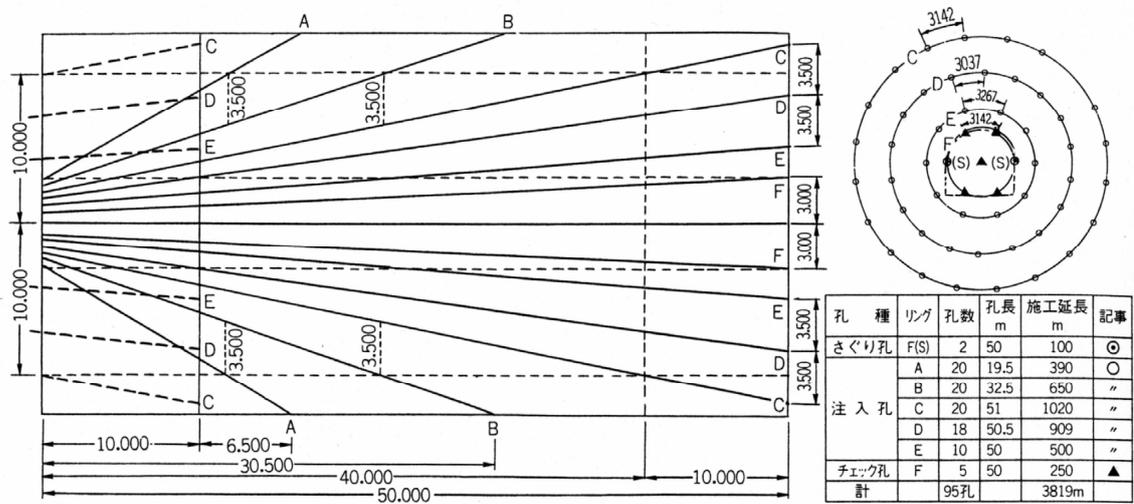


図 3.2-29 水平坑標準注入パターン図 (l=50mの場合、1号) 19)

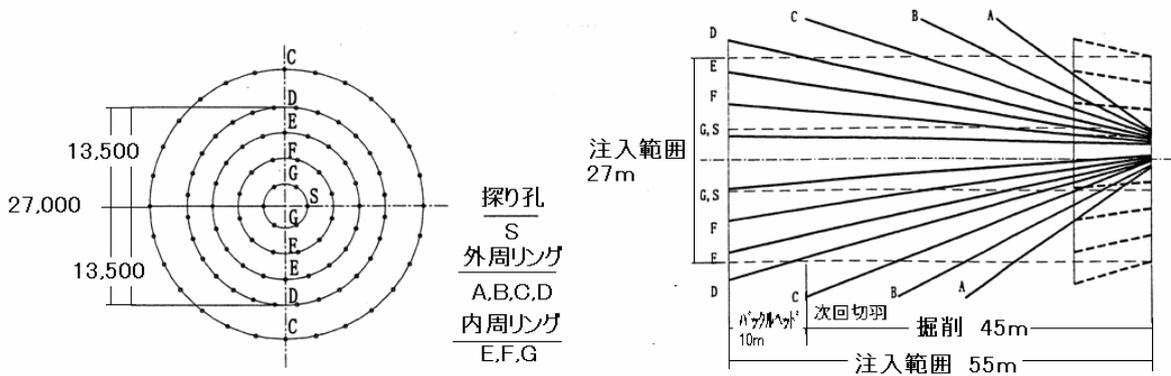


図 3.2-30 注入パターン図 (2号取水路トンネル)  
(参考文献 18)に加筆)

## (b) 注入材料

注入材料は、浸透性がよいこと、ゲルタイムの調整ができること、必要な強度を有すること、耐久性があること、作業性がよいこと等を考慮して、青函トンネル工事で開発された高炉コロイドセメントとS-1号水ガラスを用いたLWが用いられた。配合は(LW(セメントミルク w/c=300、200、150、100%)で)湧水量及び注入量に応じて濃度を変更していった。

表 3.2-39 LWの標準配合<sup>17)</sup>

配合 W/C	セメントミルク		水ガラス75%溶液		ゲルタイム 標準値 (20℃)
	セメント	水	水が100%	水	
300%	150.1 kg	450.3 kg	592.5 kg	125.0 kg	6' 00"
200%	214.5 kg	429.0 kg	592.5 kg	125.0 kg	4' 05"
150%	273.1 kg	409.6 kg	592.5 kg	125.0 kg	2' 45"
100%	375.6 kg	375.6 kg	592.5 kg	125.0 kg	1' 45"

## (c) 注入圧力

注入圧の上限値は静水圧の3倍程度で岩盤の限界圧力を若干上回る圧力とされた。注入試験より岩盤の限界圧力は2.5MPaであったため最大注入圧力3MPaが基本とされた。

## (v) 注入方法

注入は外側の孔から内側の孔へ順次施工し、所定の注入が完了した後、チェック孔における透水試験(湧水量およびブルジオン値)により、注入効果を確認した。透水係数が $10^{-7}$ m/sオーダーであれば注入完了とするが、それより大きい場合には追加孔の施工、注入が実施された。注入フローチャートを図3.2-31に示す。

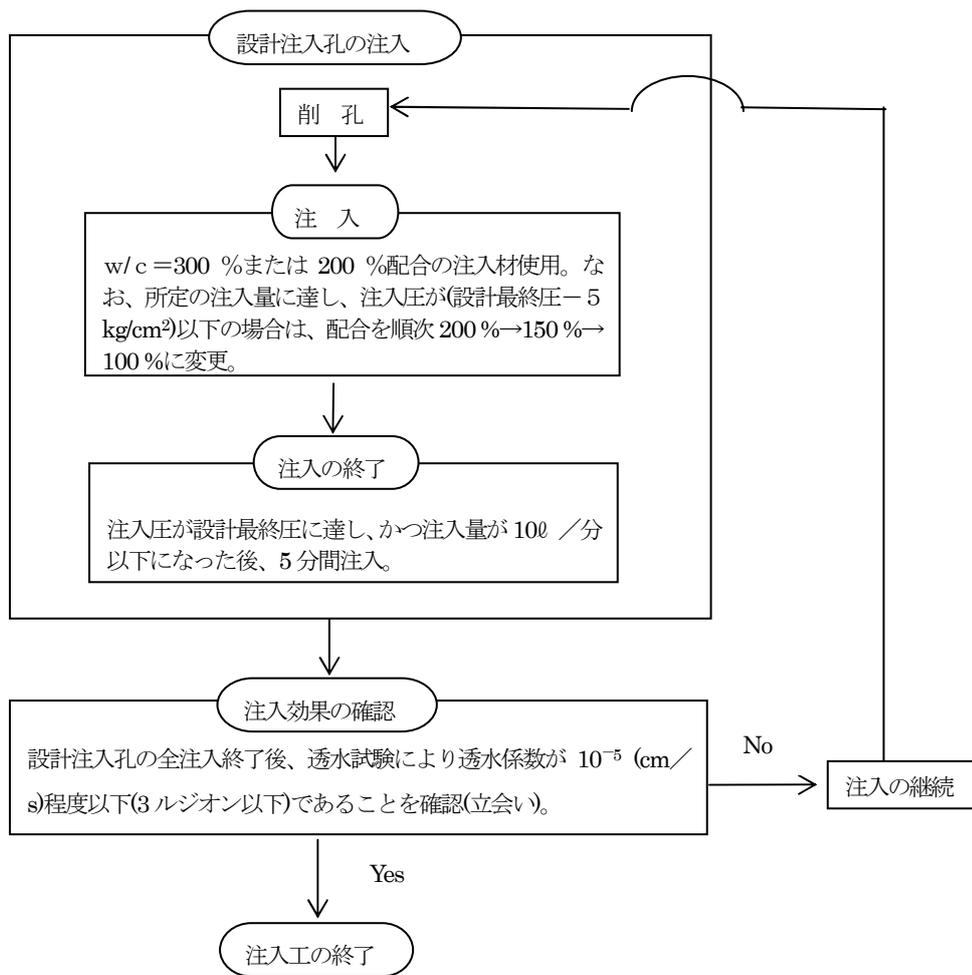


図 3.2-31 注入フローチャート  
(参考文献 17)を基に作成)

(vi) 注入結果

水平部の注入実績の総括を表 3.2-40に、斜坑部の実績を表 3.2-41に示す。注入後の地盤の透水係数は目標の  $10^{-7} \text{m/s}$  オーダーを達成されており、トンネル 1 m 当りの湧水量は 1.1~1.7L/分/mとなっている。

表 3.2-40 注入結果（水平部）

（参考文献 18）を基に作成

	放水路水平坑 1 号機	取水路水平坑 1 号機	取水路水平坑 2 号機
掘削径 (m)	5.9	6.1	8.6
注入範囲径 (m)	20.0	20.0	27.0
注入延長 (m)	695	380	453
ブロック数	14	9	8
削孔数 (孔)	1337	856	1402
総削孔長 (m)	54,485	28,631	58,641
注入量 (m <sup>3</sup> )	4,976	2,728	6,061
平均注入量 (L/m)	91	95	103
注入率 (%)	2.8	3.1	3.1
平均湧水量 (L/分/m)	1.1	1.3	1.7

表 3.2-41 注入結果（1号取放水路斜坑部）<sup>17)</sup>

	取水路斜坑				放水路斜坑			
	第1ステージ (18m)	第2ステージ (21m)	第3ステージ (23m)	全体	第1ステージ (26m)	第2ステージ (26m)	第3ステージ (28m)	全体
注入圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	10~15	15~20	20~25	—	10~15	15~20	20~25	—
透水係数 (cm/s)	$6.4 \times 10^{-6}$	$4.4 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-5}$	$2.6 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-5}$	$0.6 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-5}$
改良対象体積 (m <sup>3</sup> )	$10.7 \times 10^3$	$10.6 \times 10^3$	$6.7 \times 10^3$	$28.0 \times 10^3$	$10.7 \times 10^3$	$12.6 \times 10^3$	$8.0 \times 10^3$	$31.3 \times 10^3$
LW注入量 (m <sup>3</sup> )	142	199	164	505	160	183	165	508
注入率 (%)	1.3	1.9	2.4	1.8	1.5	1.4	2.1	1.6

(3) 塩嶺トンネル<sup>20,21)</sup>

(i) 工事概要

塩嶺トンネルは、長野県の岡谷～塩尻間を別線で短絡する複線路線工事に伴って施工された延長5,994mのトンネルである。岡谷～塩尻間の鉄道工事全体は、5工区に分割されており、塩嶺トンネル工事は岡谷方を第2工区(2,860m)、塩尻方を第3工区(3,134m)としている。トンネル諸元を表 3.2-42に示す。

塩尻方の第3工区では、多量の湧水のため工事は難航し、塩嶺累層(凝灰角礫岩)に対しては湧水対策のために、水抜きボーリング、水抜き迂回坑の掘削や薬液注入工を実施しているが、最大50t/分にも及ぶ大量湧水のため地上部に減濁水問題が生じている(図 3.2-32参照)。

また、岡谷方の第2工区でも塩尻市勝弦の斜坑より掘削を開始したが、泥岩特有の強膨張性地山による急激な膨張現象に見まわれ、工事は非常に難航した。さらに、塩嶺累層が出現している区間に対しては湧水防止のため薬液注入工を実施している。

表 3.2-42 塩嶺トンネルの諸元一覧

項目	内容
建設地	長野県
用途	鉄道
建設期間	1974-1982
トンネル延長	5.994km
トンネル断面	約86m <sup>2</sup>
トンネル幅	約8.7m
土被り	～250m

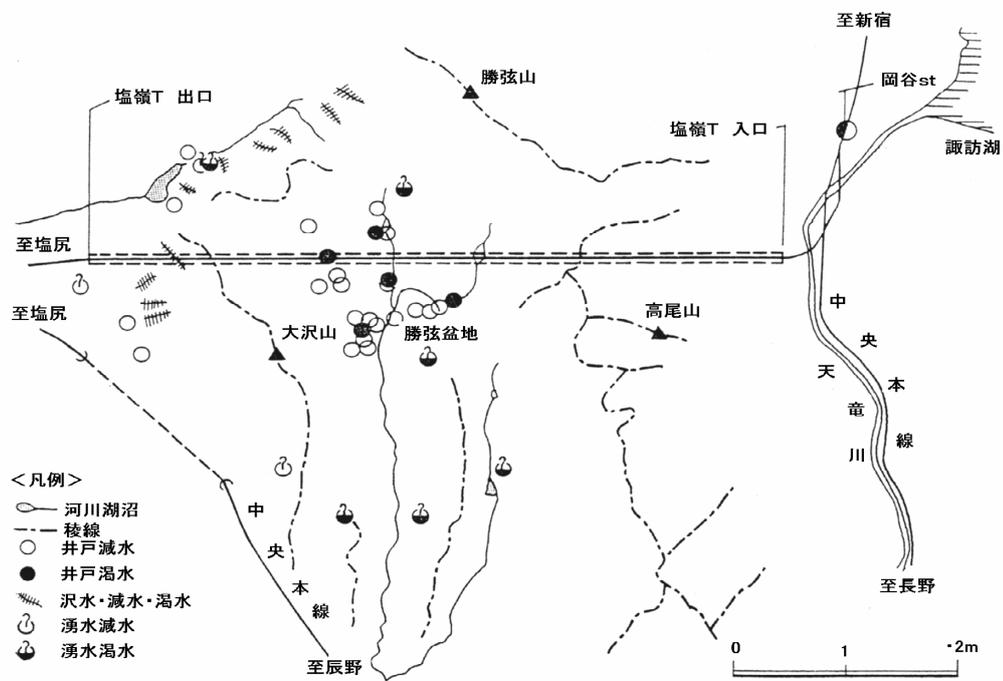


図 3.2-32 減濁水発生箇所図

(参考文献21)に加筆)

(ii) 地質状況

当該地区は、フォッサマグナ西縁（糸魚川～静岡線）と中央構造線が会合する地域で擾乱帯にあっており、地質構造は複雑で地層は断層や褶曲で激しく乱されている。

地質については、主として第三紀末あるいはそれ以後の新期の火山噴出物および堆積層である安山岩・凝灰角礫岩（塩嶺累層）からなり、多量の被圧水を有している。北西部には一部砂質粘板岩・砂岩よりなる古生層が存在し、岡谷方では泥岩層が伏在している。これらの古生層や泥岩層は、塩嶺累層の基盤層を構成するものと考えられる（図 3.2-33参照）。泥岩層は、含水比が最大 19.4%の超軟質泥岩であり、かなりもまれて破碎している。

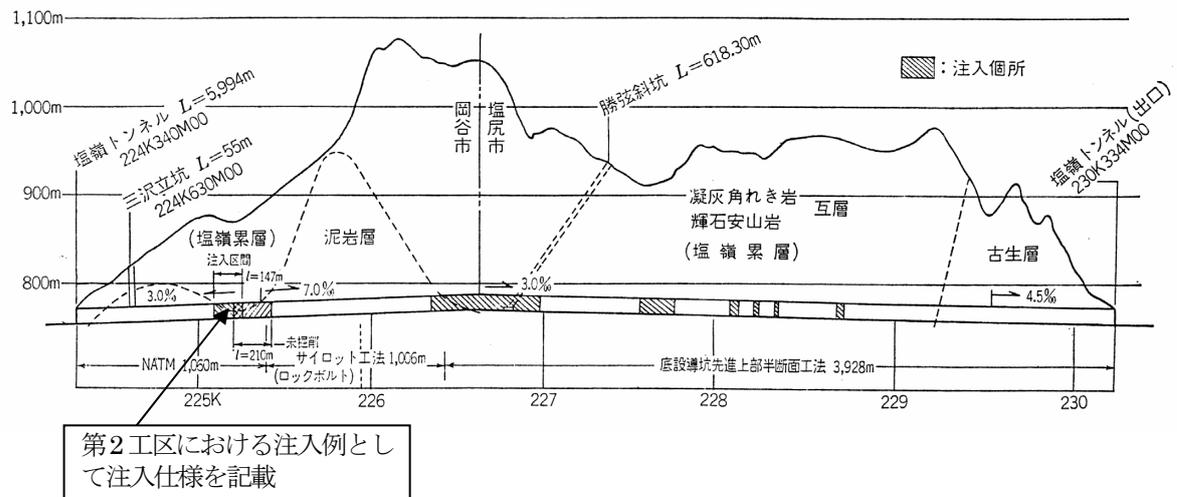


図 3.2-33 地質縦断面図

(参考文献 20)に加筆)

(iii) グラウト注入

図 3.2-33中の斜線で示す範囲で薬液注入が行われている。以下に、第2工区と第3工区に分けてその概要を示す。

(a) 第2工区における注入工

周辺地表の湧水防止と突発湧水に伴う地山崩壊の防止を目的として注入工が実施されている。以下に 147m区間（図 3.2-33参照）における注入工について示す。

- ◆ 注入材料：LW による脈状注入に加えてアロンによる浸透注入を実施している（表 3.2-43参照）。

表 3.2-43 注入材料の配合<sup>20)</sup>

LW配合 (1,000 l 当たり)							アロンSR配合 (15°C) (1,000 l 当たり)					
品名	単位	50%	75%	100%	150%	200%	品名	単位	30秒	1分	3分	5分
A 珪酸ソーダー	l	250	250	250	250	250	A 珪酸ソーダー	l	220	250	250	250
液 水	l	250	250	250	250	250	液 水	l	250	250	250	250
B セメント	kg	611	508	380	275	217	B 硬化剤	kg	30	30	30	30
液 水	l	306	339	380	414	435	液 急結剤	kg	36.8	338	27.0	24.5
							液 水	l	436.2	438.5	443.2	445.0

- ◆ 注入範囲と注入孔配置：注入範囲はトンネル径の2倍程度（直径約20m）とし、注入孔間隔は先端において3m程度とされた。注入長は42～50mとし、次回注入のためのカバーロックは15mとされた。注入パターンは、外周（R=10m）、中周（R=7m）、内周（R=4m）からなる3段の傘状を基本とする（図 3.2-34参照）。
- ◆ 注入圧力：最終注入圧力は、静水圧0.7MPaの4倍以上の3MPaとした。

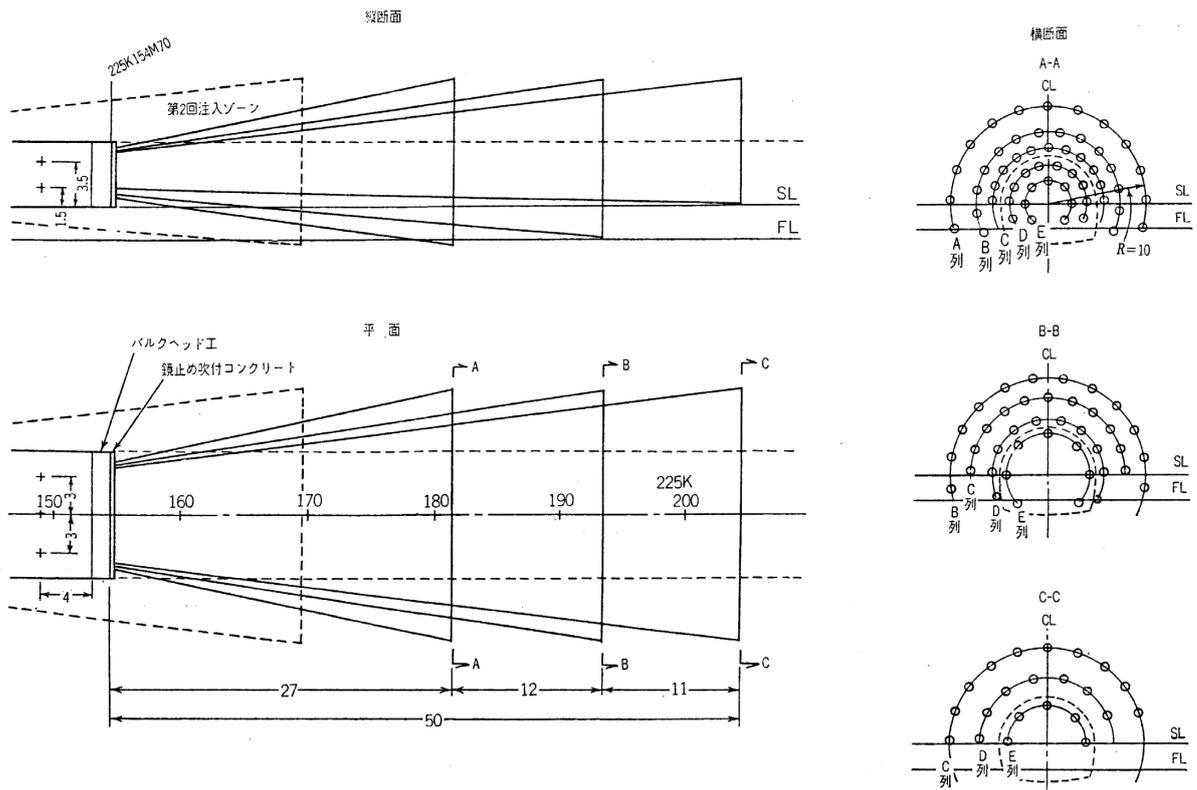


図 3.2-34 注入パターン図<sup>20)</sup>

- ◆ 注入結果：注入実績を表 3.2-44に示す。完全な止水は達成出来ておらず、掘削時に 100～150L/分の湧水が見られたと報告されている。

表 3.2-44 注入実績<sup>20)</sup>

	孔数	穿孔長 (m)	注入量 (m <sup>3</sup> )		
			LW	アロンS	計
第1回	24	877	37	33	70
第2回	49	2,816	135	609	744
第3回	60	2,462	268	481	749

(b) 第3工区における注入工<sup>21)</sup>

塩嶺累層において大量湧水が発生しており、特に坑口から1,534m進んだ段階で坑口総排水量が約20tf分に達し、掘削不能となり、先進ボーリングによる地質調査の結果、水抜き迂回坑を先進させることとしている。その後も湧水量は増大し、平均30数tfの湧水が発生しており、特に安山岩の亀裂からの湧水が多い。一方、凝灰角礫岩からの湧水量は相対的には少ないが、固結度の低いところでは土砂流出に伴う切羽の崩壊が発生したため、水抜きボーリングに加えて薬液注入による地盤改良を実施している。以下に薬液注入の概要を示す。

- 注入材料：LW-1
- 注入範囲と注入孔配置：注入範囲は掘削幅の3倍を原則とし、注入延長は55m（カバーロック5m）とした（図3.2-35参照）。
- 注入圧力：最大4MPaに抑えている。

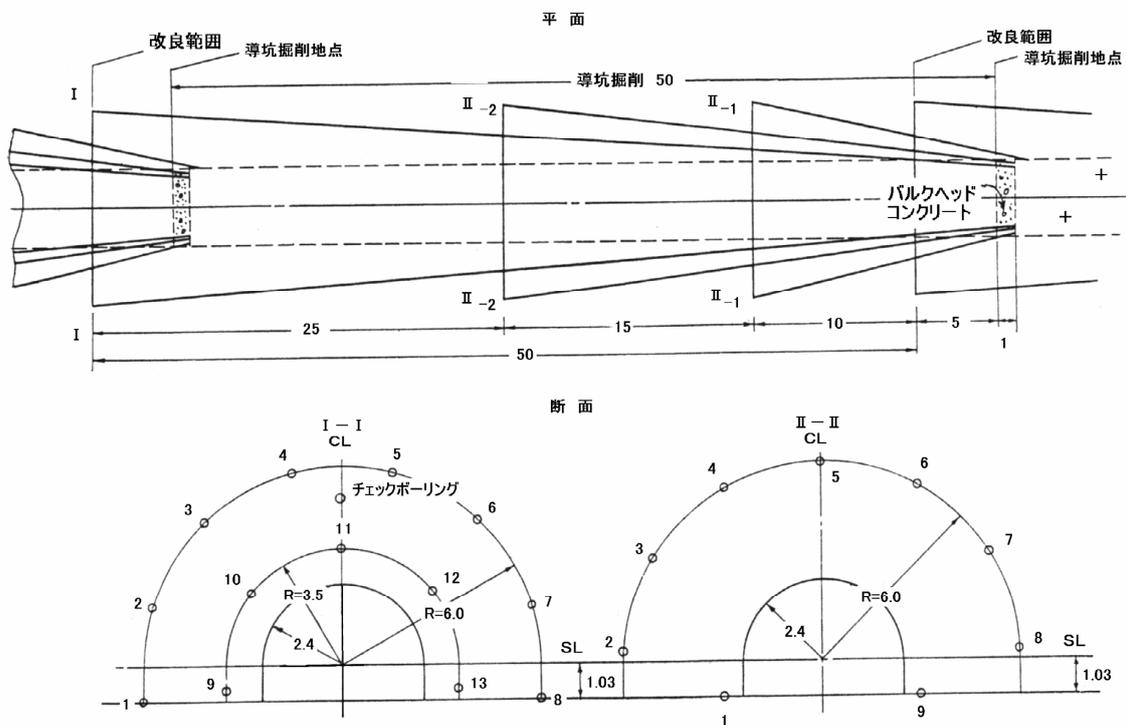


図 3.2-35 薬液注入の標準注入孔配置図<sup>21)</sup>

(4) 吉田導水路トンネル<sup>22)</sup>

## (i) 工事概要

吉田導水路は愛媛県肱川（ひじかわ）上流の野村ダム（洪水調節と利水補給（かんがい用水と水道用水）のための多目的ダム）から南北分水工まで6,348mを導水する主要幹線用水路である。トンネル勾配は1/800であり、約4m<sup>3</sup>/sの水を流下する小断面トンネルである。

宇和町明間の観音水（湧水）は名水百選にも選ばれ、地域の信仰地としてあがめられている水量豊富、水質清冷な水であり、トンネルの掘削に際しては観音水と他の湧水に影響を及ぼさないことが要求された。

施工は、上流部2,720mと下流部3,628mの2工区に分かれて1976年に掘削が開始され、上流部は1980年に無事完成したが、下流部は坑口から1,800mの仏像構造線通過に10ヶ月、2,600m付近の大規模な粘土層（約80m）の掘削に20ヶ月、3,000m付近の凝灰岩およびチャート層からなる破碎帯約25mの掘進に8ヶ月を要する大工事となり、9年6ヶ月をかけて1985年に完成した。特に、観音水の下部を通過する3,000m付近の破碎帯では止水グラウト工を3回も実施する難工事となった。

なお、トンネル断面は半径1.0mの幌型断面を基本とするが、下流側では高压の地下水を止水するために半径1.3mの円形断面に変更している。

トンネル諸元を表3.2-45に示す。

表 3.2-45 吉田導水路トンネルの諸元一覧

項目	内容
建設地	愛媛県
用途	水路
建設期間	1976 - 1985
トンネル延長	6.348km（上流部：2.72km、下流部：3.628km）
トンネル断面	約12m <sup>2</sup>
トンネル幅	2.0m（幌型断面区間）、2.6m（円形断面区間）
土被り	100～500m（湧水圧は最大2MPa）

## (ii) 地質状況（図3.2-36参照）

吉田導水路は四国西南部の中央構造線の南側に位置している。この東西方向に仏像構造線が走っており、仏像構造線の北側には褶曲運動が繰り返され複雑な構造を呈する三宝山帯板ヶ谷層（チャート、砂岩、粘板岩、石灰岩、玄武岩などから構成）があり、南側には四万十帯大浦層（砂岩、頁岩、礫岩などから構成）が分布している。

板ヶ谷層の石灰岩帯は、カルスト地形が見られ、一部に大きな隙間が広がっている。砂岩、粘板岩、チャートは海拔350mより低い場所に分布して石灰岩の足元を押さえるような形で横たわっている。チャートの風化岩は亀裂が多く地下水をかなり通すが、粘板岩は水を通しにくい。このため、石灰岩の地下谷を流れ込んでいる地下水は水を通しにくい地層に止められ、地表に湧き出す。

上述の観音水は石灰岩の洞窟に流れ込んだ水が地表に湧出したものである。

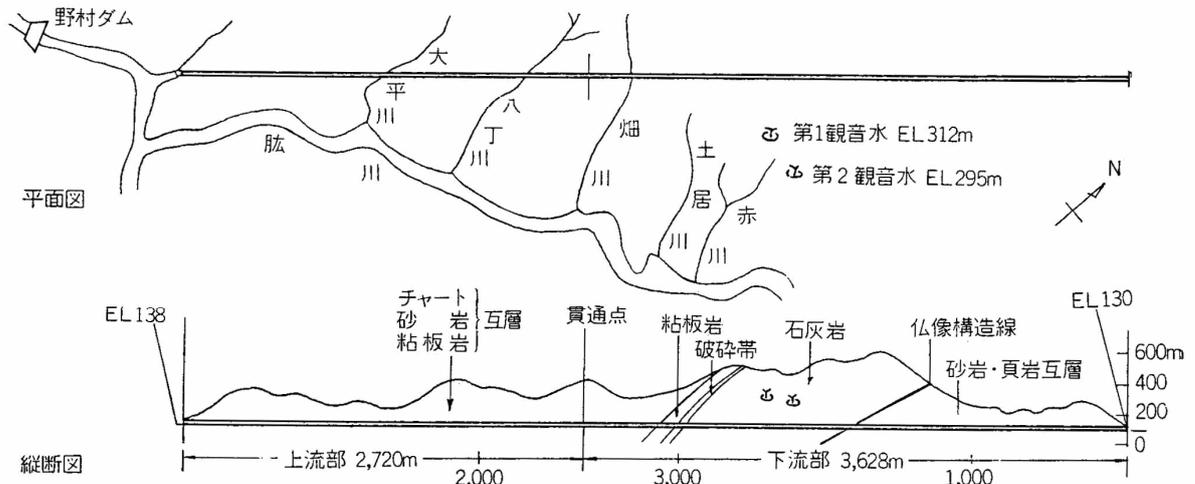


図 3.2-36 地質概要図<sup>22)</sup>

(iii) グラウト注入

下流部の坑口から 3,000m 付近における凝灰岩混じり粘土の破碎帯区間 (22.7m) において実施した 3 回の止水グラウト工の概要を以下に示す。

(a) 改良目標

観音水や他の湧水にトンネル掘削の影響が及ばないように、トンネル内への湧水を抑制することが目標とされた。グラウト効果の判定基準は、注入後に実施するチェック孔の湧水量が 1 箇所当たり 10L/min 以下、または 1 本 (40m) あたり 30L/分以下を目標とした。

(b) 注入仕様

- 第 1 回目のグラウト注入
  - ・ 注入範囲と注入孔配置：半径 8m (掘削半径 1.82m の 4 倍) とし、注入孔数は注入孔間隔が先端で 3m となるように 1 円周で 17 孔あるいは 9 孔に設定された。削孔長は、ジャンボドリルのドリフター (95kg 級、φ55mm) の穿孔能力より最大 40m に設定している (図 3.2-37 参照)。
  - ・ 注入材料：セメントミルクを主体に、必要に応じて LW を使用している。セメントは普通ポルトランドセメントを使用して水セメント比は 8:1、4:1、2:1、1:1 としている。但し、十分な止水効果が得られなかったため、途中から超微粒子セメントや薬液を使用している。最終的には、セメントミルクを 100,000L、薬液を 31,000L 注入している。
  - ・ 注入圧力：最大注入圧力は湧水圧 (約 2MPa) の 2 倍以上とし、5MPa に設定している。
  - ・ 注入方法：グラウト注入は外側断面の孔から内側断面の孔へ移行。1 断面の施工順序は奇数孔からはじめに行い、続いて偶数孔を行った。グラウト孔の穿孔中にもグラウト効果のチェ

ックを行い、最終的には6断面終了後にチェックボーリングを入れ、グラウト効果のチェックを実施している。

- ・ グラウト注入孔の総延長：3,200m
- ・ 工期：75日間

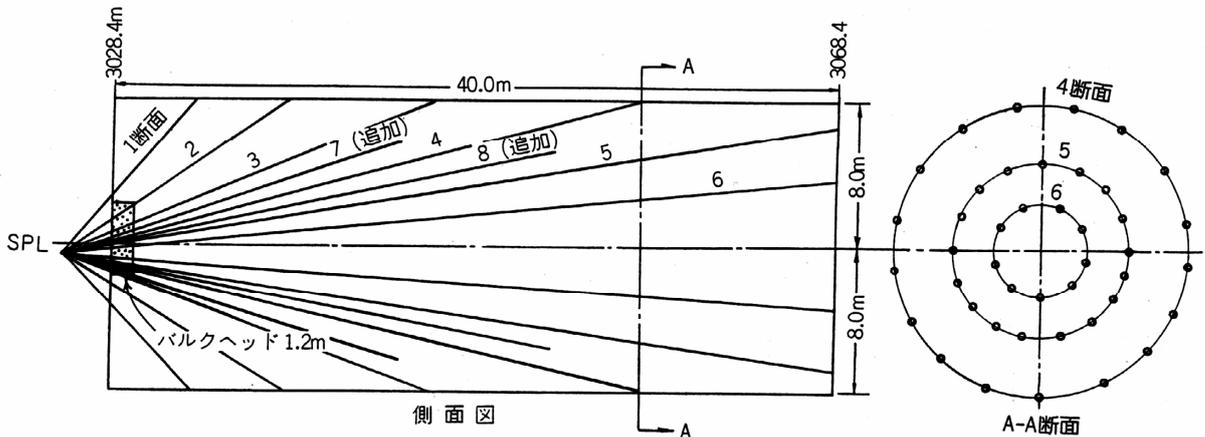


図 3.2-37 第1回目注入の注入パターン<sup>22)</sup>

- 第2回目のグラウト注入
  - ・ 注入範囲と注入孔配置：第1回目の注入後にゆるみを抑えるために手掘り（ピックハンマー）で掘削を開始したが、1.8m掘削した段階で切羽付近の側壁の土砂崩壊や200L/分の湧水が発生したため、切羽の左上方付近のグラウトが不十分であったと判断して図 3.2-38に示す箇所にて再度グラウト注入を実施している。
  - ・ 注入材料：セメントミルク（36,000L）、薬液（23,000L）
  - ・ グラウト注入孔の総延長：220m
  - ・ 工期：9日間

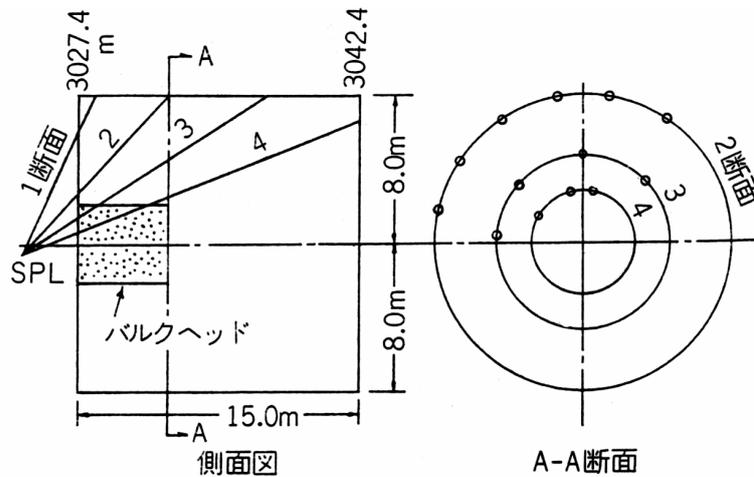


図 3.2-38 第2回目注入の注入パターン<sup>22)</sup>

- 第3回目のグラウト注入
  - ・ 注入範囲と注入孔配置：手掘りで3.5m掘削した段階で湧水量が300L/分に増加し、切羽が全面崩壊したため、3回目のグラウト注入を実施している。改良半径は、第2回注入時の1.5倍である12m（ただし、底部は前回と同様に半径8m）としている。注入孔間隔は先端で3mだが、半径8m地点では2.0mであり、第2回注入時の1.5倍の孔密度としている。注入段数は当初6断面（図3.2-39）としていたが、最終的には8断面となっている。
  - ・ 注入圧力：最大注入圧力は7MPaに設定している。
  - ・ 注入ステージ長：5m（第2回目までは20m）
  - ・ 注入材料：セメントミルク（75,000L）、薬液（260,000L）
  - ・ グラウト注入孔の総延長：2,200m
  - ・ 工期：50日間

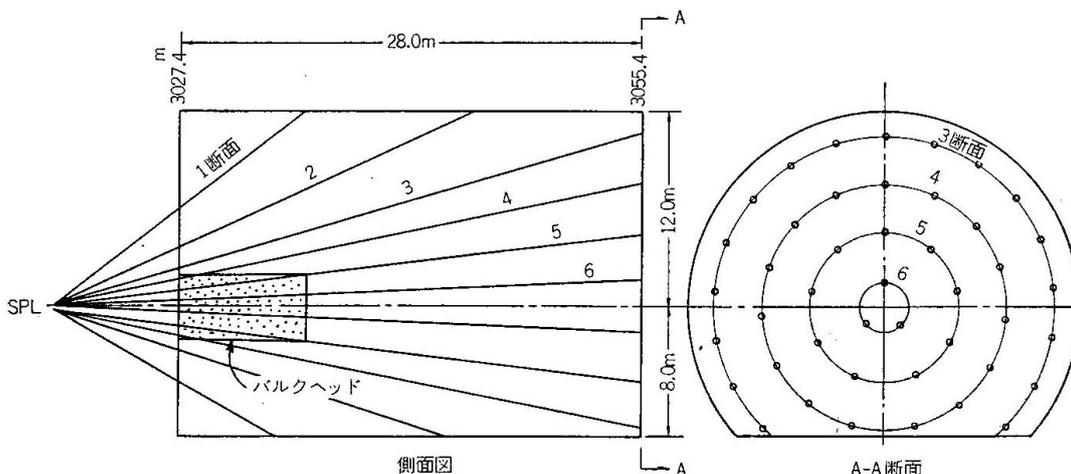


図 3.2-39 第3回目注入の注入パターン図<sup>22)</sup>

(iv) 考察

22.7m間の断層破碎帯を掘削するのに、3回も止水グラウトを実施する結果となった原因は以下の3点に要約される。

- ・ 掘削後の時間経過によりゆるみが生じたこと
- ・ 第1回目、第2回目のグラウト注入材料が適切でなかったこと（セメントミルクを主体として若干のLWを使用したが、普通のLWでは浸透に問題があるうえ強度が不足した）
- ・ 粘土層では、注入孔密度を密にし、注入ステージ長を短くする必要があったこと

(5) 串木野石油備蓄基地<sup>23),24)</sup>

## (i) 工事概要

地下石油備蓄タンクでは周辺の水圧で石油を封じ込める水封式が採用されている。水封式とは、岩盤中に空洞を掘削し地下水の水圧で、空洞内の油やガスを漏洩させることなく封じ込めるものである。このため、タンク周辺の地下水位は常に一定に保たれており、タンク内に湧出する余分な地下水はポンプにより揚水されている。

このような地下石油備蓄タンクが、岩手県久慈基地、愛媛県菊間基地、鹿児島県串木野基地にあり、このうち久慈基地と串木野基地において大規模はグラウトが実施されている。特に、串木野基地では、地下水位の低下防止、タンク内への湧水量の低減を目的に、タンク本体掘削時にセメントによるプレグラウト、ポストグラウトが実施されている上に、施工中にタンク底部岩盤に高透水層の存在が明らかとなり、大量の湧水が発生したため、セメント注入による長尺グラウト（深度10～50m）等が大規模に実施されている。

そこで、串木野基地における主なグラウト工の概要を以下に示す。

なお、トンネル諸元を表 3.2-46に、また、基地概要図を図 3.2-40に示す。

表 3.2-46 串木野石油備蓄基地のトンネル諸元一覧

項目	内容
建設地	鹿児島県
用途	石油備蓄
建設期間	1987-1991 (岩盤タンク工事期間)
トンネル延長	5.550km (L=555m×10基)
トンネル断面	約 329m <sup>2</sup>
トンネル幅	18m (高さ: 22m)
土被り	60～120m

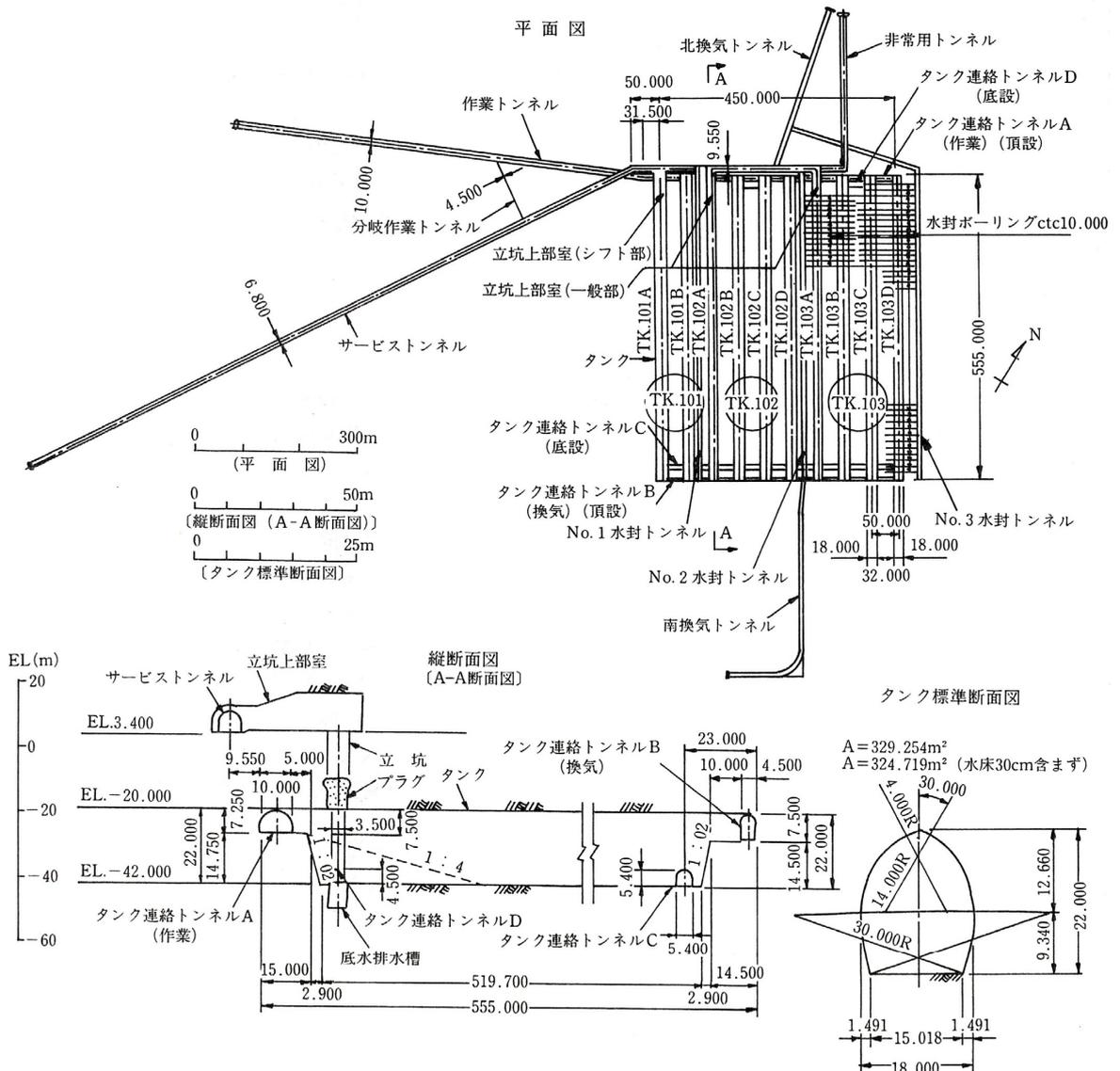


図 3.2.40 串木野石油備蓄基地概要図<sup>23)</sup>

(ii) 地質状況

地質は古期安山岩類の自破砕状安山岩及び礫岩からなり、一軸圧縮強度は平均 50MPa 程度と中硬岩に属する岩盤である。当サイトではF1～F13の13条の断層が確認されており、F2～F8断層は破砕幅10cm～130cm程度であったが、特にタンク底部に位置するF10、F11、F13断層は、破砕幅が10数mにおよび、複雑にからみあって高透水ゾーンを形成していた(図3.2-41参照)。

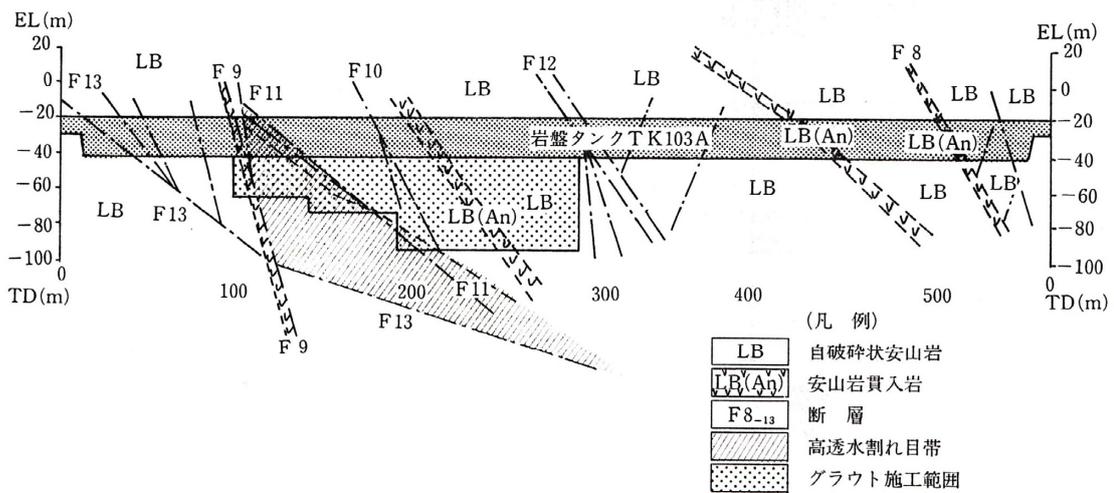


図 3.2-41 TK103A 地質縦断面図<sup>23)</sup>

(iii) グラウト工

串木野基地でのグラウトは、地下水位を確保し、湧水量を設計湧水量以下に抑制するために、5～数10ルジオンの亀裂性岩盤を1～4ルジオン程度に改良することを目標として以下のグラウトを実施している。

- ・ アーチプレグラウト：アーチ部切羽から先進ボーリングを削孔し、岩盤の湧水状況に応じてプレグラウトを実施
- ・ ベンチプレグラウト：底盤より下部に向けて先進ボーリングを削孔し、岩盤の湧水状況に応じてプレグラウトを実施
- ・ ポストグラウト：ベンチ掘削後に湧水区間にポストグラウトを実施
- アーチプレグラウト：注入パターンは2段のカサ状に注入孔を配置し、タンクの外周5mを改良範囲とし、注入長は25m、キャップロックは5mとして実施された(図 3.2-42)。

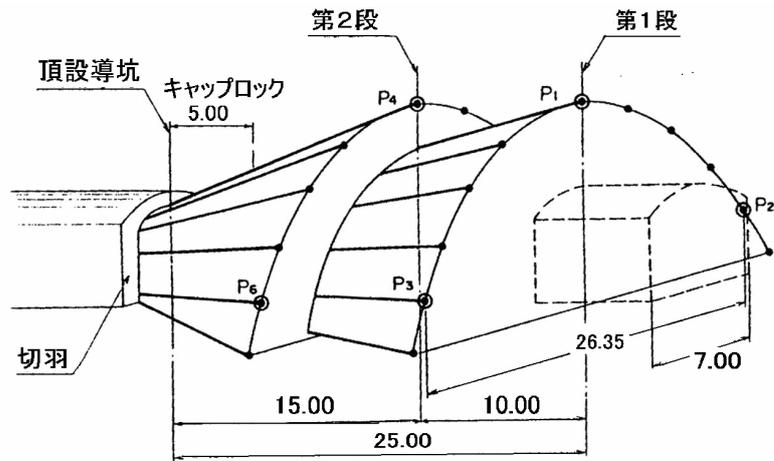


図 3.2-42 アーチ部プレグラウト施工範囲図  
(参考文献 24)に加筆

- ベンチプレグラウト：岩盤タンク掘削時に発見された断層や湧水帯を対象として実施されている。改良範囲は、タンク外周の5mであり、注入孔は孔間隔が先端で3.5m程度になるように配置された（図 3.2-43参照）。

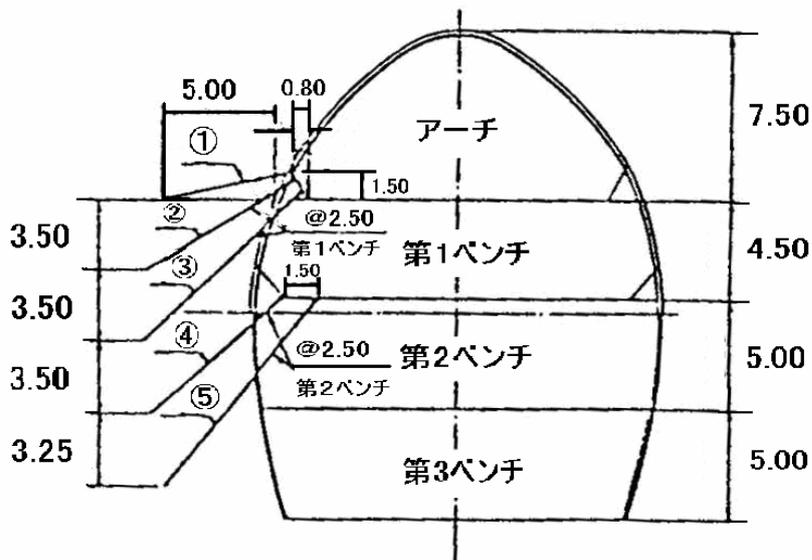


図 3.2-43 ベンチプレグラウト施工範囲図  
(参考文献 24)に加筆

- ポストグラウト：アーチ部及びベンチ部掘削後に確認された湧水箇所に対して施工されている。削孔長は3mであり、孔ピッチは1.5mとして実施された（図 3.2-44参照）。

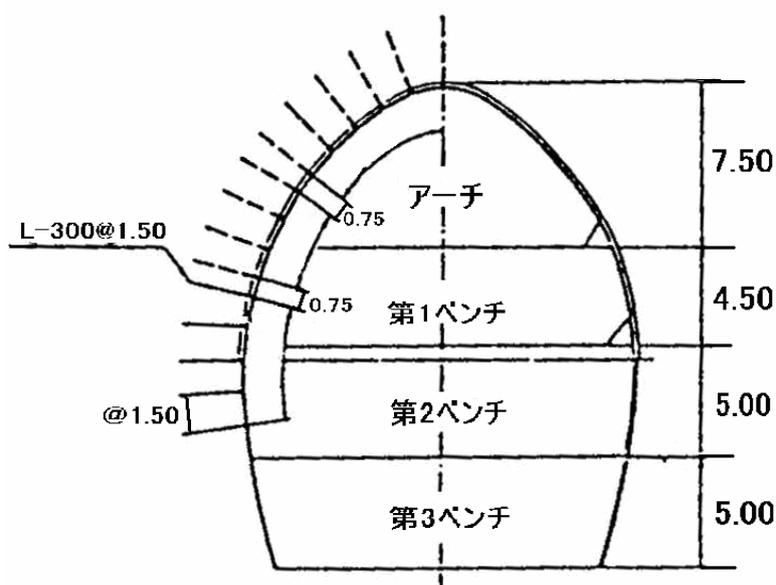


図 3.2-44 ポストグラウト施工範囲図  
(参考文献 24)に加筆)

#### (iv) 水封対策としてのグラウト工

施工途中に TK103 ユニット (図 3.2-40 参照) 下部で高透水ゾーンが発見されたため、岩盤タンク内の湧水量を設計湧水量以下に低減するために、以下の 3 種類のグラウトが追加実施された。ここでは、下記のうちのセメントグラウトの概要を以下に示す。

- ◆ セメントグラウト
- ◆ 粘土系グラウト
- 注入材料：高炉セメント B 種を基本としているが、一部ブリーディングの低減を目的として少量の粘土を添加している。また、3、4 次孔の一部において超微粒子セメントを使用している。
- 注入範囲と注入孔配置：注入範囲は、平均 30m であり、注入孔配置は、1、2 次孔が 3m の格子配列をとり、3 次孔が 1、2 次孔の中央に配置され、4 次孔で 1.5m ピッチとなる中央内挿法による。注入孔の配置を図 3.2-45 に示す。

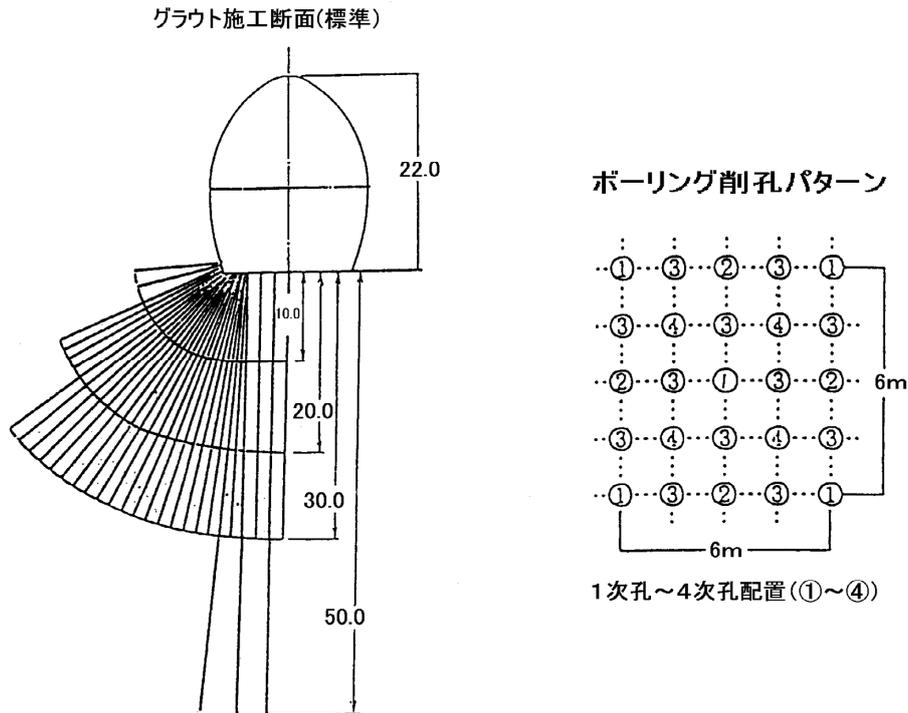


図 3.2-45 長尺グラウト施工範囲図  
(参考文献 24)に加筆)

● 施工方法

ロータリーパーカッションドリルにより注入孔を削孔し、バックステップステージ工法（5m／ステージ）により水押し試験を実施している。水押し試験結果より、グラウトの初期配合を選定し、パッカー方式によるバックステップステージ工法（5m／ステージ）によりグラウトが実施されている。グラウト終了は、注入圧力が規定圧力に到達後、流量が1L／分以下で30分間のダメ押し注入を実施している。

● 注入結果

長尺グラウトの注入実績を表 3.2-47に示す。また、注入回数と湧水量の低減率の関係を図 3.2-46に示す。

表 3.2-47 セメントグラウト実績<sup>24)</sup>

施 工 場 所	単 位 注 入 セ メ ン ト K g / m							ボーリング長 (m)	セメント量 (t)
	1次	2次	3次	4次	追加	平均(注1)	平均(全井)		
TK-103A	211	127	36	25	-	118	42	45,755	1,593
TK-103B	107	60	69	34	74	74	23	74,759	1,637
TK-103C	200	88	28	-	-	132	32	24,229	731
TK-103D北部	270	101	51	42	-	94	24	85,042	1,837
TK-103D南部	95	75	64	25	-	81	10	25,584	303
TK-103D南々部	139	36	43	35	-	76	14	49,072	596
計	165	74	53	37	74	92	24	304,441	6,697

H5. 2. 27 現在  
(注) H4. 2月以前は含まず

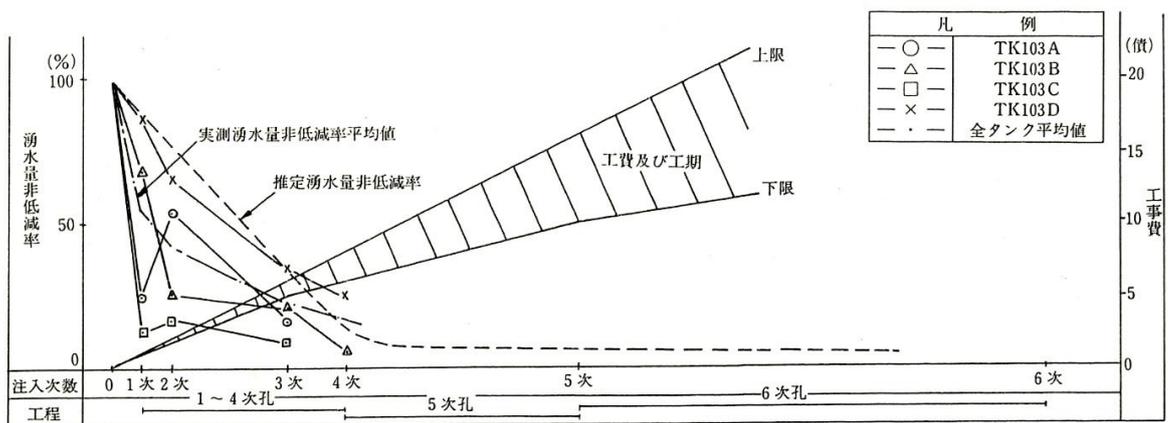


図 3.2-46 注入次数と湧水量の低減率<sup>23)</sup>

注入次数の進捗にあわせて、地盤の透水係数・改良深さ・水頭・注入孔配置・改良度合いのデータを収集・分析し、各注入次数終了後の湧水量を推定している。図 3.2-46に、この推定湧水量と実績湧水量を示す。また、同図中には、工程及び工費の予測値（上、下限）が示されている。同図より、推定湧水量は4次孔終了時で約87%の低減であり、5次孔によるさらなる低減は6%程度と湧水低減効果が低いことがわかる。一方、5次孔を施工することによる工期・工費の増大量は1~4次孔の総額とほぼ同レベルであるため、施工効率はきわめて悪く、4次孔を最終次数としたことは適切であったことがわかる。

### 3.2.3 施工方法の比較

前項において調査したグラウト実績のうち、特に耐久性が要求されるグラウト工として、国内においては海底トンネルにおけるプレグラウトを取り上げ、北欧における環境配慮型トンネルと比較して表 3.2-49に示す。

同表より、改良効果の点で両者に大きな違いがあることがわかる。

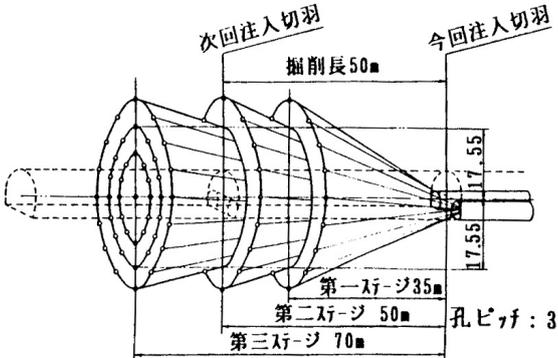
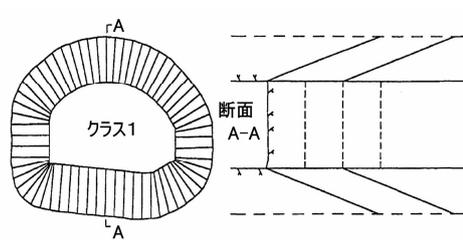
この理由としては以下の2点があるのではないかと推測される。

- トンネル掘削方法とグラウト技術発展の経緯の違い
  - ・ 日本においては、グラウト工法はダムにおいて発達してきた。トンネル工事は、湧水に対して基本的に排水構造形式が採用されている。都市部において遮水構造が要求される場合は、地山が土砂であることが多いためシールド工法が基本的に採用され、近年山岳トンネルを適用せざるをえない場合は、掘削後に覆工コンクリートと防水シートにより水密性を確保する構造形式が採用されている。このように、トンネル工事においてグラウト工法により高い止水性が要求されるケースがほぼ海底トンネルに限定されてきたこともあり、北欧に比べてトンネルグラウト工法が発達してこなかったのではないかと推測される。
  - ・ 北欧においては良好な岩盤を安価に掘削する技術の一つとして地下発電所導水路トンネル等においてグラウト技術が利用されてきた<sup>1)</sup>。近年環境配慮型トンネル掘削の必要性が生じたが、スウェーデンでは **Hallandsås railway tunnel** において、ノルウェーでは **Romeriksporten tunnel** においてグラウト工事に伴う環境問題が発生した。このため、環境に優しいグラウト技術の開発機運が高まり、特にノルウェーにおいては“**Tunnels for the Citizen**”という活動が開始され、グラウト技術が大きく進歩したものと考えられる。
- 岩盤条件の違い
  - ・ 北欧の岩盤は亀裂頻度等に起因する透水性自体が日本に比べて大幅に低く、さらに亀裂形状も複雑でないため、グラウトによる改良が容易なのではないかと考えられる。

表 3.2-48 地下水に対するトンネル構造  
(参考文献 25)をもとに作成)

構造種別	排水構造	難透水層構造	遮水構造
概要図			
構造の特徴	トンネル底部の排水工により排水するため、覆工には水圧はほとんど作用しない。	トンネル底部の排水工により少量の排水をすることにより、覆工には水圧はほとんど作用しない。	トンネル内へは一切排水しないため、覆工に静水圧が作用する。
トンネル構造の規模	中規模	中規模	大規模
地下水位との関係	深いほど地下水低下領域が広がる。地下水位の低下量は大きい。	深くなると難透水層の厚さが大きくなる。地下水位の低下量は小さい。	深くなるほどトンネル構造物は大規模になる。地下水位の変化はない。
施工事例	一般山岳トンネル	青函トンネル、北習志野トンネル、上越新幹線(中山、浦佐、堀之内トンネルの一部区間)など	一般のシールドトンネル 中部電力北豊田南部平町線洞道など。

表 3.2-49 トンネルにおけるグラウト実績の比較

	国内	北 欧
目的	排水型トンネルを基本とするため、グラウト注入は一般的に掘削時の湧水低減を目的とした仮設の止水対策と位置付けられることが多いが、海底トンネルにおいては、突破湧水対策に加えて、湧水の排水費用を抑えるための恒久的な止水性が求められる。なお、近年都市部においてウォータータフトンネルが建設されているが、恒久的な止水性能についてはコンクリートセグメント等の覆工構造に期待している。	都市部の環境配慮型トンネルにおいては、恒久的な止水を、グラウト注入のみにより実現しており、現在までに多数の実績が有る。特に、スウェーデンにおいては、極めて厳しい環境基準を確保したトンネル実績がある。
改良効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>湧水量：150L/分/100m程度</li> <li>透水係数：<math>10^{-7}</math> m/s オーダー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>湧水量：0.5～5.0L/分/100m程度</li> <li>透水係数：<math>10^{-7}</math>～<math>2.5 \times 10^{-9}</math> m/s</li> </ul>
注入材料	<p>■プレグラウト：LW(水ガラス+セメント材料) 青函トンネルでの実績が基本になっており、配合はLW(セメント比：w/c=1.0～3.0)が用いられている場合が多い。(LWグラウトは水ガラスを使用していることから耐久性に問題があるため、青函トンネルにおいては、高炉コイトセメントによる改良LWが採用された。) また、浸透注入を期待してケミカルグラウトを併用している場合もある。</p> <p>■ポストグラウト：水ガラス+セメント材料</p>	<p>■プレグラウト：セメント (一般的に、W/C=0.8～3.0程度の高濃度) 改良目標に応じて以下を使い分けしている場合がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>10～25 L/分/100m：普通セメント</li> <li>5～10 L/分/100m：微粒子セメント</li> <li>5 L/分/100m以下：超微粒子セメント</li> </ul> <p>(近年、ノルウェーを中心にシリカフェームを添加し、ブリーディングを抑えるケースが増えている。)</p> <p>■ポストグラウト：ケミカルグラウト、セメント</p>
注入方法	プレグラウトを基本とし、改良目標を満たさない場合はポストグラウトにより補完	プレグラウトを基本とし、改良目標を満たさない場合はポストグラウトにより補完
注入仕様	<p>■青函トンネルの例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>注入間隔：3m</li> <li>注入長：40～70m程度</li> <li>改良範囲：掘削半径の3倍程度(硬岩部)</li> <li>注入圧力：湧水圧の3倍程度で岩盤の限界圧力を若干上回る程度。7.5MPa(青函)、3MPa(塩嶺、志賀)</li> </ul> 	<p>■Lundby トンネルの例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>注入間隔：最低1m</li> <li>注入長：10～17m</li> <li>改良範囲：4m以上(ロックボルト長、緩み領域をカバーする範囲)</li> <li>注入圧力：5～10MPa(ノルウェー)、4MPa程度(スウェーデン、フィンランド)</li> </ul> 

### 3.3 放射性廃棄物地層処分（研究）におけるグラウト研究

#### 3.3.1 研究の概要

放射性廃棄物地層処分において施工中の湧水抑制を目的とした主なグラウト研究としては以下が挙げられる。

- ・ NUMO-SKB-Posiva による低 pH グラウトに関する共同研究
- ・ SKB によるセメントグラウト注入方法に関する研究
- ・ JAEA による低 pH グラウト研究
- ・ エタノールベントナイト研究
- ・ 塩水ベントナイト研究

以下にこれらの研究の概要を示す。

#### 3.3.2 NUMO-SKB-Posiva による低 pH グラウト研究

##### (1) 研究の概要

ベントナイトに悪影響を与えないために、浸出水の pH が 11 以下（図 3.3-1 参照）となる低 pH グラウト材料の開発を目的として研究がスタートした。ベントナイト材料への影響を考慮すると、セメント材料自体の使用量を抑制することが望ましいが、現状における知見ではセメントからの浸出水の pH 値が 11 以下であれば、ベントナイト材料の機能を大きく低下させることは無いと考えられている。

この研究の中では、廃棄体処分区域周辺の止水グラウトにおいては、亀裂の大きさに応じて適用するグラウト材料を以下のように使い分けることが考えられている<sup>26)</sup>。

- ・ 100  $\mu$  m 以上の亀裂：低 pH セメント材料
- ・ 100  $\mu$  m 以下の亀裂：非セメント材料（Silica Sol）

また、研究全体は以下の 4 つのサブプロジェクトから構成されている。

- ・ SP1：低 pH セメント材料の研究開発（担当：Posiva）
- ・ SP2：低 pH 非セメント材料（Silica Sol）の研究開発（担当：SKB）
- ・ SP3：セメント材料の原位置試験（担当：Posiva）
- ・ SP4：Silica Sol の原位置試験（担当：SKB）

そこで、以下では低 pH セメント材料の研究と、非セメント材料の研究に分けて記載する。

##### (2) 低 pH セメント材料の研究

###### (i) 研究フロー

研究は適宜、修正を加えながら進めているが、全体的な流れを示すと概ね図 3.3-2 に示す通りとなる。

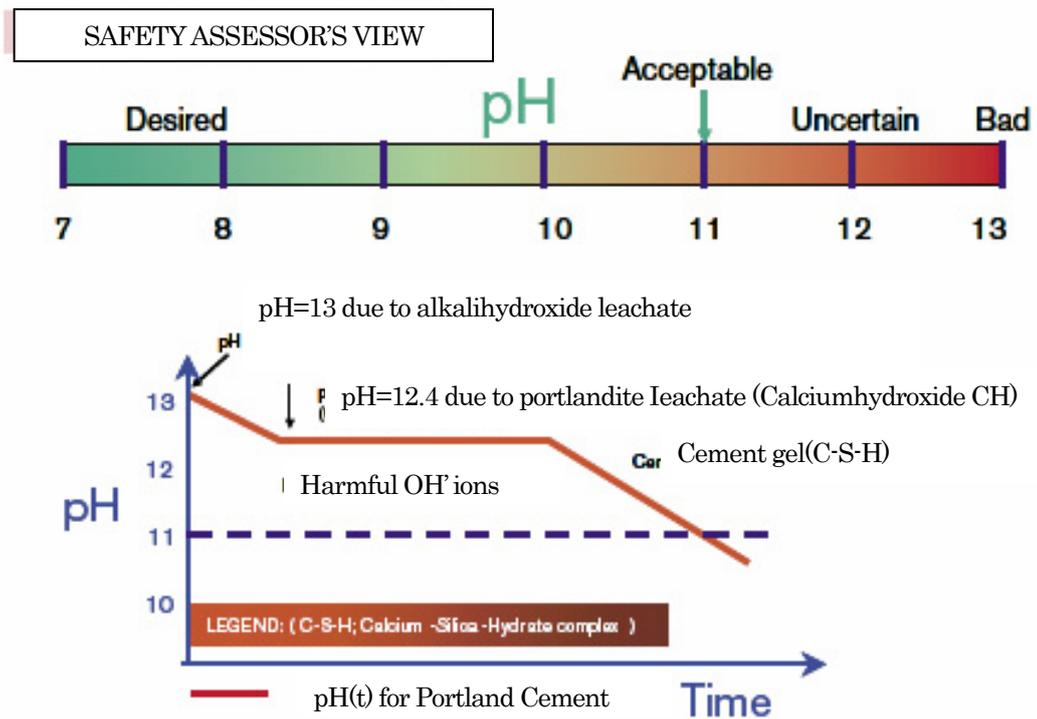


図 3.3-1 浸出水の pH の目標値<sup>26)</sup>

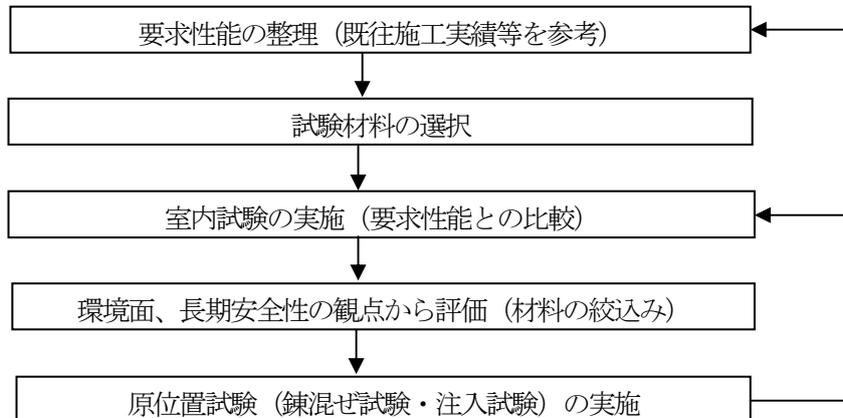


図 3.3-2 研究フロー

(ii) 要求性能の整理

要求性能を当初、表 3.3-1 に示すように仮に設定し、材料選定に利用した。さらに、定量化出来ない要求性能として以下の項目を挙げている。

- ・ 材料が処分場の建設及び作業時に調達可能であること
- ・ 材料またはその成分が過去に使用された実績があること
- ・ 材料が必要な期間、化学的及び物理的に安定してしていること (耐久性)

また、その後の第1回目原位置施工試験の結果を受けて、表 3.3-2に示すように一部要求性能を修正している（ただし、“unofficial” との断り有り）。なお、原位置注入時においては、表 3.3-3に示す性能を有することを目標としている。

表 3.3-1 グラウト材料に関する要求性能

要求度	特性	要求値	試験方法
要求性能	pH	≤ 11	滲出試験
	浸透性能 $b_{min}$	≤ 80 $\mu$ m	浸透試験（60分経過後） ペネトレーティメーター （図 3.3-3参照）
	浸透性能 $b_{crit}$	≤ 120 $\mu$ m	
望ましい性能	粘性	≤ 50mPas	60分経過後
	ブリーディング	≤ 10%	2時間経過後
	ワーカビリティ	≥ 60min	浸透性能と粘性より判断
	せん断強度	≥ 500Pa	フォールコン試験（6時間経過後） （図 3.3-4参照）
	降伏強度	≤ 5Pa	60分経過後
	一軸圧縮強度	≥ 4MPa	28日強度

表 3.3-2 材料に関する要求性能（非公式修正案）

要求度	特性	要求値	試験方法
要求性能	pH	≤ 11	滲出試験
	浸透性能 $b_{min}$	≤ 80 $\mu$ m	浸透試験（60分経過後） ペネトレーティメーター
	浸透性能 $b_{crit}$	≤ 120 $\mu$ m	
望ましい性能	粘性	設定せず	
	ブリーディング	≤ 10%	2時間経過後
	ワーカビリティ	≥ 60min	浸透性能と粘性より判断
	せん断強度	≥ 2kPa	フォールコン試験（6時間経過後）
	降伏強度	設定せず	
	一軸圧縮強度	≥ 8MPa （ただし、他の性能が優れている場合は7MPaでも可）	28日強度

表 3.3-3 材料に関する要求性能（原位置試験時）

特性	要求値	試験方法
浸透性能	75 $\mu$ （パイロット試験1）、63 $\mu$ （混練試験）、 100 $\mu$ m（パイロット試験1）のメッシュサイズに対して 300ml以上が目標（200-300ml：good、200ml以下： poor）	フィルターポンプにより測定（図 3.3-6参照）
ブリーディング	≤ 10%（5%以下がより望ましい）	2時間経過後
ワーカビリティ	40s以下：優、40-50s：良、50-60s：可、60s以上： 不可	マッシュコーン試験（図 3.3-5参照）
せん断強度	≥ 0.5kPa（6時間経過以内）	フォールコン試験
一軸圧縮強度	高いほど良く、数MPaが望ましい	28日強度



図 3.3-3 ペネトラビリティメーター<sup>1)</sup>



図 3.3-4 フォールコーン試験機

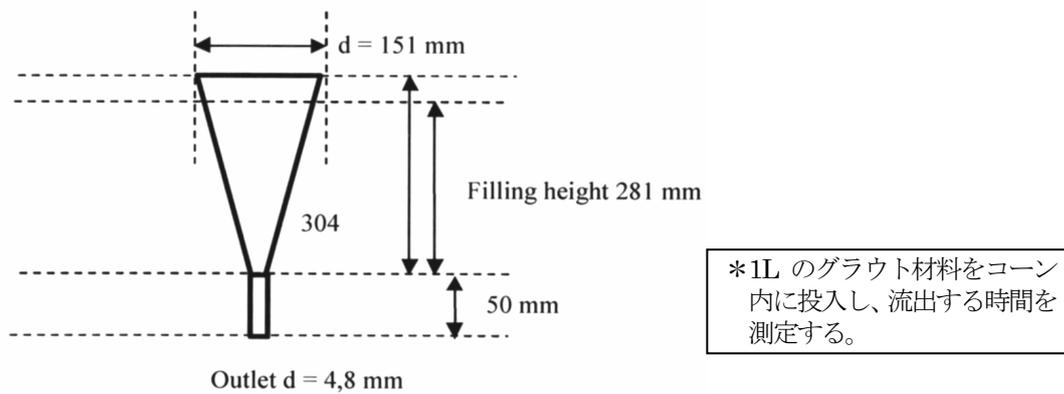


図 3.3-5 マッシュコーン試験<sup>27)</sup>



図 3.3-6 フィルターポンプ

(iii) 試験材料の選択

以下に示す 5 材料が候補材料として選択された。

こららをまとめて表 3.3-4に示す。

- ・ **OPC+SF** : 普通ポルトランドセメント (OPC) + シリカフューム (SF)。SF は数種類の市販品が使用されているが、弱酸性のスラリーであるグラウトエイドが主に選択されている (グラウトエイドは Elkem 社によるシリカフュームスラリーの商品名であり (図 3.3-7参照)、主にノルウェーにおいてブリージングの低減(図 3.3-8参照)、浸透性の向上(図 3.3-9参照)、長期強度の増進(図 3.3-10参照)を目的としてセメントグラウトに混和されている<sup>28)</sup>)。OPC としては主に UF16 (Cementa 社製超微粒子セメントの商品名) が使用されているが、Rheocem 900 (Degussa 社製超微粒子セメントの商品名) や White cement が使用された場合もある。
- ・ **Slag** : 高炉水砕スラグ (Blast furnace slag) + OPC。OPC としては急硬性セメントが使用されている。
- ・ **SSC** : Super Sulphate cement。高炉スラグ+石膏+急硬性セメント。OPC として急硬性セメントが、石膏は非常に粒形の小さいスラリー状のものが使用されている。
- ・ **LAC** : Low-Alkali Cement。NUMO から提案のあった日本製の低アルカリセメント (電力中央研究所と太平洋コンサルタントが開発)。
- ・ **Fly ash** : フライアッシュシステムは硬化時間の調整が困難なことに加え原材料の使用性及び安定性の問題より検討対象から除外した。

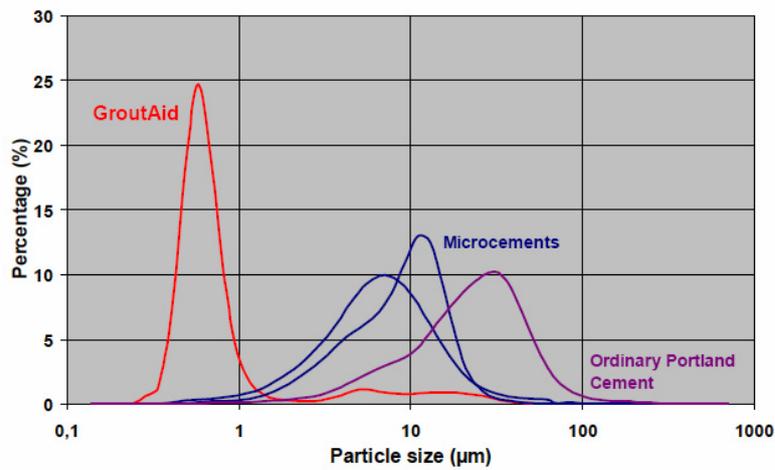
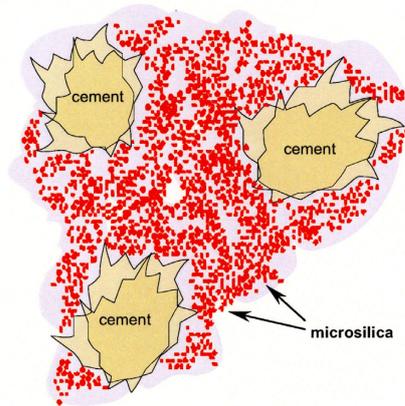
表 3.3-4 候補材料一覧表

材料	略称	組合せ
Ordinary Portland Cement + Silica Fume	OPC+SF	普通ポルトランドセメント (OPC <sup>*1</sup> ) + シリカフューム (SF)
Blast furnace slag	Slag	高炉水砕スラグ (Blast furnace slag) + 急硬性セメント (アルカリや水ガラスは、長期安全性の観点から混入せず)
Super Sulphate cement	SSC	高炉スラグ+石膏+急硬性セメント
Low-Alkali cement	LAC	電力中央研究所と太平洋コンサルタントが開発した低アルカリセメント LAC をグラウト材用に微粉碎したもの <sup>*2</sup>
Fly ash system	—	凝結が遅いことに加えて材料の使用性及び安定性に問題があるという理由で却下

\*1 : UF16 が主に使用され、一部 Rheocem900、白色セメントを使用

\*2 : 成分調整はしていない

セメント粒子とマイクロシリカ粒子のイメージ図



グラウトエイド (マイクロシリカ) の粒径

**Chemical composition**

SiO <sub>2</sub>	86% min.
Carbon	2.5% max.
LOI (Loss on Ignition)	3.0% max.
Alkali oxides	2.0% max.

**Physical properties**

Bulk density	1350-1410 kg/m <sup>3</sup>
Solids content	50% ± 2%
Surface area dry (BET)	15 m <sup>2</sup> /g min.
Viscosity	100 cP max.
Coarse particles (+45μm)	1.0% max.
pH	4.5 – 6.5
Color	gray

図 3.3-7 グラウトエイドの特性  
(Elkem 社パンフより抜粋)

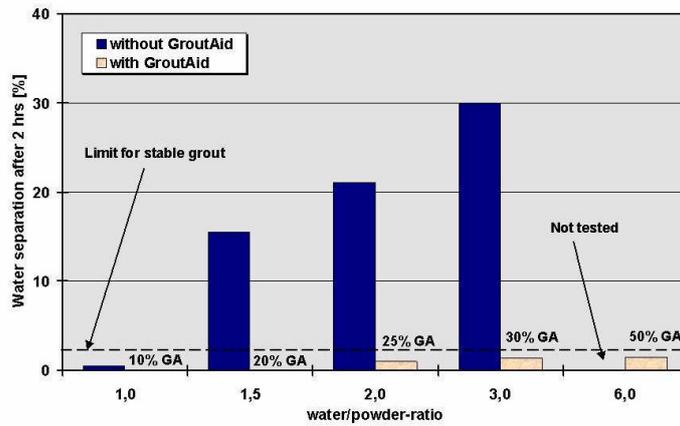


図 3.3-8 グラウトエイドのブリーディングへの影響  
(Elkem 社パンフより抜粋)

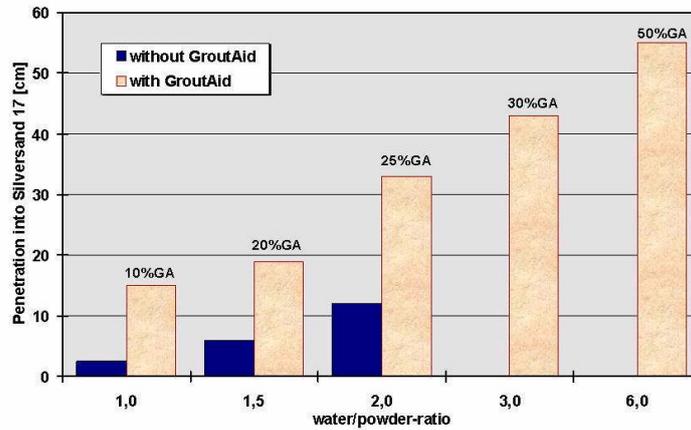


図 3.3-9 グラウトエイドの浸透性への影響  
(Elkem 社パンフより抜粋)

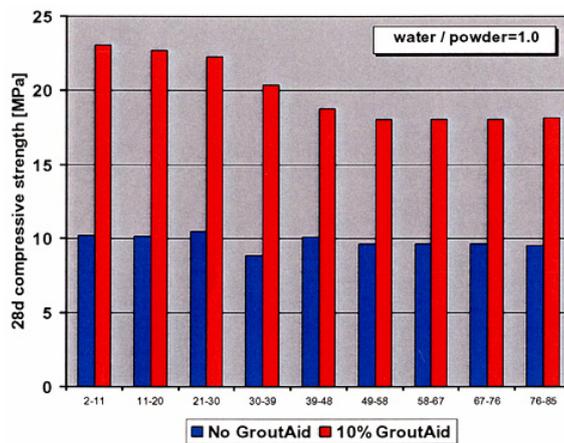


図 3.3-10 グラウトエイドの強度への影響  
(Elkem 社パンフより抜粋)

(iv) 室内試験

以下の試験が実施され、要求性能を満たす配合に対してグラウト固化体からの浸出水の pH 測定が実施された。

- ・ 浸透性確認試験：フィルターポンプ（適用性が高い材料についてはペネトラビリティメーターにより  $b_{min}$ 、 $b_{crit}$  を測定）により測定
- ・ プリーディング試験：100ml メスシリンダーにて測定
- ・ 初期せん断強度試験：フォールコーン試験により測定
- ・ 粘性、降伏強度：同軸粘度計により粘性と降伏強度を測定（ビンカム流体（図 3.3-11参照）を想定しているため）
- ・ 1 軸圧縮強度：40mm×40mm×160mm の供試体

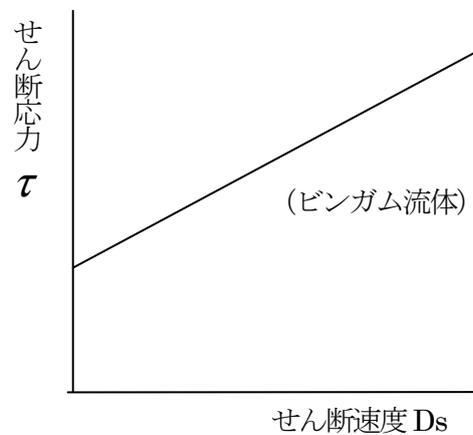


図 3.3-11 ビンカム流体の流動曲線

● 浸出水の pH 試験<sup>29)</sup>

室内試験において要求性能を最も満足する配合に対して以下の要領で2種類の滲出試験（平衡試験、拡散試験）が実施された。

- ・ 浸漬水：当初は表 3.3-5に示す淡水と塩水の2種類を使用
- ・ 養生温度：当初は、20°Cと 50°Cで実施していたが、20°C+淡水が最も保守的な設定であることが判明したため、以降は20°C+淡水にて実施
- ・ 試験方法：供試体を CO<sub>2</sub> を除去した水中に浸漬し、窒素環境下のグローブボックス内にて実験を実施

表 3.3-5 浸出水の pH 試験に使用した地下水<sup>26)</sup>

		Fresh (ALL-MR)	Saline (OL-SR)			Fresh (ALL-MR)	Saline (OL-SR)
pH		8.8	8.3	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mol/L	1.1×10 <sup>-3</sup>	
Na <sup>+</sup>	mol/L	2.3×10 <sup>-3</sup>	0.21	Cl <sup>-</sup>	mol/L	1.4×10 <sup>-3</sup>	0.41
Ca <sup>2+</sup>	mol/L	0.13×10 <sup>-3</sup>	0.10	Br <sup>-</sup>	mol/L		1.3×10 <sup>-3</sup>
K <sup>+</sup>	mol/L	0.10×10 <sup>-3</sup>	0.54×10 <sup>-3</sup>	J <sup>-</sup>	mol/L		0.01×10 <sup>-3</sup>
Mg <sup>2+</sup>	mol/L	0.03×10 <sup>-3</sup>	2.3×10 <sup>-3</sup>	F <sup>-</sup>	mol/L		0.06×10 <sup>-3</sup>
Sr <sup>2+</sup>	mol/L		0.40×10 <sup>-3</sup>	B <sup>-</sup>	mol/L		0.09×10 <sup>-3</sup>
SiO <sub>2</sub>	mol/L	0.03×10 <sup>-3</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mol/L	0.10×10 <sup>-3</sup>	0.04×10 <sup>-3</sup>

- ・ 平衡試験: 平衡試験では定期的に滲出液の一部分を抽出し、同量の新鮮な浸出液で置換する。抽出した浸出液は濾過した後に pH 測定、及び可能であればアルカリ度滴定を実施する。抽出の頻度は Olkiluoto の地下水流動に基づき 0.26L/年に設定している。供試体の作成方法及び浸漬状況をそれぞれ、図 3.3-12 と図 3.3-13 に示す。



a)



b)

図 3.3-12 供試体の作成方法<sup>29)</sup>

(セメント周辺の白い円環は型枠用のプラスチック)

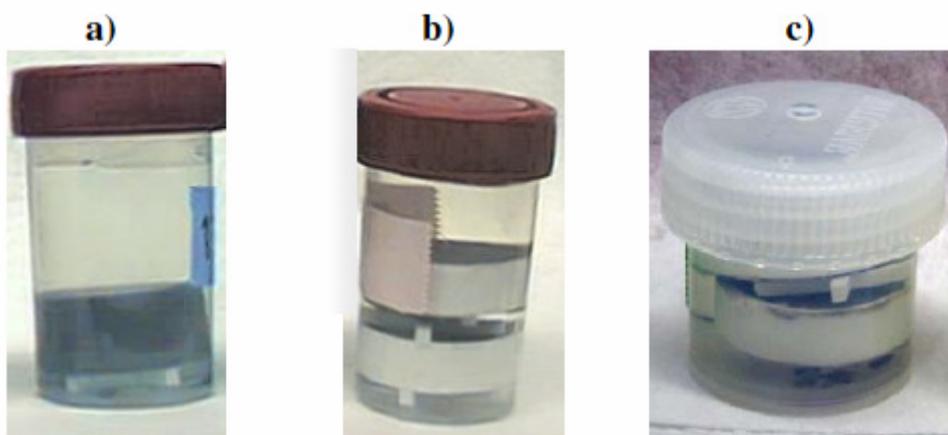


図 3.3-13 供試体の浸漬状況<sup>29)</sup>

( a ) は最初に試験した供試体 ( Mix12 ) のみ適用、 b ) が標準形式、 c ) は拡散試験に適用 )

- ・ 拡散試験：拡散試験では定期的に滲出液の全てを新鮮なものに置換する。置換頻度は時間とともに減少する（初日2回（3h、6h）、6日目まで毎日、8日目、11日目、15日目、その後は7日ごとに20回測定）。
- 室内試験結果
  - ・ OPC+SF：OPC と SF だけの配合では硬化に時間がかかりすぎるため、エトリンガイト系の硬化促進剤（ETTA）の添加が必要とされている。ETTA の成分はハイアルミナセメント（HAC）と石膏スラリーからなる。ETTA の添加により、降伏強度が要求性能を満足しないものの非常に浸透性能の良い配合を見出すことができたため滲出試験を実施している。また、UF16 に代えて低アルカリの白色セメント（WCE）を使用した試験も実施している。硬化時間が延びるが降伏強度が改善されており（要求性能までは達していない）、滲出試験を実施している。SF として粉体のシリカフェームを使用した試験も実施しているが、グラウトエイドに比べて注入性能を低下させる結果となっている。OPC+SF に ETTA を加えた配合は、OPC と SF の比率により pH の要求性能を満足したものとほぼ満足したものに分けられるが、グラウト材料としての要求性能のより高い後者を第1回原位置試験の使用材料として選定している。白色セメントを使用した配合は UF16 を使用した配合に比べ pH が低くなることが期待されたが、平衡試験の結果はほぼ同等か部分的には上回る（性能的に劣る）ところもあったため、白色セメントの使用のメリットはないとしている。
  - ・ Slag 及び SSC：滲出試験の結果、両配合ともに滲出した硫化物量が非常に多く、処分施設の長期安全性の観点からは危険性を含む材料であると結論づけられている。このため、Slag については、第1回原位置試験には使用されたが、その後候補材料から除外されている。
  - ・ LAC：通常粒径の LAC と微粉碎したものの2種類が試験された。グラウトに関する室内試験において、浸透性能の点で要求性能をはるかに下回る結果となった。LAC の微粒成分の凝集が理由と想定されている。pH に関する情報を得るためだけの目的で1種類の配合について滲出試験が実施されている。pH については要求性能を満足する結果であったが、グラウ

ト材料としては不適であるとしている。

また、上記を含めて全体的な試験結果は、以下の通りとなる。

- ・ 浸出水の pH を 11 以下に保つためには、OPC+SF、白色セメント+SF、Slag に対しては、SiO<sub>2</sub> 量が粉体量の 50% 以上、或いは Ca/Si 比が 0.8 以下である必要がある
- ・ 浸透性を保つためには、OPC+SF については水粉体比を 2 以上に、Slag の場合は 1.6 以上にする必要があるが、水粉体比が高いために凝結が遅延するので十分な強度発現を確保するためにはエトリンガイト系の促進剤 (ETTA) が必要となる。

上記の結果より、OPC+SF 及び Slag が要求性能を満たすため、原位置試験にはこれらのうち要求性能をほぼ満たす配合である f63 (OPC+SF、表 3.3-6 参照)、S20c (Slag、表 3.3-7 参照) を使用することになった (S20c が選定されたが、流動性に欠けたため、水粉体比の高い S21 が原位置試験に採用された)。

なお、f63 の性能試験結果を表 3.3-8 に、pH 試験結果を図 3.3-14 に示す。これらより、f63 は 20 週目に pH が目標値 (11.0) にほぼ到達していることがわかる。

同様に、S20c 及び S21 の性能試験結果を表 3.3-9 に、pH 試験結果を図 3.3-15 に示す。

表 3.3-6 選定された OPC+SF の配合 (f63)

(参考文献 26) に加筆

Mix	Binder	OPC type	SF type	OPC /DM	SF /DM	Gypsum /OPC	HAC /OPC	SF /OPC	SP /DM	Ca/Si molar ratio SiO <sub>2</sub> wt-%	Water /DM
12	UF16-SF	UF16	Grout-Aid	0.77	0.23	0.000	0.000	0.30	0.00	1.35 Ca/Si 39.5 wt-%	1.26
f63	UF16-SF with ETTA	UF16	Grout-Aid	0.56	0.38	0.027	0.075	0.69	0.00	0.83 Ca/Si 49.3 wt-%	2.48
f64	UF16-SF with ETTA	UF16	Grout-Aid	0.49	0.46	0.027	0.075	0.94	0.00	0.65 Ca/Si 54.9 wt-%	2.91
w1	WCE-SF with ETTA	WCE	Grout-Aid	0.56	0.38	0.027	0.075	0.69	0.00	0.85 Ca/Si 50.0 wt-%	2.48
w2	WCE-SF with ETTA	WCE	Grout-Aid	0.49	0.46	0.027	0.075	0.94	0.00	0.67 Ca/Si 55.5 wt-%	2.91

\*上表中の略称

SF : シカフェム、DM : 粉体、ETTA : エトリンガイト系促進剤、UF16 : スウェーデン Cementa 社製の耐硫酸塩グラウト用超微粒子セメント、Gypsum : 石膏、HAC : 高アルミセメント、SP : 分散剤

表 3.3-7 選定された Slag の配合 (S20c)  
(参考文献 26) に加筆

Mix	Binder	OPC type	SF type	OPC /DM	SF /DM	SL /DM	G /DM	SF /SL	OPC /SL	Gypsum /SL	Superpl /DM	Ca/Si molar ratio SiO <sub>2</sub> wt-%	Water /DM
S14 and S26 <sup>1)</sup>	Slag-RC10- Gypsum-SF	RC10	Grout- Aid	0.029	0.29	0.59	0.093	0.50	0.05	0.16	0.00	0.60 Ca/Si 49.5 wt-%	1.57
S20c	Slag-RC10- SF	RC10	Grout- Aid	0.063	0.31	0.63	0.000	0.50	0.100	0.000	0.00	0.57 Ca/Si 53.3 wt-%	1.58
S21 <sup>2)</sup>	Slag-RC10- SF	RC10	Grout- Aid	0.063	0.31	0.63	0.000	0.50	0.100	0.000	0.00	0.57 Ca/Si 53.5 wt-%	2.00

<sup>1)</sup> Mix S26 was nearly identical to the mix S14, the only difference was the fineness of the ground slag batch, which was finer for mix S26. S14 was leach tested for pH.

<sup>2)</sup> Mix S20c was selected to pilot field test 1, but it turned out to be too stiff, and so mix S21 (higher W/DM) was tested instead.

\*上表中の略称：SL 高炉スラグ

表 3.3-8 選定配合 f63 の性能試験結果  
(参考文献 26) に加筆

Mix	Bleeding (%)	6 h Shear strength (kPa)	b <sub>min</sub> (μm)	b <sub>crit</sub> (μm)	Viscosity, Bingham (mPas)	Yield value, Bingham (Pa)
12	0	0.2	63	108	55	22
f63	0	3.7	44	65	50	21
f64	0	3.4	44	63	40	16
w1	0	1.3	49	103	35	8
w2	0	1.1	47	102	28	7

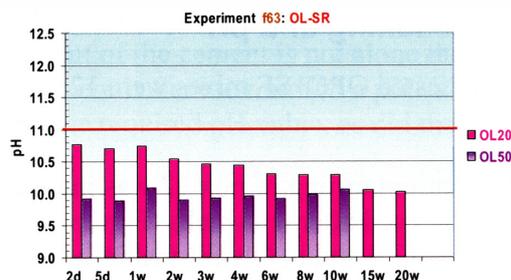
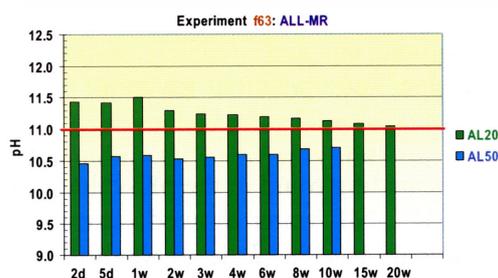


図 3.3-14 選定配合 f63 の pH 試験結果<sup>26)</sup>  
(左図：淡水、右図：海水)

表 3.3-9 選定配合 S20c 及び S21 の性能試験結果  
(参考文献 26) に加筆

Mix	Bleeding (%)	6 h Shear strength (kPa)	b <sub>min</sub> (μm)	b <sub>crit</sub> (μm)	Viscosity, Bingham (mPas)	Yield value, Bingham (Pa)
(S14)/S26	(0)/0	(0.98)/0.98	(40)/47	(139)/135	(50.3)/52.3	(17.7)/21.7
S20c	0	2.77	40	99	62.6	24.2
S21	0	1.46	37	99	36.2	8.5

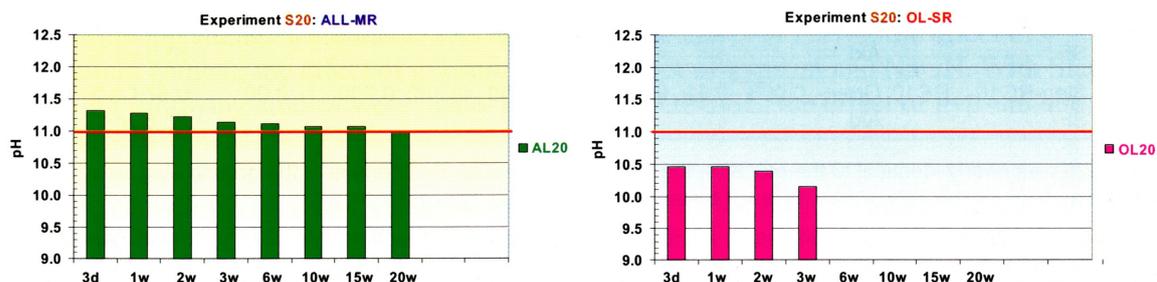


図 3.3-15 選定配合 S20c 及び S21 の pH 試験結果<sup>26)</sup>

(左図：淡水、右図：海水)

(v) 環境面、長期安全性の観点から評価

環境面からの評価は文献調査により実施された。具体的には、製造者による製品仕様とスウェーデンの法規、フィンランドの法規、ヨーロッパ基準と照らし合わされた。その結果、OPC+SF は問題無いとされたが、Slag については高炉スラグがある環境下においては H<sub>2</sub>S を生成することが判明したために、最終的には研究対象から外された。

長期安全性の観点からは、低 pH セメントは処分場建設工事に使用可能であると判断されたが、将来的には使用量に関する制限値が必要となる可能性がある。また、セメントによる岩盤への影響に加えて、分散剤等のグラウト材料中の有機物による放射性核種の移行に対する影響が懸念されている。

(vi) 原位置試験

(a) 第 1 回目原位置試験

以下のトンネルにおいて 1 ラウンドのみグラウト注入を実施している。

- 試験場所
  - ・ Kamppi-Kruunuhaka 多目的トンネル (ヘルシンキ/フィンランド)
  - ・ トンネル断面：幅 5.9m × 高さ 5.1m
  - ・ 湧水圧：0.4MPa
  - ・ 岩盤条件：花崗岩とペグマタイトを挟んだ片麻岩であり、オルキオトサイトに類似している。



図 3.3-16 注入箇所切羽面<sup>27)</sup>

- 試験実施日：2004年5月19日
- 使用材料（高性能減水剤を使用せず）
  - ・ OPC+SF：f 63
  - ・ Slag：S20c、S21（この段階では、Slagも研究対象とされていた）

表 3.3-10 使用材料の配合表<sup>27)</sup>

Recipe S20c hole 1		Recipe S21 holes 2-5 and 13-14		Recipe f63 holes 6-12	
Water/Dry Materials	1.6	Water/Dry Materials	2	Water/Dry Materials	2.5
Water	81 l	Water	105 l	Water	75 l
RC10	4 kg	RC10	4 kg	UF16	20 kg
SL10	40 kg	SL10	40 kg	AC10	1.5 kg
GroutAid	26 l	GroutAid	29 l	Gypsum slurry	0.5 l
				GroutAid	20 l

Dry material includes all dry components also in GroutAid and gypsum slurry  
 RC10 = grinded Rapid cement (d98=10 μm)  
 SL10 = grinded blast furnace slag (d98=10 μm)  
 AC10 = grinded aluminium cement (d98=10 μm)

- 使用グラウト設備
  - ・ ミキサー：Atlas Copco Cemis 201E
  - ・ アジテーター：Atlas Copco Cemag401E
  - ・ ポンプ：Atlas Copco Craelius ZBE-100
- 注入方法
  - ・ 最大注入圧力：4～5MPa
  - ・ 停止基準：注入圧力が4MPaに安定した時点
  - ・ 注入孔：14本（注入孔径54mm、注入孔間隔1.5m（切羽面にて）、孔長24m、オーバーラップ長4-5m）
  - ・ 注入順序：表 3.3-11参照

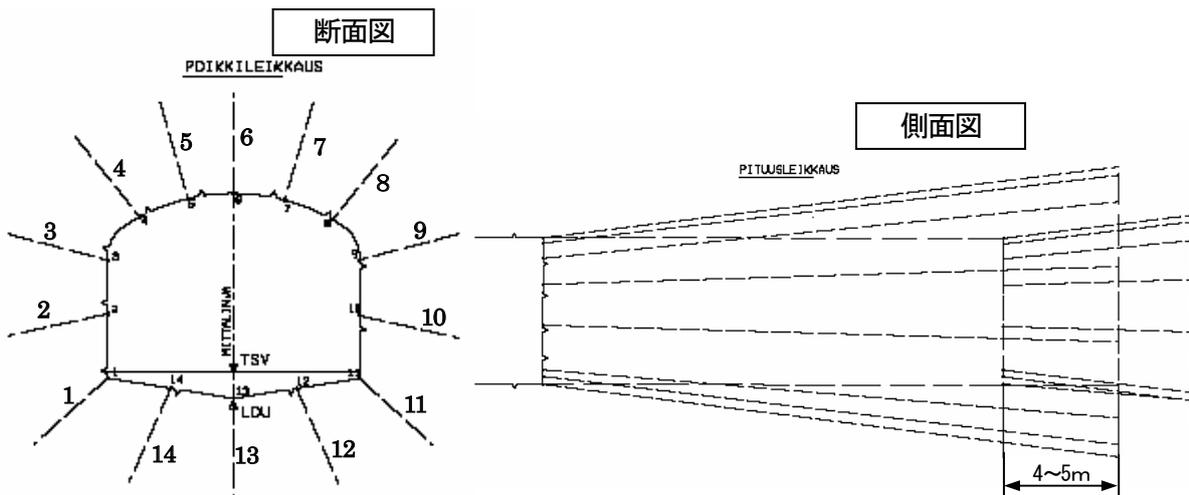


図 3.3-17 グラウト注入孔配置図

(参考文献 27) に加筆

表 3.3-11 注入順序と注入材料

注入順序	1	2	3
注入材料	Slag/S20c	Slag/S21	OPC+SF/f63
注入孔 No.	1	14,13,2,3,4,5	12,11,10,9,8,7,6

● 試験結果

- ・ 水押し試験：S20c 注入孔 0.47Lu、S21 注入孔の平均 0.43Lu、f63 注入孔の平均 0.52Lu
- ・ Slag/S20c：流動性が不足したため、十分な注入が出来ず
- ・ Slag/S21：十分な初期せん断強度と 1 軸圧縮強度（28 日）が得られず。また、注入孔 NO. 2 及び 3 注入時に岩盤の亀裂よりトンネル内に還流してきた（図 3.3-18参照）
- ・ OPC+SF/f63：十分な初期せん断強度と 1 軸圧縮強度（28 日）が得られなかった。施工性に関しては、Slag と比較すると流動性は高かったが、混練 1 時間後には、2-3cm 程度の塊がフィルターポンプ試験実施時に発生していた。さらに、注入後 6 日目にパッカーを撤去した際に、グラウト材が硬化せずに漏出（注入孔 No.9、10）
- ・ チェック孔：グラウト注入後に切羽面の 4 隅にチェック孔を掘削し、水押し試験を実施した結果、平均 0.23Lu であり、グラウト注入により半分に低下した。しかしながら、チェック孔に通常（OPC）のグラウト材（水セメント比 0.8）を注入した結果、平均 9 L/m が注入され（注入試験においては、S21 では平均 8 L/m、f 63 では 6 L/m が注入されている）ため、低 pHセメントグラウトでは十分に亀裂を充填できていないことが判明した。このため、Slag を諦めて、OPC+SF に関して配合を変更し、強度発現と流動性（粘性の低下）の向上を目指すこととした。

（なお、フローメータのキャリブレーションミスにより、予定より水を多く添加してしまったことも強度が予定通り発現しなかったことの一因である）

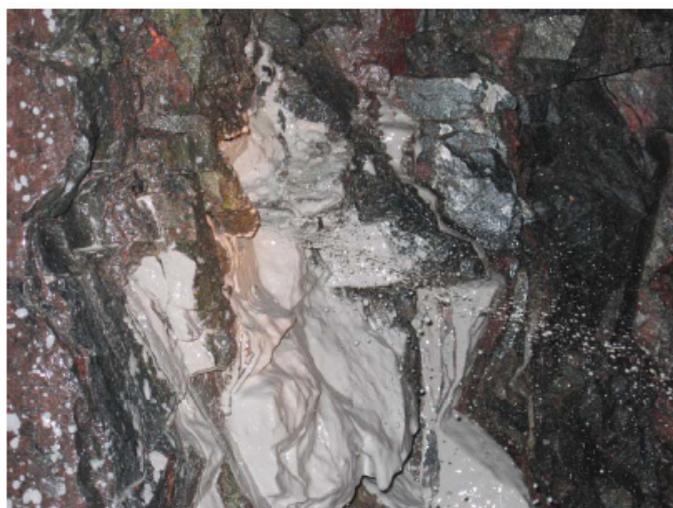


図 3.3-18 S21 のトンネル内への還流状況<sup>27)</sup>

(b) 配合修正 (OPC+SF のみ)

第1回目原位置試験結果を踏まえて、以下の観点から材料の再検討が実施された。

- ・ OPC+SF に基づいた配合であること (スラグ系材料については滲出試験において滲出した硫化物量が非常に多く、処分施設の長期安全性の観点から候補材料から除外された)
- ・ 早期強度発現のため低い水粉体比 (W/DM) であること
- ・ 流動性を確保するために高性能減水剤 (Scancem 社製 SP40) を使用すること
- ・ 現場における使用材料の種類を減少させること

● 室内試験

可能性のある配合は以下の通りであり、具体的には表 3.3-12に示す3種類の配合組合せに対して室内試験を実施し、表 3.3-13に示す結果が得られている。

- ・ 水粉体比 : 1.2~1.6
- ・ 高性能減水剤添加量 : 2~3% (セメント重量比)
- ・ アルミナセメント添加量 : 0~1.5%

表 3.3-12 室内試験に使用した配合組合せ<sup>27)</sup>

Recipe	G/OPC	HAC/OPC	SF/OPC	SP/DM %	W/DM
P3	0.000	0.000	0.69	2.0	1.61
P12	0.000	0.015	0.69	3.0	1.61
P13	0.000	0.000	0.69	3,1	1.61

\*G : 石膏、SF : シリカフェュームスラリー (グラウトエイド)、SP : 分散剤、DM : 粉体量、W : 水

表 3.3-13 室内試験結果<sup>27)</sup>

Recipe	Bleed (%)	Shear strength 6h (kPa)	Shear strength 24h (kPa)	B <sub>min</sub> (μm)	B <sub>crit</sub> (μm)	Marsh cone (s)	Compressive strength 28 d (MPa)
Original requirement	≤ 10%	≥ ~0.5		≤ 80	≤ 120	*)	≥ ~ 4
Updated requirement	≤ 10%	≥ ~2		≤ 80	≤ 120	*)	≥ ~ 7
P3	0	1.3	> 245	46	107	136	14.4
P12	0	1.3	196	40	97	52	14.4
P13	0	0.3	130	38	67	51	14.0

\*) based on general know-how and experiences Marsh fluidity values < 40 s can be seen very good and 40-50 s promising

● 現場試験練り

現場において練混ぜ順序による材料特性を比較するために、以下の現場試験練りが実施された。

- ・ 練混ぜ設備 : Atlas Copco Cemix 201E (回転数 : 1745rpm)

- ・ 練混ぜ手順：P3 に対して 4 種類、P12 に対して 1 種類、P13 に対して 2 種類（表 3.3-14 参照）を試験

表 3.3-14 試験練りのケース<sup>27)</sup>

P3 A		P3 B		P3 C		P3 D	
Water	40 l	Water	40 l	GroutAid	20 l	GroutAid	20 l
Ultrafin 16	20 kg	SP40	0.55 l	Water	40 l	Water	40 l
mixing	2 min	Ultrafin 16	20 kg	SP40	0.55 l	mixing	2 min
GroutAid	20 l	mixing	2 min	mixing	2 min	Ultrafin 16	20 kg
SP40	0.55 l	GroutAid	20 l	Ultrafin 16	20 kg	SP40	0.55 l
mixing	3 min	mixing	3 min	mixing	3 min	mixing	3 min
agitating		agitating		agitating		agitating	
P12 A		P13 A		P13 B			
Water	40 l	Water	40 l	Water	20 l		
Ultrafin 16	20 kg	Ultrafin 16	20 kg	Ultrafin 16	20 kg		
Alumina cement	0.3 kg	SP40	0.83 l	SP40	0.83 l		
SP40	0.83 l	mixing	2 min	mixing	2 min		
mixing	2 min	GroutAid	20 l	GroutAid	20 l		
GroutAid	20 l	mixing	3 min	mixing	3 min		
mixing	3 min	agitating		agitating			
agitating							

上記の結果、グラウト材の材料特性に練混ぜ手順がかなり影響することが確認され、最もグラウト材として性能の良い P3A が選定された。P3A における初期せん断強度（フォールコーン）試験結果を図 3.3-19 に、ワーカビリティ（マッシュコーン）試験結果を図 3.3-20 に示す。

また、室内試験結果と比較すると、初期強度は室内試験の方が高く、流動性（マーシュコーン試験結果）は現場練りの方が優れていた。これは主に、現場においては温度が低いことと（日中：7℃、夕方：5℃、夜間：マイナス 2、3℃）、ミキサーの違いによるものと考えられる。

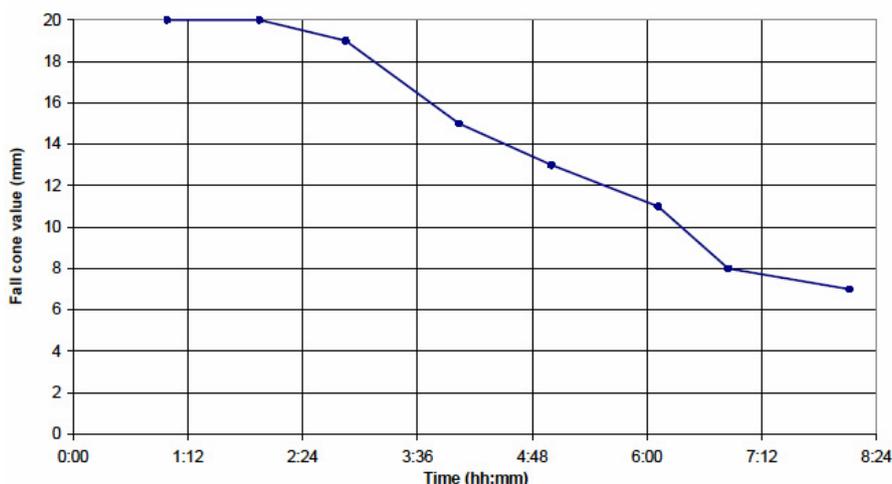


図 3.3-19 初期せん断強度試験（フォールコーン試験）の結果（P3A）

（目標値：6 時間経過時点でせん断強度 0.5kPa 以上（フォールコーン値 7mm 以下））

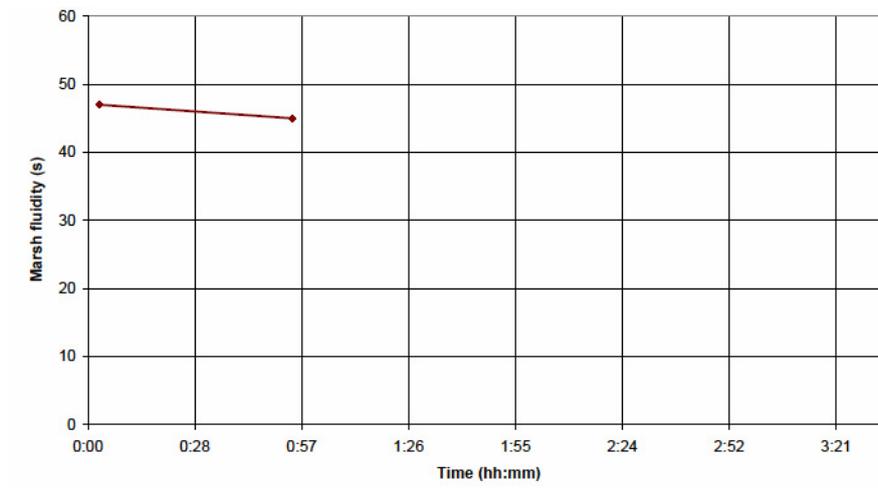


図 3.3-20 マッシュコーン試験（ワーカビリティ試験）の結果（P3A）  
（目標値：40 s 以下）

(c) 第2回目原位置試験

- 試験場所 (図 3.3-21参照)
  - ・ ONKALO アクセストンネル (Station214 : アクセストンネル坑口から 214m地点)
  - ・ トンネル断面 : 高さ 6.7m、幅 5.5m
  - ・ トンネルレベル : 海拔-17m (土被り厚 : 26m)
  - ・ 湧水圧 : 0.2~0.25MPa
  - ・ 岩盤条件 : 0.08-0.92Lu (60 $\mu$ m 以下の亀裂を有しており、グラウト注入無しではトンネル延長 25mで 0.8L/分の湧水量と予測されていた。岩質は花崗岩ペグマタイト、雲母片麻岩、結晶質片麻岩を挟んだミグマタイト。RQD は 80-100 程度、Q 値は 1.3-16.7 (Poor-Good)。亀裂状態は “moderate” であり、亀裂長は 15m以下である (大半は 3m以下、平均 1.5m程度)

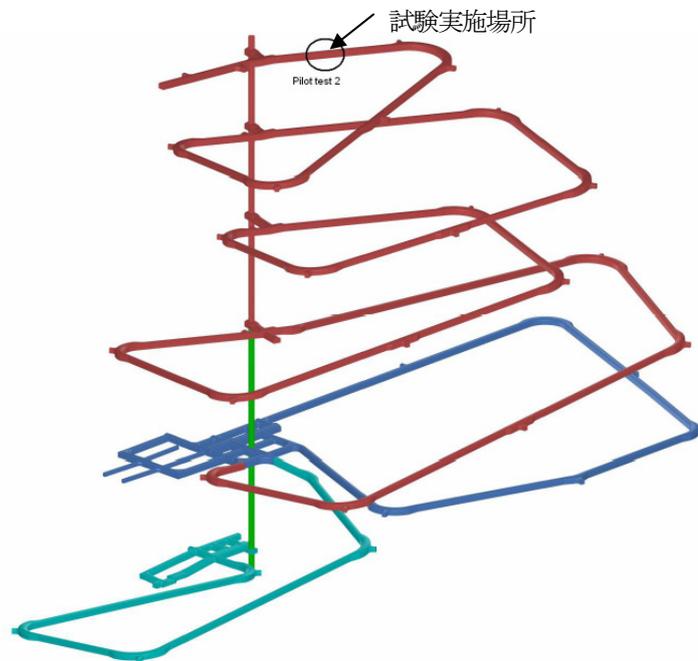


図 3.3-21 第2回目原位置試験の実施場所  
(参考文献 27) に加筆)

- 注入方法
  - ・ 注入孔数 : 22 本 (図 3.3-22参照)
  - ・ 探り孔 : 4 本 (図 3.3-23参照) において水押し試験を実施 (表 3.3-15参照)
  - ・ 注入孔長 : 26m
  - ・ 注入孔間隔 : 最大 2.5m
  - ・ 注入孔径 : 54mm
  - ・ 停止基準 : 注入圧力が 2.5MPa で安定するか、注入量が 730L に達した段階

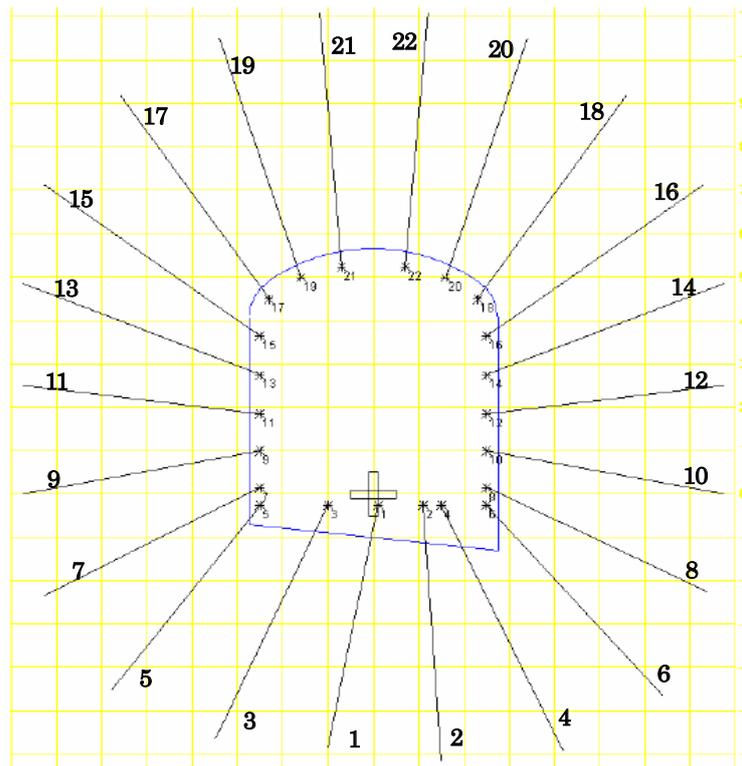


図 3.3-22 グラウト注入孔配置<sup>27)</sup>

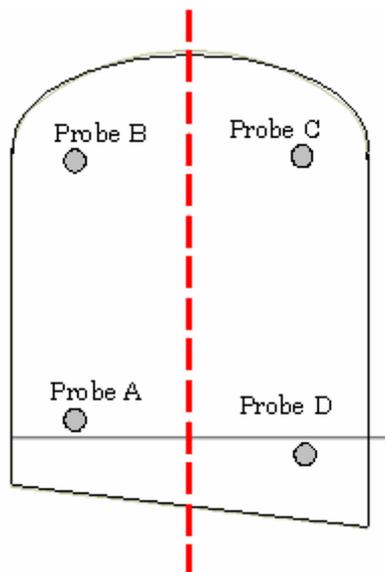


図 3.3-23 探りボーリング配置  
(参考文献 27) を基に作成

表 3.3-15 探りボーリングにおける水押し試験結果<sup>27)</sup>

<b>Probe hole OL-PR0214B, near grouting hole 15</b> water flowing out of the hole: 0.63 l/min Lugeon values: 0.92 – 0.44 – 0.36 – 0.32 – 0.15	<b>Probe hole OL-PR0214C, near grouting hole 16</b> water flowing out of the hole: 0.03 l/min Lugeon values: 0.26 – 0.16 – 0.21 – 0.14 – 0
<b>Probe hole OL-PR0214A, near grouting hole 7</b> water flowing out of the hole: 0.06 l/min Lugeon values: 0.08 – 0.16 – 0.17 – 0.16 – 0.37	<b>Probe hole OL-PR0214D, near grouting hole 8</b> water flowing out of the hole: 0.32 l/min Lugeon values: 0.64 – 0.29 – 0.26 – 0.21 – 0

● 使用材料

トンネルの左半分に低pHセメントを、右サイドに比較用として標準的なセメントグラウト材料を注入した(表 3.3-16参照)。これらの材料のバッチ練りのグラウト性能を測定した結果は、特に OPC+SF (配合 P3) に関しては、現場試験練りの結果に比べてグラウト性能が劣っているが(表 3.3-17参照)、これは気温がさらに低かった(2-3℃)ため、シリカフェームに富んだ材料が影響を受けやすかったためではないかと推測されている。

表 3.3-16 試験に使用したグラウト配合

	トンネル左サイド及びブーフ部	トンネル右サイド
注入孔No.	1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,18,22,23	2,4,6,8,10,12,14,16,20,探り孔
グラウト配合	OPC+SF (配合名称:P3)	比較用標準グラウト
水粉体比	1.6	1.0
分散剤使用量	粉体の 2w% (10 g/L)	粉体の 1w% (8 g/L)
練り混ぜ順序	水 40L	水 40L
	超微粒子セメント (Ultrafin16) 20kg	硬化調整剤 (SetControl II) 0.8L
	2 分間練混ぜ	30 秒間練混ぜ
	グラウトエイド 20L	超微粒子セメント (Ultrafin16) 60kg
	メラミン系分散剤 (SP40) を 0.55L	4 分間練混ぜ
	3 分間練混ぜ	—
	攪拌	—

表 3.3-17 現場におけるグラウト試験結果<sup>27)</sup>

	P3 1. batch	P3 2. batch	P3 3. batch	Reference grout
Filtration stability (ml) (filter pump 100 μm)	140-240	240-270	270	300
Marsh fluidity (s)	51-53	51	54	36
Bleeding (%)	0	0		1
Fall cone	~ 0.5 kPa at ~ 9 h			

● 注入試験結果

全注入孔における注入量を表 3.3-18に示す。同表より、以下のことがわかる。

- ・ P3は標準グラウトに比べて注入量が少ないということは無いが、これは左側ループ部で岩盤亀裂が多いこと、P3を先行注入したことによると考えられる。
- ・ 注入後、チェック孔（孔長 22m）を4本削孔し、水押し試験を 0.6MPa で実施した結果、0Lu と測定された。
- ・ 注入試験区間の掘削時には、（低 pH セメントを注入した）左側については、最初の 20m程度はドライ或いは多少の湿気が見られた。その後、235-240 区間においては若干の滴水が見られ、注入孔間隔が開いたため止水効果が不十分であると考えられた。特に、ロックボルト注入部については、ある程度の滴水が見られた。ロックボルト長が 3mであることより、低 pHセメントグラウトの改良範囲は 2～3m程度以下であると考えられる（今回は、1ラウンドのみ注入しているため、グラウト注入区間のオーバーラップは無い）。一方、（標準的なセメントグラウトを注入した）右側については全体的によりドライであり、2、3の水滴が見られた程度である。
- ・ 上記より、低 pH セメント（OPC+SF）についてもある程度の止水効果が確認され、適用可能性は示されたといえる。ただし、標準グラウト材料に比べると、その浸透性、止水性能は満足できるものではなかった。低 pH セメントの浸透性能が低い場合は、注入孔間隔を狭める、注入圧力を変更することが考えられる。また、シリカ量が多すぎるため、グラウトエイドの一部を他の pHを低減させる材料で置換することが出来れば、さらにグラウト材として適用しやすくなるものと考えられる。
- ・ フィルターポンプにおいては、浸透不能と考えられる微小亀裂（60 $\mu$ m 以下）に対しても、原位置試験ではグラウト材が浸透しており、これは水理学的亀裂幅の測定方法、フィルターポンプ試験方法の問題、注入圧により亀裂が開いた、ことのいずれかに起因するものと考えられる。

表 3.3-18 グラウト注入量<sup>27)</sup>

(グラウト注入量には、グラウト孔内のグラウト量 (57L) を含む)

Hole	Recipe	Total grout volume litres	Volume l/ borehole-m	Cement-kg/ borehole-m
1	P3	171	6.8	2
2	Reference grout	9	0.2	0.3
3	P3	56	2.2	0.7
4	Reference grout	122	4.9	3.7
5	P3	88	3.5	1.1
6	Reference grout	7	0.3	0.2
7	P3	178	7.1	2.1
8	Reference grout	16	0.6	0.5
9	P3	279	11.2	3.3
10	Reference grout	97	3.9	2.9
11	P3 (+Reference grout)	65	2.5+0.1	0.7+0.1
12	Reference grout	70	2.8	2.1
13	P3	102	4.1	1.2
14	Reference grout	61	2.5	1.9
15	P3	683	27.4	8.2
16	Reference grout	84	3.4	2.6
17	P3	20	0.8	0.2
18	P3 (+Reference grout)	1370	49.3+5.5	14.8+4.2
19	P3 (+Reference grout)	859	34.2+0.1	10.3+0.1
20	Reference grout	445	17.8	13.5
21	P3 (+Reference grout)	665	26.6+0.0	8.0+0.0
22	P3 +Reference grout	1522	31.2+29.7	9.3+29.2
Extra hole 23	P3	273	10.9	3.3
OL-PR0214A <sup>)</sup>	Reference grout	35	1.4	1.1
OL-PR0214B <sup>)</sup>	Reference grout	43	1.7	1.3
OL-PR0214C <sup>)</sup>	Reference grout	55	2.2	1.6
OL-PR0214D <sup>)</sup>	Reference grout	50	2.0	1.5
<b>total</b>		<b>7427</b>		<b>3299</b>

## (vii) 結論

- OPC+SF: 原位置注入試験により適用可能性が確認されたため、今後研究を継続する。ただし、十分な強度を得るためには高性能減水剤を添加し水粉体比率を1.6以下にする必要があるため、高性能減水剤が長期安全性上の懸念材料となる。また、浸透性が標準的なセメント材料に比べて劣るため、孔配置、注入圧を変更する必要があると見られる。さらに、低温により流動性、浸透性が影響されるため、シリカ分を他の低pH材料で置換できることが望ましい。
- Slag, SSC: 金属材料の腐食を促進するH<sub>2</sub>Sの溶脱量が多いため候補材料から外す。
- LAC: 微小粒径成分が凝集し浸透性能が悪いため候補材料から外す。
- Fly ash: 初期強度、原材料の使用性能及び安定性の問題があるため、当初より検討から除外した。

### (3) 非セメント材料の研究

ケミカル材料に関する研究は Silica sol の処分施設への適用性確認と Periclase (MgO) に関する今後の研究の必要性確認からなり、SKB が主体となって実施している。Silica sol については室内試験と原位置試験が実施されている。Periclase (MgO) については文献調査が実施されている。

以下、これらについてその概要を記述する。

#### (i) Silica sol の概要

Silica sol はアモルファス状の二酸化珪素 ( $\text{SiO}_2$ ) 粒子を安定的に分散させたコロイダルシリカを原料とした粒径 5~100 nm のグラウト材料である。これまでは、日本を中心に地盤改良に使用されてきたもので岩盤グラウトへの適用は新しい試みである。数種類の Silica sol が市販されているが、以前にスウェーデンの Halladsås トンネルで実施された注入試験では Cembinder U22 が、Äspö HRL の原位置試験では Eka Gel EXP36 が使用されている。

Eka Gel EXP36 は従来の Silica sol にアルミニウムで改良を加えたものであり、より良い製品であると考えられている。一方、Cembinder U22 は基本的な Silica sol であり、Halladsås トンネルでの試験に適用されている。

Silica sol の硬化には通常 NaCl か  $\text{CaCl}_2$  が使用される。図 3.3-24 に Silica sol のイメージ図を示す。

- ・ 成分：コロイダルシリカ（アモルファス状の二酸化珪素 ( $\text{SiO}_2$ ））
- ・ 粒径：5~100nm
- ・ 商品例：Cembinder U22、Eka Gel EXP36

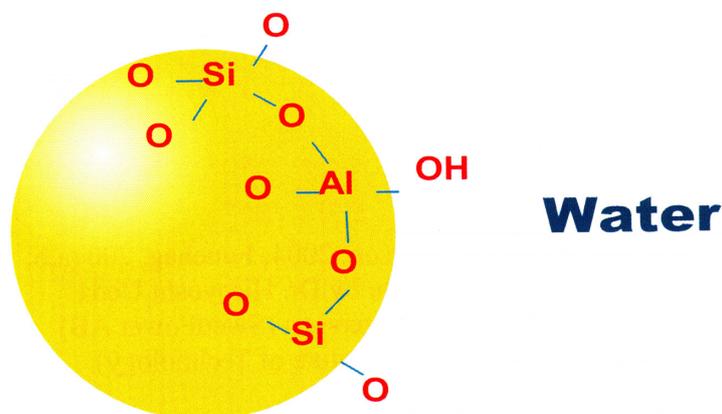


図 3.3-24 Eka Gel EXP36 のイメージ図<sup>26)</sup>

#### (ii) 室内試験

- 試験材料：Eka Gel EXP36
- ・  $\text{SiO}_2$  : 35% by weight ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{SiO}_2$  の 0.8%) により安定化)
- ・  $\text{CaCl}_2$  (硬化促進剤) : 2.9% (Silica Sol :  $\text{CaCl}_2 = 8 : 1$ )
- ・ pH : 10 以下
- ・ 粒径 : 14nm ( $\pm 3$ nm)

● 試験項目

試験は養生方法の違う以下の4種類の供試体について実施されている。

- ・ +8°C、相対湿度 100%
- ・ +8°C、相対湿度 95%
- ・ +8°C、相対湿度 75%
- ・ +20°C、相対湿度 50%

試験期間は6ヶ月間である。以下に試験項目を示す。

- ・ 乾燥収縮量測定
- ・ 強度試験（曲げ強度、圧縮強度、せん断強度）
- ・ ドライアウト試験
- ・ コロイド溶脱量測定
- ・ サンドコラム試験

上記のうち、ドライアウト試験は、以下の仮説を実証するために実施されている。

Silica sol は空気中では乾燥収縮が生じるが、実際に岩盤内に注入された場合は、周囲に地下水が存在するため Silica sol の乾燥収縮が抑制され、十分な止水性が期待できるのではないかと考えられる。

試験方法は、岩石コアに注入孔を削孔し、Silica sol を注入して作成した試験供試体に、片側から動水勾配をかけてゲル化した Silica sol を通じた水のリーク量を測定するものである。試験の概要図を図 3.3-25 に示す。

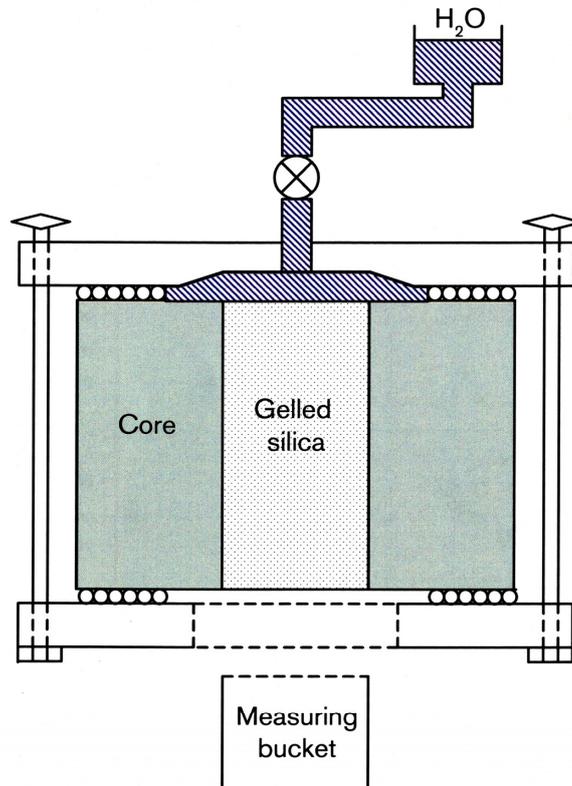


図 3.3-25 ドライアウト試験<sup>26)</sup>

(水圧：一定圧、漏水は下部のバケツにて測定する。)

サンドコラム試験は、Silica sol の浸透長の確認とその計算手法の検証を目的として実施されている。  
 図 3.3-26 に試験の概要図を示す。

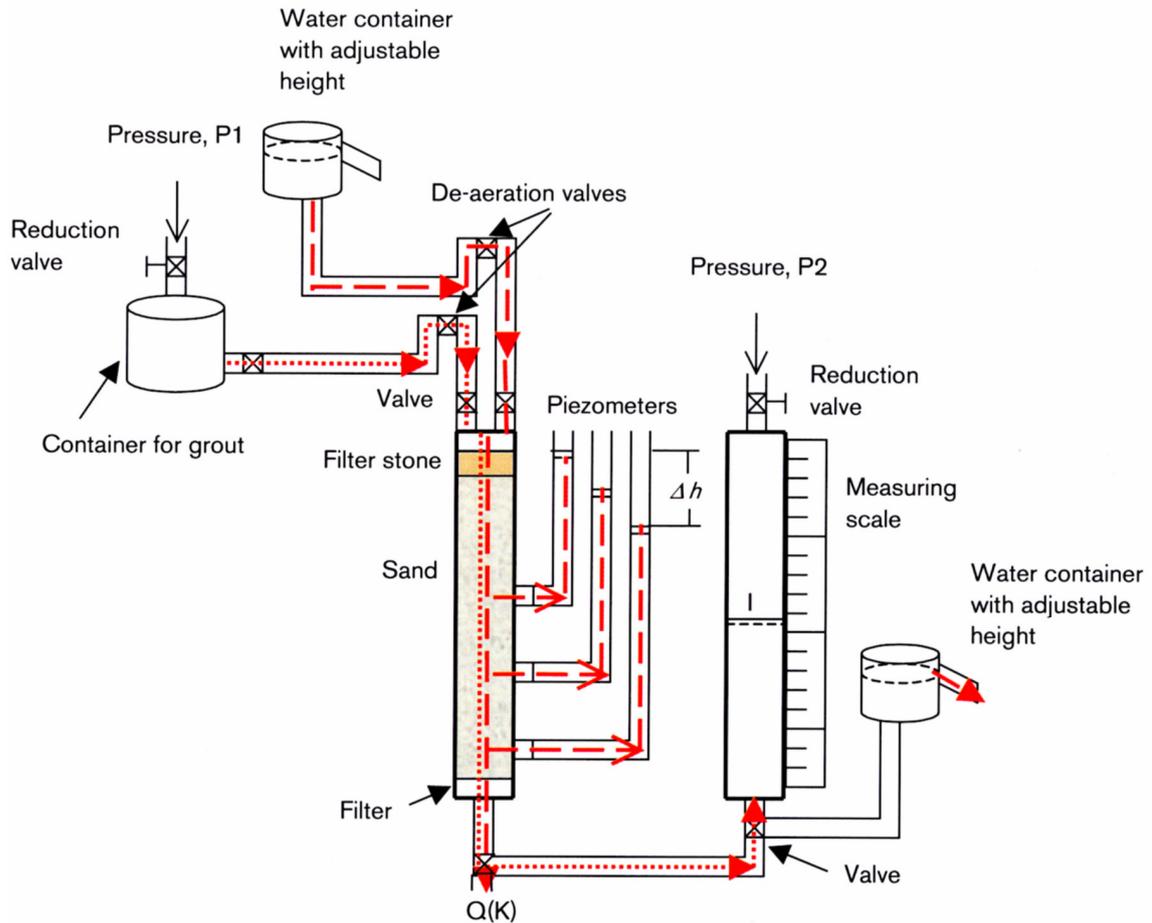


図 3.3-26 サンドコラム試験<sup>26)</sup>

(点線はグラウト材の流れを、破線は水の流れ (透水係数の測定用) を示す)

#### (4) 試験結果

試験結果を以下に示す。

- ・ 乾燥収縮量測定：図 3.3-27 参照
- ・ 強度試験 (曲げ強度、圧縮強度、せん断強度)：図 3.3-28 参照
- ・ ドライアウト試験：図 3.3-29 参照
- ・ コロイド溶脱量測定：コロイド溶脱量はすべてのケースで 1 mg/L を下回るという非常に低い結果となっている。
- ・ サンドコラム試験：図 3.3-30 参照

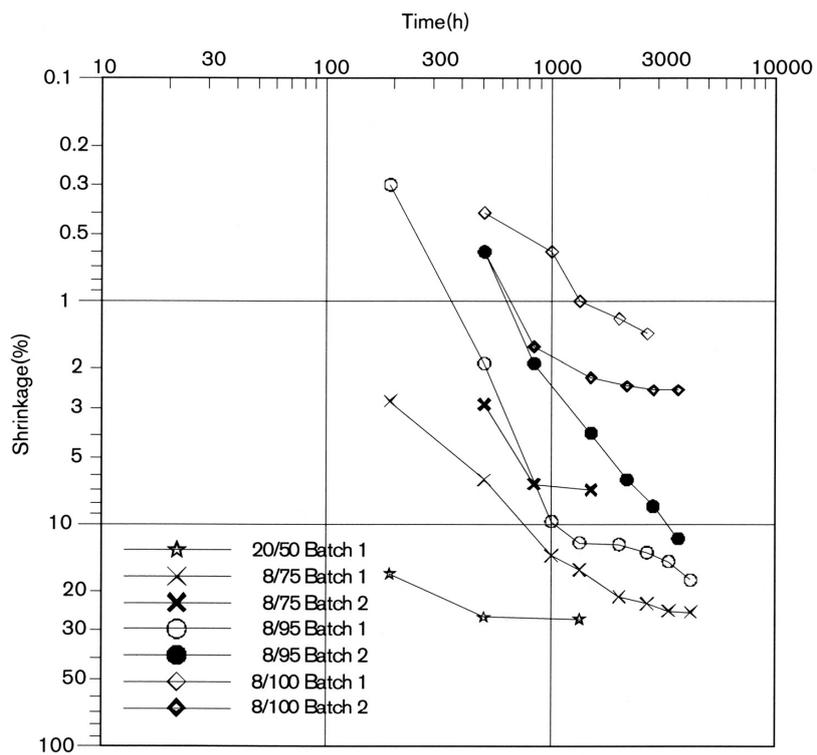


図 3.3-27 乾燥収縮の経時変化<sup>26)</sup>

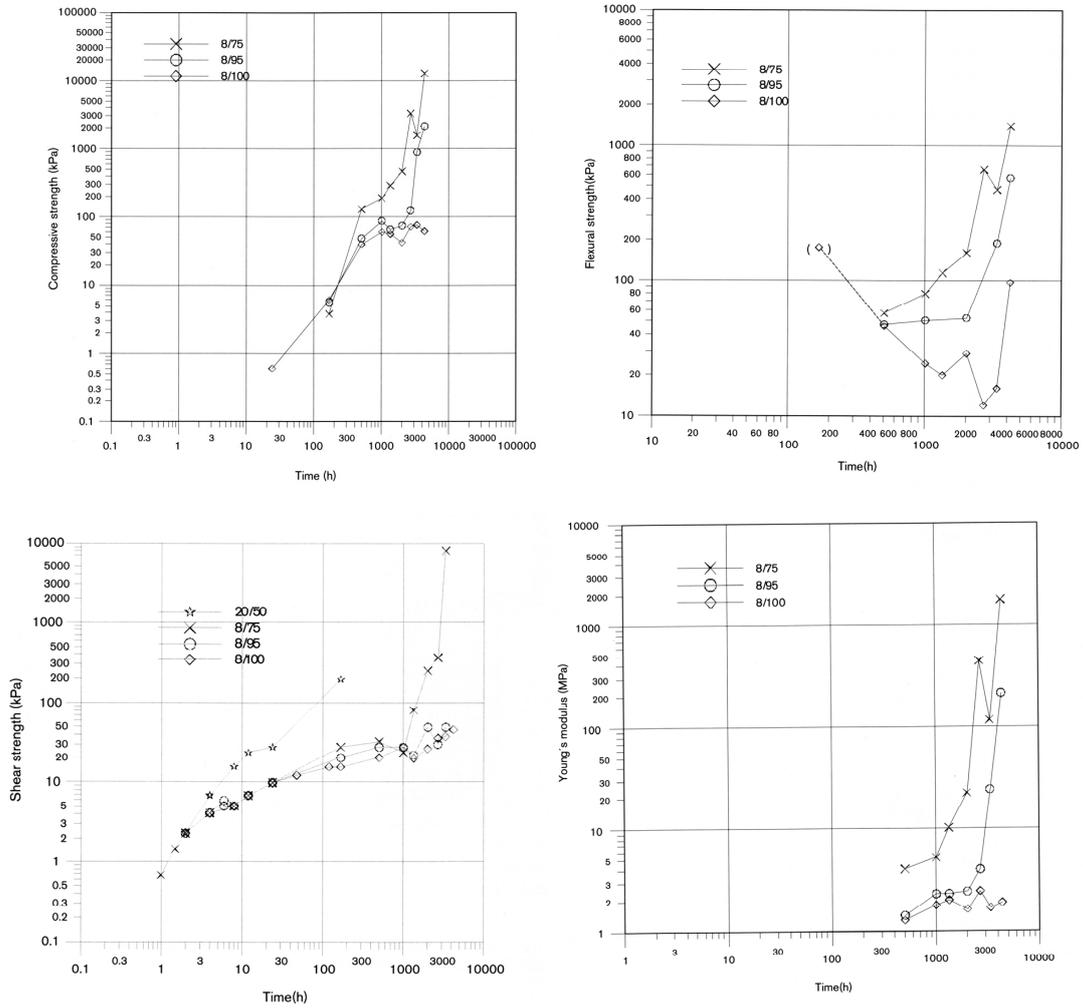


図 3.3-28 強度及びヤング係数の経時変化<sup>26)</sup>

(左上図：圧縮強度、右上図：曲げ強度、左下図：せん断強度、右下図：ヤング係数)

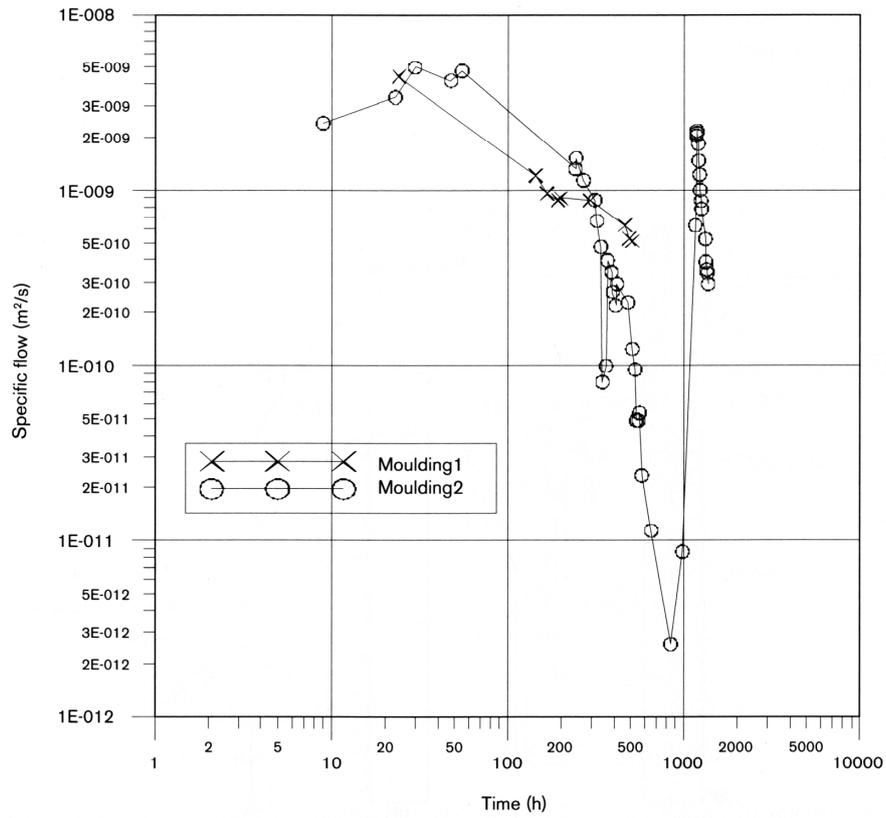


図 3.3-29 ドライアウト試験結果<sup>26)</sup>

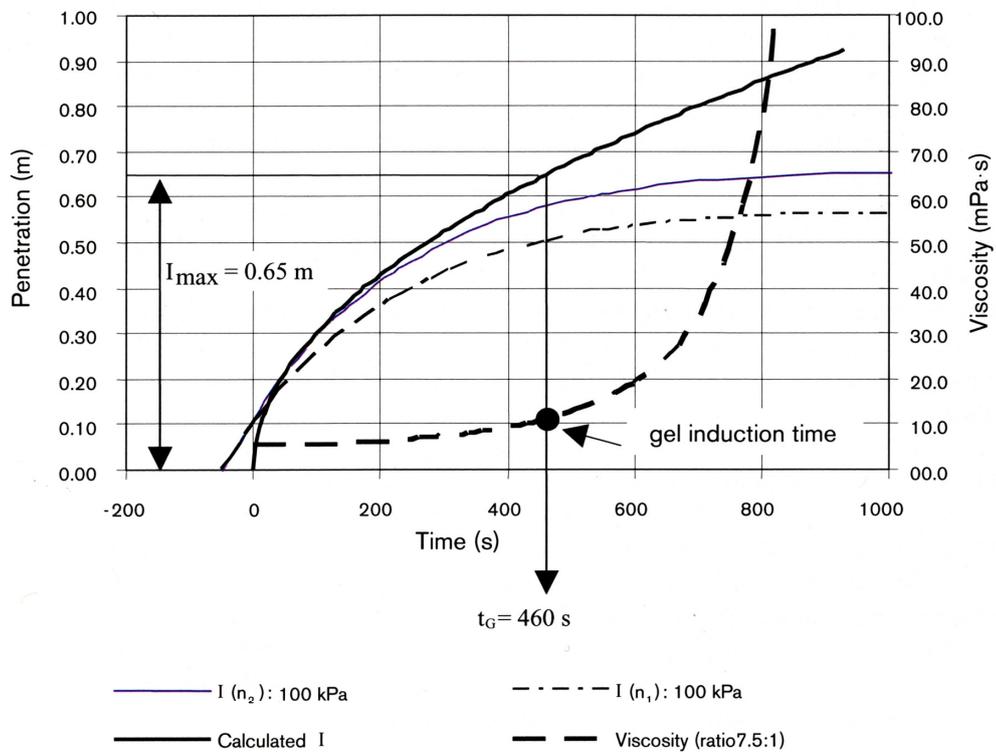


図 3.3-30 サンドコラム試験結果<sup>26)</sup>

(i) 原位置試験

(a) Äspö HRL における実験

● 試験実施場所

セメントグラウトを既に注入した地下 100m地点のアクセストンネルとサイドトンネル間のピラーが試験場所である。過去の調査結果から試験区間には透水量係数  $6.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 、水理的亀裂開口幅  $45 \sim 50 \mu\text{m}$  の 1 つの亀裂が存在することが判明している。図 3.3-31 に試験場所を示す。

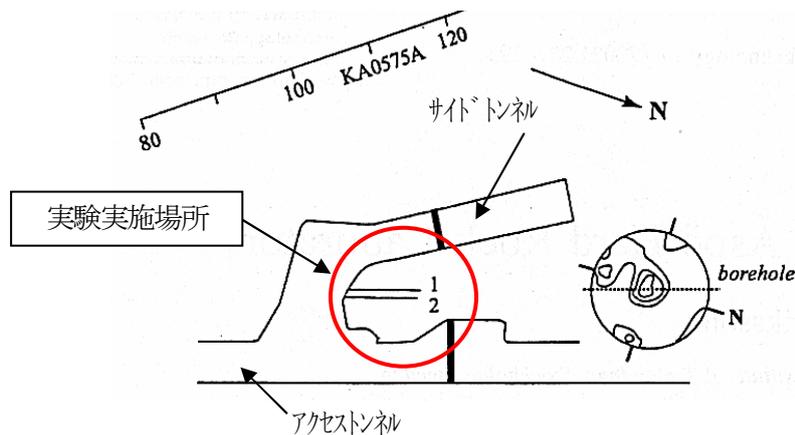


図 3.3-31 試験実施場所

(参考文献 26) に加筆

● 試験方法

試験材料は Eka Gel EXP36 (試験室でのゲルタイムは 46 分)、注入圧力は 0.2 MPa である。試験手順を図 3.3-32 に、試験孔配置図を図 3.3-33 に示す。

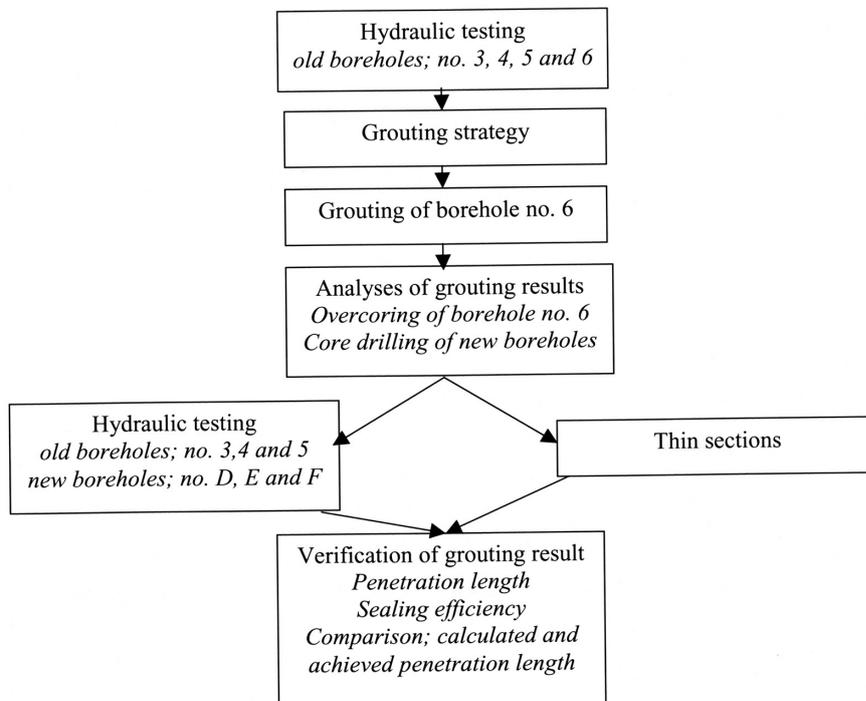


図 3.3-32 試験フロー<sup>26)</sup>

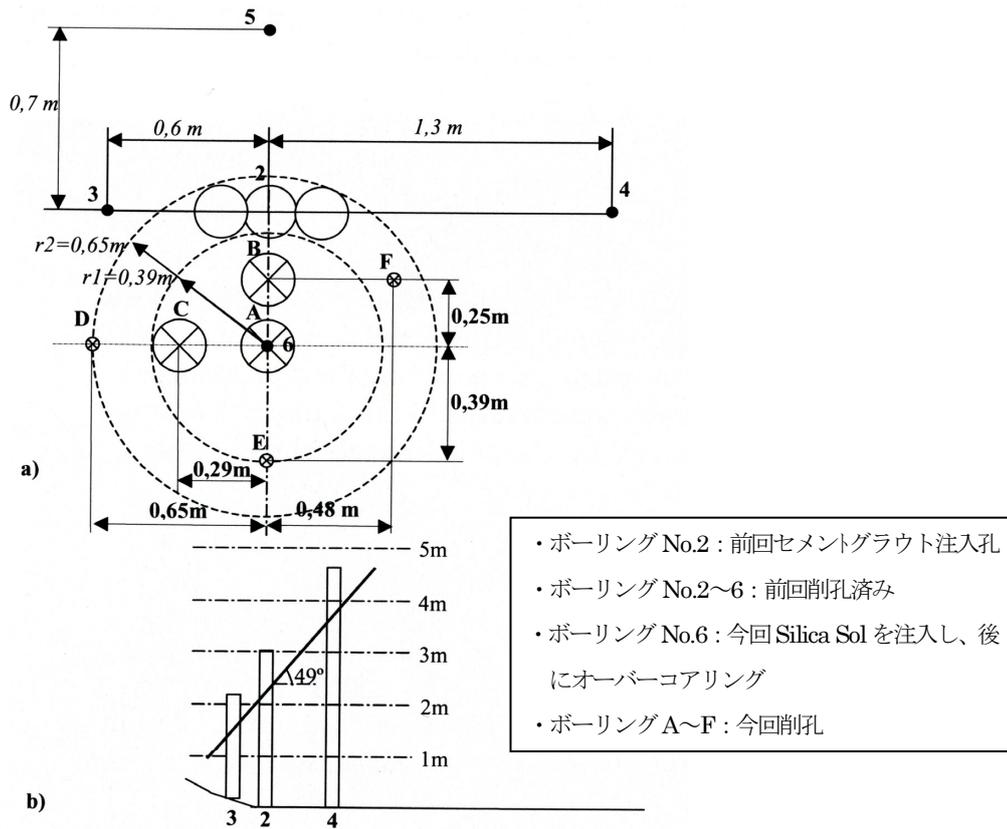


図 3.3-33 試験孔配置図<sup>26)</sup>

● 試験結果

ボーリングコアの目視及びマイクロスコープによって Silica sol の浸透が確認されている。コアの目視では 6 本中、注入孔から最も離れたコアを含む 5 本のコアで Silica sol が観察され、マイクロスコープでは少なくとも 3 箇所での Silica sol の浸透が確認された。透水量係数は注入前の  $1.5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  から注入後は  $4.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  に低減しており、約 70% の止水効果があった。

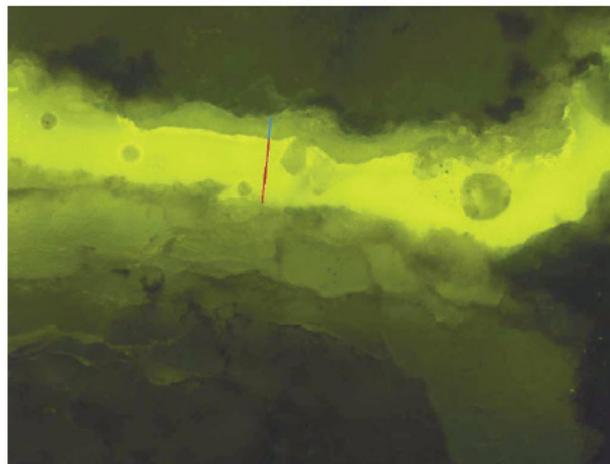


図 3.3-34 グラウト注入孔から 50mm の浸透状況<sup>26)</sup>  
 (濃緑色部 (青線) : Silica Sol、明緑色部 (赤線) : エポキシ樹脂)

(ii) 酸化マグネシウム

文献調査の結果、酸化マグネシウム (MgO) はグラウト材としては以下の使用はあるが、プレグラウト材として単独では使用されていない。

- ・ 止水ブロッカーセメント<sup>28)</sup> (図 3.3-35参照) として Elkem 社 Thermax (酸化マグネシウムを 70-100%含有、図 3.3-36参照) がポストグラウト時の一時的な止水材としてされている。

また、酸化マグネシウムに対しては実績より、以下の問題があることが判明している。

- ・ 低い改良効果
- ・ 高コスト
- ・ 低い浸透性能
- ・ 急速な硬化

また、環境影響については、酸化マグネシウムは無機物のアルカリであるため問題無いという意見と、逆に有害であるという意見がある。

上記より、酸化マグネシウムを微小亀裂に対するグラウト材料として適用することは難しいと考え、今後の研究は不必要であると結論づけている。

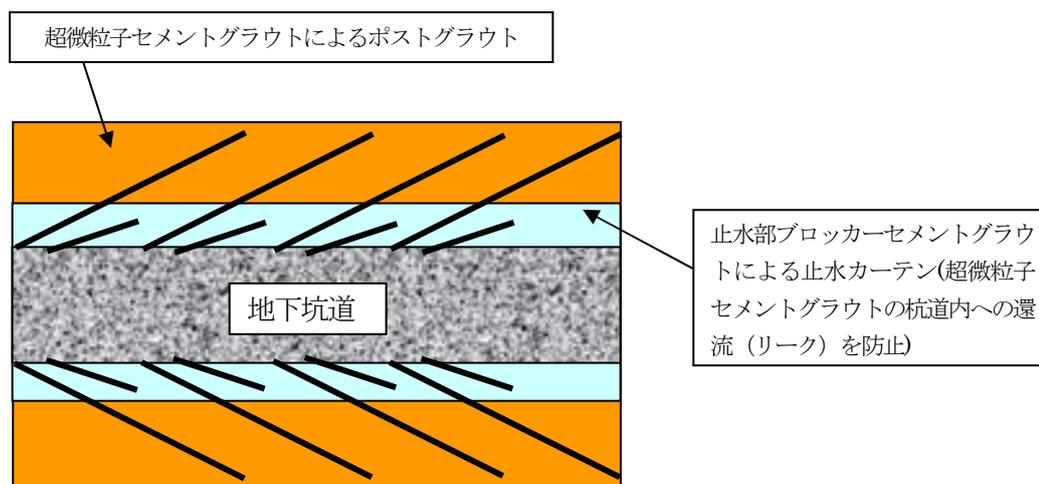


図 3.3-35 ポストグラウトにおけるブロッカーセメントの使用  
(イメージ図)

# THERMAX™

## PRODUCT INFORMATION

### GENERAL INFORMATION

THERMAX™ is a high pressure micro-fine cement designed for grouting water, brine and other fluid inflows in tunnels, mines, dams, and other civil engineering applications. THERMAX™ offers a simple, cost effective alternative to prepolymer and cementitious pressure grouts. THERMAX™ has the following benefits:

- controlled, quick set times
- will not pack, separate or segregate
- low viscosity
- unaffected by pumping pressures
- unaffected by brine.

### TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES

Appearance:	Off White Powder
Particle Size:	9.0 microns (mean)
Surface Area:	3200 m <sup>2</sup> /kg
Bulk Density:	3.0 gm/cc
Slurry Density:	1.6 kg/l
Shrinkage:	0.5% or less

### ENVIRONMENTAL ANALYSIS

THERMAX™ is a mineral based cement approved by Environmental Agencies in North America and the European Union.

### COMPRESSIVE STRENGTH

24 hour compressive strength:

up to 21 MPa

### TUNNELING APPLICATIONS

- Control high pressure water flow
- Grouting curtains and rock tightening
- Pre-injection grouting

### MINING APPLICATIONS

- Seepage control - including brines
- Shaft linings
- Void filling

### DAM APPLICATIONS

- Seepage control in concrete and earthen structures
- Rock anchoring
- Foundation stabilization

### ENVIRONMENTAL APPLICATIONS

- Soil stabilization
- Solidification of toxic wastes

### PACKAGING

- 25 kg multi-walled paper sacks
- shrink-wrapped
- palletized
- bulk bags available

### STORAGE AND HANDLING

Store under normal dry warehouse conditions. Protection from the atmosphere to prevent hydration is recommended. Handling should be done with proper safety equipment.

図 3.3-36 Elkem 社 Themax のカタログ

### 3.3.3 SKBによるセメントグラウト注入方法に関する研究

#### (1) Äspö HRL (深度 100m地点) における実験<sup>30)</sup>

- 試験実施場所：Äspö 研究所（他の実験に影響しない、或いは影響されない場所として、地下 100m地点のアクセストンネルとサイドトンネル間のピラーを選定（図 3.3-31参照））
- 試験方法：1 m間隔で2本のボーリング孔を掘削し、ボーリング孔の 2.0-2.5m区間に存在する開口幅 40~50  $\mu\text{m}$  の亀裂 ( $T=5 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ ) に対して超微粒子セメント ( $d_{95} < 12 \mu\text{m}$ 、分散剤添加、材料特性は表 3.3-19参照) を以下の要領で注入している。

#### <グラウト注入方法>

- ① ダブルパッカーを所定の亀裂に対して 0.5m間隔で設置
- ② グラウト材を混練し、パッカー間に注入
- ③ 0.4MPa の注入圧で 10 分間加圧し、グラウト注入量を計測

#### <コアボーリング ( $\phi 200\text{mm}$ ) による亀裂部の採取>

- ① グラウト材の発現強度が 0.1MPa に達した段階で、ダブルパッカーを撤去
- ② グラウト改良体に補強用鉄筋を挿入
- ③ ボーリング孔を他のグラウト材で充填
- ④ グラウト材が十分に硬化した段階で、大口径 ( $\phi 200\text{mm}$ ) コアボーリングにより改良体を採取

表 3.3-19 グラウト材料特性

		経過時間		
		10 分	20 分	30 分
密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1210	—	—	—
材料分離 [%]	20	—	—	—
浸透性能				
$b_{\text{critical}}$ [mm]		104	104	121
$b_{\text{min}}$ [mm]		46	46	42
レオロジー				
降伏値 [Pa]		0.3	0.4	1.4
塑性粘度 [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]		0.02	0.02	0.04

- 試験結果
  - ・ ボーリング孔近傍（半径 50mm の範囲）においては亀裂面の約 50%にグラウト材が浸透
  - ・ 浸透性の良い成分が部分的に、最大 100mm 程度（浸透距離）まで浸透。
  - ・ 亀裂に浸透したグラウト材料の化学分析結果より、広範囲に浸透したものは化学成分が注入材料と異なり溶けやすい成分がより遠くまで浸透したことを示している。

#### (2) Äspö HRL (深度 450m地点) における実験<sup>31),32)</sup>

- 試験実施場所：Äspö Pillar Stability Experiment (ASPE) 用トンネル（坑道長 70m）
- 試験目的

- ・ 大深度 (GL-450m) 下におけるグラウト技術の現状レベルの把握
- ・ 既往のグラウト浸透理論の適用性の確認及びその発展に資するデータの取得  
⇒必要最小限のグラウト注入により十分な止水性能を得ること

● 試験方法

以下の3ステップにより地質データをブラッシュアップし、効率的なグラウト設計、施工を実施している (図 3.3-37参照)。

また、調査ボーリングにおいては、表 3.3-20に示す水理学的試験が実施されている。

これらの3ステップに対しグラウト設計及び注入結果の予測を行い、実施した2回のグラウト注入結果と比較している (図 3.3-38、表 3.3-21参照)。

- ・ Description 1 : コアボーリング
- ・ Description 2 : Description 1 に加え、探りボーリングのデータ
- ・ Description 3 : Description 2 に加え、グラウト孔のデータ

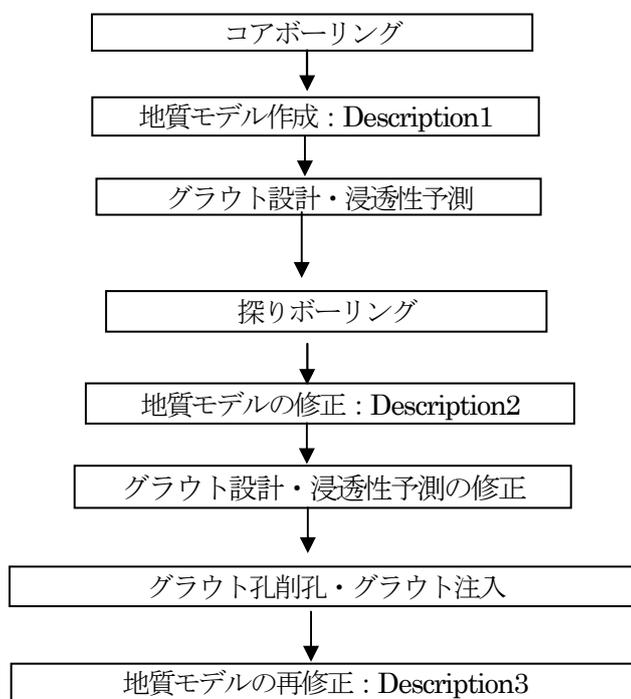


図 3.3-37 検討フロー

表 3.3-20 水理学的試験項目

試験名	コアボーリング	探りボーリング	グラウト孔
Posiva Flow Log	○	—	—
Inflow during drilling	○	○	○
Pressure build-up tests	○	○	—
Water loss measurements (Lugeon test)	—	—	○ (Fan1 の1次注入のみ)

● 地質モデルの作成

グラウト設計に使用する地質モデルの作成は、水理学試験によって得られる亀裂からの湧水量に基づいて行われる。Fransson<sup>33)</sup>によると、ある亀裂を貫く幾つかのボーリング孔がある場合、各ボーリング孔からの湧水量  $Q$  を水頭差  $dh$  で割った値 specific capacity の中央値がその亀裂の透水量係数  $T$  とほぼ等しい。透水量係数は Cubic law により水理的亀裂開口幅  $b$ 、水の密度  $\rho$ 、粘度  $\mu$  を用いて表せることから以下の関係式が成り立つ。

$$\frac{Q}{dh} \approx T = \frac{\rho g b^3}{12\mu} \quad (\text{数式 3.3-1})$$

水理的亀裂開口幅  $b$  と亀裂開口幅の算術平均  $b_{\text{average}}$ 、標準偏差  $\sigma_b$  の関係は、Zimmerman and Bodvarsson<sup>34)</sup>によると、 $c$  をコンタクトエリア (岩盤亀裂中の接触面) として以下のように表される。

$$b^3 = (b_{\text{average}})^3 \left[ 1 - \frac{1.5\sigma_b^2}{(b_{\text{average}})^2} \right] (1 - 2c) \quad (\text{数式 3.3-2})$$

以上の関係式を利用して、水理学試験によって得られる各亀裂からの湧水量に基づき水理的亀裂開口幅を設定した後に、亀裂開口幅の分布を仮定し、グラウト設計に使用している。

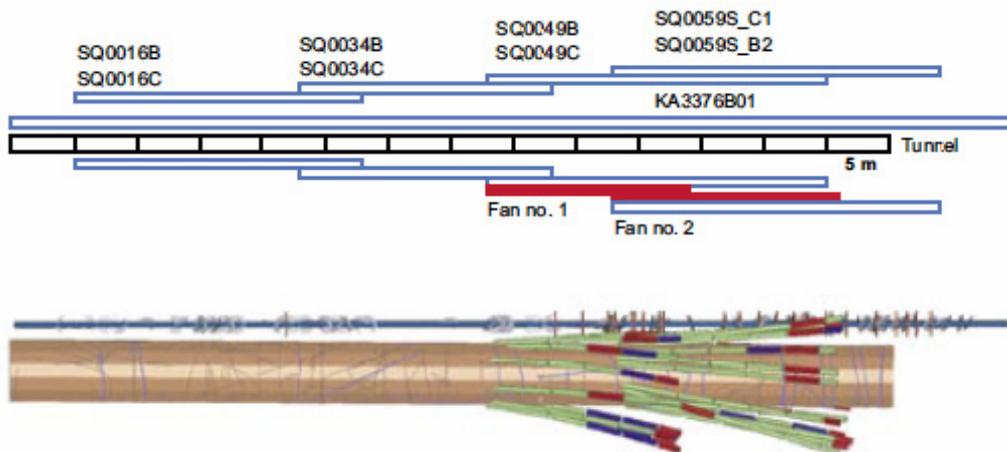


図 3.3-38 ボーリングとグラウトファンの位置関係<sup>32)</sup>

(上図において、KA : コアボーリング、SQ : 探りボーリング、Fan : グラウトファン  
下図において、緑 : 湧水量 2L/分以下、青 : 湧水量 2L/分以上、赤 : 最大湧水量発生部)

表 3.3-21 グラウト工に関連した作業の時系列<sup>32)</sup>

three meters. Time is approximate but corrected to HMS-time.

Activity	Location/borehole	Date
Drilling (acc. inflow)	SQ0016B	2003-05-09, 14:50- 2003-05-09, 15:26
Drilling (acc. inflow)	SQ0016C	2003-05-09, 17:28- 2003-05-09, 18:09
Pressure build-up test	SQ0016B	2003-05-09, 19:45- 2003-05-09, 20:45
Pressure build-up test	SQ0016C	2003-05-09, 21:45- 2003-05-09, 22:45
Drilling (acc. inflow)	SQ0034C	2003-05-22, 09:15- 2003-05-22, 09:43
Drilling (acc. inflow)	SQ0034B	2003-05-22, 11:41- 2003-05-22, 12:08
Pressure build-up test	SQ0034C	2003-05-22, 16:43- 2003-05-22, 17:43
Pressure build-up test	SQ0034B	2003-05-22, 18:43- 2003-05-22, 19:43
Drilling (acc. inflow)	SQ0049B	2003-05-27, 12:15- 2003-05-27, 13:08
Drilling (acc. inflow)	SQ0049C	2003-05-27, 15:30- 2003-05-27, 16:18
Pressure build-up test	SQ0049B	2003-05-27, 18:21- 2003-05-27, 19:21
Pressure build-up test	SQ0049C	2003-05-27, 20:51- 2003-05-27, 21:51
Drilling (acc. inflow)	Fan 1:1 (0049)	2003-06-02, 23:00- 2003-06-03, 18:01
Water loss measurements	Fan 1:1 (0049)	2003-06-03
Grouting	Fan 1:1 (0049)	2003-06-03, 21:50- 2003-06-04, 16:52
Drilling (acc. inflow)	Fan 1:2 (0049)	2003-06-05, 14:52- 2003-06-05, 21:59
Grouting	Fan 1:2 (0049)	2003-06-10, 19:39- 2003-06-13, 23:30
Drilling (acc. inflow)	Fan 2 (0059)	2003-06-24, 15:40- 2003-06-25, 17:02
Pressure build-up test	G15 (0059)	2003-06-24, 22:45- 2003-06-24, 23:45
Grouting	Fan 2 (0059)	2003-06-26, 12:49- 2003-06-27, 00:44
Drilling (acc. inflow)	SQ0059 S_C1	2003-06-27, 20:00- 2003-06-27, 20:35
Drilling (acc. inflow)	SQ0059 S_B2	2003-06-27, 20:07- 2003-06-27, 21:07

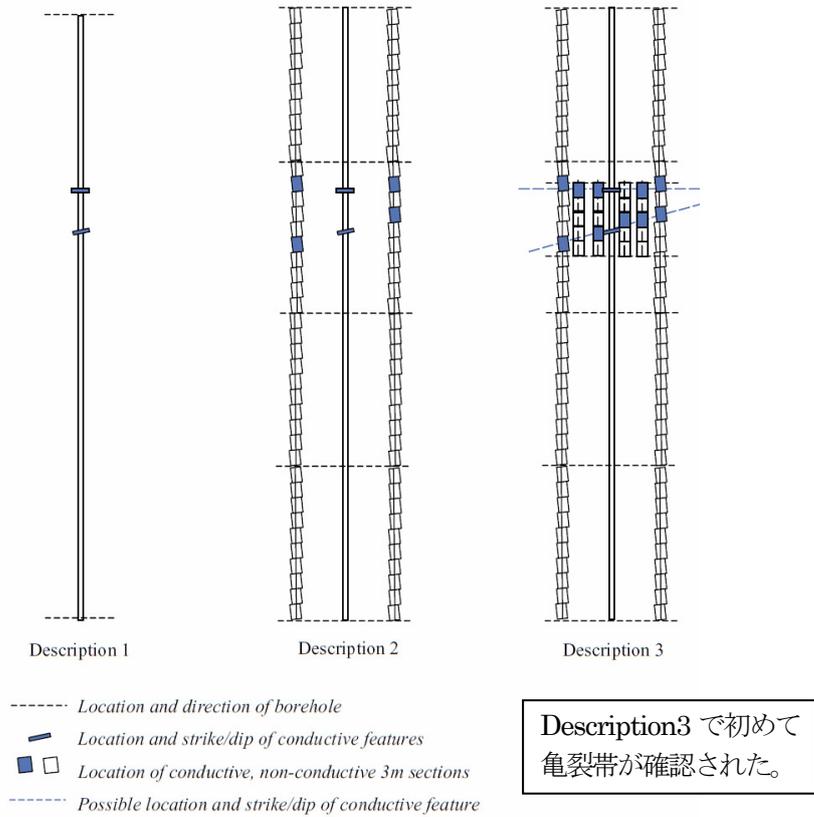


図 3.3-39 地質条件の更新の例<sup>32)</sup>

● Description1

コアボーリングで実施された Posiva Flow Log と Inflow during drilling の結果から、全体で25箇所の湧水箇所が確認されており、そのうちファン1で5箇所 (Inflow No.4、5、7、8、9)、ファン2で3箇所 (Inflow No.11、12、19) の2 L/min 以上の湧水 (2 L/min の湧水は亀裂開口幅 50  $\mu\text{m}$  に対応し、それ以下の亀裂はセメントグラウトでは注入不可能であるためグラウト対象外) が確認されている。各湧水に対し、Pressure build-up tests から算出された水頭差  $dh = 343\text{ m}$  を使用して水理学的亀裂開口幅  $b$  が計算される (表 3.3-22参照)。さらに、各亀裂の開口幅分布については、コアボーリング1種類のデータしかないため、亀裂開口幅標準偏差  $\sigma_b$  を算術平均  $b_{\text{average}}$  の1/2、コンタクトエリアを20%と仮定して Zimmerman らの式を使用して亀裂の幾何学的開口幅を算定している (表 3.3-23参照)。

表 3.3-22 算定された水理学的亀裂幅<sup>32)</sup>

(グラウトの対象となる2L/分以上が太字で示されている。)

Inflow number	Borehole depth [m] PFL	Inflow [L/min] PFL and Drilling	Q/dh [m <sup>2</sup> /s] dh: 450 m	b(Q/dh) [ $\mu\text{m}$ ]	Q/dh [m <sup>2</sup> /s] dh: 343 m	b(Q/dh) [ $\mu\text{m}$ ]
1	21.8	0.11	4.2E-09	19	5.5E-09	21
2	43.4	0.02	8.0E-10	11	1.1E-09	12
3	45.6	0.23	8.6E-09	24	1.1E-08	26
<b>4</b>	<b>47.7</b>	<b>4.67</b>	<b>1.7E-07</b>	<b>65</b>	<b>2.3E-07</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>48.2</b>	<b>2.50</b>	<b>9.3E-08</b>	<b>53</b>	<b>1.2E-07</b>	<b>58</b>
6	49.5	1.17	4.3E-08	41	5.7E-08	45
<b>7</b>	<b>49.8</b>	<b>12.00*</b>	<b>4.4E-07</b>	<b>89</b>	<b>5.8E-07</b>	<b>98</b>
<b>8</b>	<b>50.5</b>	<b>27.00*</b>	<b>1.0E-06</b>	<b>117</b>	<b>1.3E-06</b>	<b>128</b>
<b>9</b>	<b>51.8</b>	<b>11.00*</b>	<b>4.1E-07</b>	<b>87</b>	<b>5.3E-07</b>	<b>95</b>
10	52.1	0.20	7.4E-09	23	9.7E-09	25
<b>11</b>	<b>57</b>	<b>9.00*</b>	<b>3.3E-07</b>	<b>81</b>	<b>4.4E-07</b>	<b>89</b>
<b>12</b>	<b>58.2</b>	<b>2.23</b>	<b>8.3E-08</b>	<b>51</b>	<b>1.1E-07</b>	<b>56</b>
13	59.8	0.90	3.3E-08	38	4.4E-08	41
14	61.2	0.03	1.2E-09	13	1.6E-09	14
15	62.6	0.16	6.0E-09	21	7.9E-09	23
16	63.4	1.13	4.2E-08	41	5.5E-08	44
17	63.7	0.12	4.3E-09	19	5.7E-09	21
18	65.2	0.50	1.9E-08	31	2.4E-08	34
<b>19</b>	<b>65.6</b>	<b>2.10</b>	<b>7.8E-08</b>	<b>50</b>	<b>1.0E-07</b>	<b>55</b>
20	66.8	0.15	5.6E-09	21	7.3E-09	23
21	69.2	0.05	1.7E-09	14	2.3E-09	15
22	70.8	0.02	8.6E-10	11	1.1E-09	12
23	71.7	1.75	6.5E-08	47	8.5E-08	51
24	72.4	0.48	1.8E-08	31	2.3E-08	33
25	73.6	0.02	5.7E-10	10	7.5E-10	11
Sum:		77.55	2.9E-06		3.8E-06	

\* Upper measurement limit for Posiva Flow Log is approximately 5 L/min. Larger inflows are estimated based on inflow during drilling (see difference between measurements in Figure 3-1).

表 3.3-23 算定された幾何学的亀裂幅<sup>32)</sup>

	Inflow number	b [ $\mu\text{m}$ ]	$b_{\text{average}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$b_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	c [%]
Fan 1	4	71	98	49	20
	5	58	80	40	20
	7	98	134	68	20
	8	128	177	89	20
	9	95	132	66	20
Fan 2	11	89	123	62	20
	12	56	77	39	20
	19	55	76	38	20

● 当初グラウト設計

表 3.3-23に示すとおり、亀裂開口幅は多くが 100 μm以下であることを考慮して以下のようにグラウト設計がなされている。また、これに基づきグラウト注入結果が予測されている。

<当初グラウト設計>

- ・ ファン数 (プレグラウト) : 2
- ・ 注入回数 : 1
- ・ 注入孔 : 孔数 21 (最大間隔 2m)、孔長 16m、孔径 64mm
- ・ 注入圧 : 水圧+2MPa
- ・ 注入終了基準 : 注入速度が 0.2L/分以下或いはグラウト注入量が 200L 以上
- ・ 注入材料 : 表 3.3-24参照
- ・ 配合の切替 : 100L (グラウト A) ⇒50L (グラウト B) ⇒50L (グラウト C)

表 3.3-24 グラウト材料の配合及び特性<sup>32)</sup>

Property		Grout		
		A	B	C
		UF 16, w/c 2.0 0.9% HPM	UF 16, w/c 1.0 0.9% HPM	UF 16, w/c 0.8 0.9% HPM
Rheology	Yield value [Pa]	$0.296e^{0.0004t}$	$1.5e^{0.0004t}$	—
	Viscosity [Pa]	$0.0056e^{0.0004t}$	$0.017e^{0.0004t}$	—
Penetrability	$b_{min}$ [μm]	37	41	—
	$b_{critical}$ [μm]	$0.0032t+60$	$0.0032t+75$	—
Density	[kg/m <sup>3</sup> ]	1290	1480	—
Bleed	[%]	15	5	—

<グラウト注入結果の予測>

表 3.3-25 グラウト注入結果の予測 (平均値)<sup>32)</sup>

	Inflow number	Median grouted volume [l]	Median grouted time [min]	Median sealing effect [%]
Fan 1	4	19	54	99
	5	7	17	97
	7	104	320	99
	8	257	569	99
	9	104	315	99
Fan 2	11	134	435	99
	12	9	22	91
	19	9	22	91

表 3.3-26 グラウト注入結果の予測 (ファンの合計値)

(表 3.3-25に基づいて算定)

	Fan1	Fan2
総注入量*	497L	152L
注入時間*	569 分	435 分
止水効果	99%	97%
注入後湧水量	1L/分	1L/分

\*注入孔がグラウトにより満たされるグラウト注入量と注入時間を除く。

● Description2

このステップでは地質モデルの作成に、上記のコアボーリングに加えて新たに2本の探りボーリングの結果を使用する。探りボーリングにおける水理学的試験においても湧水箇所が発見され、図 3.3-40に示すようにコアボーリングで観察された湧水箇所の一部と同様の亀裂に起因することが確認されている。

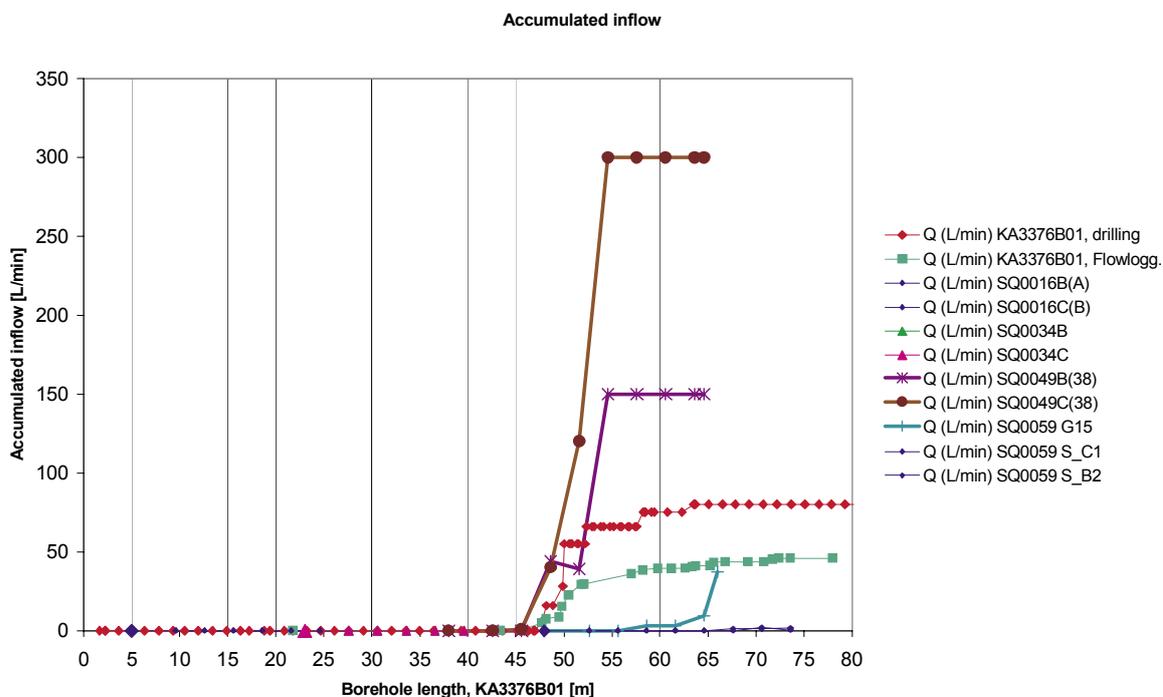


図 3.3-40 コアボーリングと探りボーリングの比較<sup>32)</sup>

これらの結果をまとめると、各亀裂に対し3種類の specific capacity が存在し、その中央値から水理学的亀裂開口幅を設定する(表 3.3-27参照)とともに幾何学的亀裂開口幅を算定している(表 3.3-28参照)。

表 3.3-27 算定された水理学的亀裂幅<sup>32)</sup>

(SQ0049B ボーリングを基に算定、グラウトの対象となる 2L/分以上が太字で示されている。)

Section no	Section	Length [m]	dQ [L/min]	dQ [m <sup>3</sup> /s]	Q/dh [m <sup>2</sup> /s] dh: 343 m	b(Q/dh) [μm]
	0-4.6	4.6	0	0	0	0
	4.6-7.6	3	0	0	0	0
<b>B1</b>	<b>7.6-10.6</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>7.50E-04</b>	<b>2.19E-06</b>	<b>151</b>
	10.6-13.6	3	0	0	0	0
<b>B2</b>	<b>13.6-16.6</b>	<b>3</b>	<b>105</b>	<b>1.75E-03</b>	<b>5.10E-06</b>	<b>201</b>
	16.6-19.6	3	0	0	0	0
	19.6-22.6	3	0	0	0	0
	22.6-25.6	3	0	0	0	0
	25.6-26.6	1	0	0	0	0

表 3.3-28 算定された幾何学的亀裂開口幅 (Description 2)<sup>32)</sup>

	Inflow number	b [μm]	b <sub>average</sub> [μm]	σ <sub>b</sub> [μm]	c [%]
Fan 1	4	145	185	67	20
	5	58	80	40	20
	7	98	134	68	20
	8	128	157	39	20
	9	201	264	111	20
Fan 2	11	89	123	62	20
	12	56	77	39	20
	19	55	76	38	20

表 3.3-28に示すとおり、いくつかの亀裂開口幅が 100 μm を超えていることから次のようにグラウト設計が変更されている。

● グラウト修正設計

Description1 から 2 への変更に伴い、グラウト設計が Fan 1 についてのみ以下のように修正された。

<グラウト修正設計>

- ・ 地質条件：45-66m区間において最大湧水有り。予想亀裂幅：240 μm
- ・ 注入回数：2 (1次注入により大きな亀裂、2次注入により小さな亀裂を止水する。)
- [1次注入]
- ・ 注入孔：孔数 11、孔長 16m、孔径 64mm
- ・ 注入圧：水圧+1MPa
- ・ 注入終了基準：湧水量が 1.0L/分以下
- ・ 配合の切替：150L (グラウト B) ⇒50L (グラウト C)
- [2次注入]

- ・ 注入孔：孔数 20、孔長 16m、孔径 64mm
- ・ 注入圧：水圧+2MPa
- ・ 注入終了基準：注入速度が 1.0L/分（1次注入）  
 配合の切替：100L（グラウト A）⇒50L（グラウト B）⇒50L（グラウト C）

<グラウト注入結果の予測>

表 3.3-29 グラウト注入結果の予測（平均値、Fan1 の 1 次注入）<sup>32)</sup>

Inflow number	Median grouted volume [l]	Median grouted time [min]	Median sealing effect [%]
4	112.5	326.1	100
5	1.8	4.9	11
7	26.7	75.8	79
8	63.1	186.8	100
9	329.4	727.7	100

表 3.3-30 グラウト注入結果の予測（平均値、Fan1 の 2 次注入）<sup>32)</sup>

Inflow number	Median grouted volume [l]	Median grouted time [min]	Median sealing effect [%]
4*	—	—	—
5	11.1	27.1	71
7	0.3	4.4	0
8*	—	—	—
9*	—	—	—

\* Can not be regouted in the model since the fracture was totally sealed in the first grouting round.

表 3.3-31 グラウト注入結果の予測

（表 3.3-25に基づいて算定）

	Fan1 の 1 次注入	Fan1 の 2 次注入
総注入量*	630L	11L
注入時間*	728 分	27 分
注入効果	97%	62%
注入後湧水量	0.4/分	0.1L/分

\*注入孔がグラウトにより満たされるグラウト注入量と注入時間を除く

● Description 3

このステップでは地質モデル作成に、注入で使用されたグラウト孔自体の結果が加えられている。ただし、修正された地質モデルはグラウト設計には反映せず、グラウト注入結果のみを予測している。グラウト孔はファン 1（1次注入）では 11 孔、ファン 2 では 20 孔あるため、各亀裂に対する情報量は Description 1, 2 に比べはるかに多い。ファン 1 ではグラウト孔が各亀裂箇所を貫く箇所における湧水の有無の比率によりコンタクトエリアを設定し、水理学的亀裂開口幅と亀裂開口幅分布は Description 2 と同様としている（ファン 2 では同様の方法をとるとコンタクトエリアが過大となるため、40%と設定）。

表 3.3-32 算定された幾何学的亀裂開口幅 (Description 3) <sup>32)</sup>  
(Fan1)

	Section number	b [ $\mu\text{m}$ ]	b <sub>average</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	b <sub>0</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	c [%]
Fan 1:1	1	0	0	0	90
	2	43	43	0	91
	3	123	214	98	36
	4	92	150	53	36
	5	150	186	65	18

表 3.3-33 算定された幾何学的亀裂開口幅 (Description 3) <sup>32)</sup>  
(Fan2)

	Section number	b [ $\mu\text{m}$ ]	b <sub>average</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_b$ [ $\mu\text{m}$ ]	c [%]
Fan 2	1	34	58	0	40
	2	38	81	46	40
	3	54	108	54	40
	4	34	67	32	40
	5	90	162	48	40
	6	68	151	90	40

また、グラウト注入結果の予測は次のように修正されている。

<グラウト注入結果の予測>

表 3.3-34 グラウト注入結果の予測 (平均値、Fan1 の1次注入) <sup>32)</sup>

Section number	Median grouted volume [l]	Median grouted time [min]	Median sealing effect [%]
1	0	0	0
2	0	0	0
3	68	333	100
4	20	110	1
5	133	641	100

表 3.3-35 グラウト注入結果の予測（平均値、Fan1 の2 次注入）<sup>32)</sup>

Section number	Median grouted volume [l]	Median grouted time [min]	Median sealing effect [%]
1	0	0	0
2	0	0	0
3	2	18	23
4	44	430	99
5	0	0	0

表 3.3-36 グラウト注入結果の予測（平均値、Fan2）<sup>32)</sup>

Inflow number	Median grouted volume [l]	Median grouted time [min]	Median sealing effect [%]
1	2	11	20
2	6	27	83
3	21	110	99
4	3	11	29
5	165	898	100
6	94	451	100

表 3.3-37 グラウト注入結果の予測（ファンの合計値）

（表 3.3-34～表 3.3-36に基づいて算定）

	Fan 1			Fan2
	1 次注入	2 次注入	合計	
総注入量*	221L	46L	267L	291L
注入時間*	641 分	430 分	1071 分	898 分
注入効果	97%	92%	99.6%	95%
注入後湧水量	—			0.1L/分

\*注入孔がグラウトにより満たされるグラウト注入量と注入時間を除く

● グラウト注入結果

実際のグラウト注入結果を以下に示す。

表 3.3-38 グラウト注入結果<sup>32)</sup>

Fan	Grout take [l] Including hole filling/ excluding hole filing	Grouting time [min] Including hole filling/ excluding hole filing	Sealing effect [%]
1:1	1633/863	196/160	97
1:2	2537/1137	854/800	97
2:1	2456/1470	480/420	95

グラウト注入結果の予測と注入結果より、以下のことが考察されている。

- ・ コアボーリングによって早期に亀裂情報を取得することは、早期にグラウト設計を行う上で

重要である。

- ・ 探りボーリングによって初期のグラウト設計を修正することが可能である。
- ・ 予測注入量は実際の注入量に比べて大幅に少ない。
- ・ 予測注入時間は実際の注入時間に対しばらつきが大きい。
- ・ 予測注入効果は実際の注入効果と非常に近い値である（ファン1の1次注入とファン2において）。

● まとめ

<グラウト設計>

- ・ ファン1においては、1次注入で大きな亀裂に対して少ないグラウト孔から低圧で少量のグラウト材料を使用して注入し、2次注入で小さな亀裂をより多いグラウト孔からより厳しい注入終了基準に従い注入することを意図して実施したが、いずれも成功に終わった。透水係数に換算すると、注入前の透水係数  $2.7 \times 10^{-7}$  m/s に対し、1次注入後が  $9.5 \times 10^{-9}$  m/s、2次注入後が  $3.3 \times 10^{-10}$  m/s と十分な止水性を確保することができた。
- ・ ファン2においても、注入後の透水係数が  $1.9 \times 10^{-9}$  m/s と注入は成功した。
- ・ これらの結果は、現在のグラウト技術の大深度で比較的透水性の低い岩盤に対する適用性判断に役立つ。

<グラウト施工>

- ・ 大深度で高水圧下における注入であるため、計測に特別な機器が必要であった。
- ・ 水理学的試験に多くの時間が費やされることは施工上問題であり、解決策が必要とされる。

<その他（地質のモデル化等）>

- ・ 2 L/min 以上の湧水箇所のみを対象とし、走向・傾斜といった亀裂情報をもとに地質をモデル化することは有効であり、試験全体を通じて整合性のあるものであった。
- ・ 0.1 m ピッチで実施する Posiva Flow Log の結果と比較しても、3 m 区間毎の Inflow during drilling 結果は、2 L/min 以上の湧水箇所に対してのみグラウトを実施するという目的に対しては十分な精度を有していた。
- ・ 地質の適切なモデル化には、Posiva Flow Log や Inflow during drilling のようにボーリング近傍の透水性を測定する試験だけではなく、Pressure build-up tests のように亀裂全体の透水性を評価する試験が役立つ。
- ・ この試験では地質のモデル化にあたり、グラウト孔の 3 m 区間毎の湧水量を測定したが、グラウト全体からの湧水量に基づくグラウト設計手法が確立されれば、区間毎湧水量を測定することは不要であろう。

上記のように地質条件を詳細に把握することで、システムチックな全面プレグラウトを省略することが可能となった。

### 3.3.4 JAEAによる低 pH グラウト研究

HFSC に類似した材料を用いて以下の浸漬試験が実施されている<sup>35)</sup>。

#### (1) 試験方法

使用材料を表 3.3-39に、材料の配合を表 3.3-40に示す。

供試体は、水セメント比 80%として作成し、ペーストを混練後、密閉容器に入れて 20°Cで 28 日間密封養生した。養生後に余剰の水分を取り除くために 7 日間真空乾燥を行った後に粉碎した。浸漬試験は、ポリ容器に粉碎したセメント硬化体 20g とイオン交換水 40g を入れ (液固比 2.0) pHを測定する期間まで、20°C及び 65°Cの状態です浸漬させた。

表 3.3-39 使用材料一覧表  
(参考文献 35)をもとに作成)

材料名	最大粒径( $\mu\text{m}$ )	比表面積( $\text{cm}^2$ )	組成等
微粒子 OPC : OPC を微粉碎)	20	10,270	JIS 規格
SF (A) : シカフェーム (高純度品)	4	202,000	SiO <sub>2</sub> 99%以上
SF (B) : シカフェーム (中位品)	7	198,000	SiO <sub>2</sub> 95%以上
LP : 石灰石微粉末	18	9,500	CaCO <sub>3</sub>
BFS : 高炉スラグ 微粉末	7	12,000	JIS 規格

表 3.3-40 材料の組合せ  
(参考文献 35)をもとに作成)

試験 ケース	混合割合 (質量%)				
	微粒子 OPC	シカフェーム (高純度品)	シカフェーム (中位品)	石灰石微粉末	高炉スラグ <sup>g</sup> 微粉末
1	50	50	—	—	—
2	50	—	50	—	—
3	20	—	20	60	—
4	20	—	20	—	60
5	30	—	30	40	—

#### (2) 試験結果

pHの経時変化を 20°Cの場合は図 3.3-41に、65°Cの場合は図 3.3-42にそれぞれ示す。

これらの図より、65°Cにおける実験結果が最終段階における浸出水の pH 状態であると想定すると、試験ケース 4 の高炉スラグ微粉末を含んだケース以外においてはいずれも pH が 10 程度以下まで低下したことがわかる。

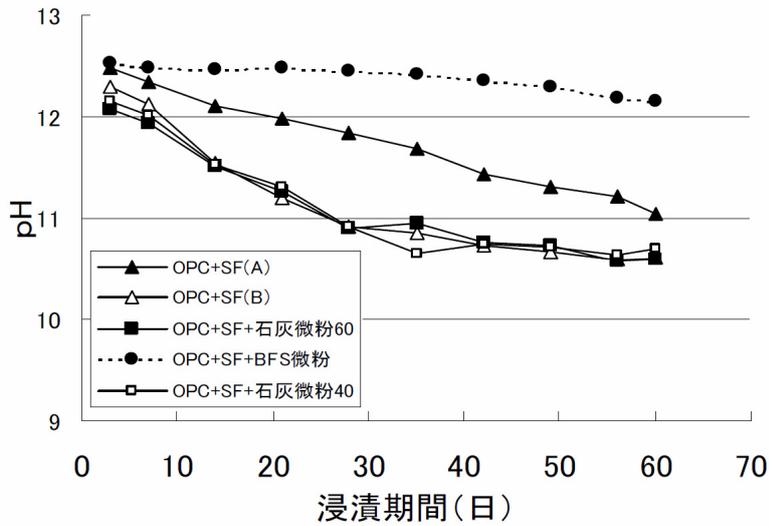


図 3.3-41 20°Cにおける pHの経時変化<sup>35)</sup>

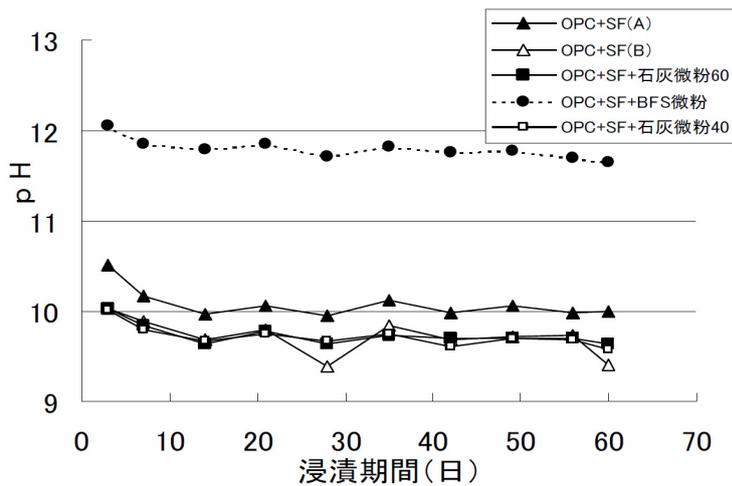


図 3.3-42 65°Cにおける pHの経時変化<sup>35)</sup>

(3) まとめ

粒径が比較的大きいフライアッシュを用いている HFSC ではなくて粒径が小さい材料からなる供試体を用いてその pH特性のみが研究されている。その結果、微粒子 OPC、シリカフェーム、石灰石微粉末からなる材料が低 pHセメントグラウトの候補になりうる事が示されているが、強度特性及び浸透性能等については現状では研究されていない。

### 3.3.5 エタノールベントナイト研究

高レベル放射性廃棄物の地層処分を対象としたグラウト技術の研究が行われており、グラウト材料のひとつとして長期の安定性と止水性が期待されるベントナイトが着目されている。しかし、ベントナイトは真水でスラリーを作成すると、粘性が高く、高濃度スラリーの注入が困難である。そこで、この粘性を低下する対策としてエタノールを溶液としたベントナイトスラリーが検討されている。以下にその概要を示す。

#### (1) エタノールベントナイトの基本特性

西垣<sup>36)</sup>、田岡<sup>37)</sup>らは、エタノールを溶媒としたベントナイトスラリーの基礎特性（粘性特性、透水性、拡散試験）について室内試験を実施し、以下のような特性を明らかにし、グラウト材としての適用可能性を確認している。

##### (i) 粘性

##### (a) エタノール濃度とスラリーの粘性の関係

ファンネル粘度の測定を行い、エタノール濃度が60～100%までは粘性の大きな変化が見られないが、60%以下となると急激に粘性が増加するという特性を示している。（図 3.3-43参照）。なお、図中のエタノールベントナイトはエタノール液とベントナイトの重量比を示している。

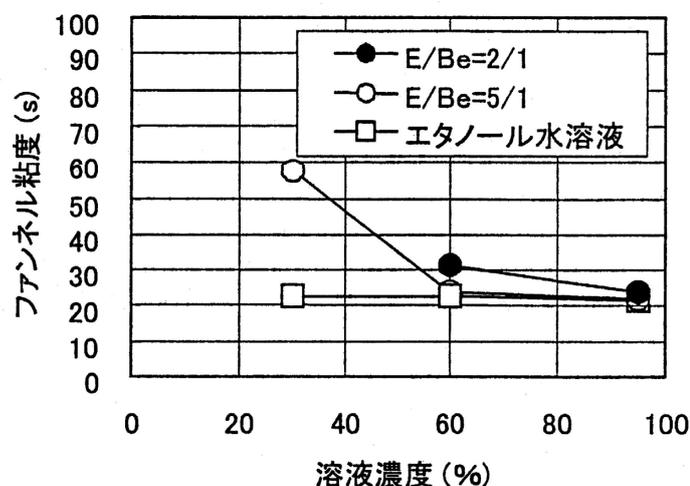


図 3.3-43 エタノールベントナイトスラリーのファンネル粘度<sup>36)</sup>

##### (b) 配合比とスラリーの粘性

水、エタノール、塩水を溶媒として、溶液／ベントナイトの配合比を変えてB型粘度計により粘性を測定した結果（図 3.3-44参照）、水の場合と比較してエタノール、塩水は高密度かつ低粘性でスラリーが作成可能であることを示している。

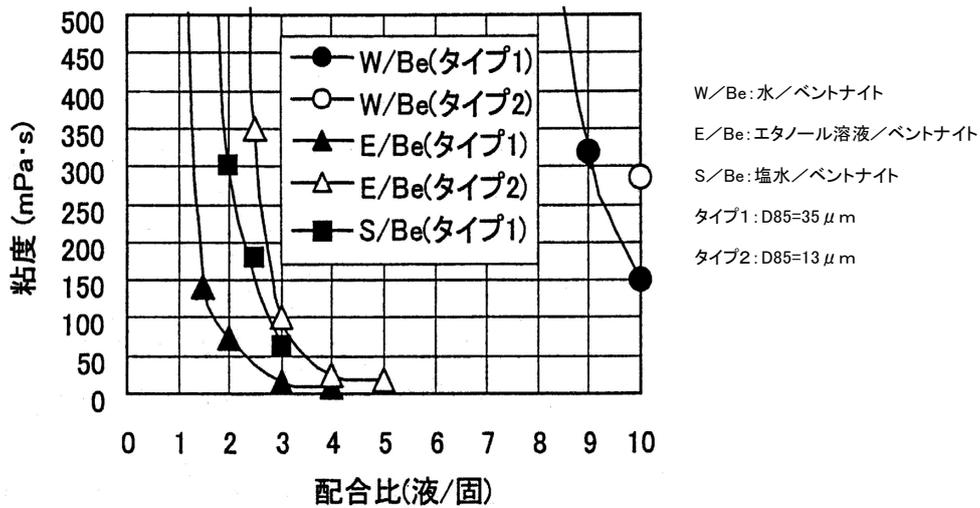


図 3.3-44 配合比と回転粘度計で測定した粘度の関係<sup>36)</sup>

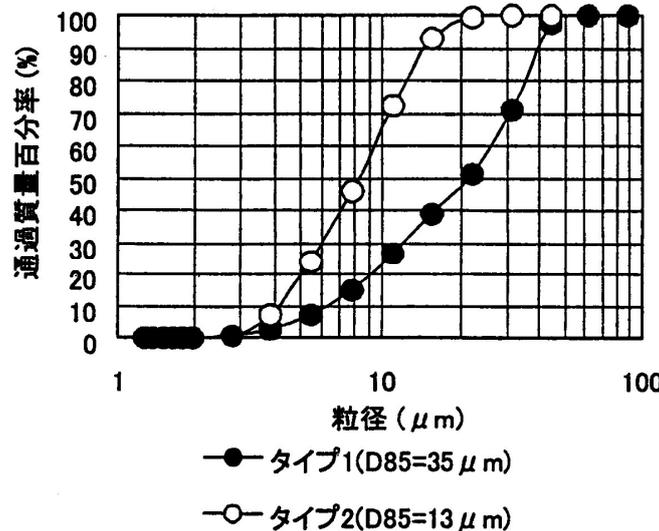


図 3.3-45 ベントナイトの粒径加積曲線 (溶媒: 60%エタノール、湿式)<sup>36)</sup>

(ii) エタノールベントナイトスラリーの透水性

エタノールベントナイトスラリー (エタノール濃度 60%、エタノール/ベントナイト=1.2/1) に対して、鉛直方向の膨潤等による変位を拘束条件として透水試験 (図 3.3-46参照) を行い (間隙比は 1.3~2.3 に調節)、通水の時間経過につれてエタノールベントナイトスラリーは膨潤し、それに伴って固有透過度は低下し、最終的に  $10^{-14}$ ~ $10^{-13}$  オーダー ( $\text{cm}^2$ ) と極めて低透水性を呈することを示している。固有透過度の経時変化及び通水時のベントナイトの膨潤圧測定結果を図 3.3-47及び図 3.3-48に示す。なお、固有透過度  $k$  は、水の密度や粘性によらない物質固有の係数であり、透水係数  $K$  と以下の関係になる。

$$K = k \cdot g \cdot \rho / \eta \quad (\text{数式 3.3-3})$$

ここに、 $\rho$ : 地下水の密度、 $\eta$ : 粘性率、 $g$ : 重力加速度

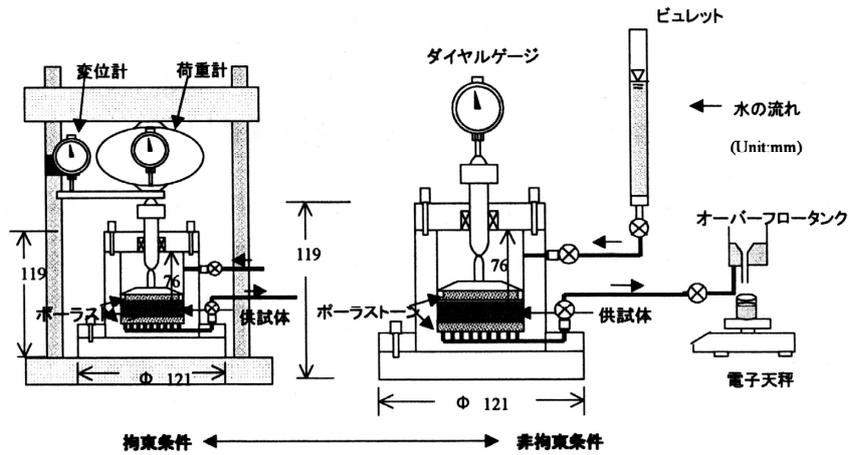


図 3.3-46 変水位透水試験装置<sup>37)</sup>

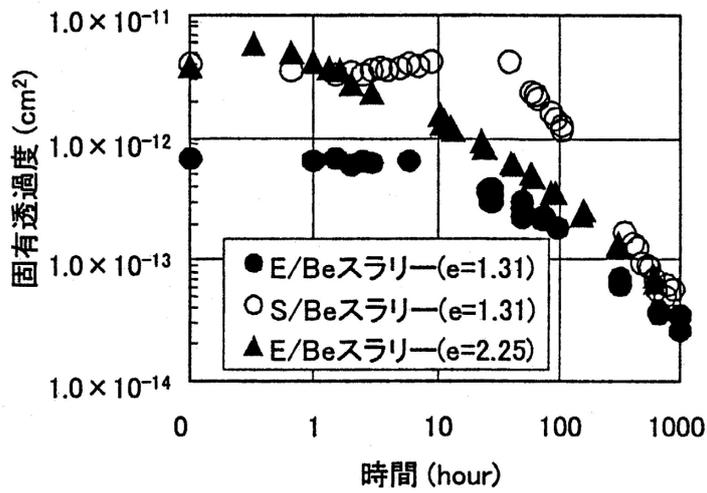


図 3.3-47 エタノールベントナイトスラリーの透水試験結果<sup>36)</sup>

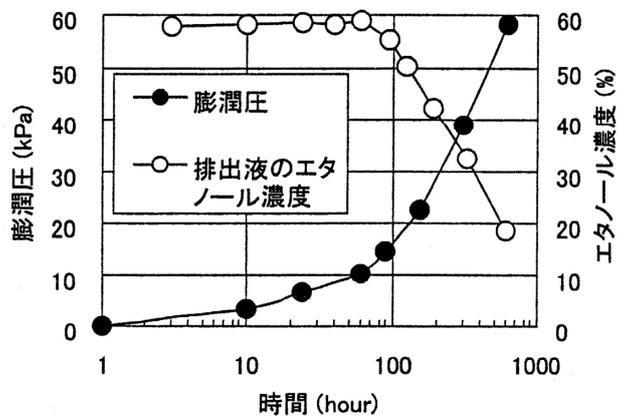


図 3.3-48 エタノールベントナイトスラリー (e=2.25)の通水時の膨潤圧<sup>36)</sup>

(iii) エタノールベントナイトスラリーの水による拡散試験

鉛直一次元拡散試験によりエタノールベントナイトスラリーからのエタノール拡散現象を把握し、拡散係数の値が  $10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$  のオーダーであることを示している。拡散試験装置を図 3.3-49 および図 3.3-49 に、試験結果を図 3.3-50 および図 3.3-51 に示す。

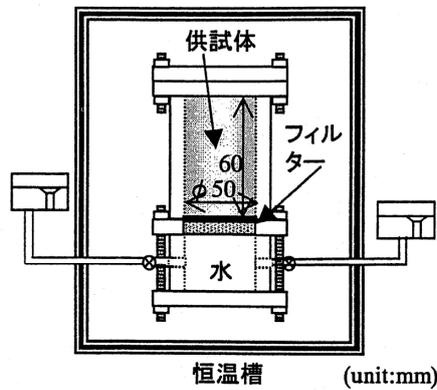


図 3.3-49 エタノールベントナイトスラリーの拡散試験装置<sup>36)</sup>

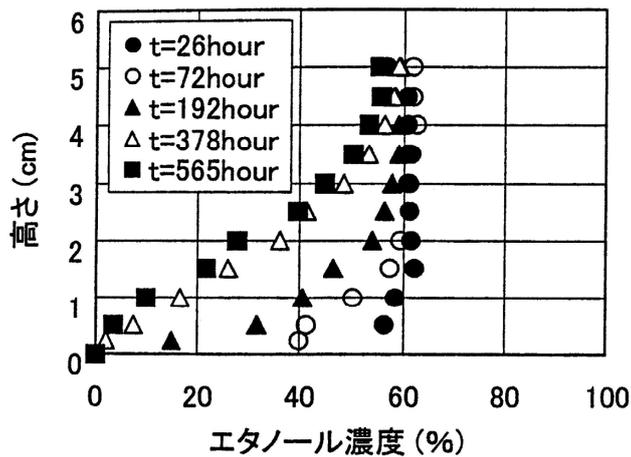


図 3.3-50 拡散境界面からの所定高さにおけるエタノール濃度の経時変化<sup>36)</sup>

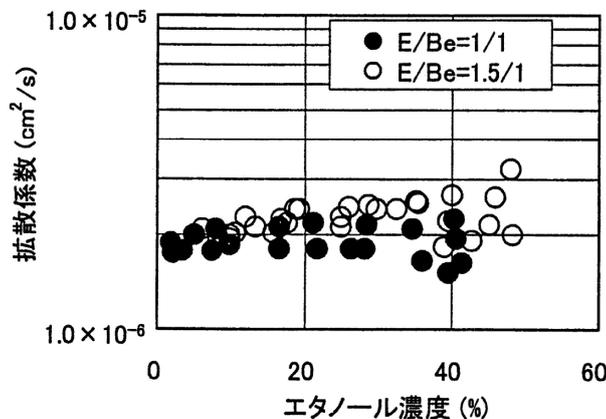
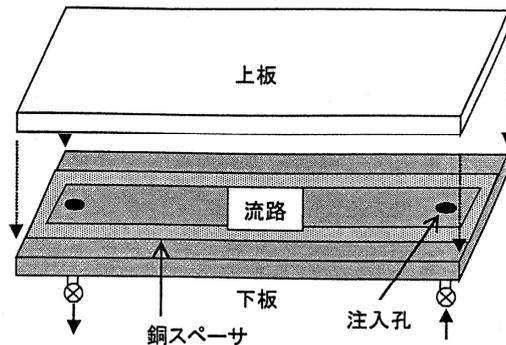


図 3.3-51 エタノール濃度とエタノールベントナイトスラリーのエタノール拡散係数の関係<sup>36)</sup>

(2) 浸透性能に関する研究

(i) 西垣<sup>36)</sup>らの研究

エタノールベントナイトスラリーをどの程度の亀裂まで注入できるか、また、十分な充填密度で注入が可能であるかを把握するために、図 3.3-52に示す平行平板亀裂モデルを用いた注入試験が行われた。注入は0.1MPaの一定圧での注入（静的注入）と最大圧力が0.3MPaで周波数が7Hzで振動を与えて注入する方法（動的注入）がとられた。



小型亀裂モデル：流路幅=1cm，流路長6cm  
 長尺亀裂モデル：流路幅=2cm，流路長150cm

図 3.3-52 平行平板亀裂モデル<sup>36)</sup>

(a) 静的注入試験

エタノールベントナイトスラリーの配合比と注入可能亀裂開口幅及び回転粘度計で計測した粘度の関係が実験により調べられた。注入試験の概要は以下の通りである。

- ・試験装置：小型亀裂モデル（図 3.3-52参照）
- ・注入圧：定圧（0.1MPa）
- ・材 料：ベントナイト2種類（D85=35 $\mu$ m、D85=13 $\mu$ m）
- ・配 合：エタノール／ベントナイト=0.6～3.0

試験結果を図 3.3-53に、また比較として示されている普通ポルトランドセメント、超微粒子セメントの場合の結果を図 3.3-54に示す。試験結果より、以下のことが言及されている。

- ・ある亀裂開口幅にスラリーを注入する場合には図中の曲線より薄い濃度の配合比のスラリーを使用する必要がある。
- ・D85 と亀裂開口幅の関係からグラウト材料の D85 の2倍以下の亀裂開口幅にはまったく注入できないことが分かった。

D85=35 $\mu$ m：注入不可亀裂開口幅 b=50 $\mu$ m、D85／b=1.43

D85=13 $\mu$ m：注入不可亀裂開口幅 b=20 $\mu$ m、D85／b=1.54

- ・超微粒子セメントに分散剤を添加することにより注入が可能となった亀裂開口幅（50 $\mu$ m）よりもさらに微細な亀裂開口幅（20 $\mu$ m）の範囲までエタノールベントナイトスラリーは注入可能である。

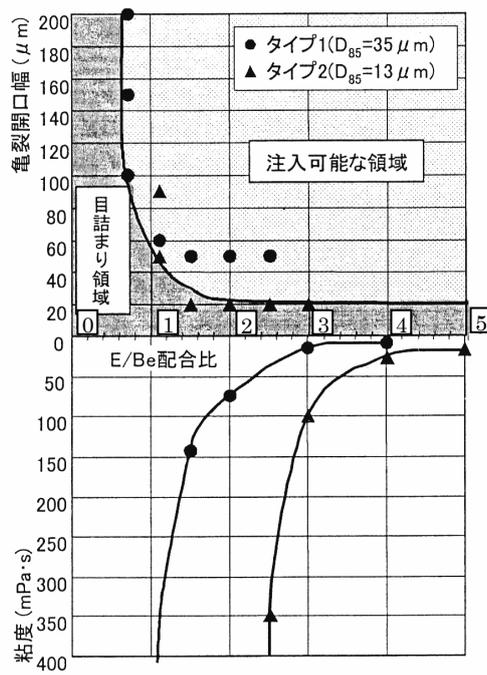


図 3.3-53 エタノールベントナイトスラリーの配合比と注入可能亀裂開口幅<sup>36)</sup>

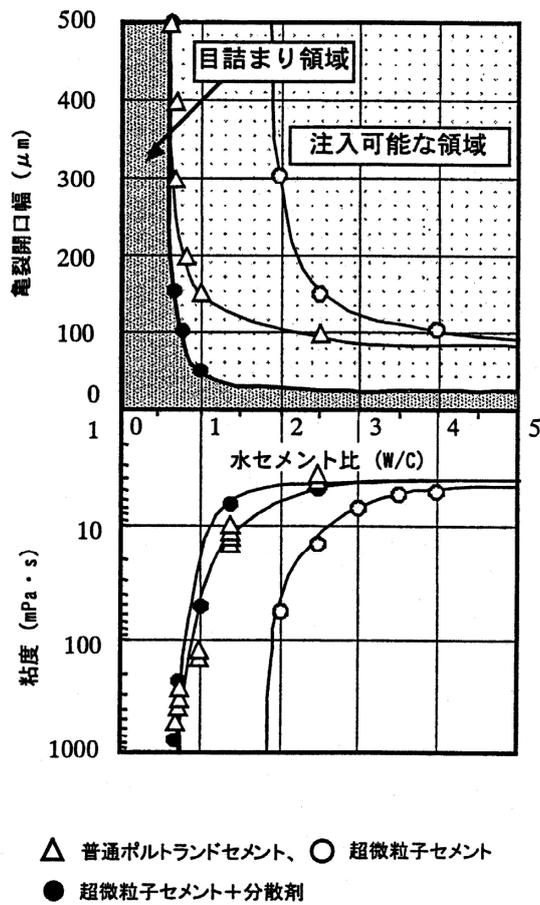


図 3.3-54 セメントミルクの配合比と注入可能亀裂開口幅及び粘性の関係<sup>36)</sup>

(b) 動的注入試験

エタノールベントナイトスラリーにおいて振動を与えながら注入する動的注入が静的注入に対してどの程度効果があるかを実験で確認している。注入試験の概要は以下の通りである。

- ・試験装置：平行平板亀裂モデル (図 3.3-52参照)
- ・注入圧：静的 (一定圧 0.3MPa) および動的 (Max0.3MPa、周波数 7 Hz)
- ・材料：ベントナイト (D85=35 μm)
- ・配合：エタノール/ベントナイト=1.5/1
- ・亀裂開口幅：100 μm

試験結果を図 3.3-55及び表 3.3-41に示す。試験結果より、静的注入と比較して動的注入は、目詰まりすることなく注入でき、より高密度で充填できると言及している。

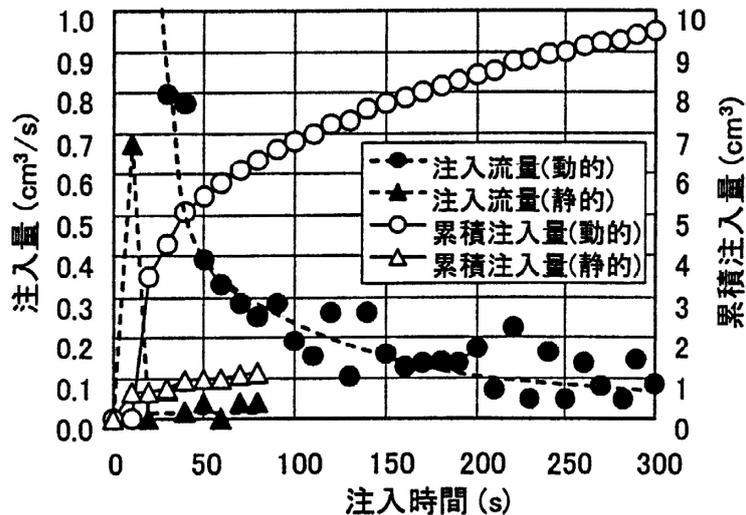


図 3.3-55 注入流量と累計流量の経時変化<sup>36)</sup>

表 3.3-41 亀裂内での注入後エタノールベントナイトスラリー間隙比<sup>36)</sup>

$e_d$ (動的)	$e_s$ (静的)	$e_d/e_s$
3.48	6.07	0.57

(ii) NUMO における研究

石井<sup>38)</sup>、高瀬<sup>39)</sup>らはエタノールベントナイトグラウトの浸透メカニズムについての検討を行っている。

(a) 石井らの研究<sup>38)</sup>

石井らは注入後のグラウト材の擬似固結現象（グラウト材のエタノール濃度が地下水中に拡散することによるグラウト材の粘度の上昇）を実験的に確認するために、「割れ目モデルエタノール拡散試験」、及び「エタノールの濃度低下に伴う粘度測定試験」を実施している。以下に各試験の概要を示す。

● 割れ目モデルエタノール拡散試験

図 3.3-56に示すような岩石円板を2枚重ねた岩石割れ目モデル（割れ目幅：1、2、4、8mm）を作成し、割れ目にグラウト材（単位ベントナイト量：0.1、0.2、0.4、0.8Mg/m<sup>3</sup>）を挟み込んだ試験体を水中に漬け、一定時間後（1、2、4、8、16、32日後）に割れ目内のグラウト材のエタノール濃度を測定している。測定結果から割れ目幅とエタノール濃度が40%以下（初期値60%）となる所要時間の関係を示しており、これより外挿して、岩盤割れ目が0.2～0.5mmの割れ目条件においては10分～2時間でエタノール濃度が初期値の60%から40%に低下する可能性があるとしている。

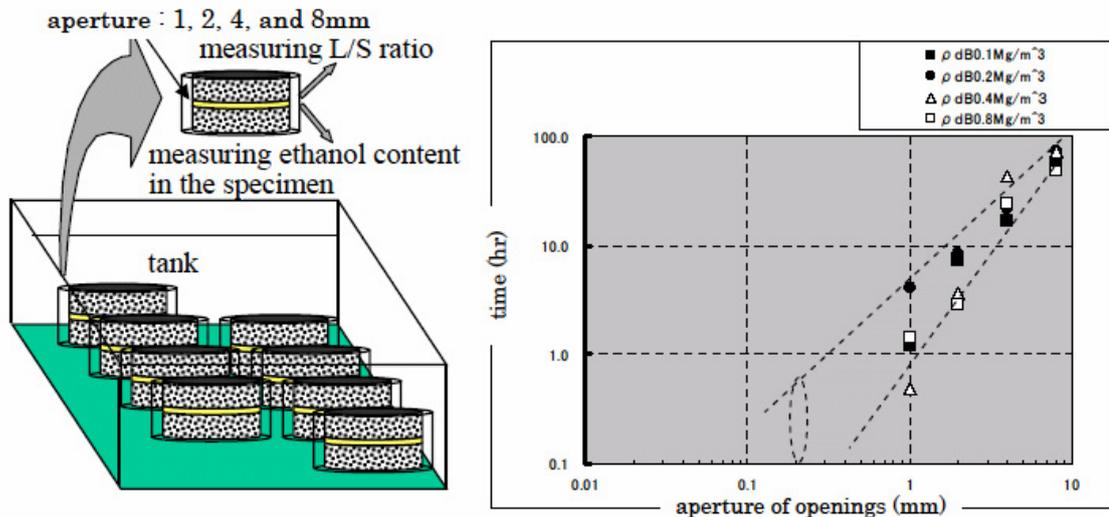


図 3.3-56 試験装置及び試験結果

(エタノール濃度40%以下となる最小時間と亀裂開口幅の関係)

● エタノールの濃度低下に伴う粘度測定試験

エタノール濃度を変えた場合の単位ベントナイト量0.4Mg/m<sup>3</sup>のスラリーの粘度の測定を実施し、以下の現象を把握したとしている。

- ・エタノール濃度が60%から次第に減少して40%以下になった場合には顕著に粘性が増大する。
- ・せん断速度が低下すると、粘度が非常に高くなる。

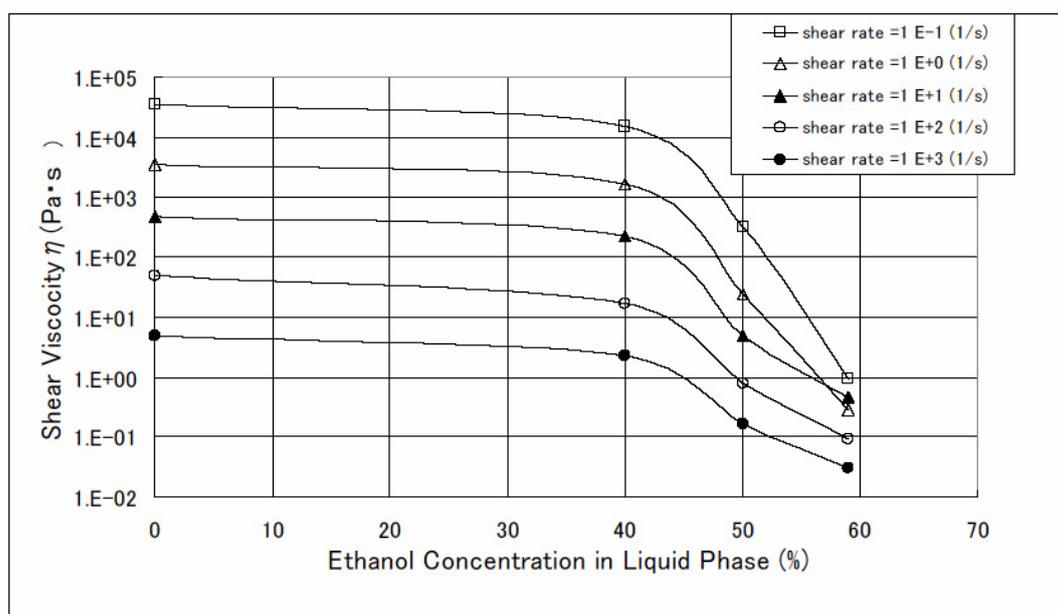


図 3.3-57 エタノール濃度、せん断速度と粘性の関係

上記の要素試験結果からエタノールベントナイトスラリーの割れ目内浸透挙動を以下のように推論している。

- ・グラウト材を割れ目内に注入する初期段階では割れ目内を流動するが、その後、スラリーのエタノール濃度は40%以下に低下する。
- ・エタノール濃度が低く（40%以下）になると、粘度は著しく（100倍程度）上昇する。
- ・スラリーの粘度が上昇することにより、グラウト材の流速は顕著に（例えば100分の1）小さくなる。
- ・グラウト材の流速が（2桁程度）低下することによって、グラウト材の粘度はさらに（2桁程度）増大する。
- ・その結果、グラウト材は流速が低下し始めた直後から短時間で割れ目内において流動を停止して割れ目を止水する。

#### (b) 高瀬らの研究<sup>39)</sup>

高瀬らは非ニュートン流体モデルを用いて一定注入速度試験についての解析を実施し、流動予測モデルの検証を試みている。一定注入速度試験の試験装置は、来待砂岩の上にアクリル板を設置して岩盤亀裂を模擬しており（図 3.3-58参照）、模擬亀裂に10mL/時間という極めて低流速でエタノールベントナイトを注入した結果、約1時間（=3,600s）でグラウト液の浸透が止まる結果となっている（図 3.3-59参照）。上記の実験状況を、解析により模擬した結果、エタノールベントナイトスラリーの先端部において拡散によりエタノール濃度は徐々に低下し、スラリーの移動が停止する直前の3500秒後にはエタノール濃度は40%強にまで下がっていることが判明し、スラリーの擬似硬化にいたるプロセスの一部を適切に表現出来たとしている。また、砂岩のマトリックス内にエタノールが1mm拡散するという解析結果になっている（図 3.3-60参照）。

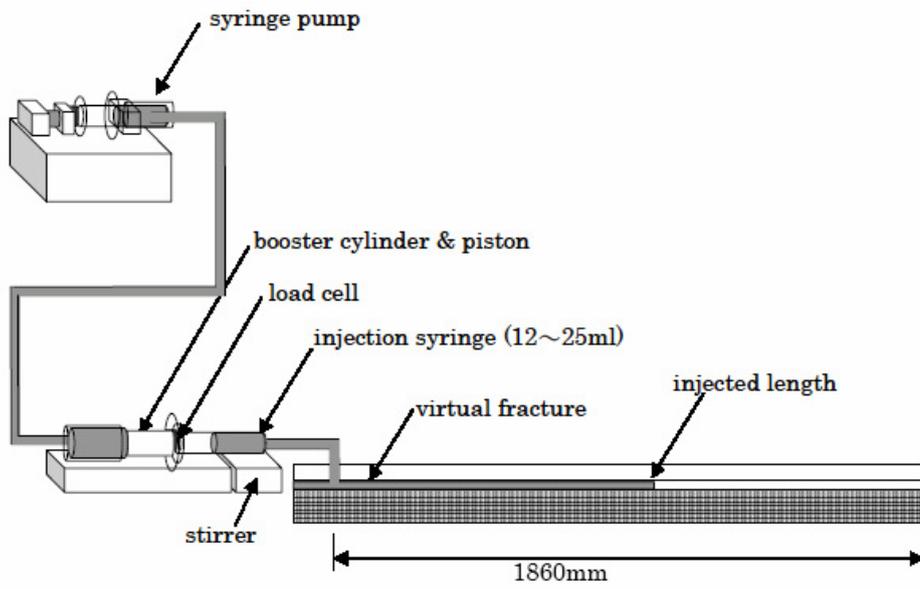


図 3.3-58 試験装置

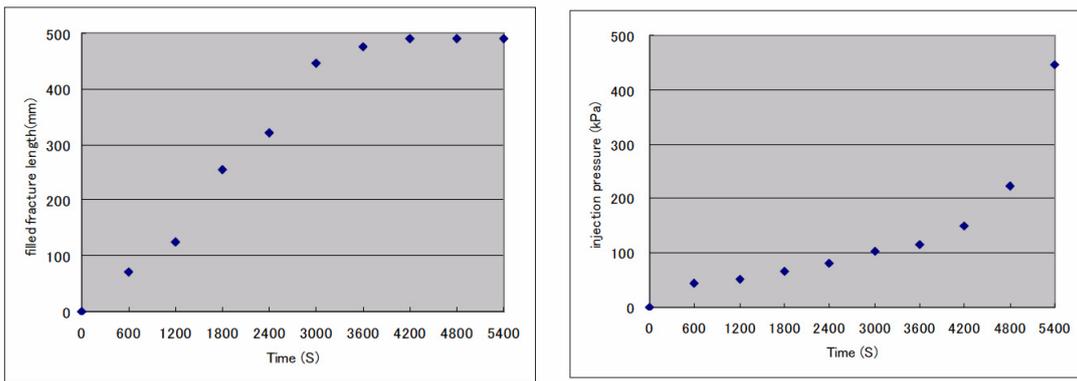


図 3.3-59 ベントナイトスラリーのフロント位置及び注入圧の経時変化（一定注入速度試験結果）

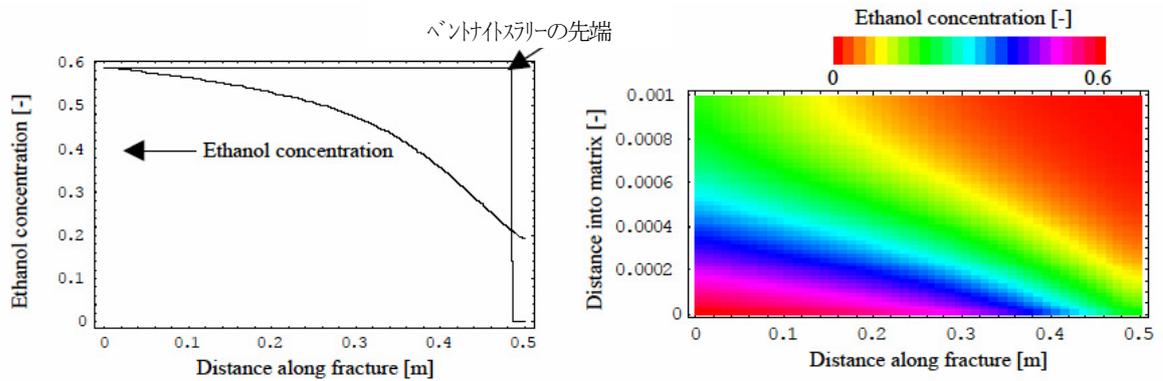


図 3.3-60 解析結果（3500 秒後のベントナイトスラリーのフロント位置及び亀裂、マトリックスのイタール濃度）

(3) 原位置試験

浅田<sup>40)</sup>、白石<sup>41)</sup>、岩佐<sup>42)</sup>らはエタノールベントナイトスラリーによる現位置での注入試験を実施してその適用性を検討している。以下にその概要を示す。

(i) 浅田<sup>40)</sup>らの試験（基礎岩盤に対する注入試験）

(a) 試験場所

花崗岩を主体とする基礎岩盤（ルジオン値0.04～4.73Lu、図3.3-61参照）

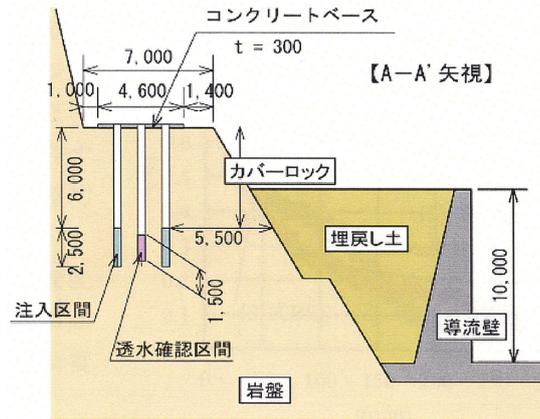


図 3.3-61 試験岩盤<sup>40)</sup>

(b) 試験仕様

- ・使用材料：クミネ工業社製クニゲルV1（国内産Naベントナイト、50%粒径 $10\mu\text{m}$ ）及び58wt%エタノール水溶液（硫酸アンモニウム0.8wt%、亜硫酸ナトリウム0.2wt%混合）
- ・注入孔配置：中央内挿法による三角マツにて6孔に注入。（図3.3-62参照）
- ・注入方法：漏洩防止のためカバーロック部（GL0～-6m）をセメントミルクで事前注入。最大注入圧力、注入速度をそれぞれ0.3MPa、20L/minとし、グラウト材の液固比をL/S=10から段階的に減少。0.3MPaの注入圧力により0.5L/min以下の注入量が30分間続いたところで注入終了。
- ・測定項目：40日後、注入孔群の中央に設けた試験孔でルジオン試験を実施。

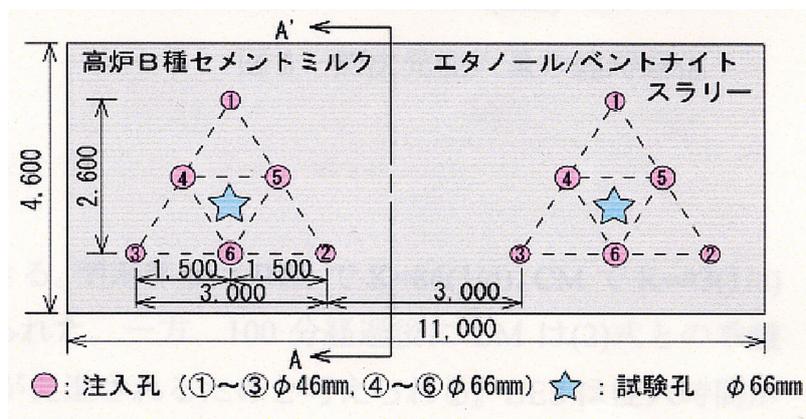


図 3.3-62 注入孔の配置<sup>40)</sup>

(c) 試験結果および考察

注入試験結果および考察として以下のように述べている。

- ・ 注入に関して、ダムのカートングラウトに用いられている一般的な注入装置を用いて問題なく施工することができた。
- ・ ルジオン値あたりの単位注入粉体量に関して、エタノールベントナイトは  $5.85\text{kg/m/Lu}$  とセメントミルク ( $2.53\text{kg/m/Lu}$ ) の2倍以上注入でき、セメントミルクより岩盤に注入しやすい傾向が確認できた。
- ・ 注入40日後の試験孔でのルジオン値はセメントミルクで  $0.26\text{Lu}$ 、エタノールベントナイトで  $0.26\text{Lu}$  未満となり、遮水性改善効果はエタノールベントナイトの方が優れていた。

(ii) 白石<sup>41)</sup>、岩佐<sup>42)</sup>らの試験（石灰岩中の湧水亀裂に対する注入試験）

(a) 試験場所

奥多摩工業(株)三ツ又鉱山（石灰岩、図 3.3-63のA点の湧水亀裂（約  $2\text{ l/min}$ ）を対象）

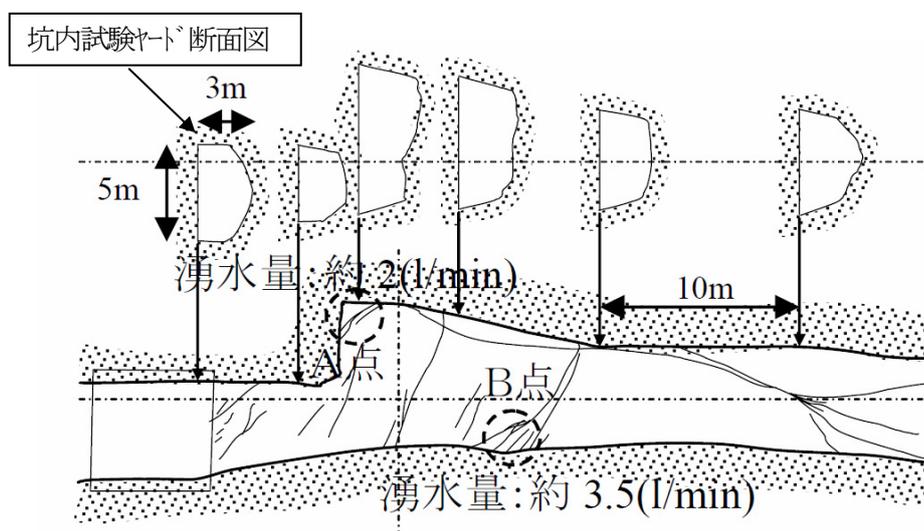


図 3.3-63 坑内試験ヤードの平面図と断面図

（参考文献41）に加筆

(b) 注入仕様

- 使用材料：クミネ工業社製クニゲルV1（国内産Naベントナイト、50%粒径  $10\mu\text{m}$ ）及び58wt%エタノール水溶液（硫酸アンモニウム0.8wt%、亜硫酸ナトリウム0.2wt%混合）
- 配合：エタノールとベントナイトの液固比を  $L/S=4, 2, 1.5$ 。
- 注入孔配置：湧水亀裂に対し4本のボーリングを実施。（図 3.3-64参照）ただし、透水試験によりNo.4孔は湧水箇所との連続性が確認されたが、No.1～3孔では想定した亀裂の連続性が確認されなかった。
- 注入条件および結果
  - ・ No.4孔（湧水亀裂への注入）：最大注入圧力  $0.3\text{MPa}$  で  $L/S=4$  で注入開始し、段階的に濃い配合を注入。湧水箇所からスラリーが流出するが  $L/S=2$  程度の注入時に、湧水部、坑壁から

のリークが止まり一時的には止水することができたが、その後湧水が発生した。(図 3.3-65 参照)。

- ・ No.3孔 (ゆるみ域への注入) : 最大注入圧力 1.0MPa で L/S=4 及び 2 を注入。表面亀裂からのリークが観察されたが、濃いスラリーの注入時にはリーク量が減少したことからダム押しと判断し、注入を終了。
- ・ No.1、2孔 (ボーリング孔閉塞確認) : 最大注入圧 1.5MPa で L/S=4 を注入。ベントナイト注入量 7.1kg、4.1kg の注入で注入終了。

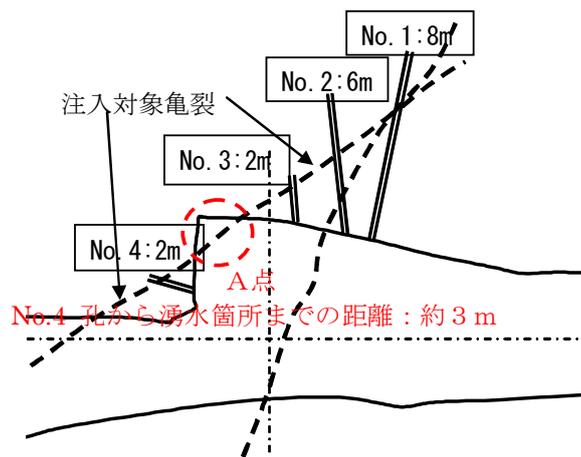


図 3.3-64 注入孔配置平面図<sup>41)</sup>

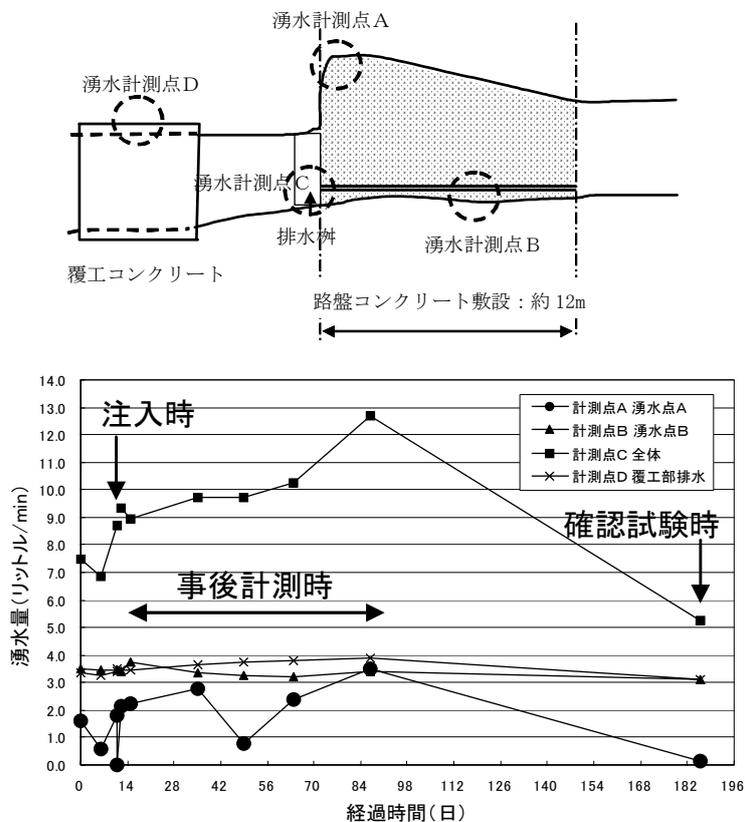


図 3.3-65 湧水計測点及び湧水量の経時変化図<sup>41)</sup>

(c) 確認試験と結果

注入試験終了後（約半年後）にNo.4近傍に3本、No.3近傍に2本の確認ボーリング（図 3.3-66参照）が実施され、亀裂内のスラリーの充填状況、注入孔内のスラリーの充填状況が確認された。

注入孔：No.4～孔内にL/S=1.89のベントナイトを確認。エタノール濃度は約2%（図 3.3-67参照）

No.3～孔内にスラリー状（L/S=3.92）のベントナイトを確認。エタノール濃度は約25%

No.2～孔内にL/S=1.30のベントナイトを確認。エタノール濃度は約15%

No.1～孔内上部にはエタノール濃度52%の上澄み液が分布。ベントナイトはスラリー状で回収不能。

確認孔：No.4-1～コア、BTV、X線解析結果より亀裂充填物（粘土等）を含む亀裂内にベントナイトを確認。

No.4-2,3～コア、BTV、X線解析結果より明確なベントナイトスラリーは確認できなかった。

No.3-1,2～コア、BTVともに明瞭なベントナイトスラリーを確認できなかった。

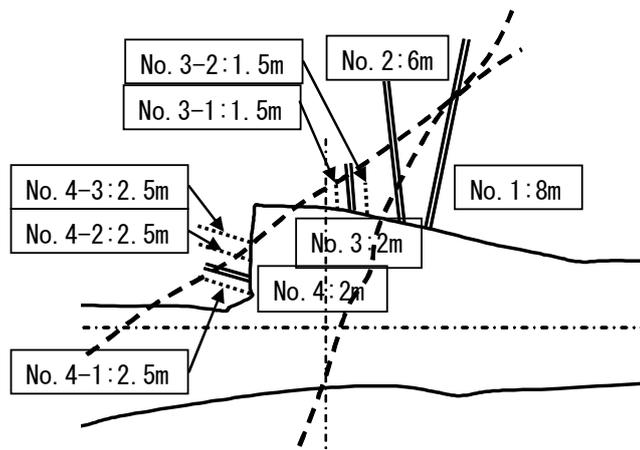


図 3.3-66 注入孔および確認孔配置平面図<sup>42)</sup>



図 3.3-67 注入孔 (No.4) 内ベントナイト<sup>42)</sup>

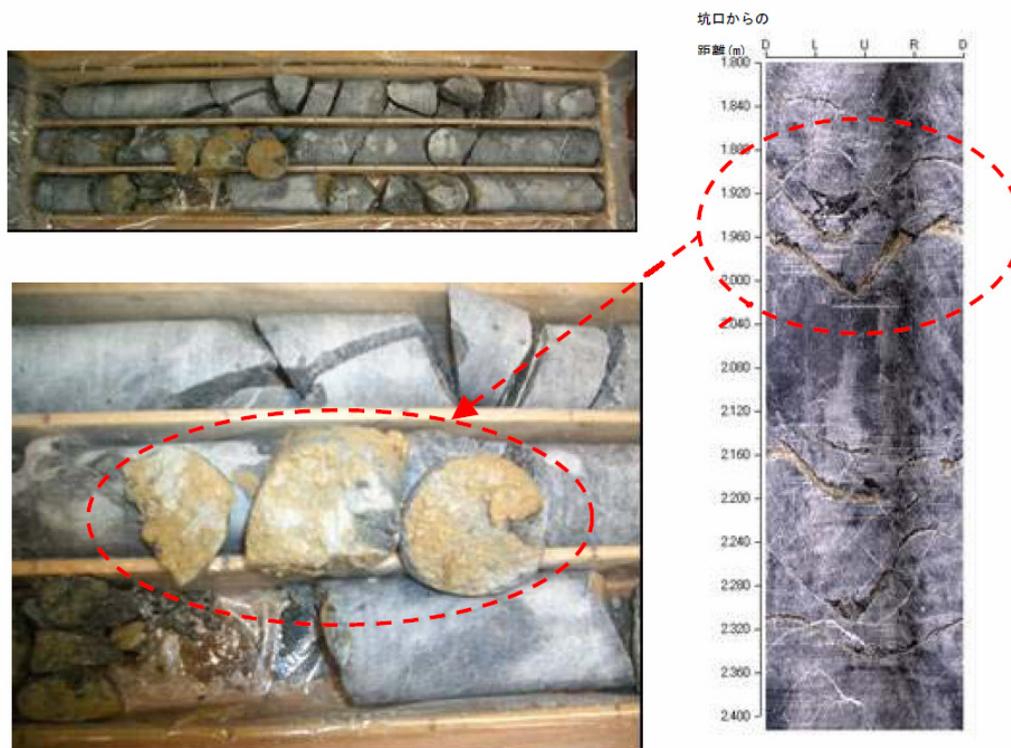


図 3.3-68 亀裂内充填状況 (φ86、No4-1 孔ボアリングコア及びBTV画像)  
(参考文献 42) に一部加筆

#### (d) まとめと課題

注入試験の結果、まとめと課題として以下のように述べられている。

- ・エタノールベントナイトスラリーによる亀裂及びボーリング閉塞への適用性が示唆された。
- ・スラリーのエタノール濃度の低下に加えて、スラリーの脱水、圧密による密度上昇効果により止水性を発揮することが想定される。
- ・ただし、注入後のベントナイトの密度が低い場合にはエタノール濃度の拡散に伴う粘度上昇効果を発揮する前に湧水圧によって水みちが再発する可能性がある。
- ・スラリーを継続注入し、脱水圧密現象を促進することができれば、充填物（ベントナイト）の密度の上昇に伴う、粘性、止水性の向上を図ることができると考えられる。

#### (4) エタノールベントナイトグラウトに関する既往の研究のまとめ

エタノールベントナイトグラウトに関する既往の研究について文献調査を行った。その結果、エタノールベントナイトは高い流動性を示し超微粒子セメントよりも微小亀裂に対する浸透性が優れていること、また、注入後はエタノール成分が地下水中に拡散することによって消失し、ベントナイトの粘度が著しく増大して割れ目をシールし、極めて難透水性を呈する可能性があるなどグラウト材としてその有効性が室内実験及び実岩盤における注入実験により示されつつある。しかし、一方では注入後のベントナイトの密度が低ければエタノール濃度の拡散に伴う粘度上昇効果を発揮する前に湧水圧によって水みちが再形成される可能性があるとの報告もある。このように、注入されたグラウト材料が地下水圧により流出される危険性に対して更なる検討が必要であると言える。

### 3.3.6 塩水ベントナイト研究

高レベル放射性廃棄物の地層処分を対象としたグラウト技術の研究が行われており、グラウト材料のひとつとして長期の安定性と止水性が期待されるベントナイトが着目されている。しかし、ベントナイトは真水でスラリーを作成すると、粘性が高いため高濃度のスラリー注入が困難である。小林<sup>43)</sup>、泉<sup>44)</sup>らはこの粘性低下対策として塩水溶液を用いた塩水ベントナイトを実際のダム基礎岩盤およびトンネルにおいて試験注入を実施しその適用性を検討している。以下にそれぞれの現位置注入試験の概要を示す。

#### (1) ダム基礎岩盤における現地試験

##### (i) 試験場所

- ・ 試験場所：関西電力(株)大河内発電所太田ダム左岸側
- ・ 地質条件：中世代白亜紀生野層群に属するヒン岩（CL 級岩盤、図 3.3-69参照）

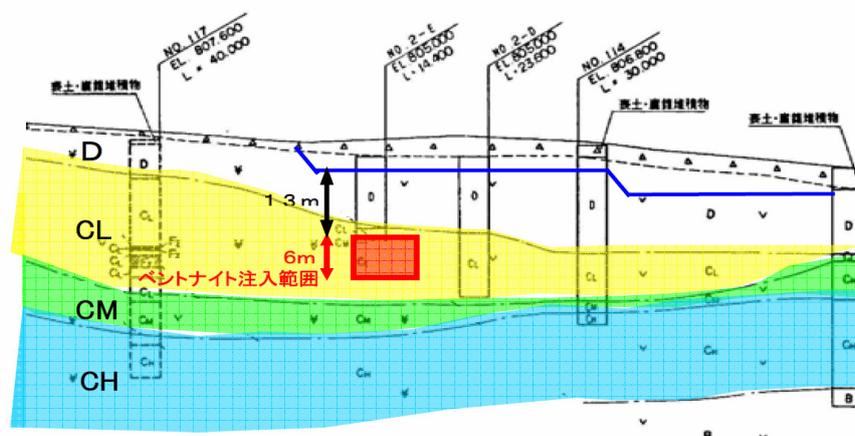


図 3.3-69 地質断面図<sup>43)</sup>

##### (ii) 試験仕様

- ・ 注入材料：ベントナイト（山形産 Na 型）及び 4% 塩水を使用。
- ・ 配合：4% 塩水とベントナイトの液固比 L/S=8、6、4(各 400L)、3（注入完了）
- ・ 注入方法：注入回数ごとの透水性の改善を目的とし、中央内挿法による三角マツにて、9 孔、18 ステージの注入を実施。注入配孔、及び注入基準を図 3.3-70、表 3.3-42 に示す。

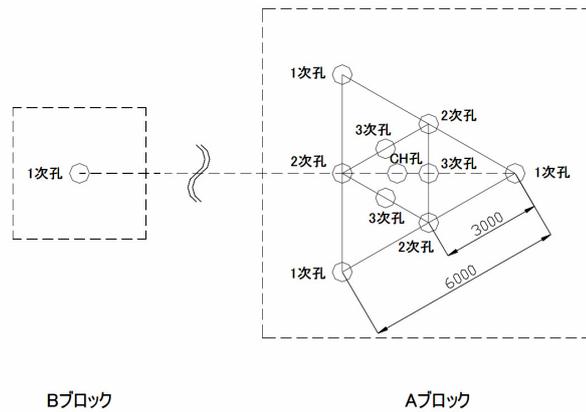


図 3.3-70 注入配孔<sup>43)</sup>

表 3.3-42 注入基準<sup>43)</sup>

	St	試験深度(m)	区間長	ホーリング径	最大注入圧力	最大注入速度	注入完了基準
			(m)	(Φ)	(Mpa)	(L/min/St)	
Aブロック	1	13.0~16.0	3.0	46	0.20	12	0.2Mpaの注入圧力により0.6L/min以下の注入量が20分
	2	16.0~19.0			0.30		0.3Mpaの注入圧力により0.6L/min以下の注入量が20分
Bブロック	1	1.0~4.0			0.10		0.1Mpaの注入圧力により0.6L/min以下の注入量が20分

(iii) 試験結果

下記に示すような一般的なセメントミルクでの注入と同様の傾向を確認。

- ・ 注入チャート：注入開始直後に注入流量は最大値（4L/min/m）に達し、その後は徐々に注入量が低減。
- ・ ルジオン値と単位注入ベントナイト量の関係：ルジオン値に比例して単位注入ベントナイト量が増加。（図 3.3-71参照）
- ・ 回数によるルジオン値の傾向：回数の増加とともにルジオン値が低減する傾向を確認（図 3.3-72参照）

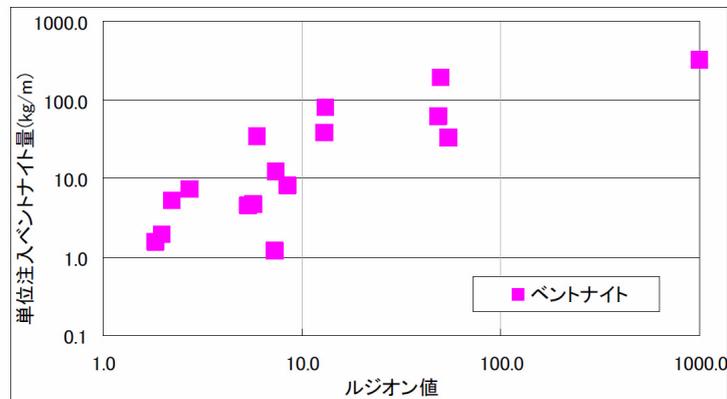


図 3.3-71 Lu 値と単位注入ベントナイト量の関係<sup>43)</sup>

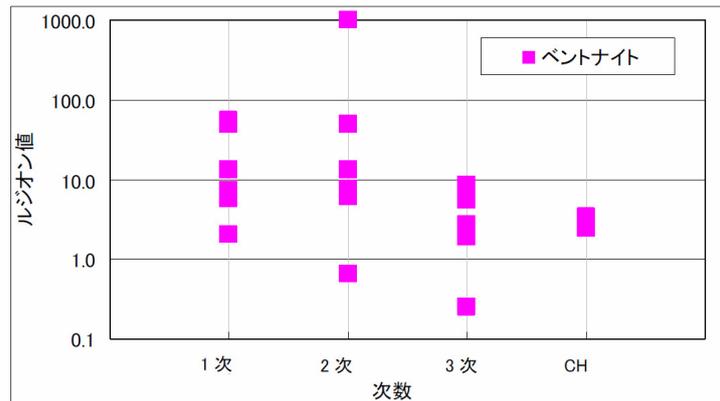


図 3.3-72 Lu 値と次数の関係<sup>43)</sup>

(iv) 結論

試験結果より以下の結論を示している。

- ・ 塩水ベントナイトはセメントミルクを用いたグラウトと同様の透水性の改善が期待できる。
- ・ 従来のセメントミルクを用いたグラウトと同じ設備を用いて注入を行えることが確認された。

(2) 実トンネルにおける現地試験<sup>44)</sup>

(i) 試験場所

- ・ 試験場所：関西電力(株)大河内発電所構内横坑トンネル内 (坑口より 420～440m間の 20m間)
- ・ 地質条件：中世代白亜紀生野層群に属するヒン岩 (CH 級岩盤)

(ii) 試験仕様

- ・ 注入材料：ベントナイト (山形産 Na 型) 及び 4%塩水を使用
- ・ 配合：4%塩水とベントナイトの液固比 L/S=4、8 から段階的に L/S=2 まで減少
- ・ 注入方法：注入配孔を図 3.3-73に、注入基準を表 3.3-43にそれぞれ示す。

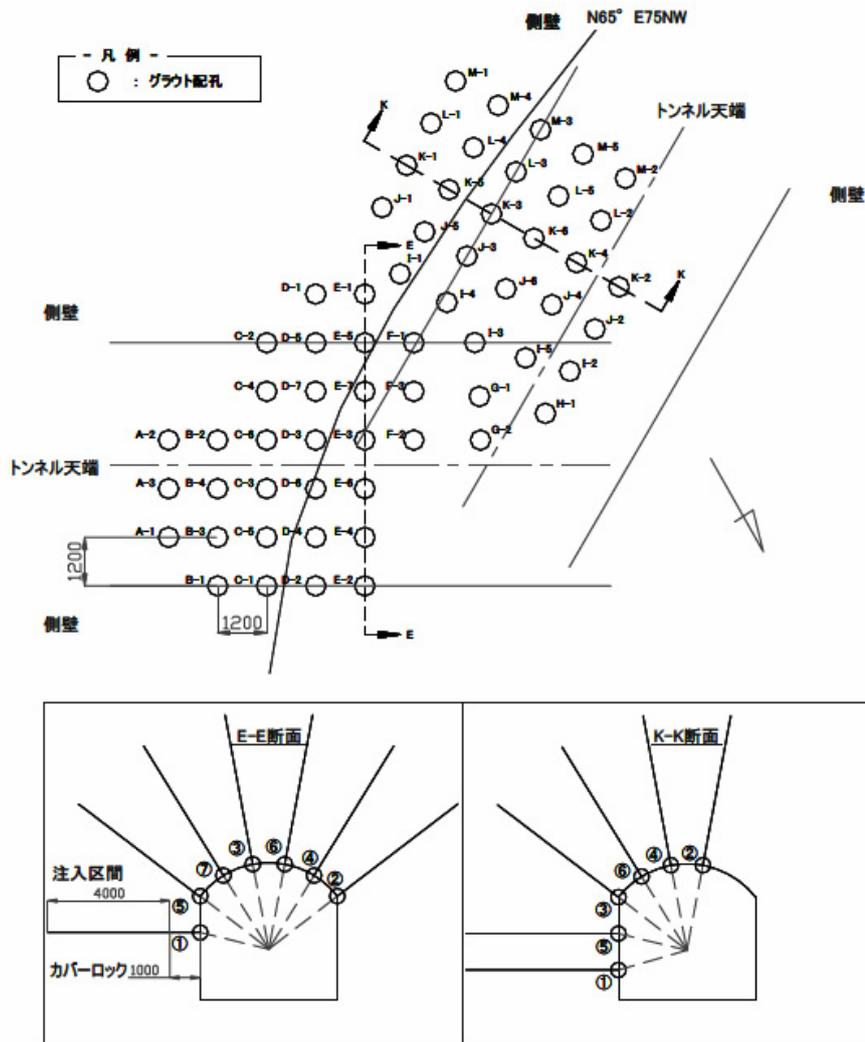


図 3.3-73 注入配孔<sup>44)</sup>

表 3.3-43 注入基準<sup>44)</sup>

削孔長	削孔長5m, カバーロック1m, 注入区間4m
ボーリング孔径	Φ46, Φ66
最大注入圧力	0.2Mpa
最大注入速度	16L/min/St
配合切替基準	液固比L/S=4, 8から段階的に最小L/S=2まで減少
注入完了基準	0.2Mpaの注入圧力により0.8L/min以下の注入量が20分

- ・ 試験計測項目：注入後の止水効果を確認するために以下の項目について測定を実施。  
 試験範囲及びトンネル全体の湧水量測定  
 塩分濃度計及び土圧計を設置しベントナイトの膨潤を測定

(iii) 試験結果

全 60 孔のうち 58 孔については塩水ベントナイトを用い、2 孔 (3.0、5.6Lu) については真水を溶媒としたベントナイトスラリーを用いて注入が実施され、以下の結果を得ている。

- ・ 溶媒として真水を用いた注入は、粘性が高く単位注入ベントナイト量も塩水を用いた注入より少ない。(図 3.3-75参照)
- ・ 塩水ベントナイトによる注入はルジオン値に比例して単位注入ベントナイト量が増加する傾向が見られ、一般のセメントミルクを用いたグラウトの傾向と同様の傾向を示す(図 3.3-74、図 3.3-75参照)。
- ・ 注入前の試験範囲の湧水量は 0.4L/min~3.3L/min 程度にバラツキが見られトンネル全体湧水量に対し 1.1%~1.4%程度であったが、注入完了後の試験範囲の湧水量は 0.3L/min 程度でほぼ一定となっており、トンネル全体湧水量の 0.3%~0.5%程度と注入前より低い値となっている。(図 3.3-76、表 3.3-44参照)

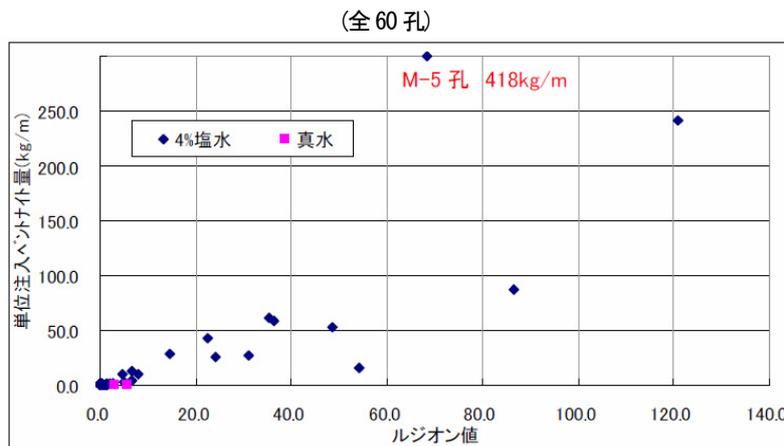


図 3.3-74 Lu 値と単位注入ベントナイト量の関係 (全 60 孔) <sup>44)</sup>

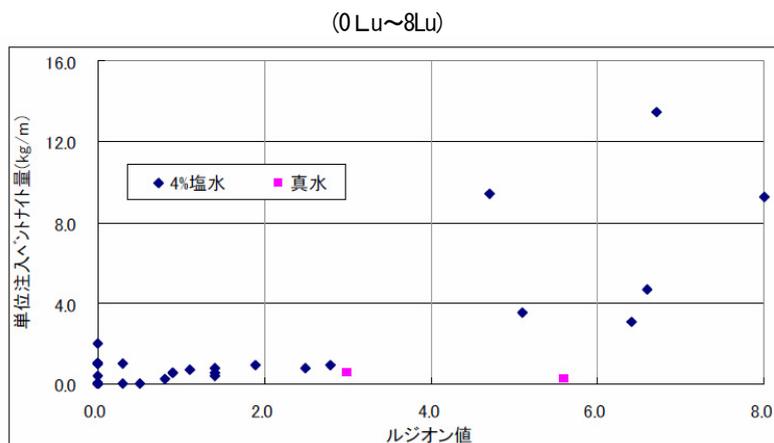


図 3.3-75 Lu 値と単位注入ベントナイト量の関係 (0~8Lu) <sup>44)</sup>

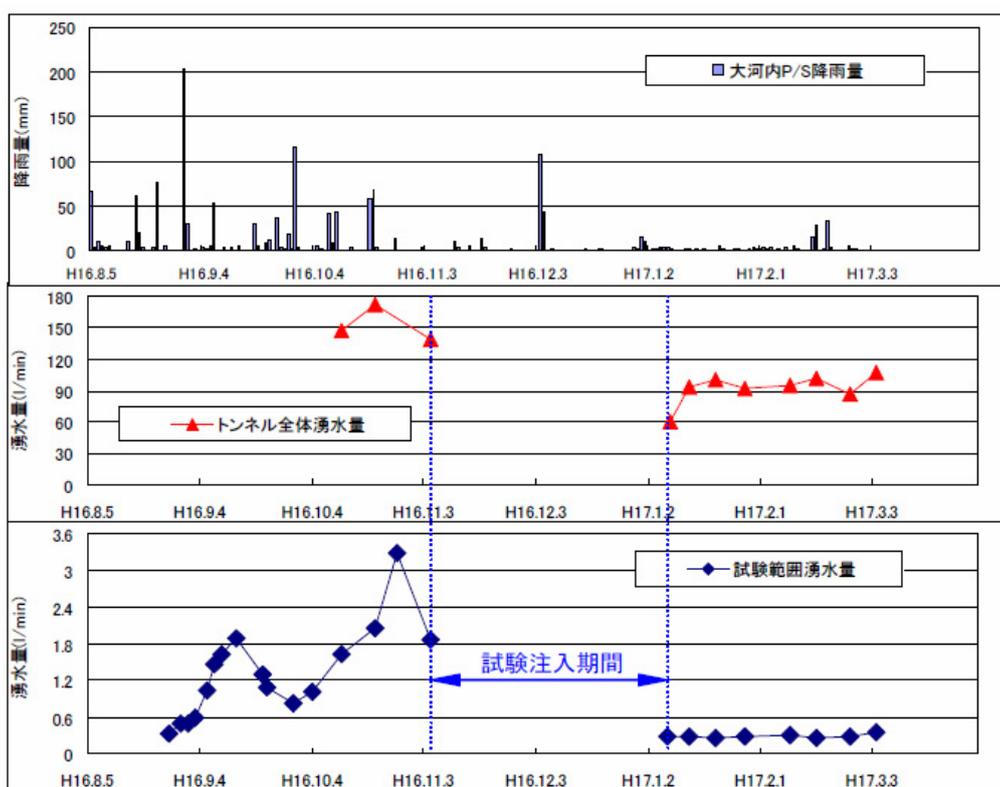


図 3.3-76 注入範囲と雨量及びトンネル全体湧水量の関係<sup>44)</sup>

表 3.3-44 試験範囲湧水量がトンネル全体湧水量に占める割合<sup>44)</sup>

測定時期 年	注 入 前			注 入 後							
	H16			H17							
月 日	10/12	10/21	11/5	1/8	1/13	1/20	1/28	2/9	2/16	2/25	3/4
比 率	1.1%	1.2%	1.4%	0.5%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%

(iv) まとめ

注入試験の結果を以下のようにまとめている。

- ・塩水ベントナイト注入による止水効果は確認されたが、今後とも測定を行い長期的な測定に基づいて評価を行っていく予定である。
- ・ベントナイト中の塩分の拡散による希釈状況、ベントナイトの膨潤圧について現位置測定、及び室内試験を実施し解析中である。
- ・塩水ベントナイトの施工は、通常のセメントと異なり固結しないことから、透水試験の方法や注入の方法の検討が必要であり、今後、これらの課題への対応を検討する。

### 3.4 放射性廃棄物地層処分におけるグラウト方法

#### 3.4.1 検討方法

放射性廃棄物地層処分におけるグラウト工には、地下 300m 以深という大深度下において極めて高い止水性を実現することが要求されており、その注入材料に関しては様々な研究が実施されているが、その注入方法に関する研究実績は極めて限られているのが現状である。そこで、本節においては放射性廃棄物地層処分におけるグラウト工の施工方法を整理し、今後瑞浪超深地層研究所で研究を進めていくための方向性を定めるものとする。

具体的な検討フローを図 3.4-1 に示す。

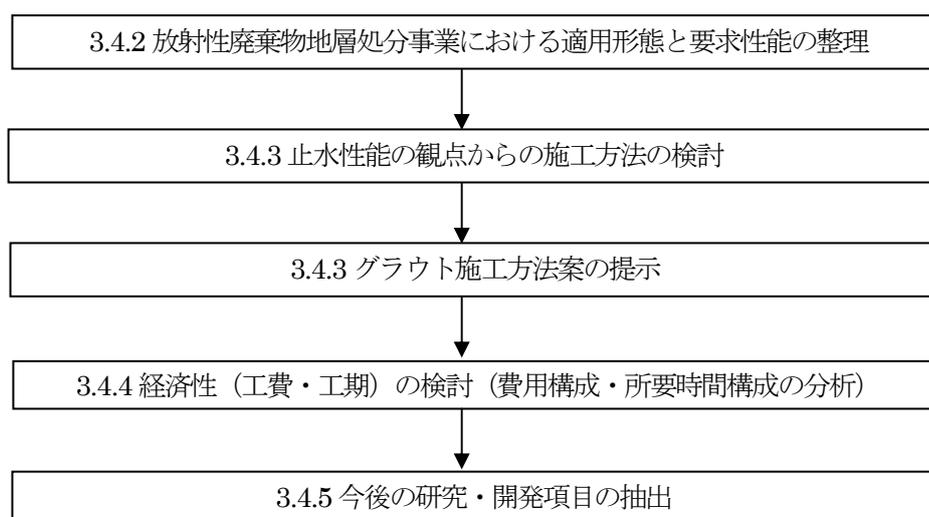


図 3.4-1 検討フロー

#### 3.4.2 放射性廃棄物地層処分事業における適用形態と要求性能の整理

##### (1) 選定する適用形態

放射性廃棄物地層処分におけるグラウト工の適用形態としては、大別して以下の 3 項目が考えられる。それぞれについて、その詳細を表 3.4-1 に示す。

- ・ 建設のための工学的対策
- ・ 操業/閉鎖のための工学的対策
- ・ 閉鎖後の長期安全性確保のための対策

また、グラウト高度化研究として研究の優先順位の高い適用形態としては、地下大深度において地層処分特有の要求性能を満たす必要がある以下の 3 項目が考えられる。

- ・ 処分坑道のプレグラウト：人工バリア（緩衝材定置・埋戻し材構築）設置のための環境整備
- ・ 性能評価上優位となる断層破碎帯等のプレ/ポストグラウト：天然バリア性能の改良
- ・ 性能評価上優位となる緩み領域のポストグラウト：天然バリア性能の修復

また、上記 3 種類の形態に関する要求止水性能と候補材料を表 3.4-2 にまとめて示す。

同表に示すように、天然バリア機能の改良・修復に関しては、天然材料の使用がその前提となるが、

天然材料は材料に関する基礎研究段階であるため、現状で注入方法を検討することは時期尚早と考えられる。そこで、まず本章においては、処分坑道のプレグラウトに焦点を絞り、その注入方法を検討するものとする。

表 3.4-1 地層処分におけるグラウト技術の適用形態  
(参考文献 45) より抜粋)

適用目的	適用形態
建設のための工学的対策	掘削時の安全性/施工性確保のための止水 ・湧水に伴う切羽の崩壊、地山の崩落防止 ・大量の湧水による工事遅延の防止
	地表の地下水環境への影響低減のための止水 ・地下水位の低下防止
操業/閉鎖のための工学的対策	埋め戻し材の施工性確保のための止水 ・埋め戻し材の施工時の湧水影響の低減
	緩衝材の施工性確保のための止水 ・緩衝材の定置作業時の湧水影響の低減
	強度プラグの隙間の間詰め ・強度プラグと岩盤との間の隙間処理
閉鎖後の長期安全性確保のための対策	安全評価上有意な水みちの長期的な止水 ・(止水プラグの効果の補完のための) 湧水量の多い割れ目帯の止水 ・掘削に伴うゆるみ領域の修復
	埋め戻し材の隙間の間詰め ・埋め戻し材間、埋め戻し材と岩盤との間の隙間処理
	緩衝材の隙間の間詰め ・緩衝材と廃棄体、緩衝材と岩盤との間の隙間処理

表 3.4-2 適用形態と候補材料  
(参考文献 45) より抜粋)

目的	対象	グラウトの種類	候補材料	要求止水性能
人工バリア(緩衝材・埋戻し材)設置のための環境整備	処分坑道	プレグラウト	人工材料 天然材料	人工バリア定置の観点より決定
天然バリア性能の改良	高透水割れ目帯 (断層破碎帯等)	プレポストグラウト	天然材料 (人工材料による補完の可能性有り)	核種移行の観点より決定
天然バリア性能の修復	ゆるみ領域	ポストグラウト		

## (2) 要求性能の整理

人工バリア（緩衝材・埋戻し材）定置の観点から、その止水性について検討した研究事例は少ないが、SKBにより以下の研究が実施されている。以下にその概要を示す。

### (i) 緩衝材定置（縦置き方式）

SKBの設計上の前提条件<sup>46)</sup>においては、湧水、浸水により処分孔を放棄する基準として10L/分が仮に設定されている。また、1L/分を基準値とした場合についてもロス率を算定することとされている。また、Project JADE<sup>47)</sup>の中では、縦置き方式（KBS-3V）は、横置き方式（KBS-3HとMLH）に比べて、湧水に対してはより優れていると定性的に評価している。しかしながら、Canister Retrieval Test<sup>48)</sup>においては緩衝材の膨潤挙動が予想よりも早かったことが報告されているおり、Svemar<sup>49)</sup>は緩衝材を防水シートで覆うことも提案している。このため、グラウトによりどの程度まで湧水量を低減すべきかという基準値については現状では明確な結論は出ていないようである。

また、特に緩衝材を成型ブロックの形態で処分場に持込む場合は、FEBEXにおいて空気中の湿気により緩衝材は膨潤し、ベントナイトブロックが壊れた事例も報告<sup>2)</sup>されているため、湧水をグラウトのみで対応するためには、極めて高い止水性が要求されるものと考えられる。

### (ii) 緩衝材定置（横置き方式）

Project JADE<sup>47)</sup>の中で、KBSコンセプト（KBS-3V、KBS-3H）とMLH（Medium long holes）を定性的に比較した中で、横置き方式（KBS-3HとMLH）は縦置き方式（KBS-3V）に比べて掘削量が少ないため、経済性、環境影響の点では優れているが、定置技術の確実性、弱層への対応、湧水による影響が大きい点が欠点として挙げられている。そこで、その後Börgessonら<sup>50)</sup>により、KBS-3Hコンセプト（図3.4-2参照）における緩衝材定置方法について検討が実施された。

その結果、KBS-3Hに対しては、湧水や湿度により緩衝材が膨潤し、ゲル化した緩衝材が湧水により流失することが問題となるため、廃棄体間にTight Distance Block（図3.4-3参照）を設置し、岩盤に密着させる必要があり、その場合は廃棄体当たり0.2L/分（0.2L/分/10m）の湧水までなら対応可能と推論している。

### (iii) 埋戻し材定置

Bäckblom<sup>50)</sup>はエスポ硬岩研究所における模擬処分坑道においては、10m区間における5L/分の湧水により埋戻しに支障が生じたため、処分坑道を埋戻すためには、坑道全線において湧水量を0.5L/分以下に抑える必要があると報じている。

上記を取りまとめると、湧水をグラウトのみで止水する場合は0.2L/分/10m（横置き方式の場合）という極めて高い止水性能が要求され、土被りが浅い北欧の環境配慮型トンネルの中でも特に基準値が厳しい場合（1～数L/分/100m）と同等の止水性を大深度下において実現する必要があることがわかる。但し、上記の研究は海外のサイト条件（沿岸域立地等）や緩衝材仕様を前提としているため、その研究結果をわが国に適用する際には、十分な検討が必要である。さらに、グラウト以外の湧水対策技術との組合せや、今後の緩衝材定置方法に関する研究や埋め戻し方法に関する研究の進展に応じて随時変更されていくものと考えられる。このため、本研究の中においては、明確なグラウトによる改

良目標は設定しないが、暫定的に1~10L/分/100m程度を研究の目安に仮設定する。

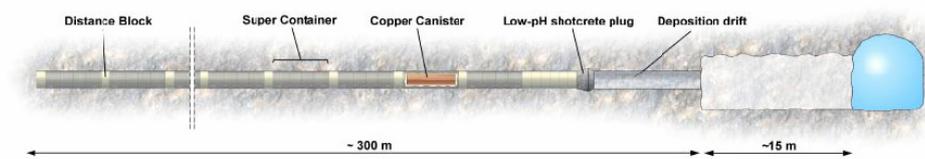
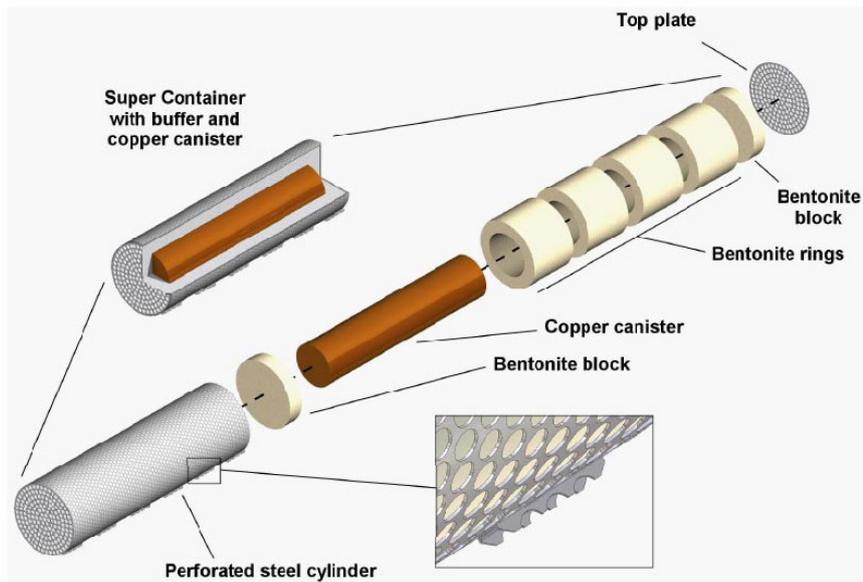
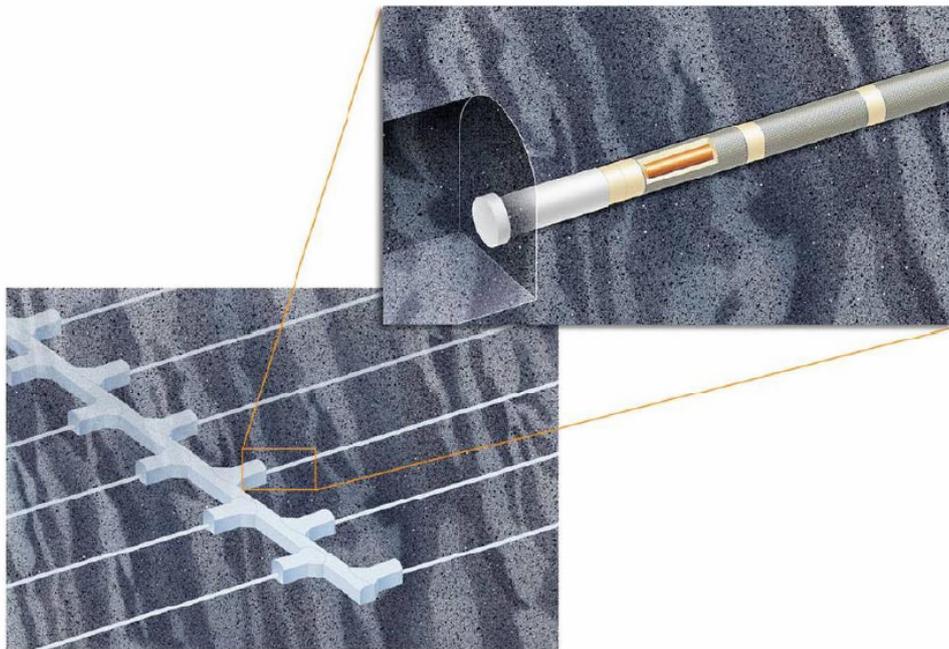


図 3.4-2 KBS-3H コンセプト<sup>50)</sup>

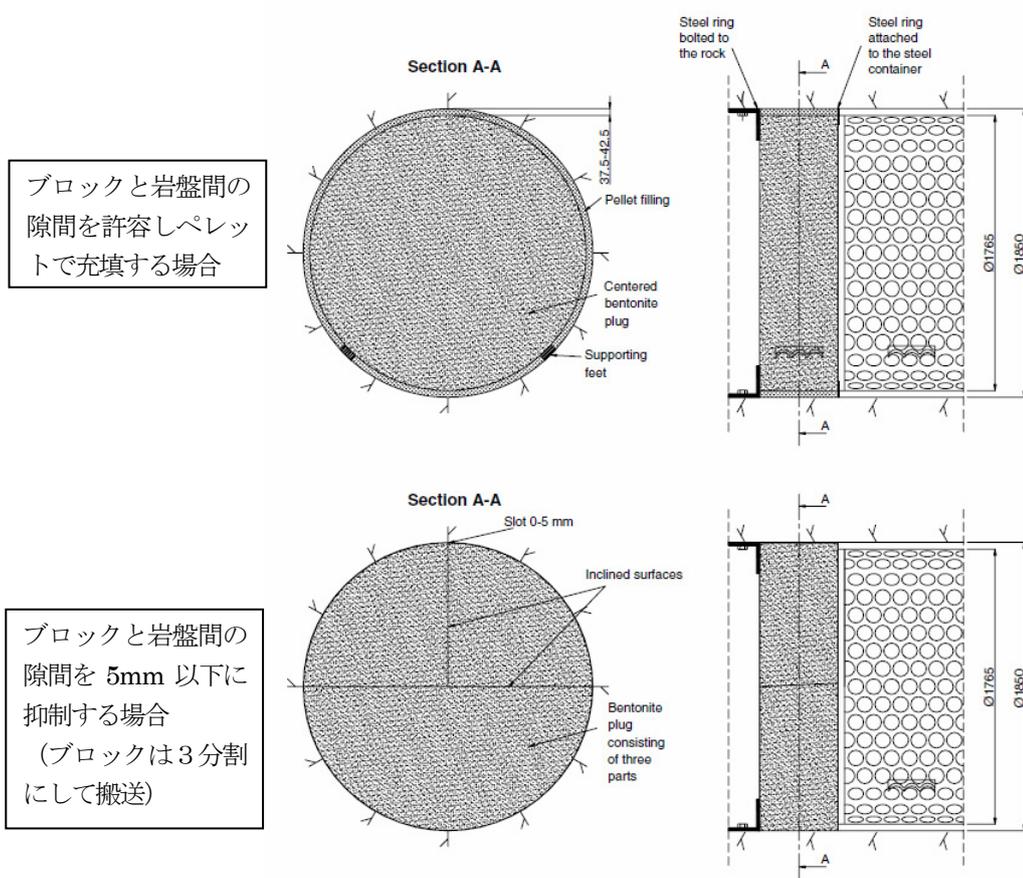


図 3.4-3 Tight Distance Block<sup>50)</sup>

(ブロック 1 体の幅は 0.5m、ブロック全体の幅は 3~6m 程度)

### 3.4.3 止水性の観点からの施工方法の検討

3.2 節の施工実績調査の結果、硬質な岩盤に恵まれた北欧の環境配慮型トンネルにおいては、セメント材料によるプレグラウト（部分的にポストグラウトを併用）により透水性の低い傘状のグラウト改良ゾーンをトンネル周辺に1重に構築し、傘同士をある程度ラップさせることにより、0.5~1.0L/分/100m（Lundby Road Tunnel/sweden）という極めて高い止水性能を確保し、コンクリートライニング無しでウオータータイトトンネルを建設していることが判明した（ただし、土被りが浅いことに注意する必要がある。Lundby Road Tunnel の場合は5~40m）。一方、青函トンネル等の日本の海底トンネルについては、地山強度が低いため、掘削半径の3倍程度の範囲を改良し、ある程度幅広く改良体を構築することで、止水性と地山の安定性の両方を確保している。

本項では、硬岩サイトにおける処分坑道建設のためのプレグラウトを検討対象として、簡易式を用いて改良範囲と湧水量との関係について検討するものとする。なお、処分坑道を建設可能であることから、地山条件としてはある程度良好な硬質岩盤を想定する。

#### (1) 湧水量の予測式

大深度トンネルを対象とした簡易式としては、定常湧水を算定する Goodman らの式<sup>51)</sup>（数式 3.4-1）が有名であるが、本章においてはトンネル周囲の水圧低下を考慮するためにスキんファクターという低減係数を導入したスウェーデンで一般的に使用されている簡易式<sup>1)</sup>を、グラウト注入前、及び注入後の湧水量を予測するために使用することにする。同式において、スキんファクターを0とした場合が、Goodman の式に相当するため、両式の基本的な考え方は同様であると言える。

- Goodman らの簡易式

$$Q = \frac{2\pi \cdot K \cdot h}{\ln\left(\frac{2 \cdot h}{R}\right)} \quad \text{(数式 3.4-1)}$$

- 本節において使用する簡易式

- ・ グラウト改良前

$$Q = \frac{2\pi \cdot K \cdot h}{\ln\left(\frac{2 \cdot h}{R}\right) + \xi} \quad \text{(数式 3.4-2)}$$

- ・ グラウト注入後

$$Q = \frac{2\pi \cdot K_i \cdot h}{\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \frac{K_i}{K} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{R+t}\right) + \xi} \quad \text{(数式 3.4-3)}$$

ここに、

Q：トンネル内湧水量（m<sup>3</sup>/s/m）

K<sub>i</sub>：グラウト改良ゾーンの透水係数（m/s）

K：地山の透水係数（m/s）

R：トンネル半径（m）、t：グラウト改良範囲（m）、h：土被り（m）

ξ：トンネル周囲の水圧低下を考慮した SF（Skin Factor：一般に2~7が採用）

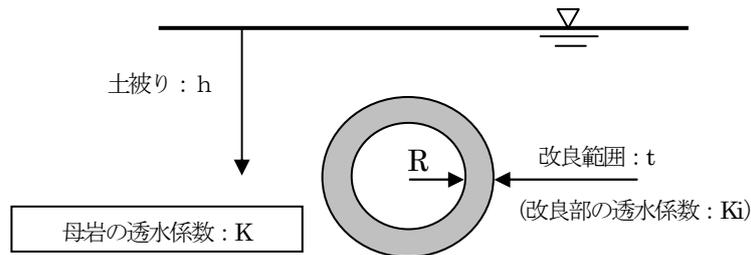


図 3.4-4 想定したトンネルモデル

(2) 予測結果

(i) 試算における仮定条件

- ・ 設置深度 : 500~1000mを想定し、このうち 1000mを基本とする。
- ・ 母岩の透水係数 : 第2次取りまとめ/第1分冊<sup>52)</sup>において示されている花崗岩の透水係数は、深度による低下傾向は明瞭には現れておらず、全深度において概ね  $10^{-7} \sim 10^{-10} \text{m/s}$  の範囲に分布している (図 3.4-5参照)。本章においては、グラウト改良が必要となる岩盤であるため、最も高い値である  $10^{-7} \text{m/s}$  を基本とし、 $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{m/s}$  の中でパラメータスタディを実施するものとする。
- ・ トンネルの換算半径 : 処分坑道を検討対象とし、直径 5.0mの円形トンネルと見なす。処分坑道は、実際は接続する多数の坑道群からパネルを構成しているが、本章においては簡易的に単体トンネルと見なすものとする。

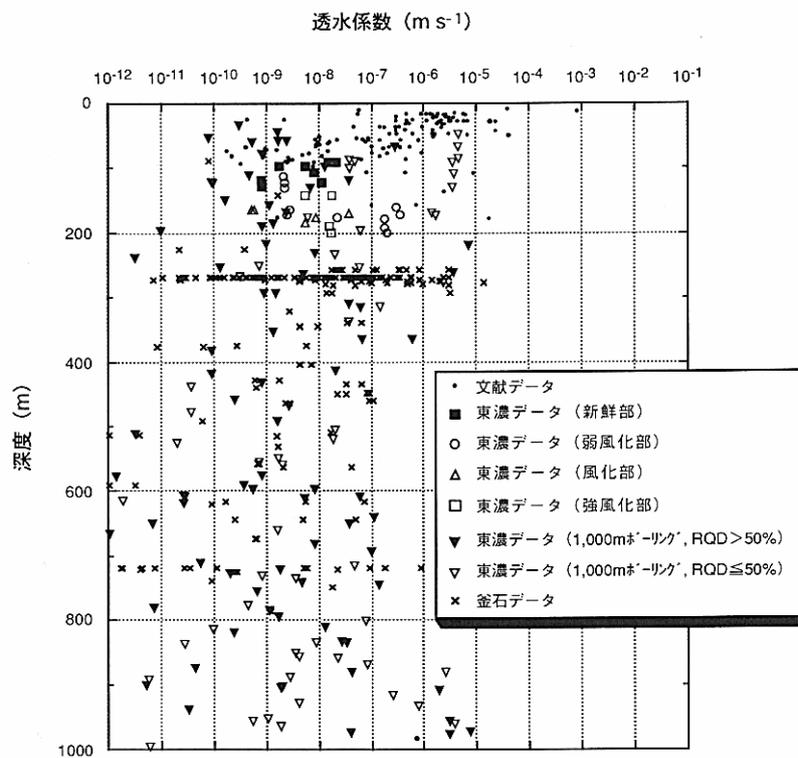


図 3.4-5 花崗岩の深度と透水係数の関係<sup>52)</sup>

(ii) 試算結果

● グラウト改良前

グラウト改良前の湧水量（1分間の100m当りの湧水量）を表 3.4-3～表 3.4-5及び図 3.4-6に示す。これらの結果より、以下のことがわかる。

- ・ 表 3.4-3及び図 3.4-6（上図）において、湧水量はSkin Factor (SF) にそれ程影響されておらず、SF=0 に比べて SF=7 で約 50%湧水量が低減している。一般的には、経験より 2～7 が採用されているが、本書では平均値である 4 を基本とする。
- ・ 表 3.4-4及び図 3.4-6（中図）において、母岩の透水係数に比例して湧水量は増大しており、地下深部 500m以深において数 L/分/100m程度の湧水量となるためには、 $10^{-9}$ m/s オーダーの透水係数となる必要があり、逆に  $10^{-8}$ m/s オーダー以上の透水係数の場合は、何らかの湧水対策が必要となる可能性があるものと考えられる（ただし、単体トンネルでの計算であることに注意）。
- ・ 表 3.4-5及び図 3.4-6（下図）より、湧水量に与えるトンネル半径の影響は極めて小さく、トンネル半径が4倍になっても、湧水量は10～20%程度しか増大しないことがわかる。

表 3.4-3 グラウト改良前の湧水量（Skin Factor の影響）

(単位 : L/分/100m)

SF	深度 (m)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
0	86.0	148.6	206.4	261.4	314.6	366.4	417.0	466.8	515.7	564.0
1	70.0	124.1	174.5	222.8	269.6	315.3	360.1	404.2	447.7	490.6
2	59.1	106.6	151.2	194.1	235.9	276.7	316.9	356.4	395.5	434.1
3	51.1	93.4	133.4	172.0	209.6	246.6	282.9	318.8	354.2	389.3
4	45.0	83.1	119.3	154.4	188.7	222.3	255.5	288.3	320.7	352.8
5	40.2	74.8	107.9	140.0	171.5	202.4	233.0	263.1	293.0	322.6
6	36.3	68.1	98.5	128.1	157.2	185.8	214.1	242.0	269.7	297.2
7	33.1	62.4	90.6	118.1	145.1	171.7	198.0	224.0	249.9	275.5

■固定条件：母岩の透水係数= $10^{-7}$ m/s、坑道形状は半径 2.5mの円形坑道（単体）

表 3.4-4 グラウト改良前の湧水量（母岩の透水係数の影響）

(単位 : L/分/100m)

透水係数 (m/s)	深度 (m)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$1.0 \times 10^{-6}$	449.8	830.8	1193	1544	1887	2223	2555	2883	3207	3528
$1.0 \times 10^{-7}$	45.0	83.1	119.3	154.4	188.7	222.3	255.5	288.3	320.7	352.8
$1.0 \times 10^{-8}$	4.5	8.3	11.9	15.4	18.9	22.2	25.6	28.8	32.1	35.3
$1.0 \times 10^{-9}$	0.4	0.8	1.2	1.5	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5

■固定条件：SF=4、坑道形状は半径 2.5mの円形坑道（単体）

表 3.4-5 グラウト改良前の湧水量（トンネル半径の影響）

(単位：L/分/100m)

トンネル 半径(m)	深度 (m)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
2.5	45.0	83.1	119.3	154.4	188.7	222.3	255.5	288.3	320.7	352.8
5.0	49.0	90.0	128.7	166.2	202.7	238.6	273.9	308.7	343.2	377.3
10.0	53.9	98.1	139.7	179.9	219.0	257.4	295.1	332.3	369.1	405.4

■固定条件：母岩の透水係数=10 <sup>-7</sup> m/s、SF=4
---

## ● グラウト改良後

グラウト改良後の湧水量（1分間の100m当りの湧水量）を表 3.4-6～表 3.4-14及び図 3.4-7及び図 3.4-8に示す。これらの結果より、以下のことがわかる。

- ・ 図 3.4-7及び図 3.4-8より、グラウト改良範囲は、1.0R 以上の範囲を改良していれば湧水量には大きく影響しないことがわかる。特に、SF=4 の場合（図 3.4-8）、この影響が顕著であり、止水性のみの観点から改良範囲を広く取る必要性が無いことがわかる。一方、改良体の透水係数については、湧水量に顕著に影響することがわかる。
- ・ また、図 3.4-9より、グラウト改良体の透水係数を  $1.0 \times 10^{-9}$  m/s まで低減出来れば、母岩の透水係数、及び改良範囲に関わらず、湧水量は 10L/分/100m 以下に低減できることがわかる。

今回のモデルは、処分坑道を単体のトンネルとしてモデル化しているが、実際の処分地下施設は、主要坑道に囲まれたパネルに多数の処分坑道が接続するため、連絡坑道及び主要坑道に地下水が流れ込み、処分パネル建設後は処分坑道 1 本当りの湧水量はかなり低減されることが期待される。このため、本試算結果はかなり安全側であると考えられるが、少なくとも 1.0R 以上の範囲を  $10^{-8}$  m/s オーダーで改良出来れば、かなりの止水性が確保出来、さらに  $10^{-9}$  m/s オーダーで改良することが出来れば、かなりドライな状態を確保できるものと考えられる。

表 3.4-6 グラウト改良後の湧水量（改良部透水係数と改良範囲の影響、その1）

（単位：L/分/100m）

改良部透水係数(m/s)	改良範囲／トンネル半径									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
5.0E-08	531.7	511.0	496.0	484.4	475.0	467.1	460.4	454.5	449.4	444.8
1.0E-08	364.8	291.7	252.5	227.5	209.9	196.7	186.4	178.1	171.1	165.3
5.0E-09	262.0	189.9	156.5	136.8	123.7	114.2	106.9	101.2	96.5	92.6
1.0E-09	80.5	50.1	38.7	32.7	28.8	26.2	24.2	22.7	21.5	20.5

■固定条件：SF=0、母岩の透水係数=1.0×10<sup>-7</sup>m/s、深度 1000m

■改良前の湧水量：564.0L/分/100m

表 3.4-7 グラウト改良後の湧水量（改良部透水係数と改良範囲の影響、その2）

（単位：L/分/100m）

改良部透水係数(m/s)	改良範囲／トンネル半径									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
5.0E-08	1824.1	1458.6	1262.4	1137.4	1049.6	983.7	932.2	890.4	855.7	826.4
1.0E-08	709.9	463.7	365.4	311.5	276.9	252.6	234.5	220.3	208.9	199.5
5.0E-09	402.5	250.3	193.5	163.3	144.2	131.0	121.2	113.5	107.4	102.4
1.0E-09	90.2	53.5	40.6	34.0	29.8	27.0	24.9	23.3	22.0	20.9

■固定条件：SF=0、母岩の透水係数=5.0×10<sup>-7</sup>m/s、深度 1000m

■改良前の湧水量：2819.8L/分/100m

表 3.4-8 グラウト改良後の湧水量（改良部透水係数と改良範囲の影響、その3）

（単位：L/分/100m）

改良部透水係数(m/s)	改良範囲／トンネル半径									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
5.0E-08	2620.1	1898.8	1564.7	1368.0	1236.6	1141.6	1069.1	1011.7	964.8	925.6
1.0E-08	805.1	500.6	387.1	326.5	288.4	261.9	242.3	227.1	214.9	204.8
5.0E-09	431.5	260.7	199.4	167.3	147.3	133.4	123.2	115.3	109.0	103.8
1.0E-09	91.6	53.9	40.9	34.1	30.0	27.1	25.0	23.4	22.0	21.0

■固定条件：SF=0、母岩の透水係数=1.0×10<sup>-6</sup>m/s、深度 1000m

■改良前の湧水量：5639.7L/分/100m

表 3.4-9 グラウト改良後の湧水量（改良部透水係数と改良範囲の影響、その4）

（単位：L/分/100m）

改良部透水係数(m/s)	改良範囲/トンネル半径									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
5.0E-08	249.8	245.2	241.6	238.9	236.5	234.6	232.9	231.4	230.0	228.8
1.0E-08	74.9	71.2	68.6	66.6	65.0	63.7	62.6	61.6	60.8	60.0
5.0E-09	39.9	37.8	36.2	35.0	34.1	33.4	32.7	32.1	31.7	31.2
1.0E-09	8.4	7.9	7.6	7.3	7.1	6.9	6.8	6.7	6.6	6.5

- 固定条件：SF=4、母岩の透水係数=1.0×10<sup>7</sup>m/s、深度 1000m
- 改良前の湧水量：352.8L/分/100m

表 3.4-10 グラウト改良後の湧水量（改良部透水係数と改良範囲の影響、その5）

（単位：L/分/100m）

改良部透水係数(m/s)	改良範囲:(R+t)/R									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
5.0E-08	374.5	356.2	343.1	333.2	325.2	318.6	313.0	308.2	303.9	300.1
1.0E-08	83.2	78.3	74.9	72.4	70.3	68.6	67.2	66.0	64.9	64.0
5.0E-09	42.2	39.7	37.9	36.6	35.5	34.7	33.9	33.3	32.8	32.3
1.0E-09	8.5	8.0	7.7	7.4	7.2	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5

- 固定条件：SF=4、母岩の透水係数=5.0×10<sup>7</sup>m/s、深度 1000m
- 改良前の湧水量：1764.2L/分/100m

表 3.4-11 グラウト改良後の湧水量（改良部透水係数と改良範囲の影響、その6）

（単位：L/分/100m）

改良部透水係数(m/s)	改良範囲/トンネル半径									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
5.0E-08	399.4	377.5	362.2	350.5	341.2	333.5	327.1	321.5	316.6	312.3
1.0E-08	84.4	79.3	75.8	73.1	71.0	69.3	67.9	66.6	65.5	64.5
5.0E-09	42.5	39.9	38.1	36.8	35.7	34.8	34.1	33.5	32.9	32.4
1.0E-09	8.5	8.0	7.7	7.4	7.2	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5

- 固定条件：SF=4、母岩の透水係数=1.0×10<sup>6</sup>m/s、深度 1000m
- 改良前の湧水量：3528.4L/分/100m

表 3.4-12 グラウト改良後の湧水量（母岩の透水係数の影響、その1）

（単位：L/分/100m）

母岩の透水係数(m/s)	改良範囲/トンネル半径									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1.0E-05	8.6	8.0	7.7	7.4	7.2	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5
1.0E-06	8.5	8.0	7.7	7.4	7.2	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5
1.0E-07	8.4	7.9	7.6	7.3	7.1	6.9	6.8	6.7	6.6	6.5

■固定条件：SF=4、改良部の透水係数=1.0×10<sup>-9</sup>m/s、深度 1000m

表 3.4-13 グラウト改良後の湧水量（母岩の透水係数の影響、その2）

（単位：L/分/100m）

母岩の透水係数(m/s)	改良範囲/トンネル半径									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1.0E-05	42.8	40.1	38.3	36.9	35.9	35.0	34.2	33.6	33.0	32.5
1.0E-06	42.5	39.9	38.1	36.8	35.7	34.8	34.1	33.5	32.9	32.4
1.0E-07	39.9	37.8	36.2	35.0	34.1	33.4	32.7	32.1	31.7	31.2

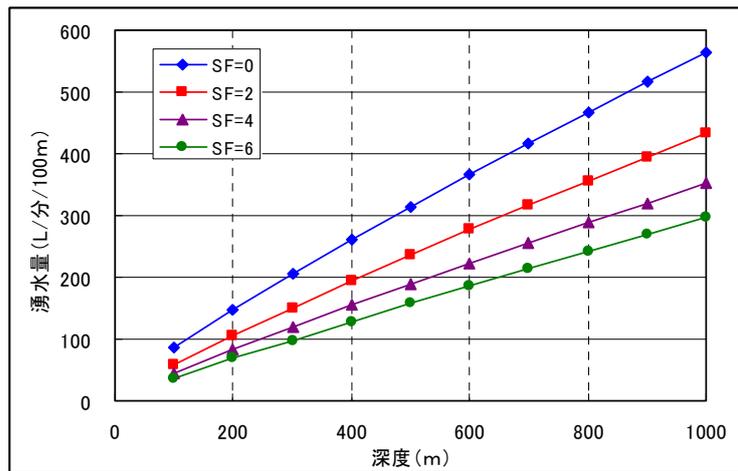
■固定条件：SF=4、改良部の透水係数=5.0×10<sup>-9</sup>m/s、深度 1000m

表 3.4-14 グラウト改良後の湧水量（母岩の透水係数の影響、その3）

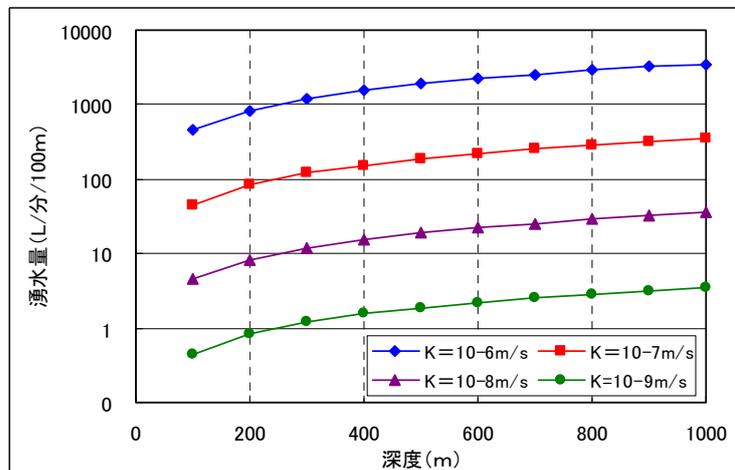
（単位：L/分/100m）

改良部透水係数(m/s)	改良範囲/トンネル半径									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1.0E-05	85.5	80.2	76.6	73.9	71.7	69.9	68.4	67.1	66.0	65.0
1.0E-06	84.4	79.3	75.8	73.1	71.0	69.3	67.9	66.6	65.5	64.5
1.0E-07	74.9	71.2	68.6	66.6	65.0	63.7	62.6	61.6	60.8	60.0

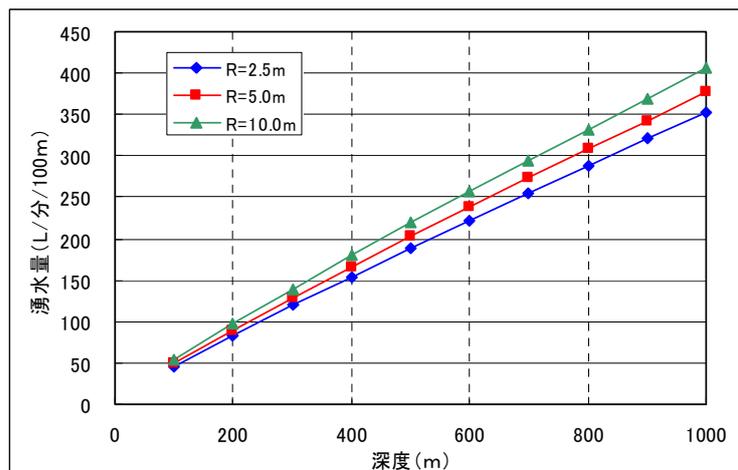
■固定条件：SF=4、改良部の透水係数=1.0×10<sup>-8</sup>m/s、深度 1000m



■固定条件：母岩の透水係数=10<sup>-7</sup>m/s、坑道形状は半径2.5mの円形坑道（単体）



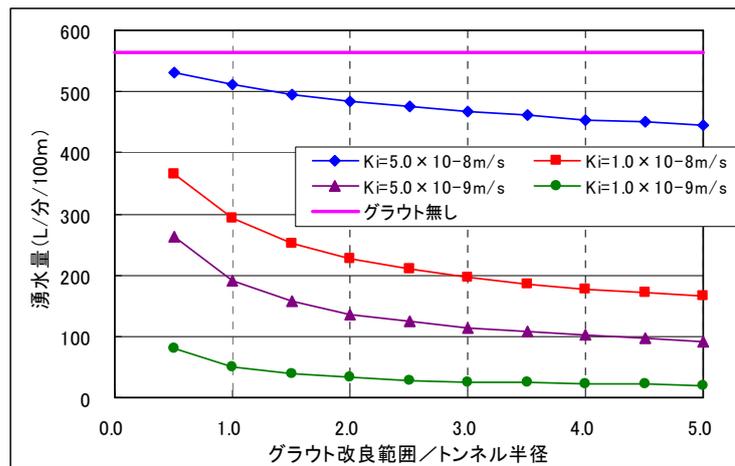
■固定条件：SF=4、坑道形状は半径2.5mの円形坑道（単体）



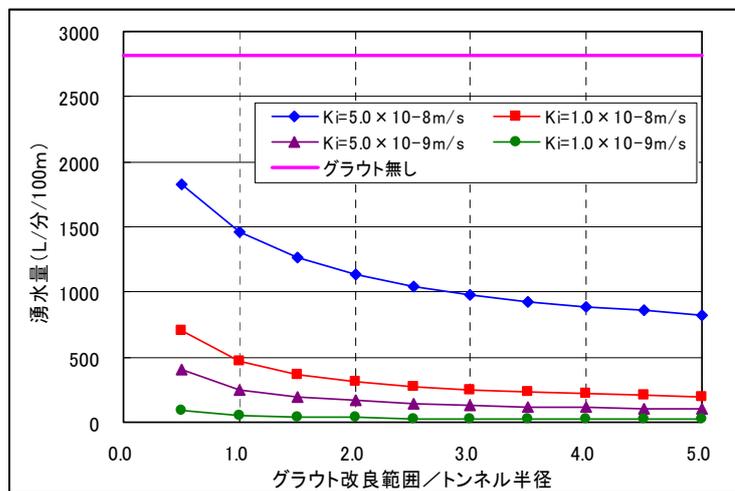
■固定条件：母岩の透水係数=10<sup>-7</sup>m/s、SF=4

図 3.4.6 グラウト改良前の予測湧水量

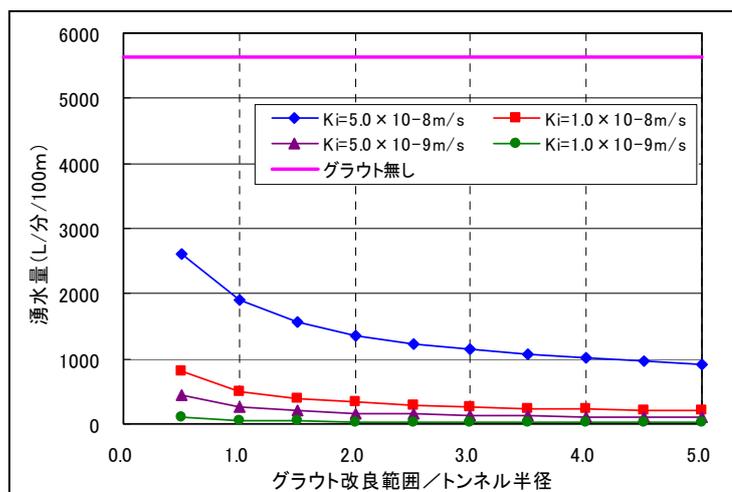
(上：SFの影響、中：母岩の透水係数の影響、下：トンネル半径の影響)



■固定条件：SF=0、母岩の透水係数= $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 、深度 1000m

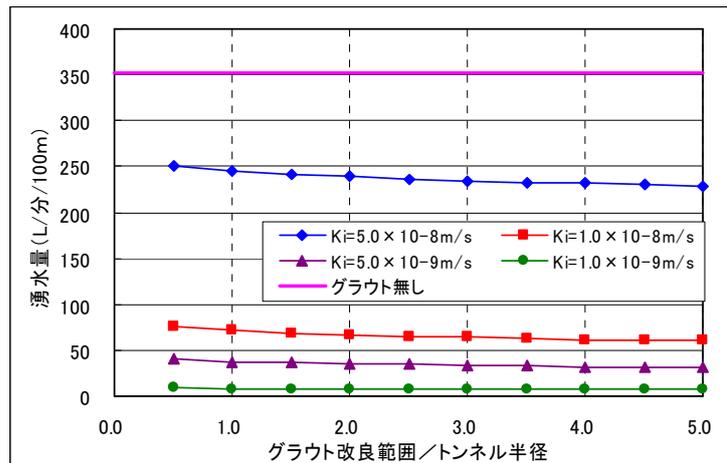


■固定条件：SF=0、母岩の透水係数= $5.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 、深度 1000m

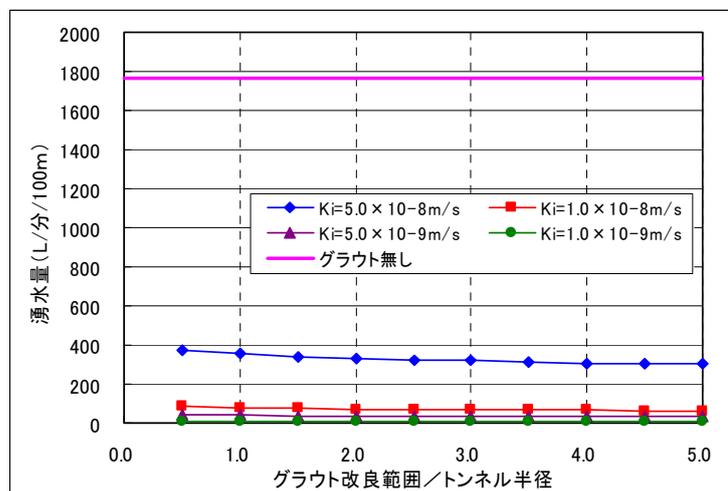


■固定条件：SF=0、母岩の透水係数= $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、深度 1000m

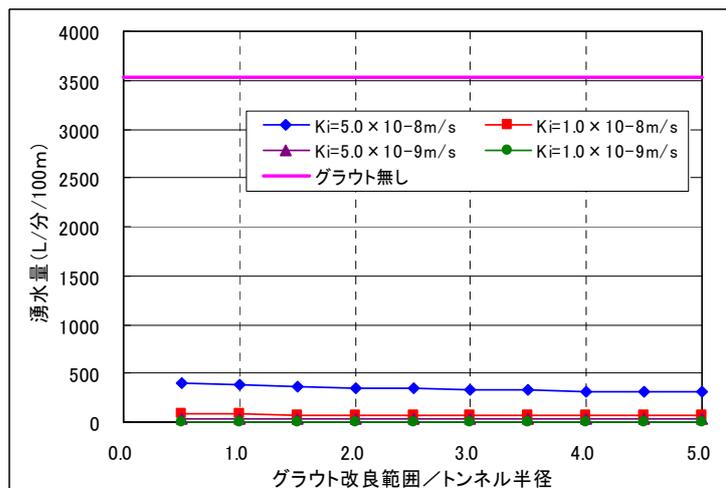
図 3.4-7 グラウト改良後の予測湧水量 (SF=0、深度 1000mの場合)



■固定条件：SF=4、母岩の透水係数=1.0×10<sup>-7</sup>m/s、深度 1000m

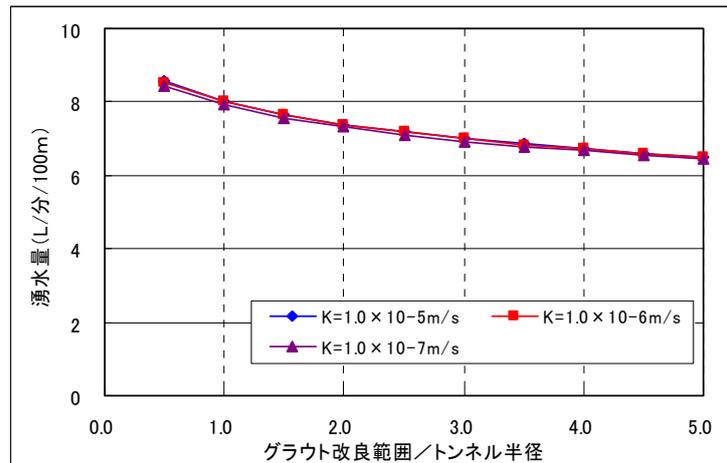


■固定条件：SF=4、母岩の透水係数=5.0×10<sup>-7</sup>m/s、深度 1000m

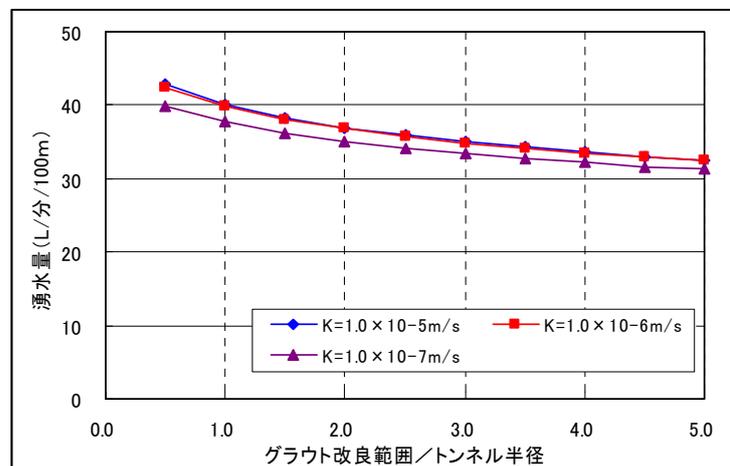


■固定条件：SF=4、母岩の透水係数=1.0×10<sup>-6</sup>m/s、深度 1000m

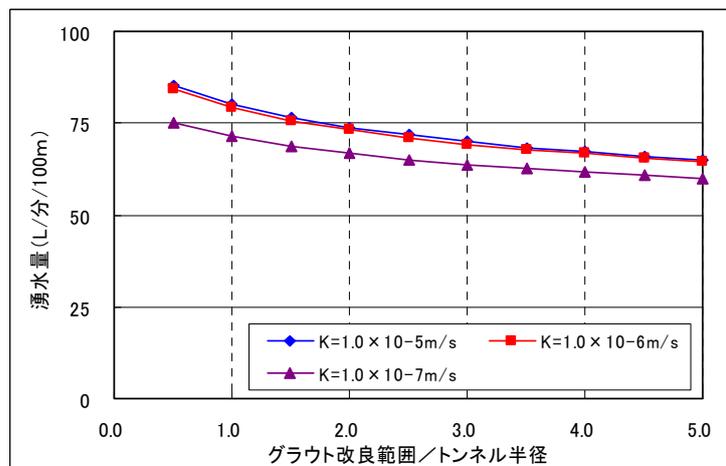
図 3.4-8 グラウト改良後の予測湧水量 (SF=4、深度 1000mの場合)



■固定条件：SF=4、改良部の透水係数=1.0×10<sup>-9</sup>m/s、深度 1000m



■固定条件：SF=4、改良部の透水係数=5.0×10<sup>-9</sup>m/s、深度 1000m



■固定条件：SF=4、改良部の透水係数=1.0×10<sup>-8</sup>m/s、深度 1000m

図 3.4-9 グラウト改良後の予測湧水量 (SF=4、深度 1000mの場合)

### (3) グラウト施工方法案の提示

#### (i) 検討の前提条件

- ・ 対象とする地下坑道：処分坑道
- ・ 岩盤条件：硬質の結晶質岩盤
- ・ 注入方法：プレグラウト（既往実績より、ポストグラウトに比べて効率的であるため）
- ・ 止水の目的：高透水割れ目、割れ目密集帯等の湧水箇所を以下の目的で止水改良する。
  - 周辺の地下水環境への影響の低減
  - 作業環境の向上
  - 排水処理費用の低減
  - ◎人工バリア構築に支障となる湧水量の低減
- ・ 深度：500～1000mの大深度であり、グラウト注入に伴う地上への影響（アップリフト等）は無視しうる。

#### (ii) 施工方法

結晶質岩における止水注入の基本的な考え方を以下に示す。

- ・ 高い止水性の確保：岩盤内の亀裂ネットワークをグラウト孔により確実に補足し、材料分離の少ない安定した高濃度グラウト材料を注入することで、トンネル周辺に密実な改良体を構築する。
- ・ 経済性の確保：トンネルのグラウト注入は、作業場所がスペースの狭い切羽に限定されるため、グラウト注入効率がトンネル工事全体の効率化に結びつく。このため、止水性に悪影響を与えない範囲でグラウト注入時間の短縮を図る。

上記を実現するために、主に北欧の環境配慮型トンネルにおけるグラウト施工方法を参考に、放射性廃棄物地層処分における注入方法として、以下を提案する。

##### <注入材料>

現状においては、セメント材料（低pHセメント）を基本と考える。ただし、セメント材料による1次注入の結果、十分な止水性が得られない場合は、より浸透性能に優れたケミカル材料による2次注入を実施するものとする。

- ・ セメント材料：材料分離（ブリーディング）の少ない安定した高濃度材料（低いW/C比率）を使用する。注入工の後半に注入する材料は、硬化促進剤を使用することにより固化時間を調整し、掘削サイクルの短縮を図ることが望ましい。
- ・ ケミカル材料：地下深部であるため、耐久性が高い上に、高強度材料が必要となる。ただし、必要強度及び材料自体については今後の研究が必要である。

##### <注入孔配置>

- ・ 注入範囲：良好な硬質岩盤の場合は、空洞安定性の観点から注入範囲を広げる必要が無い上に、(2)の湧水量に関する試算結果より、止水性の観点からも注入範囲を1R程度以上とれば十分であった。このため、経済性（工費・工期）を考慮して、1R以上でかつ、岩盤の緩み領域とロックボルト長を満足する範囲を注入範囲とする。

- ・ 注入間隔：掘削精度の範囲内で出来るだけ狭める（切羽面で1.0m間隔）。このため、高い掘削精度が求められるため、1回の注入長は北欧の環境配慮型トンネルにおける事例を参考に15～25m程度とする。（図 3.4-10参照）

<注入圧力>

- ・ 高い浸透性を確保するためには高い差圧を载荷可能とすることが望ましく、ノルウェーのトンネルにおいては最終注入圧力を10MPaの高圧に設定している事例もある。また、青函トンネルにおいても限界圧力を若干上回る7.5MPa程度の高圧を作用することで浸透性を確保しており、硬岩サイトのプレグラウトにおいては高圧注入が望ましいと言える。一方、放射性廃棄物地層処分においては坑道周辺の天然バリアを傷めないことも重要であるため、岩盤亀裂を開口させるような高圧载荷については十分な検討が必要である。

<その他>

- ・ グラウトパターンの設定：ダムグラウトのように中央内挿法により注入孔配置を設定することは、効果の確認試験回数が増えるため、グラウト注入時間の増大につながる場合がある。一方、ノルウェーの環境配慮型トンネルのように、最初から孔数を規定したシステムグラウトを実施することで、グラウト注入次数を低減出来れば、施工の合理化につながる可能性がある。注入孔の数と次数の分割については今後の大きな課題である。
- ・ ダメ押し注入：セメント材料の場合、ダム等においては20～30分程度ダメ押しを実施し、加圧脱水させ、密実な改良体の形成を図っている場合があるが、その必要性については今後検討する必要がある。
- ・ 配合切替：1本の注入孔により、大きな亀裂から小さな亀裂までを効率的に注入するために、薄い配合から濃い配合にグラウト材を順次切替える配合切替が実施されている場合が多い。一方、最初に薄い配合を注入することは、注入時間が長くなり不経済になるばかりではなく、十分な量のグラウトが注入出来ない場合は、ブリーディング量が大きく強度の弱い薄い配合のまま注入が終了することとなり、止水性の観点からも懸念される。このため、配合切替の必要性、及び切替パターンについては今後、十分に検討する必要があると言える。

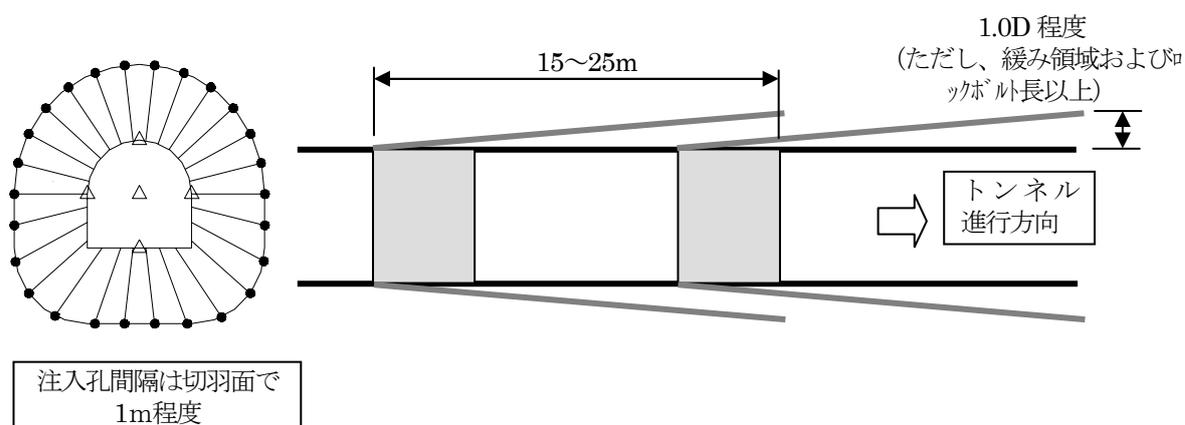


図 3.4-10 注入配置のイメージ図

### 3.4.4 経済性の検討

#### (1) 検討の目的

前項で設定した注入方法の場合、1回当たりの注入長を短く抑えているため、注入回数が増加し、青函トンネル等の日本におけるトンネルグラウト方法に比べて、工期及び工費が増加する可能性がある。また、放射性廃棄物地層処分においては微小な亀裂まで注入するために、超微粒子セメントを用いる上に、セメントグラウトのpHを11以下に抑えるために、高価なシリカフュームスラリーを大量に添加しているため、注入材料が高価になることが予想され（図 3.4-11参照）、注入費用全体に与える注入材料費の影響が懸念される。

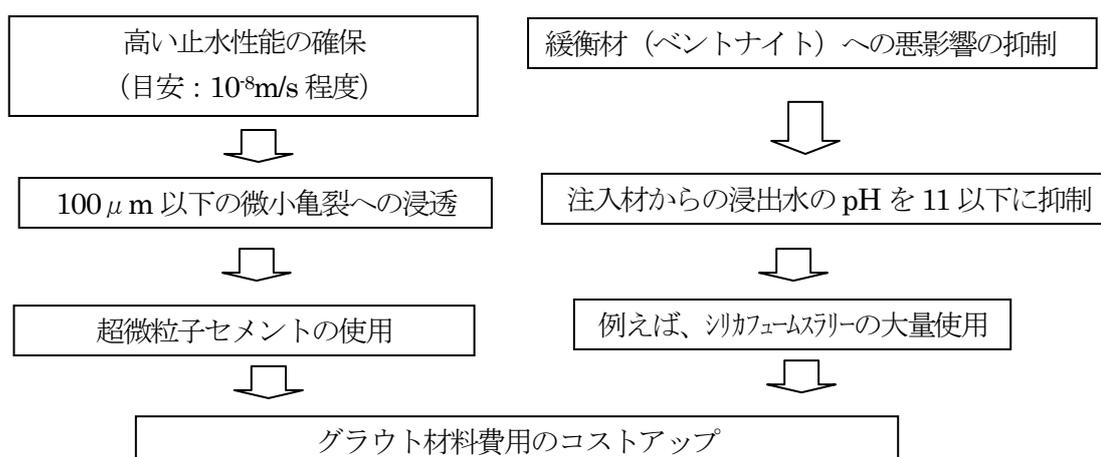


図 3.4-11 セメントグラウト材料のコストアップ要因

そこで、前項で提案したグラウト注入方法を採用した場合におけるコストへの影響を把握するために、以下の2種類のモデルケースを作成し、その費用及び工期を比較する。さらに、それぞれの注入方法において、材料費及び注入時間に起因する費用項目の比率を試算し、それぞれがグラウト全体費用に与える影響について考察する。

- ・ 今回提案した注入方法（短尺ボーリング方式）：北政の環境配慮型トンネルにおける全断面プレグラウト方式をベース（グラウト注入孔長：24m程度）
- ・ 長尺ボーリング方式：国内の海底トンネル等における全断面プレグラウト方式をベース（グラウト注入孔長：50m程度）

#### (2) 検討モデル

##### (i) 検討条件

比較しやすいように、検討における条件を以下のように統一する。

- ・ 対象トンネル：処分坑道（幅 5m、高さ 5mの馬蹄形断面、断面積：22.3m<sup>2</sup>）
- ・ 対象岩盤：花崗岩（透水係数：10<sup>-7</sup>m/s オーダーを想定）
- ・ 注入材料：超微粒子セメント（分散剤を1.5%添加）
- ・ 削孔方法：2ブームジャンボ（削孔速度1m/分）
- ・ 注入時間：2.5時間/ステージを基本ケースとする。

- ・ 注入セメント量：20 kg/m/注入孔を基本ケースとする。
- ・ カバーロック：6m

(ii) モデルケース

● 注入孔高密度配置+短尺ボーリング (以下、短尺ボーリング案)

3.2節に示した Sandvika-Asker railway tunnel/skaugum tunnel (ノルウェー、オスロ) を参考に以下のようにモデルケースを設定する。

- ・ 円周方向の注入孔間隔：切羽において 0.7m、先端部において 1.5m程度
- ・ 注入範囲：第 2 次取りまとめにおけるロックボルト (長さ：3m) をカバーするために 3.5 mに設定
- ・ 注入孔長：24m (有効長：18m)
- ・ ステージ数：1 回 (パッカー方式) を基本とする
- ・ 注入孔配置：図 3.4-12に示す
- ・ 注入孔密度 =  $\frac{\sum \text{注入孔長} \times \text{注入孔数}}{\text{改良体の体積}} = 0.24 \text{ 孔/m}^2$

● 注入孔低密度配置+長尺ボーリング案 (以下、長尺ボーリング案)

3.2節に示した青函トンネルを参考に以下のようにモデルケースを設定する。

- ・ 円周方向の注入孔間隔：先端部において 3.0m程度
- ・ 半径方向の注入孔間隔：先端部において 3.5m程度
- ・ 注入範囲：1D (φ5.3mの円形断面に換算) の範囲と考えて 5.5m
- ・ 注入孔長：50m (有効長：44m)
- ・ ステージ数：3 回 (パッカー方式)
- ・ 注入孔配置：図 3.4-13に示す
- ・ 注入孔密度 =  $\frac{\sum \text{注入孔長} \times \text{注入孔数}}{\text{改良体の体積}} = 0.18 \text{ 孔/m}^2$

上記の2種類の案に対して、表 3.4-15に示すパラメータスタディを実施する。また、短尺ボーリングについては、2ステージ (パッカー方式) で注入した場合、及びグラウト材料単価をパラメータとしたケースについても検討する。

表 3.4-15 パラメータスタディの検討ケース  
(基本ケース)

ケース番号	セメント注入量 (kg/m/注入孔)	注入時間 (時間/注入孔)	備考
1	20	2.5	標準
2	20	1.25	注入時間の影響を把握
3	20	3.75	
4	20	5.0	
5	10	1.25	注入量の影響を把握
6	30	3.75	
7	40	5.0	

表 3.4-16 パラメータスタディの検討ケース（短尺ボーリング案のみ）  
（参考）

ケース番号	ステージ数	グラウト材料単価	注入時間 (時間/注入孔)	備考
8	2	1.0	2.5	標準
9		1.0	1.25	ステージ数と注入時間の影響を把握
10		1.0	3.75	
11		1.0	5.0	
12	1	0.5	2.5	注入材料単価の影響を把握
13		1.5	2.5	
14		2.0	2.5	

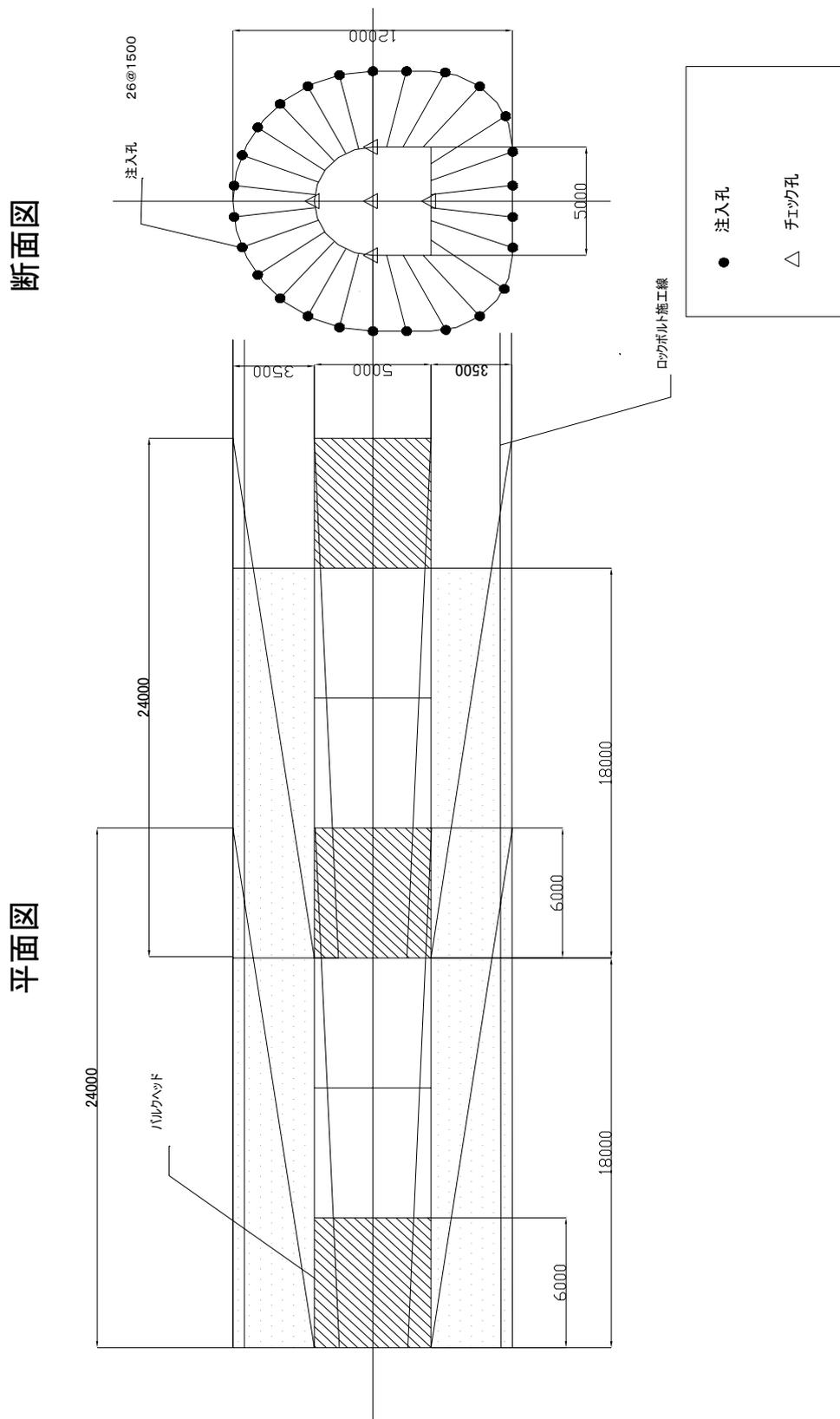


図 3.4-12 注入孔配置図 (短尺ボーリング案)

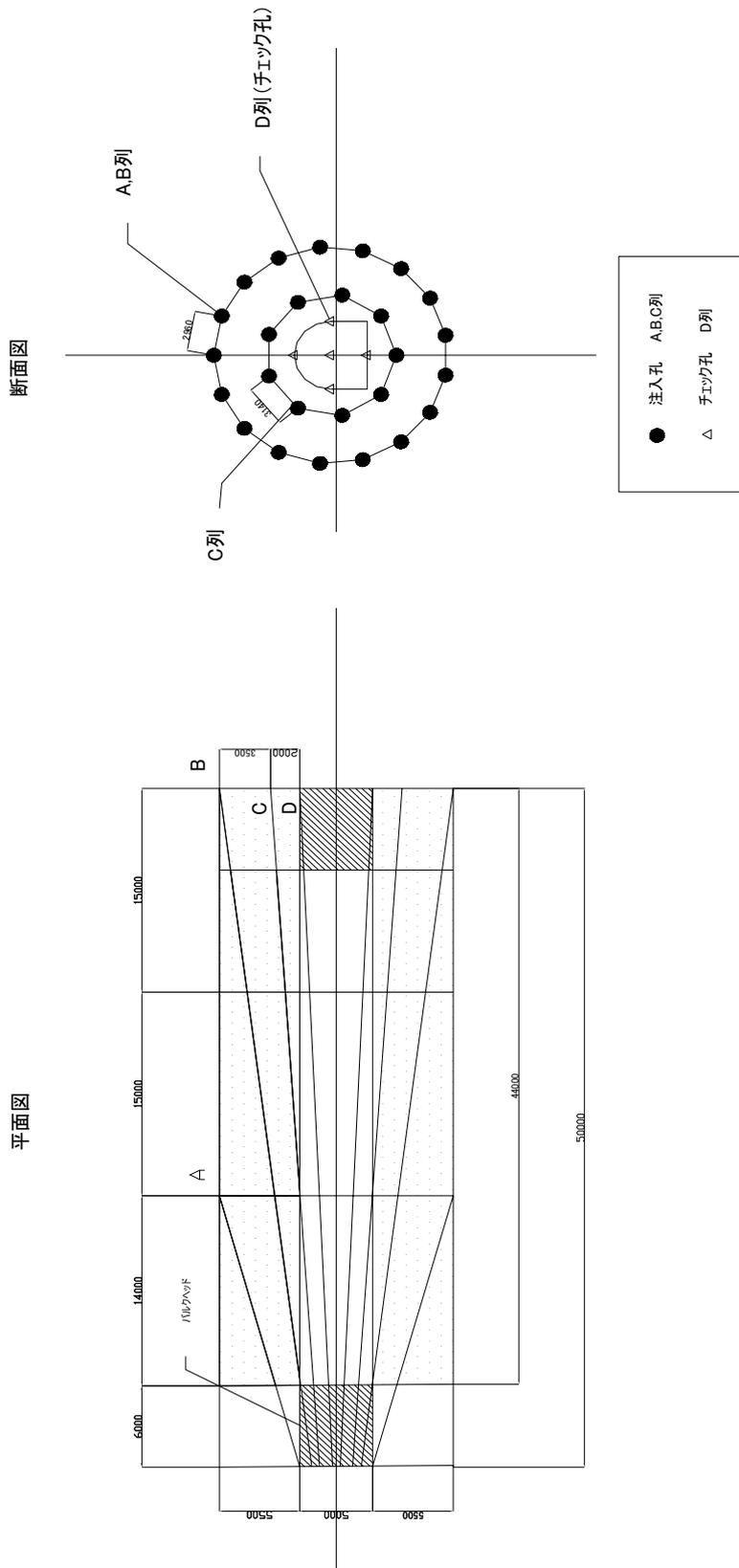


図 3.4-13 注入孔配置図 (長尺ボーリング案)

(iii) 積算根拠

工費・工期の算定は、以下の基準により実施するものとする。

(a) 参照積算基準

- ・ ダム工事積算の解説 平成 17 年度版 (財)ダム技術センター
- ・ 建設機械等損料表 平成 17 年度版 (社) 日本建設機械化協会
- ・ 地質調査関連工事用機材等価格調査表 平成 12 年度版 (社) 全国地質調査協会連合会

(b) 積算条件

- ・ 作業時間  
拘束時間：7：00～19：00 12 時間  
賃金対象時間：11 時間  
実作業時間：9.5 時間 (=11 時間×0.86)
- ・ 機械構成  
ボーリングマシン：2ブームジョンドリル1台  
グラウトポンプ：平均4台 (2～6台)

(3) 工費算定結果

(i) 数量一覧表

積算の基本となる数量を以下に示す。

表 3.4-17 短尺ボーリング案 (その1)  
(注入スパン：24m、有効注入区間：18m)

項目	単位	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6	ケース 7
注入孔数	孔	26	26	26	26	26	26	26
注入孔削孔長	m/孔	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3
注入削孔長計	m	631.8	631.8	631.8	631.8	631.8	631.8	631.8
チェック孔数	孔	5	5	5	5	5	5	5
チェック孔削孔長	m/孔	24	24	24	24	24	24	24
チェック削孔長計	m	120	120	120	120	120	120	120
注入ステージ数	s t	26	26	26	26	26	26	26
透水試験	s t	5	5	5	5	5	5	5
全削孔長	m	751.8	751.8	751.8	751.8	751.8	751.8	751.8
注入量	kg/m (孔)	20	20	20	20	10	30	40
全注入量	t	12.6	12.6	12.6	12.6	6.3	19.0	25.3
注入時間	h / s t	2.5	1.25	3.75	5	1.25	3.75	5
全注入時間	h	65.0	32.5	97.5	130.0	32.5	97.5	130.0

表 3.4-18 短尺ボーリング案 (その2)

(注入スパン: 24m、有効注入区間: 18m)

項目	単位	ケース8	ケース9	ケース10	ケース11	ケース12	ケース13	ケース14
注入孔数	孔	26	26	26	26	26	26	26
注入孔削孔長	m/孔	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3
注入削孔長計	m	631.8	631.8	631.8	631.8	631.8	631.8	631.8
チェック孔数	孔	5	5	5	5	5	5	5
チェック孔削孔長	m/孔	24	24	24	24	24	24	24
チェック削孔長計	m	120	120	120	120	120	120	120
注入ステージ数	s t	52	52	52	52	26	26	26
透水試験	s t	10	10	10	10	5	5	5
全削孔長	m	751.8	751.8	751.8	751.8	751.8	751.8	751.8
注入量	kg/m (孔)	20	20	20	20	20	20	20
全注入量	t	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6
注入時間	h/s t	2.5	1.25	3.75	5	2.5	2.5	2.5
全注入時間	h	130.0	65.0	195.0	260.0	65.0	65.0	65.0

表 3.4-19 長尺ボーリング案

(注入スパン: 50m、有効注入区間: 44m)

項目	位置	単位	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
注入孔数	A列	孔	17	17	17	17	17	17	17
	B列	孔	17	17	17	17	17	17	17
	C列	孔	9	9	9	9	9	9	9
計		孔	43	43	43	43	43	43	43
注入孔削孔長	A列	m/孔	20.7	20.7	20.7	20.7	20.7	20.7	20.7
	B列	m/孔	50.4	50.4	50.4	50.4	50.4	50.4	50.4
	C列	m/孔	50.1	50.1	50.1	50.1	50.1	50.1	50.1
計		m/孔	121.2	121.2	121.2	121.2	121.2	121.2	121.2
注入削孔長計	A列	m	351.9	351.9	351.9	351.9	351.9	351.9	351.9
	B列	m	856.8	856.8	856.8	856.8	856.8	856.8	856.8
	C列	m	450.9	450.9	450.9	450.9	450.9	450.9	450.9
計		m	1659.6	1659.6	1659.6	1659.6	1659.6	1659.6	1659.6
注入ステージ数	A列 (1 s t/孔)	s t	17	17	17	17	17	17	17
	B列 (3 s t/孔)	s t	51	51	51	51	51	51	51
	C列 (3 s t/孔)	s t	27	27	27	27	27	27	27
計		s t	95	95	95	95	95	95	95
チェック孔数	D列	孔	5	5	5	5	5	5	5
チェック孔削孔長	D列	m/孔	50	50	50	50	50	50	50
チェック削孔長計	D列	m	250	250	250	250	250	250	250
透水試験		回	15	15	15	15	15	15	15
全削孔長		m	1909.6	1909.6	1909.6	1909.6	1909.6	1909.6	1909.6
注入量		kg/m (孔)	20	20	20	20	10	30	40
全注入量		t	33.2	33.2	33.2	33.2	16.6	49.8	66.4
注入時間		h/s t	2.5	1.25	3.75	5	1.25	3.75	5
全注入時間		h	237.5	118.8	356.3	475.0	118.8	356.3	475.0

(ii) 費用算定結果

トンネル1m当り（グラウト有効長当り）のグラウト工全体費用の算定結果を、短尺ボーリング案のケース1を1.0とした比率に換算して、表 3.4-20～表 3.4-22にまとめて示す。

表 3.4-20 短尺ボーリング案のグラウト費用比率(その1)

(注入ステージ数：1)

ケース名	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
注入時間（時間）	2.5	1.25	3.75	5	1.25	3.75	5
セメント注入量（kg/m）	20	20	20	20	10	30	40
グラウト工全体費用の比率	1.00	0.91	1.09	1.18	0.74	1.26	1.51
材料費比率 <sup>*1</sup> （%）	33	36	30	28	22	39	44
注入工費比率 <sup>*2</sup> （%）	18	10	25	31	12	22	24

\*1：グラウト工全体費用に占める材料費の比率

\*2：グラウト工全体費用に占める注入工（人件費、機械損料等）の比率

表 3.4-21 短尺ボーリング案のグラウト費用比率(その2)

ケース名	ケース8	ケース9	ケース10	ケース11	ケース12	ケース13	ケース14
注入時間（時間）	2	2	2	2	1	1	1
セメント注入量（kg/m）	1.25	2.5	3.75	5	2.5	2.5	2.5
グラウト工全体費用の比率	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.5	2.0
材料費比率 <sup>*1</sup> （%）	1.14	1.33	1.51	1.69	0.84	1.16	1.33
注入工費比率 <sup>*2</sup> （%）	29	25	22	19	20	42	49

\*1：グラウト工全体費用に占める材料費の比率

\*2：グラウト工全体費用に占める注入工（人件費、機械損料等）の比率

表 3.4-22 長尺ボーリング案のグラウト費用比率

(注入ステージ数：3)

ケース名	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
注入時間（時間）	2.5	1.25	3.75	5	1.25	3.75	5
セメント注入量（kg/m）	20	20	20	20	10	30	40
グラウト工全体費用の比率	1.15	0.99	1.32	1.48	0.81	1.50	1.83
材料費比率 <sup>*1</sup> （%）	31	36	27	24	22	36	39
注入工費比率 <sup>*2</sup> （%）	24	14	31	37	17	27	30

\*1：グラウト工全体費用に占める材料費の比率

\*2：グラウト工全体費用に占める注入工（人件費、機械損料等）の比率

また、算定結果を以下のように図示する。

- 短尺ボーリング案
  - ・ 注入時間をパラメータ（セメント量が一定）：ケース 2,1,3,4（図 3.4-14）
  - ・ 注入量をパラメータ（注入速度が一定）：ケース 5,1,6,7（図 3.4-15）
  - ・ ステージ数をパラメータ（セメント注入量を一定）：ケース 2,1,3,4,8,9,10,11（図 3.4-16）

- ・ 材料単価をパラメータ（セメント量、注入時間を一定）：ケース 12,1,13,14（図 3.4-17）
- 長尺ボーリング案
- ・ 注入時間をパラメータ（セメント量が一定）：ケース 2,1,3,4（図 3.4-18）
- ・ 注入量をパラメータ（注入速度が一定）：ケース 5,1,6,7（図 3.4-19）

これらの結果より以下のことがわかる。

- ・ 短尺ボーリング案の場合、標準ケースであるケース 1 において、グラウト全費用に占める材料費及び注入工の割合は、それぞれ 33%、18%（図 3.4-14 のケース 1）であり材料費の比率が高いことがわかる。これは、注入材料として高価な超微粒子セメントを使用しているためである。
- ・ 短尺ボーリング案の場合、注入時間が 2 倍（ケース 4）に増えても全体工費に与える影響は 18% の増加（表 3.4-20 のケース 4）であり、それ程影響が大きいわけではないことがわかる。通常のトンネルであれば、切羽が 1 つしかないため、注入時間の増大に伴い掘削工が手待ちとなり、掘削工の単価が増大することが考えられるが、放射性廃棄物地層処分の場合には地下坑道数が多く、複数の切羽が同時進行することが予想されるため、注入時間の増大に伴う手待ちは通常のトンネル掘削工事ほどは生じない可能性がある。
- ・ しかしながら、短尺ボーリング案の場合でも 24m を 2 ステージに分割して注入する場合は（表 3.4-21）、標準ケースであるケース 9 において、グラウト全費用に占める材料費及び注入工の割合は、それぞれ 25%、28% であり、注入工の比率の方が高くなる。この場合は、注入時間を短縮することが全体工費低減につながるることとなる。また、2 ステージにすることにより 33% グラウト費用が増大する（表 3.4-21 のケース 9）ことがわかる。
- ・ 短尺ボーリング案の場合、グラウト材料単価が 2 倍になるとグラウト費用が 33% 増大（表 3.4-21 のケース 14）することがわかる。今回のグラウト材料は、超微粒子セメント＋分散剤（1.5%）であるが、低 pH セメントグラウト材料は高価なシリカフェュームスラリーを大量に混入（セメント量の 1.4 倍）しているため、グラウト材料費用が高くなり、グラウト費用全体を増大させる可能性がある（ただし、現状で Posiva で検討されている P3 配合の場合は、超微粒子セメント単体に比べて、それ程高価にはならない）。

**\*参考**

超微粒子セメントにグラウトエイドを 1.4 倍添加した場合（Posiva における原位置試験に使用した P3）、グラウト材料費は以下の通りとなる。

- ・ 配合 1（レファレンス）：超微粒子セメント＋分散剤（1.5%）
- ・ 配合 2（P3）：超微粒子セメント＋グラウトエイド（140%）＋分散剤（2.0%）
- ・ 配合 3（参考）：普通セメント＋分散剤（1.5%）

水セメント比を同一とした場合の材料費（単位重量）の比率はおよそ以下の通りとなる。

配合 1：配合 2：配合 3 = 1：1.1：0.1

- ・ 長尺ボーリング案の場合は、注入時間が 2 倍（表 3.4-22 のケース 4）に増えると、全体工費に与える影響は 48% も増加する。これは、長尺ボーリング案の場合、3 ステージに分割して注入するため、工費全体に占める注入工費用の割合が高いためであると考えられる。
- ・ 図 3.4-18 及び図 3.4-19 より、いずれのケースにおいてもトンネル 1m 当りのグラウト費用は、

短尺ボーリング案の方が長尺ボーリング案より安価であることがわかる。特に、注入時間の増大に伴い工費の差が開く傾向にある。

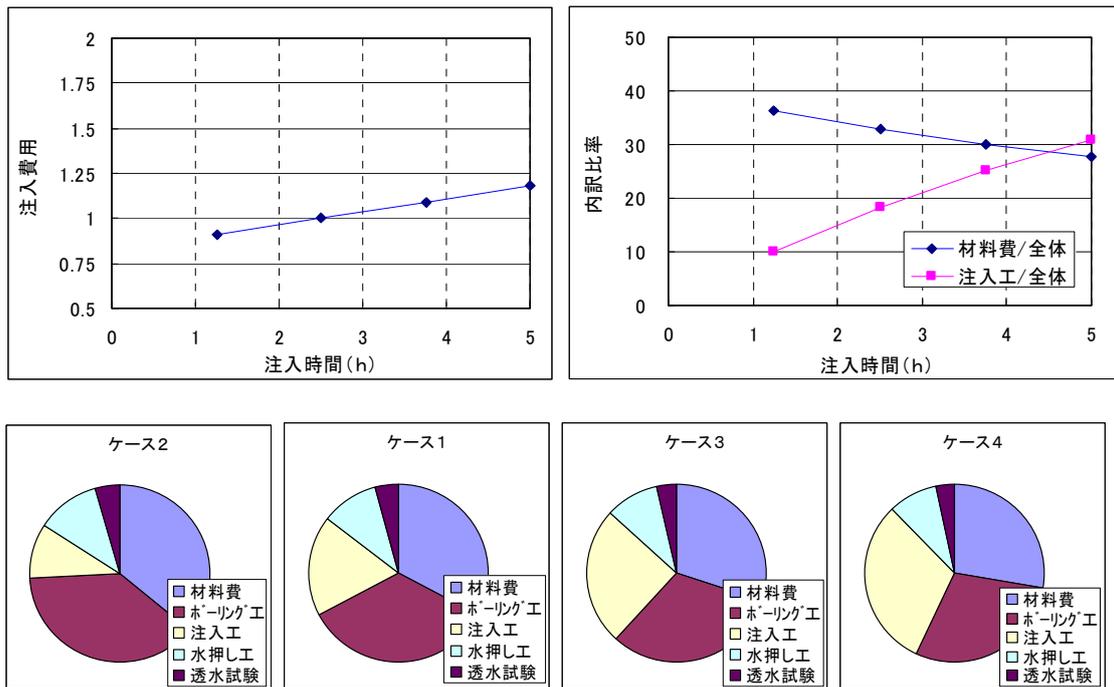


図 3.4-14 短尺ボーリング案における注入時間の影響  
(注入セメント量：一定、1ステージ注入、ケース 2,1,3,4 を比較)

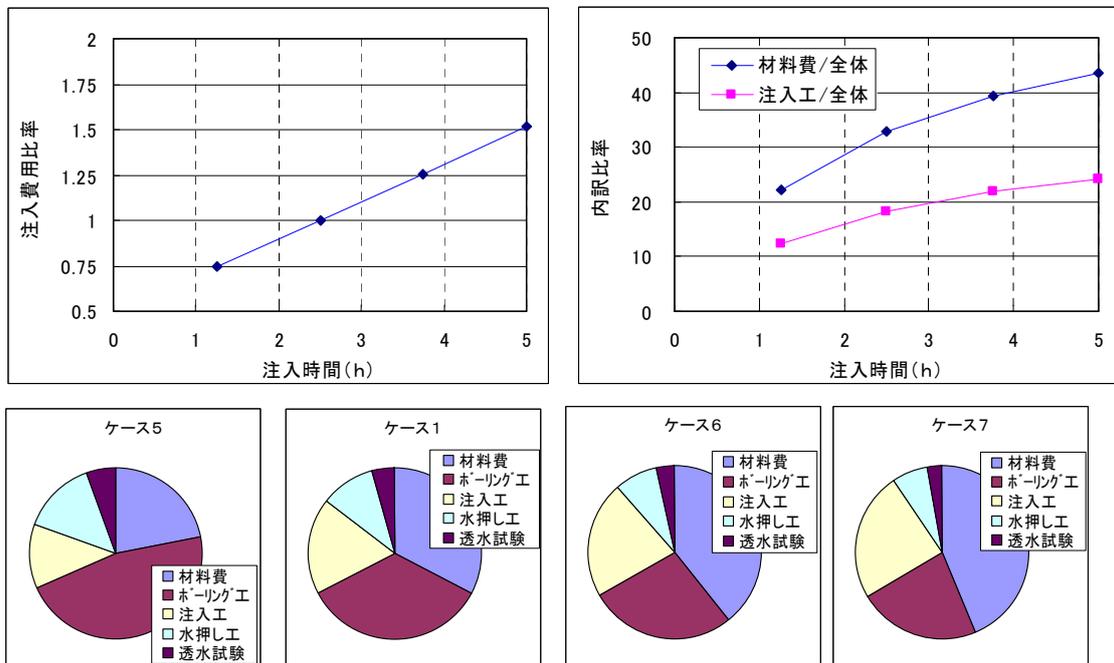


図 3.4-15 短尺ボーリング案における注入量の影響  
(注入速度：一定、1ステージ注入、ケース 5,1,6,7 を比較)

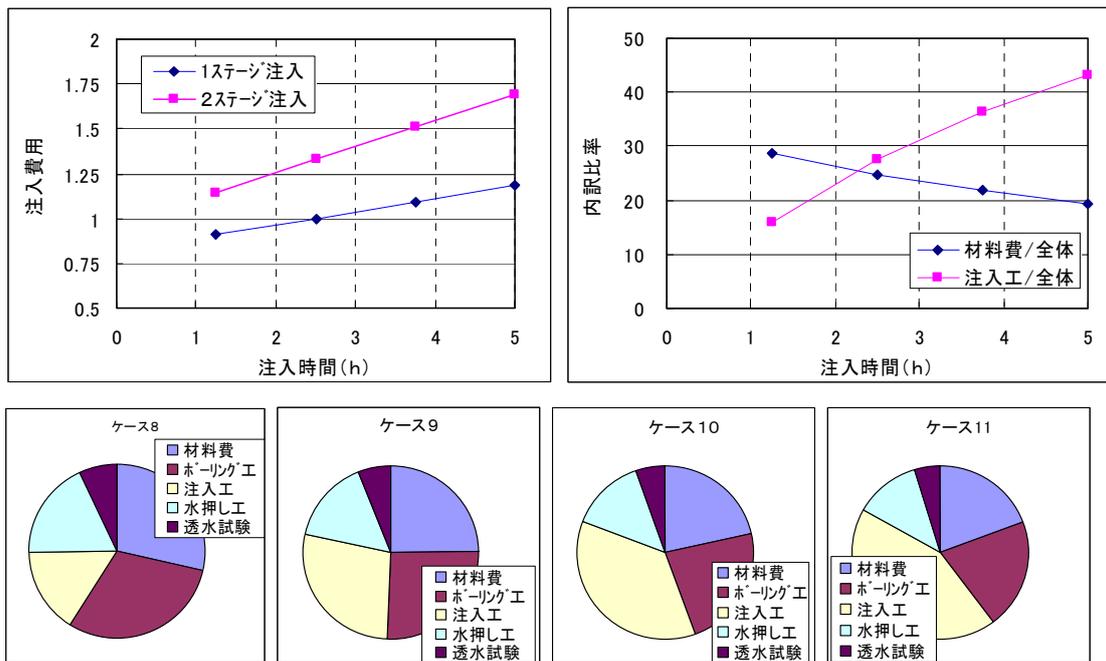


図 3.4-16 短尺ボーリング案におけるステージ数の影響  
(セメント注入量：一定、ケース 2,1,3,4,8,9,10,11 を比較)

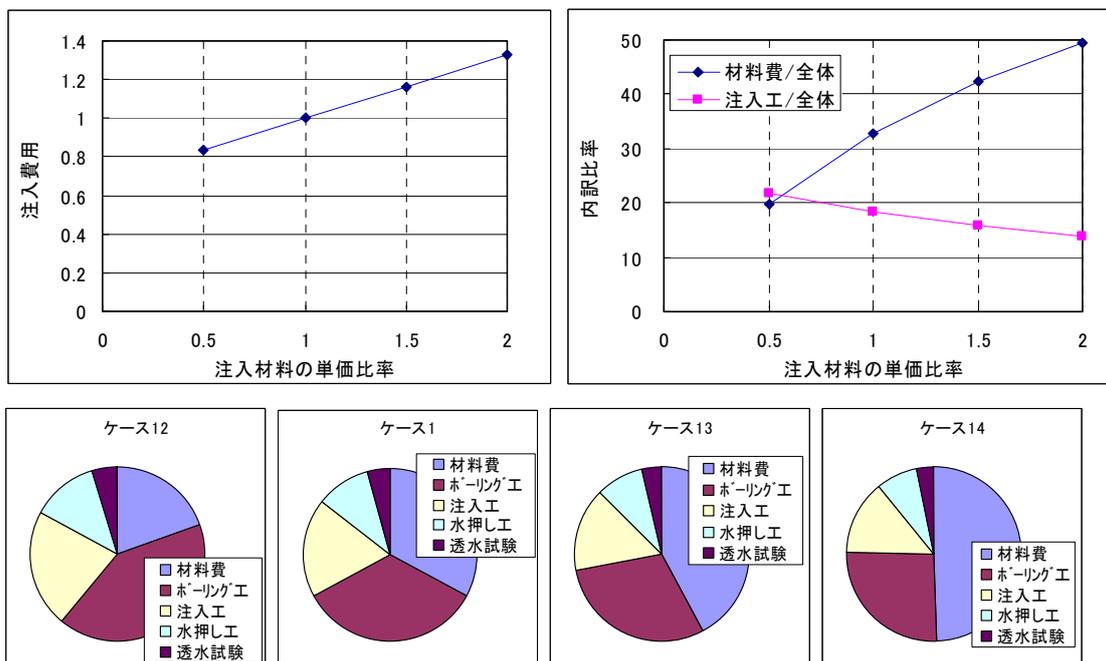


図 3.4-17 短尺ボーリング案における材料単価の影響  
(セメント量及び注入時間：一定)：ケース 12,1,13,14 を比較)

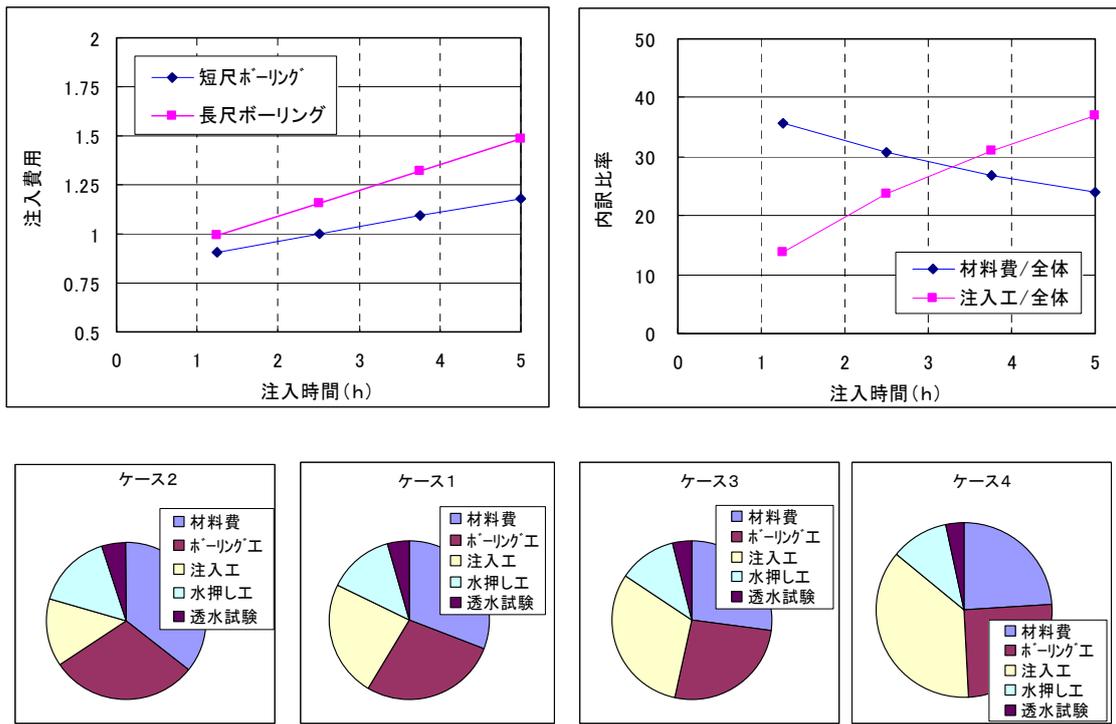


図 3.4-18 長尺ボーリング案における注入時間の影響  
(注入セメント量：一定、1ステージ注入、短尺と長尺のケース2,1,3,4を比較)

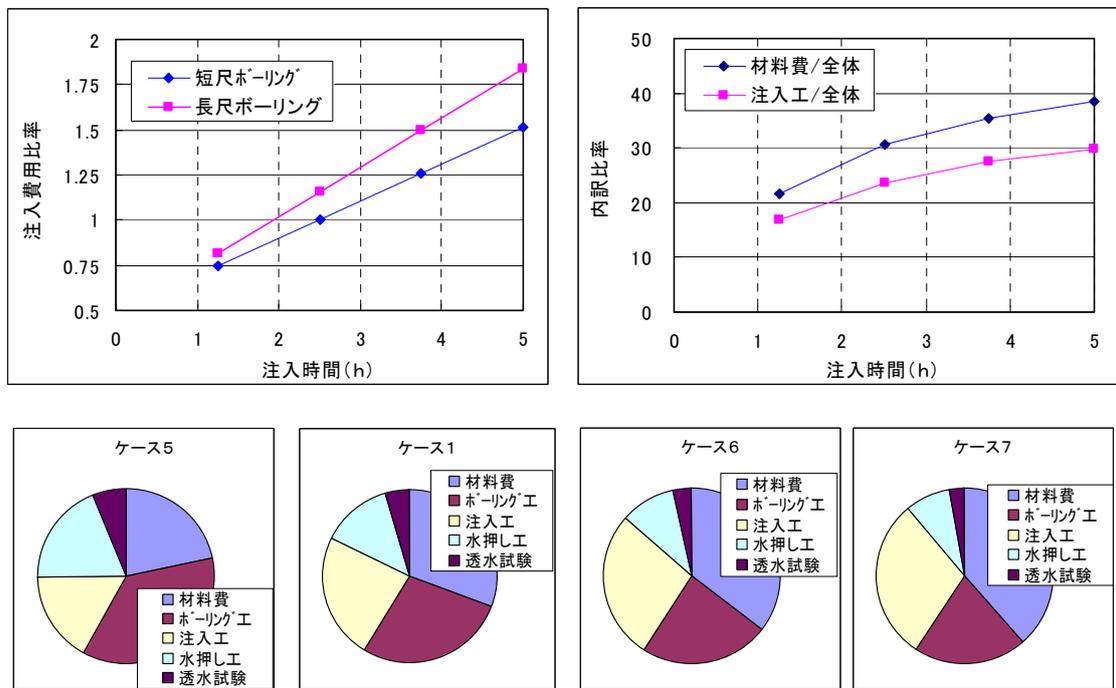


図 3.4-19 長尺ボーリング案における注入量の影響  
(注入速度：一定、1ステージ注入、短尺と長尺のケース5,1,6,7を比較)

(4) 工期算定結果

(i) 作業能率

(a) ボーリング工

- ・ 機械稼働率：0.54 に設定

- ・ 機械実作業時間

1交代制            機械実作業時間=賃金対象時間×機械稼働率

$$6.0 \text{ h} = 11 \text{ h} \times 0.54$$

$$1\text{m当り実作業時間} = (1\text{m} \div \text{純削孔時間}) + \text{ロッド引き抜き時間} + \text{ロッド継時間} + (\text{孔間移動時間} \div \text{孔長}) + (1 \text{ ステージ当り付帯時間} \div 1 \text{ ステージ長})$$

- ・ 純削孔時間：1m/分に設定
- ・ ロッド引抜時間：0.7分/mに設定
- ・ ロッド継時間：1分/m (24m孔；24分/孔、50m孔；50分/孔)
- ・ 孔間移動時間：10分/孔を標準とする。
- ・ 1ステージ当り付帯時間：30分/ステージを標準

表 3.4-23 削孔サイクルタイム

孔長	純削孔時間	ロッド引抜時間	ロッド継時間	孔間移動時間	ステージ長	st付帯時間	m当り実作業時間	1孔当り実作業時間
24	1	0.7	1	0.8	18	1.67	5.17	124.08
50	1	0.7	1	0.4	44	0.68	3.78	189.00

\*単位：分

- 日当り削孔長(最大削孔能力)

- ・ 24m孔：6h×60分÷5.17分/m×2ブーム=139m (5.8本/日)

- ・ 50m孔：6h×60分÷3.78分/m×2ブーム=190m (3.8本/日)

※実際の施工では、グラウト工との施工制約によって、上記の削孔能力を出せない場合があることに注意。

(b) グラウチング工

- ・ 機械稼働率：0.86 に設定

- ・ 機械実作業時間

1交代制            機械実作業時間=賃金対象時間 × 機械稼働率

$$9.5 \text{ h} = 11 \text{ h} \times 0.86$$

$$\text{日当りステージ数} = \text{機械実作業時間} \div 1 \text{ ステージ当り作業時間}$$

表 3.4-24 1ステージ当りの作業時間

工種	作業内容	作業時間
水押し工	準備跡付け	1.0
	水押し	0.7
注入工	注入	α
	ダメ押し	0.5

\*単位：時間

表 3.4-25 1ステージ当りの注入時間

ケース	1	2	3	4	5	6	7
注入時間	2.5	1.25	3.75	5	1.25	3.75	5
ケース	8	9	10	11	12	13	14
注入時間	2.5	1.25	3.75	5	2.5	2.5	2.5

\*単位：時間/St.

表 3.4-26 注入サイクルタイム

ケース	1	2	3	4	5	6	7
準備跡片付け	1	1	1	1	1	1	1
水押し	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
注入工	2.5	1.25	3.75	5	1.25	3.75	5
計	4.2	2.95	5.45	6.7	2.95	5.45	6.7
日当りst数	2.3	3.2	1.7	1.4	3.2	1.7	1.4
ケース	8	9	10	11	12	13	14
準備跡片付け	1	1	1	1	1	1	1
水押し	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
注入工	2.5	1.25	3.75	5	2.5	2.5	2.5
計	4.2	2.95	5.45	6.7	4.2	4.2	4.2
日当りst数	2.3	3.2	1.7	1.4	2.3	2.3	2.3

\*単位：時間/St.

- ・ 注入機械台数の設定：ボーリングは2ブームのジャンボドリル1台により実施するため、その削孔速度は限定される。そこで、ケースごとに削孔速度を最大限発揮できるように注入機械台数を選定する。この結果、常に削孔と注入工の同時施工が可能となる。
- ・ 短尺ボーリングの場合：2ブームのジャンボドリルの最大削孔能力は139mであり、1日5.8本が削孔可能である。そこで、注入機械台数は最大6台とする。ただし、短尺ボーリングの場合は、1孔当りの注入時間が短いケースが存在する。そこで、このようなケースについては、1日あたりの削孔可能本数と注入可能本数（表 3.4-26参照）がほぼ一致するように注入機械台数を6台から低減するものとする（表 3.4-27参照）。

表 3.4-27 投入する注入機械台数（短尺ボーリング案）

ケース	1	2	3	4	5	6	7
削孔可能本数/日	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
注入可能ステージ数/日	2.3	3.2	1.7	1.4	3.2	1.4	1
必要注入台数	2.5	1.8	3.4	4.1	1.8	4.1	5.8
設定注入台数	3	2	4	4	2	4	6
ケース	8	9	10	11	12	13	14
削孔可能本数/日	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
注入可能ステージ数/日	2.3	3.2	1.7	1.4	2.3	2.3	2.3
必要注入台数	5.0	3.6	6.8	8.3	2.5	2.5	2.5
設定注入台数	5	4	6	6	3	3	3

- ・ 長尺ボーリングの場合：最大削孔能力は190mであり、1日3.8本が削孔可能である。そこで、注入機械台数は最大4台とする。注入工に関しては、短尺ボーリングとは異なり1孔当りの注入時間が最短の場合であるケース2においても、8.9時間(=2.95時間/st×3st)かかるため、1日に1孔程度の施工となる。このため、注入機械台数を低減することは出来ないため、全ケースにおいて4セットの施工機械を投入するものとする。

#### <工期の算定>

削孔と注入工は、基本的には同時に実施するものと仮定した。この場合、工期に関してクリティカルになるのは初日の削孔とその後の注入工、透水試験である。

そこで、上記の考え方にに基づき工期(方数)を算定し、2交代の場合はその半分を日数として算定した。その結果を、短尺ボーリングについては表3.4-28に、長尺ボーリングの場合は表3.4-29に示す。

次に、有効注入孔長さ(短尺ボーリング：18m、長尺ボーリング：44m)を工期で割ることにより、1日当りの進行長を算定した結果を、表3.4-30にまとめて示す。また、短尺ボーリングの場合のケース1を1.0として比率を比較した結果を図3.4-20にまとめて示す。

これらの図表より、以下のことがわかる。

- ・ 基本ケースであるケース1については短尺ボーリング案も長尺ボーリング案もほぼ同じ工期となった。
- ・ 注入時間を変えたケースについては、注入時間の短いケース2及び5(1.25時間/St)については長尺ボーリングの方が進行長が長く、工期の点で有利となった。
- ・ 一方、注入時間の長いケース3、4、6、7については短尺ボーリングの方が有利となった。
- ・ これは、短尺ボーリング案の場合は、削孔速度がネックとなり削孔速度に応じた注入機械セット数を投入しているのに対して、長尺ボーリング方式の場合は、注入工がネックとなるため1孔当りの注入時間の増大がそのまま工期の増大につながるためである。
- ・ ただし、短尺ボーリング方式において2ステージで注入する場合(ケース番号8～11)については、全体的に工期が長尺ボーリング方式に比べて劣ることが分かる。

上記より考えて、短尺ボーリング案は工期の点でも長尺ボーリング案に比較して決して不利ではなく、ほぼ同等であることがわかる。但し、2ステージに分割する場合は短尺ボーリング方式は不利であり、短尺ボーリング方式は1ステージで注入することで始めて経済的にも有利となると言える。

表 3.4-28 工期の算定結果 (短尺ボーリング案)

区分	工種	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
数量	注入工(st)	26	26	26	26	26	26	26
	透水試験(回)	5	5	5	5	5	5	5
注入能力	注入工(st)	2.3	3.2	1.7	1.4	3.2	1.7	1.4
	台数	3	2	4	4	2	4	6
工期(日)	削孔工	1	1	1	1	1	1	1
	注入工	3.8	4.1	3.8	4.6	4.1	3.8	3.1
	透水試験	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
	工期(日)	6.5	6.8	6.5	7.3	6.8	6.5	5.8
	2交代	3.3	3.4	3.3	3.7	3.4	3.3	2.9

区分	工種	ケース8	ケース9	ケース10	ケース11	ケース12	ケース13	ケース14
数量	注入工(st)	52	52	52	52	26	26	26
	透水試験(回)	10	10	10	10	5	5	5
注入能力	注入工(st)	2.3	3.2	1.7	1.4	2.3	2.3	2.3
	台数	5	4	6	6	3	3	3
工期(日)	削孔工	1	1	1	1	1	1	1
	注入工	4.5	4.1	5.1	6.2	3.8	3.8	3.8
	透水試験	3.3	3.3	3.3	3.3	1.7	1.7	1.7
	工期(日)	8.8	8.4	9.4	10.5	6.5	6.5	6.5
	2交代	4.4	4.2	4.7	5.3	3.3	3.3	3.3

表 3.4-29 工期の算定結果 (長尺ボーリング案)

区分	工種	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
数量	注入工(st)	95	95	95	95	95	95	95
	透水試験(回)	15	15	15	15	15	15	15
注入能力	注入工(st)	2.3	3.2	1.7	1.4	3.2	1.7	1.4
	台数	4	4	4	4	4	4	4
工期(日)	削孔工	1	1	1	1	1	1	1
	注入工	10.3	7.4	14.0	17.0	7.4	14.0	17.0
	透水試験	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	工期(日)	16.3	13.4	20.0	23.0	13.4	20.0	23.0
	2交代	8.2	6.7	10.0	11.5	6.7	10.0	11.5

表 3.4-30 グラウト工の1日当り進行長の比較

		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
注入進行長(m/日)	短尺ボーリング	5.5	5.3	5.5	4.9	5.3	5.5	6.2
	長尺ボーリング	5.4	6.6	4.4	3.8	6.6	4.4	3.8
進行長の比率	短尺ボーリング	1.00	0.96	1.00	0.89	0.96	1.00	1.13
	長尺ボーリング	0.98	1.20	0.80	0.69	1.20	0.80	0.69

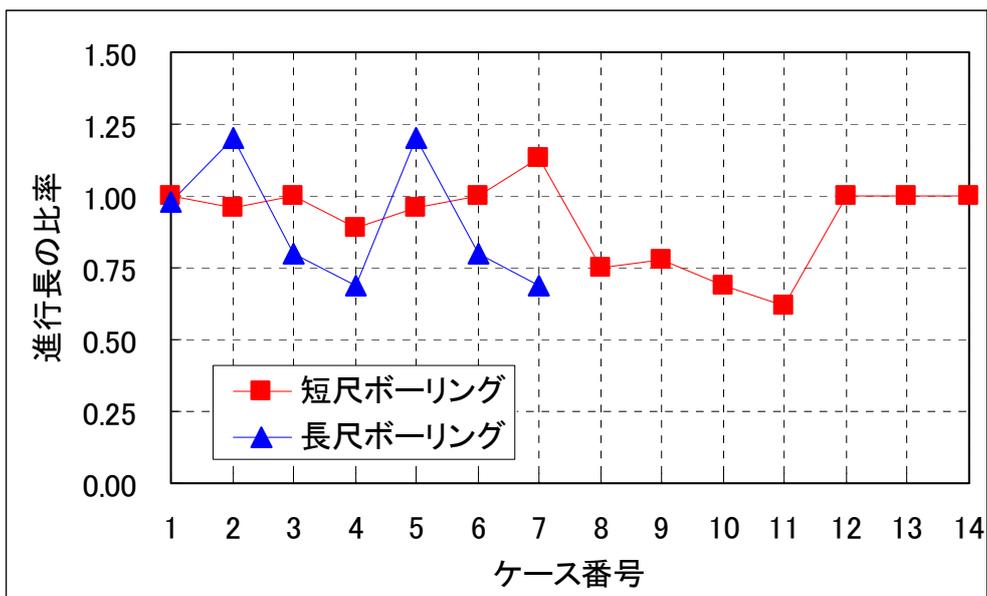


図 3.4-20 工期の比較  
(短尺ボーリング案のケース1を1.0とする)

### 3.5 まとめ

本章においては、放射性廃棄物地層処分の処分坑道における（プレグラウト方法の）注入方法の方向性を検討するために、国内外の施工実績、放射性廃棄物地層処分におけるグラウト研究の実績を調査し、（プレグラウトの）注入方法に関する方向性を示した。さらに、工期工費の観点から評価を試みた。その結果、以下のことが判明した。

- グラウト実績

北欧においては、都市部、森林部及び湖沼下等において地下水環境に配慮したウォータータイトトンネルが NATM 工法で掘削されており、その水密性はコンクリート覆工ではなく、主にセメント系材料を使用したグラウト注入により担保されている。これらのトンネルの土被りは比較的浅く、数m～数十m程度が多い。また、その岩質は基本的に硬質であるため、一般的に止水性の確保のみを目的としてグラウトが実施されている。止水性に対する要求レベルは、雨水による自然涵養量より決定されており、特に厳しい区間では0.5～数L/分/100mの基準が設定されており、セメント材料によるプレグラウト工法と、部分的にポストグラウト工法を併用することにより、この湧水基準を達成している。

- 放射性廃棄物地層処分におけるグラウト研究

主に、①NUMO-SKB-Posiva による低pH グラウト研究、②SKB によるセメントグラウト注入方法に関する研究、③日本における天然材料（ベントナイト系材料）に関する研究、が挙げられる。特に、①の研究については既にフィンランドの Onkalo において低pH セメントグラウト、スウェーデンのエスポ硬岩研究所においてシリカゾルの原位置試験が実施されており、その実現性に向けてかなり高い技術レベルに達していると言える。ただし、低pH セメントグラウトについては初期の強度発現と浸透性の確保、シリカゾルに関しては深部岩盤における適用性、について今後の研究が必要である。一方、天然系材料については、まだ基礎研究の段階であり、特に地下水による流失に対する抵抗メカニズムについて、今後の研究が必要であると言える。

- 放射性廃棄物地層処分におけるグラウト方法

結晶質岩等の硬質岩盤サイトを対象に、処分坑道の湧水箇所（透水性割れ目、割れ目密集帯）に対するプレグラウト方法について検討した。基本的に、同種の岩盤条件において高い止水性を実現している北欧の環境配慮型トンネルを参考に、短尺ボーリング（15～25m程度）により高密度に注入孔を削孔し、1重の密実な改良体をトンネル周辺に配置する注入方法を選定した。また、湧水量に関する簡易計算の結果、改良範囲は0.5～1.0D程度で十分であり、むしろ改良体の透水係数を低減させる方が重要であることが判明した。放射性廃棄物地層処分における湧水基準は、主に緩衝材・埋め戻し材の定置の観点から決まるものと考えられているが、その基準は現状では不明確である。仮に、数L/分/100m程度の湧水量に抑制するためには、改良体の透水係数を $10^{-8}$  m/s オーダー以下、出来れば $10^{-9}$  m/s オーダーにすることが望ましいことが判明した。次に、短尺ボーリング案を国内の海底トンネルにおける長尺ボーリング（50m程度）による注入方法と比較した結果、工費、工期ともに短尺ボーリング案は長尺ボーリング案に比較して、劣ることは無いことが判明した。また、工費及び工期低減のためには注入時間の短縮（特に、ステージ数を少なくすること）が重要であることが判明した。そこで、短尺ボーリング案をプレグラウト工法における本研究の基本方式とし、さらに工費・工期低減に向けて注入時間の短縮を目指すものとする。

### 第3章参考文献

- 1) Finnish Tunnelling Association : “Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden, and Norway-Literature Study (2003)
- 2) Bäckblom,G. : “Experience on grouting to limit inflow to tunnel/s”, POSIVA Working Report 2002-18 (2002)
- 3) Brantberger,M. , Nelson,M. : “Hallandsås ridge railway tunnel/s – Development of pre-grouting methodology”, Underground Construction in Modern Infrastructure (1988)
- 4) 日本トンネル技術協会 : TBM ハンドブック、(2000)
- 5) Johansen,P.: “Inflow criteria for a railway tunnel in the greater Oslo area”, Norwegian tunneling society Publication No. 12 (2001)
- 6) Moen,P.: “The greener side to grouting in Norway”, Tunnel/s & Tunnelling International , June (2004)
- 7) Bråten,T.,Haug/Ruth,G.: “The Gardermoen rail link,from oslo to gardermoen airport”,Norwegian tunneling society Publication No. 10 (2004)
- 8) Beitnes,A.: “Lessons to be learned from long railway tunnels”, Norwegian tunneling society Publication No. 12 (2001)
- 9) Sievänen,U. , Hagrosä,A.: “Water inflow into underground facilities and rock grouting - Experiences from Finland”, POSIVA Working Report 2002-26 (2002)
- 10) 鈴木和也、児玉安彦 : 青函トンネルの施工 (3) 本州側海底部、トンネルと地下、第5巻4号、pp.20-31 (1974)
- 11) 大迫哲 : 青函トンネルの施工(15) 先進導坑貫通までの概要、トンネルと地下、第14巻3号、pp.15-22 (1983)
- 12) 土木学会 : 青函トンネルの注入技術—その歩みと明日への展開—、(1986)
- 13) 日本鉄道建設公団 : 津軽海峡線工事誌、日本鉄道建設公団 (1990)
- 14) 日本鉄道建設公団 : 青函トンネル技術のすべて、鉄道界図書出版 (1986)
- 15) 玉木稔、末永充弘 : 出水断層部の施工、鉄道土木 Vol.25、No.3、鉄道施設協会 (1983)
- 16) 宮岸和伸、黒川建治、宮本武志 : 志賀原子力2号機取水路トンネル掘削における計測管理、電力土木、No.303(2003.1)
- 17) 宮崎甚夫、内田秀彦、宮岸和信 : 志賀原子力発電所海底取放水路トンネルの設計・施工について、電力土木、No.228、(1990.9)
- 18) 穴田文浩、宮本武志、大坂和弘 : 亀裂性岩盤を対象とした海底トンネル工事における止水注入実績、電力土木、No.315(2005.1)
- 19) 宮崎甚夫、内田秀彦、前田隆、土橋雄次 : 日本海に海底トンネルで取放水設備をつくる、北陸電力 志賀原子力発電所、トンネルと地下、第23巻9号、pp.15-23、(1992)
- 20) 篠原茂夫、山口進、安藤順造 : 湧水区間における NATM 中央東線塩嶺トンネル岡谷方、トンネルと地下、第13巻1号、pp.35-45 (1982.1)
- 21) 早川敏彦、原繁之、西川直輝 : 地下水盆下のトンネル施工と水分調査 中央本線塩嶺トンネル、トンネルと地下、第11巻2号、pp.25-34 (1980)

- 22) 原田種雄：20kgf/cm<sup>2</sup>の水圧に挑む南予用水吉田導水路トンネル、トンネルと地下、第17巻4号、pp.57-63(1986)
- 23) 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 (1997)
- 24) 日本石油地下備蓄株式会社：串木野地下石油備蓄基地工事記録 (岩盤土木) (1994)
- 25) 日本トンネル技術協会：大断面トンネルの設計、施工法に関する調査研究 (その2) (1994)
- 26) Bodén, A., Sievänen, U. : “Low-pH injection grout for deep repositories –Summary report from a co-operation project between NUMO(Japan), Posiva(Finland), and SKB(Sweden)”, SKB R-05-40 (2005)
- 27) Sievänen, U., Syrjänen, P., Ranta-aho, S.: “Injection Grout for Deep Repositories -Low-pH Cementitious Grout for Larger Fractures Field Testing in Finland , Pilot Tests”, Posiva Working Report 2004-47 (2005)
- 28) Hansen, T., Roald, S., Nomeland, T., Grant, B.: “Predictable and successful rock injection -The first time around A new improved system for cost-effective control of water in-leakage during tunnel excavation may reduce the need for expensive sandwich lining systems”, ICGGE Bled 2003 (2003)
- 29) Vuorinen, U., Lehtikoinen, J., Imoto, H., Yamamoto, T., Alonso, M. C.: “Injection Grout for Deep Repositories, Subproject 1: Low-pH Cementitious Grout for Larger Fractures, Leach Testing of Grout Mixes and Evaluation of the Long-Term Safety”. Working Report 2004-46, Posiva (2005)
- 30) Eriksson, M.: “Grouting Field Experiment at the Äspö Hard Rock Laboratory”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.17, pp.287-293 (2002)
- 31) Eriksson, M., Fransson, Å., Emmelin, A.: “Grouting trials in hard jointed rock-investigation, design and execution”, 16<sup>th</sup> ICSMGE, pp.2247-2251 (2005)
- 32) Emmelin A., Eriksson, M., Fransson, Å : “Characterisation, design and execution of two grouting fans at 450m level, Äspö HRL”, SKB R-04-58 (2004)
- 33) Fransson, Å: “Characterisation of a fractured rock mass for a grouting field test”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.16, pp331-339 (2001)
- 34) Zimmerman, W., Bodvardsson, S.: “Hydraulic conductivity of Rock Fractures”, Transport in Porous Media, Vol.23, pp.1-30 (1996)
- 35) 入矢桂史郎、栗原雄二、藤島敦：低アルカリ性グラウトに関する基礎的研究、土木学会第58回年次学術講演会(2003)
- 36) 西垣誠、小松満、見掛信一郎、田岡洋、中島朋宏：エタノールを用いたベントナイトスラリーの亀裂性岩盤へのグラウト効果、土木学会論文集、No.764、III-67、pp.221-233 (2004)
- 37) 田岡洋、西垣誠、小松満、見掛信一郎：ベントナイトグラウトの物理特性に関する研究、土木学会第56回年次学術講演概要集 第3部、pp.524-525 (2001)
- 38) Ishii, T., Iwasa, K., Shiraishi, T., Sakurai H., Saito, A., Nakashima, H., Ueda, H., Sakabe, Y., Ishiguro, K.: “Experimental study of the Mechanism of Ethanol/Bentonite Slurry Grouting”,

- MRS2005 29<sup>th</sup> Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management (2005)
- 39) Takase, H., Iwasa, K., Ishii, T., Ueda, H., Sakabe, Y.: “Consolidation of Bentonite Ethanol/slurry Injected in a Planar Fracture ; Mathematical Modelling and Experiment”, MRS2005 29<sup>th</sup> Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management (2005)
- 40) 浅田素之、中島均、石井卓、堀内澄夫：エタノール／ベントナイトスラリーの岩盤注入特性、土木学会第 58 回年次学術講演会 CS7-049、pp.375-376(2003)
- 41) 白石知成、岩佐健吾：エタノール・ベントナイトスラリーによる原位置岩盤内注入試験—その 1：注入試験条件、事後計測結果—、平成 17 年度土木学会西部支部研究発表会投稿中(2006)
- 42) 岩佐健吾、白石知成：エタノール・ベントナイトスラリーによる原位置岩盤内注入試験—その 2：確認試験結果—、平成 17 年度土木学会西部支部研究発表会投稿中(2006)
- 43) 小林翼・龍田圭亮・金谷賢生・寺田博一・西垣誠： “塩水ベントナイトによるグラウチング工法の現地試験（その 1）”、土木学会第 60 回年次学術講演会、(2005)
- 44) 小林翼・龍田圭亮・金谷賢生・寺田博一・西垣誠： “塩水ベントナイトによるグラウチング工法の現地試験（その 2）”、土木学会第 60 回年次学術講演会、(2005)
- 45) 小林伸司・延藤遵：瑞浪深地層研究所におけるグラウト技術の開発、核燃料サイクル開発機構業務委託報告書（2005）
- 46) SKB: “Deep repository Underground design premises Edition D1/1”, SKB R-04-60(2004)
- 47) Birgersson, L., Pers, K., Wiborgh, M.: “Project JADE Long-term function and safety Comparison of repository systems”, SKB TR-01-18 (2001)
- 48) Gunnarsson D., Boergesson L., Hoekmark H., Johannesson L/Sanden T.: “Report on the installation of the Bachfill and Plug Test. IPR-01-17”, SKB (2002)
- 49) Svemar, C.: “Emplacement of bentonite blocks and canisters in a KBS-3V fashion-how feasible is the proposed technology, Advances in Understanding Engineered Clay Barriers”, pp.47-52(2005)
- 50) Börgesson, L/Sanden, T., Fälth, B., Åkesson, M., Lindgren, E.: “Studies of buffers behavior in KBS-3H concept Working during 2002-2004”, SKB R-05-50 (2005)
- 51) Goodman, R.: “Groundwater inflows during tunnel driving”, Engineering Geol., v.2, pp.39-56(1965)
- 52) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—、分冊 1 わが国の地質環境（1999）