

JAEA-Research 2017-013 DOI:10.11484/jaea-research-2017-013

海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得

Study on Characterisation of Colloidal Silica Grout Under Condition of Sea Water

戸栗 智仁	沖原 光信	辻 正邦	中島 均
杉山 博一	齋藤 亮	佐藤 稔紀	青柳 和平
桝永 幸介			

Satohito TOGURI, Mitsunobu OKIHARA, Masakuni TSUJI, Hitoshi NAKASHIMA Hirokazu SUGIYAMA, Akira SAITO, Toshinori SATO, Kazuhei AOYAGI and Kousuke MASUNAGA

> バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

Horonobe Underground Research Department Horonobe Underground Research Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

February 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2018

海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

戸栗 智仁*, 沖原 光信*, 辻 正邦*, 中島 均*, 杉山 博一*, 齋藤 亮*, 佐藤 稔紀, 青柳 和平, 桝永 幸介[※]

(2017年10月19日受理)

これまで沿岸部に着目した研究開発は、地質環境調査がメインであり、施工技術などの工学技 術や安全評価は対象外であった。地層処分場建設のための工学技術として、坑道掘削時における グラウト技術(湧水抑制対策)を高度化するための研究開発がこれまで多く行われてきている。 沿岸部においては、地下水が海水条件下にあり、セメント系のグラウト材料については大きな問 題になることは指摘されていない。

一方、北欧では、湧水量を大幅に少なくするために、浸透性が高くて耐久性の高い活性シリカ コロイドを用いた溶液型のグラウト(以下、溶液型グラウトと呼ぶ)の研究が行われ、沿岸域の 地下研において実証試験および実適用が開始されている。我が国では、資源エネルギー庁委託事 業の「地下坑道施工技術高度化開発」において溶液型グラウトが候補材料として検討されている。

このように、溶液型グラウトは海水条件下で適用され始めているが、固化のメカニズムは不明 であり、国内外のいずれの事例において具体的な施工方法は未確立である。また、溶液型グラウ トの周辺岩盤への影響については未知の部分が多い。このような背景を踏まえて、本業務は、資 源エネルギー庁の委託事業である、「地層処分技術調査等事業(沿岸部処分システム高度化開発)」 の一環として、3 年程度をかけて海水条件下でのグラウトに関する研究を行う計画であり、本報 告書はその初年度の成果をまとめたものである。

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁 「平成 28 年度地層処分技術調査等事業(沿岸部処分 システム高度化開発)」の成果を使用して取りまとめたものである。 幌延深地層研究センター:〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2

- ※ 特定課題推進員(パシフィックコンサルタンツ株式会社)
- * 清水建設株式会社

i

JAEA-Research 2017-013

Study on Characterisation of Colloidal Silica Grout Under Condition of Sea Water

Satohito TOGURI*, Mitsunobu OKIHARA*, Masakuni TSUJI*, Hitoshi NAKASHIMA*, Hirokazu SUGIYAMA*, Akira SAITO*, Toshinori SATO, Kazuhei AOYAGI and Kousuke MASUNAGA^{*}

> Horonobe Underground Research Department Horonobe Underground Research Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management Japan Atomic Energy Agency Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

> > (Received October 19,2017)

Regarding the engineering technology, although it has been recently studied much on the grouting technology during the tunnel excavation, it has not studied as an aspect for applying to the coastal area. The underground water on the saline condition has not been pointed out to influence the cementitious grout material.

In Nordic countries, in order to sufficiently reduce the water ingress at a geological disposal site, it has been performed the researches on liquid type grout using active silica colloid, which is called "colloidal silica grout" or "silica sol". It has been applied to seal fine fractures that cannot be penetrated by cement particles. Demonstration tests and practical applications have been conducted at deep underground facilities in Sweden and Finland, which are both in the coastal area. As written above, although the colloidal silica grout started to be applied to the sea water condition, the mechanism of gelling under saline water is not known and the grouting methodology under sea water is not yet established. Therefore, the research project on the grouting for about three years has been established, as a part of the public offered project "Commission fee for surveying techniques, etc. for geological disposal of radioactive wastes" by Resources and Energy Agency (development of the disposal system in coastal area). This report shows the result of the first year of this project as following items; Study on the state-of-art technology and remain tasks; laboratory tests on characterisation of colloidal silica grout under sea water; Study on the development of grouting technology (design and the evaluation method of influence on the rock mass).

Keywords : Coastal Area, Under Condition of Sea Water, Rock Grouting, Colloidal Silica Grout

This work was carried out by Japan Atomic Energy Agency under the contract with the Natural Resources and Energy Agency, Ministry of Economy, the Trade and Industry. %Special Topic Researcher (PACIFIC CONSULTANTS CO.,LTD.) *SHIMIZU CORPORATION

目 次

1. はじめに	1
2. 既存の知見及び課題の整理	2
2.1 概要	2
2.2 地層処分のための溶液型グラウト技術の概要	3
2.3 既存文献の調査	7
2.3.1 文献リストと調査結果の概要	7
2.3.2 着目すべき調査結果	12
2.3.3 文献調査結果のまとめ	25
2.4 最新知見の収集	27
2.4.1 グラウトワークショップ開催	27
2.4.2 オンカロの視察	29
2.4.3 最新知見のまとめ	32
2.5 課題の整理	33
2.6 まとめ	35
2.6.1 各節の調査結果のまとめ	35
2.6.2 課題の整理	37
3. 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得	
3.1 概要	
3.2 実施スケジュール	39
3.3 基本物性の把握	40
3.3.1 添加剤を変化させたゲルタイム測定試験による基本配合の取得	40
3.3.2 強度試験	
3.3.3 まとめ	52
3.4 施工性・止水性(ゲル化特性)の把握	53
3.4.1 地下水との接触による白濁試験	53
3.4.2 粒径の経時変化測定試験	56
3.4.3 粘性の経時変化測定試験	58
3.4.4 温度影響の測定試験	60
3.4.5 まとめ	62
3.5 長期安定性(力学的、化学的安定性)の把握	63
3.5.1 ホモゲル長期力学的安定性確認試験	63
3.5.2 ホモゲル長期化学的安定性確認試験	65
3.5.3 まとめ	70
3.6 今年度の試験結果のまとめ	71
4. グラウト設計技術・影響評価技術の知見の整理	72
4.1 概要	72
19 切辛士ごを車頂め公然の細胞について	72

5. 研究のまとめ	76
5.1 今年度の研究成果のまとめ	76
5.1.1 既存の知見及び課題の整理について	76
5.1.2 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得について	76
5.1.3 グラウト設計技術・影響評価技術の知見の整理について	77
5.2 今後の課題	78
5.2.1 北欧の専門家との技術的な意見交換などの継続	78
5.2.2 養生水と練混ぜ水の影響の検討	79
5.2.3 海水練混ぜグラウト	79
参考文献	80
付録	83

Contents

1. Introduction	1
2. SURVEY ON STATE-OF-ART TECHNOLOGY	2
2.1 Objective and outline	2
2.2 Grouting tehcnlogy for gelogical disposal	3
2.3 Survey on articles	7
2.3.1 List of articles and summary of each	7
2.3.2 Notable results	12
2.3.3 Summary	25
2.4 Survey on latest knowledge	27
2.4.1 Grouting Workshop	27
2.4.2 Visiting ONKALO	29
2.4.3 Summary	32
2.5 Tasks to be solved	33
2.6 Summary	35
2.6.1 Summary	35
2.6.2 Tasks to be solved	37
3. LABORATORY TESTS UNDER SEA WATER	38
3.1 Objective and outline	
3.2 Schedule	39
3.3 Basic properties	40
3.3.1 Gel time	40
3.3.2 Mechanical properties	48
3.3.3 Results	52
3.4 Workability and gelling properties	53
3.4.1 Sensitivity to groundwater	53
3.4.2 Silica diameter during gelling	56
3.4.3 Viscosity during gelling	58
3.4.4 Sensitivity to temperature	60
3.4.5 Results	62
3.5 Long-term stability	63
3.5.1 Long-term mechanical stability confirmation	63
3.5.2 Long-term chemical stability confirmation	65
3.5.3 Results	70
3.6 Results of each test	71
4. STUDY ON DEVELOPMENT OF GROUTING TECHNOLOGY	72
4.1 Overview	72
4.2 Tasks to be solved	72

76
76
76
76
77
78
78
79
79
80
83

図リスト

义	2.1 - 1	海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得に関するフロー2
义	2.2-1	岩盤グラウチングの例3
义	2.2-2	北欧で用いられている溶液型グラウト4
义	2.2-3	日本で用いられている溶液型グラウト(活性コロイダルシリカ)4
义	2.2-4	溶液型グラウトの研究開発の変遷について5
义	2.3-1	pH とシリカコロイドのゲル化特性12
义	2.3-2	異なる硬化促進剤(NaClまたは KCl)で練混ぜた溶液型グラウトの透水試験13
义	2.3-3	透水試験における透水流量の推移13
义	2.3-4	香港の海底トンネル HATS2A において用いられた材料14
义	2.3-5	完成した香港の海底トンネル HATS2A の様子14
义	2.3-6	オンカロのデモ 2 トンネルの平面図(左)および断面図(右)に示すグラウト孔の位置
义	2.3-7	フローチャートによるグラウト管理の例16
义	2.3-8	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設における同一の mf 発達部への溶液型グラウト孔の配置例19
义	2.3-9	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における現地湧水による白濁試験19
义	2.3-10	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの長期力学的安定性試験結果21
义	2.3-11	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における長期化学的安定性試験(試験1)結果22
义	2.3-12	倉敷 LPG 貯槽基地における長期化学的安定性試験(試験 2)結果
义	2.3-13	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における長期止水効果確認試験の装置
义	2.3-14	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における長期止水効果確認試験の結果
义	$2.3 \cdot 15$	瑞浪の深度 500m において 130L/min の湧水が発生した注入孔の止水状況
义	2.3-16	異なる化学的環境で養生した固結豊浦砂の強度
义	2.4-1	グラウト技術のワークショップの開催状況
义	2.4-2	POSIVAのビジターセンター
义	2.4-3	ONKALO 特性調査施設およびデモ 2 トンネル
义	2.4-4	デモトンネルと地質・サイズがほぼ同じオンカロリサーチギャラリーの様子30
义	2.4-5	デモ 2 トンネルの様子その 1 (POSIVA ホームページ Image gallery より抜粋)30
义	2.4-6	デモ 2 トンネルの様子その 2(POSIVA ホームページ Image gallery より抜粋)31
义	3.1-1	試験の一覧フロー
义	3.3-1	海水条件下を考慮した溶液型グラウトの配合の考え方40
义	3.3-2	グラウトの構成材料:活性コロイダルシリカ(左),硬化促進剤(中),pH 調整剤(右)
义	3.3-3	ゲルタイム試験の試験手順
义	3.3 - 4	ゲルタイム試験(その1)の試験結果
义	3.3-5	ゲルタイム試験(その2)の試験結果
义	3.3 - 6	pH 調整剤を 4ml/L に固定した場合の硬化促進剤量とゲルタイムの関係47
义	3.3-7	基本配合(6 種類)の一軸圧縮試験結果
义	3.3-8	ホモゲルの円筒供試体(左)および一軸圧縮試験(中央・右)の模様

义	3.3 - 9	三軸圧縮試験より得られたモールの応力円
义	3.3-10	ホモゲルのせん断強度の時間変化50
义	3.3-11	ベーンせん断試験機
义	3.3 - 12	ベーンせん断試験の様子(左:供試体,右:試験状況)51
义	3.3-13	せん断強度の時間変化52
义	3.4-1	白濁試験の方法
义	3.4-2	精製水で練混ぜた溶液型グラウトによる白濁試験結果の模様54
义	3.4-3	50%人工海水で練混ぜた溶液型グラウトによる白濁試験結果の模様54
义	3.4-4	100%人工海水で練混ぜた溶液型グラウトによる白濁試験結果の模様
义	3.4-5	試験に用いた粒径分布測定装置(ゼータサイザーナノ-ZS)56
义	3.4-6	粒径分布の時間変化
义	3.4-7	レオメーター (Physica MCR-301) の全景 (左), 測定状況 (右)58
义	3.4-8	ゲル化の進展に伴う流動曲線の変化(S-60)
义	3.4-9	ゲル化の進展に伴うせん断粘度の変化(D-60, M-60, S-60)
义	3.4-10	基本配合(ゲルタイム 60 min)の練混ぜ温度の違いによるゲルタイムの変化60
义	3.4-11	基本配合(ゲルタイム 120 min)の練混ぜ温度の違いによるゲルタイムの変化60
义	3.4-12	練混ぜ温度の影響による力学強度の違い61
义	$3.5 \cdot 1$	55 °Cで促進養生したホモゲルの一軸圧縮強度64
义	3.5 - 2	ホモゲルの浸漬の様子65
义	3.5 - 3	シリカ分析の違いとシリカ形態の考え方67
义	3.5-4	溶出したシリカの形態(基本配合 D-60, 20 ℃標準養生)67
义	3.5 - 5	養生水の全シリカの時間変化(左:20℃標準養生,右:55℃促進養生)68
义	3.5-6	養生水のナトリウムイオン濃度の時間変化(左:20 ℃標準養生,右:55 ℃促進養生)
	•••••	
义	3.5-7	養生水のカリウムイオン濃度の時間変化(左:20℃標準養生,右:55℃促進養生).69
义	3.5-8	養生水が精製水の場合のナトリウムイオン濃度とカリウムイオン濃度の比較69
义	5.2 - 1	海水練混ぜグラウトの配合イメージ79

表リスト

表	2.2-1	北欧製(左)と日本製(右)の溶液型グラウトの違い	.6
表	2.3-1	欧文の調査文献リストおよび海水条件下に対する留意事項	.8
表	2.3-2	邦文の調査文献リストおよび海水条件下に対する留意事項	1
表	2.3-3	オンカロの先行ボーリング孔 (ONK-PH16) から採取した地下水の成分1	5
表	2.3-4	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの品質管理試験2	20
表	2.3-5	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの基本配合2	20
表	2.3-6	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの長期力学的安定性試験養生2	21
表	2.3-7	倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの長期化学的安定性試験養生2	21
表	$2.5 \cdot 1$	溶液型グラウトの各国の取り組みならびに課題	33
表	2.6-1	調査結果のまとめ	35
表	2.6-2	溶液型グラウトの各国の取り組みならびに課題	37
表	3.2-1	溶液型グラウトの特性データ取得(室内実験)の実施スケジュール	39
表	3.3-1	溶液型グラウトの構成材料4	1
表	3.3-2	設定する6種類の基本配合4	1
表	3.3 - 3	ゲルタイム試験(その1)の試験結果	4
表	3.3 - 4	設定した6種類の基本配合4	17
表	3.3-5	強度試験の種類,試験ケースおよび材齢	8
表	3.3 - 6	三軸圧縮試験で得られた破壊時の軸方向応力4	9
表	3.3-7	ベーンせん断試験結果	52
表	3.4-1	白濁試験結果のまとめ	55
表	3.4-2	練混ぜ温度の違いとゲルタイム	30
表	3.5-1	養生水の化学分析手法	55
表	3.5 - 2	採取した養生水の化学分析結果(20℃標準養生)	36
表	3.5-3	採取した養生水の化学分析結果(55℃促進養生)	36
表	3.6-1	海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得で得られた知見のまとめ	1
表	4.2-1	溶液型グラウトの各国の取り組みならびに課題7	/3
表	4.2-2	グラウト材料に求められる要件(グラウト技術のガイドライン ³⁾ より抜粋)	/3
表	4.2-3	グラウト材料の基本物性に起因する問題(グラウト技術のガイドライン ³⁾ より抜粋)	
			4
表	4.2-4	水理地質構造に対する問題点(グラウト技術のガイドライン ³⁾ より抜粋)	15

This is a blank page.

1. はじめに

資源エネルギー庁の審議会「地層処分技術ワーキンググループ」では、国が提示する地域の科 学的な特性を示すマップについて議論がなされており、沿岸からの距離が短い範囲(沿岸海底下 や島嶼部を含む)は輸送面でも好ましいとされている¹⁾。沿岸部においては、塩水の影響や海陸接 合部などの沿岸部固有の環境を考慮した、地質環境の調査技術・工学技術・安全評価技術の高度 化が必要とされている。諸外国、特に北欧では、フィンランドの処分サイトであるオルキルオト、 スウェーデンの地下研究施設があるオスカーシャムも処分サイトであるエストハンメルも沿岸域 である。日本の深地層の研究施設である幌延と瑞浪は沿岸域ではなく、北欧のこれらの地域にお ける海水条件で考慮するべき課題についての研究開発は行われていない。一方、平成19年度から 24年度まで、幌延町の沿岸域を対象として、資源エネルギー庁の委託事業「沿岸域塩淡境界・断 層評価技術高度化開発」が行われた。研究開発の内容としては、物理探査とボーリング調査など の地質環境調査が中心であり、施工技術などの工学技術や安全評価は対象外であった。

坑道掘削時の湧水抑制対策にはグラウト注入が有効であるが、地層処分のための地下坑道は高 水圧および低透水性の地質環境にあり、グラウトによる天然バリア・人工バリアへの影響が懸念 される。このことから、既存のグラウト技術を高度化する必要があり、グラウトに関する研究開 発は、これまで多く行われてきている。グラウトの材料としては、古くは普通ポルトランドセメ ントが用いられてきたが、目的や用途に応じて、超微粒子や低アルカリ性のセメントが開発・適 用されてきた。ただし、セメント系材料は、海水条件下では特に大きな問題になることは指摘さ れていない。北欧では、処分坑道や処分孔周辺において湧水量を大幅に少なくするために、浸透 性が高くて耐久性の高い活性シリカコロイドを用いた溶液型のグラウトの研究が行われ、沿岸域 のエスポ硬岩研究所(スウェーデン、以下、エスポ HRL と表記)や地下特性調査施設(フィンラ ンド、以下、オンカロと表記)において実証試験および実適用が開始されている。ただし、海水 条件下での固化のメカニズムは不明であり、施工方法も未確立である。溶液型グラウトの周辺岩 盤への影響については未知の部分が多い。我が国では、瑞浪の深度 500 m という高圧下において 超微粒子セメントに加えて溶液型グラウトを用いたグラウトの施工に成功している。また、沿岸 域の倉敷では塩水環境の地下水において溶液型グラウトによる施工が実施されているが、具体的 な施工方法は未確立である。

このような背景を踏まえて、本業務は、資源エネルギー庁の委託事業である、「地層処分技術調 査等委託費(沿岸部処分システム高度化開発)」の一環として、以下の課題を設定し、3年程度を かけてグラウトに関する研究を行う計画である。

・既存の知見及び課題の整理

・グラウト特性データの拡充・長期挙動の現象理解・モデル化・数値解析

- ・グラウト設計技術の更新・適用性確認
- ・グラウトの影響評価技術の更新・適用性確認

本報告は、上記の課題のうち、既存の知見及び課題の整理ならびに海水条件下での溶液型グラウト特性データを取得したものである。

2. 既存の知見及び課題の整理

2.1 概要

本章の導入部として、2.2 節における既存知見の収集に先立ち、沿岸域にかかわらず地層処分の ための溶液型グラウト技術の既往の知見をまとめる。

次に、2.3 節において沿岸域あるいは海水条件下において溶液型グラウトを対象とした室内試 験や実証試験、現場施工の知見について文献調査を実施する。スウェーデンのエスポ HRL やフィ ンランドのオンカロにおける実証試験、倉敷における LPG 備蓄基地(岩盤貯槽)における施工試 験や実績など、海外シンポジウム講演予稿集などの欧文ならびに邦文について各々10 編程度を目 安に調査する。また、2.4 節では、海水条件下での溶液型グラウトの最新知見の収集のため、溶液 型グラウトの実適用が進んでいる北欧における現地調査を実施した。現地調査では、専門家と意 見交換を実施して技術的アドバイスを享受するとともに、沿岸域に溶液型グラウトが実適用され た地下施設の視察を計画した。

いずれの調査においても、塩水環境が材料特性に与える影響や、設計方法、施工方法への留意 点などに着目し、溶液型グラウトを海水条件下で適用する際の課題を整理する。



図 2.1-1 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得に関するフロー

2.2 地層処分のための溶液型グラウト技術の概要

本節では、海水条件下における溶液型グラウトの既存文献の調査に先立ち、国内および北欧において地層処分のために研究開発されてきた当該技術の概要を整理する。

坑道掘削時の湧水抑制対策には岩盤グラウチング(図 2.1-1 参照)が有効であるが、地層処分のための地下坑道は高水圧および低透水性といった改良が困難な地質環境にあり、グラウトによる天然バリア・人工バリアへの影響も懸念される。このことから、既存のグラウト注入技術を高度化する必要があり、2007 年~2012 年の 6 ヵ年に亘る資源エネルギー庁委託事業の「地下坑道施工技術高度化開発²」、その成果となる「グラウト技術のガイドライン³」、瑞浪超深地層研究所や幌延深地層研究センターにおける開発など、関連する研究開発が多く行われてきている。



図 2.2-1 岩盤グラウチングの例4)

処分事業の進んでいる北欧では、将来の地層処分場に非常に厳しい許容湧水量が求められている。SKBでは例えば処分坑道において 1.7 L/min/100 m⁵、POSIVA では 1.8 L/min/100 m⁶とされている。いずれも現状の許容湧水量の目安であるが、我が国では瑞浪超深地層研究所の深度 500 m の坑道におけるポストグラウチング後の湧水量が約 70 L/min/100 m⁷)であることを考慮すれば、当該坑道が湧水亀裂の多い区間であったことを考慮しても北欧の許容湧水量は非常に厳しい 基準と言える。

そこで、北欧では処分坑道のような大深度高水圧下において湧水量を大幅に少なくして許容湧水量を達成するため、セメント粒子が浸透できない微細な亀裂や隙間を改良できる浸透性が高く耐久性の高い活性シリカコロイドを主成分とした溶液型グラウト(以下、溶液型グラウトと呼ぶ)の研究開発が2007年頃より行われている⁸。なお、北欧では、BASF 社製の Meyco®シリーズの溶液型グラウトが主流である(図 2.2-1 参照)。

北欧の溶液型グラウトについて、スウェーデンはオスカーシャムのエスポ HRL において実証 試験で適用され⁹、フィンランドはオルキルオトのオンカロでは実証試験に加えて実適用が開始さ れている⁶。特筆すべき点は、いずれの地下研も沿岸域に位置しており、特にオンカロでは処分 深度の地下水中の塩分濃度が高いことである¹⁰⁾。なお、溶液型グラウトはスウェーデンでは Silica sol、フィンランドでは Colloidal silica grout と呼ばれている。



図 2.2-2 北欧で用いられている溶液型グラウト (Meyco®シリーズ、BASF 社製)¹¹⁾

我が国では、グラウト材料としては、古くは普通ポルトランドセメントが主に海底トンネルで 用いられてきており、目的や用途に応じて、超微粒子や低アルカリ性のセメントが開発・適用さ れてきた。溶液型グラウトは、注入材料としての適用は北欧より歴史が古く、もとは 1992 年に 「恒久グラウト」と呼ばれて砂地盤の液状化対策などの本設注入のため開発された材料である(図 2.2・3 参照)。土木工事としては、パーマロック®Hiシリーズ(強化土エンジニヤリング社製)の 十分な実績があるが、岩盤グラウト工事としての実績は少ない。そこで、日本原子力研究開発機 構では上述の 6ヵ年(2007 年~2012 年)の地下坑道施工技術高度化開発において、溶液型グラ ウトに関しては特性データの取得ならびにグリムゼルテストサイトでの実証などの研究開発を実 施している。

近年では、瑞浪超深地層研究所の深度 300 m において溶液型グラウトの試験施工が 2010 年に 実施され¹²⁾、2014 年には深度 500 m の高圧下において超微粒子セメントに加えて溶液型グラウ トを用いたグラウト工事に成功している 7。また、沿岸域に位置する倉敷 LPG 岩盤貯槽の建設工 事では、マイクロフラクチャと呼ばれる微細な亀裂が交差する岩盤に、溶液型グラウトが補足的 に採用された実績がある¹³⁾。

以上、日本と北欧の溶液型グラウトの研究開発について、変遷の概要を図 2.2-4 に示す。



図 2.2-3 日本で用いられている溶液型グラウト(活性コロイダルシリカ)



図 2.2-4 溶液型グラウトの研究開発の変遷について¹⁴⁾

表 2.2-1 は、既往文献に示されている北欧と日本の溶液型グラウトの材料自体の比較結果である¹⁵⁾。北欧の溶液型グラウトは、粒径が 2-100 nm(超微粒子セメント材の 1/100~1/1,000 程度) であることから非常に浸透性に優れ、耐久性向上のためにナトリウムイオン(Na⁺)の含有量を無 くすよう製造されている。グラウト配合は、活性シリカコロイド溶液の主材と、硬化促進剤とな る副材(NaCl の 10wt%水溶液)を練混ぜることにより行い、配合比率を変えることでゲルタイ ムを調整している。

一方、日本の溶液型グラウトは、粒径が 10~20 nm 程度(超微粒子セメント材の 1/1,000 程度) であることから、北欧製品同様に非常に浸透性に優れ、イオン交換法により Na+を除去している ため耐久性にも優れている。硬化促進剤は、北欧では汎用品の NaCl の水溶液ではなく、KCl を 主成分とした粒状の材料(図 2.2-3 の左より 2 つ目)を現地で練混ぜ水(地下水や現場の処理水 など)に溶かした溶液を用いる。このため、日本の溶液型グラウトは、配合中の粒状の硬化促進 剤の添加量を変えることで、ゲルタイム調整を行う。すなわち、日本の溶液型グラウトは、配合 に含まれる主材量(シリカ量)がゲルタイムに関わらず一定(一般に重量比 80%)という特徴が ある。主材と副材の比率によってゲルタイムを変えている北欧方式では、その比率によって配合 中のシリカ量が変わることになる。

(Tsujiら 2013¹⁵⁾の表を一部加筆)

	TASS-tunnel	MIU-300m-niche
Manufacture	Eka Chemichals AB, Sweden (Supplied by BASF)	Kyokado Engineering Co., Ltd., Japan
Product name	Meyco MP 320	Permarock [®] Hi-R (brand name: Hi-Silica)
Specification	 SiO₂ (amorphous particles) = 40 wt% 	• SiO ₂ (amorphous particles) = 30.6 wt%
of main liquid	• NaOH = 0.4%	• $Na_2O < 0.6\%$
component	Particle diameter: 2-100 nm	Particle diameter: 10-20 nm
Hardening	Sodium chloride (NaCl) solution with a	Granular potassium chloride (KCL)
accelerator	concentration of 10 wt%.	(Need to dissolve in water before mixing)

このように、北欧と日本における汎用品の溶液型グラウトは、それぞれ硬化促進剤の提供され る形態やその成分に若干の違いがあるが、硬化促進剤中の陽イオンが、ナノサイズの活性シリカ コロイドに働きかけてゲル化するメカニズムを持つ同一の材料である。また、北欧と日本の溶液 型グラウトに共通する特徴としては、いずれもセメントグラウトよりも pH が低く、pH9~10 程 度となっていることである。セメントグラウトに用いる混和剤のような有機物を含まないため、 人工バリアなどへの長期影響は非常に少なく、地下水が海水条件下になった場合、地下水を練混 ぜ水に用いる場合でも塩水の pH は一般に 8.2 程度のため、低アルカリな材料には変わりがない と考えられる。

ただし、いずれの実績においても、海水条件下での固化のメカニズムやその基礎物性の詳細は 不明であり、具体的な施工方法も未確立である。また、溶液型グラウトの周辺岩盤への影響や海 水条件下における材料への影響については未知の部分が多い。

従って、今回の溶液型グラウトの研究に先立ち、上述した既往知見や文献なども含めて、最新 知見をメインに塩水環境や海水条件下の切り口で溶液型グラウト技術の調査を実施し、課題を整 理する必要があると言える。

2.3 既存文献の調査

2.3.1 文献リストと調査結果の概要

本節では、沿岸部あるいは海水条件下において溶液型グラウトを対象とした室内試験や実証試験、現場施工の知見について調査を実施した文献およびその結果を示す。

調査対象としたのは、スウェーデンのエスポ HRL やフィンランドのオンカロにおける実証試験、倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における実験や実適用など、海外シンポジウム講演予稿集などである。表 2.3-1 に調査した欧文の文献リスト、表 2.3-2 に調査した邦文の文献リストを示す。

欧文については、2013年の第7回北欧グラウトシンポジウムおよび2016年の第8回北欧グラ ウトシンポジウムに溶液型グラウトの文献が多く記されており、調査対象の大部分を占めている。 また、a-7~a-18の文献は、主に次節の2.4最新知見の収集における海外現地調査において海外の 専門家から紹介を得て追加調査を実施した文献である。詳細は付録2に示すが、清水建設がフィ ンランドのSaanio&Riekkola Oy(岩盤設計および地層処分技術を扱うフィンランドのコンサル タント会社)の協力を得て作成したものである。

一方、邦文については、海水環境下での適用事例が少なかったが、倉敷ならびに瑞浪超深地層 研究所では溶液型グラウトの注入実績があり、特に倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事では海水の地下 水に対する施工配合上の工夫が実施されていたため、それらの施工事例をメインに調査した。

		茲	2.3-1 欧大い調査	大きしくてのよう道子	11千 トーム刈り る 笛 息 争 頃	(6/1)
No.	発行年	文献名	著者名	出典 (検討された国)	概要	海水条件下に対する留意事項など
a-1	1979	The Chemistry of Silica Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry ¹⁶⁾	R. K. Iler	Newyork, John Wiley & Sons, Inc $(\mathcal{T} \neq \mathcal{Y} \not{\mathcal{P}})$	「シリカの化学」 溶解性、 重合、コロイドと表面特 性、生物化学について示 されている。	シリカコロイドはpH を調整して酸性側にすることにより、ゲルタイム(ゲル化を引き起こす陽イオンの影響)を変えることができる。すなわち、海水の影響の軽減が可能といえる。
a-2	2007	Silica Sol for Rock Grouting – Tests on Mechanical Properties ¹⁷⁾	C. Butron, M. Axelsson, G. Gustafson	Chalmers University of Technology No. 2007:6 $(\not{\sim} \not{\rightarrow} \pm - \vec{\gamma} \not{\sim})$	溶液型グラウトの基礎物 性試験の報告書	海水条件下に対する記述はなし。
a-3	2011	Injekteringen av TASS -tunneln Design, genomförande och resultat från förinjekteringen ¹⁸⁾	J. Funehag, A. Emmelin	SKB R-10-39 (スウェーデン)	エスポ HRL における適 用事例の成果報告書	海水条件下に対して留意したことなどの記述は 特になし。グラウトの希釈を防ぐために注入孔内 の残留水を除去する装置が適用された。
a-4	2012	Guide to grouting with a silica sol –for sealing in hard rock ¹⁹⁾	J. Funehag	BeFo Report 118 $(\not\prec \dot{\gamma}_{\perp} - \vec{\gamma}_{\perp})$	スウェーデンにおける溶 液型グラウトの設計手 法・指針	溶液型グラウトの浸透理論に基づく設計施工手 法に関する指針。海水条件に関する記述はなし。
a-5	2016	Durability of silica sol, chemical aspects affecting the mechanical properties ²⁰⁾	C. Soegaard, Z. Abbas, J. Funehag	8th Nordic Grouting Symposium, pp. 245-255 $(\varkappa \vartheta \pm - \vec{\tau} arsigma)$	溶液型グラウトの硬化促 進剤の違い(Na+と K+) に応じた耐久特性の取得	硬化促進剤としては同じゲルタイムを得るには K+の方が Na+より添加量が少なく、結合力が強く 溶脱(イオンの崩壊)しない傾向にあり、イオン が溶脱しても透水性が変わらないことが把握さ れた。
a-6	2016	Pre-excavationGrouting (PEG) for HATS2A in Hong Kong ²¹⁾	E. Grov, K. F. Garshol, D. Brox	8th Nordic Grouting Symposium, pp. 186-202 $(\not \downarrow \not \nu \not \neg \pm -)$	香港の海底トンネルにお ける溶液型グラウトの施 工事例	海底トンネルで超微粒子セメントと溶液型グラ ウトを併用し、トンネル湧水を 1.0 L/min/100 m にまで低減(99.99%もの低減)した。
a-7	2013	Colloidal Silica-Grouting in Demonstration Tunnel 2 in ONKALO ⁶⁾	K. Hollmén, U. Sievänen, J. Funehag, N. Granberg, T. Lyytinen, P. Syrjänen, J. Säippä	POSIVA Working Report 2012-84 (フィンランド)	オンカロのデモ 2 トンネ ルにおける実証試験 (付録 2(1)参照)	オンカロにおける地下水はカルシウムイオン (Ca ²⁺) 濃度が高く、溶液型グラウトは Ca ²⁴ に急 激に反応する(急激にゲルをする)ことが分かった。

ま 2.3-1 欧女の調査文献リストおよび海水冬件下に対する留音事項(1/3)

		按		米小年のようとして、「「「」	5千 こうえる の 国息 事項	(2)
No.	発行年	文献名	岁是是	出典 (検討された国)	概要	海水条件下に対する留意事項など
a-8	2013	Underground Openings Production Line 2012 - Design, Production and Initial State of the Underground Openings ²²⁾	POSIVA	POSIVA Working Report $2012-22$ $(\mathcal{ 7} \not\prec \mathcal{ Y} \not\supset ec{arkappa})$	最終処分のための地下空 洞建設における(グラウ トを含む)設計・施工に関 するリファレンスレポー	佈水条件下に関する記述なし。
a-9	2013	Colloidal silica-grouting tests in underground research facility Onkalo, Eurajoki, Finland ²³⁾	K. Hollmen, S. Mustonen, T. Lyytinen	7th Nordic Grouting Symposium, Proceedings, pp.115-124 $($	オンカロの深度 420 m に おけるデモ 2 トンネルで の試験注入結果について	トンネル断面内だけに注入孔を設けた区間で天盤からの滴水や注入後の自孔リークなどグラウトのゲル化の不確実性が課題となった。大深度の塩水環境下による急激な硬化から、微小亀裂に短距離しか浸透できなかったことをその要因として挙げている。
a-10	2013	Grouting of shaft intersecting deep underground hydro- geological zones HZ20A & HZ20B in ONKALO underground research facility, Olkiluoto ²⁴⁰	L. Hatakka, J. Tirinen, N. Salminen, G. Nuijten, R. Lehmusjärvi, S. Aro	7th Nordic Grouting Symposium, Proceedings, pp.147-152 $(\mathcal{I} \prec \mathcal{I} \overrightarrow{\mathcal{I}} \mathcal{I} \overrightarrow{\mathcal{I}})$	オンカロの立坑における 溶液型グラウトを併用し た注入結果について (付録2(2)参照)	厳しい許容湧水量(1 立坑 5 L/min)を達成しており、目標達成には、溶液型グラウトが不可欠と示している。
a-11	2013	Silica grouting in deep underground saline conditions in ONKALO underground research facility ¹⁰⁾	L. Hatakka, N. Salminen, G. Nuijten, R. Lehmusjärvi, S. Mustonen	7th Nordic Grouting Symposium, Proceedings pp.17-28 $(7 \prec \vee \vec{7} \vee \vec{k})$	オンカロの処分深度にお けるアクセス坑道での注 入結果について (付録2(3)参照)	「Water injection」が溶液型グラウトの(先端での)早期硬化を防ぎ、また亀裂中の微細な介在物も除去できた結果、高い浸透性が確保できたとしている。
a-12	2006	Low-pH Injection Grout for Deep Repositories, Summary Report from a Co-operation Project Between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden) ²⁵⁾	Bodén A., Sievänen U.	POSIVA Working Report 2005-24. (フィンランド)	低 pH セメントとその他 材料について検討した国 際プロジェクト (付録2(4)参照)	Ca**を用いることで同じゲルタイムを得るのにNa+の硬化促進剤より 75%減らせることが判明。長期の化学的安定性として、海水(地下水)中のイオン濃度が高いため、Na+や Ca*+の溶脱は懸急されないとしているが、長期力学的安定性は検討する必要があるとしている。

表 2.3-1 欧文の調査文献リストおよび海水条件下に対する留意事項 (2/3)

		女 2.3-1	以入り週日	く悪いくことものほう	キゴー こうしょう し 田 忌 事	頃 (0,0)
No.	発行年	文献名	著者名	出典 (検討された国)	概要	海水条件下に対する留意事項など
a-13	2006	Control of Water Inflow and Use of Cement in ONKALO after Penetration of Fracture Zone R19. ²⁶⁾	Ahokas H et.al.	POSIVA Working Report 2006-45 $(7 \prec \vee \overrightarrow{7} \vee \overrightarrow{k})$	オンカロにおける湧水 対策の概要 (付録2(5)参照)	湧水を抑制すること自体が、化石水の上昇を防ぎ、 さらなる地下水の塩水化とそれに伴う緩衝材への 悪影響を防ぐことができる。
a-14	2007	Pre-grouting test in Nygård tunnel – Silica Sol in practical use. ²⁷⁾	Isomäki J.,	Tampere Polytechnic. Final thesis $(\varkappa { } \neg \pm - { } \neg \checkmark \lor)$	スウェーデンにおける 実適用事例 (付録2(6)参照)	海水条件への記述はなし。施工業者にとって溶液型 グラウトは効率的に注入ができる実用的なツール となっていない。
a-15	2008	Silica Colloids and their Effect on Radionuclide Sorption – A Literature Review. ²⁸⁾	Hakanen M., Hölttä P	POSIVA Working Report 2008-29. $(7 \prec \vee \overline{7} \vee \mathbb{K})$	溶液型グラウトの地層 処分システムへの影響	文献調査後、塩水系の地下水 OLSO と塩分濃度の低い地下水 ALLARD でシリカの安定性や Eurpoium 152 の収着性を実験により検討。溶液型グラウトの
a-16	2009	Silica Colloids and their Effect on Radionuclide Sorption – Experimental Study. ²⁹⁾	Hakanen M., Hölttä P., Lahtinen M	POSIVA Working Report 2009-26. $(7 \land \vee 7 \lor \aleph)$	評価に関する文献調査 および実験研究 (a-16 は実験に関する報 告 付録2(7)参照)	収着量は pH と相関があり、pH が高いほどに大きいと判明。さらに、イオン濃度が高い地下水への溶液型グラウトからのコロイド流出は懸念されないが、氷河の融水に受ける影響を考慮する必要があるとされている。
a-17	2009	R20 Programme: Development of Rock Grouting Design, Techniques and Procedures for ONKALO. ³⁰	Sievänen U	POSIVA Working Report 2008-45 $(7 \prec \vee \vec{7} \vee \vec{k})$	オンカロにおけるグラ ウト設計技術の開発 (付録2(8)参照)	トンネル断面内に注入孔を設けることを基本とし、 要求性能が満たされない場合に溶液型グラウトの 適用や断面外に注入孔を設けることが検討された。
a-18	2015	Impact of groundwater salinity on penetration of colloidal silica ³¹⁾	Lehtonen H	Aalto University. Bachelor Thesis. (フィンランド)	地下水の塩分が溶液型 グラウトの浸透に与え る影響の取得 (付録2(9)参照)	サンドコラムを用い、塩水系の地下水で満たした場合と水道水で満たし場合について、溶液型グラウトの浸透に関する比較実験を実施している。グラウトが地下水と混ざる状況が観察された。

表 2.3-1 欧文の調査文献リストおよび海水条件下に対する留意事項 (3/3)

JAEA-Research 2017-013

No.	発行年	文献名	著者名	出典	概要	海水条件下に対する留意事項など
b-1	2013	倉敷 LPG 貯槽建設工事における溶液型グラウト による止水対策 (その1) 一溶液型グラウトの マイクロフラクチャへの注入計画と実績-13)	征失雅宏、竹内伸 光、大西勝、金戸辰 彦	土木学会第 68 回年次学術講演 会	溶液型グラウトを用い た実績の概要	■溶液型グラウトの適用範囲 セメントによる改良効率が極めて低いマイ クロフラクチャの発達部に適用された。
b-2	2013	倉敷 LPG 貯槽建設工事における溶液型グラウト による止水対策 (その2) 一溶液型グラウトの 現場条件を考慮した溶液型グラウトの長期安定 性確認試験-32	延藤遵、小林伸司、 征失雅宏、鳥田俊 介、小山忠雄、角田 百合香、前島俊雄	土木学会第 68 回年次学術講演 会	溶液型グラウトの化学 的・力学的長期安定性 の取得	■室内試験および現場試験 現場の工事用水・地下水の水質・水温、施 工場所の気温などによって、ゲルタイムの 変化や現地湧水による白濁など、品質が変
b-3	2013	倉敷 LPG 貯槽建設工事における溶液型グラウト による止水対策 (その3) 一溶液型グラウト改 良体の長期止水効果確認試験-33	中谷篤史、奥野哲 夫、小林伸司、征矢 雅宏、前島俊雄	土木学会第 68 回年次学術講演 会	原位置の岩石ブロック を用いた溶液型グラウ トの長期止水性能の取 得	化する可能性が懸念され、それらの条件を変化させた試験が実施された。 変化させた試験が実施された。 ■長期の力学的安定性試験 現地湧水などにてホモゲルを養生し、一軸
b-4	2013	水封式 LPG 岩盤貯槽のアーチ部止水対策工実績 - 倉敷国家石油ガス備蓄基地-34)	竹内伸光、小林伸 司、征矢雅宏、大西 勝、金戸辰彦	土木学会第 68 回年次学術講演 会	溶液型グラウトを用い た実績の概要	圧縮試験によりホモゲルの長期力学的安定 性が確認されている。養生温度は 20 ℃と 促進用の 55 ℃の 2 条件である。
p-5	2013	施工記録:日本初の LPG 地下岩盤貯槽建設工事 の概要,水封トンネル・LPG 地下岩盤貯槽の施 工,貯槽の気密試験33	征失雅宏、 池田建太郎	清水建設, 土木 クォータリー Vol. 180	倉敷 LPG における工 事・実施試験の詳細	■長期の化学的安定性試験 現地湧水にて養生したホモゲルのシリカ溶 脱量の経時変化を測定し、ホモゲルの長期
p-6	2014	倉敷基地 LPG 岩盤貯槽における高水圧下のグラ ウト施工実績と改良効果の評価について ³⁶⁾	小林伸司、宮嶋保 幸、水道健、金戸辰 彦、山本浩志、前島 俊雄	第 42 回岩盤力 学に関するシン ポジウム pp.125-130	倉敷 LPG における工 事・実施試験の詳細	化学的安定性が確認された。 ■長期止水効果確認試験 岩石ブロックを採取して改良体ブロックに て透水性が長期的に有意に増大しない事を 確認するため、長期止水効果確認試験が実 施された。
p-7	2015	大深度の岩盤止水を目的とした活性シリカコロ イドの適用 14)	辻正邦, 小林伸司, 延藤遵, 杉山博一	基礎工 10 月, pp.62-67	溶液型グラウトの岩盤 適用に関する一連の知 見のとりまとめ	国内外の知見や研究開発・適用実績がまと められている。
b-8	2015	瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する 検討一設計・施工計画および施工対策技術の開 発一(平成 26 年度)」(委託研究) ³⁷⁾	小林伸司, 新美勝 之, 辻正邦, 山田俊 子, 青栁芳明, 佐藤 稔紀, 見掛信一郎, 大澤英昭	JAEA- Technology 2015-039	瑞浪の深度 500 m で溶 液型グラウトが適用さ れた実績の概要	海水条件下に関する記載はないが、北欧の オンカロの知見同様に、溶液型グラウトの 注入後の養生時間は長い方が望ましい可能 性が示されている。
6-q	2016	薬液注入の長期耐久性と恒久グラウト本設注入 工法の設計施工-環境保全型液状化対策工と品 質管理38	米倉亮三,島田俊介	近代科学社	溶液型グラウトの開発 関係者による、注入工 法に関する技術図書 (主に地盤改良)	サンドゲルの場合は、海水を含めて様々な 養生水において強度特性が増加し続ける実 験結果が記載されている。

表 2.3-2 邦文の調査文献リストおよび海水条件下に対する留意事項

2.3.2 着目すべき調査結果

(1) 欧文について

調査した欧文の文献のなかから、海水条件下での溶液型グラウトを実施するうえで着目・留意 すべき結果について以下に列挙する。

1) 文献 a-1:シリカの化学より

R. K. Iler の「シリカの化学」はシリカやコロイド扱う化学者・研究者にとって教科書的な位置 づけの図書である。図 2.3-1 は一般的なシリカコロイドにおける pH に応じたゲルタイムの関係 を示したものである。溶液型グラウトは通常 pH9-10 のため、硬化促進剤(塩)を加えない場合 (NO SALT)のゲルタイムは pH7 程度より右側に向かって立ち上がっているため、無限に長くゲ ル化しないことが分かる。しかし、一定の陽イオン(ここでは、NaCl)を加えることにより、傾 きが小さくなり、ゲルタイムが発生する。このため、海水条件下では地下水中の陽イオンがグラ ウトに反応してゲルタイムが短くなることが容易に理解できる。ここで、シリカを酸性側になる ように pH を調整すると、その形態が左側に推移し、塩分濃度に拠らず短いゲルタイムに収束し、 さらに酸性側に振ると今度は逆にまたゲルタイムが長くなる方に推移することが分かる。

このように、溶液型グラウトをはじめとしたコロイダルシリカ溶液は、酸性側に振ることにより、海水条件下の影響を低減できると言える。



図 2.3-1 pH とシリカコロイドのゲル化特性

2) 文献 a-3: エスポ HRL における実証試験より

本文献では、セメントグラウトと溶液型グラウトを併用したプレグラウチングの実施結果について触れられているが、塩水環境で問題になる事例が報告されていない。

3) 文献 a-5: スウェーデンにおける最新の室内試験

本文献では、溶液型グラウトの硬化促進剤の違いによる長期耐久性に着目し、NaClの硬化促進 剤を用いた溶液型グラウトと KClを用いた場合の双方のホモゲル供試体について透水試験を実施 した報告がされている。双方の供試体に水頭をかけて透水させて、溶液の透過量やその成分分析 が行われている。実験模様は図 2.3-2 のとおりである。

図 2.3-3 に 3,168 時間 (132 日) に亘る透過流量の変遷を示す。水頭が同じ条件であるが、NaCl で練混ぜた方(赤)が KCl で練混ぜた方(青)より透過量が多いことが分かる。K+の方が Na+よ りシリカとの結合力が強く、同じゲルタイムを得るのにも少ない量で良いこと(K+の方が結合の 強い)ことが影響しているのではないかと考察されている。すなわち、KCl を用いた方が、緻密 な供試体組織になる可能性があると言える。

また、いずれのケースも透過したシリカは飽和しており、イオンも同時に溶出しているにもか かわらず、透水量が有意に増加していない、すなわち透水性が有意に増加していないと結論づけ られている。引続き試験を継続するとのことである。



図 2.3-2 異なる硬化促進剤(NaCl または KCl)で練混ぜた溶液型グラウトの透水試験



図 2.3-3 透水試験における透水流量の推移 (赤: NaCl で練混ぜ、青: KCl で練混ぜ)

4) 文献 a-6: 香港の海底トンネルでの施工

本文献では、香港島とヴィクトリア港を結ぶ深度約 150 m の海底トンネル HATS2A の掘削時 のプレグラウチングがノルウェーの業者より報告されている。本工事では、グラウト材に普通セ メントの適用を一切廃止して、超微粒子セメントと溶液型グラウトを併用している(図 2.3-4)。 普通セメントの場合には、養生時間が超微粒子セメントより長く必要なため、その待ち時間とコ スト差の比較評価から超微粒子セメントを全面的に採用している。施工結果は、最初のグラウト 注入孔で 9,200 L/min/100 m もの大量湧水が確認された区間において、最終的にトンネル掘削後 に 1.0 L/min/100 m にまで低減されている。実に 99.99%もの低減に成功し、また、切羽崩壊のよ うな事故もなかったとのことである。完成したトンネルの様子を図 2.3-5 に示す。



図 2.3-4 香港の海底トンネル HATS2A において用いられた材料



8th Nordic Grouting Symposium Oslo, Norway, 26-27. September 2016



5) 文献 a-7: オンカロのデモ2トンネルにおける実証試験より

オンカロにおける地下水の特性は、表 2.3-3 に示す通り、非常に Ca²⁺の含有量が多い。溶液型 グラウトは Ca²⁺に非常に急激に反応することが分かっていた。十分な注入流量があれば、先端で 反応しても後ろからグラウト材が追いかけてくるので注入に支障がないが、注入流量が小さく浸 透距離が伸びない場合は注入できないことが懸念されていた。しかし、そのための対策について は触れられていない。注入孔内に溶液型グラウトのプラグがしっかりできるところもあれば、何 度も注入しても完全に止水できない孔(自孔リークする孔)があったと記されている。また、基 本的に処分坑道を模擬しているため、トンネル断面内に全ての注入孔が配置するよう試みている。 具体的には、壁面より 0.6 m 内側に壁面と平行に配置し、1.9 m の浸透距離を期待することで壁 面の外側 1.3 m を改良する設計である(図 2.3-6 参照)。

表 2.3-3 オンカロの先行ボーリング孔(ONK-PH16)から採取した地下水の成分

Parameter	Concentration mg/l
TDS, total dissolved solids	13860
Calcium Ca	2100
Sodium, Na	3040
Chloride, Cl	8580



図 2.3-6 オンカロのデモ2トンネルの平面図(左)および断面図(右)に示すグラウト孔の位

置

- 15 -

6) 文献 a-9: オンカロにおける注入試験

前述の文献より溶液型グラウトの施工方法について詳しく報告されている。Chamers University of Technology (スウェーデン)の注入理論に基づき、溶液型グラウトの浸透距離によ る設計および注入管理(図 2.3-7 に示すフローチャートで管理)の成果が報告されている。使用 材料 Meyco MP320 (ゲルタイム:55min)、注入圧 9.0-9.5 MPa、注入時間 44 min (ゲルタイム の 4/5)、改良すべき最小亀裂 20 μ m、パッカー設置深さ 0.5~1.5 m、必要浸透距離:3.9 m (20 μ m 亀裂)で設計されている。



図 2.3-7 フローチャートによるグラウト管理の例

(設計注入圧の到達時や注入圧の持続の可否に応じて圧力や注入時間や配合などを適宜変更する ようなフローである。北欧のグラウト浸透理論がベースである。)

注入装置としては、注入孔内の残留水とグラウトを置換するバキュームポンプを含む装置を使 用し、要求性能を満足する結果が得られたが、トンネル断面内にだけ注入孔を設けた区間では天 盤から滴水があり、パッカーを外したときに自孔リークする孔があるなど溶液型グラウトの施工 (ゲル化)の不確実性が課題となった。

このように、バキュームポンプは効果的に機能したが、微小亀裂では短い距離しか浸透してお らず、断面内に注入孔を設けた区間では、壁面まで最低3mの浸透距離が必要と想定され、その 浸透を確保することが困難であった。また、10 µm以下の亀裂の改良も困難であったと評価され ている。自孔リークの理由は不明である。自孔リークしない孔もあるので、施工の不確実性が課 題とされている。 7) 文献 a-8~11: オンカロの立坑やアクセス坑道におけるグラウチング

オンカロでは、デモトンネルで得られた不確実性の要因の一つとして、塩分環境の地下水を考 えた。そこで、亀裂の多い孔は短いゲルタイムの低圧注入、タイトな孔は長いゲルタイムの高圧 注入とし、地下水の塩分の影響を排除するためにグラウチング前の「Fresh Water Injection (淡 水注入:亀裂の水押し洗浄)」の手法を開発した。「Water Injection」の主な仕様は下記の通りで ある。

• 注入E: 80~90 bar

・ 注入時間:Water Injection 終了後からグラウト開始までにかかる「準備時間以上」

この手法のメリットとして、溶液型グラウトの(先端での)早期硬化を防ぐだけでなく、亀裂 内の微細な介在物(クレイ)を予め除去できるため、確実かつ非常に高い浸透性を確保できたと 推察している。また、グラウト注入前は空気を圧入して注入孔の水抜きする手法が開発された。 これまでのバキュームにより水を吸い取る方式では、亀裂に注入した「新鮮な水」を吸い戻して しまうためである。その結果、岩盤内への実際の注入量の把握が容易であったとされている。こ れは、注入孔がグラウトで満たされると、急激に流量が下がったため、どの時点から浸透が始ま ったか把握できるためとのことである。

さらに、グラウトの養生として、注入終了後に3日間パッカーを密閉・養生し、さらに24時間 後にパッカーを外すという施工方法を実施したとのことである。これにより、自孔リークが発生 せず、非常にドライなトンネルに仕上がったとのことである。

8) 文献 a-7~18: フィンランドにおける溶液型グラウトの開発について

フィンランドにおける最新研究、室内試験、適用実績などについての文献である(詳細は付録 2)。ここでまとめた文献のほとんどは、オンカロに関連して POSIVA により実施されたものであ る。オンカロは、将来フィンランドの地層処分場の一部となる予定である。また、フィンランド が携わった一般土木工事のプロジェクトとして、スウェーデンの Nygård tunnel を示したが、こ こでは、溶液型グラウトの値段が高いこと、材料廃棄率が高いこと、溶液型グラウトのための注 入設備がないことなどから、効率的・実用的ではないと評価されている。

オンカロは、2004年に建設を開始している。建設開始前に主な課題は、地下水位の降下と施設 への湧水が発生すること、さらにそれに伴う深層の塩水環境の地下水(化石水)が上昇すること とされ、地下施設への湧水を防止する手法として岩盤グラウチングが決定された。このため、オ ンカロでは下記の通り非常に厳しい許容湧水量が設定されている。

・立坑1本あたり: 5 L/min

·坑道 100 m あたり: 1~2 L/min

このように、オンカロでは許容湧水量が非常に厳しいため、100 µmより小さい岩盤亀裂をグ ラウチングすることが研究開発の対象となり、セメントグラウトよりも優れた浸透性能から溶液 型グラウトを使用するようになった。また、長期安全評価、環境面、使用材料の長期耐久性など の観点から、グラウト材料としては「低 pH セメント」および「溶液型グラウト」の二種類が今 後の研究対象とされていることが分かった。

これらの試験で適用されてきた溶液型グラウトの製品名は、最初は Eka Gel EXP36 であり、

次に Meyco MP320 であり、現在は BASF 社によって販売されている MasterRoc MP320 である。

溶液型グラウトのコロイドが放射性核種の収着に与える影響も研究されている。ただし、溶液 型グラウトの長期安定性はまだ明確ではなく、シリカが長期にわたり溶脱する影響を無視するこ とはできないとされている。また、EBSシステムで使用されるベントナイト緩衝材は、コロイド の潜在的な供給源であると考えられるため、ベントナイトと溶液型グラウトの相乗作用は不明と されている。コロイドを媒介しての放射性核種の移行に関しては、地化学環境におけるコロイド 安定性および移動性に依存するのではないかとされている。また、オンカロでは塩水と淡水の中 間の環境下から塩水環境下の地下水が分布することが分かっているなかで、溶液型グラウトから のコロイド流出は問題にならないとされているが、氷河の融水に受ける影響を考慮する必要があ るとされている。

近年、POSIVA により溶液型グラウトの注入直前に「淡水注入(Grouging with fresh water before colloidal silica grouting)」を実施する手法が実証されている。淡水注入の目的は、溶液型 グラウトの塩水地下水への影響を防止し、グラウトのゲル化(ゲルタイム)を予測可能にするこ とである。実証結果から、淡水注入は溶液型グラウトを大量に消費することを防げるとともに、 湧水抑制に効果的なことから非常に有望な手法とされている。

最新の研究では、サンドコラムを用い、塩水環境の地下水(人工地下水)で満たした場合と水 道水で満たした場合に溶液型グラウトを浸透させる実験が実施されている。この研究は、オンカ ロのデモトンネル2において溶液型グラウトの実証試験で発生した問題(ゲルタイムやゲル化の 不確実性)を解明することを目的としている。注入時のサンドコラムの観察により、溶液型グラ ウトと人工地下水または水道水が混ざり合う状況が明確となった。すなわち、「注入時は亀裂内に 層流が発生し、地下水がグラウトに置き換わるため、グラウトと地下水の混合が起きない」とい う仮説を否定するものであった。

溶液型グラウトの注入は岩盤注入の分野ではまだ新しい手法であるが、放射性廃棄物の最終処 分施設において湧水を防止するために非常に良い手段であることが証明されていると言える。さ らに、低 pH セメントと溶液型グラウトをプレグラウチングで組み合わせる手法が、湧水抑制に 最も適しているようである。ただし、溶液型グラウトの塩水環境下における長期安全性やその挙 動については完全には解明された訳ではないため、さらなる研究の必要があるとされている。

フィンランドにおける文献の調査結果から留意すべき事項として、バルト海と太平洋の塩分環 境の違いがある。すなわち、フィンランドと日本の沿岸域を比較すれば岩盤条件と塩水環境の違 いにより地下施設における地下水環境は大きく違う可能性があることに留意する必要があると言 える。

(2) 邦文について

調査した欧文の文献の中から、海水条件下での溶液型グラウトを実施する上で着目・留意すべ き結果について以下に列挙する。

1) 文献 b-1~6: 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの適用について

i) 溶液型グラウトが適用された範囲

倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事ではセメント材料に加えて補足的に溶液型グラウトを用いたプレ グラウチングおよびポストグラウチングが実施されている。改良対象となったのは図 2.3-8 に示 すように、セメントグラウトによる透水性改良効率が極めて低いマイクロフラクチャ発達部(以 下、mf 発達部と称す)である。当初は mf 発達部に対し直交する孔配置としていたが、ルジオン 値に対し注入量が小さく改良が進まないため、mf 発達部に対し平行する孔配置(面内グラウト) とすることで、mf 発達部とグラウト孔の接触面積を大きくし、改良効果を高めている。



図 2.3-8 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設における同一の mf 発達部への溶液型グラウト孔の配置例¹³⁾

ii) 室内試験および現場試験

溶液型グラウトは、現場の工事用水・地下水の水質・水温、施工場所の気温などによって、ゲ ルタイムの変化や現地湧水による白濁(図 2.3-9)など、品質が変化する可能性が懸念された。こ のため、それらの条件を変化させた室内試験および現場試験が行われている。



図 2.3-9 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における現地湧水による白濁試験¹³⁾

現場での品質管理試験方法として、表 2.3·4 のような試験が設定されている。また、現場では、 試験の目標値を満足するように調整配合を設定するとともに安定した品質の確保に努めている。

試験名 管理項目		目標値	
甘土町人計時	ゲルタイム	設定時間±30分	
基平配合讯驶	pH(練混ぜ直後 60 分経過後)	6.0±1.0	
白濁確認試験*	現地湧水と接触させた状態	白濁しないこと	
50%希釈試験**	ゲルタイム (pH も測定)	ゲル化すること	

表 2.3-4 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの品質管理試験¹³⁾

*現地湧水にグラウト材をゆっくりと注ぎ込む.

**グラウト材体積百分率 50%に相当する現地湧水を添加する.

iii) 基本配合の決定

貯槽掘削に備え、試験施工を行い溶液型グラウトの改良効果を確認するとともに、長期安定性 確認試験を行いながら取得された基本配合を表 2.3-5 に示す。特筆すべき点は、pH6 程度の中性 ~酸性側の配合に調整されていることである。溶液型グラウト自体は pH9-10 の弱アルカリ性の ため、強酸性の pH 調整剤が添加されていると考えられる。

表 2.3-5 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの基本配合¹³⁾

	ゲルタ イム(分)	pH*	シリカ (kg)	硬化材 (kg)	工事用水 (kg)
1	120	5.8	968	9.875	16.25
2	120	6.5	968	5.93	9.4
*冷中で地下ナナ所の影響が小ない町合った亦再した					

*途中で地下水水質の影響が少ない配合2に変更した.

また、溶液型グラウトは岩盤グラウトへの適用実績や沿岸域への適用実績が少ないことから、 長期力学的安定性試験、長期化学的安定性試験、長期止水効果確認試験が実施されている。以下 にそれぞれの概要を示す。

iv) 長期力学的安定性試験

現地湧水やブリーディング水にてホモゲルを養生し、一軸圧縮試験によりホモゲルの長期力学 的安定性の確認試験を実施されている。養生は、表 2.3-6 に示すように、標準温度 20 ℃と、既 往研究³⁹⁾において採用された促進養生温度 55 ℃の 2 条件で行っている。

試験結果を図 2.3-10 に示す。促進養生の場合の換算養生日数は、標準養生および促進養生の試 験結果の比較から算出した促進倍率(イオン交換水 40 倍、現地湧水 90 倍)を試験材齢に乗じた ものである。一軸圧縮強度は、イオン交換水に比べて現地湧水で養生した場合の方が小さいが、 現地湧水の場合においても 50 年相当の養生期間において一軸圧縮強度は増加し続けている。

標準養生 促進養生 200ml の養生水中に供 55°Cの恒温室 試体 φ 100×H50 を浸漬 内にて養生

10,000 oI-N △S-N ◇I-H □S-H 一軸圧縮強度 (kN/m²) 1.000 ć 100 自 q F 4

図 2.3-10 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの長期力学的安定性試験結果 ³²⁾

100

養生日数

1,000

10

50年相当

10,000 100,000

v) 長期化学的安定性試験

10 1

既往研究16,32)を参考に、現地湧水にて養生したホモゲルからのシリカ溶脱量の経時変化を測定 することにより、ホモゲルの長期化学的安定性を確認している。試験としては、以下の2種類を 実施している(表 2.3-7)。試験1(養生水の置換を行わない条件)で、養生水中の全シリカ濃度、 溶解性シリカ濃度が増加しないことを確認する。試験2(養生水を繰返し置換する条件)で、養生 水中の全シリカ濃度、溶解性シリカ濃度の溶解速度が増加しないことを確認する。

試験1	試験 2
LC I NE MARKAN LC I N	
6Lの養生水中に供試体	1L の養生水中に供試体 40ml を 1 体静置

表 2.3-7 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの長期化学的安定性試験養生 ³²⁾

表 2.3-6 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における溶液型グラウトの長期力学的安定性試験養生³²⁾

試験1の結果を図 2.3-11 に示す。試験1では養生水の置換を行わない予定であったが、全シリ カ濃度が安定した状態にあると判断されたため、一度水替えを実施した。次に、試験2の結果を 図 2.3-12 に示す。図 2.3-11 より、試験1では全シリカ、溶解性シリカ濃度ともに増加していな いことが分かる。次に図 2.3-12 に示す試験2では全シリカ、溶解性シリカともに溶解速度(図中 の濃度増分の勾配)が増加していないことが分かる。したがって、溶液型グラウトの硬化体は化 学的に安定しているものと言える。また、養生水の違いについては、イオン交換水よりも現地湧 水の方が全シリカ、溶解性シリカ濃度ともに小さいことから、倉敷の現地湧水は化学的安定性に 悪影響を与えないものと考えられる。



図 2.3-11 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における長期化学的安定性試験(試験 1)結果 ³²⁾



図 2.3-12 倉敷 LPG 貯槽基地における長期化学的安定性試験(試験 2)結果³²⁾

vi)長期止水効果確認試験

既往の類似研究では、米倉らが動水勾配 50 の浸透水圧下においてサンドゲルの透水性が増加 しないことを報告している³⁸⁾。しかし、岩盤亀裂に対する溶液型グラウトの長期透水性に関する 検討は報告された例が少ない。そこで、原位置で溶液型グラウトにより改良された岩石ブロック を採取して改良体ブロックにて透水性が長期的に有意に増大しない事を確認するため長期止水効 果確認試験を実施している。試験装置を図 2.3-13 に示す。試験結果を図 2.3-14 に示す。2 種類 の試験体にて実施し、いずれも 1,400 日間の長期的に有意な透水系の増加がないことが確認され た。



図 2.3-13 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における長期止水効果確認試験の装置 ³³⁾



図 2.3-14 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における長期止水効果確認試験の結果³³⁾

2) 文献 b-8:瑞浪超深地層研究所における溶液型グラウトの適用について

瑞浪超深地層研究所では深度 500 m の研究アクセス南坑道において溶液型グラウトを用いたポ ストグラウチングが実施されている。特に、海水条件下に限った話ではないが、特筆すべき点と して、削孔時に毎分 130 L/min もの非常に大量の湧水が発生した孔があり、一度の注入で止水は できずに 2 回の再注入を実施したものの、溶液型グラウトの注入のみで、わずか 0.06 L/min (99.99%)までほぼ完全にドライになるまで低減できたことである(図 2.3-15)。

なお、最後の再注入は現場が夏季休暇に入る直前であったため、夏季休暇中はパッカーをかけ たままにして1週間以上の養生が実施されている。北欧のオンカロの知見で溶液型グラウトは養 生時間が長い方が望ましいと記されていることから、日本の溶液型グラウトにおいてもその可能 性を試していたと考えられ、十分な養生時間が確実な施工に繋がる可能性があると考えられる。



図 2.3-15 瑞浪の深度 500m において 130L/min の湧水が発生した注入孔の止水状況 37)

3) 文献 b-9: 恒久グラウト本設注入工法

本文献は、我が国の溶液型グラウト(活性シリカコロイド)自体を開発した研究者が執筆した 文献である。特に、海水条件下に関して言えば、ホモゲルではなく固結砂(サンドゲル)の知見 であるが、活性シリカコロイドはあらゆる環境で養生しても強度が増加しており(図 2.3-16)、海 水養生に対しても強度特性が低下しないことが分かっている。すなわち、養生水にかかわらず耐 久性が高いことが示唆される。



図 2.3-16 異なる化学的環境で養生した固結豊浦砂の強度 38)
2.3.3 文献調査結果のまとめ

最新知見をメインに塩水環境や海水条件下の切り口で溶液型グラウト技術の国内外の調査を実施した。以下に主な結果を列挙する。

【欧文の知見のまとめ】

- R. K. Iler によると、溶液型グラウトをはじめとしたコロイダルシリカ溶液は、酸性側に調整 することにより、塩水条件によるゲル化の影響を低減できることが考えられる。(a-1,Iler 1979¹⁶⁾)
- エスポ HRL では、セメントグラウトと溶液型グラウトを併用したプレグラウチングの実施 結果について触れられているが、塩水環境で問題になる事例が報告されていない。(a-3, Funehag ら 2011¹⁸⁾)
- 最新知見として、スウェーデンでは硬化促進剤の陽イオンの種類(K+または Na+)に着目した耐久性試験が実施されており、K+の方がより緻密なホモゲルができる可能性がある知見が得られている。また、シリカやイオンが溶脱しても130日程度までは透水性に変化がないことを明らかにし、引続き試験を継続中である。(a-5, Soegaard ら 2016²⁰⁾)
- 香港の海底トンネルではノルウェーの業者が溶液型グラウトと超微粒子セメントを併用して 99.99%の湧水量低減に成功した。(9,200 L/min/100 mの大量湧水区間⇒1.0 L/min/100 m) (a-6, Grov ら 2016²¹⁾)
- オンカロの処分深度では非常に Ca²⁺が多い地下水である。溶液型グラウトが Ca²⁺に急激に 反応する知見が得られている。十分な注入流量があれば、先端で反応しても後ろからグラウ ト材が追いかけてくるので注入に支障がないが、注入流量が小さく浸透距離が伸びない小さ い亀裂が注入できないことが懸念されていた。(a-7, Hollmen ら 2013⁶⁾)
- オンカロでは、トンネル断面内にだけ注入孔を設けた区間では天盤から滴水があり、パッカ ーを外したときに自孔リークする孔としない孔がありその不確実性が問題視された。(a-8, Posiva 2013²²⁾)
- 最新の研究では、サンドコラムを用い、注入時のサンドコラムの観察により、溶液型グラウトと人工地下水または水道水が混ざり合う状況が明確となった。これは、「グラウトと地下水の混合が起きない」という仮説を否定するものであった。(a-18, Lehtonen 2015³¹⁾)
- そこで、オンカロでは、海水条件下の対策として、地下水の塩分の影響を排除するためにグラウチング前の「Fresh Water Injection(淡水入:亀裂の水押し洗浄)」の手法が開発され、さらに亀裂の多い孔は短いゲルタイムの低圧注入、タイトな孔は長いゲルタイムの高圧注入を実施し、この手法が有効であったとされている。(a-11, Hatakka ら 2013¹⁰⁾)
- 「Water Injection」の主な仕様は、注入E: 80~90 bar, 注入時間: Water Injection 終了後からグラウト開始までにかかる準備時間以上である。溶液型グラウトのグラウト先端での硬化を防ぐだけでなく、亀裂内の微細な介在物を予め除去できるため、確実かつ非常に高い浸透性を確保できたとしている。(a-9, Hollmen ら 2013²³⁾)(a-11, Hatakka ら 2013¹⁰⁾)
- 注入前に空気を圧入して注入孔の水抜きをする手法が開発されている。注入孔がグラウトで満たされると、急激に流量が下がり、どの時点から浸透が始まったか把握できることからも有用とのことである。(a-7, Hollmen ら 2013⁶⁾)(a-11, Hatakka ら 2013¹⁰⁾)
- グラウト孔の養生として、注入終了後に3日間パッカーを密閉・養生し、さらに24時間後に

パッカーを外すという施工方法を実施したとのことである。これにより、自孔リークが発生 せず、非常にドライなトンネルに仕上がったとのことである。(a-11, Hatakka ら 2013¹⁰⁾)

【邦文の知見のまとめ】

- 主に倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事のグラウチング工事(mf 発達部)において沿岸域・海水条件下に関する各種試験が実施されている。現場の工事用水・地下水の水質・水温、施工場所の気温などによって、ゲルタイムの変化や現地湧水による白濁など、品質が変化する可能性が懸念され、それらの条件を変化させた室内試験および現場試験が行われている。(b-1,征矢ら 2013¹³⁾)(b-2,延藤ら 2013³²⁾)(b-3,中谷ら 2013³³⁾)(b-4,竹内ら 2013³⁴⁾)(b-5,征矢ら 2013³⁵⁾)(b-6,小林ら 2014³⁶⁾)
- 基本配合は、現地湧水により白濁しない、pH6 程度の中性~酸性側の配合となっていることである。溶液型グラウト自体は pH9-10 の弱アルカリ性のため、強酸性の pH 調整剤が添加されていると考えられる。(b-1, 征矢ら 2013¹³⁾)
- ・ 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事の現場条件を考慮した溶液型グラウトの長期安定性確認試験の 結果から、長期力学的安定性については現地湧水のもとで長期間(促進養生により 50 年間) ホモゲル強度が増進すること、長期化学的安定性については現地湧水のもとで(同 50 年間) シリカの溶脱が促進しないことが確認されている。(b-2,延藤ら 2013 ³²⁾)
- さらに、原位置で採取した改良体ブロックを用いて室内長期止水効果確認試験を実施した結果、1,400日間透水係数は有意に増大していないことから、4年近く改良体ブロックの止水効果が確認できたと考えられる。(b-3,中谷ら2013³³⁾)
- ・ 瑞浪超深地層研究所では、130 L/min もの大量の湧水が発生したポストグラウト注入孔に対して、溶液型グラウトの注入のみで、わずか 0.06 L/min (99.99%)、ほぼ完全にドライになるまで低減できた。現場が夏季休暇に入ることもあり、1 週間以上の養生を実施できたこともあり、日本の溶液型グラウトにおいてもオンカロ同様に長時間養生が確実な止水に寄与する可能性が示唆された。(b-8,小林ら 2015 ³⁷⁾)
- ホモゲルではなく固結砂(サンドゲル)の知見では、活性シリカコロイドはあらゆる環境で 養生しても強度が増加する傾向にあり、海水養生に対しても強度特性が低下しないことが分 かっている。すなわち、ホモゲルでの海水環境下での特性については不明である。(b-9,米 倉ら 2016 38))

2.4 最新知見の収集

2.4.1 グラウトワークショップ開催

(1) 概要

海水環境下における溶液型グラウトに関する最新知見の収集のため、フィンランドの Saanio & Rieikkola Oy (岩盤設計および地層処分技術を扱うフィンランドのコンサルタント会社、以下 S&R Oy) にコンタクトを取り、スウェーデンとフィンランドの処分事業に関わる技術者との共同 グラウト技術ワークショップをヘルシンキ (フィンランド) で 2017 年 1 月 26 日に開催した。

開催模様は図 2.4-1 に、参加メンバーは以下に示す。

- フィンランド: POSIVA (1名)、S&R Oy (2名)、B+Tech (1名)、 ROCKPLAN (1名)
- スウェーデン: Chalmers University of Technology (1名)
- 日本 :日本原子力研究開発機構(2名)、清水建設(3名)

また、ワークショップは、「背景の説明」、「最新のグラウト知見」、「海水条件下での適用」および「ディスカッション」の4部構成で開催した。

ワークショップの実施スケジュールおよび発表資料は、巻末の付録1に示す。



図 2.4-1 グラウト技術のワークショップの開催状況

(2) ワークショップで得られた知見

今回のワークショップで得られた知見や専門家による主なコメント・アドバイスについて列記 する。

■Sanna Mustonen (POSIVA):フィンランド事業者

- POSIVA は建設許可申請が下り、昨年末から、いよいよ処分場の建設段階に入った。このため、研究業務は相対的に縮小する。
- ただし、化石水の上昇を防ぐことなどから、施設全体の湧水量が厳しく定められている(例 えば立坑は1本あたり1.6 L/min)。グラウチングは必ず必要である。
- グラウト材はその化学成分が重要であり、低 pH が望ましく、有機物を含むグラウト材料は 岩盤内に残してはならない。
- 以上のことから、高水圧下の処分坑道や処分孔周辺において湧水量低減のため、溶液型グラウトは必須の材料である。
- ポストグラウチングではなく、プレグラウチングをメインターゲットとしている。
- 岩盤内に注入孔を残してはならないため、トンネル断面内に注入孔を設ける方針である。
- 断面内からの注入で水を止められない場合は、亀裂・断層帯の上流側から止水する。

■Lassi Hattaka (ROCKPLAN) : フィンランドのコンサルタント

- サンドカラムに塩水と淡水を満たした供試体に溶液型グラウトを注入すると、塩水の方は途 中で注入量・注入距離が増えなくなるのに対し、淡水は途中で止まることなく浸透を続けた。
- カップテストにより現地採水の地下水に溶液型グラウトを注ぐと、一瞬にしてゲル化した。
- このため、こういった地下水環境でグラウトを実施するために Water Injection (淡水注入) を開発した。特に、亀裂が大きい場合は他の亀裂から固まっていないグラウト材が回り込む と考えられるので問題ないが、亀裂が小さいときには目詰まりを起こすため Water Injection を実施した。
- 手順としては、Water Injection を行い、注入孔内をすぐに空にしてからグラウチングを開始 した。この方式により、オンカロの大深度で非常にドライなトンネル掘削に成功した。

■Johan Funehag (Chalmers):スウェーデンの大学の准教授、溶液型グラウトの第一人者

- Lassi 氏の Water Injection を主流とする対策に対して問題点を述べた。理論的・合理的では なく、施工時に無駄な待ち時間が発生して施工時間が長くなり、結果的に施工費が増大する ため、標準仕様(スタンダードな対策)にすべきではないとのことである。
- 海水環境下で溶液型グラウトを注入するのがどう問題なのか(具体的に浸透距離が定量的に どれだけ影響を受けるか)を亀裂平板などで実験的に把握することが重要である。影響を受 けないのであれば、少々の塊(白濁)ができたとしても、その周りを早いスピードでグラウ トが浸透するため、グラウトの広がりに問題がないはず、というのが通説である。
- 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事で実践されたような pH を調整する手法 (pH を酸性側に調整) がスマートで設計に影響を与えないので良いと考えられる。
- 室内実験で見極めて、不確実性を下げた合理的な対策を実施する必要がある。

2.4.2 オンカロの視察

POSVIA と事前にコンタクトを取り、オンカロの処分深度において溶液型グラウトの注入が実施されたデモ2トンネル(図 2.4・3 参照)と近傍のアクセス坑道を視察する計画を立ててオルキルオトを訪問した。しかし、訪問直前にオンカロ坑内で事故が発生したために入坑が許可されなかった。POSIVAのビジターセンター(図 2.4・2)で状況を説明してくれた Sanna Mustonen 氏によると当該のデモ2トンネルは溶液型グラウトを用いて十分に湧水が抑制されているとのことである。



図 2.4-2 POSIVA のビジターセンター



図 2.4-3 ONKALO 特性調査施設およびデモ 2 トンネル

(Hollmen ら 2013⁶⁾ に一部加筆)

そのかわり、同等の岩盤からなる VLJ(中低レベル放射性廃棄物処分場)ならびにその処分深 度に併設されているオンカロリサーチギャラリーを見学することができた。奥部はデモ 2 トンネ ルとほぼ同等の地質とともに、同様の幅員と高さの坑道になっているとのことである。参考まで に、当該ギャラリーの写真(図 2.4-4)を示す。なお、この近傍では断層帯以外ではほとんどグラ ウトが実施されておらず、見た目に非常にドライな環境であった。



図 2.4-4 デモトンネルと地質・サイズがほぼ同じオンカロリサーチギャラリーの様子

なお、POSIVA のホームページから引用した実際のデモ 2 トンネルの様子を示す(図 2.4-5、 図 2.4-6)。いずれもグラウトが実施されたと思えないくらい非常にドライな坑内に仕上がってい る。また、グラウト注入孔が水みちになることを防ぐために坑道断面内に注入孔を配置されてい た。このため、掘削後の双方の写真において、壁を貫く注入孔が見当たらないことが分かる。



図 2.4-5 デモ 2 トンネルの様子その 1 (POSIVA ホームページ Image gallery より抜粋)⁴⁰⁾



図 2.4-6 デモ 2 トンネルの様子その 2 (POSIVA ホームページ Image gallery より抜粋)⁴¹⁾

2.4.3 最新知見のまとめ

北欧の現地調査で得られた最新知見を以下に列挙する。

【ワークショップ】

- POSIVA のオルキルオトの処分場では、化石水の上昇を防ぐことなどから、施設全体の湧水 量をできる限り制限し、坑道ごとに非常に厳しい許容湧水量が定められている。
- 岩盤の低 pH な環境を維持し、有機物を残さず、高水圧下の処分坑道や処分孔周辺において 湧水量を低減する必要がある中で、溶液型グラウトは必要不可欠な材料である。
- グラウチングはプレグラウチングでトンネル断面内に注入孔を設ける方針である。
- 断面内からの注入で止水できない場合は、亀裂・断層帯の上流側から止水する方針である。
- フィンランドのコンサルが実施した試験の結果からは、海水環境下では溶液型グラウトの浸透距離が頭打ちし、一瞬にしてゲル化する可能性があるため、Fresh Water Injection(淡水 注入)を主な対策として実施している。
- Water injection は、微細亀裂の確実な注入ができたとしても、理論的な設計に基づいておらず、施工時間が増えて合理的でない点をスウェーデンの Funehag 先生が懸念している。
- 海水環境下で溶液型グラウトを適用するのがどう問題なのか(具体的に浸透距離が定量的に どれだけ影響を受けるか)を、亀裂平板などを用いて実験的に把握して設計にフィードバッ クすることが重要である。
- また、日本で開発されている手法 (pH を酸性側に調整) がスマートで設計に影響を与えない ので良い方法と考えられる。
- 室内実験で見極めて、不確実性を下げた合理的な対策が必要である。

【オンカロの視察】

残念ながら直前のトラブルにより入坑が許可されなかったが、同等の岩盤からなる VLJ(中低 レベル放射性廃棄物処分場)ならびにその処分深度に併設されているオンカロリサーチギャラリ ーを見学した。

2.5 課題の整理

既存文献の調査ならびにグラウトワークショップで得られた知見から、今後の溶液グラウトの 開発にあたり、表 2.5-1 のとおりに取り組みならびに課題を整理した。日本、スウェーデン、フ ィンランドとそれぞれ対策から課題となるポイントが配合選定手法、理論的な設計手法、施工対 策手法と大きく区分されたと考えられる。そこで、塩水環境下では挙動が複雑で、課題が多いと されているなか、一つの手法に依るのではなく、最終的には各国の対策を把握して、ハイブリッ ドに適切な設計施工の体系を構築するのが望ましいと考えられる。

国 名	取り組み	課題
日本	pH 調整剤を用いた海水へ の感度を下げる対策(倉敷 LPGの実績)	 ・淡水~海水条件下における場合との差異などジェネリックに練混ぜ水の幅を持たせて、その特性を取得し、適用範囲なども把握する。 ・海水環境下における最適な「配合選定手法の確立」が必要である。
スウェーデン	基本的には海水条件であっ ても設計で対応	 海水条件下によりグラウト設計が受ける不確定要素の解明が必要である。 平行平板など室内実験により現象を把握し、塩水環境下での溶液型グラウトの浸透距離の補正率の算出などを取得するのが望ましい。 「塩水環境下での理論・設計手法の確立」、「耐久性の把握」が必要である。
フィンランド	海水条件を一切排除する Water Injection (淡水注入) の対策	 カルシウムリッチな海水条件では注入が困難である。 塩水環境下では、複雑な挙動を示すことを実験的に把握したが、そのメカニズムなどは解明されていない。 現状では Water injection を対策として整備しているが、より最適な「施工手法の確立」が必要である。

表 2.5-1 溶液型グラウトの各国の取り組みならびに課題

This is a blank page.

2.6 まとめ

2.6.1 各節の調査結果のまとめ

表 2.6-1 に、各節のまとめを示す。北欧での施工対策や設計対応策を見据えながら、日本の倉敷で実践されている配合調整による対策、またその特性把握が重要な課題であることが判明した。

	公 2.0 1 明直相不006000
節	各節の調査結果のまとめ
2.2 地層処分のための溶液型グラウ ト技術の概要	 地層処分のための溶液型グラウト技術が国内外で研究開発・実証・適用されてきた経緯をまとめた。 いずれの実績においても、海水条件下での固化のメカニズムやその基礎物性の詳細は不明であり、具体的な施工方法も未確立である。また、溶液型グラにおける材料への影響については未知の部分が多い。 従って、今回の溶液型グラウトの研究に先立ち、上述した既往知見や文献なども含めて、最新知見をメインに塩水環境や海水条件下の切り口で溶液型グ理する必要があると言える。
<u>2.3</u> 既存文献の調査	 【欧文の知見のまとめ】 R.K. Hor によると、コロイグルシリカ溶液は、酸性側に調整することにより、塩水条件によるグル化の影響を低減できることが考えられる。 エスボ HRLでは、セメン・グラウトと溶液型グラウトを確用したプレダンの実施結果について触れられているが、塩水環境で特に問題視されて 最新知見として、スウェーデンでは環化促進剤の個イオンの確範(KrまたはNat)に着目した耐火性気酸が実施されており、Krの方がより数密なホモゲ ている。また、シリカやイオンが溶脱しても 130 日程度では透水性に変化がないことを明られて、引続き試験を継続中である。 香港の海底レンネルではノルウェーの業者が溶液型グラウトと溶液型ケラウトがGaPに急激に反応する知見が得られている。(9,200 L/min/100 m の大 オンカロの処分深度では非常に CaPが多い地下水である。溶液型グラウトがGaPに急激に反応する知見が得られている。+分な注入浸炭があれば、注入 透洗瓶が中しないからいも裂が注入できないことが懸念されていた。 オンカロの処分深度では非常に CaPが多い地下水である。溶液型グラウトがGaPに急激に反応する知見が得られている。+分な注入浸炭があれば、注入 透洗瓶が中しないからいも裂が注入できないことが懸念されていた。 オンカロの処分深度では非常いの塩気が注入できないことが懸念されていた。 オンカロでは、ホンネル断面内にだけ注入れを設けた区間では大変から淡水があり、パッカーを外したときの自我リークなどその不確実性が問題視えれ が起きない」という仮説を否定するものであった。 そこで、オンカでは、進水条件下の対策として、地下水の塩分の影響を排除するためにグラウチング前の「Freab Water Injection (派水上注): 4型の水川は類しバルタイムの低圧注入、タイトな孔は長いゲルタイムの高圧注入を実施し、この手法が有効であったとされている。 オンカロでは、進水条件下の対策として、地下水の塩分の影響を推除するためにグラウチング前の「Water Injection (派水注): 4型の水川は洗いケルタイムの高圧注入を実施して、シモルシャン(本): 40%の水用(地転): 40%の注意): 40%の水用(地転): 40%のためまた): 40%の水用(地転): 40%の水用(地転): 40%の水用(地転): 40%の水用(地転): 40%の水用(地転): 40%の水用(地転): 40%の水用(本): 40%の水用(地転): 40%の水用(本): 40%のた): 40%のた: 40%の(本): 40%のた): 40%のた: 40%のた: 40%のた: 40%のた: 40%のた: 40%の(A0%の大): 40%のた: 40%の: 40%のた: 40%の: 40%の: 40%0: 4
2.4 最新知見の収集	 【ワークショップ】 POSIVAではオルキルオトの処分場で、化石水の上昇を防ぐことなどから、施設全体の湧水量をできる限り制限し、坑道ごとの非常に厳しい許容湧水量、 岩盤の低 pH な環境を維持し、有機物を残さず、高水圧下の処分坑道や処分孔周辺において湧水量を低減する必要がある中で、溶液型グラウトは必要不可 グラウチングはプレグラウチングでトンネル断面内に注入孔を設ける方針である。 断面内からの注入で止水できない場合は、亀裂・断層帯の上流側から止水する方針である。 フィンランドのコンサルの試験結果からは、海水環境下では溶液型グラウトの浸透距離が頭打ちし、一種にしてゲル化する可能性があるため、Fresh Wa として実施している。 Water injection は、微細亀裂の確実な注入ができたとしても、理論的な設計に基づいておらず、施工時間(施工費)が増えて合理的でない点をスウェーー 海水環境下で溶液型グラウトを適用するのがどう問題なのか(具体的に浸透距離が定量的にどれだけ影響を受けるか、海水条件下でのグラウト浸透距離 で実験的に把握して設計に返すことが重要である。 また、日本で開発されている手法(pH を酸性側に調整)がスマートとで、設計に影響を与えないので良い方法と考えられる。 室内実験で見極めて、不確実性を下げた合理的な対策が必要である。 【オンカロの視察】 残念ながら直前のトラブルにより入坑が許可されなかったが、同等の岩盤からなる VLJ(中低レベル放射性廃棄物処分場)ならびにその処分深度に併設さ を見学した。

表 2.6-1 調査結果のまとめ

ウトの周辺岩盤への影響や海水条件下 、ラウト技術の調査を実施し、課題を整

ていない。 ゲルができる可能性がある知見が得られ

量湧水区間⇒1.0 L/min/100 m) 、に支障がないが、注入流量が小さく浸

た。 た。これは、「グラウトと地下水の混合

押し洗浄)」の手法が開発され、さらに

D手法を開発し、さらに亀裂の多い孔は 注入圧:80~90 bar、注入時間:Water かを予め除去できるため、確実かつ非常

これにより、自孔リークが発生せず、

5水の水質・水温、施工場所の気温など われている。 とめ、強酸性の pH 調整剤が添加されて 0 年間)ホモゲル強度が増進すること、 4 年近く改良体ブロックの止水効果が確 9.99%)にまでほぼ完全にドライになる 時間養生が確実な止水に寄与する可能性 の強度特性が低下しないことが分かって

が定められている。 可欠な材料である。

Vater Injection(淡水注入)を主な対策 -デンの Funehag 先生が懸念している。 進の補正率の取得など)を亀裂平板など

れているオンカロリサーチギャラリー

2.6.2 課題の整理

既存文献の調査ならびにグラウトワークショップで得られた知見から、今後の溶液グラウトの 開発にあたり、表 2.6-2 のとおりに課題を整理した。日本、スウェーデン、フィンランドのそれ ぞれ対策から課題となるポイントが配合選定手法、理論的な設計手法、施工対策手法と大きく区 分されたと考えられる。そこで、塩水環境下では挙動が複雑で、課題が多いとされている中、1つ の手法に依るのではなく、最終的には各国の対策を把握して、ハイブリッドに適切な設計施工の 体系を構築するのが望ましいと考えられる。

国名	取り組み	課題
日本	pH 調整剤を用いた海水へ の感度を下げる対策(倉敷 LPGの実績)	 ・淡水~海水条件下における場合との差異などジェネリックに練混ぜ水の幅を持たせて、その特性を取得し、適用範囲なども把握する。 ・海水環境下における最適な「配合選定手法の確立」が必要である。
スウェーデン	基本的には海水条件であっ ても設計で対応	 海水条件下によりグラウト設計が受ける不確定要素の解明が必要である。 平行平板など室内実験により現象を把握し、塩水環境下での溶液型グラウトの浸透距離の補正率の算出などを取得するのが望ましい。 「塩水環境下での理論・設計手法の確立」、「耐久性の把握」が必要である。
フィンランド	海水条件を一切排除する Water Injection (淡水注入) の対策	 カルシウムリッチな海水条件では注入が困難である。 塩水環境下では、複雑な挙動を示すことを実験的に把握したが、そのメカニズムなどは解明されていない。 現状では Water injection を対策として整備しているが、より最適な「施工手法の確立」が必要である。

表 2.6-2 溶液型グラウトの各国の取り組みならびに課題

3. 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得

3.1 概要

「2. 既存の知見及び課題の整理」の結果を踏まえて、海水条件下での溶液型グラウト特性デー タを室内試験により取得する。粘性、硬化時間、強度、塩分濃度、pH 調整、添加剤などに着目し て、各々3~5 種類のパラメータを振った条件によりデータを取得する。

具体的には、グラウト注入環境が海水条件となる可能性や、海水を用いてグラウトを練混ぜる ことの実現性などを考慮し、練混ぜ水の種類、ゲルタイムを調整するための添加剤の種類や量を 変えてゲルタイムを把握することで適切なゲルタイムを実現するための基本配合を決定し、その 基本配合で練混ぜたグラウトの施工性に係わる特性および硬化後のホモゲルの安定性に係わる特 性を取得する。図 3.1-1 に本試験の一覧フローを示す。



図 3.1-1 試験の一覧フロー

3.2 実施スケジュール

表 3.2-1 に溶液型グラウトの特性データを取得する室内実験の実施スケジュールを示す。

今年度(平成28年度)の検討では、計画した3種類の大項目のうち、基本物性の把握および施工性・止水性(ゲル化特性)の把握の2つについて全ての試験が終了した。

長期安定性(力学的、化学的安定性)の把握については、最大2年間の長期間のデータ取得となるため、平成30年度末頃まで試験が継続する計画である。

表 3.2-1 溶液型グラウトの特性データ取得(室内実験)の実施スケジュール

	2	平成2	8年度		平成2	9年度	E	平成3	0年度	
海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得										
基本物性の把握 添加剤を変化させたゲルタイム測定試 験による基本配合の取得 強度試験										
施工性・止水性(ゲル化特性)の把握 地下水との接触による白濁試験 粒径の経時変化測定試験 粘性の経時変化測定試験 温度影響の測定試験										
長期安定性(力学的、化学的安定性)の把握 ホモゲル長期力学的安定性確認試験 ホモゲル長期化学的安定性確認試験										

3.3 基本物性の把握

ここでは、ゲルタイムが 60 min および 120 min となる基本配合を練混ぜ水の種類(人工海水、 50%人工海水、精製水)ごとに設定し、設定した基本配合のホモゲルに対して力学試験を実施し て、その基本物性を把握した。

3.3.1 添加剤を変化させたゲルタイム測定試験による基本配合の取得

(1) 配合の考え方

コロイダルシリカに硬化促進剤(粒状)を溶解させた溶液(B液と呼ぶ)を混合すると、ゲル 化に向けた反応が始まり、一定時間経過した時点でゲル化が完了する。ゲル化するまでの時間、 すなわちゲルタイムは硬化促進剤の添加量により異なる。B液を作製するための液体(練混ぜ水) は、通常、真水に近い工事用水が用いられる。

ゲルタイムはコロイダルシリカの pH を変えることで調整することもある。pH を変えるために は、あらかじめコロイダルシリカに pH 調整剤を添加する。pH 調整剤を加えたコロイダルシリカ 溶液を A 液と呼ぶ。図 3.3-1 は、A 液と B 液を混合した溶液型グラウトの製造イメージを示す。

練混ぜ水の性状が違えば、硬化促進剤や pH 調整剤の添加量が同じでも、ゲルタイムが異なり、 ゲル化した時のホモゲル(グラウト硬化体)の特性も異なる。ここでは、練混ぜ水に海水を用い た場合を想定し、練混ぜ水の性状によるゲル化特性を把握するとともに、所定のゲルタイムを示 す配合条件(基本配合)を設定する。



図 3.3-1 海水条件下を考慮した溶液型グラウトの配合の考え方

(2) 使用材料と設定する基本配合

使用した材料は、表 3.3-1 に示すとおりである。3 種類の練混ぜ水ごとに、硬化促進剤および pH 調整剤の添加量を変え、ゲルタイムを測定する。グラウト中のパーマロック Hi シリカの容積 割合は 80%で固定条件とする。これはメーカー推奨値であり既往実績などでも同条件となってい る。すなわち、グラウト1Lを作製するのに 800 mL のパーマロック Hi シリカを使用する。得ら れた結果を用いて、3 種類の練混ぜ水ごとに、2 種類のゲルタイム(60 min、120 min)に対応す る基本配合(6 種類)を表 3.3-2 のとおり設定した。

ゲルタイムについては日本では 35~120 min の幅広いゲルタイムでの検討が進められてきた⁴⁾ が、北欧の合理的な注入設計の観点では 60 min 未満のゲルタイムが主流になっている。このよう な観点から、本研究ではゲルタイム 60 min を標準と考え、ゲルタイム 120 min は日本の過去の 研究^{13),32),33)}と比較するための設定と考えた。

材料名	商品名	説明	
活性コロイダル	パーマロック Hi シリカ	・半透明の液状	各材料の
シリカ	(強化土エンジニヤリング製)	・主成分:SiO ₂ 30.6%	写真は図
		Na ₂ O 含有量<0.6%	3.3-2 参照
		pH 9∼10	
硬化促進剤	アクターN	・粒状	
	(強化土エンジニヤリング製)	・ 主成分:KCl	
pH 調整剤	アクターM	・無色透明の液状	
	(強化土エンジニヤリング製)	・主成分:H ₃ PO ₄	
		pH <1	
練混ぜ水	3 種類:	・無色透明の液状	
	・人工海水		
	(金属腐食試験用アクアマリン:八洲薬品製)		
	・50%人工海水		
	・精製水		

表 3.3-1 溶液型グラウトの構成材料

表 3.3-2 設定する6種類の基本配合

基本配合名	練混ぜ水	ゲルタイム (min)	設定項目
S-60	人工法学	60 注)	グラウト 1L に対する
S-120	入工毋小	120	・硬化促進剤量(g)
M-60		60 注)	・pH 調整剤量(mL)
M-120	50%人工/伊尔	120	
D-60	本生生	60 注)	※パーマロック Hi シリカの 800 mL
D-120	相聚小	120	は固定条件

注) ゲルタイム 60 min を標準仕様とした。



図 3.3-2 グラウトの構成材料:活性コロイダルシリカ(左),硬化促進剤(中),pH調整剤(右)

(3) ゲルタイム試験の方法

ゲルタイムの測定方法は図 3.3-3 に示す手順で行った。





(4) ゲルタイム試験(その1)

3 種類の練混ぜ水に対して、それぞれ硬化促進剤と pH 調整剤の添加量を変えてゲルタイムを 測定した。硬化促進剤は 3 水準(15,10,5 g/L)、pH 調整剤は 4 水準(6,4,2,0 ml/L) である。な お、硬化促進剤の単位はすべての添加剤を加えたのちのグラウトの体積に占める粉体としての硬 化促進剤の質量を示しており、pH 調整剤の単位は同様に最終的なグラウトの体積に占める溶液 としての pH 調整材の体積を示している。表 3.3-3 および図 3.3-4 に試験結果を示す。

pH 調整剤を添加することでグラウトの pH を低下することができる。pH 調整剤を添加しない 場合のグラウトは pH9 前後である。pH 調整剤を 2 ml/L 刻みで添加することによる pH 低下の効 果は、練混ぜ水の種類や硬化促進剤の添加量によっても若干異なるが、pH 調整が 2 ml/L の場合 で pH8 前後、4 ml/L で pH 6.5 前後、6 ml/L で pH5.5~6 である。

硬化促進剤の添加量がゲルタイムに与える影響については、練混ぜ水の種類にかかわらず、添 加量が多くなればゲルタイムが短くなる傾向があるが、その効果については練混ぜ水の種類に依 存する。すなわち、硬化促進剤が同じであれば、練混ぜ水が精製水の場合より人工海水の場合の 方のゲルタイムが短い。人工海水には塩化ナトリウムや塩化マグネシウムなどの塩が多く含まれ ており、これが硬化促進剤と同じ硬化を生み出しているためと考えられる。

一方、pH 調整剤の添加量がゲルタイムに与える影響については、練混ぜ水が精製水の場合には pH2~4程度のグラウトが中性を示す領域でゲルタイムが最も短くなり、下に凸の傾向を示すが、 練混ぜ水が人工海水の場合には、このような傾向はみられず pH 調整剤が少ないほどゲルタイム が短い傾向を示した。特に、人工海水の場合で pH 調整剤を添加しない場合は、ゲルタイムが数 分程度と非常に短く、グラウトに適正なゲルタイムである 60~120 min をコントロールする目的 には適さないと思われる。

このように、ゲルタイムを調整するためには、硬化促進剤と pH 調整剤の添加量をそれぞれ調 整する必要があり、その効果の傾向は硬化促進剤が練混ぜ水の違いによらないのに対して、pH 調 整剤は練混ぜ水の種類に依存していることがわかった。

	試験条件	試験結果			
(生)日 12-14	硬化促進剤	pH 調整剤	TT	ゲルタイム	
裸氓也水	(g/L)	(ml/L)	рН	(min)	
		6	5.95	90	
	1 5	4	6.49	58	
	15	2	7.75	53	
		0	9.02	117	
		6	5.61	209	
小主集日二人	10	4	6.59	136	
有聚水	10	2	7.78	265	
		0	9.16	2,225	
		6	5.91	384	
	-	4	6.73	515	
	G	2	8.12	48 h 以上	
		0	9.40	48 h 以上	
		6	5.84	77	
	1 -	4	6.37	44	
	15	2	7.74	23	
		0	8.81	8	
	10	6	5.61	159	
		4	6.50	83	
50%人上海水		2	7.48	81	
		0	8.90	54	
	_	6	5.62	290	
		4	6.50	242	
	G	2	7.59	872	
		0	9.06	1,541	
		6	5.77	82	
	1 -	4	6.48	37	
	15	2	7.40	17	
		0	8.63	1	
		6	5.46	193	
	10	4	6.56	59	
人工海水	10	2	7.42	39	
		0	8.70	3	
		6	5.36	308	
	-	4	6.34	168	
	5	2	7.62	181	
		0	8.79	23	

表 3.3-3 ゲルタイム試験(その1)の試験結果



(5) ゲルタイム試験(その2)と基本配合の設定

目的とするゲルタイムとして設定している 60 min もしくは 120 min の基本配合を設定するに あたって、これまでの試験結果より pH 調整剤を4ml/Lに固定して硬化促進剤の添加量でゲルタ イムを調整することが、練混ぜ水の違いの影響を少なくできると考えた。加えて、3.4.1 に示す白 濁試験では、pH 調整剤を添加しない場合や2 ml/L だけ添加した場合には、白濁現象が発生して グラウトの施工性に懸念があることも示されている。

このため、pH 調整剤を4 ml/L に固定して、追加で数点の硬化促進剤の添加量を変えたゲルタ イム試験を実施した。図 3.3-5 にゲルタイム試験(その2)の結果を示す。図 3.3-6 は、この結果 を再整理したものである。この図より、練混ぜ水の種類ごとに設定する基本配合を表 3.3-4 に示 すように決定した。



図 3.3-5 ゲルタイム試験(その2)の試験結果



図 3.3-6 pH 調整剤を 4ml/L に固定した場合の硬化促進剤量とゲルタイムの関係

配合名.	練混ぜ水	設定 ゲルタイム (min)	pH 調整剤 (ml/L)	硬化促進剤 (g/L)
D-60	生ました	60		15.0
D-120	相殺小	120		11.0
M-60	500/ 人工海水	60		13.0
M-120	50%八工(伊八	120	4	8.5
S-60	人工海水	60		11.0
S-120	八工碑小	120		6.5

表 3.3-4 設定した6種類の基本配合

3.3.2 強度試験

設定した 6 種類の基本配合のホモゲル(グラウト硬化体)に対して強度試験を行い、基本的な 強度特性および海水を練混ぜ水として用いたことによる影響を把握した。強度試験として 3 種類 の試験(一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、ベーンせん断試験)を行った。一軸圧縮試験は 6 種類の 基本配合に対して実施したが、三軸圧縮試験およびベーンせん断試験は標準仕様のゲルタイムで ある 60 min の配合のみで試験を実施した。実施した基本配合と材齢を表 3.3-5 に示す。

副会々は泪北水がれ		設定	強度試験				
配合名.	練施セ水	<i>リルタ</i> イム (min)	一軸圧縮試験	三軸圧縮試験	ベーンせん断試験		
D-60	业主告ロート	60	•	•	•		
D-120	有聚小	120	•	—	_		
M-60	50%人工	60	•	•	•		
M-120	海水	120	•	—	—		
S-60	レーン海水	60	•	•	•		
S-120	八上/毋小	120	•	—	_		
材齢			3 材齢: 1 7 28	上日 7日 3日	4 材齢: 6 時間 1 日 2 日 3 日		

表 3.3-5 強度試験の種類, 試験ケースおよび材齢

(1) 一軸圧縮試験

設定した 6 種類の基本配合のホモゲル (グラウト硬化体) に対して一軸圧縮試験を行った。供 試体は直径 50 mm、高さ 100 mm の円筒供試体を用いた(図 3.3・8)。圧縮は 1 %/min(1 mm/min) のひずみ速度で行った。図 3.3・7 に試験結果を示す。材齢が進むにつれて一軸圧縮強度は大きく なる。ゲルタイムが 60min の配合は、ゲルタイムが 120min の配合よりも一軸圧縮強度が大きい。 すなわち、ゲル化までに時間がかかる配合の方が一軸圧縮強度は小さく、その傾向は材齢が 28 日 時点でも同様である。練混ぜ水の種類が一軸圧縮強度に与える影響は、時間の経過とともに強度 が増加する現象と比べると大きくはない。練混ぜ水が精製水の場合の一軸圧縮強度が最も小さく、 最も大きいのは、人工海水の場合ではなく、50%人工海水の場合である。練混ぜ水の塩分濃度に 対して相関性が認められないことから、今回の試験で得られた練混ぜ水の種類による一軸圧縮強 度の違いは、供試体作製などの試験のバラツキによるものと思われる。



図 3.3-7 基本配合(6種類)の一軸圧縮試験結果



図 3.3-8 ホモゲルの円筒供試体(左)および一軸圧縮試験(中央・右)の模様

(2) 三軸圧縮試験

設定した6種類の基本配合のうち、ゲルタイムを60minに設定した3種類の基本配合(D-60、M-60、S-60)のホモゲル(グラウト硬化体)に対して三軸圧縮試験を行った。供試体は、一軸試験に用いたものと同様に直径50mm、高さ100mmの円筒供試体を用いた。拘束圧は、50kPa、100kPa、150kPaの3水準とした。圧縮は1%/min(1mm/min)のひずみ速度で行った。

表 3.3・6 に試験によって得られた破壊時の軸方向応力(最大軸方向応力)を示す。図 3.3・9 は この結果をモールの応力円として示した。すべての配合、すべての材齢において、側圧を変えて もモールの応力円の大きさは変わらないことがわかる。これはホモゲルの強度が側圧によらず、 軸差応力で決定される材料であることを示している。この場合、モールの応力円の半径は、せん 断強度を示しており、三つの側圧で得られたせん断強度を平均して各配合、各材齢のせん断強度 を求め、図 3.3・10 に示した。なお、S・60 の側圧 150 kPa の試験結果は、あきらかに小さい値を 示しており、供試体作製時の不具合などが考えられたため、せん断強度を算出するデータとして 用いなかった。図 3.3・10 から、せん断強度は材齢が進むにつれて大きくなる傾向があり、練混ぜ 水の違いによる影響はないことがわかる。

配合名	材齢	側圧(kPa)				
		50	100	150		
	1日	77.6	131.2	175.3		
D-60	7 日	97.3	147.2	195.8		
	28 日	128.3	184.2	234.8		
	1 日	80.2	125.8	175.6		
M-60	7 日	94.7	152.5	196.8		
	28 日	129.8	184.0	234.8		
S-60	1 日	77.3	128.3	162.3		
	7日	96.0	149.3	192.8		
	28 日	128.0	176.1	220.9		

表 3.3-6 三軸圧縮試験で得られた破壊時の軸方向応力



図 3.3-10 ホモゲルのせん断強度の時間変化

(3) ベーンせん断試験

基本配合ごとにベーンせん断試験を行い、配合後の経過時間に伴うせん断強度の変化を確認した。図 3.3-11 に示すような幅 1 cm、高さ 2 cm の十字型の羽根(ベーン)のついた試験機を用いた。試験状況を図 3.3-12 に示す。





図 3.3-11 ベーンせん断試験機



図 3.3-12 ベーンせん断試験の様子(左:供試体,右:試験状況)

試験機を供試体へ貫入時のトルクの最大値を計測し、式 3.3-1 によりせん断強度に換算した。 表 3.3-7 に試験結果を示す。図 3.3-13 は、各配合におけるせん断強度の時間変化を示したもので ある。せん断強度は、練混ぜから1日経過までは急激に増加するが、その後は増加が緩やかにな る。また、練混ぜ水の違いによる影響は、一軸圧縮試験、三軸試験より得られた強度と同様に、 明確には判断できないと考えられる。

$$\tau_{s} = \frac{T_{\max}}{\frac{\pi D^{3}}{6} + \frac{\pi D^{2} H}{2}}$$

$$\tau_{s} : せん断強度(Pa)$$

$$T_{\max}: 最大トルク(N \cdot m) \cdots 式 3.3 \cdot 1$$

$$D: 羽根の幅(m)$$

$$H: 羽根の高さ(m)$$

	D	-60	I	M-60	S-60		
基本配合名	トルク	せん断強度	トルク	せん断強度	トルク	せん断強度	
	$(cN \cdot m)$	(kPa)	$(cN \cdot m)$	(kPa)	$(cN \cdot m)$	(kPa)	
6時間後	3.00	8.2	3.00	8.2	2.50	6.8	
1日後	5.50	15.0	5.75	15.7	4.75	13.0	
2日後	5.75	15.7	5.75	15.7	5.00	13.6	
3日後	6.50	17.7	6.50	17.7	5.75	15.7	

表 3.3-7 ベーンせん断試験結果



図 3.3-13 せん断強度の時間変化

3.3.3 まとめ

2 種類の硬化促進剤をそれぞれ変化させてゲルタイムを測定し、練混ぜ水の種類ごとにゲルタ イムが 60 min および 120 min となる基本配合を設定した。また、基本配合のホモゲルの短期的 な強度を 3 種類の力学試験を実施して確認した。以下に、これらの試験で得られた知見を列挙す る。

- 海水条件下でのグラウト特性データを取得する目的に対して、練混ぜ水として人工海水、精製水、その中間の性質を示す練混ぜ水として 50%人工海水(人工海水と精製水を1:1 で混合)、の3種類を選定した。
- 3 種類の練混ぜ水を用いて、硬化促進剤および pH 調整剤の添加量を変えゲルタイムを測定したところ、同じゲルタイムを実現するためには、練混ぜ水の種類に応じて添加剤の量を変える必要があることがわかった。
- 3 種類の練混ぜ水ごとにゲルタイムが 60 min および 120 min となる添加剤量(硬化促進剤, pH 調整剤)を設定し、計 6 種類の基本配合を設定した。
- 基本配合のホモゲルを作製し、短期的な力学強度を把握する目的で、一軸圧縮試験、三軸圧 縮試験およびベーンせん断試験を実施した結果、最大28日までの材齢において、力学強度が 時間とともに増加する傾向は、練混ぜ水の種類に依存しないことが判明した。
- すなわち、pH 調整剤を用いる本手法に拠れば練混ぜ水として海水を用いることは、基本物性 に影響を与えることはなく、有意な問題点が見つからなかった。

3.4 施工性・止水性(ゲル化特性)の把握

3.4.1 地下水との接触による白濁試験

塩分濃度の高い海水系地下水と接触して急激にゲル化(白濁現象)した場合、岩盤の微小亀裂 への浸透性が低下することが考えられ、基本配合の設定にあたっては白濁現象が発生しない配合 を選定する必要がある。このため、硬化促進剤および pH 調整剤の添加量を変化させ白濁試験を 実施した。図 3.4-1 に白濁試験の方法を示す。A 液と B 液を混合し溶液型グラウトを作製したの ち、速やかに少量のグラウトを注射器にて接触水の中に垂らす。接触水には人工海水と50%人工 海水の2種類を用いた。

図 3.4-2~図 3.4-4 に白濁試験の模様を、表 3.4-1 に試験結果のまとめを示す。練混ぜ水の種 類、硬化促進剤の添加量にかかわらず、pH 調整剤を添加しない場合は白濁現象が発生した。また、 練混ぜ水が精製水、接触水が人工海水であった場合は、pH 調整剤を2 ml/L 添加したグラウトで は白濁現象に近く、接触水がわずかに濁る現象が起きた。pH 調整剤が4ml/L以上では、すべて のケースにおいて白濁現象は発生しなかった。図 3.3-4 に示したように、pH 調整剤を添加しない グラウトは pH9 程度のアルカリ性であり、pH 調整剤を添加することで酸性方向に改質すること ができ、pH 調整剤が 2~4 ml/L の間でアルカリ性から酸性に変わるので、溶液型グラウトの pH を酸性側にすれば、白濁現象が発生しないことが分かった。





図 3.4-2 精製水で練混ぜた溶液型グラウトによる白濁試験結果の模様



図 3.4-3 50%人工海水で練混ぜた溶液型グラウトによる白濁試験結果の模様



図 3.4-4 100%人工海水で練混ぜた溶液型グラウトによる白濁試験結果の模様

表 3.4-1 白濁試験結果のまとめ

(○:白濁しない, △:微かに白濁, ×:白濁)

		接	触水				
		50% 人工海水	人工海水				
	精製水	pH調整剤 (ml/L) (1/3) 0 2 4 6 〒 5 × 0 0 0 戦 10 × 0 0 0	pH調整剤 (ml/L) (1/8) 0 2 4 6 〒 5 × △ ○ ○ 型 10 × △ ○ ○				
		◎ ⁻ pH調整剤 (ml/L)	◎ ^p H調整剤 (ml/L)				
練り混ぜ水	50%人工海水	B 0 2 4 6 酸 5 × O O 取 10 × O O 15 × O O	B 0 2 4 6 受 5 × O O 5 × O O 210 × O O 15 × O O				
	人工海水	pH調整剤 (ml/L) 0 2 4 6 興型10 × 0 0 0 型15 × 0 0 0	pH調整剤 (ml/L) 0 2 4 6 〒 5 × 0 0 0 型 10 × 0 0 0 型 15 × 0 0 0				

- 55 -

3.4.2 粒径の経時変化測定試験

ゲル化するまでの溶液型グラウトの粒径分布を動的光散乱法により測定した。測定試料はゲル タイムが 60 min の 3 種類の基本配合(D-60, M-60, S-60)とし、練混ぜからゲル化までの間 に 5~6 回の測定を行い、ゲル化にともなう粒径の変化を確認した。測定にはゼータサイザーナノ -ZS (Malvern Instruments 社製)を用いた。図 3.4-5 に試験装置に試料を装着する様子を示す。

図 3.4-6 に試験結果を示す。溶液型グラウトの練混ぜ直後の粒径は 10~50 nm 程度にほとんど の粒径が含まれている。5 min 後のピーク粒度は練混ぜ水の違いによらず、13.54 nm を示してい る。時間の経過にともなって粒径が大きくなっていく傾向を示すが、その変化はわずかである。 例えば、練混ぜ水が精製水の場合(D-60)では、ピーク粒度は 34 min 後でも 21.04 nm を示して いる。他の 2 つの基本配合(M-60, S-60)の場合も同様である。ただし、ゲルタイムに近くな ると 10 nm 以下の粒径を示すようになるが、これはゲル化が進行し粒径の測定ができなくなって いるものと考えられる。



図 3.4-5 試験に用いた粒径分布測定装置(ゼータサイザーナノ-ZS)



3.4.3 粘性の経時変化測定試験

基本配合の溶液型グラウトの粘性は回転型レオメーターを用いて測定した(図 3.4-7)。測定試料はゲルタイムが 60 min の 3 種類の基本配合(D-60, M-60, S-60)とし、練混ぜからゲル化までの間に 5~6 回程度の測定を行い、ゲル化にともなう粘性の変化を確認した。測定には Physica MCR-301 (Anton Paar 社製)を用いた。



図 3.4-7 レオメーター (Physica MCR-301) の全景 (左), 測定状況 (右)

各測定においては、せん断速度を変えながら、せん断速度に応じたせん断応力を測定し、図 3.4-8 に示すような流動曲線を取得する。せん断速度が 0.01~200 1/s の間において、対数間隔で 段階的に大きくして 60 点のアップカーブを取得したのちに、200 1/s から小さくして同様のダウ ンカーブを取得する。1 点を1 秒で計測しているため、1 組のアップカーブとダウンカーブを得る のに 2min を要する。それぞれの基本配合に対して、練混ぜからの測定時間を変えて、数点の流 動曲線を取得した。

図 3.4-8 に示すように、練混ぜ直後には流動曲線は直線に近く、ニュートン流体的な挙動を示 すことがわかる。しかし、ゲル化が進むにつれて曲線的な挙動を示すようになる。この傾向は、 他の2種類の基本配合(D-60, M-60)についても同様であった。

図 3.4-9 にゲル化にともなうせん断粘度の変化を3種類の基本配合(D-60, M-60, S-60)について示す。せん断速度とせん断応力の傾きであるせん断粘度は、ニュートン流体ではせん断速 度に依存せず一定値を示すが、ゲルタイムに近くなるとせん断速度に依存するため、図 3.4-8 (d) の破線で示したようにせん断速度 200 1/s の時点でのせん断粘度をその経過時間でのせん断粘度 とした。

図 3.4-9 より、ゲル化に伴い、せん断粘度は次第に上昇し、その変化は 40 min (60 min のゲ ルタイムの 2/3 の時間)を過ぎたあたりから顕著であることがわかる。練混ぜ水の異なる 3 種類 の基本配合のすべてで同じ傾向であることから、練混ぜ水の違いによる粘性の変化に違いはない と言える。



図 3.4-8 ゲル化の進展に伴う流動曲線の変化(S-60)



図 3.4-9 ゲル化の進展に伴うせん断粘度の変化(D-60, M-60, S-60)

3.4.4 温度影響の測定試験

練混ぜ温度が変わった場合のゲルタイムおよびゲル化後の強度特性(一軸圧縮強度)の変化を 調べた。基本配合6種類に対して、高温側(35 ℃)と低温側(10 ℃)の練混ぜ温度でゲルタイ ム試験を行った。また、高温側(35 ℃)と低温側(10 ℃)で練混ぜ、同温度で養生したホモゲ ルに対して一軸圧縮試験を行った。なお、養生水は練混ぜ水と同じものを用いた。

表 3.4-2 にゲルタイム試験の結果を示す。図 3.4-10 および図 3.4-11 は、設定ゲルタイムが 60 min と 120 min の場合に区分し、横軸に練混ぜ温度を縦軸にゲルタイムを示した。なお、練混ぜ 温度 20 ℃のプロットは実験値ではなく、設定ゲルタイムである 60 min (図 3.4-10)、120 min (図 3.4-11) である。ゲルタイムは、高温側で練混ぜると設定値より短くなり、低温側では長くな ることが分かった。図 3.4-10 で示す 3 つのグラフを比較すると、練混ぜ水が精製水、50%人工海 水、人工海水で異なる場合の明らかな違いは見られない。図 3.4-11 においても同様のことがいえ る。図 3.4-12 に材齢 1 日と材齢 7 日で取得したホモゲルの一軸圧縮強度を示す。低温側 (10 ℃) では一軸圧縮強度は若干小さく、高温側 (35 ℃) では 2 倍程度大きいことがわかる。このような 温度依存の傾向は材齢、また練混ぜ水の違いによらず認められることが分かった。

配合名.	練混ぜ水	設定	ゲルタイム (min)	
		ゲルタイム (min)	10 ℃練混ぜ	35 ℃練混ぜ
D-60	·精製水	60	99	18
D-120		120	190	30
M-60	50%人工	60	122	19
M-120	海水	120	216	28
S-60	人工海水	60	125	16
S-120		120	231	29

表 3.4-2 練混ぜ温度の違いとゲルタイム







図 3.4-11 基本配合(ゲルタイム 120 min)の練混ぜ温度の違いによるゲルタイムの変化





(c) 練混ぜ水が人工海水の場合

図 3.4-12 練混ぜ温度の影響による力学強度の違い
3.4.5 まとめ

練混ぜ水が異なる溶液型グラウトの施工上の留意点を明らかにするために、4 種類の試験を実施した。以下に、これらの試験で得られた知見を列挙する。

- 白濁試験では、3 種類の練混ぜ水によるグラウトを海水環境の地下水に接触させ、急激にゲル化(白濁)しない配合を把握し、前節の基本配合の設定へフィードバックした。
- 粒径の経時変化測定試験では、ゲル化前のグラウトの粒径の時間的変化を、ゲルタイム 60 min の 3 種類の練混ぜ水の基本配合に対して、動的光散乱方式により確認した。この結果、40 min 程度経過までは粒径のピークが 20~40 nm と非常に微小な粒径で推移していることがわかった。この傾向は練混ぜ水として海水を用いた場合も精製水の場合もほぼ同じであり、練混ぜ水の種類は粒径の変化に影響を与えなかった。
- 粘性の経時変化測定試験では、ゲル化前のグラウトの粘性変化を、回転型レオメーターを用いて測定した。40 min (ゲルタイムの 2/3) 程度までは非常に小さいニュートン流体挙動を示しており、粘性の増加傾向に練混ぜ水の違いは確認できなかった。
- 温度影響の確認試験では、グラウト温度 20 ℃を基準として、低温側(10 ℃)と高温側(35 ℃) に変わることによる影響を、ゲルタイムとホモゲルの短期的な力学強度に着目して確認した。 低温側(10 ℃)ではゲルタイムは短くなり、高温側(35 ℃)ではゲルタイムが長くなるこ とがわかった。同様な温度で養生したホモゲルの最大 7 日材齢の力学強度については、低温 側は基本温度に対して若干小さい一軸圧縮強度を示し、高温側は 2 倍程度大きい一軸圧縮強 度を示した。このような温度依存性の傾向は、練混ぜ水が変わっても同じであった。

3.5 長期安定性(力学的、化学的安定性)の把握

3.5.1 ホモゲル長期力学的安定性確認試験

材齢の経過とともに溶液型グラウトの強度が増加することを確認するとともに、練混ぜ水の違いが強度発現に与える影響を、長期間養生した供試体を用いて一軸圧縮試験で確認する。

養生期間は最大2年間を想定している。20 ℃標準養生の供試体に対しては、基本物性の把握と して図 3.3-7 に材齢 28 日までの3 材齢の結果を示している。同一時期に養生を開始した供試体 に対して、来年度以降、長期安定性試験として適切な間隔(材齢 2,3,6,12,18,24 か月の6 材齢を 計画)で一軸圧縮試験を実施する予定である。

加えて、養生温度を 55 ℃とした促進養生の供試体についても、最大で 2 年間の養生で一軸圧 縮試験(来年度以降, 28 日, 2,4,6,12,18,24 か月の 7 材齢の計画)を実施する。55 ℃促進養生の 供試体については、本年度は材齢 1 日と 7 日の一軸圧縮試験を実施した。試験対象は 20 ℃標準 養生、55 ℃促進養生ともに 6 種類の基本配合である。

促進養生の考え方は加賀(2000)³⁹⁾の研究で示された概念であり、溶液型グラウトを注入した 固結砂において、時間の経過にともなう強度増加挙動を、養生温度を上げることで短時間に確認 できるというものである。温度に比例して約5~60倍の時間短縮効果があるとされており、この 倍率を促進倍率と言う。例えば、55℃促進養生を行った場合、促進倍率として30倍が示されて おり、材齢1日で得られる一軸圧縮強度は、20℃標準養生を行った供試体の30日目の圧縮強度 と同じであるという考え方である。なお、この場合の30日を促進時間と呼んでいる。

本研究では、20 ℃標準養生、55 ℃促進養生ともに、気中で1日間20 ℃標準養生を行い、そののちに養生水に浸し、養生水を設定温度(20 ℃および55 ℃)とした。養生水の種類は練混ぜ水と同じである。

図 3.5-1 に長期力学安定性確認試験における一軸圧縮強度を示す。赤いマークは 55 ℃促進養 生の結果の横軸を促進時間で示したものである。すなわち、55 ℃促進養生の供試体については、 1 日材齢は促進養生を開始する前なので横軸 1 日の位置にプロットしており、材齢 7 日の結果は 6 日間が促進養生期間なので、促進倍率として試しに 30 倍を適用して 181 日の位置にプロット している。55 ℃促進養生の材齢 7 日で得られた一軸圧縮強度はそれぞれ、180 kPa (D-60)、120 kPa (D-120)、145 kPa (M-60)、112 kPa (M-120)、163 kPa (S-60)、111 kPa (S-120) であ る。なお、比較のために 20 ℃標準養生の結果 (図 3.3-7 で示した材齢 1 日, 7 日, 28 日)を黒 いマークで示している。

図 3.5-1 より、55 ℃で促進養生したホモゲルの材齢7日の一軸圧縮強度は、20 ℃標準養生した材齢7日の値と比較してはるかに大きく、促進倍率30倍を適用して181日の時間にプロットすると、ほぼ強度の増加が整合していることがわかる。練混ぜ水の違いが長期強度に与える影響は認められないが、ゲルタイムの違いによる長期強度への影響については、促進時間181日を経過しても、初期強度が大きかったゲルタイムが短い配合の供試体が、ゲルタイムが長い配合の供試体と比べて、長期強度も大きい結果を示している。

このような促進養生の考え方については、これまでに海水条件下の観点で検討されていないた め、20 ℃標準養生の供試体の2か月以降の結果が得られる来年度以降、詳細な考察を行うものと する。





3.5.2 ホモゲル長期化学的安定性確認試験

地下水にさらされた時のホモゲルの化学的安定性を把握するために、硬化したホモゲルを養生 水に浸漬し、養生水の化学分析を行うことでホモゲルからのシリカ成分などの溶出を確認した。

基本配合 6 種類に対して、養生温度を 20 ℃標準養生と 55 ℃促進養生の 12 ケースに対して試 験を実施した。養生水は練混ぜ水と同じとし、3 L の養生水を満たしたビーカー中に、100 ml の ホモゲルを硬化させたビーカーを練混ぜ 1 日後から浸漬した。なお、ホモゲルが養生水と接触し ている表面積は、20 cm² である。図 3.5-2 にホモゲルの浸漬の状況を示す。

養生水の化学分析は、材齢7日後および材齢14日後にそれぞれ250mlを採取して行った。養 生水採取後に養生水の追加補充は行っていない。分析項目は、表3.5-1に示すように、ホモゲル の劣化に直接結びつくと考えられるシリカの溶出を中心に、補足的にコロイダルシリカに含まれ るナトリウムおよび硬化促進剤の成分であるカリウムを加えた5項目とした。シリカについては、 溶出形態の判断のために、全シリカ、溶存及びコロイド状シリカ、イオン状シリカの3種類を対 象とした。



図 3.5-2 ホモゲルの浸漬の様子 (14日後の採水が終了した時点の状態)

表	3.5-1	養生水の化学分析手法
_		

対象		試験方法	分析機器	
्याम	全シリカ	JIS K0101 44.3	吸光光度法	
シリガ (SiO ₂)	溶存及びコロイド状シリカ	JIS K0101 44.2	吸光光度法	
	イオン状シリカ	JIS K0101 44.1	吸光光度法	
Na		JIS K0102 48.1	フレーム光度法	
K		JIS K0102 49.1	フレーム光度法	

※ JIS K0101:工業用水試験方法

JIS K0102:工場排水試験方法

表 3.5-2 に 20 ℃標準養生の場合の分析結果を、表 3.5-3 に 55 ℃促進養生した場合の分析結 果を示す。なお、55 ℃促進養生で基本配合(S-120)の7日後採取の分析結果は、分析トラブル により取得できなかった。

ハギ西日	松山市間	基本配合					
分析項目	採水時間	D-60	D-120	M-60	M-120	S-60	S-120
	初期条件	0.0		2.6		2.2	
全シリカ(mg/L)	7日	1.6	2.1	2.7	2.8	20	21
	14 日	5.2	4.9	7.0	6.2	32	32
※左五パットノ いゆいりも	初期条件	0.0		1.4		1.2	
俗仔及いコロイト状ンリル	7日	1.3	1.7	1.9	2.6	17	18
(mg/L)	14 日	4.9	4.8	6.4	6.1	32	32
	初期条件	0.0		1.4		1.1	
イオン状シリカ(mg/L)	7 日	1.3	1.6	1.9	2.6	17	18
	14 日	4.9	4.6	6.2	6.0	32	32
	初期条件	0		5,300		10,000	
ナトリウム (mg/L)	7 日	12	20	4,900	5,100	10,000	10,000
	14 日	48	44	4,900	5,000	9,100	9,000
	初期条件	(0	170		390	
カリウム(mg/L)	7日	$\overline{54}$	49	240	230	460	430
	14 日	160	100	340	260	580	480

表 3.5-2 採取した養生水の化学分析結果(20℃標準養生)

衣 3.5-3 採取した養生水の化学分析結果 (55 し促進)

八七百日	这个中国	基本配合					
万机填日	抹小时间	D-60	D-120	M-60	M-120	S-60	S-120
	初期条件	0.0		2.6		2.2	
全シリカ(mg/L)	7 日	12	12	13	12	77	-
	14 日	24	21	25	32	100	97
※右五パッウノ いゆう 川 カ	初期条件	0.0		1.4		1.2	
俗任及いコロイトホンリル (mg/I)	7 日	11	11	12	12	77	-
(mg/L)	14 日	24	21	24	29	100	96
	初期条件	0.0		1.4		1.1	
イオン状シリカ(mg/L)	7 日	11	11	12	12	76	-
	14 日	23	20	23	29	94	96
	初期条件	0		5,300		10,000	
ナトリウム (mg/L)	7 日	51	46	5,400	4,800	9,800	-
	14 日	76	66	5,000	5,200	10,000	9,700
	初期条件	(0	170		390	
カリウム (mg/L)	7 日	120	99	310	270	510	-
	14 日	220	140	390	320	590	490

図 3.5-3 は、今回分析に用いた 3 種類のシリカ分析手法と対応するシリカ形態の関係を示した ものである。全シリカ分析は、サンプルをイオン化させて分析することで、すべての形態のシリ カが同定できる手法である。溶存およびコロイド状シリカ分析では、ろ過により 1 µm以上のシ リカを除いたうえで、ろ液をすべてイオン化させて分析する。イオン状シリカ分析では、同様の ろ液をイオン化させる処理をすることなく分析することで、イオン状態のシリカのみを同定でき る。このようにして得られた 3 つの分析値を用いることで、1 µm以上の塊状シリカ、コロイド 状シリカおよびイオン状シリカの 3 つの形態についてその割合を得ることができる。

図 3.5-4 は表 3.5-2 に示した分析結果の中から、一例として基本配合 D-60 のシリカの時間変 化を示したものである。養生水に含まれるシリカの形態は、そのほとんどがイオン状シリカであ ることがわかる。他のすべてのケースで同様の傾向であった。すなわち、ホモゲルからはイオン 状態でシリカが溶出していると言える。



JIS K 0101_1998 工業用水試験方法

図 3.5-3 シリカ分析の違いとシリカ形態の考え方



図 3.5-4 溶出したシリカの形態(基本配合 D-60, 20 ℃標準養生)

図 3.5-5 にすべてのケースの全シリカ濃度の時間変化を示す。すべてのケースで養生水のシリカ濃度は上昇しており、14 日経過時点ではホモゲルからのシリカの溶出が続いていると言える。 練混ぜ水および養生水の種類の違いによる影響については、人工海水の場合のシリカ濃度が最も 高く、精製水の場合は小さく、その違いは 5~6 倍程度である。50%人工海水の場合の養生水のシ リカ濃度は、人工海水と精製水の中間的な値は示しておらず、限りなく精製水と同様に小さい値 となった。引続き傾向を観察し、今後、原因について検討する必要がある。

養生温度の違いについては、20 ℃標準養生の場合に比べて、55 ℃促進養生では3倍程度、全 シリカ濃度が高い結果となっている。力学特性の検討では既往知見で暫定的に促進倍率を 30 倍 として検討したが、溶出特性にその程度の倍率が整合するかどうかは、今後のデータの蓄積を待 って検討が必要である。



図 3.5-5 養生水の全シリカの時間変化(左:20℃標準養生,右:55℃促進養生)

図 3.5-6 に養生水のナトリウムイオン (Na⁺) 濃度の経時間変化を、図 3.5-7 にカリウムイオン (K⁺) 濃度の経時変化を示す。養生水として用いた人工海水の濃度は、Na+が約 10,000 mg/L、K⁺が約 400 mg/L であり、50%人工海水は人工海水を同量の精製水で薄めているので、イオン濃度もナトリウム、カルシウムともに半分となっている。

ホモゲルを浸漬したのちの養生水の Na+濃度については、12 供試体すべてにおいて図 3.5-6 からは増加傾向が判断できない。初期濃度が、人工海水および 50%人工海水においては高いため、 溶出による濃度変化は発生しない可能性がある。養生水が精製水の場合の Na+濃度の変化については、後述する。

K+濃度に関しては、図 3.5-7 でホモゲルからの溶出による養生水の濃度変化を確認できる。12 供試体すべてにおいて、時間の経過とともにイオン濃度が増加している。濃度の変化量は、練混 ぜ水および養生水の違いによらず、ほぼ同等である。例えば、練混ぜ水および養生水が精製水の D-60 を 20 ℃標準養生した場合は、14 日間の濃度変化が 0 mg/L から 180 mg/L 増加しており、 練混ぜ水および養生水が人工海水の S-60 を 20 ℃標準養生した場合は、同じ時間で 400 mg/L か ら 590 mg/L と 190 mg/L 増加している。この傾向は、養生温度にも依存していない。なお、シリ カの濃度変化は、20 ℃と 55 ℃の養生温度の違いで図 3.5-5 に示したように 3 倍程度あった。し かし、ゲルタイムの違いによる傾向は認められ、ゲルタイム 60 min のほうが、ゲルタイム 120 min の場合より濃度変化が大きい。シリカの場合はゲルタイムの違いが影響しなかった。 図 3.5-8 に、精製水の場合のみ Na+と K+の濃度変化を比較した。K+の方が、Na+より濃度変化 が大きい。また、K+で認められたゲルタイムの違いによる影響は Na+では認められない。ゲルタ イムが 60 min のホモゲルは 120 min のホモゲルより主要成分がカリウムである硬化促進剤が多 く含まれており、このことが養生水の濃度を高くしたことが考えられる。





図 3.5-8 養生水が精製水の場合のナトリウムイオン濃度とカリウムイオン濃度の比較 (左:20 ℃標準養生,右:55 ℃促進養生)

3.5.3 まとめ

溶液型グラウトの長期的な安定性を、力学的および化学的の2つの観点で把握するために、そ れぞれに対して長期試験を計画し、練混ぜ水が異なる基本配合に対して試験を開始し、初期デー タを取得した。以下に、これらの試験で得られた知見を列挙する。

- 力学的観点での長期安定性評価(長期力学安定性試験)においては、材齢に応じた強度変化 を取得し、20 ℃標準養生のホモゲルおよび55 ℃の促進養生のホモゲルを最大2年間で9つ の時間段階で実施する計画である。現在、ホモゲルの養生を引続き実施中である。
- 長期力学安定性試験のうち、材齢 28 日までの 20 ℃標準養生および材齢 7 日までの 55 ℃促 進養生のホモゲルに対して一軸圧縮試験を実施したところ、促進温度 55 ℃で 30 倍の促進時 間を想定した場合の強度変化がほぼ妥当と考えられ、練混ぜ水の違いによる影響は確認でき ないことが分かった。
- 化学的観点での長期安定性評価(長期化学的安定性試験)においては、ホモゲルを浸漬した 養生水の分析を定期的に行うことで、ホモゲルからのシリカ成分の溶出を評価する。20 ℃標 準養生のホモゲルおよび55 ℃の促進養生のホモゲルを最大2年間浸漬する計画である。現 在、ホモゲルの養生を引続き実施中である。
- 長期化学的安定性試験のうち、浸漬(養生)開始から1週間目、2週間目に養生水を採取し、 成分分析を行った結果、養生水のシリカ濃度、Na+濃度、K+濃度が時間の経過とともに上昇 するデータが得られた。特に、イオン状で溶出するシリカによる濃度上昇は、練混ぜ水およ び養生水(練混ぜ水と同じ)による違いが大きく影響を与えることが明らかになった。ただ し、本年度の検討は2週間までのデータのため、ホモゲルからの溶出に関しては継続的な取 得とその検討が必要である。

3.6 今年度の試験結果のまとめ

本章では、海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得のため、練混ぜ水が異なる溶液型 グラウトに対して、3.3 節においてゲルタイムを 60 min および 120 min に調整するための配合 (基本配合)を設定した上で、基本配合のホモゲルに対して基本物性を取得し、3.4 節において施 工性・止水性に関連する特性を取得し、3.5 節において長期安定性に関する検討および試験を開始 した。表 3.6-1 に、各節で得られた知見をまとめる。

表 3.6-1 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得で得られた知見のまとめ

節	まとめ	備考
3.3 基本物性の把握	 練混ぜ水として人工海水、精製水およびその中間の性質を示すものとして人工海水と精製水を1:1で混合した3種類を選定した。 3種類の練混ぜ水を用いて、硬化促進剤およびpH 調整剤の添加量を変えてゲルタイムを測定し、同じゲルタイムを実現するためには練混ぜ水の種類に応じて添加剤量を変える必要があることが分かった。 3種類の練混ぜ水ごとにゲルタイムが 60 min および 120 min となる添加剤量(硬化促進剤,pH 調整剤)を設定し、計6種類の基本配合を設定した。 基本配合のホモゲルを作製し、短期的な力学強度を把握する目的で、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験およびベーンせん断試験を実施した結果、最大 28日までの材齢において、力学強度が時間とともに増加する傾向は、練混ぜ水の種類に依存しないことが判明した。 すなわち、pH 調整剤を用いる本手法に拠れば、練混ぜ水として塩水を用いることは、基本物性に影響を与えることはなく、有意な問題点が見つからなかった。 	・試験終了
3.4 施工性・止水性 (ゲル化特性)の 把握	 自濁試験では、3 種類の練混ぜ水によるグラウトを海水環境の地下水に接触させ、急激にゲル化(白濁)しない配合を把握し、前節の基本配合の設定へフィードバックした。 粒径の経時変化測定試験では、ゲルタイム 60 min の 3 種類の練混ぜ水の基本配合に対して、動的光散乱方式により確認した。この結果、時間に応じて<u>粒径の変化する傾向が練混ぜ水の違いに影響されないことが分かった。</u> 粘性の経時変化測定試験では、40 min (ゲルタイムの 2/3)程度までは非常に小さいニュートン流体挙動を示しており、<u>粘性の増加傾向に練混ぜ水の違いは確認できなかった。</u> グラウト温度 20 ℃を標準として、低温側(10 ℃)と高温側(35 ℃)に変わることによる影響を、ゲルタイムとホモゲルの短期的な力学強度に着目して確認した。ホモゲルの最大 7 日材齢の力学強度については、低温側は基本温度に対して若干小さい一軸圧縮強度を示し、高温側は 2 倍程度大きい一軸圧縮強度を示した。このような温度依存性の傾向は、<u>練</u>混ぜ水が変わっても同じであった。 	・試験終了
3.5 長期安定性 (力学的、化学的 安定性)の把握	 力学的観点での長期安定性評価(長期力学安定性試験)においては、材齢に応じた強度変化を取得し、20 ℃標準養生のホモゲルおよび55 ℃の促進養生のホモゲルを最大2年間で9つの時間段階で実施する計画である。現在、ホモゲルの養生を引続き実施中である。 長期力学安定性試験のうち、<u>材齢28日まで</u>の養生温度の異なる一軸圧縮試験を実施し、促進時間を想定した強度変化に整合性があったため、<u>練混ぜ水の違いによる影響は確認できないことが分かった。</u> 化学的観点での長期安定性評価(長期化学安定性試験)においては、ホモゲルを浸漬した養生水の分析を定期的に行い、ホモゲルからのシリカ成分の溶出を評価している。異なる養生温度で最大2年間浸漬する計画である。現在、<u>ホモゲルの養生を引続き実施中である。</u> 長期化学的安定性試験のうち、浸漬(養生)開始から1週間目、2週間目に養生水を採取し、成分分析を行った結果、シリカに対しては練混ぜ水および養生水(練混ぜ水と同じ)による違いが濃度上昇に影響を与えることが明らかになった。<u>養生を引続き実施中である。</u> 	 ・今年度取得 出来る ・長東の ・長期特性の ・把握のため、 平成31年度 末頃試験を を定 (表 3.2-1 参照)

4. グラウト設計技術・影響評価技術の知見の整理

4.1 概要

資源エネルギー庁委託事業「地下坑道施工技術高度化開発」の成果(グラウト技術のガイドラ イン³⁾、ならびに、3章「海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得」の結果を踏まえて、 溶液型グラウトの設計技術および影響評価技術の開発を進めるにあたり、留意すべき事項や今後 の課題を整理する。

4.2 留意すべき事項や今後の課題について

グラウト技術のガイドラインは、表 4.2-2、表 4.2-3、表 4.2-4のように示され、それぞれ、グ ラウト材料に求められる要件、材料の基本物性に起因する問題点、水理地質構造に対する問題点 である。いずれも、グラウト特性に関して細かく整理されている。

今年度の試験結果は、ジェネリックな海水条件下を設定し、練混ぜ水を精製水、極端な例とし て 100%の海水、さらにその中間にあたる 50%人工海水を適用するケースについて実験し、特性 データを把握した。その結果、100%の海水で練混ぜた場合であっても、力学特性についてはゲル タイムを精製水と同等に設定すれば、同様の特性が得られることが分かった。ただし、既存の知 見と課題の整理の章(2.3)においてフィンランドの知見から得たように、溶液型グラウトは塩水 環境下において様々な溶解イオンなどと複雑な挙動を示す可能性があり、グラウト施工時だけで なく、長期を含む塩水環境との化学的特性の解明、ならびに、一つの手法に依るのではなく、最 終的には各国の対策を把握して、ハイブリッドに適切な設計施工の手法・体系を確立し、グラウ ト技術のガイドラインを拡充するのが望ましい。

このように今年度得られた情報は有用かつ非常に多く、実験によるデータの取得とともに時間 をかけて留意事項や課題を整理していく必要があると考えられる。そこで、今年度は留意すべき 事項や今後の課題として、3章の課題の整理のまとめ表(表 4.2·1)および上述の表 4.2·2、表 4.2·3、 表 4.2·4 を示すこととする。次年度以降は、さらなる検討および試験結果とともに、溶液型グラ ウトを塩水環境に適用する切り口として、グラウト技術のガイドラインにおける設計技術や影響 評価技術を整理していくことが望ましい。

国 名	取り組み	課題
日本	pH 調整剤を用いた海水へ の感度を下げる対策(倉敷 LPGの実績)	 ・淡水~海水条件下における場合との差異などジェネリックに練混ぜ水の幅を持たせて、その特性を取得し、適用範囲なども把握する。 ・海水環境下における最適な「配合選定手法の確立」が必要である。
スウェーデン	基本的には海水条件であっ ても設計で対応	 海水条件下によりグラウト設計が受ける不確定要素の解明が必要である。 平行平板など室内実験により現象を把握し、塩水環境下での溶液型グラウトの浸透距離の補正率の算出などを取得するのが望ましい。 「塩水環境下での理論・設計手法の確立」、「耐久性の把握」が必要である。
フィンランド	海水条件を一切排除する Water Injection (淡水注入) の対策	 カルシウムリッチな海水条件では注入が困難である。 塩水環境下では、複雑な挙動を示すことを実験的に把握したが、そのメカニズムなどは解明されていない。 現状では Water injection を対策として整備しているが、より最適な「施工手法の確立」が必要である。

表 4.2-1 溶液型グラウトの各国の取り組みならびに課題

表 4.2-2 グラウト材料に求められる要件(グラウト技術のガイドライン³⁾より抜粋)

×	才象期間	要	求 特 性	具体的な項目の例	確認方法	
			微小な亀裂にも浸透可能で ある	注入対象亀裂開口幅に対して十分小さな粒径で ある	室内試験、 グラウト注入試験、 「グラウト浸透予測」	
				施工中の粒径の増大が少ない		
		浸诱性	想定通りの浸透性が安定的	想定外のゲル化が少ない	室内試験、	
			に確保できる	地下水中の化学物質による影響を受けにくい		
建	グラウト			水温による影響を受けにくい	グラウト注入試験	
設	施工時		岩盤に悪影響を与えることな く注入可能である	粘性が小さい		
1.1	C.			注入初期の圧縮強度およびせん断強度が大きい		
		at all the	水圧に対して十分な抵抗力 が発現する	地下水中の化学物質による影響を受けにくい	安内計廠	
操		正水性 (硬化特性)		地下水中のpHによる影響を受けにくい		
alle				地下水の流量の影響を受けにくい		
莱				岩石中に含まれる鉱物の影響を受けにくい		
時			物理的に安定である	ブリーディングによる体積減少が少ない		
		 ・広水性 ・(耐久性、 ・安定性) 		乾燥による体積減少が少ない		
	操業時			長期的な圧縮強度およびせん断強度が大きい	1 P 104-9X	
	(グラウト			地下水中の化学物質による影響を受けにくい		
	注入後)		・安定性)	地下水中のpHによる影響を受けにくい		
			化子的に女定てのる	地下水の流量の影響を受けにくい		
				岩石中に含まれる鉱物の影響を受けにくい		
			岩盤に影響の少ない材料で ある(低アルカリ性) 岩盤に影響の少ない量・範	アルカリ性の基となる鉱物の発生が少ない		
				注入時に材料分離が生じない		
	閉鎖後	E 期かた 早く郷		必要な注入量が少ない	グラウト注入試験、	
	AISRIX	12月11月16年7日	囲で改良可能である	注入後の材料が限定された範囲にとどまる	「グラウト浸透予測」	
			核種移行を助長する化学物 質を含まない		有機物を含有しない	室内試験

表 4.2-3	グラウト材料の基本物性に起因する問	題(グラウト技術のガイドライン ^{3;}	より抜粋)
---------	-------------------	-------------------------------	-------

問題点	概要	対象となる材料の一例
高アルカリ性	セメント系材料やコロイダルシリカに硬化剤として水酸化カルシウムを加えることによりC-S- Hを形成するグラウト材料などにおいては、混合直後において比較的高いアルカリ性を示す 場合がある。これを抑制するためには、適切なポゾラン材料を適量添加することが有効であ るが、後述するとおり複数材料を混合する際には材料分離の影響も考慮する必要がある。	低アルカリ性セメント系 グラウト材料 超微粒子球状シリカ グラウト材料
有機物の含有	原材料に有機物を含んでいる場合、長期的には分解された有機物に付着した核種が地下 水中に溶出し拡散することが想定され、長期的な影響評価上問題となる。特に、材料の分 散性を高めるために、分散効果のある流動化剤(あるいは減水剤)を添加する場合、有機系 の材料が主成分となっている場合があるので注意が必要である	
団粒化の発生	グラウト材料は化学反応あるいは加圧脱水などにより粒子同士が凝集することにより止水 効果を発現するものであるが、原材料あるいは反応直後の材料の粒子が急激に結合する ことなどにより団粒化を生じると、浸透性能の低下や材料の分離などが生じる原因となる。 原材料が粉体として供給されるグラウト材料においては、製造されて消費されるまでの間に 吸湿などにより団粒化する場合や、混練水との混合時に団粒化する場合が想定される。ま た、ポゾラン材料として粉体のシリカフュームを使用する場合には、製造メーカーにおいて出 荷前に意図的に凝結による団粒化を行っている場合もあるので注意が必要である。	低アルカリ性セメント系 グラウト材料
	原材料はスラリーであっても複数の原材料を混合して使用するグラウト材料においては、分 散性を高めるための流動化剤を添加する手順を間違えると、団粒化を生じることが想定され るので注意が必要である。	超微粒子球状シリカ グラウト材料
材料分離	複数の原材料を混合して使用するグラウト材料においては、それぞれの原材料の粒度が異なると浸透中に材料分離を生じる可能性がある。この場合、原材料の混合比率が設計とは 異なってしまうため、混合後の材料のpHや強度などの材料物性も設計上期待されている値 にはならない。	低アルカリ性セメント系 グラウト材料
地下水中への溶出	注入後のグラウト材料は分解あるいは地下水中への成分の溶出などにより、長期的には散 逸により消滅していく。ただし、地下施設の建設操業中においては必要な止水効果が維持 確保されなければならないものの、化学的な安定性が不足しているために地下水中への成 分の溶出が速い場合には、この確保が困難になることが予想される。	溶液型グラウト材料
乾燥収縮	地下施設の建設操業中は、坑道内への湧水は排水処理されるため、坑道近傍は乾燥のた め不飽和状態になると想定される。この影響により、充填されたグラウト材料材の含水率が 高くかつ剛性が乏しい場合は、乾燥収縮によりグラウト材料の止水効果が低減すると共に、 場合によっては水圧による押し出しが生じる可能性がある。	溶液型グラウト材料
想定外の硬化反応	硬化を促進する材料を添加することでコロイド粒子を電気的に不安定化し、粒子同士の結合 を促進することで止水性を発現するようなグラウト材料の場合、狭隘な亀裂内においては強 制的に粒子同士が衝突することにより設計上想定していない結合の促進が生じ、急激に浸 透性能が低下する場合がある。	溶液型グラウト材料
高粘性	使用するグラウト材料の粘性が高すぎる場合、使用する注入装置が対応可能な注入圧力を 超過してしまい、注入できない可能性がある。逆に、注入装置が必要な注入圧力を満足す る場合においても、その圧力が対象岩盤の限界圧力以上となると、新たな亀裂の発生など により対象岩盤に悪影響を及ぼす可能性がある。	

問題点	概要	対象となる材料の一例
亀裂開口幅	注入対象とする岩盤の亀裂開口幅が非常に小さい場合は、グラウト材料の種類および配合 によっては注入できない可能性がある。また、仮に高圧により注入可能な場合であっても、 その圧力が対象岩盤の限界圧力以上となると、新たな亀裂の発生などにより対象岩盤に悪 影響を及ぼす可能性がある。	
水質	地下水中の塩分濃度が高い場合、無機塩を硬化剤として利用することによりコロイド粒子同 士が結合するグラウト材料においては無機塩と同様に硬化が促進されるため、強度発現は 速くなる一方で浸透性能は低下する。また、塩分以外にもグラウト材料の硬化現象に影響を 及ぼす化学的成分が地下水中に含まれている可能性がある。 さらに、含有成分によっては、注入されたグラウト材料が長期的に分解・溶出していく速度に 影響を与える。	溶液型グラウト材料
水温	比較的大きな発熱(または吸熱)を伴う化学反応により結合が進行するグラウト材料の場合、水温の影響により反応が加速(あるいは抑制)され、浸透特性や強度発現に影響が生 じる。	溶液型グラウト材料
地下水のpH	地下水のpHはグラウト材料の強度発現に影響を与える。特に、無機塩を硬化剤として利用 することによりコロイド粒子同士が結合するグラウト材料の場合、地下水中のpHが高いと硬 化が阻害される。	溶液型グラウト材料
飽和度	グラウト注入領域となる対象母岩が不飽和状態である場合、注入されたグラウト材料に乾 燥が生じる恐れがある。この場合、「グラウト材料の基本特性に関する問題点」において記 述したとおり、充填されたグラウト材料の乾燥収縮による体積変化が大きい場合は、止水効 果の低下や水圧による押し出しが生じる恐れがある。	溶液型グラウト材料
水圧	地下水圧が高い場合、使用するグラウト材料や配合の粘性に対応した注入圧力に加えて、 さらに大きな注入圧力が必要になる。この場合、使用するグラウト材料の粘性が高すぎる場 合、使用する注入装置が対応可能な注入圧力を超過してしまい、注入できない可能性があ る。また、注入されたグラウト材料が十分硬化する前に注入装置の取り外しを行った場合、 高水圧により注入されたグラウト材料が押し出しあるいは流出してしまう可能性がある。特 に初期強度の小さなグラウト材料においては、その可能性が高くなる。	
流量	地下水が豊富で大量の湧水が予想されるような場合、注入されたグラウト材料が十分硬化 する前に、希釈あるいは洗掘により流失してしまい、所要の止水性能が発揮されない可能 性がある。	
透水性の異なる地層 の偏在	貫入岩脈や断層破砕帯などの不透水性(あるいは高透水性)の地層の偏在や、片麻状構造やレンズ状の堆積構造を持つ不均質な地層などにおいては、原位置透水試験によりグラウト材料を選定する上で重要な対象母岩の浸透特性を評価する際、実際以上に低く(あるいは高く)評価してしまう可能性がある。	
限界圧力	対象母岩の限界圧力が小さい場合、使用するグラウト材料の粘性によっては、注入圧力が 限界圧力を超過する可能性がある。この場合、新たな亀裂の発生などが生じて対象岩盤に 悪影響を及ぼす可能性がある。	
岩石中の鉱物	岩石中に含まれる鉱物によっては、グラウト材料の硬化現象または耐久性・安定性に影響を与える可能性がある。	

表 4 2-4	水理地質構造に対する問題占	(グラウト技術のガイドライン ³⁾ より抜粋)
12 7.2 7	小生心具情迫にかり、の问题示	

5. 研究のまとめ

5.1 今年度の研究成果のまとめ

5.1.1 既存の知見及び課題の整理について

既存文献の調査ならびに北欧でのグラウトワークショップ開催などを通して、溶液型グラウト を適用するための多くの知見や課題を把握することができた。北欧のフィンランドでは、オンカ ロでの溶液型グラウトの適用時にゲル化に対する課題があったため、多くの実験的アプローチを 実施し、カルシウムリッチな地下水への施工が(急激にゲル化することから)難しいことや、塩 水系の地下水への浸透挙動などが把握された。このため、フィンランドでは多くの室内試験が実 施され、海水環境下では課題が多くメカニズムが解明されないことから、その解決策として、Fresh Water Injection (グラウチング前の岩盤への淡水注入による塩水環境の除去ならびに亀裂介在物 の洗浄)やパッカーの長期養生など施工対策が実施されている。スウェーデンでは、海水条件下 での課題は特に指摘されていないが、耐久性に関して課題とされていることから、長期安定性に 関する実験が実施され、理論的な設計で解明しようというアプローチが行われている。

ただし、北欧のいずれの国においても倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事で適用されたような配合設 計からの対策アプローチは行われていないことが分かった。そこで、北欧での施工対策や設計を 見据えながら、日本の倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事で実践されている配合調整による対策を確立 し、またその特性把握を行うことが今後の重要な課題であることが判明した。

5.1.2 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得について

本章では、海水環境下および塩分の含まれていない地下水環境下を模擬して室内試験を実施し、 溶液型グラウトの特性データを取得した。具体的には、3種類の異なる練混ぜ水(人工海水、精製 水、50%人工海水)を用いて、それぞれゲルタイムを 60 min および 120 min に調整するための 配合(基本配合)を取得し、各基本配合の硬化前のグラウトおよびゲル化したホモゲルに対して それぞれの基本物性ならびに施工性に関連する特性を取得し、2年に亘る長期安定性に関する試 験を開始してその初期段階の特性を取得した。以下に、今年度の試験により得られたれた主な知 見を列挙する。

- 塩水環境(塩分濃度)の異なる練混ぜ水では溶液型グラウトのゲルタイムは異なるが、硬化 促進剤および pH 調整剤を適切に調整することで、海水条件下でも急激にゲル化(白濁)し ない 60 min および 120 min のゲルタイムのグラウトを配合できることが分かった。
- ゲルタイムが同じ配合であれば、練混ぜ水の違いによる短期強度の違いは認められない。すなわち、人工海水ならびに 50%人工海水の双方を練混ぜ水に適用することは精製水を適用する場合と同様であり、問題点は認められなかった。
- 練混ぜ水が異なるグラウトであっても、ゲルタイムが同じとなるように配合した場合はその ゲル化特性(粒径や粘性の変化)や温度変化に応じた強度特性に差異がなかったため、施工 性に関する特性の違いは認められなかった。
- 力学的および化学的な観点での2つの長期安定性試験を開始し、初期データを取得した。化学的安定性試験では、ホモゲルからのシリカの溶出挙動は、練混ぜ水および養生水(練混ぜ水と同じ)の違いに影響を受けることが、養生水のシリカ濃度を分析することで明らかになった。次年度のデータ取得に向けて引続きホモゲル供試体の養生を実施中である。

以上のように、本年度の成果として溶液型グラウトは塩水環境下においても pH 調整剤を適用 することにより、所定のゲルタイムを設定することができ、施工性や長期安定性に対してもゲル タイムを同等に設定すれば、塩分が含まれていない通常の地下水で練混ぜた場合と遜色のない特 性が得られているといえる。

ただし、長期の安定性については、特に長期化学的安定性試験については今後も結果に違いが 出る可能性があるため、引続き次年度も試験を実施してその特性を把握する必要がある。

5.1.3 グラウト設計技術・影響評価技術の知見の整理について

資源エネルギー庁委託事業「地下坑道施工技術高度化開発」の成果、ならびに、3.海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得の結果を踏まえて、溶液型グラウトの設計技術および影響評価技術の開発を進めるにあたり、留意すべき事項や今後の課題を以下に整理した。

今年度の試験結果は、ジェネリックな海水条件下を設定し、練混ぜ水を精製水、極端な例とし て 100%の海水、さらにその中間にあたる 50%人工海水を適用するケースについて実験し、特性 データを把握した。その結果、100%の海水で練混ぜた場合であっても、力学特性についてはゲル タイムを精製水と同等に設定すれば、同様の特性が得られることが分かった。ただし、既存の知 見と課題の整理の章(2.3)においてフィンランドの知見から得たように、溶液型グラウトは塩水 環境下において様々な溶解イオンなどと複雑な挙動を示す可能性があり、グラウト施工時だけで なく、長期を含む塩水環境との化学的特性の解明ならびに、1 つの手法に依るのではなく、最終的 には各国の対策を把握して、ハイブリッドに適切な設計施工の手法・体系を確立し、グラウト技 術のガイドラインを拡充するのが望ましい。具体的には、今年度は留意すべき事項や今後の課題 として、2 章の課題の整理のまとめ図およびグラウト技術のガイドラインに示されている、グラ ウト材料に求められる要件、材料の基本物性に起因する問題点、水理地質構造に対する問題点を 留意すべき事項や今後の課題として示した。

次年度以降は、さらなる検討および試験結果とともに、溶液型グラウトを塩水環境に適用する 切り口として、グラウト技術のガイドラインにおける設計技術や影響評価技術を整理していくこ とが望ましい。

5.2 今後の課題

5.2.1 北欧の専門家との技術的な意見交換などの継続

今回の文献調査ならびに現地調査では、グラウトで止水するという目的は互いに共通している にもかかわらず、海水条件下に対する技術的なアプローチの手法は棲み分けたかのように、各国 で異なっていた。端的に言えば、日本は配合対応、スウェーデンは理論・設計対応、フィンラン ドは施工対応である。

今回の文献調査でも示したように溶液型グラウトは、そもそも日本発祥の技術であるため、日本では配合対応策が先んずるのは当然かもしれない。また、グラウト注入理論・浸透理論、亀裂実験の実施で有名なスウェーデンで設計対応を取るのも自然な流れである。フィンランドは処分事業・技術ではスウェーデンと足並みを揃えていることが多い印象であったが、このグラウトの対応については、処分場の建設が差し迫っていることや、スウェーデンの地下研では見られないカルシウムリッチな地下水環境など、現場で解決する事象が多いことからより泥臭いボトムアップ的な技術が発展したのではないかと推察される。

いずれにせよ、今回のワークショップで各国に異なる意見やアプローチがあることが分かり、 課題解決に向けても、一つのやり方だけを用意するよりはそれぞれのやり方をうまく適切に使う 方法が最も合理的であると考えられる。すなわち、今回の成果を機に、引続き本事業については、 この3か国の意見やアドバイスをお互いに交わしながら開発していくのが望ましいと考えられる。

また、具体的に今年度では基本配合ならびに長期安定性以外の基本物性を取得した中で、実際 に亀裂内に浸透する様子を、例えば亀裂を人工的に模擬したような平行平板の実験装置を用いた 浸透実験が考えられる。しかし、倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事で実施されたような長期止水性試験 は装置の設備費が非常に高価である。例えば、既に類似の装置を所有しているフィンランドやス ウェーデンと提携しながら試験を委託することも技術を発展させるという意味では有意義となる 可能性がある。

5.2.2 養生水と練混ぜ水の影響の検討

今回の化学的安定性試験では、まだ2週間の結果ではあるが、練混ぜ水および養生水(練混ぜ水と同じ)の違いが、ホモゲルを浸漬している養生水のシリカ濃度の上昇に影響を与えることが明らかになった。精製水と50%人工海水の結果は比較的近いが、海水を用いた場合はシリカ濃度の上昇が大きい結果となった。この結果からは、練混ぜ水に海水を用いたこと、養生水に海水を用いたことのどちらが大きい要因なのかは把握できないため、練混ぜ水と養生水を変えたうえでの同様の浸漬試験を実施し、シリカなどの溶出挙動などの化学的な特性に対するデータを拡充するのが望ましいと考えられる。また化学分野に詳しい専門家にその影響について意見を得ることが望ましいと考えられる。

5.2.3 海水練混ぜグラウト

今年度の知見では、海水を練混ぜ水に使えば配合中の硬化促進剤を減らすことができた。すな わち、pH 調整剤、硬化促進剤、練混ぜ水と現場で取り扱う材料の種類が多いと非常にハンドリン グが難しくなるため、思い切って硬化促進剤を省略して、配合決定が容易になる配合を検討する ことができる(図 5.2-1)。また、場合によってはこれまで 80%に固定してきた Hi シリカ(溶液 型グラウトの原液)の容積を変えることも視野にいれる。



参考文献

 経済産業省資源エネルギー庁:沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会 とりまとめ、2016.
 http://www.moti.go.in/committee/konkyukai/energy_onvironment/engan_kaiteika/ndf/

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/pdf/ report01_01.pdf(参照:2017 年 2 月 1 日).

- 2) 日本原子力研究開発機構:平成24年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物 処分関連,地下坑道施工技術高度化開発 6カ年報告書,2013.
- 3) 日本原子力研究開発機構:平成24年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物 処分関連,地下坑道施工技術高度化開発 グラウト技術のガイドライン(平成24年度版), 2013.
- 4) 日本原子力研究開発機構:平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処 分関連,地下坑道施工技術高度化開発報告書,2010.
- http://www.enecho.meti.go.jp/rw/library/21-08/21fy8.pdf(参照:2017年2月1日).
- 5) Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) : Final repository facility Underground design premises/D2, R-07-33, 2007.
- 6) Kalle Hollmén, Ursula Sievänen, Johan Funehag, Nils Granberg, Tapani Lyytinen, Pauli Syrjänen, Jarno Säippä : Colloidal Silica–Grouting in Demonstration Tunnel 2 in ONKALO, POSIVA Working Report 2012-84, 2013.
- 7) 辻正邦,小林伸司,佐藤稔紀,見掛信一郎:瑞浪超深地層研究所における大深度のポストグラウチング技術 新技術を導入した設計,施工実績,湧水抑制効果の評価について–,第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,2016, pp.359-364.
- 8) Johan Funehag : Grouting of Fractured Rock with Silica Sol. Grouting Design Based on Penetration Length. Doctor thesis, Department of geology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.
- 9) J. Funehag, A. Emmelin : Injekteringen av TASS -tunneln Design, genomförande och resultat från förinjekteringen, SKB R-10-39, 2011.
- 10) Lassi Hatakka, Noora Salminen, Guido Nuijten, Riitta Lehmusjärvi, SannaMustonen : Silica grouting in deep underground saline conditions in ONKALO underground research facility, 7th Nordic Grouting Symposium, Proceedings pp.17-28, 2013.
- 11) Masakuni Tsuji & Johan Funahg: Gelling of silica sol in high pressure, 7th Nordic grouting symposium, 2013.
- 12) 延藤遵, 辻正邦, 草野隆司, 見掛信一郎, 神谷晃, 石井洋司:瑞浪超深地層研究所深度 300m における耐久性に優れた溶液型グラウトの試験施工, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.179-184, 2011.
- 13) 征矢雅宏, 竹内伸光, 大西勝, 金戸辰彦: 倉敷 LPG 貯槽建設工事における溶液型グラウトに よる止水対策(その1) -溶液型グラウトのマイクロフラクチャへの注入計画と実績-, 土 木学会第 68 回年次学術講演会, 2013.
- 14) 辻正邦,小林伸司,延藤遵,杉山博一:大深度の岩盤止水を目的とした活性シリカコロイド の適用,基礎工 10月, pp.62-67, 2015.
- 15) Masakuni Tsuji, Johan Funehag, Shinji Kobayashi, Toshinori Sato and Shin-ichiro Mikake : Comparison of grouting with silica sol in the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden and Mizunami Underground Research Laboratory in Japan, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014.
- 16) Ralph K. Iler : The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica, New York, Wiley-Interscience publication, 1979.
- 17) Christian Butron, Magnus Axelsson, Gunnar Gustafson : Silica Sol for Rock Grouting Tests on Mechanical Properties, Chalmers University of Technology No. 2007:6, 2007.
- 18) J. Funehag and A. Emmelin: Injekteringen av TASS -tunneln Design, genomförande och resultat från förinjekteringen, SKB R-10-39, 2011.
- 19) J. Funehag : Guide to grouting with a silica sol –for sealing in hard rock, BeFo Report

118, 2012.

- 20) C. Soegaard, Z. Abbas, J. Funehag : Durability of silica sol, chemical aspects affecting the mechanical properties, 8th Nordic Grouting Symposium, 2016, pp. 245-255.
- 21) E. Grov, K. F. Garshol, D. Brox : Pre-excavation Grouting (PEG) for HATS2A in Hong Kong, 8th Nordic Grouting Symposium, 2016, pp. 186-202.
- 22) POSIVA : Underground Openings Production Line 2012 Design, Production and Initial State of the Underground Openings, POSIVA Working Report 2012-22, 2013.
- 23) Kalle Hollmen, Sanna Mustonen, Tapani Lyytinen : Colloidal silica-grouting tests in underground research facility Onkalo, Eurajoki, Finland, 7th Nordic Grouting Symposium, Proceedings pp.115-124, 2013.
- 24) Lassi Hatakka, Janika Tirinen, Noora Salminen, Guido Nuijten, Riitta Lehmusjärvi, Susanna Aro : Grouting of shaft intersecting deep underground hydro-geological zones HZ20A & HZ20B in ONKALO underground research facility, Olkiluoto, 7th Nordic Grouting Symposium, Proceedings pp.147-152, 2013.
- 25) 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). POSIVA Working Report 2005-24, 2006.
- 26) Ahokas H., Ahokas T., Hansen J., Hellä P., Koskinen K., Koskinen L., Lehtinen A., Löfman J., Marcos N., Mészáros F., Partamies S., Pitkänen P., Sievänen U., Snellman M., Vieno T. : Control of Water Inflow and Use of Cement in ONKALO after Penetration of Fracture Zone R19. POSIVA Working Report 2006-45, 2006.
- 27) Isomäki J : Pre-grouting test in Nygård tunnel Silica Sol in practical use. Tampere Polytechnic. Final thesis, 2007.
- 28) Hakanen M., Hölttä P. : Silica Colloids and their Effect on Radionuclide Sorption A Literature Review. POSIVA Working Report 2008-29, 2008.
- 29) Hakanen M., Hölttä P., Lahtinen M : Silica Colloids and their Effect on Radionuclide Sorption – Experimental Study. POSIVA Working Report 2009-26, 2009.
- 30) Sievänen U. : R20 Programme: Development of Rock Grouting Design, Techniques and Procedures for ONKALO. POSIVA Working Report 2008-45, 2009.
- 31) Lehtonen H. : Impact of groundwater salinity on penetration of colloidal silica. Aalto University. Bachelor Thesis, 2015.
- 32) 延藤遵,小林伸司,征矢雅宏,島田俊介,小山忠雄,角田百合香,前島俊雄:倉敷LPG 貯槽 建設工事における溶液型グラウトによる止水対策(その2) -溶液型グラウトの現場条件を 考慮した溶液型グラウトの長期安定性確認試験-,土木学会第68回年次学術講演会,2013.
- 33) 中谷篤史, 奥野哲夫, 小林伸司, 征矢雅宏, 前島俊雄: 倉敷 LPG 貯槽建設工事における溶液 型グラウトによる止水対策(その3) -溶液型グラウト改良体の長期止水効果確認試験-, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013.
- 34) 竹内伸光,小林伸司,征矢雅宏,大西勝,金戸辰彦:水封式 LPG 岩盤貯槽のアーチ部止水対 策工実績-倉敷国家石油ガス備蓄基地-,土木学会第68回年次学術講演会、2013.
- 35) 征矢雅宏, 池田建太郎:施工記録○日本初の LPG 地下岩盤貯槽建設工事の概要○水封トンネル・LPG 地下岩盤貯槽の施工, 貯槽の気密試験, 清水建設, 土木クォータリー Vol. 180, pp.2-56, 2013.
- 36) 小林伸司, 宮嶋保幸, 水道健, 金戸辰彦, 山本浩志, 前島俊雄: 倉敷基地 LPG 岩盤貯槽にお ける高水圧下のグラウト施工実績と改良効果の評価について, 第42回岩盤力学に関するシ ンポジウム, pp.125-130, 2014.
- 37) 小林伸司,新美勝之, 辻正邦, 山田俊子, 青栁芳明, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 大澤英昭:瑞浪 超深地層研究所における工学技術に関する検討(平成 26 年度) - 設計・施工計画および施 工対策技術の開発-(委託研究), JAEA-Technology 2015-039, 170p, 2015.
- 38) 米倉亮三,島田俊介:薬液注入の長期耐久性と恒久グラウト本設注入工法の設計施工--環境 保全型液状化対策工と品質管理,近代科学社,302p,2016.

- 39) 加賀宗彦:水ガラス系注入材の安定性と注入固結砂の長期強度の予測,土木学会論文集, No.652/Ⅲ-51, pp.195-205, 2000.
- 40) Posiva Image gallery, ONKALO demonstraation tunnel: http://www.posiva.fi/en/media/image_gallery?gfid_2061=94&gpid_2061=1835#gallery_2061 (参照: 2017年2月1日).
- 41) Posiva Image gallery, ONKALO Demonstration tunnel 2: http://www.posiva.fi/en/media/image_gallery?gfid_2061=94&gpid_2061=2915#.WLxkINKLRpg(参照:2017年2月1日).

付 録

付録1 グラウトワークショップ発表資料

付録 2 REVIEW OF SUMMARY REPORTS ON COLLOIDAL SILICA GROUTING IN FINLAND

This is a blank page.

付録1:グラウトワークショップ発表資料

(JAEA) SHMZ

Workshop on colloidal silica grouting (silica sol) in sea water, Helsinki, 26th January 2017



26th January 2017 Shimizu Corporation, JAPAN Masakuni Tsuji

Workshop on colloidal silica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017 Today's Work, Tomorrow's Heritage

Introduction of the participants 🦇 stime

ORGANIZATIONS of Participants:

FINLAND: POSIVA, ROCKPLAN, Saanio & Riekkola (S&R) SWEDEN: Chalmers University of technology (Chalmers)

JAPAN: Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Shimizu Corporation (SC)

Main PARTICIPANTS:

Name	Affiliation	
Sanna Msutonen	POSIVA	
Jari Dunder	POSIVA	
Heikki Saarikivi	S&R	
Jorma Autio	S&R	
Fionán O'Carroll	S&R	
Lasse Hataka	ROCKPLAN	
Johan Funehag	Chalmers	
Toshinori Sato	JAEA	
Kazuhei Aoyagi	JAEA	
Hitoshi Nakashima	SC	
Mitsunobu Okihara	SC	
Masakuni Tsuji	SC	

Workshop on colloidal silica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017

What is **Colloidal silica** (Silica sol in Sweden) grouting?

- Nano-size silica particles (around 1/1000 of super-fine cement particle)
- Sweden: Chalmers with SKB applied for rock grouting with theory for first time in the world at Äspö HRL.
- Japan: It was originally developed and for decades used for the purpose of a ground improvement material to resist earthquake. Nowadays, it has applied to URL and a storage cavern for rock grouting.
- Finland: POSIVA seems to have applied a lots to ONKALO

EUROPE	JAPAN
Eka Chemichals AB, (BASF)	Kyokado Engineering Co., Ltd.
Meyco MP320	Permarock ®Hi-R
SiO ₂ amorphous particle Particle diameter: 2-100 nm	SiO ₂ amorphous particle Particle diameter: 10-20 nm
Sodium chloride NaCl with a concentration of 10 wt%.	Mainly Granular KCL (Dissolve in water before mixing)
D ₂) Hardening Accelerator JAPAN: Granular Type Europe: Liquid Type Japanese type needs a "water to be added, in the field.	Grout mix homo-gel
	EUROPE Eka Chemichals AB, (BASF) Meyco MP320 SiO ₂ amorphous particle Particle diameter: 2-100 nm Sodium chloride NaCl with a concentration of 10 wt%. D ₂) Hardening Accelerator <i>JAPAN: Granular Type</i> <i>Europe: Liquid Type</i> Japanese type needs a "water to be added, in the field.

Workshop on colloidal silica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017

Backgrounds; coastal area 🦇 shinz

- JAEA and SC recently started the study on "Characterization of colloidal silica grouting under sea water".
- The background is that studying on the engineering technologies for the geological repository specific for "coastal area" is recently a hot issue in Japan.



Fig: Conceptual image of geological repository based on topographical characteristics of coastal area in Japan. Adapted from the published materials in the 3rd council of studying group on techniques for geological disposal of radioactive wastes http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/pdf/003_02_00.pdf

Grouting has been focused as one of the most important tasks to be studied on by the studying group.

Workshop on colloidal silica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017



Workshop on colloidal silica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017





Workshop on colloidal silica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017

SAANIO & RIEKKOLA DY

Today's Purpose

(AEA) SHITZ

- Purpose of the today's workshop
 - ✓ Sharing the *latest grouting* knowledge and technology
- Sharing the colloidal silica grouting methodology especially under sea water
- ✓ Finding a clue to *develop the mutual grouting technology*



Fig: Illustration adapted from "Guide to grouting with silica sol –for sealing in hard rock, Johan Funehag, Befo Report 118, Stockholm 2012"

Workshop on colloidal silica aroutina in sea water. Helsinki. 26th Januarv 2017

10

	AGENDA	(JAEA)	SHMŽ	
Morning Part 1:	Introductions			
10.00-10.20	Coffee and Introductions of each participant (All participants)			
10.20-10.40	Background and purpose of the study, Masakuni Tsuji (SC)			

10.40-11.00	Grouting in the Horonobe Underground Research Laboratory in Japan, Kazuhei Aoyagi (JAEA)

Morning Part 2:	State-of-art colloidal silica grouting
11.00-11.30	Silica sol grouting in hydraulic gradient and durability, latest news from SWEDEN, Johan Funehag (Chalmers)
11.30-11.50	Colloidal silica grouting campaigns in 500 m depth of Mizunami URL in JAPAN, Masakuni Tsuji (SC)
11.50-12.10	Presentation from Finland (POSIVA) (If possible, latest news)
12.10-12.30	Short discussion and summary (All participants)
12.30-1400	Lunch at Kuparitalo

Workshop on colloidal silica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017

	AGENDA	(JAEA)	SHMŽ	
Afternoon Part 1:	Influence on properties, methodology, and design under sea	a water		
14.00-14.20	Presentation from Finland (POSIVA) (If possible, focused on countermeasure to sea water, e.g. Water grouting?)			
14.20-14.40	Experience of acidic Mixture to resist sea water in Kurashiki LPG JAPAN, Masakuni Tsuji (SC)	storage cav	ern in	
14.40-15.00	Ongoing laboratory tests in Japan, Hitoshi Nakashima (SC)			
15.00-15.10	Comments and discussions for the laboratory tests (All participation)	nts)		
15.10-15.20	Short break			
Afternoon Part 2:	Final discussion - clue to develop the mutual technologies			
15.20-16.00	Discussions and summing-up (All participants) Tip for <u>KEY WORDs</u> ✓ Different properties, requirements, methodology between ✓ Countermeasure against sea water ✓ Fracture, gradient, durability, water leakage ✓ Potential and limitation ✓ What we need for each Sweden, Finland, and Japan ✓ What we can cooperate	each country		
18.00 Dinner at	Savoy Restaurant, Eteläesplanadi 14, Helsinki, organized by			
Workshop on colloidal s	ilica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017		12	
	KEY WORDS	(JAEA)	SHMŽ	
 KEY WORDS that we should have in mind now are; Different properties, requirements, methodology between each country 				
G (rheology, g durabil	rout properties el time, strength, mechanical ity, chemical durability) Sea water	propertie and distrib tivity, gradi	<mark>S</mark> oution, ent)	
(Targ Counterme	Requirement et of water leakage) asure against sea water Assured metho	o considen dology	ation)	
Potential a	nd Limitation of colloidal silica			
What	we need for each country what we can	coopera	ite	
Workshop on colloidal s	ilica grouting in sea water. Helsinki, 26th, January 2017		13	

Workshop on colloidal silica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017



KEY WORDS



• KEY WORDS reffered form the recent symposium in 2016,



A slide from the Introduction of 8th Nordic grouting symposium in Oslo by Eivind Grøv Chairman of the Scientific Committee Chief scientist/Professor II SINTEF/NTNU

• So, what do you have in mind now ?

Let's start!!

Note that the outcome of this workshop will be published to the JAEA's technical report. The report will be at least in English for the Summary and Appendix which records the minute of this workshop.

Workshop on colloidal silica grouting in sea water, Helsinki, 26th January 2017

付録 2: REVIEW OF SUMMARY REPORTS ON COLLOIDAL SILICA GROUTING IN FINLAND

本資料は、溶液型グラウト(コロイダルシリカのグラウト)に関し、海水環境下における 影響に着目し、フィンランドにおける最新研究、室内試験、適用実績等についての文献をま とめたものである。なお、本資料は、清水建設がフィンランドの Saanio & Riekkola Oy (岩 盤設計および地層処分技術を扱うフィンランドのコンサルタント会社)の Heikki Saarikivi 氏と Olga Boustani 氏の協力を得て作成したものである。

ここでまとめた文献のほとんどは、オルキルオトのオンカロに関連して POSIVA により 実施されたものである。オンカロは、将来フィンランドの地層処分場の一部となる予定であ る。また、フィンランドが携わった一般土木工事のプロジェクトとして、スウェーデンの Nygård tunnel を示したが、ここでは、溶液型グラウトの値段が高いこと、材料廃棄率が高 いこと、溶液型グラウトのための注入設備がないことなどから、効率的・実用的ではないと 評価されている。

オンカロは、2004年に建設を開始している。建設開始前に、主な課題は地下水位の降下 と施設への湧水が発生すること、さらにそれに伴う深層の塩水環境の地下水(化石水)が上 昇することとされ、地下施設への湧水を防止する手法は、岩盤グラウチングであると決定さ れた。このため、オンカロでは下記の通り非常に厳しい許容湧水量が設定されている。

- ・立坑1本あたり: 5 L/min
- ・坑道 100m あたり: 1~2 L/min

このように、オンカロでは許容湧水量が非常に厳しいため、100 µm より小さい岩盤亀 裂をグラウチングすることが研究開発の対象となり、セメントグラウトよりも優れた浸透 性能から溶液型グラウトを使用するようになった。また、長期安全評価、環境面、使用材料 の長期耐久性などの観点から、グラウト材料としては「低 pH セメント」および「溶液型グ ラウト」の二種類が今後の研究対象とされていることが分かった。

これらの試験で適用されてきた溶液型グラウトの製品名は、最初は Eka Gel EXP36 であ り、次に Meyco MP320 であり、現在は BASF 社によって販売されている MasterRoc MP320 である。

溶液型グラウトのコロイドが放射性核種の収着に与える影響も研究されている。ただし、 溶液型グラウトの長期安定性はまだ明確ではなく、シリカが長期にわたり溶脱する影響を 無視することはできないとされている。また、EBS システムで使用されるベントナイト緩 衝材は、コロイドの潜在的な供給源であると考えられるため、ベントナイトと溶液型グラウ トの相乗作用は不明とされている。コロイドを媒介しての放射性核種の移行に関しては、地 化学環境におけるコロイド安定性および移動性に依存するのではないかとされている。ま た、Olkiluotoでは塩水と淡水の中間の環境下から、塩水環境下の地下水が分布することが 分かっている中で、イオン濃度が高い地下水への溶液型グラウトからのコロイド流出は懸 念されていないが、氷河の融水に受ける影響を考慮する必要があるとされている。

近年、POSIVA により溶液型グラウトの注入直前に「淡水注入(Grouging with fresh water before colloidal silica grouting)」を実施する手法が実証されている。淡水注入の目的は、溶液型グラウトの塩水地下水への影響を防止し、グラウトのゲル化(ゲルタイム)を予測可能にすることである。実証結果から、淡水注入は溶液型グラウトを大量に消費することを防げるとともに、湧水抑制に効果的なことから非常に有望な手法とされている。

最新の研究では、サンドコラムを用い、塩水環境の地下水(人工地下水)で満たした場合 と、水道水で満たした場合に溶液型グラウトを浸透させる実験が実施されている。この研究 は、オンカロのデモトンネル 2 において溶液型グラウトの実証試験で発生した問題(ゲル タイムやゲル化の不確実性)を解明することを目的としている。注入時のサンドコラムの観 察により、溶液型グラウトと人工地下水または水道水が混ざり合う状況が明確となった。す なわち、「注入時は亀裂内に層流が発生し、地下水がグラウトに置き換わるため、グラウト と地下水の混合が起きない」という仮説を否定するものであった。

溶液型グラウトの注入は岩盤注入の分野ではまだ新しい手法であるが、放射性廃棄物の 最終処分施設において湧水を防止するために非常に良い手段であることが証明されている と言える。さらに、低 pH セメントと溶液型グラウトをプレグラウチングで組み合わせる手 法が、湧水抑制に最も適しているようである。ただし、溶液型グラウトの塩水環境下におけ る長期安全性やその挙動については完全には解明された訳ではないため、さらなる研究の 必要があるとされている。

フィンランドにおける文献の調査結果から留意すべき事項として、バルト海と太平洋の 塩分環境の違いがある。すなわち、フィンランドと日本の沿岸域を比較すれば岩盤条件と塩 水環境の違いにより地下施設における地下水環境は大きく違う可能性があることに留意す る必要があると言える。

次ページ以降に各文献の概要について示す。

(1) [a-7] Colloidal Silica-Grouting in Demonstration Tunnel 2 in ONKALO⁶⁾

1) Abstract

Posiva carried out grouting using colloidal silica as the grouting material and with the time stop method as the design approach. Three fans were pre-grouted at Posiva Oy's research space ONKALO demonstration tunnel 2 in autumn 2011 and early winter 2012.

Colloidal silica is a mix of one-component colloidal silica and accelerator. Before gelling, colloidal silica behaves like a Newtonian liquid. Colloidal silica's efficiency of penetrating hydraulic apertures in small fractures in rock is significantly better than that of cement-based grout.

The grouting design was based on an analytical calculation model. A new technique was used in the grouting implementation, which primarily differed from the previous technique regarding vacuum pumping and packers.

The goal of the first grouting fan in the demonstration tunnel was to check the functionality of the equipment and the method; therefore, the fan was drilled into rock mass with no hydraulic conducting fractures.

The second grouting fan was drilled into rock mass with an observed fairly low hydraulic conductivity that was lower than the start criterion established in Posiva Oy's requirements to manage groundwater inflows. Nevertheless, the grouting was carried out. The sealing effect was estimated from the control boreholes, and a slight improvement in sealing was noted.

The boreholes of the third grouting fan clearly penetrated a water conductive rock mass. The grouting was carried out in two phases, in which the new boreholes in the second phase were drilled between the existing ones that were drilled in the first phase. In the third fan, the grouting boreholes of the first phase were noted to be significantly crooked and the second phase grouting boreholes were drilled in locations that differed from the original design. The quantity of grouting boreholes was increased in the second phase. The sealing effect was estimated by monitoring the second phase boreholes and control boreholes. Based on observations from the control boreholes, the grouting had a sealing effect.

In the second and third grouting fans, the grouting boreholes started leaking a few hours after the grouting was finished. In order to find the cause of the leakage, the second grouting fan was grouted again several times. The cause of the leakage remained inconclusive.

Leaking bolt boreholes have been observed on the excavated rock surface. A leakage in the second grouting fan area has been mapped (0.4 l/min).

The grouting equipment and method was concluded to be functional. More focus should be placed on the preciseness of drilling the grouting boreholes and on verifying if leakages have been sealed. Based on these grouting experiments, the smallest sealable fracture hydraulic aperture using colloidal silica at the final repository depth is approximately 10 μ m.

2) Introduction

Grouting was carried out in autumn of 2011 in demonstration tunnel 2 in ONKALO, (Fig.-1)



Fig.-1 ONKALO and the demonstration tunnel 2 (red), where colloidal silica -grouting were carried out.

Posiva has set strict targets for water inflow into the ONKALO tunnels and shafts as well as for the disposal facility. The targets are due to the long-term safety of the disposal facility; too high inflow rates may conduct fresh surface water or draw up deep saline water to disposal level, and this is unfavourable for the engineered barrier system (EBS). At the same time, the amount of certain stray materials, especially cement-based, shall be minimised in order to restore favourable chemical conditions for EBS components.

The targeted inflow limits call for grouts that are able to penetrate into fractures of some tens of microns in hydraulic aperture. Cement-based grouts cannot penetrate into fractures with apertures in a range of 50-100 μ m or smaller. There are also limitations for the use of cement-based construction materials; the amount of cement should be minimised, and it should be of low pH below approximately 300 m depth. Colloidal silica is a good alternative to cementitious grouts; it is a low pH grout, and it can penetrate into extremely small fractures ($\leq 100\mu$ m).

Colloidal silica is regarded to function well in full scale production. The disadvantages are high price of colloidal silica and high mass loss. Grouting equipment shall preferably generate as steady a grouting pressure as possible. A vacuum pump has also been regarded as a necessity to get the grouting borehole empty of water or air before grouting. Emptying of boreholes is considered an efficient method of dealing with low inflows irrespective of grout type.

The targets of the grouting project were primarily that the inflows into the tunnel should be reduced by the planned methods (achieving targeted penetration lengths), with materials and techniques that are also considered acceptable for grouting of central tunnels and deposition tunnels in a future repository. In practice, this means the use of colloidal silica, design methods based on penetration models of Newtonian fluids, as well as the equipment and practices developed in the Äspö TASS-grouting project (Funehag 2008).

The main goal was to show that a sealing of the rock mass can be achieved by means of colloidal silica grouting. The newly developed methods used in the TASS-tunnel in Äspö HRL should be adopted to suit the rock mass and equipment in demonstration tunnel 2 in ONKALO, Finland.

3) Implementation and results

Altogether three grouting fans were applied. These fans were drilled at the tunnel chainages:

- TC48 (short test fan, 7 m)
- TC53 (actual grouting fan, one grouting stage, 20 m long)
- TC65 (actual grouting fan, two grouting stages, 20 m long)

The base design for actual grouting consists of stipulated pressures and grouting times. There were limitations, which were taken into account in the design. Desired penetration length was 3 m in the critical aperture (here set to 20 μ m based on the design calculations). 20 μ m comes from requirements and it is conservative (Q = 200 ml/min corresponds to bhydr~26 μ m)

A summary of the base design is as follows:

- Grouting pressure (total) = 9 MPa,
- Gel time = 55 min (tolerance ±2min is included in the calculations)
- Acceptable borehole filling time < 5 min.
- Pumping time = 44 min (4/5 of the gel time),
- Critical hydraulic aperture = 20 µm,
- Results in a theoretical penetration length of ~3.4 m,

With these settings of the grouting technique, the following fan geometry was chosen:

- Borehole distance of 1.3 to 1.5 m,
- The overlap of grout between grout boreholes is close to 100 % seen as the vertical distance between the boreholes,
- Borehole length of 20 m,
- Borehole diameter of 64 mm,
- All boreholes drilled nearly parallel to the tunnel and inside the theoretical tunnel profile,
- Minimum overlap of 4 m between grouting fans,
- The boreholes need to be angled from fan to fan in order to avoid starting a new borehole too close to an old one (the bottom of the borehole from previous fan), due to the overlap.

The base criteria used in grouting is that full pressure is reached within 5 min, and that the gel time is within the accepted limits of ± 2 min. A scale was introduced instead of the flow meter. The full pressure and the gel time were within the limits. As the project progressed, minor changes were made.

4) Conclusion

The fan at TC48 was a test fan, where the equipment work procedures were checked. In the area of fan at TC53 the rock was very tight, and it was questionable if grouting was needed. Grouting was done several times in the same boreholes, and every time the boreholes started to drip after packers were removed. There were problems both with borehole deviations and

with equipment. The reason for leaking is still unknown. However, re-grouting the same grouting boreholes was considered a futile operation. Grouting at TC65 was done with the split spacing technique, which leads to a very good sealing effect, and at least as good as in Swedish tunnelling projects, where colloidal silica was used as grout. Behaviour of colloidal silica was mainly as expected, and gelled colloidal silica was observed in boreholes. However, grouted boreholes started to drip again. Grouting equipment and the vacuum pump generally functioned well.

The grouting at demonstration tunnel 2, especially at TC65, clearly shows that a "tight" rock can be sealed even tighter. We are most likely dealing with channelled flows, which need be addressed with special consideration. The achievements of grouting cannot produce a fully tight tunnel, and this needs to be clear to everyone dealing with grouting. A methodology needs to be developed for showing if the targets have been reached or not. It should include devices for measuring very small flows.

Besides having taken a lot of effort and resources to reach these results, the gained knowledge from this project suggests that another design for grouting can be devised.
(2) 【a-10】 Grouting of shaft intersecting deep underground hydrogeological zones HZ20A & HZ20B in ONKALO underground research facility, Olkiluoto ²⁴⁾

1) Abstract

The excavation of the underground nuclear waste repository in the deep bedrock presents a challenge of minimizing inflow to prevent unfavourable changes in hydrogeology and groundwater chemistry, e.g. upcoming of deep strongly saline groundwater of infiltration of shallow waters into the bedrock. This paper focuses on grouting of the shafts (inlet and exhaust air shafts and personnel shaft) that intersect the hydraulic zones HZ20B at -300 to -400 metres above sea level.

Posiva and Rockplan have developed strategies on how to group grout, how to verify the sufficiency of the grouting results and, if necessary, to design post-grouting strategies to restrain the inflow into shafts. In the control holes the inflow limit is set to 0.2 l/min to assure the 5 l/min criteria in the open shaft after the raise boring.

The paper includes earlier phases of cement grouting, control and development of the work method, and brief review of a new silica grouting method.

2) Inflow requirements

The exaction of Onkalo and the repository may disturb the local groundwater conditions. If the inflow into the facility is too high, the pressure changes will raise the level of the highly saline groundwater, (currently below -500 metres) and the possible upcoming is estimated to be a risk to the functioning of the repository.

The maximum inflow set for the ONKALO extent is 80 l/min. The maximum total allowed inflow from all current and future HZ20 intersections is 40 l/min, which is modelled to prevent the rise of the deep saline groundwater. Currently the ONKALO inflow is between 30 to 35 l/min and has stayed at that level since the 10-15 l/min increase when HZ20-zones were intersected with the access tunnel early in 2009. The final inflow from HZ20 will be known after all the shafts are raise bored.

A crucial factor in keeping the total inflow within acceptable limits is the successful grouting of the shafts` intervals below the -290m level, which have the inflow have the inflow limit of 5 l/min per shaft. The threshold values may change as more information on groundwater behaviour is gained.

3) Silica grouting

Silica grouting has been utilized successfully in ONKALO at the connection tunnel leading to the repository level. The method developed by Rockplan and Posiva includes the preliminary step of injecting the fractures in bedrock with fresh water to prevent the contact of saline deep groundwater and silica grout. This was necessary because it was observed that silica entering a fracture filled with saline groundwater would flocculate rapidly and prematurely. The new method is described in more detail in the poster "Silica grouting in deep underground saline conditions in ONKALO underground research facility, Olkiluoto".

4) Conclusion

The grouting has been successful, considering the challenging environment and the strict limits set to the inflows. The need to create new procedures to improve the grouting results has given several new tools, which can be used in other projects.

The improvements in silica grouting (presented in further depth in poster "Silica grouting in deep underground saline conditions in ONKALO underground research facility, Olkiluoto") are likely to be the keystone in achieving the desired inflow of 0.2 l/min in control holes.

(3) [a-11] Silica grouting in deep underground saline conditions in ONKALO underground research facility, Olkiluoto ¹⁰⁾

1) Abstract

The excavation of the underground research facility ONKALO by Posiva in part of the final disposal facility related site investigations carried out in Olkiluoto, Finland. One of the key issues for the long term safety of the future underground repository is groundwater inflow management. It is also important to keep inflow and foreign reagent substances in the surrounding bedrock to minimum.

Grouting with silica in the saline environment has previously not yielded very good results (e.g. TASS tunnel at Äspo which required a remarkably dense grouting fan to achieve result 1)), and the small fracture apertures make cement grouting non-ideal. Rockplan and Posiva have developed a method for grouting with silica in saline groundwater conditions that has yielded extremely good results, as it prevents premature flocculation of the silica and thus ensures a good permeability. A tunnel from the research facility to the storage level was one of the first locations where it was used and this article illustrates the main results of that grouting.

2) Pre-grouting with water injections

It has been observed both in the field and in laboratory tests that colloidal silica grout can react with a saline groundwater. In saline conditions a rapid reduction of grout flow into boreholes during grouting and poor sealing results have arguments to exclude the possible negative influence of the saline groundwater. The proposed solution was to replace saline groundwater with fresh water. This was done by injecting the holes with fresh water at high pressure. By this method the fresh injected water pushes the saline water further away from the hole and from the close vicinity of the holes. Fresh water acts as a buffer between silica grout and saline groundwater.

The minimum pressure of water injections is depended on the groundwater pressure, but in practice 80-90 bar pressure was used in tight bedrock. The time limits is set such that the total target time of the preliminary steps before grouting is shorter than the duration of fresh water injection. This is intended to ensure that the pressure of the saline groundwater doesn't force the fresh water out of the rock joints before silica grouting can begin, and that the silica grout will not encounter saline water prematurely.

The hole being grouted was emptied of water by using pressurized air instead of vacuum to prevent the fresh water being sucked out from the joints. All holes not being operated simultaneously must have their packers closed. Utilizing the time in full ensures a relatively dry borehole, so that the silica does not dilute.

3) Conclusion

The improvement of using fresh water injection into the fractures before silica grouting yields a good result in grouting tight fractures in saline environment. In previous locations the silica mass consumption into the rock was minimal even though there was a water inflow. The gelling behaviour of the silica during grouting was unpredictable, and the grouted holes still had significant water inflow after the grouting severe leaking in the excavated tunnels was observed. By using grouting with fresh water injections prior to silica grouting the mass consumption had a strong correlation with the water inflow. Additionally, the grouted hole only had none or only a minimal inflow afterwards and all the silica mass in the holes was gelled perfectly. The tunnel was concluded to be nearly dry after excavation.

(4) **[**a-12**]** Low-pH Injection Grout for Deep Repositories, Summary Report from a Co-operation Project Between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden)²⁵⁾

1) Abstract

This report summarises results achieved in the joint SKB, Posiva and NUMO project "Injection grout for deep repositories". The work has been carried out in four sub-projects with SKB and Posiva as responsible for two sub-projects each. This report summarises the original reporting. Posiva was responsible for the studies on low-pH cementitious grout, while SKB was responsible for the studies on non-cementitious grout. The work was done by literature surveys, laboratory analyses and field tests.

A result of the project is that there are both low-pH cementitious material for grouting larger fractures ($\geq 100 \ \mu m$) and non-cementitious material for grouting smaller fractures (< 100 μm) that will, after further optimisation work, be recommended for grouting of deep repositories. This project concentrated on the technical development of properties for the low pH grouts. Long-term safety and environmental aspects and durability of materials were preliminarily considered. Continued evaluations have to be carried out.

The non-cementitious candidate materials were investigated regarding basic properties and long-term safety aspects in order to form the basis for the decision whether silica sol can be used in the deep repository and whether periclase (MgO) should be further investigated. In a small field-test it was also investigated if the penetration of silica sol (a Newton fluid) can be predicted based on hydraulic tests, transmissivity and hydraulic aperture.

Silica sol, colloidal silica, is a stable dispersion of discrete nonporous particles of amorphous silicon dioxide (SiO2). The product tested in this project, Eka Gel EXP36, has a particle size of around 14 nm. When used as injection grout, the silica sol particles shall aggregate and form a solid gel at the set time. This is controlled with addition of salt, normally sodium chloride (NaCl) or calcium chloride (CaCl2). The concentration of the accelerator (salt) depends on the properties of the environmental conditions, e.g. groundwater flow, water temperature, salinity of the surrounding water, etc and on the time required for the sol to gel. When using NaCl, the concentration of the accelerator in solution is normally around 10%. If calcium chloride is used as accelerator, the total chloride concentration is reduced some 75%. Both a higher salt concentration and a higher temperature give a shorter gelling time.

Rock grouting with silica sol is a relatively new application. Silica sol has been used for soil grouting in e.g. Japan. The Japanese experience is that colloidal silica is a durable grout. Test results show that samples were impermeable during a test period of more than 11 years, and that it achieved increasing strength in saline water. Since there was little known about the basic mechanical properties of silica sol, these were investigated at Chalmers University of Technology using standard methods for concrete and geotechnical testing and the test specimens were cured in four different environments.

No significant release of colloids is foreseen because the Ca and Na ion concentration in the groundwater is expected to be high enough to suppress colloid formation. The salt used as accelerator will not affect the salt levels in the groundwaters expected in the Finnish and Swedish sites. The long-term stability of silica sol gel has not been clearly demonstrated and it's favourable to gain a better understanding of its durability and mechanical properties before it can be recommended for repository grouting. Experiments with silica sol and sand

columns show that by assuming that the hydraulic aperture is a good estimate of the aperture of a fracture, the results from the sand column test can be applied to interpret both the penetration length in fractures and the grout characteristics themselves.

2) Introduction

When constructing a deep repository, the use of common construction materials, as steel and concrete, are foreseen. With respect to the repository long-term safety, a suitable chemical environment is vital. The use of low-pH products is necessary in order to get leachates with a sufficiently low pH (\leq 11). Hence Posiva from Finland and SKB from Sweden carried out a pre-study in 2001. The feasibility study was carried out in 2002 – mid 2003. Apart from Posiva and SKB also NUMO from Japan sponsored the studies. The feasibility study is not reported in a referable report.

As a result of the feasibility study, the participating companies found it necessary to separate the development of injection grouts into two types, one for larger fractures, i.e. hydraulic aperture $\geq 100 \ \mu\text{m}$, and one for smaller fractures, i.e. hydraulic aperture $< 100 \ \mu\text{m}$. In June 2003, the three participating companies NUMO, Posiva and SKB launched the here reported project "Injection grout for deep repositories". The results in this report are based on research mainly performed at Chalmers University of Technology, Sweden and VTT (Technical Research Centre of Finland), Finland. The objectives of the current project were to:

- Develop cementitious grout recipes for larger fractures, i.e. hydraulic aperture ≥ 100 μm that gives a pH ≤ 11 in the leachate. Further the grout should be verified in the field, showing that it fulfils requirements on workability and penetration.
- $\cdot\,$ Develop low-pH non-cementitious grouts for smaller fractures, i.e. hydraulic aperture $<100~\mu m.$
- Test grouting with silica sol in earlier cement grouted fracture at the Äspö HRL.

3) Non-cementitious low-pH injection grout for smaller fractures

The text in this section is based on the referable reports (Axelsson, 2004; Funehag, 2004a,b; Funehag, 2005) and on non-referable reports and memos written by Dr. Hiroyoshi Ueda (NUMO), Dr. Börje Torstenfelt (SwedPower AB), Mr. Kalle Pettersson (SwedPower AB) and Dr. Mats Jansson and Dr. Maria Atienza (KTH, the Royal Institute of Technology).

Grouting of smaller fractures, hydraulic aperture < 100 μ m, is anticipated to be done with non-cementitious low-pH grouts. The objectives of the sub-projects SP2 and SP4 were to investigate basic properties and long-term safety aspects of the non-cementitious candidate materials, to form the basis for the decision whether silica sol can be used in the deep repository and whether periclase (MgO) should be further investigated. Further, it was investigated if the penetration of silica sol (a Newton fluid) can be predicted based on hydraulic tests, transmissivity and hydraulic aperture.

The laboratory work was carried out at Chalmers University of Technology while a literature review on silica sol was carried out by NUMO and environmental acceptance and long-term safety studies were carried out at SKB, the Royal Institute of Technology in Stockholm (KTH) and Swedpower. Further Swedpower carried out a short review on periclase grouting.

A small field-test was carried out by Chalmers at the Äspö HRL.

4) Main findings on testing of silica sol

The field-tests at the Äspö HRL aimed at investigating the transmissivity and penetration of silica sol (a Newtonian fluid) in a small fracture, aperture 40–50 μ m. The fracture has earlier been grouted with cement (a Bingham fluid), resulting in a very limited penetration. The methods for predicting/estimating the grout penetration were hydraulic tests, visual observation of the cores and microscopy analyses.

The visual observation showed that five of total six cores had traces of silica sol. All cores were drilled within the predicted penetration length. One core did not show any traces of grout even though cores further away did. The use optical brightener is not the best tracer because particles may cause some clogging. Other tracers, e.g. Uranine, should be considered in future research, but laboratory work needs to be carried out to see that it does not affect the properties of the grout.

5) Conclusion

The basic mechanical properties of silica sol were investigated. No requirements were set on this grout, except that it should be possible to grout fractures smaller than 100 μ m and that the leachant pH should be below 11.

The project has not carried out any pH measurements on silica sol leachates, but the manufacturer states that pH is 9.5–10. Silica sol is colloidal silica in a stable dispersion of discrete non-porous particles of amorphous silicon dioxide, SiO2 with 5–100 nm particle diameter. The particles in the tested product Eka® Gel EXP36 have a diameter of 14 nm. Adding a salt, sodium chloride and calcium chloride, makes the silica sol particles aggregate and form a gel.

Rock grouting with silica sol is a new application, but some successful minor rock grouting tests had been performed in Sweden at the start of the project. Silica sol has been used for soil grouting in e.g. Japan, where durability, penetration properties and controlling of gel time have been identified as key issues. More than 11 years of permeability tests on grouted sand columns indicate that silica sol is a durable grout (Yonekura, 1996).

Silica sol is ductile at the beginning of the hardening process and gets more and more brittle as strength increases. This strength increase continues over a long time. In the laboratory tests it was found that the strength increase and shrinkage are highly depending on ambient temperature and humidity. A high temperature and/or low humidity make the strength development faster. Silica sol also has a tendency to shrink in low humidities. The shrinkage, after six months in 8°C and 75% relative humidity, can be as large as 25%. The results of the tests that were carried out to imitate drying out of silica sol in a fracture are not fully understood. After breakthrough of water, the leakage decreases over time.

Change of humidity in a tunnel and fracture is likely to occur. In order to gain a better knowledge of climatic influences on silica sol behaviour it would be favourable to further investigate strength development and drying shrinkage followed by wetting again, at different humidities and temperatures. Colloidal silica seems to be a feasible material to seal very small fractures (< 0.05 mm). The gel is sufficiently stable to prevent water flow through the sealed fractures. This can be concluded after other studies carried out during 2–3 years, a time put in relation to the time the tunnel in question is to be open. No chemicals are foreseen released in concentrations that would be harmful to the environment.

Colloid formation has been found small in laboratory tests, less than 1 ppm, and is likely to be suppressed by the high enough content of ions (Ca, Na) in the groundwater. The long-term stability of silica sol gel has not been demonstrated. The anticipated salt amounts originating from the accelerator are not expected to cause any problem as groundwaters at repository level also have substantial salt concentrations.

The studies presented in this report have given a better understanding of the gel behaviour, but those studies need to be complemented. The minor field-test carried out in a drained rock pillar at Äspö HRL showed that it is possible to grout, calculate and predict grout spread in fractures that could not be grouted with cement.

Silica sol is acceptable from an environmental and long-term safety point of view. The longterm stability of the product needs to be evaluated. However, it is favourable to gain a better understanding of the durability and the mechanical properties to be able to make a proper grouting design before it is recommended for repository grouting.

(5) [a-13] Control of Water Inflow and Use of Cement in ONKALO after Penetration of Fracture Zone R19 $^{\rm 26)}$

1) Abstract

The construction of ONKALO, the underground rock characterisation facility at Olkiluoto, started in summer 2004. The potential disturbances due to construction of ONKALO, which were assessed prior to construction, have been reassessed in this report. The identified disturbances due to the construction of ONKALO were the drawdown of the groundwater table, and intrusion of surface water and upconing of deep saline groundwater. The intrusion of surface water would lead to reduced pH and redox buffering capacity of the rock. The latter would lead to locally high salinity levels that may negatively impact the performance of the buffer bentonite and backfill.

This report comprises the observations for the first 670 m of access tunnel (reached in September 2005). The measured water inflow (1.7 l/min/100 m of tunnel) has remained well within the set target (1 - 2 l/min/100 m of tunnel). Grouting has been used as a measure to minimize water inflow.

The performance of the currently used ordinary cementitious grout and of the proposed new grouting materials (low-pH cementitious grouts and colloidal silica) has been evaluated. It is recommended that the use of the current grouts be continued while grouts based on low-pH cements and non-cementitious materials are being developed and tested. Clear acceptance criteria and peer review of new materials performance need to be adopted before adopting new materials.

2) Introduction

The suitability of Olkiluoto for the location of a spent fuel repository has been investigated over a period of fifteen years by means of ground and airborne methods and from shallow and deep (300 - 1000 metres) boreholes. The construction of ONKALO, the underground rock characterisation facility at Olkiluoto, started in summer 2004. The first estimate on the potential disturbance due to the construction of ONKALO was assessed in Vieno et al. (2003). The first version of an integrated.

The identified disturbances due to the construction of ONKALO are the following:

- In case of no sealing of rock: drawdown of groundwater table, and intrusion of surface waters leading to reduced buffering capacity of rock (pH, redox), and upcoming of deep saline groundwater, which may lead to locally high salinity levels that may be harmful for the buffer bentonite and backfill.
- In case of sealing of rock by cementitious materials: formation of a high pH plume originating from cement, and its effect on the transport processes in the geosphere and the performance of the EBS.

The aim of this study is the updating of the estimates on the geohydrological and geochemical disturbances based on the new site data and the results from monitoring. Recommendations and justifications for the practises to be adapted after penetration of RH19B from the long-term safety point of view are also made.

3) Knowledge and experience gained from the construction of ONKALO There are numerous alternatives for grout mixes in tunnelling. Grout mixes can be divided into cementitious grouts and chemical grouts. The so-called chemical grouts include a wide range of chemically different grouts. These can be divided into gels (silicates, acryl amids, acrylates, lignosulphonates) and into resins (aminoplasts, fenoplasts, epoxy and polyurethane) (Axelsson & Nilsson 2002, Andersson & Sellner 2000, Andersson 1998).

Most of the chemical grouts were out of consideration because organic materials should be avoided in the construction of ONKALO, and thus only cementitious grouts and silicates were left. Sodium silicate (water glass) is not chemically stable, and it is suitable only when shortterm water tightness is required. Colloidal silica is promising, but the experience of it is very limited. Thereby, cementitious grouts were considered to be suitable as the main grout material.

The target for water inflow is tight, which means that fractures with small aperture have to get sealed. This requirement limited the suitable cements to the group of microcements, of which d95-grain size is less than 20 μ m. Also sulphate resistant cements were preferred, which left only a couple of commercial products. Ultrafin16 is generally considered to have good penetration ability, and it was thus selected for use in ONKALO.

4) Development and testing of non-cementitious grout for fractures with small

apertures (< 50 µm)

Colloidal silica is a new grouting material that has a great potential to penetrate narrow fractures. The main experiences of colloidal silica are from grouting of soil in geotechnical applications.

The colloidal silica tested within the project "Injection grout for deep repositories" consisted of 35 wt.% SiO2 and the accelerator used was CaCl2 (2.9 wt.%); pH was around 10. The colloidal silica was stabilised with Al2O3 (0.8% by weight of SiO2).

The key questions related to the performance of the colloidal silica are related to the following:

- Development of basic mechanical properties of colloidal silica with time, such as drying shrinkage, flexural strength, compressive strength, and shear strength
- Penetration ability
- Eventual release of colloids from colloidal silica.

Based on the studies performed (Bodén & Sievänen 2005), colloidal silica seems to be a feasible material for sealing fractures with very small apertures (<50 \pm m). The gel is sufficiently stable to prevent water flow through the sealed fractures. However, the drying out of colloidal silica in a fracture is not fully understood. The long-term stability of colloidal silica gel has not been clearly demonstrated and it will be advantageous to gain a better understanding of its durability and mechanical properties before recommending it for repository grouting.

Within the new SKB-Posiva-NUMO co-operation project "Premises for optimisation of lowpH grouts" SKB/Chalmers will study the identified critical issues during the earlier project phase, such as the effect of variable environmental conditions (drying shrinkage, effect of humidity, strength development). The plan is also to include detailed studies on the molecular development of hardening colloidal silica. Also the setting time and gelling time need to be evaluated.

5) Conclusion

Experiences from colloidal silica are so far based on laboratory testing of shrinkage and strength properties and field-testing in two tunnels in Sweden. The penetration ability of the material is expected to be into fractures with apertures less than 50 μ m. A clear benefit as compared to the other cement-based grouts is that there is no need for a superplasticizer. Strength is a material property needing more effort. Strength is very much dependent on the environment, e.g. the development of longer-term compressive strength is much slower when compared to that of the low-pH cementitious grout.

With regard to the management of the groundwater inflow into ONKALO, the following options were considered:

- · All grouts, cementitious or not, are to be used, but in smaller amounts.
- · Colloidal silica will be especially used for fractures with very small apertures.
- · Later, if other materials become available, they might be used as well.

Recommendations: Development and testing of complementary grouting materials, such as colloidal silica, for smaller fractures should also be continued. Better understanding of its durability and mechanical properties is needed before it can be recommended for ONKALO or repository grouting. It is likely that a combination of low-pH cementitious grout and colloidal silica will be needed in the future.

(6) [a-14] Pre-grouting test in Nygård tunnel – Silica Sol in practical use ²⁷⁾

1) Abstract

This final thesis deals with grouting of rock caverns. In this final thesis is examined pregrouting by Silica Sol and compared that with grouting by cement view point of method of work, time management and results.

Both cement grouting and grouting by Silica Sol were examined in Sweden, Nygård-tunnel, where is made observations of method of work, disturbances, time management and wastages. Information about need and importance of grouting, grout and facilities were studied from literature.

This final thesis reveals that method of work which is used in grouting test, is not practical grouting method to Lemcon Ltd. By improving the working method of grouting and developing facilities, pre-grouting by Silica Sol could be practical method of work.

2) Introduction

Time management and wastages required by pre-grouting can be estimated based on feasibility studies carried out during design phase. However, estimating work is very imprecise.

In Sweden, the contracts based on unit prices are often used in rock construction projects. For this reason, the grouting works may cause losses for contractors, in case if changes in the number of units should be considered. In case there is no possibility of the risk mentioned above, the unit prices for grouting works might be smaller. A work phase with smaller risks would be better for client and contractor alike.

The aim of this thesis work was to study the use of Silica Sol and to compare it with the cement grouting from the point of view of work methods, time management and results. Based on pre-grouting tests carried out in Sweden, this thesis work is aiming to give the answers for the following questions:

- How Silica Sol differs from cement grouting used nowadays?
- What Silica Sol requires from the equipment?
- How the use of Silica Sol affects the use of resources and duration of works?
- · How the time used for grouting works depend on the rock qualities?
- · Does Silica Sol decrease leakages?
- Is this method appropriate, effective, and practical for grouting work with the equipment and resources provided by Lemcon Oy?

The pre-grouting with Silical Sol was planned by the owner of the project (Banverket) and it was just one possible way of using this grouting material.

3) Colloidal silica grouting

In pre-grouting test carried out in a Nygård tunnel, a milk-white product called Meyco MP 320 is used as a colloidal silica material.

The product has been tested in different sites all over the world, including Ireland and Sweden. In Ireland, the product was used for reinforcement of sandy and silt soils around the

mineshaft. In Göta tunnel in Göteborg, the product was used for pre-grouting purposes due to very demanding conditions on site.

For the pre-grouting tests in Nygård tunnel, the same equipment was used for grouting works as well as for cement grouting within the same project. The pre-grouting test was made in Nygård tunnel, with pile intervals 436+723-436+633, i.e. the total length of the grouted area was appr. 90 m. Three first fans were chosen for this thesis work as a sampling unit. During the test, five fans were grouted in a railway tunnel starting from pile interval 436+723-436+699. In one fan, there were 40 grout boreholes, 24 m long each. The boreholes had the same direction outside the tunnel profile as the boreholes that were used for the cement grouting.

It was decided during the test that the boreholes located in the lowest part of both sides of the tunnel should be grouted with cement and other with colloidal silica. As a rule, there were 19-21 boreholes grouted with cement in one fan, the rest of boreholes were grouted with colloidal silica.

4) Comparison of working practices

There are significant differences in work methods. In traditional work method, only one grouting substance is used, whereas in pre-grouting test two grouting substances were used. Using of two grouting substance causes additional washing when for example cement is changed to colloidal silica. Equipment should be washed thoroughly in order to prevent setting of substances and therefore causing problems. Also, short setting time of colloidal silica requires additional washing, a mass prepared for one borehole cannot be used in another borehole as the setting process of material will start after a short period of time after mixing it with accelerator.

5) Conclusions

The method that was tested is not appropriate, efficient neither practical grouting method for grouting works with equipment used by Lemcon Oy. Table-1 shows the advantages and disadvantages of grouting with cement and colloidal silica.

Grouting with cement	Grouting with colloidal silica
Advantages:	Advantages:
the price of material	short setting time
the method is well known	good penetrability
Disadvantages:	Disadvantages:
bad penetrability	the price of material
long setting time	the method is not known
	equipment washing

Table-1 Advantages and disadvantages of grouting with cement and colloidal silica.

The high price of material and high wastage percentage are the most essential reasons why the method used in pre-grouting test is not appropriate. The best and biggest improvement would be the renewal of grouting equipment. A new pump that would allow to pump into borehole two different substances simultaneously should be developed.

(7) 【a-16】 Silica Colloids and their Effect on Radionuclide Sorption – Experimental Study ²⁹⁾

1) Abstract

Non-cementitious grouts have been tested in ONKALO for the sealing of fractures with the small hydraulic aperture. A non-cementitious inorganic grout material for sealing the fractures of the apertures less than 0.05 mm is colloidal silica called silica sol. In this work, the release of silica colloids from the silica sol gel, the stability of silica sol colloids and sorption of Europium-152 on silica sol colloids were determined in saline OLSO and low salinity Allard groundwater simulates, de-ionized water and NaCl and CaCl2 solutions. The salinity of groundwater had a significant influence on the release and stability of silica colloids. In OLSO, particle size distribution was at first wide from nanometres to thousands of nanometres. According to the disappearance of large particles, aggregation and sedimentation had been occurred after one year. Zeta potential values around zero indicated the instability of colloids. In Allard, particle size distribution was narrow and the particle diameter remained less than 60 nm. High negative zeta potential values were in accordance with the existence of stable silica colloids. Europium sorption on silica sol colloids was significantly dependent on solution pH. The Kd–values were 2–10 m3 kg-1 for OLSO pH 7– 8 and Allard pH 8–9 and 100–140 m3 kg-1 for OLSO pH 10–11. In OLSO pH 10–11 samples Eu-152 was rapidly sorbed onto silica sol colloids and measured radioactivity in a liquid phase was at the background level resulting in inaccurate Kd determination.

The concentrations of the released silica colloids were some higher than concentrations of natural colloids determined in granitic groundwater. The main uncertainties remain in the quantification of colloid generation under realistic repository conditions and how mobile colloids are. Irreversible sorption on silica colloids may increase radionuclide transport if colloids are sufficiently stable. Under the prevailing medium saline to saline groundwater conditions in Olkiluoto, no significant release of colloids from silica sol is expected but the possible influence of glacial melt waters and the synergy of bentonite and silica colloids has to be considered.

2) Introduction

In the underground rock characterization facility ONKALO, final disposal technology is tested in actual deep underground conditions. Cement is predominantly used for permeation grouting in hard rock. Because of high pH value which can be harmful for the Engineered Barrier System (EBS) (Boden and Sievänen 2005) and limitation in penetration for cement-based grouts, non-cementitious grouts have been tested in Olkiluoto for the sealing of fractures with the small hydraulic aperture (Arenius et al. 2008).

Colloid-facilitated transport of radionuclides may significantly contribute to the long-term safety performance of a spent nuclear fuel repository. In colloidal system solid particles from 1 nm to 1 µm in diameter are dispersed in liquid to form suspension. Due to surface charge, a high surface-to-volume ratio and low diffusivity, colloid transport is significantly different to that of a solute. Several studies have indicated radionuclide, especially actinide sorption on colloids and the mobility of radionuclides attached to colloids (Puls and Powell 1992; Vilks and Baik 2001; Yamaguchi et al. 2008). Field-scale studies at hazardous waste sites have evidenced that colloid transport can enhance the actinide migration (Buddemeier and Hunt 1988; Kersting et al. 1999; Novikov et al. 2006). Objective of this experimental work was to determine colloid release from the silica sol gel, the stability of silica colloids in different

groundwater conditions and radionuclide sorption on silica colloids.

3) Experimental

The silica sol and NaCl accelerator proposed to be used by Posiva has the brand name "MEYCO® MP320" (EKA Chemicals). Grout consists of a sol of colloidal silica and a salt solution called accelerator. Silica sol is a stable suspension of amorphous particles of silica [SiO2], which builds randomly distributed [SiO4]4- tetrahedra (Iler 1979). The particles have hydroxylated surfaces, which are insoluble in water. Colloidal silica is manufactured from of quartz and NaCl heated and diluted with water to make a liquid. The colloidal particle size is normally 5–100 nm. The size and shape of dried silica sol colloids were determined by scanning electron microscopy, FESEM. The average pH of the solution is 9.4 and viscosity of the sol is similar to water.

Groundwater simulates used, were the saline OLSO (Vuorinen and Snellman 1998) and low salinity Allard (Allard and Beall 1979). Initial pH values were adjusted to 7–11. Silica sol gel samples were made by mixing 4 mL silica sol and 1 mL accelerator in a 15 mL plastic centrifuge tube. After 45 min final setting time, 10 mL groundwater simulate or electrolyte solution was added on top of gel. The release and stability of colloids were followed by taking samples after about one month, half year and one year. Release of colloids from silica gel was followed by analyzing solution pH, particle size distribution, colloidal silica concentration and stability of colloids identified by measuring zeta potential.

Stability of silica sol colloids was followed in de-ionized water (MilliQ) and OLSO and Allard groundwater simulates. The stability of colloids was surveyed by measuring particle size distribution, particle concentration and zeta potential as a function of time.

4) Results and discussions

At the beginning, pH was stabilized predominantly due to atmospheric CO2. After one year, measured pH values were increased likely due to hydroxide ions produced in the dissolution of silica. Difference in pH values between OLSO and Allard is explained by calcium and sodium ions present in saline OLSO in which calcium hydroxide and sodium hydroxide is produced resulting in lower pH values in OLSO.

Particle size and zeta potential in MilliQ samples was rather stable except the most two diluted solutions. These results also confirmed that the release and stability of silica colloids depend significantly on groundwater salinity. In saline OLSO, colloidal particle size distribution was wide from nanometre size to thousands of nanometres. The disappearance of large particles and decrease in colloidal silica concentration during an experimental time and a zeta potential near zero suggest flocculation or coagulation. In low salinity Allard samples, particle size distribution was rather constant over an experimental time period and mean particle diameter remained less than 100 nm. Zeta potential decreased with solution pH. Negative zeta potential values indicated the existence of stable silica colloids. Decrease in colloidal silica concentrations and increase in the occasionally measured reactive silica indicated dissolution of silica colloids.

5) Conclusions

The concentrations of the released silica colloids were some higher than the concentrations of natural colloids determined in granitic groundwater. The long-term stability of silica sol gel has not yet been clearly demonstrated and a long-term release

of silica colloids cannot be excluded. The bentonite buffer used in the EBS system is assumed to be a potential source of colloids and the synergy of bentonite and silica colloids are still unclear. The potential relevance of colloid-mediated radionuclide transport depends on colloid stability and mobility in different geochemical environments. The main uncertainties remain in the quantification of colloid generation under realistic repository conditions and how mobile colloids are. Irreversible sorption on silica colloids may increase radionuclide transport if colloids are sufficiently stable and thus mobile. Under the prevailing medium saline to saline groundwater conditions in Olkiluoto, no significant release of colloids from silica sol is expected, but the possible influence of glacial melt waters has to be considered.

(8) 【a-17】 R20 Programme: Development of Rock Grouting Design, Techniques and Procedures for ONKALO ³⁰⁾

1) Abstract

The Grouting Technique –project (INKE) studied the grouting experiences obtained from the first 2 km of the ONKALO access tunnel, searched for suitable grouting design approaches, carried out two grouting tests and one pilot grouting test with colloidal silica in ONKALO, analysed the expected grouting conditions in deep rock from the grouting point of view, studied the feasibility of so called optimal design solution in the expected grouting conditions.

The ideal grouting design solution (in this project: the use of low pH cementious grouts, grouting holes inside the tunnel profile, limited grout take) from the long term safety point of view and the feasibility of it in different rock conditions is presented, but it can be used seldom, because fractures are typically very small. The alternatives are to direct the grouting holes outside the tunnel profile, to use higher grouting pressures or to develop thicker and thinner grout mixes and take colloidal silica in use. The last alternative is recommended.

2) Introduction

It was decided before the construction that grouting will be the primary measure to control the groundwater inflow into the tunnels. The achievements and the strategy of grouting was evaluated earlier, when the major water bearing structures called RH19 at the depth level of about -100 m were intersected (Ahokas et al. 2006). The suggestion was made to develop grouting further for better control of water ingresses.

Those recommendations resulted in Posiva Oy's decision to set up the R20 programme for the years 2006 - 2008. The programme is a R&D scheme with an objective to enhance the control of water inflow by grouting. The programme shall come up with a feasible grouting methodology, which can be applied after intersecting the group of water bearing RH20 structures at the approximate depth of -70 m.

The R20 programme (Hansen et al. 2008) consisted of three projects covering the following areas (the project abbreviation in brackets):

- 1. Long term safety issues related to the controlling of water inflow (IPA),
- 2. Technical properties of grouting materials (IMA) and
- 3. Development of grouting design, techniques and procedures (INKE).

This report describes the outcome of the INKE project and presents the outcome of various subtasks as well as puts forward a suggestion for a grouting method for future.

3) Experiences from the field tests

Three grouting tests were performed in ONKALO during the year 2007. The first grouting test was performed in the ONKALO access tunnel with cement-based low pH grout. The second grouting test was carried out in the personnel shaft 1. This test was divided into three stages and the low pH grouts were used. The third grouting test was a pilot test with colloidal silica.

Concluding remarks about the pilot test with the colloidal silica:

- · Plenty of first hand practical experiences were obtained,
- Water pumps and water flow gauges used in conventional way to determine loss were not suitable in these rock conditions with quite a poor conductivity,
- Results cannot be considered reliable, and to draw any conclusions on grouting is difficult,
- Also, small grout flow was nearly impossible to observe due to too poor accuracy of the grouting equipment (0.0 dm3/min) and
- The reading accuracy of the flow meters should be 0.01 dm3l/min.
- 4) Discussion and synthesis

Many practical hints for operating with colloidal silica were obtained in the pilot field. These apply to e.g. its sensitivity to impurities in the mixers, the accelerator quality and the dosing, the practical range of the operating time, the operating time considerations, when designing the grouting and the work phases, the storage of the components, etc. It was hard to remove all the silica from the grouting holes (in order to fill them with the cement paste later). Because the content of the accelerator has a great impact to behaviour of the colloidal silica and the practical operation times, the question, how to seal relatively large fractures under high water pressures with this material aroused. In order to get the material to gel fast enough, the accelerator content should be relatively high, which means that the practical operation time for the grouter will be very short. The beaker test did not work as a method to follow the early age strength development of colloidal silica, because the conditions prevailing in rock differs significantly from those in a tunnel.

The grouting with accelerated mixes and especially with colloidal silica should be trained more, because there are limitations concerning the time frame the material properties remain within workable limits.

5) Conclusions and recommendations

Pre-grouting is recommended to be the main way to seal the rock. In order to enable fluent and cost efficient tunnel driving, the use of typical designs for the expected rock conditions is recommended. The major structures like the RH19 and the RH20, the shafts, the post-groutings, the cases where a leaking fracture intersects the tunnel drift, should be designed individually. According to the study performed, the fractures down to the hydraulic apertures of $100 - 200 \mu m$ can be sealed with the cementitious low pH grouts and having the grouting holes inside the tunnel profile (to minimise the grout remaining in rock). However, these fractures occur very sparcely in the ONKALO bedrock, and usually the alternative design solutions have to be searched. Those are: the use of colloidal silica instead of cementitious grouts, the grouting holes outside the tunnel profile or having high grouting pressures. Out of these choices, the use of colloidal silica and the grouting holes outside the tunnel profile are recommended. The development of thicker cementitious grouts for intersection of the major hydrogeological structures is recommended.

(9) [a-18] Impact of groundwater salinity on penetration of colloidal silica ³¹⁾

1) Abstract

The aim of this bachelor's thesis was to study the impact of groundwater salinity on penetration of colloidal silica, i.e. to observe and to follow in the laboratory tests how salty groundwater affects the penetration of grouting mass, colloidal silica. In addition to description of laboratory tests, their implementation and results, this work describes also material properties of colloidal silica, its operating principles and penetration problems detected during in-situ grouting. Also, the requirements set by final disposal of nuclear waste for grouting masses used in the rock as well as waterproofing achieved as a result of their use are presented in this bachelor's thesis.

For this bachelor's thesis, some sand column tests were carried out. Two pipes located next to each other were filled with sand and afterwards with water with different salinity degree. One pipe was filled with fresh water and another one with groundwater that was prepared artificially specially for this test. The space that was left between the sand grains simulates the geometry of natural fractures in the rock. The hypothesis was that colloidal silica would penetrate in pipes simulating rock fractures differently in salt-free and salty environment as it was proved during in-situ grouting described in this bachelor's thesis.

Based on results of this bachelor's thesis, the salinity of capillary water had clear impacts on penetration of colloidal silica. In pipes filled with artificial groundwater, grouting material flocculated, i.e. silica grains agglomerated too soon due to higher water salinity. The penetration of colloidal silica with fresh water taken from a tap was not disturbed.

The results of this study are analysed quantitatively as well as with visually and by making observations. Water injection with salt-free water before starting grouting with colloidal silica that was tried in in-situ grouting could be a solution for grouting in environment with salty groundwater. Finally, this bachelor's thesis work presents improvement suggestions for sand column test that were carried out for this study.

2) List of abbreviations

tG	Effective gelling time [s]
р	Hydrostatic pressure [Pa]
Δp	Prevailing overpressure [Pa]
b	Hydraulic gap opening [m]
μ0	Viscosity [Pa·s]
I <i>max,21</i>	D Maximum possible penetration depth [m]
g	Average acceleration of gravity [m/s ²]

3) Introduction

Usually, a mixture of cement and water is used for grouting. However, due to increased requirements to waterproofing in tunnel and rock construction works some alternative grouting materials were developed to be used instead of cement. One of such materials is colloidal silica with smaller size of particles comparing to cement based grouting materials. However, silica's strength qualities are weaker. Thus, colloidal silica can be used for blocking smaller fractures. Bigger fractures determined in the same site can be blocked with grouting material based on cement (Funehag 2011.)

Some sites require high level of waterproofing, such as repository for spent nuclear fuel. For example, the suitability of the Olkiluoto bedrock for the final disposal was studied in Posiva's underground rock characterisation facility ONKALO in Olkiluoto. In this site, high criteria is set for the level of waterproofing and for this reason some grouting tests with colloidal silica were carried out. Also, the use of grouting materials based on cement is reduced as the higher pH of cement could cause harm to a multibarrier system.

However, some problems were detected in penetration of silica and in achievement of required level of waterproofing. Especially in the environment with salty groundwater, the level of waterproofing was below required level and grouting had to be repeated several times resulting in lower level of waterproofing comparing to desired one. Flocculation, i.e. too fast agglomeration and gelling of silica grains that prevents the penetration of the mass during grouting, is suspected to be one possible reason for this. (Hatakka et al. 2013)

The aim of this bachelor's thesis was to find out the impacts of salty groundwater on penetration of colloidal silica in laboratory tests. For this purpose, a sand column test was carried out in the laboratory of Department of Civil and Environmental Engineering of Aalto University. Based on test's results, the same problems were faced during testing that were detected also during in-situ grouting tests.

Firstly, the material properties of colloidal silica, its operational principles and application are described in this work. In the next part of the work, the sand column test is described phase by phase from its planning till implementation with following presentation of its results. The last chapter covers conclusions and reasoning based on results of sand column test.

The term 'effective gelling time' ('tehollinen geeliytymisaika' in Finnish) is a free Finnish translation of English term 'gel induction time'. Effective gelling time in this bachelor's thesis means gel induction time.

4) Application of colloidal silica in grouting and penetration related problems

With connection to the final disposal of spent nuclear fuel, pre-grouting works were carried out in the demonstration tunnel 2 of Posiva's underground rock characterisation facility ONKALO in 2011 and 2012. It was stated in Posiva's work report published in December 2013 that there is no enough data on impacts of salty ground water on grouting with colloidal silica. However, it was mentioned that especially high calcium content may affect to some extent the penetration of colloidal silica. Also, it was brought out that mixing of colloidal silica with water when silica replaces the groundwater in a fracture is very unlikely. According to the report, silica's flow with slow speed is also laminar. Taking these facts into consideration, grouting boreholes started to leak already in some hours after grouting. The reason for leaking was not clarified, despite the fact that grouting fan was repeated again several times. Demonstration tunnel 2 had a total salinity of 13860 mg/l and 2100 mg/l of it was calcium. (Hollmén et al. 2013.). Also in TASS tunnel in Äspö groundwater contained salt. A grouting fan with boreholes located closer to each other had to be used there in order to achieve required grouting results. (Hatakka et al. 2013)

Flocculation is suggested to be a problem related to grouting in environment with salty groundwater. Flocculation means the agglomeration of silica's particles at too early stage due to impact of saline groundwater. Thus, the spreading of colloidal silica in a fracture slows

down and waterproofing properties of fracture become weaker. Based on these results, Rockplan and Posiva have developed a new method of grouting with silica in environment with saline groundwater that was tested in access tunnel 4366-22 of ONKALO. In this method, saline groundwater is replaced by injecting fresh water into grouting boreholes just before starting grouting with colloidal silica. Results were good as gelling of colloidal silica was successful and the leakage of grouting boreholes was minimal or boreholes did not leak at all. This method prevented too early flocculation of silica particles. (Hatakka et al. 2013.)

5) Sand column test

In this chapter, sand column test carried out in the laboratory of Department of Civil and Environmental Engineering of Aalto University is described. The aim of this test was to study the penetration of colloidal silica in pipes filled with sand that were filled with water before adding silica. The interstitial air-space between grains of sand simulates real varying geometry of fractures.

Half of the tests was carried out by using fresh tap water taken from a municipal water supply network. Other half of the tests was carried out with artificially prepared groundwater.

Based on problems detected during grouting tests, a hypothesis covering results of sand column test was made. According to this hypothesis, colloidal silica would penetrate in different way in pipes filled with artificial groundwater and fresh water. Another assumption was that in a pipe filled with artificial groundwater a flocculation might be detected, i.e. the agglomeration of silica particles, especially in the central part of the pipe filled with coarse sand.

i) Equipment

Two one meter long transparent acrylic pipes with inside diameter 40 mm and outside diameter 50 mm were used for sand column test. Sieve mesh (0,125 mm) was fixed in the lower part of both pipes to prevent the flowing of sand that was added to pipes later. Pipes were fixed on a test stand next to each other in order to observe the tests being carried out with fresh and artificially prepared groundwater simultaneously (Figure 6).

2 l measuring jugs with lines for each 20 ml were placed under the pipes. Water and colloidal silica flowed to these jugs during the tests that allowed to measure the amount of penetrating substances. After the pipes were fixed, they were filled with sand so that both pipes would content as much the same amount of sand with the same grain size as possible.



Fig.-6 Acrylic test pipes in a test stand with the scale in between. A jug was placed under each pipe for collecting liquid.

ii) Colloidal silica and estimation of gelling time

Silica MEYCO MP 320 was used for this test. Sodium chloride solution with 10 % salt concentration was used as an accelerator. The appropriate gelling time of suspension of colloidal silica and accelerator was determined based on the penetration depth. The aim was to achieve 20-30 μ m hydraulic fracture opening *b*. Maximum possible penetration depth for two dimensioned (2D) flow *I*_{max,2D}, for colloidal silica can be calculated by using formula 1:

$$I_{max,2D} = 0.45 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot t_G}{6 \cdot \mu_0}},\tag{1}$$

where *b* is a hydraulic fracture opening, Δp is prevailing overpressure, t_G is effective gelling time and $\mu 0$ is a viscosity of colloidal silica suspension. By effective gelling time t_G , the time when viscosity of colloidal silica and accelerator is doubled comparing to the initial state. This time is equal to appr. 1/3 of gelling time t_G .

In this test, there was no ground water pressure, so the prevailing overpressure Δp needed for this test was the same as hydrostatic pressure of the water column in a pipe. Water column was 1000 mm high as shown in the Figure 7.

The length of the pipe was estimated to be the height of water column as hydrostatic pressure increasing steadily downwards affected the pipe from its upper part and, respectively, the suction increasing upwards the pipe caused by capillarity affected in the lowest part of the pipe. In this case, each part of the pipe was affected by equal power moving liquids and it was possible to estimate roughly but precisely enough that the overpressure is equal to hydrostatic pressure of water column within the whole height of the pipe.

Maximum possible penetration depth was clarified with gelling times equal to 30 min and 60 min by using formula 1. Longer gelling times were not considered as it was decided to keep testing time as short as possible in order to make testing process as rational as possible.

Table-2	Maximum possible penetration depth Imax, 2D with gelling times equal to 30 min
	and 60 min.

$T_G(s)$	$t_G(s)$	Δp (Pa)	μ_0 (Pa·s)	<i>b</i> (mm)	Imax,2D (mm)
3600	1200	0,0981·10 ⁵	0,005	0,02	178, 3
1800	600	0,0981·10 ⁵	0,005	0,02	126,1

Table 3 presents four tests made in test cups regarding gelling times as well as proportions of silica and accelerator used in sand column tests. Gelling time tests were carried out in single-use cups.

Date	Test Nro	Silica (g)	Proportion of accelerator in silica (%)	Accelerator (g)	Gelling time (min)	Comments
24.2.2015	Test 1	200	24,00 %	48	appr. 20	Target was 30 min
24.2.2015	Test 2	200	19,40 %	38,8	44	Target was 60 min
24.2.2015	Test 3	200	17,50 %	35	60	Correct ratio.
25.2.2015	Experiment 1	4908	18,58 %	911,8	50	Calculation mistake, had to be 17,5 %.
26.2.2015	Test 4	200	17,50 %	35	60	To assure that Test 3 (24.2.2015) was made in a right way
26.2.2015	Experiment 2	3284	17,50 %	574,7	60	Correct ratio.
26.2.2015	Experiment 3	2931	17,50 %	512,9	60	Correct ratio.
27.2.2015	Experiment 4	2344	17,50 %	410,2	60	Correct ratio.
27.2.2015	Experiment 5	2006	17,50 %	351,1	60	Correct ratio.

Table-3	Determination of gelling time of colloidal silica and accelerator solution based on
experime	nt and test results and their proportions. Bigger amounts of accelerator shortened
	gelling time.

iii) Sand grain sizes

The grain sizes of the sand used in final successful experiments are shown in the Figure 7. At the bottom of the pipe above the sieve mesh (0,125 mm), 50 mm layer of sand with the grain size equal to 0,5...1,0 mm was placed. This layer prevented the clogging of the mesh with finer sand. In this way, it was possible to keep the flow of silica and water through the sieve mesh as unrestricted as possible. 50 mm thick layer of the sand the grain size equal to 2,0...4,0 mm was placed on top pf the first layer. This layer prevented the dust contamination caused by fine-grained sand when water and colloidal silica were added to pipes. The interstitial air-space between grains of sand simulates the fracture space in the rock. Two different types of sand with very different grain sizes were used during the experiment, coarse and fine-grained sand as the walls of natural fractures are not smooth parallel surfaces. Instead, the fracture might become wider or thinner even within short distances. Proportion of coarse sand used during experiment correlated with the bigger opening detected in the real fracture in the rock and proportion of fine-grained sand correlated with more narrow fracture section according to what the hydraulic opening *b* of the borehole fracture is determined.



Fig.-7 The amount of different types of sand in the pipe (on the left) and their grain sizes (on the right).

iv) Saline concentration in artificial groundwater and its preparation

The salinity of water had to be as similar to the salinity level of natural groundwater as possible. For this reason, the amount of salt was based on the amount of salt measured in groundwater in Posiva Oy's research space ONKALO demonstration tunnel 2.

In this research space, the total salinity of ground water (TDS, Total Dissolved Solids) was equal to 13860 mg/l, whereas proportions of different salts were as follows: calcium (Ca) 210 mg/l, sodium (Na) 3040 mg/l and chlorine (Cl) 8580 mg/l (Hollmén et al. 2013). The total salinity level of artificial groundwater used in experiment was set to 13,7 g/l and the proportion of calcium and chlorine masses to 2:3. Sodium chloride that was used during experiment was an ion compound NaCl. Calcium chloride was developed from hydrated salt, calcium chloride dehydrate $CaCl_2 \cdot H_2O$.

As salts easily absorb humidity for example from the air, they had to be dried in the oven with 105 °C before mixing them with water. After being dried for two days, 7,64 g of calcium chloride dehydrate and 7,49 g of sodium chloride were added to measuring cylinder until the grade of 1000 ml. After this, saline solution was mixed for 15 minutes to ensure that all the salt would dissolve in saline solution (Figure 8).





6) Execution of tests

Test was started by filling the pipes placed next to each other with the sand and the interstitial air-space between sand grains was completely saturated with water (Figure 9). After this, water surfaces in both pipes were set at the same level and the changes in the height of water level before adding silica was observed. When observation of decreasing level of water was long enough, colloidal silica and accelerator were mixed together.

JAEA-Research 2017-013



Fig.-9 Pipes were completely saturated with water. Water poured on the layer of sand with grain size equal to 2,0...4,0 mm was muddy after mixing with sand dust.

A mixture of colloidal silica and accelerator was added to both pipes as simultaneously as possible. Silica was poured to both pipes at this moment when the level of water decreased to the level of the border of two upper layers of sand with grain sizes equal to 0,125 ...0,250 mm and 2,0...4,0 mm. In this way, it was assured that flocculation would not happen in pipe 2 before the silica's penetration into other sand layers and air volume in both pipes would not increase significantly.

After this, observation of penetration of silica in both pipes was started. The idea of the first test was to follow silica's penetration in units of time using the measurement grade located between the pipes. As it was impossible to observe the penetration of silica in the most fine-grained sand, it was impossible to get results. The sand with grain size equal to 0,250...0,50 mm was used as the most fine-grained sand. For this reason, silica started to flow through both pipes already within 6 minutes. This time was too short for observing the penetration of silica and for recording results.

In the second test, the amount of water flowing from the pipes was observed in units of time. It was noticed that sand filling was not comparable in both pipes as the fall in water level in pipe 1 was faster, i.e. measuring cylinder placed under this pipe was filled with water faster. Also, the sand with grain size equal to 0,250...0,50 mm was replaced with more fine-grained sand with grain size equal to 0,125...0,250 mm in order to prevent flowing of silica too fast out of the pipe.

Although it was impossible to observe the penetration of silica in more fine-grained sand, it was decided to observe its penetration in coarse sand in units of time. Finally, this test was not successful neither the penetration of silica in that layer was laminar.

In three last tests, the same grade of compactness of sand filling in both pipes were tested. For this purpose, the equal level of water surfaces was set in both pipes and measuring cylinders under the pipes were emptied. When cylinders were placed under the pipes again, stopwatch was launched. After this, increasing volumes of water coming out from the pipes measured in cylinders were observed and registered. The penetration of silica through the sand was observed as an increase of its volume in measuring cylinders placed under the pipes as well as visually, differently from the test 1. The sand with grain size equal to 0,125...0,25 mm that was proved to be good in the second test was used as a fine-grained sand in three last tests.

It was important for all tests to take care of pouring the same amount of water in both pipes (either fresh tap water or artificial groundwater) already at the phase of filling pipes with sand in order to prevent mixing of salinity levels of the pipes. Also, the level of water surfaces had to be above the sand level to ensure minimum possible access of air into pipes.

7) Results

In Table 4 are gathered results measured during the tests. For example, the time when it was possible to observe the wake of colloidal silica in the layer of coarse sand, the time when silica came out of the pipe, the time when the leakage stopped and the total volume of leak liquid after adding more silica into pipes.

Test Nr (pipe Nr)	Coarse sand (minutes)	Silica came out (minutes)	Leakage stopped (minutes)	Leakage volume after adding more silica (ml)	Comments
1 (1)	Х	4:00	24:00	650	Changes in measured volumes.
1 (2)	X	6:00	14:30	280	Changes in measured volumes.
2 (1)	х	14:50	34:30	430	Failure with use of sand.
2 (2)	x	е	13:45	200	Failure with use of sand.
3 (1)	3:40	17:35	35:10	400	Successful test
3 (2)	3:20	е	15:25	230	Successful test
4 (1)	3:15	16:50	34:10	400	Successful test
4 (2)	3:10	е	14:30	220	Successful test
5 (1)	4:05	19:40	33:20	400	Successful test
5 (2)	5:10	е	10:50	200	Successful test
 (1) = pipe 1, fresh water (2) = pipe 2, artificial groundwater 					

Table-4	Test results	

e = this effect did not occur

x = the result was not registered/measured



Fig.-10 In a can in the forefront of the picture is colloidal silica that was used during the tests. A can on the right side of the picture is placed under the pipe filled with artificial groundwater and based on the colour of the liquid in the can it can be assumed that silica did not penetrate through the sand layers. In the can on the left side of the picture, there is also some silica that penetrated through the sand layers among the fresh tap water.

By the moment of time when silica was in the layer of coarse sand is understood the moment when it was possible to observe visually silica's wake in the sand layer. Silica flowing out was followed by observing cans placed under the pipes. As a mass of colloidal silica was a liquid that had milk-white colour, it was transparent and thicker than water, it was possible to detect changes in the colour of liquid drops falling into cans. The more silica mixed with capillary water in the pipes, the more easily it was to detect changes in the colour of liquid flowing to cans (Figure 10). Thereby, by the end of liquid flow is understood the time when the last drop of liquid came out of the pipe being observed.



Koe 2. Vuotomäärä silikan lisäyksen jälkeen

Fig.-11 Graph showing penetration of liquids in pipes 1 and 2 during the test 2 after adding the silica. In pipe 2, silica did not go through the layer of sand and the penetration ended too soon.¹⁾



Fig.-12 Leakage volume after adding silica in test 3. In pipe 2 that was saturated with an artificial groundwater, penetration was clearly weaker than in pipe 1 as 170 ml less of colloidal silica flowed through the pipe 2.²)

¹⁾ Translation of Figure 11 from Finnish to English: Koe 2. Vuotomäärä silikan lisäyksen jälkeen = Test 2. Leakage volume after adding silica; Määrä (ml) = Volume (ml); Aika (min) = Time (min); Putki 1 = Pipe 1; Putki 2 = Pipe 2; Karkealla = coarse sand; Vuoto loppui = Leakage ended; Silika tuli ulos = silica came out.

²⁾ Translation of Figure 12 from Finnish to English: Koe 2. Vuotomäärä silikan lisäyksen jälkeen = Test 2. Leakage volume after adding silica; Määrä (ml) = Volume (ml); Aika (min) = Time (min); Putki 1 = Pipe 1; Putki 2 = Pipe 2; Karkealla = coarse sand; Vuoto loppui = Leakage ended; Silika tuli ulos = silica came out.



Fig.-13 Leakage volume after adding silica in test 4. In pipe 2 that was saturated with an artificial groundwater, penetration was clearly weaker than in pipe 1 as 180 ml less of colloidal silica flowed through the pipe 2.³⁾



Fig.-14 Leakage volume after adding silica in test 5. In pipe 2 that was saturated with an artificial groundwater, penetration was clearly weaker than in pipe 1 as 200 ml less of colloidal silica flowed through the pipe 2.⁴)

The first important observation was that colloidal silica did not flow laminarily in section with a coarse sand with grain size equal to 4,0...5,0 mm (Figure 15). Such processes were detected with fresh tap water as well as with artificial groundwater. It is difficult to claim something about finer-grained sand as it was impossible to observe this process visually. Mixing of colloidal silica with water may occur also in a finer-grained sand, however, it was impossible to determine its volume in this test.

³⁾ Translation of Figure 13 from Finnish to English: Koe 2. Vuotomäärä silikan lisäyksen jälkeen = Test 2. Leakage volume after adding silica; Määrä (ml) = Volume (ml); Aika (min) = Time (min); Putki 1 = Pipe 1; Putki 2 = Pipe 2; Karkealla = coarse sand; Vuoto loppui = Leakage ended; Silika tuli ulos = silica came out.

⁴⁾ Translation of Figure 14 from Finnish to English: Koe 2. Vuotomäärä silikan lisäyksen jälkeen = Test 2. Leakage volume after adding silica; Määrä (ml) = Volume (ml); Aika (min) = Time (min); Putki 1 = Pipe 1; Putki 2 = Pipe 2; Karkealla = coarse sand; Vuoto loppui = Leakage ended; Silika tuli ulos = silica came out.



Fig.-15 Penetration of colloidal silica in the layer of sand with grain size equal to 4,0...5,0 mm. Penetration is not laminar. Pictures from test 5 (on the left) and test 3 (on the right).



Fig.-16 Flocculation of silica particles in pipe 2 due to the salinity of artificial groundwater. Picture from test 5.



Fig.-17 Slica particles did not flocculate in pipe 1 filled with fresh tap water. Picture from test 5.

8) Conclusions

The aim of this bachelor's thesis was to study the impact of salty groundwater on the penetration of colloidal silica. For this study, a sand column test was carried out in the laboratory environment that allowed to observe the problems detected during in-situ grouting.

Salty groundwater clearly affected the gelling time of silica and its flow stopped too early before the effective gelling time was achieved. Also, the flow stopped much earlier before the comparison sample where the flow ended after about 35 min with gelling time equal to 60 min. In comparison samples, a fresh tap water was used as a capillary water. Results received during the observations correspond to the problems mentioned in work report of demonstration tunnel 2 in research space ONKALO (Hollmén et al. 2013). It was noticed that the penetration of the mass ended immediately in the beginning of grouting works and even the grouting works made in access tunnel 4366-22, it was not detected that the flow would end too early when salty groundwater was extracted from rock fractures by injecting water before the injection of colloidal silica (Hatakka et al. 2013).

Results of this bachelor's thesis support the conclusions made based on observations of grouting works regarding the impacts of salty groundwater on silica mass. The results are contradicting with the assumption claiming that silica mass has laminar flow in rock fractures by replacing groundwater and the mixing of these two liquids would not happen. Based on the sand column test, it was possible to observe clearly the process of silica's mixing with salty artificial groundwater as well as fresh tap water.

The aim of the experimental test was to try to simulate the natural geometry of fracture system by using different types of sand. Even in rock fractures with small hydraulic fractures, there are points where fracture aperture could be big enough. Due to fracture's geometrical changes, there can occur whirls in water flows, even if the pressure used remains constant. Even the flow is not laminar in rock fracture due to whirls and mixing, it was impossible to determine its amount in very small hydraulic fractures of 20 µm.

Affected by artificial groundwater, silica flocculated that was assumed also in a hypothesis of this study. In pipes filled with artificial groundwater, colloidal silica reminded the structure of porridge, it did not gel properly after the flow was over. The same effect was detected also in in-situ grouting in the environment with salty groundwater (Hollmén et al. 2013). The method developed and tested by Posiva and Rockplan concerning applying water injections before starting grouting with colloidal silica could be a solution for grouting works in environment with salty groundwater in the future. The method was proved to be efficient at least in an access tunnel 4366-22 in research space ONKALO (Hatakka et al. 2013).

It was said in work report of demonstration tunnel 2 in research space ONKALO (Hollmén et al. 2013) that some fast and sudden reaction were detected between colloidal silica and ground water with high content of calcium. Based on sand column test made for this thesis work, it is not possible to comment this observation. In the test carried out for this thesis work, artificial groundwater contained both sodium and calcium salts. Thus, it is not possible to be sure what of these who had bigger impact on flocculation and to early gelling.

Some improvements could be done for the sand column test carried out for this bachelor's thesis in order to achieve more precise results. To make the observation of penetration process of silica mass and its flow out of the pipe easier to observe, some colourant that would be easy to distinguish from the sand could be mixed with silica. However, that was not very important as test results were consistent comparing to the results of in-situ grouting tests carried out earlier.

Also, it would be possible to continue the observation of effects taking place in test pipes as well as registering quantitative results with more than one person participating in testing. In this case, persons could concentrate on observing smaller issues as from one person testing required very high accuracy, registering results and taking care of rhythm when observing changes in test pipes. However, from the point of view of the hypothesis of this study, it was possible to register results and observations precisely enough. This is a blank page.

_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例				
AI 立長 SI 組立単位				
名称	記号			
面 積 平方メートル	m ²			
体 積 立方メートル	m ³			
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s			
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2			
波 数 毎メートル	m ⁻¹			
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²			
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg			
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²			
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m			
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸			
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²			
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1			
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	1			
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 旭立単位			
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	ガレイ	Gv	J/kg	m ² e ⁻²
カーマ		Gy	ong	
線量当量,周辺線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 e^{-2}$
方向性線量当量,個人線量当量		50	5/Kg	III 8
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位		
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位			
名称	記号	SI 単位による値	
分	min	1 min=60 s	
時	h	1 h =60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	۰	1°=(π/180) rad	
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad	
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	$1 t=10^3 kg$	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの				
名称			記号	SI 単位で表される数値
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値	
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J	
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N	
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s	
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$	
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$	
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx	
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²	
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$	
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T	
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹	
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」			

は対応関係を示すものである。

		表	(10.	SIに 帰	属さないその他の単位の例
名称				記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	3	/	7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	x	N	111		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートルヌ	系カラ:	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進っ	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ	П	IJ	Į	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ		~		$1 = 1 = 10^{-6} m$
