

海水条件下の岩盤亀裂に適した 溶液型グラウトの特性取得

辻 正邦^{1*}・沖原 光信²・中島 均³・齋藤 亮³・青柳 和平⁴・佐藤 稔紀⁴

¹清水建設株式会社 関西支店 土木技術部 (〒541-8520 大阪府大阪市中央区本町3丁目5-7)

²清水建設株式会社 土木技術本部 バックエンド技術部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)

³清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

⁴日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター (〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進432番地2)

*E-mail: tsujimas@shimz.co.jp

Key Words : colloidal silica grout, saline water, pH adjuster, grout property, grout penetration theory.

1. はじめに

(1) 研究背景

近年、地層処分に関する科学的特性を示すマップが公開され(図-1参照)、沿岸部が輸送面でも処分に好ましいとされている。沿岸部においては、塩水影響や海陸接合部などの環境を考慮した地質環境の調査・工学・安全評価に関する技術の高度化が必要であるが、工学に着目した研究開発は進んでいなかった。一方、スウェーデンやフィンランドでは処分サイトや地下研究施設が沿岸域にあり、海水環境を考慮した研究開発が行われている。

(2) 地層処分のためのグラウト技術(溶液型グラウト)

地層処分のための工学技術として、坑道掘削時のグラウト技術(湧水抑制対策)の高度化開発が多く行われてきた。北欧では、処分施設の坑内湧水量が厳しく制限され(坑道延長100mあたり1.7L/分¹または1.8L/分²)、その実現のために、浸透性が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)の研究開発が進められている。溶液型グラウト(図-2参照)は、粒径が10~20nm程度で非常に浸透性に優れ、劣化因子のNaイオンが除去されているため耐久性に優れている。ただし、無機塩と反応して硬化する機構のため、沿岸部では海水影響の懸念がある。また、溶液型グラウトは地盤工学の分野では恒久グラウトの名称で砂質地盤の液状化防止に20年近く適用実績のある材料である。

地層処分の分野では、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は候補材料として検討されてきた。ただし、海水条件下を想定した物性取得や硬化のメカニズムを考慮した具体的な設計・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。

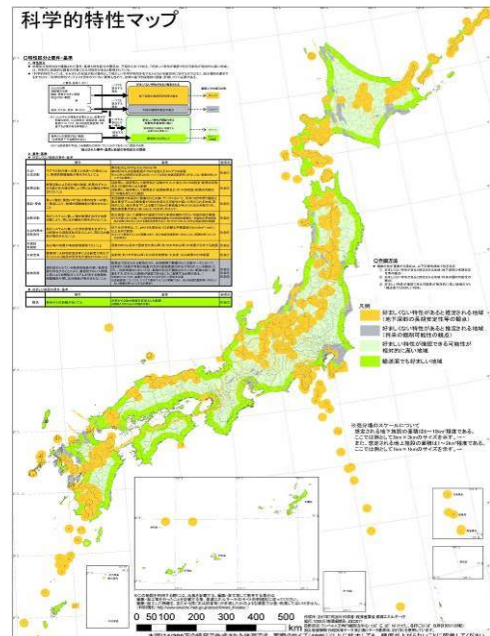


図-1 地層処分に関する科学的特性マップ(参照: https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakuteikiokuseimap/)

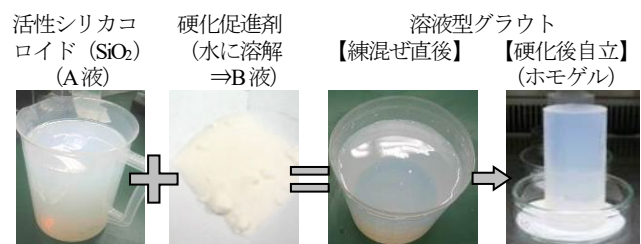


図-2 活性シリカコロイドを用いた溶液型グラウトの概要

(3) 研究概要

このような背景のなか、平成28年度から3か年にわたり、資源エネルギー庁の委託事業(平成28年度・平成29年度・平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に
関する技術開発事業: 沿岸部処分システム高度化開発)の一環として「海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得」に関する研究を実施した(表-1参照)。

本稿では、その成果の一部として、海水条件下における知見（①），基本物性取得（②），浸透特性取得（④），研究レビュー（⑤）の概要について報告する。

表-1 三か年にわたる本研究の概要

実施項目（検討年度）	実施概要
①既往知見・課題の整理（H28）	・文献調査 ・国際グラウトワークショップ
②材料特性取得（H28～H30）	・ゲル化特性・基本物性の取得 ・長期安定性（耐久性）特性取得
③長期挙動の現象理解の検討（H29）	・長期挙動の知見の整理 ・長期止水性の推定に関する検討 ・化学的メカニズムに基づく長期挙動に関する知見整理
④モデル化・数値解析への適用性検討（H29～H30）	・浸透理論の検討（海水条件下の理論式考案） ・浸透特性の把握，理論の検証
⑤設計技術の適用性評価（H30）	・研究レビュー（ワークショップ） ・グラウトガイドライン更新案 ・最新知見入手（オンカロ視察）

2. 海水条件下における溶液型グラウトの知見

(1) 概要

研究の開始にあたり、地下水が海水環境の場合のグラウト技術の動向調査と課題抽出のため、国際グラウトワークショップの開催とともに、国内外の文献調査を実施した。海外は主にフィンランドとスウェーデンの文献を調査した。両国は、岩盤グラウト技術と地層処分事業の双方の先進国であり、溶液型グラウトは日本で発明されたが、岩盤注入としての研究と適用は日本より早期に着手している³⁾。ここでは、得られた主な知見を紹介する。

(2) 北欧の知見

海外文献では、フィンランドのオンカロ特性調査施設（以下、オンカロと呼ぶ）とスウェーデンのエスボ硬岩研究所での実験・実証試験を中心として20編を調査した。

オンカロの深度420mの実証試験場では、地下水が化石水を含み、Caイオンの多い塩水であった。設計した時間通りにグラウトが注入できない課題があり、亀裂内部で地下水とグラウトが反応する懸念があった。現地の地下水を用いた室内試験が実施され、著しく反応する特性が認められ、オンカロでは配合や設計での対応は困難と判断された。そこで、地下水環境を塩水から淡水に改良するWater Injection（淡水の事前注入）⁴⁾という施工手法が開発されている。さらに、溶液型グラウトは、希釈や塩水影響を受けて亀裂内部での硬化（ゲル化）にバラつきが増加するリスクを考慮し、注入孔内の残留水を除去する手法や、安全側に養生時間を長く確保する対策（3日以上グラウトパッカーを残置）が取られている。

スウェーデンでは、岩盤注入の分野で溶液型グラウトがセメントに比べて実績の少ない材料であること、施工時に不確実性があることが課題とされ、材料の耐久性お

よび浸透理論を用いた設計技術の開発が進められている。なお、エスボ硬岩研究所では、塩水による溶液型グラウトへの影響は報告されていない。これは、地下水中のCaイオンがオンカロほど多くないことが要因として挙げられる。後述の浸透特性の確認試験では、その確認のため海水と比較してオンカロの模擬地下水を適用した。

(3) 国内知見

国内では溶液型グラウトの適用事例自体が少なく、沿岸域では倉敷LPG貯槽建設工事のグラウト工事（以下、倉敷と呼ぶ）での数編の報文を中心に、9編の文献調査を実施した。倉敷では、微細な亀裂が発達してセメントが注入できない範囲に溶液型グラウトが適用されている。現地の地下水が塩水であり、急激な反応による目詰まり、オンカロ同様に浸透性の低下が課題とされていた。そこで、酸性のpH調整剤を練混ぜ水に添加し、白濁試験（図-3参照）⁵⁾で白濁が発生しない配合を設定する対策が実施されていた。ただし、倉敷の現地湧水に特化した開発であり、一般的な海水（湧水を想定）を練混ぜ水に用いた配合や基本物性については取得されていない。

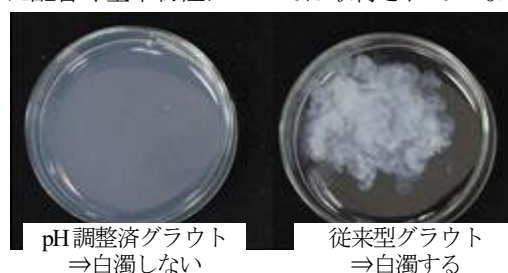


図-3 白濁試験結果の例（現地湧水にグラウトを一滴投下）⁵⁾

海水条件下ではないが、瑞浪超深地層研究所では、溶液型グラウトによるポストグラウチングが有効であった。削孔時に大量湧水（130L/分）が発生した注入孔においても溶液型グラウトの注入のみで、当該孔の完全止水（0.0L/分）を達成している⁶⁾。注目すべきは、オンカロでの実績を参考に、当該孔が1週間以上養生されている点である。したがって、一般に溶液型グラウトはセメントに比べて大幅に強度が低いものの、堅硬な岩盤への注入時は、水圧に抵抗する十分な浸透距離と確実な材料硬化を確保できれば、止水可能なことを示唆している。

(4) 国際グラウトワークショップの結論

ワークショップを通じて、溶液型グラウトの塩水への対応策が日本、フィンランド、スウェーデンでそれぞれ配合設定手法、設計手法、施工手法に大きく区分されることが判明した。将来的には、開発成果を共有して適切な設計施工手法を組み合わせることが合理的であるという結論が得られた。我が国では、地下水環境（養生水）や練混ぜ水が、淡水～海水条件に変化する可能性を想定し、ジェネリックで異なる海水環境に対する配合対策が、その物性取得とともに重要であることを確認した。

3. 海水条件下における基本物性の取得

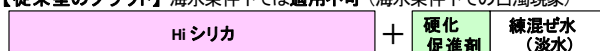
(1) 概要

従来型の溶液型グラウト（図-4参照）は、活性シリカコロイド（A液、本節ではHiシリカ、強化土エンジニアリング製を使用）に、無機塩（硬化促進剤：本節ではKClを使用）を練混ぜ水で溶解した溶液（B液）を加えることで硬化が始まる。硬化までの時間（ゲルタイム）は陽イオン濃度で調整する。

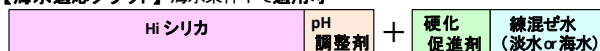
本研究では、文献調査で得られた倉敷での事例を参考に、従来型の溶液型グラウトに適正量のpH調整剤（少量の強酸溶液）を添加することで海水環境に対応させた2種類のグラウト（「海水適応グラウト」、「海水硬化促進グラウト」（図-4参照））の基本配合を設定するとともに、その物性を取得した^{7,8)}。海水適応グラウトは、海水と接触時に急激な硬化を生じないため、設計通りに注入ができないリスクの低減が可能である。配合設定の際には、白濁試験（図-3参照）を実施し、白濁が生じなければ、急激な硬化が生じない配合と判定した。

この海水適応型の配合には、異なる海水条件下での設計・施工条件を想定し、硬化促進剤を溶解する練混ぜ水として3種類を検討した。海水の使用を想定した人工海水（八洲薬品製アクアマリン）、一般的な処理水（淡水）を模擬した精製水、その中間として人工海水と精製水を等量で混合した水を対象とした。さらに、検討の過程で、練混ぜ水として海水を用いる場合、硬化促進剤を用いなくても、グラウトは硬化することが明らかになったため、硬化促進剤を用いず、pH調整剤とグラウト原液と海水の比率でゲルタイムを調整するグラウトとして、「海水硬化促進グラウト（図-4参照）」を考案した。

【従来型のグラウト】海水条件下では適用不可（海水条件下での白濁現象）



【海水適応グラウト】海水条件下で適用可



【海水硬化促進グラウト】海水条件下で適用可



← A液 → ← B液 →

図-4 海水条件下に対応するグラウトの配合概念

(2) 基本配合の設定

グラウトのゲルタイムは、陽イオン濃度およびpHに依存する。施工に適正なゲルタイムは60分～120分程度とされており、海水適応グラウトでは硬化促進剤とpH調整剤の添加量を変化させて配合試験を行い、本研究で用いるゲルタイム60分と120分の基本配合を設定した（表-2参照）⁷⁾。同様に海水硬化促進グラウトでは、Hiシリカの割合とpH調整剤の添加量を変え、ゲルタイム60分の基本配合を求めた（表-3参照）⁸⁾。すべての基本

配合において、白濁試験で白濁しないことを確認した。なお、従来型のグラウトのpHは9.0程度のため、いずれの配合も中性に近く、環境影響が低い配合と言える。

また、海水適応グラウトの場合は、pH調整剤の添加量を4.0ml/Lに固定すれば、淡水～海水条件で適正なゲルタイムの範囲で白濁しない配合が得られることがわかった。今後の合理的な配合設計手法に展開できると言える。

表-2 海水適応グラウトの基本配合

配合名	練混ぜ水	ゲルタイム (分)	Hiシリカ (ml/L)	pH	pH調整剤 (ml/L)	硬化促進剤 (g/L)
D-60	精製水	60	800	6.49	4.0	15.0
D-120		120		6.46		11.0
M-60	50%人工海水	60		6.43		13.0
M-120		120		6.48		8.5
S-60	人工海水	60		6.44		11.0
S-120		120		6.46		6.5

表-3 海水硬化促進グラウトの基本配合

配合名	練混ぜ水	ゲルタイム (分)	Hiシリカ (ml/L)	pH	pH調整剤 (ml/L)	硬化促進剤 (g/L)
Si-45	人工海水	80	450	7.75	0.5	0.0
Si-60		72	600	8.13		

(3) 施工性に係る特性

グラウトの施工性（浸透特性）に影響する特性として硬化前の粒径の経時変化と粘性の経時変化が挙げられる。

そこで粒径の変化を動的光散乱法で測定した。海水適応グラウトにおいて、練り混ぜから30分（ゲルタイムの1/2の時間）～40分の間はグラウトの粒径は練混ぜ直後と変わらず20～40nmの範囲を示し、練混ぜ水の違いによる影響はなかった。海水硬化促進グラウトにおいても、同様に30～40分程度までは粒径の変化はなかった。

また、粘性の変化を回転型レオメーターで測定した。図-5に示すように、海水適応グラウトではゲルタイムの2/3程度の時間までは、粘性は緩やかに上昇し、その後急激に増加した。練混ぜ水の違いによる粘性の違いはなかった。海水硬化促進グラウトでは、海水適応グラウトよりも粘性の変化が早く始まり、その後は緩やかに増加する傾向を示した。これは、配合中のシリカの割合（濃度）が少ないことが影響していると考えられる。

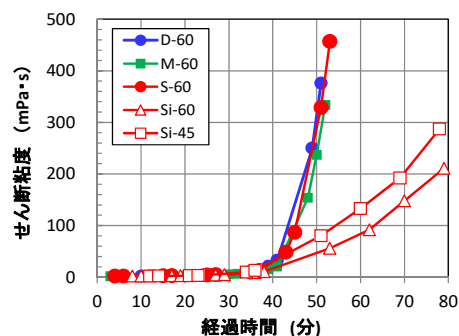


図-5 粘性の経時変化

(4) 長期力学特性

硬化後のグラウトの力学特性として、20℃の水中養生した各配合のホモゲル供試体を対象に一軸圧縮強度を取得した。養生は練混ぜ水と同種の水で行い、養生期間は海水適応グラウトは最大2年程度、海水硬化促進グラウトは最大1.5年程度とした。図-6に練混ぜ水の違いによる一軸圧縮強度の日数変化を示す。250日程度までは練混ぜ水の種類によらず、一軸圧縮強度は増加した。その後は練混ぜ水が海水の場合に強度低下が確認された。一方、練混ぜ水が精製水の場合および50%人工海水の場合

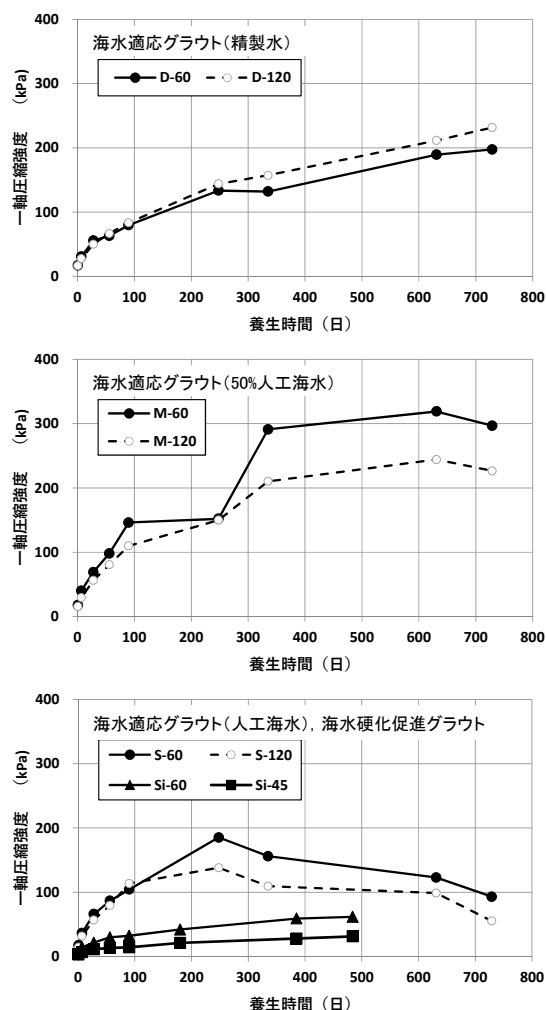


図-6 ホモゲルの一軸圧縮強度（長期力学特性）

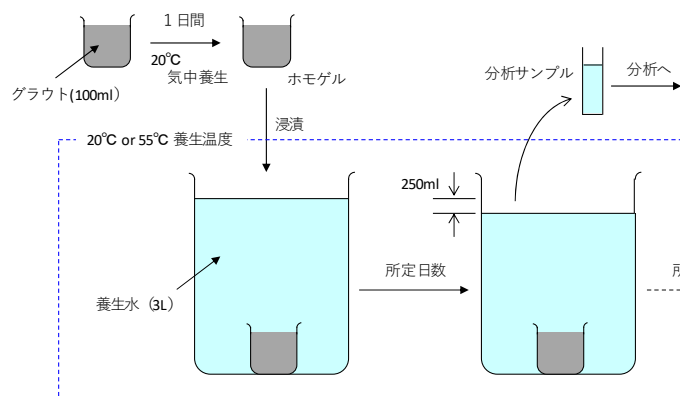


図-6 長期化学的安定性試験の試験手順と浸漬状況

合では、250日以降も強度が増加した。このことから、ホモゲルの内部構造の変化を長期間にわたり観察するなど、強度低下のメカニズム解明が今後の課題と言える。

(5) 長期化学特性（浸漬試験）

硬化後のグラウトの長期にわたる化学的安定性を検討するために、図-7に示すように、養生水への浸漬を行い、定期的に養生水から分析サンプルを採取し（最大2年程度）、ホモゲルからの溶出したシリカの濃度や各種イオンの分析を行った。

海水適応グラウト、海水硬化促進グラウトともに、浸漬直後から養生水の濃度が同様に上昇した。海水適応グラウトから溶出して上昇するシリカ濃度の上昇速度は、養生水（＝練混ぜ水）に人工海水を用いた場合が精製水や50%人工海水を用いた場合より高かったが、いずれも練混ぜ水や養生水の種類によらず90 mg/L程度に濃度が収束した（20℃養生時）。また、海水硬化促進グラウトの場合は、ホモゲル中のシリカ濃度が低いが、海水対応グラウトと同程度の90 mg/L程度に収束した。

以上のことから、溶液型グラウトはシリカ・イオン成分の溶出はあるものの、海水影響による傾向の大きな違いはなくいずれも収束するため、シリカ崩壊・溶脱のような現象は起きていないと考えられる。したがって、前節の強度特性の低下は、化学的な結合の消失などによる耐久性低下に起因するものではないと推察される。

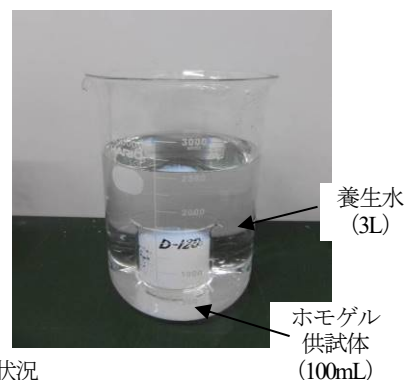
4. 海水条件下における浸透特性の取得

(1) 概要

溶液型グラウトを海水条件下でのモデル化や数値解析への適用に資するため、北欧で適用されている溶液型グラウトの浸透モデルの改良を検討するとともに、室内試験によりその浸透特性を把握・検証した。

(2) 海水条件下での溶液型グラウトの浸透理論の検討

北欧では、溶液型グラウトの設計にあたりゲル化を考慮した浸透理論（図-8、左式参照）が適用されている⁹⁾。理論式の特長は、浸透距離がゲル化の兆候が始まるゲ



ル・インダクションタイム (t_g) に依存する点である。経験上, t_g はゲルタイムの約1/3の時間とされている。ただし, 塩水系地下水に受ける影響は考慮されていない。

Aalto大学 (フィンランド) では, 塩水条件下での溶液型グラウトの浸透試験において, 淡水環境と塩水環境 (オンカロの地下水環境) における溶液型グラウトの浸透量の比較が示されている¹⁰⁾。ここでは, 海外製グラウト (MasterRoc® MP320, BASF社製) が用いられている。本検討では, 塩水条件下においてはグラウトが海水と混ざり合うことによってゲルタイムが早く, すなわち t_g が短くなるが, その時点までは淡水環境下と同様の挙動を示すことを発見した。そこで, 注入時間の項を補正する係数 ϕ を既存の理論式に乗じることで, 「海水適用時のグラウト浸透理論」を考案した¹¹⁾ (図-8, 右式参照)。

<従来>

$$I_{max,2-D} = 0.45 \cdot b \sqrt{\frac{\Delta p t_g}{6\mu_0}}$$

⇒

<改良版>

$$I_{max,2-D} = 0.45 \cdot b \sqrt{\frac{\Delta p t_g \phi}{6\mu_0}}$$

$I_{max,2D}$: グラウト孔と交差する亀裂からグラウトが円盤 (2D) 状に浸透するときの最大浸透距離 (理論上の半径)

b : 水理学的亀裂開口幅

Δp : グラウト注入差圧 (注入圧と湧水圧の差)

t_g : ゲル・インダクションタイム (ゲルタイムに依存)

μ_0 : 配合時の初期粘性

ϕ : 海水条件下において t_g を補正する関数

図-8 海水適用時の溶液型グラウトの浸透理論式の改良

(3) 海水条件下におけるグラウト浸透特性確認試験

平行平板を用いた室内試験を実施して亀裂中の溶液型グラウトの浸透特性 (浸透距離, 形状等) を把握し, 考案した浸透理論の適用性を検討した。

浸透装置は, 人工亀裂を模擬したアクリル製の65cm四方の平行平板の装置を用いて亀裂開口幅を0.08mmに設定した。精製水, 人工海水 (100%, 50%希釈), オンカロの地下水 (100%, 50%希釈) の5種類の地下水条件で平行平板内を満たし, 3種類のグラウト (海外製 MP320, 海水適応型, 従来型) を平板中央の管より浸透させた。また, 平板装置の境界に到達しないように浸透圧2kPa (20cm水頭), ゲルタイムは20分以内の計画とした。さらに, 地下水の動水環境と静水環境で試験を実施したが, 本稿では静水環境での結果を紹介する。結果一覧を表-4に, 人工海水に浸透時の浸透形状を図-9に示す。

従来型グラウトを用いると, 亀裂が人工海水で満たされていた場合は精製水で満たされた場合の65%の浸透距離となり, 大きく浸透性が低減した。これに対して, 海水適応型グラウトを用いると人工海水と精製水で同じ浸透距離 (100%) になった。海水適応型グラウトでは, 海水浸透時でも浸透理論の $\phi=1$ に設定可能であり, すなわち, 補正不要で従来の理論式が適用可能と言える。また, 海外グラウトは人工海水中では84%に低減された。

オンカロの地下水はCaイオンが多い特徴があり, 北既往文献で示されたように, 浸透性が総じて最も低い結果となった。従来型配合では浸透距離が38%と大幅に低減され, 海水適応型では80%, 海外製ではおよそ78%の低減である。そこで, 浸透距離80%として ϕ を逆算すると $\phi=0.64$ となる。なお, 本検討の海水対応型は, 海水には白濁しないが, オンカロ模擬地下水には白濁を生じたため, Caイオンの多い地下水に白濁しない配合を取

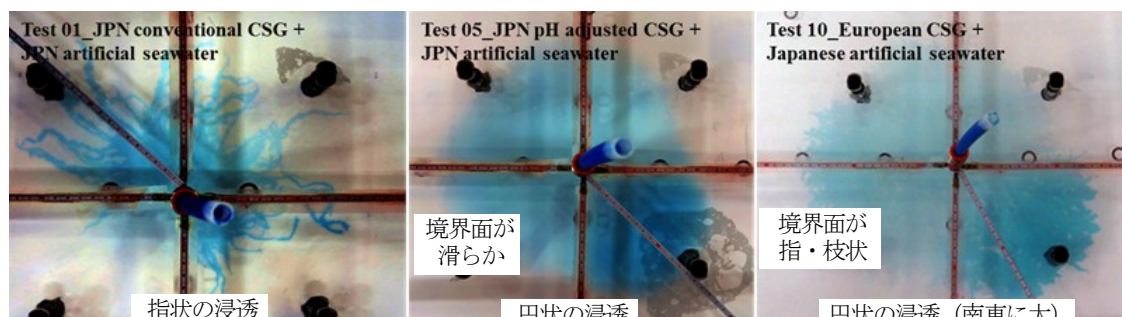
表-4 グラウト浸透特性確認試験における浸透距離のまとめ (静水環境下)

地下水条件 グラウト種類	精製水	オンカロ地下水 50% + 精製水 50%	オンカロ地下水	人工海水 50% + 精製水 50%	人工海水
従来型グラウト <ゲルタイム 15分>	167 (100%) 南東		63 (38%) 円状	178 (107%) 円状	①109 (65%) 指状
海水適応型グラウト <ゲルタイム 17分>	167 (100%) 円状	206 (※) (123%) 南東	134 (80%) 円状	173 (104%) 南東	②167 (100%) 円状
海外製グラウト (MP320) <ゲルタイム 12分>	227 (100%) 西	264 (116%) 西	178 (78%) 南東		③190 (84%) 南東

上段: 浸透量から換算した理論上のグラウト浸透距離 (mm), () 内は同材料で精製水時の浸透距離を100%とした場合の相対量

下段: 浸透形状の傾向, 「円状: 比較的円盤上に近い形状」「方角: 局所的に浸透が大きい方角」「指状: 不均一な指状の形状」

(※) ゲルタイム調整に失敗してゲルタイムが22分となったため, 浸透距離が大きい。



①従来型グラウト

②海水適応型グラウト

③海外製グラウト (従来型)

図-9 人工海水で満たした平行平板へのグラウト浸透形状の比較 (静水環境下)

得すれば、同様に $\phi=1$ にすることが期待できる。

今後、異なる海水条件下での補正関数 ϕ の決定手法を検討する必要があるが、地下水が安定する条件下であれば事前に実験室等で ϕ を取得し、ゲルタイムを割り増し設計することにより、（海水対応グラウトを計画できない場合でも）北欧での浸透距離を確保する設計手法に展開できることが示唆された。

また、浸透形状の観察結果では、従来型グラウトを人工海水に浸透時に「指のような形状での不均一な浸透」（図-9①参照）が発生したことに留意する必要がある。これは、白濁にみられるようなグラウト浸透先端（界面）での急激な反応により、同心円状に広がらずに枝分かかれして浸透したためと考えられる。このような現象が発生すると、注入孔の近傍に止水されない範囲が発生するため、止水性がほとんど期待できないと言える。

なお、グラウトの初期粘性は日本製が2mPasに対し、海外製が5mPas（日本製の2.5倍）である。したがって、海外製の方が高い粘性で地下水と混ざりにくいと考えられ、海外製が日本の従来型と比較して地下水の影響を受けず、そして指状の浸透が発生しない要因と推測できる。

5 研究成果のレビュー

2019年の初めに、北欧のグラウト専門家や処分事業の関係者を集めて、第2回の国際グラウトワークショップを開催し、3か年にわたる本研究の成果を報告し、レビューを受けた（図-10参照）。

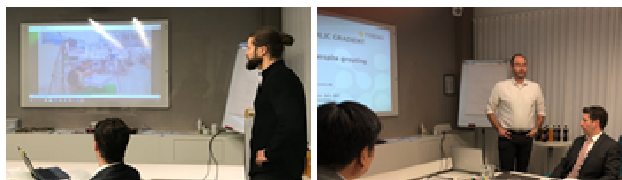


図-10 第2回グラウト技術のワークショップ（参加者15名）

成果レビューでは、本研究で実施した材料特性取得、浸透特性取得を始めとした各種検討について、専門家から多くのコメントや評価を受領した。全体として、本研究の成果はグラウト技術の発展に貢献し、グラウト設計・影響評価技術に展開できるとの講評を得た。

また、今後の課題として、更なる長期的な耐久性の確認、浸透性能の把握のためには動水環境下でのグラウト浸透と未硬化のグラウトの流出まで考慮した設計理論の確立、大型またはより実物に近い（亀裂を模擬した）平板試験装置を用いた浸透特性確認試験の実施、将来の実適用に向けて海底トンネルなど岩盤空洞での注入実証とそのフィードバックなどが重要であるとの助言を得た。

6. おわりに

平成28年度から3か年にわたり実施した本研究の成果として、既往情報の整理、配合手法の確立や浸透理論の改良、長期耐久性や浸透特性に係るデータの取得など、多岐にわたる検討を行い、多くの有用な知見を得た。

同時に、溶液型グラウトは、通常のセメントグラウトと異なる無機系グラウトであり、無機塩の反応にその硬化（ゲル化）が委ねられるため、地下水の水理、水質、水温・岩盤条件、施工手法など、さまざまな因子に影響を受けやすいことが課題として得られた。

今後、本技術が実証段階に入るなかで、取得データの拡充やグラウト技術のガイドラインの更新が必要である。さらに、処分深度では地下水がオンカロのように化石水を含むなど、一般的な海水と組成が異なる地下水条件にも考慮する必要がある。

最後に、溶液型グラウトの岩盤注入は我が国では適用事例が少ない。このため、今後の更なる技術の発展のためには、グラウト技術と処分事業のいずれも先進国である北欧諸国と、引き続き技術的なワークショップ等を通じた意見・情報交換を行い、研究開発を推進することが望ましいと言える。

謝辞：本研究の実施に際しては、ルレオ工科大学Johan Funchag教授（スウェーデン）および強化土エンジニアリング㈱の方々から貴重な助言を頂きました。また、浸透特性確認試験の実施、国際グラウトワークショップの開催には、AINSグループ（フィンランド）の方々に多大なる協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) : Final repository facility Underground design premises/D2, R-07-33, 2007.
- 2) Kalle H.ほか：Colloidal Silica - Grouting in Demonstration Tunnel 2 in ONKALO, Posiva working report 2012-84, 2013.
- 3) 辻正邦ほか：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.
- 4) Lassi H.ほか：Silica grouting in deep underground saline conditions in ONKALO underground research facility, Nordic grouting symposium, 2013.
- 5) 小林伸司ほか：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.
- 6) 辻正邦ほか：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集，p.359-364, 2016.
- 7) 中島均ほか：海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得（その3）—基本物性試験—，土木学会第72回年次学術講演会，2017.
- 8) 中島均ほか：海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得（その4）—海水対応グラウトの基本特性—，土木学会第73回年次学術講演会，2018.
- 9) Johan F. : Injektionen av TASS-tunneln Design, genomförande och resultat frånförinjekteringen, SKBR-10-39, 2011.
- 10) Lehtonen H. : Impact of groundwater salinity on penetration of colloidal silica, Aalto University, 2015.
- 11) 辻正邦ほか：海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得（その5）—海水条件下でのモデル化・数値解析への適用性検討—，土木学会第73回年次学術講演会，2018.