海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得（その２）
－海外の地層処分のためのグラウト技術に関する最新動向－

清水建設(株)　正会員　○辻　正邦　正会員　沖原光信
正会員　中島　均　正会員　齋藤　亮
日本原子力研究開発機構　正会員　佐藤稔紀　正会員　青柳和平

１．はじめに

本稿では、海水条件下において溶液型グラウトを適用するための課題を整理するにあたり、国内外における最新の文献調査ならびに海外現地調査を実施した。その概要とともに、海外の地層処分のためのグラウト技術における最新動向を報告する。

２．文献調査

文献調査は、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実施した。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おける論文集を中心に、スウェーデンのエスポ硬岩研究所やフィンランドのオンカロ特性調査施設（地下研）における基礎試験や実証試験など、合計 20 編の文献を調査した。邦文については、倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事における実験や施工実績を中心に 9 編の文献を対象とした。

文献調査の結果を表-1 に示す。北欧では特にフィンランドのオンカロにおいてカルシウムが多い海水系地下水に対する各種実験を行い、施工技術の開発が実施されていた。スウェーデンでは、特に地下水による問題は発現していないがグラウト設計技術と耐久性が課題とされ、耐久性に関する試験が実施されていた。日本では、主に倉敷において現地湧水に対する配合設計による対応策が実施されている知見が得られた。

表-1　溶液型グラウトを海水条件下に適用するにあたり、文献調査から得られた主な知見のまとめ

海外文献（20 編）の主な知見	邦文文献（9 編）の主な知見
➢ コロイド化学の専門書によると、グラウトを酸性側に調整することにより、塩水によるゲル化の影響を低減できる。 ➢ フィンランドのオンカロの処分深度 450m では非常にカルシウムイオンが多い海水系地下水であり、グラウトが急に反応して注入ができないなど、施工に支障が出ていた。 ➢ このため、人工的に亀裂を模擬した装置を作成して各種地下水環境下における浸透実験が実施されている。 ➢ オンカロでは、Fresh **Water Injection**（グラウトチング前の岩盤への淡水注入）と呼ばれる注入領域の地下水を淡水環境に改質する対策や、グラウトの希釈防止のため空気を圧入して注入孔を水抜きする手法が開発され、確実な注入と止水性の高い坑道の構築に成功している。 ➢ また、グラウト注入後、3 日以上グラウトパッカーを取り外さない「長期養生」が重要であることを指摘している。 ➢ スウェーデンのエスポ硬岩研究所ではカルシウムイオンが多くないためか、沿岸域の地下水は問題になっておらず、材料の耐久性や設計上の不確実性の解明が課題とされている。 ➢ スウェーデンにおける溶液型グラウトの硬化促進剤の塩の成分を比較した実験によれば、K^+イオンの方が Na^+を用いるより緻密なホモゲルが出来る可能性があるとしている。 ➢ ノルウェーの業者が、香港の地下鉄において超微粒子セメントと溶液型グラウトのみで海底下のトンネルを掘削し、99.99%の止水に成功している（9,200L/min/100m の大量湧水と予測した区間⇒施工後 1.0 L/min/100m）。	➢ 倉敷 LPG 岩盤貯槽建設工事のグラウチング工事（マイクロフラクチャ発達部）に適用するため、沿岸域・海水条件下に関する各種試験が実施されている。 ➢ 同工事では、現地湧水による白濁等、品質の変化を懸念し、室内試験および現場試験が実施されている基本配合は、「現地湧水による白濁しない、pH6 程度の中性～酸性側の配合」のため、酸性の pH 調整剤が添加されていると考えられる。 ➢ さらに、現地湧水のもとで長期間（温度促進により 50 年間）ホモゲル強度が増進すること、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。また、4 年近く改良体ブロックの止水効果が確認されている。 ➢ 地盤注入の文献に固結砂（サンドゲル）を用いた実験の知見があり、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。 ➢ 瑞浪超深地層研究所では 130L/分もの大量の湧水が発生したポストグラウチングの注入孔に対して、溶液型グラウトの注入のみにより、わずか 0.06L/分（99.99%）にまでほぼ完全にドライになるまで低減できた。ここでは現場が夏季休暇の前のため、7 日におよぶ「長期養生」を実施しており、その効果があった可能性がある。

キーワード　地層処分、北欧、海水条件、岩盤グラウチング、活性シリカコロイド、溶液型グラウト
連絡先　〒104-8370　東京都中央区京橋二丁目 16-1　清水建設(株)　土木総本部　土木企画室　TEL：03-3561-3914

３．海外現地調査

平成 29 年 1 月に海水条件下における溶液型グラウトに関する最新知見収集と研究に対するヒアリングを実施するため、フィンランドおよびスウェーデンの専門家とグラウト技術ワークショップをフィンランドのヘルシンキにて開催した（図-1）。参加機関は、POSIVA（フィンランドにおける地層処分の実施主体）やフィンランドのコンサルタント、スウェーデンの大学・コンサルタント、JAEA、清水建設である。

図-1　グラウト技術ワークショップ（ヘルシンキ）

議論のなかで、特に地層処分施設の建設段階に入った POSIVA にとって化石水の上昇を防ぐ観点から地下施設全体の許容湧水量を非常に厳しく制限していること、また岩盤をアルカリ環境にすることをできるだけ避けたいなかで、溶液型グラウトは不可欠な材料となっていることが判明した。同時に、セメントと違って海水に反応するゲル化特性を持つことから様々な課題を有していることが判明した。例えば、文献調査で得られた Water Injection（表-1）と呼ばれる手法についても、そこに至った室内試験などの経緯を多く知ることができた。また、スウェーデンの専門家からは、施工経験に頼りすぎる手法は、理論的・実験的に構築した設計がされていないため、最適手法ではないとの指摘もあった。一方、我が国の倉敷で採用されている pH を調整して酸性側のグラウトを使うことに対しては、「配合設計による手法が海水を扱うのに適切のため、実験等によりブラシュアップする手法が良い」「北欧の海と日本で違うように海水成分による違いを考慮する必要がある」等のアドバイスを受けた。

溶液型グラウトの各国の取り組みならびに課題の整理

①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）
⇒課題：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

②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したい
⇒課題：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
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等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

③フィンランド：海水条件を一切排除する Water Injection（水注入）の対策
⇒課題：カルシウムリッチな海水条件では注入が困難
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，
そのメカニズム等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

⇒【目指すべき姿（提案）】
塩水環境下では挙動が複雑で，課題が多いとされているので，１手法に依るのではなく，３か国の課題を共有して解決する，設計施工体系の構築
ハイブリッドな材料・設計・施工手法の確立

図-2　海水条件下に適用時の課題や対策のまとめ

４．まとめ

文献調査ならびにグラウト技術ワークショップで得られた知見から、溶液グラウトの開発にあたり図-2 の通りに課題を整理した。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、設計手法、施工手法と大きく区分されると考えられた。最終的には各国の対策を把握して、適切な設計施工を実施するのが望ましいといえる。我が国においては、注入する岩盤の地下水環境（養生水）や練混ぜ水が，淡水～海水条件となる可能性を想定し，ジェネリックな海水条件に対する配合対策を開発する必要があることが明らかになった。本調査は、資源エネルギー庁の公募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）」の一環として実施した。