

薬液注入の計画について

<本資料に記載の項目>

「今後の主な対話項目」（2024年2月5日 静岡県）抜粋

II 生物多様性編

3 回避・低減措置及び代償措置

(2) 椹島より上流（本流河川）の流量減少に対する具体的な保全措置、モニタリング計画

2025年11月
東海旅客鉄道株式会社

目 次

(1) 薬液注入の計画について	1
1) プレグラウトについて	1
2) ポストグラウトについて	7
(2) 薬液注入の耐久性について	8
1) 施工後 30 年経過したセメント水ガラス注入材の観察	8
2) 注入域の湧水圧の状況	9
3) 注入域の湧水量の状況	10
4) 注入域の湧水化学分析結果の経年変化	11
5) 注入を実施した海底部の坑内湧水量の経年変化	12
6) 南アルプストンネル静岡工区における薬液注入の効果の継続性に係るモニタリング ..	12
【巻末資料】	14
○幌延深地層研究計画地下研究施設における薬液注入の例	14

(1) 薬液注入の計画について

1) プレグラウトについて

- ・上流域モデル¹による沢の流量変化を分析した結果、トンネルと主要な断層の交差部における薬液注入は、沢の流量減少量を低減する効果があることを確認しました。
- ・そこで、流量減少が予測される沢については、沢の流量減少への低減措置として、トンネルと主要な断層の交差部²において、薬液注入を実施することを考えています³。
- ・薬液注入の方式として、まずはトンネル掘削に先立ちトンネル前方に注入するプレグラウト方式を考えています。
- ・沢の流量減少への事前の対策であるプレグラウト方式の実施に際しての薬液注入フローを以下及び図 1 に示します。
- ・まず、薬液注入を実施する地盤に対してボーリング調査を実施し、地質や湧水の状況を確認します。薬液注入を実施する箇所⁴の透水性を確認するため、注水による岩盤の透水試験 (JGS1322) ⁴やルジオン試験 (JGS1323) ⁵を基本とし、薬液注入を行う前の透水係数を確認します。
- ・地質や湧水の状況を確認した結果を踏まえて、薬液注入の設計を行います。改良目標透水係数、薬液注入の方式、注入材料、注入範囲、注入率 (注入量)、注入孔間隔・配置、注入孔本数、削孔・注入長、注入圧・注入速度、注入順序等を決定します。
- ・注入初期には、一部を先行施工して試験を行う現場注入試験を行い、設計の妥当性を検討の上、本施工に移行します。試験の結果次第では、随時設計を修正します。
- ・設計に基づき薬液注入を実施し、薬液注入実施後には、効果を確認するため、薬液注入を実施した箇所へのチェックボーリングを行います⁶。チェックボーリングでは、注入前と同様に、透水性を確認する試験を行い、透水係数を確認します。また、削孔した孔からの湧水量もあわせて確認します。
- ・確認の結果、設計時に定めた改良目標透水係数⁷と同程度まで透水性が改良された場

¹国土交通省 リニア中央新幹線静岡工区有識者会議 (環境保全) において、大井川上流域の沢の影響分析という目的のもと、新たに作成した GETFLOWS による解析モデル

² 透水係数が $1.0\text{E-}6$ (m/s) 以上の箇所を対象とすることを考えている

³ 「注入の設計施工マニュアル、公益財団法人鉄道総合技術研究所、平成 23 年 10 月」に準ずる

⁴ 注水による岩盤の透水試験 (JGS1322) : ボーリング孔内をパッカーにより任意の試験区間に区切り、試験区間内の有効注水圧力を段階的に上昇させながら注水し、その定常時の注水流量から透水係数を求める試験。

⁵ ルジオン試験 (JGS1323) : ボーリング孔内をパッカーで区切った試験区間内に一定圧力で注水し、圧力と注水量から透水性を求める試験。

⁶ チェックボーリングの本数については、既往の実績 (青函トンネルにおいて 3 本、地芳トンネルにおいて 2 本実施) を踏まえ、現場の状況に応じて数か所程度実施することを考えている。

⁷ 既往の実績から確認される中では、実行可能な目標透水係数として、 10^{-7} (m/s) を基本とする。青函トンネルでは、“注入による岩盤の止水効果の実測”を目的のひとつとし、先進導坑と並行する試験坑 (水深約 20m、土被り 244m) において、薬液注入前後の岩盤の透水性を評価している。具体的にはまず、5 本の試験孔を設けて注入前の自然地山の透水性を調査し、その後、同地山に対して薬液注入を実施、同じ地山に対して新たに 3 本のチェック坑を設け、薬液注入後の透水性を調査している。その結果、薬液注入前に 5 本の試験孔で計測した透水係数 k_m は、 $k_m=2.142\times 10^{-6}$ (m/s)、 $k_m=6.291\times 10^{-7}$ (m/s)、 $k_m=5.459\times 10^{-7}$ (m/s)、 $k_m=9.336\times 10^{-6}$ (m/s)、 $k_m=1.753\times 10^{-6}$ (m/s) であったことに対し、薬液注入後に新たに設けた 3 本のチェック坑では $k_m=3.212\times 10^{-8}$ (m/s)、 $k_m=2.227\times 10^{-8}$ (m/s)、 $k_m=4.406\times 10^{-8}$ (m/s) となり、「注入の効果は明らかで、注入によって地山の透水係数は $10^{-1}\sim 10^{-2}$ (cm/s) 程度小さくなっていることがわかる」(青函トンネル土圧研究調査報告書 p218 引用) とされている (青函トンネル土圧研究調査報告書、社団法人土木学会、昭和 52 年 3 月より)。一方で、現地の地質や湧水等の状況次第では、透水係数を 10^{-7} (m/s) まで改良することが困難な場合もあることに留意。

合には、当該箇所掘削を実施します。

- ・改良目標透水係数まで改良されていない場合には、補足注入を実施し、改良目標透水係数となるよう繰り返し薬液注入を実施します。
- ・現地の状況を踏まえ、これ以上の改良が見込めない場合であっても当該箇所掘削を実施しますが、その際には、代償措置の検討の前提とした解析モデルにおける透水係数と比較し透水係数が同等以下であることを確認し、代償措置の検討の前提とした解析モデルにおける透水係数より大きければ、影響予測の見直しを行います。
- ・薬液注入実施箇所のトンネル掘削にあたっては、透水係数の改良状況に関わらず、薬液注入実施箇所のトンネル湧水量をモニタリングし、代償措置の検討の前提とした解析モデルにおける当該区間のトンネル湧水量と比較し、実際のトンネル湧水量の方が大きい場合には、現地の状況に応じた追加の代償措置を検討します。検討した代償措置を実施するか否かについては、現地の生物の生息・生育状況等を踏まえ、静岡県専門部会委員等の専門家に相談し、判断します。
- ・また、巻末資料に記載した幌延深地層研究計画地下研究施設における薬液注入では、大深度の高水圧（最大 10Mpa）に対応可能である「高圧・高止水対応グラウト注入技術」が活用されています（2014 年度に土木学会の技術開発賞を受賞）。
- ・本技術は、装置の小型化によりトンネル内の狭い場所でも余裕をもって使用することが可能とされており、高水圧が想定される静岡県内の南アルプストンネル工事における断層部への薬液注入においても参考にできる技術であると考えています。
- ・実際には、薬液注入を実施する前に行うボーリング調査の結果やその時点までのトンネル掘削実績を踏まえ、適用する技術等も含め、薬液注入の設計を行い、施工します。

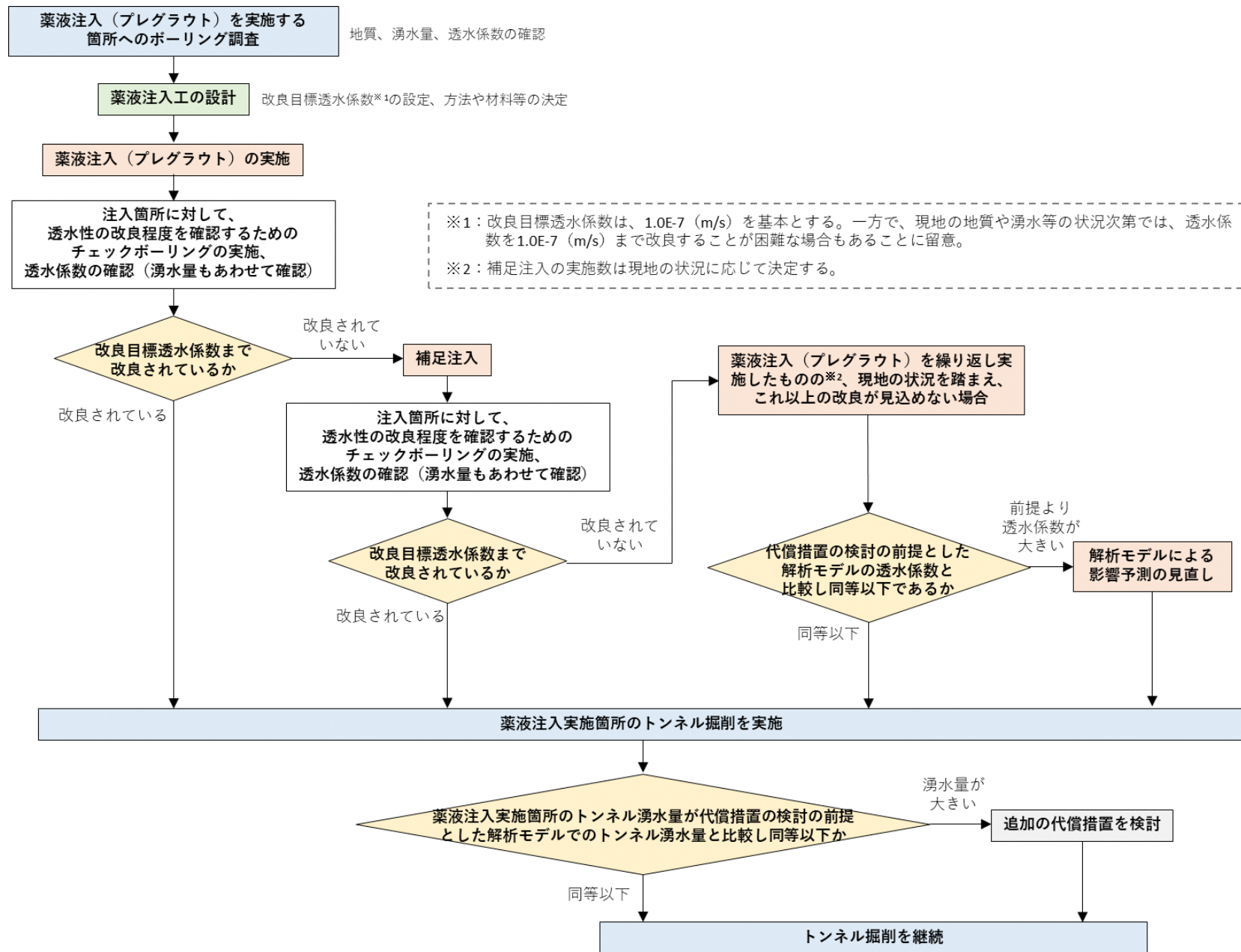


図 1 薬液注入（プレグラウト）のフロー

- ・注入材料は、水ガラス系（有機物を含まないもの）やセメント系の注入材を使用することを考えています⁸。
- ・基本的にはまず、高い水圧でも注入材が押し流されないよう、短い時間で注入効果が期待できる材料（主に水ガラス系（セメント水ガラス系を基本））を用いて、注入（初期注入）を行い、その後、その周囲に強度の高い注入材料（主にセメント系）を重ねて注入（本注入）することで、徐々に改良範囲を広げ、改良体をトンネル外周に構築していくことを考えています。
- ・水ガラス系のうちセメント水ガラス注入材については、青函トンネルを事例に、注入施工後 30 年が経過した現状の注入材料がどのような状況にあるのかを複数の観点から調査し、セメント水ガラス注入材の耐久性について評価を行った文献⁹において、「青函トンネル海底部における各種計測データの経年変化から、注入域の劣化等を示すような結果は確認されておらず、注入域は長期的に健全な状態を保持している。」と評価されています。
- ・今回の注入計画全体としての耐久性という観点では、このような水ガラス系の周囲に、強度が高く耐久性のある注入材料（主にセメント系）を更に重ねて注入するため、全体としての耐久性は確保されるものと考えています。
- ・また、薬液注入を実施する前に行うボーリング調査や先行して行う現場注入試験の結果、その時点までのトンネル掘削実績を踏まえ、使用する材料等の検討を行い、上記の材料と異なる材料を使用する場合には、耐久性について確認の上、使用します。
- ・なお、透水係数を確認するチェックボーリングは、本注入まで完了したのちに実施します。

⁸ 注入材は種類により、ゲルタイムと呼ばれる注入材と湧水が触れてから固化するまでの反応時間を設定することが可能。水ガラス系（水ガラスとは、ケイ酸ナトリウムが溶け込んだ液体であり、注入後、化学反応により固化する物質）は、ゲルタイムをコントロールしやすく、早期のトンネル湧水低減や岩盤でクラック部に注入材を浸透させる必要があるような場合に適用する。なお、瞬結タイプのゲルタイム（硬化時間）は、1 分未満であり、未反応のまま地盤中に存在することはないとされている。また、セメント系は、セメントを主材料とした注入材であり、ゲルタイムは水ガラス系よりも長いため、固化するまでの時間は長くなるが、固化強度は大きく、長期的にも安定した改良体を構築可能である。

⁹ セメント系薬液注入材の耐久性に関する研究、秋田勝次、2011、京都大学学術情報リポジトリ

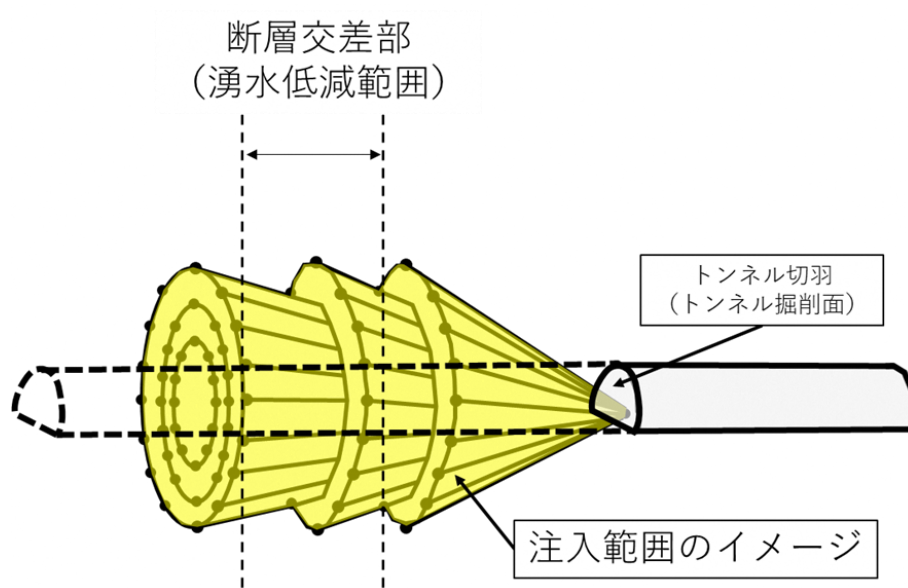


図2 薬液注入のイメージ（その1）

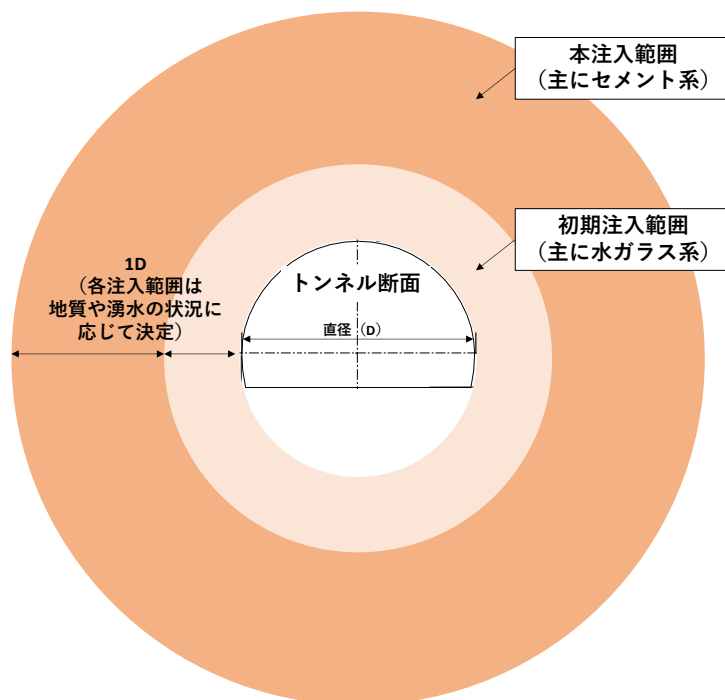


図3 薬液注入のイメージ（その2）

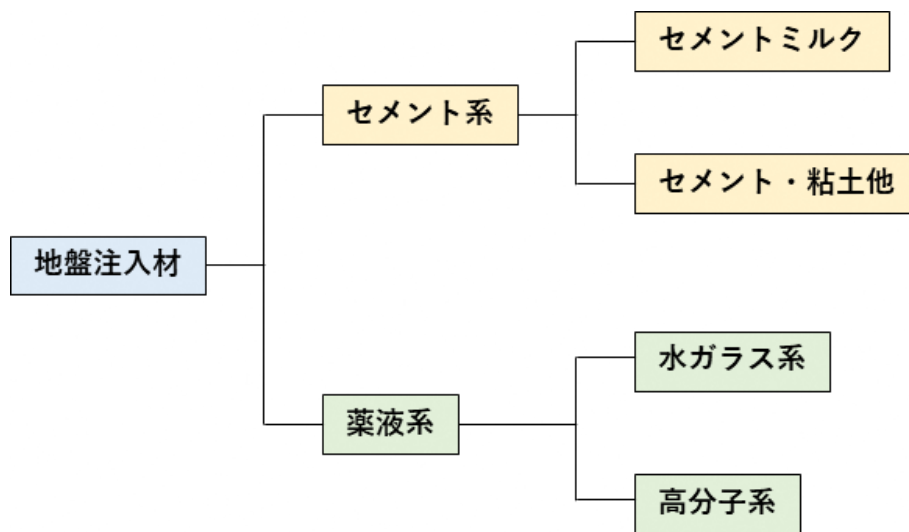


図 4 注入材の分類¹⁰

¹⁰ 「山岳トンネルの補助工法、2009 年 10 月、土木学会」より

- ・トンネル湧水は、処理設備により適切に処理したうえで河川へ放流します。また、薬液注入箇所周辺の沢やトンネル湧水放流先河川の水質の確認も行います。
- ・また、高速長尺先進ボーリング等の地質調査の結果、沢の近傍において断層等、大量のトンネル湧水の発生が想定される区間が確認された場合で、トンネルの線形変更により沢の流量への影響が低減される可能性のある場合には、トンネルの機能を確保できる範囲内で線形の変更が可能な斜坑等¹¹について、線形変更による影響の低減を検討します（図5）。

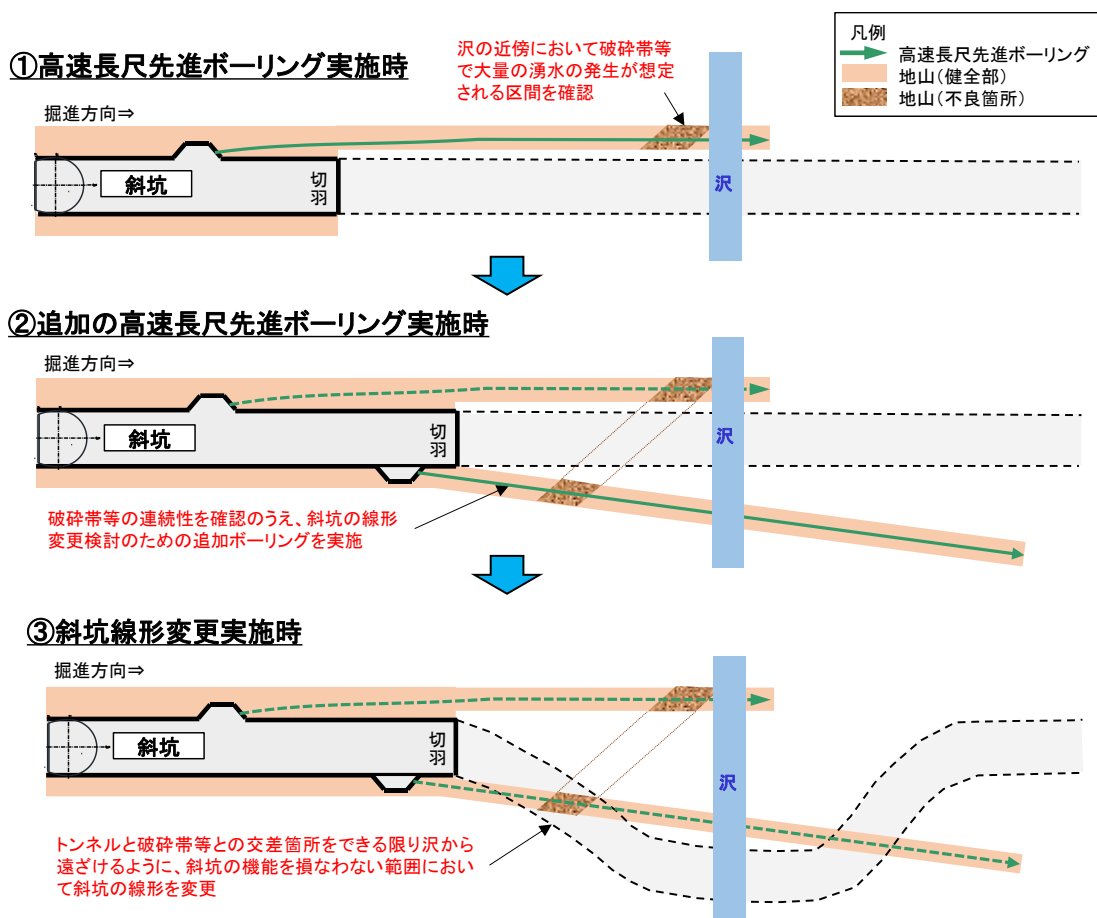


図5 斜坑における線形変更のイメージ

2) ポストグラウトについて

- ・掘削後のトンネル湧水や沢の流量の状況を踏まえ、トンネル湧水量が増加している区間等において、原因を調査した結果、原因箇所が特定され、ポストグラウトによりトンネル湧水量の低減が可能であり、また、トンネル内の安全性を考慮したうえで、ポストグラウトが実施可能であれば、ポストグラウトを実施します。

¹¹ 斜坑、先進坑、導水路トンネル、工事用道路トンネルを指す（本坑以外のトンネル）

(2) 薬液注入の耐久性について

青函トンネルを事例に、注入施工後 30 年が経過した現状の注入材料がどのような状況にあるのかを複数の観点から調査し、セメント水ガラス注入材の耐久性について評価を行った文献¹²に基づき、薬液注入の耐久性を以下の通り、お示しします。

1) 施工後 30 年経過したセメント水ガラス注入材の観察

- ・セメント水ガラス注入材の長期材料特性を把握することを目的として、青函トンネル海底部の作業坑において側壁部からボーリング調査を実施し、採取したコアを用い、各種試験を実施しています。
- ・注入施工後 30 年経過した箇所において実施したボーリングのコアから採取した直後の試料の状況は図 6 の通りです。
- ・「コアからは、岩盤の亀裂に脈状に密着した堅硬なグラウトが観察された。トンネル地山内のグラウトは大半が岩盤の亀裂に存在し密封され湿潤状態であるため、当初から想定されたとおりグラウトは崩壊することなく、安定した固結物となっている。」と評価されています。



図 6 施工 30 年後に採取した直後の試料の状況¹²

¹² セメント系薬液注入材の耐久性に関する研究、秋田勝次、2011、京都大学学術情報リポジトリ

2) 注入域の湧水圧の状況

- ・青函トンネル海底部の作業坑において、注入域およびその外側の地山部分における湧水圧の分布を測定しています。
- ・作業坑の注入域における湧水圧を最大15年間測定した結果は、図7、図8の通りです。測定方法は、壁面から地山側にボーリング孔（長さ5m、10m、15m、20m）を設け、壁面の口元管周囲を閉塞したうえで各孔に水圧計を設置するものです。

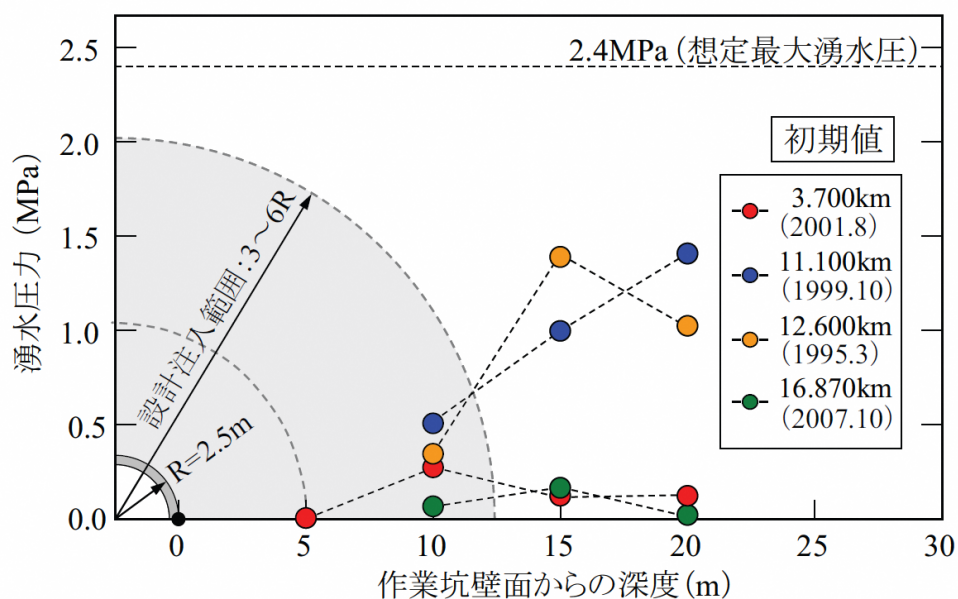


図7 注入域における湧水圧の分布（初期値）¹⁰

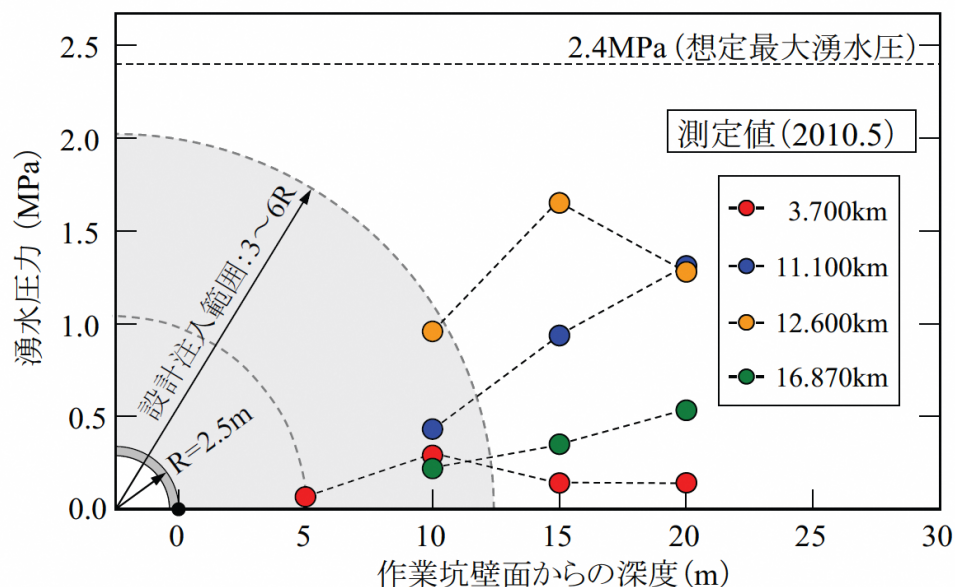


図8 注入域における湧水圧の分布（2010.5時点）¹²

- ・「測定開始時点から現在まで概ね湧水圧の変動は小さく、注入域内の湧水圧は、海底下における本来の最大湧水圧である 2.4Mpa と比較し極めて小さく、注入効果が良く発揮されていることを示している。また、注入域を超え注入半径の 2 倍近い深度となっても、湧水圧はさほど大きくない。このことは、設計注入域を超えて注入材料が入っており、止水性が高いことを示しており、トンネルとしては安全側の構造体となっているものといえる。青函トンネルの注入施工においては、圧力管理を主体とした注入方式をとっていたため、所定の最終注入圧になるまで、換言すれば、注入対象領域が所定の透水係数になるまで安全側に注入されたものと考えてよい。」と評価されています。

3) 注入域の湧水量の状況

- ・湧水圧測定に使用したボーリング孔からの湧水量の経年変化について、作業坑 2 箇所の状況は、図 9 の通りです。

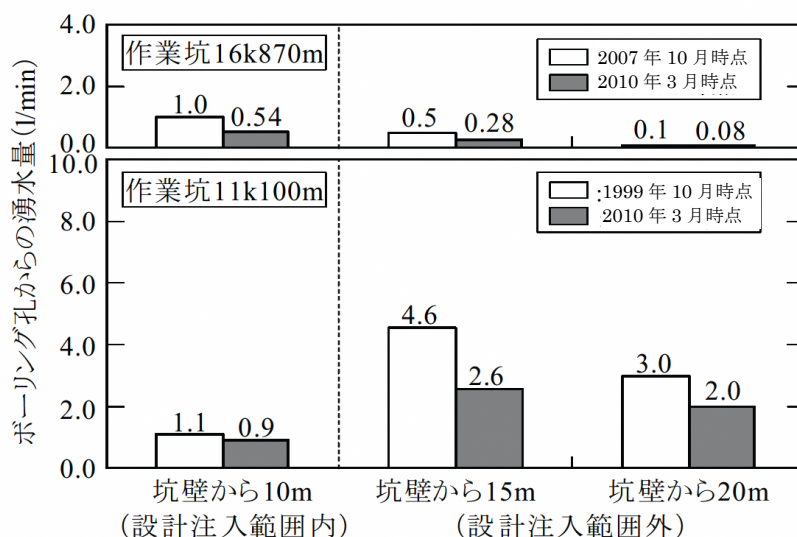


図 9 注入域における湧水量の変化¹²

- ・「注入域内の湧水量は数 l/min オーダーと小さく、10 年経過後も湧水量の変動は微量であり、注入域は健全性を保持しているものと考えられる。」と評価されています。

4) 注入域の湧水化学分析結果の経年変化

- ・青函トンネル作業坑壁面からの坑内湧水化学分析結果の経年変化は図 10 の通りです。

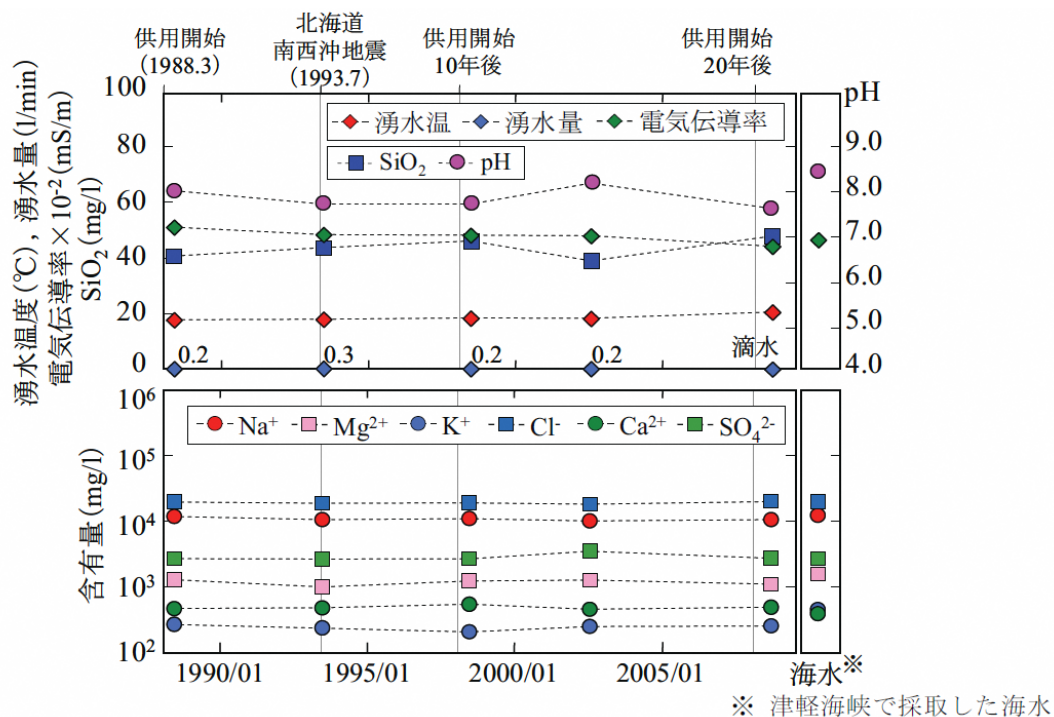


図 10 湧水化学分析結果の経年変化¹²

- ・「供用開始後 20 年経過しても湧水温度、湧水量、電気伝導率、pH の変化は微少であり、また各化学成分の含有量もほぼ一定の傾向となっていることが確認できる。また坑内湧水の化学成分には、海水成分と比較し顕著な差は確認されていない。これらのことから、トンネル坑内への湧水とともに注入材の成分が溶脱しているような現象は生じていないことが想定され、注入域は長期的に安定した状態を保持しているといえる。」と評価されています。

5) 注入を実施した海底部の坑内湧水量の経年変化

- ・青函トンネル供用 20 年後までの海底部の坑内湧水量の経年変化は図 11 の通りです。

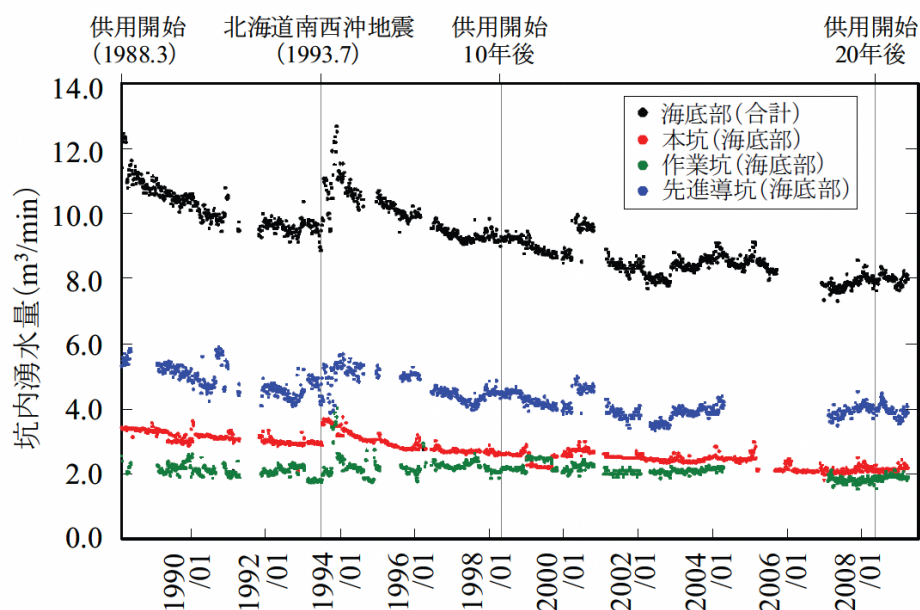


図 11 海底部における坑内湧水量の経年変化¹²

- ・「坑内湧水量が長期的に増加傾向を示していないことから、グラウト硬化体は劣化や破壊を生じておらず、注入域として健全な状態を保っていると考えられる。」と評価されています。
- ・以上の「青函トンネル海底部における各種計測データの経年変化から、注入域の劣化等を示すような結果は確認されておらず、注入域は長期的に健全な状態を保持している。」と評価されています。

6) 南アルプストンネル静岡工区における薬液注入の効果の継続性に係るモニタリング

- ・南アルプストンネル静岡工区では、薬液注入の効果の継続性（耐久性）をモニタリングするため、静岡県内全体のトンネル湧水量のほか、薬液注入箇所を含む一定区間で区切ったトンネル湧水量を継続して計測します。
- ・薬液注入箇所を含む一定区間で区切ったトンネル湧水量が、明らかな上昇傾向を示した場合には、増加の原因を調査し、対応を検討します。
- ・生物への影響が生じた場合の対応については、対話項目 2（6）で整理する管理フローにおいて、工事完了後の対応として別途整理します。
- ・また、列車が走行しない先進坑や斜坑においては、これらのトンネルで薬液注入箇所

がある場合、先述の青函トンネルで行われたような方法での耐久性の確認を行うことも可能であるため、必要に応じて実施します。

【巻末資料】

○幌延深地層研究計画地下研究施設における薬液注入の例¹³

- ・幌延深地層研究センターは北海道天塩郡幌延町に建設された 3 本の立坑と水平坑道からなる施設であり、地質としては堆積泥岩が分布しています（図 1 2）。
- ・図 1 2 の漸移帯中に発達した割れ目帯や断層部分では 10^{-6}m/s 程度の比較的透水性が高い部分も確認されていたため、止水対策として掘削工事に先立って高水压下でのグラウト工事を実施しました。
- ・改良範囲を図 1 2 にお示しします。施工手順は、基本長（ステージ長）を 5m とし、基本長の削孔ごとにグラウトを行うステージ工法です。注入材料は、微細な割れ目を対象とした超微粒子型注入材等です。
- ・透水性の改良目標を 0.1 ルジオン（透水係数約 $1.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ に相当）と設定し、施工した結果、「立坑および水平坑道を対象に実施したグラウト工の数量は、総注入孔数が約 3,000 孔、掘削総延長が約 140,000m であった。改良結果として、全注入孔の全ステージにて 1 ルジオン以下、全ステージの 96%で 0.1 ルジオン以下を達成した。」と評価されています。

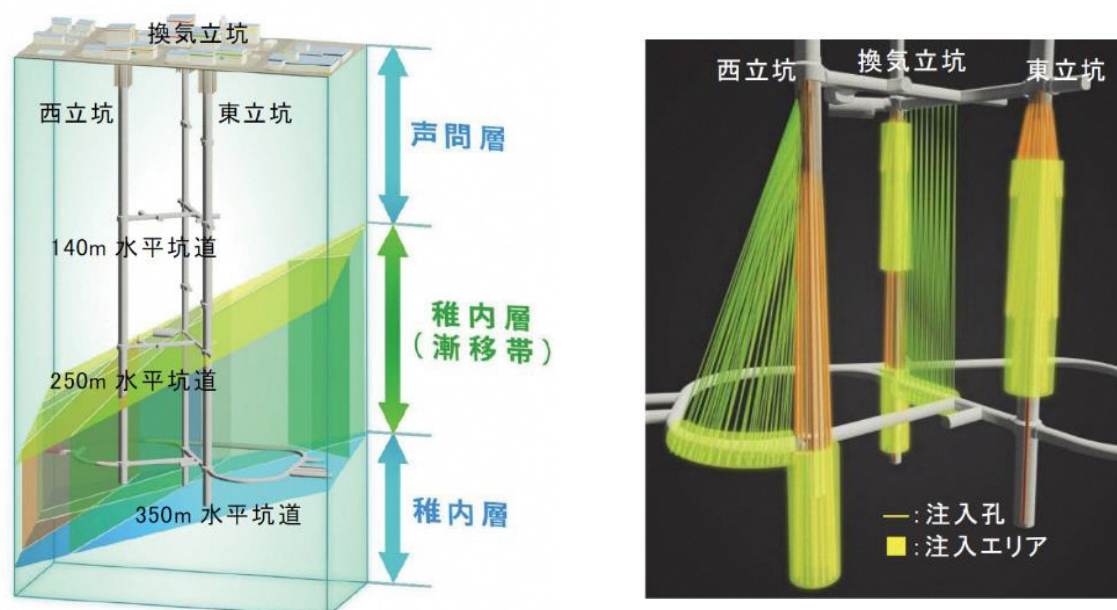
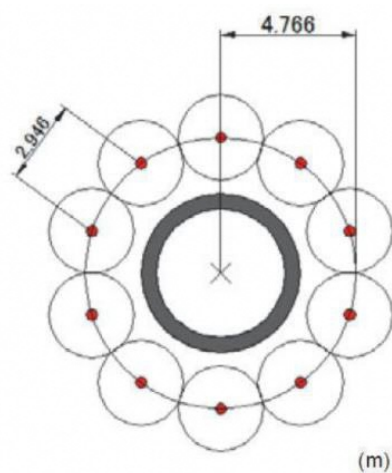
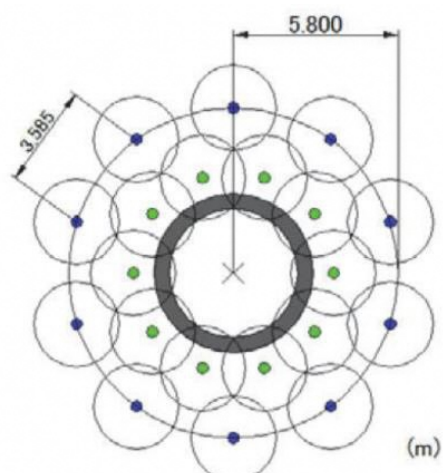


図 1 2 幌延深地層研究センター鳥瞰図（左図）と立坑のグラウト改良範囲（右図）¹³

¹³ 幌延深地層研究計画地下研究施設整備（第Ⅱ期）等事業におけるグラウト工事結果の概要、鈴木弘・進藤彰久・南出賢司・本島貴之、土木学会第 71 回年次学術講演会（平成 28 年 9 月）



改良範囲の例
(リングが1つの場合)



改良範囲の例
(リングが2つの場合)

図 1 3 グラウト孔配置断面図 (立坑) ¹³