

3、薬液注入の止水効果と耐久性及び水質管理について

(1) 止水効果について

1) 青函トンネルの例¹

- ・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、主な地質は流紋岩と玄武岩）において、薬液注入前後の岩盤の透水性を評価しています。
- ・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（セメントと水ガラスによる）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ます。
- ・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）とされています。

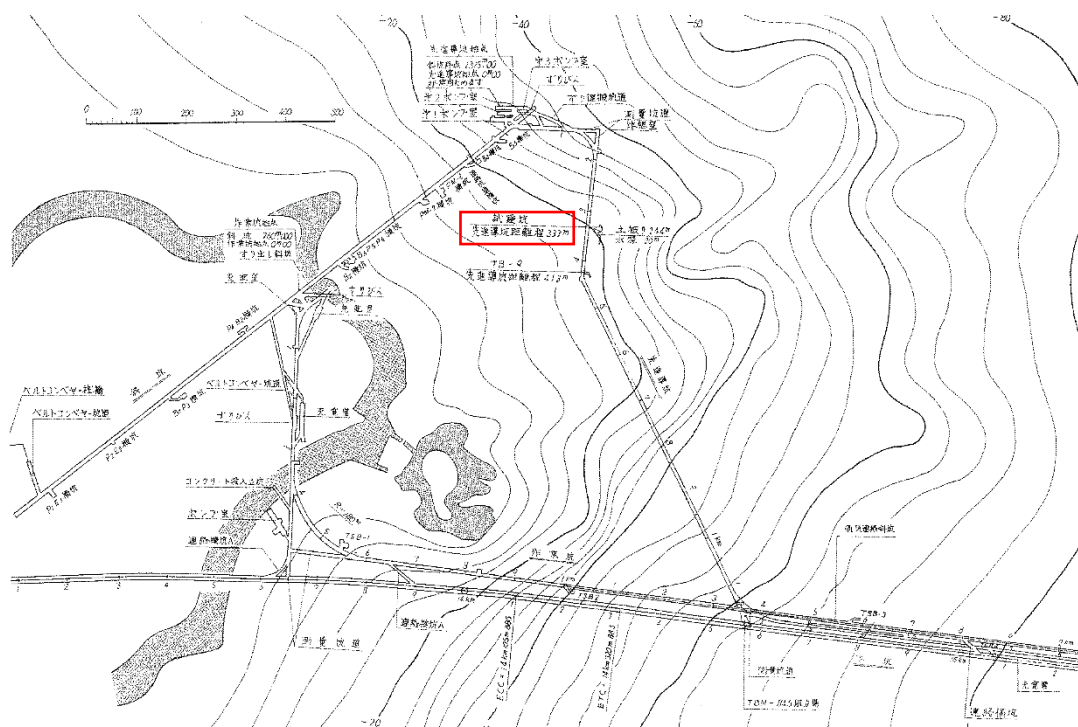


図 3-1 竜飛側坑道平面図¹

¹ 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

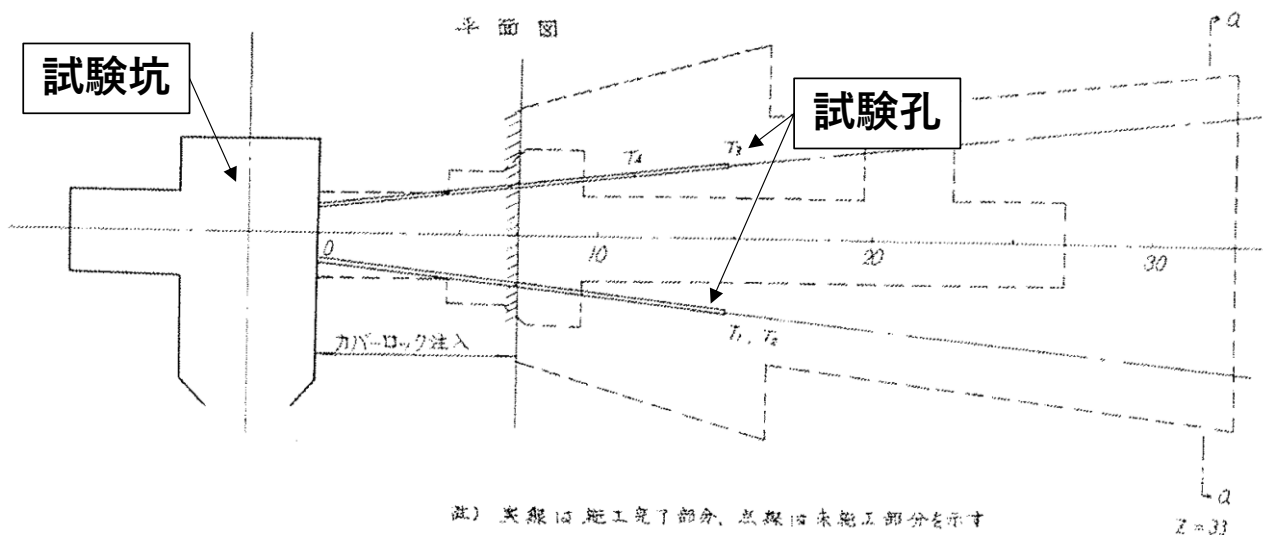


図 3-2 薬液注入前の自然地山の透水性を調査した際の試験孔（平面図）¹
（JR東海一部追記）

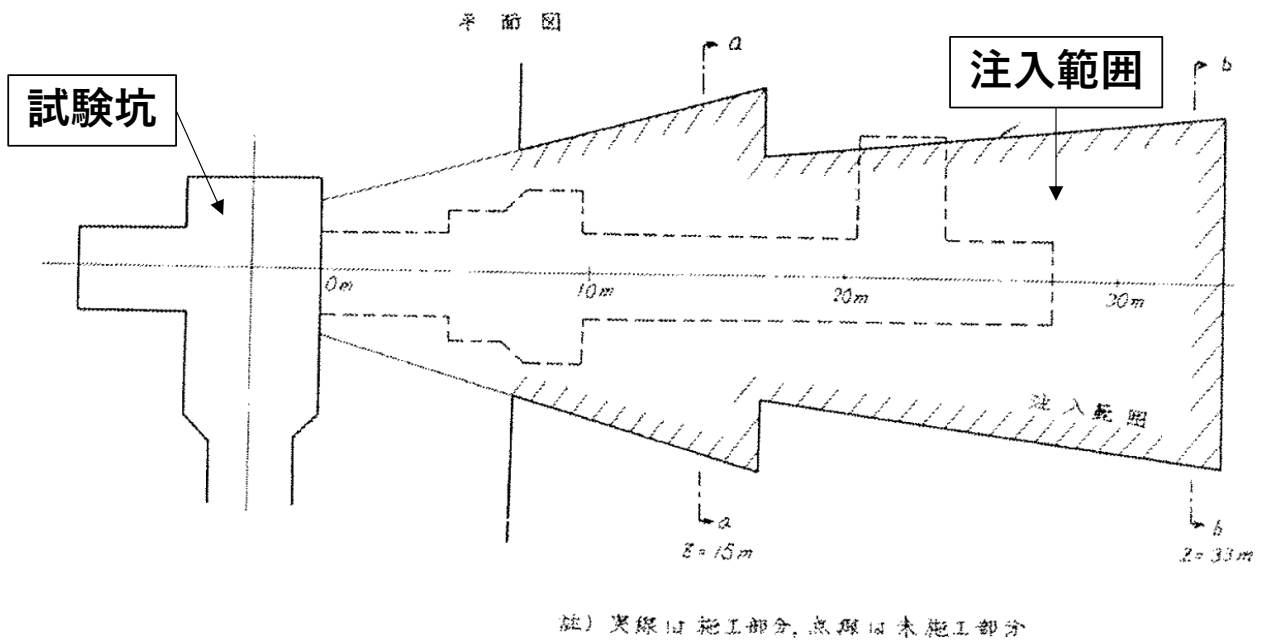


図 3-3 止水注入（薬液注入）の平面図¹（JR東海一部追記）

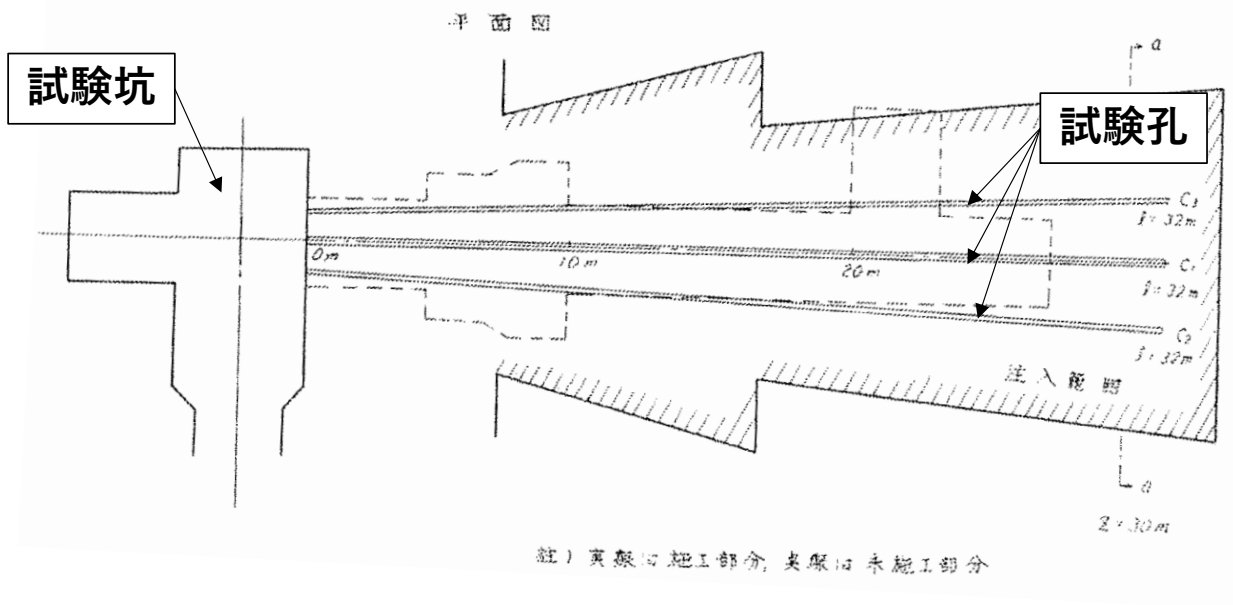


図 3-4 薬液注入後の透水性を調査した際の試験孔（平面図）¹
（JR東海一部追記）

2) 北薩トンネルの例²

- ・北薩トンネルでは、図 3-5 に示す湧水が最も多い区間 100m について、トンネル湧水の減水対策工を施工するにあたり、図 3-6 に示す試験施工①区間、③区間の地質の異なる 2 つの区間で、試験グラウチングを実施しています。

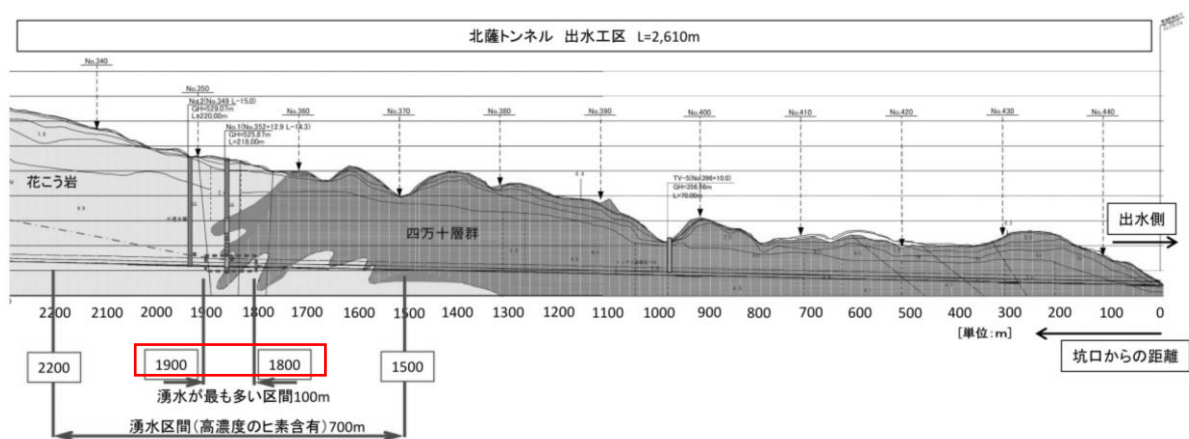


図 3-5 北薩トンネルの地質縦断図²（JR東海一部加筆）

² ダムのグラウチング技術を適用した山岳トンネルの減水対策工、古田島信義・鈴木雅文・中出剛・木佐貫浄治、ダム工学 27 (3)、195-206、2017

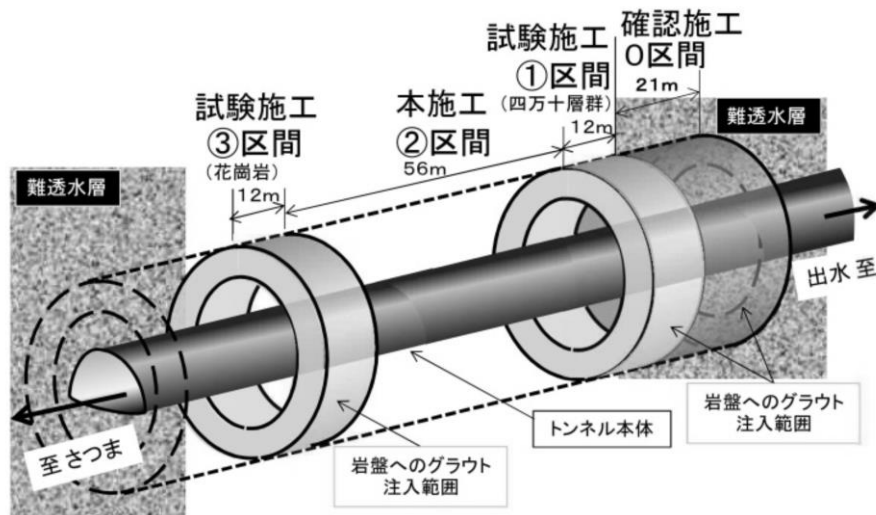


図 3-6 減水対策工施工区間の鳥観図²

- ・試験施工区間①の地質は、四万十層の破碎帯区間であり、試験施工区間③の地質は、比較的亀裂幅が小さい花こう岩の区間です。土被りはいずれも約 200m です。
- ・薬液注入の注入区間の構造は図 3-7 に示すとおり、リング状の改良ゾーンを連続させた円筒状の構造とし、グラウチング³の施工深度については、トンネル壁面から深さ 3.6m をカバーロックとし、3.6～6.6m の 3.0m 区間を注入区間としています。注入材料は極超微粒子セメントです。

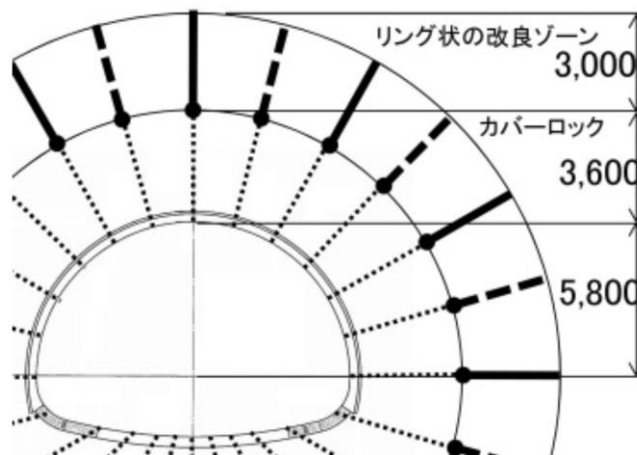


図 3-7 施工深度（改良厚）²

³ セメントや薬液などの各種注入材を構造物周辺基礎地盤もしくは構造物自体に注入し、基礎地盤の強度増加および固結化もしくは止水性向上を図る基礎改良工法

- ・薬液注入後の改良目標透水係数を 4×10^{-8} (m/s) 程度とし、ルジオン値 (Lu)⁴に換算して約 0.4Lu 程度としています。
- ・トンネル円周方向へのリング状のグラウチングであるため、図 3-8 の通り、1次孔と2次孔を配置するリング (Aリング) と3次孔と4次孔を配置するリング (Bリング) を設定し、Aリングを施工してからその間のBリングを施工するものとしています。

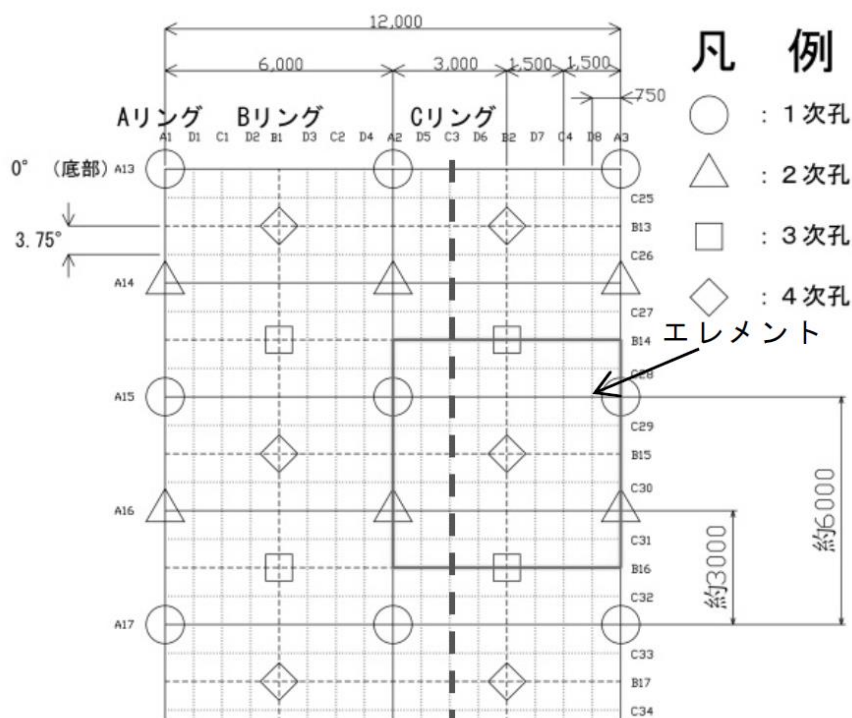


図 3-8 孔配置 (平面展開図)²

- ・上記の計画に基づき実施された試験グラウチングの結果、「(グラウチングの) 完了基準の一つとしている最終次数孔の超過確率 15%値は、①区間で 0.40Lu、②区間で 0.27Lu となり、その平均値が①区間で 0.20Lu、③区間で 0.16Lu となった。また、1次孔の平均値は①区間で 38.8Lu、③区間で 21.6Lu であり、これは地山の改良前の値といえる。つまり四万十層 (①区間) は平均で 38.8Lu から 0.20Lu、花こう岩層 (③区間) は平均で 21.6Lu から 0.16Lu となり、多くは四万十層で 0.40Lu 以下、花こう岩層で 0.27Lu 以下に改良された。よって両区間は改良目標値 0.4Lu 以下に改良された。」とされています。

⁴ 岩盤の透水性を求める試験 (ルジオンテスト) によって求められる値をいう。ボーリング坑内での定水位の保持に必要な補給水量を測定するもので、圧力 0.98MPa、孔長 1m、1 分間当りの補給水量 (L) を表し、1L/min/m の水が注入されたときを 1ルジオンと称する (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)

3) 瑞浪超深地層研究所の例⁵

- 次に、高水圧下での薬液注入を行っている事例として、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター瑞浪超深地層研究所（岐阜県瑞浪市）での事例を示します。

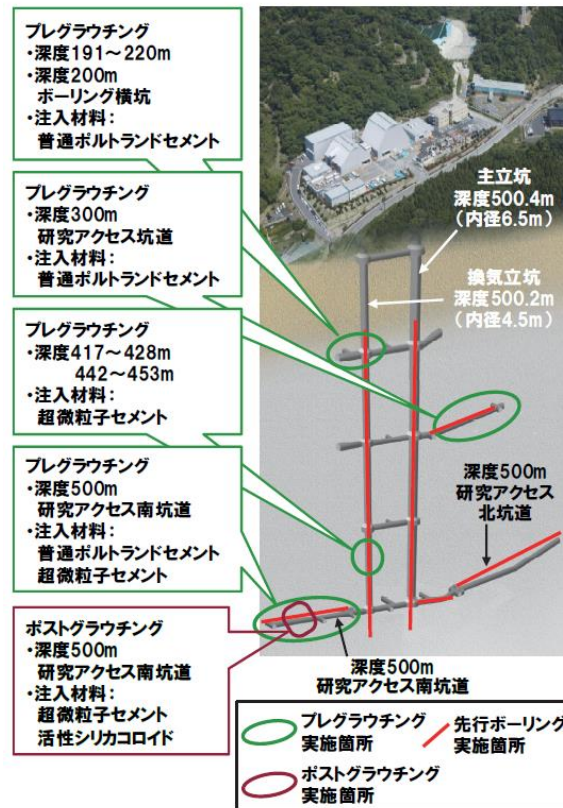


図 3-9 瑞浪超深地層研究所研究坑道のレイアウト⁵

- 研究坑道付近の地質は、地上から深度 180m 程度までは新第三紀の堆積岩層、それ以深は白亜紀に形成された花崗岩体が主として分布しています。
- 深度 500m では、湧水箇所の水圧は概ね 3MPa を超え、最大 4MPa の高水圧であり、深度 500m 研究アクセス南坑道では、湧水抑制対策として薬液注入を実施しています。
- プレグラウチング孔の標準的な配置と坑道掘削の施工パターンを図 3-10、図 3-11 に示します。注入材料は超微粒子セメントです。

⁵ 高湧水下におけるプレグラウチングとポストグラウチングを併用した湧水抑制効果の評価、見掛信一郎・池田幸喜・松井裕哉・辻正邦・西垣誠、土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 74, No1, 76-91、2018

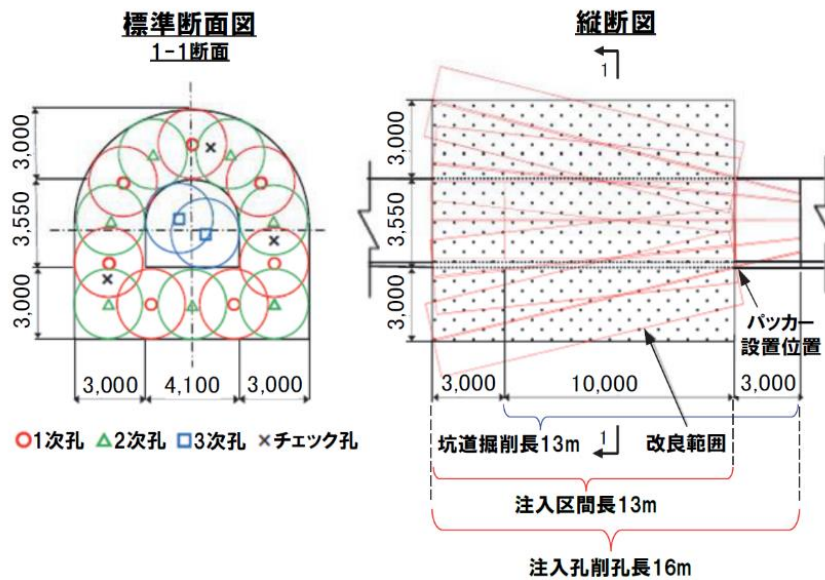


図 3-10 プレグラウチング孔の標準的な配置（単位：mm）⁵

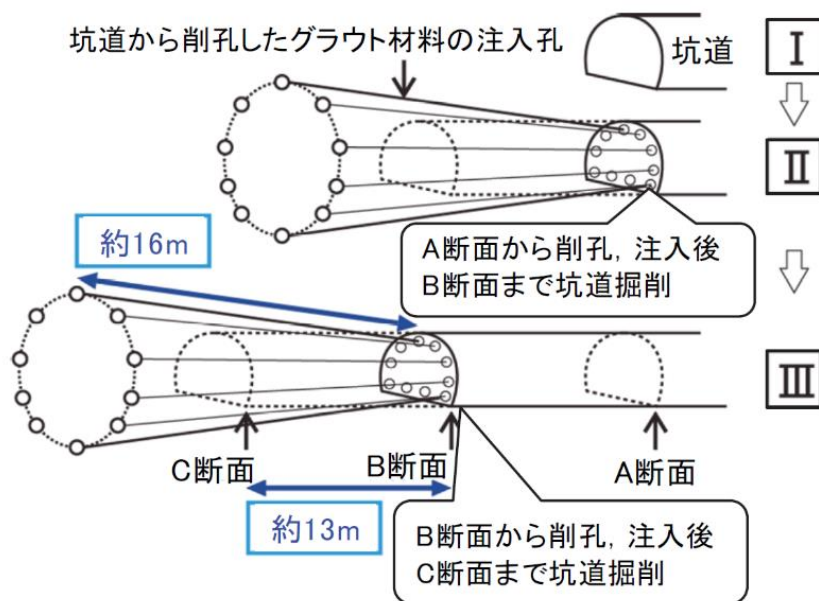


図 3-11 プレグラウチングと坑道掘削の標準的な施工パターン⁵

- ・上記の計画に基づき注入を実施した結果、「当該区間の注入範囲の透水係数は、先行ボーリングの結果からCM区間で 17.7Lu ($\cong 2.3 \times 10^{-6}\text{m/sec}$)であり、プレグラウチングによる注入範囲のチェック孔のルジオン試験結果は平均 0.09Lu ($\cong 1.1 \times 10^{-8}\text{m/sec}$)であった。」とされています。

4) 幌延深地層研究計画地下研究施設の例⁶

- ・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、地質としては新第三紀の堆積泥岩である声問層および稚内層が分布しています(図 3-1 2)。
- ・図 3-1 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圧下でのグラウト工事を実施しました。
- ・改良範囲を図 3-1 3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 1.3×10^{-8} 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。

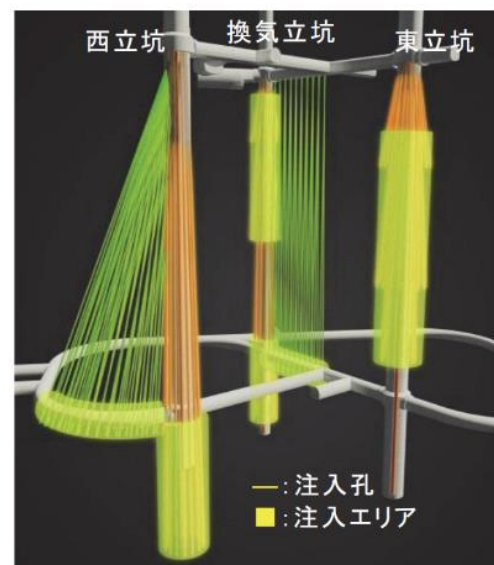
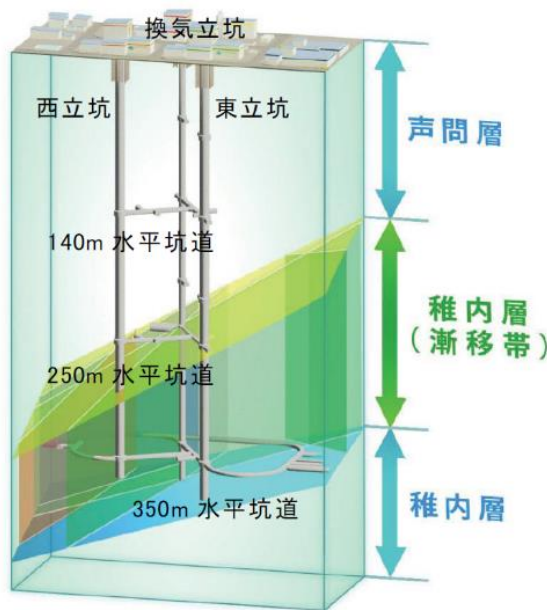
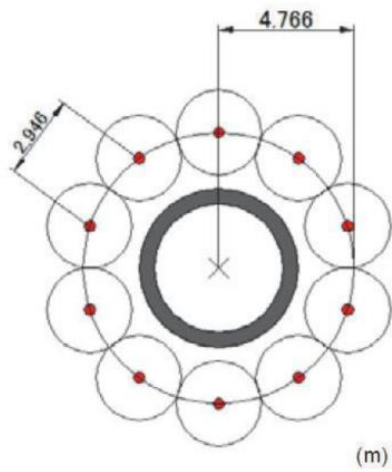


図 3-1 2 幌延深地層研究センター鳥瞰図⁶

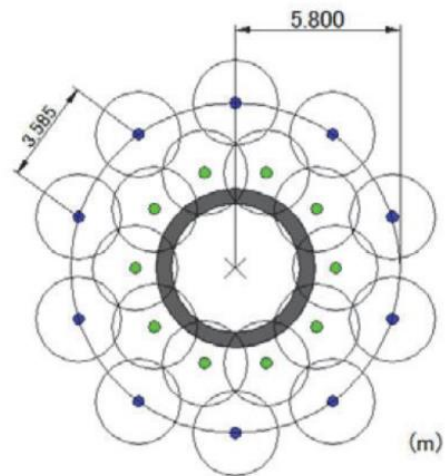
図 3-1 3 グラウト改良範囲(立坑)⁶

⁶ 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)



(m)

改良範囲の例
(リングが1つの場合)



(m)

改良範囲の例
(リングが2つの場合)

図 3-14 グラウト孔配置断面図 (立坑)⁶

(2) 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、セメント系薬液注入材の耐久性について評価を行った文献⁷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 3-15 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 3-15 施工 30 年後に採取した直後の試料の状況⁷

⁷ 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3-16、図3-17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。

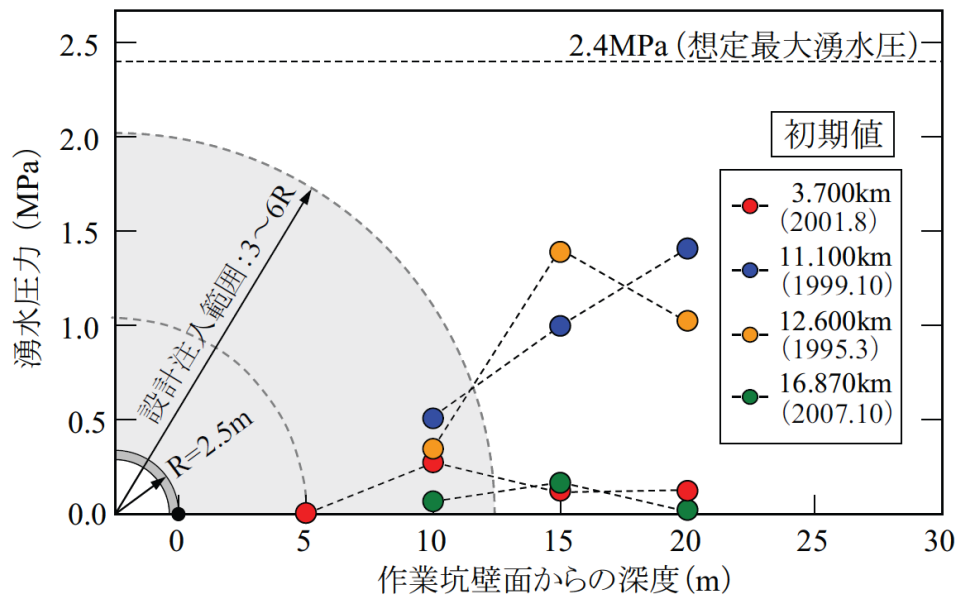


図 3-16 注入域における湧水圧の分布（初期値）⁷

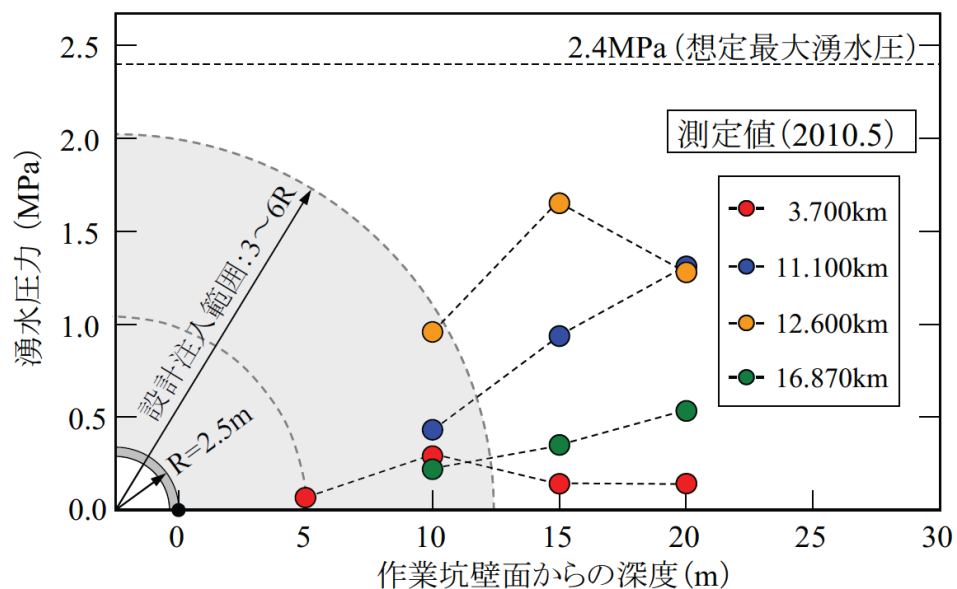


図 3-17 注入域における湧水圧の分布（2010.5時点）⁷

- ・「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っていない。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（作業坑 16k870m、作業坑 11k100m）の状況は、図 3-18 の通りです。

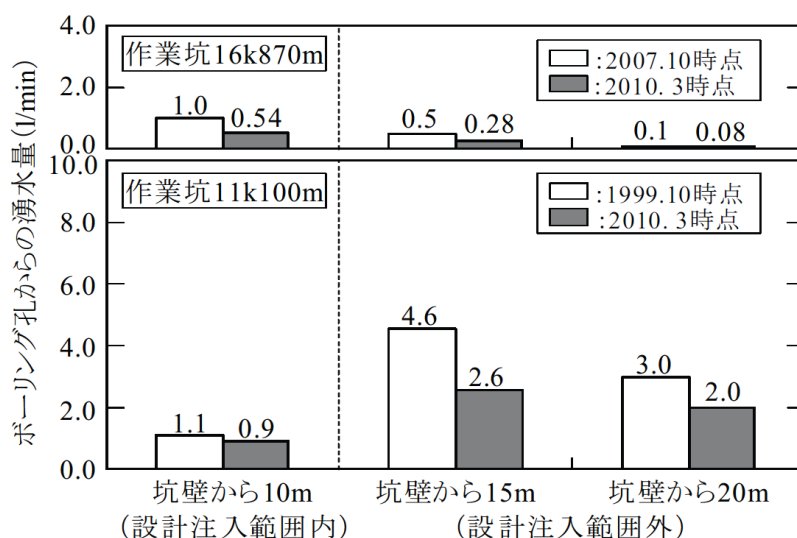


図 3-18 注入域における湧水量の変化⁷

- ・「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) 注入域の透水係数

- 青函トンネルの先進導坑および作業坑で得られた注入前の探り削孔時と注入後の確認孔の透水係数、施工後30年経過している作業坑において確認した透水係数は、図3-19の通りです。

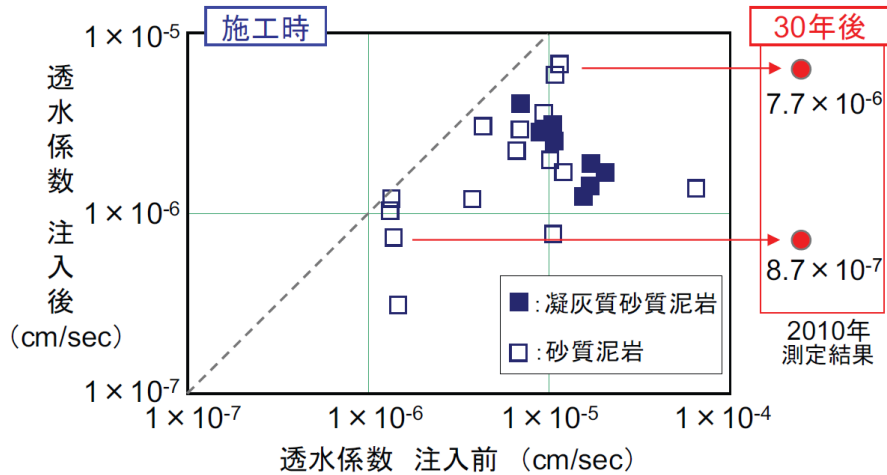


図 3-19 透水系数分布図 (施工前と施工後の比較) ⁷

- 「建設当時の注入後の透水系数の範囲内と判断できる。」と評価されています。

5) 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3-20の通りです。

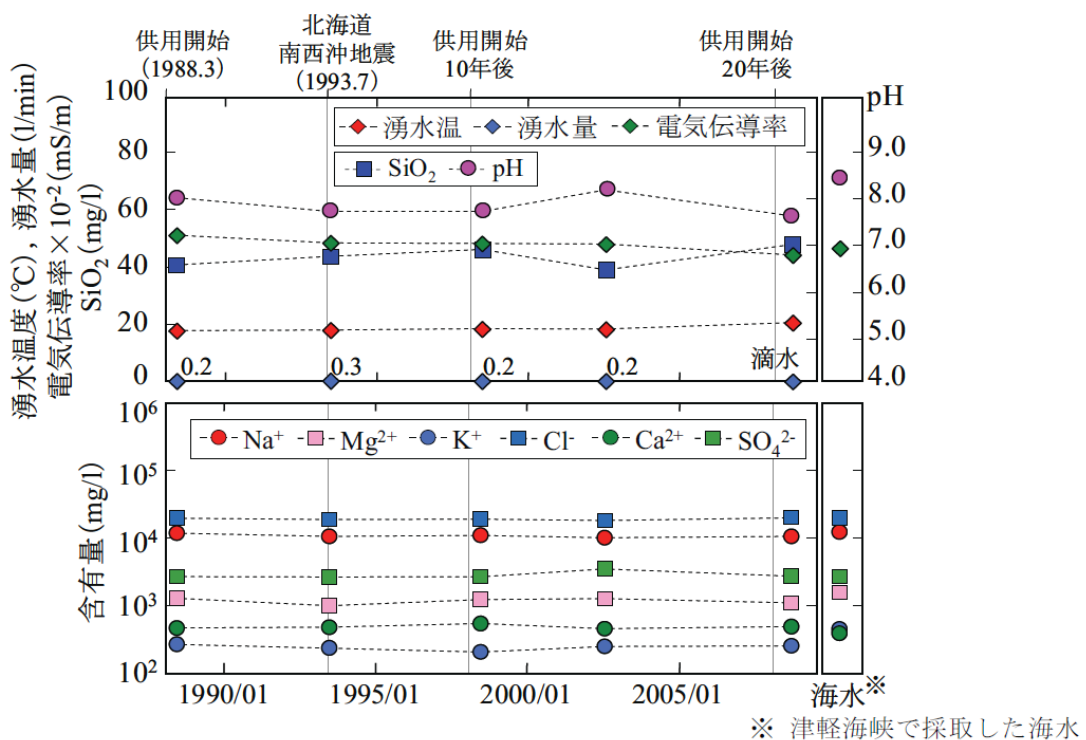


図 3-20 湧水化学分析結果の経年変化 ⁷

- ・「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。

6) 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 3-2 1 の通りです。

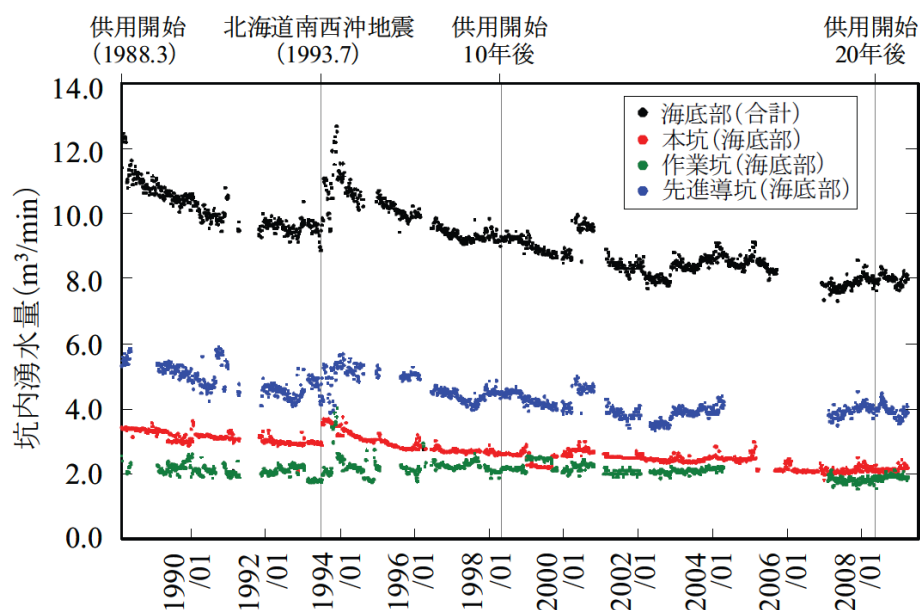


図 3-2 1 海底部における坑内湧水量の経年変化⁷

- ・「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。

(3) 薬液注入に伴う河川や地下水の水質管理について

- ・薬液注入を実施する際には、「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針について」（昭和49年7月10日建設省官技発第160号）（以下、「暫定指針」）に準じて、水質管理を行っていきます。
- ・まず、トンネル湧水を河川へ放流するにあたっては、水素イオン濃度（pH）、浮遊物質（SS）、自然由来の重金属等の処理設備を設置し、処理設備内等で各項目の計測、対策を行い、管理基準値以下に処理したうえで河川へ放流します（本編「5. 地上部分の改変箇所における環境への影響と対策」P5-1～P5-5参照、以下、表3-1、表3-2に再掲、放流箇所は図3-22の通り）。
- ・また、薬液注入に伴い、暫定指針に準じた排水基準⁸も遵守します。水素イオン濃度（pH）については、南アルプス地域の特性を考慮し、表3-3に記載の通り暫定指針の排水基準（許容限度5.8以上8.6以下）より厳しい管理基準（6.5以上8.5以下）で管理します⁹。
- ・観測井においては表3-4、表3-5に示す時期及び回数、検査項目と水質基準に適合していることを確認します（観測井の場所は図3-23の通り）。
- ・万が一、基準を超過するような傾向が確認された場合には、薬液注入を一時中断します。その後、水質への影響が低減されるよう使用する材料や注入範囲を検討し、薬液注入を再開して、トンネル湧水量の低減に努めます。

表 3-1 処理設備における水質管理基準（pH、SS）

項目	管理基準	(参考) 排水基準 許容限度	(参考) 上乘せ排水基準 (大井川水域) 許容限度	(参考) 環境基準 (AA) 基準値
pH	6.5以上8.5以下	5.8以上 8.6以下	—	6.5以上 8.5以下
SS	25mg/L以下	200mg/L (日間平均 150mg/L)	40mg/L (日間平均 30mg/L)	25mg/L以下

水質汚濁防止法等に基づく排水基準として、大井川水域ではpHは5.8以上8.6以下、SSは最大40mg/L以下、日間平均30mg/L以下が定められています。南アルプスの地域特性を踏まえ、現時点で最高水準の処理能力を有する処理設備を設置し、表3-1に示す基準値で管理していきます。なお、この管理基準値は、公共用水域の環境基準の水域類型のなかで最も厳しい基準で、ヤマメ、イワナ等の貧腐水性水域の水産生物用として適用され、大井川上流（駿遠橋より上流）の水域類型であるAA型の値と同等となっています。

⁸ 暫定指針に記載の内容について JIS 規格番号等の改定・変更を反映

⁹ 管理基準にて管理するほか、トンネル切羽からのトンネル湧水の水量（薬液注入実施後を含む）や水温、水質（pH、EC等）の計測も行い、薬液注入による変化の傾向を確認する

表 3-2 処理設備における水質管理基準（自然由来の重金属等）

項目	管理基準
カドミウム	0.03 mg/L以下
六価クロム	0.5 mg/L以下
水銀	0.005 mg/L以下
セレン	0.1 mg/L以下
鉛	0.1 mg/L以下
ひ素	0.1 mg/L以下
ふっ素	8 mg/L以下
ほう素	10 mg/L以下
亜鉛	2 mg/L以下

水質（自然由来の重金属等）について、水質汚濁防止法等に基づく排水基準を処理設備における水質管理基準として設定しました。

表 3-3 薬液注入に伴う水質検査項目および排水基準

注入材の種類		検査項目	検査方法	許容限度
水 ガ ラ ス 系	有機物を含まないもの	水素イオン濃度 (pH)	JIS K0102 の 12 に定める方法 ¹⁰	5.8 以上 8.6 以下
	有機物を含むもの	水素イオン濃度	同上	同上
		生物化学的酸素要求量 (BOD) (単位 1 リットルにつきミリグラム)	JIS K0102 の 21 ¹¹ または 17 ¹² に定める方法	160 (日間平均 120) ¹³

¹⁰ ガラス電極を用いた pH 計によって測定される起電力から求める方法。

¹¹ 試料を希釈水で希釈し、20℃で 5 日間放置したときに消費された溶存酸素の量 (mg/mL) から求める方法。

¹² 100℃における過マンガン酸カリウムによる酸素消費量 (CODMn) 試料を硫酸酸性とし、酸化剤として過マンガン酸カリウムを加え、沸騰水浴中で 30 分間反応させ、そのとき消費した過マンガン酸の量を求め、相当する酸素の量 (ng/L) で表す方法。

¹³ 「日間平均」による許容限度は一日の排出水の平均的な汚染状態について定めたものである。

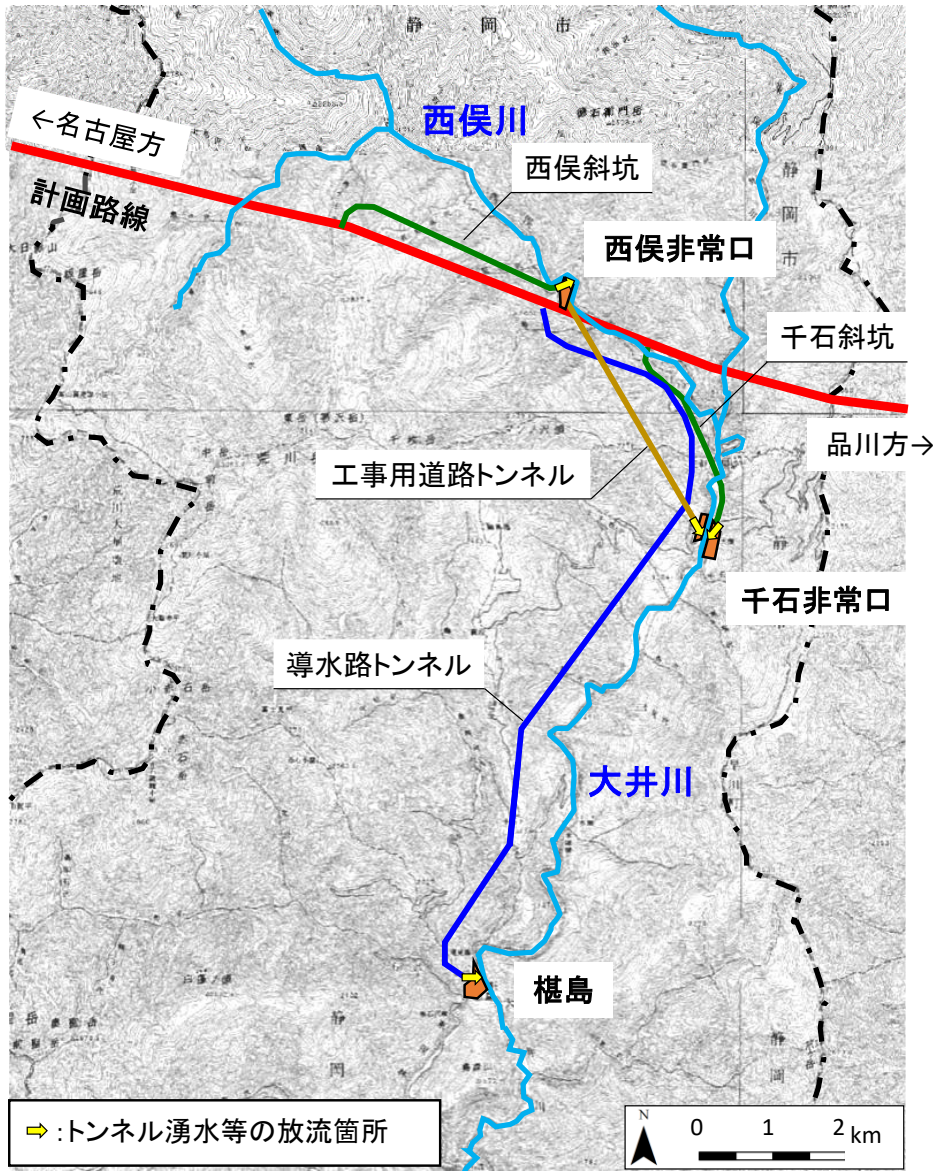


図 3-2 2 トンネル湧水等の放流箇所

表 3-4 地下水の採水時期及び回数

時期		回数
注入工事着手前		1回
注入工事中		毎日1回以上
注入工事終了後	2週間以内	毎日1回以上 当該地域における地下水の状況に著しい変化がないと認められる場合で、調査回数を減らしても監視の目的が十分に達成されると判断される場合は、週1回以上
	2週間を超え半年経過するまで	月2回以上

表 3-5 地下水の検査項目と水質基準

注入材の種類		検査項目	検査方法	水質基準
水 ガ ラ ス 系	有機物を含まないもの	水素イオン濃度 (pH)	水質基準に関する省令(平成15年厚生労働省令101号)に基づく「水質基準に関する省令の規定に基づき厚生労働大臣が定める方法」(平成15年厚生労働省告示第261号) または JIS K 0102 の12に定める方法 ⁹	pH8.6以下(工事直前のpHが8.6を超える場合は当該測定値以下*) であること
	有機物を含むもの	同上	同上	同上
		有機物(全有機炭素(TOC)の量)	水質基準に関する省令(平成15年厚生労働省令101号)に基づく「水質基準に関する省令の規定に基づき厚生労働大臣が定める方法」(平成15年厚生労働省告示第261号)	3mg/L以下(工事直前の測定値が3mg/Lを超える場合は当該測定値以下) であること

※各観測井のうち深井戸(田代ダム付近)については、これまでのpHの計測結果(平成29年12月以降、月1回の頻度で計測)の平均値が9.2であり、8.6を超える値のため、工事直前の計測値を水質基準として設定することを考えている。

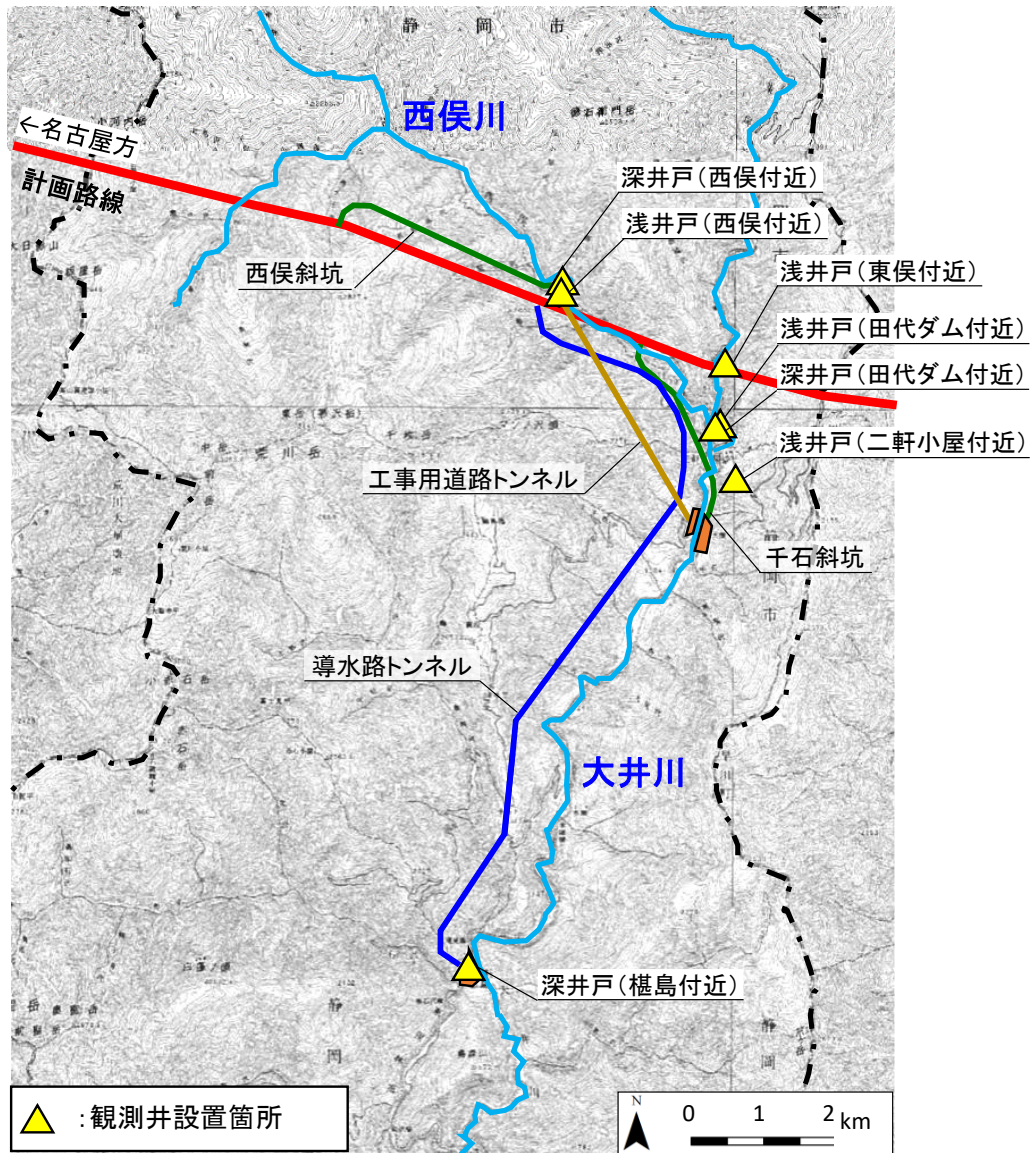


図 3-2 3 榎島以北の観測井位置図