

1 1、薬液注入工について

(1) 薬液注入工の概要

- ・薬液注入工とは、地盤の強化や透水性の減少を目的として、地盤内に薬液を注入する工法です。近年では、鉄道路線に近接した工事をはじめ、ダム工事、河川工事、山岳トンネル工事、また大規模地震時に発生が懸念される地盤の液状化への対策など、様々な工事の場面で薬液注入工が用いられています。
- ・薬液注入工では、地盤内に注入材を注入していくのですが、地盤の状況により図 1 1-1 のように大きく 4 つの注入形態に分類されます。
- ・特に山岳トンネルは、主に岩盤内への注入となるため、注入箇所ので地盤状況に合わせて注入形態を選定し、施工する必要があります。

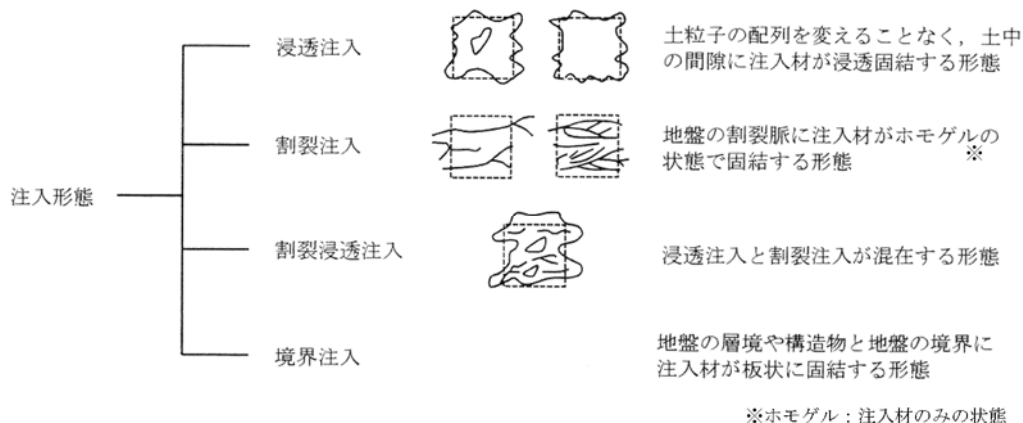


図 1 1-1 注入形態の分類

※注入の設計施工マニュアル 鉄道総合技術研究所

- ・薬液注入を計画するためには、注入を行う地盤が有する透水性や詳細な地質の状況把握が必要不可欠です。ボーリング調査により、コアボーリングから岩石試料を採取して直接確認することや、ボーリング孔を活用した注水試験で地盤の透水係数を把握して、湧水量の低減に必要な目標透水係数を設定するなどして、薬液注入の設計を行います。
- ・注入工法や注入材料の選定にあたっては、ボーリング調査の結果をもとに、トンネル工学や地下水学などに詳しい専門家のご意見を伺って、適切な方法を策定し丁寧に進めていきます。

- ・注入材は、大きな分類として溶液型か懸濁型で分類され、それぞれの材料によって、特徴や発揮される効果などの違いがあります。(図 1 1-2)

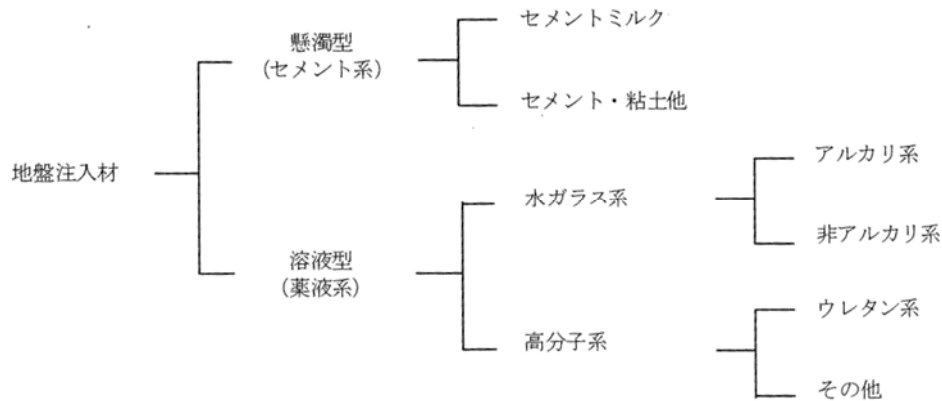


図 1 1-2 注入材の種類

※山岳トンネルの補助工法 土木学会

- ・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できます。
- ・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していきます。
- ・懸濁型（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かかりますが、固化強度は大きく、長期的にも安定した改良体を構築できます。割裂注入により、クラック部を補強できる効果が得られます。
- ・注入材は、さまざまな性質や特徴を有しており、注入を行なう施工状況に応じて適切な材料選定を行っていきます。

(2) 山岳トンネルにおける薬液注入工

1) 山薬液注入工の計画と施工フロー

・(1) で紹介したとおり、山岳トンネルにおいても、薬液注入を行うことがあります。山岳トンネルにおける薬液注入は、注入を行う目的や期待する効果によって、実施方法等は多岐に亘ります。

・例えば、山岳トンネルで注入により対策を行う必要性が考えられる場合としては、

①トンネル切羽の安定性を確保しつつ、湧水量を抑制する場合

②予期せぬ切羽の崩壊が起こった場合

③大量の湧水が生じた場合

などが挙げられ、対応を要する事象に合わせて、計画、設計していく必要があります。

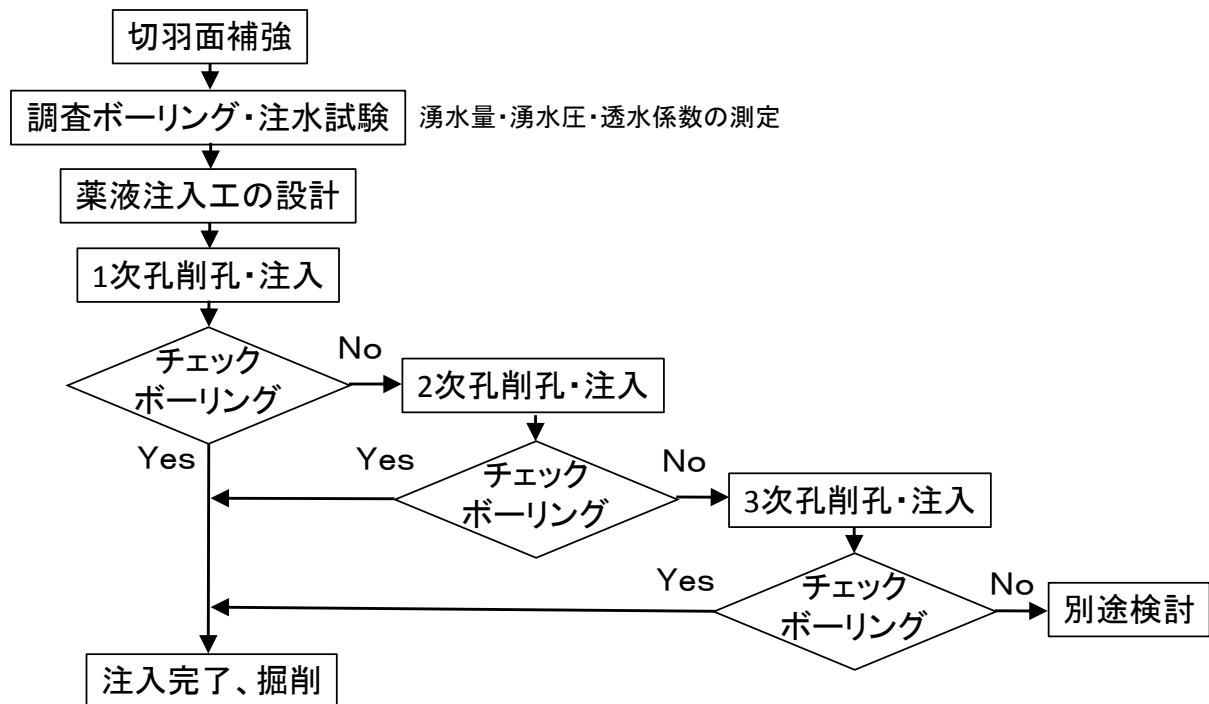


図 1 1-3 薬液注入工の施工フロー

- ・山岳トンネルにおける一般的な薬液注入工の施工フローを図 1 1-3 に示します。
- ・注入に先立ち、切羽面を吹付けコンクリートで補強します。この目的は、トンネル切羽付近で作業する作業員の安全確保や、注入材を地盤内へ注入する際、トンネル内に注入材が逆流しないよう補強するためのものです。
- ・次に、事前の調査ボーリングにより、トンネル前方の湧水量や湧水圧、注水試験により、注入を行う前の透水係数を測定します。
- ・その結果を踏まえて、注入工法、注入材、注入範囲、注入圧等に関する設計を行います。
- ・その後、1次孔削孔を行い、注入を行います。注入材は、対策の内容や規模、注入箇所状況等を勘案して設定します。
- ・注入後は、チェックボーリングにて注水試験により透水係数を確認します。透水係数が目標を達成していれば、注入は完了としてトンネル掘削を進めます。目標に達していない場合は、2次孔削孔・注入を行い、再度、透水係数を確認します。
- ・このように、改良目標として設定した透水係数となるまで注入を繰り返し施工していきます。

2) 南アルプストンネルにおける対応

- ・南アルプストンネルでは、高速長尺先進ボーリングを活用してトンネル前方の状況を慎重に確認し、トンネル掘削を進めて行きます。
- ・高速長尺先進ボーリングにて、地質の悪い区間や湧水が急激に増加する区間、断層や破碎帯などが確認された場合は、トンネル湧水量がさらに多く発生するリスクがあるため、状況により追加のボーリング調査を行なったうえで、必要に応じて、薬液注入を施工し湧水量を低減していきます。

なお、追加のボーリング調査は、地表部から実施可能な調査箇所を選定は難しいため、トンネル坑内から実施していくことで考えています。

- ・モニタリングの状況を踏まえ、更なる湧水低減対策等が必要な場合は、薬液注入工の範囲の変更や、異なる種類の薬材を使用するなど、注入工法や注入材を含め追加の対策を行うことで、湧水量を低減していきます。

- ・山梨県境付近の断層帯のように、特に土被りが大きい箇所等では、高圧の大量湧水が発生するリスクがあります。

高圧の大量湧水区間では、薬液を注入しようとしても水圧に押され、うまく地盤内に注入されず、トンネル内へ薬材が流れ出てしまうことも考えられるため、必要により、追加のボーリング等で一時的にトンネルのごく周辺の水圧を下げたうえで、薬液注入の施工を行います。

- ・薬液注入の計画は、地盤状況に応じた設計を行っていくことが肝要であるため、事前に実施する高速長尺先進ボーリング・コアボーリング等の調査結果や、過去に薬液注入を行いトンネル掘削した事例を参考にしながら、進めてまいります。

【参考】高水圧下における薬液注入事例

< 1. 地芳^{じよし}トンネル >

- ・高水圧下で薬液注入を行った事例として、地芳^{じよし}トンネル（愛媛県久万高原町^{くまこうげん}－高知県^{こうち}梺原町^{ゆすはら}）での事例を示します。（図 1 1-4、表 1 1-1）

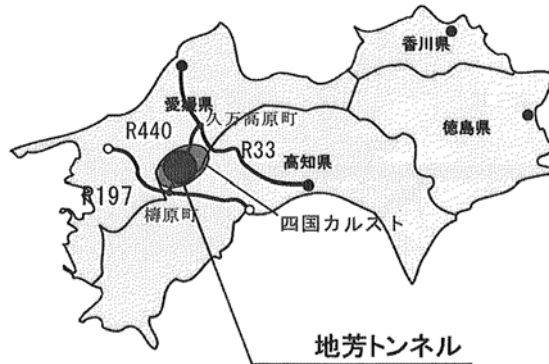


図 1 1-4 地芳トンネル位置図

※トンネルと地下（2009年3月号）より抜粋

表 1 1-1 地芳トンネルの諸元や地質等

トンネル名称等	一般国道440号 地芳トンネル(2010年3月完成)
地質年代等	秩父帯(ジュラ紀)粘板岩、緑色岩及び砂岩の混在岩、石灰岩
トンネル延長、土被り	トンネル延長2,990m、土被り最大約400m

- ・地芳トンネルの地質は、秩父帯（ジュラ紀）の付加体を含む地質構造です。
- ・愛媛県側の坑口から延長700m付近に石灰岩層があり、ここで約20m³/分（約0.33m³/秒）の大量湧水が出現し、大量湧水箇所より以奥で、水圧が約2.0MPa（区間最大で約2.65MPa）という高水圧な状況が継続して出現しました。このような厳しい条件の中で、止水注入が行われました。
- ・注入の計画にあたっては、過去の工事経験を参考に、青函トンネルの実施例をベースとして進められました。

青函トンネルは海底トンネルであり、トンネル全体に全水圧が作用する状態がありますが、地芳トンネルも青函トンネルとほぼ同等の水圧が作用しています。

- ・大きな水圧に対し、薬液の注入圧力を水圧の2～3倍程度、薬液注入範囲をトンネル外径の約3倍確保し、また注入材は、当初水ガラス系を用いて注入を行いま

したが、のちにより確実な止水ゾーンを形成するため、高強度・高耐久性のセメント系注入材に変更し、ゲルタイム調整可能なものを使用して施工されました。

- ・地芳トンネルも、高い水圧が作用していたことから、トンネルのごく周辺の水圧を下げるための対策として追加ボーリング等を行い、止水注入箇所の作業環境の改善を図りながら、施工が進められており、南アルプストンネルでも参考になる事例であると考えます。

< 2. 瑞浪超深地層研究所 >

- ・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 1 1-5）

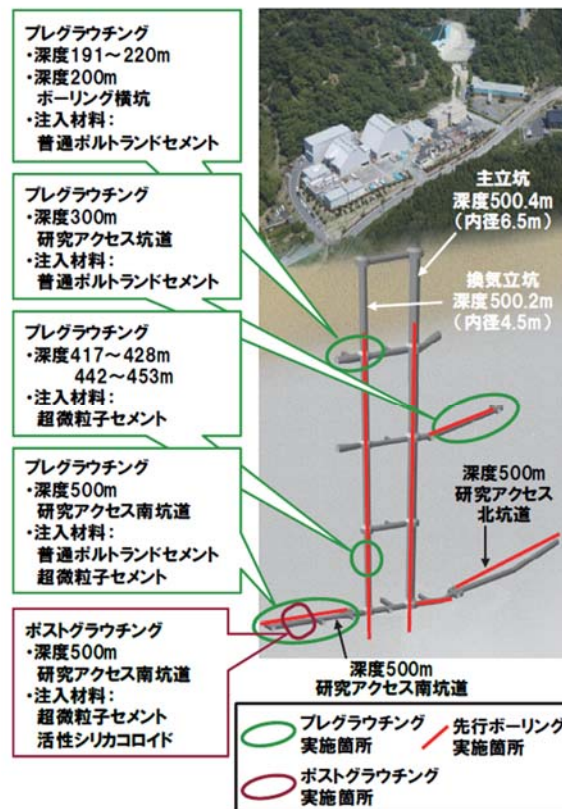


図 1 1-5 瑞浪超深地層研究所研究坑道のレイアウト

※土木学会論文集（地圏工学）2018 より抜粋

- ・研究坑道付近の地質は、地上から深度 1 8 0 m 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。
- ・研究坑道は、発破掘削工法で掘削し、先行ボーリング調査などにより掘削範囲の

地質や地下水状況を把握したうえで掘削しています。地下水以下を掘削することから、大量の湧水と高い水圧下にて掘削する必要がありました。

- 深度500mまでの研究坑道を掘削する間に、先行ボーリング調査により大量湧水が発生する可能性が高いことが分かり、湧水抑制対策として薬液注入を実施しています。

想定される水圧は、最大約4MPaであり、大きな水圧下で確実な薬液注入効果を得る必要がありました。

- 大きな水圧に対し、薬液注入時の圧力で周辺岩盤に変形や破壊を生じない範囲で設定する考えのもと、薬液注入圧力を最大水圧の+1MPa程度、薬液注入範囲は、研究坑道の外側3mの範囲を注入範囲としています。
- 注入材は、セメント系を使用していますが、研究坑道掘削箇所の岩盤開口割れ目の状況に応じ、セメントでも材料粒子の大きいものから小さいものを使い分けて実施しています。
- 地下水を抑制しながら進める工事として、薬液注入の技術は十分に活用されており、また、大きな水圧が作用する環境下でも、必要な効果を発揮させながら実施されている事例です。

【参考】高水圧に対応した薬液注入技術の開発

< 1. 幌延^{ほろのべ}深地層研究施設 >

- 高水圧に対応した薬液注入技術の開発事例として、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延^{ほろのべ}深地層研究センター（北海道天塩郡幌延^{ほろのべ}町）の地下研究施設において、湧水抑制対策のため、薬液注入工を実施しています。（図 1 1-6）

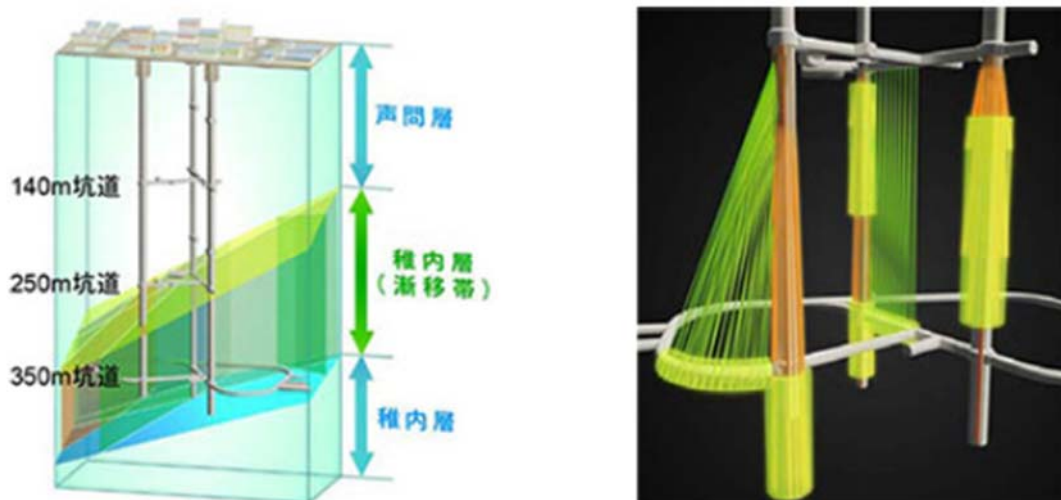


図 1 1-6 幌延深地層研究施設（左図）および薬液注入位置（右図）の概要図

※大成建設株式会社HPより抜粋

- 地下研究施設は、換気立坑、東立坑、西立坑の3本の立坑（深度500m）と、深度140m、250m、350mに展開する水平坑道で構成されています。地質は、地上から深度約250mまでは、声間層と呼ばれる珪藻質泥岩、250m以深は、稚内層と呼ばれる珪質泥岩、いずれも堆積岩が分布しています。
- 薬液注入では、最深部500mにおいて想定される水圧（5MPa相当）をカバーし、かつ今後、本事業の更なる延長により、最大10MPa程度の高水圧が作用しても、岩盤内へ確実に薬液を注入し、湧水を抑制できる技術を開発しております。なお、本技術は、2014年度に土木学会の技術開発賞を受賞しております。
- 実務面では、地元漁協と1日当りの湧水排出量制限（750m³/日以下）が協定締結されており、この値を上回らないよう、湧水抑制を目的に薬液注入を実施しており、実績排出量は地元漁協との協定値よりも大幅に抑えることができています。
- 本技術は、立坑で活用されている技術ではありますが、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でき、更なる湧水抑制を求められるトンネルや高止水性が求められるダムなどへの適用が期待されています。

- ・以上の事例ように、高水圧な状況で薬液を注入する技術は、近年、環境影響や環境保全の観点からも、積極的に技術開発が進められています。
- ・しかし、薬液注入を行う場所、地質、作業環境、構造種別など、多種多様な現場でそれぞれ異なる条件があるため、これら条件を総合的に勘案して、薬液注入の計画を検討しなければなりません。
- ・高水圧に対し、高い圧力で薬液を注入することは、理論上可能であっても、施工性を鑑みると、薬液注入を安全に実施するための安全対策や、万が一注入時のトラブルに対する緊急対策を入念に行う必要があるなど、検討すべきことが多くあります。その場合は、必要により、追加のボーリング等で、トンネルのごく周辺の圧力を下げ、自然環境への影響が及んでいないか、注意深く確認しながら、作業環境の改善を図り、より安全で確実な薬液注入を行える、環境作りを並行して検討する必要があります。