

帯水層におけるトンネル施工のための 止水注入とその管理について

旭川開発建設部 富良野道路事務所 工務課 ○千葉 哲也
柏谷 光晴
小林 暁

旭川十勝道路のうち「富良野道路」に計画されている北の峰トンネル（仮称）L=2,928mは、夕張山地山麓の扇状地を通過する。当該地は水資源が豊富であり、周辺水文環境への影響に配慮して非排水構造や止水注入工等を採用し、トンネル計画を行っている。

本研究では、今年度施工した止水注入について試験施工から本施工及び注入品質効果の確認まで、現在の施工状況について報告を行うものである。

キーワード：薬液注入、地下水解析、自然環境

1. まえがき

(1) 北の峰トンネルの計画

旭川十勝道路は、旭川市から占冠村を結ぶ延長約120kmの地域高規格道路として計画されており、北海道縦貫自動車道および北海道横断自動車道と接続することにより、北海道における広域交流ネットワークを形成し、当該地域の交通円滑化、地域間連携や広域的な人流・物流の活性化に寄与する路線である。（図-1,2参照）

富良野市内では、主要産業である農作物輸送の物流交通や観光交通、沿道市街地から発生する域内交通が輻輳し、慢性的な交通混雑が発生していることから、「富良野道路」（富良野市字学田～富良野市字上五区間・8.3km）の整備を平成14年度に事業着手している。

「北の峰トンネル」（仮称、以下省略）は、「富良野道路」において計画されている延長約3kmのトンネル（図-3参照）であり、平成21年度から工事に着手している。



図-2 旭川十勝道路位置図



図-1 高規格道路・地域高規格道路網図



図-3 事業位置図

本トンネルの建設地周辺は、芦別岳に代表される夕張山地山麓の丘陵地であり、広大な森林や豊富な地下水など豊かな自然環境が保たれており、当地域においては、自然環境が生み出す美しい景観や清らかな水の活用により、リゾート運営や営農活動の展開とともに、市民の飲料水確保など豊かな自然の恩恵を受けている。

(2) 三次元浸透流解析によるトンネル工法選定

前述のとおり、本トンネルの建設地周辺は豊かな水資源を有し、特に既往調査により御料断層付近には被圧水の存在が確認されている。(図-4参照) 本トンネルは、被圧帯水層の下を低土かぶりで通過することから、トンネル施工による地下水への影響を評価し、影響を極力抑える対策工法を検討した。

三次元浸透流 定常解析 (工事による最終的な地下水影響を評価) により非排水区間を計画した。更には被圧水および透水性の大きい ($1.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$) 砂礫層の分布が確認されている御料断層付近には、非定常解析 (工事段階の時系列毎の地下水影響を評価) により止水注入区間を計画した。(図-5~6参照)

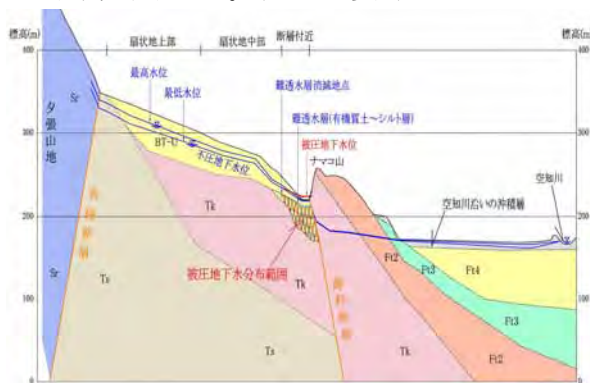


図-4 二線川付近の水文地質模式断面図

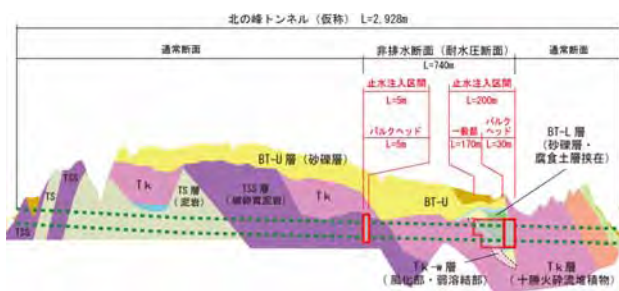


図-5 各断面区間とトンネル地質縦断面図

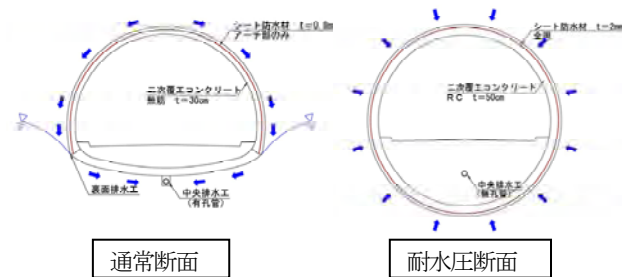


図-6 トンネル断面図

2. 止水注入工 室内試験

上記の対策工法のうち止水注入工を実施するにあたり、まず室内試験を行った。下記に検討概要を示す。

(1) 注入部の地質

止水注入工において対象となる地盤は主にBT層とよばれる扇状地堆積物と、Tk層と呼ばれる十勝溶結凝灰岩である。特に止水注入工ではBT層と、Tk層の風化あるいは弱溶結部と考えられるTk-w層への注入が重要となる。(図-5参照)

(2) 注入材料の選定

注入箇所は恒久的な止水性が求められるバルクヘッド区間とトンネル掘削時の切羽安定性及び止水性が求められる一般部に分かれる。(図-5参照)

しかしながら、BT層のように細砂に相当する地盤に対しては長期耐久性があるセメント系、いわゆる懸濁系材料の注入は困難であると言われている。

そこで模擬地盤を作成し、カラムを用いた室内一次元浸透試験を実施し、土砂地盤に注入可能な注入材料について検討を行った。模擬地盤については既往調査の中で、平均よりも透水係数の高い地盤を採用した。

a) 地盤条件

模擬地盤は、図-7 に示す粒度分布の細砂を用いた。地盤物性は、図中に示すとおりである。これらの値は既往調査で得られた透水係数分布のうち、高い方の地盤条件に近く、改良が必要な模擬地盤の条件として適切であるといえる。

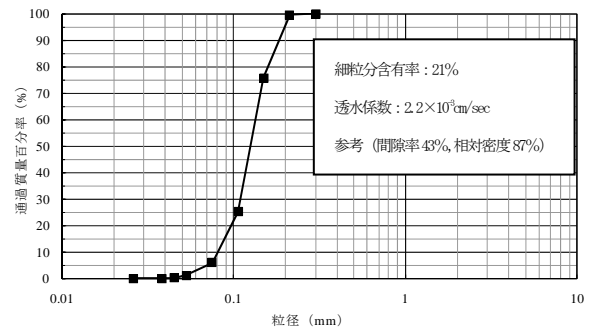


図-7 模擬地盤の粒度分布(注入材料設定)

b) 試験材料の一次選定

バルクヘッド区間は、恒久的な止水性向上が要求される。注入材料としてまず当初設計で選定した特殊スラグ系注入材を選定した。また、長期耐久性に優れ、一般的に用いられるグラウト材として超微粒子セメントを選定した。しかし、これらの材料ではBT層での浸透性に懸念があるため、超微粒子セメントより粒径を細かくした極超微粒子セメントも試験材料として選定した。

バルクヘッド区間以外の一般注入区間では地山の安定

性および止水性の向上が要求される。まず、当初設計で選定した薬液系注入材である中性・酸性系注入材（シリカゾル系）を選定した。また、浸透性だけでなく強度発現にも優れている極超微粒子セメントも選定した。

これらの一次選定結果と、実際に室内一次元浸透試験に用いた材料をそれぞれ表-1 に示す。

c) 試験方法

試験方法は図-8 及び写真-1 に示すように内径50mm、長さ約1000mmの亚克力筒に所定の間隙率となるよう層厚25mmづつ試料を投入し、ランマーを用いて突固めて製作した。地盤の流出防止を目的として亚克力筒の上下にフィルターを設けた。その結果、全浸透長はフィルター層も考慮すると97.5cmとなる。ここではこの97.5cmのカラムに対して注入した実験を「室内一次元浸透試験」と呼ぶ。

また、設計注入量は、間隙体積+ホース体積に相当する890mlとし、上部から排出される間隙水が設計注入量に達した時を充填率100%と判断し、試験終了とした。注入圧は、圧力と流量が比例関係を保つ限界圧力(0.5MPa)に設定した。

注入後3日経過した後に、亚克力筒を10cmづつ切断し、亚克力部分を取り除いて改良体のコアを採取した。採取後はコアを湿潤状態で養生し、注入後7日経過した後に一軸圧縮試験を行い、一軸圧縮強さ σ_7 を求めた。

d) 二次選定（室内一次元浸透試験）

上記b) 及びc) のとおり室内一次元浸透試験を実施した。以下に結論を示す。(図-9~10参照)

- ①の特殊スラグ系注入材は、設計量を注入する事ができず、浸透長は0cmであった。当然ながら強度を得ることはできなかった。
- ②の超微粒子セメントは設計量を注入する事はできたが、浸透長は30cmであった。改良部の σ_7 は1.3N/mm²程度であった。
- ③の極超微粒子セメントは設計量を注入する事ができた。浸透長は97.5cmであり、カラム全長を浸透させることができた。改良体の σ_7 は1.6N/mm²程度であった。
- ④の中性・酸性系注入材は、設計量を注入する事ができた。浸透長は97.5cmであり、カラム全長を浸透させることができた。改良体の σ_7 は0.3N/mm²程度であった。

表-1 一次選定結果および試験に用いた材料表

施工部位	注入材	
バルクヘッド区間	①	特殊スラグ系注入材
	②	超微粒子セメント
	③	極超微粒子セメント
一般注入区間	④	中性酸性系注入材 (シリカゾル系注入材)
		上記③と同じ材料

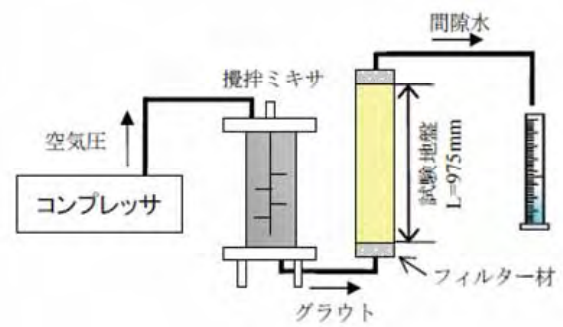


図-8 室内一次元浸透試験概要

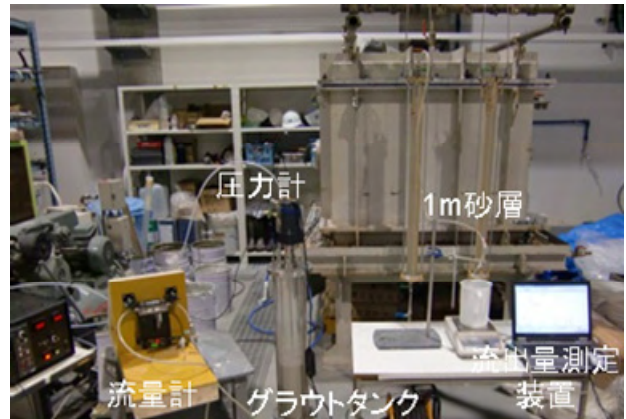


写真-1 室内一次元浸透試験状況

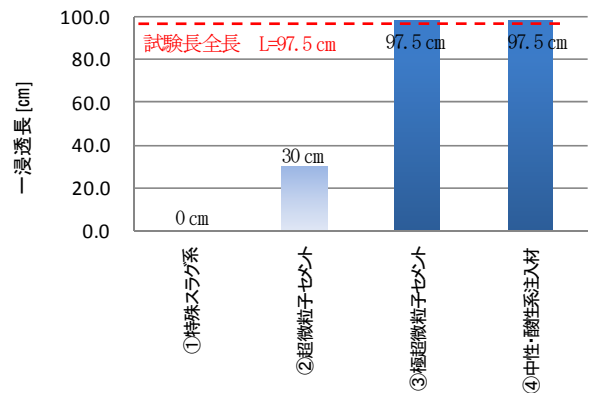


図-9 各注入材料の浸透長

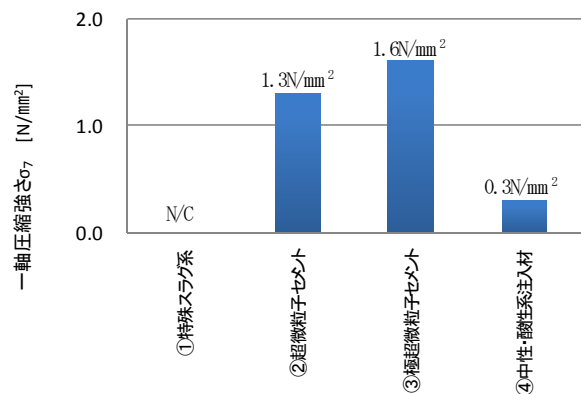


図-10 各注入材料の一軸圧縮強さ

e) 注入材料の選定 結論

一次及び二次選定の結果をまとめる。

バルクヘッド区間のBT層は、浸透性、長期耐久性と強度に優れた極超微粒子セメントを選定した。

一般注入区間のBT層は、中性・酸性系注入材と極超微粒子セメント両方が適用可能だが、当初設計で選定され、より浸透性及びコストに優れる中性・酸性系注入材を選定した。

(3) 注入孔間隔の設定

次に、薬液注入工で一般的に採用される1.0mピッチの注入孔間隔が適切であるかどうかを検証するために、目標改良長を62.5cmとした室内一次元浸透試験を行った。(図-11 参照)

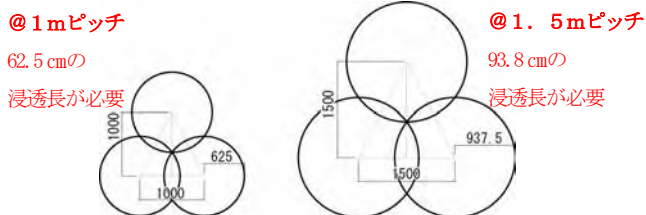


図-11 最適に地盤改良するために必要な改良長

a) 地盤条件

模擬地盤は、図-12 に示す粒度分布の細砂を用いた。地盤物性は、図中に示すとおりである。これらの値は、既往調査で得られた透水係数分布のうち低い側の地盤条件に近く、注入孔間隔を決定する模擬地盤の条件として適切であるといえる。

b) 室内一次元浸透試験

注入圧力は、実験上で設定可能な圧力のうち、最大の0.7MPaとした。設計注入量は試験地盤及び下端フィルターの体積及び間隙率から818m³とした。

また、1日以内に全注入量が行えないと判断した場合は、グラウチング技術指針¹⁾に示される基準値(0~0.2L/min/m)の比(約106分の1)を乗じ、注入完了基準を1ml/minに定めた。注入終了については、流量が1ml/minを下回ってから30分のだめ押し注入時を採用した。

c) 改良効果の評価

注入より3日後、試験体をアクリル筒から脱型した結果、注入口元から80cmまでが固結しており、それより先は脱型後に崩壊した。(写真-2参照)

次に、注入より7日後、上記供試体を用いて透水試験及び一軸圧縮試験を行った。(表-2参照)

試験の結果、原地盤の透水係数(1.0×10⁻⁴cm/sec)から3乗オーダー透水係数を減じる事ができており、一軸圧縮試験の結果も0.6N/mm²程度あり、十分な改良効果が得られていると言える。

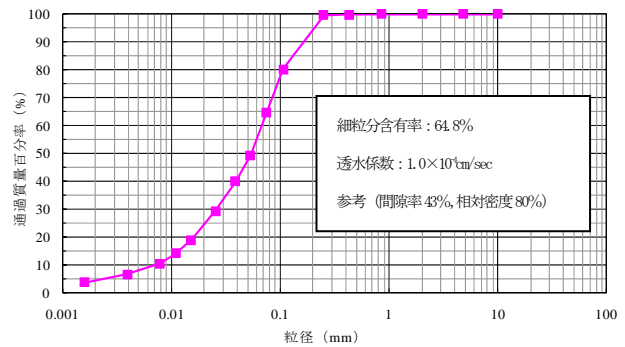


図-12 模擬地盤の粒度分布(注入孔間隔設定)

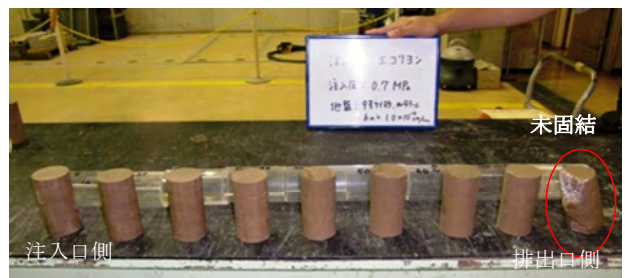


写真-2 中性・酸性系供試体

表-2 透水試験及び一軸圧縮試験結果

供試体No.	口元からの距離 (cm)	透水係数 (cm/sec)	一軸圧縮強さ (N/mm ²)	湿潤密度 (g/cm ³)
1	0~10	3.71E-08	-	2.039
2	10~20	-	0.56	2.021
3	20~30	-	0.57	2.020
4	30~40	-	-	-
5	40~50	1.24E-07	-	1.934
6	50~60	1.44E-07	-	1.927
7	60~70	2.01E-07	-	1.976
8	70~80	-	-	-
9	80~90	未改良	未改良	未改良

d) 注入孔間隔の設定 結論

上記の結果、中性・酸性系注入材の浸透性は80cm程度であり、注入孔間隔、1.5mの場合は、孔間に未改良部が残る可能性が高く、1.0mの場合は孔間も十分に浸透させることができ、目標の改良品質を達成できる可能性が高いため1.0m間隔で注入を行うこととした。なお、合理化を図るためには1.0mと1.5mの間に最適値がある可能性があるが、室内試験で設定した模擬地盤よりも、透水係数が低い土砂も存在することから、室内試験のみで決定するのではなく、原位置試験施工で注入率等をパラメータとすることで最適化、合理化を図っていくこととした。

3. 止水注入工 原位置試験施工

(1) 試験条件

室内試験で選定した注入材料を用いて、BT層とTk層の両層が確認出来る箇所、試験施工を実施した。

(図-13, 14参照) 試験条件は 表-3 及び表-4 に示す。

(2) 試験施工結果

試験施工後、試験注入孔中央にチェック孔を設け、コア観察と透水試験を実施した。

コア観察の結果では極超微粒子セメントはBT層・Tk層ともに良好と判断した。中性・酸性系注入材は土砂部では比抵抗値も低下し良好と判断できるが、岩盤部では亀裂内にホモゲル状で存在し、トンネル掘削時にゆるむ懸念があるため不適と判断した。(写真-3 参照) 透水試験結果についてはBT層、Tk層とも概ね良好な結果が得られた。(表-5 参照)

(3) 試験施工結果に基づく本施工注入仕様

試験施工結果から本施工の注入仕様を以下のとおり決定した。(図-15, 表-6 参照)

試験施工では透水係数等は満足したものの、岩盤部への定圧注入は、大量のグラウトを要したため、本施工においては定量注入に変更し合理化を図ることとした。ただし、事前の地質調査で、バルクヘッド付近のBT層において、高透水が想定されるレキ層が確認(写真-4 参照)されたことから、定量注入で目標を達成するために、逸走防止のための工夫として事前改良工を行うこととした。



写真-4 断層付近BT層 (G.L. 15m~25m)

表-3 バルクヘッド試験ケース (極超微粒子セメント)

試験ブロック	地層名	地質	配合	注入方式	注入率
HY-T1	BT	土砂	W/C=800%	定量注入	間隙率×充填率90%
HY-T2					間隙率×充填率120%
HY-T3					間隙率×充填率150%
HY-T1	Tk	岩盤	W/C=400%	定圧注入	定圧注入のため設定値無し
HY-T2			W/C=600%		
HY-T3			W/C=800%		

※BtはBt-U, Bt-L, Bt-Tを含む。TkはTk, Tk-w等を含む

※ の着色部が試験のパラメータ

表-4 一般部試験ケース (中性・酸性系注入材)

試験ブロック	地層名	地質	配合	注入方式	注入率
Eco-T1	BT	土砂	W/C=800%	定量注入	間隙率×充填率90%
Eco-T2					間隙率×充填率120%
Eco-T3					間隙率×充填率150%
Eco-T1	Tk	岩盤	標準	定圧注入	定圧注入のため設定値無し
Eco-T2			標準		
Eco-T3			ゲルタイム促進		

※BtはBt-U, Bt-L, Bt-Tを含む。TkはTk, Tk-w等を含む

※ の着色部が試験のパラメータ

表-5 試験施工結果 (改良後の透水係数)

	岩盤部 (Tk層)		土砂部 (BT層)	
	配合	透水係数	配合	透水係数
極超微粒子セメント	定圧・W/C=400%	2.1E-06~6.1E-05	間隙率×90%	5.88E-07~4.88E-05
	定圧・W/C=600%	9.7E-06~1.2E-05	間隙率×120%	1.40E-05~1.88E-05
	定圧・W/C=800%	3.7E-06~2.0E-05	間隙率×150%	1.14E-05~1.27E-04
中性・酸性系注入材	定圧・標準配合	2.5E-06~1.4E-05	間隙率×90%	2.62E-06~1.85E-04
	定圧・標準配合	6.2E-06~1.0E-05	間隙率×120%	3.85E-06~1.95E-05
	定圧・ゲルタイム促進配合	8.4E-06~1.5E-05	間隙率×150%	3.46E-06~2.66E-05

表-6 本施工注入仕様

	a) バルクヘッド部	a2) 事前改良工	b) 一般部 (BT層)	c) 一般部 (Tk層)
注入材	極超微粒子 (室内試験より)	懸濁型水ガラス系 (※2 試験施工より)	中性・酸性系 (室内試験より)	極超微粒子 (※1 試験施工より)
注入率	間隙率×120% (試験施工より)	8% (一次注入のみ)	間隙率×120% (試験施工より)	間隙率×120% (試験施工より)
注入方式	定量	定量	定量	定量

※1) 試験施工において、岩盤部への中性・酸性系注入材による改良ではホモゲルが確認されたため

※2) 断層付近、BT層に高透水のレキ層を確認したため逸走防止として施工し、ゲルタイムを有する注入材を採用

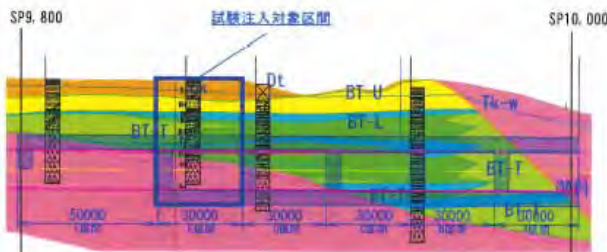


図-13 試験施工側面図

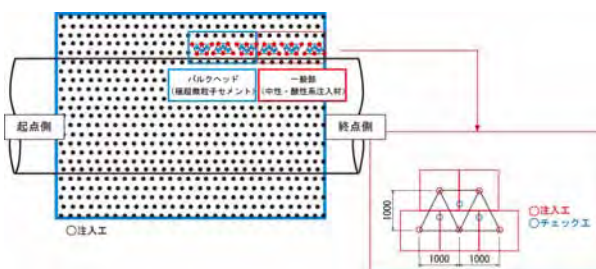


図-14 試験施工平面図・試験孔配置図



写真-3 岩盤部開口割目 ホモゲル充填状況

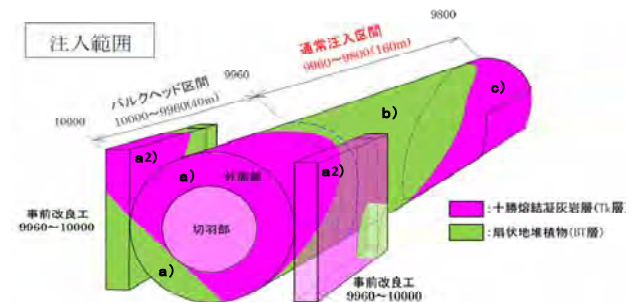


図-15 本施工注入仕様 概念図

4. 本施工

室内試験及び試験施工で決定した注入仕様に基づき、本施工を行った。削孔は最大12台、注入は最大64セットを投入し、昼夜2交代により施工した。(写真-5, 6 参照) 本トンネルの直上には北電高圧線鉄塔があるため、鉄塔直下の改良範囲については、鉄塔周囲から斜め打ちによる注入を実施した。注入前から光波を用いた自動計測により監視を行い、管理基準値以内の傾斜で注入を完了することができた。その他、注入圧の異常上昇もなく、施工を無事終えることができた。



写真-5 削孔状況



写真-6 注入状況

5. 品質効果確認

注入工の品質確認については、以下の2点について確認を行うこととした。

a) 意図した改良範囲が改良されているか。

事前の調査結果からBT層には高透水性のレキ層が確認された。またTk層においても風化起因の亀裂が多く見られたため、注入範囲が設計から大きく外れたり、局部的に注入範囲が拡大したりすることが懸念された。そこで、地盤全体の変化を把握出来るような調査を行うこととした。一般的には弾性波探査や電気探査が考えられるが、事前の室内試験から、比抵抗値による変化がより

敏感であったため、電気探査を採用した。地上でのノイズが多く、また複数回にわたる横断方向への電極配置も困難であったことから、地上での二次探査ではなく、ボアホールを利用した三次元比抵抗トモグラフィーを採用した。なお、BT層は複雑な地層構成であることから、注入前後で2回の探査を実施し、前後の比抵抗値を解析することで、注入範囲が大きく設計からかけ離れていないか確認することができる。²⁾ (図-16 参照)

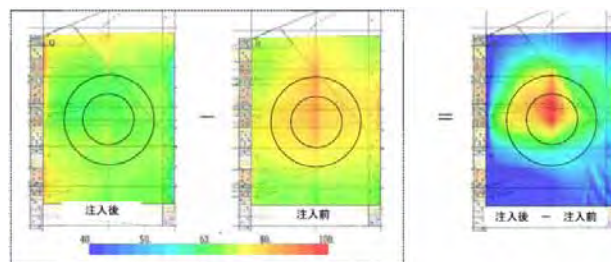


図-16 比抵抗トモグラフィー (例SP9955)

b) 目標透水性の確認。

透水性の確認については、透水性が直接的に測定できない電気検層や電気探査等では不可能であることから、改良体を削孔し、透水試験による透水性の確認をおこなっているが、本施工が先日完了したばかりのため、透水試験及び資料取りまとめ中である。今後引き続き試験等を進め、最終的な品質効果確認を行う。

6. まとめと今後の課題

北の峰トンネルにおける止水改良目標は1ルジオン程度(透水性で 10^{-5} cm/sec オーダー)としている。これは、これまで行われてきた、三次元浸透流解析で止水改良後の入力値として採用している。

本トンネルの注入箇所は、高透水性のレキ層や有機質土、シルト、砂などマトリックスを有する扇状地堆積物(BT層)であったため、室内試験、試験施工を十分行いより確実・合理的な施工を行ってきたが、効果確認工実施時のコア確認から、レキ層の透水性が想定以上であった可能性も考えられ、目標としている透水性を一部得られていないことも想定される。改良後の透水性は、周辺の水環境に大きな影響を与える可能性があるため、別途行われている三次元浸透流解析と連携し、更には有識者に相談し助言を頂きながら、周辺の水環境に極力影響を与えないような、安全・確実な施工に努めた。

(参考文献)

- 1) 財団法人国土技術研究センター：グラウチング技術指針(案)同解説. pp. 71, 2002. 5.
- 2) 社団法人地盤工学会：地盤工学への物理探査技術の適用と事例. pp. 203, 2003. 9.