

線路下横断トンネル工事における 薬液注入効果確認の一考察

福井 義弘・仲山 貴司・赤木 寛一

現在、鉄道事業者において実施されている線路下横断トンネル工事では必要に応じて止水や周辺地盤防護を目的に薬液注入による地盤改良を行うが、その注入効果確認には多大な労力を費やしている。そこで注入効果確認の効率化を図るため、薬液固結土を使った各種室内試験を行い、その結果をうけて通常は注入材の充填状況を確認するために実施される弾性波速度探査の中の音響トモグラフィ探査とシリカ濃度測定から、注入後の圧縮強度と透水係数を推定する方法を提案し、実現場での計測によってその妥当性を確認した。本稿ではその提案内容と妥当性について報告する。

キーワード：薬液注入，線路下横断，トンネル，弾性波速度，音響トモグラフィ，シリカ濃度，透水係数

1. はじめに

近年、各鉄道事業者では踏切除去や河川改修などの際に多くの場合で線路下を低土被りで通過する線路下横断トンネル工事を採用している。これらの工事では必要に応じて止水や周辺地盤の防護を図るため、薬液注入による地盤改良が実施される。薬液注入では良好な固結形状を得るための注入条件の設定¹⁾と注入後の効果確認が重要となるが、後者については原位置試験と不攪乱試料を用いた室内土質試験が主で、注入範囲全域を評価するには膨大な労力を要するという課題がある。

そこで筆者らは原位置試験および室内試験の要否の判断や実施箇所の絞り込みを効率的に行える方法を検討し、通常は注入範囲への注入材の充填状況を確認するために用いている弾性波速度とシリカ濃度から注入後の圧縮強度と透水係数を推定する方法を提案した。

2. 薬液固結土による室内試験

(1) 室内試験の概要

線路下横断トンネルは一般的に浅深度での施工であり、注入対象となる地盤は主に砂質土または礫質土である。また、使用する水ガラス溶液型注入材は注入形態を浸透注入主体とすることが可能であり、この場合には土の骨格が乱されないことから地盤の種類によらず同程度の粘着力が付加される傾向がみられる²⁾。

そこで、筆者らは注入前後の圧縮強度と透水係数のいずれの相対変化とも土の骨格粒子の大きさの影響が

小さいものと考え、まず、同一の砂試料で圧縮強度と透水係数が異なる寸法φ 50 mm × 100 mm の薬液固結土を作製し、弾性波速度とシリカ濃度に生じる相対変化の程度を確認した。

(2) 薬液固結土の作製

薬液固結土の供試体は、硅砂7号³⁾を用いて、表一に示す注入材の濃度と相対密度で各4体作製した。各4体のうち、3体で弾性波速度測定および圧縮試験を実施し、同一試料で1サンプリングのシリカ濃度を測定した。そして、残りの1体は透水係数の測定に使用した。

表一 注入材の濃度と相対密度

No.	注入材の濃度	相対密度
1-1	100%	60%
1-2	75%	
1-3	50%	
2-1	100%	80%
2-2	75%	
2-3	50%	

表中の注入材の濃度とは、薬液固結土の作製に使用した注入材の希釈度合いを示したものであり、例えば注入材の濃度50%の薬液固結土では、標準配合で作製した注入材と水を比率1:1で混合したことを表す。

注入材は線路下横断トンネル工事で主に使用されている中酸性系の水ガラス溶液型とした。この注入材の化学反応式を式(1)に示す。



本研究では希釈することで複数の圧縮強度と透水係数の異なる薬液固結土が作製できるように表—2に示す高強度配合の材料を選定した。なお、薬液固結土の作製手順については文献³⁾を参照されたい。

表—2 室内試験に使用した注入材の配合

分類	配合 (1ℓあたり)		ゲルタイム
溶液型 無機 特殊中酸性	A 剤	主剤：250 mℓ	緩結 (長結)
		水：300 mℓ	
	B 剤	硬化剤：20 mℓ	
		pH調整剤：20 g	
		水：410 mℓ	

(3) 室内試験方法

(a) 弾性波速度の測定方法

弾性波速度は薬液固結土に三軸圧縮試験用のセルで側圧 100 kPa (空気圧) を与え、薬液固結土上下面に取り付けた P 波、S 波素子に発信用電圧を印加して測定した。なお、起信波形は振幅 100 V の矩形波とし、サンプリングレート 4×10^{-4} ms で収録して 64 回のスタッキングによりノイズ処理を行った。

(b) シリカ濃度の測定方法

シリカ濃度とは、乾燥した薬液固結土の単位質量当たりのシリカ質量 (mg/g-dry) であり、本研究では薬液固結土の固結シリカを溶液化し、ICP 発光分析装置を使用して測定した。

(c) 一軸圧縮強度、透水係数の測定方法

一軸圧縮強度は JIS A 1216 に準拠して求めた。また、透水係数は JIS A 1218 が一般的であるが、難透水試料であることからここではフローポンプ法³⁾を用いて求めた。

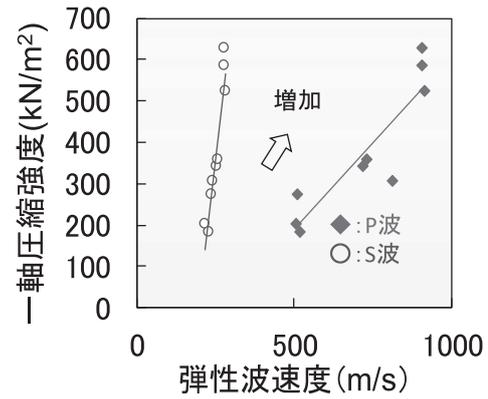
(4) 室内試験結果

(a) 弾性波速度と一軸圧縮強度および透水係数の関係

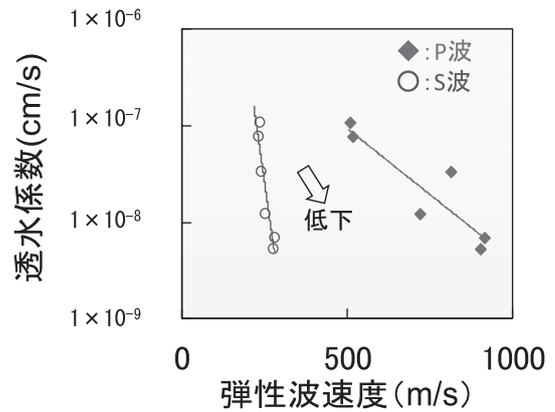
弾性波速度と一軸圧縮強度および透水係数の関係を図—1, 2に示す。これらの図から弾性波速度の増加に伴い一軸圧縮強度は増加、透水係数は低下することがわかる。また、薬液固結土の圧縮強度には 202 ~ 628 kN/m²、透水係数には 1×10^{-7} ~ 5×10^{-9} cm/sec の範囲で、S 波速度に 218 ~ 279 m/sec、P 波速度に 505 ~ 914 m/sec の変化が生じた。

(b) シリカ濃度と圧縮強度および透水係数の関係

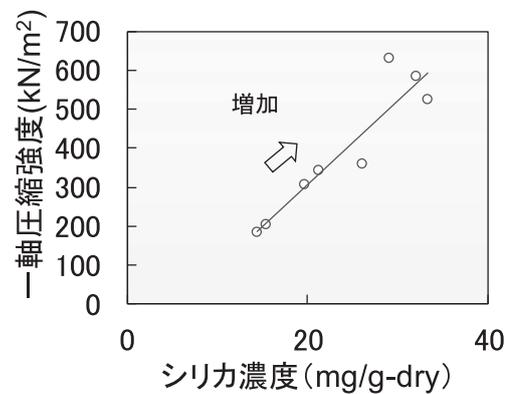
シリカ濃度と圧縮強度および透水係数の関係を図—3, 4に示す。これらの図から弾性波速度と同様、シ



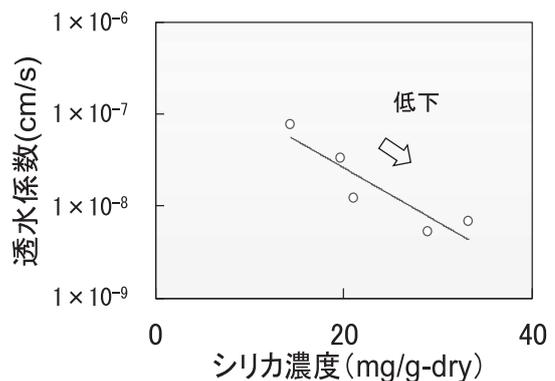
図—1 弾性波速度と圧縮強度の関係



図—2 弾性波速度と透水係数の関係



図—3 シリカ濃度と圧縮強度の関係



図—4 シリカ濃度と透水係数の関係

リカ濃度の増加に伴い圧縮強度は増加、透水係数は低下することがわかる。また、シリカ濃度には 14 ~ 33 mg/g-dry の変化が生じた。

(c) 弾性波速度とシリカ濃度の相対変化量

弾性波速度とシリカ濃度のいずれにおいても圧縮強度と透水係数の相対変化量に対して線形に近い相関が見られた。これらを整理したものを表一3に示す。なお、弾性波速度は変化量が大きいP波速度とした。

表一3 弾性波速度とシリカ濃度の相対変化量

	弾性波速度 Vp の変化量 (m/sec)	シリカ濃度の変化量 (mg/g-dry)
圧縮強度の変化量 (100 kN/m ² あたり)	100 程度	4 程度
透水係数の変化量 (1 オーダーあたり)	300 程度	17 程度

3. 現場計測による検証

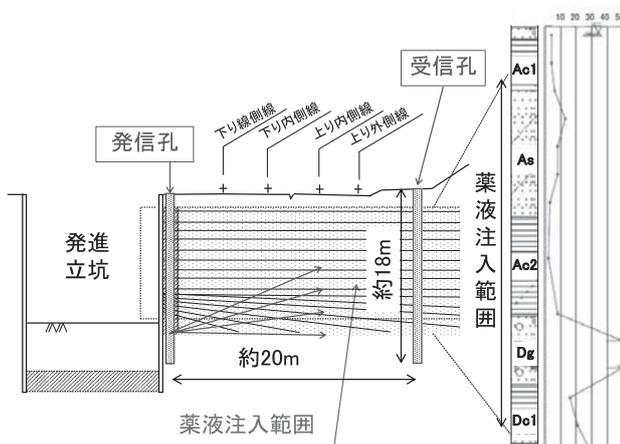
(1) 検証の概要

検証については、止水を目的として薬液注入を実施した JR 西日本管内の線路下横断トンネル工事の現場で実施した⁴⁾。注入範囲の深度は G.L-1.5m ~ G.L-14.3m であり、地層は図一5に示すように上部に沖積砂質土層 (As 層) が存在し、沖積粘性土層 (Ac2 層)、洪積礫質土層 (Dg 層)、シルトが主体の洪積粘性土層 (Dc1 層) と続く構成であった。当該の現場では高周波弾性波を用いた音響トモグラフィおよびシリカ濃度の測定を行うとともに注液圧試験も実施し、地盤の種類によらず表一3の関係が成り立つかを検証した。

(2) 高周波弾性波を用いた音響トモグラフィ探査

(a) 測定方法

弾性波速度探査には音響トモグラフィ探査を用いた⁵⁾。



図一5 対象現場の地層と音響トモグラフィ探査の測定位置

これは2つの計測孔の一方を発信孔、他方を受信孔として、音響波の伝播速度と振幅減衰を算出し、計測断面の地盤情報を可視化するものである。

本研究で用いた音響トモグラフィ探査は、通常の弾性波速度探査と異なり、パルス圧縮と呼ばれる信号増幅方法の一つである疑似ランダム波を用い、周波数および音圧を制御した発信を行うことで、発信周波数に減衰の激しい1~10 kHzの高周波数帯を用いており、そのため都市部などでも騒音の影響を受けない⁵⁾。また、他の探査と比較しても高い精度で広範囲の計測が可能である。

注入の効果確認で行われる音響トモグラフィ探査では通常は注入後のみに実施され、その絶対値で評価するケースが多いが、ここでは弾性波速度の相対変化量を得るため、薬液注入前後で探査を実施した。発信孔と受信孔の位置は図一5に示したとおりである。距離は約20m、各々の孔深さは約18mで、受信孔に多チャンネル受信器を挿入、発信孔にて発信器を鉛直方向に50cm毎に移動して計測を行った。

(b) 測定結果

薬液注入前後のP波速度を用いたトモグラフィ解析結果の差分(P波速度の相対変化量)を図一6に示す。注入範囲全体において、注入後のP波速度は大きくなったが、その増加量には違いが見られる。一般に粘性土層の透水係数は小さく、間隙への注入材の充填率は低く設計する一方、砂礫層は間隙比、透水係数が大きく、間隙への注入材の充填率は大きく設計する。よって、砂礫層の方が注入量や透水係数の低下量が大きくなるため、P波速度の増加量は大きくなるが、測定結果はこれと合致している。

(3) シリカ濃度測定

(a) 測定方法

シリカ濃度は現場にて採取した不攪乱試料を用いて測定した。シリカ濃度も弾性波速度と同様に注入前後の相対変化量を得る必要があり、そのため本研究では立坑掘削時に保存しておいた掘削残土を注入前の原地盤であるとし、エレメント推進時の掘削残土を注入後の薬液固結土とした。なお、エレメント推進時の試料は、図一6に示すAs, Ac2およびDg層の位置で採取した。各位置での弾性波速度の増加量はAsで0.02~0.06 km/sec, Ac2で0.06~0.10 km/sec, Dg1で0.12~0.16 km/sec, Dg2で0.14~0.16 km/sec程度の範囲であった。

(b) 測定結果

測定結果を表一4に示す。これより弾性波速度の

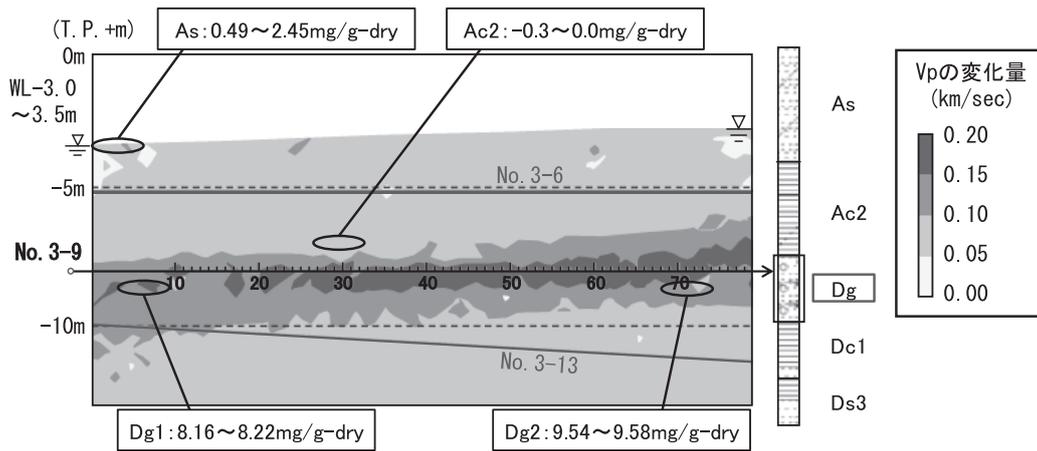


図-6 音響トモグラフィ探査結果 (P波速度の相対変化量)

表-4 シリカ濃度の測定結果

試料 地層	シリカ濃度の差分 (mg/g-dry) (3試料の平均)			
	As	2.45	0.87	0.49
Ac2	-0.2	-0.3	0.0	
Dg	1	8.16	8.16	8.22
	2	9.54	9.56	9.58

表-5 透水係数の算定に用いた注入条件

注入速度 q (ℓ/min)	6 (No.3-6) 8 (No.3-9, 3-13)
注入材と水の粘度比 μ_g/μ_w	2.0
注入孔半径 r (cm)	5.0
注入半径 R (m)	0.33
水の単位体積重量 γ (kN/m ³)	10.0

測定結果と同様の傾向を示しており、Dg層付近にあたる位置でシリカ濃度の変化量は大きく、As層とAc2層ではシリカ濃度の変化量は小さくなった。

(4) 透水係数の推定

(a) 注液圧試験からの推定方法

注液圧試験は、図-7に示すように本施工した注入孔の中から試験孔を選定した上で再注入を行い、その際の圧力により注入効果を確認するものである。本研究ではこれを使って透水係数の詳細検討を行った。

透水係数の推定に用いた試験孔は図-7のうち、実際に地下水位以浅であったDg層にあたるNo.3-9、Ac2層のNo.3-6およびDc1層のNo.3-13とした。なお、As層については地下水位の境界付近にあり、Maagの式³⁾の適用ができないことから推定には至らなかった。

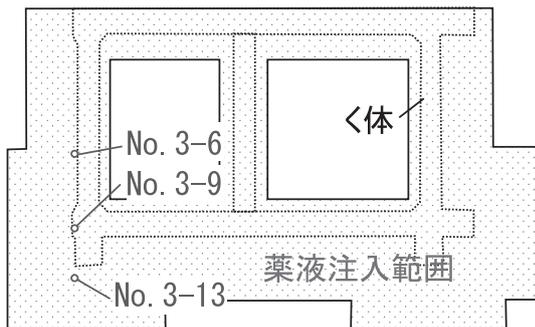


図-7 注液圧試験の位置

表-5に示す施工条件に基づき、原地盤の透水係数は薬液注入の本施工時における最大注入圧力、注入後の透水係数は注液圧試験の最大注入圧力を式(2)に示すMaagの式に代入して求めた。

$$p = \frac{\gamma_w q}{4\pi k_w} \left[\left(\frac{\mu_g}{\mu_w} \right) \frac{1}{r} + \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_w} \right) \frac{1}{R} \right] + \gamma_w h_w \dots (2)$$

注液圧試験の値を代入 → 透水係数を逆算

ここに、 p : 注入圧力 (kPa), γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m³), h_w : 注入孔近傍の地下水位 (m), q : 注入量 (m³/sec), k_w : 透水係数 (m/sec), μ_w : 水の粘性 (Pa·sec), μ_g : 注入材の粘性 (Pa·sec), R : 注入半径 (m)

(5) 提案内容の検証結果

(a) 音響トモグラフィ探査, シリカ濃度測定からの推定方法

提案内容の検証については、注液圧試験において再注入時に得られた最大注入圧と施工当初の本注入時に得られた最大注入圧からMaagの式によって求めた透水係数を施工現場での実際の値とした。そして、施工現場における注入前後での高周波弾性波を用いた音響トモグラフィ探査結果や現場において採取した不攪乱試料を用いて測定したシリカ濃度と注入前の原地盤と同等とみなせる立坑掘削時に保存しておいた掘削残土のシリカ濃度を使って、表-3に示す室内試験で得ら

れた弾性波速度と一軸圧縮強度，透水係数との関係，およびシリカ濃度と一軸圧縮強度，透水係数との関係から推定した相対変化量より求めた透水係数とを比較することで提案内容の評価を行った。

(b) 推定の比較結果

各層における透水係数の推定結果を図-8～10に示す。注液圧試験による算定では，薬液注入後の透水

係数はいずれも低下した。これらの結果から，音響トモグラフィ探査結果から推定した透水係数と注液圧試験結果から Maag の式を用いて求めた透水係数の値は概ね一致することがわかる。一方，シリカ濃度からの推定値は，Dg 層で注液圧試験結果からの値および音響トモグラフィ探査結果からの推定値と概ね一致するが，Ac2 層ではシリカ濃度から推定した透水係数が低下していない結果となり，注液圧試験結果から求めた透水係数と乖離した。その原因としては，注液圧試験と音響トモグラフィ探査は，一般的に測定位置の平均的な評価を行うものであるのに対して，シリカ濃度は採取試料固有の評価を行うため，採取した試料のばらつきが推定される。また，Ac2 層は粘性土であり，薬液が回り込みにくいため，一般的には浸透注入と割裂注入が混在する注入形態となる。これらの要因が推定結果に影響した可能性が考えられる。

4. 結論

実現場の粘性土と礫質土に対して音響トモグラフィ探査，シリカ濃度測定を実施し，それから推定した透水係数と注液圧試験で算定した透水係数を比較したところ，音響トモグラフィ探査による推定では粘性土と礫質土で，シリカ濃度測定による推定では礫質土で概ね両者の値の一致が見られた。本研究で得られた知見を図-11に示す。従来から充填状況を把握するために実施している高周波弾性波を用いた音響トモグラフィ探査やシリカ濃度測定は，注入効果を直接評価する一軸圧縮強度試験や現場透水試験と独立した位置づけとなっていて，互いの連関が明確になっていなかったが，その課題に対し，両者を関連付ける新たな評価手法を提案できた。このことは音響トモグラフィ探査によって求めた弾性波速度から注入効果の直接的な指標である一軸圧縮強度や透水係数を算定可能とすることを示唆している。

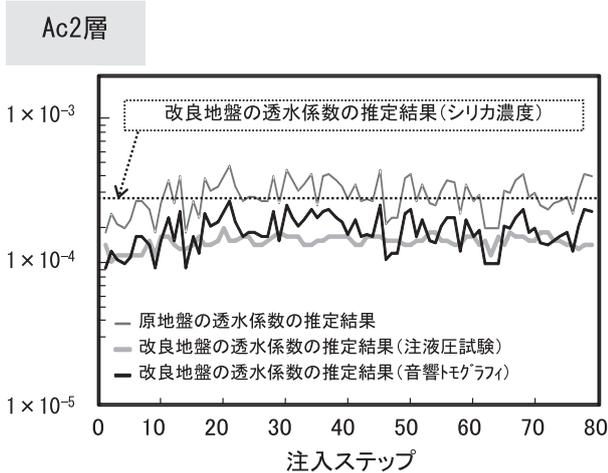


図-8 No.3-6の透水係数の推定結果 (Ac2層)

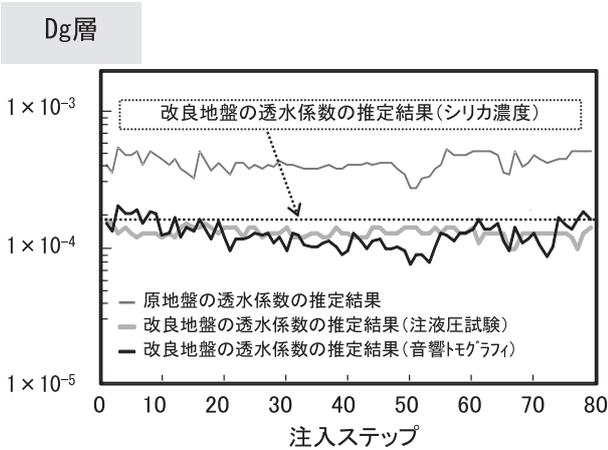


図-9 No.3-9の透水係数の推定結果 (Dg層)

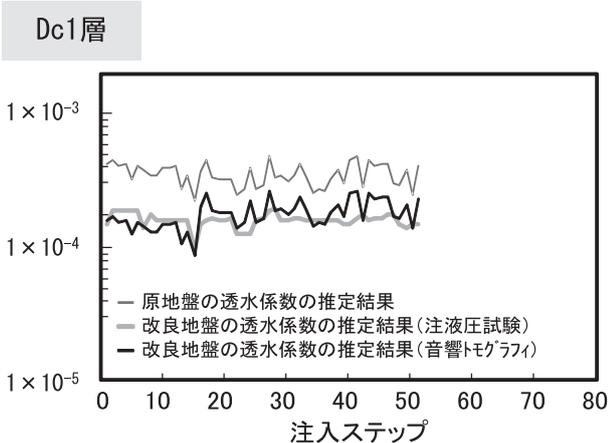
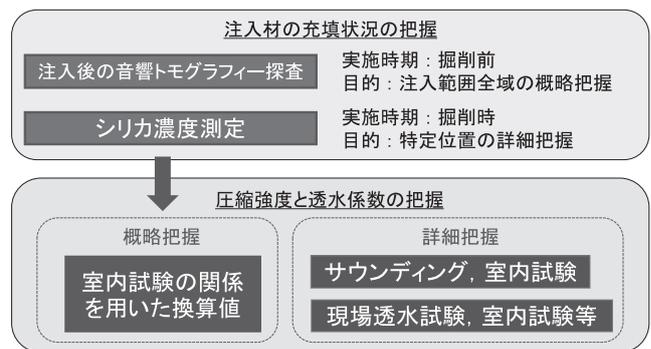


図-10 No.3-13の透水係数の推定結果 (Dc1層)



⇒詳細把握の要否の判断，実施箇所の絞り込みに利用

図-11 新たな評価手法の提案

5. おわりに

注液圧試験のような原位置試験は作業時間を要するため、今回提案し得られた結果は、薬液固結土の一軸圧縮強度と透水係数を効率的に推定するために寄与するものと考えている。但し、本研究では水ガラス溶液型注入材を対象としたが、実際には粗詰めを目的とした一次注入も実施される。そのため、この影響による誤差が含まれていることが課題として残されており、今後も精度向上に取り組んでいく必要がある。

謝 辞

最後に実現場のデータ採取では、西日本旅客鉄道(株)の村田一郎博士、ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)の近藤政弘博士に多大なるご支援を賜った。ここに改めて謝意を表する次第である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 福井義弘, 森 麟, 赤木寛一: 薬液の限界注入速度決定の問題点とその改善に関する研究, 土木学会論文集, No.658 / VI-48, pp.81-92, 2000.9
- 2) 牛田貴士, 仲山貴司, 岡野法之, 焼田真司, 吉川和行: 水ガラス系注入材の強度特性, 土木学会第 66 回年次学術講演会, III-020, pp.39-

40, 2011.9

- 3) 福井義弘, 仲山貴司, 澤田 亮, 赤木寛一: 線路下横断トンネル工事に伴う薬液注入の評価, 土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 25 巻, pp.27-33, 2020.1
- 4) 清水隆弘, 近藤政弘, 山田孝弘: 薬液注入の品質管理への音響トモグラフィ探査の適用, トンネルと地下, Vol.50, No.9, pp.681-690, 2019.9
- 5) 榎原淳一, 石原謙治, 山尾和行: 音響トモグラフィ法による薬液注入の改良範囲の把握, 基礎工, 第 41 巻 9 号, pp.87-89, 2013.9

【筆者紹介】



福井 義弘 (ふくい よしひろ)
アジア航測(株) 社会インフラマネジメント事業部
中部インフラ技術部
技術部長 博士 (工学)



仲山 貴司 (なかやま たかし)
(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
トンネル
主任研究員 博士 (工学)



赤木 寛一 (あかぎ ひろかず)
早稲田大学理工学術院
創造理工学部 社会環境工学科
教授 工学博士