線路下横断トンネル工事に伴う薬液注入の評価

福井 義弘¹·仲山 貴司²·澤田 亮³·赤木 寬一⁴

¹正会員 アジア航測(株)中部インフラマネジメント技術部(〒462-0825名古屋市北区大曽根 3-15-58) E-mail: ixfcm@mx2.canvas.ne.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

³正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 総務部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: sawada.ryo.29@rtri.or.jp

⁴フェロー会員 早稲田大学理工学術院教授(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1) E-mail: akagi@waseda.jp

現在,踏切解消や河川改修等のリニューアル事業のため,既設線路下を低土被りで通過するトンネル工 事が数多く実施されている.本研究は、この工事で行われる薬液注入の効果確認の効率化に資するため、 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とシリカ濃度測定から、圧縮強度と 透水係数を推定する方法を提案する.まず、各測定段階で圧縮強度と透水係数の推定を可能にするため、 薬液固結土の弾性波速度、シリカ濃度、強度および透水係数の測定を行い、これらの相関関係を取り纏め た.次に、現場計測を実施してこの妥当性を確認した.

Key Words: underground structure, ground reinforcement, chemical grouting, improvement effect

1. はじめに

現在,交通渋滞の緩和を目的とした踏切解消や河川氾 濫防止を目的とした河川改修などのリニューアル工事に 伴い,線路下を低土被りで通過する線路下横断トンネル 工事が数多く実施されている.この工事中には,列車走 行の安全性を確保するため,トンネルを小断面のエレメ ントに分割して掘削していくエレメント推進・けん引工 法(図-1)などが採用されるとともに,止水や周辺地盤 防護などのため,薬液注入による地盤改良が必要に応じ て実施される(図-2)¹.

この薬液注入には、列車走行の安全性を確保するという観点から、注入効果(薬液固結土に期待する耐力と止水性)が確実に得られていることが求められる.そのため、注入後の施工現場において実施する効果確認の各種方法が技術図書等^{1,2,3)}で紹介されている.

ただし、注入効果の直接的な指標である薬液固結土の 圧縮強度と透水係数を得る方法としては、通常、それぞ れに対応した原位置試験(サウンディングや PS 検層、 原位置透水試験など)や不撹乱試料を用いた室内土質試 験が主体となっており、これら方法のみで注入範囲全域 を評価しようとすると、作業時間が膨大になるという課 題があった.

そこで、本研究では、図-3に示すように原位置試験



と室内試験の要否の判断や実施箇所の絞り込みが効率的 に行えるよう,通常は注入範囲への注入材の充填状況を 確認する目的で実施される弾性波速度探査とシリカ濃度 測定に着目し,これら調査で得られるパラメータ(弾性 波速度とシリカ濃度)から圧縮強度と透水係数を推定す る方法を提案する.



図-3 本研究で提案する注入効果確認の流れ

2. 薬液固結土の物理的特性と室内試験

(1) 概 要

線路下横断トンネルの多くは盛土または盛土下の浅深 度で施工されており、薬液注入の対象となる地盤は砂質 土または礫質土である場合が多い.また、ダブルパッカ 工法の二次注入等で用いられる水ガラス溶液型注入材で は注入形態を浸透注入主体とすることが可能となってお 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⁴.

そこで、本研究では、注入前後の圧縮強度と透水係数 のいずれにおいても、これらの相対変化には土の骨格粒 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薬液固結土(φ 50mm×100mm)を作製し、弾性波速度とシリカ濃度に どの程度の相対変化が生じるか確認した。

(2) 薬液固結土の作成条件・方法

薬液固結土は,表-1の諸元を有する硅砂7号を用いて, 表-2の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測定 し,同一試料でシリカ濃度を測定した(1サンプリン グ).また,残りの1体は透水係数の測定に使用した.

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、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.

注入材は線路下横断トンネル工事で主流となっている 中酸性系の水ガラス溶液型を使用した.この注入材の化 学反応式を式(1)に示す.

$Na_2O \cdot nSiO_2 + H_2SO_4 \rightarrow nSiO_2 + Na_2SO_4 + H_2O \cdot \cdot (1)$

一般に、中酸性系の水ガラス溶液型は、この化学反応

	表-1	砂試料	(珪砂7号)	の物性値
--	-----	-----	--------	------

土粒子の密度 ps (g/cm ³)	2.620
最大間隙比	0.931
最小間隙比	0.613
平均粒径 D50 (mm)	0.180

表-2 薬液固結土の作成条件

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

表-3 使用した注入材の標準配合

分類	配合 (1Lあたり)		ゲルタイム
73 1.95	А	<u>主</u> 刹:250mL	
溶液型	剤	水: 300mL	经经济
無機	р	硬化剤: 20mL	版h (長結)
特殊中酸性	B 刘	pH 調整剤:20g	(政府)
	711	水:410mL	

式で生成されている SiO₂(シリカ)が薬液固結土の固化 成分となるものであり、この配合が材料により異なる. 本研究では希釈することで圧縮強度と透水係数が広範囲 で異なる薬液固結土が作製できるように、高強度配合の 材料を選定した(標準配合:**表-3**).

なお、この注入材は、珪酸ソーダ中のシリカを活性化 するために希硫酸を加えて、Na⁺イオンを除去するとと もに、コロイド化したシリカの重合(シロキサン結合) を促進させている.また、酸化ナトリウムを中和する量 の希硫酸しか加えないことにも特徴があるものである.

具体的な薬液固結土の作成手順を次に示す.

①相対密度に応じた間隙にてん充率100%となる量の注

入材をモールド(φ50mm×100mm)に投入する(図-4 a))

②水中落下で目標相対密度となる砂試料をモールドに投入する(図-4b), c)).

- ③気中養生を1日,水中養生を2日行う.
- ④プラモールドを脱型のうえ、マイターボックス、直ナ イフで整形する(図-4d)).

(3) 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 100kPa(空気圧)を与え(図-5a))、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 して行った. 起信波形は振幅 100V の矩形波とし、サン プリングレート4×10⁴ms で収録し、64回のスタッキン





グによりノイズ処理を行った(図-5b)).

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/gdry)をいう.薬液固結土の固結 シリカを溶液化し,ICP発光分析装置に通すことで測定 した.具体的な手順を次に示す.

①薬液固結土を細かく粉砕して10gを採取する.

②2%の水酸化ナトリウム水溶液を 20ml 入れ攪拌する.③容器を熱湯に入れ攪拌しながら 30 分静置する.

④③の上澄み液を吸引ろ過し,溶液 lml を 100ml メス フラスコへ入れる.

⑤メスフラスコに塩酸 2ml をさらに加えた後,純水で 100ml までメスアップし混ぜる.

⑥ICP 発光分析装置で、⑤で作製した溶液のシリカ含有量(ppm)を測定する.これをシリカ濃度に換算する.c)圧縮強度、透水係数の測定方法

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 ことからフローポンプ法を用いて求めた.フローポンプ 法とは難透水性試料の透水係数を得るため,薬液固結土 への浸透水の供給を注射器状のシリンダーで安定して行



表4 弾性波速度とシリカ濃度の相対変化量

	弹性波速度	シリカ濃度
	Vpの変化量	の変化量
	(m/s)	(mg/g-dry)
圧縮強度の変化量	100 程度	1程度
(100kN/m ² あたり)	100 1至/支	「主反
透水係数の変化量	300 程庫	17 程度
(1オーダーあたり)	500 住反	1/ 1主/文

うものである.

(4) 試験結果

a)弾性波速度と圧縮強度および透水係数の関係

弾性波速度と圧縮強度および透水係数の関係を図-6, 図-7 に示す. これらの図から弾性波速度が増加するの 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. 薬液固結土の圧縮強度が 202~628kN/m²,透水係数 が 1×10⁷~5×10⁹cm/s の範囲では,S 波速度に 218~ 279m/s,P波速度に 505~914m/s 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-8, 図-9に示す.これらの図から,弾性波速度と同様に, シ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~ 33mg/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 度と透水係数の変化に対して線形に近い相関が見られた. そのため、試験結果から、圧縮強度と透水係数に対する 弾性波速度とシリカ濃度の相対変化量をまとめると、表 4のように簡易な形で整理することができた.なお、 弾性波速度については変化量が大きいP波速度の値を示 した.

3. 現場計測による検証

(1) 概 要

検証を行った現場は、止水を目的として薬液注入を実施した線路下横断トンネル工事である.注入範囲の深度はGL-1.5m~GL-14.3mであり、図-10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)と続く地層構成を有していた.

本研究では、この現場において、地盤の種類によらず 表-4 の関係が適用できるかを検証することとし、弾性 波速度およびシリカ濃度の測定を行うとともに、比較対 象として注液圧試験の結果を整理した。

(2) 弾性波速度探查

a) 測定方法

弾性波探査には音響トモグラフィ探査を用いた⁹. これは図-11に示すように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.

通常の弾性波探査と異なるのは、周波数および音圧を 制御した発信を行うことであり、発信周波数は 1~ 10kHzと高い周波数帯を用いているため、都市部などで



図-10 現場計測断面



図-11 音響トモグラフィ探査の概要5



図-12 弾性波探査結果 (P波速度の変化量)

も騒音の影響を受けないことが特徴である.また,他の 探査と比較して,高い精度で広範囲の計測が可能となっ ている.

通常,注入の効果確認で行われる弾性波探査では注入 後のみで実施され、その絶対値で評価する場合が多い. ただし、本研究では、表-4の相対変化量を得るため、 薬液注入前後において探査を実施した.発信孔と受信孔 の位置は図-10に示したとおりであり、距離は約20m, 各々の孔深さは約18mである.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.

表-5 シリカ濃度の測定結果

試料		シリカ濃度の差分 (mg/g-dry)		
地層		(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-6	透水係数の筧定に用い	た注入条件
100		

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μg/μw	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(kN/m³)	10.0

b) 測定結果

薬液注入前後のP波速度を用いてトモグラフィー解析 を実施した⁹. 解析結果の差分(P波速度の相対変化 量)を図-12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みら れる.特に,Dg層付近にあたる位置で0.15km/sを超え る増加量を示す箇所が帯状に存在した.一般に,粘性土 層の透水係数は小さく,間隙への注入材のてん充率は低 く設計する³.一方,砂礫層は間隙比,透水係数が大き く,間隙への注入材のてん充率は大きく設計する.した がって,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.測定結果 はこの傾向と整合するものであった.

(3) シリカ濃度測定

a) 測定方法

現場において採取した不撹乱試料を用いて室内試験と 同様の方法で測定した.弾性波速度と同様にシリカ濃度 も薬液注入前後の相対変化量を得る必要があり、本来は 同位置の試料を用いるのが良いが、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、角型鋼管推進時の掘削残土を注入後の薬液固結土と した.なお、角型鋼管推進時の試料は、図-12 に示す As, Ac2 および Dg 層の位置で採取した.なお、各位置での 弾性波速度の増加量は As で 0.02~0.06km/s, Ac2 で 0.06 ~0.10km/s, Dg1 で 0.12~0.16km/s, Dg2 で 0.14~0.16km/s 程度の範囲であった.

b) 測定結果

測定結果を**表-5** に示す.弾性波速度の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 8.16~9.58mg/g-dry の範囲であった.また,As 層と Ac2 層ではシリカ濃度の変化量は小さく 0~2.45mg/g-dry の範囲であった.







図-15 No.3-9 の透水係数の推定結果 (Dg 層)



図-16 No.3-13 の透水係数の推定結果 (Dc1 層)

(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-13 に示すように本施工した注入孔 から幾つかを試験孔として選定して再注入を行い、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、地盤の種類によらず、表4の相対変化 量の関係を用いることができるかに着目したものであり、 特に、不明であった透水係数について詳細検討を行った.

透水係数の推定に用いた試験孔は図-13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 に加え, Ac2 層の No.3-6, 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, Magg の式の適 用ができないことから推定に至らなかった.

表-6 に示す施工条件とともに、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 Magg の式 ³に代 入して求めた.

$$p = \frac{\gamma \cdot q}{4\pi k_{w}} \cdot \left\{ \left(\frac{\mu_{g}}{\mu_{w}} \right) \frac{1}{r} + \left(1 - \frac{\mu_{g}}{\mu_{w}} \right) \frac{1}{R} \right\} + \gamma \cdot h_{w} \quad \cdot \quad \cdot \quad (2)$$

ここに, *p*:注入圧力(kPa), *yw*:水の単位体積重量(kN/m³), *hw*:注入孔近傍の地下水位(m), *q*:注入量(m³/s), *kw*:透水係数(m/s), *µw*:水の粘性(Pars), *µw*:注入材の粘性(Pars), *R*:注入半径(m)

b)弾性波探査,シリカ濃度測定からの推定方法

測定された弾性波速度とシリカ濃度の注入前後の差分 に表4の関係を乗じて透水係数の変化量を求め、本施 工の薬液注入時の最大注入圧力から求めた原地盤の値に この変化量を加えることで注入後の透水係数を求めた. c)推定の比較結果

各層における透水係数の推定結果を図-14~図-16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 は低下し、Ac2層、Dg層、Dc1層ともに1×10⁴cm/s(1× 10⁶m/s)のオーダーとなった.

これらの結果から,弾性波速度探査と注液圧試験の値 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層で注液圧試験および弾性波速度探査と 概ね一致するが,Ac2層では異なる結果(透水係数の低 下していない結果)となった.注液圧試験と弾性波速度 探査は,測定位置の平均的な評価を行うものであるのに 対して,シリカ濃度では採取試料のばらつきが推定され る.Ac2層は粘性土であり,一般には浸透注入と割裂注 入が混在する注入形態となる.これが推定結果に影響し た可能性が考えられる.

4. おわりに

本研究では、通常は注入範囲への注入材の充填状況を

確認するために実施される弾性波速度探査とシリカ濃度 測定に着目し、これら調査で得られるパラメータ(弾性 波速度とシリカ濃度)から圧縮強度と透水係数を推定す る方法を検討した.本研究で得られた知見を以下に示す.

- 注入材を希釈することで圧縮強度と透水係数が異な る砂試料による薬液固結土を作製し、弾性波速度と シリカ濃度の変化量を測定した.この結果、これら の変化は注入材のてん充率によらず一定であること が確認できた.
- 2) 上記の相対変化量は、圧縮強度 100kN/m² あたり、 弾性波速度 V_pは 100m/s 程度、水ガラス濃度は 4mg/g-dryであった.また、透水係数1オーダーあた り、弾性波速度 V_pは 300m/s 程度、水ガラス濃度は 17mg/g-dryであった.
- 3) 浸透注入の場合,既往の研究から,上記の相対変化には土の骨格粒子の大きさによる影響が小さいと考え、実現場の粘性土と礫質土に対して弾性波速度探査、シリカ濃度測定を実施した.上記の関係を用いて透水係数の推定し、注液圧試験で算定した透水係数と比較したところ、弾性波速度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、概ね両者の値で一致が見られた.

本研究で実施した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、今回得られた結果は効率的に薬液 固結土の圧縮強度と透水係数を推定するために寄与する ものと考えている.ただし、本研究では、水ガラス溶液 型注入材を対象としたが、実際には荒詰を目的とした一 時注入も実施される.そのため、この影響による誤差は 含まれていることが課題として残されており、今後も精 度向上に努めていきたいと考えている.本研究で得られ た知見が注入効果確認の一助となれば幸いである.

文献

- 公益社団法人土木学会:トンネル・ライブラリー第 31号 特殊トンネル工法—道路や鉄道との立体交差 トンネル—, 2019.
- 2) 公益社団法人地盤工学会:薬液注入工法の理論・設計・施工,2009.
- 3) 公益財団法人鉄道総合技術研究所:注入の設計施工 マニュアル, 2011.
- 4) 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 年次学術講演会講演集,III-020, pp.39-40, 2011.
- 6) 坂本寛章,古藤賢,近藤政弘,仲山貴司,澤田亮, 小山幸則,白川和靖:音響トモグラフィ探査による 薬液注入改良効果の検証,第50回地盤工学研究発表 会講演集, C-02, pp.191-192, 2015.

EVALUATION METHOD OF CHEMICALLY STABILIZED SOIL WITH GROUTING IN RAILWAY UNDERPASS CONSTRUCTUION

Yoshihiro FUKUI, Takashi NAKAYAMA, Ryo SAWADA and Hirokazu AKAGI

The evaluation of the strength increase and the permeability reduction of the chemically stabilized sand with grouting has been carried out by using the elastic wave velocity and the silica concentration measurement results. The strength increase and permeability reduction of the chemically stabilized sand have been estimated reasonably well by the proposed method.