

トンネル先受け注入材の開発と 地盤条件に応じたその選択について

Development of grouting materials for forepiling method
and their selections adapted to the ground conditions

脇田伸吾¹・山本拓治¹・伊達健介²

Shingo Wakita, Takuji Yamamoto and Kensuke Date

¹正会員 鹿島建設 技術研究所 岩盤・地下施設グループ (〒182-0019 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:swakita@kajima.com

²正会員 鹿島建設 技術研究所 土質・地盤環境グループ (〒182-0019 東京都調布市飛田給2-19-1)

With the increasing use of NATM in urban areas, numerous types of forepiling method have been adopted to reduce surface settlement or reinforce tunnel face. However, the actual ground is heterogeneous, the reinforcing effects of grouting are inadequate in many cases.

It is important for grouting to select materials adapted to the ground conditions in order to obtain effective reinforcement of grouting. New grouting materials and methods, therefore, have been developed which has two different types of materials and being able to exchange them according to the changing ground conditions.

Key Words : forepiling, surface settlement, grouting, sodium silicate, permeation, grain size

1. はじめに

近年、トンネル工事においては、一層のコスト低減や多様な断面形状での施工が求められている。そのため、都市部での土被りの浅い、未固結の土砂地山のような、従来シールド工法で施工されていた地盤においても、山岳工法が適用されるケースが増加している。このような都市部でのトンネル工事は一般に、土被りが浅く、未固結の土砂地山が多いなどの悪条件に加え、都市の過密化や用地問題などから、既存の構造物に対する近接施工となる場合も多く、山岳部よりも厳しい条件下で工事が行なわれている。

このような条件下でも、山岳工法が適用できるようになった要因として、補助工法の果たしている役割は大きい。その中でも鋼管の打設と注入により、切羽前方地山を先行補強する注入式鋼管フォアパイリング工法は、切羽安定や肌落ち防止、地表面沈下抑制を目的として数多くのトンネルで採用され、その有効性が確認されてきた。

しかしながら実際の地盤は、不均質で複雑であるため、注入材が地山に適合していない場合は、局部的に注入されたり逸走したりして、改良体が十分に形成されず、注入による所定の地山改良効果が得られていないことがあった。

一般に、都市土木工事では、砂質・砂礫土層のような透水性地盤に対しては、できる限り浸透注入が可能な材料（水ガラス系溶液型など）を使用し、粘性土地盤の場合は、通常の注入速度では割裂注入形態となるため、ホモゲル強度に優れ、ゲルタイムが調整できる懸濁型注入材が望ましいとされている¹⁾。（表-1 参照）

表-1 土質条件と最適な注入薬液の種類¹⁾

土質条件	最適な注入薬液（目的）	
砂質土	溶液型<水ガラス系>	（止水・強度）
	場合によっては懸濁型<超微粒子、特殊シリカ>	（強度）
粘性土	懸濁型<セメント、特殊シリカ> セメント、セメント・ベントナイト	（強度）

しかしながら、トンネル先受け用の注入材は、強度的な問題からセメント系注入材か、ウレタン系注入材が主に使われ、粘着力が低く、浸透注入による改良が必要な、密な砂質地山に適した溶液型の注入材は存在しなかった。

そこで筆者らは、フォアパイリング工法やその他各種先受け工法一般に使用できる経済的で安全性が高く、補強効果の高い注入材の開発に取り組んできた²⁾。今回、2種類の新しい注入材を地盤条件に応じて使い分けられる工法を開発し、室内実験、原位試験、実トンネルへの適用を行ったので、その結果について報告する。

2. 新しい注入材・注入工法について

(1) 先受け注入材に求められる性能

一般に、都市部でのトンネル掘削において想定される地盤条件は、注入材の浸透形態から、表-2に示す2種類に分類される。一つは砂粒子の間隙への浸透注入が可能な、砂質地盤（以下ではこれを地盤1とする）、もう一つは弱面、空隙などへ脈状注入していく粘性土や亀裂を伴った地盤である（以下ではこれを地盤2とする）。したがって、地質状況によって浸透形態も異なるため、注入材に求められる性能も異なる。

地盤1で求められる性能としては、設計改良範囲へ確実に浸透注入が可能な高い浸透性、ゲルタイムが調整できることが求められる。また注入後ただちに掘削できるよう、早期にサンドゲル強度（改良地盤の強度）が発現することが求められる。

一方地盤2においては、地盤の補強メカニズムが、脈状注入による地盤全体の強度や結合力の増加であるため、注入材には材料そのものの強度（ホモゲル強度）が求められる。また地盤2では注入材が設計範囲外に逸走する可能性も大きく、ゲルタイムが調整できること（限定注入できること）も重要である。さらには、脈状注入と同時に、浸透注入も可能となれば、地盤の補強度合いは一層高まるため、浸透性が高い方がより望ましい。

先受け工法が用いられる都市部でのトンネル掘削においては、住宅直下や地下水利用を行っている滞水層近くで注入工事を行うこともあることから、環境面に配慮した注入材であることも非常に重要である。

(2) 従来の注入材の種類と問題点

一般に、トンネル先受け用注入材としてはセメント系やウレタン系が、止水用目的などには水ガラス系溶液型などが用いられてきた。それぞれの注入材の比較を表-3に示す。

セメント系材料は、セメント粒子を持つ懸濁型注入材であるため、密な砂質地盤では浸透注入せず注入圧が上昇したり、亀裂が伴うような地盤ではゲルタイムの調整が不安定なため逸走したりする場合がある。そのような地盤条件では、浸透性・固結強度に優れたウレタン系注入材が用いられる。しかしながら、ウレタン系注入材は、人の健康被害発生の抑制や地下水等の汚染防止の観点から、使用できる材料は限定されており、またその適用範囲は、工事の安全等を確保できない場合の応急措置として、位置

表-2 浸透形態による地盤の分類

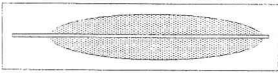
	地盤1	地盤2
浸透形態		
	浸透注入	割裂注入
地盤	砂質地盤	粘性土・亀裂を伴った地盤
注入材への要求性能	-高浸透性（密な砂質地盤でも浸透） -ある程度長いゲルタイム -早期のサンドゲル強度	-早期のホモゲルの強度や粘着力 -調整可能なゲルタイム -高浸透性

表-3 従来の注入材の比較

	セメント系注入材	ウレタン系注入材	水ガラス系溶液型注入材
粘性	50～150 mPa s	50～170 mPa s	5～10 mPa s
一軸圧縮強さ (1日強度)	0.5～1.0 N/mm ² (ホモゲル)	4.0 N/mm ² (ホモゲル)	0.1～0.5 N/mm ² (サンドゲル)
ゲルタイム	10～120 分 程度	40～120 秒 程度	数秒から数十分

付けられている³⁾。一方、水ガラス系溶液型注入材は、従来から主に止水や液状化対策などの目的に用いられてきたため、トンネル工事に使用するには強度が不十分であった。

(3) 新しい注入工法の開発

筆者らは、これらの問題を解決するために、新しい注入材料・工法の開発に取り組んだ。まず、環境への配慮やコストの点から、水ガラス系注入材に着目した。しかし、従来の水ガラス系溶液型注入材では強度が得られないという欠点があったため、早期に強度を発現することが可能な、水ガラスと硬化剤の配合を検討した。また、地盤条件は絶えず変化するため、地盤 1、2 が掘削とともに不規則に現れるような場合にも対応できるよう、A 液（水ガラス）を共通とし、B 液（硬化剤）を 2 種類用意して、地盤条件に応じて使い分けることとした。この方式を用いれば地山の変化に対して、最小の労力で注入材の変更が可能となる。B 液は、地盤 1 への注入に適した「溶液型」と地盤 2 に適した「懸濁型」の 2 種類を用意した。本工法の方法物性値を表-4 に示す。両材料とも早期の強度発現が可能となっており（溶液型は 1 日でサンドゲル一軸圧縮強度 1.0 N/mm² 以上、懸濁型は 1 日でホモゲル一軸圧縮強度 3.0 N/mm² 以上）、B 液の調整剤の分量を変えることで、ゲルタイムの調整も可能である。

表-4 新しい注入材料の物性値

	溶液型注入材	懸濁型注入材
A液	特殊水ガラス	
B液	-溶液型硬化材 -ゲルタイム調整剤 -水	-懸濁型硬化材 -ゲルタイム調整剤 -水
一軸圧縮強度 (1日強度)	サンドゲル強度 1.0 N/mm ² 以上	ホモゲル強度 3.0 N/mm ² 以上
浸透性	密な砂質地盤 ($k=10^{-1}$ cm/s オーダー) でも浸透	高浸透性セメント系 注入材と同等以上
ゲルタイム	3~45分 (ゲルタイム調整可)	1~10分 (ゲルタイム調整可)

図-1 に、今回開発した溶液型・懸濁型注入材、および他の注入材について、地盤の種類と浸透形態の関係を示す。

3. 比較注入試験

実施工への適用の前に、本工法で使用する 2 種類の注入材の浸透性や改良体の出来形確認と、従来の注入材との比較を行うため、室内と原位置において比較注入試験を実施した。図-2 に、試験を実施した地盤の粒度分布と、各種注入材の想定される浸透可能範囲を示す。

(1) 室内注入実験

本注入材の有効性の確認と、従来材料との比較を目的として、大型土槽を用いた室内注入実験を実施した。注入実験装置を図-3 に示す。大型土槽は、注入式フォアパイリングを模擬できるように、塩ビ管が水平方向に間隔 600mm で 2 本設置できるようになっている。土槽内の模型地盤は、所定の粒度のケイ砂を、含水比 5% に調整し、単位単位体積重量 ($\gamma_d=1.50$ g/cm³) になるよう、1 層 15 cm ずつ締め固め作製した。なお注入管は、地盤に予め設置することとした。

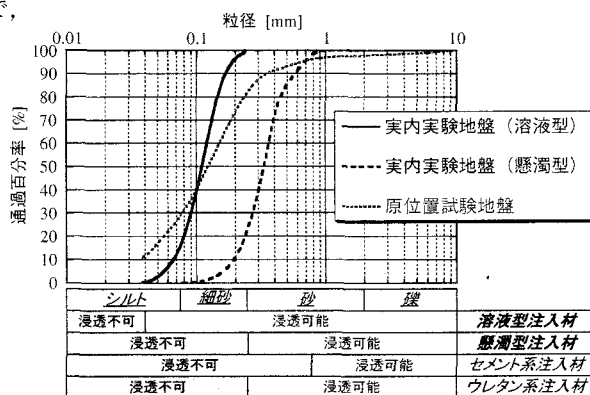


図-2 試験地盤の粒度分布とグラウト浸透範囲

地盤の種類	粘土	シルト	細砂	砂	礫	亀裂性地盤
透水係数 k [cm/sec]	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0
注入材料	浸透形態					
セメント系注入材		③		①		②
ウレタン系注入材		③		①		②
水ガラス系溶液型注入材	③		①			②
新しい注入材	溶液型	③	①			②
	懸濁型	③		①		②

①浸透注入

②割裂注入

③注入不可、または亀裂や弱面があった場合、割裂注入

図-1 地盤の種類と浸透形態の関係について¹⁾

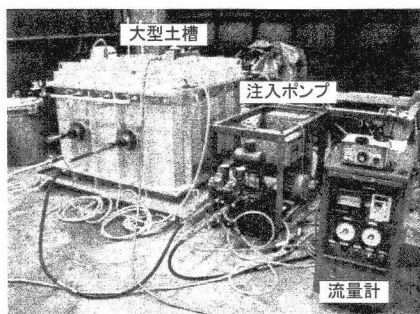


図-3 注入実験装置の概要

土槽の上蓋にはゴムバッグが設置されており、模型地盤に上載圧をかけることで、想定する土被り高さを再現できるようになっている。注入は実工事とはほぼ同様に、塩ビ管に開けたφ10mmの小孔（1断面あたり2孔、30cmピッチの千鳥配置で計8孔設置）から、プランジャーポンプを用いて定量注入で行なった。注入から1日後に、土槽の下蓋を取り外すことで、掘削を模擬しており、改良体の形成状況の確認を行った。溶液型、懸濁型注入材を用いた試験の注入仕様を、表-5に示す。

(a) 溶液型注入実験

溶液型の注入実験として、地盤1（砂質地盤）を模擬するため、図-2の粒度を持つケイ砂8号を使用した。Creagerの方法を用いて20%粒径 D_{20} からおおよそ地盤の透水係数を推定すると、透水係数は約 $9.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ である。なお、浸透性を比較するため、セメント系注入材の注入試験も行った。

溶液型注入材の注入時には、特に圧力の上昇もなく、所定の注入量を注入することができた。一方、セメント系注入材の注入時には、開始直後に注入圧が急激に上昇し、設定上限圧（0.5MPa）まで達したため、注入を終了した。注入から1日後、土槽の下蓋を外し、改良体の出来型の比較を行った。図-4に示すように、セメント系注入材においては、少量しか注入されなかったため、塩ビ管の周辺のみしか改良体が形成されていない。一方、溶液型においては、密な砂質地盤でも設計注入量の注入が可能であったため、設計通りの直径約600mmの均質な改良体を形成することができた。

(b) 懸濁型注入実験

懸濁型注入材の適用地盤としては、地盤2（粘性土地盤）、もしくは比較的大きな間隙・空隙が存在する地盤が考えられる。そのため、本来であれば地盤2を設定し、試験するのが理想であるが、室内実験において割裂注入形態を模擬することは困難であったため、本試験では、溶液型を対象とした試験で用いたよりも粗い粒度のケイ砂6号を用いて、材料の浸透性、及び強度の発現性を確認した。粒度分布から想定される地盤の透水係数は約 $1.4 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ である。

注入時には、特に目立った圧力の上昇もなく（最大圧0.2MPa）、所定の注入量を注入することができた。図-5は、注入から1日後に掘り出した改良体である。図から分かるようにほぼ均質な円柱状の改良体が形成されており（直径400～450mm）、懸濁型にも拘わらず、ある程度浸透性が高いことを確認した。



図-4 溶液型注入材の試験結果
（セメント系注入材との比較）

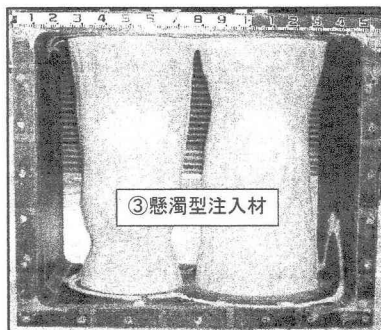


図-5 懸濁型注入材の試験結果

表-5 室内注入実験での注入仕様

使用注入材	試験地盤材料 (平均粒径)	地盤の透水係数 (粒径から推定)	改良体の目標直径	注入速度	ゲルタイム
① 溶液型注入材	ケイ砂8号 (0.11mm)	$k=9.0 \times 10^{-4}$	600 mm	8 L/min	10 min
② セメント系注入材			600 mm	8 L/min	30 min
③ 懸濁型注入材	ケイ砂6号 (0.34mm)	$k=1.4 \times 10^{-2}$	425 mm	8 L/min	5 min

(2) 原位置注入試験

図-2 に示すように、原位置試験を実施した地盤は、細粒分が含まれる砂質地盤であり、地盤 1 に分類される。そのため、2 種類の新しい注入材では溶液型注入材を選択し、浸透性能を比較する目的で、セメント系とウレタン系注入材についても試験注入を行った。表-6 に注入仕様および結果を示す。

溶液型注入材の注入圧は、2 孔とも初期圧から 0.1 ~ 0.15MPa という低圧レベルに抑えることができた。設計注入量を注入することができた。ウレタン系注入材の最大上昇圧は、溶液型注入材の 2 倍であった。セメント系注入材については、途中で限界圧を上回ったため、その時点で注入を終了した。

図-6 に注入から 1 週間後に掘り出した、改良体の状況を示す。溶液型においては円柱状の改良体が平均的に $\phi 800 \sim 1400\text{mm}$ で形成されているのに対し、ウレタン系注入材では、脈状に薬液が浸透し均質な改良体となっていないことがわかる。これは前者が浸透注入されたのに対し、後者が割裂注入となったためだと考えられる。セメント系注入材は、室内実験と同様、設計注入量を注入できず、鋼間周りにのみ、改良体が形成された。

4. トンネル実施工への適用

(1) 実トンネルへの適用

室内実験および原位置試験から、本注入材 2 種類の優位性を確認することができたので、トンネル実施工への適用を行った。現在まで数々の現場に適用⁴⁾しているが、その一例を表-7 に示す。また、その 3 つのトンネルの切羽から採取した土砂の粒度を図-7 に示す。注入材の選定は、地質条件及び粒度分布より、A, B トンネルでは溶液型を、C トンネルでは懸濁型を選択した。

(2) 適用結果

図-8 は A トンネルにおいて当初ウレタン系注入材を採用していた時の、掘削後の天端部分の状況である。図からわかるように、完全に鋼間が剥き出しとなっており、注入による改良体が形成されていないことがわかる。粒度分布から換算した地盤の透水係数は約 $3.8 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であり、 $k=10^{-3} \text{cm/s}$ オーダーではウレタン系注入材は浸透注入形態とならず、注入による十分な補強効果が得られない場合があるといえる。

表-6 原位置試験における注入仕様および結果

	改良体目標直径	設計注入量	注入速度	注入圧 初期 最大	限界圧	ゲルタイム
溶液型注入材	1200 mm	200L	15 L/min	0.4 MPa 0.55 MPa	初期圧 + 0.5MPa	15 min
ウレタングラウト	900 mm	55kg	4 kg/min	0.4 MPa 1.2 MPa	初期圧 + 2.5MPa	2 min
セメントグラウト	900 mm	149L	15 L/min	0.07 MPa 0.58 MPa	初期圧 + 0.5MPa	30 min

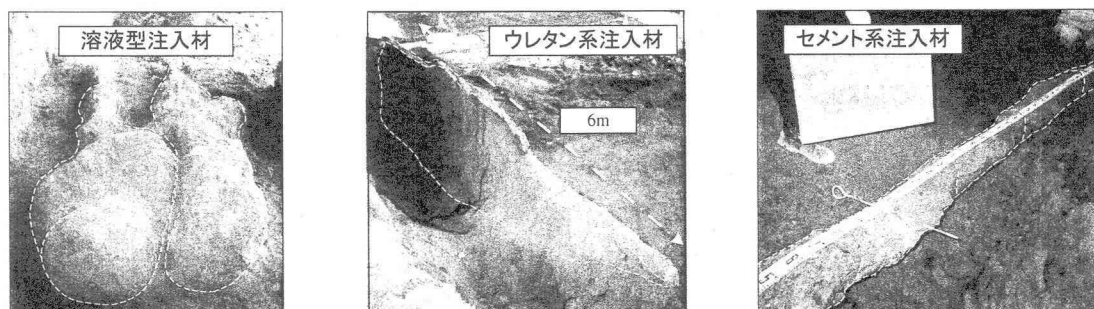


図-6 原位置試験での改良体掘り出し状況の比較

表-7 実トンネル工事への注入材の適用

	トンネルサイト	適用工法の種類	適用材料	地盤の透水係数 (粒度分布から算出)
A トンネル	山岳部での未固結の砂層	長尺鋼管フォアパイルング (12.5m)	溶液型注入材	$k=3.8 \times 10^{-3} [\text{cm/s}]$
B トンネル	都市部での未固結の砂質地盤	長尺鋼管フォアパイルング	溶液型注入材	$k=6.5 \times 10^{-4} [\text{cm/s}]$
C トンネル	都市部での未固結の粘性土地盤	長尺鋼管フォアパイルング	懸濁型注入材	—

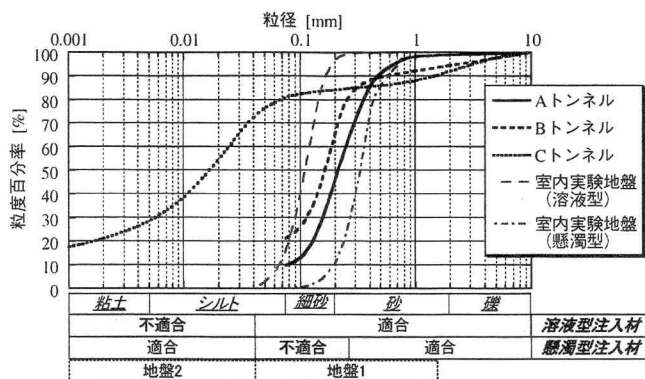


図-7 各トンネルの粒度分布と注入材の適用範囲

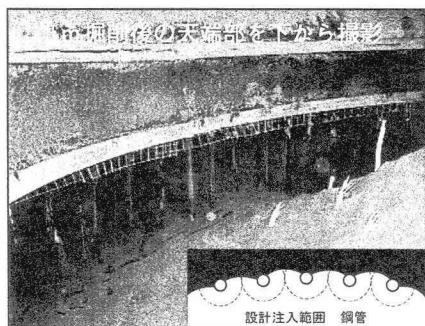


図-8 ウレタン系注入材を適用した場合の切羽天端の状況

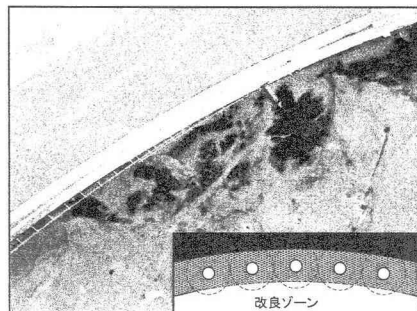


図-9 溶液型注入材を適用した場合の切羽天端の状況

一方、図-9 は、同トンネルの同じ地質で溶液型注入材を適用した結果である。図から分かるように、鋼間の下部にも改良体が形成されており、切羽補強や肌落ち防止に効果的であると考えられる。なお、固結領域を確認するため、掘削天端部にフェノールフタレイン溶液を散布して、改良域を確認している。このことから、A トンネルのような砂質系地山において確実な補強効果を得るためには、高い浸透性を持つ溶液型注入材で確実に浸透注入させることが最も効果的であると言える。

実際の注入時においても、ウレタン系では上限圧

を超えて、途中終了となった孔が多かったのに対し、溶液型注入材では、ほとんどの孔で定量注入を行うことができた。鋼間下にも確実に改良体が形成されることは、安全面のみならず、吹付けコンクリートの増し吹き防止にもつながり、コスト削減にも繋がると思われる。

(3) 改良土の強度について

図-10 は、A トンネルと C トンネルの切羽で採取した、注入材が浸透した改良土である。注入材の浸透形態は、粒度分布から事前に予測されたように、A トンネルでは浸透注入、C トンネルでは割裂注入形態であった。

砂質地盤において溶液型が浸透した改良土（A、B トンネル）について、一軸圧縮強さを測定した。

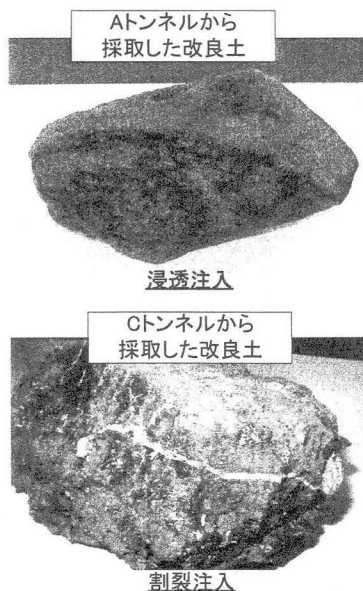


図-10 トンネル切羽で採取した改良土

図-11 は、改良土断片の成型 ($\phi 5 \times h 10\text{cm}$) 状況である。成型した供試体について、注入日から1週間後に一軸圧縮試験を実施した。試験結果を表-8 に示す。試験結果より、A トンネルにおいては、平均約 3.50N/mm^2 、B トンネルにおいて平均約 1.65N/mm^2 の高い一軸圧縮強さを発現していることが確認された。A、B トンネルによる一軸圧縮強度の違いは、地盤の密度の違いや、粒度分布によるかみ合せの違い、注入材の浸透度合いの違いなどに関係があると考えられる。

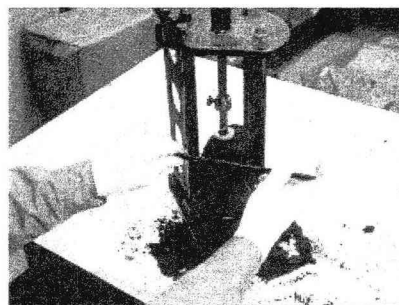


図-11 改良体の成型状況

表-8 改良体の一軸圧縮試験結果

	適用材料	試験本数	一軸圧縮圧縮強さ 平均	平均変形係数 E_{50}
Aトンネル	溶液型注入材	6	3.50 [N/mm ²]	2.83E+02
Bトンネル	溶液型注入材	3	1.65 [N/mm ²]	2.16E+02

5. まとめ

土砂トンネルにおける補助工法として、先受け工法は有効であるが、場合によっては注入による補強効果が十分得られていないことがあった。そこで浸透性が高く早期強度を有する2種類の注入材を、地山の地盤条件に応じて選択可能な新しい注入工法を開発した。また、室内実験、原位置試験、実トンネルへの適用を行った結果、以下のことを確認した。

- ・ 地山の変化に適した材料として、溶液型と懸濁型の、新しい2種類の水ガラス系注入材を開発した。
- ・ 2種類の注入材が、室内実験・原位置試験から、従来の注入材よりも優れていることを確認した。
- ・ 実トンネルへ適用した結果、地盤の透水係数が $k=10^{-3}\text{cm/s}$ オーダーの密に締まった砂質地山においても、ほぼ設計注入量を注入でき、浸透注入が可能であった。
- ・ トンネル掘削時には、浸透注入によって鋼管回りに改良領域がしっかり形成されていることを確認し、鋼管の間からの土砂の抜け落ちや肌落ちもなく、安全に掘削を完了することができた。
- ・ 固結した改良体（サンドゲル）の一軸圧縮強さを測定したところ、地盤条件によって異なるが、最低でも 1.5N/mm^2 以上の高い圧縮強度を発現していることを確認した。

今後は、更なる現場適用を進めるとともに、研究開発を進め、鏡ボルト等の注入材にも適用を拡大させていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 例えば、最新地盤注入工法技術総覧、最新地盤注入工法技術総覧編集委員会、産業技術サービスセンター、pp102-107, 1997
- 2) 山本、日比谷、伊達、関、下田：トンネルの先受け工法に用いる新しい注入材の検討、第36回地盤工学研究発表会、pp1921-1922, 2001
- 3) 日本道路公団：山岳トンネルにおけるウレタン注入の安全管理に関するガイドライン、1992
- 4) 脇田、山本、吉迫、伊達：溶液型注入材によるトンネル先受け工法、土木学会第59回年次学術講演会、VI-375, pp.747-748, 2004