

報告

ポリウレタン系注入材の浸透性評価と固結体の特性評価について

Evaluation of permeation and solidification characteristics of polyurethane injectants in sand

齋藤 拓未 (さいとう たくみ)

早稲田大学 創造理工研究科

fourock@fuji.waseda.jp

赤木 寛一 (あかき ひろかず)

早稲田大学 理工学術院

中島 智 (なかじま さとる)

東ソー(株) ウレタン研究所 機能性フォーム第2グループ

キーワード: 浸透, 注入, ポリウレタン系注入材, 強度, 環境評価

1. はじめに

薬液注入工法は、固結時間を調節した材料を地盤中の間隙水と置き換えながら浸透させ地盤を固結させる方法であり、水ガラス系注入材をはじめとする様々な材料が利用されている。このうちポリウレタン系注入材は地山内の亀裂へ浸透・発泡させることで地山の内部応力を高め、岩片間の結合を高める効果がある。また、水ガラス系注入材に比べ高い強度を示し、発泡に要するライズタイムの調整が容易であるという特徴を持つ。

しかし、「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針<sup>2)</sup>」によって、ポリウレタン系注入材の用途は制限されており、現在の用途は山岳トンネル工法でのトンネル掘削工事における切羽天端からの崩落防止や緩みの拡大防止、地山の固結や改良および止水といった目的での利用に留まる<sup>3)</sup>。また、ポリウレタン系注入材の注入施工性や浸透性は未解明な部分が多く、いまだに施工範囲のコントロールは困難である。したがって、水ガラス系注入材と同様に浸透注入が可能となれば、今後のさらなる適用範囲の拡大が期待できる。

以上より、本報告では砂地盤におけるポリウレタン系注入材の適用性を把握するために、条件を変化させた模擬地盤に対して注入試験を実施し、浸透性能および形成された固結体の力学特性を検討した。また、注入時の排水および注入後の固結体を与える環境への影響について溶出物試験により評価を行った。

2. 試験内容

2.1 浸透性の評価

注入試験は粘度の異なる3種類のポリウレタン系注入材に対し3種類の模擬地盤を設定し、一定速度にて注入を行った。試験条件は表-1に示す注入材粘度、模擬地盤、注入速度(実施工での注入速度から注入孔断面積の比をとり中間値を決定)の組み合わせによって決定した。使用砂の物性値を表-2に、粒度分布を図-1に示す。ここで、単粒武蔵野礫層は実際の武蔵野礫層の粒度分布に近い値となるよう珪砂を配合し作製した。

表-1 試験条件の組み合わせ

注入材粘度 mPa・s@20°C	模擬地盤	注入速度 L/min
1000	珪砂2号	0.189(装置下限値)
2000	珪砂4号	0.944(実施工比較)
3000	単粒武蔵野礫層	1.89(装置上限値)

表-2 模擬地盤物性値

模擬地盤	珪砂2号	珪砂4号	単粒武蔵野礫層
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.640	2.645	2.646
最大間隙比 $e_{max}$	0.954	0.925	0.740
最小間隙比 $e_{min}$	0.679	0.618	0.461
透水係数 $k$ (cm/s)	0.0564	0.0292	0.0730

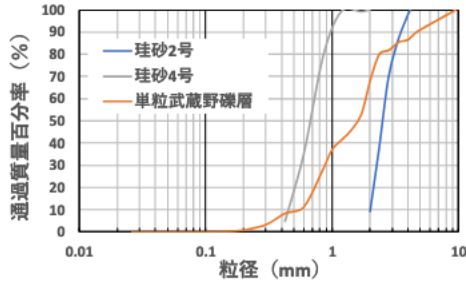


図-1 模擬地盤粒度分布



図-3 モルタルによるキャッピング

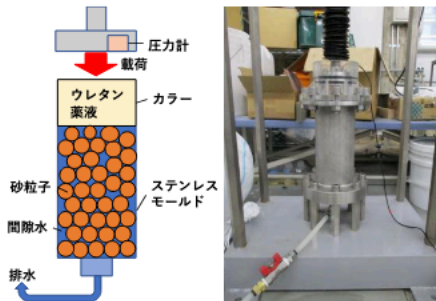


図-2 模擬地盤概要図(左), 注入試験機(右)

模擬地盤の作製について、図-2 に示す注入装置内で剥離用に内面処理を行ったステンレスモールド(寸法： $\phi 10\text{cm} \times h 25\text{cm}$ )の底面にポーラスストーンを設置した。その後、乾燥砂を3回に分けて投入し、相対密度が60%となるように締め付けた後、通水させ完全飽和とした。

作製した模擬地盤上部にポリウレタン 200g を設置し一定速度で注入を行う。注入時、注入圧力と排水量を測定した。荷重後はポリウレタンを十分反応させるため荷重後の状態を維持して約1時間放置し、除荷の直前に注入圧力および排水量の測定を停止した。

## 2.2 固結体力学特性の評価

薬液固結後、脱型した固結体のうち端面が比較的平坦なものについて力学特性を検討するため一軸圧縮試験(JGS 0511)を実施した。固結体の端面整形のため図-3 に示すようにモルタルを用いてキャッピングを行い、さらに固結体の上下にアンボンドキャッピングを施した。アンボンドキャッピングは固結体の端面に鋼製のキャップを被せることで、キャップ内のゴムパツ

表-3 溶出物試験ケース

試験ケース	条件	
浸漬液	1	固結体浸漬液
	2	
	3	
ブランク	珪砂のみの浸漬液	
注入排水	1	薬液注入時の排水
	2	
	3	ブランク
ブランク	模擬地盤通水時の排水	

ドが変形し固結体に密着するものである。

## 2.3 溶出特性の評価

ポリウレタン系注入材の注入時に発生した注入排水および固結体浸漬液についてそれぞれ3つずつ試料を作製し、表-3 に示す試験ケースにて有機物含有量測定を目的としたCOD消費量の測定(JIS K 0120)およびpH値測定(JIS K 0102)を行った。ここで比較用のブランク試料は、浸漬液は模擬地盤に使用する珪砂の浸漬液であり、注入排水は模擬地盤作製時の通水時に発生した排水を採取した。また、固結体浸漬液はタンクリーチング試験により作液した。以下にその手順を記す。  
＜タンクリーチング試験手順＞

- ① 非金属材料内に粉砕した固結体または珪砂を設置する。その後所定量の純水(固液重量比1:10)を溶媒液として固結体を浸水させる。
- ② 容器を密閉し40°Cの恒温室内で16時間養生する。
- ③ 容器内の溶媒液を採取し、それをポリウレタン系注入材またはブランクの固結体浸漬液とした。

### 3. 試験結果

#### 3.1 力学特性の評価

図-4 に注入時の圧力および排水量の時間変化の一例(注入材粘度  $3000\text{mPa}\cdot\text{s}$ )を示す。注入圧力は最も注入材の粘度が高いケースにおいても  $0.05\text{MPa}$  以下であり、割裂も見られなかった。これは、注入材の反応に伴い発生した気泡が圧縮されたため、圧力の上昇が緩やかに推移したと考えられる。また、排水量の時間変化を見ると、注入初期のピストン降下中の領域で排水量が急激に上昇し、その後のピストン降下後の領域では排水量の増加は緩やかに変化した。注入初期の段階ではピストン降下に伴い模擬地盤内にポリウレタンが浸透し、ピストン降下後はポリウレタンと水分が反応し発泡が生じていると考えられる。

珪砂2号を用いて作製した固結体の注入材浸透距離  $L$  を注入速度  $0.189\text{L}/\text{min}$  の場合の各粘度における浸透距離  $L_0$  でそれぞれ基準化し算出した基準化浸透距離 ( $L/L_0$ ) と注入速度について図-5 に整理した。浸透距離は注入速度  $0.944\text{L}/\text{min}$  で注入材粘度  $2000, 3000\text{mPa}\cdot\text{s}$  の固結体で  $0.8$  程度であったが、そのほかのケースでは  $1$  に近い値である。以上より、今回の注入速度の範囲では注入材浸透距離は一定であると言える。

注入材粘度と浸透距離の関係について図-6 に整理した。ここで、前述の図-5 の結果より注入速度による浸透距離の明確な差は確認できなかったことから、図-6 においては注入速度のみが異なる試験ケースは同一のものとして扱う。浸透距離の平均値は珪砂2号、単粒武蔵野礫層、珪砂4号の順で減少している。これは図-1 に示す粒度分布の結果に対応しており、平均粒径の違いによる影響と思われる。また、珪砂2号、珪砂4号の粘度増加に伴う浸透距離の減少量は  $1000\text{mPa}\cdot\text{s}$  あたり約  $3\text{cm}$  で一定であった。一方、単粒武蔵野礫層では粘度の違いによる浸透距離の減少量は珪砂と比較して小さかった。図-1 の粒度分布より単粒武蔵野礫層は珪砂より均等係数が大きく、平均粒径や均等係数の違いが粘度上昇に伴う浸透距離の減少量に影響を与えたと考えられる。

図-7 に注入材粘度  $2000\text{mPa}\cdot\text{s}$  の固結体の一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係を示す。圧縮強度は  $10$

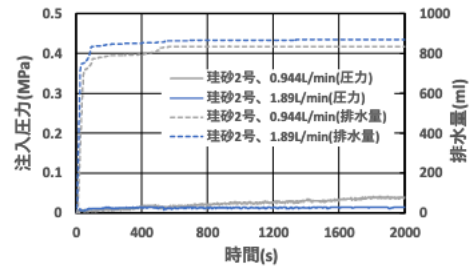


図-4 注入圧力と排水量の時間変化

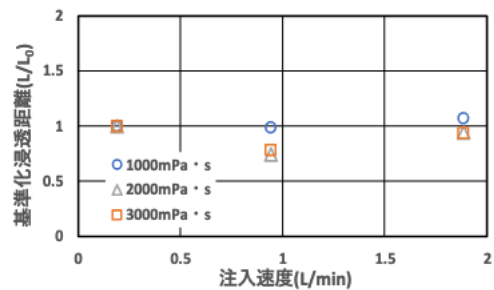


図-5 注入速度-浸透距離関係(珪砂2号)

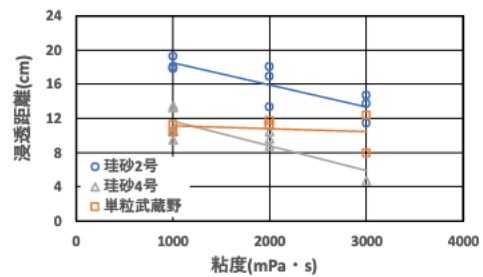


図-6 粘度-浸透距離関係

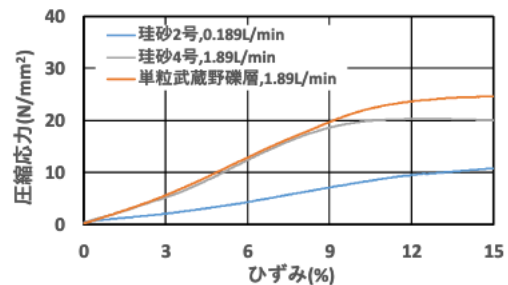


図-7 一軸圧縮試験の応力-ひずみ関係(粘度  $2000\text{mPa}\cdot\text{s}$ )

～25N/mm<sup>2</sup>であり非常に高い値を示した。珪砂2号の固結体の圧縮強度は他ケースに比べ約10N/mm<sup>2</sup>小さいが、表-4に示すように珪砂2号の固結体は供試体密度が小さく、供試体密度の違いが圧縮強度に影響したと思われる。図-8に示すように、固結体はひずみ15%圧縮時において固結体中央部が大きく膨張し、明確なすべり面は確認できない。また、応力-ひずみ関係からもわかるように固結体は高い靱性を示した。

### 3.2 溶出特性の評価

表-5に固結体浸漬液と注入排水のCOD試験結果とpH試験結果をそれぞれ示す。過マンガン酸カリウム消費量について、ブランクはどちらも約1.3mg/Lで一致した。固結体浸漬液はブランクに比べ5.0～6.0mg/L増加したが、注入排水はブランクの値にほぼ等しくなった。pH値について、固結体浸漬液および注入排水いずれもブランクの値と一致し約pH=7であった。ここで薬液注入工法における水質基準<sup>4)</sup>では過マンガン酸カリウム消費量は10mg/L以下、pH値は8.6以下とされている。したがってポリウレタン系注入材の固結体は水ガラス系薬液に適用される水質基準を満たしていることが確認できた。

## 4. まとめ

本報告では、3種類の粘度を有するポリウレタン系注入材を異なる粒度分布の砂を用いて作製した模擬地盤に対して一定速度で注入することで、浸透性、固結体特性および溶出特性について実験的に検討を行った。注入試験により圧力と排水量の時間変化を測定したところ、発泡性を有する注入材の圧縮性が高いため大きな圧力上昇は見られず、注入初期の排水量の増加の際に浸透が生じ、その後は水との反応による発泡が生じていることを確認した。また、注入後の固結体に対する一軸圧縮試験の結果、固結体は非常に高い強度を示すとともに、大きな靱性を有することを確認した。さらに、COD試験、pH測定により固結体溶出液や注入排水が水ガラス系注入材と同等の環境基準を満たすことを確認した。本報告を踏まえると、従来空隙の充填を主要な目的として適用されてきたポリウレタン系注入材について地盤への浸透作用を加味した更なる適用範囲の拡大が期待できると言える。



図-8 一軸圧縮試験時の様子

(左：試験前、右：試験後)

表-4 一軸圧縮試験における供試体密度

試験ケース (粘度 2000mPa・s)	供試体密度 (g/cm <sup>3</sup> )
珪砂2号, 0.189L/min	1.59
珪砂4号, 1.89L/min	1.71
単粒武蔵野礫層, 1.89L/min	1.72

表-5 溶出物試験結果

試験ケース	COD (mg/L)	pH
浸漬液	1	7.6
	2	6.5
	3	5.9
	ブランク	1.2
注入排水	1	0.6
	2	0.3
	3	1.7
	ブランク	1.4

## 参考文献

- 1) 山崎・中道・赤木：ポリウレタン系注入材を用いた固結砂の長期養生中の強度、溶出特性、土木学会平成29年度全国大会, 2017. <http://www.f.waseda.jp/akagi/2017jscc3-025.pdf>
- 2) 建設省：山岳トンネル工法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について, 1994.
- 3) ジェオフロンテ研究会：ウレタン系注入材に関する技術資料 注入式フォアポーリングの設計・試験方法・積算編 空洞充填に関する留意点, p.27, 2010.
- 4) 建設省：薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針, 1974. [https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000007052.pdf](https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000007052.pdf) (原稿受理 2020.5.29)