

砂地盤におけるポリウレタン系注入材の浸透性能と固結体の諸特性評価について

早稲田大学 学生会員 ○山本 馨
早稲田大学 学生会員 齋藤 拓未
早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一
東ソー（株） 正会員 中島 智

1. はじめに

山岳トンネル工法でのトンネル掘削において、切羽天端の崩落防止や緩みの拡大防止、地山の固結、改良及び止水を主な目的としてポリウレタン系注入材とボルト材を組み合わせる先受けを行う工法として、ウレタン系注入式フォアポーリング工法がある。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、岩片間の結合力を高める効果がある。また、発泡に要する時間に相当するライズタイムの調整が容易であり、注入ボルト周囲の限定注入に適しており、地山からのリークに対しても対応が可能で注入材のロスが少ない。ポリウレタン系注入材は水ガラス系注入材よりも高い強度が得られるが¹⁾、その浸透性や固結体の形成過程には、地盤の改良前強度や透水性、地盤中の亀裂の有無などによる不均一性などが関係しており、それらの多くの地盤条件によって決定される。そのため、ポリウレタン系注入材の注入施工性には未解明な部分が多く、未だにその施工範囲のコントロールは困難である。

また、「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針」によって現在その使用用途は制限されており、ポリウレタン系注入材の現在の用途は山岳トンネル工事における緊急事態の応急措置としての使用に留まっている²⁾、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更なる使用用途の拡大が期待できる。

以上より本報告では、ポリウレタン系注入材の注入時の施工性を検討するために、諸条件を変えて、ポリウレタン系注入材を模擬地盤に注入する実験を実施し、その浸透性を評価した。具体的には、ポリウレタン系注入材の粘度と模擬地盤条件を変えて注入実験を実施し、浸透性および形成された固結体の力学的特性について考察を実施した。

2. 試験内容

2.1 試験条件

粘度の違う3種類のポリウレタン系注入材を粒径の異なる3種類の模擬地盤に対して一定速度で注入を行う。試験条件は表2-2に示す粘度、模擬地盤、注入速度の組み合わせにより設定する。また使用砂の粒度分布を図2.1に示す。

2.2 試験手順

・模擬地盤作製

模擬地盤は目標相対密度を60%として空中落下法により作製する。離型処理を施した円筒容器（ステンレスモールド：寸法φ10cm×h25cm）に砂を3層に分けて投入し、各層10回ずつ締め固めた後、通水し完全飽和とする。

・注入試験

空中落下法により作製した飽和砂地盤に参考文献³⁾を基にポリウレタン系薬液注入材を一定注入速度で注入する。その際、ピストンの載荷面に設置された圧力計によって注入時の圧力を測定する。また、注入および注入材と水との反応に伴う発泡による排水量を測定する。

表 2-1 試験条件

注入材粘度 mPa・s@20℃	模擬地盤	注入速度 L/min
1000	珪砂 2 号	0.189
2000	珪砂 4 号	0.944
3000	単粒武蔵野礫層	1.887

表 2-2 模擬地盤の物性値

模擬地盤	土粒子密度 ρs (g/cm ³)	透水係数 k (cm/s)
珪砂 2 号	2.640	5.64×10 ⁻²
珪砂 4 号	2.645	2.92×10 ⁻²
単粒武蔵野礫層	2.646	7.30×10 ⁻²

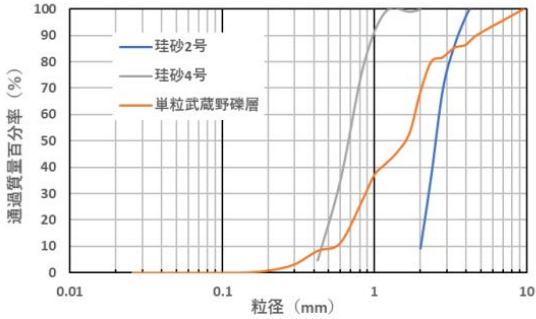


図 2.1 使用砂の粒度分布

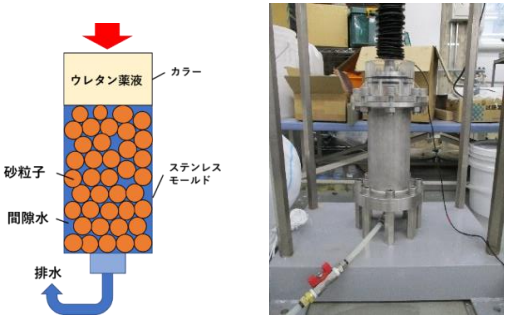


図 2.2 注入試験模式図（左）、注入試験機（右）

3. 試験結果

図 3.1 に注入試験における注入圧力と排水量の時間変化の一例を示す。図 3.1 は注入材粘度 $3000\text{mPa}\cdot\text{s}$ のケースであるが、注入材の圧縮性が高いため注入圧力は 0.05MPa 以下であり、割裂も見られなかった。また排水量の時間変化を見ると初期の段階で排水量が急激に増加しその後はほとんど増加せず横ばいに推移している。このことから初期の排水量が上昇している間に注入材の浸透が生じ、その後の緩やかに排水量が推移する領域では水との反応による発泡が生じていると考えられる。

図 3.2 に注入材の粘度と浸透距離の関係を示す。珪砂 2 号、4 号において粘度の上昇とともに浸透距離が減少する傾向が顕著に確認された。また同粘度においては粒径の大きな珪砂 2 号の浸透距離が 4 号に比べて大きく、その中間に単粒武蔵野礫層が位置している。図 2.1 の粒度分布を見ると単粒武蔵野礫層は珪砂 2 号、4 号の間に分布していることから、模擬地盤条件において注入材の浸透性は、地盤の透水係数のみでなく平均粒径や均等係数に影響を受けていると考えられる。

図 3.3 に注入試験による固結体の一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係を示す。一軸圧縮強さは $10\sim 25\text{N/mm}^2$ 程度と、水ガラス系注入材と比較して非常に高い強度を示した。また図 3.4 に示す通りいずれの供試体においても明確なすべり面は確認できず、応力ひずみ関係からわかる通り強い靱性を示す結果となった。

4.まとめ

本報告では粘度の違うポリウレタン系注入材を粒径および粒度の異なる砂を用いた模擬地盤に対して一定速度で注入することで、浸透性および固結体について評価および考察を行った。注入試験により圧力と排水量の時間変化を確認したところ、注入材の圧縮性が高いため大きな圧力上昇は見られず、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が確認できた。また注入後の固結体に対する一軸圧縮試験の結果、水ガラス系注入材と比較して非常に高い強度を示すとともに、靱性を発揮する結果となった。

既往研究¹⁾においてはポリウレタン系注入材による固結砂の水中溶出液が環境基準値を満たしていることも確認できており、本報告を踏まえ、今後ポリウレタン系注入材の更なる適用範囲の拡大が期待できると考える。

<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
- 2) 建設省: “山岳トンネル子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” pp27 2010

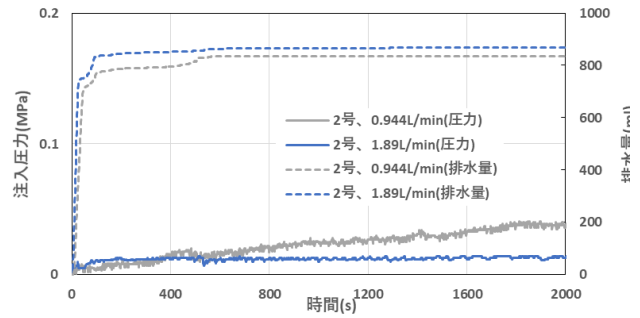


図 3.1 注入時間と注入圧力、排水量の関係
(粘度 $3000\text{mPa}\cdot\text{s}$)

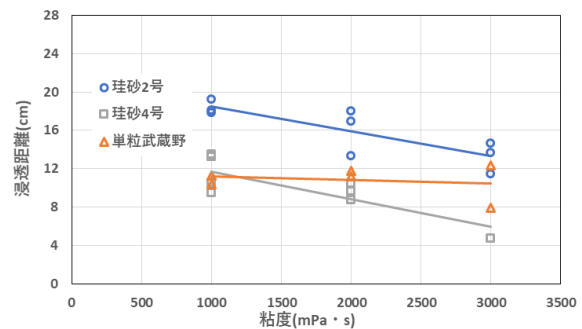


図 3.2 注入材粘度と浸透距離の関係

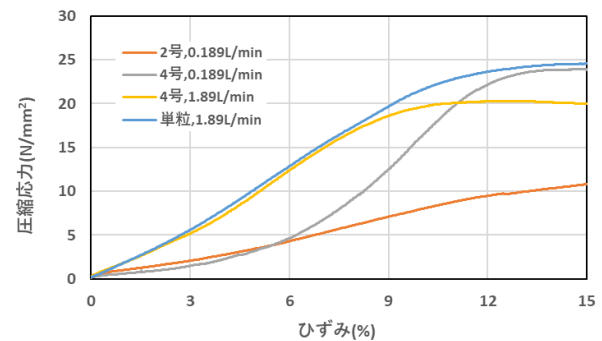


図 3.3 一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係



図 3.4 一軸圧縮試験時の様子
(左: 試験前, 右: 試験後)