

## 透水試験および浸透流解析による薬液注入剤の地盤内浸透挙動の評価

芝浦工業大学大学院 ○(学)福島一馬・(正)稲積真哉

大林組

(正)諸富鉄之助・(正)照井太一・(正)三浦俊彦

大阪防水建設社

(正)本橋俊之

富士化学

(正)笹原茂生・(正)宮谷佳雄

### 1. はじめに

薬液注入工法は軟弱な砂地盤の隙間に注入剤を注入し、注入剤は土粒子の隙間中で浸透・固結（ゲル化）し、それが接着剤となって地盤強化や止水等の効力を発揮する。ただし、薬液注入工法は膨大な施工実績を有しているものの、地盤内における液状固結材の浸透挙動は不明確な点が多い。そこで本研究では、諸物性の異なる薬液による飽和砂の透水試験を実施することで飽和砂中での薬液の浸透性を把握するとともに、浸透流解析によって薬液の諸物性の相違が地盤内の薬液浸透挙動に及ぼす影響を評価している。

### 2. 薬液を用いた飽和砂の変水位透水試験

化学組成およびレオロジーの異なる複数薬液の地盤内浸透特性を把握するため、飽和砂に対して浸透水として3種類の薬液（酸性系薬液であるA1ならびにA2、およびアルカリ系薬液であるM1）を用いた変水位透水試験を実施した。浸透水として用いた薬液は化学組成が各々異なることによって、図-1で示されるようにゲル状態へ転移する以前の粘性係数が僅かに異なり、且つゲル状態へ転移する時間（ゲルタイム）も異なる。これに対して、変水位透水試験に供した砂は、締め固めた足利山砂（ $w=16.3\%$ 、 $\rho_d=1.755\text{g/cm}^3$ 、飽和透水係数 $k=6.03\times 10^{-6}\text{m/s}$ ）である。ここで、使用した薬液のゲルタイムはA1：1.5時間程度、A2：6時間程度およびM1：1.5時間程度であるため、変水位透水試験におけるスタンドパイプ内薬液水位変動の測定は、各薬液がゲル状態へ転移するまでの時間を目安とした。

図-2は、締め固めた足利山砂に対してA1、A2およびM1薬液を浸透させた際の各薬液の透水係数の経時変化を示している。これより、A1、A2およびM1いずれの薬液においても、足利山砂中での透水係数はおよそ $1\times 10^{-8}\text{m/s}$ オーダーレベルで変動しており、水の飽和透水係数と比較して2オーダー程度低いものの、各薬液の透水係数に大きな差違はみられない。この要因は、各薬液の粘性係数が水の粘性係数と比べて大きいものの、A1、A2およびM1の薬液においてゲル状態へ転移する以前の粘性係数に大きな相違がないことが挙げられる。すなわち、飽和砂中での薬液の浸透は薬液の粘性係数に大きく依存することが推察できる。

### 3. 薬液を用いた飽和砂地盤中の浸透流解析

水ガラス系薬液は主成分である二酸化ケイ素（ $\text{SiO}_2$ ）と酸化ナトリウム（ $\text{Na}_2\text{O}$ ）のモル比によって1から5号に分類され、各号によって粘性係数等のレオロジー特性が異なる。浸透流解析では1号から5号までの薬液の粘性係数の違いが飽和砂質地盤内での浸透

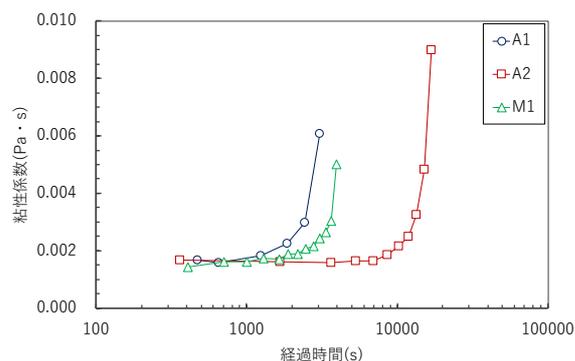


図-1 使用した薬液の粘性係数の経時変化

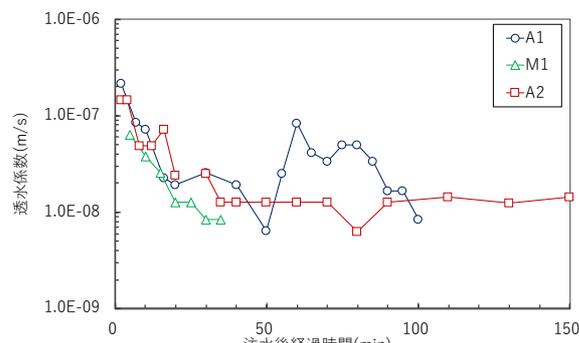


図-2 使用した薬液による透水係数の経時変化

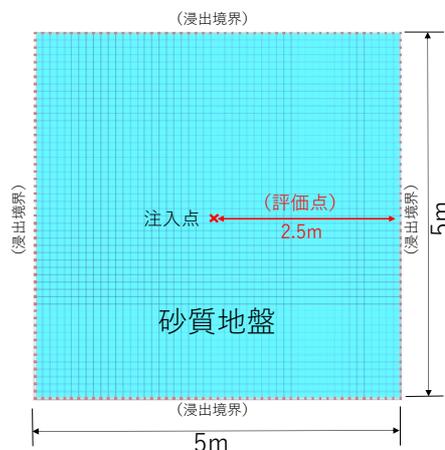


図-3 浸透流解析の対象として設定した砂質地盤断面

キーワード 薬液注入工法、水ガラス系薬液注入剤、浸透流解析、浸透挙動

連絡先 〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5 豊洲キャンパス研究棟9階09J32 TEL03-5859-8360

挙動に及ぼす影響を評価する（表-1 参照）。図-3 は浸透流解析の対象として設定した断面を表している。境界条件は全ての端辺を浸出点とし、対象断面の中心を薬液の注入点に設定している。薬液の注入圧は圧力水頭で表現し、注入時間は 1800 秒間として非定常解析を実施している。表-2 は砂質地盤の諸物性を示しており、その透水係数は  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4} \text{m/s}$  の範囲で変動する。ここで、式(1)（テイラーの式）を用いて、地盤の透水係数を仮定した上で等価粒子径  $D_s$  を求め、薬液の単位体積重量  $\gamma$ 、粘性係数  $\eta$  ならびに求められた  $D_s$ 、を用いて各号薬液による透水係数を求めている。

$$k = C \frac{\gamma e^3}{\eta (1+e)} D_s^2 \quad (1)$$

ここで、 $k$ ：透過の透水係数（m/s）、 $C$ ：間隙の形状（ $=1$  を仮定）、 $\gamma$ ：透過流体の単位体積重量（ $\text{N/m}^3$ ）、 $\eta$ ：透過流体の粘性係数（ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）、 $e$ ：間隙比（ $=0.4$  を仮定）、 $D_s$ ：等価粒子径（m）である。

解析結果は、薬液注入圧に対する圧力比が対象地盤内の各節点において得られる。本研究では注入点からの水平距離 2.5m までを 0.1m 間隔で注入点を除く計 25 箇所の節点にて圧力比を抽出する（図-3 参照）。また本研究では注入点からの距離と流量の関係によって薬液の浸透挙動を評価することを試みる。そのため、薬液の浸透流量は圧力比、地盤の透水係数および薬液の粘性係数から式(2)を用いて求めている<sup>2)</sup>。

$$Q = AV = Aki \quad (2)$$

ここで、 $Q$ ：流量（ $\text{m}^3$ ）、 $A$ ：各要素の断面積（ $\text{m}^2$ ）、 $V$ ：流速（ $\text{m/s}$ ）、 $k$ ：透水係数（ $\text{m/s}$ ）、 $i$ ：各接点における初期からの圧力差／節点間距離である。

図-4 は透水係数  $1 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-5}$  および  $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$  の砂質地盤に対して粘性係数の異なる各号薬液を注入圧 0.1MPa で注入した際、注入時間 1800 秒後に注入点から水平距離 2.5m までの浸透流量を示している。これらの結果より、いずれの透水性を有する砂質地盤であっても低粘性の薬液は高粘性のものと比較して浸透流量が大きくなる。すなわち、薬液を用いた飽和砂地盤中の浸透流解析の結果は、浸透水に薬液を用いた変水位透水試験で得られた結果（図-2 参照）と同様の傾向が示された。なお、例えば 1 号薬液に着目した場合、透水係数  $1 \times 10^{-4} \text{m/s}$  の砂質地盤（図-4(a)参照）は 2.0L/min 以上の浸透流量であるが、透水係数  $1 \times 10^{-5}$  および  $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$  の砂質地盤（図-4(b)および図-4(c)参照）では各々 0.1 および 0.01L/min 程度の浸透流量となり、対象地盤の透水性は薬液の浸透流量に影響を及ぼすことになる。よって、対象地盤の性質や改良範囲・目的等に応じて適切な粘度を有した薬液の選択が必要である。

#### 4. おわりに

本研究では、飽和砂に対して諸物性の異なる薬液の変水位透水試験を実施することで飽和砂中での薬液の浸透性を把握したとともに、浸透流解析によって薬液の諸物性の相違が砂質地盤内の薬液浸透挙動に及ぼす影響を評価した。その結果、砂質地盤中での薬液の浸透は薬液の粘性係数に大きく支配されることが明らかになった。そのため、薬液注入工法の適用においては、対象地盤の性質や改良範囲・目的等に応じて適切な粘度を有した薬液の選択が必要である。

【参考文献】

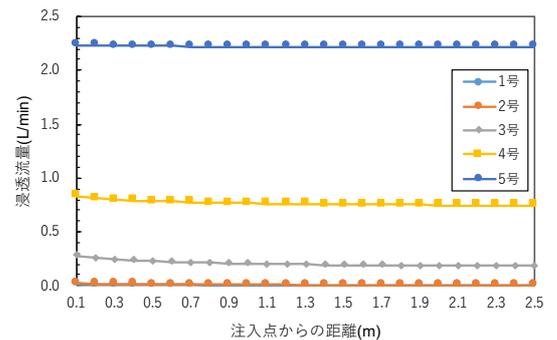
- 1) 社団法人日本グラウト協会：新訂正しい薬液注入工法，日刊建設工業新聞社，2011。
- 2) 福井ら：薬液の限界注入速度決定の問題点とその改善に関する研究，土木学会論文集，No.658/VI-48，81-92，2009。

表-1 浸透流解析で設定したパラメータ

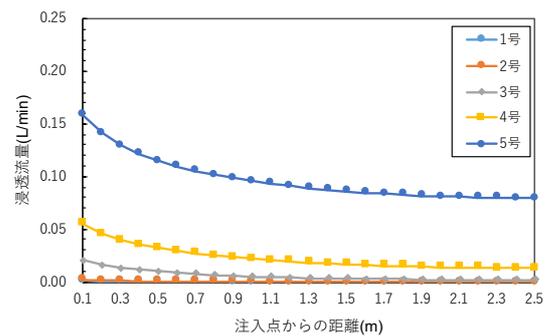
水ガラス系薬液の注入圧 (MPa)	0.1
	1.650 (1号)
	1.130 (2号)
水ガラス系薬液の粘性係数 (Pa·s)	0.125 (3号)
	0.050 (4号)
	0.020 (5号)

表-2 砂質地盤としてのパラメータ

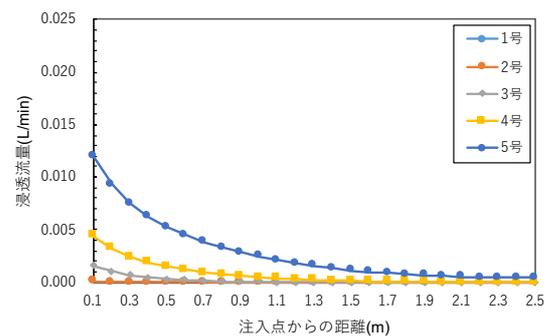
飽和単位体積重量 ( $\text{kN/m}^3$ )	20
初期間隙比	0.4
有効間隙率 (%)	30
	$1 \times 10^{-4}$
飽和透水係数 (m/s)	$1 \times 10^{-5}$
	$1 \times 10^{-6}$
比貯留係数 (1/m)	$1 \times 10^{-4}$



(a) 砂質地盤の透水係数： $1 \times 10^{-4} \text{m/s}$



(b) 砂質地盤の透水係数： $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$



(c) 砂質地盤の透水係数： $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$

図-4 砂質地盤における薬液の浸透流量