

水ガラス系および水ガラス・粘土混合系溶液注入地盤の 動水勾配の変化に対する透水性評価

Evaluation of Water Glass and Clay Mixture-injected Ground Permeability
Based on Changes in Hydraulic Gradient

高橋啓介	Keisuke TAKAHASHI	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
小松 満	Mitsuru KOMATSU	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
岩田 徹	Toru IWATA	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
岩本昭仁	Akihito IWAMOTO	((株)カテックス)
北川貴士	Takashi KITAGAWA	(第一工業製薬(株))
瀧本弘治	Koji TAKIMOTO	(山陽クレー工業(株))
柴原 晃	Akira SHIBAHARA	((株)フソウ中国支社)

地盤の止水対策には主に溶液型の薬液が使用されており、地盤や地下水の状況によっては対策工事費が膨大になるだけでなく、環境への負荷が大きな課題となる。特に、トンネル切羽付近での湧水対策に適用する場合、注入した薬液がゲル化する前に移動することで、注入量に対する効果が不十分であることが考えられるが、動水勾配の違いによる注入効果を透水性の変化から明らかにした例はみられない。そこで本報では、砂地盤に溶液型薬液を注入する際の検討として、動水勾配が異なる条件下での注入後の透水性低下効果を評価する室内での基礎的な水平一次元浸透実験を実施した結果について報告する。

キーワード：止水対策，水ガラス，透水係数，動水勾配，流出 (IGC : D-04)

1. はじめに

都市域でのトンネル建設において、建設条件の制限によって NATM 工法が採用されるケースが増えている。しかし、高透水性の砂層が工事の妨げになったり¹⁾、陥没事故の要因²⁾となるケースも見受けられる。現在、地盤の透水性を低下させるために地盤の中に注入する材料(地盤注入材、あるいはグラウトと呼ばれる)は、主に水ガラス系や高分子系から構成される薬液系、セメント系や粘土系から構成される非薬液系に大別される³⁾。このうち、水ガラス系薬液は、浸透注入により砂質系地盤に適用する溶液型と粘性土地盤中に割裂注入して粘着力の増加を図る懸濁型の2種類に分類される³⁾。前者は間隙水をゲル状の物質で置換する方法で、液状化防止工法においても広く用いられている⁴⁾。しかし、地下水の条件によっては注入量の増加に伴って対策工事費が膨大になる場合がある。特に、トンネル工事における切羽付近での湧水対策では、注入した薬液がゲル化する前に地下水流とともに移動することで、注入量に対する効果が不十分であったり、湧水とともに流出するなど、環境への負荷が大きな課題となる。従来の研究では、砂地盤に水ガラス系の溶液型薬液(以下、水ガラス系溶液と称する)を浸透注入する際の効果に対して、主に改良土の強度の観点から検討がなされている^{5), 6)}。この中で、間隙水による希釈の有無や水との比重差による沈殿の影響につい

て考慮されているものの、動水勾配の違いによる注入効果を透水性の変化から明らかにした例はみられない。

そこで本報では、砂地盤に溶液型薬液を注入する際の検討として、トンネルの切羽での止水対策のような高い動水勾配が生じている通水状態での注入と掘削前の事前対策を対象としたきわめて低い動水勾配下を対象にした。具体的には、動水勾配が異なる条件下での注入後の透水性低下効果を評価する室内での基礎的な2種類の水平一次元浸透実験を実施した結果についてまとめる。さらに、水ガラス系溶液の使用量低下と従来の研究^{7), 8)}で透水性低下機能を確認したカオリン粘土系溶液の間隙内での移動を抑制させる目的で水ガラス系溶液および水ガラスとカオリン粘土を混合させた溶液(以下、水ガラス・粘土混合系溶液)の注入特性を評価したので併せて報告する。

2. 実験方法

2.1 通水状態での注入実験

2.1.1 実験装置

実験装置の概略図を図-1に示す。供試体は両端に試料の流出を防止するためのステンレスメッシュ(孔径109 μ m)および多孔板を設置した直径 ϕ 10cm×長さ50cmの亚克力製カラムに試料を水中落下法によって投入し、密度を高めるためにカラム周囲を打撃して作製した。供

試体は、上下それぞれ定水位タンクに内径 $\phi 15\text{mm}$ のホースで接続することで定水位の通水を行い、作用する水頭は流入側の蓋での水頭差を差圧計により、通水流量は供試体の流出側に設置した流量計によりそれぞれ測定した。注入管は外径 $\phi 1\text{cm}$ × 内径 $\phi 6\text{mm}$ × 長さ 5cm の先端が塞がった樹脂性の円筒で、 $\phi 3\text{mm}$ の孔を開口率 45% になるように全体に配置し、その周囲にステンレスメッシュ（孔径 $109\mu\text{m}$ ）を巻きつけたものであり、カラムの外側から外径 $\phi 6\text{mm}$ × 内径 $\phi 5\text{mm}$ のステンレスパイプを接続して供試体の中央位置に設置した。また、注入管に接続したステンレスパイプには背圧が作用できるビュレットを接続し、注入量はビュレット内における注入材の高さの変化から求めた。なお、通水には水道水を用い、流出側で測定した水温により温度補正を行った。

2.1.2 試料および注入材の物理特性

試料には岡山県産の川砂を用い、試料自体の目詰まりを防ぐために $106\mu\text{m}$ のメッシュで水洗いした残留分を使用した。土粒子密度は $\rho_s = 2.682\text{ g/cm}^3$ 、均等係数と曲率係数はそれぞれ $U_c = 2.75$ 、 $U_c' = 0.92$ である。粒径加積曲線を図-2に示す。注入に用いた水ガラス系溶液は、表-1に示す硬化剤を用いる2液タイプで、反応開始は混合後約18分、ゲルタイムは約20分である。また、実験条件は、トンネルの施工事例¹⁾を参考に、注入前の動水勾配が $i = 2.8$ 、2.1、1.5の3ケースに設定して実験を実施した。

2.1.3 実験方法

通水を開始してから流量と水頭差が安定した状態にあることを確認した後、水ガラス系溶液を圧力注入した。注入は、まず、攪拌装置でA液とB液を混合後、すぐにビュレットに入れ、背圧50kPaを作用させた状態でマグネチックスターラーで常時攪拌させながらゲル化開始直前に注入した。これは、溶液のゲル化開始までに常時攪拌を必要とする上、粘性が増加し始めると背圧を作用させて直ちに注入しなければならないためである。注入後、流出流量と水頭差を計測し、約1週間通水を継続した。なお、注入時にはpHの変化を流出側の定水位タンクの中で計測した。

2.2 未通水状態での注入実験・段階通水実験

2.2.1 実験装置

実験装置の概略図を図-3に示す。供試体の直径と注入管の長さがそれぞれ $\phi 5\text{cm}$ と 4cm 、下流側の定水位タンクが供試体に直結している以外は図-1に示した通水下での注入実験装置と同様である。なお、下流側の定水位タンクを供試体に直結させることで、水頭は差圧計を用いず、流入側の蓋に設置したマンノメーターおよび間隙水圧計により、通水流量は供試体の流入側に設置したデジタル流量計によりそれぞれ計測した。

2.2.2 試料および注入材の物理特性

供試体内部の注入溶液の移動を観察しやすいように、試料には川砂と粒径が類似しているガラスビーズ（粒子密度 $\rho_s = 2.561\text{ g/cm}^3$ 、 $D_{50} = 0.80\text{ mm}$ 、均等係数 $U_c = 1.78$ ）を

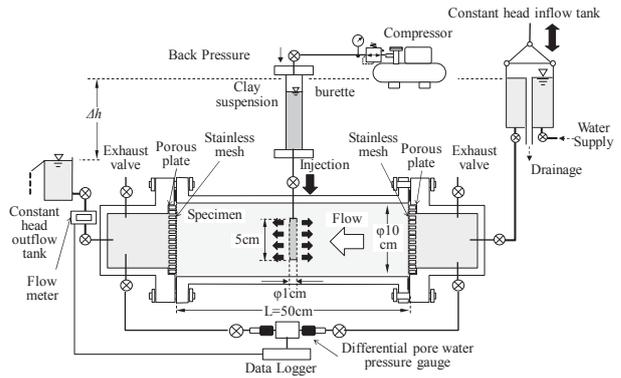


図-1 通水状態での注入実験装置概略図

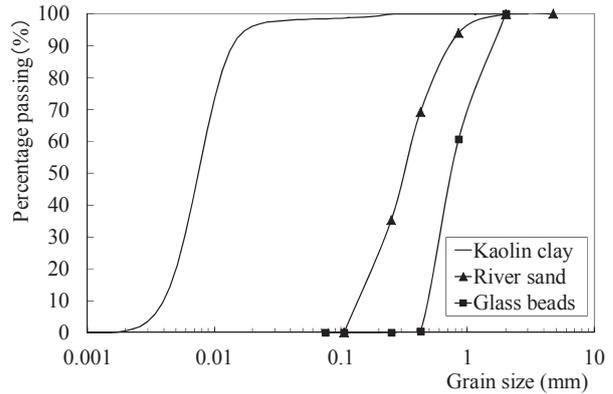


図-2 試料の粒径加積曲線

表-1 水ガラス系溶液の特性

項目	A液	B液
成分	特殊水ガラス	有機系特殊硬化剤
粘度(dPa·s/25°C)	0.18	0.1以下
比重(20°C)	1.32	1.01
混合比重	1.17	
pH	11.4	5.6
配合比	A:B=1:1	
硬化開始 (min)	18 (10°C)	
ゲルタイム (min)	20 (10°C)	

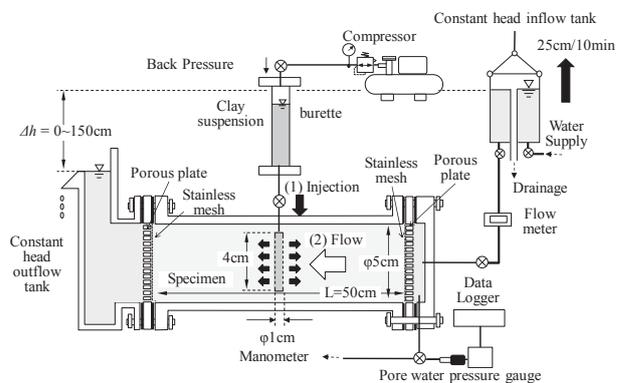


図-3 未通水状態での注入実験・段階通水実験概略図

用いた。ガラスビーズの粒径加積曲線を図-2に併せて示す。注入に用いた溶液は、通水時の注入実験と同じ水ガラス系溶液に加え、カオリン粘土系溶液の流亡抑制を検討するための水ガラス・粘土混合系溶液の2種類である。

水ガラス・粘土混合系溶液は、岡山県産のカオリン粘土（土粒子密度 $\rho_s=2.713 \text{ g/cm}^3$, $D_{50}=7.48 \text{ mm}$, 均等係数 $U_c=2.12$)を配合比 $c/w=0.52$ の溶液（密度 $\rho_c=1.385 \text{ g/cm}^3$, 粘度 $\mu=1.10 \text{ dPa}\cdot\text{s}$ ）に、水ガラスを質量比で5%混合した溶液（密度 $\rho_c=1.365 \text{ g/cm}^3$, 粘度 $\mu=0.25 \text{ dPa}\cdot\text{s}$ ）である。なお、カオリン粘土の粒径加積曲線を図-2に併せて示す。

ここで、水ガラス・粘土混合系溶液の沈殿挙動を調べた結果を図-4に示す。測定方法は、攪拌した溶液を円筒形容器に入れて静置し、一定時間経過後に容器内の溶液の上下同体積に含まれる粘土の質量を炉乾燥法により測定した上で、その質量比（上部質量/下部質量）で評価した。結果として、水ガラス・粘土混合系溶液は1時間後には質量比が小さくなっており、沈殿が進んでいることが判明した。これは、前述したように、カオリン粘土系溶液の粘度は $1.10 \text{ dPa}\cdot\text{s}$ であるが、水ガラス・粘土混合系溶液の粘度は $0.25 \text{ dPa}\cdot\text{s}$ と低いことが影響しているものと推察される。用いたカオリン粘土は原鉱を乾式分級した後、気流中でサイクロン分級して製造されており、その時点でのpHは6程度の弱酸性を示している。一方、湿式分級して分離させる粒子の細かい粘土は、原鉱に水を加えながら粉碎したスラリーに珪酸ソーダ（水ガラス）を加えて、酸性から $\text{pH}=8\sim 9$ 程度のアルカリ性にした上で、粗い粒子を沈殿除去した上で製造されている。つまり、カオリン粘土系溶液よりも水ガラス・粘土混合系溶液の方がpHが高いことで沈殿が促進され、結果的に粘度が低下することが判明した。

2.2.3 実験方法

定水位タンクの高さを下流端と同じ高さに設定して未通水状態とした上で、それぞれの溶液を供試体中央から上下流両端付近に達するまで加圧しながら注入した。その後、定水位タンクの高さを10分間隔で25cmずつ段階的に上昇させ、定水位タンクと流入側の水頭のマノメーターを目視により1分毎に測定するとともに、間隙水圧計で10秒毎のデータを連続的に記録した。さらに流入流量の変化をデジタル流量計で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 通水状態での注入実験結果（水ガラス系溶液）

動水勾配の異なる3ケースの実験結果として、図-5に 15°C に換算した透水係数の経時変化を示す。横軸の時間は注入時刻を基準にした経過時間で表示している。注入前に $i=2.8$ のケースがやや低い値を示しているが、供試体の密度の違い、あるいは乱流域への遷移が考えられる。そこで、図-6にこれら3ケースの注入前の動水勾配とダルシー流速との関係を示す。 $i=2.8$ のケースの値が線形関係を示す破線から下方に外れる傾向を示している。

ここで、図-7に $i=1.5$ のケースの供試体に対してあらかじめ動水勾配を変化させて測定した動水勾配とダルシー流速との関係を示す。動水勾配の増加に伴い、流速はや

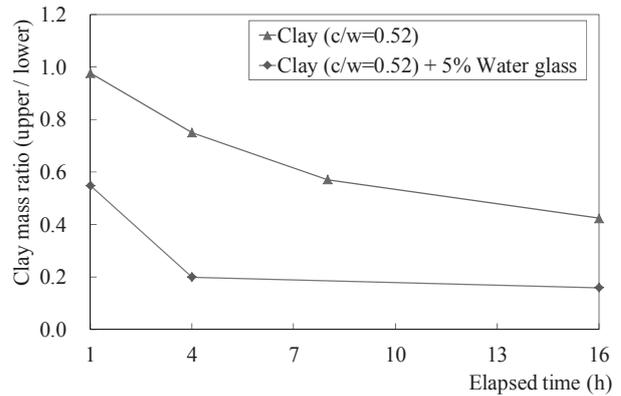


図-4 カオリン粘土系溶液および水ガラス・粘土混合系溶液の沈殿挙動

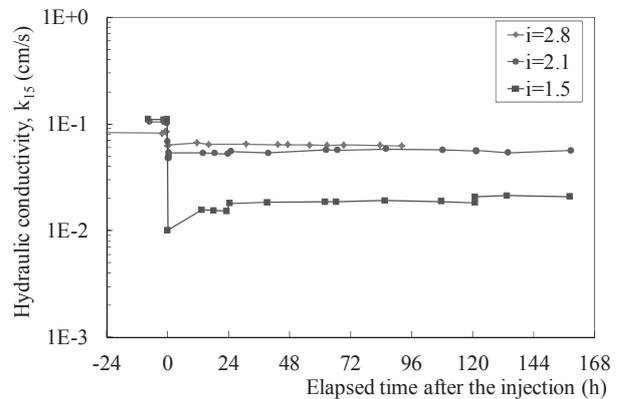


図-5 透水係数の経時変化

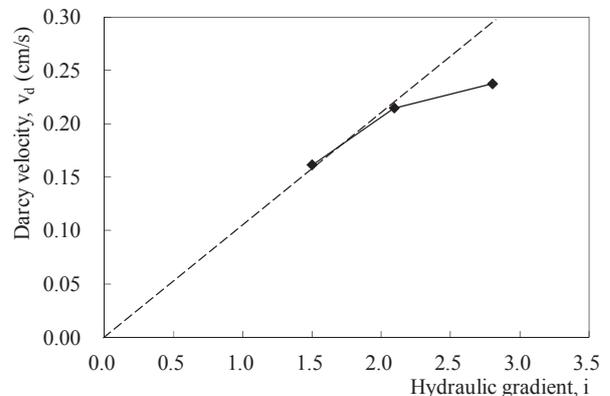


図-6 動水勾配とダルシー流速との関係（3 ケース）

や直線関係から外れるものの、 $i=2.8$ での低下もわずかであった。このことから、図-6における $i=2.8$ の値の乖離は、供試体の密度の違いが考えられるが、供試体解体後に注入した水ガラスと川砂の分離が出来なかったため、それぞれの供試体の乾燥密度の値は不明である。なお、別途、同様の水中落下法で作製した供試体に対して測定した乾燥密度は、 $\rho_d=1.694\sim 1.716 \text{ g/cm}^3$ の値を示し、供試体の乾燥密度の差異はわずかであった。結局、この要因は解明できなかったことから、 $i=2.8$ の供試体のみ注入前から透水性が他よりも若干小さいことを考慮した上で以下の結果を評価することとした。

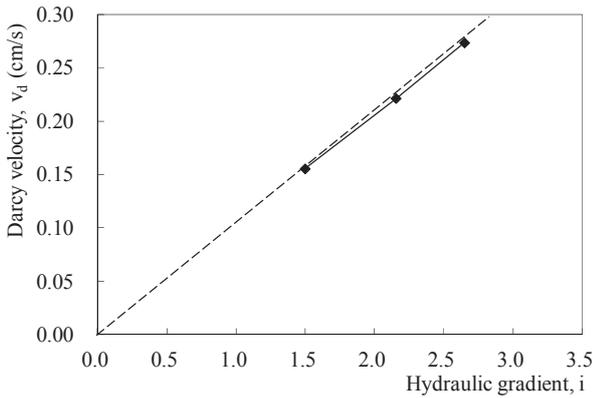


図-7 動水勾配とダルシー流速との関係 ($i=1.5$ の試験に用いた供試体の測定結果)

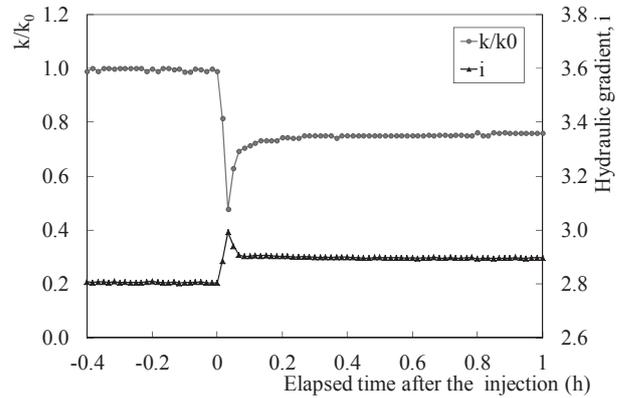


図-9 注入前後の透水係数比および動水勾配の経時変化 ($i=2.8$)

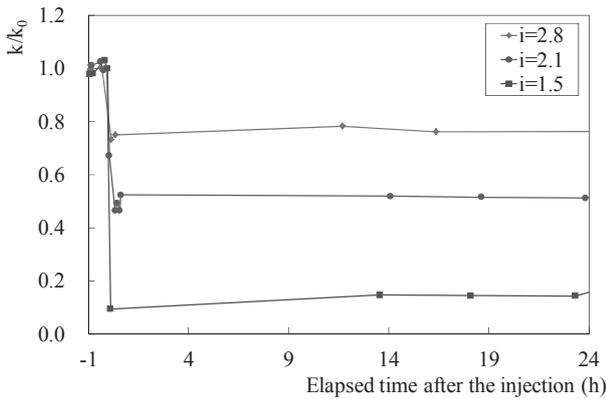


図-8 注入前後の透水係数比の経時変化

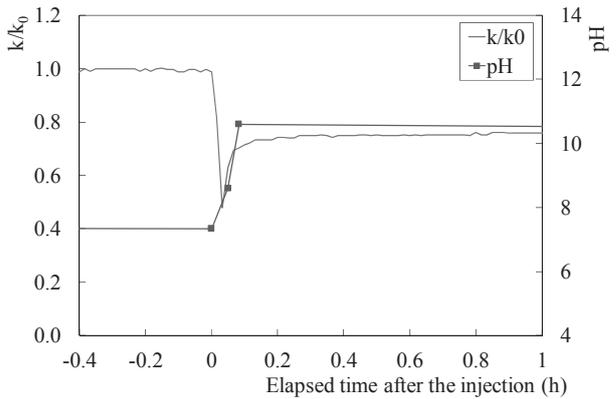


図-10 注入前後の透水係数比と pH の経時変化 ($i=2.8$)

図-5 の結果を基に注入前後の透水係数比 (k/k_0) の経時変化に整理した結果を図-8 に示す. 透水係数の低下割合は, $i=1.5$ では約 9 割, $i=2.1$ では約 5 割, $i=2.8$ では約 2 割程度となった. ここで, $i=2.8$ における注入時刻前後を拡大した結果を図-9 に示す. 注入直後に約 5 割程度まで低下したものの, その後すぐに上昇していることが分かる. また, 透水性の低下に併せて動水勾配が上昇する挙動を示した. この結果から, 注入した水ガラス系溶液が供試体を通過して流出したことが推察される. このことは図-10 に示す流出側の定水位タンク内で計測した pH の上昇からも確認された. 溶液はゲル化するまでに粘性が時間とともに増加するため, 注入は粘性が増加し始めるとすぐに行う必要がある. しかし, 動水勾配が高い場合には, 注入開始からゲル化までの約 2 分の間に水ガラス系溶液が流速の影響により広がらず, 下流に移動・流出する可能性が示唆された.

また, 図-11 および図-12 に注入前の動水勾配およびダルシー流速と注入前後の透水係数比との関係をそれぞれ示す. 動水勾配が高い程, 透水係数の低下がわずかである結果を示し, ダルシー流速との関係ではほぼ線形となった. 供試体の間隙率が約 37%であることを考慮すると, $i=2.8$ のケースでは約 40 秒で供試体中央の注入位置から, 下流方向に供試体の半分の距離を移動することとなり, 注入後, 砂層内でゲル化する前に流出した可能性があることが確認できた.

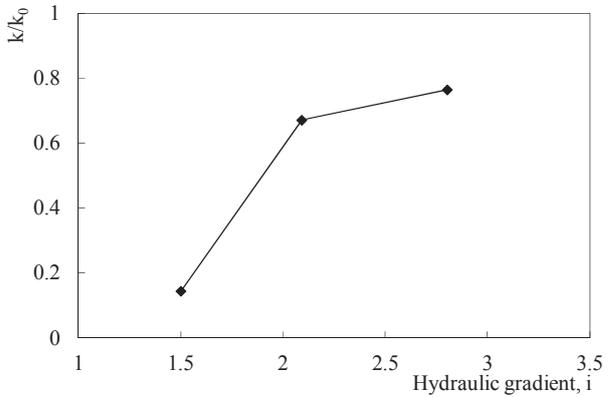


図-11 注入前の動水勾配と注入前後の透水係数比の関係

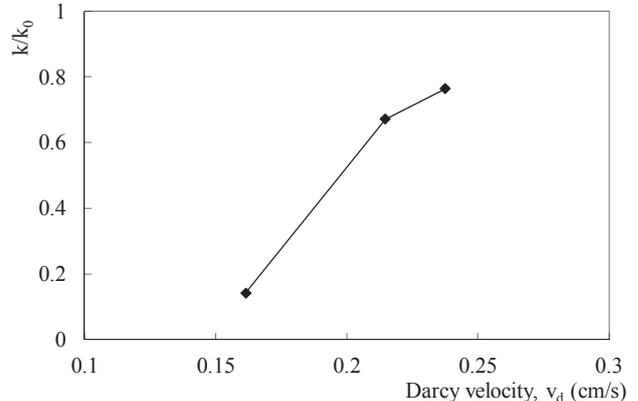


図-12 注入前のダルシー流速と注入前後の透水係数比の関係

ただし、これらの結果は、各ケースにおいて1回の実験によるものであることから、より相対的な評価を行うためには、様々な動水勾配による結果を追加するとともに、結果の再現性を確認する必要がある。

3.2 未通水状態での注入実験・段階通水実験結果

3.2.1 水ガラス系溶液

ガラスビーズの供試体に水ガラス系溶液を注入し、ゲル化が完了するまで1時間程度養生した。その後、段階的に水頭を増加させて通水実験を実施した結果として、**図-13**に水頭と流量の経時変化を示す。上流側の水頭は、流入側の定水位タンクと同程度の値で推移し、 $h=146.2\text{cm}$ ($i=2.91$) まで上昇したものの、流量計の計測値は下限値 ($Q=0.05\text{L/min}$) を越えることはなく、0の表示となった。注入前のガラスビーズの透水係数 (15°C 換算) は $k_{15}=3.30\times 10^{-1}\text{cm/s}$ であり、仮に $i=2.91$ で $Q=0.05\text{L/min}$ とすると、 $k_{15}=1.65\times 10^{-2}\text{cm/s}$ となり、注入前の透水係数の5%未満で保持されていることとなる。したがって、通水状態での注入実験と異なり、一度ゲル化が完了すると高い動水勾配下でも移動せず、初期の止水性を保持していることを確認した。

3.2.2 水ガラス・粘土混合系溶液

次に、ガラスビーズの供試体に水ガラス・粘土混合系溶液を注入し、水ガラス系溶液と同様に1時間程度養生した。その後段階的に水頭を増加させて通水実験を実施した結果について、別途実施したカオリン粘土系溶液に対する結果と比較する形でまとめる。なお、両結果を比較する上で通水温度に違いがある(カオリン粘土系溶液: 30.4°C , 水ガラス・粘土混合系溶液: 10.4°C) ことから、水頭と流量の経時変化はそれぞれの挙動に対する比較のみとし、絶対値の評価は 15°C に換算した透水係数で行うことに留意する必要がある。

まず、**図-14**と**図-15**に水頭と流量の経時変化を示す。水頭の増加とともに流入側の定水位タンクとの差が大きくなっており、供試体の透水性の上昇に伴って、供試体流入前のホースや流量計での水頭損失が大きくなっている様子を示している。また、カオリン粘土系溶液では、40分経過後に一度上昇した水頭が大きく低下する現象を示すとともに、流量の急激な増加が認められたことから、この時点で供試体内の粘土の多くが移動したことが推察される。一方、水ガラス・粘土混合系溶液にはこの現象は見られなかった。

これらの結果に基づいて算定した透水係数と動水勾配の経時変化を**図-16**に示す。初期の動水勾配 $i=0.5$ では同様に透水係数が増加しているが、次の段階である $i=1.0$ では水ガラス・粘土混合系溶液は継続して透水係数が増加している。一方、カオリン粘土系溶液は一定の透水係数を維持しているものの、40分後の動水勾配 $i=1.75$ に上昇した段階で透水係数が増加し、水ガラス・粘土混合系溶液と同程度となっていることを示している。

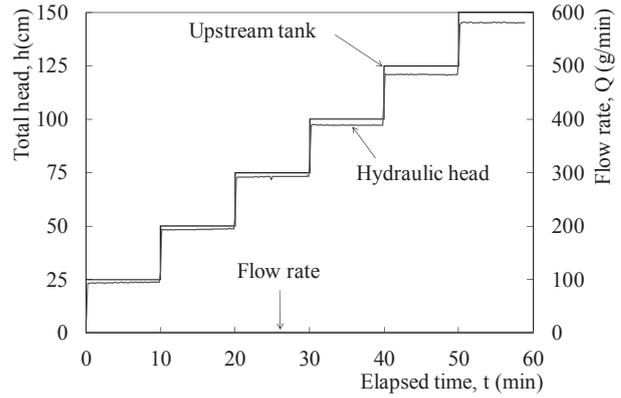


図-13 水頭と流量の経時変化

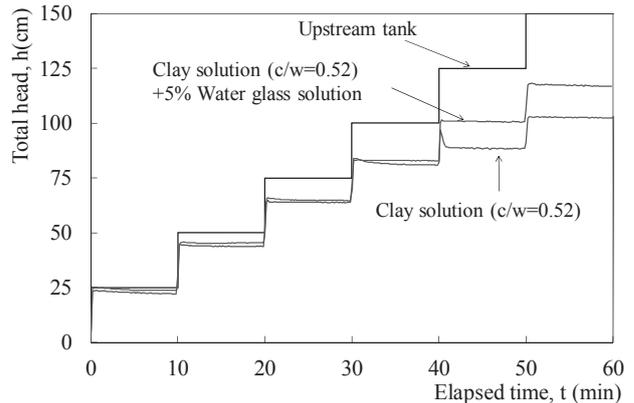


図-14 水頭の経時変化

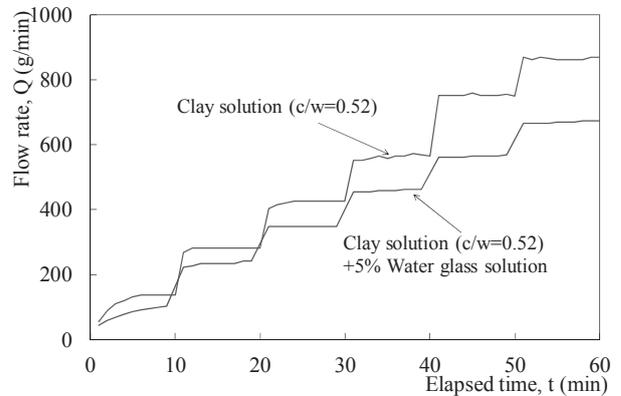


図-15 流量の経時変化

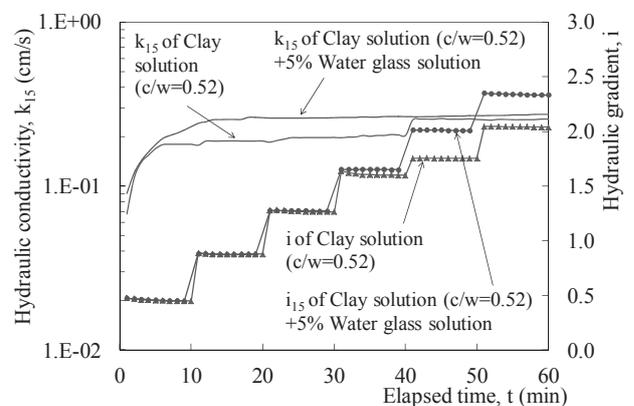


図-16 透水係数と動水勾配の経時変化

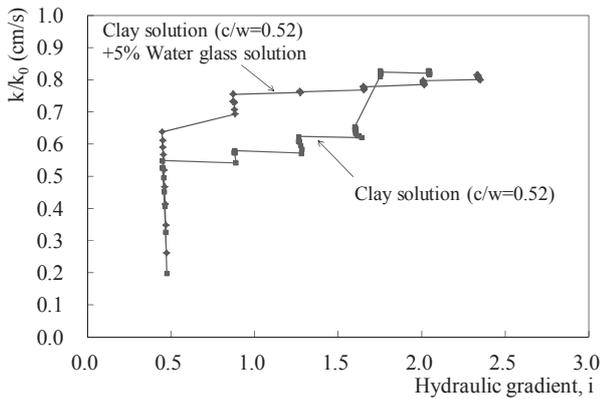


図-17 動水勾配と注入前後の透水係数比の関係

最後に、図-17に動水勾配と注入前後の透水係数比の関係（いずれも15℃換算）を示す。水ガラス・粘土混合系溶液は注入後の初期段階では8割程度の低下率を示していたが、最終的には2割程度の低下率に留まっていることが分かる。また、カオリン粘土系溶液は、動水勾配1.0～1.5では4割程度の低下率で維持する傾向を示している。これらの要因としては、水ガラス・粘土混合系溶液の粘性がカオリン粘土系溶液よりも低いことが挙げられる。つまり、カオリン粘土系溶液に5%の水ガラス系溶液を足しても透水性低下機能は発揮されず、逆に粘性が低下したり、図-4に示したように沈殿が促進されることで機能を損なうことが示唆された。なお、ここでは1種類（5%）の配合割合のみを検討した結果であることから、さらに水ガラス系溶液を添加することで異なる特性を示すことも考えられる。

4. まとめ

本研究では砂地盤に溶液型薬液を注入する際の検討として、水ガラス系溶液を対象に動水勾配が異なる通水状態での注入後の止水効果を評価する室内での基礎的な水平一次元浸透実験を実施した。また、水ガラス・粘土混合系溶液を含めた2種類の溶液について、未通水状態で注入した後に段階的に動水勾配を増加させた場合の止水効果の変化を調べる水平一次元浸透実験を実施した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 注入した水ガラス系溶液が流速の影響により広がらず、下流に移動あるいは流出する可能性があることが示唆された。つまり、高い動水勾配下では十分な止水効果が見込まれない可能性がある。
- (2) カオリン粘土系溶液に水ガラス系の溶液を混合すると粘度が低下し、沈殿が促進されることが判明した。つまり、止水効果の向上は認められず、逆に粘性が低下することで効果を損なうことが示唆された。
- (3) 注入した水ガラス系溶液が流出せずゲル化が完了すると、高い動水勾配での通水状態でも移動せず、初期の止水性を保持することを確認した。

今後の課題としては、異なる透水性の供試体に対するデータを蓄積する必要がある。また、カオリン粘土系溶液への水ガラス系溶液の添加割合を変化させることで特性の違いを確認すること、逆に増粘剤を添加することが止水性を維持できる機能を発揮することにつながるかなど、効果的な注入方法を検討することが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は一般財団法人フソウ技術開発振興基金の助成を受けて実施された研究成果に基づくものである。また、室内実験の実施にあたっては、児島直氏（令和2年3月岡山大学卒業、現神戸市）に多大な尽力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高橋啓介, 光増朝久, 吉本治憲, 大金隆宏, 小松満: 都市域山岳 NATM 施工における軟弱地山に対する補助工法の採用事例, 地盤と建設, Vol.36, No.1, pp.153-160, 2018.
- 2) 三谷泰博: 福岡市営地下鉄七隈線博多駅陥没事故とその復旧工事, 地盤工学会誌 Vol.67, No.8, pp.4-7, 2019.
- 3) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会編: 最新地盤注入工法技術総覧, 産業技術サービスセンター, pp.79-95, 1997.
- 4) 池野勝哉, 吉田誠, 安楽宗一郎, 風間基樹, 渦岡良介, 仙頭紀明: 溶液型薬液注入工法を用いた盛土直下の液状化対策効果とその数値解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1, pp.622-628, 2009.
- 5) 加賀宗彦: 水ガラス系薬液注入固結砂の強度の耐久性と浸透水圧の影響, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.70, No.1, pp.1-15, 2014.
- 6) 林健太郎, 山崎浩之, 善功企: 溶液型薬液注入工法の施工管理方法に起因する改良土の強度低下のメカニズム, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.70, No.4, pp.387-394, 2014.
- 7) Komatsu, M., Takahashi, K., and Takimoto, K.: Pressurized clay injection method using kaolinite for controlling groundwater of a saturated sand layer, 7th International Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 615, 8p., 2019.
- 8) 高橋啓介, 小松満, 瀧本弘治: カオリクレー注入地盤の動水勾配の変化に対する透水性評価, 地盤と建設, Vol.37, No.1, pp.145-150, 2019.

(2020年6月15日 受付)