

カオリンクレ－懸濁液の注入特性と移動特性に与える要因の検討

Investigation of Factors Affecting Injection and Migration Characteristics of Kaolin Clay Suspension

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)
瀧本弘治	Koji TAKIMOTO	(山陽クレ－工業 (株))
柴原 晃	Akira SHIBAHARA	((株) フソウ中国支社)

著者らは、トンネル工事などで問題となる高透水性の砂層に対する止水工法に着目し、新たな粘土系注入材による透水性低減工法の開発を目指している。これまでに、注入材として岡山県内で産出されるカオリンクレ－を用い、その懸濁液を圧入した供試体に対する一次元浸透実験から、透水係数低減効果がカオリンクレ－の種類毎に異なることを明らかにするとともに、この現象に懸濁液の粘度等の要因が関わっている可能性等について指摘した。本報では、配合比の異なる懸濁液と減粘剤を添加した懸濁液を用いることにより、カオリンクレ－の間隙内移動特性に与える要因を検討した結果について報告する。

キーワード：粘土系注入材，懸濁液，透水係数，動水勾配，粘度，
一次元浸透実験 (IGC : D-04)

1. はじめに

近年のトンネル工事において、多様な補助工法の開発や特殊機械の進歩、複雑な断面の変化への対応など、未固結地盤を主とする地質でも NATM 工法¹⁾を採用するケースが増えている。しかし、未固結地盤の中でも高透水性の砂層の出現が工事の進捗の妨げになるケースも少なくない。そのような場合、補助工法の採用による対策工事費の追加が必要となる。さらに、採用する工法によっては地下水環境保全の観点から、湧水処理における水質汚濁への配慮が課題となる²⁾。ここで、トンネルでの湧水対策は、地下水を低下させる排水工法と地盤の透水性を低下させる止水工法に大別される。止水工法に着目すると、用いられる地盤注入材は、主に水ガラスやウレタンを使用する薬液系とセメントや粘土を使用する非薬液系に分類される³⁾。薬液系に対する既往の研究では、水ガラス系薬液を注入固結した砂の強度の長期耐久性や浸透水圧の影響を評価した事例⁴⁾や、活性シリカを主体とした薬液注入工法で固化した改良体の耐久性を評価した事例⁵⁾などがみられる。特に、水ガラス系注入材においては、間隙内でゲル化することで効果を発揮するため、浸透注入時に地下水の流速が高い条件では、注入された溶液がゲル化する前に流亡する場合があります。工費や環境負荷の観点から採用が困難となる場合がある。

非薬液系に対する既往の研究では、山岳トンネル掘削に伴う高濃度のヒ素を含む時間当たり約 300 トンの湧水をセメント注入により時間当たり 40 トンに低減させた事例が報告されている⁶⁾。また、これらのセメント系の注入においては、これまで主に岩盤の亀裂が対象とされてき

たが、超微粒子セメントの開発等により浸透性が優れてきており、砂層や狭小割れ目の岩盤への注入についての研究が行われている⁷⁾。ここで、セメント系は粒子の固結により注入途中での目詰まりを生じる可能性や、pH が高いことから、地下水への環境対策が必要になる場合があるので注意を要する。一方、粘土系注入材は、地下水の浸透流を利用して粘土を空間周辺の広い範囲の岩盤の亀裂に流し込み、湧水量を低減させる工法であり、セメント系に比べて注入到達距離が長い等の効果を得た事例が報告されている⁸⁾。粘土系注入材は、注入後に固結しないことから、注入の方法によっては地下水流により全て流亡してしまう可能性も考えられる。

以上の現状を鑑み、本研究ではこれらの課題に対して、トンネル掘削に先行して高透水性の砂層の透水性を低下させる新たな注入材の開発を目的とし、岡山県産のカオリンクレ－（以下、クレ－）を材料としたカオリンクレ－懸濁液（以下、懸濁液）を圧力注入する方法に着目した。なお、粘土系注入材は、薬剤などを添加しない場合、注入後に固結することがないことから、地下水流によって流亡する可能性がある。これまでに著者らは、ガラスビーズを用いた水平一次元浸透実験を実施し、段階的に動水勾配を変化させた際の透水性の変化と注入した懸濁液の流亡状況を評価した⁹⁾。その結果、透水係数低減効果がクレ－の種類毎に異なること、また、これには懸濁液の粘度等の要因が関わっていることを確認した。本報では、これまでの知見をベースに、配合比の異なるクレ－および減粘剤を添加した懸濁液に対する実験を追加することで、懸濁液の間隙内移動特性に与える目詰まりや粘度等の要因を検討した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略図を**図-1**、実験状況を**写真-1**に示す⁹⁾。供試体は、両端に試料であるガラスビーズの流出を防止するためのステンレスメッシュ（孔径 109 μm ）および多孔板を設置した直径 $\phi 5\text{cm}$ ×長さ 50cm のアクリル製カラムに、ガラスビーズを水中落下法によって投入し周囲を打撃により締め固めることにより密度を高めた。動水勾配を変化させるために、上流側には定水位タンクを接続し、電動ウインチと連動しているワイヤーにより吊して巻き上げることで、高さを微調整できる構造とした。また、供試体に作用する水頭は流入側でマン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（最小検出流量 0.003L/min）によりそれぞれ計測した。注入する懸濁液は、供試体であるカラムの中央位置の上側側面に設置し、背圧が作用できるビュレットを接続した。コンプレッサーによる圧力注入によりアクリル製カラム内に充填させた。ここで、懸濁液の注入量はビュレット内の注入前後の水位変化から求めた。なお、通水には水道水を用いた。

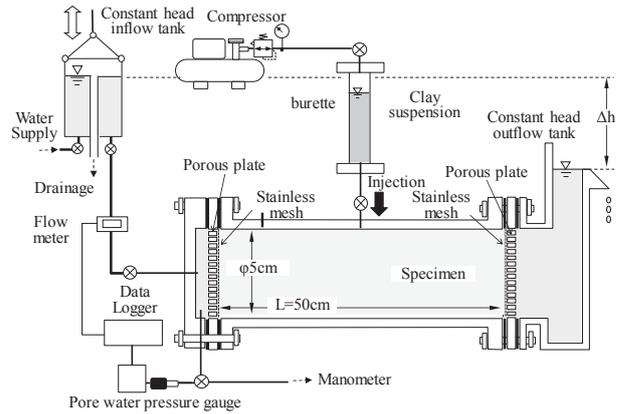


図-1 実験装置概略図⁹⁾

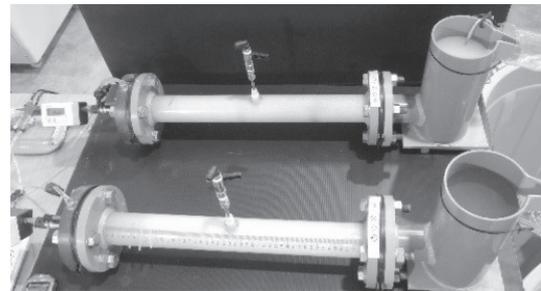


写真-1 実験状況

2.2 試料の物理特性

止水材として注入するクレーは市販されている岡山県産の3種類（c3, c5, c7と称す）をそれぞれ用いた。クレーの種類毎の物理特性を**表-1**に示す。土粒子密度はc3, c5, c7の順に小さくなっている。また、クレーの粒径加積曲線を**図-2**に示す。50%粒径 (D_{50}) は、c7が最も大きく約7 μm であり、c3とc5はほぼ等しく約5 μm 程度である。c3, c5は共にスラリー中の固形分を回転により分級する湿式分級であるが、c5のみ最終的に炭酸カルシウムにより中性化する違いがある。さらに、クレーは水と混合すると種類毎の粘度特性に違いがある。クレーの種類別の懸濁液質量配合比 (c/w, c:クレー質量とw:水質量の比を表す) と粘度の関係を**図-3**に示す。供試体の試料は、ケース毎に粒径の異なるガラスビーズの#20および#80を使い分けた。これらの物理特性を**表-2**、粒径加積曲線を**図-4**にそれぞれ示す。なお、減粘剤は市販の粉体タイプ（ナフタリンスルホン酸ナトリウムホルマリン縮合物）を使用した。

表-1 クレーの物理特性

種類	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	50%粒径 D_{50} (μm)	均等係数 U_c
c3	2.748	4.928	1.942
c5	2.736	5.027	1.896
c7	2.713	7.482	2.117

表-2 ガラスビーズの物理特性

種類	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	50%粒径 D_{50} (μm)	15%粒径 D_{15} (μm)	均等係数 U_c
GB#20	2.561	550	500	1.27
GB#80	2.561	76	66	1.21

2.3 実験ケース

実験ケースは、別途実施した一次元浸透実験結果により最も透水性の低減効果が認められた配合比とした¹⁰⁾。クレーの種類毎の配合比と透水係数低減効果の関係を**図-5**に示す。実験ケースは粘度を固定したケース1、配合比を固定したケース2、さらに減粘剤により粘度を調整したケース3とした。なお、ケース1及びケース2はGB#80、ケース3はGB#20の試料で供試体を作製した。それぞれのケース毎のクレーの種類と配合比を**表-3**~**表-5**に示す。

2.4 実験方法

流入側に接続した定水位タンクの高さを下流端から25cmの高さに設定した上で通水を開始し、流量が一定値となった時点で、供試体両端の水頭差と流量を測定して注入前の透水係数を算定した。次に、定水位タンクの高さを下流端と同じ高さに設定した上で、懸濁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、目視により充填の確認を行うとともに注入開始から停止までの時間を記録した。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、定水位タンクの上昇1分前と1分後の流入側の水頭のマンメーターを目視により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、さらに流入流量の変化をデジタル流量計により測定を実施した。

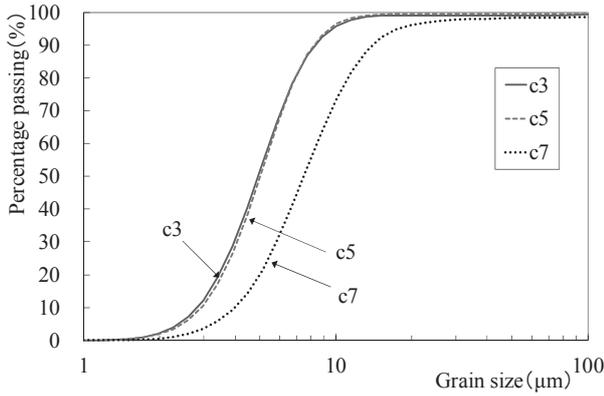


図-2 試料の粒径加積曲線

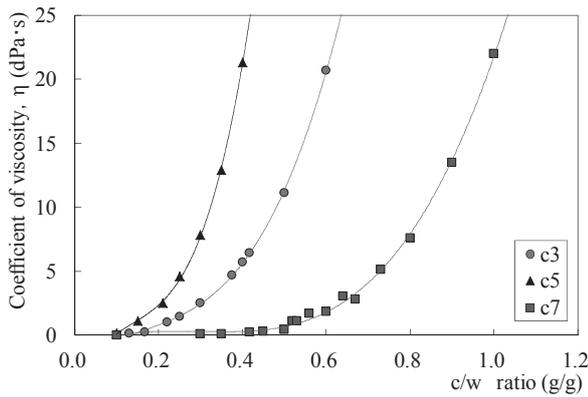


図-3 懸濁液と粘度の関係

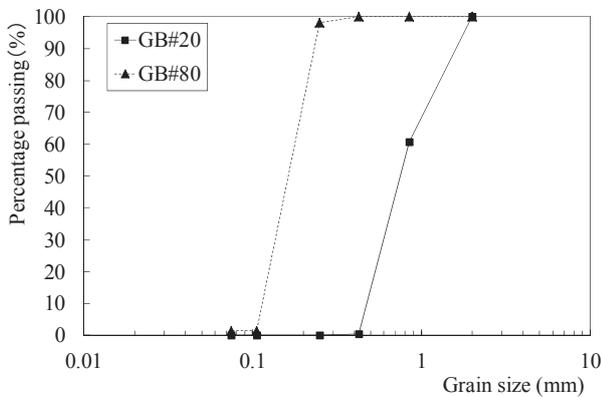


図-4 ガラスビーズの粒径加積曲線

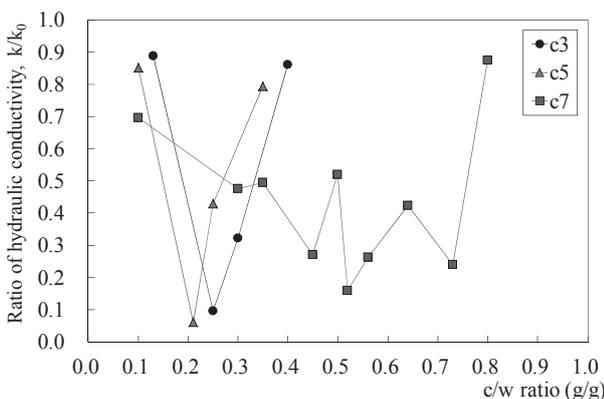


図-5 配合比と透水係数低減率の関係¹⁰⁾

表-3 実験ケース1：粘度固定 (GB#80)

クレー種類	懸濁液質量配合比 c/w	懸濁液密度 ρ (g/cm ³)	粘度 η (dPa・s)
c3	0.30	1.145	2.52
c5	0.21	1.115	2.51

表-4 実験ケース2：配合比固定 (GB#80)

クレー種類	懸濁液質量配合比 c/w	懸濁液密度 ρ (g/cm ³)	粘度 η (dPa・s)
c3	0.21	1.185	0.94
c5	0.21	1.188	2.51

表-5 実験ケース3：減粘剤配合 (GB#20)

クレー種類	懸濁液質量配合比 c/w	懸濁液密度 ρ (g/cm ³)	粘度 η (dPa・s)	
			減粘剤配合前	減粘剤配合後
c5	0.25	1.201	4.60	3.00
c7	0.73	1.443	5.11	1.43

3. 実験結果

3.1 ケース1 (粘度固定)

懸濁液は c3, c5 とも上下流両端付近に達するまで注入した。その後、定水位タンクを段階的に上昇させた際の水頭と流量の経時変化を図-6 に示す。c3 は定水位タンクの設定高さが $h=25\text{cm}$ 程度では目視でも通水は確認されず、 $h=50\text{cm}$ において流量計の最小検出量未満の微量の通水を目視で確認し、水頭差は設定値とほぼ等しい結果となった。 $h=75\text{cm}$ では少ないものの、一定の流量を流量計で検出し、水頭差は設定値とほぼ等しい結果となった。 $h=100\text{cm}$ では定水位タンクの上昇後、流量は少し増加傾向を示したが、水頭差の大きな変化は確認できなかった。 $h=125\text{cm}$ では定水位タンクの上昇後、流量は少し増加傾向を示したものの大きな変化ではなく、水頭差も設定値との大きな差は確認できなかった。最大の設定水頭である $h=150\text{cm}$ において流量は少しの増加にとどまり、最終的に約 24g/min 程度となった。水頭差は定水位タンクの上昇後に水頭差が低くなる傾向を示したが、直ぐに設定値に回復することが確認された結果となった。

c5 は c3 とほぼ同じ傾向を示し、最終的な流量は 24g/min となった。一方、水頭差は設定値よりも少し低い傾向を示し、特に $h=100\text{cm}$ においてその傾向は顕著となった。

3.2 ケース2 (配合比固定)

懸濁液は c3, c5 とも上下流両端付近に達するまで注入した。その後、定水位タンクを段階的に上昇させた際の水頭差と流量の経時変化を図-7 に示す。c3 は定水位タンクの設定高さが $h=25\text{cm}$ 程度では目視でも通水は確認さ

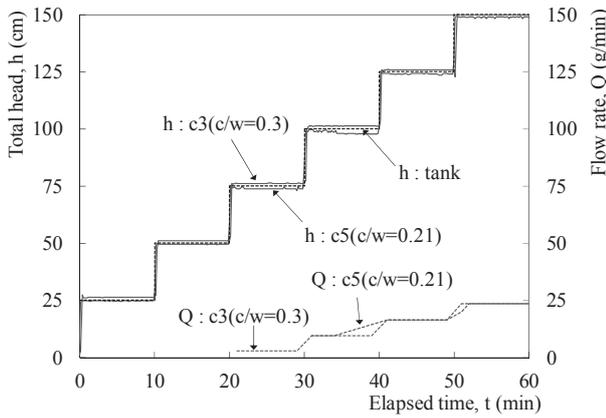


図-6 水頭差と流量の経時変化 (ケース 1)

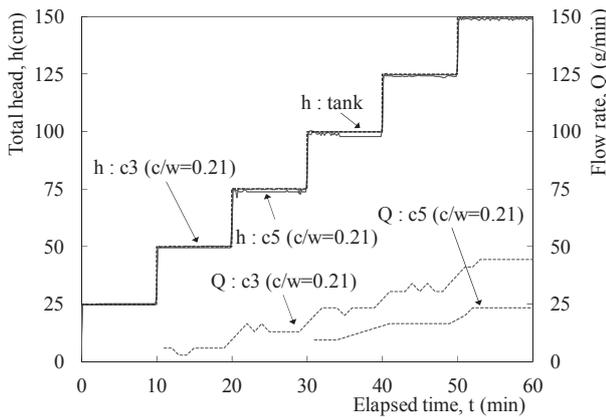


図-7 水頭差と流量の経時変化 (ケース 2)

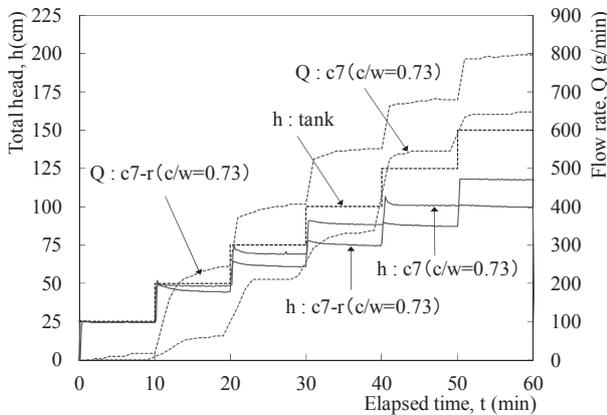


図-8 水頭差と流量の経時変化 (ケース 3 : c7)

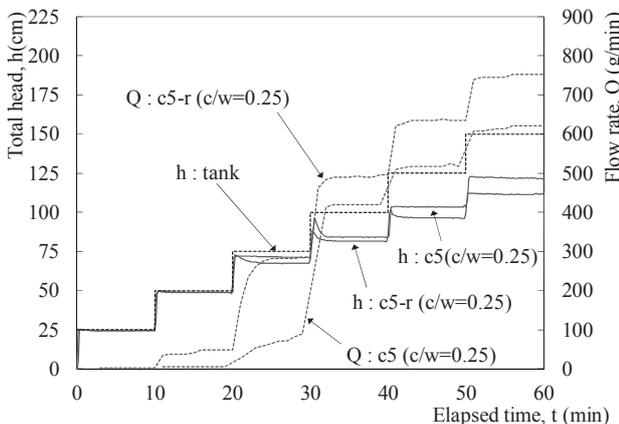


図-9 水頭差と流量の経時変化 (ケース 3 : c5)

れず、 $h=50\text{cm}$ においてわずかな流量が検出されたものの、水頭差は設定値とほぼ等しい結果となった。 $h=75\text{cm}$ では定水位タンクの上昇後に流量が増加し、水頭差は定水位タンクの上昇後に、設定値から下回ったが直ぐに回復した。 $h=100\text{cm}$ では定水位タンクの上昇後に流量は少し増加傾向を示したが、水頭差は設定値と同じ傾向を示した。 $h=125\text{cm}$ においても定水位タンクの上昇後に流量は少し増加傾向を示したが、大きな変化は確認できず、水頭差も設定値と同じ傾向を示した。最大の設定水頭である $h=150\text{cm}$ においても流量はわずかな増加にとどまり、最終的には約 45g/min 程度、水頭差は定水位タンクとほぼ同じ値であった。

$c5$ は $h=50\text{cm}$ まで目視でも通水は確認されず、水頭差も設定値と同じ傾向を示した。 $h=75\text{cm}$ でも流量計の最小検出量未満の微量の通水を目視で確認した。 $h=100\text{cm}$ では流量計での流量を検出し、水頭差は設定値より少し低い値を示した。 $h=125\text{cm}$ では流量および水頭差の変動は確認されなかった。最大の設定水頭である $h=150\text{cm}$ においても流量は少し増加し、最終的に流量は約 24g/min 程度、 $c3$ の流量の約 54% 程度となった。水頭差は若干の変動を示したが、定水位タンクとほぼ同じ傾向が確認された。

3.3 ケース 3 (減粘剤配合)

減粘剤配合の $c7$ 懸濁液 ($c7\text{-r}$ と称す) と減粘剤未配合の $c7$ 懸濁液 ($c7$ と称す) の注入において、 $c7\text{-r}$ は上下流両端付近に達するまで注入したものの、 $c7$ は途中で停止した。その後、定水位タンクを段階的に上昇させた際の水頭差と流量の経時変化を図-8 に示す。 $c7\text{-r}$ は、設定値が $h=25\text{cm}$ の時に流量を流量計で検出したものの、水頭差については設定値と大きな相違は確認できなかった。この時、 $c7$ の通水は目視においても確認できなかった。 $h=50\text{cm}$ で $c7\text{-r}$ は大きく流量が増加したものの、 $c7$ の流量は少なかった。その後、 $c7\text{-r}$ は水頭差の上昇に伴って流量が増加し、最終的に約 800g/min 程度となった。一方、 $c7$ は水頭差の上昇に伴って流量は増加するものの、最終的な値は約 650g/min であり、減粘剤を配合した場合と比べ約 80% 程度となった。水頭差は、設定値に比べ明らかに低くなることを確認した。

次に、減粘剤配合の $c5$ 懸濁液 ($c5\text{-r}$ と称す) と未配合の $c5$ 懸濁液 ($c5$ と称す) の水頭差と流量の経時変化を図-9 に示す。 $c5\text{-r}$ は設定値が $h=25\text{cm}$ では微量の通水を目視で確認したものの、その段階での変化は認められなかった。 $h=50\text{cm}$ になると流量を流量計で検出し、 $h=75\text{cm}$ で流量が大きく変化し、それ以降も設定値の変化毎に大きく流量が増える状況を確認した。最終的に $c5\text{-r}$ の流量は約 750g/min となった。一方、 $c5$ は、設定値が $h=75\text{cm}$ の時に流出を確認し、 $h=100\text{cm}$ の時に大きく流量が変化し、最終的に約 620g/min となり、 $c5\text{-r}$ の流量の約 82% 程度を示した。

3.4 供試体の乾燥密度

実験終了後に供試体を解体し、ガラスビーズと内部に残留したクレを水洗いにより分離した後、炉乾燥して乾燥密度を測定した結果、 $\rho_d=1.547\sim 1.570\text{ g/cm}^3$ の範囲となった。この結果に基づき、各ケースの供試体にばらつきがないものとして、以降の考察を行った。

4. 考察

4.1 フィルター則による注入および間隙内移動の検討

粒子径の観点からクレの粒子がガラスビーズの間隙に詰まるかどうかを検討した。フィルター材料（ここではガラスビーズを示す）が原地盤の微粒子（ここではクレを示す）を流出させない条件は以下のフィルター則で示される¹¹⁾。

$$\frac{D_{f15}(\text{フィルター材料の15\%粒径})}{D_{85}(\text{原地盤の85\%粒径})} < 5 \quad (1)$$

図-2より、クレ(c3, c5)の D_{85} は約 $7.5\mu\text{m}$ であり、ガラスビーズ#80の D_{f15} は約 $66\mu\text{m}$ である。したがって、 $66 / 7.5 \approx 8.8$ となり、5倍よりも大きくなることから、c3とc5はガラスビーズ#80の間隙に対してクレの粒子全てが試料の間隙内を移動することになる。ここで、先ほどの実験ケース1,2の懸濁液の注入量と注入質量および注入時間の関係を図-10に示す。なお、懸濁液の注入容積は、注入ビュレットの注入前後の水位差から算出し、注入質量については懸濁液の注入容積と密度の関係により算出した。注入時間は、注入開始から注入停止までの時間を示している。

ケース1について、c3(c/w=0.3)とc5(c/w=0.21)を比較すると、注入懸濁液容積はc5の方が多く、注入時間も長いことが判明した。一方で密度が高いc3は、懸濁液の注入容積は少ないものの、注入質量はc5とほぼ同じになった。また、c3の注入速度がc5に比べて速いことから、懸濁液の注入について、配合比に起因する密度の違いが注入特性に対する要因の一つであることが考えられる。

ケース2について、c3(c/w=0.21)とc5(c/w=0.21)を比較すると、注入懸濁液容積はc5の方が多く、注入質量も多くなることが判明した。注入時間は少しの差はあるものの、c5の注入速度がc3に比べて遅く注入量が多いことから、懸濁液の注入において、粘度が注入特性の要因の一つであることが考えられる。

次に、ケース3について、クレ(c7, c5)の D_{85} は図-2よりそれぞれ約 $12.5\mu\text{m}$ および約 $7.5\mu\text{m}$ であり、ガラスビーズ#20の D_{f15} は約 $500\mu\text{m}$ となる。そのため、c7は $500 / 12.5 = 40$ 、c5は $500 / 7.5 \approx 66.7$ となり5倍よりも非常に大きくなるため、c7とc5は試料であるガラスビーズ#20の間隙内をこれらの懸濁液が全て移動するこ

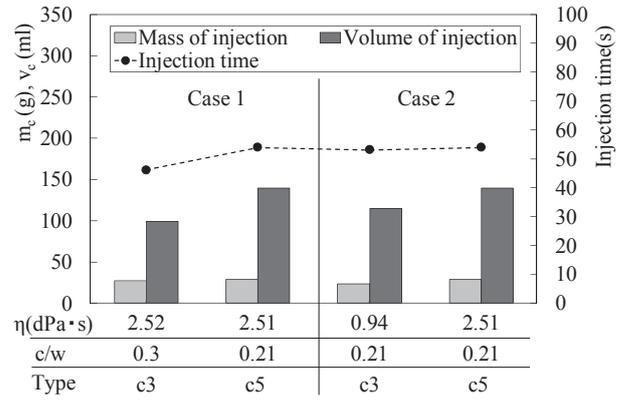


図-10 注入クレ量と注入時間の関係

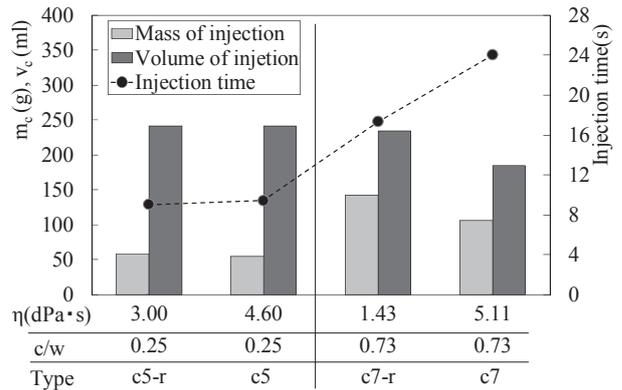


図-11 注入クレ量と注入時間の関係

となる。

ここで、c5およびc7の減粘剤を配合した懸濁液と減粘剤を配合していない懸濁液のそれぞれについて、懸濁液の注入量と注入質量および注入時間の関係を図-11に示す。c5-rとc5を比較すると、注入懸濁液溶液と注入質量は近い値を示し、注入時間もほぼ同じ値を示した。これは粘度の差が小さいことが要因と考えられる。

一方、c7-rとc7を比較すると、注入懸濁液容積はc7-rがc7より大きい結果となった。これはc7が途中で注入停止したことが大きな要因である。注入時間については、c7の注入速度が遅いことから、粘度が注入速度への影響の要因の一つと考えられる。また、フィルター則による間隙内をクレの粒子が全て移動することとなるが、実験結果は途中で注入が停止したことから、粘度が間隙内の移動に影響を与える要因の一つであると考えられる。

4.2 密度と粘度に対する透水係数と動水勾配の変化

4.2.1 ケース1（粘度固定）でのクレの移動

ここでは、粘度を固定したケースの実験結果より、透水係数と動水勾配について考察する。透水係数と動水勾配の経時変化の関係を図-12に示す。c3において動水勾配 $i=2.0$ のときに透水係数が大きく変化している。それ以降については、少しずつ透水係数が高くなる傾向を示した。これは、初期段階で透水係数の変化が発生したものの、 $i=3.0$ においても透水性の低減効果が確認できる結果を

示している。つまり、初期段階で試料の間隙内の移動が発生したものの、最終的には多くのクレーが残存する結果であると判断できる。c5は*i*=3.0まで少しずつ透水係数が高くなる傾向を示したものの、大きな変化は確認されなかった。最終的に動水勾配が高くなると、わずかにc5よりc3の方が透水係数が低くなることから、c3の方が間隙内の移動が少ないことが確認できた。ここで、密度に着目すると、配合比はc3がc5より大きいことから、粘度が同じである場合、密度の高いc3は密度が低いc5より透水性の低減効果があると判断できる。この結果により、同じ粘度の場合、密度が高い配合が間隙内でのクレーの移動が少ないことが示唆された。

4.2.2 ケース 2 (密度固定) でのクレーの移動

透水係数と動水勾配の経時変化の関係を図-13 に示す。c3の透水係数は動水勾配*i*=1.0から変動し、*i*=3.0まで少しずつ高くなる傾向を示したものの、これらの大きな変化は確認されなかった。これにより、*i*=3.0においても透水性の低減効果を示したことから、試料の間隙内に多くのクレーが残存することを確認した。c5においては、c3と同様に*i*=3.0まで少しずつ透水係数が高くなる傾向を示したものの、こちらも大きな変化は確認されず、c3より低い透水係数で推移した。ここで粘度に着目すると、c3の粘度は0.94 dPa・s、一方でc5の粘度は2.51 dPa・sであり、c5の粘度はc3に比べ非常に高い。また、c5とc3は密度がほぼ等しいことから、粘度が高い配合が透水係数の低減効果があることが確認された。つまり、ほぼ等しい密度の懸濁液では粘度の高い配合が、間隙内のクレーの移動が少ないことが判明した。

4.2.3 ケース 3 (減粘剤配合) でのクレーの移動

減粘剤を配合したc7-rとc7の透水係数と動水勾配の経時変化を図-14 に示す。c7-rは動水勾配*i*=0.5の時に透水係数が1オーダー程度急激に大きくなり、*i*=1.0以降は流量の急激な変化は確認できなかった。c7は*i*=1.0の時から透水係数が高くなり始め、*i*=1.5以降からの急激な変化は確認できなかった。つまり、減粘剤を配合すると低い動水勾配から大きく透水係数が増加していることから、クレーが容易に流亡することがわかる。

また、c5-rとc5における透水係数と動水勾配の経時変化を図-15 に示す。c5-rにおいて、*i*=0.5から*i*=1.0へ移行したときに透水係数が大きく変化し、さらに*i*=1.0から*i*=1.5においても透水係数が大きく変化し、それ以降は緩やかな変化となった。これは、間隙内の多くのクレーが低い動水勾配で流亡したことを示している。一方、c5は*i*=1.0から*i*=1.5で透水係数が大きく変化し、それ以降は大きな透水係数の変化はなかった。つまり、c5に減粘剤を配合すると、低い動水勾配から大きく透水係数が増加することから、クレーが容易に流亡することを示している。つまり、間隙内のクレーの移動において粘度が大きな要因の一つと考えることができる。

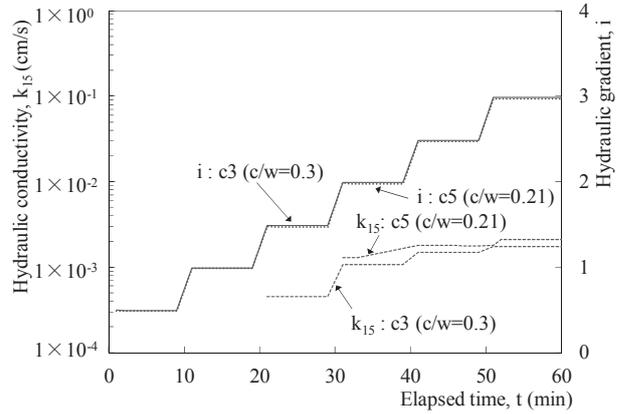


図-12 透水係数と動水勾配の経時変化(ケース1)

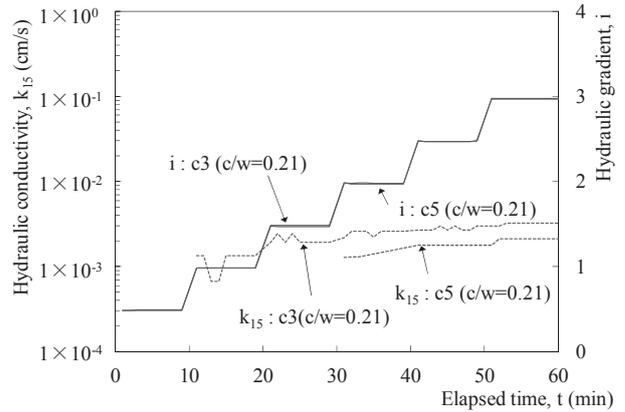


図-13 透水係数と動水勾配の経時変化(ケース2)

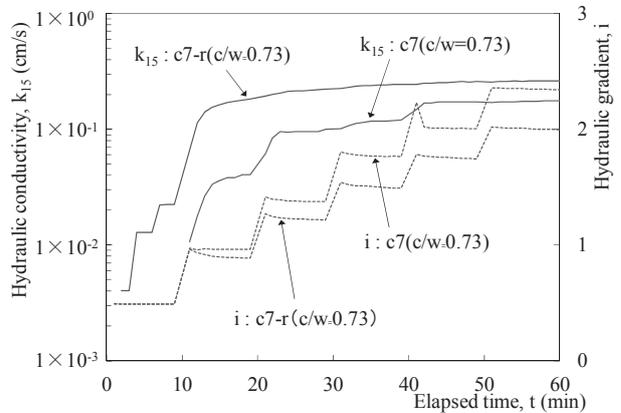


図-14 透水係数と動水勾配の経時変化(ケース3:c7)

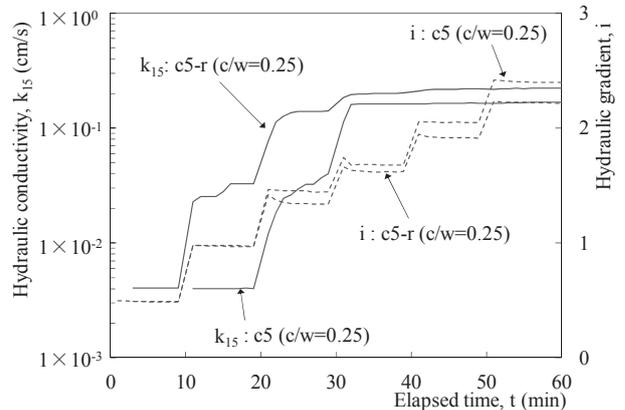


図-15 透水係数と動水勾配の経時変化(ケース3:c5)

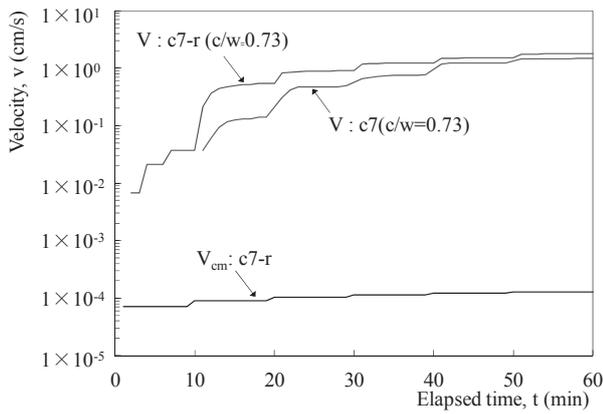


図-16 実流速と多粒子限界流速の関係

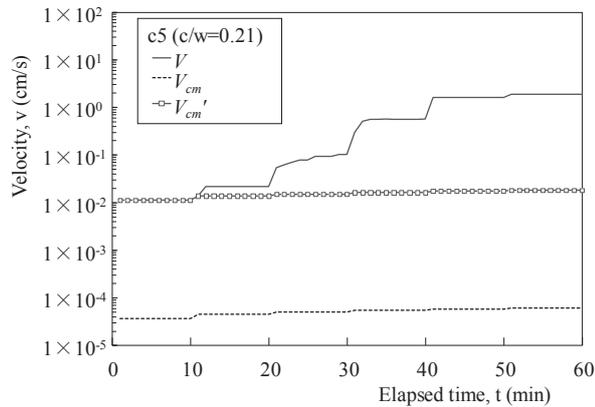


図-17 実流速と修正多粒子限界流速の関係

4.3 実流速および多粒子限界流速

懸濁液の密度と粘度が間隙内での移動に及ぼす影響に対してさらに考察を加えるため、多粒子限界流速を用いた評価を行った。

水平浸透流に対する多粒子限界流速式は、堤防におけるパイピングなどの浸透破壊に対する安定性を判断する指標として、次式(2)で示される¹²⁾。

$$V_{cm} = n^{1/m} \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w(\rho_s - \rho_w) g d^3}{54\mu^2} + 1} - 1 \right\} \quad (2)$$

ここで、 ρ_s :土粒子の密度 (g/cm³)、 ρ_w :液体の密度 (g/cm³)、 μ :水の粘性係数 (g/(cm・s))、 d :土粒子径 (cm)、 g :重力加速度 (g/cm³)、 n :間隙率、 m :Reynolds数により求まる定数である。

(2)式により算出した c7 の多粒子限界流速および c7-r と c7 の実流速に対する通水開始後の経時変化を図-16 に示す。c7-r と c7 を比較すると、c7-r が c7 に比べ早くから流速が確認されていることから、粘度が低いことが要因となり、間隙内のクレーの移動が早く始まったことを示している。さらに c7-r は通水開始後 10 分で大きく流速が上昇しているのに比べて、c7 は段階毎に流速が増していることから、間隙内の移動は粘度が高ければ移動しにくいことが判明した。

次に、多粒子限界流速と実流速を比較すると、多粒子限界流速の結果は、非常に遅い流速で間隙内の移動が発生する結果となった。しかし、実流速は多粒子限界流速と比較すると、約 2 オーダー程度高い流速から移動を開始している。ここで、式(2)において、懸濁液の密度は $n^{1/m}$ で考慮されているが、粘性係数については考慮されていないことから、この差が生じたことが推定される。そこで、式(2)の右辺第 1 項の分母にある粘性係数に水の粘性係数 μ と懸濁液の粘性係数 μ_c の比で表される係数 $\alpha = \mu / \mu_c$ を導入した補正を行った。

$$V'_{cm} = n^{1/m} \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w(\rho_s - d_w) g d^3}{54(\alpha\mu)^2} + 1} - 1 \right\} \quad (3)$$

この補正式を用い、粘度の高い c5 (c/w=0.21) に適用した結果を図-17 に示す。ケース 1 及びケース 2 の結果において、c5 (c/w=0.21) は試験開始後約 20 分後から微量の通水を目視で確認していることから、概ね実流速が多粒子限界流速を越えた付近から懸濁液の移動が始まることが確認できた。このことから、間隙内のクレーの粒子の移動について、懸濁液の密度とともに粘度が間隙内の移動の大きな要因であることがあらためて示唆された。

5. まとめ

本研究では岡山県産のカオリンクレーを材料とした新たな注入材に着目し、既往の研究で透水係数の低減効果が認められた懸濁液の配合に対して、異なる種類のクレーに対して粘度を固定したケース及び密度を固定したケース、さらに同じ種類のクレーに対して減粘剤を配合することにより粘度のみを変化させたケースを設定し、懸濁液を注入した供試体に対して動水勾配を段階的に変化した水平一次元浸透実験結果に基づいて注入特性及び間隙内の移動特性を評価した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) フィルター則によると間隙内をクレーの粒子が全て移動することとなるが、実験結果は途中で注入が停止したことから、粘度がクレーの間隙内の移動に影響を与える要因の一つであることが示唆された。
- (2) 同程度の粘度の場合、密度が高い配合が間隙内のクレーの移動が少ないことが示唆された。
- (3) 同程度の密度の場合、粘度の高い配合が、間隙内のクレーの移動が少ないことが判明した。
- (4) 減粘剤を配合すると、間隙内のクレーが容易に流亡する結果を示した。
- (5) 提案されている多粒子限界流速式を適用したところ、実際よりも 2 オーダー以上低い流速で移動する結果となった。そこで、粘性係数を補正することで、間隙内で移動し始める実流速と補正後の多粒子限界流速に近い値を示した。

以上のことから、懸濁液の間隙内の移動、つまり注入や流亡について懸濁液の粘度が大きな要因の一つであること、さらに密度も要因の一つであることが判明した。

今後は、今回提案した多粒子限界流速の補正式に対する詳細な検討が課題として挙げられる。

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る。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 / [山岳工法編]・同解説, pp.42-45, 2016.
- 2) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 24, 山岳工法の調査・設計から施工まで, pp.144-145, 2018.
- 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.79-85, 1997.
- 4) 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.
- 5) 仲山貴司, 澤田亮, 平岡陽, 赤木寛一：薬液注入工法で固化した改良体の耐久性評価に関する研究, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.2, pp.162-173, 2013.
- 6) 古田島信義, 鈴木雅文, 中出剛, 片山政弘, 手塚仁, 木佐貫浄治：北薩トンネルにおけるヒ素を含有するトンネル湧水の減水対策-ダムグラウチング技術を適用した山岳トンネルの岩盤グラウチング-, 地盤工学ジャーナル, Vol.12, No.4, pp.469-478, 2017.
- 7) 米田俊一, 中川浩二：粒子径を変えた各種セメントグラウトの基礎的性質と浸透性比較, 土木学会論文集, No.462, VI-18, pp.101-110, 1993.
- 8) 宮永佳晴, 蒔田敏昭, 江原昌彦, 秦野輝儀：粘土グラウトによる地下水の制御-その理論と石油備蓄・久世基地の施工実績-, 応用地質, Vol.35, No.4, pp.153-165, 1994.
- 9) 高橋啓介, 小松満, 瀧本弘治：カオリンクレー注入地盤の動水勾配の変化に対する透水性評価, 地盤工学会, 地盤と建設, Vol.37, No.1, pp.145-150, 2020.
- 10) 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.
- 11) 地盤工学会編：根切工事と地下水-調査・設計から施工まで-, pp.197-198, 1991.
- 12) 杉井俊夫, 山田公夫, 名倉晋：限界流速からみた浸透破壊の発生と進行, 土と基礎, Vol.57, No.9, pp.26-29, 2009.

(2020年6月15日 受付)