

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

Evaluation of Kaolin Clay-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)
瀧本弘治 Koji TAKIMOTO (山陽クレー工業(株))

高透水性の砂層は都市部に多く存在し、建設工事において例えば地下水処理など、多くの対策が必要な要因となっている。そのため、対策工事費の追加や採用する工法によっては環境への配慮が大きな課題となる場合がある。そこで本研究では、岡山県内で産出されるカオリンクレーに着目し、低コストで環境に配慮した注入工法の開発を行っている。注入したカオリンクレーは固結しないことから、地下水流によって流亡する可能性がある。本報では、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から流亡状況を評価した結果について報告する。

キーワード：注入工、懸濁液、透水係数、動水勾配、流亡 (IGC : D-04)

1. はじめに

近年のトンネル工事において、補助工法の開発が進んだことで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、高透水性の砂層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、対策工事費の追加が必要となるが、採用する工法によっては環境への負荷が大きな課題となる場合がある²⁾。特に地下水などの湧水対策として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。ここで止水工法に着目すると、山岳トンネルでは水ガラスやウレタン系の薬液注入工法³⁾を用いることが主であるものの、水質汚濁への配慮が必要とされている⁴⁾。また、化学的な薬液以外にも、従来、地盤内の透水係数を低下させる工法として、セメントミルクやベントナイトを岩盤や地盤内に注入する工法がとられてきたが、セメントミルクやベントナイトを用いた工法では 30 μ m 程度以上の間隙への注入に限定される上に、狭い範囲の改良しか期待できなかった。近年は超微粒子セメント⁵⁾や様々な添加剤による注入材が開発されているが、新たに開発された材料や薬液を使った注入材は高価であり、特に人工材料を使った注入材は環境への影響や長期間の効果を期待できないことなどの問題がある。

上述のような現状を鑑み、経済的かつ自然に悪影響を及ぼさない透水性を低下させる新たな工法の開発は意義深いものと考えることができる。そこで、本研究では、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ために低コストで環境に配慮した注入工法の開発を目的に、カオリンクレー懸濁液を注入する方法に着目した。この方法のメカニズムとしては、間隙構造にクレー粒子を充填し、砂層内の細粒分を増加させることで透

水性を低下させる仕組みである。ここで、カオリンクレーは自然由来の材料であり、環境負荷が少ない。この工法を既存の補助工法と組み合わせることにより、高費用の注入材の使用量を低下させ、工費を抑えることができるものと考えられる。

既往の研究として、これまでに、亀裂性岩盤を対象とした粘土グラウトとして希薄な懸濁液を長期間注入することにより広範囲を改良した事例⁶⁾があるが、濃度の比較的高い懸濁液を注入する工法はほとんど見られない。また、カオリンクレーを混合した供試体での透水性の低下挙動を把握した事例⁷⁾では、遮水性を持続させるためには一定量以上の混合量が必要であること、一定量以上の混合量であっても動水勾配が増加した場合に流亡が始まることが指摘されている。そこで本報では、ガラスビーズを用いた水平一次元浸透実験を実施し、カオリンクレー注入後に動水勾配を段階的に変化させた際の透水性の変化から流亡状況を評価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。供試体は、両端に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(109 μ m)および多孔板を設置した直径 ϕ 5cm×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、密度を高めるためにカラム周囲を打撃して作製した。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、ワイヤーに吊して巻き上げることで高さを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によりそれぞれ計測した。カオリン・クレ懸濁液は、供試体の中央位置の上側側面に設置した上で背圧が作用できるビュレットを接続し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、カオリン・クレ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。

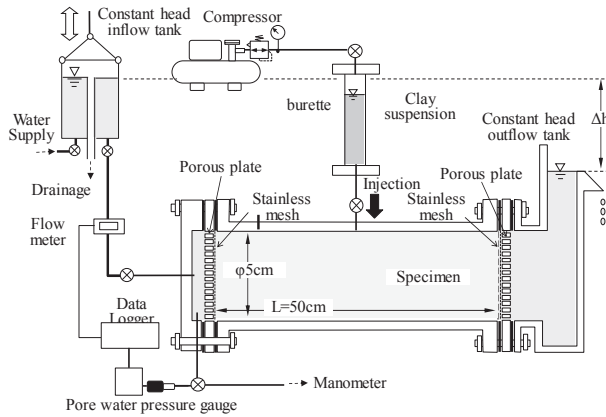


図-1 実験装置概略図

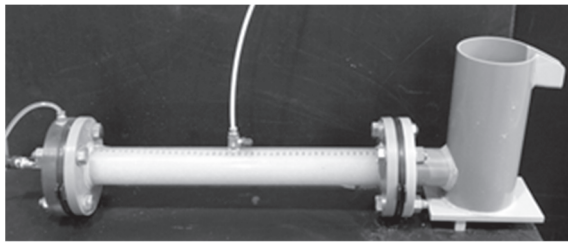


写真-1 実験状況

2.2 試料の物理特性

ガラスビーズは土粒子密度 $\rho_s=2.561\text{g/cm}^3$, $D_{50}=0.80\text{mm}$, 均等係数 $U_c=1.78$ のものを、注入するカオリン・クレには市販されている3種類（c3, c5, c7と称する）をそれぞれ用いた。カオリン・クレの種類毎の物性値を表-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、試料の粒径加積曲線を図-2に示す。50%粒径は、c7が最も大きく約 $7.5\mu\text{m}$ であり、c3とc5はほぼ等しく D_{50} は約 $5\mu\text{m}$ 程度である。なお、c3とc5の粒度特性はこのように類似しているものの、両者は製造過程での分級方法が異なる。c3は気流中粒子の力学的挙動の差を利用した乾式分級であり、c5は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。次に、ハンディタイプのデジタル回転式粘度計で測定したクレの種類毎の各重量配合比（c/w, c:クレ重量とw:水重量の比を表す。以下、配合比と称する）と粘度の関係を図-3に示す。同じ配合比ではc5が最も粘度が高く、c7が最も粘度が低いことが分かる。また、c3はc5とc7の中間よりややc5よりの特性を示している。さらに、c5においては配合比0.1から少しの配合比の変化により急激に粘度が高くなる特性を示していることから、僅かな配合比の変化に対して粘度は急激

に変化する。一方、c7は配合比0.6の領域まで粘度は緩やかに変化することから、配合比の変化に対し粘度の変化は小さい。混合クレであるc3:c7=2:1およびc3:c7=1:1はそれぞれc3とc7の間の領域にあり、c3:c7=2:1はc3の特性に近い値を示している。

表-1 カオリン・クレの物理特性

クレ種類	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

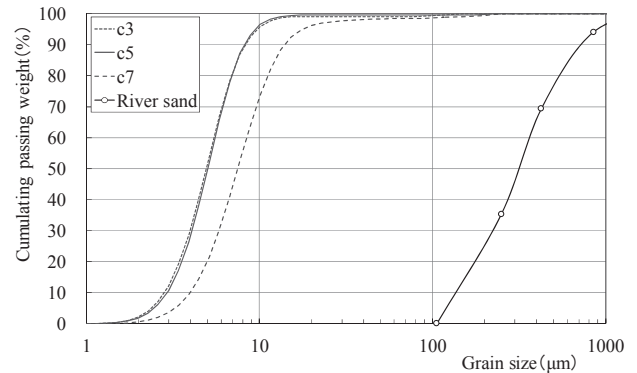


図-2 試料の粒径加積曲線

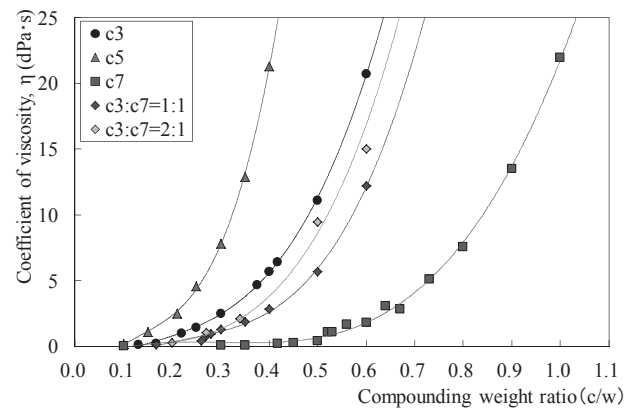


図-3 カオリン・クレ懸濁液と粘度の関係

表-2 実験ケース

クレ種類	クレ乾燥重量混合比	懸濁液重量配合比 c/w	懸濁液密度 ρ (g/cm ³)	粘度 η (dPa·s)
c3	—	0.25	1.148	1.46
c5	—	0.25	1.140	4.60
c7	—	0.73	1.279	5.11
c3 : c7	1:1	0.30	1.166	1.31
c3 : c7	2:1	0.27	1.151	1.06

2.3 実験ケース

実験ケースを表-2に示す。懸濁液の重量配合比は別途実施した一次元浸透実験⁸⁾の結果を基にした。この実験は、試料に川砂を用い、動水勾配を約2.7に設定して通水しながらカオリン・クレ懸濁液を圧入させた際の透水性の低減効果を確認したものであり、効果が高かった配合であるc3のc/w=0.25, c5のc/w=0.25, c7のc/w=0.73とした。

さらに、c3とc7を乾燥重量混合比で1:1および2:1でそれぞれ混合したもので効果が高かったc3:c7=1:1の $c/w=0.30$ 、c3:c7=2:1の $c/w=0.27$ を加えた計5種類の実験を実施した。

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、流出流量が一定値となった時点での供試体両端の水頭差と流出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、写真-2に示すようにカオリンクレー懸濁液を供試体中央から上下流両端付近に達するまで圧力注入した。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、定水位タンクの上昇1分前と1分後の流入側の水頭のマノ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た。さらに流入流量の変化をデジタル流量計により測定するとともに、注入したカオリンクレーの状況を観察した。

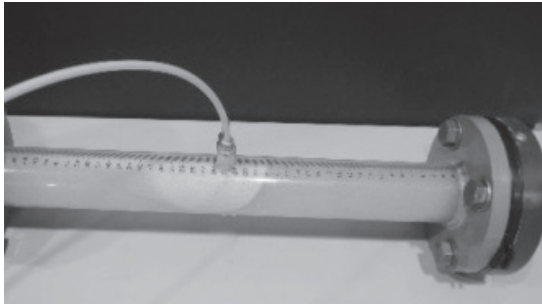


写真-2 クレー懸濁液注入状況

3. 実験結果

3.1 水頭差の変化と流出流量の関係

実験結果の一例として、図-4にc3およびc5に対して実施した通水時の水頭差と流出流量の経時変化を示す。

c3は定水位タンクの設定高さ（排水口を基準とした高さ）が $h=25\text{cm}$ 程度では流出量は認められず、 $h=50\text{cm}$ から流出の開始を確認した。 $h=75\text{cm}$ では流入側の水頭差は設定水頭差より低い値を示しながら流量が徐々に増え、 $h=100\text{cm}$ では定水位タンクの上昇直後に流入側の水頭差が大きく低下し、逆に流量の増加が連続的に増大した。さらに $h=125\text{cm}$ 以降では流入側の水頭差が設定水頭差まで達しない状況であり大きな流量の変化はなかった。

一方、c5は $h=50\text{cm}$ までの変化はc3と同じ傾向を示したものの、流出を確認したのはc3より遅く $h=75\text{cm}$ の時であった。流出流量は全体的にc3に比べて少なく、最終的にはc3の約58%程度の値を示した。

3.2 透水係数の変化と動水勾配の関係

図-4を基に算定した透水係数と動水勾配の経時変化を図-5に示す。2種類とも動水勾配(i)の変化は概ね同じ

傾向を示している。透水係数(k_{15})は動水勾配が $i=2$ 付近までいずれも大きく変化している。これ以降の動水勾配では、緩やかに増加する結果となったが、最終的な透水係数はc3よりc5の方が低くなった。

3.3 試料の乾燥密度

実験終了後に試料を解体し、ガラスビーズと残留クレーを水洗いにより分離した後、炉乾燥してガラスビーズの重量から乾燥密度を測定したところ、 $\rho_d=1.604\sim 1.623(\text{g}/\text{cm}^3)$ の範囲となったことから、注入前の供試体は、各ケースで差がないものとした。

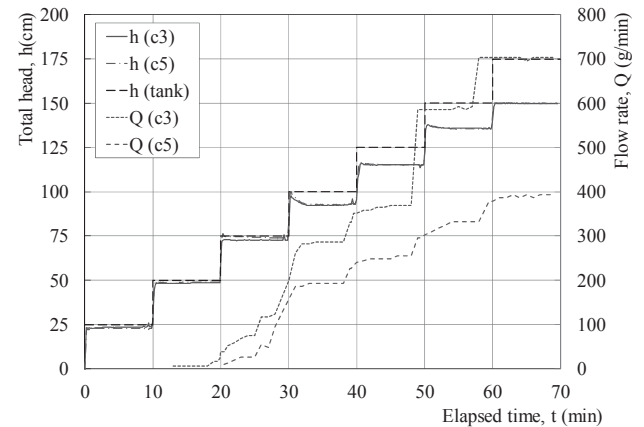


図-4 水頭差と流量の経時変化(c3, c5)

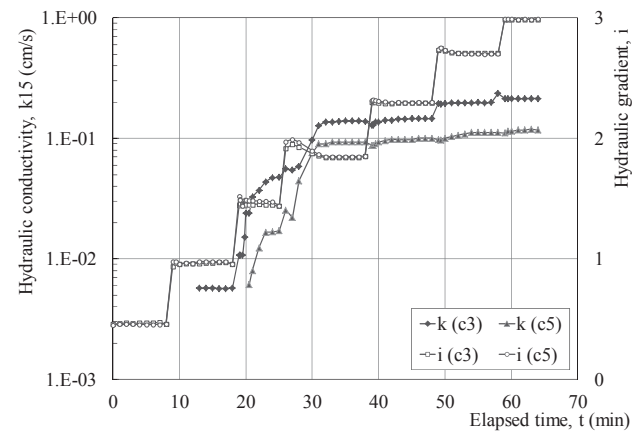


図-5 透水係数と動水勾配の経時変化(c3, c5)

4. 考察

4.1 フィルター則について

まず、粒子径の観点からカオリンクレー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）が原地盤の微粒子（ここではカオリンクレー）を流出させない条件は、以下のフィルター則で示される⁹⁾。

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

図-2 よりカオリンクレー (c7) の D_{85} は約 $12\mu\text{m}$ でありガラスビーズの D_{15} は $500\mu\text{m}$ となる。そのため、 $500/12 \approx 41.7$ となり、5 倍よりも大きくなるため、全て流亡することになる。さらに、c3 および c5 の粒径は c7 より小さいことから、今回実験で使用したカオリンクレーは粒径の観点から考えると全て流亡することになる。

4.2 流速と動水勾配の関係

図-7 に流速と動水勾配の関係を示す。まず、c3 は動水勾配 $i=1.0\sim 1.5$ の範囲で流速が発生している。 $i=1.5$ および $i=2.0$ は動水勾配を変化させた直後に大きく流速が変化するが、その後、ほぼ一定値に落ち着く。さらに、 $i=2.0$ より大きくなると、流速が急激に大きくなる傾向を示した。そのため、 $i=2.0$ よりも小さければ流亡の程度は小さいものと判断できる。次に、c5 は $i=2.0$ 付近において急激に流速が大きくなる傾向を示したものの、c3 よりも流亡は少ない状況にあった。また、c7 は $i=0.5$ 付近から流速に変化が現れ、 $i=1.0$ 付近では流速が大きく変化し、それ以降は経時的に流速が早くなって、注入していない供試体に対する流速と類似した傾向を示した。

一方、混合したカオリンクレーの c3:c7=1:1 は、 $i=1.0$ から流れが発生している。これは、 $i=1.0$ から急に透水係数が大きくなったことが考えられる。それ以降の動水勾配の変化については c7 に類似しており、流亡が多い結果を示した。また、c3:c7=2:1 は $i=1.0\sim 2.0$ 付近では c3 に類似している。しかし、 $i=2.0$ 付近からは c5 の傾向に類似しており、流亡しにくい特性を示した。

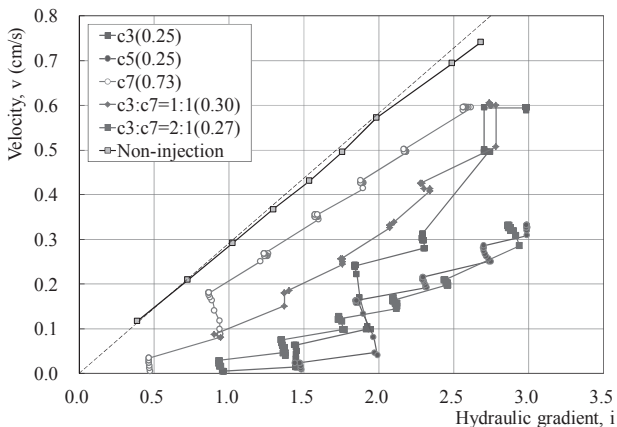


図-7 流速と動水勾配の関係
(凡例の () 内は配合比を表す)

4.3 透水係数と動水勾配の関係

図-8 に透水係数と動水勾配の関係を示す。透水係数が高いものは c7 および c3:c7=1:1 であり、 $i=1.0$ 程度で既にカオリンクレーを注入していない (非注入) 供試体のレベルまで上昇している。一方、c3 は $i=1.5$ で大幅に透水係数が上昇しており、 $i=1.5$ 以降では c7 および c3:c7=1:1 とほぼ同様の値にまで上昇していることが分かる。一方、c5 は初期の透水係数が低く、 $i=2.0$ で上昇するものの、

最終的な値は非注入供試体の $1/3$ 程度を確保している。また、c3:c7=2:1 は初期の透水係数は c3 や c5 に比べて高いものの、 $i=2.0$ 以降は c5 と同様のレベルを維持しており、残留したカオリンクレーが透水性を低下させている状況が示唆された。

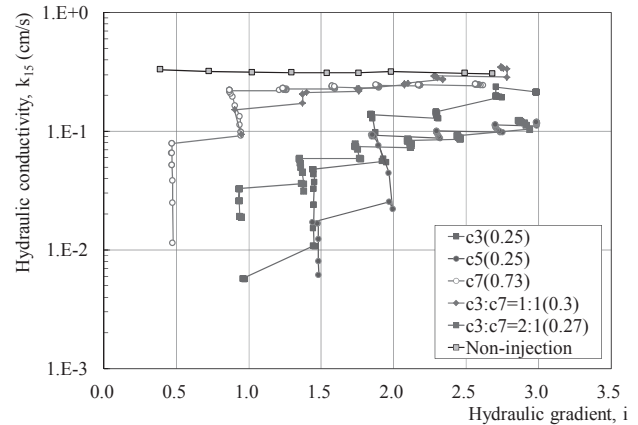


図-8 透水係数と動水勾配の関係
(凡例の () 内は配合比を表す)

4.4 注入クレー質量と残存クレー質量の関係

別途測定した懸濁液の密度に基づき注入した懸濁液の体積からカオリンクレー質量 (以下、注入クレー質量) を求めた。また、実験終了後の供試体を水洗いしたものと流出したものをそれぞれ炉乾燥することにより、試料内に残存したカオリンクレー質量 (以下、クレー残留質量) と流出したカオリンクレー質量 (以下、クレー流亡質量) を測定した。これらの結果を図-9 に示す。

注入クレー質量は c7 が最も多く c3, c5, c3:c7=2:1, c3:c7=1:1 はそれぞれ近い注入量を示した。一方、クレー残留質量は c3:c7=1:1 が最も少なく、他の 4 種類は全て約 40g 程度と c3:c7=1:1 に比べ約 2 倍の残留量となった。また、クレー流亡質量は c7 が最も多く、c3:c7=1:1 がその次、残り 3 種類の流亡量は少ない結果を示した。これらの結果から、c7 は注入クレー質量は多いものの、流亡クレー質量の割合も他に比べて多いことが判明した。

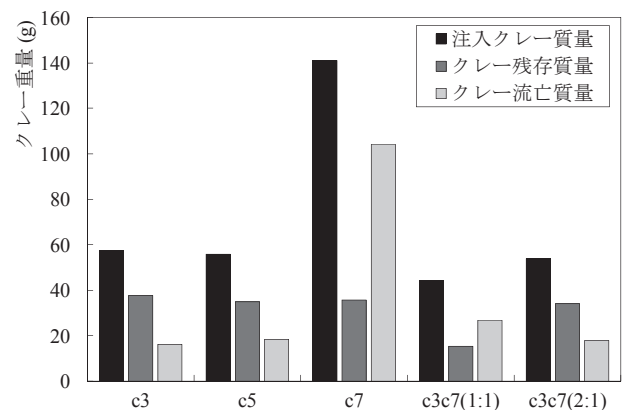


図-9 注入クレー質量とクレー残留質量およびクレー流亡質量の関係

4.5 透水係数低下率とクレ－残存率の関係

図-10 にクレ－残存率と透水係数低下率および最大動水勾配の関係を示す。ここで、最大動水勾配は実験終了時に供試体に作用していた動水勾配を表している。

まず、c5 は透水係数の低下率が最も高く、クレ－残存率も多くなっている。さらに最大動水勾配も約 $i=3.0$ となり最も高くなった。また、c3:c7=2:1 の透水係数低下率は2番目に大きい値となり、クレ－残存率も高い値となっている。最大動水勾配はc5 よりやや低い値となった。次に、c3 の透水係数低下率は3番目に大きい値であるが、c5 に比べると約 20%程度下回った。一方、クレ－残存率は最大となっており、最大動水勾配はc5 とほぼ等しい値となった。これらから、透水係数の低下率は単に残留クレ－率によるものではなく、カオリンクレーの種類によって異なることが判明した。

一方、c7 の透水係数低下率は約 20%となり、c5 の透水係数低下率の 1/3 程度を示した。また、クレ－残存率は最も小さく約 25%程度、最大動水勾配も最も小さい値となった。また、c3:c7=1:1 の透水係数低下率は最も低く、むしろ、非注入供試体よりも高い透水係数を示しているが、クレ－残存率はc7 より大きい値を示している。このことは、残留したカオリンクレーが透水係数の低下に全く寄与していないばかりか、カオリンクレーの注入圧により、ガラスビーズの配置状況が変化したことで、透水性が高くなったものと推察される。

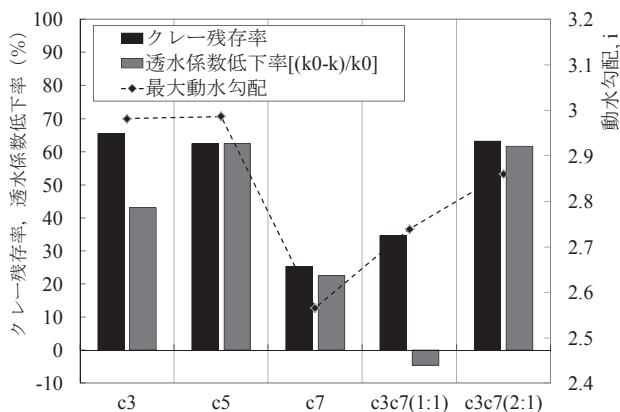


図-10 クレ－残存率と透水係数低下率および最大動水勾配の関係

4.6 カオリンクレーの流亡挙動の観察

c7 のカオリンクレーの動水勾配の変化毎の実験状況を写真-3～写真-8 に示す。写真-3 はカオリンクレー懸濁液を注入した直後で動水勾配 $i=0$ の状況であり、ガラスビーズの間にカオリンクレーが詰まっている様子が分かる。次に、写真-4 は動水勾配が $i=0.5$ の状況であり、供試体の天端部を中心に細い連続した間隙（ここでは、水ミチと呼ぶ）が少し出現しているものの流出流量はまだ0である状況である。これはカオリンクレー懸濁液の粘性が浸透力に抵抗しているものと推察できる。写真-5 は動水勾配 $i=0.5\sim1.0$ の状況であり、細い水ミチがクモの

巣状に多く出現し、さらに水ミチの幅が広がってきていることから透水性が高くなってきていることが判る。動水勾配が高いことから浸透力が強くなることで注入されたカオリンクレーの流亡が始まっている様子を示している。写真-6 は動水勾配が $i=1.0\sim2.0$ の状況であり、動水勾配が大きくなることでカオリンクレーを流亡させながら水ミチが拡大している。そのため、供試体全体にはっきりとした水ミチを確認した。写真-7 は $i=2.0$ 以上の状況であり、一部カオリンクレーが確認できる程度まで流亡している様子を表している。

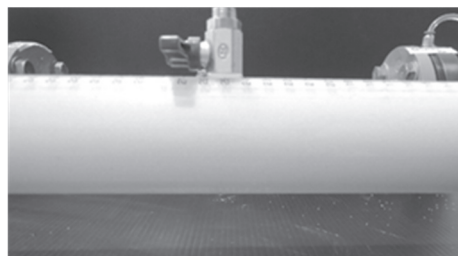


写真-3 注入後 ($i=0$) の状況

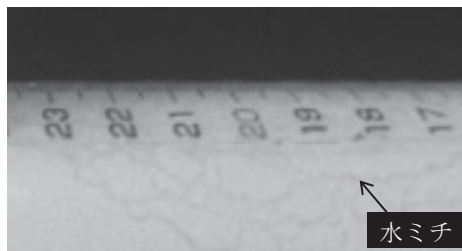


写真-4 $i=0.5$ の状況

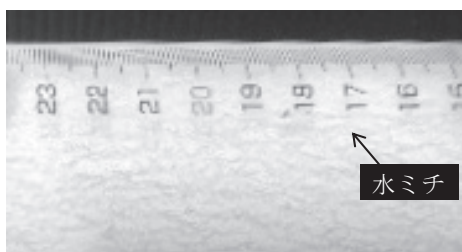


写真-5 $i=0.5\sim1.0$ の状況

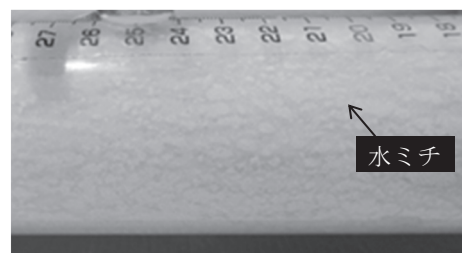


写真-6 $i=1.0\sim2.0$ の状況

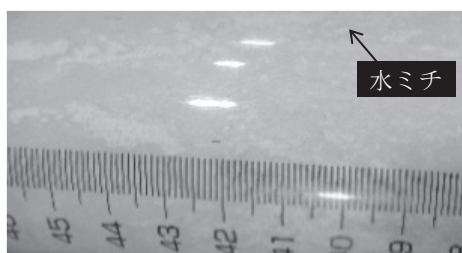


写真-7 $i=2.0$ 以上の状況

さらに、写真-8に実験装置の流出側で動水勾配の変化により水が白濁した状況を示す。動水勾配が初期の状況においては薄白色であるが、動水勾配の変化に伴い白濁が濃くなった。つまり、カオリンクレイが浸透力により試料の中から流亡している状況が時々刻々と変化していることを把握することが出来た。



写真-8 流出側の状況

4.3 透水性低下と粘度の関係

最後に、上述の結果に対して、粘度の違いの観点から考察する。透水係数低下率が大きかった c5 の粘度は 4.60 dPa/s で全体の 2 番目に大きい。また、c3:c7=2:1 の粘度は 1.06 dPa/s であった。一方、透水係数低下の効果が発揮できなかった c7 の粘度は 5.11 dPa/s であることから、動水勾配の変化による透水性に対し、単に粘性のみが要因ではなく、注入したカオリンクレイの状況が種類によって異なっていること、つまり、乾式分級と湿式分級による違いが考えられる。

5. まとめ

本研究ではカオリンクレイ懸濁液を注入した供試体に対する水平次元浸透実験を実施し、動水勾配の変化に対するクレイ懸濁液の種類毎の透水性から流亡状況を評価した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) カオリンクレイ懸濁液はフィルター則以外の要因により透水係数低減効果を発揮する。
- (2) 動水勾配の変化に対する流速の変化の違いや高い動水勾配での流速の抑制効果がクレイの種類毎に異なることが判明した。
- (3) 動水勾配の変化に対する透水係数の変化やその大きさがクレイの種類毎に異なることが判明した。なお、最終的に動水勾配を約 $i=3.0$ 程度まで上昇させた状況で透水係数の低下効果を維持したものは c3:c7=2:1 および c5 であった。
- (4) クレイの残存率が透水係数の低下に寄与しているものの、これらに定量的な関係は認められな

った。

- (5) 透水性が高くなるメカニズムは、水ミチの形状や数に影響されることが判明した。
- (6) 透水性の低減効果はクレイの粘性以外の要因も関わっていることが示唆された。

以上のことから、クレイ懸濁液は種類毎に動水勾配の変化に対する透水性への影響が異なることが判明した。

今後は、ガラスビーズと残留したカオリンクレイをあわせた密度やカオリンクレイ懸濁液の粘性等から流亡状況のメカニズムを把握するとともに、現象の再現性を踏まえ、最も透水係数低減効果があるカオリンクレイの種類と配合比を決めることが課題として挙げられる。

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) 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，地盤工学会，地盤と建設，Vol.36，No.1，pp.153-160，2018。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 米田俊一，岡林茂生，田村昌仁，森麟：微粒子セメントを用いたグラウトの細砂地盤への間隙浸透形態に関する微視的研究，土木学会論文集，No.493，III-27，pp. 109-118，1994。
- 6) 西垣誠，小松満，黒川正宏，伊藤隼一，滝本弘治：高透水性地盤へのカオリナイト注入による地盤改良工法，第 40 回地盤工学研究発表会発表公演集，pp.1307-1308，2005。
- 7) 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。
- 8) 高橋啓介，小松満，瀧本弘治：カオリンクレイ注入による砂層の透水性低下工法に関する水平次元浸透実験，第 54 回地盤工学研究発表会，No.0432，pp.863-864，2019。
- 9) 地盤工学会編：根切工事と地下水一調査・設計から施工まで一，pp.197-198，1991。

(2019 年 6 月 17 日 受付)