

カオリンクレー懸濁液の砂層への注入範囲に関する研究

Study on The Range of Injection of Kaolin Clay Suspension into Soil Layer

柴原 晃¹⁾, 高橋 啓介²⁾, 小松 満³⁾

1) Akira SHIBAHARA, 博士後期課程, 岡山大学大学院環境生命科学研究科, a.shibahara@fuso-inc.co.jp

2) Keisuke TAKAHASHI, 客員研究員, 岡山大学大学院環境生命科学研究科, p4z703gm@s.okayama-u.ac.jp

3) Mitsuru KOMATSU, 教授, 岡山大学学術研究院環境生命科学学域, mkomatsu@okayama-u.ac.jp

著者らは, 都市部の地下開発が注目されている中, 地下トンネル工事において NATM 工法採用時に問題となる高透水性地盤の補助工法に着目し, 地下水環境への負荷が小さい粘土系の注入材により, 透水性を低減させる新たな工法の開発を目指している. いままでに, 岡山県産のカオリンクレーを用いた懸濁液を使用した一次元浸透試験から, 透水性低減効果のある 2 種類のカオリンクレー懸濁液を提案し, さらにカオリンクレーの間隙内移動特性に与える要因を特定している. 本論文では断面二次元土層を使用した実験により, 注入範囲の検討および透水性低減効果を検証した結果について報告する.

キーワード: カオリンクレー, 透水係数, 注入範囲, 動水勾配

(IGC : D-04)

1. はじめに

近年, 都市部の地下開発が注目されている中, 高速道路新設工事等の地下トンネル工事が増えており, さらに NATM 工法が採用される事例が多くある. 都市部のトンネル工事は山岳トンネル工事に比べると, 高透水性砂地盤が工事の妨げとなる場合が多くあり, このような場合には対策工事として補助工法を追加する必要がある. 補助工法として, 地下水の湧水対策については地下水位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, このうち止水工法は地盤注入材として, 水ガラス系を主とした薬液系および, セメントや粘土を主とする非薬液系がある¹⁾. しかし, 人工材料が主となる地盤注入材を選定した場合, 地下水環境によっては化学物質の浸透や, pH 等による地下水への影響が懸念され, さらに使用する材料によっては, 追加工事費への影響も懸念材料となる.

薬液系注入材に関する既往の研究では, 砂地盤を対象とした, 現地注入実験において, 注入時に削孔穴から漏出しによる注入阻害の課題に対して新しい技術の導入により, 60%程度の注入圧で広範囲な浸透注入を可能としているが, 液状化対策が主たる目的である²⁾. また, この研究では, 砂質地盤を対象とし注入後の地盤改良効果の確認において, 判定指標として N 値と固結状況との関係を把握しているが, 透水性の評価等には着目していない³⁾. 薬液系注入材の効果が発揮されるまでには, ある一定の養生期間を有することもあり, 高透水性の地盤条件や地下水の条件によっては, 硬化する前に周辺へ流出する可能性も考えられる.

セメント系注入材に関する既往の研究では, 地盤の強

度増加を主の目的とする場合が多いが, 近年, 浸透注入の研究も進められている. これらの研究は, 粒度分布の異なる超微粒子セメントを用いた室内実験から, 浸透性を改善する最適な粒度分布の存在を示唆している⁴⁾ことや, 液状化対策を対象とした微粒子注入工法の確立を目的に, 浸透可否評価法の提案⁵⁾などが主で, 砂地盤の透水性について対象としていない.

粘土系グラウトに関する既往の研究として, 放射性廃棄物処分におけるグラウトは, セメント系材料が主体であるが, PH 等の化学的影響への懸念から, 粘土系グラウトに着目した研究が進められている. この研究では, 岩盤を対象としたグラウト材料の適用性の評価を行い, 亀裂およびポーリング閉塞へのグラウト材料として, 適用可能であると示唆している⁶⁾が, 砂地盤を対象としていない.

そこで高橋らは都市部の砂地盤を対象とした, 新たな非薬液系注入材料の開発を目的として, 粘土材料である岡山県産のカオリンクレーに着目し, クレー懸濁液を用いた透水性低減効果について, 水平一次元モデルの実験により効果の確認を実施している^{7),8)}. その結果, 透水性低減効果の高いクレーの種類と配合比および, 粘性係数が存在することが示されているものの, 大型土層による実験等により実際に現場に適用するための, 注入範囲等の検証が必要であると指摘している.

本報では, これまでの研究で得られた知見から, 断面二次元土槽を用いて, 2 種類のクレー懸濁液について, 注入範囲の検討および透水性低減効果の検証および比較, さらに浸透式を用いた浸透距離の検証および修正多粒子限界流速による, クレー粒子の間隙内移動の特性について報告を行う.

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、写真-2に示す。この実験装置は、ハンドルを回転することにより二次元モデルとして、鉛直断面および水平断面の両方の実験を可能とすることを目的に製作した。実験土槽内の供試体寸法は、水平一次元モデルで使用したカラム寸法 ($L=50\text{cm}$) を、注入管からの寸法値と設定し、幅 $100\text{cm} \times$ 高さ $100\text{cm} \times$ 奥行 15cm とした。クレー懸濁液は中央部から攪拌注入タンクを介して、コンプレッサーにより定圧注入する構造となっている。通水は注水側と排水側の定水位タンクの水頭差によるものとし、透水性と動水勾配、流量、注入材の広がり等の関係を、明らかにすることを実験の目的としている。特に注入材の広がりを確認するため、透水性を確認するために使用した、一次元カラムに比べ大型の土層とした。注水側のタンクは電動ウインチにて昇降できる仕組みであり、 1mm 単位での調整が可能である。また実験土槽内の水頭差は、供試体内の間隙水圧の計測により把握することとし、自動で最大44チャンネルの間隙水圧の連続計測を可能とする、マルチスキヤニングバルブシステムを導入した。供試体の作成方法は試料である川砂の流出防止のため、ステンレスメッシュ (孔径 $109\mu\text{m}$) を実験土層の両端に設置し、水中落下法によって投入した後に、実験土層周辺を打撃することにより締固めを行った。通水流量の測定は流量計 (最小検出流量 $0.003\text{L}/\text{min}$) により計測し、水温については水温計にて随時測定を行った。クレー懸濁液の注入量については、攪拌注入タンクの注入前後の液位差をタンクを目盛りにより測定し、その液位差にタンクの断面積を乗じて算出した。

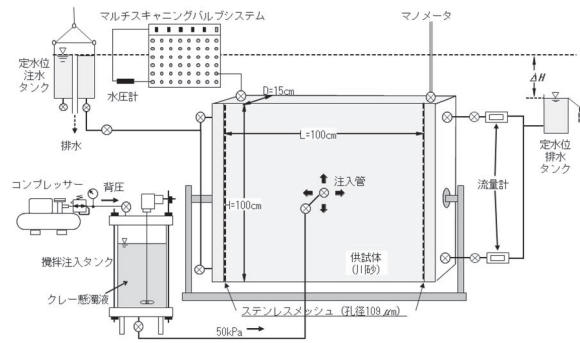


図-1 実験装置概略図

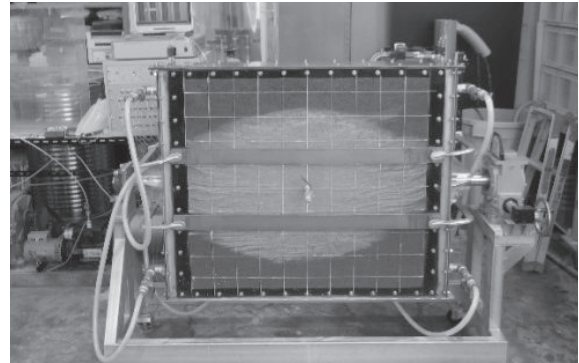


写真-1 実験状況 (鉛直方向)

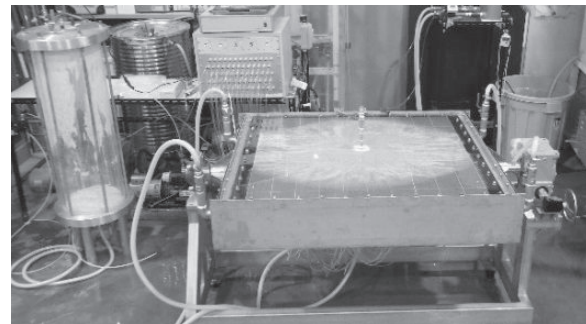


写真-2 実験状況 (水平方向)

2.2 試料の物理特性

供試体の試料は川砂を使用し、物理特性を表-1に粒径加積曲線を図-2に示す。川砂は試料の透水性を保つため、試料自体の目詰まりを防ぐことを目的とし、 $106\mu\text{m}$ 以上の粒径とした。懸濁液の材料として使用するクレーは、市販されている中から2種類のクレー (以下 c3, c7 と称す) をそれぞれ用いた。クレーの物理特性を表-2に、粒径加積曲線を図-2にそれぞれ示す。c3 と c7 の土粒子密度と均等係数はそれぞれ近い値を示すが、50%粒径については c3 が約 $5\mu\text{m}$ に対して、c7 は約 $7.5\mu\text{m}$ であることから、c3 の粒径に比べて c7 の粒径は大きい値を示している。また、図-2の粒径加積曲線から、c3 は c7 に比べて全体的に粒径が小さい試料である。

2.3 実験ケース

c3 および c7 の2種類を材料として、クレー懸濁液を用いた透水性低減効果について、水平一次元モデルでの実験による効果の確認を実施した実験⁸⁾結果から効果のあった2つの配合を選定した。実験ケースを表-3に示す。

表-1 供試体の物理特性

種類	土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	50%粒径 $D_{50}(\mu\text{m})$	均等係数 U_c
川砂	2.682	718	4.23

表-2 クレーの物理特性

種類	土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	50%粒径 $D_{50}(\mu\text{m})$	均等係数 U_c
c3	2.748	4.928	1.942
c7	2.713	7.482	2.117

実験ケースは通水無しの条件で注入した、c3 配合比 0.25 および c7 配合比 0.52 で、二次元での広がりを検討するための鉛直方向と、90度回転させた水平方向の計4ケースとし、通水下での注入状況を検討するために、通水しながら注入を実施する、c3 配合比 0.25 鉛直方向の1ケースを加えた合計5ケースとした。

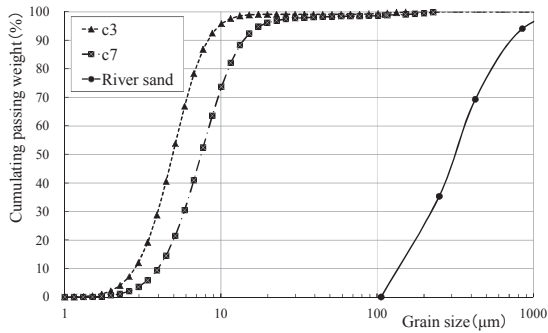


図-2 粒径加積曲線

表-3 実験ケース

case	種類	配合比 c/w(g/g)	粘度 η (dPa·s)	土層の 向き	備考
1	c3	0.25	1.46	鉛直	通水 無し
2				水平	
3	c7	0.52	1.10	鉛直	
4				水平	
5	c3	0.25	1.46	鉛直	通水 下

2.4 実験方法

2.4.1 注入実験

クレー懸濁液の注入範囲を検討するために注入実験を実施した。攪拌注入タンクからコンプレッサーによる50kPaの背圧により、供試体の中央部に設置した注入管から圧入した。注入の終了については、タンク内のクレー懸濁液が空になること、もしくは注入が停止した場合とした。注入範囲については、メジャーにより広がり进行检测した。さらに1分毎に注入量の測定を実施し、注入速度も測定した。また、通水下での注入実験における注水タンク設定高さは、本実験の最大設定高さ $\Delta H=100\text{cm}$ の半分である $\Delta H=50\text{cm}$ （設定動水勾配 $i=0.5$ ）を条件とした。

2.4.2 通水試験

クレー懸濁液注入後の透水係数低減効果の検討および動水勾配と透水係数の関係、さらにはc3およびc7の透水性低減効果の比較を目的に、注入実験終了後に通水試験を実施した。具体的には注入効果の確認として、注水タンクの設定高さを $\Delta H=10\text{cm}$ とし注入前後の透水性を比較した。続いて、注水タンクの設定高さを $\Delta H=12.5\text{cm}$ 毎に最大 $\Delta H=100\text{cm}$ まで、段階毎に通水流量および間隙水圧、水温の測定を実施した。

3. 実験結果

3.1 注入実験

3.1.1 注入範囲

case1~case5のクレー懸濁液注入後の状況について、写真3~写真7にそれぞれ示す。c3（鉛直方向）では左右が少し長い楕円形の形状を示した。具体的な寸法は左右方向については、測定可能である最大の50cmで最小値は上部の30cmとなった。さらに目視による観察から砂層へ均等に注入されていることが確認された。c3（水平方向）でも楕円形に近い形状となった。具体的な寸法は最大で50cm、最小値は30cmとなりc3（鉛直方向）と類似した結果となった。目視による観察から表面は水により少し薄まった状態であったが、砂層に均等に注入されていることが確認できた。一方c7（鉛直方向）では、横方向への広がりが卓越している。

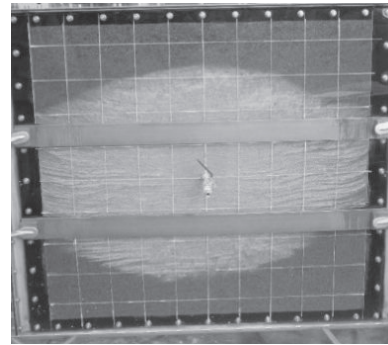


写真-3 注入完了 (c3 鉛直方向)

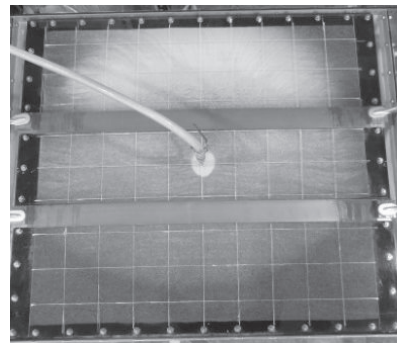


写真-4 注入完了 (c3 水平方向)

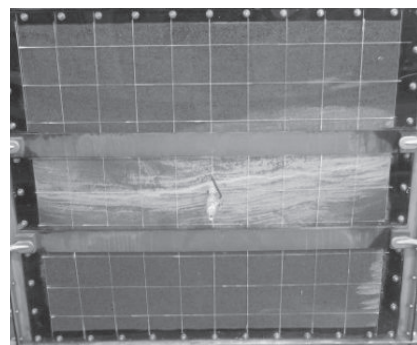


写真-5 注入完了 (c7 鉛直方向)

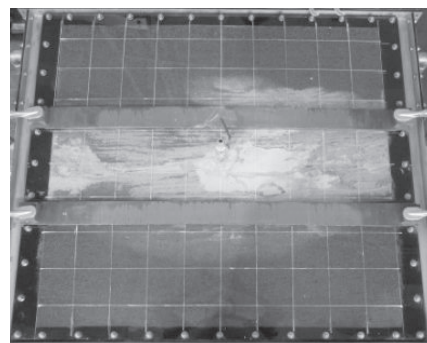


写真-6 注入完了 (c7 水平方向)

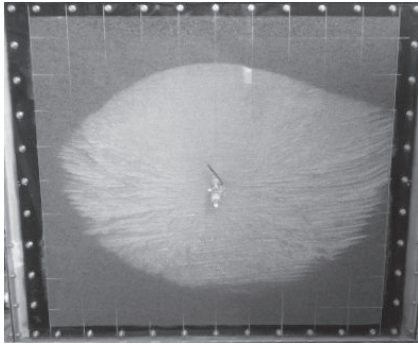


写真-7 注入完了 (c3 鉛直方向, 通水時)

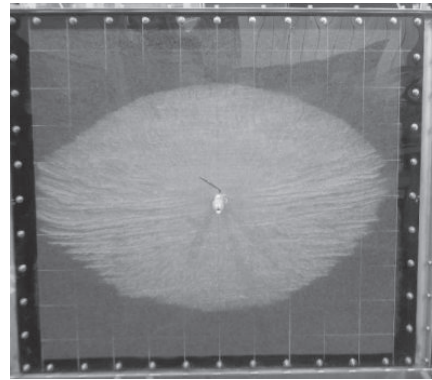


写真-8 注入完了 (c3 鉛直方向)

表-4 注入範囲実験結果

case	種類 (配合比)	方向	最大値 (cm)	最小値 (cm)
1	c3	鉛直	50	30
2	(0.25)	水平	50	30
3	c7	鉛直	50	10
4	(0.52)	水平	50	18
5	c3 (0.25)	鉛直	50	32

具体的な寸法は最大で 50cm, 最小値が 10cm 程度であった。さらに目視による観察から, 割裂浸透注入の痕跡が確認できた。c7 (水平方向) では, c7 (鉛直方向) に比べ若干の広がり確認された。具体的には最大で 50cm, 最小で 18cm であり, 目視による観察では割裂浸透注入の痕跡が確認できた。c7 において割裂浸透注入が発生した原因として, c3 より粒径が大きく密度が大きいことが考えられる。また c3 (水平方向) と同様に砂層とアクリル板の間に若干の水ミチが出来たことにより, クレーが薄くなっている状況が確認できたが, この水ミチにおいて試料の移動やクレー流亡等は確認されなかったため, 大きな影響は無いと考える。以上の結果について, 注入範囲の最大値および最小値の一覧表を表-4 に示す。

以上より, c3 と c7 の注入の範囲を比較すると, c3 は c7 より注入範囲が広く浸透性が高いことが確認できた。

次に通水下の注入について, クレーは左から右に少し延びていることが確認された。これは正面から見て左から右へ通水していることから, その影響を受けていることにより, 少し右寄りの楕円形となった。具体的な寸法は最大 50cm で最小値は 32cm となり非通水状況と同じ傾向を示した。つまり, 設定動水勾配 $i=0.5$ の条件下の通水時において, 非通水時と同等に注入が可能であることが判明した。

3.1.2 クレー懸濁液の注入量

クレー懸濁液の注入量について, c3 (鉛直方向) では 43.8L, c3 (水平方向) では 46.6L, c7 (鉛直方向) では 40.2L, c7 (水平方向) では 55.1L の結果であった。しかし, c7 は注入中に流亡が確認されていることから c3 および c7 は川砂に対して概ね同量の注入が可能と推測される。ここで c3 (鉛直, 水平), c7 (鉛直, 水平) の注入速度の経時変化を図-3 および図-4 にそれぞれ示す。

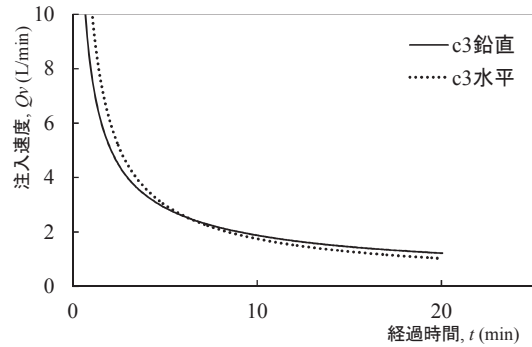


図-3 注入速度経時変化 (c3 鉛直, 水平)

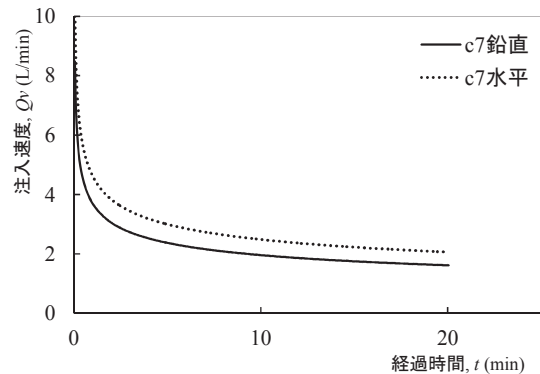


図-4 注入速度経時変化 (c7 鉛直, 水平)

c3 では鉛直方向と水平方向は概ね同じ傾向を示した。緩やかな曲線を示していることから, 注入直後から 10min 程度まである一定の速度を保ちながら浸透している状況が確認される。一方で c7 でも鉛直方向と水平方向は同じ傾向を示した。しかし注入直後から急激に注入速度が遅くなり, その後は一定の速度で注入されていることから, 割裂浸透注入の傾向を示していることが想定できる。以上より, 粒度および懸濁液の密度が小さい c3 は, c7 に比べ広い範囲で浸透しながら広がる性質であることが示唆された。

3.1.3 再現性

注入実験の再現性について, 各実験の代表として c3 (鉛直方向) の注入完了の状況を写真-8 に示す。前述した写真-3 の注入範囲は最大 50cm で最小値は 30cm の結果に

対し、写真-8の注入実験の検測結果でも、最大50cmで最小値は30cmとなりほぼ同じ範囲の結果が確認された。さらに目視による形状も概ね類似していると判断でき、注入実験の再現性が確認できた。

3.2 通水試験

クレ懸濁液注入後の通水試験の結果において、case1~case4の4種類について結果を整理した。c3およびc7の流量経時変化図を、それぞれ図-5および図-6に示す。c3鉛直方向の流量は注水タンクの設定高さ $\Delta H=12.5\text{cm}$ では $Q=0.72\text{L/min}$ となり、注水タンク高さの変化毎に約 $Q=0.5\text{L/min}$ の流量が増加し、最終的には $Q=4.49\text{L/min}$ の結果となった。c3水平方向の流量は、注水タンクの設定高さ $\Delta H=12.5\text{cm}$ で $Q=0.43\text{L/min}$ となりc3鉛直方向より少ない結果となった。注水タンク高さの変化毎に約 $Q=0.6\text{L/min}$ の流量が増加し、最終的には $Q=5.12\text{L/min}$ となり、c3鉛直方向に比べて大きい値となった。さらに注水タンクの設定高さが $\Delta H=50\text{cm}$ の時に、流量は水平方向が鉛直方向に比べて大きい値となった。c7鉛直方向の流量は、注水タンクの設定高さ $\Delta H=12.5\text{cm}$ で $Q=1.34\text{L/min}$ となり、注水タンク設定高さが $\Delta H=37.5\text{cm}$ までは大きく増加し、それ以降については約 $Q=0.4\text{L/min}$ の流量が増加し、最終的には $Q=4.94\text{L/min}$ の結果となった。c7水平方向の流量は、注水タンクの設定高さ $\Delta H=12.5\text{cm}$ で $Q=0.89\text{L/min}$ でc7鉛直方向より少ない結果となった。注水タンク高さの変化毎に約 $Q=0.4\sim 0.8\text{L/min}$ の流量が増加し最終的には $Q=5.23\text{L/min}$ となりc7鉛直方向に比べて大きい値となった。さらに注水タンクの設定高さが $\Delta H=75\text{cm}$ の時に、流量は水平方向が鉛直方向に比べて大きい値となった。

ここで図-5および図-6から、鉛直方向では、c3に比べてc7の流量は多くなり、水平方向についても同様にc3に比べてc7の流量が多くなった。つまりc7に比べてc3の流量は少ない傾向であることが判明した。

写真-9にc3鉛直方向の通水試験前および通水試験後のクレ懸濁液の状況を示す。大きな変化は無いものの、注入範囲の周辺および表面は、流亡が原因で少し薄くなっていることが確認できる。

3.3 透水係数低減効果と動水勾配の関係

c3およびc7の透水係数 k_{15} および動水勾配 i の経時変化をそれぞれ図-7および図-8に示す。c3鉛直方向では、透水係数 k_{15} は時間の経過とともに大きな変化は無く、緩やかに増加する傾向であることが確認できる。動水勾配 i は時間の経過とともに増加傾向を示し、 $t=70\text{min}$ から増加傾向から変化が無くなる傾向を示した。一方でc3水平方向では、透水係数 k_{15} は時間の経過とともに、c3鉛直方向に比べ増加する傾向が確認でき、 $t=50\text{min}$ からは大きく増加する傾向を示した。また、動水勾配 i は時間の経過とともに増加傾向を示したが、 $t=40\text{min}$ から急激に減少傾向となり、最終的に動水勾配 $i=0.04$ 程度まで低下し

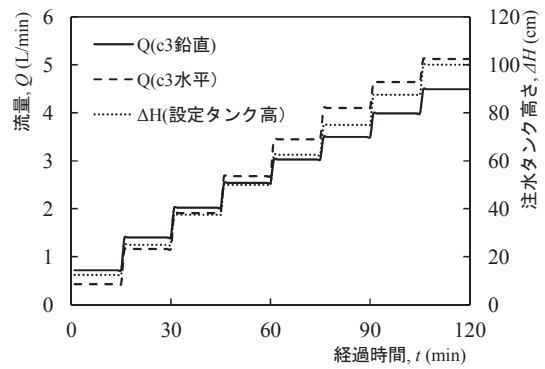


図-5 流量経時変化図 (c3 鉛直, 水平)

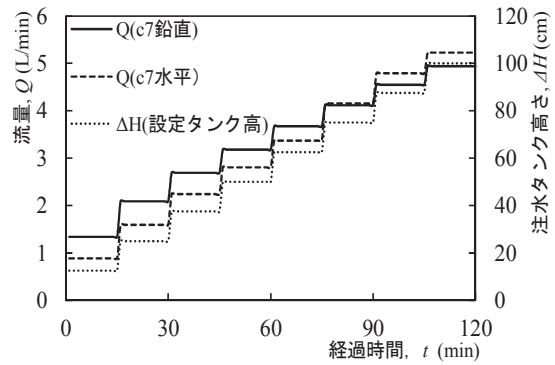


図-6 流量経時変化図 (c7 鉛直, 水平)

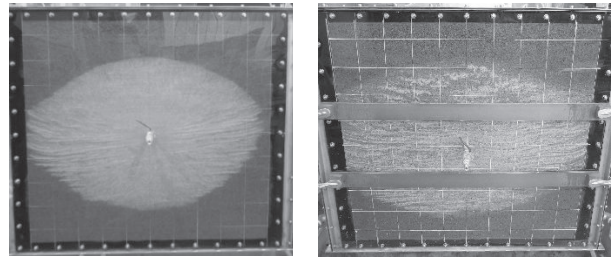


写真-9 通水試験前後 (c3 鉛直方向)

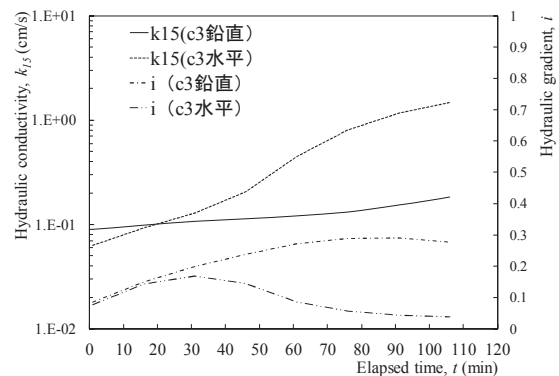


図-7 透水係数経時変化図 (c3 鉛直, 水平)

た。つまりc3鉛直方向では、透水係数の低減効果の持続が確認できたが、水平方向については透水係数の低減効果が維持できていないことが確認できた。c7鉛直方向では透水係数 k_{15} は時間の経過とともに大きな変化は無いが全体的に高い傾向を示している。動水勾配 i は時間の経過とともに緩やかな増加傾向を示し、 $t=70\text{min}$ から増

加傾向から変化が止まる傾向を示した。一方で c7 水平方向の透水係数 k_{15} は $t=60\text{min}$ まで非常に緩やかに増加傾向を示したが、それ以降から急激な増加傾向を示した。動水勾配 i は時間の経過とともに緩やかな増加傾向を示したが、 $t=60\text{min}$ から急激に減少傾向を示した。つまり c7 鉛直方向では c3 と同様に透水係数の低減効果の持続が確認できたが、水平方向については透水係数の低減効果が維持できていないことが確認できる。c3 および c7 の水平方向について、実験装置のアクリル板と試料の間隙が水圧により大きくなり、広範囲の水ミチが出来たことが実験中の観察からも確認できたことから、透水性が高くなった要因の一つであることが推察される。

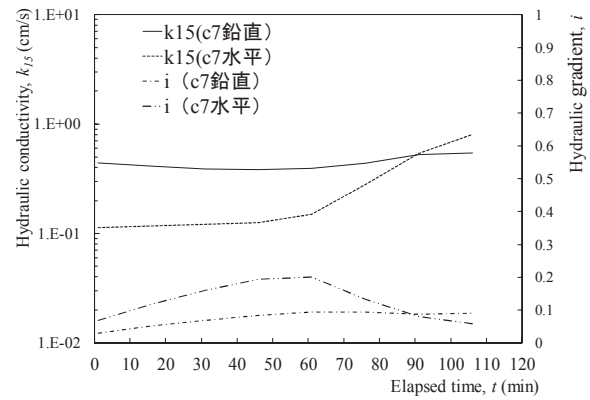


図-8 透水係数経時変化図 (c7 鉛直, 水平)

4. 考察

4.1 注入範囲

4.1.1 浸透距離の検討

理論値を用いて注入範囲の浸透距離を検討する。クレ一懸濁液が含まれる粒子グラウトの浸透距離 $R_e(\text{cm})$ は式(1)によって推定できることが示されている⁹⁾。

$$R_e = \frac{\gamma_w \cdot g \cdot h \cdot r_e}{2S} + r \quad (1)$$

c3鉛直方向について式(1)から、注入孔半径 $r=0.5(\text{cm})$ 、水の単位体積重量 $\gamma_w=1.0(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、重力加速度 $g=981(\text{cm}/\text{s}^2)$ 、注入圧 $h=510(\text{cm})$ とし、間隙等値半径 $r_e(\text{cm})$ およびゲル強さ $S(\text{dyne}/\text{cm}^2)$ は前述した粒子グラウトの浸透距離推定式の条件⁹⁾より、通水前の懸濁液の粘度(表-3) および試料の注入前透水係数(表-6) から推定した。その結果 $R_e \approx 42.1(\text{cm})$ となった。同様に c3 水平方向、c7 鉛直方向、c7 水平方向をそれぞれ計算した結果、 $R_e \approx 35.7(\text{cm})$ 、 $R_e \approx 79.6(\text{cm})$ 、 $R_e \approx 55.6(\text{cm})$ となる。理論値に差がある理由として、供試体の試料の透水係数の違いが要因の一つであることが考えられる。

表-5 に理論値の結果と実験から得られた注入範囲について、case1~case4 までの 4 種類の最小値をそれぞれ示す。理論値との比較は実験結果の最小値と比較することにした。理由として、実験装置には通水、排水用の配管があり、その方向は水が流れやすい。そのため、注入圧により押し出されやすいことから、楕円状に広がりやすくなっているため、安全側を考慮し配管装置が付いていない方向とした。c3 鉛直方向では理論値が 42.1cm に対して実験値が 30cm、c3 水平方向では理論値が 35.7cm に対して実験値が 30cm となり、理論値と実験値は近い値を示した。c7 鉛直方向では理論値が 79.6cm に対して実験値は 10cm、c7 水平方向では理論値が 55.6cm に対して実験値は 18cm となり理論値と実験値は大きな差異が生じる結果となった。

表-5 注入範囲検討

case	種類 (配合比)	方向	理論値 (cm)	実験 最小値 (cm)
1	c3(0.25)	鉛直	42.1	30
2	c3(0.25)	水平	35.7	30
3	c7(0.52)	鉛直	79.6	10
4	c7(0.52)	水平	55.6	18

この原因として、c3 は浸透注入に対し、c7 は割裂浸透注入の傾向を示しているため、一定の方向へ浸透が卓越したことが原因と考えられる。また c7 懸濁液は c3 懸濁液に比べ、密度が高いこと、粒径が大きいことから c3 に比べて浸透しにくいことが考えられる。以上のことから、c3 懸濁液について、理論式は適用可能であることが示唆された。

4.1.2 間隙水圧の検討

マルチスキャニングバルブシステムで測定した間隙水圧から、流線網を作成し通水状況を確認するとともに、クレ一懸濁液注入後の通水状況について評価を行った。

図-9 に c3 鉛直方向 (case1) における注入前通水時 ($\Delta H=12.5\text{cm}$) の流線網を、図-10 にクレ一懸濁液注入後の通水時 ($\Delta H=12.5\text{cm}$) の流線網をそれぞれ示す。注入前の流線網(図-9)では全体的に間隙水圧が低く、さらに左から右に向かって間隙水圧が低くなっていることが確認できる。つまり、水は左から右へ流れていることを示す。注入後の流線網(図-10)においても、左から右にかけて間隙水圧が低くなっていることが確認できる。流線網から注入範囲を想定した結果、注入範囲は楕円形により示された。この注入範囲からクレ一による影響範囲(r)は約 20cm 程度と想定できる。実験結果から得られた最小値の 30cm に比べて、上と下側の 10cm 程度において透水性が高くなっていることが想定できる。つまり注入範囲の周辺は通水によりクレ一の間隙内移動が始まっていることが推測できる。以上より、間隙水圧からカオリクレーの注入効果が確認出来ること、さらに通水によるカオリクレーの間隙内移動の状況が確認出来ることが判明した。

4.2 透水係数低減効果の要因

通水試験の結果から透水係数を算出し、クレー懸濁液の注入前および注入後の透水係数について、注水設定タンク高さを $\Delta H=10\text{cm}$ とした時の4種類 (case1, case2, case3, case4) の結果を図-11に示す。さらに注入前後の透水係数および透水係数の低減率を表-6に示す。透水係数は温度補正による k_{15} としている。図-11から4種類において注入前に比べ注入後では、透水係数は低い値を示している。つまりクレー懸濁液により透水性の低減効果を示している。表-6からc3では鉛直方向および水平方向において、それぞれ72%および70%の透水係数低減効果となった。一方c7では鉛直方向および水平方向において、それぞれ26%および62%の透水係数低減効果となった。図-12にクレー残留質量と注入後の透水係数の関係を示す。c3では鉛直方向および水平方向における供試体内の残留クレー質量がほぼ等しく、一方でc7は鉛直方向より水平方向の供試体内の残留クレー質量が多かったことが要因と考える。さらにc3はc7よりクレーの残留率が大きいことから透水性の低減効果が大きいと考える。以上のことからc7に比べc3は透水係数の低減効果が大きいことが示唆された。

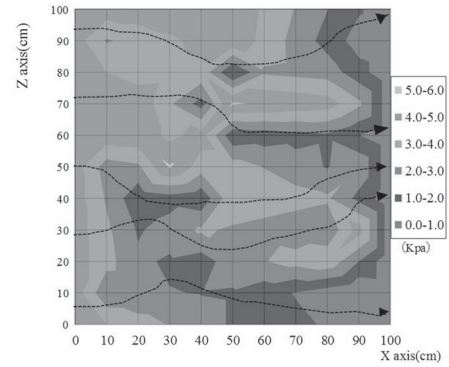


図-9 流線網 (注入前 c3 鉛直 $\Delta H=12.5\text{cm}$)

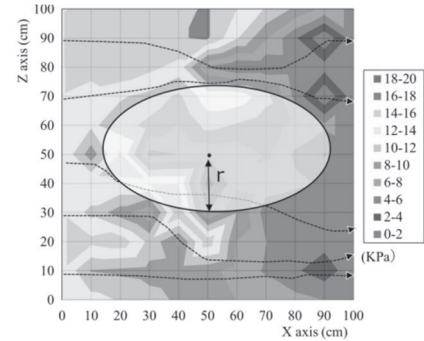


図-10 流線網 (注入後 c3 鉛直 $\Delta H=12.5\text{cm}$)

4.3 多粒子限界流速による評価

クレー懸濁液の間隙内移動について c3 鉛直方向の実流速と修正多粒子限界流速の経時変化図を図-13に示す。修正多粒子限界流速は式(2)により表される¹⁰⁾。

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

ここで、 ρ_s :土粒子の密度 (g/cm^3), ρ_w :液体の密度 (g/cm^3), μ :水の粘性係数 ($\text{g/(cm}\cdot\text{s)}$), d :土粒子径 (cm), g :重力加速度 (g/cm^3), n :間隙率, m : Reynolds数により求まる定数, 係数 $\alpha = \mu / \mu_c$, μ_c :懸濁液の粘性係数である。図-13より実流速は修正多粒子限界流速より遅いことから、実流速では粒子は間隙内を移動しないこととなるが、実際には移動している。要因として、クレー注入範囲の周辺は濃度が薄くなり粘性が低下している。また注入範囲周辺の流速が速くなりクレーの間隙内移動が発生していることが推測できる。表-5の実験最小値である、注入範囲の30cmを非通水断面とした想定通水断面の断面積により流速を算出した。図-13より注入範囲を想定した実流速は修正多粒子限界流速を超えていないものの、 $t=80\text{min}$ 程度から近づいている。図-7 透水係数経時変化図の k_{15} (c3鉛直) でも $t=80\text{min}$ 付近から透水係数の変化が確認出来ることから、クレー粒子の間隙内移動が始まっていることが推測できる。

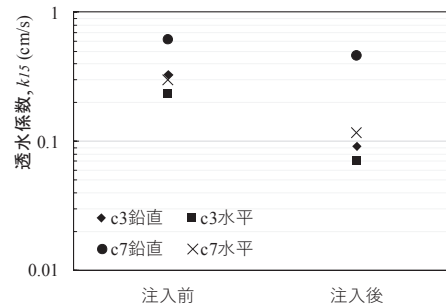


図-11 透水係数低減効果 ($\Delta H=10\text{cm}$)

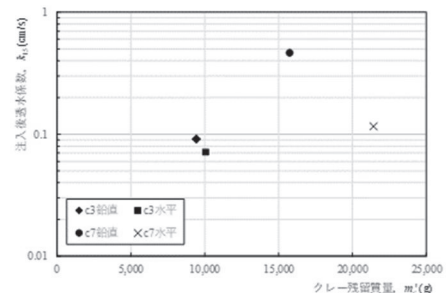


図-12 クレー残留質量と注入後の透水係数の関係

表-6 透水係数 k_{15} (注入前後)

case	向き	種類 (配合比)	注入前 k_{15} (cm/s)	注入後 k_{15} (cm/s)	低減率 (%)
1	鉛直	c3	3.30.E-01	9.13.E-02	72%
2	水平	(0.25)	2.36.E-01	7.15.E-02	70%
3	鉛直	c7	6.21.E-01	4.62.E-01	26%
4	水平	(0.52)	3.02.E-01	1.16.E-01	62%

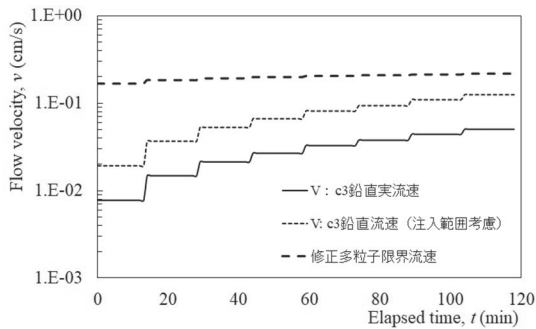


図-13 実流速経時変化図 (c3 鉛直)

5. まとめ

本研究では、大型である断面二次元土層を使用した実験により、クレー懸濁液の注入範囲および透水性低減効果を調べるため、既往の研究で効果があった配合により、注入実験および通水試験を行った。注入実験の結果および浸透距離の推定式から注入範囲の評価を行うとともに通水試験から透水係数低減効果の検証を行った。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 粒径の小さなc3クレー懸濁液は粒径の大きなc7クレー懸濁液に比べて浸透性が高いこと、さらに通水中の条件においても非通水時と同様に注入が可能であることが示唆された。
- (2) c3クレー懸濁液は、浸透注入で楕円形に注入されること、一方でc7クレー懸濁液は浸透割裂注入の傾向を示し横長に注入されることが判明した。
- (3) クレー懸濁液の注入範囲について、c3では理論式が適用可能であるが、c7では適用が難しいことが示唆された。
- (4) 間隙水圧から作成した流線網から、注入効果の確認および注入後の通水時におけるクレーの間隙内移動が想定できることが示唆された。
- (5) 透水係数低減率はc3の鉛直方向および水平方向では約70%の低減効果に対し、c7では鉛直方向が26%、水平方向62%となり、c7よりc3の方が透水係数低減効果は大きいことが判明した。
- (6) 実流速と修正多粒子限界流の評価から、クレーの間隙内移動の要因として、注入後の粘性の低下および注入範囲周辺の流速が通水断面の減少により、局所的に速くなるのが要因であることが推測された。

今後は、c3クレーを対象に注入範囲検討の理論値の最大値(約80cm)を採用した、幅160cm×高さ160cmの大型土層での検討や、移流拡散方程式によるシミュレーションにて広がり等の検証を実施する。また、縦横断方向の注入間隔の検証を行い、新たなトンネル補助工法開発の実現に向けて大きく進歩するものと期待する。

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ならびに一般社団法人中国建設弘済会技術開発支援事業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竹内元春氏(令和4年3月岡山大学卒業、現レイスグループ)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) 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.
- 2) 赤塚光洋，大野康年，伊藤孝芳，下坂賢二，八嶋厚，村田芳信，荻谷敬，花田有紀：注入効率と品質を向上させた薬液注入工法の開発—新しい地山パッカと特殊シール材の効果—，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol.77，No.1，pp.70-86，2021.
- 3) 森麟，森満雄，江本佑橋，阿部道雄，田村昌仁：砂質地盤における薬液注入の効果判定指標としてのN値に関する実験的研究，土質工学会論文報告集，Vol.34，No.2，pp.123-130，1994.
- 4) 吉田了三，磯田英典，福山誠，松井悟：超微粒子セメントグラウトの浸透性に関する実験，第37回地盤工学研究発表会，pp.839-840，2002.
- 5) 上村健太郎，佐々木隆光，伊藤和也，永尾浩一，末松直晃：微粒子注入における間隙指標を用いた地盤浸透の可否評価方法，地盤工学ジャーナル，Vol.13，No.2，pp.135-147，2018.
- 6) 白石知成，岩佐健吾，石井卓，斎藤亮：エタノール・ベントナイトスラリーの岩盤内グラウト材料としての適用性検討，トンネル工学会論文集，Vol.16，pp.69-80，2006.
- 7) 高橋啓介，小松満，瀧本弘治：カオリンクレー注入による砂層の透水性低下工法に関する水平一次元浸透実験，第54回地盤工学研究発表会，pp.863-864，2019.
- 8) 高橋啓介，小松満，岩田徹，瀧本弘治：カオリンクレー懸濁液圧入による高透水性砂質層の透水性低減効果に関する基礎的研究，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol.77，No.3，pp.233-247，2021.
- 9) 土質工学会：地盤改良の調査・設計から施工まで，pp.272-274，1978.
- 10) 高橋啓介，小松満，岩田徹，瀧本弘治，柴原晃：カオリンクレー懸濁液の注入特性と移動特性に与える要因の検討，地盤と建設，Vol.38，No.1，pp.51-58，2020.

(2022年6月13日 受付)