

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04254

研究課題名（和文）ゼロエミッションを可能とする現地土をダイレクトに用いる止水技術開発と効果検証

研究課題名（英文）Development and verification of groundwater cut-off technology using field-generated soil directly to enable zero emissions

研究代表者

小松 満（Komatsu, Mitsuru）

岡山大学・環境生命自然科学学域・教授

研究者番号：50325081

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、新たな粘土系注入工法の開発を目的に、現場試料に着目した。まず、現場試料から細粒分を抽出する方法について検討した上で、抽出した細粒分による懸濁液の特性を調べた。さらに、水平一次元カラム内の供試体に懸濁液を圧力注入した際の挙動や、動水勾配を段階的に上昇させた通水実験における透水性の変化を調べることで、その効果を検証した。その結果、粘度を高めるためにベントナイトを混入させた懸濁液において高い透水性低減効果を示した。また、回転式断面二次元土槽を用いた注入範囲の検討から、粒径の小さなカオリンクレ懸濁液は粒径の大きいものに比べて浸透性が高いことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地盤の止水を目的とした注入材の特性を明らかにする研究はこれまでも数多く実施されているが、産業副産物を注入材として用いる点に着目した研究事例はみられない。本研究では、セメントや薬液を用いたものに代わる環境への負荷が少ない材料を用いた新たな注入工法を創造することにより、河川堤防における高透水性地盤やトンネル掘削時の湧水に対する注入以外にも汚染地下水の拡散制御壁への利用、地盤沈下の原因となる粘土層の圧密沈下防止対策としての利用等への応用、砂質地盤を注入により粘性地盤に改良することで液状化を防止する技術への応用等への波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on in-situ samples to develop a new clay-based injection method. First, a method for extracting fine grains from the field samples was studied, and then the characteristics of the suspension with the extracted fine grains were investigated. The effect of the method was verified by examining the behavior of the suspension when it was pressure-injected into the specimen in a horizontal one-dimensional column and the change in hydraulic conductivity in a hydraulic experiment in which the hydraulic gradient was increased in steps. The results showed that the suspension mixed with bentonite to increase viscosity was highly effective in reducing hydraulic conductivity. The results of the injection range study using a rotating sectional 2D soil tank suggested that the permeability of the kaolin clay suspension with smaller particle size was higher than that of the suspension with larger particle size.

研究分野：地下水

キーワード：注入 懸濁液 透水係数 粘度 通水実験

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の河川堤防の浸透による破堤の事例を踏まえ、緊急処置としてパイピング等を引き起こす危険性のある基礎地盤の遮水性を確保する必要があるが、大規模な改修では多大な費用と期間を要するため、新たな工法の開発が急務となっている。また、都市域の地下工事において、トンネル内への湧水による地表陥没事例が発生していることから、止水対策が必要である。しかし、現状では湧水発生時に対処するのみで、事前の対策は実施されていない。本研究では、注入材として新たに粒度調整した現場土に着目し、これまでの発想を180度転換した現場状況に応じた環境に配慮した低コストで効率的な「ゼロエミッション」注入工法の開発を目的に、粒度の調整方法及びその透水係数の低減率と注入範囲などの効果を評価する室内試験を実施することで工法の実現に向けた基盤となる成果を創出する。

地盤の止水を目的とした注入材は水ガラス系やウレタン系を主とする薬液系と、セメントや粘土系を主とする非薬液系に分類され、各注入材の特性を明らかにする研究が多く実施されている。ここで、選定する工法の注入材の種類や使用量によっては、環境への負荷が大きな問題となるケースがある。特に、化学的な材料を使用する場合は、排水の処理だけでなく地下水の浄化が必要となることもあり、止水工法やその注入材の選定には十分に配慮しなければならない。

一方、止水を目的とした注入を実施する地盤の状況を考えてみると、河川堤防における高透水性地盤やトンネル掘削時の湧水を生じている切羽などでは、高い動水勾配下での流速が生じていることが考えられる。このような条件においてはこれまで薬液系が使用されており、通水下における非薬液系での止水効果を検証した事例はほとんど見られない。このことから、これまでの常識とは異なり、より環境に配慮した技術開発が求められている。

2. 研究の目的

上記の背景に対し、これまでに砂層の透水性を低下させる低コストで環境に配慮した粘土系注入材の開発を目的に、カオリンクレーに着目した研究を実施してきた。これは、セメント等の非薬液系注入材と同様に、砂質層の空隙に圧入充填する方法であるが、固化しないことから、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。なお、カオリンクレーは、数 μm 程度の粒子の天然材料であることから、中長期的な地下水への浸透においても環境負荷が少なく、さらに、ベントナイトのように懸濁液にする際に膨潤しないことから性質が変化せず、攪拌することにより繰り返し使用できるメリットを有している。具体的には、高透水性の砂層（透水係数： 10^{-3}m/s オーダー）に対し、高い動水勾配（2.7程度）の一次元浸透条件下でカオリンクレー懸濁液を圧力注入した実験での結果から、透水係数を最も低下させることのできる最適な配合比が存在し、最大2オーダー程度の止水効果が得られることが判明した。さらに、クレー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、この影響には懸濁液の粘性が密接に関わっていることを明らかにした。この研究を進めていく中で、環境への負荷を最大限低減させるためには、止水を行う地盤自体を材料にすることに着目した。具体的には、(1)懸濁液中の細粒分の粒度の調整方法、(2)透水係数の低減率、(3)注入範囲と流亡状況、を設定し、止水技術の効果を評価する室内試験を実施する。

3. 研究の方法

(1) 注入材の作製（現地発生土の粒度調整）

まず、数種類の現地発生土で懸濁液を作製し、攪拌後の沈殿状況から懸濁液に含まれる細粒分を把握する。この結果に基づいて、数 μm の粒子が含まれる沈殿層を抽出できるような注入懸濁液抽出機を試作する（アイデアとしては、任意の時間に任意の層の懸濁液を抽出できるようにセパレートタイプの円筒形の容器をベースとする）。なお、現地発生土の細粒分が少ない場合は、可搬型の粉砕機を使用し、懸濁液の濃度を炉乾燥、粘度を回転粘度計により測定する。

(2) 水平一次元通水下での注入実験

これまでに実績のある図-1に示した水平一次元の通水下での注入実験を実施する。ここでは、濃度や粘度による変化を踏まえて注入圧力を設定するとともに、注入前後の流量と動水勾配の変化から透水係数の低減効果を整理する。さらに地盤内の細粒分の注入状況をマイクロSCOPEで確認するとともに、流亡した懸濁液をフラクションコレクターで時間毎に採取して粒度分布を調査する。なお、透水係数の低減率の具体的な数値について、河川堤防やトンネル工事での透水性地盤の改良効果の有無を示す数値的目標をパイピング発生やトンネル内湧水による切羽の崩落などの条件を勘案し、流量を1/100以下にすることを目標に、透水係数の低下幅を2オーダーに設定する。

(3) 二次元通水下での注入実験と注入範囲算定理論の構築

研究室で所有する回転式二次元土槽を用いて断面および平面での注入実験を行い、流速と注入範囲の関係を明らかにする。なお、亀裂性岩盤を対象とした理論式による注入範囲と坑道採掘半径の関係の既往の研究による算出方法を参考に、未固結地盤への適用は未知であることから、

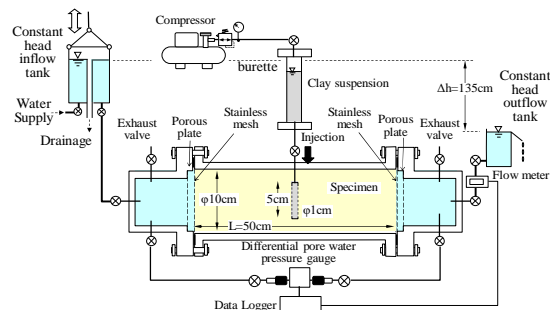


図-1 一次元浸透条件下の圧力注入試験

注入材料の特性と注入圧力・注入量から注入範囲を算定できる理論式を構築する。

4. 研究成果

(1) 注入材の作製（現地発生土の粒度調整）

図-2 に、抽出手順のイメージ図を示す。まず、ストークスの理論式を用いて沈降速度を求め、液面から一定距離の高さまで特定の粒径の粒子が沈降する時間を算出した上で、懸濁液攪拌後、該当の高さまでの懸濁液を抽出した（一次抽出）。さらに、抽出した懸濁液を再度沈降させ、上澄み液を抽出することで懸濁液を濃縮し、配合比を高めた（二次抽出）。ここで、沈降速度を求める際に必要となる懸濁液の粘性係数は、回転式粘度計で測定した。抽出したまさ土細粒分の粒径加積曲線を図-3、懸濁液中の細粒分(s)と水(w)の質量配合比(s/w)及び粘性係数を表-1 に示す。抽出した細粒分の 50% 粒度はカオリンクレ- c7 と比較的近く、カオリンクレ- よりも粒径幅が広い。一方、抽出した細粒分懸濁液の質量配合比は注入効果の高い値が得られたものの、粘度は想定 $1 \sim 1.5 \text{ dPa} \cdot \text{s}$ 程度より小さいことから、十分な効果が得られない（粘度が低いと注入後に地下水流の影響で流亡する）可能性があることが判明した。

そこで、増粘剤として天然材料であるベントナイトを添加することとした。注入材として作製したまさ土及び川砂の抽出細粒分ベントナイト配合懸濁液の配合比及び粘度を測定した結果を表-1 に示す。

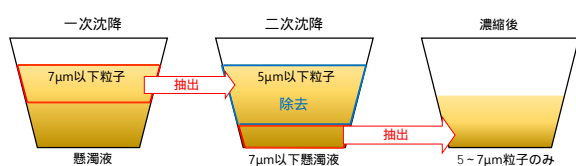


図-2 細粒分抽出のイメージ図

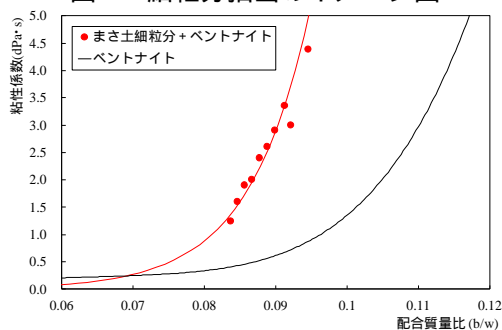


図-3 懸濁液と粘性係数の関係

表-1 懸濁液の配合比及び粘度測定結果

(a) まさ土				
種類		細粒分のみ	ベントナイト混合	
質量配合比	s/w (g/g)	0.339	0.355	0.294
	b/w (g/g)	-	0.069	0.084
	(s+b)/w (g/g)	-	0.424	0.378
粘性係数	η (dPa·s)	0.51	1.41	2.37
(b) 川砂				
種類		細粒分のみ	ベントナイト混合	
質量配合比	s/w (g/g)	0.402	0.302	0.290
	b/w (g/g)	-	0.093	0.097
	(s+b)/w (g/g)	-	0.395	0.386
粘性係数	η (dPa·s)	0.51	1.40	2.35

s/w : 抽出細粒分質量/水質量, b/w : ベントナイト質量/水質量

(2) 水平一次元通水下での注入実験

作製した懸濁液の注入状況及び通水時の透水性の変化挙動を把握するために図-1 に示す水平一次元実験を実施した。装置は両端に不織布、ステンレスメッシュ（孔径 $109 \mu\text{m}$ ）、多孔板を設置した直径 10 cm 、長さ 50 cm のアクリル製カラムに、所定の動水勾配を設定するために、上流側には高さを調整できる定水位タンクを内径 15 mm のビニールホースで接続した。また、供試体に作用する水頭は流入側の蓋における水頭をマンメータにより、通水流量は供試体の流出側に設置したデジタル流量計（流量が計測下限値の場合は一定時間毎の流出重量）によりそれぞれ計測した。注入する懸濁液は、攪拌後、背圧が作用できるピュレット内に入れ、カラム中央に設置した直径 $1 \text{ cm} \times$ 長さ 5 cm （開口率 45% ）のステンレスメッシュ（孔径 $109 \mu\text{m}$ ）を巻き付けた注入管を介して実施し、注入量はピュレット内の水位変化から求めた。なお、通水には、あらかじめ脱気した水道水を用いた。実験ケースの一覧を表-2 に示す。開き目 4.5 mm のふるい通過分のまさ土と川砂をそれぞれ 1 ケースとし、これらには注入をせず、元の地盤の透水係数の値として比較に用いた（G, R）。次に、まさ土と川砂のそれぞれに対して、先述のように $106 \mu\text{m}$ ふるい残留分に粒度調整した細粒分を除去した試料を注入対象として用いた（注入前：GS, RS）。注入する懸濁液は、それぞれ細粒分を抽出した試料のみで作製したもの（懸濁液：F, 注入後：GS-F, RS-F）、さらに粘度を 2 種類に調整したもの（懸濁液：FB, 注入後：GS-FB, RS-FB）を用いた。また、比較のために、まさ土のみベントナイトのみで作製したもの（懸濁液：B, 注入後：GS-B）の効果も確認した。なお、乾燥密度は手動による動的締固めを踏まえ、通水時に浸水沈下が生じて供試体上部に隙間が生じないように考慮した上で、可能な限り高透水性となるように低い値を設定した。

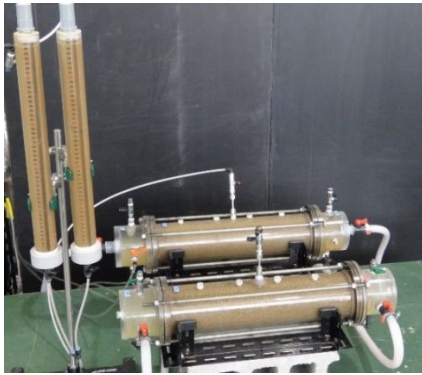


写真-1 水平一次元注入・通水実験状況

表-2 実験ケース

ケース	供試体		注入懸濁液	
	種類	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	種類	粘性係数 η (dPa·s)
G	まさ土	1.60		
GS-F		1.52	まさ土細粒分	0.51
GS-FB	まさ土細粒分除去	1.54	ベントナイト配	1.41
		1.55	合まさ土細粒分	2.37
GS-B		1.55	ベントナイト	1.56
		1.49		2.38
R	川砂	1.42		
RS-F	川砂細粒分除去	1.44	川砂細粒分	0.51
RS-FB		1.45	ベントナイト配	1.46
		1.44	合川砂細粒分	2.35

結果の一例として、細粒分みの懸濁液を注入した供試体における注入前後の透水係数と動水勾配の関係を図-4(a)に示す。注入前はGSとRS、注入後はGS-FとRS-Fで表示している(凡例の[]内は繰り返しの測定回数を示している)。なお、同図には、G[1]及びR[1]の結果も比較のために記載している。細粒分を除去した試料の供試体は、除去する前と比較して、1オーダー程度増加し、動水勾配に対して概ね一定値で推移した。また、注入後の透水係数は、まさ土(GS-F)は、動水勾配に対してやや増加傾向、逆に、川砂(RS-F)は低下傾向を示した。つまり、注入後の供試体の透水係数が、細粒分を除去した供試体や原粒度の供試体の透水係数よりも低下していることが示唆された。また、粘性係数の異なるベントナイトを配合した細粒分懸濁液を注入したまさ土と川砂の供試体における注入前後の透水係数と動水勾配の関係を図-4(b)に示す。注入前はGSとRS、注入後はGS-FBとRS-FBで表示している。注入後の透水係数は、初期段階で注入前から2~3オーダー程度低く、動水勾配の増加に対して徐々に低下し、最終的に4~5オーダー程度まで低下する傾向を示した。また、粘性係数の違いについては、より低いものの方が、透水係数が低くなる結果を示した。

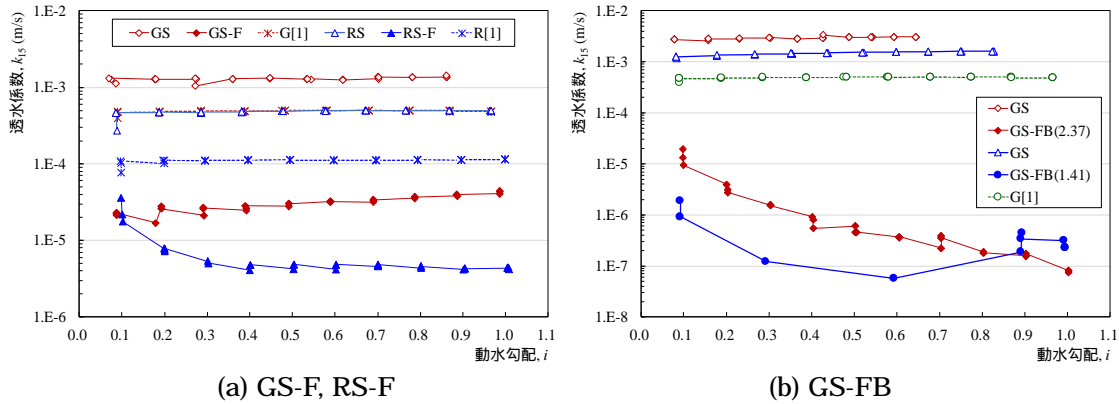


図-4 注入前後の透水係数と動水勾配の関係

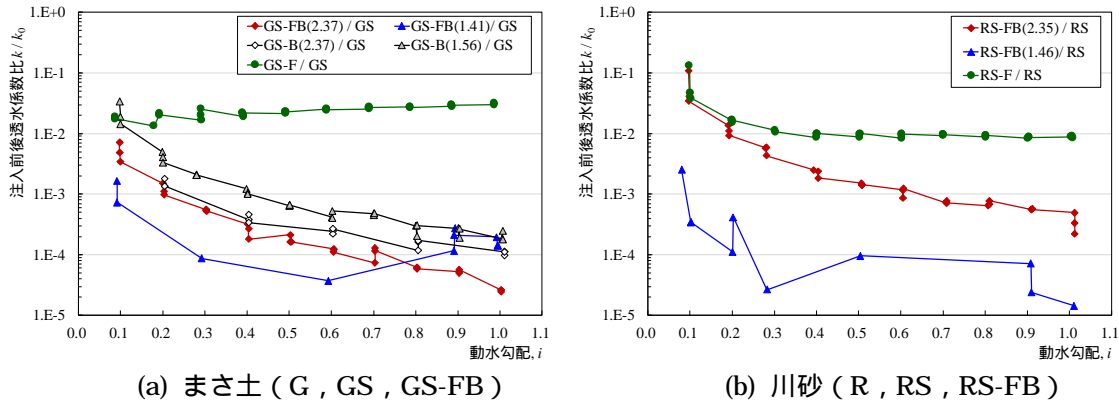


図-5 注入前後の透水係数比と動水勾配の関係

次に、まさ土、川砂のそれぞれに対する注入前後の透水係数比 (k/k_0) と動水勾配の関係を図-5に示す。まず、細粒分みの懸濁液注入のケースでは、透水性の低減効果が1~2オーダー程度であり、動水勾配の上昇に伴って徐々に増加する傾向を示した。一方、ベントナイトのみの懸濁液注入のケースでは、2~4オーダー程度の低減効果が得られることが判明した。さらに、べ

ントナイトを配合した細粒分懸濁液のケースでは、2~4 オーダー程度の低減効果が得られており、懸濁液の粘性係数が低いGS-FB (1.41) やRS-FB (1.46) の方が高い効果が得られることが分かる。なお、動水勾配が $i=0.9$ 以上で透水係数が上昇しているものの、注入後の通水実験において、供試体下流からの懸濁液の流出は確認できなかった。また、川砂に対する結果では、細粒分のみ懸濁液注入のケースでは、1~2 オーダー程度低下し、最終的にまさ土のような動水勾配の上昇に伴う透水性の増加は見られず、概ね2 オーダー程度の一定値で推移した。また、粘性係数の高いケースでは $i=0.3$ 付近から急激に透水性が低下する挙動を示した一方、粘性係数の低いケースでは初期段階からまさ土のケースと同様に3~5 オーダー程度の低減効果を示した。このことから、既往の研究において示されている粘性係数の範囲である約 $1.0 \sim 1.5 \text{ dPa} \cdot \text{s}$ で高い低減効果が得られることが示唆された。

(3) 二次元通水下での注入実験と注入範囲算定理論の構築

実験装置の概略図を図-6、実験状況を写真-2 に示す。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。

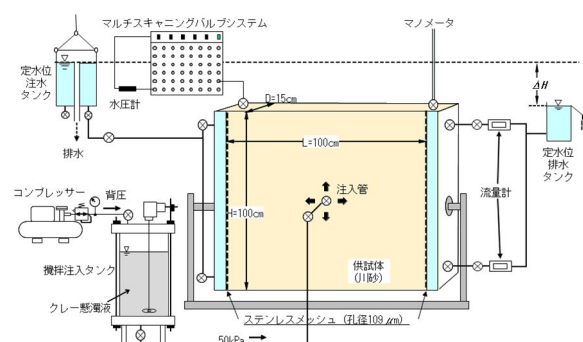


図-6 実験装置概略図

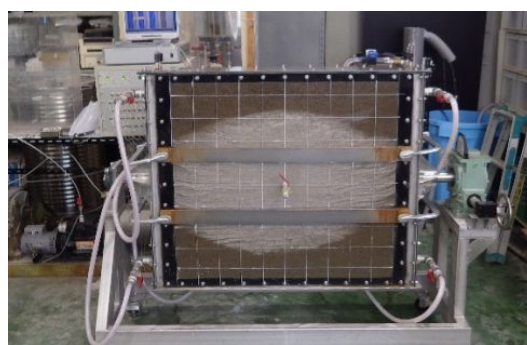


写真-2 実験状況 (鉛直方向)

表-3 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

注入範囲の最大値および最小値の一覧表を表-3 に示す。クレー懸濁液注入後の状況について、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。また、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た。

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-7 に示す。いずれも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。図-7 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。その一方、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。

これらの結果から、粒径の小さなクレー懸濁液は粒径の大きな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。また、注入後の形状に関して、粒径の小さなクレー懸濁液は浸透注入の傾向を示す楕円形であり、粒径の大きなクレー懸濁液は浸透割裂注入の傾向を示す横長であることが判明した。

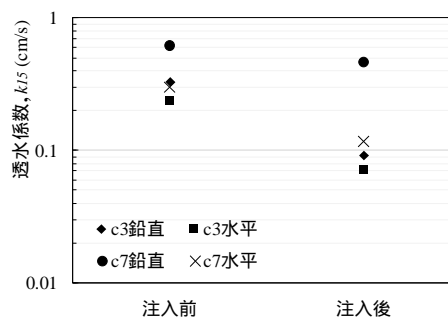


図-7 透水係数の変化 ($H=10\text{cm}$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 柴原 晃, 高橋 啓介, 小松 満	4. 巻 Vol. 40, No. 1
2. 論文標題 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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤と建設	6. 最初と最後の頁 81-88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 柴原 晃, 高橋 啓介, 小松 満	4. 巻 Vol. 40, No. 1
2. 論文標題 現場試料の細粒分を用いた懸濁液注入による透水性低減効果に関する基礎的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤と建設	6. 最初と最後の頁 25-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 柴原 晃
2. 発表標題 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
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------