

## 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

A Basic Study on the Effectiveness in Permeability Reduction by Grouting Pressure Suspension Using  
Fine Particles of Soil Sample at the Site柴原 晃<sup>1)</sup>, 高橋 啓介<sup>2)</sup>, 小松 満<sup>3)</sup>

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, pfo85g9n@s.okayama-u.ac.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

本研究では、高透水性の基礎地盤に細粒分を注入することで透水性を低下させる粘土系注入工法の開発を目的に、現場状況と環境に配慮した現場試料から抽出した細粒分を用いた新たな懸濁液に着目した。水平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た結果、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。さらに、注入時のグラウタビリティー比や注入後の間隙内移動挙動から考察を行った結果、既往の研究で示されている粘度の範囲が重要であることが示唆された。

キーワード：注入，懸濁液，透水係数，粘度，通水実験

(IGC : D-04)

## 1. はじめに

近年、河川堤防の浸透による破堤事例を踏まえ、その現象把握と対策工法に関する研究が進められており、基礎層を構成する材質の違いによってパイピングの進行規模が異なることが示されている。具体的には、基礎層の下部が高透水性で上部がそれよりも低い透水性で構成された基礎地盤において、法尻付近で大きな上向きの動水勾配が発生することで法尻付近からの漏水が生じ、その漏水を契機に、上部基礎地盤からの噴砂や堤体陥没により決壊に至る可能性があることが判明している。

現状での浸透対策工法には、堤体を対象とした強化工法と排水工法、基礎地盤を対象とした遮水工法が採用されている<sup>2)</sup>。このうち、基礎地盤の遮水工法は、高透水性の基礎地盤によるパイピングの発生を防止するために川表遮水工法やブランケット工法によって地下水流を遮断させるが、その一方で、基礎地盤の透水性を低下させることができればパイピング防止につながると考えられる。また、河川堤防などの盛土構造物において、粗粒な土粒子が形成する骨格を維持したまま、細粒な土粒子が流出するサフュージョン現象が問題視されており、この現象が経年的な堤体の安定性低下を引き起こす危険性が指摘されている<sup>3),4)</sup>。このような微細な土粒子の流出は透水性の増加とともに促進されることから、透水性を低下させて進行を止める対策が必要となる。

地盤の透水性を低下させる注入材は、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る<sup>5)</sup>。これまでに、地盤内における液状固結材の浸透挙動<sup>6)</sup>や地下水の流れが速い地盤に

おける特殊な薬液注入工の開発<sup>7)</sup>、複数の微粒子を用いた配合における注入材の開発<sup>8)</sup>など、各注入材の特性を明らかにする研究が進められている。

一方、著者らは新たな粘土系注入材として、粒径が5~7 $\mu\text{m}$ 程度の岡山県産のカオリンクレーに着目し、高い動水勾配の次元浸透条件下で粒径の異なる2種類のカオリンクレーによる懸濁液を圧力注入した場合の挙動を調査した<sup>9)</sup>。その結果、砂質層の透水性を低減させる最適な粘度の範囲が存在し、その範囲は約1.0~1.5 dPa $\cdot$ sであることを示した。つまり、粘性が小さすぎると浸透はするが流亡してしまう、逆に粘性が大きすぎると浸透が困難であることから、適度な粘性でカオリンクレーが残留し、透水係数低減に寄与することが判明した。また、注入の可否はグラウタビリティー比により評価できること、注入後の間隙内の移動にも粘度が大きく影響していることを確認した。さらに、これらの結果を踏まえ、粘土系注入材による河川堤防の基礎地盤の透水性低下工法として、上述のカオリンクレー懸濁液の注入後における止水効果をモデル実験により確認している<sup>10)</sup>。

上述のカオリンクレーの他、超微粒子セメント<sup>11)</sup>等は数 $\mu\text{m}$ 程度の粒子グラウトとして位置付けられることから、対象とする地盤自体の細粒分を材料として注入しても効果が得られる可能性が考えられる。つまり、原地盤自体を用いることで、より環境に配慮した注入工法となる。そこで、本報では、これまでのカオリンクレーによる懸濁液の研究で得られた知見に基づき、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

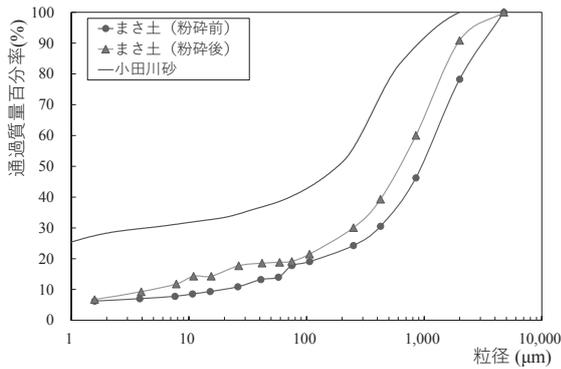


図-1 粒径加積曲線（まさ土，川砂）

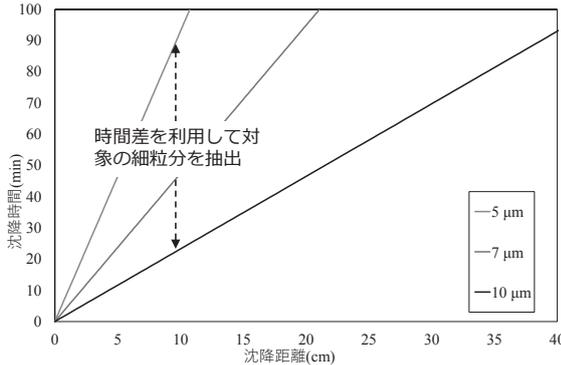


図-2 任意の距離における到達時間

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。

## 2. 現場試料試料の物理特性と注入材の作製方法の検討

### 2.1 試料の物理特性

開き目 4.5mm のふるいで中礫分以上を取り除いた岡山県産のまさ土及び岡山県の一級河川である小田川で過去に噴砂が確認された氾濫平野（倉敷市真備町内）から採取した河床堆積物（以下、川砂と称する）を用いた。まさ土は試料の細粒分を増加させることを目的に、粉碎機（アズワン、エクストリームミル MX-1200XTM）を用いて試料を粉碎した。測定した粒径加積曲線を図-1 に示す。ここで、まさ土は JIS A 1204「土の粒度試験方法」に準じた浮ひようによる沈降分析、川砂は土壤粒度分布計測装置（METER 社、PARIO 土壤分布計測装置、以下 PARIO 装置）を用いて測定した。まさ土は粉碎後に細粒分が増加していることが分かる。

### 2.2 現場試料の細粒分の抽出方法の検討

既往の研究で用いたカオリンクレーは、市販されている岡山県産の 2 種類（c3、c7 と称する）であり、50% 粒径は c3 の約 5 $\mu$ m、c7 が約 7 $\mu$ m である。また、透水性低減効果を示した懸濁液のクレー粒子と水の質量配合比は

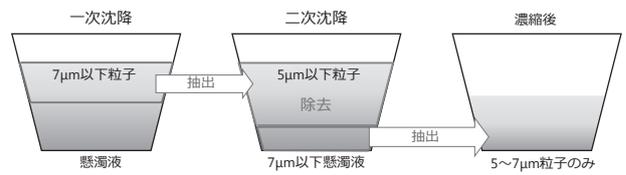


図-3 細粒分抽出のイメージ図

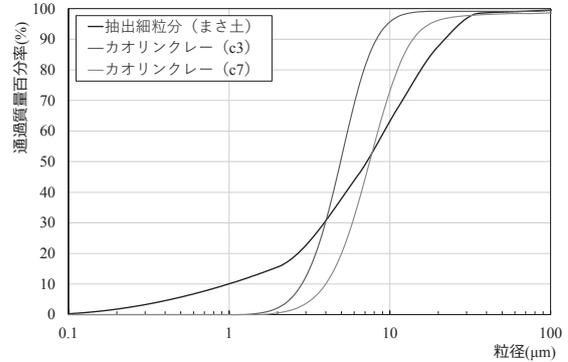


図-4 粒径加積曲線（抽出細粒分，カオリンクレー）

表-1 抽出細粒分懸濁液の質量配合比及び粘度測定結果

質量配合比	s/w (g/g)	0.350
粘性係数	$\eta$ (dPa · s)	0.597

0.25～0.52 である<sup>9)</sup>。そこで、現場試料からこの粒径に近い土粒子を抽出する方法について検討した。具体的には、図-2 に示すように沈降速度の差を利用し、懸濁液中で粒径 7 $\mu$ m 粒子より大きい粒子を沈降させ、粒径 7 $\mu$ m 以下の粒子が存在する部分を抽出した。

図-3 に、これらの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（TVC-10 東機産業、測定範囲（使用ロータ）：0～5dPa · s (No.1), 0～20dPa · s (No.2)) で測定した。なお、抽出に用いた容器は透明の 10L パケツ（直径約 27cm）であり、約 2L の懸濁液の抽出に用いた土量はまさ土で約 45kg、抽出までに要した時間は一次抽出が約 15 時間、二次抽出が約 16 時間であった。

### 2.3 細粒分懸濁液の抽出

上述の方法で抽出したまさ土細粒分の粒径加積曲線を図-4、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% 粒径はカオリンクレー c7 と比較的近く、カオリンクレーよりも粒径幅が広い（4 $\mu$ m 以下の粒子が約 30%かつ 10 $\mu$ m 以上の粒子が約 40%程度含まれている）。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 1～1.5dPa · s 程度より小さいこと

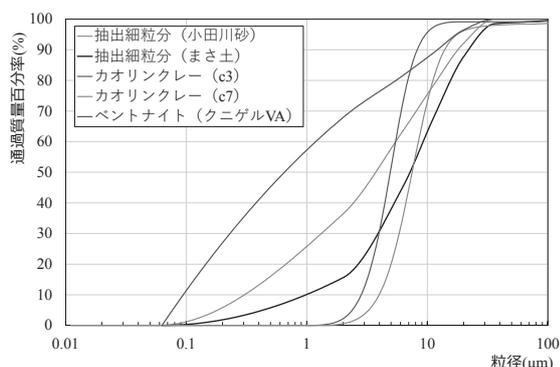


図-5 ベントナイト及び抽出細粒分の粒径加積曲線

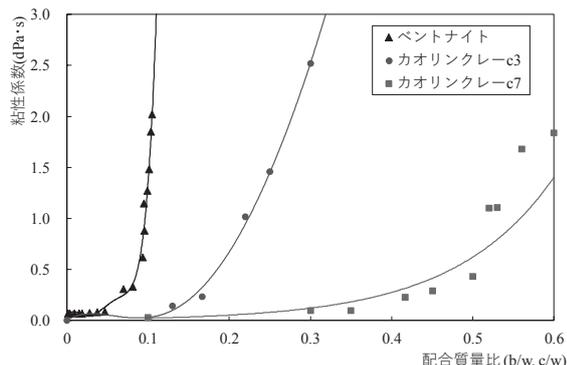


図-6 懸濁液と粘性係数の関係

表-2 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	$\eta$ (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	$\eta$ (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

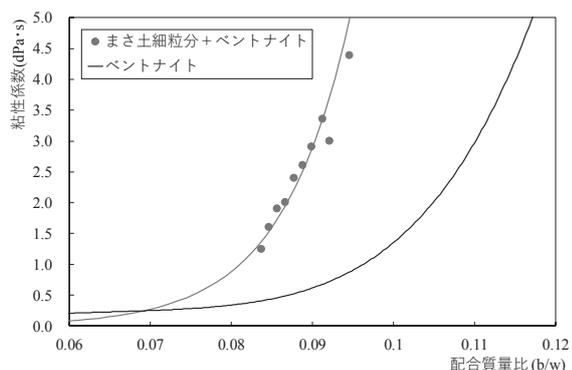


図-7 懸濁液と粘性係数の関係

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。

## 2.4 細粒分懸濁液の粘度調整

増粘剤には各種掘削工法における安定液（泥水）用の各種高分子化合物が販売されているが、本研究では水環境への影響を極力低減することを目的としていることから、天然材料を添加することとした。

カオリンクレーの他に粘土系注入材として、既往研究<sup>14)</sup>を参考に国産の天然ベントナイトであるクニゲルVA（クニミネ工業株式会社、以下、単に「ベントナイト」と称する）を対象とした。まさ土および川砂の抽出細粒分との粒度分布の比較を図-5、ベントナイト及び2種類のカオリンクレーをそれぞれ用いた懸濁液の粘性係数を比較した結果を図-6に示す。ここで、配合質量比は水(w)に対するベントナイト(b)とカオリンクレー(c)の乾燥質量の比で表している。抽出した細粒分に対して増粘剤の質量は可能な限り小さい方が良いので、カオリンクレーよりも少ない添加質量で粘度の増加が見込めるベントナイトを添加することとした。

これらの結果を踏まえ、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-2に示す。粘性係数の異なる懸濁液及び抽出細粒分のみそれぞれ3種類の懸濁液を作製した。また、まさ土の抽出細粒分の懸濁液中にベントナイトを添加した際のベントナイト-水質量配合比(b/w)と粘性係数の関係を整理した結果を図-7に示す。抽出した細粒分懸濁液中の元々の粘性の影響で、同じ粘性係数で比較すると、表-2に示した通り、まさ土細粒分のみ懸濁液は水よりも粘性が高いことから、ベントナイトのみよりも約2%程度少ないベントナイト量で粘度が上昇することが判明した。

## 3. 水平一次元カラムによる注入及び通水実験

### 3.1 実験装置

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実施した水平一次元実験装置の概略図を図-8に示す。両端に不織布、ステンレスメッシュ（孔径109 $\mu$ m）、多孔板を設置した直径10cm、長さ50cmの亚克力製カラムに、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15mm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1cm×長さ5cm（開口率45%）のステンレス

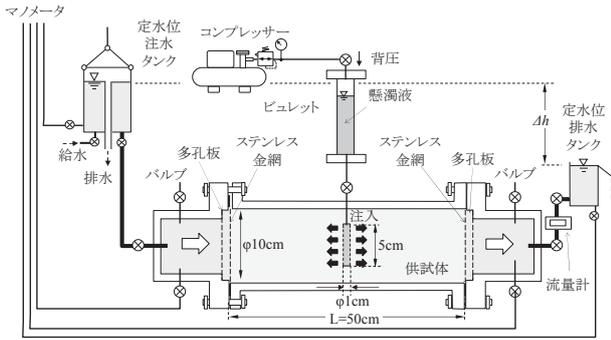


図-8 水平一次元実験注入・通水装置概略図

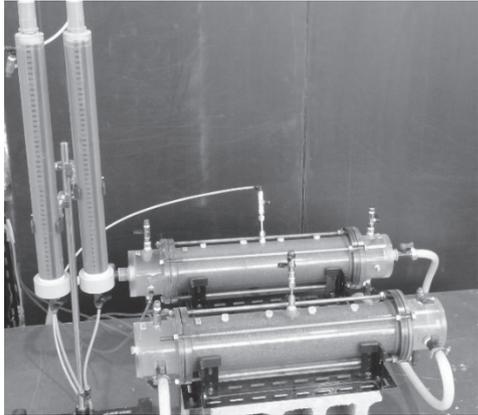
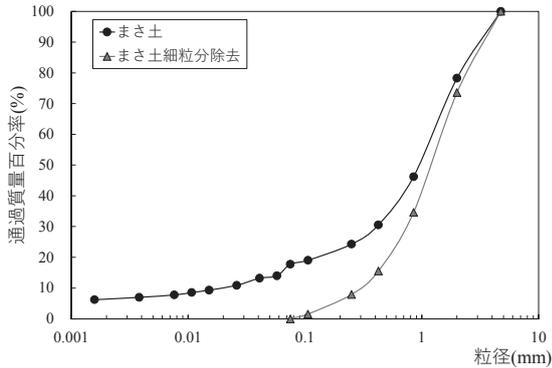
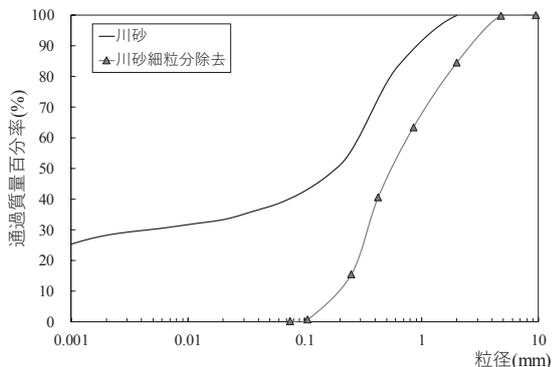


写真-1 水平一次元注入・通水実験状況



(a) まさ土



(b) 川砂

図-9 試料の粒径加積曲線

メッシュ（孔径 109 $\mu$ m）を巻き付けた注入管を介して実施し、注入量はビ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。

表-3 実験ケース

ケース	供試体		注入懸濁液	
	種類	乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	種類	粘性係数 $\eta$ (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	1.44	川砂細粒分	0.51
RS-FB	分除去	1.45	ベントナイト配	1.46
		1.44	合川砂細粒分	2.35

### 3.2 供試体の作製

試料には、先述した細粒分抽出の際に用いた試料と同様のまさ土（土粒子密度  $\rho_s=2.630$  g/cm<sup>3</sup>）及び川砂（土粒子密度  $\rho_s=2.676$  g/cm<sup>3</sup>）を用いた。

図-9 にそれぞれの粒径加積曲線を示す。懸濁液の注入は、細粒分の少ない高透水層を対象としていることから、さらに 106 $\mu$ m ふるい残留分に粒度調整した細粒分を除去した試料も準備した。なお、細粒分を除去した川砂は、PARIO 装置により測定した。

供試体は所定の含水比に調整した試料をアクリル製カラム内に直径  $\phi 60$ mm の締固め棒を用い、1層あたり 2cm で所定の乾燥密度になるように、手動の動的締固めによって作製した。その後、供試体の上流から一定水頭で脱気水を通水することで供試体の飽和度を高めた。なお、飽和度の確認は背圧を作用させる方法等があるが、ここでは、カラム壁面の気泡が消散した状況を目視で確認することにより概ね飽和状態であるものと判断した。

### 3.3 実験方法及び実験ケース

実験方法は、まず、事前通水として流入側の定水位タンクを電動ウインチにより最大 50cm まで 15 分間隔で 5cm ずつ段階的に上昇させ、水頭差と流出量を計測した。その後、水頭差を 0cm に下げて、流出量がなくなったのを確認した後、供試体の中央部から予め配合してビュレットに入れた懸濁液を背圧 50kPa の一定条件で圧入した。その際、注入量の経時変化をビュレット内の水位変化から計測した。懸濁液は注入が自然に停止するか、もしくは供試体両端から流出するまで継続した。なお、圧入時間は最も長いもので 10 分程度であった。懸濁液は分散剤を添加していないことからビュレット内で細粒分が徐々に沈殿を生じるが、図-2 に示した通り、10 分程度の圧入時間では懸濁液中の細粒分の沈降距離はわずかであり、ビュレット内での沈殿は生じていないが、圧入時間が長くなる場合は、ビュレット内での攪拌が必要となる。

圧入後は、再度事前通水と同様に定水位タンクの高さを最大 50cm まで 15 分間隔で 5cm ずつ段階的に上昇させ、水頭差と流出量を計測するとともに、供試体内の懸濁液

表-4 懸濁液注入結果

(a) まさ土					
ケース /項目	GS-F (0.51)	GS-FB (1.41) (2.37)		GS-B (1.56) (2.38)	
T (min)	30.0	18.0	15.0	7.4	21.5
Q (cm <sup>3</sup> )	1043.9	1084.8	1104.7	1138.74	1046.4
V(cm <sup>3</sup> /min)	34.80	60.27	73.64	153.9	48.67
(b) 川砂					
ケース /項目	RS-F (0.51)	RS-FB (1.46) (2.35)			
T (min)	13.0	10.2	13.0		
Q (cm <sup>3</sup> )	793.5	1073.7	876.57		
V(cm <sup>3</sup> /min)	61.04	105.3	67.43		

※ ( ) 内の数値は粘性係数を示す。

の状況を観察した。実験終了後、供試体内の土粒子質量を炉乾燥により測定するとともに、粒度分布を測定した。

実験ケースの一覧を表-3に示す。開き目4.5mm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 $\mu$ 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。

### 3.4 注入実験結果

懸濁液注入結果として、各ケースにおける注入時間 T (min)、全注入量 Q (cm<sup>3</sup>)、注入速度 V(cm<sup>3</sup>/min)の一覧を表-4に示す。いずれも途中で注入が停止したものはなく、供試体端から懸濁液の一部が流出した時点で終了した。なお、表内の( )は、粘性係数の値を示している。

注入量は、川砂の供試体の間隙率(約45%)がまさ土の供試体の間隙率(約40%)よりも大きいにも関わらず、RS-F(0.51)及びRS-FB(2.35)が他よりもやや少なかった。なお、ここでの間隙率の値は供試体の乾燥密度の平均値と土粒子密度の値から算出した。また、注入速度の差異については、供試体や懸濁液の種類による明確な傾向は認められなかった。

### 3.5 通水実験結果

#### 3.5.1 細粒分除去前供試体 (G, R)

細粒分を除去する前の試料に対する通水実験結果とし

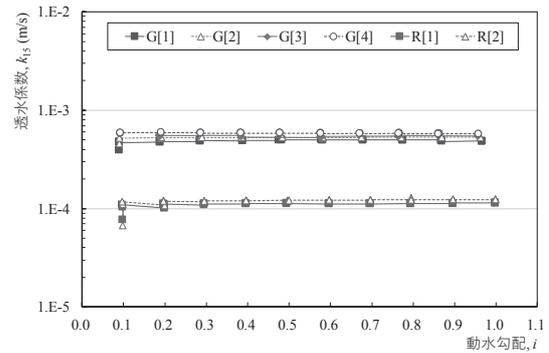


図-10 透水係数と動水勾配の関係 (G, R)

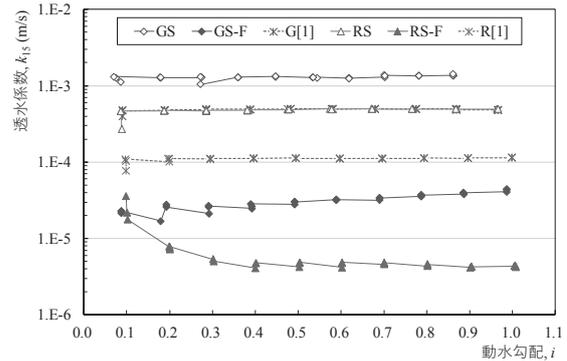


図-11 注入前後の透水係数と動水勾配の関係 (GS-F, RS-F)

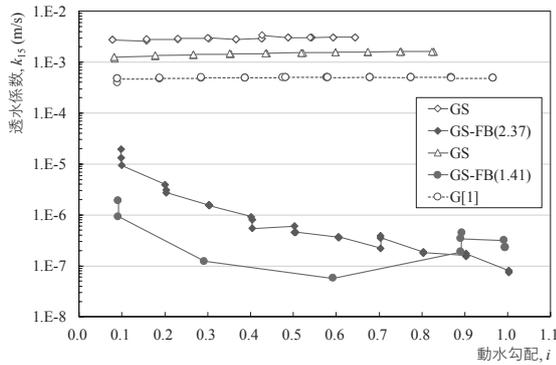
て、透水係数と動水勾配の関係を図-10に示す。試料に含まれる細粒分による目詰まりの有無を確認するため、まさ土(G)は4回、川砂(R)は2回の繰り返し通水(1回の通水時間:15分×10段階=150分)を実施した(凡例内の( )内の数字は繰り返しの回数を表している)。川砂の初期段階(i=0.1)で透水性の増加が認められるものの、その後は概ね一定値で推移した。

#### 3.5.2 細粒分懸濁液注入供試体 (GS-F, RS-F)

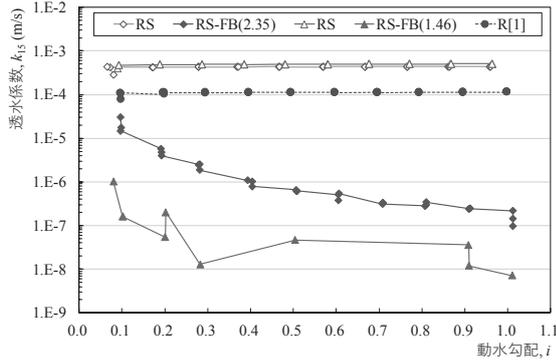
細粒分のみ懸濁液を注入した供試体における注入前後の透水係数と動水勾配の関係を図-11に示す。注入前はGSとRS、注入後はGS-FとRS-Fで表示している(凡例の[ ]内は繰り返しの測定回数を示している)。また、同図には、図-10に示したG[1]及びR[1]の結果も比較のために記載している。細粒分を除去した試料の供試体は、除去する前と比較して、1オーダー程度増加し、動水勾配に対して概ね一定値で推移した。また、注入後の透水係数は、まさ土(GS-F)は、動水勾配に対してやや増加傾向、逆に、川砂(RS-F)は低下傾向を示した。つまり、注入後の供試体の透水係数が、細粒分を除去した供試体や原粒度の供試体の透水係数よりも低下していることが示唆された。

#### 3.5.3 ベントナイト配合細粒分懸濁液注入供試体 (GS-FB, RS-FB)

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-12にそれぞれ示す。注入前はGSとRS、注入後はGS-FBとRS-FBで表示している



(a) まさ土 (G, GS, GS-FB)



(b) 川砂 (R, RS, RS-FB)

図-12 注入前後の透水性係数と動水勾配の関係 (GS-FB, RS-FB)

(凡例の ( ) 内は粘性係数の値を示し, GS, RSなどの同じ記号のものは, 同じ試料で別の供試体を表している). 同図においてもG[1]及びR[1]の結果を比較のために記載している. まさ土の注入前の細粒分を除去した試料の供試体での透水性係数に差異が認められる. 表-3に示した供試体の作製条件には明確な差は無いことから, 供試体作製時の間隙分布のわずかな違いを示しているものと考えられる. 一方, 川砂においては, 同様の差異は認められない.

注入後の透水性係数は, 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, 透水性係数が低くなる結果を示した.

### 3.5.4 ベントナイト懸濁液注入供試体 (GS-B)

ベントナイトのみで作製した懸濁液をまさ土の供試体に対して注入した結果を図-13に示す. 注入前はGS, 注入後はGS-FBで表示している (凡例の ( ) 内は粘性係数の値を示し, [ ]内は繰り返しの測定回数を示している.). 通水前の供試体において, 先述と同様の要因と考えられる差異が認められた. なお, 粘性係数の高い方の懸濁液 (2.38) を注入する前の供試体のみ, 実験時間の都合で動水勾配を0.1ずつ増加させた結果を示している. 注入後の透水性係数は, 初期段階で注入前から1~2オーダー程度低く, その後はベントナイト配合細粒分懸濁液同様に動水勾配の増加に対して徐々に低下し, 最終的に3~4オー

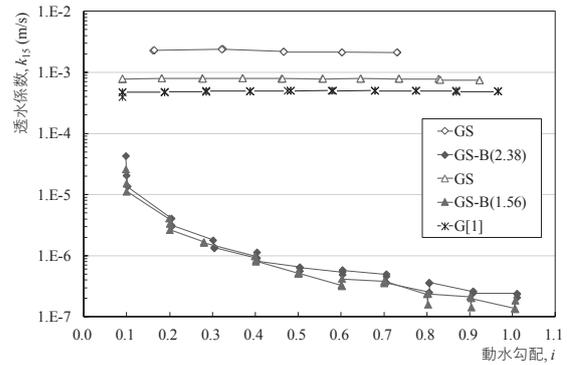


図-13 注入前後の透水性係数と動水勾配の関係

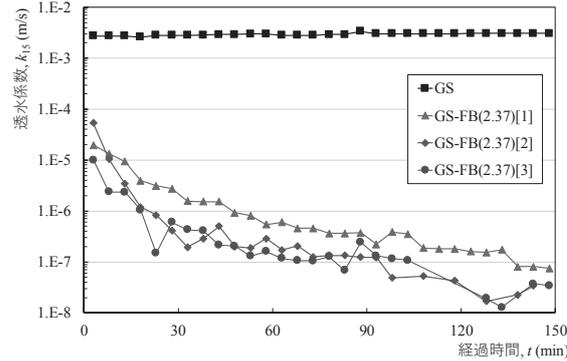


図-14 透水性係数と動水勾配の関係 (GS-FB(2.37))

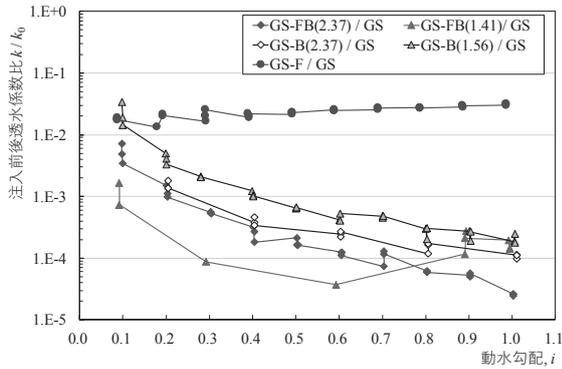
ダー程度まで低下する傾向を示した. また, 粘性係数の違いについては, 明確な差異は認められなかった.

## 4. 考察

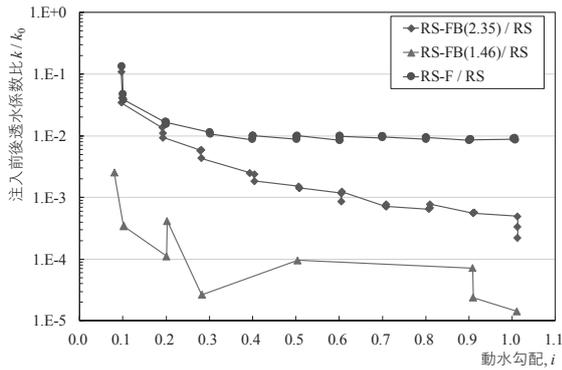
### 4.1 注入効果の検証

動水勾配の増加に対する透水性低下挙動を示した供試体のうち, ベントナイト配合の細粒分懸濁液を注入したまさ土のケース GS-FB (2.37) に対して繰り返し通水を行った結果を図-14に示す. 3回の繰り返し通水 (1回の通水時間: 15分×10段階=150分) を実施したところ (凡例内の ( ) 内の数字は繰り返しの回数を表している), 動水勾配の増加に対する透水性低下挙動は毎回同様の傾向が見られるとともに, 初期の透水性係数が徐々に低下した. つまり, 注入した細粒分が動水勾配の増加に伴って目詰まりを生じるとともに, 水圧除荷後, 一部は完全に元に戻ることなく, 徐々に透水性を低下させていることが示唆された.

次に, まさ土, 川砂のそれぞれに対する注入前後の透水性係数比 ( $k/k_0$ ) と動水勾配の関係を図-15に示す. まず, 細粒分のみ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, ベ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



(a) まさ土 (G, GS, GS-FB)



(b) 川砂 (R, RS, RS-FB)

図-15 注入前後の透水係数比と動水勾配の関係

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。

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<sup>9)</sup>において示されている粘性係数の範囲である約1.0~1.5dPa・sで高い低減効果が得られることが示唆された。

#### 4.2 グラウタビリティー比による注入可否の検証

注入対象地盤の土粒子径から懸濁液型の注入材の浸透可否を評価する指標である次式(1)で示されるグラウタビリティー比<sup>14)</sup>を用い、懸濁液粒子の注入可否の状況を考察した。

$$GR = D_{15}/G_{85} \quad (1)$$

ここで、 $D_{15}$ ：注入対象地盤の15%粒径、 $G_{85}$ ：懸濁液粒子の85%粒径であり、 $GR > 15 \sim 24$ であれば注入可能、 $GR < 11$ であれば注入不可である。表-5にグラウタビリティー比による注入可否を検討した結果を示す。 $GR$ の値からはいずれも注入可となり、実験結果と整合した。

表-5 グラウタビリティー比による注入可否検討結果

ケース	GS-FB	GS-B	GS-FB
実験結果	○注入可	○注入可	○注入可
$GR (D_{15}/G_{85})$	25.8 ○注入可	37.3 ○注入可	18.7 ○注入可

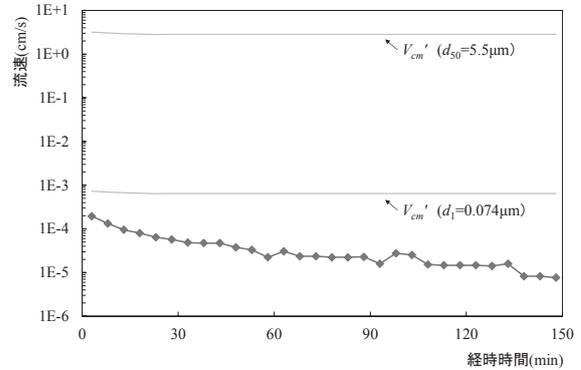


図-16 多粒子限界流速と実流速の比較

#### 4.3 実流速および多粒子限界流速の比較

水平浸透流に対する多粒子限界流速式<sup>14)</sup>の粘性を考慮した次式の補正式<sup>15)</sup>を用い、それぞれの流量の経時変化を基に、供試体内の実流速の経時変化として表すとともに、式(2)中の*d*の値に粒径加積曲線における任意の通過質量百分率(*P*)に相当する粒子径*d<sub>P</sub>*を代入して求めたケースGS-FB(2.37)に対して限界流速(その粒子が移動し始める流速)の経時変化を整理した結果を図-16に示す。

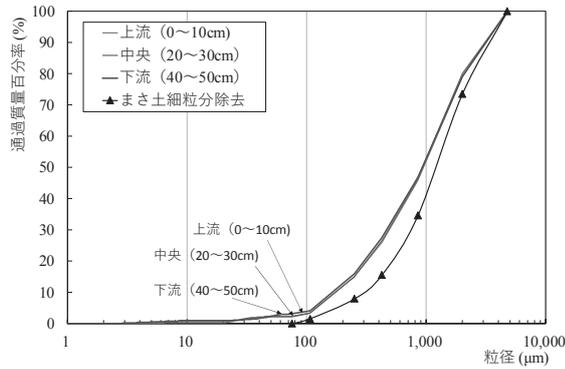
$$V_{cm}' = n^{1/m} \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w(\rho_s - d_w) g d^3}{54(\alpha\mu)^2} + 1} - 1 \right\} \quad (2)$$

ここで、 $V_{cm}'$ ：補正多粒子限界流速(m/s)、 $\rho_s$ ：土粒子の密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $\rho_w$ ：液体の密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $\mu$ ：水の粘性係数 (g/(cm・s))、 $d$ ：土粒子径 (cm)、 $g$ ：重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)、 $n$ ：間隙率、 $m$ ：Reynolds数により求まる定数である。

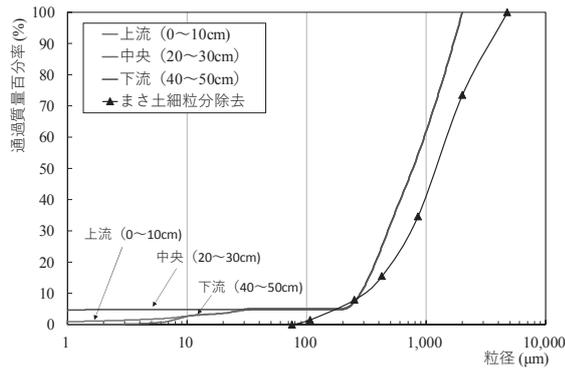
ベントナイト配合の細粒分懸濁液を注入した供試体について、実流速は*P*=1%に相当する限界流速よりも低いことから、間隙内に注入したほぼ全ての細粒分が移動せず、動水勾配の増加による水頭差の上昇によって、さらに目詰まりを生じたものと理解できる。

#### 4.4 通水実験後の供試体内の粒度分布

ベントナイト配合の細粒分懸濁液を注入したケースGS-B (1.56) および GS-FB (2.37) の供試体を試験後に解体し、上流、中央、下流の各10cmの区間毎に採取した試料の粒度分析を行って整理した粒径加積曲線を図-17に示す。特にGS-FB (2.37)において、いずれの区間においても数μm程度の細粒分が数%程度含有しており、注入前の粒度分布から変化していることが確認できた。



(a) GS-B(1.56)



(b) GS-FB(2.37)

図-17 通水実験後の粒径加積曲線

## 5. まとめ

本研究では、透水性の基礎地盤に細粒分を注入することで透水性を低下させる粘土系注入工法の開発を目的に、現場状況と環境に配慮した粒度調整した現場試料を用いた新たな懸濁液に着目し、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た。

以下に本研究で得られた知見を列挙する。

- (1) 現場試料から粒径5~7 $\mu\text{m}$ の土粒子を抽出する方法として、ストークスの法則を用いた沈降時間の推定による2段階の抽出方法を示した。実際に細粒分みの懸濁液を作製した結果、粒径幅は広いものの、平均粒径が5~7 $\mu\text{m}$ の粒子径を有することを確認した。なお、現場試料の細粒分含有率が低い場合は、懸濁液抽出前に粉碎処理を行うことで、効率良く細粒分を抽出することができる。
- (2) 抽出した懸濁液の粘度は透水性低減効果を示す粘度よりも低い値を示したことから、天然材料であるベントナイトを添加することで目標の粘度に調整することが可能となることを示した。
- (3) 懸濁液注入後の通水試験結果から、限られた実験条件の範囲内ではあるが、既往の研究での知見である透水係数の低減効果の高い粘性係数である1~1.5dPa $\cdot$ s程度が該当することが判明した。
- (4) グラウタビリティー比による注入可否を検討した

結果からはいずれも注入可となり、実験結果と整合した。

- (5) 注入後の通水試験後に供試体の区間毎に採取した試料の粒度分析を行って整理した粒径加積曲線から、いずれの区間においても細粒分が数%程度含有していることが確認できた。

今後の課題としては、懸濁液中の粒子径や地盤の間隙構造を踏まえた定量的評価を行うために様々な試料や供試体条件に対する試験結果の蓄積ならびに分析が挙げられる。なお、実現場に適用するにあたっては、細粒分の少ない高透水層を懸濁液注入の対象としていることから、その周囲の細粒分を多く含む層、例えば被覆層からの細粒分の抽出が望ましい。さらに、現場仕様の機材の開発も必要である。例えば、細粒分を効率的に抽出できるとともに、細粒分が少ない試料にも対応できる粉碎機（ボールミル）や、大口径の沈殿層、抽出後の細粒分を含む懸濁液の配合比を上げるための濃縮装置などである。また、より細粒分の含有率を多くすることでベントナイトを添加せずに粘度を増加する方法などの検討も必要である。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(21K04254)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、築山推氏(令和4年3月岡山大学卒業、現西日本高速道路株式会社)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) 小松満, 増山博之, 新村卓也, 舘川逸朗: 透水性基礎地盤に起因する河川堤防のパイピング進行性破壊に関する模型実験, 地盤と建設, Vol.36, No.1, pp.111-118, 2018.
- 2) 中島秀雄: 図説 河川堤防, 技報堂出版, pp.156-160, 2003.
- 3) 堀越一輝, 高橋章浩: 浸透流による盛土内の細粒土の移動に与える再堆積の影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.473-488, 2015.
- 4) 石丸太一, 鈴木素之, 高野翔太: 濁度を利用した細粒分流出実験における移動土粒子の粒度組成とその時間変化, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.1, pp.47-60, 2022.
- 5) 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.
- 6) 林健太郎, 善功企, 山崎浩之: 溶液型薬液による浸透注入時の移流分散現象, 土木学会論文集, 土木学会論文集, No.771/III-68, pp.11-20, 2004.
- 7) 内田泰彦, 原信行, 谷室裕久, 吉田聡志: 地下水の流れが速い地盤における特殊な薬液注入工の開発

- と凍結工の施工, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, VI-71, 2021.
- 8) 上村健太郎, 蓮沼佑晃, 馬上拓也, 佐々木隆光, 伊藤和也, 永尾浩一, 末政直晃: 微粒子シリカと微粒子水酸化カルシウムを混合した注入材の強度評価について, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.74, No.2, pp.234-247, 2018.
- 9) 高橋啓介, 小松満, 岩田徹, 瀧本弘治: カオリンクレ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.
- 10) 小松満, 中原佑, 高橋啓介: 河川堤防における浸透破壊のパターンに関する模型実験, 地盤と建設, Vol.37, No.1, pp.61-69, 2019.
- 11) 小泉悠, 田中俊行, 竹内仁哉, 金沢智彦, 西垣誠: 極超微粒子セメント注入材による砂質土地盤への注入工法の開発, 材料, Vol.61, No.1, pp. 52-57, 2012.
- 12) 戸井田克, 山本拓治, 日比谷啓介, 伊藤雅和, 新野正明: 注入材料としてのベントナイトの基本特性について, 土木学会第 51 回年次学術講演会, III-A354, pp.708-709, 1996.
- 13) 土質工学会編: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp.2-4, 1985.
- 14) 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.
- 15) 高橋啓介, 小松満, 岩田徹, 瀧本弘治, 柴原晃: 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, 地盤と建設, Vol.38, No.1, pp.51-58, 2020.

(2022 年 6 月 13 日 受付)

