博士論文

細粒分懸濁液圧入による高透水性砂質層の透水性 低減効果に関する研究

令和5年3月

柴原 晃

岡山大学大学院 環境生命科学研究科

要旨

近年,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.このうち,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, 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用いられている.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.そ こで,既往の研究で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 用いた高透水性の砂層を対象とした透水性低減効果について,主に水平一次元モデル の実験により効果の検証が行われた.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唆された.

本論文ではまず,研究背景として,未固結地盤を主とする地質で NATM 工法を採用 するケースでの問題点を指摘するとともに,高透水性の砂質層を対象とした注入技術 において,新たな材料の選定と止水効果の検証が求められている背景を論述した.ま た,本研究の目的を述べ,研究内容とともに工学的意義を示した.

次に,薬液系注入材と非薬液系注入材を用いた従来の注入技術を総括するとともに, カオリンクレー懸濁液の注入に関する既往研究の経緯と得られた知見を整理すること で新たな課題を抽出し,本研究の位置付けを明確にした.

さらに,新たに製作した断面二次元土槽を用いて,主にカオリンクレー懸濁液の注 入範囲について検討した.その結果,粒径の小さなカオリンクレー懸濁液は粒径の大 きいものに比べて浸透性が高いことが示唆された.また,注入範囲に関する検討から, 粒子グラウトの浸透距離の理論式が適用可能であることが判明した.

一方,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,基盤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.上述のカオリンクレーの他,超微粒子セメント 等は数 µm 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,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.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.

目次

 1.1 緒言	1 4 5 6 9 9 9 9 10 12 13 13 16 20 29
 1.2 本研究の目的と意義 1.3 本論文の構成 参考文献 第2章 従来の研究 2.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4 5 6 9 9 9 10 12 13 13 16 20 29
1.3 本論文の構成 参考文献 第2章 従来の研究 2.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5 6 9 9 10 12 13 13 13 16 20 29
 参考文献 第2章 従来の研究 2.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6 9 9 10 12 13 13 16 20 29
第2章 従来の研究 2.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	 9 9 10 12 13 13 16 20 29
第2章 従来の研究2.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	 9 9 10 12 13 13 16 20 29
 2.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9 9 10 12 13 13 16 20 29
 2.2 注入工法の特徴 2.3 薬液系注入材に関する研究 2.4 非薬液系注入材に関する研究 2.5 カオリンクレー懸濁液を用いた研究 2.5.1 試料の物理特性 2.5.2 実験方法 2.5.3 実験結果 	9 10 12 13 13 16 20 29
 2.3 薬液系注入材に関する研究 2.4 非薬液系注入材に関する研究 2.5 カオリンクレー懸濁液を用いた研究 2.5.1 試料の物理特性 2.5.2 実験方法 2.5.3 実験結果 	10 12 13 13 16 20 29
 2.4 非薬液系注入材に関する研究 2.5 カオリンクレー懸濁液を用いた研究 2.5.1 試料の物理特性 2.5.2 実験方法 2.5.3 実験結果 	12 13 13 16 20 29
 2.5 カオリンクレー懸濁液を用いた研究 2.5.1 試料の物理特性 2.5.2 実験方法 2.5.3 実験結果 	13 13 16 20 29
2.5.1試料の物理特性	13 16 20 29
2.5.2 実験方法 ····································	16 20 29
2.5.3 実験結果	20 29
	29
2.5.4 考察 ·····	
2.6 本研究の位置付け	35
2.6.1 現状での課題の抽出 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35
2.6.2 本研究の工学的意義 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
参考文献	36
第3章 カオリンクレー懸濁液の二次元土槽実験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
3.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
3.2 実験方法	39
3.2.1 実験装置	39
3.2.2 試料の物理特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40
3.2.3 実験ケース ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	41
3.3 実験結果	43
3.3.1 注入実験結果	43
3.3.2 通水試験結果 ······	46
3.3.3 透水係数低減効果と動水勾配の関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・	48
3.3.4 間隙水圧分布 ······	49
3.4 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	51
参考文献	51
	-
第4章 カオリンクレー懸濁液の注入特性の検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
4.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
4.2<注入範囲の推定	53
4.2.1 理論式の適用性検討 ····································	- 0

4.2.2 流線網による評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 56
4.3 透水係数低減効果の検証 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 59
4.4 多粒子限界流速による評価	· 60
4.5 まとめ ・・・・・	· 61
参考文献	· 62
第5章 現場試料を用いた注入材の作製方法の検討	· 63
5.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 63
5.2 試料の物理特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 63
5.3	· 64
	. 68
5.4 和位力恐惧攸の柏皮調金	- 00
$\begin{array}{c} 0.5 5.6 \end{array}$	• (1
参考乂献	• 71
第6章 抽出細粒分懸濁液による水平一次元注入および通水実験 ・・・・・・・・	• 72
6.1 概説	· 72
6.2 実験方法	· 72
6.2.1 実験装置	· 72
6.2.2 供試体の作製 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 73
6.2.3 実験ケースおよび実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 75
6.3 注入実験結果	· 76
6.4 通水実験結果	· 78
6.4.1 細粒分除去前供試体 (G. R) ···································	· 78
6 4 2 細粒分縣濁液注入供試体 (GS-F RS-F) ····································	· 78
6 4 3 ベットナイト 配合細粒分縣 濁液注入 供試休 (GS-FR RS-FR) ·····	· 79
6.4.4 《汉人士子人縣溫海沿入冊封体 (CS-D)	. 90
0.4.4 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	01
	· 81
	· 81
6.5.2 グラウタビリティー比による注入可否の検証 ・・・・・・・・・・	· 83
 6.5.3 実流速および多粒子限界流速の比較 	· 83
6.5.4 通水実験後の供試体内の粒度分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 84
6.6 まとめ ・・・・・	· 85
参考文献	· 86
第7章 結論	· 87
7.1 結論	· 87
7.2 工法の実現性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 89
7.3 新たな注入材の可能性 ····································	· 91
7.4 実用化に向けた今後の課題 ····································	. 93
	· 05
	50
- E0+ III	0.0
6判 6干 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	. 90

第1章 序論

1.1 緒言

都市域のトンネル工事において、未固結地盤を主とする地質の場合はシールド工法を適 用する場合が多いが、近年、山岳工法であるNATM工法^{1),2)}を採用するケースが増えている ³⁾.この理由として、補助工法の開発が進んだことで周辺地山への影響抑止や切羽対策への 技術が向上し、それに伴って経済的な設計が出来る場合があること、さらに、シールド工 法や開削工法に比べて断面を変化させる対応等が容易であることが挙げられる.その一方、 湧水や地山の地質状況によっては、地表への影響を抑えるためにグレードの高い補助工法 を採用する場合があり、計画当初の想定金額より工事費が増える懸念がある.また、掘削 補助工法の分類における対象地盤は硬岩、軟岩、土砂から構成されており、軟弱地盤を対 象とした詳細な分類がない.そのため、施工をしながらその都度、対策を検討する必要が あり、場合によっては多大な労力と時間を費やすこととなる.

このような現状を踏まえると、結局、都市域のトンネル工事において、NATM工法かシ ールド工法のどちらかを選択すべきかの二者択一の議論は、各技術者の経験を踏まえた上 で、種々の要因により異なる⁴⁾.しかし、施工条件によっては、最初からNATM工法を選択 せざるを得ないケースもあり、土被りが小さいなど、厳しい施工条件によっては、シール ド工法とは異なり、工事の進捗に伴って地表面への陥没等の影響を及ぼすことにもなりか ねない⁵⁾.したがって、このような地表面への影響のみならず、周辺環境に影響を及ぼす ことなくトンネル工事を施工するためには、工学的なアプローチ⁶⁾に基づく補助工法の選 択が必要である.具体的には、切羽からの湧水を少なくすることを目的とした湧水対策、 切羽の肌落ちや崩落を抑制することを目的とした切羽安定対策、さらに、切羽の先行的な 緩みを抑制することで地表面の沈下を抑えることを目的とした地表面沈下対策などである. このうち湧水対策は、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³⁾.止水工法は、地盤条件に適した工法の採用が必要であり⁷⁾、選定する注入 材の種類や使用量によっては、環境への負荷も大きな課題となる場合がある.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 ⁸⁾,注入材の選定には十分に配慮しなければならない.

注入材は図-1.1 に示すように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⁹⁾,各注入材の特性を明らかにする研究が進められ ている.薬液系に関して、森川ら¹⁰⁾は、水ガラス系溶液型注入材の砂質地盤への浸透注入 に着目し、注入固結砂の粘着力を客観的かつ定量的に推定する方法を提案した.また、加 賀¹¹⁾は、水ガラス系溶液型注入材を浸透注入した固化砂に対して浸透水圧を作用させた状 態で養生させた結果、浸透水圧が強度の劣化に影響を及ぼす結果を得ている.



図-1.1 注入材の種類⁹⁾

このように水ガラス系溶液型注入材の浸透注入に対する検討が実施されているものの, その多くは固化後の砂の強度に関するものである.一方,高橋ら¹²⁾は,地下鉄駅の建設工 事における砂礫層の止水対策として薬液注入工と排水工であるディープウエル工法による 施工事例を報告している.水ガラス系溶液型注入材は土粒子間の間隙水と水ガラスのゲル が置換されることにより止水効果を発揮することから,施工条件によっては,ゲル化する まで地下水の移動に伴い化学的な成分が周辺に流出してしまう可能性が懸念される.一般 には 1~3 分程度のゲルタイムを設定していることが多く¹³⁾,高透水性の砂質層において 地下水流速が大きな場合は,浸透注入としての適用が難しくなることが考えられる.

非薬液系であるセメント系注入材について、延藤ら¹⁴は、亀裂性岩盤を対象とした止水 工法を対象とし、注入圧力を段階的に上昇させることで高濃度配合の注入材が充填できる ことを示している.また、米田ら¹⁵は、粘性と粒径を変化させた注入材を砂層や岩盤亀裂 に注入し、これらが浸透性に与える影響を確認している.古賀ら¹⁶は、微粒子の濃度が異な る注入材を土試料に注入することで、微粒子の浸透特性が注入濃度によって異なることを 述べており、小泉ら¹⁷は、極超微粒子注入材により、砂質土地盤を対象に高い浸透性能に よる地盤の高強度改良を確認している.このようにセメント系注入材に対する検討も数多 く実施されているものの、主に岩盤亀裂を対象にしている割裂注入であったり、砂質地盤 への浸透性が優れている極超微粒子セメントであっても効果が期待される強度発現に養生 期間が必要であったりする.そのため、地下水の流速が大きな場合には、硬化する前にセ メント成分が流出する恐れがあることから、地下水の pH を上昇させてしまうことが懸念 される.なお、亀裂性岩盤に限らずグラウト工法では、低濃度のものは遠方まで到達し、 高濃度のものは注入孔近傍に留まることから、濃度の低い配合から注入を開始し、順次、 濃度の高い配合に切り替えていく方法が実施されている^{18,19}.

一方,非薬液系の粘土系注入材について,升元ら²⁰⁾は,岩盤強度を対象に周辺地下水の 化学的変化等の観点から目詰まり機能の把握および最適な注入濃度の存在を示している. また,宮永ら²¹⁾は,亀裂性岩盤を対象に,希薄な懸濁液を長期間注入することにより広範 囲の透水性を低下させた事例を報告している.しかし,高透水性の砂質層を対象とした粘 土系注入材の適用はほとんどみられない.そこで本研究では,高透水性の砂質層の透水性 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.他の粘土系注入材と同様に,砂質層の間隙にカオリンクレーを圧入充填して砂 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,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,懸濁液にする際に膨潤したり,固結したり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が考えられる.

ここで、本研究で目的とする砂質層でのトンネル工事における切羽の湧水対策としての 注入材の技術開発に対する要求性能について説明すると、対象は切羽付近で既に高い流速 が発生している箇所における注入と掘削前の低い流速で注入した後に掘削による動水勾配 の上昇による間隙内移動に大別される.前者に対しては、湧水量を低下させること、後者 に対しては注入時に低下させた透水係数を維持することが求められる.具体的には、本研 究で用いる 1×10⁻³ m/s 程度の砂層は土の透水性の分類 ²²⁾から"高い"と"中位"の境界の透水 性に該当し、これを"中位"と"低い"の境界の透水性にするには 1×10⁻⁵ m/s 程度まで低下させ ることが求められる.つまり、目標とする透水係数の低下は 2 オーダー程度となるが、既 に高い流速が発生している条件での注入では、まずは透水性の低下による湧水量の低下が 見込めるかどうかの点に着目した.

これまでに西垣ら²³⁾はあらかじめカオリンクレーを混合した供試体を用いて透水性の低 下挙動を把握している.その結果,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,また,一定量以上の混合量であっても動水勾配が大きくなった場合に流亡 が始まる可能性があることなどを指摘しているものの,具体的な注入方法の検討には至っ ていない.ここで,注入の影響因子としては,地盤と注入材の粒子径の関係だけでなく, 懸濁液の密度や粘性が考えられる.Herndon ら²⁴⁾は薬液系の注入で実際に現場に適用され ている粘性の範囲を示している.また,非薬液系の注入における粘性の影響に対して,小 山ら²⁵⁾は,セメント系注入材の連続的に比重を変化させて注入する際の注入材の粘性の経 時変化および濃度と密度による透水性低減効果を組み込んだ解析モデルを開発している. さらに,Yoon ら²⁶⁾は濃度を変化させたベントナイト系注入材を粒子の異なる砂試料に注入 させた結果から粘度の違いによる注入体積の変化を調査し,注入可否を判断している.一 方,注入後の動水勾配の変化に対する間隙内移動を検討した例はみられない.

そこで、高橋ら²⁷)、²⁸は新たな粘土系注入材として、粒径が5~7µm程度の岡山県産のカ オリンクレーに着目し、高い動水勾配の一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.その結果、クレー懸濁液を注 入材に用いた場合、砂質層の透水性を低減させる最適な粘度の範囲が存在するという Herndonら²⁴が薬液系注入材を対象に示した既存研究と一致する知見を得た.具体的には、 その範囲は約1.0~1.5 dPa・sであり、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,高橋ら²⁹⁾は注入後の動水勾配の変化によりクレーが流亡する状況についてまとめた.

一方,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,基盤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,基盤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³⁰). 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^{31),32)}.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.小松ら³³⁾は、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.

1.2 本研究の目的と意義

上述の現状を鑑み、本研究では、既往の研究で得られた知見から、断面二次元土槽を用 い、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、さらには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検証する.

また、上述のカオリンクレーの他、超微粒子セメント¹⁷⁾等は数µm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、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.

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図-1.2に示す.以下,各章の概要について述べる.

第1章の序論では、本研究の背景および目的、工学的意義を示した.

第2章の従来の研究では、現状での注入工法に基づき、セメント系注入材、粘土系注入材 に関する従来の研究をそれぞれまとめるとともに、本研究の基となっている高橋ら²⁸⁾が実 施した、高い動水勾配の一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についての知見を整理する.

第3章のカオリンクレー懸濁液の二次元土槽実験では、2種類のカオリンクレーを用い、 既往の研究で得られた知見に基づき、最も透水性低減効果が得られる粘性係数の配合比を 設定した上で、断面二次元土槽による注入および通水実験を実施した結果についてまとめ る.具体的には、前面と背面に厚さ2cmのアクリル板を有し、回転軸により水平および鉛 直での実験を可能とした幅100cm×高さ100cm×奥行15cmの鋼製土槽の中央からクレー懸濁 液を圧入して注入範囲を把握するとともに、注入後に段階的に動水勾配を上昇させること で、透水性低減効果を流量と動水勾配の変化から、注入範囲の変化を間隙水圧の計測値か ら整理する.また、未通水条件と通水条件での圧入時の違いの有無について調べる.

第4章のカオリンクレー懸濁液の注入特性の検討では,第3章における実験結果を踏まえ, 前章の断面二次元土槽での注入実験および注入後の通水実験結果に基づき,実験による注 入範囲に対して粒子グラウトの浸透距離を推定する理論式の適用性の検証を行うとともに, 流線網から注入範囲の変化を評価する.また,透水性低減効果を基に,2種類のクレー懸濁 液を比較し,有用性の違いを論述する.また,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の評価を実施する.

第5章の現場試料を用いた注入材の作製方法の検討では,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,現場試料から細粒分 を抽出する方法を検討するとともに,懸濁液の特性について調査する.具体的には,現場 試料から粒径5~7μm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段階の抽出方法を検討する.なお,現場試料の細粒分含有率が低い場合は, 懸濁液抽出前に粉砕処理を行う.また,抽出した懸濁液の粘度を測定した上で,これまで の知見で得られた透水性低減効果を示す粘度に調整する方法も併せて検討する.

第6章の抽出細粒分懸濁液による水平一次元注入および通水実験では第5章において現場 試料から抽出した細粒分を用いて作製した懸濁液を用い,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 性の変化を調査する.また,これらの結果に基づき,注入効果やグラウタビリティー比に よる注入可否の検証を行うとともに,実流速および多粒子限界流速の比較,通水実験後の 供試体内の粒度分布から考察を加える.

第7章の結論では、本研究で得られた知見をまとめるとともに、実用化に向けた今後の研 究課題について述べる.



図-1.2 本論文の構成

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,山岳トンネル工法の調査・設計から施工まで, pp.35-36, 2018.
- 3) 後藤広治,五十嵐央,磯島磨,柴田勝央,大浦道哉,伊藤憲男,加藤直樹:都市部河 川直下におけるNATM による接続トンネル施工,土木学会第67回年次学術講演会講演

概要集, VI-051, pp.101-102, 2012.

- 4) 結城則行,清水則一,古川浩平,中川浩二:都市トンネルにおけるNATM とシールド 工法の比較に関するアンケート調査,土木学会論文集,No.516/VI-27, pp.63-73, 1995.
- 5) 日経BP社:日経コンストラクション,第659号, pp.32-49, 2007.
- 6) 中川浩二:山岳トンネル建設における臨床トンネル工学的アプローチ,地盤と建設, Vol.24, No.1, pp.1-10, 2006.
- 7) 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.
- 8) 平田健正:土壌・地下水汚染の研究の動向と課題,地下水学会誌,第35巻,第1号,pp.11-21, 1993.
- 9) 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.
- (10) 森川義人,所武彦,高橋則雄:水ガラス系溶液により浸透注入された砂質地盤の粘着力の評価,材料, Vol.47, No.2, pp.148-151, 1998.
- 11)加賀宗彦:水ガラス系薬液注入固化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.
- 12) 高橋浩一,松本伸,大河内保彦,龍岡文夫:りんかい大井町駅建設工事における東京礫 層の止水対策,土木学会論文集,No.777/III-65, pp.53-58, 2004.
- 13) 土質工学会: 地盤改良の調査・設計から施工まで, p.275, 1978.
- 14) 延藤遵,西垣誠,見掛信一郎,小林伸司,佐藤稔紀:注入圧力によるグラウトの目詰まり現象抑制効果,土木学会論文集C, Vol.64, No.4, pp813-832, 2008.
- 15)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.
- 16) 古賀誠,島田英樹,松井紀久男:グラウト材の模擬地盤への注入実験とろ過理論を導入した注入解析の適用性-グラウチングにおけるグラウト材の浸透挙動に関する研究(第2報),資源と素材,Vol.118, pp.29-35, 2002.
- 17)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,日本材料学会,Vol.61,No.1, pp.52-57, 2012.
- 18) 前揭4), p.401.
- 19) 櫻井聖, 生形健司: 動平川ダムのコンソリデーショングラウチングについて, ダム技術, No.42, pp.58-64, 1990.
- 20) 升元一彦,藤田朝雄,杉田裕:坑道周辺の掘削影響領域への粘土系材料を用いたグラウト注入手法の検討,土木学会論文集C, Vol.62, No.1, pp175-190, 2006.
- 21) 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.
- 22) 地盤工学会:地盤材料試験の方法と解説,丸善, p.450, 2009.
- 23) 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講演集,pp.1307-1308,2005.

24) Herndon, J., Lenahan, Tom.: Grouting in soils, Vol.1, A state-of the-art report, pp.72-76, 1976.

- 25)小山倫史,高橋健二,田村晴彦,小林翼,龍田圭亮,大西有三:粘性の経時変化を考慮 したグラウト注入過程の数値シミュレーション,第38回岩盤力学に関するシンポジウム 講演集,pp.149-154, 2009.
- 26) Yoon, J., Mohtar, S. E. C.,: Groutability of granular soils using bentonite grout based on filtration model, Transport in Porous Media, Vol.102, pp.365–385, 2014.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 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,地盤と建設, Vol.37, No.1, pp.145-150, 2019.
- 30) 中島秀雄: 図説 河川堤防, 技報堂出版, pp.156-160, 2003.
- 31) 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.
- 32) 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.
- 33)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.

第2章 従来の研究

2.1 概説

本研究が対象としている都市域の地下工事や堤防の浸透対策工事における高透水性砂質 層を対象とした注入工法の特徴をまとめるとともに,注入材毎の特性に関する直近(3年程 度)の既往研究を整理することで,本研究の課題を抽出する.

本章の内容を大別すると以下の5項目となる.

- (1) 注入工法の特徴
- (2) 薬液系注入材に関する研究
- (3) 非薬液系注入材に関する研究
- (4) カオリンクレー懸濁液を用いた研究
- (5) 本研究の位置付け

2.2 注入工法の特徴

注入工法を実施する目的は, 図-2.1 のように大別される¹⁾. このうち,本研究で目的と しているのは遮水注入であり,事前に非薬液系の懸濁液を高透水性の砂層に注入すること で透水性を低下させて湧水を防ぐ注入である.

− 遮水注入(あらかじめ湧水を防ぐ注入)
 − 地盤強化(あらかじめ地盤の崩壊やゆるみを防ぐ注入)
 − その他 − 液状化対策
 − 止水(出ている水を止める)
 ± 実汚染対策他

図-2.1 注入の目的¹⁾

注入は地盤の特性によってその形態が異なる. 図-2.2 は,その判定基準を示したもの²⁾ であり,まず,対象となる土層を地盤材料の工学的分類等により特定し,次にN値からそ の土の締まり具合を判定することで,浸透注入になるのか,割裂注入になるかが判定でき る.なお,概略の目安として,以下のような考え方も示されている³⁾.

砂分 80%以上,粘性土分 20%以下の地盤においては、問題なく浸透注入が可能である.

- ② 砂分が 80%~70%,粘性土分が 20%~30%の地盤では、浸透注入は可能であるが、
 一部割裂注入も起こる.注入工法の選択や施工管理が重要である.
- ③ 砂分 70%~60%,粘性土分 30%~40%の地盤では,浸透注入と割裂注入が混在するので,締まり具合のゆるい土では,特に慎重な検討と施工管理が重要である.
- ④ 砂分 60%以下,粘性土分 40%以上の地盤では、ほとんど浸透注入は起こらず、全て 割裂注入となる。

本研究では、高透水性の砂層に対する遮水注入を目的としていることから、注入形態は 浸透注入に該当する.



図−2.2 土質と注入形態関係図²⁾

2.3 薬液系注入材に関する研究

薬液系注入材は高分子材料や水ガラスを主材とした注入材が主である. 直近では, 主に, 新たな材料や方式による注入工法, 浸透固化させた地盤の特性, 注入効果の把握に関する 研究が行われている.

(1) 新たな材料や方式による注入工法に関する研究

加藤ら⁴)は薬液注入による液状化対策を目的とした高分子系薬液(複合ポリマー型地盤改 良剤)を開発し、薬液の安全性、改良強度、耐久性、遮水性を検討するとともに、実地盤 への適用性を確認した.改良したサンドゲルの透水係数は、用いた薬液濃度の範囲(6~18%) では1×10⁻⁶~1×10⁻⁹ cm/sであり、臨海部の埋立地でのフィールド試験において、改良体の半 径は計画半径1.25mに対して半径1.5m程度を確保し,改良強度は設計基準強度を満足していることを確認している.

赤塚ら⁵は薬液注入工法において削孔穴からの薬液の漏出しによる注入損失や削孔壁の 崩壊による注入阻害等の課題を改善するため、布パッカの内側にゴムを装着した地山パッ カと削孔時には孔壁崩壊を防護し、薬液注入時には溶解する特殊シール材の二つの機能を 併せ持つ工法を開発している.これにより、砂地盤を対象とした現地注入実験の結果、注 入管周りからの薬液の漏れ出しがないこと、および従来のシールグラウト方式による薬液 注入工法と比較して60%程度の注入圧で広範囲な浸透注入が可能であることを確認してい る.一方、森河ら⁶は、薬液注入工法で地盤に改良材を注入すると、地盤の空隙に目詰まり が発生し、地盤の透水係数が低下することで薬液の浸透範囲や改良体の品質に大きく影響 する問題を解決するため、薬液注入時に超音波振動を付与することにより、地盤の透水性 の低下を抑制する新しい薬液注入工法を開発した.また、井澤ら⁷も小型の施工機械を用い て薬液を動的に注入することより脈状の改良体を液状化地盤内に割裂注入する工法を開発 しており、適切な薬液配合と動的注入条件により飽和砂層地盤内に多方向に脈状改良体を 割裂注入できることを確認している.

(2) 浸透固化させた地盤の特性に関する研究

薬液注入によって改良した地盤の特性は、改良後の透水性低減効果に関するものではな く、液状化強度に対する繰返しせん断に対する抵抗性の把握が主流となっている.秋本ら ⁸は、強震時を想定して高い応力比での繰返し中空ねじりせん断試験を実施することで、繰 返しせん断に対する抵抗性を確認し、薬液改良土の特徴を適切に評価するためには、ひず み量と過剰間隙水圧比を併せた総合的な液状化の判断が必要であることを指摘している. また、秋本ら⁹は、薬液改良土が礫分や貝殻片などの直径が大きな粒子ほど強度が低くなる ことに加え、近年、液状化対策に用いられている薬液は、ホモゲル強度が従来よりもかな り低いことから、既往の強度発現メカニズムの適用に関し、強度発現に影響を及ぼす要因 を特定した.その結果、薬液改良土の一軸圧縮強さは、土粒子の付着力に起因する強度と 発生負圧に起因する強度から構成され、土粒子の表面積、内部摩擦角および発生負圧が一 軸圧縮強さに影響を及ぼすことを明らかにしている.さらに、秋本ら¹⁰は、事後調査時の 乱れの影響で過小に評価される場合があり、サンプリング試料の一軸圧縮試験による評価 は、礫分含有率15%以下、平均粒径1mm以下、試料採取率75%以上において適用可能である ことを示している.

笠間ら¹¹は,薬液の浸透の不均一性や対象地盤の土質の不均質性等により,自然堆積地 盤に比べてせん断強度等に空間的な不均質性を有することを指摘し,強度の不均質性を考 慮した支持力解析を行うことで不均質性が支持力に与える影響を確率・統計的に考察し, 性能規定に基づく支持力評価法を提案している.また,佐々木ら¹²は,改良土の強度発現 機構に関して定量的な評価がなされていない問題に対し,注入材のゲル化反応に伴う体積 収縮が砂の骨格を拘束することにより,改良強度が発揮されるモデルを提案するとともに, 骨格の拘束効果を弾性波試験により定量的に評価した.

(3) 注入効果の把握に関する研究

遠藤ら¹³⁾は、サンプリング時に乱れの影響を受けやすい一軸圧縮試験による品質確認方 法に代えて、原位置における動的コーン貫入試験を導入することで改良後における一軸圧 縮強さを適切に推定する方法を示しているが、改良効果を判断できない場合があることに 対して、土性に応じた複数の指標を用いて総合的に改良効果を評価する方策を検討した.

大野ら¹⁴は、薬液注入工法の改良効果の確認において、一軸圧縮強度はサンプリングに よる乱れの影響等による測定のばらつきが大きいことから、改良前後の特性変化の定量的 把握が難しいことを指摘し、点電極を用いた埋め込み型マイクロ電気検層法を新たに開発 し、小型土槽実験と沿岸部埋立地における現地実証実験を実施した.その結果、薬液注入 前後の比抵抗変化が明確に見られたことを報告している.

一方,清水・小田^{15),16}は,注入圧,注入量を適宜に変更することによる地盤改良の品質 向上を目的に,薬液注入の浸透過程を比抵抗トモグラフィにより把握する試みを行ってい る.注入途中の比抵抗分布の変化を測定するために,常時の監視が可能な新しい解析法を 検討している.また,高野ら¹⁷⁾も,比抵抗トモグラフィの適用性を検討するため,注入過 程を目視で確認するための透明の模型地盤を構築し,2つの注入孔から着色した低比抵抗の 浸透液を注入しながら2次元比抵抗トモグラフィの計測を行うことでその有効性を確認し ている.

2.4 非薬液系注入材に関する研究

非薬液系注入材に関する直近の研究では、セメント系注入材の現場での適用性や強度特 性に関する成果が報告されている.

中出ら¹⁸⁾は、山岳トンネルの貫通後に湧水を抑制する課題に遭遇したことから、極超微 粒子セメント(平均粒径 1.5µm)を注入材として、トンネル周囲の岩盤へのグラウチング を実施した.具体的には、ダムのコンソリデーショングラウト手法を用いたポストグラウ トによる減水対策工法について、施工データをもとにその有用性を示している.また、高 水頭下における減水対策工法の適用性について考察している.

兵動ら¹⁹⁾は,都市部の厳しい施工条件下においても周辺地盤に影響を与えず適用できる 浸透固化処理工法に着目し,シリカ溶脱による強度低下が懸念される薬液に代わり,細粒 分を含有する地盤に適応できる通常より微細なセメント注入材で固結した砂供試体の動的 変形特性を調べている.

新たな材料の開発として、阿部ら²⁰⁾は、主に空洞充填材料として用いられる可塑性グラ ウト材料について、水中に充填した際の周辺水のpHの上昇を抑制することで環境負荷の 低減を図ることを目的として、高強度の可塑性グラウト材料の配合を対象に、結合材中の セメント量をできるだけ少なくし、かつ高炉スラグ微粉末、フライアッシュといった混和 材を大量に混合する配合を提案している.これによって、高強度でかつセメントの水和反 応による硬化の過程で生成される水酸化カルシウムの溶出を抑制することができるとして いる.さらに、阿部ら²¹⁾は、水中における巨礫地盤の間隙に対して可塑性グラウト材料を より高品質に充填するために、自重によってグラウト材料が引きちぎられて落下する現象 を抑制する配合とすることが望ましいことを示した.また、特に水中においてフレッシュ 状態における引張強さを大きくするためには、セメントの一部をシリカフュームに置換し、 かつベントナイトを混合した配合が有効であることを確認した.

前田ら²²⁾は,積み石背面への注入工法を提案し,室内模型注入試験や現場注入試験により,注入材としての可塑性グラウトは,流動性が低く積み石目地からの漏出量が少ないことから高い充填性能を示すことを確認し,その注入方法を提示した.

2.5 カオリンクレー懸濁液を用いた研究²³⁾

2.5.1 試料の物理特性

(1) 注入試料

注入するクレーは市販されている3種類(c3, c5, c7と称する)の中からc3とc7の2種類 を用いた.c5についてはc3と粒径が類似していることや,製造時の特性にばらつきが確認 されたことから本報での検討から除外した.また,併せて2種類のクレーを混合させて粒径 分布を広くした3種類のクレー(質量混合比c3:c7=1:1,2:1,1:2)についても検討を行った. 写真-2.1にカオリンクレーの電子顕微鏡写真を示す.これらの特徴として,c7よりもc3の 方がより丸みを帯びており,球状であることがわかる.それぞれのクレーの製造方法は, まず,c7は原鉱を乾式分級した後,気流中でサイクロン分級して製造されており,pHは6 程度の弱酸性を示す.一方,c3は原鉱に水を加えながら粉砕してスラリー化し,分級精度 を上げるために珪酸ソーダ(水ガラス)を加えて,酸性からpH=8~9程度のアルカリ性に した上で複数の分級槽を通過させ,大きな粒子を沈殿除去した上澄み液を濃縮沈殿槽に送

る.濃縮沈殿槽では,塩酸を滴下して再度酸性状態にすることで珪酸ソーダ(水ガラス) を分離させ,さらに漂白の工程を経てフィルタープレスにて脱水し,乾燥させて製品とな っている.

クレーの物理特性を表-2.1に、クレーの粒径加積曲線を図-2.1にそれぞれ示す.土粒子 密度はc3がc7より大きく、50%粒径はc7が約7μmでc3の約5μm程度より大きい.

(2) 供試体試料

供試体として用いた2種類の試料の物理特性を表-2.2に,粒径加積曲線を図-2.2に示す. 川砂は岡山県産で,試料自体の目詰まりを防ぐために106µmのメッシュで水洗いした残留 分を使用した.一方,ガラスビーズはクレーの注入時の充填状況や通水時の間隙内での移 動状況を観察するために,川砂と粒径分布が近い#20を含む計5種類を用いた.



写真-2.1 カオリンクレーの電子顕微鏡写真

項目乀	c3	c7	
土粒子密度	$ ho_s ({ m g/cm^3})$	2.748	2.713
50%粒径	$D_{50}(\mu\mathrm{m})$	4.928	7.482
均等係数	U_c	1.942	2.117
液性限界	w _L (%)	53.0	46.7
塑性限界	w _p (%)	24.9	33.8

表-2.1 カオリンクレーの物理特性



図-2.1 カオリンクレーの粒径加積曲線

-		,		
種類		土粒子密度 ρ _s (g/cm ³)	50%粒径 D ₅₀ (µm)	均等係数 <i>U</i> c
川砂		2.682 718		4.23
	#20		550	1.27
	#40	2.561	160	2.17
ガラスビーズ	#50		150	1.17
	#60		140	1.20
	#80		76	1.21

表-2.2 川砂およびガラスビーズの物理特性





図-2.3 クレー毎の配合比と粘度の関係

(3) クレー懸濁液

回転式粘度計(東機産業製TCV-10)を用いて測定したクレーの単体および2種類を混合 した質量配合比(c/w,クレーと水の質量比を表す.以下,配合比)と粘度の関係を図-2.3 に示す.配合比が高くなるとともに粘性は増加するが,同一粘性の発現は,c3の方がc7 に比べて低い配合比で生じている.また,2種類を混合したクレー懸濁液は,それぞれ混 合の割合が高いクレーの粘性に類似し,c3:c7=1:1は,配合比が高くなるほどc3 に近い粘 度特性を示した.次に,クレー懸濁液(c3:c/w=0.25,c7:c/w=0.52)の沈降特性の一例を 図-2.4に示す.測定方法は,攪拌した溶液を直径 5cm×高さ24cmの円筒形容器に入れて静 置し,一定時間経過後に容器内の溶液の上下同体積に含まれる粘土の質量を炉乾燥法によ り測定した上で,その質量比(上部質量/下部質量)で評価した.なお,図中にはストー クスの法則に基づく沈降速度から計算した理論値も併記した²⁴⁾.結果として,理論値より も計測値の沈降が速いものの,2種類とも概ね同様の傾向を示しており,数十分程度であ れば沈降の影響はわずかであると判断できる.言い換えると,懸濁液作製後,注入までに 時間を要する場合は攪拌する必要がある.







図-2.5 実験①装置概略図

写真-2.2 実験①状況

2.5.2 実験方法

(1) 実験装置

a)実験①: 通水時の注入実験

供試体に川砂を用いた実験①の装置の概略図を図-2.5に,実験状況を写真-2.2にそれぞれ示す.供試体は両端に川砂の流出を防止するためのステンレスメッシュ(孔径 109µm) および多孔板を設置した直径 10cm,長さ 50cmのアクリル製カラムに,川砂を水中落下法 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出の蓋における水頭差を差圧計により,通水 流量は供試体の流出側に設置したデジタル流量計によりそれぞれ計測した.クレー懸濁液 は,攪拌後,背圧が作用できるビュレット内に入れ,カラム中央に設置した直径 1cm×長さ 5cm (開口率 45%)のステンレスメッシュ(孔径 109µm)を巻き付けた注入管を介して注 入した.ここで,クレー懸濁液の注入量はビュレット内の注入前後の液面変化から求め, 通水には水道水を用いた.

図-2.6 実験②装置概略図

b)実験②:注入後の通水実験

供試体にガラスビーズを用いた実験②について、クレー懸濁液の注入時における実験装置の概略図を図-2.6(a)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(孔径 109µm)および多孔板を設置した直径 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.クレー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、動水勾配が作用していない条件下でアクリル製カラム内に 圧入した.なお,クレー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.

次に、クレー懸濁液の注入後の通水実験の装置の概略図を図-2.6(b)に、実験状況を写真 -2.3にそれぞれ示す.動水勾配を段階的に変化させるために、上流側には定水位タンクを 接続し、ワイヤーに吊して電動ウインチにより上昇させて水頭差を調整した.また、供試 体に作用する水頭は流入側でマノ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、通水には水道水を用いた.

写真-2.3 実験②状況

			レー懸濁	液	供試体	(川砂)
クレ		配合比	濃度	粘度	乾燥密度	間隙率
1里 (判	貝	c/w (g/g)	C (%)	$\eta (dPa \cdot s)$	$ ho_{ m d}$ (g/cm ³)	n (%)
	1	0.130	11.5	0.15	1.665	38.2
-2	2	0.250	20.0	1.46	1.667	38.1
05	3	0.300	23.1	2.52	1.655	38.5
	4	0.400	28.6	5.70	1.720	36.1
	1	0.100	9.1	0.03	1.719	36.1
	2	0.300	23.1	0.10	1.656	38.5
	3	0.350	25.9	0.10	1.731	35.7
	4	0.450	31.0	0.29	1.702	36.8
-7	5	0.500	33.3	0.43	1.698	36.9
C /	6	0.520	34.2	1.10	1.700	36.9
	7	0.560	35.9	1.68	1.738	35.4
	8	0.640	39.0	3.06	1.676	37.8
	9	0.730	42.2	5.11	1.655	38.5
	10	0.800	44.4	7.58	1.698	36.9
	1	0.167	14.3	0.14	1.684	37.4
	2	0.260	20.6	0.44	1.707	36.6
2 7	3	0.270	21.3	0.80	1.734	35.6
c3:c/	4	0.300	23.1	1.31	1.721	36.1
-1.1	5	0.350	25.9	1.86	1.727	35.8
	6	0.400	28.6	2.83	1.709	36.5
	7	0.500	33.3	5.67	1.702	36.8
	1	0.200	16.7	0.13	1.731	35.7
c3:c7	2	0.325	24.5	1.11	1.727	35.8
=1:2	3	0.340	25.4	1.18	1.714	36.3
	4	0.600	37.5	8.23	1.733	35.6
	1	0.200	16.7	0.27	1.719	36.1
c3:c7	2	0.270	24.5	1.06	1.698	36.9
=2:1	3	0.340	25.4	2.11	1.709	36.5
	4	0.600	37.5	15.00	1.740	35.4

表-2.3 実験①ケース

(2) 実験ケース

a) 実験①: 通水時の注入実験

実験①のケースを表-2.3 に示す.単体のクレーは c3 の 4 ケース, c7 の 10 ケースを実施 した.さらに粒径幅の広いクレーについて検討するために,混合クレーとして 3 種類の混 合比により,合計 15 ケースを実施した.

b)実験②:注入後の通水実験

実験②のケースを表-2.4 に示す.単体のクレーでは、c3 が 1 ケース、c7 が 3 ケース、 混合クレーは 3 種類の混合比でそれぞれ 1 ケースとし、実験に用いた供試体は表-2.5 に示 すガラスビーズ#20~#80 の 5 種類である.なお、通水実験終了後に試料を解体し、ガラス ビーズ#20 に対して、内部に残留したクレーを水洗いにより分離した後に炉乾燥して乾燥 密度を測定した結果、pd=1.589~1.616 g/cm³ の範囲となった.若干の密度の差が認められ るものの、それぞれのガラスビーズの種類に対する供試体にばらつきがないものとして結 果を評価した.

なお, 表-2.3 および表-2.4 には配合比と濃度 C (%) を併記した. ここで, 配合比はクレーの混合比と紛らわしいことから, 実験結果は濃度を基準に整理することとした.

~	•)(*)(*)			
クレー 種類	配合比 c/w (g/g)	濃度 C (%)	密度 ρ(g/cm ³)	粘度 η(dPa・s)
c3	0.25	20.0	1.148	1.46
	0.30	23.1	1.149	0.10
c7	0.52	34.2	1.356	1.10
	0.73	42.2	1.360	5.11
c3:c7=1:1	0.30	23.1	1.166	1.31
c3:c7=1:2	0.34	25.4	1.152	1.18
c3:c7=2:1	0.27	21.3	1.151	1.06

表-2.4 実験②ケース:クレー懸濁液

表−2.5 実態	験②ケース:供試体	(ガラスビーズ)
ガラスビーズ	乾燥密度	間隙率
種類	$ ho_{ m d}$ (g/cm ³)	n (%)
#20	1.604	37.4
#40	1.582	38.2
#50	1.569	38.7
#60	1.576	38.5
#80	1.558	39.1

(3) 実験方法

a)実験①:通水時の注入実験

トンネルの施工事例²⁴⁾を基に, FEM 浸透流解析を用いてトンネル切羽に作用する最大の 動水勾配と流速を求めた結果, それぞれ *i*=2.7, *v*=2.55×10⁻⁵ m/s と求まったことから, 注入 前の通水条件としてこの動水勾配になるように設定した.通水開始後,流量が安定するの を確認した上で,予め配合したクレー懸濁液を背圧 50kPaの一定条件で注入した.なお, 背圧は水頭差と装置の強度を考慮して設定した.注入完了はビュレット内のクレー懸濁液 を全て注入した場合(全量1100cm³),もしくは、ビュレット内のクレー懸濁液の水位低下 が停止した場合とした.通水は注入後の数日間継続した.通水終了後,供試体中に残留す るクレー質量を測定するため,供試体解体後に川砂とクレーを水洗いにより分別し,炉乾 燥を用いて質量を測定した.

b)実験②:注入後の通水実験

クレー懸濁液の注入前に定水位タンクの高さを段階的に上昇させて通水し,各段階で流 出流量が一定値となった時点における供試体両端の水頭差と流出流量から注入前の各動水 勾配における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 して通水を止め,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目視で確認 しながら背圧 50kPaの一定条件で圧入した.その後,定水位タンクの高さを最大 150cm ま で 10 分間隔で 25cm ずつ段階的に上昇させ,供試体内のクレー懸濁液の状況を観察した. 実験終了後,実験①と同様に残留質量を測定した.さらに,排出水と流亡したクレー懸濁 液を全て回収し,炉乾燥により流亡したクレー質量も測定した.

2.5.3 実験結果

(1) 実験①: 通水時の注入実験

a) 単体クレー (c3, c7)

流量と水頭差の測定結果の一例として、図-2.7にc7(C=33.3%)の注入時の時間を基準 にした経時変化を示す.なお、注入前の通水は透水係数が一定値に落ち着くまで実施し、 このケースでは注入前の通水においてわずかに透水係数が低下する傾向を示した.このケ ースでの注入時間は7分で、注入直後に急激に流量が低下するとともに、水頭差は上昇し た.この結果を基に透水係数(15℃換算)と動水勾配の経時変化を求めた結果を図-2.8に 示す.注入後、約5日間通水を継続したものの、透水係数と動水勾配の変化は認められな かった.他のケースも概ね同様の傾向を示したことから、同図に示したように、注入直前 の透水係数(ko)と1日経過後の透水係数(k)の値を評価することとした.

図-2.9に c3, c7 の透水係数(koおよび k)と濃度の関係を示す.koは c3, c7 とも概ね 1×10⁻³ m/s 程度を示していることから,注入前の各供試体はほぼ同条件とみなせる.一方, k は c3 において濃度が C=20.0%で概ね 1×10⁻⁴ m/s 程度の最小値を示し, c7 は濃度に対して増減が 見られる結果を示した.これらの最小値に着目すると,先述したように目標とする 2 オーダー程度の透水係数の低下は得られていないものの,既に高い流速が発生している条件で の注入においても透水性の低下が見込めることが判明した.

この結果に基づき,透水係数比(k/ko)と濃度の関係に整理したものを図-2.10に示す. 縦軸の値が小さいほど透水係数の低減効果(以下,効果)が高いことを示しており,c3で は濃度が C=20.0%のときに k/ko は最小値の 0.1 程度を示し,それ以外の濃度については効 果が低いことが確認できる.一方,c7は濃度が高くなるにつれて効果が発揮されるものの, 顕著に表れたのは C=34.2%のときである.しかし, C=33.3%と C=39.0%のときに効果が低 い値を示し, C=31.0~39.0%の範囲のばらつきが大きくなっている.図-2.11 にビュレット 内の注入前後の液面変化から求めたクレー懸濁液注入量と濃度の関係を示す.c3 では C=20.0%を境に大幅に注入量が減る傾向となり,一方,C=20.0%より低い場合ではビュレッ ト内のほぼ全量が注入されている.c7 は濃度が低い領域において注入量が多いものの, C=25.9%程度から C=35.9%程度までは注入量が減る傾向となった.しかし,これ以上の濃 度では再び注入量が増える傾向を示し,C=39.0%程度から大幅に注入量が減る傾向を示し た.これらの結果から,両クレーともに濃度が低い場合,注入量は多くなるものの,クレ ーの種類毎に濃度に対する注入量が異なることが判明した.

図-2.7 流量および水頭差の経時変化の一例(c7, C=33.3%)

図-2.8 透水係数および動水勾配の経時変化の一例(c7, C=33.3%)

図-2.12 に注入したクレーの質量と濃度の関係を示す.ここで,注入クレー質量はクレ ー懸濁液注入量と濃度から求めた.c3 では C=20.0%のとき最大となっており,濃度が低い と注入クレー質量が減少する傾向は注入量の関係と明らかに違っている.c7 でも同様の傾 向を示し、C=39.0%で最大となった. 濃度の低いクレー懸濁液は、注入量が多くてもクレ ー質量は少なくなり、濃度が高いものは注入量が少なくてもクレー質量は多くなることを 示唆している.

図-2.11 クレー懸濁液注入量と濃度の関係(単体クレー)

図−2.14 透水係数比と濃度の関係(混合クレー)

b) 混合クレー (c3:c7=1:1, 1:2, 2:1)

図-2.13に透水係数(koおよびk)と濃度の関係を示す.単体クレーと同様に,koは概ね 1×10⁻³ m/s 程度を示していることから,注入前の各供試体はほぼ同条件とみなせる.

注入後の k に関して, c3:c7=1:2 では c7 の傾向に類似しているが, c7 に比べて透水係数 のばらつきが少ない. c3:c7=2:1 では濃度が低い領域では c3 に類似し,濃度が高い領域で は c7 に類似する傾向となっている.一方, c3:c7=1:1 では,混合クレーそれぞれの中間の 傾向を示している.つまり,透水係数と濃度の関係において,混合クレーは混合割合の多 い単体クレーに類似する傾向を示した.

図-2.14 に透水係数比 (k/ko) と濃度の関係を示す. c3:c7=1:2 では c7 の傾向, c3:c7=2:1 では c3 の傾向にそれぞれ類似しており, c3:c7=1:1 はそれらの中間の傾向を示した. 透水 係数比が最小となる配合も混合比で違いが認められ, 概ね C=21.3%~25.9%の範囲内に存 在し, c3 の傾向に近いことが判明した. また, 図-2.15 に注入量と濃度の関係を示す. 単 体クレーと同様に, 濃度が小さい程注入量は多くなり, 濃度が大きくなると注入量は減少 する傾向を示した. 全体的な傾向は c3:c7=1:1 が最も c3 に類似しているが, c3:c7=1:1 と c3:c7=1:2 のばらつきが c7 の傾向を示している. さらに, 図-2.16 に注入クレー質量と濃度 の関係を示す. 同じ配合でみると c3:c7=2:1 が最大となり, c3:c7=1:1 が最小となった.

図-2.15 クレー懸濁液注入量と濃度の関係(混合クレー)

図-2.16 注入クレー質量と濃度の関係(混合クレー)

c)供試体内に残留したクレー質量

次に、供試体内に残留したクレーの質量を整理する. 図-2.17 に単体クレーと混合クレ ーそれぞれのクレー残留量と濃度の関係を示す.単体クレーおよび混合クレーのいずれも、 クレー残留量が最大となる濃度が存在することが明確に表れている.

図-2.18 に単体クレーと混合クレーそれぞれのクレー残留質量比(注入クレー質量と残留 したクレー質量の比)と濃度の関係を示す. c3 および c3:c7=1:1 では濃度が高くなるにつ れて残留する傾向を示し, c7 では高い濃度においても結果にばらつきがあり, c3 が最も残 留することが判明した.

以上より,透水係数の低減効果を発揮するのは注入クレー質量ではなく,残留クレー質 量が多いケースであること,つまり,クレーの種類ごとにそれぞれ最大の効果を発揮する 濃度が存在することが明らかとなった.なお,濃度が小さいケースではビュレットの懸濁 液全量に達したために注入を終了しているが,注入質量と比べて残留質量が極端に少ない ため,さらに注入を続けても効果は変わらないと判断できる.

図-2.17 クレー残留質量と濃度の関係

図-2.18 残留クレー質量比と濃度の関係

d)同一実験条件での結果の再現性

実験結果の妥当性を検証するために、同一実験条件での結果の再現実験を実施した結果 を表-2.6 に示す.供試体条件を完全に一致させることが困難であるため、結果に若干の差 異が認められるものの、傾向の再現性としては概ね確認できたものと判断した.

(a) 実験条件								
クレー 種類 N			クレー懸濁液			供試体(供試体(川砂)	
		実験	懸濁液 配合比	濃度	懸濁液 粘度	乾燥 密度	間隙率	
		INU.	c/w (g/g)	C (%)	$\eta (dPa \cdot s)$	$ ho_{\rm d}$ (g/cm ³)	n (%)	
c7	8	1-1	0.640	20.0 2.06		1.676	37.8	
C7	8'	1-2	0.040	39.0	5.00	1.668	38.0	
c3:c7	7	2-1	0.500	33.3	5 67	1.702	36.8	
=1:1	7'	2-2	0.500		5.07	1.633	39.3	
(b) 実験結果						_		
字 聆 Ŋ_		No	透水係数(m/s)			5)	_	
_	关款 No. 1-1 1-2 2-1 2-2		注入前	前 k ₀	注入後 k	k / k_0	_	
			1.40×	10-3	5.93×10 ⁻⁴	0.424		
_			1.16×	10-3	4.80×10 ⁻⁴	0.414	_	
			1.01×	10-3	8.81×10 ⁻²	0.872		
_			1.51×	10-3	1.26×10-3	0.834	_	

表-2.6 実験①ケース:再現実験

(2) 実験②:注入後の通水実験

a) 注入実験

クレー懸濁液のガラスビーズ供試体への注入状況の一例として、ガラスビーズ#50 に対 して c7 (C=23.1%)のクレー懸濁液を充填したケースの状況を写真-2.4 に示す.次に、粘 性の小さい c7 (C=23.1%)の注入結果および通水後の透水実験結果として、粒径の異なる ガラスビーズ供試体に対する注入クレー質量、通水後に供試体中に残留したクレー質量、 通水により流亡したクレー質量と注入速度を図-2.19 に示す.表-2.5 に示したように、粒 径の異なる各ガラスビーズ供試体における間隙率の差は僅かであることから、これらの違 いは間隙の量ではなく、間隙の大きさによる違いを表しているものと判断できる.注入ク レー質量は粒径が大きい#20 と#40 が多く、これらは概ね供試体両端まで注入されている質 量を示している.その一方で#50 と#60 に対する注入質量は徐々に低下し、#80 は注入不可 となった.これらの結果から、間隙の大きさに対して注入質量が変化するとともに、注入 不可となった#80 においては注入管付近で目詰まりが生じているものと推察される.

次に、クレー残留質量に着目すると、#20 が最も少なく#40 が最も多い結果となった.ク

レー流亡質量はガラスビーズ供試体の粒径が小さくなるほど、少なくなっていることから、 間隙の大きさによって注入したクレーの流亡状況が異なることが分かる.また、注入速度 に着目すると、#20 で最も速く、#60 で遅くなったことから、間隙の大きさにより注入速度 も異なることが判明した.

100 30 -質量(g) Ś ■注入クレー質量 90 廔(ml) ■クレー残留質量 25 80 ■クレー流亡質量 ן 2 颩 70 ◆注入速度 20 5 60 50 15 40 10 30 20 5 10 注入不可 0 0 #40 #50 #80 #20 #60 (550) (160)(150) $(D_{50}(\mu m))$ (140)(76) ガラスビーズ

写真-2.4 クレー懸濁液注入状況:実験②(c7, C=23.1%, ガラスビーズ#50)

図-2.19 c7(C=23.1%)注入結果および注入後の通水実験結果

b) 通水実験

川砂の粒径に近いガラスビーズ#20の供試体に対して、実験①で透水性の低減効果が高 い濃度である6ケース(単体クレーのc3が1ケース,c7が2ケース,混合クレーのそれ ぞれ1ケース)の実験結果を示す.図-2.20および図-2.21に動水勾配を段階的に変化させ た時の流量と水頭差の経時変化をそれぞれ示す.なお、これらの結果を比較する上で通水 温度に違いがある(10.4℃~30.4℃)ことから、水頭と流量の経時変化はそれぞれの挙動に 対する比較のみとし、絶対値の評価は15℃に換算した透水係数で行うことに留意する必要 がある.c7(C=34.2%)およびc3:c7=1:2(C=25.4%)が初期段階から流量が大きく上昇し ており、設定水頭差(定水位タンクの水頭差)と比べた水頭差が低くなっている.特に c3:c7=1:2(C=25.4%)は、設定水頭差が25cmから50cmに上昇する際に大幅に流量が増加 しており、この段階で間隙内のクレー懸濁液の多くが流亡したことで供試体の透水性が上 昇し、それに伴って、供試体流入前のホースや流量計での水頭損失が大きくなっている様 子を示していることが分かる.また、c3:c7=1:1(C=23.1%)は設定水頭差が50cmから75cm に上昇する際に流量が大幅に増加し、c7も概ね同様の挙動を示した.一方、c3:c7=2:1 (C=24.5%)およびc3(C=20.0%)は水頭差の上昇に伴う流量の増加が少なかった.

これらの結果を基に,図-2.22 に動水勾配 i と透水係数 k15(15℃換算)の関係を示す.

c7 (C=34.2%) は *i*=0.5, c3:c7=1:2 (C=25.4%) は *i*=0.5~1.0, c3:c7=1:1 (C=23.1%) は *i*=0.5 ~1.0 で透水係数が大幅に上昇し,その後の変化は小さくなっている.一方,c3 (C=20.0%) は *i*=1.5~2.0, c3:c7=2:1 (C=24.5%) と c7 (C=42.2%) は概ね同様に各段階でそれぞれ透水 係数が上昇しており,これらの 3 ケースと先述の 3 ケースとは透水係数に差異が確認でき る.次に, **図**-2.23 に動水勾配 *i* と注入前後の透水係数比 (k/k_0 , いずれも 15°C換算) の 関係を示す.まず,粒径が大きく粘性が低い c7 (C=34.2%), c3:c7=1:1 (C=23.1%), c3:c7=1:2 (C=25.4%) は動水勾配の上昇に伴い,透水性の低減効果が減少し,*i*=2.0 で概ね 1~2 割 程度の効果しか残っていない.一方,粒径が小さい,あるいは粘性が高い c3 (C=20.0%), c3:c7=2:1 (C=24.5%), c7 (C=42.2%) は *i*=2.5 でも 6~8 割程度の効果を維持している*C* が分かる.以上より,動水勾配の上昇に対して透水性の低減効果を維持しているグループ と,維持できていないグループとに分けることができ,粒径と粘性の違いが要因であるこ とが判明した.実験①ではいずれも効果が発揮された濃度であるものの,注入後の段階的 な動水勾配の上昇による透水性の変化がクレー懸濁液の特性により明確に分かれる結果が 示唆された.

図-2.21 水頭差の経時変化

図-2.22 透水係数と動水勾配の関係

図-2.23 透水係数比と動水勾配の関係

2.5.4 考察

(1) 残留クレーと透水係数の関係

実験①の結果に基づき、単体クレーと混合クレーそれぞれの透水係数比と残留クレー質 量の関係を整理し、図-2.24 に示す.全体的な傾向でみるとクレーの種類の違いはさほど 認められず、残留クレー質量が多くなれば透水性の低減効果が高いことが分かる.一方、 部分的な傾向をみると、残留クレー質量が多い部分で c7 の効果が低く、c3 の効果が高い 結果が現れており、混合クレーについてもそれぞれの割合が高い方に近い結果となってい る.このことから実験②の結果でも示されたクレーの粒径が関係していることが推察され る.また、図-2.25 に透水係数比と残留クレー質量比(残留したクレー質量 mc?/注入クレ ー質量 mc)の関係を示す.それぞれの種類毎に透水係数比が小さくなる残留クレー質量比 が認められる.単体クレーの c7 および混合クレーの c3:c7=1:2 は約 0.5~0.6 程度であり、 透水性の低減効果の高い配合でも注入したクレーの約半分が流亡していることが分かる. 一方、単体クレーの c3 および混合クレーの c3:c7=1:1 および c3:c7=2:1 は約 0.7~0.8 程度で あり,注入したクレーの流亡が約 2~3 割程度に留まっていることを示している.つまり, 粒径が小さいクレーの方が流亡の割合が少ないことが示唆された.

図-2.25 透水係数比と残留クレー質量比の関係

(2) 粘性係数と透水係数の関係

実験①の結果に基づいて単体クレーと混合クレーそれぞれの透水係数比と粘性係数の関係を図-2.26 に示す.クレーの種類の違いはさほど認められず,透水性の低減効果の高い粘性係数の範囲が約 1~1.5dPa·s の範囲に集中していることが分かる.つまり,透水性の低減効果において粘性係数が重要なパラメータの一つであることが示唆された.

(3) 粘性係数と残留クレーの関係

実験①の結果に基づき、単体クレーと混合クレーについて、それぞれの粘性係数と残留 クレー質量の関係をまとめて図-2.27 に示す.クレーの種類の違いはさほど認められず、 残留クレー質量の高い粘性係数の範囲が図-2.26 に示した透水性の低減効果と同様に約 1 ~1.5 dPa·s の範囲に集中していることが分かる.また、図-2.28 に粘性係数と残留クレー 質量比の関係を示す. 概ね粘性係数が低いと残留クレー質量比は減少し、粘性係数が高く なると残留クレー質量比が増加する傾向が認められる. つまり,粘性係数が低いとクレー 懸濁液の注入量は多くなるものの,懸濁液中のクレー量が少ない上に流亡しやすくなるこ と,逆に粘性係数が高いとクレー懸濁液の注入量は少ないが,流亡しにくくなることを示 している.

上述の結果から、クレー懸濁液の濃度は透水係数比が最小値を示した粘性係数になるように決定することとなる. つまり、濃度の粘性係数の関係を示した図-2.29 に基づき、クレーの種類によって異なるものの、概ね 20~35%の範囲となる. なお、本報では検討していないが、懸濁液の粘性を調整する添加剤などを用いることも考えられる. 図-2.24 に示した結果から、残留クレー質量が多いほど透水係数比が小さくなることが明らかとなっていることを鑑み、高い濃度のクレー懸濁液の粘性を低下させるとより高い効果が得られる可能性が考えられる. この場合、クレー懸濁液の濃度と粘性係数は必ずしも一義的な関係ではなくなるため、濃度と粘性係数の両方の特性を評価する必要がある.

図-2.26 透水係数比と粘性係数の関係

図-2.27 クレー残留質量と粘性係数の関係


図−2.29 濃度と粘性係数の関係

(4) グラウタビリティー比による注入可否の検討

次に,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 グラウタビリティー比を用い,クレー粒子の注入可否の状況について考察する,グラウタ ビリティー比(GR)は,注入材の85%粒径 G8sと地盤土の15%粒径 D1sを用いて以下の式 で表される²⁶.

ここで, GR>24 であれば注入可能, GR<11 であれば注入不可と判断されている 21).

まず,実験①に使用した川砂とカオリンクレーの粒度分布から式(1)を計算した結果を表 -2.7に示す.いずれのクレーに対しても注入可である計算結果となっており,実験結果と も一致した.

次に,実験②に使用した5種類のガラスビーズとカオリンクレーの粒度分布から式(1)を 計算した結果を表-2.8に示す.また,注入実験時の挙動から注入可否を判断した結果を併 記する.実験結果は,#80のガラスビーズに対して,c7の(C=23.1%および C=34.2%)が 不可となったことから、概ね式(1)の指標と整合する結果となった. つまり、クレー懸濁液 の注入の可否において、グラウタビリティー比が適用できることが判明した. 一方、#80 以外のガラスビーズでは、全てのクレー懸濁液が注入可能であることを示しており、供試 体内に圧入されたクレー懸濁液が間隙内を途中で止まることなく移動できることを示して いる.しかし、実験②の結果では、特に粘性の高いグループでは、高い動水勾配下の条件 (*i=2.5* 程度)においても実際にガラスビーズの間隙内にクレーが残留している結果を示し ていることから、この点からも粘性が影響していることが考えられる.

一方, Tachibana, et. al.²⁷⁾はダルシー流れと非ダルシー流れにおける速度の空間分布の違い を定量的に分析・可視化しており,非ダルシー流れの領域の透水係数の非線形性の原因を 土粒子表面付近の流れの遅い部分の増加による疑似的な透水断面の低下であることを示し ている. つまり,高い動水勾配下の条件において,間隙中で流れの速い部分によりクレー 懸濁液が流亡し,流れの遅い部分により残留していること,また,粘性の増加により透水 方向の流れに対抗して透水性の低減効果を維持しているものと推察される.また,実験① に用いた川砂は,ガラスビーズと比較して粒子が角ばっていることから,微細な間隙が多 く存在することで,実験②で透水性の低減効果の低いグループに分けられたグループのc7 (C=34.2%, η=0.52 dPa·s), c3:c7=1:1 (C=23.1%, η=0.30 dPa·s), c3:c7=1:2 (C=25.4%, η=0.34 dPa·s) でも,通水時の圧入により,流れの遅い微細な間隙に充填されたことで通水断面積 が低下し,透水性の低減効果を示したものと理解できる.

表-2.7 注入可否検討結果:実験①(川砂)

クレー種類	c3	c7	c3:c7 = 1:1	c3:c7 = 1:2	c3:c7 = 2:1
計算	50.7	29.2	36.2	31.7	41.3
実験	0	0	0	0	0

クレー	濃度	任可		ガラ	ラスビーズ	重類	
種類	C (%)	俚別	#20	#40	#50	#60	#80
-2	_	計算	66.7	37.3	37.3	34.7	17.3
63	20.0	実験	0	—	—	—	0
	_	計算	38.5	21.5	21.5	20.0	10.0
.7	23.1		0	0	0	0	×
C /	34.2	実験	0	—	—	—	—
	42.2		0	—	—	—	—
a ² .a ⁷ -1.1	_	計算	47.6	26.7	26.7	24.8	12.4
c3:c7-1:1	0.30	実験	\bigcirc	—	—	—	—
a ² .a ⁷ =1.2	_	計算	41.7	23.3	23.3	21.7	10.8
c3:c7-1:2	0.34	実験	\bigcirc	—	—	—	—
22.27-2.1	_	計算	54.3	30.4	30.4	28.3	14.1
c5:c7=2:1	0.27	実験	\bigcirc	—	—	—	—

表-2.8 注入可否検討結果:実験②(○:可,×:不可)

(5) 実流速および多粒子限界流速の比較

最後に、クレー懸濁液の密度と粘度が間隙内での移動に及ぼす影響についてさらに考察 を加えるため、注入したクレー懸濁液の粒子が移動し始める流速に対する評価を行った.

杉井らは粒子が移動し始める流速について、Terzaghiの限界動水勾配および Kozeny の透水係数式を用いた方法では流速が大きいほど実験値から外れる問題点を指摘した上で、実流速の観点から粒子レベルで評価する多粒子限界流速式を提案し、乱流域についても適用できる範囲が広いことなどの有効性を示し、主に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提案している²⁷⁾.ここで、水平浸透流に対する多粒子限界流速 Vem は、Richardsの干渉沈降速度と単粒子の限界流速をレイノルズ数によらず適用可能な Ruby 式により誘導される次式(2)で示される²⁹⁾.

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.

検討結果の一例として、実験②における c3 (C=20.0%)の結果を基に、(2)式により算出 した多粒子限界流速 Vcmおよび実流速 Vに対する通水開始後の経時変化を図-2.28 に示す. 多粒子限界流速の結果は、非常に小さな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オーダー程度大きな流速を示しており、 この流速でも.実際にクレー懸濁液が間隙内に留まっている.このことは、式(2.2)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.つまり、クレー懸濁液の粘性が間隙内の移動の 大きな要因であることがあらためて示唆された.



図-2.28 実流速および多粒子限界流速の算定結果(実験②)

2.6 本研究の位置付け

2.6.1 現状での課題の抽出

現在,薬液注入工法は水ガラス系溶液型注入材やセメント系懸濁型注入材が主流である が,これらは化学的にゲル化,もしくは固化させ地下水を止水することを目的としている. また、使用する薬剤は土砂に交じり、使用量が多くなれば産業廃棄物となる場合がある. さらに、薬剤の性質によっては地下水中に溶出し、排出水の処理や地下水流によって周辺 環境に拡散し、広い範囲で環境への悪影響を生じかねないため、使用するために多くの事 前準備や配慮が必要となる. つまり, 対象地盤の事前調査結果に基づく適正な注入材の選 定や周辺環境への調査等の入念な事前準備が必要となる. 懸濁型注入材であるセメント系 注入材も対象地盤として岩盤が多く、さらに、割裂注入での施工が多い、高透水性砂地盤 における適用例は、浸透性についての事例は少なく、具体的な止水効果や流れのある地下 水条件下での研究は例を見ない.粘土グラウトについてもいくつかの事例があるものの, 比較的低濃度の懸濁液を地下水の流れを利用して自然に浸透させたものである. 高濃度の 粘土懸濁液を高透水性の砂層に圧力注入して透水性を低下させるという手法を用いた事例 は非常に少ないため、未だ不明な点が多い、また、粘土グラウトは固化しないため、動水 勾配の上昇に伴って流速が大きくなると間隙内の粘土グラウトが流亡する可能性が非常に 高く、透水性低下機能を持続する事ができない、そのため、高濃度の粘土懸濁液を使用し た粘土グラウトの最適な配合比や浸透および流亡等の移動挙動、その要因について検討す ることが求められている.

本研究では新たな粘土系注入材として岡山県産のカオリンクレーに着目し,高い動水勾 配の一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.限られた実験条件の範囲内ではあるが,以下に本研究で得られ た知見をまとめる.

- (1)透水係数比と残留クレー質量の関係から、クレーの種類の違いはさほど認められず、 残留クレー質量が多くなれば透水性の低減効果が高いことが判明した.
- (2)動水勾配の上昇に対して透水性の低減効果を発揮するものとしては、粒径が小さいクレーあるいは粒径が大きくても高い粘性を有しているものである.一方、効果を発揮できていないグループとして粒径が大きく粘性が低いものである.
- (3)透水性の低減効果の高いクレー懸濁液の粘性係数の範囲は約 1.0~1.5 dPa·s の範囲で あり、その粘性を示す濃度はクレーの種類によって異なるものの、概ね約 20~35%の 範囲であることが示唆された.
- (4) クレー懸濁液の注入の可否において、グラウタビリティー比による注入可否の検討が 適用できることが判明した.また、注入後の通水実験で動水勾配の上昇に対して透水 性の低減効果を発揮できていないクレー懸濁液でも、通水時の注入実験では流れの遅 い微細な間隙に充填されたことで通水断面積が低下し、透水性の低減効果を示したも のと理解できる.

(5) クレー懸濁液注入後の実流速と多粒子限界流速の算定結果は2オーダー程度異なり、 実際には大きな流速でも間隙内にクレー懸濁液が留まっていることが分かった.した がって、注入後の動水勾配の変化に対する間隙内移動においてクレー懸濁液の粘性が 透水性の低減効果に大きく影響していることが示唆された.

以上のことから,クレー懸濁液を注入材に用いた場合,砂質層の透水性を低減させる最 適な粘度の範囲が存在するという Herndon ら²¹⁾が薬液系注入材を対象に示した既存研究と 一致した.その結果,クレー懸濁液の最適な濃度が決まるとともに.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はクレー懸濁液の粘性が 大きく影響していることを確認した.つまり,本実験で使用したクレー懸濁液は,川砂と ガラスビーズの供試体に対し,グラウタビリティーでは浸透可能範囲内であってもクレー 残留質量と透水係数低減に差がみられた.その要因は粘性であり,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.

そこで本研究では、高透水性の砂層を対象にした低コストで環境に配慮した注入工法の 開発を目的に岡山県産のカオリンクレーに着目した.なお、本研究における課題を以下に 示す.

- ① カオリンクレーおよび懸濁液の特性調査
- ② 通水下での注入に最適なクレー懸濁液の検討
- ③ クレー懸濁液の間隙内移動挙動の評価
- ④ 水ガラス系注入材の性能およびクレー懸濁液との混合効果の検証

2.6.2 本研究の工学的意義

本研究では、カオリンクレーおよびクレー懸濁液の特性を調査した上で、通水下での注 入に最適なクレー懸濁液の検討および間隙内のクレー懸濁液の移動挙動について検討する. これらの結果から、対象の注入地盤に応じたクレー懸濁液の種類や配合条件を設定する指 標を示すことができる.さらに、安価で環境に配慮した自然由来の材料を使用する粘土グ ラウトにより、高透水性砂地盤を対象とした条件において、透水性を低下させる新たな工 法の知見を得ることができる.さらに、都市域における高透水性砂地盤のトンネル施工の 補助工法に留まらず、河川堤防の基礎地盤の透水性を下げることにより、パイピングによ る浸透破壊対策工法の新たな開発に寄与するものと考える.

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, p.50, 1997.
- 2) (社)日本薬液注入協会:薬液注入工法の設計・施工指針, 1989.

- 3) 前掲1), pp.56-57.
- 4) 加藤満,後藤宇,大山将,小山孝,後藤彰宏,高田じゆん,坪内隆太郎,中野駿,勝見 武:複合ポリマー型地盤改良剤の開発-アルカリ性を呈する地盤にも有効な薬液注入 技術-,地盤工学ジャーナル, Vol.16, No.1, pp.23-34, 2021.
- 5) 赤塚光洋,大野康年,伊藤孝芳,下坂賢二,八嶋厚,村田芳信,苅谷敬三,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.
- 6) 森河由紀弘,本谷洋二,岡田宙,野口好夫,石田明人:超音波振動を併用した新しい薬 液注入工法,材料, Vol.69, No.1, pp.63-68, 2020.
- 7) 井澤淳,小島謙一,荒木豪,大西高明,林田晃,藤原寅士良,上田恭平,舘山勝:脈状割 裂注入による効率的な液状化対策工法の開発,土木学会論文集C(地圏工学),Vol.75, No.4, pp.454-468, 2019.
- 秋本哲平,仙頭紀明,林健太郎:溶液型薬液注入工法によって改良された地盤の動的 特性,地盤工学ジャーナル, Vol.16, No.4, pp.333-342, 2021.
- 9) 秋本哲平,仙頭紀明,上野一彦:薬液注入改良土の一軸圧縮強さに影響を及ぼす要因の評価,土木学会論文集B3(海洋開発),Vol.78, No.2, pp. I 535-I 540, 2022.
- 10) 秋本哲平,林健太郎,善功企,長津辰男,山本敦,車田佳範:溶液型薬液注入工法により改良された地盤の事後調査方法の選定,土木学会論文集B3(海洋開発),Vol.76, No.2, pp. I 648-I 653, 2020.
- 11) 笠間清伸,長山達哉,濱口信彦,杉村佳寿,藤井照久,金智之,善功企:性能規定に基づ く浸透固化処理地盤の支持力評価,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.78, No.1, pp.45-59, 2022.
- 12) 佐々木隆光, 末政直晃, 島田俊介: 弾性波試験を用いた薬液注入材による改良土の強度 発現機構に関する検討, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.76, No.4, pp. 374-393, 2020.
- 13) 遠藤敏雄,規矩大義, 菅野高弘,藤井照久,高田圭太:土性のばらつきが大きい地盤 における薬液注入工法による地盤改良効果の確認方法,土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.77, No.2, pp. I_415-I_420, 2021.
- 14) 大野康年,八嶋厚,村田芳信,下坂賢二:電気検層を用いた薬液注入工法の改良効果確認,材料, Vol.71, No.1, pp.91-96, 2022.
- 15)清水智明,小田義也:薬液注入の浸透過程を監視するための比抵抗トモグラフィの時 系列解析法の提案,物理探査,Vol.72, pp.139-154, 2019.
- 16) 清水智明,小田義也:薬液注入の浸透過程を監視するための比抵抗トモグラフィの時 系列解析法の実験的検証,物理探査, Vol.73, pp. 192-208, 2020.
- 17)高野大樹,杉山友理,新部貴理,長谷川信介,櫻井健,竹花和浩:比抵抗トモグラフィ を用いた薬液注入のリアルタイムモニタリングに関する検討,土木学会論文集B3(海 洋開発), Vol.78, No.2, pp. I 781-I 786, 2022.

- 18)中出剛,鈴木雅文,手塚仁,古田島信義,片山政弘,木佐貫浄治,西垣誠:ポストグラウトによる山岳トンネルの減水対策工法とトンネル挙動に関する一考察,土木学会論文集F1(トンネル工学), Vol.75, No.1, pp.75-87, 2019.
- 19) 兵動太一,塚本良道,野田翔兵,橋本和佳,荒井靖仁,掛川智仁:微細なセメント改良 材で固結した砂供試体の動的変形特性に及ぼす水セメント比の影響,土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, pp. I 211-I 216, 2019.
- 20) 阿部智彦,藤原浩己:可塑性グラウト材料の水中におけるpH上昇の抑制に関する実験 的研究,セメント・コンクリート論文集, Vol.74, No.1, pp.404-411, 2020.
- 21) 阿部智彦, SOESILO Egy Crystal,藤原浩己:可塑性グラウト材料のフレッシュ状態における引張強さに関する実験的研究,セメント・コンクリート論文集, Vol.75, No.1, pp. 448-455, 2021.
- 22)前田剛志,猿谷賢三,小池健司,平野光孝,矢島寿一,峯岸邦夫:空積み構造石積み壁 への背面注入補強工法に関する開発,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.78, No.1, pp.1-13, 2022.
- 23) 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,No.0432, pp.863-864, 2019.
- 24) 澤孝平編著:地盤工学,森北出版, pp.18-20, 2009.
- 25) 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,地盤と建設,Vol.36, No.1, pp.153-160, 2018.
- 26) 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.
- 27) Tachibana, I., Moriguchi, S., Takase S., Terada K., Aoki T., Kamiya K., Kodaka T.: Characterization of transition from Darcy to non-Darcy flow with 3D pore-level simulations, Soils and Foundations, Vol.57, Issue 5, pp.707-719, 2017.
- 28) 杉井俊夫,梅基哲矢,山田公夫,名倉晋:浸透破壊を対象とした進行性メカニズムの評価に関する研究,地盤工学シンポジウム論文集, Vol.25, pp.61-67, 2013.
- 29) 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.

第3章 カオリンクレー懸濁液の二次元土槽実験

3.1 概説

本研究では、地下トンネル工事におけるNATM工法採用時に問題となる高透水性地盤の 湧水対策の補助工法に着目し、地下水環境への負荷が小さい天然材料である粘土系の注入 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.前章で示した通り、既 往の研究では、岡山県産のカオリンクレーに着目し、高動水勾配の通水時における一次元 カラムへのクレー懸濁液の圧入による浸透試験から、透水性低減効果が得られる粘性係数 の範囲を特定するとともに、未通水時に圧入後、段階的に動水勾配を上昇させた一次元浸 透試験から、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.

本章では、2種類のカオリンクレーを用い、既往の研究で得られた知見に基づき、最も透 水性低減効果が得られる粘性係数の配合比を設定した上で、断面二次元土槽による注入お よび通水実験を実施した結果についてまとめる.具体的には、前面と背面に厚さ2cmのア クリル板を有し、回転軸により水平および鉛直での実験を可能とした幅100cm×高さ100cm× 奥行15cmの鋼製土槽の中央からクレー懸濁液を圧入して注入範囲を把握するとともに、注 入後に段階的に動水勾配を上昇させることで、透水性低減効果を流量と動水勾配の変化か ら、注入範囲の変化を間隙水圧の計測に基づくコンター図から整理する.また、未通水条 件と通水条件での圧入時の違いの有無について調べる.

3.2 実験方法

3.2.1 実験装置

図-3.1に製作した回転式二次元モデル実験装置の概略図,写真-3.1に実験状況を示す. 鉛直断面で供試体を作製した後,回転させることで平面断面二次元の実験も可能となって いる.実験土槽内の供試体寸法は幅100cm×高さ100cm×奥行15cmであり,中央部から攪拌 注入タンクを介してクレー懸濁液を定圧注入する構造となっている.水平一次元のカラム 実験同様に注水側と排水側の定水位タンクの水頭差により通水し,流速と注入範囲の関係 を明らかにすることを目的とする.ここで,注入範囲と流亡状況は,10cmピッチで供試体 内の間隙水圧の計測により把握することとし,自動で計56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ャ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109µm) 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0.003L/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の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-3.1 回転式二次元モデル実験装置概略図



(a) 攪拌注入タンク



(b) 二次元土槽写真-3.1 回転式二次元モデル実験状況

3.2.2 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-3.1に粒径加積曲線を図-3.2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、106µm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-3.2に粒径加積曲線を図-3.2 に川砂と併せて示す.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5µmに対して、c7は約7.5µm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,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.

话粘	土粒子密度	50%粒径	均等係数
性积	$\rho s(g/cm^3)$	$D_{50}(\mu m)$	U_{c}
川砂	2.682	718	4.23

表-3.1 試料の物理特性

插 粨	土粒子密度	50%粒径	均等係数
作里 尖貝	$\rho s(g/cm^3)$	$D_{50}(\mu m)$	U_{c}
c3	2.748	4.928	1.942
c7	2.713	7.482	2.117

表−3.2 クレーの物理特性



図-3.2 粒径加積曲線

3.2.3 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-3.3に示す.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. 写真-3.2 に鉛直状況(case1)および水平方向(case2)の実験状況を示す.

0050	话粘	配合比	粘度	上屋の向き	借去	
case	1里 大只	c/w(g/g)	$\eta(dPa \cdot s)$	工層の回る	加石	
1	2	0.25	1 46	鉛直		
2	65	0.25	1.40	水平	通水	
3	-7	0.52	1 10	鉛直	無し	
4	C /	0.52	1.10	水平		
5	c3	0.25	1.46	鉛直	通水下	

表-3.3 実験ケース



(a) 鉛直方向(case1)(b) 水平方向(case2)写真-3.2 実験状況

実験は、まずは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を検測した. 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*ΔH*=100cmの半分である*ΔH*=50cm(設 定動水勾配i=0.5)を条件とした.

次に、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*ΔHを*10cm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*ΔHを*12.5cm毎に最大100cm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.

3.3 実験結果

3.3.1 注入実験結果

(1) クレー懸濁液の注入範囲

case1~case5のクレー懸濁液注入後の状況について,**写真-3**.3に示す.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で最小値は下部の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.



(a) case1: c3鉛直方向







(c) case3: c7鉛直方向

(d) case4: c7水平方向



(e) case5: c3鉛直方向,通水時写真-3.3 注入後の状況

	種類	七百	最大距離	最小距離
case	(配合比)	刀凹	(cm)	(cm)
1	c3	鉛直	50	30
2	(0.25)	水平	50	30
3	с7	鉛直	50	10
4	(0.52)	水平	50	20
F	с3	約古	FO	2.0
Э	(0.25)	竝但	50	32

表-3.4 注入範囲実験結果

注入範囲の最大距離および最小距離の一覧表を表-3.4に示す.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が確認された.具体的には最大で50cm, 最小で20cm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.

(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-3.3に示す.

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.



図-3.3 注入速度経時変化

(3) 注入実験の再現性

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-3.4に示す.前述した写真-3.3(a)の注入範囲は最大50cmで最小値は30cmの結果に対し, 最大50cmで最小値は30cmとなり,概ね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.



写真-3.4 注入後の状況: c3 鉛直方向

3.3.2 通水試験結果

クレー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図-3.4に示す. c3鉛直方向の流量は注水タンクの設 定高さ*ΔH*=12.5cmでは*O*=0.72L/minとなり,注水タンク高さの変化毎に約*O*=0.5L/minの流量 が増加し、最終的にはQ=4.49L/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*ΔH*=12.5cmで*O*=0.43L/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0=0.6L/minの流量が増加し、最終的には0=5.12L/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*4H*=50cm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 *△H*=12.5cmで*O*=1.34L/minとなり,注水タンク設定高さが*△H*=37.5cmまでは大きく増加し, それ以降については約Q=0.4L/minの流量が増加し,最終的にはQ=4.94L/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*ΔH*=12.5cmで*Q*=0.89L/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*0*=0.4~0.8L/minの流量が増加し最終的に は*O*=5.23L/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⊿H=75cm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-3.4 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.



図-3.4 流量経時変化図



写真-3.5 通水試験前後(c3鉛直方向)

写真-3.5にc3鉛直方向の通水試験前および通水試験後のクレー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.

3.3.3 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k15および動水勾配iの経時変化を図-3.5に示す.



c3鉛直方向では,透水係数k1s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=70min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k1s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=50min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=40min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k₁₅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=70min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k₁₅はt=60min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=60min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.

3.3.4 間隙水圧分布

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分布からクレー懸濁液注入前後の通水状況の変化を比較した.計測点の位置を図-3.6に示す.次に,各ケースの注入前(*ΔH*=10.0cm)と注入後(*ΔH*=12.5cm)のコンター図を図-3.7~図-3.10に示す.なお,コンター図は,図-3.6の格子上の節点の値を用い,計測以外の節点は,両端の実測値からの平均値を用いて描画した.

機器の不具合で一部の測定値が欠損したことから,値のばらつきが多くなっているもの の,注入前は上流から下流に向かって概ね一様に水圧が低下している分布が,注入後は上 下部分の勾配が下流に伸びていることから,中心部分を迂回して流れている様子が分かる,



図-3.6 間隙水圧計測点







図-3.8 間隙水圧分布 (case2: c3 水平)



図-3.9 間隙水圧分布 (case3: c7 鉛直)



図-3.10 間隙水圧分布 (case4: c7 鉛直)

3.4 まとめ

本章では、2種類のカオリンクレーを用い、既往の研究で得られた知見に基づき、最も透 水性低減効果が得られる粘性係数の配合比を設定した上で、断面二次元土槽による注入お よび通水実験を実施した結果についてまとめた.具体的には、前面と背面に厚さ2cmのア クリル板を有し、回転軸により水平および鉛直での実験を可能とした幅100cm×高さ100cm ×奥行15cmの鋼製土槽の中央からクレー懸濁液を圧入して注入範囲を把握するとともに、 注入後に段階的に動水勾配を上昇させることで、透水性低減効果を流量と動水勾配の変化 から、注入範囲の変化を間隙水圧の計測値に基づくコンター図で整理した.また、未通水 条件と通水条件での圧入時の違いの有無について調べた.

以下に本章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.
- (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.

参考文献

1) 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.

- 2) 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.
- 3) 柴原晃,高橋啓介,小松満,瀧本弘治: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,令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会講演概要集,III-274,2022.

第4章 カオリンクレー懸濁液の注入特性の検討

4.1 概説

本章では,前章の断面二次元土槽での注入実験および注入後の通水実験結果に基づき, 実験による注入範囲に対して粒子グラウトの浸透距離を推定する理論式の適用性の検証を 行うとともに,透水性低減効果を基に,2種類のカオリンクレーを比較し,有用性の違いを 論述する.また,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の評 価を行う.

4.2 注入範囲の推定

4.2.1 理論式の適用性検討

まずは,理論値を用いて注入範囲の浸透距離を検討する.セメント等における粒子グラウトの浸透距離*R*_eは次式(4.1)によって推定できることが示されている¹⁾.

 $R_e = \frac{\gamma_w \cdot g \cdot h \cdot r_e}{2S} + r \qquad (4.1)$

ここで, R_e : グラウトの浸透距離(cm), r: 注入孔半径(cm), γ_w : 水の単位体積重量(g/cm³), g: 重力加速度(cm/s²), h: 水頭(注入圧)(cm), r_e : 間隙等値半径(cm), S: グラウトのゲ ル強さ(dyne/cm²)である.

まず、c3の鉛直方向について、注入孔半径r=0.5(cm)、水の単位体積重量 $y_w=1.0$ (g/cm³)、 重力加速度g=981(cm/s²)、注入圧h=510(cm)、間隙等値半径 r_e (cm)およびゲル強さS(dyne/cm²) は、**表-4.1**に示す通水前の懸濁液の粘度および**表-4.2**に示す試料の注入前透水係数のそれ ぞれの値から推定した.これらの値を用い、式(4.1)の計算結果として、 $R_e=42.1$ (cm)が得ら れた.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、それぞれ、 $R_e=35.7$ 、79.6、55.6(cm)となった.

一方,注入量から浸透距離を求めるには,図-4.1に示すように,注入速度の経時変化から限界注入量を推定し,注入によるクレー懸濁液の浸透範囲を円柱型と仮定した場合,限 界浸透距離*r*_{lim}は次式(4.2)で示される.

$$r_{lim} = \sqrt{\frac{Q_{lim}}{nD\pi}} \qquad (4.2)$$

ここで、*r_{lim}*: グラウトの限界浸透距離(cm), *Q_{lim}*: 限界注入量(cm³), *n*: 間隙率, *D*: 供試

体の奥行き(cm)である.

表-4.3および図-4.2に式(4.1)および式(4.2)によりそれぞれ算出した推定浸透距離を示す. これらから, c7鉛直を除き,実測値は理論直線と近く,やや高い値を示していることが分 かる.なお, c7鉛直の実測値が低いのは,注入形状が側方に広がったことで,鉛直方向の 浸透が抑制されたものと推察される.

衣⁻4. I	クレー感風攸の私度				
插粨	配合比	粘度			
俚积	c/w (g/g)	$\eta (dPa \cdot s)$			
c3	0.25	1.46			
c7	0.52	1.10			

表−4.1 クレー懸濁液の粘度

表−4.2 クレー懸濁液注入前後の透水係数の値および低減率

case	方向	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-4.1 限界注入量の推定方法

case	種類 (配合比)	方向	注入量推定 (cm)	理論値 (cm)
1	c3	鉛直	49.8	42.1
2	(0.25)	水平	50.1	35.7
3	c7	鉛直	50.4	79.6
4	(0.52)	水平	64.1	55.6

表-4.3 推定浸透距離の比較(注入量推定,理論値)



図-4.2 透水係数と浸透距離の関係(理論値,実験値)



写真-4.1 注入直後の注入範囲の推定(実測値)

次に,写真-4.1に示す実測により注入直後の注入範囲との比較を行う.注入範囲がいず れも楕円状に広がっているのは,供試体を水中落下法で作製しているため,鉛直方向に資 料が堆積していること、左右が透水境界で上下が不透水境界であることが影響している.

表-4.4に実測値と理論値を比較した結果を示す.なお,実測値は,4方向の測定値の平均 値とした.ここで,実測値と先述の注入量からの推定値の差異は,注入範囲が土槽の奥行 方向に必ずしも一様でないこと,一部が側面から流出していること等が要因として挙げら れる.

	種類	+ b	理論値	実測値
case	case 万问 (配合比)		(cm)	(cm)
1	c3	鉛直	42.1	39.5
2	(0.25)	水平	35.7	43.5
3	c7	鉛直	79.6	32.0
4	(0.52)	水平	55.6	37.0

表-4.4 注入範囲の比較(理論式,実測値)

4.2.2 流線網による評価

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,クレー懸濁液注入後の通水状況について評価を行った.

図-4.3~図-4.6にcase1~case4における注入前通水時(*ΔH*=10.0cm),注入後通水時 (*ΔH*=12.5cm),通水終期段階(*ΔH*=87.5cm)の流線網を示す.なお,同図には,実測によ る注入直後の注入範囲を黒色破線で併記した.

まず,注入前後の比較から,注入後には概ね注入範囲を迂回する形で通水が生じている 様子が把握できる.また,段階通水(動水勾配の上昇)に伴う顕著な変化は認めらないこ とから,流速の増加によるカオリンクレーの間隙内移動は,注入範囲内の外側付近に限定 的に生じていることが判明した.















図-4.4 流線網による注入前後の比較(case2: c3水平)





図-4.5 流線網による注入前後の比較(case3: c7 鉛直)







図-4.6 流線網による注入前後の比較(case4: c7水平)(続き)

4.3 透水係数低減効果の検証

次に、 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 *ΔH*=10cmとした時の4種類(case1, case2, case3, case4)の結果を図-4.7に示す.ここで、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.同図から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.っまり、クレー懸濁液により透水性の低減効果を示している.表-4.2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72%お



図-4.7 透水係数低減効果(*△H*=10cm)



図-4.8 クレー残留質量と注入後の透水係数の関係

図-4.8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.

4.4 多粒子限界流速による評価

次に、多粒子限界流速と実験時の実流速を比較することで、注入したカオリンクレーの 間隙内移動挙動を評価する.なお、修正多粒子限界流速は式(4.2)により表される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.

図-4.9にcase1のc3鉛直方向について、実流速と修正多粒子限界流速の経時変化図を示す. 実流速が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-4.4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.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*=80min程度から近づいている.図-4.10に示す透水係数 経時変化図の k_{15} (c3鉛直)でもt = 80min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-4.10 透水係数経時変化図(case1: c3 鉛直, case2: c3 水平)

4.5 まとめ

本章では,前章の断面二次元土槽での注入実験および注入後の通水実験結果に基づき, 実験による注入範囲に対して粒子グラウトの浸透距離を推定する理論式の適用性の検証を 行うとともに,透水性低減効果を基に,2種類のカオリンクレーを比較し,有用性の違いを 論述した.また,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の評 価を行った.

以下に本章で得られた知見をまとめる.

(1) 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.

- (2) 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.
- (3) 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.
- (4)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、局所的に速くなることが要因であることが推測された.

参考文献

- 1) 土質工学会:地盤改良の調査・設計から施工まで, pp. 272-274, 1978.
- 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.

第5章 現場試料を用いた注入材の作製方法の検討

5.1 概説

前章までに論述したカオリンクレーの他,超微粒子セメント等は数µm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、本章では、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、現場試料から細粒分を抽出する方法を検討するとともに、 懸濁液の特性について調査する。具体的には、現場試料から粒径5~7µm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段階の抽出方法を検討す る。なお、現場試料の細粒分含有率が低い場合は、懸濁液抽出前に粉砕処理を行う.また、 抽出した懸濁液の粘度を測定した上で、これまでの知見で得られた透水性低減効果を示す 粘度に調整する方法も併せて検討する.

5.2 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(土粒子密度ps=2.630 g/cm³)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¹⁾,土粒子密度ps=2.676 g/cm³)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,**写真-5.1**に示す粉砕機(アズ ワン,エクストリームミル MX-1200XTM)を用いて試料を粉砕した.



写真-5.1 粉砕機 (アズワン, エクストリームミル MX-1200XTM)

測定した粒径加積曲線を図-5.1に示す.ここで,まさ土はJISA1204「土の粒度試験方法」 に準じた浮ひょうによる沈降分析,川砂は写真-5.2に示す土壌粒度分布計測装置(METER 社,PARIO土壌分布計測装置,以下PARIO装置)を用いて測定した.まさ土は粉砕後に細 粒分が増加していることが分かる.



図-5.1 粒径加積曲線(まさ土,川砂)



写真-5.2 土壌粒度分布計測装置(PARIO)での測定の様子

5.3 細粒分の抽出と懸濁液の作製

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5µm、c7が約7µm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0.25~0.52である²⁾.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.

具体的な作製方法は、まず、写真-5.3に示すように、試料と水を任意の質量配合比で懸

濁液を作成し,攪拌する。次に,**写真-5.4**に示すように,攪拌後の懸濁液を開き目75μmの ふるいに通過させ,ふるいを通過した懸濁液を採取する。そして,75μmふるい残留分と水 で再度懸濁液を作製し,同様の作業を行った。



写真-5.3 懸濁液攪拌の様子



写真-5.4 75µmふるい通過の様子

作製した懸濁液に対して、図-5.2に示すように沈降速度の差を利用し、懸濁液中で粒径7 μm粒子より大きい粒子を沈降させ、粒径7μm以下の粒子が存在する部分を抽出した.な お、降時間到達後、写真-5.5に示すように、液面から沈降距離までの高さの懸濁液を真空 ポンプにより吸引容器内に抽出した。



図-5.2 任意の距離における到達時間



写真-5.5 真空ポンプを用いた抽出の様子



図-5.3 細粒分抽出のイメージ図

図-5.3に具体的な細粒分抽出手順のイメージ図を示す.まず,次式(5.1)に示す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,写真-5.6に示す回転式粘度計(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バケツ (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.

$$v = \frac{g_n(\rho_s - \rho_w) d^2}{30 \eta} \qquad (5.1)$$

ここで、 g_n :重力加速度(=981cm/s²)、 ρ_s :土粒子密度(g/cm³)、 ρ_w :流体の密度(g/cm³)、d: 土粒子径(mm)、 η :流体の粘性係数(Pa・s)である。



写真-5.6 回転粘度計(東機産業製TCV-10)使用の様子



図-5.4 粒径加積曲線(抽出細粒分,カオリンクレー)

表-5.1 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	$\eta (\mathrm{dPa}\cdot\mathrm{s})$	0.597
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-5.4, 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-5.1に示す.抽出した細粒分の50%粒度はカオリン 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(4µm以下の粒子が約30%か つ10µm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,粘度は想定の1~1.5dPa・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.なお,懸濁液沈降時の様子を**写真-5.7**に示す。



(a) 0h

(b) 2h **写真-5.7** 懸濁液沈降時の様子 (c) 4h

5.4 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³⁾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-5.5,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-5.6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.なお,注入材の作製の際,ベントナイトは膨潤性を有していることから, 写真-5.8に示すミキサーでの攪拌が不十分である場合には裏ごしを行い,土粒子の団粒化 を防ぐことで注入材を作製した。



図-5.5 ベントナイト及び抽出細粒分の粒径加積曲線



図-5.6 懸濁液と粘性係数の関係



写真-5.8 ミキサーでの撹拌の様子

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-5.2に示す.粘性係数の異なる懸濁液及び抽出細粒分のみのそれぞれ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ー水質量配合比(b/w)と粘性係数の関係を整理した結果を図-5.7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-5.2に示した通り,まさ土細粒分のみの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.

		(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	$\eta (dPa \cdot s)$	0.51	1.41	2.37	
(b) 川禄					
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	$\eta \ (dPa \boldsymbol{\cdot} s)$	0.51	1.40	2.35	

表-5.2 懸濁液の配合比及び粘度測定結果

※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-5.7 懸濁液と粘性係数の関係

5.5 まとめ

本章では,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,現場試料から細粒分を抽出する方法を検討するとともに,懸濁液 の特性について調査した。以下に本章で得られた知見をまとめる。

- (1) 現場試料から粒径5~7µm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.実際に細粒分の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5~7µm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、懸濁液抽出前に粉砕処理を行うことで、 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。

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.
- 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.
- 3) 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.

第6章 抽出細粒分懸濁液による水平一次元注入および通水実験

6.1 概説

本章では、前章において現場試料から抽出した細粒分を用いて作製した懸濁液を用い、 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査する.また、これらの結果に基づき、注入 効果やグラウタビリティー比による注入可否の検証を行うとともに、実流速および多粒子 限界流速の比較、通水実験後の供試体内の粒度分布から考察を加える.

6.2 実験方法

6.2.1 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-6.1に示す.



図-6.1 水平一次元実験注入·通水装置概略図

両端に不織布,ステンレスメッシュ(孔径109µm),多孔板を設置した直径10cm,長さ50cm 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 入出の蓋における水頭をマノメーターにより,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,背圧が作用できるビュレット内に入れ,カラム中央に設置し た直径1cm×長さ5cm(開口率45%)のステンレスメッシュ(孔径109µm)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.**写真-6.1**に実験状況を示す.



写真-6.1 水平一次元注入·通水実験状況

6.2.2 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p_s=2.630 g/cm³)及び川砂(土粒子密度p_s=2.676 g/cm³)を用いた.

図-6.2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106μm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φ60mm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.**写真-6.2** に作製後の供試体の状況を示す.



図-6.2 実験装置概略図



(a) まさ土 **写真-6.2** 供試体の状況



(b)川砂 **写真-6.2** 供試体の状況(続き)

6.2.3 実験ケース及び実験方法

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、流出量が無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-6.3の通り、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.



図-6.3 任意の距離における到達時間

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-6.1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106µm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.

	供試体		注入懸濁液		
ケース	種類	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	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	ベントナイト配合まさ土	1.41	
		1.55	細粒分	2.37	
		1.55	ベントナイト	1.56	
03-В		1.49		2.38	
R	川砂	1.42	_	_	
RS-F		1.44	川砂細粒分	0.51	
RS-FB	川砂細粒分除去	1.45	ベントナイト配合川砂細	1.46	
		1.44	粒分	2.35	

表-6.1 実験ケース

6.3 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*(cm³),注入速度 *V*(cm³/min)の一覧を**表-6.2**,注入状況を**写真-6.3**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.

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

表-6.2 懸濁液注入結果

※()内の数値は粘性係数を示す.



(b)懸濁液注入後(上:まさ土懸濁液,下:ベントナイト水懸濁液)



(c) 懸濁液注入後(川砂懸濁液)写真-6.3 懸濁液注入の様子

6.4 通水実験結果

6.4.1 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て,透水係数と動水勾配の関係を 図-6.4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.



図-6.4 透水係数と動水勾配の関係 (G, R)



図-6.5 注入前後の透水係数と動水勾配の関係(GS-F, RS-F)

6.4.2 細粒分懸濁液注入供試体 (GS-F, RS-F)

細粒分の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-6.5 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-6.4 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.

6.4.3 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-6.6にそれぞれ示す.



図-6.6 注入前後の透水係数と動水勾配の関係(GS-FB, RS-FB)

注入前はGSとRS, 注入後はGS-FBとRS-FBで表示している(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係数に差異が認められる.表-6.1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.

6.4.4 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-6.7 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.



図-6.7 注入前後の透水係数と動水勾配の関係



写真-6.4 川砂懸濁液注入後の通水による流亡状況 (左:懸濁液注入あり,右:懸濁液注入なし)



(a) 通水前(b) 通水後写真-6.5 通水前後の水みちの様子(川砂供試体)

注入後の透水係数は,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.

なお,写真-6.4に川砂懸濁液注入後の通水による流亡状況,写真-6.5に通水前後の水み ちの様子を示す.

6.5 考察

6.5.1 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-6.8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係数比(k/ko)と動水勾配の関係を 図-6.9に示す.まず、細粒分の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、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.



図-6.8 透水係数と動水勾配の関係(GS-FB(2.37))



図-6.9 注入前後の透水係数比と動水勾配の関係

川砂に対する結果では、細粒分のみの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 一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³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.

6.5.2 グラウタビリティー比による注入可否の検討

次に,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 グラウタビリティー比を用い,懸濁液粒子の注入可否の状況を考察した,グラウタビリテ ィー比(GR)は,注入材の85%粒径 G85と地盤土の15%粒径 D15を用いて次式(6.1)で表さ れる¹⁾.

$$GR = \frac{D_{15}}{G_{85}}$$
 (6.1)

ここで, GR>24 であれば注入可能, GR<11 であれば注入不可と判断されている¹⁾.

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	37.3	18.7
	○注入可	○注入可	○注入可

表-6.3 グラウタビリティー比による注入可否検討結果

表−6.3 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.

6.5.3 多粒子限界流速による評価

水平浸透流に対する多粒子限界流速式²⁾の粘性を考慮した次式の補正式³⁾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(6.2)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dP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-6.10に示す.

ここで、*V_{cm}*[']: 補正多粒子限界流速(m/s), 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(m/s²), 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.



図-6.10 多粒子限界流速と実流速の比較

6.5.4 通水実験後の供試体内の粒度分布

2種類(ベントナイト配合抽出細粒分懸濁液,ベントナイト懸濁液)の懸濁液を注入した 供試体を試験後に解体し,図-6.11に示すように上流,中央,下流の各10cmの区間毎に採 取した試料の粒度分析を実施した.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)ケースの粒径加積曲線を図-6.12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.



図-6.11 試料の採取区間



図-6.12 通水実験後の粒径加積曲線

6.6 まとめ

本章では前章において現場試料から抽出した細粒分を用いて作製した懸濁液を用い,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査した.また,これらの結果に基づき,注入効 果やグラウタビリティー比による注入可否の検証を行うとともに,実流速および多粒子限 界流速の比較,通水実験後の供試体内の粒度分布から考察を加える.以下に本研究で得ら れた知見をまとめる.

- (1) 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·s 程度が該当 することが判明した.
- (2) 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.

(3) 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.

参考文献

- 1) 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.
- 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.
- 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.

第7章 結論

7.1 結論

本研究では、岡山県産のカオリンクレーに着目し、高透水性の砂質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とした既往の研究で得られた知 見から、主に断面二次元土槽を用い、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、さらには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検証した.

一方,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,対象と する地盤自体の細粒分を材料として注入する新たな粘土系注入工法の開発を目的に,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.

以下,各章で得られた成果をまとめて総括を行い,本論文の結論とする.

第1章の序論では、本研究の背景として、未固結地盤を主とする地質でNATM工法を採用 するケースでの問題点を指摘するとともに、これまでに高透水性の砂質層を対象とした粘 土系注入材の適用例がみられない状況を鑑み、新たな材料の選定と止水効果の検証が求め られている背景を論述した. さらに、カオリンクレーに着目した経緯と本研究での目的を 述べ、研究内容とともに工学的意義を示した.

第2章の従来の研究では、現状での注入工法に基づき、セメント系注入材、粘土系注入材 に関する従来の研究をそれぞれまとめるとともに、高い動水勾配の一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についての既 往研究での成果を整理することで本研究の目的を抽出し、本研究の位置付けを明確にした.

第3章のカオリンクレー懸濁液の二次元土槽実験では、2種類のカオリンクレーを用い、 既往の研究で得られた知見に基づき、最も透水性低減効果が得られる粘性係数の配合比を 設定した上で、断面二次元土槽による注入および通水実験を実施した結果についてまとめ た.具体的には、前面と背面に厚さ2cmのアクリル板を有し、回転軸により水平および鉛直 での実験を可能とした幅100cm×高さ100cm×奥行15cmの鋼製土槽の中央からクレー懸濁液 を圧入して注入範囲を把握するとともに、注入後に段階的に動水勾配を上昇させることで、 透水性低減効果を流量と動水勾配の変化から、注入範囲の変化を間隙水圧の計測値から整 理した.また,未通水条件と通水条件での圧入時の違いの有無について調べた.その結果, 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.

第4章のカオリンクレー懸濁液の注入特性の検討では,第3章における断面二次元土槽で の注入実験および注入後の通水実験結果に基づき,実験による注入範囲に対して粒子グラ ウトの浸透距離を推定する理論式の適用性の検証を行うとともに,流線網から注入範囲の 変化を評価した.また,透水性低減効果を基に,2種類のクレー懸濁液を比較し,有用性の 違いを論述した.さらに,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 いての評価を実施した.その結果,粒径の小さなクレー懸濁液にはクレー懸濁液の注入範 囲の理論式が適用可能であることが示唆されるとともに,透水係数低減効果が大きいこと が判明した.加えて,実流速と修正多粒子限界流の評価から,注入後のカオリンクレーの 間隙内移動を生じさせる要因として,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ことを指摘した.

第5章の現場試料を用いた注入材の作製方法の検討では,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,現場試料から細粒分 を抽出する方法を検討するとともに,懸濁液の特性について調査した.具体的には,現場 試料から粒径5~7µm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.実際に細粒分の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5~7µm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,懸濁液抽出前に粉砕処理を行うことで,効率良く細粒分を抽 出することができることが判明した.また,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が示唆された.

第6章の抽出細粒分懸濁液による水平一次元注入および通水実験では第5章において現場 試料から抽出した細粒分を用いて作製した懸濁液を用い,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 性の変化を調査した.また,これらの結果に基づき,注入効果やグラウタビリティー比に よる注入可否の検証を行うとともに,実流速および多粒子限界流速の比較,通水実験後の 供試体内の粒度分布から考察を加えた.具体的には,懸濁液注入後の通水試験から,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·s程度が該当 することが判明するとともに,グラウタビリティー比と実験結果の注入可否の判断が整合 する結果が得られた.また,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.

7.2 工法の実現性

本研究で実施したクレー懸濁液による新たな注入工法の検討は,あくまで主に水平一次 元のカラム実験による基礎的な要素実験であり,工法の実現性を検討する上では,二次元 あるいは三次元モデルによる注入範囲に対する検討ならびに浸透距離を推定する理論式の 構築が挙げられる.そこで,新たに回転式二次元モデル土槽を製作し,鉛直断面および平 面断面二次元場での注入範囲の検討を開始した.以下に本工法の実現に向けた取り組みに ついて述べる.

(1) トンネルエ事への適用

三次元モデルで工法の実現性を確認した後には,実用化に向けた検討が必要である.具体的には,現場に適用する際の工法の設計であり,注入装置の製作と注入井および注入管の仕様,注入ピッチの決定,数値解析による評価が挙げられる.また,注入後の短・長期的な溶出特性を把握し,環境への影響評価を行う必要がある.

図-7.1にトンネル掘削時の湧水に対する注入方法のイメージ図を示す.クレー懸濁液が 対象となる浸透注入は,掘削断面を含む高透水層を対象とした掘削前注入と切羽の全断面 を対象とした掘削時注入に大別される.いずれの場合においてもクレー懸濁液の流亡を少 なくさせるためには薬液系注入材を一定間隔で注入してプラグ的な役割を持たせ,その間 にクレー懸濁液を注入する必要がある.

(2) その他の対策工法としての適用

本工法は、トンネル工事以外にも下記に示すように治水、土壌地下水汚染、圧密沈下防止、液状化防止等の対策への貢献が期待できる.

① パイピング破壊の危険性の堤防の基礎地盤の透水性低下.

- ② 汚染地下水の拡散制御壁としての利用.
- ③ 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.
- ④ 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.

このうち,①に関して,図-7.2に河川堤防における高透水性地盤に対する注入方法のイ メージ図を示す.

ここで、模型実験を用いてクレー懸濁液注入による浸透対策工法について検討した結果 について述べる¹⁾.模型実験土槽の概略図を図-7.3 に示す.土槽寸法は長さ 120cm×奥行 15cm×高さ 40cm(上流側長さ 10cm は水位調整槽)、土層構成に用いた試料を下記に示す. ① 砂(Sa2):岡山県内の一級河川において過去に噴砂が確認された箇所から採取された砂

試料であり、中透水性、旧河道、k=9.43×10⁻⁵ m/s(相対密度:D_r=90%)である. ② 砕石(G):7号砕石(k=5.47×10⁻³ m/s).下部基盤層と排水礫層に用いた. ③ 混合材料(S:C):まさ土:粘土(岡山県産)=7:3(乾燥重量比)で混合した試料で, k=1.75×10⁻⁷ m/s である.



図-7.1 トンネル掘削時の湧水に対する注入方法



図-7.2 河川堤防における高透水性地盤に対する注入方法

図-7.4に土層構成および実験後の状況を示す.同一の土層構成で別途実施した浸透対策 を行っていないケースよりも破壊の規模が小さかった.また,実験後の開削状況からパイ ピング破壊につながる砂層の流出はほとんど見られないことを確認した.このことから, 浸透対策工法として用いられている遮水壁に加え,高透水性の基礎地盤にクレー懸濁液を 注入することでパイピングを抑制できる可能性があることが示唆された.なお,浸透対策 工法である矢板による止水と比較すると,例えば川表側の連続遮水壁の設置により地下水 位が変化し,川裏側での地下水環境に影響が生じる可能性があることから,より地下水環 境に配慮した対策工法となることが考えられる.また,川裏側でのドレーン設置が困難な 場合等,砂層の透水係数を低下させる必要がある際の工法としての利用が見込まれる.



図−7.3 模型実験土槽概略図²⁾



図-7.4 土層構成および実験後の状況:クレー懸濁液注入²⁾

7.3 新たな注入材の可能性

既往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加え、本研究で検討した現 場試料から抽出した粒径5~7µmの細粒分による懸濁液においても、高透水性砂層の透水性 を低減させる効果の高い粘性係数である1~1.5dPa·s程度が該当することが判明した.つま り、これらと同等の粒子径で適度な粘性係数を示す懸濁液であれば、同様の効果が得られ る可能性がある.

一方,日本の漁業において、貝殻などの魚介類残渣は一般廃棄物とされており、各地域 内で適切な処理が義務付けられていることから、コンクリートの細骨材の一部を破砕した 牡蠣殻で置換した牡蠣殻コンクリート²⁾など,建設分野においても廃棄物である貝殻の有効 活用に向けた様々な取り組みが実施されている.重松ら³⁾は、使用に耐えられなくなったグ ラウンド表層部に破砕した貝殻を混ぜ合わせることによる性能(高透水性,適度な強度) 回復の是非を検討している.具体的には、2種類の砂質土をベースにした室内試験において、 貝殻を土質改良材として用いた場合の締固め、支持力、透水性に対する効果を明確にする とともに、現地実証試験においても透水性に対する飛躍的な向上が見込めることを明らか にしている.また、中房ら⁴⁾や小林ら⁵⁾は、砂層と礫層で構成される土のキャピラリーバリ ア(CB)の礫代替材として破砕貝殻を下部層に用いることで、乾燥、地震力の作用などに より、上部の砂が下部礫層の間隙に移動し、CB機能の喪失が防止できることを見出してお り、浸透水と接触した際の破砕貝殻からのカルシウム溶出量ならびに浸出水のpHに及ぼす 影響を検討した結果,廃棄物処分場への適用が問題ないことを明らかにしている.

このように、廃棄物である粉砕貝殻を地盤の透水性向上を目的に適用する試みがなされ ているが、一方、本研究で対象とした高透水性砂層の透水性低減効果を目的とした研究は 見られない.そこで、瀬戸内産天然カキ殻微粉末である胡粉 (pH:8±1,山陽クレー工業(株) 製、吉備胡粉、oyと称する)の粒径加積曲線を図-7.5,配合質量比と粘性係数の関係を調 べた結果を図-7.6に示す.平均粒子径は7~10µm,配合比0.15~0.2程度で1~1.5dPa・s程度 を示したことから、単体の懸濁液により、粘性の調整なしにカオリンクレーのc3と同様な 効果が期待できることが判明した.



図-7.5 胡粉およびカオリンクレーの粒径加積曲線



図-7.6 配合比と粘性係数の関係(牡蠣殻胡粉:oy)

7.4 実用化に向けた今後の課題

上述のように,既に室内試験レベルでは,カオリンクレー懸濁液注入による地盤の透水 性低下効果を確認しており,実用化に向けては,他の注入工法の事例を基に,実際の現場 を想定した注入機や注入管の開発に取り組む必要がある.また,これらの装置の導入にお いては,実規模レベルでの検証が必須となる.具体的には3µm程度の粒子から構成される 懸濁液の圧入ポンプおよび懸濁液の攪拌装置(沈降抑制),注入管から懸濁液の圧力注入を 可能とするパッカー方式の先端ノズルや狭隘な施工ヤードでも設置可能であるコンパクト なプラント設備の開発等である.

以下に今後の課題をまとめる.

(1) 現場注入工法の開発

- 1)現場試験に用いるカオリンクレー懸濁液の定圧注入機を製作すること.これまでの知見により、1時間程度で沈降が開始するので、懸濁液作成後は攪拌しながら注入できるようにする.ここで要求される仕様は、下記に示す従来の非薬液系注入の際に用いる数値を必要とする.
 - ・最大吐出圧力:1.0MPa
 - ・吐出量:1~10 @ /min
 - ・インバータ方式のモーター回転数無段変速により、吐出量調整可能.
 - ・ダブルパッカー方式注入ノズル(径50mm程度)
 - ・常時調合した懸濁液が追加可能.
 - ・四輪により可搬可能.
- 2) 注入井(注入管)の仕様は、目的の深度に確実にカオリンクレー懸濁液を圧力注入で きるような注入管(VP65mm有孔管)と遮水方法とすること。
- 3)設計・製作した注入機および注入管が室内試験結果から算出された注入量が吐出できることを既設井戸で確認すること。
- (2) 現場注入実験
 - 1) 設計・製作した注入機および注入井が3次元での注入が確実になされているか確認す ること.
 - ・理論式からカオリンクレー懸濁液の注入範囲を半径50cmと想定したうえで、2か所から注入を実施する事により、注入範囲の確認および効果さらには重ね部分の検証を実施する.具体的な実試験装置は高さ3m×幅3m×奥行3mを確保しカオリンクレー懸濁液の注入管は2mの深さまで設置する.図-7.7に実試験装置図を示す.
 - ・カオリンクレー懸濁液を,設置した注入管の先端からパッカー方式注入ノズルにより50kPaの圧力注入を実施する. 図-7.8に注入イメージ図を示す.
 - ・注入範囲については,目視による注入確認及び検測を実施する.
 - 2) 実験結果を踏まえて注入工法の仕様作成すること.
 - ・注入範囲の決定(注入量,注入時間)

- ・注入ピッチの決定(注入管の間隔)
- ・注入圧の決定
- ・期待される透水係数低減効果



図-7.7 実試験装置図



図-7.8 注入イメージ図

最後に、本研究の成果を踏まえ、実用化に向けた具体的な着目ポイントを以下に列挙する.

- 1) 注入材の遮水に対する有効性を実規模レベルで確認し,実用化に向けた検討を加速させる.
- 2) 本研究で着目したカオリンクレーは天然材料であるため環境への負荷が少なく,岡山県 で産出される材料の有効活用の面で有益である.
- 3) 現場の土をそのまま用いて現在の地盤を改良する工法は例がない.
- 4) 老朽化した堤防は非常に多く、低コストの材料とすることにより、大量の注入材が使用 される可能性がある.

- 5) 製品の販売価格は極力抑える必要があり、製品自体での利益が期待できない場合でも、 現場の改良方法の設計業務を行うことで、付加価値を得ることができる.
- 6) カオリンクレーの製造会社では、分級精製技術として、水を利用した「湿式製法」と空気を利用した「乾式製法」の2つの工場を所有しており、2つの製法により幅広い範囲の粒度の製造が可能である.現在、1社で両方の分級精製技術を所有するメーカーは国内に無いことから、設計変更を余儀なくされる場合でも、必要な粒度調整に対して柔軟に対応できる利点がある.

参考文献

- 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.
- 2) 堀口至,目片雄土,三村陽一:コンクリートの基礎特性に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, No.1, pp.559-564, 2013.
- 3) 重松宏明,小田憲一,樋口恵美子,高野典礼,田崎宏:貝殻混合によるグラウンド表層 材の土質改良効果,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.68, No.1, pp.138-149, 2012.
- 中房悟,小林薫,松元和伸,森井俊広:貝殻を再利用したキャピラリーバリア地盤の大型土槽実験による限界長の評価,土木学会論文集C(地圏工学),Vol.69, No.1, pp.126-139, 2013.
- 5) 小林薫, 鈴木ひかり, 進藤里歩, 村上哲, 松元和伸, 森井俊広: 廃棄物最終処分場覆土に 用いる水産系副産物(貝殻)の適用性に関する実験的研究, 土木学会論文集B3(海洋 開発), Vol.72, No.2, pp. I_958-I_963, 2016.

謝辞

本論文は、岡山大学大学院環境生命科学研究科博士後期課程環境科学専攻在学中に行っ た研究成果を取りまとめたものであり、研究を推進するに当たり非常に多数の方に御指導 と御助言、御支援を頂きました.

岡山大学大学院環境生命科学研究科の小松満教授には入学前より御指導頂き,学識者の 世界への挑戦に対し後押しを頂き,研究全般にわたり御指導,御支援を賜りました.研究 以外でも多くの人生における新たな気づきなどを学ばせて頂きました.深く感謝の意を表 します.

岡山大学大学院環境生命科学研究科の竹下祐二教授,珠玖隆行准教授,金秉洙准教授 (現:韓国檀国大学准教授)には副指導教員として細部にわたり御指導,御支援を頂きま した.深く感謝の意を表します.

岡山大学大学院環境生命科学研究科の高橋啓介客員研究員には従前の研究における知見 をベースに研究全般にわたり御指導,御支援を賜りました.深く感謝の意を表します.

室内試験の実施にあたっては森裕紀氏(現岡山大学大学院),竹内元春氏(現レイスグル ープ),築山推氏(現西日本高速道路株式会社)に多大な尽力を頂きました.深く感謝の意 を表します.

株式会社フソウ 専務執行役員(建設事業部長)工藤修様には業務の遂行にあたり,御 配慮及び御協力を頂きました.関係する業務におきましては株式会社フソウの諸兄から多 数の御指導と御支援を頂きました.深く感謝の意を表します.

最後に大学院での学びの場を提供して下さった全ての皆様,学びの場へ気持ちよく送り 出してくれた家族に心から感謝の意を表します.

引き続き皆様の御指導御鞭撻の程宜しくお願い致します.