## 博士論文

# 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研究

## 令和3年3月

## 高橋 啓介

# 岡山大学大学院 環境生命科学研究科

要旨

近年,都市部でのトンネル工事において未固結地盤を主とする地質に対してもNATM 工法を採用するケースが増えている。高透水性の砂質層の出現により湧水が問題とな った場合,止水工法などの補助工法が必要となるが,採用するグラウト材の種類や使 用量によっては,工事費の増大や地下水環境への負荷が問題となることがある。

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、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 系の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。また、ウレタ ン系注入材は砂層への浸透注入は難しく、水みちを直接塞ぐ割裂注入である。一方、 非薬液系の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。また、ベント ナイト等の粘土系注入材を高透水性の砂質層に適用した事例はほとんどみられない。

そこで本研究では,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,主に水平一次元のカラム実験による基礎的な検討を実施した。他の注入 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質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が,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。本研究での実施内容は、粒径の異な る3種類のクレーを対象に,まず,クレーと水を混合した懸濁液の配合比の違いによる 粘性や沈殿特性を調べた。次に,供試体に川砂を用いた水平一次元注入実験を実施し, 高動水勾配が作用している地下水流の条件下で,カオリンクレー懸濁液を圧入し,粘 性と透水係数低減効果の関係から注入に適したカオリンクレーの濃度の範囲を明らか にした。さらに,透水係数の低減効果が認められた濃度を対象に,供試体に数種類の ガラスビーズを用いて注入の可否を判定するとともに,注入後に動水勾配を段階的に 変化させた水平一次元通水実験を実施し,カオリンクレー懸濁液の間隙内移動を粘性 の違いから考察した。

その結果,透水係数を最も低下させることのできる最適な濃度が存在することが判 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,さらに, 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が新たな知 見として得られた。結論として,適度な粘性を有する濃度の懸濁液を用いることで, 高動水勾配が作用している地下水流の条件下においても透水性の低減効果が得られる ことが明らかとなった。

## 目次

第1]	章 序	論	•		• •	• •	• •	• •	• •	• •	•	• •	• •	•••	• •	• •	• •	• •	• •	• •	• •		• •		• •		• •		•••	• •	1
1.1	緒言	ī	••		• •	•••	•••	• •		• •	•	• •	• •	• •	• •	• •	•••	•••	•••	• •	•••		• •		••		•••			•••	1
1.2	本研	F究(	の目	的	と	意	義		• •	• •	•	• •		• •	•••	• •		••		• •	• •		•••		•••		•••				3
1.3	本論	ì文í	の樟	埥成							•	• •		• •	• •	•••		•••		• •	• •		• •		•••		•••				4
参考	文献	•	•••						• •		•	• •			• •	• •		••		• •	• •		•••				•••				5
第2章	章 従	(来)	の研	Ŧ究	,	• •	• •		• •		•									• •	• •										7
2.1	概説	į	•••					• •	• •	• •	•	• •		• •	•••	• •		••		• •	• •		•••				•••				7
2.2	注入	ιŢ	去の	)特	徴		• •	• •		• •	•	• •	• •	• •	• •	• •	•••	•••	•••	• •	• •		• •		••		•••			•••	7
2.3	薬液	系	Èλ	、材	に	関	す	る	研	究	,	•		• •	•••	• •		••		• •	• •		•••		•••		•••				8
2.4	非漢	液	系注	Eλ	材	に	関	す	る	研	穷	Ľ	•	• •	• •	• •	•••	•••	•••	• •	•••		• •		••		•••				12
2.	4.1	セ	メン	ィト	系	注	入	材			•	• •		• •	• •	•••		•••		• •	• •		• •		•••		•••				12
2.	4.2	粘	土系	注	λ	材		• •		• •	•	• •		• •	••	•••	••	••	••	•••	••		••	•••	••	•••	••		•••	•	16
2.5	本研	F究(	の位	Ζ置	付	け		• •	•••	• •	•	• •		• •	•••	• •		••		• •	• •		•••				•••				19
2.	5.1	現:	伏て	<b>こ</b> の	課	題	の	抽	出		•	• •	• •	• •	••	•••	••	••	••	•••	••		••	•••	••	•••	••		•••	•	19
2.	5.2	本福	研究	ະດ	Τ	学	的	意	義		•	• •		• •	••	•••	••	••	••	•••	••		••	•••	••	•••	••		•••	•	20
参考	文献	• •	••			•••	•••	• •			•	• •			••	• •	••	•••		•••	•••		••		••		•••				20
第3章	章 都	市	或卜	・ン	ネ	ル	I	事	で	の	Ъ	: 기	< ]	_ >z	±∂	)〕	官旅	臣哥	퇵仭	ij											23
第3章 3.1	章 都 概説	了市 1 1 · · ·	或	-ン 	ネ 	ル 	Т 	事 	で 	の 	<u>т</u>	<u>-</u> 기 	< ] 	二注 	去 <i>0</i> 	)〕 ..	官放 	<b>也</b> 哥 	<b>厚</b> 例 ..	刊 	•	 	 	 	 	 	•••	 	 		23 23
第3章 3.1 3.2	章 都 概	3市」 2・・・ 5 概 5	或	・ン 	ネ  	ル 	工 	事 	で 	の 	· 11	こ フ ・・ ・・	< ]  	二注  	去 <i>0</i> 	)〕 .. ..	官が 	<b>近</b> 马 ・・	<b>厚</b> 何 .. ..	列 · ·		  	 	  	 	  	•••	· · ·	••••		23 23 23
第3章 3.1 3.2 3.	章 都 概説 工事 2.1	3市」 2 ≨概 至	或 · 要 事	·ン ··· 。 。	ネ  及	ル   び	工 ··· 事	事前	で ·· 調	の ··· 査	Ш	- フ - ・ - ・ - ・	< ]  	二 注  	去の  	)〕 ・・ ・・	尾が ・・ ・・	<b>伍</b> 马 • •	厚	列  	 	  	 	  	 	  	•••	  	· · · ·		23 23 23 23
第3章 3.1 3.2 3. 3.	章 都 概説 工事 2.1 2.2	で た い で て の で の で の で	或:要事羽	・ン ・・ 容 況	ネ ・・ 及	ル ・・ び	工 ··· 事 ··	事 前	で調	の ··· 査 ··		<u>-</u> 才  	< ]   	  	去の  	)〕 ・・ ・・	ミが ・・ ・・	<b>伍</b>  	<b>厚</b> 何 .. .. ..	列   	  	   	· · · · · · ·	· · · ·	· · · · · ·	   	· · ·	· · · ·	· · · ·		23 23 23 23 23 25
第3章 3.1 3.2 3. 3. 3.	章 都 概説 2.1 2.2 2.3	市 い 概 工 切 王 王 フ 王	或 要事羽質ト 内おお	ン・・ 容況況	ネ   及	ル ・・ び ・・	工 事	事 前	で・・・調・・・	の査		- <b>才</b>  	< ⊒   	- 72   	去 <i>0</i>  	)〕 ・・ ・・	€	西	<b>耳</b> 仍 	初  	  	   	· · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · ·	· · · ·	· · · ·		23 23 23 23 25 27
第3章 3.1 3.2 3. 3. 3. 3.	章 都 概 2.1 2.2 2.3 2.4	市・概工切土湧	或 要事羽質水上 内おおお	ン・・ 勾代代代	ネ・・・及	ル  び 	エ 事	事 前	で・・ 調・・・	の査		-	< ]    	二    	去 <i>0</i> .. .. ..	) ) : : : : : : :	€		<b>事</b> ....... 例.......	列  	  	· · · · · · · ·	· · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · ·	· · · · · · · ·	   		23 23 23 23 25 27 27
第3章 3.1 3.2 3. 3. 3. 3. 3.3	章 都 概 工 2.1 2.2 2.3 2.4 削	市、概工切土湧補	或 . 要事羽質水助上	ン・・・ 容況況況法	ネ・・・及	ル  び 	エ・・ 事・・・・	事 前	で・・ 調・・・・	の 査	· TF	- <b>才</b>   	< ]    	二 :   	去 <i>0</i>   		€ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1910	<b>耳</b> 仍 	列   	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	23 23 23 23 25 27 27 28
第3 3.1 3.2 3. 3. 3. 3.3 3.3	章 概 工 2.1 2.2 2.3 2.4 削 3.1	市、概工切土湧補工	或 要事羽質水助事 人名法马达	ン・・ 習代代代ニョン・・ 容況況況法容	ネ・・ 及 ゆう 及	ル・・・び・・・・び	エ・・ 事・・・・ 事	事	で 調 調	の 査		- - - - - - - - - - - - - -	< I     	- 75     	去 <i>0</i> ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	) 了 : : : : : : : : : : :	€		<b>肾</b> ......... 例..........	列	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	23 23 23 25 27 27 28 28
第3 3.1 3.2 3. 3. 3. 3.3 3.3 3.3	章 概 型 概 工 1 2 2 2 2 3 2 4 削 3 3 2 4 1 3 3 2 4 1 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	了。 概工切土 湧補工補 丁、概工切土 湧補工補	或、要事羽質水助事助下,内おおおす。	ン・・ 習代代代に回こ	ネ・・ 及 アンクス 及採	ル・・び・・・ び用	エ・・ 事・・・・ 事の	事 . . 前 . . . . 前 流	で 調 調 れ	の 査 査		- <b>才</b>  	< _      	二 汸 · · · · · · · · · · · ·	去 <i>0</i> 		1	1910日,一日,一日,一日,一日,一日,一日,一日,一日,一日,一日,一日,一日,一日	<b>耳</b> · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	列 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · ·	23 23 23 25 27 27 28 28 28 29
第3章 3.1 3.2 3. 3. 3. 3.3 3.3 3.4	章   2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	72."概工切土湧補工補."	或 要事羽質水助事助一下 内羽羽羽工内ユリ	ン・・ 習代代代ニョニリン・・ 容況況況法容法ン	ネ・・及 及採グ	ル・・び・・・ び用	エ・・事・・・ 事の・	事..前....前流.	で・・ 調・・・・ 調れ・	の 査 査		- オ - ・ - ・ - ・ - ・ - ・	< ]     	二 <u>汚</u> ・・・ ・・・ ・・・ ・・・	去 <i>の</i> ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・		121、	1919年19日1月19日1月19日1月19日1日19日1日19日11日11日11日11日11日11日11日11日11日	<b>髥</b> . . . . . . . . . . . . . . . . . . .	<b>刘</b> • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · ·	23 23 23 25 27 27 28 28 28 29 31
第3章 3.1 3.2 3. 3. 3.3 3.3 3.4 3.5	章   2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	3 2 2 概工切土湧補工補ブ補市 - 一概工切土湧補工補工補	或 要事羽質水助事助一助ト 内北北北北口山	ン・・ 羽代代代三羽ニリニン・・ 容況況況法容法ン法	ネ・・及 及採グシ	ル・・び・・・ び用 ス	エ・・事・・・ 事の・テ	事 ・ ・ 前 ・ ・ ・ 前 流 ・ ム	で・・ 調・・・・ 調れ・	の 査 査		- <b>小</b>     	L >	二 <u>7</u> 2 · · · · · · · · · · · ·	去 <i>の</i> ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・		12	西:::::::::::	<b>肾</b> ....................................	列 · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · ·	23 23 23 25 27 27 28 28 29 31 34
第3章 3.1 3.2 3. 3. 3. 3.3 3.4 3.5 3.5 3.	章   2 2 2 2 3 3    5     4   5 . 1 4 3 3     5 . 1 4 都 訪 事	了。 我也一切上 湧 礼 工 補 工 補 具	或 要事羽質水助事助一助本ト 内おおおれていすい	ン・・ 羽代代代二羽ニリニコン・・ 容況況況法容法ン法な	ネ及 及採グシ現	ル・・び・・・び用 ス象	エ・・事・・・ 事の・テに	事・・前・・・・前流・ム応	で・・ 調・・・・ 調れ・ じ	の・・査・・・・査 ・・・た		二、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、	<		去.......... 去の.....		ミ・・・・・・・・・ くが・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	匝............... ∠	<b>「</b> 「」」」」」」」」」	刘	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · ·	· ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	23 23 23 25 27 27 27 28 29 31 34 34
第3章 3.1 3.2 3. 3. 3. 3.3 3.3 3.4 3.5 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3.	章   2 2 2 2 3 3    5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	了。 概工切土湧補工補ボ補具掘 市·概工切土湧補工補ボ補具掘	或 要事羽質水助事助一助本削下 内北北北北内ユウユ的補	ン・	ネ・・及 及採グシ現工	ル・・び・・・び用 ス象法	エ・・事・・・ 事の・ テにの	事・・前・・・前流・ム応計	で・・ 調・・・・ 調れ・ ( 画	の 査 査 た	· · · · · ·		<       		去.......... 去. の........... 去.		ミ・・・・・・・・・ く・が・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	● · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	耳····································	刘	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· ·		· ·	· · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	23 23 23 25 27 27 28 28 29 31 34 34 34
第3章 3.1 3.2 3. 3. 3.3 3.3 3.4 3.5 3.4 3.5 3.4 3.5 3.6	章   2 2 2 2 2 3 3    5 5 5	了。我工切土湧補工補引	或 要事羽質水助事助一助本削解ト 内状状状工内エリエ的補析	ン・ 「お犬犬」 ヨニリニ リ前行ン・・ 容況況況法容法ン法な助に	ネ・・及 及採グシ現工よ	ル・・び・・・び用 ス象法る	エ・・事・・・事の・テにの要	事・・前・・・ 前流・ム応計素	で・・調・・・ 調れ・ じ画実	の・・ 査・・・・ 査・・・ た 験	止・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	こここ こここ ここう 前の きつけい こうしょう しょうしょう しょうしょう しょうしょう むいしょう しょう しょう 日本 白い 日本	<コ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・	· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	去.......... 去. 殳の...................... シ. ▽		ミ・・・・・・・・・ く・・ が・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	逛 · · · · · · · ·	<b>耳</b> ................ 例.................	利 · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · ·		· ·	· · · · · · · ·			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	23 23 23 25 27 27 28 28 29 31 34 34 34 34
第3章 3.1 3.2 3. 3. 3. 3.3 3.3 3.4 3.5 3.4 3.5 3.6 3.7	章 2222 33 55 概工.1.2.3.4 掘1.2.追掘.1.2 浸ま都説事 削 加削 透と	おい概工切土湧補工補引具掘流めす、概工切土湧補工補が補具に流め	或 . 要事羽質水助事助一助本削解	~	ネ・・及 及採グシ現工よ・	ル・・び・・・び用 ス象法る・	エ・・事・・・ 事の・テにの要・	事::前:::前流:厶応計素:	で・・調・・・ 調れ・ じ画実・	の・・査・・・査 ・・た 験・	止・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	二、、、、、、、、、、;、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、	<コ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・ ・・	ニ・・・・・・・・・ ニ・ 2・2・2・2・2・2・2・2・2・2・2・2・2・	去...........去.殳. ク............ 去.殳.		ミ・・・・・・・・・ く・・・ が・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	臣 · · · · · · · · ·	<b>耳</b> .............. 何...............	列	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · ·		· ·	· · · · · · · ·				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	23 23 23 25 27 27 28 28 29 31 34 34 34 34 35 37

第4章 カオリンクレー及び懸濁液の特性調査 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
4.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
4.2 カオリンクレーの物理特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
4.3 クレー懸濁液の物理特性	40
4.3.1 粘度及び密度	40
4.3.2 沈降特性	41
4.3.3 減粘剤混合クレー懸濁液	43
4.4 クレー懸濁液混合砂の強度特性	44
4.4.1 実験方法	44
4.4.2 試験結果及び考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	46
4.5 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	47
参考文献	48
第5章 通水下での注入に最適なクレー懸濁液の検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
5.1 概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
5.2 実験方法	49
5.2.1 実験装置	49
5.2.2 試料の物理特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	51
5.2.3 予備通水実験 ······	52
5.2.4 実験ケース ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	57
5.2.5 実験方法	57
5.3 実験結果	59
5.4 考察	65
5.5 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	70
参考文献	70
第6章 クレー懸濁液の間隙内移動挙動の評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
6.1 概説	71
6.2 実験方法 ····································	71
6.2.1 実験装置	71
6.2.2 実験ケース	71
6.2.3 実験方法	74
6.3 実験結果	74
6.3.1 クレー種類及び供試体の差異に対する検討(ケース1~2) ・・・・・・・	74
6.3.2 異なる配合比及び減粘剤添加の懸濁液に対する検討(ケース3~5)・・	80
6.4 考察	83
6.4.1 グラウタビリティー比による注入可否の検討 ・・・・・・・・・・・・・・	83
6.4.2 注入時間及び容積に関する検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	84
6.4.3 密度と粘度に対する透水係数と動水勾配の変化 ・・・・・・・・・・・・・・	86
6.4.4 多粒子限界流速による評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	88
6.5 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	90
<u>수 고 수 최</u>	Q1

第7章 水ガラス系注入材の性能及びクレー懸濁液との混合効果の検証	93
7.1 概説	93
7.2 実験方法	93
7.2.1 通水状態での注入実験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	93
7.2.2 未通水状態での注入実験・段階通水実験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・	95
7.3 実験結果および考察	97
7.3.1 通水状態での注入実験結果(水ガラス系溶液) ・・・・・・・・・・・・・	97
7.3.2 未通水状態での注入実験・段階通水実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・	101
7.4 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	104
参考文献	104
第8章 結論	105
8.1 結論	105
8.2 工法の実現性	107
8.3 実用化に向けた今後の課題 ····································	110
参考文献	112
謝辞 ····································	113

### 第1章 序論

#### 1.1 緒言

都市部でのトンネル工事において、急な線形や断面変化への対応の必要性、あるいはト ンネル掘削における使用機械等の性能向上により、近年、未固結地盤を主とする地質でも NATM 工法を採用するケースが増えている。NATM 工法を施工する上での問題点は以前よ り指摘されているように<sup>1)</sup>,不規則な地層が入り混じっている場所においては,事前の調 査では高透水性の砂質層などの存在を把握できない場合もあり,湧水やそれに伴う流砂の 発生が懸念される。これらは時に地盤の空洞や陥没を発生させ , **写真-1.1** に示すような福 岡市の地下鉄工事で発生した陥没事故<sup>2)</sup>にみられるようなインフラや道路交通に影響を与 える場合がある。その場合,復旧工事や新たな対策工によって,工期の延期や費用の増大 等,工事全体に多大な損失を及ぼすこととなる。一方,このような状況を避けるには,確 実な補助工法の選定が必要となる。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<sup>3)</sup>。止水工法は,地盤条件に適した工法の採用が必要であ り<sup>4)</sup>, 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<sup>5)</sup>,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<sup>3)</sup>,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<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>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。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<sup>8)</sup>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 薬液注入工とディープウエル工法による排水工の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<sup>9)</sup>,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。



写真-1.1 福岡市の地下鉄工事で発生した陥没事故 2)

非薬液系であるセメント系注入材について,延藤ら<sup>10)</sup>は,岩盤亀裂を対象とした止水工 法について,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<sup>11)</sup>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<sup>12)</sup>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<sup>13)</sup>は,極超微粒子注入材により,砂質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,岩盤亀裂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<sup>14),15)</sup>。一方,非薬液系の粘土系注入材に ついて,升元ら<sup>16</sup>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 能の把握及び最適な注入濃度の存在を示している。また,宮永ら<sup>17)</sup>は,岩盤亀裂を対象に, 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こ とから,新たな材料の選定と止水効果の検証が求められている。

#### 1.2 本研究の目的と意義

上述の現状を鑑み,本研究では,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,新たな粘土系注入材としてカオリンクレーに 着目した。他の注入材と同様に,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<sup>-3</sup> m/s 程度の砂層は土の透水性の分類<sup>18)</sup>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<sup>-5</sup> 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 量の減少が見込めるかどうかの点に着目した。

これまでに西垣ら<sup>19)</sup>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<sup>20)</sup>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<sup>21)</sup>は,セメント系注入材の比重を連続的に変化させて注入する際の注入材の粘性の経 時変化及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<sup>22)</sup>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。

本研究では,主に Herndon ら<sup>20)</sup>が薬液系注入材を対象に示した適度な粘性の範囲(約0.1 ~6 dPa·s)の知見がクレーと水を混合したクレー懸濁液にも該当するかを調べた。具体的 には,粒径の異なる3種類のクレーを対象に,クレー懸濁液の配合比の違いによる粘性や 沈殿特性を調べる。次に,供試体に川砂を用いた水平一次元注入実験を実施し,高動水勾 配が作用している地下水流の条件下で,クレー懸濁液を圧入し,粘性と透水係数低減効果 の関係から注入に適したクレー懸濁液の濃度の範囲を明らかにする。さらに,透水係数の 低減効果が認められた濃度を対象に,供試体に数種類のガラスビーズを用いて注入の可否 を判定するとともに,注入後に動水勾配を段階的に変化させた水平一次元通水実験を実施 し,クレー懸濁液の間隙内移動を粘性の違いから考察する。

#### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を図-1.1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,本研究の背景及び目的,工学的意義を示した。

第2章の従来の研究では,既往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た上で本研究の位置付けを明確にする。

第3章の都市域トンネル工事での止水工法の実施事例では,地山状況に応じた補助工法の システムを整理することで,都市域軟弱地盤のトンネル工事において,補助工法を迅速か つ経済的に選択し,地表に影響を与えることなく工事を完了した事例についてまとめる。 さらに,この事例におけるトンネル掘削時の流速を推定することで本研究で実施する要素 実験での実験条件を設定する。

第4章のカオリンクレー及び懸濁液の特性調査では、クレー懸濁液の注入及びその後の移 動挙動に影響するカオリンクレーとその懸濁液の物性値を測定した結果についてまとめる。 また、クレー懸濁液の注入前の状況を把握するための沈降実験を行うことで注入時におけ る攪拌の必要性を明らかにする。さらに、注入後の止水効果だけでなく、粘着力による強 度増加の有無について、クレー懸濁液と砂試料を混合して作製した供試体に対して実施し た三軸圧縮実験結果についてまとめる。

第5章の通水下での注入に最適なクレー懸濁液の検討では,粒径の異なる3種類のクレー を対象に,供試体に川砂を用いた水平一次元注入実験を実施し,高動水勾配が作用してい る地下水流の条件下で,クレー懸濁液を圧入し,粘性と透水係数低減効果の関係から注入 に適したカオリンクレーの濃度の範囲を明らかにする。

第6章のクレー懸濁液の間隙内移動挙動の評価では,第5章で効果が認められたクレー懸 濁液の種類と配合を対象に,懸濁液を圧入したガラスビーズの供試体に対する一次元通水 実験を実施し,段階的に動水勾配を変化させた際の透水性の変化から流亡状況を評価する とともに,懸濁液の濃度や粘度との関係を明らかにする。さらに,配合比の異なる懸濁液 と減粘剤を添加した懸濁液を用いることにより,カオリンクレーの間隙内移動特性に与え る要因を検討する。

第7章の水ガラス系注入材の性能及びクレー懸濁液との混合効果の検証では,第5章,第6 章と同様に室内での基礎的な2種類の水平一次元注入及び通水実験を実施し,動水勾配が異 なる条件下での注入後の透水性低下効果を評価する。さらに,水ガラス系溶液の使用量低 下と透水性低下効果を確認したクレー懸濁液の間隙内での移動を抑制させる目的で水ガラ ス系溶液及び水ガラスとクレー懸濁液を混合させた溶液の注入特性を評価する。 第8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,二次元土槽による注入実験を通して工法の実現性に言及するとともに,実用化に向けた今後の研究課題について述べる。



#### 参考文献

- 1) 國見宏,河田孝志:都市NATMの切羽安定について,土木学会論文集,第421号,VI-13, pp.253-262,1990.
- 2) 日経BP社:日経コンストラクション,第659号, pp.32-49, 2007.
- 3) 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.

- 4) 地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ24, 山岳工法の調査・設計から施工まで, pp.144-145, 2018.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 土質工学会:地盤改良の調査・設計から施工まで, p.275, 1978.
- 10) 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.
- 11)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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 前揭4), p.401.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 地盤工学会:地盤材料実験の方法と解説,丸善, p.450, 2009.
- 19) 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.
- 20) Herndon, J., Lenahan, Tom.: Grouting in soils, Vol.1, A state-of the-art report, pp.72-76, 1976.
- 21)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.
- 22) 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.

## 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高透水性砂質層を対象とした地下工事における注入工 法の特徴をまとめるとともに,注入材毎の特性に関する既往の研究を整理することで,本 研究の課題を抽出する。大別すると以下の4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) 本研究の位置付け

#### 2.2 注入工法の特徴

トンネル工事等における注入工法について,水谷ら<sup>1)</sup>は都市域におけるトンネルを含む 都市空間利用技術の課題として,未固結で地下水位が高い地盤で地表部への生活環境の影 響を考慮する必要があり,その中で地下水対策が重要であると述べている。注入工法には 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<sup>2)</sup>。止水 工法は,地盤の中に注入材を充填して効果を発揮させるもので,地盤条件に適した工法の 選定が必要である<sup>3)</sup>。選定する工法の注入材の種類や使用量によっては,補助工法の施工 後にトンネルを掘削しないとその効果を確認できない場合がある。

また,その効果によっては再施工や追加施工が必要となる場合もあり,追加の工事費に よる対経済性や工期延伸によるプロジェクト全体の工程への影響,また,薬液の使用量が 増えることによる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る<sup>4)</sup>。

西垣<sup>5)</sup>はトンネル工事による周辺環境への課題を表-2.1 にまとめている。つまり,地表 の水環境と生態系への影響を検討する上で,降水量や気温などの変化,地下水位や地下水 流向流速,さらに,水質の変化等を数十年にわたって総合的に評価することが必要である と唱えている。したがって,地下水や河川水が我々の生活環境や生態系に与える影響が大 きいことから,止水工法やその注入材の選定には十分に配慮しなければならない。

注入材は図-2.1 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<sup>2)</sup>,各注入材の特性を明らかにする研究が進められている。

表-2.1 排水構造のトンネル工事における周辺環境への課題<sup>5)</sup>

- (1) 地上の湧水の枯渇
- (2) 地上の池の枯渇
- (3) 地上の河川流量の減少
- (4) 滝の流量の減少
- (5) 地表層の地下水位低下による井戸の枯渇
- (6) 地表層の水分量の変化による生態系の変化
- (7) 地上の河川流量の低下による農業用水の減少
- (8) 地下水の低下による地盤沈下現象
- (9) 地下水の低下による地盤陥没現象
- (10) トンネル内からの湧水による河川水の水質悪化
- (11) トンネル内からの湧水による河川水の水温変化



図-2.1 注入材の種類<sup>2)</sup>

#### 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。後藤ら<sup>6)</sup>は都市域 において高地下水位下でNATM工法でのトンネル施工を行った。周辺に河川が流れており, 切羽の崩落を招くとトンネルの水没はもとより河川への被害や地表部への甚大な被害が予 想されることから,確実な止水対策が必要とされた。加えて,地質が透水性の高い砂層で あるため切羽が不安定化する可能性もあることから,図-2.2に示す薬液注入フローの手順 に従った有機系薬液を用いた低圧浸透注入工を地表部より行い,透水係数を10<sup>-5</sup> m/sオーダ ーから10<sup>-7</sup> m/sオーダー程度まで周辺環境への影響を抑えながら低下させたことを報告し ている。つまり,トンネル上部の強度増加を目的とした高圧噴射攪拌工と切羽の安定化を 目的とした地上からの薬液注入工を採用しており,大量の注入材を使用することで多大な 工費を要することが懸念される。



図-2.2 薬液注入フロー 6)

長谷川ら<sup>7)</sup>は岩盤の割れ目を対象とした,高粘性流体として,高分子溶質であるメチルセ ルロースを定流量で注入した際の注入圧力の変化より,割目の次元を推定する評価法に関 する室内実験を行った。一次元流動を模擬した鋼管での試験と二次元流動を模擬した割れ 目モデルでの試験を実施した結果,図-2.3に示すように一次元では線形,二次元では対数 関数になることを確認している。さらに,注入圧力の時間変化より鋼管の管径や割れ目モ デルの割れ目幅の変化も評価が可能であることを報告している。しかし,高粘度流体が水 と混合することにより粘性低下が生じ,評価の誤差が大きく生じることを課題としている。



図-2.3 注入圧力応答からの割れ目次元の判定理論 <sup>7)</sup>

仲山ら<sup>8)</sup>は水ガラス系溶液を注入して固化した改良体の長期耐久性について,実験室で改 良体の大きさの変化を把握し,この変化は薬液に含まれるシリカが密接に関係しているこ とを確認した。加えて,改良体内のシリカ濃度を表す拡散方程式を用いて供試体の一軸圧 縮強度の推定式を提案し,実物大改良体との比較によりその妥当性を検証している。また, 図-2.4に示すように供試体内部のシリカ濃度分布を推定するとともに,100年後までの改良 体について長期耐久性を有することを確認している。しかし,改良した供試体を流水環境 下において養生することでシリカの溶脱を促進させており,地下水流が大きい場所では劣 化が大きいことが課題であると指摘している。



図-2.4 シリカ濃度分布の解析結果<sup>8)</sup>

森川ら<sup>9)</sup>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式(2.1)を提案している。具体的には,地盤条件(地盤 の土被り,細粒分の含有状況,間隙比)や薬液の浸透形態等を注入条件のパラメーターと し評価することで,高い精度での評価を実現している。

> $c = A \cdot B^{RH} + \sigma_{tH}$ (2.1)  $A = f(\sigma_{tH}) : \mathbf{g} \mathbf{k} \mathbf{I} A = 4.181 \cdot \log \sigma_{tH} + 4.144$

 $B = f(B_{rH})$  : 実験式log  $B = 0.228 \cdot B_{rH} - 4.851$ 

$$R_H = (1/\lambda) \cdot (e/6) \cdot D_d$$

ここで,*c*:固結砂粘着力, $\sigma_{tH}$ :ホモゲル引張強度, $B_{rH}$ :ホモゲルのぜい性度, $R_{H}$ :動水 半径 (mm), $\lambda$ :補正係数( $\lambda = 0.897 \cdot U_c^{-0.549}$ ), $U_c$ :均等係数,*e*:間隙比, $D_d$ :代表粒径 ( $D_{10}$  or  $D_{20}$ )。

加賀<sup>10)</sup>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 せた状態で供試体を養生できる試験装置により,注入固結砂強度の経時変化を調査してい





図-2.5 SiO<sub>2</sub>溶脱率の経時変化<sup>10)</sup>



**図-2.6** 現場透水試験結果<sup>11)</sup>

高橋ら<sup>11)</sup>は,都市部の地下鉄駅の建設工事において,地下水が高く透水性が高い東京砂 礫層の止水対策として水ガラスによる薬液注入工を主とし,さらに排水工であるディープ ウエル工法,施工管理として比抵抗トモグラフィを採用し,図-2.6に示すように透水係数 を10<sup>-4</sup> m/s~10<sup>-5</sup> m/s程度に低下させ,周辺へ影響を与えることなく施工を完了させた事例を 報告している。しかし,本工事は縦坑の開削工事であり,薬液注入された掘削土の処分が 問題となることも考えられる。さらに,大量の薬液を注入することにより,周辺環境への 影響も懸念される。

以上のように,薬液系注入材に関して主に水ガラスを対象にした研究が進められている。 砂地盤を対象とした研究の多くでは,改良体の長期強度に着目しており,高透水性砂質層 の止水を目的とした具体的な研究はみられない。水ガラスを用いた薬液注入工法は,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。つまり,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 ることから,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想定 される。

#### 2.4 非薬液系注入材に関する研究

#### 2.4.1 セメント系注入材

一般にセメント系を主材とした注入は岩盤を対象とした止水を目的として恒久的な信頼 性を求める場合が多いが,近年では超微粒子セメントや極超微粒子セメントを用いた注入 材の開発により,浸透注入への適用等の研究が進められている<sup>12)</sup>。

古田ら<sup>13)</sup>は岩盤を対象とした大量出水の山岳トンネルにおいて,ダムに用いられるグラ ウチング工法を採用し,減水に成功した事例を報告している。具体的には,砂岩・頁岩の 互層及び花崗岩を対象地盤としたトンネルの全周方向に,極超微粒子セメントを用いたグ ラウチングを行い,最大1200t/hあった湧水を40~50t/hまで低下させることに成功している。 また,懸濁液の粘性が同程度でも懸濁物質の粒径分布が小さいものほど浸透性が高いこと を確認している。さらに図-2.7に示すように,孔密度の増加によってルジオン値が減少し ており,注入範囲もしくは注入量とルジオン値の減少には相関が見られる。なお,ルジオ ン値とはダム基礎地盤の透水性を表す尺度であり,ルジオン試験により求められる<sup>14)</sup>。



**図-2.7** ルジオン値次数逓減図(孔密度)<sup>13)</sup>

矢部ら<sup>15)</sup>は地盤条件と懸濁型薬液注入材(セメント系及びスラグ)の関係を把握するため,砂及び礫を対象とした室内一次元注入試験を行った。それにより,間隙の大きさによ

って浸透距離が変わることや,一部の試料では懸濁物質の沈降があることを指摘している。 さらに図-2.8に示すように,従来のグラウチングにおいて浸透の可否を判断する基準のGr (グラウタビリティー比)の大きいものは,浸透には有利であるものの,強度が低いこと を報告している。

延藤ら<sup>16)</sup>は亀裂性岩盤への止水グラウトを対象とし,高濃度のセメントグラウト配合, 高密度の注入孔配置,複数孔の同時注入を主とした特徴のプレグラウト工法により,高い 止水性と施工の合理化を同時に達成できることを確認している。具体的には,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,さらに,目詰ま り現象の考察により,図-2.9に示すようなメカニズムで最終的に目詰まりが発生したこと を推察している。



図-2.8 グラウタビィティー比と一軸強度の関係<sup>15)</sup>



図-2.9 推測される目詰まり現象のメカニズム<sup>16)</sup>

米田ら<sup>17)</sup>は,セメント粒子径を変えた各種グラウトの基本特性や室内モデル浸透性試験 により,間隙比の小さい砂層や狭小割れ目の岩盤への浸透性について超微粒子セメントが 最も優れていること,実岩盤におけるグラウト効果について超微粒子セメントが顕著であ ること,これらはセメントの粘度より粒子径の違いであることを示唆している。さらに**図** -2.10に示すように,砂層モデルに対し相対流量とGr(グラウタビリティー比)の関係を整 理し,概ね試験結果と一致することを報告している。しかし,岩盤や砂に対する浸透性の 評価が主であり,止水効果等については確認していない。



図-2.10 砂/セメント粒径比と相対流量(初期1分間)<sup>17)</sup>

古賀ら<sup>18)</sup>はグラウト材の基礎的な性質を明らかにするために,グラウト材の流動特性試験や真砂土試料を対象とした注入試験を実施した。その結果,図-2.11に示すように解析と 実験結果が良い一致を示したことから,間隙内を流れるグラウトにおいて,ろ過理論を導入した解析手法のグラウト注入への適用性を確認している。



図-2.11 水セメント比毎の流量経時変化(解析値と実験値)<sup>18)</sup>

小泉ら<sup>19)</sup>は極超微粒子セメント注入材により砂質土地盤を対象に,従来の注入材と浸透 性能を比較した上で,室内3次元注入試験により極超微粒子注入材の改良効果を評価し,こ れを踏まえて現場注入試験の結果も併せて報告している。具体的には浸透性能について図 -2.12に示すように極超微粒子注入材が従来の注入材に比べ高い効果が得られている。さら に現場注入試験においては**写真-2.1**に示すように,計画通りの改良体出来形を確認している。しかし,浸透性が非常に良好であるがゆえに流速の速い条件においては流亡等による 化学成分の流出が懸念される。



図-2.12 注入材と浸透長の関係<sup>19)</sup>



写真-2.1 改良出来形状況(現場注入試験)<sup>19)</sup>

このようにセメント系注入材に対する検討は数多く実施されているものの,主に亀裂性 岩盤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<sup>20),21)</sup>。

#### 2.4.2 粘土系注入材

宮永ら<sup>22)</sup>は石油備蓄基地の施工において,周辺の岩盤の亀裂に対して地下水の浸透流を 利用し,図-2.13の粒度分布図を有する久慈粘土を材料とした粘土グラウトを行った。図 -2.14に示すように石油を備蓄する空洞の上流側より,濃度が1/600~1/200と希薄な粘土粒 子の懸濁液を流し込み,目詰まりによる透水性の低下を生じさせることで,湧水量を3,600 ℓ/minから2,600 ℓ/minまで減少させ,周辺地下水位の低下への影響を最小限に留めている。 なお,この粘土グラウトは年単位の時間を要している。







図-2.14 粘土グラウトの概要<sup>22)</sup>

これらの結果を踏まえ,粘土のグラウト材料としての特性について,薬液やセメントと 異なり化学的に硬化することがなく,遠方まで浸透させることができると述べている。ま た,目詰まり後に圧密,脱水されることで容易に流失しないことを室内及び現場試験で確 認しており,粘土グラウトの必要条件として,細粒であること,粘性が小さいこと,沈降 しにくいこと,沈積後に流失しにくいことを指摘している。

升元ら<sup>23)</sup>は,掘削影響領域への粘土グラウト注入方法の適用性を確認するために,図 -2.15に示すような実際の坑道の底板を対象とした粘土グラウト注入適用試験を実施し,注 入の経過に伴い亀裂の目詰まりが確認できたこと,4.0%までの注入濃度ではある条件でモ デル化できたこと,さらに,透水係数低減効果の評価から亀裂の押し広げが確認されたこ とにより,透水性が増加した可能性を述べている。



図-2.15 粘土グラウト注入試験レイアウト 23)

上村ら<sup>24</sup>)は微粒子シリカと微粒子水酸化カルシウムを混合した非セメント系懸濁型注入 材を用いた液状化対策を提案している。図-2.16及び図-2.17に示すように,粉体/水比(P/W) が小さいほど浸透性が高いこと,同じP/Wでは注入圧力が大きいほど注入速度の低下を抑 えられることを報告している。逆に,注入圧力が低い場合,微粒子の目詰まりが連続的に 生じるとしている。一方,P/Wが低い場合,浸透性があるため安定した注入が可能であり, 十分な浸透距離が得られている。しかし,液状化を対象とした強度調査のみに留まってお り,止水効果については着目していない。



図-2.16 注入時間と注入質量の関係<sup>24)</sup>



図-2.17 注入材濃度 0.10 の結果<sup>24)</sup>

西垣ら<sup>25)</sup>は岡山県東部で広く産出されるカオリンクレーに着目し,地盤中に注入させる ことで止水壁を作成することを目的に,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た。具体的には,図-2.18に示すように,鉛直一次元カラ ムを用い,高透水性の砂質土である川砂にカオリンクレーを混入した試料を中央部に配置 し,これを挟むように上下に川砂を詰めた。表-2.2に示すように2つのケースに対して, 通水時の動水勾配の上昇に伴うカオリンクレーの挙動を各計測点での間隙水圧の変化から 求めた。その結果,図-2.19に示すように,カオリンクレー混合量が少ないケースでは遮 水効果は上昇せず,また,動水勾配*i*=0.167で流亡が始まった。したがって,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。また,カオリンクレーが一定量以下の 混合量であっても,カオリンクレーを固まらせる性質を持つ物質を混合した場合の結果の 差異についての検討が課題であると述べている。



図-2.18 試験装置図<sup>25)</sup>

	ケース 1	ケース 2
クレー混合質量 (g)	270	540
川砂との質量混合率(%)	6.3	11.8
川砂の間隙率 n(%)	36.8	37.5
乾燥密度 $ ho_{d}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.83	1.94

表-2.2 供試体作成条件 25)



#### 2.5 本研究の位置付け

#### 2.5.1 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及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。

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。

カオリンクレー及び懸濁液の特性調査

通水下での注入に最適なクレー懸濁液の検討

クレー懸濁液の間隙内移動挙動の評価

水ガラス系注入材の性能及びクレー懸濁液との混合効果の検証

#### 2.5.2 本研究の工学的意義

本研究では,カオリンクレー及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及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) 水谷敏則,猪熊明:地下空間利用技術の開発,土木学会論文集,No.505/III-29,pp.1-9, 1994.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 西垣誠:トンネル施工における地下水環境保全,地下水学会誌,第62巻,第2号, pp.283-301,2020.
- 6) 後藤広治,磯島唐,柴田勝央,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について,土木学会第67回年次学術講演会,VI-051,2012.
- 7) 長谷川琢磨,後藤和幸,田中靖治,西垣誠,野原慎太郎:高粘性流体の注入による割 れ目の特性評価法の室内試験での実証,土木学会論文集C(地圏工学),Vol.71,No.2,

pp.55-68, 2015.

- 8) 仲山貴司,澤田亮,平岡陽,赤木寛一:液注入工法で固化した改良体の耐久性評価に
   関する研究,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.69, No.2, pp.162-173, 2013.
- (9) 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.
- 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.
- 11) 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.
- 12) 土質工学会:地盤改良の調査・設計から施工まで, p.275, 1978.
- 13) 古田島信義,鈴木雅文,中出剛,片山政弘,手塚仁,木佐貫浄治:北薩トンネルにお けるヒ素を含有するトンネル湧水の減衰対策 - ダムのグラウチング技術を適用した山 岳トンネルの岩盤グラウチング - ,地盤工学ジャーナル, Vol.12, No.4, pp.469-478, 2017.
- 14) 地盤工学会: 地盤工学用語辞典, p.396, 2009.
- 15) 矢部浩史,深田久:地盤条件が懸濁型薬液注入の浸透性に及ぼす影響について:土木 学会第72回年次学術講演会, -029,2017.
- 16) 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.
- 17)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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 前揭1), p.401.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) 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.

### 第3章 都市域トンネル工事での止水工法の実施事例

#### 3.1 概説

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<sup>1),2)</sup>を採用するケースが増えている <sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>。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<sup>5)</sup>。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<sup>6)</sup>に基づく補助工法の選 択が必要である。

本章では,地山状況に応じた補助工法のシステムを整理することで,都市域軟弱地盤の トンネル工事において,補助工法を迅速かつ経済的に選択し,地表に影響を与えることな く工事を完了した事例<sup>7)</sup>についてまとめるとともに,トンネル掘削時の流速を推定するこ とで本研究で実施する要素試験での試験条件を設定する。

#### 3.2 工事概要

#### 3.2.1 工事内容及び事前調査

都市基盤河川奈坪川改修工事(トンネル本体)は施工延長が847.3m,掘削断面が32.3m<sup>2</sup>, 縦断勾配が1‰とほぼ水平に近いトンネル本体を都市域において施工する工事である。 NATM工法の機械掘削で立坑からの掘削開始となるため,レール工法を採用した。事前の 地質調査ではトンネル上部約6m付近まで透水性が低く固結度の高い凝灰質砂岩がほぼ一 様に分布するとの結果が示されていたことから,山岳NATM工法を採用しても安定した施 工となることが見込まれ,設計でのトンネル支保パターンは全区間D パターン(インバ ートストラットによる閉合)と計画された。

工事位置は図-3.1中の赤線で示すように,栃木県宇都宮市のJR宇都宮駅から東側約1km の範囲である。施工箇所の直上は通行量の多い道路であり,周辺は商業施設やマンション 等が密集しているため,これらの環境に影響を及ぼすことなく施工を完了させる必要があ った。事前の4本のボーリングによる地質調査に基づいて推定された地質断面図を図-3.2 に示す。施工範囲の地質状況は,地表面から深さ18m程度まで砂礫層(透水係数:約10<sup>-4</sup> m/s ~10<sup>-5</sup> m/s)が確認され,それ以深については凝灰質砂岩(難透水層,透水係数:約10<sup>-6</sup> m/s ~10<sup>-8</sup> m/s)から構成される結果であった。そのため,砂礫層によるトンネル坑内への湧水 の影響を考慮し,凝灰質砂岩内にトンネルの被りを確保するように掘削位置が計画された。



#### **図-3.1** 工事位置



図-3.2 地質断面図

#### 3.2.2 切羽状況

#### (1) 掘削開始~約300m区間

約200mまでは、地盤調査結果に基づく当初計画の通り凝灰質砂岩が出現し、固結度が高 く透水性も非常に低い地質で、切羽は安定した状況であった。100m付近の掘削状況を**写真** -3.1、切羽の状況を写真-3.2に示す。これらから固結度の高い切羽である様子が分かる。 一方、約200m~300mの区間では切羽から地下水の滲(にじ)みが発生した。しかし、補助 工法の採用までに至る事象はなかった。



写真-3.1 掘削状況(固結度が高い)

写真-3.2 切羽状況(100m付近)

#### (2) 316m付近

316m付近からは,**写真-3.3**に示すように,切羽上部に固結度の低い層が出現したが,大量の湧水等は確認されず,湿潤な状態で表面の剥離にとどまる程度であった。また,切羽中央下部にかけては掘削後,徐々に地下水が滲み出す状況であった。



写真-3.3 切羽状況(316m付近)

#### (3) 326m付近

326m付近においては,切羽上部は固結度の低い層となり,切羽からの剥離が発生した。 また,**写真-3.4**に示すように,黄褐色未固結層が出現し,掘削後すぐに湧水が発生する状 況であった。さらに,右側部分では流砂が発生し,容易に空洞が出来やすい状況となった。 切羽の下方部分については固結度が高い状況であるが,地下水の滲み出しが確認された。



写真-3.4 切羽状況(330m付近)

(4) 367m付近

367m付近での切羽の状況を**写真-3.5**に示す。切羽のほぼ全面が黄褐色未固結層となり, 湧水の増加に伴う切羽の押し出しや,切羽からの剥離が多くなった。さらに,切羽の中央 部から大量の湧水が発生したことでトンネル全体での出水量は約380トン/日に上ったこと から,トンネル掘削の一時中断を余儀なくされた。



写真-3.5 切羽状況(367m付近)

#### 3.2.3 土質状況

固結度の高い凝灰質砂岩(100m付近)と固結度の低下により掘削補助工法が必要となった凝灰質砂岩(320m付近), 湧水に伴い流砂が発生した黄褐色未固結層(350m付近)の土 質データを表-3.1に示す。

地盤条件の調査において,ボーリング等により得られた物性値は,ごく限られた情報で あるため,実際の事象も勘案してトンネル掘削方法を判断する必要がある。また,未固結 の砂質地盤は突発湧水により切羽の安定性を著しく低下させることや,切羽の崩壊の可能 性についても十分検討する必要があるため,地山の流動化に対する検討が特に重要な項目 となった。ここで,地山の流動化を示す指標を表-3.2に示す。この指標は,未固結の砂地 山を対象にした既往の事例等に基づく経験的な指標である<sup>1)</sup>。切羽状況と表-3.1より,固結 度の低下した地質及び表-3.2に該当するような地盤の流動化を示す切羽においては,透水 性が高く,地下水が流入しやすい状況であることが判明した。地下水が流入し切羽が脆弱 になると,流砂が発生しやすくなることは明らかである。以上から,湧水及び流砂の発生 による地上への影響,特に地上の陥没や井戸の枯渇などのリスクが工事進捗の際の懸念材 料となった。

項目	凝灰質砂岩 (100m 付近)	凝灰質砂岩 (320m 付近)	黄褐色未固結層 (350m 付近)
土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.661	2.621	2.631
細粒分含有率(%)	20.0	19.2	10.2
均等係数	18.0	12.06	3.65
一軸圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	9.92	_	_

表-3.1 土質データの一覧: 黄褐色未固結層(350m 付近)

**表-3.2** 地山の流動化を示す指標の例<sup>1)</sup>

項目	指標値
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.65
細粒分含有率 (%)	10
均等係数	5

#### 3.2.4 湧水状況

坑内湧水状況を表-3.3にまとめる。立坑周辺からの湧水はあるものの,トンネル切羽に おいて220m付近までトンネル坑内からの湧水量は約0.1トン/日であった。しかし,220m付 近から326m付近については徐々に切羽から湧水が発生し,326mの切羽では小規模な流砂が 発生したことにより,トンネル坑内の湧水量は約250トン/日となった。さらにトンネル坑 内の湧水量が増え続け,388m付近の大量湧水発生時には約500トン/日の湧水量となった。 そのため,写真-3.6に示すように,水平水抜きボーリングを採用しながら施工する事により,切羽の位置が800m付近における湧水量は約300~400トン/日となった。

	<u>.</u>	
切羽位置(m)	坑内湧水量(トン/日)	摘要
220	約 0.1	-
326	約 250	流砂発生
388	約 500	大量湧水
800	約 300~約 400	-

表-3.3 坑内湧水状況



写真-3.6 水抜きボーリング時の湧水状況(380m付近)

#### 3.3 掘削補助工法

#### 3.3.1 掘削補助工法の採用

前述の通り,トンネル掘削方法は小断面のレール工法である。一般的なNATM工法のト ンネルと大きく異なる点は,断面が小さいこととレール工法であるため,機械の離合に時 間を費やすことが挙げられる。したがって,急な段取り替えなどの対応が困難であること から,切羽の崩落等の異常時に効果的な対応策である吹付コンクリートの準備に時間を要 する。そこで,本工事では,地山の強度が低下した場合や,湧水発生時への確実な対策が 必要とされた。トンネルの補助工法として,切羽からの湧水を少なくすることを目的とし た水抜きボーリングなどの湧水対策や,切羽の肌落ちや切羽の崩落を抑制することを目的 としたボルトと注入材を併用する切羽安定対策,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長尺ボルトと注入材を併用する地表面沈下 対策などがある。また,対象地山の分類分けとして主に土砂・軟岩・硬岩のみであるため, 本工事において当初予期していなかった地質が出現したが,トンネル内空変位の計測値が 全て許容範囲であったことからトンネル支保パターン変更の必要性はなかった。したがって,対策として土砂を対象とした補助工法の分類を適用し,事象に合わせた経済的な補助 工法を採用した。

#### 3.3.2 補助工法採用の流れ

以下に補助工法採用の流れを列挙する。

- (1)約300m付近において,凝灰質砂岩の固結度が下がり,透水性が高くなった。そのため, 切羽からの湧水量が増え,切羽の小崩落が発生した。そこで,掘削補助工法として, 写真-3.7に示すような,トンネル坑内からの水平水抜きボーリングを採用し,切羽からの湧水を低減させた。
- (2)約316m付近において、切羽からの湧水量がさらに増加したこと、また、一部砂層が出現し、天端からの抜け落ちが発生したことから、湧水対策に合わせ天端安定対策を採用した。天端安定対策について、自立できる砂質土地山を想定し、注入式フォアポーリング(ボルト長L=3m,シリカレジン注入)及び水平水抜きボーリングを採用した。
- (3)約333m付近において、帯水している黄褐色未固結層が広がり、湧水による流砂で空洞が発生した。ここで地盤が未固結となったため、地表面への影響を防ぐために、トンネル周辺の緩みを抑制する必要があった。天端部に対しては中尺先受工(鋼管径 φ76.3mm,鋼管長約6m,鋼管間隔600mm,シリカレジン注入)を標準としたが、非常に脆い地山状況の場合は、鋼管と鋼管の間の抜け落ちを抑制するため、鋼管間隔が狭い450mmを採用した<sup>8)</sup>。切羽(鏡)には中尺鏡ボルト工(鋼管径φ76.3mm,鋼管長約9m,鋼管間隔1200mm,シリカレジン注入)を採用し、さらに水平水抜きボーリングと鏡吹付を併用した。中尺先受工及び中尺鏡ボルト工の配置断面図を図-3.3に示す。中尺先受け工において、切羽天端部右側は脆弱なため鋼管間隔450mmを採用し、切羽左側は右側より固結度が高いことから、鋼管間隔600mmを採用した。中尺鏡ボルト工は鋼管間隔1200mmとした。



写真-3.7 水平水抜きボーリング実施状況



図-3.3 中尺先受工·中尺鏡補強工配置断面図

(4)約367m付近において、切羽中央部からの集中湧水により発生した流砂を起因として約 30m<sup>3</sup>の空洞が発生した。湧水が多く中尺先受工及び中尺鏡ボルト工と水平水抜きボー リングだけでは掘削が不可能になった。さらに空洞が大きくなることにより、地表面 への甚大な影響が懸念された。そこで、写真-3.8に示すように切羽中央部分の集中湧 水箇所周辺に止水注入工を採用し、その他の部分においては、中尺先受工及び中尺鏡 ボルト工を採用した。止水注入工とは、水ガラスを未固結地山など透水性の高い地山 に高圧で浸透注入することにより、土粒子間の水を水ガラスに置き換えることで透水 性を下げ、さらには地盤に粘着力を付与して掘削を可能にすることを目的とした工法 である。



写真-3.8 止水注入工範囲

(5) 約388m付近からは切羽全体がほぼ黄褐色未固結層となるとともに,流砂と大量湧水が 発生し,トンネル上部に存在する透水性の高い砂礫層に影響を与える懸念が生じ,ト
ンネルの水没と地表面への影響懸念がさらに高まったことから,全面止水注入工を採用した。注入範囲は図-3.4に示すように,トンネル切羽の周囲について切羽から2m程度外側の範囲を注入ゾーンと設定した。また,切羽の下半部にある凝灰質砂岩部については,止水注入範囲外とした。



図-3.4 止水注入工範囲

# 3.4 追加ボーリング

工事計画に対し,想定外の地質が出現したことにより,地表面へのリスク回避はもとよ り,確実な構造物の構築と工事への安全性を配慮し,切羽の地質状況と湧水等の事象に合 わせた補助工法を組み合わせながら工事を進捗させた。しかし,補助工法は種類も多く, 仕様によってはコストと工期に大きな影響を与える。また,未掘削範囲の地質状況につい ても想定外の地質が出現する可能性が否定できないことから,完成までの工事費及び工期 を把握することが困難となった。この時点で掘削を進めながら補助工法を選定することは 多大な時間を費やすこととなるが,その一方で,事業を進める上では費用と工期を適切に 把握する必要もある。そこで,約450m以降の区間についての地質状況を把握することを目 的に,追加ボーリングを実施した。

地上追加ボーリングは,止水注入工の範囲を把握すること,すなわち,止水注入工を採 用した地質である黄褐色未固結層の分布を把握する目的で実施した。その施工位置は,ボ ーリング孔により砂礫層の地下水が切羽に影響を与える懸念及び道路規制等の地上の状況 を考慮し,トンネル掘削断面範囲外をとることにした。

地上の支障物など現場条件を考慮し,当初ボーリング調査区間(間隔約200m~約300m毎) に対し,約50m間隔を目途に追加ボーリングを実施した。さらに,トンネル掘削の影響範 囲に黄褐色未固結層が出現した区間については間隔を狭め,約20m~30mの間隔で追加ボー リングを実施し,最終的に約20カ所の追加ボーリングを実施した。

図-3.5に追加調査ボーリングフローを示す。調査時点の切羽状況は,ほぼ全面黄褐色未 固結層が出現していたことから,切羽から約20m程度離れたTBr-1を調査開始位置と選定し, 到達側に向かって順次調査を進めた。TBr-3及びTBr-4の調査結果より黄褐色未固結層がト ンネル掘削範囲に存在する区間は,切羽の位置からTBr-3及びTBr-4の区間までと推定出来 たことから,TBr-1とTBr-3の区間において,更なる追加ボーリング調査を実施した。



図-3.5 追加調査ボーリングフロー

追加ボーリングの調査位置及び調査結果から推定した黄褐色未固結地山付近の地質断面 図を図-3.6 に,以降のトンネル掘削範囲の地質断面図を図-3.7 に示す。この地質断面図及 び図-3.8 に示した地質縦断図から推定された事項を以下に列挙する。

- (1) 断面 は,全面が黄褐色未固結層である。
- (2) 断面 は, 黄褐色未固結層が支配するが, トンネル天端付近では凝灰質砂岩が出現す る。しかし, 凝灰質砂岩の一軸圧縮強度は 86.8kN/m<sup>2</sup> であり, 脆弱である。
- (3) 断面 は,トンネル断面内における黄褐色未固結層の割合が小さくなっており減少傾 向にある。
- (4) 断面 は, 黄褐色未固結層の層厚が薄くなり, トンネル断面の下方に位置してきている。
- (5) 断面 は,トンネル断面では黄褐色未固結層の存在は無く,ほぼ凝灰質砂岩である。
- (6) 図-3.7 に示した通り, 到達立坑までの断面 ~ は, トンネル上部に黄褐色未固層が あるものの, トンネル掘削範囲については, 黄褐色未固結層の存在は確認されなかっ た。



図-3.6 追加ボーリング調査による推定地質断面図(その1)



図-3.7 追加ボーリング調査による推定地質断面図(その2)



図-3.8 追加ボーリング調査による推定地質縦断図

# 3.5 掘削補助工法システム

## 3.5.1 具体的な現象に応じた補助工法システム

今回のトンネル工事において,地質条件及び湧水等の事象に適応した掘削補助工法の施 工箇所,注入材,現象を基にしたシステムを整理した結果を表-3.4に示す。このシステム は,切羽の崩落や湧水の状況に適応した補助工法の組み合わせを6段階のステップに分けて いる。例えば,切羽に小崩落及び切羽湧水などの現象が発生した場合,補助工法として, 鏡吹付と水抜きボーリングを採用するステップ1となる。また,現象として,局所湧水と流 砂及び天端崩落が発生した場合については,補助工法として,局所止水注入及び中尺先受 工,さらには中尺鏡ボルト工を採用するステップ5となる。したがって,切羽の状況が不安 定になるほどステップが大きくなる。このシステムを利用する利点を以下に列挙する。

- (1) 未掘削区間について,追加地質調査から想定した推定地質(図-3.6,図-3.7,図-3.8 参照)により未施工区間の掘削補助工法の計画ができる。
- (2) 工事再開後,施工中の切羽に予期せぬ突発的事象が発生した場合に,迅速な掘削補助 工法の採用判断基準として使用できる。

#### **3.5.2 掘削補助工法の計画**

追加ボーリングから想定した地質に基づき,提案したシステムを使って,掘削補助工法 の詳細な計画を行った。止水注入工については,特に経済性と工期に大きな影響を与える ことから,トンネル断面内の地質を考慮し,適した掘削補助工法を組み合わせることによ り,経済的かつ効果的な計画を実施した。ただし,追加ボーリング調査を多く実施したも のの,ボーリングによる情報は点での情報であるため,実際の切羽における地質状況や湧 水状況,さらには固結度などの状況を確認し,掘削補助工法の妥当性を検証することを前 提とした。掘削補助工法の計画の一部を図-3.9に示す。この図は最終的に追加調査により 推定した地質をもとに,ステップ4~ステップ6に分けて補助工法を計画したものである。

	施工签码	› ት እ ##	旧女			ステ	・ップ		
桶助工运石	加上固別	注八树		1	2	3	4	5	6
止水注入	全断面	水ガラス系	全面湧水・流砂	-	-	-	-	-	
止水注入(局所)	切羽局所	(浸透注入)	局所湧水・流砂	-	-	-	-		-
中尺先受工	天端		天端崩落・湧水	-	-	-			-
中尺鏡ボルトエ	切羽	シリカレジン	鏡崩落・湧水	-	-	-			-
注入式フォア ボーリング	天端	(割裂注入)	天端崩落	-			-	-	-
GRP 鏡ボルト	切羽		鏡崩落	-	-		-	-	-
水抜きボーリング	掘削断面図外	-	切羽湧水						-
鏡吹付	切羽	- 鏡の小崩落							
	(1)	(2)	-	(3)	(4)	(5)			

表-3.4 具体的な現象(地質の状況)に応じた補助工法システム



図-3.9 掘削補助工法計画図

# 3.6 浸透流解析による要素試験条件の設定

上述の現場事例に基づき,トンネル掘削時の流速を推定することで本研究で実施する要 素試験での最大動水勾配を設定することとした。図-3.10に解析モデルを示す。想定地下水 位からトンネル底面までの水頭差は*h*=24.3m,薬液注入による透水性低下工法を行った際の 注入範囲は、トンネル軸方向長さで1施工あたり9mである。



図-3.10 解析モデル

**図-3.11**に示す流速分布図の解析結果からトンネル切羽に作用する切羽付近の最大動水 勾配と流速を求めたところ,それぞれ*i*=2.7,*v*=2.55×10<sup>-5</sup> m/sと求まり,**第5章**以降に実施 する要素試験条件として設定した。



図-3.11 解析結果:流速分布図

## 3.7 まとめ

都市域地下開発工事における山岳NATM工法による軟弱地盤の施工に関して,本工事の 初期段階で実際に未固結地盤において発生した事象に応じて,補助工法のシステムを整理 した。そして,途中段階からこのシステムの利用と地質を把握するために実施した地上追 加ボーリングにより,詳細な補助工法の計画を実施した。補助工法のシステムを活用する ことにより,迅速かつ効果的に計画した補助工法の妥当性及び,切羽の事象に基づいた補 助工法の軽微な変更が実施できた。一部,システムに基づいた補助工法の仕様変更が発生 したものの,概ね計画通りの補助工法で対応した。その結果,陥没や井戸の枯渇など地表 面及び周辺環境に影響を与えることなく工事を完成させた。

トンネル工事においては,地質状況や湧水の状況など同一の施工条件とはならないため, 補助工法を選定するにあたり,過去のトンネル工事の成功事例を参考に対応をする必要も あり,現場技術者の経験や熟練度に左右される場合もある。したがって,設計時や施工時 に補助工法の採用が必要となった場合,地山の流動化を示す均等係数や透水係数などの地 盤条件を反映させた数値的根拠に基づく補助工法システムを確立することで,設計と施工 の大きな乖離を回避することが重要である。

## 参考文献

- 1) 土木学会:トンネル標準示方書[共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説,pp.42-45, 2016.
- 2) 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) 例えば,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, -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/ -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) 吉本治憲,大金隆宏,光増朝久,高橋啓介:都市域山岳NATM における軟弱地山の施 エについて~都市基盤河川奈坪川改修工事(トンネル本体)~,土木学会第69回年次 学術講演会講演概要集, -054,pp.107-108,2014.
- 8) ジェオフロンテ研究会,アンブレラ工法分科会,AGF-WG:小口径注入式長尺先受工 法実態調査に基づく設計パターン(案)-工法の概説と施工実態調査結果-,2006年

12月6日, p.10, 2006.

# 第4章 カオリンクレー及び懸濁液の特性調査

#### 4.1 概説

本章では、クレー懸濁液の注入及びその後の移動挙動に影響するカオリンクレーとその 懸濁液の物性値を測定した結果についてまとめる。また、クレー懸濁液の注入前の状況を 把握するための沈降実験を行うことで注入時における攪拌の必要性を明らかにする。さら に、注入後の止水効果だけでなく、粘着力による強度増加の有無に関して、クレー懸濁液 と砂試料を混合して作製した供試体に対して実施した三軸圧縮実験結果についてまとめる。

## 4.2 カオリンクレーの物理特性

実験に用いたカオリンクレーは、山陽クレー工業株式会社製のMCクレー、HAクレー、 TPクレー(以降,それぞれc3,c5,c7と称す)である。クレーの製造方法について,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とc5は原鉱に水を加えながら粉砕し,スラリー化する。スラリーは分 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,再度酸性の状態にして珪酸ソーダ(水ガラス) を分離させる。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 なる。なお,c5のみ乾燥後の製品化の際に炭酸カルシウムを添加して中性化させている。

表-4.1及び図-4.1に土粒子密度等の物理特性とカオリンクレーの粒度分布をそれぞれ示 す。これらより,c3とc5は粒度分布や土粒子密度が類似していることがわかる。また,写 真-4.1にカオリンクレーの電子顕微鏡写真を示す。それぞれの特徴として,c3及びc5は板 状で角が丸みを帯びており,c7は粒状であることがわかる。

項目丶	種類	c3	c5	c7
土粒子密度	$\rho_s (g/cm^3)$	2.748	2.736	2.713
50%粒径	$D_{50}(\mu m)$	4.928	5.027	7.482
均等係数	$U_c$	1.942	1.896	2.117
液性限界	w <sub>L</sub> (%)	53.0		46.7
塑性限界	w <sub>p</sub> (%)	24.9		33.8

表-4.1 カオリンクレーの物理特性



図-4.1 カオリンクレーの粒度分布





# 4.3 クレー懸濁液の物理特性

#### 4.3.1 粘度及び密度

実験に使用したクレー懸濁液の物理特性を表-4.2に示す。クレー懸濁液の密度はピクノ メーター,粘度は回転式粘度計(東機産業株式会社製,TCV-10)を用いて計測した。さら に,図-4.2にクレーの種類毎による配合比と粘度の関係を示す。水と混合した場合,クレ ーの種類によって同じ配合比でも粘度の発現に差があることがわかる。c3とc5はクレーそ のものの性質は類似しているがc5の粘度が出やすく,それに次いでc3,c7と粘度が出にく いという結果になった。c3とc7を混合したものについては,c3とc7の間に粘度が現れる結 果となった。

クレー種類	配合比 c/w	懸濁液密度 $\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	粘度µ (dPa・s)
c3	0.25	1.148	1.46
c5	0.21	1.188	2.51
c7	0.52	1.385	1.10
c3:c7=1:1	0.30	1.166	1.31
c3:c7=2:1	0.27	1.151	1.06
c3:c7=1:2	0.34	1.248	1.18

表-4.2 クレー懸濁液の物理特性



## 4.3.2 沈降特性

クレー懸濁液をはじめとする懸濁型注入材は注入時によく攪拌され,粒子が液体全体に 分散されていることが要求される。つまり,沈殿が発生しやすいかどうかは,クレー懸濁 液の特性として重要であると考えられる。そこで,クレー懸濁液の沈降特性を把握するた め以下の方法で沈降実験を行った。

測定方法は,写真-4.2に示すように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 燥法により測定た上で,その質量比(上部質量/下部質量)で評価した。

測定結果を図-4.3に示す。種類別に見ると,懸濁液では最終的な沈殿質量はc5が最も少ないという結果になった。また,c3とc3:c7=1:1の沈降曲線は概ね一致している。c3とc5を比較すると,粒度や土粒子密度がほとんど同じにもかかわらず,沈降速度は10~20%程度の差が生じる結果となった。次に,c3とc3:c7=1:1を比較すると8時間後付近よりそれぞれの単体の沈降速度より沈降しやすい傾向となり,混合したクレーは別の沈降特性となった。ここで,沈降の経時変化を写真-4.3に示す。時間の経過に伴ってクレーと水の境界面が明瞭に確認できた。







図-4.3 クレー懸濁液の沈降特性測定結果



(a) 1h(b) 4h(c) 8h(d) 16h写真-4.3時間毎の懸濁液の沈殿の様子

次に, c3とc7のみの測定結果と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 <sup>1)</sup>を比較した結果を図-4.4に示す。結果として,理論値よりも計測値の方が沈降が速いもの 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1時間以上を要する場合は攪拌 を行う必要がある。



図-4.4 クレー懸濁液の沈降特性

#### 4.3.3 減粘剤混合クレー懸濁液

クレーの移動に及ぼす粘度の影響を確認するため,減粘剤(粉体,セルフロー120P)に よって粘度を低下させた懸濁液を用意した。減粘剤を添加した混合懸濁液の物理特性を表 -4.3に示す。さらに,減粘剤を使用した混合懸濁液の配合比と粘度の関係を図-4.5に示す。 減粘剤を使用した場合,いずれの懸濁液についても大幅に粘度が低下する傾向を示した。

クレー種類	配合比	密度	粘度	備老					
	c/w	$\rho c(g/cm^3)$	$\mu(dPa \cdot s)$	ר HE					
c5	0.25	1.201	3.00	減粘剤未添加の粘度 μ=4.60					
c7	0.73	1.443	1.43	減粘剤未添加の粘度 μ=5.11					

表-4.3 減粘剤を加えた場合の懸濁液の物理特性



# 4.4 クレー懸濁液混合砂の強度特性

注入後の止水効果だけでなく,粘着力による強度増加の有無を調べることを目的に,ク レー懸濁液と砂試料を混合して作製した供試体に対する圧密非排水三軸圧縮(CU)試験<sup>2)</sup>を 実施した。実験の流れとしては,試料準備,供試体の作製,供試体の設置,供試体の飽和, B 値の測定,供試体の圧密,せん断の順である。供試体は水槽内で沈降方式によって製作 し,その後凍らせて製作した。また,圧縮によって供試体から排水した吸排水量を二重管 ビュレットで測定により体積ひずみを計測し,せん断過程ではロードセルセンサーによっ て圧縮強度を測定した。圧縮強度と体積ひずみの関係を求め,モールクーロンの破壊規準 により強度定数(粘着力(c'),内部摩擦角(φ'))を求めた。

#### 4.4.1 実験方法

#### (1) 試験装置

図-4.6 に圧密非排水三軸圧縮試験(CU)の実験装置を示す。装置は、ベロフラムタイプの 三軸セルであるペデスタルに、ポーラスメタルを装着している。せん断中は供試体上部か らの排水経路の先にビュレットを接続して、ビュレット内の水位の変動を差圧計により読 み取る。そこで、供試体からの吸排水量を測定により体積ひずみを計測する。セル上部に は、軸変位計が取り付けられており、せん断中の供試体の軸変位量を測定する。荷重計は 写真-4.4 に示すようにセル内部に装着されているため、せん断時のピストン貫入に伴う摩 擦力を考慮する必要のない構造になっている。



図-4.6 圧密非排水三軸試験機の概念図

写真-4.4 荷重計(矢印参照)

# (2) 供試体の作製

砂試料には岡山県産の川砂を用いた(物性等は次章で示す)。供試体は直径 5cm,高さ 10cmのモールドに水中沈降方式によって所定の乾燥密度になるように詰め,その後で写真 -4.5に示すように,凍らせて製作した。なお,供試体の初期条件を表-4.4に示す。



写真-4.5 作製した供試体

渾の	初期	杀仵
ļ	御の	「体の初期

項目		砂		クレー懸濁液混合砂			
等方応力 σ <sub>c</sub> (kPa)	50	75	100	50	100	150	
ろ乾燥後砂質量 (g)	353.24	353.85	355.60	346.57	348.98	338.63	
ろ乾燥後クレー質量 (g)				13.95	8.17	13.2	
乾燥密度 ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1.80	1.80	1.81	1.84	1.82	1.79	

#### (3) 供試体の設置

作製した供試体をポーラスストーンの上に載せ,メンブレーンを被せゴムリングを用い て固定させた。その際,供試体の上面にろ紙を設置した後,圧密時に等方圧密が出来るよ うに供試体上部に取り付けた金属のキャップをロードセルから外した。そして,セルを組 み立て供試体がすべて水に浸かるようにセル水を入れた。供試体に加わる拘束圧力は常に 30kPa 以下とすることで試験前に供試体の体積変化による乱れを防止した。また,凍った 供試体が解けるまで 30kPa の拘束圧力を維持しながら 12 時間以上放置した。

#### (4) 供試体の飽和過程

供試体の飽和過程は二重負圧法を用いた。真空ポンプを用いて背圧に-30 kPa を与え,脱 気水を十分に通水させた。その際,初期状態ではチューブから供試体の間隙空気が抜けて いる様が見て取れたが,脱気水の通水が供試体体積のおよそ3倍となった時点で供試体か ら空気が出なくなった。その後間隙水圧計の内部に水を満たし,段階的に背圧(back pressure)を供試体にかけて間隙水圧係数,B値を調べ,0.95以上になることを確認した。

#### (5) 圧密・せん断過程

圧密過程では,供試体のキャップに繋がっているバルブを開け排水状態にして圧密を行った。有効拘束圧力の条件として,砂:50kPa,75kPa,100kPa,クレー懸濁液混合砂:50kPa, 100kPa,200kPa を加えた状態で圧密過程が終了後,非排水条件下でせん断速度 0.1%/min でせん断を行い,間隙水圧や鉛直荷重,そして鉛直変位を測定した。

#### 4.4.2 試験結果及び考察

図-4.7 に軸ひずみと軸差応力の結果を示す。有効拘束圧力が高くなる程,軸差応力も高 くなることが確認された。また,クレー懸濁液混合砂より砂の方がより脆性破壊挙動を示 しており,クレー懸濁液の混合によって砂の剛性が弱くなったと考えられる。一方,図-4.8 は,モールの応力円とモールクーロンの破壊規準により求めた強度定数を示している。3 つのモール円を規準にして直線の接線を引くことにより,砂の場合:粘着力(*c*)=0 kPa と内 部摩擦角(*ϕ*')=45.8°,クレー懸濁液混合砂の場合:粘着力(*c*)=60.0 kPa と内部摩擦角(*ϕ*')= 39.4°がそれぞれ求まった。いずれも高い内部摩擦角が得られているが,砂にカオリンクレ ーを混合することで内部摩擦角が低下し,粘着力が増加することが示唆された。





## 4.5 まとめ

クレー懸濁液の注入及びその後の移動挙動に影響するカオリンクレーとクレー懸濁液の 物性値を測定した結果についてまとめた。また,クレー懸濁液の注入前の状況を把握する ための沈降実験を行うことで注入時における攪拌の必要性を明らかにした。さらに,注入 後の止水効果だけでなく,粘着力による強度増加の有無について,クレー懸濁液と砂試料 を混合して作製した供試体に対して実施した三軸圧縮実験結果を示した。

以下に本章で得られた知見をまとめる。

- (1) クレー懸濁液作製後,注入までに1時間以上を要する場合は攪拌を行う必要がある。
- (2) 水ガラスによって沈降は早くなるものの細粒分は液体中に分散することが考えられる。
- (3) 砂層にクレーを注入することで粘着力の増加が期待できる。

# 参考文献

- 1) 澤孝平編著:地盤工学,森北出版, pp.18-20, 2009.
- 2) 地盤工学会:地盤材料試験の方法と解説, pp.572-575, 2009.

# 第5章 通水下での注入に最適なクレー懸濁液の検討

#### 5.1 概説

粒径の異なる3種類のクレーを対象に,供試体に川砂を用いた水平一次元浸透実験を実施 し,高動水勾配が作用している地下水流の条件下で,クレー懸濁液を圧入し,粘性と透水 係数低減効果の関係から注入に適したカオリンクレーの濃度の範囲を明らかにする。

#### 5.2 実験方法

#### 5.2.1 実験装置

水平一次元浸透実験装置を図-5.1,実験状況を写真-5.1に示す。供試体は直径ol0cm× 50cmのアクリル製カラムに砂試料を水中落下法によって投入し締固めたものを使用した。 供試体の上流側及び下流側には,砂試料の細粒分の流失による供試体の変化を防ぐため, ステンレスメッシュ(孔径109μm)を設置した。動水勾配は,供試体の上流側と下流側の 蓋に生じる水頭差を差圧計により計測し,供試体長で除することで求めた。水頭差は上流 側タンクの高さを昇降機により変化させることで調整し,流量は供試体の下流側タンク付 近に設置した流量計を目視により読み取った。また,流量計の計測範囲外の場合は流出水 を一定時間採取した後に重量を測定して求めた。水頭差,温度はデータロガーに自動記録 される装置を採用した。注入管はアクリル製カラムの中央(上流側より25cm)の位置にあ リ,試料投入前に先行して注入管を挿入し,その後に供試体を作成した。上流側及び下流 側の蓋にはステンレスメッシュと多孔板を介して試料を充填していない部分を設けた。こ れは供試体に空気が混入した場合に、設置しているドレーンより除去するためのスペース である。また,下流側では注入したクレー粒子が間隙に留まらず流亡した際,ホース及び コネクタ部において目詰まりを起こさないためのクレーの沈殿槽を兼ねている。沈殿量が 多く,ホースとの接続部において閉塞する恐れがある場合は,その都度,通水を一時的に 停止し沈殿クレーの除去を行った。通水の方法として、クレー懸濁液の注入前は循環方式 とし、クレー懸濁液注入後は流亡したクレー粒子が使用する水に混入されることで生じる 供試体へのクレー粒子の再混入や,目詰まりを発生させないために排水させた。なお,通 水に使用する水道水を用いた。





(b) 注入管概略図

図-5.1 実験装置概略図



**写真-5.1** 実験状況

#### 5.2.2 試料の物理特性

高透水性砂地盤の再現のために適切な試料を選定した。検証した試料は**写真-5.2**に示す 王子砂(東京都産),川砂(岡山県産),及びガラスビーズ(株式会社不二製作所製,#80) である。



(a) 王子砂

(b) 川砂 **写真-5.2** 検討に用いた各試料

(c) ガラスビーズ

**表-5.1** 砂試料物性值<sup>1)</sup>

試料名	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最小密度 (g/cm³)	最大密度 (g/cm <sup>3</sup> )	50%粒径 D <sub>50</sub> (mm)	均等係数	曲率係数
川砂(岡山県産)	2.682	1.407	1.692	0.718	4.230	1.234
王子砂(東京都北区産)	2.694	1.212	1.486	0.289	2.739	0.980

**表-5.2** ガラスビーズ<sup>2)</sup>

材質	形状	新モース硬度 ビッカース高度	真比重	嵩比重 (代表値)	化学成分 ( % )	粒番号 (μm)
ガラス系	球形	5.5 ( 550V )	2.5	1.6	ソーダ石灰ガラ ス(99%~)	20 (1000 ~ 710)

各試料に対してJISA 1202「土粒子の密度実験方法」及びJISA 1204「土の粒度実験方法」 に準じて測定を行った<sup>3</sup>)。砂試料の物性値を表-5.1,ガラスビーズの物性値を表-5.2,粒 径加積曲線を図-5.2に示す。高い動水勾配を作用させるため供試体内部で細粒分の移動に よる目詰まりが原因で透水性の低下が起こる可能性があるため,各試料をそれぞれ, 0.075mm,0.106mm,0.250mmの開き目のふるいで水洗いして細粒分を取り除いて,粒度調 整した試料を3種類作成した後,予備通水実験を行った。なお,各試料を試料名(細粒分を 取り除いたふるいの目の大きさ(µm))と称する。



#### 5.2.3 予備通水実験

高透水性の砂地盤の再現に適した試料の選定を目的に予備通水実験を実施した。

王子砂の透水係数の経時変化を図-5.3(a)に示す。細粒分を取り除くために使用したふる いの開き目が大きくなるほど、初期透水係数は上昇する結果となった。しかし、粒度調整 を行った試料を含め、すべての試料において動水勾配の増加に伴い透水性が低下した。さ らに長期間の通水により動水勾配の変化が無いにも関わらず、透水性が低下している。特 に王子砂と王子砂(250)にでは、*i*=2.5~3.0の区間において顕著である。

川砂の透水係数の経時変化を図-5.3(b)に示す。川砂(75)と川砂(106)での通水実験 を実施した。王子砂に比べて,細粒分を取り除いたことによる初期透水係数の変化は小さ い。川砂(106, case1)では実験の初期に大量の空気の混入が生じたため,動水勾配を上 昇させる前に実験を終了したが初期透水係数の参考のために記載している。川砂(75)で は動水勾配の増加によって透水性の低下が認められたため,動水勾配を*i*=2.7程度まで上昇 させず実験を終了した。川砂(106, case2)では動水勾配の増加を受けても透水係数の変 動がほとんど見られなかった。



図-5.3 透水係数の経時変化

ガラスビーズの透水係数の経時変化を図-5.3(c)に示す。ガラスビーズの通水実験はごく 短時間で終了した。理由として、初期透水係数が4.13×10<sup>-1</sup> cm/sとかなり大きかったこと、 さらに、透水性が非常に高いため通水ホースなどでの水頭損失の影響が大きく、装置の都 合により目標の動水勾配である*i*=2.7程度を作用させることが出来なかったためである。

王子砂及び川砂での透水性の低下は高い動水勾配が作用することで,試料内の土粒子が 移動することにより再配列が生じているものと考えられる。また,川砂(106)は長期間, 動水勾配*i*=2.7を作用させた場合でも,透水性の低下はほとんど見られず安定していた。こ れは川砂の粒径が大きく,高い動水勾配の作用によって供試体が圧縮された場合でも通水 の間隙を一定に保てるためであることを示唆している。ここで,動水勾配が*i*=2.7と非常に 大きいためダルシー則が適用できるかを確認した。動水勾配と流速の関係を図-5.4に示す。 流速と動水勾配の関係が線形であることから,乱流域ではないと判断できる。また,レイ ノルズ数について動水勾配とレイノルズ数の関係を図-5.5に示す。



図-5.4 流速と動水勾配の関係(川砂106)



図-5.5 レイノルズ数と動水勾配の関係

地下水流でのレイノルズ数と層流の判定基準は式(5.1)で示される。

$$R_e = \frac{\rho_w v D}{\eta} \qquad (5.1)$$

ここで,  $Re: レイノルズ数, \rho_w: 水の密度(g/cm3), v: 流速(cm/s), D: 平均粒径(cm), \eta: 水の粘性係数(g/s cm)である。図より動水勾配<math>i=3$ 程度でもRe < 10であるためダルシー則が適用できる層流区間である。以上の結果より,注入実験の条件下において試料に含まれる粒子の移動が起こらず,透水性が低下しない川砂(106)が適していると判断できる。また, 王子砂及び川砂では細粒分を取り除いた結果,通水による透水性の低下を抑制できた。

土構造内の土粒子の移動に関して内部侵食や限界動水勾配といった研究がなされている。 そこで,杉井らの提案する多粒子限界流速<sup>4)</sup>を用いて土粒子の移動について考察する。杉井 らは層流状態において多粒子限界流速がTerzaghiの限界動水勾配式とKozenyの式を用いて 算出された透水係数より算出した浸透破壊時の実流速と一致すると報告している。なお, 多粒子限界流速式<sup>4)</sup>は次式(5.2)で表される。

$$v_{cm} = n^{1/m} \cdot v_c = n^{1/m} \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w g(\rho_s - \rho_w) d^3}{54\mu^2} + 1} - 1 \right\}$$
(5.2)

Re < 0.2  $1/m = 4.65 + 19.5 \cdot d/D$ 0.2 < Re < 1.0  $1/m = (4.46 + 17.6 \cdot d/D)Re^{-0.03}$ 1.0 < Re < 500  $1/m = 4.45Re^{-0.1}$ 500 < Re < 7000 1/m = 2.39

ここで,*v<sub>cm</sub>*:限界流速(cm/s),*v<sub>c</sub>*:Rubeyの砂粒の沈降速度(cm/s),1/m:補正係数,*n*: 間隙率(%),μ:液体の粘性係数(Pa•s),ρ<sub>w</sub>:水の密度(g/cm<sup>3</sup>),*d*:粒子径(cm),g: 重力加速度(g/cm<sup>2</sup>)である。

川砂(106)及び王子砂(250)の透水係数の経時変化を図-5.6に示す。王子砂(250)は 動水勾配*i*=1.0付近より緩やかに透水係数の低下が始まっている。それに対して、川砂(106) は動水勾配によらず安定している。ここで、川砂(106)及び王子砂(250)のそれぞれで 平均粒径及び水洗いしたふるいの開き目を用いて多粒子限界流速を計算した。実流速及び 多粒子限界流速の経時変化を図-5.7に示す。どちらの試料もふるいの開き目より求めた多 粒子限界流速に比べて、実流速が大きい結果となった。これは、ふるいの開き目以下の土 粒子が存在した場合、移動することを示しており、川砂(75)及び王子砂(106)において 透水性が低下した原因として細粒分の移動による間隙の変化と判断できる。また、それぞ れの平均粒径より求めた多粒子限界流速と実流速を比較するとどちらも実流速が多粒子限 界流速よりも小さかった。そのため、粒子の移動が生じない条件であったものと判断でき る。しかし、王子砂(250)において透水性が低下している。これは多粒子限界流速が鉛直 方向の流れ場における理論として構築されているからである。多粒子限界流速は水平流れ が卓越する場でも局所的に鉛直流れが生じるため適用は可能とされているが<sup>4)</sup>、本研究の ように高い動水勾配が作用する水平一次元通水実験では、鉛直方向の流れが生じにくいと 考えられる。また,水平方向浸透流が卓越する実験において浸透破壊が生じた実験値が多 粒子限界流速より小さく,3分の1程度であったと報告している<sup>4)</sup>。そのため,王子砂(250) において多粒子限界流速以下ではあるが,細粒分の移動が生じ,透水性が変化したと推測 される。また,川砂(106)では,王子砂(250)と同様に実流速が多粒子限界流速の3分の 1より大きく,土粒子の移動が生じる可能性があるが,透水性の顕著な低下は認められない。 これは,川砂(106)が王子砂(250)に比べて,間隙率が低いことが要因であると考えら れる。また,粒径分布から王子砂(250)に比べて川砂(106)の方が大きな粒子が多く, 加えて試料自体も角ばっているため,粒子同士の噛み合わせによる移動の拘束も影響して いることが推測できる。これらの状況から,通水による試料自体の土粒子の移動による透 水性の低下が起こりにくい試料として,**写真-5.4**に示す川砂(106)を採用した。





写真-5.2 川砂(106)

#### 5.2.4 実験ケース

実験ケースを表-5.3に示す。単体のクレーはc3とc5は各4ケース,c7は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,c3とc7の混合クレーとしてc3が 多めの混合と同じ割合の混合及びc7が多めの混合とした3種類とし合計15ケースを実施した。クレー懸濁液の配合比と濃度及び懸濁液の粘度,さらに供試体の乾燥密度及び間隙率 を表-5.3に併せて示す。また,実験結果の再現性を確認するため,c7では配合比c/w=0.64 を用い,注入条件を変更して複数回実験を行った。

## 5.2.5 実験方法

注入前の通水条件として、3.6の浸透流解析で求めた最大動水勾配がi=2.7になるように設定した。通水開始後,流出側に設置した流量計により流量が安定するのを確認した上で, あらかじ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1100cm<sup>3</sup>),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,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。クレー注入状況を写真-5.3,実験終了後の供試体解体状況を写真-5.4に示す。



写真-5.3 クレー注入状況



**写真-5.4** 供試体解体状況

表-5.3 実験ケース

		ク	レー懸濁液	友	供試体(川砂)		
クレー種類	頁	懸濁液配合比	濃度	懸濁液粘度	乾燥密度	間隙率	
		c/w (g/g)	C (%)	$\eta  (dPa \cdot s)$	$ ho_{ m d}~( m g/cm^3$ )	n (% )	
	1	0.130	11.5	0.15	1.665	38.2	
c3	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	0.17	1.721	36.1	
-5	2	0.210	17.4	2.51	1.718	36.2	
05	3	0.250	20.0	4.60	1.714	36.3	
	4	0.350	25.9	12.90	1.707	36.6	
	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	
27	5	0.500	33.3	0.43	1.698	36.9	
C7	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	
	3	0.270	21.3	0.80	1.734	35.6	
c3:c7=1:1	4	0.300	23.1	1.31	1.721	36.1	
	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	
27.1.2	2	0.325	24.5	1.11	1.727	35.8	
c3:c/=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	
	2	0.270	24.5	1.06	1.698	36.9	
c3:c/=2:1	3	0.340	25.4	2.11	1.709	36.5	
	4	0.600	37.5	15.00	1.740	35.4	

#### 5.3 実験結果

(1) 単体クレー(c3,c5,c7)

流量と水頭差の測定結果の一例として,図-5.8にc7(C=33.3%, c/w=0.5)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-5.9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(k)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-5.9 透水係数及び動水勾配の経時変化の一例(c7, c/w=0.5)

図-5.10にc3,c5,c7の透水係数( $k_0$ 及びk)と濃度の関係を示す。 $k_0$ はc3,c5,c7とも概 ね1×10<sup>-3</sup> 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c5において濃度がC=17.4%(c/w=0.21)で概ね5×10<sup>-4</sup> m/s程度の最小値を示し,c3におい て濃度がC=20.0%(c/w=0.25)で概ね1×10<sup>-4</sup> m/s程度の2番目の最小値を示し,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。



図-5.10 透水係数と濃度の関係(単体クレー)



図-5.11 透水係数比と濃度の関係(単体クレー)

この結果に基づき,透水係数比( $k / k_0$ )と濃度の関係に整理したものを**図-5.11**に示す。 縦軸の値が小さいほど透水係数の低減効果が高いことを示しており,c5では濃度が C=17.4%(c/w=0.21)のときに $k / k_0$ は最小値の0.1程度を示し,c3では濃度がC=20.0% (c/w=0.25)のときに $k / k_0$ はc5と同程度の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%(c/w=0.52)のときである。しかし,*C*=33.3%(c/w=0.50)と *C*=39.0%(c/w=0.64)のときに効果が低い値を示し,*C*=31.0~39.0%(c/w=0.45~0.64)の 範囲のばらつきが大きくなっている。

図-5.12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% (c/w=0.25)を境に大幅に注入量が減る傾向となり,c5では C=17.4% (c/w=0.21)を境にc3と同様に大幅に注入量が減る傾向となった。一方,c3では C=20.0% (c/w=0.25)より低い場合,c5ではC=17.4% (c/w=0.21)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% (c/w=0.35)程度からC=35.9% (c/w=0.56)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% (c/w=0.64)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 においては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-5.12 クレー懸濁液注入量と濃度の関係(単体クレー)



図-5.13 注入クレー質量と濃度の関係(単体クレー)

図-5.13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%(c/w=0.25)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。c5では C=17.4%(c/w=0.21)のとき最大となっており傾向はc3と概ね同様である。c7でも同様の傾 向を示し,C=39.0%(c/w=0.64)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。

以上より,クレーの種類毎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内のクレー懸濁液が全量に達した ことから注入を終了しているが,既にクレー懸濁液の流亡が生じているため,さらに注入 を続けても効果は変わらないと判断できる。

(2) 混合クレー(c3:c7=1:1,1:2,2:1)

図-5.14に透水係数(k<sub>0</sub>及びk)と濃度の関係を示す。単体クレーと同様に,kは概ね1×10<sup>-3</sup> 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-5.14 透水係数と濃度の関係(混合クレー)

図-5.15に透水係数比(k/k<sub>0</sub>)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%(c/w=0.27~ 0.35)の範囲内に存在し,c3の傾向に近いことが判明した。



図-5.16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。



図-5.17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。



#### (3) 供試体内に残留したクレー質量

次に,供試体内に残留するクレーの質量を整理する。図-5.18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。単体クレー及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-5.19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及び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。



図-5.18 クレー残留質量と濃度の関係

#### (4) 同一実験条件での実験結果の再現性

実験結果の妥当性を検証するために,同一実験条件での実験結果の再現実験を実施した 結果を表-5.4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。



図-5.19 残留クレー質量比と濃度の関係

表-54	宔騇	ケース	•	<b>五現宝</b> 歸
18 0.7	一大一		•	

			(u)	大叭小			
<b>b</b>			クレ	供試体(川砂)			
テレー		実験 No.	懸濁液配合比	濃度	懸濁液粘度	乾燥密度	間隙率
			c/w (g/g)	C (%)	$\eta (dPa \cdot s)$	$\rho_{\rm d}$ (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)
-7	8	1-1	0.640	20.0	2.06	1.676	37.8
c7 8	8'	1-2	0.640	39.0	3.00	1.668	38.0
o2.o7-1.1	7	2-1	0.500	22.2	5 67	1.702	36.8
c3:c/=1:1	7'	2-2	0.300	33.3	3.07	1.633	39.3

•	1000	-		•	1 3 - 70
	(a)	宝縣	含冬	4	

(b) 実験結果			
実験 No.	透水係数(m/s)		
	注入前 k <sub>0</sub>	注入後 k	$k \neq k_0$
1-1	1.40×10 <sup>-3</sup>	5.93×10 <sup>-4</sup>	0.424
1-2	1.16×10 <sup>-3</sup>	4.80×10 <sup>-4</sup>	0.414
2-1	$1.01 \times 10^{-3}$	8.81×10 <sup>-2</sup>	0.872
2-2	$1.51 \times 10^{-3}$	1.26×10 <sup>-3</sup>	0.834

#### 5.4 考察

## (1) 残留クレーと透水係数の関係

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図-5.20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及びc5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。



図-5.20 透水係数比と残留クレー質量の関係



また,図-5.21に透水係数比と残留クレー質量比(残留したクレー質量*m*<sub>c</sub>?/注入クレー 質量*m*<sub>c</sub>)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及び混合クレーの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及びc5さらに混合クレーのc3:c7=1:1及び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から,効率的な注入材料であることが 示唆された。

#### (2) 粘性係数と透水係数の関係

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-5.22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1~2.5 dPa・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。以上の結果から,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-5.23に基づき,最適なクレー懸濁液の濃度はクレーの種類に よって異なるものの,概ね濃度は20~40%の範囲となる。なお,懸濁液の粘性を調整する 添加剤などを用いる場合,図-5.20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-5.22 透水係数比と粘性係数の関係



#### (3) ベントナイト懸濁液に対する検討

上述の知見がカオリンクレー以外のクレーに適用できるか確認するために、ベントナイ ト懸濁液に対して同様の検討を実施した。実験に用いたベントナイトは,図-5.24に示す粒 度分布を有する山形県産Na型ベントナイトであり、土試料にはクレー懸濁液と同様に川砂 を用い、供試体も同様の条件で作製した。ベントナイト懸濁液は、クレー懸濁液において 効果が認められた粘度を踏まえ,配合比c/w= 0.12,濃度C=10.7%,粘性係数η=1.7dPa・sの1 ケースを実施した。



図-5.24 ベントナイトの粒度分布

図-5.25に注入時の時間を基準にした透水係数(15 換算)の経時変化を示す。注入直後 に流量が一旦低下したものの,再び上昇する挙動を示した。なお,注入時間は24分,注入 量は893.9cm<sup>3</sup>であり,流出側では初期段階から流亡が多く観測された。



この結果を基に,注入直前の透水係数(k<sub>0</sub>)と1日経過後の透水係数(k)の比として整理した結果を図-5.26に示す。注入中は一旦k/k<sub>0</sub>=0.4程度まで低下したものの,注入直後から上昇し,1日後ではk/k<sub>0</sub>=0.72となった。この結果を図-5.22に示した透水係数比と粘性係数の関係にプロットしたグラフを図-5.27に示す。1ケースのみの結果であるが,クレー懸濁液とは異なる挙動を示しているものと考えられる。





## 5.5 まとめ

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3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。以下に本章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1.0~2.5 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20~40%の 範囲であることが示唆された。

## 参考文献

- 1) 小松満, 榊利博: 飽和砂地盤における空気侵入値の定量的評価手法に関する研究, 地盤 と建設, Vol.30, No.1, pp.39-46, 2012.
- 2) 株式会社不二製作所:研磨剤 ガラスビーズ, 2019.2.参照. http://www.fujimfg.co.jp/kenmazai/Abrasiveglassbeads.html
- 3) 地盤工学会:土質実験 基本と手引き , pp.17-21, 2009.
- 4) 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6章 クレー懸濁液の間隙内移動挙動の評価

#### 6.1 概説

前章において透水性の低減効果が認められたクレー懸濁液の種類と配合比を対象に,配 合比の異なる懸濁液と減粘剤を添加した懸濁液を用い,供試体にガラスビーズを使用して 段階的に動水勾配を変化させる水平一次元通水実験を実施し,カオリンクレーの間隙内移 動について,グラウタビリティー比や多粒子限界流速の観点から,クレー粒子の供試体の 間隙内移動挙動について考察する。

#### 6.2 実験方法

#### 6.2.1 実験装置

クレー懸濁液の注入時における実験装置の概略図を図-6.1(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(109µm)及び多孔板を設置し 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-6.1(b)に示す。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 メーター及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。なお,実験状況を写真-6.1に示す。

#### 6.2.2 実験ケース

実験ケースは検討項目の異なる4ケースとした。まず,ケース1は**表-6.1**に示すように前 章において効果が高かった配合であるc3のc/w=0.25,c5のc/w=0.25,c7は2ケースのc/w=0.52, 0.73とした。さらに,c3とc7を乾燥重量混合比で1:1,1:2及び2:1でそれぞれ混合したもので 効果が高かったc3:c7=1:1のc/w=0.30,c3:c7=1:2のc/w=0.34,c3:c7=2:1のc/w=0.27を加え た計6種類の実験を実施した。なお,供試体の試料は,前章で示した#20のガラスビーズ(以 下,GB)で,土粒子密度ρ<sub>s</sub>=2.561g/cm<sup>3</sup>,D<sub>50</sub>=0.80 mm,均等係数U<sub>c</sub>=1.78である。





写真-6.1 実験状況

ケース2は供試体条件の差異に対する検討として,表-6.2に示すようにGB#20~#80の5種 類に対する検討を行った。

ケース3は表-6.3に示すように粘度を固定した検討,ケース4は表-6.4に示すように配 合比を固定したケース,さらに,ケース5は表-6.5に示すように減粘剤により粘度を調整 した3ケースとした。なお,ケース3及びケース4はGB#80,ケース5はGB#20の試料で 供試体を作製した。

クレー 種類	懸濁液配合比 c/w	濃度 C(%)	懸濁液密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	粘度 n(dPa•s)
1=141		- ( )	F (0 <sup></sup> )	(
c3	0.25	20.0	1.148	1.46
c5	0.25	20.0	1.140	4.60
-7	0.52	34.2	1.356	1.10
c /	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-6.1** 実験ケース1:クレー懸濁液の違い

**表-6.2** 実験ケース2:供試体の違い

-		
ガラスビーズ	乾燥密度	間隙率
種類	$\rho_{\rm d}  ({\rm g/cm^3})$	n (% )
GB#20	1.604	37.4
GB #40	1.582	38.2
GB #50	1.569	38.7
GB #60	1.576	38.5
GB #80	1.558	39.1

表-6.3 実験ケース3:粘度固定(GB#80)

クレー 種類	懸濁液配合比 c/w	懸濁液密度 ρ(g/cm³)	粘度 η (dPa・s)
c3	0.30	1.145	2.52
c5	0.21	1.115	2.51

表-6.4 実験ケース4:配合比固定(GB#80)

クレー 種類	懸濁液配合比 c/w	懸濁液密度 ρ(g/cm³)	粘度 η (dPa・s)
c3	0.21	1.185	0.94
c5	0.21	1.188	2.51

表-6.5 実験ケース5:減粘剤配合(GB#20)

クレー	懸濁液配合比	懸濁液密度	粘度 η (dPa・s)		
種類	c/w	$\rho (g/cm^3)$	減粘剤 配合前	減粘剤 配合後	
c5	0.25	1.201	4.60	3.00	
c7	0.73	1.443	5.11	1.43	

#### 6.2.3 実験方法

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,写真-6.2に示すように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,前章の実験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。



写真-6.2 クレー懸濁液注入状況

## 6.3 実験結果

#### 6.3.1 クレー種類及び供試体の差異に対する検討(ケース1~2)

#### (1) 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%,c/w=0.30)のクレー懸濁液を充填したケースの状況を写真-6.3 に示す。 次に,粘性の小さい c7(C=23.1%,c/w=0.30)の注入結果及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-6.2 に示す。表-6.1 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。



写真-6.3 クレー懸濁液注入状況:実験ケース2 (c7(C=23.1%, c/w=0.30), ガラスビーズ#50)



図-6.2 c7(c/w=0.30)注入結果及び注入後の通水実験結果

#### (2) 通水実験

実験ケース1の結果として,図-6.3及び図-6.4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%,c/w=0.52)及びc3:c7=1:2(C=25.4%,c/w=0.34)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%,c/w=0.34)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%, c/w=0.30)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た。また, c?も概ね同様の挙動を示した。一方,c3:c7=2:1(C=21.3%,c/w=0.27)及びc3(C=20.0%, c/w=0.25)は水頭差の上昇に伴う流量の増加が少なかった。



**図-6.3** 流量の経時変化



図-6.4 水頭差の経時変化

これらの結果を基に,図-6.5 に動水勾配 *i* と透水係数 *k*<sub>15</sub>(15 換算)の関係を示す。c7 (C=34.2%, c/w=0.52)は *i*=0.5, c3: c7=1:2(C=25.4%, c/w=0.34)は *i*=0.5~1.0, c3: c7=1: 1(c/w=0.30)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%, c/w=0.25)は *i*=1.5~2.0, c3: c7=2:1(C=24.5%, c/w=0.27)と c7(C=42.2%, c/w=0.73)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-6.6 に動水勾配 *i* と注入前後 の透水係数比(*k*/*k*<sub>0</sub>,いずれも15 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%, c/w=0.52), c3: c7=1:1(C=23.1%, c/w=0.30), c3: c7=1:2(C=25.4%, c/w=0.34)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%, c/w=0.25), c5(C=20.0%, c/w=0.25), c3: c7=2:1(C=24.5%, c/w=0.27), c7(C=42.2%, c/w=0.73)は i=2.5 でも 6~8 割程度の効果を維持していることが分かる。

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。前章の実験ではいずれも透水係数の低減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-6.5 透水係数と動水勾配の関係



図-6.6 透水係数比と動水勾配の関係

c7 の動水勾配の変化毎の実験状況を写真-6.4 に示す。写真-6.4(a)はクレー懸濁液を注入した直後で動水勾配 *i*=0 の状況であり,ガラスビーズの間隙にカオリンクレーが詰まっている様子が分かる。次に,写真-6.4(b)は動水勾配が *i*=0.5 の状況であり,供試体の天端部を中心に細い連続した間隙(ここでは,水みちと呼ぶ)が少し出現しているものの流出流量はまだ0 である状況である。これはクレー懸濁液の粘性が浸透力に抵抗しているものと推察できる。写真-6.4(c)は動水勾配 *i*=0.5~1.0 の状況であり。細い水みちがクモの巣状

に多く出現し, さらに水みちの幅が広がってきていることから透水性が高くなってきてい ることが判る。動水勾配が高いことから浸透力が強くなることで注入されたカオリンクレ ーの流亡が始まっている様子を示している。写真-6.4(d)は動水勾配が *i*=1.0~2.0 の状況で あり,動水勾配が大きくなることでカオリンクレーを流亡させながら水みちが拡大してい る。そのため,供試体全体にはっきりとした水みちが現れた。 写真-6.4(e)は *i*=2.0 以上 の状況であり,一部カオリンクレーが確認できる程度まで流亡している様子を表している。

さらに, 写真-6.5 に実験装置の流出側で動水勾配の変化により水が白濁した状況を示す。 動水勾配が初期の状況においては薄白色であるが,動水勾配の変化に伴い白濁が濃くなっ た。つまり,カオリンクレーが浸透力により試料の中から流亡している状況が時々刻々と 変化していることを把握することが出来た。



(a) 注入後(*i*=0)の状況



(b) *i*=0.5 の状況

(c) *i*=0.5~1.0の状況



(d) *i*=1.0~2.0 の状況

(e) *i*=2.0 以上の状況

写真-6.4 動水勾配の変化毎の実験状況(c7)



**写真-6.5** 流出側の状況

## (3) 注入クレー質量と残存クレー質量の関係

別途測定した懸濁液の密度に基づき注入した懸濁液の体積からカオリンクレー質量(以下,注入クレー質量)を求めた。また,実験終了後の供試体を水洗いしたものと流出した ものをそれぞれ炉乾燥することにより,試料内に残存したカオリンクレー質量(以下,ク レー残留質量)と流亡したカオリンクレー質量(以下,クレー流亡質量)を測定した。こ れらの結果を図-6.7に示す。

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



図-6.7 注入クレー質量とクレー残存質量及びクレー流亡質量の関係

#### (4) 透水係数低下率とクレー残存率の関係

図-6.8 にクレー残存率と透水係数低下率及び最大動水勾配の関係を示す。ここで,最大動水勾配は実験終了時に供試体に作用していた動水勾配を表している。

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

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



#### 6.3.2 異なる配合比及び減粘剤添加の懸濁液に対する検討(ケース3~5)

#### (1) ケース3(粘度固定)

懸濁液は c3, c5 とも上下流両端付近に達するまで注入した。その後,定水位タンクを段 階的に上昇させた際の水頭と流量の経時変化を図-6.9 に示す。c3 は定水位タンクの設定高 さが h=25cm 程度では目視でも通水は確認されず,h=50cm において流量計の最小検出量未 満の微量の通水を目視で確認し,水頭差は設定値とほぼ等しい結果となった。h=75cm では 少ないものの,一定の流量を流量計で検出し,水頭差は設定値とほぼ等しい結果となった。 h=100cm では定水位タンクの上昇後,流量は少し増加傾向を示したが,水頭差の大きな変 化は確認できなかった。h=125cm では定水位タンクの上昇後,流量は少し増加傾向を示し たものの大きな変化ではなく,水頭差も設定値との大きな差は確認できなかった。最大の 設定水頭である *h*=150cm において流量は少しの増加にとどまり,最終的に約 24g/min 程度 となった。水頭差は定水位タンクの上昇後に水頭差が低くなる傾向を示したが,直ぐに設 定値に回復することが確認された結果となった。

c5 は c3 とほぼ同じ傾向を示し,最終的な流量は 24g/min となった。一方,水頭差は設定 値よりも少し低い傾向を示し,特に *h*=100cm においてその傾向は顕著となった。



図-6.9 水頭差と流量の経時変化(ケース1)

#### (2) ケース4(配合比固定)

懸濁液は c3, c5 とも上下流両端付近に達するまで注入した。その後,定水位タンクを段 階的に上昇させた際の水頭差と流量の経時変化を図-6.10 に示す。c3 は定水位タンクの設 定高さが h=25cm 程度では目視でも通水は確認されず,h=50cm においてわずかな流量が検 出されたものの,水頭差は設定値とほぼ等しい結果となった。h=75cm では定水位タンクの 上昇後に流量が増加し,水頭差は定水位タンクの上昇後に,設定値から下回ったが直ぐに 回復した。h=100cm では定水位タンクの上昇後に流量は少し増加傾向を示したが,水頭差 は設定値と同じ傾向を示した。h=125cm においても定水位タンクの上昇後に流量は少し増 加傾向を示したが,大きな変化は確認できず,水頭差も設定値と同じ傾向を示した。最大 の設定水頭である h=150cm においても流量はわずかな増加にとどまり,最終的には約 45g/min 程度,水頭差は定水位タンクとほぼ同じ値であった。

c5 は h=50cm まで目視でも通水は確認されず,水頭差も設定値と同じ傾向を示した。 h=75cm でも流量計の最小検出量未満の微量の通水を目視で確認した。h=100cm では流量計 での流量を検出し,水頭差は設定値より少し低い値を示した。h=125cm では流量及び水頭 差の変動は確認されなかった。最大の設定水頭である h=150cm においても流量は少し増加 し,最終的に流量は約 24g/min 程度,c3 の流量の約 54%程度となった。水頭差は若干の変 動を示したが,定水位タンクとほぼ同じ傾向が確認された。



図-6.10 水頭差と流量の経時変化(ケース2)

## (3) ケース5(減粘剤配合)

減粘剤配合の c7 懸濁液 (c7-r と称す)と減粘剤未配合の c7 懸濁液 (c7 と称す)の注入 において,c7-r は上下流両端付近に達するまで注入したものの,c7 は途中で停止した。そ の後,定水位タンクを段階的に上昇させた際の水頭差と流量の経時変化を図-6.11 に示す。 c7-r は,設定値が h=25cm の時に流量を流量計で検出したものの,水頭差については設定 値と大きな相違は確認できなかった。この時,c7 の通水は目視においても確認できなかっ た。h=50cm で c7-r は大きく流量が増加したものの,c7 の流量は少なかった。その後,c7-r は水頭差の上昇に伴って流量が増加し,最終的に約 800g/min 程度となった。一方,c7 は水 頭差の上昇に伴って流量は増加するものの,最終的な値は約 650g/min であり,減粘剤を配 合した場合と比べ約 80%程度となった。水頭差は,設定値に比べ明らかに低くなることを 確認した。

次に,減粘剤配合の c5 懸濁液 (c5-r と称す)と未配合の c5 懸濁液 (c5 と称す)の水頭 差と流量の経時変化を図-6.12 に示す。c5-r は設定値が h=25cm では微量の通水を目視で確 認したものの,その段階での変化は認められなかった。h=50cm になると流量を流量計で検 出し,h=75cm で流量が大きく変化し,それ以降も設定値の変化毎に大きく流量が増える状 況を確認した。最終的に c5-r の流量は約 750g/min となった。一方,c5 は,設定値が h=75cm の時に流出を確認し,h=100cm の時に大きく流量が変化し,最終的に約 620g/min となり, c5-r の流量の約 82%程度を示した。

#### (4) 供試体の乾燥密度

実験終了後に供試体を解体し,ガラスビーズと内部に残留したクレーを水洗いにより分離した後,炉乾燥して乾燥密度を測定した結果, $\rho_d=1.547 \sim 1.570 \text{ g/cm}^3$ の範囲となった。この結果に基づき,各ケースの供試体にばらつきがないものとして,以降の考察を行った。



図-6.11 水頭差と流量の経時変化(ケース3:c7)



図-6.12 水頭差と流量の経時変化(ケース3:c5)

#### 6.4 考察

#### 6.4.1 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 *G*85 と地盤土の 15%粒径 *D*15 を用いて以下の式 で表される<sup>1)</sup>。

$$GR = \frac{D_{15}}{G_{85}}$$
 (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<sup>1)</sup>。

ガラスビーズ種類		#20	#40	#50	#60	#80
c3	計算	66.7	37.3	37.3	34.7	17.3
(C=20.0)	実験		-	-	-	
c7	計算	38.5	21.5	21.5	20.0	10.0
(C=23.1%)	実験					×
(C=34.2%)	実験		-	-	-	×

表-6.6 注入可否検討結果( :可, ×:不可)

粘度が小さい c7 (C=23.1%, c/w=0.30)と, お互いに粘度が近い c3(C=20.0%, c/w=0.25) と c7 (C=34.2%, c/w=0.52)について,式(6.1)の計算結果と実験結果を比較した一覧を表 -6.6 に示す。実験結果は,#80のガラスビーズに対して,c7 (C=23.1%, c/w=0.30)および c7 (C=34.2%, c/w=0.52)が不可となったことから,概ね式(6.1)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,6.3.1 の実験結果では,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.<sup>2)</sup>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 を定量的に分析及び可視化しており,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,前章 の実験に用いた川砂は,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,6.3.1 の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%, c/w=0.52, η=0.52 dPa・s), c3 : c7=1 : 1 (C=23.1%, c/w=0.30, η=0.30 dPa・s), c3 : c7=1 : 2 (C=25.4%, c/w=0.34, 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。

#### 6.4.2 注入時間及び容積に関する検討

実験ケース1,2の懸濁液の注入量と注入質量及び注入時間の関係を図-6.13 に示す。な お,懸濁液の注入容積は,注入ビュレットの注入前後の水位差から算出し,注入質量につ いては懸濁液の注入容積と密度の関係により算出した。注入時間は,注入開始から注入停 止までの時間を示している。 ケース1について, c3(c/w=0.3)とc5(c/w=0.21)を比較すると,注入懸濁液容積はc5 の方が多く,注入時間も長いことが判明した。一方で密度が高いc3は,懸濁液の注入容積 は少ないものの,注入質量はc5とほぼ同じになった。また,c3の注入速度がc5に比べて 速いことから,懸濁液の注入について,配合比に起因する密度の違いが注入特性に対する 要因の一つであることが考えられる。

ケース 2 について, c3 (c/w=0.21) と c5 (c/w=0.21)を比較すると,注入懸濁液容積は c5 の方が多く,注入質量も多くなることが判明した。注入時間は少しの差ではあるものの, c5 の注入速度が c3 に比べて遅く注入量が多いことから,懸濁液の注入において,粘度が 注入特性の要因の一つであることが考えられる。

次に,ケース3について,クレー(c7,c5)の D<sub>85</sub>はそれぞれ約 12.5µm 及び約 7.5µm で あり,ガラスビーズ#20の D<sub>f15</sub>は約 500µm となる。そのため,c7 は 500 / 12.5 = 40,c5 は 500 / 7.5 66.7 となり 5 倍よりも非常に大きくなるため,c7 と c5 は試料であるガラスビ ーズ#20 の間隙内をこれらの懸濁液が全て移動することになる。



ここで, c5 及び c7 の減粘剤を配合した懸濁液と減粘剤を配合していない懸濁液のそれ ぞれについて,懸濁液の注入量と注入質量及び注入時間の関係を図-6.14 に示す。c5-r と c5を比較すると,注入懸濁液溶液と注入質量は近い値を示し,注入時間もほぼ同じ値を示 した。これは粘度の差が小さいことが要因と考えられる。

一方, c7-r と c7 を比較すると, 注入懸濁容積は c7-r が c7 より大きい結果となった。こ れは c7 が途中で注入停止したことが大きな要因である。注入時間については, c7 の注入 速度が遅いことから,粘度が注入速度への影響の要因の一つと考えられる。また,フィル ター則によると間隙内をクレーの粒子が全て移動することとなるが,実験結果は途中で注 入が停止したことから,粘度が間隙内の移動に影響を与える要因の一つであると考えられ る。



図-6.14 注入クレー量と注入時間の関係

#### 6.4.3 密度と粘度に対する透水係数と動水勾配の変化

## (1) ケース3(粘度固定)でのクレーの移動

ここでは,粘度を固定したケースの実験結果より,透水係数と動水勾配について考察す る。透水係数と動水勾配の経時変化の関係を図-6.15に示す。c3において動水勾配*i*=2.0のと きに透水係数が大きく変化している。それ以降については,少しずつ透水係数が高くなる 傾向を示した。これは,初期段階で透水係数の変化が発生したものの,*i*=3.0においても透 水性の低減効果が確認できる結果を示している。つまり,初期段階で試料の間隙内の移動 が発生したものの,最終的には多くのクレーが残存する結果であると判断できる。c5は*i*=3.0 まで少しずつ透水係数が高くなる傾向を示したものの,大きな変化は確認されなかった。 最終的に動水勾配が高くなると,わずかにc5よりc3の透水係数が低くなることから,c3の 方が間隙内の移動が少ないことが確認できた。ここで,密度に着目すると,配合比はc3が c5より大きいことから,粘度が同じである場合,密度の高いc3は密度が低いc5より透水性 の低減効果があると判断できる。この結果により,同じ粘度の場合,密度が高い配合が間 隙内でのクレーの移動が少ないことが示唆された。

#### (2) ケース4(密度固定)でのクレーの移動

透水係数と動水勾配の経時変化の関係を図-6.16 に示す。c3 の透水係数は動水勾配 *i*=1.0 から変動し,*i*=3.0 まで少しずつ高くなる傾向を示したものの,これらの大きな変化は確認 されなかった。これにより,*i*=3.0 においても透水性の低減効果を示したことから,試料の 間隙内に多くのクレーが残存することを確認した。c5 においては,c3 と同様に*i*=3.0 まで 少しずつ透水係数が高くなる傾向を示したものの,こちらも大きな変化は確認されず,c3 より低い透水係数で推移した。ここで粘度に着目すると,c3 の粘度は 0.94 dPa・s,一方で c5 の粘度は 2.51 dPa・s であり,c5 の粘度は c3 に比べ非常に高い。また,c5 と c3 は密度が ほぼ等しいことから,粘度が高い配合が透水係数の低減効果があることが確認された。つ まり,ほぼ等しい密度の懸濁液では粘度の高い配合が,間隙内のクレーの移動が少ないこ とが判明した。



図-6.16 透水係数と動水勾配の経時変化 (ケース 2)

#### (3) ケース5(減粘剤配合)でのクレーの移動

減粘剤を配合した c7-r と c7 の透水係数と動水勾配の経時変化を図-6.17 に示す。c7-r は 動水勾配 *i*=0.5 の時に透水係数が1 オーダー程度急激に大きくなり,*i*=1.0 以降は流量の急 激な変化は確認できなかった。c7 は *i*=1.0 の時から透水係数が高くなり始め,*i*=1.5 以降か らの急激な変化は確認できなかった。つまり,減粘剤を配合すると低い動水勾配から大き く透水係数が増加していることから,クレーが容易に流亡することがわかる。

また, c5-r と c5 における透水係数と動水勾配の経時変化を図-6.18 に示す。c5-r において, *i*=0.5 から *i*=1.0 へ移行したときに透水係数が大きく変化し, さらに *i*=1.0 から *i*=1.5 においても透水係数が大きく変化し,それ以降は緩やかな変化となった。これは,間隙内の多くのクレーが低い動水勾配で流亡したことを示している。一方, c5 は *i*=1.0 から *i*=1.5 で

透水係数が大きく変化し,それ以降は大きな透水係数の変化はなかった。つまり,c5 に減 粘剤を配合すると,低い動水勾配から大きく透水係数が増加することから,クレーが容易 に流亡することを示している。つまり,間隙内のクレーの移動において粘度が大きな要因 の一つと考えることができる。



図-6.17 透水係数と動水勾配の経時変化(ケース3:c7)



図-6.18 透水係数と動水勾配の経時変化 (ケース3: c5)

#### 6.4.4 多粒子限界流速による評価

懸濁液の密度と粘度が間隙内での移動に及ぼす影響に対してさらに考察を加えるため、 多粒子限界流速を用いた評価を行った。

水平浸透流に対する多粒子限界流速式は,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,次式(6.2)で示される<sup>3)</sup>。

ここで,ρ<sub>s</sub>:土粒子の密度(g/cm<sup>3</sup>),ρ<sub>w</sub>:液体の密度(g/cm<sup>3</sup>),μ:水の粘性係数(g/(cm・s)), d:土粒子径(cm),g:重力加速度(g/cm<sup>3</sup>),n:間隙率,m:Reynolds数により求ま る定数である。

(6.2)式により算出した c7 の多粒子限界流速及び c7-r と c7 の実流速に対する通水開始後 の経時変化を図-6.19 に示す。c7-r と c7 を比較すると, c7-r が c7 に比べ早くから流速が確 認されていることから,粘度が低いことが要因となり,間隙内のクレーの移動が早く始ま ったことを示している。さらに c7-r は通水開始後 10 分で大きく流速が上昇しているのに比 べて, c7 は段階毎に流速が増していることからも,間隙内の移動は粘度が高ければ移動し にくいことが判明した。



図-6.19 実流速と多粒子限界流速の関係

次に,多粒子限界流速と実流速を比較すると,多粒子限界流速の結果は,非常に遅い流 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オーダー程度高い流速から移動を開始している。ここで,式(6.2)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。そこで,式(6.2)の右辺第1項の分母にある粘性係数に水 の粘性係数 $\mu$ と懸濁液の粘性係数 $\mu_c$ の比で表される係数 $\alpha = \mu/\mu_c$ を導入した補正を行った。

この補正式を用い,粘度の高い c5(c/w=0.21)に適用した結果を図-6.20 に示す。ケース1及びケース2の結果において,c5(c/w=0.21)は実験開始後約20分後から微量の通水を目視で確認していることから,概ね実流速が多粒子限界流速を越えた付近から懸濁液の移動が始まることが確認できた。このことから,間隙内のクレーの粒子の移動について, 懸濁液の密度とともに粘度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-6.20 実流速と修正多粒子限界流速の関係

#### 6.5 まとめ

本章では前章において透水係数の低減効果が認められたクレー懸濁液の配合に対して, あらかじめクレー懸濁液を注入した供試体に対する水平一次元浸透実験を実施し,動水勾 配の変化に対するクレー懸濁液の種類毎の透水性から流亡状況を評価した。また,異なる 種類のクレーに対して粘度を固定したケース及び密度を固定したケース,さらに同じ種類 のクレーに対して減粘剤を配合することにより粘度のみを変化させたケースを設定し,懸 濁液を注入した供試体に対して動水勾配を段階的に変化させた水平一次元浸透実験結果に 基づいて注入特性及び間隙内の移動特性を評価した。以下に本研究で得られた知見をまと める。

- (1)動水勾配の変化に対する流速の変化の違いや高い動水勾配での流速の抑制効果がクレーの種類毎に異なることが判明した。
- (2) 動水勾配の変化に対する透水係数の変化やその大きさがクレーの種類毎に異なることが判明した。なお,最終的に動水勾配を約 i=3.0 程度まで上昇させた状況で透水係数の低下効果を維持したものは c3:c7=2:1 と c3 及び c5 であった。
- (3) クレーの残存率が透水係数の低下に寄与しているものの,これらに定量的な関係は認

められなかった。

- (4) 透水性が高くなるメカニズムは,水みちの形状や数に影響されることが判明した。
- (5) 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。
- (6) 同程度の粘度の場合,密度が高い配合が間隙内のクレーの移動が少ないことが示唆された。
- (7) 同程度の密度の場合,粘度の高い配合が,間隙内のクレーの移動が少ないことが判明 した。
- (8) 減粘剤を配合すると,間隙内のクレーが容易に流亡する結果を示した。
- (9)提案されている多粒子限界流速式を適用したところ,実際よりも2オーダー以上低い 流速で移動する結果となった。そこで,粘性係数を補正することで,間隙内で移動し 始める実流速と補正後の多粒子限界流速が近い値を示した。

## 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.
- 2) 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.
- 8) 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.

# 第7章 水ガラス系注入材の性能及びクレー懸濁液 との混合効果の検証

## 7.1 概説

前述の通り,都市域でのトンネル建設では,高透水性の砂質層が工事の妨げになったり, 陥没事故の要因となるケースも見受けられる<sup>1)</sup>。現在,地盤の透水性を低下させるために 地盤の中に注入する材料(地盤注入材,あるいはグラウトと呼ばれる)は,主に水ガラス 系や高分子系から構成される薬液系,セメント系や粘土系から構成される非薬液系に大別 される<sup>2)</sup>。このうち,水ガラス系薬液は,浸透注入により砂質系地盤に適用する溶液型と 粘性土地盤中に割裂注入して粘着力の増加を図る懸濁型の2種類に分類される<sup>2)</sup>。前者は間 隙水をゲル状の物質で置換する方法で,液状化防止工法においても広く用いられている<sup>3)</sup>。 しかし,地下水の条件によっては注入量の増加に伴って対策工事費が膨大になる場合があ る。特に,トンネル工事における切羽付近での湧水対策では,注入した薬液がゲル化する 前に地下水流とともに移動することで,注入量に対する効果が不十分であったり,湧水と ともに流出するなど,環境への負荷が大きな課題となる。従来の研究では,砂地盤に水ガ ラス系の溶液型薬液(以下,水ガラス系溶液と称する)を浸透注入する際の効果に対して, 主に改良土の強度の観点から検討がなされている<sup>4),5)</sup>。この中で,間隙水による希釈の有 無や水との比重差による沈殿の影響について考慮されているものの,動水勾配の違いによ る注入効果を透水性の変化から明らかにした例はみられない。

そこで本章では,砂地盤に溶液型薬液を注入する際の検討として,トンネルの切羽での 止水対策のような高い動水勾配が生じている通水状態での注入と掘削前の事前対策を対象 としたきわめて低い動水勾配下を対象にした。具体的には,第5章,第6章と同様に室内で の基礎的な2種類の水平一次元浸透実験を実施し,動水勾配が異なる条件下での注入後の透 水性低下効果を評価する。さらに,水ガラス系溶液の使用量低下と前章までで透水性低下 機能を確認したクレー懸濁液の間隙内での移動を抑制させる目的で水ガラス系溶液及び水 ガラスとカオリンクレーを混合させた溶液(以下,水ガラス混合クレー懸濁液)の注入特 性を評価する。

## 7.2 実験方法

#### 7.2.1 通水状態での注入実験

(1) 実験装置

実験装置の概略図を図-7.1に示す。装置は第5章と同様であり,供試体は両端に試料の流

出を防止するためのステンレスメッシュ(孔径109µm)及び多孔板を設置した直径φ10cm× 長さ50cmのアクリル製カラムに試料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。供試体は,上下それぞれ定水位タンクに内径φ15mmのホー スで接続することで定水位の通水を行い,作用する水頭は流入出の蓋での水頭差を差圧計 により,通水流量は供試体の流出側に設置した流量計によりそれぞれ測定した。注入管は 外径φ1cm×内径φ6mm×長さ5cmの先端が塞がった樹脂性の円筒で,φ3mmの孔を開口率45% になるように全体に配置し,その周囲にステンレスメッシュ(孔径109µm)を巻きつけた ものであり,カラムの外側から外径φ6mm×内径φ5mmのステンレスパイプを接続して供試 体の中央位置に設置した。また,注入管に接続したステンレスパイプには背圧が作用でき るビュレットを接続し,注入量はビュレット内における注入材の高さの変化から求めた。 なお,通水には水道水を用い,流出側で測定した水温により温度補正を行った。









#### (2) 試料及び注入材の物理特性

試料には第5章と同様に岡山県産の川砂を用い,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。土粒子密度はρ<sub>s</sub>=2.682 g/cm<sup>3</sup>,均等係数と曲率 係数はそれぞれU<sub>c</sub>=2.75,U<sub>c</sub>'=0.92である。粒径加積曲線を図-7.2に示す。注入に用いた水 ガラス系溶液は,表-7.1に示す硬化剤を用いる2液タイプで,反応開始は混合後約18分,ゲ ルタイムは約20分である。また,実験条件は,第3章での数値解析結果を参考に,注入前の 動水勾配が*i*=2.8,2.1,1.5の3ケースに設定して実験を実施した。

項目	A液	B液	
成分	特殊水ガラス	有機系特殊硬化剤	
粘度(dPa•s/25 )	0.18	0.1以下	
比重(20)	1.32	1.01	
混合比重	1.17		
pH	11.4	5.6	
配合比	A:B=1:1		
硬化開始 (min)	18 ( 10 )		
ゲルタイム (min)	20 (10)		

表-7.1 水ガラス系溶液の特性

#### (3) 実験方法

通水を開始してから流量と水頭差が安定した状態にあることを確認した後,水ガラス系 溶液を圧力注入した。注入は,まず,攪拌装置でA液とB液を混合後,すぐにビュレットに 入れ,背圧50kPaを作用させた状態でマグネチックスターラーで常時攪拌させながらゲル化 開始直前に注入した。これは,溶液のゲル化開始までに常時攪拌を必要とする上,粘性が 増加し始めると背圧を作用させて直ちに注入しなければならないためである。注入後,流 出流量と水頭差を計測し,約1週間通水を継続した。なお,注入時にはpHの変化を流出側 の定水位タンクの中で計測した。

#### 7.2.2 未通水状態での注入実験・段階通水実験

#### (1) 実験装置

実験装置の概略図を図-7.3 に示す。装置は第6章と同様であり,供試体の直径と注入管 の長さがそれぞれ φ5cm と 4cm,下流側の定水位タンクが供試体に直結している以外は図 -7.1 に示した通水下での注入実験装置と同様である。なお,下流側の定水位タンクを供試 体に直結させることで,水頭は差圧計を用いず,流入側の蓋に設置したマノメーター及び 間隙水圧計により,通水流量は供試体の流入側に設置したデジタル流量計によりそれぞれ 計測した。



図-7.3 未通水状態での注入実験・段階通水実験概略図

## (2) 試料及び注入材の物理特性

試料には**第6章**と同様にガラスビーズ(粒子密度 $\rho_s$ =2.561g/cm<sup>3</sup>,  $D_{50}$ =0.80 mm, 均等係数  $U_c$ =1.78)を用いた。ガラスビーズの粒径加積曲線を**図-7.2**に併せて示す。注入に用いた溶 液は,通水時の注入実験と同じ水ガラス系溶液に加え,クレー懸濁液の流亡抑制を検討す るための水ガラス混合クレー懸濁液の2種類である。

水ガラス混合クレー懸濁液は、岡山県産のカオリンクレー(土粒子密度 $\rho_s$ =2.713 g/cm<sup>3</sup>,  $D_{50}$ =7.48 mm,均等係数 $U_c$ =2.12)を配合比c/w = 0.52の溶液(密度 $\rho_c$ =1.385 g/cm<sup>3</sup>,粘度 $\mu$ =1.10 dPa·s)に、水ガラスを質量比で5%混合した溶液(密度 $\rho_c$ =1.365 g/cm<sup>3</sup>,粘度 $\mu$ =0.25 dPa·s)である。なお、カオリンクレーの粒径加積曲線を図-7.2に併せて示す。

ここで,水ガラス混合クレー懸濁液の沈殿挙動を調べた結果を図-7.4に示す。測定方法 は,攪拌した溶液を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。結果として,水ガラス混合クレー懸濁液は1時間後には質量比が小さく なっており,沈殿が進んでいることが判明した。これは,前述したように,クレー懸濁液 の粘度は1.10 dPa・sであるが,水ガラス混合クレー懸濁液の粘度は0.25 dPa・sと低いことが 影響しているものと推察される。用いたカオリンクレー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,その時点でのpHは6程度の弱酸性を示している。 一方,湿式分級して分離させる粒子の細かい粘土は,原鉱に水を加えながら粉砕したスラ リーに珪酸ソーダ(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, 粗い粒子を沈殿除去した上で製造されている。つまり,クレー懸濁液よりも水ガラス混合 クレー懸濁液の方がpHが高いことで沈殿が促進され,結果的に粘度が低下することが判明 した。



図-7.4 クレー懸濁液及び水ガラス混合クレー懸濁液の沈殿挙動

## (3) 実験方法

定水位タンクの高さを下流端と同じ高さに設定して未通水状態とした上で,それぞれの 溶液を供試体中央から上下流両端付近に達するまで加圧しながら注入した。その後,定水 位タンクの高さを10分間隔で25cmずつ段階的に上昇させ,定水位タンクと流入側の水頭の マノメーターを目視により1分毎に測定するとともに,間隙水圧計で10秒毎のデータを連続 的に記録した。さらに流入流量の変化をデジタル流量計で測定した。

## 7.3 実験結果及び考察

#### 7.3.1 通水状態での注入実験結果(水ガラス系溶液)

動水勾配の異なる3ケースの実験結果として、図-7.5に15 に換算した透水係数の経時変 化を示す。横軸の時間は注入時刻を基準にした経過時間で表示している。注入前に*i*=2.8の ケースがやや低い値を示しているが,供試体の密度の違い,あるいは乱流域への遷移が考 えられる。そこで,図-7.6にこれら3ケースの注入前の動水勾配とダルシー流速との関係を 示す。*i*=2.8のケースの値が線形関係を示す破線から下方に外れる傾向を示している。ここ で,図-7.7に*i*=1.5のケースの供試体に対してあらかじめ動水勾配を変化させて測定した動 水勾配とダルシー流速との関係を示す。動水勾配の増加に伴い,流速はやや直線関係から 外れるものの,*i*=2.8での低下もわずかであった。このことから,図-7.6における*i*=2.8の値 の乖離は,供試体の密度の違いが考えられるが,供試体解体後に注入した水ガラスと川砂 の分離が出来なかったため,それぞれの供試体の乾燥密度の値は不明である。なお,別途, 同様の水中落下法で作製した供試体に対して測定した乾燥密度は,*p*d=1.694~1.716 g/cm<sup>3</sup> の値を示し,供試体の乾燥密度の差異はわずかであった。結局,この要因は解明できなか ったことから,*i*=2.8の供試体のみ注入前から透水性が他よりも若干小さいことを考慮した 上で以下の結果を評価することとした。



図-7.7 動水勾配とダルシー流速との関係(i=1.5の実験に用いた供試体の測定結果)

図-7.5の結果を基に注入前後の透水係数比(k/k<sub>0</sub>)の経時変化に整理した結果を図-7.8 に示す。透水係数の低下割合は,i=1.5では約9割,i=2.1では約5割,i=2.8では約2割程 度となった。ここで,i=2.8における注入時刻前後を拡大した結果を図-7.9に示す。注入直 後に約5割程度まで低下したものの,その後すぐに上昇していることが分かる。また,透 水性の低下に併せて動水勾配が上昇する挙動を示した。この結果から,注入した水ガラス 系溶液が供試体を通過して流出したことが推察される。このことは図-7.10に示す流出側 の定水位タンク内で計測した pHの上昇からも確認された。溶液はゲル化するまでに粘性 が時間とともに増加するため,注入は粘性が増加し始めるとすぐに行う必要がある。しか し,動水勾配が高い場合には,注入開始からゲル化までの約2分の間に水ガラス系溶液が 流速の影響により広がらず,下流に移動・流出する可能性が示唆された。



図-7.9 注入前後の透水係数比及び動水勾配の経時変化(/=2.8)



図-7.10 注入前後の透水係数比と pHの経時変化( /=2.8)



図-7.11 注入前の動水勾配と注入前後の透水係数比の関係



図-7.12 注入前のダルシー流速と注入前後の透水係数比の関係

また,図-7.11 及び図-7.12 に注入前の動水勾配及びダルシー流速と注入前後の透水係数 比との関係をそれぞれ示す。動水勾配が高い程,透水係数の低下がわずかである結果を示 し,ダルシー流速との関係ではほぼ線形となった。供試体の間隙率が約 37% であることを 考慮すると,*i*=2.8 のケースでは約 40 秒で供試体中央の注入位置から,下流方向に供試体 の半分の距離を移動することとなり,注入後,砂層内でゲル化する前に流出した可能性が あることが確認できた。

ただし、これらの結果は、各ケースにおいて1回の実験によるものであることから、より 相対的な評価を行うためには、様々な動水勾配による結果を追加するとともに、結果の再 現性を確認する必要がある。

#### 7.3.2 未通水状態での注入実験・段階通水実験結果

#### (1) 水ガラス系溶液

ガラスビーズの供試体に水ガラス系溶液を注入し,ゲル化が完了するまで1時間程度養 生した。その後,段階的に水頭を増加させて通水実験を実施した結果として,図-7.13 に 水頭と流量の経時変化を示す。上流側の水頭は,流入側の定水位タンクと同程度の値で推 移し,h=146.2cm(*i*=2.91)まで上昇したものの,流量計の計測値は下限値(*Q*=0.05L/min) を越えることはなく,0の表示となった。注入前のガラスビーズの透水係数(15 換算) は*k*<sub>15</sub>=3.30×10<sup>-3</sup>m/s であり,仮に*i*=2.91 で*Q*=0.05L/min とすると*k*<sub>15</sub>=1.65×10<sup>-5</sup>m/s となり, 注入前の透水係数の 5%未満で保持されていることとなる。したがって,通水状態での注入 実験と異なり,一度ゲル化が完了すると高い動水勾配下でも移動せず,初期の止水性を保 持していることを確認した。



#### (2) 水ガラス混合クレー懸濁液

次に,ガラスビーズの供試体に水ガラス混合クレー懸濁液を注入し,水ガラス系溶液と 同様に1時間程度養生した。その後段階的に水頭を増加させて通水実験を実施した結果に ついて,別途実施したクレー懸濁液に対する結果と比較する形でまとめる。なお,両結果 を比較する上で通水温度に違いがある(クレー懸濁液:30.4 ,水ガラス混合クレー懸濁 液:10.4 )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。

まず,図-7.14 と図-7.15 に水頭と流量の経時変化を示す。水頭の増加とともに流入側の 定水位タンクとの差が大きくなっており,供試体の透水性の上昇に伴って,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。また,クレー懸濁 液では,40 分経過後に一度上昇した水頭が大きく低下する現象を示すとともに,流量の急 激な増加が認められたことから,この時点で供試体内の粘土の多くが移動したことが推察 される。一方,水ガラス混合クレー懸濁液にはこの現象は見られなかった。

これらの結果に基づいて算定した透水係数と動水勾配の経時変化を図-7.16 に示す。初 期の動水勾配 *i*=0.5 では同様に透水係数が増加しているが,次の段階である *i*=1.0 では水ガ ラス混合クレー懸濁液は継続して透水係数が増加している。一方,クレー懸濁液は一定の 透水係数を維持しているものの,40分後の動水勾配 *i*=1.75 に上昇した段階で透水係数が増 加し,水ガラス混合クレー懸濁液と同程度となっていることを示している。

最後に,図-7.17 に動水勾配と注入前後の透水係数比の関係(いずれも 15 換算)を示 す。水ガラス混合クレー懸濁液は注入後の初期段階では 8 割程度の低下率を示していたが, 最終的には 2 割程度の低下率に留まっていることが分かる。また,クレー懸濁液は動水勾 配 1.0~1.5 では 4 割程度の低下率で維持する傾向を示している。これらの要因としては, 水ガラス混合クレー懸濁液の粘性がクレー懸濁液よりも低いことが挙げられる。つまり, クレー懸濁液に 5%の水ガラス系溶液を足しても透水性低下機能は発揮されず,逆に粘性が 低下したり,図-7.4 に示したように沈殿が促進されることで機能を損なうことが示唆され た。なお,ここでは 1 種類(5%)の配合割合のみを検討した結果であることから,さらに 水ガラス系溶液を添加することで異なる特性を示すことも考えられる。




### 7.4 まとめ

本章では砂地盤に溶液型薬液を注入する際の検討として,水ガラス系溶液を対象に動水 勾配が異なる通水状態での注入後の止水効果を評価する室内での基礎的な水平一次元浸透 実験を実施した。また,水ガラス混合クレー懸濁液を含めた2種類の溶液について,未通 水状態で注入した後に段階的に動水勾配を増加させた場合の止水効果の変化を調べる水平 一次元浸透実験を実施した。

以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 注入した水ガラス系溶液が流速の影響により広がらず,下流に移動あるいは流出する 可能性があることが示唆された。つまり,高い動水勾配下では十分な止水効果が見込 まれない可能性がある。
- (2) クレー懸濁液に水ガラス系の溶液を混合すると粘度が低下し,沈殿が促進されることが判明した。つまり,止水効果の向上は認められず,逆に粘性が低下することで効果を損なうことが示唆された。
- (3) 注入した水ガラス系溶液が流出せずゲル化が完了すると、高い動水勾配での通水状態 でも移動せず、初期の止水性を保持することを確認した。

今後の課題としては,異なる透水性の供試体に対するデータを蓄積する必要がある。また,クレー懸濁液への水ガラス系溶液の添加割合を変化させることで特性の違いを確認すること,逆に増粘剤を添加することが止水性を維持できる機能を発揮することにつながるかなど,効果的な注入方法を検討することが挙げられる。

# 参考文献

- 三谷泰博:福岡市営地下鉄七隈線博多駅陥没事故とその復旧工事,地盤工学会誌Vol.67, No.8, pp.4-7, 2019.
- 2) 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.79-95,1997.
- 池野勝哉,吉田誠,安楽宗一郎,風間基樹,渦岡良介,仙頭紀明:溶液型薬液注入工法 を用いた盛土直下の液状化対策効果とその数値解析,土木学会論文集A1(構造・地震 工学), Vol.65, No.1, pp.622-628, 2009.
- 4) 加賀宗彦:水ガラス系薬液注入固結砂の強度の耐久性と浸透水圧の影響,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.70, No.1, pp.1-15, 2014.
- 5) 林健太郎, 山崎浩之, 善功企: 溶液型薬液注入工法の施工管理方法に起因する改良土の 強度低下のメカニズム, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.70, No.4, pp.387-394, 2014.

# 第8章 結論

### 8.1 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に,主に水平一次元のカラム実 験による基礎的な検討を実施した。

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ことを指摘し,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既往の注入工法に基づき,薬液系注入材として主に水ガラス系溶液,非薬液系注入材としてセメント系注入材及び粘土系注入材に関する従来の研究を総括 するとともに,これらの問題点を指摘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章の都市域トンネル工事での止水工法の実施事例では,地山状況に応じた補助工法の システムを整理することで,都市域軟弱地盤のトンネル工事において,補助工法を迅速か つ経済的に選択し,地表に影響を与えることなく工事を完了した事例についてまとめ,設 計時や施工時に補助工法の採用が必要となった場合,地山の流動化を示す均等係数や透水 係数などの地盤物性値等を反映させた補助工法システムを確立することが設計と施工の大 きな乖離を回避するために必要であることを指摘した。

さらに,トンネル掘削時の流速を推定することで本研究で実施する要素実験での実験条 件を設定した。

第4章のカオリンクレー及び懸濁液の特性調査では、クレー懸濁液の注入及びその後の移 動挙動に影響するカオリンクレーとその懸濁液の物性値を測定した結果についてまとめた。 また、クレー懸濁液の注入前の状況を把握するための沈降実験を行うことで注入時におけ る攪拌の必要性を明らかにする。さらに、注入後の止水効果だけでなく、粘着力による強 度増加の有無について、クレー懸濁液と砂試料を混合して作製した供試体に対して実施し た三軸圧縮実験結果を示した。その結果、クレー懸濁液作製後、注入までに1時間以上を要 する場合は攪拌を行う必要があること,水ガラスによって沈降は早くなるものの細粒分は 液体中に分散することが考えられること,砂層にクレーを注入することで粘着力の増加が 期待できることが判明した。

第5章の通水下での注入に最適なクレー懸濁液の検討では,粒径の異なる3種類のクレー を対象に,供試体に川砂を用いた水平一次元注入実験を実施し,高動水勾配が作用してい る地下水流の条件下で,クレー懸濁液を圧入し,粘性と透水係数低減効果の関係から注入 に適したクレー懸濁液の濃度の範囲を調査した。その結果,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。また,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 いるものであること,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 低いものであることが明らかとなった。具体的には,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。

第6章のクレー懸濁液の間隙内移動挙動の評価では,第5章で効果が認められたクレー懸 濁液の種類と配合を対象に,懸濁液を圧入したガラスビーズの供試体に対する一次元通水 実験を実施し,段階的に動水勾配を変化させた際の透水性の変化から流亡状況を評価する とともに,懸濁液の濃度や粘度との関係を調べた。さらに,配合比の異なる懸濁液と減粘 剤を添加した懸濁液を用いることにより,カオリンクレーの間隙内移動特性に与える要因 を検討した。その結果,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た。さらに,提案されている多粒子限界流速式を適用したところ,実 際よりも2オーダー以上低い流速で移動する結果となったことから,粘性係数を補正するこ とで,間隙内で移動し始める実流速と補正後の多粒子限界流速が近い値を示した。

第7章の水ガラス系注入材の性能及びクレー懸濁液との混合効果の検証では,第5章,第6 章と同様に室内での基礎的な2種類の水平一次元注入及び通水実験を実施し,動水勾配が異 なる条件下での注入後の透水性低下効果を評価した。さらに,水ガラス系溶液の使用量低 下と透水性低下機能を確認したクレー懸濁液の間隙内での移動を抑制させる目的で水ガラ ス系溶液及び水ガラスとクレー懸濁液を混合させた溶液の注入特性を評価した。その結果, 高い動水勾配下では十分な止水効果が見込まれない可能性があること,クレー懸濁液に水 ガラス系の溶液を混合しても止水効果の向上は認められず,逆に粘性が低下することで効 果を損なうことが示唆された。さらに,注入した水ガラス系溶液が流出せずゲル化が完了 すると,高い動水勾配での通水状態でも移動せず,初期の止水性を保持することを確認した。

# 8.2 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,鉛直断面及び平面 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) 断面二次元土槽による注入実験

図-8.1に製作した回転式二次元モデル実験装置の概略図,写真-8.1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プシステムを導入した。



図-8.1 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-8.1 回転式二次元モデル実験状況

土試料に川砂を用いてこれまでの実験と同様の条件で作製した供試体に対し,c3 (c/w=0.25,C=20.0%)のクレー懸濁液を注入した際の鉛直方向及び水平方向の実験状況を 写真-8.2 に示す。注入時の背圧は 50kPa とし,懸濁液の沈降を防止するために常時攪拌し た上で,注排水タンクの水頭差 ⊿h=0cm での注入を行った。鉛直断面の供試体にクレー懸 濁液を注入した結果として,クレー懸濁液は注入管の約 10cm 上部を中心にほぼ同心円上に 注入されており,浸透距離は最大で 50cm,最小で 35cm ほどである。一方,平面断面の供 試体にクレー懸濁液を注入した結果として,クレー懸濁液は鉛直方向よりも水平方向への 浸透が進んでおり,注入管を中心に楕円形に注入されている。注入状況から水平方向に約 50cm,鉛直方向に約 40cm の浸透が完了している。鉛直断面の注入結果に着目すると,鉛直 下方よりも上方の距離が長くなった。これは供試体下部の方が川砂の乾燥密度が高いこと が影響している可能性がある。浸透距離は最大で 50cm 程度まで達した時点でちょうど準 備した懸濁液の全量に達したことから,注入によって目詰まりしたクレー懸濁液が脱水あ るいは圧密等により密度が増加する現象が生じているものと推察される。



(a) 鉛直方向(b) 水平方向写真-8.2 注入後の状況:c3(c/w=0.25, C=20.0%)

次に,注入後,注水側の定水位タンクを段階的に上昇させ,流出流量,注入範囲形状, 各計測点での間隙水圧のそれぞれの変化を観察した。その結果の一部を図-8.2 に示す。水 頭差が上昇するにつれて,流出流量は増加するとともに,注入範囲の形状は小さくなった。 この状況はコンター図の変化に表れている。具体的には,通水前の注入範囲は破線にて, さらに通水後の注入範囲は実線で表しており,その差から明らかに流亡状況が確認でき, 通水後の注入範囲の残存状況も確認できた。

現状では予備実験の段階であるが,これらの変化挙動について本研究の水平一次元実験 で得られた知見による評価を実施することで工法の実現性の有無の判断につながるものと 考えられる。





図-8.2 流線網図とクレー残留状況: c3 (c/w=0.25, C=20.0%)

### (2) 浸透距離を推定する理論式の構築

上述の断面二次元実験の結果を踏まえ,注入材料の特性と注入圧力ならびに注入量から 注入範囲を算定できる理論式を構築する必要がある。ここで,クレー懸濁液が含まれる粒 子グラウトの浸透距離は次式(8.1)によって推定できることが示されている<sup>1)</sup>。

$$R_e = \frac{\gamma_{\rm w} \cdot g \cdot h \cdot r_{\rm e}}{2S} + r \qquad (8.1)$$

ここで, $R_e$ : グラウトの浸透距離(cm),r: 注入孔半径(cm), $\gamma_w$ : 水の単位体積重量(g/cm<sup>3</sup>), g: 重力の加速度(cm/sec<sup>2</sup>), 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/cm<sup>2</sup>)である。なお, $r_e$  は地盤の透水係数,S は粘性係数との関係により表 される。

上式(8.1)は主にセメント系注入材を対象としたものであるが,まずはカオリンクレーに も適用できるか検討する必要がある。なお,溶液型グラウトの場合は,一点から球状にグ ラウトが浸透していくと仮定した球状浸透の式と,ストレーナー注入のように柱状に浸透 していくとした柱状浸透の式がある<sup>1)</sup>。ここで,上式(8.1)より浸透距離を計算した結果, 浸透距離は約 70cm となり実験結果の注入範囲と近い結果を示したことから概ね適用でき ると考えられる。今後は実験を重ねることにより適用性の精度を高める必要性がある。

# 8.3 実用化に向けた今後の課題

#### (1) トンネル工事への適用

二次元あるいは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 井及び注入管の仕様,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-8.1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。

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。

汚染地下水の拡散制御壁としての利用。

地盤沈下の原因となる粘土層の圧密沈下防止対策としての利用等への応用。

砂質地盤を注入により粘性地盤に改良することで液状化を防止する技術への応用。

このうち, に関して, 図-8.2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。



図-8.1 トンネル掘削時の湧水に対する注入方法



図-8.2 河川堤防における高透水性地盤に対する注入方法

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<sup>2)</sup>。模型実験土槽の概略図を図-8.3 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。 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<sup>-5</sup> m/s(相対密度:*D*<sub>r</sub>=90%)である。

砕石(G):7号砕石(k=5.47×10<sup>-3</sup> m/s).下部基盤層と排水礫層に用いた。

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<sup>-7</sup> m/s である。

図-8.4 に土層構成及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-8.3** 模型実験土槽概略図<sup>2)</sup>



図-8.4 土層構成及び実験後の状況:クレー懸濁液注入 2)

### (3) その他の粘土系注入材に対する検討

本研究での知見により,数µmの細粒分を特定の粘度を有する懸濁液にして注入するこ とで止水効果が認められたことから,対象地盤そのものを注入材として用いることも考え られる。つまり,注入材として新たに粒度調整した現場土を用いることで現場状況に応じ た環境に配慮した低コストで効率的な注入工法の開発が見込まれることから,粒度の調整 方法及びその透水係数の低減率と注入範囲などの効果を評価する室内試験を実施すること で工法の実現に向けた基盤となる成果を創出することが可能となるものと考えている。

## 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.
- 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.

本論文は,著者が清水建設株式会社において現場技術者時代に,都市域のトンネル現場 において大量湧水に遭遇し,現場の技術者及び専門業者の仲間たちと,寝る間も惜しまず 土木技術を経験的な知見から自然現象と戦ったことが始まりとなり,3年の間,岡山大学大 学院環境生命科学研究科の小松満准教授をはじめ,多くの方々の,ご指導,ご鞭撻,ご助 言により取り纏める事が出来ました。

岡山大学大学院環境生命科学研究科の小松満准教授からは,ご多忙にも関わらず浅学で ある小生に対し,初歩の段階から研究全般にわたり時間を惜しむ事無く,きめ細やかなご 指導を賜りました。さらに研究以外に,人への気配り,物事を貫き通す志,妥協をしない こと,発想の転換力,非は素直に認める等々,多くの事を学ばせていただきました。

岡山大学大学院環境生命科学研究科の竹下祐二教授からは,実験方法や論述のアドバイ ス等,3年間にわたりご指導とご支援を賜りました。また,岡山大学大学院環境生命科学研 究科の諸泉利嗣教授からは,実験結果の着眼点や論述等,3年間にわたりご指導とご支援を 賜りました。岡山大学大学院環境生命科学研究科の金秉洙准教授からは第4章の圧密非排水 三軸圧縮試験におきまして多大なるご支援を賜りました。

岡山大学大学院環境生命科学研究科の綾野克紀教授からは,学術全般や人生論について 丁寧にご指導を賜りました。さらに岡山大学大学院環境生命科学研究科の藤井隆史准教授 からは,室内実験にて様々なご支援を賜りました。

岡山大学大学院環境生命科学研究科の榊利博客員教授からは,海外で経験された豊富な 知識や新たな研究テーマへの挑戦の姿勢,さらに論述方法等を賜りました。大阪大学大学 院工学研究科の小泉圭吾助教からは,発注者ニーズの研究の関わり方とその評価等,実践 に関するご指導を賜りました。また,先生方には国際発表の際に大変丁寧に英語の御指導 を賜りました。

岡山大学地盤・地下水研究室の皆様には大変お世話になりました。2018年度卒業の津田 朋志氏(現岡山大学大学院),中原佑氏(現近畿地方整備局),中本萌氏(現岡山大学大学 院)の方々には,1年目の初期段階で試行錯誤しながら行った室内実験で,サポートを頂き ました。2019年度卒業の児島直氏(現神戸市役所),山本理沙氏(現日本工営株式会社)の 方々には,2年目の新たな室内実験の準備から実施まで,お力添えを頂きました。2020年度 学部生の湯浅一矢氏(岡山大学4回生),高塚晃佑氏(岡山大学4回生),森裕紀氏(岡山大 学4回生)の方々には,大型の土層を使用した室内実験の準備から実施まで,献身的な御協 力を頂きました。

山陽クレー工業株式会社代表取締役の瀧本弘治氏からは,カオリンクレーを快く提供し て頂き,さらにカオリンクレーの特性について多大なるアドバイスを賜りました。

株式会社カテックス執行役員東京支店長の足立忠彦氏及び第一建工株式会社代表取締役 の森高寛氏からは,薬液系注入材についての知見やアドバイスを賜りました。

株式会社フソウの中国支店次長 柴原晃氏には環境に関する知見やアドバイスを賜りま りながら,実験の事象について討議させて頂きました。さらに,一般財団法人フソウ技術 開発振興基金の助成を頂戴したことは,心より感謝申し上げます。

清水建設株式会社広島支店の皆様には,3年にも渡り研究に費やす時間やその間のきめ細 かなご支援を頂戴いたしました。その中でも,入学当時の上司である清水建設株式会社広 島支店営業部(土木)元営業部長の二階堂禎俊氏には,当時決断に悩んでいた私の背中を 押していただきました。清水建設株式会社広島支店副支店長の佐野真氏からは,学術への 挑戦に対し,多大なるご理解とご協力及び激励を賜りました。さらに,岡山大学の大先輩 である清水建設常任顧問の河田孝志氏をはじめ岡山大学の卒業生の皆様からは,3年間を通 じて叱咤激励を頂戴いたしました。

本論文を纏めるにあたり,また研究を実施するにあたり,記述しきれないほどの多くの 皆様方との出会いや,皆様からのご指導をはじめ世間話などから生まれる発想力など,皆 様とのコミュニケーションの大切さを痛感することが出来ました。社会人として折り返し 地点を過ぎているにも関わらず,自分の人間としての未熟さを大きく痛感した次第です。 と同時に自己修正力や諦めないポジティブな思考回路を学べる事が出来ました。この気持 ちを糧に建設業をはじめ土木の工学分野へ少しでも貢献と恩返しができるように精進して まいる所存です。

結びになりますが,大学院での学びを快諾してくれた事,さらに日常の生活を心から支 えてくれた妻である高橋明日香,息子であり良きライバルの高橋彰人と高橋優介には心よ り感謝と御礼を申し上げます。3年間継続できたことは家族の支えがあったことと痛感して います。ありがとう。

これからが新たな出発となりますが、引き続き皆様のご支援を頂戴できれば幸いです。

令和3年3月

# 高橋 啓介