

# 低透水性地盤のグラウチングに関する実験的研究

大野睦雄<sup>1</sup>・トランデュクフィオン<sup>2</sup>・鈴木敦巳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工修 (株) 間組常務執行役員東京支店長 (〒107-8658 東京都港区北青山 2-5-8)

<sup>2</sup>正会員 工博 (株) 間組国際事業統括支店 (〒107-8658 東京都港区北青山 2-5-8)

<sup>3</sup>正会員 工博 熊本大学工学部環境システム工学科教授 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

既設フィルダム等の水理的安定性の向上を目的とする補修で、堤体等の地盤の遮水性向上を目指した工法として、グラウチングは有効なものの一つである。本研究は従来のセメント系材料では浸透注入（地盤を破壊せず低圧力で注入する方法）による注入効果が期待できない、透水係数  $k \leq 10^{-3} \text{ cm/s}$  の低透水性地盤に対して遮水性をさらに改善させるためのグラウト材を検討し、室内注入試験により材料の適用性を確認するとともに、グラウト材の地盤への浸透長さを推定する式を導き、グラウト材の配合設計およびグラウチングの設計手法を提案した。

**Key Words:** grouting, coefficients of permeability, ultra fine-grained cement, kaolinite clay

## 1. はじめに

既設フィルダム等の水理的安定性の向上を目的とする補修で堤体等の地盤の遮水性向上を目指した工法として、グラウチングは有効なものの一つである。グラウチングは地盤を半永久的に改良するために、①地盤の間隙や亀裂等をグラウト材により確実に充填できること、②改良された地盤が長期的に安定性を保たれること、③施工中と施工後の地盤への悪影響を与えないこと、等の条件を満足しなければならない。

このためには地盤を破壊せずに注入する、いわゆる低圧力下での浸透注入が求められる。一方、地盤への従来のグラウチング方法は次のような課題が指摘されている。

- ①一般的によく使用されているセメント系または粘土系グラウト材は、透水係数  $10^{-3} \text{ cm/s}$  以上の比較的高透水性地盤に有効視され、それ以下の透水係数を持つ低透水性地盤に対しては注入効果が期待できない。
- ②地盤条件に対するグラウチングの設計パラメータには、グラウト材やその配合、グラウチングによる改良範囲などがある。しかし、これらは経験論的に決定されており、合理的な設計手法が未だ確立されていない。

以上の背景において、本研究は従来のセメント系材料では浸透注入が困難とされている、透水係数  $k \leq 10^{-3} \text{ cm/s}$  の低透水性地盤を対象に遮水性をさらに向上させるグラウト材を開発し、材料の適用性を室内注入試験により確認するとともに、グラウト材の地盤への浸透長さを推定する方法を導き、地盤条件に応じたグラウト材の配合設計およびグラウチングの設計手法を提案した。

研究の手順は、①グラウト材と地盤条件の設定、②配合試

験および注入試験による材料特性試験、③浸透長さの推定方法の検討と、これに基づく、グラウト材の配合設計並びにグラウチングの設計手法の提案、の3段階に分けて進めた。

## 2. グラウト材と地盤条件の設定

### (1) グラウト材の設定

低透水性地盤の遮水性を改善するために要求されるグラウト材は、低圧で一定時間の連続注入が可能のように、粒径が小さく、流動性に優れるとともに、固結して安定な材料であることが必要である。

表-1に参考文献1)で提示されたグラウト材の評価項目<sup>1)</sup>を示す。

また、改良対象土とグラウト材の粒度特性に関するグラウチング<sup>2)</sup> (間隙に浸透可能なグラウト材の粒度条件)は、下記の経験式により評価した。

表-1 グラウト材の評価項目

要求性能	評価項目	目標値	備考
流動性	プルパクト70-	≤9.5 秒	グラウトポンプでの 圧送可能な流動性
	マッシュ70-	≤25 秒	
施工性	硬化時間	3~4 時間	注入時間/バッチ
分離抵抗	ブリージング率	≤5%	硬化後の品質保証
安定性	硬化後の強度 (軸圧縮強度)	50~100kPa	原地盤と同程度

表-2 使用材料の化学成分 (単位%)

材料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO MgO	SO <sub>3</sub>
超微粒子セメント	27	11	2	—	56	2
カオリナイト	57	27	—	<6.5	<2	—

表-3 締め固めた供試体の物性値

試料	湿潤密度 $\rho_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	含水比 w (%)	乾燥密度 $\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	間隙比 e	透水係数 k (cm/s)
A	10.8~12.0	100	5.4~6.0	3.4~3.9	$2 \times 10^{-4}$ ~ $2 \times 10^{-5}$
B	14.6~15.6	38	10.6~11.3	1.3~1.5	$2 \times 10^{-3}$ ~ $8 \times 10^{-4}$

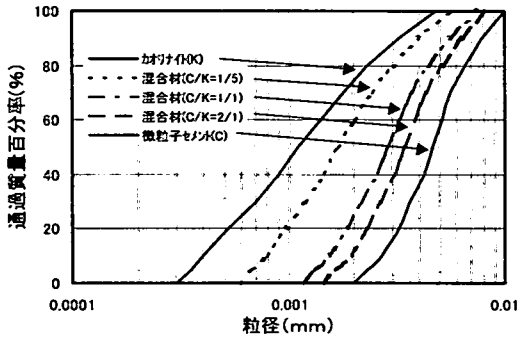


図-1 超微粒子セメントとカオリナイトの粒径加積曲線

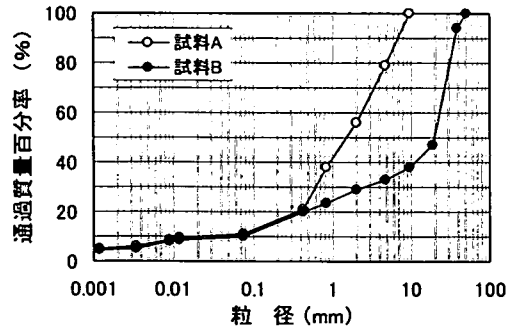


図-2 試料の粒径加積曲線

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

$$D_{10} / G_{95} \geq 8 \quad (2)$$

ここに、

$D_{10}$ ,  $D_{15}$ : 改良対象土の通過質量百分率 10%, 15% に対する粒径 (mm)

$G_{85}$ ,  $G_{95}$ : グラウト材の通過質量百分率 85%, 95% に対する粒径 (mm)

グラウト材は表-1の評価項目とともに式(1)および(2)を満足することが望ましい。

本研究では、透水係数  $k \leq 10^{-3}$  cm/s の低透水性地盤を対象に遮水性をさらに改善できるグラウト材として超微粒子セメントとカオリナイトを混合した懸濁型グラウト材に着目した。これは、超微粒子セメントの最大粒径が 10  $\mu$ m で、従来の普通セメント ( $D_{max}=80 \mu$ m) に比較してその粒径が極めて小さい。また、カオリナイトは、①粒径の大きさを 5  $\mu$ m 以下に製造可能で、②主要鉱物はカオリナイトとセリサイト、風化しにくい材料であり、化学的安定性が優れていること<sup>3)</sup>による。表-2、図-1に本研究に使用した、超微粒子セメントとカオリナイトの化学成分<sup>4),5)</sup>と粒径加積曲線を示す。

## (2) 地盤条件の設定

注入対象地盤は、透水係数が  $k=10^{-3} \sim 10^{-5}$  cm/s を有する締め固められた地盤とした。使用した材料は自然に堆積した礫混じり粘性土を粒径 2mm 以上、2~0.42mm、0.42~0.075mm と 0.075mm 以下の 4 試料に水洗いによりフルイ分級したのち、各々分級された試料を自然含水比付近になるまで気中乾燥した。さらに各分級試料を所定の比率で混合し(試料 A と呼ぶ

ぶ)、質量 2.5kg のランマーを用い、直径 10cm、高さ 12.7cm のモールドに締め固めて、透水試験 (JIS A1218) を実施し、透水係数  $k=10^{-4} \sim 10^{-5}$  cm/s を得るための地盤条件を確認した。また、 $k=10^{-3}$  cm/s オーダの供試体については、礫混じり粘性土と砂礫 (粒径 5~50mm) を乾燥質量比 1:2 の比率で混合して作製した (試料 B と呼ぶ)。

試料 A、試料 B の締め固めた供試体の物性値を表-3 に、粒度分布を図-2 に示す。

試料 A は礫混じり粘性土を粒度調整したもので、締め固めた供試体は間隙比が 3.4~3.9 と比較的大きいにもかかわらず透水係数は  $k=10^{-4} \sim 10^{-6}$  cm/s と小さく、粘性土系地盤の性質を有している。また試料 B は大量の砂礫を混合したもので、締め固めた供試体は間隙比 1.3~1.5 と小さいが、透水係数は  $10^{-3}$  cm/s と比較的大きいことから粘性土より砂礫系地盤の性質を有するものと考えられる。以下、前者の供試体を粘性土系供試体、後者を砂礫系供試体と呼ぶ。

## 3. グラウト材の材料特性試験

### (1) 配合試験

#### a) 試験方法

グラウト材は、全量で 5,000ml となるよう、まず所定量の水と分散剤 (K 社製マイティ 150R) をポリバケツ容器に入れ、電動ミキサーを用いて 1 分間混合したのち、攪拌しながら所定量の超微粒子セメント、カオリナイトの順で投入して 3 分間混合し、作製した。引続き、フロー試験、レオロジー特性試験、ブリージング率試験を実施し、グラウト材の特性を把握した。

フロー試験<sup>6),7)</sup> はマーシュフローとプレバクトフローによった。マーシュフローでは 500ml、プレバクトフローでは

表-4 配合の試験結果

配合 番号	配合条件			試験結果										評価 <sup>注)</sup>				
	C/K	G/W	R/C	ρ (N)	η <sub>sp</sub> /C (Pa·s)	η <sub>sp</sub> /C (Pa·s)	粘度 η (Pa·s)	硬化時間 (min)	引張り強 度 (N/30)	流動性 η <sub>sp</sub> /C (Pa·s)	粘性 η <sub>sp</sub> /C (Pa·s)	硬化時間 3~5分	材料分 割	配合評 価	◎	○	△	×
1	1/0	1/1	1	1.0	—	13.6	660	50	1.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	1/0	1/2	2	1.0	22.9	9.0	51	220	11.4	○	○	△	×	×	×	×	×	×
3	2/1	1/3	4.5	1.0	23.4	9.4	150	180	1.0	○	△	○	◎	△	○	△	○	×
4	2/1	1/3	4.5	1.5	21.8	9.2	102	170	1.2	○	△	△	◎	△	○	△	○	×
5	2/1	1/6	9	1.5	20.0	8.8	20	210	3.2	○	○	○	○	○	○	○	○	×
6	2/1	1/8	12	1.5	19.9	8.6	30	240	18.2	○	○	○	○	○	○	○	○	×
7	1/1	1/6	12	1.5	20.8	9.0	102	180	2.7	○	△	△	○	△	○	△	○	×
8	1/1	1/8	16	1.5	20.0	9.0	41	250	5.4	○	○	○	○	△	△	△	○	×
9	1/1	1/10	20	1.5	20.0	8.6	30	240	9.3	○	○	○	○	×	×	×	×	×
10	1/2	1/9	27	1.5	20.1	8.6	255	190	4.2	○	×	△	○	×	×	×	×	×
11	1/2	1/12	36	1.5	20.2	8.8	122	190	4.4	○	△	△	○	×	×	×	×	×
12	1/5	1/6	36	1.0	25.0	9.2	850	120	0.2	○	×	×	△	◎	×	×	×	×
13	1/5	1/10	60	1.0	21.5	8.8	250	120	3.4	○	×	×	○	×	×	×	×	×
14	1/5	1/12	72	1.0	20.6	8.8	120	120	7.1	○	△	×	△	×	×	×	×	×
15	1/10	1/6	66	1.0	27.5	9.1	1050	170	0.0	△	×	△	◎	×	×	×	×	×
16	1/10	1/12	132	1.0	20.6	8.2	240	170	5.3	○	×	△	△	×	×	×	×	×
17	1/10	1/18	198	1.0	20.7	8.6	100	170	5.6	○	△	△	△	×	×	×	×	×

注) 評価記号: ◎:優れている, ○:適合, △:やや適合, ×:不適合1725ml

のグラウト材をコーンに入れて、その全量が流下するまでの時間(秒)を測定してフロー値とする。

レオロジー特性試験はB型粘度計(T社製, B8M型)<sup>8)</sup>を用いて、グラウト材の粘度を測定し、イールドバリュー(降伏値)に換算した。これは、共軸円筒型回転粘度計の一種で、グラウト材等の懸濁液の粘性抵抗に抗して回転速度を一定に保つのに必要なモーメントを測定するものである。ローターはグラウトの流動性によってNo.1~4を用いて行い、回転数を3~60rpmまで6段階に変化させた。読取りは各回転数において指示値がほぼ一定になったのち行った。測定結果からせん断応力Sとせん断速度Dを算定し、両者の関係曲線からせん断速度がゼロのときのせん断応力をイールドバリューとして推定するものである。

ブリージング試験は土木学会のポリエチレン袋を用いる方法<sup>9)</sup>に従った。

b) 配合試験の結果

配合試験の結果を表-4に示す。ただし、表中には、C:セメント, K:カオリナイト, G:グラウト材の固形分=C+K, W:水, R:遅延剤を表す。表-4の総合評価では、配合No.3, 4, 5, 7, 8(C/K=2/1, 1/1)が比較的良好な結果となった。また、配合No.12(C/K=1/5, G/W=1/6)では粘性や硬化時間が不適合であるが、前記の配合(C/K=2/1, 1/1)より平均粒径が小さく、グラウトビリティの向上が期待できる。したがって、これらの配合を室内注入試験に用いた。なお、グラウト材の強度については、ブリージング試験の供試体を28日間養生したのち、中間部から直径5cm, 高さ10cmの供試体を切り取って、一軸圧縮試験を実施した。

試験結果では、一軸圧縮強さ $q_u$ と水セメント比W/Cの関係はばらつきがあるものの、概ね相関関係が見られ、W/C=10程度までは $q_u > 100$ kPa, W/C > 10では $q_u = 50 \sim 100$ kPa, またW/C

表-5 グラウト材とグラウトビリティの関係

グラウト材の配合と粒径			$D_{15}$	$D_{10}$
C/K	$G_{85}$ (mm)	$G_{95}$ (mm)	$G_{85}$	$G_{95}$
2/1	0.0055	0.0085	27	7
1/1	0.0045	0.007	33	9
1/5	0.0035	0.006	43	10

表-6 供試体の透水性とグラウト材配合比

No.	試料条件	グラウト材配合比			
		目標透水係数(cm/s)	配合番号 <sup>注)</sup>	C/K	G/W
1	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	3	C/K=2/1	G/W=1/3	1.0
2	$10^{-3}$ オダ	4	C/K=2/1	G/W=1/3	1.5
3	$10^{-3}$ オダ	5	C/K=2/1	G/W=1/6	1.5
4	$10^{-3}$ オダ	12	C/K=1/5	G/W=1/6	1.0
5	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	5	C/K=2/1	G/W=1/6	1.5
6	$10^{-4}$ オダ	7	C/K=1/1	G/W=1/6	1.5
7	$10^{-5}$ オダ	8	C/K=1/1	G/W=1/8	1.5

注) 配合番号は表-4にしたがった。

$\geq 20$ のとき $q_u < 50$ kPaになった

次に配合試験結果(表-4)を参考に試料A, B(図-2参照)の粒度条件( $D_{10}=0.06$ mm,  $D_{15}=0.15$ mm)に対するグラウト材のグラウトビリティの評価を式(1), (2)により行い、その評価結果(表-5参照)をふまえて、室内注入試験における供試体の透水性とグラウト材配合比の組合わせを表-6のように設定した。

(2) 注入試験

a) 試験方法

注入試験は図-3に示す直径56cm, 高さ75cmの特殊モールドを用い、以下の手順により実施した。

- ①供試体の作製: あらかじめ実施した予備試験結果から所定の透水係数を得られるように質量10kgのバイブレーションタンパーを用いて締め固めて、直径46cm, 高さ50cmの供試体を作製する。なお、供試体外周には厚さ5cmの排水層を設けている。
- ②供試体の飽和: 水頭10cmの静水圧で飽和させる。
- ③注入前の透水試験: 1.96kPaの静水圧により定圧透水試験を実施する。
- ④注入試験: 注入圧力は、1step目を1.96kPaとし、次回以降3.92kPaの刻みで段階的に増大させ、注入パイプ(φ30mmの塩ビ管)を通じて供試体中央から水平放射状に注入する。各段階の持続時間は10分間とした。注入試験終了後、注水により注入パイプを約10分間洗浄する。
- ⑤養生: 供試体を飽和させた状態で3日間養生する。
- ⑥注入後の透水試験: 注入前と同じ要領で実施する。注入の管理項目および方法は次のように設定した。

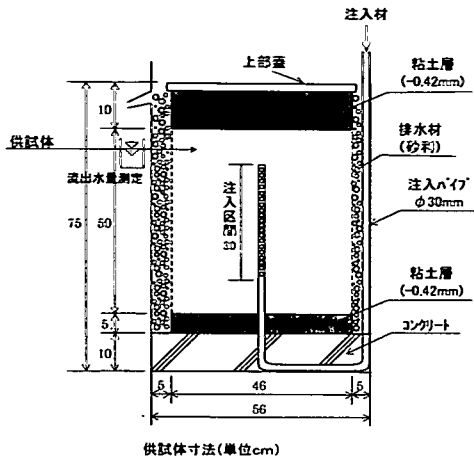


図-3 供試体の寸法

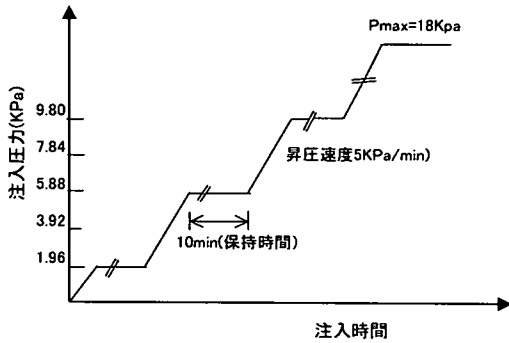


図-4 注入圧力の基本パターン

④注入圧力

本試験に先立ち限界圧試験を実施し、供試体の限界圧力を求め、これを注入圧力の上限とした。水圧を 3.92kPa/step で段階的に増加させて、注入圧力と注入量の関係を調べたところ、注入圧力が 18kPa 程度に達すると流量が急に増加し始めた。

限界圧試験をもとに、図-4 に示す注入圧力パターンを採用することとした。

⑤注入速度<sup>9)</sup>

アースダム等の補修における注入速度は一般に 2l/min/m と規定されており、これより注入区間 30cm に対し、0.6l/min/30cm とした。

⑥注入完了<sup>9)</sup>

注入完了は次に示す条件のいずれかが該当した時とした。

①注入圧力が 18kPa に達し、しかも注入速度が 0.006l/min/30cm 以下になった時。

②注入材が供試体外周の排水層に流出した時。

注入後の注入材の充填率は式 (3)、(4) で与えられる

平均見かけ充填率  $\alpha$  と有効充填率  $\alpha'$  によった。ここに、見かけ充填率とは水分を含めた、充填されたグラウト材全量が供試体の間隙に止まるものと仮定したものである。また有効充填率とは、水分を除いた固形粒子だけが間隙に止まるとしたものである。なお、充填率は本来、体積比での定義が一貫性があるが、本研究では実務での施工管理の利便性を考慮して、 $G, W$  の単位に質量を用いた。

$$\alpha = Q / (\pi \times n \times R^2 \times (1 + \beta) \times H) \quad (3)$$

$$\alpha' = \alpha \times G / (G + W) \quad (4)$$

ここに、

$Q$  : 注入量 ( $\text{cm}^3$ )

$n$  : 間隙率

$R$  : 供試体半径,  $R = 22\text{cm}$

$\beta$  : 損失係数=0.1 とする

$H$  : 注入区間高さ,  $H = 30\text{cm}$

$G$  : グラウト材の固形分 (セメント+カリウム)

$W$  : 水分

注入後、注入パイプを注水により洗浄し、供試体を 3 日間養生したのち、透水試験を実施した。透水係数  $k$  の算定は下式<sup>10)</sup>を用いた。

$$k = \frac{Q}{2\pi \times L \times \Delta h \times t} \times Ln \frac{L}{r} \quad (5)$$

ここに、

$Q$  : 時間  $t$  に対する流出量 ( $\text{cm}^3$ )

$L$  : 試験 (注入) 区間の長さ (30cm)

$\Delta h$  : 水頭差 (cm)

$t$  : 時間 (s)

$r$  : 注入パイプの半径 (1.5cm)

b) 試験結果

表-7 に注入試験結果を示す。

図-5 に注入前と後の透水係数の関係を示すが粘性土系供試体と砂礫系供試体を区別せず、注入前後の透水係数の関係は回帰分析により近似的に次式で表される。

$$k_1 = 0.363 \times k_0^{1.1506} \quad (\text{相関係数 } R = 0.99) \quad (6)$$

ここに、

$k_0$  : 注入前の透水係数 ( $\text{cm/s}$ )

$k_1$  : 注入後の透水係数 ( $\text{cm/s}$ )

今回の試験範囲では、注入前の透水係数  $k_0 = 10^{-2} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$  オーダに対して注入後の透水係数は  $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$

表-7 注入試験結果

試験番号	注入前透水係数 $k_0$ (cm/s)	グラウト材配合番号 <sup>注)</sup>	試験結果		
			注入圧 P (kPa) 注入量 Q (l) 充填率 $\alpha$	注入後透水係数 $k_i$ (cm/s)	$k_i/k_0$
1-B	$1.5 \times 10^{-2}$ (砂礫系)	3	P=9.8 Q=9, $\alpha=33\%$	測定せず*	-
2-B	$1.4 \times 10^{-2}$ (砂礫系)	4	P=3.9~9.8 (Ave. 6.85) Q=1.6, $\alpha=6\%$	$1.1 \times 10^{-4}$	0.08
3-B	$2.4 \times 10^{-2}$ (砂礫系)	5	P=2.0~3.9 (Ave. 2.94) Q=15, $\alpha=38\%$	$4.4 \times 10^{-3}$	0.18
4-B	$2.3 \times 10^{-2}$ (砂礫系)	12	P=2.5~24.5 (Ave. 13.48) Q=2.5, $\alpha=9\%$	$8.0 \times 10^{-4}$	0.35
5-A	$7.6 \times 10^{-4}$ (粘性土系)	5	P=3.9~17.6 (Ave. 10.78) Q=4.0, $\alpha=15\%$	$9.6 \times 10^{-5}$	0.13
6-A	$1.9 \times 10^{-4}$ (粘性土系)	7	P=3.9~15.7 (Ave. 9.80) Q=2.0, $\alpha=6\%$	$9.0 \times 10^{-6}$	0.05
7-A	$6.4 \times 10^{-5}$ (粘性土系)	8	P=3.9~17.6 (Ave. 10.78) Q=2.3, $\alpha=7\%$	$9.0 \times 10^{-6}$	0.14

注) グラウト材配合番号は表-4にしたがった。

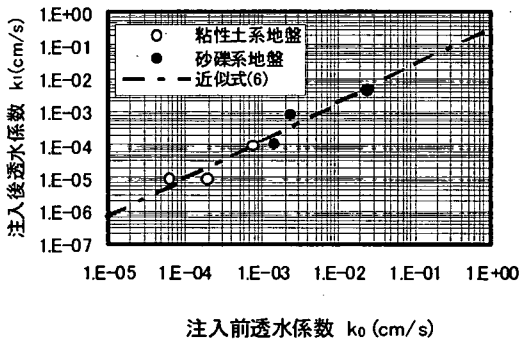


図-5 注入前と後の透水係数の関係

になり、注入前の約 1/3~1/20 倍小さくなり、本グラウト材は砂礫系供試体とともに粘性土系供試体に対しても注入効果が確認できた。

図-6 に注入前後の透水係数と有効充填率の関係を示す。図-7 に間隙比  $e$  と透水係数  $k$  の関係を示す。ただし、間隙比は見かけ充填率  $\alpha$  および有効充填率  $\alpha'$  (式(3), (4)参照) を用いて次式により計算された。

$$e_1 = n_1 / (1 - n_1) \text{ または } e_1' = n_1' / (1 - n_1') \quad (7)$$

$$n_1 = n_0 (1 - \alpha) \text{ (見かけ充填率を用いる場合)} \quad (8)$$

$$n_1' = n_0 (1 - \alpha') \text{ (有効充填率を用いる場合)} \quad (9)$$

ここに、

$e_1, n_1$  : 注入後の見掛け間隙比, 見掛け間隙率 (充

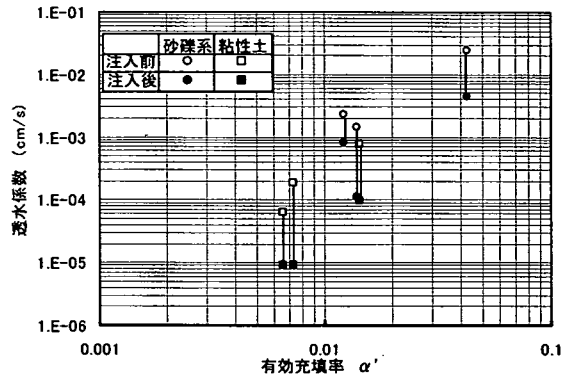


図-6 注入前の透水係数と充填率の関係

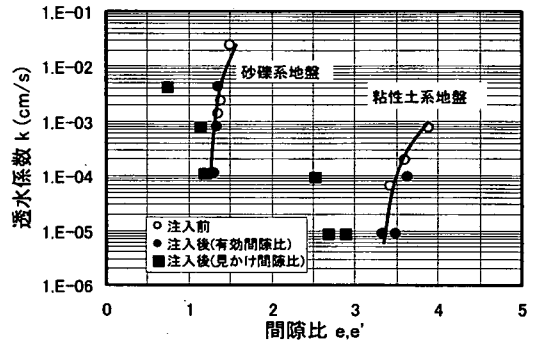


図-7 間隙比と透水係数の関係

填されたグラウト材全量が間隙比を充填・閉塞するものと仮定して計算した値)

$e_1', n_1'$  : 有効間隙比, 有効間隙率 (充填されたグラウト材のうち、水分を除いた固形成分だけを有効成分として算定した値)

$n_0$  : 注入前間隙率

注入前の透水係数が大きいほど有効充填率  $\alpha'$  は大きくなり、グラウト材の固形分による充填性が良いことを示す(図-6)。また、図-7 から次のことが読み取れる。①粘性土系供試体と砂礫系供試体を比較すると、全体的に前者の透水係数が小さいこと、②有効間隙比をみた場合、各地盤に対し、有効間隙比と透水係数は良い相関を示す。(詳細は、図-8, 9参照)

注入効果の評価指標とする注入後と前の透水係数比 ( $k_i/k_0$ ) (表-7 参照) をみると粘性土系供試体は充填率が小さいにも拘わらず、 $k_i/k_0$  は 1/7~1/20 の範囲に変化し、砂礫系供試体の  $k_i/k_0=1/3\sim 1/14$  に比較して注入効果が大きいことがわかる。一般に、砂礫系供試体は平均間隙比が小さいが間隙の粗さは比較的粗く連続性が良いため、透水係数は大きく、グラウト材が間隙へ充填し易い。これに対して粘

性土系供試体は間隙比が大きいにもかかわらず、連続性の悪い、多数の微細間隙からなることに加え間隙水のうち拘束水分が比較的多く、通水に有効な間隙が少なく、その結果として透水係数は小さく、充填率も小さい。その反面、充填率に対する透水性の変化は敏感で小さな充填率で間隙の閉塞効果が大きい。

つまり、もともと透水係数  $k_0$  の小さい供試体は  $k_0$  の大きいものに比べて通水に有効な間隙が少ない。したがって、前者は比較的低い通水率でも通水に有効な間隙の閉塞率は後者に比べて高くなり、透水係数の低下が著しいと推察される。

なお、粘性土系供試体と砂礫系供試体ともに見かけ間隙比と透水係数の相関が見られない(図-7)。

有効間隙比と透水係数の関係を粘性土系供試体と砂礫系供試体を別々に整理し、図-8、9に示す。

両者とも注入前と後の有効間隙比と透水係数の関係は、粘性土系地盤で一部のデータを除いてほぼ同じ曲線上に並んでいることが分かる。このことから供試体は実質的にグラウト材のうちの固形成分による間隙の充填・閉塞効果で透水係数は小さくなると考えられる。

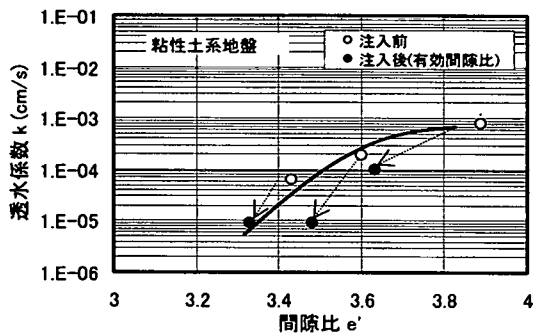


図-8 有効間隙比と透水係数の関係(粘性土系供試体)

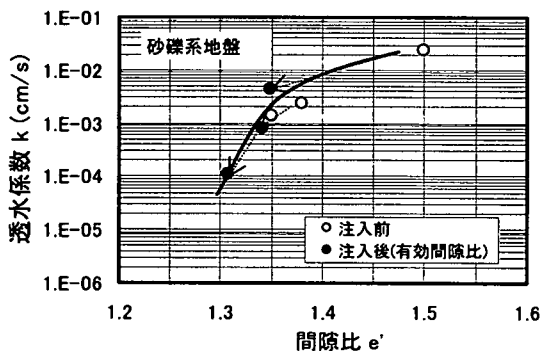


図-9 有効間隙比と透水係数の関係(砂礫系供試体)

#### 4. 浸透長さの推定方法およびグラウチングの設計手法の提案

グラウチングの設計・施工においては、グラウチングの目的や検討地盤の条件(透水性、強度など)に応じて適切な材料を選定するとともに注入範囲を予測することが重要である。従来では対象地盤の透水性のみに基づき経験的に材料を選定する方法<sup>9)</sup>が一般的であり、地盤の透水係数によって、グラウト材の種類が限定される。しかしながら、実際では同じグラウト材を使用しても配合条件によって、グラウト材の流動性が変化する。その結果、注入効果(注入範囲)も違ってくるはずである。つまり、注入効果はグラウト材の粒径等の物性値だけではなくグラウト材の流動性も重要な影響要因と考えられる。

流動性を評価する特性として、注入による浸透長さ(注入範囲)を考慮することができる。まず、室内試験結果から得られた注入量、地盤条件の関係から、次式<sup>1)</sup>により求められた平均浸透長さ( $L_{exp}$ )と透水係数の関係を図-10に示す。なお、 $L_{exp}$ の算定の際、注入材が供試体を全通した場合と途中で閉塞した場合では最大充填率が本来異なるが、本研究ではこの違いを考慮せずに一律に最大充填率0.3を用いた。また、式(3)においても、途中で閉塞した場合には実際の浸透長さを用いて充填率を計算する必要があるが、本研究では全通した場合との違いを考慮せずに一律に供試体半径を用いた。

$$L_{exp} = \left\{ \frac{Q}{(\pi \times n \times \alpha \times (1 + \beta) \times H)} \right\}^{0.5} \quad (10)$$

ここに、

$Q$  : 流量( $\text{cm}^3$ )

$n$  : 間隙率

$\alpha$  : 最大充填率=0.3とする

$\beta$  : 損失係数=0.1とする(実験状況に基づく)

$H$  : 注入区間高さ=30cm(図-3参照)

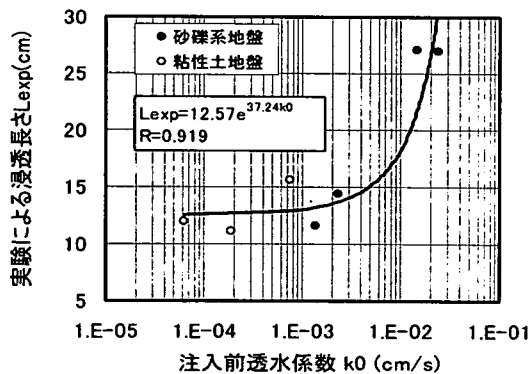


図-10 注入前透水係数と平均浸透長さの関係

粘性土系供試体と砂礫系供試体が異なった変化傾向を示すが概ね透水係数が高いほど浸透長さ  $L_{exp}$  は増大する。

今回の注入条件において、透水係数  $k=10^{-2}$ cm/s では  $L_{exp}=18$ cm,  $k=10^{-3}$ cm/s では  $L_{exp}=13$ cm,  $k=10^{-4}$ cm/s では  $L_{exp}=12.5$ cm 程度の結果になった。

一方、本研究は Buckingham-Reiner の細管内の粘性流理論および Hazen-Poiseuille のピンガム流体の運動式を地盤の間隙内の流れに適用し、注入による浸透長さ（注入範囲）の予測式を導いた。

Buckingham-Reiner の細管内の粘性流は下式<sup>10)</sup>のように表される。

$$Lcal = (P \times R) / (4\eta_f) \quad (11)$$

ここに、

$Lcal$  : 計算による浸透長さ (cm)

$P$  : 注入圧力 (dyn/cm<sup>2</sup>)

$R$  : 細管半径 (cm)

$\eta_f$  : イールドバリュウ (降伏値) (dyn/cm<sup>2</sup>)

地盤内の間隙を細管円筒と仮定し、その細管の平均半径を  $R$  とすると、Hazen-Poiseuille の円筒中の流れから地盤の間隙中を流れる水の平均流速は下式<sup>12)</sup>のように表される。

$$v_{av} = \frac{\rho_w \times I \times R^2}{8\mu} \quad (12)$$

ここに、

$v_{av}$  : 土の間隙中の真の平均流速 (cm/s)

$\rho_w$  : 水の単位容積重量 = 9.8kN/m<sup>3</sup>

$I$  : 動水勾配,  $R$  : 細管の平均半径 (cm)

$\mu$  : 水の粘度 = 10.09 × 10<sup>-4</sup>Pa.s

次に、地盤内の流れの見かけ流速  $v$  と真の流速  $v_{av}$  との関係は次式<sup>13)</sup>で表される。

$$v = \theta \times v_{av} = k \times I \quad (13)$$

ここに、

$$\theta = 1 - (1 - n)^{2/3}$$

$\theta$  : 面積間隙率

$n$  : 体積間隙率

$k$  : 透水係数

$I$  : 動水勾配

式(12)の  $v_{av}$  を式(13)に代入すると次のようになる。

$$v = \frac{\theta \times \rho_w \times I \times R^2}{8\mu} = k \times I \quad (14)$$

$$R = \sqrt{\frac{8\mu}{\rho_w \times \theta}} \quad (15)$$

上記の式(15)は地盤の間隙を細管円筒に等価し、その平均半径  $R$  を間隙率、透水係数および水の粘性係数から換算したものである。

式(11)と式(15)を用いて算定した浸透長さを表-8 に、また浸透長さの計算値と試験結果から求めた実験値の関係を図-11 に示す。

計算値  $Lcal$  は実験値  $L_{exp}$  より約 1.1 倍大きくなる結果を示す。これは計算と実験の条件との違いによるものと考えられる。すなわち、①実際の地盤の粒径や間隙の大きさは複雑で、ランダムに分布しているのに対して計算値では間隙が同じ直径をもつ細管と仮定していること、②計算では、細管の粗さや曲率の相違を考慮できないこと、③地盤への懸濁型グラウト材の浸透に対する抵抗はグラウト材の粘性抵抗と同時に土粒子とグラウト材の超微粒子の間の摩擦抵抗の両方によるものに対して、計算では後者の摩擦抵抗を考慮せず、粘性抵抗だけを影響要因としていること、が主な原因である。

表-8 浸透長さの計算値

試験 No.	供試体の透水係数 $k_0$ (cm/s)	供試体の間隙率(間隙比)	グラウト材の(1.5)バリュウ (dyn/cm <sup>2</sup> )	平均注入圧 <sup>注)</sup> (kPa)	浸透長さ (cm)	
					計算値	実験値
1-B	$1.5 \times 10^{-2}$	0.59 (1.45)	1.5	9.80	27.1	22.1
2-B	$1.4 \times 10^{-3}$	0.57 (1.35)	0.55	6.86	16.1	9.5
3-B	$2.4 \times 10^{-2}$	0.60 (1.50)	0.45	2.94	34.0	28.4
4-B	$2.3 \times 10^{-3}$	0.58 (1.38)	1.2	13.48	18.4	11.8
5-A	$7.6 \times 10^{-4}$	0.80 (3.89)	0.45	10.78	18.5	12.7
6-A	$1.9 \times 10^{-4}$	0.78 (3.60)	0.55	9.80	7.0	9.1
7-A	$6.4 \times 10^{-5}$	0.77 (3.43)	0.4	10.78	6.2	9.8

注) 平均注入圧は各圧力段階の平均値である。

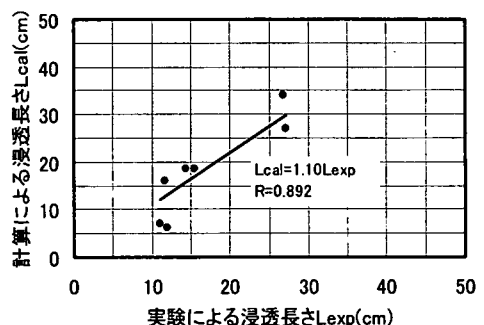


図-11 浸透長さの計算値と実験値の比較

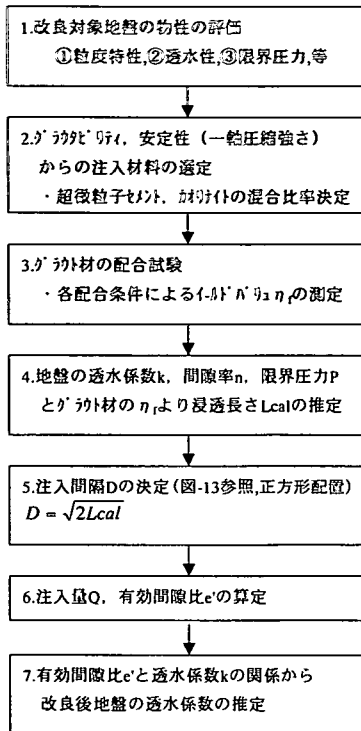


図-12 グラウチングの設計の手順

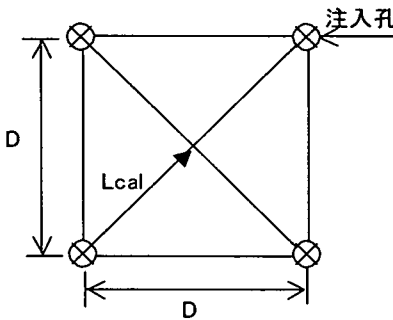


図-13 注入間隔と浸透長さの関係

しかしながら、浸透長さの計算値は実験値に比較してやや大きくなるものの、両者の相関は見られ、計算による浸透長さの概略的な推定値としては有効であると考えられる。

以上の結果から、グラウチングの基本設計において、グラウト材の配合設計およびグラウチングの設計手法を図-12に示すフローのように提案する。

すなわち、①改良地盤の粒度特性や透水性に関する評価を行い、②これに対応するグラウチング材から注入材を選定し、③配合試験、注入試験によるグラウト材の配合設計を行い、④地盤の透水係数、間隙率、限界圧およびグラウト材の

イールドバリューにより浸透長さを推す。次に⑤推定した浸透長さから注入間隔を設計し、⑥注入量および注入後の有効間隙比を算定する。さらに⑦有効間隙比と透水係数の関係から注入後の透水係数を推定するのである。

## 5. 結論

本研究は、従来、普通セメント（最大粒径約 80 μm）の注入による地盤の遮水性の改善が困難とされている透水係数  $10^{-3}$  cm/s オーダ以下の地盤を対象に、粒径の小さい超微粒子セメント（最大粒径 10 μm）とカオリナイト（最大粒径 5 μm）を混合した懸濁型グラウト材に着目して、室内注入試験により注入効果を検討した結果から次のことが判明した。

① 充填率は透水係数  $k_p = 10^{-2} \sim 10^{-3}$  cm/s の砂礫系供試体に対して 20% 以上になり、注入後の透水係数  $k_i$  は  $(k_i/k_p) = 0.1$  程度に小さくなっている。また、 $k_p = 10^{-4}$  cm/s オーダの粘性土系供試体では充填率が 10% 以下と小さいにもかかわらず、注入後の透水係数の低下率  $(k_i/k_p)$  は 0.1 ~ 0.05 で、 $k_p = 10^{-2} \sim 10^{-3}$  cm/s の供試体と同程度以上の注入効果であった。このことから粘性土系供試体に対しても本研究で提案した懸濁型グラウト材の遮水性向上効果が確認できた。

② 砂礫系供試体に比較して粘性土系供試体の透水係数は小さく、充填率も小さい。その反面、充填率に対する透水係数の変化率は大きく、小さな充填率で間隙の閉塞効果が大きい。これは、もともと透水係数  $k_0$  の小さい供試体は  $k_0$  の大きいものに比べて通水に有効な間隙が少ない。したがって、粘性土系供試体は比較的低い充填率でも通水に有効な間隙の閉塞率は後者に比べて高くなり、透水係数の低下が著しいと推定される。

③ 粘性土系供試体や砂礫系供試体の透水係数の低下は実質的に供試体内に充填された水分を含めたグラウト材ではなく、そのうちの固形成分だけの充填によって間隙が閉塞され、透水係数は低下するのである。

④ グラウト材の浸透長さを Buckingham-Reiner のピンガム流体の運動式および Hazen-Poiseuille の円筒中の流れに関する式を地盤の間隙内の流れに適用して、注入圧、地盤の透水係数およびグラウト材のイールドバリューを関数とした予測式を導き、これに基づいた、グラウト材の配合設計およびグラウチングの設計手法を提案した。

今後の課題は、実際の複雑な地盤条件に対して、本研究で提案した懸濁型グラウト材の注入特性を確認するとともに、浸透長さの推定式の妥当性を評価することが重要である。

## 参考文献

- 1) 増田民夫, 千代田将明, 河澄守, 大野睦雄, トンデユク・フィ・フン, 安部章正: 超微粒子セメントとカオリナイトを用いた懸濁型グ



- ラウト材の注入効果について、薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム、発表論文集、pp. 251～256、(社)土質工学会、1993年。
- 2) 坪井直道：薬液注入工法の実際、pp. 144～148、鹿島出版会、1976年。
  - 3) 関陽太郎：建設技術者のための岩石学、pp. 1～17、共立出版、1976年。
  - 4) ジークライト(株)：ジークライトの製品特性(パンフレット)
  - 5) 日鐵セメント(株)：スーパーファインの特性(パンフレット)、(1990年)
  - 6) 日特建設(株)、NCC技術資料GT-003：セメント・ベントナイトグラウト性状試験報告書、p. 7、1976年。
  - 7) 国分正胤編：土木材料実験(改定四版)、pp. 316～322、技報堂出版、1997年。
  - 8) 川崎種一：回転粘度計による粘性測定の実際、NEW FOOD INDUSTRY Vol. 22 No. 4～6 (1980) 別刷、pp. 1～30、東機産業(株)、1980年。
  - 9) 水資源開発公団試験所(第三試験課、地質試験室報告、第8510号)、グラウトの調査設計法に関する研究、〔Ⅲ〕総括、昭和60年度、pp. 55～91。
  - 10) 地盤工学会：地盤調査法、pp. 329～333、1995年
  - 11) 喜田大三、炭田光輝、川地武、辻博和：泥水シールド工法における砂礫地盤の泥水の品質管理、第19回土質工学研究発表会、pp. 1413～1414、1984年。
  - 12) 松尾新一郎、河野伊一郎：地下水位低下工法、pp. 20～22、鹿島出版会、1975年。
  - 13) 林正夫：フィルダムの着岩部の安定性向上に関する考察、第10回ダム技術講演討論会テキスト、日本大ダム会議、pp. 1～22、1978. 3。

(2000. 12. 22 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE GROUTING FOR LOW-PERMEABILITY GROUND

Mutsuo ONO, Duc Phi Oanh TRAN and Atsumi SUZUKI

This study focuses on grounds with coefficients of permeability of  $10^{-3}$  cm/s or less in which grouting using ordinary cement is difficult, laboratory mixing tests and grouting tests were conducted on mixture of ultra fine-grained cement and kaolinite clay. Based on these tests, the authors were able to propose mixing proportions appropriate to the actual permeability of the ground. In addition, the authors have leaded an equation for estimating the penetration length of grouting. Furthermore, the method for design of the conditions of grout and pitch of grouting pipes, according to the estimated penetration length of grouting, is proposed.