

第 11 章 土の透水試験

1. はじめに

1.1 土の透水性とは

土中における自由水の移動のしやすさを表す土の性質を透水性と呼ぶ。土の透水性は、透水係数として定量的に表されるが、土の種類、密度や飽和度などによって大きく異なる。本試験は締固めた試料および乱さない試料を対象に、飽和状態における透水係数を求めることを目的としている。室内供試体で現場条件を再現できない場合は、現場透水試験を用いるのが適切である。

本章では、締固めた供試体の透水係数を求める室内透水試験の方法を解説している。

1.2 試験方法の概略

動水勾配 i と土中を流れる流速 v (cm/s) との間に、水の流れが層流である限り比例関係が成り立つ。この関係はダルシー (Darcy) の法則と呼ばれ、図-11.1 に示すように土試料中を水位の高いところから低いところに向けて流れる浸透水の流速 v は、次式で表される。

$$v = ki = k \frac{\Delta h}{L} \times 100 \quad (11.1)$$

上式の比例定数 k が透水係数 (m/s) を表す。なお、式 (11.1) の流速 v は見かけの流速である (p.101, 6.5 参照)。また、供試体の断面積を A (cm²) とすれば、単位時間の流量 q (cm³/s) は、次式で表される。

$$q = kiA = k \frac{\Delta h}{L} A \times 100 \quad (11.2)$$

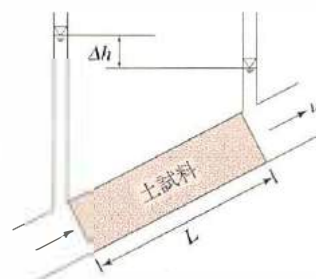


図-11.1 土中の水の流れ

土の室内透水試験には、定水位透水試験と変水位透水試験がある。対象とする土の種類、透水性の大きさにより適用が異なる。図-11.2 にそれぞれの試験方法の概略を示す。



図-11.2 室内透水試験方法の概略

1.3 結果の利用

現地に対応した締固めた供試体を用いることから、アースダムや堤防、道路、埋立地といった人工造成地盤の透水性、浸透水量を推定することに利用される。

1.4 結果の目安

定水位か変水位かどちらの試験法を適用するかを判断するには、透水係数の概略値を知っておく必要がある。表-11.1 を参考にして土の種類から経験的に算定することもできる。また、後述するヘーゼン (Hazen) の式 (p.99) など粒径等を使って推定する方法がある。

表-11.1 透水係数の目安

透水係数 k (m/s)											
10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰
実質上不透水		非常に低い		低い		中位		高い			
粘性土		微細砂、シルト 砂-シルト-粘土混合土				砂および礫			清浄な礫		

2. 試験器具

2.1 共通器具

- (1) 供試体作製器具

① ノギス

② はかり：ひょう量 10 kg, 最小読取値 1 g のもの(第 2 章 2.1 (p.8) 参照)。

③ 締めめ器具：第 9 章 2. (p.72) 参照。

④ 含水比測定器具：第 3 章 2.1 (p.18) 参照。
- (2) 供試体の飽和度を高める器具

① 真空ポンプ：真空度 80 kPa 以上を保ち得るもの。

② 水浸減圧容器：図-11.5 参照。

③ 減圧吸水装置：図-11.7 参照。
- (3) 計測器具

① 鋼製ものさし

② ストップウォッチまたは時計

③ 温度計：最小目盛 1℃ 以下のもの。

2.2 定水位透水試験器具 (図-11.3 参照)

フィルターとしてセラミックや金属製の多孔板を用いる場合には、目詰まりしていないか注意する。

- ① 透水円筒：内径 10 cm, 高さ 12 cm のもの。

② 透水円筒カラー

③ 有孔板

④ 金網：425 μm のもの。

⑤ フィルター

⑥ 越流水槽

⑦ メスシリンダー：1 cm^3 単位で水量が測定できるもの。

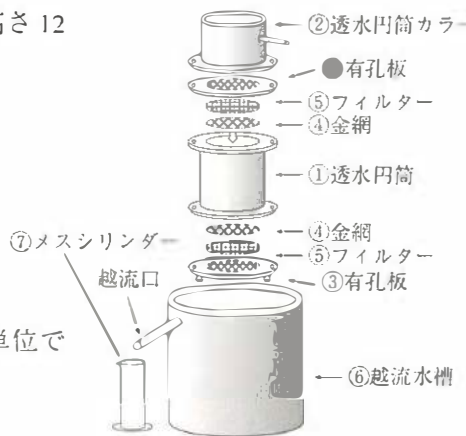


図-11.3 定水位透水試験器具

水浸減圧容器は主に定水位透水試験に用いる供試体を、減圧吸水装置は変水位透水試験に用いる供試体を飽和させるのに用いる。

金網の網目は 425 μm を標準とするが、フィルターとしての多孔板にセラミックまたは金属性多孔板を用いる場合、金網を省略してもよい。

越流水槽は供試体上面より約 1 cm 以上の高さで水位を一定に保ち得る越流部のあるもの。

フィルター材に粗砂を用いる場合は、良く水洗いしたものを用いる。その粒度は次の条件を満たしたものを用いる。

$$D_{f15} / D_{k5} \leq 4$$

$$5 < D_{f15} / D_{15} \leq 20$$

D_{f15} ：フィルターとして用いる粗砂の 15% 粒径

D_{15}, D_{k5} ：試料の 15% および 85% 粒径

2.3 変水位透水試験器具 (図-11.4 参照)

金網については、フィルター材の粒径も小さくなるためフィルター材が通らない程度のもの。

- ① 透水円筒：内径 10 cm, 高さ 12 cm のもの。

② スタンドパイプ：目盛りのついた長さ 1 m 程度の透明の管で内径は 0.5 cm または 2.5 cm のもの。

③ 有孔板

④ 金網：250 μm あるいはそれ以下のもの。

⑤ フィルター：定水位の場合と条件は同じ。

⑥ 貯水槽：試験開始前にスタンドパイプに水を補給するためのもの。

⑦ 越流水槽

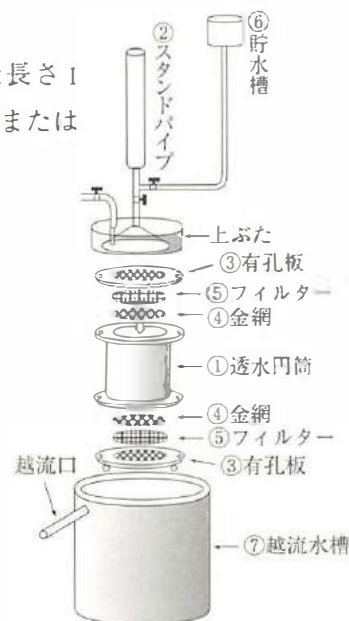
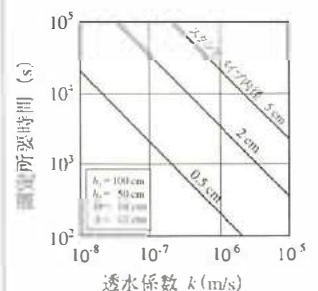


図-11.4 変水位透水試験器具

スタンドパイプの内径を選ぶ際の参考として、式(11.8)で算出した関係を下図に示す。



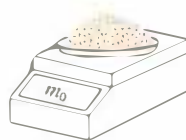
変水位透水試験におけるスタンドパイプ内径と所要時間

3. 供試体の作製

3.1 準備

- ① 含水比が均一になった試料を準備する。
- ② 試料の最大粒径(mm)をはかる。
- ③ 準備された試料の質量 m_0 (g)をはかる。
- ④ その試料の一部を用い土粒子の密度 ρ_s (g/cm³)を測定する。
- ⑤ 透水円筒の内径 D_m (mm)をはかり断面積 A (cm²)を求める。
- ⑥ 透水円筒を有孔板に固定する。
- ⑦ フィルター材を底に敷き、その上に金網を置く。
- ⑧ 有孔板、フィルター材、金網を含む全体の質量 m_2 (g)をはかる。
- ⑨ 底にある金網の上から透水円筒の表面までの高さを3ヶ所はかり、その平均から L_m (cm)を求める。

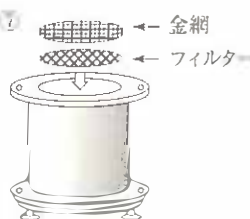
③



⑤



⑥



※ 第2章 3.2 (pp.10~11) に従って準備する。

※ 予想される最大粒径近くのふるいをいくつか準備し、どのふるいにすべて通過するかを調べ、最大粒径を決める。

※ ρ_s は第3章 3. (p.19) 参照。

試料	土質名称	砂質泥	容器 No.	58
	最大粒径 mm	19	透水内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.652	円筒長さ L_m cm	12.73
スタンバイ	① 内径 cm		質量 m_2 g	1519
	断面積 A cm ²		試験用水	水道水
供試体作製、 飽和方法	JISA 1210 呼び名Eの方法で ρ_{sat} の90% になるように締固めた。 水浸脱気法			

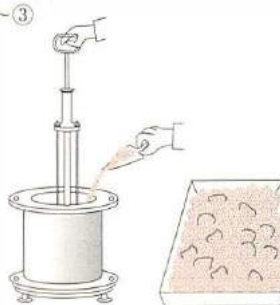
※ p.102, 図-11.16 参照。

3.2 供試体の
締固め

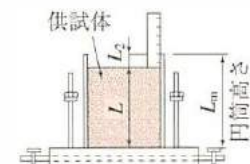
粒径別の片寄りと密度のばらつきに注意する。

- ① 試料を締固め一層分だけ入れ締固める。
- ② 締固めた層の上面をへらなどでかき起こし、層間のなじみを良くするようにしておく。
- ③ ①、②の作業を繰り返し、透水円筒にほぼいっぱいになるように締固める。
- ④ 供試体の表面が平面になるように調整し、3.1⑨の作業と同様に供試体の上面から透水円筒の上面までの高さ L_2 を3ヶ所の平均から求める。供試体の高さは $L = L_m - L_2$ で得られる。
- ⑤ 直ちに全体の質量 m_1 (g)をはかる。供試体の質量 m (g)は $m = m_1 - m_2$ で得られる。
- ⑥ 残った試料を用いて試験前の供試体の含水比 w (%)を求める。
- ⑦ 供試体上面にフィルター材を敷き、その上に金網を置く。
- ⑧ その上に有孔板を載せて透水円筒に固定する。

①~③



④



※ 1層の厚さは締固め後で1.5 cm、または最大粒径の1.5倍のうち大きい方をとる。

※ 締固め仕事量はあらかじめ決めておく(第9章、表-9.1 (p.71) 参照)。

※ 第9章「突固めによる土の締固め試験」を行った供試体をそのまま用いることもある。この場合はモールドの高さが供試体の高さとなる。

※ 乱さない試料を用いる場合は、試料と円筒の間に水みちができないようにすきまをペーパースト止水材で密閉する。この場合、供試体の断面積、質量、長さ、含水比はあらかじめ求めておく。

供試体寸法	供試体 No.	21	供試体の状態	試験前		試験後 ³⁾
	直径 D cm	10.00		(供試体 + 透水円筒) 質量 m_1	g	3291
	断面積 A cm ²	78.54		供試体質量 $m = m_1 - m_2$	g	1772
	長さ L cm	12.73		湿潤密度 $\rho_t = m/V$	g/cm ³	
	体積 V cm ³	1000		乾燥密度 $\rho_s = \rho_t / (1 + w/100)$	g/cm ³	
				間隙比 $e = (\rho_s / \rho_w) - 1$		
			飽和度 $S_r = w \rho_s / (e \rho_w)$	%		
含水比	容器 No.	45	52	63	試験後 ³⁾	
	m_a g	311.5	307.6	309.3		
	m_b g	302.9	299.6	300.4		
	m_k g	103.5	103.4	103.5		
	w, w_t %	4.3	4.1	4.5		
		平均値	4.3			

※p.102, 図-11.16 参照。

4. 試験方法

4.1 定水位透水試験

(1) 供試体の飽和度を高める方法

- ① 供試体をセットした透水円筒を、脱気水を満たした水浸減圧容器に静かに入れる (図-11.5 参照)。
- ② 水浸減圧容器をセットし、真空ポンプにつなぐ。
- ③ 真空ポンプで容器内を徐々に減圧し、**透水円筒から気泡が出なくなるまで減圧を続ける。**
- ④ 気泡が出ないことが確認できたら、徐々に容器内の圧力を大気圧まで戻す。
- ⑤ ①～④の作業で供試体が飽和状態に達した後、水浸減圧容器の蓋を取り、**透水円筒に透水円筒カラーを取りつける。**

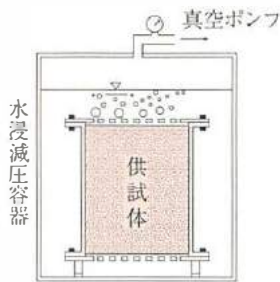


図-11.5 水浸減圧容器による脱気法

※水浸するだけで供試体を飽和状態にできる際、粗砂の供試体では①～④の作業を行わなくてよい。

(2) 透水試験の方法

試料の上面が注水により浸食しないように注意する。

- ① 水を満たした越流水槽に透水円筒を空気が入らないようにしながら静かに移し替える (図-11.6 参照)。
- ② 透水円筒カラーに注水し、越流口から越流させ、給水側の水位を一定に保つ。
- ③ 越流水槽から越流する様子を調べ、越流量がほぼ一定になることを確認する。
- ④ **メスシリンダーを越流口においた時間 t_1 (s) から、はずすまでの時間 t_2 (s) をストップウオッチではかり、その間にメスシリンダーに流れ込んだ水量で流出水量 Q (cm³) を求める。**
- ⑤ ④の測定を 3 回以上行う。
- ⑥ ④の条件を保ち、**透水円筒カラーの水位と越流水槽の水位の差 h (cm) をはかる。**
- ⑦ **越流水槽の水温 T (°C) を④、⑤の作業毎に測定する。**
- ⑧ 測定が終れば越流水槽から透水円筒を取り出して、試験後の供試体の**含水比 w_t (%) を測定する。**

※流出水量は、質量を測定することで求めてもよい。

※保水性の小さい試料の場合は試験後の含水比測定を省いてもよい。

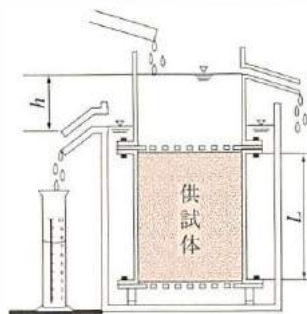


図-11.6 定水位透水試験による測定

測定 No.		1	2	3	5
測定開始時刻	t_1				
測定終了時刻	t_2				
測定時間	$t_2 - t_1$ s	180	210	180	ストップウォッチで測定した。
定水位	水位差 h cm	15.0	15.0	15.0	
	透水量 Q cm ³	472	510	460	
	T ℃に対する透水係数 k_T m/s				
変水位	時刻 t_1 における水位差 h_1 cm				
	時刻 t_2 における水位差 h_2 cm				
	T ℃に対する透水係数 k_T m/s				
測定時の水温	T ℃	19	19	19	

※p.102. 図-11.16 参照。

4.2 変水位透水試験

(1) 供試体の飽和度を高める方法

- ① 透水円筒に上ぶたを取りつけ、減圧吸水装置に連結する (図-11.7 参照)。
- ② バルブ B、C を開いて給水瓶に水を満たす。
- ③ バルブ B、C を閉じ、バルブ A を開き、アスピレーター瓶を通じて真空ポンプで透水円筒内を減圧する。

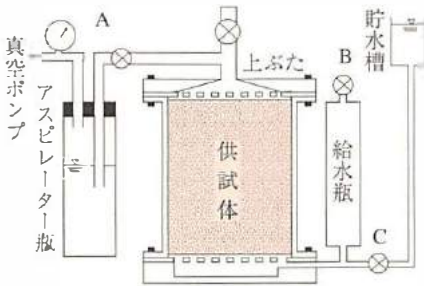


図-11.7 減圧吸水装置による脱気法

※減圧または煮沸により十分脱気した水を使用する

- ④ バルブ A を閉じ、バルブ B を徐々に開いて給水瓶の水を供試体に浸透させる。
- ⑤ アスピレーター瓶に気泡が出なくなるまで②～④の作業を繰り返す。
- ① 供試体を飽和させる作業が終れば、減圧吸水装置をはずし、透水円筒の上ぶたにスタンドパイプと貯水槽を連結し、水を満たした越流水槽に沈める (図-11.8 参照)。

※急激に真空度を高くすると、供試体内の気泡が膨張し、かえって気泡が出にくくなり、供試体を乱すことにもなるので、約 30 分間隔で段階的に真空度を高めて脱気するのがよい。

スタンドパイプを上蓋に取りつける際、スタンドパイプから水を出しながら取りつくと気泡が上ぶたに入りにくい。

(2) 透水試験の方法

- ② スタンドパイプの内径をはかり、断面積 a (cm²) を求める。
- ③ スタンドパイプに越流水槽の水面から測った高さ h_1 (cm) および h_2 (cm) を設定する。
- ④ バルブ E を閉じ、バルブ D を開いて貯水槽の水をスタンドパイプの高さ h_1 より高いところまで水を満たし、バルブ D を閉じる。
- ⑤ バルブ E を開いて、スタンドパイプの水面が h_1 および h_2 を通過

※長時間にわたる計測になる場合、通気を許す状態で軽く蓋をするか、水面に油を浮かすなどしてスタンドパイプ内の水の蒸発を防ぐ。

試験初期の動水勾配が大きいと、土粒子が移動し、透水係数が変化するため、粒径分布を考慮して h_1 の高さを設定する。

- した時刻 t_1 および t_2 を記録する。
- ⑥ ④、⑤の操作を繰り返し、 h_1 、 h_2 を通過する時間 ($t_2 - t_1$) がほぼ一定となることを確認した後、3 回以上の測定を行う。
- ⑦ 越流水槽の水温 $T(^{\circ}\text{C})$ をはかる。
- 透水円筒をはずし、試験後の供試体の含水比 $w_f(\%)$ を測定する。

保水性の小さい試料の場合は試験後の含水比測定を省いてもよい

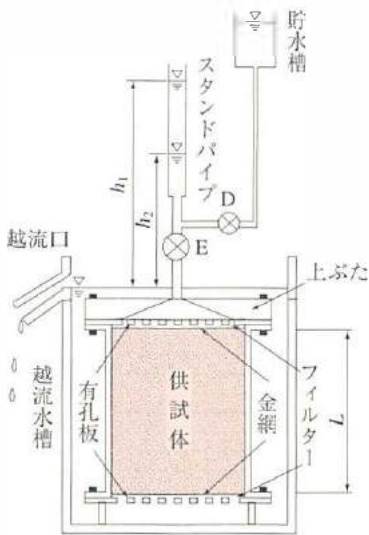


図-11.8 変水位透水試験による測定

測定 No	1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1	11:53:00	14:42:00	9:43:00		
測定終了時刻 t_2	14:41:00	18:39:00	17:15:00		
測定時間 $t_2 - t_1$ (s)	10080	14220	27120		
水位差 h (cm)					
透水量 Q (cm ³)					
$T^{\circ}\text{C}$ に対する透水係数 k_T^{20} (m/s)					
変水位					
時刻 t_1 における水位差 h_1 (cm)	171.4	171.5	171.7		
時刻 t_2 における水位差 h_2 (cm)	156.0	150.6	133.4		
$T^{\circ}\text{C}$ に対する透水係数 k_T^{20} (m/s)					
測定時の水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	18.0	18.0	18.0		

p.102. 図-11.17 参照。

5. 結果の整理

供試体の湿潤密度 $\rho_l(\text{g/cm}^3)$ 、乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$ 、間隙比 e 、飽和

5.1 供試体の初期状態

度 $S_r(\%)$ を次式で算出する。

$$\rho_l = \frac{m}{AL} = \frac{m}{V} \tag{11.3}$$

$$\rho_d = \frac{\rho_l}{1 + \frac{w}{100}} \tag{11.4}$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \tag{11.5}$$

$$S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} \tag{11.6}$$

保水性の小さい試料の場合は飽和度の計算を省いてもよい。

ここに、 m : 供試体の質量(g) (↔ 3.2 ⑤)
 A : 供試体の断面積(cm²) (↔ 3.1 ⑤)
 L : 供試体の長さ(cm) (↔ 3.2 ④)

V : 供試体の体積 (cm³) (= AL)
 w : 含水比 (%) (⇨ 3.2 ⑥)
 ρ_s : 土粒子の密度 (g/cm³) (⇨ 第 3 章 3. (p.19) 参照)
 ρ_w : 水の密度 (g/cm³) (⇨ 実質的に 1 でよい)

供試体 No. 21				試験前	試験後 ²⁾
直径 D cm	10.00	供試体 + 透水円筒質量 m_1	g	3291	
断面積 A cm ²	78.54	供試体質量 $m = m_1 - m_2$	g	1772	
長さ L cm	12.73	湿潤密度 $\rho_v = m/V$	g/cm ³	1.772	
体積 V cm ³	1000	乾燥密度 $\rho_d = \rho_v / (1 + w/100)$	g/cm ³	1.699	
		間隙比 $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$		0.561	
		飽和度 $S_r = W \rho_s / (e \rho_w)$	%	20.3	

⇨ p.102, 図-11.16 参照。

測定時の水温 T °C に対する透水係数 k_T (m/s) を次式で求める。

5.2 定水位透水試験による透水係数

$$k_T = \frac{L}{h} \cdot \frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \times 100 \quad (11.7)$$

ここに、 h : 水位差 (cm) (⇨ 4.1 (2) ⑥)
 Q : 流出水量 (cm³) (⇨ 4.1 (2) ④)
 $(t_2 - t_1)$: 測定時間 (s) (⇨ 4.1 (2) ④)

⇨ 2009 年 11 月より日本工業規格 (JIS) では、透水係数の単位 (cm/s) を (m/s) に統一した。式中の「1/100」は cm を m に換算するための係数である。
⇨ 透水試験中の水位差が一定の場合、ダルシーの法則 (式 (11.2)) から

$$Q = qL = k_i A t \times 100 \\ = k \frac{h}{L} A t \times 100$$

これより式 (11.7) が得られる。

測定 No.	1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1					
測定終了時刻 t_2					
測定時間 $t_2 - t_1$ s	180	210	180		
水位差 h cm	15.0	15.0	15.0		
透水量 Q cm ³	472	510	460		
T °C に対する透水係数 k_T ³⁾ m/s	2.83×10^{-4}	2.62×10^{-4}	2.76×10^{-4}		
変水位 時刻 t_1 における水位差 h_1 cm					
時刻 t_2 における水位差 h_2 cm					
T °C に対する透水係数 k_T ³⁾ m/s					
測定時の水温 T °C	19	19	19		
温度補正係数 η_T / η_{15}	0.902	0.902	0.902		
15°C に対する透水係数 k_{15} m/s	2.55×10^{-4}	2.36×10^{-4}	2.49×10^{-4}		
代表値 k_{15} m/s		2.5×10^{-4}			

透水係数の計算は有効数字 3 桁で、 k_{15} の代表値は有効数字 2 桁で報告すればよい。

ストップウォッチで測定した。

2.76E-4 と表示してもよい。

⇨ p.102, 図-11.16 参照。

試験方法の表から求める。

測定時の水温 T °C に対する透水係数 k_T (m/s) を次式で求める。

5.3 変水位透水試験による透水係数

$$k_T = 2.303 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{100} \quad (11.8)$$

ここに、 a : スタンドパイプの断面積 (cm²) (⇨ 4.2 (2) ②)
 $(t_2 - t_1)$: 測定時間 (s) (⇨ 4.2 (2) ⑤)
 h_1 : 時刻 t_1 における水位差 (cm) (⇨ 4.2 (2) ⑤)
 h_2 : 時刻 t_2 における水位差 (cm) (⇨ 4.2 (2) ⑤)

⇨ 透水試験中に水位差が変化する場合、ダルシーの法則 (式 (11.2)) から

$$dQ = k \frac{h}{L} A dt \times 100$$

断面積 a のスタンドパイプ中の水位が dt 時間に dh だけ低下したとすると

$$dQ = -a dh$$

$$上式より \\ -\frac{dh}{h} = k \frac{A}{La} dt \times 100$$

時刻 t_1 から t_2 の間に水位が h_1 から h_2 まで低下したとして、式を積分すると

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{100}$$

自然対数を常用対数に直すと、式 (11.8) が得られる。

測 定 No	1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1	11:53:00	14:42:00	9:43:00		
測定終了時刻 t_2	14:41:00	18:39:00	17:15:00		
測定時間 $t_2 - t_1$ s	10080	14220	27120		
定水位					
水位差 h cm					
透水層 Q cm ²					
$T^{\circ}\text{C}$ に対する透水係数 $k_T^{(1)}$ m/s					
水位					
時刻 t_1 における水位差 h_1 cm	171.4	171.5	171.7		
時刻 t_2 における水位差 h_2 cm	156.0	150.6	133.4		
$T^{\circ}\text{C}$ に対する透水係数 $k_T^{(2)}$ m/s	6.22×10^{-8}	6.09×10^{-8}	6.20×10^{-8}	6.20E-8と表示してもよい。	
測定時の水温 T $^{\circ}\text{C}$	18.0	18.0	18.0		
温度補正係数 η_T/η_{15}	0.925	0.925	0.925		
15 $^{\circ}\text{C}$ に対する透水係数 k_{15} m/s	5.75×10^{-8}	5.63×10^{-8}	5.74×10^{-8}		
代表値 k_{15} m/s		5.7×10^{-8}			

p.102, 図-11.17 参照。

5.4 温度 15 $^{\circ}\text{C}$ に対する透水係数 k_{15} は $T^{\circ}\text{C}$ に対する水の粘性による補正係数 η_T/η_{15} を表-11.2 から求め、次式で算出する。

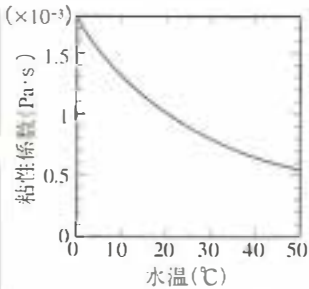
$$k_{15} = k_T \cdot \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \tag{11.9}$$

ここに、 η_T, η_{15} : 水温が $T^{\circ}\text{C}$ 、15 $^{\circ}\text{C}$ における水の粘性係数 (Pa $\cdot$ s)

表-11.2 温度 15 $^{\circ}\text{C}$ に対する $T^{\circ}\text{C}$ の粘性係数の比 η_T/η_{15}

$T^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.575	1.521	1.470	1.424	1.378	1.336	1.295	1.255	1.217	1.181
10	1.149	1.116	1.085	1.055	1.027	1.000	0.975	0.950	0.925	0.902
20	0.880	0.859	0.839	0.819	0.800	0.782	0.764	0.748	0.731	0.715
30	0.700	0.685	0.671	0.657	0.645	0.632	0.620	0.607	0.596	0.584
40	0.574	0.564	0.554	0.544	0.535	0.525	0.517	0.507	0.498	0.490

流体の粘性係数は、温度が高くなるほど、小さくなる。



温度と水の粘性係数の関係

温度と水の粘性係数の関係は p.34 表-4.2 参照。

6. 結果の活用と応用

6.1 試験で得られた透水係数と地盤の透水性

室内試験で求められる透水係数は、その供試体のもつ物性値としてとらえられる。自然状態の地盤では、地層の変化や水みちといった局所的問題ももっている。乱さない試料を用いて室内透水試験を行っても、その供試体が地盤を代表している保証はなく、局所的な物性値を広い範囲の地盤に適用するのは問題がある。そのため、室内試験結果の利用範囲が限定されることとなり、結果の利用としては人工的な埋め戻しや盛土の材料としての透水性、または地盤の局所的な透水性の評価として用いられることが多い。現場の透水係数、流量の算定などの透水問題を取り扱う場合には、現場透水試験¹⁾を用いるのが一般的である。

締固め試験で作成された試料を用いて透水試験を行うと、図-11.9 のように最適含水比を境にして締固め時の含水比の違いによって著しい透水係数の変化が認められる³⁾。これは、フィルダム施工でコア材料の締固めを行う際の重要な検討項目の一つであり、指針の一つとして提案されている。

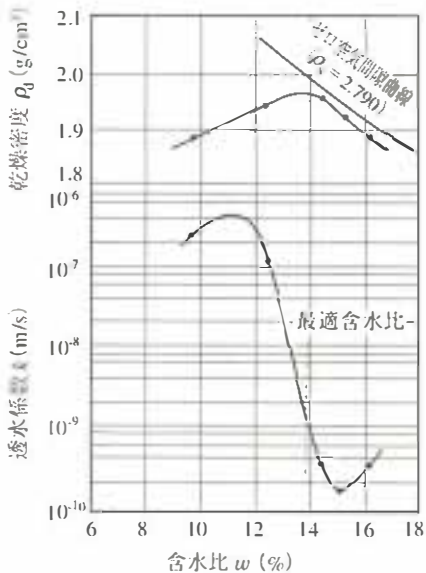


図-11.9 締固めと透水係数の関係

1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.377～422，2004。

2) 土質工学会：土質試験結果の解釈と適用例（第一回改訂版），pp.325～365，1979。

6.2 土の透水性に影響する因子

土の透水性、透水係数に影響する因子は、土自身もつ性質・状態や浸透水の性質などに分けられる。以下にこれらの関係について示す。

(1) 土粒子径

土粒子径が大きくなるほど透水係数 k (m/s) は大きくなり、粒子径の2乗に比例することが得られている。代表的なヘーゼン (Hazen) の式を式(11.10)に示す。

$$k = C_h (0.7 + 0.03t) D_{10}^2 \times \frac{1}{100} \quad (11.10)$$

ここに、 D_{10} : 有効径 (cm)、 t : 温度 (°C)、 C_h : 係数 (表-11.3 参照)

その他にクレージャー (Creager) は代表径として、20%通過径 D_{20} を用いて透水係数との関係を表-11.4 のように示した。

表-11.3 係数 C_h の値

C_h	砂の状態
150	均等な粒子の場合
116	細砂の緩く締った状態
70	細砂のよく締った状態
60	大小粒子混合の場合
46	非常に汚れている場合

表-11.4 Creager による D_{20} と透水係数 k^3

D_{20} (mm)	k (m/s)	土質	D_{20} (mm)	k (m/s)	土質
0.005	3.00×10^{-8}	粗粒粘土	0.18	6.85×10^{-5}	細砂
0.01	1.05×10^{-7}	細粒シルト	0.20	8.90×10^{-5}	〃
0.02	4.00×10^{-7}	粗粒シルト	0.25	1.40×10^{-4}	〃
0.03	8.50×10^{-7}	〃	0.30	2.20×10^{-4}	中砂
0.04	1.75×10^{-6}	〃	0.35	3.20×10^{-4}	〃
0.05	2.80×10^{-6}	〃	0.40	4.50×10^{-4}	〃
0.06	4.60×10^{-6}	微細砂	0.45	5.80×10^{-4}	〃
0.07	6.50×10^{-6}	〃	0.50	7.50×10^{-4}	〃
0.08	9.00×10^{-6}	〃	0.60	1.10×10^{-3}	粗粒砂
0.09	1.40×10^{-5}	〃	0.70	1.60×10^{-3}	〃
0.10	1.75×10^{-5}	〃	0.80	2.15×10^{-3}	〃
0.12	2.6×10^{-5}	細砂	0.90	2.80×10^{-3}	〃
0.14	3.8×10^{-5}	〃	1.00	3.60×10^{-3}	〃
0.16	5.1×10^{-5}	〃	2.00	1.80×10^{-2}	細礫

(2) 間隙比

土粒子間の間隙が大きいくほど透水性は大きくなる。間隙構造は、密度や粒子径、粒子形状、粒度の分布によって異なるが、これまで間隙比または間隙率の関数に比例することが実験的に得られている。図-11.10 に実験に基づく3つの間隙比関数で表した透水係数の関係を示す。コゼニー (Kozeny) は土粒子を球と考え、ヘーゼン・ポアズユ (Hazen-Poiseuille) の式を用いて透水係数は間隙比関数 $e^3/(1+e)$ に比例するという関係を導いている。

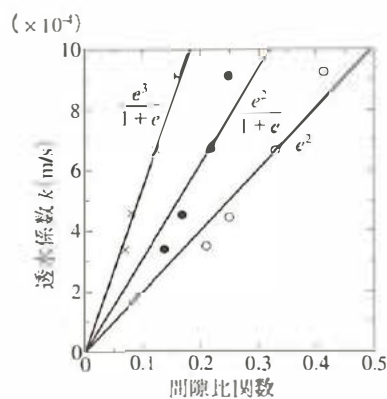


図-11.10 透水係数と間隙比関数⁴⁾

(3) 飽和度

供試体の飽和度が低下すると、図-11.11 に示すように、得られる透水係数は小さくなる。また、特殊な装置を用いて不飽和透水係数を求めた結果を図-11.12 に示す。不飽和時にもダルシーの法則は成り立ち、不飽和透水係数は土の保水性 (水分量と土中に発生する負の間隙水圧の関係) に強く影響をうける。

※ヘーゼンの式は簡易的に

$$k = 100 D_{10}^2 \times \frac{1}{100}$$

と示されることが多い。これは $t = 10^\circ\text{C}$ で C_h を平均的に 100 を採用していることになる。

3) 土質工学会：掘削のポイント、土質工学会、p.180、1967

※間隙率 n (%) は次式で定義される (p.17、図-3.2 参照)。

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 = \frac{e}{1+e} \times 100$$

※間隙比と透水係数の関係

$$k_1 : k_2 = \frac{e_1^3}{1+e_1} : \frac{e_2^3}{1+e_2}$$

4) Lambe, T. W. and Whitman, R. V. : Soil Mechanics, John Wiley & Sons, pp.110~111, 1948.

※不飽和透水係数については、p.101 の💡を参照。

※第7章土の保水性試験を参照。

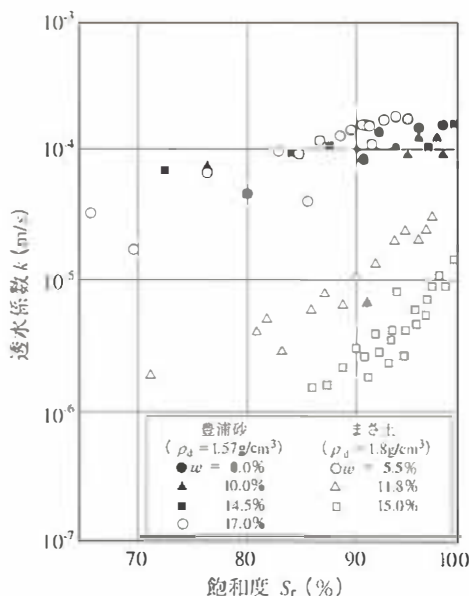


図-11.11 飽和度と透水係数の関係⁵⁾

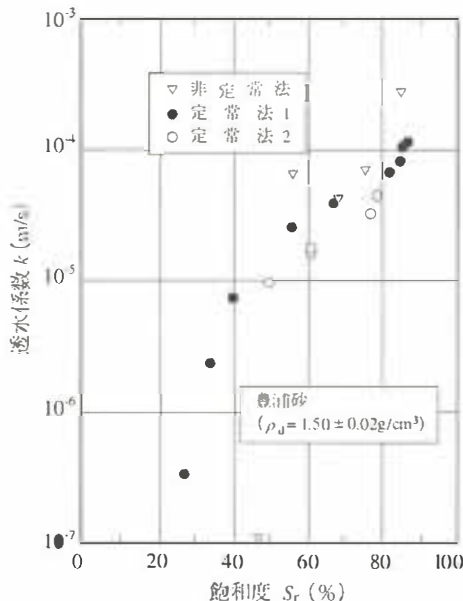


図-11.12 不飽和透水係数⁶⁾

5)河野伊一郎・西垣誠：室内試験に関する2,3の考察, 土質工学会論文報告集, Vol.22, No.4, pp.181~190, 1982.

6)不飽和地盤の透水性評価に関する研究委員会, 地盤工学会, p.87, 1997.

(4) 浸透水の粘性係数

透水係数は, 6.3 の式(11.11)~(11.13)のように浸透水の粘性係数 η に反比例する。また, 粘性係数は水温が高いほど小さくなるため (p.98, 5.4 参照), 水温が高いほど透水係数は大きくなる。透水係数は浸透する液体の粘性係数および液体の温度に影響を受ける。一般には, 水を対象とするため, 上の透水試験では 15℃における透水係数 k_{15} で表す。

粘性係数と透水係数の関係

$$k_1 : k_2 = \frac{1}{\eta_1} : \frac{1}{\eta_2}$$

透水係数は粘性係数に反比例する。

6.3 透水係数の推定式

透水係数 k (m/s) は, 以下の式で間接的に推定できる。

(1) テイラー (Taylor) の式 (コゼニー (Kozeny) 式と同形)

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} C_k \frac{e^3}{1+e} D_s^2 \times \frac{1}{10^4} \quad (11.11)$$

(2) ツンカー (Zunker) の式

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} C_z \left(\frac{n}{100-n} \right)^2 D_w^2 \times \frac{1}{10^4} \quad (11.12)$$

(3) テルツァーギ (Terzaghi) の式

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} C_t \left[\frac{n/100 - 0.0013}{3\sqrt{1-n/100}} \right]^2 D_{10}^2 \times \frac{1}{10^4} \quad (11.13)$$

式(11.10)のヘーゼンの式でも推定できる。

式(11.11)~(11.13)は, 粘性係数 η と水の単位体積重量 γ_w の SI への単位換算 (1/100) と k を cm/s から m/s に換算する (1/100) ため, 1/10⁴ が換算係数となっている。

たとえば文献7)によると C_k : 極めて角張った砂で 1.0, 丸味を帯び, 揃っている川砂 3.6, ガラス球 5.2 C_z : ガラス球 2.3, 丸味を帯び, 揃っている川砂 1.75 C_t : 丸味のある砂 10 ($U_c = 1.18$ のとき), 角張った川砂 6 ($U_c = 1.40$), ローム質川砂 2.6 ($U_c = 5.84$)

7)久保田敬一・河野伊一郎・宇野尚雄: 透水設計へのアプローチ, 鹿島出版会, pp.77-79, 1976.

ここに, η : 水の粘性係数 (Pa · s)

e : 間隙比

n : 間隙率 (%)

γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m³)

C_k, C_z, C_t : 形状係数⁷⁾

D_s : 土粒子の直径 (cm)

D_w : $\sum 1/(p_i/D_i)$

p_i : ある粒径範囲を代表する平均粒径 D_i の試料が全試料に対する含有率

6.4 ダルシーの法則の限界

ダルシーの法則は層流状態の浸透流に適用されるため、どのような条件の範囲で浸透流が層流であるのか把握しておく必要がある。土の種類によっては、図-11.13に示すように動水勾配 i が大きくなると乱流状態に移移するため、透水性の高い試料の場合には動水勾配と流速が比例する範囲、すなわち層流範囲を確認しておくのがよい。土の種類による流れの状態を表-11.5に示しておく。

表-11.5 土の種類と浸透流の状態⁸⁾

試料	砂質土、シルト	砂		砂礫	礫		
		細	粗		中	粗	巨
$D_{10}(\text{mm})$	0.075~0.02	0.25	0.6	2.0	9.5	26.5	75
浸透流の状態	通常の i では常に層流	緩い砂では $i < 0.2 \sim 0.3$ 、密な砂では $i < 0.3 \sim 0.5$ で層流			実質的には常に乱流		

ダルシーの法則の限界には、透水性の高い粗粒土に限るわけではなく、粘土の場合にも生じる。粘土の場合、砂の場合と逆に動水勾配が小さい場合に問題となる。図-11.14に示すように動水勾配が小さいと流れないか、流れても比例値よりも流れが小さくなるといわれている。しかし、通常の間隙水の動きはほとんどの場合、ダルシーの法則に従う。

6.5 見かけの流速

土中を浸透する浸透水は、実際には図-11.15に示す土粒子間の間隙を流れることから、間隙および土粒子部を含めた全断面積を流れる流速よりも速くなる。ダルシーの法則として知られる土中を流れる流速は、土の全断面を流量断面として考えており、このときの流速は「見かけの流速」であることに注意しなければならない。土中の間隙部を流れる流速は間隙断面が一定でなく厳密に求めることが困難なため、「見かけの流速」を間隙率または有効間隙率（透水に有効な断面部分）で除した流速が「真の流速」に近いと考えられている。

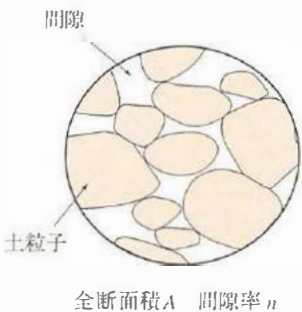


図-11.15 土の断面

層流とは、水の流れの中にインキを細い管から注入したとき、インキが渦を起こさず糸を引いたように線状に流れるような水の流れをいう。

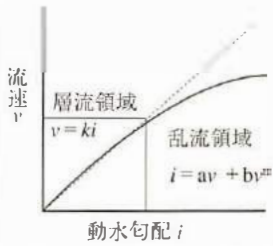


図-11.13 動水勾配と流速の関係

8) 土質工学会：土質試験法（第2回改訂版）、pp.334~371、1979。

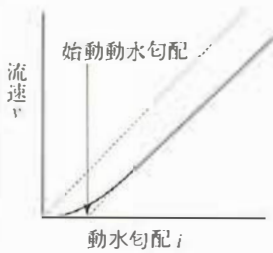
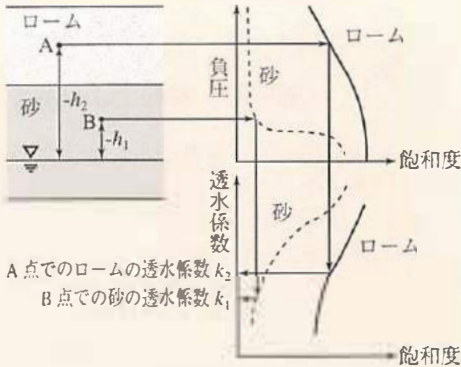


図-11.14 低い動水勾配における粘土の透水挙動と流速の関係



＜不飽和透水係数とは＞

透水係数には、飽和透水係数と不飽和透水係数がある。不飽和透水係数は土粒子と水と空気からなる不飽和土中の水の流れ易さを表すものであり、間隙が飽和されている状態の透水係数が飽和透水係数である。透水係数は土の保水性に大きく影響し、土中の間隙水圧の低下により指数的に減少する。その低下は土の種類などによって異なり、図のような砂とロームの成層地盤の場合、飽和透水係数の大きい砂の方が不飽和状態では透水係数が小さくなる逆転現象も珍しくない。不飽和土中を浸透する場合にも、ダルシーの法則は成り立ち、供試体内に定常流を作り出し透水係数を求める定常法や、時間的に変化する流れ（非定常流）から求める非定常法などが提案されている。



7. 設問

- 1) ダルシーの法則について説明せよ。また、この法則はどのような流れに対して成り立つか。
- 2) 定水位透水試験と変水位透水試験の適用の違いについて説明せよ。
- 3) 実質上、不透水であるとは透水係数がどれくらいをいうか説明せよ。
- 4) 透水係数に影響を与える因子を挙げよ。
- 5) 透水試験を行う前に、十分に飽和させる必要があるのはなぜか説明せよ。
- 6) 水温と透水係数の間にはどのような関係があるか説明せよ。
- 7) 透水係数を間接的に推定する方法を挙げよ。
- 8) 真の流速、見かけの流速とは何か説明せよ。

8. データシートの記入例

JIS A 1218
品名: 水素水

上の透水試験(水位比、含水率)
用いた規格: 基準番号: 記載される。

測定年月日: 2009.8.7

測定件名: ○○工事材料試験

試験者: 西島 誠二

試料番号(深さ) No.2 (GL±0.00 ~ -0.50m)

土質別称	砂質砂	透水性 Na	58
最大粒径 mm	19	内径 D _i cm	10.00
粒数百分含量 P _n (%)	2.652	外径 L _e cm	12.73
標準偏差 s _p cm		質量 m _s g	1519
スタンバイ	質量 c _m g	試験用水	水道水

供試体作製: JISA 1210 呼び名 E の方法で P_{ave} の 90% にるように転削めた。
飽和法: 水浸れ状態

供試体 No.	211	試験後	試験後
質量 W _D cm	10.00	(供試体+透水容器) 質量 m ₁ g	3291
断面面積 A _C cm ²	78.54	供試体質量 m ₂ mg	1772
縦径 L _v cm	12.73	湿潤密度 ρ _{wet} Mg/m ³	1.772
注: 単位 g/cm ³	1000	乾燥密度 ρ _d = (1-w)/P _a g/cm ³	1.699
		孔隙比 e = (ρ _s /P _a) - 1	(0.58)
		空隙度 V _v = w/(e + P _a) %	20.3

試 験 前

試 験 後	1	2	3	4	5
容積 V _o	A5	52	63		
m ₁ g	311.5	307.6	309.3		
m ₂ g	302.9	299.6	300.4		
m ₃ g	103.5	103.4	103.5		
W _r %	4.3	4.1	4.5		
平均値		4.3			

測定 No

測定開始時間
測定終了時刻 t

測定時間 t	180	210	180
電圧 E ₀ V cm	15.0	15.0	15.0
透過水量 Q _t ml	472	510	460
透水係数 k _f m/s	2.83 × 10 ⁻⁸	2.62 × 10 ⁻⁸	2.76 × 10 ⁻⁸
透水係数 k _f m/s			2.76E-8 と使用してもよい。
透水係数 k _f m/s			
測定時の水温 T ₁ °C	19	19	19
温度補正係数 f _T	0.902	0.902	0.902
修正した透水係数 k _f m/s	2.55 × 10 ⁻⁸	2.36 × 10 ⁻⁸	2.49 × 10 ⁻⁸
代表値		2.5 × 10 ⁻⁸	

所記事項

試料の保水性が低いので、試験後の供試体質量と含水比の測定を省略した。

1. 実土は試験の場合
2. 土質別、構成、一一致などを含む。
3) 測定中の透水試験は測定を省略すること。
4. $k_f = \frac{Q}{A \cdot L} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \frac{1}{100}$
5. $k_f = \frac{Q}{A \cdot L} \cdot \log \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{1}{100}$
 $A = d_r \cdot \pi / 4$

図-11.16 定水位透水試験の記入例

[illegible]

図-11.17 変水位透水試験の記入例



＜砂利は、細粒土より水を通しにくい？＞

乾いた砂利層の上に細粒土からなる層が分布しており、両方の層とも傾斜している。地表の細粒土に降雨が降り、浸透水が細粒土層内に流れ込んできても、なぜか砂利層まで水が流れ込まずに、細粒土層の中を水は流れていく。では、砂利層は細粒土より水を通しにくいのか？

これは砂利層と細粒土層の毛管圧の違いが原因して発生する現象である。細粒土は砂利より粒径が小さいため、砂利の毛管圧よりも大きい。そのため、砂利層との境界まで水が流れてきたとしても、細粒土の毛管圧の方が大きいので水は砂利層内には引き込まれずに、傾斜している層に沿って水は流されて行く。しかし、細粒土層が飽和すると毛管圧はなくなるが、砂利層の毛管圧が働いているため、今度は砂利層内に水が流れ込んでくることになる。古墳などに、このような地下水制御を行ったものが見られる。

