

土の透水試験

高田 徹*

* TAKATA Toru、株式会社設計室ソイル 東京都中央区日本橋 3-3-12-4F

1. はじめに

土の透水性は、重要な性質の一つで、河川・海岸堤防、フィルダムや基礎地盤からの漏水、井戸からの揚水、地下水位以下の掘削に伴う排水、斜面の安定に影響する浸透流など、地盤工学の多くの問題に関わってくる。

一方、戸建住宅の建設では、経済的理由があるせいか、土の透水試験を実施することはほとんどない。しかし住宅地盤でも、土の透水性や水に起因して検討すべきケースはあり、十分な検討を行わなかったせいで結果的に損することもあり得る。

例えば、過去に宅地内の一部で水はけが悪いといった相談を受けたことがある。この要因は、これまで使用していた比較的大型な貯留槽を撤去する際に固化材等を用いて埋め戻したため、その部分の透水性が周囲と異なって低くなったからだとの調査で分かったが、これも水の透水性に起因した問題の一つである。また、地下室付きの住宅建設で、適切な止水対策を行わずに地下水位以下の掘削を行ったせいで基礎底板部を緩ませたり、仮設土留めの隙間から地下水が逸出して隣地の宅地を沈下させるといった事故もある。事前に土の透水性を見極め、適切な対策（例えば、仮設的な止水注入）を行えば未然に事故を防ぐこともできたりする。さらには、近年問題視されている宅地の陥没事故は、土の透水性に起因して土の細粒分が洗掘されることで陥没に至ったりする。

土の透水性は、住宅地盤であまり馴染まないと思うかも知れないが、広義には圧密現象も土の透水性と深い関連がある。また土の透水係数は、土質とも関連性がある。「土

の透水試験」は、土の透水性、すなわち土中における自由水の移動のしやすさを測定するための試験である。本稿では、当試験の最低限知っておいて欲しい内容や留意点についてまとめた。

2. 土の透水

図-1 に示すような断面積 A 、長さ（透水距離） L の土中を水位差 h の状態で左から右に定常的に流れているとする。この水の流速 v は、流れが生じている区間の動水勾配 i に比例する。これがダルシーの法則の内容で、式 1 のように示される。

$$v = k \frac{h}{L} = ki \quad (1)$$

また、単位時間当たりの水量 q は、式 2 で得られる。

$$q = vA = kiA \quad (2)$$

式 1、式 2 中の比例定数 k を透水係数と呼び、水の流れやすさを示す値で、m/s、cm/s の単位を用いる。

一般に、粘土よりも砂の方が透水係数は大きくなる。この値が大きいことは水を通しやすく、逆に小さいことは水を通しにくいことを表している。土の種類別による透水係数の値は、概ね表-1 のようである。

透水係数の概略値を土の粒度分布や間隙率から求める式は多く提案されている。参考まで、式 3 にヘーゼン（Hazen）の簡易公式を、表-2 にクレイガー（Creager）によって実測した試料の有効径 D_{20} の値と透水係数の関係を示しておく。

$$k = C_h D_{10}^2 \text{ (cm/s)} \quad (3)$$

ここに、 C_h : 定数 (50~150)、 D_{10} : 有効径 (10%通過径) (cm)

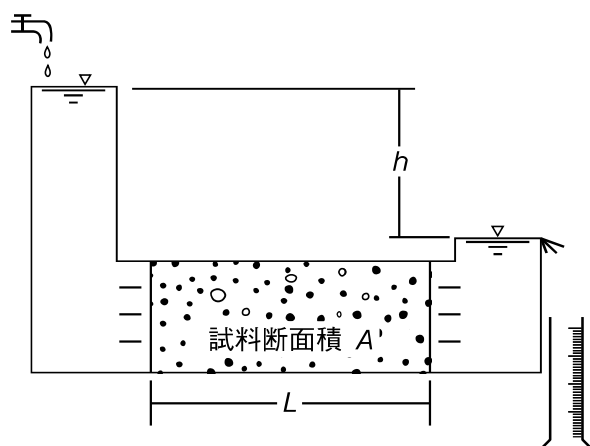


図-1 土中の水の流れと水頭差

表-1 土の透水性と適用される透水試験

透水性	透水係数の範囲 k (cm/sec)	土 質
高 い	10^{-1} 以上	れき
中 位	$10^{-1} \sim 10^{-3}$	粗砂、中砂、細砂
低 い	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	極微砂、シルト質砂、ゆるいシルト
きわめて低い	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	かたいシルト、粘土質シルト、粘度
不透水	10^{-7} 以下	完全な均一粘度

表-2 クレーガーによる粒径 (D_{20}) と透水係数の関係

D_{20} (mm)	k (cm/s)	土質分類
0.005	3.00×10^{-6}	粗粒粘度
0.01	1.05×10^{-5}	細粒シルト
0.02	4.00×10^{-5}	粗粒シルト
0.03	8.50×10^{-5}	
0.04	1.75×10^{-4}	
0.05	2.80×10^{-4}	
0.06	4.60×10^{-4}	極微粒砂
0.07	6.50×10^{-4}	
0.08	9.00×10^{-4}	
0.09	1.40×10^{-3}	
0.10	1.75×10^{-3}	
0.12	2.60×10^{-3}	微粒砂
0.14	3.80×10^{-3}	
0.16	5.10×10^{-3}	
0.18	6.85×10^{-3}	
0.20	8.90×10^{-3}	
0.23	1.40×10^{-2}	
0.30	2.20×10^{-2}	中粒砂
0.35	3.20×10^{-2}	
0.40	4.50×10^{-2}	
0.45	5.80×10^{-2}	
0.50	7.50×10^{-2}	
0.60	1.10×10^{-1}	粗粒砂
0.70	1.60×10^{-1}	
0.80	2.15×10^{-1}	
0.90	2.80×10^{-1}	
1.00	3.60×10^{-1}	
2.0	1.80	細礫

3. 土の透水試験方法

透水係数を得るための室内試験法は、比較的透水性の大きい試料に用いられる「定水位透水試験」と、透水性の小さいものに対して行う「変水位透水試験」の2種類に分けられる。

3.1 定水位透水試験法

図-2 に定水位透水試験の概略を示す。まず、供試体上部の水面を一定位置に保持しながら給水を行う。そして供試体を通じた水との水位差 h を一定に保ちながらあふれる水の量をメスシリンダーで測定できるようにする。ある程度水を流して定常状態になっていれば、ダルシーの法則が成立しているので、式2がそのまま利用できる。 t 時間に供試体中を流れる水量 Q を測定することにより、

$$Q = qt = kiAt = k \frac{h}{L} At \quad (4)$$

となるため、式5により透水係数 k が求められる。

$$k = \frac{Q}{At} \frac{L}{h} \quad (5)$$

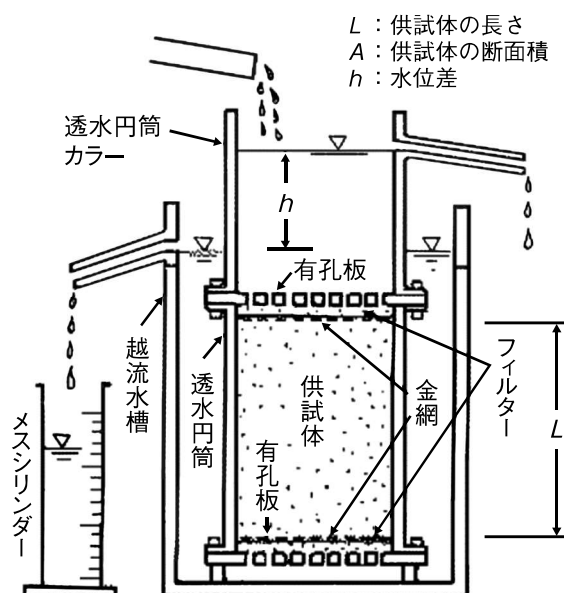


図-2 定水位透水試験の概略図¹⁾

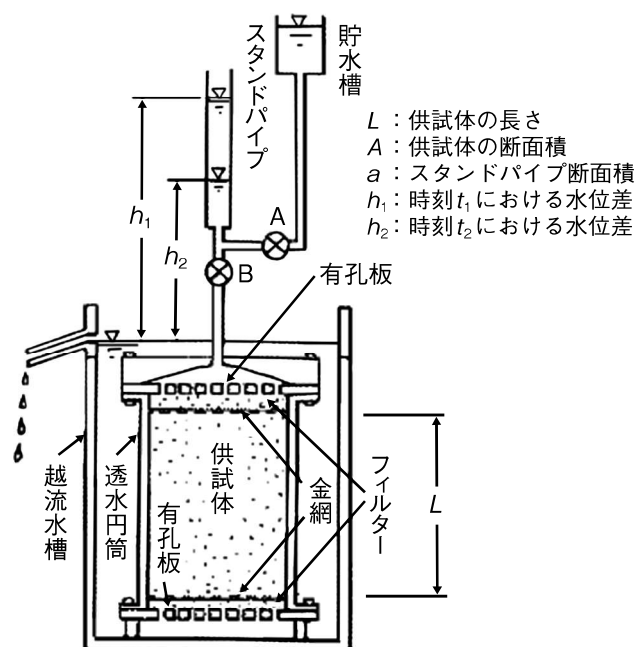


図-3 変水位透水試験の概略図¹⁾

3.2 変水位透水試験法

図-3 に変水位透水試験の概略を示す。定水位測定試験が給排水面を常時一定にして試験するのに対し、変水位透水試験は、給水面が時間の経過と共に徐々に下がろうとし、この水位変化と時間を測定するのが特徴である。

当試験は、図-3 に示すように、任意の時間 t_1 から t_2 の間にスタンドパイプ内の水位が、 h_1 から h_2 に低下する状態を計測する。なお、スタンドパイプの断面積 a は、供試体の透水性が低い場合には小さく、高い場合には大きいものを選択し、スタンドパイプ内の水位降下量の計測が容易となるように配慮する。

断面積 a のスタンドパイプの水位が dt 時間に、 dh だけ低下したとすると、その水量 dQ は、

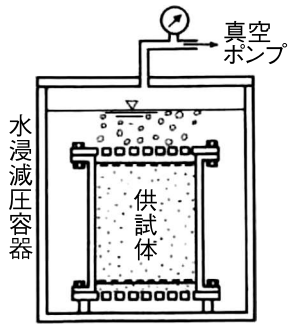


図-4 水浸脱気法

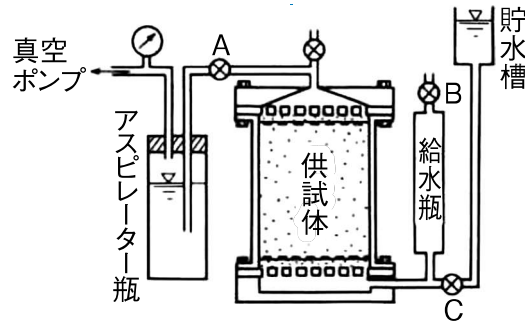


図-5 給水脱気法

表-2 温度 15℃の透水係数に補正する粘性係数の比

T(℃)	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

$$dQ = -a \cdot dh \quad (6)$$

となる。またこの水量は、式3より式7のように書くことができる。

$$dQ = k \frac{h}{L} A \cdot dt \quad (7)$$

パイプ内の水の減少量（式6）は、供試体の水量（式7）に等しいので、

$$-adh = kA \frac{h}{L} dt \quad (8)$$

この式を変数分離すると、

$$-\frac{1}{h} dh = kA \frac{1}{aL} \cdot dt \quad (9)$$

これを試験開始時のから終了時まで積分すると、

$$-\int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{h} dh = kA \frac{1}{aL} \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (10)$$

が得られる。この積分を行えば透水係数を求める式11（自然対数表示）、式12（常用対数表示）が得られる。

$$k = \frac{L \cdot a}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (11)$$

$$k = 2.30 \frac{L \cdot a}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (12)$$

3.3 試験時の留意事項

① 供試体の飽和

試験を行う上で最も注意することは、供試体の飽和度を高める操作にある。礫や粗砂などでは、それほど問題としないが、それ以外の土質材料では不飽和の部分が存在すると透水係数に影響し、透水係数を小さく見積もる結果となる。供試体の飽和度を高める方法には真空ポンプで脱気する水浸脱気法（図-4）と吸水

脱気法（図-5）がある。なお試験水については、水道水ではなく脱気水を用いる。

② 供試体の不均質な締め固め

供試体の試料は均質なことが条件で透水係数を算出するため、不均質になっていると透水に差異が出てしまい精度に大きな影響を与えてしまう。試料の混合不十分、透水円筒に投入する際の粒径別分離、いくつかの層に分けて締め固める際の密度のばらつきや各層の分離がないように注意する必要がある。

また、乱れの少ない試料を用いる際には、供試体周面沿いの漏水が特に問題になるので、適切な止水材を用いてすき間を完全に充填しなければならない。

③ 水温

土の透水性は、浸透させる水の粘性係数に反比例する。粘性係数は、水温の影響を受ける。透水係数は15℃を基準温度として表される。温度 T で試験したときの透水係数 k_T を、基準温度15℃に対して式13で補正すれば、統一的な比較ができる。

$$k_{15} = k_T \cdot \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \quad (13)$$

ここに、 η_T/η_{15} は、温度15℃の透水係数 k_{15} を求めるための補正係数で表-2から求める。

4. おわりに

冒頭でも述べたように、土の透水試験は住宅建設では馴染みが低い。しかし、建設工事におけるトラブルの多くは、土中に存在する水の挙動が関係していることが多く、水に関する知識は重要である。この浸透現象は地盤工学の重要な諸問題に関連するので知っておいて損はない。

なお本稿では、室内試験法の特集として、土の透水試験を紹介したが、大きな粒径の礫を含む土が対象となったり、試料採取が困難な場合、地盤が不均質で代表試料の選定が困難な場合には、現場透水試験が適切である。その際には、参考文献2を参照されたい。

5. 参考文献

- 1) ㈱地盤工学会：土質試験の方法と解説、1997.11.
- 2) ㈱地盤工学会：地盤調査の方法と解説、pp.512-615,2013.3