

透水試験における飽和度の確認方法に関する一考察

An Aspect on the Verification Methods of Degree of Saturation during the Proposed Hydraulic Conductivity Test

石 田 哲 朗 (いしだ てつろう)

東洋大学助教授 工学部環境建設学科

1. はじめに

従来の透水試験器よりも簡便で、一度に五つの供試体の飽和透水試験を実施することができ、透水する段階、または透水した後でも、供試体はそのままで定水位透水試験、変水位透水試験を選択し直すことができる試験器を提案した¹⁾。この試験を実施する際にはチャンバーに設置する供試体に外圧を与えて、試験器外部に設置した間隙水圧計により、間隙圧係数 B 値²⁾を計測し、供試体の飽和状態を確認できる。透水係数が飽和度に依存して変化することは不飽和土の領域でよく示される浸透特性曲線（体積含水率 θ あるいは飽和度 S_r 、比透水係数 k_r の関係）からも明らかである。ところで、間隙圧係数 B 値については、三軸試験法の中では0.95以上（粘土では0.9以上）であれば飽和状態にあると見なされているが、明確に B 値と飽和度の関係は示されていない³⁾。

そこで、本報では提案する飽和透水試験において得られた B 値がどの程度の飽和度にあるのかを、背圧を作用させて供試体の飽和度を高める理論的な方法⁴⁾から得た結果と比較検討した。また、これらの飽和度の確認方法を実施すると、得られる透水係数へ影響を及ぼすかを検証し、それぞれの適合性について考察を行った。

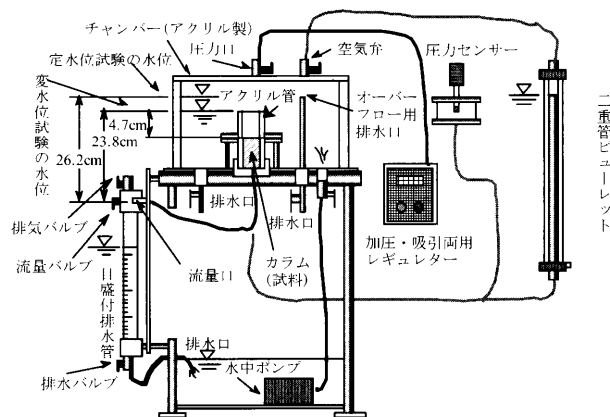
2. 試験装置と試験方法

提案している透水試験装置の概略を図—1に示す。試験器の高さは110 cmで、試験装置上部のチャンバー（内径28 cm、高さ16 cm、体積9 850 cm³）に供試体を設置する加圧型である。底部の水槽（体積23 000 cm³）には、水中ポンプが設置してあり給排水に使用する。試験器前面に取り付けた目盛付き排水管は可動式で、定水位透水試験時の水頭差は1.0 cm 刻みで12.0 cm までと、最大26.2 cmの水頭差を与えることが可能である。変水位透水試験時には最大50 kPa までの加圧ができる。

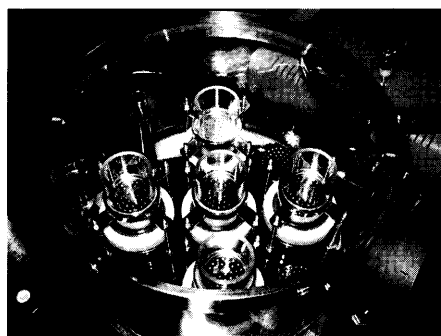
チャンバー内の供試体寸法、直径5.0 cm、高さ5.1 cmで体積は100 cm³である（写真—1）。このサイズのカラムは、ランマーによって試料を締め固めることはできないが、締め固めたモールドから試料を抜き出し、カラム内に成形することはでき、突き棒によって所定の密度に調整し供試体を容易に作製することもできる。不攪乱試料の試験を行う際には市販されているコアサンプラーの採土缶と寸法が同一なため、深さ方向に連続して採取した

不攪乱試料をそのまま用いて供試体とすることが可能である。供試体の組立は、カラムにゴム製のOリングを取り付け回転させるだけで、試料受器に固定できるように工夫しており、通水断面を容易に確保できる。また、チャンパー内に供試体を設置する加圧型であるために、間隙圧係数 B 値の計測や二重管ビューレットを介在させて背圧を加えることも容易である。なお、提案している透水試験装置、試験方法や間隙圧係数 B 値の計測方法の詳細は文献 1) を参照していただきたい。

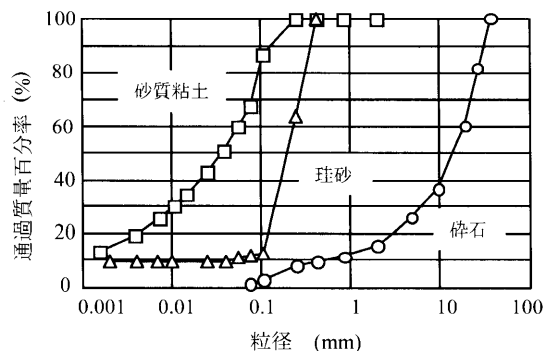
実験には、図—2に示した粒径分布を持つ珪砂、碎石と砂質粘土を用いた。測定手順は、供試体をセットし底面から浸透させ、チャンパー内の所定の水位まで給水する。この水位と二重管ビューレット内の水位を一致させ、真空脱気を1時間行い、背圧 ΔP （圧力が低いと計測が難しいので196.2 kPa）をかけて供試体内に流入した水量 ΔV を計測し、式(1)から飽和度を換算する⁴⁾。



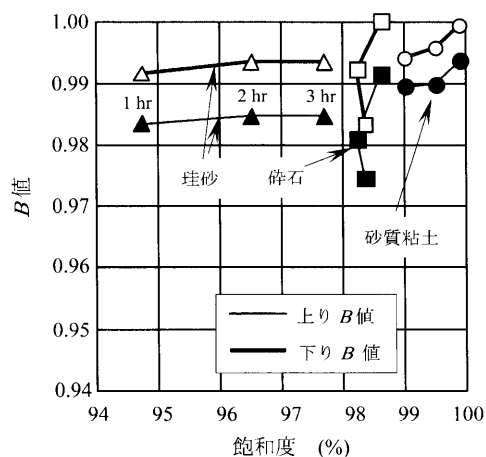
図—1 透水試験装置の概略図¹⁾



写真—1 チャンパー内の供試体¹⁾



図—2 土質材料の粒度分布



図—3 B 値と飽和度の関係

$$S_r = \frac{1}{1-H} \frac{P_0 \Delta V}{\Delta P V_v} \dots\dots\dots (1)$$

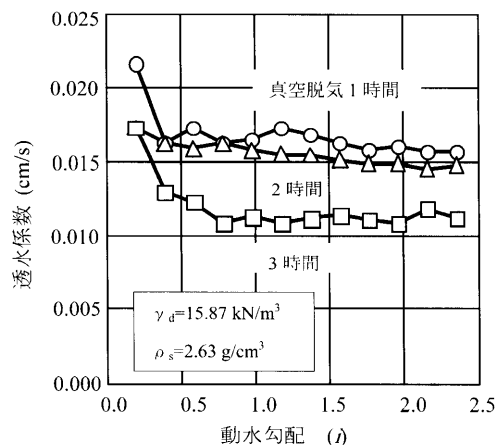
ここで、 H はヘンリー係数、 P_0 は大気圧、 V_v は供試体の間隙部分の体積である。

続いて、間隙圧係数 B 値 (29.4 kPa を中心に ± 9.81 kPa の増減により上り、下り B 値を計測) を確認し、透水試験へと進む。同一の供試体に対して再度、真空脱気を 1 時間施し、同様の計測を繰り返す。これを 3 回、延べ 3 時間まで真空脱気した供試体の飽和度、 B 値および透水係数を求めた。透水試験は珪砂、碎石の供試体では定水位法を、砂質粘土では変水位法を選択した。碎石はカラムの大きさから極端に大きな粒径は取り除いている。

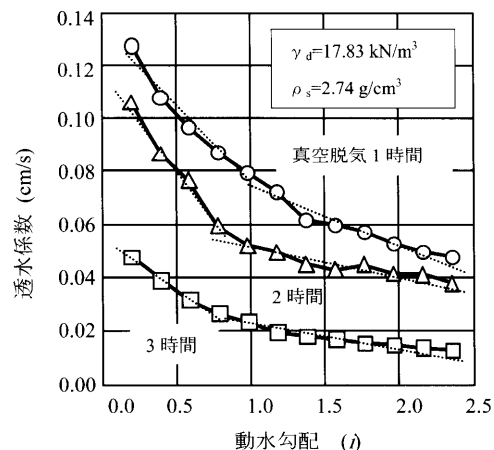
3. 試験結果とその考察

図—3 に真空脱気時間を加算した、それぞれの試料の間隙圧係数 B 値と飽和度の関係を示す。それぞれの試料は特徴のある挙動を示している。珪砂は B 値の変動は少ないが飽和度は真空脱気時間が増すにつれて増加する。碎石は逆に B 値は増加するが飽和度の変動は少ない。砂質粘土は脱気時間が増すと B 値も飽和度も増加している。 B 値と飽和度には、土質材料に関わらず相関関係が見られればと考えたが、その関係は土質材料によって異なる結果となった。

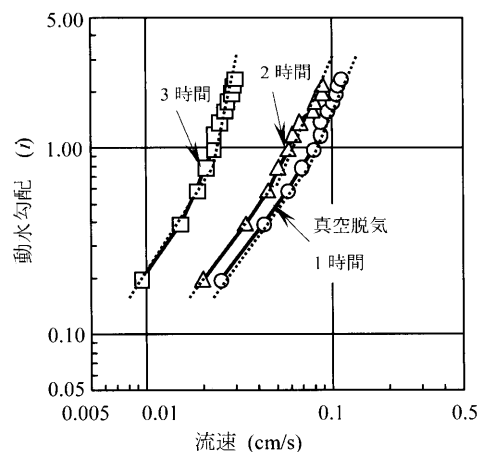
図—4 には珪砂の供試体に対して、真空脱気、背圧、 B 値の計測を終了した段階ごとに行った透水試験結果



図—4 珪砂の透水係数と動水勾配の関係

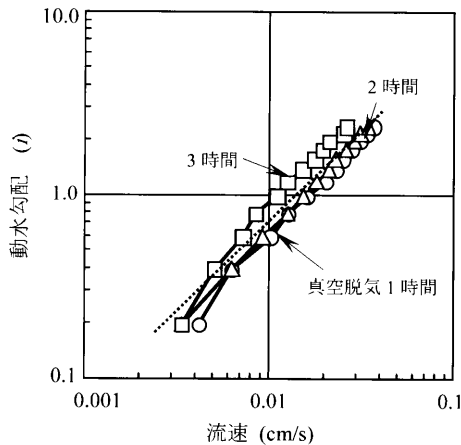


図—5 碎石の透水係数と動水勾配の関係

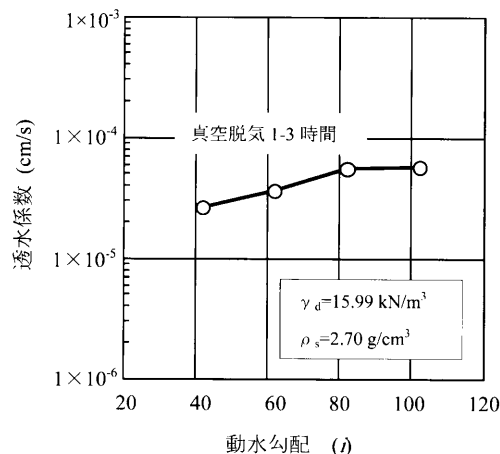


図—6 碎石の流速と動水勾配の関係

(普通目盛) を示す。横軸は 1.0 cm 間隔で変化させた水頭差を動水勾配で表している。図—3 から明らかなように飽和度は上昇しているにも関わらず、その確認作業を繰り返すごとに供試体の透水性が低下していく状況が見受けられる。図—5 の碎石も同様な傾向が見られる。その減少傾向は図中に破線で示したように、動水勾配で 0.5~1.0 の範囲で変化する二つの異なる勾配に沿って直線的に変化することがわかる。ここでの試験結果のレイノルズ数 Re はすべての試料に対して理論的 ($Re < 1$)



図一七 珪砂の流速と動水勾配の関係



図一八 砂質粘土の透水係数と動水勾配の関係

には層流域にある。ただし、碎石の層流・乱流域は他の土質材料と異なり、層流域の透水性を得るには特に動水勾配を小さくとる必要がある⁵⁾。そこで、図一六に碎石の流速と動水勾配の関係を両対数目盛で表した。この図中の勾配が1なら層流で、それを超える勾配は乱流状態にあると判断できる。変化点よりも小さな動水勾配を破線で示した直線の勾配は1より幾分大きい、それ以上の動水勾配では、さらに勾配が増し乱流域での透水性を計測していたことがわかる。同様に、珪砂の流速と動水勾配の関係を両対数目盛で図一七に示す。図中の破線は勾配1を表す。最も小さな動水勾配の値を除けば、破線の勾配と等しく層流状態にある。透水性の低下は乱流状態によるものではないことがわかる。

図一八の砂質粘土の結果は繰り返し実験を行ったようには見えないが、得られた透水係数に変化はなく重複している。真空脱気、背圧を与える操作を繰り返し、飽和度は高くなっている（図一三）にも関わらず透水性に変化はない。また、他の試料と異なり、動水勾配が大きくなると透水性は増加傾向にある。

4. 結論

以上の計測結果から飽和度の確認方法について考察すると、間隙圧係数 B 値と飽和度の関係は、土質材料により異なり一様な相関関係にはない。砂質土では B 値に変化がなくとも真空脱気の時間を増やすことにより飽和度は高くなる。真空脱気は少なくとも3時間は行う必要がある。上り B 値の方が下り B 値より低い値を示す。間隙水圧係数 B 値から、ほぼ飽和状態と判断するには上り B 値で0.98以上とする。

真空脱気を繰り返すと飽和度は増す。しかし、本報の操作（真空脱気、背圧、 B 値の計測）を繰り返すと、碎石や砂質土のような透水性の大きな土質材料では透水性が低下する傾向にある。これまでの試験結果も踏まえて、この低下の原因を考えると、標準砂やまさ土の飽和度を高めるためには294.3~490.5 kPaの背圧をかける必要があったと報告されているが⁴⁾、この背圧による影響は大きく、196.2 kPaの背圧を加えたためと思われる。なお、3時間程度の脱気後に、29.4 kPaを中心に ± 9.81 kPaの増減により間隙圧係数 B 値を計測しても供試体内の土粒子の構造骨格に大きく変化を与えるとは考えにくい¹⁾。ちなみに、ASTM Standards D 4767-1995では粘性土の圧密非排水三軸試験時の背圧を70 kPaとしている⁶⁾。

背圧を加えることは供試体内に毛管張力が存在すれば、それを消滅し飽和させる効果はあるが、碎石や砂質土では過度の背圧が加わると土粒子の構造骨格を乱し、間隙分布量を減少させ透水性を低下させられると思われる。したがって、粘性土では問題はないように思われるが、碎石や砂質土では低い加圧で計測が可能な間隙圧係数 B 値により飽和状態を確認した方がよい。

最後に、本研究を行うに当たり、実験・データ整理を担当してくれた卒論生であった和田勇介、熊木健太、寺嶋佑介、菅家秀和君らには大変な苦勞をかけた。心からお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 石田哲朗・横山博司：改良型透水試験器による飽和土の透水試験，地下水学会誌，第46巻，第1号，pp. 23~35, 2004.
- 2) Skempton, A. W.: The Pore-Pressure Coefficient A and B, Géotechnique, Vol. 4, No. 4, pp. 143~147, 1954.
- 3) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説 第一回改訂版，地盤工学会，p. 487, 2000.
- 4) 河野伊一郎・西垣 誠：室内透水試験法に関する2, 3の考察，土質工学会論文報告集，Vol. 22, No. 4, pp. 181~190, 1982.
- 5) 松尾新一郎・木暮敬二：碎石の透水性に関する実験，土と基礎，Vol. 18, No. 2, pp. 5~10, 1970.
- 6) ASTM Standards: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils, D 4767-95, pp. 894~904, 1995.

(原稿受理 2004.4.14)