

「空気圧入法」と「水分特性曲線法」による砂の間隙径分布の考察

岐阜大学工学部 正会員 宇野 尚雄 神谷 浩二
 岐阜大学大学院 学生会員 今枝 真澄
 (株)大林組 田中 宏路

1. はじめに

土の間隙構造は、土中の注入材挙動や透水性に影響を及ぼすにもかかわらず、その構造の取り扱いは十分に究明されないままである。筆者らは、間隙構造を表現する重要な要因である間隙径分布を計測するための簡便法として、「空気圧入法」(以下、圧入法)を提案した¹⁾。一方、間隙構造と水分特性曲線を関連づけて²⁾、水分特性曲線から間隙径分布を推定する手法(本報では「水分特性曲線法」と称す、以下、水分法)があるけれども³⁾、計測した間隙径分布との対比は検討されていない。本報告では、圧入法による砂の間隙径分布と水分法によるものを対比するとともに、両手法の原理的違いから圧入法について考察する。

2. 圧入法

飽和試料層の底面から空気圧力水頭 h_a (cm)を与えると、空気圧が $h_{a,min}$ (cm) になるときに空気が鉛直上向きに試料層中を流れ始める。更に、空気圧を徐々に増加すると、 h_a と空気流量 Q_a (cm^3/s)の関係は、図-1の②のように、空気圧が $h_{a,min}$ から $h_{a,max}$ (cm)の範囲では曲線関係となり、 $h_{a,max}$ より大きくなるときは乾燥試料の $h_a \sim Q_a$ 関係①を h_a 軸方向に平行移動した関係と一致する。関係②において、ある空気圧 $h_{a,i}$ のときの固有透過度 k_i (cm^2)及び透気係数 $k_{a,i}$ (cm/s)は、Darcy 則に基づいて、次式によって表される。

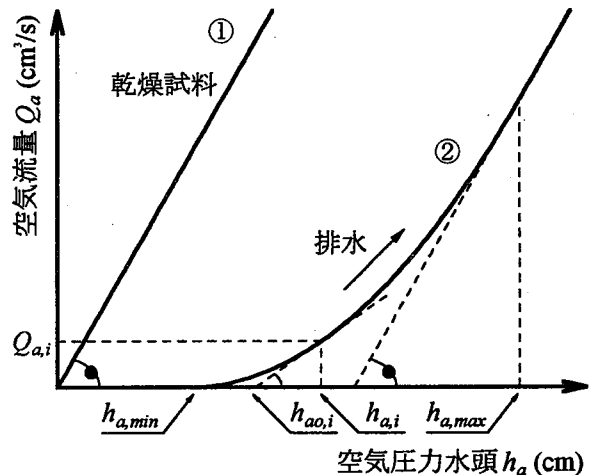


図-1 空気圧力水頭と空気流量

$$k_i = \frac{\eta_a L}{\rho_w g A} \frac{Q_{a,i}}{h_{a,i} - h_{a0,i}} \cdot 10 \quad (1a), \quad k_{a,i} = \frac{L}{A} \frac{Q_{a,i}}{h_{a,i} - h_{a0,i}} \quad (1b)$$

ここに、 η_a : 空気の粘性係数、 L : 試料層高さ (cm)、 ρ_w : 水の密度 (g/cm^3)、 g : 重力加速度 (cm/s^2)、

A : 試料層断面積 (cm^2)、 $h_{a0,i}$: 図-1の関係②の $h_{a,i}$ の点での接線と h_a 軸との交点で表される空気圧 (cm)。

ところで、「間隙部分をまっすぐに連続した円形毛管の集合体とみなす」毛管モデルの仮定に基づくと、間隙径 d_e (mm)は空気圧 h_a から次式によって算出される。

$$d_e = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_a} \cdot 10^4 \quad (\text{ここに、}\sigma : \text{水の表面張力 (N/m).}) \quad (2)$$

図-1の関係②の $h_{a,min}$ から $h_{a,max}$ の範囲の曲線関係は、空気圧の増加に伴い大きな間隙径を有する間隙部分から順に間隙水が押し出され空気が流れる状態を表している。式(2)の $h_{a,i}$ を、 $h_{a,min}$ で代用することにより最大間隙径 $d_{e,max}$ (mm)が、 $h_{a,max}$ で代用することにより最小間隙径 $d_{e,min}$ (mm)が、それぞれ算出される。

一方、 $h_{a,i}$ のときに間隙水が押し出され空気が流れた間隙部分の間隙率 $n_{b,i}$ (累積間隙率と称す)は、式(1)から算出する k_i 、式(2)から算出する $d_{e,i}$ を用いて、次式により算出される¹⁾。

Considerations of the Distributions of Sand Void Diameter Measured by Air Intrusion Method and that Estimated from Moisture Characteristic Curve : Takao UNO (Gifu University), Kohji KAMIYA (Gifu University), Masumi IMAEDA (Gifu University) and Kohji TANAKA (Obayashi Corporation)

$$n_{b,i} = \sum_{j=1}^i \Delta n_{b,j} \quad (3a), \quad \Delta n_{b,j} = \frac{32\Delta k_j}{(d_{e,j}/10)^2} \quad (3b), \quad \Delta k_j = k_j - k_{j-1} \quad (3c)$$

ここに、 $\Delta n_{b,j}$ 、 Δk_j (cm²)はそれぞれ間隙径 $d_{e,j}$ の大きさを有する間隙部分の間隙率、固有透過度である。この $n_{b,i}$ を用いて、累積間隙体積百分率 V_b (%)を次式により定義し、間隙径分布は $d_e \sim V_b$ 関係で表す。

$$V_{b,i} = \left(1 - \frac{n_{b,i}}{n}\right) \cdot 10^2 \quad (4)$$

3. 水分法

参考文献 3)に紹介されている手法の概略は以下のようである。図-2のように水が毛管上昇している毛管束を任意の高さで切断したとき、直径が d_m (mm)から $d_m + d(d_m)$ の間にある毛管が占める断面積 dA_v (cm²)の、毛管束(試料層)の全断面積 A に対する割合を $dA_v/A = f(d_m)d(d_m)$ とすると、毛管束の間隙率 n 及び体積含水率 θ はそれぞれ次式により表される。

$$n = \int_0^{d_{m,max}} f(d_m)d(d_m) \quad (5a), \quad \theta = \int_0^{d_{m,i}} f(d_m)d(d_m) \quad (5b)$$

$$f(d_m) = \frac{d\theta}{d(d_m)} \quad (f(d_m) : \text{毛管径の分布密度関数}) \quad (5c)$$

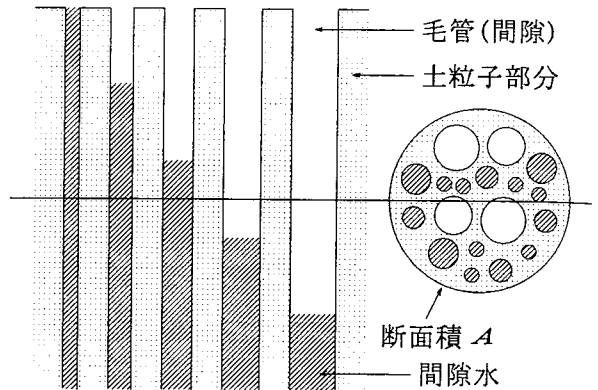


図-2 毛管束の含水状態

ここに、 $d_{m,max}$: 最大間隙径(mm)、 $d_{m,i}$: 水で満たされている毛管部分のうちでの最大の毛管径(mm) 一方、毛管径 d_m は、毛管上昇高さ、即ち、サクシオン h_p (cm)から次式により算出される。

$$d_m = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_p} \cdot 10^4 \quad (6)$$

式(5c)、(6)より、 $f(d_m)$ は次式により表される。

$$f(d_m) = \frac{dh_p}{d(d_m)} \frac{d\theta}{dh_p} = -\frac{4\sigma}{\rho_w g d_m^2} \cdot 10^4 \frac{d\theta}{dh_p} \quad (7)$$

よって、図-3のように $\theta \sim h_p$ (負圧を正とする)関係で表す土の水分特性曲線が毛管束のそれと等しいとすれば、式(6)により間隙径 d_m (mm)が、式(7)により間隙径の分布密度関数 $f(d_m)$ がそれぞれ求められる。

次に、本報では、間隙量を表す累積間隙体積百分率 V_r (%)を次式により定義する。

$$V_r = \left\{ \frac{\int_0^{d_{m,i}} f(d_m)d(d_m)}{\int_0^{d_{m,max}} f(d_m)d(d_m)} \right\} \cdot 10^2 \quad (8)$$

これは、式(5a)、(5b)より次のように書き換えられる。

$$V_r = \frac{\theta}{n} \cdot 10^2 = S_r \quad (\text{ここに、} S_r : \text{飽和度}(\%)) \quad (9)$$

即ち、図-3の $\theta \sim h_p$ 関係を $S_r \sim h_p$ 関係で表現し直し、 h_p を式(6)により d_m に換算すれば、それは間隙径分布を表すことになる。本報では、 $d_m \sim V_r$ 関係によって間隙径分布を表す。

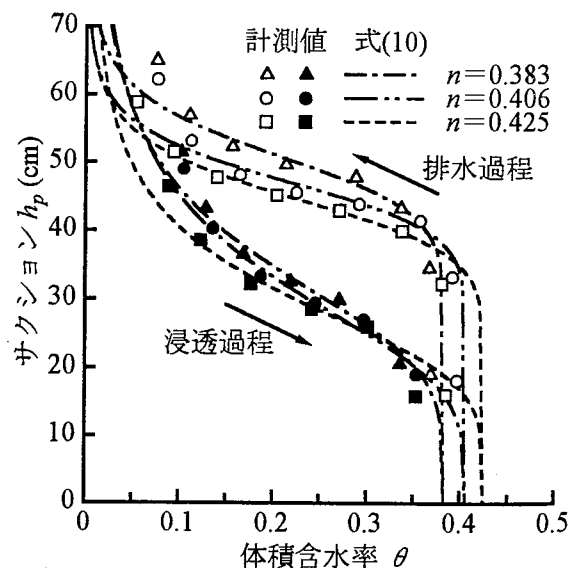


図-3 水分特性曲線(サクシオンプレート法)(標準砂)

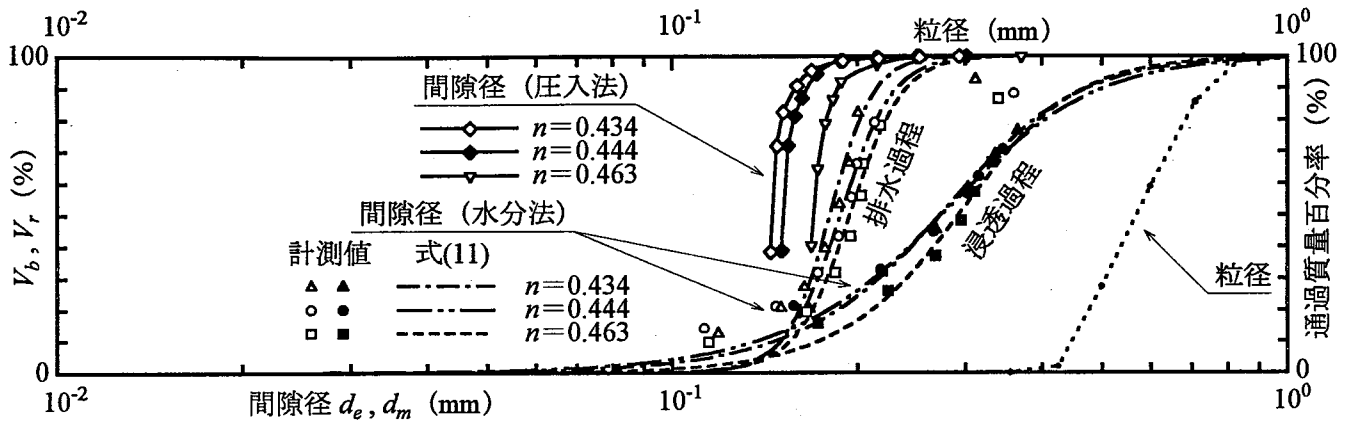


図-4(a) 圧入法と水分法による間隙径分布の対比(粗砂)

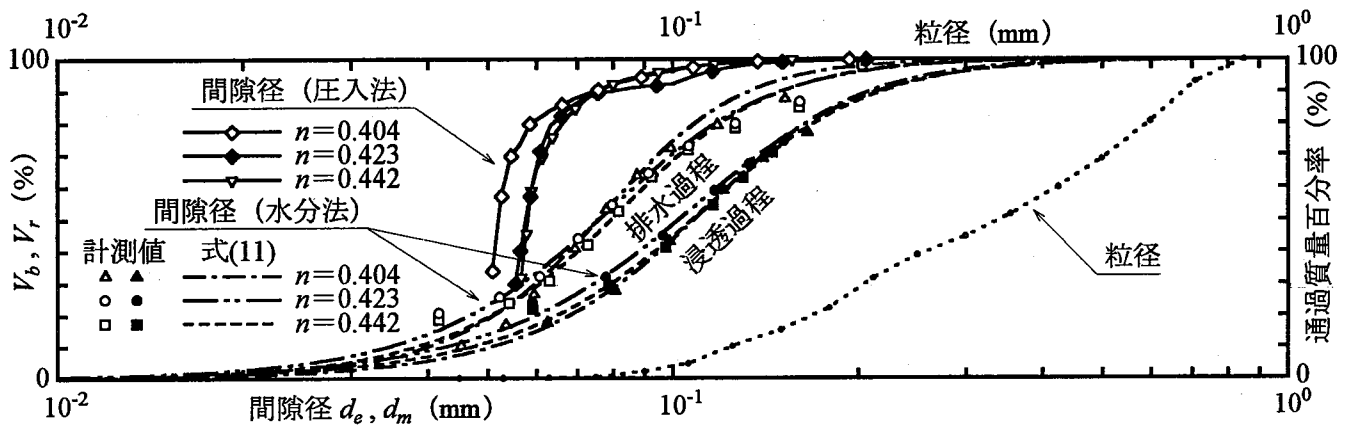


図-4(b) 圧入法と水分法による間隙径分布の対比(混合砂)

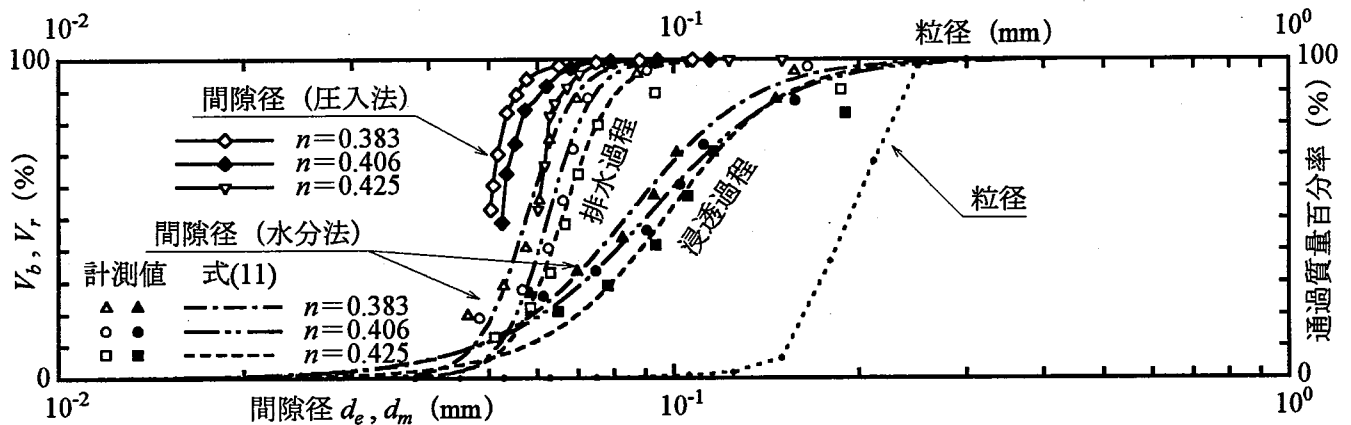


図-4(c) 圧入法と水分法による間隙径分布の対比(標準砂)

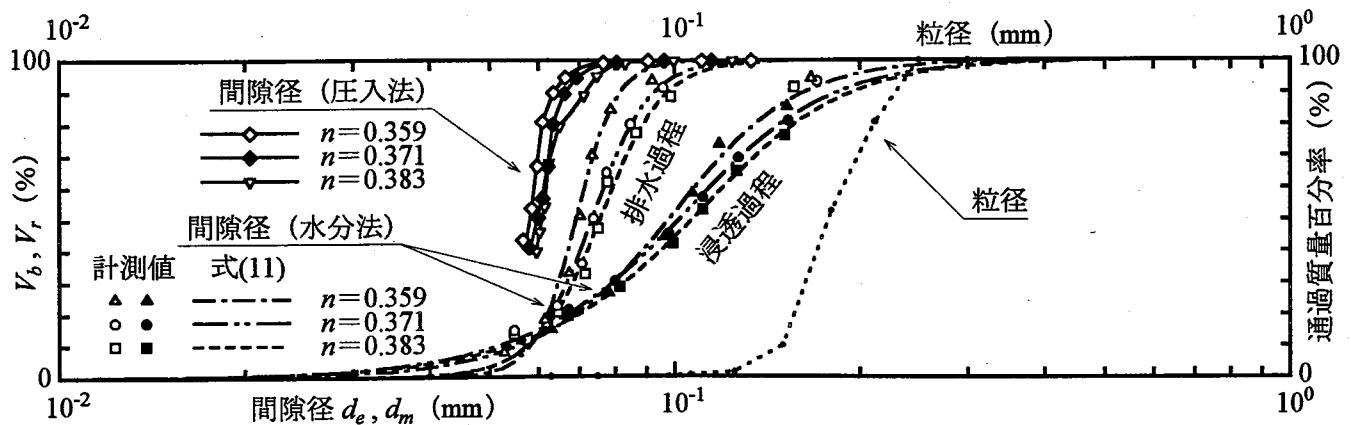


図-4(d) 圧入法と水分法による間隙径分布の対比(GB-AC(ガラスビーズ))

表-1 式(10), 式(11)における未知パラメータ α, n^*

試料名称	間隙率 n	過程	α	n^*	試料名称	間隙率 n	過程	α	n^*
粗砂	0.434	排水	0.0613	12.584	標準砂	0.383	排水	0.0196	11.538
		浸透	0.1012	4.159			浸透	0.0305	4.489
	0.444	排水	0.0641	10.546		0.406	排水	0.0212	12.298
		浸透	0.1040	3.806			浸透	0.0335	4.083
	0.463	排水	0.0664	10.451		0.425	排水	0.0225	10.771
		浸透	0.1056	4.812			浸透	0.0349	4.805
混合砂	0.404	排水	0.0281	4.078	GB-AC	0.359	排水	0.0235	13.631
		浸透	0.0418	3.543			浸透	0.0356	4.548
	0.423	排水	0.0296	3.431		0.371	排水	0.0251	9.666
		浸透	0.0412	3.163			浸透	0.0381	3.914
	0.442	排水	0.0304	3.643		0.383	排水	0.0260	8.885
		浸透	0.0425	3.306			浸透	0.0402	3.868

4. 圧入法と水分法による間隙径分布

図-4 は、圧入法及び水分法による間隙径分布を粒度と併せて示したものである。図中の水分法に関する一点鎖線、二点鎖線及び破線は、間隙径分布の全体像を調べるために、次の van Genuchten の水分特性曲線推定式(10)と式(6), 式(9)に基づいて⁴⁾, $\theta_r=0, \theta_s=n$ と仮定して書き換えた次式(11)を、表-1 の α, n^* をそれぞれ用いて表したものである。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \cdot 10^2 = \frac{1}{\left\{1 + (\alpha h_p)^{n^*}\right\}^m} \cdot 10^2 \quad (10), \quad V_r = \frac{1}{\left\{1 + \left(\alpha \frac{4\sigma}{\rho_w g d_m} \cdot 10^4\right)^{n^*}\right\}^m} \cdot 10^2 \quad (11)$$

ここに、 S_e : 有効飽和度(%), θ_r : 残留体積含水率, θ_s : 飽和体積含水率,

α : 土の種類で決まるパラメータ (1/cm), n^* : 土の種類で決まるパラメータ, $m=1-1/n^*$

水分法では、図-3 に示したように水分特性曲線の排水と浸透過程でのヒステシスによって、図-4 のように2つの間隙径分布が得られる。しかしながら、以下の対比には、圧入法による間隙径分布は間隙水の排水現象で得られるため、水分法によるものはその類似現象である排水過程で得られるものを用いるのが適当である。

さて、図-4 によれば、水分法による間隙径分布は粒度を粒径軸方向に平行移動したような分布型となるのに対し、圧入法によるものは粒度に関係なく狭い範囲での分布頻度が高い均等な分布型となる傾向にある。また、図-5 のように、圧入法による平均間隙径 d_e^* (mm)は¹⁾, 水分法による50%間隙径 d_{m50} (mm)の8~9割程度の大きさである。

圧入法では、飽和試料への空気圧入に伴い試料層下端から上端に至る一次元方向に貫通する空気道が形成された間隙部分を、水分法では水-空気界面が三次元的に形成された間隙部分をそれぞれ毛管モデルで近似するという原理的な違いがある。即ち、圧入法と水分法による間隙径分布のずれには、一次元的(圧入法)と三次元的(水分法)という違いが影響していると懸念される。

(1) 間隙径 d_e^* と d_{m50}

湿潤土の一次元透気試験により調べた S_r ~比透気係数 k_a/k_{ad} (k_a : 湿潤土の透気係数(cm/s), k_{ad} : 炉乾燥土の

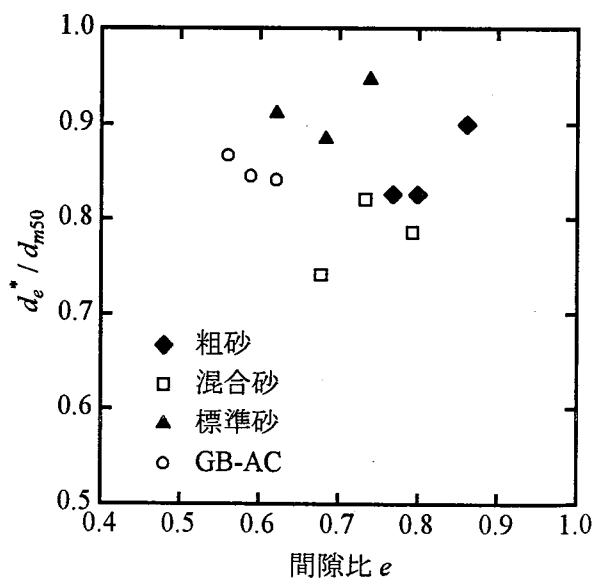


図-5 平均間隙径 d_e^* と 50%間隙径 d_{m50}

透気係数 (cm/s) の関係と⁵⁾、図-3 に示した水分特性曲線を $S_r \sim h_p$ 関係で表現し直したものを対比した図-6 から、 $k_{at}/k_{ad} \sim h_p$ 関係を調べたものが図-7 である。一方、圧入法において、式(1b)の h_{ai} のときの k_{ai} は、ある飽和度のときの透気係数であるため、 $k_{at}/k_{ad} = k_{ai}/k_{ad}$ として、 $k_{at}/k_{ad} \sim h_a$ 関係を図-7 に重ね合わせて示した。

$k_{at}/k_{ad} \sim h_p$ 関係と $k_{at}/k_{ad} \sim h_a$ 関係は比較的類似しており、 $h_a = h_p$ とみなせる。両手法の間隙径を求めるそれぞれの式(2)と式(6)を比較すると $d_e/d_m = h_p/h_a$ である。よって、 $d_e = d_m$ となり、両手法の間隙径は同じものである。

(2) 間隙径の分布範囲

図-6 の $S_r \sim k_{at}/k_{ad}$ 関係では、 $S_r = 0 \sim 10\%$ 程度のとき $k_{at} = k_{ad}$ 、 $S_r = 10 \sim 90\%$ 程度のとき S_r の増加に伴い k_{at} は減少し、 $S_r = 90\%$ 程度のとき $k_{at} = 0$ となる傾向にある。これは、一次元方向の空気流に寄与しない間隙部分が全間隙の 10% 程度あること、 $S_r = 90\%$ 程度以上では砂層内に水-空気界面が形成されても貫通する空気道が形成されないことを表している。

一方で、前節(1)より $h_a = h_p$ とみなし、圧入法の $h_{a,min}$ 、 $h_{a,max}$ に対応する飽和度を水分特性曲線からそれぞれ推定したのが図-8 である。いずれの試料についても $h_{a,min}$ に対応する飽和度は $S_r = 90\%$ 程度、 $h_{a,max}$ に対応する飽和度は $S_r = 10 \sim 20\%$ 程度であり、前述の $k_{at} = 0$ 、 $k_{at} = k_{ad}$ のときの飽和度にそれぞれ一致する。

即ち、圧入法では、 $h_{a,min}$ より小さな空気圧では飽和試料内に空気が侵入しても貫通する空気道が形成され難いこと、 $h_{a,max}$ より大きな空気圧では微細な間隙部分や空気流に垂直な方向の間隙部分の間隙水が押し出されず、そのような間隙部分が空気流に寄与し難いことが予想される。そのため、図-4 のように、圧入法では、最大間隙径 $d_{e,max}$ より大きな間隙径の範囲や最小間隙径 $d_{e,min}$ より小さな間隙径の範囲が計測されず、間隙径の分布範囲は水分法によるものより狭くなると考えられる。

(3) 累積間隙体積百分率 V_b と V_r

図-4 より、圧入法のある間隙径 d_e に対応する V_b と $d_e = d_m$ に対応する水分法の V_r の差は、最小で数%、最大で 60% 程度であり、式(9)のように飽和度から得られ、間隙体積を的確に評価する V_r に対して V_b は異なる。

砂層のある切断面の間隙が隣り合う切断面の間隙に連結するとき、空気道の形成は小さい方の間隙径を有す

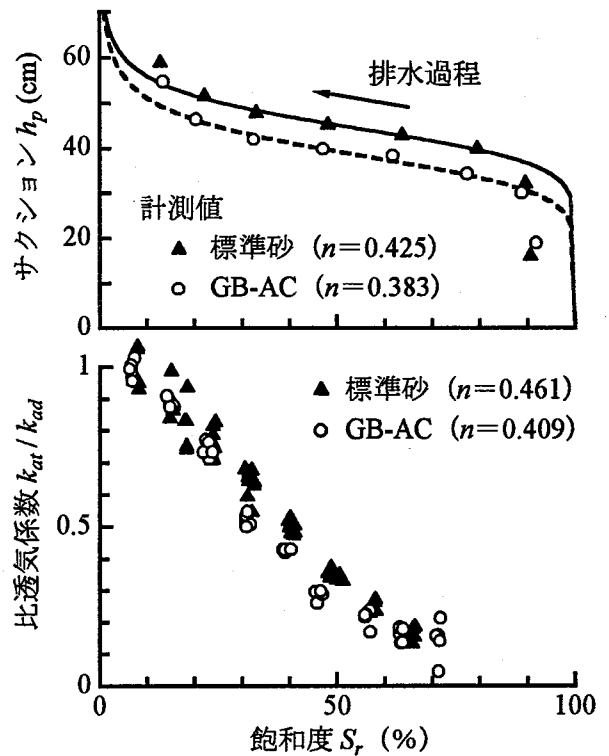


図-6 飽和度と比透気係数、サクシヨンの関係

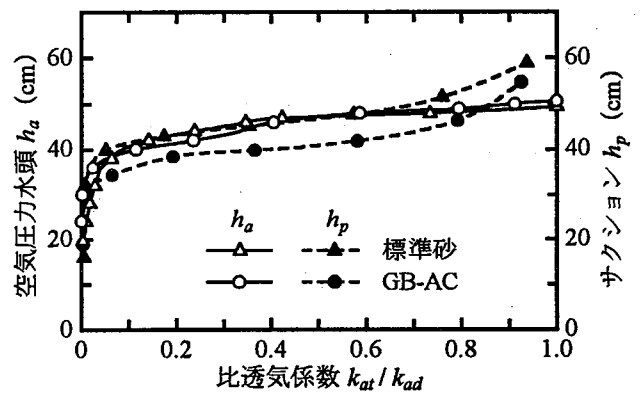


図-7 空気圧力水頭 h_a とサクシヨン h_p

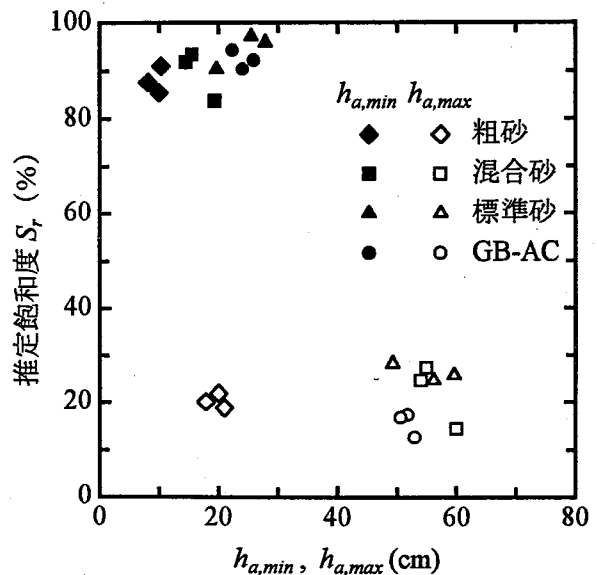


図-8 $h_{a,min}$ 、 $h_{a,max}$ と推定飽和度

る間隙部分に依存すると予想される。そのため、圧入法では、太さが変化する間隙部分の最小部の径を間隙径として評価し、その最小径を有する毛管束でその間隙部分が近似され、そして、大きな径を有する部分の体積が最小径の体積として評価されると考えられる。即ち、そのような間隙部分に対して、過小な体積評価を与えている懸念がある。

一方、前節(2)の「間隙内に空気が侵入して水-空気界面が形成されても空気道が形成されない」ことを是認すると、飽和度低下に伴い増加する空気間隙部分の全てが貫通する空気道にならないこと、換言すると、空気間隙体積の全てが空気道の形成された間隙部分の体積に相当しないことが考えられる。

以上の(1)、(2)、(3)より、圧入法と水分法による図-4の間隙径分布や図-5の平均間隙径のずれは、間隙径の評価の違いによるものではなく、間隙径の分布範囲や間隙体積の評価の違いによる影響であると判断される。

Childsら²⁾、Campbellは⁶⁾、水分法による間隙径分布から一次元流れに関する透水係数を表現するために、連結する間隙のみが透水性に寄与する等の仮定のもとで、間隙径の分布密度関数に修正を加えている。この修正は、三次元的な間隙径分布を一次元的なものに変換するものであると想像され、一次元と三次元では分布密度関数が異なることを表していると考えられるので、この面からの検討を今後の課題とする。

5. おわりに

本報告では、三次元データの水分特性曲線から間隙径分布を求める水分法に対して、筆者らが提案した圧入法を比較した結果、次述する事項が得られた。

- 1)水分法では、水分特性曲線の排水と浸透過程でのヒステシスのため、2つの間隙径分布が得られる。本報では、圧入法による間隙径分布と対比するのに適当である排水過程でのものを用いた。
- 2)水分法による間隙径は粒度を平行移動したような分布型となるのに対し、圧入法によるものは、粒度に関係なく均等な分布型となる傾向にある。また、圧入法の平均間隙径 d_e^* は、水分法の50%間隙径 d_{m50} の8~9割程度の大きさである。
- 3)圧入法における空気圧 h_a は水分法におけるサクション h_p に相当するものである。また、 h_a ~比透気係数 k_{ad}/k_{ad} 関係と h_p ~ k_{ad}/k_{ad} 関係が一致するため、圧入法による間隙径 d_e と水分法による間隙径 d_m は同じものである。
- 4)間隙体積を表現する圧入法による累積間隙体積百分率 V_b と水分法による V_r の差は、最大で60%程度、最小で数%である。飽和度から得られる V_r に対して、圧入法では、微細な間隙や空気流に垂直な方向の間隙部分が評価され難く、一方で、飽和度が低下しても空気道が形成されないために d_e や V_b が評価されない状態があることに起因すると推察された。また、そのため、圧入法による間隙径の分布範囲は水分法に較べて狭くなる。

《参考文献》

- 1)神谷浩二, 宇野尚雄, 松島健之:「空気圧入法」による砂質土の間隙径分布の計測, 土木学会論文集, No. 541/III-35, pp. 189-198, 1996.
- 2)Childs, E. C. and Collis-George, N.: The Permeability of Porous Materials, *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A*, Vol.201, pp.392-405, 1950.
- 3)土壌物理研究会編:土の物理学-土質工学の基礎-, 森北出版, pp. 199-238, 1979.
- 4)van Genuchten, M. Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 5)宇野尚雄, 神谷浩二, 鬼頭明義, 杉井俊夫:湿潤土の透気係数について, 第5回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 77-82, 1993.
- 6)Campbell, G. S.: *Soil Physics with Basic*, Elsevier Science B. V., pp.49-58, 1985.