

III-102

「空気圧入法」による間隙径分布の測定

岐阜大学工学部 正会員 神谷浩二 宇野尚雄
岐阜県庁 大堀健一

1. はじめに 飽和試料への空気圧入により、その圧入圧力と空気透過量の関係から間隙径分布を測定する方法である「空気圧入法」に関して^{1), 2)}、その測定方法などについての検討結果をここに報告する。

2. 間隙径分布測定原理 乾燥試料について透気試験をおこなうと、D'Arcy則より空気流量 Q_a (cm³/s) と空気圧力水頭 h_a (cm) は、図-1の①のような原点を通る直線関係が得られる。次に、飽和試料について透気試験をおこなうと空気圧力水頭 h_{amin} で空気が流れ始め、さらに空気圧力水頭を徐々に増加させていくと、空気圧力水頭 h_{amax} で乾燥試料の直線関係に平行となる図-1の②のような曲線関係が得られる。ところで、飽和試料中を空気が流れるには、空気圧力が毛管圧力を超え水を押し出さなければならない。間隙部分を直径 d_{ei} (cm) のまっすぐな円柱管と仮定すると、

$$d_{ei} = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_{ai}} \quad (1)$$

ここに、 σ : 水の表面張力 (dyn/cm), ρ_w : 水の密度 (g/cm³), g : 重力加速度 (cm/s²).

空気が流れ始めるときの空気圧力水頭 h_{amin} で最大間隙径 d_{emax} が、乾燥試料の透気性に一致するときの空気圧力水頭 h_{amax} で最小間隙径 d_{emin} が式(1)によりそれぞれ算出される。また、L. Žagar は、ある空気圧力水頭 h_{ai} のときに式(1)より算出される間隙径 d_{ei} 、固有透過度 k_i (cm²) および空気が流れる間隙部分の間隙率 n_{ei} (以下、累積間隙率と称する) の関係を次式で与えている²⁾。

$$Q_{ai} = k_i \frac{\rho_w g A}{\eta_a} \frac{(h_{ai} - h_{aoi})}{L}, \quad k_i = \frac{n_{ei}}{32} d_{ei}^2 \quad (2)$$

ここに、 η_a : 空気の粘性係数 (g/(cm·s)), L : 試料層高さ (cm), A : 試料層断面積 (cm²),

n_{ei} : d_{emax} から d_{ei} の範囲の間隙径を有する間隙部分の間隙率(累積間隙率)。

しかしながら、空気の流れについては、空気の圧縮性による流れへの影響を考慮する必要がある。圧縮性流体である空気の一次元定常流れに關しての連続式より、 $\rho_a Q_a = \text{const}$ (ρ_a : ある空気圧力水頭のときの空気の密度 (g/cm³)) であるから、透気試験において測定される空気流量 Q_a を標準状態(大気圧下)における空気流量 Q_a' に補正して、式(2)を次のように書き改め、固有透過度 k_i' など定義する。

$$Q_{ai}' = \frac{\rho_{ai}}{\rho_a'} Q_{ai} = k_i' \frac{\rho_w g A}{\eta_a} \frac{(h_{ai} - h_{aoi})}{L}, \quad k_i' = \frac{n_{ei}}{32} d_{ei}^2 \quad (3)$$

ここに、 Q_a' : 補正空気流量 (cm³/s), ρ_a' : 標準状態(大気圧下)における空気の密度 (g/cm³).

次に、間隙径分布についてであるが、本報告では、式(3)により算出される累積間隙率 n_{ei} と間隙率 n を用いて、空気が流れる間隙部分の体積を意味する累積間隙体積百分率を次式で定義する。

$$\text{累積間隙体積百分率} = \frac{n_{ei}}{n} \times 100 = \frac{d_{emax} \text{ から } d_{ei} \text{ の範囲の間隙径を有する間隙部分の体積}}{\text{全間隙体積}} \times 100 \quad (4)$$

そして、間隙径 d_{ei} に対する累積間隙体積百分率の関係によって間隙径分布を表す。

3. 測定結果と考察 図-2(a)は、乾燥試料の透気試験結果より空気流速 v_a と空気圧力水頭 h_a の関係を示したものである。標準砂、GB-ACのいずれの試料についてもある空気圧力水頭より大きくなると、原点を通る直線関係よりずれが生じ、D'Arcy則が成り立たなくなる。このずれが生じるときの部分についての $1/\text{Re}$ 数 Re ($Re = \rho_a v_a D_w / \eta_a$) を試算すると、 $Re \geq 1$ であることから、D'Arcy則が成り立たなくなるのは、空気の流れが層流から乱流へと変化しているためであると考えられる。一方、図-2(b)に示したシルトについてもD'Arcy則が成り立たなくなる部分が存在するが、 $1/\text{Re}$ 数を試算すると十分に層流域であると判断される。式(3)と同様に、空気の圧縮性による影響の補正をおこなうと、図中の実線のように補正空気流速 v_a' と h_a

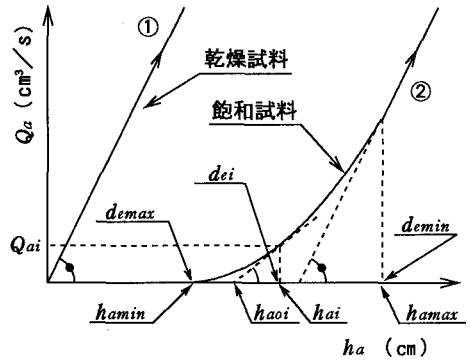


図-1 空気流量と空気圧力水頭

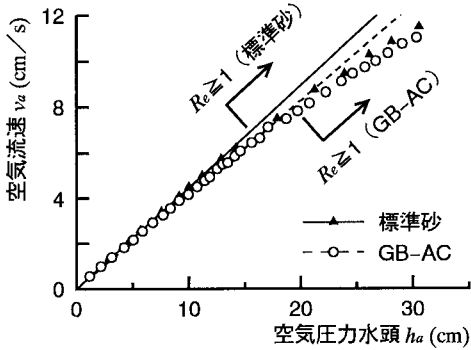


図-2(a) 空気流速と空気圧力水頭

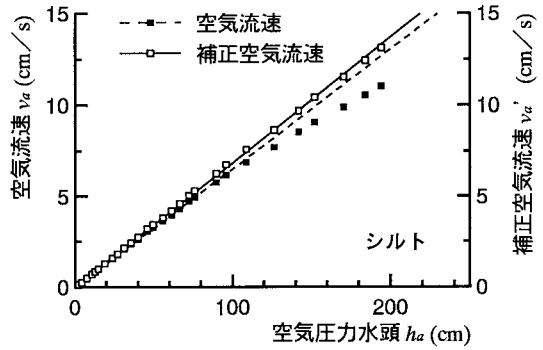


図-2(b) 空気流速・補正空気流速と空気圧力水頭

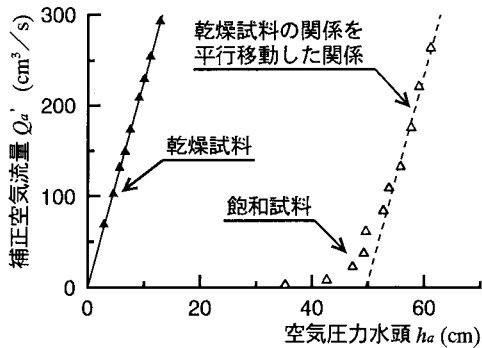


図-3 補正空気流量と空気圧力水頭（標準砂）

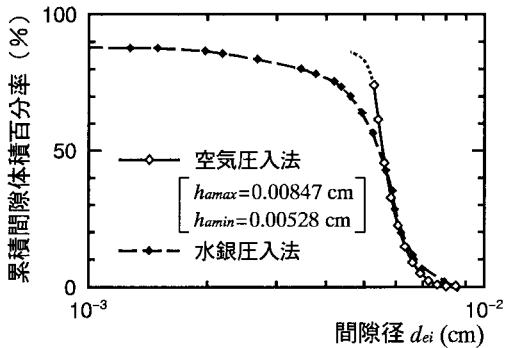


図-4 空気圧入法による間隙径分布（標準砂）

表-1 累積間隙率と空気間隙率

	n_{max}	n_a	n	n_{max}/n_a	n_{max}/n
標準砂	0.290	0.276	0.391	1.051	0.743
GB-AC	0.335	0.269	0.362	1.247	0.926

は原点を通る直線関係が得られる。このことより、空気圧力水頭がおおよそ $h_a \geq 100$ cm になるときに D'Arcy 則が成り立たなくなるのは、空気の圧縮性による流れへの影響があるためであると考えられる。また、空気の圧縮性による影響がないと考えられる $h_a \leq 100$ cm の範囲について v_a と h_a の関係から D'Arcy 則により求めた固有透過度の値と、 v'_a と h_a の関係から同様に D'Arcy 則を適用して求めた固有透過度の値には、ほとんど差がない。即ち、式(3)のように空気の圧縮性による影響を補正した空気流量 Q'_a あるいは空気流速 v'_a と空気圧力水頭 h_a の関係は、層流域であれば空気圧力レベルに関係なく D'Arcy 式の型によって表現できる。

さて、図-3において、乾燥試料の補正空気流量 Q'_a と空気圧力水頭 h_a の関係を横軸方向に平行移動すると、図中の点線のように飽和試料のその関係と一致する部分が認められる。この結果より、間隙径分布を求めたものが図-4の実線であり、比較のため水銀圧入法による間隙径分布を併記したものが破線である。空気圧入法による間隙径は、標準砂で 0.00528～0.00847 cm、GB-AC で 0.00474～0.00745 cm の範囲である。また、空気圧入法と水銀圧入法による間隙径分布を比較すると、間隙径の大きい範囲では、両者は近い分布を示しており、空気圧入法によるものは間隙径分布として妥当なものであると考えられる。なお、式(2)の関係に基づいて間隙径分布を求めた結果と比較すると、累積間隙率 n_{ei} の値や間隙径分布の型にはあまり違いがない。

次に、表-1は、空気圧力水頭 h_{max} のときに求まる累積間隙率 n_{max} と試験後飽和度測定より求めた空気間隙率 $n_a (= n(1 - S_r))$ を対比したものである。これらは、ほぼ近い値を示していることから、累積間隙率 n_{ei} は空気の流れに寄与する間隙部分の間隙率に相当するものであることがわかる。

4. おわりに 本報告は、乾燥試料層の透気性について検討し、また、空気圧入法による間隙径分布の測定結果について考察した。その結果、①空気流量を補正した式(3)の関係に基づいて妥当な間隙径分布が得られる、②累積間隙率 n_{ei} は空気が流れる間隙部分の間隙率である、ことを示した。

【参考文献】 1) 宇野・神谷・大堀：土の透気性に基づいた間隙径分布測定法の検討，第29回土質工学研究発表会講演集，1994，掲載予定。 2) L. Zagar: Ermittlung der Größenverteilung von Poren in Feuerfesten Baustoffen und Glasnutschen Teil II, Arch. Eisenhüttenwes., Vol. 27, No. 10, pp. 657-663, 1956.