

III-703

空気圧入法による間隙径分布測定を試み

岐阜大学工学部 正会員 宇野尚雄 ○神谷浩二
 中部大学工学部 正会員 杉井俊夫

1. はじめに 飽和土試料への空気圧入により、空気圧入圧力と空気透過量の関係から間隙径分布を求める方法を試みたところ、比較的良好な結果が得られたためここに報告する。

2. 測定装置及び方法 間隙径分布測定装置の概要図を図-1に示す。試料層は高さ3cm、直径8cmの円柱供試体である。測定方法は、飽和土試料の透気試験の結果より間隙径分布を求める空気圧入法である¹⁾。

乾燥試料充填層における空気の流れについて、Darcy則より固有透過度は次式で与えられる。

$$k = \frac{\eta_a L Q_a}{A p_a} = \frac{\eta_a L Q_a}{A \rho_w g h_a} = \frac{\eta_a}{\rho_w g} k_a \quad (1)$$

k : 固有透過度(cm^2), η_a : 空気の粘性係数($\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$),
 L : 試料層高さ(cm), Q_a : 空気流量(cm^3/s),
 A : 試料層断面積(cm^2), p_a : 空気圧力差(dyn/cm^2),
 ρ_w : 水の密度(g/cm^3), g : 重力加速度(cm/s^2),
 h_a : 空気圧力水頭差(cm), k_a : 透気係数(cm/s).

乾燥試料について透気試験をおこなうと、図-2の①のように空気圧力と空気流量は直線関係となる。次に、この乾燥試料を水で飽和し再び透気試験をおこなうと、図-2の②のような曲線が得られる。曲線②について空気圧力差 p_{amin} で空気が流れ始め、徐々に空気圧力を増加させていくと空気圧力 p_{amax} で直線①に平行になる。

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ださなければならない。間隙部分を直径 R_e の円柱管と仮定すると、毛管則より空気圧力と間隙径の関係は次式となる。

$$R_e = \frac{4 \sigma \cos \phi}{p_a} = \frac{4 \sigma \cos \phi}{\rho_w g h_a} \quad (R_e : \text{間隙径}(\text{cm}), \sigma : \text{水の表面張力}(\text{dyn}/\text{cm}), \phi : \text{接触角}(\text{grad}).) \quad (2)$$

飽和試料の透気試験において空気圧力水頭差 h_a を測定して、この式(2)により間隙径 R_e を算出する。

次に、 $p_{amin} - p_{amax}$ 間において、個々の空気圧力差 p_a について式(2)により間隙径 R_e を求めれば、それは、間隙径分布を示すものと考えられる。L. Žagarらは飽和試料の透気試験より求まる固有透過度 k 、間隙径 R_e 、流れに有効な間隙率 n_e (ここでは有効間隙率と称する)の関係は次式で与えている。

$$k = n_e R_e^2 / 32 \quad (\text{Hagen-Poiseuilleの式}) \quad (3)$$

この式により有効間隙率 n_e を算出し、式(2)より求めた間隙径 R_e に対してプロットし間隙径分布を表す。

3. 測定結果及び考察 図-3は、標準砂(粒径範囲425 μm 以下)についての空気流量 Q_a と空気圧力水頭差 h_a の関係を示したものであるが、乾燥試料について Q_a と h_a の関係は、2. で述べたような直線関係は得られなかった。レイノルズ数($=Dv_a/\nu_a$)(代表粒径 D は D_w 、 v_a は空気流速、 ν_a は空気の動粘性係数)を試算すると0.024~1.19であり、種々の流体に対するMuskatの整理²⁾によれば、十分に層流とみなすことができる。また、空気の圧縮性を考慮したFick則(Darcy則は空気流速 v_a で考えるのに対し、Fick則は空気質量速度 $\rho_a v_a$ (ρ_a : 空気密度)で考える)を適用したが³⁾、この程度の空気圧力レベルでは、空気の圧縮性の影響はそれほどないと考えられた。これについては、装置上の問題ではないかと考えられるが、今後の研究課題である。しかし、図中の点線のように飽和試料の透気性が乾燥試料のと一致する部分が認められ、飽和試料中を空気が流れ始めたときから乾燥試料の透気性に一致したときの h_a の区間について間隙径分布

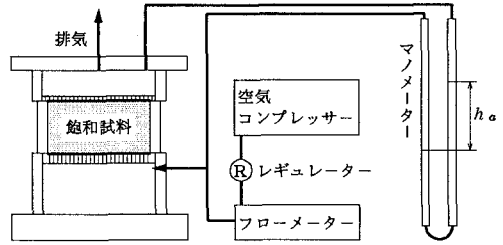


図-1 間隙径分布測定装置概要図

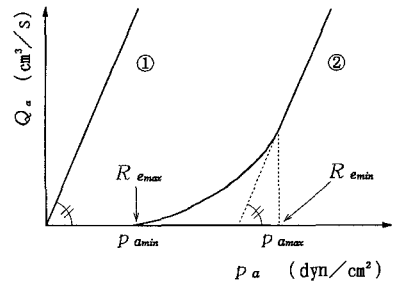


図-2 空気流量と空気圧力差

を求めたのが図-4である。左縦軸の累積有効間隙率割合は、 $(1 - n_{ei}/n_{emax}) \times 100 (\%)$ (n_{ei} : ある h_a で求まる有効間隙率, n_{emax} : 乾燥試料と同じ透気性を示すときの h_a で求まる有効間隙率) で定義し、流れに寄与する全間隙体積に対する最小間隙径 R_{emin} からある間隙径 R_{ei} の範囲での間隙体積の占める割合を示したものであり、右縦軸の有効間隙率割合は、 $(n_{ei}/n_{emax} - n_{ei+1}/n_{emax}) \times 100 (\%)$ ($n_{ei} > n_{ei+1}$) で定義し、流れに寄与する全間隙体積に対する間隙径 R_{ei} から間隙径 R_{ei+1} ($R_{ei} < R_{ei+1}$) の範囲での間隙体積が占める割合を示したものである。図-5は、空気圧入法による間隙径分布と水銀圧入法による間隙径分布⁴⁾を比較したものである。水銀圧入法は土粒子の細孔などのかなり小さな間隙径まで測定しているのに対し、空気圧入法は流体の流れに寄与する部分の間隙径しか測定できないという違いがあるため、間隙径の大きさの範囲は違っている。しかし、間隙径の大きい範囲では両者は近い分布を示しており、空気圧入法による間隙径分布は妥当なものであると考えられる。次に、表-1は、平均間隙径 R (毛細管モデルでいう管路の直径であり、透過法による比表面積 S_v と間隙比 e より $R = 4e/S_v$ で表される)⁵⁾ と空気圧入法による間隙径分布の平均値 R_m (各測定点の有効間隙率割合 P_i とそのときの間隙径 R_{ei} より $R_m = \sum(P_i \times R_{ei})/100$ によって求めたものである)の比較をしたものであるが(図-4に標準砂の R を示した)、ほぼ近い値を示している。即ち、 R は平均径としての意義を有し、流体の透過性を考える上でかなり有用なものであることがわかる。また、図-6は、平均値 R_m と平均粒径 D_w の関係を示したものであるが、今回用いた4試料に関しては、直線関係が得られ、間隙径分布と粒度分布は対応していることがわかる。

4. おわりに 本報告は、空気圧入法による間隙径分布測定について述べた。この方法は、精度の点で今後検討する必要があるが、①空気圧入法は流体の透過性を考える上で有効な間隙径分布測定法であること、②毛細管モデルでいう管路の直径は平均径としての意義を有すること、がわかった。

【参考文献】

- 1) L. Žagar: Über die Textur von feuerfesten Baustoffen, Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft, pp. 264-301, 1958.
- 2) Muskat, M.: The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media, pp. 69-74, 1946.
- 3) Geoffrey E. Blight: Flow of Air Through Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, No. SM4, pp. 607-624, 1971.
- 4) 佐藤健・曾場昭之・桑山忠・宇野尚雄: 水銀圧入式ポロシメーターによる粒状材料の間隙径分布の測定, 土木学会論文集, No. 445, III-18, pp. 139-142, 1992.
- 5) 宇野尚雄・杉井俊夫・神谷浩二: 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, 土木学会論文集, No. 470, III-23, 1993. 6(投稿中).

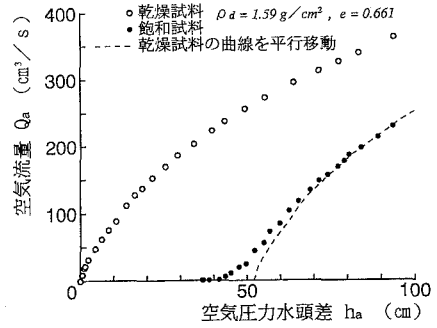


図-3 空気流量と空気圧力水頭差(標準砂)

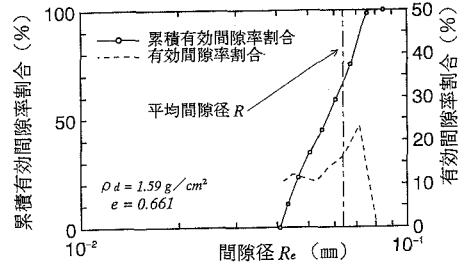


図-4 間隙径分布(標準砂)

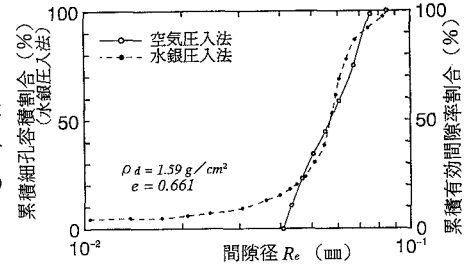


図-5 水銀圧入法との比較(標準砂)

表-1 平均間隙径 R , R_m

(μm)	R	R_m	R/R_m
標準砂	63.8	60.2	1.06
粉碎砂1	51.7	49.3	1.05
粉碎砂2	33.2	35.1	0.95
混合GB	44.4	38.9	1.14

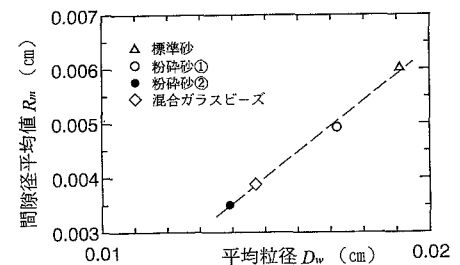


図-6 平均間隙径と平均粒径