

# 砂の粒度と間隙径分布の関係

岐阜大学工学部 正会員 宇野尚雄 ○神谷浩二  
同 上 松島健之

1. はじめに 本報告は、砂のような粒状材料の粒度分布と「空気圧入法」により計測した間隙径分布の関係を示すとともに、その関係について考察するものである。

2. 間隙径分布測定方法 測定方法は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求める空気圧入法である<sup>1), 2)</sup>。飽和試料中を空気が流れるには、空気圧力が毛管圧力を越えて間隙水を押し出さなければならず、間隙部分を毛管の集合体と仮定すると、ある空気圧力水頭  $h_{a,i}$ (cm)のときの間隙径  $d_{e,i}$ (cm)は、毛管則より、次式によって算出することができる。

$$d_{e,i} = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_{a,i}} \quad (\sigma: \text{水の表面張力}(\text{dyn/cm}), \rho_w: \text{水の密度}(\text{g/cm}^3), g: \text{重力加速度}(\text{cm/s}^2)) \cdots (1)$$

また、 $h_{a,i}$ のときの固有透過度  $k_{f,i}$ (cm<sup>2</sup>)と式(1)の  $d_{e,i}$  から、間隙水が空気圧力によって押し出された間隙部分の間隙率を意味する累積間隙率  $n_{e,i}$ を次式によって算出する。

$$n_{e,i} (= \sum \Delta n_{e,i}) = \frac{32k_{f,i}}{d_{e,i}^2} \quad (\Delta n_{e,i}: d_{e,i} \text{の大きさを有する間隙部分の間隙率}) \cdots (2)$$

間隙径分布は、 $d_{e,i}$ と  $n_{e,i}$ から求める次式の累積間隙体積百分率  $V_{e,i}$ との関係によって表す。

$$V_{e,i} = \left(1 - \frac{n_{e,i}}{n}\right) \times 100 \quad (n: \text{間隙率}) \cdots (3)$$

3. 測定結果 図-1は、標準砂、ガラスビーズ GB-ACに関して、粒度分布と間隙径分布を対比して示したものである。また、比較のため水銀圧入法による間隙径分布を一点鎖線で示しているが<sup>2)</sup>、空気圧入法による間隙径分布は、水銀圧入法によるものとほぼ一致しており、その妥当性が確認できる。一方、比較的粒径が均等なこれらの試料では、間隙径も均等な分布で、粒径のほぼ1/3に相当している。

4. 粒径と間隙径 間隙径分布から求める平均間隙径  $d_e^*$ (cm)を  $d_e^* = \sum(\Delta n_{e,i} d_{e,i}) / \sum \Delta n_{e,i}$ により、粒度分布から求める平均粒径  $D_w$ (cm)を  $D_w = \sum m_i / \sum (m_i / D_i)$  ( $m_i$ : ある粒径範囲を代表する平均粒径  $D_i$ (cm)の試料質量(g))によりそれぞれ定義する。表-1は、 $d_e^*$ 、 $D_w$ 及び後述する式(4)の  $d/D_m$ を示したものであり、また、累積間隙率  $n_{e,max}$ (空気が通ることのできるすべての間隙部分の間隙率)<sup>2)</sup>、 $n$ を併記する。

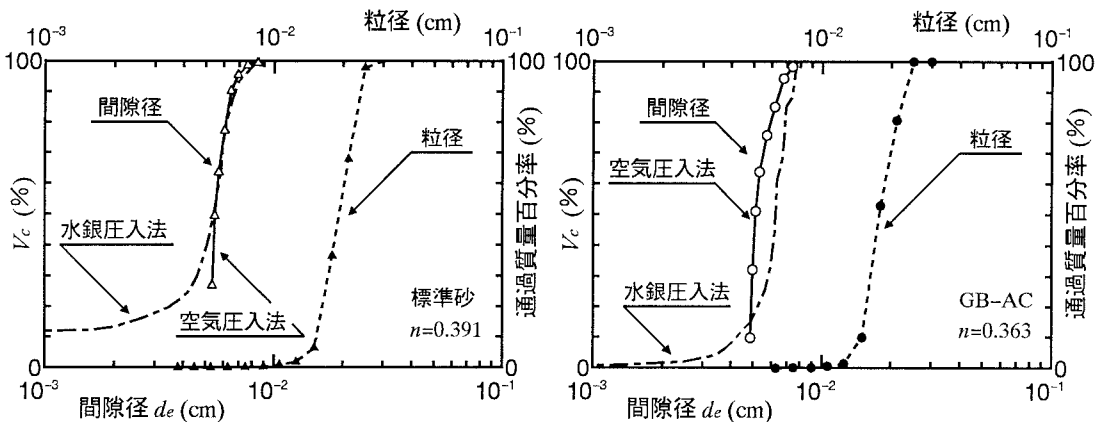


図-1 (a) 粒度分布と間隙径分布(標準砂)

図-1 (b) 粒度分布と間隙径分布(GB-AC)

表-1 平均粒径と平均間隙径

| 試料名   | $d_e^*$ (cm) | $D_w$ (cm) | $d_e^*/D_w$ | $d/D_m$ | $n_{e,max}$ | $n$   | $n_{e,max}/n$ | $\alpha$ |
|-------|--------------|------------|-------------|---------|-------------|-------|---------------|----------|
| GB-C  | 0.0110       | 0.0359     | 0.31        | 0.36    | 0.300       | 0.348 | 0.86          | 0.86     |
| 標準砂   | 0.00587      | 0.0188     | 0.31        | 0.43    | 0.286       | 0.391 | 0.73          | 0.73     |
| 標準砂   | 0.00542      | 0.0188     | 0.29        | 0.42    | 0.295       | 0.386 | 0.76          | 0.69     |
| GB-AC | 0.00540      | 0.0178     | 0.30        | 0.38    | 0.327       | 0.363 | 0.90          | 0.80     |

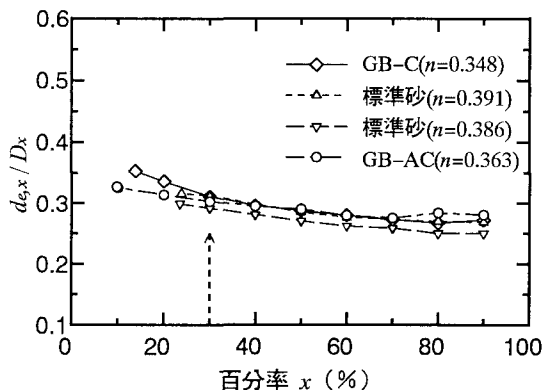


図-2 粒度分布と間隙径分布の比

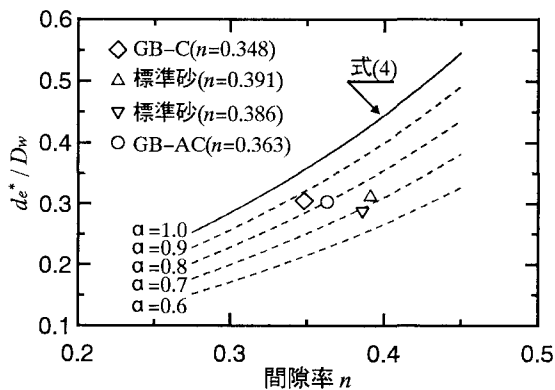


図-3 平均間隙径、平均粒径と間隙率

図-2は、図-1の $V_c$ 及び通過質量百分率の $x\%$ のときの間隙径 $d_{e,x}$ の粒径 $D_x$ に対する比を示したものである。 $d_{e,x}/D_x$ はほぼ一定であり、間隙径分布は粒度分布に対して相似的な位置関係にあることがわかる。また、いずれの試料についても $d_e^*/D_w \approx 0.3 \approx d_{e,30}/D_{30}$ の関係となっている。

次に、粒径と間隙径の関係については、間隙を毛管と仮定して誘導されるKozeny-Carman式に基づいて、透気試験から求まる平均間隙径 $d$ (cm)、平均粒径 $D_m$ (cm)と $n$ の関係が次式で表される<sup>3)</sup>。

$$\frac{d}{D_m} = \frac{2}{3} \frac{n}{1-n} \quad \dots \dots \dots (4)$$

表-1では、 $d_e^*/D_w$ は $d/D_m$ より小さくなる傾向にあり、式(4)の $d/D_m$ を $d_e^*/D_w$ に置き換えるには、式(4)を修正する必要がある。本報告では、式(4)に修正係数 $\alpha = (d_e^*/D_w)/(d/D_m)$ を乗じて、 $d_e^*$ 、 $D_w$ と $n$ の関係を次式で定義する。

$$\frac{d_e^*}{D_w} = \frac{2}{3} \alpha \frac{n}{1-n} \quad \dots \dots \dots (5)$$

図-3は、 $d_e^*/D_w$ を $n$ に対して示したものである。また、図中の実線及び点線は式(5)の関係を示したものであり、 $\alpha = 1.0$ のときに式(4)に一致する。各試料についての $\alpha$ を求めると、GB-Cで $\alpha = 0.86$ 、標準砂で $\alpha = 0.73$ 、 $0.69$ 、GB-ACで $\alpha = 0.80$ である。 $\alpha < 1.0$ となるのは、①ある一定断面をもたない連続した間隙が存在する場合に、 $d$ は全間隙体積を考慮して算出されるのに対して、 $d_{e,i}$ や $d_e^*$ は最小断面部分に近い間隙径であること、②表-1より $\alpha \approx n_{e,max}/n$ であるから、 $\alpha$ は空気が通り抜ける間隙部分のみの間隙率を考慮するような値であること、が考えられる。

5. おわりに 本報告では、比較的粒径が均等な砂のような粒状材料に関して、粒度分布と空気圧入法により得られた間隙径分布を比較した結果、①間隙径分布は粒度分布に対して相似的な位置関係にある、②間隙径は粒径の3割程度の大きさであること、を述べた。

【参考文献】 1)宇野尚雄・神谷浩二・大堀健一：空気圧入法による粒状材料の間隙径分布測定、平成5年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp.391-392、1994。 2)T.Uno, K.Kamiya : Air Intrusion Method to Measure Sand Void Diameter, Proc. of the 10th ARC on ISSMFE(1995,投稿中)。 3)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.469/Ⅲ-23, pp.25-34、1993。