

粒度分布との関係でみた砂の間隙径分布の評価

岐阜大学工学部 正会員 ○神谷 浩二
同 上 フェロー 宇野 尚雄

1. はじめに

本研究は、砂質土の間隙構造の評価・表現法を究明するものである。筆者らは、提案の「空気圧入法」(以下、圧入法と呼ぶ)と従来法の「水分法」による間隙径分布を対比して^{1)・2)}、後述するように、両者の間に生じる分布差には間隙構造の特徴が反映していることを見出した³⁾。本報告では、圧入法と水分法による間隙径分布のそれぞれに対して粒度分布が与える影響を分析する。即ち、間隙空間を形成する土粒子部分の状態量の観点で、間隙径分布を検討することにより、間隙構造の機構解明への手掛かりを得ようとするものである。

2. 圧入法と水分法の対比および間隙径分布の意義^{1)~3)}

圧入法は¹⁾、水で飽和した砂試料層へ空気を圧入したときの空気圧力と空気透過量の関係を用いて、間隙径 d_e (mm)と累積間隙体積百分率 V_b (%)の関係の間隙径分布を求める方法である。一方、水分法は²⁾、水分特性曲線から間隙径分布を求める方法であり、それは間隙径 d_m (mm)と累積間隙体積百分率 V_r (%)の関係で表される。

図-1は、圧入法と水分法による間隙径分布を対比して示したものであり、質量および個数基準による粒度をそれぞれ重ね合わせて示した。なお、水分法の間隙径分布は、排水過程での水分曲線から求めたものである²⁾。一方で、質量粒度は粒径 D (mm)と通過質量百分率 P_M (%)の関係で示し、個数粒度は、粒子質量を粒子数に換算する方法に基づき、 D と通過個数百分率 P_N (%)の関係で示した。

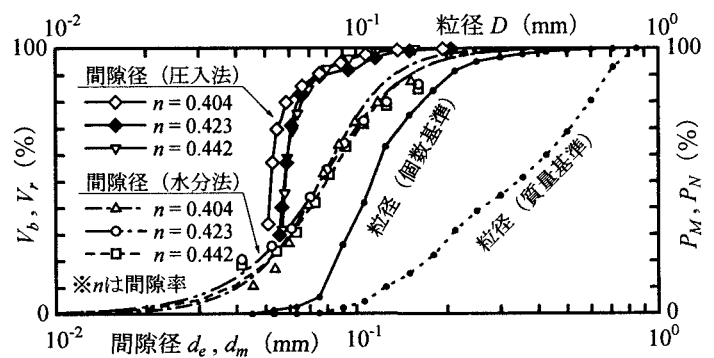


図-1 間隙径分布と粒度分布(試料名称:混合砂B)

さて、水分法では質量粒度を水平移動したような分布型をもつ間隙径分布が得られるのに対して、圧入法では狭い間隙径範囲で頻度が高い均等な間隙径分布が得られる²⁾。圧入法と水分法による間隙径 d_e と d_m は等大であるので、両手法による間隙径分布のずれは、間隙体積の評価量としての圧入法の累積間隙体積百分率 V_b と水分法の V_r の差によるものである²⁾。

圧入法では、飽和試料への空気圧入によって空気流が生じた間隙部分を毛管モデルで近似する仮定に基づくのに対して¹⁾、水分法では、間隙水が保持された間隙部分を毛管近似するという原理的な相違がある²⁾。一方で、圧入法の妥当性は、毛管モデルそのもので間隙径分布が既知の「毛管模型」の計測により検証している¹⁾。従って、圧入法で評価の間隙体積は空気流に寄与の間隙部分の毛管体積に相当し、水分法では毛管モデルからのずれとして「間隙が瘤状に広くなったりする」空間の全体積に相当し、同じ間隙径に対応の V_b と V_r が異なる原因である³⁾。

即ち、図-2のような間隙部分(白塗り部分と塗りつぶし部分)において、圧入法による間隙径分布は、空気の毛管流に寄与の間隙部分(白塗り部分)のみを表現したものという意義を有する。それに対して、水分法によるものは、瘤状の間隙空間(白塗り部分と塗りつぶし部分)を表現したものという意義を有する³⁾。

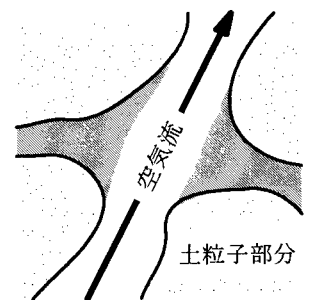


図-2 瘤状の間隙部分

3. 質量・個数基準の粒度と圧入法・水分法による間隙径分布

(1) 分布型の対応 図-1で先述したように、水分法による間隙径分布は質量粒度とほぼ同じ分布型をもつ。即ち、水分法では分布型が質量粒度によって決まる。一方、圧入法による間隙径分布は、質量粒度や水分法による間隙径分布に較べて、均等な分布型を示す。この特徴は、図-1のように、質量粒度に対して個数粒度が均等な分布型になることと類似する。従って、圧入法では分布型が個数粒度に影響され易いと考えられる。

(2) 粒径と間隙径 平行関係の水分法による間隙径分布と質量粒度の間には、次の関係が成立する⁴⁾。

$$d_m = \beta_r D \quad (\beta_r \text{は砂試料の状態により決まる定数}) \quad (1)$$

即ち、質量粒度の各々の粒径 D に β_r 値を乗じて間隙径 d_m に変換したものは、水分法による間隙径分布に相当する。

砂試料について調べた β_r 値を間隙比 e との関係で示したのが図-3 である。図中の破線のそれぞれは、 $\beta_r = a \cdot e$ の関係を各試料での測定値に対してフィッティングさせたものであるが、間隙比の増加量に対して一定の割合で β_r 値は大きくなる。

次に、Carman による粒径と間隙径の関係に基づく⁵⁾、 β_r 値は、理論的に、次式(2)のように間隙比 e と粒子の形状係数 K_s を用いて表される。なお、 K_s 値は、粒子の比表面積から算出でき、粒子が球形のとき 6 で、角張るほど 6 以上の大きな値になる⁵⁾。

$$\beta_r = 4e/K_s \quad (2)$$

図-4 には、図-3 の整理より算出した β_r/e の値を形状係数 K_s に対して示し、式(2)の関係を実線で併記した。長良川砂、混合砂 A、混合砂 B では、実線の理論的關係からずれが生じる。

このずれの意味を検討するために、質量粒度の均等係数 U_c に対する β_r 値の相関を調べた。図-5 は、式(2)により β_r 値から e と K_s の影響を除いたときの $\beta_r/(4e/K_s)$ 値を U_c に対して示したものである。 U_c が 1 に近いとき $\beta_r/(4e/K_s) \cong 1$ であるが、 U_c が 2~3 程度の長良川砂、混合砂 A、混合砂 B では $\beta_r/(4e/K_s)$ 値は 1 より小さくなる。ところで、福田らは個数粒度の代表値としての「粒度評価径 $D_c(\text{mm})$ 」を提案した⁶⁾。結果的に、 D_c は次式(3)のように質量粒度の 50% 粒径 D_{50} と U_c を用いて表される。

$$D_c/D_{50} = 0.3/\exp[0.5(0.484 + 0.420 \cdot \ln U_c)^2] \quad (3)$$

図-5 には式(3)の関係を実線で示した。一方、図中の破線は、式(3)により求めた D_c/D_{50} 値を 4 倍して示したものであるが、 $\beta_r/(4e/K_s) \cong 4D_c/D_{50}$ の関係が認められる。従って、 β_r 値は、理論的な式(2)に較べて、次式によって表すことができる。

$$\beta_r = 4.8e/K_s / \exp[0.5(0.484 + 0.420 \cdot \ln U_c)^2] \quad (4)$$

式(1)の β_r 値は質量粒度の粒径からの間隙径 d_m の差を表し、その差は、上述のように質量粒度の粒径 D_{50} からの個数粒度の粒径 D_c の差と相関をもつ。即ち、 β_r 値には e 、 K_s と個数粒度が影響すると考えられる。結論的に、式(1)、式(4)より、水分法の間隙径 d_m は間隙比 e 、粒子形状 K_s 、 U_c を用いて表現の個数粒度の影響量、質量粒度の粒径 D との関係で表され

また、圧入法の間隙径 d_e は、水分法の d_m と等大であるため²⁾、同様に e 、 K_s 、 U_c 、 D を用いて表される。

4. おわりに 本報告では、圧入法の間隙径分布と個数粒度の分布型が類似し、水分法では質量粒度の分布型と合致すること、一方で、両手法の間隙径は質量および個数粒度の影響を受けることがそれぞれ判明した。粒度と間隙径分布の特徴的な関係が、両手法の分布差に起因の間隙構造を解明するための手掛かりと考える。

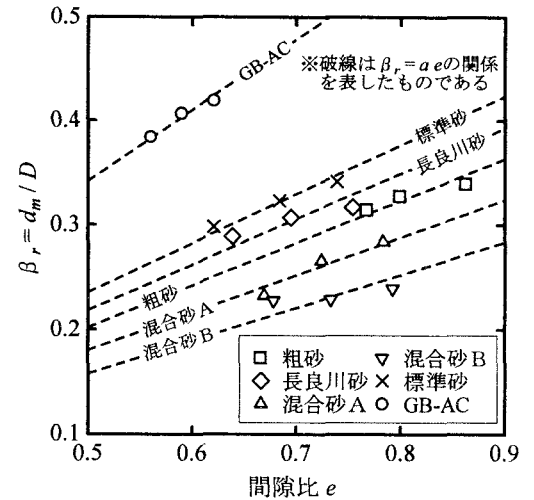


図-3 間隙比と β_r 値の関係

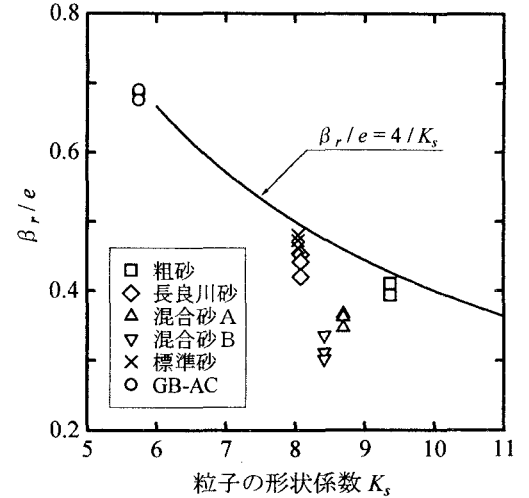


図-4 粒子の形状係数と β_r/e の関係

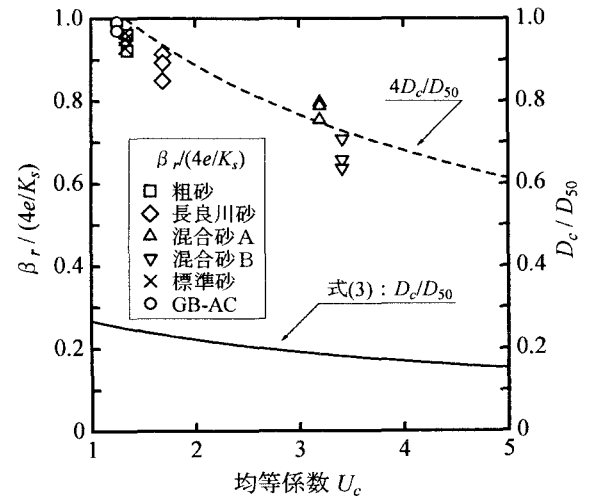


図-5 質量粒度の U_c と $\beta_r/(4e/K_s)$ 、 D_c/D_{50} との関係

参考文献 1) 神谷ら：「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) 宇野ら：「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布，土木学会論文集，No. 603/III-44，pp. 35-44，1998. 3) Uno, T. et al. : Estimation of void diameter distribution of sands, *Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - Tenth Asian Regional Conference*, Vol.1, pp.129-132, 1999. 4) 神谷ら：間隙径分布からみた砂質土の間隙評価，土木学会中部支部平成 10 年度研究発表会講演概要集，pp. 309-310，1999. 5) 宇野ら：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. 6) 福田ら：「粒度評価径」の提案とそれに基づく日本統一土質分類法の分析，土木学会論文集，No. 582/III-41，pp. 125-136，1997.