

水分保持特性曲線に基づく間隙構造とtailing現象の考察

信州大学工学部 正会員 棚橋 秀行
 信州大学工学部 非会員 藤原 千寿子(現 三田市)
 信州大学工学部 正会員 梅崎 健夫

1.はじめに ガラスビーズを用いたカラム実験を行い、団粒構造を持たない試料のtailing現象の発生メカニズムを水分保持特性曲線の形状に基づいて検討した。

2.実験の方法と結果 試料はガラスビーズGMB-05(粒径43~60 μm)、GMB-10(粒径90~140 μm)、GB-G(粒径120~212 μm)と豊浦砂(粒径110~420 μm)である。加圧板法によって求めたこれらの水分保持特性曲線を図-1に示す。内径5.0cm、高さ20.3cmの透明アクリルカラムに、試料を乾燥密度 $\rho_d=1.55\text{g}/\text{cm}^3$ で充填し、ポンプによって NH_4Cl 水溶液(原水 Cl^- 濃度 $C_0=228.6\text{mg/l}$)を試料層に通水した。流出 Cl^- 濃度 C を一定時間ごとに測定して得た破過曲線の一例を図-2に示す。本研究ではtailing現象の領域を相対濃度が0.9から1に達するまでの流量として図-2のように定量化した。これをもとに実験結果を整理したところ、図-3に示したようにダルシー流速が大きくなるほどtailing現象が顕著になることがわかった。しかし、その度合いは試料によってかなり異なる。tailing現象にもっとも違いのみられたダルシー流速 $1.5 \times 10^{-1}\text{cm}/\text{min}$ のケースに着目し、それぞれの試料の水分保持特性曲線の形状とtailing現象の関係を整理した結果を図-4に示す。水分保持特性曲線の形状の指標には、有効飽和度50%の点から残存飽和度に漸近する最初の点と、飽和度100%になる最初の点までのそれぞれの縦方向の長さの比(a/b)を用いた。図-4から、指標(a/b)が大

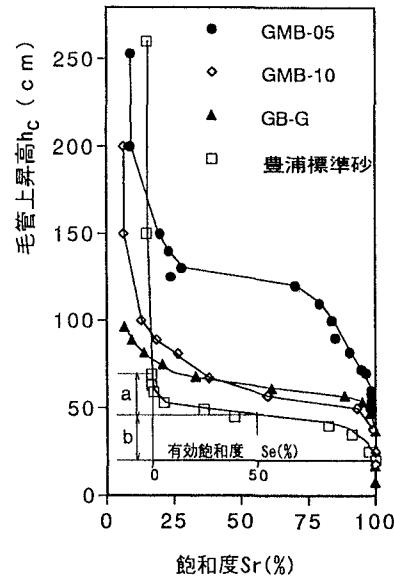


図-1 水分保持特性曲線

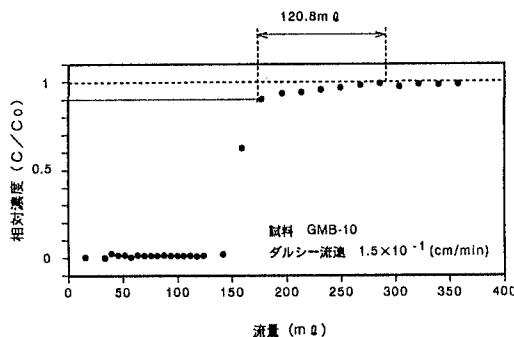


図-2 破過曲線

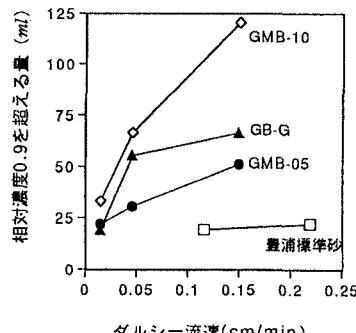


図-3 ダルシー流速とtailing現象

破過曲線、tailing現象、水分保持特性曲線

〒380 長野市 若里500 TEL 026-226-4101 FAX 026-223-4480

きいほどtailing現象が顕著になる線形的な相関が明らかになった。この近似直線が原点を通るということは、 $a=0\text{cm}$ では相対濃度0.9付近で破過曲線が垂直に切り立った形状になることを意味している。

3. 水分保持特性曲線の形状からみた間隙構造 水分保持特性曲線の形状から試料の間隙構造がどのように説明されるかを考える。従来より、土中の間隙を毛細管に置き換えて考えることがよく行われている。水温25度において毛細管上昇高 $h_c(\text{cm})$ と毛細管径 $d(\text{cm})$ の間には次式のような関係があることが知られている¹⁾。

$$h_c = 0.3/d \quad (1)$$

図-1において飽和度100%近傍における毛管上昇高を h_{c1} 、そのときの毛細管径を d_1 とする。同様に有効飽和度50%および残存飽和度近傍におけるそれぞれの値を、 h_{c2} と d_2 および h_{c3} と d_3 とすると、水分保持特性曲線の形状の指標(a/b)と毛細管径($d_3 < d_2 < d_1$)は次式のような関係を持つ。

$$\begin{aligned} a/b &= (h_{c3} - h_{c2}) / (h_{c2} - h_{c1}) \\ &= (d_1/d_3) \cdot (d_2 - d_3) / (d_1 - d_2) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 d_1, d_3 を一定とした場合、式(1)を用いて水分保持特性(飽和度Sr～毛管上昇高 h_c)曲線を有効飽和度Seと毛細管径の関係に置き換えると図-5のようになる。このとき、有効飽和度Seは次式のように表わされる。

$$Se = \sum_{i=m}^1 n_i \pi \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 l / (V_v - V_r) \quad (3)$$

ここで、 m :毛細管の区分数、 n :管径 d_i の毛細管の本数、 l :単位奥行き1(cm)、 V_v :間隙全体積(cm³)、 V_r :残存飽和度部分の間隙体積(cm³)である。式(3)からもわかるように、図-5は毛細管の集合体の体積を径の小さいものから大きいものへと累積したものである。 d_2 は有効飽和度50%に対応するので、管径 $d_3 \sim d_2$ までの毛細管の累積体積と管径 $d_2 \sim d_1$ までの毛細管の累積体積はいずれも50%となる。 d_1, d_3 を一定とした場合、 a/b の大小が d_2 の値によって左右される。図-6は、有効飽和度Seを各毛細管ごとの体積の割合に置き換えて整理したものである。 d_2 は有効飽和度50%に対応するので、管径 $d_3 \sim d_2$ までの曲線に囲まれた部分の面積 A_1 と管径 $d_2 \sim d_1$ までの曲線に囲まれた部分の面積 A_2 はいずれも50%になる。 a/b の小さいときには管径 $d_3 \sim d_2$ までの小さな毛細管が多く分布しており、 a/b の大きいときには管径 $d_2 \sim d_1$ までの大きな毛細管が多く分布していると考えられる。

4. 間隙構造とtailing現象の発生メカニズム 3.で考察したように、 a/b の小さい試料では小さな毛細管が多く分布している。このためカラム実験において流速が大きくなても比較的均一に溶液が流れるためtailing現象があまり発生しなかったと考えられる。一方、 a/b の大きい試料は、大きな毛細管が多く分布しており、流速が大きくなると溶液が通りやすい大きな間隙を優先的に流れ、小さな間隙へ溶液が行きわたるのが遅れるためにtailing現象が発生やすいと推測される。

5.まとめ 団粒構造を持たないガラスビーズの破過曲線のtailing現象に着目し、実験的検討を行った。その結果、水分保持特性曲線の形状とtailing現象を定量的に相關づける指標を提案した。また、水分保持特性曲線の形状から間隙構造を介してtailing現象の発生メカニズムを説明できることを示した。

参考文献 1)赤井浩一：土質力学,p.33,朝倉書店,1988.

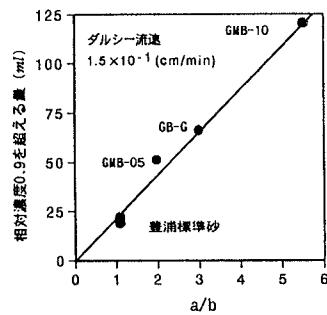


図-4 水分保持特性曲線の形状とtailing現象

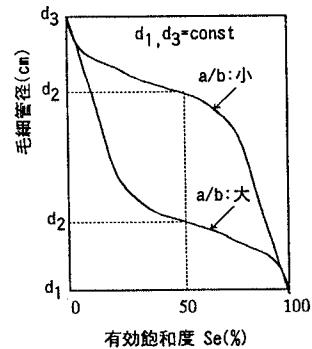


図-5 有効飽和度と毛細管径

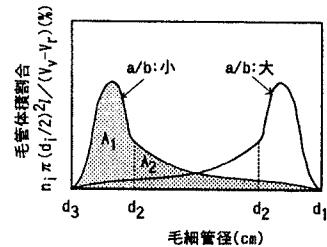


図-6 毛細管径と毛管体積割合