

粗面を持つ細管内の不飽和流に関する実験的研究

名古屋大学大学院 学 生 員 ○ 鷺見 哲也
 名古屋大学工学部 正 会 員 松林宇一郎
 名古屋大学工学部 フェロー 高木 不折
 名古屋大学大学院 高柳 俊伸

1. はじめに 山地土壌における表層土壌において、浸透や流出に大きく寄与する Soil-Pipe や Macropore のような粗空隙内の速い流れ（選択流）については、その物理法則が明確にされているとは言えない。そこで、粗空隙をもつ土壌中の浸透のモデル化を先の目標として、本研究ではその素過程として単独の粗空隙の代わりに mm オーダーの細管を考え、その構成則としての流量-飽和度の関係を実験により求め、さらにその物理的表現を試みた。すでに 鷺見ら¹⁾ によって鉛直滑面パイプにおける実験が行われており、物理的説明がなされている。今回は、粗面を持ったものについて、傾斜もつけた場合を含めて報告する。

2. 実験方法 より土壌パイプに近いものを見るための粗面のパイプは、図 2-2 のように、半径 4mm の半円上の直線の溝を彫った 2 枚の塩化ビニール板を用意し、接着剤を薄く塗布された溝の表面に平均粒径 0.75mm のガラスビーズを張り付け、お互いの溝をあわせて作成された。飽和状態から排水された水の体積を有効管内体積として飽和度の計算に用い、また、これから得られた有効内径 6.8mm を以後内径として用いる。また、管の角度 β は 90° , 85° , 73.6° , 30° の 4 ケース設定した。不飽和流の流況は、滑面の場合には図 2-3 のようにおよそ 3 つに分けられ、粗面も同様の状況であると予想される。低流量の層流領域(a)と乱流領域(c)および遷移領域(b)である。ここでは、領域(a)と領域(c)のモデル化を行う。

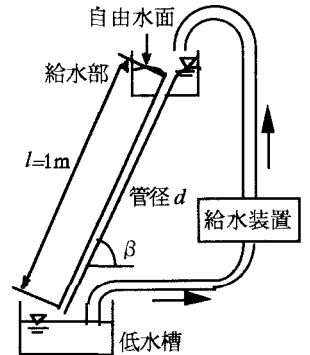


図 2-1 実験装置の概要

3. 結果とその定式化 流量と飽和度の関係を示したのが図 3-1 である。各プロットは傾斜角の違いを示している。またここには乱流理論式による理論値を併記してある。これは、以下の手続きで得られた。まず満管時の流量を対数分布則においても現れるように、壁面粗さの特性量 y_0 (流速 0 と見なす壁面からの距離) を求めた (0.039mm)。 (Colebrook²⁾ の仮定 $y_0 = ks/33$ を用いて求めた相当粗度 ks は 1.275mm であり、ガラスビーズ平均粒径の 1.7 倍となった。) この y_0 を用いて、実際は気泡流であるところを同心円の環状流と仮定し、力の釣り合いから得られるせん断応力と Prandtle の運動量輸送理論及び混合距離を決める Prandtle の仮説から、次式を得た。

$$u(y) = \int_{y_0}^y \frac{u_*}{\kappa \sqrt{r}} \frac{\sqrt{r-y}}{y} dy = \int_{y_0}^y \frac{\sqrt{gl\theta/2}}{\kappa} \frac{\sqrt{r-y}}{y} dy$$

r : 管内半径 $\kappa=0.4$
 y : 壁面からの距離
 l : エネルギー勾配

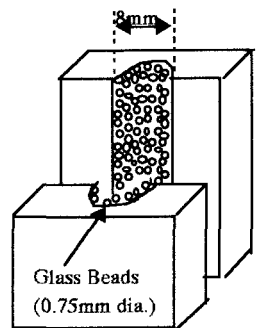


図 2-2 粗面の作成

これによる不飽和領域の理論値はよく実験値を再現している。気泡流であるが、中心付近の流速に分布がないことが関わっていると考えられる。

一方、層流領域 ($\theta < 50\%$) は、図 4-2 の Moody 線図上の各傾斜角に於ける勾配-1 の直線部分に対応する。図 4-1(b) から、Beven and Germann³⁾ の理論式 (以下 B&G) ,

$$Q_{B\&G} = \frac{\pi g l r^4}{8\nu} \left\{ \theta(3\theta - 2) - 2(1 - \theta)^2 \ln(1 - \theta) \right\}$$

に比べ、いずれの傾斜角においてもこれより下回っており、壁面からのせん断抵抗が理論より上回っていることがその原因である。もし一様薄膜流と仮

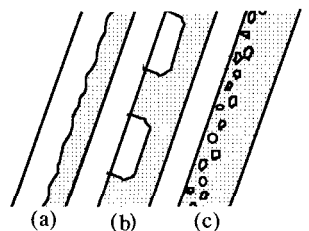
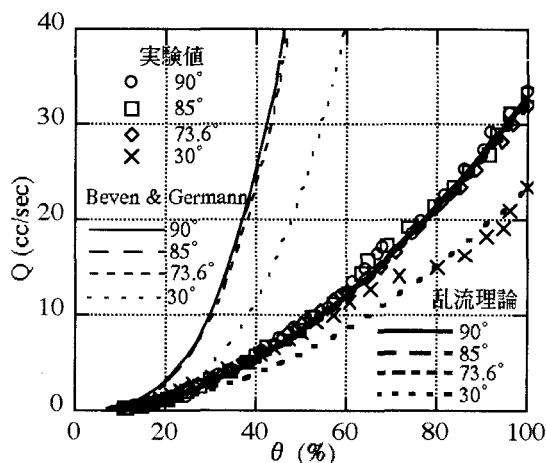
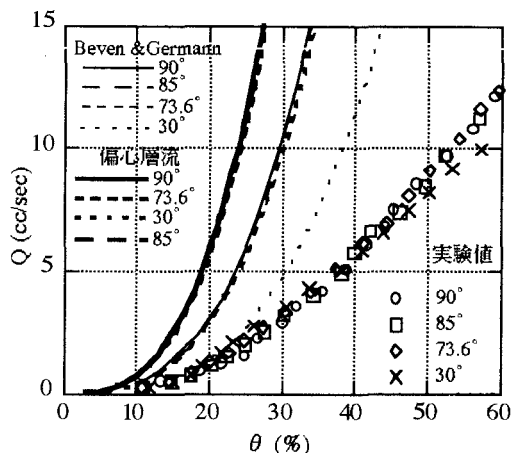


図 2-3 不飽和流の流況



(a) 全体図



(b) 低流量領域の拡大図 (層流)

図3-1 Q-θの実験結果と理論式との比較 (粗面, 内径 6.8 (m))

定し、表面の凹凸の大きさが水膜厚さに匹敵する場合、凹凸によって流線は管の方向の座標軸よりも長くなり、また潤辺も平均円周長より長くなる。もしガラスビーズが正方配列で密に張り付けられた場合、単位管壁面積あたりの実表面は約 1.8 倍となる。このような効果が流量を抑えることとなる。ここで、B&G の流量理論値に対する実験値の比 α_q を図 4-4 に示すが、ここには、①今述べた抵抗の増大による効果、②傾斜に起因する流水断面の偏りに伴う流量の増大効果、及び③勾配による駆動力としての重力の影響の変化、の 3 つが現れている。但し、凹凸の効果があるのは壁面近傍にある流線だけであるから、①の効果は飽和度の増大に伴い薄れる。以上から、壁面の粗度、管の内径及び傾斜角をパラメータとして、 α_q を飽和度に対する関数に表現できればよいと考える。一方で、図 3-2 において実験値が B&G 式からはずれていることから、水理径深 R をこれらの要因から評価することによっても再現することができると考えられる。

4. 最後に 本研究では、流量-飽和度関係の層流領域の定性的説明と、乱流領域のモデル化を行った。今後は、空隙の形状等の情報を入れた形で、土壌一体としての挙動を表現するモデルの開発に繋ぎたい。最後に、平成 8 年度文部省科学研究費補助金 (特別研究員奨励費) の補助を受た事をここに深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 鷺見ら:鉛直パイプ内の不飽和流に関する基礎的研究,水工学論文集,第 40 巻,pp.419-425,199
- 2) 椿東一郎, 水理学 I, 森北出版, pp.86-93, 1973
- 3) Beven, K. and Germann, P.: Water Flow in Soil Macropores II. A Combined Flow Model, J. of Soil Science, 1981, Vol.32, pp.15-29, 1981