

細いパイプ内における不飽和流

名古屋大学大学院 学生員 ○ 鷲見 哲也
 名古屋大学工学部 高柳 俊伸
 名古屋大学工学部 正会員 松林宇一郎
 名古屋大学工学部 正会員 高木 不折

1. はじめに 山腹斜面などの現地表層土中の浸透に対し、Darcy流れだけでなくSoil-PipeやMacroporeのような粗空隙内の速い流れの寄与が大きい事が言われている。その物理的説明を長期目標として、本研究では粗空隙内流れの素過程としてmmオーダーの空隙内不飽和流を考え、その最も単純な条件である滑らかな鉛直円管内不飽和流の流量と飽和度の関係について、理論的考察及び実験を行った。

2. シートフローの理論 壁面と同心円のシートフローを形成したと仮定し、その層流の場合の流量を、Beven and Germann(1981) (以下B&G) は式(1)で表している。ここに、 r :管内の半径、 f :空気柱の半径、 ν :動粘性係数、 g :重力加速度である。次に、乱流層を伴ったシートフローについて考えてみる。ここでは、Prandtl-Karmanの対数分布則を用いないで、以下のように取扱う。図-1のような円管内の鉛直シートフローを考えると、壁面からの距離 ζ における剪断応力 τ は、力の釣合から式(2)となる。次に、壁面のごく近傍では粘性底層(厚み δ_L)があり層流状態であるから、剪断応力は式(3)で表され、式(2)から流速分布 u は式(4)となる。粘性底層の厚み δ_L については、その無次元量 $\delta_L^* = \delta_L u_* / \nu = 8.0$ とした(u_* :摩擦速度)。それより中心側は乱流となる。そこでの渦動粘性係数 ε はPrandtlの運動量輸送理論により $\varepsilon = l^2 |du/d\zeta|$ であるが、混合距離 l は壁面乱流におけるPrandtlの仮説 $l = \kappa y$ (y :仮想壁面からの距離、 $\kappa = 0.4$)を適用し、ここで y を便宜上壁面からではなく、粘性底層境界から外側に y_0 の位置からとる。これにより $y = \zeta - \delta_L + y_0$ が与えられ、

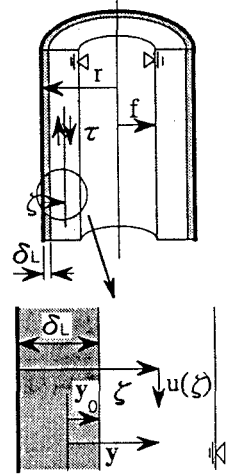


図-1 乱流の理論

ここでの τ は最終的に式(5)となり、また、 y_0 は粘性底層との境界 $\zeta = \delta_L$ における式(2)の τ と式(5)から式(6)で表される。Prandtl-Karmanの対数分布則では、 ζ に関係なく $\tau = \tau_0 = \tau(\zeta = 0)$ と仮定しているが、ここでは剪断応力の式(2)をそのまま用いる。以上から流速 u の微分方程式は式(7)となり、 $\zeta = \delta_L$ における式(4)の流速との接続を考慮して式(7)を数値的に積分すると、乱流領域での流速分布 $u(\zeta)$ が得られる。これと式(4)から式(8)で流量が計算される。

以上から、細いパイプでは影響の大きい粘性底層を無視する事なく流速分布を表現できるかどうか、次の実験を行ってその適用を試みた。
 3. 鉛直円管内不飽和流の実験 この実験では、円管内不飽和流の流量による状態の遷移の観察と、流量と飽和度の関係の把握と考察を行った。

3.1 実験装置と実験方法 滑らかな円管として内径 $r = 4\text{mm}$ のガラス管と内径 $r = 6, 8, 10\text{mm}$ の透明塩化ビニール管を用いた。図-3のように、鉛直に配置された長さ 2m の円管の上端からは自由水面から流入するようにし、

$$Q_L = \frac{\pi g}{8\nu} \left\{ (r^2 - f^2) (r^2 - 3f^2) - 4f^2 \ln \frac{f}{r} \right\} \quad (1)$$

$$\tau(\zeta) = \rho g \frac{(r - \zeta)^2 - f^2}{2(r - \zeta)} \quad (2) \quad \tau = \rho \nu \frac{du}{d\zeta} \quad (0 \leq \zeta \leq \delta_L) \quad (3)$$

$$u = \frac{g}{2\nu} \left(\frac{r^2 - (r - \zeta)^2}{2} + f^2 \ln \frac{r - \zeta}{r} \right) \quad (0 \leq \zeta \leq \delta_L) \quad (4)$$

$$\tau = \rho \kappa^2 (\zeta - \delta_L + y_0)^2 \left(\frac{du}{d\zeta} \right)^2 \quad (5) \quad y_0 = \frac{\nu}{\kappa} \sqrt{\frac{2(r - \delta_L)}{g \{ (r - \delta_L)^2 - f^2 \}}} \quad (6)$$

$$\frac{du}{d\zeta} = \sqrt{\left(\frac{g}{2\kappa^2} \right) \frac{(r - \zeta)^2 - f^2}{(r - \zeta)(\zeta - \delta_L + y_0)}} \quad (\delta_L \leq \zeta \leq r - f) \quad (7)$$

$$Q_r = 2\pi \int_0^{r-f} (r - \zeta) u(\zeta) d\zeta \quad (8)$$

$$Q_{LB} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\pi g}{8\nu} \left\{ (r_b(\alpha)^2 - f^2) (r_b(\alpha)^2 - 3f^2) - 4f^2 \ln \frac{f}{r_b(\alpha)} \right\} d\alpha \quad (9)$$

$$r_b(\alpha) = a \cos \alpha + \sqrt{r^2 + a^2 (\cos^2 \alpha - 1)}$$

図-2 理論式

下端は開放した。流量の制御を可能とした上で、飽和度と流量の関係を測定した。飽和度の管内平均は、管の上下端を同時に封鎖の後に排水して測定した管内貯留量を管内体積で除して求めた。また、動粘性係数を粘度計で測定した。

3.2 実験結果と考察 図-4は流量 Q と管内飽和度 θ の関係を管径毎にプロットしたものであり、各径とも一度折れ曲がった曲線となる。平均実流速 v ($=$ 流量/ $($ 管断面積 $\times$ 飽和度 $)$)をMoody線図に表したのが図-5である。ここに、摩擦損失係数 $f=8/(v/u_*)^2$ 、 $u_*= (gr\theta/2)^{-1/2}$ 、 $Re=2vr\theta/\nu$ である。図中、少ない流量では層流と見られる直線の部分にあり、流量の増加により径によって異なる Re 数で先に示した乱流の理論の曲線上に移移する。先の層流の部分は、B&Gの理論式から大きく外れて摩擦損失係数が小さくなっており、理論より輸送性が高い理由として、壁面に沿って水の厚みに偏りがあるのではないかと考えた。そこで、空気柱の中心が管の中心より a だけ偏心したとき(図-7)の層流の理論式として式(9)を考えたところ、偏心距離 a の水の厚み h に対する比 $a/h=0.85$ 程度の場合に実験結果を表現できる事がわかった。次に、平均実流速 v の無次元量 v/u_* と u_* のReynolds数との関係を、管径8mmで管長を変えて測定したもののについて図-6に示す。この図と実際にみられた流れの状態(図-8)を比較し、次のように考察した。状態<a>では、シートフローを形成し、水膜の偏りを伴う層流である。状態では、空気柱が閉塞されるようになり、セル状に流下する。状態<c>への遷移領域と見ることができる。状態<c>では、空気が中心付近を泡状に流下する。実際はシートフローではないが乱流の理論で近似でき、中心付近で流速の分布が小さい事がその理由として考えられる。また、管長50cmでやや離れるのは、上端付近で加速が終わるまでの短い区間で少ない流速による大きい流水断面が飽和度の管内平均値に影響するものと考えられる。

4. おわりに 単純な条件での流量と管内飽和度の間の関係を得、物理的な表現が可能になった。これを足掛かりに空隙の形状等の土壌空隙に関わる因子による影響について検討しようと考えている。最後に、本研究は平成7年度文部省科学研究費補助費(特別研究員奨励費)の補助を受けました。深謝申し上げます。

参考文献 1) Beven, K and Germann, P : Water Flow in Soil Macropores II. A Combined Flow Model, J. of Soil Science, 1981, 32, pp.15-29, 1981 2) 椿東一郎 : 水理学 I、森北出版、pp. 86-90

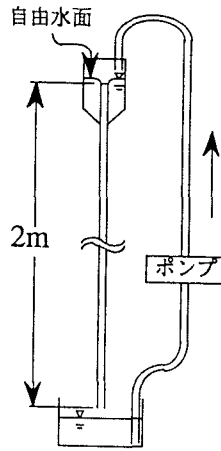


図-3 実験装置

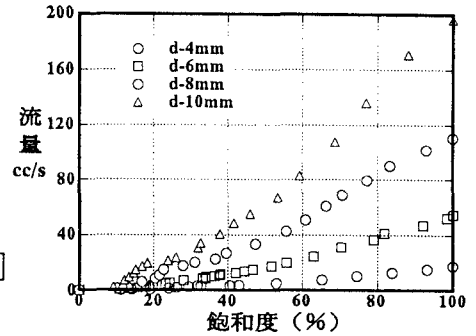


図-4 流量と飽和度

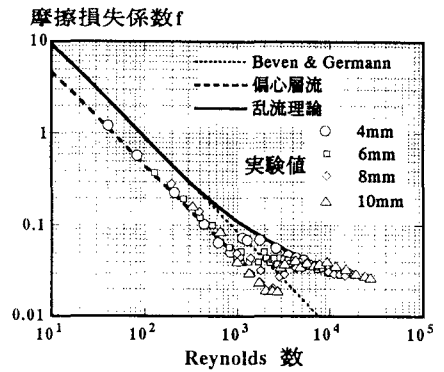


図-5 Moody線図

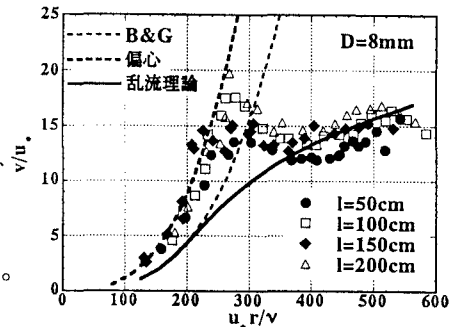


図-6 無次元表示

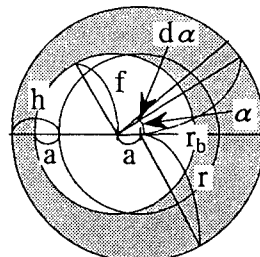


図-7 偏心の考慮

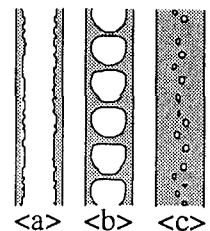


図-8 流れの状態