

現地浸透実験に基づく土壌の飽和・不飽和透水係数の評価について

九州大学大学院 学生員 ○ 新保 弘
九州大学工学部 正 員 神野 健二
九州大学工学部 正 員 粉井 和朗
九州大学工学部 正 員 上田 年比古

1. はじめに

本研究は、福岡市下水道局が住宅地等への設置を検討している雨水浸透樹に対して現地定水位浸透実験を行い¹⁾、浸透流量と現地土壌の土質および飽和・不飽和透水係数との関係について検討し、浸透流量に対する不飽和流れの寄与について考察を加えるものである。

2. 雨水浸透樹による現地浸透実験

図-1に、本研究で用いた浸透樹の概略を示す。定水位浸透実験の一定満水深Hは45cmと25cmに設定している。図-2に各実験地の土質柱状図、浸透樹の埋設深度、および実験前の地下水位を示す。

3. 解析方法

方法(1) 飽和流理論による方法²⁾：飽和流理論によれば、円形試験孔における定水位浸透試験では、飽和透水係数 k_0 (cm/s)と最終浸透流量 Q (cm/s)との関係は、地下水面と浸透樹内の水面との距離 Tu (cm)によって、次の3つの式で与えられている。

$$(a) Tuが水深Hの3倍以上のとき: k_0 = CQ / \{2\pi H^2 \{1 + C/2(a/H)^2\}\} \quad (1)$$

$$C = \text{arcsinh}(H/a) - \sqrt{(a/H)^2 + 1} + a/H$$

$$(b) H \leq Tu \leq 3Hのとき: k_0 = 3Q \ln(H/a) / \{\pi H(H + 2Tu)\} \quad (2)$$

$$(c) 地下水面が孔底より高いとき: k_0 = Q \ln(H/a) / \{\pi Tu(2H - Tu)\} \quad (3)$$

ここに、 a :試験孔半径(cm)、 H :孔内水深(cm)である。

方法(2) Reynolds and Elrickの近似解による方法³⁾：Reynoldsらは、土壌の不飽和特性を考慮したモデルから、次式を提案している。

$$Q = k_0 (2\pi H^2 / C + \pi a^2) + Q_u, \quad Q_u = 2\pi H \phi_m / C \quad (4)$$

C :土質特性と H/a から与えられる定数、 ϕ_m :マトリックポテンシャル

$$\phi_m = \int_0^{h_0} k_u(h) dh \quad h_0: 周辺土壌の初期サクション(cm) \quad (5)$$

いま、土壌の不飽和透水係数 $k_u(h)$ を次式で近似する。

$$k_u(h) = k_0 \exp(-\alpha h) \quad \alpha: 不飽和特性パラメータ(cm⁻¹) \quad (6)$$

式(6)を式(5)に代入し、 $h_0 \rightarrow \infty$ と仮定すると、 ϕ_m は近似的に $\phi_m = k_0 / \alpha$

で与えられる。以上のことから、方法(2)によれば、式(4)中の未知係数 k_0 、 ϕ_m は、同一の浸透樹において異なる満水深での定水位浸透試験を2回以上行うことにより求めることができる。

4. 解析結果および考察

表-1に、方法(1)、(2)により求めた飽和透水係数 k_0 、方法(2)により求めた不飽和特性パラメータ α を示す。これを見ると、方法(1)による k_0 の算定値は、方法(2)による k_0 に比べて大きくなっている。これは、方法(1)の飽和理論が不飽和域の影響を考慮していないためであると考えられる。また、方法(2)による百道、三宅の k_0 はほぼ同一の値となっているが、地下水面から浸透樹までの距離は三宅の方が長いことから、 Q は三宅の方が大きくなると考えられる。しかし、実際は百道の Q の方が約250cm³/s大きくなっている。これは、 α に代表される土壌の不飽和特性の違いによるものと考えられる。

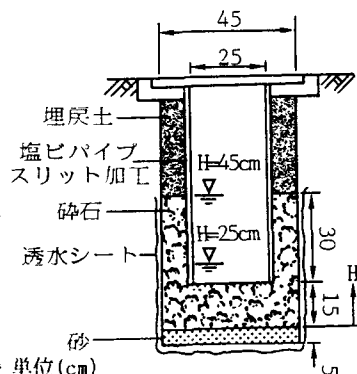


図-1 浸透ますの概略図

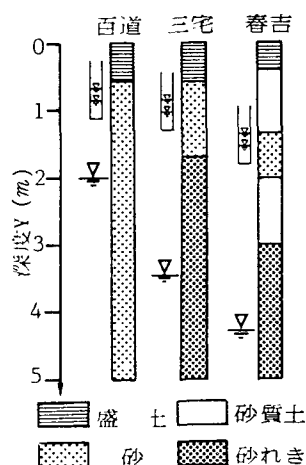


図-2 各実験地の土質柱状図、地下水位と浸透ますの位置

表-2には、最終浸透流量 Q に対する、方法(2)により算定した不飽和流れの項 Q_u の寄与を示している。表に示すように、 α^{-1} では百道は三宅の約2倍であり、 Q_u では百道は三宅に比べて約250 cm^3/s 大きくなっている。つまり、 k_o が同じでも、不飽和特性の違いにより Q は異なり、 Q_u の寄与は30%-50%と大きいことがわかる。

5. 不飽和特性式の改良

Mualemの土質カタログ⁵⁾から三宅、春吉の土壌と粒度分布が比較的よく似ているカタログNo.4138の資料を選び、図-3にそれらの粒度分布を、図-4に不飽和透水係数比 $k_r(h)=k_u(h)/k_o$ を示す。図より、粒度分布は概ね一致しているといえるが、 $k_r(h)$ はあまり一致していないことがわかる。そこで、飽和域付近の変化を表現するために、式(6)に代わり次式を考える。

$$k_u(h)=k_o \exp(-\beta h^2) \quad \beta: \text{不飽和特性パラメータ} (\text{cm}^{-1}) \quad (7)$$

式(7)を式(5)に代入、積分し、 $h_o \rightarrow \infty$ とすると、 β と式(6)中の α との関係は次式で表される。

$$\beta = \pi \alpha^2 / 4 \quad (8)$$

図-5に、式(8)の関係から求めた β を用いた三宅、春吉の $k_r(h)$ と、No.4138の $k_r(h)$ を示す。式(7)による $k_r(h)$ はNo.4138の砂の $k_r(h)$ とよく一致している。従って、方法(2)において、 $k_u(h)$ の関数形として式(7)を用いれば、より適切な土壌の $k_u(h)$ を簡単に推定できると考えられる。また、土質カタログを利用して、土壌の粒度分布から β を推定することも可能であろう。

6. おわりに

本研究で得られた結論を要約すると次のようである。

- 1) 浸透櫛を用いて地下水涵養を行う場合、飽和域よりも不飽和域に浸透櫛を設置した方が浸透流量は大きくなる。
- 2) 飽和理論により算定した飽和透水係数は、不飽和域を考慮して算定したそれに比べ過大な値となる。
- 3) 本実験に関しては、最終浸透流量に対する不飽和流れの項の寄与は30%-50%と、大きなものである。
- 4) 透水係数とサクションの関係式として $k_u(h)=k_o \exp(-\beta h^2)$ を用いることにより、より適切な不飽和透水係数を推定することができる。

最後に、本研究にあたり福岡市下水道局に多大なご協力を戴いたことを記し、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福岡市下水道局計画課：下水道（雨水）の改善計画調査報告書，昭和61年3月，昭和63年3月。
- 2) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック，建設産業調査会，p.289，昭和54年9月。
- 3) Reynolds, W.D., Elrick, D.E., and Clothier, B.E.: The Constant Head Well Permeameter (Effect of Unsaturated Flow), Soil Science, vol.139, No.2, p.172-180, 1985.
- 4) Stephens, D.B., Lambert, K., and Watson, D.: Regression Models for Hydraulic Conductivity and Field Test of the Borehole Permeameter, Water Resources Research, vol.23, No.12, p.2207-2214, 1987.
- 5) Mualem, Y.: A Catalogue of the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Hydrodynamics and Hydraulic Laboratory, Israel, 1976.

表-1 飽和透水係数 k_o (cm/s)と不飽和パラメータ α^{-1} (cm)の算定結果

実験地	半径 a (cm)	湛水深 H (cm)	最終浸透量 Q (cm^3/s)	(1)飽和理論 k_o (cm/s)	(2)Reynolds and Elrick k_o (cm/s)	α^{-1} (cm)
百道	22.5	45	1039	6.11×10^{-2}	3.68×10^{-2}	42.7
		25	783	8.46×10^{-2}		
三宅	22.5	45	783	4.60×10^{-2}	3.69×10^{-2}	18.6
		25	537	5.80×10^{-2}		
春吉	22.5	45	348	2.05×10^{-2}	1.54×10^{-2}	24.2
		25	244	2.64×10^{-2}		

表-2 最終浸透流量 Q に対する不飽和流れ Q_u の寄与

実験地	α^{-1} (cm)	Q (cm^3/s)	Q_u (cm^3/s)	Q_u/Q (%)
百道	43	1039	477	46
		783	457	58
三宅	20	783	219	28
		537	210	39
春吉	24	348	113	33
		244	108	44

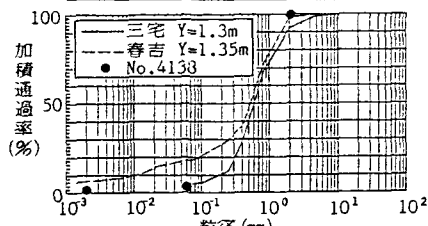


図-3 粒度分布

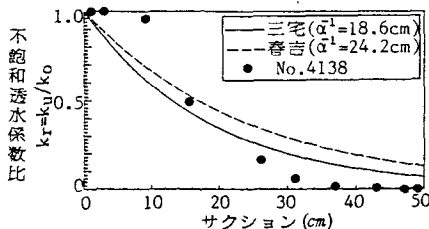


図-4 不飽和特性の比較(1)

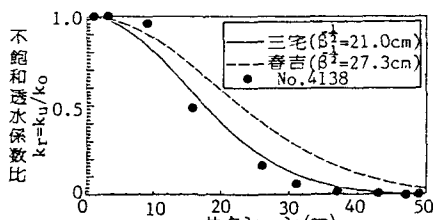


図-5 不飽和特性の比較(2)