

1. はじめに

斜面の降雨による崩壊現象や、洪水期の堤体の破壊は、土と水の相互作用によるものであり、この現象を解明するには土中への浸透、特に不飽和土中の浸透現象と、不飽和土の浸透による力学強度の低下現象を定量的に把握しなければならない。これらの中で、不飽和領域内の浸透現象に関しては、降雨の斜面への浸透による中間流の発生¹⁾や洪水の堤体内への浸透問題の解析がきわめて容易になっている。^{2), 3)}しかし、解析が、飽和領域と不飽和領域を対象としているために、透水係数と、不飽和状態の浸透特性が必要である。本報告では、これらの浸透特性を原位置で計測する方法について論述する。

2. 不飽和土の浸透特性

不飽和領域と飽和領域を網羅した浸透の支配方程式は連続の式と Darcy²⁾の式を不飽和領域まで拡張した式より、次式となる。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{sij} \cdot k_r(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + k_{sij} \cdot k_r(\psi) \delta_{ij} \right) \quad (1)$$

ここで $C(\psi)$ は比水分容量であり $(\partial \theta / \partial \psi)$ で定義される。すなわち、図-1 の $\theta - \psi$ の水分特性曲線の勾配により定められる値である。また、 k_r は負の圧力水頭 (ψ) あるいは体積含水率 (θ) に依存する関数で飽和の透水係数 k_s に対する不飽和の透水係数の比によって定められる。

3. 水分特性曲線

不飽和土の水分特性曲線を原位置で計測するには、浸潤試験あるいは排水試験により、地盤内の土の含水量の変化と負の圧力水頭の変化を時々刻々と計測する必要がある。地盤内の土の含水量の変化を非破壊状態で継続して計測するには、中性子水分計を用いる方法が一般的である。⁴⁾また、その体積含水率に対応する負の圧力水頭(サクション)を計測するには、テンションメータが用いられる。しかし、中性子水分計による計測はきわめて複雑で大掛かりな装置が必要であり、また、中性子の線源を絞ることが困難であることより、薄い層状の地盤では、それぞれの層の水分量の変化の計測が不可能である。一方、サクションの計測において、正の間隙水圧の測定のように間隙水圧計を土中に長時間埋設すると、ポーラスカップとダイアグラムの間の水が逸散することが多い。さらに原位置での重力だけによる水分量の変化はきわめて緩慢であるため計測が、数10日にも及ぶことが多く、計測できるデータが限られてしまう。このような原位置における水分特性の計測に対して、かく乱試料

を採取して室内でP_ψ試験を実施する方法は、きわめて広範囲の体積含水率の変化に対応する水分特性曲線を求めることが可能である。また、真空ポンプによる減圧や遠心力を用いるために原位置で計測するより迅速に測定でき数多い試験結果を得ることができる。さらに体積含水率と透水係数の関係に用いられる有効飽和度 $(S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r))$ の θ_s の値も室内試験での計測はきわめて簡単である。ただ、この値に浸潤だけによる体積含水率を用いるべきか、完全飽和状態の値を用いるべきかは確固たる定義がなされていない。浸潤が生じて浸潤前線通過後の透水係数が一定

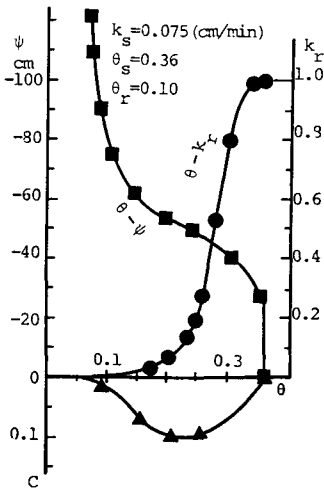


図-1 不飽和状態の浸透特性

表-1 浸透特性

浸透特性	記号
飽和の透水係数	k_s
不飽和透水係数	$k(\theta)$
水分特性曲線	$\psi(\theta)$
限界毛管水頭	ψ_{cr}
飽和体積含水率	θ_s
最小容水量	θ_r

であると考えらるなら浸潤だけによる体積含水率を用いてもよいようであるが、浸潤による体積含水率の値は、浸潤前の体積含水率によっても図-2に示すように変化し、土中の空気の移動によっても大きく左右されと考えられる。 θ_s の値の変化が実際の解析的にどの程度影響あるかを今後検討する必要がある。 θ_r に関しては水分特性曲線より求める方法を先に提案している⁶⁾。また ψ_{cr} の原位置での定め方は Bouwer の提案する方法が簡単で良い⁷⁾。

4. 不飽和透水係数

不飽和状態の透水係数を原位置で計測する方法として瞬時水分計測法や、Crust - Topped 法などがある⁸⁾。しかし、これらの方法も土中での浸潤あるいは排水による体積含水量の変化を経時的に中性子水分計で計測する必要がある。したがって実験はどうしても大規模になり、原位置での計測時間も透水性が悪い場合には、1ヶ月近く計測する場合がある。土中の水分量の経時的な変化を計測するかわりに、土中のサクシオンを計測して、水分特性曲線より逆に土中の水分移動量を推定する方法も提案できるが、この方法も、長期間の計測では、サクシオンの計測方法に問題が生じる。したがって、最近では、不飽和透水係数は水分特性曲線から推定する方法が盛んに報告され、推定した透水係数を実際に原位置および室内試験より得られた結果と比較してきわめて良好な結果を得ている。著者は過去に、この推定式についての整理を行ったが⁶⁾、ここでは Mualem¹¹⁾と Van - Genuchten¹²⁾の方法について述べる。彼らは、不飽和透水係数と飽和透水係数の比の相対透水係数として次式を提案している。

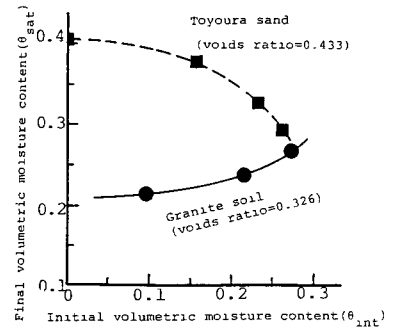


図-2 初期体積含水率(θ_{int})と浸潤後の体積含水率(θ_{sat})の関係

$$k_r = \frac{k(\theta)}{k_s} = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e)^m]^2 \quad (2) \quad S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^{1-1/n} \quad (3)$$

(2)式の m の値は $m=1-1/n$ であり、この n の値は、(3)式と実験より計測される水分特性曲線との比較により定められる。(2)式のより一般的な式として、次式が Mualem により提案されており 50 種類の土についての検討がなされている。

$$k_r = S_e^{1/2} \left[\int_0^{S_e} \frac{1}{\psi(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{\psi(x)} dx \right]^2 \quad (4)$$

5. 飽和透水係数

飽和透水係数の値は、室内実験より原位置試験により求める値であり、原位置において Green - Ampt モデルを用いて一次元浸透を起こさせて計測するとよい¹³⁾。この手法の改良方法については当日発表する。

参考文献 1) 西垣，今井：不均質な斜面への降雨の浸透特性，第19回土質工学研究発表，1984，508。

2) 赤井，大西，西垣：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，1977，第264号

3) 大西，西垣：有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析，京都大学交通土木工学教室，1981。

4) たとえば，佐倉，開発：野外土槽における観測システムについて，筑波大学水理実験センター報告，4，25-29

5) 土質工学会編：土質調査法，1979，pp. 142-156。

6) 西垣：飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する2，3の考察，土質工学会論文報告集，1983，23(3)。

7) Bouwer, H.: Rapid field measurement of air-entry value and hydraulic..., Water Res. Res., 2, 1966.

8) van Bavel, C.H.M. et al.: Hydraulic properties of clay loam soil..., Soil Sci. Soc. Am. Proc., 32, 1968.

9) Hillel, D. et al.: Transient infiltration into crust-topped profiles, Soil Sci., L09, 1970.

10) Dane, J.H.: Comparison of field and laboratory determined hydraulic..., Soil Sci. Soc. J., 44, 1980.

11) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity..., Water Res. Res., 12, 1976.

12) 河野，西垣：原位置での不飽和浸透特性の一測定法，地質と調査，1981，3号，pp. 66-72。