

II-610

焼却灰の不飽和水分特性と不飽和透水係数の測定

北海道大学工学部 (正)東條安匡 前崎 巧
(正)田中信寿 (正)松藤敏彦

1. はじめに

埋立層内の水分移動機構の解明は、浸出水集排水システム、及び浸出水処理施設の計画・設計・運転を適正に行うために重要である。しかし、埋立層内部は構造が極めて不均質かつ多様であり、さらに構造や特性が時間と共に変化するという特質をもっている。そのため、特に不飽和水分移動においては、その支配因子の特定が困難である。埋立地内ではほとんどの部分は不飽和帯であり、水分移動は、その不飽和水分特性に大きく依存している。そこで、今回焼却灰を対象として不飽和透水係数を中心に測定を行ったのでその結果について報告する。

2. 試料

実験に用いた試料は全連続式の清掃工場(600t/day)から採取したbottom ashで、その15mmふるい通過分を用いた。また、試料を繰り返し使用すると微細分の流亡、溶解性成分の溶出などでその特性が変化し、実験に再現性が得られなくなるため、常に新しいものを使用するよう努めた。水分との接触量による特性の変化に関する実験も別途行っているが今回は報告しない。

3. 各種測定方法による不飽和透水係数

(方法1) Van Genuchtenの方法

不飽和透水係数は飽和度(s)の関数であり、飽和状態($s=1$)では飽和透水係数に、また水分移動が起きない最大の含水率(residual wetness)($s=s_r$)においてゼロに一致する。この方法は、測定手法の確立された飽和透水係数と水分特性曲線から不飽和透水係数を推定できることから広く用いられている。一般に、飽和含水率は媒体の真比重と充填密度から算出される事が多いが、焼却灰の場合、実際に空隙が完全に水分で満たされる事は想定し難く、この方法による飽和含水率は飽和透水係数測定時の実質的な含水率に較べて過大のものになってしまう傾向があると考えられる。我々のこれまでの実験に於いても、真比重から算出した飽和含水率でGenuchten式を用いて不飽和透水係数を算出すると、実際の現象に較べてかなり不飽和透水係数が小さくなる傾向が確認されている。そこで、実際に図-1に示すような装置を用いて、焼却灰の飽和含水率の測定を行った。その結果を図-2に示すが、真比重(約 $3.0 \sim 3.4 \text{ g/cm}^3$)から算出されたものに較べて約10%近く小さい結果を得た。また充填密度とはほぼ線形の関係がある。水分特性曲線については多数のサンプルに関して土柱法を行い図-3の様な結果を得た。含水率は、ある程度幅を持ったものとして得られ、図中には実測値、各サンプルにおける平均値、平均値±標準偏差を示している。また、飽和透水係数はこれまでの研究から $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ の範囲にあることが分かっているが、今回の測定に関してもほぼ 10^{-3} のオーダーに入る結果を得た。これらからGenuchtenの各種パラメータを算出し、不飽和透水係数を得た。結果を図-8に実線で示す。

(方法2) Zohar b. A. Samaniらの方法

土壌 pF を測定する際に用いられる図-4の様な装置に於て、特定のポテンシャル差を与え、その際の吸水量を時間と共に測定する。吸水量と時間の間にはDarcy則により $dV=K \cdot l(t) \cdot A \cdot dt$ の関係があり、ポテンシャル勾配を $l(t)=C_1 \cdot t^{C_2-1}$ とし、時間で積分すると $V=F_1 \cdot t^{F_2}-F_3 \cdot t$ (ここで $F_1=((K \cdot A \cdot C_1)/(C_2+1))$, $F_2=C_2+1$, $F_3=K \cdot A$)となる。任意のポテンシャルにおける測定量 V 、 t に対し最小二乗法で F_1, F_2, F_3 を求め、不飽和

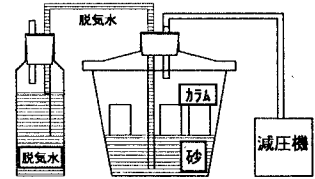


図-1 飽和含水率測定装置

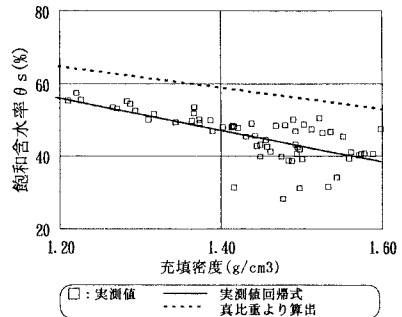


図-2 飽和含水率測定結果

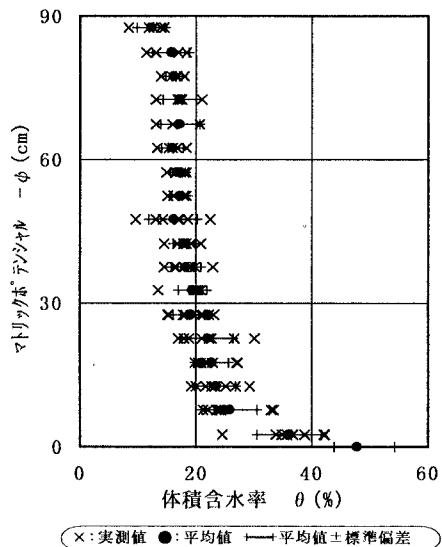


図-3 水分特性曲線

透水係数 K を得る。焼却灰の場合、浸潤過程においては殆ど吸水性が確認されなかったため、排水過程に関する実験のみを行った。即ち、装置の上部の容器内に飽和状態で試料を充填し、徐々に排水口の高さを下げることによってポテンシャル差を与える。このポテンシャル差によって、均衡状態が崩れた水分が排水口より排水される。この排水量を時間経過と共に測定し、図-5の様な結果を得、これに最小自乗法で曲線近似し、各パラメータを算出する。この様にして得られた結果が図-8に×で示すものであり、破線は各値を $K(\theta)=a \cdot \theta^b$ の形で近似した曲線である。

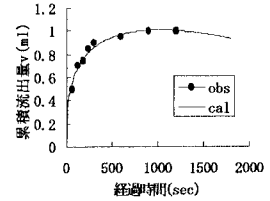
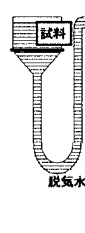


図-4 装置図(方法2)

図-5 結果例(方法2)

(方法3) 田中らによる方法

Richardsの不飽和浸透理論によると一次元鉛直方向の水分移動フラックスは $Q = -K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\theta) = D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta)$ で表現される。水分移動が定常状態にあるとき図-6のような鉛直一次元カラムにおいては、一定含水率(θ_s)となる領域が上部に存在し、そこでは、前式の最右辺第一項がゼロとなるため $Q = K(\theta_s)$ となる。このことを利用してフラックスと含水率の関係から不飽和透水係数を算出しようとするのが本方法である。実験は、カラム上部から、断面に一樣に降雨を与え、流出量を天秤にて計測する。また、カラムは全体を吊り下げる形にし、総重量もまた天秤にて計測する。各測定は1分間隔でRS232C回線からコンピュータに取り込まれるよう自動化して行った。カラムに供給する降雨は、(5~25~5mm/h)で数段階に変化させ、浸潤過程と排水過程を形成させた。各降雨量は、定常状態が確認できる程度(10~20hr)に継続した。測定結果例を図-7に示す。このようにして計測した層内平均含水率(θ_{av})と流出フラックス(Q)、及び水分特性曲線から含水率(θ_s)と不飽和透水係数 $K(\theta)$ の関係を得た。このような一連の実験を、同一の充填層に対して数回繰り返して得られた結果が図-8に●で示すものである。

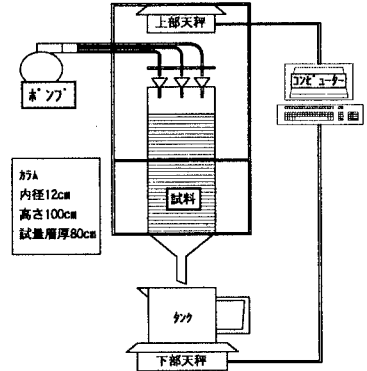


図-6 装置図(方法3)

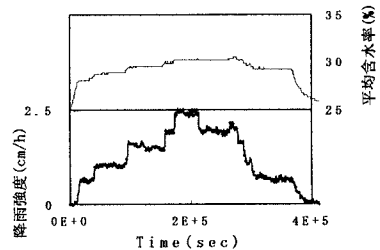


図-7 結果例(方法3)

4. 各測定法に関する検討

方法(1)で実測の飽和含水率 θ_s で算出したもの、及び方法(2)によって得られた不飽和透水係数は方法(3)のものと1桁から2桁異なっている。方法(1)で真比重から飽和含水率を求める方法(図中:計算 θ_s)を使うと、さらに1桁ほど低い。この理由としては、(1)、(2)の方法が、毛管水移動を基礎に不飽和透水係数を決定しているのに対し、(3)は毛管以外の「グレイブ」で移動する水分も含めて計測しているためと考えられる。実際の処分場を模擬したカラム等で応答特性を計測しなければ、どの測定方法が実際の現象を最もよく表現しているものであるか判断できないが、埋立層内には大間隙が多量に存在している事は以前から示唆されており、実際の不飽和透水係数は(1)、(2)の方法による値よりかなり大きな値を持つ可能性が考えられる。

参考文献

- 1) M.Th. Van Genuchten: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp. 892-898 (1980)
- 2) Zohrab A. Samani et al: Simple Laboratory Measurement of Unsaturated Hydraulic Conductivity, J. Irrigation and Drainage vol. 113, No. 3, Aug, 1987 ASCE
- 3) 田中信寿 他: 廃棄物埋立層における不飽和水分移動特性とその測定法に関する研究、廃棄物学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 107-115, 1993

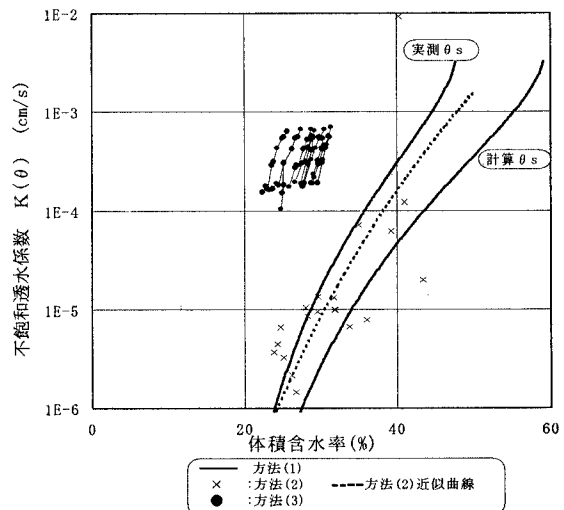


図-8 各方法による不飽和透水係数