

II-449 廃棄物充填層内の不飽和流れにおける非反応性物質の移動特性について（第3報）

北海道大学 工学部 正会員 三谷紀行*
正会員 田中信寿
正会員 神山桂一

1.はじめに 廃棄物層内の不飽和流動及び溶質移動の機構を明らかにするために、(中粒)砂〔粒径0.25～0.5mm〕、焼却灰、人工ごみの充填層〔直径124mmφ、深さ900～905mm〕を用い、①水分特性曲線(図1)、②不飽和水分流動特性(図2)、③定常降雨によるNaClの浸入・流出曲線(例を図9に示す)、並びに、④断続降雨による層内NaClの洗出曲線(前報²⁾の図1,2)を求め、既に報告した¹⁾2)

本報告では、焼却灰層における不飽和流動と定常降雨による溶質移動の数式モデルを提案し、実験結果と比較することでモデルの検証を行う。

2.水分存在・流動様式の提案 図1から、砂層のデータと比較しながら焼却灰層の特徴を考察すると、①重力脱水できず、層内に固定される水分が多い($\theta = 0 \sim \theta_p$ の領域)、②毛管力によって水分吸引できる領域が小さい($\theta = \theta_p \sim \theta_s$ の領域)、③水分吸引できない大間隙領域が大きい($\theta = \theta_s \sim \theta_e$ の領域)ことが分る。また、図2から、不飽和水分流動特性の特徴を考察すると、砂層は1本の緩やかな勾配の直線で表現できるのに対して、廃棄物層では急勾配の直線($\theta_s \sim$)と緩勾配の直線($\theta = \theta_p \sim \theta_s$)の2領域で表現できる(焼却灰層のみではこの指摘に無理がある)。

以上のことから焼却灰層の水分の存在および流動の様式がモデル化できる(表1)。これは3成分流動モデル³⁾に物理的イメージを与えるものである。

表中の「固定水帯(不動水)」は、水を強く吸引保持できる微細孔隙群(塊)からなり、各群は相互に独立しているものと考えられる。また、表中に示した「膜状流れ」の根拠は次の通りである。一般に、傾斜角 β をもつ壁面に沿って定常的に流れる水膜(図3)について次式が成立する⁴⁾。

$$v_z = \rho_w g \delta^2 \cos \beta / 3 \mu \quad (1)$$

流速 v_z 、液膜厚み δ を降水量 q_z' 、含水率 θ_r で表現すると

$$q_z' = v_z a \delta \quad (2) \quad \theta_r = a \delta / \cos \beta \quad (3) \quad \text{となるので、}$$

式(1)に代入すると、 $q_z' = (\rho_w g / 3 \mu) (\alpha' / a)^2 \theta_r^3 \quad (4)$ となる。

そこで、実測値 q_z vs θ_{av} (図2)から、毛管流れ部の最大含水率 θ_s ($=0.246$)及び最大毛管流れ流量 $q_z^{\circ \max} (=1.32 \text{ mm/h})$ を用いて、次式により q_z' 、 θ_r を求め、それらの関係を図示すると図4のようになる。

$$q_z' = q_z - q_z^{\circ \max}; \quad \theta_r = \theta - \theta_s \quad (5)$$

図4では、式(4)の関係が満足されている。

表1 焼却灰層内の水の存在様式と流れ様式

含水率	水の存在様式	流れ様式
$0 \sim \theta_p$	固定水帯	不動水
$\theta_p \sim \theta_s$	毛管水帯	毛管流れ
$\theta_s \sim \theta_e$	(大孔隙)	膜状流れ

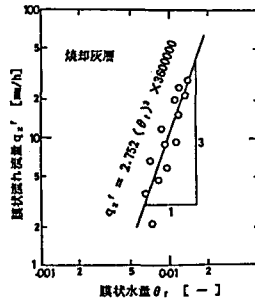


図4 膜状流れ流量 q_z' と膜状水量 θ_r の関係

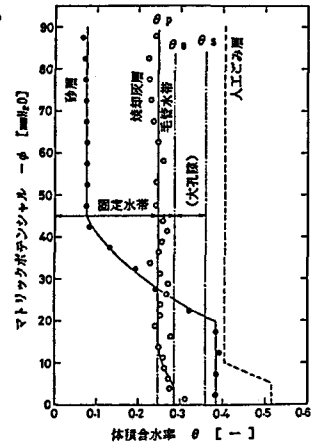


図1 水分特性曲線

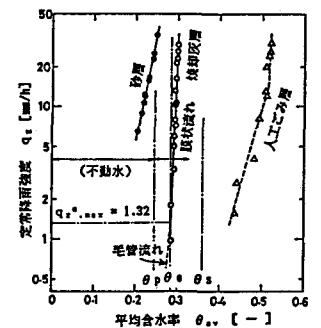


図2 不飽和水分流動特性

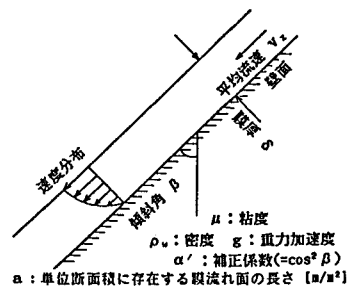


図3 膜流れ模式図

* (現在) 昭和電工(株)勤務

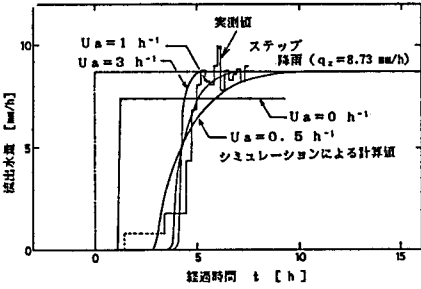


図6 ステップ状降雨に対する浸出水量シミュレーション例

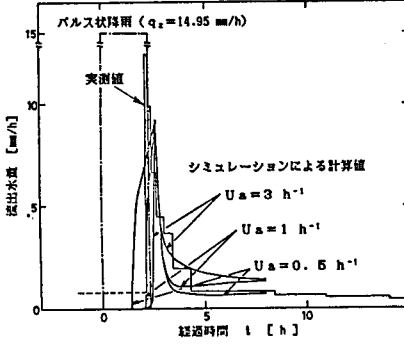


図7 パルス状降雨に対する浸出水量シミュレーション例

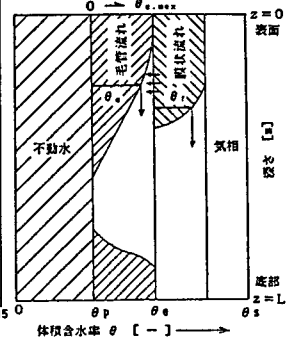


図5 水分流動の模式図

3. 不飽和水分流動モデルの提案

水分流動の模式図を図5に示す。降雨時、毛管部のもつ吸引力によって毛管部を満たしながら、水分が流下する。さらに多量の降雨があった時には、水分は大孔隙を膜流れとなって流下する。膜流れは大流速をもつため、毛管流れより早く流下し、膜状水が毛管不飽和部へ吸引される。これを数式モデルで表現すると

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial t} = -\frac{\partial q_z}{\partial z} + U_a(\theta_{c, \max} - \theta_c) \delta(\theta_r) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial t} = -\frac{\partial q_z'}{\partial z} - U_a(\theta_{c, \max} - \theta_c) \delta(\theta_r) \quad (7)$$

ここで毛管流れ流量 $q_z = K(\theta_c) - D(\theta_c) \frac{\partial \theta_c}{\partial z}$ で求め、不飽和透水係数 $K(\theta_c) = \exp(80.02\theta_c - 5.125)$ [cm/h]、水分拡散係数 $D(\theta_c) = \exp(61.00\theta_c - 0.635)$ [cm²/h] とおいた、また膜状流れ流量 $q_z' = 2.752(\theta_r)^3$ (図4) である。

降雨流出速度のシミュレーション例を図6, 7に示す。図から、上記モデルの唯一つのパラメータである毛管吸引容量係数 U_a は $0.5 \sim 1 \text{ h}^{-1}$ 程度でよいことが分る。

4. 定常降雨による溶質移動モデルの提案

水分流動は毛管流れ領域と膜状流れ領域

で生じ、これらの流れによって固定水部と溶質 (NaCl) 交換が生じる。さらに、図8に示すように、固定水部を、毛管流れ部と溶質交換する領域 θ_p と膜状流れ部と溶質交換する領域 θ_r' とに分ける。これを数式モデルで表現すると (式(8), (9): 毛管流れ部、式(10), (11): 膜流れ部)

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = -\frac{q_z}{\theta_c} \frac{\partial C_c}{\partial z} - \frac{k}{r_c/2} (C_c - C_p) \quad (8) \quad \frac{\partial C_p}{\partial t} = \frac{\theta_c}{\theta_p} \frac{k}{r_c/2} (C_c - C_p) \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_r}{\partial t} = -\frac{q_z'}{\theta_r} \frac{\partial C_r}{\partial z} - \frac{k'}{\delta} (C_r - C_{r'}) \quad (10) \quad \frac{\partial C_{r'}}{\partial t} = \frac{\theta_r'}{\theta_p'} \frac{k'}{\delta} (C_r - C_{r'}) \quad (11)$$

$$\text{出口において} \quad C_{out}(t) = (q_z/q_z) C_c(t, L) + (q_z'/q_z) C_{r'}(t, L) \quad (12)$$

これによるシミュレーション結果の例を図9に示す。焼却灰層の溶質移動は、大量に存在する固定水と大流速の膜状流れとが溶質交換を行うことで生ずるため、早い時期に定常値に近づく。それに、小流速の毛管流れと固定水とが溶質交換することで生ずる小さな濃度応答が重畳し、そのことによって全体応答に tailing が生ずると解釈される。

引用文献 1) 高村、田中、神山; 土木学会第41回年次学術講演会(第2部) p.873(1986) 2) 田中、神山、宇野; 土木学会第42回年次学術講演会(第2部) p.968(1987) 3) 森澤、堀内、山岡、井上; 衛生工学研究論文集、第22巻、p.9/21(1986) 4) Bird, R.B. et al; Transport Phenomena, p.37, John Wiley & Sons (New York) 1960

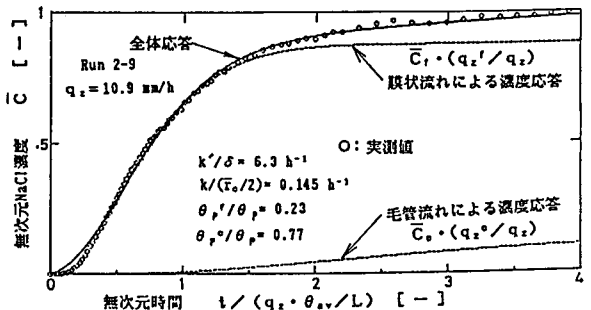


図9 定常不飽和流れによる溶質浸透過程のシミュレーション例