

不飽和浸透流における溶質分散係数の測定

Dispersion coefficient of solute in unsaturated flow

さ とう くに あき むら おか こう じ
佐 藤 邦 明* 村 岡 浩 爾**
い とう
伊 藤 洋***

1. はじめに

最近、水理学のみならず土質工学の分野においても地盤環境・地下水保全に係わって、地盤や地下水の力学的側面に加え地下水質、地盤汚染の問題が取り上げられるようになってきている^{1),2)}。この種の問題は単に力学的諸問題にとどまらず、衛生工学や環境化学といった広範な分野にまたがる学際的色彩をもつ内容を含むだけに多面的アプローチを必要とする。しかしながら、飽和、不飽和地盤の浸透流による物質分散・拡散現象に問題点を絞り、それらの支配的な現象を一つ一つ抽出して解明することは大切である。

周知のように、地下における物質の分散・拡散現象は従来専ら飽和浸透流によるものが研究されて来た^{3),4),5)}が、実際には飽和浸透流に加えて、不飽和流によるものが昨今注目されている^{6),7)}。従来、飽和浸透流による分散現象を定量的に記述する方法の主流は物質・溶質の吸着や脱着を考慮した分散方程式に基づいたものであった。他方、不飽和流による分散・拡散を定量的に記述する考え方としては、基本的には不飽和浸透流の基礎式と物質・溶質の保存式を同時に解くというアプローチになろう。しかし、不飽和流の場合には不飽和浸透流そのものも計測条件がある程度限られ、加えて物質・溶質が生物・化学的に変化するということがあって、確たる成果が得られていないように思われる。

このような背景にあって、本報は不飽和浸透流における物質・溶質の分散・拡散現象の性質および、現象の特色を明らかにしつつ、研究の第一歩として不飽和流による溶質分散の実験を試み、分散係数の表現に関し新しい知見を得た。言うまでもなく、こういった分散パラメーターの測定は容易でなく、一度にいろいろな多孔体と水理条件について多量の結果を得ることは出来ないの、やはりこの種の研究成果を地道に集積していくことが不可欠であろう。そういった意味で、本研究が今後の研究に足掛かりを与えると思われるのでここに報告する。

2. 不飽和浸透流における物質分散の形態と基本式

地下における物質・溶質の分散や拡散は大別して不飽和帯と飽和帯で起こり得るが、いずれにおいても物質の分散・拡散物質は水の移動によって促される。元来、地下水の運動は非常に緩慢であるから、物質の移動もゆっくりしたものとなる。言うまでもなく、河川や湖沼などの水域における物質分散・拡散とは多分に違った側面があり、特に間隙中の土粒子、岩石との間に生ずる化学的吸着、脱着といったものの他に、微生物活動による物質自体の相変化が加わることになる。

いま、不飽和浸透流における物質・溶質の分散プロセスをミクロに観察すると、図-1のようにモデル化して考えることができる。つまり、土粒子間に水は不飽和状態で付着した形で毛管力と重力に起因して流れており、分散物質は土粒子と相互に吸着・脱着を伴う。もし、分散物質そのものが放射性をもつような場合、放射能に注目すると、放射性物質は分散および吸着・脱着しつつ時間とともに崩壊しつつ移動することになる。その場合、不飽和流自体の流れは、重力と毛管ポテンシャルによって流動するわけであるから、支配方程式としては不飽和浸透流のそれで記述される。

結局、実際上不飽和流における物質・溶質の分散・拡散を解析するには、物質・溶質の分散方程式と不飽和浸透流の支配方程式を所要の初期・境界条件下で同時に解かねばならないことになる。

ここで、不飽和浸透流場における吸着（脱着）を考慮し

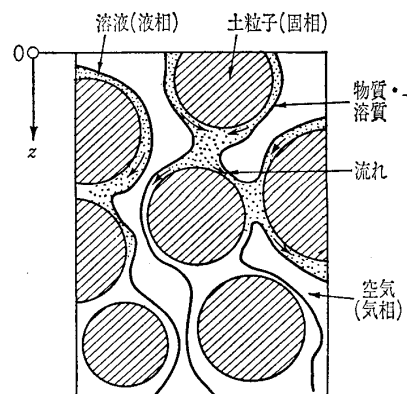


図-1 不飽和流れによる分散

*埼玉大学助教授 工学部

**国立公害研究所 水質土壌環境部水質環境計画室長

***熊谷組 原子力開発室土木技術部

た一次元移流分散方程式は次のように飽和浸透流のそれと比べて多少違ってくる。

いま、図-1のように物質・溶質が z 軸方向に分散する際、物質保存式は距離 z 、 $z+\Delta z$ において、

$$\frac{\partial}{\partial t}(C\theta)A\Delta z = [J_z|_z - J_z|_{z+\Delta z}]A - \varepsilon A\Delta z \quad \dots\dots(1)$$

ここに、

$$J_z = -D_u \frac{\partial}{\partial z}(C\theta) + w\theta C \quad \dots\dots(2)$$

である。ここで、 A ：断面積、 θ ：不飽和流の体積含水比 ($\theta = V_l/V$, V_l ：液相体積、 V ：総体積、 $\theta = \lambda S_r$, S_r ：飽和度、 $S_r = V_l/V_v$, $V_v = V_l + V_a$, V_v ：空隙体積、 V_a ：気相体積、 λ ：初期の空隙率、 $\lambda = (1 - V_s)/V = (V_v + V_b)/V \approx V_v/V$, V_s ：固相（土粒子）体積、 V_b ：吸着固相の体積、 $V_b \ll V_v$), D_u ：不飽和分散係数、 C ：液相中の物質体積濃度 ($C = V_m/V_l$, V_m ：物質体積)、 w ：真の流速、 t ：時間、 z ：座標、 ε ：吸着固相の変化率 とする。

一方、式(1)における ε は、 $\varepsilon = \partial S / \partial t$, S ：総体積に対する吸着固相体積濃度、 $S = V_b/V$ を導入すると、式(1)、(2)から、

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(C\theta) = D_u \frac{\partial^2}{\partial z^2}(C\theta) - \frac{\partial}{\partial z}(wC\theta), \quad \dots\dots(3)$$

となる。

式(3)が溶質の吸着を考慮した薄い濃度液の不飽和分散方程式であるが、もし、定常不飽和流 $w = \theta = \text{const.}$ を考え、また吸着固相濃度 S が液相濃度 C に比例する (Langmuir の式) とすれば⁸⁾、式(3)は次のようになる。

$$\left(1 + \frac{b}{\theta}\right) \frac{\partial C}{\partial t} = D_u \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - w \frac{\partial C}{\partial z} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 b は吸着比例定数であるが、 $S = V_b/V = V_s/V \cdot V_b/V_s = (1 - \lambda)V_b/V_s$ を用いると、 $b = (1 - \lambda)a$ ($a = V_b/V_s/C$) と表すことができる。係数 a は、液相濃度に対する単位固相体積当たりの物質体積濃度であり、一般に分配係数として定義されている⁹⁾。以上のように式(4)は物質保存則とフィックの法則に基づき、吸着項を含ませたものとなっていることが分かる。

他方、鉛直一次元不飽和流の基本式は、水の保存および運動の式より、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_u + D_w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad \dots\dots(5)$$

となる。ここに、 k_u ：不飽和浸透係数、 D_w ：水分拡散係数である。

式(5)における k_u , D_w はともに含水比 θ の関数であり、 $D_w(\theta) = k_u(\theta)(-\partial \phi / \partial \theta)$ となる。ここに、 ϕ ：サクシオン水頭である。

したがって、もし非定常不飽和流において物質が分散する現象においては、式(3)および(5)を用いて、 C , θ を境界条件下で解けばよいことになり、カップリング問題というこ

とになる。

しかし、本報では不飽和流の場合は定常とし、式(5)は $\partial / \partial z (k_u + D_w \partial \theta / \partial z) = 0$ となる。もし、境界条件、 $z=0$, $\theta=\theta_0$, $z=L$, $\theta=\theta_l$ として積分すれば、含水比 θ の z 方向分布は、 $\theta = (\theta_l - \theta_0) / L \cdot z + \theta_0$ となって、直線分布ということになる。もし、 $\theta_l = \theta_0$ とすれば、 θ の分布は θ_0 と一定になる。後述する本研究の実験の場合に相当する。

分散方程式(4)の解は、条件、

$$\left. \begin{aligned} C(0, t) &= C_0, \quad t \geq 0 \\ C(\infty, t) &= 0, \quad t \geq 0 \\ C(z, 0) &= 0, \quad z \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(6)$$

の下でラプラス変換法を用いて解くことにする。

まず、次のような無次元表示を用いて、式(4)および条件式(6)を書き換えると

$$f = C/C_0, \quad \xi = z/L, \quad I = D_u T / L^2, \quad \beta = wL / 2D_u,$$

$$T = t / \left(1 + \frac{b}{\theta}\right), \quad \frac{\partial f}{\partial I} = \frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial f}{\partial \xi}, \quad \dots\dots(7)$$

$$\left. \begin{aligned} f(0, I) &= 1, \quad I \geq 0 \\ f(\infty, I) &= 0, \quad I \geq 0 \\ f(\xi, 0) &= 0, \quad \xi \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(8)$$

となる。ここで、 L ：代表長さである。

つぎに、 f のラプラス変換を ϕ として式(7)をラプラス変換すると、次の常微分方程式が得られる。

$$\frac{d^2 \phi}{d\xi^2} - 2\beta \frac{d\phi}{d\xi} - s\phi = 0 \quad \dots\dots(9)$$

この場合の特性方程式は $m^2 - 2\beta m - s = 0$ であるから、その完全解は、

$$\phi = c_1 e^{(\beta + \sqrt{\beta^2 + s})\xi} + c_2 e^{(\beta - \sqrt{\beta^2 + s})\xi},$$

$$(c_1, c_2 : \text{定数}) \quad \dots\dots(10)$$

である。また、境界条件をラプラス変換すると、 $\phi(0, s) = 1/s$, $\phi(\infty, s) = 0$ となる。したがって、 $c_1 = 0$, $c_2 = 1/s$ であり、式(10)は、

$$\phi = \frac{1}{s} e^{(\beta - \sqrt{\beta^2 + s})\xi}, \quad \dots\dots(11)$$

となる。これより、式(4)の解は式(11)の逆変換をとることにより次式のように求まる⁸⁾。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z - wT}{2\sqrt{D_u T}} \right) + \exp \left(\frac{wz}{D_u} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{z + wT}{2\sqrt{D_u T}} \right) \right], \quad \dots\dots(12)$$

ここで、 $T = t / (1 + b/\theta)$ である。

また、式(12)において、Raifai・Ogata は $D_u / wz < 1$ であれば、右辺第2項は無視できるとし³⁾、Ogata & Banks は、 $D_u / wz < 0.0075$ であれば、第2項は5%以下の誤差で無視できるとしている⁴⁾。

結果的に見れば、不飽和浸透流における物質・溶質の分散・拡散現象に係わる水理パラメーターとしては、基本的に不飽和流自体に関与する水分拡散率 D_w 、不飽和浸透係数 k_u 、

毛管ポテンシャル ψ , 空隙率 λ ということになり, 分散方程式に含まれる分散係数 D_u , および物質・溶質の吸着・脱着, 相変化に関する吸着比例定数 b ということになる。これらパラメーターを知ることによって, 方程式の未知量は含水率 θ , 流速 w および濃度 C ということになり, それらを所要の条件下で解けばよい。

基本的には上述の水利パラメーターを与えて, 基礎式を解くことになるが, もし不飽和流自体が定常流であるとするれば, 流れの場としては簡単になって, 主要水利定数は分散係数および吸着定数となって, それを用いて分散方程式を解くことに帰着することになる。

3. 実験とその結果

3.1 実験装置と実験方法

不飽和流における物質分散の性質を明らかにし, 分散係数の量的評価を行うため, 図-2に示したような室内砂層カラムを用いた降雨による不飽和分散実験を行う。実験装置は大きく分けて, ①多孔体充てんカラム(長さ1.45m, 内径0.19mの亚克力製透明円筒), ②降雨シミュレーター(定量ポンプによる圧送雨滴設定), ③真空ビンとポンプ, ④水質サンプリングポーラスカップ(長さ51mm, 外径10mmの多孔円筒)である。測定システムと内容は, 多孔体充てんカラムに多孔媒体を所定の高さに充てんし, 降雨シミュレーターから供給される溶質液を不飽和浸透させ, 定時的に浸透液を真空ポンプ作動により埋込みポーラスカップより少量採取して, 充てん層中の溶質濃度分布経時変化を得るものである。しかる後に, 所要の不飽和流の水利パラメーターを実験的に測定・決定する。

今回の実験に用いられた多孔媒体は2種類, 細砂(平均粒径 $d_m=0.34$ mm, 比重 $\gamma=2.755$, 透水係数 $k_s=1.13 \times 10^{-4}$ m/s, 空隙率 $\lambda=0.51$), および砂($d_m=0.65$ mm, $\gamma=2.695$, $k_s=1.80 \times 10^{-4}$ m/s, $\lambda=0.43$)であった。いずれも比較的均質な砂である。検出分散物質としては, 砂粒への吸着がないとされている塩素イオン Cl^- , および土壤汚染物の一つとして知られているアンモニア性窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ の混合液である。この降雨水溶液濃度は細砂の浸透実験では Cl^- 濃度2462 ppm, $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度1011 ppm, 砂の場合は Cl^- , 2606 ppm, $\text{NH}_4\text{-N}$, 981 ppmであった。実験は光を遮断した恒温状態で実施される。

実験手順は次のようである。まず, 多孔媒体(本実験では2種の砂)を0.15mの厚さごとに均質に充てんし, 1.45mの厚さに詰めるが, 充てん中に不飽和浸透水を採取するためのポーラスカップを砂層上面から $z=0.1$ m(ポーラスカップ番号 P_1 とする), 0.4m(P_2), 0.7m(P_3), 1.00m(P_4), 1.30m(P_5)の図中に示した位置の断面中心に埋め込んでおく。次に, 砂層上に降雨滴による砂面のかく乱防止紙を置き, ちょうど砂層最下面が図-2に示したオーバーフロー管の先端高度と一致するように調節する。降雨

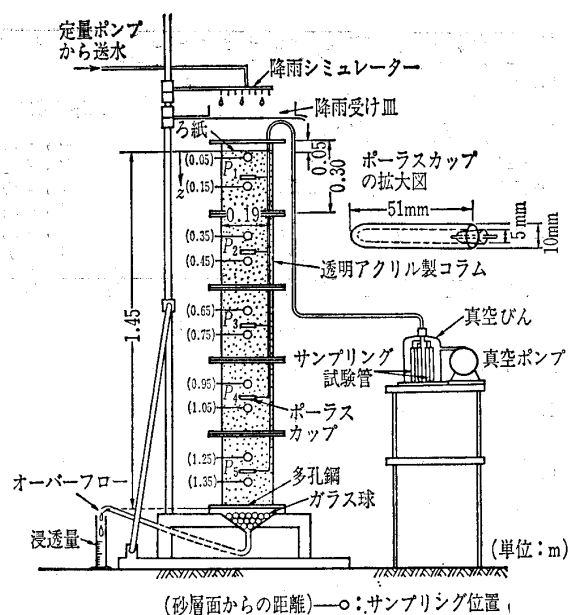


図-2 不飽和流における溶質分散の実験装置

受け皿で遮断した状態で蒸留水降雨を降らせ, 所定の降雨強度($R=30$ mm/h)が得られるよう定量送水ポンプを調整する。所定の降雨強度 $R=30$ mm/hが得られたら, 降雨受け皿を取り去り, 降雨が砂層中を浸透し, 定常状態(降水量と流出量が一致した状態)となるまで約一日間浸透を継続する。しかる後, 蒸留水降雨から水溶液降雨に変え, 蒸留水から水溶液浸透流に置換される時間を考慮し, 5分経過後を実験開始とした。降雨継続パターンは細砂の実験では72時間一定強度, 砂では54時間である。浸透中の分散経時変化を測るため, 砂層中に埋め込んだポーラスカップから定時的に(15分間隔)真空ポンプにより吸引採取する。採取量は6~7 mlである。このようにして, 溶質分散実験が進められるが, 実験終了後に各5つのカラムブロック(図中の5個)の質量を各々測り, 吸着量, 含水比分布測定用の砂のサンプリングを行う。サンプリング位置は図中に示したように水質サンプリング孔を挟んで10点であった。

なお, 水質測定方法に関して, Cl^- 濃度は Cl^- 電極による電位と Cl^- 濃度の関係から求め, $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は自動分析装置(テクニコン社, A-II型)によった。

次に, 吸着実験は, バッチ法により行った¹⁰⁾。まず, メスフラスコに乾燥させた試験砂を30gとったものを9試料準備し, それぞれのメスフラスコに1, 2, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 ppmの $\text{NH}_4\text{-N}$ 溶液100 mlを加えて, よく振とうする。一定時間経過した後, 上澄液をろ過し, 各ろ液について $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を自動分析装置により求め, 初期濃度との差より単位質量砂に対する吸着量を求める。そこで, 式(4)における吸着比例定数 b を決定する。

3.2 実験結果

実験は大別して二種の砂について, 含水比分布, 分散, お

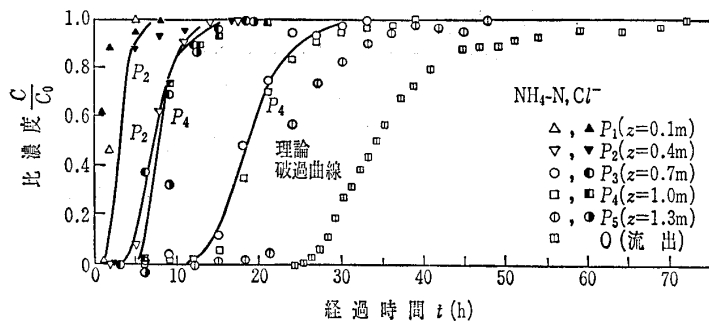


図-3 細砂の場合における Cl^- , $\text{NH}_4\text{-N}$ の $C/C_0 \sim t$ 実測曲線

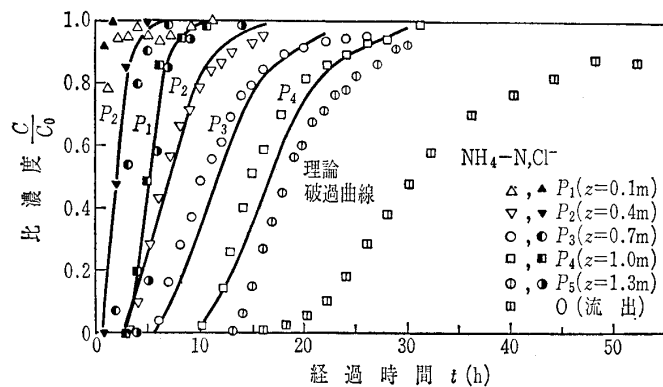


図-4 砂の場合における Cl^- , $\text{NH}_4\text{-N}$ の $C/C_0 \sim t$ 実測曲線

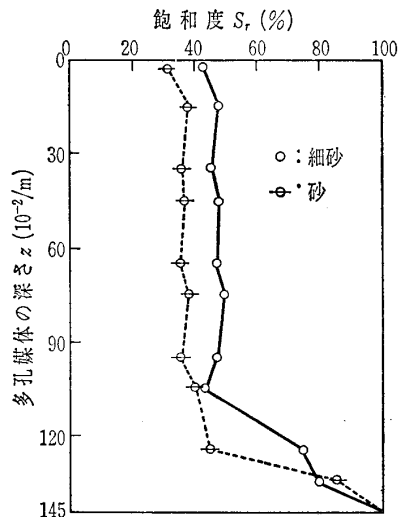


図-5 定常不飽和流の細砂と砂の飽和度分布

よび吸着を測定したが、まず各ポーラスカップによる溶質 Cl^- および $\text{NH}_4\text{-N}$ の比濃度経時変化に注目する。図-3, 4 は各々細砂、および砂の Cl^- の $C/C_0 \sim t$ 変化, $\text{NH}_4\text{-N}$ の $C/C_0 \sim t$ 変化の測定結果を示したものであり、図中 $P_1 \sim P_5$ は砂層中の測定点の位置における結果を表している。 Cl^- および $\text{NH}_4\text{-N}$ の比濃度経時変化、つまり破過曲線 (breakthrough curve) は飽和浸透流の場合についても類似の曲線が得られることが知られているが^{4),8)}、やはり不飽和流の場合も類似の曲線が得られることは大変興味深い。しかしながら、 $\text{Cl}^- \sim t$ 曲線と $\text{NH}_4\text{-N} \sim t$ 曲線を比べると、各々の破過曲線の立上がり時刻、曲線形状ともかなり違っていることが認められる。つまり、 $\text{Cl}^- \sim t$ 曲線の方が

$\text{NH}_4\text{-N} \sim t$ 曲線に比べてかなり立上がり早く、破過曲線自体濃度変化が早期に現れ、経時的に $C/C_0=1$ に早く近づいている。他方、 $\text{NH}_4\text{-N} \sim t$ 曲線は立上がりは遅く、かつ $C/C_0=1$ に漸近するが $C/C_0=1$ になるのにかなり時間を要している。つまり、 Cl^- の場合は砂粒子との間で吸着は起こり難いが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合には吸着 (砂粒との化学反応) の効果が大きく $C/C_0=1$ になるのに時間を要し、破過曲線の tail effect ($C/C_0=1$ にゆっくりと漸近する効果) が現れている。このことはある混合溶質が分散しつつ流下する際に、その分散物質の成分によって破過曲線が違ってくるといふ注目すべき結果を示していると言えよう。

次に、細砂、砂の両実験時における含水飽和度の鉛直分布 (実験終了時) を示したものが図-5 であるが、定常飽和流であるため、充てん層下端部付近における毛管上昇帯を除けば、分布は鉛直方向にほとんど一様になっていると見てよからう。したがって、今回の不飽和流は砂層の圃場容量 (field capacity) より過剰となった降雨浸透が重力によって流下する、いわゆる重力流となって浸透しているものと判断され、乾燥砂層中へ降雨が非定常浸透し、浸潤帯が一様に進む不飽和流とは現象的に違ったものとなっている。

そこで、既に説明を加えたように $\text{NH}_4\text{-N}$ の砂粒子との間の吸着に目を転じると、式(4)における吸着項の定数 b を決めねばならない。図-6 は上述したバッチ法による $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 C_k と吸着量 E の関係を示したものである。これらの関係を用いて、分配係数 a を $a = \rho_s \cdot E / C_k (\rho_s$: 固相の密度) として求めると $a=0.65$ となる。次に、図-5 より細砂の場合、砂の場合の平均飽和度 \bar{S}_r を求めると、それぞれ $\bar{S}_r=46.2\%$, 36.3% となるから、既に測定されているそれぞれの砂の空隙率を代入して定数 b は、細砂の場合 $b=0.319$, 砂の場合 $b=0.370$ となる。

浸透速度は、定常流量を実質流水断面積 (空隙率と飽和

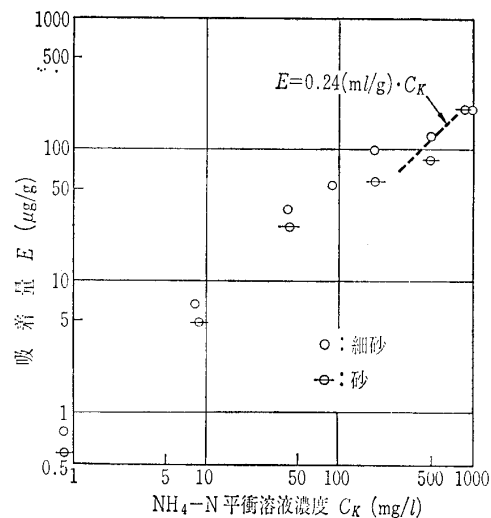


図-6 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 C_k と吸着量 E の関係

度から求める)で割ることにより求めることができ¹¹⁾, 細砂の場合 $w=0.127$ m/h, 砂の場合 $w=0.193$ m/h となる。

4. 分散係数の決定

ここで, 不飽和流に關与する流速や代表粒径について考え, ついで分散係数について検討を加えることとする。既に3.で述べたように, 不飽和状態で流れている砂層中では含水率は流出口付近の毛管上昇帯を除いてほとんど一定となっていた。そこで, 式(4)における吸着に關する定数 b が決まっているから, 不飽和流における分散係数を決定することができる。一般に, 飽和, 不飽和流に限らず, 分散係数の決定は次の手順でなされている。實際上, 分散方程式の解析解を得たときの条件と同じ条件で分散実験を行い, それより得られる破過曲線と理論解によるそれを対比して, 両者が最も合致する分散係数を求める。つまり, 今の場合, 式(2)の解曲線と図-3, 4で得られている $\text{Cl}^- \sim t$ 曲線, および $\text{NH}_4\text{-N} \sim t$ 曲線を比べて, best fit する際の分散係数を決定するということになる。

具体的に, 細砂の場合の Cl^- , $\text{NH}_4\text{-N} \sim t$ 実測曲線を用いて分散係数 D_u を求めると, 吸着比例定数 b は Cl^- の分散を考える場合には吸着はないと考え $b=0$ とし, $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合は上述したように $b=0.319$ とする。浸透速度 w は, 既に求めてある $w=0.127$ m/h を用いて, 分散係数 D_u を決めてこれらの値を式(2)に代入すると $C/C_0 \sim t$ の理論曲線が得られる。この理論曲線が実測曲線に最も合致するような D_u を求めるわけで, 本実験の場合, 分散係数 D_u は Cl^- , $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合ともに $D_u=3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ となった。同様にして, 砂の場合のそれを求めると, $D_u=8.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ となった。また, 参考のため高濃度比下における tail effect を無視して分散係数を求めると, それぞれ $D_u=8.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$, $D_u=2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ となった。

以上のようにして得られた分散係数 D_u を用いて飽和流の場合の Reynolds 数 $Re = wd_m/\nu$ (ν : 水の動粘性係数) と類似の関係を無次元表示すると図-7 のようになる。実験結果は少ないが, D_u/ν は Re が増大すると, 大きくなることは明らかであり, このことは飽和流の場合の分散係数と Re の関係と合致した傾向である。飽和流の分散と不飽和流のそれとは分散係数, Re 数の物理的意味が同じでないから, 両者を単純に比較して詳細な議論をすることは必ずしも有義ではないが, 参考のため Harleman-Rumer の低濃度塩水による縦方向分散式 ($D_s/\nu=0.66 Re^{1.2}$)⁴⁾ および玉井 ($D_s/\nu=5.1 Re$)¹²⁾ によるものも併せて示してある。ここで, D_s : 飽和分散係数である。

今回得られた不飽和浸透流の $D_u/\nu \sim Re$ 関係が飽和流における塩水によるものに比べて, D_u/ν が大きくなる理由について考えてみると, 一つは不飽和流での流速 w および粒径 d_m は, 飽和流で定義されたそれらとは違うことがあるが, 不飽和流の場合分散物質が降雨によって加え

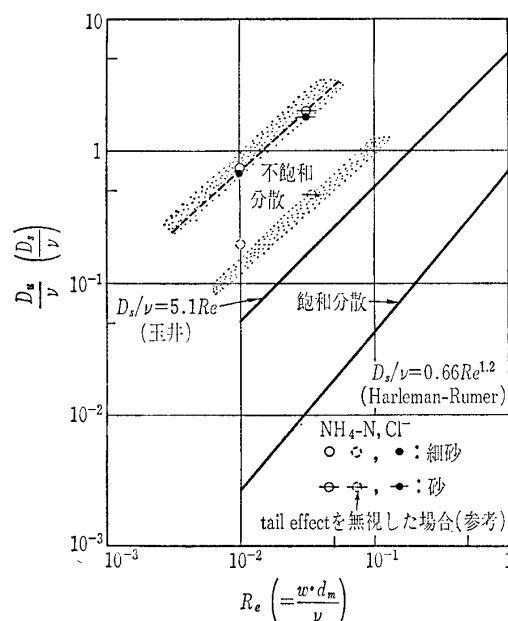


図-7 $D/\nu \sim Re$ の関係

られる際は付加水束は fingering (フィンガーリング) と類似した現象によって, 非常に不均質に流下するため, 見掛け上分散が助長されるものと解釈される。したがって, この不均質水束流によって, 分散係数が大きく表れるものと考えてよさそう。この種の fingering 現象は乾燥砂層カラムに降雨を与えた際に現れることは既に多くの実験によって観測されている事実であり, 十分理解できることである。

5. む す び

不飽和浸透流における物質・溶質の分散に焦点を当て, 現象のモデル化, 特色, および分散係数について実験結果を中心に検討した。その結果は次のように要約されよう。

不飽和流による溶質分散は吸着や脱着を伴いながら毛管流動によって輸送され, これは多孔媒体の空隙中の網状水束流としてモデル的に認識されよう。不飽和流による分散は飽和流のそれに比べて大きく, 飽和度に依存する¹³⁾。更に, 二, 三の溶質分散実験によると, 本実験では $D_u=8.0 \times 10^{-4} \sim 8.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ であり, 吸着に係る定数は $b=0.319 \sim 0.370$ であった。また, Reynolds 数 Re と無次元分散係数 D_u/ν の関係は, 飽和流のそれと同様の傾向にあることが分かった。今後, この種の研究が蓄積され, 本研究成果を含め, 更に現象解明と分散パラメーターの値がいろいろな水理条件, 多孔媒体について集積されることを希望したい。

なお, 本研究は昭和53, 54年度に埼玉大学工学部と国立公害研究所水質環境部との共同研究によって進められたものの一部であり, その後更に検討を加えたものである。実験研究に協力された当時本学学生飯沢雅人(現在電源開発)

および鈴木猛康（現在熊谷組）両氏に心よりお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 前田慶之助・広川宗生・大田正彦：廃棄物埋立処分における環境影響評価について，環境保全と地盤工学に関するシンポジウム，pp. 69～72，1983.
- 2) 森澤眞輔・林 伸行・井上頼輝：廃棄物埋立処分場周辺の地下水汚染モニタリング井戸の最適配置，衛生工学研究論文集，Vol. 20，pp. 133～145，1984.
- 3) Rumer, R.R.: Longitudinal dispersion in steady and unsteady flow, Journal of the Hydraulics division, Proc. A.S.C.E., p. 156, July, 1962.
- 4) Harleman, D.R.F. and Rumer, R.R.: Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium, J. Fluid. Mech. Vol. 16, pp. 384～394, 1963.
- 5) 筒井天尊・西牧研壯：放射性核種の帯水砂層中での挙動に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第200号，1972.4.
- 6) 鎌田 博：土壌中における放射性核種の移動に関するパラメータ，日本原子力学会誌，Vol. 19, No. 5, pp. 275～283, 1977.
- 7) 井上頼輝・森澤眞輔・馬原保典：通気層における放射性核種の移動，(I)，日本原子力学会誌，Vol. 17, No. 7, pp. 376～384, 1975.
- 8) Ogata, A.: Theory of dispersion in a Granular Medium, Geological Survey Professional Paper 411-I, US, pp. 11～134, 1970.
- 9) 井上頼輝・森澤眞輔：放射性核種の土壌と水との間の分配係数値，日本原子力学会誌，Vol. 18, No. 8, pp. 524～534, 1976.
- 10) 村岡浩爾・岩田 敏：不飽和浸透に伴う栄養塩の土壌吸着特性に関する研究，国立公害研究所研究報告，第47号，pp. 64～67, 1983.
- 11) Matsuo, S., Nisida, K. and Sasaki, S.: Physical properties of soil particles and their effect on hydraulic conductivity of unsaturated decomposed granite soil, Soils and Foundations, Vol. 21, No. 4, Dec., pp. 1～12, 1981.
- 12) 玉井信行：密度流の水理，土木学会新体系土木工学 22, pp. 178～182, 1980.
- 13) De Smedt, F. and Wierenga, P.J.: Solute transfer through columns of glass beads, Water Resour. Res., Vol. 20, No. 2, pp. 225～232, Feb., 1984.

(原稿受理 1984.6.18)

学会刊行物案内

現場技術者のための土と基礎シリーズ A 5判 送料各1冊 350円

1. 杭基礎の調査・設計から施工まで〔第1回改訂版〕

590ページ 会員特価 5,400円 定価 7,000円

2. 土質調査の計画と適用

433ページ 会員特価 3,900円 定価 5,100円

3. 地盤改良の調査・設計から施工まで

330ページ 会員特価 3,300円 定価 4,300円

4. 盛土の調査・設計から施工まで

443ページ 会員特価 4,300円 定価 5,600円

5. ケーソン工法の調査・設計から施工まで

410ページ 会員特価 3,800円 定価 4,900円

6. 建設工事に伴う公害とその対策

344ページ 会員特価 3,200円 定価 4,100円

7. フィルダムの調査・設計から施工まで

356ページ 会員特価 3,300円 定価 4,200円

8. 地中埋設管の調査・設計から施工まで

407ページ 会員特価 3,800円 定価 4,900円

申込み先 社団法人 土 質 工 学 会

東京都千代田区神田淡路町2-23 菅山ビル

〒101 ☎03-251-7661(代) 郵便振替 東京4-40786