

II-129 浸透層上の流れにおける主流と浸透流間の物質輸送

京都大学大学院 学生員 西内 美宣
 京都大学工学部 正員 岩佐 義朗
 京都大学工学部 正員 綾 史郎
 日本道路公団 正員 中井 俊雄

1. はじめに; 本研究は、浸透性路床上の流れにおける浸透性路床上の主流と浸透流との間に生じる物質交換機構について実験的に研究したものである。具体的には、まず水深方向の物質輸送について室内水路において基礎的な水理実験を行い、浸透層内の流れを観察するとともに、交換層厚と、減衰時間定数の測定を行い、物質輸送の形態および交換の特性について調べた。つぎに、物質輸送に関するいくつかの特性パラメータ(交換速度、乱流拡散係数、減衰時間定数)と水理量、浸透層構成材料との関係について考察を行った。

2. 実験方法と解析法; 実験は、(1)染料を用いた可視化による浸透層内の流れの観察と交換層厚との測定、(2)主流に塩水とトレーサーとして瞬間的に投入し、主流、浸透層における塩水濃度の時間的変化の測定による移流速度の測定、(3)主流に定常的にトレーサーを投入し、浸透層内を一様濃度とした後、浸透層内の濃度の時間的変化を測定することによる減衰時間定数の測定からなっている。浸透層構成材料としては、ガラスビーズ; $d_{50}=1.25\text{ cm}$ (A), 1号ケイ砂; $d_{50}=0.354\text{ cm}$ (B), 2号ケイ砂; $d_{50}=0.218\text{ cm}$ (C), 3号ケイ砂; $d_{50}=0.113\text{ cm}$ (D), の4種を用い、水路幅5cm, 層厚10cm前後として、流量(16.2~602 cm^3/sec), 路床勾配(1/4000~1/100), 水深(1.0~4.2 cm)を変化させて20通りの実験を行った。実験の詳細及び実験諸量については、紙面の都合上省略する¹⁾。

<解析法> 本研究では、浸透層上の流れにおける物質輸送を評価するために、濃度の1/10減衰時間で定義された減衰時間定数 T_{10} を求めることにより、交換速度や乱流拡散係数を用いて行った。すなわち、それぞれ

$$k \equiv (y_b/T_{10}) \cdot \ln 10 \quad (1)$$

$$D_y \equiv (4y_b^2/T_{10}) \cdot \ln 10 \quad (2)$$

と定義した。ここに k : 交換速度, y_b : 交換層厚さ, T_{10} : 減衰時間定数, D_y : 乱流拡散係数下である。

3. 実験結果; 実験(1)の結果の例を示せば図-1のようであり、浸透層は流水の形態、現象の時間スケールにより3層に大別されることわかる。

浸透層Aは、主流への染料投入停止後すまやかに染料が抜ける層であり、投入停止後もしばらく染料の残留のみられる層と浸透層B、浸透層下部から連続投入した染料によって染められた層と浸透層Cとしている。図-1は浸透層の流れを例示したものであるが、浸透層Aでは、流れは乱流的な時間的空間的にランダムなものであり、主流部と浸透層の境界面を通じて主流からの流れが伝播し主流との質量、運動量交換が非常に盛んに行われているものと考えられる。浸透層Bでは、浸透層Aを取り囲むように比較的安定した流れが存在する。これは主流からの流れが深さとともに急激に減衰するためと考えられ、交換の時間スケールについても浸透層Aに比べて長いものである。浸透層Cにはいくつかの空間スケールをもった主流への吹き出しと有する非常にゆっくりにした

(Darcy流速程度)流下方向への流れが存在する。また、浸透層B, Cの境界は安定しており、浸透層Cが交換に与える影響は小さいと考えられる。したがって物質交換に関係するのは、主として浸透層A, Bであり、特に浸透層A(以後、交換層と呼ぶ)は最も主流との交換が盛んな領域である。次に、実験(3)によって得られた交換層内の濃度の時間的変化を初期濃度 C_{B0} で正規化して示すと、図-3のようであり、交換層内の濃度は指数関数的に

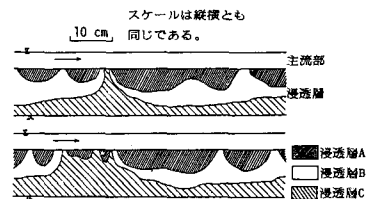


図-1 染料可視化実験結果

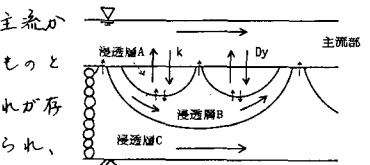


図-2 流れの形態

減衰していくことがわかる。同図より、減衰時間定数 T_{10} を求めると、 T_{10} は水理量、浸透層構成材料に依存するようであり、 $T_{10} = 10 \sim 100$ 秒程度の値であった。

4. 物質交換機構に関する考察; <交換層に関する考察> まず、交換層厚 z について検討を行う。交換層厚 z を図-4に示すように $y_b = \frac{\sum a_i}{\sum b_i}$ で定義すると、 y_b は浸透層構成材料が大きければ大きくなるようであり、図-5からは

$$y_b = 2.35 dm + 0.53 \quad (\text{単位; cm}) \quad (3)$$

の関係となる。次に、交換層の形状について考察を行うと、図-4において交換層の個数 n を知れば、平均的な形状比 $\eta = y_b / (L/n)$ で与えられる。また測定区間において交換層セルの占める比 $\xi = L/L$ で与えられる。図-6、図-7は全実験ケースについて、 y_b と横軸にヒッて、 η 、 ξ をプロットしたものであるが、 η と ξ は浸透層構成材料や水理量による依存性は見られず、

$$\eta \approx 0.25 \quad (4)$$

$$\xi \approx 0.825 \quad (5)$$

程度に相当する。さらに、個々の交換層セルの長さ z/dm について見ると、どの実験ケースについても、かなりばらつきがあるが、必ずしも均等ではなく数個の z/dm に集中する傾向を持つようである。

<交換機構に関する考察> (1)式で定義される交換速度 R と、前出の y_b と実験(3)で求めた T_{10} により求めると、

$$R = (1.0 \sim 20.0) \times 10^{-2} \quad (\text{cm/sec}) \quad (6)$$

程度に相当した。この値は前報²⁾で移流分散係数を測定することによって求めた R と比較すると、5倍程度系統的に大きくなっている。

次に(2)式によって求められた拡散係数について見ると、

$$D = (0.2 \sim 8.0) \times 10^{-2} \quad (\text{cm}^2/\text{sec}) \quad (7)$$

$$D/hu_w = (0.6 \sim 16) \times 10^{-2} \quad (8)$$

$$D/ub_{dm} = 0.9 \sim 25 \quad (9)$$

程度である。ここは h ; 水深、 u_w ; 摩滅速度、 u_b ; 浸透層内流速である。ここで、(8)式は水深方向の流速分布式として対数則を用いて Reynolds 相似によって求められた $D/hu_w = 6.67 \times 10^{-2}$ と同程度の値となっている。一方、(9)式と浸透層内の横分散係数とされている $D_T/ub_{dm} = 0.04$ と比較すると、(9)式の方がはるかに大きくなっており、主流が浸透流におよぼす効果が出ていると考えられる。

最後に、減衰時間定数 T_{10} について dm 、 U_A (主流部平均流速) を基本量として次元解析を行うと、その結果は図-8に示すようであり、

$$\frac{dm}{T_{10} U_A} = C \left(\frac{K}{U_A} \right) \left(\frac{h}{dm} \right)^{3/5} Fr.^{-2/5} \quad (10)$$

の関係式が得られた。(10)式は、減衰時間定数 T_{10} には主流、浸透流の特性、水理量が相互に作用していることを示しているが、(2)式のもつ物理的意味については明らかでなく、今後、理論的実験的検討の必要がある。

<参考文献>

- 1) 中井俊雄; 京都大学修士論文, 1986, 2) 中井俊雄; 第40回土木学会年講, II-250, 1985
- 3) 玉井信行; 密度流の水理, 新体系土木工学22, 1980, 技報堂

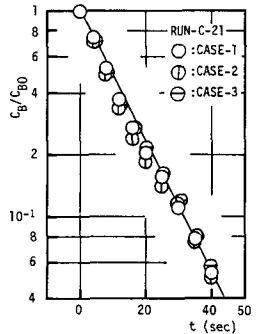


図-3 濃度の時間的变化

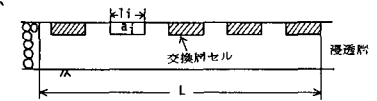


図-4 交換層の形態

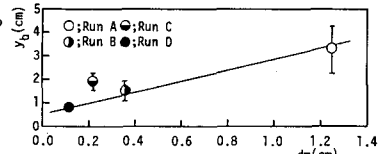


図-5 $y_b \sim dm$

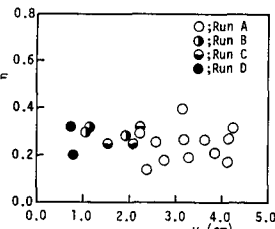


図-6 $\eta \sim y_b$

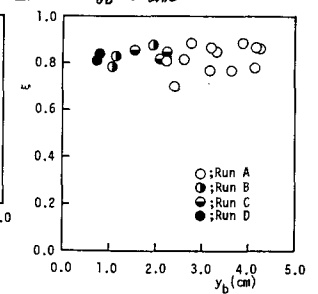


図-7 $\xi \sim y_b$

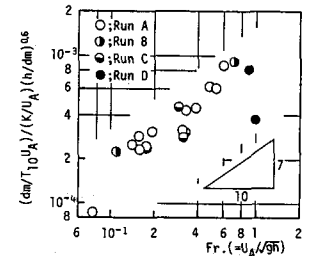


図-8 $(dm/T_{10}U_A)/(K/UA)(h/dm)^{3/5} Fr.^{-2/5} \sim Fr.$