

浸透層内の流れの分散係数について

鳥取大学 大学院 ○学生員 梶田 丞二
鳥取大学 工学部 正 員 鈴木 幸一

1. はじめに：河水、地下水、海水中の汚染物質の拡散問題の解決のためには、拡散場における分散係数を明らかにする必要がある。本研究では、被圧地下水流中の物質分散係数を明らかにすることを目的として、分散現象に密接に関係していると思われる空隙系特性の相違によって、分散係数特性がどのように変化するかを考察しようとしたものである。すなわち、地下水浸透層の構成粒子として、ガラスビーズおよび砂を用い、等方等質の浸透層における塩分濃度の分散現象を実験的に把握し、空隙系特性の違いによる分散係数特性の違いを明らかにしようとしたものである。

2. 縦分散係数と横分散係数：分散物質の連続条件を考えることにより導かれる一次元浸透層流中の物質分散現象の基礎式は、拡散物質濃度を S とすると、

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} = D_1 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \quad (1)$$

で表わされる。ここに、 x は流下方向距離、 y はそれに垂直距離で、 u は x 方向の流速である。また、 D_1 および D_2 が縦分散係数および横分散係数である。

縦分散係数 D_1 を実験的に求めるために式(1)において、 y 軸方向に濃度変化のない($\partial S / \partial y = 0$)状態で実験を行えばよい。すなわち濃度 S は、距離 x と時間 t だけの関数 $S = S(x, t)$ と表わされ、初期条件および境界条件が、 $S(0, t) = S_0$ ($t \geq 0$)、 $S(x, 0) = 0$ ($x > 0$)、 $S(\infty, 0) = 0$ ($t \geq 0$)で表わされたとすると、微小項を無視すると、相対濃度 S/S_0 は式(1)を解けば式(2)のようになる。

横分散係数 D_2 については、分散現象が定常($\partial S / \partial t = 0$)のとき、 $\partial^2 S / \partial x^2 \ll \partial^2 S / \partial y^2$ となり、濃度 S は、距離 x 、 y だけの関数 $S = S(x, y)$ と表わされ、境界条件が、 $S(0, y) = 0$ ($-\infty < y \leq 0$)、 $S(0, y) = S_0$ ($0 < y < -\infty$)、 $\partial S / \partial y = 0$ ($y = \pm \infty$)であるように実験をすれば、相対濃度 S/S_0 は式(3)で表わされる。

$$1 - 2 \frac{S}{S_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{x - ut}{2 \sqrt{D_1 t}} \right) \quad (2)$$

$$1 - 2 \frac{S}{S_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2 \sqrt{D_2 x / u}} \right) \quad (3)$$

ここに、 erf は誤差関数である。したがって、実験により、式(2)に S/S_0 、 x 、 u 、 t を与え、また式(3)に S/S_0 、 y 、 x 、 u を与えることにより、縦分散係数 D_1 および横分散係数 D_2 を計算することができる。

表-1 浸透層構成材の特性

	平均粒径 (mm)	空隙率 (%)	比重	均等係数	粒径範囲 (mm)
ガラスビーズ	1.0	38.5	2.48	1.37	0.71-1.20
砂	1.04	41.7	2.65	1.47	0.59-1.68

3. 実験的考察：本実験に用いた浸透層構成粒子は、ガラスビーズおよび砂で、その特性を表-1に示しているが、両者とも平均粒径は約1mmで、砂の粒径範囲はガラスビーズの粒径範囲よりやや広いことがわかる。

縦分散係数の実験について図-1のような縦分散モデルを考える。既述の縦分散実験の初期条件および境界条件を満足するように実験を行なう。すなわち、淡水で満たされ、流速 u で流れる浸透層中に、塩水を連続して流す。このとき、流下方向(x)の一定地点における相対濃度 S/S_0 を、塩水流入時刻($t=0$)から時間間隔 t で測定する。このようにして得られたデータを式(2)に与え縦分散係数 D_1 を求める。

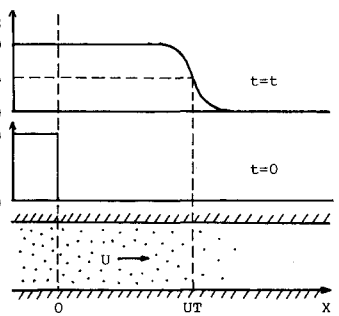
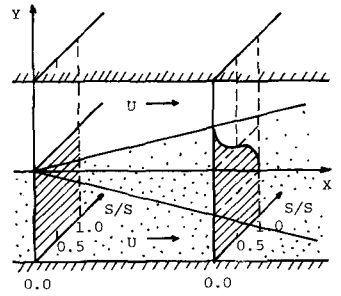


図-1 縦分散モデル

横分散係数の実験について図-2のような横分散モデルを考える。既述

の横分散実験の境界条件を満足するように実験を行なう。すなわち、淡水で満たされ、流速 U で流れている浸透層の上層に淡水を、下層に塩水を連続的に流入させ、定常状態になったならば、流下方向 (x) の一定の地点において、 x 軸に垂直方向の距離 y の地点の相対濃度 S/S_0 を測定する。このようにして得られたデータを式(3)に与えて横分散係数 D_h を求める。

浸透層内の基本特性を知る方法として透水係数を調べた結果、浸透層構成粒子をガラスビーズから砂に換えたとき、空隙率が増加したにもかかわらず、透水係数は 0.584 cm/sec から 0.348 cm/sec と小さくなったが、この原因は砂の形状のいびつさから流路が複雑になり通水能が低下したと考えられる。

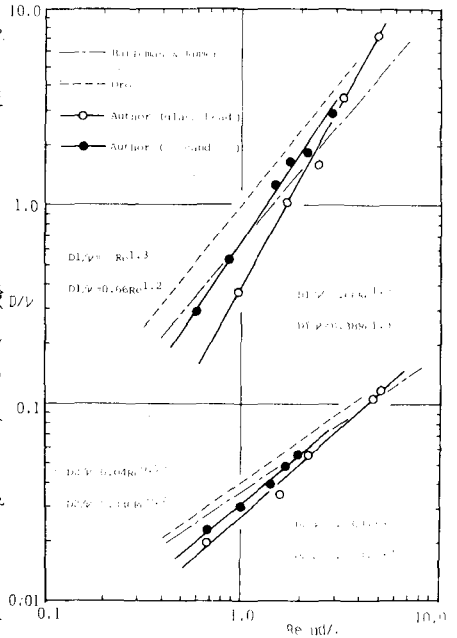


図一2 横分散モデル

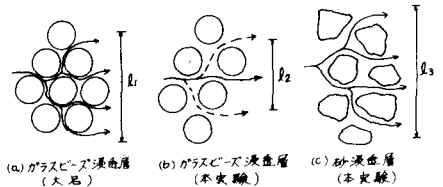
動粘性係数で無次元化した分散係数 D/ν と、砂粒レイノルズ数 $Re = ud/\nu$ の関係を示したものが図一3である。この図を参考にするに、砂の無次元縦分散係数は、ガラスビーズの場合と比較して大きくなっている。また無次元横分散係数についても、わずかではあるが同じ傾向を示す。

また、図一4には Harleman & Rumer による実験値と、大呂らの実験値が示されている。Harleman & Rumerは、浸透層構成粒子として、平均粒径 0.96 mm 、均等係数 1.14 のガラスチック球を用い、その空隙率は 36% 、透水係数 0.8 cm/sec であった。また、大呂らは本実験に用いたガラスビーズと同一のものを用い、その空隙率は 38.8% 、透水係数は 0.382 cm/sec であった。

この実験値と本研究により得られたガラスビーズの場合の実験値とを比較すると、 Re が比較的大きいところでは両者はほとんど一致しているが Re が小さくなるにつれ、本実験の分散係数のほうが小さくなる傾向が見られる。この原因の一つとして、透水係数の違いとも関連する空隙率特性の違いが考えられる。すなわち、本実験における透水係数 0.584 cm/sec は、大呂の場合の 0.382 cm/sec より大きいことから、締め固めの程度が異なり、図一4に示すように浸透層がゆるんでいることが考えられる。図一4に示した空隙率特性の違いによる分散現象を考えると、空隙が広いほど、分散物質はなめらかに進行し、逆に空隙が狭いほど、分散物質は複雑に入り組んだ流路を移動していく。また砂浸透層の空隙率はガラスビーズの場合より大きい、これは砂粒子の形状によるもので、その流路は複雑になっていると考えられる。このような流路を考えると、流路がなめらかなほど分散係数が小さくなり、流路が複雑になるほど分散係数が大きくなることが考えられる。



図一3 分散係数とレイノルズ数との関係



図一4 浸透層の空隙特性

4. まとめ：浸透層構成粒子の違いにより、流路が複雑になるになると、分散係数が大きくなり、また、同一の浸透層構成粒子を用いても、締め固め度によって空隙率特性が異なり、分散係数が異なってくるということがわかったが、今後、砂の粒径を変えた場合、分散係数が、浸透層の空隙率など空隙率特性の変化により、どのように変化するかを明らかにしたい。

参考文献：1) Ogata, A. & Banks, R.B.: Prof. Paper 411-A, U.S.G.S., Washington, D.C. 1961.

2) Harleman & Rumer : J. Fluid Mecha. Part 3, vol.16, July 1963.

3) 大呂 敏美：「鳥取大学卒業論文」, 1979.