

II-429

礫層内における深さ方向物質輸送現象の発生機構

東京大学工学部 正会員 長岡 裕
東京大学工学部 正会員 大垣眞一郎

1. はじめに

礫等で構成された河床における生物学的自浄作用の機構を明らかにするには、礫層における水理学的特性、特に深さ方向の物質輸送のメカニズムを解明し、基質が礫層のどこまで深く供給され得るかを知らなければならない。そのことによって初めて自浄作用を増大させる目的で水路等に礫を敷き詰めることの有効性を議論することも可能になる。本研究では礫層を有する開水路において塩水トレーサーを用いて礫層内の深さ方向拡散係数を測定し、併せてホットフィルム流速計によって礫層内の流速分布を測定して、礫層内深さ方向の物質輸送現象の機構解明を試みた。

2. 実験水路と実験条件

実験水路（大小2本）の概要をFig.1に示す。水路は循環式の開水路で、中央部にそれぞれ直径1.9 cmおよび4.08 cmの磁製球を最密充填に7層積み重ねた礫層を有している。実験に用いた水理条件はまとめてTable 1に示した。

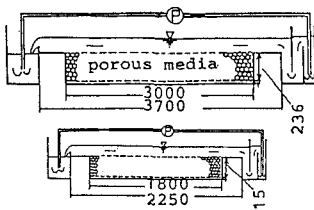


Fig.1 Experimental Open Channel (mm)

Table 1 Experimental Condition

	particle diameter (cm)	* mean velocity (cm/s)	water surf. slope (%)	friction velocity (cm/s)	depth (cm)
Case 1	4.08	42.8	3.8	4.30	6.75
Case 2	4.08	28.0	2.8	4.07	6.75
Case 3	4.08	21.1	1.2	2.70	6.75
Case 4	4.08	16.7	0.75	2.18	6.75
Case 5	4.08	11.7	0.35	1.53	7.00
Case 6	4.08	8.9	0.20	1.15	6.75
Case 7	4.08	5.8	---	---	6.75
Case 8	4.08	5.5	---	---	6.75
Case 9	4.08	3.9	---	---	6.75
Case 10	1.9	30.2	3.8	2.91	3.2
Case 11	1.9	20.3	1.0	1.65	3.2
Case 12	1.9	11.2	0.40	1.09	3.2
Case 13	4.08	17.4	0.85	1.57	3.25
Case 14	4.08	18.1	0.25	1.76	12.95

3. 深さ方向拡散係数の測定

深さ方向拡散係数はFig.2に示す様に5本の導電率測定センサーを礫層内各層に埋め込み、水路表面流中の塩分が礫層深部へ拡散する過程を記録して計算によって求めた¹⁾。

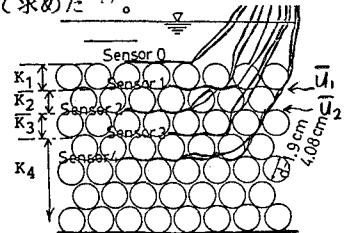


Fig.2 Setting of Conductivity Sensors and Definition of Diffusion Coeff. (K1-K4)

4. 礫層内流速測定

大粒径についてはコニカル形のホットフィルムセンサーを礫層内に埋め込み、礫層内流速分布を求めた。小粒径については2本の導電率測定センサーを流れ方向に間隔を開けて設置し、上流より注入された塩水の通過を測定することによって求めた。礫層境界におけるスリップ速度 u_0 および粒径 d で無次元化した流速分布の例をFig.3に示す。また礫層境界における乱流強度をホットフィルム流速計によって測定した。

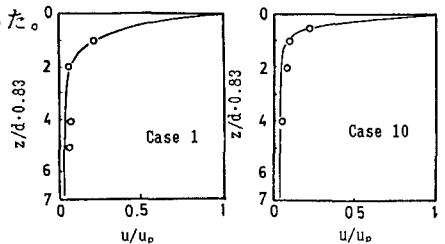


Fig.3 Velocity Profile in Porous Media

5. 深さ方向拡散現象の発生機構

(1) 礫層境界面付近

礫層境界付近の深さ方向拡散現象は境界付近における乱流および礫を回り込むような流れによるものと考えられる。物質輸送を包括的に拡散係数の形で表現し、乱流拡散係数が乱流強度と混合距離の積で表せるとすると

$$K_1 = \alpha_0 \sqrt{u} \quad (1)$$

K_1 : 乱流拡散係数

λ_0 : 礫層境界面における混合距離

$\sqrt{U'^2}$: 礫層境界面における乱流強度

が成立すると考えられる。ただしここでは主流方向と深さ方向の乱流強度が等しいと仮定した。礫層内の混合距離としては

$$\lambda_0 = K_2 \cdot B \quad (2)$$

$$B = \frac{2\lambda^2}{3(1-\lambda)} d \quad (3)$$

K_2 : 礫層内混合距離に関する定数

B : 礫層内空けきスケール

λ : 礫層内空けき率 d : 粒径

の形²⁾を考えた。 K_2 の値は概ね1であるとしてあるので²⁾、礫層境界面における乱れ強度と混合距離の積を計算し、境界面付近における深さ方向拡散係数 K_1 との関係をプロットしたものがFig.4である。粒径、流速、水深等のパラメーターによらずプロットは概ね

$$K_1 = \lambda_0 \sqrt{U'^2} \quad (1)$$

の線上付近に集まっており、礫層表面付近の深さ方向拡散係数が式(1)で統一的に表現し得ることが実験的に示された。

(2) 礫層深部

礫層内部における物質輸送は地下水におけるようないわゆる多孔体中の分散現象と同様に流路の変更により、物質が移流にともなって輸送されと考えられる。深さ方向の物質輸送を担う深さ方向流速の大きさ(絶対値)の時間平均は近似的に主流方向の時間平均流速に等しいと仮定できる。すなわち

$$|v_z| = v_x \quad (4)$$

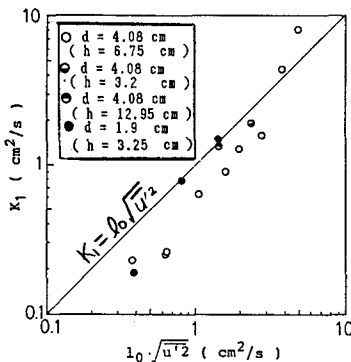


Fig.4 Relationship between Diffusion Coeff. and Turbulent intensity near Porous Boundary

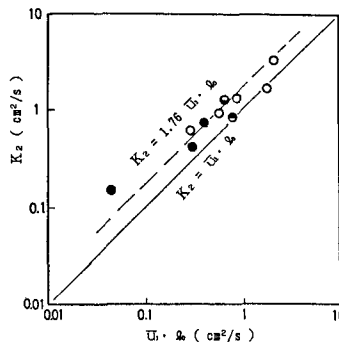


Fig.5 Relationship between Diffusion Coeff. and Time Average Velocity in Deeper Region of Porous Media

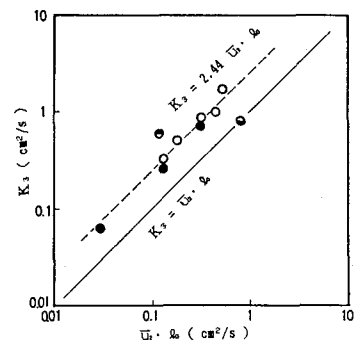


Fig.6 Relationship between Diffusion Coeff. and Time Average Velocity in Deeper Region of Porous Media

$|v_z|$: 礫層内深さ方向流速の絶対値

v_x : 礫層内主流方向流速

—は時間平均を表す

である。礫層内における物質輸送のスケールを礫層境界面における混合距離 (= 礫層空隙スケール) に等しいと仮定すると礫層内深さ方向拡散係数 K_2 、 K_3 、 K_4 は混合距離 λ_0 と礫層内の時間平均流速の積で表せると考えられる。

Fig.5、Fig.6はそれぞれ K_2 、 K_3 について各層の上側端における時間平均流速 $\bar{U}_1$ 、 $\bar{U}_2$ と礫層内混合距離との積との関係をプロットしたものである。両図において礫層深部における拡散係数 K_2 、 K_3 は

$$K_2 = \bar{U}_1 \cdot \lambda_0 \cdot 1.76 \quad (5)$$

$$K_3 = \bar{U}_2 \cdot \lambda_0 \cdot 2.44 \quad (6)$$

の形で表せることが示されている。つまり礫層内混合距離として約2倍の大きさのものを考慮すべきであることが示された。

6. まとめ

礫層内における深さ方向拡散係数は

①境界面付近

(境界面における乱流強度) × (礫層空隙スケール)

②深部

(時間平均流速) × (礫層空隙スケール) × 2

で概ね表せる。

参考文献

- 1)長岡、大垣「礫で構成された河床における水理学的特性—深さ方向拡散係数の測定—」第21回水質汚濁学会講演集(1987)
- 2)山田、川端「浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究」土木学会論文報告集,325,69-80(1982)