

ボーリング孔内における微細粒子の運動特性

九大工学部 学生員 ○本村 浩志 九大工学部 正 員 梶井 和朗

九大工学部 正 員 神野 健二 九大工学部 正 員 上田 年比古

1. はじめに

従来、ボーリング孔を利用して、地下水の流速や流向の調査が行なわれている。この場合ボーリング孔内の流れと、砂、シルト、あるいは岩盤等で構成される地盤内の流れとの関係について、予め明らかにする必要がある。本報ではボーリング孔内の流れと、ボーリング孔を設ける前の地盤内での地下水の流れとの関係を明らかにし、次いでボーリング孔内の流れの検討のために、流体用トレーサとして粒径 $1\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ の微細粒子を用いた場合の運動特性について検討を加えたものである。

2. ボーリング孔内の流れ¹⁾

無限遠に広がる多孔性媒質中の定常で一様な U_∞ の流れに対し、半径 R_0 のボーリング孔を設けたモデルを仮定する。この場合の基礎式は、多孔性媒質中では一般化されたダルシーの式、ボーリング孔内は粘性流体の基礎式(ストークスの式)で与えられるものとする。

$$\text{多孔性媒質中の流れ} : \nabla P = \mu \nabla^2 \mathbf{U} - (\mu/K)\mathbf{U} \quad \dots (1), \quad \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad \dots (2)$$

$$\text{ボーリング孔内の流れ} : \nabla P = \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad \dots (3), \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots (4)$$

ここに、 $P, \mathbf{U}$ は多孔性媒質中の圧力と流体速度、 $p, \mathbf{u}$ はボーリング孔内の圧力と流体速度、 μ は粘性係数、 K は地盤に固有の、透水係数である。境界条件としては、無限遠では、 $U_x = U_\infty$, $U_y = 0$, $P = -(\mu/K)U_\infty$ を、一方ボーリング孔境界では、速度、圧力、せん断力が一致するように、 $u_r = U_r$, $u_\theta = U_\theta$, $\partial u_\theta / \partial r = \partial U_\theta / \partial r$, $p = P$ を用いている。ここに x, y は、流れ方向と流れに鉛直方向、 r, θ は、円筒座標系の半径方向と接線方向である。この場合のボーリング孔内流速は、次式ようになる。

$$u_r/U_\infty = (u_0/U_\infty + a \zeta^2/8) \cos \theta \quad \dots (5), \quad u_\theta/U_\infty = -(u_0/U_\infty + 3a \zeta^2/8) \sin \theta \quad \dots (6)$$

ここに、 u_0 はボーリング孔中心の速度であり、 $\zeta = r/K^{1/2}$, $a = -8(\alpha - \beta)/\Delta$, $\Delta = 8(\alpha - \beta) + \zeta_0^2(\alpha + 3\beta)$, $\alpha = K_0(\zeta_0) + (\zeta_0 + 2\zeta_0^{-1})K_1(\zeta_0)$, $\beta = K_0(\zeta_0) + 2\zeta_0^{-1}K_1(\zeta_0)$, $\zeta_0 = R_0/K^{1/2}$ で、 K_0, K_1 は変形されたベッセル関数である。

3. 微細粒子運動の式と解

ボーリング孔内の微細粒子の運動は、流体速度と粒子速度の差によって生じる粘性抵抗力と、粒子に作用する揺動力によって規定され、次式により示される。

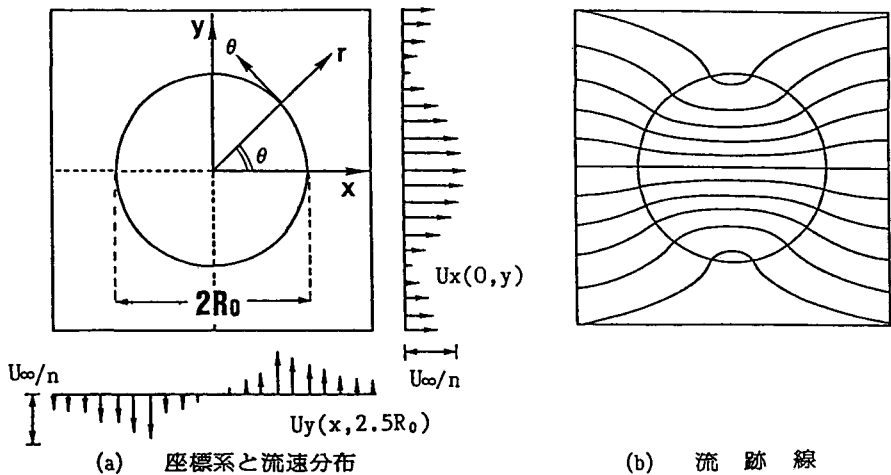


図-1 ボーリング孔内の流れ

$$dV/dt = -\gamma(V-U) + N(t) \quad \dots (7)$$

ここに、 V は粒子速度、 $N(t)$ は揺動力、 $\gamma = 6\pi d \mu/m$ 、 d は粒子径、 m は粒子の質量である。 $1/\gamma$ は、時間の次元をもち反応時間とよばれるものである。又、揺動力 N は、平均値0、分散 $2D\delta$ の正規性白色雑音を与えている²⁾。ここに、 δ はデルタ関数、 $D = \gamma k T/m$ で、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。式(7)の解は、次式の積分形によって与えられる。

$$V = V_0 \exp(-\gamma t) + \int_0^t \exp[-\gamma(t-s)] \times [\gamma U(s) + N(s)] ds \quad \dots (8)$$

ここに、 V_0 は粒子の初速度である。

4. 結果と考察

4.1 流体の流れ 図-1, (a), (b)に流速分布、および流体粒子を追跡して得られる流跡線を示す。流体はボーリング孔内に吸いこまれる様に流れ、中心部分ほど流跡線間隔は密になっており、流速が早いことがわかる。無限遠流速を空隙率 n （ここでは $n=0.4$ とした）で除した実流速 U_∞/n と、中心部分流速 u_0 とを比較すると $u_0 = 1.2U_\infty/n$ の関係になる。

4.2 微細粒子の平均速度と速度変動 図-2 に U_∞ が 10^{-3} (cm/s)の場合の、流れ方向における微細粒子速度の時間的変化を示す。3種類の粒子径で比較検討を行った。100 μm 粒子ではほとんど変動が見られないのに対し、1 μm 粒子では変動がかなり大きい。次に、表-1に U_∞ が 10^{-1} (cm/s)と 10^{-3} (cm/s)の場合の平均速度と標準偏差を示す。これによると、1 μm 粒子は変動が大きく、100 μm 粒子は変動は小さいが、実際の流体速度と一致していない。これに対し、10 μm 粒子は比較の変動が小さく、流体速度ともよく一致していることから、流体用トレーサーとしては10 μm 程度の粒子を用いるのが適当ではないかと考えられる。

5. おわりに

本研究によれば、ボーリング孔内の速度から多孔性媒質中の流れを決定するには、流体用トレーサーに10 μm 程度の粒子を用いることが望ましいと考えられる。

また無限遠流速 U_∞ とボーリング孔中心流速 u_0 は、 $u_0 = 1.2U_\infty/n$ の関係になることが確かめられた。今後は実験を行い、本報の解析方法の妥当性について検討を進めて行く予定である。

謝辞：本研究を行なうにあたり、御尽力頂きました清水建設株式会社の平野文昭氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 佐野 理：多孔性媒質中に穿った円柱状の空洞を過ぎる粘性流，ながれ，Vol. 2，pp.252~259，1983。
- 2) 堀 淳一：ランジュバン方程式，岩波書店，pp. 9~19，1977。

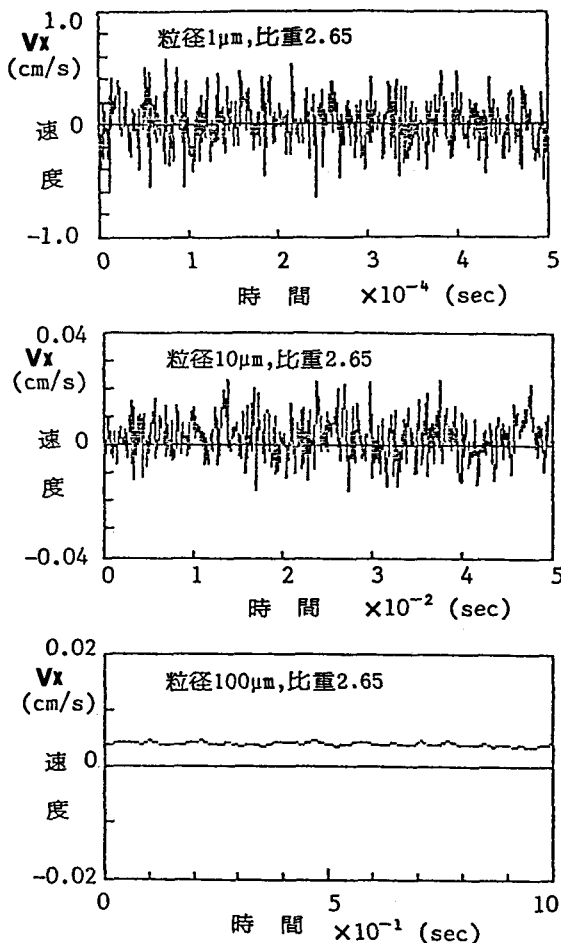


図-2 粒子速度の時系列

表-1 粒子の平均速度と標準偏差

$d (\mu m)$	$\bar{u}_x = 0.00292$ (cm/s) $U = 10^{-3}$ (cm/s)		$\bar{u}_x = 0.292$ (cm/s) $U = 10^{-1}$ (cm/s)	
	$\bar{V}_x$	σ	$\bar{V}_x$	σ
1	0.00752	0.242	0.292	0.249
10	0.00296	0.00747	0.292	0.00778
100	0.00399	0.000260	0.399	0.000250