

九大 工学部 学生員 斎留 康裕 学生員 中森 英明
学生員 百田 徹也 正員 神野 健二

1. まえがき. 本報ではしゃんせつ水のような濁水が砂層媒体の空げま中を流下するとき, 砂層による抑留が生じ濁度および流量が減少する過程について検討を行った. この現象は地下水の人工かん養時に, 注入井隔壁で目づまりが生じ, 注入量が減少する現象と類似である. 浮遊粒子の抑留過程の記述には従来より過方程式が用いられているが, 本報で扱う媒体での抑留や地下水の人工かん養時の目づまりの問題に対しては, まだ十分に活用されていない. ここで過方程式と流れる場とを同時に数値計算し, 抑留過程の進行をシミュレートし考察を加えている.

2. 鉛直浸透層内の抑留について

(2-1) 基礎式. $\bar{v}$ を断面平均流速, k ; 透水係数, k_0 ; 初期透水係数, q ; 水頭, C_0 ; 粒子間けき流体中の濁度 (g/cm^3), g ; 粒子間けき流体の単位体積当りの抑留除去量 (g/cm^3), g_s ; 浮層構成砂 1g 当りの抑留量 (g/g), ε ; 空げ率, ε_0 ; 初期空げ率, ν_s ; 砂の比重, ν_h ; ヘッドロの比重, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$; 定数とすれば

$$\text{連続式; } \partial \bar{v} / \partial z = 0 \quad \dots (1) \quad \text{Darcy 則; } \bar{v} = -k \partial q / \partial h \quad \dots (2)$$

$$\text{粒子間けき流体の濁質の連続式; } \partial C_0 / \partial t = -(\bar{v} \varepsilon) \partial C_0 / \partial z - \partial g / \partial t \quad \dots (3)$$

$$\text{また} \quad \varepsilon g / (\nu_s (1 - \varepsilon_0)) = g_s \quad \dots (4)$$

$$\text{抑留の関係式; } \partial g_s / \partial t = \varepsilon \beta_1 C_0 (1 - \beta_2 g_s) (1 + \beta_3 g_s) / (\nu_s (1 - \varepsilon_0)) \quad \dots (5)$$

$$\varepsilon(t, z) = 1 - (1 - \varepsilon_0) (1 + \beta_2 \nu_s / \nu_h) \quad \dots (6) \quad \text{実験式; } k/k_0 = \exp(-\alpha g_s) \quad \dots (7) \quad (\text{仮定})$$

以上の方程式 (1) ~ (7) 式の未知数は $\bar{v}, k, q, C_0, g, g_s$ 及び ε の 7 個であるから境界・初期条件を与えて数値解を求めることができる.

(2-2) 実験. 図-1 に実験装置を示す. 図-2 には流入濁水中のヘッドロの粒度分布を示している. 浮材には $0.42 \sim 0.59 \text{ mm}$ の砂を用いた. 実験では圧力変換器による各点の水頭変化及び濁度, 流量を記録し, 実験終了後浮層 1 cm の小正間の抑留量を測定し図-3 を得た.

(2-3) 数値計算と実験結果. 定数 β_1 は (5) 式から $g_s \neq 0$ の現象の初期段階の g_s の時間変化, すなわち (7) 式から k/k_0 の時間変化から概略値が求まる. また (5) 式から $\partial g_s / \partial t = 0$ で $\beta_2 = 1/g_s$ すなわち β_2 は飽和状態の g_s の逆数として求められる. β_2 は抑留が進行すると抑留効果が増大することを示すパラメーターであるが, β_2 が β_1 , β_2 に比べ重要な因子ではないことが藤田¹⁾の研究から推定できるので, 一応ここは 0 とした. このようにして定数を定め, 境界条件として q については図-1 中の A, B 間に一定の水頭差 10.5 cm を与え, C_0 については A 部の流入濁度として, 実験 1 では, $1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 実験 2 では $1.4 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ を与えて, (1) ~ (7) 式を差分化して各正間, 各時間ごとの数値計算を行い, 実験値との比較は図-1 の a, b 区間の透水係数の時間変化について行った. こうして β_1, β_2 を変えて, 両者がほぼ一致するように最終的 β_1, β_2 を求めた. これらの計算結果を図-4, 5 に示している. これによれば図-4 では $\beta_1 \approx 0.0015 (\%)$ $\beta_2 \approx 88.0$, また図-5 から $\beta_1 \approx 0.002 (\%)$ $\beta_2 \approx 20.0$ が得られた. 非本解析により実験の傾向をある程度シミュレートしていると言えよう.

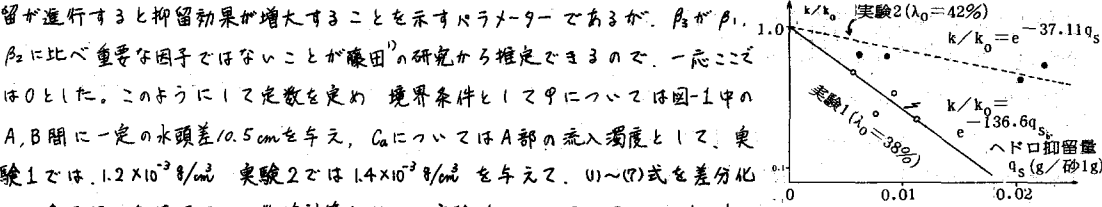


図-2 ヘッドロの粒度分布

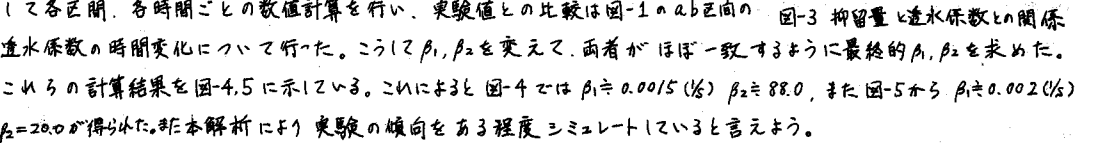
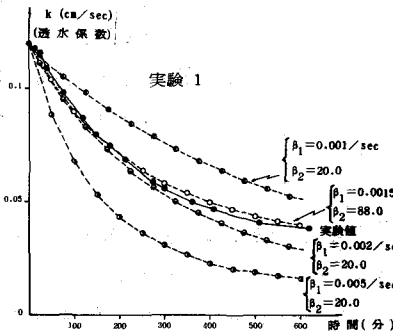


図-3 抑留量と透水係数の関係

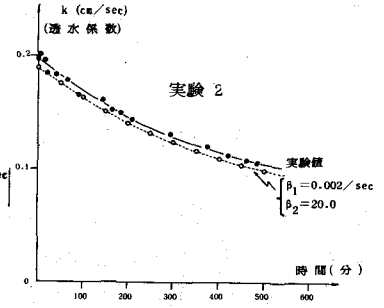
3. 2次元浸透媒体での閉塞過程について

(3-1) 基礎式 流れの場合は図

6に示すように自由表面を有し、しかも水面勾配が緩やかで準一様流の仮定が成立立つものとする。実際の現象では抑留の進行は鉛直方向で変化すること、またヘドロの堤体中での光降性を考える必要があるが取り扱



実験 1



実験 2

扱いがきわめて複雑になる。図-4, 5の間の透水係数の時間的変化(1)

図-5, 6の間の透水係数の時間的変化(2)

で、ここでは現象はすべて鉛直方向に一樣であるとした。この場合、前述の平均値に断面平均水平流速 $\bar{u}$ とおけば、濁質の抑留について(3)~(5)式が用いられる。自由表面の高さを $h(x, t)$ とし

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k h \frac{\partial h}{\partial x}) \dots (8)$$

したがって未知数は $\bar{u}, k, h, C_a, \beta, \beta_s, \varepsilon$ の計7個、用いる式は(2)~(7)及び(8)式の計7個である。

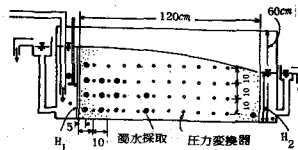


図-6 堤体装置

(3-2) 実験 図-7に堤体の構成土粒子の粒度分布を示している。 k_0 はDupuit-Forchheimerの流量公式で求め、 $k_0 = 0.35 \text{ cm/s}$ を得た。また(7)式の定数 α は図-7の砂材に対する図-3のような実験結果を得ていないため便宜上 $\alpha = 100$ とした。

(3-3) 数値計算と実験結果との比較 ここでは実験の流量の時間変化が数値解と一致するように $\beta_1 = 0.05 (1/s)$ と $\beta_2 = 100$ の組及び $\beta_1 = 0.05 (1/s)$ と $\beta_2 = 25.0$ の組を与えて計算した。実験の初期では実験値と比較的近い値を示しているが抑留が十分に進行して流量が急に減少する60分付近では $\beta_1 = 0.05 (1/s)$ $\beta_2 = 25.0$ の場合でもあまり良い一致を示していない。 β_2 が小さい場合には飽和抑留量が大きくなり、したがって早い時間に k 及び ε の変化が生じる。(8)式の水頭に関する差分式(本報では陰形式を用いている)

の係数行列は k と ε を含むが、このような状況の場合の係数行列が、数値解を求めた上で不安定となり、解が飛散し易いことがわかった。このため、水頭から Darcy 則により $\bar{u}$ を算定するときに誤差を生じることが考えられた。図-9には抑留が十分に進行した時点の自由表面形を比較している。現段階では、まだ良好な精度が得られていないが、堤体の流入地点付近で抑留が生じている様子を示している。

4. 結 論 本報の計算で堤体中の抑留過程をシミュレートすることが可能と考えられるが、① β_1, β_2 の評価法 (β については単粒子抑留の理論⁽¹⁾を適用することから考えられるが) の確立 ② 透水係数と抑留量との関係が

常に(6)式の形式で表わされるか ③ 準一様流の仮定は抑留が進行しても成立つか ④ 浮遊粒子の沈降性の影響はどの程度かなど、多くの問題点を残している。今後は室内実験による検討を行い、未知パラメータの評価法を求めるとともに数値解についても、精度、安定性の向上を考えなければならない。

参考文献: 1) 藤田賢二, "急速な過工程の数学的表現(I)", 水道協会雑誌第510号, 1977, pp. 12~29

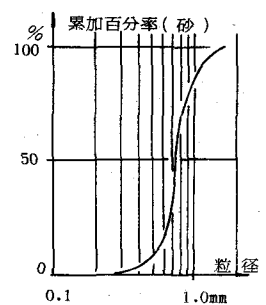


図-7 堤体砂粒度分布

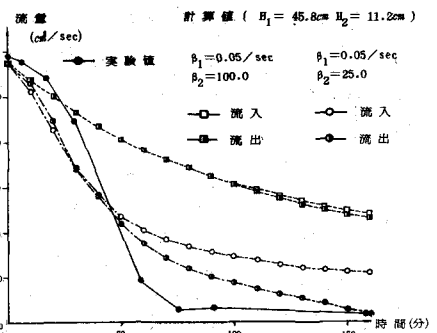


図-8 流量の時間的変化の比較

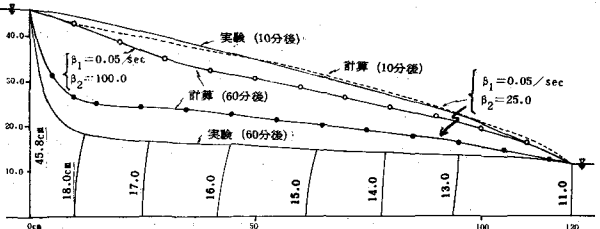


図-9 自由表面の時間的変化の比較