

浸透層上の濁質堆積層の挙動

九州大学工学部 ○学生員 福田 達郎 正 員 上田 年比古

九州大学工学部 正 員 神野 健二 正 員 粉井 和朗

九州大学工学部 大石 秀人

1. まえがき

流出抑制や地下水人工涵養のための浸透施設、浸透池が各地で計画され運用されているが、その際問題となるのは、浸透能力の低下である。この原因として、浸透層上に形成される濁質堆積層が考えられる。この濁質堆積層厚の挙動を、濁質の沈降による層厚増加と圧密による減少の二つと考え、その成長過程を、数値計算で求めようとするものである。

2. 基礎式

距離軸は、浸透層上面の位置を原点とし、これから上方に z 軸をとる。

時刻0において、堆積層の厚さが0であったとし、また堆積のままで、圧密されていない堆積層厚さを H_0 とすれば、堆積層の時刻 t における厚さ H は、
$$H(t) = -\int_0^t \bar{\epsilon} dz + H_0(t) \quad \text{---- (1)}$$

$$H_0(t) = \int_0^t \{(q + v_p) \cdot c_0 / \gamma_s / (1 - n_0)\} dt \quad \text{---- (2)}$$

ここに、 $\bar{\epsilon}$: 圧密による堆積層の公称ひずみ、 q : 空塔速度、 v_p : 粒子の自然沈降速度、 c_0 : 濁質の重量濃度、 γ_s : 固体粒子の単位重量、 n_0 : 初期空隙率(自然沈降沈積部の圧密されていない初期の空隙率)である。(1)式の右辺第1項の圧密による堆積厚さの減少分を求めるために、次の圧密方程式を考える。 ϵ を自然ひずみとすれば、

$$\partial \epsilon / \partial t = C_u \cdot (\partial^2 \epsilon / \partial z^2) - \partial \{(\rho_s - \rho_f)(1 - n) \cdot k / \rho_f\} / \partial \epsilon \cdot \partial \epsilon / \partial z \quad \text{--- (3)}^{(1)}$$

上の式で、 $g(\epsilon) = \partial \{(\rho_s - \rho_f)(1 - n) \cdot k / \rho_f\} / \partial \epsilon \quad \text{--- (4)}$ とおけば、

(3)式は、
$$\partial \epsilon / \partial t + g(\epsilon) \cdot \partial \epsilon / \partial z = C_u \cdot (\partial^2 \epsilon / \partial z^2) \quad \text{---- (5)}$$

となる。(4)式の $g(\epsilon)$ については、まず実験によって透水係数 k と空隙率 n の値を測定し、コゼニー式 $k = \alpha \cdot \{n^3 / (1 - n)^2\}^m$ を求め、また自然ひずみ $\epsilon = \ln\{(1 - n) / (1 - n_0)\}$ を用いて、 $g(\epsilon)$ を ϵ の関数式で表示すれば、

$$g(\epsilon) = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f \cdot \alpha \cdot [-3 \cdot m \cdot \{1 - (1 - n_0) \cdot \exp(\epsilon)\}^{3m-1} \cdot \{(1 - n_0) \cdot \exp(\epsilon)\}^{2-2m} + \{1 - (1 - n_0) \cdot \exp(\epsilon)\}^{3m} \cdot (1 - 2 \cdot m) \cdot \{(1 - n_0) \cdot \exp(\epsilon)\}^{3m} \cdot (1 - 2 \cdot m) \cdot \{(1 - n_0) \cdot \exp(\epsilon)\}^{1-2m}] \quad \text{---- (6)}$$

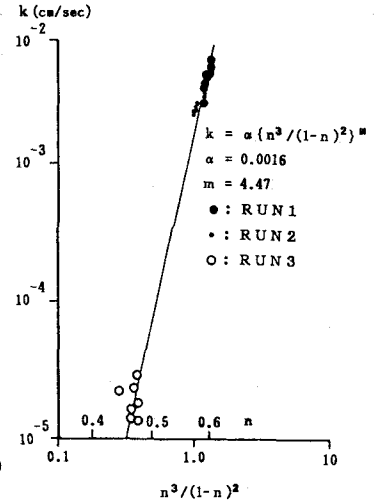
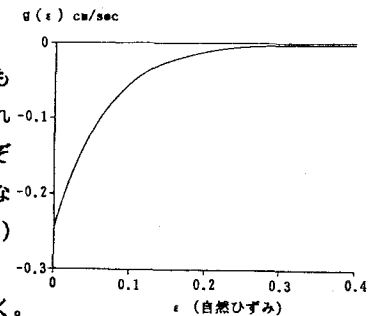
ここで、 n : 空隙率、 C_u : 圧密係数、 ρ_s : 固体粒子の密度、 ρ_f : 流体密度である。また、コゼニー式における定数 α 、 m の値は、図-1に示す実験結果から $\alpha = 0.0016$ 、 $m = 4.47$ とした。 $\rho_s = 2.05$ 、 $\rho_f = 1.0$ 、 $n_0 = 0.64$ とした場合の $g(\epsilon)$ cm/sec を図-2に示す。

3. 自然ひずみ ϵ の数値計算

(5)式の ϵ に関する移流拡散方程式を解くのに、ここでは粒子移動法をもちいた。粒子移動法²⁾は、濁質堆積層内に仮に配置させた多数の粒子にそれぞれひずみ ϵ をもたせ、それらを伝播速度 $g(\epsilon)$ で移動させたときのそれぞれの粒子の位置と ϵ から、濁質堆積層内の ϵ の変化を求めるものである。なお $g(\epsilon)$ で移動する粒子の ϵ の変化は次のようにして求める。すなわち(5)式において $g(\epsilon) = dz/dt$ とおけば、(5)式は

$$d\epsilon/dt = C_u \cdot (\partial^2 \epsilon / \partial z^2) \quad \text{---- (7)}$$
 となるので、この式から求めてゆく。

また、(2)式の空塔速度 $q(t)$ は、堆積層下端からの流出流量を堆積層の断面積で除した値であるが、ここでは $q(t)$ の式にはこの流出流量の時間変化の実験値を参考として、指数関数で近似し、
$$q(t) = q_0 \cdot \exp(-a \cdot t) \quad \text{---- (8)}$$
 とした。

図-1 k と n の実験結果図-2 $g(\epsilon)$ と ϵ の関係

ここに、 q_0 : 初期の空塔速度で 0.8(cm/sec), a : 定数で 0.003 (1/sec)とした。

次に、(7)式の ϵ に関する境界条件には、上面でのひずみを $\epsilon = 0$ 、底面でのひずみを、実験による流出流量の時間変化から考えて、 $\epsilon(t) = \epsilon_i(1 - \exp(-b \cdot t))$ ----- (9) と仮定した。ここに、 ϵ_i : 最終ひずみで 0.437, b : 定数 0.017 (1/sec)とした。図を図-3に示す。次に計算のフローチャートを図-4に示す。

4. 堆積層厚さの計算

(7)式の数値計算で得られた自然ひずみ ϵ の時空間値を次式で公称ひずみ $\bar{\epsilon}$ に変換する。 $\bar{\epsilon} = 1 - \exp(-\epsilon)$ --- (10)
(1)式の右辺第1項算定は次のようにする。時刻0から $\Delta t = 10$ 分毎の圧密されていない自然堆積層厚さを常に4分割して得られる各分割層 Δz_i に対する $\bar{\epsilon}_i$ を(10)式から求め、これから得られる各層毎の圧密量を合計する。すなわち、
$$\int_0^{H_0} \bar{\epsilon} dz = \sum_{i=1}^s (\bar{\epsilon}_i \cdot \Delta z_i)$$
 ----- (11) ここに、 s は分割総数。こうして、各時刻の圧密量及び H_0 を求め、(1)式から堆積層厚さを求めた。

5. 実験及び計算結果

実験³⁾では、濁質材料に粒径105~125 ミクロンの博多湾ヘドロを用いており自然沈降速度はストークスの式から $v_p = 0.57$ cm/secとした。また、濁水濃度は $c_0 = 0.0005$ g/cm³、浸透層上面からの水位は5.0mとした。またここでは、圧密係数 $C_u = 0.0000$ 15cm³/secとした。これらの値を用いた $H(t)$ の計算結果及び実験結果を図-5に示している。計算値は90分までは実験値に近い値を示した。なお、それ以降は、堆積層厚さが異常な値を示し、計算続行ができなかった。この原因は(7)式のひずみ ϵ の算定値が各層毎で振動してきたためであった。

5. むすび

(1)、(3)、(10)式からの数値計算によって、濁質堆積層の成長過程をある程度求めることができた。しかし、実際の現象と合うまでにはまだ多くの問題が残っており、 ϵ の数値計算上の問題点、計算で用いた各定数、各係数の値、境界条件の設定の仕方、更に $g(\epsilon)$ を求めるための透水係数と空隙率との関係など、今後更に検討していく必要があると考える。

参考文献

- 1) 笠正人：軟弱粘度の圧密、鹿島出版会、1967
- 2) 神野・上田：粒子移動による移流分散方程式の数値解法、土木学会論文集 271号、53.3.
- 3) 広城ほか：浸透池底面の濁質膜の透水係数の変化、土木学会西部支部研究発表会 (62・3)

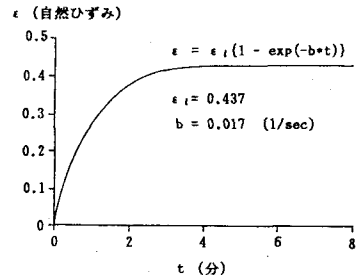


図-3 底面でのひずみと時間の関係

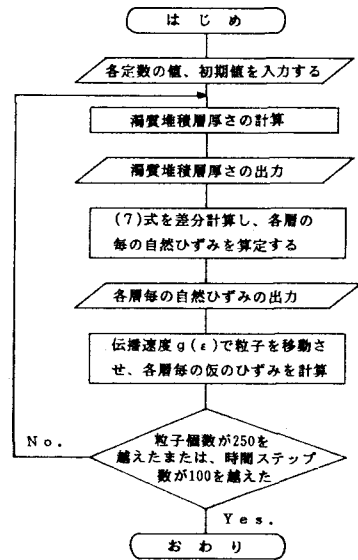


図-4 フローチャート

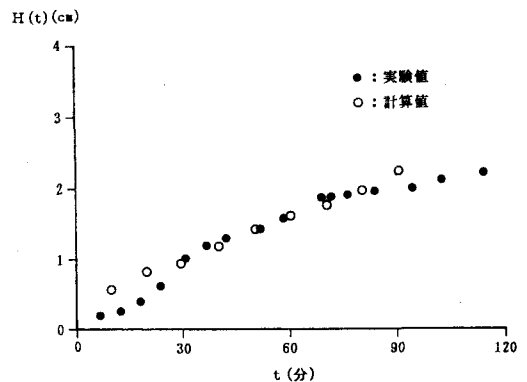


図-5 $H(t)$ の計算結果及び実験結果