

京都大学大学院 学員員 土屋 逸  
京都大学工学部 正 員 若佐 義朗  
京都大学工学部 正 員 綾 史郎

1. はじめに; 浸透層内の密度流現象については, 従来より多くの研究が行われているが, 本研究は, 不圧浸透層における塩水の侵入現象と塩水位の周期変動に伴う塩水楔の非定常応答特性について, 自由水面の存在と浸透水の混合を考慮した2次元数値解析モデルにより解析し, これらの特性について考察したものである。

2. 数値モデルと数値解析法; 2.1 浸透層を等質, 非圧縮性とし, 流体は非圧縮性, Boussinesq 近似が成立するものと仮定すると, 基礎方程式は次の様に表わせる。

①連続方程式  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$

②運動方程式  $0 = -\frac{\partial}{\partial x}(\frac{P}{\rho_f}) - \frac{1}{K_x}u \quad (2) \quad 0 = -\frac{\rho}{\rho_f} \frac{\partial}{\partial z}(\frac{P}{\rho_f}) - \frac{1}{K_z}w \quad (3)$

③物流分散方程式  $\lambda \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C) + \frac{\partial}{\partial z}(w C) = \lambda \frac{\partial}{\partial x}(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z}) + \lambda \frac{\partial}{\partial z}(D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z}) \quad (4)$

④状態方程式  $P = (P_s - P_f)C + P_f \quad (5)$

ここに,  $u, w$ ;  $x$ (水平),  $z$ (鉛直)方向の Darcy 流速,  $P$ : 水の圧力,  $\rho_f$ : 基準密度( $=1.00 \text{ g/cm}^3$ ),  $\rho_s$ : 塩分密度( $=1.02 \text{ g/cm}^3$ ),  $g$ : 重力加速度,  $K_x, K_z$ : それぞれ  $x, z$  軸方向の透水係数,  $C$ : 塩分濃度,  $D_{ij}$ : 分散係数テンソル( $i, j = x, z$ )であり, 本研究では  $D_{ij}$  は次の様に表す。

$$D_{xx} = (A_x u^2 + A_z w^2) / |V| \quad D_{xz} = D_{zx} = (A_x - A_z) u w / |V|$$

$$D_{zz} = (A_z u^2 + A_x w^2) / |V|$$

ここに,  $|V| = \sqrt{u^2 + w^2}$ ,  $A_x, A_z$ : それぞれ縦, 横分散長である。

圧力  $P$  に関しては, (1), (3) 式より次の Poisson 方程式

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{P}{\rho_f}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial}{\partial z} \frac{P}{\rho_f}) = -\frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial}{\partial x} \frac{P}{\rho_f}) \quad (6)$$

を得, (2), (3), (4), (5), (6) 式を有限要素法により離散化して数値解析した。具体的な離散化手段は既報に準じているので省略する。

2.2 流れ及び濃度に関する境界条件は, Fig. 2-1 に示すようであり,  $C_0$  境界の運動学的条件は, 差分により,

$$(P_{i+1}^n - P_i^n) / \Delta t = -\frac{1}{2} \left( \frac{P_{i+1}^n - P_i^n}{x_{i+1} - x_i} + \frac{P_i^n - P_{i-1}^n}{x_i - x_{i-1}} \right) + w_i^n \quad (7)$$

のように離散化した。ここに,  $u_i, w_i$  はそれぞれ  $x, z$  軸方向の実流速であり,  $P_i$  は水位である。(7) 式より, 時間増分  $\Delta t$  後の節点  $i$  における水位  $P_i^{n+1}$  が求まり, その水位に応じて自由表面上の節点を移動させ,  $(n+1)$  時刻の解析領域を決定する。また, 淡水位と塩水位の水位差が両水位に比べ小さいことから, 浸潤面は考慮せず, 塩水側境界水位と淡水側境界水位はそれぞれ塩水位, 淡水位と同じとした。

2.3 本計算法の精度及び妥当性を検証するため, Fig. 2-2 に示す一様密度の不圧浸透層を考え, 両端水位一定( $h_0 = 30.0 \text{ cm}$ ), 初期水面形  $h(x, 0) = f(x) = 0.1 - (x-50)/2500$  の条件のもとで, 水面低下の時間的変化を数値解析した。計算結果を線形, 一様モデルによる理論解と比較したものが Fig. 2-3 である。図より, 計算値の方が理論解よりやや水面低下が遅いが, 全体としては, 良い一致を示している。

3. 塩水侵入現象の数値解析: 3.1 Fig. 2-1 の浸透層を対象として,  $t=0$  で塩水側境界に設けられたゲートを急閉し, 塩水の侵入過程につ

$C_1; p(z) = \rho g(h_1 - z), u_2 = 0$   
 $C_2; p(z) = \rho g(h_2 - z), C = C_0 = 0$   
 $C_3; p = 0, u = \partial h / \partial t + u_0 \partial h / \partial x$  (運動学的条件)  $\partial C / \partial n = 0$   
 $C_4; w = 0, \partial C / \partial n = 0$

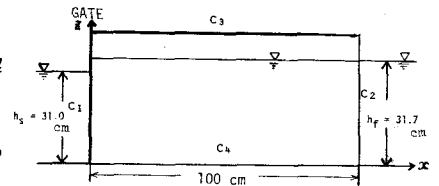


Fig. 2-1 不圧浸透層模式図と境界条件

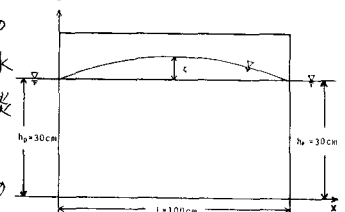


Fig. 2-2 不圧浸透層の模式図

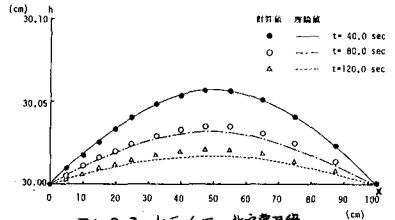


Fig. 2-3 水面低下の非定常過程

いて数値解析した。なお、分散長は  $A_L = 0.5 \text{ cm}$ ,  $A_T = 0.05 \text{ cm}$  とし、Fig. 2-1 の浸透層を 154 節点、260 の三角形要素に分割し、 $\Delta t = 10 \text{ 秒}$  で計算を行った。Fig. 3-1 は、 $x = 40 \text{ cm}$  における水位、及び楔高  $h$  ( $c = 0.5$  等濃度線と不浸透面が交差する点の Z 軸からの距離) の無次元量の経時変化を示したものである。図から水位の変化はすみやかに終了し、自由水面が定常状態に移行する時間は濃度分布のそれよりほかに小さいことがわかる。また、自由水面形状は、塩水の侵入が進行してもほとんど変化がない。

Fig. 3-2 は、定常状態と思われる  $t = 8000 \text{ sec}$  の濃度分布と流速ベクトルを合せて示したものである。濃度分布形状を二層流仮定に基づき塩水楔形状 (Fig. 3-2 直線) と比較すると数値計算による楔の方が、二層流理論のものよりやや短くなる。なお、塩水侵入と流速ベクトルの経時変化については、被圧浸透層におけるものと同じようである。

3.2 次に塩水位を周期的に振動させ、塩水楔の非定常応答特性について検討する。すなわち、3.1 で得られた  $t = 8000 \text{ sec}$  後の状態を初期条件とし、淡水位は、 $h_d = 31.7 \text{ cm}$  で一定とし、塩水位  $h_s$  が

$$h_s = 31.0 + \sin(2\pi t/T) \quad (8)$$

振動するときの解析である (分散長は、 $A_L = 1.00 \text{ cm}$ ,  $A_T = 0.05 \text{ cm}$  を用いた)。

Fig. 3-3 は、各時刻における自由水面形状を示したものであり、淡水系における楔形モデルによる理論値

$$\begin{aligned} \zeta(x, t) = & \exp(-mx) \sin(\frac{2\pi}{T}t - mx) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \exp(-m(ZL+x)) \sin(\frac{2\pi}{T}t - m(ZL+x)) \right. \\ & \left. - \exp(-m(ZL-x)) \sin(\frac{2\pi}{T}t - m(ZL-x)) \right\} - (9) \end{aligned}$$

$$m = \sqrt{\frac{2\pi}{ZCH}} = \sqrt{\pi/CH}, \quad C = \frac{L}{L}, \quad L: \text{浸透層長さ}$$

と合せて示している。塩水位の振動に伴い、Fig. 3-4 に示すように塩水楔も振動するが、Fig. 3-3 から水面の振動は、淡水系と密度系とでは顕著な違いは見られず、塩水侵入の影響はほとんどないことがわかる。

Fig. 3-4 は、楔高さ ( $C = 0.5$  等濃度線の Z 座標を定義) の経時変化の一例を示したものであるが、塩水側境界から離れるに従い、振幅が減衰するとともに、位相の遅れが認められる。次に周期  $T$  の影響について述べる。周期の長い方が塩水楔位置の水平方向への変動が大きくなり、周期が短い場合には、楔長さの変化は少なく、塩水境界近くの楔高さの変化が顕著である。楔高さの振動の減衰特性を楔高さの振幅と距離の関係として片対数紙上に示すと Fig. 3-5 のようであり、両者の関係は直線であり、楔振幅の減衰率を  $n$  とすると、

$$\zeta = \zeta_0 \exp(-nx) \quad (10)$$

となる。 $n$  は、Fig. 3-5 に示されるように、周期  $T$  が長くなる程小さく、塩水位の振動周期が長い程楔高さの Z 軸方向の振幅の減衰は少なく、先に述べた楔変動パターンの違いは、この減衰率の違いによる。 $n$  を自由水面振動の振幅の減衰率  $m$  と比較すると、楔高さの振幅減衰率の方が大きく、境界水位の振動による自由水面の振動より、楔高さの振動の方が早く減衰することがわかる。

最後に、本研究において多大なる御協力をいただいた元京都大学大学院生 (現群馬県大田巨氏) に厚く感謝致します。

(参考文献) 1) 岩佐・綾・大田: 京大防災年報 第27号 B-2, 昭和59年4月

2) 本間・石原: 応用水理学 中 II RP309~312, 1968 女善

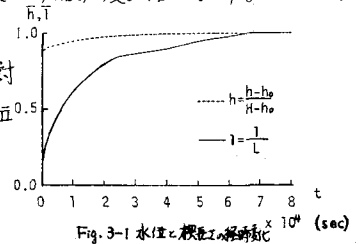


Fig. 3-1 水位と楔高の経時変化

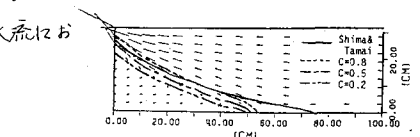


Fig. 3-2  $t = 8000 \text{ sec}$  の濃度分布と流速ベクトル

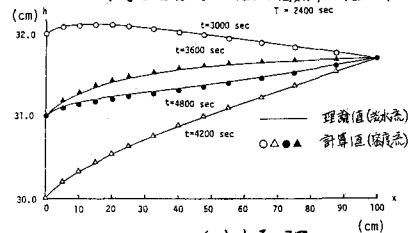


Fig. 3-3 自由水面位置

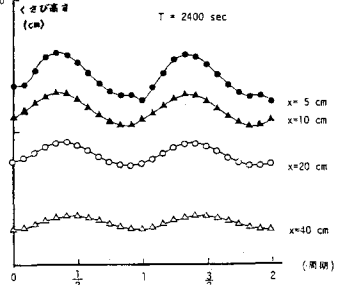


Fig. 3-4 楔高さの経時変化

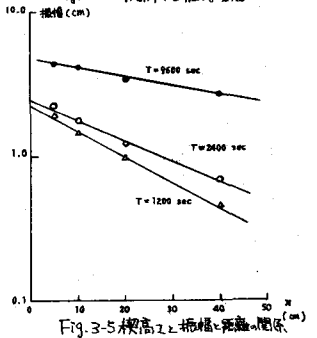


Fig. 3-5 楔高さの振幅と距離の関係