II-192　透水層内密度流の数値解析

○ 神戸大学工学部　正員　川谷 健
神戸大学工学部　学生員　倉谷 光一

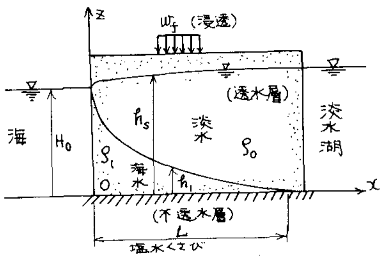
海に接する透水層に侵入した塩水くさびの形状は，その上の淡水位の変化によって変化する。淡水および海水の両領域における流量が与えられ，境界条件が設定されれば，淡塩水境界面の定常状態における形状は解析的に決定することができる。しかし，淡水位の変化に伴う塩水くさびの形状の非定常な変化は解析的に決定することがきわめて困難である。ここでは，数値計算によって，透水層の上方より局部的な浸透がある場合をとりあげ，それにともなう自由水面の隆起と降下（Water Mound）および淡塩水境界面の非定常な変化の過程を検討し，得られた結果を報告する。解析のためのモデルを図－1に示す。透水層は矩形であり，等方，等質であるものとする。また，透水層の下部は水平な不透水層に接している。透水層内の流れは自由水面を有する2次元流であり，淡塩水境界面での淡水と塩水との混合や拡散はないものと仮定する。座標系，その他の記号は図－1に示すとおりである。淡水および海水の両領域において満されるべき微分方程式は，それぞれ

$$\frac{\partial H}{\partial t}=\left(H-\frac{\Delta\rho}{\rho_1}h\right)\frac{\partial^2 H}{\partial X^2}+\frac{\Delta\rho}{\rho_1}h\frac{\partial^2 h}{\partial X^2}+\left(\frac{\partial H}{\partial X}\right)^2+\frac{\Delta\rho}{\rho_1}\left(\frac{\partial h}{\partial X}\right)\left(\frac{\partial h}{\partial X}-\frac{\partial H}{\partial X}\right)+\frac{W_f}{K}$$

（淡水領域）…(1)

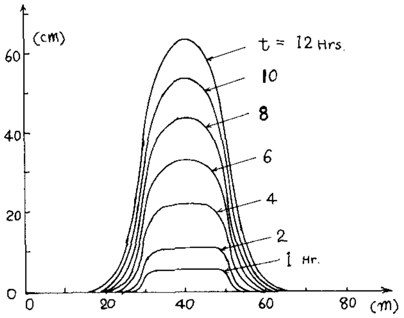
$$\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\Delta\rho}{\rho_1}h\frac{\partial^2 h}{\partial X^2}+\frac{\rho_0}{\rho_1}\left[h\frac{\partial^2 H}{\partial X^2}+\left(\frac{\partial H}{\partial X}\right)\left(\frac{\partial h}{\partial X}\right)\right]+\frac{\Delta\rho}{\rho_1}\left(\frac{\partial h}{\partial X}\right)^2$$

（塩水領域）‥‥(2)　である。

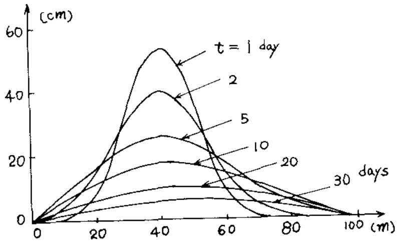


図－1

ここで，$X=x/L$，$H=h_s/L$，$h=h_1/L$，$t=T/(nL/K)$ などの無次元量であり，Lは塩水くさびの長さ，nは透水層の空隙率，Kは透水係数，Tは時間変数，$\Delta\rho=\rho_1-\rho_0$ などである。浸透開始前，自由水面と淡塩水境界面はHerzbergの条件であたえられる平衡状態にあるものとし，初期水面は $h_s=H_0+0.05\sqrt{x}$ であるとする。その他の諸量は，$L=100\,m$，$H_0=20\,m$，$K=10^{-3}$ cm/sec，$n=0.4$，$\rho_0=1.0$ g/cm³，$\rho_1=1.025$ g/cm³ および $W_f=20$ mm/Hr ($30^m\leqq x\leqq 50^m$) とする。さらに，塩水くさびの伸縮はないものと仮定した。式(1)と式(2)を差分近似し，陽解法を適用する場合，解が収束するためには時間間隔(Δt)と距離間隔(ΔX)を適切に選択することが必要である。上記の2式は非線形であるけれども，線形方程式に対する収束条件を適用できるものと仮定して，$\Delta T=12\,min$，$\Delta x=2\,m$ をえらんだ。局部浸透が12時間継続し，その後浸透は停止するものとする。浸透開始時間を$t=0$とし，$t=60$日(1440時)まで計算を行った。自由水面の初期値からの変位量を図－2と図－3に示す。また，淡塩水境界面の初期値からの変位量を図－4と図5に示す。自由水面の変位は，ほぼ正規分布に近い形をしているが，時間の経過とともに，初期条件および境

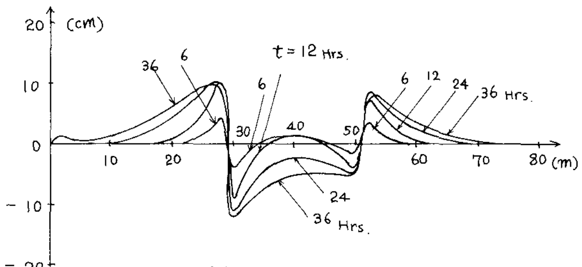


図－2

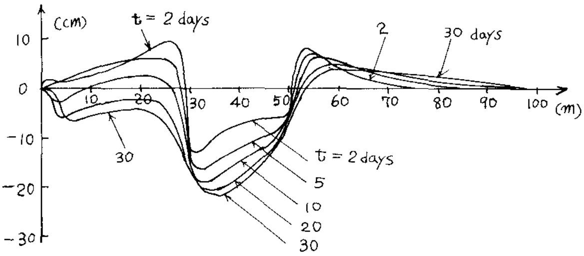


図－3

界条件の影響によって非対称性が増す。さらに時間がたつと，自由水面の頂点は淡水湖側に移り，ふたたび，対称性が増してくる。一方，淡塩水境界面は，はじめ浸透区間（30 ≦ x ≦ 50 m）で降下し，区間外では隆起する。時間の経過とともに，一度隆起した部分も降下するが，海側での降下は淡水湖側のそれに比してはるかに大きいことがみとめられる。総浸透量に対するWater Moundの体積の時間的変化，および，淡塩水境界面の初期値から変位した体積と降下した体積との時間的変化を図−6に示す。境界面の変位量，降下量ともに，t＝40日くらいでほぼ一定値に達し，前者は総浸透量の約50%，後者は約40%となる。さらに，t＝60日には総浸透量のほぼ95%が流出したことがわかる。Water Moundの形成の過程（T≦12 hrs）では淡塩水境界面の変位あるいは降下はきわめてちいさい。Water Moundの拡散低下の過程（T＞12 hrs）においても，境界面の降下の速さはWater Moundの低下のそれに比してかなり遅いことがみとめられる。

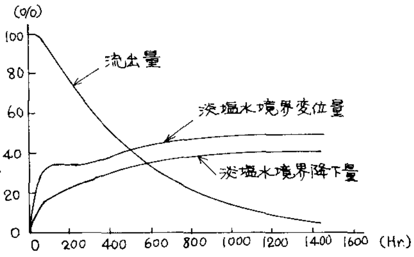


図−4



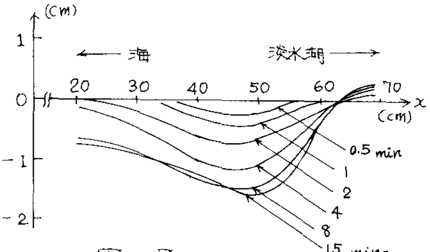
図−5

図−7に，グリセリンを使ってHele-Shaw Modelによって得られた淡塩水境界面の初期面よりの変位量を示す。浸透の区間は40 ≦ x ≦ 50 cmである。実験方法から生ずる制約のために，浸透の機構は数値計算のために設定した解析モデルとは必ずしも一致しないが，境界面の時間的変化の過程は数値計算結果と定性的に一致することが認められる。すなわち，淡塩水境界面の降下部分は，時間の経過とともに，海側へ大きくひろがってゆくが，それに比して淡水湖側への降下部分の進行はかなり小さい。一方，数値計算の結果にみられるような浸透区間外での淡塩水境界面の隆起はみとめられない。区間外での境界面の隆起については，数値計算における不連続性（x＝30および50 mでW_sの値は不連続である）にもとづく誤差である可能性もあり，なお検討する必要である。



図−6

以上のように，20 mm/HR の浸透が局部的に12時間継続しただけで生ずる結果は，40日以上にわたる自由水面形の変化や淡塩水境界面の変形となる。浸透量の時間的変化，あるいは繰り返して浸透がある場合などでは，過去の浸透の影響は長期にわたって存続すると考えられる。したがって，透水層内における密度流は非定常的に取り扱われることが重要な点であると思われる。



図−7