

II-105 地下空洞掘削による塩水侵入過程のシミュレーション

九州大学大学院 ○伊藤 敏朗  
九州大学工学部 梶井 和朗  
九州大学工学部 神野 健一  
九州大学工学部 上田 年比古

1. はじめに

海岸付近で岩盤地下利用の一環として石油地下備蓄の空洞施設を掘削する場合<sup>1)</sup>、地下水流れに関する課題は、それまで平衡状態を保ちながら海へ向かって流動していた地下水が岩盤掘削によりいかに変化するかを正確にとらえることである。したがって、岩盤掘削後の地下水の変化を数値解析することは、塩水侵入による地下水塩水化や貯油槽周辺配管の腐食等の障害を防ぐための環境影響評価に必要である。本報では、海岸付近において石油地下備蓄施設を建設した場合の塩水侵入過程を、不飽和領域の存在を考慮して数値シミュレーションする方法について検討を加えたものである。

2. 基礎式

二次元不飽和-飽和領域における圧力水頭に関する基礎式は、水平方向に  $x_1$  軸、鉛直上向きに  $x_2$  軸とると次式で示される。

$$\partial \theta / \partial t = (C_a + \alpha_o s) \partial h / \partial t = \partial q_1 / \partial x_1 - \partial q_2 / \partial x_2 \quad (1)$$

$$q_1 = -k_1 \partial h / \partial x_1 \quad (2)$$

$$q_2 = -k_2 (\partial h / \partial x_2 + \rho / \rho_o) \quad (3)$$

ここに、 $t$ ; 時間、 $h$ ; 圧力水頭、 $k_1, k_2$ ;  $x_1, x_2$  方向の透水係数、 $q_1, q_2$ ;  $x_1, x_2$  方向のDarcy流速、 $\rho$ ; 密度、 $\rho_o$ ; 淡水密度であり、比水分容量  $C_a$  は、体積含水率を  $\theta$  とすると  $C_a = d\theta / dh$  の関係にあり、飽和領域では、 $C_a = 0$  となる。式(1)の左辺の  $s$  は、地盤を構成している土砂粒子間の圧縮応力による空隙率の変化ならびに水の圧縮性の影響を考慮するためにとり入れた定数である。なお、不飽和領域では、圧力水頭の変化による空隙率の変化が生じないものと仮定して、係数  $\alpha_o$  は不飽和領域で  $\alpha_o = 0$ 、飽和領域で  $\alpha_o = 1$  の値をとる。

塩水濃度  $C(x_1, x_2, t)$  に関する基礎式は、次の二次元移流分散方程式で示される。

$$\begin{aligned} \partial(\theta C) / \partial t + u \partial(\theta C) / \partial x_1 + v \partial(\theta C) / \partial x_2 = & \partial(\theta D_{11} \partial C / \partial x_1 + \theta D_{12} \partial C / \partial x_2) / \partial x_1 \\ & + \partial(\theta D_{21} \partial C / \partial x_1 + \theta D_{22} \partial C / \partial x_2) / \partial x_2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $u, v$  は実質流速であり、分散係数  $D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$  は次式で表わされる。

$$\theta D_{11} = \alpha_l u^2 / V + \alpha_t v^2 / V + \theta D_m \quad (5)$$

$$\theta D_{22} = \alpha_t u^2 / V + \alpha_l v^2 / V + \theta D_m \quad (6)$$

$$\theta D_{12} = \theta D_{21} = (\alpha_l - \alpha_t) uv / V \quad (7)$$

ここに、 $V = (u^2 + v^2)^{1/2}$  であり、 $D_m$ ; 浸透層内での分子拡散係数、 $\alpha_l$ ; 縦分散長、 $\alpha_t$ ; 横分散長である。式(4)の濃度  $C$  と式(3)の密度  $\rho$  とは、 $C = (\rho - \rho_o) / (\rho_s - \rho_o) \times 100$  の関係にある。ここに、 $\rho_s$ ; 塩水密度である。

3. 計算条件および計算方法

この計算において初期条件は含水量の時間的変化が無い状態すなわち式(1)の  $\partial \theta / \partial t = 0$  の場合の数値解を用い、境界条件は、図-1で境界ABは、一定のかん養量  $9.375 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  を与え、境界BC、DEは、静水圧境界、境界AFではFluxの

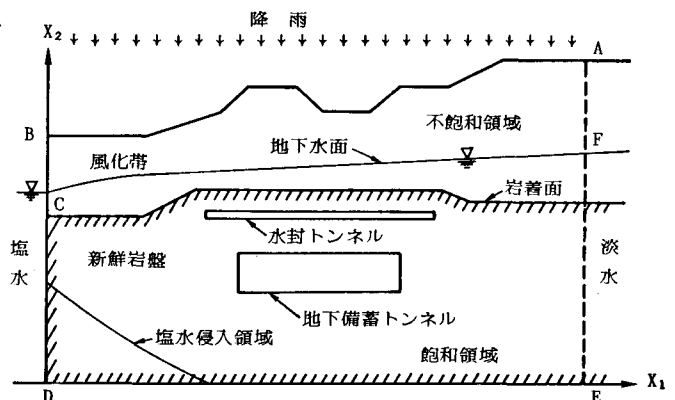


図-1 計算領域

出入り自由とした。また、初期の塩水侵入位置は地下水の流れを準一様流と仮定して与えた。ここで、計算領域の水平方向の長さは480m、鉛直方向の最大の高さは258mである。

地盤の不飽和(hが負の場合)の特性について、透水係数比 $k_r$ 、不飽和含水率 $\theta$ 、比水分容量 $C_a$ は、

$$k_r = k/k_s = (\theta/\theta_s)^m \quad (8)$$

$$\theta = \theta_s A / (A + |h|^B) \quad (9)$$

$$C_a(h) = AB\theta_s |h|^{B-1} / (A + |h|^B)^2 \quad (10)$$

ここで、風化帯では飽和透水係数;  $k_s = 5.0 \times 10^{-4}$  cm/s、飽和含水率;  $\theta_s = 0.25$ 、 $m = 4.0$ 、 $A = 3.5 \times 10^5$ 、 $B = 2.5$ 、新鮮岩盤で、 $k_s = 2.5 \times 10^{-6}$  cm/s、 $\theta_s = 0.05$ 、 $m = 4.0$ 、 $A = 4.0 \times 10^3$ 、 $B = 2.3$ とした。分散長として、 $\alpha_l = 500$  cm、 $\alpha_t = 50$  cm、貯油層内圧力水頭2200 cmを仮定し、時間間隔は拡散項の安定条件より約60日、格子間隔  $\Delta x_1 = 1000$  cm、 $\Delta x_2 = 600$  cmとした。

上述の条件で、式(1)をCrank-Nicholson法により差分化し、SOR法により反復計算を行い、一定の相対誤差内に収束した時の値を初期平衡解とした。貯油槽掘削後の塩分濃度に関する非定常計算では、式(4)の移流項の離散化誤差が問題となる。ここでは、移流項の離散化誤差がない粒子移動法で数値計算を行った。

#### 4. 計算結果

本計算により得られた結果を図-2

~4に示す。図-2は、貯油槽周辺の流速ベクトルを、図-3では、貯油槽掘削2年後の濃度分布を、図-4は、貯油槽掘削1年後の圧力水頭分布を表わす。図-2は、貯油槽掘削のために海へ向かって流れていた地下水が貯油槽へ向かって流れていることがわかる。図-3からは、図-2による流速ベクトルにより塩水くさびが拡散し、淡塩境界面が広がっていることを示す。図-4では、水封トンネルによって地下水面の低下が抑えられている。

#### 5. おわりに

以上の計算の結果、本計算法で不飽和領域を考慮した計算領域で貯油槽掘削により塩水が拡散しながら貯油槽に向かう過程が計算できる。ただ、本計算例では新鮮岩盤で透水係数が小さいために流速が遅く、塩水くさびの進行は遅く拡散幅も小さい。

参考文献 1) 地下水入門、土質工学会編 pp.186-189

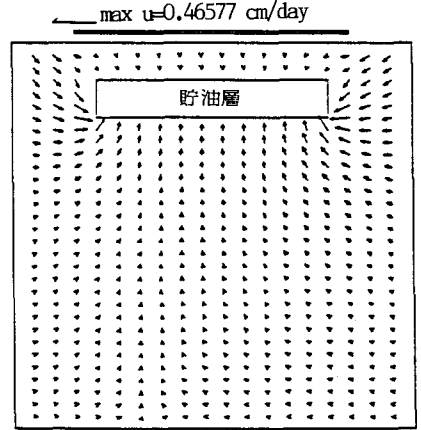


図-2 貯油槽掘削2年後の貯油槽周辺流速ベクトル

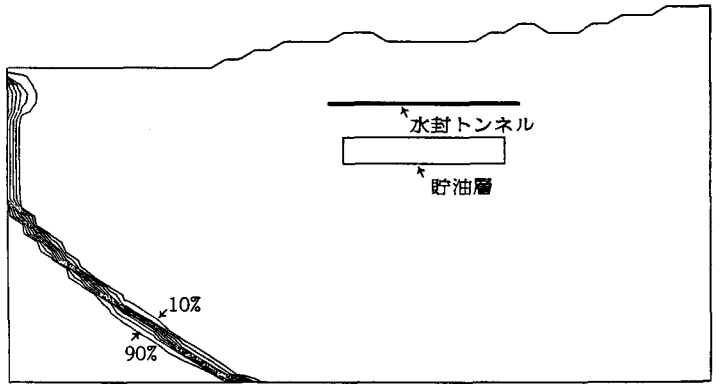


図-3 貯油槽掘削2年後の濃度分布

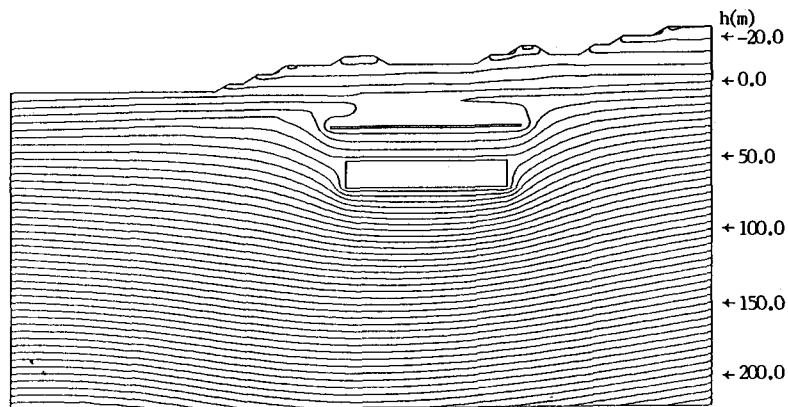


図-4 貯油槽掘削2年後の圧力水頭分布