

III-495

地盤内の気液3相流体に関する有限要素法解析

(株)開発計算センター 正員 〇木野戸 広、正員 井田 文雄
 電源開発(株) 正員 小菅 正敏
 岡山大学 正員 西垣 誠、正員 竹下 祐二

1. はじめに

地盤の多相流体に関する問題は、岩盤内エネルギー備蓄や地下水塩水化問題、有機塩素系溶剤による地下水汚染などが挙げられる。しかし、これら諸問題に対する従来の検討法は、疑似解析により対応していたのが現実である。今回、我々はこの種の問題に対し、3相(気相・水相・非水相)間の気化・溶解などを考慮した気液3相流解析コードを開発した。本報告では、海岸帯水層における圧縮空気地下貯蔵施設の液密・気密性について検討した結果を紹介する。

2. 気液3相流の支配方程式および付帯条件

流体は圧縮性流体として扱い、気液2相流体¹⁾の質量保存則を3相系に拡張して、気相～水相間と気相～非水相間に気化・溶解を考慮すると、支配方程式は以下となる。

<気相>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \frac{k_{ra} k_{ij}}{\beta_a \mu_a} \left(\frac{\partial P_a}{\partial X_j} + \rho_a g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) + \frac{R_{aw} k_{rw} k_{ij}}{\beta_w \mu_w} \left(\frac{\partial P_w}{\partial X_j} + \rho_w g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) \right. \\ & \left. + \frac{R_{an} k_{rn} k_{ij}}{\beta_n \mu_n} \left(\frac{\partial P_n}{\partial X_j} + \rho_n g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) \right\} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \left[n \left(\frac{S_a}{\beta_a} + R_{aw} \frac{S_w}{\beta_w} + R_{an} \frac{S_n}{\beta_n} \right) \right] - \frac{Q_a}{\rho_{asc}} \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

<水相>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \frac{k_{rw} k_{ij}}{\beta_w \mu_w} \left(\frac{\partial P_w}{\partial X_j} + \rho_w g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) + \frac{R_{wa} k_{ra} k_{ij}}{\beta_a \mu_a} \left(\frac{\partial P_a}{\partial X_j} + \rho_a g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) \right\} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \left[n \left(\frac{S_w}{\beta_w} + R_{wa} \frac{S_a}{\beta_a} \right) \right] - \frac{Q_w}{\rho_{wsc}} \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

<非水相>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \frac{k_{rn} k_{ij}}{\beta_n \mu_n} \left(\frac{\partial P_n}{\partial X_j} + \rho_n g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) + \frac{R_{na} k_{ra} k_{ij}}{\beta_a \mu_a} \left(\frac{\partial P_a}{\partial X_j} + \rho_a g \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) \right\} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \left[n \left(\frac{S_n}{\beta_n} + R_{na} \frac{S_a}{\beta_a} \right) \right] - \frac{Q_n}{\rho_{nsc}} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、a, w, n : 気相・水相・非水相を表す添字、SC : 標準状態条件を表す添字、P : 圧力、 k_{ij} : 透過係数テンソル、 k_r : 相対透過係数、 β : 体積変換係数、 μ : 粘性係数、 ρ : 密度、n : 間隙率、S : 飽和度、 R_{aw} , R_{an} : 気相の水相および非水相に対する溶解率、 R_{wa} , R_{na} : 水相および非水相の気相に対する気化率、g : 重力加速度、Q : Sink/Source、 X_i : 空間座標。

付帯条件として3相の飽和度の総和は1とし、毛管圧力に関しては以下の関係を考える。

$$P_{caw} = P_a - P_w \quad \dots\dots (4), \quad P_{can} = P_a - P_n \quad \dots\dots (5), \quad P_{cnw} = P_n - P_w \quad \dots\dots (6)$$

ここに、 P_{caw} : 気相～水相間の毛管圧、 P_{can} : 気相～非水相間の毛管圧、 P_{cnw} : 非水相～水相間の毛管圧。

3. 海岸帯水層における圧縮空気地下貯蔵施設の液密・気密性の検討

高さ30m×幅20mの空洞をEL. -100m～-130mの地点に想定し、空洞から左側180mの地点にEL. +2mの淡水境界を、空洞から右側100mの地点にEL. +0mの塩水境界を静水圧相当で与え、EL. -180m地点は不透気・不透水条件とした（図-3参照）。物性は表-1および図-1に示す。解析結果を図-2～図-3に示す。

これより、貯蔵圧の増大に従い、淡水が排除されて密度差より塩水が侵入する傾向が窺えている。

表-1 解析物性条件

空気密度 $\rho_a = 1.247$ [kg/cm ³]	空気粘性係数 $\mu_a = 17.6$ [μ Pa·sec]
淡水密度 $\rho_w = 1000.0$ [kg/cm ³]	淡水粘性係数 $\mu_w = 890.0$ [μ Pa·sec]
塩水密度 $\rho_n = 1025.0$ [kg/cm ³]	塩水粘性係数 $\mu_n = 1075.0$ [μ Pa·sec]
透水係数 $k_w = 1.0 \times 10^{-4}$ [cm/sec]	
相対透過係数 $k_{rf} = 1$ ($S_r = 1$), $k_{rf} = 0$ ($S_r < 1$) (f=a, w, n)	

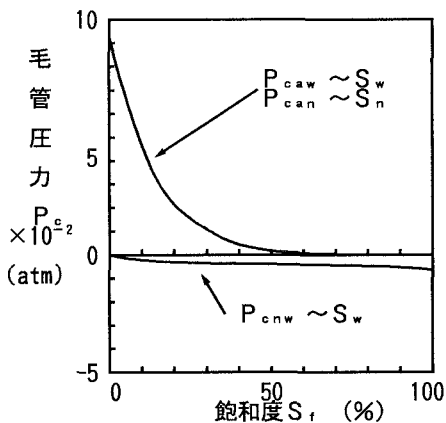


図-1 毛管圧力と飽和度の関係

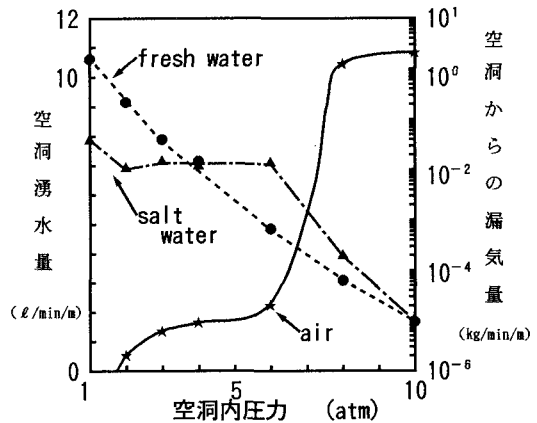


図-2 地下空洞内圧力と湧水量・漏気量の関係

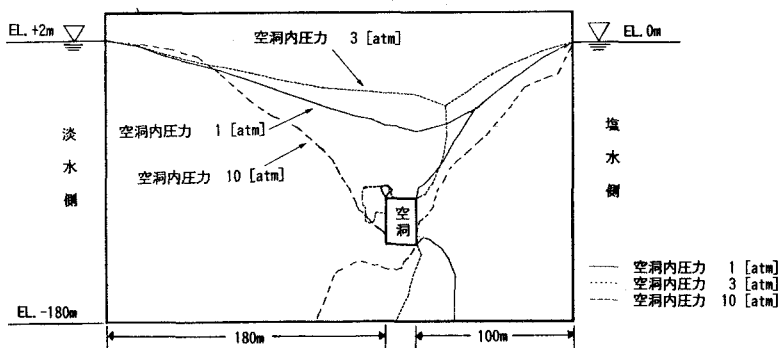


図-3 各流体間の境界面

4. おわりに

海岸帯水層にCAES-G/Tを建設する場合、地下貯蔵施設の耐久性を検討する上で淡塩境界面の位置が重要であり、淡塩成分の湧水量の把握が本提案手法により可能となった。

1)中川他：「岩盤内圧縮空気貯蔵空洞からの漏気防止条件」，土木学会論文集第 370号/Ⅱ-5, pp. 233-241, 1986年6月。