

地下浅部の降雨浸透に関する気液二相流解析による検討

大成建設株式会社 正会員○小野 誠
 大成建設株式会社 正会員 八木 啓介
 大成建設株式会社 正会員 井尻 裕二

1. はじめに

放射性廃棄物処分等の埋設施設については、透水性の異なる複数のバリア材や複雑な水理地質構造の存在によって、安全評価の対象領域が不均質な透水性を有すると想定されるため、筆者らは不均質場への適用性が高く、従来の手法よりも精度良く流速ベクトルが得られる手法として知られる混合ハイブリッド有限要素法¹⁾(以後、MHFEM とする)の放射性廃棄物処分に関連する諸問題への適用を検討している^{ii), iii)}。

評価対象となる施設が地下浅部に位置する場合、降雨浸透による雨水の施設への浸入・浸出が核種の主要な移行手段となり得るため、その挙動を評価する手法が必要となる。一般的に、降雨浸透を数値解析で評価する手法としては、飽和不飽和浸透流解析が用いられることが多いが、この手法は空気が被圧されないと仮定することによって、空気存在を無視した解析手法であるため、降雨浸透に伴う間隙空気の被圧やそれに伴う間隙水の押し出し等の挙動が表現できない。そのため、このような不飽和帯における間隙中の空気の挙動を考慮する場合には、解析評価手法としては気液二相流解析が用いられる。

本検討では、地下浅部の降雨浸透問題について、筆者らの検討している MHFEM による解析手法を適用した飽和不飽和浸透流解析および気液二相流解析を実施した。併せて、降雨浸透問題において間隙中の空気の挙動を考慮することが、どのように挙動評価に影響を及ぼすかを確認するため、両者の解析結果を比較した。

2. MHFEM形式の支配方程式

空間離散化した任意の要素 K_k における気液二相流解析の支配方程式を式 1～式 4に示す。なお、本検討においては、簡単にするため多孔質媒体と水の圧縮性およびガスの水への溶解は無視した。

$$\int_{K_k} (\mathbf{K}_k^{-1} \mathbf{q}_{hw,k}) \cdot \chi_{h,k} d\mathbf{x} = \lambda_{w,k} \left\{ \int_{K_k} P_{hw,k} \nabla \cdot \chi_{h,k} d\mathbf{x} - \sum_{i=1}^{N_f} \int_{E_{k,i}} (TP_{hw,k,i} \mathbf{n}_{k,i}) \cdot \chi_{h,k} dl - \int_{K_k} (\rho_{w,k} g \nabla z_k) \cdot \chi_{h,k} d\mathbf{x} \right\} \quad \text{式 1}$$

$$\int_{K_k} (\mathbf{K}_k^{-1} \mathbf{q}_{hg,k}) \cdot \chi_{h,k} d\mathbf{x} = \lambda_{n,k} \left\{ \int_{K_k} P_{hg,k} \nabla \cdot \chi_{h,k} d\mathbf{x} - \sum_{i=1}^{N_f} \int_{E_{k,i}} (TP_{hg,k,i} \mathbf{n}_{k,i}) \cdot \chi_{h,k} dl - \int_{K_k} (\rho_{g,k} g \nabla z_k) \cdot \chi_{h,k} d\mathbf{x} \right\} \quad \text{式 2}$$

$$\int_{K_k} \frac{\phi_k}{P'_{c,k}} \left(-\frac{\partial P_{hw,k}}{\partial t} + \frac{\partial P_{hg,k}}{\partial t} \right) \varphi_h d\mathbf{x} + \int_{K_k} (\nabla \cdot \mathbf{q}_{hw,k}) \varphi_h d\mathbf{x} = \int_{K_k} \eta_{w,k} \varphi_h d\mathbf{x} \quad \text{ただし, } P'_{c,k} = \frac{\partial P_{c,k}}{\partial S_w} \quad \text{式 3}$$

$$\int_{K_k} \left\{ \frac{\phi_k}{P'_{c,k}} \frac{\partial P_{hw,k}}{\partial t} + \left(C_{fg} \phi_k S_{g,k} - \frac{\phi_k}{P'_{c,k}} \right) \frac{\partial P_{hg,k}}{\partial t} \right\} \varphi_h d\mathbf{x} + \int_{K_k} (\nabla \cdot \mathbf{q}_{hn,k}) \varphi_h d\mathbf{x} = \int_{K_k} \eta_{n,k} \varphi_h d\mathbf{x} \quad \text{式 4}$$

ここで、 $E_{k,i}$ ($i = 1, \dots, N_f$) は要素 K_k の要素境界、 α ($= w, g$) を相(水相/ガス相)とすると、 P_{ha} は要素内の α 相の流体圧の近似値 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]、 TP_{ha} は要素境界上の α 相の流体圧の近似値 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]とする。また、 ρ_a は α 相の流体密度 [ML^{-3}]、 S_a は α 相の飽和度 [—]、 η_a は単位体積当たりの α 相の流入出量 [T^{-1}]、 $\mathbf{q}_a$ は α 相の流束ベクトル [LT^{-1}]、 λ_a は α 相のモビリティ ($\lambda_a = k_{ra} / \mu_a$)、 k_{ra} は α 相の相対透過係数 [—]、 μ_a は α 相の粘性係数 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$]、 C_{fg} はガスの圧縮係数 [M^{-1}LT^2]、 $\mathbf{K}$ は絶対浸透率 [L^2]、 ϕ は間隙率 [—]、 g は重力加速度 [LT^{-2}]、 z は基準位置からの高さ [L]、 χ_h および φ_h は重み関数である。

なお、飽和不飽和浸透流解析においては、ガス相に関する支配方程式(式 2および式 4)は無視でき、ガス相圧力を大気圧 ($P_g=0$) で一定とみなす。

キーワード 混合ハイブリッド有限要素法, 気液二相流解析, 飽和不飽和浸透流解析, 降雨浸透

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル 29 階 大成建設(株)原子力本部 mono@ce.taisei.co.jp

3. 地下浅部の降雨浸透に関する2次元解析

3. 1 解析条件

本検討では、図 1に示すように地下浅部に位置する、透過性に差がある複数の材料（表 1参照）より構成される施設を対象とした数値解析を 30 年の計算期間で実施した。境界条件は、側方を排水層に地下水面が位置し、左から右への動水勾配が 5%となる水頭固定境界、下方を不浸透境界、上方のうち土壌層の範囲を降雨浸透境界とした。なお、土壌層の底部には地表面と通じる排水管を模擬した要素を 1 か所設置した。また、ケーススタディとして土壌層の上部に遮水層がなく露出したケースと遮水層を設けたケースの 2 通りを実施した。

3. 2 解析結果

30 年後の施設の飽和度と流向の分布図を図 2および図 3に示す。今回の解析条件では、飽和度分布については気液二相流解析と飽和不飽和浸透流解析との間に大きな差はなく、排水管からの排水量についても差はわずかであることが確認された。いずれの手法でも同様な結果が得られており、MHFEM による地下浅部の降雨浸透問題への適用性が示された。今後は、気相の被圧が顕著となると想定される、降雨浸透量が増加した場合や飽和不飽和浸透特性を変えた場合についても検討を行い、飽和不飽和浸透流解析と気液二相流解析のそれぞれの適用性についても検討を行う予定である。

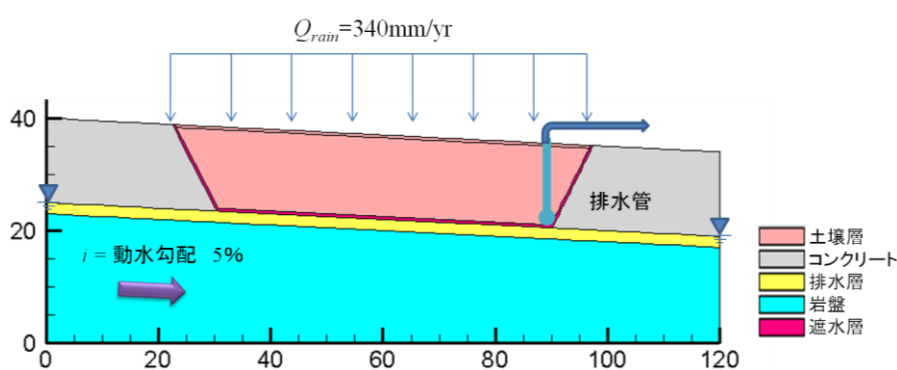


図 1 解析モデル

表 1 材料ごとの浸透率

材料名	浸透率 [m ²]
土壌層	10 ⁻¹³
コンクリート	10 ⁻¹⁵
排水層	10 ⁻¹²
岩盤	10 ⁻¹⁴
遮水層	10 ⁻¹⁶

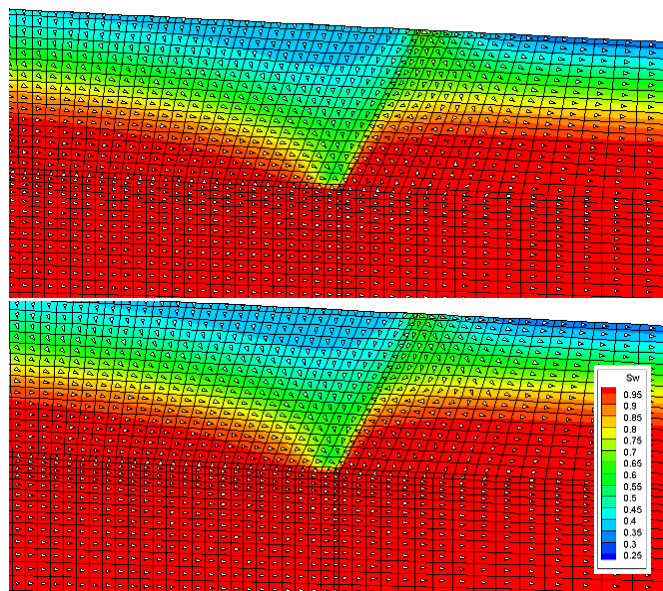


図 2 排水管付近の飽和度コンター（上部遮水層なし）
（30 年後，上：单相流，下：2 相流）

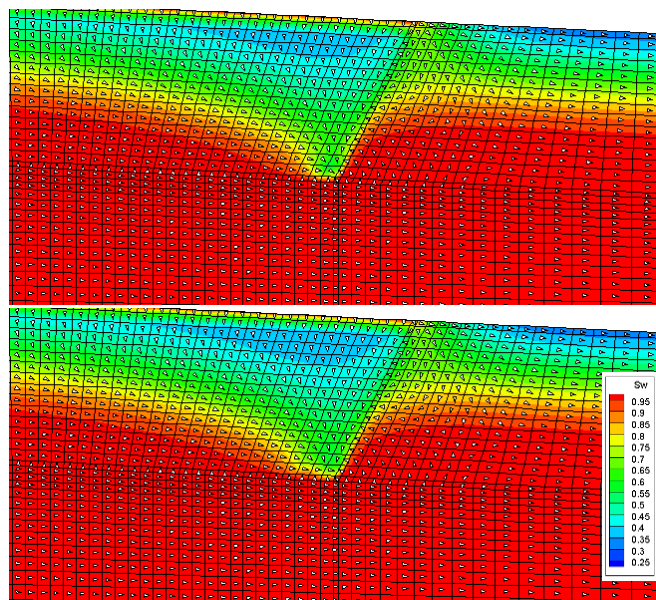


図 3 排水管付近の飽和度コンター（上部遮水層設置）
（30 年後，上：单相流，下：2 相流）

i) Arnold, D.N., and F.Brezzi (1985) : Mixed and nonconforming finite element methods: Implementation, post processing and error estimates, Math. Modell. Numer. Anal., 19, 7-32

ii) 八木ら(2012) : 混合ハイブリッド有限要素法と不連続ガラーキン法を用いた密度依存流解析, 土木学会第 67 回年次学術講演会 CS13-046

iii) 小野, 鈴木 (2014) : 圧力定式化による混合型有限要素法の 2 相流解析への適用性に関する検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), vol.70, No.1, 96-105