

メッシュフリー法による飽和-不飽和浸透流解析

Saturated-unsaturated seepage analysis by a mesh-free method

櫻井英行*・白石知成**

Hideyuki Sakurai and Tomonari Shiraishi

*正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

**正会員 工修 清水建設株式会社 技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

A three-dimensional seepage flow analysis system using the element-free Galerkin (EFG) method is presented. The EFG method is a well-known mesh-free method. A saturated-unsaturated seepage model is introduced into the EFG analysis of seepage flow with a free surface. Fundamental formulations of the EFG method and non-linear computations based on the saturated-unsaturated seepage model are described in this paper. Some numerical examples show that the accuracy of EFG solutions comparable to that of finite element solutions. The rate of solution convergence according to density of nodal distribution is also discussed.

Key Words: mesh-free method, element-free Galerkin method, saturated-unsaturated seepage, free surface seepage

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分施設を計画する上でサイト周辺の地下水流動場や地下施設建設による地下水流動場の変化を予測することは非常に重要である。しかし、サイト調査の初期段階では、十分なデータは望めない。透水特性などの物性データが乏しいだけでなく、複数の地質構造を考えざるを得ない場合さえある。そうしたデータが少なく曖昧な状態では、地質学的解釈の相違や地質調査の進展、さらには地下施設の形態・位置・配向の設計に伴う解析モデルの変更に迅速に対応し、地下水流動場への影響を柔軟に検討できる解析システムでなければならない。しかしながら、地質構造は複雑かつ複数の材料から構成される三次元複合領域であるため、複雑形状への順応性に優れた FEM でさえ、三次元のメッシュ分割が大きな障壁となり、そうした解析システムを実現することは大変難しい。

このような背景のもと、著者らは、メッシュフリー法を応用した新しい解析システムの開発を手がけてきた¹⁾²⁾。メッシュフリー法は、当初、三次元メッシュ生成作業を根本的に解消する「メッシュレス」法として期待され、多くの研究者によって、いろいろな応用がなされてきた。しかし、「メッシュ生成が不要」というメッシュフリー法の最大の特徴を前面に出した論文はほとんどなく、不連続性の扱いが

容易といった他の利点に着目した報告ばかりである。メッシュレスという表現も年々使われなくなり、代わりに少し柔らかな表現のメッシュフリーというカテゴリの中で粒子法や一般化有限要素法等、色々な研究報告が行われているのが現状であろう³⁾⁴⁾。

一方、著者らが開発中の解析システムでは、メッシュフリー法でも積極的にメッシュを利用する。メッシュフリー法では要素の概念なくして解の局所近似を行えることに着目し、メッシュ間の非適合と重複を許容する不整合なメッシュの集まり (CMA: Consistency-free Mesh Assembly) を入力データにすることを可能にした。図-1 はその一例である。メッシュは、地層境界や断層によって区分けされた地層ブロックごと、独立に分割が行われている。従って、地層境界面と断層面において隣接するメッシュ間で分割パターンが必ずしも一致していない。また、CMA はメッシュの重複も許すため、例えば、図-1 にあるように、地質調査の進展により新たな薄い地層が発見された場合でも、その地層だけのメッシュ分割を行い、元のメッシュに加えるだけで済む。元のメッシュの変更は不要である。図-1 の右下は、鉛直断面における全水頭コンターであり、別途用意した不整合のないメッシュを用いて解析した FEM の結果も灰色の太線で図示している。不整合なメッシュでも妥当な結果が得られことも確認できる。このように CMA とメッシュフリー法の統合が、従来

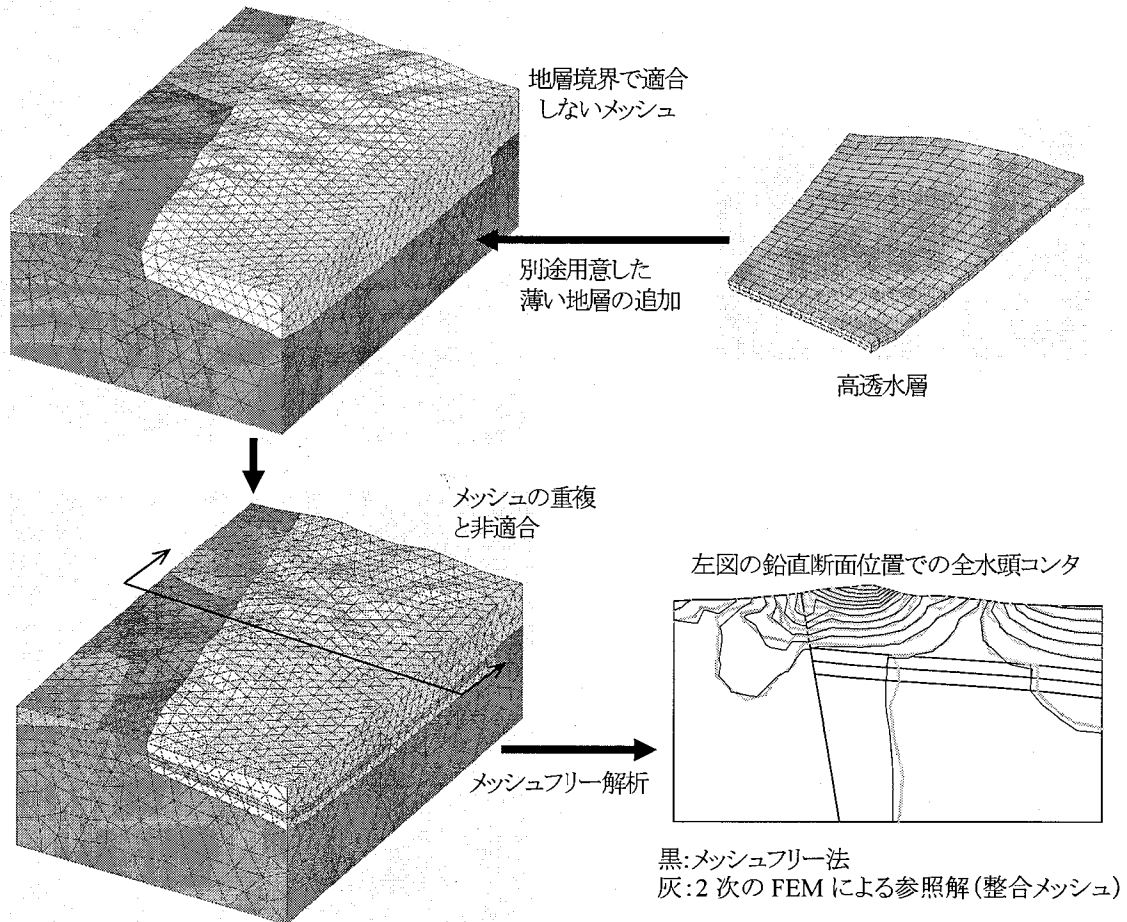


図-1 メッシュ間の非適合と重複を許容する不整合メッシュ (CMA) とその解析例²⁾

の FEM 解析に比べ、メッシュ分割とその変更手続きを飛躍的に向上させ、冒頭に述べた要件をほぼ満足する解析システムを実現させる一つのアプローチであると言える。文献 1), 2) では、CMA の利便性を示す数値計算例に加え、本手法の計算精度などの基本性能や CMA に対する具体的な計算機処理について詳説している。

さて、地下水の浸透流解析では、未知の自由水面、すなわち、浸潤面の扱いは必要不可欠である。浸潤面を有する地下水の移動には、浸潤面より下の飽和領域の透水性だけでなく、浸潤面より上の不飽和領域の保水状態や透水性も強く寄与する。しかし、メッシュフリー法による浸潤面を考慮した浸透流解析に関する既往の報告⁵⁾では、この不飽和領域の透水特性が考慮されていない。これに対し、本研究では、メッシュフリー法に飽和-不飽和の考え方⁶⁾を導入することを試みた。飽和-不飽和浸透流解析は不飽和領域の透水特性を考慮した方法である。FEM では既に実用化されており、商用システムも多い。本報では、メッシュフリー法の基本数理に加え、飽和-不飽和解析法における非線形性の扱いを示し、数値解析例による解析精度の検証結果について論ずる。

2. メッシュフリー法

2.1 関数近似

本解析システムで採用した Element-Free Galerkin Method (EFGM)⁷⁾は、FEM に近いメッシュフリー法といえる。大きな相違点は、関数近似に移動最小自乗法 (MLSM) を用いる点である。まず、領域内の任意の評価点 $\bar{x}$ における未知関数 $h(\mathbf{x})$ の近似を次のように記述する。

$$h(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{x}}) = \{p_m(\mathbf{x})\}^T \{a_m(\bar{\mathbf{x}})\} \quad (1)$$

ここで、 $\{p_m(\mathbf{x})\}$ は基底である。本システムでは次の三次元線形基底を用いた。

$$\{p_m(\mathbf{x})\} = \{1 \ x \ y \ z\}^T, m=4 \quad (2)$$

未定係数 $\{a_m(\bar{\mathbf{x}})\}$ は、領域内の任意の点 $\bar{\mathbf{x}}$ において、次の評価関数の最小条件から求められる。

$$J = \sum_i^N w(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}) [\{p_m(\mathbf{x}_i)\}^T \{a_m(\bar{\mathbf{x}})\} - h_i]^2 \quad (3)$$

ここで、 N は評価点周りに設定した影響領域 d_i 内に存在する節点数である。図-2は、ハッチで示された影響領域内に 7 個の節点が存在する例である。 $\mathbf{x}_i$ は、 i 番目の節点の空間座標値であり、 h_i は $\mathbf{x}=\mathbf{x}_i$ における h の節点値である。

重み関数 $w(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})$ は評価点 $\bar{\mathbf{x}}$ からの距離の関数であり、非常に重要な役割を演じる。関数近似の局所性だけでなく、領域全体での滑らかさにも寄与する。そのため、解析精度への影響も大きい。本システムでは、近似関数とその 2 階微分までの連続条件を満足するように設計された次の四次スプラインを用いた。

$$w(\bar{r}_i) = 1 - 6\left(\frac{\bar{r}_i}{d_i}\right)^2 + 8\left(\frac{\bar{r}_i}{d_i}\right)^3 - 3\left(\frac{\bar{r}_i}{d_i}\right)^4 \quad (4)$$

$$\bar{r}_i = \mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}} \quad (5)$$

式(3)の最小条件から計算される $\{a_m(\bar{\mathbf{x}})\}$ を式(1)に代入にし、整理すると FEM と同様の形の形状関数を得る。

$$h(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{x}}) = \{g_N(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{x}})\}^T \{h_N\} \quad (6)$$

ここに $\{g_N(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{x}})\}$ は、形状関数であり、

$$\{g_N(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{x}})\}^T = \{p_m(\mathbf{x})\}^T [A_{mm}(\bar{\mathbf{x}})]^{-1} [B_{mN}(\bar{\mathbf{x}})] \quad (7)$$

そして、

$$\{h_N\} = \{h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_N\}^T \quad (8)$$

$$[A_{mm}(\bar{\mathbf{x}})] = [P_{mN}(\mathbf{x}_i)][W_{NN}(\bar{\mathbf{x}})][P_{mN}(\mathbf{x}_i)]^T \quad (9)$$

$$[B_{mN}(\bar{\mathbf{x}})] = [P_{mN}(\mathbf{x}_i)][W_{NN}(\bar{\mathbf{x}})] \quad (10)$$

$$[P_{mN}(\mathbf{x}_i)] = [\{p_m(\mathbf{x}_1)\} \quad \{p_m(\mathbf{x}_2)\} \quad \dots \quad \{p_m(\mathbf{x}_N)\}] \quad (11)$$

$$[W_{NN}(\bar{\mathbf{x}})] = \text{diag}[w(\bar{r}_1) \quad w(\bar{r}_2) \quad \dots \quad w(\bar{r}_N)] \quad (12)$$

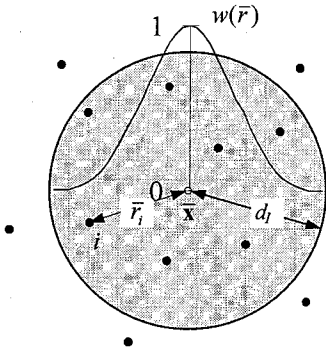


図-2 移動最小自乗法の影響領域と重み関数。

2.2 浸透流方程式とガラーキン法

地盤の透水性は等方であるとする、定常浸透流の基礎方程式は次式で表される。

$$\nabla(k\nabla h) = 0 \quad \text{in } V \quad (13)$$

ここで、 k は透水係数、 h は全水頭（速度ポテンシャル）、 ∇ は線形微分演算子である。一般には、地下水の流速は非常に遅いので、速度項は無視され、全水頭は、既知の位置水頭 z と圧力水頭 $p_w / \rho_w g$ の和で表される。

$$h = z + p_w / \rho_w g \quad (14)$$

p_w は地下水圧、 ρ_w は地下水の密度、 g は重力加速度である。境界条件は、全水頭（または圧力水頭）が規定される Dirichlet 境界条件とフラックスが規定される Neumann 境界条件である。

$$h = \hat{h} \quad \text{on } S_h \quad (15)$$

$$k \frac{\partial h}{\partial n} = \hat{q} \quad \text{on } S_n \quad (16)$$

ここに、 q はフラックス、添え字 $\wedge$ は既知量を表し、 n は領域 V の境界 S_n に立てた単位法線ベクトルである。

上述のとおり、EFGM では、近似関数 h を MLSM によって構築するため、形状関数の節点値はクロネッカ・デルタの条件を満足しない。

$$g_i(\mathbf{x}_j, \bar{\mathbf{x}}) \neq \delta_{ij}, \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

したがって、式(15)の Dirichlet 条件と地層境界における近似関数の連続性 (C^0 連続条件) は自動的に満足されないため、それらを付帯条件として汎関数に導入する必要がある。ペナルティ法によりそれらの付帯条件を考慮すれば、

$$\begin{aligned} \Pi(h) = & \sum_e \left\{ \int_V \frac{1}{2} k_e (\nabla h)^2 dV - \int_{(S_n)_e} (h\hat{q}) dS \right. \\ & \left. + \int_{(S_h)_e} \frac{\alpha}{2} (h - \hat{h})^2 dS \right\} + \sum_{\text{all } S_l} \int_{S_l} \frac{1}{2} \beta (h_+ - h_-)^2 dS \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、添え字 e は、各地層に関する量を意味する。 α 、 β はペナルティ数であり、十分大きな正の数値である。また、右辺、第 4 項は、地層境界 S_l 上における全水頭 h の連続条件を表す。ただ、著者らの経験では、右辺、第 3 項と第 4 項を無視し、FEM 同様、Dirichlet 境界条件を代数方程式に直接代入して解いても、解への有意な影響はないという見通しを得ている⁸⁾。従って、本論文では、次式を扱う。

$$\Pi(h) = \sum_e \left\{ \int_V \frac{1}{2} k_e (\nabla h)^2 dV - \int_{(S_n)_e} (h\hat{q}) dS \right\} \quad (19)$$

2.3 メッシュの利用

前述のとおり、本解析システムでは、メッシュフリー法とはいえ、FEMと同様のメッシュを積極的に利用する。メッシュフリー法でも、実は、メッシュの存在は非常に都合がよい。本システムでは、次の3項目においてメッシュを利用している。

- 解析対象の幾何形状定義
- 解析結果の図化
- 数値積分のセル

a)の幾何形状定義に関しては、CADから出力したSTL (Standard Triangulation Language) ファイル等が利用される場合もあるが、STLは対象物の表面形状を三角形からなる多面体で表現したメッシュに他ならない。当然、領域内部の節点は、別途生成する必要があるし、形状を表現することが目的なので、三角形の頂点も、解析用節点としては必ずしも十分な細かさではない。一旦、CADで地層ブロックがモデリングされれば、地層ごとのメッシュは、FEM用の四面体メッシュ・ジェネレータで比較的容易に生成可能である。幾何形状の定義だけでなく、解析者の意図した解析用節点も同時に生成できるのである。

さらに、FEMプリ/ポストプロセッサは、FEM解析システムの構成要素として発展し、完成度も非常に高い。境界条件の設定や解析結果の図化処理等にそれらを流用できることは大変大きな強みである。

また、式(19)の領域積分の際、メッシュフリー法では、解析領域を包含する構造格子(バックグラウンド・セル)を利用した数値積分や節点に適当な重みを割り当てた節点積分などが行われる³⁾⁴⁾。しかし、FEMのようなメッシュが利用できれば、積分点の解析領域に対する内外判定は不要(バックグラウンド・セルではそれが必要)であるだけでなく、積分セル(要素)の大きさが節点密度に自動的に順応しているため、計算効率や積分精度の面で有利になる⁹⁾¹⁰⁾。

3. 浸潤面の扱い

浸透流解析において浸潤面を扱うためには、二つの非線形性を考慮する必要がある。不飽和領域の浸透特性(材料特性)に関する非線形と浸出面の境界条件に関する非線形である。

3.1 不飽和浸透特性

便宜上、次の負の圧力水頭を定義する。

$$\psi = -p_w / \rho_w g \quad (20)$$

不飽和領域 V_U の浸透特性は、一般に、体積含水率

θ と負の圧力水頭 ψ の関係(水分特性曲線)、及び、体積含水率 θ と比透水係数 k_R (飽和透水係数 k_S に対する不飽和透水係数 k_U の比) の関係により解析に導入される。これは、不飽和領域では、透水係数が、未知変数 h (h と ψ は式(14)、(20)で結ばれる) の関数となることに対応する。

$$k = k_U(\psi) \quad \text{in } V_U \quad (21)$$

不飽和浸透特性は、原位置試験や室内試験を実施して決定すべき物理特性であるが、計測が複雑なため、解析に利用できるだけの十分なデータを得ることは容易ではない。これに対し、van Genuchten¹¹⁾は、不飽和浸透特性の簡便な推定法として次の関数モデル(以降、VGモデル)を提案している。

$$k_U(\psi) = k_R(\psi) \cdot k_S \quad (22)$$

$$k_R(\psi) = S_e^{1/2} \{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\}^2 \quad (23)$$

ここに、 S_e は次式で定義される有効飽和度である。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_R}{\theta_S - \theta_R} \quad (24)$$

VGモデルでは、水分特性曲線の推定式として次式が用いられる。

$$S_e = \{1 + |\alpha \psi|^n\}^{-m} \quad (25)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (26)$$

ここで、 α 、 n 、 θ_R は、実験データから同定されるVGモデルのパラメタである。竹下・河野¹²⁾は、VGモデルを我が国の代表的な測定結果に適用し、その有効性を確認した。図-3は、そのうちの砂丘砂のVGモデルである。横軸は飽和度 σ (飽和体積含水率 θ_S に対する体積含水率 θ の比)、破線が水分特性曲線、実線が飽和度 σ と比透水係数 k_R の関係である。各パラメタは次のとおりである。

$$\theta_S = 0.403 \quad (27)$$

$$\alpha = 3.56(\text{m}^{-1}), \quad n = 4.793, \quad \theta_R = 0.042 \quad (28)$$

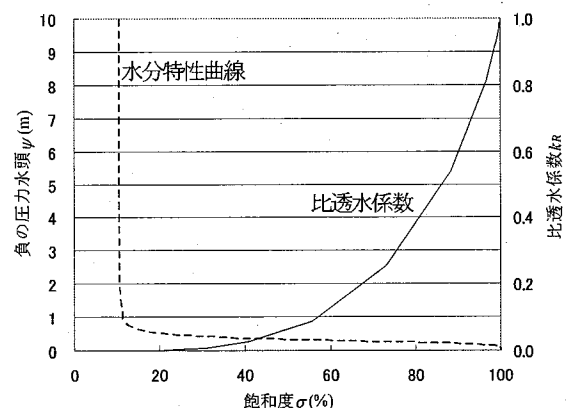


図-3 不飽和浸透特性(砂丘砂のVGモデル)

3.2 浸出面

簡単のため、ここでは、図-4 に示す堤体内の浸透を考える。この場合、堤体の右、下流側の表面 S_D は浸出面となり、水面の上部に堤体の表面から地下水が浸出する領域が発生する。この領域も浸潤面と同様、未知である。解析上は、浸潤面より下の飽和領域では、式(15) の Dirichlet 境界条件により次の大気圧条件 ($p_w=0$) が設定される。

$$\hat{h} = z \quad \text{on } S_D \in V_S \quad (29)$$

浸潤面より上の不飽和領域では、式(16) の Neumann 境界条件により不透水条件とする。

$$\hat{q} = 0 \quad \text{on } S_D \in V_U \quad (30)$$

3.3 収束計算

上述の二つの非線形性は、いずれも式(19)から得られる代数方程式を修正しながら、繰り返し計算を行い、収束させる必要がある。図-5 は、そのフローである。図-5 において、添え字の i は節点に関する量であることを意味する。まず、すべての領域に飽和透水係数を与え、浸出面はすべて不透水条件として解析し、初期値を得る。2 回目以降の解析では、式(19)の積分の際に、積分点における前回の圧力水頭値が負の場合は、図-3 の不飽和浸透特性から透水係数を設定する。浸出面では、節点における前回の圧力水頭値が正の場合は、その節点を式(29)の大気圧条件とする。節点の圧力水頭が負の場合は、式(30)の不透水条件とする。この処理を所定の収束条件が満足されるまで繰り返す。後述の数値計算例では、解析結果の全水頭ベクトルについて、最新の結果と前回との差をとり、その最大値ノルムが 1mm 以下として収束判定を行った。

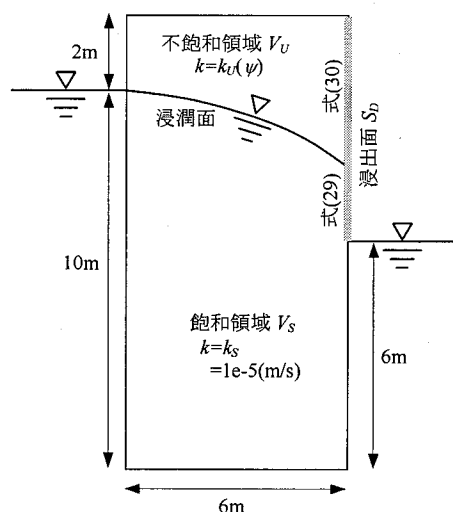


図-4 堤体内の浸透問題

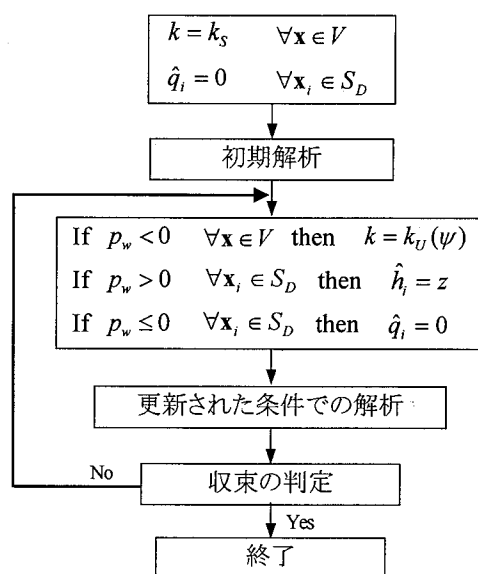


図-5 解析フロー

4. 数値実験

図-4 に示す矩形断面堤体内の浸透問題により、本手法の基本性能を確認した。飽和領域の透水係数は、 $1 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ とし、不飽和領域の透水係数は、図-3 の砂丘砂の VG モデルにより設定した。ただし、関数モデルにおいては、-5m の圧力水頭において 1×10^{-15} といった非常に小さな比透水係数となるが、そのような透水性は非現実的である上、数値的にも不安定になる。ここでは、実際の比透水係数の測定値¹²⁾を参考にして最小値を 1×10^{-3} とした。図-6 は、解析に用いた不飽和浸透特性を負の圧力水頭と比透水係数の関係で表したものである。

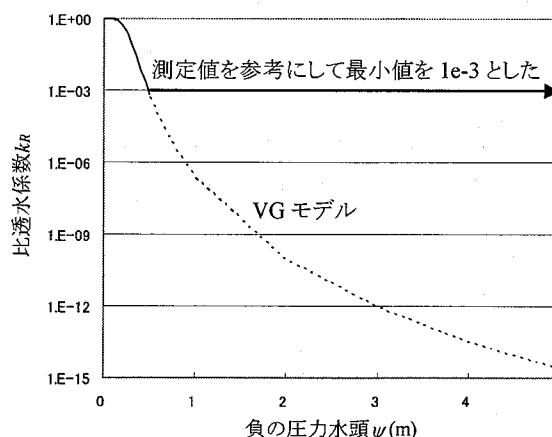


図-6 解析に用いた不飽和浸透特性

境界条件は、図-4 に示す堤体の左右の水面下の節点においては、式(15)より次の静水圧条件とした。

$$\hat{h} = 10\text{m} \quad (31)$$

$$\hat{h} = 6\text{m} \quad (32)$$

浸出面を除く、その他の面は、不透水境界とした。

$$\hat{q} = 0 \quad (33)$$

浸出面の境界条件は前述のとおり、浸潤面の位置により式(29)、または、式(30)に設定される。

この問題に対し、細かさの異なる構造格子を3種類用意した。表-1はその仕様である。二次元問題ではあるが、奥行き方向にも二列の節点を配した三次元メッシュである。図-7に、粗いメッシュの Mesh-1 と細かいメッシュの Mesh-3 を示す。

各メッシュに対し、図-2の影響領域の大きさを变化させた解析、並びに、比較のための線形六面体要素を用いた FEM 解析を実施した。図-8に解析結果を示す。横軸の κ は表-1の節点間隔で正規化した影響領域の半径、縦軸の E_h は、次の誤差指標である。

$$E_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nodes} (h_i - h_i^{reference})^2}{(h_i^{reference})^2}} / nodes \quad (34)$$

誤差の算出の際し、参照解として、非常に細かい分割(格子間隔 0.05m)による FEM の結果を用いた。また、式(31)、(32)により境界条件が与えられる節点は誤差指標の計算から除外した。

図-8において、○が EFGM の結果である。FEM の結果は、影響領域とは無関係なので水平線で表した。図より次のことが分かる。

- ・メッシュを細かくすることによる本システムの解の収束性は、FEM 同様、良好である。
- ・本システムの解の精度は、影響領域の大きさに左右されるものの、広い範囲で FEM と同程度の精度が得られている。

図-9に、Mesh-2の解析結果を用いた浸潤面以下の圧力分布を示す。浸潤面は、圧力水頭がゼロとなる位置として陰的に定義される。図-9において、実線が $\kappa=1.5$ のメッシュフリー法の結果、破線は、細かいメッシュの FEM 参照解である。両者は紙面上では、区別できないほど、良好な一致を示していることが確認できる。ただ、浸出面近傍では浸潤面に明らかな差が見られる。浸出面では、浸潤面を挟んで境界条件が、式(29)から式(30)に不連続に変化するため、メッシュの細かさの違いが顕著に表れてしまう。図-9の△印は、式(30)、(31)の境界条件が規定された節点位置を示す。浸潤面は、堤体外側の水面より高い位置にあり、収束計算の過程で、式

(29)により大気圧条件が与えられたことが分かる。Mesh-2では、水面より上の2節点分に与えられた。

以上の解析では、EFGM は各要素で $5 \times 5 \times 5$ 点のガウス積分を用い、各積分点において、図-6 から不飽和透水係数を設定した。これに対し、FEM では、 $2 \times 2 \times 2$ 点のガウス積分であるが、要素構成節点の圧力水頭から求めた不飽和透水係数の平均値を要素の透水係数として評価した。したがって、不飽和浸透特性の解像度は、EFGM の方が細かい。図-8の解析精度の差は、このことが影響している可能性も考えられる。そこで、各メッシュにおいて、積分点数を変化させた解析を実施した。図-10は解析結果である。影響領域の大きさは、 $\kappa=1.5$ を用いた。図-10において、横軸は、一方向のみの積分点数である。すなわち、2は、 $2 \times 2 \times 2$ 点のガウス積分を意味する。図より、Mesh-1の $2 \times 2 \times 2$ 点の場合を除き、積分点数による影響は小さいことが分かる。したがって、図-8の解析精度の差は、不飽和浸透特性の解像度の違いではなく、関数近似の違いによるものと考えられる。また、文献8)、9)では、不飽和透水特性を考慮しない解析で、積分セルが六面体の場合、 $2 \times 2 \times 2$ 点でも十分であることを確認している。しかしながら、図-10の結果は、不飽和領域では要素の透水係数が要素内で変化するため、要素サイズが大きいと $2 \times 2 \times 2$ 点のガウス積分では不十分になりうることを示唆している。これは、不飽和浸透特性にも強く依存するため、不飽和浸透特性によっては、より多くの積分点を必要とするとも考えられる。不飽和領域を含む要素の積分点数の設定については、今後も数値実験を重ねて詰めていきたい。

次に、不飽和浸透特性の解析精度への影響を確認するため、図-6の特性曲線を用いずに、すべてを飽和透水係数に設定した解析を試みた。図-11は解析結果である。図-8と同様に、横軸は、節点間隔で正規化した影響領域の大きさ、縦軸は、式(34)の誤差指標である。●が EFGM の結果、水平線は FEM の結果である。全体的な傾向としては、図-8と同様であるが、EFGM、FEM とも図-8の不飽和浸透特性を考慮した方の解析精度が劣っている。やはり、飽和-不飽和解析では、より細かいメッシュ分割が必要となると言えよう。

図-12は解の収束速度の観点で整理し直したグラフである。横軸は節点間隔、縦軸は式(34)の誤差指標である。○と□は、それぞれ不飽和浸透特性を考慮した EFGM と FEM の結果であり、●と■は、それぞれ不飽和浸透特性を無視した EFGM と FEM の結果である。EFGM の結果は、 $\kappa=1.5$ の値を用いた。図より、不飽和浸透特性に係わらず、EFGM と FEM は、それぞれに同様の収束性を示していることが分かる。また、この図からは、EFGM の方が

FEM に比べ、メッシュサイズの縮小に伴う、解の収束性に優れていると言うことができる。

表-1 各メッシュの仕様

	Mesh-1	Mesh-2	Mesh-3	reference
節点間隔	1m	0.5m	0.25m	0.05m
節点総数	182	650	2450	58322
	13x7x2	25x13x2	49x25x2	241x121x2
要素総数	72	288	1152	28800
	12x6x1	24x12x1	48x24x1	240x120x1

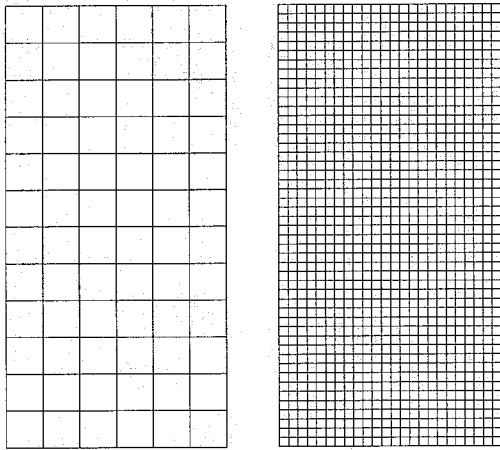


図-7 Mesh-1 と Mesh-3

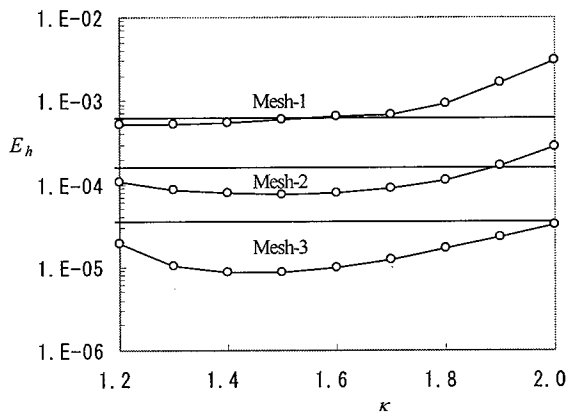


図-8 不飽和透水特性を考慮した場合の解析精度

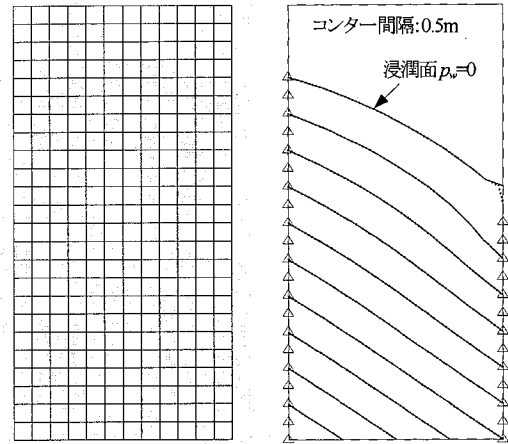


図-9 Mesh-2 と圧力水頭分布の比較

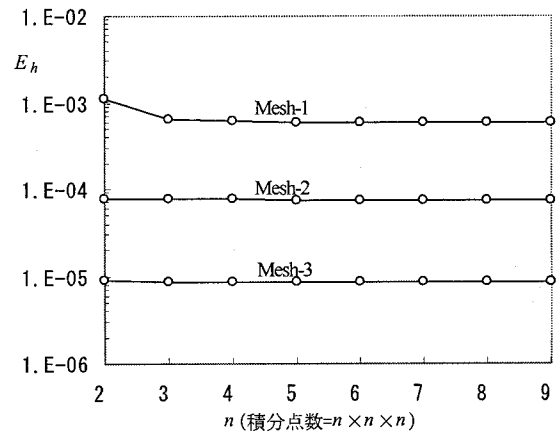


図-10 不飽和透水特性を無視した場合の解析精度

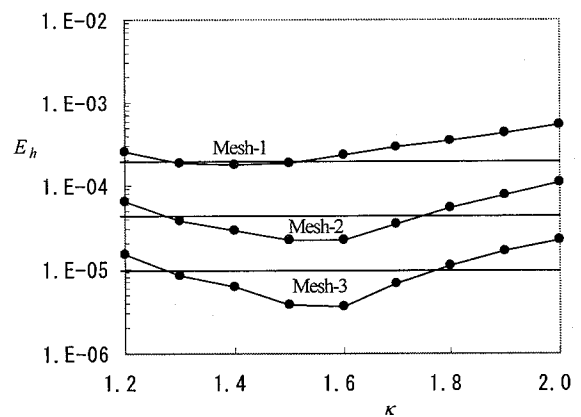


図-11 不飽和透水特性を無視した場合の解析精度

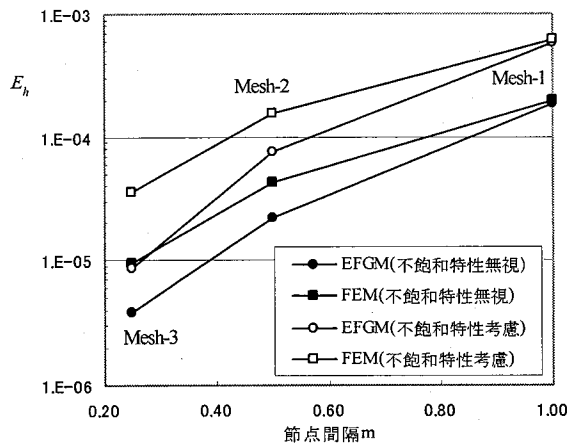


図-12 節点間隔の変化に伴う解の収束性

5. おわりに

三次元浸透流解析では、いくつもの複雑な地層境界面を有する三次元地質構造が対象となる。FEMでは、この地質構造の三次元メッシュ生成がボトルネックとなり、エンジニアはそれに多大な労力と時間を費やさざるを得ないのが実状である。これに対し、著者らは、不整合メッシュ (CMA) とメッシュフリー法を統合した浸透流解析システムの開発を手がけ、非常に柔軟な解析が可能になることを示してきた。本論文では、これまで考慮できなかった地下水の自由水面を扱えるようにするため、FEM解析で実用化されている飽和-不飽和解析の考え方をメッシュフリー法に導入し、基本性能を確認するための数値実験を行った。その結果、従来のFEMと同程度以上の解の精度と収束性が期待できることが分かった。

今後は、降雨による地下水の涵養を考慮した場合の基本性能も確認し、本システムの実用性を向上させると共に、実際問題に適用し、解析例を蓄積して、信頼性の向上も図りたいと考えている。

参考文献

- 1) 櫻井英行：Element-free Galerkin 法を応用した新しい三次元地下水浸透流解析システム，土木学会論文集，第 720 号/VII-25, pp.63-75, 2002.
- 2) 櫻井英行：メッシュ生成の問題に供するメッシュフリー法と不整合メッシュの応用，日本機械学会論文集 A 編，第 70 巻，第 691 号，pp. 346-353, 2004.
- 3) 樫山和男ら：国際フォーラム「土木工学における計算力学手法の新展開」の企画調査，平成 16 年度科学研究費補助金（基礎研究 (C)（企画調査）），No.16636010, 2005.
- 4) Sakurai, H.: Element-free methods vs. meshless CAE, *I. J. Comput. Meth.*, in press.
- 5) Li, G. et al.: Free surface seepage analysis based on the element-free method, *Mech. Research Communications*, Vol.30, pp.9-19, 2003.
- 6) 赤井浩一ら：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，第 264 号，pp.173-192, 1977.
- 7) Belytschko, T. et al.: Element-free Galerkin methods, *I. J. Num. Meth. Eng.*, Vol.37, pp. 87-96, 1994.
- 8) 櫻井英行：EFGM と不整合メッシュを利用した CAE システム，日本機械学会第 15 回計算力学講演会講演論文集，No.02-2, pp.379-380, 2002.
- 9) 櫻井英行，大谷佳広：要素メッシュを領域積分に利用した三次元メッシュフリー法の解析精度，土木学会第 60 回年次学術講演会，CS6-019, pp.251-252, 2005.
- 10) 櫻井英行，大谷佳広：三次元メッシュフリー解析の領域積分における有限要素メッシュの利用，計算工学講演会論文集，Vol.10, pp.403-406, 2005.
- 11) Van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Am. J.*, Vol.44, No.5 pp.892-898, 1980.
- 12) 竹下裕司，河野伊一郎：不飽和浸透特性の推定方法とその適用について，地盤と建設，Vol.11, No.1, pp.127-136, 1993.

(2006 年 4 月 1 日 受付)