地下施設計画に供する新しい三次元地下水浸透流 EFGM 解析システム

清水建設技術研究所　正会員　○櫻井　英行，後藤　高志
中央大学理工学部　正会員　川原　睦人

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評価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．透水係数などの物性値が乏しいだけでなく，地質データの解釈が違えば，複数の地質構造を検討する必要もある．そうしたデータが少なく曖昧な状態にある地下施設計画の初期段階では，次の要件を満足する地下水流動解析システムは不可欠である．

要件1：地質学的解釈の相違，地質調査の進展に伴う解析データの変更が容易なこと．

要件2：地下施設の形態・位置・配向検討に伴う解析データの変更が容易なこと．

ところが，従来のFEMによる解析システムでは，三次元メッシュ・データの作成が足かせとなり，これらの要件を満足することは大変難しい．これに対し，著者らは，Element-Free Galerkin Method（EFGM）[1]を応用した新しい解析システムを開発した[2]．EFGMは，メッシュレス法一種である．三次元メッシュ生成作業を解消する最も現実的な手法として期待され，多くの研究者によって，いろいろな応用がなされてきた．しかしながら，地質構造のように複雑形状の複数材料から構成される三次元複合領域までも扱える汎用的なシステムは，開発されていない．解析対象の幾何形状定義や形状関数作成のための節点収集法が大きな課題と言える．本稿では，不整合メッシュ集合体（CMA：Consistency-free Mesh Assembly）と呼ぶ特殊なメッシュ・データをEFGMに導入することにより，非常に柔軟な三次元地下水浸透流解析が可能になり，冒頭述べた二つの要件が満足されることを三次元の計算例により具体的に示す．

２.Element-Free Galerkin Method

EFGM では関数近似に移動最小自乗法（MLSM）を用い，次の評価関数の最小条件から形状関数を構築する．

$$J=\sum_{i}^{N} w(r_i)\left[\{P(\mathbf{x}_i)\}^T\{a(\mathbf{x})\}-\phi_i\right]^2 \qquad (1)$$

本システムでは基底関数として，三次元完全一次多項式を用いた．$\{P(\mathbf{x})\}$ が基底，$\{a(\mathbf{x})\}$ が未定定数である．$\mathbf{x}_i$ は，i 番目の節点の空間座標値であり，ϕ_i は $\mathbf{x}=\mathbf{x}_i$ における ϕ の節点値，r_i は評価点 $\mathbf{x}$ と節点 i との距離である．N は評価点周りに設定した影響領域内に存在する節点数である．重み関数 $w(r_i)$ には，4 次スプライン関数を用いた．

地下水流動の支配方程式は，次の浸透流方程式と境界条件式で与えられるものと仮定する．

$$\nabla(k\nabla\phi)=0 \qquad \text{in } V \qquad (2)$$

$$\phi=\hat{\phi} \qquad \text{on } S_\phi \qquad (3)$$

$$\partial\phi/\partial n=\hat{q} \qquad \text{on } S_n \qquad (4)$$

ここで，k は透水係数，ϕ は全水頭（速度ポテンシャル），∇ は線形の微分演算子である．MLSM では，式(3)の基本境界条件が自動的に満足されないため，本システムではペナルティ法により汎関数に取り入れた．すなわち，

$$\Pi(\phi)=\int_V \frac{1}{2}k(\nabla\phi)^2\,dV-\int_{S_n} k\phi\hat{q}\,dS+\int_{S_\phi}\frac{\alpha}{2}(\phi-\hat{\phi})^2\,dS \qquad (5)$$

α はペナルティ数で十分大きな正の実数である．FEM 同様，形状関数を式(5)に代入し，停留化すると最終的な線形代数方程式系を得る．領域積分は，解析領域を包含する構造格子（バックグラウンド・セルと呼ぶ）を利用した数値求積法により行われるのが一般的である．以上に関する詳細については，文献 1),2)を参照されたい．

３.不整合メッシュ集合体（CMA）

複雑な三次元形状を対象とする EFGM 解析システム開発の大きなハードルとして，合理的な幾何形状定義と形状関数構築のための節点収集法がある．本システムでは，CMA により，これらのハードルを乗り越えた．地質構造のように多くの材料不連続面を持つ三次元複合領域のメッシュ作成を困難にしている最も大きな要因は，材料不連続面でメッシュが適合するようにソリッド・モデリングを行うことである．この制約がないとソリッド・モデリングは格段に楽になる．そして，そのソリッド・モデルから材料不連続面で非適合となるメッシュは，既存の技術により，容易に生成可能なのである．本システムでは，この非適合なメッシュ群を EFGM 解析に利用しており，これをCMAと呼ぶ．メッシュレスとはいえ，解析対象の幾何形状定義，つまり，ソリッド・モデリングは必須であり，そのソリッド・モデルから，CMA が容易に生成できるのであれば，それを積極的に利用しようという発想である．CMA は不連続面でのメッシュの非適合だけでなく，メッシュ同士の重複も許す．EFGM 解析においても要素とメッシュ（CMA）が利用できるメリットは大きい．例えば，

・解析領域の幾何形状定義として利用する．
・数値積分のセルとして利用する．
・解析結果の画像化に利用する．

キーワード：Element-Free Galerkin Method(EFGM)，放射性廃棄物地層処分，地下水浸透流，不整合メッシュ集合体（CMA），メッシュレス

連絡先：〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17　清水建設（株）技術研究所原子力グループ TEL(03)3820-5476, FAX(03)3820-5959

・FEM 形状関数を利用して微分値を求める．ほか．

4．数値解析例

図-1 に示す 3 種の地質と円柱状の地下施設から成る問題により本システムの有効性を述べる．透水係数，基本境界条件は，図中のとおりである．その他の境界面は不透水条件とした．**図-2** は，この問題に対する CMA である．各地層ごとに独立にメッシュが作成されており，地層境界面で非適合な状態にある．また，地下施設のメッシュは完全に地層のメッシュと重複している．ここでは，幾何形状の定義と形状関数構築，及び，解析結果の図化処理に CMA を利用している．詳細は，文献 2)を参照されたい．**図-4** は，**図-1** に示す断面上での全水頭分布である．黒線が本システムによる結果，白線は，別途用意した不整合のないメッシュによる FEM の結果，破線は断面上での地層境界である．両者は良い一致を示していることが確認できる．また，この CMA では，地下施設の位置と形態の変更が自由である．**図-3** は，地下施設の位置をモデル中央に移動し，半径を小さく，高さを大きくした例である．地下施設と地層のメッシュの重複が許されているので，3 種の地層のメッシュに対する変更は一切不要である．**図-5** に示すように，黒線の本システムの結果と不整合のないメッシュによる白線の FEM の結果は良く一致していることが分かる．ここでは，地下施設の位置・形状の変更例を示したが，例えば，地質調査の進展により新たな薄層が発見された場合なども，その薄層に対応するメッシュを別途作成し，所定の場所に配置するだけで解析可能である．なお，**図-3** と 5 において EFGM の等値線が地下施設部分で重複しているが，FEM 用の図化ソフトを利用して描いていることによる．必要に応じて汎用可視化ソフトを用いれば回避できる．

5．おわりに

CMA と呼ぶ特殊なメッシュ・データを利用した EFGM による新しい三次元浸透流解析手法を紹介した．この手法により，冒頭の地下施設計画に必要な二つの要件を十分に満足する浸透流解析システムの見通しが十分に得られた．

引用文献

1) Belytschko, T., Lu, Y.Y. and Gu, L.: Element-free Galerkin methods, *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, 37, 229-256, 1994.

2) 櫻井英行：Element-free Galerkin 法を応用した新しい地下水浸透流解析システム，土木学会論文集Ⅶ，投稿中．

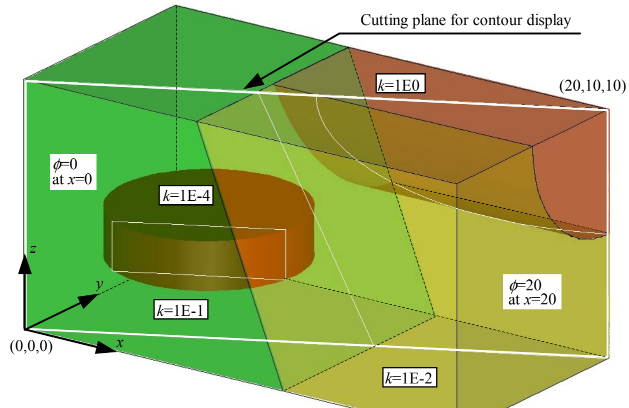

図-1　3 種の地層と地下施設から成る解析対象

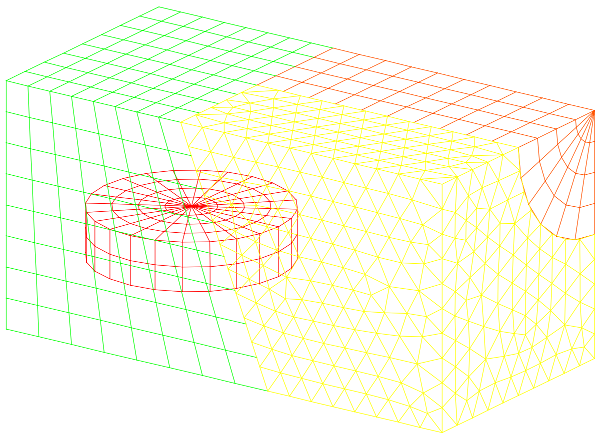

図-2　メッシュ間の非適合と重複のある CMA

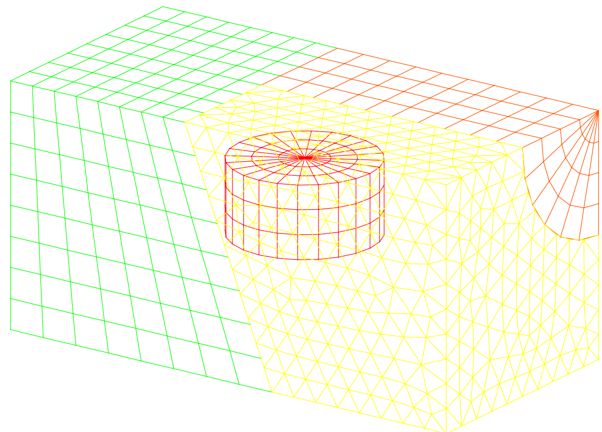

図-3　地下施設の位置・寸法の異なる CMA

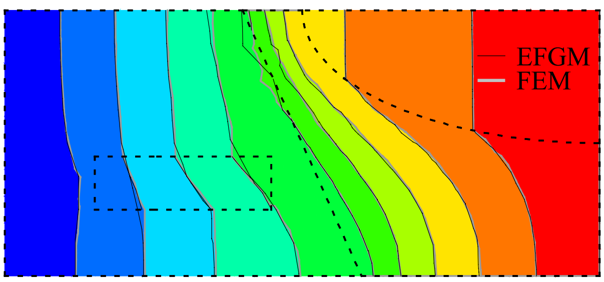

図-4　CMA（図-2）による EFGM 解と FEM 解

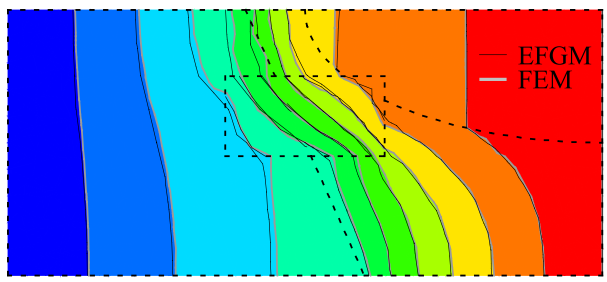

図-5　CMA（図-3）による EFGM 解と FEM 解