

拡張有限要素法を用いた浸透流解析システム

清水建設技術研究所 正 ○山田俊子・正 櫻井英行
上智大学 長嶋利夫

1. はじめに

有限要素法(FEM)による地下水浸透流解析では, 解析領域が複雑な地質構造や地下施設から構成される三次元複合領域であるため, メッシュ分割に多大な時間と労力を要する. 特に透水性が周囲の地層に比べて極端に異なり, 地下水流動場に大きな影響及ぼす断層のような薄い構造は, メッシュ分割を困難にする大変厄介な存在である. これに対し筆者らは拡張有限要素法(X-FEM: eXtended Finite Element Methods)¹⁾を用いた浸透流解析システムの開発に着手し, これまでの検討でメッシュ分割の大幅な効率化と解析精度の維持を両立できることの見通しを得た²⁾. しかし, X-FEMでは, レベルセット法を導入することにより物性境界等の不連続面をメッシュ分割とは独立に扱え便利な反面, 入力データの作成や結果の図化といったプレ/ポスト処理に工夫を要することが課題であった. 本論文では, 既存のFEM用プレ/ポスト処理ソフトを最大限に利用し, 実用性の高いX-FEMによる浸透流解析システムを提案する.

2. X-FEM とレベルセット法

スカラーポテンシャル場 $\phi(\mathbf{x})$ における X-FEM の近似の一般形は次のよう書ける.

$$\phi^h(\mathbf{x}) = \sum_{I \in \mathbf{N}} \phi_I L_I(\mathbf{x}) + \sum_K \sum_{I \in \mathbf{M}^{(K)}} L_I(\mathbf{x}) a_I^{(K)} f^{(K)}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここに, $L_I(\mathbf{x})$ は, 一般的な FEM の節点 I に関する形状関数, $\mathbf{N}$ は全節点の集合である. $f^{(K)}(\mathbf{x})$ は部分的に導入されるエンリッチ関数であり, $\mathbf{M}^{(K)}$ はエンリッチされる節点の集合, K はエンリッチ関数の数である. ϕ_I と a_I は未定数である. エンリッチ関数 $f^{(K)}(\mathbf{x})$ として微分不連続関数を導入することにより, メッシュ分割とは独立に材料境界面を考慮することが可能となる. ここで, 材料境界面を表すためにレベルセット関数を用いる. 各節点 I から材料境界面 K への符号付き距離を $\lambda_I^{(K)}$ とすると, レベルセット関数は, FEM の形状関数を用いて, 次のように表すことができる.

$$\lambda^{(K)}(\mathbf{x}) = \sum_{I \in \mathbf{N}} \lambda_I^{(K)} L_I(\mathbf{x}) \quad (2)$$

ここで, エンリッチ関数は, より安定した精度が得られるように著者らが文献 2) で提案した次式を用いた.

$$f^{(K)}(\mathbf{x}) = 1 - \left| \sum_{J \in \mathbf{M}^{(K)}} \lambda_J^{(K)} L_J(\xi(\mathbf{x})) \right| / \left(\sum_{J \in \mathbf{M}^{(K)}} |\lambda_J^{(K)}| L_J(\xi(\mathbf{x})) \right) \quad (3)$$

3. プレ処理

図-1 は解析領域である母岩の中に, 厚さの薄い難透水の断層が三次元的に分布する三次元定常飽和浸透流問題である. この解析モデルを例として, 解析を実施する場合のプレ処理から解析までの手順を以下に示す.

- (1) 断層を考慮していないメッシュ A を作成する(図-2).
- (2) メッシュ A とは独立に, 断層をモデル化したメッシュ B を作成する(図-3).
- (3) メッシュ B のメッシュ A との境界面に, 二次元要素を張り, 物性境界面ごとにグループ化する(図-3).
- (4) (3)で作成したメッシュ B の物性境界面のグループを用いて, レベルセット関数を計算する.
- (5) (4)で求めたレベルセット関数にそれぞれ ID を付ける.
- (6) レベルセット関数の ID を用いて, 内在物(断層)を定義し, X-FEM により解析を実行する(図-4).

4. ポスト処理

図-5 は図-1 における▲と△位置での ϕ の x 方向分布である. X-FEM の解析結果(実線)は, 難透水層前後の急激な変化を表現しており, 断層を要素分割した FEM の結果(淡い太線)とよく一致している. また, 比較のため, 断層が通過する要素の透水性を均質化して直交異方性の透水係数を適用する従来の簡便な手法による解析も実施したが, この均質化手法による結果(点線)は特に断層近傍で FEM の解析結果から大きく外れており, X-FEM の解析精度の優位性が確認できる. しかし, メッシュ A を用いて X-FEM の解析結果をコンタで表しても, 断層のメッシュを分割していないため, FEM の解析結果コンタのような断層近傍の分布を十分に表現できない(図-8, 図-9). そこで, 以下の手順によりポスト処理を行う.

- (7)メッシュ B の表面を引き伸ばしたメッシュ C を用意し, メッシュ A と節点上の解析結果を用い, メッシュ C の節点における値を式(1)を用いて算出する(図-6).
- (8)メッシュ A とメッシュ C を同時に利用して解析結果の図化を行うことにより, 断層近傍についても FEM と概ね同様のコンタを表示することができる(図-7, 図-10).

5. おわりに

X-FEM を用いた地下水浸透流解析システムを提案した. このシステムにより, 従来使用している FEM のプレ/ポスト処理ソフトをそのまま利用して一連の解析作業が可能になる. 実用化のためには, X-FEM の要素ライブラリの充実や飽和-不飽和モデルへの適応性の検討が必要である.

キーワード: 拡張有限要素法, 浸透流解析, 断層, 材料不連続, プレ/ポスト処理

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 安全安心技術センター TEL(03)3820-8779

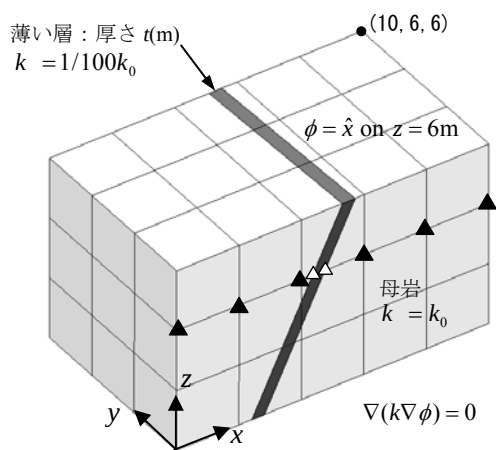


図-1 解析モデル

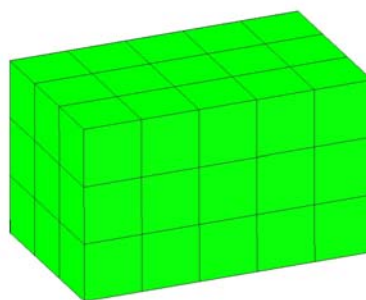


図-2 メッシュ A

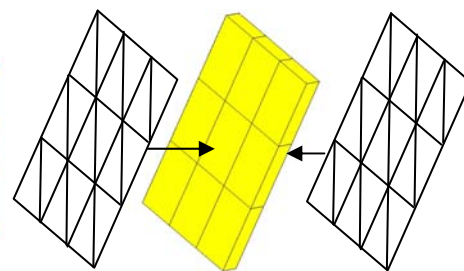


図-3 メッシュ B と二次元メッシュ

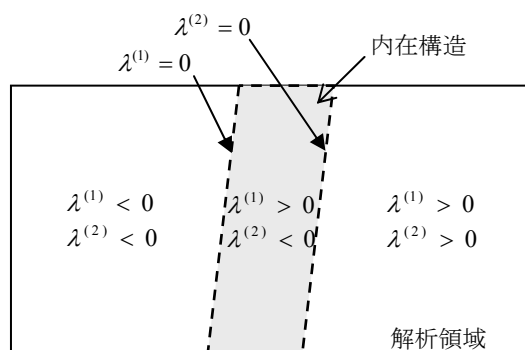


図-4 内在構造のデータ定義

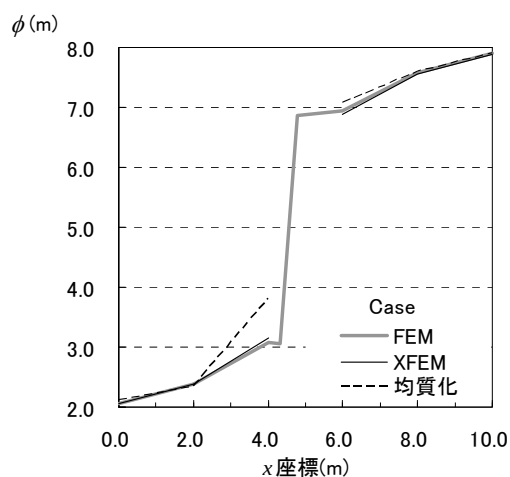


図-5 解析結果

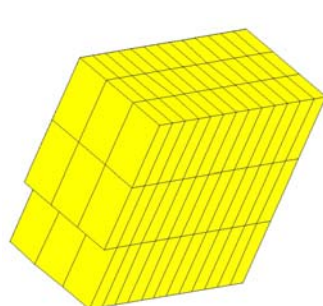


図-6 メッシュ C

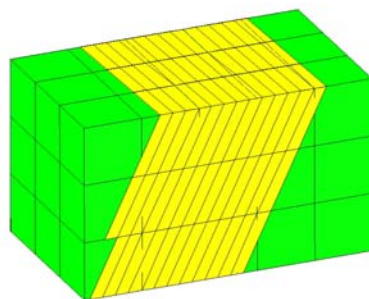


図-7 メッシュ A とメッシュ C

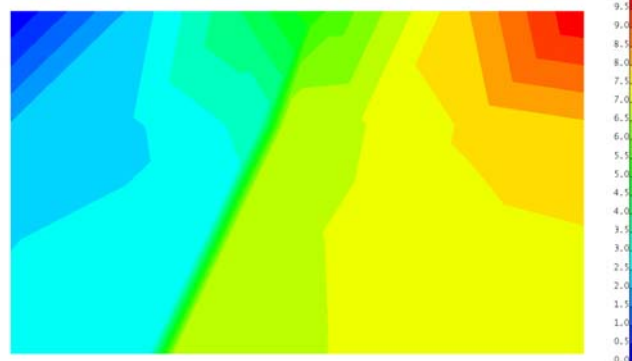


図-8 FEM の解析結果コンタ表示

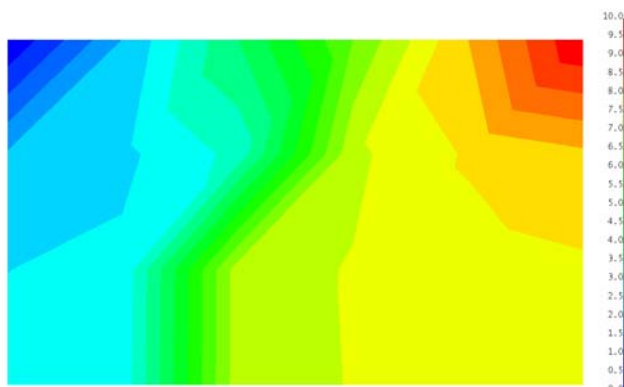
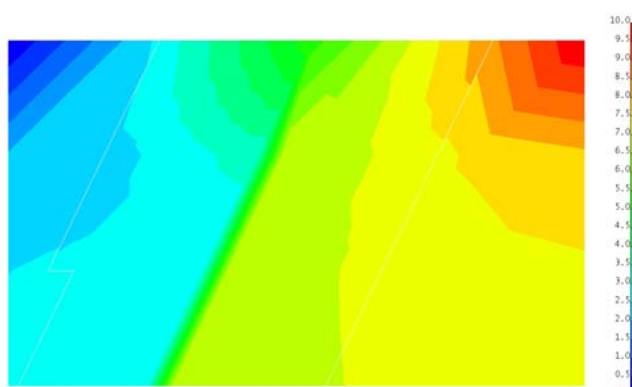


図-9 X-FEM の解析結果コンタ表示 (メッシュ A のみ)

図-10 X-FEM の解析結果コンタ表示
(メッシュ A およびメッシュ C)

参考文献

- 1) N. Moës et al., A finite element method for crack growth without remeshing, *Int. J. Numer. Methods. Engrg.* 46, 131-150 (1999).
- 2) 櫻井英行ほか：薄い内在物のモデル化に関するX-FEMの解析精度，計算工学講演会論文集，Vol.14，2009.5(提出済)