

氏名（本籍）	山田 俊子（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 213 号
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	浸透流有限要素解析における注水／揚水孔の簡便かつ効果的なモデル化とその検証に関する研究
論文審査委員	（主査）教授 鈴木 誠 （副査）教授 上田 宏 教授 田村 和夫 教授 内海 秀幸 中央大学 教授 檜山 和男

学位論文の要旨

浸透流有限要素解析における注水／揚水孔の簡便かつ効果的なモデル化とその検証に関する研究

本論文は、有限要素法（FEM）による広域を対象とした浸透流解析における注水／揚水孔や井戸等の簡易なモデル化手法を開発し、提案するモデル化について、工学シミュレーションにおける V&V（Verification & Validation：検証と妥当性確認）の観点から、検証に位置付けられる評価結果をまとめたものである。

FEM による広域を対象とした浸透流解析において、領域や構造物の大きさに比べて非常に小さな径の注水／揚水孔や井戸等をモデルに考慮する際に、孔を実寸法でメッシュ分割すると、実務上非現実的なモデル規模となることがある。そのような場合には、解析モデルを合理的な規模にするため、孔の実径を無視して、節点群に水頭等を境界条件として与えた点源の連なりとしてモデル化することが多い。孔を節点で代表させる点源を用いたモデル化は、要素サイズに依存するある半径を有する孔として近似することになる。ここではこれを相当半径と呼ぶ。相当半径と実半径との乖離が大きいと点源の流量や点源周辺の水頭分布の解析精度は低下するため、点源を用いて孔を表す際には、相当半径が実半径と等価になるようなモデル化が解析精度向上のために必要となる。

本研究の目的は、FEM を用いた浸透流解析における、孔や井戸の点源によるモデル化について、実務上合理的な解析モデルの規模を保持しつつ、要素サイズの影響を低減し、解析精度を改

善させることである。そこで、点源を含む要素の透水係数を要素サイズに応じて補正する式を用いることにより、点源の相当半径を孔の実半径と等価にする簡易なモデル化を開発した。さらに、提案したモデル化の検証として、工学シミュレーションにおける V&V の観点から、コード検証 (Code Verification) と解検証 (Solution Verification) を実施した。

提案したモデル化は、被圧帯水層の単一孔の二次元放射状流問題、および単一孔の先端部で生じる三次元球状流問題の理論解に基づき、有限要素の種類に応じて導出した複数の補正式を用いるものである。二次元放射状流問題に対しては三角形一次要素および四角形一次要素の補正式を示し、三次元球状流問題に対しては四面体一次要素の補正式を示した。

コード検証では、複数の数値実験による理論解や参照解との比較により、提案するモデル化が期待する精度を得ることおよび所期の性能を発揮することを確認した。数値実験は、補正式を導出した単一孔の二次元放射状流問題および三次元球状流問題に加えて、より一般的な二次元放射状流の領域に複数の孔が配列された問題や、線状の定圧規定境界の近傍に複数孔が配列された問題についても実施し、提案するモデル化の適用性を示した。また、実務を想定した不均質な地盤の問題を対象とする数値実験も実施し、適用性を確認した。さらに、所期の性能確認のため、要素分割の細分化に伴う正解への収束性に着目したモデルの性能の評価を行い、提案するモデル化の妥当性を明らかにするとともに、モデルの性能に関するコード検証を実施する際の留意点を顕在化させた。

解検証では、空間方向に関する離散化誤差の定量的な推定による評価を行った。実問題に近い線状の定圧境界近傍にある群孔問題を対象とし、要素サイズの異なる三つのメッシュの解から収束解を推定し、格子収束指数 (Grid Convergence Index) を用いて誤差範囲を例示した。その際に観測される解の正確度のオーダに着目し、本研究が提案するモデル化と従来のモデル化との検証結果の特性を明示し、解検証の重要性および実施時の留意点を示した。

最後に結論においては、本研究を総括している。点源の相当半径を孔の実半径と等価にする簡易なモデル化とその検証としてコード検証と解検証により、ここで提案したモデル化の有効性および有用性を示した。

審査結果の要旨

有限要素法 (FEM) による広域を対象とした浸透流解析において、領域や構造物の大きさに比べて非常に小さな径の注水/揚水孔や井戸等をモデルに考慮する際に、孔を実寸法でメッシュ分割すると、実務上非現実的なモデル規模となることがある。そのような場合には、解析モデルを合理的な規模にするため、孔の実径を無視して、節点群に水頭等を境界条件として与えた点源の連なりとしてモデル化することが多い。孔を節点で代表させる点源を用いたモデル化は、要素サイズに依存するある半径 (相当半径) を有する孔として近似することになる。相当半径と実半径との乖離が大きいと点源の流量や点源周辺の水頭分布の解析精度は低下するため、点源を用いて

孔を表す際には、相当半径が実半径と等価になるようなモデル化が解析精度向上のために必要となる。

本論文は、FEMによる広域を対象とした浸透流解析における注水／揚水孔や井戸等の簡易なモデル化を提案し、提案するモデル化について有効性を示すとともに、工学シミュレーションにおけるV&V (Verification & Validation: 検証と妥当性確認) の観点から、検証に位置付けられる評価結果をまとめたものである。

本論文は5章から構成されており、以下のとおりである。

第1章では、本研究の目的と概要を示している。FEMを用いた浸透流解析における、孔や井戸の点源によるモデル化について、実務上合理的な解析モデルの規模を保持しつつ、要素サイズの影響を低減し、解析精度を改善させることである。そこで、点源を含む要素の透水係数を要素サイズに応じて補正する式を用いることにより、点源の相当半径を孔の実半径と等価にする簡易なモデル化を提案した。さらに、提案したモデル化の検証として、工学シミュレーションにおけるV&Vの観点から、コード検証 (Code Verification) と解検証 (Solution Verification) を論じている。

第2章では、FEMを用いた浸透流解析における、孔や井戸の点源によるモデル化について、実務上合理的な解析モデルの規模を保持しつつ、解析精度を改善させるため、点源を含む要素の透水係数を要素サイズに応じて補正する簡易なモデル化手法を提案した。このモデル化として、理論解に基づき、被圧帯水層の単一孔の二次元放射状流問題に対しては三角形一次要素および四角形一次要素の補正式を示し、単一孔の先端部で生じる三次元球状流問題に対しては四面体一次要素の補正式を示した。

第3章のコード検証では、複数の数値実験による理論解や参照解との比較により、提案するモデル化が期待する精度を得ることの確認、および、所期の性能を発揮することを確認した。数値実験は、補正式を導出した単一孔の二次元放射状流問題および三次元球状流問題に加えて、より一般的な二次元放射状流の領域に複数の孔が配列された問題や、線状の定圧規定境界の近傍に複数孔が配列された問題についても実施し、提案するモデル化の適用性を示した。また、実務を想定した不均質な地盤の問題を対象とする数値実験も実施し、適用性を確認した。さらに、所期の性能確認のため、要素分割の細分化に伴う正解への収束性に着目したモデルの性能の評価を行い、提案するモデル化の妥当性を明らかにするとともに、モデルの性能に関するコード検証を実施する際の留意点を顕在化させた。コード検証は、相当半径を補正しない従来のモデル化や点源以外のモデル化についても行い、提案するモデル化手法の優位性も併せて示した。

第4章の解検証では、空間方向に関する離散化誤差の定量的な推定による評価を行った。実問題に近い線状の定圧境界近傍にある群孔問題を対象とし、要素サイズの異なる三つのメッシュの解から収束解を推定し、格子収束指数 (Grid Convergence Index) を用いて誤差範囲を例示した。その際に観測される解の正確度のオーダに着目し、本研究が提案するモデル化と従来のモデル化との検証結果の特性を明示し、解検証の重要性および実施時の留意点を示した。

第5章では、結論として本研究を総括している。本研究の目的である点源の相当半径を孔の実半径と等価にする簡易なモデル化とその検証としてコード検証と解検証により、ここで提案したモデル化の有効性および有用性を示した。

以上のように本研究はFEMによる広域を対象とした浸透流解析における注水／揚水孔や井戸等の簡易なモデル化を提案し、モデル化についてV&Vの観点から評価を示し、一連の価値ある知見を提示した。したがって、学位申請者の山田俊子は博士（工学）の学位を得る資格があると認める。