

地盤の内部侵食解析に向けた粒子法による半解像型 連成モデルの開発

辻, 勲平

<https://hdl.handle.net/2324/6787581>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 辻 勲平

論 文 名 : 地盤の内部侵食解析に向けた粒子法による半解像型連成モデルの開発

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

地盤内部を流れる浸透流により引き起こされる「内部侵食」は、津波や豪雨などの自然災害時の地盤の崩壊を助長するだけでなく、道路陥没や取水施設の漏水事故など、インフラの不具合といった社会問題の要因にもなっている。この内部侵食が発生すると、地盤に潜在する孔や亀裂などの弱部が水みちとなり、微細な領域で小さな土粒子が移動・流失することで侵食域が拡大し、やがて地盤の緩みや崩壊を誘発する。間隙水の流れと土粒子の複雑で相互作用の結果として生じる内部侵食は、粒子スケールの観察や計測が極めて困難なことも相まり、その発生メカニズムなど、未解明な点が多く残されている。今後、内部侵食による地盤全体の不安定化との関連性を定量的に評価するには、仮想的な数値実験による微視的な詳細分析が可能な数値シミュレーションが有効な手段になり得る。

内部侵食の数値シミュレーションを行うには、土粒子と間隙水の相互作用を適切にモデル化した上で、侵食に伴う土粒子の移動まで表現可能な連成解析が必要である。この土粒子の水の連成解析技術は、詳細な流れと流体力の算出が可能な「解像型連成モデル」と、半経験的な抗力・浸透流モデルに基づく計算コストが小さな「非解像型連成モデル」に大別される。そして、これまでの研究により、両者の連成モデルは粒子と流体の空間解像度の比から適切に判断すべきとの指標が示されている。ただし、解像型連成モデルにより堤防全体などの広域解析は計算コストの面から非現実的であり、一方で半経験的な非解像型連成モデルでは本研究が対象とする内部侵食などの局所的な破壊の表現が困難であるとの課題が残されており、計算効率と精度の両者を満足する新たな連成計算モデルの構築が望まれている。

本研究では、流体と土粒子の解析手法として Lagrange 記述の粒子法を選択し、内部侵食プロセスにおける土粒子の移動までが直接表現可能な流体-地盤連成解析手法を開発した。具体的には、流体解析には Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH)、土粒子には個別要素法 (DEM) を適用した連成解析手法を開発し、従来の解像型・非解像型連成モデルの適用限界を把握するとともに、これらの課題を克服し得る新たな半解像型連成モデルを提案した。

本論文は第 1 章から第 7 章までの 7 つの章で構成されている。各章の内容は以下の通りである。

第 1 章では、はじめに本論文の研究背景である地盤の内部侵食の種別を定義し、内部侵食が関与した被害例についてまとめた。そして、内部侵食に関わる既往の研究と、粒子スケールでの内部観察が可能な数値シミュレーションの必要性と粒子法の現状について述べ、最後に本論文の構成を示した。

第 2 章では、固体粒子と流体が混じる固液混相流の連成モデルについて整理した。特に、既存の連成モデルである解像型連成モデルと非解像型連成モデルの発展経緯や課題についてまとめた。そして、両者の課題を克服するために近年開発が進められている半解像型連成モデルの概念を紹介し、

内部侵食解析を対象とした「解像型・非解像型ハイブリッドタイプ半解像型連成モデル」を粒子法で実現する方針を示した。

第3章では、まずは土粒子と流体の混相流の運動を記述する Darcy-Brinkman 方程式について説明した。この方程式は、水のみを対象とした自由表面流れと、地盤内部を透過する浸透流を、一つの方程式で統一記述したものである。その後、安定化 ISPH 法と DEM により、この統一方程式を解く具体的な手順を提案した。また、固体解析用の粒子法である DEM の接触計算方法をまとめるとともに、任意形状の不透水性剛体を球形粒子の集合体で表現するクラスターDEM の定式化を示した。そして、安定化 ISPH 法と DEM による全体の計算アルゴリズムについて整理した。

第4章では、半経験的な抗力・浸透流モデルに基づく非解像型連成モデルに焦点を当て、ケーソン式防波堤の捨石マウンド内で発生する内部侵食解析を実施した。既往の実験との比較を通して、半経験的な抗力・浸透流モデルで同定すべき抗力係数の決定方法を示すとともに、従来の ISPH 法と比較した安定化 ISPH 法の浸透流解析における優位性を確認した。この基礎検討の後、平成 23 年東北地方太平洋沖地震で発生した津波によるケーソン式防波堤の捨石マウンドの浸透崩壊を模擬した実験の再現解析を行い、内部侵食に対する非解像型連成モデルの適用限界とその要因を考察した。そして、実務でも広く採用される Terzaghi の限界動水勾配に基づく浸透崩壊の判定基準を非解像型連成モデルに導入した改良法を提案することで、実験結果と整合した解析結果を得た。

第5章では、固体の移動を伴う流体现象を移動境界値問題として解析する解像型連成モデルの高精度化を提案した。移動する固体背面に生じる複雑な渦とそれによる圧力損失を再現し、同時に接触を伴う固体の水中での挙動を表現するには、特に従来の粒子法の低精度な微分モデルと移動境界の取り扱いに課題があることを指摘した。そして、これら問題点を克服する高精度化手法（高精度微分モデル、粒子再配列等）の導入と Passively Moving Solid 法に基づく移動境界の改良法を開発した。そして、複数の形状の固体を水中で落下させた簡易的な実験との比較を通し、提案した高精度な解像型モデルの精度検証を行った。

第6章では、第4章および第5章で提案した非解像型・解像型連成モデルを融合した、粒子法に基づく「解像型・非解像型ハイブリッドタイプ半解像型連成モデル」を提案した。特に、本研究の対象である内部侵食現象に対し、どのような方針でハイブリッドタイプの半解像型連成モデルを使用すべきか議論した上で、二極化した粒度分布を持つ粒子層を用いた数値実験を実施し、提案モデルの有効性と、内部侵食解析への適用可能性を示した。

第7章では、各章で得られた知見について総合的に整理し、本論文の今後の課題と将来展望について述べた。