

審査の結果の要旨

氏名 阿部慶太

近年の巨大地震、そして深刻化する異常気象によって、自然、人工の斜面の崩壊、浸透破壊、地盤の液状化、土石流等、地盤の大変形、流動に関わる土砂災害が顕在化している。例えば 2004 年新潟中越地震では、活褶曲地帯の軟岩斜面で多数の斜面崩壊が発生し、生活基盤の再建で土砂の安定化が極めて重要な復旧課題になった。2005 年パキスタン北部地震では、カシミールの山岳地帯の地震断層沿いに無数の斜面崩壊、土石流が発生し、土砂災害による死者は震災犠牲者約 8 万 7 千人のうち 3 分の 1 にも達するとされている。

土砂災害のリスク低減に向けた対策としては、斜面安定工や砂防ダムの建設等によるハード対策、地盤の挙動の監視や予測等によるソフト対策がある。2001 年に施行された土砂災害防止法で数万にも及ぶとされる斜面が土砂災害警戒区域としての指定を受け、このため単に災害発生の可能性の有無だけでなく、発生した場合の影響にまで踏み込んで優先順位を考えたいうえで限られた資源を用いての土砂災害対策の重要性が以前にも増して認識されるようになった。土砂災害危険箇所ゾーニングにおける有効な手法としては、数値解析シミュレーションにより土砂の挙動を予測し、土砂災害危険箇所を特定する方法がある。そしてこれまでに円弧すべり法、ニューマーク法等の簡易法、さらに有限要素法、個別要素法等の詳細法が用いられている。地盤の崩壊が極めて複雑な様相を見せることを考えれば、特に後者の詳細法の発展が期待される。しかし、地盤の変形解析の主流として用いられる有限要素解析では、大変形に至ると解析格子の変形が著しくなり、解析の信頼性が大きく損なわれるだけでなく数値計算そのものが破綻するという大きな限界がある。地盤の不連続体としての挙動を扱い得る解析手法としては形状と大きさを有する粒子の集合体の挙動を時間領域で追跡していく個別要素解析も行われているが、実務的な解析を行う上での粒子数の制約もあり、解析パラメータや計算時間刻みの設定に多くの困難な課題が残されている。このような背景から、既存の解析手法をベースとしつつも大きな改善を加えたツールの開発、整備が急務である。

本論文は、メッシュフリー法の一つである **Material Point Method (MPM)** に、固相ばかりでなく水を表現する粒子を加え、地盤の大変形、流動解析ツールを構築し、その可能性と将来の課題について様々な模型実験や実際の土砂崩壊現象などの再現解析を通して検討したものである。物性値を保有しながら自由に移動できる固相、液相粒子の動きを、時間ステップごとに背面空間に固定された解析格子に投影し、時々刻々その動きを追跡する **MPM** のスキームでは、例えば粒子が解析格子の境界を越えるときにノイズが発生するなどの問題が内在するが、それらの課題に丁寧に対応し、併せて斜面崩壊、盛土の浸透破壊現象、液状化、土石流の大変形、流動解析に適用する上での構成則やパラメータ設定にも細心の検討を加え、**MPM** による大規模地盤の大変形、流動解析への可能性を大きく広げたものである。

以下、検討内容と得られた成果の概要を各章毎に述べる。

第 1 章では、研究の背景、目的と実施内容を示している。地盤の大変形、流動解析ツールの開発、整備の重要性について述べるとともに、地盤の大変形解析を扱う上で、地盤の変形解析の主流である有限要素解析および個別要素解析が有する課題について述べている。併せてメッシュフリー法の地盤の大変形解析における有用性を示し、有限要素法や個別要素法に代わりメッシュフリー法をベースとして地盤の変形解析ツールを開発、整備することの重要性を指摘している。

第 2 章では、**MPM** を含む複数のメッシュフリー法の地盤の変形問題への適用に関する既往の研究事例について述べている。この中で、地盤の変形問題への適用事例の多さと、数値解析上の課題の少なさから、**MPM** の有用性についてまとめている。

第 3 章では、**MPM** の詳述とともに **MPM** で地盤の変形解析を行う上で必要な地盤の構成則、動的解析対応への拡張および固液二相系への拡張についてまとめている。**MPM** については、支配方程式の離散化とアルゴリズムについて詳述した上で、粒子が解析格子の境界を越えるときに発生するノイズの課題と対策について提示している。地盤の構成則については、**Drucker-Prager** モデル、**Mohr-Coulomb** モデル、**SYS-Cam clay** モデル、砂の繰返しモデルについて詳細に記述している。動的解析対応への拡張については、動的解析の実施に向け **MPM** 上でレーリー減衰を表現する式を新たに提案している。固液二相系への拡張については、**MPM** をベースに固相、液相粒子を用いた手法を新たに構築し、地盤内での間隙水の挙動と固相の大変形を扱い可能な数値解析手法を提案している。そして、一次元圧密問題とボーリングのシミュレーションを行い提案手法の有効性を検証している。

第 4 章では、第 3 章で構築した手法を用いて、地震時の斜面崩壊、盛土の浸

透破壊および地震時の液状化による浮き上がり現象に関する既往の模型実験の再現解析を行い、構築した手法の有効性について検証している。構築した手法により、地震時の斜面崩壊では、弱層を有した斜面模型の崩壊形態を良好に再現できること、盛土の浸透破壊では、浸透に伴う地下水位の変化と崩壊時挙動を連続的に良好に再現できること、液状化による浮き上がり現象では、振動に伴う過剰間隙水圧の上昇と有効応力の低下を良好に再現できることを示し、構築した手法の一連の地盤の大変形現象に対する有効性について詳細に検証している。

第5章では、浅水流方程式をMPMに適用したDepth Average Material Point Method (DAMP)をベースに、固体と流体のレオロジーに流動化率という概念を導入し土石流の流動解析ツールを構築している。流路模型の流路勾配を変化させ、試験材料として乾燥砂と液状化砂を用いた土砂の流動模型実験を実施し、試験材料の流下および堆積の様子について再現解析を行い、構築した手法の土砂の流動解析への有効性を検証している。さらに、再現解析結果と既往の土石流の研究報告に基づいて、土石流の解析パラメータを決定するフローを提案し、当該フローに基づいて、実際の土石流のシミュレーションを行い、構築した手法の有効性と今後の課題についてまとめている。

第6章では、本論文で検討した結果をとりまとめるとともに、今後の課題を述べている。

以上、本論文は、メッシュフリー法の一つであるMaterial Point Method (MPM)に、固相ばかりでなく水を表現する粒子を加えた地盤の大変形、流動解析ツールを開発し、綿密な検証を通してその有用性を示したものである。今後の発展性も高く、また防災面での活用も期待できる研究成果と評価できる。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。