

審査の結果の要旨

論文提出者 張 馳

近年、欧米先進国・途上国を問わず非常に大きな自然災害（地震・豪雨時の斜面崩壊や洪水氾濫、津波など）が頻発する状況があり、その対策は各国行政の共通の課題でもある。筆者は、このような状況に鑑み、行政の自然災害対策（防災施設設計・施工、ハザードマップ作成など）における科学的評価の不可欠の道具として、実用性・信頼性の高い新たな数値解析技術の提案を行っている。

本研究は二つのテーマで構成されており、第一のテーマは「洪水氾濫に関する高速安定化数値解析手法の開発」、第二のテーマは「安定化数値解析による崩壊土塊の到達範囲予測」である。

1. 洪水氾濫に関する高速安定化数値解析手法の開発

洪水氾濫解析は、浅水長波方程式をリーブログ法などの陽的差分解法により2次的に解くことが一般的である。また、解の安定化のために風上差分の導入や、クーラン数が CFL 条件を満足するように時間ステップが設定され、計算が進められる。しかし、地形変化（人工物含む）のある広い領域の長時間の洪水氾濫計算では、水際線は時々刻々変化し、特に速度や水深が急激に変化する場所では流入より流出が過大となり所々に負の水深が生じやすい。この現象が起こる場合には、十分小さな時間ステップを設定するか、負の水深を単純に限界流動水深に戻し計算を続行することが一般的である。しかし、時間ステップの縮小は計算時間の大幅な増大をもたらす、また、単純な補正操作は質量保存誤差の累積、解の非物理性、数値的不安定性を引き起こす可能性がある。

筆者はこの問題に対処するため、質量を厳密に保存しながら安定性の向上を可能とする格子流出量修正法を提案している。この方法では、解析中に負の流動深が生じた格子に対し、まず水深をゼロにする流出フラックス修正係数を求めて当該ステップのフラックスを修正する。さらに、その修正が引き起こす周辺格子への影響を次々に補正し、全域で負の流動深がなくなるまで反復修正した後、次の計算ステップへ移る。以上の手続は物理的には明確で質量保存も厳密に保たれるが、収斂性や安定性に関しては理論的な検討は難しく、実際の適用例から検討する必要がある。

筆者は本提案手法の有効性を明確化するため、実験室スケールでの数値実験やいくつかの実際の大規模洪水事例を使い、質量保存誤差、安定性、解の精度、CPU 時間の観点から詳細に検証している。その結果、特に、天然ダムが決壊による扇状地の大規模洪水氾濫解析から、従来の方法では質量保存誤差の蓄積が急激に起こり計算が発散するような時間ステップを使う場合でも、格子流出量修正法では完全に質量を保存しながら安定な計算が可能であることが示されている。この計算例では、計算効率は数十倍に向上可能であり、大きな時間ステップの計算水深分布は細かい時間ステップの計算結果と実用的に差のないことが示されている。さらに、筆者は一般座標系による氾濫解析プログラムの開発と格子流出量修正法の組み込みを行い、地形・人工物表現の柔軟性による計算格子数の大幅な減少と本手法による安定化が、計算時間の大幅な短縮に繋がることを示している。

以上の計算手法は、今後の洪水氾濫のリアルタイム予測、氾濫危険度の多数の試行錯誤計算、ハザードマップ作成のための精細解析、などに大きく寄与するものと考えられる。

2. 安定化数値解析による崩壊土塊の到達範囲予測

筆者は、集中豪雨や地震時の斜面崩壊に伴う土砂災害の対策立案に資するため、斜面から平地を移動する土塊の運動および到達範囲（被害範囲）の予測信頼性向上を目指した新しい解析手法を提案している。

筆者の解析手法は、既存研究を参考に土塊間隙中の水圧効果を考慮したクーロン混合モデルの導入、崩壊土塊の運動開始・停止に関する物理的に正確な条件の計算方法の導入を行うと共に、三次精度風上スキームの導入、負値の流動深に起因する数値不安定性を防止するための格子流出量修正法の導入を行い、従来実用評価に利用されている数値モデルの再現性を大きく向上したものとなっている。

提案手法の有効性は、斜面模型実験や既報実験データ、さらに実際の土砂崩壊事例を利用して検証されている。まず、著者の行った模型実験で得られた斜面・水平面上の土塊（乾燥砂）の運動・堆積の実測結果が、測定されたパラメータを用いて本手法により良好に再現されている。また、いくつかの他研究者の斜面模型実験や乾燥粒子流実験等の再現計算から、崩壊土砂流の速度、堆積範囲の経時変化、最終堆積状況が良好に再現されることが示されている。

実際の土砂災害の再現解析では、3つの事例が検討されている。青森県で発生した斜面崩壊の事例では、堆積範囲に関しては、地形や植生の影響等の不確実性があるものの、おおむね現地の実測結果を再現可能であることが示されている。宮城県で発生した流動型地すべりの事例では、計算堆積範囲は実測結果と比較し再現性が良好であることが示されている。さらに、鳥取県における数度の土砂崩落事例に関しては、最後の崩壊時の堆積範囲が、それ以前の崩壊時に対し実験および試行計算により求められたパラメータにより良好に再現可能であることが示されている。また、従来実用に供されているモデルより再現性が大幅に改善していることを示すと共に、導入した格子流出量修正法が土砂崩壊の計算でも安定性向上に大きな効果を有することを定量的に示している。

この解析手法は、今後の斜面崩壊対策策定や砂防施設設計、ハザードマップ作成などにおいて、実用性・信頼性のある予測を行う上で非常に有用なものと考えられる。

以上の内容から、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。

「審査の結果の要旨」の概要

1. 課程・論文博士の別 論文博士
2. 申請者氏名 張 馳 (ちょう ち)
3. 学位の種類 博士 (工学)
4. 学位記番号 博士 第 号
5. 学位授与年月日 平成 年 月 日
6. 論文題目 洪水氾濫・土砂崩壊シミュレーションの安定性・信頼性改善手法の開発
7. 審査委員会委員 (主査) 東京大学 助教授 登 坂 博 行
東京大学 教 授 大久保 誠 介
東京大学 教 授 玉 木 賢 策
東京大学 助教授 徳 永 朋 祥
東京大学 講 師 定 木 淳
筑波大学 教 授 宮 本 邦 明
8. 提出ファイルの仕様等 提出ファイル名 使用アプリケーション OS
文書ファイル 張馳・要旨概要.doc word Windows XP
テキストファイル 張馳・要旨概要.txt Windows XP