

降雨浸透・流出過程および土石流発生・流下・氾濫過程の一体型の数値解析法

国立研究開発法人土木研究所 ○山崎祐介, 清水武志, 石井靖雄

1. はじめに

土石流による被害の防止・軽減のためには、土石流の発生時期や氾濫範囲を推定する必要がある。土石流の氾濫範囲は、流出解析などにより土石流の流量を計算し、それを二次元氾濫計算領域の氾濫開始地点に境界条件として与えるという方法により推定されている^{1),2)}など。

近年、降雨や降灰厚分布等の時間・空間分解能が高く、かつリアルタイム性の高いデータを得られる環境が整いつつある³⁾ことから、これらの情報を有効活用し、土石流の氾濫リスク評価のさらなる精度向上を図るため、土石流氾濫モデル（以降、解析モデルという）の開発に取り組んでいる。解析モデルは、地形モデル、降雨流出モデル⁴⁾、土石流流下モデル⁵⁾⁻⁸⁾、および土石流氾濫モデル⁵⁾⁻⁸⁾から構成され、降雨流出、土石流の発生、流下、および氾濫までの過程を結合して扱うことを図っている。

本稿は、解析モデルを提案し、1990年7月に九州北部で発生した豪雨時において、阿蘇市一の宮町の古恵川で発生した土石流氾濫に適用し、その適応性について検討するものである。

2. 解析モデル

2.1 地形モデル

地形モデルは、流域地形モデルと氾濫原地形モデルから構成されている。流域地形モデルは、降雨流出モデルおよび土石流流下モデルの計算領域であり、斜面系と河道系によって構成されている。斜面系は直角座標上に等分割されたグリッドセルで表現され、河道系は隣接する周囲8方向のグリッドセルの中心を結ぶ線分で表現されている。河道の上流端は、ある閾値以上の集水面積を持つグリッドセルであり、最急勾配方向の下流側のグリッドセルに接続していき、下流端に至る。河道の幅・深さは、グリッドセルのサイズから独立して設定することが可能である。氾濫原地形モデルは、等分割されたグリッドセルで表現されている。

降雨流出モデルおよび土石流氾濫モデルは平面2次元座標を用いて表現され、土石流流下モデルは、1次元座標を用いて表現されている。

2.2 降雨流出モデル

降雨流出モデル⁴⁾は、流域斜面において、表土層の湿潤・乾燥過程、飽和側方浸透流（以降、浸透流という）および表面流の発生・流下過程の計算を行う。表面流および浸透流には、それぞれマニング則およびダルシー則が適用されている。河道が設定されているグリッドセルにおいては、越流公式⁹⁾にて河道への流出量を計算し、土石流流下モデルに境界条件として与えている。

2.3 土石流流下モデル

土石流流下モデルは、斜面からの表面流および浸透流による流入量を境界条件とし、土石流の侵食・堆積をとまなう流下過程の計算を行う。土石流の発生は、河床堆積物に無限長斜面の安定解析^{4),10)}を適用し、斜面からの流入量により不安定となった場合に、その地点の堆積物の全層が流動化するものとする。流動化した堆積物には、

土石流の支配方程式⁸⁾を適用している。土石流の形成と規模の決定機構に重要な役割を果たす、微細砂の流体相への遷移現象^{11),12)}を考慮するため、質量保存則は、固相として流れを支配する粗粒砂と、水とともに流体相として挙動する微細砂に分けて記述されている^{7),8)}。

土石流の流下過程において、土石流の表面標高が地盤標高を上回った地点では、越流公式⁹⁾により土石流の溢流量を算出し、これを土石流氾濫モデルに境界条件として与えている。本解析モデルにおいて、氾濫発生地点は、土石流が流路を流下していく過程で、土石流の表面標高と流路側岸の地盤標高によって定まる。

2.4 土石流氾濫モデル

土石流氾濫モデルは、河道から溢流した土石流の氾濫過程の計算を行う。土石流の支配方程式⁸⁾は、平面2次元座標における表現であることを除き、土石流流下モデルの支配方程式と同様である。

3. モデルの適用

1990年7月の豪雨により、阿蘇市一の宮町では古恵川から土石流が氾濫し、土砂災害が発生した。この災害においては、災害の発生時刻、土石流の痕跡、氾濫範囲や氾濫した土砂量に関する調査結果¹³⁾がある。これらの情報を用いて、土石流流出および土石流氾濫の再現性の検討を行った。

3.1 対象現象

気象庁アメダス阿蘇乙姫地点の雨量データによると、最大時間雨量は、7月2日9時から10時の67mm、24時間雨量は448mmである。坂梨地区および松原橋には9時20分に土石流が到達した¹³⁾。また、阿蘇古恵川で氾濫した土砂の総量は36万m³と推定されている¹³⁾。また、後述の図-1の(★)点におけるピーク流量は、痕跡から960m³/sと推定されている¹³⁾。

3.2 計算に用いたデータ

計算に用いたデータと条件は次の通りである。地形データには、国土地理院数値標高10mを用いており、JGD2011IIの10m解像度に投影変換する際にBilinear補間を行っている。降雨データには、気象庁のアメダス阿蘇乙姫地点の1時間データ用い、計算領域に一样に与えている。土石流の発生・非発生を判定する雨量の時間分解能は、10分程度が必要である¹⁴⁾¹⁵⁾ため、土石流の発生現象を解析する上では、10分データを用いることが望ましいが、本検討では災害当時のデータが存在している1時間データを用いている。

計算に与えた物性値は、一般的な値や火山地域での降雨流出解析事例¹⁶⁾に基づき設定しているが、それ以外は土砂流出量¹³⁾やピーク流量¹³⁾に近い値になるように、次の通り設定している。

- ・降雨流出モデル：空間刻み30m、表土層厚2m、飽和体積含水率0.43¹⁶⁾、残留体積含水率0.045¹⁶⁾、表層浸透能36mm/h¹⁶⁾、下層浸透能200mm/h、飽和透水係数0.001cm/s¹⁶⁾、等価粗度係数0.1¹⁶⁾
- ・土石流流出モデル：距離刻み30m、河道幅15m、堆

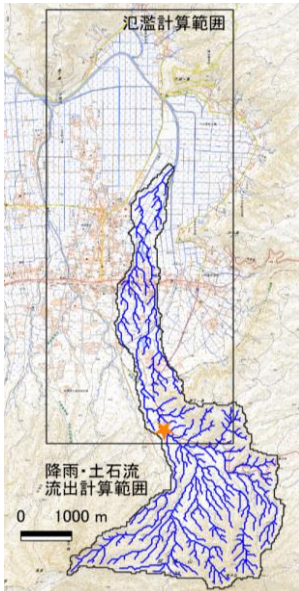


図-1 計算範囲

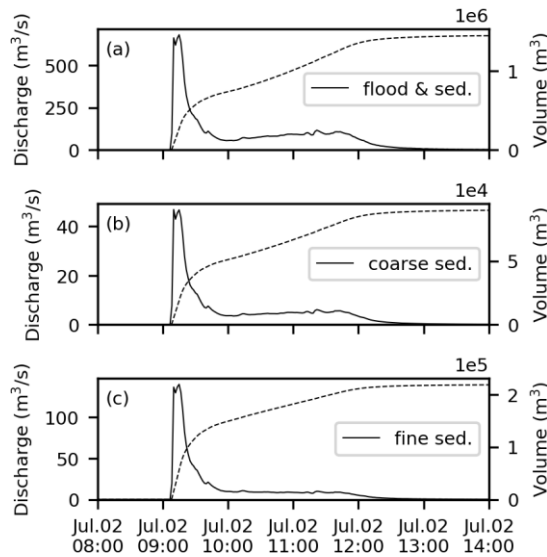


図-2 土石流・土砂の流出量変化



図-3 最大流動深分布

積物厚（侵食可能深）2 m，代表粒径 0.2 m¹⁶⁾，微細土砂含有率 0.4，水の質量密度 1000 kg/m³，砂礫の質量密度 2650 kg/m³，砂礫の内部摩擦角 35°，堆積土砂濃度 0.6

・土石流氾濫：空間刻み 10 m，堆積物厚 0 m，その他は土石流流出モデルと同様である。

図-1 に降雨流出モデルおよび土石流流出モデルと、土石流氾濫モデルの適用範囲，土石流の流出量の抽出地点（★）を示す。

3.3 計算結果

図-2 に土石流（水，粗粒砂，および微細砂の混合体）(a)，粗粒砂(b)，および微細砂(c)の流出量と累積流出量の時間変化を示す。粗粒砂と微細砂の累積流出量は，それぞれ 9 千 m³，220 千 m³ である。これらは，空隙を含んでいない量であるため，空隙率を 0.4 とすると，合計で 380 千 m³ となり，調査結果¹³⁾に近い値である。また，ピーク流量の発生の時刻は，土石流が発生した 9 時 20 分¹³⁾に近い。

図-3 に最大流動深の計算値と調査結果による氾濫範囲を示す。最大流動深は床下とみなす 0.45 m 未満⁹⁾を非表示にしている。計算による流動深は，領域の北端に氾濫水が滞留していること，東岳川に沿って氾濫水が流下している点などに違いが生じている。これは，地形モデルに水路や道路盛土などの地形を表現していけば改善されるものと推定される。

4. おわりに

本稿では，開発した土石流の発生，流動，および氾濫過程を結合して扱う解析モデルを説明するとともに，古恵川の土石流氾濫の計算結果を示した。本モデルの支配方程式の適用範囲には限界があり，継続的な実態の把握とモデルの適用性の検討を行っていく予定である。

参考文献

1) 内田太郎，山越隆雄，清水武志，吉野弘祐，木佐洋志，石塚忠範：河道閉塞（天然ダム）及び火山の噴火を原因とする土石流による被害範囲を速やかに推定する手法，

土木技術資料，Vol.53，No.7，pp.18-23，2011。
 2) 高橋 保，中川 一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，砂防学会誌，44 巻，3 号，pp.12-19，1991。
 3) 山崎祐介，林真一郎，石井靖雄：火山噴火に伴う土石流の氾濫リスク評価の精度向上と、降灰厚分布情報を迅速にリスク評価に反映するシステムの開発，土木技術資料，Vol.61，No.12，pp.8-11，2019。
 4) 山崎祐介，江頭進治，岩見洋一：避難予警報のための土砂災害シミュレーターに関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），72 巻，4 号，pp.1327-1332，2016。
 5) 江頭進治，宮本邦明，伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，Vol.41，pp.789-794，1997。
 6) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム（1），砂防学会誌，Vol.46，No.1，pp.45-49，1993。
 7) 江頭進治，萬矢敦啓，エスカローナ ロシレット，山崎祐介，工藤 俊：土石流形成における微細砂の役割，平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集，B，pp.72-73，2016。
 8) 山崎祐介，江頭進治：豪雨に伴う土砂・流木の生産と流下過程に関する研究，河川技術論文集，第 24 巻，pp.71-76，2018。
 9) 国土交通省，水管理・国土保全局：治水経済調査マニュアル（案）2020。
 10) 内田太郎，盛 伸行，田村圭司，寺田秀樹，瀧口茂隆，亀江幸二：場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所予測に及ぼす影響，砂防学会誌，62 巻，1 号，pp.23-31，2009。
 11) 西口幸希，内田太郎，田中健貴，蒲原潤一，奥山遼佑，日名純也，松原智生，桜井 亘：深層崩壊の発生に伴う土砂移動現象と被害発生位置の実態，砂防学会誌，68 巻，6 号，pp.31-41，2015。
 12) 江頭進治，宮本邦明，竹林洋史：崩壊に伴う土石流・泥流の形成と規模の決定機構，砂防学会誌，68 巻，5 号，pp.38-42，2016。
 13) 橋本晴行，平野宗夫，林 重徳，梅村 順：1990 年 7 月熊本県一の宮町の土石流災害について，水文・水資源学会誌，4 巻，1 号，pp.25-32，1991。
 14) 奥田節夫：土石流の計測法に関する研究，京都大学防災研究所年報，A，15，pp.35-41，1972。
 15) 池田曉彦，水山高久，原口勝則：土石流の発生を支配する降雨量に関する考察，砂防学会誌，60 巻，3 号，pp.26-31，2007。
 16) 田方 智，山越隆雄，栗原淳一，笹原克夫，桜庭雅明，高橋 秀，小野寺 勝：新規細粒火山灰が堆積した流域における分布型流出解析モデルの検討，砂防学会誌，60 巻，4 号，pp.15-24，2007。