

熊本地震時の阿蘇大橋崩落メカニズム解明に向けた 粒子法による土砂災害のモデル化

九州大学 学生会員 ○西田 浩清

九州大学大学院 正 会 員 浅井 光輝

1. 目的

2016 年 4 月に起きた熊本地震により南阿蘇村で崖すべりが生じ、阿蘇大橋が崩落した。それにより重要な交通網が遮断され、その後の援助活動、復旧活動等にも支障をきたした。深夜の震災のため、阿蘇大橋崩落の目撃情報がなく、その崩落メカニズムは未解明な点が多い。これまでの被害調査により、図-1 に示すように崖の 2 か所が大きく崩壊したとされている。崩落パターンとして、

- 1) 上部の土砂のみが降りかかり、阿蘇大橋が崩落
- 2) 下部の土砂崩れにより、阿蘇大橋の基礎部分が喪失し、阿蘇大橋が崩落
- 3) 上部の土砂崩れが下部に到達したとき、下部でも土砂崩れが生じ、阿蘇大橋が崩落

という、3 つのパターンを想定し、その各崩壊メカニズムと被害調査の比較検討を行う方針とした。本研究では、まず崩壊パターン 1) の可能性の検討のため、上部の土砂の流体的挙動に焦点をあて、土砂を高粘性流体として扱い、粒子法の一つである ISPH 法を用いてシミュレーション結果より流体力の見積もりを行うこととした。

2. 解析手法

2.1. 安定化 ISPH 法

ISPH 法は非圧縮性流体解析用の手法で、支配方程式を予測子修正子法に基づく射影法と呼ばれる分離型解法によって時間離散化し、その分離された方程式を SPH 法の基礎式に基づいて空間離散化を行う手法である。本研究ではナビエ・ストークス方程式と連続の式を支配方程式として用いた。ISPH 法の離散化された圧力ポアソン方程式に粒子分布の平滑化に作用する項を付加し、粒子分布の不均一性に起因する空間近似作用素の精度低下を防ぐ安定化 ISPH 法という手法を用いる。¹⁾ 安定化 ISPH 法では、圧力ポアソン方程式は次式(1)のように離散方程式を定める。



図-1 土砂災害が起きた山の航空写真

$$\langle \nabla^2 P_i^{n+1} \rangle = \frac{\rho_i^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{v}_i^* \rangle + \alpha \frac{\rho_i^0 - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2} \quad (1)$$

なお、 α は 0~1 までの値をとる安定化パラメータであり、本解析では $\alpha=0.01$ とした。

2.2. 速度評価手法

順来の ISPH 法では(2)式の様に速度を陽的に解く。

$$\frac{\mathbf{v}^* - \mathbf{v}^n}{\Delta t} = \nu \nabla^2 \mathbf{v}^n + \mathbf{g} \quad (2)$$

そのため、(3)式に示す陽解法の数値安定性の条件を満たさなければならないので、高粘性流体を扱う際、時間刻みを微小に設定しなければならず、膨大な計算時間を要する。そこで陽解法ではなく陰解法で速度を評価する手法に改良することで、高粘性流体の解析を可能とする。

$$\Delta t \leq D \frac{l^2}{\nu} \quad (3)$$

ここで、 l は粒子間距離、 D は拡散数である。拡散数は経験的に 0.2~1.0 を用い数値安定性を保つことができる。²⁾

(2)式の右辺の速度を仮の速度に置き換えて, (4)の示す, 陰解法の式に書き換える.

$$\frac{\mathbf{v}^* - \mathbf{v}^n}{\Delta t} = \nu \nabla^2 \mathbf{v}^* + \mathbf{g} \quad (4)$$

これを SPH 法の基礎式を用いて, 解くことで仮の速度を評価する.

3. 解析モデル

国土地理院から入手した熊本地震前の 5m メッシュの DEM データ(構造格子状の標高データ)と国土交通省九州地方整備局から入手した熊本地震後の 1m メッシュの DEM データから, 地形と土砂のモデルを作成した.

3.1. 地形のモデル

熊本地震後の 2 次元格子状に並ぶ高さのデータをもった点群データを三角形要素でつなぎ, STL データ(3D-CAD の表面メッシュデータ)に変換した. その STL データから粒子間隔 2m とし, 地形の境界部分を定義するための壁粒子を生成した.

3.2. 土砂のモデル

熊本地震後の 1m 間隔の DEM データを, 熊本地震前の DEM データの評価点(5m メッシュ)で補間をし, 地震前後で座標を一致させ, その差をとることで, 土砂量の見積もりをした. 具体的には地震前後の地表面をそれぞれ STL 面で定義し, 両表面の間に 2m 間隔の粒子を配置することで, 土砂部分(粘性流体としてモデル化する領域)の粒子モデルを作成した. 国土地理院による土砂量の見積もりでは約 27 万立方メートルに対し, 今回作成したモデルは約 24 万立方メートルでありほぼ同等の見積もりとなっていることを確認している.

4. 解析結果

土砂が流体として流動する過程を定性的に確かめるため, まず土砂を水と同一の粘性として扱い, 土砂モデルの挙動を確認した. 図 3, 図 4 にはその領域を黒線で示しているが, 解析結果もその範囲内にとどまっているものと判断した.

5. 結論

地震前後の航空測定の結果より, 南阿蘇村での土砂量を見積もり, 粒子法による数値解析を通して, その流動軌跡について被害調査と比較した. 今後は適切な粘性値を入力し, 阿蘇大橋に作用した流体力の見積もりへと発展する予定である.

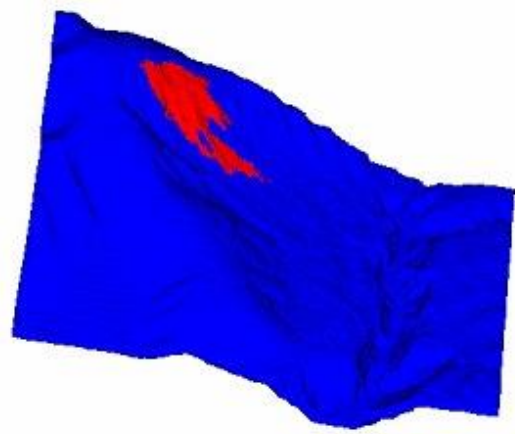


図-2 土砂と地形の粒子モデル
(赤色：土砂 青色：地形)

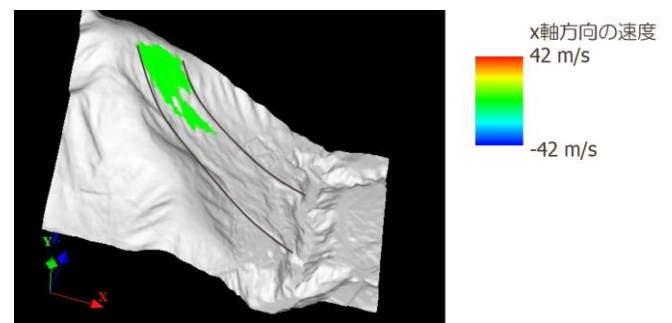


図-3 土砂の挙動(土砂すべり前)

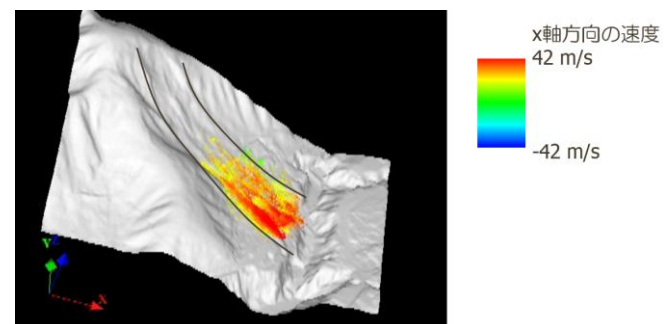


図-4 土砂の挙動(土砂すべり後)

参考文献

- 1) Mitsuteru Asai, Abdelraheem M. Aly, Yoshimi Sonoda and Yuzuru Sakai : A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, *International Journal for Applied Mathematics*, Vol.2012, Article ID 139583, 24 pages, 2012.
- 2) 福澤洋平, 富山秀樹, 柴田和也, 越塚誠一 : MPS 法による高粘性非ニュートン流体の流動解析, *Transactions of JSCES*, Paper No.20140007