

MPM による阿蘇大橋に作用した崩壊土砂の衝撃力評価

○東北大学工学部建築・社会環境工学科	学生会員	吉田 昂平
東北大学 (災害科学国際研究所)	正会員	山口 裕矢
東北大学 (災害科学国際研究所)	正会員	森口 周二
東北大学 (災害科学国際研究所)	正会員	寺田 賢二郎

1. はじめに

2016 年 4 月の熊本地震本震により、阿蘇大橋が落橋したが、崩壊土砂により橋の主要部が流され、当時の映像などもないため、落橋の原因は未だに解明されていない。今日までに様々な研究が進められ、ようやく FEM 解析¹⁾ などから落橋の主な要因がいくつかにしぼられてきた。しかし、その要因の中で崩壊土砂の影響については FEM 解析では斜面崩壊の再現は難しく、橋に対する静的な荷重の検討にとどまっている。本研究では、粒子法の一つである MPM(Material Point Method)を用いて、当時の斜面崩壊の再現を試みる。また、その解析の妥当性についても砂の流動実験と比較し、議論する。

2. 解析手法

MPM では、粒子と格子による離散化が行われている。そのアルゴリズムを図 1 に示す。粒子が質量や体積、速度、変形勾配などの物理量を持ち、求解は格子点上で陽解法によって行う。また、この粒子と格子は内挿関数によって補間することで結び付けられている。各ステップにおいて、粒子から格子へのマッピング、格子上で計算、格子から粒子へのマッピング、格子のリセットを行い、これを繰り返すことで変形を計算する。また、構成則は Hencky 超弾性モデルと Drucker-Prager の降伏基準に基づく関連流れ則を採用する。

3. 砂の流下実験

3.1 実験概要

MPM の検証の対象としたのは森口ら²⁾の流下実験である。実験装置の概要を図 2 に示す。実験装置の奥行き方向は 30cm である。また、用いた砂は十分に乾燥した豊浦砂である。この砂を実験装置上部から斜面上を流下させ、下部の測定器で衝撃力を測定する。斜面上は同様の砂で覆うことで、摩擦を表現している。また、斜面の傾きは可変であり、45～65 度に変化させて衝撃力を測定している。

3.2 解析条件・解析モデル

実験装置をもとに本検証に用いる解析モデルを作成した。グリッドは、0.01m×0.01m とし、平面ひずみ条件で 2 次元解析を行った。また、初期状態における砂の位置では、各グリッドに 9 個の粒子 (3×3) を配置し、初期応力状態を再現するため、砂を流す前に 10 秒間のローディングを行った。底面及び測定器の位置ではノンスリップ条件を採用した。傾斜角は 45 度、50 度、55 度、60 度に変化させ、この 4 ケース

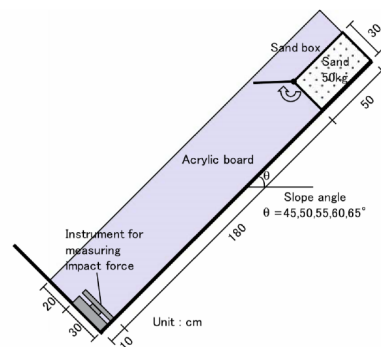


図-1 実験装置

について検証し、重力加速度は各傾斜角に対応するように水平方向と鉛直方向に分解した。

入力パラメータは、弾性係数を 2MPa、ポアソン比を 0.3、内部摩擦角を 35 度、粘着力を 0Pa、ダイレイタンシー角を 0 度とした。弾性係数とポアソン比は、阿部らの研究³⁾を参考に決定した。また、内挿関数については格子境界付近で安定させるために GIMP(Generalized Interpolation Material Point Method)を採用した。

3.3 解析結果

図 3 に傾斜角 45 度の場合の時刻歴を示す。図 4 に示すグラフは縦軸が衝撃力 (N)、横軸が時間 (s) になっている。これらの解析結果から、衝撃力の最大値が実験値と概ね一致していることが分かる。しかし、粒子が衝突後に測定器付近に堆積した状態での作用力が小さい。これは、固体として解析したために堆積した砂のせん断抵抗が実際よりも大きいことが原因として考えられる。このような問題はあつたものの、橋に対する土砂の衝撃力を対象とする場合、せん断抵抗の影響は小さいと考えられるため、最大の衝撃力のみから影響評価を十分行えるものと判断した。

4. 実地モデルにおける数値解析

4.1 実地モデル

国土地理院の数値標高モデルから実地モデルを作成した。崩壊部分に対しておおよその崩壊量 50 万 m³ 程度を設定し、この部分のパラメータを変化させることで斜面崩壊の再現を試みる。中村ら⁴⁾の研究を参考に決定したパラメータを表 1 に示す。阿蘇大橋の位置には境界を与え、上面での衝撃力

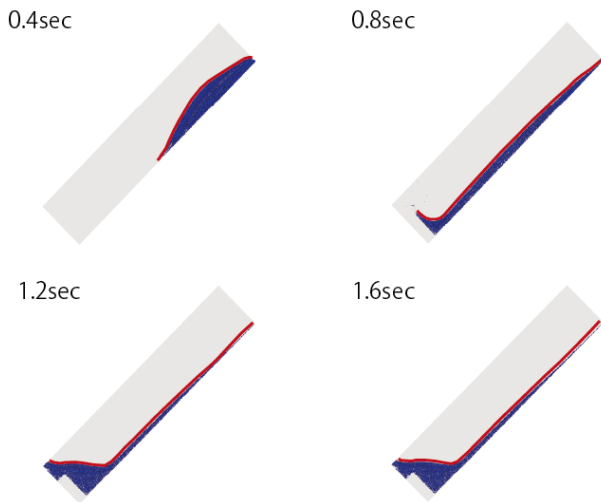


図-2 傾斜角 45 度における移動距離に関する時刻歴

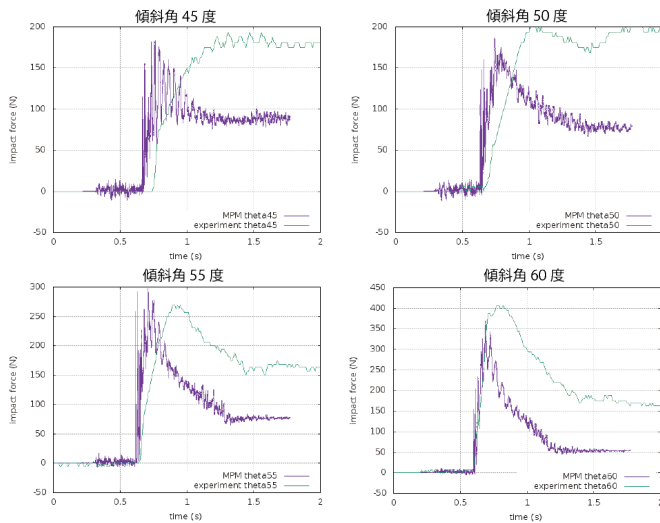


図-3 衝撃力の比較 青：解析結果 灰色：実験結果
表-1 入力パラメータ

	非崩壊部分	崩壊部分
弾性係数 (Pa)	2.0×10^6	2.0×10^6
ポアソン比	0.3	0.3
粘着力 (kPa)	150	0
内部摩擦角 (度)	35	10
ダイレイタンシー角 (度)	0	0

を算定した。グリッドは $5\text{m} \times 5\text{m} \times 5\text{m}$ の立方体であり、各グリッドに 8 粒子 ($2 \times 2 \times 2$) 配置した。

4.2 解析結果

崩壊後の様子を図 5 に示す。ここでコンター図は塑性変形である。衝撃力の解析結果を図に示す。20 秒付近で土砂が衝突し、最大値 60MN を示していた。初期状態で橋の端部に粒子が存在していたため、崩壊土砂の影響のみを評価するため、5 秒から 15 秒における作用力の平均を基準とした。概算した設計荷重 (B 活荷重) 約 4.4MN と比較すると、10 倍以上大きな値となっており、橋の崩壊に影響があったものと推察できる。しかし、内挿関数が線形であるため格子境界における不安定性の影響で作用力が大きく算定されている

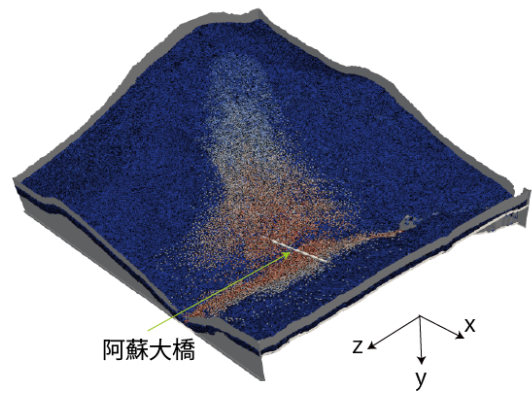


図-4 崩壊後の様子

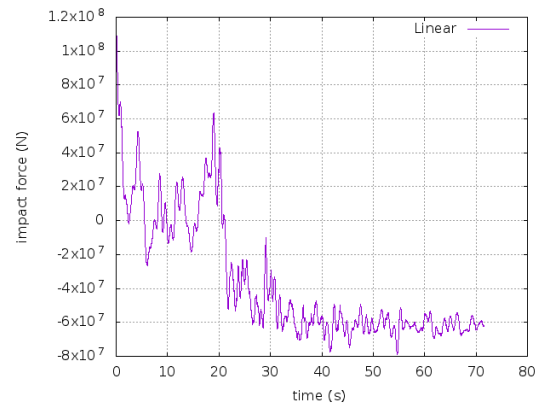


図-5 線形補間における作用力

可能性があるため、GIMP での解析が必要である。

5. 結論

砂の流下実験における再現解析では、MPM により構造物に対する最大衝撃力を算定することは可能である一方で、砂を固体として解析することに限界があることが明らかになった。これを改善するためには、流体として解析することの必要性が示唆される。また、パラメータや粒子数を変化させ、それらの影響を考察する必要がある。実地モデルの数値解析では内挿関数に線形関数を用いたため、格子境界付近で不安定になってしまったと考えられる。それを改善するためには GIMP での解析が必要となる。また、現状では精度も十分とは言えず、粒子数を増やす必要がある。

参考文献

- 1) 原倅平, 浅井光輝, 磯部大吾郎, 田中聖三: ASI-Gauss 法による阿蘇大橋崩壊のプロセスの検証計算工学講演会論文集, Vol.23, 2018.6.
- 2) Suji Moriguchi, Ronald I. Borja, Atushi Yashima, Kazuhide Sawada.: Estimating the impact force generated by granular flow on rigid obstruction, Acta Geotechnica, pp.57-71, 2009.
- 3) 阿部慶太, JOHANSSON Jorgen, 小長井一男: MPM を応用した高速長距離土砂流動の運動範囲予測のための数値解析手法土木学会論文集 C, Vol.63, No.1, 93-109, 2007.1.
- 4) 中村晋, 阿部慶太, 渡辺健治, 中島進: 実験による崩壊土の流下挙動と衝撃作用の分析および MPM による再現解析土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.74, No.3, 259-274, 2018.