

## MPM を用いた崩壊土砂の衝撃作用の分析

|                 |      |        |
|-----------------|------|--------|
| ○東北大学工学研究科      | 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る、阿蘇大橋崩壊の落橋の原因は未だに解明されておらず、特に崩壊土砂の影響については FEM 解析による斜面崩壊の再現は難しく、橋に対する動的な荷重の検討が求められている。本研究では、砂の流下実験の再現解析を通して、粒子法の一つである MPM(Material Point Method) を用いた衝撃力による構造物に対する影響評価について検討するとともに、当時の斜面崩壊を再現し、阿蘇大橋に作用した衝撃力の算定を試みる。

### 2. 解析手法

MPM では、粒子と格子による離散化が行われる。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。各時間ステップにおいて、粒子から格子へのマッピング、格子上での計算、格子から粒子への補間、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、構成則は有限変形に基づく弾塑性モデルとし、弾性域では Henky 超弾性モデルを、塑性判定には Drucker-Prager の降伏基準を採用した。また、過剰なダイレイタンシーを抑制するため、流れ則には非関連流れ則を採用し、硬化が発生しない完全塑性とした。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) を採用する。

### 3. 砂の流下実験

#### 3.1 実験概要

森口ら<sup>1)</sup>の流下実験を MPM の検証の対象とする。その実験装置の概要を図 2 に示す。装置の奥行き方向は 30cm である。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には、各グリッドに 9 個の粒子 (3 × 3) を配置し、底面及び測定器の位置ではノンスリップ境界を採用した。衝撃力は測定位置で

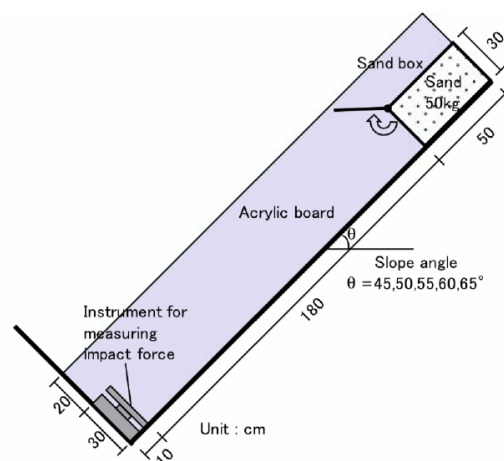


図-1 実験装置

の傾斜方向の格子節点作用力を合算することで算定した。傾斜角を変化させ、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、Poisson 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。

#### 3.3 解析結果

図 2, 3 では、作用力の時刻歴は実験値とほぼ一致しており、ある程度の精度で再現できているといえる。一方で作用力の最大値は、全ケースにおいて実験値と比較して 2 倍以上大きくなった。これは既往の研究<sup>2)</sup>と同様の傾向であり、MPM によって土砂流動の衝撃力を評価する上での課題と認識されている。本検証で用いた弾塑性モデルでは、粒子の回転によるエネルギー損失は表現できないことなどが原因と考えられ、流下する砂のように粒子間距離が広がり粒子単体のエネルギー散逸が無視できなくなる場合は、それらを考慮したモデル化が必要である。

### 4. 実地のモデルを用いた数値解析

#### 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。崩壊部分を設定し、斜面崩壊の再現を試みる。崩壊部分は弾性係数 1MPa、Poisson 比を 0.3、粘着力を 20kPa、内部摩擦角を 15 度に設定した。また、非崩壊部分は弾性体とし、弾性係数 100MPa、Poisson 比を 0.3 とした。阿蘇大橋の橋梁は格子の境界条件として表現し、上面での鉛直下向き方向の

キーワード：熊本地震 阿蘇大橋 MPM 衝撃力 崩壊土砂の動的解析

〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133

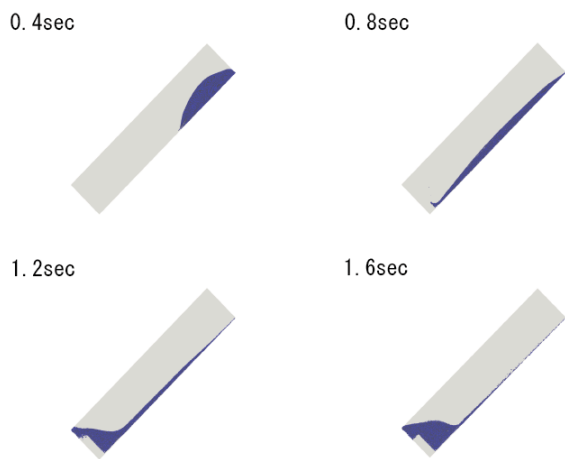


図-2 傾斜角 45 度における移動距離に関する時刻歴  
傾斜角 45 度 傾斜角 50 度

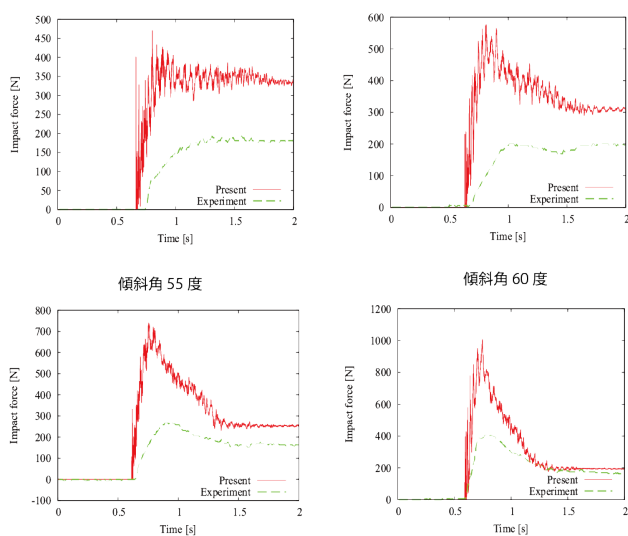


図-3 衝撃力の比較 赤：解析結果 破線：実験結果  
格子節点作用力を合算することで衝撃力を算定した。グリッドは 2.5m×2.5m×2.5m の立方体であり、各グリッドに 8 粒子 (2×2×2) 配置した。

## 4.2 解析結果

崩壊後の様子を図 4 に、衝撃力の時刻歴応答を図 5 に示す。25～30 秒付近で土砂が衝突し、最大値 25MN を示している。この値を  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$  倍した値 8.3～12.5MN が実際に橋に作用した衝撃力と推測されるが、これは原ら<sup>3)</sup>の FEM 解析で作用させた静的荷重 34MN は下回っており、FEM 解析では橋が崩壊に至らなかったことから、崩壊土砂の衝突が阿蘇大橋崩壊の一因となった可能性は低いと考えられる。

## 5. 結論

MPM による砂の流下実験の再現解析では、作用力の時刻歴は概ね一致したが、衝撃力を実際よりも 2～3 倍程度大きく評価してしまうことが確認された。これを改善するためには、粒子の回転などによるエネルギー損失を考慮したモ

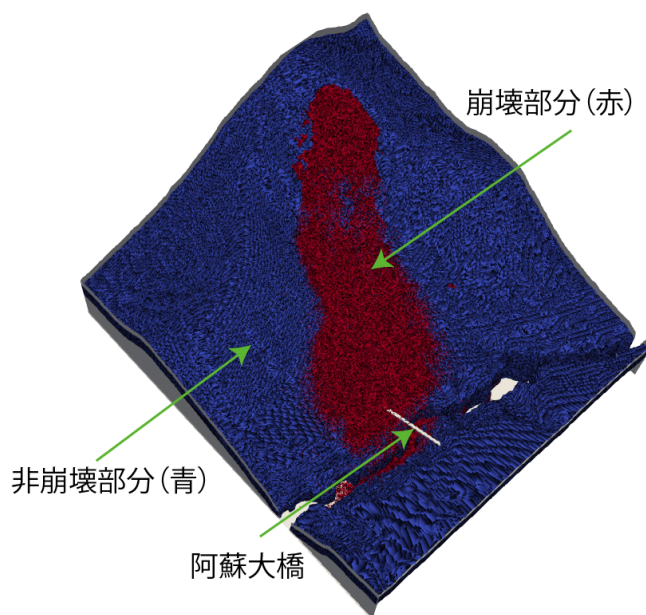


図-4 崩壊後の様子

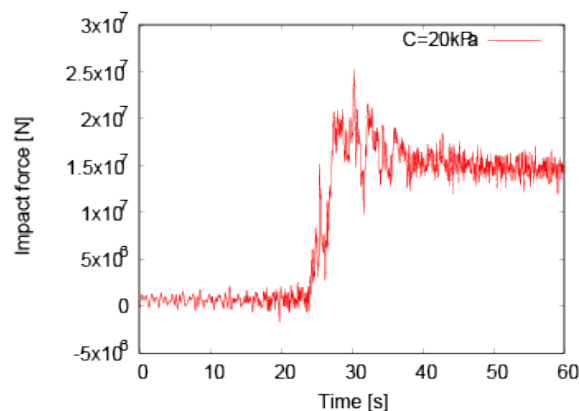


図-5 作用力の時刻歴  
デル化が必要である。実地モデルの数値解析では、算定した作用力を  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$  倍することで、実際に橋に作用した衝撃力を推定したが、この値は実験の再現解析から得られた経験的な値であり、解析規模が拡大した場合や解析対象が土砂になった場合の影響についてはさらなる検討の必要性が指摘される。

## 参考文献

- 1) Suji Moriguchi, Ronaldo I. Borja, Atushi Yashima, Kazuhide Sawada.: Estimating the impact force generated by granular flow on rigid obstruction, Acta Geotechnica, pp.57-71, 2009.
- 2) 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.
- 3) 原侔平, 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.