

不連続変形法と粒子法による固体と流体の連成数値解析に関する研究

関西大学大学院理工学研究科	学生会員	○久野 実希子
基礎地盤コンサルタンツ株式会社	正会員	三木 茂
関西大学環境都市工学部	フェロー	大西 有三
サンコーコンサルタント株式会社	正会員	佐々木 猛

1. はじめに

我が国は、全国土の約7割を山地・丘陵地が占め、地震や火山活動も活発である上に台風や豪雨等に見舞われやすい。特に、近年では豪雨の頻度が上がり、全国各地で土砂災害が発生している。こうした問題に対して、国や各研究機関が被害を予測・防止するための解析が行われてきたが、その解析は充分満足できるものではなかった。その理由の一つとして、このような災害は何らかの破壊現象を伴うが、その破壊現象を連続体の手法で解析しようとしたためと考えられる。

そこで、本研究では不連続性体の解析手法として確立している不連続変形法（DDA）を用いて土石流の解析を試みた。また、豪雨に伴う斜面崩壊、土石流では、固体粒子が動くと共に、間隙に存在する水も運動する。この水の動きを解析するために、メッシュフリー解析法の一つである粒子法の MPS 法を採用した。本研究では、不連続変形法と粒子法の両者を組み合わせて、固体と流体の相互作用の算定方法に工夫を凝らすことで、土石流に対する新たな解析手法の検討を行った。

2. 解析手法

本研究では、土石流を陰解法に基づき解が安定しやすい不連続変形法（DDA）を用いて解析する。DDA の基本式は、式(1)に示すハミルトンの方程式をもとに、固体の接触を含む全体系の運動式を、エネルギー最小化原理により釣り合い方程式を求めて定式化するものである。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad \left(\dot{u} = \frac{du}{dt}, \ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2} \right) \quad (1)$$

ここに、M：質量マトリックス、C：減衰マトリックス(= ηM)、 η ：粘性係数、K：剛性マトリックス、F：外力ベクトル、t：時間、u：ブロック重心における変位、 $\dot{u}$ ：変位速度、 $\ddot{u}$ ：変位加速度である。

また、本研究では、境界条件が刻々変わる状態での水の動きを粒子法により追跡する。粒子法による流体力学のコンピュータシミュレーションでは、空間と時間の離散化を行う。空間の離散化では、流体を複数の粒子の集まりとして表す。1 個の粒子はある大きさの流体の塊であると考え、次に時間の離散化では、水粒子が少しずつ動くように時間間隔は十分短くし、その時間間隔ごとに、水粒子の位置を計算する。流体の運動方程式は、式(2)に示すナビエーストークス方程式である。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2 u + g \quad (2)$$

ここに、u：速度、t：時間間隔、 D/Dt ：ラグランジュ微分、 ρ ：密度、P：圧力、 ν ：動粘性係数、g：重力加速度ベクトル、 ∇ ：勾配、 ∇^2 ：ラプラシアンである。

DDA の土石流解析への適用に当たっては、岩塊間の流水の影響を考慮する必要がある。そこで、斜面を流下する土石流中の岩塊について図 1 に示すような領域を定義した。この領域内を水粒子が通過すると、内田、伯野(1990) の方法に従い、下式で与えられる流水と DDA ブロック（岩塊）の速度差の 2 乗に比例する力が DDA ブロック（岩塊）に作用するとした。

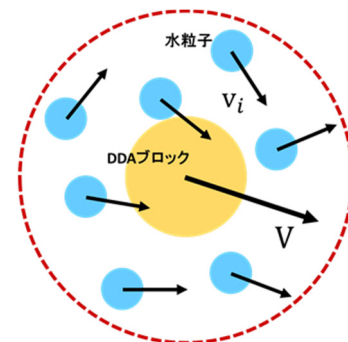


図1 DDAブロックに作用する流体力

キーワード 不連続変形法、粒子法、連成解析

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 関西大学・地盤環境工学研究室 TEL 06-6368-0837(6507)

$$F_x = C_D a \rho_w \frac{|V_x - v_x|(V_x - v_x)}{2} \quad (3)$$

$$F_y = C_D a \rho_w \frac{|V_y - v_y|(V_y - v_y)}{2} \quad (4)$$

ここに、 F_x 、 F_y ：水から岩粒に働く x 方向、y 方向の抗力、 V ：岩塊の速度、 v ：流速、 C_D ：抗力係数、 a ：流れ方向への粒子の投影面積、 ρ_w ：水の密度である。

3. 解析条件と結果

仮想した粒子法解析モデルは、降雨が幅 100m 高さ 38.4m の凸凹斜面上の河川を流下するモデルである（図 2 参照）。DDA 円（剛体）要素解析モデルは、粒子法解析モデルの斜面の上部に、大小様々な円要素（剛体）を配置したものである（図 3 参照）。粒子法解析で得られた流速を作用させる効果を確認するために、DDA 円要素解析を行った。なお、浮力については、円要素単位体積質量から 1000kg/m^3 引くことで考慮したが、粒子法解析で得られる水圧については考慮していない。DDA 解析における流速分布は、粒子法解析において得られた水粒子の位置とその位置における流速で与えた。

粒子法解析結果を図 2、流速を与えない場合の解析結果を図 3、粒子法解析結果で得られた時間変化（0.10 秒ごと）流速分布を与えた解析結果を図 4 に示す。なお、水粒子、DDA ブロックそれぞれの速度をベクトルで表している。図 3 と図 4 を見ると、最初は比較的似ているが、間もなく流速を与えた円要素は速度が速くなり、水流に沿って移動している。また、図 3 では最初の凹斜面に差し掛かると、速度が落ちているが、図 4 では比較的速度を保ったまま凸斜面の部分に到達しており、円要素の落下距離も大きい。

4. まとめ

本研究では、水の影響を簡易的に表現し、粒子法解析で得られた流速を用いて、DDA 円（剛体）要素解析を行った。その結果、流体力の効果を確認することができ、土石流の解析に適用できる可能性があると言える。今後の課題として、粒子法解析で得られる水圧についても考慮した解析を行い、精度の向上が必要である。

参考文献

- (1) 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hua Shi, 不連続性岩盤解析実用化研究会：不連続変形法(DDA), 丸善株式会社, 2005.
- (2) 越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平：粒子法入門, 丸善出版株式会社, 2014.
- (3) 内田吉彦, 伯野元彦：粒状体シミュレーションによる岩屑流・土石流の解析, 地震研究所彙報, Vol.65, pp.321-411, 1990.

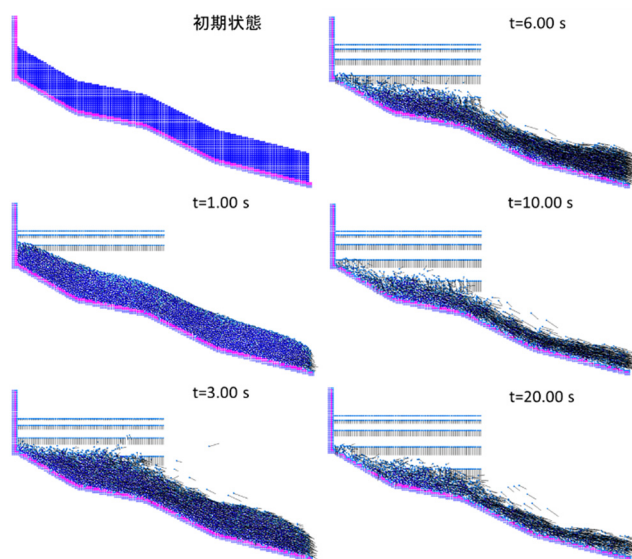


図2 粒子法解析結果

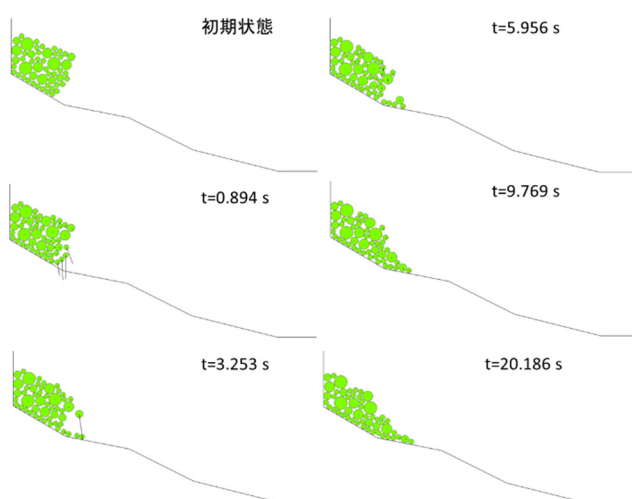


図3 粒子法解析での流速を与えない解析結果

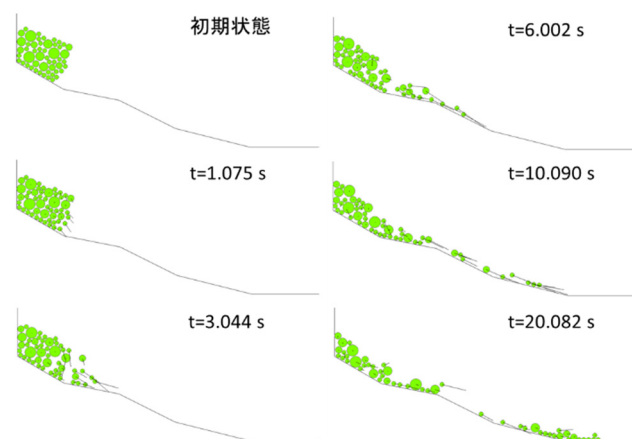


図4 粒子法解析結果で得られた時間変化(0.10秒刻み)流速分布を与えた解析結果