

粒状体流れを模擬した一次元スティックスリップモデルの速度依存性

名古屋工業大学 学生会員 ○山崎 友裕
名古屋工業大学 正会員 前田 健一

1 背景と目的

我が国では、毎年多くの土砂災害が発生し、莫大な被害を被っている。効率的な砂防対策を考えるために、土石流の内部構造に着目し、石礫流れを粒状体として計算する個別要素法で再現した。図-1(a)は解析結果で、色の濃い粒子ほど大きな応力が分担している。内部では、色の濃い粒子が連なった応力鎖と、それが発生と消滅を繰り返すことにより、流れ方向に発生する塑性応力波が存在し¹⁾、この塑性応力波は粒状体流れ全体の速度とは違う速度で伝播すること²⁾(図-1(b))、 V と u の2つの速度の大小関係で流れの区分が可能ということが明らかになった。本研究では粒状体流れの内部挙動の基本的な性質を捉えるために、一次元スティックスリップモデル^{3), 4)}(多質点モデル)を導入し、粒子流れの比較的先端部分の挙動の比較と考察を行った。ここで、スティックスリップとは摩擦により一定の力を与えても物体の速度が時間経過により増減する現象である。以前の報告⁵⁾にて、粒状体流れにおいて確認されている特徴的な挙動である、先端では構造が不安定であること、速度が大きいほど構造が不安定であること、傾斜角が安息角付近で挙動が変わること¹⁾といった挙動と一次元スティックスリップモデルの挙動を比較したことから、パラメータの影響による挙動の変化を本報告で扱う。

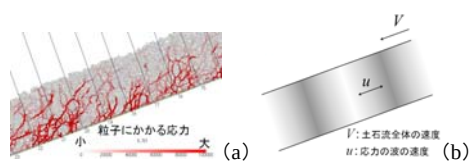


図-1 粒子流れ中の応力鎖と応力波：
(a) DEM 解析結果；(b) 模式図

2 多質点モデルの概要

図-2のような、土石流内の石礫の塊を摩擦のある質点で、その弾性をばねで表現し、それらを連結させることで粒状体流れの一次元スティックスリップモデル(多質点モデル)とした。基本のパラメータは実際の石礫を考慮し表-1のように設定した。また、石礫間において引張力は作用しない為、質点間がバネの自然長より

も長くなると、ばねは作用しないものとした。本研究では、平面に置いたモデルを最後尾(図-2左端)の質点(質点番号1)が一定速度 v を保つように力 F を作用させた。モデル全体のマクロ的考察と、質点それぞれに関する質点の速度、質点の合力というミクロ的考察を行った。

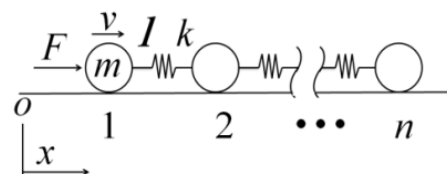


図-2 石礫流れのスティックスリップモデル

表-1 解析パラメータ

	記号(単位)	数値
全質点数	n (個)	2, 100
質点質量	m (kg)	1000
重力加速度	g (m/s^2)	9.8
ばね定数	k (N/m)	$1.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8$
ばねの自然長	l (m)	1.0
静止摩擦係数	μ	0.56
動摩擦係数	μ'	0.28, 0.56
載荷時間	t (s)	10
載荷速度	v (m/s)	0.01~5.00
計算刻み	Δt (s)	0.000010

3 解析結果及び考察

3.1 多質点モデルのマクロ的な考察

(1) 挙動に違いによる分類についての考察

図-3にあるように一質点モデルにおいてスティックスリップ挙動を分類したところ、載荷速度 v が小さい場合(図-4(a)領域1)(以降領域1)は規則正しい挙動を示し、載荷速度が大きい場合(図-4(a)領域3)(以降領域3)スティックスリップ挙動を示さない、そしてその中間(図-4(a)領域2)(以降領域2)では、ランダムなスティックスリップ挙動を示すことが分かっている。そこでこの分類を多質点モデルの挙動に当てはめたとところ一質点モデルと同様に分類できた。その多質点モデルの挙動の違いは、各質点の運動量の総和の最大値による分類(図-4(b))と一致し、載荷速度が大きければその分運動量の総和の最大値が小さくなる。

土石流、応力鎖、スティックスリップ

連絡先 名古屋市昭和区御器所町名古屋工業大学 16 号館 227 号室 23418573@stn.nitech.ac.jp 052-735-5497

多質点モデルにおいて、領域2と3の境界では、荷重速度がバネ定数の平方根に比例しているようである。

図-3 一質点モデルにおけるスティックスリップの分類⁴⁾

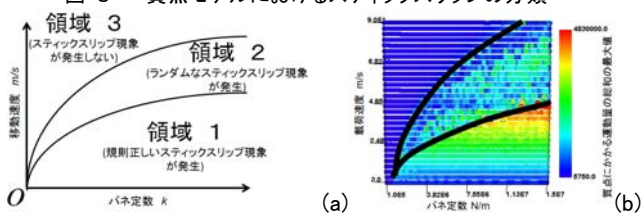


図-4 一質点モデルと多質点モデルの比較; (a) 図-3 におけるスティックスリップの分類⁴⁾; (b) 多質点モデルの挙動の違いによる分類と一質点モデルとの対応; (a, b ともに縦軸: 荷重速度 横軸: バネ定数)

(2) 運動量比にした場合の分類についての考察

図-5のように配色を各質点の運動量の総和と荷重運動量(荷重速度×全体の質量)の比(運動量比)にしたところ、領域1, 2と領域3での分類が出来、領域1, 2において荷重速度を大きくすれば、運動量比は単純増加するものの、ある値で頭打ちに至り、荷重運動量よりも大きな値(領域1, 2の濃色部)を示すことを得た。これは、質点同士が互いに影響し合うためだと考えられる。

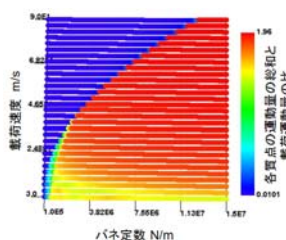


図-5 図-4(b)の配色を各質点の運動量の総和と荷重運動量(荷重速度×全体の質量)の比にしたグラフ

3. 2 多質点モデルのミクロ的考察

(1) 質点の速度に関する考察

質点の速度の最大値は図-6(a)のような分布となった。これを図-6(b), 図-6(c)のように投影したところ、質点の速度の多質点モデル内における最大値について、領域1内においては質点の速度の最大値は直線1に依存し、領域2内において質点の速度の最大値は直線1から直線2に移り、荷重速度が大きい場合、直線2に依存するという関係を得た。

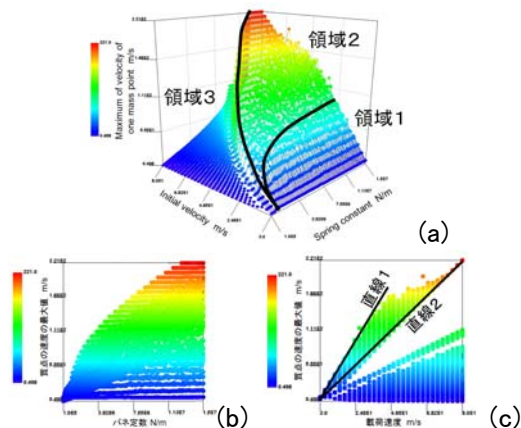


図-6 質点の速度の最大値の分布(縦軸: 荷重速度 横軸: バネ定数 高さ: 質点の速度の最大値); (a) 鳥瞰図; (b) 図(a)を横軸-高さ軸平面に投影した図; (c) 図-6(a)を縦軸-高さ軸平面に投影した図

(2) 一つの質点に作用する合力に関する考察

質点の合力の最大値は図-7(a)のような分布となった。これを図-7(b), 図-7(c)のように投影したところ、領域1内において質点にかかる力の最大値は荷重速度のみに依存し、領域2内において質点にかかる力の最大値はバネ定数のみに依存という関係を得た。

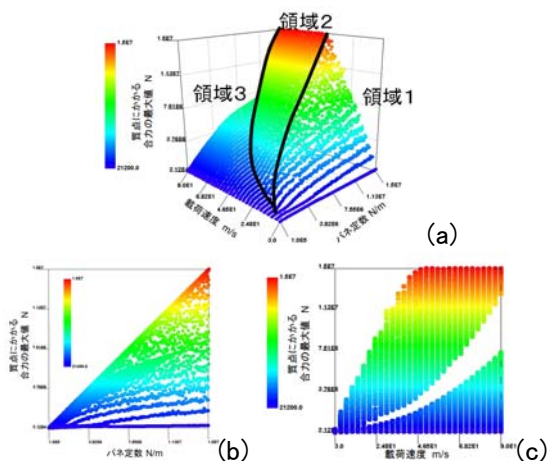


図-7 質点にかかる合力の最大値の分布(縦軸: 荷重速度 横軸: バネ定数 高さ: 質点の速度の最大値); (a) 鳥瞰図; (b) 図(a)を横軸-高さ軸平面に投影した図; (c) 図(a)を縦軸-高さ軸平面に投影した図

4 まとめ

本研究により、多質点モデルは荷重速度及びバネ定数により、その挙動をいくつかに分類することが可能であることを得た。そこから、より複雑な挙動である粒状体流れや石礫型土石流にも荷重速度や物性での挙動の分類が可能であると考えられる。

謝辞: この研究で用いた装置の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B) 21360222 によるものであり、深謝の意を表します。

参考文献: 1) 前田ら: 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011. 2) 前田, 福岡, 館井: 第22年度砂防学会研究発表会概要, pp80 - 81, 2010. 3) B.N.J.Persson: Sliding Friction, pp17 - 25, 1997. 4) 田中 久一郎: 摩擦のおぼなし, pp83 - 94, 1985. 5) 山崎, 前田, 館井: 平成22年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp245 - 246