

名古屋工業大学
名古屋工業大学
国土交通省

学生会員
正会員

○ 山崎友裕
前田健一
館井 恵

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かかっている。それにより、以下のことが明らかになった。

- ・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、伝播していく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。

本研究では粒状体流れの内部挙動の基本的な性質を知るために一次元スティックスリップモデル^{3),4)}を導入し、そのモデルと粒状体流れの内部挙動との比較、検討を行った。

本報告では、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。

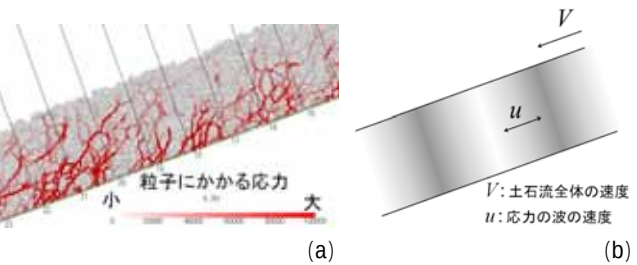


図-1 流れの速度と波速: (a)解析結果; (b)模式図

2 一次元スティックスリップモデルの概要

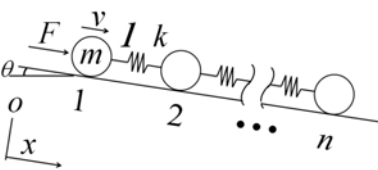


図-2 石礫流れのスティックスリップモデル

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、質点間がばね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。質点1に作用する力 F と変位 x をマクロ挙動、各質点の挙動をミクロ挙動として観察した。傾斜角をつけたケース

も同様に観測した。

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
静止摩擦力	μ	0.56
動摩擦力	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)	0.00010
傾斜角	θ (°)	0 ~ 30

3 解析結果及び考察

3.1 単一ばねモデル

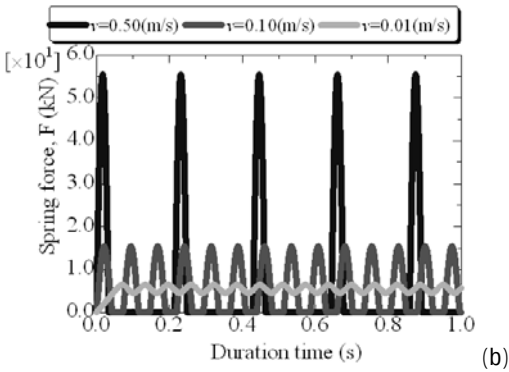
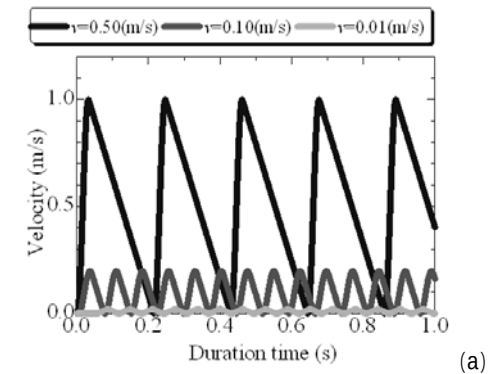


図-3 質点数2での解析結果:

- (a) 先端質点の速度の経時変化と速度依存、
- (b) ばねにかかる力の経時変化と速度依存

質点数2個、連結ばね1本の場合の挙動を調べた。図-3(a)に先端質点の速度の経時変化を示す。速度は0から載荷速度の2倍の間で振動し、先端の質点が停止と移動を繰り返すというスティックス

リップという挙動を示していることがわかった。図-3(b)にバネにかかる力の経時変化を示す。速度が大きいとき($v=0.50\text{m/s}$:黒線), 力が0になる時間がある一定時間存在するようになる。これはバネには引張り力が働かないためである。他の载荷速度の場合($v=0.01\text{m/s}$:赤線, $v=0.05\text{m/s}$:緑線, $v=0.10\text{m/s}$:青線), 同じ周期で同じ振動の中心で振動している。

図-3(a), (b)ともに载荷速度が大きいほど振幅は大きくなっている。弾性のばねと完全塑性の性質をもつ質点を連結し摩擦力を与えただけで、速度依存の性質を持つことがわかった。

3.2 連続ばねモデルの挙動

3.2.1 マクロ挙動

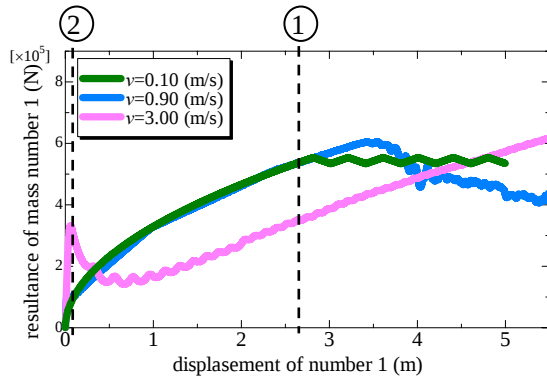


図-4 作用力と最後尾の質点位置の係に及ぼす载荷速度の影響

質点数 100 とし、载荷速度を変えた場合の作用力 F と最後尾の質点 (質点番号 1) の流下距離との関係性を図-4 に示す。 $v=0.10\text{m/s}$ の場合、先端の質点に力が加わる前 (より左) は、 F が単調増加し、非線形性が確認できた。その後先端の質点に力が伝わった後、全体として振動している。 $v=0.90\text{m/s}$ になると $v=0.10\text{m/s}$ と似た挙動で高周波成分が増加している。さらに速度が大きくなると ($v=3.00\text{m/s}$) 载荷初期 () にピークが出現し、減少したのち振動を伴いながら増加する。質点数が 100 のときでも速度依存性が確認できた。

3.2.2 ミクロ挙動

ここで図-5の時刻 A ($t=5.00\text{s}$), B ($t=15.00\text{s}$), C ($t=30.50\text{s}$), D ($t=31.15\text{s}$), E ($t=31.50\text{s}$) における速度の空間分布を図-6 に示す (先端の質点が動き出す前の時点で A, B の 2 時点, 動き出した後の場合で 3 か所)。先端の質点 1 が動き出すまでは、各質点の速度は後方から徐々に大きくなっている。先端が動き出すまでおよそ 27 秒かかり全体が振動して流れる塑性波は平均で 3.6m/s で伝わっており、弾性波速度の理論値解に比べてかなり遅い。

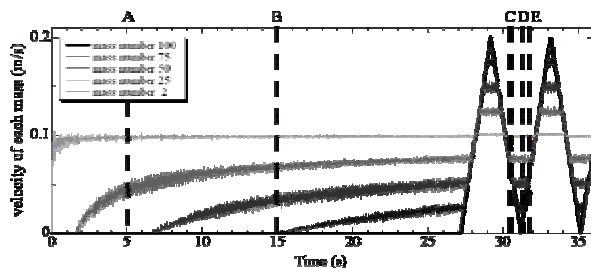
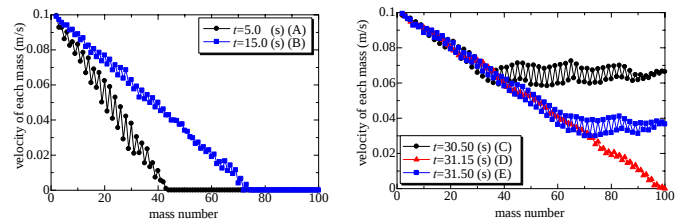


図-5 全体の質点の速度の経時変化



(a)

(b)

図-6 各質点の速度分布:

(a) 先端の質点 100 がまだ動き出していない場合、

(b) 先端の質点 100 が既に動き出した後の場合

横軸は、mass number, 縦軸は velocity of each mass

3.2.3 傾斜角の違い

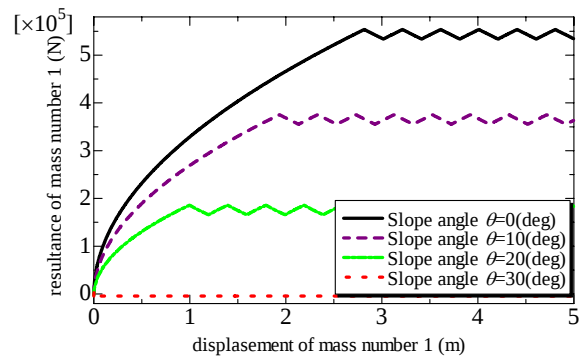


図-7 作用力と最後尾の質点位置の係に及ぼす傾斜角の影響

質点数 100 とし、傾斜角 θ を変えた場合の力質点番号 1 を一定速度にするために必要な力 F とその流下距離との関係性を図-7 に示す。傾斜角が 0, 10, 20 度のとき、それぞれの振動の周期や振幅の大きさなどの挙動は似ているが、傾斜角が大きいほど作用力の大きさ自体は小さくなっている。しかし、傾斜角が 30 度のときは力を与えなくても流下している。摩擦係数 μ の $\tan^{-1}\mu=29^\circ$ を傾斜角が超え、それぞれの質点にかかる重力の斜面下向きの力が、最大静止摩擦力よりも大きくなり、各々で流下し質点同士が離れ“疎”になったためである。

4 まとめ

本研究により、粘性要素がないスティックスリップモデルにおいて、载荷速度によってスティックスリップモデルの挙動が変化するという、速度依存がマクロ的にもミクロ的にも確認できた。その他に、スティックスリップモデル内では力が徐々に後方から前方へ伝わる様子が確認できた。また、先端が不安定であることや塑性波の存在、傾斜角と安息角の大小による挙動の変化など粒状体流れと多くの共通点が確認された。つまり、一次元スティックスリップモデルは粒状体流れの内部波動伝播の考察に有効であることがわかった。

参考文献

- 1) 高橋 保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004. 12.
- 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: 摩擦のおはなし, pp83 - 94, 1985.