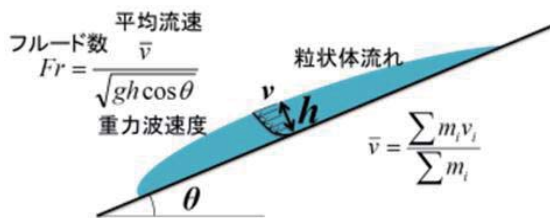


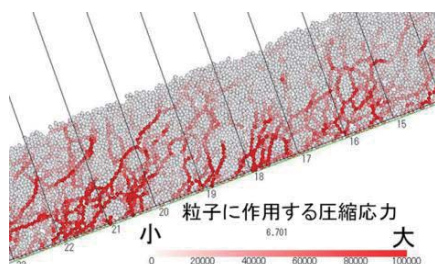
スティック・スリップ現象に着目した粒状体流れ挙動の分類

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

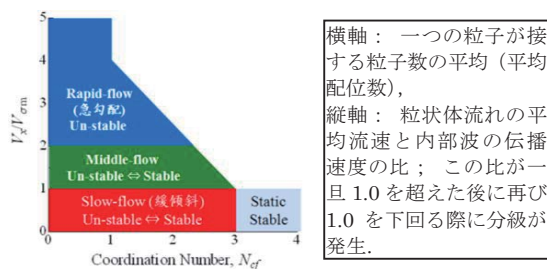
1. はじめに



図—1 粒状体流れのフルード数の概要



図—2 DEM 解析結果(濃色:圧縮応力大)



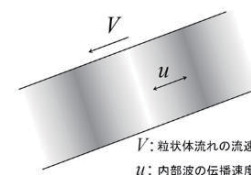
図—3 流れ中の速度と構造状態の概念図

石礫型土石流では巨礫の先端集中現象及び堆積層の上部に向かって粒径が大きくなる現象(分級)が知られている。流れ中に分級が発生すると、流れ表面に浮き上がった巨礫の衝突により、堰堤の上部が危険になることが指摘されている¹⁾。著者らによる一連の研究では、石礫型土石流を模擬したアルミナボール球による模型実験と個別要素法(DEM)を用いた数値解析を行った^{2),3)}。その結果、平均流速によって流れの挙動が変化し、平均流速と流れの厚さを水理学のフルード数(Fr) (図—1)に当てはめることで、分級の発生条件($0.5 \leq Fr < 1.0$)を提案した。また、粒状体流れ挙動の数値解析の結果から、斜面角度によって流れ挙動が変化し、分級の発生において、粒状体流れ内部に圧縮応力を受けた粒子(図—2の赤い粒子部分)の連なり(応力鎖)の発生・消滅が必要であることが分かった。さらに、粒状体流れ内で波動伝播(内部波)が観測され、流下方向の平均流速 V_x と内部波の伝播速度 V_{om} に対する比によって応力鎖の形成及び分級の発生が支配されていることを確認した(図—3)。

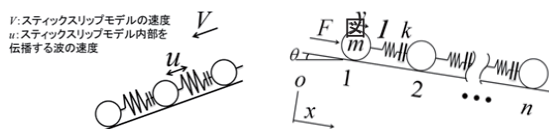
本報告では、内部波に着目して、粒状体流れを単純化した一次元スティック・スリップモデルを用い、粒状体流れの運動と分級メカニズムについて考察を行った結果を示す。

2. スティック・スリップモデル数値解析概要

図—4に図—2を単純化し、流れ中に内部波(応力の縦波)が伝播する様子を示している(応力の大きさを濃淡で示した)。ここでは、重力による滑走(質点質量)、流れと河床との摩擦(摩擦係数)、流れ内の圧縮性(ばね定数)に着目し、粒状体流れの先端部分の挙動を、図—5に示すような一次元スティック・スリップモデルで表現することを試みた。解析の基本のパラメーターは、実際の石礫塊を考慮し、表—1のように設定した。石礫間には引張力は作用しないため、質点間がバネの自然長よりも長くなると、質点間同士の力が作用しないものとした。さらに、平面に置いたモデルの最後尾(図—6(b)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、速度一定の後続流を表現している。模型実験同様、内部波の波速とモデルの物性から定義される速さの比から挙動の分類を提案する。



図—4 粒状体流れの簡略



(a) 粒状体流れのスティック・スリップモデルの提案
(b) 計算対象のスティック・スリップモデルの要素

図—5 石礫流れの一次元スティック・スリップモデル

表—1 基本形の解析パラメーター

	記号 (単位)	数値
全質点数	n (個)	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)	1.0×10^7
ばねの自然長	l (m)	1.0
静止摩擦係数, 動摩擦係数	μ, μ'	0.56, 0.56
载荷速度	v (m/s)	1.0
計算刻み	Δt (s)	0.000010
斜面角度	θ (°)	0.0

3. スティック・スリップモデルの挙動とDEM 解析結果

図—6にスティック・スリップモデル内に発生する波動伝播挙動を示す。赤の点はこの部分では質点の隣接する両方のばねが圧縮しており、青では片方のみが圧縮、緑は両方が自然長の状態であることを示す。また、モデルの典型的な挙動を図—7に示す。図中には、これらの挙動と対応すると考える、斜面傾斜が緩勾配、安息角付近、急こう配の解析結果も示している。载荷開始後、最後尾の質点から進行方向へ振動を伴った力の伝播を確認した(挙動(I),(II))。载荷速度 v によっては、内部に衝撃波的に弾性縦波が出現した。また、滑りとばねの変形が連成しながら伝播する内部波も確認した(挙動(II)で顕著)。この波速は、弾性波よりも遅

い。さらに、 v の増加に伴い、モデル内において隣り合う質点間の距離が l よりも広がり(挙動(III))、このような質点の個数 N_l が増加し、圧縮応力分布及び質点分布が疎となる。上記のように、モデルの挙動は、荷重速度 v によって支配され、分類することができる。荷重速度が遅い場合(図-7(a))の挙動(I)では、モデル全体が常に圧縮で荷重—縮み量曲線において弾塑性挙動を示すが(図-8(a))、挙動(II)(図-7(b))では、ばねの伸縮が発生し、荷重—縮み量曲線はランダムに振動する(図-8(b))。さらに、スティック・スリップモデルにおいて、 v の増加と同様の効果を k , θ の増加, n , μ , μ' の減少でも示すことができた。同様の傾向はDEM解析結果にも見られた。

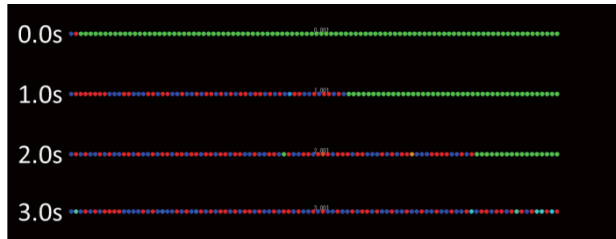


図-6 スティック・スリップモデル内の波動伝播(上)と弾性波と内部波(下)の関係

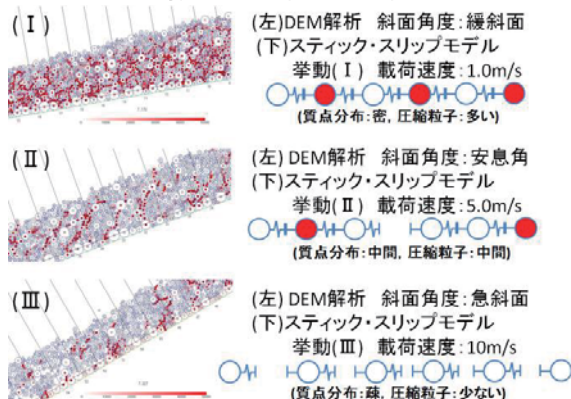


図-7 スティック・スリップモデル挙動とDEM解析結果の対応

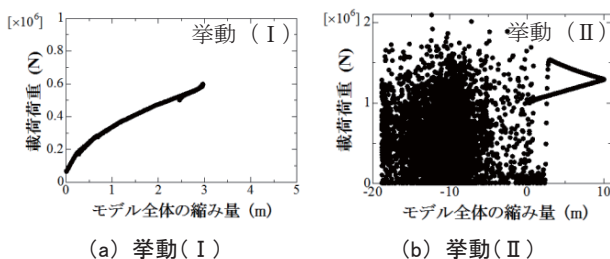


図-8 荷重—縮み量曲線

4. スティック・スリップモデルの挙動の分類

圧縮状態にあるばねの個数 N_c と質点距離がばねの自然長よりも長い箇所数 M との経時変化をそれぞれ図-9, 10に示す。荷重速度が遅い場合には多くばねは圧縮状態にあるもの、速度が増加すると、質点間がばねの自然長よりも長くなりモデル内の力の繋がりが切れ

てしまう箇所が見られる。それぞれの数は荷重速度の増加に伴い変動する速度依存性を有しており、振動することがわかる。これは、モデルに固有な弾性波(質量とばね定数で表される)、すべりとばねの圧縮によって伝播する内部波及び荷重速度という3つの速度の相対的な関係と圧縮部状態にある質量—ばねの塊の大きさの部分によって支配される現象であると考えられる。

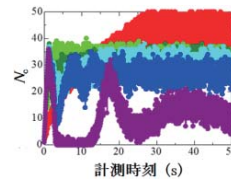


図-9 圧縮状態にあるばねの個数の変化経時変化での速度依存性

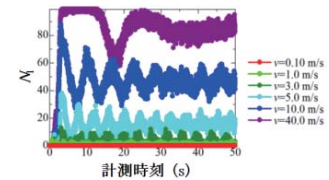


図-10 質点距離がばねの自然長よりも長い箇所数の変化速度依存性

5. スティック・スリップモデルの内部波

フーリエ変換によって内部波の波長と周期を求め、内部波速度 v_i を算出し、弾性波速度 v_e との比 v_i/v_e を求め、荷重速度とばね定数との関係を調べた(図-11)。その結果、挙動(I)では v_i/v_e が0.65より大きな値を示した。荷重速度 v が速い、挙動(III)の場合には、1.0を超える場合も計測された。一方、挙動(II)では v_i/v_e は0.65より小さな値を示した。つまり、内部波と流速との比から、挙動(I)～(III)の分類が可能であることが分かった。

6. 結論

弾性と完全塑性を組み合わせただけの一次元スティック・スリップモデルにおいても、荷重—変位関係に速度依存性を有することが分かった。この現象では、内部のばねの伸縮挙動の伝播特性が重要であり、粒状体流れ中に発生する内部波に着目することで合理的に分類可能である。模型実験、DEM解析、一次元スティック・スリップモデルのいずれにおいても、流速と内部波速度に着目したフルード数を定義することで、複雑な石礫型流れを三つの状態に規定することができた。

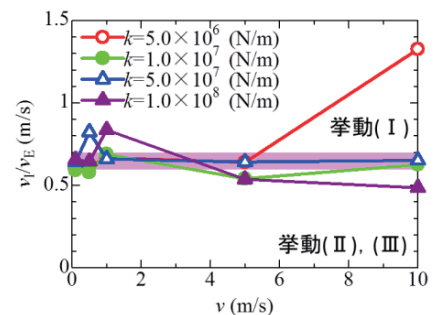


図-11 内部波速度と弾性波速度の比

参考文献:

- 1) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004.
- 2) 前田・館井・福岡: 個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.
- 3) 館井・前田・山崎: 塑性応力波の伝播速度からみた石礫流れ挙動, 平成23年度砂防学会研究発表会概要集, pp.300-301, 2011.
- 4) Wood, D.M.: *Geotechnical modeling*, Spon Press., 2004.