ー次元スティックスリップモデルによる粒状体流れの速度依存に関する考察

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 被害を被っており,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た.石礫流れを個別要素法 で再現した結果,流れ中に圧縮応力の強弱が伝播する 応力波の存在を明らかにした¹⁾.これは,粒子間の摩 擦とインターロッキングによって強く応力を伝える 応力鎖の発生によるものである. **図-1(a)**はその概念 図で,Vは土石流全体の速度であり,uは応力の波の 速度で色の濃淡が応力の大小を示している.ここでは, 水理学のフルード数 F_r (断面平均流速 Vの長波 \int gh 内部に対する比)のように,流れの状態を力学的に分 類することを考えた.



2. スティックスリップモデルの概要



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 ることで流れの一次元スティックスリップモデル^{2),3)} 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り 応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, ばねの作用は消失するのとした. 本報告 では, 水平に置いたモデルを最後尾(図-2 の左側) 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 とその変位 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.

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
名古屋工業大学 学生会員	舘井 恵

表-1 解析パラメータ

	記号(単位)	数值
全質点数	n (個)	100
質点質量	<i>m</i> (kg)	1000
重力加速度	g (m/s ²)	9.8
ばね定数	<i>k</i> (N/m)	$1.0 \times 10^7 \sim 10^8$
ばねの自然長	<i>l</i> (m)	1.0
静止摩擦力	μ	0.56
動摩擦力	μ^{ι}	0.28, 0.56
載荷時間	<i>t</i> (s)	10
載荷速度	v (m/s)	0.01~3.00
計算刻み	Δt (s)	0.00010

3. 単一ばねの場合の基本挙動の計算結果及び考察

まず,質点数2個,連結ばね1本の場合の挙動を調べた.観察の結果,図-3に示すように,大きく分けて2種類の動き方があることが分かった.載荷速度が遅い場合(図-2(a)),ばねには常に圧縮力が掛っているが,載荷速度が速い場合(図-2(b)),質点間の距離がばねの自然長よりも広くなりばねの力が0となることが分かる.また,載荷速度が速い程,振幅が大きくなっていることも分かる.これは質点1の単位時間当たりの変位量が大きくなり,それに合わせて質点1に作用する力Fも大きくなるためだといえる.



図-3 単一ばねの場合のバネに働く力の 載荷速度依存性: (a)v=0.01 m/s; (b) v=0.1 m/s

4. 多連結ばねの場合の計算結果及び考察

基本のパラメータを中心とし,速度,ばね定数を変 えながら数値計算を行った.質点数が変わった場合の 全体の挙動の様子を考察した.

4.1 マクロ挙動に及ぼすばね定数と載荷速度の影響

図-4 は作用力 F と変位 x のマクロ挙動に及ぼす載 荷速度とバネ定数の影響について示している.載荷速 度の違いにより,図-3 と同様にばねにかかる力が 0 になるものとならないものという 2 種類の分類がで きた.これは速度があまり速くないときは系全体が常 に圧縮状態であり,ばねに常に圧縮力がかかる.一方, 速度が早い(v=3.0m/s)と急激に質点にかかる力が大 きくなり,質点の移動速度が大きく,ばね間距離がば ねの自然長を超えて圧縮力がかからなくなるためで ある.これは、石礫流れで、流速が大きくなると粒子 集合体が緩くなり大きな間隙が発生することと対応 すると考えられる(粒子間の衝突が支配的な流れとな る).一方、v=0.1-0.7m/sの比較的遅い波では、ばね に常に圧縮力が発生しており、ばねに発生する力が振 動していることがわかる.載荷速度が大きいほど、振 動の振幅は大きくなり、力が回復するまでに必要な変 位量も大きくなることから、モデル系全体としては構 造的には不安定化していると言える.ばね定数が高く なると、振動振幅も大きくなるものの、力が回復する までに必要な変位量は小さくなる.これらの傾向は、 DEM 解析においても流速が大きな場合は、間隙比が 高く、配位数が低い構造力学的に不安定な構造に変化 していることと対応している.



4.2 ミクロ挙動について

ここで、規則的である全体が常に圧縮され、ばねに は常に圧縮力がかかっている状態(k=1.0×10⁷N/m, v=0.1m/s)に着目した結果を図-5に示す.先端程(質 点番号が大きい)、動き始めるまで時間がかかるとい った進行性がみられる.先端(質点番号100)が動き 始めた後(27s)は、先端の速度に合わせて、周期4s 程度の大きくうねりのような振動を示すことが分か った.その振幅は先端にいくほど大きく変動しており、 先端から、加速と減速が始まり、それが後方に伝播し ていくことが分かる.



ここで図-5 の時刻 A(t=5.00 s), B(t=15.00 s), C(t=30.50 s), D(t=31.15 s), E(t=31.50 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おり,図中では直線的 に分布しているようである(この直線は,図-6(a)にあるように動き始めた(速度がゼロでない)最も先方の 質点と最後尾の質点(質点番号1)とを平均的に結ん だ直線).各質点の速度は,この平均的直線を基準に ゆらいでおり,時間の経過とともに,その直線の傾き は緩くなっていった.図-6(b)の先端に力が伝わった 後は,先端の速度が最大,最少の時(D)にはその点と 最後尾の速度を結んだ直線に他の質点が従うことが わかった.先端の質点の速度がそれ以外の時(C,E)は, (D)の直線に従うが先端の速度付近になるとその速度 付近で振動する.つまり,先端が動きだすと,系全体 の挙動が大きく変化するといえる.



(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

4.3 マクロ挙動に及ぼす動摩擦係数の影響

動摩擦係数µ'を 0.56 から 0.28 の 1/2 とし,静止 摩擦係数µと異なる値にした場合の作用力 F と変位 x のマクロ挙動を図-7 に示す.発生する作用力 F は半 分以下となるとともに,作用力の振動にも乱れが生じ, 高周波の成分が多く存在することがわかる.また,途 中(x=4.6m 付近)で飛越しが発生した.



紙面の都合上省略するが,静止摩擦係数と動摩擦係 数の差が大きいほど,いったん先端の質点が動き始め ると,飛び出すように移動し,ばねの長さが自然長よ りも大きくなるような質点の離散化が起きやすくな る.これは,石礫流の先端部分では,動的挙動に対す る抵抗(摩擦や回転抵抗)が小さくなると,ゆるく不 安定な挙動となることを示唆している.

参考文献

 前田,福間,舘井:第 22 年度砂防学会研究発表会概要, pp80-81, 2010. 2)B.N.J.Persson: Sliding Friction, pp17-25, 1997.
3)田中 久一郎:摩擦のおはなし, pp83-94, 1985.