

鳥取大学工学部 道上正規
 鳥取大学地域共同研究センター ○宮本邦明
 (財) 砂防・地すべり技術センター 松本和樹
 (財) 砂防・地すべり技術センター 高濱孝一郎
 (財) 砂防・地すべり技術センター 嶋 大尚

1. はじめに

火山活動や地震などに伴い大規模な土砂移動(土塊の滑動)が生じることがあり、広範囲わたり大きな災害をもたらすことがある。このような土砂移動現象を予測・評価するためには、数値シミュレーションによる方法が有効である。シミュレーションの実施にあたっては、計算条件の設定、計算結果の解釈が重要であるが、想定する現象を如何に評価するかという問題が根幹にある。このことは、対象とする流れがどのような移動形態をとり、流れの発生、発達、流下、堆積のそれぞれの過程がどのようなファクターに支配されているのかという議論に還元される。つまり、流れの応力構造の議論へと集約されていく。本研究は、間隙水、粘着力が乏しい乾燥粒子流を対象として、その応力構造を議論し、乾燥粒子流としての崩壊土塊の予測・評価するための流動モデルに関する検討を行ったものである。

2. 乾燥粒子流の応力構造

別稿¹⁾で得られた乾燥粒子流に関する実験結果から、乾燥粒子流中の粒子は密な状態で層流で移動してことが確認された。このような粒子群の流れにおいては、粒子間摩擦に起因するクーロン力が卓越しており、その一方でせん断変形に伴う粒子同士の非弾性衝突による応力が生じている。粒子間隙流体(空気)により満たされているので、間隙流体による応力が存在する。間隙流体による応力は、空気の密度・粒子密度に比べて十分小さいので、全体の応力に対して無視される。

以上より、乾燥粒子流におけるせん断力と圧力は次式のようになる。

$$\tau = \tau_s + \tau_d \tag{1} \qquad p = p_s + p_d \tag{2}$$

ここに、 τ_s は粒子間摩擦による降伏応力(クーロン力)であり、 p_s は粒子による静的な骨格応力である。 τ_s は次式で与えられる。

$$\tau_s = p_s \cdot \tan \phi_s \tag{3}$$

ここに、 ϕ_s : 粒子の内部摩擦角

τ_d は粒子の非弾性衝突によるせん断力であり、 p_d は粒子の非弾性衝突の際に保存されるエネルギーに対応する圧力であり、それぞれ次式で与えられる。²⁾

$$\tau_d = \frac{1}{12} (1 - e^2) \sin^2 \Psi \cdot c^{\frac{1}{3}} \cdot \sigma d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \tag{4} \qquad p_d = \frac{1}{12} e^2 \sin^2 \Psi \cdot c^{\frac{1}{3}} \cdot \sigma d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \tag{5}$$

ここに、 e : 粒子の反発係数、 Ψ : 粒子の衝突角、 c : 粒子濃度、 σ : 粒子の密度、 d : 粒径

乾燥粒子流には降伏応力があるため、外力から降伏応力を差し引いたものが流動に使われる。定常状態では外力が降伏応力より大きい必要がある。

以上が乾燥粒子流に関する構成則であるが、粒子骨格応力 p_s に関する構成則がない。すなわち、式(3)~(5)を式(1)、(2)に代入すると、三つの未知数 p_s 、 c 、 u に対して方程式が2本しかないため、方程式系が閉じておらず、このままでは流れが解けないことになる。そこで、 p_s の構成則を導入して全体の構成則を完成させ、方程式系が閉じるようにする必要がある。 p_s の構成則を全圧力(拘束圧) p に対する比 α で与える。支配パラメータとして残りの未知数、濃度 c と速度 u を取りうるが、 p_s が静的な骨格応力であることから、速度はパラメータとならない。つまり、支配パラメータは濃度になると考えられる。また、 p_s はその制約条件として $c = c_0$ (停止している場合)のときには、 $p_s = p$ となり、粒子衝突による動的な圧力が存在せず、 $c = 0$ (粒子がない場合)のとき $p_s = 0$ となる。このような性質を持つ単純な関数形として

$$\alpha = \frac{p_s}{p} = \left(\frac{c}{c_0} \right)^n \tag{6}$$

ここに、 c_0 : 堆積層の濃度

を導入する。

3. 乾燥粒子流の流速分布・抵抗則

2次元等流状態における運動方程式は x 、 z 方向にそれぞれ、

$$c \cos \theta - \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0 \tag{7} \qquad c \cos \theta - \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \tag{8}$$

と表される。これを、濃度 c が流動深によらず一定であるとすると、式(1)~(5)、及び(7)、(8)を解くことにより、 $\tan \theta > \alpha \tan \phi_s$ 条

条件下で次のような流速分布が得られる。

$$u = \frac{2}{3} c^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{g(\sin \theta - \alpha \cos \theta \tan \phi_s)}{k_g(1-e^2)\sigma d^2}} \left\{ h^{\frac{3}{2}} - (h-z)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (9) \quad \frac{u}{u_s} = 1 - (1-\eta)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

ここに、 u_s は表面流速 $\eta = z/h$ である。乾燥粒子流の流速分布は土石流と同じ 3/2 乗則にしたがう。流速分布式(9)をさらに積分すると、抵抗則として、次式が得られる。

$$\frac{u_m}{u_s} = \left\{ \frac{48}{25} c^{\frac{2}{3}} \frac{[1 - \alpha(\tan \phi_s / \tan \theta)]}{(1-e^2)\sin^2 \Psi} \right\}^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h}{d} \right) = f(\theta, c, \alpha) \left(\frac{h}{d} \right) \quad (11)$$

上式より、 u_m/u_s と h/d は線形の関係にあることがわかる。また、その係数 f は濃度と勾配、 α の関数である。概略的には、 c 、 α はほぼ一定値をとることから、 $u_m/u_s \sim h/d$ 平面上で、抵抗則を評価しようとするとき、最も大きな支配要因は流路勾配 θ である。図-1には式(11)の係数 f に関して $c = 0.3$ 、 $\alpha = 0.8$ 、 $\tan \phi_s = 0.8$ として、勾配による変化を示したものである。図からもわかるように、勾配が大きくなるほど係数 f は大きくなる。つまり、勾配が大きくなると抵抗は小さくなる。

4. 実験との比較

前項で示した構成則を用いて抵抗則に関する計算値と実験値とを比較する。ここで、 α を式(6)で表現することとし、 $n = 0.2$ 、 $c_s = 0.52$ とおく。図-2には、流動深、平均流速、流砂量に関する実験値から濃度を計算し、これらの値と式(11)から α を逆算した値、及び式(6)による計算値(図中の実線)を示している。図からわかるように、本実験の範囲において α の評価式は実験をよく説明している。また、 α の値は 0.85~0.9 程度であり、これまでの土石流に関する研究における値(0.8~0.9)³⁾と同一の範囲にある。図-3には u_m/u_s 、及び h/d に関する計算値と実験値³⁾を示しており、前項に示した構成則は実験値をよく説明していることがわかる。

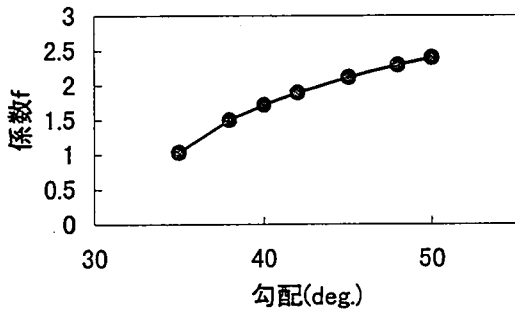


図-1 係数 f と勾配の関係

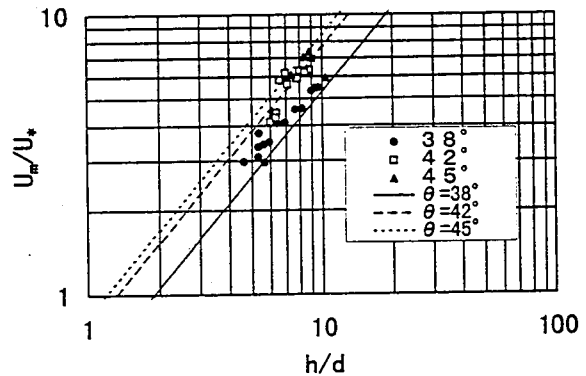


図-3 u_m/u_s と h/d の関係

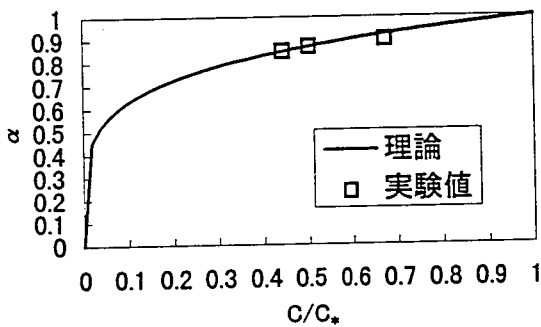


図-2 α と濃度の関係

5. まとめ

乾燥粒子流としての崩壊土塊の運動を予測・評価するための流動モデルに関する検討を行った。本モデルのせん断力はクーロン力と粒子の非弾性衝突によるせん断力からなり、圧力は粒子骨格応力と粒子の非弾性衝突の際に保存されるエネルギーに対応する圧力からなる。本モデルは胡稿³⁾の乾燥粒子流の抵抗則に関する実験値をよく説明している。今後、間隙に水や泥水を含んだ場合についても検討していきたい。

参考文献

- 1) 松村ら：乾燥粒子流の流動に関する実験的研究，平成9年度九州学会研究発表会
- 2) 宮本邦明：Newton 流体を含む粒子流の流動機構に関する研究，立命館大学学位論文，1985
- 3) 江頭ら：土石流の構成則に関する研究，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，pp.487-501，1989