

傾斜面における濡れた粉体層の衝突崩壊条件

滝澤真太, 新屋啓文, 桂木洋光

名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

概要

含水率や傾斜角を制御した濡れた粉体層に固体球を衝突させた際の応答を調べた。その結果、「クレーター形成」、「斜面崩壊」の2種類の応答が観察され、特に「斜面崩壊」が起こる条件は始動角近傍の傾斜角と固体球衝突により斜面を形成する粉体に誘起された振動に関係していることが分かった。さらに、濡れた粉体層を傾斜面に置かれたブロックとみなすモデルによって、斜面崩壊が起きる条件について議論した。

Collapse condition of inclined wet granular layer due to impact

Shinta Takizawa, Hirofumi Niiya, Hiroaki Katsuragi

Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University

Abstract

We conducted an experiment of collapse of inclined wet granular layer caused by a solid projectile impact with various water contents and inclination angles. As a result, we found two types of outcomes: crater formation and collapse. The collapse phase is observed when the impact-induced vibration at the bottom of wet granular layer is strong enough. Thus, we propose a simple block model to explain the condition of collapse of wet granular layer due to impact.

1 はじめに

自然界は、粉体で構成された地形でありふれており、その傾斜面は外部からの摂動で流動化することにより、地崩れを起こす場合がある。例えば、土砂などで構成される急斜面は地震や大雨などによって土砂崩れを起こし、積雪層の崩壊に伴う雪崩も突発的な崩壊現象として知られている。また、地球以外の砂礫で覆われた固体天体の表面地形においても、クレーター壁面などの傾斜地形が存在する。その地形は比較的小規模な隕石衝突による振動等により流動化し、地崩れに至る可能性が示唆されている [1]。

上記の崩壊現象を理解するために、粉体を用いた研究が近年行われており、その大部分は乾いた粉体を用いている。乾いた粉体で構成された砂山は、始動角と呼ばれる傾斜角で流動化を開始し、このとき

の流動化は表面付近で起こる [2]。しかし、天然の傾斜地形の多くは水分を含んでおり、乾いた粉体に比べ粒子間の付着力が著しく強い。また、地球以外の固体天体でも、微小重力環境では粉体間の付着力が傾斜地形崩壊において支配的となる場合が存在する。そのため、付着力を無視した乾いた粉体実験による検討のみでは、崩壊現象の統一的理解を行う上で不十分である。

本研究では、粉体間付着力を有する粉体の崩壊現象を簡単に模擬する方法として、濡れた粉体に着目する。濡れた粉体の力学的特徴は乾いた粉体と大きく異なり、粒子間液架橋による付着力や粉体間摩擦の減少など複雑な相互作用が働く。その結果、濡れた粉体層の強度は含水率の増加に対し急上昇の後、ほぼ一定値に漸近するように振る舞うことが知られている [3]。このような性質をもった濡れた粉体層に

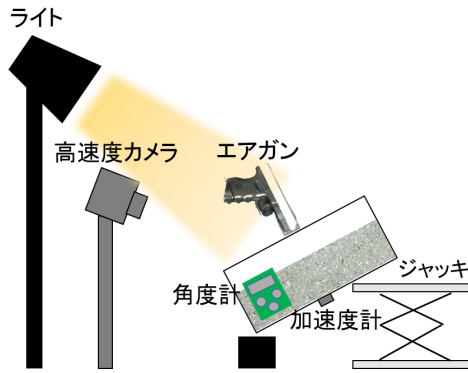


図 1: 実験系の概略図

外部から摂動を加えた際の変形や崩壊の物理機構解明は、自然界における突発的崩壊現象の理解のために必要な要素となる。

また、このような現象は特殊な相互作用を持つ散逸粒子系を臨界状態に設定した上で摂動を加えた際に起こるカタストロフィ的な協同現象の一種と捉えることができ、その特徴付けは散逸粒子系の基礎力学的観点からも興味深い。

本研究の目的は、濡れた粉体層に摂動を加えた際の変形・崩壊の動力学を理解することであり、様々な含水率や傾斜角の条件下で濡れた粉体層に固体球を衝突させ、粉体層の応答や衝突起因の振動を調べることで斜面崩壊が起きる条件について議論を行う。

2 実験

本研究で用いた実験系の概略を図 1 に示す。まず、粒径 $d_g = 0.4 \text{ mm}$ のガラスビーズと水を含水率 W が $0.002 \sim 0.024$ の範囲で均質になるよう混合させ、内側に同種粒子を貼り付けたアクリル容器 (幅 97.5 mm 、奥行き 147.5 mm) 内に展開する。ここで、含水率 W は粉体層全体と水の体積の比として定義する。このとき、層厚 Z が 28 mm で充填率が 0.49 となるように詰め、表面を平らにならすことで濡れた粉体層を形成する。その後、このアクリル容器をジャッキによって傾斜させ、傾斜角 θ を容器に取り付けた角度計によって測定する。射出装置はばね駆動の空気銃を用いており、直径 6 mm 、質量 0.11 g のプラスチック球が、速度 $32.0 \pm 0.6 \text{ m/s}$ で容器中央部にほぼ垂直に衝突するよう射出される。固体球衝突により励起される加速度を測定するため、アクリル容器の底面中心に加速度計を取り付けた。

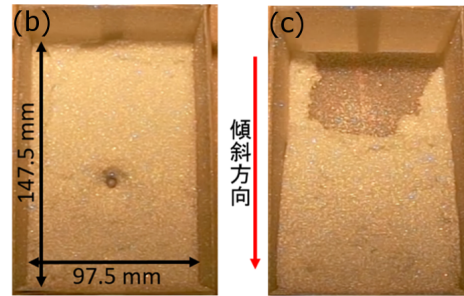
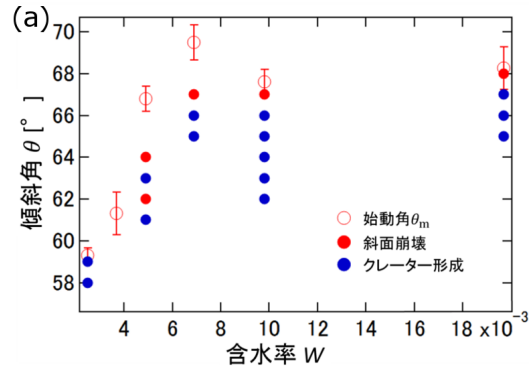


図 2: 濡れた粉体層に対して固体球を衝突した結果 (a) W と θ に関する「クレーター形成」(青丸)と「斜面崩壊」(赤丸)の散布図 (b) 「クレーター形成」($W = 0.007, \theta = 65^\circ$) (c) 「斜面崩壊」($W = 0.007, \theta = 66^\circ$)

初めに、濡れた粉体層を傾斜させたときに衝突なしで自発的に崩壊する角度 (始動角 θ_m) の W 依存性を調べた。ここで、粉体層が底面から滑るように全層が崩れたときの傾斜角を始動角と定義する。次に、 W と θ を独立に変化させ、固体球衝突による濡れた粉体層の応答を観察した。また、加速度計を用いて固体球衝突による粉体層の底面における加速度の垂直成分を調べた。

3 結果

始動角の含水率依存性を図 2(a) に示す。ここで、エラーバーは 5 回測定の標準誤差を示している。濡れた粉体層の始動角は含水率に対して増加するが、少量の水でほぼ一定値に漸近しており、先行研究と定性的に整合的な結果を示した [4, 5]。また、 θ_m における濡れた粉体の流動化は全層で起こっており、表面のみが流動化する乾いた粉体の場合とは全く異なる振る舞いを示すことを確認した。

濡れた傾斜粉体層へ固体球を衝突させた結果、「クレーター形成」と「斜面崩壊」の 2 種類が確認された (図 2(b)(c))。ここでは、固体球衝突によってクレーターが形成した後、粉体層が静止している状態

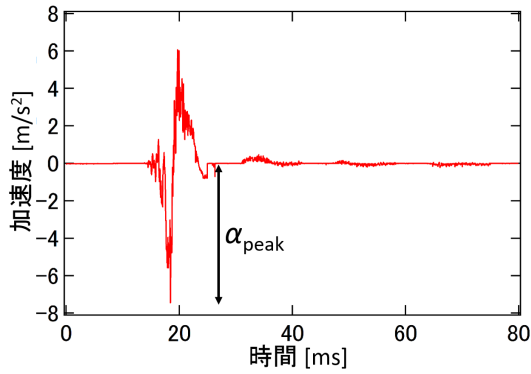


図 3: $W = 0.007$, $\theta = 66^\circ$ の濡れた粉体層に対し、固体球を衝突したときの容器底面の中心における加速度波形

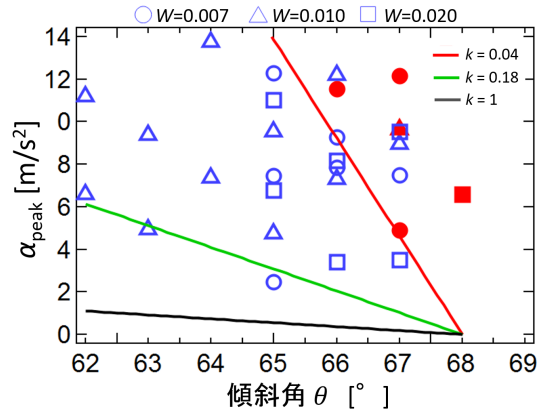


図 4: 容器底面の中心における最大加速度 α_{peak} と傾斜角 θ に関する「クレーター形成」(青色)と「斜面崩壊」(赤色)の領域を表す相図。

を「クレーター形成」、衝突直後に斜面が崩壊した場合を「斜面崩壊」と定義する。特に、「斜面崩壊」は傾斜角が始動角近傍のときにのみ起きていることがわかる(図 2(a))。 $W = 0.005$ では、青と赤が混在している領域があるが、これは実験上のゆらぎによるものだと考えられる。さらに、この崩壊様式は始動角での斜面崩壊と同じように、粉体層底面から滑るように全層が崩れていることが確認された。また、衝突により励起された加速度波形の例を図 3 に示す。ここで、固体球の進行方向が負の値に対応し、負の値の絶対値の最大値を α_{peak} とする。 α_{peak} の値は濡れた粉体層の不均質な構造に依存するため、衝突条件が同じでもばらつきを示す。この α_{peak} と重力の働き方を規定する θ が斜面崩壊の発生要因を測定する主要因であると考えられる。

そこで α_{peak} と θ を用いた「クレーター形成」と「斜面崩壊」の相図を作成した(図 4)。ここで、図 2(a) で始動角が含水率に対しほぼ一定値 (68°) となる $W : 0.007 \sim 0.020$ の範囲のデータを使用した。濡れた粉体層の不均質性の影響もあり、「クレーター形成」と「斜面崩壊」のプロットが重なる部分もあるが、相図の境界が図 4 の赤線のように引けることが分かる。

4 解析と議論

4.1 ブロックモデル

固体球衝突による濡れた粉体層の崩壊発生メカニズムの理解を深めるため、 α_{peak} と θ の効果を考慮した単純なモデルを提案する。本モデルでは濡れ

た粉体層を傾斜面におかれたブロックとみなし、ブロックの滑り出す条件が濡れた粉体層の崩壊条件だと仮定する。ここで崩壊する条件は、ブロックにかかる重力と底面摩擦、衝突励起振動による垂直抗力を弱める実効的な力の釣り合いを考慮して次式で得られる。

$$g \sin \theta > \mu (g \cos \theta - \alpha_{\text{eff}}) \quad (1)$$

ここで g は重力加速度、 μ は容器底面と濡れた粉体層との実効的摩擦係数、 α_{eff} は振動によるブロックの底面にかかる垂直抗力を実効的に弱めるような加速度を表す。また、 μ はクーロン摩擦則により θ_m と

$$\mu = \tan \theta_m \quad (2)$$

という関係を持つとする。 α_{eff} は、振動の伝播に伴う減衰を考慮すると、容器底面の中心における加速度 α_{peak} とは異なる値になるはずである。よって、 α_{eff} を α_{peak} に比例定数 k をかけて

$$\alpha_{\text{eff}} = k \alpha_{\text{peak}} \quad (3)$$

と表すことにする。式 (1-3) からこのモデルにおけるクレーター形成相と斜面崩壊相の境界は、

$$\alpha_{\text{peak}} = \frac{g}{k} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\tan \theta_m} \right) \quad (4)$$

となる。 $k = 1$ とした場合の境界線は図 4 の黒線のようになり、実験結果を説明できない。図 4 においてクレーター形成相と斜面崩壊相は一部混在しているが、斜面崩壊が起こり始める境界線としては図 4 の赤線のようになる。このとき k の値は $k=0.04$ となり、実効的垂直抗力の低減は、最大加速度のおよ

そ4%程度の加速度によりもたらされることが示唆される。

4.2 k の推定

ブロックモデルと相境界の整合性を確認するには、 k の値がモデルの枠組みの中で推定可能となることが望ましい。本研究では残念ながら k の値をモデルから導出することには未だ成功していないが、その途中経過として、振動加速度の等方的減衰の効果について考慮した結果について以下に概説する。具体的には、等方減衰を仮定して、底面全体の振動加速度を見積もり、その平均値を底面全体での実効加速度として採用した。 α_{peak} の伝播距離に依存した減衰を調べるために、 $W = 0.007$ 、 $\theta = 0^\circ$ の条件下で濡れた粉体層の厚さ Z を変化させ、衝突により誘起される底面中心の最大加速度を測定した (図 5(a))。エラーバーは測定 5 回における標準偏差である。ここで、 $Z/d_g > 140$ の領域でほぼ一定値に漸近しているのは、衝突点から容器側壁までの距離が $122d_g$ に相当しているため (境界効果) だと考えられる。そこで、 $Z/d_g > 140$ の領域を除いて、等方的伝播による幾何学的減衰を考え、べき関数でフィッティングすると

$$\alpha_{\text{peak}} = \alpha_0 \left(\frac{Z}{d_g} \right)^{-2.3} \quad (5)$$

を得る ($\alpha_0 = 7.2 \times 10^4 \text{ m/s}^2$)。衝突点から伝わる振動が等方減衰すると仮定し、濡れた粉体層の底面における最大加速度分布を式 (5) に基づいて推定した (図 5(b))。この加速度分布を濡れた粉体層底面全体で積分し、その値を底面全体に均等に分配すると、粉体層底面にかかる実効的な加速度 α_{eff} が 0.74 m/s^2 と推定される。これは、式 (3) より $k = 0.18$ に対応し、図 4 の相図では緑線の境界に相当する。しかし、この推定値では相図の境界を適切に説明できていない。これは、衝突励起振動の伝播方向に依存した異方的減衰の存在を示唆している。今回の推定では垂直方向の加速度減衰に基づき、振動の等方減衰を仮定したため、 α_{eff} の値が過大評価されたと考えられる。

5 まとめ

濡れた粉体層に振動を加えたときの崩壊の動力学を解明するため、濡れた粉体層に固体球を衝突させる実験を行った。その結果、濡れた粉体層の傾斜角が始動角近傍のときに斜面崩壊が起きることが分か

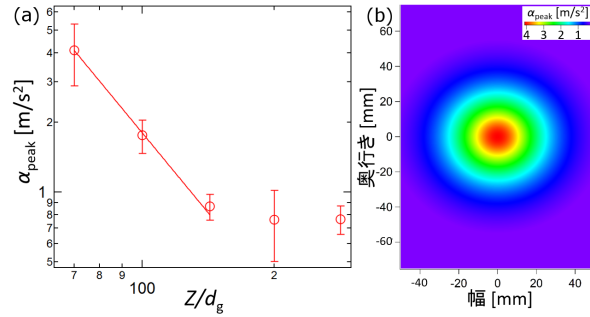


図 5: (a) $W = 0.007$ 、 $\theta = 0^\circ$ の濡れた粉体層底面の中心における最大加速度 α_{peak} の層厚 Z 依存性。(b) 衝突点から伝わる振動が等方減衰と仮定した場合の濡れた粉体層底面における加速度分布

り、崩壊様式を含水率と傾斜角の相図により示した。また、十分な含水率によって始動角がほぼ一定値となる濡れた粉体層において、始動角近傍で発生する崩壊のメカニズムを解き明かすため、単純なブロックモデルを提案し、固体球衝突による実効的な加速度 α_{eff} に適当な値を入れた場合に、実験結果をうまく説明できることがわかった。さらに、振動の等方減衰を仮定し、 α_{eff} の値の推定を試みたが、過大評価となった。これは、衝突による振動の異方的減衰が関係していると考えられる。

今後は、固体球衝突時の濡れた粉体層に伝わる振動伝播の異方性を取り入れて、底面における加速度分布および α_{eff} の推定を向上させたい。

参考文献

- [1] J.E. Richardson Jr, H.J. Melosh, R.J. Greenberg & D.P. O' Brien, *Icarus*, **179**. (2005) 325-349
- [2] H.M. Jaeger, S.R. Nagel, & R.P. Behringer, *Rev. Mod. Phys.* **68**, (1996) 1259-1273.
- [3] M. Scheel, R. Seemann, M. Brinkmann, M. DiMichiel, A. Sheppard & S. Herminghaus, *J. Phys.: Condens. Matter* **20** (2008) 494236.
- [4] S. Nowak, A. Samadani & A. Kudrolli, *Nature Physics* **1**, (2005) 50-52.
- [5] P. Tegzes, R. Albert, M. Paskvan, A.-L. Barabási, T. Vicsek & P. Schiffer, *Phys. Rev. E* **60**, (1999) 5823.