

液体中における粉粒体崩壊の実験

Experiments on granular column collapse in liquids

澁谷 史 [1]; 隅田 育郎 [2]

Fumi Shibuya[1]; Ikuro Sumita[2]

[1] 金大・理・地球; [2] 金大・自然研

[1] Earth Sci., Kanazawa Univ.; [2] Nat.Sci.Tech., Kanazawa Univ.

はじめに:異なる物性を持つ混合しない2層の境界に均衡が崩れる力が加えられたとき、その境界は崩壊する。自然界の例では、地すべり、泥流、雪崩などで、マグマ溜りでも内壁が崩壊することが予想される。これらの崩壊は多様な条件下で起こり、その形態や到達距離、崩壊時間も様々である。崩壊する物質は固体粒子が流体(気体または液体)の中に分散している粉粒体として振舞う。粉粒体はその存在する条件によって流体のようにも固体のようにも振舞うことが知られており、まだモデル化する方法が確立していない。崩壊の発生から到達時間や距離を予測する上で、粉粒体の粒径、液体の粘性、粉粒体柱のアスペクト比などに対するパラメータ依存性を知ることは重要な問題である。先行研究の大半は崩壊を空気中で行っており、特にアスペクト比を変えた時の崩壊過程の違いなどが調べられてきた。しかし、液体中の研究は少なく、まだ良く分かっていない。本研究では、液体と粉粒体の境界での崩壊に着目する。

目的:粒径とアスペクト比を変えた粉粒体柱の崩壊実験を粘性流体中で行い、その崩壊過程と最終状態の粒径、アスペクト比依存性を観察、測定、整理する。そして、崩壊過程のモデル化を行う。

実験及び解析方法:(1)粉粒体崩壊実験; スチロールケースにシリコンオイルとガラスビーズ封入し、ガラスビーズを水平に堆積させ7日以上放置した後、手動で90°回転させて崩壊を発生させその過程を静止画及び動画で撮影する。粒径依存性については、粒径0.05-1mmの場合をアスペクト比4で、またアスペクト比依存性については、アスペクト比が1-9の場合を粒径0.05mmで行なった。撮影した画像において崩壊している粉体柱の境界を求め、その位置エネルギーを計算する。(2)粉粒体と高粘性流体の混合物の降伏応力の測定; ガラスビーズとシリコンオイルをピーカーで混合し沈殿させ、上澄みのシリコンオイルを除いた試料を回転型粘性率計で異なるせん断速度で変形して、降伏応力を求める。

結果・考察:

(1)崩壊過程の特徴 粒径依存性; 表面流の供給源の欠落領域が粒径によって異なる。粒径が小さい場合、その領域は表面流直上の狭い領域および粉粒体柱の上面のごく薄い部分であるため、侵食は粉粒体柱の幅が減少する(垂直)方向に進み、後に粉粒体柱の高さが減少する(水平)方向に進む。一方で、粒子が大きい場合その領域は粉粒体柱上面の全体の領域であるため、初めから水平方向に進む。また、粒径が大きいほど崩壊時間は短く、短距離で停止し最終傾斜角が大きい。アスペクト比依存性; アスペクト比に依らず表面流が起きる厚さは一定である。よってアスペクト比が小さい(体積が大きい)ほど崩壊が終了するために時間を要する。また、垂直方向の侵食が一定量進むと、欠落領域が下方へ移動するため、アスペクト比が小さい(横幅が大きい)場合、垂直方向と水平方向の侵食が交互に見られる。

(2)実験の解釈 表面流が発生する条件; 表面流はせん断応力が降伏応力よりも小さな場合に起きると考えることができる。測定の結果、降伏応力は0.05mmの時46.11Pa、0.6mmの時66.84Paである。粉粒体を含む流体の実効粘性率は、経験式としてEinstein-Roscoeの方程式(McBirny and Murase, 1984)が良く使われる。実験から求めたせん断速度を用いると、それぞれ < 0.46 、 < 0.52 の時に上の条件が満たされていることが分かる。この値は最大 packing fractionの0.6より小さく、表面流の起きている場所での packing fractionとして妥当である。停止条件; 粉粒体の表面流を流体としてモデル化すると、表面流の底面のせん断応力は粒径と粉粒体柱の不動領域の $\sin(\text{傾斜角度})$ に比例する。降伏応力とせん断応力が釣り合う時に停止すると考えると、傾斜角度は降伏応力に比例し、粒径に反比例する。粒径が0.05mmから0.6mmの12倍になった場合でもその降伏応力は45%程度の増加であるので、粒径が大きくなると傾斜は小さくなり、先端位置は粒径が大きい程遠くまで到達するはずである。しかし、崩壊実験では粒径が小さな方が遠くまで到達していることと矛盾する。従って、停止条件に関しては粉粒体流を流体に近似するモデルでは説明できない。これは、流体に近似した場合、粒子同士の衝突によって散逸される運動エネルギーを考慮することができないためと考えられる。崩壊時間; 粉粒体の集合体をニュートン流体と近似すると力のつりあいと幾何学から特徴的なタイムスケールが求められ、それは実効粘性率に比例、粒径の2乗とアスペクト比に反比例する。ここで実効粘性率を液体粘性率の1000-10000倍とすると、実験結果を良く説明する。この実効粘性率の値は、Einstein-Roscoeの方程式によると、粉粒体の packing fractionが50-60%程度のサスペンションのものに相当し、その表面流が発生する条件から得られる packing fractionの上限値と整合的である。