19503

粒子層内落下物体の特異協調挙動発生メカニズムの検討

Investigations of the Generation Mechanism of Cooperative Behavior of Disks Falling in a Particle Bed

援助対象者 Scholarship Student: 川幡 大知 Daichi KAWABATA

川幡 大知

同志社大学大学院理工学研究科 博士課程後期 2 年

Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, PhD Student (D2)

E-mail: cyjd1701@mail4.doshisha.ac.jp

研究指導者 Academic Leader: 白川 善幸 Yoshiyuki SHIRAKAWA

教授, Professor

E-mail: yshiraka@mail.doshisha.ac.jp

抄 録

現在まで、数多くの興味深い粉体挙動の報告がなされている。その一例に、粉体中を複数の円盤が落下する際、円盤が特異な配置を繰り返しながら落下する挙動がある。この挙動は円盤の落下に伴う粉体層の状態変化が影響し、発生すると考えられる。本研究では、2 個の円盤の初期投入距離と時間差を変化させて層内に投入し、その挙動を解析することにより落下挙動におよぼす物体間相互作用を検討した。

ABSTRACT

Several interesting phenomena of particle behavior have been reported to date. One of them is that the several disks fall while becoming unique configurations under the condition that they are dropped into a particle bed. This behavior is called “cooperative behavior” and can occur due to the state change of particle bed with the disks falling. In this study, we dropped only two disks into the bed with various the disk initial distance and the dropping time differences, and the interaction between the disks was investigated by analyzing the falling behavior.

成 果 の 概 要

1. 緒言

現在まで、数多くの興味深い粉体挙動の報告

がなされている。そのような粉体挙動の一例として、粒子層での落下物体の特異協調挙動が報告されている (Pacheco-Vázquez and Ruiz-Suárez, 2010)。これは、奥行き一層のポリスチ

レン粒子層に5個の鉄製円盤を上部より同時に投入すると円盤の落下に伴い、それらの配置が上に凸、水平、下に凸という特異な配置を繰り返し形成するという報告である。我々は既報 (Kawabata D. et al., 2020) にて本挙動の発生メカニズムモデルを提案しているが、粉体層の状態変化が及ぼす影響の詳細については不明な部分が多い。そこで本研究では、2物体の初期投入距離を変化させて層内に投入し、その挙動を解析することにより、沈降挙動に及ぼす粉体層状態の影響を検討した。

2. 実験方法

図1に実験装置の概略図を示す。高さ500 mm、横幅350 mm、奥行き5.5 mmの塩化ビニル容器に奥行きと同程度の直径5.0 mmのポリスチレン粒子を充填し、奥行一層、高さ425 mmの2次元粒子層を作製した。その後、直径25.4 mm、厚み5.0 mmの鉄製円盤を粒子層表面から50 mmの位置から、投入した。初期投入距離は2物体の表面間距離を10 mm～60 mmとした。図1に示されている層内の固定円盤に関しては後述する別実験でのみ使用する。そして、円盤の沈降挙動を高速度カメラで撮影後、動画解析ソフトにより解析した。

3. 実験結果

図2 (a): 先に落下させた円盤 (以下第一円盤), (b): 後に落下させた円盤 (以下第二円盤)) に投入時間差 0.022 ~ 0.030 s の場合に投入距離

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

を変化させた際の経過時間 t における円盤の高さを示す。比較として単一の円盤を落下させた際の結果も同時に示す。また横軸の時間は各円盤が落下し始めた時間を 0.0 s とした。図 2(a) より、単一円盤のみ落下させた条件では円盤は大きな減速を伴わず落下していることがわかる。投入距離が 10 mm, 30 mm の条件における、第一円盤の落下速度は、経過時間が 0.2 s 付近で傾きが急に変化し、大きく減速していることがわかる。また、投入距離が 60 mm の条件でも 0.2 s 付近で傾きが小さく変化していることから、緩やかに減速していることがわかる。またどの投入距離条件においても、減速した後に加速していることがわかる。この落下途中に第一円盤が減速し、加速する現象は円盤投入時間差が 0.076 s の条件 (初期投入距離 10 mm) でも確認された。次に図 2(b) より第二円盤に対しては、投入距離が 10 mm と 30 mm の条件においては、それぞれ経過時間が 0.3 s と 0.4 s 付近で大きく減速していることがわかる。また 60 mm の条件では、減速をしない落下が確認できる。これらの結果から、円盤間の水平方向の相対距離に関しては、投入距離が 30 mm 以下の条件で第一円盤が減速した後、第二円盤も減速することがわかった。

次に円盤が落下する際の速度変化に影響をおよぼす範囲について検討するため、図1に示したように片方の円盤を粒子層内に固定し (以下固定円盤)、粒子層上部から水平方向の表面間

Fig. 2 Variation of the height of (a) first disk and (b) second one as a function of time under some conditions about initial disk distance.

距離で 5 mm ~ 50 mm の位置から、単一円盤のみを投入した。図 3 に固定円盤上下領域 (a) : 固定円盤中心から上部 100 mm の領域 (白), (b) : 下部 100 mm の領域 (黒)) での投入円盤と固定円盤の水平方向の表面間距離 d_s に対する投入円盤の落下速度 V_f を示す。ここで、円盤中心から上下それぞれ 100 mm の領域を通過する際の平均落下速度を V_f と定義した。また、固定円盤が投入円盤の沈降挙動に及ぼす影響を検討するため、固定円盤を入れず単一円盤のみを投入した結果も同時に示す。図 3(a) より、固定円盤上部の領域ではどちらの条件も d_s の値に関わらず、 V_f はほぼ一定値を取っていることが確認できる。次に図 3(b) より、固定円盤が存在する条件は単一円盤のみを落下させた条件に比べ、固定円盤下部の領域での $d_s < 30$ mm の範囲では、 V_f の値は大きく減少することがわかる。しかし、 $d_s > 30$ mm の範囲では、その減少量は小さいことがわかる。これらの結果より、固定円盤下部の領域での $d_s = 30$ mm の条件から V_f の傾向に変化が見られ始めたことから、円盤が落下する際の相互作用は円盤表面から 30 mm の範囲付近にまで及ぶと考えられる。また円盤の沈降挙動に関しては、その円盤の下部よりも上部に位置する物体の影響を受けることが示唆された。これにより、図 2 の投入距離が 60 mm の条件では、第一円盤には落下速度のわずかな減少がみられたが、第二円盤に関しては第一円盤ほどの減速が見られなかったと考えられる。

図 2 の結果において、第一円盤の落下速度が減少した原因と、投入距離によってその減速度

合いに変化が見られた原因について考察する。各条件の沈降挙動の動画から円盤周りの層粒子の流動状態に違いがあることが確認できた。図 4 に投入距離を変化させた条件で、減速がみられた経過時間 (0.2 s 付近) での各条件のスナップショットを示す。また比較のため、単一円盤を投入した際のスナップショットも同時に示す。なお、どの条件も左側に位置する円盤が第一円盤である。図 4 より、どの条件においても第一円盤下部の充填率がほぼ一定であることがわかる。しかし、落下速度が減少しなかった条件 (単一円盤) と比較すると、二円盤を投入した条件では第一円盤上部の充填率が大きいことがわかる。これは、第二円盤の落下によって第二円盤周辺の層粒子が動きやすくなることに伴い、第一円盤周囲の層粒子が第一円盤上部への移動を促進するため、第一円盤上部の充填率が大きくなったと考えられる。円盤上部の充填率が大きいとき、円盤周りの層粒子は円盤上部へと移動しにくくなる。その結果、円盤の落下が

Fig. 3 Falling velocities in (a) upper area and (b) lower area of a fixed disk as a function of surface distance between intruding disk and fixed one.

Fig. 4 Snapshots of disks falling behavior (a) one disk, (b) 10 mm, (c) 30 mm and (d) 60 mm initial disk distance at about 0.20 s.

抑制されるため落下速度が減少する。この効果は、その両円盤間の相対距離が小さいほど大きくなるため、投入距離が 10 mm, 30 mm の条件と 60 mm の条件では、落下速度の減少度合いに差が生じたと考えられる。一方、円盤下部の充填率に顕著な差が見られなかったことを考えると、他の落下物体との相対距離により決まる物体上部の充填率が沈降挙動に大きく影響を及ぼしているということが示唆された。

外部発表成果

口頭・ポスター発表

1. 川幡 大知, 山田 雛乃, 林 千晴, 下坂 厚子, 吉田 幹生, 白川 善幸, “粒子層での二物体沈降挙動に及ぼす投入位置と時間差の影響”

参考文献

- Kawabata D., Yoshida M., Shimosaka A., Shirakawa Y., Discrete element method simulation analysis of the generation mechanism of cooperative behavior of disks falling in a low-density particle bed, *Advanced Powder Technology*, 31 (2020) 1381–1390.
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.01.008>
- Pacheco-Vázquez F., Ruiz-Suárez J.C., Cooperative dynamics in the penetration of a group of intruders in a granular medium, *Nature Communications*, 1 (2010) 123.
<https://doi.org/10.1038/ncomms1123>

響”, 粉体工学会 2020 年度春期研究発表会.

2. 川幡 大知, 山田 雛乃, 林 千晴, 下坂 厚子, 吉田 幹生, 白川 善幸, “粒子層での二物体沈降挙動における物体間相互作用の実験的解析”, 粉体工学会 2020 年度秋期研究発表会 (東京, Nov. 17–18, 2020).