流動する粒状体の停止メカニズムに関する実験

東北学院大学　工学部　環境建設工学科　（学）○南條　早紀
柳沢　貴宏
（正）　飛田　善雄

1. はじめに

一定角度を有し側壁がある斜面(斜面長さ L=1.8m)に対して、斜面角度θを変え(θ＝10，20，30°)、一定量のガラスビーズを用いて流動実験を行い、速度の斜面角度依存性、流れのパターンなど流動挙動を観察した。

さらに、ある間隔で杭をうち粒状体の流動を停止させることを試み、流動停止時に示す粒子構造のパターンを詳細に観察するとともに、粒状体特有の力を伝達する構造の生成が流動の停止をもたらすという観点から停止メカニズムを考察した。

2. 実験器具

1)斜面

実験に使用した斜面は、以下の条件とした。

・斜面の長さ：1.8 m

・斜面角度：10, 20, 30°

・スタート位置から杭を模した釘の設置場所までの距離：0.75 m

2)粒子の物性

今回の実験では、粒径の異なるほぼ球状のガラスビーズ2種類を用いた。その基本的物性を表-1に示す。

表-1　粒子の物性

ガラスビーズ	粒径 D(mm)	粒子密度 ρ(g/cm^3)	安息角 θ°
No. 2	2.0	1.545	19.1°

3. 実験項目

本実験では、様々な条件のもとに流動する粒状体を停止させ、残留率への影響を観察した。対象とした実験項目とその実験における主要な観察結果を以下に記す。

1)運動エネルギーによる影響

ガラスビーズを停止させるために、プラダンに釘を5mm間隔で打ったものを斜面に設置した。始点から75cmの距離を流動させたものと、流動距離ゼロのもので停止率の比較を行った。釘に接する部分では、粒状体の停止構造が観察できた。

2)釘幅と斜面角度による影響

釘の打つ間隔(x＝ 8.0, 7.0, 6.0, 5.0, 4.5, 4.0, 3.5 cm)と列の数(1, 2 列)、斜面角度θ(θ＝10,20,30 度)を変えた。実験条件によって粒子の残留率に変化がみられ、残留率の増加に一定のパターンがみられた。

3)停止装置変更による影響

釘の部分をコンクリート用釘、ねじ、金網と形状を変えてガラスビーズを流した。形状変化により、それぞれ残留率に変化がみられたが、特に網での残留率の増加が著しかった。

4. 実験条件による残留率の比較

1)運動エネルギーによる残留率への影響

粒状体が運動エネルギーを有する場合と有さない場合の残留率の差は、3％（無/有＝1.1)であった。

2)釘間隔による残留率への影響

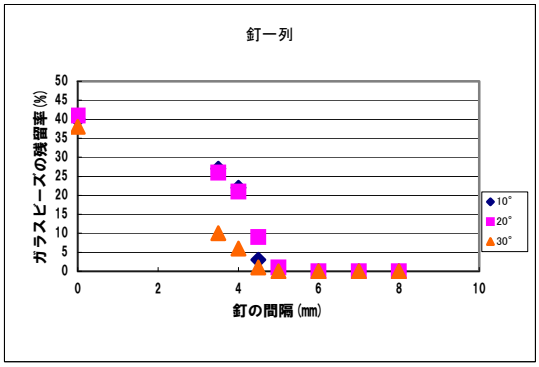
粒子の粒径に対して釘同士の間隔が狭くなるにつれて、残留率は徐々に上がっていき、ある釘間隔で増加の傾きが急になった。また、釘の間隔が5mm～8mmの間では、各釘間隔でのガラスビーズの残留率にはばらつきがあり、平均値はゼロとなるもののわずかではあるが残留がみられた。

3)斜面角度による残留率への影響

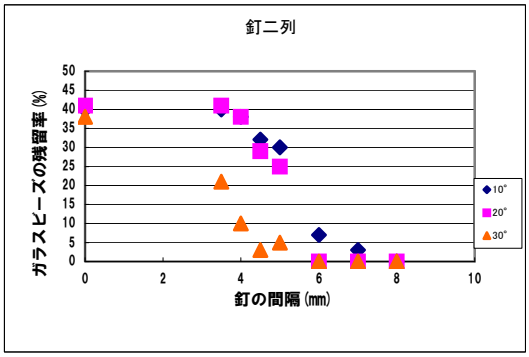
斜面角度は10，20°の場合には残留率に大きな変化は見られないが、30°になると残留率は10，20°の半分に減少した。傾斜角度が20°から30°の間に残留率が大きく変化する臨界点がある。

4)釘の列による残留率への影響

図－1に示すように、釘が1列よりも2列の方が残留率は増加した。1列では粒子の残留がゼロであった釘の間隔でも、2列では粒子の残留がみられた。また、2列の場合には、釘の間隔が3mmのとき10°と20°で残留率が最大値とほぼ同じになった。



図－1　釘1列・斜面角度θ(θ＝10, 20, 30°)を変えたときの残留率



図－2　釘2列・斜面角度θ(θ＝10, 20, 30°)を変えたときの残留率

5) 停止装置の形状による影響

○ねじの場合(1,2 列)

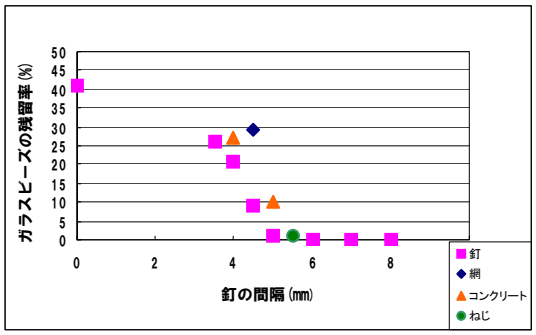
丸釘とねじでは、残留率に明確な差はみられなかった(以下、図－3 参照)。

○コンクリート用釘の場合(1, 2 列)

丸釘とコンクリート用釘では、残留率の差はほぼないに等しい。ただし、コンクリート釘 2 列、斜面の傾斜角度が 30° の場合のみ丸釘の 2 倍の残留率になる。

○網の場合(1 列)

網の残留率は丸釘1列の3倍近くになった。また、丸釘2列の残留率に近い値をとった。



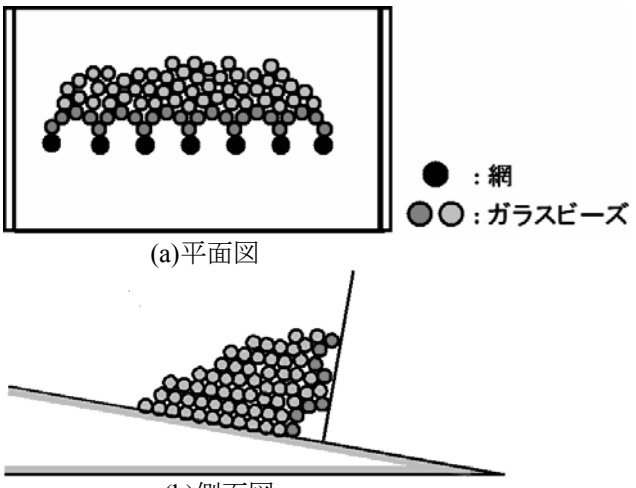
図－3　障害物 1 列・斜面角 20 度の残留率

5. 粒子の停止パターンの観察

全実験を通して、流動する粒状体のとる停止パターンが確認できた。

1)アーチによる閉塞

釘部分での停止構造を調べると、アーチ構造をとり閉塞している部分が多く見られた。一方で、何箇所か 2 粒が同時に挟まっている箇所も見られたが、アーチ構造を多くとるほど残留率が増加した。また、丸釘からコンクリート用釘に変更することで、釘が太くなったため土台が安定し、より多くのアーチ構造での閉塞がみられた。網では、水平方向に加えて垂直方向にもアーチ構造が形成された(図－4 参照)。



(a)平面図

(b)側面図

図－4　粒状体のアーチ構造

2)釘の間隔

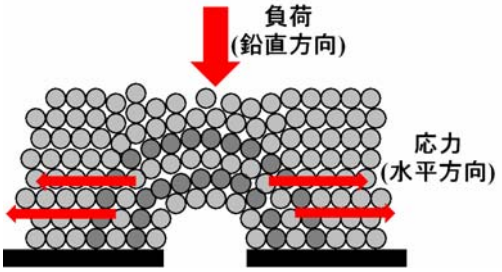
流動する粒状体は、釘の間隔が粒径の 3 倍以下の幅で停止構造をとった。1 列では粒子の残留がゼロであった釘の間隔でも、2 列では粒子の残留がみられたことから、粒径に対して釘の開口部が多少大きい場合には、停止構造はとるものの準安定となる。本実験では丸釘の場合、1 列では 4mm～5mm の間に、2 列では 5mm～6mm の間に安定した停止構造をとれる臨界点が存在すると考えられる。

6. 考察

実験全体を通して、粒子は停止するときアーチを主とする安定した停止構造をとることが分かった。

粒子にかかる力は、粒子同士の接触点に沿って伝わっていくため、横方向に向きを変える傾向がある(図－5 参照)。この挙動は、鉛直方向に圧縮された均質な固体の場合と著しく異なる。応力が元々の負荷の方向に対して垂直な方向に向けられてゆく傾向は、粉粒体の本質的な特徴である。この性質のために、本実験の粒状体の停止においても、アーチ効果(arch effects)として知られている重要な現象が引き起こされ、それが粒状体の停止において重要な役割を果たしていると考えられる。

粒子が停止構造をとるためには、アーチ構造をとるための足がかりとなる土台が必要となる(土台となるものの開口部は粒径の 4 倍以下が有効である)。本実験では丸釘のデータを基に、ねじ、コンクリート釘、網でも粒状体の停止を試みた。前述の実験結果からも分かる通り、アーチ構造を形成する足がかりとして網がもっとも適しており、水平及び垂直方向にアーチ形成を促し、効率よく粒子を停止させることができた。



図－5　粉粒体のアーチ形成

7. まとめ

本実験では、様々な実験条件のもとで流動する粒状体の停止実験を行い、粒状体のとる停止メカニズムに注目した。

アーチ構造は、鉛直方向にかかる力をアーチに沿って水平方向に伝達することで、力を分散して外力に抵抗する。よって、流動する粒状体を停止させるためには、粒子がアーチ構造をとりやすいように足がかりを作ることが必要となる。本実験の結果で網が有効であったことからも分かるように、水平方向と鉛直方向の二方向からアーチ形成を促進することが、粒状体の停止メカニズム形成に有効となる。

8. 参考文献

1) 中西秀、奥村剛(2002)：「粉粒体の物理学」

2) 地盤工学会　地盤工学用語辞典改訂編集委員会：地盤工学用語辞典

3) 田口　善弘　著：砂時計の七不思議