

濡れた粉体層における穴構造の力学特性

篠田明友子¹, 藤原慎一², 桂木洋光¹
名大院環境¹, 名大博物館²

1. はじめに

生物の巣穴はその生態解明や巣穴形成時の環境を復元するための重要な情報である。そのため、先行研究では現生のスナガニが砂浜に形成する、斜めに伸びた巣穴の形態ついて調べられている¹⁾。しかし、このような巣穴のサイズが砂浜の物理的な環境条件によってどのように制約されているかについて、定量的な議論はこれまでにされていない。

一方で、砂浜の砂のような水に濡れた粉体の力学特性についてはソフトマター物理の問題としてこれまで研究されてきた。例えば、濡れた粉体の引張強度は含水率(濡れた粉体層の全体積に対する水の割合)に非線形的に依存することが明らかにされている²⁾。しかし、生物の巣穴のような特殊な構造における濡れた粉体の力学特性はこれまで調べられてこなかった。そこで、本研究では砂浜に形成される巣穴を濡れた粉体層中の穴構造とみなし、この穴構造の力学特性を、実験的手法を用いて調べた。

2. 研究手法

本研究では、水で濡らしたガラスビーズの層に横穴を開けて、粉体層の上面から万能試験機を用いて一定速度で一様(面的)に荷重をかける実験を行った。実験条件として、含水率 W と充填率 ϕ (濡れた粉体層の全体積に対する粉体の体積の割合) を変化させた。このとき、载荷中の穴の変形の様子を、透過光を用いて動画撮影し、これを画像解析して穴の断面積および相当直径(穴の断面を円形と仮定した場合の直径)を計測した。また、穴が変形する際の圧縮の抵抗力も同時に測定した。

3. 結果

穴の開いた粉体層に一定速度(0.5 mm/s)で荷重をかけると、初期状態において円形である穴の断面が徐々にその形状を崩しながら縮小していく様子が見られた(図1)。このとき、穴が縮むタイムスケール

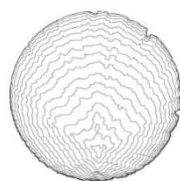


図1 穴の変形の様子。穴の輪郭(0.5 s 間隔)を重ねた図。

は含水率が大きいほど、また充填率が小さいほど長くなることがわかった。さらに、抵抗力の時間変化は単調増加を示すが、含水率が大きくなるとその定性的挙動が変化する様子が見られた。

4. 解析

実験で得られた穴の相当直径と抵抗力をもとに、トンネルにかかる最大剪断応力のモデル³⁾を用いて穴にかかる最大剪断応力を求めた。このモデルでは、穴の2次元断面構造が図2のようなトンネル構造であると仮定し、鉛直方向の静的な力のつり合いからトンネルにかかる最大剪断応力を以下の(1)式のように推定している。

$$\tau = \frac{\sigma + \rho g C}{2 \ln(2C/D + 1)} \quad (1)$$

(1)式で、 τ は最大剪断応力、 σ は外部圧力、 ρ は粉体層のかさ密度、 D はトンネルの穴直径、 C は上部厚さ、 g は重力加速度である。ここで、 D は相当直径、 $\sigma = F/(押し込む板の面積)$ 、 $\rho = \phi \rho_{grain} + W \rho_{water}$ とした。

(1)式を用いて求めた最大剪断応力の穴の変形(相当直径 D)に対する変化(図3)の中から、穴構造の力学特性を特徴づける2つの強度に着目した。1つ目は降伏応力 τ_{yield} で、これは穴の変形し始めを特徴づける強度である。2つ目は τ の最大値 τ_{max} で、 $\tau = \tau_{max}$ に達するまでの穴の変形の履歴を含め、穴の変形全体を特徴づける強度である。そこで、これらの含水率及び充填率依存性について調べた。

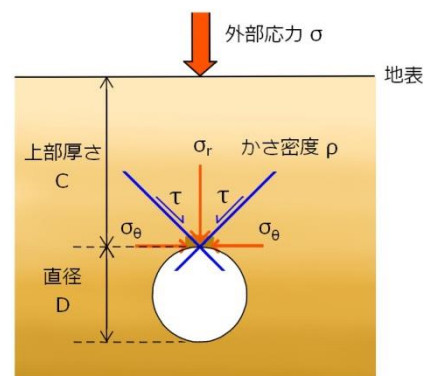


図2 トンネルモデルの概略図。

5. 議論

5.1 τ_{yield} と τ_{max} の含水率および充填率依存性

2つの強度の含水率依存性を見ると、 τ_{yield} はピークを持つのに対し、 τ_{max} は単調増加を示すことがわかった(図4)。また、充填率に対しては両者とも単調増加を示す。含水率が小さい領域では、粒子間に形成される液架橋が粉体同士を結合させる働きをするため、含水率の増加に伴って τ_{yield} が増加するが、含水率が大きい領域では水が粒子間の摩擦力を減らし、粉体層の流動性が増すため τ_{yield} は減少すると考えられる。一方で、 $\tau = \tau_{\text{max}}$ となるときは穴の変形がある程度進んでおり、その分粉体層が初期状態に比べて圧縮されている。含水率が大きいほど穴が縮むタイムスケールは長くなるため、より圧縮されて充填率が大きい状態になっている。 τ_{max} は充填率に強く依存するため、 $\tau = \tau_{\text{max}}$ となるときの充填率の違いによって、 τ_{yield} とは異なり、単調増加を示すと考えられる。

5.2 巣穴への応用

本研究で得られた実験データから推定される濡れた粉体層中の穴構造の強度を、実際の巣穴と照らし合わせて議論する。まず、スナガニの巣穴の観察結果^{1) 4)}に基づき、砂浜にある巣穴を仮定して $W=0.22$, $\phi=0.55$, $D=20$ mm, 砂の真密度を 2.5 g/cm³ と設定した。 τ_{yield} を降伏強度とみなした場合、上記のような条件における降伏強度は、およそ 850 Pa である。ここで、穴構造にかかる最大剪断応力がすべて上部層の自重によるものとし、(1)式で $\sigma=0$ とした場合に穴が形状を維持できる限界の深さを求めた。その結果、およそ 40 cm という深さが得られた。

一方で、実際の観察¹⁾では深さ $10\sim 90$ cm で直径 $10\sim 40$ mm の巣穴が観察されており、実験データから推定される限界の深さはこれと整合的であるといえる。しかし、実際の巣穴の強度や周辺環境に対する定量的な指標として応用していくためには、実際の巣穴により近いセットアップで実験を行い、得られた実験データと巣穴およびその周辺の砂浜の含水率や充填率を比較して議論する必要がある。

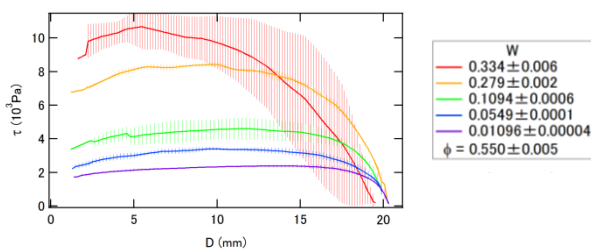


図3 最大剪断応力 τ の相当直径 D に対する変化。

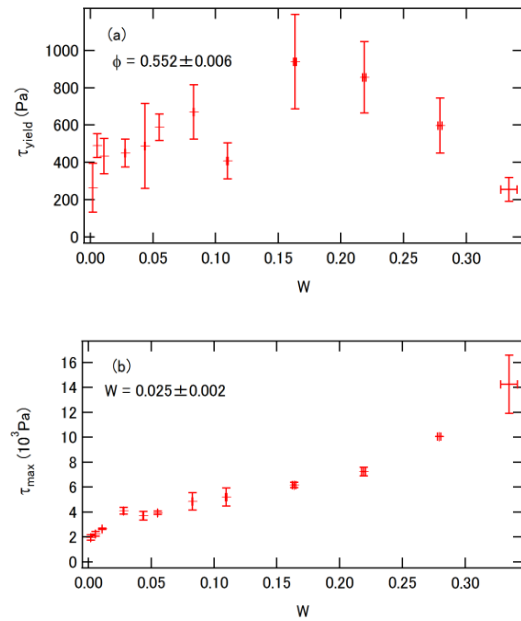


図4 (a) τ_{yield} と (b) τ_{max} の含水率依存性。

6. 結論

本研究では、カニなどの生物が砂浜に作る巣穴の強度を定量的に調べる第一歩として、濡れた粉体における穴構造の力学特性に重点を置いて実験的研究を行った。その結果、穴の変形様式が含水率に依存することがわかった。さらに、穴の変形に伴う最大剪断応力の変化の中から、穴構造の力学特性を特徴づける2つの強度に着目したところ、これらが異なる含水率依存性を示すことがわかった。さらに、実験結果から得られた強度に基づき、濡れた粉体層中で穴の形が維持される限界の深さを求めた結果、実際に観察された巣穴の大きさと整合的であることがわかった。

今後は、穴構造の力学特性をより詳しく調べる実験を行い、実際の巣穴や砂浜を観察し結果を比較することで、生物や環境を調査する際の指標としての巣穴に物理学的側面から情報を提供できるようにしたい。

引用文献

- 1) Seike and Nara, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **252**, 458 (2007).
- 2) Schubert, Agglomeration, 77, 144 (1977).
- 3) Knappett and Craig, Craigs Soil Mechanics, 490 (2012).
- 4) Sassa and Watabe, Report of the Port and Airport Research Institute, **45**, 4, 61 (2006).