スナガニ巣穴の力学的安定性の議論へ向けた濡れた粉体層中の横穴構造の強度推定実験

篠田 明友子¹, 藤原 慎一², 新屋 啓文^{1,3}, 桂木 洋光^{1*}

Experimental Study of Stability and Strength of a Horizontal Tunnel in Wet Granular Layer: Empirical Forms of Strength to Discuss the Mechanical Stability of Crab Burrows

Ayuko Shinoda¹, Shin-ichi Fujiwara², Hirofumi Niiya^{1,3} and Hiroaki Katsuragi^{1*}

Received 3 September 2018; Accepted 7 November 2018

Empirical forms for the strengths characterizing stability of a horizontal tunnel in wet granular matter are experimentally derived. The motivation of this study comes from the observation of crab burrows on sandy beach. To understand the mechanical constraints for constructing the stable burrow structures, we perform a set of simple experiments with a horizontal tunnel structure made in a wet granular layer. Then, the tunnel is compressed from the top of the layer using a universal testing machine. During the compression, the shrinking tunnel shape is captured by a camera. Using the measured compression force, stroke, and shrinking tunnel images, we define and measure the mechanical strengths of wet granular matter with a horizontal tunnel. By systematically varying the experimental conditions, we obtained the empirical forms for estimating strength values. Using the measured results, we briefly discuss the mechanical conditions of sandy crab burrows.

Keywords: Strength of wet granular matter, Tunnel stability, Crab burrows, Uniaxial compression experiment.

1. 緒 言

夏季を中心とした温暖な時期に砂浜にでかけるとスナガニの仲間 (*Ocypode*: Fig. 1 (a)) の巣穴 (Fig. 1 (b)) をいたるところに見つけることができる。巣穴の入り口の直径は2~3 cm程度で、スナガニの甲羅の大きさに合わせて作られており、巣穴の内壁に特別な補強はされていない。スナガニの巣穴は入口から斜めに掘られ、奥の方で徐々に水平に近づいていく。巣穴が作られている砂浜は、潮汐や気候の影響を受けてその状態を常に変化させているが、基本的には湿り気を含む砂粒で構成されている状態にあると考えられる。このような「濡れた粉体」とみなせる層は、土壌や岩盤などの層に比べ穴を掘るこ

とが容易であると考えられる一方、作られた穴の強度もさほど強くないと考えられる。そのような環境でスナガニは巣穴を作り、暑さや乾燥、捕食者の脅威から逃れるために日中の多くの時間を巣穴内で過ごしている。また、巣穴を掘ることは砂浜環境の物質循環を活性化させる効果もあるとされており[1,2]、巣穴はしばしば生痕化石として地層中に残ることも確認されている[3]。そのため、巣穴の状態は(古)環境推定の指標としても有用となりうると考えられている。

実際のスナガニ巣穴の直径の上限は数 cm 程度となっている。上述のように、基本的に巣穴の直径はスナガニの体の大きさによって決まっており、スナガニの生態や生息環境への適応などに関する何らかの制約によってスナガニの体の大きさが決まり、その結果として巣穴の直径が決められていると考えられる。しかし一方で、巣穴を作る基盤である湿った砂浜環境の砂を用いて安定的に作ることができる巣穴の直径や深さなどのサイズ自体も濡れた粉体層の力学特性によって制約されている可能性がある。

そこで本研究では、スナガニの巣穴のようなトンネル構造が濡れた粉体層中でどの程度安定的に存在しうるかについて、粉体物理の側面からの検討を試みることにした。濡れた粉体層における強度などの力学特性は、含水率に依存して複雑に変化することが知られており[4,5]、

1 名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University
(Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan)
2 名古屋大学博物館
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
Museum, Nagoya University
(Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan)
3 新潟大学 研究推進機構 超域学術院
(〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050 番地)
Center for Transdisciplinary Research, Niigata University
(8050 Ikarashi-nino-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181, Japan)
* Corresponding Author katsuragi@eps.nagoya-u.ac.jp

Fig. 1 (a) A ghost crab and (b) a crab burrow

その統一的理解は必ずしも簡単ではない[6,7]。また、充填率や構成粒子のサイズも濡れた粉体層のバルク強度に影響を与えることが知られている[8,9]。たとえば、含水率が比較的小さな領域では粒子間の液架橋力の効果により濡れた粉体層の強度は向上する。一方、含水率が比較的大きな領域では水の影響により粒子間の摩擦が低減され、滑りが起こりやすくなることにより、粉体層が比較的容易に変形可能な状態となる。これらの効果が複雑に絡み合って濡れた粉体層の力学特性は決定されるため、その振る舞いは非線形性を示すことが多い。濡れた粉体層の力学特性の解明を目指した研究はこれまで数多く行われてきたが[10–17]、穴構造の安定性に関する議論は、我々が知るかぎりこれまでに行われていない。そこで本研究では、湿った砂浜にあるスナガニ巣穴の力学特性を議論する第一歩として、濡れたガラスビーズ層に作られた横穴（トンネル）構造の力学特性について実験的に調べることにした。この単純化された実験系は天然の巣穴条件を直接的に再現することはできないが、濡れた粉体層の物理特性について基本的性質をまずは明らかにするために、本研究ではあえてシンプルなモデル系での実験を行う方針とした。

2. 実験方法

濡れた粉体層の基本的物理特性を明らかにするために、実験としては可能なかぎりシンプルな系を採用した。用いた実験セルの概念図を Fig. 2 (a) に示した。具体的実験の手順を以下に示す。直方体の容器にあらかじめ直径 D_0 の横穴を開けておく。そこに直径 D_0 の円柱を挿入した状態でガラスビーズと水（水道水）の混合による濡れた粉体層を、充填率を注意深く調整しながらトンネル上部の層厚が C （この実験では常に $C = 20$ mm とした）となるまで充填する。その後、円柱を抜き去ることにより濡れた粉体層中の横穴（トンネル）構造を準備する。用意した実験セル内の濡れた粉体層全体を Fig. 2 (a) に示すように上面から一様に圧縮する。圧縮には万能試験機（島津製作所、AG-X 5 kN）を用い、圧縮時の変位と力を 100 Samples/s で計測した。また、圧縮中の横穴構造の変形の様子を CMOS カメラ（センテック、STC-

Fig. 2 Experimental setup and raw data example of compressed tunnel structure. (a) Schematic image of the experimental cell is shown. (b) Superimposed tunnel boundaries and (c–f) corresponding raw images are displayed. Experimental conditions are $W_0 = 0.011$, $\phi_0 = 0.55$, and $C = 20$ mm.

MCCM401U3V) を用いて 2 frames/s のレートで撮影した。セル上面からの圧縮はすべての実験条件において一定速度 (0.5 mm/s) で行った。なお、この圧縮速度が慣性の効果を無視できるほど十分小さいことは予備実験により確認した。容器の側壁に開けられた直径 D_0 の穴は、横穴の圧縮実験中も開放されている状態とした。ただし、この穴より粉体が漏れ出るような挙動はほとんど確認されず、横穴の圧縮は擬二次元的に起こっているとみなせる。これらの力学的計測と横穴の形状計測の結果を元に、濡れた粉体層中の横穴構造の力学特性について、次節以降議論を進める。

実験で変化させたパラメーターは、初期含水率 W_0 、初期充填率（固体分率） ϕ_0 、初期横穴直径 D_0 、およびガラスビーズの平均粒子直径 d である。 W_0 と ϕ_0 は粉体層全体の体積（横穴部分を除く）に対する水と粒子の体積分率の初期値として、それぞれ以下のように定義される。

$$W_0 = \frac{V_{\text{water}}}{V_{\text{total}}} \quad (1)$$

$$\phi_0 = \frac{V_{\text{grain}}}{V_{\text{total}}} \quad (2)$$

ここで V_{total} 、 V_{water} 、 V_{grain} はそれぞれ、粉体層の全体積、水の占める体積、粒子の占める体積を表す。体積計算のために必要となる水とガラスビーズの真密度は、それぞれ $\rho_{\text{water}} = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_{\text{grain}} = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とした。一様に濡れた粉体層を作成するために、乾燥したガラスビーズと水を円筒容器に入れてポッドミル回転台（日陶科学、ANZ）上で 10 分間回転させ (100 rpm) 両者を十分に混合した。パラメータは $0.003 \leq W_0 \leq 0.33$ 、 $0.44 \leq \phi_0 \leq 0.56$ 、 $D_0 = 5, 10, 20 \text{ mm}$ 、 $d = 0.1, 0.4, 0.8 \text{ mm}$ (AS-ONE, BZ-01, 04, 08) の範囲で変化させ、 D_0 を変化させるために異な

るサイズの実験セル ($(D_0, X, Y, Z) = (5 \text{ mm}, 75 \text{ mm}, 40 \text{ mm}, 100 \text{ mm}), (10 \text{ mm}, 80 \text{ mm}, 40 \text{ mm}, 105 \text{ mm}), (20 \text{ mm}, 100 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 120 \text{ mm})$) を用いた (X, Y, Z の方向については Fig. 2 (a) を参照)。このように、 D_0 の増加に合わせて容器サイズも増加させているが、実験装置の制約などの関係から、 D_0 に対する容器サイズの相似比や横穴壁と容器壁との距離などを完全に一定に保つことはできなかった。

3. 実験結果および考察

3.1 横穴収縮の様子

Fig. 2 (b) に実際に撮影した画像から抜き出した横穴境界形状の時間発展 (1 s 間隔) を重ね書きしたものを、Fig. 2 (c-f) にカメラにより撮影された実際の画像のデータを示す。このときの実験条件は $W_0 = 0.011$, $\phi_0 = 0.55$ であった。本実験では透過光を用いて横穴形状を撮影したため、Fig. 2 (c-f) において中央の明るい部分が横穴に相当する。Fig. 2 (b) より、横穴構造は、最初は円形に近い形状を保ちつつ縮小し、徐々に非円形となり、最終的には消滅していることがわかる。本論文で報告する範囲より大きな初期横穴径 D_0 をとった場合 (もしくは粒径 d が大きい場合) に、横穴構造が、Fig. 2 (b) で示されるような連続的収縮でなく、突発的崩壊を示すことも我々の最近の実験で明らかとなっている [18]。しかし、本論文では連続的収縮を示す横穴の力学的特性の解析に焦点を絞ることとする。この連続的収縮相では、横穴の形状は奥行方向 (Y 方向) にほぼ一様に変形しており、Fig. 2 の画像による二次元的解析により横穴構造断面の力学を適切に議論することが可能となる。また、Fig. 2 (b) より、上から圧縮を加えているために横穴の上方が顕著に収縮していることがわかるが、連続的収縮相では上からの崩落などがないことを考えると、側方や下方からの圧縮もわずかながら受けていることが見てとれる。

3.2 横穴収縮と圧縮力

横穴形状の時間変化に対する初期含水率および初期充填率の影響を定量化するため、横穴の変形と圧縮に要する力の関係を CMOS カメラおよび万能試験機を用いて計測した。Fig. 3 に画像解析により求められた横穴の断面積 A と圧縮力 F をそれぞれ時間 t の関数として示した。Fig. 3 (a,c) では W_0 を変化させ、Fig. 3 (b,d) では ϕ_0 を変化させ、それぞれそのほかのパラメータは固定された際の実験結果が示されている。Fig. 3 (a,c) には同一実験条件で 3 回実験を行った結果の平均と標準偏差が示されており、Fig. 3 (b,d) には各実験条件下で行われた 1 回の実験の結果が表示されている。Fig. 3 (a,c) より、繰り返し実験回数は 3 回と多くないもののトンネルの圧縮特性はほぼ再現性のある結果が得られていると考えられる。Fig. 3 (a,b) より、 W_0 が大きいかもしれない ϕ_0 が小さい場合に横穴の収縮が比較的ゆっくりと進むことがわかる。これは、横穴部分以外の濡れた粉体層が「水分による粒子間の潤滑化」と「低充填率による空隙領域の存在」のために効率的に圧密を受けるためと考えられる。この傾向

に対応するように Fig. 3 (d) において ϕ_0 と F が正の相関を持ち、 ϕ_0 が大きくなるに連れて F の値も大きくなることが確認できる (F は充填率が大きな場合により大きな値をとる)。ただし、Fig. 3 (c) における F と W_0 の関係は単調ではなく、 W_0 が小さすぎても大きすぎても F の値が小さくなることがわかる。この含水率に関する強度挙動の非単調性は、低含水率領域では粒子間液架橋力の効果により濡れた粉体層の強度が上昇し、高含水率領域では間隙流体による粒子間摩擦の低減が起こるという効果の重ね合わせに対応すると考えられる。この非単調性が起こる含水率の値 $W_0 = 0.245$ は、文献 [7] によると、粉体層中における間隙水の分布様態が funicular 相から bubble 相へ移り変わる値 $W_0 = 0.28$ に近く、濡れた粉体層中の横穴構造の力学特性がこの間隙水の分布状態の変化にほぼ対応して起こっていると考えられる。Funicular 相までは空隙が十分水で埋められていないのに対して、bubble 相では間隙水中に気体が気泡状に点在する状態となる [7]。このことより、液体と気体の混合割合とその分布状態が濡れた粉体層の力学特性を大きく左右することがわかる。

前述のように、 D_0 または d が大きい場合には、横穴構造の突発的崩壊がみられるためその力学特性の計測には限界があった。また、時間的・技術的制約からすべての実験条件で網羅的な実験を行うことはできず、今回の実験では、比較的实际のスナガニ巣穴の状況に近いと思われる適度に湿った粉体層の領域で、横穴構造が載荷により連続的に収縮する条件に集中し実験・解析を行った。

3.3 横穴構造にかかる最大せん断応力

濡れた粉体層中の横穴構造の力学的安定性や強度について定量的に議論するためには、横穴構造にかかる応力の値を推定することが必要となる。そこで本研究では、地中に作られた円形のトンネル形状上部端にかかる最大せん断応力 τ を、二次元トンネル形状モデルにおいて垂直方向の力のバランスを考えることにより見積もる以下の式 [19] を用いることとした。

$$\tau = \frac{\sigma_{\text{ex}} + \rho g C}{2 \ln(2C/D + 1)} \quad (3)$$

ここで、 σ_{ex} , ρ , g , D はそれぞれ、外力による応力 ($\sigma_{\text{ex}} = F/S$; S は粉体層上面の面積)、濡れた粉体層全体の密度、重力加速度の大きさ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)、収縮している横穴の有効直径 ($D = \sqrt{4A/\pi}$) を表す。Eq. (3) の右辺の量はいずれも実験で計測可能もしくは既知の量となるので、横穴にかかるせん断応力 τ の値は、実験結果を Eq. (3) に代入することにより見積もることができる。

得られた τ と D の関係を Fig. 4 に示す。Fig. 4 (a), (b) にはそれぞれ W_0 , ϕ_0 を変化させた場合の $\tau(D)$ が示されている。横穴構造は収縮しているので、Fig. 4 のプロットにおける時間発展は、 D が 20 mm から減少する方向に進む。Fig. 4 に示されている $\tau(D)$ 曲線 (応力曲線) は基本的に以下の 2 つの特徴を持っている: (i) 初期のほとんど収縮が進まない領域での τ 値の急増傾向、(ii) 収縮により D が小さくなる効果を受けて τ の値がやがて頭打ち

Fig. 3 Example data of shrinking tunnels. Area of tunnels A with various (a) W_0 and (b) ϕ_0 are shown vs. time t . Corresponding compression force F is presented in (c) and (d). In panels (a) and (c), average and standard deviation of three experimental runs are shown, while the data from single experimental run for each experimental condition are presented in panels (b) and (d).

Fig. 4 The maximum shear stresses τ applied to the top of the tunnel with various (a) W_0 and (b) ϕ_0 are shown as functions of the tunnel diameter D

になる傾向。(i) から (ii) に移り変わる D の著しい減少が始まる時点での τ は横穴構造の降伏を特徴づける強度とみなすことができる。また、収縮変形の中後期ステージでは、 τ がほぼ一定値となる場合が多く、これは、横穴にかかる実効的印加せん断応力 τ が横穴構造の実効的強度値を超えないように (Eq. (3) において τ が大きくなりすぎないために)、横穴が収縮している (D が小さくなっている) ことを示唆している。すなわち、ほぼ一定値となっている領域の τ の値も横穴構造の一種の強度に対応していると考えられる。

3.4 横穴構造の実効的強度値: τ_{yield} , τ_{max}

Fig. 4 に示されるこれらの $\tau(D)$ 曲線の挙動から、我々は濡れた粉体層中の横穴構造の力学特性を特徴づける量として2つの強度値 τ_{yield} および τ_{max} を導入することとした。前者は「横穴構造が顕著な変形を始める時点での τ の値」として定義され、後者は「変形中における τ の最

大値」として定義される。前者の「横穴構造が顕著に変形を始める時点」は何らかの閾値を導入して定める必要があるが、我々はさまざまな閾値の候補を試した結果、横穴面積の収縮速度に閾値を定める手法がもっともよく変形の開始を特徴づけることを実際のデータ挙動より確認した。具体的な横穴面積の減少曲線の例を **Fig. 5** に示す。ここで、 $\frac{dA}{dt} = -1 \text{ mm}^2/\text{s}$ を、顕著な変形の始まりに対応する閾値とし、この閾値に達した時間を $t=0$ と定義した。この閾値をすべてのデータに用いることにより系統的に τ_{yield} を求めた。 $\frac{dA}{dt}$ はほとんどのデータにおいておおむね Fig. 5 と同様の挙動を示したが、変形開始の閾値による同定には限界があり、 τ_{yield} の値は後述のように比較的大きなばらつきを示すこともわかった。また、 $\tau(D)$ 曲線の最大値により τ_{max} を定義して実験結果よりその値を求めた。それらの値の実験条件依存性を確認した結果を以下に順に示す。

Fig. 5 An example data of area decreasing rate dA/dt with $W_0 = 0.011$, $\phi_0 = 0.55$, and $C = 20$ mm. The horizontal dashed line indicates the threshold for yielding, and vertical dotted line shows the identified time of yielding.

Fig. 6 に τ_{yield} の各種実験条件依存性を示す。Fig. 6 (a) より、 τ_{yield} の W_0 への依存性はあまり強くないことがわかる。 $W_0 = 0.15$ 付近にわずかに見られるピーク挙動は濡れた粉体のバルク挙動が含水率に単調に依存しないことを示しているが、その効果は大きくない。ただし、この含水率依存性は Fig. 3 で示した力学特性の W_0 に関する非単調な変化と関係があるかもしれない。間隙水が bubble 相をなす $W_0 > 0.28$ の領域では τ_{yield} の明らかな減少が確認できる。また、 τ_{yield} が ϕ_0 に明確に依存しないことも Fig. 6 (b) からわかる。一方、誤差は大きいものの τ_{yield} の d 依存性が Fig. 6 (c) により確認できる（この大きな誤差は τ_{yield} の $\frac{dA}{dt}$ 閾値敏感性を反映していると考えられる）。これは濡れた粉体層の強度の起源が粒子間の液架橋力にあるとすると、（液架橋の曲率半径が粉体層構成粒子の大

きさにほぼ比例する[20]ので）自然な結果といえる。実際、フィッティングではデータの不確かさは大きいものの $\tau_{\text{yield}} \sim d^{-0.9}$ となり、上の解釈と整合的な結果が得られている（液架橋のラプラス圧が d にほぼ反比例するため、 τ_{yield} が d にほぼ反比例していると考えられる）。しかし、 τ_{yield} の D_0 依存性については、わずかな負の相関が認められる程度であった（Fig. 6 (d)）。

また、**Fig. 7** に τ_{max} の各種実験条件依存性を示す。Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると、 τ_{yield} と τ_{max} の挙動の定性的相違点と類似点が明らかになってくる。たとえば、 τ_{yield} の W_0 および ϕ_0 依存性はわずかであったが（Fig. 6 (a,b)）、 τ_{max} は W_0 に関して明確に増大し（Fig. 7 (a)）、顕著な ϕ_0 依存性も確認できる（Fig. 7 (b)）。すなわち、 τ_{max} は τ_{yield} に比べ、より充填率や含水率の影響を受けやすい量となっていることがわかる。一方、 τ_{max} の d および D_0 依存性について（Fig. 7 (c,d)）は、トンネルが連続収縮を示す領域が限られているためデータ点数は限られているが、定性的挙動は τ_{yield} のそれ（Fig. 6 (a,b)）と似通っているといえる。Fig. 6 および Fig. 7 における実線はそれぞれのデータ挙動に対する経験的フィッティングを表している。

3.5 横穴構造の強度推定の経験式

本節では、これらの経験的フィッティングのモデルを統合させることにより、実効的に濡れた粉体層中の横穴構造の強度を推定する経験式を以下に導く。まず、 τ_{yield} の各種パラメーター依存性について、実験結果を元に以下の形式を用いる。

$$\tau_{\text{yield}}(W_0) = \tau_{W_0} + \tau_{W_1} W_0 + \tau_{W_2} W_0^2 = \tau_{W_0} f(W_0) \quad (4)$$

Fig. 6 Parameter dependences of the yield strength, τ_{yield} . (a) τ_{yield} vs. W_0 , (b) τ_{yield} vs. ϕ_0 , (c) τ_{yield} vs. d , and (d) τ_{yield} vs. D_0 are shown in each corresponding panel. Curves indicate the empirical fitting forms.

Fig. 7 Parameter dependences of the maximum strength, $\tau_{\max}$. (a) $\tau_{\max}$ vs. W_0 , (b) $\tau_{\max}$ vs. ϕ_0 , (c) $\tau_{\max}$ vs. d , and (d) $\tau_{\max}$ vs. D_0 are shown in each corresponding panel. Curves are the empirical fitting forms. The inset in (b) magnifies the same data shown in the main panel.

$$\tau_{\text{yield}}(\phi_0) = \tau_{\phi_0} \quad (5)$$

$$\tau_{\text{yield}}(d) = \tau_{d_0} \left(\frac{d}{d_*} \right)^\alpha = \tau_{d_0} h \left(\frac{d}{d_*} \right) \quad (6)$$

$$\tau_{\text{yield}}(D_0) = \tau_{D_0} \exp \left(-\frac{D_0}{D_*} \right) = \tau_{D_0} k \left(\frac{D_0}{D_*} \right) \quad (7)$$

ここで, $\tau_{W_0} = 3.6 \times 10^2$ Pa, $\tau_{W_1} = 3.4 \times 10^3$ Pa, $\tau_{W_2} = -1.1 \times 10^4$ Pa, $\tau_{\phi_0} = 3.7 \times 10^2$ Pa, $\tau_{d_0} = 3.9 \times 10^2$ Pa, $\alpha = -0.9$, $d_* = 0.4$ mm, $\tau_{D_0} = 9.9 \times 10^2$ Pa, $D_* = 23$ mm は Fig. 6 におけるフィッティングより求まった値 (もしくは設定した値) であり, f , h , k は Eqs. (4), (6), (7) の中で定義される無次元量による関数を表す。同様に, $\tau_{\max}$ についても Fig. 7 のフィッティングより以下の形式を仮定する。

$$\tau_{\max}(W_0) = \tau'_{W_0} \exp \left(\frac{W_0}{W_*} \right) = \tau'_{W_0} f' \left(\frac{W_0}{W_*} \right) \quad (8)$$

$$\tau_{\max}(\phi_0) = \tau'_{\phi_0} \exp \left(\frac{\phi_0}{\phi_*} \right) = \tau'_{\phi_0} g' \left(\frac{\phi_0}{\phi_*} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{\max}(d) = \tau'_{d_0} \left(\frac{d}{d_*} + \frac{\tau'_{d_1}}{\tau'_{d_0}} \right) = \tau'_{d_0} h' \left(\frac{d}{d_*} \right) \quad (10)$$

$$\tau_{\max}(D_0) = \tau'_{D_0} \quad (11)$$

ここで, フィッティングより各パラメーター値は $\tau'_{W_0} = 3.0 \times 10^3$ Pa, $W_* = 0.26$, $\tau'_{\phi_0} = 2.0 \times 10^{-1}$ Pa, $\phi_* = 0.057$, $\tau'_{d_0} = -9.5 \times 10^3$ Pa, $\tau'_{d_1} = 1.3 \times 10^4$ Pa, $\tau'_{D_0} =$

3.5×10^2 Pa と求まった。また, f' , g' , h' はそれぞれ Eqs. (8)~(10) で定義される無次元量による関数である。これらのパラメーター依存性 (Eqs. (4)~(10)) が互いに独立 (変数分離可能) であると仮定することにより, 最終的に以下の関係式を得る。

$$\frac{\tau_{\text{yield}}}{f(W_0)h(d)k(D_0)} = \tau_* \quad (12)$$

$$\frac{\tau_{\max}}{f'(W_0)h'(d)} = \tau'_* g''(\phi_0) \quad (13)$$

この関係に対応するプロットを **Fig. 8** に示している。 $\tau_{\max}$ の挙動についてはデータのばらつきは大きいものの, Eq. (13) がおおむねデータの傾向を捉えている。一方, τ_{yield} については, データのばらつきが大きく明確な傾向を認めることが難しいため, 現状では Eq. (12) は強度値のオーダーエスティメイト程度にしか用いることができないものとなった。Fig. 8 を用いた全データのフィッティングより $\tau_* = 5 \times 10^2$ Pa, $\tau'_* = 4.4 \times 10^{-2}$ Pa, $g''(\phi_0) = \exp(\phi_0/0.055)$ が得られた。これらの経験的モデル式を用いることにより, 濡れた粉体層中の横穴構造の強度についての近似値 (オーダー) を得ることが可能となる。

しかしながら, 本研究ではこれらの経験式の背景にある物理機構に十分に迫ることはできなかった。たとえば, $g''(\phi_0)$ の関数形として経験的に指数関数を用いたが, 充填率は本来無限に増大できる量ではないので, $g''(\phi_0) \sim |\phi_0 - \phi_c|^{-\beta}$ のような発散形式の方が妥当かもしれな

Fig. 8 Empirical laws for (a) τ_{yield} and (b) τ_{max} . Although τ_{yield} is almost independent of ϕ_0 , τ_{max} is clearly an increasing function of ϕ_0 .

い (ϕ_c , β は定数)。また, Fig. 8 におけるデータのばらつきは, パラメーター間の (独立でない) 関係性の影響に依っているとも考えられる。強度値の物理的意味を明らかにする更なる詳細な実験・解析は今後の課題といえる。また, 前述のように実験条件についても必ずしも網羅的にカバーできていない部分があり, 今後さらなる系統的实验などが必要となる。データ解析において仮定した関数関係は完全に経験的なもので, 濡れの相が pendular 相, funicular 相から bubble 相に至るまでの全域を一つの経験式でフィットしているの, 背後にある物理メカニズムとの対応も明らかではない。今後さらなる物理機構の考察が必要となる。

3.6 議論：スナガニ巣穴の安定性について

最後に, ここまでで得られた結果を元に, 砂浜にみられるスナガニ巣穴の典型的強度と安定性について簡単に考察する。まず, 先行研究[3,21]を元に巣穴の作られる環境の典型的含水率および充填率を, それぞれ 0.22 および 0.55 程度であるとする。この条件下で, 横穴が変形を始める強度 τ_{yield} の値は, Fig. 6 (a) より 600 Pa 程度であることがわかる。また, 上記の充填率と含水率の条件より, 湿った砂のバルク密度はおおよそ $\rho = 1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と求まる。また, スナガニ巣穴の典型的直径の代表値として $D = 20 \text{ mm}$ を用い, これらの値と $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $\sigma_{\text{ex}} = 0$ を Eq. (3) に代入することによって, C を未知数として解くとおおよそ $C = 0.25 \text{ m}$ となることがわかる。この値は, 巣穴の上部にかかる濡れた粉体層の自重により巣穴が変形を始める深さに対応し, 求められた値 ($C = 0.25 \text{ m}$) は典型的なスナガニ巣穴の深さに近い値[3,22]となった。すなわち, スナガニの巣穴は変形が起らない程度の深さまで掘られているといえる。

ただし, 本研究では粉体のサンプルとして球形のガラスビーズを用いており, τ_{yield} や τ_{max} の値は粒子形状の影響を受けて変化すると考えられる。我々は, 砂粒子を用いた同様の実験や, 実際のスナガニ巣穴についてのフィー

ルド調査も別途行っており, これまでのところ, 上記の解析結果とおおむね整合的な結果を得ている。その結果の詳細な報告については別の機会[22]に譲るが, スナガニは濡れた粉体層中で穴が安定に存在しうる範囲を知った上で巣穴のサイズ (直径, 深さ) を決めているようである。むしろ, 濡れた粉体層の強度的限界による制約で巣穴直径の上限が決定され, スナガニの体の大きさがこの巣穴直径の上限によって制約されているということかもしれない。このような仮説を検証するためにはより詳細な実験, モデリング, フィールド調査などが必要となる。

4. 結 言

本研究では, スナガニ巣穴のような濡れた粉体層中につくられた穴構造の力学的安定性を議論するための基礎研究として, 水とガラスビーズの混合層中に作られた横穴構造の圧縮実験を行った。含水率, 充填率 (固体分率), 粒子粒径, 初期穴径などのパラメーターを系統的に変化させ実験を行い, 横穴の圧縮による縮小とその際の圧縮力を計測した。二次元トンネル形状の上部にかかるせん断応力のモデルを用いることにより, 横穴構造の変形開始時の応力値と, 変形中の最大応力値を二種類の強度 (τ_{yield} , τ_{max}) として定義した。系統的实验により, これらの強度値のパラメーター依存性を実験的に明らかにし, それらを統合することにより経験的強度推定式を得た。また, 実験で得られた結果をスナガニ巣穴の典型的な状況に照らして強度を推定することにより, スナガニ巣穴が自重の効果による変形が起きない範囲の深さを持っていることが明らかになった。今後は, 濡れた粉体の力学特性の基礎的特徴づけと天然のスナガニ巣穴の調査結果などとの比較をさらに進めていきたいと考えている。

[謝辞] 本研究の一部は JSPS 科学研究費補助金 16K13861 および 18H03679 の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

Nomenclature

A	: projected area of a tunnel	[mm ²]	Z	: height of experimental cell	[mm]
C	: thickness of cover upon a tunnel	[mm]	α	: an exponent (fitting parameter in Eq. (6))	[-]
d	: grain size	[mm]	β	: an exponent	[-]
d_*	: typical grain size	[mm]	ρ	: bulk density	[kg/m ³]
D	: instantaneous diameter of a tunnel	[mm]	ρ_{grain}	: true density of grains	[kg/m ³]
D_0	: initial diameter of a tunnel	[mm]	ρ_{water}	: water density	[kg/m ³]
D_*	: typical tunnel size (fitting parameter in Eq. (7))	[mm]	σ_{ex}	: external stress	[Pa]
f	: dimensionless function in Eq. (4)	[-]	τ	: shear stress	[Pa]
F	: compression force	[N]	τ_{d_0}	: fitting parameter in Eq. (6)	[Pa]
f'	: dimensionless function in Eq. (8)	[-]	τ_{D_0}	: fitting parameter in Eq. (7)	[Pa]
g	: magnitude of gravitational acceleration	[m/s ²]	τ_{max}	: maximum strength	[Pa]
g'	: dimensionless function in Eq. (9)	[-]	τ_{W_0}	: fitting parameter in Eq. (4)	[Pa]
g''	: dimensionless function in Eq. (13)	[-]	τ_{W_1}	: fitting parameter in Eq. (4)	[Pa]
h	: dimensionless function in Eq. (6)	[-]	τ_{W_2}	: fitting parameter in Eq. (4)	[Pa]
h'	: dimensionless function in Eq. (10)	[-]	τ_{yield}	: yield strength	[Pa]
k	: dimensionless function in Eq. (7)	[-]	τ_{ϕ_0}	: fitting parameter in Eq. (5)	[Pa]
S	: area of upper surface of experimental cell	[mm ²]	τ_*	: fitting parameter in Eq. (12)	[Pa]
t	: time	[s]	τ'_{d_0}	: fitting parameter in Eq. (10)	[Pa]
V_{grain}	: grain volume	[mm ³]	τ'_{d_1}	: fitting parameter in Eq. (10)	[Pa]
V_{total}	: total volume	[mm ³]	τ'_{D_0}	: fitting parameter in Eq. (11)	[Pa]
V_{water}	: water volume	[mm ³]	τ'_{W_0}	: fitting parameter in Eq. (8)	[Pa]
W_0	: initial water content	[-]	τ'_{ϕ_0}	: fitting parameter in Eq. (9)	[Pa]
W_*	: typical water content (fitting parameter in Eq. (8))	[-]	τ_*	: fitting parameter in Eq. (13)	[Pa]
X	: width of experimental cell	[mm]	ϕ_0	: initial packing fraction	[-]
Y	: depth of experimental cell	[mm]	ϕ_*	: fitting parameter in Eq. (10)	[-]

References

- [1] B. K. K. Chan, K. K. Y. Chan, P. C. M. Leung, Burrow architecture of the ghost crab *Ocypode ceratophthalma* on a sandy shore in Hong Kong, *Hydrobiologia* 560 (2006) 43–49.
- [2] S. S. L. Lim, C. H. Diong, Burrow-morphological characters of the fiddler crab, *Uca annulipes* (H. Milne Edwards, 1837) and ecological correlates in a lagoonal beach on Pulau Hantu, *Crustaceana* 76 (2003) 1055–1069.
- [3] K. Seike, M. Nara, Occurrence of bioglyphs on *Ocypode* crab burrows in a modern sandy beach and its palaeoenvironmental implications, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 252 (2007) 458–463.
- [4] Z. Fournier, D. Geromichalos, S. Herminghaus, M. M. Kohonen, F. Mugele, M. Scheel, M. Schulz, B. Schulz, C. H. Shier, R. Seemann, A. Skudelny, Mechanical properties of wet granular materials, *J. Phys.: Condens. Matter* 17 (2005) S477–S502.
- [5] M. Scheel, R. Seemann, M. Brinkmann, M. D. Michiel, A. Sheppard, S. Herminghaus, Liquid distribution and cohesion in wet granular assemblies beyond the capillary bridge regime, *J. Phys.: Condens. Matter* 20 (2008) 494236:1–7.
- [6] N. Mitarai, F. Nori, Wet granular materials, *Advan. Phys.* 55 (2007) 1–45.
- [7] S. Herminghaus, Wet granular matter – A truly complex fluid, World Scientific, Singapore (2013).
- [8] P. Pierrat, S. H. Caram, Tensile strength of wet granular materials, *Powder Technol.* 91 (1997) 83–93.
- [9] G. Lumay, J. Fiscina, F. Ludewig, N. Vandewalle, Influence of cohesive forces on the macroscopic properties of granular assemblies, *Powders & Grains* 2013 (2013) 995–998.
- [10] D. J. Hornbaker, R. Albert, A.-L. Barabási, P. Schiffer, What keeps sandcastles standing? *Nature* 387 (1997) 765.
- [11] R. Albert, I. Albert, D. Hornbaker, P. Schiffer, A.-L. Barabási, Maximum angle of stability in wet and dry spherical granular media, *Phys. Rev. E* 56 (1997) R6271–R6274.
- [12] L. Bocquet, E. Cheriaix, S. Ciliberto, J. Crassous, Moisture-induced ageing in granular media and the kinetics of capillary condensation, *Nature* 396 (1998) 735–737.
- [13] T. C. Halsey, A. J. Levine, How sandcastles fall, *Phys. Rev. Lett.* 278 (1998) 3141–3144.
- [14] S. Nowak, A. Samadani, A. Kudrolli, Maximum angle of stability of a wet granular pile, *Nat. Phys.* 1 (2005) 50–52.
- [15] P. C. F. Møller, D. Bonn, The shear modulus of wet granular matter, *EPL* 80 (2007) 38002:1–6.
- [16] M. Pakpour, M. Habibi, P. Møller, D. Bonn, How to construct the perfect sandcastle, *Sci. Rep.* 2 (2012) 549:1–3.
- [17] G. Lumay, J. Fiscina, F. Ludewig, N. Vandewalle, Influence of cohesive forces on the macroscopic properties of granular assemblies, *Powders & Grains* 2013 (2013) 995–998.
- [18] A. Shinoda, S. Fujiwara, H. Niiya, H. Katsuragi, Void structure stability in wet granular matter and its application to crab burrows and cometary pits, *Sci. Rep.* 8 (2018) 15784:1–8.

- [19] J. A. Knappett, R. F. Craig, *Craig's Soil Mechanics*, Spon Press (2012).
- [20] M. Scheel, R. Seemann, M. Brinkmann, M. D. Michiel, A. Sheppard, B. Breidenbach, S. Herminghaus, Morphological clues to wet granular pile stability, *Nat. Mat.* 7 (2008) 189–193.
- [21] S. Sassa, Y. Watabe, The role of suction in tidal geoenvironments and burrowing activity of benthos performance index for conservation and restoration of intertidal sandy flats, *Rep. Port and Airport Res. Inst.* 45 (2006) 61–107.
- [22] A. Shinoda, S. Fujiwara, H. Niiya, H. Katsuragi, Physical constraints on sand crab burrows: mechanical properties of wet sand explain the size and spatial distributions of burrows on beaches, in preparation.