サンゴ礫混じり土の安息角に与える礫分含有率の影響

山口大学大学院	学生会員	〇田上	聖人
山口大学大学院	正会員	中田	幸男
山口大学大学院	正会員	梶山	慎太郎

1. はじめに

サンゴ礫混じり土には、礫の形状がいびつで大きく、緩く堆積するなどの 特殊性がある.そのため実務において、特殊性が力学特性に現れるサンゴ礫 の含有率を明らかにすることが重要であるが、上記の特殊性から簡易かつ安 価な方法はない¹⁾.本研究では、間隙比および安息角を力学挙動の指標とし て、砂とサンゴ礫混じり土の力学挙動の境界となる礫分含有率*G^b*を明らかに する既往の研究²⁾の発展を主な目的とし、新たに開発した試験方法・器具を 用いて安息角ならびに間隙比を求める試験を行った.



図1 壁面境界の影響を受ける 割合(左が砂,右が礫)

2. 既往の研究の問題点と改善点

既往の研究²⁾では、サンゴ礫混じり土の礫分含有率に応じた間隙比と安息 角を求める際に、直径 150mm の CBR 試験用のモールドを使用した.これ は、サンゴ礫は礫のサイズが大きいという特殊性により、地盤工学関係規格・ 基準 JGS 0161、JIS A12224「砂の最小密度・最大密度試験方法」で定められ た内径 60mm のモールドでは、長さ約 50mm のサンゴ礫に対して小さすぎ使 用できなかったためである.CBR 試験用のモールドに変更したことで、最小 密度・最大密度試験や安息角測定試験を行うことができたが、試料と試験器 具寸法比による問題(以降、寸法比問題と呼称する)が生じていた.

最小密度・最大密度試験は、本来、土粒子と土粒子によって生じる間隙比 を測定することを目的としているが、試験の性質上、試験器具と土粒子の間 の間隙も、土粒子の間隙として結果に入ってしまう.図1に示すように、粒 子が十分小さい場合(粒径 2mm 以下)は、試験器具壁面と土粒子の間隙の影 響は小さく無視できる(左の赤い部分).しかし、礫などの粒子が大きい場合 は、壁面の影響を受ける体積(右の青い部分)の割合が無視できないほど大き くなってしまい、粒子同士の正確な間隙を測定することができなくなってし まう.これにより、サンゴ礫混じり土の場合は、本来の間隙比よりも大きな 値となっている可能性がある.また、安息角においても、試料と試験器具底 面の大きさの比が 1:40 より小さいと、値が安定せずにばらつきが生じる 問題 ³がある.こうした問題を解決するためには、試料と試験器具の寸法の 差を大きくする必要がある.具体的には「試験器具の大型化」があり、本研 究ではこれを採用した.それにより、問題を完全に取り除くことはできない が、その影響を受ける体積の割合を低くできるため、試料の本来の間隙比を より正確に測定することが可能になる.



写真1 大型安息角試験装置



写真2 レーザー距離測定装置

キーワード サンゴ礫混じり土,安息角,間隙比 連絡先 〒755-0097 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学 地盤工学研究室 TEL:0836-85-7326

3. 試験器具·条件

寸法問題を軽減させるために、本試験では CBR 試験用モールドの2倍, 直径 300mmの「礫の最小密度・最大密度試験用モールド」を中央に装着 した大型安息角試験装置(写真 1)を新たに開発して、 礫混じり土の砂山 を作成した. 試験器具を大型化したことによって、試験器具壁面境界の影 響を受ける試料の体積の割合を抑えようとするものである. この装置は、 上部にエアシリンダーを装着しており、空気圧によって中央のモールド を一定の速度で引き上げて礫混じり土の砂山を作成する. 安息角の測定 方法には明確な基準はなく、多種にわたる⁴⁾. 本実験で行った方法は「排 出法」と呼ばれるもので、流動性と良い粒度の試料に向いた方法である. こうして作成した礫混じり土の砂山の間隙比と安息角を同時に測定する ために、レーザー距離測定装置(写真 2)を導入した. このレーザー距離測 定装置は、0.1mm まで計測、スマートフォンからの遠隔操作が可能な計測 器を用い、アルミフレームの枠に装着して使用する.

礫分であるサンゴ礫は,長さ約 30mm のもの(写真 3)を用い,さらに礫 粒子の形状の比較のために砕石(写真 4,粒径 5~15mm)を用意した.それ らを沖縄県チイビシ島で採取したチイビシ砂(写真 5)に混ぜ合わせて礫混 じり土を作成し,実験を行った.図3にチイビシ砂の粒度分布,表1に各 試料の土粒子密度を示す.なお,サンゴには,サンゴ礁を形成するもっと も一般的なミドリイシ種を使用している.

3.1 試験手順

試験の手順は以下のようになる.

- (1)目標の礫分含有率になるように、砂と礫を混ぜ合わせて礫混じり砂を 作成し、10層に分けて大型安息角試験装置のモールド内に投入する. (写真 6.7)
- (2)大型安息角試験装置を稼働させ、モールドを一定速度で上昇することで礫混じり砂の砂山を作成する.(写真8)
- (3)落下した礫混じり砂を刷毛とスコップで除去し、レーザー距離測定装⁵⁰ 置を出来上がった砂山の頂点に合わせ、モールドの端に向かって 10mm 間隔でレーザー測定器と砂山表面の距離を測定する.これを直交する よう4方向(図4)におこない、砂山全体の形状データ(図5)を得る.
- (4)ふるいを用いて,砂山を砂分と礫分に分け,それぞれの質量を測定する.
- (1)~(4)の過程を 10%ずつ礫分含有率を変えながら繰り返し(それぞれ砂 分のみ,礫分のみの試験も行う),サンゴ礫で 50%前後,砕石で 70%前後 まで測定を行った.それ以降の含有率では,粒径の差が大きくなり,供試 体内の試料が均質にならなかったため,測定を行っていない.

3.2 測定・結果の算出

まず,得られた形状データから砂山の体積を計算する.次に,測定し ておいた砂分と礫分の質量を,それぞれの土粒子密度で除することで砂 分と礫分の土粒子体積を得る.砂山の体積から砂分・礫分の土粒子体積を 引くことで間隙の体積を導出し,最終的に間隙比を求めた.安息角は,同



図2本実験での安息角の定義



写真3 サンゴ礫









表1 各試料の土粒子密度				
試料名	サンゴ礫	砕石	チイビシ砂	
土粒子密度 $ ho s[g/cm^3]$	2.845	2.680	2.734	



写真6 試料の混ぜ合わせの様子

じく砂山の形状データから図5のように求めた.どこを安息角とするかに ついても作成方法と同様に様々な議論があるが,測定が簡易である点,測 定者による誤差が少ない点から本試験では図2のように砂山の頂点とモー ルドの端で形成される角度を安息角と定義した.

4. 試験結果·考察

図6に間隙比とサンゴ礫含有率の関係,図7に安息角とサンゴ礫含有率の関係を示す.グラフ中の赤い丸プロット(●)と線は直径300mmの試験器具で行った本実験の結果であり,青い三角プロット(▲)と線は直径150mmの試験器具で行った過去の実験の結果²⁾である.図6中の実線および破線は,Ladeら⁵⁾が提唱した砂分と礫分が隙間なく理想的に充填された状態で礫分含有率が推移した時の理論線(以降,Ladeらの理論線と呼称する)である.図7中の実線は礫分100%の時の安息角,破線は安息角の実験値の傾向を表す推定線である.

まず、礫分単体の間隙比では、300mm 試験器具の結果は 150mm 試験器 具のものと比べて 29.6%小さくなったが、チイビシ砂では 1.4%の差しか生 じなかった.これは、やはり寸法問題が発生していたことを示しており、 試験器具の寸法が試料に対して小さいと、試料と試験器具の間に生じる間 隙の影響を強く受けて、試料本来の間隙比よりも大きくなってしまうこと を示している.チイビシ砂が試験器具の違いでほとんど差がなかったの は、粒径が他の礫に比べて非常に小さく、試料と試験器具によって生じる 間隙が試験器具壁面のごく近傍のみで発生し、その影響が小さかったため である.一方、安息角は試験器具が異なっても差は概ね 5%以内に収まっ ていた.これは、安息角は試験器具の影響を受ける範囲がモールドの端の 近傍に限られており、砂山全体に占める割合がどちらの試験器具において も、小さかったためと考える.

4.1 砂とサンゴ礫混じり土の力学挙動の境界となる礫分含有率G^b

サンゴ礫混じり土において、特殊性が力学特性に現れ始めるサンゴ礫の 含有率は、礫混じり土の力学挙動が砂主体から砂と礫の力学挙動が入り混 じった中間構造に移り変わる礫分含有率*G^b*である.そのため、*G^b*を求める ためには、なんらかの指標に注目して力学挙動の変化を評価する必要があ る.既往の研究²⁾では、間隙比と安息角を指標とし、間隙比と礫分含有率 のグラフ上で、間隙比の実験値が Lade らの理論線から乖離し始める礫分 含有率を*G^b*とする判定と、安息角と礫分含有率のグラフ上で、安息角が砂 単体の安息角から変化し始める礫分含有率を*G^b*とする判定の二つの判定 方法を用いていたが、両者には若干の差が生じていた.そのため、実験結 果を考察してどちらを判定基準に用いるかを検討した.

本実験の間隙比の結果からは 32.5%. 安息角の結果からは 22.5%の礫分[®] 含有率でサンゴ礫混じり土の力学挙動が砂主体から砂と礫の力学挙動が 入り混じる中間構造のものになった. 渡部ら[®]が三軸試験から得た実験結 果からは,20%以上でサンゴ礫のかみ合いや粒子破砕の影響が表れ始める ことが報告されており,本試験の安息角の結果と一致している.一方で, 過去の実験²においては,間隙比の結果からは20%,安息角の結果からは



写真7 試料注入



写真8 稼働中の大型安息角 試験装置



図4 出来上がった砂山(矢印は測定方向)



17.5%であった. 試験器具のサイズの違いにより,間隙比判 定の**G**^bで 12.5%,安息角判定の**G**^bで 5%の差が生じたことか^{2.5} ら,間隙比は礫単体の場合だけでなく,砂と礫の混合砂にお ^{2.0} いても,試験器具サイズの影響を受けやすく,安息角は受け ^{2.1} にくいことが考えられる.

次に、本実験の結果で、間隙比と安息角の判定基準の違い により**G**^bに 10%の差が生じた.こうした傾向は、礫を砕石に 変更して行った実験でも確認された.この差については、図 8 に示した礫混じり土の内部構造の模式図から説明可能であ る.状態①では、礫の含有率が低く、礫同士が離れているた ⁵⁰ め,砂山の高さは砂単体と同じで、砂単体と同じ安息角を示 す.状態②では、礫同士が互いに力を伝え合う距離に近づき、 砂山の高さが変化し安息角も変化し始める.砂山の高さが変 化していることから、この時点で力学挙動が礫の影響を受け る.状態③では、礫同士の接触点周辺で大きめな間隙が発生 し、砂山の間隙比が Lade らの理論式に従わなくなる.安息 角の判定基準は状態①と②の間、間隙比の判定基準は状態② と③の間である.これらを考慮すると、安息角の判定基準で 求めた**G^b**のほうが力学挙動が変化

する礫分含有率に近い.以上の「試 験器具の大きさに左右されにく い」「判定基準が礫混じり土の定義 と合致している」「三軸試験の結果 と同じであったこと」という点か ら**G^bの判別基準には安息角を**用い るのが適当と判断した.



5. 結論

本研究では、試験器具の寸法比による影響は、特に礫単体の間隙比に強く表れるが、安息角はその影響を受けにくいこと、同様の傾向が砂とサンゴ礫混じり土の境界となる「砂分主体の構造から中間構造となるときの 礫分含有率*G^b*」においても確認できたこと、安息角のほうが間隙比に比べて力学挙動の変化をとらえる判定 基準ことに適していること、サンゴ礫混じり土の安息角に与える礫分含有率の影響を評価した結果、砂とサン ゴ礫混じり土の境界礫分含有率*G^b*は 22.5%前後であることが明らかになった

6. 参考文献

- 1) Y.Watabe et al. Soil and foundations, Vol.55(5), pp1233-1242, 2015
- 2) 内野隆太郎ら, 第51回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.479-480, 2016
- 3) 梶山慎太郎ら, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1725-1726,2018
- 4) 松倉公憲ら, 安息角:定義と測定法にまつわる諸問題, 筑波大学水理実験センター報告, No.13, p27-35, 1989
- 5) P.V.Lade et al, Geotechnical testing journal, No. 4, pp336-347, 1998
- 6) 渡部要一ら:サンゴ礫混じり土の力学特性,港湾空港技術研究所報告,第55巻第3号,2016