

粗粒土の安息角および間隙比に与える礫分含有率の影響

Effect of Gravel Content on Reposed Angle and Void Ratio of Coarse-Grained Soil

田上聖人	Masato TAUE	(山口大学大学院創成科学研究科)
中田幸男	Yukio NAKATA	(山口大学大学院創成科学研究科)
梶山慎太郎	Shintaro KAJIYAMA	(山口大学大学院創成科学研究科)

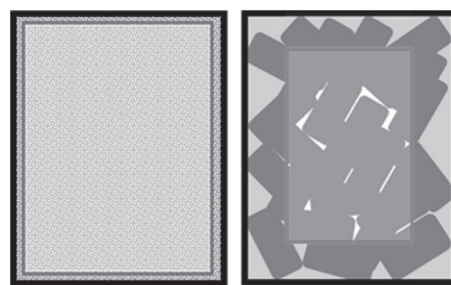
本研究では、直径 2mm 以上の礫を含む粗粒土に対して、礫の含有率を変化させながら安息角および間隙比の測定試験を行い、礫の含有率が粗粒土の工学的性質に与える影響を評価した。その結果、礫のサイズが大きくなる、形状がいびつになるほど、低い礫分含有率で礫の影響が粗粒土に表れ始めること。その影響の指標として検討した安息角と間隙比では、安息角のほうが低い礫分含有率で礫の影響を捉えたこと。また、粒度をもとにした「地盤材料の工学的分類」による粗粒土の分類と、本研究で得られた力学挙動の結果から推定した粗粒土の分類とでは、少なからず差が生じることが認められた。

キーワード：粗粒土、礫分含有率、安息角、間隙比、粒径、地盤材料の工学的分類
(IGC : D-02, D-06)

1. はじめに

粒径が 2mm 以上の礫を含む粗粒土は、盛土やロックフィルダム、海洋構造物の基礎などに幅広く使用される地盤材料である。そのため、礫の含有率が粗粒土の工学的性質に与える影響を把握することは非常に重要である。既往の研究では、主に、一面せん断試験などを用いて、粗粒土の礫分含有率に応じたせん断強度の変化に着目したもの^{1)~4)}と、密度試験などを用いて、間隙比の変化に着目したもの^{2),5),6)}がある。せん断強度の変化に着目した研究からは、直径 5mm と 0.4mm のガラスビーズを礫と砂に見立てた実験において、礫分含有率が 40%未満の場合、砂のせん断強度が支配的に、70%以上の場合、礫のせん断強度が支配的に、その間の 40~70%の場合は、砂と礫の影響が混在することなどが明らかにされている¹⁾。間隙比の変化に着目した研究からは、礫分含有率が増加すると、間隙比が砂単体の時よりも小さくなる、Walker-Holtz 法⁷⁾では推測ができなくなるなど、といった報告がなされている。しかし、こうした粗粒土の研究事例は、粒径 2mm 以下の細粒土(シルト・粘土)の研究事例に対して、非常に少ないのが現状である。

粗粒土の研究が細粒土に比べて研究が進んでいない原因のひとつに、粒径が大きいと、正確な室内実験の実施とその結果の妥当な解釈が容易でないという問題⁸⁾がある。粒径が大きいと、通常的一面せん断試験機や三軸圧縮試験機では土質試験が行うことができず、より大型の試験器具が必要となり、試料の量や試験にかかる時間・費用が増加するため、正確な知見を得るために必要な試験回数を確保できなくなる。特に、本研究の主目的である礫分含有率に応じた粗粒土の工学的性質を調べるような実験では、相当な試験回数が必要であるため、影響が顕著である。



(a) 粒径 2mm 以下の場合 (b) 粒径 2mm 以上の場合
図-1 モールド境界効果の影響を受ける割合

そこで、内野ら⁹⁾は、比較的計測が簡易な安息角と間隙比に着目して、「サンゴ礫混じり土」の礫分含有率に応じた工学的性質を把握する実験を行った。サンゴ礫混じり土とは、死骸化したサンゴが礫として砂や土に混じった粗粒土のことであり、礫の形状がいびつで大きく、ゆるく堆積するなどの特殊性を有する¹⁰⁾。そのため実務において、特殊性が力学挙動に表れる含有率を明らかにすること。つまり、礫分含有率に応じた粗粒土の工学的性質を調べることが重要とされる粗粒土のひとつである。

内野らの研究⁹⁾では、粗粒土の礫分含有率に応じた間隙比と安息角を求める際に、内径 150mm の CBR 試験用のモールドを使用した。これは、サンゴ礫のような粒径の大きい礫は、地盤工学関係規格・基準 JGS0161, JISA12224「砂の最小密度・最大密度試験方法」¹¹⁾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、試料とモールドの寸法比に起因する問題(以降、モールド境界効果と呼称する)が生じている可能性があった。

間隙比を求める最小密度・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、モールドと土粒子の間隙比も、土粒子同士の間隙比として結果に入ってしまう。図-1の(a)に示すように、粒子が十分小さい場合(粒径2mm以下)は、モールド壁面と土粒子によって生じる間隙比の影響は小さく無視できる。しかし、図-1の(b)に示すように、礫などの粒子が大きい場合(粒径2mm以上)は、モールド境界効果の影響を受ける体積の割合(ハッチ部分)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比を測定することができなくなってしまう¹²⁾。これにより、粗粒土の場合は、本来の間隙比よりも大きな値になっている可能性がある。

本研究では、試験器具の大型化により、モールド境界効果の影響を軽減させようとして、礫含有率が粗粒土の安息角および間隙比にどのような影響を与えるかについて、また、3つの粒子形状の異なる粒状材料を用いることで、粗粒土内の礫の粒子形状により現れる特徴を抽出することを意図して実験的に評価し、力学挙動の変化を考察することを目的とした。

2. 粗粒土の試料と試験装置

2.1 試料

内野ら⁹⁾と同じく、礫試料には、サンゴ礫を形成する一般的なミドリイシ種のサンゴ(写真-1 直径約10mm、長さ約30mm)、形状による影響を幅広く調査するために、形状が大きく異なる碎石(写真-2 粒径約10mm)とガラスビーズ(写真-3 粒径約10mm)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-4)に混ぜ合わせて3種類の粗粒土試料を作成した。この3種類の試料はそれぞれ、いびつな礫、角ばった礫、球体に近い礫を含む粗粒土をモデル化するもので、想定される礫形状の全体をカバーしていると考えられる。図-2に各試料の粒度分布、表-1に土粒子密度を示す。

2.2 安息角・間隙比試験装置

原ら¹³⁾により、試料の寸法に対してモールドの内径が10倍以上の時に、モールド境界効果の影響が大幅に軽減されると報告されているため、用いる試料の最大寸法であるサンゴ礫の30mmに合わせて、本試験ではCBR試験用のモールドの2倍、内径300mmの「礫の最小密度・最大密度試験用モールド(高さ350mm、内径300mm、外径320mm)」を中央に装着した大型安息角試験装置(写真-5)を新たに開発した。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(15.6cm/min)で引き上げて粗粒土の砂山を作成する。作成した粗粒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-6)を導入した。この装置は、0.1mmまで計測、スマートフォンからの遠隔操作が可能なレーザー距離計をアルミフレームの枠に装着し、水平方向にスライドできるようにしたものである。



写真-1 サンゴ礫



写真-2 碎石

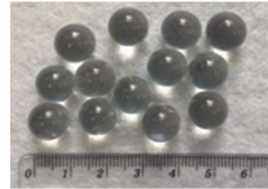


写真-3 ガラスビーズ



写真-4 チイビシ砂

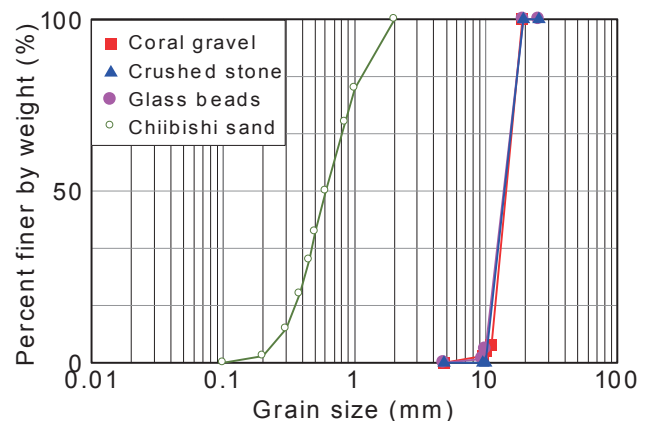


図-2 各試料の粒度分布

表-1 各試料の土粒子密度

試料区分	試料名	土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]
礫	サンゴ礫	2.845
	碎石	2.680
	ガラスビーズ	2.500
砂	チイビシ砂	2.734

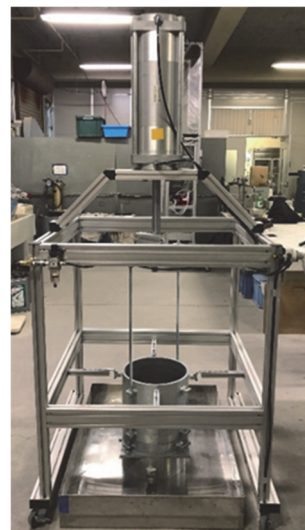


写真-5 大型安息角試験装置

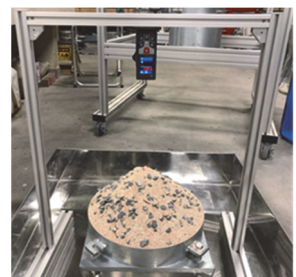


写真-6 レーザー距離測定装置

3. 試料および試験装置

3.1 試験の概要

安息角の測定方法には、明確な基準はなく、多種にわたる¹⁴⁾。主な測定方法としては、試料を落下させてできる円錐の傾斜を測定する「注入法」と、試料の入ったモールドを引き上げることで拘束を排除してできる円錐の傾斜を測定する「排出法」がある。注入法は、粒径が小さく、粒度のばらつきが少ない試料に向いた方法であり、粗粒土試料に向かないため、本研究では、「排出法」を採用した。

間隙比の測定方法については、原らの研究¹³⁾を参考にして決定した。具体的には、砂の最小密度試験では、モールドに試料を投入する際に漏斗を用いるが、粗粒土では、粒径の大きい礫が漏斗に引っ掛かり、試料内で粒度の偏りが起きてしまうため、ボウルなどで直接試料を投入する方法の方が誤差が生じにくく、また体積の測定に関しては、試料表面を直接ノギスで計測する方法が、最も誤差が生じにくいことが報告されている。本試験では、レーザー測定器をノギスの代わりに利用した。レーザーによる測定の詳細については、3.2節で取り上げる。

こうした点を考慮した試験手順は、以下のようになる。

- (1) 目標の礫分含有率になるように、砂試料と礫試料を用意し、それぞれを10分割して各ボウルで十分混ぜ合わせる(写真-7)。ボウルごとに砂と礫が分離しないように大型安息角試験装置のモールド内に投入する(一層の厚み約35mm)(写真-8)。なお、この方法は原らの研究でばらつきが少ないことが指摘されている。
- (2) 大型安息角試験装置を稼働させ、モールドを一定速度15.6cm/minで上昇することで粗粒土試料の砂山を作成する。(写真-9、図-3)
- (3) モールドから落下した粗粒土試料をスコップと刷毛で除去し、レーザー距離計測装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間隔でレーザー計測器と砂山表面の距離を測定する。これを直交するように4方向(図-3)に行い、砂山の形状データ(図-4)を得る。
- (4) ふるいを用いて、粗粒土試料の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。また、ばらつきが大きいサンゴ礫は6回、砕石、ガラスビーズは3回を基本としている。サンゴ礫で礫分含有率50%前後、砕石で70%前後、ガラスビーズで70%前後まで測定を行った。それ以上の含有率では、粒径の差が大きくなり、モールド内で砂分と礫分が分離し、均一な粗粒土試料を作成できなかったため、測定を行っていない。

試験終了後、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の体積を得る。砂山の体積から砂分と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。



写真-7 試料の混ぜ合わせの様子



写真-8 試料投入の様子



写真-9 稼働中の大型安息角試験装置

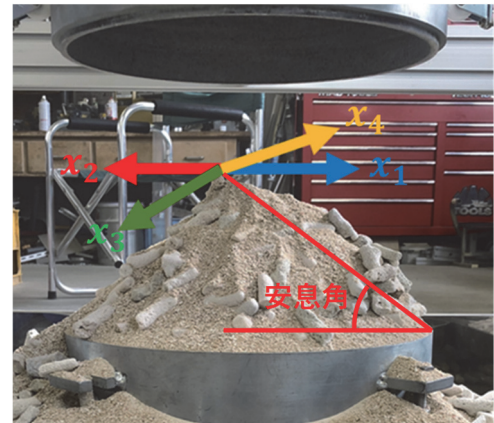


図-3 出来上がった砂山(矢印は測定方法)

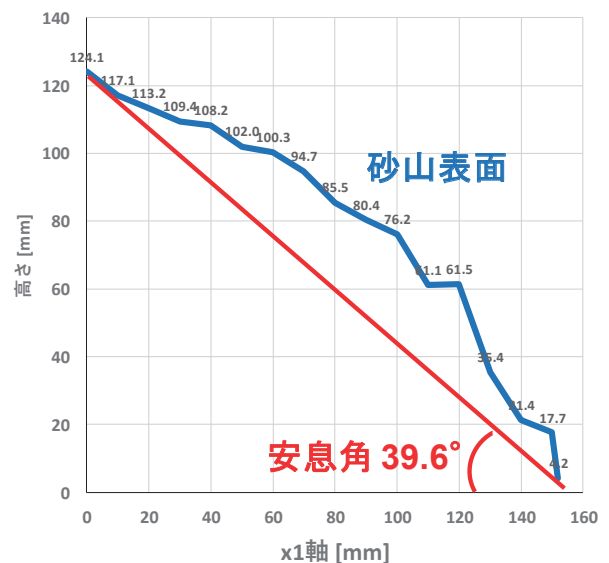


図-4 図-3におけるx1軸方向の形状データ

安息角は、同じく砂山の形状データから図-4 のように求めた。どこを安息角とするかについても、測定方法と同様に様々な議論がある¹⁴⁾が、測定が簡易である点、測定者による読み取り誤差が少ない点から、本試験では、図-3 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、4 方向の計測で得られる 4 つの安息角の平均をとった。

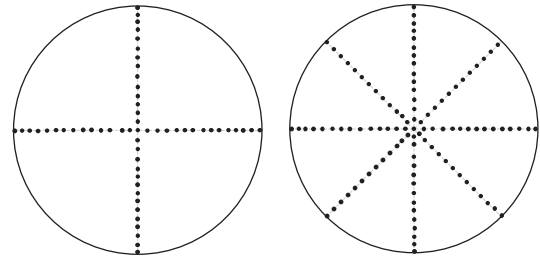


図-5 4 方向計測法 と 8 方向計測法

表-2 4 方向計測法と 8 方向計測法から得られた結果

		Case				
		①	②	③	④	⑤
4方向	間隙比	0.817	0.790	0.761	0.739	0.769
	安息角°	38.1	40.2	39.4	38.2	37.2
8方向	間隙比	0.812	0.758	0.800	0.759	0.717
	安息角°	38.3	40.1	39.3	38.0	37.2

3.2 レーザーによる測定

本試験では、粗粒土の砂山の表面形状から体積を得るためにレーザーによる測定を行った。ノギスではなくレーザー測定器を用いた理由は、人による読み取り誤差をなくするためと、値を記録する時間を短縮するため（用いたレーザー距離計には、計測値を表計算ソフトに記録し、ほかの端末に転送する機能がある。）である。

計測点数については、原らの研究¹³⁾では、モールドの直径が 300mm の場合、計測点数が 10 点程度で間隙比の誤差が収束し、20 点以上ではほぼ誤差がなくなることが確認されている。しかし、この結果は比較的平坦な粗粒土の表面を計測したものであるため、砂山の斜面を計測する場合、より多くの計測点が必要となる可能性があり、レーザーによる測定を実施するにあたって、計測点の数と方向を再度検討する必要があった。本研究で用いるレーザー距離測定装置は上部のアルミフレームに、10mm 間隔で印を設置しており、直径 300mm のモールドの場合は、1 方向につき 15 点前後の計測を行うようになっている。より正確な粗粒土の砂山の形状データを得るためには、計測方向が多ければ多いほど良いが、計測方向が多くなると、その分実験に時間がかかり、できる実験自体の回数が少なくなってしまう。そこで、比較的砂山の表面形状がいびつであったサンゴ礫含有率が 40%前後の砂山を 5 回作成し、それぞれを 4 方向計測法と 8 方向計測法(図-5)で計測、安息角と間隙比の結果の差が小さければ、実験を 4 方向計測法で行うこととした。

表-2 は、その結果をまとめたものである。表-2 から、安息角の誤差は、すべての Case で 1%を下回っており、間隙比の誤差は最大でも Case⑤での 6.7%であることが分かったため、4 方向計測法と 8 方向計測法による差は小さいと判断し、実験を 4 方向計測法で行った。

4. 安息角および間隙比に与える礫分含有率の影響

安息角と各礫分含有率の関係を図-6～図-8 に、間隙比と各礫分含有率の関係を図-9～図-11 に示す。図-6～図-11 のグラフ中の丸プロット(●)と直線(—)、長破線(---)は、直径 300mm のモールドで行った本実験の結果であり、三角プロット(▲)と一点鎖線(- · -)、点線(···)は、直径 150mm のモールドで行った過去の実験の結果である。

図-6～図-8 の直線(—)と一点鎖線(- · -)は、礫分 100%の時の安息角、長破線(---)と点線(···)は安息角の実験値の

傾向を表す推定線である。安息角の推定線は、2 種類の砂と礫が混ざった混合体の力学的性質の変化が、礫同士の距離の影響を受けるとした上田らの研究¹⁵⁾を参考に描いている。上田らの研究では、力学的性質の変化点を直線で結んで、力学的性質を砂が支配する領域、礫が支配する領域、それらの遷移領域の 3 つに分類した。本研究でも、砂単体の安息角から変化し始めた点から、礫単体の安息角に到達する点までを直線で結んで推定線を描いている。

図-9～図-11 中の長破線(---)および点線(···)は式(1)を、直線(—)および一点鎖線(- · -)は式(2)をもとにして描いた。

$$e = e_1 \left(1 - \frac{F}{100} \right) - \frac{F}{100} \quad (1)$$

$$e = e_2 \cdot \frac{F}{100} \quad (2)$$

式(1)および式(2)は、それぞれ Lade ら¹⁶⁾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砂分の間隙比および礫分の間隙比を表す理論式である。ここで、 e_1 は礫分 100%の間隙比、 e_2 は砂分 100%の間隙比、 F は砂分含有率を表している。これ以降、式(1)と式(2)によって描かれる線を Lade らの理論線と総称する。

なお、 $G_{150}^{b(a)}$ や $G_{300}^{b(e)}$ の添え字の数字は、試験を行ったモールドのサイズを示している。

4.1 安息角・間隙比の挙動

まず、図-6～図-9 の安息角と各礫分含有率の関係のグラフからは、礫分含有率が低い間は砂単体と同じ安息角を示し、ある礫分含有率から礫単体の安息角に向かって安息角が変化し始める傾向が見て取れる。グラフ中では、実験値の傾向を把握するために、破線を直線的に描いたが、安息角が変化し始める礫分含有率 $G^{b(a)}$ の直前で微妙な安息角の上昇が見られたり、碎石の結果において、礫分含有率 70%付近の結果が碎石単体の安息角の結果を上回っているなど、傾向にそぐわない結果も確認された。現段階では、砂と礫の相互作用が影響しているのではないかと考えている。

粗粒土の安息角および間隙比に与える礫分含有率の影響

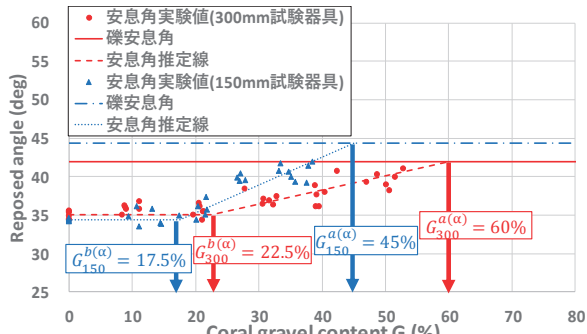


図-6 安息角とサンゴ礫含有率の関係

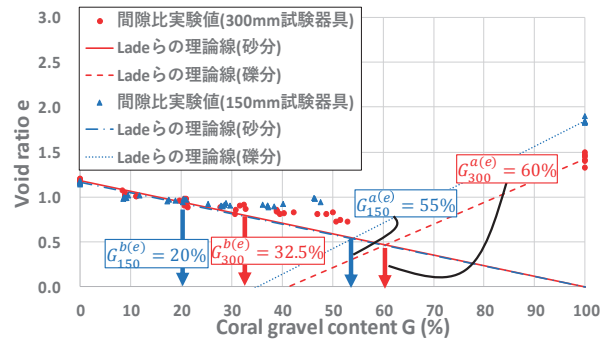


図-9 間隙比とサンゴ礫含有率の関係

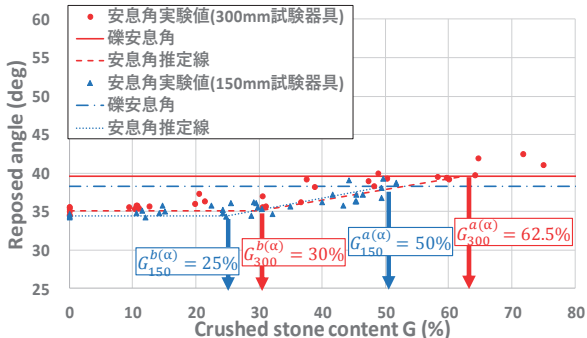


図-7 安息角と砕石含有率の関係

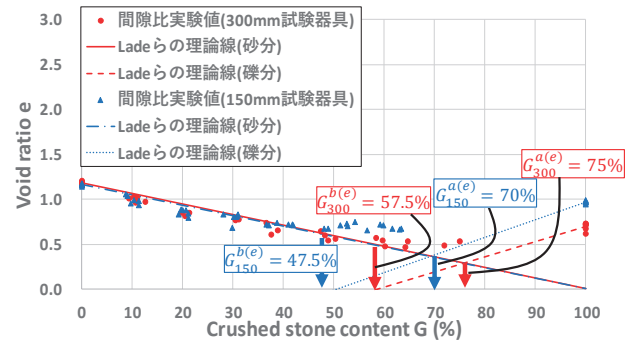


図-10 間隙比と砕石含有率の関係

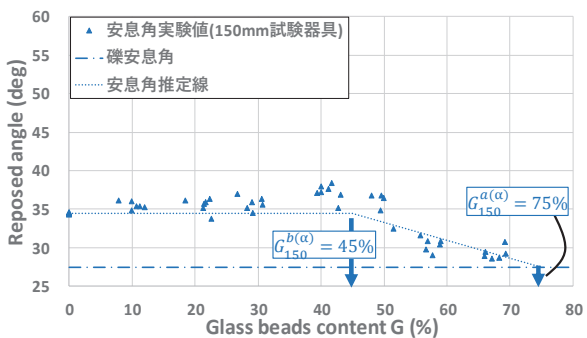


図-8 安息角とガラスビーズ含有率の関係

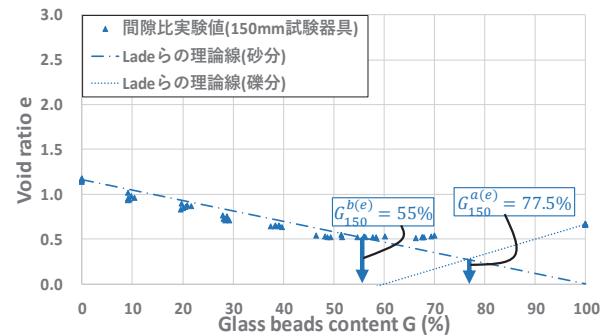


図-11 間隙比とガラスビーズ含有率の関係

次に、図-9～図-11の間隙比と各礫分含有率の関係のグラフからは、礫分含有率が低い間は、Ladeらの理論線そって間隙比が推移するが、ある礫分含有率から実験値の間隙比が、理論線の間隙比よりも大きい値を示し始めて理論線にそぐわなくなる。これは、粗粒土の内部構造(骨格構造)において、ある礫分含有率から礫同士の接触が発生し、接触点周辺に砂が入り込めない巨大な間隙が表れることによる。つまり、理論線の根底にある「砂分と礫分が隙間なく理想的に充填された状態」が成立しなくなることで、理論線にそぐわなくなる。

安息角と間隙比の結果に共通する特徴の一つとして、礫分含有率 100%の結果以外では、均質な材料としての値が得られなかった。これは間隙比に対する Lade らの理論線における、砂の理論線と礫の理論線の交点(理論上、粗粒土全体の間隙比が最も小さくなる礫分含有率)に到達する前に、モールド内で砂分と礫分が分離し、均一な粗粒土試料を作成できなくなったことによる。Lade らの理論線の交点となる礫分含有率以上の礫分含有率を有する粗粒土は、現実の重力下では存在しないことを意味している。例えば、礫分含有率が 90%の均一な粗粒土が存在するためには、無

表-3 砂・礫単体における間隙比・安息角のモールド寸法による差

	安息角 α [°]			間隙比 e [-]		
	サンゴ礫	砕石	チイビン砂	サンゴ礫	砕石	チイビン砂
150mm器具	44.4	38.3	34.5	1.848	0.971	1.164
300mm器具	42.0	39.6	35.1	1.426	0.697	1.180
差 [%]	5.8	3.5	1.9	29.6	39.3	1.4

重力空間で、礫の間隙に砂粒子が浮遊している状態が必要になる。

4.2 モールド境界効果の影響

表-3は、図-6～図-11の砂・礫単体の間隙比・安息角の平均値と砂・礫単体の間隙比・安息角の平均値をまとめたものである。表から安息角は、モールド寸法が2倍に変化してもおおむね5%以内に差が収まっている一方で、間隙比は、チイビン砂では、差が1.4%であったが、サンゴ礫で29.6%、砕石で39.3%の差が生じているのが分かる。間隙比のサンゴ礫と砕石だけに大きな差が生じた原因は、モールド境界効果の影響である。モールド境界効果は、土粒子とモールドとの接触付近の間隙比が土粒子同士の間隙比に比べて大きくなり、その影響は、モールドに接触する面積

と土粒子の粒径に比例する。今回の場合、150mm モールドでの間隙比を求める試験では、試料体積のほぼ全域がモールドに接触しているが、300mm モールドでの試験は、モールド壁面を取りはらわれているため、接触部分はモールド底面周辺に限定、つまり、大幅にモールド境界効果の影響を受ける体積の割合が小さくなっている。そのため、粒径が大きく、モールドと接触する体積割合が高かったサンゴ礫と砕石は、間隙比に差が生じ、粒径の小さいチイビシ砂は差が生じにくかった。これらから、過去の実験⁹⁾では、粒径の大きい試料の間隙比を過大評価していたと言える。安息角を求める試験では、150mm, 300mm 両方の試験においてもモールド側面を取り払って行ったため、モールドと接触する体積の割合が低くなり、両者の差が生じにくかったと考えられる。

4.3 砂主体・中間構造・礫主体の境界礫分含有率

図-6～図-8 における $G^{b(a)}$ は、安息角の実験値が、砂単体の安息角から礫単体の安息角に向かって変化し始める礫分含有率のことであり、 $G^{a(a)}$ は実験値が、礫単体の安息角と等しくなる礫分含有率である。それぞれ「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」「力学挙動が砂と礫の力学挙動が入り混じった中間構造から礫主体の構造に移り変わる礫分含有率」と解釈される。

図-9～図-11 における $G^{b(e)}$ は、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のことであり、 $G^{a(e)}$ は、砂分を表す理論線と礫分を表す理論線の交点と考えた。つまり、試料全体の間隙比が最も小さくなる礫分含有率のことである。それぞれ「礫同士の接触により、巨大な間隙が発生し始める礫分含有率」「礫のみで構造が形成される際に、その間隙を砂粒子で充填される礫分含有率」と解釈される。ここで、 $G^{b(e)}$, $G^{a(e)}$ は土の物理的性質の変化点であり、力学挙動の変化点ではないが、間隙比は、せん断抵抗角などの力学挙動に影響を及ぼすパラメータの一つであるため、間隙比を測定することで力学挙動の変化点を捉えることができるのではないかと考え、検討材料に加えている。

図-12 に $G^{b(a)}$ および $G^{a(a)}$ と礫分含有率 100%の間隙比の関係を示す。

まず、 $G^{b(a)}$ および $G^{a(a)}$ と礫分含有率 100%の間隙比の関係からは、礫単体の間隙比が大きいほど、低い礫分含有率で $G^{b(a)}$, $G^{a(a)}$ が発現し、 $G^{b(a)}$ - $G^{a(a)}$ 間の範囲が広がる。つまり、低い礫分含有率で礫の影響が発現し、中間構造をとる礫分含有率の範囲が広がる事が分かる。

同様に、 $G^{b(e)}$ および $G^{a(e)}$ と礫分含有率 100%の間隙比の関係からも、礫単体の間隙比が大きいほど、低い礫分含有率で $G^{b(e)}$, $G^{a(e)}$ が発現し、 $G^{b(e)}$ - $G^{a(e)}$ 間の範囲が広がる。既往の研究⁹⁾で、礫の形状がいびつになるほど、またサイズが大きくなるほど、礫単体の間隙比が大きくなる事が報告されていることから、これらの傾向は礫のいびつさに

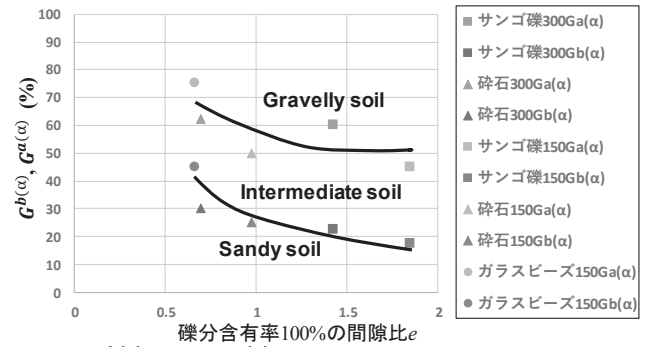


図-12 $G^{b(a)}$ および $G^{a(a)}$ と礫分含有率 100%の間隙比の関係

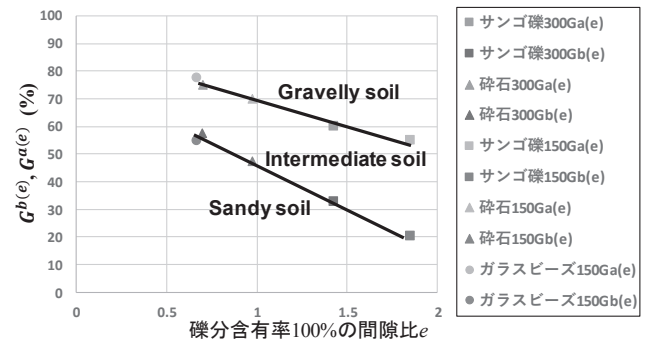


図-13 $G^{b(e)}$ および $G^{a(e)}$ と礫分含有率 100%の間隙比の関係

よって引き起こされていると言える。

モールドのサイズの変化に着目して、安息角が変化する礫分含有率 $G^{b(a)}$, $G^{a(a)}$ と間隙比が変化する礫分含有率 $G^{b(e)}$, $G^{a(e)}$ の数値を比較したところ、

- (1) モールドを大きくした場合、つまり、モールド境界効果の影響を軽減させた場合、 $G^{b(a)}$, $G^{a(a)}$, $G^{b(e)}$, $G^{a(e)}$ のすべての値が大きくなる。
- (2) その時の値の増加量は、 $G^{b(a)}$, $G^{a(a)}$ よりも $G^{b(e)}$, $G^{a(e)}$ のほうが大きい。
- (3) 同じ 300mm モールドで試験を行っても、 $G^{b(a)}$ と $G^{b(e)}$ の間で、サンゴ礫では 10%, 砕石では 27.5%, ガラスビーズでは 10%の差が生じる。

ことが見て取れる。

(1)や(2)から、 $G^{b(a)}$, $G^{a(a)}$, $G^{b(e)}$, $G^{a(e)}$ といった砂と礫が入り混じった粗粒土でもモールド境界効果の影響が現れていると言える。(3)の $G^{b(a)}$, $G^{b(e)}$ の差が生じた理由は、4.1 節で触れた粗粒土の内部構造(骨格構造)を用いて説明が可能である。 $G^{b(a)}$ は砂単体の安息角から変化する礫分含有率であり、内部構造的には、砂に礫が浮いた状態から礫が増え、礫同士の接触が増加することで粗粒土の砂山の高さが変化し、最終的に安息角の変化が起こる。 $G^{b(e)}$ はLade らの理論線から間隙比が乖離し始める礫分含有率であり、内部構造的には、礫同士の接触で巨大な間隙が発生することで起こる。この二つに共通することは、礫同士の接触によって引き起こされるという点であるが、両者の違いは接触の程度で、安息角の変化は、ごく少数の礫が接触し力を及ぼしあうことで引き起こされるが、間隙比の変化は、多数の礫が接触して砂が入り込むことの出来ない空間(間隙)が生じないと引き起こされず、この差が $G^{b(a)}$, $G^{b(e)}$ の差として現れる。



図-14 地盤材料の工学的分類における2mm以上の礫を含む粗粒土の分類

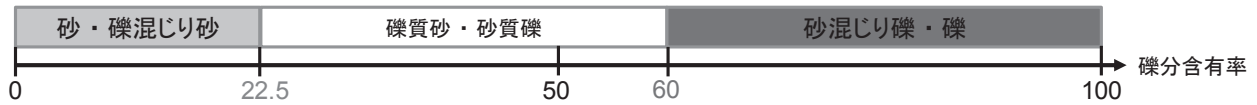


図-15 礫がサンゴの場合の安息角による分類



図-16 礫が碎石の場合の安息角による分類

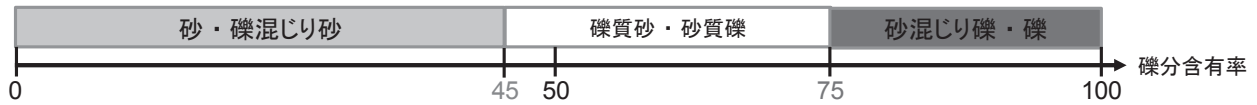


図-17 礫がガラスビーズの場合の安息角による分類

$G^{b(\alpha)}$, $G^{b(e)}$ と $G^{a(\alpha)}$, $G^{a(e)}$ に差が生じたことで、粗粒土の力学挙動の変化を捉える指標としては、安息角と間隙比のどちらが適切であるかを検討する必要性が生じた。ここではやはり、安息角は土の力学的性質であるという点から、 $G^{b(\alpha)}$, $G^{a(\alpha)}$ を粗粒土の力学挙動の変化を捉える指標とした。しかし、礫のサイズやいびつさに対する影響の表れ方に共通する点があったため、今後も両者の関係について知見を蓄積させる必要があると考える。

4.4 地盤材料の工学的分類との比較

図-14に地盤材料の工学的分類における2mm以上の礫を含む粗粒土の分類を、図-15に礫がサンゴの場合の安息角による分類を、図-16に礫が碎石の場合の安息角による分類を、図-17に礫がガラスビーズの場合の安息角による分類を示す。

土の工学的性質を推定することを目的とした地盤工学会基準 JGS0051「地盤材料の工学的分類」¹⁾は、2mm以上の礫を含む粗粒土を図-14のように分類している。特に、粗粒土は、粒度に基づいて分類がなされている。これによれば、砂主体の力学挙動を示す礫分含有率は0～15%とされている。しかし本実験で、工学的性質の一つである力学的性質(安息角)を試験した結果からは、サンゴ礫の場合22.5% (図-15)、碎石の場合30% (図-16)、ガラスビーズの場合45% (図-17)で力学挙動が砂主体から中間構造になり、大きなずれが生じた。さらに、礫主体の力学挙動を示す礫分含有率は、85～100%であるとされている(図-14)が、本研究で用いた材料では、礫分含有率が80%を超えるよう粗粒土は存在せず、それぞれの存在限界は、サンゴ礫で60% (図-15)、碎石で62.5% (図-16)、ガラスビーズで75% (図-17)付近であった。

これは、粗粒土の工学的性質、特に力学的挙動を粒度のみで判断しようとする、少なからず差が生じることを意味している。

5. まとめ

今回、モールド境界効果の影響を軽減させた状態で、粗粒土の安息角および間隙比に与える礫分含有率の影響を評価した結果をまとめると、以下に示ようになる。

- (1) 安息角は、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 $G^{b(\alpha)}$ に到達する直前に微かではあるが、上昇傾向が見て取れる。また、粗粒土は、力学挙動が砂と礫の力学挙動が入り混じった中間構造から礫主体の構造に移り変わる礫分含有率 $G^{a(\alpha)}$ 、礫のみで構造が形成される際にその間隙を砂粒子で充填される礫分含有率 $G^{a(e)}$ 付近やそれよりも礫分含有率が高い範囲では、試料の分離が起こり、粗粒土として存在できなくなる。
- (2) モールドを大きくした場合、つまり、モールド境界効果の影響を軽減させた場合、最も影響が表れるのは、礫単体の間隙比であり、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 $G^{b(\alpha)}$ 、力学挙動が砂と礫の力学挙動が入り混じった中間構造から礫主体の構造に移り変わる礫分含有率 $G^{a(\alpha)}$ 、礫同士の接触により巨大な間隙が発生し始める礫分含有率 $G^{b(e)}$ 、礫のみで構造が形成される際にその間隙を砂粒子で充填される礫分含有率 $G^{a(e)}$ についても、すべての値が大きくなる。その時の値の増加量は、 $G^{b(\alpha)}$, $G^{a(\alpha)}$ よりも $G^{b(e)}$, $G^{a(e)}$ の方が大きい。
- (3) 礫のサイズが大きくなるほど、または、形状がいびつになるほど、低い礫分含有率で礫の影響が粗粒土の挙動に表れ始め、中間構造をとる礫分含有率の範囲($G^{b(\alpha)} \sim G^{a(\alpha)}$, $G^{b(e)} \sim G^{a(e)}$)が広がる。また、同じサイズのモールドで試験を行っても、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 $G^{b(\alpha)}$ と礫同士の接触により巨

大な間隙が発生し始める礫分含有率 $G^{b(e)}$ の間に差が生じ、 $G^{b(a)}$ の方が低い礫分含有率で礫の影響を捉える。

- (4) 粒度をもとにした「地盤材料の工学的分類」による粗粒土の力学挙動の分類と、実際に工学的性質の一つである力学的性質(安息角)の結果から推定した粗粒土の分類を比較すると、少なからず差が生じる。

6. 今後の方針

本研究では、砂試料をチイビシ砂の1種類に固定して、礫試料の種類を変えることで、粗粒土の安息角と間隙比に与える礫分含有率の影響を評価した。今後は逆に、礫試料を1種類に固定して、砂試料の種類を変えることで、砂が粗粒土の安息角と間隙比に与える礫分含有率の影響にどのような変化をもたらすか、を明らかにする実験を実施していきたい。

参考文献

- 1) Luis E. Vallejo : Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures, Canadian Geotechnical Journal, Vol.38, No.5, pp.1097-1104, 2001.
- 2) Alessandro Simoni, Guy T. Houlsby : The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures , Geotechnical & Geological Engineering, Vol.24, No.3, pp.523-549, 2006.
- 3) Wen-Jong Chang, Thitibhorn Phantachang : Effects of gravel content on shear resistance of gravelly soils , Engineering Geology, Vol.207, pp.78-90, 2016.
- 4) 向谷光彦, 小林延行, 堀政理, 溝渕直人, 藤原保夫 : 礫を混入した粘性土の一面せん断特性, 第37回地盤工学研究発表会論発表文集, Vol.37, pp.205-206, 2002.
- 5) Tae-Gew Ham, Yukio Nakata, Rolando P. Orense, M.ASCE, Masayuki Hyodo : Influence of Gravel on the Compression Characteristics of Decomposed Granite Soil, Geotechnical and Geological Engineering, Vol.136, No.11, pp.1574-1577, 2010.
- 6) 森 満雄, 阿部道雄, 森麟 : 礫まじり土の締固め密度の推定に関する研究, 土木学会論文集, Vol.541/III-35, pp.159-171, 1996.
- 7) Walker, F.C. & Holtz, W.G. : Control of Embankment Material by Laboratory Testing, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol.118, No.1, pp.1-25, 1953.
- 8) 社団法人土質工学会 : 粗粒材料の変形と強度, pp.1-2, 1986.
- 9) 内野隆太郎, 中村礼, 中田幸男, 水谷耀大 : サンゴ礫混じり土における礫含有率が間隙比と安息角に与える影響, 第51回地盤工学研究発表会発表論文集, Vol.51, pp.479-480, 2016.
- 10) Yoichi Watabe, Shinji Sassa, Takashi Kaneko, Yukio Nakata : Mechanical characteristics of reconstituted coral gravel soils with different fractions of finger-coral fragments and silt matrix, Soil and Foundations, Vol.55, No.5, pp.1233-1242, 2015.
- 11) 公益社団法人地盤工学会 : 土質試験 基本と手引き, pp.49-64, 2015.
- 12) 板橋一雄, 松尾稔, 内藤充則, 神谷圭吾 : 均一な粒状材料の粒子形状評価と充填特性, 地盤工学会論文報告集, Vol.43, No.1, pp.115-127, 2003.
- 13) 原忠, 國生剛治 : 砂礫の最小・最大密度に及ぼす影響因子の分析, 土木学会論文集, No.778/III-69, pp.151-162, 2004.
- 14) 松倉公憲, 恩田裕一 : 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, Vol.13, pp.27-35, 1989.
- 15) Takao Ueda, Takashi Matsushima, Yasuo Yamada : Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture, Granular Matter, Vol.13, No.6, pp.731-742, 2011.
- 16) Poul V. Lade, Carl D. Liggio, jr., and Jerry A. Yamamuro : Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, Geotechnical Testing Journal, Vol.21, No.4, pp.336-347, 1998.

(2019年6月17日 受付)