

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 18 日現在

機関番号：82707

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360208

研究課題名(和文) サンゴ礫混じり土の地盤定数評価手法の提案～サンゴ礫骨格とマトリックスの相互作用～

研究課題名(英文) Proposal of determination method of soil parameters for coral gravel soils -interaction between skeletal structure of coral gravels and silty soil matrix

研究代表者

渡部 要一 (Watabe, Yoichi)

独立行政法人港湾空港技術研究所・その他部局等・研究領域長

研究者番号：00371758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,500,000円、(間接経費) 3,450,000円

研究成果の概要(和文)：サンゴ礫混じり土は、フィンガーコーラルに代表されるサンゴ礫が、シルト質からなるマトリックスの中に介在した土である。本研究では、サンゴ礫の含有量をパラメトリックに調整して人工的に作製した再構成試料に対して三軸せん断試験を実施し、サンゴ礫が形成する骨格がせん断挙動に与える影響について明らかにした。また、原位置から採取した不攪乱試料に対してせん断試験を実施し、せん断挙動を支配するサンゴ礫骨格の状態を代表しうる評価パラメータを提示した。

研究成果の概要(英文)：Coral gravel soil is a composite soil consisted of silty matrix and finger-coral gravels. In this study, a series of triaxial shear tests for coral gravel soils with different proportion in volumetric percentage of coral gravels were conducted to examine the influence of skeletal structure of coral gravels on the shearing behavior. In addition, another series of triaxial shear tests were conducted for undisturbed coral gravel soil samples with various grain-size distributions to find a governing parameter for the shearing behavior associated with the skeletal structure.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：サンゴ礫混じり土 せん断特性 三軸試験 サンゴ礫含有率 間隙比 個別要素法 粒子破碎

1. 研究開始当初の背景

珊瑚礁に囲まれた熱帯・亜熱帯の島嶼部では、沿岸にサンゴ礫混じり土が堆積している。サンゴ礫混じり土の実務データを整理して、設計パラメータ設定手法を提案したものが一部で使われている。この方法では、排水性と相関がある細粒分と礫分の両者の割合や、試料の乱れの有無によって、三軸UU試験か三軸CD試験かを選択して実施し、せん断強さを評価するものである。この提案は古くから使われており、沖縄県内における実務において多用されている状況にある。しかしながら、排水性は礫分や細粒分の割合で決まるような単純なものではなく、細粒分からなるマトリックスの中に粗粒分が浮いているのか、粗粒分が構成する骨格の隙間に細粒分が不十分に充填されているのか、といった土の状態で決まるはずである。

また、サンゴ礫混じり土は、サンプリング時にサンゴ礫が刃先に当たり、コアを採取する際にサンゴ礫を動かしてしまうことでマトリックス部にも乱れを生じさせるため、従来の手法では、サンゴ礫混じり土の不攪乱試料の採取は不可能であった(図-1)。結果として、乱れの有無を議論することは本質的に不可能となり、サンプリング時の乱れの影響により極度に弱い強度しか得ることはできず、実際には安定であるのに地盤改良が必要という、不経済な設計(過大設計)を余儀なくされてきた面があるかも知れない。

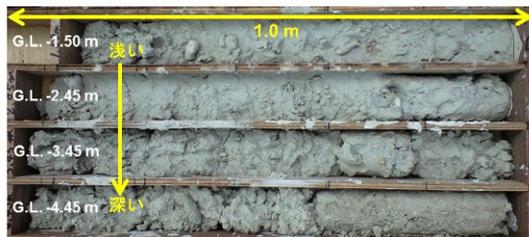


図-1 通常のサンプリング試料

しかしながら、最近のサンプリング技術の開発により、状況は変わることが予想される。近年、回転するサンプラーと土(サンプラーの外側と内側)との間に水溶性ポリマーを充填して摩擦を無くし(水溶性ポリマーをせん断し続けると摩擦が無くなる)、回転ビットで切削しながら時間を掛けてゆっくりと丁寧に試料採取することによって、大型の礫が介在した試料であっても、きわめて良質な状態で試料採取できる方法が開発された。他にも、気泡泥水を使うサンプリング方法など、幾つかの高品質サンプリングの方法が開発されてもいる。これらのサンプリング方法は、取扱いが難しかったサンゴ礫混じり土本来のパフォーマンスを評価するために、不攪乱試料を採取することを可能にした。

上述の沖縄県内の実務で採用されている地盤パラメータ設定手法では、三軸UU試験とはいうものの、実際には幾つかの設定拘束圧を作用させた後、「乱れを除去する」こと

を目的としてCU試験のように排水バルブを開けて短時間だけ圧密し、その後すぐにバルブを閉めて急速に非排水せん断を行うというものである。これは、土質力学で通常行われるUU試験とCU試験を混同した不可解な方法となっており、学会基準等として想定されていない方法である。このような状況から、国内外で行われる一般的な三軸UU試験や三軸CU試験とは著しく異なるきわめてローカルな試験法となってしまっている。

2. 研究の目的

サンゴ礫混じり土は、フィンガーコーラルに代表されるサンゴ礫がシルト質からなるマトリックスの中に多量に介在した土であり、排水性が低いと粘着力 $c$ 、排水性が高いとせん断抵抗角 $\phi$ が基礎設計に用いられる。しかしながら、サンゴ礫の存在が良質のサンプリングを妨げるため、サンゴ礫混じり土本来の力学挙動のパフォーマンスを評価できず、過大設計を余儀なくされている可能性がある。沖縄県などでは、沿岸にサンゴ礫混じり土が多く堆積しており、その取扱いに苦慮しているのが実情である。本研究では、最新の調査・試験・観察・解析技術を駆使して、粘土・シルト・砂からなるマトリックス部分と介在するサンゴ礫の部分の挙動を定量的に評価し、サンゴ礫混じり土の力学特性を解明し、設計地盤定数の評価手法を提案することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、次に挙げる5つの項目について研究を実施した。

(1) サンゴ礫混じり土の堆積構造の把握

沿岸域(リーフ内の干潟など)を対象として、MASW(多チャンネル型表面波探査)により(図-2)、空間的なサンゴ礫混じり土の堆積分布を把握し、その形成過程を検討した。また、高品質サンプリングにより、不攪乱により近い状態のサンゴ礫混じり土試料を採取し、CTスキャナを駆使して採取試料の内部構造の可視化を通じて、サンゴ礫とマトリックス(シルト・粘土)の堆積構造の解明を試みた。

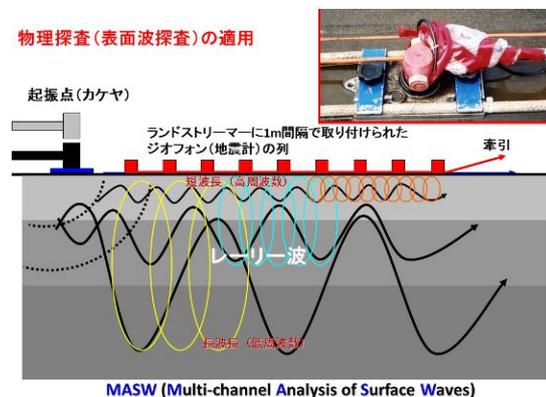


図-2 MASWの概念図

(2) サンゴ礫の力学挙動の解明

サンゴ礫混じり土を特徴付ける「サンゴ礫」単体の力学特性について、破碎試験（割裂試験）や摩擦試験の結果を基に、個別要素法（DEM）によるモデル化を試みた。DEMによる一次元圧縮過程のシミュレーションを行い、サンゴの破碎性に着目して力学挙動の支配因子を調べた。

(3) マトリックスの力学挙動

サンゴ礫混じり土のマトリックス部分を抽出し、マトリックスを構成する土質からなる土要素の力学挙動を調べた。

(4) 人工試料によるパラメトリックスタディ

サンゴ礫とシルト・粘土マトリックスとの配合を変えて人工的に混合土試料を作製し（表-1）、各種物理・力学試験（三軸CU-bar試験と三軸CD試験）を通じて、マトリックスの挙動（排水か、非排水か）、サンゴ礫の噛み合わせ（最初からか、途中からか）、サンゴ礫の破碎（脆性的か、延性的か）について検討した。

表-1 再構成サンゴ礫混じり土の配合

	サンゴ礫体積 百分率 $V_{\text{coral}}$	砂・シルト体積 百分率 $V_{\text{silt}}$	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 $w$
S100C0	0%	100%	1.81	29.8%
S95C5	5%	95%	1.82	26.6%
S90C10	10%	90%	1.86	24.5%
S80C20	20%	80%	1.89	22.2%
S70C30	30%	70%	1.95	19.1%
S56C44	44%	56%	2.01	16.3%

(6) 不攪乱試料の力学特性

高品質の不攪乱試料を入手し、これに対して三軸CU-Bおよび三軸CD試験を実施するとともに、CTスキャナによる内部骨格の観察や、ふるい分け試験による粒度分布の把握などを行い、力学試験結果に見られるサンゴ礫の影響を検討した。

(7) サンゴ礫混じり土の設計地盤定数の提案

人工試料を対象に結果を定量的に整理し、不攪乱試料に対する試験結果との整合を考えた力学挙動の支配パラメータを検討し、設計地盤定数の設定方法を検討した。

4. 研究成果

MASWで捉えたサンゴ礫混じり土が堆積地盤のせん断波速度構造を図-3に示す。サンゴ礫の痕跡として、石灰岩層が複雑な不陸を形成した地層の谷部にサンゴ礫混じり土が堆積している様子が見られる。サンゴ礫が堆積した地盤は複雑な地層構成をしていることが多く、ボーリング調査を実施するに当たっても、MASWの併用など、ボーリング地点間の空間情報を補間する調査・探査手法の併用が望まれると言える。

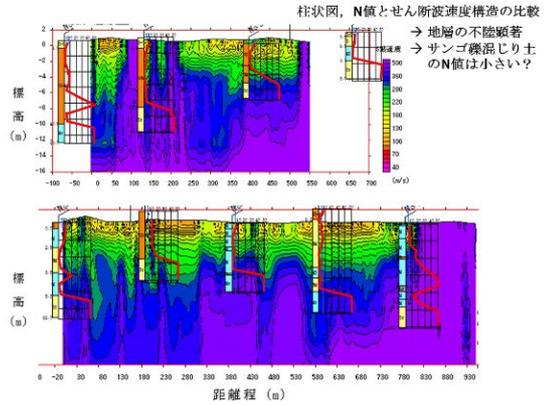


図-2 柱状図・ $N$ 値とせん断波速度構造の比較

三軸試験では、背圧200kPaを負荷して十分に飽和させ、有効圧密圧力 $\sigma'_c=50$ kPaで等方圧密した後、排水条件を設定して圧縮せん断試験を実施した。再構成試料の場合、同じ配合の供試体を2つずつ準備し、一方には三軸CU-bar試験、もう一方には三軸CD試験を実施した。また、不攪乱試料に対しては、先行実施した再構成試験の結果を踏まえて、三軸CD試験のみ実施した。比較的排水性の高い材料であることから、せん断速度は排水条件によらずとも0.1%/minとした。

再構成試料に対するCU-bar試験およびCD試験において得られた最大主応力差 $q_{\text{max}}$ とサンゴ礫の体積百分率の関係を図-3に示す。CU-bar試験とCD試験のいずれにおいても、サンゴ礫の体積百分率が20%未満ではサンゴ礫の増加に伴うせん断強さの増加はわずかであり、20%を超えるとサンゴ礫の増加とともにせん断強さが増加する。

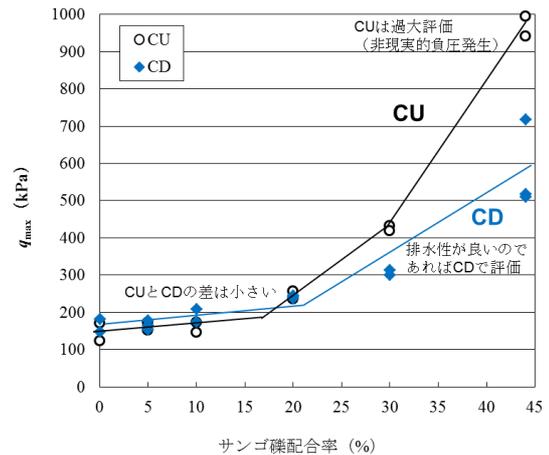


図-3 最大主応力差 $q_{\text{max}}$ とサンゴ礫の体積百分率の関係

サンゴ礫が20%未満では、主応力差の最大値 $q_{\text{max}}$ は、CD試験の方が若干大きいもののCU-bar試験とCD試験ではほぼ同じ値となった。これは、シルト質土でも砂のようなわずみ硬化挙動が現れたが、ダイレーションが顕著ではないことから、CU-bar試験とCD試験の応力経路が比較的似ていて、両者のせん断強さにあまり差が現れなかったためと考えら

れる。

サンゴ礫が20%以上になるとダイレーションが顕著になり、CU-bar試験では完全非排水条件下において原位置では非現実的な高い負の過剰間隙水圧が発生した結果、有効応力が著しく増加し、結果として非常に大きなせん断強さが得られた。これに対し、CD試験ではダイレーションに伴って試料が膨張して密度が低下してしまうため、強度の増大はCU-bar試験ほど大きくはない。設計に用いるべき現実的なせん断強さを求めるという視点からすると、サンゴ礫44%のCU試験で得られた負の過剰間隙水圧は非現実的なほどに大きく、得られたせん断強さもこれに起因したものであることから、設計で使うには不適切であると考えられる。このため、サンゴ礫を大量に含む試料（本研究の場合にはサンゴ礫が20%以上）の場合には、排水試験から得られるせん断強さをを用いるべきである。

CD試験で得られた限界状態線の傾き $M$ について、最大値 $M_{max}$ や残留値 $M_{res}$ とサンゴ礫体積百分率との関係、ならびに最大値に対する残留値の比 $M_{res}/M_{max}$ とサンゴ礫体積百分率との関係を図-4に示す。サンゴ礫が骨格を形成するような試料では、 $M$ が2を超える（ $\phi$ が $50^\circ$ を超える）結果となっており、一般的な土で得られる値に比べて著しく大きい。これは、サンゴ礫は突起があるなどきわめてアンギュラリティが高い礫粒子であることに起因したものであると考えられる。

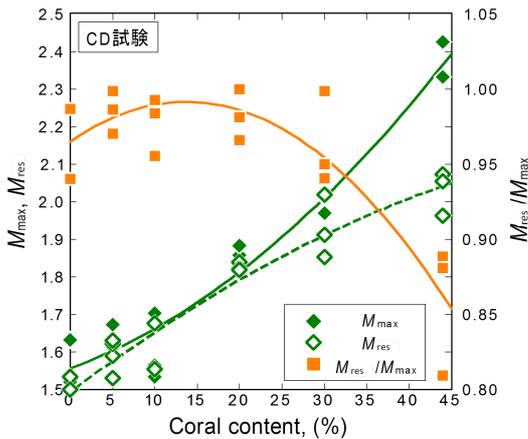


図-4  $M_{max}$ ,  $M_{res}$ とサンゴ礫体積百分率との関係

再構成試料に対しては、上述のようにサンゴ礫体積百分率20%以下ではマトリックスを形成するシルト質土が力学挙動を支配し、サンゴ礫体積百分率が20%以上になるとサンゴ礫同士が接触するようになり、せん断に伴ってサンゴ礫の噛み合いに起因するダイレーションと破碎の影響がせん断特性を支配するようになることがわかった。一方、不攪乱試料の場合、定性的には同様の傾向が見られるものの、サンゴ礫の不均質な混入状況や粒子寸法の相違により、不攪乱試料で得られた定量的な傾向を直接適用できない。

そこで、複数のサイトから入手したサンゴ

礫混じり土の不攪乱試料に対し、一連の三軸試験を実施するとともに、試験前後のCT画像による内部構造の観察、粒度試験による粒径分布の把握などを行い、土の骨格構造と力学挙動に着目した検討を行った。様々な検討を行った結果、砂よりも大きな粒子（0.075mm以上）が形成する骨格と、シルトよりも小さな粒子（0.075mm以下）が形成するマトリックスとに分けて考え、マトリックス部分を間隙とみなして骨格が形成する間隙比（骨格間隙比 $e_{g(75\mu m)}$ ）を定義すると、再構成試料・不攪乱試料によらず、一連の三軸試験で得られた力学挙動において、ダイレーションの傾向や粒子破碎の影響が現れるか現れないかを統一的に評価するパラメータになる可能性が示唆された（図-5、図-6）。

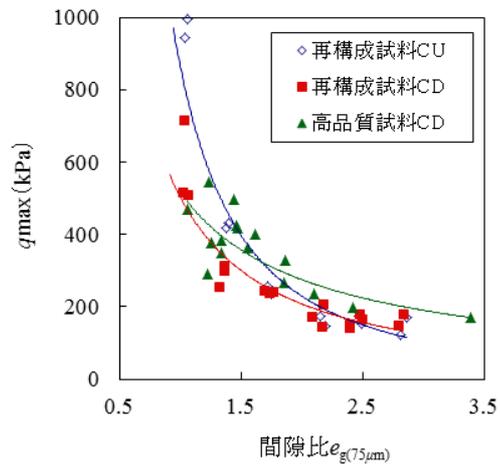


図-5 最大主応力差 $q_{max}$ と骨格間隙比 $e_{g(75\mu m)}$ の関係

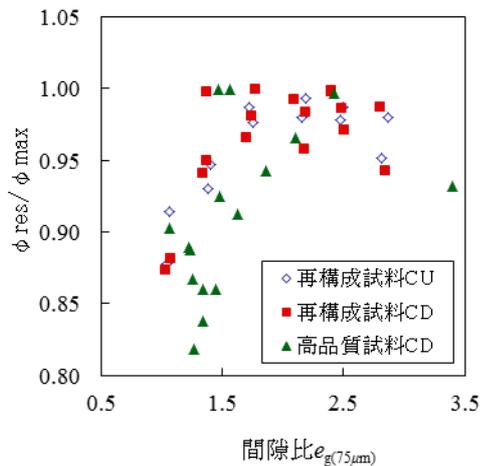


図-6 内部せん断応力の最大値と残留値最大主応力差 $q_{max}$ と骨格間隙比 $e_{g(75\mu m)}$ の関係

サンゴ礫の粒子破碎の影響は、せん断挙動のみならず、個別要素法DEMを用いた力学モデルと、それを用いた数値シミュレーションによる検討も行っている。サンゴ礫の圧裂引張り試験結果を基に破碎性のあるサンゴ礫粒子をモデル化し、無重力状態で空間にランダムに発生させたサンゴ礫に対して、上方か

ら圧縮して初期状態を作製し、一次元圧縮の過程をシミュレーションした(図-7)。粒子破碎の影響などについて、定性的な傾向のみならず、ある程度定量的な傾向をも捉えることもでき、三軸試験結果に見られた粒子破碎の影響を考察する上で有用な知見を得ることができた。

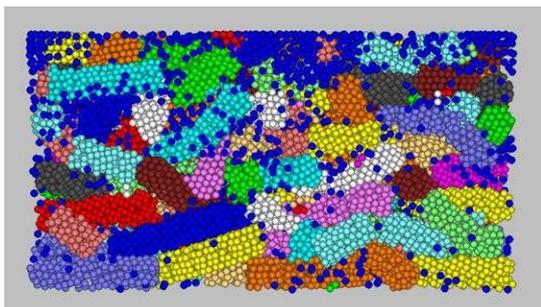


図-7 サンゴ礫圧縮過程に対する個別要素法によるシミュレーションで得られた変形・破碎状況の例

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Watabe, Y. and Sassa, S. (2012): Sedimentary stratigraphy of natural intertidal flats with various characteristics, *Soils and Foundations*, 52(3), 411-429, 2012.

DOI: 10.1016/j.sandf.2012.05.003

〔学会発表〕(計5件)

Kaneko, T., Watabe, Y. and Yanagisawa, A. (2013): Shearing Property of Coral Gravel Soils, *Proceedings of the 5th KGS -JGS Geotechnical Engineering Workshop*, Seoul, 55-60.

Nakata, Y. and Watabe, Y. (2013): DEM simulation for coral gravels, *Proceedings of the Workshop on Experimental Micromechanics for Geomaterials (Joint Workshop of the ISSMGE TC101-TC105), EXP MICRO 2013.*

金子 崇, 渡部要一, 柳沢昭彦, 山田眞一 (2013): サンゴ礫混じり土(配合調整試料)のせん断特性, 第48回地盤工学研究発表会講演集, 869-870.

柳沢昭彦, 渡部要一, 金子 崇 (2013): サンゴ礫混じり土(高品質サンプリング試料)のせん断特性, 第48回地盤工学研究発表会講演集, 871-872.

犬飼 惇, 中田幸男, 兵動正幸, 渡部要一 (2012): さんご礫の破碎挙動とDEMモデリング, 第47回地盤工学研究発表会講演集, 709-710.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
なし

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

渡部 要一 (WATABE, Yoichi)

独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤研究領域長

研究者番号: 00371758

##### (2)研究分担者

佐々 真志 (SASSA, Shinji)

港湾空港技術研究所 地盤研究領域 動土質研究チームリーダー

研究者番号: 10392979

中田 幸男 (NAKATA, Yukio)

山口大学大学院 理工学研究科 教授

研究者番号: 90274183

山田 文彦 (YAMADA, Fumihiko)

熊本大学大学院 自然科学研究科 教授

研究者番号: 60264280

椋木 俊文 (MUKUNOKI, Toshifumi)

熊本大学大学院 自然科学研究科 准教授

研究者番号: 10392979

##### (3)連携研究者

なし