

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

Vol.55 No.2 June 2016

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,  
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 55 卷 第 2 号 (Vol. 55, No. 2) , 2016 年6月 (June 2016)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 高潮津波シミュレータ(STOC)による津波被害解析手法 ..... 富田孝史, 本多和彦, 千田優 ..... 3 (Numerical Simulation on Tsunami Inundation and Debris Damage STOC Model .....Takashi TOMITA, Kazuhiko HONDA, Yu CHIDA)
2. 植生が浅海域の流動場にもたらす影響に関する現地調査と流動モデルによる数値解析 .....茂木博匡, 中川康之, 渡辺謙太, 所立樹, 門谷茂, 桑江朝比呂 .....35 (Field Observations and Numerical Analyses on the Effect of Vegetation on the Hydrodynamics of a Shallow Water Using a New Hydrodynamic Model .....Hirotsada MOKI, Yasuyuki NAKAGAWA, Kenta WATANABE, Tatsuki TOKORO, Shigeru MONTANI, Tomohiro KUWAE)
3. サンゴ礫混じり土の力学特性—人工配合による再構成試料を使ったパラメトリックスタディー ..... 渡部要一, 金子崇, 佐々真志 ..... 61 (Mechanical properties of coral-gravel soil –a parametric study using reconstituted samples– .....Yoichi WATABE, Takashi KANEKO, Shinji SASSA)
4. 海底液状化土砂流動のダイナミクスと解析法及び実験・現地検証 ..... 佐々真志 ..... 75 (Submarine Liquefied Flow Dynamics and Their Analytical Framework with Experimental and Field Validations ..... Shinji SASSA)

## サンゴ礫混じり土の力学特性 —人工配合による再構成試料を使ったパラメトリックスタディー—

渡部要一\*・金子 崇\*\*・佐々真志\*\*\*

### 要 旨

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。サンゴ礫が少なればシルトが支配的な力学挙動となり、サンゴ礫が多くなるとシルトとサンゴ礫との複合的な力学挙動を示すものと考えられる。本研究では、サンゴ礫混じり土の力学特性を評価することを目的として、サンゴ礫含有率をパラメータとした一連の三軸試験を通じて以下の知見を得た。サンゴ礫混じり土の強度定数は、サンゴ礫の噛み合わせや粒子破碎の影響を受けるため、サンゴ礫含有率に支配されており、本研究で用いた試料の場合、サンゴ礫の体積含有率が20%を越えるとその影響が現れた。サンゴ礫の体積含有率が20%以下の試料では、CD試験から得られたせん断強さはCU-bar試験から得られたせん断強さよりもわずかに大きい、両者の差はきわめて小さい。一方、サンゴ礫体積含有率が20%以上の試料では、CU-bar試験から得られたせん断強さは、激しいダイレーションのために原位置では非現実的なほどに大きな負圧が発生し、設計強度としては過大評価になる。CD試験から得られたせん断強さについても、体積膨張のために強度が増加する傾向が見られるが、CU-bar試験の結果に比べるとかなり小さな値となる。サンゴ礫が密に詰まった試料では、せん断抵抗角 $\phi$ は一般的な土に比べて非常に大きな値となるが、せん断を続けるとサンゴ礫の粒子破碎によって次第に減少する。

キーワード：サンゴ礫混じり土，サンゴ片，シルトマトリクス，粒子破碎，力学特性，三軸試験

---

\* 地盤研究領域長

\*\* 地盤研究領域土質研究グループ研究官

\*\*\* 地盤研究領域動土質研究グループ長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5053 Fax：046-844-4577 e-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

## **Mechanical properties of coral-gravel soil – a parametric study using reconstituted samples –**

**Yoichi WATABE\***  
**Takashi KANEKO\*\***  
**Shinji SASSA\*\*\***

### **Synopsis**

Coral gravel soils, which are composite soils consisting of finger-coral fragments and silt matrix, are often found in coastal regions of sub-tropical islands, particularly in Okinawa. In this study, for reconstituted soils with various coral gravel fractions up to 44% that was the densest package, a series of triaxial CU-bar and CD tests was conducted to study determination method for soil design parameters in consideration of interaction between soil skeleton consisted of coral fragments and silt matrix. For samples with volumetric percentage of coral fragments less than 20%, the shear strength obtained from the CD tests was slightly larger than that obtained from the CU-bar tests; however, the difference between those two tests was very small. For samples with volumetric percentage larger than 20%, the shear strengths obtained from the CU-bar tests were significantly overestimated because of the unrealistically large negative excess pore pressure in the field corresponding to significant dilation. The shear strengths obtained from CD tests also show the similar tendency corresponding to the volume expansion; however, these are much smaller than those obtained from the CU-bar tests. For the samples with dense package of coral fragments, shear resistance angle  $\phi$  was much larger than normal soils; however, it tended to decrease in association with particle crush of coral fragments. The tendency of particle crush was visually evidenced through CT-images observed before and after the triaxial tests. The soil parameters were significantly influenced by volumetric percentage of coral fragments in association with particle interaction and particle crush, when the percentage was larger than 20% for the coral gravel soils examined in this study.

**Keywords:** Coral gravel soil, coral fragment, silt matrix, particle crush, mechanical properties, triaxial test

---

\* Director, Geotechnical Engineering Department (Head, Soil Mechanics and Geo-environment Group)  
\*\* Researcher, Soil Mechanics and Geo-environment Group  
\*\*\* Head, Soil Dynamics Group  
Port and Airport Research Institute, 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5053 Fax : +81-46-844-4577 e-mail: [watabe@ipc.pari.go.jp](mailto:watabe@ipc.pari.go.jp)

## 目 次

要 旨	61
1. はじめに	65
2. 供試体の作成条件と作成方法	67
3. 試験結果	68
4. CTスキャナによる試料内部構造の観察	72
5. 結論	72
謝辞	73
参考文献	74

## 1. はじめに

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存在した土である。サンゴ礫が少なければシルトが支配的な力学挙動となり、サンゴ礫が多くなるとシルトとサンゴ礫との複合的な力学挙動を示すものと考えられる。一般に、構造物基礎の設計では、排水性が低いと非排水せん断特性を考慮して粘着力 $c$ 、排水性が高いと排水せん断特性を考慮してせん断抵抗角 $\phi$ が用いられる。しかし、シルトとサンゴ礫との複合材に対しどのように $c$ や $\phi$ を設定したら良いか、これまでのところあまり多くの知見は得られていない。これは、サンゴ礫の存在が良質のサンプリングを阻害するため、サンゴ礫混じり土本来の力学挙動のパフォーマンスを正しく評価できなかったためでもある。サンゴ礫混じり土は、日本では、亜熱帯気候下に位置する南西諸島の海岸に多く堆積しており、これらの地域では、構造物基礎の設計において、上記理由によりその取り扱いに苦慮しているのが実情である。

沖縄県沿岸の建設現場では、一般的なサンプリング方法（粘性土はコアキャッチャー付きの固定ピストン式シンウォールサンプラー、砂や石灰岩はロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプラーなど）で試料採取が実施されている。一例として、浦添市の海岸における道路の埋立て建設現場（図-1）で採取された試料の様子を写真-1に示す。表層付近から深度 8m の部分がサンゴ礫混じり土に相当する地層であり、それ以深はサンゴ礫混じり土を含む石灰岩が主体となっている。試料採取時にサンプラーの刃先にサンゴ礫が当たり、サンゴ礫が連れ込まれるなどして試料が著しく乱れ、もはや不攪乱試料とは言えない状況になっていることがわかる。このように試料が乱れてしまうために、サンゴ礫混じり土の力学特性の解明が遅れてきた。

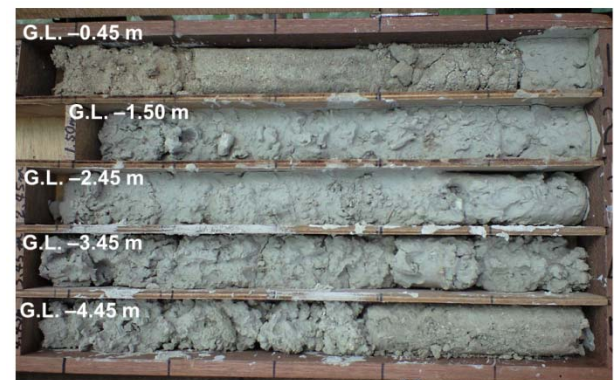
サンゴ礫混じり土の力学特性を直接的に調べた研究事例はきわめて少なく、当該分野の研究は始まったばかりであると言える。しかしながら、砂礫などの大きな寸法の粒子が粘性土のマトリックスの中に存在している混合土を対象とした研究など、関連した研究が幾つか報告されている。Fragaszy et al. (1990)は、大きな粒子が存在することによってその周囲の細粒分マトリックスの詰まり具合が影響を受けることに着目し、土の密度がどのように変化するかモデル化して表現した。Fragaszy et al. (1992)や Simon and Houlsby (2006)は、礫を含む砂質土のせん断特性の評価を試みている。これらの研究は、試験に用いる供試体の寸法に影響を与えるような大きな礫を

含む場合に、ある最大寸法以下の粒度に調整したり、相似粒度に調整したりした試験用試料に対する力学試験結果から元の粒度の試料の力学特性をどのように評価したら良いかに着目したものである。

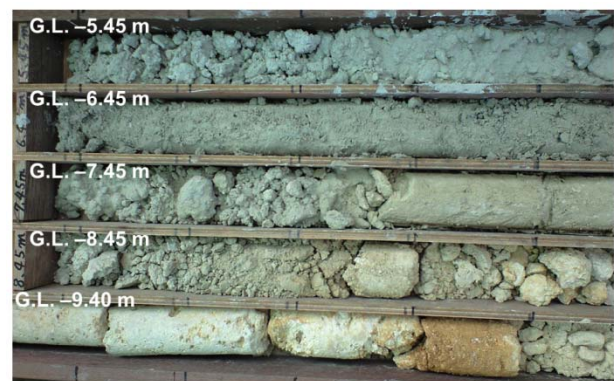
Kumar and Muir Wood (1999)や Vallejo and Mawby (2000)は、粗粒分と細粒分の混合土のせん断特性について調べている。いずれの研究においても、粗粒分が少ないと細粒分のせん断挙動が全体のせん断挙動を支配し、粗粒分がある程度以上になると粗粒分の影響が現れ始め、



図-1 サンゴ礫混じり土が堆積する沖縄県浦添市の海岸



(a) G.L. -0.45 to -5.45 m



(b) G.L. -5.45 to -10.40 m

写真-1 一般のサンプラーで採取されたサンゴ礫混じり土の状況

粗粒分の割合がさらに増えると粗粒分のせん断挙動が全体のせん断挙動を支配するようになるという結論が導かれている。しかしながら、それらの挙動を分ける配合の境界は、それぞれ異なる値が報告されており、個々の材料特性によって異なっている。Crawford et al. (2008)は、礫と粘土の混合土について、せん断特性のみならず、透水特性についても調べている。また、Watabe et al. (2011)は、粘土と砂の混合土について、圧縮特性と透水特性を土骨格と関連して議論している。

本研究で扱うサンゴ礫混じり土の場合、粒子破碎の影響についても考慮する必要がある。せん断に伴う砂質土や礫質土の粒子破碎の影響については、例えば、Lade et al. (1996)や Lobo-Guerrero and Vallejo (2005)に報告されている。近年では粒子破碎の影響を DEM でモデル化してシミュレートするなどにより、せん断挙動に現れる粒子破碎の影響も明らかになってきている (Lobo-Guerrero and Vallejo 2006)。

本研究では、サンゴ礫含有率を種々変化させて作成した人工配合の試料を作製して一連の三軸試験 (CU-bar 試験および CD 試験) を実施した。サンゴ礫混じり土の力学挙動について、シルトとサンゴ礫の複合材としての挙動がサンゴ礫含有率の変化とともにどのように変化するかをパラメトリックに調べ、 $c$  や  $\phi$  といった地盤定数の設定手法を提案することが目的である。最新の研究によれば、地球温暖化の影響によりサンゴの生息域は徐々にではあるが緯度の高い地方に向かって広がっており、現在は温帯気候下にある地域でも将来的にはサンゴ礁が広がる可能性があることが報告されている (Jones, 2011; Yamano et al. 2011)。このような背景からも、本研究で扱うサンゴ礫混じり土の重要性は、現在の亜熱帯地域にとどまらず、将来的にはさらに拡大していく可能性があるものと考えられる。

試験に用いたサンゴ礫混じり土は、上述の浦添市の海岸において、干潟・浅瀬から採取したものである。複合材としてのサンゴ礫混じり土をバックホーで掘削・採取したのち、試験室にてサンゴ礫とシルト質土 (砂分、シルト分、粘土分を含めて、ふるい分けして得られた 2mm 以下の粒子をまとめてシルト質土と称することにする) とに分離し、次章で説明する手順で所定の配合に調整し、供試体を作製して三軸試験に供した。

シルト質土の土粒子密度は  $2.76\text{g/cm}^3$ 、液性限界は 22.9%であったが、塑性限界は得られず非塑性の土であると評価された。シルト質土の粒径加積曲線を図-2 に示す。0.075mm 以下の細粒分含有率は約 50%、0.005mm 以下の粘土分は 17% (0.002mm 以下は 13%) である。一方、

サンゴ礫については、フィンガーコーラル (枝状サンゴ) の破片を中心に、様々な形状や太さ、長さのものが含まれており、サンゴ礫の表面には様々な突起が付いていることがわかる (写真-2)。

シルト質土の鉱物組成を X 線回折分析によって調べた結果を図-3 に示す。細粒分含有率 50%の土であるが、カオリナイト、イライト、ス멕タイトといったいわゆる粘土鉱物や、多くの堆積物に見られる一般的な鉱物であ

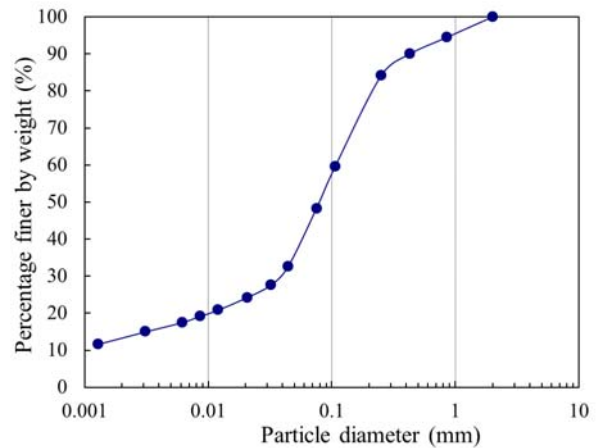


図-2 試験に用いたシルトの粒径加積曲線



写真-2 試験に用いたサンゴ礫の例

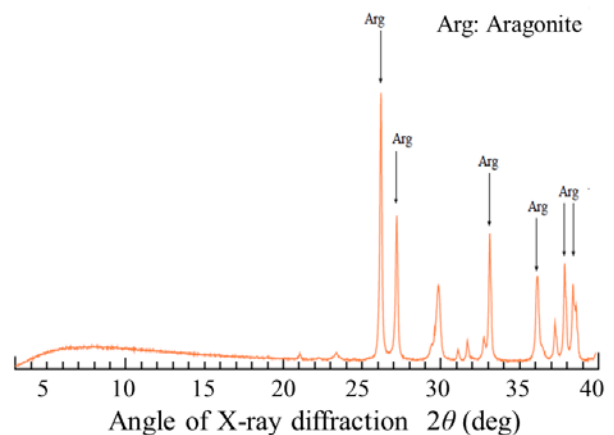


図-3 サンゴ礫混じり土のシルトマトリックス部分に対する X 線回折による鉱物分析結果



表-1 人工配合サンゴ礫混じり土試料の一覧

Sample	Percentage of coral fragments in volume (particle fraction)	Percentage of silt matrix in bulk volume (particle fraction)	Bulk density	Water content
C0S100	0% (0%)	100% (100%)	1.81 g/cm <sup>3</sup>	29.8%
C5S95	5% (9%)	95% (91%)	1.82 g/cm <sup>3</sup>	26.6%
C10S90	10% (17%)	90% (83%)	1.86 g/cm <sup>3</sup>	24.5%
C20S80	20% (31%)	80% (69%)	1.89 g/cm <sup>3</sup>	22.2%
C30S70	30% (44%)	70% (56%)	1.95 g/cm <sup>3</sup>	19.1%
C44S56	44% (59%)	56% (41%)	2.01 g/cm <sup>3</sup>	16.3%

る石英などもほとんど含まれていない。同定された鉱物はサンゴの骨格を形成するアラゴナイト (Chalker et al. 1985; Kleyvas et al. 1999) で、CaCO<sub>3</sub>を主成分とするものである。換言すれば、多くの土に含まれるシリカ (Si) 系鉱物が含まれていない。このように、粘土鉱物を含まないことが、細粒分を 50%含むにもかかわらず塑性が見られないことの原因であると考えられる。

沖縄県各地の港湾工事で行われた地盤調査結果から、サンゴ礫混じり土のマトリックス部分を形成するシルト質土について、シルト分と粘土分 (0.005mm 以下) の含有率の関係を示したものが図-4 として報告されている (親泊・善, 2004)。塑性指数が 20 以上のもの、20 未満のもの、塑性を示さないものに分類してプロットされている。本研究で扱っている浦添のサンゴ礫混じり土では、シルト質土の細粒分含有率は FC=50%、粘土分含有率は 17%であることから、プロットが集中した領域内にあり、サンゴ礫混じり土のシルト質土としては代表的なものの一つであると言える。また、細粒分が多くても粘土分が 50%以下の土では、浦添のシルト質土と同様に塑性を示さないものが多い。

## 2. 供試体の作成条件と作成方法

試験条件は、表-1 に示すように、供試体の全体積に対しサンゴ礫の体積が 0, 5, 10, 20, 30, 44%の 6 通りとした。サンゴ礫 44%は、サンゴ礫が最も密に詰められた状態で、サンゴ礫が骨格を形成した隙間をシルト質土が埋めている。シルト質土は含水比 30%の飽和状態で準備し、これがサンゴ礫の隙間に充填される (全体体積に対してそれぞれ 100, 95, 90, 80, 70, 56%となる)。

各配合に合わせてサンゴ礫とシルト質土をそれぞれ 5 等分にして用意し、それぞれに対して含水比が約 30%となるようにシルト質土に水を加えてスラリー状とした中

にサンゴ礫を投入して十分に混合した。次に、内側にテフロンシートをセットした高さ 15cm, 直径 7.5cm の塩化ビニル製円筒容器に投入し 1 層毎に締め、5 層に分けた全ての試料を投入した後、円筒容器の上下をステンレス板で拘束するとともに、塩化ビニル円筒の半径方向の膨張を抑えるためにバンドで締め付けた状態で-40℃の冷凍庫で 24 時間かけて凍結させた。凍結した供試体を容器から脱型して寸法と重量を計測した後、三軸試験機のペダスタルに載せ、ペーパードレーンとゴムスリーブを装着し、キャップを取り付けた。

三軸セルを組み立て、セル内を脱気水で満たした後、16kPa のセル圧を负荷し、脱気水を通水しながら十分な時間をかけて解凍するとともに、供試体の飽和度を高めた。その後、背圧 200kPa を负荷して十分に飽和させ、有効圧密圧力  $\sigma'_c=50\text{kPa}$  で等方圧密した後、排水条件として三軸圧縮試験を行った。排水性が悪い材料に対しては

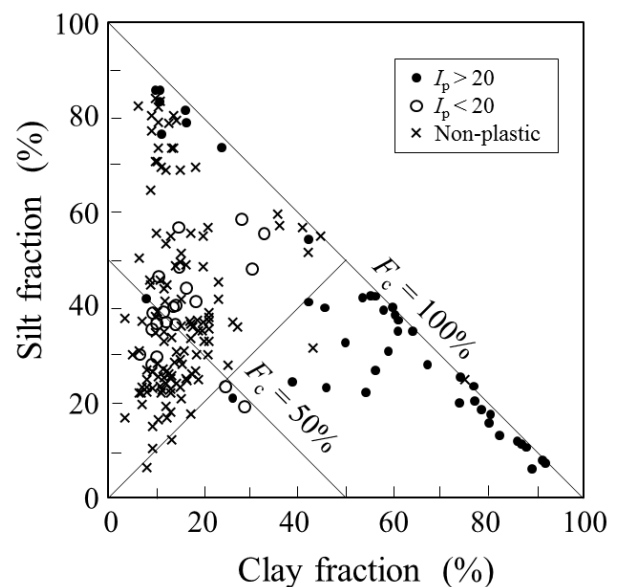


図-4 サンゴ礫混じり土のシルトマトリックス部分におけるシルト分含有率と粘土分含有率の関係



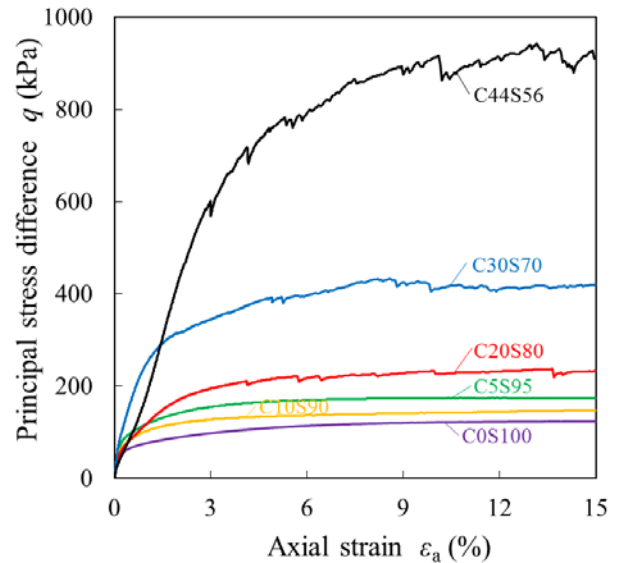
非排水試験から粘着力  $c$  を、排水性が良い材料に対しては排水試験から  $\phi$  を評価することに対応するため、ここでは、同じ配合の供試体を 2 つ準備し、1 つには非排水せん断試験 (CU-bar 試験)、もう一方には排水せん断試験 (CD 試験) を実施した。比較的排水性の高い材料であることから、せん断速度はともに 0.1%/min とした。なお、表-1 に示したように、作製したサンゴ礫混じり土の湿潤密度は  $1.81 \sim 2.01 \text{g/cm}^3$  であるので、圧密圧力 50kPa は深さ 5~6m の地層の有効土被り圧を想定した設定ということになる。

試料記号はシルト質土とサンゴ礫の配合を反映して付けられており、S と C の後の数字はそれぞれシルト質土とサンゴ礫の体積百分率を表している。

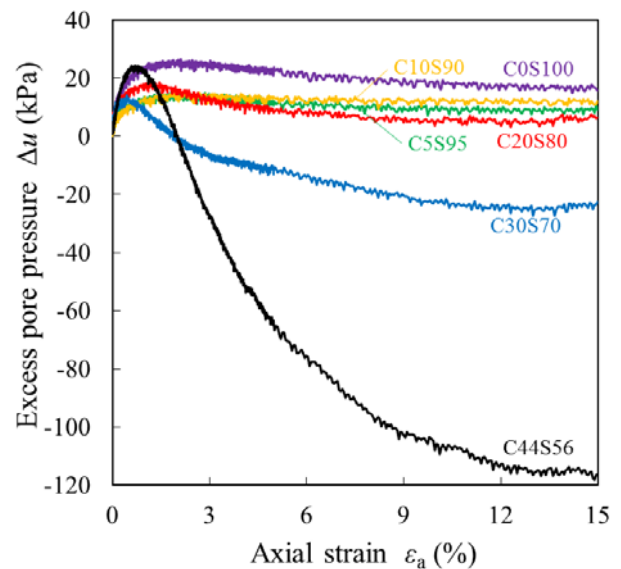
### 3. 試験結果

三軸圧密非排水圧縮せん断試験 (CU-bar 試験) で得られた(a)主応力差  $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係、ならびに(b)過剰間隙水圧  $\Delta u$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係を図-5 に示す。サンゴ礫を含まない C0S100 を始めサンゴ礫を 5% 含む C5S95 や 10% 含む C10S90 では、主応力差は軸ひずみ 1% 程度まで急勾配で増加した後、軸ひずみ 5% 程度までさらに徐々に増加し、軸ひずみ 5% 以上ではほぼ一定値となっている。過剰間隙水圧は、軸ひずみ 1~2% まで上昇した後徐々に減少するが、それでも軸ひずみ 15% まで正の値を示している。このような挙動は正規圧密状態にある粘性土やシルトのせん断挙動の典型である。しかし、サンゴ礫を 30% 含む C30S70 や 44% 含む C44S56 になると主応力差は軸ひずみ 5% 程度まで急勾配で著しく増加し、その後も軸ひずみ 10% 程度まで徐々に増加し続ける。

主応力差の最大値は、サンゴ礫の体積百分率 0, 5, 10, 20, 30, 44% においてそれぞれ 120, 180, 150, 220, 420, 920kPa である。サンゴ礫の増加とともにせん断強さが増加する傾向があり、サンゴの体積百分率が 20% 以上になるとその増加は飛躍的に増大する。サンゴ礫の体積百分率が 30% 以上の試料では、軸ひずみ 1% 程度までは過剰間隙水圧は増加するが、その後減少に転じ、軸ひずみ 2% 以上では負の過剰間隙水圧となる。特に C44S56 では著しい負の過剰間隙水圧が発生しており、軸ひずみ 15% 時に  $-120 \text{kPa}$  にまで達している。サンゴが骨格構造を形成する C44S56 で著しく大きなせん断強さが発揮されているが、その理由は、せん断に伴って骨格を形成するサンゴ礫が著しいダイレーションを起こすにもかかわらず、排水バルブが閉じられているためである。現場では完全な非排水は期待できないので、実地盤ではあり得ないよ



(a) 主応力差  $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係

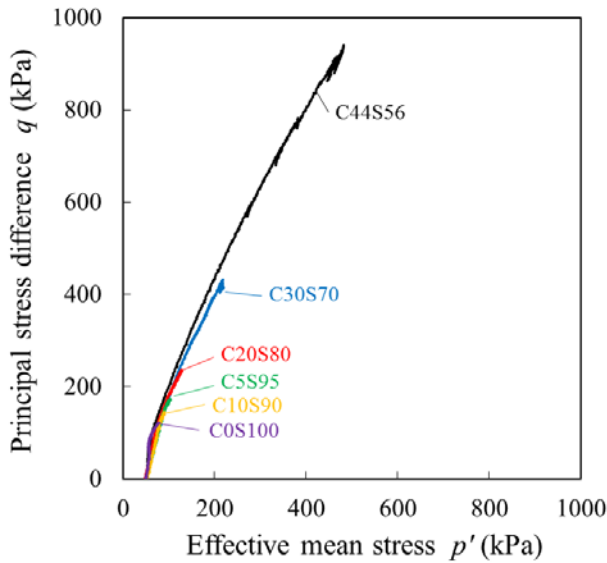


(b) 過剰間隙水圧  $\Delta u$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係

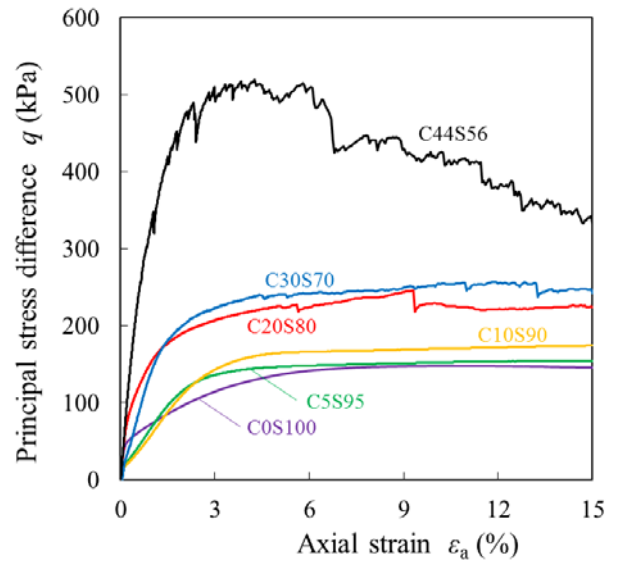
図-5 三軸 CU-bar 試験の結果

うな著しい負の過剰間隙水圧が発生していることになる。従って、サンゴ礫が骨格を形成するほどにサンゴ礫が密に入っている C44S56 のような試料において、CU-bar 試験から得られる非排水せん断強さは、実際の強度よりも過大評価している可能性があり、設計上危険である。

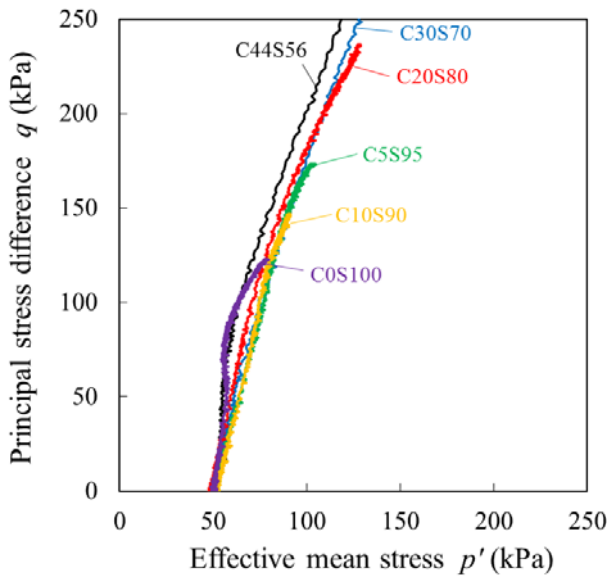
C44S56 では、せん断中の主応力差の変化に著しいノイズ状の変化 (凸凹) が現れているが、これは、骨格を形成するサンゴ礫が破碎してサンゴ礫同士が噛み合いが外れ、応力が瞬間的に減少することが表れた結果であると考えられる。このような変化は C30S70 でも明瞭に見られる。不明瞭ではあるが、C20S80 においても同様の傾向が僅かに見られ、一部のサンゴ礫は接触し合って破碎している可能性が示唆される。サンゴ礫同士が噛み合った



(a) せん断試験から得られた応力経路の全体図



(a) 主応力差  $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係

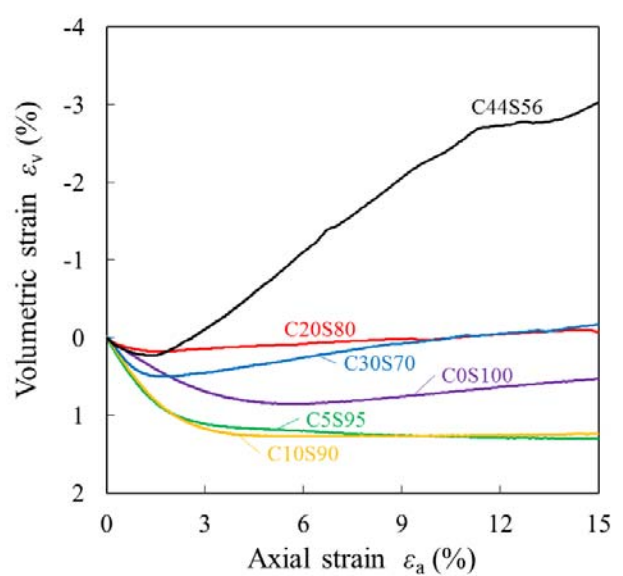


(b) せん断試験から得られた応力経路の初期部分に着目した拡大図

図-6 三軸 CU-bar 試験で得られた有効応力経路

挙動が見られるかどうかは、サンゴ礫の体積百分率 20% 辺りが境界になるようである。なお、このようなノイズのような変化が粒子破碎に起因することは、破碎性の土に対する DEM によるシミュレーションの結果 (Lobo-Guerrero and Vallejo 2006) からも示唆されるものである。

応力経路を主応力差と平均有効主応力の関係として、応力経路の(a)全体図と(b)初期部分の拡大図を図-6 に示す。全体の傾向としては、上に凸な曲線となっている。サンゴ礫を含まない C0S100 では、過剰間隙水圧の発生により平均有効主応力が一旦減少する傾向がわずかに見られるものの、その後限界状態線に沿って右上に向かう



(b) 体積ひずみ  $\epsilon_v$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係

図-7 三軸 CD 試験の結果

傾向を示し、ひずみ硬化の傾向を示す。サンゴ礫を 5% 以上含むものでは、平均有効主応力が一旦減少する傾向は見られず、単調に右上に向かって推移しており、ダイレーションを生じる密な砂のように著しいひずみ硬化を示す挙動になっている。サンゴ礫を 30%以上含む C30S70 や C44S56 では、限界状態に達したと考えられる応力経路の後半部分でも、限界状態線の傾きが次第に小さくなる傾向を読み取れる。これは上述の主応力差と軸ひずみ関係において示唆されたように、サンゴ礫の破碎の影響が現れたものと考えられる。

三軸圧密排水圧縮せん断試験 (CD 試験) で得られた(a) 主応力差  $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係、ならびに(b) 体積ひずみ  $\epsilon_v$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係を図-7 に示す。多少順

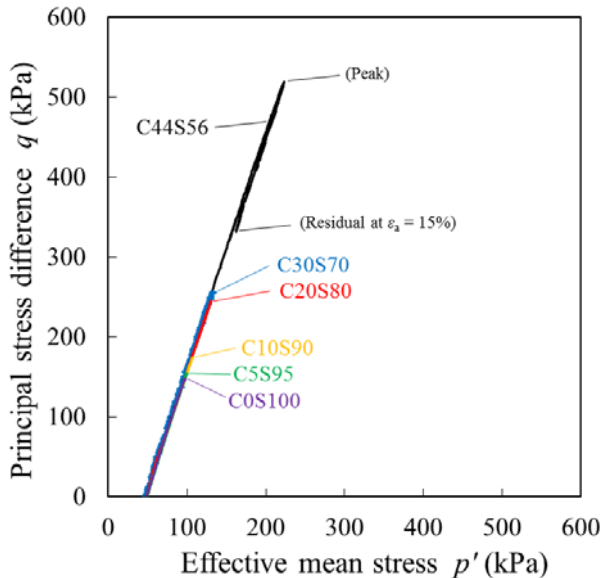


図-8. 三軸 CD 試験から得られた有効応力経路

番が前後するものもあるが、基本的には CU-bar 試験と同様にサンゴ礫が増えると最大主応力差が増える傾向にあり、特に、サンゴ礫が骨格を形成する C44S56 の増加が著しい。

サンゴ礫が 10%以下の試料では、せん断に伴って体積圧縮を生じる。サンゴ礫が 20%や 30%の試料では、初期に圧縮が見られたのち膨張に転じるが、その変化は非常に小さく、体積変化はほとんど見られない。C44S56 では、初期に僅かに圧縮が見られた後、著しい膨張が生じている。この著しい膨張のために、ひずみの増大に伴う主応力差の減少、すなわち、ひずみ軟化の傾向が強く現れる結果が得られた。

主応力差と軸ひずみの関係は、サンゴ礫の体積百分率が 10%以下の試料では滑らかな曲線になっているが、サンゴ礫の体積百分率が 20%以上になると、CU-bar 試験と同様にサンゴ礫が破碎することに伴って現れると考えられる著しいノイズ状の変化(凹凸)が現れている。特に、C44S56 において顕著である。

応力経路を主応力差と平均有効主応力の関係として図-8 に示す。排水試験なので、傾き 1:3 の直線で表されるが、ひずみ軟化が見られる C44S56 では、ピーク強度発現時から主応力差が約 40%も低下し、これにより、限界状態線の傾き  $M$  は 2.4 から 2.0 まで約 17%低下している。このことは、サンゴ礫が多く含まれる試料の CU-bar 試験において限界状態線の傾きがせん断とともに低下したと整合している。

CU-bar 試験および CD 試験において得られた最大主応力差  $q_{max}$  とサンゴ礫の体積百分率の関係を図-9 に示す。図-5～図-8 では、図を見やすくするために各配合の試料

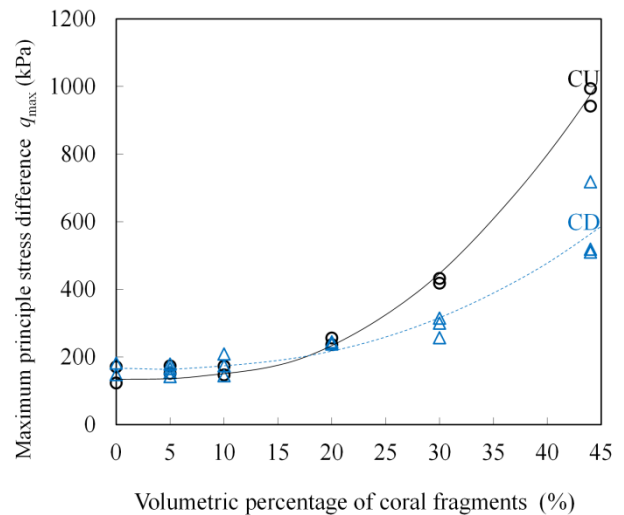
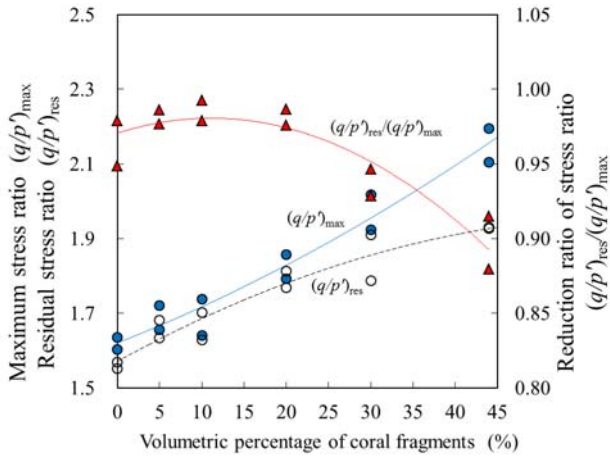


図-9 三軸 CU-bar 試験と三軸 CD 試験から得られた最大主応力差とサンゴ礫体積百分率の関係

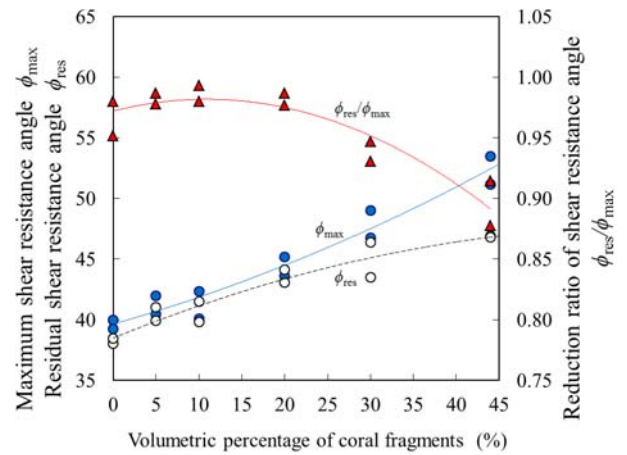
に対する代表的な 1 供試体の結果のみを示したが、実際には各配合の試料に対して 2 供試体 (C44S56 の CD 試験は 3 供試体) ずつ試験を実施しており、図-9 にはすべての結果をプロットした。CU-bar 試験と CD 試験のいずれにおいても、サンゴ礫の体積百分率が 20%未満ではサンゴ礫の増加に伴うせん断強さの増加はわずかであり、20%を超えるとサンゴ礫の増加とともにせん断強さが増加する。

サンゴ礫が 20%未満では、主応力差の最大値  $q_{max}$  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、図-7 に示したように、シルト質土のみでも砂のようなひずみ硬化挙動がわずかに現れたが、体積変化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。

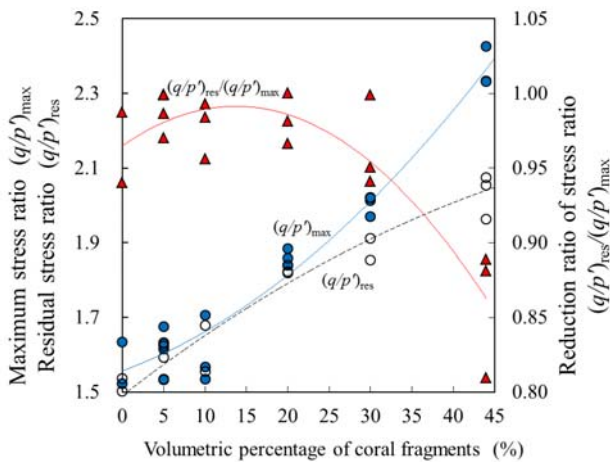
サンゴ礫が 20%以上になるとダイレーションが顕著になり、CU-bar 試験では完全非排水条件下において原位置では非現実的なほどに高い負の過剰間隙水圧が発生した結果、有効応力が著しく増加し、結果として非常に大きなせん断強さが得られた。これに対し、CD 試験ではダイレーションに伴って試料が膨張して密度が低下してしまうため、強度の増大は CU-bar 試験ほど大きくはない。設計に用いるべき現実的なせん断強さを求めるという視点からすると、C44S56 の CU-bar 試験で得られた負の過剰間隙水圧は非現実的なほどに大きく、得られたせん断強さもこれに起因したものであることから、設計で使うには不適切であると考えられる。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)



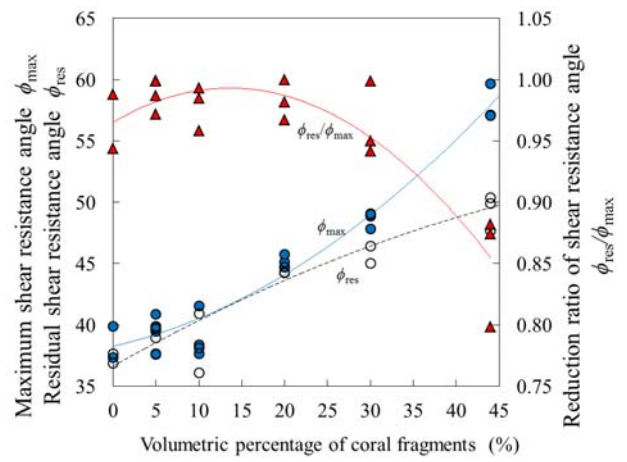
(a) CU-bar 試験



(a) CU-bar 試験



(b) CD 試験



(b) CD 試験

図-10 応力比の最大値 $(q/p)_{\max}$ 、残留値 $(q/p)_{\text{res}}$ 、および、両者の比 $(q/p)_{\text{res}}/(q/p)_{\max}$ とサンゴ礫体積百分率との関係

図-11. せん断抵抗角の最大値 $\phi_{\max}$ 、残留値 $\phi_{\text{res}}$ 、および、両者の比 $\phi_{\text{res}}/\phi_{\max}$ とサンゴ礫体積百分率との関係

の場合には、排水試験から得られるせん断強さを用いるべきである。

上述したサンゴ礫があまり含まれない試料（本研究の場合にはサンゴ礫が20%未満）の場合には、非排水せん断試験から得られた試験結果を用いるべきである。ただし、本研究の試料の場合には、CU-bar試験とCD試験で差がほとんど現れないことから、結果としてどちらの試験結果でも大きな差はない。しかし、シルト質土の部分がより粘性土のような挙動を示す場合など、ダイレーション特性が異なれば、サンゴ礫が少なくともCU-bar試験とCD試験の結果に著しい差が生じることが想定され、原則としてはCU-bar試験のせん断強さとするべきである。

限界状態線の傾き $M$ について、最大値 $M_{\max}$ と残留値 $M_{\text{res}}$ 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 $M_{\text{res}}/M_{\max}$ とサンゴ礫体積百分率との関係を図-10に示す。同様の図をせん断抵抗角 $\phi$ について示したものを図-11に示す。CU-bar試験の結果では、COS100において $M_{\max}, M_{\text{res}}, M_{\text{res}}/M_{\max}$  ( $\phi_{\max}, \phi_{\text{res}}, \phi_{\text{res}}/\phi_{\max}$ )

はそれぞれ1.62, 1.57, 0.97 (40°, 38°, 0.95)、C44S56においてそれぞれ2.18, 1.92, 0.88 (53°, 47°, 0.89)であった。同様にCD試験の結果では、COS100において $M_{\max}, M_{\text{res}}, M_{\text{res}}/M_{\max}$  ( $\phi_{\max}, \phi_{\text{res}}, \phi_{\text{res}}/\phi_{\max}$ )はそれぞれ1.55, 1.50, 0.97 (38°, 37°, 0.97)、C44S56においてそれぞれ2.04, 2.40, 0.85 (50°, 59°, 0.85)であった。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°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、写真-2に示したように表面に突起があるなど、サンゴ礫は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。

$M_{\max}$  ( $\phi_{\max}$ )はほぼ直線であるがやや下に凸な曲線、 $M_{\text{res}}$  ( $\phi_{\text{res}}$ )はやや上に凸な曲線、 $M_{\text{res}}/M_{\max}$  ( $\phi_{\text{res}}/\phi_{\max}$ )は上に凸な曲線（二次曲線で近似しているため、サンゴ礫体積百分率が小さいところで減少するように見えてしまうが、本来は一定と考えるべき）で表される関係が見られる。限界状態線の傾きやせん断抵抗角で見ても、最大主応力差 $q_{\max}$ で考察したように、サンゴ礫体積百分率が



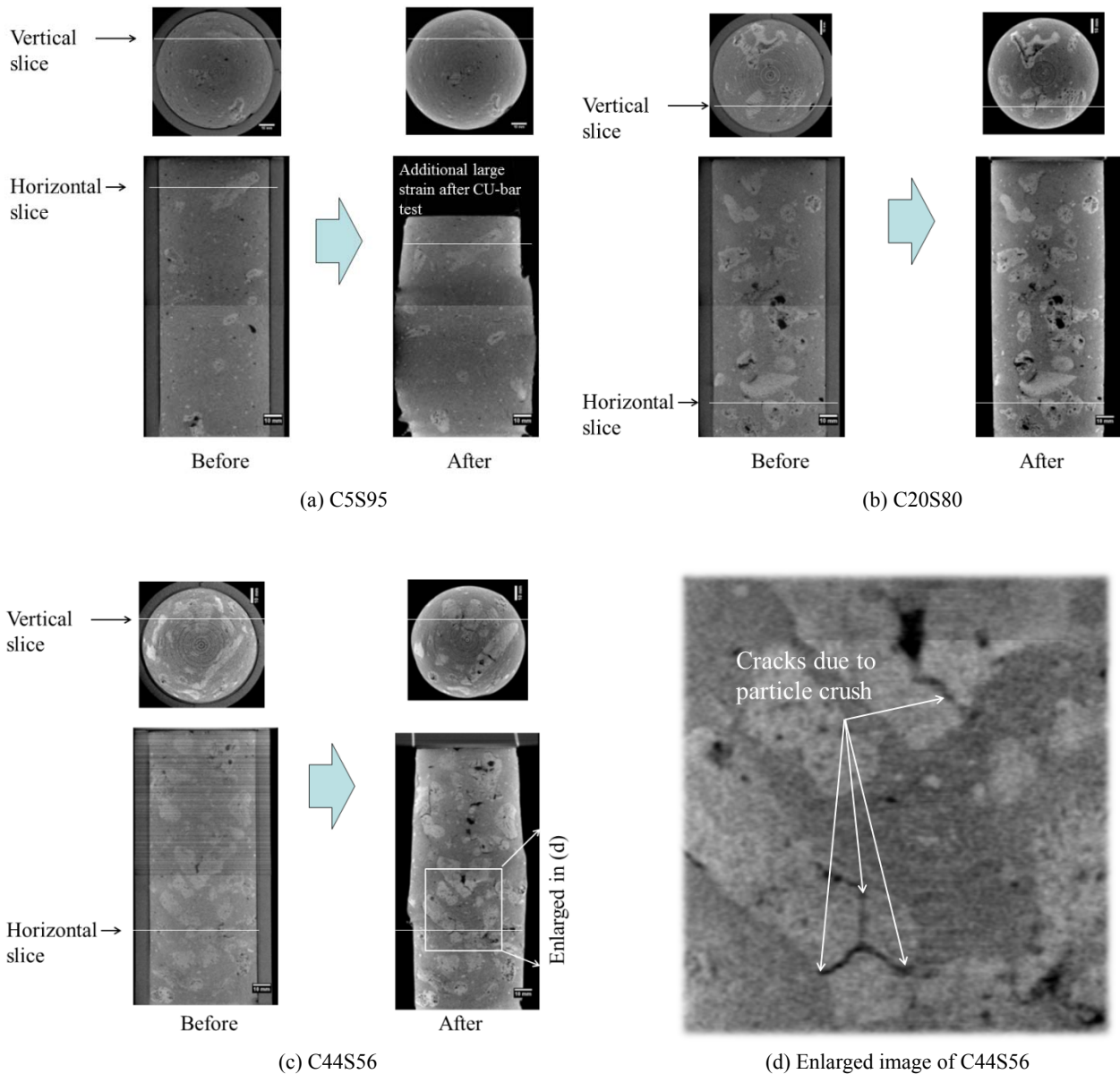


図-12 三軸 CU-bar 試験のせん断前およびせん断後に CT 撮影した断面画像

増加するのに伴って大きくなる傾向が見られる。また、サンゴ礫体積百分率が20%を超えると最大値と最小値の差が開き、サンゴ礫44%では最大値からで15%程度減少している。

#### 4. CTスキャナによる試料内部構造の観察

サンゴ礫混じり土の体積百分率が5%、20%、44%の試料について、CU-bar試験のせん断試験前とせん断試験後の内部構造をCTスキャナで観察した結果を断面画像として図-12に示す。配合したサンゴ礫は、写真-2に示したようなフィンガーコーラルであり、CTによる断面画像としてはサンゴ礫の横断面は円形や楕円形、縦断面は長い粒子として捉えられている。中には枝分かれしたよ

うな複雑な形状のサンゴ礫も含まれている。

サンゴ礫が少量しか含まれないC5S95では、サンゴ礫が相互に干渉することなくシルト質土のマトリックスの中に浮かんでいて、せん断試験により大変形を与えても、相互に離れて存在するサンゴ礫に特に変化は生じなかったことが確認できる。サンゴ礫が20%含まれるC20S80では、多くのサンゴ礫は他のサンゴ礫と接触しそうなほどになっており、せん断に伴って割れたものもあることを確認できる。サンゴ礫が骨格を形成しているC44S56では、ほとんどすべてのサンゴ礫が他のサンゴ礫と接触しており、せん断に伴って多くのサンゴ礫が割れている様子を確認できる。これらのサンゴ礫の破碎状況は、図-5や図-7に見られた応力~ひずみ関係の著しいノイズのような変化が、サンゴ礫の破碎に起因したものである

ことを裏付けるものとなっている。

サンゴ礫の破砕性について、個別要素法によりシミュレーションをした研究成果が報告されている (Nakata and Watabe, 2013; 2015)。使用されているサンゴ礫は、本研究と同一地域から採取されたものであり、サンゴ礫の挙動を理解する上で参考になる。サンゴ礫の割裂引張強度は  $5\text{N/mm}^2$  程度であり (Nakata and Watabe, 2013)、一般的なコンクリートと同レベルにある。強度を支配する物質が炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$  で共通であることに由来するかも知れない。この結果を基に個別要素法による解析パラメータを設定し、サンゴ礫がかみ合った骨格構造の圧縮挙動をシミュレーションすると、応力集中によりサンゴ礫が破砕され、著しいノイズのような応力の変化が現れた (Nakata and Watabe, 2013)。このようなシミュレーション結果も、上述したサンゴ礫体積百分率が高い試料の挙動を裏付けるものである。

## 5. 結論

本論文では、サンゴ礫とシルトマトリックスから構成されるサンゴ礫混じり土についてサンゴ礫体積百分率をパラメータとした人工配合試料を作成し、その力学特性をパラメトリックに詳しく調べた。得られた主な知見を以下に取りまとめる。

- 1) 本研究で扱ったシルトマトリックスの主な鉱物はアラゴナイトであり、サンゴを構成する炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$  と同じ鉱物である。このような鉱物組成であることは、サンゴ礫混じり土のシルトマトリックスが非塑性であることの理由の一つであると考えられる。
- 2) 三軸 CU-bar 試験でも、三軸 CD 試験でも、サンゴ礫の体積百分率が 20% を越えると、体積百分率の増加とともにせん断強さが増加する。
- 3) サンゴ礫の体積百分率が 20% 以下の試料では、体積百分率の増加とともにわずかにせん断強さが増加する傾向が見られた。これらの試料では、CD 試験から得られたせん断強さは CU-bar 試験から得られたせん断強さより大きくなるものの、両者の差は非常に小さい。しかしながら、せん断特性は土のダイレイタンス特性に依存することから、設計で使うべき強度として第一に考えるべきせん断強さは CU-bar 試験から得られた値とすべきである。
- 4) サンゴ礫の体積百分率が 20% 以上の試料、特に、体積百分率が 44% とサンゴ礫が最密状態に詰められている試料において、CU-bar 試験から得られたせん断強さは、原位置では起こりえない非現実的なほどに大きな負の

過剰間隙水圧に起因した値が得られていることから、設計に使うせん断強さとしては著しく過大評価している可能性がある。CD 試験から得られたせん断強さについても、体積膨張によりせん断強さが大きくなる傾向が見られるが、CU-bar 試験で見られた強度増加の傾向よりも遙かに小さい。これらの結果に基づいて考えると、サンゴ礫が密に詰まった試料に対する設計用のせん断強さは、排水強度を用いるべきである。

- 5) サンゴ礫が密に詰まった試料では、応力比  $q/p'$  は 2 以上 (せん断抵抗角  $\phi$  が  $50^\circ$  以上) の大きな値になる。この値は、一般的な土に比べてきわめて大きい。この大きなせん断抵抗は、サンゴ礫の表面についていた突起により粒子のアンギュラリティが高いことで説明できる。
- 6) せん断強さと同様に、サンゴ礫の体積百分率の増加とともに、せん断抵抗角  $\phi$  は増加する。サンゴ礫の体積百分率が 20% 以上になると、せん断強さがピーク値を示した後、せん断を続けるとせん断抵抗角は著しく減少する。
- 7) サンゴ礫の体積百分率が 20% 以上の試料では、せん断中に著しくギザギザの応力～ひずみ関係が観察された。このギザギザの曲線になる理由は、せん断中に生じるサンゴ礫の破砕に起因していると考えられ、せん断前後の CT 画像の比較から、実際にサンゴ礫が破砕したことを確認した。
- 8) サンゴ礫混じり土のせん断強さの評価では、サンゴ礫のかみ合いのみならずサンゴ礫の破砕の影響がせん断強さを支配する鍵となる。

(2016年1月25日受付)

## 謝辞

沖縄総合事務局の與那嶺和史氏と前幸地紀和氏には、サンゴ礫混じり土を提供いただくとともに、試験結果に対して実務面から有益なアドバイスをいただきました。基礎地盤コンサルタンツ (株) の山田眞一氏には、サンゴ礫混じり土の再構成試料の作成に当たり、ご協力をいただきました。東亜建設工業 (株) からの依頼研修生であった柳沢昭彦氏と野崎郁郎氏には、サンゴ礫混じり土の三軸試験を実施していただきました。基礎工研究チームリーダーの水谷崇亮氏には、CT画像撮影にご協力いただきました。ここに記し、感謝の意を表します (いずれも所属は研究実施時のもの)。本研究は、文部科学省の科学研究費補助金 (基盤研究(B) 課題番号23360208) を受けて実施しました。

## 参考文献

- Chalker, B., Barnes, D., and Isdale, P. (1985): Calibration of X-ray densitometry for the measurement of coral skeletal density. *Coral Reefs* 4(2), 95–100
- Crawford, B.R., Faulkner, D.R., and Rutter, E. H. (2008): Strength, porosity, and permeability development during hydrostatic and shear loading of synthetic quartz-clay fault gouge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 113(B3), doi:10.1029/2006JB004634
- Fragaszy, R.J., Su, W., and Siddiqi, F.H. (1990): Effects of oversize particles on the density of clean granular soils. *Geotechnical Testing Journal* 13(2), 106–114.
- Fragaszy, R., Su, J., Siddiqi, F., and Ho, C. (1992): Modeling strength of sandy gravel. *Journal of Geotechnical Engineering* 118(6), 920–935.
- Jones, N. (2011): Coral marches to the poles. *Nature*, doi:10.1038/news.2011.33
- Kleypas, J.A., Buddemeier, R.W., Archer, D., Gattuso, J.-P., Langdon, C., and Opdyke, B.N. (1999): Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science* 284(5411), 118–120
- Kumar, G.V., and Muir Wood, D. (1999): Fall cone and compression tests on clay±gravel mixtures. *Géotechnique* 49(6), 727–739.
- Lade, P., Yamamuro, J., and Bopp, P. (1996): Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering* 122(4), 309–316.
- Lobo-Guerrero, S., and Vallejo, L.E. (2005): DEM analysis of crushing around driven piles in granular materials. *Géotechnique* 55(8), 617–623.
- Lobo-Guerrero, S., and Vallejo, L.E. (2006): Modeling granular crushing in ring shear tests: experimental and numerical analyses. *Soils and Foundations* 46(2), 147–157.
- Nakata, Y., and Watabe, Y. (2013): DEM simulation for coral gravels, *Proceedings of the Workshop on Experimental Micromechanics for Geomaterials*, Hong Kong, pp.692-695.
- Nakata, Y., and Watabe, Y. (2015): Compression behavior for assembly of DEM crushable cylindrical gravels, *Geomechanics from Micro to Macro, Proceedings of the International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro*, IS-Cambridge 2014, pp.281-284.
- Simoni, A., and Houlsby, G.T. (2006): The direct shear strength and dilatancy of sand–gravel mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering* 24(3), 523–549.
- Vallejo, L.E. (2001): Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures. *Canadian Geotechnical Journal* 38(5), 1097–1104.
- Watabe, Y., Yamada, K., and Saitoh, K. (2011): Hydraulic conductivity and compressibility of mixtures of Nagoya clay with sand or bentonite. *Géotechnique*, 61(3), 211–219.
- Yamano, H., Sugihara, K., and Nomura, K. (2011): Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters* 38(4), doi:10.1029/2010GL046474
- 親泊正孝, 善 功企 (2004): 排水特性からみたサンゴ礫混じり土の強度評価上の区分方法, 土木学会論文集, No.771/III-68, 1–10.



港湾空港技術研究所報告 第55巻第2号

2016.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2016) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## CONTENTS

1. Numerical Simulation on Tsunami Inundation and Debris Damage STOC Model .....	Takashi TOMITA, Kazuhiko HONDA, Yu CHIDA .....	3
2. Field Observations and Numerical Analyses on the Effect of Vegetation on the Hydrodynamics of a Shallow Water Using a New Hydrodynamic Model .....	Hirotsada MOKI, Yasuyuki NAKAGAWA, Kenta WATANABE, Tatsuki TOKORO, Shigeru MONTANI, Tomohiro KUWAE .....	35
3. Mechanical properties of coral-gravel soil –a parametric study using reconstituted samples– .....	Yoichi WATABE, Takashi KANEKO, Shinji SASSA .....	61
4. Submarine Liquefied Flow Dynamics and Their Analytical Framework with Experimental and Field Validations .....	Shinji SASSA .....	75