

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.3 September 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 3 号 (Vol. 55, No. 3) , 2016 年9月 (September 2016)

目 次 (CONTENTS)

1. サンゴ礫混じり土の力学特性－高品質試料のせん断特性に対する支配パラメーター
..... 渡部要一, 金子崇, 佐々真志 3
(Mechanical properties of coral-gravel soil - an integrated governing parameter for undisturbed samples -
.....Yoichi WATABE, Takashi KANEKO, Shinji SASSA)

サンゴ礫混じり土の力学特性

—高品質試料のせん断特性に対する支配パラメーター

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。サンゴ礫が少なければシルトが支配的な力学挙動、サンゴ礫が多ければシルトとサンゴ礫との複合的な力学挙動が現れる複雑な地盤材料である。筆者らの既往の研究では、シルトマトリックスにサンゴ礫（粒子寸法を9.5～37.5mmに限定）を配合してサンゴ礫体積含有率をパラメータとする再構成試料を作成し、これに対して一連の三軸試験を実施した。その結果、サンゴ礫体積含有率が20%以上になるとサンゴ礫のかみ合いや粒子破碎の影響がせん断挙動に強く表れることがわかった。しかしながら、原位置にあるサンゴ礫混じり土の場合、サンゴ礫の形状や寸法は多様であり、かつ、シルトマトリックスが不均質であることから、人工的に配合して準備した再構成試料とは異なる複雑な力学挙動が現れることが予想された。そこで、本研究では、複雑な骨格構造を有するサンゴ礫混じり土の力学挙動を支配する統一的なパラメータを見いだすことを目的として、不攪乱試料として採取した高品質試料に対して一連の三軸CD試験を実施し、得られた試験結果について多角的な視点から考察した。その結果、粒径がシルト粒子以下の細粒分を間隙と見なし、粒径が砂以上の粗粒分がサンゴ礫と共に骨格を形成していると評価した骨格間隙比によって、再構成試料のみならず各地から採取した不攪乱試料も含めて、多様なサンゴ礫混じり土の力学挙動を統一的に説明できることを明らかにした。

キーワード：サンゴ礫混じり土，不攪乱試料，サンゴ片，シルトマトリックス，粒子破碎，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 – an integrated governing parameter for undisturbed samples –

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

Synopsis

Coral gravel soils are composite soils comprising of finger coral fragments and silt matrix. In a case of small amount of coral fragments, the mechanical behavior of the coral gravel soil is governed by silt matrix, and in a case of large amount of coral fragments, mechanical behavior of the coral gravel soil is governed by coral fragments. As the first step, the authors prepared an artificial coral gravel soil mixtures with various volumetric percentages of coral fragments, and conducted a series of triaxial tests. It was clarified that the contact effect (or interlocking) between coral fragments was observed for the samples with volumetric percentage of coral fragments larger than a certain threshold value (20% in the authors' previous study). For undisturbed samples collected from the field, however, the mechanical behavior might be different from that for the reconstituted samples, because the silt matrix is non-uniform and the coral fragments have various dimensions and shapes. In the present study, high-quality samples collected as undisturbed samples from various sites were examined through a series of triaxial CD tests. The test results were discussed with various points of view to find an integrated governing parameter for the mechanical behavior of coral gravel soils. It was found out that intergranular void ratio corresponding to 0.075 mm, in which particles finer than a diameter of 0.075 mm (i.e. particles of clay and silt) are regarded as void, is very useful parameter in evaluation of the shear strength of both the reconstituted and undisturbed coral gravel soil samples.

Keywords: Coral gravel soil, undisturbed sample, coral fragment, silt matrix, particle crush, triaxial test

* Director, Geotechnical Engineering Department (Head, Soil Mechanics and Geo-environment Group)
** Researcher, Soil Mechanics and Geo-environment Group
*** Head, Soil Dynamics Group
National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology
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

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
2. 試料と三軸試験方法	9
3. 試験結果	11
4. 試験結果の統合的整理	14
5. 実務への適用	17
5. 結論	18
謝辞	18
参考文献	18

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介在した土である。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となる。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 ϕ 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 ϕ 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を正しく評価できなかったことも一因である。サンゴ礫混じり土は、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その取り扱いに苦慮しているのが実情である。

このような状況を解決するための第一歩として、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るため、渡部ら(2016)は、サンゴ礫含有率を種々変化させて作製した人工配合試料に対して一連の三軸試験(CU-bar試験およびCD試験)を実施した。その結果、サンゴ礫含有率がある閾値以上に多く含まれるようになると、サンゴ礫の噛み合わせや破碎の影響が強く表れること、サンゴ礫が多くダイレーションが著しい試料の場合には、CU-bar試験は原位置ではあり得ない大きな負圧に起因した有効応力により、せん断強さを過大評価することなどの知見を得た。これらの研究成果は、原位置から採取した高品質試料を対象とする本研究の先駆けとして位置づけられる。

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の部分にサンゴ礫混じり土に相当する地層であり、それより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、刃先が変形したり、サンゴ礫が連れ込まれたりして、試料が著しく乱れた状態になっていることがわかる。

良質な試料が得られないこと、ならびに、試料が不均

質で扱いにくいことなどから、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細粒分からなるマトリックスの中に介在している混合土を対象とした研究など、関連した研究から得られた知見が幾つか報告されている。Fragasz 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をモデル化して表現した。Fragasz et al. (1992)やSimoni 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、供試体寸法に影響を与えるような大きな礫を含む場合に、ある最大寸法以下に粒度調整したり、相似粒度に調整したりした室内試験用試料の力学試験結果から、原位置における元の粒度の試料の力学特性をどのように評価したら

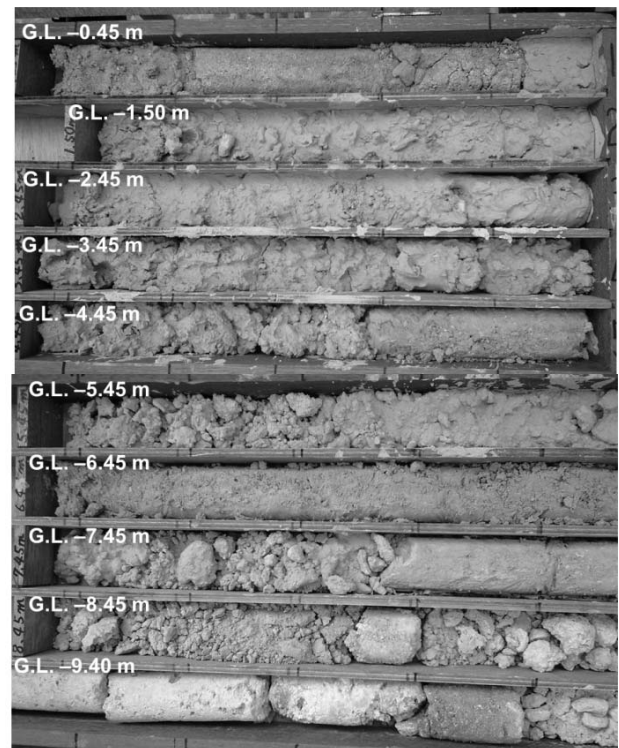


写真-1 一般的なサンプリング方法で採取されたサンゴ礫混じり土試料の状態。

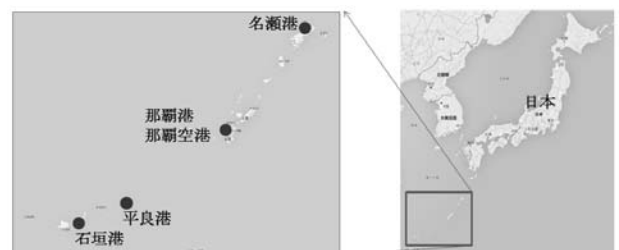


図-1 高品質試料の採取地

表-1(a) 浦添地区から試料採取して作製した再構成試料の概要

Sample ID	Symbol	Volumetric percentage of coral gravels > 9.5 mm (%)	Volumetric percentage of coral gravels > 9.5 mm and < 37.5 mm (%)	Percentage finer by weight < 9.5 mm (%)	Percentage finer by weight < 2 mm (%)	Percentage finer by weight < 0.075 mm (%)	Void ratio e_0
C0S100	A	0	0	100	100	48.2	0.98
C5S95	B	5	5	95	95	45.8	0.86
C10S90	C	10	10	90	90	43.4	0.77
C20S80	D	20	20	80	80	38.6	0.67
C30S70	E	30	30	70	70	33.7	0.51
C44S56	F	44	44	56	56	27.0	0.42

表-1(b) 那覇空港拡張予定地から採取した高品質試料の概要

Sample ID	Depth from G.L. (m)	Symbol	Volumetric percentage of coral fragments > 9.5 mm (%)	Volumetric percentage of coral fragments * > 9.5 mm and < 37.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 9.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 2 mm (%)	Percentage finer by weight * < 0.075 mm (%)	Void ratio * e_0	Intergranular void ratio *	
									$e_{g0.075}$	e_{g2}
GP1-3	5.75	A	7.1	7.1	88.7	80.4	57.3	0.80	3.04	7.11
GP1-6	10.48	B	9.6	9.6	84.5	76.7	39.3	0.80	1.90	5.90
GP1-7	11.48	C	2.2	2.2	96.2	84.1	41.7	0.94	2.27	9.76
GP1-9	13.40	D	15.9	9.5	85.4	79.9	42.1	0.57	1.63	5.83
GP2-6	10.85	E	18.6	7.5	88.0	72.1	23.9	0.79	1.31	4.74
GP2-7	11.25	F	24.1	12.6	77.5	62.7	17.9	0.96	1.36	3.79

* Calculated without particles larger than 37.5 mm

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。これらの研究では、粗粒分が少なく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、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(閾値)は、それぞれ異なる値が報告されており、閾値は個々の材料特性に依存する値であると理解される。

本研究で扱うサンゴ礫混じり土の場合、粗粒分が細粒分マトリックスの中に介在することだけでなく、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、力学挙動に現れる粒

子破碎の影響も明らかになってきている (Lobo-Guerrero and Vallejo 2006; Nakata and Watabe 2015)。

上述したように、これまで、サンゴ礫混じり土にはサンゴ礫が介在するために、乱れが少ない状態での試料採取ができず、力学挙動の評価が困難であった。しかしながら、近年になってサンプリング技術が向上し、乱れが少ない状態での試料採取が可能となってきた。実際、一部の大規模プロジェクトや重要構造物の地盤調査では、高度なサンプリング技術により乱れの少ない試料(以下では、高品質試料と称し、その採取方法を高品質サンプリングと呼ぶ)を採取し、力学試験を行う事例も出てきている。

本研究では、沖縄県沿岸の代表的な港湾域(沖縄本島:那覇空港と那覇港, 宮古島:平良港, 石垣島:石垣港)ならびに鹿児島県の島嶼部の港湾域(奄美大島:名瀬港)から採取した高品質試料に対して三軸試験を実施し、試験結果の比較・整理を通じて、サンゴ礫混じり土の力学特性の評価を試みた。その際、自然堆積状態にあるサン

表-1(c) 那覇港から採取した高品質試料の概要

Sample ID	Depth from G.L. (m)	Symbol	Volumetric percentage of gravels > 9.5 mm (%)	Volumetric percentage of coral gravels * > 9.5 mm and <37.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 9.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 2 mm (%)	Percentage finer by weight * <0.075 mm (%)	Void ratio * e_0	Intergranular void ratio *	
									$e_{g0.075}$	e_{g2}
1-3.80	3.80	A	23.0	19.7	67.7	34.8	9.6	0.72	0.89	1.51
1-5.77	5.77	B	24.2	21.3	63.4	54.7	11.4	0.86	1.09	2.80
1-12.0	12.0	C	2.0	2.0	96.4	85.0	20.0	0.98	1.46	10.79
3-11.3	11.3	D	17.8	13.6	74.1	62.0	17.3	1.08	1.50	4.01
3-13.8	13.8	E	0.9	0.9	98.4	83.9	6.7	1.01	1.15	9.99

* Calculated without particles larger than 37.5 mm

表-1(d) 平良港から採取した高品質試料の概要

Sample ID	Depth from G.L. (m)	Symbol	Volumetric percentage of coral gravels > 9.5 mm (%)	Volumetric percentage of coral gravels * > 9.5 mm and <37.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 9.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 2 mm (%)	Percentage finer by weight * <0.075 mm (%)	Void ratio * e_0	Intergranular void ratio *	
									$e_{g0.075}$	e_{g2}
G8-A	11.46	A	0.2	0.2	99.7	97.4	17.2	0.93	1.32	61.88
G8-C	14.86	B	0.1	0.1	99.9	97.9	14.1	1.00	1.32	78.15
G9-1	14.05	C	1.6	1.6	97.5	93.6	13.0	0.92	1.20	24.85
G11-1	13.50	D	13.4	12.0	81.9	70.6	19.8	0.70	1.09	4.15
G11-A	15.21	E	33.6	6.3	89.8	80.9	26.6	0.84	1.47	7.46
G11-C	15.61	F	22.5	12.0	80.2	72.1	25.3	0.86	1.45	4.93
G1-2-1-1	2.30	G	16.1	16.1	74.7	48.7	9.3	0.70	0.85	2.06
G1-2-1-2	2.30	H	8.8	8.8	85.4	57.6	9.5	0.82	0.99	2.90
G1-4-3-7	16.60	I	2.5	2.5	95.9	89.0	14.1	0.90	1.21	14.1
G2-1-2-8	16.60	J	0.0	0.0	100	98.7	13.2	0.96	1.25	123.24

* Calculated without particles larger than 37.5 mm

ゴ礫混じり土の不攪乱試料は不均質性が著しいため、力学特性を統一的に解釈することが難しいと予想された。そこで、パラメトリックな評価の一助となるように、サンゴ礫とシルトマトリックスの混合割合を調整した人工配合試料（以下では、再構成試料と呼ぶ）に対する一連の三軸試験の結果（渡部ら, 2016）についても合わせて比較・整理することにより、力学特性に表れるサンゴ礫の噛み合わせや破碎の影響、すなわち、サンゴ礫混じり土特有の力学特性を評価する上で重要となるパラメータについて検討する。

2. 試料と三軸試験方法

試験に用いた高品質試料は、図-1に示す沖縄県的那覇

空港、那覇港臨港道路、平良港（宮古島）、石垣港（石垣島）、鹿児島県の名瀬港（奄美大島）において高品質サンプリングにより採取したものである。ここで言う高品質サンプリングとは、砂礫や破碎帯のサンプリング用に開発されたサンプリング方法であり、ポリマーを使うGPサンプリング（酒井, 2014）、泥水の噴出方法を工夫したGSサンプリング（平井ら, 2015）、気泡泥水を用いるIFCSサンプリング（河合ら, 2015）の3つの方法である。いずれのサンプリング方法においても、サンゴ礫を動かすことなく切断し、細粒分を掘削泥水で洗い流してしまうことなく高品質な状態で試料採取できていることを、試料の外観だけでなく、X線写真やCT画像により確認した。

試験に用いた試料の概要を表-1にまとめた。原位置から採取したサンゴ礫混じり土は不均質であり、粒度のば

表-1(e) 石垣港から採取した高品質試料の概要

Sample ID	Depth from G.L. (m)	Symbol	Volumetric percentage of coral gravels > 9.5 mm (%)	Volumetric percentage of coral gravels * > 9.5 mm and < 37.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 9.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 2 mm (%)	Percentage finer by weight * < 0.075 mm (%)	Void ratio e_0^*	Intergranular void ratio *	
									$e_{g0.075}$	e_{g2}
GS-4	10.68	A	38.7	27.1	60.7	52.4	13.9	0.58	0.82	2.05
GS-5	11.86	B	10.5	10.5	84.6	69.7	25.9	0.64	1.17	3.82
GS-6	12.52	C	7.5	7.5	88.6	76.9	41.1	0.74	1.88	5.61
GS-8	14.50	D	8.5	8.5	87.0	76.2	45.9	0.73	2.10	5.44
GS-9	15.50	E	6.9	6.9	89.8	80.8	51.5	0.68	2.35	6.70
GS-10	16.51	F	9.5	9.5	85.8	76.2	44.7	0.69	1.95	5.26
GS-11	17.51	G	7.2	7.2	89.3	83.0	53.5	0.71	2.55	7.76
GS-12	18.84	H	8.7	8.7	86.8	82.3	56.9	0.73	2.86	7.56
GS-13	11.48	I	19.3	19.3	72.5	58.0	24.7	0.56	1.02	2.39
GS-14	12.50	J	12.6	12.6	81.6	67.4	39.9	0.63	1.62	3.48

* Calculated without particles larger than 37.5 mm

表-1(f) 名瀬港から採取した高品質試料の概要

Sample ID	Depth from G.L. (m)	Symbol	Volumetric percentage of coral gravels > 9.5 mm (%)	Volumetric percentage of coral gravels * > 9.5 mm and < 37.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 9.5 mm (%)	Percentage finer by weight * < 2 mm (%)	Percentage finer by weight * < 0.075 mm (%)	Void ratio e_0	Intergranular void ratio *	
									$e_{g0.075}$	e_{g2}
3-I-2	3.00	E1	0.2	0.2	99.7	97.6	11.9	1.00	1.28	37.35
3-I-3	4.50	E2	2.8	2.8	95.4	95.0	80.8	0.86	8.37	30.97
3-I-4	6.00	E3	5.3	5.3	89.8	87.7	68.8	1.24	5.85	14.67
3-S-5	7.50	E4	0.1	0.1	99.9	99.2	71.1	0.93	5.65	199.84
3-I-6-1	9.00	E5	0.4	0.4	99.4	98.3	73.0	0.88	5.92	91.41
3-I-7-1	10.50	E6	0.1	0.1	99.9	98.0	71.8	0.98	5.98	83.81
4-I-5	17.50	E7	13.4	13.4	80.2	70.6	48.1	0.65	2.05	4.03
5-I-8	12.00	E8	10.7	10.7	82.6	74.6	64.6	0.84	3.81	5.42

* Calculated without particles larger than 37.5 mm

らつきも著しいため、統一的な解釈に当たって参照するため、渡部ら(2016)において扱われた、サンゴ礫含有率をパラメータとした再構成試料も合わせて示してある。

比較対象とした再構成試料(表-1(a))は、浦添地区で採取したサンゴ礫とシルトを混合して作製したもので、シルトマトリックス(液性限界 $w_L=22.9\%$ 、塑性限界NP)に長さ9.5~37.5mmの枝サンゴ礫(直径10mm前後)を体積百分率0~44%の範囲で混合して準備した。

高品質試料の採取深度は海底面下5~15mのものが多

く、サンゴ礫混じり土の単位体積重量が 18kN/m^3 程度であることから、有効土被り圧 σ'_{v0} は $40\sim 120\text{kN/m}^2$ となるものが多い。三軸試験の圧密圧力はもっとも頻度が高い値で代表し、那覇空港、那覇港、平良港、名瀬港いずれの試料に対しても 50kN/m^2 に、また、比較的深いところから試料採取した石垣港の試料に対しては 100kN/m^2 に統一した。先行して実施した再構成試料にする試験結果(渡部ら, 2016)から、サンゴ礫が多く著しいダイレーションが生じる場合には、非排水条件での試験(CU試験)では、

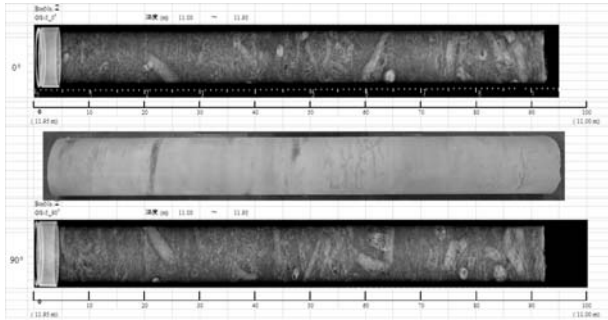


写真-2 高品質試料の X 線写真の例 (石垣港試料 B)

原位置ではあり得ない大きな負圧による有効応力により、設計に使うべきせん断強さとしては過大評価してしまうことがわかっているため、本研究では排水条件で試験 (CD試験) を実施することにした。いずれの試験でも軸ひずみ速度は0.1%/minとし、せん断中に過剰間隙水圧の発生は認められず、排水条件が満足されていた。

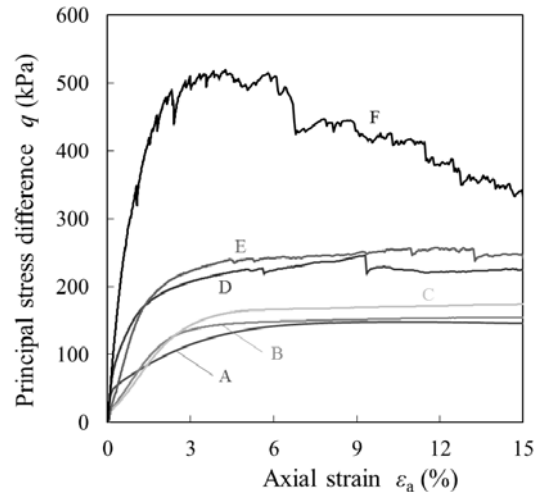
高品質試料の状態を確認した例として、石垣港において高品質サンプリング (GSサンプラーを使用) により採取した高品質試料の X 線写真を写真-2に示す。試料を2方向から撮影しており、上の画像は最初の撮影方向 (0°) のもの、下の画像はそれから90°回転した方向で撮影したものである。なお、中央の画像は、外観を一般のカメラで撮影した写真である。多くのフィンガーコーラルが入っており、その周囲に隙間が見られないことから、試料採取中にサンゴ礫が動くことなくダイヤモンドビットで切断されていることがわかる。また、石垣港の試料は泥水の噴出方法を工夫したGSサンプラーによる採取であるが、マトリックスの部分が洗い流されることなくコアリングされたことが読み取れる。

3. 試験結果

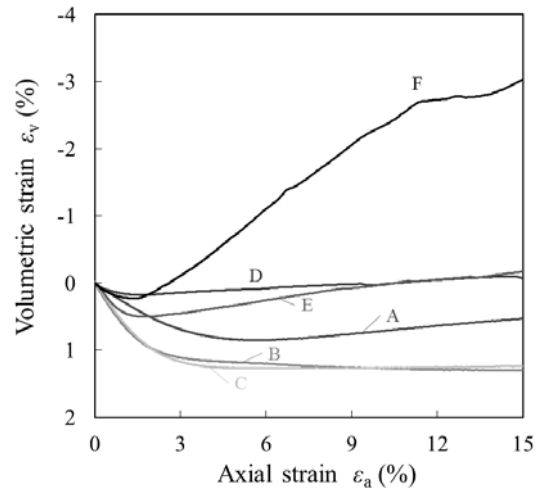
再構成試料と高品質試料に対して、三軸圧密排水圧縮せん断試験 (CD試験) で得られた(a)主応力差 $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$ と軸ひずみ ϵ_a の関係、ならびに(b)過剰間隙水圧 Δu と軸ひずみ ϵ_a の関係を図-2～図-7に示す。

再構成試料 (図-2) では、多少順番が前後するものもあるが、基本的には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試料Fの増加が著しい。

サンゴ礫が10%以下の試料 (試料A～C) 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 (試料D, E) 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。サンゴ礫が44%の試料 (試料F) では、き



(a) 主応力差と軸ひずみの関係



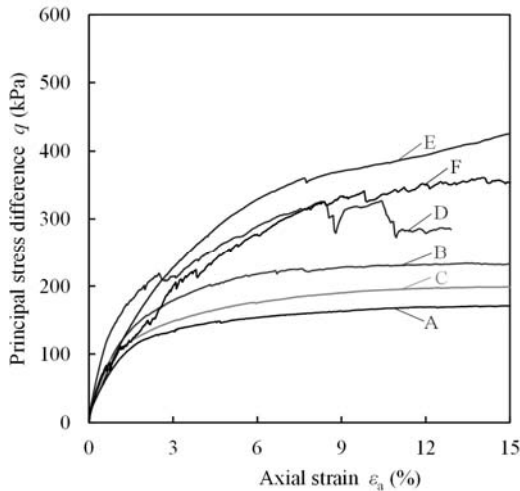
(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-2 再構成試料の三軸CD試験結果

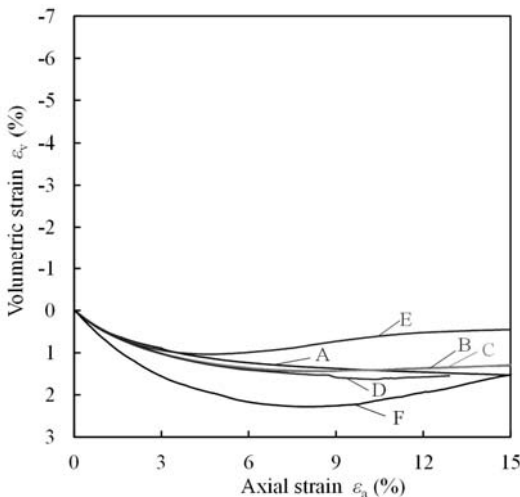
わめて初期に僅かに圧縮が見られた後、著しい膨張が生じている。この著しい膨張のために、ひずみの増大に伴う主応力差の減少、すなわち、ひずみ軟化の傾向が強く現れる結果が得られた。

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 (試料A～C) 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 (試料D～F) になると、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、サンゴ礫の体積百分率44%の試料 (試料F) において顕著である。ちなみに、サンゴ礫の体積百分率44%は、再構成試料作製に用いたサンゴ礫を最も密に詰めた状態である。

那覇空港の試料 (図-3)、那覇港の試料 (図-4) の一部や名瀬港の試料 (図-7) の一部では、わずかに圧縮が卓越する傾向が見られた。圧縮が卓越する試料の多くでは、

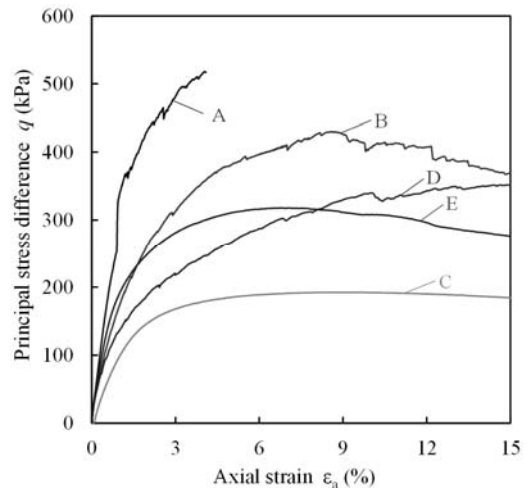


(a) 主応力差と軸ひずみの関係

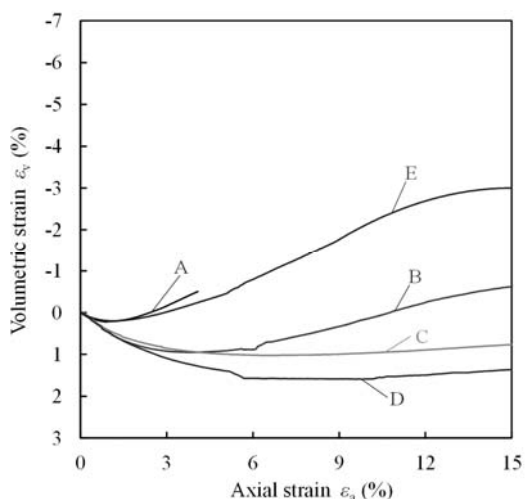


(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-3 那覇空港試料の三軸CD試験結果



(a) 主応力差と軸ひずみの関係



(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-4 那覇港試料の三軸CD試験結果

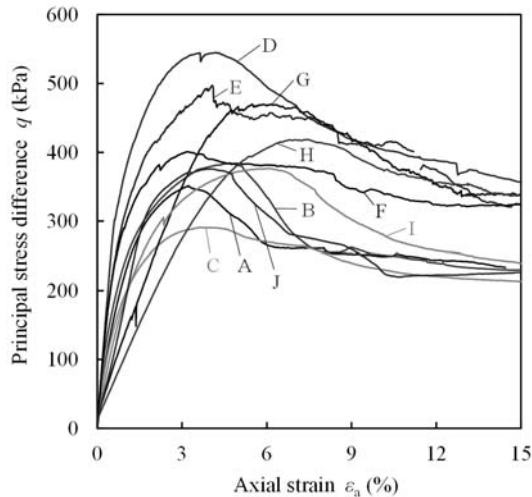
せん断に伴う密度増加とともに強度増加する傾向、すなわち、ひずみ硬化の傾向が現れた。一方、那覇港や名瀬港のその他の試料や平良港の試料(図-5)ならびに石垣港の試料(図-6)では、せん断にともなって体積膨張する傾向が強く現れた。これらの試料の多くでは、せん断に伴って密度が減少して強度が低下する傾向、すなわち、ひずみ軟化の傾向が現れた。

高品質試料の地域ごとの特徴は以下の通りである。

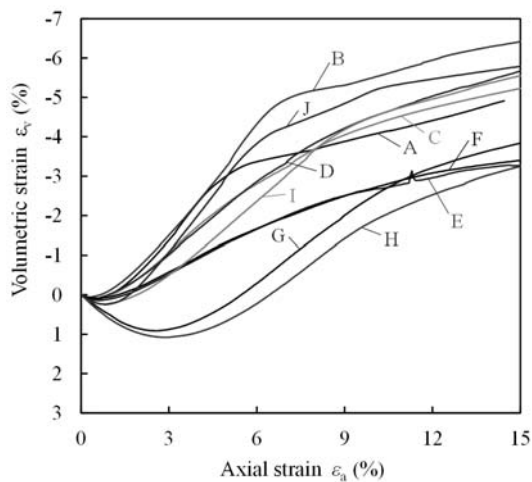
- (a) 那覇空港の試料では、全体的に緩やかにひずみ硬化する傾向が見られる。大きなせん断強さを発現したものは粒子破碎の影響あるいはサンゴ礫同士のすべりなどにより、曲線にギザギザの変化が現れている。せん断に伴う体積圧縮傾向が見られ、密になることにより強度が増加することから、ひずみ硬化型の挙動となっている。
- (b) 那覇港の試料でも、試料Dなどはひずみ硬化型の挙動

が見られるが、体積ひずみが圧縮から膨張に転じる試料EやBでは、ひずみ軟化型の挙動が見られ、ピーク強度を読み取ることができる。なお、試料Aは強度が大きく、ロードセルの容量オーバーによりピーク強度が確認される前に試験を終了した。

- (c) 平良港の試料では、全ての試料でピーク強度が明瞭の現れており、その後ひずみ軟化する傾向が現れている。せん断開始時に若干の体積圧縮が見られるが、いずれも体積膨張に転じ、軸ひずみ15%時の体積ひずみは-3%~ -6%に達していた。ひずみ軟化は、体積膨張による密度低下に対応した強度低下として説明できる。
- (d) 石垣港の試料でも、ほぼ全ての試料でピーク強度が現れ、その後ひずみ軟化する傾向が現れている。ひずみ軟化が著しい試料では体積膨張が著しく、軸ひずみ15%時の体積ひずみは-3%~ -6%に達していた。試料DやHなど、一部の試料ではピーク強度が不明瞭である

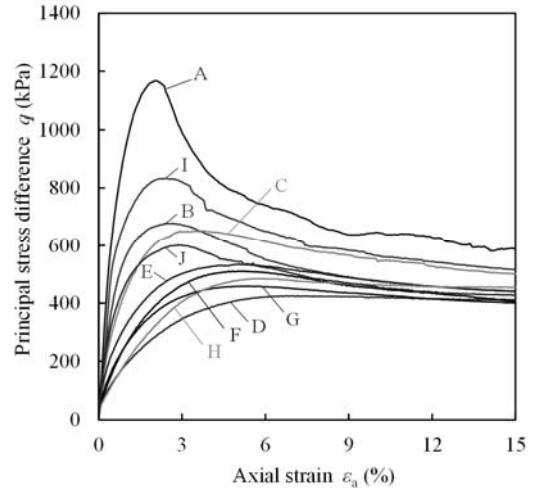


(a) 主応力差と軸ひずみの関係

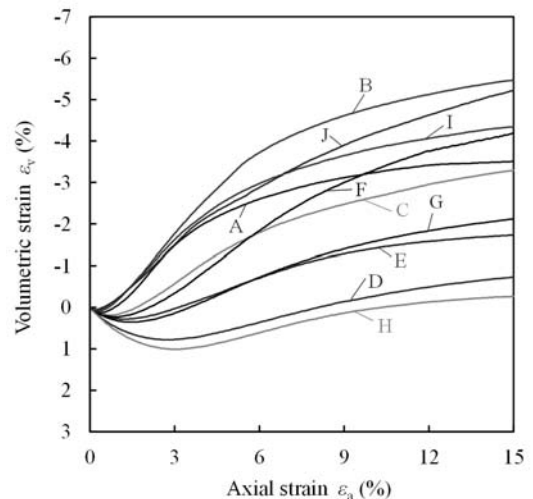


(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-5 平良港試料の三軸CD試験結果



(a) 主応力差と軸ひずみの関係



(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

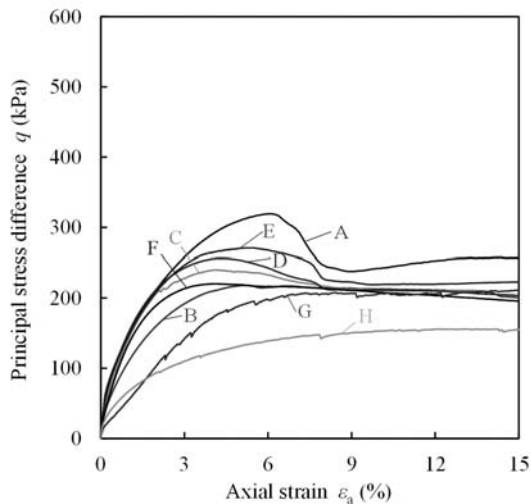
図-6 石垣港試料の三軸CD試験結果

が,そのような試料では,そもそも強度が小さいこと,体積膨張がわずかであることから,低密度であると推定される. 実際,表-1(e)からも,間隙比が比較的大きな試料であることがわかる.

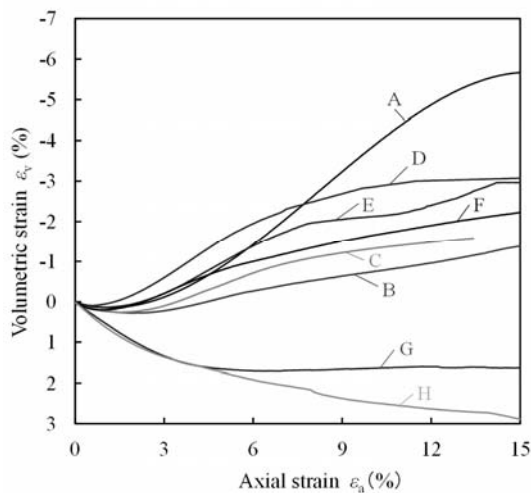
(e) 名瀬港の試料では,平良港や石垣港の試料ほど明瞭ではないもののピーク強度が現れたものが多く,これらは,体積膨張によりひずみ軟化の傾向が見られたものと一致している. 一方で,一部試料(試料B, G, H)ではピーク強度が現れずにひずみ硬化する傾向が見られたが,これらの試料では体積圧縮の傾向にあった. せん断中に体積圧縮が見られる試料は緩詰め状態にあると考えられるが,表-1(f)の間隙比からは,これらの試料が他の試料と比べて間隙比が大きいとは言えず,むしろ,小さい方である. せん断時のダイレーション特性は絶対値としての間隙比や密度ではなく,相対密度によって支配されていることから,間隙比などの一

般的な物理特性だけでは評価が難しいことがわかる.

せん断試験終了後,試料の中に含まれていた9.5mm以上の礫分をふるい分けし,介在していたサンゴ礫を確認した. 代表的な例として,那覇空港の(a)試料Bと(b)試料Eの試料に含まれていたサンゴ礫を写真-3に示す. 試料Bでは全てのサンゴ礫の最大寸法が37.5mm以下であった一方で,試料Eでは37.5mm以上の巨大なサンゴ礫が含まれていたことがわかる. 表-1では,サンゴ礫の体積百分率について,9.5mm以上のサンゴ礫全てを含むものとして算出した値に加えて,9.5~37.5mmのサンゴ礫だけを抽出して算出した値も表示している. 三軸せん断挙動を評価するに当たって,供試体のある部分が剛性の高い塊(かたまり)となっている場合,せん断は主に他の部分で生じることから,以降の考察では,37.5mmよりも大きなサンゴ礫を除外した部分の体積に占める9.5~37.5mmのサンゴ礫の体積百分率の方を使用することにする. 37.5mm



(a) 主応力差と軸ひずみの関係



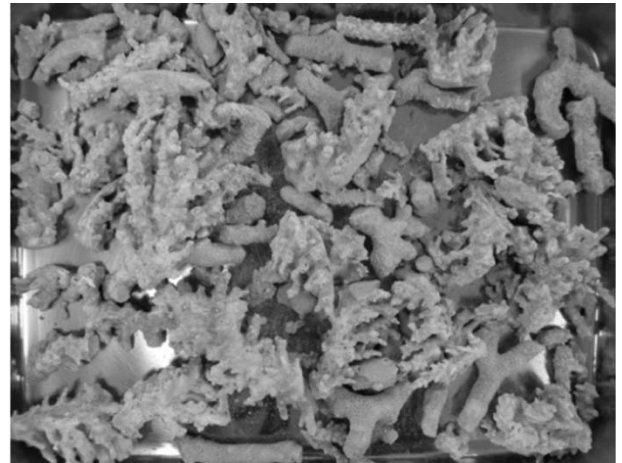
(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-7 名瀬港試料の三軸CD試験結果

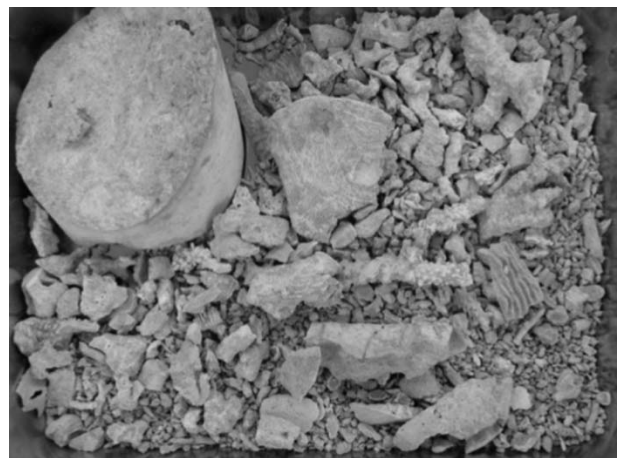
よりも大きなサンゴ礫については、三軸試験機のキャップやペダスタルと同様に、剛性が高く変形には寄与しないものとして整理することにした。

4. 試験結果の統合的整理

せん断試験から得られた(a)主応力差の最大値 q_{max} とサンゴ礫の体積百分率の関係、ならびにせん断抵抗角の(b)最大値 ϕ_{max} および(c)残留値（ピークが現れないものは軸ひずみ15%時） ϕ_{res} とサンゴ礫の体積百分率の関係を図-8に示す。再構成試料については渡部ら(2016)に示したデータのうち、CD試験の結果のみを示している。再構成試料では、サンゴ礫の体積百分率が20%よりも大きくなると、サンゴ礫が噛み合うようになり、せん断強さが増大すると評価された。これは、シルトマトリックスに長さ9.5mm~37.5mmの枝サンゴ片が混合している場合であ



(a) 那覇空港試料B

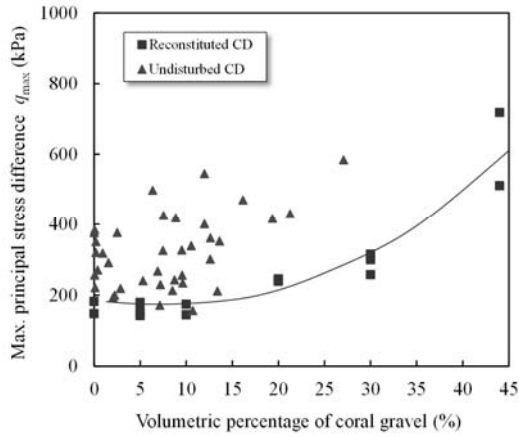


(b) 那覇空港試料E

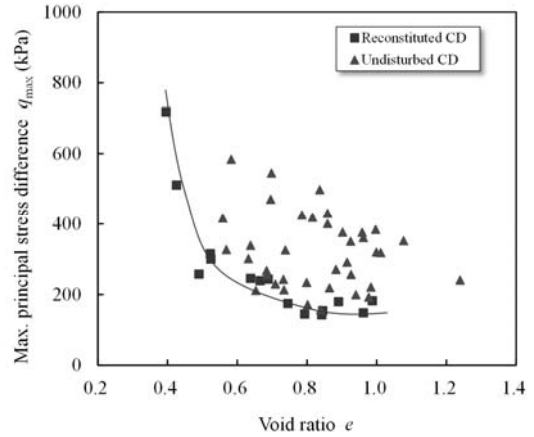
写真-3 試料の中に含まれていた9.5mm以上の礫分の例

り、実際のサンゴ礫混じり土の高品質試料では、介在するサンゴ片が多様な寸法であること、そもそもシルトマトリックスの部分についても鉱物や粒度が異なることからサンゴ礫の体積百分率との関係はきわめて不明瞭になる。サンゴ礫が多いほど強度が大きくなるのは当然のことなので右上がりの傾向が見えなくもないが、これらの図では、高品質試料についてはばらつきが大きすぎて傾向を評価できないことがわかる。また、再構成試料と高品質試料とはプロットされる領域に著しい乖離も見られ、高品質試料は粒子形状が複雑であること等に起因して、再構成試料よりも大きな値が得られている。

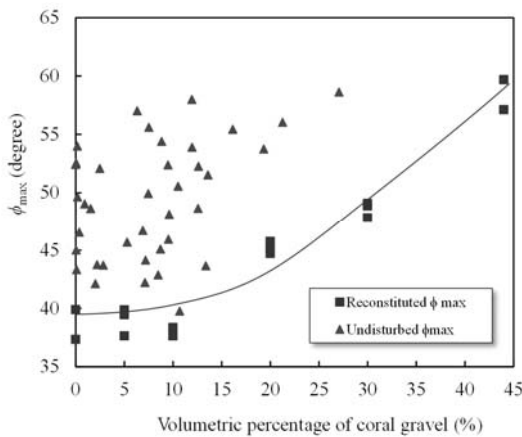
密に締め固められた土試料は大きなせん断強さを有することから容易に想像できるように、せん断強さは、土の密度と強い相関があることが知られている。土の密度は間隙比と対応するので、図-8の横軸を間隙比に変換してプロットした関係を図-9に示す。間隙比が高くなると土は緩詰めとなり、強度が低下する傾向が現れるものと予想されるとおり、再構成試料では、右下がりな下に凸



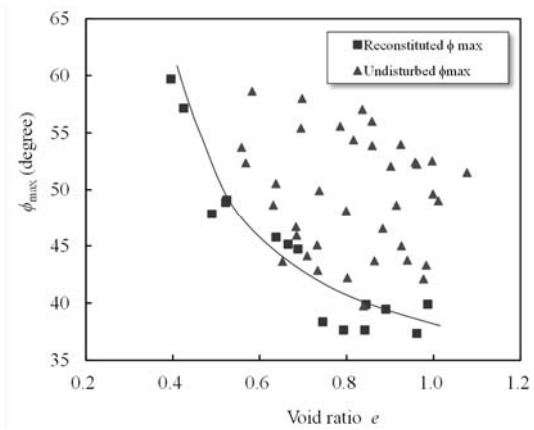
(a) 主応力差の最大値 q_{max}



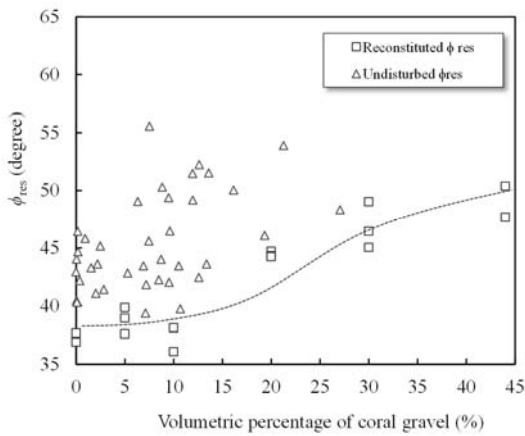
(a) 主応力差の最大値 q_{max}



(b) せん断抵抗角の最大値 ϕ_{max}

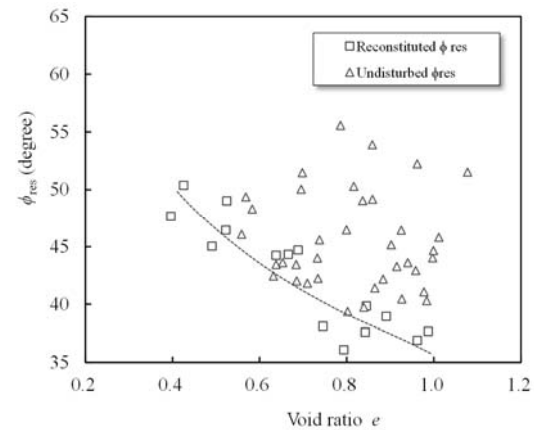


(b) せん断抵抗角の最大値 ϕ_{max}



(c) せん断抵抗角の残留値 ϕ_{res}

図-8 強度定数とサンゴ礫の体積百分率の関係



(c) せん断抵抗角の残留値 ϕ_{res}

図-9 強度定数と間隙比eの関係

な傾向が明瞭に読み取れる。しかしながら、不攪乱試料ではばらつきが大きすぎて、強度やせん断抵抗角といった力学特性について、間隙比をパラメータとしても傾向を読み取ることはできなかった。

サンゴ礫混じり土では、大きな粒子が形成する土骨格の隙間を小さな粒子が形成するマトリックスが埋め尽く

していると考えられる。この骨格構造は、一般に用いている間隙比 e そのものでは表現することができない。ここでは、ある粒径を設定し、それ以下の小さな粒子が占める部分は間隙であるとみなして算出する骨格間隙比 e_g (Kurbis et al., 1988; Georgiannou et al. 1990; 大嶺・落合 1992; Thevanayagam, 1998) を利用して骨格の状態を評価することを試みた。通常行われている土質試験結果と関

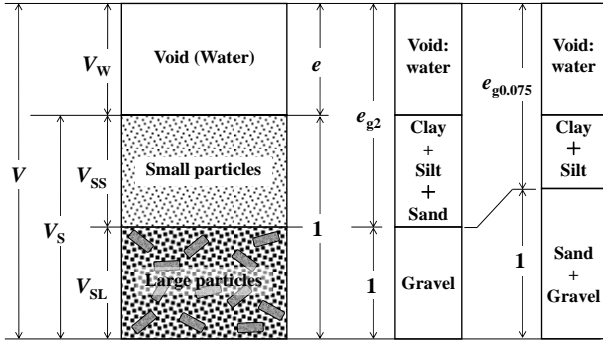


図-10 骨格間隙比の概念図

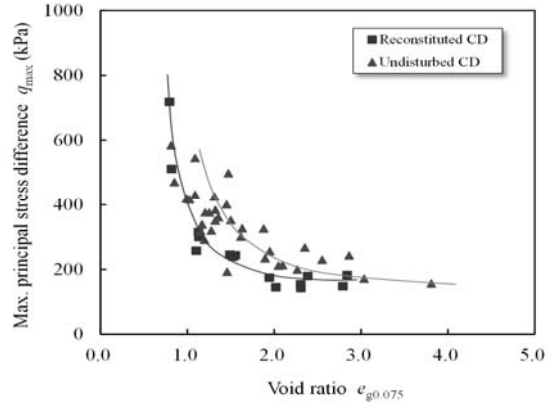
連づけるため、砂とシルトの境界となる粒径0.075mmおよび砂と礫の境界となる粒径2mmで骨格間隙比 e_g を定義し（それぞれ $e_{g0.075}$ および e_{g2} と表すことにする。図-10を参照）、力学挙動を表現する評価指標になるかどうかを検討した。

骨格間隙比 $e_{g0.075}$ ならびに e_{g2} を用いてプロットした関係を図-11、図-12にそれぞれ示す。図-11は骨格間隙比 $e_{g0.075}$ が5以下のもののみ、図-12は骨格間隙比 e_{g2} が25以下のもののみをプロットした。大きな粒径の粒子をあまり含まない試料では、これらの値が非常に大きくなってしまふことからここではプロット範囲外になるとして除外することにした。

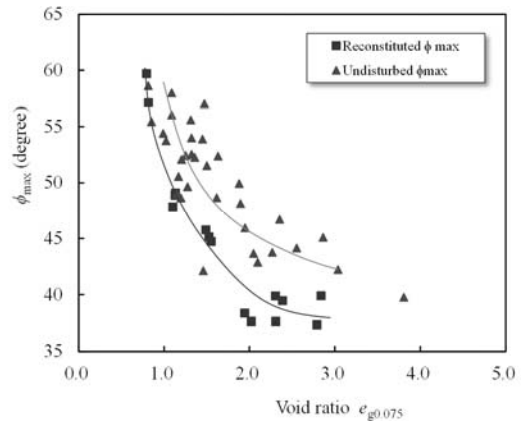
図-11の骨格間隙比 $e_{g0.075}$ では、再構成試料のみならず、高品質試料についても、(a)最大強度とせん断抵抗角の(b)最大値や(c)残留値に右下がりや下に凸な関係を明瞭に確認できる。さらに、再構成試料と高品質試料の両者の傾向がきわめて近接しており、骨格間隙比 $e_{g0.075}$ が多様なサンゴ礫混じり土のせん断特性を統一的に解釈できる支配パラメータになっていることがわかる。ただし、再構成試料に比べて、サンゴ礫が複雑な形状をしている（アンギュラリティが高い）高品質試料の方が、強度定数は大きくなっている。

図-12の骨格間隙比 e_{g2} では、再構成試料については右下がりや下に凸な傾向を読み取ることができるものの、高品質試料についてはばらつきが大きく、傾向を読み取れなくなってしまう。

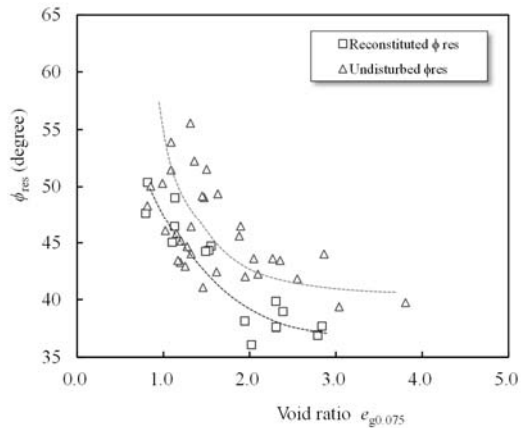
このように、粒径分布が決まっているシルトマトリックスとサンゴ礫が混合している再構成試料では、サンゴ礫の体積百分率、 e 、 $e_{g0.075}$ 、 e_{g2} いずれのパラメータに対しても強度定数との相関を読み取ることができるが、現地から採取した高品質試料では、 $e_{g0.075}$ をパラメータとしたときのみ、せん断強さ、せん断抵抗角（最大値や残留値）といった強度定数との相関を見いだすことができた。このことは、サンゴ礫混じり土の力学特性を評価す



(a) 主応力差の最大値 q_{max}



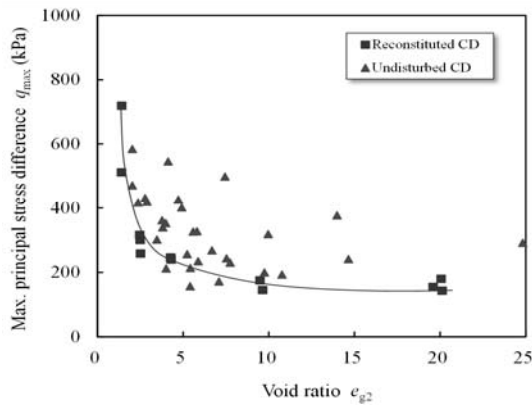
(b) せん断抵抗角の最大値 ϕ_{max}



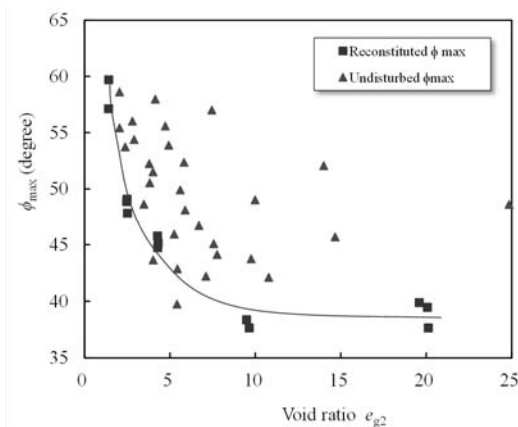
(c) せん断抵抗角の残留値 ϕ_{res}

図-11 強度定数と骨格間隙比 $e_{g0.075}$ の関係

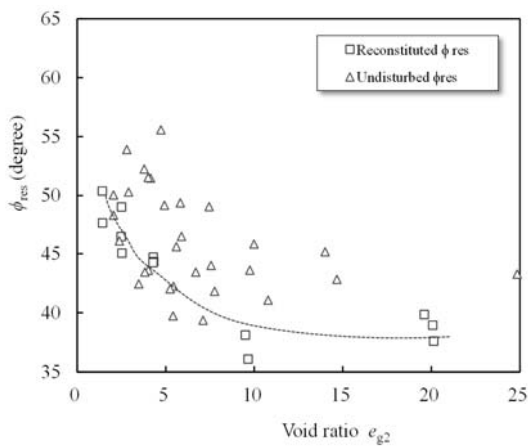
るに当たって、大きなサンゴ片のみならず、粒径が0.075mmより大きな砂と礫（サンゴ片を含む）の粒子が総合して骨格を形成しており、骨格の間隙を埋めるマトリックスは粒径が0.075mmより小さなシルトと粘土の粒子によって構成されていることを意味している。このように、粒径範囲ごとの役割を考えることは、土質力学において、粗粒分と細粒分との境界を0.075mmとしていることとも整合するものである。



(a) 主応力差の最大値 q_{max}



(b) せん断抵抗角の最大値 ϕ_{max}



(c) せん断抵抗角の残留値 ϕ_{res}

図-12 強度定数と骨格間隙比 e_{g2} の関係

ある粒径以上の粒子のみが骨格を形成し、それよりも小さな粒子は間隙であると見なす骨格間隙比を導入する場合、骨格と間隙の境界となる粒径を大きく設定すると、細粒分が多い試料では、骨格とみなす粒子が少なくなり、骨格間隙比の値が非常に大きなものになってしまう可能性がある。極端な例として、境界とする粒径以下の粒子しか含まれていない場合には、骨格間隙比は無限大となってしまう。このように非常に大きな骨格間隙比となる

ケースでは、境界として設定する粒径が対象としている土に合っておらず、実際にはもっと小さな粒子が骨格を形成している。一般に土質力学で用いられている間隙比は、境界とする粒径を無限小とした場合であり、必ず定義できる物性値である。一方、骨格間隙比を定義する場合、骨格を形成する大きな粒子と、間隙を埋めているだけの小さな粒子とを適切に区分する粒径を境界の値として設定しなければ、不自然な骨格間隙比の値が計算されてしまうことになる。本研究においても、粒径2mm以下の粒子を間隙と見なす骨格間隙比 e_{g2} の場合には、そもそも図-12の横軸のように大きな値が計算され、さらに極端に大きな値が計算されて図の表示範囲外に位置するものもあった。一般的なサンゴ礫混じり土では、0.075mmよりも小さな粒子(シルトと粘土からなるいわゆる細粒分)と大きな粒子(砂と礫からなるいわゆる粗粒分)がともに含まれるため、粒径0.075mmを境界として設定することは、上述したような適用範囲外のものが生じにくいいため、使いやすいパラメータになると考えられる。

5. 実務への適用

本研究では、サンゴ礫混じり土の力学特性として、最大主応力差 q_{max} やせん断抵抗角の最大値 ϕ_{max} と残留値 ϕ_{res} に対する統一的な支配パラメータとして、粒径0.075mmを境界として、それよりも大きな粒子が骨格を形成し、それよりも小さな粒子は間隙である(応力を伝える骨格ではない)として定義される骨格間隙比 $e_{g0.075}$ が有効であることを示した。本章では、実務においてどのように骨格間隙比 $e_{g0.075}$ を使うかについて、以下に提案する。

力学特性を表す q_{max} 、 ϕ_{max} 、 ϕ_{res} が $e_{g0.075}$ を支配パラメータとした関係として、ある程度統一的に表現できるとしても、その相関関係にはばらつきもあり、万能な関係式や関係図が得られているわけでもない。従って、一般の地盤調査と同様に、本稿では高品質試料と称している乱れの少ない試料を原位置から採取し、ある程度の排水性を期待できるサンゴ礫混じり土の場合には、原位置応力相当の圧密圧力の下で三軸CD試験を実施して力学特性を評価することが地盤調査の基本として位置づけられる。その上で、物理試験結果として得られる粒度から算出できる $e_{g0.075}$ をパラメータとして図-11と照らし合わせ、得られた力学特性の評価が、既存の調査結果として得られているサンゴ礫混じり土の力学特性と比べて乖離がないかどうか評価することにより、試験結果の信頼性を増すことができる。

しかしながら、高品質試料を採取するために実施する

高品質サンプリングは、一般的な地盤調査でのサンプリング方法に比べて費用が高い。このため、地盤調査に十分な費用をかけられる大規模プロジェクトなどを除いては、高品質試料を用いた力学試験を実施することは困難であると考えられる。そこで、一般的なサンプリング方法で採取した試料が乱れてしまっていると判断される場合には、物理試験結果として得られる粒度から算出できる $e_{g0.075}$ を用いて、図-11から力学特性を表す q_{max} 、 ϕ_{max} 、 ϕ_{res} を推定する方法も活用できると考えられる。しかしながら、図のトレンドとなる値をそのまま使うのではなく、ばらつきを考慮して、予測幅を考えた上での安全側の値（強度定数であれば小さめの値）を設定すべきであると言える。

5. 結論

- 1) 三軸CD試験で得られる主応力差～軸ひずみ関係は、せん断中に体積圧縮を生じる試料では、せん断中に試料が密になって強度が増加することによりひずみ硬化型の挙動となる。一方、せん断中に体積膨張（ダイレーション）を生じる試料では、せん断中に密度が低下して強度が減少することにより、主応力差最大となるピーク強度が現れた後、ひずみ軟化型の挙動となる。
- 2) 再構成試料では、サンゴ礫の体積百分率が20%以上になると、力学挙動にサンゴ礫が噛み合う影響が現れるが、実際のサイトから採取した高品質試料では、サンゴ礫の体積百分率（ただし、特定の粒径幅9.5mm～37.5mmのサンゴ礫で算出）は、強度定数と関連のあるパラメータにはならない。
- 3) せん断強さは土の密度を反映する間隙比と関連があるとして、強度定数と間隙比の関係を整理した場合、再構成試料では両者の関係に高い相関が見られるが、高品質試料では、間隙比は強度定数と関連のあるパラメータにはならない。
- 4) 粒径0.075mmよりも大きな砂や礫（サンゴ礫を含む）が骨格を形成する粗粒分として、それ以下の粒子（シルトや粘土）を間隙と見なした骨格間隙比 $e_{g0.075}$ を定義し、強度定数と骨格間隙比 $e_{g0.075}$ の関係を整理すると、再構成試料でも高品質試料でも、ともに骨格間隙比 $e_{g0.075}$ は、強度定数と関連のあるパラメータになる。このことは、土質力学において、粒径0.075mmが粗粒分と細粒分の区分となっていることとも整合する。
- 5) 粒径2mmよりも大きな礫（サンゴ礫を含む）が骨格を形成する粗粒分として、それ以下の粒子を間隙と見なした骨格間隙比 e_{g2} を定義し、強度定数と骨格間隙比 e_{g2}

の関係を整理すると、骨格間隙比 e_{g2} は、強度定数と関連のあるパラメータにはならない。

- 6) 間隙比 e や骨格間隙比 e_{g2} は強度定数と関連のあるパラメータにならず、 $e_{g0.075}$ は関連のあるパラメータになることから、力学定数の支配パラメータとなる適切な骨格間隙比の定義が存在する。粒径0.075mmあたりを境界に骨格を形成する粒子と間隙と見なせる粒子とに区分することが有効である。
- 7) 形状が整ったサンゴ礫が多く含まれる再構成試料に比べ、形状が複雑なサンゴ礫が多く含まれる高品質試料の方が、強度定数は大きな値が得られる傾向にある。
- 8) 骨格間隙比は、粗粒分が少ないために細粒分も骨格を形成するような粒度の試料では、極端に大きな値として算出され、有効な指標とはならない可能性がある。骨格間隙比 $e_{g0.075}$ を用いる場合、サンゴ礫混じり土には粒径0.075mmより大きな粒子（砂や礫）も、それより小さな粒子（シルトや粘土）も共に含まれていることから、物性値として使いやすい値のパラメータとして算出される。
- 9) 実務において、高品質試料に対する力学試験を行う場合には、強度定数を評価するに当たって骨格間隙比 $e_{g0.075}$ を用いて整理し、既存のデータと比較し、試験結果の信頼性を高めることが有効であると考えられる。
- 10) 実務において、高品質試料の採取が困難な場合、一般的なサンプリング方法で採取された乱れた試料を用いて粒度を評価し、当該試料の骨格間隙比 $e_{g0.075}$ が算出できれば、既存データとして得られている強度定数と骨格間隙比の関係に基づいて、強度定数を推定することが可能である。ただし、データのばらつきを考慮し、強度定数を安全側に設定する必要がある。

(2016年4月28日受付)

謝辞

サンゴ礫混じり土の試料入手に当たっては、内閣府沖縄総合事務局ならびに国土交通省九州地方整備局にご協力いただきました。ここに記し、感謝の意を表す。本研究の一部は、科研費（課題番号23360208）を受けて実施しました。

参考文献

- 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.
- Georgiannou, V.N., Burland, J.B., Hight, D.W. (1990): The

- undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension. *Géotechnique* 40(3), 431-449.
- Kumar, G.V., and Muir Wood, D. (1999): Fall cone and compression tests on clay±gravel mixtures. *Géotechnique* 49(6), 727-739.
- Kuerbis, R., Negusse, D., Vaid, Y.P. (1988): Effect of gradation and fine content on the undrained response of sand. *Hydraulic fill structure, Geotechnical Special Publication* 21, ASCE, New York, 330-345.
- 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. (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.
- Thevanayagam, S. (1998): Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124(6), 479-491.
- Vallejo, L.E., Mawby, R. (2000): Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures. *Engineering Geology* 58(2), 125-136.
- 大嶺 聖, 落合英俊 (1992): 二種混合体の応力-ひずみ関係と混合土の一次元圧縮特性への適用, 土木学会論文集, No.448/III-19, 121-130.
- 河合弘泰, 園田慎一, 渡部要一, 松本昭二郎, 池田政人, 高田 誠, 北村良介 (2015): サンゴ礫混じり土の新サンプリング手法と力学特性について, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.3, pp.415-424.
- 酒井運雄 (2014): GPサンプリング, 地盤工学会誌, Vol.62, No.10, pp.37-38
- 平井孝治, 規矩大義, 大島昭彦, 利藤房男 (2015): サンプリングの泣き所も乱れの少ない方法で採取 (GSサンプリング), 地盤工学会誌, Vol.63, No.4, pp.10-13.
- 渡部要一, 金子 崇, 佐々真志 (2016): 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, 港湾空港技術研究所報告, Vol.55, No.2, pp.61-74.

港湾空港技術研究所報告 第55巻第3号

2016.9

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. Mechanical properties of coral-gravel soil - an integrated governing parameter for undisturbed samples –	Yoichi WATABE, Takashi KANEKO, Shinji SASSA	3
--	---	---