

サンゴ礁周辺海底堆積土の工学的特性

ENGINEERING PROPERTIES OF SEABED SEDIMENTARY SOIL AROUND CORAL REEFS

親泊 正孝

Masataka OYADOMARI

正会員 内閣府沖縄総合事務局 平良港湾工事事務所(〒906-0012 平良市字西里 7-21)

To obtain a more accurate evaluation of strength of coral gravel soil, engineering properties of that material were compared to soils of another group. Samples taken near coral reefs contain more gravel than those soils, and N values for coral gravel soil are lower due to less sand content. Results of triaxial UU-tests show some larger angles of internal friction in the samples of another group compared to zero degrees of angle in common clay soils using the same test. Results of triaxial CD-tests seem more credible than those of UU-tests in evaluating shear strength of coral gravel soil since this material is considered adequate as an intermediate soil. Triaxial CD-tests further demonstrate that coral gravel soil could be affected by the cementation effect.

Key Words : Sedimentary soil, coral reef, coral gravelly soil, intermediate soil, cementation effect

1. はじめに

沖縄県は我が国で唯一の亜熱帯気候下にあり、40 有余の有人島からなる島嶼県である。島々は、南北約 400km、東西約 1,000kmの広大な海域に散在し、殆どの島はその周囲をサンゴ礁により囲まれている。サンゴ礁は台風に対しては自然の防波堤としての機能を有しているが、その際の強烈な波浪によりサンゴが破碎されて周辺へ堆積してきた。その結果、サンゴ礫混じり地盤と呼ばれる特殊な層が沖積層として形成されてきた。

サンゴ礫混じり地盤は地盤工学的には相当に複雑な特性を有し、また、各島々で特性が異なり、多様性に富んでいる。そのため、当該地盤の工学的分類及び強度評価は困難なものがあり、沖縄での長年の解決すべき課題であった。これらの課題に対し、透水性、塑性指数に着目して分類法の提案を行い、それに基づき一部ではあるが強度評価も行った。塑性指数に関しては、液性限界、塑性限界が得られないサンプルが数多く見られるため、20%以上の土を粘性土とみなすことなどとし、強度については、平良港の上層部の土にセメンテーション効果が見られるなど、一定の知見が得られてきている¹⁾²⁾。

従来の設計実務において、細粒分が40%を超えると塑性指数が得られない土であっても粘性土としてみなし、粘着力をせん断強さとして用いるなど³⁾、不適切と言える取り扱いがあった。実際、土質柱状図ではサンゴ礫を含む土層

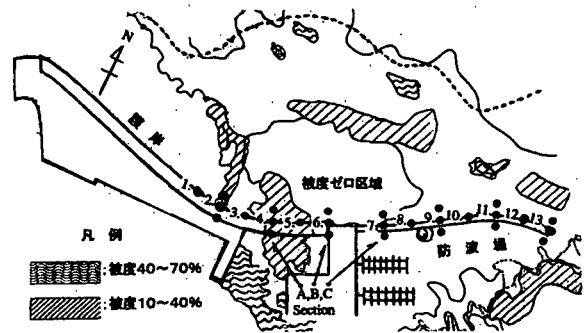


図-1 土質調査位置とサンゴ礁の分布

の標準貫入試験値(N 値)がかなり低い⁴⁾ため、細粒分と合わせると見かけ上、粘性土と判断されやすい。このような問題を解決する方法としてサンゴ礁の分布状況に着目して N 値や内部摩擦角を観察することは有効である。

本研究は、平良港内の堆積土に関して、サンゴ礁周辺とサンゴ被度のゼロ周辺とで平面的に区分着目し、サンゴ礫混じり地盤の工学的特性がどのように異なるかを明らかにし、それによって、より一層の強度評価の精度向上を図ることを目的として行った。

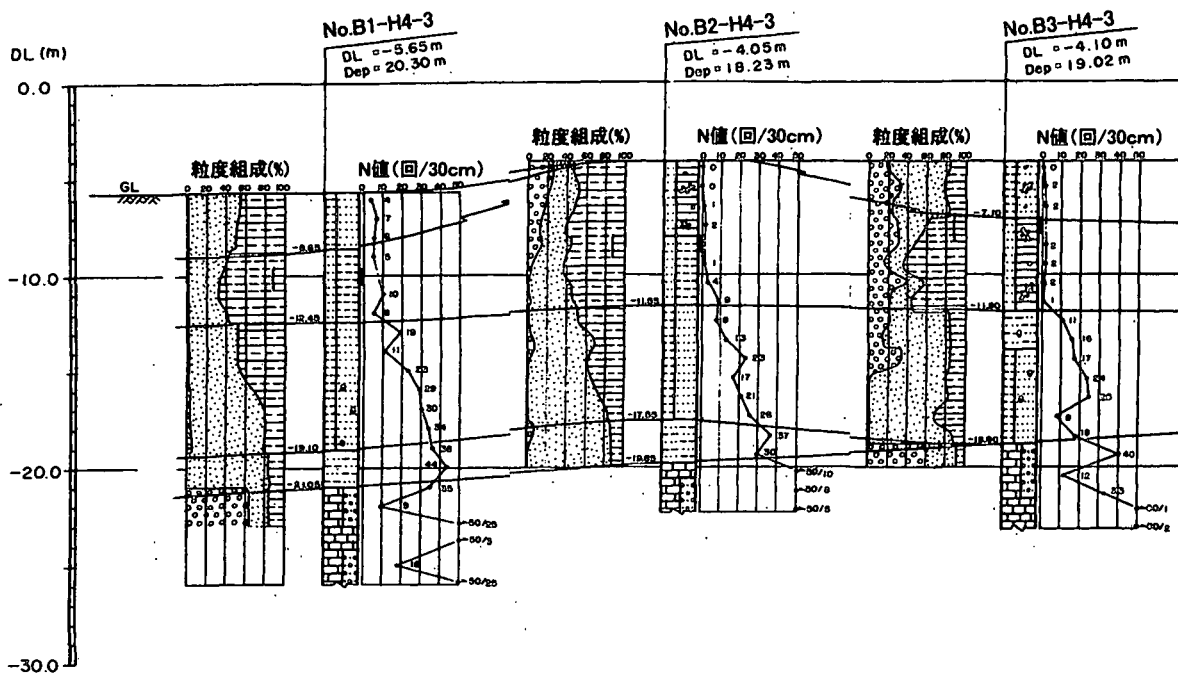


図-2 代表的な土質柱状図

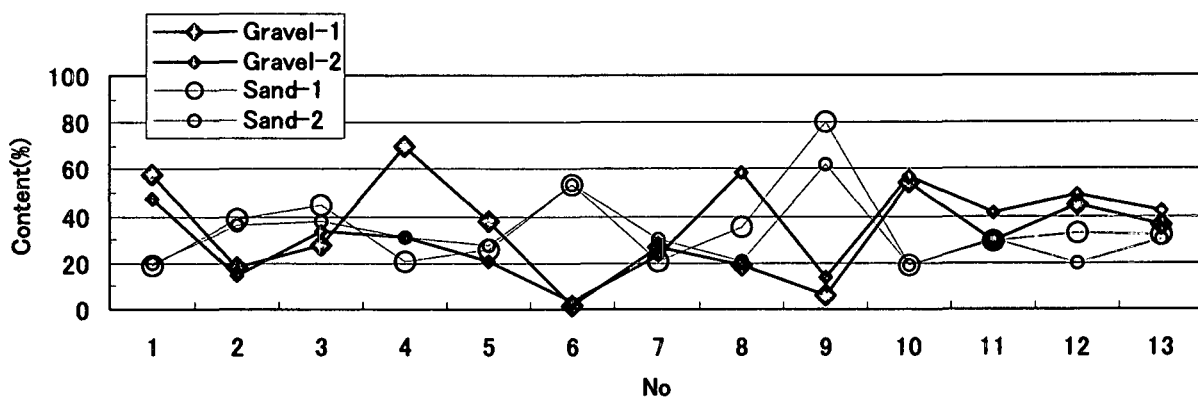


図-3 各調査孔の地表面付近の礫分, 砂分含有量

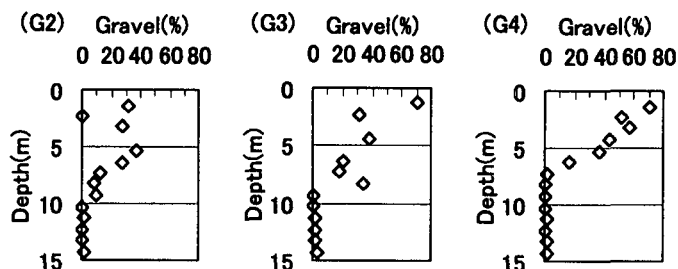
2. 土質調査とサンゴ礁

平良港内の T 地区において、護岸、防波堤の建設が行われて来た。当該地域にはサンゴ礁が広く分布しており、建設地点付近のサンゴの一部は別の地域へ移植された。当該地域で工事前にサンゴの被度調査が実施されており、その結果、殆どの場所で後述のように被度が10%未満から70%程度までの区域と被度がゼロである区域がほぼ明確になっている。また、護岸、防波堤の建設に際し、多数の土質調査が行われており、その結果をいくつかの観点で分析を行った。

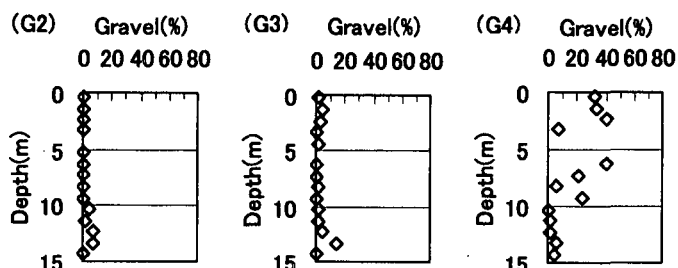
本論文で取り扱う土質調査の調査孔位置とサンゴ礁の分布を併せて図-1に示した。構造物の護岸と防波堤の法線

上に図の左手から番号を付してある。サンゴ礁の被度を凡例で図示してあるが、図中の海域の白地部分は被度が10%未満であり、特に注目する区域として被度がゼロの区域をその旨明示してある。即ち、当該被度ゼロ区域以外は少なくともサンゴ礁が分布していることを意味している。ここで言うサンゴの被度とは、縦、横1mの方形枠を海底に適宜当ててその枠内でのサンゴ分布の面積比をパーセントで示した数値である。

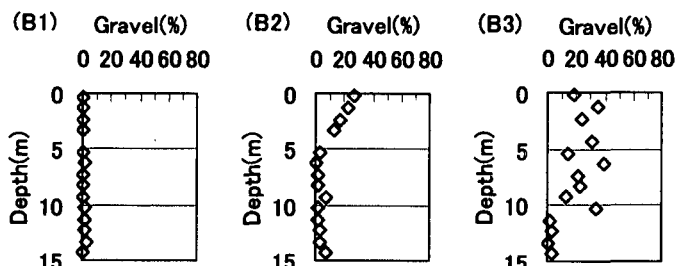
当該地区のサンゴ礫は枝サンゴの破砕片が多い。枝サンゴの形状はY字型を多少変形させたものに近く、これらを含む土の最大粒径は長辺ではなく短辺(枝部間)で計られることが多い。サンゴ礫混じり土は礫分が20%を超えるとサンゴ礫そのものの含有量が多くなることが別途の検討で判っている。前述のように、本論文は平面的な観点で諸検討



(a) 断面 A



(b) 断面 B



(c) 断面 C

図-4 3つの断面の礫分含有量

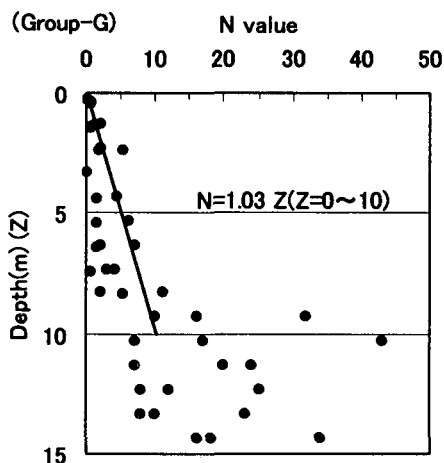
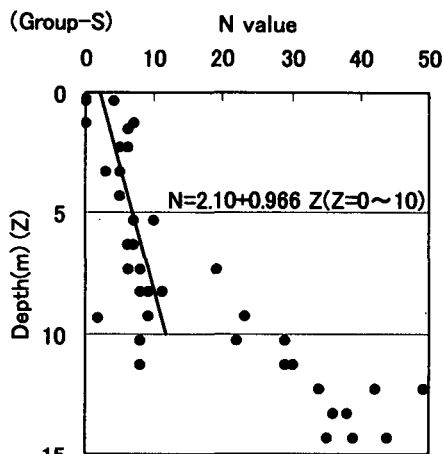


図-5 N 値の深度分布

を行うので、土のグルーピングは上述の礫分の値は用いず、サンゴ被度がゼロ周辺の砂分が多い土のグループをSとして、また、被度が大きいところでその影響を受けたことにより礫分が多いグループをGとして2大別し、これらの相違をいくつか見ていく。

(1) 土層とサンゴ礁の被度

実際の土質柱状図とN値を概観してみる。図-2は図-1の番号7における3調査孔についての柱状図であり、図中の左手から右手の順で図-1中の北側から南側に相当させてある。図-2ではNo.B2,B3にはサンゴ礫を示すマークが見られるが、No.B1には見られない。図-1中の番号7の箇所は断面Cとしてあるが、その北側はサンゴ礁の被度がゼロの区域となっている。番号7の法線上の点とその南側の点は、やや微妙ではあるが、被度が10%未満の区域に位置している。図-2のサンゴ礫は、これらの位置関係と整合性が取れている。

図-3は、各調査孔の地表面付近の礫分、砂分の含有量を縦断的に示している。添え字の1,2は表層から数えて第

1回目と第2回目の標準貫入試験のサンプルであることを意味している。礫分20%以上が殆どであるが、サンゴ礫がいくらかでも分布している区域であると思われる。また、No.6の位置がほぼ被度ゼロ区域にあるためか砂分の方が多い。No.9でも同様に砂分がかなり多いがサンゴの被度が実際には極端に低いのであろう。図-4に、No.4,6,7についてそれぞれ断面A,B,Cとして礫分の深度分布を示している。図の左側が北側、右側を南側としているが、断面B,Cについては、サンゴの被度ゼロ区域側、即ち、左側(北側)では礫分が殆どなく、右側(南側)については、含有量は異なるものの礫分が多いことが判る。断面Aは3孔ともサンゴ被度10~40%の中にあつて深度10mまでは最大では70%と礫分が多い。断面BはG4の南の孔だけ、断面Gは法線上(B2)と南の孔(B3)の2本が、最大で40%と前者より少ないものの礫分が深度10mまでは相当に多い。サンゴ被度10%未満と少ないもののその分布個所に位置しているからであろう。断面A,B,Cともに礫分が多いのは深度10m程度まで、含有量はほぼ20~70%の範囲にある。

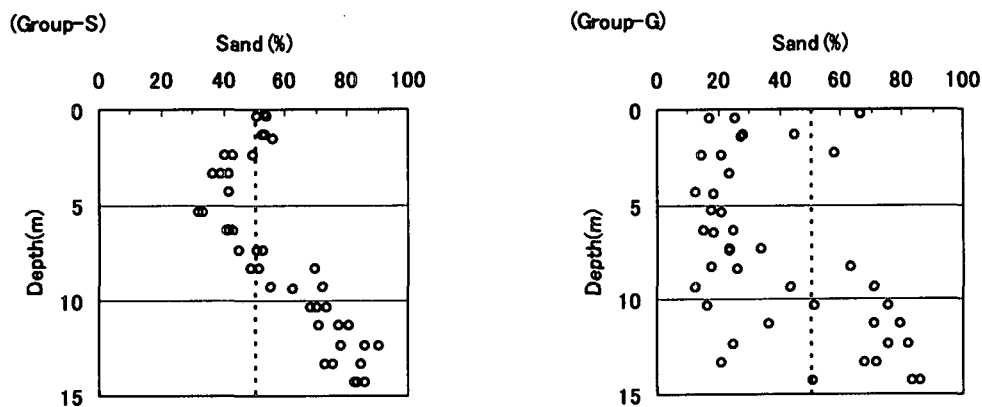


図-6 砂分の深度分布

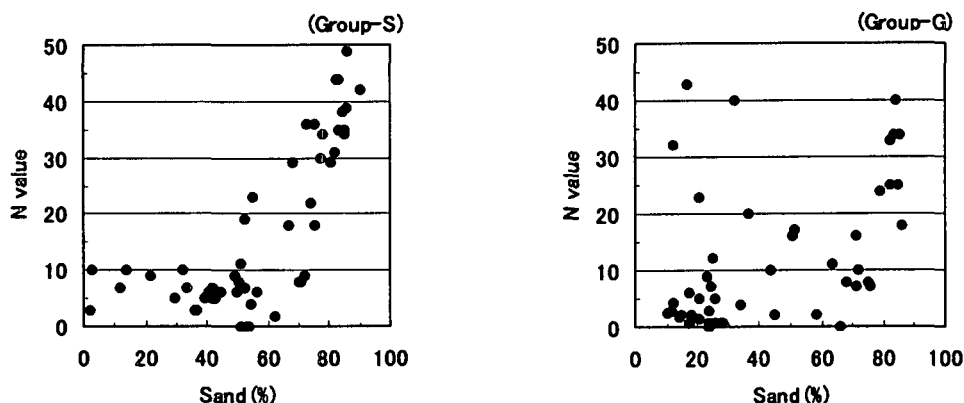


図-7 砂分とN値との関係

前述のグループ S は断面 B の G2, G3 及び断面 C の B1 を選んだ。

(2) 土層における N 値

再度図-2を見ると、サンゴ礫のマークが図示されていない No. B1 の N 値は深度の増大とともに大きくなっていくが、サンゴ礫を含む No. B2, B3 ではサンゴ礫のマークのある土層での N 値は 0~2 とかなり低い。しかし、それ以深では急に N 値が増大している。これらについて粒度組成を併せて見ると N 値の大きさ或いは増大には砂分の多寡が大いに関係しているようである。

(3) N 値の深度分布

N 値の深度分布を図-5に示す。2つのグループに分けて示しており、深度 10m までに關する1次回帰直線を挿入してある。この場合、N 値軸に切片を考慮すると、グループ G は切片が負になるので切片をゼロとした。深度 10m 以浅の範囲でグループ S の方の N 値がグループ G の方より大きい値を示している。グループ S は、深度 10m 以深でも、なお N 値は大きい値を示している。このような傾向は、砂分が

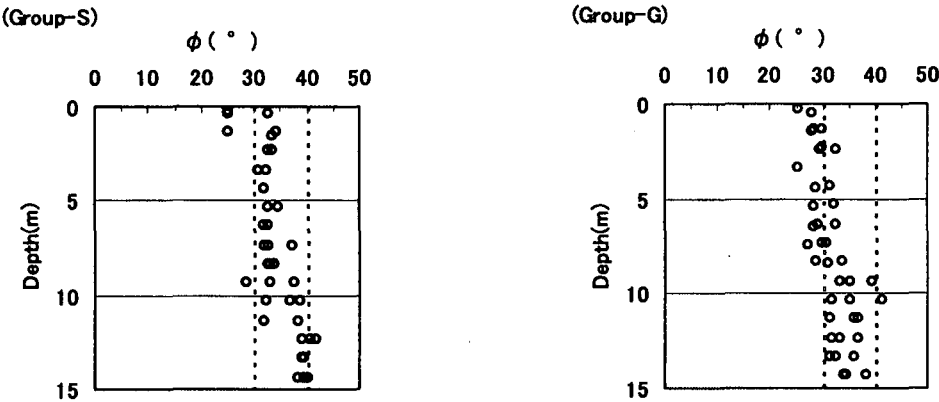
多いと締め固めの度合いが大きくなるからであろう。砂分に関し深度分布を見たのが図-6である。グループ S はほぼ 40% 以上の砂分を有するが、グループ G では砂分にバラツキがあるものの深度 10m までは 20% 程度が多い。これらにより、砂分の少ないグループ G、即ち、サンゴの被度が 10% 程度以上分布している区域の調査孔では N 値が相対的に低い値を示すことが判る。

(4) 砂分とN値

N 値は砂分の多寡と関係があるようだと述べた。これを詳しく見るため図-7に砂分とN値との関係を示した。グループごとに見ると、グループ S では砂分が 50% を超えるところからその増大とともに N 値が急増している。グループ G は一見相関が無いように見えるが、砂分 60% 以下で N 値 10 以上の 8 つほどのサンプルを除くと、砂分が 60% を超えるところからグループ S 同様にその増大とともに N 値が急増すると言える。砂分が少ない土はサンゴ礫が多いことを考えると、8 つほどのサンプルについては、サンゴ礫そのものが標準貫入試験時のロッドに接触し、抵抗反応を示したのではないかと考えている。

表一1 三軸圧縮試験結果

		Sample	Depth (m)	c_u, c_d ($\times 98\text{kPa}$)	ϕ ($^\circ$)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	F_c (%)	I_p (%)	ρ_t (g/cm^3)
UU Test	Group-S	G2	4.4	1.05	18.7	0.4	31.7	55.1	12.8	67.9	Np	1.880
		G3	5.4	0.01	22.3	1.50	32.9	55.6	10.0	65.6	Np	1.863
		B1	4.4	0.85	23.7	0.3	34.3	53.2	12.2	65.4	Np	1.872
	Group-G	G4	5.4	0.02	0.7	49.5	13.4	27.1	10.0	37.1	8.0	1.900
		B3	3.4	0.120	1.9	30.5	30.4	26.9	12.2	39.1	3.1	1.964
		B7	3.4	0.21	3.9	41.3	18.5	24.2	16.0	40.2	4.4	1.941
CD Test	Group-S	G2-5	5.4	0.068	41.4	0.0	25.0	60.0	15.0	75.0	Np	1.894
		G2-8	8.4	0.825	32.7	0.0	33.0	52.0	15.0	67.0	Np	1.867
		G3-6	6.4	0.0	41.9	0.0	25.0	59.0	16.0	75.0	Np	1.886
	Group-G	G4-5	5.4	0.621	34.0	26.0	25.0	30.0	19.0	49.0	Np	1.992
		G4-9	9.4	0.593	36.7	35.0	29.0	22.0	14.0	36.0	Np	1.953
		G5-4	4.4	0.0	46.8	27.0	19.0	32.0	22.0	54.0	Np	1.962



図一8 内部摩擦角の深度分布

3. せん断強度

(1) 内部摩擦角の深度分布

マイヤーホフは砂質土のN値と相対密度(D_r)及びN値、有効上載圧との関係を求めて砂の内部摩擦角(ϕ)を求めることを提案した。これを基本に港湾分野では次式が用いられている⁴⁾。

$$\phi = 25 + 3.2 \sqrt{\frac{100N}{70 + P_{vo'}}} \quad (1)$$

ここに、 ϕ : 砂の内部摩擦角、 N : 標準貫入試験値、 $P_{vo'}$: 標準貫入試験時の有効上載圧(kN/m^2)。

式(1)によりグループS,Gの内部摩擦角を深度ごとに求めて図-8に示した。グループSの場合、深度10mまでは殆ど $30 \sim 40^\circ$ の範囲に分布し、10m以深はほぼ 40° 前後である。また、グループGの場合、深度10mまでは地表面付近の 26° 前後から 35° 前後へと漸増し、深度10m以深は $30 \sim 40^\circ$ の範囲にある。土が砂質土としての性格を

強くする場合は、砂分が多く、締め固めの度合いを増すのであるから、これらの傾向は半ば当然であると言え、また、前述のN値の分布傾向を反映しているものである。

(2) 三軸圧縮試験結果

前述の内部摩擦角と比較するため、三軸圧縮試験結果を関連データと併せて示したのが表-1である。この場合、UU試験とCD試験の2種類につきグループS,Gごとに整理した。先ず、注目すべきは細粒分(F_c)と塑性指数(I_p)である。 F_c が50%を超えていても I_p が N_p (non plastic)であることなどからこれらはすべて中間土として分類されるものである¹⁾。グループSの1サンプルについてのUU試験に関し、応力とせん断強さの関係を図-9に示した。横軸に接するモールの応力円は左側がそれぞれ側方圧(σ_3)、右側が軸力(σ_1)である。円の接線が約 24° の勾配を有し、通常粘性土に対して適用した結果とはかなり異なったものとなっていることが判る。

a) 粘着力

粘着力(C_u)の値を見るとUU試験の6サンプルすべてがゼロとなっていないことが特徴的である。通常、飽和されている粘性土は $C_u=0$ となる。表-1の12サンプルすべてが海中のものであり、飽和状態であること、また、中間土に対してUU試験を行ったことを踏まえると C_u 値が得られるということは、サンプルが試験実施以前に膨張したためであると考えている。

b) せん断抵抗角

UU試験において、グループSとGの差異がせん断抵抗角に現れている。前者が砂質土ほどではないが、ある程度大きい ϕ となり、後者はかなり小さい。しかしながら、前出図-8の内部摩擦角と比べると、かなり小さ目の値となっており、通常なら粘性土に対して行われるUU試験を中間土に対して実施したという不適切性を指摘できる。

c) セメンテーション効果

CD試験は細粒分の多寡に拘わらず塑性指数が N_p の土に対して行われており、当該試験の適用に不合理性は無いと言えよう。これらのことは親泊が別途指摘している⁵⁾。得られたせん断抵抗角はすべて 30° 以上であり、通常の砂質土の値に達している。CD試験において粘着力(C_u)が得られたのは6サンプルのすべてが中間土であることも考えられるが、むしろ、セメンテーション効果に起因しているのではないかと考えている。セメンテーション効果については、その可能性を親泊が既に指摘している²⁾。CD試験の ϕ と C_u 値について、グループS,G間に特別な差異は見られないが、 ϕ のみについて言及するならば前述のN値から求めた ϕ 値に比べてやや大き目である。

d) 湿潤密度

UUとCDの試験でグループSとGに分けたが土の湿潤密度において明確な差がある。即ち、前者の6サンプルすべてが 1.8 台、後者の6サンプルすべてが 1.9 台である。グループGはサンゴ礫を多く含むのであるから、その密度(ρ_s)が砂分以下のそれより大きいためであろうと考えている。

4. 結 論

サンゴ礁周辺の堆積土について、サンゴの分布している所とその被度がゼロ周辺の土の工学的特性を比較した。以下に結論を示す。

- (1) サンゴが分布している周辺の土は礫分が多く、サンゴ被度がゼロ周辺の土は礫分が殆ど無く、砂分が相当に多い。
- (2) サンゴが分布している周辺の土は砂分が少ないためN値が小さい。また、マイヤーホフの式によりN値から求めた

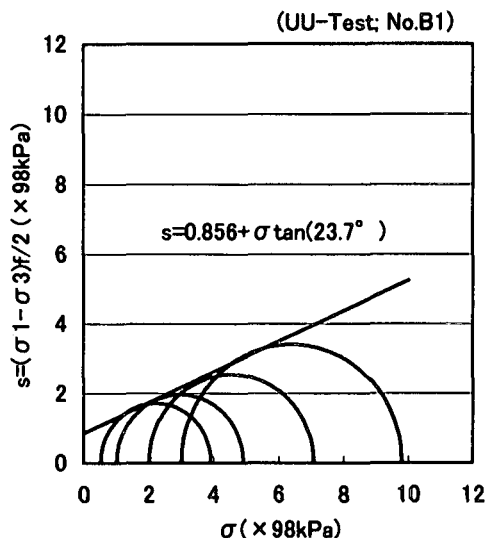


図-9 UU試験結果の1例

せん断抵抗角(ϕ)は $26^\circ \sim 40^\circ$ の範囲にある。

(3) 三軸圧縮試験について、UU試験が中間土に対して実施されており、サンゴ被度がゼロ周辺の砂分の多い土では ϕ が大き目に得られている。UU試験は、通常、粘性土を対象に実施されるのであるから、このような結果は他の地域では殆ど見られないものである。

(4) 三軸圧縮試験はすべて中間土に対して実施されており、UU試験よりCD試験を適用した結果の方の信頼性が高い。この場合、CD試験により得られた粘着力(C_u)はセメンテーション効果を示していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) M. Oyadomari and H. Uehara : Classification and strength properties of coral gravelly soils - Case studies of the port and coastal ground in Okinawa Islands-, Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Volume 1, pp. 135~140, 2000.
- 2) 親泊正孝:シルト分を多く含むサンゴ礫混じり土のセメンテーション効果, 第13回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 沖縄地盤工学研究会, pp. 14~17, 2000.
- 3) 沖縄総合事務局港湾計画課:サンゴ礫混じり土調査・設計マニュアル(案), pp. 58~61, 1995.
- 4) 運輸省港湾局編集, (社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, p.245, 1999.
- 5) 親泊正孝:さんご礫混じり土に適用された強度試験とその結果に関する幾つかの考察, 土と基礎, Vol. 49, No. 3, Ser. No. 518, 地盤工学会, pp. 8~11, 2001.