

琉球大学学術リポジトリ

さんご礁石灰質砂のせん断特性(農業工学科)

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 新城, 俊也, 宮城, 調勝, 小宮, 康明, 島袋, 進, Shinjo, Toshiya, Miyagi, Norikatsu, Komiya, Yasuaki, Shimabukuro, Susumu メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/3861

さんご礁石灰質砂のせん断特性

新城俊也*・宮城調勝*・小宮康明*・島袋進*

Toshiya SHINJO, Norikatsu MIYAGI, Yasuaki KOMIYA, and
Susumu SHIMABUKURO: Stress-strain characteristics of coralline
calcareous sands in Ryukyus Islands

Summary

Drained triaxial compression tests were performed on the three sand from the coral reef in Ryukyus Islands. Stress-strain behaviors and the influence of particle crushing on strength-deformation characteristics were discussed.

Sands were composed of coral fragments, shell, foraminifera, algae, etc., and had the carbonate content in exceed of 95%. Particle crushing during shearing process occurred in sand which resulted large void space under the same relative density. It was found that there was a tendency for both suppression of dilation and the decrease in the peak friction angle with the increase in particle crushing. In the conventional triaxial test, increasing confining pressure was found to increase Young's modulus and decrease Poisson's ratio.

緒 言

南西諸島は亜熱帯気候下にあり、島じまの周りには熱帯亜熱帯地方独特のさんご礁が発達し、浅い海を形成している。この海域において近年農道整備の一環として離島を結ぶ長大橋の建設、また漁港の整備を始め一般港湾施設、石油荷役施設、埋め立てなどの工事が数多く実施されている。現世さんご礁は、礁が波力によって破碎されたコーラルリーフロックの破片およびさんご礁に棲息するさんご、貝類、石灰藻、有孔虫などの生物遺骸が堆積した石灰質砂礫からなる地盤である。また、場所によっては、例えば陸から細粒分が供給される河川付近では、さんご礫を含むさんご礫混じり粘土が堆積し軟弱地盤を形成している²⁾。このようなさんご礁地盤は深さ広がりともに堆積状態が不均質であり、それに加えて堆積物は細粒分から礫分まで含み、サンプリングや室内試験の実施が容易でなく、支持力や沈下性状の評価が困難である。そのため、現状は杭等の基礎の支持層はさんご礁堆積物の下方に位置する基岩層に求めることが多い。

一方、多くの場合さんご礁堆積物と基岩とに挟まれて琉球石灰岩が分布し、中間層を形成している。琉球石灰岩は、現世さんご礁と類似の石灰質堆積物がかつて隆起し、その表層が再結晶作用によって岩石化したものであるが、再結晶した固結層より下部は未固結のゆるい砂礫質の岩相をなし不均一な地盤

* 琉球大学農学部農業工学科

を形成している³⁾。この特有の不均一性に起因して琉球石灰岩層も支持層としての評価が容易でない。そのためさんご礁地盤では、その下方に分布する琉球石灰岩層は固結層が十分な厚さと広がりをもつ場合を除いて支持層として利用できないことが多い。そのため基岩を支持層とすることになり、杭は長尺となり施工の面からも基礎工は不経済となる。したがってさんご礁地盤の評価法を確立し、それに適した基礎と工法の開発あるいはさんご礁地盤を改良することにより支持層としての利用を検討する必要がある。

ところで、地盤を構成している砂や礫に注目すると、さんご礁の生物を起源とするさんご砂や礫は軟らかく、粒子内部に間隙を含み、石英質の砂に比べて破碎しやすい。粒子破碎は強度、ダイレイタンスーなどの砂の力学挙動に影響を及ぼし、砂地盤の支持力低下と沈下の原因となる。したがって、さんご礁地盤における支持力機構と沈下状況を明かにするためには、地盤性状の評価法に加えて石灰質生物遺骸からなる砂と礫の力学挙動を把握することが必要である。また地盤改良の面からも力学挙動を明らかにすることは重要である。

本研究はさんご砂の力学挙動に関する研究の一環として、さんご礁の海域から採取した3種類の砂について排水三軸圧縮試験を行い、強度・変形特性およびそれに及ぼす密度の影響について調べたものである。

試料および実験方法

1. 試料

試料は那覇の沖合いに位置する砂州慶伊瀬付近の浅海からの海底砂(C)および宮古島下地町前浜(M)と来間島(K)の海岸から採取した海浜砂の3種類であり、色調はいずれも乳白色を呈している。これらは、さんご、二枚貝、巻貝、石灰藻、有孔虫、苔虫、うにななどの石灰質生物遺骸の破片で構成されている。これらの試料には礫状のさんごの破片や貝が少量含まれるが、実験には2mmふるい通過試料を用いた。顕微鏡観察によると、砂Cはフィンガーコーラル様の筒状粒子や角ばった破片状の粒子が多く、これらは内部に間隙を含む。砂Kは、扁平、筒状の粒子が少なく、粗粒細粒ともに摩耗により角がとれ、丸味を帯びた粒子が多くみられる。砂Mは、細粒分は扁平、筒状の形状のものが多く、角ばっているが、粗粒分は角がとれ砂Kと同様粒子内部の間隙は表面で塞がっている。

Fig. 1に粒度分布を示す。またTable 1に物理試験結果を示した。比重試験はJIS A 1202土の比重測定法に準じて行い、多孔性を考慮して煮沸による脱気に十分時間をかけた。相対密度試験は土質工学会基準によって行い、最大間隙比は乾燥砂を漏斗で素早くモールドに注ぎ込む方法で、また最小間隙比は水平打撃によってモールド内の砂を密に詰める方法で決定した。吸水率は砂を水侵し十分脱気した後 JIS A 1109 細骨材の表乾比重および吸水率試験にもとづいて決定した。砂Cは他に比べて吸水率が大きく、多孔質であることがわかる。粒子内部の間隙比は吸水率から計算によって求めた。Table 1の最大、最小間隙比は内部間隙比を含めた値である。これらの砂は粒度、粒形、表面粗さなどが異なり、その粒子特性により密度が異なるが、同じ相対密度では砂K、M、Cの順に密な状態が得られる。

さんご石灰質砂の主成分は炭酸カルシウム(CaCO_3)であるので、シュレッター炭酸定量器を用いて含有量を測定した。これらの砂の CaCO_3 含有量は95%以上であり、ほとんどが CaCO_3 で構成されていることがわかる。また砂の鉱物組成を

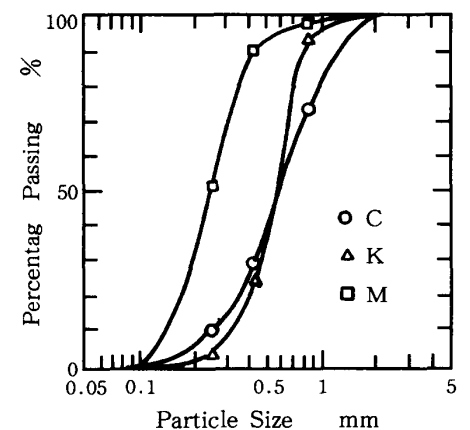


Fig.1 Particle size distributions for the three sands

X線回折試験を行って調べた。これらの砂はいずれにおいてもアラゴナイトとカルサイトが共存しており、量的にカルサイトを多く含有する傾向にあった。

Table 1 Soil properties

Soil type		Chiibishi	Kurima	Maehama
Denoted		C	K	M
Specific gravity	C_s	2.77	2.79	2.79
Effective size	D_{10} (mm)	0.27	0.33	0.12
Coefficient of uniformity	U_c	2.5	1.8	2.3
Minimum void ratio	e_{min}	0.98	0.62	0.82
Maximum void ratio	e_{max}	1.52	0.95	1.21
Intenal void ratio	e_{int}	0.14	0.07	0.08
Absorption	(%)	4.9	2.4	2.7
Carbonate content	(%)	96	95	95
Mineralogy		Calcite Aragonite	Calcite Aragonite	Calcite Aragonite

2. 実験方法

飽和砂について排水三軸圧縮試験を実施した。砂の密度は相対密度95%の密詰めと50%の中詰めである。うにの刺などは取り除き、所定の密度になるようにあらかじめ計量した炉乾試料を煮沸脱気し飽和させた。2つ割りモールドで保持した三軸試験用メンブランに空気が混入しないように飽和砂を入れた。詰め方は約10層に分け、直径1cmのロッドで中詰めは軽くタッピングしながら、密詰めはタッピングによる突き固めとモールド側面への打撃を併用して行った。供試体の寸法は高さ10cm、直径5cmであり、ペDESTALには排水のためにナイロンメッシュを挟んだ。またキャップとの間にはテフロンシートを挟み端面摩擦の軽減に努めた。供試体をセット後水頭にして約100cmの負圧を内部に作用させて供試体を自立させた後、三軸セルを組み立て、0.2kgf/cm²の側圧の作用のもとで供試体内部の負圧を解消した。

三軸圧縮試験は、所定の側圧で等方圧密した後、側圧を一定に保って軸応力だけを増加させた。圧密圧力は0.5～5.0kgf/cm²範囲であり、圧密とせん断の両過程を通して0.5kgf/cm²のバックプレッシャーを作用させた。軸ひずみ速度は0.5%/minで最大20%の軸ひずみまで軸変位を作用させた。軸荷重はロードセルで、体積変化は差圧計で、軸変位はストレンゲージタイプの変位計でそれぞれ電氣的に測定した。試験終了後せん断した砂のふるい分け試験を行い粒度変化を調べた。

実験結果と考察

1. 応力～ひずみ関係

軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) ～軸ひずみ ϵ_1 関係および体積ひずみ ϵ_v ～軸ひずみ ϵ_1 関係をそれぞれの砂について Fig. 2～Fig. 4 に示す。これらの図から次のことが指摘できる。

- 1) 砂Cの密詰めでは ($\sigma_1 - \sigma_3$) ～ ϵ_1 関係はせん断初期段階で直線関係が見られるが、直ちに非線形となり、ピーク強度に達した後徐々に軸差応力が減少する。ピーク強度は側圧の増加とともに増加し、ピーク強度時の軸ひずみも8%～12%の範囲で側圧とともに増加するが、軸ひずみ20%においても軸差応力は一定にならない。体積ひずみはせん断初期段階で収縮を示し、 ϵ_v ～ ϵ_1 関係は線形関係にあるが、低側圧では直ちに体積膨張に転じダイレイタンスーに伴って体積が増大する。しかしながら側圧の増加に伴って体積収縮ひずみは収縮傾向から膨張傾向へ移行する点の軸ひずみと

もに増大し、体積収縮傾向が顕著となる。

2) 一方、中詰め砂では ($\sigma_1 - \sigma_3$) $\sim \epsilon_1$ 関係は初期に直線関係がみられるが、密詰め比べて非線形が著しく、ピーク強度時の軸ひずみも増大し、側圧 5 kgf/cm² では軸ひずみ 20% においても軸差応力は増加を続けている。 $\epsilon_v \sim \epsilon_1$ 関係は初期段階では密詰めと同様体積収縮を示す。しかし、その後の膨張傾向は密詰め比べてゆるやかであり、密度の減少によりダイレイタンス挙動が抑制され、側圧 4 kgf/cm² 以上では体積収縮傾向を持続したままである。

3) 砂Kでは密詰め ($\sigma_1 - \sigma_3$) $\sim \epsilon_1$ 関係は初期段階で直線関係を示した後非線形となるが軸ひずみ 5~7% で明確なピークを示し、その後軸差応力は急激に減少し強度一定の状態 (限界状態) に至る。体積ひずみは初期に収縮を示した後ダイレイタンスに伴って体積膨張を続けるが最終的には体積一定の状態に達する。強度は側圧とともに増加するが、ダイレイタンスに伴う体積膨張は側圧に関係なく類似した挙動を示している。中詰め砂では ($\sigma_1 - \sigma_3$) $\sim \epsilon_1$ 関係はピーク強度までは密詰め砂と同じ傾向にあるが、密詰め比べて強度は低下し、またピーク強度後の強度低下はゆるやかであり、軸ひずみ 20%

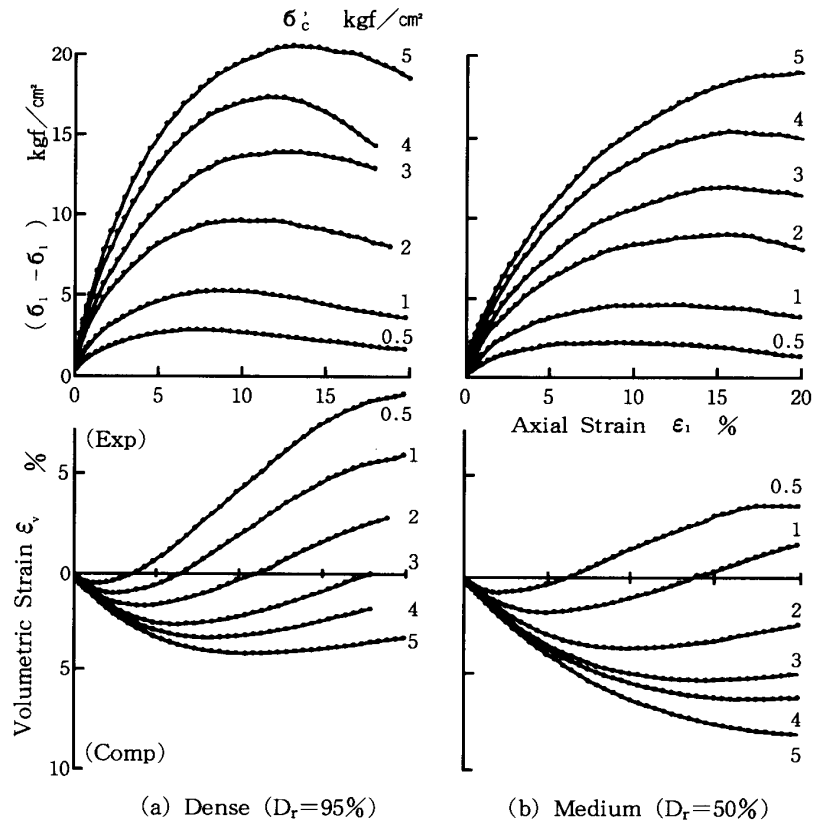


Fig.2 Stress-strain curves for Chiibishi sand (C)

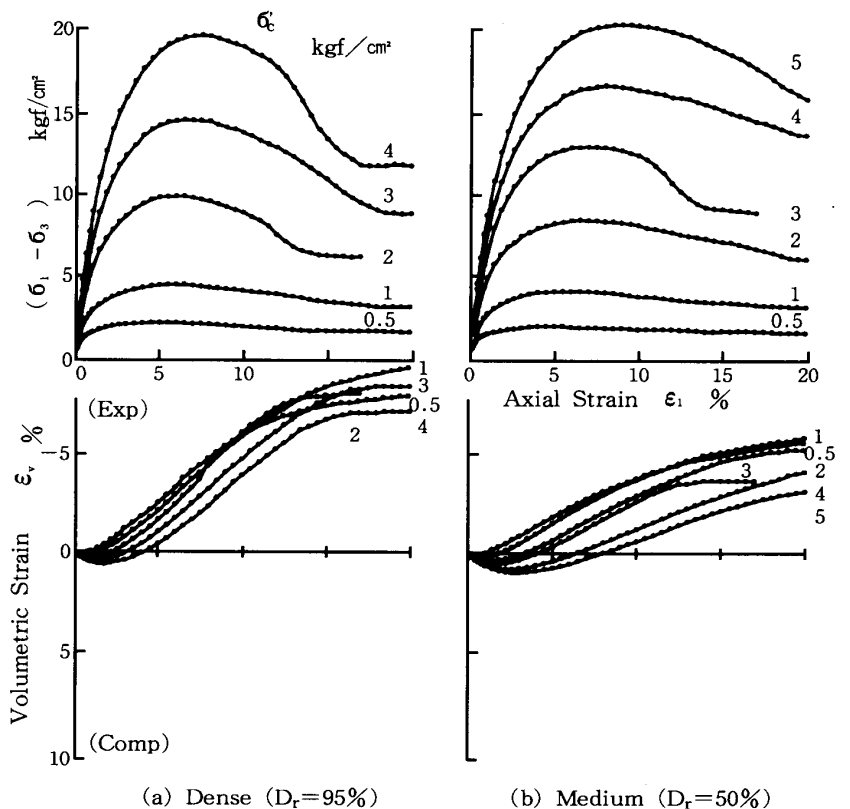


Fig. 3 Stress-strain curves for Kurima sand (K)

においても強度は定常状態に至らない。 $\epsilon_v \sim \epsilon_1$ 関係は密詰めと同様体積収縮後膨張を続けるが、最終段階でも密詰めのように明確に体積ひずみが一定の状態に達するには至らない。ダイレイタンスー挙動は側圧の増加とともに抑制される傾向があるが、側圧に関係なく体積膨張を持続している。

4) 砂Mでは密詰め($\sigma_1 - \sigma_3$) $\sim \epsilon_1$ 関係は砂Kの場合と同じであるが、ピーク強度に達した後急激に応力が低下し、砂Kよりも小さい軸ひずみ段階で軸差応力が定常状態に達する。 $\epsilon_v \sim \epsilon_1$ 関係においても急激なダイレイタンスーを示した後応力と呼応して小さな軸ひずみ段階で定常状態に至る。中詰め砂では密詰め

に比べて強度が低下し、ピーク強度時の軸ひずみも増加するが、その後の強度は減少し最終的に一定となる。 $\epsilon_v \sim \epsilon_1$ 関係もダイレイタンスー挙動が側圧の増加により抑制される傾向にあるが、体積膨張後最終的に体積が変化しない状態に達している。

以上のことよりせん断挙動について次のことがいえる。①応力 \sim ひずみ関係は石英砂のような一般的な砂におけると同様密度と拘束圧の影響を受ける。②応力 \sim ひずみ関係とそれに及ぼす拘束圧の影響の程度は砂によって異なり、同じ相対密度の密詰めであっても、それらを一般的な砂の密詰めと緩詰め状態の応力 \sim ひずみ挙動に対比すると砂KとMは密詰め状態の挙動、砂Cは緩詰め状態の挙動に類似している。③砂によるこのような応力 \sim ひずみ挙動の差は、石灰質生物遺骸の硬さなどの性質によるよりも、場所ごとに粒度、粒形、表面粗さなどの砂の粒子特性が異なり、その粒子特性によって決まる空隙比の大きさがよりその挙動に影響を及ぼすことによると考えられる。

2. 破碎特性

せん断試験終了後ふるい分け試験を行い、試験前の粒度との比較から試験前の有効径 D_{10} を基準に定めた破碎係数 C_{cr} を用いて粒子破碎の程度を評価した¹⁾。ここに、 $C_{cr} = \text{試験後の } D_{10} / \text{試験前の } D_{10}$ (試験前の有効径) における通過率/試験

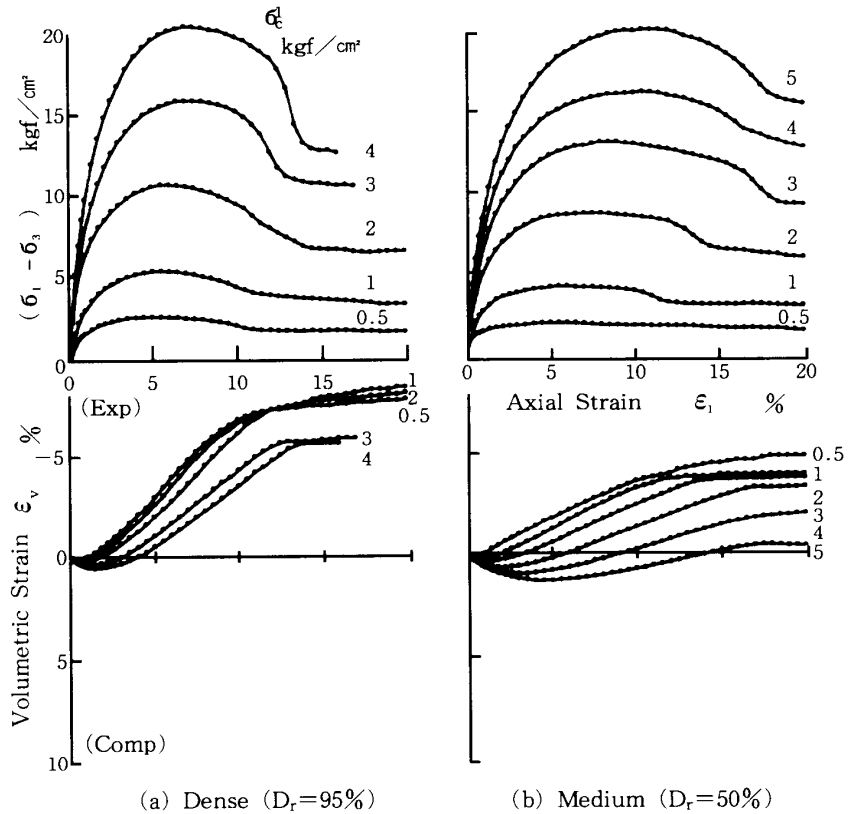


Fig. 4 Stress-strain curves for Maehama sand (M)

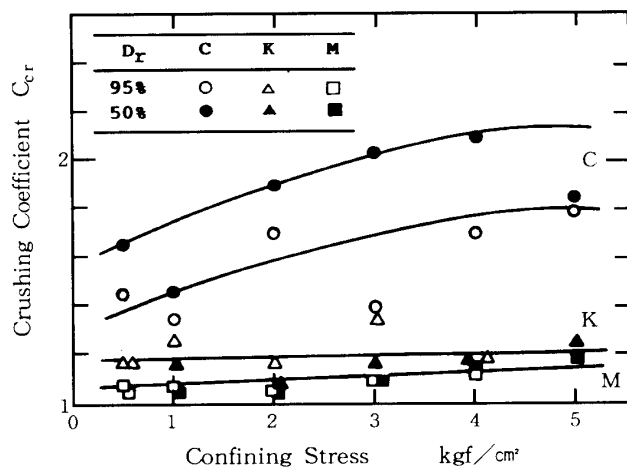


Fig. 5 Relationship between crushing coefficient and confining stress

前のD₁₀における通過率。Fig. 5は破碎係数と側圧の関係を示したものである。砂Cは粒子破碎を生じやすく、破碎程度は拘束圧の増加とともに増え、また密詰めよりも中詰めの方がより破碎している。それに対し、砂KとMは実験の側圧の範囲では破碎係数の値は小さく、せん断に伴う粒子破碎はわずかとみなせる。砂の粒子破碎は粒度、粒形、作用応力、間隙比、粒子の硬さなどに支配されるが、破碎しやすい砂Cは他の砂に比べて間隙比が大でしかも大きな内部間隙を有しており、このことからさんご砂の破碎は粒子の硬さよりも粒子特性によって決まる間隙比の大きさにより影響されると考えられる。このことは、同一の砂においても密詰めは粒子相互の接点が多く応力は分散するが、緩詰めでは接点が少なく応力集中によって破碎しやすくなることから明らかのように、密な状態でも間隙比が大きい砂は破碎しやすいといえる。

せん断過程で粒子破碎が生じると、破碎した粒子は粒子間の間隙を埋め、体積が減少し、ダイレイタンスによる体積膨張が減少する。Fig. 2に示したように砂Cは側圧の増加に伴って体積収縮が顕著となるのは主に粒子破碎に原因しており、粒子破碎はダイレイタンスなどの変形挙動に影響を及ぼすことがわかる。

3. 強度特性

強度をせん断抵抗角で表し、ピークせん断抵抗角と側圧の関係をFig. 6に示す。ここにピークせん断抵抗角は $\sin \phi_p = (\sigma_1 - \sigma_3)_p / (\sigma_1 + \sigma_3)_p$ の関係から求めた。 ϕ_p は砂Cにおいては側圧の増加に伴って著しく減少し、側圧によってその値が変化する。砂Mではその減少はわずかであり、また砂Kではほぼ一定の値を示している。一方、中詰めの方が密詰めより ϕ_p は小さく、密度の減少によってその値は減少するが、側圧の影響は密詰めと類似している。また、側圧の影響から明らかなように破壊包絡線は、砂Cでは非線形であるが、砂KとMでは直線近似できる。

Fig. 7は強度に及ぼす破碎の影響を調べるために、ピークせん断抵抗角 ϕ_p と破碎係数 C_{cr} の関係を示したものである。砂KとMではこの関係は小さい破碎係数とわずかの ϕ_p の減少の範囲にあるが、砂Cでは破碎係数の増加とともに ϕ_p が減少する傾向を示している。 ϕ_p が減少することは、破壊包絡線が曲線となることであるから、側圧による強度増加の割合が粒子破碎とともに減少することを示しており、粒子破碎は強度に影響を及ぼすことがわかる。

Fig. 8は限界状態すなわち軸差応力と体積ひずみが軸ひずみの増加に対して変化しなくなる状態におけるせん断対角 ϕ を側圧に対して示したものである。ただし、砂Cおよび砂Mの中詰めでは軸ひずみ20%において限界状態に至らないので、それらについては軸ひずみ20%

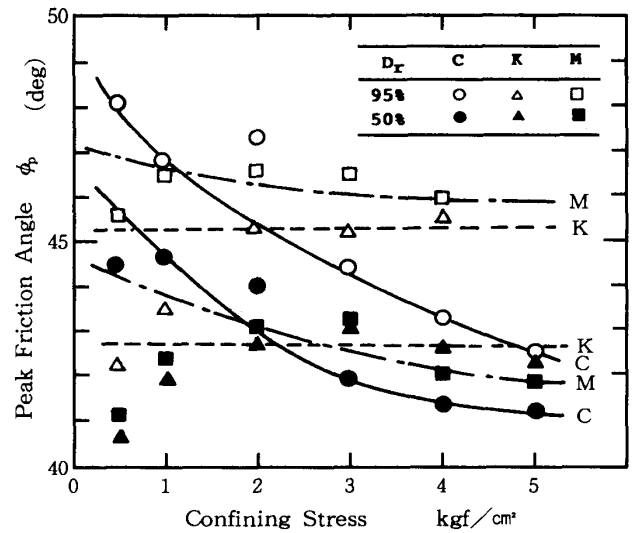


Fig. 6 Relationship between peak friction angle and confining stress.

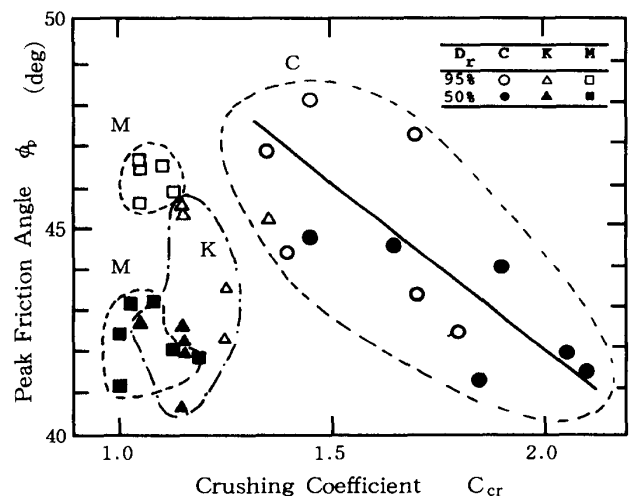


Fig. 7 Decrease in peak friction angle with particle crushing

における値を示している。同じ砂の ϕ_r は初期密度に関係なく一定であり、側圧の影響は見られない。 ϕ_r は砂Cで大きな値にあるが、限界状態に達するにはさらに軸ひずみが必要である。一方砂Kは限界状態にあると見なすと、そのときの値は砂Mとはほぼ一致しており、さんご砂の限界状態におけるせん断抵抗角は $\phi_r=37^\circ$ 程度である。

4. 変形特性

Fig. 2 ~ Fig. 4 に示したように砂の応力~ひずみ関係は非線形関係にあるが、破壊に至らないある応力レベル以内では砂地盤を弾性体とみなし、弾性解析によって応力・変形を便宜的に評価できる⁴⁾。ここでは排水ヤング率 E' とポアソン比 ν をそれぞれ $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 関係および $\epsilon_v \sim \epsilon_1$ 関係の初期段階の直線部の傾きから次式で求めた。

$$E' = (\sigma_1 - \sigma_3) / \epsilon_1 \quad (1)$$

$$\nu = (1 - \epsilon_v / \epsilon_1) / 2 \quad (2)$$

Fig. 9 は排水ヤング率と側圧の関係を両対数紙にプロットしたものである。密詰めの方が中詰めよりヤング率は大きく、その値は側圧とともに増加しており、その関係は次式で近似される。

$$E' = m p_0 (\sigma'_c / p_0)^n \quad (3)$$

ここに、 σ'_c ：拘束圧 (kgf/cm²)、 p_0 ：単位応力 (kgf/cm²)、 m と n ：材料パラメーター。 m と n の値は砂Cで密詰めするとき170、0.57、中詰めするとき125、0.48、砂Kで密詰め405、0.47、中詰め310、0.53、および砂Mで密詰め440、0.59、中詰め350、0.58である。

ポアソン比 ν と側圧の関係を片対数紙上にプロットし Fig. 10 に示す。ポアソン比は密詰めよりも中詰めの方が小さな値を示し、砂KとMではそれらの値は側圧の増加に伴ってわずかに減少するが、砂Cでは側圧による減少が著しく、小さな値になる。 $\nu = 0$ は軸荷重が作用しても測方への変位が生じないことを意味しており、原位置においては拘束力が測方膨張によって増加しないため、側方拘束による強度増加は期待できないことを示唆している。図から明かなようなポアソン比と側圧の関係は次式で表示できる。

$$\nu = a - b \log (\sigma'_c / p_0) \quad (4)$$

ここに、 σ'_c ：拘束圧 (kgf/cm²)、 p_0 ：単位応力 (kgf/cm²)、 a と b ：材料パラメーター。 a と b の値は、砂Cの密詰めで0.20、0.22、中詰めで0.15、0.19、砂Kの密詰めで0.36、0.11、中詰めで0.29、0.11、また砂Mの密詰めでは0.37、0.10、中詰めで0.34、0.12である。

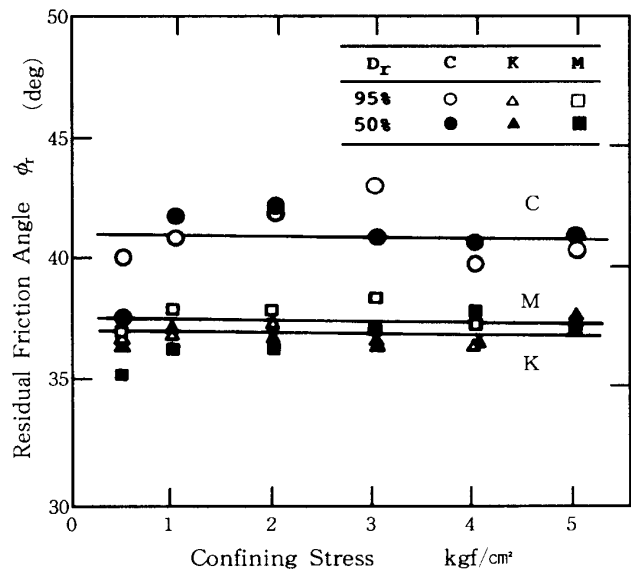


Fig.8 Residual friction angle for three calcareous sands

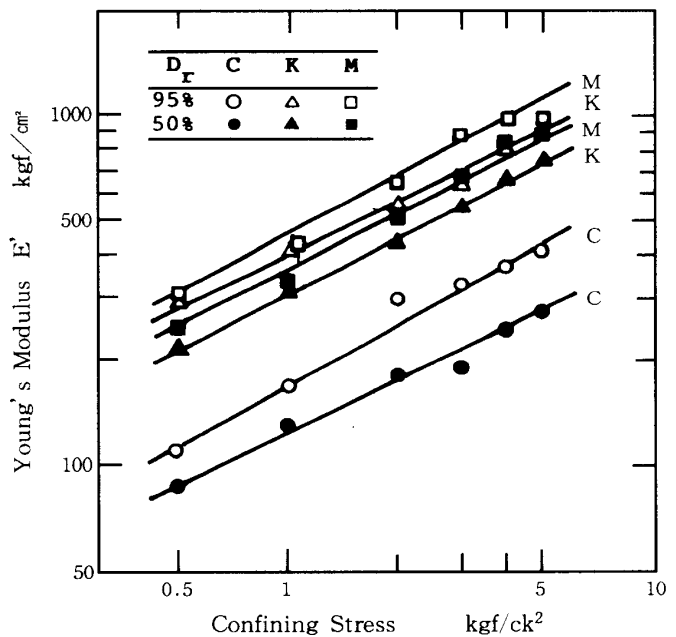


Fig. 9 Relationship between measured Young's modulus and confining stress

要 約

3種類のさんご砂について排水せん断試験を実施した。結果を要約すると次のようである。

1) さんご砂はさんご、貝類、石灰藻、有孔虫、うにななどのさんご礁に棲息する生物の石灰質遺骸であり、場所によって粒度、粒形などの粒子特性が異なるが、炭酸カルシウム含有量が95%以上の石灰質砂である。

2) 同じ相対密度でも砂ごとに密度に差があり、大きな間隙を形成する砂は緩詰め砂に類似した挙動、また小さな間隙を形成する砂は密詰め砂に類似した挙動を示し、応力~ひずみ挙動は粒子特性によって決まる間隙比の大きさに支配される。

3) 同じ相対密度でも大きい間隙比を形成する砂はせん断過程での粒子破碎が顕著であり、粒子破碎はダイレイタンスーなどの変形挙動に影響を及ぼす。

4) 粒子破碎は側圧による強度増加の割合を減少させ、強度特性にも影響を及ぼす。

5) 排水ヤング率 E' は拘束圧 σ'_c の増加とともに増大し、これらは式(3)の関係で表せる。一方ポアソン比 ν は拘束圧の増加に伴って減少し、これらは式(4)の関係で近似できる。

終わりに、砂の鉱物同定に御教示いただいた本学部農芸化学科助教授渡嘉敷義浩先生、実験に協力いただいた卒業生梶原等君に謝意を表す次第である。

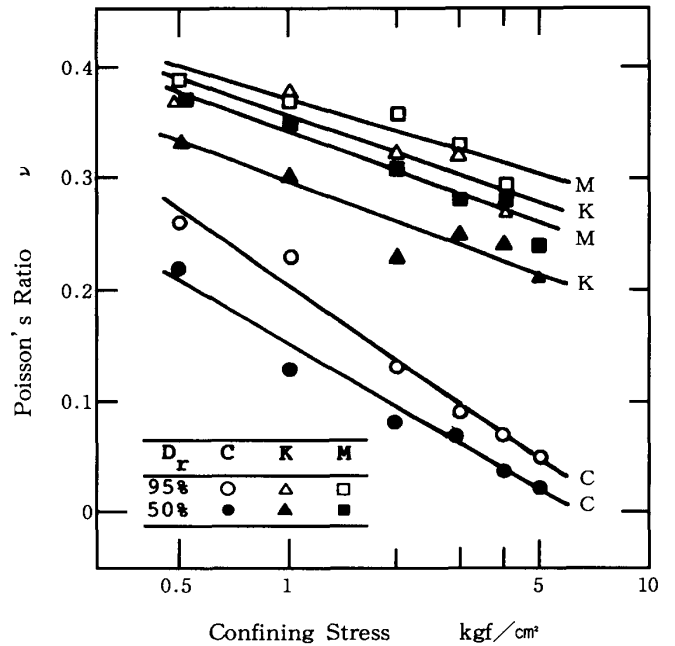


Fig.10 Relationship between measured Poisson's ratio and confining stress

参考文献

1. Datta, Gulhati and Rao 1981 Engineering behavior of carbonate soils of India and some observations on classification of such soils, STP777, ASTM, 113-140
2. 古川博恭 1980 沖縄における応用地質学的諸問題、琉球列島の地質学研究、5 : 75-90
3. 古川博恭 1982 琉球石灰岩、九州・沖縄の特殊土、 p181-193
4. 木村猛 1978 土の応力伝播、鹿島出版会