琉球大学学術リポジトリ

石灰質砕砂の強度特性

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): 砕砂, 琉球石灰岩, 三軸圧縮試験, せん断強度, ダイレイタンシー キーワード (En): Crushed sand, Ryukyu limestone, Triaxial compression test, Shear strength, Dilatancy 作成者: 新城, 俊也, 宮城, 調勝, 永吉, 功治, Shinjo, Toshiya, Miyagi, Norikatsu, Nagayoshi, Koji メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/3649

石灰質砕砂の強度特性

新城俊也*・宮城調勝*・永吉功治**

Toshiya SHINJO, Norikatsu MIYAGI and Koji NAGAYOSHI : Mechanical properties of crushed Ryukyu limestone sand

キーワード：砕砂，琉球石灰岩，三軸圧縮試験，せん断強度，ダイレイタンシー
Key words : Crushed sand, Ryukyu limestone, Triaxial compression test, Shear strength, Dilatancy

Summary

A series of triaxial compression tests was carried out on crushed Ryukyu limestone sand to investigate the shear strength characteristics of carbonate sediments litholized with recrystallization. The test results were compared with that of carbonate sand in coral reef. Compression yield stress, internal friction angle at peak strength, critical state frictional angle and e-logp' relation before and after shearing were discussed. Particle breakage in crushed sand shows the increase in fine-grain fraction smaller than particle size of 75μm with compare to carbonate sand. The internal friction angle at peak strength for crushed sand decreases with the increase in confining pressure and on the other hand the friction angle at the critical state is constant regardless of the degree of particle breakage.

緒　言

南西諸島の島々の周辺には，さんご礁堆積物や地質的年代の新しい琉球石灰岩が分布している。現在のさんご礁堆積物は，ここ1万年間継続して堆積したものであり，シルトから礫分までの広範な大きさの粒径からなり，これらは緩い堆積状態を形成している[1]。琉球石灰岩は，過去のさんご礁堆積物が氷河性の海面変動を繰り返し受け形成されたものである。これらのさんご礁堆積物は離水の際溶解-再結晶作用により石質化しているが，全体として岩盤化しているのではなく地層は部分的に固結し，多くは砂礫状を形成している。そのため琉球石灰岩は固結層と砂礫層が互層をなす複雑な地盤を形成している。このような地盤を構造物の支持層として利用するためには砂礫状の堆積物の力学特性を把握することが重要である。

琉球石灰岩を構造物の支持層として利用するためには地盤の力学特性を適切に評価する必要がある。しかしながら，琉球石灰岩中の砂礫層は，シルトから粗礫に至るまでの粒径からなり，不攪乱試料のサンプリングが容易でなく，また，力学挙動を調べるための実粒度による室内試験の実施が困難である。そこで本研究では，石質化している琉球石灰岩層の砂礫の代わりに土木材料として広く使用されている琉球石灰岩の砕砂に注目し，砕砂の力学特性から砂礫層の挙動を類推することをねらいとした。力学特性は三軸圧縮試験装置を用いておおよそ5MPaの応力レベルまでの等方圧密試験と排水せん断試験により検討した。また，さんご礁堆積物の石灰質砂についても同様の試験を行い，砕砂の力学特性と比較した。

* 琉球大学農学部生産環境学科
** 鹿児島大学大学院連合農学研究科
琉球大学農学部学術報告　48：113～118（2001）

試　料

実験には，琉球石灰岩の砕砂とさんご礁堆積物の石灰質砂を用いた。砕砂はクラッシャーランを75μm から2mm までの粒径にふるいで調整して使用した。石灰質砂は2mm ふるい通過試料を用いた。これらの試料の物理的性質と粒度分布を Table 1と Fig. 1 にそれぞれ示した。炭酸カルシウム含有量はいずれの試料においても95%以上である。均等係数 U_c は砕砂に対して5.0，石灰質砂に対して2.4である。

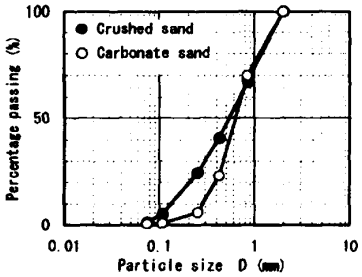

Fig. 1 Grading curves of samples

Table 1 Physical properties

Sample		Crushed sand	Carbonate sand
Density of soil particles	ρ_s (g/cm^3)	2.72	2.77
Uniformity coefficient	U_c	5.0	2.4
Maximum void ratio	e_{max}	1.17	1.53
Minimum void ratio	e_{min}	0.68	0.98
Carbonate content	(%)	95	96

実 験 方 法

試験は，軸荷重50kN，側圧10MPa まで載荷可能な高圧用三軸圧縮試験装置を用いた。供試体の寸法は直径5cm，高さ10cm である。供試体のセットは操作の都合上凍結供試体を用いた。凍結供試体は，内径5cm，高さ10cm のモールドに乾燥試料を空中落下により充填し，モールドごと水に浸し真空ポンプで脱気し，その後冷凍庫で凍結させて作成した。供試体の密度は，砕砂に対して相対密度 Dr=約80%，石灰質砂に対して Dr=約60%に設定した。

凍結供試体は，モールドから脱型した後三軸セルにセットし，側圧98kPa の作用下で解凍した。 試験は等方圧密試験，圧密排水せん断試験（CD 試験）を行った。

等方圧密試験では，圧密圧力をバックプレッシャー0.49MPa のもとで20kPa から5.9MPa まで変化させた。圧密は供試体上下両端面からの排水により行い，各圧密圧力における圧密時間は24hr である。

CD 試験は，圧密終了後有効側圧0.049—4.9MPa の範囲で，軸ひずみ速度0.25mm/min の速さで行った。せん断過程での排水は供試体上下両端面から行い，排水量はビューレットに集め差圧計で測定した。軸ひずみは最大35%程度まで作用させた。なお，圧密過程およびせん断過程ともにバックプレッシャー0.49MPa を作用させた。

せん断試験終了後，粒子破砕の程度を調べるためふるい分けによる粒度試験を行った。

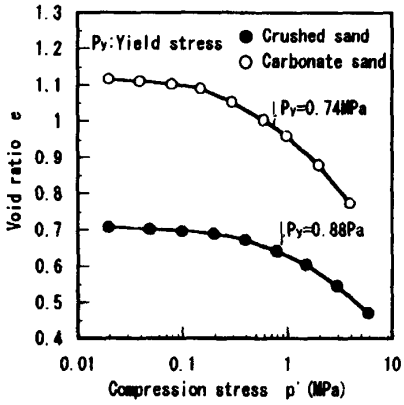

Fig. 2 Isotropic compression test (e-logp' relations)

実 験 結 果

1 等方圧密試験

Fig. 2は，等方圧密試験による間隙比と等方圧密圧力の関係をe-logp′関係で砕砂と石灰質砂について示したものである。砕砂および石灰質砂のe-logp′関係はいずれも降伏を示した後，直線関係に移行している。キャサグランデ法により決定した圧密降伏応力 P_y は砕砂で0.88MPa，石灰質砂で0.74MPaを示している。圧密降伏応力を越える応力域では，粒子の破砕が急速に進むため，顕著な圧縮性を示すことが推測される。

圧密降伏応力以上での圧縮指数λは，砕砂に対して0.10，石灰質砂に対して0.14であり，砕砂に比べて石灰質砂の圧縮性が大きい。

2 圧密排水せん断試験（CD試験）

砕砂のCD試験による主応力差（σ_1-σ_3）-体積ひずみε_v-軸ひずみε_1関係をFig. 3に示す。応力は軸ひずみε_1の増加に伴いピーク強度に達した後減少しており，（σ_1-σ_3）-ε_1関係はひずみ硬化-軟化型を示している。ピーク強度に至るまでの軸ひずみは，側圧の増加に伴い7%から20%まで増大している。

一方，ε_v-ε_1関係は，圧縮降伏応力以下の側圧ではせん断開始後体積圧縮を示しその後体積膨張に転じている。その傾向は側圧の増加とともに収縮傾向に変化し，ダイレイタンシーが抑制されている。圧縮降伏応力以上では，せん断に伴う収縮傾向が顕著であり，特に有効側圧2.94MPa以上では有効側圧に関係なくε_v-ε_1関係はほぼ一致している。

Fig. 4は，石灰質砂の主応力差（σ_1-σ_3）-体積ひずみε_v-軸ひずみε_1関係を示したものである。（σ_1-σ_3）-ε_1関係は有効側圧の増加に伴ってひずみ硬化―軟化型からひずみ硬化型に変化している。有効側圧0.98MPa以下ではピーク強度時の軸ひずみは側圧の増加に伴って9%から27%まで増加し，ピーク強度後は応力の減少を伴って限界状態に至っている。有効側圧1.96MPa以上では軸ひずみ30%以上においても応力は増加し続けている。

ε_v-ε_1関係では有効側圧の増加に伴って体積収縮が著しく，石灰質砂の収縮量は砕砂に比べて著しく増大している。

3 粒子破砕

Fig. 5は，せん断終了後の粒度分布を砕砂および石灰質砂について示したものである。なお，図中には試験前の粒度分布も併記してある。せん断に起因した粒子破砕は顕著であるが，砕砂と石灰質砂では破砕状況が異なっている。砕砂では粒径75μm以下の細粒分が含有量にして30%付近まで増加し，細粒分の増加が著しい。一方，石

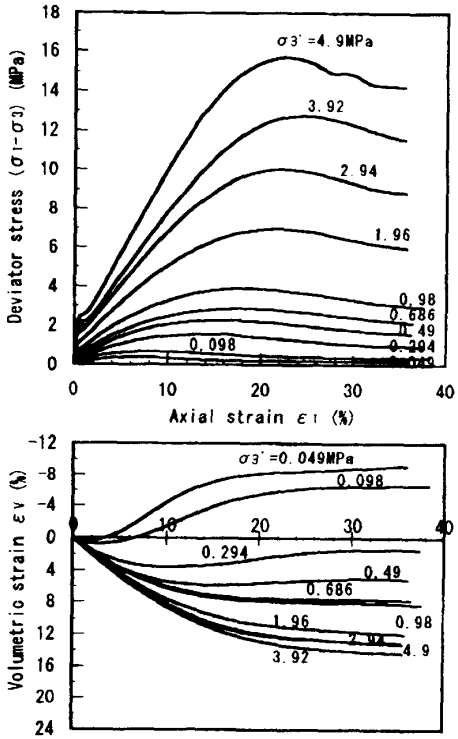

Fig. 3 Deviator stress, volumetric strain and axial strain relations (Crushed sand)

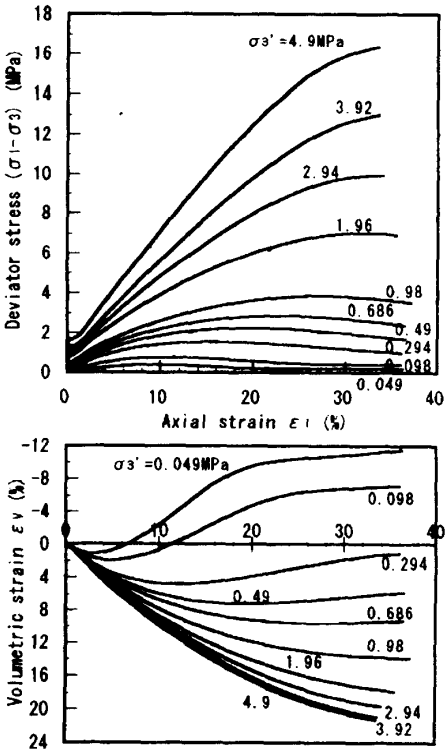

Fig4. Deviator stress, volumetric stain and axial strain relations (Carbonate sand)

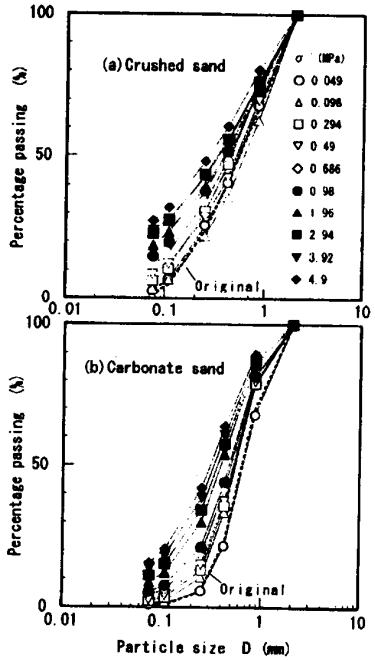

Fig. 5 Grading curves befor and after crushing

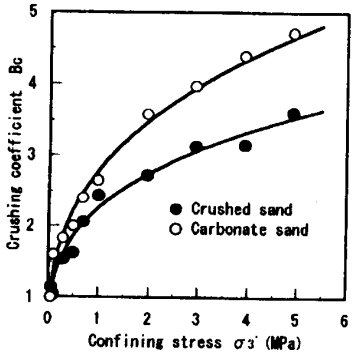

Fig. 6 Relationship between crushing coefficient and confining stress

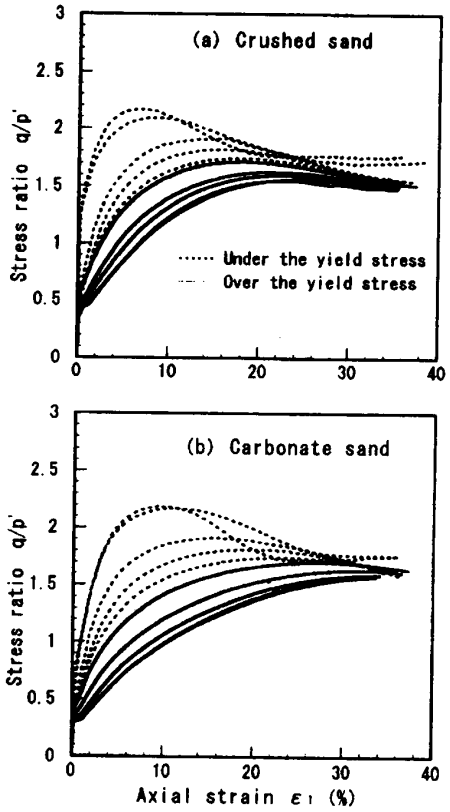

Fig. 7 Relationship between stress ratio and axial strain

灰質砂では細粒分の増加に比べて粒径0.25−0.425mmの範囲の粒子が卓越して増加している。このことは，過去に再結晶作用を受けた砕砂と現在のさんご礁堆積物の砂礫では破砕形態に差のあることを示唆している。

Fig. 6は，粒子破砕量を破砕指数 $B_c=d'/d$ （ここに、d：試験前の有効径における通過率、d′:試験前の有効径における試験後の通過率）[2] で評価し，砕砂と石灰質砂について破砕指数と側圧の関係を示したものである。75μm 以下の増加量は砕砂の方が石灰質砂に比べて著しいが，粒径0.25mm（有効径 D_{10}に近い）の増加量は逆に石灰質砂の方が大きくなっている。

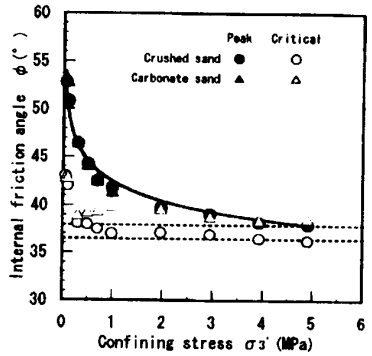

Fig. 8 Relasionship between internal friction angle and confining stress

考　察

Fig. 7は，応力-ひずみ関係を応力比 q/p′と軸ひずみε_1関係で示したものである。ここに，$q=(\sigma_1-\sigma_3)$:軸差応力，$p'=(\sigma'_1+2\sigma'_3)/3$: 平均有効応力である。これらはそれぞれの砂に対して，圧密降伏応力以下と以上の有効側圧に分けて示してある。

砕砂では圧密降伏応力に関係なく有効側圧5MPa の範囲内で q/p′-ε_1関係にピークがみられ，内部摩擦角はそれぞれの有効側圧でピークを示した後，限界状態の一定値に収束している。ピーク強度時の内部摩擦角は低い有効側圧では小さい軸ひずみで発現するが，有効側圧の増加に伴って発現するまでのひずみは増大している。

石灰質砂では圧密降伏応力よりも低い有効側圧で q/p′-ε_1関係にピークが生じ，ピーク時の内部摩擦角の発現に要するひずみは有効側圧の増加に伴って増大している。一方，圧密降伏応力より高い有効側圧では q/p′-ε_1関係にピークがみられず，内部摩擦角は限界状態に至って始めて発現されている。

限界状態の応力比 q/p′は砕砂よりも石灰質砂の方がわずかに大きいが，それに至るまでの内部摩擦角の発現に差がみられ，石灰質砂に比べて砕砂の方がより小さな軸ひずみレベルで発現している。

Fig. 8は，内部摩擦角と側圧の関係を砕砂および石灰質砂について示したものである。ここに，内部摩擦角φは，q/p′=(6sinφ) / (3-sinφ) の関係から求めた[3]。

砕砂では，圧密降伏応力以下の応力域におけるピーク強度時の内部摩擦角ϕ_dは，側圧の増加に伴って53°から41°まで急激に減少している。降伏応力以上の応力域では側圧の増加に伴う内部摩擦角の減少はわずかであり
ϕ_dは38°まで徐々に減少している。一方，限界状態の内部摩擦角ϕ_{cv}は側圧にかかわらずほぼ36.5°で一定している。

石灰質砂では，砕砂同様にピーク強度時の内部摩擦角ϕ_dは降伏応力以下の応力域では側圧の増加とともに減少しているが，降伏応力以上ではϕ_dの減少量はわずかである。一方，限界状態の内部摩擦角ϕ_{cv}は38°であり，砕砂に比べてわずかに大きい。

Fig. 9は，ピーク強度時のダイレイタンシー係数 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$と側圧の関係を示したものである。砕砂では側圧の増加に伴ってダイレイタンシーは減少し，その後側圧の増加にかかわらずダイレイタンシーはほぼ一定を示している。一方，石灰質砂では側圧の増加に伴ってダイレイタンシーは急激に減少し，しかもそれ以上の側圧に対しても減少を示している。このことは，砕砂では，粒子破砕がある程度進行すると，ダイレイタンシー挙動はほぼ一定となるが，石灰質砂では，粒子破砕の進行とともにダイレイタンシーは減少傾向にあることを示している。

Fig. 10は，p′—q 関係を砕砂と石灰質砂についてそれぞれ示したものである。また，圧密降伏応力以下の応力域については p′—q 関係を拡大し Fig. 11に示し

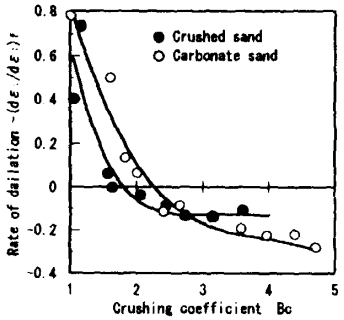

Fig. 9 Relationship between rate of dailation at failure and crushing coefficient

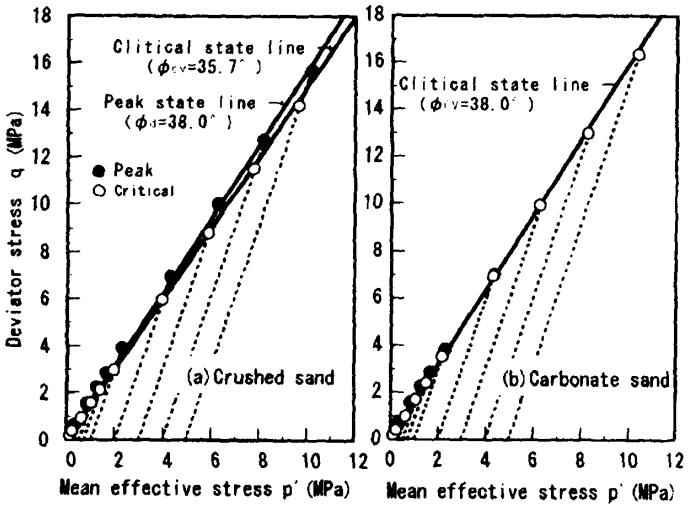

Fig. 10 Filure line

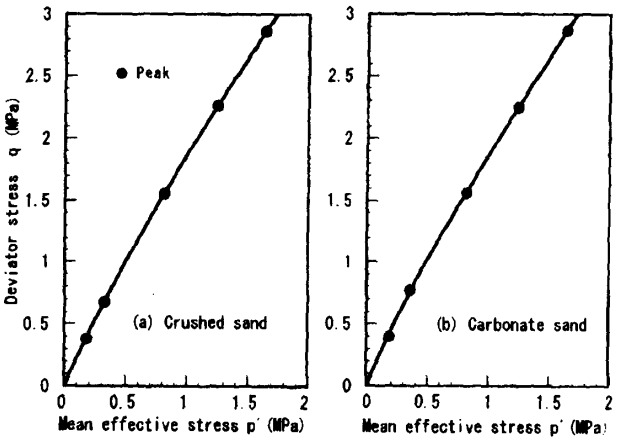

Fig. 11 Failure envelopment ($\sigma_3' \leqq 0.686$MPa)

た。Fig11では，側圧の増加に伴ってピーク強度時の内部摩擦角ϕ_dが減少することから分かるように，破壊包絡線は非線形となる。一方，Fig. 10に示すように圧密降伏応力以上の応力域においては，砕砂の内部摩擦角ϕ_dは38°（c_d=0）を，限界状態の内部摩擦角ϕ_{cv}は35.7°（c′=0）を示している。降伏応力以上の応力域での石灰質砂の内部摩擦角は，顕著なひずみ硬化を示すことから，ピーク時と限界状態とでは同じとなり，その値はϕ_{cv}=38°（c′=0）である。

Fig. 12は，圧密終了時およびせん断終了時の間隙比 e と平均有効応力 p′の関係を示したものである。砕砂と石灰質砂ではいずれにおいてもせん断終了時の e-logp′関係には線形関係が認められ，それらの傾きは砕砂と石灰質砂に対してそれぞれ0.13と0.22となっている。一方，砕砂と石灰質砂それぞれにおいて圧密終了時の e-logp′関係は実験の応力範囲では非線形を示しているが，より広範な応力域での e-logp′関係は線形性を示すことが推測され，その傾きはせん断終了時の e-logp′関係の傾きに一致している。

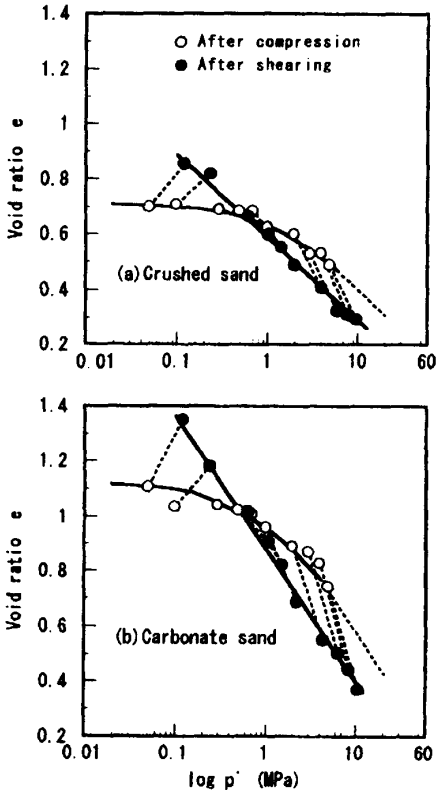

Fig. 12 Relationship between void ratio of after shearing and mean effective stress

摘　要

琉球石灰岩の砕砂とさんご礁の石灰質砂について三軸圧縮試験を行いせん断特性を比較検討した。主な結果は次のようである。

(1) 等方圧密試験による圧密降伏応力は砕砂で0.88MPa，石灰質砂で0.74MPa であり，砕砂の圧縮性は石灰質砂に比べて小さい。

(2) せん断に伴う粒子破砕は砕砂では石灰質砂に比べて75μm 以下の細粒分の増加が著しい。

(3) 砕砂では内部摩擦角ϕ_dは小さなひずみレベルで発現される。

(4) 一方，30%以上の大きな軸ひずみレベルにおける限界状態の内部摩擦角ϕ_{cv}は砕砂で35.7°，石灰質砂で38°である。

(5) せん断終了時の e-logp′関係は線形関係にあり，その傾きは砕砂の方が石灰質砂より小さい。このことは石灰質砂では粒子破砕に伴う強度増加の影響が大きいことを示唆している。

参 考 文 献

1. Tsuchida, T. and Kobayashi, M : Engineering properties of coral soils in Japanese south western islands, Engineering for Calcareous Sediments, Vol. 1,137-144,1988
2. 新城俊也：さんご石灰質砂の粒子破砕の表示，琉球大学農学部学術報告（38），175−182，1991
3. 地盤工学会：土の強さと地盤の破壊入門，142-143，1998.