

琉球大学学術リポジトリ

さんご石灰質砂の粒子破碎の表示(生産環境学科)

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/20.500.12000/3835

さんご石灰質砂の粒子破碎の表示

新城俊也*・宮城調勝*・小宮康明*・島袋 進**

Toshiya SHINJO, Norikatsu MIYAGI, Yasuaki KOMIYA and
Susumu SHIMABUKURO : Measures for particle breakage of
coral calcareous sands

Summary

In order to understand the mechanical behaviour of coral calcareous sands under shear and compressive stress, it is necessary to adopt the measuring method which express adequately the degree to which particles of sand are crushed. Various indices for particle breakage proposed by investigators were utilized to evaluate the amount of particle breakage developed under confined compressive tests for sands. According to comparison of the difference in methodes it was found that a useful index would be the ratio of percentage of particles of sand after test finer than D_{10} of original sand to percentage of particles of original sand finer D_{10} of original sand, B_c . For the sands from different sites, there appeared to be a unique relationship between B_c and stress ratio, applied stress divided by compressive yield stress.

緒 言

さんご礁に堆積している砂や礫は、さんご、有孔虫、貝などのさんご礁に棲息する石灰質の殻や骨格を有する生物の遺骸およびそれらの破片である。これらの砂礫は生物を起源としているので石英質のものに比べて比較的軟質で、粒子に破碎が生じやすい。したがって、これらの砂礫層を構造物の支持層とする場合、粒子破碎に伴って砂礫層の体積は収縮し、ダイレイタンスー特性も変化するので、これらの挙動は支持力機構にも影響を及ぼし、その結果粒子破碎は杭の先端支持力低下と沈下の増大、あるいは周面摩擦の低下などの原因となる。このように粒子破碎に伴って強度、変形などの砂礫の力学挙動が変化するので、粒子に破碎が生じやすい砂礫層での支持力の評価には、粒子破碎の程度を適切に評価できる尺度を用いて力学特性を検討する必要がある。

粒子破碎の程度を表示する指標は多くの研究者によって考案されている²⁾。これらの指標はいずれの指標を用いても対象とする土の粒子破碎の程度を表示できると考えられるが、指標の適用に際しては指標相互の関係を事前に把握しておくことは便利なことが多い。しかしながら個々の指標間での関係は、粒子破碎の程度を一つの状態に限定した場合は関連性を容易に推測できるが、粒子破碎の程度が大きく

*琉球大学農学部農業工学科、**沖縄県農林水産部

変化すると、それに伴う指標間の相対的变化を把握することが困難なことが多い。また、類似の鉱物組成の土であっても粒度等の土の状態が異なると、指標によっては圧縮応力や剪断応力などの粒子破碎要因と粒子破碎の程度との関係を個々の状態に対して表現できても統一的に表現できないことがある。したがって、指標間の比較を行いそれらの相互関係を把握し、またそれらが土の状態に関係なくどの程度力学挙動を統一的に表示できるかを調べる必要がある。

本研究は、拘束一次元圧縮によって粒子破碎を生じた石灰質砂に多くの研究者によって提案された粒子破碎の指標のいくつかを適用し、これら指標の相互関係を調べるとともに力学挙動の表現に適切な指標について検討を行う。

粒子破碎の表示法および実験

1 粒子破碎の表示

粒子破碎の程度は破碎前後の粒度変化に基づいて検討されており、これらの提案された指標は、粒径加積曲線上の点の移動に基づくもの、粒径加積曲線によって囲まれる面積に基づくもの、粒子表面積に基づくもの、などに大別される。ここでは次に示す指標を用いた (Fig.1)。

- (1) 粒子破碎前後の75 μm ふるい通過量の差： F'

破碎前の粒径が75 μm より大きい場合破碎後の75 μm ふるい通過量で定義する。 F' の値は0-100%の範囲にある。

- (2) 15%通過率に対応する粒子破碎前後の粒径の比⁵⁾： $B_D = D'_{15}/D_{15}$

B_D は破碎後の15%通過径 D'_{15} と破碎前の15%通過径 D_{15} の比であり、0-1の値で表示される。標準ふるいによるふるい分けでは75 μm ふるい通過量が15%以上の場合は $D_{15} = 75\mu\text{m}$ とする。

- (3) 粒子破碎前の10%の通過径 (D_{10}) における粒子破碎前後の通過率比¹⁾： $B_C = p'/p$

破碎前の通過率 $p = 10\%$ とそのときの粒径 D_{10} における破碎後の通過率 p' の比であり、1以上の値で表示される。石灰質砂の粒子破碎程度の尺度として用いられる。

- (4) Marsalの粒子破碎率³⁾： B_M

B_M は粒子破碎前後の粒径加積曲線間の最大通過率幅に等しい。

- (5) 粒子破碎前後の粒径加積曲線の囲む面積比³⁾： $B_R = A/(A+B)$

B_R は、粒子破碎前後の粒径加積曲線および75 μm ふるい径で囲まれる面積 A を尺度とするが、破碎前の粒径加積曲線によって形成される基準面積 ($A+B$) で除して図の大きさの影響を取り除いて破碎率としている。1以下の値で表示される。

- (6) 粒子破碎前後の比表面積の差⁷⁾： ΔS

比表面積 S (cm^2) は、粒径75 μm 以上の粒子については各粒径ごとにその平均粒径の粒子を球形とみなし計算で求め、粒径75 μm 以下については空気透過法で測定して求めた。

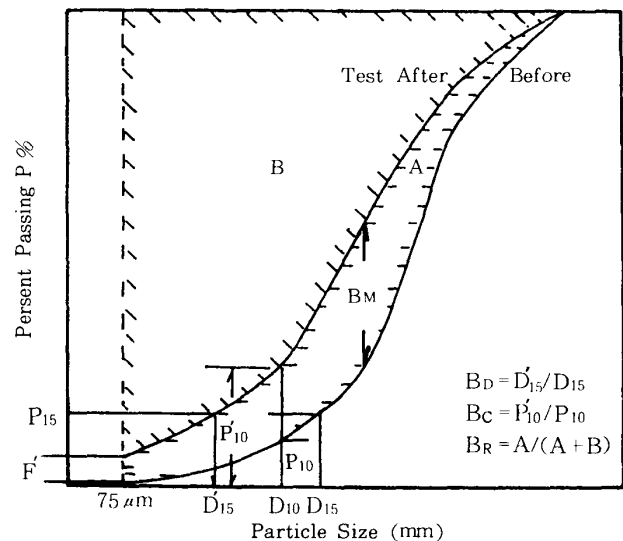


Fig.1 Measures of particle breakage

2 粒子破碎試験および結果

さんご砂の一次元圧縮試験と試験前後のふるい分け試験結果を利用して各指標による粒子破碎の評価を行った。

試料はさんご礁に分布する海底砂C並びに海浜砂KとMの3種類である。2 mmふるい通過試料の物理的性質と粒度分布をTable 1とFig.2に示す⁹⁾。

Table 1 Soil properties

Soil type		Chiibishi	Kurima	Maehama
Denoted		C	K	M
Specific Gravity	G_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
Internal 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

試験条件はTable 2に要約してある。圧縮試験は高圧一次元圧密試験装置⁸⁾を用いて実施した。シリーズIとIIIは最大圧縮圧力640kgf/cm²まで載荷可能な内径33mm、高さ20mmの圧密リングを使用し、シリーズIIは最大圧縮圧力180kgf/cm²まで載荷可能な内径60mm、高さ20mmの圧密リングを使用した。密度は、相対密度が緩詰め、中詰め、密詰めになるように準備した。シリーズIでは圧縮圧力と粒子破碎程度との関係を調べるため、1 kgf/cm²から640kgf/cm²までの所定の圧縮圧力を作用させた。一方シリーズIIでは120kgf/cm²、シリーズIIIでは640kgf/cm²の圧縮圧力を作用させている。なお、各シリーズとも所定の圧縮圧力まで一定の時間間隔で段階的に載荷した。

砂の初期粒度は代表的試料について行ったふるい分け試験の結果から決定した。試験後はその都度ふるい分け試験を行った。

Fig.3はそれぞれの砂の圧縮試験後の粒度変化を示したものである。いずれの試料においても圧縮圧力が増加すると粒子破碎に伴って細粒化することが分かる。また、同じ圧縮圧力のもとでは密詰めより緩詰め状態の方が細粒化しており、粒子破碎の程度は密度の影響を受けることが分かる。

Fig.4は、160kgf/cm²以上の圧縮圧力の作用のもとで粒子破碎が生じた砂の75 μ mふるい通過試料について、空気透過法で比表面積を測定した結果の例を、圧縮圧力との関係で示したものである。圧縮圧力の大きさに関係なく比表面積は一定値を示しており、75 μ m以下に細粒化した粒子では圧縮圧力が増加し

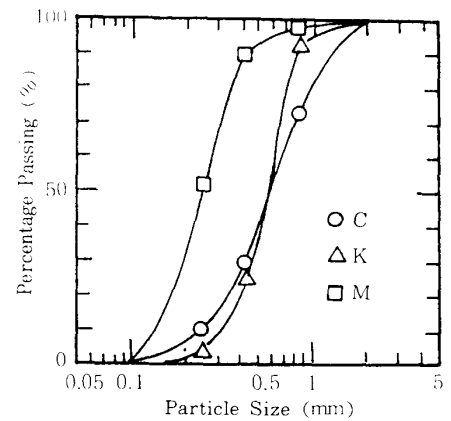


Fig.2 Particle size distribution of sands

でもさらに粒子破碎が促進されることはないようである。細かい粒子の破碎には大きな圧縮圧力を必要とすることが指摘されており³⁾、100kgf/cm²のオーダの圧縮圧力のもとでは粒径75μmより粗い粒子において粒子破碎が顕著であることが示唆される。

Table 2 Tests carried out

Case	Density	Stress (kgf/cm ²)	Sand
I	Loose Dense }	1, 10, 20, 40, 80 160,240,320,640	C
II	Loose Medium Dense }	120	C, K, M
III	Loose Dense }	640	K, M

考 察

1 粒子破碎指標の相互関係

粒子破碎前後の粒径加積曲線に基づいて粒子破碎の程度を表示する指標を砂C, K, Mについて求めた。それぞれの砂について各指標を相互に比較した結果によると、Fig.5に例示する、F'とB_Mの関係に見られるように、指標の破碎程度を示す値は相互に対応しており、それぞれの指標は指標の相対的变化によ

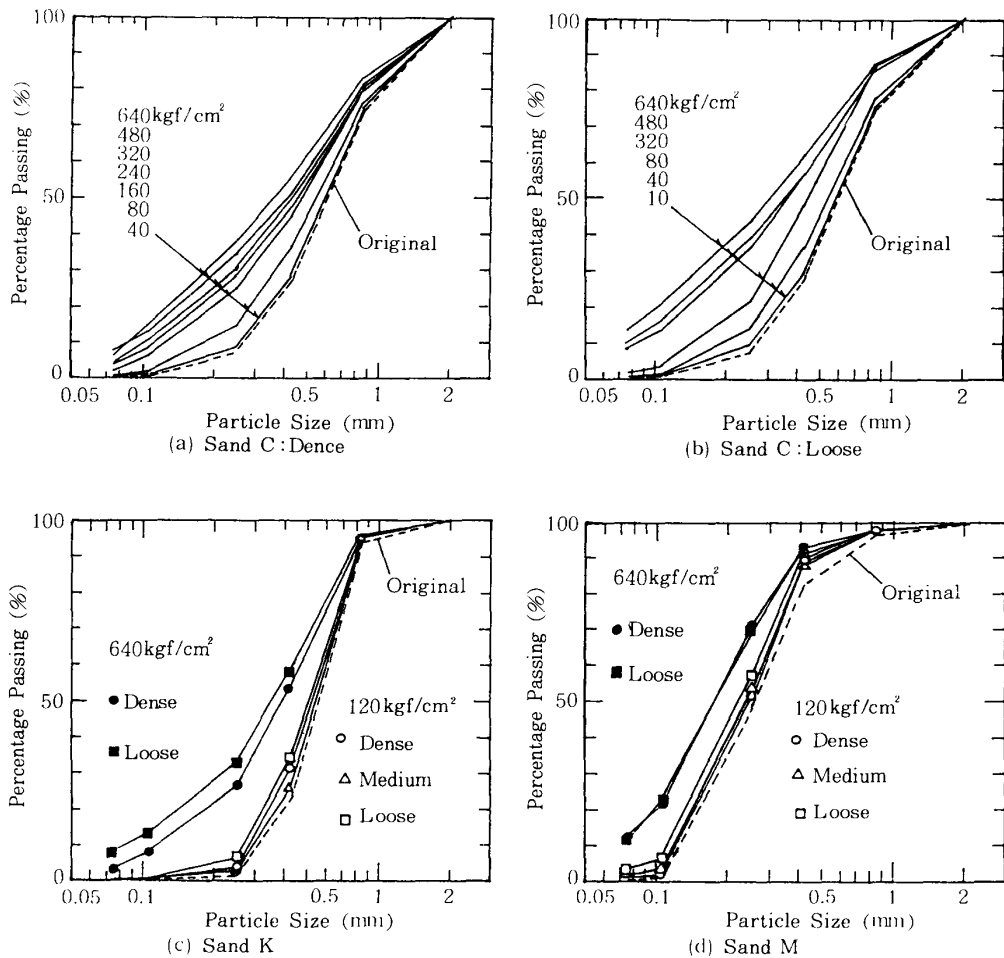


Fig.3 Particle breakage of coral sands in different stress levels

て粒子破碎の程度を表示することが可能である。このことより一つの砂に限定すると、その砂の粒子破碎に及ぼす圧縮応力や剪断応力などの影響をそれぞれの指標を用いて定性的に示すことができると考えられる。

ここでは、粒子破碎に伴う指標の相対的変化がさんご砂に対して分布場所や粒度の違いに関係なく指標間でどの程度対応するかを検討する。Fig.6は B_C に対する他の指標の対応関係を示したものである。指標の相対的変化の対応関係はタイプとして、(A) 砂(粒度)に関係しない指標($B_M - B_C$)、(B) 砂CとKのように類似した粒度に対して対応が同じ指標($B_D - B_C, B_R - B_C$)、(C) 砂ごとに対応する指標($F' - B_C, \Delta S - B_C$)、であり、またそれぞれの対応関係は線形関係と非線形関係に分けられる。

F' 、 B_D 、 B_M 、 B_C は同じ粒径加積曲線上の移動を尺度とする指標であるが、指標相互の対応関係が異なっている。 F' と B_C は砂ごとに対応する非線形関係、 B_D と B_C は類似の粒度に対して対応が同じである非線形関係をそれぞれ示している。 B_M と B_C は、粒子破碎の程度が小さいときはバラツキが見られるが、破碎程度が大きい領域での砂に関係しない対応を考慮すると、粒度に関係することなく対応しており、しかも線形関係にあるとみなすことができる。 B_M と B_C は規定された粒径における粒子破碎前後の通過率の差あるいは比率であって、尺度としては同じであり、しかもさんご砂では規定した粒径が接近していることが良好な対応関係をもたらしたと考えられる。なお、 F' と B_D の関係は非線形の(B)タイプであり、 F' と B_M 関係および B_D と B_M 関係はそれぞれ F' と B_C の関係、 B_D と B_C の関係と類似の対応関係にあった。

Fig.7は B_M と B_C の関係以外に指標の相対的変化が粒度に関係なく対応する場合の指標相互の関係を示したものである。指標 F' 、 ΔS 、 B_R は、それぞれ粒径加積曲線上の移動、粒子破碎前後の比表面積の差、粒子破碎前後の粒径加積曲線で囲まれる面積のように定義した基準が異なるが、線形と非線形の違いはあるものの、指標相互に粒度に関係しない対応関係が存在している。また、 F' と ΔS は線形関係にあるので ΔS と B_R は F' と B_R の関数に類似している。細粒分を含む砂の比表面積は粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の細粒子に比べてそれ以上の粒径の粒子が占める割合が著しく小さいので、比表面積の値は $75\mu\text{m}$ ふるい通過量に支配される。また、 F' が増加すると、Fig.3に示したように粒子破碎前後の粒径加積曲線で囲まれる面積が増加することから、 B_R も F' に支配されることが分かる。これらのことより F' 、 ΔS 、 B_R は尺度としての定義は異なるが、 F' を介して互いに関連があり、内容的には同じ特性を持つ指標とみなせる。なお、 ΔS と B_D の関係および ΔS と B_M の関係はそれぞれ F' と B_D の関係、 F' と B_M の関数に類似している。また、 ΔS と B_M の関係はFig.5に例示した F' と B_M の関数に類似している。

以上のことよりさんご砂に対し、 F' 、 ΔS 、 B_R の各指標間に、同様に B_M 、 B_C 、間に砂(粒度)に関係しない粒子破碎に伴う指標の相対的変化の対応が見られる。しかしながら、同じ粒径加積曲線上の移動を尺度とする F' と B_M あるいは B_C とは砂ごとに対応し、尺度としての特性を異にしている。

ところで、石井⁴⁾はMarsalの粒子破碎率 B_M を修正し、全粒子に対する破碎粒子の比率として物理的

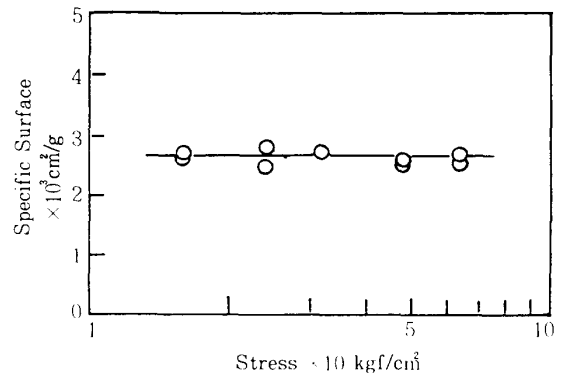


Fig.4 Effect of stress levels on specific surface of coral sands finer than $75\mu\text{m}$.

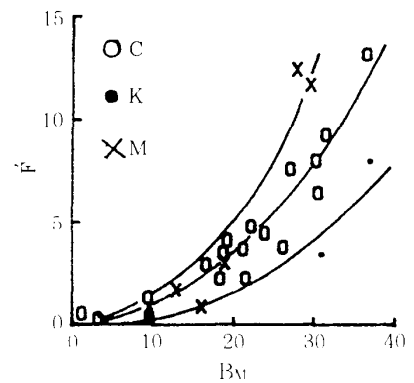


Fig.5 F' versus B_M

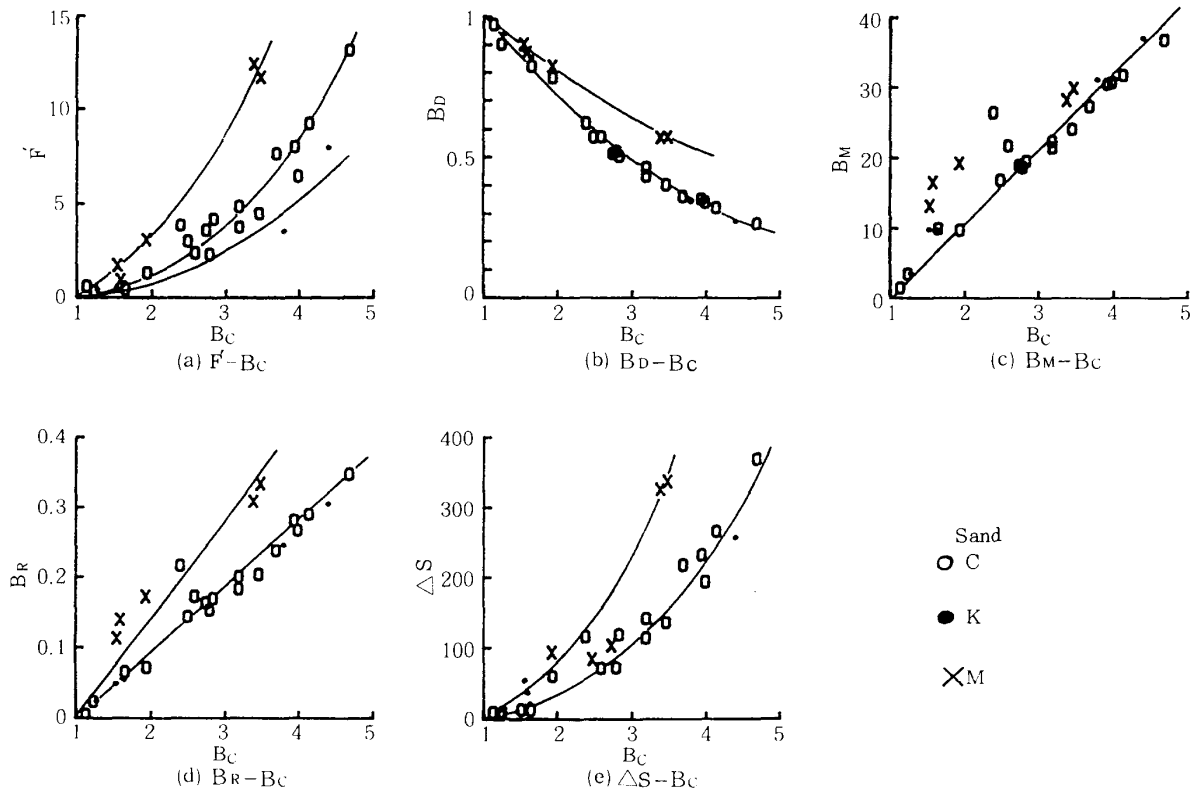


Fig.6 Variation of various indices for particle breakage with increase in B_C

意義を持つ、修正破砕率 B_M^* を提案している。Fig.8はさんご砂に対する B_M^* と B_M を比較したものである。破砕程度が小さい範囲では両者は一致し、破砕程度が大きい領域では B_M の方が B_M^* より大きくなる傾向にあるが、両者はほぼ同じ値を示している。Fig.9は B_M^* と B_C の関係を示したものであり、これらの関係はFig.6の B_M と B_C の関係と同じ対応関係にある。

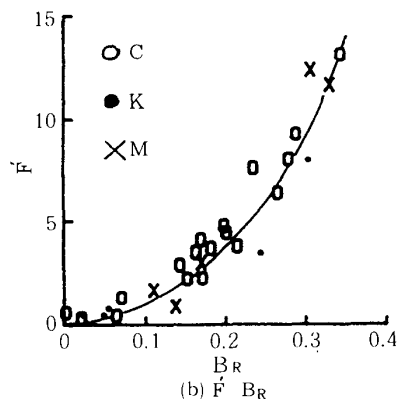
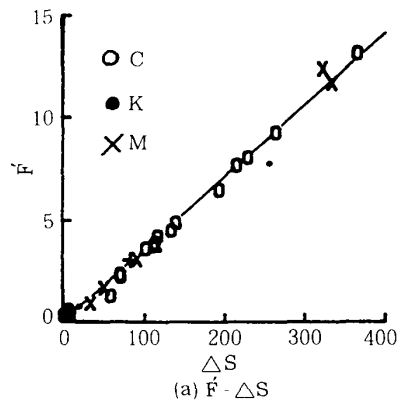


Fig.7 Comparison of F' , ΔS and B_R

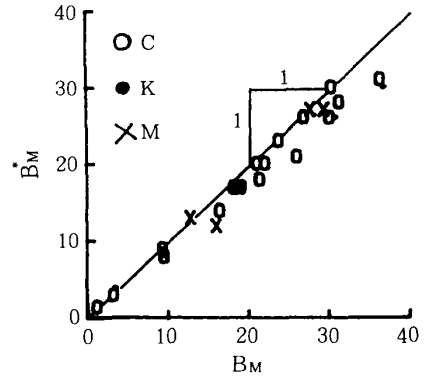


Fig.8 B_M^* versus B_M

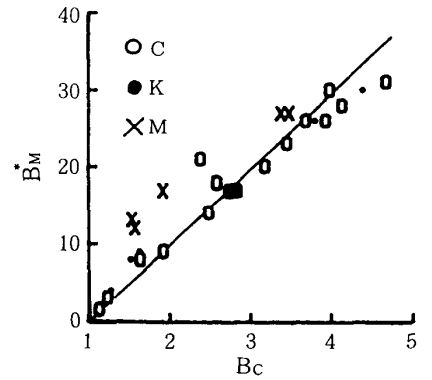


Fig.9 B_M^* versus B_C

2 粒子破碎におよぼす圧縮圧力の影響

粒子破碎の程度を表す指標を用いてさんご砂の圧縮沈下挙動の評価を試みる。Fig.10は圧縮圧力を段階的に640kgf/cm²まで作用させたときのe-log p関係を示している。圧縮圧力の増加に伴って降伏現象が認められ、それに伴って空隙比が減少する。粒状土では圧縮降伏圧力を境に粒子破碎が顕著となり、圧縮量も増加すると言われており、さんご砂においても圧縮性に及ぼす粒子破碎の影響が大きいことがわかる。一方、同じ圧縮圧力に対する圧縮量は初期密度が小さいほど大きく、またFig.3に示したように粒子破碎は密度が小さいほど顕著であり、圧縮量と粒子破碎は初期密度の影響を受けている。そこで、粒子破碎の程度と圧縮圧力の関係には初期密度が影響するのでその影響を除くため、粘性土の場合と同様にキャサグランデ法で圧縮降伏圧力 P_y を求め、これで作用圧力 p を正規化し、圧縮圧力と粒子破碎の関係を検討した。

各砂についてそれぞれの指標による粒子破碎の程度と応力比の関係を調べた結果によると、応力比の増加に伴う破碎程度の増加傾向はそれぞれの指標で表示できることが認められた。それらの指標のうち、指標の相対的变化が砂（粒度）に関係なく相互に対応する指標 F' 、 ΔS 、 B_R から F' を、また B_M 、 B_C から B_C をそれぞれ選び、それらの応力比との関係をFig.11に比較して示す。指標 F' と B_C は両方とも圧縮圧力の増加すなわち応力比 P/P_y の増加に伴って粒子破碎が増加する傾向を適切に表現している。粒子破碎に伴う F' の増加傾向は個々の砂に対してみられる。これに比べて B_C は砂に関係なく応力比とともに増加しており、応力比に対して同じ尺度でさんご砂の粒子破碎の程度を評価できる。すなわち、指標 B_C を用いてさんご砂の粒子破碎に及ぼす圧力の影響を統一的に説明できる。なお、 B_C は1より大きな値をとるので、その値が1のときの応力比はおよそ0.5であるので、圧縮圧力が降伏応力の約50%の大きさに増加すると粒子破碎が発生することが推察できる。

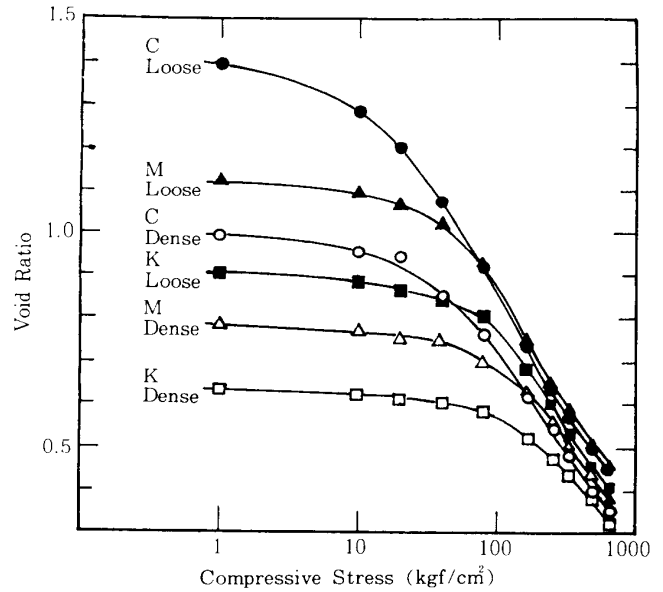


Fig.10 e-log p relations

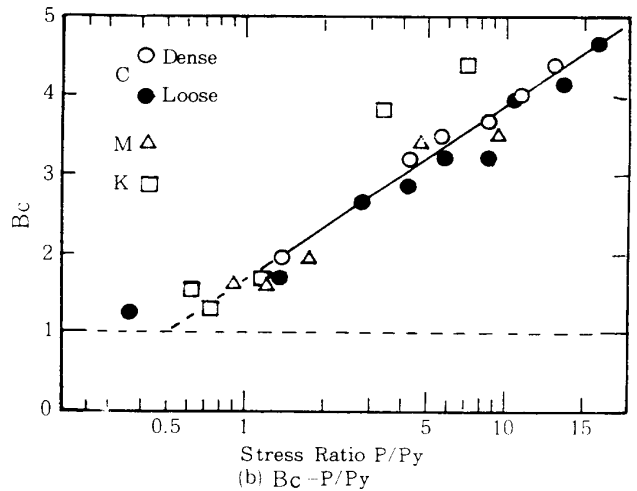
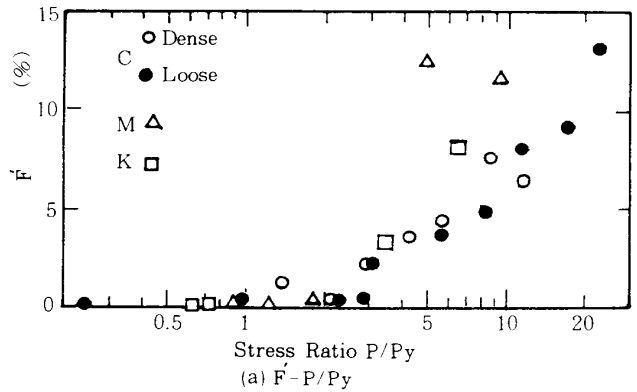


Fig.11 Relationship between indices for particle breakage and stress ratio (P_y : compressive yield stress)

摘 要

一次元圧縮下で粒子破碎が生じたさんご砂に対して多くの研究者によって提案された粒子破碎の程度の尺度となる指標を適用し、指標の相対的変化を相互に比較し、またそれらの破碎率と圧縮応力の関係を検討した。結果を要約すると以下のものである。

- (1) 指標間の相互関係は、指標の相対的変化が指標間で、さんご砂の種類や粒度の違いに関係なく対応する場合、類似した粒度のさんご砂に対して対応する場合、砂ごとに別々に対応する場合の3グループに分けられる。
- (2) さんご砂に対し、 F' 、 ΔS 、 B_R 間で、また B_M 、 B_C 間でそれぞれ砂の種類や粒度に関係しない指標の相対的変化の対応が見られる。
- (3) しかしながら、 F' 、 B_M 、 B_C は破碎前後の粒径加積曲線上の移動に基づく同様の尺度の指標にも係わらず F' と B_M あるいは F' と B_C の関係は砂ごとに別々に対応している。
- (4) さんご砂では石井の修正破碎率 B_M はMarsalの破碎率 B_M とほぼ一致しており、砂の種類や粒度に関わりなく B_C の相対的変化は B_M のそれと対応する。
- (5) 圧縮圧力の増加に伴う個々の砂の粒子破碎の程度の増加傾向はいずれの指標を用いても表示が可能である。
- (6) このうち B_C はさんご砂や粒度に係わりなく圧縮圧力をそれぞれの砂の圧縮降伏圧力で正規化した応力比とともに増加するので、圧縮圧力によるそれぞれのさんご砂の粒子破碎の程度は応力比を介して同じ尺度の B_C を用いて評価が可能である。

参考文献

1. Datta, M. et al : Engineering behavior of carbonate soils of India and some observations on classification of such soils, Geotechnical Properties, Behavior and Performance of Calcareous Soils. ASTM. S.T.P.777, p.113-140, 1981
2. 福本武明：粒子破碎の程度を示す指標、土と基礎、29(12)：64-65, 1981
3. Hardin, B.O. : Crushing of soil particles, Journal of Geotechnical Engineering, 111 : 1177-1192, 1985
4. 石井武美：粒子破碎の表示尺度のもつ物理的意義、土質工学会論文報告集、29(4)：155-164, 1989
5. Lee, K.L., Farhoomand, I.: Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression, Canadian Geotechnical Journal, 4:68-86, 1967
6. Marsal, R.J.: Discussion of shear strength, Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, 310-316, 1965
7. 三浦哲彦、山内豊聡：砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響、土木学会論文報告集、260:109-118, 1977
8. 新城俊也、小宮康明：第三紀層泥岩の高圧圧密特性、土と基礎、32(2):11-16, 1984
9. _____、宮城調勝、_____、島袋進：さんご礁石灰質砂のせん断特性、琉大農学報、37:183-190, 1990