



琉球大学学術リポジトリ

University of the Ryukyus Repository

Title	広範な応力下における一次元圧縮による石灰質砂の粒子 破砕
Author(s)	新城, 俊也; 島川, 真由美
Citation	琉球大学農学部学術報告 = The Science Bulletin of the Faculty of Agriculture. University of the Ryukyus(45): 141-148
Issue Date	1998-12-01
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/3687
Rights	

広範な応力下における一次元圧縮による石灰質砂の粒子破碎

新城俊也*・島川真由美**

Toshiya SHINJO and Mayumi SHIMAKAWA: Particle breakage of calcareous sands under vertical stress in one-dimensional compression

キーワード：粒子破碎，石灰質砂，一次元圧縮試験

Key words : Particle breakage, Calcareous sand, One-dimensional compressive test

Summary

A series of one-dimensional compressive tests has been performed on skeletal calcareous sands in order to investigate a degree of particle breakage under compressive stress. The tests were carried out on dried and saturated samples in each sand up to vertical stresses of 50MPa. The amount of particle breakage is evaluated with the index B_c defined as the ratio of percentage of particles of sand after test finer than D_{10} of original sand to percentage of particles finer than D_{10} of original sand. The compressibility of sand is measured by the compression index C_c calculated as the mean slope of the void ratio $-log(\text{vertical stress})$ curve for each increment of vertical stress. Test results show that there is little effect of saturation on particle crushing and compression of sands. According to the change of gradation curves with applied stress, it is found that the ratio of the increasing in the amount of particle breakage to the increasing in applied stress is decreased with the increasing in fine grain content finer than 0.075mm due to particle crushing. The value of C_c is rapidly increases with the increasing in B_c . It is concluded that the compression is mainly due to the breakage of particle under a wide range of vertical applied stress.

緒言

近年、沖縄地方では離島振興に関連して離島架橋が計画実施されており、さんご礁海域に大型基礎を設置する事例が増えている。さんご礁海域には、さんご礁に棲息するさんご、有孔虫、貝などの石灰質

*琉球大学農学部生産環境学科， **沖縄総合事務局農林水産部
琉球大学農学部学術報告 45 : 141~148 (1998)

骨格を有する生物の遺骸およびそれらの破片が堆積し、石灰質の砂礫からなる海底地盤を形成している。これらの堆積物を構成する砂や礫は軟質で多孔質、アンギュラーな形状に起因して粒子破碎を生じやすく、地盤としても破碎性が顕著である。構造物の杭基礎ではその先端に10MPa以上の大きい圧力が発生する事が報告されており、破碎性地盤あるいは高圧域までの広範囲の応力下にある地盤では、粒子破碎に伴って沈下の増大と支持力の低下が問題となる。そのため破碎性地盤における基礎の設計では粒子破碎に伴う圧縮性を考慮することが重要となる。

本研究では、砂礫層の圧縮性に及ぼす粒子破碎の影響を把握する事を目的として、さんご礁の石灰質砂について圧縮応力50MPaまでの一次元圧縮試験を実施し、高応力下での砂の粒子破碎の程度および圧縮性及ぼす粒子破碎の影響について検討した。

試 料

さんご礁海域の海底から採取した2種類の石灰質さんご砂(砂Aと砂B)を実験に使用した。

砂Aは石垣港の海底から採取したものであり、粒径50~100mmのさんご片を含むが、粒径2mm以下を90%以上、粒径0.075mm以下の細粒分を30%以上含む細粒分の多い砂である。実験には2mmふるい通過試料を用いた。

砂B是那覇の沖合いに位置する慶伊干瀬付近の浅海から採取したものであり、建設用の細骨材として市販されている砂を利用した。この砂は粒径0.075mm以下の細粒分をほとんど含まない粗粒な砂であり、実験には0.85mmふるい通過試料を用いた。

Fig.1に砂A, Bの実験試料の粒度分布を示す。砂Bは粗粒な砂であり、一方砂Aは細粒分を含んでいる。Table 1に物理諸量としてそれぞれの砂の土粒子の密度、最大間隙比、最小間隙比、炭酸カルシウム量を示した。いずれの砂も炭酸カルシウム含有量は90%以上であり、石灰質の殻で形成されていることが推察される。

Table 1 Soil properties

Soil location Denoted	Ishigaki port Sand A	Chibishi Sand B
Soil density ρ_s (g/cm^3)	2.77	2.77
Maximum void ratio e_{max}	1.06	1.53
Minimum void ratio e_{min}	0.73	0.98
Carbonate content (%)	92	98

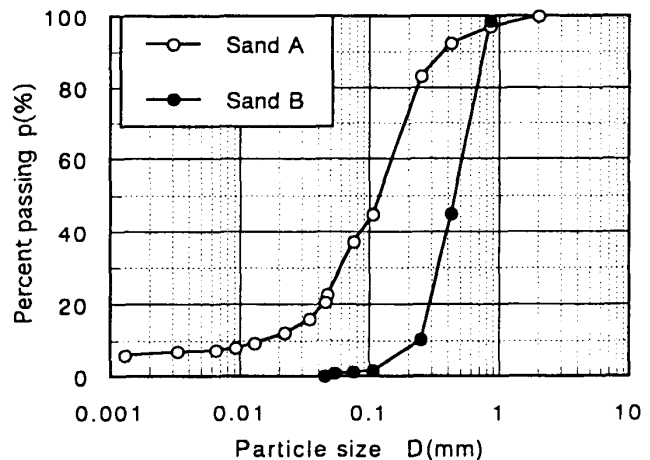


Fig.1 Grading curves for two sands tested

実験方法

1 試験装置

実験には高圧用の一次元圧密装置を用いた¹⁾。圧密装置は固定リング型であり、リングは厚肉のステンレス製で、寸法は内径33mm、高さ20mmである。加圧板には偏心を避けるためにガイド機構を有するピストンが取り付けられており、上載荷重はピストンを介して載荷板に作用させる。載荷装置はエアシリンダーを利用して荷重を発生させることが可能であり、エアシリンダーの空気圧を調整することにより所定の上載荷重を作用させた。

2 供試体の作成

供試体の作成は乾燥状態で行った。砂Aはタッピング法で作成し、試料約10gをリングに3層に分け層ごとに直径約15mmの鉄棒で50回ずつ突いて詰めた。初期間隙比はおよそ $e_0=1.0$ である。砂Bは空中落下法で作成し、約50gを5mmふるい目のふるいを5枚を通して25cmの高さから落下させた。初期間隙比はおよそ $e_0=1.27$ である。

3 载荷試験

圧縮試験は乾燥状態と水浸状態の両方について行った。

载荷試験は、それぞれの砂に対して最大圧縮応力5, 10, 20, 30, 40, 50MPaまでの载荷-除荷の一次元圧縮試験を行った。载荷は所定の圧縮応力まで段階的に8段階で行い、各段階の载荷時間は5minである。除荷過程では4段階に分けて圧縮応力を除荷した。

水浸状態試験では乾燥状態で作成した供試体に圧縮応力0.354MPaを作用させ、その圧縮応力のもとで水浸させ、その後乾燥状態の場合と同様に载荷試験を行った。但し、水浸状態の場合は細粒化に伴う透水性の低下を考慮して各载荷段階の载荷時間を10minで実施した。

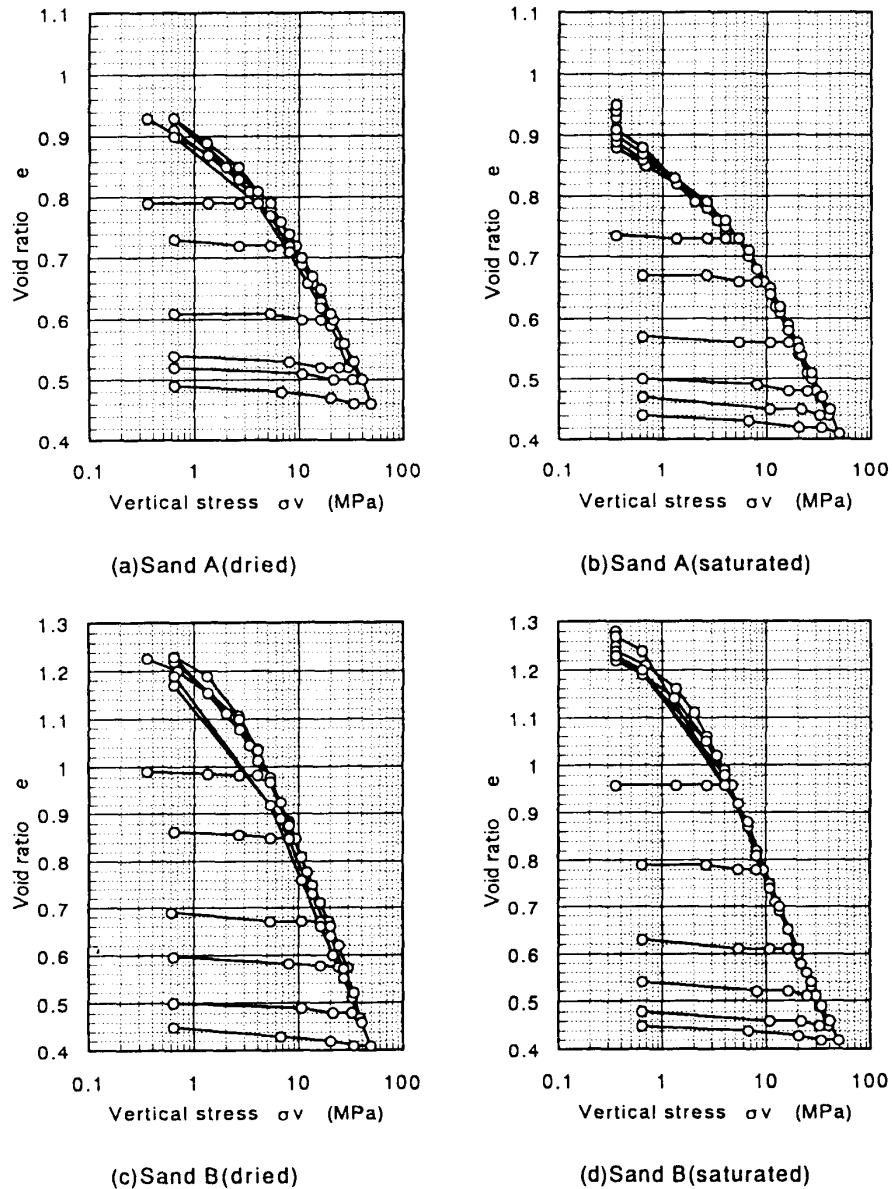


Fig.2 Test results (e - $\log \sigma_v$ relations)

4 粒子破碎量の測定

粒子破碎の程度を調べるために、除荷後粒度試験を行った。粒度試験は、粒径0.075mm以下の破碎の程度を調べるた、沈降分析法を行った。沈降分析試験後のふるい分けは、0.850mm, 0.425mm, 0.25mm, 0.106mm, 0.075mmふるいに加えて、0.045mmふるいも用いた。沈降分析試験では分散剤としてトリポリりん酸ナトリウムを1g/1000mlを使用し、また攪拌による粒子破碎を考慮し、攪拌装置による分散は省略した。

実験結果および考察

1 圧縮沈下関係

一次元圧縮試験結果は間隙比 e と圧縮応力 σ_v の関係で整理した。Fig.2に砂Aと砂Bに対してそれぞれの乾燥状態と水侵状態につて $e-\log \sigma_v$ 関係を示した。最大上載応力を個々に変化させて圧縮試験は最大圧縮応力ごとに実施しているが、それぞれの砂の $e-\log \sigma_v$ 関係は個々の供試体で一致している。 $e-\log \sigma_v$ 関係は比較的明瞭に降伏を示し圧縮応力の増加と共に間隙比が減少している。砂Aと砂Bの圧縮量を比較すると、 $\sigma_v=50\text{MPa}$ で両砂とも間隙比 $e=0.4$ 付近まで圧縮されているが、全体としての圧縮量は細粒分を含む砂Aよりも砂Bの方が大きい。また、それぞれの砂について乾燥状態と水侵状態の圧縮量を比較すると、砂Aにおいては水侵状態の場合水侵時に沈下が観測されるが、その後の圧縮応力の増加に伴う $e-\log \sigma_v$ 関係は乾燥状態の場合と同じであり、水侵時の間隙比の減少量だけ平行移動関係にあり、全間隙比の減少量は一致している。一方、砂Bにおいては水侵時の沈下はわずかであり、乾燥状態と水侵状態の $e-\log \sigma_v$ 関係は一致している。圧縮量に及ぼす水侵の影響はみられない。

圧縮降伏応力はキャサグランデ法により決定した。圧縮降伏応力 σ_y はいずれの砂においても乾燥状態と水侵状態で一致しており、それらの値は砂Aで $\sigma_y=4.8\text{MPa}$ 、砂Bで $\sigma_y=2.8\text{MPa}$ である。

2 圧縮性

圧縮応力レベルによる砂の圧縮性は圧縮指数で評価する。圧縮指数(C_c)は応力レベルに対して $e-\log \sigma_v$ 曲線の勾配として次式で求めた。

$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma_v \dots\dots\dots (1)$$

ここに Δe : 間隙比の変化, $\Delta \log \sigma_v$: 間隙比の変化に対応する鉛直応力の変化。

Fig. 3に圧縮応力とその応力レベルにおける圧縮指数(C_c)を示す。いずれの砂においても圧縮応力と圧縮指数の関係には乾燥状態と水侵状態に差が無く、圧縮指数に及ぼす水侵の影響はみられない。砂Aでは圧縮指数 C_c は低圧縮応力での0.1から圧縮降伏応力の $\sigma_v=5\text{MPa}$ 付近で0.3に急増し、その後圧縮応力の増加に伴って徐々に0.4まで増加し一定値となっている。一方、砂Bでは圧縮指数 C_c は圧縮降伏

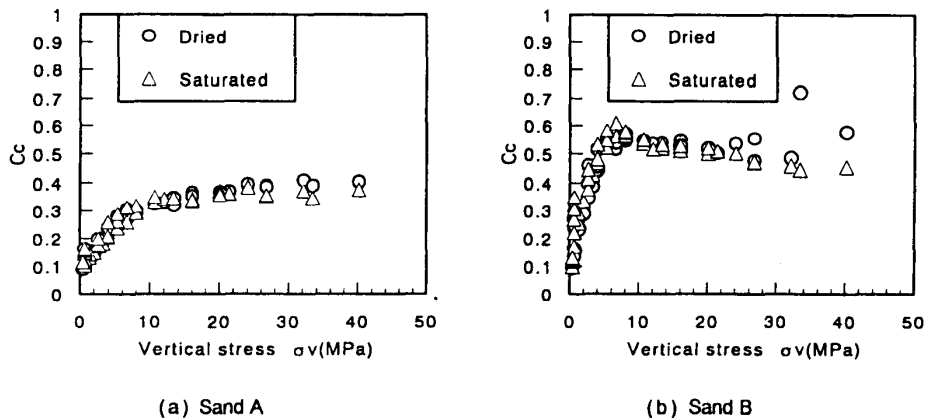


Fig.3 Variation of compression index with vertical stress

応力の $\sigma_v = 3\text{MPa}$ 付近で低圧縮応力の0.1から0.3まで急増した後、圧縮応力の増加に伴い0.5~0.6まで増加しその後減少傾向を示している。また、砂Bの方が砂Aよりも圧縮指数 C_c が大きいことから砂Bの方が圧縮性が顕著であることが分かる。

3 粒子破碎

Fig. 4は圧縮試験後に粒度試験を行いそれぞれの砂に対して最大圧縮応力の大きさによる粒度変化を示したものである。圧縮応力の増加に伴って細粒化することが分かる。細粒化の傾向は細粒分を含む砂Aよりも粗粒な砂Bにおいて著しい。また、いずれの砂においても乾燥状態と水浸状態では粒度変化に差がなく、粒子破碎に及ぼす水浸の影響はみられない。

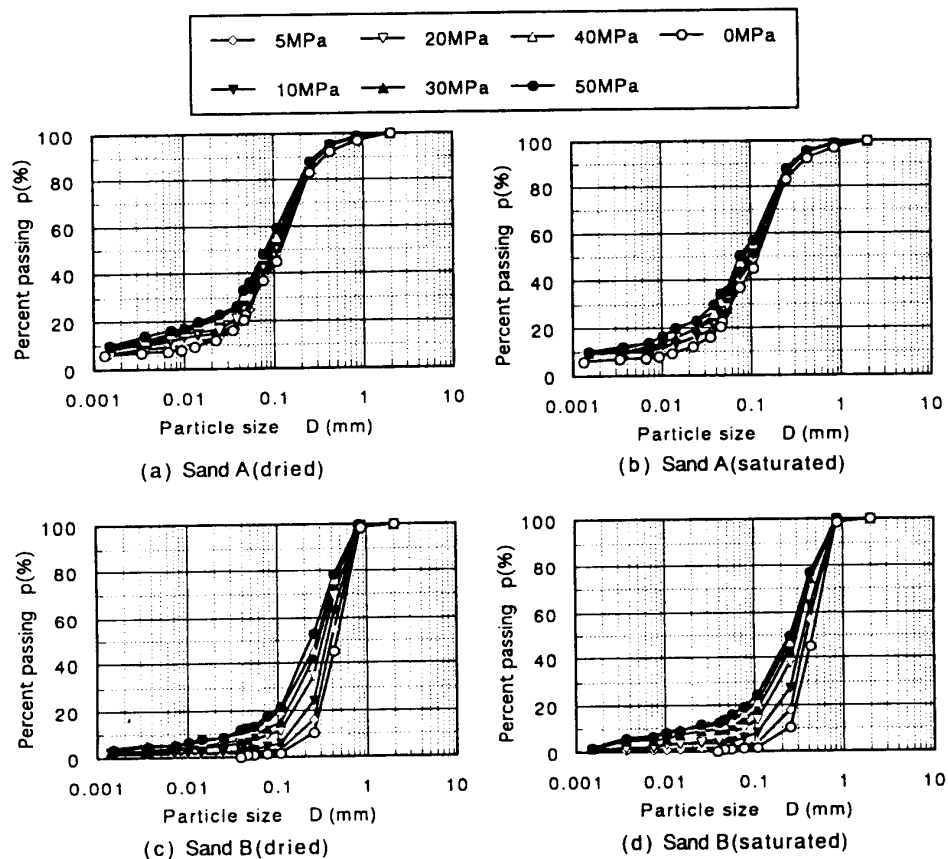


Fig.4 Particle breakage of coral sands in different stress levels

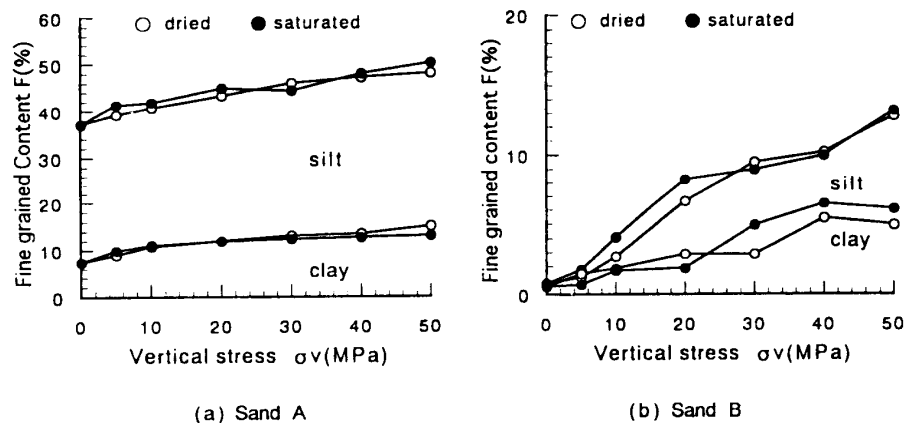


Fig.5 Variation of fine grain content with vertical stress

細粒化の傾向として、砂Aでは粒径0.105mm以上の粒子が減少し、それ以下の粒径の粒子が増加しており、また砂Bでは粒径0.25mm以上の粒子が減少し、それ以下の粒径の粒子が増加している。

Fig.5は粒径0.075mm以下の細粒分含有量Fと最大圧縮応力 σ_v の関係を示したものである。図中では、細粒分含有量Fはシルト分(粒径0.005mm~0.075mm)と粘土分(0.005mm以下)の和で示してある。細粒分含有量Fは圧縮応力の増加とともに増えるが、その増加傾向は圧縮降伏応力付近を境として著しく、その後の増加割合は徐々に緩やかである。また、圧縮応力の増加に対して粘土分含有量はほぼ一定であるが、シルト分含有量は増加傾向にある。このことは、粒子破砕量は圧縮応力の増加により単に増加を続けるのではなく、細粒部分の増加に伴って粒子破砕量の増加割合は低減することを示唆している。

4 粒子破砕量の評価

粒子破砕量の評価方法として、粒子破砕前後の粒度分布に基づいて、ここでは次に定義する破砕係数 $B_c^{2)}$ を用いる。

$$\text{破砕係数 } B_c = p' / p \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 p : 粒子破砕前の有効径 (D_{10}) における通過百分率 (10%), p' : 粒子破砕後の粒子破砕前の有効径 (D_{10}) における通過百分率。

この評価方法では破砕量の決定が容易である反面、細粒分を10%以上含む土質材料(例えば砂A)ではふるい分け試験のみを実施する場合破砕量を評価できない欠点がある。他に、粒子破砕量の評価にはMarsalの方法³⁾およびLeslieの方法⁴⁾がよく用いられる。Marsalの方法はふるい目ごとに破砕前と破砕後の残留率の差の正の部分の和として粒子破砕量 B_M で評価している。Leslieの方法はふるい目0.075mmあるいは粒子破砕前の最小ふるい目以下の粒径の細粒分含有量の増加量 ΔF で評価している。これら粒子破砕量の3手法はいずれもあるあるふるい目における粒子破砕前後の粒度分布曲線の差として粒子破砕量を評価したものであり、物理的解釈は別としてこれらは内容的に同じであり、同じ砂に対してこれら3手法による粒子破砕量は相互に相関関係がある。Fig.6は砂Aと砂Bについて(乾燥状態と水浸状態の区別無く)3手法による粒子破砕量の関係を示したものである。粒子破砕量の評価法にはそれぞれ相関関係にあることが分かる。以下では破砕係数 B_c を用いて圧縮特性に及ぼす粒子破砕の影響を検討する。

5 圧縮特性に及ぼす粒子破砕の影響

Fig.7に最大圧縮応力作用時の圧縮応力と破砕係数 B_c の関係を示す。ここで、圧縮応

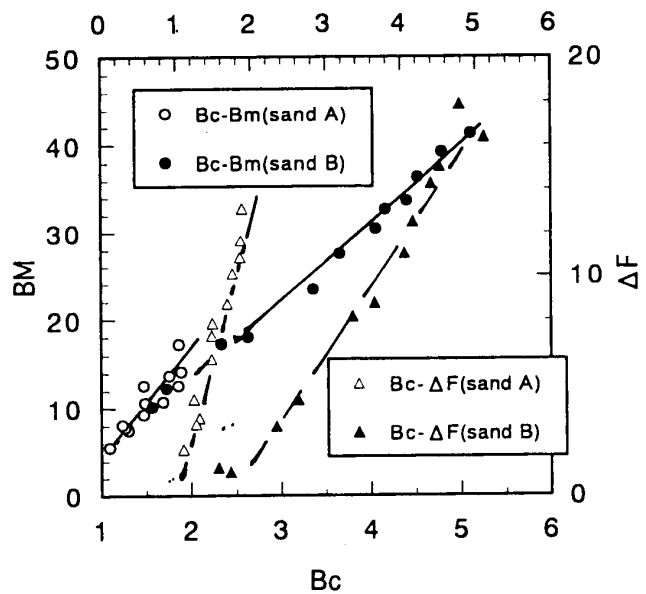


Fig.6 Comparison of B_M , ΔF and B_c .

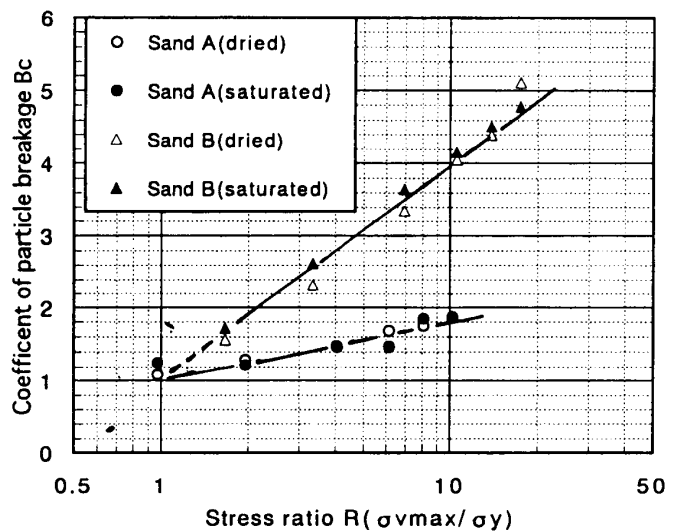


Fig.7 Relationship between B_c and stress ratio $R = \sigma_{vmax} / \sigma_y$

力はそれぞれの砂に対して圧縮降伏応力で無次元化してある。それぞれの砂に対して片対数紙上で B_c と応力比 R (σ_{vmax} / σ_y) の間に線形関係が認められる。これらの線形関係は $B_c=1$, $R=1$ 付近を通ることから粒子破碎量は圧縮降伏応力を境に顕著になることが分かる。

Fig.8は最大圧縮応力時の破碎係数 B_c と圧縮指数 C_c の関係を示したものである。砂Aと砂Bでは粒子破碎の程度が異なり, B_c と C_c の関係には砂Aと砂Bの間に連続性がみられないが, 粒子破碎に伴う圧縮性の増加傾向はそれぞれの砂に対して類似している。砂Aから明らかのように, 破碎係数の増加に伴い圧縮指数は急激に増大し, その後圧縮指数はほぼ一定となっており, わずかな粒子破碎により圧縮性は著しく増加することが分かる。また, 砂Bでは $\sigma_v=5\text{MPa}$ 以上では粒子破碎の程度がかなり進行し, 圧縮係数はほぼ一定状態にあると言える。この定常状態においては圧縮性は細粒分の圧縮が主であり, 圧縮性に及ぼす粒子破碎の影響は小さいと推測される。

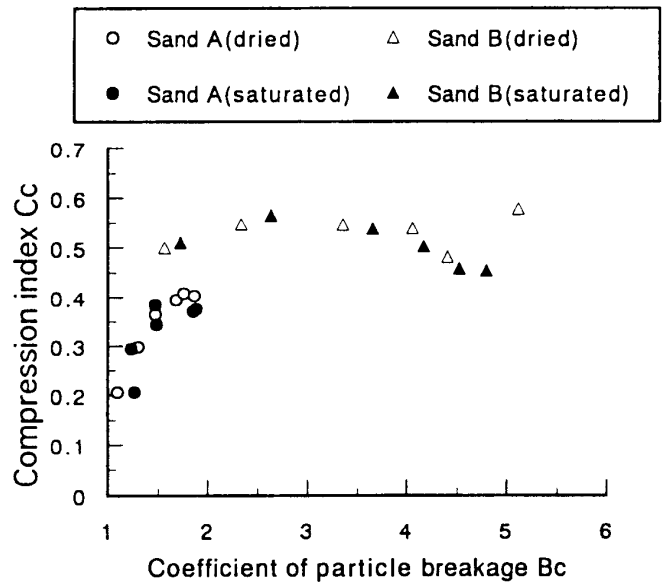


Fig.8 Relationship between C_c and B_c .

摘 要

圧縮応力による粒子破碎の程度と圧縮性に及ぼす粒子破碎の影響を把握するため2種類の石灰質砂について乾燥状態と水侵状態で50MPaまでの一次元圧縮試験を実施した。

主な結果は以下のようである。

- (1) 圧縮性は細粒な砂より粗粒の砂において大きい。また, 圧縮性に及ぼす水侵の影響は小さい。
- (2) 圧縮試験における $e-\log \sigma_v$ 関係には降伏点みられ, この降伏圧縮応力を境に圧縮指数 C_c は増大する。同様に粒子破碎も顕著となる。
- (3) 圧縮応力の増加による粒子破碎に伴って粒径0.075mm以下の細粒分が増加するが, ある程度細粒分が増加すると, 圧縮応力の増加に伴う粒子破碎量の増加割合は低減する。
- (4) 破碎係数 B_c はMarsalの方法による粒子破碎量 B_M およびLeslieの方法による粒子破碎量 ΔF と相関関係にある。
- (5) 破碎係数 B_c の増加に対して圧縮指数 C_c が急激に増加することから, わずかの粒子破碎で圧縮性が顕著となることが認められた。

参考文献

1. 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
2. Datta, M. et al: Engineering behavior of carbonate soils of India and observations on classification of such soils, Geotechnical Properties, Behavior and Performance of Calcareous Soils. ASTM. S.T.P.777, p.113-140,1981
3. Marsal, R.J.: Mechanical Properties of Rock fill, Embankment-Dam Engineering, p.109-208, Jon Wiley & Sons, 1973

4. Leslie, D.D.: Relationship between shear strength, gradation and index properties of rock fill materials, Spec. Session, No.13, 7th ICOSMFE, Contributions and discussions on mechanical properties of rock fill and gravel materials, p.201-210,1969