

過圧密履歴を受けたカーボネイト砂がせん断中に示す粒子破碎

福岡大学大学院	学生会員	宗石 和樹
名古屋大学大学院	正 会 員	山田正太郎
福岡大学	正 会 員	佐藤 研一

1. はじめに

本稿では、高圧三軸試験装置（最大セル圧 10MPa）を用いて、過圧密履歴を受けたカーボネイト砂の排水および非排水せん断挙動を示す。また、実験終了時における粒子の破碎状況について示すと同時に、過圧密履歴を受けたカーボネイト砂の粒子破碎がせん断中どのように進行していくのか実験的に調べる。

2. 実験概要

実験に用いた供試体の大きさは、直径 5cm、高さ 10cm である。試料には、沖縄の海底に堆積したカーボネイト砂を 4.75mm 以下にふるい分けして用いた（密度 $\rho_s = 2.750\text{g/cm}^3$ ，最大間隙比 $e_{\max} = 1.600$ ，最小間隙比 $e_{\min} = 1.107$ ）。カーボネイト砂は、珊瑚類の遺骸や、貝殻などを多く含んでおり粒子破碎を生じやすい。供試体の作成には棒突き法と Moist Placement 法を併用した。棒突き法は、堆積面を破壊する方法で初期異方性が小さい供試体を作成することが可能である。Moist Placement 法は、あらかじめ試料を湿らせ、相対密度の小さい供試体を作成しやすくする方法である。圧縮前の相対密度 $Dr_0 = 50\%$ ($e = 1.354$) を目標とし供試体を作成した。1 つの拘束圧に対し、過圧密履歴を与える場合と与えない場合を設けた。過圧密履歴を与える場合は、等方圧縮過程において、一度 9.0MPa まで載荷した後、各拘束圧まで除荷してからせん断を行った。

3. 破碎指数の定義

破碎量を表す指標として破碎指数 α を、30% 粒径 D_{30} を用いて次式にて定義する。

$$\alpha = -\ln(D_{30} / D_{30(0)}) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $D_{30(0)}$ は基準状態での 30% 粒径である。等方圧縮過程および全過程の破碎量を表すときは基準状態を試験前の状態にとり、せん断過程の破碎量を表すときは基準状態をせん断開始時、すなわち等方圧縮終了時の状態にとる。

4. 実験結果及び考察

4-1. せん断挙動に及ぼす拘束圧の影響 破碎性砂のせん断挙動に及ぼす拘束圧の影響について示すために、各条件におけるせん断試験結果を図-1~4 に示す。まず過圧密履歴なしに着目してみると、排水・非排水条件どちらにおいても拘束圧が大きいほど正規圧密土に近い挙動を示すことが分かる。また過圧密履歴なしに着目してみると、排水・非排水条件のどちらにおいても初期に明確な降伏点が現れることが分かる。次に非排水条件における過圧密履歴を与えた場合に注目する。すべての拘束圧において有効応力経路、軸ひずみ、どちらにおいても一点に集束していることが分かる。これは、過圧密履歴を受けた各供試体の間隙比に大きな差がなくなっているためである。

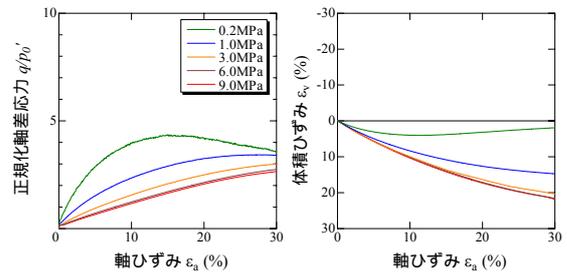


図-1 排水せん断挙動（過圧密履歴なし）

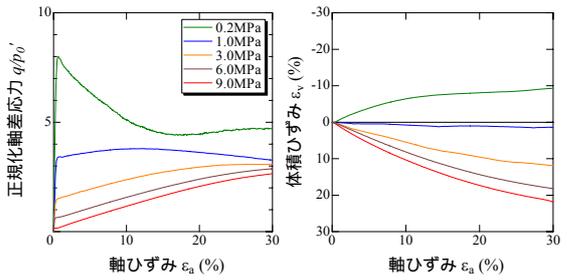


図-2 排水せん断挙動（過圧密履歴あり）

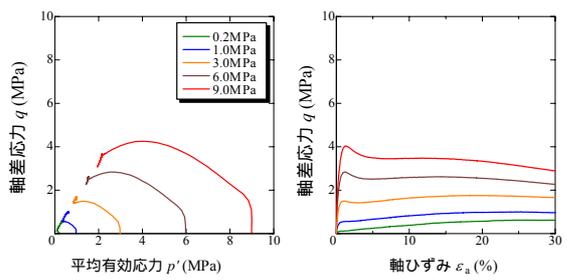


図-3 非排水せん断挙動（過圧密履歴なし）

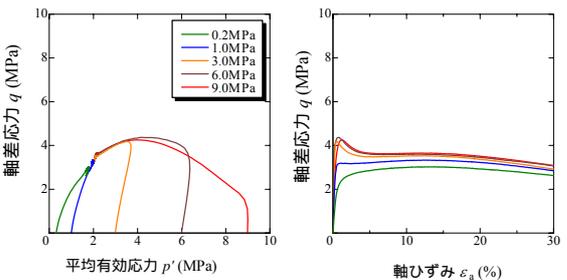


図-4 非排水せん断挙動（過圧密履歴あり）

4-2. 圧縮およびせん断過程で生じる粒子破碎

各実験の破碎量を圧縮過程，せん断過程，全過程に分けて図-5に示す。圧縮過程とせん断過程における破碎量はせん断直前の粒度を調べることで求めた。なお，せん断直前の粒度は，各実験と同じ条件の実験を別途圧縮終了時までで行うことで求めた。まず，圧縮中の破碎量に着目してみると，過圧密履歴なしでは拘束圧が大きくなるにつれ破碎量が大きくなる一方で，過圧密履歴ありでは各拘束圧でほぼ破碎量が等しいことが分かる。次に，せん断中の破碎量に着目してみる。過圧密履歴の有無に関わらず，排水せん断中では拘束圧が高いほど顕著に破碎が生じているのに対し，非排水せん断中では拘束圧が低いほど顕著に粒子破碎が生じている。非排水せん断中では，拘束圧が高いほど大きなせん断応力が加わっているにも関わらず，せん断中に生じる破碎量は拘束圧が低い方が顕著なことから，単純に大きなせん断応力が加わるほど顕著に破碎が生じるわけではないことが分かる。また，拘束圧の低い状態では排水せん断中に比べ非排水せん断中に顕著に破碎が生じるのに対し，拘束圧が高い状態では非排水せん断中よりも排水せん断中に顕著に破碎が生じていることが分かる。さらに，一旦高い拘束圧で等方圧縮することによって，せん断前に顕著な粒子破碎を生じさせておいた場合においても，せん断中に生じる破碎量は，そのような過圧密履歴を受けていない場合と比べて明らかに小さくなるわけではなく，非排水条件では過圧密履歴を与えた場合の方がむしろ顕著に破碎が生じていることが分かる。次に非排水条件の過圧密履歴ありについて着目してみると，全過程では破碎量にあまり差が現れていないことが分かる。図-4から，同一の限界状態に達した場合には破碎量にも差が現れないと言える。

4-3. せん断に伴う粒子破碎の推移

過圧密履歴を有し拘束圧 3.0MPa の排水・非排水条件におけるせん断中の粒子破碎の推移を図-6に示す。せん断中における破碎量は，同じ条件の実験を複数回実施し，途中でせん断を停止することで調べた。まず，せん断開始直後の降伏点における破碎量に着目してみると，排水・非排水条件，どちらにおいてもほとんど破碎が生じていないことが分かる。つまり，弾性挙動をしているように見える状態では破碎の進行はほとんど生じていないことが分かる。

次に降伏後の破碎の推移に着目してみる。まず排水条件では単調に硬化挙動すると同時に，破碎量が増加し続けている。これに対し，非排水条件では，軟化を示す状態において破碎の進行が緩慢で，結果的に破碎量が小さくなっていることが分かる。直感的には粒子破碎が生じることによって，軟化が生じるように思えるが，実際には軟化中には粒子破碎はほとんど生じていないことが分かる。このような観点で，改めて図-1~4と図5を見比べると，軟化を生じるような条件では，他の場合に比べて最終的な破碎量が小さくなっており，やはり軟化中は顕著な破碎が生じていないように見受けられる。

5. おわりに

本稿では，硬化中と軟化中で破碎の進行の仕方に違いが現れることを実験的に示唆した。併せて，排水条件に応じて，せん断に伴う破碎量が大きく異なることを実験的に示したが，その土が与えられた条件の下で硬化する状態にあるのか，軟化する状態にあるのかといったことの影響がそのような差を生じさせたものと思われる。今後は系統的な実験によって，そのことをより確かなものになりたい。

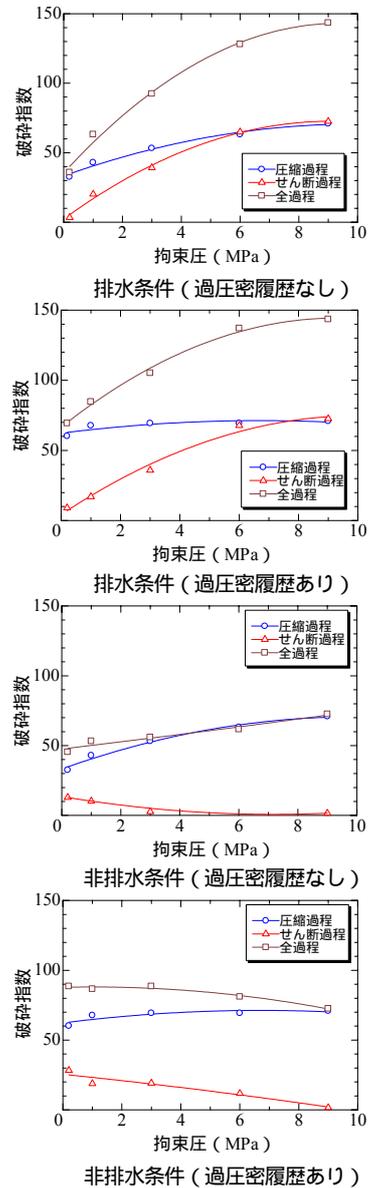


図-5 粒子破碎状況

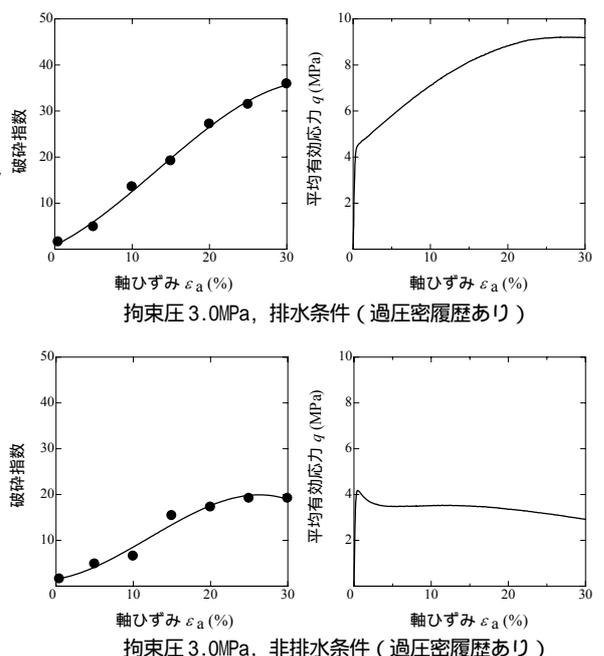


図-6 せん断に伴う粒子破碎の推移