

粒子破碎が砂質土の限界状態に及ぼす影響に関する実験的研究

福岡大学 学生会員 東城彰宏
 福岡大学 正会員 山田正太郎 佐藤研一

1. はじめに

著者らは、これまでに破碎性地盤材料には非破碎性材料と同様に限界状態が存在することを実験的に示してきた。一方、Cheng, Y.P.らは、破碎性地盤材料の限界状態について、個別要素法(DEM)を用いて調べることで、粒子破碎が生じると限界状態線が低下することを指摘している²⁾。また、Muir Wood, D.も個別要素法に基づき同様な主張をしている³⁾。しかし、現時点においてこのことは実験により十分に確かめられていない。そこで本研究では、高圧三軸試験装置(最大セル圧 10MPa)を用いて、破碎性地盤材料の排水せん断挙動に及ぼす拘束圧の影響について調べると共に、粒子破碎が生じると限界状態線が実際に低下することを確かめる。

2. 実験概要

実験に用いた供試体の大きさは、直径 $\phi = 5.0\text{cm}$ 、高さ $H = 10.0\text{cm}$ である。試料には、沖縄の海底に堆積した砂(以下沖縄砂)を 4.75mm 以下にふるい分けをして用いた(密度 $\rho_s = 2.750\text{g/cm}^3$, 最大間隙比 $e_{\text{max}} = 1.600$, 最小間隙比 $e_{\text{min}} = 1.107$)。沖縄砂は、珊瑚類、貝殻などを多く含んでおり粒子破碎を生じやすい試料である。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の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、乾燥した試料の最大間隙比を越えるようなゆるい供試体を作成することも可能である。実験条件を表-1に示す。初期相対密度を $Dr_0 = 50\%$ 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、等方圧縮時において、一度 9.0MPa まで載荷した後、各拘束圧まで除荷してから排水せん断試験を行った。過圧密履歴を与えたのは、一旦高い拘束圧で等方圧縮することによって、せん断前に粒子破碎を生じさせておくためである。せん断速度は 0.5mm/min 、軸ひずみが 30% で実験終了とした。

3. 実験結果及び考察

3-1 排水せん断試験結果 破碎性地盤材料の排水せん断挙動に及ぼす拘束圧の影響について示すために、各拘束圧における排水せん断試験結果を示す。図

-1に拘束圧 0.2MPa における排水せん断試験結果を示す。過圧密履歴なしでは、単調に硬化し続けるのに対し、過圧密履歴ありでは、初期に明確なピークが現れ、その後大きく軟化している。過圧密履歴の有無に応じて、体積変化にも大きな差が表れている。せん断終了時において、応力状態には過圧密履歴の有無に応じた差がほとんどないのに対し、間隙比には大きな違いがある。試験終了時の間隙比に違いが生じるのは、過圧密履歴を与えない状態でせん断した時に生じた粒子破碎に、過圧密履歴を与える過程で生じた粒子破碎が卓越したためであると考えられる。図-2に拘束圧 3.0MPa における排水せん断試験結果を示す。過圧密履歴ありは、初期にやはり弾性的な挙動を示した後、硬化挙動を示し、その後過圧密履歴なしとほぼ同じ限界状態に至っている。過圧密履歴の有無に応じて、せん断終了時の間隙比の差は、拘束圧 0.2MPa でせん断した場合に比べて小さい。これは、せん断中に生じる粒子破碎が、圧

表-1 実験条件

拘束圧 (MPa)	過圧密比 OCR	e_0	Dr_0 (%)	e	Dr (%)
0.2	1.0	1.367	47.6	1.324	56.2
	45	1.358	49.4	0.828	157.5
3.0	1.0	1.344	52.2	1.013	119.7
	3.0	1.350	50.9	0.789	165.5
9.0	1.0	1.360	49.0	0.810	161.3

e_0, Dr_0 : 供試体作成時
 e, Dr : せん断開始時

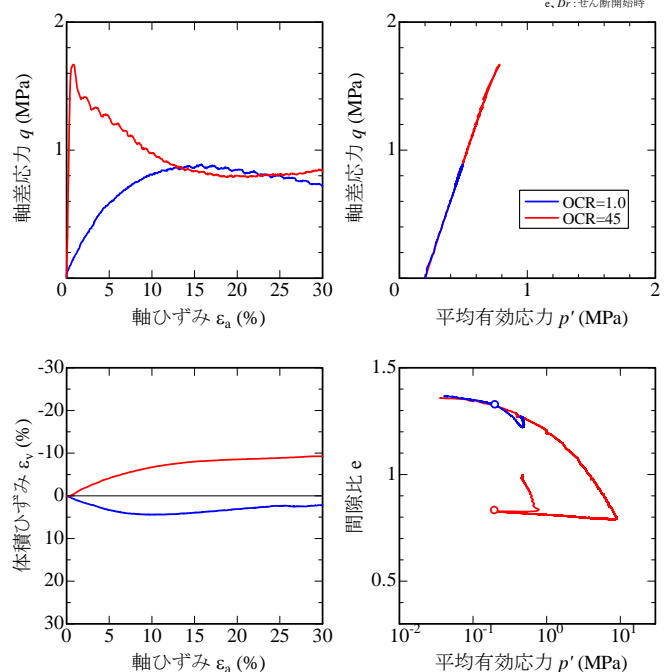


図-1 排水せん断試験結果(拘束圧 0.2MPa)

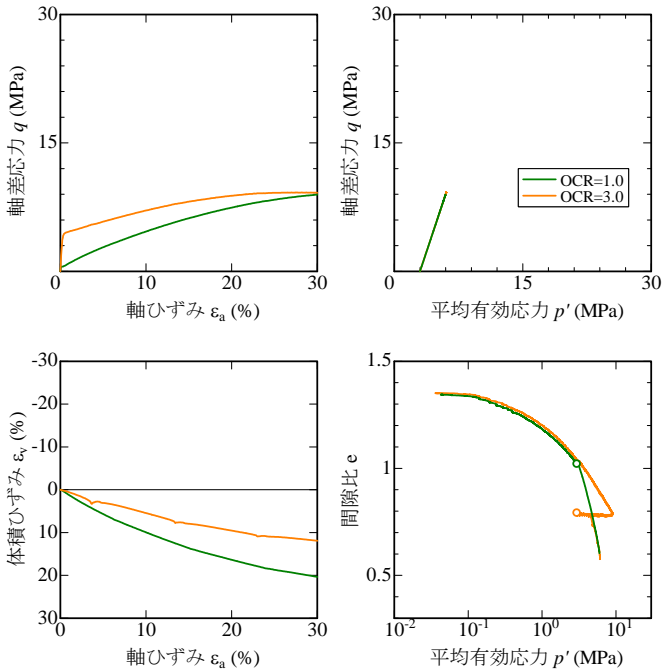


図-2 排水せん断試験結果(拘束圧 3.0MPa)

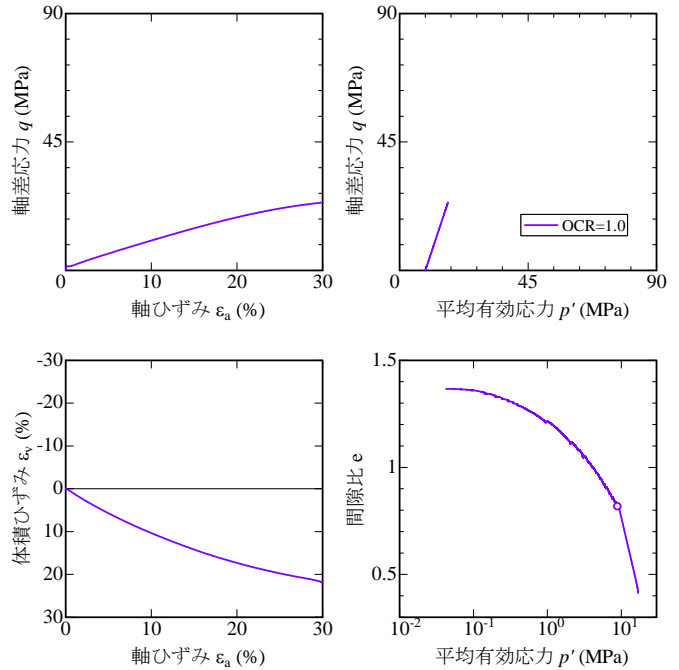


図-3 排水せん断試験結果(拘束圧 9.0MPa)

密過程に生じる粒子破碎に卓越するためであると考えられる。図-3 に拘束圧 9.0MPa における排水せん断試験結果を示す。どの拘束圧においても過圧密履歴を与えない場合について着目すると、拘束圧を上げるほど硬化の仕方が緩慢になり限界状態に至りにくくなることが分かる。これは、拘束圧が高いほどせん断中に粒子破碎が顕著に生じるためであると考えられる。また、拘束圧が高いものほど体積圧縮量が大きくなっている。これは、次に示すように粒子破碎が生じるほど限界状態線が低下することに起因する現象で、やはり拘束圧が高いほどせん断中に粒子破碎が顕著に生じることを意味していると考えられる。

3-2 限界状態の変化 先にも述べたように Cheng, Y.P.らは、破碎性地盤材料の限界状態について、個別要素法(DEM)を用いて調べることで、粒子破碎が生じると限界状態線が低下することを指摘している。ここでは、Cheng, Y.P.らによる解析結果と本実験により得られた結果を用いて限界状態線について比較する。図-4 に Cheng, Y.P.らによる解析結果を示す。この図は、各限界状態線が曲線をなすことや、一旦大きな荷重を掛けることで粒子破碎を生じさせた供試体の限界状態線(Series3)が過圧密履歴を与えない供試体(Series1と2)の限界状態線よりも下側に位置することを示すことで、限界状態線が低下することを説明している。また、図-5 に本実験で得られたせん断終了時の平均有効応力と間隙比の関係を示す。実験結果からも解析結果と同様に粒子破碎が生じると限界状態線が低下する様子が伺える。

4. まとめ

- 1) 破碎性地盤材料の排水せん断挙動に及ぼす拘束圧の影響として、拘束圧を上げるほど硬化の仕方が緩慢になり、限界状態に至りにくくなることや、体積圧縮量が大きくなることを示した。これは、拘束圧が高いほどせん断中に粒子破碎が顕著に生じることに起因する現象であると考えられる。
- 2) 実験結果に基づいて粒子破碎が生じると、限界状態が低下する可能性を示した。

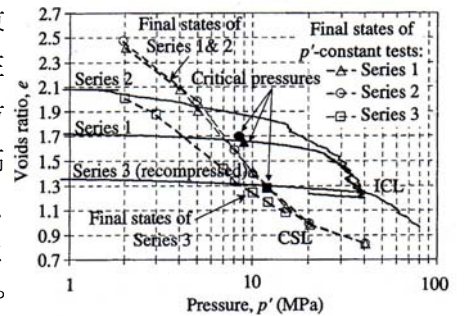


図-4 せん断終了時の平均有効応力と間隙比の関係 (DEM による解析結果)²⁾

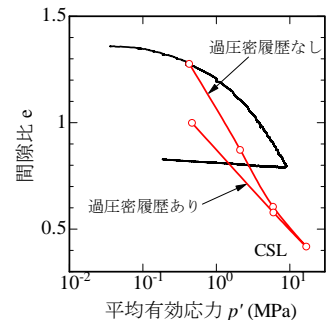


図-5 せん断終了時の平均有効応力と間隙比の関係 (実験結果)

参考文献 1) 東城彰宏, 山田正太郎, 佐藤研一 (2008): 破碎性地盤材料の非排水せん断挙動に及ぼす拘束圧の影響. 2) Cheng, Y.P., Bolton, M.D. and Nakata, Y. (2005): Grain crushing and critical states observed in DEM simulations, *Powders and grain*, Taylor and Franxis Group, London 2, pp. 1939-1937. 3) Muir Wood, D. and Maeda, K. (2008): Changing grading of soil: effect on critical states, *Acta Geotechnica* (on line).