

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05921・19K21090

研究課題名（和文）高圧条件における繰返しせん断に及ぼす粒子破碎の影響

研究課題名（英文）Effect of particle crushing on cyclic shear under high-pressure conditions

研究代表者

野田 翔兵（Noda, Shohei）

東京理科大学・理工学部土木工学科・助教

研究者番号：30749289

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：高圧条件では、粒子破碎が問題となるが、繰返しせん断時は載荷応力が小さいため、質量基準による粒度分布では粒子破碎は確認されなかった。本研究では、粒子個数による粒度分布に着目し、高圧条件下の繰返しせん断による粒子破碎の影響を検討した。せん断後の粒子を抽出し、数1000個の粒子画像からそれぞれの直径を求め、個数による粒度分布を評価した結果、拘束圧が高いほど粒径の小さい粒子が増加する傾向が確認できた。細粒分を含む試料で繰返しせん断実験を実施した結果、繰返しせん断強度は豊浦砂より低くなったが、拘束圧の影響は豊浦砂と同様であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高圧条件では、粒子破碎が問題となるが、繰返しせん断時は載荷応力が小さいため、粒子破碎は発生していないと考えられていた。しかし、これまでの手法では微小な粒子破碎は評価できないため実際に破碎しているか確認することができなかった。本研究ではその微小な粒子破碎を評価する手法を検討するものである。微小な粒子破碎の評価は、空隙構造やミクロな浸透・ダイレイタンシーの理解にも役立つものと考えている。さらに、近年研究例が増えている個別要素法（DEM）といった粒状体解析にも重要なパラメータとなる。本研究により得られる成果がこれらに大きく貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Under high-pressure conditions, particle crushing becomes a problem. However, since load stress is small during cyclic shearing, particle crushing was not confirmed in the particle size distribution based on mass. In this study, we focused on the particle size distribution according to the number of particles. We examined the effect of particle crushing due to repeated shearing under high-pressure conditions. It was confirmed that the particles with smaller particle diameter increased as the result of extracting the particles after shearing, obtaining the respective diameters from the image of several thousand particles, and evaluating the particle size distribution by the number of particles confining pressure increased. Cyclic shear tests were performed on samples containing fines. The cyclic shear strength was lower than that of Toyoura sand, but the effect of confining pressure was similar to that of Toyoura sand.

研究分野：地盤工学

キーワード：海底地盤 粒子破碎 粒子画像 繰返しせん断 高圧

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地盤工学ではこれまで陸上や沿岸域を対象とした研究が多く行われてきた。その一方、近年では、地震による海底地すべりの問題や海底資源開発などにより深海底地盤に関する関心が高くなっている。しかしながら、深海底地盤に関しては調査研究が多くを占め、工学的な研究はまだ少ない。海底と陸上の地盤では様々な違いがあるが、大きな違いは軟弱層の深さと考えられる。陸上では深さ 100m 以内でほとんどが固い層に当たるが、海底では数 100m も砂泥互層からなる堆積地盤が続く、海底地すべりの調査からも深さ 50m から 150m におよぶすべりが日本近海で確認されている。世界的にはさらに大きな海底地すべりが発生している事例も見られる。これら海底地すべりの原因として最も多いのは地震であると考えられている。これらのことから、海底地盤の安定性や海底地すべり発生の可能性の評価のためには、海底下 200m 程度の深い地盤まで対象とした研究を行う必要が生じる。これまでも高圧条件下での力学的な実験は行われており、高圧条件下における砂の力学的性質を大きく支配するのは粒子の破碎特性であること等が報告されている。しかしながら、高圧条件下での地盤の動的挙動に着目した研究は少ない。

筆者らは高圧条件下で繰返しせん断が可能な実験装置の開発を行ってきた。三軸装置による実験では、高圧条件下でのいわゆる液状化試験を実施し、豊浦砂による繰返し強度曲線を描いた結果、拘束圧の増加に伴って繰返しせん断強度が低下する結果となった。この結果を用いて安定解析等を行うと深いほど危険性が増すという矛盾に陥ることとなる。この傾向は破碎性土の挙動に近いことから、粒子破碎が原因であると考え実験前後での粒度分布の比較を行うこととした。実験後の試料を半割し、上中下の三箇所から採取した試料の粒度を測定した。しかしながら、上中下での違いだけでなく実験前後での粒度にも明確な差は確認できなかった。そこで、試料の粒子形状に着目し粒子破碎の検討を行うこととした。一番破碎量が多いと考えられる供試体の中間部分を用いて、粒子画像を撮影できる装置にて粒子画像を取得した。38mm<sup>3</sup> のさじを使い、それぞれの拘束圧の実験後試料について同体積内の粒子数の撮影を行った。粒子数は約 6500 ~ 11000 個となり、拘束圧の増加に伴い粒子数も増える結果となった。このことから、粒子数による粒度分布を整理した結果、実験前後および拘束圧の違いによる差が現れた。試験前(オリジナル)では大きい粒子の数が多く、小さい粒子数は少ない。拘束圧の増加に伴い、大きい粒子数は減少し、20 $\mu$ m 以下の粒子数が多くなっていた。この結果が粒子破碎を裏付けるものと考えられるが信頼性が有るか検証するため更なる研究を進める必要がある。

### 2. 研究の目的

これまで粒子破碎を定量化する様々な試みが行われているが、大きく粒子の形状が変わるような破碎に関するものがほとんどであった。これは、単調せん断や一次元圧縮といった供試体の変形が大きい場合や有効応力の減少がない条件、さらに破碎性土を用いて実験されたものが多いためである。本研究のような硬い粒子を用いた非排水繰返し実験では破碎は生じていないと考えられていた。しかし、微小な破碎が発生していることを示唆する結果が得られている。そこで、これまで不明確であった非排水繰返し試験による粒子破碎について明らかにしたい。

### 3. 研究の方法

研究方法については背景に記載したものと同様である。38mm<sup>3</sup> のさじを使い、実験後試料について同体積内の粒子数の撮影を行う。繰返しせん断実験は各拘束圧につき 4 本のデータを取得しているが、それぞれの拘束圧で 1 本ずつの条件しか画像を取得できていない。また、供試体の上中下で違いが生じるかについても評価できていない。そのためこれらについて同様に画像を取得し評価を行う。さらに、海底地盤は豊浦砂のようなきれいな砂(粒径の揃った砂)だけではないため、細粒分を含む砂質土にも適用可能か検証を行う。そのため、細粒分を含む砂質土による非排水繰返しせん断実験を実施する。

### 4. 研究成果

#### (1) 繰返しせん断による粒子破碎

豊浦砂による非排水繰返しせん断後の 1 つの供試体の上中下から採取した試料の分析結果(図 1) から、供試体の中間より採取した試料が 250 $\mu$ m 付近に見られるピークの値が最も低く、代わりに 20 $\mu$ m 以下の粒子が多くなっていることが分かった。これが繰返しせん断による粒子破碎の特徴であると考えられる。繰返しせん断による粒子破碎は、単調せん断に比べ応力が小さいことから、角が欠けるような破碎であり、非常に細かい粒子のみが増加していると考えられる。このため、通常実施される粒度試験方法での体積基準や質量基準による粒度分布には粒子破碎が反映されなかったものと考えられる。また、図 2 から明らかのように供試体の中央部分において細かい粒子の割合が多くなっていることから、以降は供試体中央部分より採取した試料の分析結果について考察する。粒子個数による粒度分布をまとめた結果から、75 $\mu$ m 以下の含有率である細粒分含有率を求めたものが表 1 である。表 1 には同一条件において撮影された粒子の全数も参考のため示している。表より、試験前と比較するといずれの条件においても細粒分含有率は増加しており、拘束圧が増加するとそれに伴い細粒分含有率も増加する傾向にあることが分かる。また、拘束圧 3MPa 時の繰返し応力 3.0kN の条件を除けば、同一拘束圧時には繰返し応力の増加に伴い細粒分含有率が増加する傾向が認められる。これらのことから、繰返しせん断による粒子破碎は、微細な破碎であるが、有効拘束圧・繰返しせん断応力の増加に伴ってその破碎

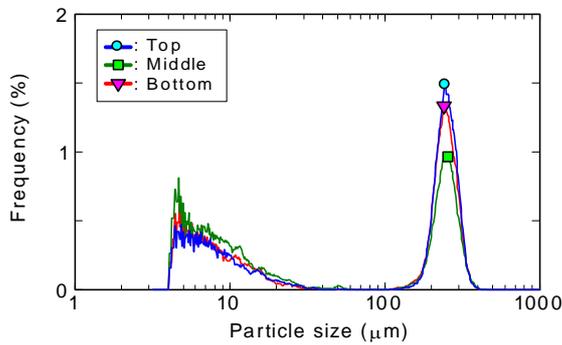


図1 拘束圧 1MPa-繰返し応力 1.2kN 時の  
粒子画像を用いた粒子個数による粒度分布  
(頻度)

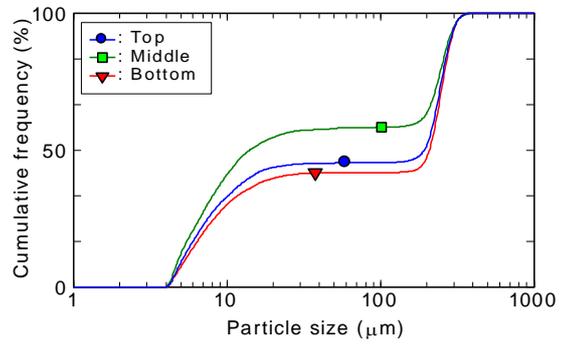


図2 拘束圧 1MPa-繰返し応力 1.2kN 時の  
粒子画像を用いた粒子個数による粒度分布  
(累積)

表1 粒子画像を用いた粒子個数による粒度分布から求めた細粒分含有率

有効拘束圧	試験前	1MPa		2MPa			3MPa			
	繰返し応力	試験前	1.2kN	1.3kN	2.1kN	2.3kN	3.0kN	2.75kN	2.9kN	3.0kN
粒子数 (個)	5899	7524	9060	7689	6665	9547	7708	11727	8489	
細粒分含有率 (%)	44.7	58.2	65.5	60.2	64.0	65.4	70.5	74.0	65.1	

量も増加すると考えられ、その評価には粒子個数による粒度分布が有効であることが分かった。

### (2) 細粒分を含む砂質土の高圧繰返しせん断実験

繰返しせん断実験は等方圧密した飽和供試体を一定測圧で非排水条件の下、一定振幅かつ対称な繰返し軸荷重を正弦波で加えてせん断を行った。背圧は深海底を模擬するため 10MPa とした。有効拘束圧は 1MPa とし、圧密後に任意の荷重を設定し周波数 0.02Hz の正弦波で繰返しせん断を行った。細粒分を含む試料のため過剰間隙水圧の上昇に時間を要したため通常より遅い速度でせん断を行っている。一般的に繰返し周波数による強度への影響はないとされているため、実験時間が長くなること以外に実験への影響はないと考えられる。その他の実験条件は豊浦砂とほぼ同じである。豊浦砂の実験結果と比較すると、軸差応力と過剰間隙水圧の時刻歴では大きな違いは見られなかったが、軸ひずみ時刻歴では両者に違いが見られた。一般的に行われている 100kPa 程度の試験では伸張側でひずみが大きく発達し破壊することが知られており、高圧での豊浦砂の軸ひずみ時刻歴でも同様の挙動となっていた。しかし細粒分を含む砂質土の結果では、圧縮側にひずみが発達し破壊に至る傾向が認められた。これは細粒分を含む試料の高圧条件で生じる影響ではないかと考えられる。

以上の結果を用いて、繰返し強度曲線を描いたものを図3、図4に示す。同一の有効拘束圧条件で豊浦砂の結果と比較すると、図3のように細粒分を含む試料の方が繰返しせん断強度が低い結果となった。一般的には、細粒分を含むと液状化しにくくなると言われているため、繰返しせん断強度も高くなると考えられるが、今回の結果ではそうはならなかった。図4に示す有効拘束圧による影響は、豊浦砂と同様に有効拘束圧が増加すると繰返しせん断強度が減少する傾向が見られた。細粒分を含む試料でも繰返しせん断中に粒子破碎が起こっている可能性が示唆された。細粒分を含む試料の粒子撮影を行うと粒子数が非常に多くなり、粒子同士が重なってしまうことから1粒ずつに分離して分析することが困難であった。細かい粒子を分析するには、まず分散方法を確立させる必要がある。

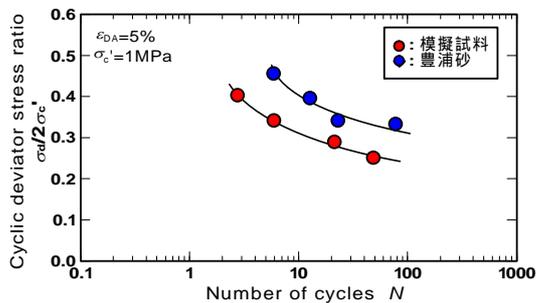


図3 細粒分を含む試料 (模擬試料) と豊浦砂の繰返しせん断強度曲線 (1MPa)

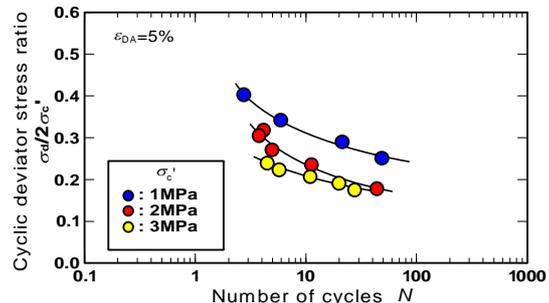


図4 細粒分を含む試料の拘束圧毎の繰返しせん断強度曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野田翔兵
2. 発表標題 豊浦砂の高圧条件下非排水繰返しせん断による微小な粒子破碎の評価に向けて
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----