

共焦点レーザー顕微鏡による粘土の残留強度発現時における せん断面のその場観察

○岩手大学

岩手大学（現：東北大学大学院）

岩手大学

日本大学

学生会員

佐々木萌奈美

正会員

山口潤

正会員

大河原正文

フェロー会員

三田地利之

1. はじめに

土の破壊規準としてクーロンの破壊規準がよく適合することが知られている。クーロンの破壊規準は、せん断強度 s 、粘着力 c 、垂直応力 σ 、せん断抵抗係数 $\tan \phi$ を用いて以下の式で表される。

$$s = c + \sigma \tan \phi$$

本研究では、せん断抵抗係数 $\tan \phi$ の存在理由、すなわちなぜ垂直応力 σ の増加に伴いせん断強度 s が大きくなるのかという疑問の解明を目的とした。 $\tan \phi$ が現われる理由として「真実接触面」の存在が考えられる。二つの固体が接触しているときに肉眼で接触していると判断できる面を見かけの接触面とよぶ。しかし、実際には表面に微小な凹凸が存在しており、凸部同士でのみ接触している。この実際に接触している面をトライボロジーでは真実接触面といい、その面積を真実接触面積という¹⁾。垂直応力の増加に伴い真実接触面積が増加し、それによって接触面間に作用する力、すなわち、せん断力が增大するのではないかという考えのもと実験を行った。本稿では目的を達成するために行った繰り返し一面せん断試験によるせん断面のその場観察結果を報告する。

2. 試験装置

本研究では、せん断試験の実施に小型せん断ユニットを使用した²⁾。小型せん断ユニットは、横幅 190.8mm、奥行 170mm、高さ 98.3mm、重量が約 3kgf とコンパクトかつ軽い。そのため分析機器にセットしてせん断試験ができる。小型せん断ユニットは、底面に直径 3～10mm の穴があり、その上に強化ガラスがセットされる構造となっている。このガラス上を供試体が移動（≡せん断）することで、せん断面を下から観察・分析できる。せん断面の観察には共焦点レーザー顕微鏡 C 2（Nikon 社製）を用いた。共焦点レーザー顕微鏡とはレーザービームとピンホールを用いて解像度の高いイメージングを行う顕微鏡のことである。ピンホールを用いて集光点で生じる光だけを抽出するため、ピントのあった鮮明な画像を取得することができる。また、スキャナで集光点を走査して 2 次元像を取得しつつ、

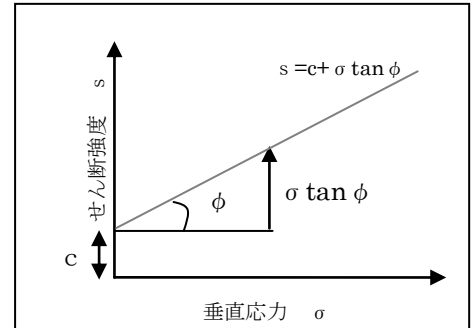


図 1 クーロンの破壊規準
荷重

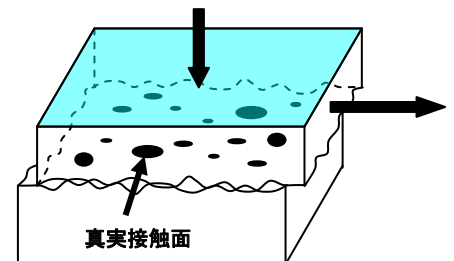


図 2 真実接触面の概念図

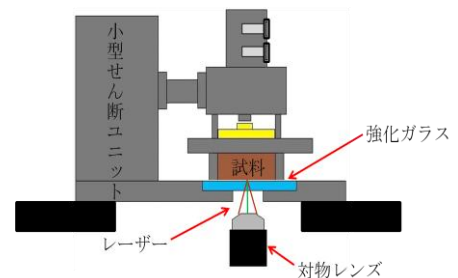


図 3 小型せん断ユニットの断面図

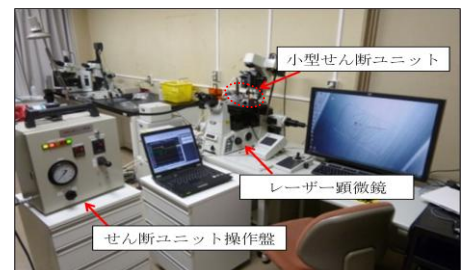


図 4 実験の様子

クーロンの破壊規準 せん断抵抗係数

岩手大学工学部社会環境工学科 TEL 019-621-6444

試料の厚さ方向にも走査することによって、深さの異なる断面画像を取得することができるという特徴をもつ。

3. 実験方法

試験には NSF 粘土（カナヤ興産）を用い、それぞれの試料を垂直応力 $\sigma_v = 50\text{kPa}$ 、 100kPa 、 150kPa の三段階で圧密した後、繰り返し一面せん断試験を行った。圧密の打ち切り時間は 3t 法により決定し、繰り返し一面せん断試験ではせん断応力が一定の値に収束した時点で終了とした。このときの値をせん断強度 s （≒ 残留強度）とした。残留状態に至ったせん断面を共焦点レーザー顕微鏡で観察した。得られた 2 次元画像をつなぎ合わせてせん断面付近の三次元立体像を構築し、その中からせん断面の画像を抽出して 2 値化処理を行い、真実接触面積を算出した。2 値化に用いたしきい値は、ヒストグラムに双峰性がみられない場合でも自動的にしきい値を算出することのできる大津の方法により決定した³⁾。画像解析には Image J（アメリカ国際衛生研究所開発）を用いた。

4. 実験結果

繰り返し一面せん断試験の結果から、垂直応力 $\sigma_v = 50.3\text{kPa}$ 、 102.3kPa 、 152.2kPa におけるせん断応力は $\tau = 2.9\text{kPa}$ 、 5.0kPa 、 6.8kPa であった。垂直応力の増加に伴いせん断強さが増加していることが分かる。せん断抵抗係数は $\tan \phi = 0.0383$ ($\phi = 2.2^\circ$) であった。小型せん断ユニットによるせん断試験が適切に行われている。

共焦点レーザー顕微鏡による真実接触面の観察により、垂直応力 $\sigma_v = 50.3\text{kPa}$ 、 102.3kPa 、 152.2kPa における真実接触面積割合は 28.33%、29.41%、29.28% が得られた。接触面積の増加率は 0.0087 である。垂直応力の増加に伴い接触面もわずかに増加していることを確認した。

5. まとめ

- ・ 共焦点レーザー顕微鏡による観察結果から粘土のせん断面に真実接触面が存在することを確認できた。
- ・ 垂直応力の増加に伴い真実接触面積は増加する。

本実験で垂直応力の増加に伴う真実接触面積の増加を確認することができた。今後はカオリン、スメクタイトなどの高純度粘土や実地盤より採取された試料を対象に、同様の実験を行い、真実接触面積の増加率とせん断抵抗係数との関係についてデータを蓄積する予定である。また、せん断面は厚みのあるせん断帯を形成しているので粘土－ガラス界面から試料の厚さ方向の断面画像を取得し各断面の接触面の増加率も算出する。

<参考文献>

- 1) 『トライボロジー辞典』 社団法人日本トライボロジー学会，養賢堂，p121-122，1995
- 2) 大河原正文・倉谷昌臣・三田地利之：『赤外分光法による粘土鉱物中の水の状態分析』 第 43 回地盤工学研究発表会 D-02，社団法人地盤工学会，2008
- 3) 大津展之：電子通信学会論文誌 D，Vol.63，No.4，1980

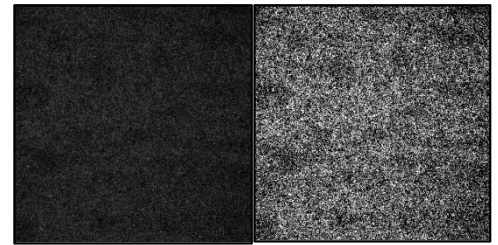


図5 生画像(左)と二値化画像(右)

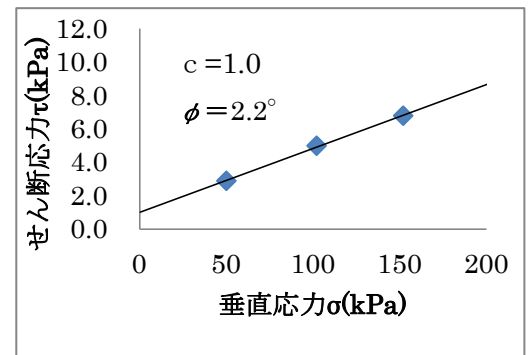


図6 せん断応力 τ と垂直応力 σ の関係

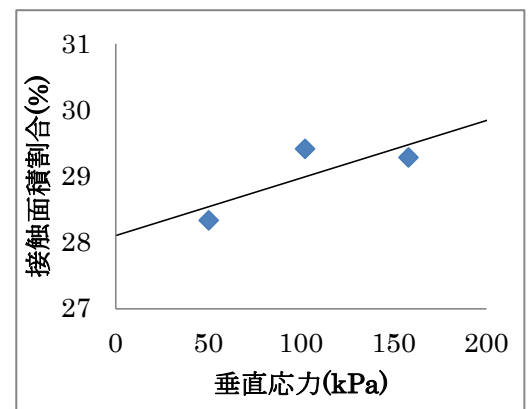


図7 真実接触面割合