

## 構造物の表面粗さが密詰め乾燥砂との繰返し载荷時の摩擦特性に与える影響

京都大学大学院 学生会員 ○廣瀬 駿  
 京都大学大学院 正会員 澤村 康生  
 京都大学大学院 フェロー会員 木村 亮

### 1. はじめに

地中構造物の地震時挙動を適切に評価する上で、地盤と構造物の接触面における応力伝搬は重要な検討項目である。この応力伝搬は、地盤材料の種類と構造物の表面粗さによって変化する<sup>1)2)</sup>。また地震時には、繰返しせん断力が作用することで接触面の摩擦特性が変化することが予想されるが、これを要素試験から得た事例は少ない。そこで本研究では、表面粗さの異なる4つの模型と密詰め乾燥豊浦砂に対して定圧繰返し一面せん断試験を実施し、繰返し回数やせん断変位が接触面の摩擦特性に及ぼす影響を検討した。

### 2. 実験概要

試験機や試験手順は、乾燥密詰め豊浦砂と表面粗さの異なる4つの模型（モルタル2種類、ステンレス2種類）との摩擦特性を単調一面せん断試験により調べた前報<sup>2)</sup>と同様である。乾燥豊浦砂は締固めにより相対密度85%になるよう作製した。鉛直応力は39.2, 78.4, 156.8 kPaの3通りとし、载荷速度0.2 mm/minの条件でせん断変位 $\delta = 1 \text{ mm} \rightarrow -1 \text{ mm}$ を4サイクル繰返した後、最終的に7mmまでせん断変位を与えた。

模型の表面粗さは接触式曲面微細形状測定機 Form talysurf PGI 1200 を利用し、一つの面に対して3回の計測を行いその平均値から求めた。表面粗さを表す指標として、一般的に用いられる算術平均高さ $Pa [\mu\text{m}]$ と、前報<sup>2)</sup>の単調载荷試験において接触面の摩擦特性に影響を与えることが明らかとなった二乗平均高さ $Pq [\mu\text{m}]$ 、最大高さ $Pz [\mu\text{m}]$ を用いて結果の整理を行った（表1）。それぞれの算出方法は以下の通りである。

$$Pa = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Zn| \quad \text{式(1)}$$

$$Pq = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Zn^2} \quad \text{式(2)}$$

$$Pz = \max(Zn) + |\min(Zn)| \quad \text{式(3)}$$

ここで、 $n$  は山、谷の総個数  $Zn$  は山・谷の振幅をそれぞれ表す。

表1 模型の表面粗さと接触面の摩擦角

	モルタル模型				ステンレス模型			
	粗面		滑面		模型 A		模型 B	
	単調	繰返し	単調	繰返し	単調	繰返し	単調	繰返し
$Pa [\mu\text{m}]$	77.5	73.5	7.1	6.4	7.5	7.6	3.0	3.1
$Pq [\mu\text{m}]$	95.0	88.1	18.1	9.9	9.3	9.0	4.0	2.6
$Pz [\mu\text{m}]$	554.1	505.1	70.9	108.6	55.8	47.1	11.0	13.2
$\Phi_{\text{ピーク}} [^\circ]$	35.9	36.8	33.0	30.9	29.8	33.2	22.8	24.2
$\Phi_{\text{残留}} [^\circ]$	31.9	31.7	29.6	29.4	27.9	30.0	-	-

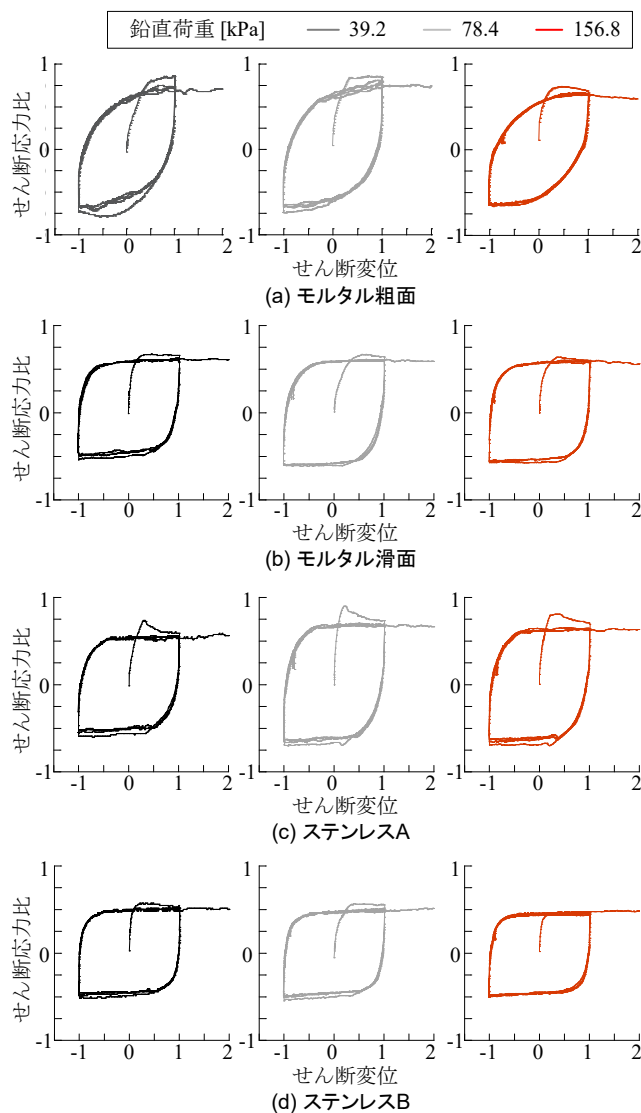


図1 せん断応力比 $\tau/\sigma_n$ とせん断変位 $\delta$ の関係

繰返しせん断、表面粗さ、摩擦特性

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター4棟583号室, Tel&Fax:075-383-3193

### 3. 実験結果

図1にせん断応力比とせん断変位の関係を示す。また表1には、前報<sup>2)</sup>の単調載荷試験および本報の繰返し載荷試験から得られた摩擦角を整理する。

図1の結果より、前報<sup>2)</sup>の単調載荷試験の結果と同様、せん断応力比を用いて正規化することで、せん断応力とせん断変位の関係は鉛直応力に依らずほぼ同じ曲線となることが確認できる。またいずれの模型においても、1周目で明確なピークを示したのち、2周目以降は同様の履歴曲線を描くことがわかる。さらに、表1より、単調載荷試験と繰返し載荷試験から得られた摩擦角が概ね一致していることがわかる。これは、繰返し載荷時の履歴曲線は単調載荷試験における残留状態から推定できることを示唆している。

図2に体積ひずみと累積せん断変位（載荷・除荷の両方向のせん断変位を加算した値と定義する）の関係を示す。接触面に繰返しのせん断変位を与えることで、豊浦砂がダイレイタンスにより圧縮と膨張を繰返ししながら圧縮方向の体積ひずみが蓄積していることがわかる。ステンレス模型では鉛直応力によらずほぼ同様の履歴曲線を描きながら体積ひずみが累積するが、モルタルでは鉛直応力によって体積ひずみの発生量に差異が生じている。しかしながら、前報<sup>2)</sup>と同様、体積変化と鉛直応力に明確な相関関係は確認できない。ここで繰返し載荷を4サイクル与えた後に、7mmまでせん断変位を与えた部分に着目すると、その体積変化はいずれも模型においてもほぼ一致することが確認できる。これより、特に表面が粗いモルタル模型では、供試体を作製した初期状態においては模型表面と豊浦砂の接触面の状態にばらつきがあるが、繰返しせん断変位を与えることで接触面の粒子のかみ合わせが変化し、最終的にはほぼ同じ状態に変化していたと考えられる。

最後に、繰返し載荷の体積変化を詳しく調べる。図3に、各載荷サイクルの圧縮量と膨張量について、4サイクルの平均値と表面粗さの関係を示す。ここでは、表面粗さの指標として最も相関が高かった算術平均高さ  $Pa$  を用いて整理している。また同図には、圧縮量と膨張量の和から求められる各サイクルにおける体積ひずみの平均値も併記している。図から圧縮量と膨張量は  $Pa$  を用いた片対数グラフ上で直線状となることが分かる。このことから繰返し載荷過程における供試体の圧縮量と膨張量は表面粗さから推定することが可能といえる。

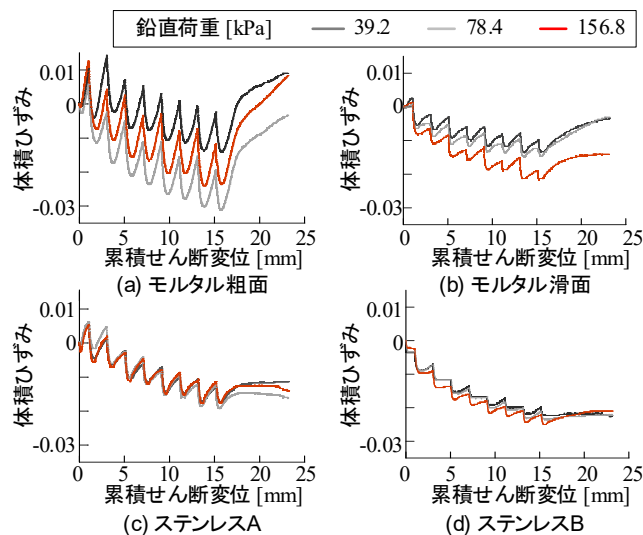


図2 体積ひずみと累積せん断変位の関係

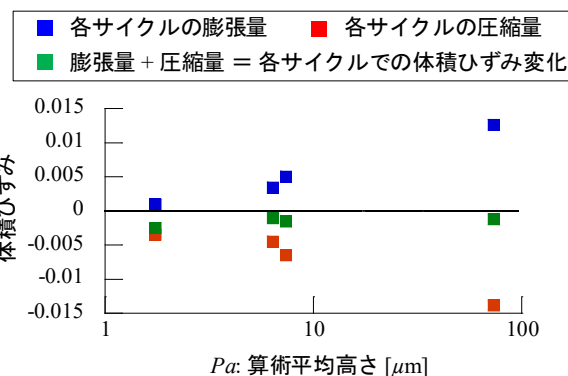


図3 体積変化と算術平均高さ  $Pa$  の関係

### 4. 結論

表面粗さの異なる4つの模型と密詰め豊浦砂に対して定圧繰返し一面せん断試験を実施した。その結果、いずれの模型においても載荷1周目で明確なピークを示すが2周目以降は同じ履歴曲線を通り、その経路は単調載荷の残留状態のせん断強度から推定できることが明らかとなった。また、繰返しせん断過程における体積変化は表面粗さに依存することを確認した。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 19K15087 の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- 1) Uesugi, M. and Kishida, H.: Influential factors of friction between steel and dry sands, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.2, pp.33-46, 1986.
- 2) 廣瀬 駿, 澤村康生, 木村 亮: 構造物の表面粗さが地盤材料との接触面における摩擦特性に与える影響, 第57回地盤工学研究発表会, 2022.