

繰返し応力を受ける破砕性粒状体の力学挙動

北海道大学大学院 学生会員 ○堀田 大介
北海道大学大学院 フェロー 三浦 清一

1. はじめに

一般に粒状体の強度・変形特性は粒子間接点における摩擦法則によって支配される。粒子接点数は構成粒子の形状や粒度分布、密度状態によって異なるが、圧密・せん断過程で生じる粒子破砕は粒状体の指標的性質に変化を与え、更には力学挙動に影響を及ぼす。北海道に分布する火山性粗粒土はしばしば土工材料として用いられることから、著者らは種々の応力条件下における強度・破砕特性を明らかにしてきた。しかしながら、性能設計が要求される昨今においては、材料および構造物としての残留強度・変形特性について知ることが必要となろう。そこで、本研究においては中空ねじりせん断試験機を用い、主応力回転を伴う繰返しせん断応力載荷時における粒子破砕特性について調べた。

2. 試験試料および試験方法

試験に用いた試料は、北海道中標津町当幌地区から採取された当幌火山灰土と豊浦砂である。各試料の物理的性質を Table 1 に示した。なお、当幌火山灰土は既往の研究において強い粒子破砕性が認められている。試験供試体はいずれの試料においても空中落下法により試料を堆積させ、二酸化炭素、脱気水を通し、196kPa の背圧供給を経て供試体の飽和化を図っている。この方法によりすべての供試体において間隙水圧係数 B 値が 0.96 以上であることを確認したのち、有効拘束圧 $\sigma'_c = 98\text{kPa}$ で等方圧密を行った。所定の圧密時間(豊浦砂においては 2 時間、当幌火山灰土においては 4 時間)が経過したのち、排水条件下で繰返しねじりせん断試験(DRAINED CYCLIC TORSIONAL SHEAR TEST: Fig.1 参照)を行った。試験は内外側圧一定、鉛直変位固定、両振幅せん断ひずみ一定、載荷周期 10 秒で載荷している。なお、当幌火山灰土は粗粒土を含むためメンブレンペネトレーションの影響は少なくないが、これに対する補正は行っていない。

また、本研究においては粒子破砕を評価するための指標として細粒分増加量 ΔF_c を用いた。細粒分増加量 ΔF_c は試験前後の試料に対しふるい分析を行い、初期状態の細粒分含有率 F_{ci} と圧密・せん断後の細粒分含有率 F_{cf} の差により求められる。なお、細粒分増加量 ΔF_c は既往の研究によりその有用性が確かめられている。

3. 試験結果と考察

Fig.2 には排水繰返しねじりせん断試験における体積変化の代表的な挙動を示した。これによると本研究で行った載荷回数の範囲においては、粒子破砕性に関わらず常に体積収縮を呈している。これは主応力回転を伴う繰返し

Table 1 Physical properties

SAMPLE NAME	TOYOURA SAND	TOUHORO VOLCANIC SOIL ($D \leq 9.5\text{mm}$)
$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.64	2.55
$\rho_{d\max}(\text{g/cm}^3)$	1.651	0.654
$\rho_{d\min}(\text{g/cm}^3)$	1.342	0.485
$D_{50}(\text{mm})$	0.22	4.4
U_c	2.1	3.6
$F_c(\%)$	0	2.2

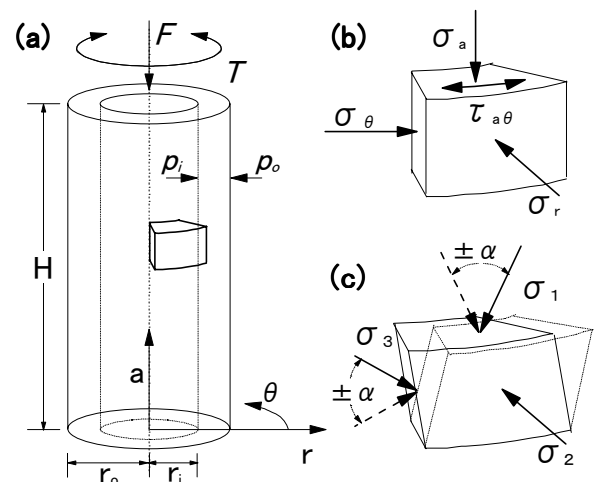


Fig.1 (a) Definition of load and pressure, (b) Normal stresses, (c) Principal stress state on cyclic torsional shear test

キーワード 火山性粗粒土、繰返し載荷、ねじりせん断、粒子破砕、主応力回転

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学研究科 TEL 011-706-6203

し、荷重により砂粒子が間隙に落ち込み、充填化されるためと考えられる。また、当幌火山灰土において体積収縮が卓越するのは、既報¹⁾で示した単調ねじりせん断試験結果と同様に粒子破碎および粒子再配列に伴う体積変化がせん断時のダイレイタンスーをはるかに上回るため、荷重形態に関わらず体積収縮を示すものと思われる。

Fig.3には繰返し荷重 N 回目の塑性仕事量 W^p を繰返し荷重 1 回目の塑性仕事量 $W^p_{atNc=1}$ で正規化した任意の繰返し荷重回数における塑性仕事比 $W^p/W^p_{atNc=1}$ の変化を示した。なお、塑性仕事量は履歴曲線の面積から求められ次式で定義される²⁾。

$$W^p = \int \sigma'_a d\epsilon_a^p + \int \sigma'_\theta d\epsilon_\theta^p + \int \sigma'_r d\epsilon_r^p + \int \tau_{\theta\theta} d\gamma_{\theta\theta}^p \quad \text{Eq. (1)}$$

ここで、本試験は排水条件下で行われているため体積変化に費やした仕事量を考慮すべきであるが、先述のように当幌火山灰土における体積変化には粒子破碎の影響が及んでいるため本研究においてはこれを補正していない。また、上式右辺における第一項から第三項は第四項に比べて極めて微小な値しか示さないため、本研究においては便宜的にゼロとして扱うこととした。こうして求められた塑性仕事比の変化を見ると、豊浦砂は荷重回数 $Nc=500$ までの間においてほぼ一定値で推移し、それ以降においては減少に転じている。これは $Nc=500$ までにおいて繰返し荷重による砂粒子の再配列が収束するためと考えられる。一方、当幌火山灰土については両振幅せん断ひずみの大きさに関わらず荷重開始とともに塑性仕事比が減少してゆく。この一因として本研究においては鉛直変位固定条件下で荷重を行っているため、粒子破碎および粒子再配列による供試体の収縮に追従できていないことが分かっている。

また、両振幅せん断ひずみの大きさに関わらず繰返し荷重によって生じた細粒分増加量 ΔF_c は、Fig.4 に示すように一定値を示した。さらに、両振幅せん断ひずみ $(\gamma_{ab})_{DA}=1.5\%$ の繰返し荷重回数 $Nc=20, 100, 1000$ で生じた細粒分増加量 ΔF_c に明瞭な違いは認められない。よって、Fig.2 に示した著しい体積変化挙動は粒子再配列によるものと指摘される。

4. まとめ

- 1) 塑性仕事比 $W^p/W^p_{atNc=1}$ は繰返し荷重を受ける粒状体の挙動を説明する指標として有用であることが示唆された。
- 2) 破碎性粒状体はせん断ひずみ振幅一定下の繰返しねじり荷重中においても破碎が卓越するが、体積変化挙動に及ぼす影響は少ない。

参考文献 1)堀田・三浦:主応力回転場における火山灰質粒状体の破碎特性,地盤工学会北海道支部技術報告集第43号,pp.305-311,2003. 2)江口・三浦・堀田:火山灰質粒状体の強度-破碎特性に及ぼす応力系の影響,火山灰地盤の工学的性質の評価法に関するシンポジウム発表論文集,pp.121-126,2002.

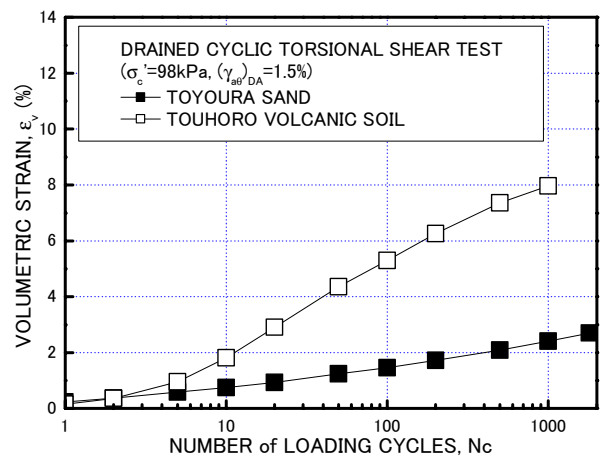


Fig.2 Volume Change Behavior

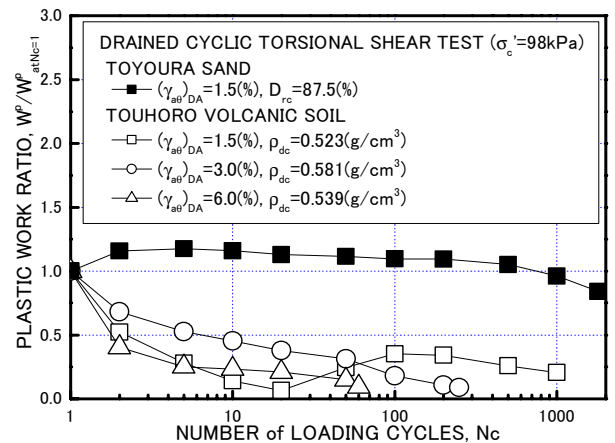


Fig.3 Plastic Work Ratio

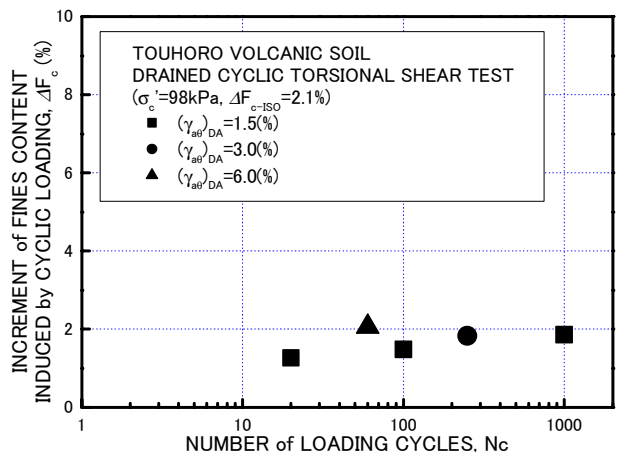


Fig.4 Particle Breakage Behavior