

繰返しせん断に伴う火山灰質砂の粒子破碎に関する基礎的研究

宇都宮大学 学生会員 ○齋藤日向子  
宇都宮大学 正会員 海野寿康, 非会員 吉直卓也

1. 研究背景と目的

近年では、平成 28 年熊本地震<sup>1)</sup>や平成 30 年北海道胆振東部地震での斜面崩壊や液状化において、火山灰質土で被害が多発している。火山灰質土は多孔質で脆く、外力により粒子が破碎しやすいという特殊な性質を持つ<sup>2)</sup>。粒子の破碎により土の粒度分布が変遷することで、土の持つ性質や力学挙動も変化することは明らかであるが、具体的な性質や挙動の変化、災害との因果関係を調べた研究は少なく、未解明な点が多くある。

本研究では、火山灰質土の粒子破碎の地震時挙動への影響を調べるため、繰返し中空ねじり試験を行った。

2. 用いた試料と試験条件

本研究で用いた試料は、粒子破碎を生じる火山灰質土試料 2 種類（赤玉土、鹿沼土）と本载荷では粒子破碎が生じないと考えられる珪砂試料 2 種類（矢作砂、豊浦砂）の全 4 試料である。赤玉土、鹿沼土、矢作砂は、粒子破碎の影響を把握しやすくするため、ふるい分けにより粒径を 0.85mm から 2mm 間に収まるべく調整した。各試料の物理特性（表-1）と粒径加積曲線（図-1）を示す。

研究は、圧密後の各試料へ繰返し载荷～静的単調载荷を行っている。全試料とも圧密後の相対密度

$Dr_c=50\%$ を目標に供試体を作成し、拘束圧 100kPa の条件で実施した。繰返し载荷（応力制御, 0.03Hz）の応力比は、液状化に達した時点の载荷回数が 50 回程度になるよう試料ごとに決定し、赤玉土は 0.17、矢作砂は 0.23、豊浦砂は 0.15 とした。载荷履歴は、発生する過剰間隙水圧 $\Delta u/\sigma'c$ の値で载荷数を調整し、 $\Delta u/\sigma'c=0, 0.25, 0.5, 0.75, 0.95$  or  $1.0$  にした。なお $\Delta u/\sigma'c=0$ は载荷履歴を与えていない試験、 $\Delta u/\sigma'c=0.95$  or  $1.0$ は液状化した試料である。

非排水での繰返し载荷後、残留せん断ひずみそのままの静的単調载荷をひずみ制御（ひずみ速度 $=0.08(\%/min)$ ）をせん断ひずみ 35%まで実施した。

試験後の試料は、赤玉土、鹿沼土について、試験後炉乾燥(40℃)した試料をふるい分けし、粒度分布の変化を把握した。また、繰返し载荷による粒子破碎量の把握のため、繰返し载荷履歴のみを与える試験も実施した。なお、本研究では粒子破碎量を以下の定義式で整理し、各ケースの破碎率を算出した。  
破碎率 $=0.85mm$ ふるい通過質量/全炉乾燥後試料質量

3. 試験結果

以下、代表例として赤玉土と矢作砂の結果を示す。（試験は、 $\Delta u/\sigma'c=0.5$ で载荷終了したもの）

(1) 繰返し载荷の力学挙動

図-2に有効応力経路と応力～ひずみ関係を示す。赤玉土と矢作砂は、平均有効応力 $p'=100kN/m^2$ から徐々に減少し、 $50kN/m^2$ に達するまでの応力経路は、2試料同様の傾向を示した。最終的に発生するせん断ひずみ $\gamma$ の絶対値は、0.2%程度であり、繰返し载荷によるせん断挙動に大きな差は、見られない。

(2) 繰返し载荷後の単調载荷の力学挙動の比較

図-3, 4に繰返し载荷後の単調载荷の力学挙動を示す。矢作砂の有効応力経路（図-3a）をみると、すべての試験ケースにおいて、一旦、過剰間隙水圧の発生に伴ってせん断応力は低下するが、その後、破壊線に沿ってせん断応力は増加している。また、応力～ひずみ関係（図-3b）をみると、すべての試験ケースにおいて、载荷終了時のせん断応力 $\tau$ が約  $155 kN/m^2$ に一致する結果となった。

表-1 試料の物理特

|                                | 赤玉土   | 鹿沼土   | 矢作砂   | 豊浦砂   |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.475 | 2.217 | 2.635 | 2.643 |
| $e_{min}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.291 | 2.704 | 0.767 | 0.597 |
| $e_{max}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.761 | 3.068 | 1.081 | 0.977 |

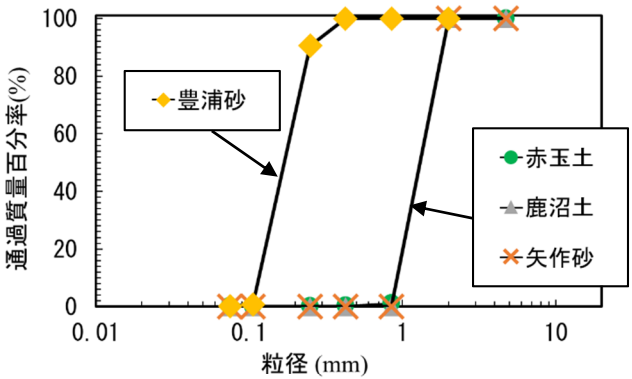


図-1 粒径加積曲

赤玉土の有効応力経路（図-4a）をみると、繰返し载荷履歴が多く、過剰間隙水圧の発生量が多いほど、せん断応力のピーク後の残留値は、小さくなる傾向を示した。また、せん断応力は、破壊線に達した時点でほぼ一定となる（若干低下）。そのため、赤玉土において、ひずみ硬化挙動はみられない。応力～ひずみ関係（図-4a）をみると、せん断応力のピーク後、せん断ひずみの増加に伴い緩やかに減少している。ピーク後の残留値も矢作砂とは異なり一致しない。このことから、破碎性試料は、繰返し载荷履歴が多く過剰間隙水圧の発生量が多いほど、せん断応力が低下する結果となった。

4. 粒子破碎について

3. (1), (2) で示したせん断履歴での赤玉土の粒子破碎量について表-2に整理したものを示す。

圧密過程では、約 15%の破碎が生じた。一方、繰返し载荷過程では、 $\Delta u/\sigma'c=0.75$  までは圧密時と同程度の破碎量であることから、この時点では繰返し载荷による破碎は生じていないようである。その後载荷が進み、 $\Delta u/\sigma'c=0.95$  において、破碎量は 27.5%を示しており $\Delta u/\sigma'c=0.75$  時点より約 12%破碎が進行している。このことから繰返し载荷では、 $\Delta u/\sigma'c$  が 0.75 から 0.95 の間で粒子破碎が多く生じるのではないかと予想される。繰返し载荷後の単調载荷では、すべての試験ケースにおいて、载荷終了時の粒子破碎量は 35～38%に一致する結果となった。

5. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- ① 非破碎性試料では、繰返し载荷による過剰間隙水圧の発生に関係なく、繰返し载荷後の単調载荷でのせん断応力のピークは一致する。
- ② 他方、破碎性試料では、繰返し载荷後の単調载荷で、せん断応力のピークは一致せず、繰返し载荷履歴が多く過剰間隙水圧の発生量が多くなるほど、せん断応力のピーク値は小さくなる。
- ③ 圧密後、繰返し载荷過程での粒子破碎は、過剰間隙水圧比が 0 から 0.75 の間はあまり生じず、载荷が進み、過剰間隙水圧比が 0.75 から 0.95 の区間で、粒子破碎が多量に生じるようである。

謝辞：本研究は、科研費 15H02263 及び、科研費 18H01529 の助成を受けて実施したものである。

参考文献 1)平成 28 年熊本地震地盤災害調査報告書、地盤工学会、pp25-113、2016 2)三浦清一、八木一善：火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価、土木学会、1997

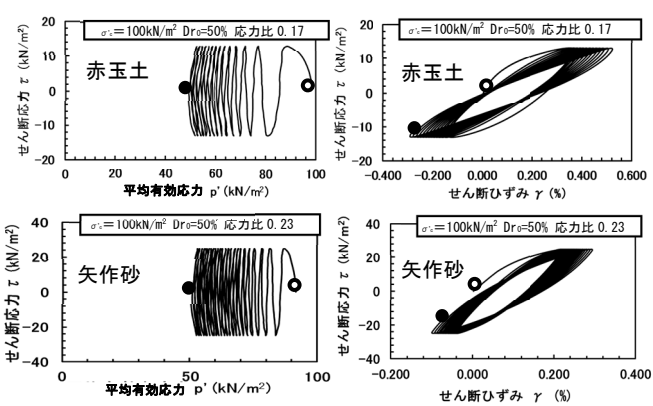


図-2 有効応力経路と応力～ひずみ関係

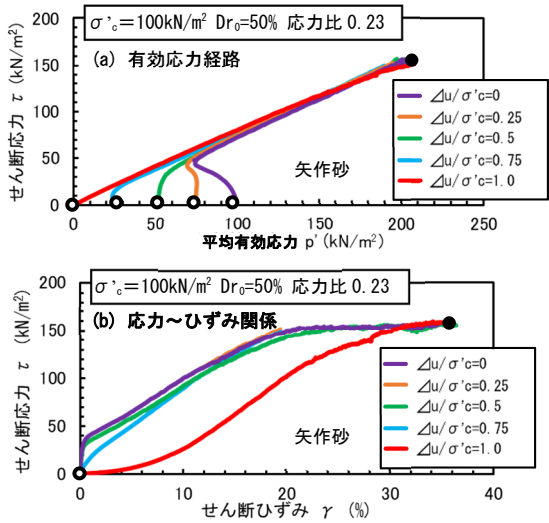


図-3 矢作砂の繰返し载荷後の単調载荷挙動

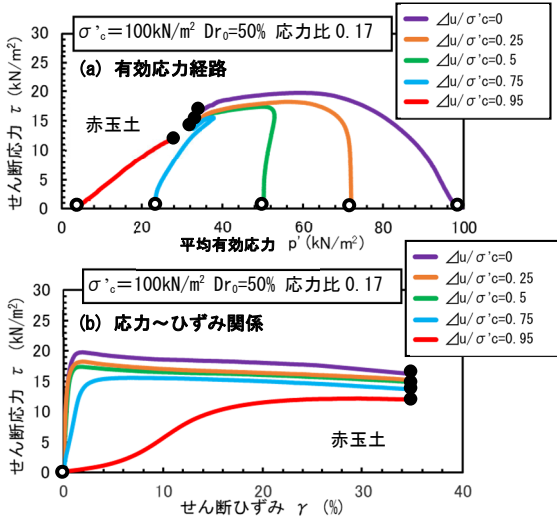


図-4 赤玉土の繰返し载荷後の単調载荷挙動

表-2 赤玉土の粒子破碎量

| 過程        | 過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'c$ |      |      |      |      |
|-----------|-----------------------------|------|------|------|------|
|           | 0                           | 0.25 | 0.5  | 0.75 | 0.95 |
| 圧密後       | 15.8 (%)                    |      |      |      |      |
| 繰返し载荷後    | —                           | 14.4 | 14.3 | 13.9 | 27.5 |
| 繰返し→単調载荷後 | 38.3                        | 37.8 | 35.9 | 38.9 | 37.8 |