

粒子破碎によって生じる細粒分が砂の非排水せん断挙動に与える影響

首都大学東京 学生会員 ○水野 光揮

首都大学東京 正会員 吉嶺 充俊

1. 目的

せん断中の粒子破碎は砂の定常状態に重大な影響を与える^[1]。本研究では、初めにせん断中の砂の粒子破碎によって増加した細粒分 FC を調べるために排水三軸試験を行う。そして、試験結果から粒子破碎による細粒分の発生量を予測するモデルを作成し、通常用いられる間隙比の代わりに骨格間隙比を用いることで、砂の粒子破碎による細粒分の増加が定常状態線に与える影響について調べる。また、Wang ら (2002)^[2] によって提案されている砂の構成則において間隙比を骨格間隙比に置き換えることで粒子破碎がない場合の非排水せん断挙動を予測し、粒子破碎がある場合と比較する。

2. 研究手法

2.1 骨格間隙比

砂の強度を発するのは粗粒の粒子であり細粒分はその隙間に漂うように存在していてせん断抵抗にはほとんど寄与しないと考え、骨格間隙比 $e_s = (e + FC) / (1 - FC)$ と同じであれば、せん断挙動は同じであると仮定する。粗粒分と細粒分の粒径差がある程度大きければこの過程は妥当であることが知られている。

2.2 実験方法

せん断中の粒子破碎による細粒分発生量を幅広い拘束圧条件とひずみ条件で調べるために、拘束圧を 100～4000kPa、載荷終了時の軸ひずみ（最大主ひずみ） $\varepsilon_z = 5 \sim 40\%$ の様々な条件で、豊浦砂、飯豊砂（7, 6, 5, 4 号）、岐阜砂（7, 6 号）について排水三軸圧縮単調載荷試験を実施した。試料はふるいわけによって予め $106\mu\text{m}$ 以下の成分を取り除いた砂を用い、圧密までに生じた細粒分は極めて少量であるため無視することとした。繰り返しせん断試験も行い単調載荷試験での細粒分の発生に関する関連性も調べた。

3. 実験結果

せん断中の粒子破碎による細粒分発生量 FC と拘束圧やひずみ等様々なパラメータとの相関を調べた結果、 FC は鉛直方向の変形に関する単位体積当たりの仕事 W （鉛直ひずみ ε_z と鉛直応力 σ'_z の積）と線形関係にあり、 $FC = B_w W$ と表すことが可能であることが示された。各砂の B_w は図-1 のようになり、岐阜砂と豊浦砂の比較から、粒子形状が角張っている方が破碎性は大きくなることが分かった。飯豊砂の結果からは、粒径が大きくなるほど破碎性は小さくなることが分かったが、これは破碎前の粒径に関わらず $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分の発生量で破碎性を評価するという条件による結果であることに注意が必要である。繰り返し載荷試験では、せん断仕事と FC 発生量の相関が載荷過程と除荷過程で異なるため、単調載荷試験と同様の関係式で表現することはできないことがわかった。

4. 粒子破碎が砂の非排水挙動に与える影響

4.1 骨格間隙比を用いた定常状態モデルの提案

せん断中に全く粒子破碎しないとすれば常に $FC = 0$ であり、定常状態も含めて常に $e_s = e$ となるので、骨格間隙比 e_s を用いた定常状態線は砂が全く粒子破碎しなかった場合の定常状態線であると言える。三軸圧縮単調載荷試験結果に基づいた定常状態での間隙比 e と拘束圧 p'_{ss} の関係を表した定常状態線と、 $FC = B_w W$ から計算した粒子破碎による細粒分発生量 FC を用いて、既往の非排水せん断試験における定常状態での骨

格間隙比 e_s を計算し、改めて骨格間隙比 e_s を用いて粒子破碎しない砂の定常状態線を描き元の定常状態線と比較すると、図-2 に示すように破碎のないものの方が全体的に上部に位置し、特に 1000kPa より拘束圧が大きくなると骨格間隙比 e_s が間隙比 e にくらべてかなり大きくなっていることが分かった。これは、せん

キーワード 砂, 定常状態, 粒子破碎

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 都市基盤環境学域 TEL 042-677-2773

断中の粒子破碎が高圧部で特に大きくなるためであると考えられる。粒子破碎のない砂の定常状態線を $e_s = e_0 - \lambda_c(p/p_a)^\xi$ と定式化した。定式化におけるモデル定数のうち e_0 と λ_c は破碎ありの場合と同じとして、定常状態線の曲率を表す ξ を図-3 のように求めた。図-2 には、このようにして求めた粒子破碎のない砂の定常状態線を点線で表示している。

4.2 構成則への適用

粒子破碎しない砂と粒子破碎する砂の定常状態モデルを既往の構成則^[2]に適用し、両者の非排水せん断挙動を比較した。その結果、図-4 に示すように、せん断中に粒子破碎が生じる影響により非排水せん断変形中のせん断抵抗や定常状態での強度は、破碎がない場合よりも低下していることが確かめられた。ただし、間隙比が大きくて緩い場合には定常状態での強度の差は小さくなることがわかった。

5. 結論

(1)せん断中の粒子破碎による細粒分発生量 FC は鉛直方向の変形に関する単位体積当たりの仕事 W と線形関係にあり、 $FC = B_w W$ という式で表すことが可能であることが示された。

(2)上記の細粒分発生量モデルを既往の構成モデルに組み込むことにより、非排水せん断変形中のせん断抵抗や定常状態での強度は粒子破碎によって低下することが定量的に表現できた。

参考文献

[1] The influence of particle breakage on the location of the critical state line of sands, V. Bandini, R. Coop, Soils and Foundations, Vol. 51, No.4, pp.591-600, 2011. [2] Bounding surface hypoplasticity model for sand, ZL Wang, YF Dafalias, CK Shen, Journal of engineering mechanics, Vol.116, issue 5, 1990. [3] The steady state of sandy soils, Verdugo, R. and Ishihara, K., Soils and Foundations, Vol. 36, No. 2, pp. 81-92, 1996

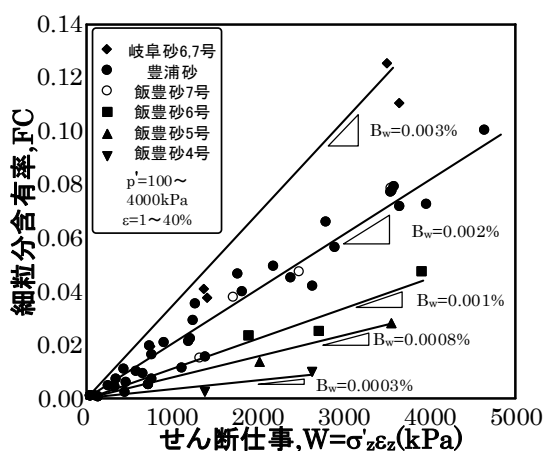


図-1: 細粒分発生量とせん断仕事の相関

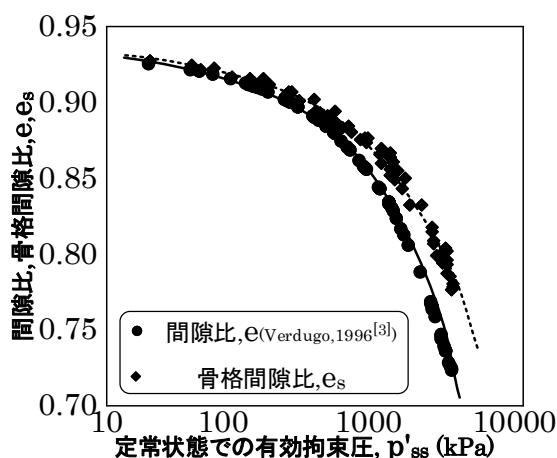


図-2: 豊浦砂の定常状態線とそのモデル

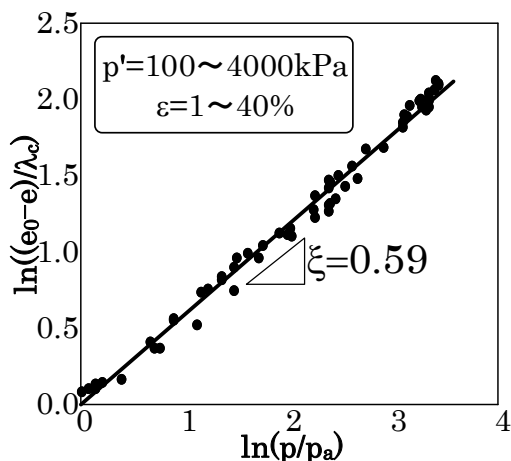


図-3: 豊浦砂のパラメータ ξ の決定方法

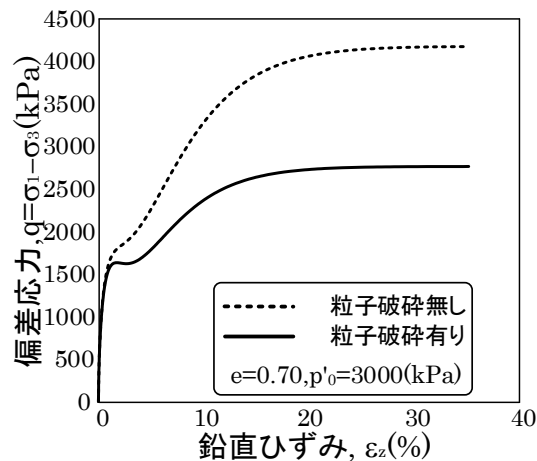


図-4: 構成則を用いた豊浦砂の破碎の有無の比較