

## バケットに作用する抵抗力を用いた礫混じり砂質土のせん断強度定数推定の試み

東北大学 正会員 ○里見 知昭  
 日立製作所 (元東北大学修士学生) 塩田 浩平  
 東北大学 正会員 高橋 弘

### 1. はじめに

i-Construction による施工生産性向上や災害復旧作業および平時の土木工事における安全性確保の観点から無人化施工のニーズが高まっている。しかし、重機に搭載されたカメラの画像（視覚情報）に頼っているため、有人施工と比べて効率が悪い。よって、力覚を応用した地盤情報推定技術が不可欠である。筆者らはパワーショベルのバケットに作用する抵抗力に着目し、細粒土を対象に掘削作業から地盤強度を推定する研究を行ってきた<sup>例え1)</sup>。しかし、実地盤のような礫混じり土のバケット掘削研究が体系的に行われた例は無く、筆者らはバケットによる礫混じり土の掘削研究を取り組んできている<sup>例え2),3)</sup>。本研究では、礫混じり砂質土を対象に掘削模型実験を行い、バケットに作用する抵抗力から土のせん断強度定数を推定する方法を提案し、その実現可能性を示す。

### 2. 掘削模型実験および地盤条件

実験装置<sup>3)</sup>の外観を図-1に示す。バケットの軌道は円弧であり(図-2)、回転半径  $R$  は 206 mm、回転速度  $\omega$  は 5.3 deg./s、最大掘削深さ  $d_{max}$  は 15 mm である。掘削抵抗力  $F_x$ ,  $F_z$  の方向はアームに対してそれぞれ垂直および平行である。アーム角度  $\theta$  はアームが回転軸の真下に来たときを 0 deg. とする。実験は同じ地盤条件に対して 3 回行う。

本研究では、硅砂 (50% 粒径  $D_{50}$ : 0.08 mm) に礫 ( $D_{50}$ : 2.50 mm) を混合した土を用いる。硅砂と礫の粒子密度は  $2.65 \text{ Mg/m}^3$  である。礫含有率  $GC$  (全体の土試料に対する礫の質量百分率と定義) は 0% から 40% までの 10% 刻みに設定した。式(1)に示す礫分の体積を空隙とみなした砂骨格空隙比  $e_s$ <sup>4)</sup> が一定になるように供試地盤を作製した。

$$e_s = \frac{V - V_{ss} - V_{sg}}{V_{ss}} = e \left( 1 + \frac{\rho_{ss}}{\rho_{sg}} \frac{GC}{100 - GC} \right) \quad (1)$$

ここで、 $V$  は土全体の体積、 $V_{ss}$  は硅砂の体積、 $V_{sg}$  は礫の体積、 $e$  は一般的な空隙比 (礫を含む土粒子に対する空隙の体積比)、 $\rho_{ss}$  は硅砂の粒子密度、 $\rho_{sg}$  は礫の粒子密度である。地盤条件は、砂骨格空隙比を 1.21 (礫含有率が 0% のときの土の乾燥密度は  $1.2 \text{ Mg/m}^3$ )、含水比 (硅砂に対する水の質量百分率と定義) を 10% に設定した。

### 3. 推定方法

図-3に示すように、バケットによって生成される土のせん断層に作用する力は、バケットから受けるせん断力と既に掘削された土の重みによって押さえられる力 (垂直力) が主として考えられる。その掘削によって生じる土のせん断層に作用する力は、一面せん断試験の供試体に作用する力と類似すると解釈できる。このことから、バケットに作用する抵抗力を土のせん断強度定数の推定に応用できる可能性がある。

バケット掘削による土のせん断強度定数推定の概念図を図-4に示す。図-4に示すように、掘削抵抗力の各波に対してせん断応力と垂直応力を求めて、せん断応力～垂直応力関係にクーロンの破壊基準を適用することで粘着力および内部摩擦角が求められる。せん断力は掘削抵抗力の一つ一つの波の大きさから算出し、垂直力は波がピークを示したときの既に掘削された土の質量から算出する。土の質量は、湿潤密度と土の体積を乗じたものである。湿潤密度はアーム

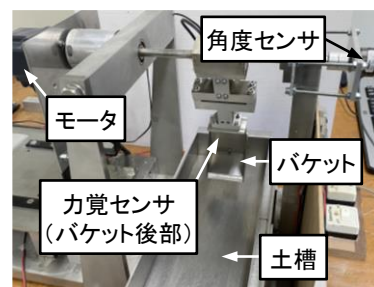


図-1 掘削実験装置

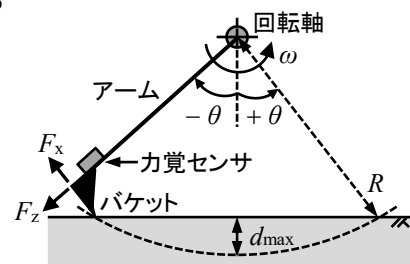


図-2 バケットの軌道

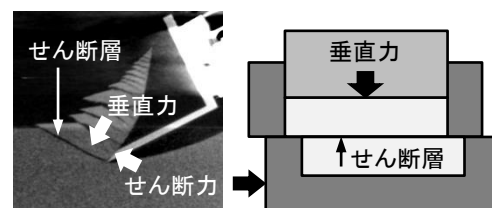


図-3 掘削時に土のせん断層に作用する力 (X線CT画像<sup>2)</sup>) と一面せん断試験の供試体に作用する力の関係

キーワード バケット掘削, 力覚情報, せん断強度定数, クーロンの破壊基準, 礫混じり土

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20 東北大学大学院環境科学研究科

が回転軸の真下に来たときの力  $F_z$  を用いて算出し、土の体積はアーム角度  $\theta$  が 0 deg. になるまでにバケットが掘削した地盤の体積とした。せん断面の面積については、簡単のために掘削で生じた土塊を図-3のような断面が台形の四角柱と仮定し、土塊の底面と側面をせん断面の面積と定義する。以上の力と面積を用いて、せん断応力および垂直応力が求められる。

#### 4. 結果および考察

図-5 に掘削から得られたせん断応力～垂直応力関係の一例を示す。図-5 より、垂直応力はせん断応力と比べると非常に小さく、大半が  $1 \text{ kN/m}^2$  未満である。これは、掘削抵抗力の変動がせん断層の生成のみによって生じたものと仮定したためである。しかし、実際はバケットと礫の接触やバケットと土の摩擦による力が生じている。そのため、土のせん断面で生じている実際のせん断応力は図-5 の値よりも小さいと予想される。一方、垂直応力については、掘削された土の質量だけでなく、バケット刃先で押された土が圧縮されて上方向からの力も働くと考えられる。よって、実際の垂直応力は図-5 の値よりも大きいと予想される。そこで本研究では、算出されたせん断応力と垂直応力にそれぞれフィッティング定数  $k_\tau$ ,  $k_\sigma$  を乗じた応力値を用いることにした。フィッティング定数  $k_\tau$ ,  $k_\sigma$  は、フィッティング定数に乗じた各応力から得られる推定値と一面せん断試験による実測値<sup>3)</sup>の二乗平均平方根誤差 (RMSE) が最も小さくなったときの値を採用した。

図-6 にせん断強度定数の推定値と実測値の比較結果を示す。推定値は3回の掘削実験から得られた平均値をプロットし、推定値の最大値と最小値をエラーバーで示している。図-6 より、せん断応力および垂直応力を調整することで、バケットに作用する抵抗力から土のせん断強度定数を概ね精度良く推定できている。しかし、内部摩擦角については、礫含有率が30%を超えると推定精度が低くなった。これは、礫が含有することで掘削土塊が歪な形状になったり、せん断面の凹凸が大きくなった<sup>2)</sup>ためであると考えられる。

このように、本方法はいくつかの仮定を設けているため、掘削抵抗力と土のせん断強度定数との回帰モデル<sup>2)</sup>に比べると推定精度は低いものの、バケットに作用する抵抗力から算出されるせん断応力および垂直応力を定数倍に調整することで、土のせん断強度定数を推定できる可能性を示すことができた。

#### 5. むすび

本研究では、礫混じり砂質土を対象に掘削実験を行い、バケットに作用する抵抗力から土のせん断強度定数を推定する方法を提案した。その結果、バケットに作用する抵抗力から得られた「せん断応力～垂直応力」関係にクーロンの破壊基準を適用することで、土のせん断強度定数を推定できる可能性が示唆された。今後は、土の種類や含水状態など様々な地盤条件に対して検討していく予定である。

**謝辞:** 本研究はJSPS 科研費 (基盤(C), JP19K04592) の助成を受けたものです。

**参考文献:** 1) Satomi T, Takahashi H, Aoki S, Kanamori H, Wakabayashi S and Hoshino T: Proc. 10th Asia-Pacific Conf. ISTVS, #15, 2018. 2) 里見知昭, 塩田浩平, 渡邊則昭, 高橋弘: 第56回地盤工学研究発表会, 2021. 3) 里見知昭, 塩田浩平, 高橋弘: 土木学会第76回年次学術講演会, 2021. 4) Thevanayagam S: J. Geotech. and Geoenviron. Eng., 124(6), pp.479-491, 1998. 5) 里見知昭, 塩田浩平, 高橋弘: 第57回地盤工学研究発表会, 2022. (投稿中)

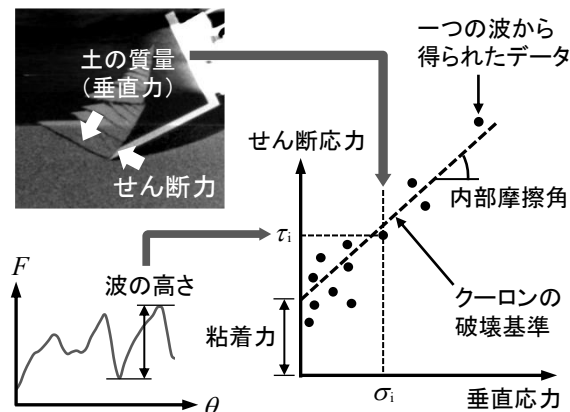


図-4 バケット掘削による土のせん断強度定数推定の概念図

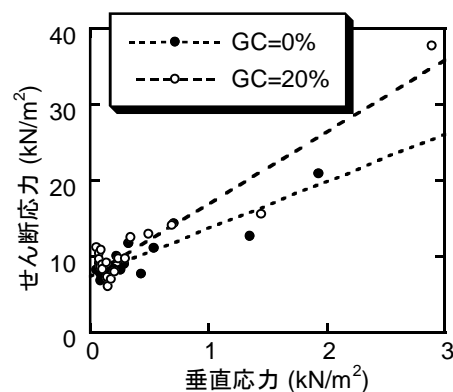


図-5 掘削から得られたせん断応力～垂直応力関係の一例

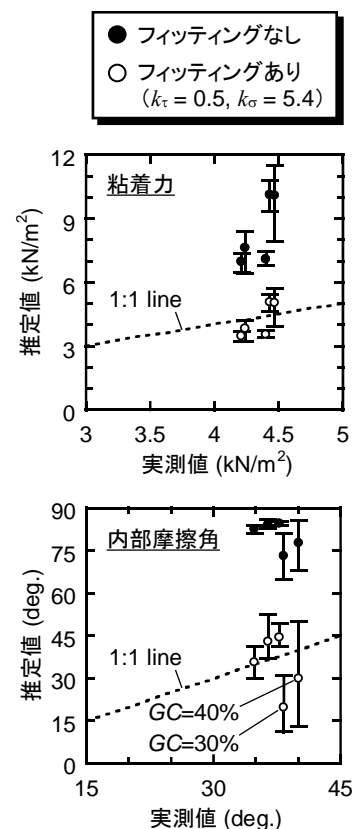


図-6 せん断強度定数の推定値と実測値の比較