# 礫混じり砂質地盤におけるバケットに作用する抵抗力とせん断強度定数の関係

東北大学	正会員	○里見	知昭
東北大学	非会員	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、重機に搭載されたビデオカメラからの視覚情報に頼っているのが現状であ り、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.著者らはパワーシ 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抵抗力から地盤強度を推定する研究を行なって きた<sup>例えば1)</sup>.しかし,土と機械の力学的相互作用問題を扱うテラメカニクス研究において,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い、そこで、著者らはバケットによる礫混じり土の変形挙動・掘 削抵抗力・地盤強度の関係に及ぼす礫の影響の解明に向けた研究に着手した<sup>例えば2),3)</sup>.本研究では,掘削模型実験お よび低拘束圧中型一面せん断試験を行い,掘削抵抗力とせん断強度定数の関係について考察することを目的とする.

## 2. 実験の概要および条件

図-1 に掘削実験装置の外観を示す.実験装置はモータ,力覚センサ,角度セン サ, 土槽 (内寸: L346 mm × W126 mm × H48 mm), バケット (L58 mm × W54 mm × H54 mm) で構成される. 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ωは 5.3 deg./s, 最大掘削深さ d<sub>max</sub> は 15 mm である. 掘削抵抗力 F の方向はアームに対して垂直である.アーム角度のはアームが回転軸の真下に来 たときを 0 deg.とする. データのサンプリング周波数は 50 Hz とし, 平滑化処理を 行う.実験は同じ地盤条件(供試体高さ:40 mm)に対して3回行う.

図-3 に低拘束圧中型一面せん断試験装置の外観を示す.本試験装置は垂直応力 を反力板側で測定することを前提とした簡易定圧試験(地盤工学会, JGS 0561) に準拠している. 本装置はモータ, エアシリンダ, ロードセル (垂直力・せん断 力),変位計(垂直変位・せん断変位),加圧板,せん断箱(D200 mm×H70 mm) で構成される. 垂直応力は 3~50 kN/m<sup>2</sup>, せん断速度は 0.2~1.4 mm/min に調整で きる.本試験では,掘削時の地盤応力状態に近づけるために垂直応力は5,10,15 kN/m<sup>2</sup>に設定し、せん断速度は通常の砂質土で設定される 0.2 mm/min よりも速い 速度1mm/minに設定した.試験は同じ垂直応力に対して3回行い,最大せん断応

本研究では, 硅砂(50%粒径D<sub>50</sub>: 0.08 mm) に礫(D<sub>50</sub>: 2.50 mm) を混合した土を用いる. 硅砂および礫の粒子密度は 2.65 Mg/m<sup>3</sup>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.礫 含有率によらず,式(1)に示す礫分の体積を間隙とみなした砂骨 格間隙比 e<sub>s</sub><sup>4</sup>が一定になるように供試地盤を作製した.

力と垂直応力の関係から粘着力および内部摩擦角を求めた.



キーワード 礫混じり土, せん断強度定数, 掘削, フォースセンシング

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





角度セン

図-2 バケットの軌道



図-3 低拘束圧中型一面せん断試験装置

Î

掘削抵抗力

ここで、Vは土全体の体積、V<sub>ss</sub>は硅砂の体積、V<sub>sg</sub>は礫の体積, e は一般 的な間隙比(礫を含む土粒子に対する間隙の体積比), p<sub>ss</sub>は硅砂の粒子密 度、p<sub>sg</sub>は礫の粒子密度である.地盤条件は、砂骨格間隙比を 1.21 (礫含 有率が 0%のときの土の乾燥密度: 1.2 Mg/m<sup>3</sup>)、含水比 w (硅砂に対する水 の質量百分率と定義)を 10%に設定した.

## 3. 結果および考察

図-4に掘削抵抗力の計測結果例を示す.図-4より,掘削が進むと掘削 抵抗力は増減を繰り返し,礫含有率が増加すると掘削抵抗力の変動が大 きくなった.その変動は土の変形・破壊と関連付けられると推測される. そこで,掘削抵抗力の計測データから波の数*N*w(掘削抵抗力の山の数),波の 高さ*H*w(掘削抵抗力の山値と谷値の差の平均値),そして掘削エネルギー*E*(*θ* ~*F*グラフで囲まれた面積,掘削時にバケットが行なった仕事の総和)を抽出 し,礫含有率との関係を考察する.抽出値を求めるに際し,バケット刃先が 地面に入ってから出るまでの計測データを用いる.

図-5 に礫含有率および掘削抵抗力からの抽出値(波の数,波の高さ,掘削 エネルギー),せん断強度定数(粘着力,内部摩擦角)の関係を示す.図-5a,b,c より,礫含有率が増加しても波の数はほとんど変化しなかったものの,礫含 有率が増加すると波の高さおよび掘削エネルギーは増加した.このことから, 地盤が密になる(間隙比 e は礫含有率が増加とともに減少する)ことで土粒 子の接触点数が増加しせん断抵抗が増加するため,バケットによって土を破 壊させるのに必要な抵抗力は増加すると解釈される.図-5d,eより,礫含有率 が増加すると,粘着力および内部摩擦角は増加した.その要因は,土粒子間 に作用するサクションの効果と土粒子のかみ合わせの効果によるものと考え られる.その効果によって掘削抵抗力が増加し,波の高さおよび掘削エネル ギーが増加したと考えられる.このように,掘削抵抗力からの抽出値は礫含 有率に対応し,礫混じり土の場合でもバケットに作用する抵抗力は地盤強度 と関係付けられる可能性が示唆された.

## 4. むすび

本研究では,礫混じり砂質土を対象に掘削模型実験および低拘束圧中型一 面せん断試験を行い,掘削抵抗力からの抽出値とせん断強度定数の関係につ いて考察した.その結果,礫含有率が増えると掘削抵抗力からの抽出される 波の高さおよび掘削エネルギーが増加し,その変化傾向は礫含有率とせん断 強度定数の関係と類似することが確認された.今後は,実験条件を増やして 掘削抵抗力からの抽出値とせん断強度定数の関係の考察を進めるとともに, 掘削抵抗力から地盤強度を推定する方法を提案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.



広力からの抽出値, せん断強度 定数の関係(点線は近似直線, エラーバーは最大値と最小値)

参考文献: 1)Satomi T, Takahashi H, Aoki S, Kanamori H, Wakabayashi S and Hoshino T: Development on estimation of cone index by using soil excavation bucket, Proc. 10th Asia-Pacific Conf. ISTVS, #15 (pp.1-8), 2018. 2)里見知昭,塩田浩平,高橋弘: バケットによる礫混じり砂質土の破壊挙動および掘削抵抗力に関する二次元模型実験,第55回地盤工学研究発表会,2020. 3)里見知昭,塩田浩平,渡邉則昭,高橋弘: X線 CT を用いたバケットによる礫混じり砂質土の破壊メカニズム,第56回地盤工学研究発表会,2021. (投稿中) 4)Thevanayagam S: Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands, J. Geotech. and Geoenv. Eng., 124(6), pp.479-491, 1998.