

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04592

研究課題名（和文）バケット掘削による礫混じり土の破壊メカニズムの解明と地盤強度推定法の開発

研究課題名（英文）Failure mechanism for gravel mixed soil due to bucket excavation and estimation on its shear strength parameters

研究代表者

里見 知昭（Satomi, Tomoaki）

東北大学・環境科学研究科・助教

研究者番号：80588020

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：危険を伴う土砂災害復旧には無人化施工が不可欠であるが、有人施工と比べて効率が悪い。それは、車載カメラでは地盤強度が分からないからである。そこで、どの現場でも必ず導入されているパワーショベルのバケットを応用した地盤強度推定技術を開発するため、土と機械の力学的相互作用を扱うテラメカニクス研究でこれまで見過ごされてきた「礫混じり土」のバケット掘削研究に取り組んだ。具体的には、掘削時の土の破壊形態・掘削抵抗力変化・地盤強度の関係に及ぼす礫の影響を二次元・三次元・X線CT掘削実験および低拘束圧中型一面せん断試験で明らかにし、掘削抵抗力（力覚情報）から土のせん断強度定数を推定する方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

災害復旧作業での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、現状は車載カメラの画像に頼っているため、有人施工と比べて効率が悪い。よって、「機械で掘削しながら地盤の強度を評価する」という新しい観点が不可欠である。しかし、バケット掘削における実地盤のような礫混じり土の破壊メカニズムは明らかにされていない。そこで本研究では、掘削実験と低拘束圧中型一面せん断試験を通じてバケットに作用する抵抗力の変化と地盤強度との関係に及ぼす礫の影響を明示した。そして、掘削抵抗力を用いた地盤強度推定法を提案できたことは、無人化施工の効率向上に貢献する技術の開発につながると期待される。

研究成果の概要（英文）：Unmanned construction is required for sediment disaster reconstruction work, and thus understanding a ground strength is significant to improve the work efficiency. To develop a ground strength estimation method using an excavator bucket, the present study investigated bucket excavation of soil mixed with gravel, which has been overlooked in terramechanics research dealing with mechanical interaction between soil and construction machinery. Specifically, this study clarified the effects of gravel on the relationship between soil failure patterns and change in excavating resistive force by bucket and ground strength through two- and three-dimensional and X-ray CT excavation tests and low confining pressure typed box shear tests. In addition, this study proposed a method for estimating shear strength parameters using the resistive force acting on the bucket.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤情報施工 バケット掘削 力覚 礫混じり土 掘削実験 X線CT 地盤強度 クーロンの破壊基準

1. 研究開始当初の背景

土砂災害発生後は直ちに状況を把握して緊急工事を行う必要があるが、二次災害の危険が高いため、安全な場所で建設機械を遠隔操作する無人化施工が不可欠である。しかし、建設機械に搭載されたカメラの画像に頼っており、画像からは地盤の強度が分からないため、有人施工と比べて効率が悪いのが現状である。よって視覚だけでなく、物と接触したときに感じる「力覚」を応用した地盤強度推定技術の開発が不可欠である。

建設機械の力覚を応用した技術を開発する上で、テラメカニクスと呼ばれる土と機械の力学的相互作用に基づいた学術研究(地盤工学と機械工学の境界領域)が担う役割は重要である。研究代表者は、建設施工の効率と品質の向上を目的に「建設機械で掘削しながら地盤強度を推定する」という新たな観点に立ち、粒径が比較的揃った細粒土を対象にバケットに作用する抵抗力から地盤強度を推定する可能性についての研究を行ってきた(Satomi et al., 2018 他)。しかし、実地盤のような粒径幅の広い「礫混じり土」を対象としたバケット掘削研究の例は国内外に無く、礫混じり土の破壊形態・掘削抵抗力変化・地盤強度の関係に及ぼす礫の影響、すなわちバケット掘削による礫混じり土の破壊メカニズムは明らかにされていない。よって、バケット掘削による礫混じり土の破壊メカニズムの解明が、建設機械の力覚を応用した地盤強度推定技術の開発に不可欠であると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、以下の3事項を行ってバケット掘削による礫混じり土の破壊メカニズムを解明して、バケットを応用した地盤強度推定法を開発する。本研究の推定対象は、地盤の安定性評価に必要な「せん断強度定数：粘着力・内部摩擦角」とする。

- (1) 掘削模型実験(二次元, 三次元, X線CT)で礫混じり土の破壊形態・掘削抵抗力変化のメカニズムを明らかにする。
- (2) 一面せん断試験で礫混じり土の地盤強度に及ぼす礫の影響を明示する。
- (3) 掘削抵抗力から礫混じり土の地盤強度を表す特徴値を取得し、バケットに作用する抵抗力から地盤強度を推定する方法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 掘削実験

① 二次元掘削実験

実験装置の外観を図-1に示す。本装置はモータ、力覚センサ、角度センサ、土槽(長さ340mm, 幅54mm, 高さ45mm)、バケット(幅54mm)で構成されている。土の変形をビデオカメラで撮影するため、土槽側面は透明アクリル板にした。バケットの軌道は円弧であり、掘削最大深さは15mmとした。掘削抵抗力 F はバケット刃先と水平方向に作用し、アーム角度 θ はアームが回転軸の真下に来たときを0degとした。

② 三次元掘削実験

本実験で使用した装置は図-1と同じであり、土槽およびバケットの寸法が異なる。土槽は、長さが346mm, 幅が126mm, 高さが48mmである。バケットは二次元掘削実験で用いたバケットに厚さ2mmの側板を取り付けたものであり、バケット幅は58mmである。

③ X線CT掘削実験

X線CT掘削実験装置を図-2に示す。X線CTスキヤナの都合上、実験装置は回転テーブル上に収めつつ、装置質量が20kg以下になるように設計した。本装置はモータ、力覚センサ、角度センサ、アクリル土槽(内寸:長さ230mm×幅70mm×高さ55mm)、アルミニウム製バケット(外寸:長さ38mm×幅34mm×高さ32mm, 刃先角:21.8deg)で構成されている。バケットの軌道は円弧であり、最大掘削深さは10mmである。

掘削実験の手順は、(1)バケットによる掘削、(2)バケット停止、(3)モータとセンサの接続ケーブルを装置から切り離し、(4)X線CT撮影であり、その手順を掘削終了まで繰り返す。バケット停止のタイミングは、二次元模型実験の結果にもとづいて、供試地盤にせん断層が生成されたとき、すなわち掘削抵抗力がピークを過ぎたときとする。X線CTの撮影

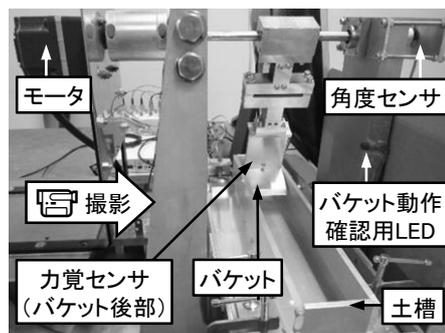


図-1 掘削実験装置

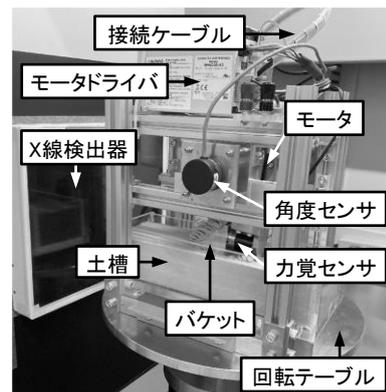


図-2 X線CT掘削実験装置

条件は、X線管電圧 120 kV、X線管電流 150 μ A、ボクセルサイズ 185 \times 185 \times 185 μ m³とした。

一連の掘削実験では、硅砂 A (50%粒径 D_{50} : 0.08 mm) あるいは硅砂 B (50%粒径 D_{50} : 0.36 mm) に礫 (D_{50} : 2.50 mm) を混合した土を用いた (以降、それぞれ Soil-A、Soil-B と記載)。硅砂および礫の粒子密度は 2.65 Mg/m³ 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。供試地盤は、礫含有率 GC によらず礫分の体積を間隙とみなした砂骨格間隙比 e_s (式(1), Thevanayagam, 1998.) が一定になるように作製した。

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

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 は一般的な間隙比 (礫を含む土粒子に対する間隙の体積比)、 ρ_{ss} は硅砂の粒子密度、 ρ_{sg} は礫の粒子密度である。地盤条件は、砂骨格間隙比を 1.21 (GC が 0% のときの土の乾燥密度: 1.2 Mg/m³)、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。

(2) 低拘束圧中型一面せん断試験

礫混じり土のバケツ掘削における応力状態に対応した低拘束圧中型一面せん断試験装置の外観を図-3 に示す。本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) に準拠しており、モータ、エアシリンダ、ロードセル、変位計、加圧板、せん断箱 (直径 200 mm \times 高さ 70 mm) で構成される。垂直応力は 5, 10, 15 kN/m² 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 1 mm/min に設定した。試験は同じ垂直応力に対して 3 回行い、クーロンの破壊基準から粘着力および内部摩擦角を求めた。地盤条件は掘削実験に合わせた。

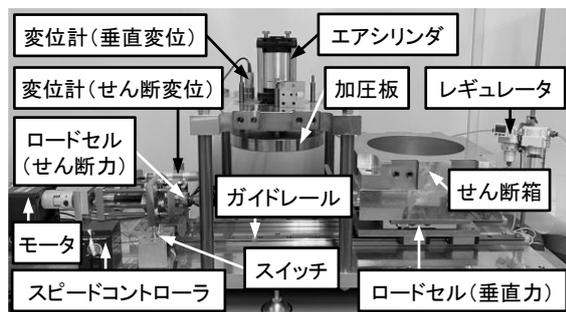


図-3 低拘束圧中型一面せん断試験装置

(3) 地盤強度推定

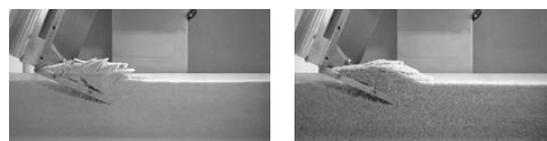
本研究では、掘削抵抗力からせん断強度定数を推定するため、①重回帰分析を用いた方法 (説明変数に掘削抵抗力から抽出される特徴値、目的変数に粘着力および内部摩擦角) と、②重回帰分析を用いない方法 (バケツに作用する抵抗力から得られた「せん断応力 \sim 垂直応力」関係にクーロンの破壊基準を適用) を提案した。

4. 研究成果

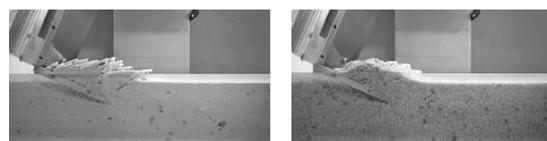
(1) 掘削実験

① 二次元掘削実験

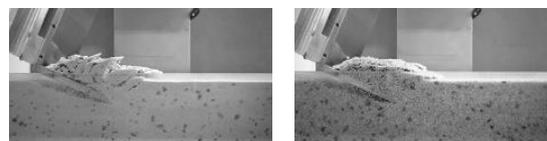
図-4 に礫含有率の違いによる土の変形の様子を示す。掘削が進むにつれてせん断線が繰り返して形成され、せん断層は Soil-B と比べて Soil-A のほうが明瞭であった。この挙動は掘削抵抗力の変化と関連付けられると推測される。また、礫含有率が増加するほど、掘削抵抗力が総じて大きくなり、Soil-A のほうが Soil-B よりも大きかった。これは、土粒子間に作用するサクシヨンの効果による土のせん断抵抗力 (地盤の強度) が増大したためであり、図-4 で示した土の形状の違いからも明らかである。



(i) 礫含有率 = 0%



(ii) 礫含有率 = 20%



(iii) 礫含有率 = 40%

図-4 礫含有率の違いによる土の変形 (左: Soil-A, 右: Soil-B)

② 三次元掘削実験

掘削抵抗力の計測結果例を図-5 に示す。掘削が進むと掘削抵抗力は増減を繰り返す、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、掘削抵抗力から抽出した特徴量 (波の数、波の高さ、掘削仕事量) と礫含有率との関係を図-6 に示す。図-6 より、礫含有率が増加しても波の数はほとんど変化しないものの、波の高さおよび掘削仕事量は増加した。このことから、地盤が密になる、すなわち礫含有率の増加とともに間隙比 e が減少すると、土粒子の接触点数

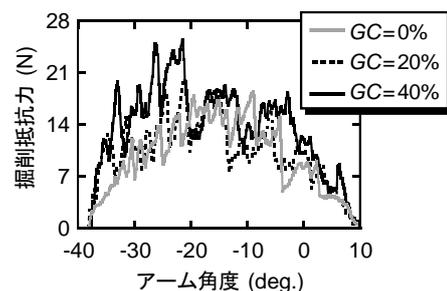


図-5 掘削実験の計測結果例 (Soil-A)

が増加してせん断抵抗が増加するため、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。

③ X線CT掘削実験

供試地盤のX線CT画像を図-7に示す。礫含有率0%の場合は(図-7a), 掘削土塊の形状は細長く、その多くは似ていた。一方、礫含有率40%の場合は(図-7b, 白色に撮影された粒子が礫), 掘削土塊が割れたり崩れたりすることで歪な形状となった。また、せん断層は礫に沿って生成され、せん断面の凹凸が大きくなることを確認された。これは、礫と硅砂の間に作用する結合力が硅砂同士に作用する結合力よりも小さいためであると考えられる。また、バケツで礫を押し込んだり引きずったりするため、礫なし地盤と比べてせん断層の生成は複雑になる。よって、バケツに作用する抵抗力は土のせん断抵抗だけでなくバケツと礫の接触力も加わるため、礫混じり土の掘削抵抗力の変動のばらつきは大きくなると考えられる。このように、バケツに作用する掘削抵抗力の変動から礫混じり土の破壊を説明できると推察される。

(2) 低拘束圧中型一面せん断試験

礫含有率およびせん断強度定数(粘着力, 内部摩擦角)の関係を図-8に示す。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ヨ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(図-5)、波の高さおよび掘削仕事量が増加した(図-6)と考えられる。

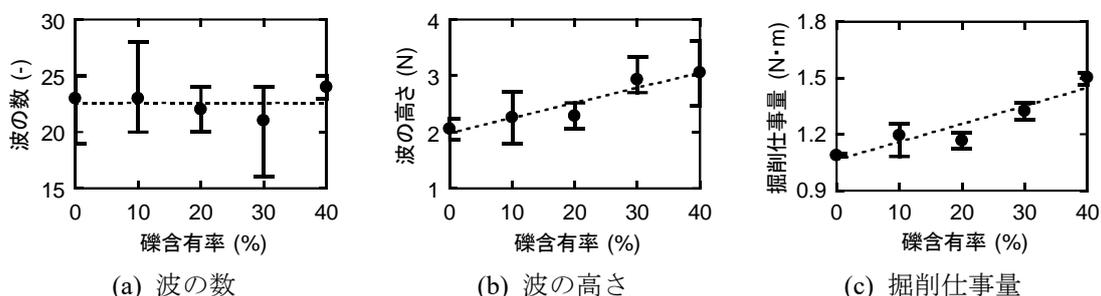


図-6 礫含有率に対する掘削抵抗力から抽出した特徴量の変化 (Soil-A, 点線は近似直線, エラーバーは最大値と最小値)

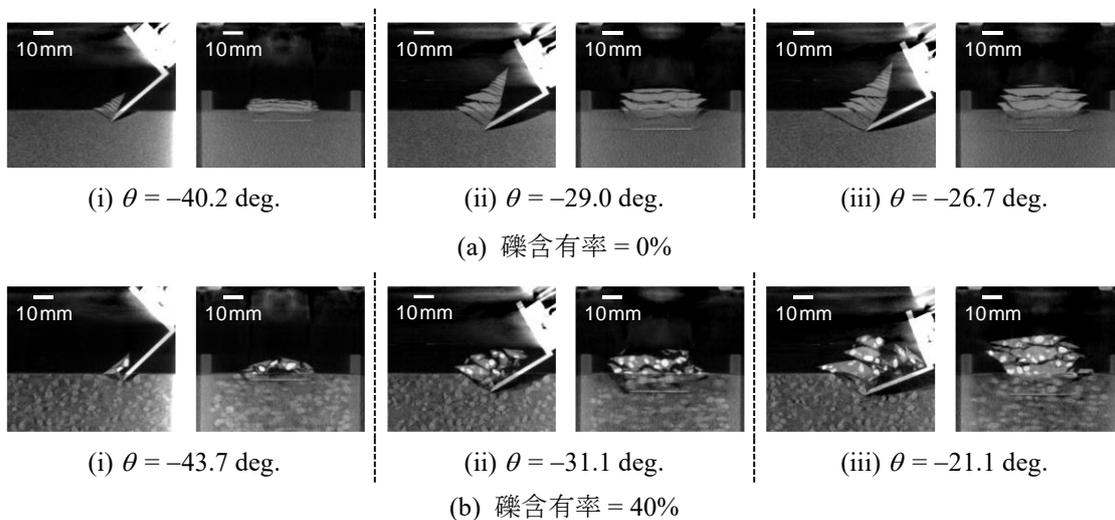


図-7 各アーム角度に対する供試地盤のX線CT画像 (Soil-A, 左: 掘削側面方向から見たバケツ中心部の断面, 右: 掘削方向から見たバケツ先端部の断面)

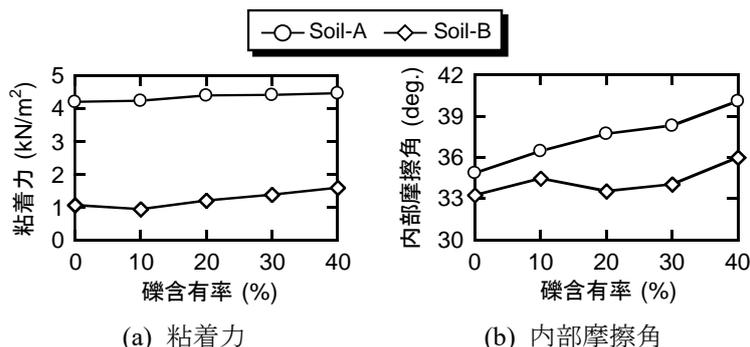


図-8 一面せん断試験結果

(3) 地盤強度推定

① 重回帰分析を用いた方法

波の大きさの標準偏差 S および掘削仕事量 W を説明変数として、粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を推定するモデル式 (式(2)) を重回帰分析で構築する。

$$(c, \phi) = k_1 + k_2 S + k_3 W + k_4 SW \tag{2}$$

ここで、 k_1, k_2, k_3, k_4 は各推定モデル式における偏回帰係数である。データのばらつきを考慮するため、掘削実験の全試行回数の計測データを用いてモデル式を構築した。

せん断強度定数の推定値と実測値の比較結果を図-9 に示す。回帰モデルの誤差を評価するため、二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) を用いた。その結果、粘着力と内部摩擦角の RMSE はそれぞれ 0.2 kN/m^2 , 0.8 deg. で、概ね良好な精度で推定可能なモデル式を構築できた。このように、細粒土だけでなく礫混じり砂質土の場合でもバケット掘削から地盤の強度を推定できることを見いだした。

② 重回帰分析を用いない方法

本方法の概念図を図-10 に示す。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、「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を求める方法である。今回は簡単のために、バケットに作用する抵抗力の変動はせん断層の生成のみによって生じると仮定し、せん断応力と垂直応力にフィッティング定数を乗じて対応した。せん断強度定数の推定値と実測値の比較結果を図-11 に示す。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-11 より、礫含有率が30%を超えると内部摩擦角の推定精度が低下した。実際、礫が含有することで掘削土塊が歪な形状になる上に、せん断面の凹凸が大きくなったことが、推定精度に影響を及ぼしたと考えられる。このように、本方法はいくつかの仮定を設けており、方法①の回帰モデルに比べると推定精度は低くなるものの、バケットに作用する抵抗力から算出されるせん断応力と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簡便に推定できる可能性を見いだした。

今後は、土の種類や含水比など様々な地盤条件に対応したバケット掘削による地盤強度推定法の高度展開と実機スケールに対応した推定技術の開発を進めていきたいと考えている。

<引用文献>

- 1) Satomi, T., Takahashi, H., Aoki, S. et al.: Development on estimation of cone index by using soil excavation bucket, Proc. 10th Asia-Pacific Conf. ISTVS, #15 (pp.1-8), 2018.
- 2) 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.

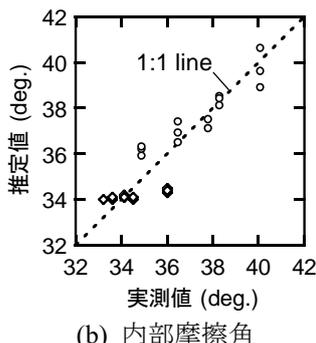
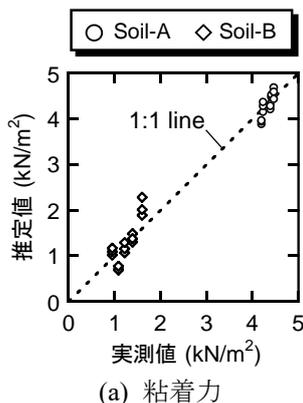


図-9 重回帰分析を用いた方法による推定結果

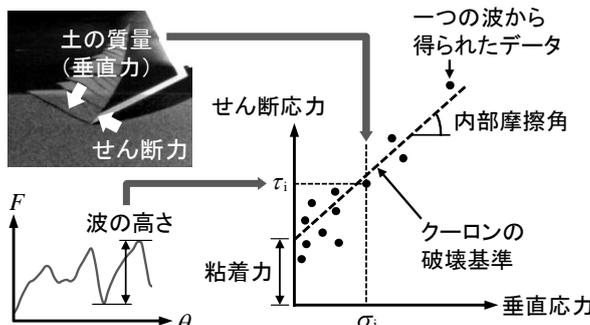


図-10 重回帰分析を用いない方法の概念図

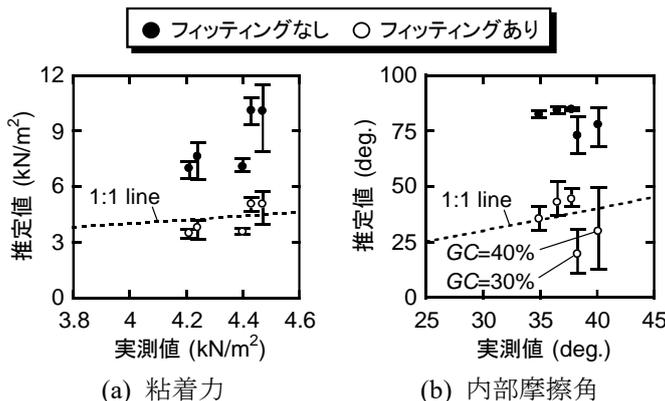


図-11 重回帰分析を用いない方法による推定結果 (Soil-A)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 塩田浩平, 里見知昭, 高橋弘	4. 巻 41
2. 論文標題 掘削バケットによる土の掘削抵抗力および地盤強度に及ぼす礫の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 テラメカニクス	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Satomi, Y. Takahashi, H. Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Investigation on Neural Network Model for Estimating Soil Strength by Bucket Excavation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of The Seventh Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and Its Applications (APSSRA2020)	6. 最初と最後の頁 329-334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei SHIOTA, Tomoaki SATOMI, Hiroshi TAKAHASHI	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental Investigation of Effect of Gravel Content on Soil Failure Process and Excavating Force During Soil Excavation by Bucket	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2019	6. 最初と最後の頁 250-254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 里見知昭, 塩田浩平, 高橋弘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会 第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 里見知昭, 塩田浩平, 高橋弘
2. 発表標題 バケット掘削による礫混じり砂質土のせん断強度定数推定のための回帰モデル
3. 学会等名 地盤工学会 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 里見知昭, 塩田浩平, 高橋弘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会 第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 里見知昭, 塩田浩平, 渡邊則昭, 高橋弘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 地盤工学会 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Satomi, Y. Takahashi, H. Takahashi
2. 発表標題 Investigation on Neural Network Model for Estimating Soil Strength by Bucket Excavation
3. 学会等名 The Seventh Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and Its Applications (APSSRA2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩田浩平, 里見知昭, 高橋弘
2. 発表標題 掘削バケットによる土の掘削抵抗力および地盤強度に及ぼす礫の影響
3. 学会等名 第41回テラメカニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 里見知昭, 塩田浩平, 高橋弘
2. 発表標題 掘削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
3. 学会等名 地盤工学会 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohei SHIOTA, Tomoaki SATOMI, Hiroshi TAKAHASHI
2. 発表標題 Experimental Investigation of Effect of Gravel Content on Soil Failure Process and Excavating Force During Soil Excavation by Bucket
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------