

# 論文

## バケットに作用する掘削抵抗力を用いた 土の強度特性の推定に関する研究

陳 敏<sup>1</sup>・里見 知昭<sup>2</sup>・高橋 弘<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 大学院環境科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

Email : fy09012@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup> 東北大学助教 大学院環境科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

Email : satomi@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

<sup>3</sup> 東北大学教授 大学院環境科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

Email : htaka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

パワーショベルのバケットによる土の掘削は土の種類、含水比および密度などの条件の変化によって大きく影響を受ける。バケットの掘削作業の自動化およびロボット化を実現するためには、掘削中、機械が自らリアルタイムで土の強度特性を把握する機能が必要不可欠である。そこで、本研究ではバケットによる掘削作業を模擬する掘削実験および一面せん断試験を行い、土の種類、含水比および乾燥密度を変化させた様々な条件の土に対して強度特性の推定について検討した。具体的にはバケット掘削実験で測定した掘削抵抗力の値から強度特性に関与すると考えられるパラメータを定義し、そのパラメータと一面せん断試験から得られる土の強度特性(粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$ )を推定する方法を提案した。その結果、粘着力は一面せん断試験で得られた値とほぼ一致する値を推定することができた。一方、内部摩擦角は一面せん断試験で得られた値の  $\pm 30\%$  の範囲で推定できることが確認された。

キーワード : *Soil-Bucket Interaction, Excavating Resistive Forces, Shear Strength Parameters, Construction Machine*

### 1. はじめに

近年、建設業および資源開発分野においては、作業環境が過酷であり、危険を伴うことが多いから、労働力不足や作業員の高齢化、人件費の高騰が深刻な問題となっている。また、近年では大規模な自然災害が頻発しており、迅速な災害復旧技術の確立が望まれているが、2次災害の危険性を考えると、建設機械の無人化・ロボット化に大きな期待が寄せられている。資源開発の分野においても同様であり、今後、未利用の資源・エネルギーの確保を目的として、作業現場が大深度あるいは高温・多湿の一種の極限環境下へ推移していくことが予想されている。そのため、作業員の安全確保のためにも、環境負荷のより少ない、ロボット化、無人化の建設作業機械に大きな期待が寄せられている<sup>1)</sup>。

しかし、建設業や資源開発の現場では、作業対象物の形状などが複雑であり、作業環境が作業の進展とともに刻々と変化する。例えば、ブルドーザやパワーショベルなどの建設機械による地盤掘削作業は地盤強度の影響を大きく受けるため、これらの作業機械のロボット化を考

える場合、作業の進展に伴う作業対象物の変化や作業環境を機械自らが認識し、その状況に応じて機械自らが最適な掘削を行うことが望ましい。しかし、掘削抵抗力などから地盤の強度特性をリアルタイムで把握しようとする研究はあまり行われていない。

本研究では、掘削作業中のパワーショベルのバケットに作用する掘削抵抗力と土の強度特性の関係に注目した。具体的には、Fig. 1に示すように、掘削時にバケットに作用する掘削抵抗力を用いて、土の強度特性(粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$ )を推定する手法の確立を目指し、土の強度特性と掘削抵抗力の関係について実験的に考察することを目的とする。

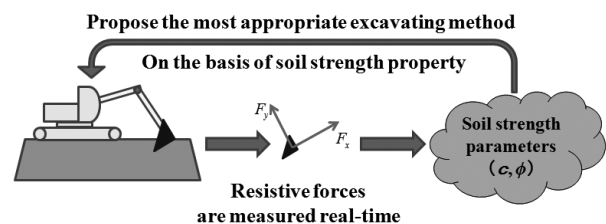


Fig. 1 Concept of this study

## 2. 従来の研究

Singh ら<sup>2)</sup>はバケットによる掘削中の鉛直方向の断面における2次元モデルを用いて、幾何学および力学を考慮した作業計画を構築し、掘削作業の進行および掘削対象物の形状変化に関するシミュレーションを行っている。高橋ら<sup>3)</sup>はバケットによる掘削中の破碎堆積物(土砂・鉱石など)内部の変形過程をモデリングし、掘削抵抗力を推定する物理モデルを提案するとともに、掘削実験により得られた掘削抵抗力の測定結果と計算値とを比較検討し、モデルの妥当性を検証している。Maciejewski らはバケット刃先の入り角度、バケット自体の回転や刃先の軌跡などの掘削条件を変化させ、異なる条件での掘削エネルギーを測定し、比較することで、バケットによる掘削方式の妥当性を検討している<sup>4)</sup>。また、バケットの刃先が土の破壊面に沿って掘削する方法を提案し、実験的によりこの掘削方法の妥当性について考察している<sup>5)</sup>。

しかしながら、上記の研究で対象としている掘削対象物は粘着力  $c$  を有しない破碎堆積物あるいは粘着力  $c$  が低い砂質土である。一般に、土は種類、含水比や密度などの条件によって粘着力  $c$  を大きく変化させる。掘削時の土のせん断破壊は粘着力に大きく影響されると考えられるため、これらの研究成果を粘着力が大きい土にそのまま応用することは難しい。また、土の強度特性が変わると、土の掘削パターンはせん断形、流れ形、裂断形のように複雑に変化するため、1つの掘削モデルで掘削抵抗力を推定することは困難である<sup>6)</sup>。つまり、土の強度特性が土の掘削作業にどの程度影響するかはまだ十分に検討されていないのが現状である。

ところで、パワーショベルによる掘削作業の効率化を図るためには、パワーショベルの掘削軌跡を自動制御する必要がある。これまでにも掘削軌跡の制御に関する研究が行われており<sup>7), 8)</sup>、熟練オペレータの掘削作業の操作技術に注目した掘削軌跡制御に関する研究成果も報告されている。例えば、境田らはオペレータの熟練度の違いによる掘削操作の違いを実験的に考察し、熟練オペレータの操作技術を抽出して掘削制御の改善を試みている<sup>9)</sup>。山元らは軌跡追従型動作計画として3次元計測システムとの連携による施工精度の向上を図り、設計や現況地形の3次元情報を活用して状況に応じた動的対応可能な自律化掘削・積込作業を試みている<sup>10), 11)</sup>。

一方、パワーショベルの自動掘削を実現するためには土の堅さに応じて掘削軌跡を変える必要があり、予め決められた計画軌跡だけでは不十分である。そこで、鮫島らは熟練オペレータの操作方法を調査し、その結果を基に熟練オペレータと同等の精度で自動掘削が可能なるファ

ジ理論による制御方法を検討している<sup>12)</sup>。

しかしながら、上記の研究では土の強度特性が掘削軌跡の制御にどの程度影響を与えるかはほとんど検討されていない。さらに、土の強度特性をパワーショベルによる掘削作業から推定するという試みも行われていない。したがって、砂質土から粘性土まで広い範囲の土の強度特性が掘削作業にどの程度影響を与えるのか検討し、掘削作業から土の強度特性を精度よく推定することは、パワーショベルの自動掘削および掘削軌跡制御に対して重要な研究課題であると考えられる。

以上の研究を鑑み、本研究は土の強度特性をパワーショベルによる掘削作業から推定する方法を実験的に推定した。

## 3. 様々な強度特性を有する土の掘削実験

### 3.1 実験の概要

建設機械に作用する掘削抵抗力と土の強度特性(粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$ )との関係を調べるため、本研究では「土の強度特性を測定する一面せん断試験」および「パワーショベルの掘削作業を模擬したバケット掘削実験」の2つの試験を実施し、両者の値を関係付けることにより、掘削抵抗力から土の強度特性の推定を試みた。Fig. 2に本研究の流れを示す。

### 3.2 本研究で使用した土

様々な強度特性を持つ土を検討対象とするため、Table 1に示すように硅砂9号と笠岡粘土を一定の乾燥質量比で混合し、全部で7種類の土を用意した。さらに、土の含水比を5%から30%の範囲で5%の間隔で変化させることで、土の含水状態を調整した。また、土の密度の影

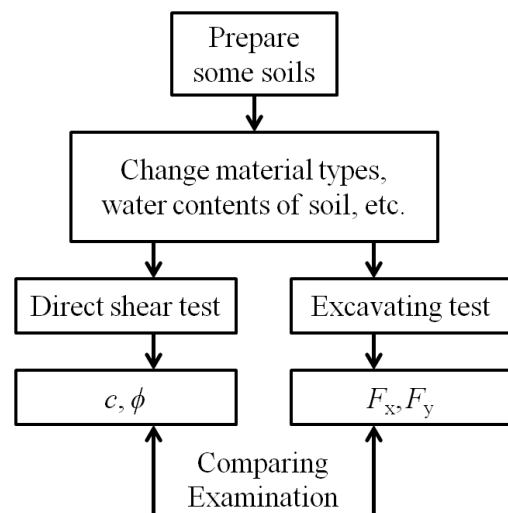


Fig. 2 Experimental framework of this study

響を調べるため、乾燥密度を  $1.0 \text{ g/cm}^3$  から  $1.3 \text{ g/cm}^3$  の範囲で調整し、実験を行った。以降、土の種類、含水比および密度条件を分かりやすくするため、例えば砂質土と粘土を 3:1 の割合で混合した土を乾燥密度  $1.2 \text{ g/cm}^3$  に調整した試料を「Sand/Clay\_3/1\_1.2」と表記する。

### 3.3 一面せん断試験

土の状態は土の種類、含水比および粒度など様々なパラメータによって異なるため、土の強度特性(粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$ )もその状況に応じて変化する。本研究では初めに一面せん断試験による土の強度特性を測定した。せん断速度は  $0.2 \text{ mm/min}$  に設定し、垂直応力は  $10 \text{ kPa}$ 、 $20 \text{ kPa}$ 、 $30 \text{ kPa}$  の 3 条件で試験を行った。

Table 1 Seven kinds of Soil used in this test

Soil type	Mass ratio	Notation
Sand	100%	Sand_100%
Sand/Clay	3/1	Sand/Clay_3/1
Sand/Clay	1/1	Sand/Clay_1/1
Sand/Clay	1/2	Sand/Clay_1/2
Sand/Clay	1/3	Sand/Clay_1/3
Sand/Clay	1/7	Sand/Clay_1/7
Clay	100%	Clay_100%

### 3.4 バケツ掘削実験

#### 3.4.1 バケツ掘削実験装置の概要

建設現場では、パワーショベルのバケツによる掘削軌跡は作業対象物、掘削の進展状況および作業計画などに応じて複雑になる。本研究では、バケツによる掘削軌跡を簡単に表すため、掘削軌跡は円弧とした。

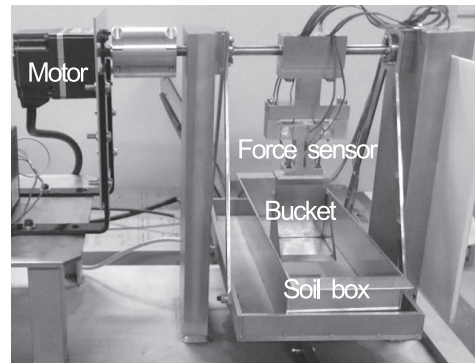
Fig. 3 に今回作製した実験装置を示す。実験装置は DC モータ (BLU220A-100、定格出力  $20 \text{ W}$ 、定格トルク  $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ )、バケツ ( $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 58 \text{ mm}$ )、土槽 ( $346 \text{ mm} \times 126 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ ) および掘削抵抗力をリアルタイムで測定できる力センサで構成されている。Fig. 4 に本装置による掘削の原理を示す。掘削の最も深いところの深さ  $D$  は  $15 \text{ mm}$  と設定し、掘削はバケツの先端部分と土の接触する瞬間からバケツと土が離れる瞬間の間の  $42 \text{ deg.}$  ぐらいの範囲で行っている。アームに作用する力  $F_x$  および  $F_y$  は、Fig. 4 に示すように定義する。具体的な掘削条件を Table 2 に示す。

#### 3.4.2 掘削抵抗力の測定および処理

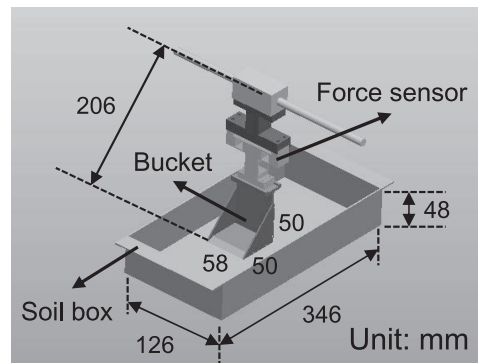
はじめに、 $110^\circ\text{C}$  に設定した乾燥炉で十分に乾燥させた土に水を加え土の含水比を調整する。次に、準備した土を土槽に入れ、所定の乾燥密度となるまで締固めを行い掘削実験の供試体を作製する。その後、掘削実験を行い、

掘削中のバケツに作用する掘削抵抗力 ( $F_x$  および  $F_y$ ) を測定する。Fig. 5 および Fig. 6 に掘削後の状況を示す。

Fig. 7 および Fig. 8 に掘削抵抗力の実験結果の一例を



(a) Main parts of this apparatus



(b) Size details of bucket arm and soil box

Fig. 3 Soil-bucket excavating apparatus

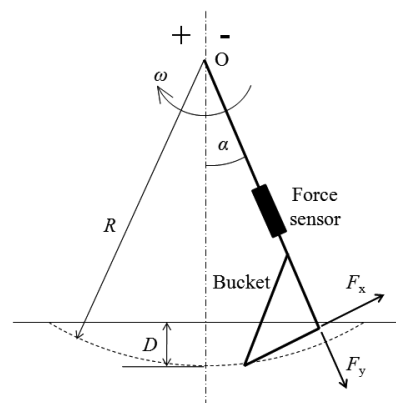


Fig. 4 Schematic diagram of bucket arm movement and resistive forces acting on the excavating bucket

Table 2 Conditions of excavating test

Circular radius of bucket arm $R$ (mm)	206
Excavating angular velocity $\omega$ (deg/s)	5.26
Angle of bucket arm $\alpha$ (deg.)	$-34 \sim 0 \sim 8$
Depth of soil $D$ (mm)	15

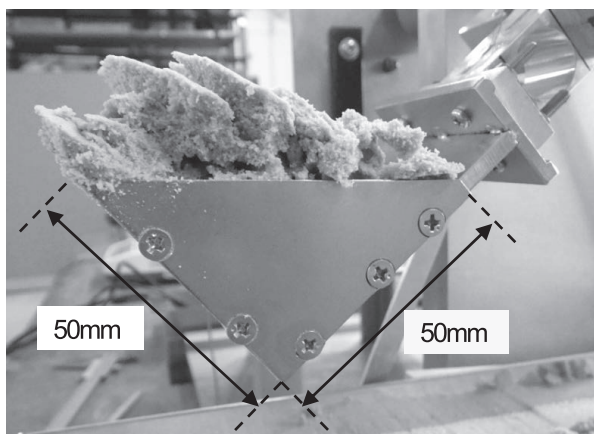


Fig. 5 Photo about after excavating

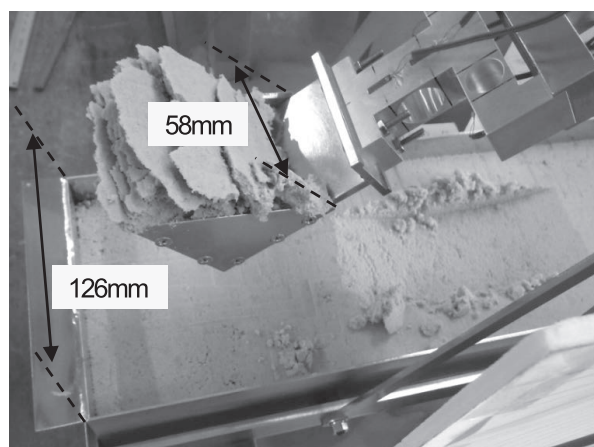


Fig. 6 Photo about bucket full of soil

示す。全実験結果をまとめると、 $F_x$  および  $F_y$  は掘削抵抗力の二つの分力であり、 $F_x$  とバケットアーム角度  $\alpha$  の関係や  $F_y$  とバケットアーム角度  $\alpha$  の関係はほぼ同じ変化傾向であることが確認された。そこで、バケットのアームと垂直になる掘削抵抗力の分力  $F_x$  を用いて掘削抵抗力と土の強度特性の関係について検討することにした。Fig. 9 に掘削抵抗力  $F_x$  の処理方法の一例を示す。本研究では力センサから発生したノイズを除去するため7次の移動平均を行った。また、掘削抵抗力は一定値ではなく、掘削の進展とともに変化する。そのため、Eq. (1) に示すように掘削に伴う仕事量  $W$  を求め、仕事量を用いて掘削抵抗力の平均値を計算した。また、同じ状態の土に対して4回の掘削実験を行い、4回測定した結果の平均値を算出した。

$$F_x = \frac{W}{L} = \frac{S_\alpha}{\alpha} \quad (1)$$

ここで、 $W$  は掘削に伴う仕事量、 $L$  は Fig. 4 に示すバケット刃先が掘削に伴う円弧長さ(点線)、 $\alpha$  は Fig. 4 に示すアームの角度、 $S_\alpha$  は掘削抵抗力をアームの回転角度で積分した値(Fig. 9 の  $S_\alpha$  に相当)である。

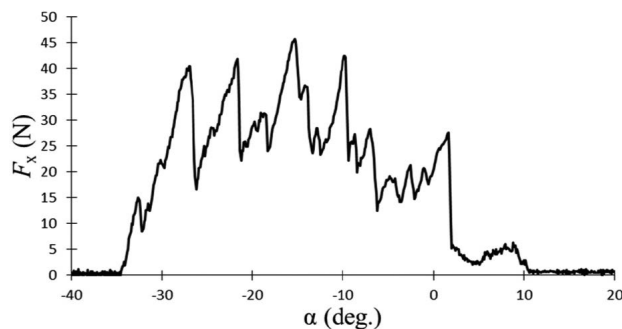


Fig. 7 Example result of resistive force  $F_x$  (Clay\_100%\_1.2)

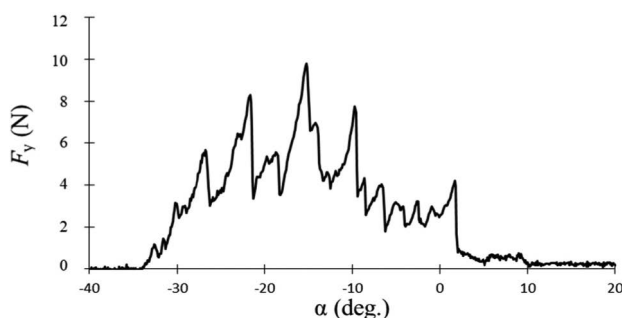


Fig. 8 Example result of resistive force  $F_y$  (Clay\_100%\_1.2)

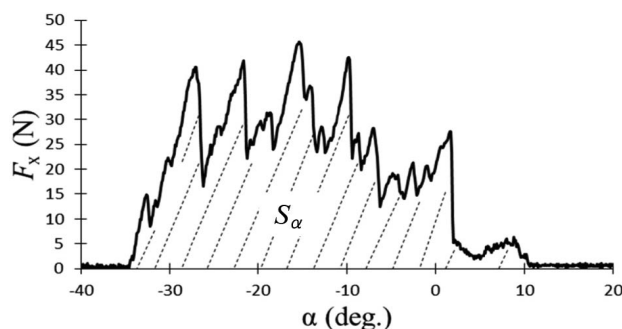


Fig. 9 Example result of the horizontal resistive force and method of processing horizontal resistive forces

## 4. 実験結果の考察

### 4.1 一面せん断試験の結果

粘着力  $c$  と含水比の関係および内部摩擦角  $\phi$  と含水比の関係をそれぞれ Fig. 10 および Fig. 11 に示す。

Fig. 10 より、粘着力  $c$  は含水比の増加とともに増大し、ある含水比になるとピーク値に達する。その後、含水比の増加とともに粘着力  $c$  は減少する傾向が見られた。また、土の粘着力は乾燥密度の変化に影響を受けることが確認された。

Fig. 11 より、本実験で使用した土試料および供試体の作製条件の範囲では、含水比および乾燥密度を変化させても、土の内部摩擦角  $\phi$  は 30 deg. から 40 deg. の範囲で分布することが確認された。

4.2 掘削実験の結果

掘削抵抗力  $F_x$  と土の含水比の関係を図. 12 に示す。掘削抵抗力は土の含水比と乾燥密度の変化によって大きく変化することが分かる。

4.3 掘削抵抗力と土の強度特性の関係

掘削抵抗力  $F_x$  を用いて土の強度特性 ( $c$ ,  $\phi$ ) を推定する方法について考察する。掘削抵抗力と内部摩擦角の関係および掘削抵抗力と粘着力の関係をそれぞれ Fig. 13 および Fig. 14 に示す。

Fig. 13 より、本実験で使用した土試料および供試体の作製条件の範囲では、掘削抵抗力  $F_x$  から内部摩擦角  $\phi$  を推定することが困難であると解釈される。

Fig. 14 より、土の粘着力  $c$  が増えると掘削抵抗力が増えることが確認される。しかし、一例として Fig. 14 の「Clay\_100%\_1.2」に示すように、土の粘着力と掘削抵

抗力の関係は含水比の影響を受けている。つまり、Fig. 14 の結果を用いて掘削抵抗力から粘着力を推定するためには含水比や乾燥密度が既知である必要がある。したがって、掘削抵抗力の平均値のみから粘着力を推定することは困難であると考えられる。

4.4 土の強度特性を推定するパラメータの考察

Fig. 13 に示したように、今回の条件における土の内部摩擦角  $\phi$  は概ね 30 deg. から 40 deg. の範囲で分布するが、この関係を用いて内部摩擦角を決定することは難しい。また、粘着力  $c$  は掘削抵抗力の平均値から推定することが困難であると推察されるため、掘削作業中にリアルタイムで測定可能なパラメータを用いて粘着力  $c$  および内部摩擦角  $\phi$  を推定する方法についてさらに考察する必要がある。

Fig. 15 に示すように、掘削抵抗力の値は掘削の進展

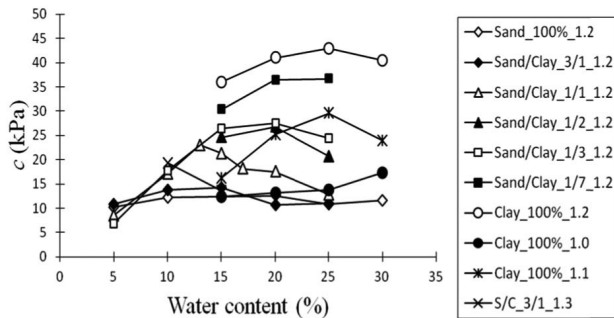


Fig. 10 Relationship between water content and cohesion

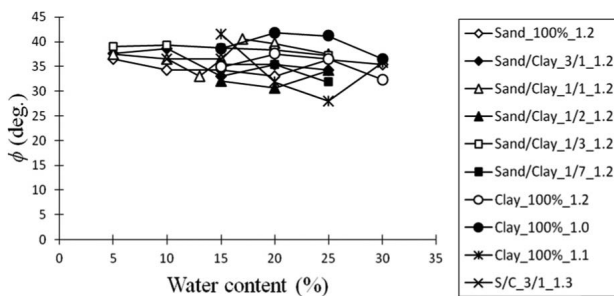


Fig. 11 Relationship between water content and internal friction angle

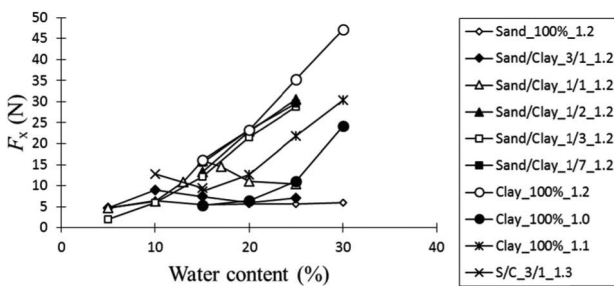


Fig. 12 Relationship between water content and horizontal resistive forces

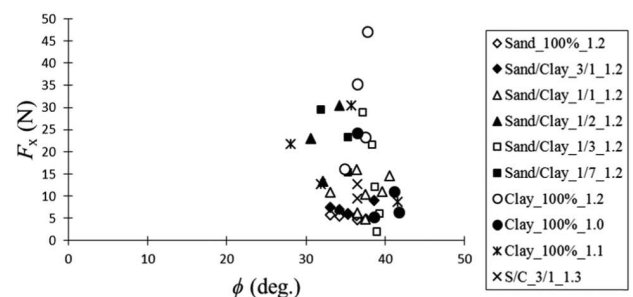


Fig. 13 Relationship between angle of internal friction angle  $\phi$  and horizontal resistive forces

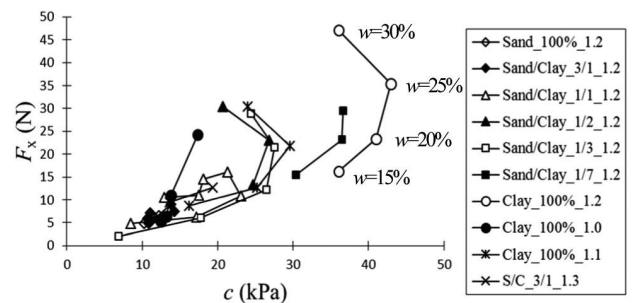


Fig. 14 Relationship between cohesion  $c$  and horizontal resistive forces

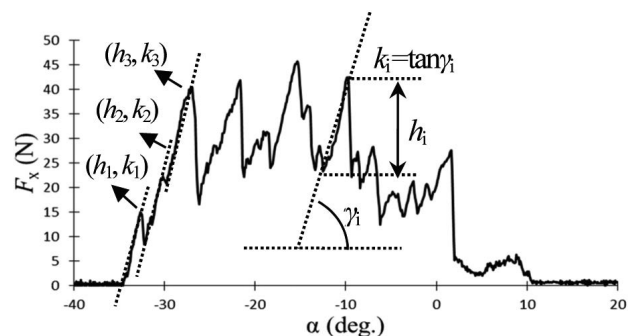


Fig. 15 Definition of parameters of slope  $k_i$  and height  $h_i$

とともに変動しても、掘削抵抗力の波形は一定の特徴を持っており、波形の傾き  $k$  は掘削中ほぼ一定の値に保持されることが実験結果から確認された。この一つの掘削抵抗力の波形は一回の土のせん断破壊によるものと考えられる。つまり、土のせん断破壊が発生するとともに、掘削抵抗力は傾き  $k$  で急激に増加する。一回のせん断破壊は短い時間で終わるため、堆積土の質量、バケットと周りの土との摩擦およびバケットとその内部の土との摩擦の変化は小さいと考えられるため、この傾き  $k$  は主に土のせん断破壊によって決まる可能性がある。そこで、この傾きの高さを  $h$  と表記し、Eq. (2) に示すように傾き  $k$  と高さ  $h$  を乗じてその合計を平均したパラメータ  $A$  を求めた。なお、 $n$  は Fig. 15 に示す掘削抵抗力の波の総数である。

$$A = \frac{1}{n} (h_1 \cdot k_1 + \dots + h_i \cdot k_i + \dots + h_n \cdot k_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \cdot k_i \quad (2)$$

ここで、パラメータ  $A$  はバケットによる掘削中に土のせん断破壊が発生した際の掘削抵抗力の変動を表す物理量と考えられる。このパラメータを用いて粘着力  $c$  を推定する可能性について考察した。 $c$  と  $A$  の関係を Fig. 16 に示す。なお、粘着力  $c$  の値が 0 に近い場合の状況も考察するため、乾燥した締固めしない Sand\_100% および Clay\_100% の 2 種類のゆるい状態の土も用いて実験を行った。その結果を前述した 7 種類の土の実験結果と併せて Fig. 16 に示す。Fig. 16 より、実験結果は 1 つの曲線近傍に分布していることが分かる。なお、図中の破線は最小二乗法により得られた次の近似式を示している。

$$A = 0.0345c^2 + 0.0952c \quad (3)$$

パラメータ  $A$  は掘削中リアルタイムで測定することができるため、式(3)の関数関係を用いることにより、 $A$  の値から粘着力  $c$  を推定することができると考えられる。

次に、Fig. 17 に一面せん断試験の結果から得られる垂直応力  $\sigma$  とせん断応力  $\tau$  の関係の模式図を示す。この垂直応力とせん断応力の関係を示す直線を延長すると、横軸と  $O'$  点に交わる。三角形  $O'OB$  の面積  $S_D$  は Eq. (4) に示すように粘着力  $c$  と内部摩擦角  $\phi$  で表わすことができ、土の強度特性と関係すると考えられる。

$$S_D = \frac{c^2}{2 \cdot \tan \phi} = f_2(h) \quad (4)$$

$$= 10.376 \cdot h^2 + 41.814 \cdot h \quad (c > 0)$$

そこで、このパラメータ  $S_D$  を用いて掘削抵抗力との

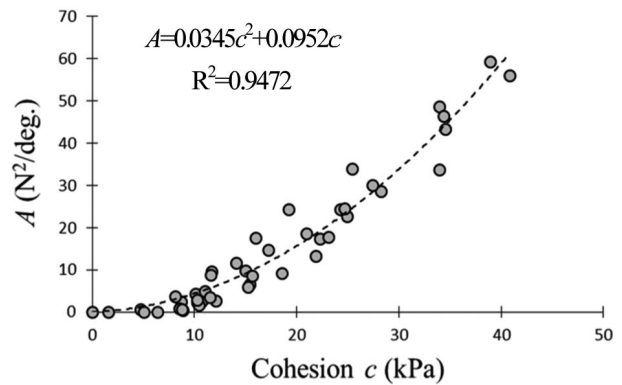


Fig. 16 Relationship between cohesion  $c$  and  $A$  calculated by Eq. (2)

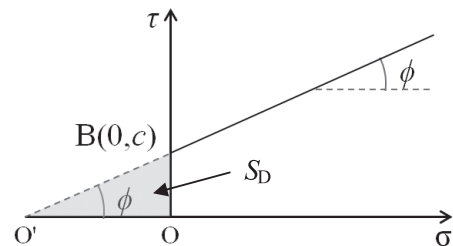


Fig. 17 Area  $S_D$  calculated by cohesion  $c$  and internal friction angle  $\phi$

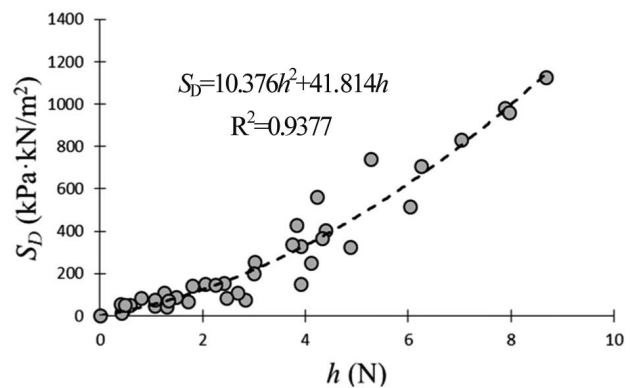


Fig. 18 Relationship between area  $S_D$  and parameter  $h$  shown in Fig. 15

関係について考察した。Fig. 18 は掘削抵抗力波の高さに関するパラメータ  $h$  と Fig. 17 に示した面積のパラメータ  $S_D$  の関係を示す。Fig. 18 より、この実験結果は 1 つの曲線近傍に分布していることが分かる。図中の破線は最小二乗法により得られた Eq. (4) の近似式を示している。

Eq. (3) および Eq. (4) から、粘着力  $c$  および内部摩擦角  $\phi$  を推定する式を Eq. (5) および Eq. (6) に示す。さらに、今回提案した推定式の有用性を検討するため、Fig. 19 および Fig. 20 に測定値と推定値の比較を示す。その結果、粘着力  $c$  は精度よく、内部摩擦角  $\phi$  は ± 30% の範囲で推定されることが分かった。

$$c=f_1^{-1}(A)$$

$$= \frac{-0.0952 + \sqrt{(0.0952)^2 + 4 \cdot 0.0345 \cdot A}}{2 \cdot 0.0345} \quad (5)$$

$$\phi = \arctan \frac{c^2}{2 \cdot f_2(h)}$$

$$= \arctan \frac{c^2}{2 \cdot (10.376 \cdot h^2 + 41.814 \cdot h)} \quad (6)$$

$$= \arctan \frac{\{f_1^{-1}(A)\}^2}{2 \cdot (10.376 \cdot h^2 + 41.814 \cdot h)}$$

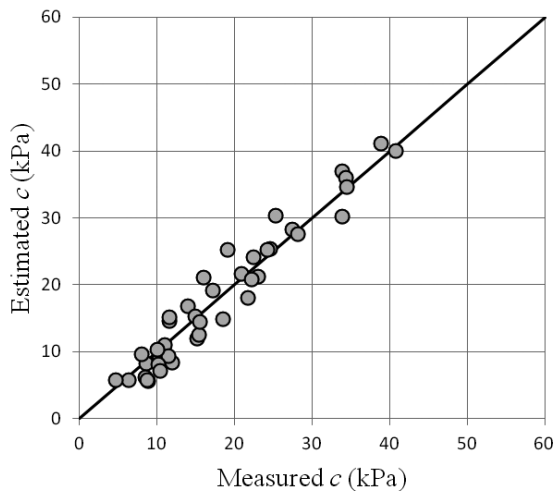


Fig. 19 Relationship between measured cohesion  $c$  and estimated cohesion  $c$

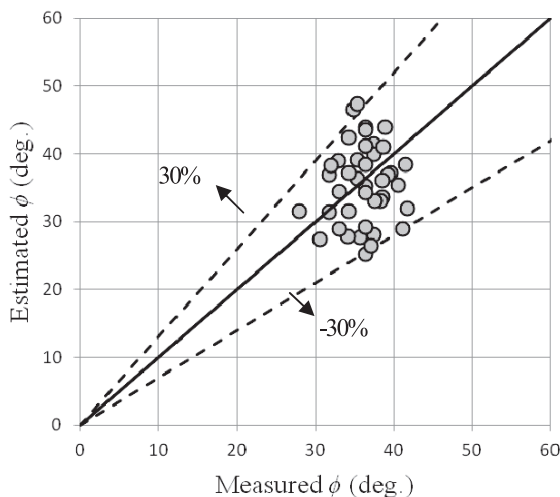


Fig. 20 Relationship between measured internal friction angle  $\phi$  and estimated internal friction angle  $\phi$

ところで、本研究で提案する土の強度特性(粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$ )の推定法は、上述したように Eq. (3) および Eq. (4) で示す実験式に基づいている。つまり厳密に

は本研究で提案する推定法は、本実験で使用した土試料および供試体の作製条件の範囲内において適用可能である。今後、実験条件を広げてデータを収集し、実験式の適用範囲を拡張する必要があると考えている。

### 5. おわりに

本研究はバケットに作用する掘削抵抗力から土の強度特性(粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$ )を推定する方法について考察した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 一面せん断試験の結果より、粘着力  $c$  は土の含水比や乾燥密度の変化によって大きく影響を受けることが分かった。また、本実験で使用した土試料および供試体の作製条件の範囲では、内部摩擦角  $\phi$  は土の含水比や乾燥密度の変化の影響を受けず概ね 30 deg. から 40 deg. の範囲で分布することが確認できた。
- (2) バケット掘削実験より、掘削抵抗力は土の種類、含水比や乾燥密度の影響を受けることが分かった。
- (3) 掘削抵抗力  $F_x$  と粘着力  $c$  の関係より、土の粘着力が増加すると掘削抵抗力も増加することが分かった。しかし、掘削抵抗力および粘着力は土の含水比および乾燥密度の影響を受けるため、掘削抵抗力の平均値のみを用いて粘着力を推定することは困難であることが明らかとなった。
- (4) 掘削抵抗力  $F_x$  は掘削の進展とともに変動し、この変動は土のせん断破壊に対応すると考えられる。そこで、掘削抵抗力の変動を表わす傾き  $k$  および高さ  $h$  の二つのパラメータを用いて、粘着力  $c$  および内部摩擦角  $\phi$  を推定する式を提案した。その結果、粘着力  $c$  は精度よく、内部摩擦角  $\phi$  は  $\pm 30\%$  の範囲で推定されることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 三宅謙三郎, 須崎利夫, 吉田弘喜, 大島寛: 碎石業における岩石採取作業の自動化技術開発, 資源と素材, Vol. 112, No. 8, pp. 572-580, 1996.
- 2) S. Singh: Task Planning for Robotic Excavation, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on IROS, pp. 1284-1291, 1992.
- 3) 高橋弘, 水上喬二郎, 齊藤泰: パワーショベルによる破砕堆積物掘削作業時における抵抗力解析, 応用力学論文集, Vol. 6, pp. 603-612, 2003.
- 4) Maciejewski J, Jarzebowski A: Laboratory optimization of the soil digging process, Journal of Terramechanics, 39, (2002), 161-179.
- 5) Jarzebowski A, Maciejewski J, JSzyba D, Trc ampczynski W: The optimization of tool shapes and trajectories in heavy machines. In: Proc. XII ISARC Symposium "Automation and Robotics in Construction", Warsaw, Poland, (1995). pp. 159-166.
- 6) 畑村洋太郎: 土の切削機構の解明 (第1報 土の切削パターンについて), 日本機械学会論文集 (第3部), 40巻338号 (昭49-10).
- 7) Maciejewski J, Jarzebowski A, Trampczynski W: Study on the efficiency of the digging process using the model of excavator

- bucket, Journal of Terramechanics 40 (2004) 221-233.
- 8) Masakazu Haga, Watanabe Hiroshi, Kazuo Fujishima: Digging control system for hydraulic excavator, Mechatronics 11 (2001) 665-676.
- 9) Yuki Sakaida, Daisuke Chugo, Kuniaki Kawabata, Hayato Kaetsu, Hajime Asama: The Analysis of Skillful Hydraulic Excavator Operation, Proceeding of the 2006 JSME conference on Robotics and Mechatronics, 2A1-B01.
- 10) 山本弘, 邵輝, 茂木正晴, 大槻崇, 柳沢雄二, 野末晃, 境田右軌, 山口崇: 油圧ショベルによる IT 施工システムに関する研究, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.5-10, 2008.
- 11) 邵輝, 山本弘, 柳沢雄二, 境田右軌, 野末晃: 油圧掘削機の自律掘削と積込動作計画に関する研究, 第 11 回建設ロボットシンポジウム, pp.271-276, 2008.
- 12) 鮫島誠, 藤井敏, 末岡淳男: ファジィ理論による油圧ショベルの自動掘削, 日本機械学会論文集 (C 編), 66 巻 650 号 (2000-10), No.99-1165.
- (2013.11.22 受付, 2014.6.24 採用決定)

## A study on Estimation of Soil Strength Characteristics by using Resistive Forces Acting on Bucket

Min CHEN<sup>1</sup>, Tomoaki SATOMI<sup>2</sup> and Hiroshi TAKAHASHI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

<sup>2</sup> Assistant Professor, Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

<sup>3</sup> Professor, Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

When the power shovel conducts the excavating work, the resistive force acts on the excavating bucket. This force is influenced by the soil strength which is decided by soil type, structure, density and water content, etc. Therefore, it is important to investigate the soil-bucket interaction in estimating the excavating performance and optimizing the excavating work. This interaction was examined by results of two experiments, that is, 1) a direct shear strength test and 2) soil-bucket excavating test. By using results of the two tests, a method to estimate soil strength parameters was described in this paper.