

砂質土における油圧ショベルの掘削動作による 地盤強度推定に向けた実験的検討

コベルコ建機株式会社
コベルコ建機株式会社
コベルコ建機株式会社
国立研究開発法人土木研究所
国立研究開発法人土木研究所

○ 島津 泰彦
関塚 良太
小岩井 一茂
遠藤 大輔
橋本 毅

1. はじめに

国土交通省が策定した「i-Construction 2.0」¹⁾では、建設現場の省人化対策として「施工のオートメーション化」に取り組む方針としている。

現在、油圧ショベルの掘削動作では、オペレータが地盤のかたさに応じて、レバーを適切に操作することで仕事量の効率を高めている。通常、現場で実施される土質試験はサンプリング数が少ないため、ショベルの作動範囲を網羅することは難しい。また、天候や地下水位などの影響も受けるため、作業中の土質をあらかじめ把握するのは難しいと考えられる。そのため、油圧ショベルの作業の自動化を実現するためには、作業対象物である地盤の性状を機械が動作中に検知し、その状態に合わせて機械の動作計画や作業中の動作修正を行うことが必要になると考えられる。

筆者らはこれまで、砂質土地盤を対象に、掘削作業における油圧ショベルのバケットに作用する掘削抵抗と地盤挙動との関係性を明らかにしてきた²⁾。具体的には、油圧ショベルの作業装置に取り付けた各種センサの計測データから算出したバケットに加わる掘削抵抗値が、McKyesとAli³⁾の提案する3次元地盤変形を考量した土圧式による理論値と同等の値になること、地盤の破壊形態やすべり線の発生の仕方が、実験と理論で同様になることを示した。

本発表では、含水比や締固め条件により、かたさを変えた複数の実験用地盤を対象に、油圧ショベルの掘削動作で地盤性状を検知することが可能か否かについて、検知方法の検討と実機実験による検証を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用機械

実験には20t級油圧ショベルを用いた。0.8m³バケットを装着しており、バケット口幅はサイドカ

ッタを含まず1060mmである。

本実験用にブーム、アーム、バケットを動かすための各油圧シリンダの変位量およびヘッド側圧力、ロッド側圧力並びにバケット進行方向に対する車体の傾斜角を計測するためのセンサを取り付けている。

また、本機械には2Dマシンコントロール(以降、MCと省略する)機能が搭載されており、バケット爪先の掘削軌道を制御することができる。また、計測用に2Dマシンガイダンスシステムも追加搭載した。

2.2 実験地盤

実験は屋内実験施設で行った。原地盤を掘削し、幅10m、長さ8m、深さ0.8mのピットを作成した後、図-1に示すように、幅方向を3分割する仕切り板を設置した。各レーンには2.3章に示す条件の地盤を準備し、各レーンで1回または2回の掘削実験を行った。

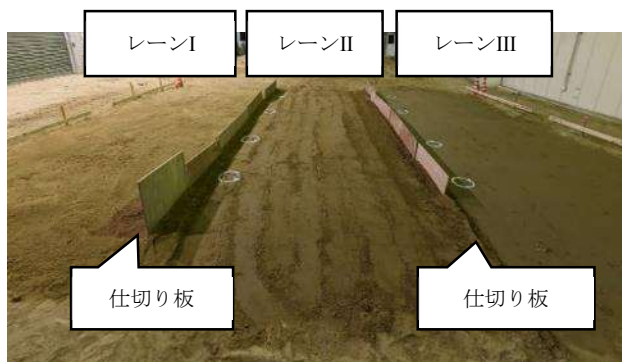


図-1 実験地盤

2.3 地盤条件

供試材料は山砂と、締固まりやすくするために細粒分を多く含むロームを山砂に混ぜた混合土の2種類を使用した。混合土は作成した時期の違いに

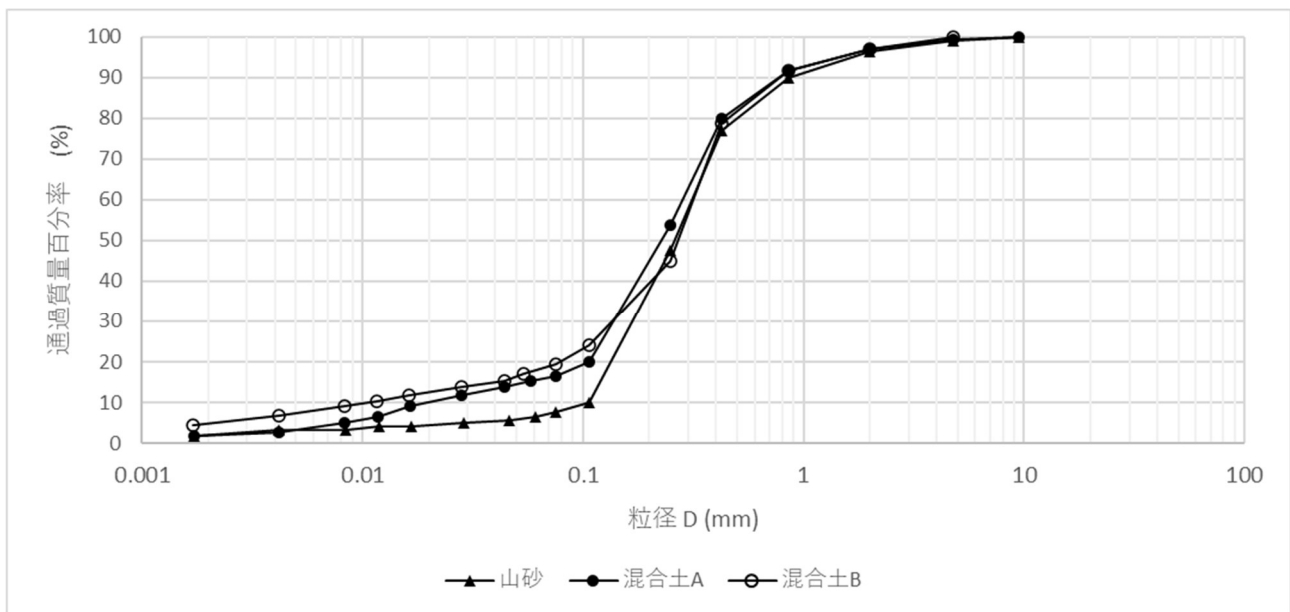


図-2 粒径加積曲線

表-1 材料の物理特性

呼称	土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	最適含水比 w_{opt} (%)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)
山砂	2.694	16.6	1.681
関東ローム	2.723	—	—
混合土 A	—	19.9	1.558
混合土 B	—	20.3	1.570

表-2 地盤条件と物性値

条件	供試材料	締固め条件	含水比 w (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	内部摩擦角 ϕ_u ($^\circ$)	粘着力 c_u (kN/m^2)
1	山砂	緩詰め	8.8	1.395	1.282	25.6	0.0
2	混合土 A	転圧 0.5 往復	19.8	1.642	1.371	27.0	24.8
3	混合土 A	転圧 7 往復	20.3	1.796	1.492	28.3	23.4
4	混合土 A	転圧 7 往復	17.9	1.694	1.436	29.6	27.8
5	混合土 B	転圧 2 往復	12.9	1.480	1.312	31.8	14.3
6	混合土 B	転圧 2 往復	20.9	1.740	1.439	22.9	24.1
7	混合土 B	転圧 2 往復	22.3	1.875	1.534	23.4	31.1

より、配合の近い 2 種類がある。各材料の粒径加積曲線を図-2 に、物理特性を表-1 に示す。

上記 2 種類の材料を用いて、次の影響確認を行うため、表-2 に示す計 7 条件で実験を行った。

(1) 締固めによる影響

含水比を最適含水比相当に調整し、ピットに材料を投入後、締固めを行った。

緩詰めは土砂を締め固まらないようにレーン内に投入した後、地表面を均した。

締固めは、各層の締固め後厚さが約 20 cm にな

るように一定深さごとに行い、極力深さ方向の締固め状態のばらつきが発生しないようにした。土砂を投入後、その上を 3 t 級ミニショベルで 1 往復走行し、軽く締固めを行う。その後、機械質量 300 kg の前後進コンパクターで、走行回数により締固めエネルギーを変えて、かたさの異なる条件 2~4 の地盤を作成した。

(2) 含水比による影響

前記締固め条件は同じとし、含水比が異なる条件である条件 5~7 を作成した。

2.4 土質試験

実験前に対象地盤の一部を内径 0.1 m、高さ 0.1 m のコアサンプラーを用いて採取し、JGS1613-2003 「コアカッターによる土の密度試験方法」に基づいて、表-2 に示す各条件の密度および含水比を計測した。

対象地盤の土の強度定数である内部摩擦角 ϕ_u (°)と粘着力 c_u (kN/m^2)は、前記の計測値をもとに供試体を作成し、JGS0521 土の三軸圧縮試験に基づき計測した。その際側圧は 50, 100, 200 kPa の 3 条件とし、掘削という短時間における現象であることから、非圧密非排水 (UU) 条件とした。

2.5 原位置試験

作成した実験地盤の原位置試験として、軽量動的コーン貫入試験と簡易支持力測定器による試験を実施した。計測はともに各レーンで 4 か所ずつ計測を行い、その平均値で評価を行った。

軽量動的コーン貫入試験の装置概要を図-3 に示す。ハンマーによる打撃でロッドと 2 cm^2 の先端コーンを地盤に打ち込みながら、打撃毎の貫入抵抗値と貫入深さを計測することで、浅い地盤の硬軟や締め固め状況の確認を行うことができる。今回は深さが 0.8 m になるまで計測した。詳細な使用方法などは参考文献 4), 5)を確認されたい。

簡易支持力測定器(キャスポル)を用いて、地盤剛性を地盤反力係数 K_{30} で計測した。ただし、条

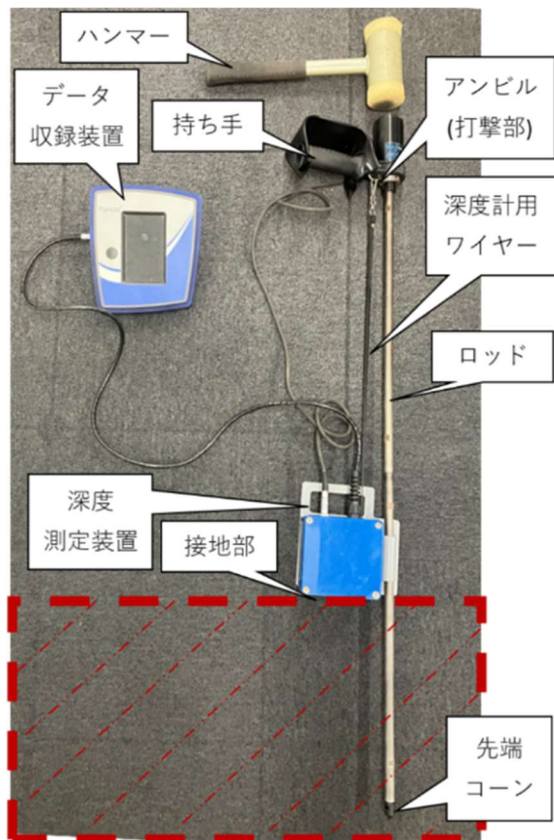


図-3 軽量動的コーン貫入試験機

件 1 の地盤に関しては計測器設置時に自重で沈み込み、計測できなかったことより、ゼロとみなした。

2.6 実験方法

図-4 に油圧ショベルの初期姿勢を、図-5 に掘削動作の模式図を示す。クローラがバケット進行方向と平行になるように機体を掘削レーン後方に設置する。バケット爪先が地表面に接地し、バケット底面が鉛直、アームシリンダ最縮となる状態を初期姿勢とする。その際の爪先位置を起点として、水平面に対して 20 度の傾きをもつ直線を MC 機能での掘削軌道として設定する。これによりオペレータのマニュアル操作によるばらつきを抑え、動作の再現性を持たせている。

オペレータは、計測を開始し、MC 機能を有効にした上で、初期姿勢からアーム引きレバー操作を行う。MC 機能によりバケット爪先が目標軌道に沿うようにブーム上げ操作が自動で行われる。

掘削開始後、バケットが移動するにつれて、掘削深さおよびバケットで抱えこむ土量が多くなり、掘削抵抗は増大していき、機械が出力可能な掘削力と掘削抵抗がつり合うことで、ショベルの動作は停止する。その後、10 秒程度レバー操作を継続した後、計測を終了する。



図-4 掘削時初期姿勢

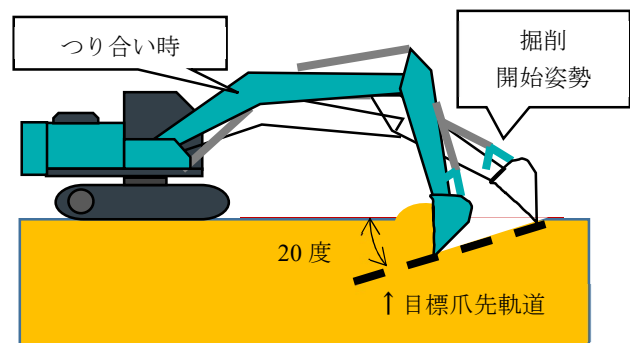


図-5 掘削動作模式図

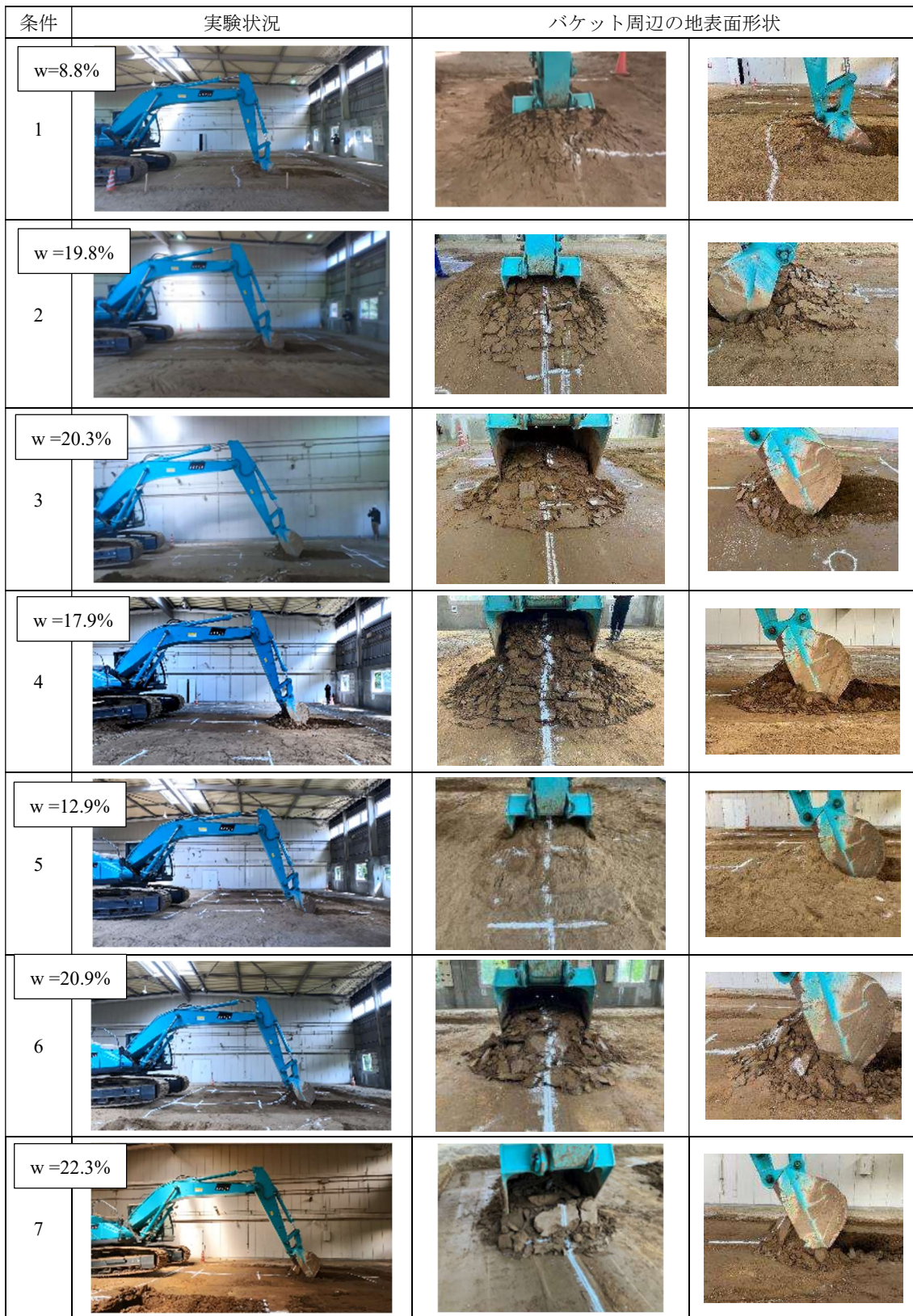


図-6 掘削後停止状態での実験状況

表-3 バケット爪先の水平方向移動距離および掘削深さ

条件	1	2	3	4	5	6	7
掘削深さ(cm)	90	70	49	52	60	54	45
水平方向移動距離(cm)	314	261	216	255	247	249	220

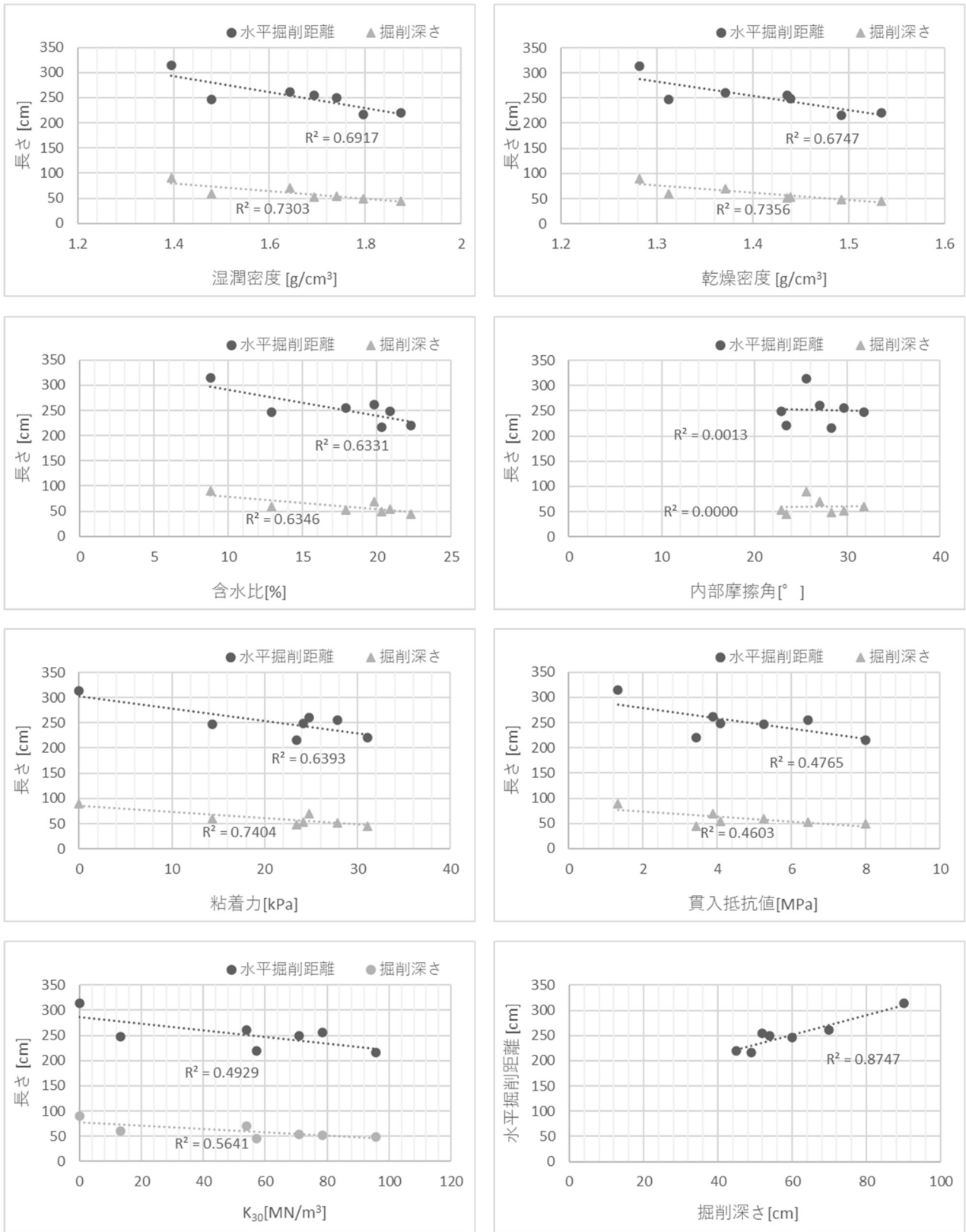


図-7 各種土質定数と水平掘削距離，掘削深さの関係

表-4 貫入抵抗および地盤反力係数

条件	1	2	3	4	5	6	7
貫入抵抗値(MPa)	1.32	3.88	8.00	6.45	5.24	4.07	3.44
地盤反力係数 K ₃₀ (MN/m ³)	0	54.0	95.6	78.6	13.2	70.8	57.2

3. 実験結果

図-6 に各条件での、掘削後停止状態での実験状況およびバケット周辺の地表面形状を示す。

含水比が低い場合は、掘削後地表面に細かなせん断線が発生し、バケット内に多くの土砂が堆積している。一方で、含水比が多い場合は、掘削中地表面の土塊がせん断線に沿って、分断されて移動する様子が確認された。また、せん断破壊された土塊の大きさも含水比の増加につれて、大きくなっていることが掘削後の写真からも分かり、掘削後の土砂堆積量が少ない。

掘削開始点を基準として、2D マシンガイダンスシステムで計測した各条件での掘削停止時のバケット爪先の水平方向移動距離および掘削深さを表-3 に、各条件の貫入抵抗値と地盤反力係数を表-4 に、土質定数等と水平方向移動距離、掘削深さの関係を図-7 に示す。湿潤密度、乾燥密度、含水比、粘着力は水平掘削距離または掘削深さと決定係数でおよそ 0.64 以上、相関係数で-0.8 から-1.0 であり、強い負の相関があることが分かった。また、貫入抵抗および地盤反力係数 K_{30} は同様に相関係数が約 -0.7 程度であり、負の相関がみられた。

4. 考察

筆者らは先行研究²⁾にて平坦な砂質地盤を油圧ショベルのバケットで掘削する際、McKyes と Ali が提案する 3 次元地盤変形³⁾が発生し、その理論から算出される掘削抵抗値と、機体のセンサ値と作業装置部のリンク機構の力学モデルから算出される油圧ショベルのバケットに加わる掘削抵抗値が同等の値になることを確認した。その際、切削刃に加わる水平方向の抵抗 P_H は、土の密度 γ 、土の粘着力 c 、载荷重 q 、掘削深さ d 、壁体幅 b とすると、式(1)のように表される。

$$P_H = (\gamma d^2 N_r + cdN_c + qdN_q)b \quad \dots\dots(1)$$

ここで N_r 、 N_c 、 N_q はそれぞれ土の自重、粘着力、上載圧に関する切削抵抗力係数である。詳細に関しては参考文献を確認いただきたい。

今回の実験では、機械が出力可能な掘削力と掘削抵抗が釣り合うまで掘削を行っている。そのため、式(1)の抵抗値は各条件で一定になっていると考えられる。式(1)において、係数を除くと、第1項では湿潤密度と掘削深さ、第2項では粘着力と掘削深さの積で構成されている。そのため、掘削深さと各土質定数が強い負の相関を示したと考えられる。また、貫入抵抗および地盤反力係数は密度と関連があるため、同様に負の相関を示したと考えられる。

今回の実験では、水平面に対して 20 度傾いた掘削軌道となるように MC 機能により掘削操作の制御を行っている。そのため、水平掘削距離と掘削深さは図-7 に示すとおり、正の強い相関を示している。これより、水平掘削距離も各土質定数と強い負の相関を示したと考えられるが、式(1)には掘削深さが変数として含まれているため、水平掘削距離よりも強い負の相関を示したと考えられる。

各土質定数の決定係数に着目すると、湿潤密度や乾燥密度に対して、含水比が低い値となっている。これは、含水比では締固めによる体積変化が考慮されないためと考えられる。

5. まとめ

砂質土をベースとした同一材料において、含水比と締固め状態が異なる地盤を用意し、油圧ショベルを規定の動作で掘削操作すると、土質定数と掘削距離および掘削深さに強い負の相関があることが分かった。

すなわち、上記の関係性があらかじめ分かっていたら、同手法において機械で計測可能な掘削深さや掘削距離をセンシングすることで土質の変化を把握出来る可能性があることが分かった。

今後は、土の材料による影響やショベルの操作を実作業に近づけての検証が必要と考えられる。

最後に、本研究は、国立研究開発法人土木研究所との共同研究「土工・舗装工における施工工程データ等を活用した生産性向上技術に関する研究」において実施したものである。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～、<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>, 2024.8.23
- 2) 島津泰彦・関塚良太・小岩井一茂・遠藤大輔・橋本毅・山口崇：砂質土における油圧ショベルのバケットに作用する掘削抵抗と地盤挙動に関する実験的検討，テラメカニクス，第44号，pp.45～50，2024
- 3) E.McKyes・O.S.Ali：The cutting of soil by narrow blades，Journal of Terramechanics, Vol. 14, No. 2, pp. 43-58, 1977
- 4) Takashi Tsuchida・A.M.R.G. Athapaththu・Seiji Kano・Kazuki Suga：Estimation of in-situ shear strength parameters of weathered granitic (Masado) slopes using lightweight dynamic cone penetrometer, Soils and Foundations, 51 巻 3 号, pp.497-512, 2011
- 5) 貞宗太郎：新しい簡易動的貫入試験手法(PANDA2)の装置と特性，全地連「技術e-フォーラム2008」高知，2008