

ミニショベルを用いた簡便な地盤調査法の実現可能性の実験的検討

Experimental Study on the Feasibility of In-situ Site Investigation using by an Excavator

一井 康二 Koji ICHII (関西大学社会安全学部)
 宮地 裕暁 Hiroaki MIYAJI (関西大学社会安全学部)
 廣部 玲央 Reo HIROBE (関西大学社会安全学部)

本研究では、新しい地盤調査法の開発の試みとして、一般的な建設機械であるミニショベルを用いた地盤調査法の実現可能性を検討した。まず、ミニショベルのバケットで掘削した土砂の密度・強度・含水比のそれぞれに対して、傾斜計等を用いた簡便な計測手法を提案した。そして、提案手法を実際のミニショベルに実装し、現場実験において実現可能性を検討した。検討の結果、土中に埋没したコンクリートガラ等を掘削した場合などを除くと、定性的には地盤強度を掘削時のミニショベルの挙動から評価することが可能であり、バケット等に設置したセンサーから掘削土砂の密度や含水比の評価することも、将来的には可能であるという見込みを得た。

キーワード：ミニショベル，地盤調査，密度，強度，含水比 (IGC：C07，D03，K04)

1. はじめに

土構造物は、現地で発生した土砂等を用いて施工することが多く、その材料特性の把握が難しい。造成した盛土では、密度管理により地盤の品質が確保されるが、使用している土質材料の特性が均一でなければ、その品質管理は難しい。また、造成していない自然地盤の特性は、標準貫入試験などの地盤調査により把握される。

ここで、標準貫入試験などの一般的な地盤調査手法は、ボーリング孔を用いたサウンディング試験が多く、点としての情報しか得ることができない。すなわち、調査地点間の土質情報は得られていない。このため、表面波探査などを用いて面的に地盤の情報を得る試み^{例えば、1)、2)}や、鉛直方向に連続したサンプリング技術の開発³⁾により、連続した地盤情報を得る努力が行われている。

本研究では、新しい地盤調査法の開発の試みとして、一般的な建設機械であるミニショベルを用いた地盤調査法の実現可能性を検討する。建設機械の多くは、施工時に土質材料を直接的に取り扱うため、工夫により土質材料の特性を把握することが可能である。例えば、オーガーによる掘削時の抵抗から地層構成を把握する技術⁴⁾や連続鋼矢板施工時の地盤抵抗から地盤情報を評価して施工管理に用いる技術⁵⁾が開発されている。しかし、ミニショベルを用いた地盤特性の評価は今まであまり行われていない。

例えば、盛土の施工時において、ダンプトラックにより土砂が搬入されることが多い。このとき、ダンプトラックへはミニショベル（もしくは大型ショベル）を用いて積み込みが行われることが多く、積み込み時に土砂の物性を把握することができれば、盛土築造で使用する土砂の全量把握も原理的には可能となる。また、ミニショ

ベルは土砂災害発生時の人命救助・応急復旧等にも使用されるため、災害発生時の土砂除去作業時に流動土砂の物性を把握することを通じて、災害発生メカニズムの解明にも役立つことが期待できる。

そこで、本研究では、掘削機械（ミニショベル）を用いて、掘削土砂の特性（密度・強度・含水比）を計測できる手法を開発することを目的とした。まず、ミニショベルのバケットで掘削した土砂の密度・強度・含水比のそれぞれに対して、簡便な計測手法を提案した。そして、提案手法を実際のミニショベルに実装し、現場実験において実現可能性を検討した。

2. 掘削土砂の重量・体積・密度の計測手法

2.1 掘削土砂の重量の計測手法

ミニショベルは大型の重機であり、掘削する土砂の重量も大きいので、図-1に示すようにアームとブームを伸ばした状態では、大きな回転モーメントが重機本体に作用する。このため、掘削土砂の重量に応じた傾斜が重機本体に生じると考えられる。言い換えれば、重機本体に生じた傾斜を測定することができれば、掘削土砂の重量を把握することができると考えられる。

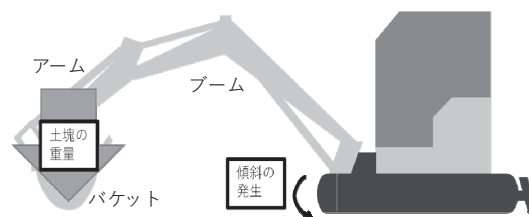


図-1 掘削土砂の重量と重機の傾斜



図-2 本研究で使用したミニショベル
(コベルコ SK45SR ゴムクローラタイプ)

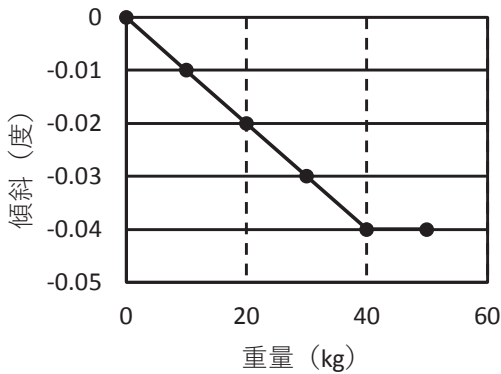


図-3 バケット内の重量と重機の傾斜の関係
(実験結果)

近年、MEMS 加速度計センサーが非常に安価に手に入るようになり、タブレットの表示位置の制御などに用いられている。この加速度センサーは傾斜角の計測にも利用することができ、非常に高精度の傾斜角の変化を計測することができる⁶⁾。そこで、本研究では傾斜計センサーを重機本体に取り付け、バケットに載荷した荷重の大きさに応じた重機本体の傾斜角を測定した。

本提案の実現可能性の検討として、実機のバケットに水のタンクを載せていくことで載荷し、重量に応じた重機の傾斜を計測した。使用した重機は図-2 に示すコベルコ建機製 SK45SR のゴムクローラタイプ⁷⁾である。ブレードは背面に向け、アームとブームを一杯に伸ばしてバケットを地面上 10cm に静止した状態で載荷した。ブームの付け根と載荷点までの水平距離は約 4.0m である。

傾斜角の計測結果を図-3 に示す。最後の 50kg 載荷を除くと、傾斜角は荷重と比例関係にあり、10kg の載荷で 0.01 度ずつ変化している。最後の載荷で変化しなかった点については、傾斜計の解像度 (0.01 度) の問題であると考えられ、解像度の良い傾斜計であれば問題なく重機の傾斜からバケット内の重量を計測できるものと考えられる。なお、実験手順の事情により、50 kg を超える荷重載荷は本研究では実施できていない。

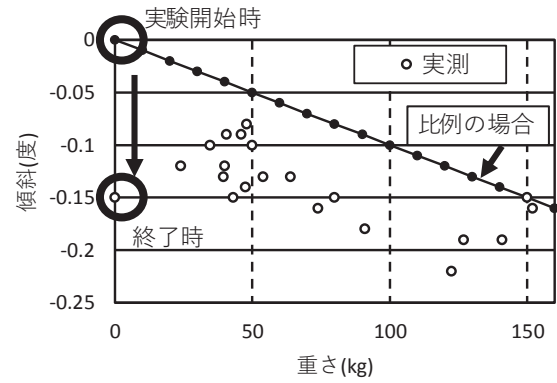


図-4 掘削土砂の重量と重機の傾斜の関係
(実験結果)

実際の重機本体の傾斜は、バケット内の土砂の重量そのものではなく、回転中心からの距離も考慮した回転モーメントの大きさに依存する。そこで、ブームの付け根と載荷点までの水平距離を回転中心までの距離と仮定し、回転モーメントの大きさと傾斜角の関係に直した関係で考える必要がある。この関係は、重機毎に異なるものと考えられるが、必要に応じて本研究と同様の手順でキャリブレーションを行うことは容易である。なお、アームやブームの状態を変えた検討も必要であるが、本研究は提案手法の実現可能性の検討であり、もっともモーメントが大きくなる状態(ブームとアームを一杯に伸ばした状態)を想定して以下の検討を行った。

次に、実際に地盤を掘削し、掘削土砂の重量と重機の傾斜角の関係を求めた。掘削は広島大学構内・陸上競技場南側の実験フィールドで行った。掘削土砂の重量は、ブルーシート上にバケット内の土砂を落とし、そのブルーシートを人力で大型荷重計に運ぶことで計測した。実験結果を図-4 に示す。ばらつきが大きいがおおむね右肩下がり関係である。許容できる誤差の程度は計測の目的によって異なるため一概に述べることはできないが、右肩下がり関係が明瞭であるという点は、必要に応じて事前にキャリブレーションした補正係数を乗じるなどの対処を行うことで、重機の傾斜角から掘削土砂の重量が測定可能であることを示唆している。

なお、本実験では掘削土砂の土量あまり一定値にならないように掘削を行っており、掘削土量が多い場合には重機自体が大きく傾斜・振動した。このため、実験後にバケットが空の状態でも重機の傾斜を測定したが、傾斜角が初期状態の値ではなくマイナス側にずれた値となった。これは、本実験では傾斜計をボルト締めせずマグネットとテープで固定していたために傾斜計がずれた可能性と、地盤自体が振動で沈下して重機の傾斜が生じた可能性を示唆している。前者の理由であれば、計測器の固定方法を改善し解像度の良い傾斜計を用いること、後者の理由であれば地盤条件の良い地点で計測を行うことで、より精度よく掘削土砂の重量が測定可能であると考えられる。

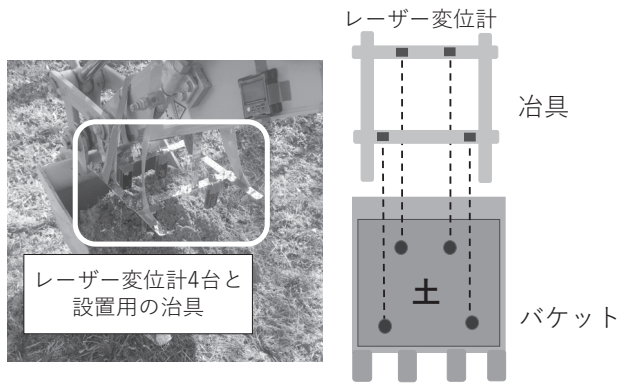


図-5 レーザー変位計による土砂の体積測定

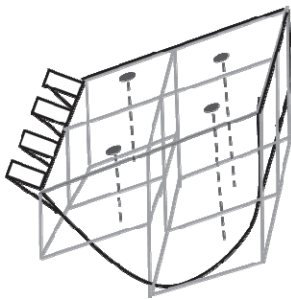


図-6 4点の計測にもとづく土砂体積の簡易推定

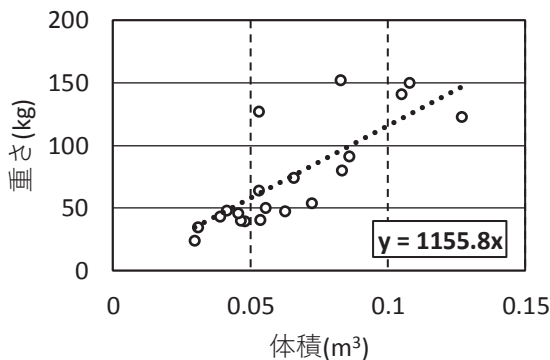


図-7 土砂体積の簡易推定と掘削土砂の重量の関係

2.2 掘削土砂の体積の計測と密度の推定

図-5に示すように、ミニショベルのアームに4台のレーザー変位計を設置し、土砂の体積の計測を試みた。まず、フィージビリティスタディとして、図に示す4点の土砂の厚み変化のみを計測し、底面積と厚み変化から体積を推定した。実際には、バケットの底面が曲面上になっていることと、土砂自体も図からわかるように山盛り状になっていて、4点のみの計測から正確な体積を把握することは難しいと考えられる。なお、簡易計測により生じる誤差の程度は、バケットと土砂の形状を厳密に測定した上で検討することが望ましいものの、本研究の主題が提案手法の実現可能性の検討であるため、厳密な形状測定は行っていない。

この点については、実際の土砂の積載形状を把握して、適切な変位計の台数や設置位置を今後検討する必要

がある。なお、計測はバケットをもっともアームに近づけた状態で行うこととした。しかし、掘削土量が多い場合は、山盛り状になった土砂がレーザー変位計の治具に接触し、治具が傾斜するなど、誤差原因となる事故が生じた（このため、応急処置的にガムテープなどで治具を補強している）。レーザー変位計の設置方法も今後の課題である。

なお、レーザー変位計の設置治具が土砂との接触によりゆがんだため、レーザーの角度と土砂の堆積面が必ず直交しているとは限らない。さらに、計測ポイントの正確な位置は不明である。これらの点は誤差要因である。

誤差要因は大きいものの、図-6に示すように各計測ポイントがバケットを4分割した各エリアの土の厚みであると想定し、体積を推定することとした。

20回の掘削における土砂重量と、上記の方法で推定した体積の関係を図-7に示す。ばらつきは大きいものの、体積の推定結果と実際の重量には相関があり、この傾きが密度の概略値に相当すると考えられる。

原点を通る直線で回帰して傾きを求めると、1.156 kg/m³となり、密度としては小さめの値となった。これは、掘削した土砂の密度であることから現地盤の密度よりも小さな値となることと、図-6に示した簡易推定で求めた体積が過大評価であった可能性が原因として考えられる。しかし、簡易な方法で概略の掘削土砂の密度を推定する方法として、提案手法の実現可能性は確認できたと考えられる。なお、本実験では掘削前の原位置の地盤密度を計測していないが、今後は掘削による体積変化を地盤の種別ごと（今回の対象は、まさ土地盤）に計測して補正係数などの方法で取りまとめる必要がある。

3. 掘削地盤の強度の評価

3.1 掘削地盤の強度の評価手法の提案と実験手順

前述の通り、バケット内の掘削土砂の重量に応じて重機本体の傾斜角が変化する。したがって、掘削時も、地盤の強度に応じた反力によって重機本体の傾斜角が変化する。そこで、掘削時の重機の傾斜角の変動を分析することで、地盤強度を評価することが可能になる。

実際の掘削作業は、複雑であり、掘削時のバケットと重機の重心位置や回転中心との距離は一樣ではない。しかし、地盤強度の評価を目的とした場合、一定のポジションからの決められた形での掘削姿勢を利用することは不可能ではない。また、本研究は提案手法のフィージビリティスタディの段階でもあり、図-8に示すように、一定の掘削姿勢を採用することとした。

実験は図-9に示す広島大学構内・陸上競技場南側の実験フィールドで行った。ミニショベルでの掘削に先立ち、実験フィールド内の10地点をスウェーデン式サウンディング試験により調査した。

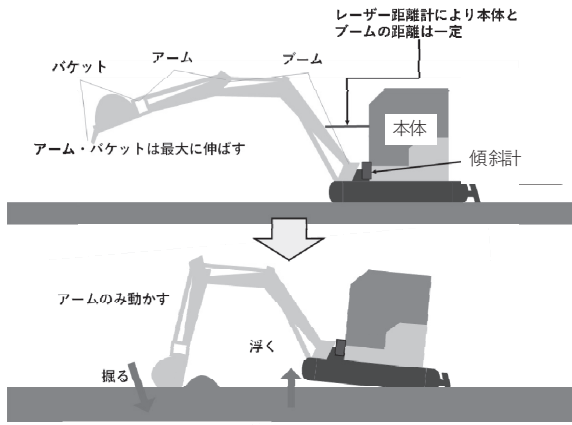


図-8 掘削姿勢とミニショベルに生じる傾斜角

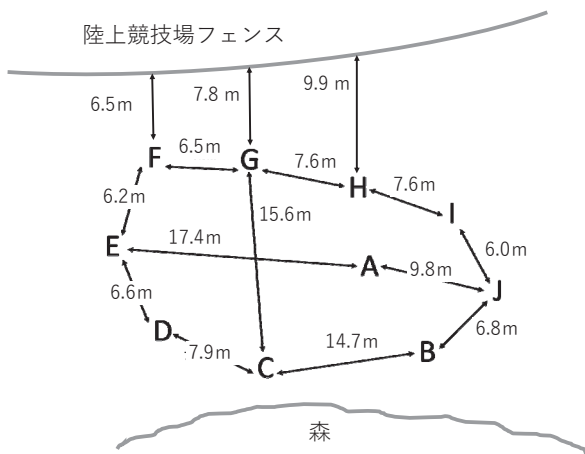


図-9 掘削実験のフィールド（広島大学構内）

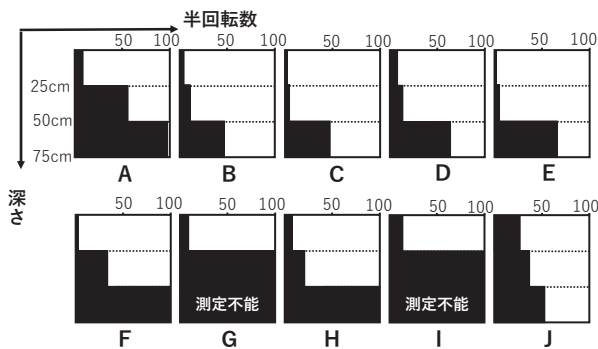


図-10 各地点のサウンディング試験結果

比較的浅い地点で堅牢な地盤が露出し、調査後のスクリーポイントの回収が困難となる事態が発生した。そこで、全地点とも調査深さは0.75 mまでとした。

スウェーデン式サウンディング試験の結果を図-10に示す。極めて表層の地盤に対する検討となるが、A, G, Iの3地点では深さ25cm以深で地盤の強度が大きく増加している。(GおよびIの2地点では、スクリーポイントの貫入が不可能であった)。

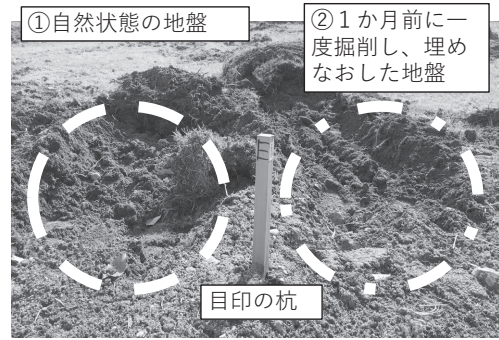


図-11 各地点の掘削箇所
(サウンディング試験地点の両脇)

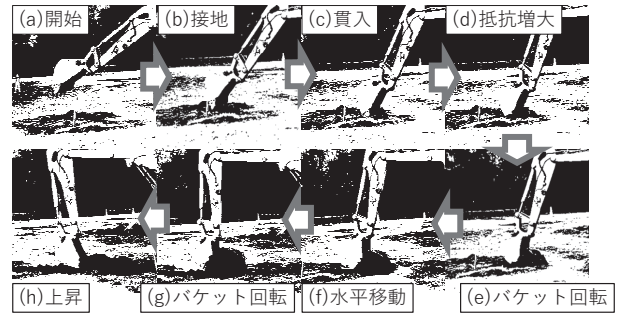


図-12 実際のミニショベルの掘削動作

また、各地点について、図-11に示すように自然地盤と予備実験で一度掘削した後に埋め戻した地盤の2度の掘削を行った。また、このように、地盤強度が異なる地点を掘削対象に含めた実験を実施できているものと考えられる。

実際のミニショベルによる掘削動作を図-12に示す。まず、(a)の段階で、掘削動作を開始する。(b)はバケットが地面に設置した状態を示す。その後、(c)の段階として、通常動作とは異なるが、ブーム位置はそのままアームのみを回転させ、バケットを地面に貫入する。このとき、地盤の抵抗が大きくなり、ミニショベルに傾斜が生じる。(d)の段階は、地面の抵抗が増大したところであり、これ以上のアームの回転が困難になった状態を示す。そこで、(e)の段階として、バケットを回転させると同時にブームを上昇させ、表層部分の掘削動作に入る。(f)は実際の掘削作業に相当する段階であり、バケットが水平に移動しながら表層地盤を掘削している。(g)は水平移動後にバケットを回転させて地盤をすくい上げる段階である。バケットが回転すると、(h)に示すようにアームを上昇させるので、地盤からの反力がなくなり、ミニショベルの傾斜は初期状態に戻る。

これを計測された傾斜角と併せて示すと、図-13のようになる。アームを引き寄せてバケットが水平移動している状態で、ミニショベルの傾斜角は最大となる。

なお、地盤の硬軟に応じてオペレーターがバケットの入射角度を調整するため、掘削深さは毎回異なる。

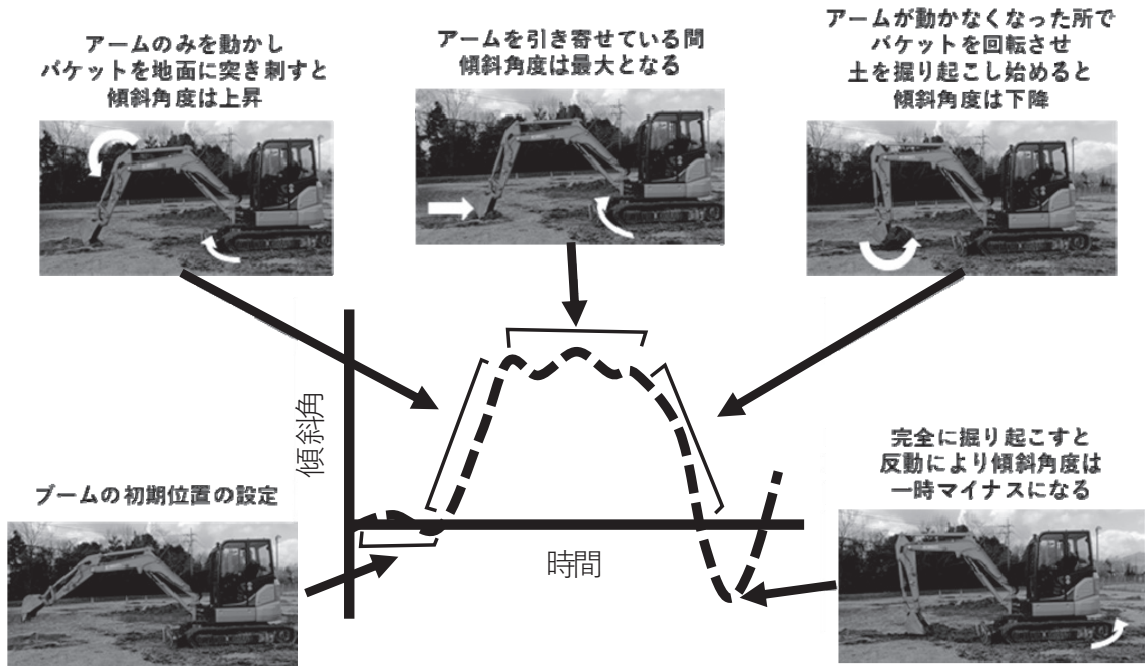


図-13 ミニショベルの掘削動作と傾斜角の関係

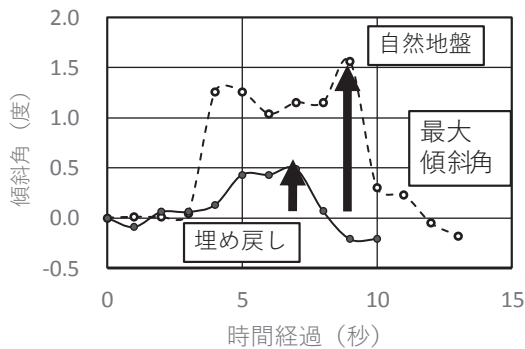


図-14 最大傾斜角の算出例(地点C)

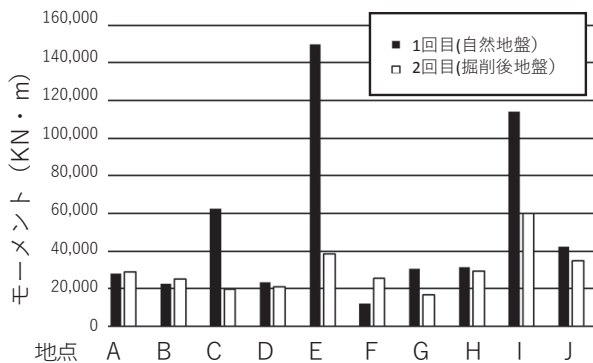


図-15 各地点の最大回転モーメントの比較

そこで、掘削後に掘削深さを計測した。調査を目的とした場合の重機の運転手法などは今後の課題である。

図-13に示したように、掘削に伴いミニショベルは浮き上がるように傾斜する。そこで、10地点、各2回の合計20回の掘削について、最大傾斜角を求めた。

最大傾斜角の算出例を図-14に示す。埋め戻し地盤の方が掘削時の抵抗が小さく、したがって傾斜角も小さい。

図-3で示したバケット内の重量と重機の傾斜角の関係から、回転モーメントと重機の傾斜角の関係を求めることができる。しかし、掘削時は回転中心が移動している可能性もあり、同じ関係を用いることができるとは限らない。この点については今後の課題であるが、ここでは、毎回の掘削を同じ重機の設置状態で行っていることと重機を支えるクローラの延長が長くて回転中心の移動を抑制するように大きな地盤反力が得られていることから、回転中心は大きく移動しないものと仮定する。すると、重機の最大傾斜角から、最大回転モーメントを算出することができる。

3.2 掘削地盤の強度評価の現地実験結果

実験フィールドの10地点の各2回の掘削について、最大回転モーメントを求めた。すべての地点の最大回転モーメントの比較を図-15に示す。C、E、Iの3地点では、予備実験で掘削して埋め戻しを行った箇所を再掘削した2回目の掘削の方における最大回転モーメントが小さくなっている。しかし、その他の地点では1回目と2回目の掘削に大きな違いはない。この理由は、そもそも他の地点では計測される最大回転モーメントが小さいことに関係している。すなわち、地点C、E、Iの3地点で計測された大きな回転モーメントは掘削時に人頭大の石が引っかかるなどの異常値であった。実際に当該地点で掘削されたコンクリートガラの例を図-16に示す。このような地点では、ガリガリという異音とともに、重機が大きく傾斜するため、本提案手法の適用は困難であるが、異常値であることの判別は容易である。



図-16 異常値の原因となるコンクリートガラの例

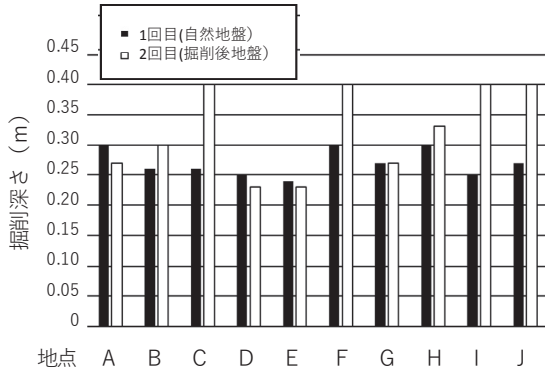


図-17 各地点における掘削深さ

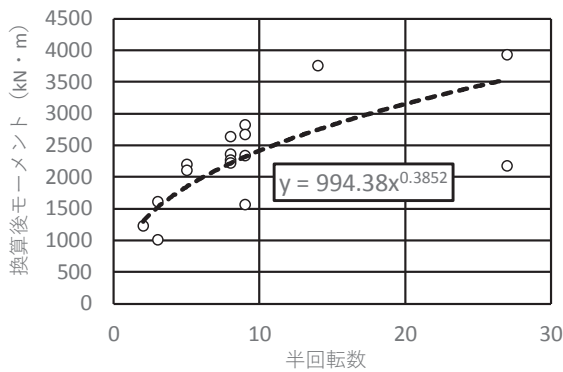


図-18 換算後の最大回転モーメントとサウンディング試験結果の関係

また、図-17に示すように、2回目の掘削では地盤が柔らかいことにより地盤深くまで掘削している。これは、重機の傾斜角が過大にならないように、1回目の掘削では掘削深さを調節していることによる。

そこで、掘削深さに比例して掘削抵抗が大きくなると仮定し、式(1)を用いて最大回転モーメントを掘削深さ0.25 m相当の時の値に換算することとした。

$$M_{0.25} = \frac{0.25}{d_m} \cdot M_{dm} \quad (1)$$

ここで、 $M_{0.25}$ ：掘削深さ0.25 m時における最大回転モーメント(kNm)、 d_m ：計測された掘削深さ(m)、 M_{dm} ：掘削深さ d_m (m)時における最大回転モーメント(kNm)、である。なお、掘削深さに応じた掘削抵抗が非線形の関

係を示す可能性もあるが、掘削深さ20~40 cm程度の限られた範囲の補正であり、一次近似として直線的な補正を行った。

スウェーデン式サウンディング試験の結果(表層0.25 mの値)と換算後の最大回転モーメントの比較を図-18に示す。ただし、前述のコンクリートガラによる異常値は除いている。異常値を除くと、おおむね、サウンディング試験の地盤抵抗の増加に伴ってミニショベルの最大回転モーメントが増加していることが確認できる。なお、図-18には近似線も示しているが、近似線と結果の差は、式(1)による回転モーメントの補正における誤差であるとか、スウェーデン式サウンディング試験で測定した地盤強度の深さ方向のばらつきなど、多くの要因が考えられる。

すなわち、ばらつきは大きいがおおむね、スウェーデン式サウンディング試験の結果に応じて、重機に作用した回転モーメントが大きくなっており、重機の傾斜角と地盤強度には相関がみられる。つまり、重機の傾斜角の測定により、地盤の強度を推定できる見通しが得られたといえる。

4. 掘削土砂の含水比の計測手法

掘削土砂の含水比を計測することができれば、砂や粘土といった土質分類等の参考資料にもなる。そこで、簡便な含水比の計測手法を検討する。

土肥らは災害時の要救助者発見の迅速化を目的とし、土質条件を変化させながら Bluetooth 電波発信機(ビーコン)の埋没実験を行っている⁸⁾。その結果、電波の届きやすさは、送信側のみならず受信側の性能にも依存するものの、総じて、土質条件に依存して電波の減衰特性が変化することがわかっている。例えば、間隙が多い砂利では最も電波が遠くまで届くが、水を吸収しやすい培養土では電波が大きく減衰する。すなわち、ビーコンが放つ Bluetooth の電波は水によって大きく遮断されてしまうことが確認された。

ここで、Bluetooth の電波を利用するビーコンの価格は1000円程度で電波は1年間持続する。また、電波強度は携帯電話等の一般的な機械で計測可能である。よって、Bluetooth 電波の減衰特性に着目すれば、含水比の概略把握が安価に可能になると考えた。しかし、ミニショベルのバケットは金属製であり、電波の非透過・反射などが生じ、実際にはバケットに設置したビーコンの電波を計測できない可能性もある。そこで、バケット内に設置したビーコンでの土砂特性の把握が可能かどうか検討することとした。

本研究では class1 の Hi-beacon と、class2 の一般のビーコンを用いた。それぞれの仕様・特徴を表-1に示す。どちらのビーコンもボタン電池で稼働し、非常に小型である。

表-1 本研究で用いた Beacon の仕様・特徴

Bluetooth class	class1	class2
名称	インタープロ社 Hi-beacon	パップアロー社 BSHSBTPT01BK
寸法	83 mm ×28 mm ×12 mm	26 mm ×45 mm ×10 mm
重量	18 g	12 g
価格	7560 円	1400 円



図-19 ビーコンの設置と含水比計測実験の状況

電波強度の計測には携帯電話のアプリ（BLE Scanner）⁹⁾を利用することができる。実際の利用時には掘削土砂との接触等を考慮して、設置方法を入念に検討する必要がある。しかし、本研究はフィジビリティスタディであるので、ビーコンをビニール袋に入れてバケツ底面に、水抜き用孔を利用して固定した。また、バケツは地面に設置した状態とし、人力で土砂を投入して実験を行った。計測は、バケツ脇で測定値を目視で読み取ることとした。ビーコンの設置状況と計測状況を図-19に示す。

ビーコンの電波強度は、「dBm」を単位として示される。これは1mWの信号強度を0dBmとした時の相対数値を表している。

土砂の含水比を14.5%と25.0%にした2ケースについて実験を行った。実験結果を図-20と図-21に示す。どちらのビーコンを用いた場合でも、土砂の厚みの増加と共に電波強度が小さくなっていく。また、ばらつきはあるが、含水比が多いケースの方が、全般的に電波強度の低下が大きい。

図-20と図-21では、バケツ内の土砂の厚みが10～15cm程度するとき、この範囲内の電波強度の変化は小さい。そこで、土砂の厚みが10～15cmの時の電波強度の平均値を用いて、含水比と電波強度の関係を求めた。結果を図-22に示す。今回の実験では含水比を2種類に変化させているだけであり、一般的な傾向を得るまでには至っていないが、含水比の増加により電波強度が低下している傾向は明瞭である。なお、図-22で低下傾向が直線的になるという理論的背景はなく、より多くの計測実験が必要である。しかし、対象地点の地盤材料を用い

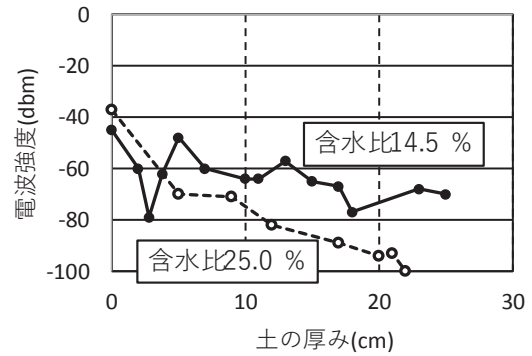


図-20 土の厚みに応じた電波強度の低下 (Hi-beacon: class1)

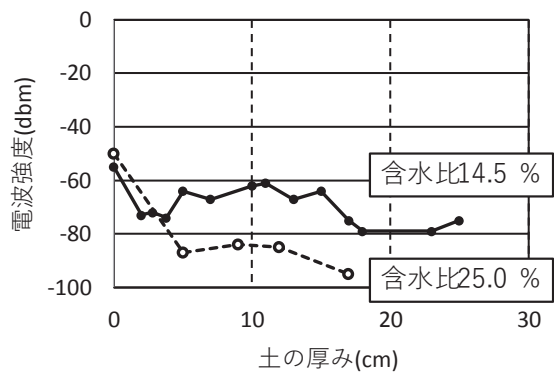


図-21 土の厚みに応じた電波強度の低下 (一般のビーコン: class2)

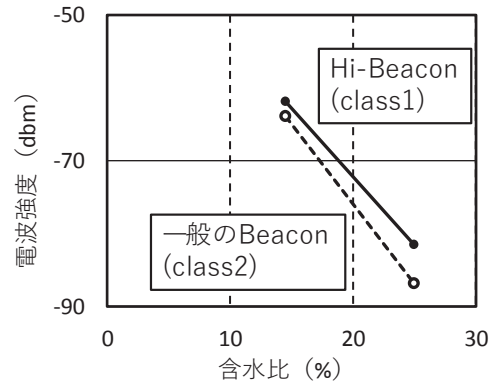


図-22 含水比に応じた電波強度の低下

て、含水比を変化させた試験によりキャリブレーションを行えば、各掘削時での電波強度から掘削バケツごとの含水比の概略推定を行うことが将来的には可能であると考えられる。

5. 結論

本研究ではミニショベルのバケツで土砂を掘削した場合に、その土砂特性を計測する手法を検討した。特

に、実際の現場での実験を通じて、提案手法の実現可能性（フィージビリティ）を検討した。

以下に得られた結論と今後の課題を述べる。

1) 掘削土砂の重量・体積・密度

掘削土砂の重量は重機の傾斜により計測することが可能であることを確認した。しかし、設置したセンサーのずれもあり、計測精度の検討は今後の課題である。

また、アームに設置したレーザー変位計によりバケット内の土砂の体積を計測し、別途測定した土砂重量との組み合わせにより密度の推定が可能であることを確認した。

なお、実際の計測にあたっては、計測のたびにバケット及びアーム、ブームのポジションを指定の位置にセットする必要があり、実際の作業中の全掘削ごとの重量を測定することは非現実的である。この点については、ブームやアームにも傾斜計を取り付けることで、連続的に計測する手法を今後試みていく必要がある。

2) 掘削地盤の強度

掘削時の重機の傾斜により計測することが可能であることを確認した。しかし、通常的地盤調査法と同じく、大きな石やコンクリートガラに接触したときは重機が大きく傾斜し、適切な値が得られない。こういった異常値の除去も含めた計測精度の検討が今後の課題である。

3) 掘削土砂の含水比

ミニショベルのバケット底面からの Bluetooth 電波の減衰特性による計測により、含水比の推定が可能であることを確認した。

しかし、現段階では静止状態においてスマートフォンのアプリで確認しており、実際の作業時に利用可能な計測・記録システムの開発が必要である。

謝辞

本研究は、国土技術センターの研究助成により実施しました。また、コベルコ建機株式会社と国立大学法人広島大学との共同研究として実施し、ミニショベル1台の使用と実験フィールドの掘削許可を得ることができました。実験実施にあたっては、コベルコ建機株式会社の田中精一氏、前田建設工業株式会社の三上武子氏、公益財団法人深田地質研究所の高橋亨氏より技術アドバイスをいただきました。実験フィールドの掘削許可等の調

整には、広島大学の湊かおる氏にご尽力いただきました。実験実施においては、広島大学大学院生の黄新華氏、関西大学学生の木戸口拓海氏、田名後大輔氏、葉山直樹氏、牧健介氏の協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 一井康二, 河野真弓: 擁壁や盛土の健全度診断への地盤震動計測 —適用性と課題—, 物理探査, Vol.68, No.2, pp.101-118, 2015.
- 2) 川尻峻三, 川口貴之, 橋本聖, 田中悠暉, 中村大, 山下聡: 盛土内の性状把握に対する表面波探査の適用性, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.1, pp.61-74, 2018.
- 3) 原口強, 中田高, 島崎邦彦, 今泉俊文, 小島圭二, 石丸恒存: 未固結堆積物の定方位連続地層採取方法の開発とその応用, 応用地質, 第39巻, 第3号, pp.306-314, 1998.
- 4) 古屋弘, 伊藤不二夫, 串間正敏, 三田地利之: オーガー掘削施工中のリアルタイム地層判定手法の開発, 土木学会論文集, No. 665/VI-49, pp.19-29, 2000.
- 5) 技研製作所: PPT システム (NETIS: SK-170006-A) http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=SK-170006&TabType=2&nt=nt (参照 2018.6.15).
- 6) Naoki Orai, Koji Ichii, Shiho Ishii: A trial of simple and easy health monitoring for power poles by using 'ipod', *Science China Technological Sciences*, Vol.58, No.4, pp.712-719, 2015.
- 7) コベルコ建機: 後方超小旋回ミニショベル アセラ・ジオスペック SK45SR, <https://www.kobelco-kenki.co.jp/products/minishovel/SK45SR-6.html> (参照: 2018年3月16日).
- 8) 土肥聖平, 一井康二: 携帯型電波発信機の土砂埋没時の性能評価, 地盤と建設, 公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集, Vol.35, No.1, pp.77-86, 2017.
- 9) Bluepixel Technologies LLP: BLE Scannar, <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mac.dom.ble.blescanner> (参照: 2018年3月16日).

(2018年6月18日 受付)