

掘削機械バケットを用いた 地盤調査手法に関する研究

関西大学社会安全学部 教授 一井康二

概要：

本研究では、掘削機械（バックホウ）を用いて、掘削土砂の特性（密度・含水比・流動特性等）を計測できる手法を開発することを目的とした。実際の計測項目と計測手法は、地盤強度（掘削時のバックホウの傾斜により計測）、地盤密度（アームに設置したレーザー変位計により体積を計測して算出）、含水比（バケット底面からの Bluetooth 電波の減衰特性による計測）、流動性および付着性（画像撮影による観察）である。また、精度の検討として、実際のバックホウに実装し、現場実験において他の計測手法で得られた指標との比較を行った。検討の結果、提案手法に一定のフィージビリティが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バケットが接触したときは適切な値が得られないことがあり、今後はこのような異常値の除去も含めた計測精度の検討が必要である。

キーワード：建設機械, バックホウ, 掘削, 地盤強度, 地盤密度, bluetooth

1. 研究目的と研究手順

土構造物は、現地で発生した土砂等を用いて施工するため、材料特性の把握が難しい。土構造物に関して、その不均質性等も考慮して信頼性を確保するためには、従来と異なる発想に基づく地盤調査法の実現が必要である。

そこで、本研究ではバックホウによる地盤調査に着目した。土構造物の施工に用いる材料のほとんどは、ダンプカーへの積み込み等の際に掘削機械（バックホウ）のバケットを通過する。そこで、バケット内において、土砂の特性を簡便に把握することを通じた、土構造物の材料の全量把握の実現を目指した。

具体的には、下記の方法で土砂特性の計測を試みた。

- ・掘削土砂の重量：バックホウの傾斜により計測。
- ・地盤強度：掘削時のバックホウの傾斜により計測。
- ・地盤密度：レーザー変位計による体積計測から算出。
- ・含水比：Bluetooth 電波の減衰特性による計測
- ・流動性および付着性：撮影画像による観察

また、計測精度の検討として、実際のバックホウに実装し、現場実験において提案手法で測定した値と、他の計測手法で得られた指標との比較を行った。しかし、実験ケースは限られており、現段階では提案手法のフィージビリティスタディの段階といえる。

2. 掘削土砂の簡易重量測定法の検討

バックホウは大型の重機であり、掘削する土砂の重量も大きい。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できると考えられる。

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。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。センサーの分解能は 0.01 度である。

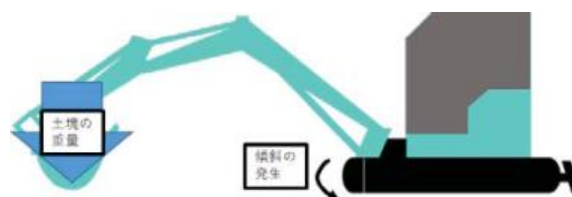


図1 掘削土砂の重量に応じたバックホウの傾斜

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¹⁾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。

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、本研究の地盤強度の推定では、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ものをを用いることとする。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。



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)

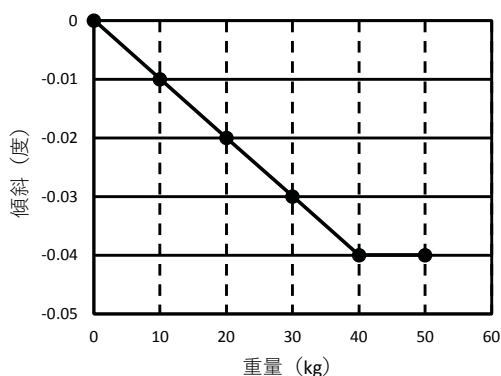


図3 バケット内の重量と重機の傾斜の関係 (実験結果)

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。ばらつきが大きいのが、おおむね右肩下がり関係であり、重機の傾斜角から掘削土砂の重量が測定可能であるという感触を得ることができた。

ここで、本実験では掘削土砂の土量がばらつくように掘削を行っており、掘削土量が多い場合には、想定以上の掘削抵抗が重機に作用したため、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、傾斜角が初期状態に戻らず、マイナス側にずれた値となった。これが計測値が大きくばらついた原因ではないかと考えられる。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。

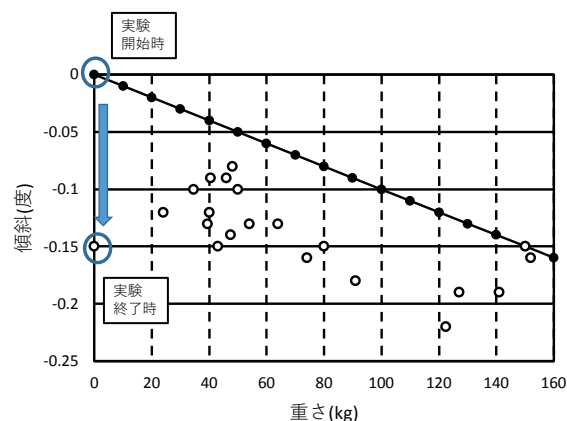


図4 掘削土砂の重量と重機の傾斜の関係 (実験結果)

3. 地盤強度の評価法の検討

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と考えられる。

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ジビリティスタディの段階でもあり、図-5 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。バックホウでの掘削に先立ち、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。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ため、全地点とも、調査深さは0.75mまでとした。

各地点について、自然地盤と予備実験で一度掘削した後埋め戻した地盤の2度の掘削を行い、地盤強度の違いが重機の傾斜角に及ぼす影響を評価できるようにした。

今回の調査フィールドでは、深さ2mまでの掘削許可を得ているものの、オペレータの技量の問題で深い地点までの掘削が難しいことと、深くまで調査した際にサウンディング試験後にスクリーポイントが回収できなくなる事態が生じたことから、深さ0.75mまでを調査するにとどめた。

実際のバックホウによる掘削動作を図6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、通常の動作とは異なるが、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、バックホウに傾斜が生じる。(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、バックホウ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-7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、バックホウの傾斜角は最大となる。

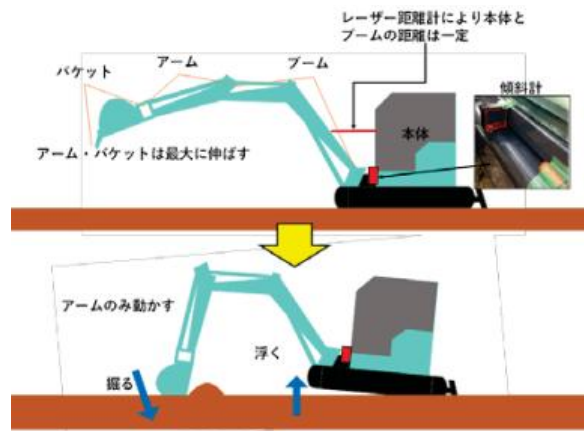


図5 本研究の掘削姿勢と重機に生じる傾斜角

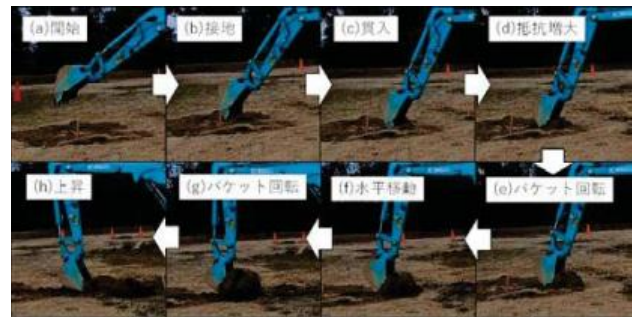


図6 実際のバックホウの掘削動作

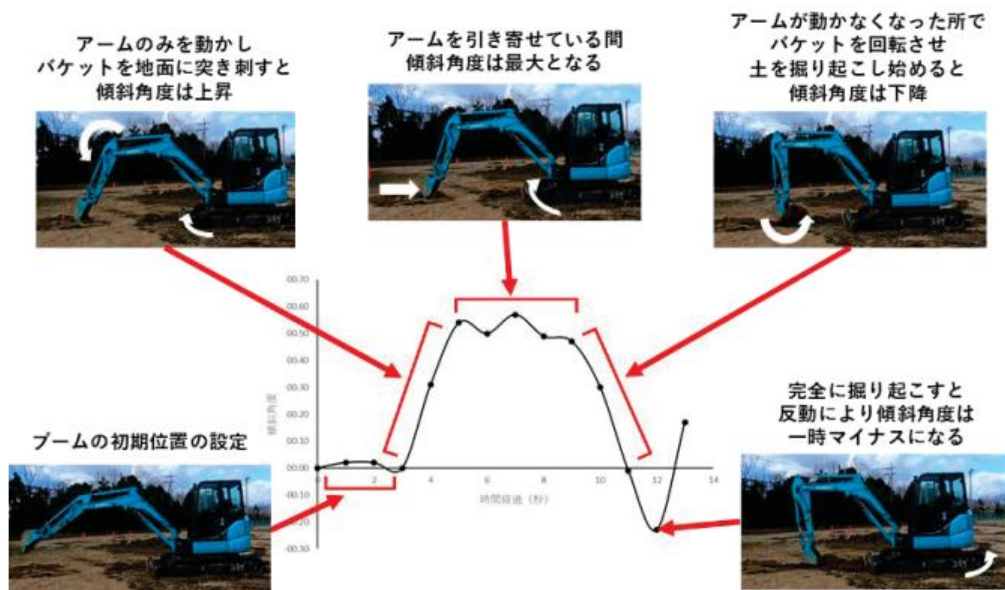


図7 バックホウの掘削動作と傾斜角の関係

なお、本実験での重機のオペレーターは有資格者ではあるが経験が浅い。このため、一定以上の傾斜を感じると不安となり深い掘削が生じないようにバケットの入射角を調整する傾向にある。すなわち、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。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。

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。なお、掘削土砂の重量推定に関連して回転モーメントと重機の傾斜角の関係を既に示したが、掘削時は重機の回転方向が異なるため、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。しかし、ここでは簡単のため、同じ関係を用いることができるものと仮定する。すると、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。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ることができ、その値を図-8に示す。C、E、Iの3地点では、予備実験で一回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がみられない。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大きな石が引っかかるなどの異常値であった可能性がある。また、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。このため、一定の傾斜角を超えないように、掘削深さをオペレータが調節した可能性がある。

掘削深さに比例して掘削抵抗力が大きくなると仮定し、最大回転モーメントを掘削深さ0.25m相当の時の値に換算することとした。そして、スウェーデン式サウンディング試験の結果と換算後の最大回転モーメントの比較を図-9に示す。なお、掘削抵抗が掘削深さに比例するものとして補正している。

地点C、E、Iの1回目と地点Eの2回目では大きな最大回転モーメントが作用している。これらの点を除くと、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バックホウの最大回転モーメントが増加しているように思われる。

そこで、各掘削ケースについて動画を詳細に観察したところ、上記の地点C、E、Iの1回目と地点Eの2回目では、大きな石がバケットにあたり、ガガガという異音を立てながら重機が大きく傾斜していた。このような大きな石との接触はスウェーデン式サウンディング試験や標準貫入試験などの既存の地盤調査法においても問題となるが、本研究で提案するバックホウを用いた手法においても問題となる。

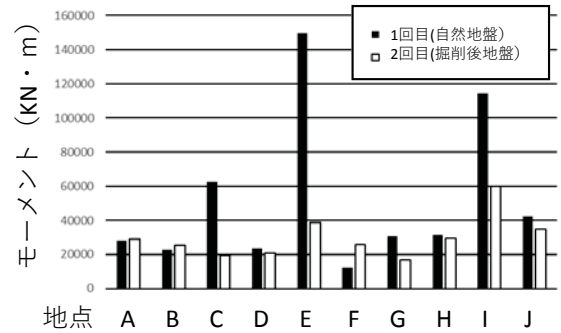


図8 各掘削で得られた最大回転モーメント

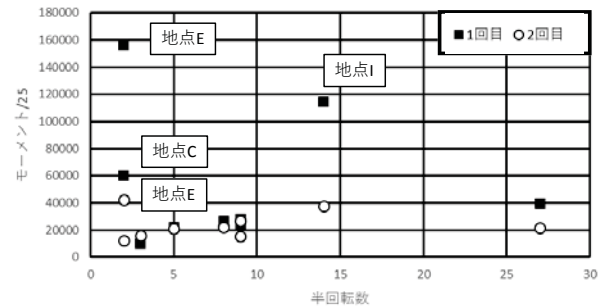


図9 換算後の最大回転モーメントとサウンディング試験結果の関係

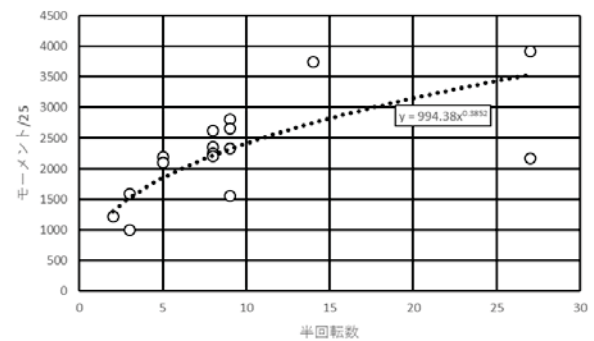


図10 換算後の最大回転モーメントとサウンディング試験結果の関係(石当たり除外)

大きな石に接触した上記の地点C、E、Iの1回目と地点Eの2回目のケースを除くと、図-10に示すようになる。ばらつきは大きいですが、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。

以上から、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. 掘削土砂の密度計測方法の検討

当初はステレオ画像により掘削土砂の体積を計測することを想定していた。しかし、実際の掘削時に撮影を行ったものの、オペレータの技量の問題から、土砂がバケット内にきちんと収まっていないケースが多くみられた。また、バケットの移動に伴い、撮影範囲が大きく変化しており、土量を評価するバケットの位置を一定にしたうえで、評価に必要な範囲をきちんと撮影できる位置にカメラを設置する必要があることが分かった。

そこで、カメラ設置位置の詳細な検討が間に合わず、画像解析による体積測定は基礎的な検討にとどめ、比較的安価に実施可能で実用性があると考えられるレーザー変位計による体積測定を行うこととした。

図-11 に示すように、バックホウのアームに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。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点のみの計測から体積を把握することは難しいと考えられる。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。



図 11 レーザー変位計による土砂の体積測定

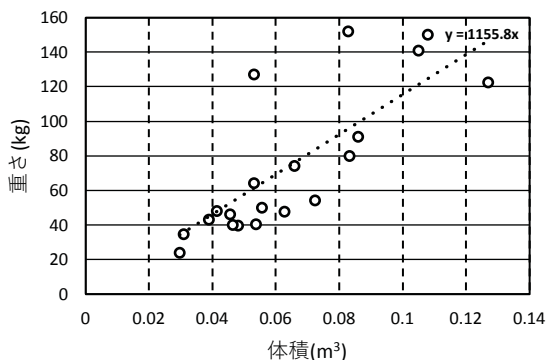


図 12 土砂体積の推定結果と掘削土砂の重量の関係

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-12 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関係があり、この傾きが密度の概略値に相当すると考えられる。なお、ここでの土砂重量は、重機の傾斜から求めたものではなく、バケット内の土砂を重量計に移して計測した値である。

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、レーザー変位計での推定では体積を過大評価していること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いえる。

5. 掘削土砂の含水比測定方法の検討

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 (beacon) の埋没実験を行っている²⁾。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 Bluetooth の性能にも依存するものの、土質条件、特に含水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。

ここで、beacon 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ことことに着目し、電波の減衰特性によって含水比の概略把握が可能ではないかと考えた。

本研究では class1 の Hi-beacon と、class2 の一般の beacon を用いた。Beacon はビニール袋に入れてバケット底面に、水抜き用孔を利用して固定した。また、バケット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。電波強度の計測には携帯電話のアプリ (BLE Scanner)³⁾ を利用し、バケット脇で目視で測定値を読み取ることとした。Beacon の設置状況と計測状況を図-13 に示す。

beacon の電波強度は、「dBm」を単位として示される。土砂の含水比を 14.5% (含水比 1) と 25.0% (含水比 2) にした 2 ケースについて実験を行った。例として Hi-beacon を用いた場合の実験結果を図-14 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。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。しかし、土質ごとに含水比を変化させた試験を行っておくことで、電波強度から含水比の概略推定を行うことは可能であると考えられる。



図13 beacon の設置状況と実験状況

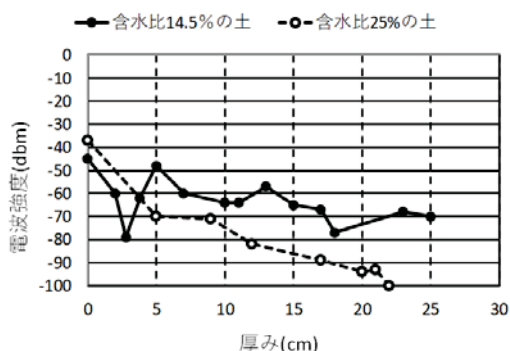


図14 土の厚みに応じた電波強度の低下 (Hi-beacon)

6. 掘削土砂の流動性・付着性の評価方法の検討

バケット内の土砂の撮影画像の分析により、流動性や付着性を評価できるのではないかと考えた。そこで、アーム下部にカメラを取り付けて、土砂の状況を観察した。

含水比 11%と含水比 14%の2種類の地盤に対して掘削実験を行い、バケット内の土砂移動、特に土砂の付着状況を観察した。結果の比較を図-15 に示す。一般に、土砂の付着はバケットの端部にあるエッジ部分から進行する。そこで、エッジ端部（バケット内ではそこでバケット肉厚が変化する）と土砂の付着範囲のそれぞれを線で示している。

図からわかるように、一般的な傾向として、含水比が大きいほど、土砂の付着範囲が大きい。このことから、土砂の付着状況や付着した土砂が流動して拡散する状況から含水比の目安を得ることができる可能性がある。しかし、掘削を繰り返すに従い、付着土砂の増減がみられており、どの時点で評価するかにより結果が異なるため、実際には難しい。

付着土砂の増減の傾向と土質特性に何らかの関係がある可能性はあるが、付着土砂の増減のメカニズムが現時点では明確ではなく、今後の課題である。

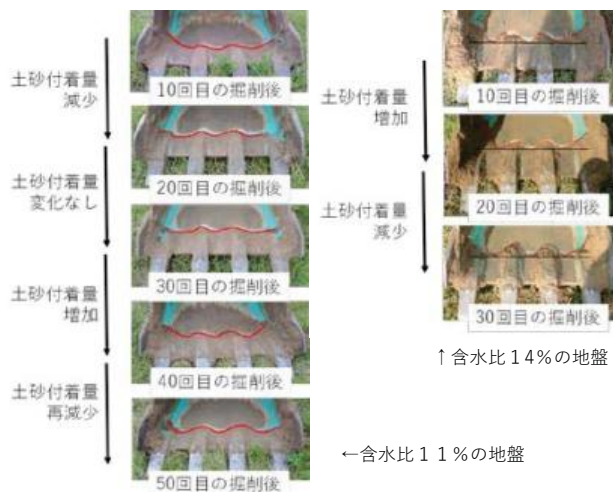


図15 バケット内の土砂付着量の増減・土砂移動

7. まとめ

本研究では、掘削機械（バックホウ）を用いて、掘削土砂の特性（密度・含水比・流動特性等）を計測できる手法を実際の現場実験において検討した。検討の結果、提案手法に一定のフィージビリティが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バケットが接触したときは適切な値が得られないことがあり、今後はこのような異常値の除去も含めた計測精度の検討が必要である。

謝辞

本研究では、コベルコ建機株式会社と国立大学法人広島大学の協力を得た。また、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いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) コベルコ建機, 後方超小旋回ミニショベル SK45SR, <https://www.kobelco-kenki.co.jp/products/minishovel/SK45SR-6.html> (参照: 2018年3月16日)
- 2) 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)
- 3) Bluepixel Technologies LLP, BLE Scanner, <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.macdom.ble.blescanner> (参照: 2018年3月16日)
- 4) 基礎から学ぶ無線LANの設定と設計 「無線LANの信号強度を表す言葉 RSSI と SNR」 (参照: 2016年12月7日) <http://www.viva-musen.net/archives/18751649.html>