

# 5. ソイルセメント山留め壁を施工する際に発生する地盤の摩擦音を活用した土質判別技術に関する基礎実験

日本大学生産工学部  
日本大学短期大学部  
日本大学大学院

○ 下村 修一  
酒匂 教明  
奥山 誠也

## 1. はじめに

山留め工事で止水工法を採用する場合、ソイルセメント壁を難透水層に到達させ、根切り場内の地下水位を低下させることが多い。壁先端が難透水層へ十分に根入れされていない場合、場内の地下水位の低下処理によって止水工法の狙いに反して周辺地盤の地下水位も低下させてしまい、周辺地盤の沈下を招く恐れがある。ソイルセメント壁の施工では、深層混合処理工法や埋込み杭工法と同様に直接土質を確認することが困難なため、掘削オーガの貫入抵抗やオペレーターの感触が土質判別や地盤の硬軟の判断のよりどころとなる。深層混合処理工法や埋込み杭工法では主に支持層への根入れ確認が最重要項目となるため、地盤の硬軟との相関性が比較的高いと思われる掘削オーガの貫入抵抗(例えば 1)を用いることは有効と考えられる。一方、例として土丹と密な砂地盤の比較を挙げると、両者の貫入抵抗は同程度であったとしても透水性は著しく異なる。このような場合は、掘削オーガの貫入抵抗だけでは土質判別は難しく、難透水層への根入れの判断は困難である。しかしながら、これに代わり客観的に施工時の難透水層への根入れを確認する技術は確立していない。そのため、施工時における壁長の管理は地盤調査結果に基づく長さ管理となり、安全側の判断として壁長を長く設定せざるを得ない。特に難透水層の傾斜や不陸が著しい場合、現状の技術では十分な対処が出来なく大きなトラブルを引き起こす可能性がある。難透水層の分布状況を推定する精度は地盤調査箇所数を増やすことで高めることは可能となる。しかし、コストと工期の面から調査箇所数には限界があるため、施工段階で根入れを最終確認する手法の要求は高いと考えられる。

一方、施工時にオペレーターが感覚的に得られる情報として、振動や音がある。例えば粒径の小さな地盤材料よりも粒径の大きな地盤材料の方が掘削時に大きな音が発生することは想像に難くない。

著者らは既に地盤調査手法のひとつであるスウェーデン式サウンディング試験(SWS 試験)を対象に摩擦音を活用した土質判別の有効性を確認している<sup>2)</sup>。SWS 試験は、土質を直接確認できないため、調査記録にオペレーターが感じた音や振動を記録しており、このような記録を客観的な数値として示すことでオペレーターの経験に依存しない評価が可能となる。

そこで本研究では、施工時に得られる掘削オーガーと地盤の摩擦音に着目し、摩擦音を活用した難透水層の判別技術の可能性について模型地盤を対象とした室内実験で検討した。

## 2. 実験装置

### 2.1 模型施工機械

図-1 に模型施工機械を示す。模型施工機械は、掘削オーガーを取り付けた駆動部、掘削オーガーの回転速度、貫入速度およびセメントミルクの吐出量をコントロールする制御部、セメントミルクタンクからなる。セメントミルクタンクはピストンにより連続的にセメントミルクの吐出が可能である。

図-2 に掘削オーガー先端付近の詳細を示す。掘削オーガーは削孔径 550mm の単軸の実機を想定し、縮尺約 1/6 として、軸部径 30mm、羽径 90mm

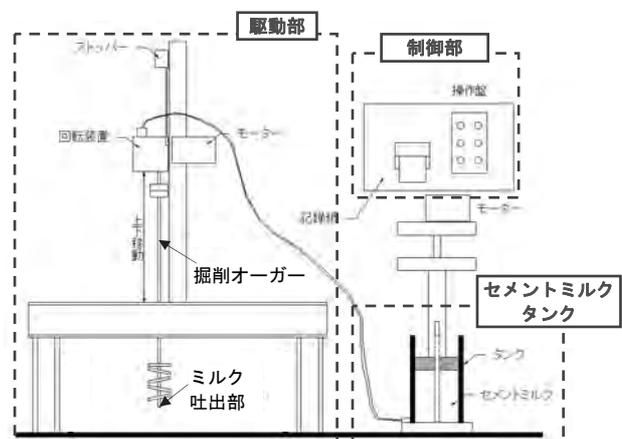


図-1 模型施工機械

とした。先端はダブルオーガー、その上部はシングルオーガーとした。軸部に中心および中心から10mm程度外側の2か所に空洞を設けた。中心の空洞はマイクおよびそのケーブルを内蔵するために設けた。マイクとオーガー先端部の間に閉空間を設け、この空間内に響く摩擦音を計測する。マイクの設置位置を上下させることで閉空間長さのコントロールが可能である。もう一方の空洞はセメントミルクの流路である。

## 2.2 摩擦音測定システム

摩擦音の収録には既往の研究<sup>2)</sup>と同様のシステムを採用した。写真-1にマイクおよび送信機の設置状況を示す。マイクはオーガー中空部内に内蔵し、モーター部付近のオーガー軸部に設置した送信機と接続している。施工時に収録した情報は送信機から無線で受信機に送られ、受信機と接続したアンプ兼AD変換器を通してパソコンに取り込まれる。

図-3に取り込んだデータから得られる時刻歴波形の一例を示す。同図には参考としてSWS試験を対象として実施した既往の研究<sup>2)</sup>で得られた波形も合わせ示した。SWS試験では、ハンドルを4半回転させた時の摩擦音を収録している。試験は人力で半回転毎に静止するため、時刻歴波形には4つの山が確認できる。一方、本実験では機械により連続的に掘削オーガーを回転させており、50rpmで掘削ツールを制御した結果、時刻歴波形には10秒間で8.5山程度が連続的に確認できる。

## 2.3 摩擦音の測定深度

図-4に測定深度と掘削オーガー位置の関係を示す。同図は一例として1層地盤で15cm/minで制御した場合の掘削オーガー位置を示している。測定開始の深度は地表面を0cmとして1層地盤を対象とした試験では深度0cm, 10cm, 20cm, 30cmで、各10秒間測定した。2層地盤を対象とした試験(5.2節)では摩擦音の連続的な変化をとらえることを目的として10秒間の測定を連続的に行った。各実験では地盤の掘削時以外に気中での機械摩擦音と各深度の暗騒音を測定した。図-4に示すように、深度によりオーガー羽部の地中への貫入量は異なるため、この影響により地中での回転貫入時の摩擦音レベルに違いが現れることが予想される。

## 2.4 摩擦音データの処理方法

時刻歴データをフーリエ変換した音圧レベルSPLで表現すると、(1)式となる。

$$SPL(f_j) = 10 \log_{10} \frac{PSW(f_j)}{P_0^2} = 20 \log_{10} \frac{1}{\sqrt{f_s N}} \cdot \frac{|X_j|}{P_0} \quad (1)$$

ここに、PSWは周波数  $f_j = f_s / N$  (Hz) ( $j=0, 1, \dots, N-1$ ) でのパワースペクトル密度関数、 $X_j$ は音圧(Pa)、 $N$ は全データ数、 $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  (Pa)である。

摩擦音はサンプリング周波数  $f_s = 44.1 \text{ kHz}$  で収録した。

さらに、既往の研究<sup>2)</sup>と同様に時刻歴データ  $P(t)$  から次式により実効値  $P_E$  を求めた。

$$P_E = \sqrt{\frac{\int_0^T \{P(t)\}^2 dt}{T}} \quad (2)$$

ただし、実効値は全区間ではなく小区間に分割して算出した。まず全収録時間10秒を区間  $T(\text{term}) = 0.2 \text{ s}$  に分割し、区間毎の実効値を算出し、(1)式に準じてSPLを求めた。このとき、後述する検討結果より、6000Hzのハイパスフィルターと8000Hzのローパスフィルターをかけた。

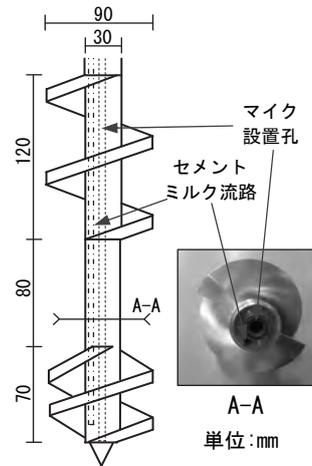


図-2 オーガー先端付近詳細

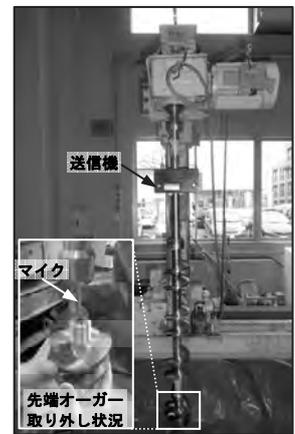


写真-1 マイクと送信機の設置状況

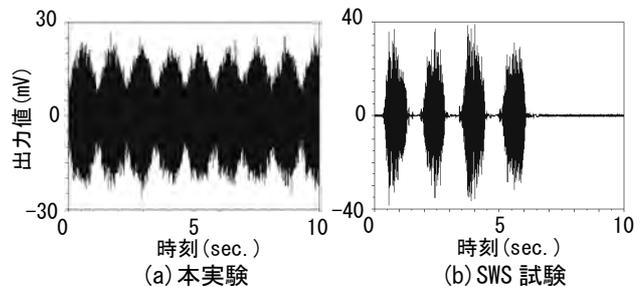


図-3 時刻歴データの一部

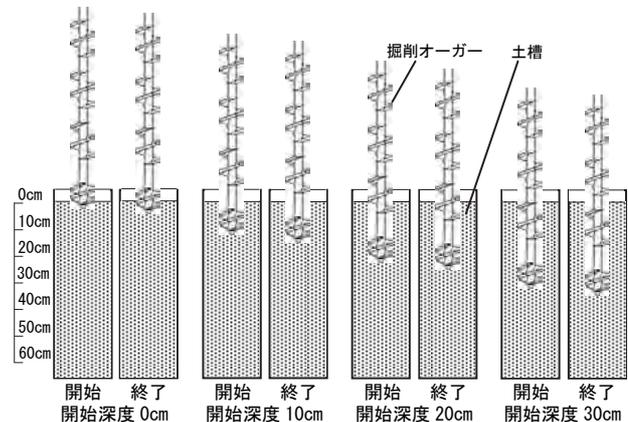


図-4 測定深度(15cm/min, 1層地盤の場合)

### 3. 模型地盤

模型地盤の試料土には珪砂 5 号(土粒子密度  $\rho_s=2.667$ )と笠岡粘土(土粒子密度  $\rho_s=2.710$ , 塑性指数  $I_p=45.1$ )を用いた。

図-5 に各試料土と各試料土を混合した土の粒径加積曲線を示す。4 章の予備実験では珪砂 5 号のみを用い、5 章の土質と音圧レベルの関係を求める実験においては珪砂 5 号に笠岡粘土を所定量混合した。

珪砂 5 号のみを用いた模型地盤では乾燥状態の砂を土槽に投入しながら土槽側面を木槌で打撃して密な地盤を作製した。この模型地盤を飽和させる場合には、その後に地盤上面から水道水を注ぎ水位が地表面となることを確認した。笠岡粘土を混合した模型地盤については、珪砂 5 号と笠岡粘土を乾燥状態で所定量攪拌混合し、その後所定量の水を加えてホバート型ミキサーで攪拌混合して作製した試料土を用いた。この試料土を土槽に高さ 10cm 程度投入する毎に表面を突き固めて模型地盤を作製した。

### 4. 予備実験

表-1 に摩擦音の計測パターンを示す。実施工の流れの中で土質判別を行うには地盤掘削中に摩擦音を計測することとなる。摩擦音に影響する因子として、オーガの回転、貫入及びセメントミルクの吐出が挙げられる。精度の高い土質判別となり得るかは気中での機械摩擦音やセメントミルクの吐出音に対して地中での回転貫入時の摩擦音のレベルが十分に高いことを確認する必要がある。

本研究では乾燥した珪砂 5 号の模型地盤を対象に表-1 に示すパターンに対して機械摩擦音や最適な閉空間長さなどの検討を行った。なお、摩擦音は暗騒音レベルからの変化量となるため、すべての実験で暗騒音レベルに大きな違いがないことを確認した。

#### 4.1 機械摩擦音の検討

図-6 に気中における暗騒音と機械摩擦音の音圧レベルのスペクトルを示す。機械制御は回転のみ(50rpm)と回転貫入(50rpm, 15cm/min)の 2 種類とし、閉空間長さは 0cm とした。図-6 より、機械摩擦音は広範囲な周波数帯域で暗騒音に対して音圧レベルの明瞭な増加が認められており、回転の影響が大きいことが分かる。また、6000~10000Hz の帯域では暗騒音レベルに近い値を示しており、同帯域での機械摩擦音の影響は小さいことが分かる。

図-7 に模型地盤中(深度 10cm)で掘削オーガを手動制御および機械制御(回転のみ 50rpm)した時の音圧レベルのスペクトルを示す。閉空間長さは 0cm である。図-7 には手動制御時の暗騒音及び機

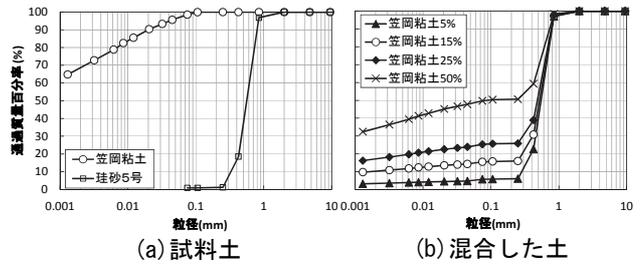


図-5 粒径加積曲線

表-1 予備実験パターン

	暗騒音	回転	回転貫入	回転貫入+セメントミルク	回転貫入(手動)
気中					
地中					

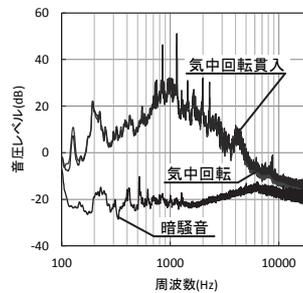


図-6 気中の機械摩擦音

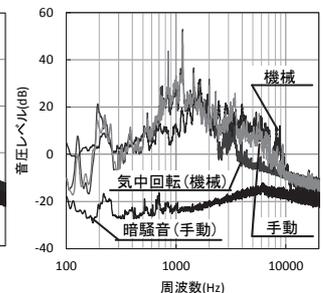


図-7 手動制御と機械制御の比較

械制御による気中の回転のみの結果も併記した。図-7 より、機械摩擦音の影響がなく、オーガと地盤間の摩擦音のみが得られる手動制御の結果を見ると 10000Hz 以下の帯域で暗騒音に対して音圧レベルの明確な上昇が確認できる。一方、機械制御では 4000~10000Hz の周波数帯域で気中回転に対して音圧レベルの明確な上昇が確認できる。さらに、この周波数帯域で手動制御と機械制御の違いは小さい。

以上より、機械制御では 6000~8000Hz の帯域の音圧レベルを抽出することで地盤とオーガ間の摩擦音の評価が可能と判断した。なお、機械摩擦音の特性は装置毎、制御方法毎に異なると予想されるため、実機においても機械毎にこれらの影響を把握する必要がある。よって、ここで提案したフィルター処理は、本装置に限り有効であることに注意が必要である。以後の検討では機械制御のみを対象とする。

#### 4.2 閉空間長さの検討

図-8 に閉空間長さを 0, 1, 2 および 5cm として回転貫入(50rpm, 15cm/min)した時の模型地盤中(深度 30cm)の音圧レベルのスペクトルを示す。地盤の摩擦音の評価は、気中での回転時に対する地中

での回転貫入時の音圧レベルの差が大きいほど土質別の音圧レベルの差が明瞭に表れ、土質判別の精度は高くなる。図-8より、6000~8000Hzの帯域において気中回転の音圧レベルは閉空間長さに因らないが、閉空間長さを0cmとした地中回転貫入時の音圧レベルは最も上昇が大きいことが分かる。よって、以後の検討では閉空間長さを0cmとする。

### 4.3 測定深度の検討

図-9に回転貫入(50rpm, 15cm/min)した時の模型地盤中の測定深度毎の音圧レベルの実効値の時刻歴を示す。なお、測定開始深度は深度0, 10, 20及び30cmであり、10秒間測定しているため、各深度2.5cm掘削する間の記録となる。図-9より、測定開始深度0cmの実効値は深度が極浅いと気中の回転時と大きな違いはなく、深度が深くなるにつれて増大している。これは先端ビットが十分に地盤に噛み合い掘削オーガの羽と土の接触面積が広がったことによる。図-4に示したように、特に深度0cmではオーガの羽と土の接触面積は急激に広がるため、実効値の上昇程度に表れたと考えられる。測定開始深度10cmではダブルオーガが完全に地中に入っており、実効値の上昇程度

は緩やかである。深度20cmでは深度10cmに比べて実効値は大きい値はほぼ一定である。シングルオーガが地中に貫入し始めており、地盤とオーガ間の接触面積が広がっているにもかかわらず、深度に応じた増加傾向は認められない。また、深度20cmと30cmでは実効値に大きな違いは認められないことから、マイクの設置位置から離れた位置での土とオーガ間の摩擦音の影響は小さく、先端ビットによる地盤の切削と先端付近のダブルオーガの羽上を移動する土の摩擦音が支配的と考えられる。以上より、深度が浅い範囲での計測は実際の施工を想定した場合に難透水層の判別の必要性はないことから、以後の検討では主に深度30cmを対象とする。

### 4.4 回転速度および貫入速度の影響

図-10に回転速度を25rpm, 50rpmおよび75rpmで、貫入速度を15cm/minに固定した場合および回転速度を50rpmで貫入速度を30cm/minとした場合の実効値の時刻歴を示す。まず回転速度の違いに着目すると25rpmは他の回転速度と異なり、気中回転時の音圧レベルが高く、波形に大きな振幅が認められ、掘削オーガと地盤間の摩擦音を評価するこ

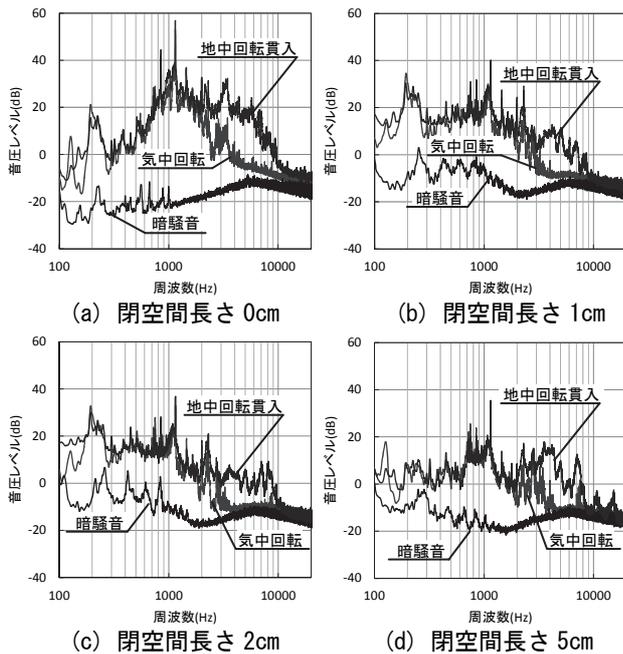


図-8 閉空間長さの影響

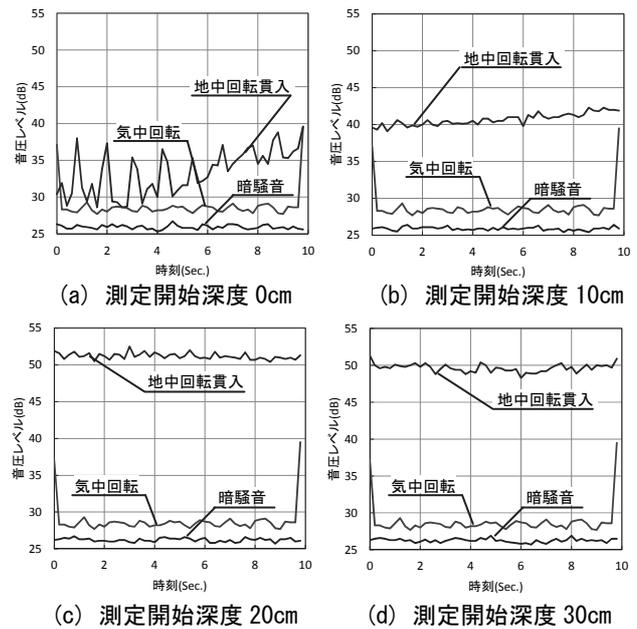


図-9 測定深度の影響

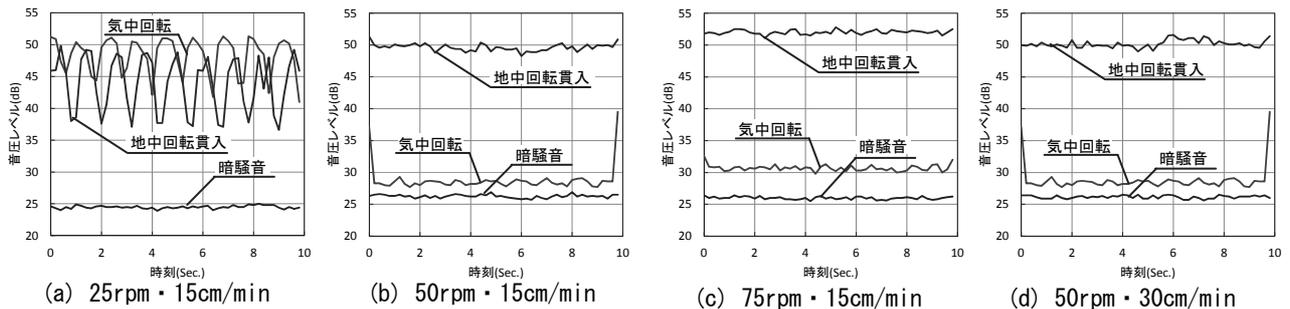


図-10 回転速度および貫入速度の影響

とが困難である。一方、50rpmと75rpmは氣中回転時の音圧レベルが低く、掘削オーガーと地盤間の摩擦音の評価が可能であり、回転速度が速いほど音圧レベルが高いことが分かる。貫入速度の違いに着目すると、貫入速度が2倍になっても音圧レベルの違いは認められない。貫入速度が速くなるとダブルオーガーへの土の供給量が増加し、土の移動の円滑さが失われて摩擦抵抗が大きくなるが、音圧レベルに顕著な違いを生じさせるほど大きな影響はないと考えられる。

以上より、砂地盤については貫入速度ではなく回転速度の影響が摩擦音に対しては大きいと考えられる。制御方法によって機械摩擦音の除去方法に検討の余地を残すが、以降では土質と摩擦音の関係を検討することを主目的に、代表として50rpm、15cm/minでの機械制御を対象とする。

#### 4.5 セメントミルク吐出の影響

ソイルセメント壁の施工においては掘削と同時にセメントミルクを注入する。セメントミルクを注入することによって先端ビット付近の土が緩み切削が容易になるとともに、土はセメントミルクと攪拌混合されて流動性が向上する。そのため、音圧レベルの低下が予想される。

図-11に氣中における水のみ吐出(960cc/min)、回転貫入のみおよび回転貫入時に水を吐出した場合(960cc/min)の音圧レベルのスペクトルを示す。同図より、検討周波数帯域である6000~8000Hzでは水のみ吐出の音圧レベルは暗騒音と同レベルであり、回転貫入時においても水の吐出の有無による音圧レベルの違いは認められない。このことは、水がオーガーの中空部内を通過することや吐出孔から排出されることは、音圧レベルの大小関係に及ぼす影響は無視できるほど小さいことを示している。セメントミルクは懸濁液であるため、水に比べて吐出時に異なる影響が出る可能性もあるが、水吐出そのものは地盤の掘削に比べて影響は極めて小さく、水とセメントミルクでは傾向は変わらないと判断し、実験の難易度も考慮した上で、本実験ではセメントミルクの代わりに水を用いた。

図-12に水の吐出量を0cc/min、480cc/min(注入率50%)および960cc/min(注入率100%)とした場合の掘削時の音圧レベルの実効値の時刻歴を示す。なお、乾燥地盤では吐出した水が地盤に浸透し、水による地盤掘削への影響を十分に把握できないと判断し、ここでは飽和地盤を対象とした。図-12より、実効値は吐出量0cc/minで42dB、480cc/minで38dB、960cc/minで34dBであり、吐出量が多いほど実効値は小さい。これは水の吐出量が多いほどビット先端地盤の切削が容易になったこと及びオーガー羽上を砂がスムーズに移動できるようになったことによると考えられる。

### 5. 土質と音圧レベルの関係

#### 5.1 1層地盤を対象とした検討

表-2に実験条件を示す。実験では、原位置に細粒分が全く含まれていない地盤が存在することは稀であるという前提のもと、細粒分が含まれた4種類の1層地盤を対象に、水の吐出の有無も条件に行った。

図-13に実効値の時刻歴の平均値と笠岡粘土の含有率の関係を示す。同図では深度20cmと30cmのデータを示した。図-13より、特異点はあるものの、水の吐出の有無に因らず概ね粘土分含有率が高い(平均粒径が小さい)ほど音圧レベルは低くなるこ

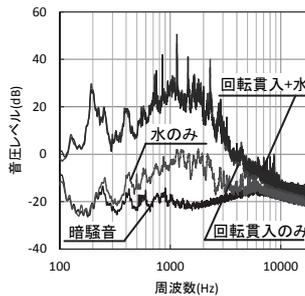


図-11 氣中における水吐出の影響

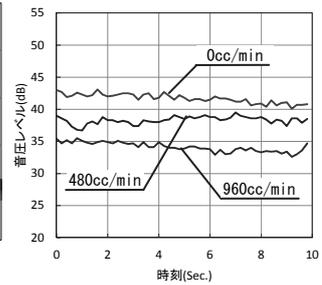
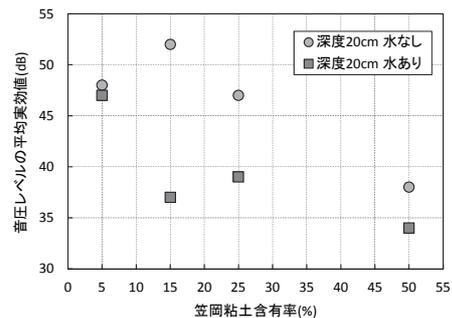


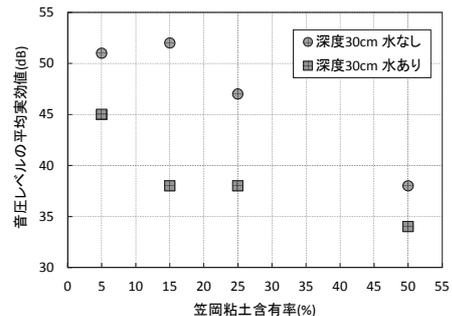
図-12 水吐出量の影響

表-2 実験条件(1層地盤)

Case	試料土の配合(質量比)		含水比 %	回転速度 rpm	貫入速度 cm/min	水 cc/min
	珪砂5号	笠岡粘土				
1D	95	5	5	50	15	0
1W						960
2D	85	15	10			0
2W						960
3D	75	25	15			0
3W						960
4D	50	50	20			0
4W						960



(a) 深度 20cm



(b) 深度 30cm

図-13 笠岡粘土含有率と平均実効値の関係

とがわかる。これはSWS試験を対象とした地盤の摩擦音の結果と同様である。

SWS試験では、スクリーポイントの回転によって生じるスクリーポイントと地盤間の摩擦音が主となる。一方、本実験では先端ビットによる地盤の切削に加えて、オーガーの羽上を土が移動する際のオーガーと土の摩擦も測定する摩擦音レベルの大きな因子となる。粘土分が増えるにつれて、平均粒径は小さくなり、音圧レベルは低下するが、土の粘着性が高まることで土の流動性は低下し、音圧レベルが増大すると考えられる。粘性土の種類によっては粒径と粘着力の影響程度が異なることも予想される。ただし、ソイルセメント壁の施工においては、掘削と同時にセメントミルクを吐出することを考慮すると、土の粘着力による流動性の低下は小さくなることが予想される。これらの影響については今後の課題とし、本実験の地盤条件内においては、SWS試験を対象とした地盤の摩擦音の評価と同様に平均粒径が小さいほど音圧レベルは低くなると判断した。

## 5.2 2層地盤を対象とした検証

前節で得られた水を吐出した場合の音圧レベルと粘土分含有率の関係の相関性を検証するため、2層地盤を対象として摩擦音を測定した。

表-3に実験条件を示す。本研究は難透水層への根入れの判断を摩擦音で評価することを目的としているため、上層を透水層（笠岡粘土5%）、下層を難透水層（笠岡粘土50%）とした。実験は上層の層厚を20cmとし、水を吐出した場合のみを対象とした。計測は深度0cmより10秒間の測定を深度30cm程度まで連続的に行った。

図-14に音圧レベルの実効値について、各深度の10秒間の平均値の深度分布を示す。同図には前節で得られた、各土質の実効値（透水層は46dB、難透水層は34dBで、いずれも深度20cmと30cmの平均値）も併記した。深度が10cm程度までの浅い領域では音圧レベルが低く、下層の難透水層と同程度になっている。これは予備実験でも示したように、オーガーの羽上の土の接触面積が狭いためと考えられる。深度15cmくらいではほぼ笠岡粘土5%の1層地盤の結果と同程度の45dBを示した。それ以深は音圧レベルが低下して笠岡粘土50%の1層地盤の結果と同程度の35dBを示した。このことは、上層の粒径の大きな透水層の摩擦の影響は認められずオーガー先端付近の影響が大きいことを示唆している。以上より、本実験の範囲内では、音圧レベルから土質を精度良く判別できる可能性が示された。

## 6. おわりに

本研究ではソイルセメント壁の施工時において、

表-3 実験条件 (2層地盤)

層厚 cm	試料土の配合 (質量比)		含水比 %	回転 速度 rpm	貫入 速度 cm/min	水 cc/min
	珪砂5号	笠岡粘土				
上層(透水層)	20	95	5	50	15	960
下層(難透水層)	50	50	50			

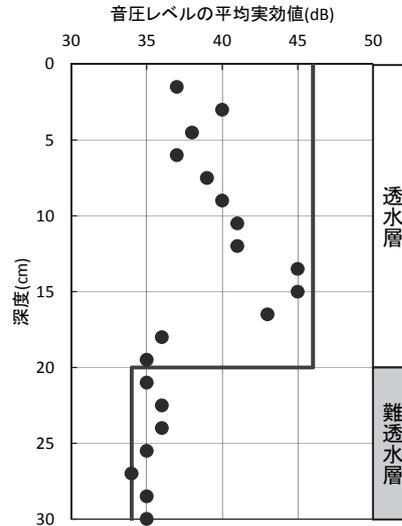


図-14 2層地盤における平均実効値の深度分布

難透水層への根入れを確認する手法として掘削オーガーと地盤間の摩擦音に着目し、模型地盤を対象に可能性を検証した。その結果、限られた条件下ではあるが以下の知見が得られた。

- 1) 機械の摩擦音は制御方法により異なるが、特定の周波数成分をカットすることで除去できる可能性がある。
- 2) 摩擦音は先端地盤の切削とオーガー羽上の土の移動によるものであり、セメントミルク(水)の吐出によりその値は低下する。
- 3) セメントミルク(水)を吐出した場合、粒径が小さい地盤ほど摩擦音は小さい。
- 4) 摩擦音を指標とすることで難透水層を判別できる可能性がある。

## 謝辞

本研究は平成26年度日本建設機械施工協会研究開発助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 下村修一・武居幸次郎・玉川悠貴：埋込み杭の施工時に得られる積分電流値と標準貫入試験のN値の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I，pp.395-396，2012
- 2) 酒匂教明・下村修一・片岡翔太・川村政史：摩擦音を利用した土質判別性能を有するスウェーデン式サウンディング試験，地盤工学会誌，Vol.63，No.4，Ser.687，pp.6-9，2015