

# ロータリーサウンドによる回転切削音による 土質判別法の適用性

塚田幸広<sup>1</sup>・青山憲明<sup>2</sup>・山木忠嘉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 建設省東北地方建設局 酒田工事事務所長 (〒998-0011 山形県酒田市上安町1-2-1)

<sup>2</sup>正会員 建設省土木研究所 施工研究室主任研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

<sup>3</sup>正会員 前建設省土木研究所施工研究室 交流研究員 現(財)福井県建設技術公社 技師  
(〒910-0005 福井県福井市大手2-9-10)

本論は地盤調査技術の高度化を目的に、ボーリングマシンによる回転貫入時の切削音による地盤の土質判別を目指し、室内実験およびフィールド実験を実施した結果にニューラルネットワークを適用して、本手法の有用性を論じたものである。

*Key Words:* sounds generated on rotary penetration rotary penetration test acoustic emission neural network

## 1. 序論

地盤調査の主目的は、構造物の建設の場となる基礎地盤の性状を把握し、構造物の設計・施工に資することである。特に近年の建設プロジェクトの大型化や都市部での近接施工の増加に伴い、細部にわたる高精度の地盤情報が求められるようになってきた<sup>1)</sup>。

このように地盤調査の精度向上が求められる中、各種センサーからの複数の測定項目から複合的に地盤情報を推定することにより、その精度を向上させようとする調査法<sup>2), 3), 4)</sup>が開発されており、その一つにロータリーサウンドティング<sup>5), 6), 7), 8), 9)</sup>がある。これはボーリング時の削孔条件(削孔速度・回転速度)を一定にして、切削ビットに生じる削孔抵抗(ビット荷重・削孔トルク)と泥水圧力を測定し、地盤の一軸圧縮強さを推定するものである。深度方向に連続測定でき、全自動化により人為的誤差がない点が標準貫入試験に比べて優れており、軟弱地盤から岩盤や改良地盤まで広く適用可能である点がコーン貫入試験に比べて優れている。しかし、土質判別については他の手法に委ねる必要があり、この点が解決されればさらに有用性は高まると考えられる。

一方、シールド工事では安全かつ効率的な作業を実現するために、切羽前方の障害物の有無や土質性状の変化を把握することが重要で、カッタービットの掘削音から切羽前方の土質性状の変化を察知する手法<sup>6), 7), 8)</sup>が研究されており成果を上げている。

本論は、土木構造物の信頼性の向上と共に、設計・施工技術の合理化に資することのできる新しい計測技術を用い

た地盤調査法の一つとして、シールド工事で用いられている切羽前方探査の技術をロータリーサウンドティングに応用した、回転貫入時の切削音による土質判別法の有用性を論ずるものである。

## 2. 小型供試体での回転貫入実験

### (1) 実験の目的

小型供試体による回転貫入実験は、回転貫入時の切削音の基礎データを得ることを目的としたものである。

### (2) 実験方法

実験装置は図-1に示すように、電動モーターにより回転(80r.p.m.)する貫入口ロッド(Φ40 mm)を、エアシリンダによって空気圧(0.5kgf/cm<sup>2</sup>)で上下させ、1mm/secの貫入速度で供試体に回転貫入させる機構となっている。

試料には図-2に示す粒度分布をもつ9種類の土質試料を用いた。

供試体は、径350mm、高さ350mmのモールドに3層に分けて各層50回ずつ、2.5kgランマーによる30cm自由落下で突固めて作製した。

回転貫入中の切削音は、貫入口ロッド先端に取り付けた切削ビット(ドラグビット、Φ40 mm)に内蔵された圧電型加速度センサー(プリアンプ内蔵、15kHz共振)によって検出し、出力された電気信号は信号計測装置を介してデジタルデータレコーダーに録音した。なお、記録した加速度は電気信号の電圧で整理している。

実験中は、信号計測装置に内蔵されたスピーカーと信号計

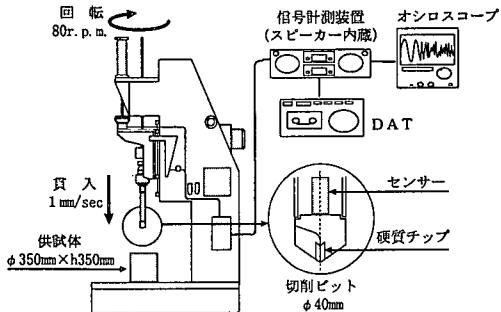


図-1 小型模型実験装置

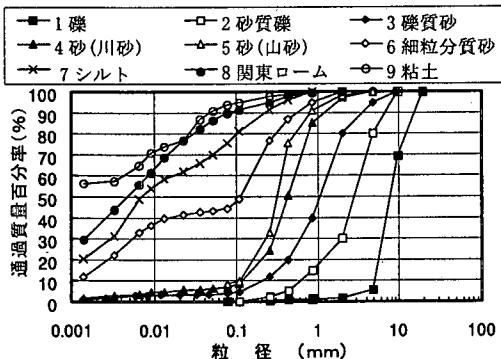


図-2 試料の粒度分布図

表-1 供試体の締固め度

ケース	試料の種類	締固め度(%) (最大乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> ))
1	磯	91.5 (1.602)
2	砂質磯	90.0 (1.877)
3	磯質砂	86.6 (1.936)
4	砂(川砂)	92.6 (1.699)
5	砂(山砂)	77.8 (1.755)
6	細粒分質砂	77.6 (1.752)
7	シルト	75.9 (1.379)
8	火山灰質粘性土(関東ローム)	74.1 (0.763)
9	粘土(霞ヶ浦粘土)	87.3 (0.651)

測定装置につながれたオシロスコープで切削音をモニタリングしながら聴覚による音の判別を行った。また、機械音は200Hzをピークとする700Hzまでの周波数に分布するため、フィルターをかけて700Hz以下の機械音を除去した。

### (3) 実験結果と考察

#### a) 聴覚による差違

実験中のスピーカーから聞こえる音は土質によって異なり、磯の場合は音量が大きく、ガリガリという音の中にキーキーという高い音が混じる。砂の場合は磯に比べて音量が小さく、ザーという一定音で聞こえる。関東ロームや粘土ではさらに音量が小さく、サーという一定音で聞こえる。このように人間の耳でも切削音の違いが明瞭に判別することができた。

#### b) 音量について

音量は計測された信号波形の振幅値で表される。図-3

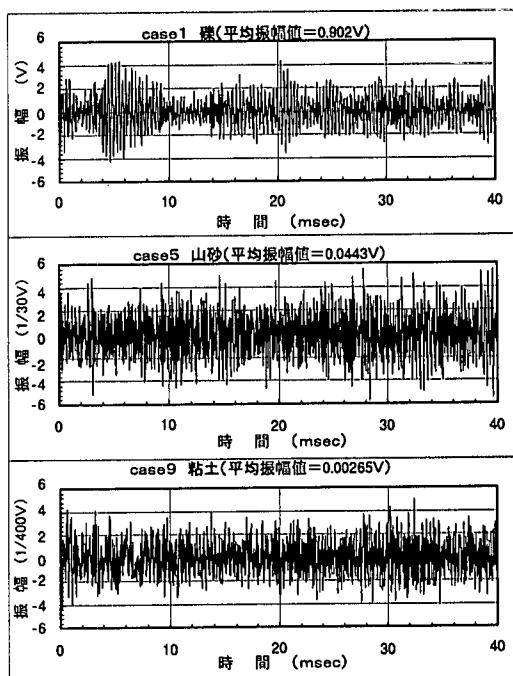


図-3 信号波形の代表例(磯, 山砂, 粘土)

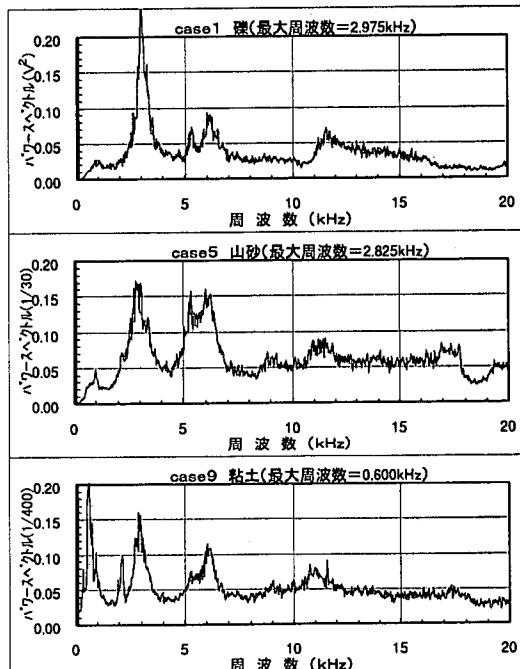


図-4 周波数特性の代表例(磯, 山砂, 粘土)

に代表的な3種類の土質(磯, 山砂, 粘土)の信号波形を示す。磯に比べ山砂や粘土は振幅値が小さいので、図は振幅値を山砂で30倍、粘土で400倍にしている。図-3では山砂、粘土はほぼ一定の振幅値で推移するが、磯は振幅値が突発的に大きくなるという特徴が認められる。また、

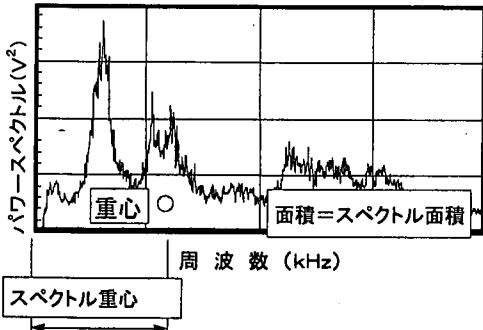


図-5 スペクトル面積とスペクトル重心の概念図

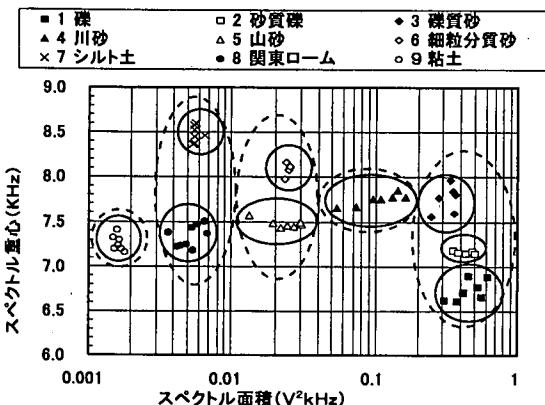


図-6 小型供試体実験での土質判別図

振幅値は磯、山砂、粘土の順に大きく、実験中にスピーカーから聞こえる音の大きさ（音量）の順序に一致する。これは振幅値が土質判別において重要な情報であることを示すものである。

#### c) 音質について

計測された信号波形をフーリエ変換し2乗平均するとパワースペクトルが得られる。これは周波数成分の分布を表すものであり、周波数特性図として音質を表す。

図-4に先に示した3種類の土質の周波数特性図を示す。信号波形と同様に、パワースペクトルを山砂で30倍、粘土で400倍している。

周波数特性図ではいずれの土質においても卓越した周波数領域が、3kHz、6kHz、11kHz付近に存在している。しかし周波数分布の全体形状は土質によって異なり、粘土においては1kHz付近にも卓越した周波数領域が存在する。すなわち土質によって切削音の周波数特性（音質）が異なると言える。

#### d) スペクトル面積とスペクトル重心

切削音を利用して土質特性を定量的に評価するためには、貫入時に計測された信号をパラメータ化しなければならない。そこで音量と音質を表す数値指標を定め、切削音の違いについて検討した。

先に示した図-4からもわかるように、音量が大きくな

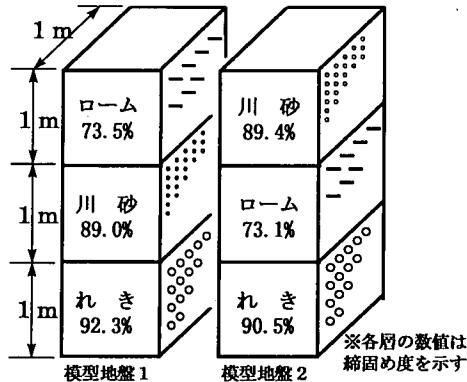


図-7 模型地盤の模式図

るほどパワースペクトルも増大し、ある周波数成分が強くなるほどその周波数に対するパワースペクトルも増大する。すなわちパワースペクトルの総和（面積）は音量を、その重心までの距離は音質を表すと考えられるので、図-5に示すように各々をスペクトル面積とスペクトル重心と定義し、音量と音質を表す数値指標として用いることにした。

図-6は各土質のスペクトル面積を横軸に、スペクトル重心を縦軸にとって実験データをプロットしたものである。この図において、粒径が大きい土質ほどにスペクトル面積の大きな領域に分布しており、スペクトル面積が土質判別に重要なパラメータであることがわかる。

一方、磯と砂質磯、山砂と細粒分質砂、シルトと関東ロームはスペクトル面積がほぼ同じ位置にあるが、スペクトル重心が多少異なる位置にある。これらはそれぞれ粒度分布が似ており、磯と砂質磯では磯分、山砂とシルト質砂では細砂分、シルトと関東ロームではシルト分が主成分をしている。このようによく似た土質性状のものでもスペクトル重心が多少異なることから、スペクトル重心は土質判別のパラメータとして利用可能であると考えられる。

以上のようにプロットされた点が各土質ごとに領域を形成していることから、スペクトル面積とスペクトル重心を用いて土質判別が行えると言える。

### 3. 模型地盤での回転貫入実験

#### (1) 実験の目的

本実験は一般的に使われているロータリー式ボーリングマシンにセンサーを取り付けて実験を行い、ボーリングマシンでの適用性を検討することを目的とした。

特に実際のボーリングにおいては排土のための送水を行なながら削孔するので、本実験においても送水を行い土質判別の障害となるかを検討した。

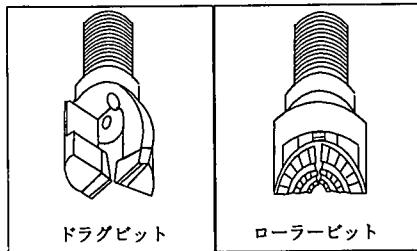


図-8 実験に仕様したビットの形状

## (2) 実験方法

複雑な実地盤により近づけるために図-7に示すように、土槽に小型供試体試験で用いた関東ローム、砂(川砂)、礫(切羽込み砕石最大粒径13mm)の3種類の土質試料からなる模型地盤1および2を、25cmづつ撒き出しランマーで締め固めて築造した。

一方ビット形状の違いも切削音に影響すると考え、図-8に示すような切削面で土をせん断破壊するタイプのドラグビットと、圧縮破壊するタイプのローラービットの2種類を使用して計4ケースの実験を行った。

実験装置には一般的なロータリー式ボーリングマシンを用い、貫入速度1cm/sec、回転数60r.p.m.、送水量20l/secとし、ビットの後端に加速度センサーを取り付けて回転貫入させ、削孔中の切削音をデジタルデータレコーダーで録音した。

## (3) 実験結果と考察

始めに送水の影響についてみると、図-9に示すように送水がある場合は送水がない場合に比べ多少スペクトル面積の小さい領域にプロットつれる傾向にあるが、その度合いは土質ごとの領域を越えるものではなく、送水を削孔であっても土質判別に支障をきたさないことを確認した。

次に、小型模型実験と同様に、各層での切削音のスペクトル面積とスペクトル重心を求め、深度との関係を図-10に示す。これによると、土層境界でスペクトル面積、スペクトル重心共に変化しており、複層であっても土質判別が可能であると言える。特に模型地盤2では上層を川砂とし、スペクトル面積の小さなローム層を正しく判別できるかという点に着目したが、土質に応じた変化を示し土層構造にも影響されないことがわかった。

またビット形状の違いによる影響は、礫層にスペクトル重心、関東ローム層にスペクトル面積の違いとして現れている。この結果をスペクトル面積とスペクトル重心の関係図に表すと図-11のようになり、小型模型実験と同様に土質ごとに領域を形成するように点がプロットされている。

模型地盤での回転貫入実験をまとめると、土層構造の影響を受けず、送水の有無やビット形状の違いについて統一することで土質判別が可能であり、実際のボーリングマシンによる適用性が認められた。

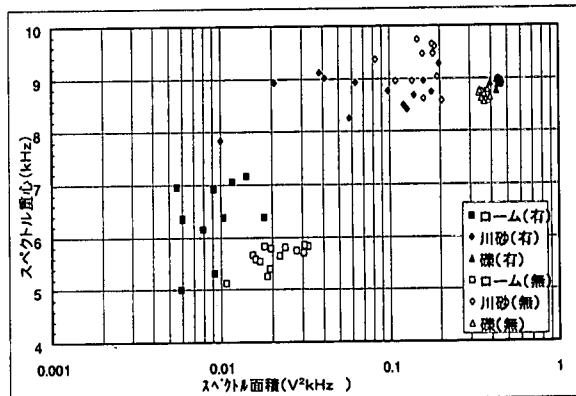


図-9 モデル地盤1, 2における送水の影響  
(ドラグビット)

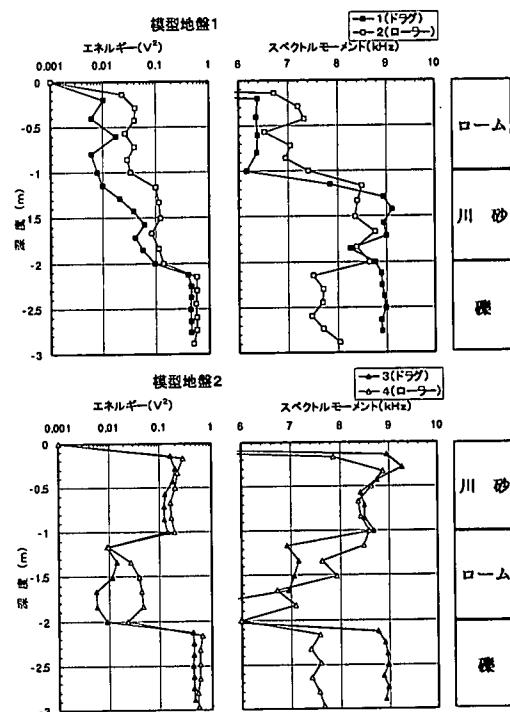


図-10 模型地盤のスペクトル面積-とスペクト

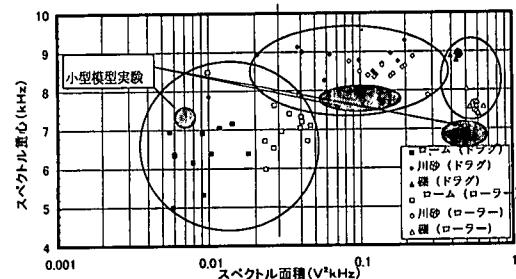


図-11 大型模型実験での土質判別図

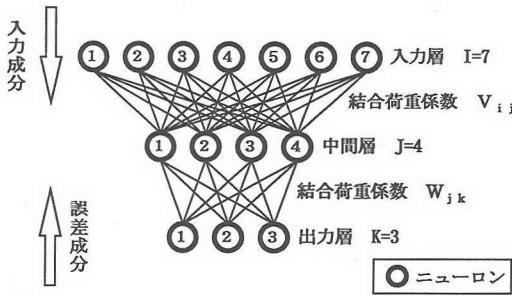


図-12 誤差逆伝播法のネットワーク

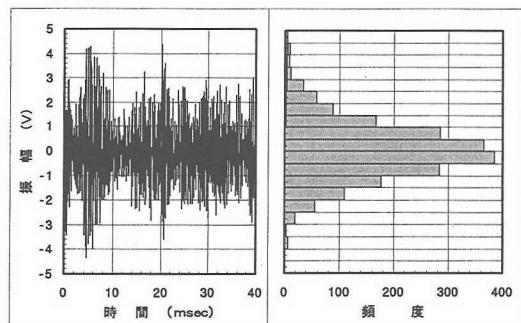


図-14 振幅分布分析例

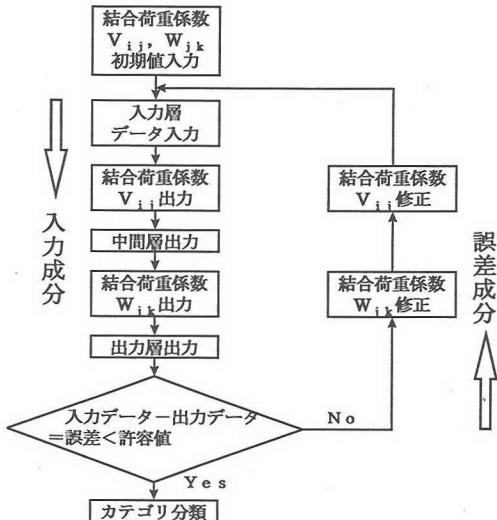


図-13 誤差逆伝播法のフロー

#### 4. ニューラルネットワークによる数値解析

##### (1) 解析の目的

音声情報等のパターン認識に優れた特性を持つ解析方法としてニューラルネットワーク理論がある。ここでは、ニューラルネットワーク理論を切削音による土質判別に利用することを目的として、実験で得られた信号波形を用いて適用性を検討した。

##### (2) 解析概要

従来から行われている if 文を連ねたプログラムによるコンピューター処理では、プログラムを実行しながら新しい情報を吸収することはできず、わずかでも条件文が一致しなければ N o と判断する。しかし人間は知識を吸収し経験を積み重ねることにより判断能力を高め、過去に蓄積した知識や経験と完全に合致しない事象に対しても、何らかの判断を下すことができる。このような人間がもつ優れた判断能力を模倣した数値解析手法がニューラルネットワー

ク<sup>9)</sup>である。ニューラルネットワークは教師データを学習するものと、教師データを必要としないものがあるが、本研究では教師データを学習するものの中で最も代表的な誤差逆伝播法を用いた。

誤差逆伝播法は人間の脳神経細胞（ニューロン）を図-12のような階層型ネットワークとしてモデル化し、図-13のフローに従って各ニューロン間の結合の重み（結合荷重係数）を教師データから学習してネットワークを構築する。最初の学習時においては結合荷重係数に乱数値を与え、入力データにはカテゴリ分類が既知の教師データを入力する。学習が終わり結合荷重係数が定まったならば、これを初期値として解析データを入力層に与え、出力層の各ニューロンに0から1の間の数値を出力する。この数値の中で最大値を示すものが分類されたカテゴリとして判断（土質判別）され、1に近いほど判別精度が高いことを意味する。

##### (3) 教師データ

誤差逆伝播法では、あらかじめカテゴリの既知なデータ（教師データ）を学習し、カテゴリが未知なデータ（解析データ）に対して学習結果を適用するので、判別精度を高めるには教師データに各カテゴリの特徴を反映したパラメータをより多く用いるのがよいとされている。

従って教師データには、土質の違いをよく反映した数値を選ぶ必要がある。土質の違いは切削音の音量と音質によく現れ、それらは振幅値と周波数特性で表現されることは先にも述べたとおりである。

そこで振幅分布分析を行い、その頻度を振幅パラメータとした。図-14に示すように振幅分布分析とは振幅値の頻度分布を求ることであり、その分布は正規分布と見なすことができる。従ってプラス側のみに着目し、各土質ごとの特徴をよく表すように0~0.15Vを20等分したときの頻度を振幅データとして用いることにした。

一方周波数特性図において、パワースペクトルは振幅分布分析における頻度と同様のものとして捉えることができる。そこで振幅パラメータと同様に、周波数特性図のパワースペクトルを周波数パラメータとし、0~20kHzを



かる。

9種類の解析データに対して5種類の分類となった判別能力については、振幅値や周波数特性以外のパラメータを入力データに加えるというような、さらなる入力データの精査が必要と考えられるが、実用的には十分な判別能力が確認できた。

以上のことから、音量を表す振幅パラメータと音質を表す周波数パラメータから、ニューラルネットワークによる数値解析を適用することにより、人間の経験や判断能力によらない土質判別が可能であると考えられる。

### b) 模型地盤実験での解析結果

表-3は模型地盤削孔時の各層での切削音から、小型供試体での解析と同様に振幅パラメータと周波数パラメータを求め、分類するカテゴリ数を3として解析した結果で、全データのうち半分を教師データとして学習させ、残り半分を解析データとして解析した。

解析では全ての層において土質分類が正しく行われ、学習段階でも解析段階でも分類を誤るようなことはなく、ニューラルネットの出力値も高い数値となっている。これは小型供試体での実験のように判別する土質数（カテゴリ数）が多くなく、特徴がパラメータによく反映されていたためである。特にドラグビットよりもローラービットの方が高い数値を示すことから、ローラービットの方が土質判別しやすいと考えられる。

表-4は模型地盤1で得られたデータで学習を行い、模型地盤2のデータについて解析した結果である。この場合も僅かに出力値は下がるが土質判別は正しく行われ、土層構成が異なるデータに対しても解析可能であることを示す。

すなわち複層からなる供試体に対しても、適切な教師データを学習させることによって、未知なデータから土質判別が行えると考えられる。

## 5. 自然地盤での適用実験

### (1) 実験の目的

小型供試体と模型地盤での実験を通じて、実際のボーリングマシンの切削音から、複層の地盤に対してもニューラルネットワークを用いることで、定量的な土質判別が可能であることが確認された。そこで本手法の実用性を更に検証するために、既に標準貫入試験による調査済みの自然地盤を対象として実験を行った。

### (2) 実験方法

実験は茨城県つくば市の建設省土木研究所構内において行った。図-15に対象地盤の土質柱状図を示す。

実験装置は模型地盤実験と同じものを用いた。なおビットはドラグビットを使用し、ビットの回転数、貫入速度、

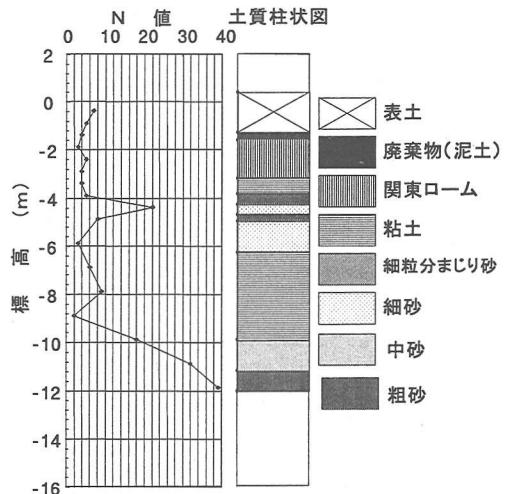


図-15 自然地盤の土質柱状図

送水量は模型地盤実験と同一とし、再現性を確認するために隣接する3ヵ所の調査地点で実験を行った。

### (3) 実験の結果

図-16に調査地点1～3のスペクトル面積とスペクトル重心を示す。

この図によればスペクトル面積、スペクトル重心共に3つのデータが同じように変化し、再現性があることがわかる。

また土質柱状図とも併せて比較すると、本実験で得られるデータの方が標準貫入試験で得られるデータよりも深さ方向に連続しており、同一土質層内であっても敏感に強度や土質によって変化していることがわかる。これは標準貫入試験では見落とし易いレンズ層を捉えることが可能であることを示し、本手法の長所をよく表すものである。

模型地盤と自然地盤で用いた実験装置は同じで、ロッドの回転数、貫入速度などの諸条件も同じとしたので、模型地盤実験で得られたデータのうちドラグビットのデータを教師データとし、調査地点3のデータを土質分類が未知の解析データとして解析を行った。模型地盤実験で得られたデータは礫、川砂、関東ロームの3種類の土質データなので、自然地盤のデータに対しても礫、砂質土、粘性土の3種類で土質判別を行った。また表土は礫混じりの砂質土であったことが調査されていたので砂質土とした。

土質判別は礫をカテゴリ2、砂質土をカテゴリ1、粘性土をカテゴリ0として、それぞれの出力値（0～1）を乗じた総和を出力結果の値とし、この値が0～0.5を粘性土、0.5～1.5を砂質土、1.5～2を礫として行った。出力結果例を表-5に、解析結果を図-17に示す。

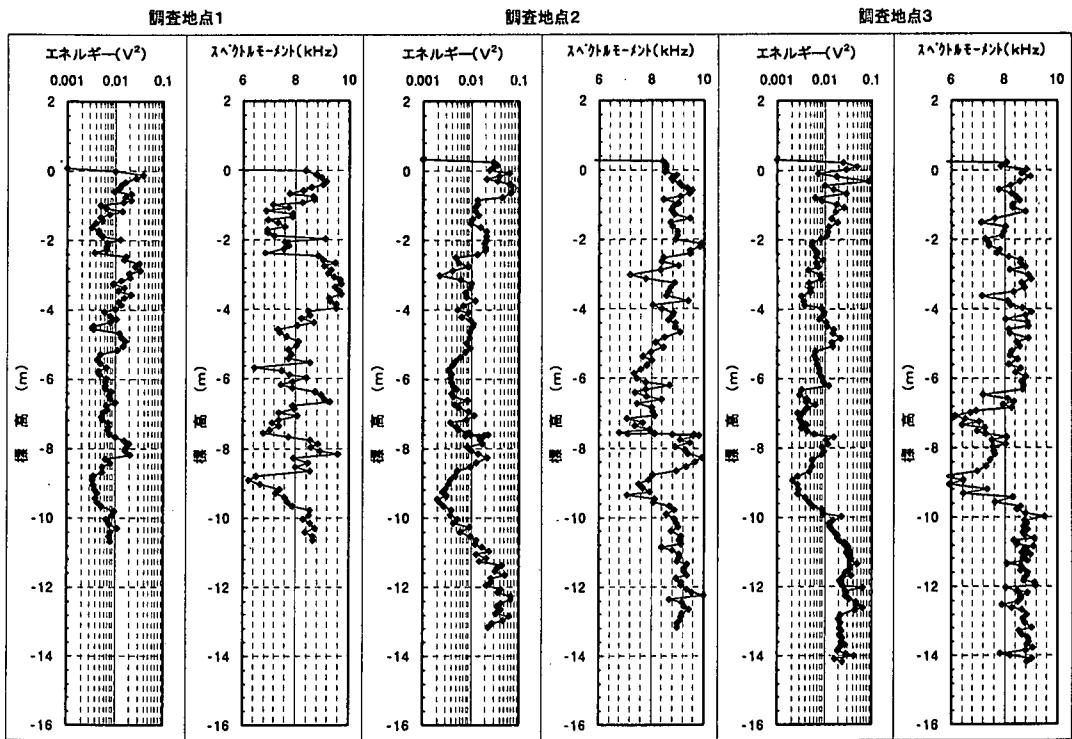


図-16 自然地盤のスペクトル面積とスペクトル重心

表-5 出力結果例

土質	カテゴリ	出力値	カテゴリ×出力値	判別結果
粘性土	0	0.928517	0	
砂質土	1	0.000001	0.000001	
礫	2	0.000001	0.000002	
		合計	0.000003	粘性土
粘性土	0	0.000144	0	
砂質土	1	0.815961	0.815961	
礫	2	0.000001	0.000002	
		合計	0.815963	砂質土
粘性土	0	0.000011	0	
砂質土	1	0.000231	0.000231	
礫	2	0.880362	1.760724	
		合計	1.760955	礫

図-17によれば標高-10m以深の砂質土層は数値解析結果にも現れているが、-4～-6mの砂質土層は数値解析結果に現れていない。砂質土については川砂のデータを教師データとしているので、粘土質細砂、細砂、粘土混じり細砂が続く-4～-6mの層は、土質性状が関東ロームの方により近いためであると考えられる。すなわち模型地盤の土質と自然地盤の土質が異なり、教師データとのマッチングが悪いためと考えられる。

しかし、先にも述べたようにスペクトル面積やスペクトル重心は土層に応じて変化していることから、自然地盤でのデータを教師データとして与えることができれば、解析可能であると考えられる。

## 6. 結 論

本論文は、ロータリーサンディングの土質判別方法として回転切削音に着目した研究成果をまとめたものである。本論文における結論は以下のとおりである。

- ①土質判別は音量と音質が重要なパラメーターで、音質は図-5で定義するスペクトル面積、音質はスペクトル重心を用いることで土質判別が可能であった。
  - ②模型地盤の回転貫入実験から、実際のボーリングと同じ条件でも、複層地盤の土質判別が可能であった。
  - ③ニューラルネットワーク理論の土質判別への利用を検討した結果、適切な教師データを与えることで土質判別への適用性が高いことが認められた。
- 今後の課題は、ニューラルネットワーク理論における土質判別の精度向上のために、教師データとなる様々な地盤データを採取し蓄積していくことが必要と考えている。

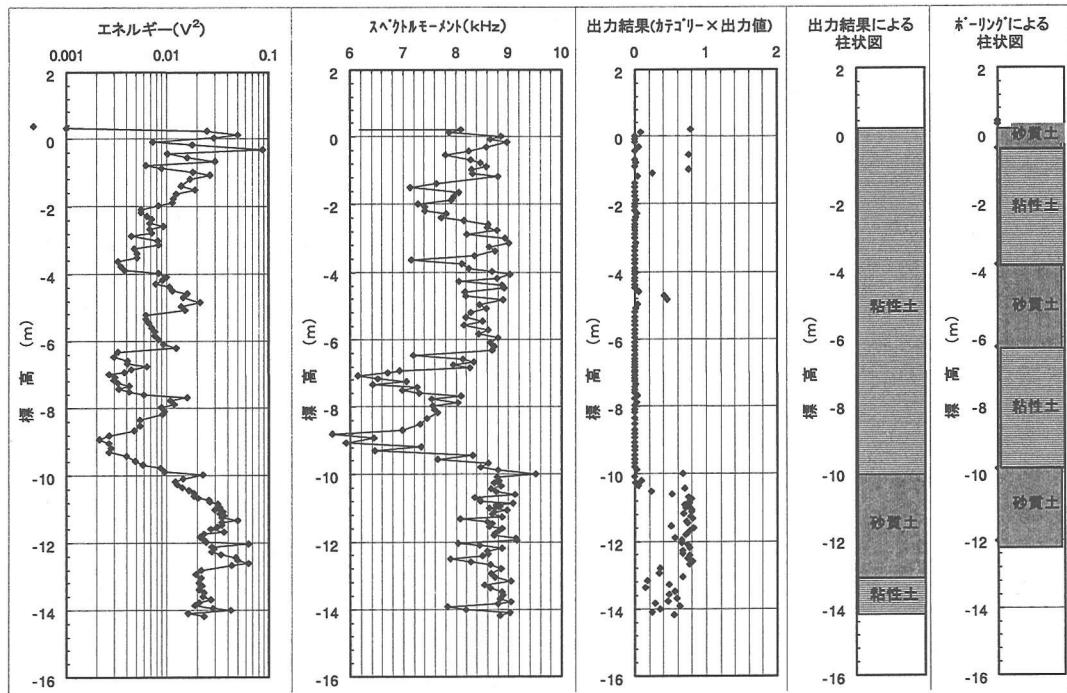


図-17 自然地盤の数値解析結果

## 参考文献

- 1) 土質工学会編:近接施工, 土質工学会, 1989.
- 2) 西原彰夫, 高木秀人, 木村範明, 諸橋毅:三成分コーン貫入試験による土質区分について, 第24回土質工学研究発表会論文集, pp.189-190, 1989.
- 3) 三村衛, 柴田徹, 延山政之:R I コーンによる砂質地盤の密度・含水量検層と液状化評価, 第30回土質工学研究発表会論文集, pp.287-290, 1995.
- 4) 長谷川昌弘, 沼口栄助:AEセンサと振動加速度計を用いた土質判別法の室内実験(2), 第28回土質工学会研究発表会論文集, pp.323-324, 1993.
- 5) 下坪賛一, 苗村正三, 新幸雄:回転貫入サウンディングによる深層混合処理地盤の評価, 第27回土質工学研究発表会論文集, pp.193-194, 1992.
- 6) 杉村亮二, 宇次原雅之, 駒崎俊治, 照井信之, 千田昌平, ロータリーサウンディングによる改良改良地盤の品質評価実験(その1), 土木学会第51回年次学術講演会概要集, pp.754-756, 1996.
- 7) 光橋尚志, 塚田幸広, ロータリーサウンディングによる改良改良地盤の品質評価実験(その1), 土木学会第51回年次学術講演会概要集, pp.757-758, 1996.
- 8) 光橋尚志, 塚田幸広, ロータリーサウンディングの現場実験と深層混合処理地盤の強度分布の検討, 第32回地盤工学研究発表会論文集, pp.189-190, 1997.
- 9) 和久昭正, 秋父顕美, 小林収, 澄川薰, 和氣輝幸:AE法を用いたシールド工事の切羽監視システムの開発, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, pp.382-383, 1994.
- 10) 大津政康:アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1988.
- 11) 勝山寅久:現場技術者のためのAE技術の応用, アイピーシー, 1995.
- 12) ニューロンネットグループ+桐谷滋:入門と実習ニューロコンピュータ, 技術講論社, 1989.

(1998.1.5受付)

STUDY OF A SOIL ASSESSMENT METHOD BASED ON SOUNDS GENERATED  
BY ROTARY SOUNDING

Yukihiro TSUKADA ,Noriaki AOYAMA and Tadayoshi YAMAKI

This report considers the practicality of a soil assessment technique based on sounds generated during rotary sounding by applying the technology used in a shield tunneling. Laboratory experiment, model ground experiment and numerical analysis have been executed. The results of them have revealed that it is possible to quantitatively assess the difference in the sounds recorded for different soil types to estimate their grain size distribution.