

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06534

研究課題名(和文) 不飽和粘土の水分および密度評価を目的とした超音波トモグラフィ技術の開発

研究課題名(英文) Ultrasonic tomography for the evaluation of water and density of unsaturated clay

研究代表者

木本 和志 (Kimoto, Kazushi)

岡山大学・環境生命科学研究所・准教授

研究者番号：30323827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、不飽和粘土の水分量と密度を評価するための超音波非破壊評価に関するものである。不飽和粘土の音響的性質はこれまであまり調べられておらず、水分や密度の影響については明らかでなかった。これに対して本研究では、弾性波速度と含水比および乾燥密度の関係を実験によって明らかにした。その結果、弾性波速度は乾燥密度と最も高い相関を示し、縦波と横波の速度比が飽和度に影響することを見出した。これにより、弾性波速度から水分と密度を逆推定できるとの見込みを得た。さらに、表面波の伝播挙動から、密度や水分量の変化を捉えられることを示し、非接触かつ表面での計測による水分・密度マッピングの基礎となる技術を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高レベル放射性廃棄物の地層処分用いられるベントナイト緩衝材の長期挙動を評価するにあたり、粘土中の水分や膨潤状態を知ることは重要である。そのためには、粘土の水分や密度の非破壊的に測定する技術が必要となるが、水分と密度の両方を計測可能な手法は今のところ存在しない。一方、本研究で対象とした超音波計測では、弾性波速度が媒体の水分と密度の影響を受けて変化するため、これら諸量間の関係を定量的に調べておけば、超音波計測結果から水分と密度の両方を推定することが可能となる。本研究はこのような原理による新たな超音波スペクトロスコーピーが可能であることを初めて示し、その実現に必要な基礎データを整備したものである。

研究成果の概要(英文)：This study is concerned with the ultrasonic method for the evaluation of water content and bulk density of unsaturated clay. Since acoustic properties of unsaturated clay has not been investigated systematically, we performed ultrasonic transmission test on compacted bentonite clay of various water content and bulk density. As the result, it was found that the ultrasonic wave velocity is correlated highly with the dry density, while the ratio of P- to S-wave velocity increases with the degree of water saturation. The set of ultrasonic velocity data obtained thus can be used to invert ultrasonic data to the water saturation and the dry density. To investigate the feasibility of ultrasonic spectroscopy further, surface waves in heterogeneous clay samples are visualized by a scanning laser ultrasonic detector. The result is encouraging in the sense that the heterogeneity of the sample appears in the measured ultrasonic wave field as the variation in the wave speed.

研究分野：応用力学

キーワード：ベントナイト 粘土 水分 密度 超音波

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材としてベントナイトの使用が予定されている。緩衝材としてベントナイトに期待される機能には、廃棄体と処分坑間の空隙充填(膨潤性)、地下水の流入抑制(低透水性)と、漏出した放射性核種の移行遅延(吸着性、低拡散性)が挙げられる。これらの特性は、ベントナイトの水分量や乾燥密度に応じて変化するため、ベントナイト中の水分や乾燥密度の分布や変化挙動を知ることは重要である。そのためには、対象を破壊することなくこれらの量を計測する技術が必要となる。水分量の計測に関しては、通常、誘電率測定に基づく方法が用いられる。一方、密度はX線を使った計測が可能だが、管理区域でしか利用できないこと、厚みのある対象には適用できない等の問題がある。これに対して弾性波検査は、計測が比較的容易で、弾性波伝播速度や分散性が、試料の密度と水分の両方に影響を受けることから、粘土の水分および密度推定の有用な非破壊計測手法になりうると期待される。しかしながら、不飽和粘土の弾性波伝播挙動はこれまで体系的に調べられておらず、その非破壊計測への利用方法も明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の二点である。

- ・ ベントナイト中を伝播する弾性波速度を計測し、水分量および乾燥密度との関係を調べること。
- ・ 弾性波計測により密度と水分の不均質性を検出するための基礎技術を開発すること。

以上により、ベントナイトの水分と密度を、弾性波を使って非破壊的に計測するための技術的基盤を整備する。

3. 研究の方法

① 実験供試体作成

モンモリロナイトと純水を混練して圧縮成形することにより、ペレット状の不飽和粘土試料を作成する。混練する水分の量と圧縮成型時のプレス荷重を調整することで、種々の乾燥密度と含水比をもつ試料を作成して弾性波計測を行う。緩衝材に使用されるベントナイトでは、モンモリロナイトだけでなく珪砂が混合される計画だが、ここでは、粘土部分の音響特性を把握するため、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトと純水のみで試料を作成し、弾性波計測に用いる。

② 超音波透過試験

弾性波伝播挙動を調べるために超音波透過試験を行う。粘土は多相多孔質体で、強い減衰を示すため、超音波の送信と受信には、測定感度のよい圧電超音波トランスデューサを用いる。各試料について、厚み方向と幅方向を透過する縦波、横波の波形を計測する。計測した波形は、初動部分を切り出して群遅延を求め、透過距離と群遅延から縦波あるいは横波速度を求める。本研究では、以上の計測に500kHzから1MHzの共振周波数をもつ超音波トランスデューサをドライカップリングで用いる。

③ 回帰曲面の作成

計測で得られた弾性波速度を水分-乾燥密度平面上にプロットし、回帰曲面を作成する。回帰曲面から等音速線を抽出し、弾性波速度から密度や水分量の逆推定が可能か、推定可能な密度-水分領域がどの程度であるかを明らかにする。

④ 非接触計測技術の開発

圧電トランスデューサを粘土試料に繰り返し取り付け、取り外しを行うと、試料表面の状態が劣化する。また、接触法による超音波計測は感度が良好な反面、計測効率が悪く、実用的とはいえない。そこで、ベントナイト粘土に対する超音波計測と水分、密度推定技術の将来的な実用化を見据え、レーザー振動計を使った非接触測定系を構築し、試料表面を伝わる超音波の挙動を詳しく調べる。ただし、送信にはこれまでと同様、圧電トランスデューサを用いる。これにより、試料全体の平均的な音速だけでなく、局所的な音速の変化を捉えることを可能とする。

⑤ 不均質試料を用いた超音波計測

前項で開発した超音波可視化装置を用い、2次元的な表面波伝播挙動を可視化する。その際、水分と密度が一定の均質な試料に加え、水分と密度が異なる部位のある試料も用いて計測を行う。両者の結果を比較することで、超音波計測により、密度あるいは水分の不均質性を検出することが可能か否かを検討する。

4. 研究成果

(1) 不飽和粘土試料の作成

図1に、不飽和粘土供試体の外観を示す。これは、絶乾状態にした10gのモンモリロナイト粉末に純水を混練したのち、0.7MPaの圧縮応力を加えて成型したものである。出来上がり寸法は、直径は30.5mm、厚みは約10mmとなっている。正確な含水比や間隙率は、湿潤時の試料体積と重量、実験終了後に計測した乾燥重量から求めた。

(2) 計測波形と周波数特性

計測で得た超音波波形とその周波数スペクトルの一例を図2に示す。これらは試料の厚み方向を透過した超音波波形を

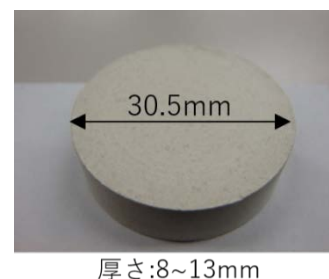


図1: 粘土供試体の外観

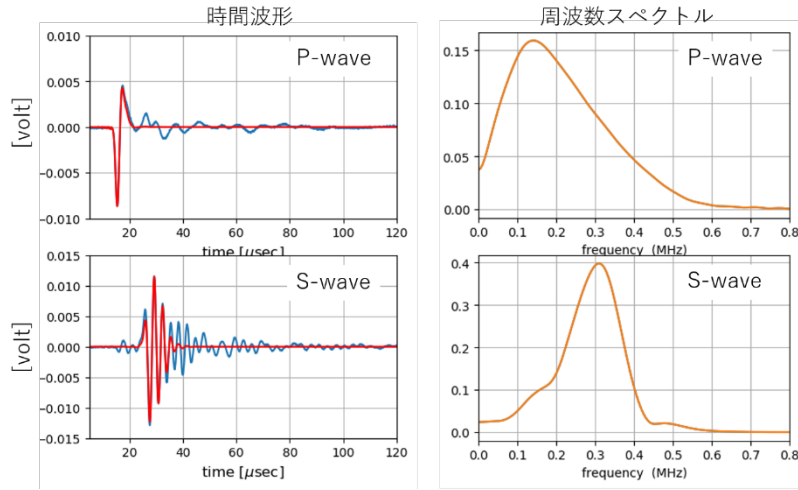


図 2：計測した透過波波形とその周波数スペクトル

示し、上が縦波、下が横波の波形である。なお、時間波形は青が計測結果を、赤が窓関数を用いて初動部分を取り出した結果である。周波数スペクトルは、赤の実線で示した波形からFFTによって計算したものである。弾性波速度の計算は、これら赤の実線で示した波形に対して位相と群遅延を計算し、透過距離と群遅延から周波数毎に速度を評価する。このようにして得た速度を、計測波形の帯域 100~500kHz において平均したものを各試験片の弾性波速度とした。

(3) 弾性波速度と含水比、乾燥密度の関係

実験結果から得られた弾性波速度に対して作成した回帰曲面を図3に示す。この図は、横軸に含水比を、縦軸に乾燥密度を取り、弾性波速度をカラーマップとして表示したものである。伝播方向(試料の厚さ、幅方向)、モード(縦波、横波)の組み合わせで4種類の結果が示されて

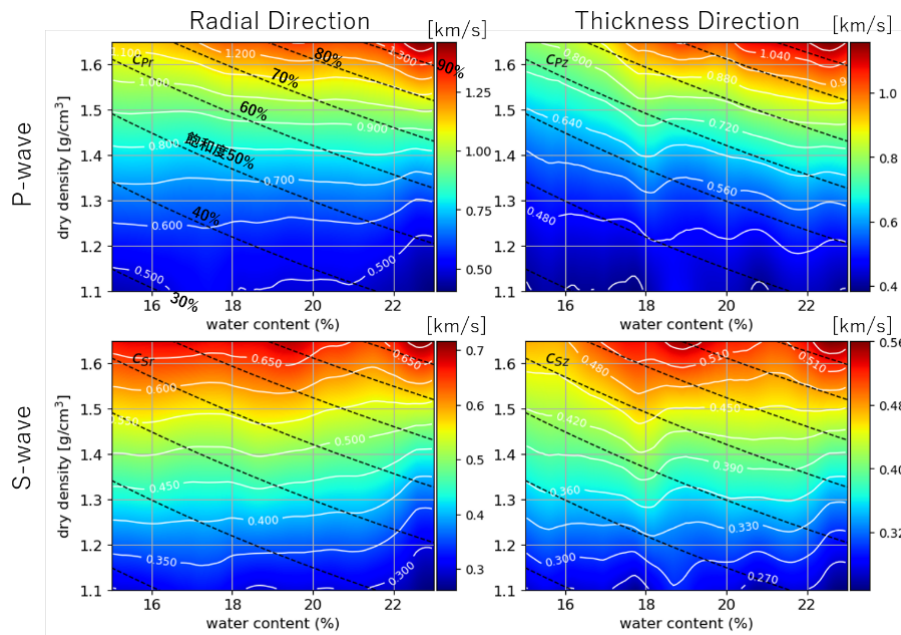


図 3：弾性波速度の回帰曲面

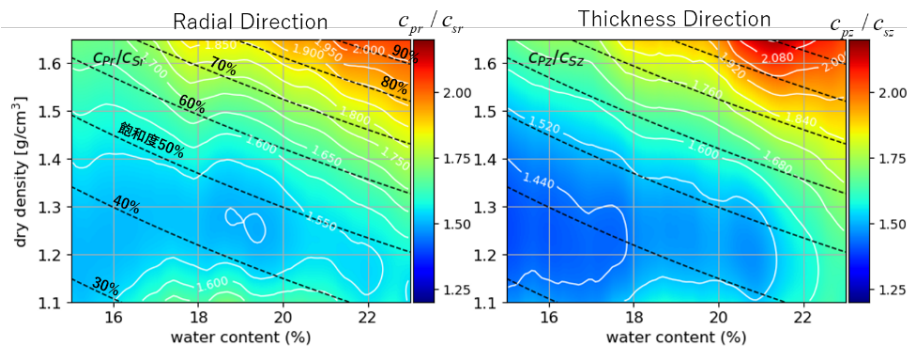


図 4：試料の含水比および乾燥密度と縦波-横波速度比の関係

いる。黒の破線は等飽和度曲線を、白の実線は弾性波速度のコンターを示したものである。この結果から、弾性波速度はモードや伝播方向に関わらず乾燥密度と強く相関し、含水比の影響は小さいことが分かる。従って、いずれかの方向とモードの組み合わせで弾性波速度を得ることができれば、試料の乾燥密度が推定できることが分かる。次に、縦波-横波音速比を求め、含水比および乾燥密度との関係として示せば、図4のようになる。この結果から明らかなように、音速比には飽和度と正の相関がみられる。このことは、縦波と横波速度が得られれば、飽和度の推定が可能となることを示唆している。以上より、当初の目的通り、弾性波計測によって不飽和粘土の密度と水分量を推定するための検査法を開発する見通しが得られたといえる。

(4) レーザー振動計による表面波伝播挙動の可視化

図5に、レーザー振動計を使った表面波計測装置の構成を示す。この装置では、試料端部にカップリングした圧電トランスデューサによって鉛直動を加え、試料幅方向(x方向)に伝わる表面波を励起する。受信には、レーザードップラー振動計を用い、精密ステージでレーザー照射位置を変化させることで試料の表面をスキャンする。その結果として得られた一連の超音波波形から、試料表面の波動伝播挙動を可視化する。

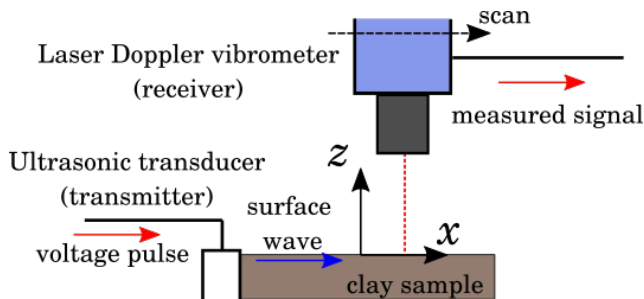


図5：レーザー振動計を使った表面波計測の方法

図6と図7は、このようにして可視化した波動場の様子を示したものである。図6は、均質な試料における鉛直振動速度のスナップショットを示したもので、可視化範囲は、試料中心から幅20mm、高さ10mmの矩形領域である。図の左側から発生した円弧状の波面が右側に伝わっていく様子が示されている。一方、図7は、試料の上半分の含水比が20%、下半分の含水比が23%となるように作成した不均質試料に対する結果を示したものである。含水比が高い側で表面波がより早く伝わる一方、含水比の低い側でより大きな振幅の波が相対的にゆっくりと直線的な波面を作りながら伝わる様子が示されている。このように、均質材では、ほぼ同心円状の波面パターンとなるのに対し、不均質試料では上下で波面パターンが明らかに異なり、弾性波速度の異なる二つの領域が区別できる。このような違いを見ることで、弾性波速度の大小、ひいては水分量、密度の空間分布が

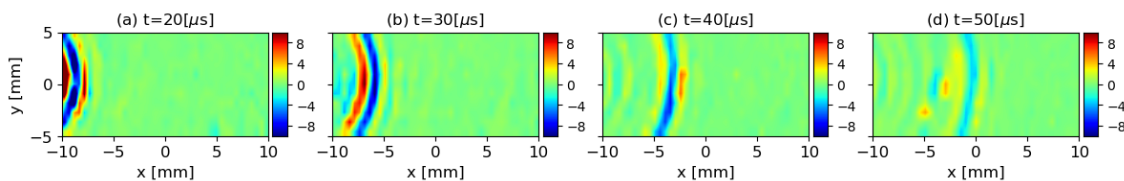


図6：不飽和粘土試料の表面を伝播する超音波(均質試料)

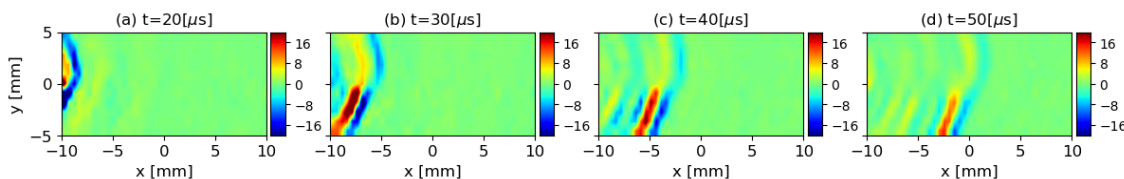


図7：不飽和粘土試料の表面を伝播する超音波(不均質試料)

推定できるようになると考えられる。

(5) まとめと展望

本研究では、不飽和粘土の弾性波速度と水分および密度の関係を、超音波計測を行い実験的に調べた。その結果、縦波と横波の音速から、水分と密度の推定につながる定量的な情報が得られることが明らかとなった。また、表面波の伝播挙動を可視化した結果、伝播速度や波面パターンの異なる空間領域が、十分なコントラストで観察できることも明らかとなった。以上により、超音波を用いて粘土の水分と密度を非破壊的に計測する手法開発の見込みが得られた。今後、このアイデアを実用的なものとするためには、不飽和粘土試料の粘弾性体モデリングを行うこと、超音波の送信も非接触法によって行うこと、より広範囲の水分、密度、周波数範囲で弾性波速度のデータを蓄積することが課題になると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 木本和志	4. 巻 74
2. 論文標題 接触音響非線形問題を対象とした有限要素解析技術の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_115-I_123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejam.74.I_115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Kimura, K. Kitayama, K. Kimoto, K. Kawamura, H. Kikura	4. 巻 131
2. 論文標題 Ultrasonic measurement in variation of a degree of saturation in compacted bentonite	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Energy Procedia	6. 最初と最後の頁 428-435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 木本和志	4. 巻 75
2. 論文標題 不飽和多孔質体中の物質拡散に関する数値解析的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_113-I_124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejam.75.2_I_113	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木本和志
2. 発表標題 接触音響非線形問題を対象とした有限要素解析技術の開発
3. 学会等名 応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村駿、北山一美、木本和志、河村雄行、木倉宏成
2. 発表標題 超音波音速計測による不飽和ペントナイト含水比評価に関する研究
3. 学会等名 第60回粘土科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木本和志
2. 発表標題 不飽和多孔質体中の物質拡散に関する数値解析的研究
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考