

せん断土槽地盤の作成方法と均一性

毛利栄征¹・榊原淳一²・吉村公孝³・山本督男⁴

¹農博 農林水産省農業工学研究所 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-2)

²川崎製鉄 株式会社 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番3号)

³株式会社ダイヤコンサルタント (〒330-8660 埼玉県大宮市吉野町2-272-3)

⁴Ph.D マイアミ大学 (Miami Florida, 33149 USA)

A series measurement of crosswell acoustic tomography was performed to investigate the distribution of permeability and porosity in the model foundation with clean sand. Basic model foundation for shaking table test was conducted on the shaking table with laminar vessel, (diameter is 1800mm) by using the boiling method. Velocity and attenuation image was obtained from a set of acoustic crosswell tomography data through an analytical inversion. We could confirm that high quality data of acoustic crosswell tomography were obtained by this system of pseudo random binary sequence (PRBS) based crosswell tomography.

In this paper, we show that the acoustically measured velocity and attenuation images agree with the density of model foundation and boiling procedure is useful technique to produce the homogeneous model foundation.

Key Words : *acoustic tomography, model foundation, permeability, porosity, images, boiling*

1. はじめに

地盤の3次元的な振動性状を評価する場合、入力振動の設定に対応した地盤の挙動を加速度や間隙水圧の応答、さらにはせん断土槽を構成しているラミナーの挙動から全体的な地盤の性状を明らかにしなければならない。これらのセンシングによって得られる離散的な情報が地盤の局所的な性状に大きく左右されているにもかかわらず、その地盤内の均一性については十分に検証することができていない。また同時に、作成される地盤の再現性についても本質的に保証されていなければならないが、全体的な平均密度などで評価されていることが多い。

特に、液状化を対象とした飽和地盤の振動性状と入力振動の関係を明らかにしようとする場合には、地盤全体の飽和度とともに密度などの物理的な性状の均一性の確保が重要である。大型模型地盤の振動実験を想定する場合には地盤の作成方法そのものがその飽和度と均一性を左右することとなるが、確定的な地盤作成方法はなく、また飽和度の評価方法のみならず地盤の均一性については十分な検証がなされていないのが現状である。

本報では、せん断土槽にできる限り均一な地盤を作成する方法を明らかにすることを目的として、ボイリングによって作成された飽和地盤の均一性を音響透水トモグラフィによって検証した。

2. 地盤の作成方法

飽和地盤を作成する一般的な方法として水中に砂を一定量づつ落下させ堆積地盤を作成する手法(以下、水中落下法)があるが、実験終了後には地盤を撤去して再度、水中落下によって作成することとなり、一回の実験準備に膨大な時間と経費を要する。また、この方法によって作成した模型地盤は地表面付近の地盤が極めて緩い状態で作成されるため、地表面に構造物を構築したり浅い位置に埋設する地中構造物を対象とした振動実験では注意が必要である。本報では地盤の再生利用を可能とするために人工的に土槽底部から上向きの浸透流を与えて地盤全体を流動化させる(ボイリング現象)ことによって地盤試料を浮遊させ、再度沈降堆積させて地盤を作成する方法を採用した。

(1) ボイリングによる地盤作成方法

実験に使用したせん断土槽を図-1に示す。土槽は内寸法で直径1750mm、高さ1810mmの円筒形状である。土槽底面には図に示すように2インチのパイプを配管し、さらに底盤部分には16箇所の注水穴を設けて別系統の流れを生じさせることによって、土槽内全面に水が回るようにしている。この注水ラインに水中ポンプを接続することによって完全に地盤を浮遊状態にすることが可能であった。注水開始から約1分程度で地盤は完全浮遊状態となるが、実験では約3分間の注水を行った。地盤作成手順は以下の通りである。なお、密度調

整のために実施する土槽の加振は振動台の上にせん断土槽をあらかじめ設置しておき、予備加振実験で作成したランダム波を負荷することによって地盤全体を振動させる方法によった。

- ① 注水による地盤の浮遊化 (ボイリング)
- ② 注水を停止し、地盤を自然に堆積させる
- ③ 地表面上の水を排水 (土槽上面から)
- ④ 土槽全体を水平方向加振 1 (ランダム波)
- ⑤ 土槽全体を水平方向加振 2 (ランダム波)
- ⑥ 土槽全体を鉛直方向加振 (ランダム波)
- ⑦ 地表面に敷き詰めプレートに振動を負荷
- ⑧ 地表面に重りを設置して土槽全体を鉛直方向加振 (ランダム波)

地盤の作成過程毎にコーン貫入試験を実施し、土槽内の均一性を概略把握した。図-2に示すように深さ方向のコーン支持力の変化で見ると、振動台上で土槽全体に振動を加えた⑥の段階ではボイリング直後に比べて地盤内部のコーン支持力の改善が見られるものの、地表面の深さ 20cm より浅い部分の改善が見られず、極めて緩い状態が見られた。このため、地表面に透水性のプレートを敷き、これを介して振動を地盤に負荷した。さらに、重りをプレート上に設置して地盤全体に鉛直振動を負荷することによって、深さ方向に支持力の改善が見られ、同時に地表面付近の支持力も上がっていることがわかる。

ボイリング直後の平均相対密度は 32~39%であったが、バイブレータ後 (③の項目後) の平均相対密度 63~68%であった。

3. 音響透水トモグラフィの原理

地盤の均一性を評価する方法として地盤の支持力や密度、透水係数などの物性値を数多く収集して面的分布を推定するという方法がある。しかしながら、この手法は代表的な試験点の情報から面的に内外捜しているもので、模型地盤のような狭い領域の均一性を評価するには十分な精度を有していない。

本報では弾性波トモグラフィの一種である音響透水トモグラフィ¹⁾を用いた。本手法は弾性波速度と減衰率から地盤の透水性を求めるが、弾性波速度が周波数に依存することを利用して理論的に透水係数を算出している。音響透水トモグラフィは発振方式にピエゾ震源を用いて、高周波の連続した単一周波数の正弦波を発振・受振するものである。受振側には hidroフォンを用いる。発振信号には疑似ランダム信号 (Pseudo Random Binary Sequence Code: PRBS コード) を用いて S/N 比を向上させている。所定のコード数だけ連続した正弦波を発振・受振することによって伝播エネルギーを増幅させている。すなわち、①高周波 (kHz オーダ) による高精度な計測、②弾性波速度だけ

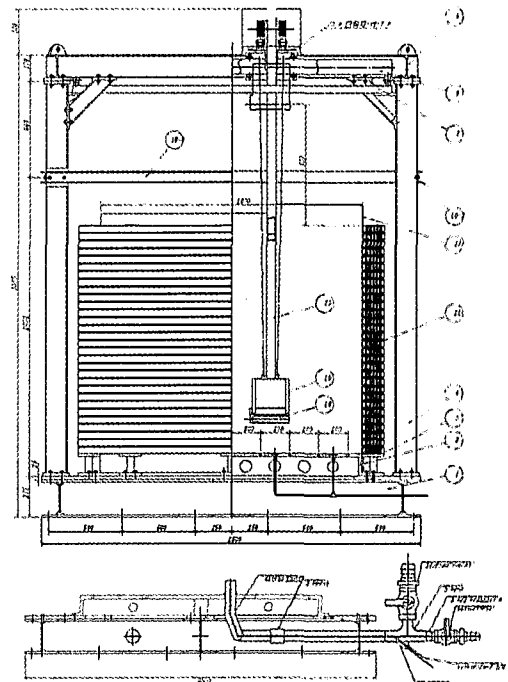


図1 せん断土槽断面図

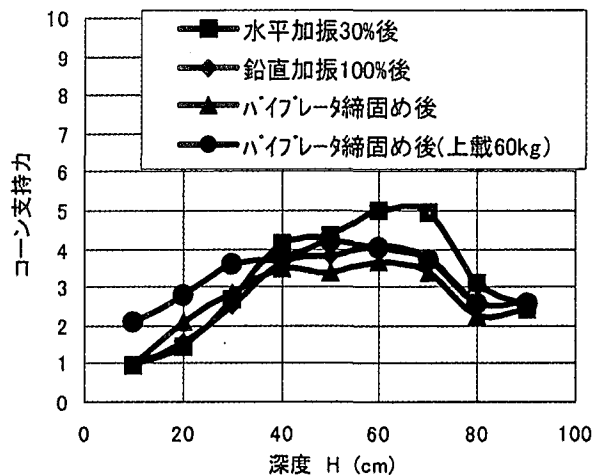


図2 地盤の深さ方向のコーン支持力の変化

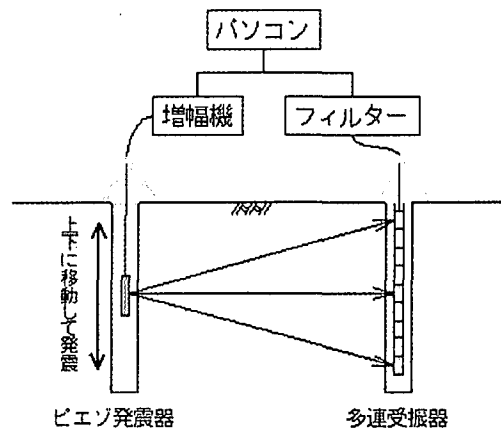


図3 音響透水トモグラフィの計測概念図

でなく振幅減衰の計測，③多孔質媒体内の弾性波伝播理論を適用した透水性の解析，などを特徴としている。図3に計測概念図を示す。

(1) 発振信号

疑似ランダム信号は図4に示すように単一のキャリア周波数を用いるためスイープ波形等の信号圧縮手法と比較して，①弾性波の周波数特性(周波数分散)を計測できる，②相関計算で現れるサイドローブが小さいため初動を読み取りやすい，③計測周波数帯域以外のノイズをフィルターで除去できるため S/N 比が高くなる，という特長を持つ。本手法ではこの疑似ランダム信号とピエゾ震源の組み合わせにより，50Hz から 30kHz までの周波数帯域を自由に選択でき，計測距離も 400 m (1kHz, 石灰岩)と広範囲の計測が可能である。

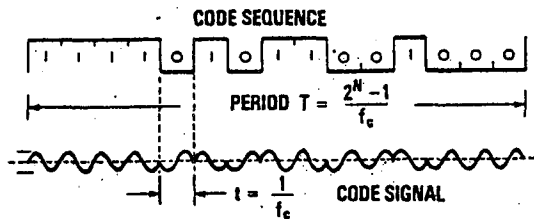


図-4 疑似ランダム信号の

(2) 透水係数

透水係数の計算には Biot²⁾，Dovorkin³⁾らの BISQ 理論を適用する。このモデルは，水と土粒子骨格で構成される多孔質地盤中に弾性波が伝播するとき，周波数に依存して伝播する波に速度分散が生じることから間隙率や透水係数を求めるものである。

逆解析には Ray Trace および SVD 法を用いており，初動の到達時間と振幅から速度分布と減衰率分布を出力する。

4. 土槽実験概要

(1) 実験条件

実施した実験の概要を図-5 に示す。せん断土槽の内部に塩ビケーシングを建て込みこの内部に発震器と受振器を設置した。直径が 1750mm という狭い領域の土槽地盤を対象として音響透水トモグラフィによる地盤内部の探査を行うに当たり，以下の点について検討した。

- ①小さな円型土槽の中で地盤の状態を把握できるだけの計測精度が確保できるか。また，計測精度を確保するための周波数帯域の確認。
- ②せん断土槽の外壁，ケーシングパイプの固定用治具など地盤以外の要素を伝播する弾性波の影響を排除できるか。また，壁面における反射波

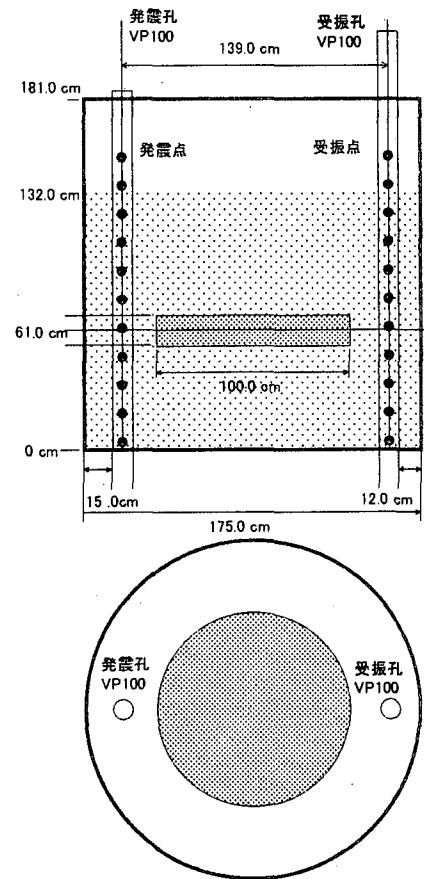


図-5 円型土槽 断面図(上)，平面図(下)

表1 使用機器

名称	仕様・明細
ピエゾ発震器	φ 40 mm、l 300 mm
ハイドロフォン	φ 30 mm、10ch@15cm
音響増幅器	発震器用 100W
信号フィルター	8ch バンドパス式
コンピューター	AD/DA 変換器内蔵 Pentium III 600MHz

表2 計測条件

項目	仕様・明細
発震周波数	6kHz~31kHz
投入電圧	10V
スタック数	4回
疑似ランダムコード長	4095
発震点・受振点間隔	15cm

の影響の確認。

③地盤の状態（密度）を変化させ、その変化を結果として把握することができるか。

せん断土槽に準備した実験ケースは次の3種類である。いずれも先に示したボイリングとバイブレータによる地表面からの振動によって地盤を作成している。

CASE1：ゆるい砂

CASE2：締まった砂

CASE3：ゆるい砂と締まった砂の混在

(図中網掛け部分が密な層で、厚み10cm、直径130cmの円形)。

CASE4：水を張った状態

また、発震器には前方にのみ音が伝播するように発泡スチロールでカバーを設置した。使用した機器および計測条件を表1、表2に示す。なお、逆解析においては、計測、計算誤差の影響を把握するために、初期値を与えず繰り返し計算を実施した。

(2)CASE4によるキャリブレーション

図-6と図-7はキャリブレーションのために実施した、砂の代わりに水だけをせん断土槽に入れたCASE4の場合の31kHzと6kHzの受振波形である。水は均質な物質であり速度は一定であるため、図中の曲線で示した等速度線(左1.6km/sec、右1.4km/sec)に沿って初動が現れるはずである。31kHzでは正確に一致しているが、6kHzではこの等速度線からずれていることがわかる。31kHzにおける最大計測誤差は0.4%、6kHzでは0.8%であった。なお、以降の計算については31kHzの結果のみを用いた。図-8に発震点と受振点の直線距離

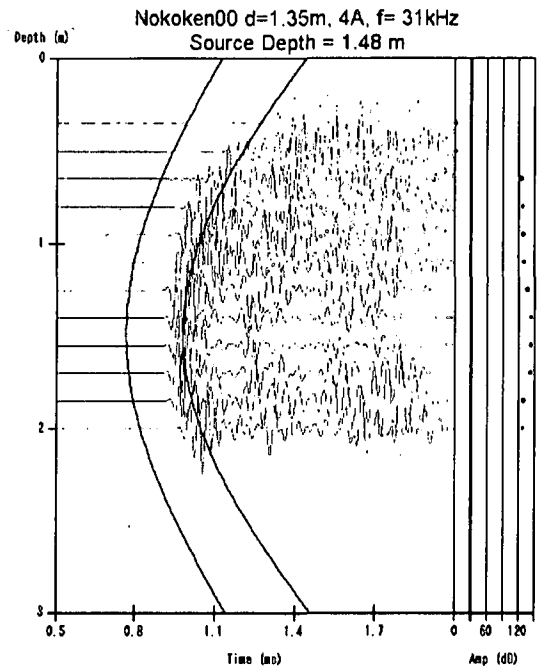


図-6 CASE4 計測波形 (31kHz)

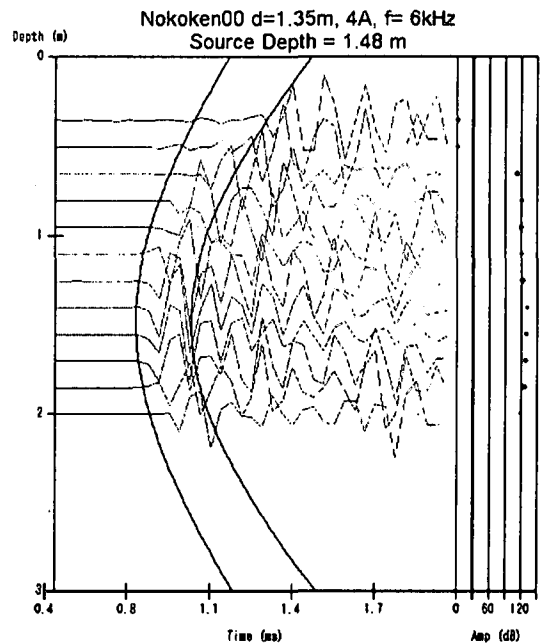


図-7 CASE4 計測波形 (6kHz)

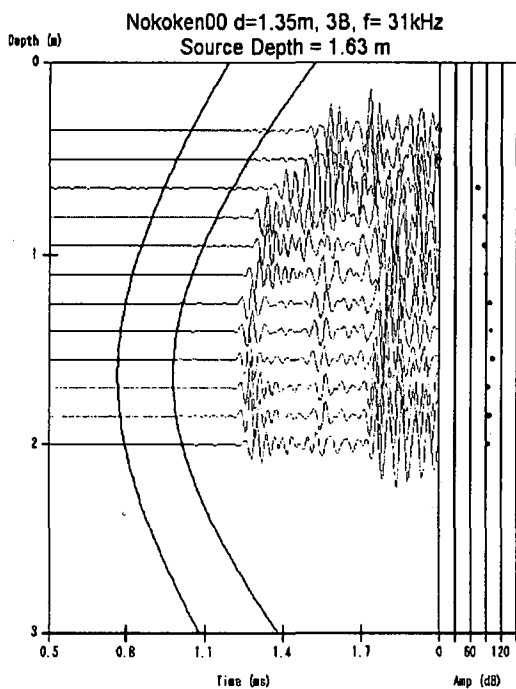


図-9 発泡スチロールを前方に設置した際の計測波形 (31kHz)

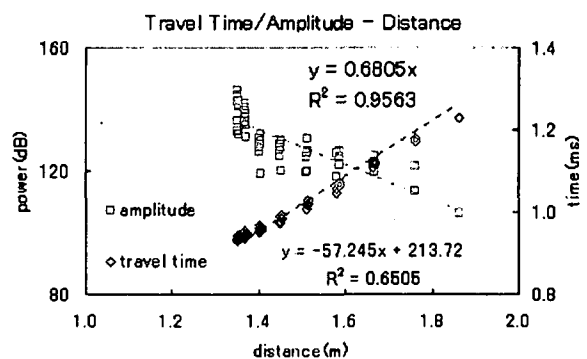


図-8 発震点・受振点距離と到達時間・振幅

離と初動の到達時間、振幅の関係を示した。到達時間は計測距離と良い相関を見せており壁面からの屈折波は現れていないことがわかる。

このことから計算した水の音速は約 1.47km/sec であり真水の音速と考えると良い。図-9 には発泡スチロールを発震器の前面に設置して、反射波の状態を調べた結果を示す。受振波形は 1.4km/sec の等速線から右側にずれており(遅れており)、図-6 の初動とは明瞭に区別できる。これからも発泡スチロールによる音の遮断はうまくなされており、また初動を見ている限りは壁面や底面の影響を受けないことがわかる。

一方、振幅については、水の減衰率は非常に小さく距離との相関は見られないはずである。従って、図-8 における変化は発震器の発震角度特性を示していると考えられる。図-10 に示すように発震角度との相関は非常によい一致を見せており、減衰率の計算には発震角度の補正を行った。

(2) 砂層の状態と計測結果の相関

図-11, 12 はゆるい砂層(図中 1E), 締まった砂層(2B)の結果を示す。ゆるい砂と締まった砂では明瞭な速度の差が認められ、キャリブレーションで確認した計測誤差と比較して有意な差であると考えられる。ゆるい砂、締まった砂の両方とも上部は速度が小さくなる傾向があり、個々の内部においても若干の不均質な状態が観測されている。この両ケースでは減衰率については計測誤差の方が大きくなってしまい逆解析計算は収束しなかった。

図-13, 14, 15 はゆるい砂層の内部に締まった砂層を設置した混在地盤(3A)、CASE3 の速度分布、減衰率分布、受振波形を示す。図中の点線で囲まれた部分が凍結により締まっている砂層である。これから今回の計測では凍結により密になった砂層部分では、速度が遅くなっており、また減衰率は大きくなっていることがわかる。図-15 に凍結砂層とほぼ同じ深度で発震した際の受振波形を示す。凍結部分は密な状態であり速度が速くなることが予想されたが(図中点線で囲まれた部分)、逆に、凍結部分の上下では初動は早い、凍結している部分では初動は遅くなっている。これは凍結部分には音が伝播しなかったか、または凍結層の作成を大気中で行ったため気泡を含んでいる可能性があり速度が遅くなったと考えられる。参考に示した減衰率がこの部分で大きくなっていることから、気泡の影響を受けている可能性が高いと推定できる。

5. まとめ

ボーリングによる地盤の繰り返し再生方法は土槽全体に負荷する振動や地表面からのバイブレータによる締め固めを併用することによって、ある程度均一な模型地盤を作成することができること

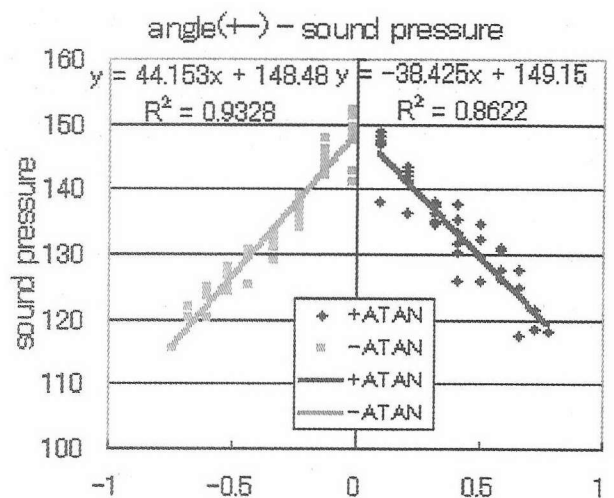


図-10 振幅と発震角度の関係

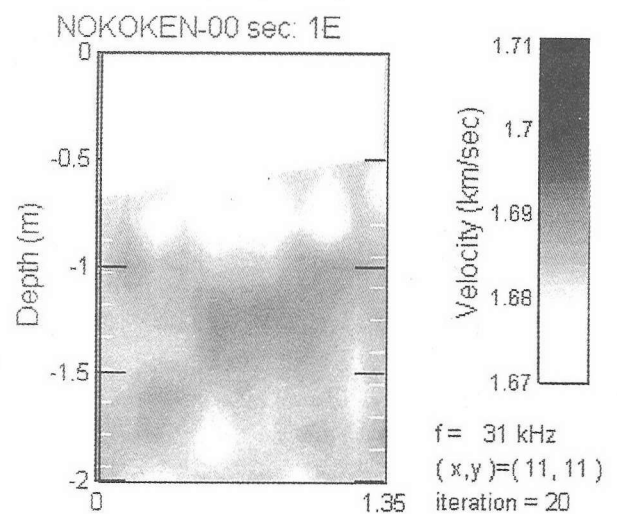


図-11 ゆるい砂における速度分布

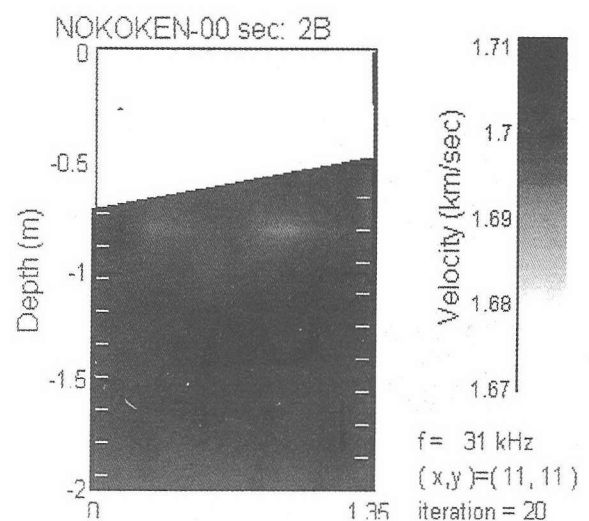


図-12 締まった砂における速度分布

が明らかとなった。また、地盤の均一性の評価に用いた音響透水トモグラフィは計測システムが周囲をステンレスなどの部材で囲まれた模型土槽においても、壁面などによる屈折、反射の影響を受けずに内部の状態を計測でき、狭い範囲で高精度なトモグラフィが可能であることがわかった。精度の高い計測を行うことで砂の締め固め状態を把握できることがわかった。一方、減衰率については、速度よりも鋭敏に外部の状態(センサーと塩ビの接触状況など)に反応するため、計測誤差が砂の状態による変化よりも大きくなってしまい、混在した砂層以外では逆解析を収斂させることができなかった。

今回は第1回目の実験であり試行錯誤を繰り返

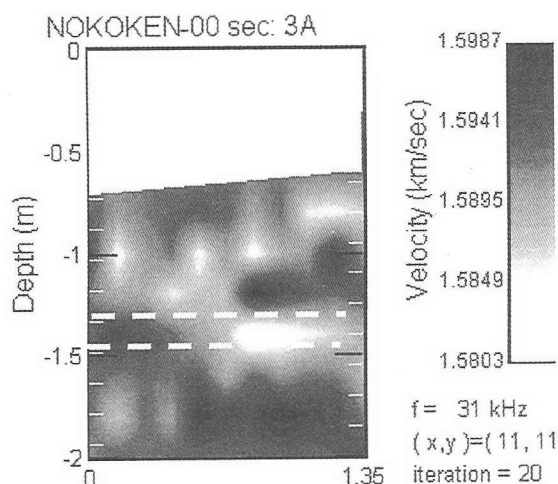


図-13 ゆるい砂と締まった砂層の混在における速度分布(点線は凍結砂層の位置)

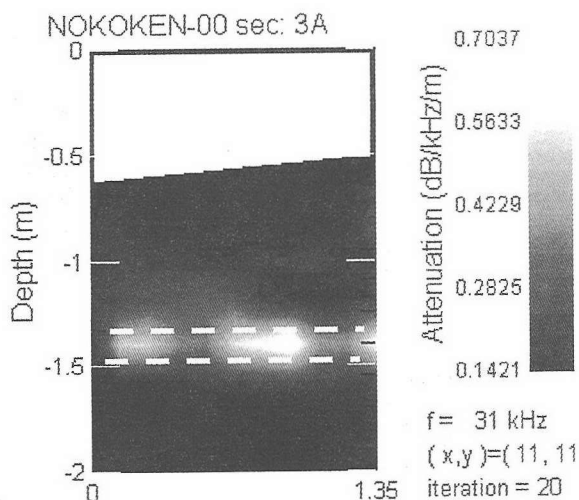


図-14 ゆるい砂と締まった砂層の混在における減衰率分布(点線は凍結砂層の位置)

した。その中で発震点と受振点の位置を正確に固定する必要があることがわかった(今回は塩ビケーシング内で3cm~5cmのすきまがあり、これによる誤差が減衰率の計算に影響を及ぼしたと考えられる)。また高周波数の波を使う際には発震器の指向性が大きくなるとともに、信号増幅器、ケーブルなどシステム全体としての電氣的なロスが発生している可能性があり、これも減衰率の計測誤差に影響を与えている可能性がある。

これらのハードウェアの課題を解決することにより正確な計測を行い、既存の手法では把握するのが困難な地盤の不均質性の評価などを行うことが可能になると考えられる。

【参考文献】

1. Yamamoto, T., Nye T., and Kuru, M. : Imaging the permeability of a limestone aquifer by crosswell acoustic tomography, Geophysics, Vol. 60, No. 6, ppp. 1634-1645, 1995
2. Biot, M. A. : Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media, The journal of the acoustical society of America, Vol. 34, No. 9, pp. 1254-1246, 1956
3. Dvorkin, J., Mavko, G., and Nur, A. : Squirt flow in fully saturated rocks, Geophysics, Vol. 60, No. 1, pp. 97-107, 1993.

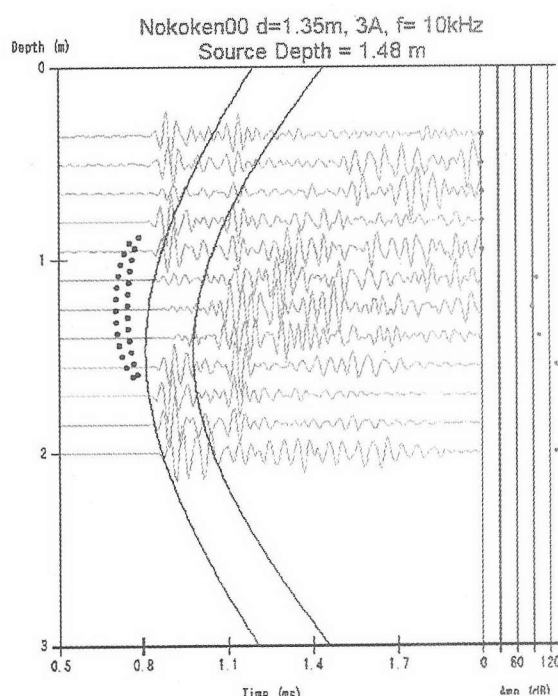


図-15 混在砂層における受振波形