

(b-16)

# 音響透水トモグラフィによる 大型模型地盤の均一性の可視化(その2)

毛利栄征<sup>1</sup>・榊原淳一<sup>2</sup>・山本督夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>農博 独立行政法人農業工学研究所 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

<sup>2</sup>川鉄シビル株式会社 (〒111-0051 東京都台東区蔵前2-17-4)

<sup>3</sup>Ph.D. マイアミ大学 (Miami Florida,33149 USA)

Laboratory acoustic transmission tests by using small tank have been developed to apply the Biot theory to field experiment. Small tank test results indicate that one can classify particle size, shape and porosity of the sand by the velocity and the attenuation of the acoustic wave. These results also show that the velocity and the attenuation with various frequencies (2kHz-80kHz) in model foundation agree with Biot's theoretical data. Accumulating experimental data by the small tank test will enable us to make permeability and porosity images at the site by high resolution acoustic tomography.

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

## 1. はじめに

音響透水トモグラフィ法は、高周波数の弾性波を用いて地盤の透水係数と間隙率を直接計測する手法である。これは周波数と出力エネルギーを正確に制御して弾性波速度および減衰率を高精度で計測し、多孔質媒体内の弾性波伝播理論(Biot, 1956)を用いて地盤の透水係数や間隙率を解析する手法である。筆者ら(2002)はこの音響透水トモグラフィ法が大型模型地盤の均一性評価に有効であることを示したが、現場への適用を行うためには、①計測・解析時間の簡略化および短縮、②物性値を正確に決定するための地盤データベースの作成が必要であるなどの課題も指摘している。

本報では上記課題を解決するために実施した技術開発とその計測例について報告する。

## 2. 開発内容

### (1) 小型模型土槽による実験

弾性波を用いた地盤の透水係数の把握についてはBiot(1956)などにより報告されているが、Yamamoto(1990)はこれらを基に砂地盤において弾性波速度と減衰率における周波数分散から透水係数が計算できることを示した。

$$f_r = \frac{\rho\eta}{2\pi(\rho_m - \rho_r^2)} \frac{V_0}{k_s V_\infty} \quad (1)$$

式(1)は分散周波数  $f_r$  から透水係数  $k_s$  が求まることを示しており、 $\rho$ 、 $\rho_r$  は水および土の密度、 $\eta$  は水の粘性係数、 $m$  は Biot の付加質量、 $V_0$ 、 $V_\infty$  は分散前後の弾性波速度を示す。図-1 は砂(透水係数  $k=10^{-9}$ )、シルト( $k=10^{-8}$ )、粘性土( $k=10^{-7}$ )における速度および減衰率の

周波数分散の理論値である。音響透水トモグラフィで計測可能な 100Hz から 100kHz までの計測範囲において、速度分散では砂とシルト、減衰率分散においては粘性土も含めた分離が可能であることがわかる。

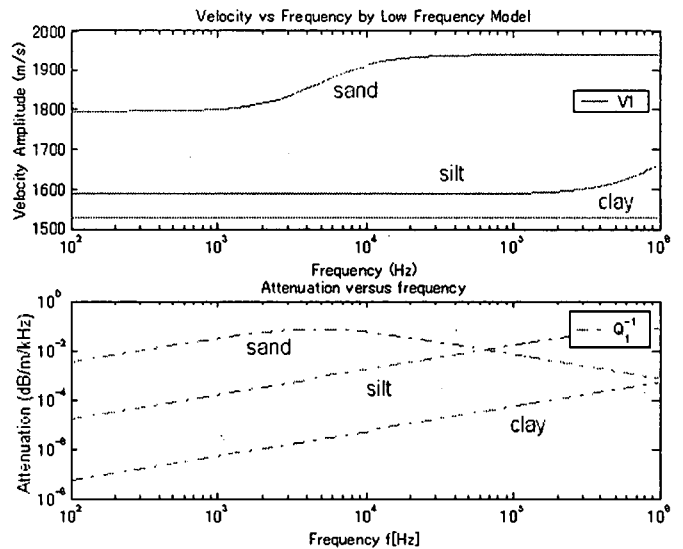


図-1 速度および減衰率の周波数分散  
上)速度分散, 下)減衰率

この Biot 理論をより正確に適用するには、土質試験の結果との比較を行いながら地盤データベースを作成する必要がある。このために小型模型土槽による実験装置を開発し、これを用いた計測を行った。図-2 は計測周波数に応じて開発した、2種類の小型模型土槽を示す。高周波数対応の垂直型は地盤の性状を制御しながら同時に透水係数、間隙率などの土質試験も行えるものであり、低周波数対応の水平型は広い周波数帯域での計測に適し

ている。両装置とも擬似ランダムコードを用いた発震-受振システム(毛利ら, 2001)を用いて計測を行った。計測周波数帯域は2kHz から78kHz までである。

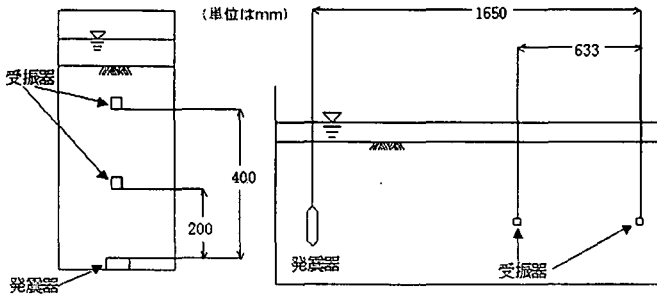


図-2 小型模型土槽  
左)垂直型, 右)水平型

図-3 および図-4 はこれらの装置を用いた計測結果の一例である。図-3 は豊浦標準砂, 珪砂(4号と8号)の間隙率を変えながら速度と減衰率を計測した結果を示している。これから①速度だけではわからない粒径や形状, 間隙率の違いによる砂の性状を, 減衰率も考慮に入れることで把握できること, また, ②ゆるい砂の状態(○の大きい部分)では減衰率が変化し, 締まった砂(○印の小さい部分)では速度の変化が顕著になることが見て取れる。本実験における透水係数の変化は約4倍(同じ種類の砂において)であるが, 速度と減衰率の計測結果はこの程度の変化にも正確に反応していることが認められた。

図-4 は霞ヶ浦標準砂を用いて周波数を細かく変えながら速度(上)および減衰率(下)の計測を行った例である。実線および点線で示してあるのは Biot 理論に基づく計算値( $k=3 \times 10^7$ )であり, 計測結果が理論値によく一致していることがわかる。速度の値が低周波数領域でばらついているのは, 波長が長くなることにより読み取り誤差が影響しているためと考えられる。

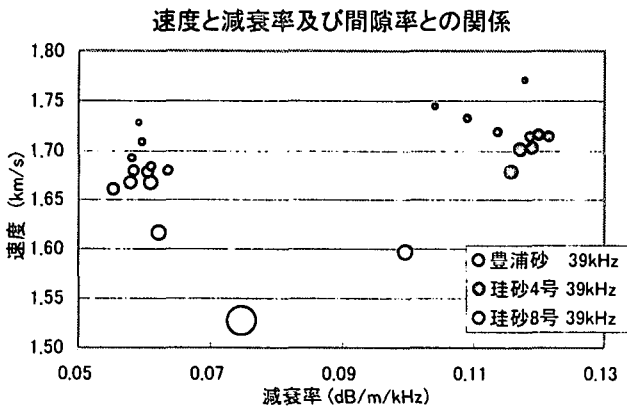


図-3 垂直型模型土槽の計測例  
間隙率の違いによる速度と減衰率の計測結果  
(○の大きさが間隙率の値に比例する)

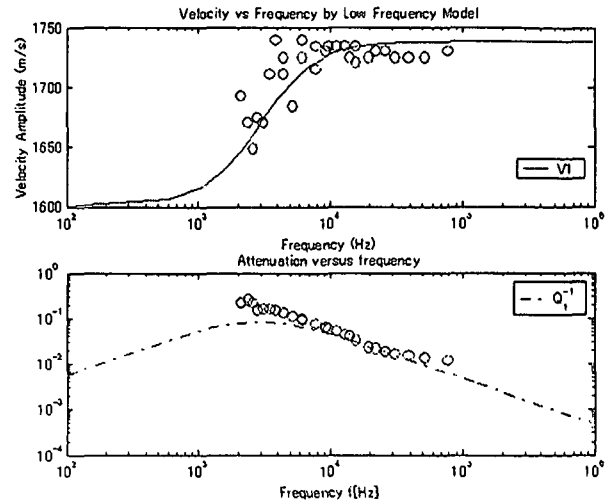


図-4 霞ヶ浦標準砂の速度および減衰率の周波数分散  
上)速度, 下)減衰率, 実線および点線は理論値

(2) 大型模型土槽のための多重発震システム

筆者ら(2002)が開発した大型模型土槽のための計測システムを高速化するために多重発震システムの開発, 設計を行った。図-5 に示すように, 従来の計測システムは「一つの発震器を深度方向に動かしながら計測していた」ため, 発震器の移動時間や計測時間が発震位置の数だけ必要であった。これに対して新しい方法は「複数の発震器を設置して同時に発震させる」もので, 1回の発震ですべての発震位置における計測を完了させるという画期的なシステムである。この同時発震を可能にするためには, 全ての発震器から同時に発震された別々の音響波を分離することが必要となる。このために開発した多重相関計算回路を用いたシミュレーションの結果を図-6 および図-7 に示す。図-6 は基本となる波形(上)を発震のタイミングを変えながら連続的に発震して合成された波形(下)を示している。本計測システムでは SN 比を向上させるために擬似ランダムコードの連続的な発震を行っているため, タイミングを変えて発震した波形は合成されても元の波形をとどめていないことがわかる。受振側ではこの合成された波形を受振するが, 多重相関計算回路を用いることで, 図-8 に示すようにそれぞれの発震器から発震された波形を分離することが可能となる。

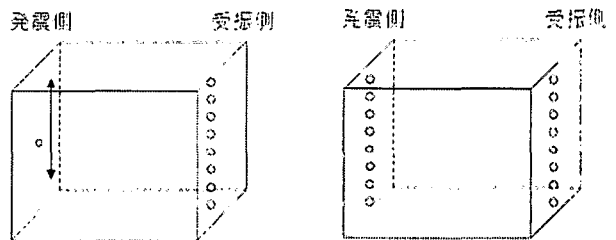


図-5 新しい発震方法  
左)新しい方法, 右)従来の方法

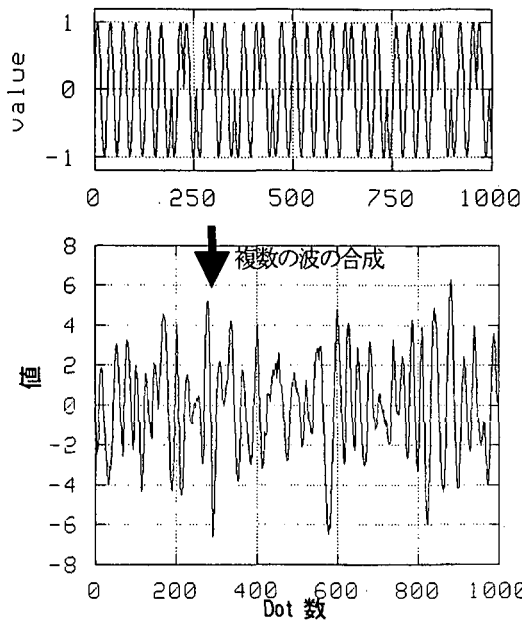


図-6 基本波形(上)と合成された波形

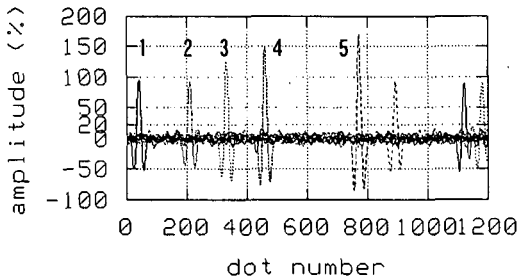
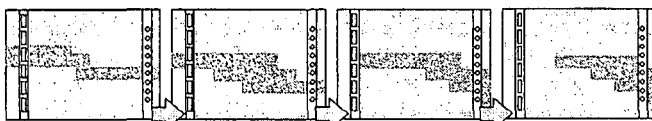


図-7 多重相関回路による計算結果

本システムを用いると、図-8 に示すように、模型地盤の内部構造の動的な変化、例えば液状化などによる地盤内部の側方流動を連続的に把握することができる。また、音響透水トモグラフィと組み合わせることで、この結果を透水係数や間隙率の変化として表示させることも可能になると考えられる。今回の開発では設計とシミュレーションにとどまったが、今後は計測システムを構築し模型土槽を用いた実験を実施する予定である。



地盤などが比較的短時間で変形、移動していく様子がアニメーションを見るように計測できる

図-8 地盤の連続的な変化をモニターする様子

### 3. 大型模型地盤を用いた実験結果

今回の実験では2層構造を持つ地盤を作成し、その分離を行うことができるかどうかを検証した。

#### (1) 実験概要

図-9 に模型地盤のレイアウトを示す。模型地盤内部に2本の塩ピケーシングを建て込み、計測試料は日光珪

砂 5 号で、土粒子密度  $2.666\text{g/m}^3$ 、最大乾燥密度  $1.621\text{g/m}^3$ 、最小乾燥密度は  $1.342\text{g/m}^3$  である。実験土槽は(独)建築研究所が保有する大型模型土槽を使用した。計測周波数は  $6\text{kHz}$  から  $78\text{kHz}$  でありトモグラフィ解析には  $31\text{kHz}$  および  $52\text{kHz}$  の結果を用いた。

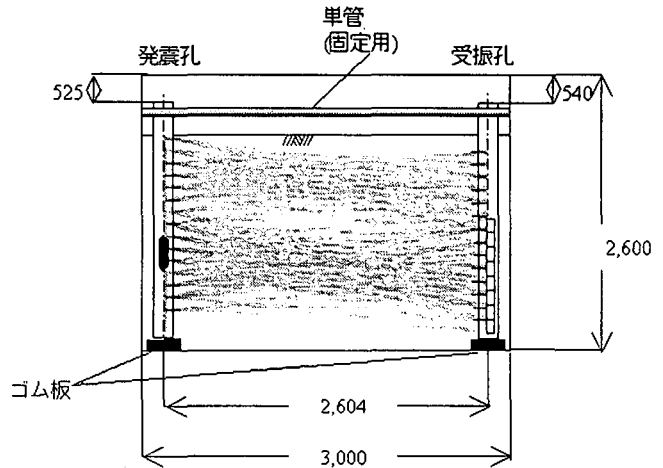


図-8 計測レイアウト(断面図)

曲線で示したのは波線解析に用いた波線の例

#### (2) 実験結果

図-9 に受振波形の例を示す。黒矢印は発震位置を示す。図中点線で囲んだ受振器は発震器との距離が最も短い。そのため到達時間が早くなるはずであるが、実際にはその上下の受振器の到達時間とほぼ同じである。これはこの部分に2層構造の境界面が存在し、境界面のすぐ上側に低速度層が存在することを示していると考えられる。

図-10 は水平方向に発震-受振した破線の初動の速度と音圧レベルをプロットしたものである。高さ  $0.8\text{m}$  付近に顕著な音速の不連続面(矢印)が存在すること、そのすぐ上部に低音圧部(矢印)があることがわかる。

初動の読取り結果を元に計算した速度分布図と減衰率分布図をそれぞれ図-11 と図-12 に示す。速度分布図からは  $0.8\text{m}$  付近を境界として高速度・低速度層に分離していること、特に境界面のすぐ上側がゆるくなっている様子が分かる。減衰率分布は低速度層およびその上側において減衰率が高くなっていることを示している。

#### (3) 考察

筆者ら(2001, 2002)が指摘しているとおり、砂の投入にインターバルがある場合、その部分で低速度や高減衰率が認められることが今回の実験でも確認された。特に飽和している砂地盤においては減衰率が  $0.1$  以下にとどまることが多いのに対して、境界面の上部ではこれをはるかに超える値が得られている。これから高さ  $0.8\text{m}$  の境界面の上部では部分的に不飽和な状態になっている可能性が考えられる。

#### 4. まとめ

音響透水トモグラフィの現場適用を目的とした地盤データベースの構築のための小型模型土層の開発と、リアルタイムでのモニターリングを可能とする多重発震システムの開発に成功した。今後は地盤データの蓄積と整備を行い、実現場における地盤のゆるみなどの情報を定量的に把握できるようにするとともに、模型土層の動的变化のアニメーション化を目指して開発を継続していきたい。

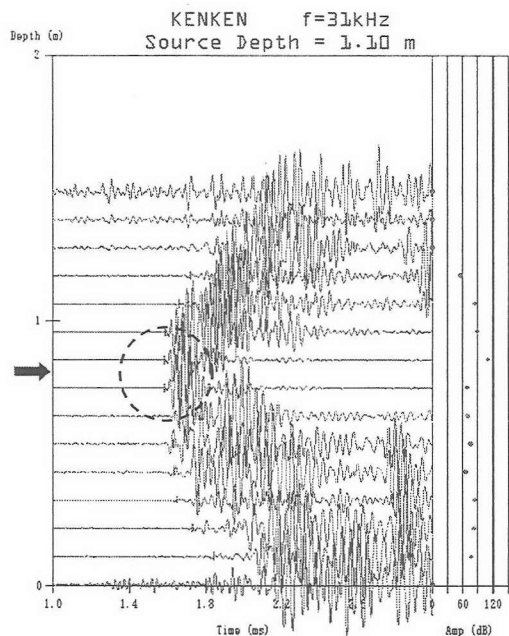


図-9 受振波形の例(周波数 31kHz, 発震深度 0.9m)

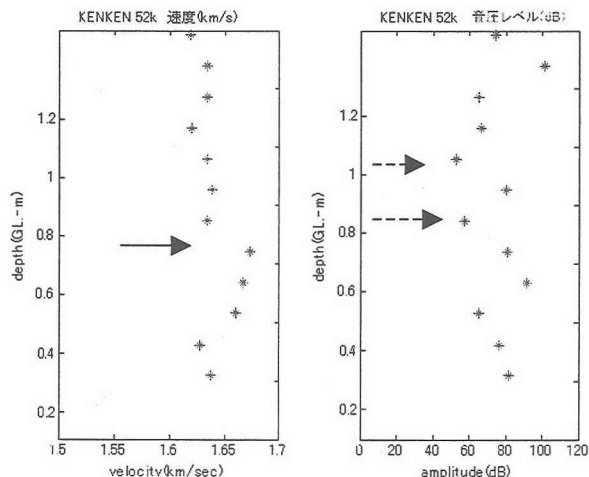


図-10 水平方向の波線の初動の読取り値から得られた速度および受振音圧

#### [謝辞]

本実験は科学技術進行調整費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として実施されたものである。また、実験に当たって独立行政法人防災科学技術研究所（他5研究機関）と

の共同研究（研究課題：「地盤の液化化と側方流動に関する大型土槽実験」、平成14年度）に基づき実施したものであることを付記し、関係者の方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

1. Biot, M.A.: Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media, The journal of the acoustical society of America, 34-9pp.1254-1246, 1956
2. Yamamoto, T. and Turgut, A.: Measurements of acoustic wave velocities and attenuation in marine sediments, J. Acoust. Soc. Am., 87(6), pp.2376-2383, 1990
3. 毛利栄征, 榊原淳一, 吉村公孝, 山本督男: せん断土槽地盤の作成方法と均一性, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, p83-88, 2001.3
4. 毛利栄征, 榊原淳一, 山本督男: 音響透水トモグラフィによる大型模型地盤の均一性の可視化, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, p95-100, 2002.3

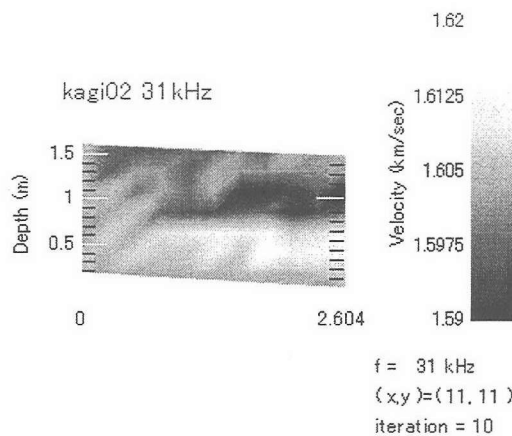


図-11 速度分布図



図-12 減衰率分布図