

1. はじめに

弾性波を地盤や構造物の調査に用いる場合には弾性波速度を用いることが一般的である。図 1 に示すように、地盤や岩盤の場合には弾性波速度が速いと「硬い、締まっている、亀裂が少ない」と判断されるが、地盤内部に礫や玉石が存在する場合、岩盤内部の亀裂が閉じている場合、さらには地盤改良、地中障害物といった要因が加わると、弾性波速度だけでは判断することができなくなる。これを解決するためには複数の調査を同時に行うことが必要であるが、調査コスト、工程の観点から難しい場合も多い。筆者らが開発した音響トモグラフィ地盤調査¹⁾は、発振波である疑似ランダム波の周波数と振幅を正確に制御することで受信波の振幅を評価することができる。この手法を用いると、2つの異なる指標を1回の計測で得ることができ、また速度変化の起こらないような小さな変化もとらえることが可能となる。本文では振幅減衰を用いた地盤と構造物の非破壊計測の例とその適用性について述べる。

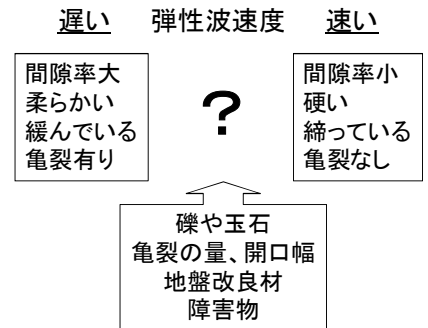


図 1 弾性波速度から分かること

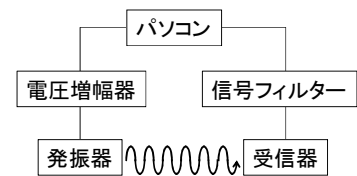


図 2 計測システム

2. 計測方法

本手法の計測システムを図 2 に示す。圧電セラミックス製の発振器と受信器を用い、500Hz から 100,000Hz までの任意の発振周波数を持つ疑似ランダム波を出力することに特長がある。図 3 は発振器の出力特性の例を示している。発振器からの出力 A_0 は印可電圧 V と出力特性 TVR を用いて式(1)で求めることができる。

$$A_0 = TVR + 20 \log V \quad (1)$$

図 4 は減衰量の求め方を示している。受信器から得られた電圧を受信器感度、信号フィルターの倍率、疑似ランダム波のコード長で補正し到達時間と受信音圧 A を得る。この受信音圧から式(2)を用いて距離減衰 L_d の影響を取り除き地盤に固有の減衰量 L を求めることができる。

$$L = A_0 - A - L_d \quad (2)$$

この減衰量は粘性減衰、散乱減衰、透過減衰からなる。粘性減衰は間隙流体と固体の摩擦、透過減衰は密度の異なる物質に伝播する際の熱への変換、散乱減衰はある程度大きい物質における反射や散乱によって発生する。一般的に未固結の地盤中では粘性減衰が卓越し、礫や玉石などが加わると散乱減衰が多くなり、亀裂の多い岩盤中では透過減衰の影響も現れる。この減衰量を距離、発振周波数で正規化したものが減衰率である。

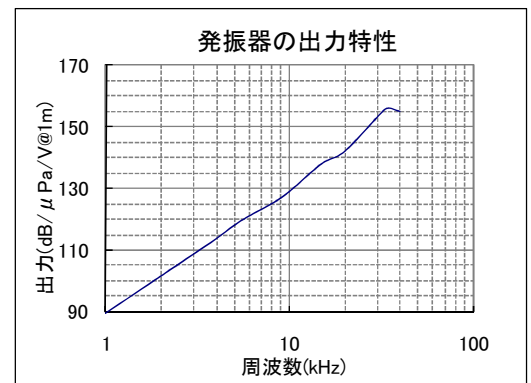


図 3 発振器の出力特性の例

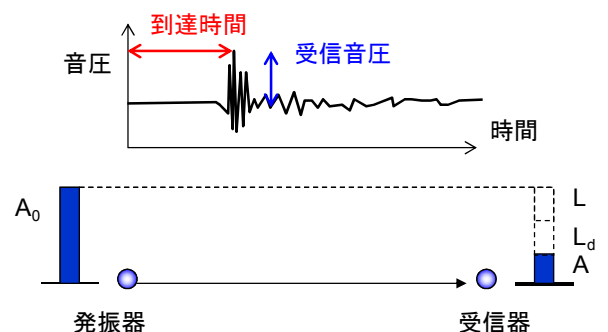


図 4 減衰量の求め方

3. 減衰率の計測例 模型土槽を用いた実験²⁾

図 5 は高さ 1m、直径 0.3m の小型模型土槽を用いた速度と減衰率の計測例である。試験体として豊浦砂(D50=0.2mm)、

珪砂 4 号 (D50=0.5mm) を用い、間隙率を 35%~45% まで変えながら計測を行った。試験体は何れも完全飽和状態であった。発振器と受振器の間隔は 0.4m であった。同図から、間隙率の小さい時の豊浦砂と間隙率の大きい時の珪砂 4 号は速度が同じであり判別できないが、減衰率は珪砂 4 号の方が 2 倍大きいので減衰率では判別できることが分かる。また、間隙率の変化は速度だけでなく減衰率にも影響を与えていることが分かる。

図 6 は振動台上に設置した高さ 2m、直径 1.8m の大型模型土槽の加振前後での速度と減衰率分布を比較して示したものである。同図は、水中落下方式で試験体を投入し、ボーリングと加振を繰り返して内部が均一になるように作成した後、上面に荷重をかけた状態での鉛直加振前後の結果を示している。発振点と受振点の数と水平距離はそれぞれ 10 点×10 点、1.5m、発振周波数は 31kHz であった。同図から、①加振の前後で速度分布は変化していないが減衰率は小さくなっている(水色、黄色→青色)こと、②速度が遅い部分(水色、青色)と減衰率の大きい部分(黄色)が一致していることがわかる。これらの結果から、速度変化では把握できない地盤の変化を減衰率を用いることで把握できることがわかる。

4. 振幅の計測例 杭長探査への適用

図 7 は既設杭の杭長探査を目的として行った模型土槽実験の状況と結果を示している。模擬杭として直径 0.019m の鉄筋棒を深度 -0.48m まで発振器と受振器の間に設置した。発振器は -0.48m、受信器は -0.35m ~ -0.60m に設置し、発振器と受信器の水平距離は 0.38m であった。これは距離 38m の間にある直径 2m の杭の探査を行うことに相当する。計測結果は模擬杭のある場合と無い場合について縦軸に受振点の深度、横軸にその音圧を示している。同図から、①模擬杭の影響を受けて音圧が低下していること、②模擬杭のない部分では音圧が同じであること、③模型土槽の不均一性の影響も受けていることが確認できる。到達時間は模擬杭の影響を受けなかったが、これは杭の有無による音の伝播距離の差が 1% と小さいためである。この結果から既設杭などの探査に振幅の計測が適用可能であることがわかった。

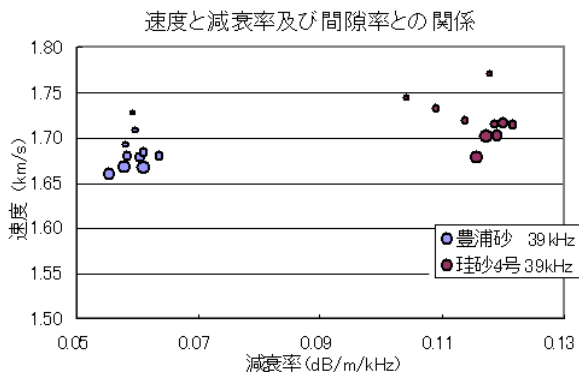


図 5 砂の粒径と速度、減衰率の関係

○印の大きさは間隙率に比例する

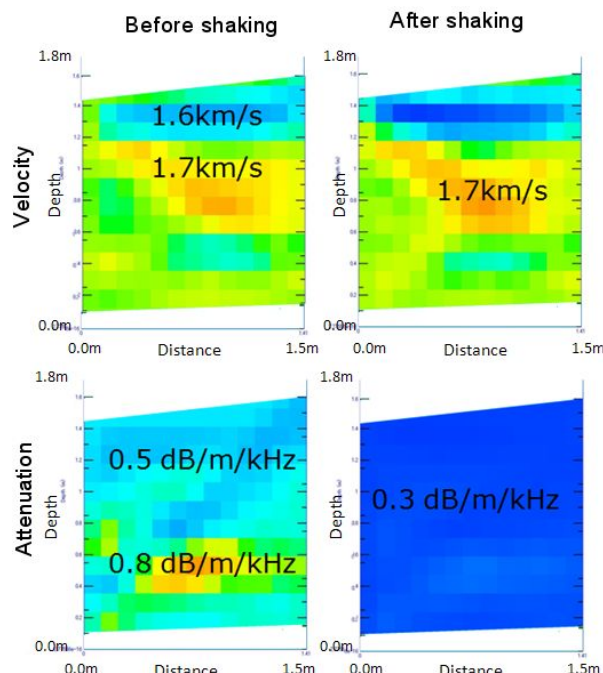


図 6 模型土槽内部の速度、減衰率分

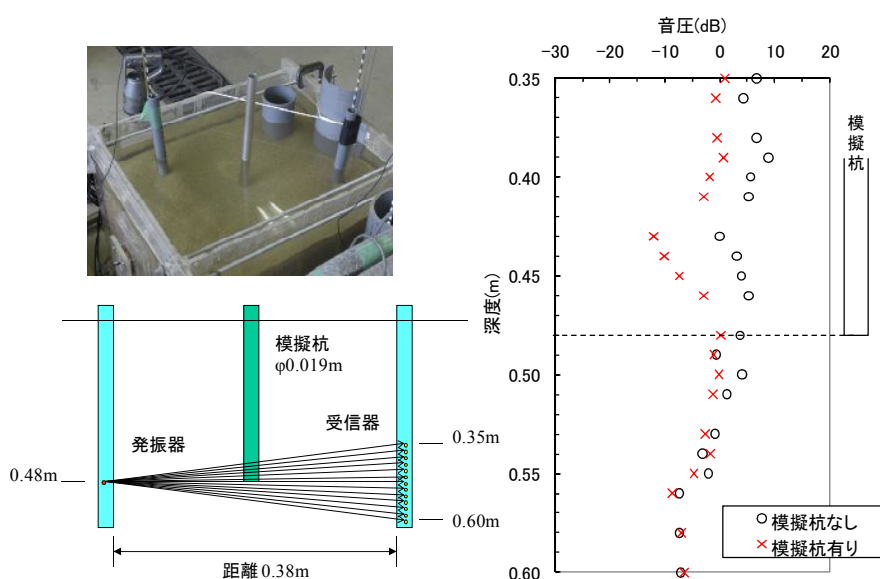


図 7 音圧の減衰を用いた模型土槽中の模擬杭の探査

1) 榎原淳一 他、高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発、土木学会論文集 C Vol. 65 (2009), No. 1 pp. 97-106

2) 毛利栄征 他、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 年 3 月