

# 音響トモグラフィを用いた高精度地盤探査

High Resolution Geological Survey by Acoustic Tomography

榎 原 淳一 (さかきばら じゅんいち)  
JFE シビル(株)開発部 課長

## 1. はじめに

正確な地盤調査を行うことは、安全・安心な構造物を効率的に建設するためには重要である。地盤調査はボーリング調査などで代表される直接的な手法と地震探査などで代表される物理探査などの間接的な手法に分けられるが、物理探査はダムやトンネルなど岩盤調査などには用いられているものの、都市部や臨海部などにおける構造物基礎に関わる地盤調査の実績は少ない。これは基礎の設計において要求される精度が計測精度よりも高かったことが原因である<sup>1)</sup>。表-1にボーリング調査と物理探査およびその組合せの長所と短所についてまとめたが、ボーリング調査と物理探査は相互に補完する技術であると考えられているにもかかわらず、組み合わせた場合でも十分な精度を得られないことがわかる。一方、最近では地下空間開発や沖合空港建設など、以前よりも深く広い範囲における正確な調査が求められるため、ボーリング調査だけでは対応しきれないケースが多くなっており<sup>2)</sup>、新しい探査手法に対するニーズが高まっていた。

筆者は米国マイアミ大と共同で、海洋調査等で用いられている音響波による手法<sup>3)</sup>を陸上での探査に適用し、音響トモグラフィによる新しい高精度地盤探査手法を開発した。本手法は高精度で広範囲の調査を行うことに特長があり、地表構造物の制約を受ける都市部での調査や広範囲の調査が必要な場合に地盤断面の可視化情報を提供することが出来る。

表-1 ボーリング調査と物理探査の比較

ボーリング調査	物理探査	ボーリング調査と物理探査の組合せ
土質、物理量を直接的に把握	土質、物理量を間接的に把握	土質、物理量を直接的に把握
精度は1m以下	精度は数m	？？
点の情報	面の情報	面の情報
孔間の情報は推定	孔間の情報は計算	孔間の情報は計算
安価	安価	高価

## 2. 音響トモグラフィ地盤探査とは

本手法は弾性波を用いる孔間トモグラフィ<sup>4)</sup>に分類される技術である。図-1に示すように、水圧を介して音響波を地盤に伝播させるピエゾ型発振器と多連の受信器を計測孔に設置しパソコンを用いて計測を行う。図-2に解析フローを示す。受信記録は発振波と共にロガーに記録

され、発振波と受信波の相関関数を計算することで受振波形を得て、これから初動走時と振幅を読み取り、逆計算<sup>5)</sup>により速度分布と減衰率分布を得ることが出来る。本手法では発振波としてある一定の波数を持つ擬似ランダム波<sup>6)</sup>を用いている。図-3に擬似ランダム波の例を示すが、従来のパルス波を用いる手法とは異なり、連続波を用いることで周波数制御を可能とし、相関関数の計算結果である受信波形から初動走時と初動振幅を得ることができる。得られた受信波形は相関関数計算前の受信記録と比較して極めて高い信号/ノイズ比を持つため(例えば波数4,095で62千倍)，地盤中の減衰が激しく通常では受信波形を読み取ることが出来ないkHzオーダーの音響波を用いた計測を行うことが出来る。

このピエゾ型発振器と擬似ランダム波の組合せにより、本手法は「計測距離、計測精度を自由に選択できる」、「精度を維持しながら広い範囲の計測が可能」、「速度と減衰率の2種類の結果からより分かりやすい調査結果を得られる」という特長を持つ。図-4は計測精度と範囲について、ボーリング調査や地震探査、電気探査などの他手法と比較して示したものであるが、計測精度はボーリング調査のみの1m程度、計測範囲は他の物理探査と同等以上の100m程度の計測が可能であることが分かる。

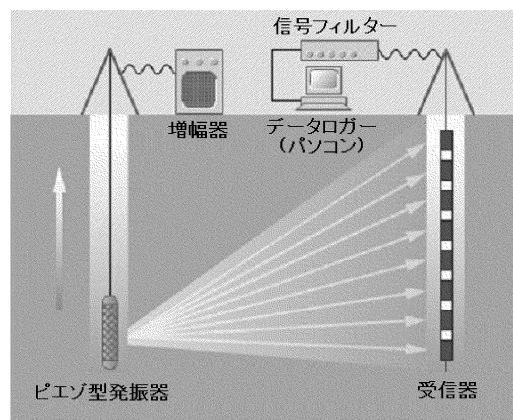


図-1 計測システム

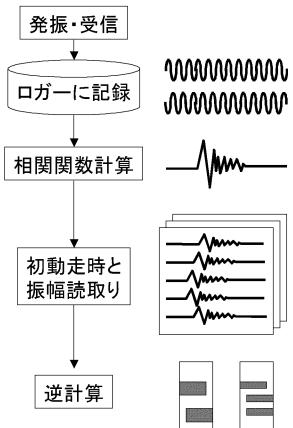


図-2 解析フロー

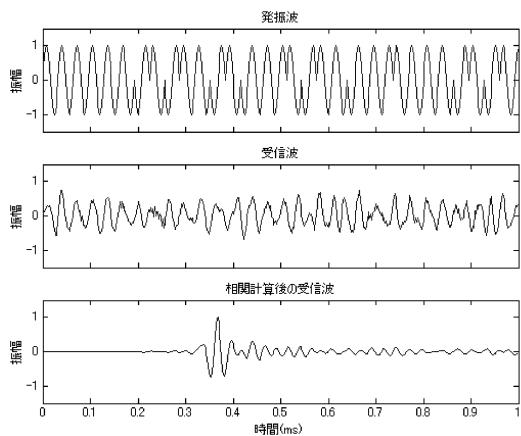


図-3 疑似ランダム波の波形例

(上：発振波，中：受信記録，下：相関計算後の受信波形)

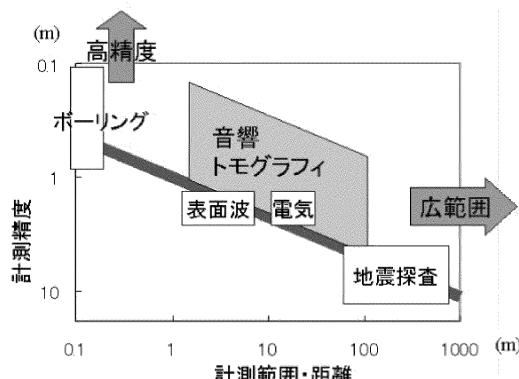


図-4 計測精度・範囲に関する他手法との比較

### 3. 適用例

本手法の適用例として、桟橋建設および倉庫建家建設に伴う基礎杭打設工事における調査結果を以下に述べる。

#### 3.1 マニラ港桟橋建設における例

フィリピン国マニラ湾は層厚 30m 以上の軟弱な沖積層とその下部の洪積礫層によって特徴付けられる<sup>7)</sup>。マニラ港はパシグ川の河口にあるため、基礎構造物の支持地盤である礫層はこの影響を受けて激しく不陸している。桟橋建設に伴う基礎杭打設工事においては、この地盤の不陸による杭の高止まりや杭長不足が懸念された

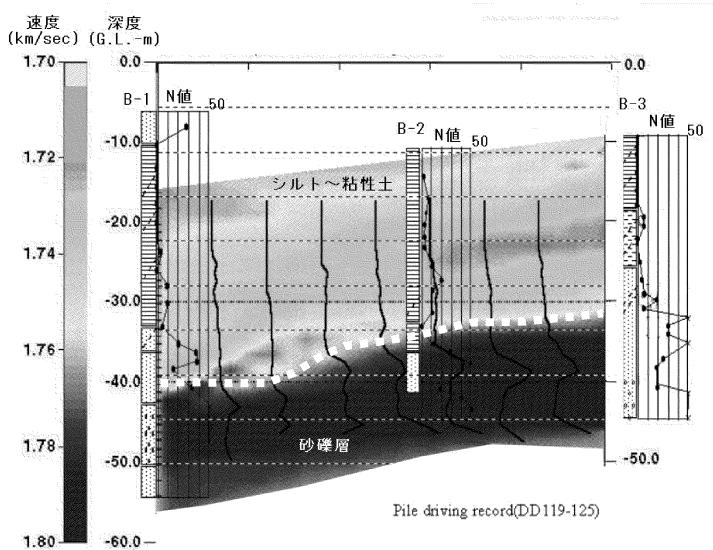


図-5 マニラ港における調査例(P 波速度分布図)

ため、地盤調査として本手法を実施することとした。図-5 は解析結果である P 波速度分布図を示している。計測深度、計測距離はそれぞれ 55m、50m であった。B-1～B-3 で示すボーリング調査の結果から、深度 GL.-30m～-40m を境として上部にシルト～粘性土層、下部に支持層である砂礫～砂層が堆積していることが分かった。同図には各ボーリング孔における標準貫入試験結果を N 値として、また、調査後に実施した杭打設工事における 1mあたりの打撃回数を黒実線で示した。同図から分かることを以下に列挙する。

- ・速度が急激に変化している境界(図中白点線で示す)と N 値および杭の打撃回数が増加している深度が誤差 1m の範囲で一致している。
- ・ボーリング調査の N 値から考えられる支持層面は B-1 と B-2 の間で 5m 以上の高低差があり、B-2 と B-3 の間には高低差がない。
- ・トモグラフィ結果からは B-1 から右に 15m までは支持層面は水平であり、そこから B-2 の位置まで支持層面が上向きに傾斜し、B-2 から B-3 の間では再び水平となっている。これらの結果は杭の打撃回数の結果と一致する。
- ・速度分布から得られる地層境界における速度変化量は 0.02km/sec であり、これは速度 1.8km/sec の 1%程度である。

以上のことから、本手法で得られた速度の境界面は杭基礎の支持層の上面であること、ボーリング調査だけでは把握できない複雑な地層変化を把握できたこと、従来の物理探査では把握できない小さな変化を明瞭に把握できたと考えられる。

#### 3.2 大阪南港の倉庫建家建設における例

天満砂礫層は大阪平野における構造物基礎の支持層としてよく知られている<sup>8)</sup>。計画地で実施したボーリング調査の結果から、図-6 に示すように、この天満層は大阪南港付近では GL.-30m 付近の第 1 天満層、GL.-60m 以深の第 2 天満層として存在することがわかった。倉庫建

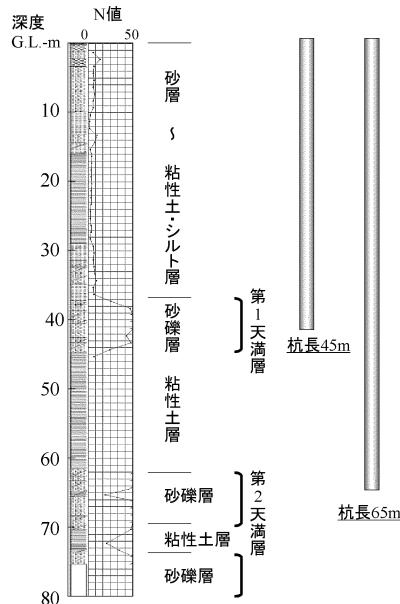


図-6 建設予定地のボーリング調査結果と  
2とおりの杭長設計

家基礎構造物を設計するにあたり、「基礎杭の支持地盤を第1、第2天満層のどちらとするか?」ということは、施工費と工期に大きな影響を与える極めて重要な問題であった。中間層である第1天満層を支持地盤とするためには、層厚がほぼ全域で10m以上あることが設計計算から求められていたが、ボーリング調査では連続した層厚の変化を捕まえることができないため、本手法を用いることとなった。図-7に工事範囲(230m×130m)とボーリング孔配置、トモグラフィ計測線をそれぞれ細実線、○印、実線矢印で示す。計測深度は50m、平均計測距離は55mであった。

解析結果の例としてNo.4←No.5→No.3測線(図-7中の太矢印線)のP波速度分布図を図-8に示す。同図にはボーリングによるN値の結果を実線で、速度分布とボーリング結果から推定される礫層の上面と下面を点線で示した。同図から、礫層の層厚がほぼ10m以上あること、支持地盤面(礫層上面)の高低差は2m以下であることが分かった。全断面において同様の結果を得ることができたため、基礎杭の支持地盤を第1天満層として設計を行い、これに基づいて無事に施工を完了した。

この結果、杭長にして30%の材料・施工費の削減と工期短縮を実現することができ、顧客から大きな評価を得ることができた。従来の探査手法では得ることのできない精度1mという正確な層厚の把握により、効率的な基礎構造物の設計が可能となつた良い例であった。

#### 4. まとめ

高周波数の音響波を用いたトモグラフィによる高精度地盤探査法を開発した。本報告で述べた二つの適用例では、本手法の結果と実際の地盤の詳細な比較を行うことで本手法の妥当性を検証し、また、計測結果に基づいて

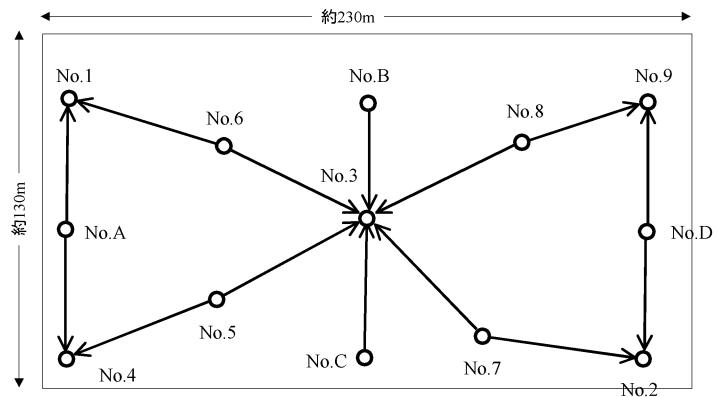


図-7 工事範囲とボーリング孔配置、トモグラフィ計測線

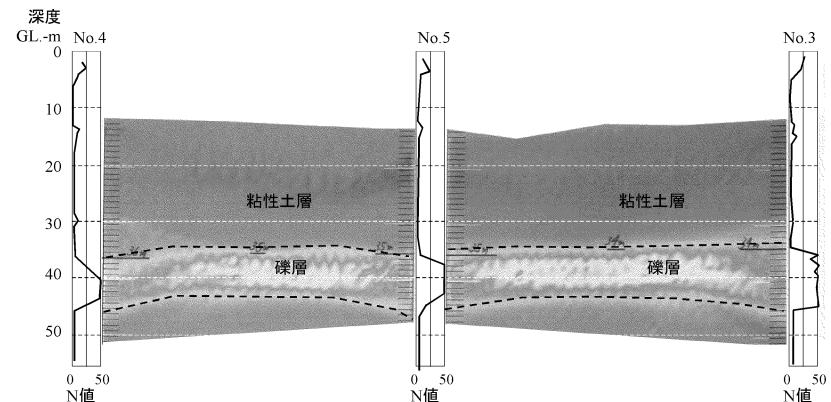


図-8 解析結果の例(No.4←No.5→No.3測線のP波速度分布図)

実施した設計によって工費と工期の削減に大きく貢献できたことを示した。今後は調査データの蓄積による精度向上と設計と施工への的確な適用を図っていきたい。

#### 参考文献

- 1) 楠健一郎：物理探査法の地盤工学における課題と提言，土と基礎，45-9, pp.19-22, 1997
- 2) 笹尾春夫ほか：委員会報告(第2章)，地下空間開発における調査・計測に関するシンポジウム発表論文集, pp.2-1-2-4, 2006
- 3) 松廣紀夫：超音波による魚群探知技術，日本音響学会誌, 61-11, pp.665-670, 2005
- 4) 六川修一：弾性波トモグラフィとその応用，物理探査, 42-6, pp.428-441, 1989
- 5) Bergman, N.D. et al : Crosshole seismic tomography, Geophysics, 54-2, pp.200-215, 1989
- 6) Cunningham, A.B. : Some alternate vibrator signals, Geophysics, 44, pp.1901-1921, 1979
- 7) 松田磐余：マニラ首都圏の地形・地質に基づく地域区分“サイスマック・マイクロゾーニングのための表層地質の分類”，関東学院大学総合学術論叢, 第24号, pp.19-48, 1998
- 8) 西垣好彦・藤田和夫：天満砂礫層と伊丹礫層，地質ニュース, No.368, pp.43~49, 1985