

# 高周波数の弾性波を用いた 高精度地盤調査手法の開発

榊原 淳一<sup>1</sup>・山本 督夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 JFEシビル株式会社 開発部 (〒284-0015 東京都台東区蔵前2丁目17-4)  
E-mail: jun-sakakibara@jfe-civil.com

<sup>2</sup>マイアミ大学教授 地盤音響学研究室 (米国フロリダ州マイアミ)  
E-mail: tyamamoto@rsmas.miami.edu

高周波数の弾性波を用いた高精度な地盤調査手法を開発した。本手法は擬似ランダム波を発振波として用いることで周波数を正確に制御すると共に、地盤中における減衰の影響を低減することで高周波数の弾性波を用いた計測を行うことができる。これにより高精度でかつ実用的な計測距離での調査が可能となった。中部国際空港建家基礎建設工事においては支持地盤の不陸が激しいため基礎杭の高止まりや杭長不足などのリスクが懸念されていたが、本手法による精度の高い計測結果を基に基礎杭の杭長設計を行い、これらのリスクを未然に回避することができた。本手法の効果を把握するために、ボーリング調査のみによる杭長設計との比較を行った結果、約40%以上のコスト削減効果があったことが分った。

**Key Words :** high frequency, seismic wave, tomography, pseudo random wave, high resolution

## 1. はじめに

正確な地盤調査を行うことは、安全・安心な構造物を正しく効率的に建設するためには重要である。この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、弾性波探査などで代表される物理探査法<sup>1)</sup>などの間接的な手法に分けられる。ボーリング調査は「地盤を直接把握できる」という長所を持つ反面、「調査範囲が狭くボーリング孔間の情報は類推に頼らざるを得ない、地表構造物がある場所では調査できない」という短所がある。一方、物理探査法は、「調査範囲が広く、また地盤断面を可視化できるため客観性が保たれる」という長所を持ち<sup>2), 3)</sup>、ボーリング調査の短所を補うことが可能<sup>1)</sup>な技術である。最近では、地下空間開発<sup>4)</sup>、地盤汚染や地震防災<sup>5)</sup>、また沖合空港建設<sup>6)</sup>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ようになってきており、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いる。さらに、ユーザーが調査結果の解釈を行い易い地盤の可視化に対するニーズも高くなっており、物理探査法への期待が大きくなってきている。

物理探査法は地震学や資源探査には早くから用いられていた<sup>1)</sup>が、建設分野においてはダムやトンネル建設、斜面・地滑り調査など<sup>7)</sup>に用いられることが多く、都市部や臨海部における基礎構造物の支持地盤調査等への適

用は少ない<sup>7)</sup>。この理由として、「現場に必要な計測精度と探査精度が一致しない」<sup>3), 7), 8)</sup>、「工学的に必要な物性値や指標と探査結果で得られる物性値との関連が明確でない」<sup>3), 9)</sup>の2点が挙げられる。これらの課題のうち後者については、複数の物理探査法を組合わせて結果を比較することで対応する<sup>9), 10), 11)</sup>ことが提案されているが、前者については高密度電気探査などの事例<sup>12)</sup>はあるものの十分な解決は成されていなかった。

Yamamoto, et al.<sup>13)</sup>は上述の課題を解決するために、海洋調査などで用いられている高周波数の弾性波による調査手法<sup>14)</sup>を陸上での孔間トモグラフィに適用したが、孔内発振器と孔内受振器の外径が我が国では一般的なφ66mmのボーリング孔よりも大きいことや、解析作業に数日を要するなど現場計測での実用性に欠ける部分があった。筆者らはこれらの点について、発振器や受振器など計測機器の小型化や操作性・搬送性の向上、解析の自動化などの改良を行うと共に、現場実験を重ねて性能検証を行い、実用的な地盤調査手法として確立した。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、特に、地表構造物の制約を受ける都市部や臨海部において地盤断面の可視化情報を提供することが出来る。本論文はこの新しい探査手法の原理と特長、性能試験結果、実証例および今後の展開について述べるものである。

## 2. 高周波数の弾性波による地盤探査手法の開発

### (1) 弾性波の特長

弾性波は地震時に最初に到達する波であり縦波やP波とも呼ばれる<sup>15)</sup>。弾性波を用いた他の探査手法として地震探査や超音波探査などがあげられるが、必要とする計測精度と計測範囲により使用する周波数帯域が異なる。地震探査では10Hzから500Hz程度<sup>16)</sup>、超音波探査では20kHzから1GHz程度<sup>17)</sup>の周波数帯域が用いられることが多い。一方、本手法で用いる周波数帯域は200Hzから20kHz程度の音響波と呼ばれる周波数帯域であり、これは概ね人の可聴帯域と一致する<sup>18)</sup>。この周波数は地盤探査において重要な探査精度と探査距離に大きな影響を与える<sup>19)</sup>。本節ではこの周波数と探査精度、探査距離の関係について述べる。

#### a) 探査精度と周波数

分解能は波長の4分の1程度と言われている<sup>20)</sup>が計測場所のバックグラウンドノイズや読取り誤差などを考慮すると、これまでの筆者らの経験では波長の2分の1程度とするのが妥当であると考えられる。地中を伝播する波の周波数、波長、速度をそれぞれ、 $f$ 、 $\lambda$ 、 $V$ とするとこれらの関係は式(1)で表される。探査精度 $\phi$ を式(2)とすると、式(1)と(2)から式(3)が得られる。従来の弾性波トモグラフィに用いられてきた衝撃波震源などの発振周波数は1kHzを越える報告<sup>21)</sup>もあるがほとんどは0.5 kHz以下<sup>16)</sup>である。例えば、発振周波数が $f=0.5$  kHz、速度 $V=2$  km/sの場合には探査精度は $\phi=2$  mとなる。図-1は式(3)から導いた発振周波数 $f$ と探査精度の関係に従来の弾性波探査と超音波探査の位置づけを併せて示しているが、現場で必要な探査精度1mを得るためには発振周波数を1kHz以上とする必要があることがわかる。つまり従来の弾性波探査は発振周波数が低いために現場に必要な計測精度が得られなかったと言える。

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (1)$$

$$\phi > \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

$$\phi > \frac{V}{2f} \quad (3)$$

#### b) 計測距離と周波数

計測距離は地盤中を伝播する際の波の減衰量によって決まる。地盤中の波の減衰は、発振音圧 $A_0$ 、受振音圧 $A$ 、計測距離 $r$ 、減衰定数 $\alpha$ を用いて式(4)および(5)として表される<sup>16)</sup>、<sup>22)</sup>、<sup>23)</sup>。 $Q$ は媒質の減衰特性を表す無次元量で

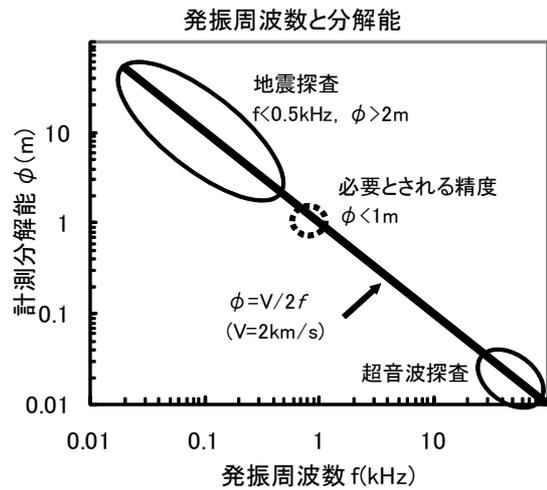


図-1 発振周波数と分解能

あって、 $Q$ の値が小さいほど減衰量は大きくなり、未固結地盤で5~20であることが多い<sup>15)</sup>。これらの式から、波の減衰は距離 $r$ に比例し、発振周波数には指数関数的に影響を受けることが分かる。例えば距離 $r=100$  m、 $Q=20$ 、速度 $V=2$  km/sの場合、発振周波数 $f=0.5$  kHzと2 kHzを比較すると、 $f=2$  kHzの減衰量は $f=0.5$  kHzの時よりも約43倍も減衰量が大きいたことが分かる。言換えれば $f=2$  kHzの場合、 $f=0.5$  kHzと同等の振幅を観測するための計測距離は44 mとなり $f=0.5$  kHzの半分以下となってしまう。これが従来の弾性波探査の発振周波数が低かった大きな理由である。計測精度を上げるために発振周波数を高くすると、減衰が大きくなり実用的な計測距離を維持できなくなる。この相反する2つの事象の影響で精度の高い計測を行うことができなかったと言える。

$$A = \frac{1}{r} A_0 e^{-\alpha r} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\pi f}{VQ} \quad (5)$$

### (2) 擬似ランダム波を用いた計測システムの開発

本手法は周波数を制御した擬似ランダム波を用いることに特徴がある。計測精度を高くするために発振周波数を高くしても、高周波数による減衰の影響を低減することができ、実用的な計測距離を維持することが可能となった。

#### a) 擬似ランダム波

擬似ランダム波はパルス圧縮<sup>24)</sup>と呼ばれる信号増幅方法の一つである。連続波を用いることにより送信するエネルギーを時間軸上に分散させているため、パルス波に比べて送信信号全体のエネルギーを大きくすることができる<sup>25)</sup>。擬似ランダム波は、特定のデータ長を持つ連続波でありこの範囲ではランダムな性質を持つこと、単一

周波数の正弦波をベースとし位相変換されていること、自己相関関数がこの周波数に依存した波長のパルス波となることが特長である<sup>26)</sup>。図-2に擬似ランダム波の例として、発振波(a)、実際の受振波(b)、発振波と受振波の相関計算後の波形(c)を示した。相関関数のピーク値となる時間(図2-(c)では0.36ms付近の極大値)は擬似ランダム波の到達時間であり、ピーク値の大きさは到達波の持つ受振

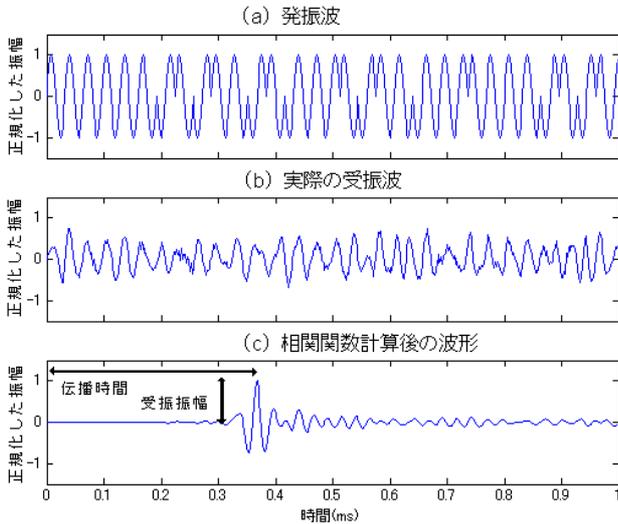


図-2 擬似ランダム波の例

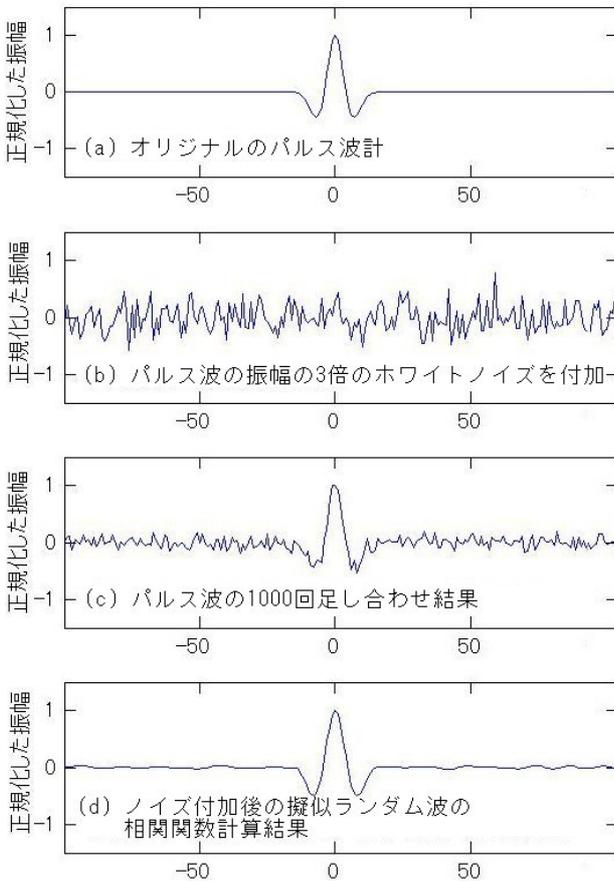


図-3 擬似ランダム波とパルス波のノイズ低減効果の比較

エネルギーと考えてよいので、これにより地中を伝播してきた波の到達時間とエネルギー量を得ることができる。図-3は擬似ランダム波を用いることによるノイズの低減効果について、パルス波の重ね合わせ結果と比較したものである。図-3(a)に示すパルス波に振幅の3倍のホワイトノイズを重ねてノイズを含んだ受振信号とし(図-3(b)), 得られた波形を1000回し合わせた結果が図-3(c)である。ホワイトノイズはランダム信号であるため足し合わせの過程で小さくなるが、パルス波は常に存在するため結果としてパルス波だけが大きくなる。図-3(d)は、上記の手順と同様に擬似ランダム波(連続波の波数は4095)に振幅の3倍のホワイトノイズを重ねて受振波とし、ホワイトノイズを含まない擬似ランダム波(発振波)との相関計算を行った結果であるが、1000回し合わせたパルス波よりもノイズが小さいことが分かる。この擬似ランダム波を用いることで減衰の激しい高周波数の弾性波を用いた計測が可能となる。

b) 計測システム

計測システムおよびその基本仕様を図-4、表-1に示す。データロガーとしてアナログ・デジタル変換およびデジ

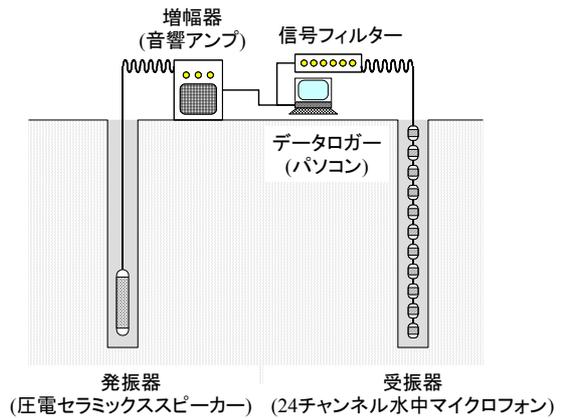


図-4 計測システム

表-1 計測システムの基本仕様

名称	仕様
発振器	外径44mm, 長さ270mm, 重量4.5kg, 出力130.6dB(入力電圧100V, 発振周波数5kHz), 共振周波数35kHz,
受振器	外径35mm, センサー間隔1m, センサー数24個, 重量11kg, 使用可能帯域1Hz~20kHz(実績), 受振感度 -162 dB re 1V/ $\mu$ Pa <sup>(*)</sup> 耐圧深度200m <sup>(*)</sup> 1 $\mu$ Paの圧力を受けた際に出力1Vを得るための増幅度
増幅器	出力電圧120V(20kHz以下), 使用可能帯域20Hz~20kHz, 電源AC100V, 消費電力60W, 重量9kg
信号フィルター	ゲイン1倍~100倍, 入出力8チャンネル, バンドパスフィルター帯域200Hz~60kHz, 電源DC $\pm$ 12V
データロガー	入力8チャンネル, 出力1チャンネル, 入力分解能16bit, 入力・出力電圧 $\pm$ 5V以下

タル・アナログ変換ボードを組込んだパソコン，増幅器（音響アンプ），受振信号フィルター，発振器（圧電セラミックスピーカー）と受振器（24チャンネル水中マイクロフォン）で構成される．パソコンから出力した発振信号を増幅器を介して計測孔に設置したピエゾ型発振器から弾性波として出力する．弾性波は計測孔内の水を介して

地中に入射・伝播し，もう一方の計測孔に設置した受振器により電圧信号に変換され，信号フィルターを介してデータロガーにより記録される．擬似ランダム波のような複雑な波形を損失することなく発信するためには，高周波数帯域でも正確な波形出力が可能なピエゾ型震源を用いることが必要である．

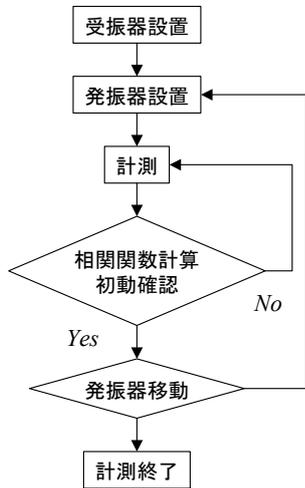


図-5 計測フロー

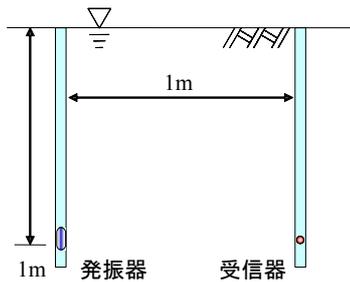


図-6 性能確認試験の計測レイアウト

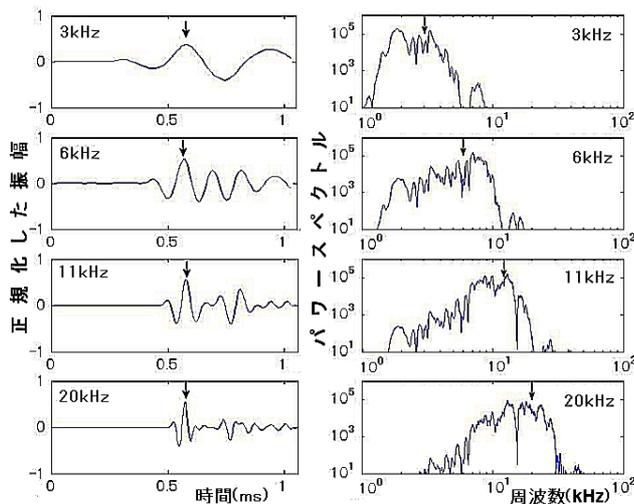


図-7 砂層中における相関関数の波形とパワースペクトル  
 発振周波数は上から 3kHz, 6kHz, 11kHz, 20kHz  
 左列)相関関数の波形(振幅は正規化してある)  
 右列)周波数スペクトル(図中矢印は発振周波数を示す)

計測フローを図-5に示す．受振器と発振器を所定の位置に設置し発振と受振を行う．得られた受振記録の相関関数を計算して波形を確認し，次の発振位置へ移動して計測を繰り返す．予定の発振器位置を全て実施して計測は完了する．解析は発振波と受振波の相関関数の波形から最初に到達した波(初動波)の到達時間と振幅を読み取り，これらを用いて波線解析と特異値分解法による逆計算<sup>27)</sup>を行い伝播速度分布と振幅減衰率分布を求める．振幅減衰率は地盤の間隙流体や土粒子の粒径に影響を受けて変化するため，伝播速度だけでは分かりにくい地中ガスや地盤のゆるみの調査に適している．この振幅減衰率と伝播速度分布を組合わせて解釈することで地盤の情報をより正確に把握することができる．

(3) 性能確認試験

a) 計測周波数の制御

計測周波数の制御に関わる性能を確認するために，茨城県霞ヶ浦の砂層中において発振周波数を3kHz～20kHzまで変えた試験を行った．地盤は飽和した均質な砂で構成されており孔壁保護のために水で満たした塩ビパイプをケーシングとして用いた．発振器と受振器の距離および発振器と受振器の設置深度は共に1.00mであった．計測レイアウトおよび計測結果をそれぞれ図-6，図-7に示す．相関関数の波形図，周波数スペクトルとも振幅はコンピュータの読み値を示している．図-7からわかるように，発振周波数に対応して相関関数の波長とパワースペクトル(図中の矢印は発振周波数)が変化していることから，正確な周波数制御を行っていることを確認した．なお，これらの結果は表-1に示す計測機器の周波数特性の範囲内に収まっており，相関関数の波形における到達波の決定に影響はない．

続いて従来の手法と比較するためにハンマーによる打撃音との比較を長さ1.00mのコンクリートブロックを用いて行った．発振器と受振器は粘土を用いて試験体に接着した．発振器と受振器の距離は1mであった．図-8および図-9は計測レイアウトおよび試験結果を示す．打撃による受振波形と本手法による相関関数の波形の振幅はコンピュータの読み値を電圧で示している．打撃音の卓越周波数は約5kHz，本手法では約40kHzであった．図中，下向き矢印は初動波の到達時間を示すが，打撃音は波の立ち上がりを読む必要があるため，図中の横向き

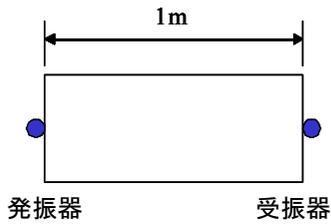


図-8 打撃音との比較試験の計測レイアウト  
コンクリート試験体の両側に発振器と受振器を設置

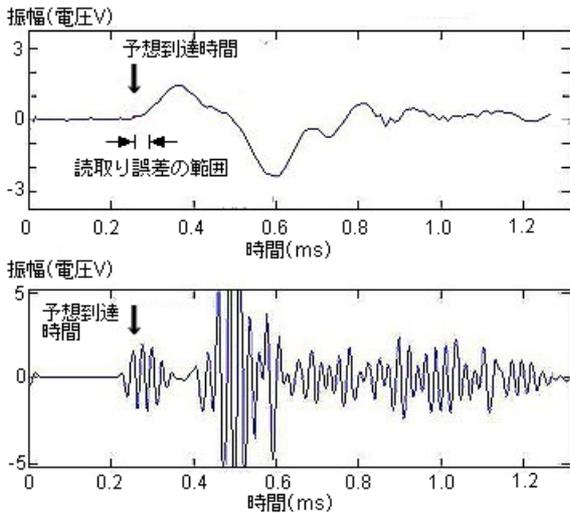


図-9 コンクリート試験体を用いた打撃音との比較(距離 1m)  
上)打撃による受振記録(卓越周波数は約 5kHz), 下)本手法による相関関数の波形記録(卓越周波数は約 40kHz)

矢印で示す範囲の読み取り誤差が発生する可能性があるが、本手法は相関関数の頂点を読むため読み取り誤差は発生しにくい。この結果から従来手法よりも波形の読み取り誤差が小さくより精度の高い計測が可能であることが分る。ただし、図-9の下図に示されるように、波長が短い故に遅れてくる波やその合成波が初動波付近に混在する場合もあるため、初動波の同定に際しては近傍の受振器の波形も考慮するなどの対応が必要である。

**b) 疑似ランダム波による信号対ノイズ比の改善**

疑似ランダム波の信号対ノイズ比の改善効果について検証を行うため、図-6と同様の計測方法を用いてパルス波の受振器録と疑似ランダム波の相関関数の波形の比較を行った。発振周波数は2kHz、計測距離は0.450mであり、パルス波として1波だけの正弦波を用いた。図-10に結果を示す。図中の下向き矢印は初動波の到達時間を示す。縦軸は受振波形および相関関数の波形の振幅をパソコンの読み値で示しているが、パルス波の初動の振幅が10程度であるのに対して疑似ランダム波の相関関数の波形の振幅は $10^5$ 程度であることが分かる。これは時間軸状に分散した信号成分は相関計算の結果として圧縮されるが、疑似ランダム波と相関性を持たないノイズ成分

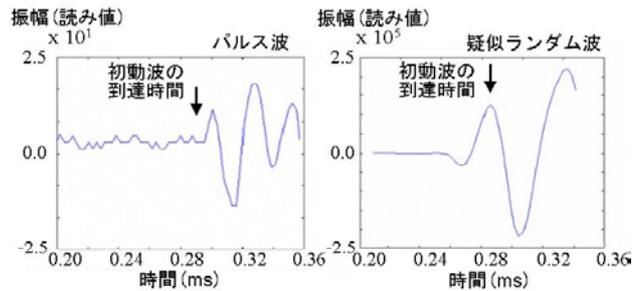


図-10 砂層中を伝播したパルス波(左)と疑似ランダム波(右)の受振記録の比較(計測距離 0.45m)

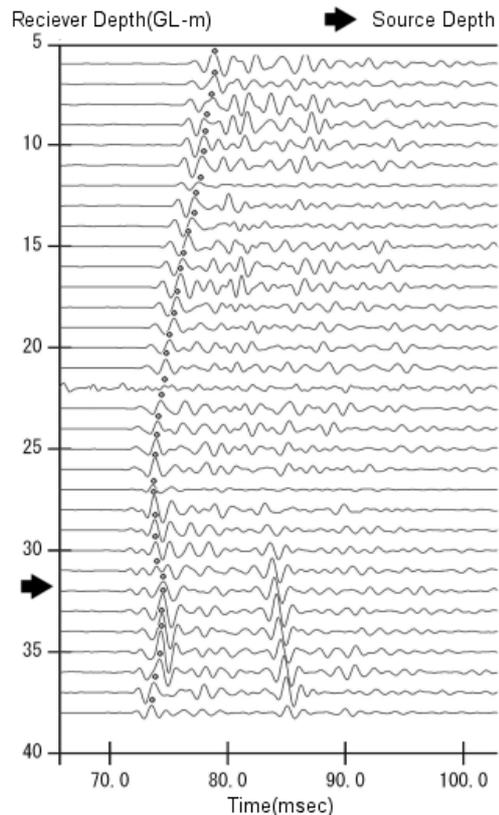


図-11 東京湾における計測結果(相関関数の波形)  
距離 110m, 発振周波数 1kHz, 粘性土砂, ○印は波の到達時間を示す

は相関計算の結果は圧縮されないためであり、本試験の場合は疑似ランダム波の相関関数波形の信号対ノイズ比は $10^4$ 倍も改善されていることが分る。前節で述べたQ値を20、発振周波数 $f$ を1kHz、伝播速度 $V$ を2km/sとし、式(4)と(5)を用いて計算すると疑似ランダム波を用いた場合は計測距離は約80m伸びることになる。図-11は本手法を用いて行った東京湾での地盤調査における受振記録の1例である。発振孔と受振孔の孔間距離は110m、発振周波数は1 kHz、発振深度はGL-32mであった。同図から、これまでの手法では伝播させることが難しかった高周波数の波が伝播していることが分かる。

### 3. 実証例と考察

#### (1) 比国マニラ港の棧橋建設工事における杭基礎の支持地盤調査<sup>28)</sup>

##### a) 調査概要

比国マニラ港南港で実施された棧橋新設工事において、本手法の検証を兼ねた地盤調査を実施した。現場は厚い粘土層の下部に基礎支持地盤である砂礫層が堆積していることがボーリング調査から分っていたが、大河川の河口に位置しており支持地盤が不陸していることが予想されていた。本調査はこの支持地盤の不陸を正確に把握することを目的として実施した。図-12に計測レイアウトを示す。基礎杭の杭長は50m、地盤への根入長は35m、平均的な杭間隔は6m~8mであった。計測距離と計測深度は共に50mであった。発振周波数は2kHz、発振点と受振点は深度方向に共に1m間隔であり、これから予想される計測精度は1m以下であった。

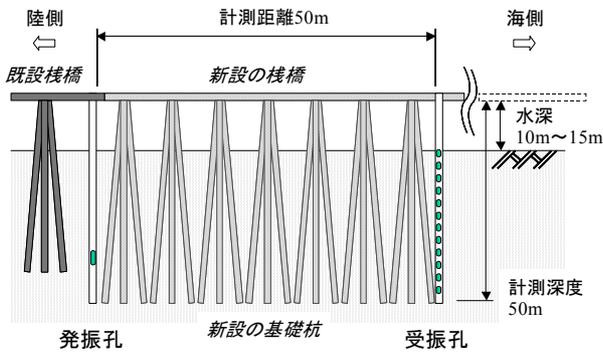


図-12 比国マニラ港における杭基礎支持地盤調査計測レイアウト(新設の棧橋と基礎杭を破線で示す)

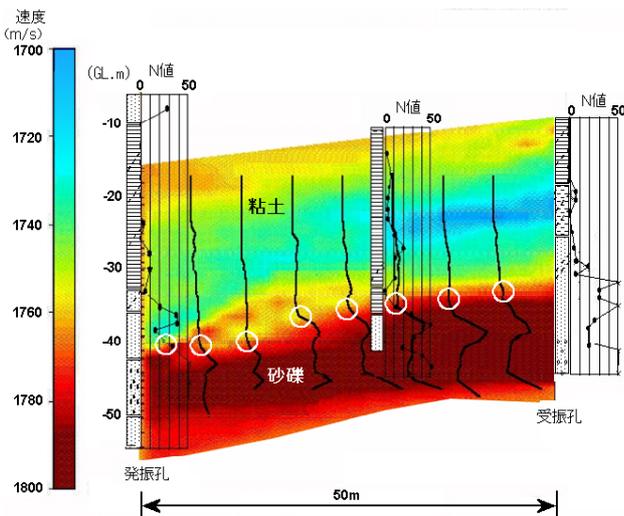


図-13 比国マニラ港における杭基礎支持地盤調査結果(速度分布図)

実線は単位長さ当たりの杭の打撃回数を示す。白線で囲った部分は単位長さ当たりの杭の打撃回数が増加している深度

##### b) 調査結果と考察

調査結果として図-13に速度分布図を示す。図中には3本の土質柱状図とN値を併せて示してある。地盤の音速は1,700m/s~1,800m/sであり、ボーリング柱状図との比較から音速1,770m/sの部分に粘土層と砂礫層の境界があることが分った。同図から発振孔付近では砂礫層はGL-40m程度にあるが受振孔側に向かうに従って砂礫層の上面の深度が浅くなっていき受振孔付近ではGL-30mの深度にあることが分る。この傾向は土質柱状図とN値とも一致していた。

調査結果の検証を行うため、調査後に施工した基礎杭の打設記録と比較を行った。図-13に基礎杭の単位長さ当たりの打撃回数を併せて示しているが、図中に白丸で囲んだ打撃回数の増加が始まる深度と調査結果から得られる粘土層と砂礫層の境界が良く一致しており、本手法によって得られた支持地盤面の位置が正しいことが分る。

#### (2) 中部国際空港における杭基礎支持地盤調査

##### a) 調査概要

中部国際空港のある伊勢湾北部は木曾川や揖斐川などの大河川流域にあり、さらに氷河期の海進海退の影響を受け複雑な地層構造をしている。同空港内に建設された立体駐車場(高さ124 m, 4層5段×2棟, 駐車台数1,280台)の基礎工事(杭本数220本)においては、この複雑な地層構造による杭の高止まり、杭長不足などの施工リスクが懸念されていた。さらに、空港操業中の施工であることから騒音・振動の少ない施工方法(既成杭の埋込工法)が要求されており、杭長変更が基本的に不可能な状況にあった。このため、ボーリング調査だけでは施工リスクの低減には不十分であると判断し本手法を実施した。

図-14に計測測線レイアウトを示す。図中、No.は計測孔

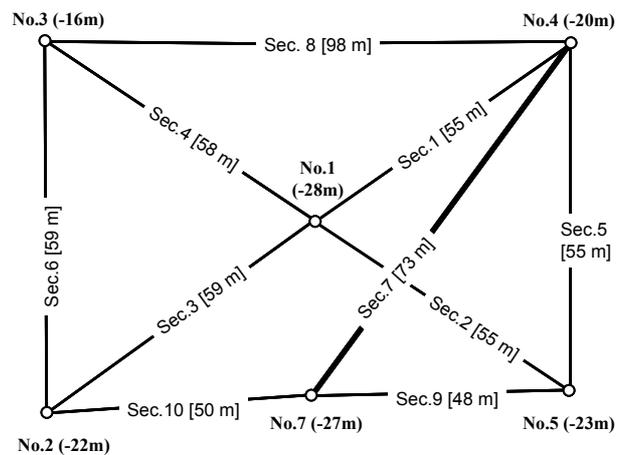


図-14 中部国際空港立体駐車場建設における杭基礎支持地盤調査(計測測線レイアウト)

No. (m)はボーリング孔と支持地盤の出現深度を示す。Sec. [m]は断面番号と計測距離を示す

の番号, Sec.は計測断面の番号, 丸括弧で囲んだ数字は固結シルト層の出現深度, 角括弧で囲んだ数字は計測距離を示す. 断面数は10断面, 計測距離は48m~98mであった. 発振点と受振点は共に深度方向に1m 間隔, 計測周波数は2kHzであり, これから予想される計測精度は±1m以下であった.

**b) 調査結果**

代表的な計測結果としてSec.7(図-14中の太線の測線)の速度分布図をボーリング調査結果と併せて図-15 に示す. 図中の白線は速度分布図とボーリング調査結果の対比から得られたシルト・細砂と固結シルトの地層境界を示しており, これは速度1,850m/sに相当する. 同図からはボーリング調査の結果だけでは把握が難しい断面中央部の3m以上の段差の存在が読み取れる.

基礎杭の杭長設計を行うためには3次元的情報を得る必要があったため, 調査した10断面の計測結果を基にして支持地盤深度, すなわち固結シルトとシルト・細砂の地層境界のコンター図を作成した. 図-16 にこれを示す. 図中, 括弧囲いの数字はボーリング結果から分かる支持地盤深度, イタリックゴシックの数字は本手法によ

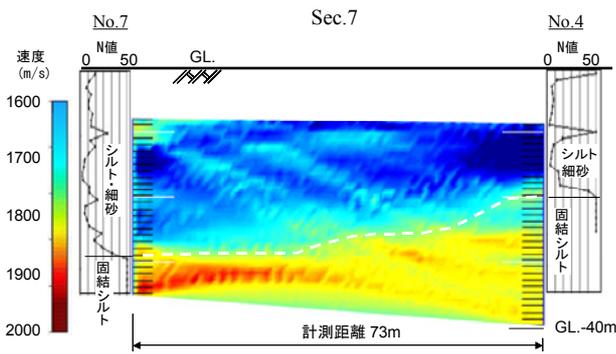


図-15 Sec.7の計測結果(速度分布図)と土質柱状図  
白破線はシルト・細砂と固結シルトの推定境界を示す

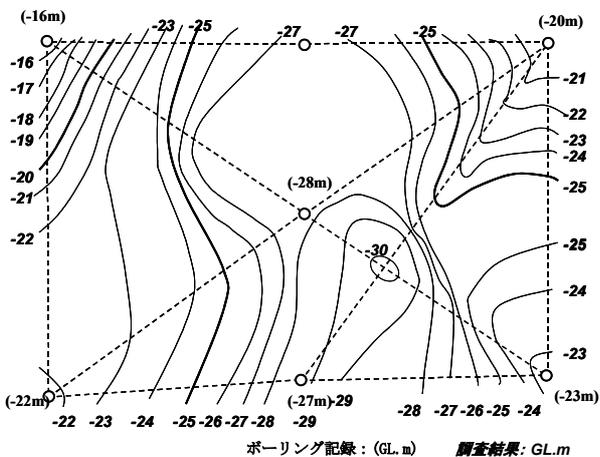


図-16 調査結果から推定する支持地盤深度のコンター図  
括弧内の数字はボーリング記録から分る支持地盤の出現深度

る調査結果から推定した支持地盤面の高さを示す. 同図から支持地盤面は窪地や急傾斜, 平坦な部分などが存在する複雑な地形をしていることが分る. 基礎杭の杭長設計は同図を基にして行ったが, 杭の高止まりや杭長不足などを発生させることなく無事に施工を終えることができた.

**c) 調査結果の検証**

本手法の調査結果を検証するために基礎杭の施工記録との比較を行った. 基礎杭の施工記録とは杭の埋込貫入抵抗(オーガーの駆動電流値)と埋込深度の関係を記録したものである. 施工記録の例を図-17に示す. この例では深度GL-11mから記録を開始しGL-19.5mから貫入抵抗が徐々に大きくなったことを示しており, 支持地盤深度はGL-20mであったと考えられる. 全ての基礎杭の施工記録を基にして得られた支持地盤深度のコンター図を本

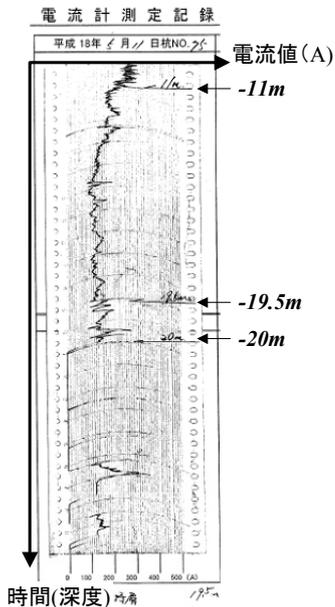


図-17 埋込工法のオーガー駆動電流の記録(例)

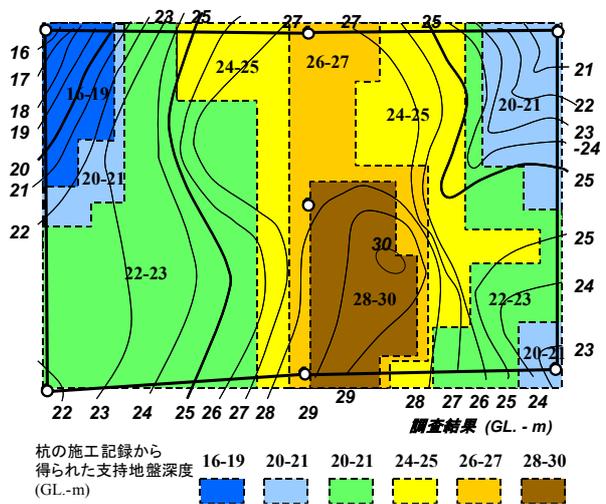


図-18 杭の施工記録から得られた支持地盤深度のコンター図と本手法から得られた支持地盤深度の比較

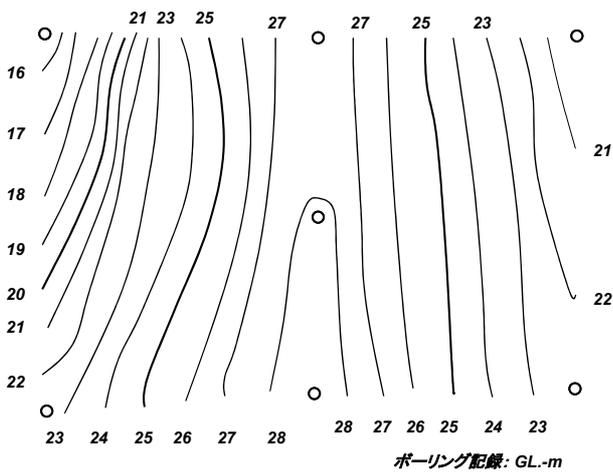


図-19 ボーリング結果のみから推定する支持地盤深度

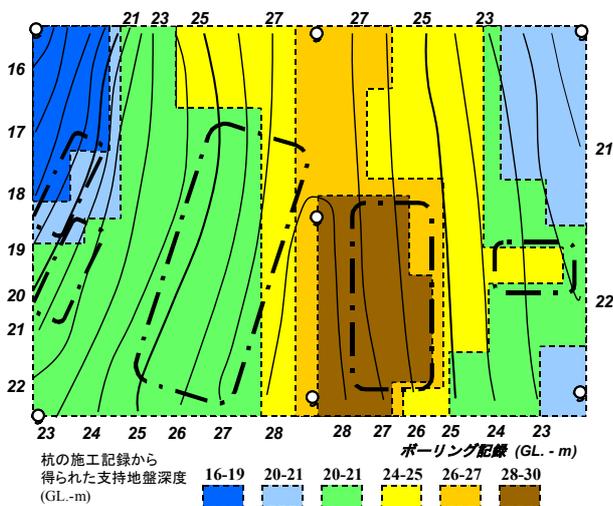


図-20 杭の施工記録から得られた支持地盤深度のコンター図とボーリング結果のみから推定する支持地盤深度の比較 (1点鎖線で囲んだ部分は基礎杭の高止まりや杭長不足が予想される部分)

手法の調査結果と比較して図-18に示す。同図から基礎杭の施工記録と本手法の調査結果が良く一致しており、共に実際の地形を反映した結果を得られていることが分る。

**d) 効果の検証：ボーリング調査のみの場合との比較**

本手法の効果を検証するため、代表的な従来方法である「ボーリング調査」だけから推定した基礎支持地盤のコンター図を作成した。これを図-19に示す。ボーリング調査だけでは孔間の地層変化を把握する事ができない為、中央部を谷とする単純なコンター図となった。基礎杭の施工記録と比較して図-20に示すが、図の左右方向の大まかな傾向は一致するが、上下方向の複雑な地形は一致していないことが分る。図中の一点鎖線で囲った範囲は2m以上の杭の高止まりや杭長不足の発生が予想される部分である。特に中央部の窪地では最大で4mもの杭長不足が予想され、継杭のできない埋込杭工法では大き

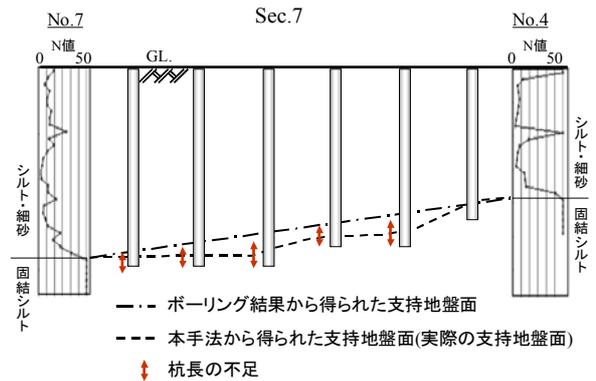


図-21 ボーリング結果のみによる杭長設計例と本手法による結果との比較

表-2 杭長設計方法の違いによる数量比較(試算)

	杭長(m)	杭重量(t)
ボーリング調査のみによる杭長設計	6,177	918
音響トモグラフィの結果を反映した杭長設計	5,295	791
差 :	882	127

な問題になっていたと考えられる。

本手法の効果を定量的に検証するために図-19のコンター図に基づいて杭長設計を行った。図-21はSec.7に沿って検討した例である。ボーリング結果のみからは図中に1点鎖線で示すような直線で支持地盤を想定せざるを得ない。前述したように、現場で採用された埋込工法は継ぎ杭が不可能な工法であり、杭長不足の発生を避けるためにはより安全な設計、すなわち余分な杭長が必要となる。一方、本手法では複雑な地盤を把握できたため、図中の波線で示す支持地盤面に基づいた効率的な杭長設計を行うことができた。全ての杭について同様の検討を行った結果を表-2に示す。この検討結果では余分な杭長が全体の14%も発生することになり、杭長の過不足による施工時の手間の増加等も加味すると、ボーリング結果だけに基づいて設計した場合と比較して施工費が約40%も少なくなることが分かった。杭長不足の際の材料手配などに伴う待機コストを考慮するとさらに余分なコストが増加すると考えられる。

**4. まとめ**

**(1) 本研究の成果**

本研究により高周波数の弾性波を用いた新しい弾性波トモグラフィ手法を開発し、その有効性を確認することができた。本論文で得られた知見について以下にまとめる。

- 1) 擬似ランダム波を発振波として用いることで高精度で実用的な計測距離を持つ計測が可能となった。従来の弾性波探査では発振周波数が低いため十分な計測精度を得ることが出来なかったが、本手法では高周波数の弾性波を用いることで基礎杭の杭長設計などに適用可能な精度による探査を行うことが出来る。図-22は他の地盤探査手法との比較を行ったものであるが、ボーリング調査に匹敵する精度で通常の弾性波探査と同等の計測範囲で計測を行うことができる。
- 2) 比国のマニラ港と愛知県の中部国際空港の2つの実証例では調査後の杭の施工記録などから本手法の精度の検証を行うことができた。特に中部国際空港の例では「従来のボーリング結果のみによる設計」と「本手法を用いた設計」を比較することで施工費が約40%も少なくなることを示すことができた。図-23は従来のボーリング調査だけを実施する場合には必要となる「過剰に安全を見込んだ設計」や「追加工事費」が、本手法のような正確な調査を行うことで不要となり、結果として工費全体を削減できることを示している。さらに、効率的な設計の基となる地盤情報を可視化して示すことは、顧客に対して施工に関する安心感を与えることができると考えられる。

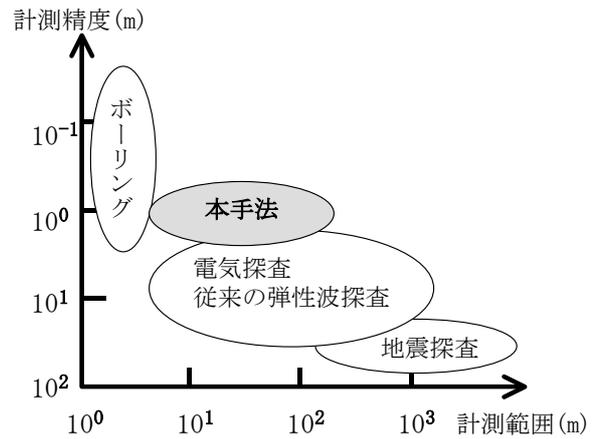


図-22 従来手法との比較

(2) 今後の展開

今後は以下の検討を進めていく予定である。

- 1) 計測結果を分かり易く判断するためには地盤物性との関連づけを行う必要がある。模型土槽実験などにより基礎的なデータを蓄積し相対密度や透水係数、飽和度等との関連性を把握する。
- 2) 支持地盤調査以外にも、空洞調査、地盤改良や亀裂性岩盤におけるグラウト剤の充填効果把握など、様々な適用先が考えられる。これらの新しい分野への適用について検討する。

**謝辞:** 本論文の作成にあたりご指導ご鞭撻を賜った濱田政則教授(早稲田大), 榊豊和氏(JFEシビル(株)), 現場計測とデータ解析を実施して頂いた, 田近久和氏(JFE技研(株)), 富重健一氏, 田中真人氏(JFEシビル(株)), 故杉山昌夫氏の諸氏に謝意を表す。計測結果の公表を快諾して頂いた中部空港株式会社に謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤村健司, 深沢晋治, 榊永幸介: 各種物理探査法の変遷と現状, 土と基礎, Vol.45, No.9, pp.7-10, pp.32-35, 1997.
- 2) 小島圭二: 地中の可視化, 土と基礎, Vol.42, No.5, pp.1-6, 1994.
- 3) 桑原徹, 北郷俊明, カルキーマダン, 山崎淳: アンケートに見る物理探査の現状・ニーズと有効利用, 土と基礎, Vol.45, No.9, pp.3-6, 1997.

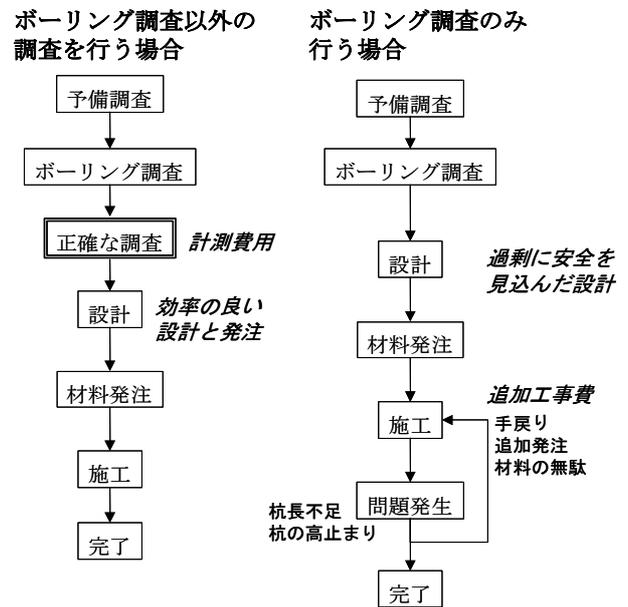


図-23 ボーリング調査以外の調査を行う場合とボーリング調査のみを行う場合の比較

- 4) 笹尾春夫: 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.
- 5) 西垣誠: 地盤調査法の変遷と今後, 土と基礎, Vol.54, No.5, pp.1-5, 2006.
- 6) 中瀬明男: 関西国際空港の沈下問題, 土木学会論文集, No.454/III-20, pp.1-9, 1992.
- 7) 田中荘一, 佐藤信一: 土木調査における物理探査の役割, 物理探査, Vol.50, No.6, pp.530-543, 1997.
- 8) 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, Vol.45, No.9, pp.19-22, 1997.
- 9) 鍛冶義和, 三木茂, 羽竜忠男, 増本清: 物理探査の結果と地盤特性の相関, 土と基礎, Vol.45, No.9, pp.11-14, 1997.
- 10) 脇坂安彦: 設計・施工への物理探査システム利用, 土と基礎, Vol.45, No.9, pp.23-25, 1997.
- 11) 鈴木浩一: 物理探査データによる地盤物性値の評価法の開発(その1), 電力中央研究所報告, U99036, 2000.
- 12) 松井保: 比抵抗高密度探査の地盤工学的ニーズと応用, 物理探査, Vol.48, No.6, pp.530-580, 1995.

- 13) Yamamoto, T., Nye, T., Kuru, M. : Porosity, permeability, shear strength: Crosswell tomography below an iron foundry, *Geophysics*, Vol.59, No.10, pp.1530-1541, 1994.
- 14) 松廣紀夫: 超音波による魚群探知技術, 日本音響学会誌, Vol.61, No.11, pp.665-670, 2005.
- 15) 佐々宏一, 芦田謙, 菅野強: 建設防災技術者のための物理探査, 森北出版, pp.12-15, 1993.
- 16) Lavergne, M. : *Seismic Methods*, Graham & Trotman Ltd., pp.18-19, pp.68-78, 1988.
- 17) 石井勇: 新版非破壊検査工学, 産報出版, pp.238-239, 1993.
- 18) 中村顕一, 吉久信幸, 深井晋: わかる音響学, 日新出版, pp.30およびpp.104-105, 1979.
- 19) 渡辺俊樹, 佐々宏一, 芦田謙, 岸本宗丸: 多数の薄層からなる低速度帯が P 波に及ぼす影響について, 物理探査, Vol.42, No.4, pp.75-81, 1989.
- 20) Widess, M. B. : How thin is a thin bed, *Geophysics*, Vol.38, pp.1176-1254, 1973.
- 21) 小倉公雄, 荘司泰敬, 大橋武一郎: 多層円盤を用いた孔中震源の開発, 物理探査, Vol.52, No.2, pp.141-152, 1999.
- 22) 吉川茂, 藤田肇: 基礎音響学, 講談社, pp.169-170, 2002.
- 23) Johnston, D. H. and Toksoz, M.N. : Definition and Terminology, *Seismic wave Attenuation (Geophysics reprint series No.2)*, pp.1-5, 1981.
- 24) Skolnik, M. : *Radar/ Handbooks 2<sup>nd</sup> Edition*, McGraw-Hill Inc., Chapter 10, 1970.
- 25) 間山清和, 林高弘, 神谷庄司: 改良型パルス圧縮方法によるガイド信号の高分解能化, 超音波テクノ, No.9-10, pp.12-16, 2006.
- 26) Cunningham, A.B. : Some alternate vibrator signals, *Geophysics*, Vol.44, pp.1901-1921, 1979.
- 27) Bergman, N.D., Bailey, R.C., Chapman, C.H. : Crosshole seismic tomography, *Geophysics*, Vol.54, No.2, pp.200-215, 1989.
- 28) 榊原淳一: 音響トモグラフィを用いた高精度地盤探査, 土と基礎, Vol.55, No.11, pp.17-19, 2007.

(2007. 11. 16 受付)

## DEVELOPMENT OF HIGH-RESOLUTION GEOLOGICAL SURVEY BY HIGH FREQUENCY SEISMIC WAVE

Junichi SAKAKIBARA and Tokuo YAMAMOTO

A high-resolution geological survey by high frequency seismic wave has been developed. This method is designed to transmit a pseudo random wave of desired frequency. We can measure an accurate geological structure between wells separated by a long distance. We conducted this new method to locate a firm siltstone accurately for the pile foundation work of multi-storey car park in Chubu international airport. Accurately visualized image of the firm siltstone layer enabled us to design exact lengths of the pile foundation. We compared the actual cost of the foundation work with the cost estimated by designing based upon only boring log and found that we saved 40 % of cost of foundation work by this new method.