

1 はじめに

近年、建造物や設備の老朽化に伴うメンテナンスが重要となっているが、補修の程度や方法などを決定し的確な対策を講じるためには、損傷や不具合の程度を正確に把握することが重要である。ところが、医者で言うところの問診や触診により不具合を検知していた熟練技術者が減少している昨今、正確な診断を行うことは難しくなっている。

弊社では 1990 年頃から地盤断面を高精度で可視化する「音響トモグラフィ地盤探査技術」を開発してきた。この音響トモグラフィは、「制御された高周波数の音響波」と「正確な計測を基にした解析手法」を特長とする画期的な地盤探査技術であるが、「防災、補修」といった構造物メンテナンスが重要視されるようになってきたため、現在は構造物診断に対応するための技術開発を行っている。開発中の手法は、既存技術である UT や目視を補完し効率的な計測を可能とすることを目指している。

2 音響トモグラフィとは

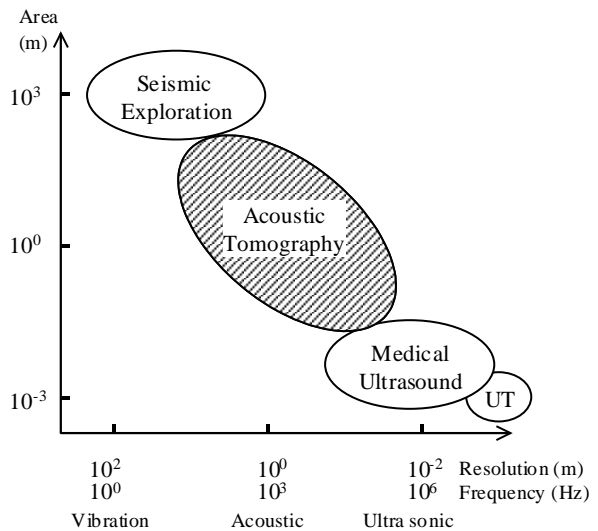
2.1 音波を用いた探査手法における位置付け

第 1 図に音波を用いた主な探査手法を、計測精度と計測範囲の観点から分類して示した。同図から計測精度は計測周波数に反比例し、計測範囲は周波数に比例することがわかる。例えば、計測周波数 10Hz ~ 100Hz 程度の低周波領域を用いる地震探査は、計測範囲は 100m ~ 1km、計測精度は 10m 程度、計測周波数 1 MHz ~ 1 GHz の超音波領域を用いる超音波診断では計測範囲は ~ 10cm、計測精度は 1mm ~ 1cm である。これらの領域の中間に位置する音響波(可聴)領域は 0.1 ~ 2m 程度の計測精度を持つため、地盤調査に用いるには都合がよいが、従来はこの音響波領域を用いた計測は海洋調査以外で用いられることは少なかった。これは、音波は地中においては式(1)(2)に示す粘性減衰により、周波数に指数関数的に比例した振幅減衰が起るため、現場に適用するには計測範囲が不十分(例えば飽和した砂層中では 1kHz で数 m 程度)であったことが理由である。

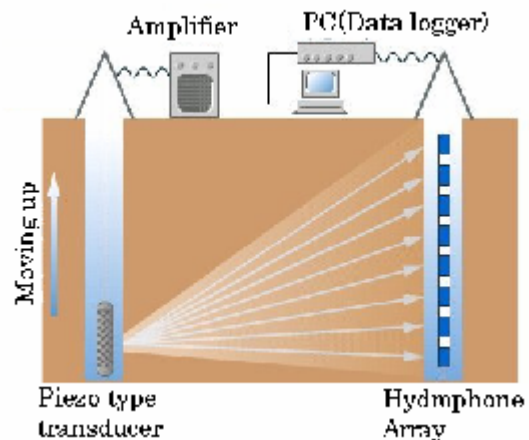
$$A = A_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot r) \cdots (1), \quad \alpha = (Q^{-1} \cdot f) / V \cdots (2)$$

A: 受波振幅, A₀: 発振波振幅, f: 発振周波数,

r: 伝播距離, Q⁻¹: 減衰率, V: 音速



第 1 図 計測精度と範囲の比較



第 2 図 音響トモグラフィの概要

2.2 音響トモグラフィの概要

音響トモグラフィの計測概念図を第 2 図に示す。UT 等でも用いられる圧電式(ピエゾ式)発振器と圧力センサーを用いた多チャンネル受信器を地中に設置し、計測孔間の縦波速度と振幅減衰率分布を出力する。

本手法で採用している疑似ランダム信号は、ある周期内でホワイトノイズの性質を持つ特殊な連続信号であり、自己相関関数を計算することでインパルス波に変換することができる。発振波は第 3 図(上)に示すような正弦波の位相変換を用いており、発振信号と受信波の相関計算を行った後、到達波の解析を行う。相関計算後はインパルス波の頂点(図中 印)が初動到達時間および初動振幅を示すため、読取り誤差が小さく自動読取りにも適している。

このピエゾ震源と地盤探査用に最適化された疑似ランダム信号の組み合わせにより以下のメリットを得られる。

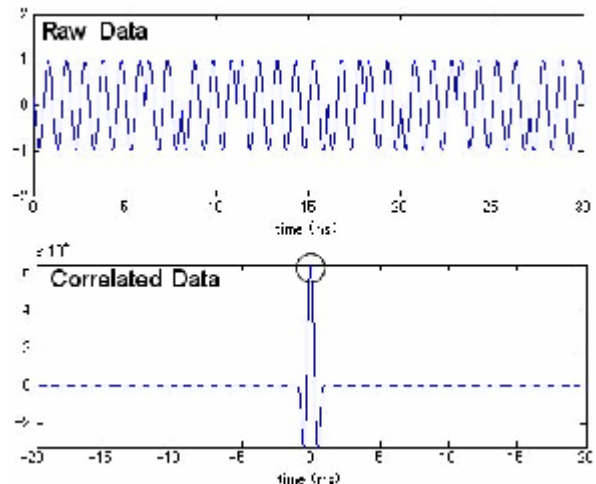
振幅の SN 比を約 65,000 倍に向上(コード長 4095 サンプル数 16/波長の場合)

計測結果として周波数を制御したパルス波を得る
打撃震源等と比較して再現性の高い計測

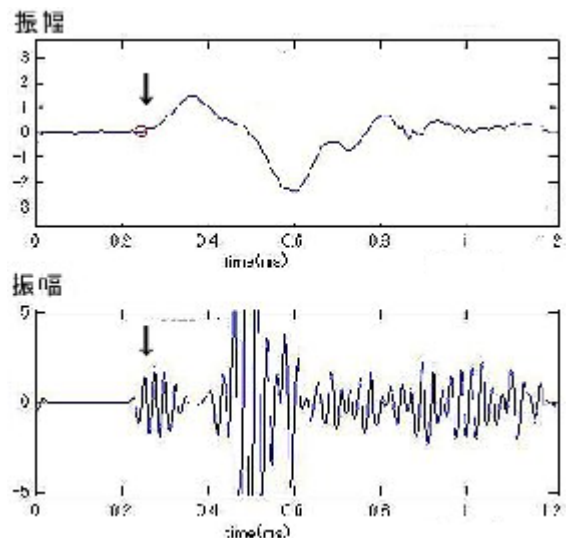
第 4 図はコンクリート供試体における打音による起振との比較である。打音(上図)の伝播周波数は約 4kHz であるのに対して本手法では約 50kHz であり、波長から考えられる精度としては 10 倍以上の差があることがわかる。また、打音の読取り位置(矢印)が波の立ち上がりであるため読取り誤差も大きいことが分かる。

2.3 地盤調査における例

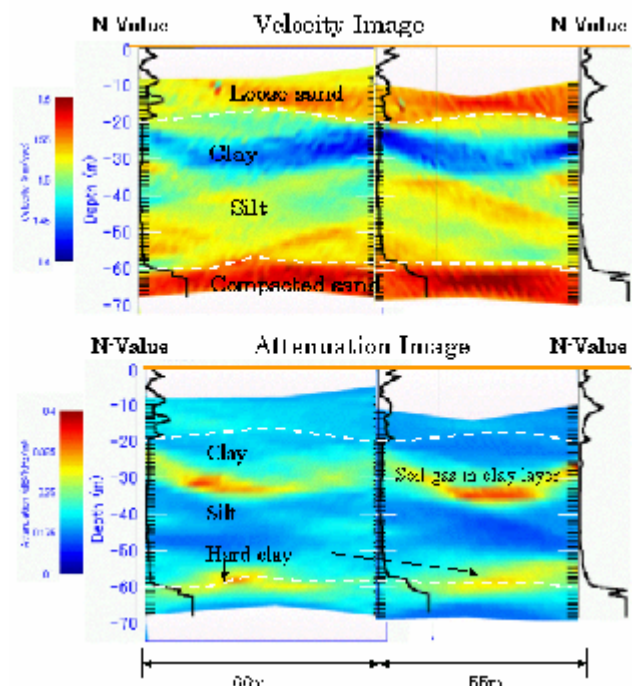
第 5 図は東京湾沿いの埋立地において実施した地盤調査の例であり、速度と減衰率分布の計測例(計測距離 66m、55m、計測深度 65m)をボーリング結果及び標準貫入試験結果(JIS A1219)と比較して示した。速度分布図からは速度 1.5km/sec 以上の砂層と 1.5km/sec 以下のシルト～粘性土層、減衰率分布から GL.-30m、GL.-60m 付近の地中ガスの存在が見て取れる。速度分布図における地層境界と実曲線で示した標準貫入試験結果が良く一致



第 3 図 疑似ランダム波の例



第 4 図 打音による起振との比較



第 5 図 東京湾における地盤調査の例

していることが分かる。

3 構造物設備診断への適用

音波を用いた構造物設備診断には、従来技術としてハンマーなどによる打撃音の評価、または UT に代表される超音波探触子を用いた反射波や屈折波の計測がある。無限遠を仮定できる地盤とは異なり、構造物には寸法による境界条件があるため、計測対象物の寸法に依存した周波数(波長)を選択する必要があり、周波数の制御ができない打撃音では計測できない場合がある。また、超音波探触子とパルス波を組み合わせた発振方法は、超音波の減衰が激しいため計測範囲が狭く、計測できる対象が限定される場合がある。また、何れの場合も音速の評価しかできないため、結果の解釈が難しいという問題があった。疑似ランダム信号とピエゾ震源を用いた発振方法はこれらの問題を解決できると考えられたため開発に着手したが、第 1 表に示すように、センサーの小型化、計測及び解析時間の高速化という課題を克服する必要があった。

第 1 表 設備診断への適用における課題

項目	地盤計測	構造物診断
発振器・受信器	計測孔内径(50mm)が制約	対象物が小さい場合小型化が必要
計測時間	現場の制約はあるが 1 日単位で専有可能	操業をしているため終日専有は困難
解析時間	計測終了後 2-3 日	補修作業があるため現場で結果が必要
耐久性・運搬性	計測車に備付け。	粉塵、高温、振動への耐久性、計測場所が狭い場合が多い

3.1 計測装置の開発

3.1.1 発振器と受信器(センサー)

発振器と受信器については、構造物に設置することが容易な形状と重量を考慮して、医療用にも用いられる円盤型の圧電素子をエポキシでコーティングして使用した。写真 1 に地盤探査用の水中マイクロフォン(右)と比較して示した。しかし、この素子は単体では使用帯域が 1MHz と音響波領域の 50 倍以上も高く、音響波領域の感度を向上させることが必要であった。このため、センサーに質量を付加することで使用帯域を下げることにした。試験結果を

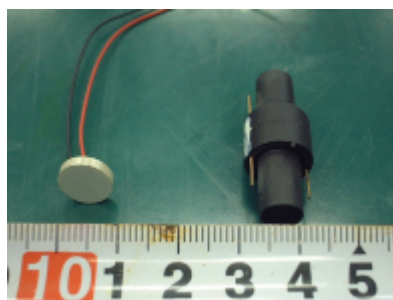
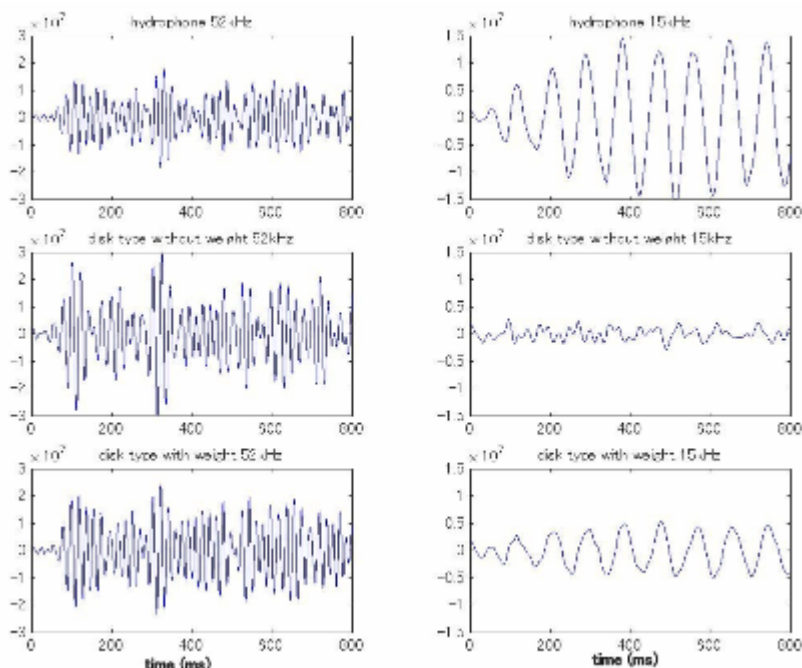


写真 1 使用した小型センサー



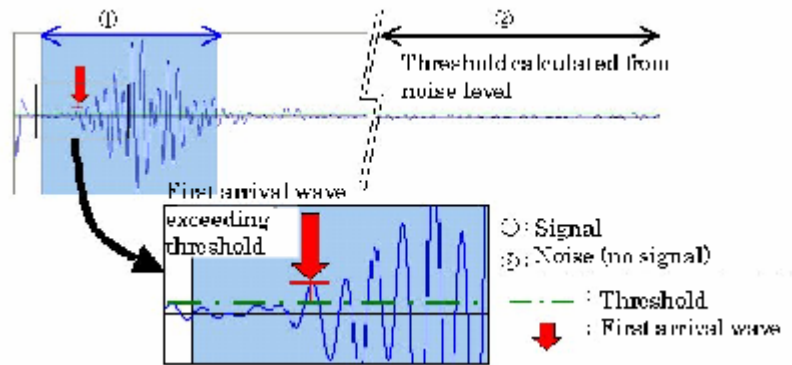
第 6 図 センサー試験結果の比較

上段: 水中マイクロフォン
 中段: 円盤型(付加質量無し)
 下段: 円盤型(付加質量有り)

第 6 図に示すが、15kHz ~ 80kHz までの帯域で安定した感度を得られることが分かる。

3.1.2 高速計測・高速解析手法の開発

工場設備などの操業停止時間を最小限に留めるためには、現場での計測対象物の占有時間の短縮や迅速な結果出力が必要である。このため、現場計測についてはセンサー替えを自動で行うハードウェアの開発、結果解析については計算プログラムの見直しなどソフトウェアの開発を行った。

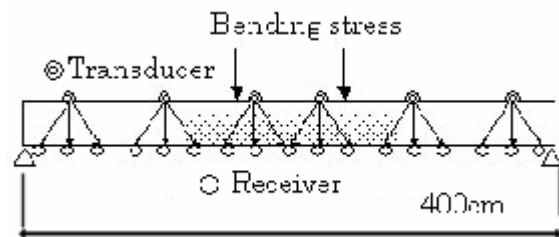


第 7 図 波形の自動読取り方法

波形解析の一部である波形読取り

は“受信波形から初動時間と振幅を読取る作業”であり、これまでは目視で読取りを行う必要があったが、ノイズと到達波の分離を正確に行うことで自動化を図ることができた。第 7 図にこの概念を示す。まず、受振信号の最後尾などの無信号部分でノイズレベルを統計的に評価し、得られたノイズの閾値を越える最初の波を初動波として抽出する。抽出した初動波の到達時間とその振幅を記録し計算に用いることとした。これにより数分(従来の 1/10 以下)で読取り作業を完了すると共に、目視による客観性の低下を回避できるようになった。

計測断面の再構築は“計測結果の逆計算により断面内部の速度分布、減衰率分布を求める作業”であり、CPU 速度に劣るパソコンでは繰返し計算に数時間がかかっていた。地盤調査では、計測範囲が広いため断面の不均一性が大きく、また波線の屈曲が起りやすいため、正確な計算を行うために計算時間の長い特異値分解法を用いていた。しかし、構造物設備診断においては、計測範囲が狭く、不均一性も地盤より単純であること、発振波は超音波に近い直進性を持つことの 2 点を考慮し、音は直進すると仮定、断面をメッシュで分割し、個々のメッシュの中を通る波線群から統計的手法を用いてメッシュの代表値を決定し、波線が通らない部分を Kriging と呼ばれる補間法を用いてスムージングすることとした。これらの改良により、通常は数時間かかっていた解析時間が 1 時間以内となり現場での結果出力が可能となった。



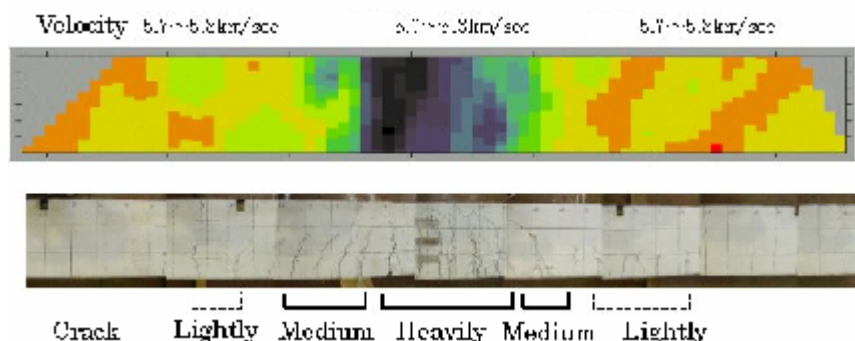
第 8 図 試験 1: コンクリート梁による亀裂把握

3.2 実証実験

実証実験には曲げ試験後のコンクリート梁および曲げ応力を付加して亀裂を入れた H 鋼を用いた。

3.2.1 試験 1: コンクリート梁内部の亀裂把握

実験に用いた梁は縦、横 30cm、長さ 400cm で、中央部 100cm 程度に曲げ試験による亀裂が卓越している。第 8 図にこ



第 9 図 試験 1: コンクリート梁による亀裂把握の結果
上側: 梁内部の速度分布図
下側: コンクリート梁の外観写真

れを示す。センサーは梁の長手方向中央部の両側に設置した。発振点は6点、受信点は18点であった。第9図に計測結果として速度分布図を試験体の写真と合わせて示す。中央部の亀裂が卓越した部分では端部の健全な部分に比べて速度が0.4～0.8km/sec 低下しており、また、目視で確認した亀裂数と速度変化には良い相関が認められることがわかる。最新の計測結果では計測距離を10m以上まで拡大することができており、構造物壁体等における一次診断への展開が期待される。

3.3.2 試験2:H鋼ウェブ内部の亀裂把握

実験に用いた H 鋼は高さ 215mm、幅 315mm、ウェブ厚 15mm、フランジ厚 32mm、長さ 2,000mm であり、亀裂は左端から 505mm、1455mm の 2 箇所であった第 10 図)。比較用に同寸法の亀裂のない H 鋼の計測も行った。本試験は H 鋼内部を逆計算により可視化するのではなく、亀裂の有無を簡単に把握できるかどうかを検証する目的で実施した。写真 2 に示す通り、センサーはウェブの両端から 5mm の位置に設置し、表面波を用いた計測を行った。センサー間距離は

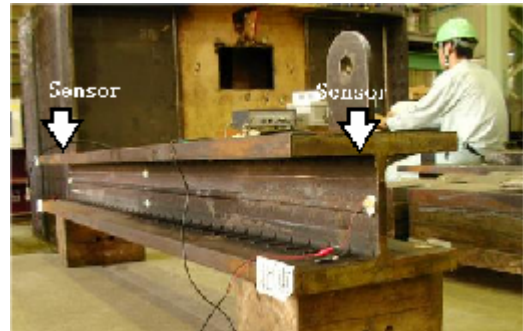
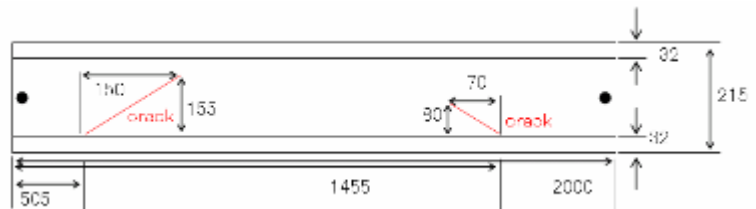


写真 2 試験 2:H 鋼ウェブ内部の亀裂把握

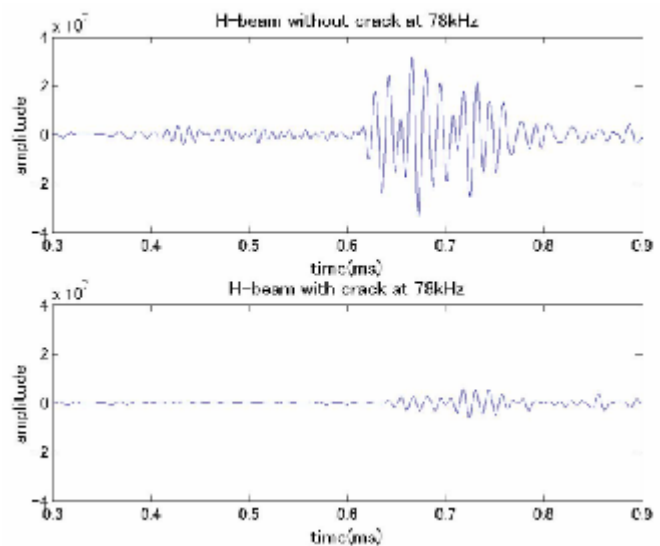
1,990mm であった。計測結果として受信波形を第 11 図に示す。亀裂のない H 鋼では 0.62ms 付近で波の到達が確認できた。これは鉄の横波の速度 3240m/sec からすると妥当な値であると言える。一方、亀裂のある H 鋼では 0.72ms 付近に到達波が確認できたが、亀裂の影響により亀裂のない H 鋼と比較して 1/10 程度の振幅しかないことが分かる。最新の計測結果では 10m 以上の構造物でも計測可能であることが分かっている。



第 10 図 試験 2:H 鋼ウェブ内部の亀裂把握

4.まとめ

地盤調査手法として開発した音響トモグラフィを構造物設備診断に適用するために、センサー、計測・解析手法の改良を行った。コンクリート梁、H 鋼を用いた実証実験においては、亀裂の有無に対応した結果を得ることができた。今後の課題として、寸法、亀裂や空洞などの欠陥の種類を変えたデータの蓄積と分かり易い結果の解釈、現場計測に対応した耐久性、携帯性に優れた計測システムの開発、の 2 点が上げられる。



第 11 図 試験 2:H 鋼ウェブの亀裂把握の計測結果

上側:亀裂のない供試体、下側:亀裂のある供試体