

音響トモグラフィを用いた構造物設備診断技術

Applying Geo-acoustic Tomography to Equipment and Structure Diagnoses

榎原 淳一 SAKAKIBARA Junichi JFE シビル 橋梁土木事業本部
田中 真人 TANAKA Masato JFE シビル 橋梁土木事業本部
田近 久和 TAJIKA Hisakazu JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(副課長)

要旨

音響波 (kHz オーダー) を用いた地盤調査手法である音響トモグラフィは、高精度、広範囲な計測、減衰率分布という新しい情報を入手できるユニークな手法である。本手法を構造物設備診断に適用するため、センサーの小型化 (10 g)、周波数特性の改善 (15 kHz~80 kHz) と計測・解析システムの自動化、高速化を行った。本システムを用いた実証実験では、コンクリート梁内部の速度分布において、曲げ試験によって発生した亀裂部分での速度低下 (0.4~0.8 km/s) が認められ、また、人工的に亀裂を発生させた H 鋼では速度低下だけでなく振幅の減少 (1/10) を確認することができ、本システムが構造物設備診断に適用可能であることが分かった。

Abstract:

Geo-acoustic tomography is a unique underground investigation-method which is characterized by high resolution and broad area-coverage. To apply this method to equipments and structures diagnoses, acoustic sensors have been improved downsized (10 g and 15-80 kHz) suitable to set up onto the surface of the structures. Automatic measurement and processing system are also improved to minimize the suspension time of plant operation. Two demonstration experiments showed that P-wave velocity in fractured part of PC beam becomes slower (0.4-0.8 km/s) and P-wave amplitude through cracked part of H beam becomes smaller (10%). These results prove that this new method has applicability to be used for the equipment and structure diagnoses.

1. はじめに

構造物や地盤を非破壊で可視化することは、構造物の健全性や地盤の安全性の評価を行う上で大変効果的である。しかし、医療用 CT や資源開発に用いられる地震探査に代表される物理探査によるトモグラフィ手法は、(1) 非破壊である、(2) 内部の断面画像を得られる、(3) 継続的な監視が可能というような長所を持つ反面、(4) 計測精度が低い (地震探査)、(5) 得られる情報と実際の関連づけが難しい、(6) コストが割高という短所もあり、医学以外の分野では技術の浸透が進んでいないのが現状である。

JFE シビルは、1991 年から米国マイアミ大学と共同で、海中探査に用いられる特殊な音響信号をベースとした「音響トモグラフィ」と呼ばれる地盤探査手法^{1,2)}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弾性波」と「正確な計測を基にした解析手法」によって特長とし、現場に適用可能な計測範囲と精度、計測結果と地盤定数との関連づけを解決した画期的な技術である。1999 年頃

までは地盤探査を目的とした開発を行ってきたが、「防災、補修」というような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、現在はこれに対応する技術開発も行っている。本論文では、この音響トモグラフィの概要と最近取り組み始めた構造物設備診断への適用について述べる。

2. 音響トモグラフィについて

2.1 音波を用いた探査手法における位置付け

Fig. 1 に音波を用いた主な探査技術を、計測精度と計測範囲について分類して示した。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分かる。たとえば、計測周波数 10 Hz~100 Hz 程度の低周波領域を用いる地震探査は、計測範囲は 100 m~1 km、計測精度は 10 m 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~10 cm、計測精度は 1 mm~1 cm 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

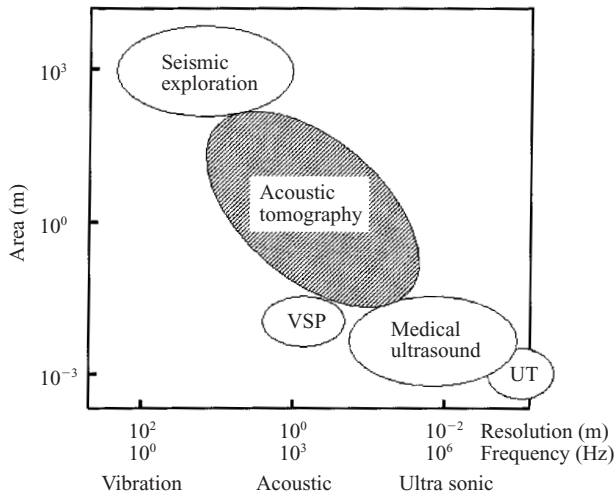


Fig. 1 Non destructive exploration method by using acoustic wave

0.1~2 m 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 (1), (2) 式に示す粘性減衰により、周波数に指数関数的に比例した減衰が起るため、現場に適用するには計測範囲が不十分 (たとえば、飽和した砂層中では 1 kHz で数メートル程度) であったことが理由である。

$$A = A_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot r) \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = (Q^{-1} \cdot f) / V \dots\dots\dots (2)$$

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

本論文で述べる音響トモグラフィは、「精度が良い」という音響波の特長を生かしながら、計測範囲を現場で適用可能な範囲 (~200 m) まで広げることができる新しい技術である。

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 Fig. 2 に示す。圧電効果を用いた発振器 (ピエゾ震源) を地盤内の計測孔に設置して、地中に音響波を伝播させ、多チャンネル受信器 (ハイドロフォンアレイ) により受信し、計測結果として「到達時間」と「受波音圧」を得る。これらから、地盤内の弾性波速度と振幅減衰率分布を計算により求め、計測孔間の地盤断面を可視化することができる。従来にはなかった、「ピエゾ震源と疑似ランダム信号を組み合わせた発振方法」を開発することで音響波を用いた高精度な計測を、現場に適用可能な計測範囲で行うことが可能となった。

音響トモグラフィで採用している疑似ランダム信号³⁾は、

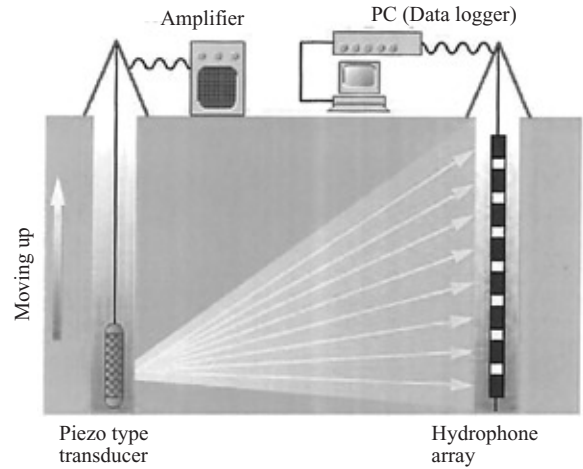


Fig.2 Geo-acoustic cross-well tomography

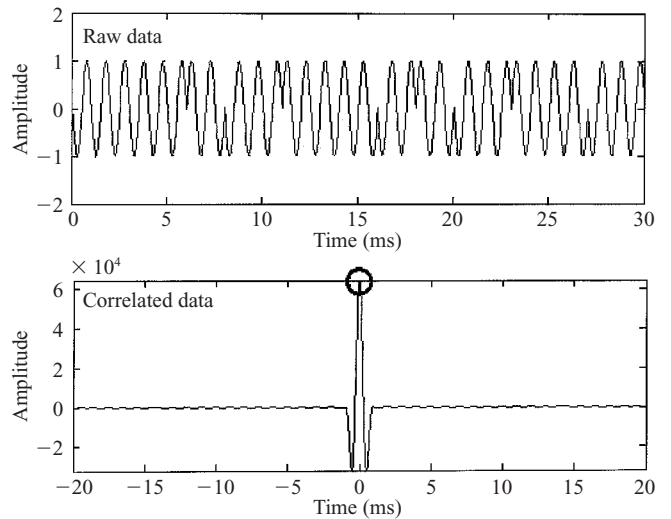


Fig.3 Pseudo random binary sequence signal

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 Fig. 3 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、読み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を組み合わせて用いることで、(1) 振幅の SN 比を約 65 000 倍に向上 (コード長 4 095, サンプル数 16/ 波長の場合), (2) 計測結果として周波数を制御したパルス波を得る, (3) 発破震源や打撃震源と比較してはるかに再現性の高い計測を実現することができた。

Fig. 4 は直径 1.6 m の実験土槽内で計測した受振波形であるが、左の発振周波数 31 kHz の方が、右の発振周波数 6 kHz よりも短い波長の計測、言い換えれば高分解能を持った計測ができていることが分かる。このように周波数の制御が簡単にできると、計測対象物の寸法に対応して周波数を変えることができるため、計測範囲 100 m の実地盤から、

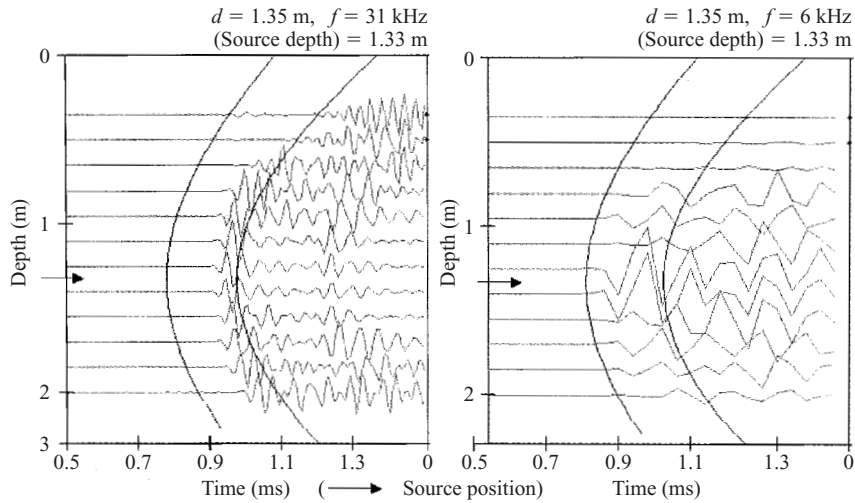


Fig.4 Received waves at 31 kHz (left) and at 6 kHz (right) in saturated sand

計測範囲数 10 cm のコンクリート構造物まで寸法に関する制約をほとんど受けない。

2.3 地盤調査におけるこれまでの実績

Fig. 5 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 66 m, 55 m, 計測深度 65 m）をボーリング結果および標準貫入試験結果（JIS A 1219）と比較して示した。速度分布図からは速度 1.5 km/s 以上の砂層と 1.5 km/s 以下のシルト～粘性土層、減衰率分布から G.L.-30 m, G.L.-60 m 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していることが分かる。

Fig. 6 は断面内の同位置における速度と減衰率の値を比較して示したものである。断面内の地層には、波線矢印で

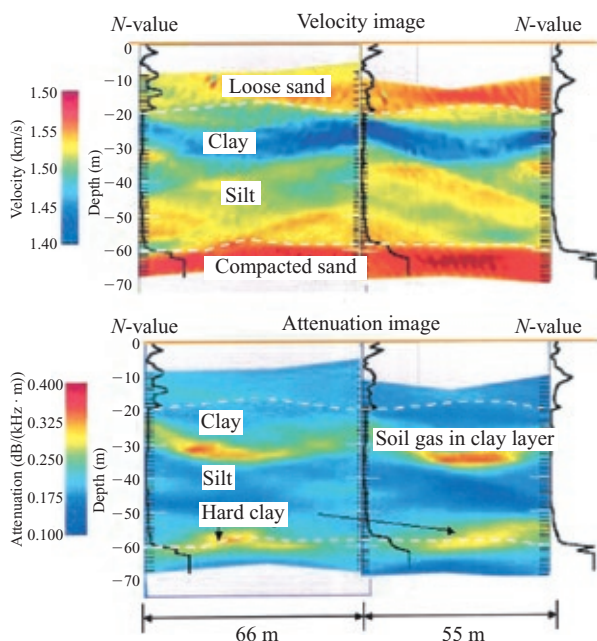


Fig.5 Velocity and attenuation images in Tokyo Bay

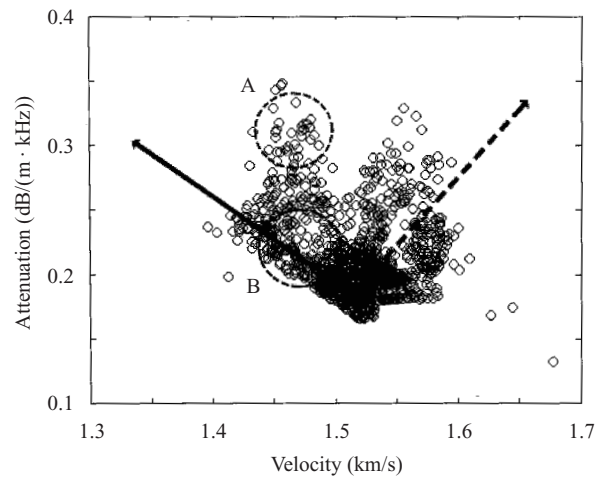


Fig.6 Velocity vs. attenuation of sand and clay layer with soil gas

示す「高速度 - 高減衰率」- 「低速度 - 低減衰率」と、実波線で示す「高速度 - 低減衰率」- 「低速度 - 高減衰率」の 2 つの傾向が認められるが、これは前者が砂と粘性土の違い、後者が飽和土と不飽和土の違いを表していると考えられる。また、音速が同じであるため評価・分離ができない有機ガスによる低速度部 A と粘性土による低速部 B の違いも明瞭に判断できることが分かる。

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るが、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

Table 1 Break through point for applying to equipment diagnosing

項目	地盤計測	構造物設備診断
発振器・受信器	孔内型であり、寸法の制約は外径のみ	対象物の寸法に合わせて小型化する必要あり
計測時間	現場工程の制約はあるが、1日単位で専有可能	現場作業のため終日専有することは困難
解析時間	設計などに用いるため、計測終了、2、3日後	現場で結果を出力し対策を講じる必要あり
運搬性	計測車を使用可能	構内での計測が多いため、人手で運搬

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、いず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、Table 1 に示すように、センサーの小型化、計測および解析時間の高速化という課題を克服する必要がある。

3.1 計測装置の開発

センサーの小型化は、構造物に貼付けることが容易な形状と重量を念頭に複数のメーカーの製品を検討した結果、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。Photo 1 に地盤探査用の水中マイクロフォン（右）と比較して示したが、水中マイクロフォンより小さくて軽いため、構造物への設置に適したセンサーであることが分かる。しかし、この素子は単体では使用帯域が1 MHz 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とした。試験の結果、10 g の付加質量をセンサー背面に設置することで15 kHz～80 kHz まで安定した感度を得られることが分かった。この結果を Fig. 7 に示す。水中マイクロフォンとほぼ同程度の感度を持つことが分かる。

3.2 高速計測・高速解析手法の開発

設備の操作を停止する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切替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。Table 2 に主な変更点をまとめた。

波形読み取りは、受信波形から初動時間と振幅を読み取る作業であり、これまでは目視で読み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。Fig. 8 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、得られたノイズのしきい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

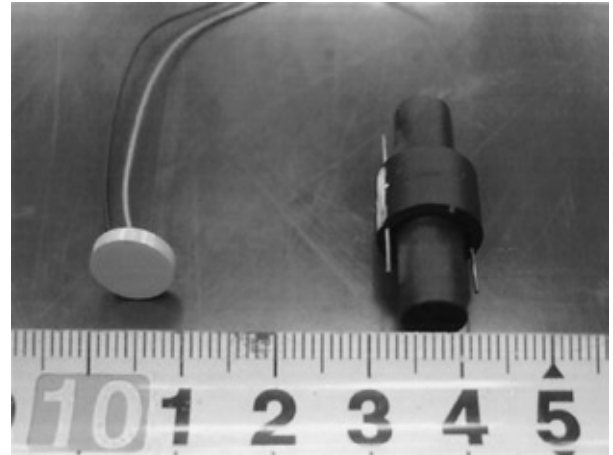


Photo 1 Piezo-electric sensor (Disk type (left), and hydrophone (right))

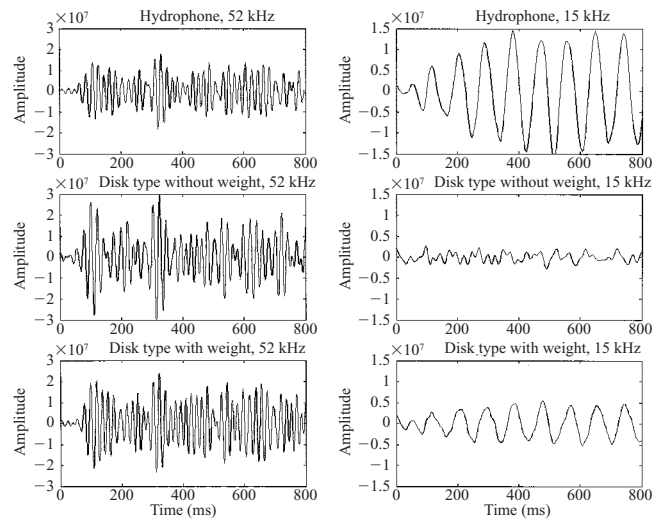


Fig. 7 Comparison of sensitivity

来の1/10以下)で読み取り作業を完了するとともに、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り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³⁾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ため

Table 2 Improvement of data acquisition and processing system

変更点	地盤調査	構造物設備診断
発振・受信センサーの切替	手動	自動 (コンピュータが指示)
波形読み取り	半自動 (一部は目視)	完全自動
逆計算 (断面の再構築)	波線が屈曲することを許可し、最小二乗法による繰り返し計算を実行	波線は直進することを可能とし、繰り返し計算による誤差の最小化を行わず

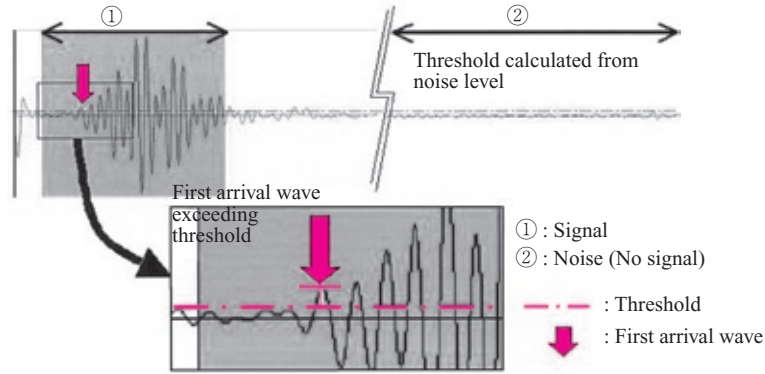


Fig. 8 Picking up method of first arrival wave

直進性を持つことの2点を考慮し、(1)音は直進すると仮定、(2)断面をメッシュで分割し、(3)ある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、(4)波線が通らない部分をKriging⁴⁾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1h以内となり、現場での結果出力が可能となった。

3.3 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。この結果について、以下に述べる。

試験1：コンクリート梁

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き裂が卓越している。Fig. 9にこれを示す。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。Fig. 10に逆計算結果を試験体の写真と合わせて示す。中央部のき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/s低下している。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分かる。

試験2：H鋼ウェブ内部のき裂把握

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2000mmであり、亀裂は左端から505mm、1455mmの2ヶ所

あった(Fig. 11)。比較用に、同寸法のき裂のない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。Photo 2に示すとおり、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1990mmであった。計測結果として、受信波形をFig. 12に示す。き裂のない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/sからすると、妥当な値であると言える。一方、き裂のあるH鋼では、0.72ms付近に到達波が

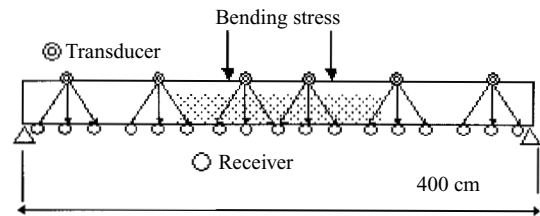


Fig. 9 Crack detection in pre-cast concrete for Experiment 1

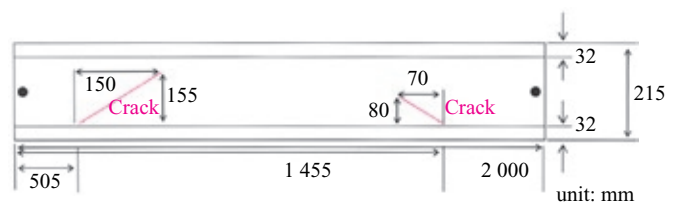


Fig. 11 Crack detection in H beam for Experiment 2

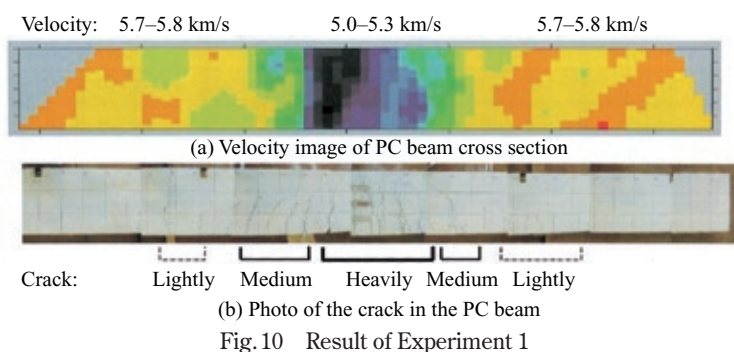


Fig. 10 Result of Experiment 1

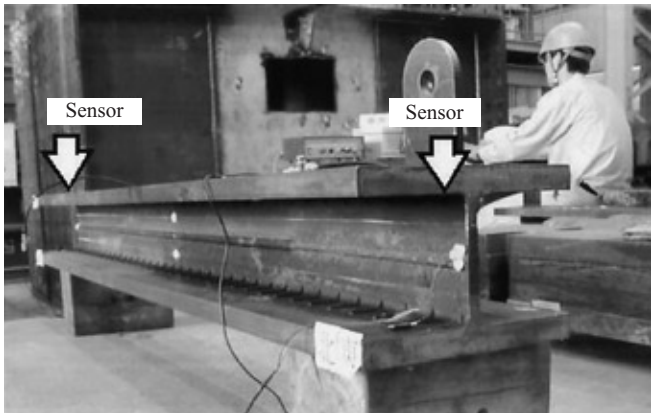


Photo 2 Crack detection in H beam by Experiment 2

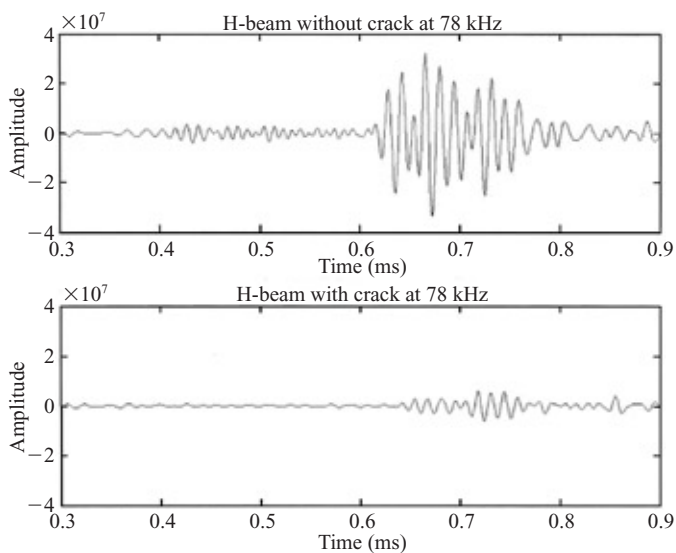


Fig. 12 Measured wave through H beam in Experiment 2

確認できたが、き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。

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、き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、(1) 寸法、き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やすい結果の解釈、(2) 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。

参考文献

- 1) 榑原淳一. 音響トモグラフィを用いた新しい地盤評価技術. 基礎工. vol. 33, no. 9, 2005, p. 81-83.
- 2) Yamamoto, Tokuo. Porosity, permeability, shear strength: Crosswell tomography below an iron foundry. Geophysics. vol. 59, 1994, p. 1530-1541.
- 3) Cunningham, Allen B. Some alternate vibrator signals. Geophysics. vol. 44, issue 12, 1979, p. 1901-1921.
- 4) Bregman, N. D.; Bailey, R. C.; Chapman, C.H. Crosshole seismic tomography. Geophysics. vol. 54, 1989, p. 200-215.
- 5) Oliver, M.A.; Webster R. K. A method of interpolation for geographical information system. Int. J. Geogr. Inf. Sci. vol. 4, 1990, p. 313-332.



榑原 淳一



田中 真人



田近 久和