

# 高周波数の波の振幅減衰を用いた構造物の非破壊診断

## Nondestructive Diagnosis for Existing Structure by Using Amplitude Attenuation of High Frequency Wave

榊原 淳一 SAKAKIBARA Junichi JFE シビル 音響トモグラフィ事業推進プロジェクトチーム 副部長  
米沢 洋 YONEZAWA Hiroshi JFE シビル 音響トモグラフィ事業推進プロジェクトチーム 課長

### 要旨

高度経済成長時代に建設された構造物は老朽化が問題となっており、早急な点検が必要となっている。本研究では、周波数を制御した疑似ランダム波を用い、振幅減衰に着目することで、供用中の設備を短時間で点検できる手法を開発した。コンクリートブロックを用いた実験では、速度分布では把握できなかった亀裂や空洞などの欠陥を減衰率分布から把握できることを実証した。また、クレーンランウェイガーダーにおける実験では、設備が稼働中でも足場を用いずに亀裂の長さやおよその位置を短時間で把握できることを実証した。

### Abstract:

Urgently inspection and maintenance works are required for structures and facilities which were built during high economic-growth period since they started aging. In this study the authors developed a new nondestructive diagnosis method by using amplitude attenuation of high frequency pseudo random wave. The experimental results show cracks and voids in the precast concrete block are detectable by attenuation image and cracks in the crane runway girder are detectable in a short time without using a scaffold even under crane operation.

### 1. はじめに

高度経済成長が始まったとされる 1955 年から 50 年以上が経過し、その当時に建設された構造物の老朽化に伴う安全性の低下が問題となっている。たとえば、橋長 15 m 以上の橋梁、約 15 万橋のうち耐用年数の目安である 50 年を超えるものは 2016 年の時点で約 20% もあるといわれている<sup>1)</sup>。また、製鉄所においても操業開始から 40～50 年を超える設備が増えてきており、確実な点検の実施が急務となっている。しかし、(1) 供用中の橋梁や設備の点検は通行や操業との調整が必要となり作業を進めにくいこと、(2) 点検すべき数量や箇所が多過ぎるため、従来の超音波探傷や磁粉探傷では点検に時間とコストがかかり過ぎること、(3) 目視や打音による点検は熟練が必要であり客観性と正確性に欠けることなどの理由から構造物の点検作業はなかなか進んでいない。

これらの問題を解決するためには、「広範囲を短時間で調査する客観的な一次スクリーニング手法」が必要と考えられる。たとえば、**図 1** に示すように、「詳細ではあるが調査範囲の狭い超音波探傷」と「広範囲ではあるが分解能の粗い弾性波探査」の中間に位置するべき調査手法が必要とさ

れている。既往の研究としては榊原ら<sup>2)</sup>が発振波の周波数を制御することでこの中間に位置する診断技術の可能性を示した。これは「高周波数の弾性波を用いた地盤探査手法<sup>3)</sup>」の発振・受信技術を構造物診断に適用したものである。この手法は任意の周波数と振幅を持つ疑似ランダム波<sup>4)</sup>を発振波として出力し、伝播速度と振幅減衰を必要な精度で計測するものである。本報は榊原らが示した適切な周波数での発振に加え、波の振幅減衰に着目することによるコンク

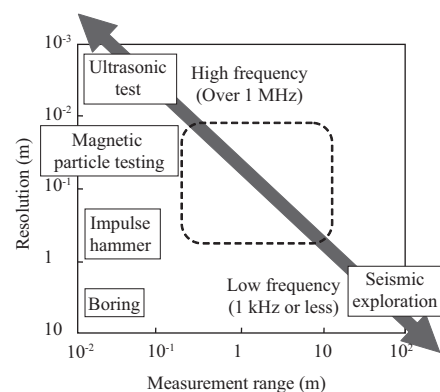


図 1 精度と調査範囲に関する既存手法の比較

Fig. 1 Comparison of diagnosis method from the viewpoint of resolution and measurement range

リート構造物や鋼構造物の非破壊診断への適用とその妥当性の検証、および実現場への試験的投入の結果について述べるものである。

## 2. コンクリート構造物診断

### 2.1 計測原理

コンクリート構造物を診断する目的は、施工不良の有無、鉄筋の腐食による内部破壊および亀裂の進展や、中性化による内部劣化などが挙げられる。しかし、従来の弾性波速度のみを評価する手法では、得られた速度の低下が材質に起因するのか、または内部劣化に起因するのかを判断することができない。地盤調査においては、速度と減衰率を同時に評価することの有効性が示されている<sup>5)</sup>。たとえば、**図2**に地盤中の伝播速度を用いた地層の分類について示しているが、速度だけでは「風化した岩と締まった砂」、また「緩い砂と固結した粘土」の区別ができない場合がある。一方、**図3**は伝播速度に加えて減衰率を用いた地層の分類について示しているが、減衰率の違いから砂、岩、粘土の違いを把握できるだけでなく、「岩盤内の亀裂の有無」や「砂や粘土内部の礫やガスの有無」が判別できることが分かる。ここで述べる減衰率とは(1)式、(2)式に示す $Q^{-1}$ を指しているが、物体内部を伝播する波は幾何減衰と異なる密度を持つ2つの物質の境界面における音の散乱・反射に起因する散乱減衰 $L_s$ 、この境界面において波が熱変換されることに起因する透過減衰 $L_t$ の影響も受ける<sup>6)</sup>。コンクリート構造物内部を伝播する波は空洞や亀裂などにおいて散乱減衰や透過減衰の影響を受け振幅が減衰すると考えられるため、これに着目した実験を行った。

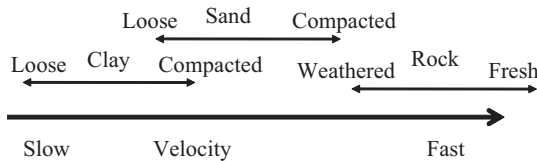


図2 速度による地層の分類

Fig. 2 Geological classification by velocity

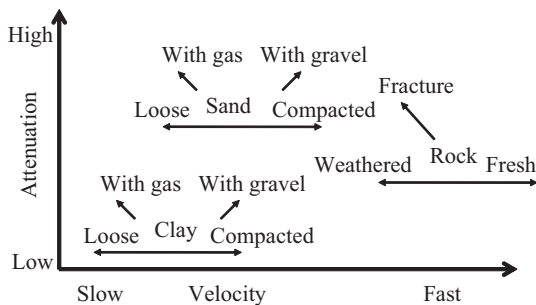


図3 速度と減衰率による地層の分類

Fig. 3 Geological classification by velocity and attenuation

$$A = A_0 - \log_{10} r - \alpha r \log_{10} e - L_s - L_t \dots\dots\dots (1)$$

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

$A$ : 受信音圧,  $A_0$ : 発振音圧,  $r$ : 伝播距離,  
 $f$ : 発振周波数,  $V$ : 伝播速度,  $Q^{-1}$ : 減衰率

### 2.2 検証実験

コンクリート構造物診断への適用性を検証するため縦1 m、横および奥行き0.9 mの鉄筋の入ったコンクリート試験体を用いた実験を行った(**図4**)。試験体には発泡プラスチック板を用いて模擬欠陥を設置した。本実験では、欠陥の種類として表面亀裂と内部欠陥、また亀裂や内部欠陥の大きさを実験パラメータとした。計測断面は2ケースあり、Case 1は深さ200 mmの模擬亀裂と $\phi$  300 mm、 $\phi$  100 mmの模擬空洞を含む断面、Case 2は深さ100 mm、400 mmの模擬亀裂と $\phi$  100 mmの模擬空洞を含む断面とした。使用した主な機器を**表1**に示す。発振器と受信器は図中に○印で示すようにアレイ式に30 mm間隔でともに31ヶ所に設置した。発振周波数は50 kHz、発振器への印加電圧は100 V<sub>rms</sub>であった。実験結果を**図5**に示す。図中、縦軸はセンサーの高さ方向の位置、横軸は発振器と受信器の水平距

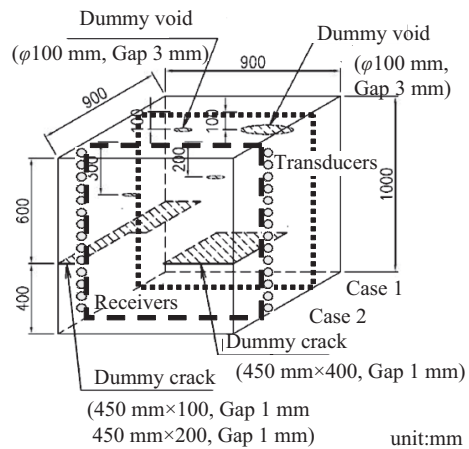


図4 コンクリート試験体の模擬亀裂とセンサー配置  
 Fig. 4 Layout of dummy voids and cracks of concrete specimen

表1 使用した主な機器  
 Table 1 Equipment list for experiment

Equipment	Specifications
Transducer, Receiver	$\phi$ 10 mm, Thickness 5 mm
Power amplifier	Bandwidth DC-100 kHz Output voltage 100 V <sub>rms</sub> (30 kHz)
Signal filter	Bandwidth 1-100kHz Output gain 1-100 times
Signal generator	Bandwidth 1-150 kHz
Data logger	Sampling frequency 1.2 MHz (1 Channel)

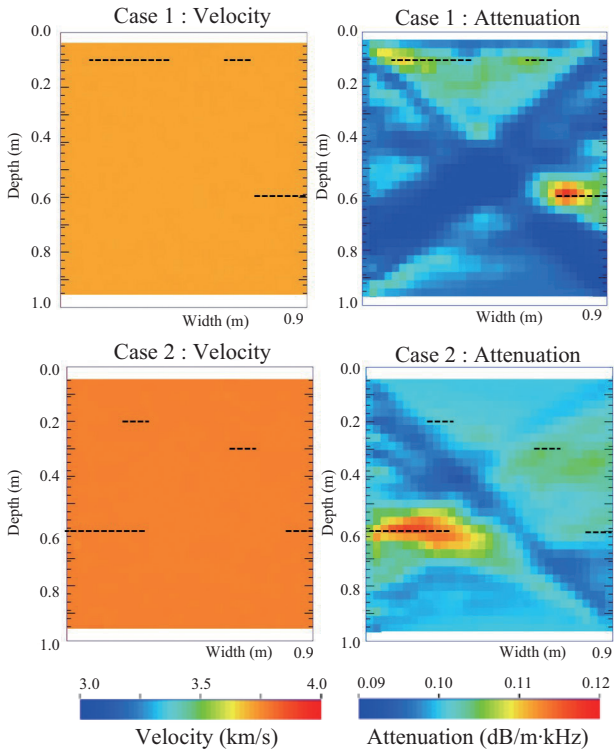


図5 実験結果

Fig. 5 Experimental result

離、水平な点線は断面内を横切る模擬亀裂と模擬欠陥を示す。同図から減衰率が0.11以上の部分と長さ20mm以上の亀裂や空洞の位置が一致していることが分かる。これは亀裂や空洞部分で散乱または透過減衰が生じたためと考えられる。長さ10mmの欠陥については明瞭な影響は認められなかった。また、速度は明瞭な変化をしていないが、これは波が減衰しながらもこれらの欠陥を透過してしまったためであると考えられる。さらに速度も減衰率も内部の鉄筋の影響を受けていないが、これは波長(約7cm)に比べて鉄筋の外径(約2cm)が十分に小さいためであると考えられる。以上のことから「振幅減衰を用いることで亀裂や空洞の位置や大きさが2次元的に把握できる」ことを結論として得た。

### 3. 鋼構造物診断(クレーンガーダー)への適用

#### 3.1 計測原理と基礎実験の結果

クレーンランウェイガーダー(以下、CRG)は製鉄所においては重要な設備の一つである。CRGの破断は重大な事故につながる可能性があるため確実な点検が必要であるが、稼働率が高く、台数が多く、高所にあり、点検しにくい設備であるため、操業を妨げずに短時間で点検する手法が求められていた。本研究では(1)最も危険な状態である下フランジ端部に発生する亀裂を探知する、(2)足場を使わず操業を止めない、(3)1スパン(約20m)全体を短時間で診断する

ことを目的としてガイド波<sup>7)</sup>を用いた点検技術を開発した。ガイド波は「実体波である縦波と横波が境界条件を満たすように材料を伝播した結果、見かけ上得られる波」であり、**図6**に示すように物体の境界面を伝播する。したがってフランジの端部(コバ面)を伝播するガイド波は端部に存在する亀裂の影響を受けると考えられる。そこで亀裂の有無や長さによる影響、およびCRGに設置されているガセットプレートの影響を把握するため**図7**に示す基礎実験を行った。試験体の長さは9000mm、厚みは20mm、板幅は400mm、亀裂長は0mm~100mm、模擬ガセットプレートの長さは0mm~200mmであった。**図8**に結果を示す。同図の振幅は亀裂長0mmおよびプレート長0mmの値により正規化してある。この結果から、亀裂が長くなると受信音圧は低下すること、200mm程度のガセットプレートでは

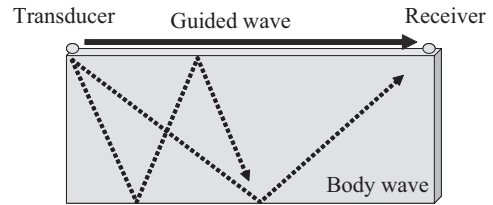


図6 ガイド波と実体波の伝搬の様子

Fig. 6 Schematic image of guided wave and body wave

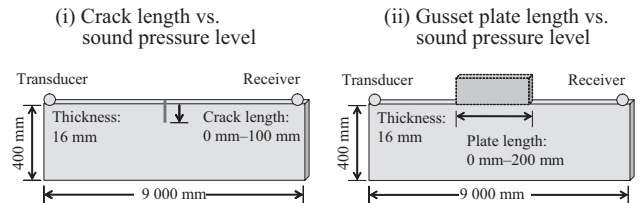


図7 基礎実験の概要

Fig. 7 Schematic images of fundamental experiment

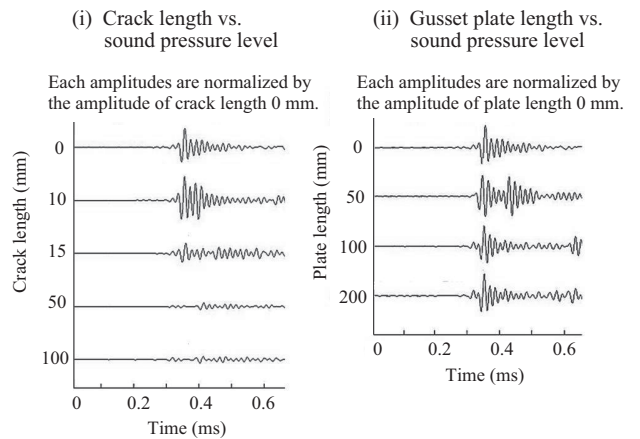


図8 基礎実験の結果  
(左 亀裂長の影響, 右 ガセットプレートの影響)

Fig. 8 Results of fundamental experiment

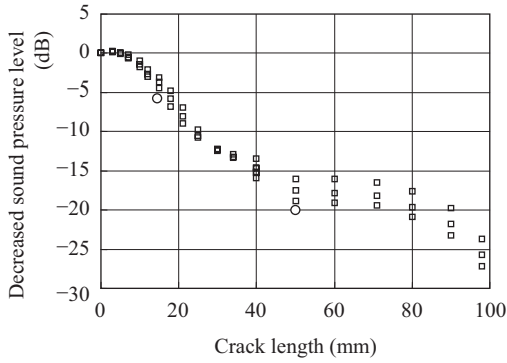


図9 亀裂長と音圧の低下量の関係

Fig. 9 Relation between crack length and decreased sound pressure level (Solid circles show results of Fig. 8.)

計測に影響を与えないことが分かった。

図9は板長が2000 mm ~ 15000 mm, 板厚が10 mm ~ 20 mm と異なる3つの試験片を用いて亀裂長を0 mm ~ 100 mm まで変えながら行った実験の結果を示している。縦軸に亀裂0 mm の結果を基準とした音圧の低下量, 横軸を亀裂長として示した。この結果から, 音圧は板長や板厚に関わらず亀裂長に応じて低下していることが分かる。図中○印は図8の結果をプロットしたものであるが, この結果ともよく一致している。

### 3.2 試作器の製作と現場での診断結果

現場への適用を検証するため試作器を用いた実証実験を行った。表1, 図10に試作器の概要をまとめた。まず, 伸縮する棒の先端に固定した発振器・受信器をフロア面から下フランジの端部(コバ面)にセットする。次にパーソナルコンピュータで作成した任意の周波数の疑似ランダム波を発振器から出力し受信器で受信する。機器はバッテリー駆動とした。また, 前項の結果を基に基準値から亀裂長20 mm 以上(12 dB 低下)を注意, 60 mm 以上(20 dB 低下)を警告とするしきい値を作成し点検結果の判定に用いた。

実験はCRGが頻繁に稼働している場所を選び実施した。実験結果の例を診断手順と合わせて図11に示す。図11の上図は, 縦軸に計測音圧, 横軸にセンサー間の距離, また,

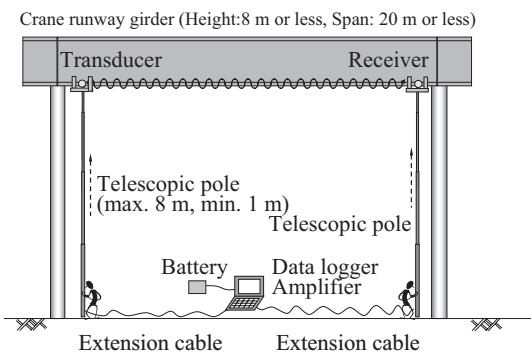


図10 試作器の概要

Fig. 10 Schematic image of diagnosis system

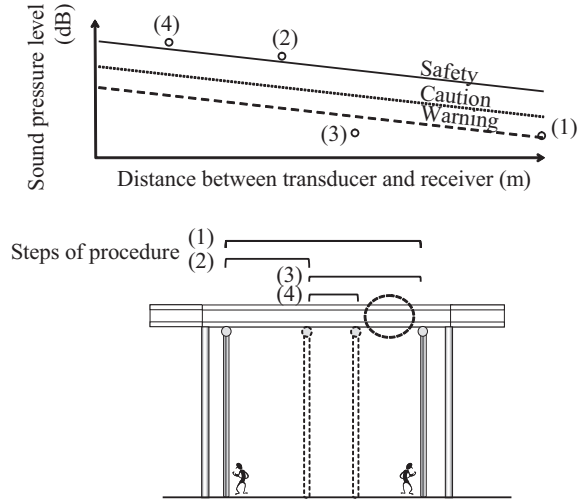


図11 診断結果の例

Fig. 11 Example of diagnosis results

3本の直線は上述のしきい値を基に, 上から基準値(安全), 注意(要監視), 警告(要対処)を示している。また, (1) ~ (4)の○印は実測値である。図11の下図は診断手順を示している。まず両端で診断し警告となったため(1), 次に左半分の診断を行い安全という結果を得た(2)。さらに右半分を診断したところ警告となったため(3), 念のために左半分を診断したところ安全という結果を得たため(4), 図中の点線円で囲む部分に亀裂があると推定した。磁粉探傷を行った結果, この位置に亀裂があることを確認した。本実験の結果から, 設備が稼働中でも足場を用いず, 亀裂の有無や長さ, およその位置を短時間で把握できることが分かった。

### 4. おわりに

本研究では周波数を制御した疑似ランダム波を用いて振幅の減衰を評価する手法を開発し, 実証実験の結果からコンクリート構造物内部の欠陥の把握やCRGのフランジ端部

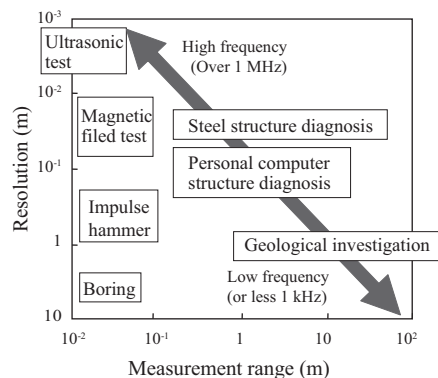


図12 精度と調査範囲に関する既存手法と本手法の比較

Fig. 12 Comparison of diagnosis method from the viewpoint of resolution and distance

(コバ面)に発生する亀裂の検知が可能であることが分かった。これにより、図1において空白であった部分を補填することができたと考えられる(図12)。CRG診断は一次スクリーニング手法として現場投入を開始しており、成果を上げつつある。

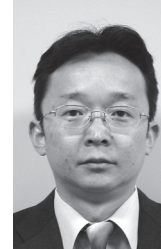
今後は機器の小型・軽量化および実績の蓄積による診断精度の向上に努めていきたい。また、さらに新しい適用分野を開拓することを目指して研究を続ける予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局. 新たな中期計画 参考資料. 2008-12-24. p. 11.
- 2) 榎原淳一, 田中真人, 田近久和. 音響トモグラフィを用いた構造物設備診断技術. JFE 技報. 2006, no. 11, p. 50-55.
- 3) 榎原淳一, 山本督夫. 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. 2009, vol. 65, no. 1, p. 97-106.
- 4) 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. 2006, no. 9-10, p. 12-16.
- 5) 榎原淳一. 減衰率トモグラフィを用いた地盤の可視化手法の開発. 第45回地盤工学研究発表会. 2010.
- 6) 佐々宏一, 芦田譲, 菅野強. 建設・防災技術者のための物理探査. 森北出版. 1993, p. 12-15.
- 7) 西野秀郎. 非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望. 非破壊検査. 2003, vol. 52, no. 12, p. 654-661.



榎原 淳一



米沢 洋