

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560493

研究課題名(和文)音響振動による大規模構造体中の欠陥の非破壊診断

研究課題名(英文)Nondestructive evaluation of a defect in a large scale structure by acoustic signal

研究代表者

安倍 正人(Abe, Masato)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：00159443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、防波堤として用いられているケーソンを対象に、複数のセンサと小型インパルスハンマを用い、打撃により発生した振動が欠陥から反射して返ってきた波を解析し、反射波の到来時刻から欠陥の位置を推定する方法である。ケーソンは複雑な構造をしているため、従来、実験結果を見ただけでは、正しい結果かどうか判断できなかった。そこで、有限要素法の一つであるFDTD法をケーソン解析に適用し、実験結果と照合する方法を確立した。この結果、実測値はFDTD法の結果とほぼ同じになることを示し、正しく欠陥の位置を推定できることが確かめられた。更に、遺伝的アルゴリズムを改良し、計算時間を約1/30に減少することができた。

研究成果の概要(英文)：The developed method estimates the propagation delays of reflection from boundaries of a structure or a defect, from which the location of the defect can be estimated.

We have also proposed the use of FDTD method for investigating the propagation delays by computer simulation, and found that the simulated results coincide well with the measured results. Furthermore, by modifying the GA algorithm, the computation time was reduced to about 1/30.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：信号処理 複数センサ 非破壊診断 遺伝的アルゴリズム FDTD法

### 1. 研究開始当初の背景

地震・台風等の災害があった場合、例えばビル、ダム、トンネル等に劣化があれば、これを検出する必要がある。特に、省資源など環境に配慮すれば、壊して作り直すのではなく修理して使うことが求められており、このために弾性構造体中の欠陥の有無だけではなく、欠陥位置の特定をも非破壊診断する技術が強く求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、欠陥の位置だけではなく、その大きさを計測するための技術を開発する。

そのために、境界要素法による数値シミュレーションを行う。そしてシミュレーションの結果と実験データとを比較することにより、欠陥の位置と大きさが反射波に及ぼす影響を調査する。そして、その結果から欠陥の位置だけではなく、その大きさを計測するための技術を確立する

### 3. 研究の方法

本研究では、欠陥の大きさと位置が異なるコンクリート構造体に対して、実験データを収集するとともに、同じ形状の構造体モデルに対して、境界要素法による数値シミュレーションを行う。そしてシミュレーションの結果と実験データとを比較することにより欠陥の位置と大きさを推定する技術を開発する。さらに開発した手法の有効性を実際に応用する。

本手法の応用例として、ケーソンという波消しのための大規模コンクリート構造体を例にとり、本手法の有効性を検証する。ケーソンは5m x 5m x 20m程度の筒状のコンクリート構造物で、沖合いの深さ15m程度のところに何十～何百個のケーソンを並べて内海を静かにさせるものである。ケーソンの中には重石として砂が入っており、波で容易には移動しないようになっている。また、実際の現場では、ケーソンの外側に三角のテトラポットが多数積まれている。このテトラポットが大きな波によって移動し、ケーソンにぶつかってケーソンに穴が開くという事故がときおり生じる。するとケーソンから重石としての砂が流出してしまい、ケーソンとしての役割が果たせなくなってしまう。そこで、ケーソンに穴が開いていないかどうか、また、砂が流出していないかどうかの診断と、穴が開いていれば、修理のために穴の位置を計測する手法が強く望まれている。しかし、穴は普通、海面より下に生じるため、危険防止の点から、海に入らずに検査する手法の開発が必要である。この場合は、従来の手法は全く利用できないため、我々が開発してきた打音法を、ケーソンの欠陥検査に応用するための研究を行う。このケーソンにおいて、センサが取り付け可能な位置は上部に限られ、その位置では境界からの反射波が無視できず、しかもその反射波と表面波がかなり近接し

て到来するため表面波と境界からの反射波はほぼ同時刻に到来するため両者を分離することが出来ない。表面波を推定するのに我々が用いている方法は最小2乗法を用いる方法で、パラメータを5つ用いている。ケーソンにおいては、近接する境界からの反射波と表面波を同時に推定する必要があるため、パラメータ数が10必要となり、大量の計算時間が必要となる。

従来は、パラメータを10個用いた場合で、1チャンネルのデータを解析するのに最近の最速のパソコンで約10日程度かかっていた。そこで、計算アルゴリズムとしてGA(遺伝的)アルゴリズムを導入し、高速化を図った。その結果、1チャンネルのデータを解析するのに約30分で解析できるようになった。しかし、それでも8チャンネルのデータを解析するのに1日かかるため、複数箇所の解析のためには更なる高速化が必須である。ところで、開発した解析アルゴリズムは並列処理できる構造になっているが、現在用いているパソコンはボードに1個のCPUのみが載っているものなので、現状のプログラムは並列性を有効利用していない。そこで、プログラムを並列処理できるように修正し、解析時間を短縮する。

### 4. 研究成果

(1) FDTD法によるシミュレーション法の開発  
有限要素法の1種であるが、過渡応答も解析できる手法であるFDTD法を用い、反射波の発生状況を確認できるようになった。

図1(a)は欠陥のないダムでの実測波形であり、図1(b)はFDTD法で同じ条件を仮定して作成した波形である。ほぼ同じ形状をしており、FDTD法でシミュレーション可能であることが分かる。

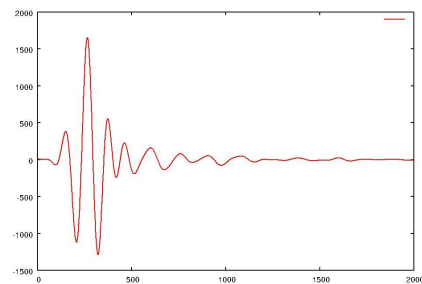


図1(a)ダムでの実測波形

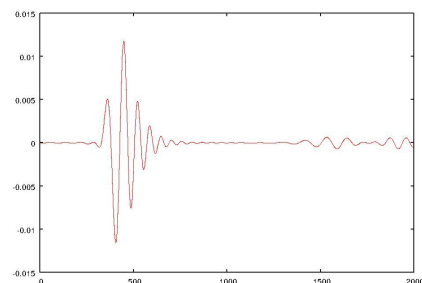


図1(b)FDTD法で作成した波形

こうして確認したFDTD法を用い、複雑な形状をもつケーソンをある程度単純化し、ケー

ソン境界や欠陥からの反射波の様子を詳細に検討した。図 2(a)に示すように、上部コンクリート蓋が存在する条件で、欠陥からの反射波が検出できるかどうかを検討した。その結果を図 2(b)に示す。

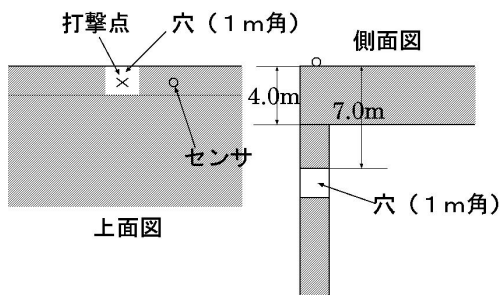


図 2(a)単純化したケーソンの形状

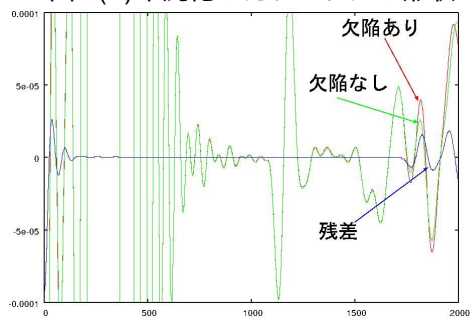


図 2(b)欠陥(穴)がある場合とない場合のセンサ波形

図 2(b)に示すように、欠陥(穴)からの反射波が確認できた。

### (2)解析プログラムの改良

我々が開発したいアルゴリズムは一種の逆フィルタで、図 1(a)の波形が入った場合に、1つのインパルスを出力するフィルタを実現するものである。しかし、実際のセンサ出力にはさまざまな周波数成分が含まれているため、従来のアルゴリズムでは、1つの反射波に対し、複数のインパルスが生じてしまい、正しい反射波の位置を同定できなかった。今回の研究において、適正な周波数範囲を詳細に調査した結果、1つの反射波に対し、1つのインパルスのみを出力できるようになった。

図 3(a)に示すケーソンで得られたセンサのうち、CH6 の波形の解析結果を図 3(b)に示す。

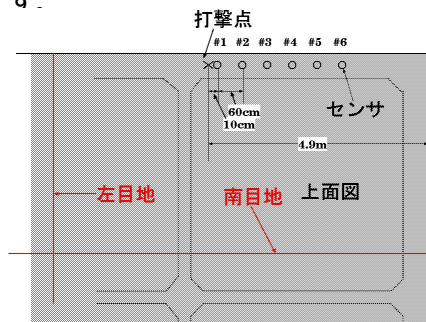


図 3(a)18 番函の上面図

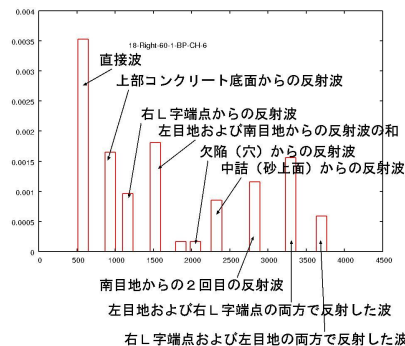


図 3(b)提案法による逆フィルタの結果

図 3(b)に示すように、ケーソンの形状から考えられる位置に正しくインパルスが現れていることが分かる。

### (3)遺伝的アルゴリズム (GA) の高速化

GA の高速化のために並列化できるように変更した。その結果、計算時間が 1/30 に減少し、従来3ヶ月以上かかっていた1函(6ch)のデータ解析を1週間で行えるようになった。更に GP/GPU を用いるようにアルゴリズムを修正したが、十分な時間短縮ができなかった。

### (4)実際のケーソンの解析

6個のセンサを用いて、各センサ出力波形から図 3(b)に示すようなインパルス列波形を作り、指向性合成により音源位置を同定した。その結果を図 4~図 6に示す。

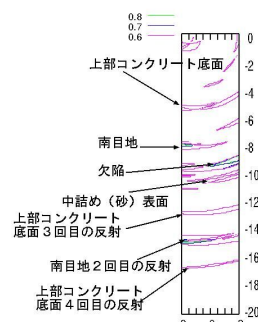


図 4 18 番函右の解析結果

図 4 は 18 番函右の解析結果である。実際に潜水して測定した欠陥の位置(9.4m)付近で、共通のインパルスが生じる確率が 0.8 以上(緑色)となっており、正しく推定できていることが分かる。一方、10.8m 付近でも 0.6 以上の値をもっているが、これは砂が流出しまった結果、残った砂の表面の位置(中詰位置)に相当する。

また、上部コンクリート蓋の底面位置(4m)付近、およびその整数倍の位置でも 0.6 以上の値をもっており、更に南側の目地の位置からの反射と考えられる位置でも 0.6 以上の値をもっていることが分かる。このうち目地に関しては、施工を工夫すれば作らないようにもできるということである。

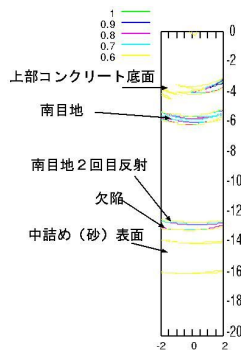


図5 21番函右の解析結果

図5は21番函右の解析結果である。実際に潜水して測定した欠陥の位置(12.7m)付近で、共通のインパルスが生じる確率が1.0以上(緑色)となっており、正しく推定できていることが分かる。一方、中詰め位置に相当する14.6m付近でも0.6以上(黄色)の値をもっている。

また、上部コンクリート蓋の底面位置(4m)付近、およびその整数倍の位置でも0.7以上の値をもっている。

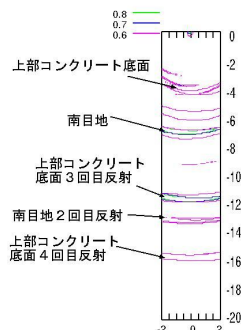


図6 21番函左の解析結果

図6は欠陥のない21番函左の解析結果である。共通のインパルスが生じる確率が0.6以上(ピンク)となっている位置は目地に関連する位置と上部コンクリート蓋の底面の位置に関連する位置だけである。

目地に関しては、施工を工夫すれば、目地がないケーソンも作れるということなので、今後は目地のないケーソンを作ることになると考えられる。

一方、上部コンクリート蓋に関しては、打撃位置を複数点選ぶと、上部コンクリート蓋の底面からの反射波の位置と欠陥からの反射波が重ならない条件を作ることができ、それら複数の結果を総合すれば、欠陥位置を同定可能であると考えられる。しかし、このためには検証実験が必要となる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

適応フィルタを用いたスピーカの高調波ひずみ率測定法の測定精度改善、藤岡豊太、永田仁史、安倍正人、

電子情報通信学会論文誌、J94-A、No.10、782-786 (2011)、査読あり

〔学会発表〕(計 5件)

Defect Detection in a Large Concrete Structure Caisson by Estimating the Reflection Wave Caused with an Impulse Hammer

Masato Abe, Toyota Fujioka and Yoshifumi Nagata, Proc. ICSV20 (Bangkok, Thailand, 2013.7.7-11) CD-ROM、査読あり

GPUとGAを用いた非破壊診断の高速化、桂川雄平、藤岡豊太、永田仁史、安倍正人、平成24年度情報処理学会東北支部研究会、資料番号12-3-1、平成24年12月22日、査読なし

Reduction of computation time using Graphic Processing Unit for the detection of a crack in a large scale concrete structure, Yuhei katurakawa, Toyota Fujioka, Yoshifumi Nagata, Masato Abe, ACOUSTICS 2012 HONG KONG Conference and Exhibition, 2012.5.17, Hong Kong Convention and Exhibition Centre, CD-ROM, 査読あり

FDTD法によるコンクリート構造体の弾性振動波形の解析、山田哲大、藤岡豊太、永田仁史、安倍正人、資料番号11-4-15、査読なし、平成23年度第4回情報処理学会東北支部研究会、平成23年12月22日

コンクリート構造体の非破壊診断のためのGAアルゴリズムのGPUによる高速化、田口慎、藤岡豊太、永田仁史、安倍正人、資料番号11-4-16、査読なし、第4回情報処理学会東北支部研究会、平成23年12月22日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安倍正人 (ABE, Masato)  
岩手大学・工学部・教授  
研究者番号：00159443

### (2) 連携研究者

佐藤雅弘 (SATO, Masahiro)  
富山大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：90132563

永田仁史 (NAGATA, Yoshifumi)  
岩手大学・工学部・准教授  
研究者番号：40301030

藤岡豊太 (FUJIOKA, Toyota)  
岩手大学・工学部・助教  
研究者番号：60292174