

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06100

研究課題名(和文) 時間領域有限差分法による推定センサ信号を用いた非破壊検査法の研究

研究課題名(英文) Study of non-destructive inspection method using the estimated sensor signal by FDTD method

研究代表者

藤岡 豊太 (Fujioka, Toyota)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：60292174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、時間領域有限差分法(FDTD法)による波動伝搬シミュレーションを我々の提案している衝撃弾性波法による大型コンクリート構造体の非破壊検査法に適用し、さらなる検査精度の向上を実現する手法の研究開発を行った。期間内における研究の結果、我々はFDTD法によって推定される波動伝搬を活用し検査精度を向上させることができることを明らかにした。さらに、FDTDにより検査時のセンサ信号を推定することができ、この推定センサ信号と測定センサ信号と組み合わせることで、さらなる検査精度の向上が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We conducted research and development of the new method to improve inspection accuracy of the non-destructive inspection method for large scale concrete structure by using impact elastic wave method and Finite-difference time-domain method (FDTD method). In this research duration, we validate that the estimated wave propagation by FDTD method can improve inspection accuracy of our propose non-destructive inspection method. Moreover, we validate that FDTD method can estimate the sensor signal by our proposed non-destructive inspection. Improvement of the further inspection accuracy can be expected by combining and using the estimated sensor signal and the measured sensor signal.

研究分野：音響信号処理

キーワード：非破壊検査 コンクリート 衝撃弾性波法 FDTD法

### 1. 研究開始当初の背景

(1) ビルやダム、防波堤などの大型コンクリート構造体は、地震や台風などの災害だけでなく、経年劣化によっても構造体内外に破損が発生する。コンクリート内部の破損などのための非破壊検査法には様々な方法があるが、ケーソンなどでは深い位置に破損が生じるため超音波法や AE 法での検査は困難であった。そこで我々は、インパルスハンマによる衝撃弾性波を用いた新たな非破壊検査法を提案している。

(2) 提案検査法は、構造物表面に加速度センサを複数設置しセンサ付近をインパルスハンマで打撃することで、破損箇所からの反射波とインパルスハンマの加振力の両方を用いて、深部にある破損箇所の位置と大きさを高精度で診断する検査法である。ハンマによる衝撃弾性波は超音波に比べ低周波でパワーが大きくコンクリートの深いところまで届くため、ケーソンのような深い位置にある亀裂などを検査するのに適している。しかし、センサ信号には縦波、横波、表面波が存在し、それらは構造体形状によって多様な反射・回折を繰り返しながら、破損箇所からの反射波とともにセンサに到達する。そのため、構造体内部の破損箇所からの反射波とその他の反射波の判別が困難な場合がある。さらに、コンクリート内部からの様々な反射波にくらべ表面波の信号パワーのほうが大きく減衰しにくいいため、必要な反射波成分を得るためには表面波の影響を除去する手法も必要である。そこで、これらの問題に対処するために、衝撃弾性波が構造体内および表面をどのように伝搬するのかを把握する必要性が生じた。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、提案検査法において時間領域有限差分法 (FDTD 法) を用いてコンクリート構造体の衝撃弾性波伝播のシミュレーション解析を行い、その結果から生成される推定センサ信号を測定センサ信号とともに利用することで、検査時に測定される信号中から破損部に起因する反射波成分のみを抽出し、検査精度の向上を図ることが目的である。

(2) 構造体内に破損がなく形状・サイズが既知な構造体での推定センサ信号を求めることにより、推定センサ信号と測定センサ信号との差異から縦波、横波、表面波による様々な部分からの反射波の影響を考慮することなく破損の有無を容易に判別でき、さらに破損箇所から起因する反射波成分のみをよりはっきりと抽出できる。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では、破損箇所からの反射波成分を効率的に抽出するため、FDTD 法によるコン

クリート構造体の衝撃弾性波解析から生成された推定センサ信号が、実際の測定センサ信号をどれだけ正しく再現できるかどうか、またどのような条件であれば正しく再現できるかについて、実際のコンクリート構造体を用いることで詳細に解析を行う。そして、破損箇所からの反射波成分のみの抽出についての検証を行う。

(2) 研究当初期間は、我々の研究グループが所有している比較的形状が簡素な実験用コンクリート構造体サンプルを対象とし、測定実験とともに FDTD 法による衝撃弾性波解析から生成される推定センサ信号の評価・検討を行う。その後、さらに大型で実用的なコンクリート構造体であるケーソンを対象とした解析と検討を進めていく。

(3) さらに、検査対象としてプレストレストコンクリート橋 (PC 橋) を構成するセグメント部材も使い、比較的小型なコンクリート構造物に対してもその有用性について検証を行う。

### 4. 研究成果

(1) 本研究では、今までに行った測定実験結果を対象に、始めにダムおよびケーソンについて FDTD 法を用いた波動伝搬シミュレーションを行い、提案非破壊検査法における FDTD 法による解析の有用性についての検証を行った。

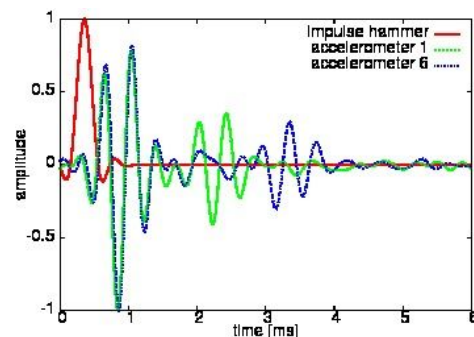


図 1 測定実験による打撃信号と測定センサ信号

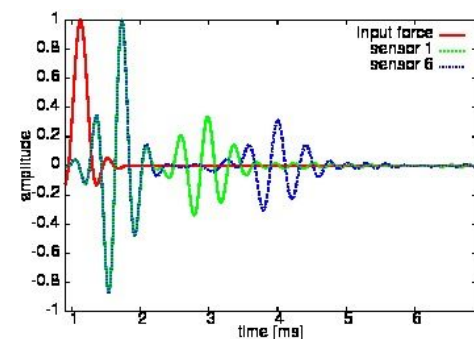


図 2 FDTD 法による入力信号と推定センサ信号

(2) ケーソンを検査対象とした場合について、その時の測定信号、また測定に用いたケーソ

ンの形状・サイズにおいて FDTD 法を用いた波動伝搬シミュレーションにより得られた推定センサ信号を各々図 1、図 2 に示す。図 1、図 2 から、ケーソンにおいては FDTD 法によって実際の測定センサ信号と同様の推定センサ信号が得られ、打撃による直接波だけでなくケーソン端からの反射波についても同じく確認できる。多くのコンクリート構造物には設計図があることから、その設計図を元に健全な構造物におけるセンサ信号を事前に FDTD 法を用いた波動伝搬シミュレーションにより推定しておくことにより、以降測定したセンサ信号との比較により、破損の有無の可能性についての簡便な検査が可能となり、さらに様々な破損のある状態のシミュレーションにより、破損の大きさや位置の推定精度の向上への寄与も期待できる。

(3) さらに、これまで検査対象としていたダムやケーソンと比べて小規模のコンクリート構造物として、PC 橋を構成するセグメントブロックにより作成された供試体を用い、提案非破壊検査法による測定実験、および FDTD 法を用いた波動伝搬シミュレーションを行った。ポストテンション方式による PC 構造物の場合、シースに PC 鋼を通しコンクリートに圧力を加えシース内にグラウトを充填することになるが、その際グラウトの未充填があるとその部分が空洞となり、そのことが後に PC 鋼の破断などの原因となる場合がある。本実験は、シース内のグラウト未充填部の検査が目的となる。

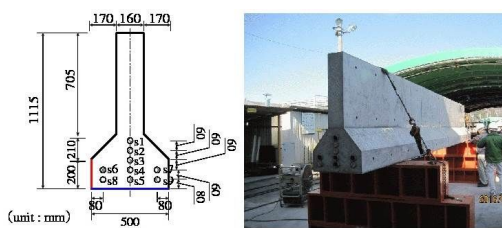


図 3 供試体概略図

(4) 非破壊検査実験に用いた供試体の形状を図 3 に示す。本実験では、シースの充填状態のことなる 5 種類の供試体を用いた実験と波動伝搬シミュレーションを行った。本実験では、供試体の下部（図 3 青線部）の左右シース直下に各 1 カ所、また同供試体左右のシース直側部に各 2 カ所の計 6 カ所に加速度センサを設置し、供試体下部の中間位置をインパルスハンマで打撃する方法で測定実験を行った。なお、5 種類の供試体は、図 3 左における全シース（s1～s9）が全て充填されている場合、またその他 s6 のみ未充填、s4, s6 が未充填、s4, s6, s7 が未充填、s1～s5, s6, s7 が未充填の場合である。

(5) 5 種類の供試体を検査対象とした場合について、その時の測定信号、また測定に用いたケーソンの形状・サイズにおいて FDTD 法を用いた波動伝搬シミュレーションによ

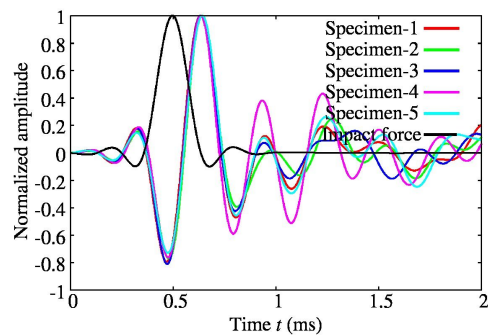


図 4 供試体の測定センサ信号（供試体 1～5）

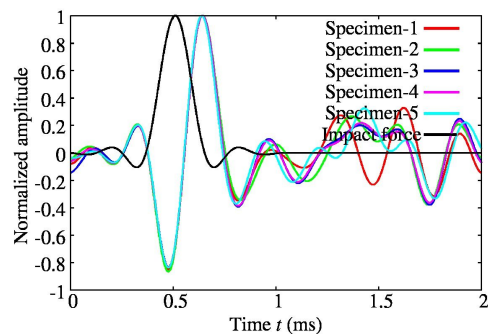


図 5 供試体の推定センサ信号（供試体 1～5）

り得られた推定センサ信号を各々図 4、図 5 に示す。図 4、図 5 より、実験による測定センサ信号、FDTD 法による推定センサ信号とも、傾向に違いはあるものの未充填シースによる差異は確認でき、その意味ではケーソンと同様の結果が得られた。この結果は他のセンサでも同様である。しかし、供試体はケーソン規模の大型構造物ではないため打撃位置や未充填シースの位置が各センサの近傍となり、その結果打撃時刻から表面波の直接波および各所からの反射波、また構造物内部の未充填シースを含めた各所からの反射波が到達する時刻が短い。そのため、それらの表面波と構造物内部による反射波の重なりが多く、未充填シースの有無の検査への有用性は確認できたものの、未充填シースの場所やその大きさ（範囲）を推定するだけの知見はまだ十分には確認できていない。

(6) 本研究では、FDTD 法を用いた波動伝搬シミュレーションを我々が提案する非破壊検査法へ活用する手法について様々な実験や検討を行った。その結果、ダムやケーソンのような大型構造物においては、シミュレーションにより得られる波動伝搬から測定センサ信号に含まれる反射波等の信号成分の推定が可能であり、さらに、シミュレーションにより得られる推定センサ信号を測定センサ信号と共に提案非破壊検査法に活用することで検査精度の向上を実現できる可能性について確認することができた。

(7) しかし、PC 橋セグメント材による供試体のような比較的小規模なコンクリート構造物では、大型構造物に比べ破損箇所が構造物

表面に近い位置となるため、直接波と多様な要因による反射波、また構造体内部を伝搬する実体波と表面波が短い時間範囲内で多数合成される。よって、波形の特徴変化から破損の有無についての情報を得ることは期待できるが、位置や大きさの推定に必要な破損箇所からの反射波成分の推定・抽出までは現状では十分ではない。しかし、FDTD法によって測定センサ信号を推定できることから、そこで得られる推定センサ信号をさらに詳細に検討する必要がある。

(8) また、非破壊検査実験では、インパルスハンマによる打撃を手動で行っていた。そのため、測定センサ信号にばらつきが生じ、FDTD法による推定センサ信号との比較検討が当初考えていたように十分に行えない部分もあった。そのため、今後は打撃用の治具を作成するなど、安定した測定センサ信号を得る方策が必要である。

#### 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2件)

藤岡豊太、永田仁史、安倍正人、衝撃弾性波法による PC シース内空隙の非破壊診断に関する実験と数値解析による検討、非破壊検査、査読有り、66巻、2017、443 - 450

DOI : doi.org/10.11396/jjsndi.66.443

Masato Abe, Toyota Fujioka, Yoshifumi Nagata, Estimating the propagation delay of a direct or reflected wave in a large concrete caisson by impact with an impulse hammer, Acoustical Science and Technology, 査読有り、Vol.38, 2017, 87-98

DOI : doi.org/10.1250/ast.38.87

[学会発表](計6件)

Masato Abe, Toyota Fujioka, Yoshifumi Nagata, Detection of a void in a concrete bridge pier by a non-destructive technique, Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Conference 2017, 2017年12月, Brisbane, Australia

Masato Abe, Toyota Fujioka, Yoshifumi Nagata, Defect detection in a concrete bridge by a non-destructive technique, 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016年12月, Honolulu Hawaii

Masato Abe, Toyota Fujioka, Yoshifumi Nagata, Location of a Defect in a concrete bridge by a non-destructive technique, INTER-NOISE 2016年8月, Hamburg, Germany

藤岡豊太、永田仁史、安倍正人、インパルスハンマを用いたコンクリート構造体内部空隙の非破壊診断法の実験的検討 ~ プレストレストコンクリート橋における未充填シースの診断 ~、電子情報通信学会応用音響研究会、2016年8月、東北学院大学多賀城キャンパス、宮城

藤岡豊太、永田仁史、安倍正人、インパルスハンマを用いたコンクリート構造体の非破壊検査法への時間領域有限差分法の適用、第8回構造体の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム、2015年10月、日本学術会議、東京

Masato Abe, Toyota Fujioka, Yoshifumi Nagata, Defect detection in a large concrete structure caisson by estimating the reflection waves, 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2015年7月, Torino, Italy

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

藤岡 豊太 (FUJIOKA, Toyota)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号 : 60292174

##### (3) 連携研究者

安倍 正人 (ABE, Masato)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号 : 00159443

永田 仁史 (NAGATA, Yoshifumi)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 40301030