

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630203

研究課題名(和文) 適応信号処理を組み込んだ衝撃弾性波法によるコンクリートの非破壊評価への新たな試み

研究課題名(英文) A new trial of nondestructive evaluation of concrete structure by an impact elastic wave method integrating adaptive signal processing

研究代表者

鎌田 敏郎 (Kamada, Toshiro)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10224651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「伝達関数マトリクスモデルに基づく適応ノイズキャンセル処理」の理論化に基づき、「コンクリート構造物対応型の適応信号処理欠陥検出システム」を試作し、衝撃弾性波法において欠陥から反射される弾性波が、衝撃により生じる表面波よりはるかに小さい低SN領域に適用した。具体的には、コンクリート表面に複数の計測点を設置し、衝撃により生じる表面波をノイズとして適応型ノイズキャンセル処理により低減し、反射波の検出を行う手法を試みた。本手法の適用対象としては、PC桁主ケーブルグラウト充填評価を取り上げ、手法の有効性が把握できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, an “impact elastic wave method integrating adaptive signal processing” was developed by theoretical analysis of “adaptive noise cancelling process based on the acoustic transfer function model”. Thus, this system was applied to detect the defects in the low SN ratio region where the elastic wave reflected at the defect was far smaller than the surface wave excited by an impact. Specifically, placing a number of sensors on the concrete and using adaptive noise cancelling process for the detected signals of the sensors, the reflected wave from the defects was separated successfully by cancelling the surface wave. The main application of the method was evaluation of PC grouting condition in post-tensioning tendon ducts of PC Members. Finally, the method was found effective for these applications.

研究分野：土木工学 コンクリート工学 維持管理工学 非破壊検査

キーワード：衝撃弾性波 伝達関数 PCグラウト充填 適応ノイズキャンセル処理 非破壊評価手法

1. 研究開始当初の背景

コンクリートを対象とした非破壊検査手法として、比較的深部まで浸透が可能な弾性波を利用した衝撃弾性波法がある。弾性波が欠陥部で多重反射する現象を利用して、周波数スペクトルのピーク周波数から内部欠陥(空隙、ひび割れなど)の位置を検出することが可能であるが、本手法が適用可能な欠陥直径と深さの関係は、直径 200mm 以上の水平欠陥に対し、約 250mm 程度であると報告されている。また、PC 桁主ケーブルグラウト充填評価などのような小口径管の管内空隙が対象の場合は、空隙径が空隙の深さの 1/4 程度までは検出が可能であるが、それより深い領域では S/N 比が大幅に低下し、空隙有無が判定できない場合があるとの報告がなされていた。

これに対し、通信、音声処理などの電子情報処理分野においては、通信性能の向上、通話信号の品質改善の観点から先進的なデジタル信号処理が導入され、S/N 比を適応的に改善するノイズキャンセル処理の導入が進んでいる(川村新等,"適応信号処理の雑音除去技術への応用" 電子情報通信学会誌, Vol.86, No.12, pp.964-968, Dec. 2003.)。しかしこれらの技術は電氣的通信路を対象とした信号処理技術であり、コンクリート構造を伝播する弾性波への適用可能性については十分なエビデンスが得られていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、衝撃弾性波法において欠陥から反射される弾性波(信号)が、衝撃により生じる表面波(雑音)よりはるかに小さい低 S/N 領域において、反射信号を選択的に分離し、微小な欠陥構造を高精度に検出する内部欠陥検出システムを構築することを目的とした。極小で深部に存在する欠陥検出に適用できるシステムとするため、信号の S/N 比は -20dB ~ -40dB 程度を想定し、欠陥を安定的に検出できるシステムを構築する。

3. 研究の方法

(1) 「伝達関数マトリクスモデルに基づく適応ノイズキャンセル処理」の理論化

コンクリート表面に複数の計測点を設置し、衝撃により生じる表面波をノイズとして低減する適応型ノイズキャンセル処理を適用し、反射波の検出を行う手法につき理論化を行った。また、コンクリート表面における複数のセンサで受信した反射波の大きさが、欠陥直径および欠陥までの深さやセンサ設置位置の違いにより受ける影響に着目した。

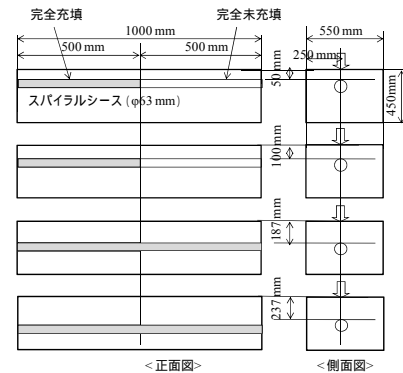
(2) 「コンクリート構造物対応型の適応信号処理欠陥検出システム」の試作

「コンクリート構造物対応型の適応信号処理欠陥検出システム」を構成する衝撃入力機構、検出機構を試作した。衝撃入力機構としては、複数種の鋼球を射出し、衝突時のエネ

ルギーを制御する電気制御方式の衝撃入力機構を検討した。適応フィルタ処理は、MATLAB による高速デジタル信号処理を行い、複数の検出器において同時検出される時系列波形の伝達関数マトリクス演算、および適応型ノイズキャンセル演算をリアルタイムで処理可能とした。

(3) PC 桁主ケーブルグラウト充填評価

対象とする欠陥構造として、PC 桁主ケーブルグラウト充填評価を対象とし、グラウト充填状況を模擬した供試体を評価した。具体的には、直径 $\phi 63\text{mm}$ のシース内に未充填、充填など異なる条件でグラウトを充填したシースを、埋設深さ 50mm、100mm、187mm、237mm に埋設している供試体を対象とした。この供試体に「コンクリート構造物対応型の適応信号処理欠陥検出システム」を使用し、「伝達関数マトリクスモデルに基づく適応ノイズキャンセル処理」を適用して、表面波、反射波の基礎データの収集を行った。また、グラウト充填状況の評価を試みた。



(a) 外形



(b) 外観

図1 欠陥を模擬した供試体の例

4. 研究成果

(1) 「伝達関数マトリクスモデルに基づく適応ノイズキャンセル処理」の理論化

内部に欠陥が存在しないコンクリート(健全部)、および内部に欠陥が存在するコンクリート(欠陥部)を音響伝達系としてモデル化し、衝撃により発生する弾性波の伝播挙動を音響伝達関数により定式化した(図2)。次に、健全部のモデルで得られる表面波を参照信号として、欠陥部のモデルにおける表面波を適応的に相殺するノイズキャンセル処理により S/N 比を改善できることを明らかにした。さらに、コンクリート表面における複数のセンサで受信した反射波の波形エネ

ギーを定義して、この大きさを定量化した評価指標として反射強さ R を導入した。

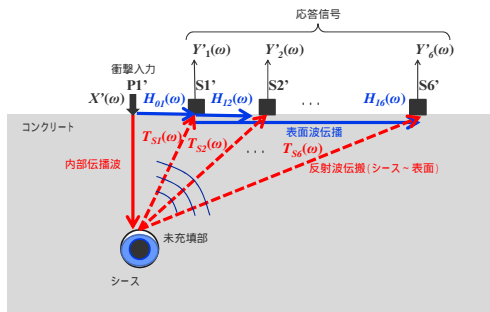


図 2 音響伝達系としてモデル化(欠陥部)

(2) 「コンクリート構造物対応型の適応信号処理欠陥検出システム」の試作

試作した衝撃入力機構を図 3 に示す。複数種(6mm、10mm、12mm)の鋼球を射出制御する電気制御方式を採用し、電磁ソレノイドに流す電流を制御することで衝突時のエネルギーを調整した。また、検出機構は接触型センサ(加速度センサ)を 40mm ピッチで等間隔に配置し、6 点の応答を同時に計測する受信システムを構成した(図 4)。また、高速デジタル信号処理ソフトウェア(Mat lab)を使用し、複数の検出点において同時検出される時系列波形(10,000 ポイント/点×6 検出点)の伝達関数マトリクス演算を、リアルタイムに処理可能な演算処理システムを構築した。

(3) PC 桁主ケーブルグラウト充填評価

PC 桁主ケーブルグラウト充填評価を対象に、グラウト充填状況を模擬した供試体(図 1)を使用して、(2)で開発した「コンクリート構造物対応型の適応信号処理欠陥検出システム」の適用を図った。実験では、欠陥直径および欠陥までの深さやセンサ設置位置の違いが評価指標(反射強さ R)に与える影響を明らかにした。結果の一例を図 5 に示す。図 5 は、シース直径 $\phi 63\text{mm}$ 、埋設深さ 100mm において、欠陥部からの反射波の評価指標(反射強さ R)とセンサ間距離の関係を示している。図 6 は、評価指標(反射強さ R)と埋設深さ(50mm、100mm、187mm)の関係を示している。以上より、衝撃弾性波法において、欠陥から反射される弾性波が、衝撃により生じる表面波よりはるかに小さい低 SN 領域において、「コンクリート構造物対応型の適応信号処理欠陥検出システム」が、PC 桁主ケーブルグラウト充填評価に適用可能であることが示された。



(b) 外観
図 3 衝撃入力機構

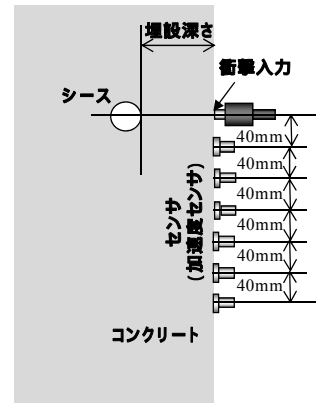


図 4 受信システムの構成

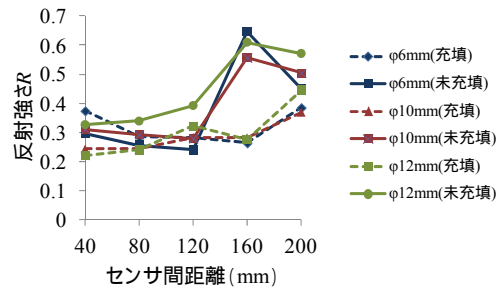


図 5 評価指標とセンサ間距離の関係の一例 (シース直径 $\phi 63\text{mm}$ 、埋設深さ 100mm)

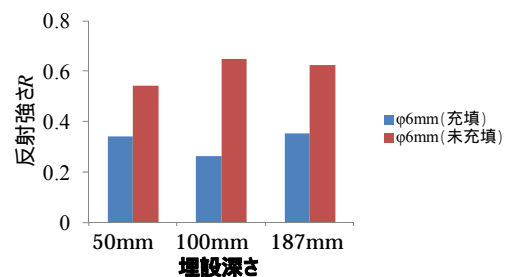


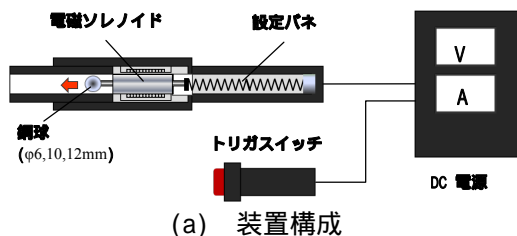
図 6 評価指標と埋設深さの関係の一例

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)

服部晋一、鎌田敏郎、内田慎哉：音響伝達関数を用いた衝撃弾性波法による PC グラウト充填状況の非破壊評価手法の検討、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、査読有、第 14 巻、2014、pp.707-714。



(a) 装置構成

〔学会発表〕(計 4 件)

服部晋一, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 中川拓郎: 音響伝達関数を用いた衝撃弾性波法による PC グラウト充填状況の非破壊評価手法の検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.9.10 ~ 2014.9.12, 大阪大学, 大阪府, 大阪市.

Hattori, S., Kamada, T., & Uchida, S.: Impact Elastic-Wave Methods for Detection of Grouting Condition in Post-Tensioning Tendon Ducts of PC Members using Adaptive Noise Canceller, 15th Int. Conf. European Bridge Conference on Structural Fault and Repair (国際学会), 2014.7.8 ~ 2014.7.10, London, Imperial College, University of London.

Hattori, S., Kamada, T., Uchida, S., & Asakura, H.: Impact Elastic-Wave Method For Detection Of Grouting Condition Of Post-Tensioned Tendon Ducts In PC Members Using Acoustic Transfer Function (国際学会), The 5th Int. Conf. on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications (国際学会), 2015.8.19 ~ 2015.8.21, Hilton Resort & Spa at Whistler, BC, Canada.

服部晋一, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 寺澤広基, 朝倉 響: 音響伝達関数を用いた PC グラウト部分未充填部の検出方法に関する基礎的検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015.9.16 ~ 2015.9.18, 岡山大学, 岡山県, 岡山市.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

鎌田敏郎, 適応信号処理を組み込んだ衝撃弾性波法によるコンクリートの内部欠陥検出システム: 日刊工業新聞, 2016.5.26, p.26.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鎌田 敏郎 (KAMADA TOSHIRO)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10224651

(2) 研究分担者

内田 慎哉 (UCHIDA SHINYA)
立命館大学・理工学部・講師
研究者番号: 70543461

(3) 連携研究者

寺澤 広基 (TERASAWA KOKI)