

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：32717

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06542

研究課題名(和文)非接触音響探査を用いたコンクリートの強度評価に関する研究

研究課題名(英文)Evaluation of concrete specimens with different strengths by noncontact acoustic inspection method

研究代表者

大平 武征(Ohdaira, Takeyuki)

桐蔭横浜大学・大学院工学研究科・研究員

研究者番号：10744526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：非接触音響探査法によるコンクリート強度評価の可能性を検討するため、強度の異なる3種類のコンクリート供試体(16N/mm<sup>2</sup>, 30N/mm<sup>2</sup>, 45N/mm<sup>2</sup>)を製作した。打設後の経時変化の計測を非接触音響探査法等で行った。実験結果から振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布により、コンクリート強度差の検出の可能性が認められた。弾性波速度と圧縮強度には比例関係が見られ、各供試体間の弾性波速度差は最大約500m/sであった。過去に実コンクリート構造物で検出できた事例では1000m/s以上の弾性波速度差があったので、明瞭な検出には弾性波速度差のもっと大きい供試体が必要であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートの硬さや表層の計測法としては、シュミット・ハンマー法、透水・透気試験やコア抜き検査といった、接触や部分破壊が必要な手法が主流である。遠隔からの音波照射加振を用いた非接触・非破壊的な計測により、コンクリート表層部の経年劣化の度合いの評価が可能になれば独創的な研究であるために学術的な価値は高く、かつ実用化された場合の社会的な意義も極めて大きいと思われる。今回の検討結果から、提案手法では対象物表面の弾性波速度にある程度の差を必要とすることが明らかになった。そこで、仮に速度差の大きい箇所だけでも遠距離から非接触で検出できれば、高所や遠方での点検作業の画期的な効率化が達成できると思われる。

研究成果の概要(英文)：In order to examine the possibility of concrete strength evaluation by the noncontact acoustic inspection method, three types of concrete specimens (16N/mm<sup>2</sup>, 30N/mm<sup>2</sup>, 45N/mm<sup>2</sup>) with different strengths were created. And the change over time after placing concrete was measured by the noncontact acoustic inspection method. From the experimental results, it was clarified that the difference in compressive strength could be detected by using the distribution of vibration energy ratio and spectral entropy. There was a proportional relationship between elastic wave velocity and compressive strength, but the elastic wave velocity difference between each specimen was about 500 m/s at maximum. In the previous case of detecting a clear difference, there was a velocity difference of 1000 m/s or more. Specimen with a larger difference of elastic wave velocity is found necessary for unambiguous detection.

研究分野：土木

キーワード：非接触音響探査法、コンクリート硬さ測定、振動エネルギー比、スペクトルエントロピー、レーザードップラー振動計、長距離音響発生装置

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 1. 研究開始当初の背景

コンクリートは、木材や鋼材などの構造材料と異なり、セメント・水・骨材・混和材料などで構成される複合材料であり、その状態や性能が時間の経過に伴って変化する。コンクリートの品質は、形成材料の種類・品質・構成割合だけでなく、施工方法・養生方法・材齢などの条件によって異なる。コンクリートの強度測定では、従来から、シュミット・ハンマーを使い直接コンクリート表面を打撃して返ってきた衝撃により強度を推定してきた(反発硬度法)。シュミット・ハンマー法は構造物に損傷を与えずに検査が可能であるが、測定のばらつきが大きいために1箇所だけではなく、数十ポイント程度を計測した平均値を求める必要がある。特に、ジャンカ等で表面がガタガタになっている場合は、表面の平らな部分に測定器を当てないと反射が正確に測れず、弱い強度が測定されるという問題がある。また、コア抜き検査は、ボーリングによりコンクリートを円筒形にくり抜き、取り出したコンクリート片の圧縮強度等を検査する方法であるが、コンクリート構造物に損傷を与えてしまうという問題がある。

一方、本研究室で考案された非接触音響探査法は、5 m 以上の遠隔から長距離音響放射装置(LRAD: Long Range Acoustic Device) を用いて強力な平面音波を放射することにより、測定対象壁面を励振させ、励振時の壁面上の振動速度分布をスキャニングレーザ振動計(SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer) を使用して2次元的に計測し、欠陥部上で発生するたわみ共振を検出・映像化するという方法である<sup>1-7)</sup>。コンクリート健全部と欠陥部との分離識別をするために、2つの音響学的特徴量(振動エネルギー比とスペクトルエントロピー)を考案導入し、その音響学的特徴量の分布の解析結果から、コンクリート健全部に対して、我々の測定によって得られる2つの音響特徴量が正規分布を示し、統計的に処理・評価できることが明らかになった<sup>8)</sup>。

当初、振動エネルギーの小さい健全部は欠陥検出という意味では注目されていなかったが、コンクリート健全部を統計的に評価・特定できれば、欠陥部を洗い出すことが可能になる。我々の測定結果で、音響学的特徴量が集合して分布する現象が測定データから観測され、実験・解析した結果、コンクリート健全部に対する2つの音響学的特徴量(振動エネルギー比・スペクトルエントロピー)の分布が正規分布になることが明らかになった。この事実は健全部の一見ランダムに見えるばらつきは、統計学的に意味を持っていることを示しており、例えば、圧縮強度が異なる場合には、その分布状態にも影響が現れる可能性が高いことが想定された。すなわち、非接触音響探査法を用いた遠距離非接触でのコンクリート強度推定が、実現する可能性があると推測された。

## 2. 研究の目的

非接触音響探査法で得られた音響学的特徴量と実際に測定されたコンクリートの硬さ(強度)との関係を、コンクリート材料の特性を踏まえて総合的に解析し、その相互関係を整理・検討することにより、非接触音響探査法を用いた遠距離非接触でのコンクリート強度推定が可能かどうかについて模索・検討することを本研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 今までに測定したコンクリート供試体および実コンクリート構造物のデータの中から健全部データを抽出し、計測した振動速度分布から得られる音響学的特徴量(振動エネルギー比・スペクトルエントロピー)の分布状態を統計的に処理・評価する。

(2) 硬さの異なるコンクリート供試体を製作し、音響加振による振動エネルギー比の分布とスペクトルエントロピーの分布の統計値を求める。コンクリートは、セメント・水・骨材・混和材料などで構成される複合材料であるので、コンクリートの品質(形成材料の種類・品質・構成割合)を考慮するだけでなく、施工方法・養生方法・材齢の条件も考慮して総合的にコンクリートの硬さ(強度)を分類・評価する必要がある。

(3) コンクリート供試体に対して、コアドリルを用いてコンクリートの円柱形コアを切り取って採取し圧縮強度を測定する。また、弾性波速度等も同時に計測する。

(4) 非接触音響探査法で得られた音響学的特徴量と実際に測定されたコンクリートの硬さ(強度)との関係を、コンクリート材料の特性を踏まえて総合的に解析し、その相互関係を整理・検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 2つの音響学的特徴量について

本研究では非接触音響探査法による計測評価に振動エネルギー比(VER: Vibration Energy Ratio)とスペクトルエントロピー(Spectral entropy)という2つの音響学的特徴量の分布を用いている。実際のコンクリート内部欠陥は複雑な形状をしていることから、欠陥規模を明らかにするために、式のような振動速度スペクトルの積分値を振動エネルギー比と定義している。ここでは、 $PSD_{defect}$ 、 $PSD_{health}$  はそれぞれ欠陥部、健全部のパワースペクトル密度(PSD: Power Spectral Density)、 $f_1$  および  $f_2$  は積分時の下限および上限周波数である。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \right)$$

健全部の評価では、健全部の振動エネルギーの最小値を基準として、健全部の振動エネルギーの分布を計算することになる。

また、スペクトルエントロピーは、信号の白色性を表す音響学的特徴量であり、信号のスペクトルを確率分布と見なし、情報エントロピーを計算したもので、式で定義される。ここで、 $S_f$ は測定点での振動速度のパワースペクトルである。

$$H_{SE} = - \sum_f p_f \log_2 p_f, \quad p_f = \frac{S_f}{\sum_f S_f}$$

### (2) 過去データの解析例 1

図-1 に示すような硬さの異なる円筒状コンクリート（直径 100 mm，長さ 200 mm）を埋設した壁型のコンクリート供試体（1000×450×200mm<sup>3</sup>）を用いて、非接触音響探査法による計測を過去に行った。設計強度は図中、左から 30, 40, 60 および 80 N/mm<sup>2</sup> であり、埋設した円筒状コンクリートの周壁部は 50 N/mm<sup>2</sup> であった。図中の赤+ は計測位置を示している。振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる分布例を図-2 に示す。この図からは硬い場所は柔らかい場所に比べると揺れにくいために、振動エネルギー比が低くかつスペクトルエントロピーが高い傾向があるように見えることがわかる。しかしながら、この実験データは計測点数も 12 点と少ないことから、より多くの計測点による評価が必要であると思われる。なお、実験時の離隔は約 3m，音源としては長距離音響放射装置（LRAD：Long Range Acoustic Device）である LRAD-300X を、レーザドップラ振動計としてはスキャンニング振動計（SLDV：Scanning Laser Doppler Vibrometer）である PSV-400-H4（Polytec Corp.）を使用した。送信音波としては周波数範囲 500-7100Hz のシングルトーンパルス波（パルス幅 3ms，インターバル 50ms）を用い、アベリッジ回数は 5 回で、コンクリート表面付近の音圧は約 100dB とした。

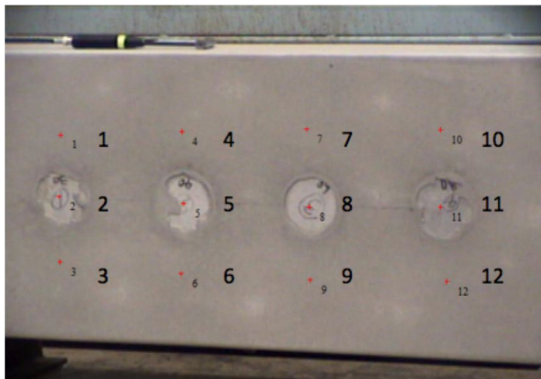


図-1 強度の異なる円筒状コンクリートが埋設されたコンクリート供試体と計測位置

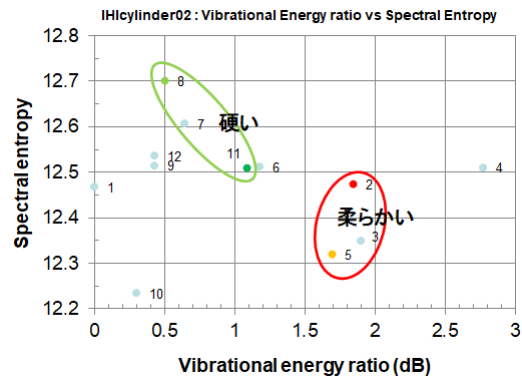


図-2 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる分布例

### (3) 過去データの解析例 2

建設後 50 年以上経過した鉄道トンネルの天井部と側壁部の健全部における、振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布例を図-3 に示す。計測点数は 121 点である。各点の縦横方向のエラーバー（誤差範囲）は、それぞれ振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布の標準偏差範囲を表す。図より、天井部の方が、側壁部に対してスペクトルエントロピーが高く、振動エネルギー比が若干低い傾向が見られる。要するに天井部よりも側壁部の方が柔らかく振動しやすきことを意味している。並行して行われた 2 点接触式の超音波テスターによるコンクリート表面部の弾性波速度（天井部約 4200m/s，側壁部約 2800m/s）とシュミットハンマーによる反発度（天井部約 75，側壁部約 60）による計測結果からも明確な差が得られており、この結果を裏付けている。なお、実験時の離隔は約 6～7m，音源としては LRAD-300X を、レーザドップラ振動計としては PSV-500Xtra（Polytec Corp.）を使用し、送信音波としては周波数範囲 500-7100Hz のシングルトーンパルス波（パルス幅 3ms，インターバル 50ms）を用い、アベリッジ回数は 3 回、コンクリート表面付近の音圧は約 110dB であった。

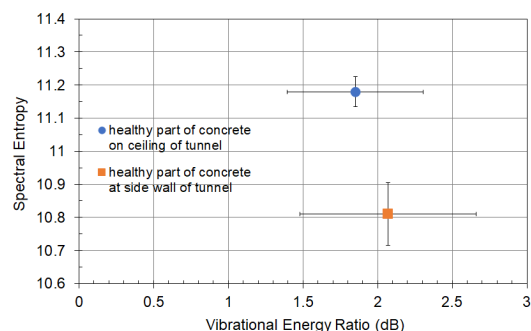


図-3 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる分布例

(4)強度の異なるコンクリート供試体を用いた計測

過去データの解析結果より、非接触音響探査法によるコンクリート強度評価の可能性が確認できたため、3種類の強度 (16N/mm<sup>2</sup>, 30N/mm<sup>2</sup>, 45N/mm<sup>2</sup>:以降 16N,30N,45N と省略) をもつコンクリート供試体 (L50×W50×H30cm<sup>3</sup>, 約 173kg) を作製して検証を行った。図-4 に実験セットアップを示す。音源としてはLRAD-300Xを、レーザドップラ振動計としてはPSV-400-H4(Polytec Corp.)を用いた。LRAD と供試体の距離は約 1.0m, 供試体とSLDV との距離は約 1.1m で計測した。供試体表面の計測位置を図-5 に示す。計測ポイント数は 81 点 (9×9) で、使用した音波は

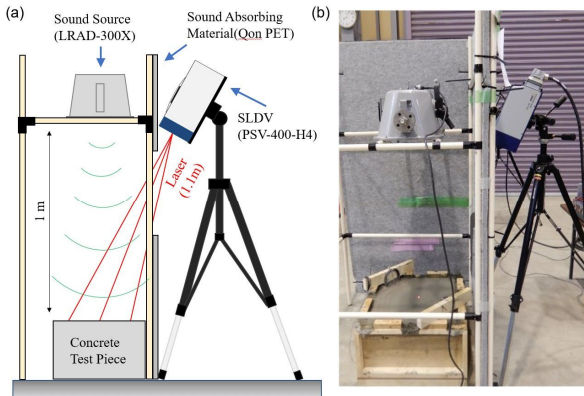


図-4 実験セットアップ, (a) セットアップ図, (b) 写真

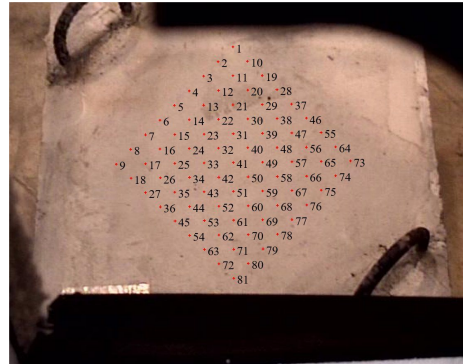


図-5 供試体表面の計測位置  
(計測ポイントは赤十字部)

周波数範囲 500 ~ 4000Hz のシングルトーンバースト波 (パルス幅 4ms, 変調周波数 125Hz, インターバル時間 50ms, 波の時間長さ 1450ms) を用いた。なお,コンクリート表面付近での音圧は約 100dB, データ加算回数は 10 回とした。

打設後 9 ~ 34 日目の振動エネルギー比の変化を図-6 に示す。16N と 30N では, 振動エネルギー比の変化が似ており, かつ 16N の振動エネルギー比の平均値が 30N より大きい。振動エネルギー比は, その測定におけるコンクリート健全部の最小振動エネルギーに対する各測定点の振動エネルギーの比を取ったもので, 各測定点で計算される。振動エネルギー比の平均値が大きいとき, 測定面上の健全部の測定点での振動エネルギーに幅があることを意味する。そういう意味では, 16N のコンクリート健全部の全測定点での振動エネルギー分布は, 30N の場合に比べて, 分布の幅が広い。45N では, 打設後 16 日目および 23 日目で変動が激しいが原因は不明である。

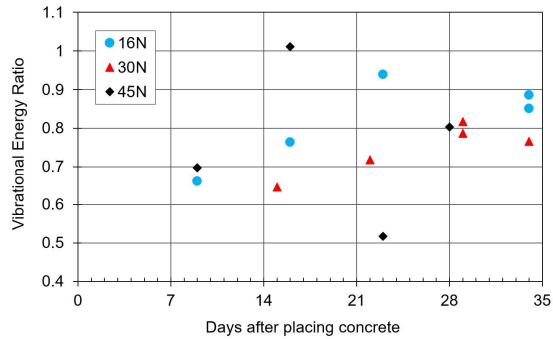


図-6 振動エネルギー比の変化  
(○:16N, △:30N, ◆:45N)

図-7 と図-8 から, 打設後 16 日の 45N を除いて全体を評価すると, ほぼ 16N > 30N > 45N の順に, 振動エネルギー比が小さくなるのがわかる。また, 図-8 より振動エネルギー比の平均値が大きくなるほど, その標準偏差も大きくなっていることもわかる。なお, 図中の○○days はコンクリート打設後の日数を表している。

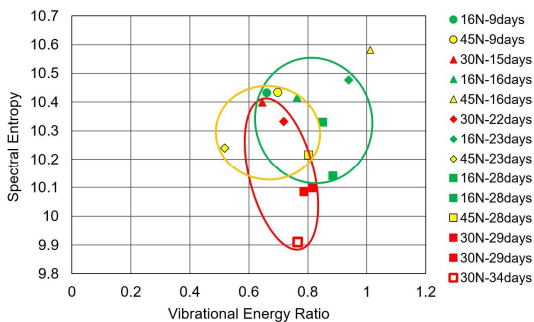


図-7 各コンクリート供試体の振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布  
(緑: 16N, 赤: 30N, 黄: 45N, ○: 9日, □: 15 or 16日, △: 22 or 23日, ◇: 29 or 34日)

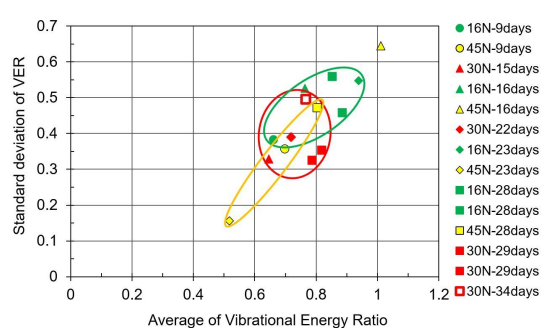


図-8 各コンクリート供試体の振動エネルギー比の平均値とその標準偏差の関係  
(緑: 16N, 赤: 30N, 黄: 45N, ○: 9日, □: 15 or 16日, △: 22 or 23日, ◇: 29 or 34日)

### (5)弾性波速度と圧縮強度

2点接触式の超音波テスター（UK1401, 日本マテック㈱）を用いて各コンクリート表面部の弾性波速度の変化を計測した。各コンクリート供試体の打設後14日(約336時間)経過までの弾性波速度の変化を図-9に示す。図より打設後2日(約48時間)以内は弾性波速度が急速に変化しており、コンクリートの強度自体が発現している過程にあることが分かる。その後、打設後8日(約192時間)以内までは、まだ各強度の供試体において、弾性波速度にバラつきがみられるものの安定し始め、11日(約264時間)以降になるとバラつきは小さくなりほぼ安定した値を示すことが分かる。次に打設後7日目および28日目の弾性波速度と圧縮強度(計測値)の関係を図-10に示す。図中の点線は全データの線形近似直線であり、圧縮強度と弾性波速度は、この結果では概ね比例関係にあることが分かる。しかしながら、今回の供試体では、強度が倍近く変化したとしても、弾性波速度は、元の値の1割程度の500m/s程度しか変化していないこともわかる。これは、現在の日本で市販されているコンクリート部材の品質の高さを示してはいるが、我々の過去データでは弾性波速度において1000m/s以上の差があった時、振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布において明確な差が得られていたことを考慮すると、今回の非接触音響探査法によるコンクリート強度評価用供試体としてはやや不十分であったと思われる。

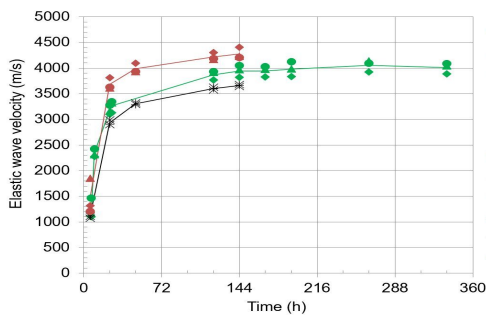


図-9 各コンクリート供試体における打設後14日目までの弾性波速度の変化

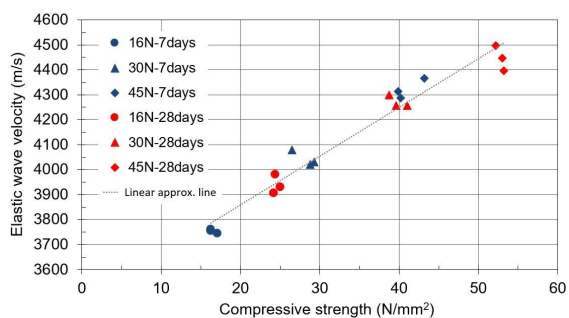


図-10 各コンクリート供試体における打設後7日目と28日目の弾性波速度と圧縮強度

### (6)まとめ

非接触音響探査法によるコンクリート強度評価の可能性を検討するため、強度の異なる3種類のコンクリート供試体(16N/mm<sup>2</sup>,30N/mm<sup>2</sup>,45N/mm<sup>2</sup>)を作製し、コンクリート打設後の経時変化の計測を非接触音響探査法等で行った。実験結果から、2つの音響学的特徴量である振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布を用いることにより、コンクリート強度の違いによる差を検出できる可能性があることが判明した。この測定結果では、各供試体の弾性波速度と圧縮強度の間には比例関係が見られたが、各供試体間の弾性波速度差は最大で約500m/s程度であった。過去に明確な差が検出されていた時は1000m/s以上の速度差があったことから、明瞭な検出のためには弾性波速度差のもっと大きい供試体が必要であることが明らかになった。ただし、仮に弾性波速度差の大きい箇所だけでも、遠距離から本手法により非接触で強度変化を検出できるようになれば、高所や遠方での点検作業の画期的な効率化が達成できると思われる。

<引用文献>

- 1 R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, and K.Katakura: Proposal of non-contact inspection method for concrete structures, using high-power directional sound source and scanning laser Doppler vibrometer, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.52, 07HC12, (2013).
- 2 K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa: Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, 07KC15, (2014).
- 3 杉本恒美, 赤松亮, 歌川紀之, 片倉景義: コンクリート非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2062-2067, (2014).
- 4 杉本恒美, 杉本和子, 黒田千歳, 歌川紀之: マルチトーンバースト波を用いた高速非接触音響探査法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2103-2108, (2016).
- 5 T.Sugimoto, K. Sugimoto, N.Kosuge, N. Utagawa and K. Katakura, High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.56, 07JC10, (2017).
- 6 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 川上明彦: インフラ点検のための音波照射加振による高速非接触音響探査法,-マルチトーンバースト波を用いた橋梁における検証-, 平成29年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.149-154, (2017).
- 7 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 黒田千歳, 金子岳夫, 森岡宏之, 志岐仁成, 中川貴之: 地下大空洞内の吹付けコンクリートに対する非接触音響探査法の適用性検討, トンネル工学報告集, 第27巻, I-8, pp.1-6, (2017).
- 8 K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda, K.Katakura: Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.54, 07HC15, (2015).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 杉本和子, 杉本恒美, 歌川紀之, 黒田千歳	4. 巻 6
2. 論文標題 非接触音響探査法のための音響学的特徴量を用いた健全部の統計的評価による欠陥検出	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 241-246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugimoto Kazuko, Sugimoto Tsuneyoshi, Utagawa Noriyuki, Kuroda Chitose, Kawakami Akihiko	4. 巻 57
2. 論文標題 Detection of internal defects of concrete structures based on statistical evaluation of healthy part of concrete by the noncontact acoustic inspection method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 07LC13.1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.7567/JJAP.57.07LC13">https://doi.org/10.7567/JJAP.57.07LC13</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kazuko Sugimoto, Takeyuki Ohdaira, Tsuneyoshi Sugimoto
2. 発表標題 Study on Noncontact Acoustic Inspection for Concrete Structures - Statistical Evaluation of a Healthy part of Concrete -
3. 学会等名 Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2019, November (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuko Sugimoto, Tsuneyoshi Sugimoto, Hiroshi Morioka, Noriyuki Utagawa, Chitose Kuroda, Takeyuki Ohdaira
2. 発表標題 Detection and acoustical visualization of internal defects in shotcrete structures by spatial spectral entropy for noncontact acoustic inspection method
3. 学会等名 The 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium 2019, October (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本和子, 杉本恒美, 歌川紀之, 黒田千歳
2. 発表標題 非接触音響探査法のための音響学的特徴量を用いた健全部の統計的評価による欠陥検出
3. 学会等名 第6回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda, A. Kawakami
2. 発表標題 Inner defect detection for concrete structure by noncontact acoustic inspection method including statistical evaluation of healthy part of concrete
3. 学会等名 The 6th Japan-US NDT Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuko Sugimoto, Tsuneyoshi Sugimoto
2. 発表標題 Detection of internal defects of concrete for noncontact acoustic inspection method using healthy part extraction
3. 学会等名 12th European Conference of Non-Destructive Testing (12th ECNDT 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuko Sugimoto, Tsuneyoshi Sugimoto, Takeyuki Ohdaira, Itsuki Uechi, Noriyuki Utagawa
2. 発表標題 Extraction of healthy part using two acoustic characteristics for defect detection by non-contact acoustic inspection method
3. 学会等名 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉本 和子, 杉本 恒美, 歌川 紀之, 黒田 千歳
2. 発表標題 音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発 -健全部評価に関する検討(II) -
3. 学会等名 土木学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	杉本 和子  (Sugimoto Kazuko)  (60642171)	桐蔭横浜大学・工学(系)研究科(研究院)・研究員   (32717)	
研究 分担者	杉本 恒美  (Sugimoto Tuneyoshi)  (80257427)	桐蔭横浜大学・工学(系)研究科(研究院)・教授   (32717)	