

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04643

研究課題名（和文）パルスウォータージェットを用いた橋梁やトンネルの高所の地上からの遠隔打音検査

研究課題名（英文）Remote impact acoustic testing at a high place such as bridges and tunnels from the ground using a pulsed water jet

研究代表者

森 和也（Mori, Kazuya）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・教授

研究者番号：50190989

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：橋梁床板下面やトンネルのコンクリートの浮き・剥離を、地上より簡便かつ経済的に、効率的な検査が可能な検査手法を開発した。この検査方法は、地上より直径数ミリの水流を打ち出して、水滴化した水流を検査面に打ち当てて、打音検査を行う方法である。従来の水流を使った方法では、水流は遠隔点で拡散し、精度の高い検査は困難であった。本研究では、層流ノズルを開発することによって、数メートル先でも水流が拡散しない方法を確立し、高所の打音検査に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の橋梁やトンネルは、1970年代の高度経済成長期に数多く作られ、それらの点検・補修が必要となっている。しかしながら、経済的な問題と、作業者の確保の問題から、万全な点検・補修が十分には行われていない状況にある。本研究は、橋梁やトンネルの点検の経済効率および作業効率を改善するものであり、SDGsの11番目の目標である「住み続けられるまちづくり」に貢献する研究である。

研究成果の概要（英文）：We have developed a convenient, cost-effective, and efficient inspection method for detecting floating and delamination of concrete in the undersides of bridge decks and tunnels. This inspection method involves discharging a water flow with a diameter of a few millimeters from the ground and directing the water droplets onto the inspection surface to perform acoustic testing. In conventional water flow methods, the water would disperse at remote points, making precise inspections challenging. In this research, we successfully established a method using laminar flow nozzles to prevent water dispersion even several meters away, enabling effective acoustic testing at heights.

研究分野：機械工学

キーワード：橋梁 トンネル 非破壊検査 水撃音響法 高所

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

全国にある73万の橋梁及び1万余のトンネルは、法令により5年間隔での定期点検が義務付けられている。定期点検は、「近接目視により行うことを基本とし、必要に応じて打音等の非破壊検査等を併用して行う。」と定められている。近年、ドローン等の発展によって、目視自体は離れた位置から近接目視に準ずる点検が可能になった。

2. 研究の目的

遠隔にて打音検査を行うことができれば、国が定める近接目視を遠隔にて実施することが可能になり、点検の大幅な簡易化が実現する。本研究の目的は、図-1に示すように、水滴の打撃によって遠隔にて打音検査を行う「水撃音響法」^{1),2)}を高所の試験に利用可能にすることである。コンクリート片の剥離・落下は、跨道橋、跨線橋およびトンネルなどのコンクリート構造物において重大性を増す。コンクリート片の落下によって、直ちに第三者被害を起こす恐れがあるからである。跨道橋、跨線橋の床板およびトンネルの天井までの地上からの高さは4m～6m程度であるので、本研究では4m以上の点検の可能性について検討した。

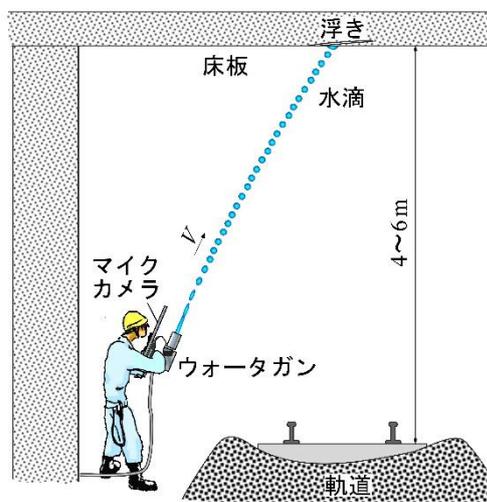


図-1 水撃音響法による跨線橋・跨道橋の検査

3. 研究の方法

図-2に示すように、ノズルから水を放出すると、水は連続した状態で放出されるが、やがて表面張力によって水滴化する。この水滴を検査壁面に衝突させると、水滴の周期で壁面を加振することができる。検査壁面に浮き・剥離があると、浮き・剥離は振動し、健全部とは異なる音響を発生する。この音響を収集し、浮き・剥離を検出する。

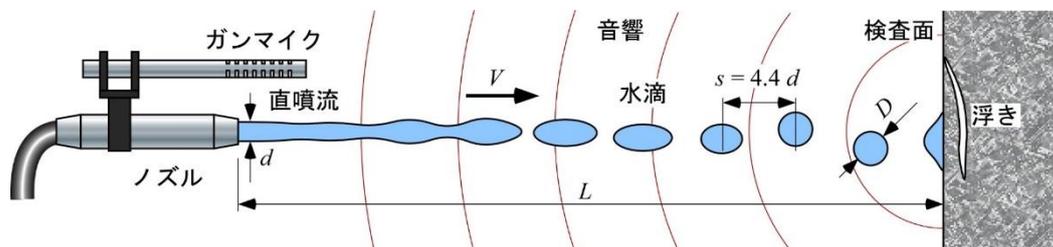


図-2 水撃音響法による跨線橋・跨道橋の検査

図-3に示す試験片を用いて高所試験を行った。欠陥を有しない試験片1個と空洞欠陥を有する試験片2個である。それぞれの試験片の大きさは、300mm×300mmの正方形であり、厚さは約90mmである。質量はいずれも約16kgである。試験片の製作は、厚さ60mm、一辺300mmの正方形コンクリート板に、モルタルを約30mm厚貼りつけた。欠陥入りの試験片は、コンクリート板の上に厚さ10mm、直径 $D=100$ mm、あるいは200mmの発泡ポリスチレンの板を置いて空洞を模した。欠陥の位置は、試験片表面より約20mmである。

水滴を用いた試験に先立ち、図-3の試験片を、打診棒を用いて打音試験を行った（玉径17mm）。図-4は、試験片中央部を打診棒で叩いたときのそれぞれの打音の周波数スペクトルである。打撃力は、ほぼ同じになるようにした。

図-4から、直径200mmの欠陥を有する試験片に比べ、欠陥が無い試験片と直径100mmの欠陥を有する試験片の打撃音は小さいことがわかる。直径200mmの欠陥を有する試験片は、1.6kHzから1.8kHzの位置に卓越したピークが現われた。直径100mmの欠陥を有する試験片は、欠陥が無い試験片と顕著な差は見られなかった。耳の判断でも、打撃音響に差が確認できなかった。

高所点検を実現するポイントは、水流が水滴化するまでの距離をできるだけ長くすることである。水流は、連続水流である場合は、水流側面からのみ空気抵抗を受け、水流が水滴化すると、個々の水滴が前方からも空気抵抗を受ける。個々の水滴が前方から空気抵抗を受けると、個々の水滴は変形し、空気抵抗が不安定になる。

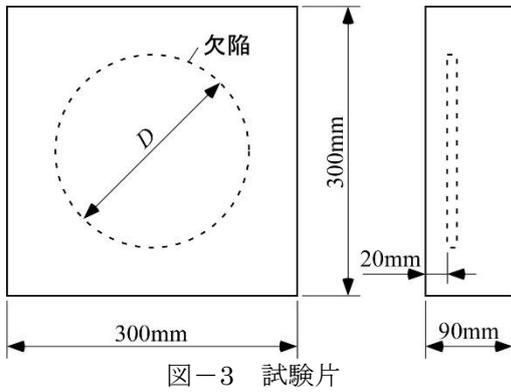


図-3 試験片

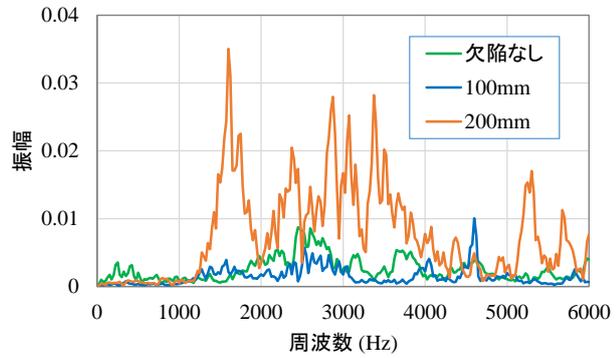


図-4 打診棒による打撃音の周波数スペクトル

また、水滴後方の空気の乱れも水滴の直進を不安定化させる。水滴に作用する力が不安定になると、水滴は拡散する。水滴が拡散すると、検査面の一点を安定的に打撃することができなくなり、加振のエネルギーが分散し、加振力は低下する。

そこで、本研究では図-5に示すような、層流ノズルを開発した。円筒形の容器内にストレーナ（80メッシュ）を配置し、水はストレーナを通過してスリットから放出される。水がストレーナを通過すると、乱流や旋回の成分が遮断され、水はストレーナ内部にほぼ様な速さで侵入する。ストレーナ内部には、渦がないため、水流がスリットから放出される時は、水流はほぼ層流となる。今回開発したノズルは、スリットを交換可能で、スリット直径（ノズル直径）を、 $d=1\text{ mm}$ 、 2 mm 、 3 mm 、 5 mm とすることができる。

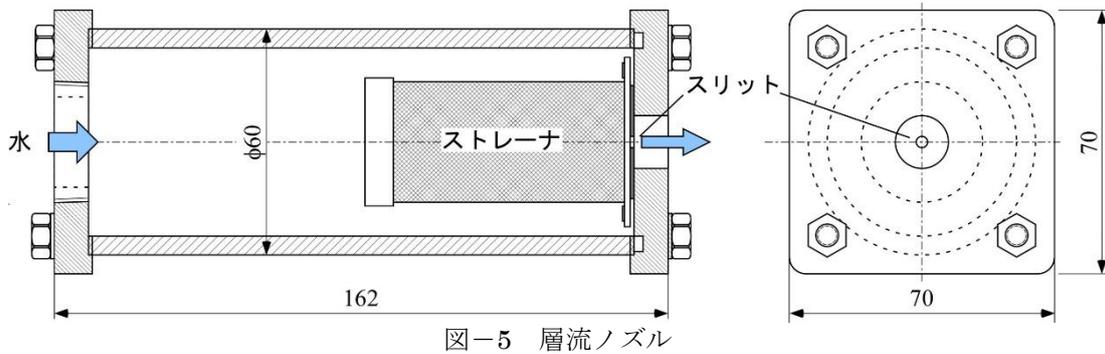


図-5 層流ノズル

図-6は、図-5の層流ノズルから放出された水流の写真である。ノズル径は $d=5\text{ mm}$ 、流速は $V=10\text{ m/s}$ である。水流は、ガラス棒のように直進し、ノズルより 1 m から 1.5 m の位置で水滴化し始めた。



図-6 層流ノズルから放出された水流

4. 研究成果

図-7に、水滴の衝突を利用した高所の打音試験の様子を示している。試験片を、断面 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ のアルミフレームで、地上より 5.2 m 鉛直上方に固定した。タンクの水を、ポンプで層流ノズルに送り、層流ノズルから鉛直上方の試験片に向けて放出した。試験条件は、層流ノズル先端と試験片との距離を 4.2 m 、層流ノズルのスリットの直径を 3 mm 、ポンプ送水圧力を 0.1 MPa 、 0.2 MPa 、 0.4 MPa の3種類とした。水流の打撃音は、ガンマイク（指向角： 30° 、周波数特性： $60\text{ Hz} \sim 20\text{ kHz}$ ）で収録し、ビデオカメラ（音響サンプリング周波数： 48 kHz ）に画像と共に記録した。

図-8は、検査装置のビデオカメラによって記録された水滴による打撃の映像である。試験片上の丸い円の印（直径 200 mm）は、欠陥位置に相当する。水滴の広がり方が 5 cm 程度以内になっていることがわかる。

図-9は、ガンマイクで収集された直径 200 mm の欠陥を有する試験片の打撃音響である。ハンマーや鋼球による打音検査の場合、打撃音響は離散的なパルス状に発生するが、水撃音響法は連続的に打撃するので、発生する打撃音も連続音となる。したがって、打撃音響から周波数スペクトルを求める場合、ハンマーや鋼球による打音検査の解析と異なり、どの時刻を切り取って解析しても、同じような周波数スペクトルになる。

試験片が比較的小さいことから、試験片自体の振動も懸念される。しかし、試験片の質量が約 16 kg で、試験片の固定が断面 40 mm×40 mm のアルミフレームであることから、試験片自体の振動の固有振動数は数十ヘルツとなる。この周波数は欠陥の存在によって発生する固有振動数とはかけ離れていることから、試験結果には影響を及ぼさない。

3種類の試験片に対して、水滴を衝突させて得られた音響の周波数スペクトルを図-10に示す。図-10では、周波数スペクトルの周波数範囲が 0 Hz から 6000 Hz 内の最大値で正規化した。図-10において、3.0 kHz 以上の周波数領域のピークは、欠陥の振動によって発生する音響とは無関係である。その理由は、ノズル直径 $d = 3 \text{ mm}$ に対して、水圧が $p = 0.4 \text{ MPa}$ 以下では、水滴の衝突によって発生する加振力の周波数上限は、図-6から求められる 2.0 kHz の 1.5 倍の 3.0 kHz 程度までだからである（水滴間隔は 4.4 d の半分程度まで確認できることから、加振周波数は 4.0 kHz 程度までであるが、4.2 m の高所を打撃すると、水滴速度が 4 分の 3 程度になるため）。

図-10における約 3.0 kHz 以上の音響は、個々の水滴が試験片に衝突したときに発生する衝突音である。そのため、約 3.0 kHz 以上のピークは欠陥の有無に関係なく発生する。そこで、欠陥の存在によって 3.0 kHz 以上の周波数の音響が発生しても、水滴の衝突音に埋もれて、この欠陥の検出は困難である。

図-10(a)の欠陥なしの試験片の周波数スペクトルと図-10(b)の直径 100 mm の欠陥の試験片の周波数スペクトルを比較すると、1.0 kHz から 1.5 kHz にかけてのピークと 2.0 kHz に同じようなピークが確認され、明確な差は確認できない。これは、直径 100 mm の欠陥はこの試験条件では検出が難しいということを意味している。この結果は、打診棒を用いた打音検査の結果と同様である。図-10(c)の直径 200 mm の欠陥を有する試験片の周波数スペクトルでは、1.7 kHz において鋭いピークが確認できる。



図-7 水滴の衝突を利用した高所検査

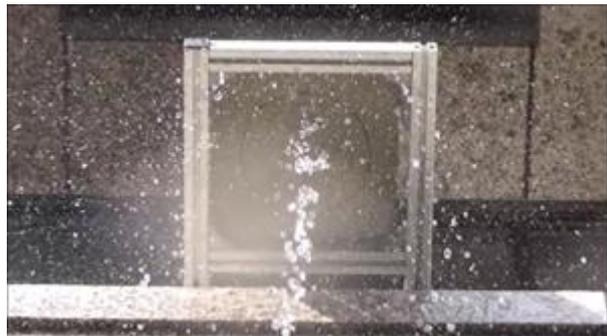


図-8 水滴の衝突の様子

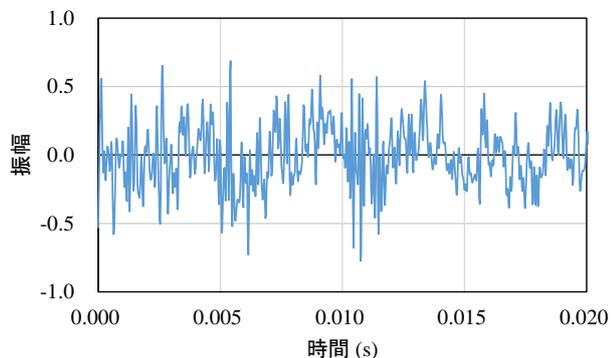


図-9 ガンマイクで収集した音響の一例

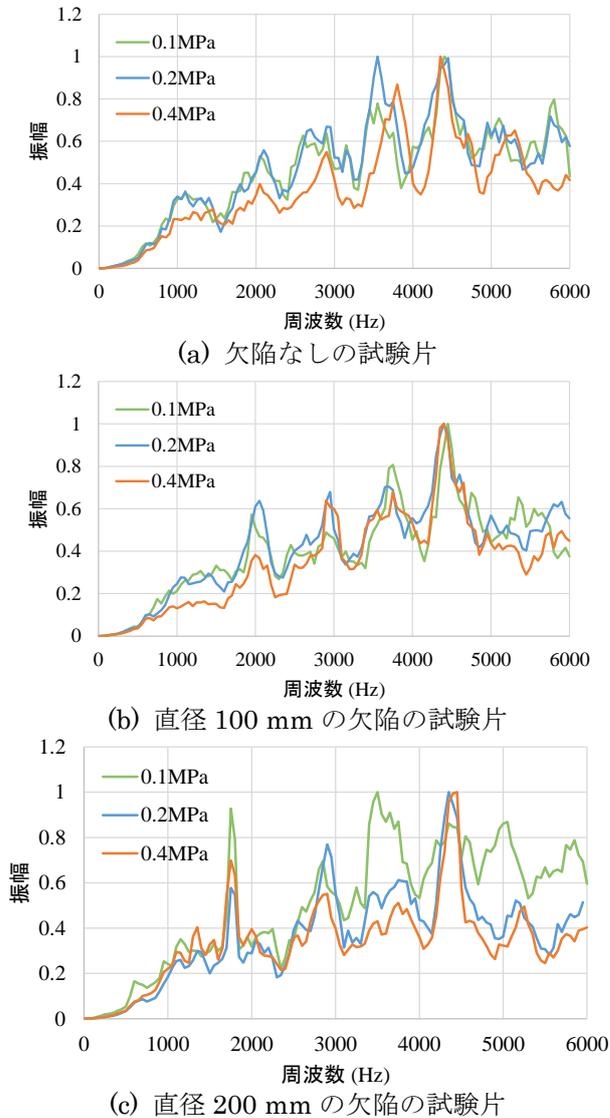


図-10 水滴の衝突音響の周波数スペクトル

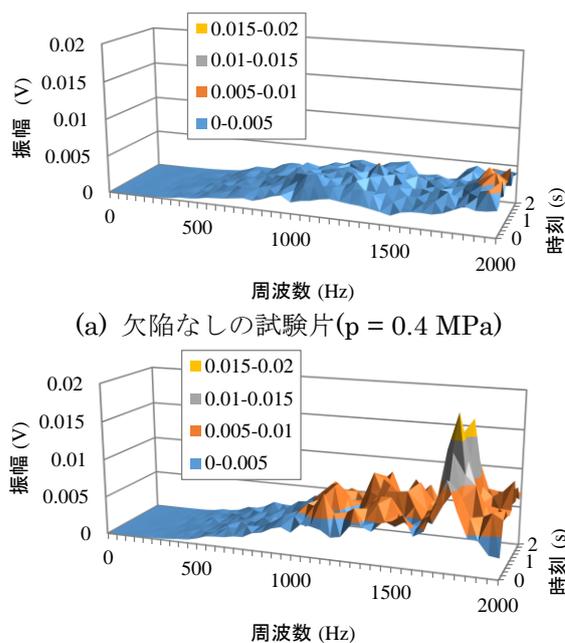


図-11 水滴の衝突音響の絶対値比較

このピークは、打診棒による試験でも発生したピークである（図-4 参照）。従って、直径 200 mm の欠陥はこの試験条件において検出できる。

実際の試験では、欠陥の大きさや深さで、ピークが発生する周波数やピークの大きさが異なるので、欠陥なしの健全部の周波数スペクトルと比較しながら、欠陥部を検出する必要がある。

打診棒による打音検査において、音響の大きさの絶対値も、欠陥の判定に有効な情報となった。そこで、欠陥なしの試験片と欠陥あり（直径 200 mm）の試験片の音響スペクトルの絶対値の比較の例を図-11に示す。図-11では、2.0秒間の連続する打撃音をスペクトログラムで表している。連続する打撃音を、0.02秒間隔に分割して、各区間の周波数スペクトルを求め、10区間の周波数スペクトルを平均化し、0.2秒間隔のスペクトログラムとして表したものである。

図-11(a)の欠陥のなしの試験片の打撃音響のスペクトログラムでは、ピークが認められないのに対して、図-11(b)の直径 200 mm の欠陥の試験片の打撃音響のスペクトログラムでは、1.6 kHzにおいて連続的にピークが確認できる。このように、音響の絶対値も欠陥の判定に重要な情報となる。

本試験では、ノズル先端より 4.2 m 上方の試験片の検査を行い、表面から深さ 20 mm にある直径 200 mm の欠陥の検出が可能であった。通常、試験装置は検査車両に搭載して使用することから、例えばノズル先端を地上より 2 m 上方の位置に設置すると、地上より約 6 m 上方の検査面を検査出来ることになる。

また、表面から深さ 20 mm にある直径 100 mm の欠陥は、水滴を用いた試験および打診棒を用いた試験で検出できなかった。一辺が 100 mm の正方形の欠陥に対して、打音検査では、深さが 20 mm 以上では検出が困難である。実験結果から、水滴の衝突を用いた遠隔打音検査は、作業者による打音検査と同等の検出性能があると思われる。

<引用文献>

- 1) 森和也・徳臣佐衣子, 「ウォータージェットを用いた構造物の遠隔非破壊検査法」, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No.1 pp. 2097-3002, 2016.7
- 2) 森和也・徳臣佐衣子, 「ウォータージェットを用いた打音試験法(水撃音響法)の走行試験」, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 1 pp. 1897-1902, 2017.7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 森 和也、徳臣 佐衣子、大嶋 康	4. 巻 44
2. 論文標題 水滴の衝突を利用した橋梁やトンネルの高所の地上からの打音検査	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1354-1359
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 河地紘征
2. 発表標題 ウォータージェットを用いた高所打音試験
3. 学会等名 日本材料学会九州支部第8回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuya Mori
2. 発表標題 Defect Detection in Concrete Structures at High Place by Using Water Jet Impact
3. 学会等名 The Japan Society of Mechanical Engineers ICM&P 2022 International Conference on Materials & Processing 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuya Mori
2. 発表標題 Automated defects detection in concrete structures using water droplets impact
3. 学会等名 6th International Conference on Materials and Reliability (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 検査システム及び検査方法	発明者 森和也、大嶋康敬、 徳臣佐衣子	権利者 熊本大学、熊本 機械
産業財産権の種類、番号 特許、7151030	取得年 2022年	国内・外国の別 国内

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------