

令和元年9月5日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06471

研究課題名(和文) ウォータジェットを用いた構造物の遠隔打音試験法の開発

研究課題名(英文) Development of Remote Hammering Testing Method for Structures Using 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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ウォータジェットを用いてコンクリート構造物のうき・剥離を検出する遠隔打音検査法(水撃音響法)を開発した。水撃音響法は、水滴化したウォータジェットによって検査壁面を打撃し、その音響から構造物の健全性を評価する方法である。検査面に、うきや剥離があると、特有の音響を発生し、欠陥を検出することができる。水撃音響法の特徴は、移動検査が可能であること、装置が安価であること、安全であること、などである。検査装置を毎秒1mの速さで移動させて、直径400mmの人工欠陥を検出することができた。この時の検査速度は、1日(10時間)に3,600平米で、複数本のウォータジェットを用いると1日1万平米の検査も可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トンネルや橋梁の点検は5年毎の点検が義務付けられているが、点検を要する橋梁は約70万橋、トンネルは1万箇所ある。さらに中間時の点検も要求され、その労力・コストは膨大である。そのため、作業員による打音検査に代わる経済的で効率的な検査方法が望まれている。効率的な検査方法として、赤外線サーモグラフィ法、レーザー加振法などがあるが、使用環境や経済性の問題のために一般的な方法とはなっていない。本研究で開発した水撃音響法は、従来作業員がハンマーで叩いていた作業をウォータジェットに置き換えたもので、低コストで高効率を実現した。水の確保などまだ実用化には課題があるが、安全な社会資本を支える技術となるものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed a remote nondestructive testing method: Water Jet Impact Acoustic Method in which the traditional hammer has been replaced with a water jet. In this new method, objects are pounded by water droplets at regular intervals. Hidden voids in the concrete can be detected as they produce a distinctive sound that is picked up by a gun microphone. The characteristics of the Water Jet Impact Acoustic Method are moving inspection, low-cost device, and safety inspection. An artificial defect with a diameter of 400 mm can be detected while the inspection device was moved at a speed of 1 m per second. This inspection speed is 3,600 square meters per day (10 hours), and inspection of 10,000 square meters per day is also possible using multiple water jets.

研究分野：機械工学

キーワード：非破壊検査 コンクリート うき・剥離 遠隔検査 ウォータジェット

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に大量に建築された社会インフラが老朽化し、効率的な試験方法が求められている。そこで、平成 25 年 6 月、国土交通省 道路局は「道路トンネルの覆工コンクリートのうき・はく離を検知する新技術」を公募した。その要求性能は以下のとおりである。

- (1) 「近接目視」と「打音検査」の組み合わせである従来技術を代替できるか、従来技術と新技術の組み合わせで代替できること。
- (2) 1 万平方メートルあたりの検査日数が 1.35 日（実稼働時間 10.8 時間）以下であること。
- (3) 従来技術の高所作業車等による「近接目視」+「打音検査」に必要な交通規制と同等もしくは軽減できること。
- (4) 直接費(人件費+機械費)が 1 万平方メートルあたり 245,000 円を大きく上回らないこと。

2. 研究の目的

本研究は、図 1 に示すウォータジェットを用いた非破壊検査法を開発し（水撃音響法）、上記性能を満足する方法を開発することを目的とした。

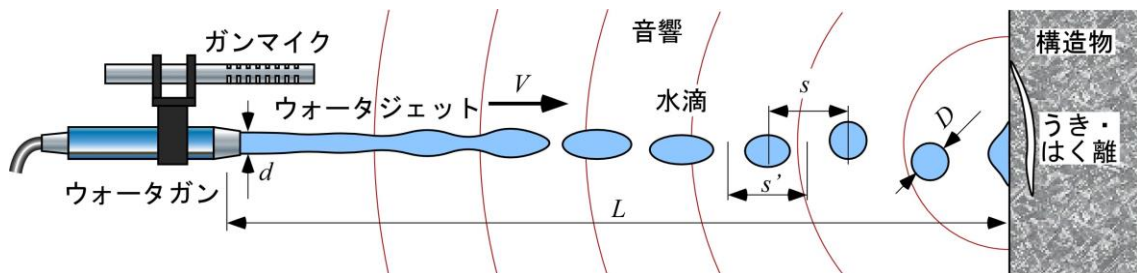


図 1 ウォータジェットを用いた非破壊検査法（水撃音響法）

3. 研究の方法

(1) ウォータジェットの特性評価

打音検査は、検査体の欠陥部の固有振動数を含む加振力を加えて、欠陥部を振動させる方法である。したがって、ウォータジェットの加振力が欠陥の振動数を含むようにする必要がある。そこで、図 2 に示すような加振力測定板を用いてウォータジェットの加振周波数を測定した。図 3 は、ウォータジェットが圧力センサに打ち当てられている様子である。

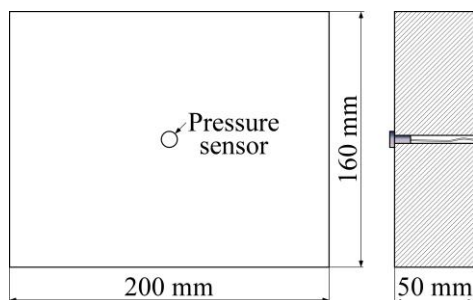


図 2 加振力測定板



図 3 加振力測定の様子

加振性能で用いたノズルを図 4 と図 5 に示す。図 4 は直噴流ノズルで、図 5 は層流ノズルである。これらのノズルの違いは、直噴流ノズルは乱流状態で直噴流が放出されるのに対して、層流ノズルは層流状態で直噴流が放出される。

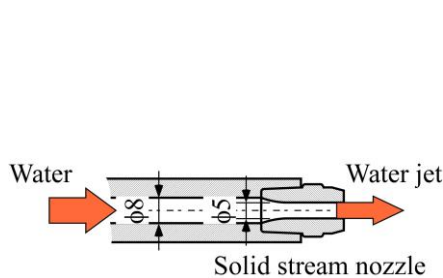


図 4 直噴流ノズル

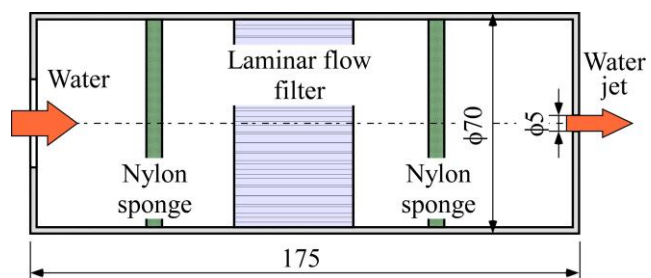


図 5 層流ノズル

(2) 静止状態での非破壊検査

直噴流ノズルを用いて静止状態での人工欠陥を有するコンクリート試験片の非破壊試験をおこなった(図6). 試験片から距離4mにおいてウォータージェットを放出し, 試験片に打ち当てた. 人工欠陥の寸法を図7に示す. 直径200mmの空洞状欠陥である. 打撃音を収集して, その周波数成分を調べた.

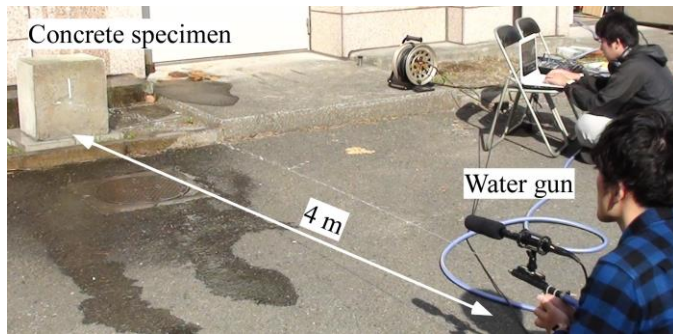


図6 静止状態での試験の様子

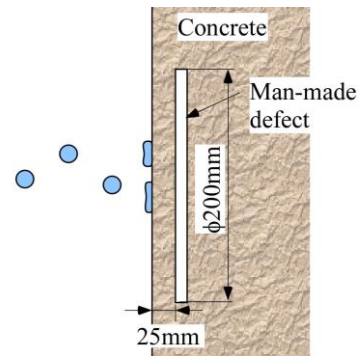


図7 コンクリート試験片

(3) 走行しながらの非破壊試験

図8に示すように, 車両からウォータージェットを放出し走行しながらの水撃音響法試験をおこなった. 図9は車両上部に搭載した水撃音響法試験装置で, ウォータガン, マイクロフォン, ビデオカメラで構成されている. 図10は, 車両内部の水撃音響法試験装置で, 水を供給する, ポンプ, バッテリー, インバータ, 水タンクなどで構成されている. 図11は, 人工欠陥入りコンクリート試験片の寸法である.



図8 走行しながらの水撃音響法試験

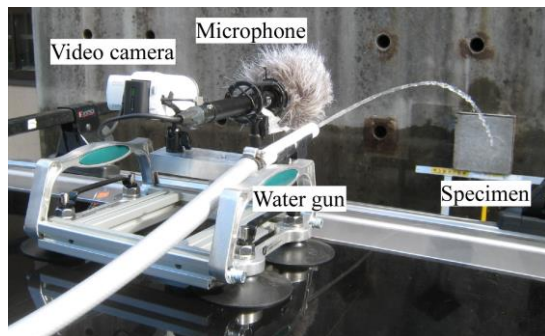


図9 車両上部の水撃音響法試験装置

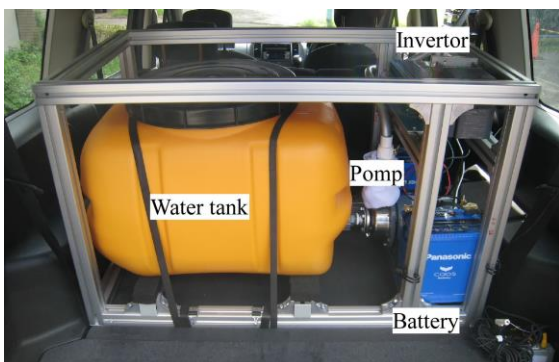


図10 車両内部の水撃音響法試験装置

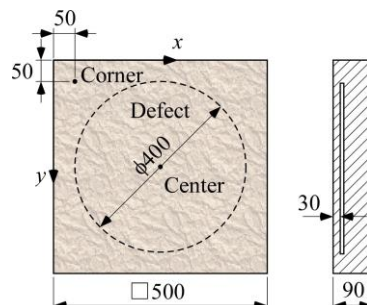


図11 人工欠陥入りコンクリート試験片

4. 研究成果

(1) ウォータジェットの特性評価

図 12 と図 13 は、直噴流ノズルと層流ノズルの加振力である。ノズルの直径は、2mm, 3mm, 5mm とした。図 14 と図 15 はその周波数スペクトルである。いずれの場合も加振力の周波数帯域は 2kHz 程度までであることがわかる。

コンクリート構造物の剥落の危険があるうき・剥離の固有振動数は一般に 2kHz 未満であり、本手法の加振周波数域の 2kHz は問題ない。

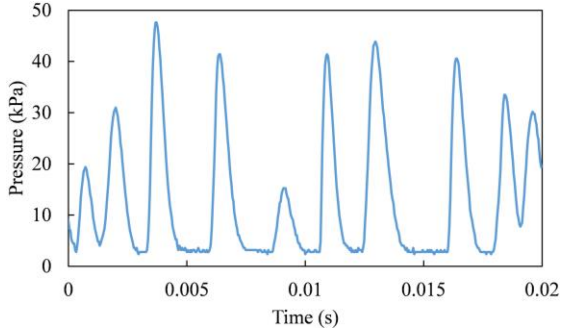


図 12 直噴流ノズルの加振力

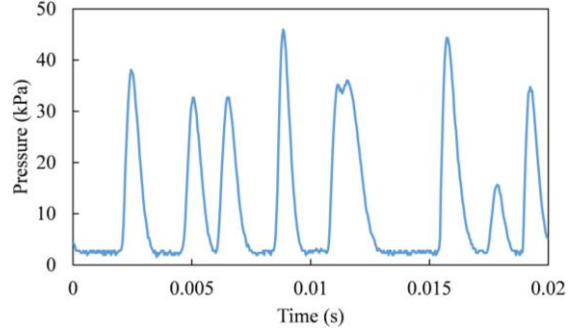


図 13 層流ノズルの加振力

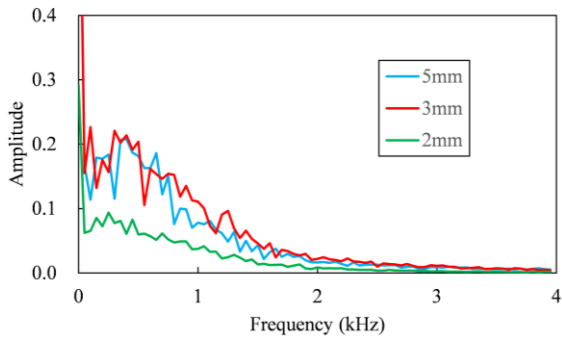


図 14 直噴流ノズルの加振力のスペクトル

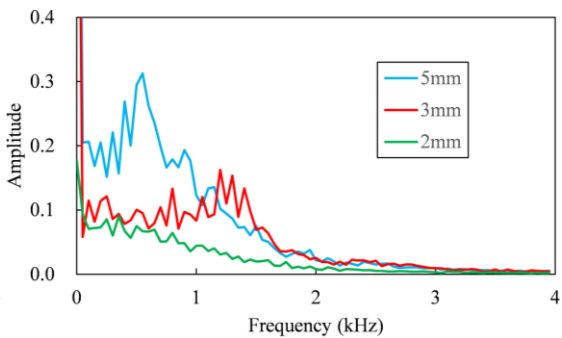


図 15 層流ノズルの加振力のスペクトル

(2) 静止状況での非破壊検査

図 16 は、欠陥がない場所をウォータジェットで叩いた時の音響の周波数スペクトルで、図 17 は欠陥上の表面を叩いた時の音響の周波数スペクトルである。ノズルは直噴流ノズルを用いて、ノズル直径を 1mm, 2mm, 5mm の三種類とした。

ノズルの欠陥のある表面の打撃音響は、欠陥の固有振動数である 2.7kHz の位置に鋭いピークが合われている。この結果、欠陥の検出が可能であることがわかる。

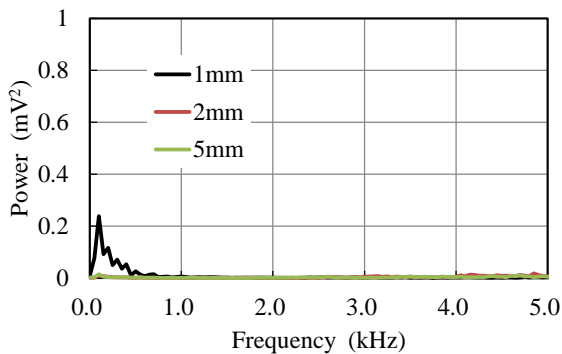


図 16 無欠陥位置の打撃音響のスペクトル

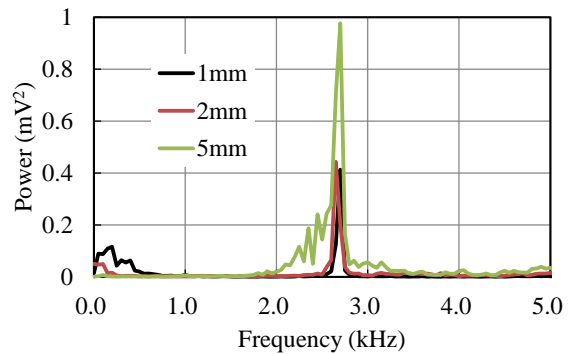


図 17 欠陥位置の打撃音響のスペクトル

(3) 走行しながらの非破壊試験

図 18 は、試験片上を 10cm 間隔でウォータージェットを走査した時の音響パワーの分布を示したものである。走行速度は 1m/s であった。時刻 1s において、ウォータージェットは試験片中央を通過している。

試験片中央部において、音響パワーが上昇している。この結果、走行試験によって欠陥の検出が可能であることがわかる。

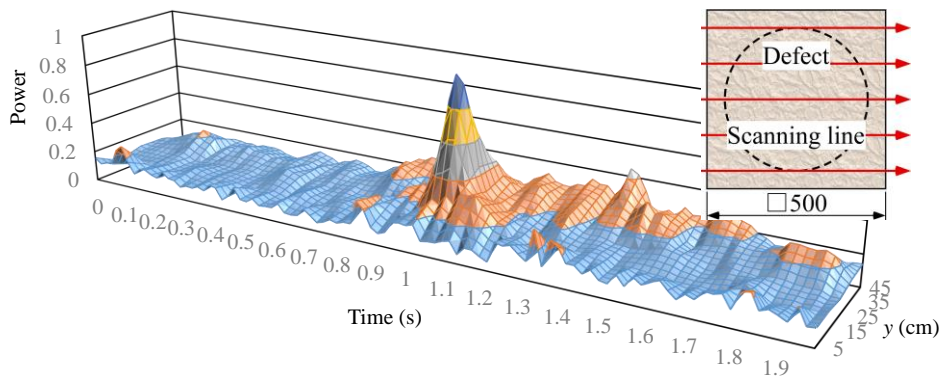


図 18 走行しながらの水撃音響法試験による音響パワー分布

(4) まとめ

当初研究目的の達成度について検証する。

- (1) 本研究手法は打音検査であり、従来の「打音検査」を代替できる。
- (2) 図 18 の検査速度は、 $0.1\text{m} \times 1\text{m/s} = 0.1\text{m}^2/\text{s}$ であった。1.35 日あたりでは、 $0.1\text{m}^2/\text{s} \times 3600\text{s/h} \times 10.8\text{h/日} = 3888$ 平米/日となる。3 本のウォータージェットを用いることによって、1 日 1 万平米の検査ができる。
- (3) 水撃音響法は、走行しながらの点検が可能であり、交通規制を必要としない。
- (4) 水撃音響法の装置は、ウォータガン、マイク、ポンプ等の汎用品で構成されており、装置は安価である。検査装置のレンタル費用は一日 10 万円を超えることはない。作業員労務費 (2 名) を 6 万円、さらに水の原価及び運搬費を考慮しても、直接費は 245,000 円を超えることはない。

以上の結果から、本研究は当初の目標を達成したと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 7 件)

- ① 森 和也, 徳臣 佐衣子, ウォータージェットによる構造物の遠隔打音検査, 電気学会誌, 査読有, 139 巻, 5 号, 2019, pp. 292-295
- ② Kazuya Mori, Saeko Tokuomi, A New Remote Nondestructive Testing Method for Concrete Walls, Proceedings of The Fourth World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, 査読有, 2019, ICSECT 114
- ③ 森 和也, 徳臣 佐衣子, ウォータージェットによる構造物の非破壊検査法: 水撃音響法の走行試験, 検査技術, 査読有, Vol. 23, No. 10, 2018, pp. 1-7
- ④ 森 和也, 徳臣 佐衣子, 人工欠陥を有するコンクリート試験片の水撃音響法による走行試験, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, 査読有, Vol. 6, 2018, pp. 229-234
- ⑤ Kazuya Mori, Saeko Tokuomi and Ippei Torigoe, Running Test of Water Jet Impact Acoustic Method, Proceedings of The Sixth Japan-US NDT Symposium, 査読有, 2018, 501007
- ⑥ Kazuya Mori, Saeko Tokuomi, Nondestructive Testing Method for Concrete Structures by Using Water Jet, Proceedings of the 6th JSME/ASME 2017 International Conference on Materials and Processing, 査読有, 2017, ICMP2017 - 4392
- ⑦ 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 (水撃音響) の走行試験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 39, No. 1, 2017, pp. 1897-1902

〔学会発表〕 (計 14 件)

- ① 中村 有博, 菅遼 太郎, 森 和也, 徳臣 佐衣子, 水撃音響法の走行試験における検査速度の向上, 日本材料学会第 31 回日本材料学会信頼性シンポジウム, 2018.12
- ② 菅 遼太郎, 森 和也, 徳臣 佐衣子, 中村 有博, 水撃音響法におけるウォータージェットの加振力日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス, 2018.12
- ③ 森 和也, 徳臣 佐衣子, タイルやコンクリート構造物のはく離の高速非破壊検査水撃音響

法，第8回おおた研究・開発フェア，2018.10

- ④森 和也，徳臣 佐衣子，水撃加振とレーザー計測を用いた非破壊検査法，土木学会第73回年次学術講演会，2018.9
- ⑤森 和也，徳臣 佐衣子，車両に搭載した水撃音響法試験装置，日本非破壊検査協会第25回超音波による非破壊評価シンポジウム，2018.1
- ⑥森 和也，徳臣 佐衣子，ウォータージェットによる非破壊検査法(水撃音響法)の加振周波数，土木学会第72回年次学術講演会，2017.9
- ⑦枳殻 真太郎，森 和也，徳臣 佐衣子，水撃音響法におけるマーキング法，日本材料学会第18回破壊力学シンポジウム，2017.12
- ⑧菅遼 太郎，的場 幸三，森 和也，徳臣 佐衣子，ウォータージェットとレーザー計測を用いた非破壊検査法，日本材料学会第18回破壊力学シンポジウム，2017.12
- ⑨林竜 之介，河野 友郎，中村 有博，森 和也，徳臣 佐衣子，水撃音響法の走行試験，日本材料学会第18回破壊力学シンポジウム，2017.12
- ⑩河野 友郎，喜多 宏伸，森 和也，徳臣 佐衣子，水撃音響法における外部騒音の影響，日本材料学会第18回破壊力学シンポジウム，2017.12
- ⑪森 和也，徳臣 佐衣子，水撃音響法の移動試験，日本機械学会2017年度年次大会，2017.9
- ⑫森 和也，徳臣 佐衣子，車両搭載型水撃音響試験装置の開発，日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス，2017.10
- ⑬森 和也，徳臣 佐衣子，ウォータージェットを用いた非破壊検査「水撃音響法」における整流効果，土木学会第71回年次学術講演会，2016.9
- ⑭森 和也，徳臣 佐衣子，掘 耕太，持原 宏丞，林 竜之介，水撃を用いた構造物のうき・はく離検出，日本機械学会2016年度年次大会，2016.9

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：徳臣 佐衣子

ローマ字氏名：Tokuomi Saeko

所属研究機関名：熊本大学

部局名：大学院先端科学研究部

職名：特別研究員

研究者番号(8桁)：40646121