

論文 ウォータジェットを用いた打音試験法（水撃音響法）の走行試験

森 和也^{*1}・徳臣 佐衣子^{*2}

要旨：ウォータジェットを構造物に当て、その音響を収集して構造物の非破壊試験を行う水撃音響法の走行試験を行った。台車に、水撃音響法の装置と水タンクおよびポンプを積載し、距離を2mに保ちつつ移動しながらはく離タイルの検出を行った。走行速度が1m/s程度であれば、大きさ□150mmから□300mmのはく離タイルの検出が可能であった。走行速度が2m/sになると走行音響のために、周波数の低い□300mmのはく離タイルの検出は困難であった。また、ウォータジェットによる加振力の周波数成分についても検討した。

キーワード：非破壊試験, 水撃音響法, ウォータジェット, 遠隔試験, 走行試験

1. はじめに

筆者らは、遠隔にてトンネルや橋梁のうき・はく離箇所を検出することを目的として、水撃音響法(Water Jet Impact Acoustic Method)を開発した¹⁾。水撃音響法とは、**図-1**に示すように、ウォータジェットを試験する構造物に当てて加振し、その音響からうき・はく離を検出する方法である。

遠隔にてうき・はく離を検知する一般的な方法としては、赤外線サーモグラフィ法²⁾がある。赤外線サーモグラフィ法の原理は、うき・はく離によって生じる断熱を利用し、うき・はく離部が周囲と異なる温度を生じることを利用する。したがって、トンネルなどの太陽光を利用できない場所においては、加熱源を必要とし装置が大掛かりになる。また、加熱に時間を要する。

その他の方法として、レーダを用いた方法³⁾やレーザを用いた方法⁴⁾が開発されているが、これらの方法も装置が大掛かりであり、移動しながらの試験には計測に時間を要する。

そこで、本論文では走行しながら水撃音響法で試験を行い、その適用限界と課題を探った。試験対象は、一辺の長さが、150mm, 200mm, 300mmの三種類のタイルのはく離検出とした。また、ウォータジェットによる加振周波数成分についても検討した。

2. 水撃音響法の走行試験方法

2.1 試験装置

水撃音響法の目的は効率的な試験である。そのためには移動しながらの試験が必要である。そこで本論文では、台車に水撃音響法の試験装置を搭載し、走行しながらタイルのはく離検出試験を行った。**図-2**にその試験装置を示す。台車に、ウォータガン、ガンマイク、ビデオカメラ、ポンプ、水タンク、バッテリーを搭載している。ウォータガンから放出されるウォータジェットは、水タンクからポンプによって供給される。ウォータジェットが試験面をたたいて生じる音響は、ガンマイクで収集され、ビデオカメラで録音される。台車は試験者が押して走行させるが、台車の速度は台車に設置した回転式速度計によって確認することができる。

2.2 試験片

試験片は、**図-3**に示すようなはく離したタイルとした。タイルは厚さ約7mmの磁器製で、サイズを□150mm, □200mm, □300mmの三種類とした。タイルのはく離は、**図-3(c)**に示すようにタイルの周囲をスペーサでコンクリート板に張り付けることによって製作した。

図-3のはく離試験片は、**図-4**に示すように、全面コンクリート板に張り付けたタイルと組み合わせて、走行しながらの試験に用いた。

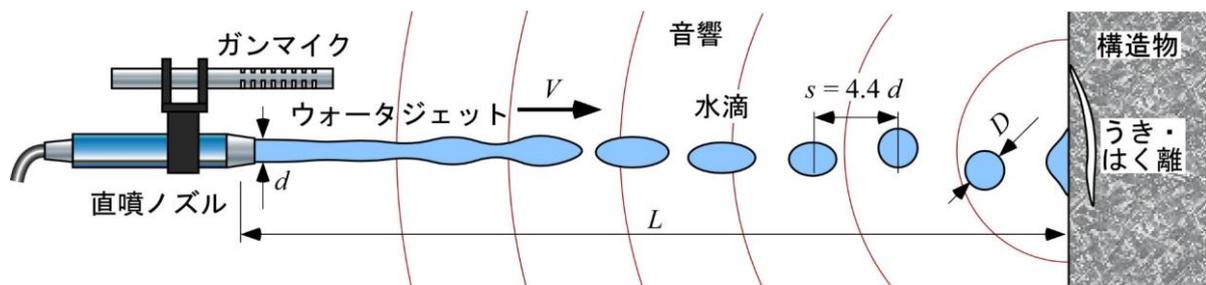


図-1 ウォータジェットを用いた非破壊試験

*1 熊本大学大学院 先端科学研究部教授 工(博) (正会員)

*2 熊本大学大学院 先端科学研究部技術補佐員

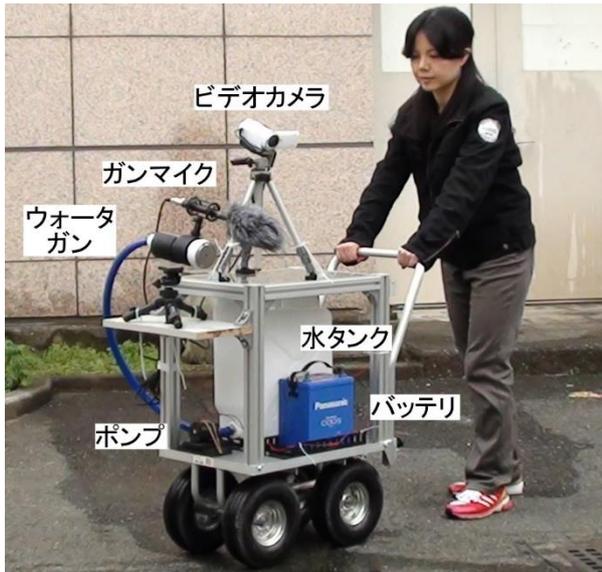


図-2 台車に搭載した水撃音響法試験装置

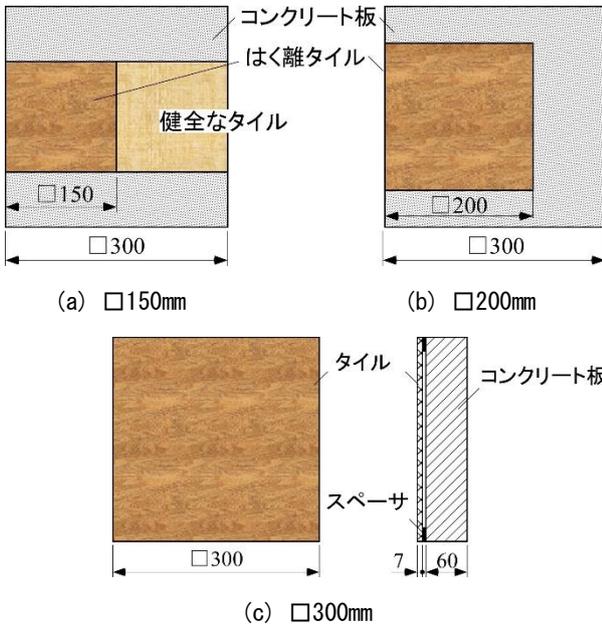


図-3 はく離タイルの試験片

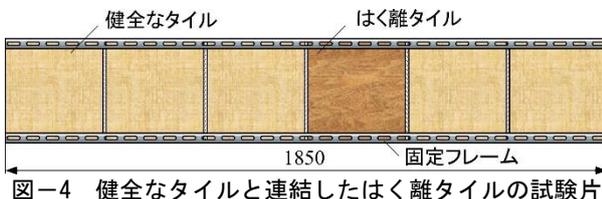


図-4 健全なタイルと連結したはく離タイルの試験片



図-5 走行しながらの水撃音響法試験の様子

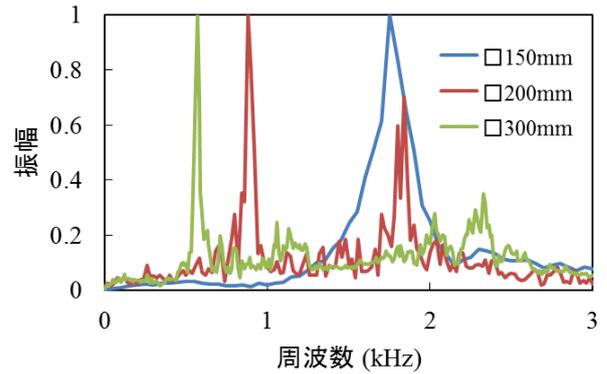


図-6 ハンマーの打撃によるはく離タイルの周波数スペクトル

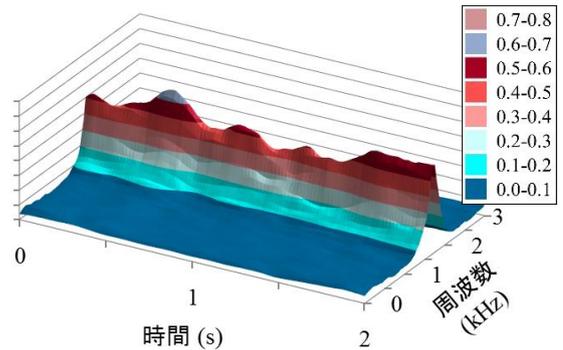


図-7 □150mm タイルの周波数スペクトル (三次元表示)

2.3 試験方法

走行しながらの水撃音響法試験の様子を図-5 に示す。試験装置は、試験片との距離を 2m に保ちながら走行させた (1.5m 以下では十分に水滴が形成されないため¹⁾)。走行の速度は、0.5m/s、1m/s、2m/s の三種類とした。用いたノズル直径 d は、2mm、3mm、5mm の三種類とした。ウォータジェットの速度は 10m/s 一定とした。

3. 試験結果

3.1 はく離タイルの固有振動数測定結果

走行しながらの水撃音響法に先立ち、図-3 のはく離タイルの固有振動数を、ハンマーを用いた打音法と台車を停止させた状態での水撃音響法で測定した。水撃音響法での測定は、直径 2mm のノズルを用いて、走行試験と同じ 2m の距離を隔てて試験した。

図-6 は、ハンマーの打撃によって生じたはく離タイルの音響の周波数スペクトルである。□150mm は 1.8kHz に、□200mm は 0.9kHz と 1.8 kHz に、□300mm は 0.5kHz、1.2kHz、2.0kHz および 2.3kHz に固有振動数があることがわかる。

図-7 は、水撃音響法で求められた□150mm タイルの周波数スペクトルの結果である。水撃音響法は、ウォータジェットによる打撃の連続音を逐次周波数スペクトルに変換するので、時間に対する周波数スペクトルの連続

変化を得ることができる。図-7の各時間における周波数スペクトルは、図-6の□150mmタイルの周波数スペクトルによく一致していることがわかる。

図-8は、図-7の結果を二次元で表示したものである。三次元表示は、振幅の大きさはわかりやすいが、山に隠れた部分が確認できないので、以下ではすべて二次元表示とした。

また、本論文で示す水撃音響法におけるスペクトルの大きさは、スケールをすべて固定しており、スペクトル間の相対的な比較が可能である。

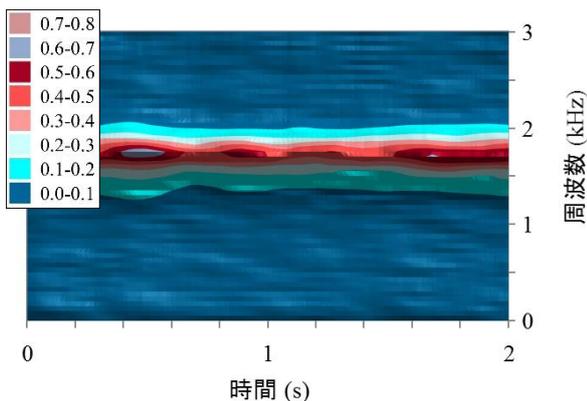


図-8 □150mmタイルの周波数スペクトル
(二次元表示)

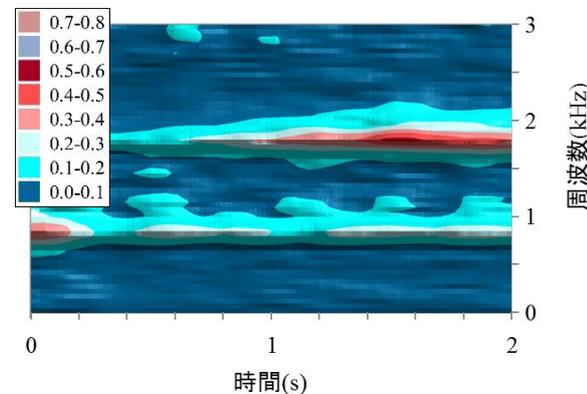


図-9 □200mmタイルの周波数スペクトル

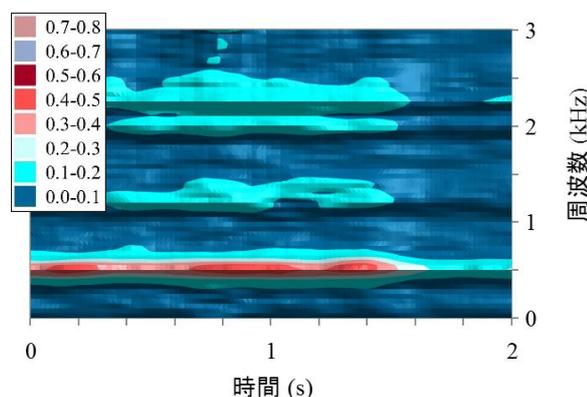


図-10 □300mmタイルの周波数スペクトル

図-9および図-10は、それぞれ□200mmタイルと□300mmタイルの周波数スペクトルの時間変化である。図-9の□200mmタイルの周波数スペクトルにおいて、0.9kHzと1.8kHzの位置に連続的にピークが確認できる。また、図-10の□300mmタイルの周波数スペクトルにおいて、0.5kHz、1.2kHz、2.0kHzおよび2.3kHzの位置に連続的にピークが確認できる。図-9と図-10の結果は、図-6のハンマーの打撃によって求められた固有振動数とよく一致している。

3.2 水撃音響法の走行試験結果

3.2.1 □150mmのはく離タイルの試験結果

図-11～図-13に、□150mmのはく離タイルの試験結果を示している。図-11はノズル直径が2mmの結果、図-12は3mmの結果、図-13は5mmの結果である。

図-11～図-13のそれぞれの図における低い周波数のスペクトルのピークは台車の走行音によるものである。このことは、図-8～図-10の周波数スペクトルからも確認できる。図-8～図-10においては、台車が停止していることから走行音が無いため、低い周波数でのピークが存在しない。

図-11～図-13から次のことが確認できる。

- (a) □150mmのはく離タイルに対して、走行速度が1m/s以下であれば、2mm～5mmの直径のノズルを用いて検出が可能である。
- (b) □150mmのはく離タイルに対して、走行速度が2m/sのとき、2mmの直径のノズルを用いた検出では、走行音が検出の障害になる。

3.2.2 □300mmのはく離タイルの試験結果

図-14～図-16に、□300mmのはく離タイルの試験結果を示している。図-14はノズル直径が2mmの結果、図-15は3mmの結果、図-16は5mmの結果である。

図-14～図-16においても、低い周波数に走行音によるピークが確認できる。図-11～図-13と同様に、速度が速いほど走行音によるスペクトルのピークは大きくなっている。

図-14～図-16から次のことが確認できる。

- (c) □300mmのはく離タイルに対して、走行速度が0.5m/sのとき、2mm～5mmの直径のノズルを用いて検出が可能である。
- (d) □300mmのはく離タイルに対して、走行速度が1m/sのとき、2mmの直径のノズルを用いた検出では、走行音が検出の障害になる。
- (e) □300mmのはく離タイルに対して、走行速度が2m/sのとき、2mm～5mmの直径のノズルを用いた検出では、走行音が検出の障害になる。これは、□300mmのはく離タイルの固有振動数が低く、走行音と低い周波数領域で重複するからである。

3.2.3 □200mmのはく離タイルの試験結果

□200mmのはく離タイルに対しても、同様の試験を行った。その結果得られた周波数スペクトルは、□300mm

のはく離タイルの周波数スペクトルとほぼ同じであった。そこで、□200mmのはく離タイルの試験結果はここでは割愛する。

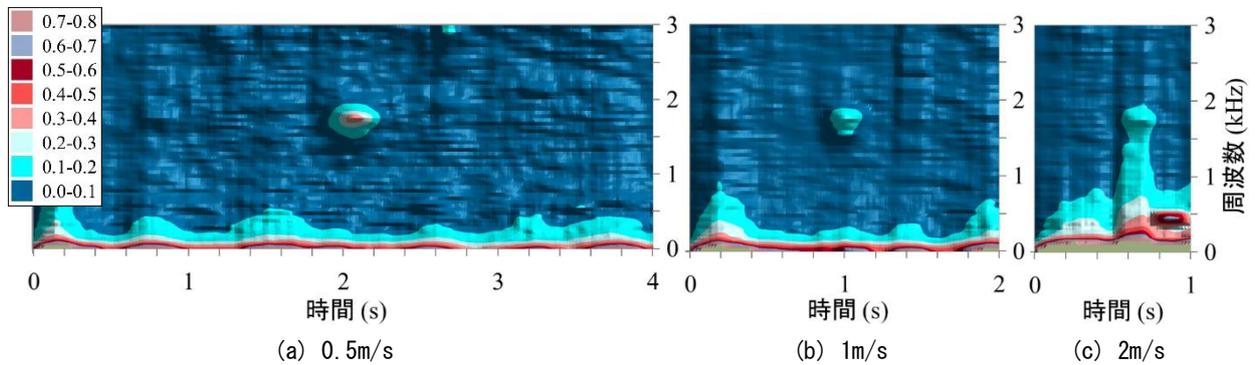


図-11 □150mmのはく離タイルに対する水撃音響法の周波数スペクトル（ノズル直径2mm）

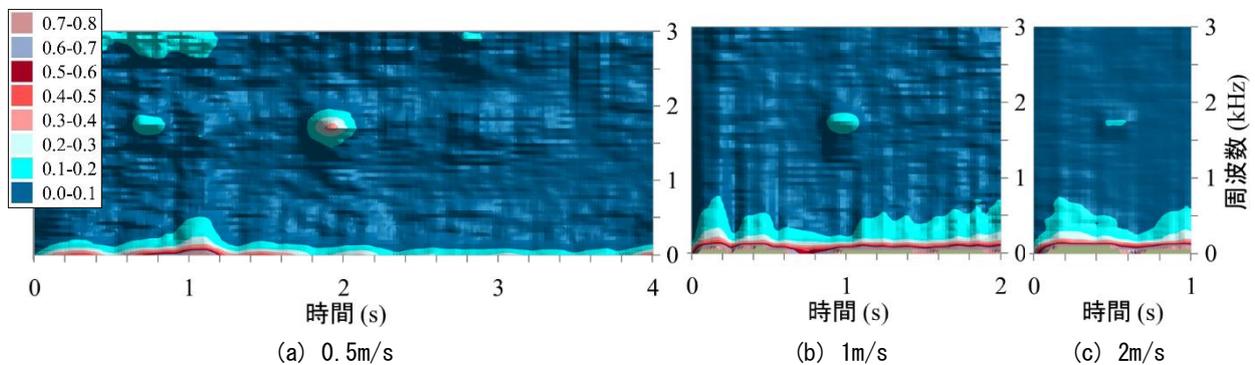


図-12 □150mmのはく離タイルに対する水撃音響法の周波数スペクトル（ノズル直径3mm）

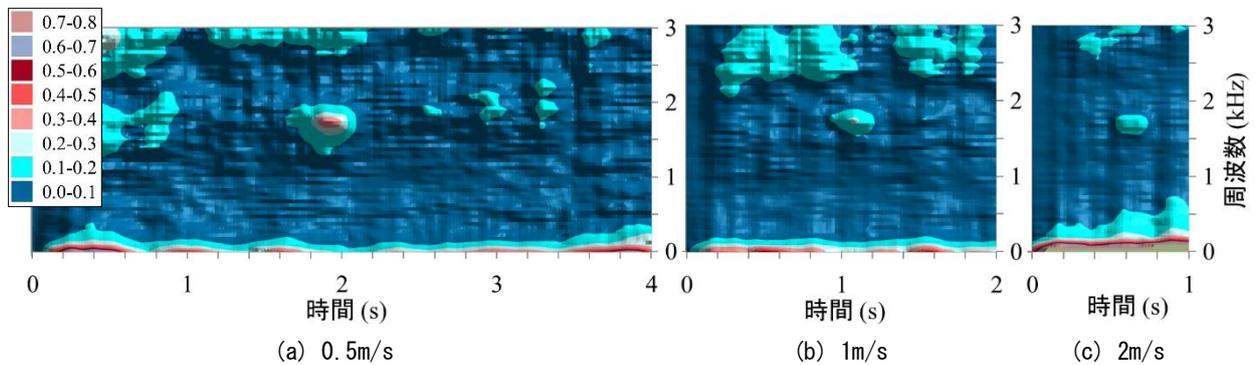


図-13 □150mmのはく離タイルに対する水撃音響法の周波数スペクトル（ノズル直径5mm）

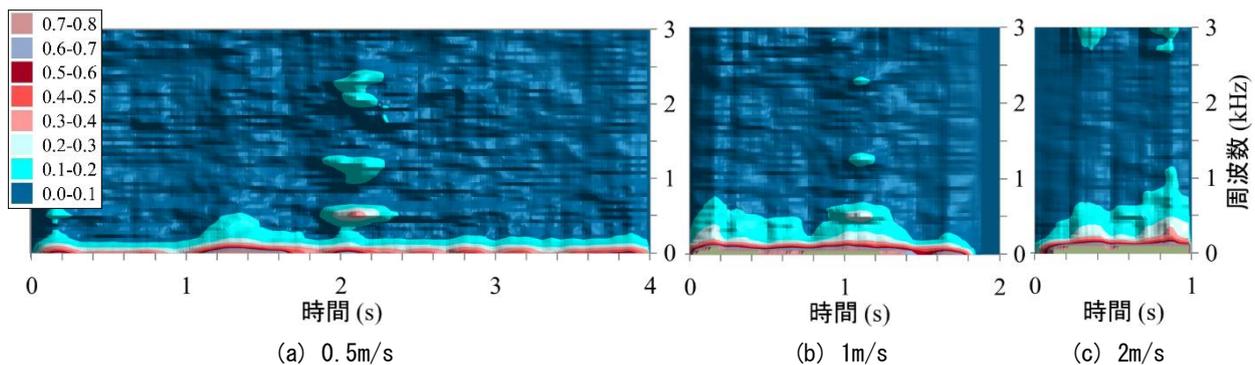


図-14 □300mmのはく離タイルに対する水撃音響法の周波数スペクトル（ノズル直径2mm）

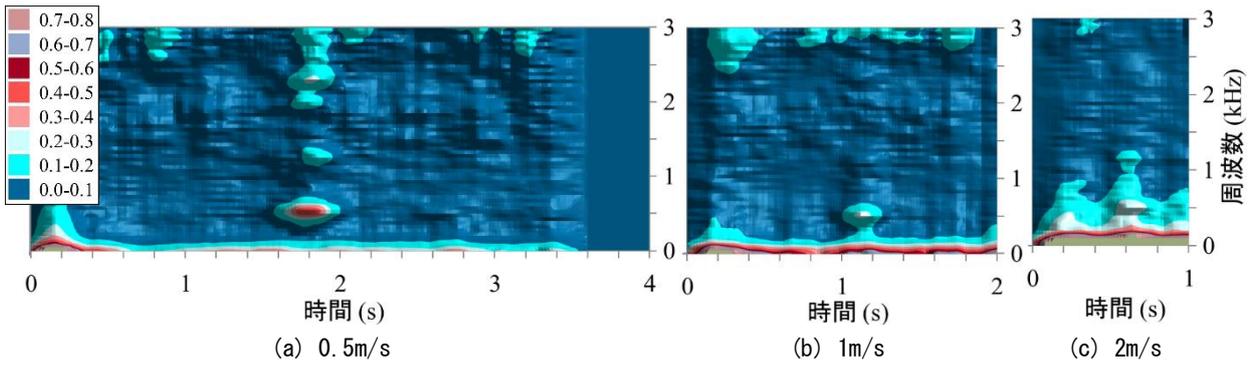


図-15 □300mmのはく離タイルに対する水撃音響法の周波数スペクトル（ノズル直径 3mm）

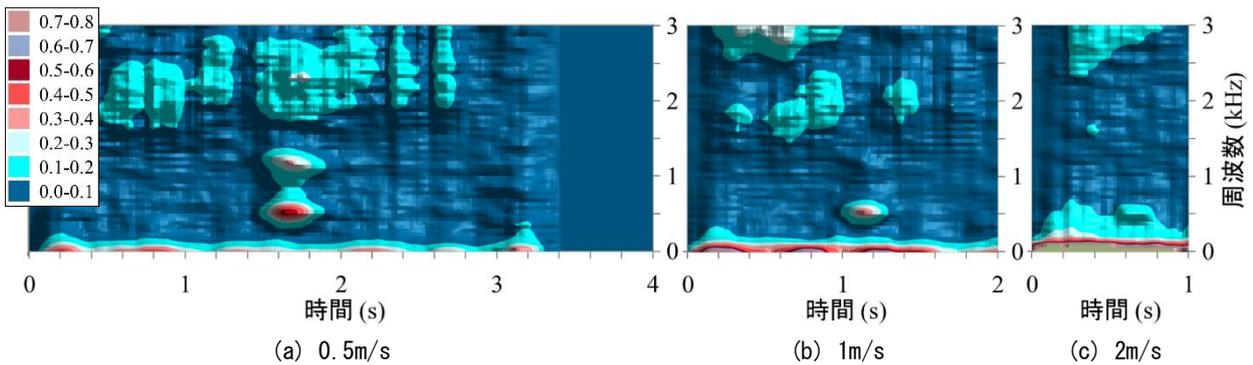


図-16 □300mmのはく離タイルに対する水撃音響法の周波数スペクトル（ノズル直径 5mm）

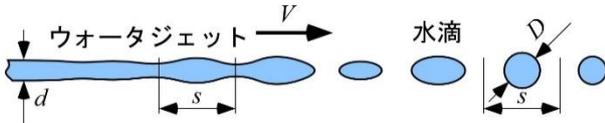


図-17 水滴間隔と水滴の大きさの関係

4. 考察—水撃音響法の加振周波数

水撃音響法は水を用いた打音法である。したがって、検出したい欠陥の固有振動を有する加振力をウォータジェットによって発生させる必要がある。そこで、ウォータジェットによる加振力が有する周波数領域を把握しておく必要がある。個々の水滴による加振周波数についてはすでに検討されているので⁵⁾、ここでは連続する水滴の打撃による加振周波数に関して検討する。

図-17に示すように、ウォータジェットは水の表面張力によって水滴化する。水滴の間隔 s はウォータジェットの直径 d （ノズルの直径）の約 4.4 倍に、水滴直径 D は d の約 1.9 倍になることが理論的に求められている^{6), 7)}。

しかし、実際には水滴の間隔は不均一になり、水滴の大きさも不均一になる。この不均一性は解析的に求めるのは難しいので、実験的に水滴間隔を測定し、ウォータジェットの加振周波数を求めた。

図-18は、直径 $d=5\text{mm}$ のノズルから、流速約 10m/s で放出されたウォータジェットの写真である。写真は、ノズルの位置から 1m の距離からの様子である。太陽光に対して、垂直に配置したスクリーン上の水滴の影から、水滴の間隔を測定した。

水滴を球形と仮定すると、水滴が壁面に接触し始めた時からの時間 t とウォータジェットの速度 V から水滴の接触半径 R が次式のように求められる¹⁾。

$$R = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - V \cdot t\right)^2} \quad (1)$$

衝撃力 F は、単位時間当たりの水の衝突する質量 $\rho\pi R^2V$ に流速 V をかけたものなので（ ρ は水の密度）、

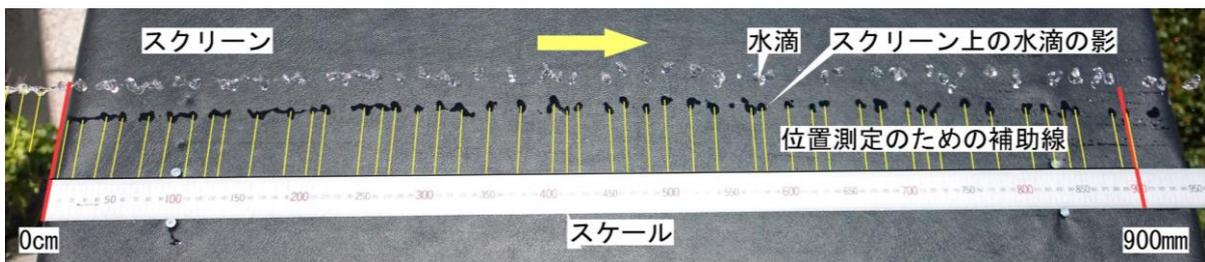


図-18 ウォータジェットの水滴間隔の測定

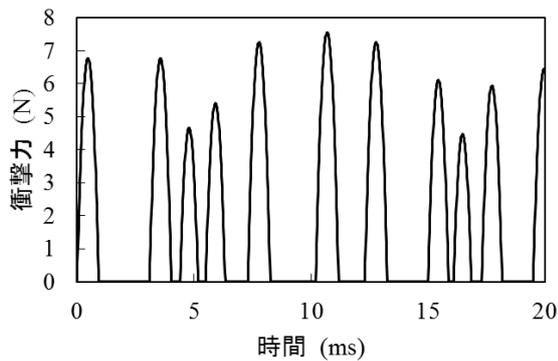


図-19 図-18の水滴間隔と式(2)から求めた衝撃力

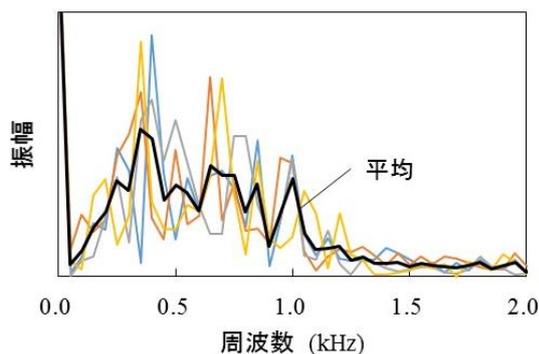


図-20 図19の衝撃力(20ms)の周波数スペクトル

衝撃力 F は、単位時間当たりの水の衝突する質量 $\rho\pi R^2V$ に流速 V をかけたものなので、次式のように表される。

$$F = \rho\pi R^2V \times V = \rho\pi R^2V^2 \quad (2)$$

図-18 から計測された水滴間隔と水滴の位置をもとに、式(1)と式(2)を用いて壁面が受ける衝撃力を計算すると図-19 のようになる。

図-20 は、図-19 の衝撃力(20ms)の周波数スペクトルと他の時間(20ms)の衝撃力の周波数スペクトルである。一つの水滴による衝撃力の周波数スペクトルは、周波数がゼロの位置で最大となり、周波数が大きくなるにしたがってなだらかに低下する。しかし、図-20 においては、0.4kHz から 1.0kHz にかけて振幅が大きくなっている。この理由は、ウォータジェットによる衝撃力の周波数は、水滴の打撃の周期性によるものだからである。図-19 に示すように、20ms 間に平均して 10 個程度の水滴の衝突があり、その平均周波数は $10/20\text{ms} = 0.5\text{kHz}$ となる。水滴間隔は変動するので周波数帯域は幅を持ち、0.4kHz から 1.0kHz にかけて振幅が大きくなるのである。

図-19 と図-20 から次のことがわかる。

- (a) 直径 5mm のノズルから 10m/s で放出されたウォータジェットは 2kHz 程度までの加振周波数成分を持つ。
- (b) 水滴の間隔はウォータジェットの速度に依存しないので、二倍の 20m/s で放出すると水滴打撃の周期が二倍になり、2kHz の二倍の 4kHz 程度までの加振周波数

域を持つ。

- (c) 水滴間隔はノズル径に比例するので、半分の 2.5mm のノズル径にすると水滴の間隔が半分になり、2kHz の二倍の 4kHz までの加振周波数域を持つ。

5. おわりに

水撃音響法の装置を台車に乗せて、走行しながらの試験を行った。試験片ははく離タイルで、走行速度を変化させて検出性能を評価した。また、ウォータジェットによる加振の周波数についても検討した。その結果以下の結論を得た。

- (1) □150mm のはく離タイルに対して、走行速度が 1m/s 以下であれば、2mm~5mm の直径のノズルを用いて検出が可能である。
- (2) □300mm のはく離タイルに対して、走行速度が 1m/s のとき、3mm, 5mm の直径のノズルを用いて検出が可能であるが、2mm の直径のノズルを用いた検出では走行音が検出の障害になる。
- (3) 走行速度の騒音は周波数が低く、検出する欠陥の固有振動数が低い場合は障害になる。
- (4) ノズル直径 5mm, 流速 10m/s のウォータジェットは、2kHz 程度までの加振周波数成分を持つ。
- (5) ウォータジェットの加振周波数の範囲は、ウォータジェットの速度に比例し、ノズル直径に反比例する。

参考文献

- 1) 森和也, 徳臣佐衣子: ウォータ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) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書, pp.138-196, 1992.3
- 3) 朴錫均, 魚本健人, 吉沢勝: レーダ法によるコンクリート内部の空隙計測に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.1191-1196, 1995.7
- 4) Laurence, J. Jacobs, Richard W. Whitcomb: Laser Generation and Detection of Ultrasound in Concrete, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 16, No. 2, pp. 56-65, Jun. 1997
- 5) Brian A. Mazzeo, Anjali N. Patil, W. Spencer Guthrie: Acoustic impact-echo investigation of concrete delaminations using liquid droplet excitation, NDT & E International, Vol. 51, pp. 41-44, 2012
- 6) Rayleigh, L.: On the Instability of Jets, Proc. London Math. Soc., Vol. 10, pp. 4-13, Nov. 1878
- 7) Weber, C.: Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles, Z. angew. Math. Mech., Vol. 11, pp. 136-154, 1931