

論文 ウォータジェットを用いた構造物の遠隔非破壊試験法

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を開発した。ウォータガンのノズルから放水された直噴流は水の表面張力によって水滴化し、検査面を周期的に打撃する。構造物のうき・はく離にウォータジェットが当たると、うき・はく離部は振動し音響を発生する。この音響を遠隔にて収集する。コンクリート試験体の表面から深さ 25mm に位置する直径 200mm の円盤状の人工欠陥と外壁タイルのうきを検査面より 4 メートルの距離から検知することが可能であった。

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, 構造物

1. はじめに

トンネルや橋梁のうき・はく離箇所の検知の課題は、交通規制を要すること、労力と時間を要すること、うき・はく離箇所の記録に時間を要すること、見落としの可能性などである。これらの課題を解決する方法の一つとして、遠隔にて試験をおこなう方法がある。遠隔にて試験をおこなうことができれば、足場を用いる必要がなくなったり、走行しながらの試験が可能になったりすることが期待できるからである。

遠隔にてうき・はく離を検知する方法としては、赤外線サーモグラフィ法¹⁾、レーダ法²⁾などがあり、近年、音波を用いた方法^{3), 4)}やレーザを用いた方法⁵⁾が開発されている。これらの方法の問題点は以下のようなものがある。

赤外線サーモグラフィ法は加熱源を必要とし、装置が大掛かりで、加熱に時間を要する。音波およびレーザを用いる方法は、振動の計測にレーザ振動計を用いるのが一般的で、計測機器を移動しながらの試験には課題がある。また、試験装置が高額になる。

そこで、本論文では図-1 に示すようなウォータジェットを構造物に打ち当てて、その音響を計測し、うき・はく離を検知する方法を開発した⁶⁾。これを水撃音響法と呼ぶ(Water Jet Impact Acoustic Method)。本論文では水撃音響法を、コンクリート試験体内の人工欠陥と外壁タイルのうきの検知に適用し、その有効性を検証した。

2. ウォータジェットを用いた非破壊検査：水撃音響法

図-1 に示すように、ノズルから放水された直噴流は、水の表面張力によって水滴化する。水滴の間隔 s は直噴流の直径 d (ノズルの直径) の約 4.4 倍になることが理論的に求められている^{7), 8)}。

$$s = 4.4d \quad (1)$$

直噴流の断面積 $\pi d^2/4$ と s の積が一つの水滴の体積 $\pi D^3/6$ と等しくなるので、水滴の直径 D は次のように求められる。

$$D = 1.9d \quad (2)$$

ウォータジェットの速度を V とすると、水滴が構造物を叩く周期 f は次のようになる。

$$f = V/s = 0.23V/d \quad (3)$$

また、一個の水滴が検査面を押す時間 T と力積 J は、

$$T = D/V = 1.9d/V \quad (4)$$

$$J = mV = \rho \frac{\pi D^3}{6} V = 3.6\rho d^3 V \quad (5)$$

ここで、 m は一個の水滴の質量、 ρ は水の密度である。

例えば、ノズルの直径を $d = 5\text{mm}$ 、ウォータジェットの速度を $V = 10\text{m/s}$ とすると、水滴の間隔は $s = 22\text{mm}$ 、直径は $D = 9.5\text{mm}$ 、周波数は $f = 0.23 \times 10 / 0.005 = 460\text{Hz}$ となる。

この周波数がうき・はく離の振動数と近いとき、うき・はく離部は振動し音響を発生する。その音響を計測することによってうき・はく離を検知することができる。

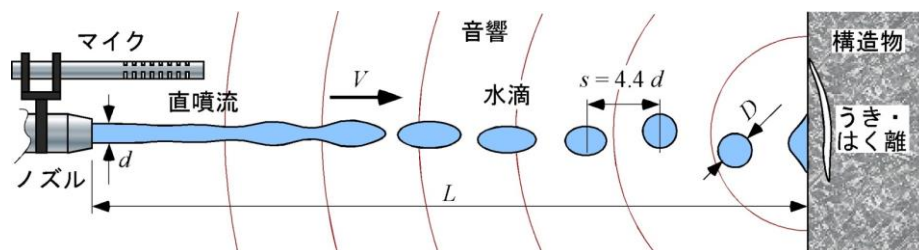


図-1 ウォータジェットを用いた非破壊検査

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工(博) (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科

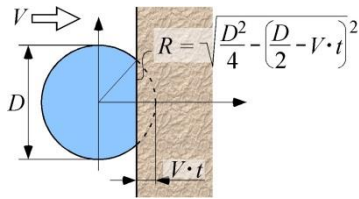


図-2 水滴の接触時間－接触面積の関係

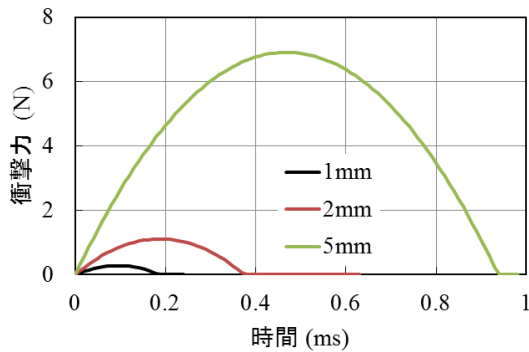


図-3 ノズル直径 $d = 1\text{mm}$, 2mm , 5mm に対する一個の水滴による接触時間－衝撃力の関係 (10m/s)

一個の水滴による時間－衝撃力の関係は次のように求められる。図-2 に示すように、水滴を球形とし、水滴が壁面に接触してからの時間を t とすると、水滴の接触半径 R は次のようになる。

$$R = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - V \cdot t\right)^2} = \sqrt{Vt(1.9d - Vt)} \quad (6)$$

したがって、衝撃力 F は、

$$F = \rho \pi R^2 V \times V = \rho \pi V^3 t (1.9d - Vt) \quad (7)$$

式(7)からノズル径 $d = 1\text{mm}$, 2mm , 5mm に対する一個の水滴の衝撃力は、図-3 のように求められる。ここで、水の密度は $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ 、速度は $V = 10\text{m/s}$ とした。水滴による衝撃力は鋼球の打撃による衝撃力と同様な半正弦波形状になり、ノズル径の拡大に伴い急激に強くなる。

3. 実験

水撃音響法はウォータジェットの水滴による加振であるので、まず水滴の状態を観察した。その後、人工欠陥と外壁タイルのうきの検知試験をおこなった。

3.1 試験装置

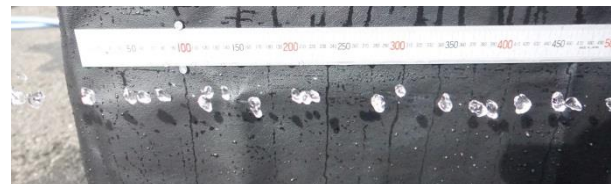
図-4 に試験装置の構成を示している。ノズルが交換できるウォータガンとショットガン型のマイクロフォンからなる。水は水道から供給し、ウォータガンに取り付けたバルブでウォータジェットの速度を調整した。ウォータジェットの最大速度は約 14m/s であった。マイクロフォンで収集した音響信号は、マイクアンプで増幅して、デジタルオシロスコープに取り込んだ。



図-4 ウォータガンとマイクロフォン



(a) ウォータガン先端から 0.5m までの距離



(b) ウォータガンから 1.0m－1.5m の距離

図-5 ウォータジェットの粒子化の状態

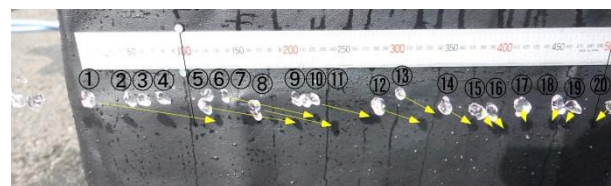


図-6 水滴の個数と間隔

3.2 ウォータジェット

図-5 はウォータジェットがノズルから放水されたあとの状態を示した写真である。ノズルの直径は $d = 5\text{mm}$ で、ウォータジェットの速度は $V = 10\text{m/s}$ である。図-5(a)はウォータジェットがノズルから放水された直後から 0.5m までの位置である。ウォータジェットは連続した直噴流であることが確認できる。図-5(b)はノズル先端から $1.0\text{m} - 1.5\text{m}$ の距離のウォータジェットで、水滴化しているのがわかる。

図-6 は、図 5-(b)をもとに、水滴の平均間隔 s を求めた図である。背面のスクリーン上に映った水滴の影から水滴の位置を確認した。図-6 からわかるように、 400mm の間隔に 20 個の水滴が確認できる。その結果 s の平均値は $s = 400/20 = 20\text{mm}$ となった。

式(1)から予測される水滴間隔は $s = 4.4 \times 5 = 22\text{mm}$ で、実験結果とほぼ一致した。ただし、図-5(b)からわかるように、個々の水滴の大きさおよび間隔にはばらつきがある。

3.3 人工欠陥の検知試験

図-7 に示すような円盤状人工欠陥（深さ 25mm，直径 200mm）を埋め込んだコンクリート試験体と欠陥のない試験体の水撃音響法試験をおこなった。

試験条件は，ウォータガンから試験体までの距離を 4m，ウォータジェット速度を $V = 10\text{m/s}$ ，ノズルの直径を $d = 1\text{mm}, 2\text{mm}, 5\text{mm}$ の三種類とした。図-7 に示すように，ウォータジェットは検査面に当たる位置においてある程度広がり，その直径はおおよそ $W = 10\text{cm}$ であった。

図-8 は直径 $d = 5\text{mm}$ のノズルから放水されたウォータジェットが欠陥のない試験体に衝突したときの音響信号の一例である。式(3)から，ウォータジェットによる加振周波数は $f = 460\text{Hz}$ となるので，20ms 内での水滴の衝突の回数は $460\text{Hz} \times 0.02\text{s} = 9.2$ 回となる。図-8 中のパルス的に音響信号が大きくなっている回数は，おおよそ 9 回程度であるので，パルス的に大きくなっている信号は水滴の衝突音と推定される。

水滴の衝突速度はほぼ一定であるので，パルスの大きさの違いは水滴の大きさの違いによるものである。したがって図-8 の結果からも，水滴の大きさはばらつきを持つことがわかる。また，パルスの間隔が一樣でないことは，水滴の間隔がばらついていることを示している。

図-9 は信号処理方法を示した図である。連続して計測される音響信号を分割し，それぞれの信号のスペクトルを求め平均する。本研究では，200ms の音響信号を 10 分割し，それぞれのスペクトルを平均した。

図-10 は欠陥のない試験体と欠陥のある試験体の音響信号のパワースペクトルを示している。欠陥のない試験体ではピークはないが，欠陥を有する試験体では，すべてのノズル径に対して，約 2.7kHz にピークが現れた。

式(3)から導かれるそれぞれのノズル径に対する加振周波数は， $f = 2.3\text{kHz}$ (1mm)， 1.2kHz (2mm)， 0.46kHz (5mm)であるが，すべてのノズル径で欠陥の検出が可能であった。これは，ウォータジェットの水滴の間隔が，実際には均一ではなく加振周波数に幅があるため，ノズル径によらず欠陥の検出が可能であったと思われる。

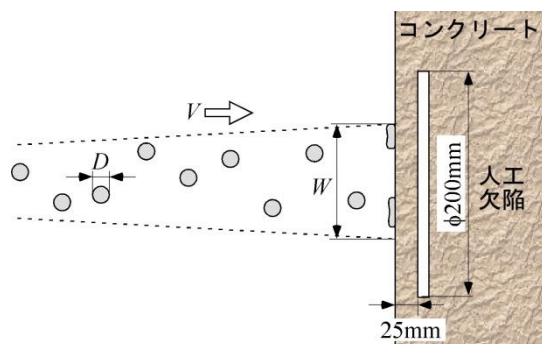


図-7 人工欠陥の検知試験

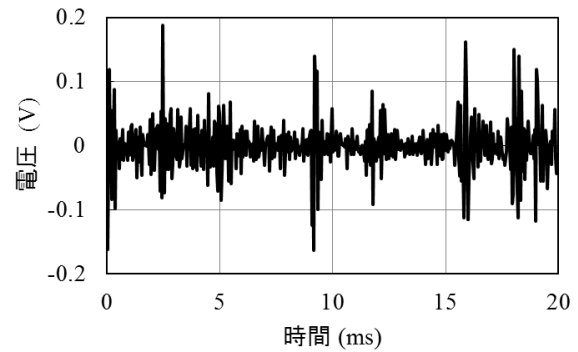


図-8 水撃音響法における音響信号

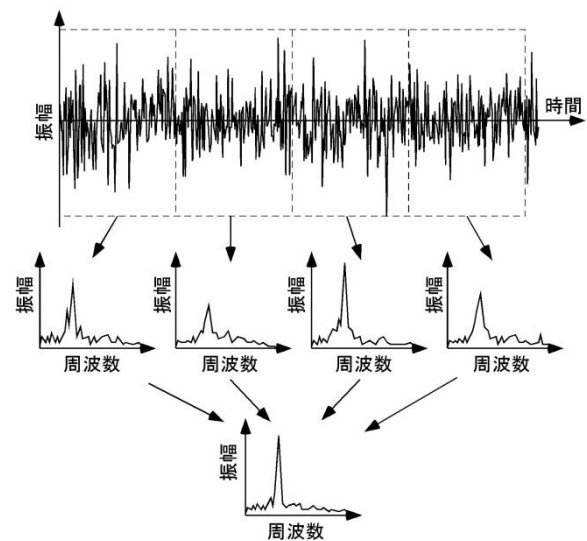
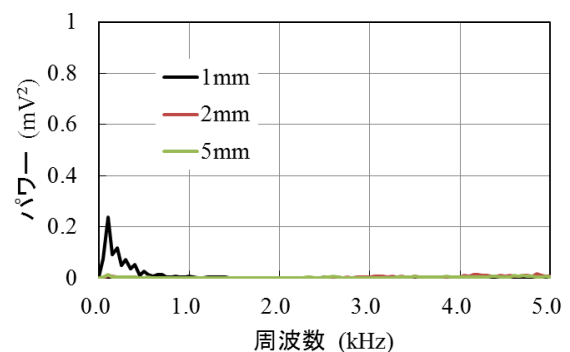
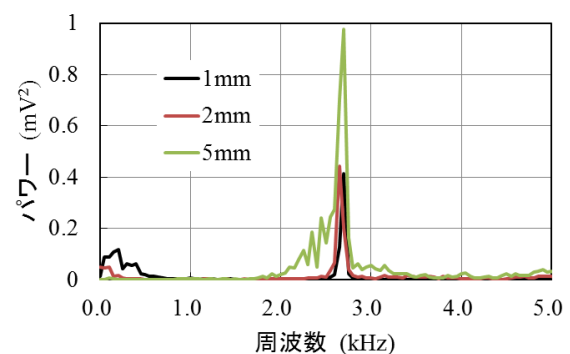


図-9 信号処理方法



(a) 欠陥のない試験体



(b) 欠陥のある試験体

図-10 音響信号のパワースペクトル

3.4 外壁タイルのうき検知試験

外壁タイルのうき検知試験をおこなった。図-11 に試験箇所を示している。打音検査でうきがないと確認された場所とうきがあると確認された二箇所である。うきがあると確認された場所は、低い打撃音が確認された。

図-12 に比較のためにおこなった打音検査のパワースペクトルを示す。うきなしの外壁タイルのスペクトルは、1kHz 以下の周波数成分が確認できないのに対して、うきありの外壁タイルのスペクトルは 0.2kHz、0.4kHz、0.9kHz の低い周波数にピークが確認できる。

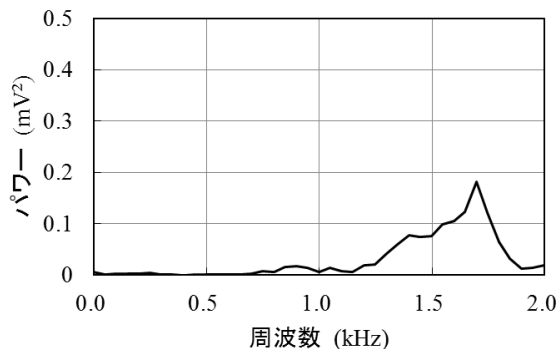
図-13 は水撃音響法を用いて外壁タイルを試験している様子を示している。検査外壁までの距離は 4m、ノズル直径は5mm、ウォータージェット速度は10m/sとした。



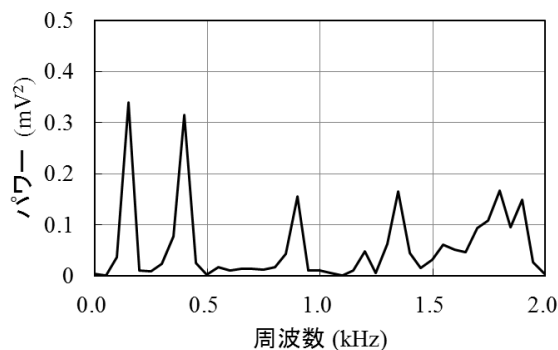
図-11 打音法による外壁タイルうき検知試験



図-13 水撃音響法による外壁タイルうき検知試験

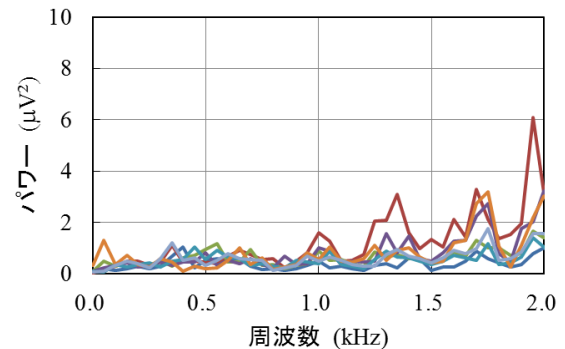


(a) うきなしの外壁タイル

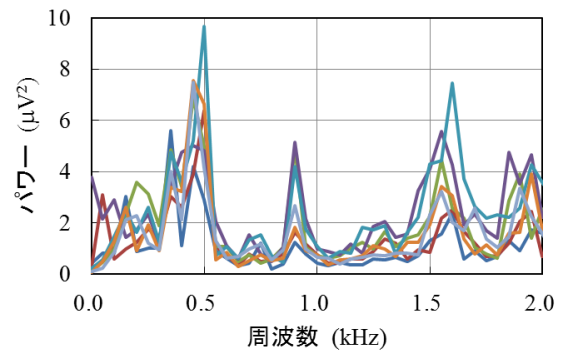


(b) うきありの外壁タイル

図-12 打音検査による音響のパワースペクトル



(a) うきなしの外壁タイル



(b) うきありの外壁タイル

図-14 水撃音響法による音響のパワースペクトル

4. 考察

4.1 国土交通省の公募要項の要求性能

ここでは、水撃音響法の有効性を、国土交通省が平成25年6月に公募した「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」の公募要領⁹⁾に記載された要求性能にしたがって検証する。

(1) 代替しようとする従来技術

要求性能：「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。

水撃音響法は、遠隔にて打音検査をおこなう方法であるので、従来の打音検査を代替できる。また、近接目視の目的は問題箇所を絞込み、効率的に打音検査をおこなうことであったが、水撃音響法は全面検査をおこなうので問題箇所を絞り込む必要がなく、近接目視を代替できる。

(2) 検査速度

要求性能：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。

水撃音響法は、図-15に示すように、走行しながらの試験が可能である。図-7に示しめす打撃寸法を $W = 0.1\text{m}$ として、 0.1m の移動中に20msの計測を10回おこなうと、 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m} = 0.01\text{m}^2$ の検査に0.2s要する。これは 1m^2 の検面に20s要し、1万平方メートルあたり20万秒、すなわち、56時間必要である。これは要求性能の約5分の1である。この問題を解決する方法は以下のとおりである。

まず、ウォータガンの並列使用である。また、周波数解像度を0.05kHzから0.1kHzに落とすことによって倍の速度での計測が可能である（計測時間の逆数が周波数解像度になる）。例えば、一回の計測時間を10msとして、秒速 $0.1\text{m}/0.1\text{s} = 1\text{m/s}$ で移動しながらの計測とする。ウォータガンを5台並べて、0.5m幅を同時に検査すると、毎秒 0.5m^2 の検査速度を得ることができる。これは1万平方メートルあたり、5.5時間である。

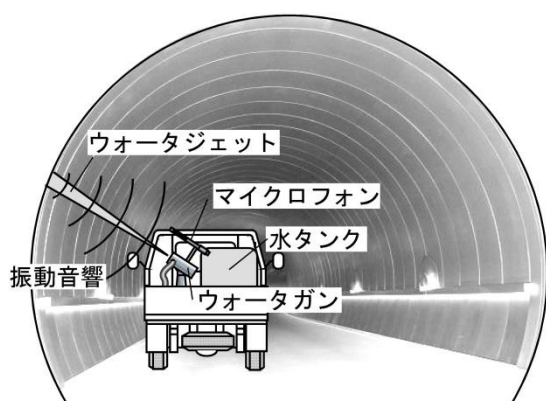


図-15 水撃音響法による走行しながらの試験

ウォータガンを増やす以外にも、ノズルの形状を改良して、打撃寸法 W を大きくする方法も有効である。例えば、 $W = 0.2\text{m}$ とすれば、4倍の速度で検査が可能である。ただし、試験の信頼性については検証が必要である。

(3) 交通規制

要求性能：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。

水撃音響法は、加振に水を使うので安全である。ウォータジェットが人に当たったとしても、ノズル径5mm、ウォータジェット速度10m/sの場合で、推力は約2Nであり、人に怪我を負わせる危険性はない。したがって、図-15に示すように交通規制を要しない試験が可能である。

(4) 費用

要求性能：直接費が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。

水撃音響法の試験装置の構成要素は、ウォータガン、ポンプ、マイクロフォン、アンプ、パソコン、発電機などである。すなわち、レーザ計測装置などの高額な計測装置を必要としない。したがって、装置は、300万円未満で構成できる。試験装置のレンタル料を装置価格の1%として、一日の検査費用を概算すると、試験装置レンタル料3万円、検査作業者労務費を2名5.5万円（3.5万円/人＋2万円/人）、ポンプ&計測用発電機燃料代0.2万円、水の原価および運搬費用を2万円とすると、総計10.7万円となる。一日に1万平方メートル以上の検査可能であるから、1万平方メートルあたり245,000円を超えることはない。

4.2 水撃音響法の課題

水撃音響法における課題を検討する。

(1) 騒音

水撃音響法は、うき・はく離が振動することによって発生する音響を遠隔にて計測することによって、うき・はく離を検知する。したがって、実際の道路での試験では、計測音響が外部環境からの騒音の影響を受ける可能性がある。この問題を解決するためには、超指向性を有するマイクロフォンの利用やノイズを除去するソフト的な取り組みが必要となると考えられる。

(2) 風

ウォータガンと検査壁面が約3m以上の場合、秒速数メートル以上の横風がウォータジェットに当たると、ウォータジェットが風になびいて一定の試験ポイントを打撃することができなくなる。風への対処方法としては、より大きな水滴、すなわち、より大口径のノズルを用いると効果的である。ただし、加振周波数に関しては注意を要する。

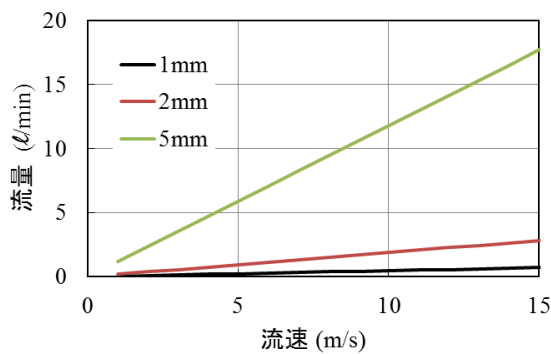


図-16 水撃音響法における水の流量

(3) 水

トンネル内での試験では、検査車両に水を搭載して試験をおこなうことになる。その場合、水の使用量が問題になることがある。図-16は、ノズル直径 $d=1\text{mm}$, 2mm , 5mm における、流速に対する流量を示した図である。ノズル直径 $d=5\text{mm}$ 、流速 10m/s において、毎分約12リットルの水が必要である。これは、8時間で5.8キロリットルを消費する計算である。

この大量の水使用の問題の解決方法の一つとして、単位時間あたりに検査できる領域を広くするような効率的な検査が有効であると思われる。検査速度を速くすることができれば、限られた水による短い検査時間でも十分な検査領域が確保される可能性があるからである。

5. おわりに

ウォータジェットを構造物に当て、その音響を収集して非破壊検査をおこなう水撃音響法を開発した。水撃音響法を、コンクリート試験体中の欠陥の検知試験、外壁タイルのうき検知試験に適用した。また、国土交通省の公募課題の要求性能にしたがって、水撃音響法の有効性を検討した。その結果以下の結論を得た。

- (1) ウォータジェットの加振周波数は、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。例えば、速度 10m/s 、ノズル径 5mm では、加振周波数は 460Hz となる。
- (2) ウォータガンから 4m の位置のコンクリート試験体中の直径 200mm 、深さ 25mm の人工欠陥を検出することができる。
- (3) 外壁タイルのうきの検知試験が可能である。ただし、うきの振動数が低い時は、低い周波数を発生可能なウォータジェットを用いる必要がある。
- (4) 水撃音響法は、水を使った安全な試験方法であるため、走行しながらのうき・はく離検知試験が可能で、交通規制を必要としない。

- (5) 水撃音響法の検査速度は、1平方メートルあたり20秒程度であるが、複数個のウォータガンを組み合わせたり、周波数解像度を粗くしたりすることによって、1万平方メートルを一日で検査することが可能である。
- (6) 水撃音響法は、検査装置が安価に構成できることと、検査に経費があまりかからないことから、一日(1万平方メートル)の検査は10万円程度で可能と予想される。
- (7) 水撃音響法の問題点には、外部の騒音や風がある。これらの問題の解決には、音響収集装置の工夫や水滴の大型化が必要である。
- (8) 水撃音響法では、水の消費も課題になると考えられる。この問題の解決には単位時間あたりに検査できる領域を広くするような効率的な検査手法の確立が有効であると思われる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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.1191-6, 1995.7
- 3) Mori, K., Spagnoli, A., Murakami, Y., Kondo, G., Torigoe, I.: A New Non-Contacting Non-Destructive Testing Method for Defect Detection in Concrete, NDT & E International, Vol. 35, No. 6, pp. 399-406, Sep. 2002
- 4) 森和也，鳥越一平，百崎彦，岩本達也：周波数スイープ音波を用いた壁面加振によるコンクリート構造物の非破壊検査，日本機械学会論文集(A編)，Vol. 72, No. 723, pp. 1787-92, 2006.11
- 5) 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
- 6) 森和也：構造物の非破壊検査方法及び非破壊検査装置，特願 2015-177167, 2015.9
- 7) Rayleigh, L.: On the Instability of Jets, Proc. London Math. Soc., Vol. 10, pp. 4-13, Nov. 1878
- 8) Weber, C.: Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles, Z. angew. Math. Mech., Vol. 11, pp. 136-154, 1931
- 9) 国土交通省：公共事業等における新技術活用システム—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の公募—公募要領，pp. 1-7, 2013.6