

論文 パルスウォータージェットを用いた水撃音響法試験

森 和也*1・徳臣 佐衣子*2・白石 史暁*3

要旨：水撃音響法はウォータージェットを検査対象に打ち当てて、その打撃音を収集して検査をおこなう方法である。水撃音響法の問題の一つは、検査に使用する水の確保である。詳細な検査をおこなうと、1m²当たり約2リットル、10,000m²当たり約20トンの水を必要とする。本論文では、ウォータージェットをパルス状に放出することによって、水を削減する方法を開発した。5Hzのパルスで、バルブ開放時間を10msとすると、水の量は約5分の1になった。このパルスウォータージェットを用いて、人工欠陥を有するコンクリート試験片の欠陥検出をおこなった。さらに、従来の水撃音響法では困難であった近接試験の欠陥検出もおこなった。

キーワード：非破壊検査、コンクリート構造物、水撃音響法、パルス、ウォータージェット

1. 緒言

橋梁やトンネルなどのコンクリート構造物の効率的で経済的な検査手法が望まれている。近年、点検作業のための十分な作業おおよび予算の確保が難しい状況にあるからである。コンクリート構造物の点検は、まず目視検査がおこなわれ、その後打音検査がおこなわれる。目視検査の効率化には、ドローンの導入が積極的に進められている¹⁾。また、打音検査にもドローンの活用が検討されている²⁾。その他、打音検査に代わる方法としては、赤外線サーモグラフィ法³⁾やレーザ加振法⁴⁾などが実用化されている。

著者らは、効率的な打音検査法の一つとして水撃音響法^{5),6)}の開発をおこなっている。水撃音響法とは、水滴の打撃によって検査壁面を打撃する方法である。水撃音響法の課題は、水の補給である。例えば、5mmのノズルで、放出速度を10m/sとすると、一分間に12リットル、一時間に720リットルの水を必要とする。本論文では、これまで連続的に放出してきた水流をパルス状に放出することによって、検査効率を損なわずに使用する水の量を低減する方法を提案する。また、本方法は検査面が近接している場合でも検査が可能であることを示す。

2. 水撃音響法

水撃音響法の基本原理を図-1に示す。連続的な水流をノズルから放出すると水流は表面張力によって水滴化する。ノズルから直噴流が放出された場合、水滴の間隔 s は、理論的に直噴流直径 d の約4.4倍になることが導かれている^{7),8)}。

$$s = 4.4 d \tag{1}$$

等間隔に並んだ水滴が検査壁面に衝突すると、周期的な加振力を生み、検査面が加振される。流速を V とすると加振周波数 F は次式のようになる。

$$F = V/s = 0.23 V/d \tag{2}$$

例えば、直噴流直径を $d=5\text{mm}$ 、流速を $V=10\text{m/s}$ とすると、加振周波数は $F = 0.23 \times 10(\text{m/s})/0.005(\text{m}) = 460\text{Hz}$ となる。実際の水滴間隔はばらつきを持ち、加振力の周波数域は460Hzを中心に、2kHz程度まで達する⁹⁾。

検査壁面にうきやはく離があると、その固有振動数が加振周波数範囲内であれば、うきやはく離部は振動し特異な音響を発生する。その音響をガンマイクで収集し、うきやはく離を検出する。

水撃音響法を用いて効率的な検査をおこなう場合、打撃点を移動しながら直線上を打撃する⁹⁾。打撃する直線

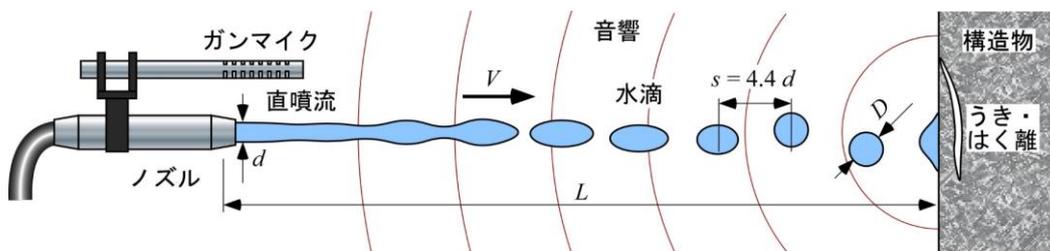


図-1 水撃音響法

*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 先端科学研究部特別研究員

*3 熊本大学工学部 学生

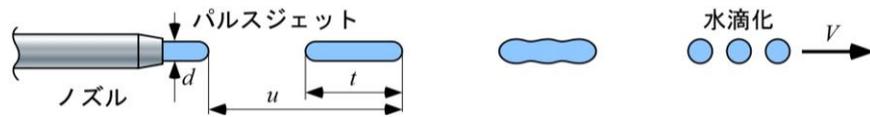


図-2 パルスウォータージェット

の間隔を 0.1m とし、直噴流直径を $d=5\text{mm}$ 、流速を $V=10\text{m/s}$ とすると、1 平方メートル当たり 2 リットルの水を必要とし、1 万平方メートルでは 20 トンの水が必要である。20 トンの水の確保、供給、運搬は容易ではなく、水撃音響法の実用化の壁となっている。そこで、検査に使用する水の量を減らす必要がある。

3. パルス水撃音響法

3.1 パルス水撃音響法

コンクリート構造物を作業者が打音検査する場合、ハンマーで検査面を一定間隔で打撃する。したがって、水撃音響法でも、ウォータージェットによる連続的な打撃検査は必要ではなく、打音検査と同様に離散点を打撃して検査をおこなえばよい。離散点の打撃は、図-2 のようなパルス状のウォータージェットを用いると実現できる。パルスジェットは、周期長さ u に対して、パルス長さ t の比を小さくすると、その比に比例して必要とされる水の量を低減することができる。

3.2 パルスウォーターガン

図-2 のようなパルス状のウォータージェットは、電磁バルブを用いて水流を断続させることによって実現できる。図-3 は、電磁バルブを用いたパルスウォーターガンである。ウォータータンク内にレギュレータで調圧された水が供給され、電磁バルブの開閉によって断続的に水が放出される。電磁バルブへは、図-4 に示すようなパルス状の電圧が供給される。

電磁バルブから急激にウォータージェットが放出されると、ウォータータンク内の圧力が急激に下がるので、エアタンクをウォータータンク上部に取り付けて、圧力の変動を低減させた。

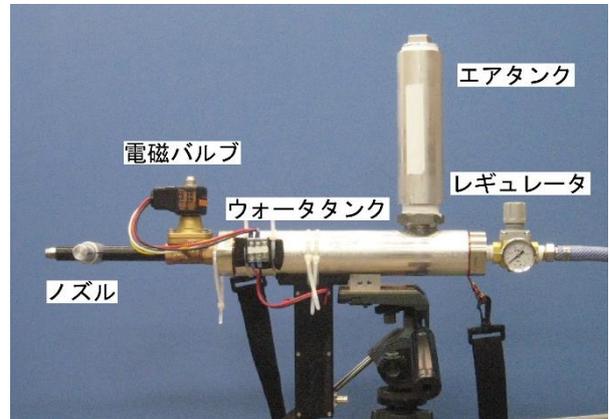


図-3 パルスウォーターガン

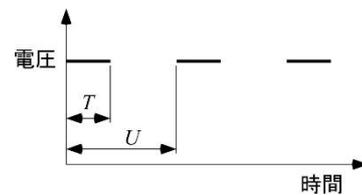


図-4 電磁バルブに加える電圧

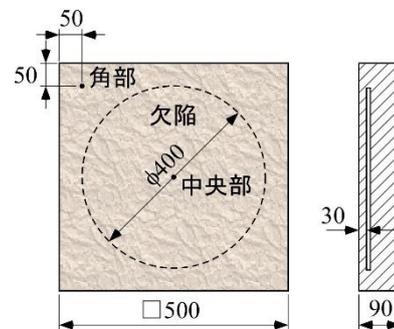


図-5 人工欠陥を埋め込んだコンクリート試験片

4. 実験

本論文では、図-3 のパルスウォーターガンを用いて、人工欠陥入りコンクリート試験片の欠陥検出の試験を通して、パルス水撃音響法の有効性を検証した。

4.1 試験片

試験片形状を図-5 に示している。一辺の長さが 500mm の正方形で、内部に直径 400mm の人工欠陥を埋め込んでいる。パルスウォータージェットによる打撃試験は、試験片中央部の欠陥中心上と角部の 2 点を試験した。この試験片の打撃音響を予め鋼球の打撃によって調べた。その音響の振幅スペクトルを図-6 に示す。欠陥中央部

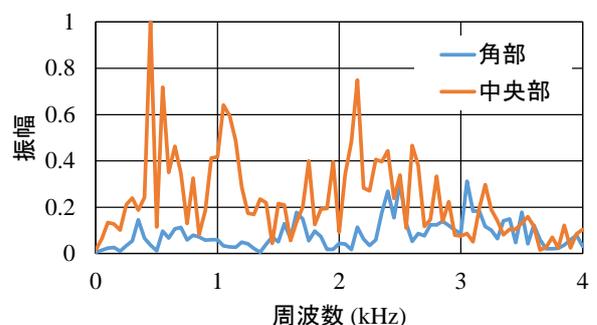


図-6 鋼球を用いた打音検査によって得られた振幅スペクトル



図-7 パルス水撃音響法試験

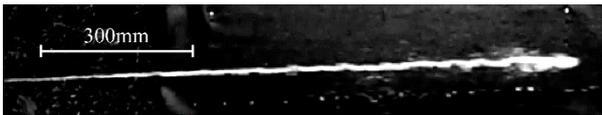


図-8 パルスウォータージェット

を打撃した場合、0.5kHz、1.1kHz、2.2kHz にピークが現れる。これが人工欠陥の固有振動数である。パルス水撃音響法の試験において、これらの周波数の位置にピークが発生するかどうかによって、パルス水撃音響法の有効性が確認できる。

4.2 パルスウォータージェットを用いた水撃音響法試験方法

パルス水撃音響法による人工欠陥入りコンクリート試験片の欠陥検出の試験の様子を図-7 に示している。試験片は水平な台の上に置いた状態で試験した。

図-8 は、パルスウォータージェットの拡大写真である。周波数 10Hz、通電時間 10ms の条件で、パルスウォータージェットの先端がノズル先端から約 1m 先に到達した時の写真である。先端部に水の塊ができていたことがわかるが、いずれのパルスの条件でも同様の水の塊が見られた。水の塊は約 1.5m の位置で水滴化した。

試験条件は以下の通りである。試験片とパルスウォーターガンのノズル先端からの距離を 2m とした。ノズルは直径 5mm の直噴ノズルを用いた。ウォータージェットを放出していない状態での圧力を 0.4MPa とした。パルスウォータージェットは、表-1 に示すように周波数を 10Hz と 5Hz、通電時間を 20ms、10ms、5ms の三種類とした。

パルス水撃音響法を用いて、毎秒 1m の速さで移動しながら検査をすると、10Hz は 10cm 間隔、5Hz は 20cm 間隔で検査面を叩くことを意味している。通電時間を変化させた理由は、バルブを開放する時間を短くしてパルスの長さを短くするほど使用する水の量を減らすことができるので、検査可能な最短のバルブ開放時間を調べるためである。

表-1 に、パルスウォータージェットの 1 分当たりの流量、1 パルス当たりの流量、流速を示している。比較のために連続流の流量も示している。

表-1 周波数・通電時間と流量の関係

周波数 (Hz)	デューティ (%)	通電時間 (ms)	流量 (L/min)	1パルス流量 (L)	流速 (m/s)
10	20%	20	14.8	0.025	15.1
	10%	10	8.3	0.014	16.1
	5.0%	5	8.4	0.014	16.6
5	10%	20	7.9	0.026	16.7
	5%	10	4.3	0.014	17.3
	2.5%	5	4.3	0.014	17.3
-	100%	連続	19.6	-	-

まず、流量を見ると、通電時間が 10ms と 5ms では流量が変わらないことがわかる。このことは、電磁バルブの機械的な開閉に要する時間には下限があり、10ms の通電と 5ms の通電では、バルブが開放されている時間に差がないと考えられる。また、5ms 未満の通電時間を実験したところ、電磁バルブは開放されることはなかった。5ms の通電時間でも、バルブは突然開放しなくなることがあり、安定的なバルブの通電時間は 10ms 程度以上であることがわかった。

通電時間が 20ms と 10ms を比較すると、流量は通電時間が長いほど流量は多くなっているが、正比例しているわけではないことがわかる。これは、電磁バルブの開閉時間が通電時間と正確には応答していないことや、バルブが長く解放されると圧力が低下し後半の流量が低下することなどの原因によるものであると考えられる。

流速は、パルスウォータージェットがノズルから放出されて、2m 先の試験片に到達するまでの時間を測定して求めた。パルスウォータージェットがノズルから放出された時刻と試験片に到達した時刻は、パルスウォータージェットを高速カメラで測定して計測した。

同一の周波数においては、通電時間が 10ms と 5ms では流速に違いはなく、20ms ではわずかに遅くなる。10Hz と 5Hz の周波数の違いでは、5Hz の方がパルスウォータージェットの流速が速くなる。これは、5Hz の方がパルスとパルスとの間のバルブを閉じている時間が長く、ウォータージェットを押し出す圧力が回復するからである。

パルスウォータージェットの流量を連続流れと比較すると、周波数 10Hz において、20ms の通電時間で、14.8 (L/min) / 19.6 (L/min) = 76% となる。10ms では、8.3 (L/min) / 19.6 (L/min) = 42% となる (5ms もほぼ同じ)。

周波数が 5Hz の場合は、20ms の通電時間で、7.9 (L/min) / 19.6 (L/min) = 40% となる。10ms では、4.3 (L/min) / 19.6 (L/min) = 22% となる (5ms も同じ)。したがって、連続的なウォータージェットと比較して、10ms の通電時間において、10Hz のパルスウォータージェットでは約 6 割、5Hz では約 8 割の水を節減することができた。

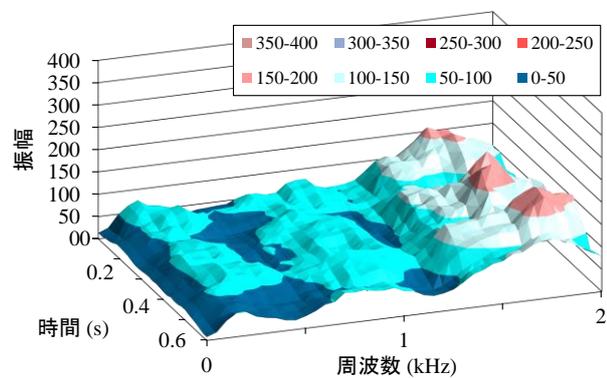
4.3 人工欠陥入り試験片の試験結果

図-5 の試験片の欠陥のない角部と欠陥中央部を表-1 の条件で、図-7 に示すように水撃音響法試験をおこなった。音響はパルスウォーターガンの横に設置したガンマイクで収集した。

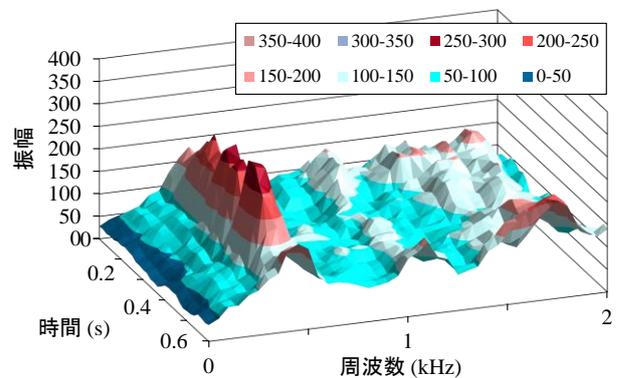
図-9 と図-10 は、パルス周波数が 10Hz のときの音響のスペクトルである。20ms の音響毎にスペクトルを計算し、20ms の時間間隔で並べた。それぞれの音響の収集感度は同じとした。図-9 は欠陥がない角部、図-10 は欠陥中央部を打撃した場合である。図-9 において、いずれの通電時間でも 1.5kHz 未満ではピークが確認できない。

一方、図-10 では欠陥の固有振動数である 0.5kHz の位置において連続的にピークが確認できる。図-9 と図-10 との比較化から、パルスウォータージェットによって、図-5 の試験片の欠陥が検出できることがわかる。ちなみに、作業者は自分の耳でも、パルスウォータージェットの打撃音の違いを確認できた。

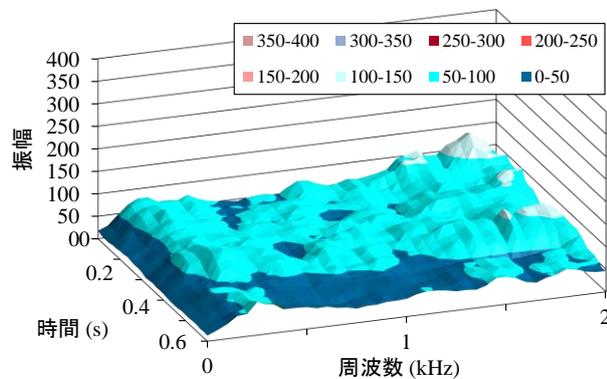
図-11 と図-12 は、パルス周波数が 5Hz のときの音響のスペクトルである。10Hz のパルスと同様に、0.5kHz の位置において連続的にピークが確認できる。また、1.1kHz の固有振動数も検出している。5Hz の周波数は 0.2s の周期であるが、0.2s おきにピークが発生していることが確認できる。



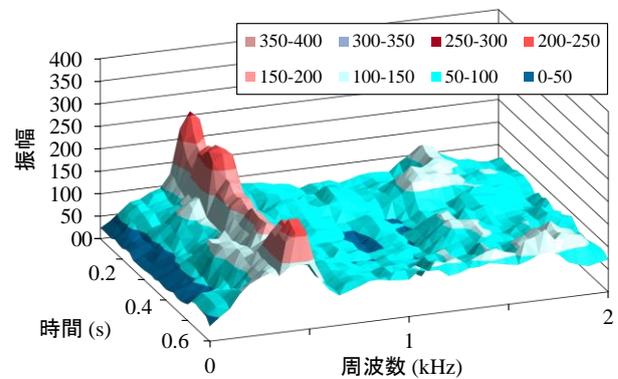
(a) 10 Hz - 20 ms 通電



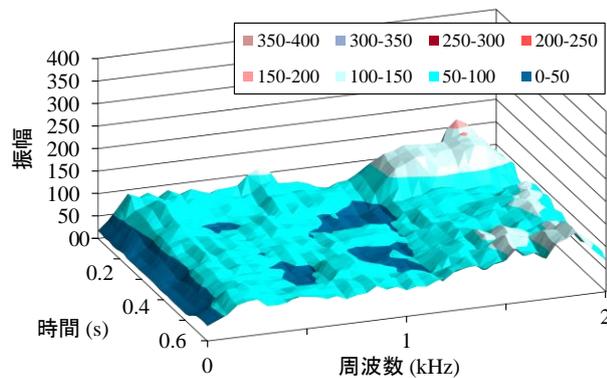
(a) 10 Hz - 20 ms 通電



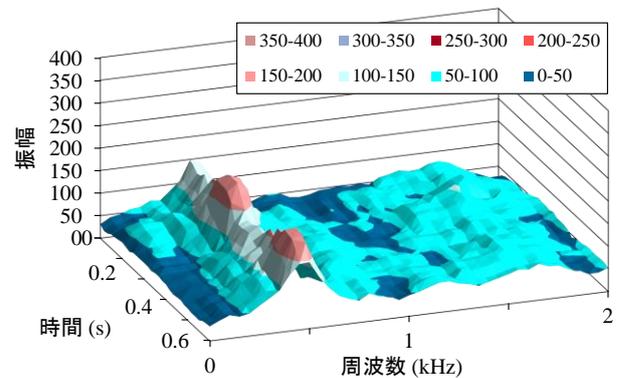
(b) 10 Hz - 10 ms 通電



(b) 10 Hz - 10 ms 通電



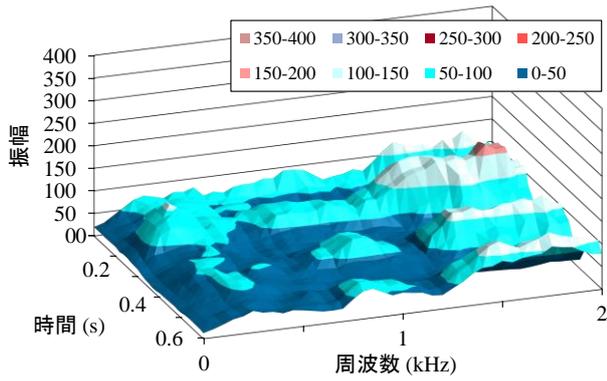
(c) 10 Hz - 5 ms 通電



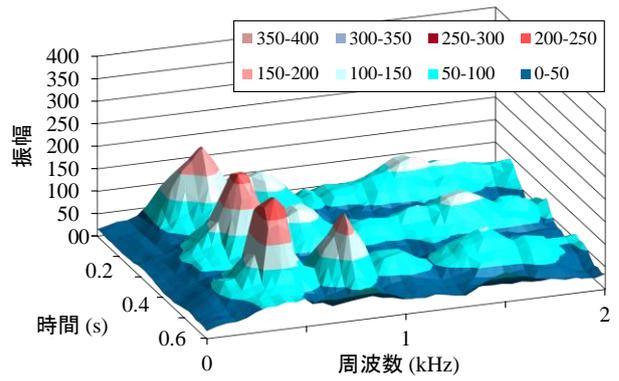
(c) 10 Hz - 5 ms 通電

図-9 10Hz における欠陥がない場所のスペクトル

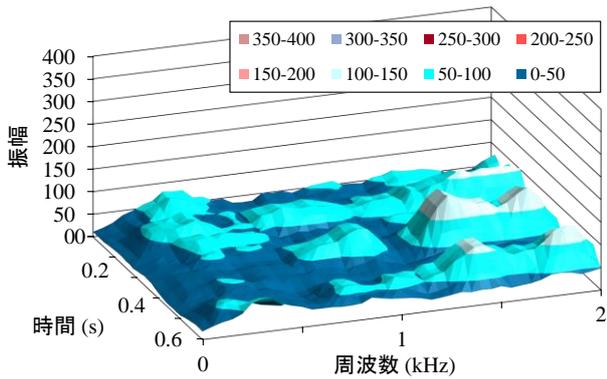
図-10 10Hz における欠陥がある場所のスペクトル



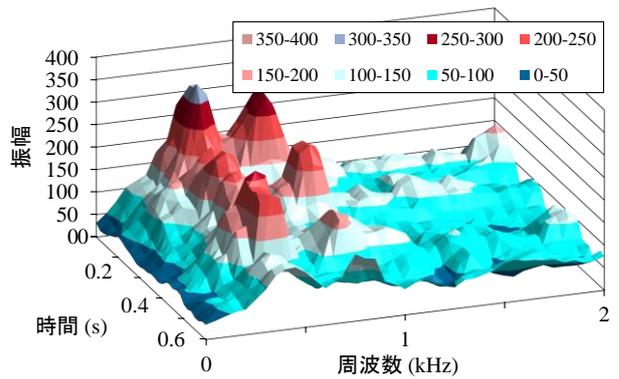
(a) 5 Hz – 20 ms 通電



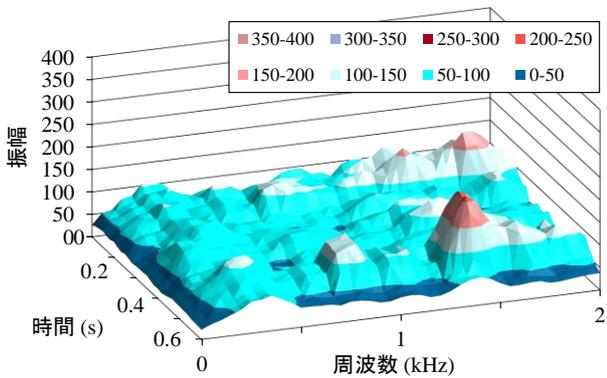
(a) 5 Hz – 20 ms 通電



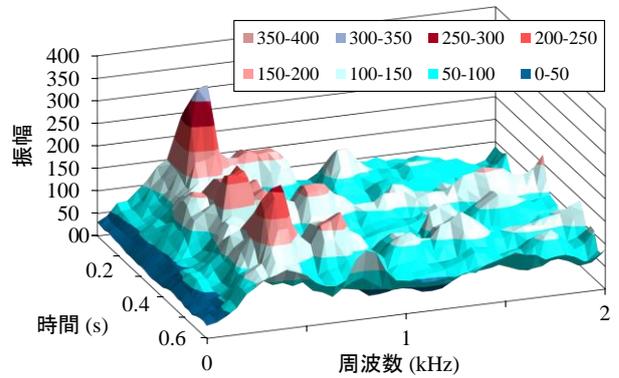
(b) 5 Hz – 10 ms 通電



(b) 5 Hz – 10 ms 通電



(c) 5 Hz – 5 ms 通電



(c) 5 Hz – 5 ms 通電

図-11 5Hzにおける欠陥がない場所のスペクトル

図-12 5Hzにおける欠陥がある場所のスペクトル

4.4 近接試験

水撃音響法は、水滴化した水流を検査壁面に打ち当てることによって検査壁面を加振する方法である。したがって、図-13に示すような検査面とノズルの間隔が狭い場合、直噴流が水滴化する前に検査面に当たり、加振力を発生することができないと考えられる。このような近接の試験においてもパルス水撃音響法が有効であるかどうか確認した。

図-14は、連続流のウォータージェットによる打撃音のスペクトルである。試験片とノズル先端までの距離を0.5mとした。欠陥がある場所の打撃音のスペクトルは欠陥の固有振動である0.5kHzおよび1.1kHzにピークが確

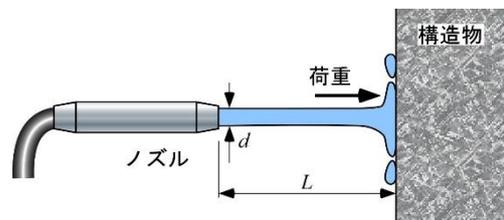
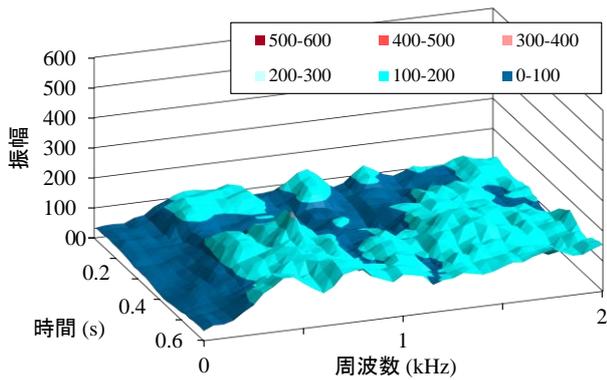


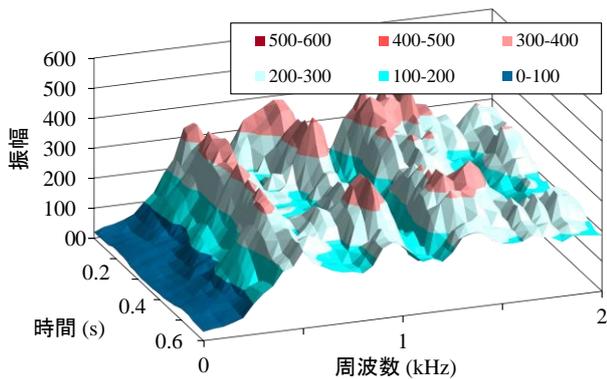
図-13 近接試験における加振力

認できるが、他の周波数領域もピークが確認できる。

すなわち、0.5mの近接距離では連続流のウォータージェットでは欠陥の検出がうまくできていない。欠陥がない場合とある場合の差は単に音響レベルの違いに過ぎない。

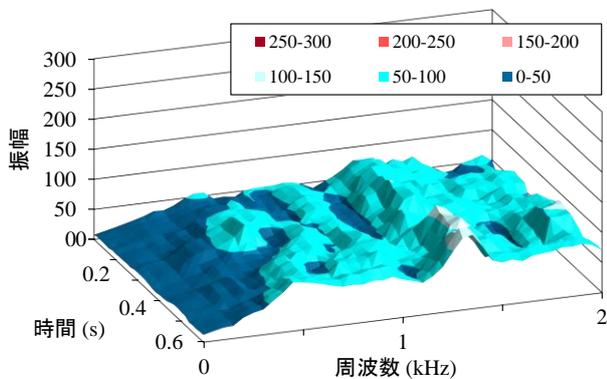


(a) 欠陥がない場所

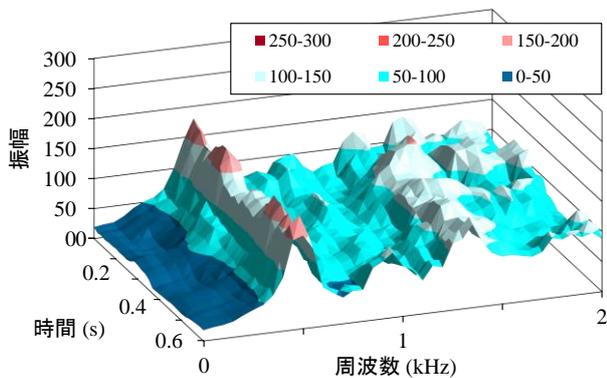


(b) 欠陥がある場所

図-14 連続流による打撃音響のスペクトル



(a) 欠陥がない場所



(b) 欠陥がある場所

図-15 パルスウォータージェットの打撃音響のスペクトル

図-15 は、同じ近接距離で、パルスウォータージェットを用いた試験結果である。この場合は、欠陥がある場所でのスペクトルに欠陥の固有振動数が現れている。

5. 結 言

水撃音響法において使用する水を減らすことを目的として、従来連続的に放出していたウォータージェットをパルス状に放出するパルス水撃音響法を開発した。この方法を実際に人工欠陥入り試験片の欠陥検出に用いた結果以下のことがわかった。

- (1) ウォータージェットのパルスの周波数を 10Hz にすると約 6 割、5Hz にすると約 8 割の水を節減することができた (10ms 通電時)。検査移動速度が 1m/s の場合、周波数 10Hz は 10cm 間隔、5Hz は 20cm 間隔の打撃に相当する。
- (2) パルスウォータージェットを用いて距離 2m の位置において、表面から 30mm の深さにある直径 400mm の人工欠陥を検出することができた。
- (3) 連続的なウォータージョットでは検査面が 50cm など近い場合欠陥検出ができない場合があるが、パルスウォータージェットを用いると検出が可能であった。

参考文献

- 1) 宮内博之：建築物におけるドローン技術の活用，コンクリート工学，Vol. 56, No. 1, pp. 55-58, 2018.1
- 2) 正沢道太郎：ドローンによる打音検査システム，日本機械学会誌，Vol. 121, No. 1200, pp. 28-29, 2018.11
- 3) 柳内睦人，金光寿一，原洋平：熱映像によるトンネル壁面の損傷診断に関する実験的研究(非破壊試験)，Vol. 18, No. 1, pp. 1209-1214, 1996.7
- 4) 島田義則，コチャエフオレグ，倉橋慎理，北村俊幸：レーザを用いたコンクリート構造物の欠陥検査技術，Vol. 65, No. 12, pp. 600-605, 2016.12
- 5) 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
- 6) 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，第 18 回破壊力学シンポジウム講演論文集，pp.271-273, 2017.12.
- 7) Lord Rayleigh: On the Instability of Jets, Proc. London Math. Soc., Vol. 10, pp. 4-13, 1878.11
- 8) Constantin Weber: Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles, Z. angew. Math. Mech., Vol. 11, pp. 136-154, 1931
- 9) 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，Vol. 6, pp. 229-234, 2018.8