

論文 パルスウォータージェットを用いたコンクリート構造物の遠隔打音検査の実用化

森 和也*1・徳臣 佐衣子*2

要旨: パルスウォータージェットを使用した遠隔打音検査の実用化を目指し、検査距離の遠隔化、目標打撃点の正確な打撃、検査面上での打撃力の分布に焦点を当てた。検査距離 5 m、打撃位置精度 2 cm~3 cm 以下、最小欠陥検出寸法 10 cm の数値目標を掲げ、1 MPa の高圧水の利用、ギヤ付き雲台による位置制御、打撃力分布測定を行った。実験では、直径 300 mm、欠陥深さ 20 mm の空洞欠陥を有するコンクリート試験片に対して、検査距離 3 m、4 m、5 m から遠隔打音試験を行い、2 cm~3 cm の打撃位置精度を達成し、欠陥検出を確認した。また、打撃力の分布を測定し、打撃力の分布が試験片面上で数センチ以下であることを確認した。

キーワード: 非破壊検査、打音検査、遠隔、パルスウォータージェット、コンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物の打音検査法の効率化は、社会的に高い要求事項となっている。筆者らは、打音検査法の効率化の一つの手段として、遠隔打音検査法が有望であると考えた。遠隔で打音検査を行うことで、作業者が高所の点検箇所へ近づく必要がなくなり、高所作業車や足場が不要になる利点がある。遠隔でコンクリート構造物を打音検査する方法としては、衝撃音波を用いる方法¹⁾、壁面に吸着して移動する装置に打音検査装置を搭載する方法²⁾、打音検査装置をドローンに搭載する方法^{3),4)}、強力なパルスレーザを用いる方法⁵⁾、ストリングシュータを用いる方法⁶⁾などが挙げられる。

衝撃音波を用いる方法は、発生する音響が大きく、市街地での利用は好ましくない。吸着装置を用いる方法は、検査面が障害物のない平面である場合は有効であるが、突起物があると検査領域に制限が生じる。ドローンを用いる方法は、風の影響を受けることと、都市部では飛行制限に抵触することがある⁷⁾。ストリングシュータを用いる方法は、現在のところ作動安定性に課題がある。筆者らは、水の衝突を利用する遠隔打音検査方法を開発中である^{8),9),10)}。本論文では、パルスウォータージェットを用いる打音検査法の実用化を目指し、検査距離の遠隔化、目標打撃点の正確な打撃、検査面上での打撃力の分布に関して検討を行った。

2. 水の衝突を利用した非破壊検査

著者らは、図-1 に示すような、水の衝突を利用した遠隔打音検査方法を開発している。水を検査面に当て、その音響をマイクで収集し、剥離の有無を判定する。

図-1(a) は、連続した水滴を検査壁面に当て、水滴の打撃の周期を基本周波数とする打撃法である⁸⁾。加振の

中心周波数 f (Hz) は、水滴の速度を V (m/s)、水滴の平均間隔を s (m) とすると、 $f = V/s$ となる。水滴の平均間隔はノズルの直径の約 4.4 倍になるため、ノズル径を 5 mm とすると、水滴の平均間隔は $s = 4.4 \times 5 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$ となる。加振周波数として、例えば 1 kHz が必要な場合、水滴の速度 V は、 $V = 1000 \text{ Hz} \times 0.022 \text{ m} = 22 \text{ m/s}$ が最適となる。

遠隔で検査を行うときの課題は風である。水滴の風の影響を減らすためには、水滴の流速を上げることが効果的であるが、加振周波数をそのままに流速を上げるためにはノズル径を大きくする必要がある。例えば流速を 2 倍の 44 m/s する場合、ノズル径は 10 mm となり、毎分 200 リットルの水が必要となる。この値は非現実的な値である。

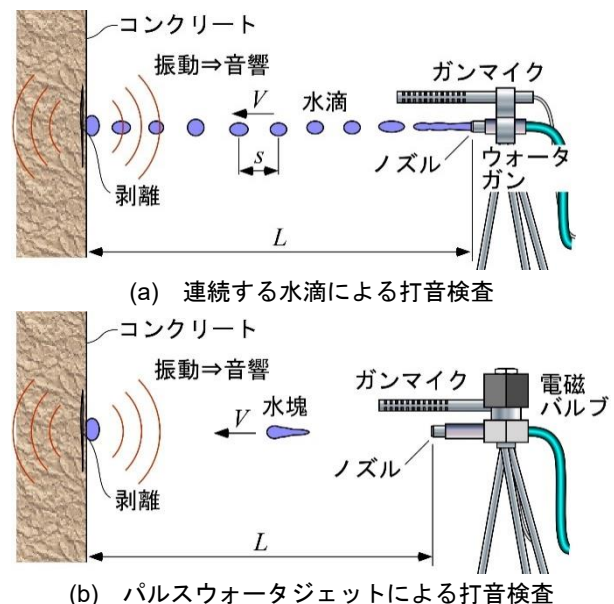


図-1 水の衝突を利用した非破壊検査

*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 工博 (正会員)

図-1(b)は、電磁バルブを用いて、パルスウォータージェットを放出し、検査面に当てる打音法である⁹⁾。この方法では、水滴の周期性を利用していないので、流速に制限がない。流速を高速化すると、一つの水塊の衝突エネルギーは増加するため、ノズルの径を小さくすることが可能である。そこで、本研究では、パルスウォータージェット打撃による打音検査の実用化を図ることとした。

3. パルスウォータージェットによる打音検査の実用化

実用化の数値目標として、検査面と検査装置との距離を5 m、打撃位置精度を2 cm~3 cm、欠陥検出最小寸法を10 cmと定めて検討を行う。これらの目標を達成するための装置を写真-1および写真-2に示す。試験装置は、パルスウォーターガンと音響と映像を収集する装置からなる。パルスウォーターガンは、電磁バルブ、ノズル、レーザーポインタで構成され、ギヤ付き雲台上に固定されている。音響と映像の収集は、ガンマイク（指向角: 30°, 周波数特性: 60Hz~20kHz, SN比: 79dB, ダイナミックレンジ: 117dB）とビデオカメラ（音響サンプリング周波数: 48 kHz）を使用して行った。

3.1 検査距離の遠隔化

検査距離の遠隔化は、実用性を考えた場合最も重要な課題である。遠隔化で問題となるのは風であるが、風には水流の高速化が効果的である。水流を高速化すると空中を水流が通過する時間が短くなり、風の影響を受けにくくなる。水流の高速化は、水圧の高圧化で実現できる。そこで、本研究では、水圧を1 MPaとし、ダイヤドラム式ポンプを用いて電磁バルブへ水を供給した。高圧水を断続する際に課題となるのは、ウォーターハンマである。急激に水路を遮断すると水圧は急上昇する。そこで、本研究では、電磁バルブとポンプの間にアキュムレータ（容量10L）を配置した。アキュムレータとは、空気や窒素ガスを圧縮して圧力容器に詰め込んだ装置で、急な水圧の変動を和らげることができる。水をパルス状に放出する時に生じる圧力の低下を防ぐことや、ダイヤドラムポンプの脈動を吸収する効果がある。また、電流の断続の繰り返しはサージ電圧の発生によって電磁バルブを損傷させる恐れがあるので、電磁バルブは交流電源とし、電源の断続は、ゼロクロス機能を有するソリッドステートリレーを用いた。ゼロクロス機能は、交流の電圧がゼロになったときに回路の断続を行うもので、サージ電圧の発生を防ぐことができる。

3.2 目標打撃位置精度の向上

目標打撃位置精度の向上は、ギヤ付き雲台とレーザーポインタの利用で実現する。写真-2に示すように、ギヤ付き雲台は、仰角と水平角をハンドルで微調整可能である。そこで、レーザーポインタは、試験片上のパルスウォ

ータの打撃点の中心にレーザーのスポットが一致するようにポインタの方向を調整した。レーザーポインタは、ノズルと共に角度を変えるため、試験片上の打撃点とレーザースポットは、試験片上で常に一致することが期待できる。

3.3 目標欠陥検出最小寸法

パルスウォーターの打撃では、検査面との距離が離れるほど、水流は拡散する。水流の打撃力による分布の大きさが、目標とする欠陥寸法よりも小さいことが必要である。そこで、図-2に示すように、厚さ約30 mmの2.5%ゼラチンに、パルスウォータージェットを衝突させて、クレータの大きさから、打撃力の分布を測定した。



写真-1 試験装置

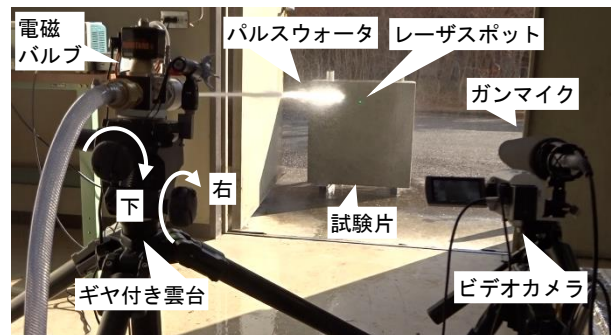


写真-2 遠隔打音試験の様子

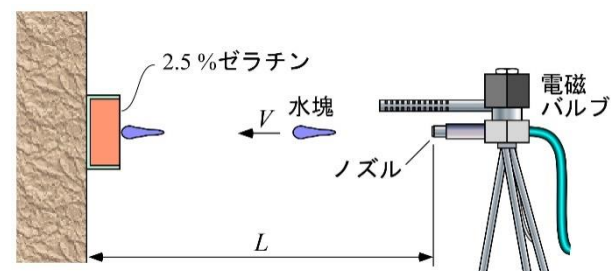


図-2 2.5%ゼラチンを用いた打撃力の分布測定

4. 検証試験

4.1 試験片

図-3の試験片を使用して、前章で述べた方法を検証した。試験片の寸法は600 mm×600 mmの正方形であり、厚さは175 mmである。試験片の製作方法は、厚さ150 mm、一辺600 mmの正方形コンクリート平板に、モルタル(W/C:0.62, 単位量:水 310 kg/m³, セメント 500 kg/m³, 細骨材 1500 kg/m³)を25 mm厚貼りつけた。コンクリート板の上に厚さ5 mm、直径D=300 mmの発泡ポリスチレンの板を置いて空洞欠陥を模した。欠陥の深さは、試験片表面より20 mmである。試験片のA点、B点、C点を打診棒で叩いたときに発生する音響の周波数スペクトルを図-4に示す。欠陥の中央部C点を打撃すると1250 Hzの音響が発生した。この1250 Hzの周波数は、空洞欠陥と試験片表面との間の部分のたわみ振動の固有振動数である(5. 考察で検証する)。

4.2 計測された映像と音響

写真-3は、計測用カメラで撮影された動画のスナップショットである。レーザスポットに向けて、パルスウォータージェットが進んでいることがわかる。試験片上の打撃点とレーザスポットのずれは、1 cm程度以下であった(無風状態)。

図-5は、ガンマイクで収集された音響信号である。パルスウォータージェットは周期1秒とした。電磁バルブ

の開放時間は1/120 sとした(西日本地区の交流周期の半分)。なお、以下の試験では、ノズルの径を4 mmとした。

各音響の最初はノイズである電磁バルブの音とパルスウォータージェットが空中を進む音が収集され、その後打撃音が収集されている。10回分のパルスウォータージェットを容器で収集して水量を測定したところ、ワンパルス約43 mLであった。従って、本研究と同様の条件で試験を行うとすれば、ポンプ性能として、43 mL×60 s ≒ 2600 mL/minの吐出量が必要である。

4.3 打撃力の試験片上での分布

距離3 m, 4 m, 5 mから2.5%ゼラチンをウォータージェットで打撃し、ゼラチンの表面の破損状態を計測した。写真-4に、ゼラチン表面の写真を示す。光を背面から照射して、破損部を見やすくしている。写真-4(a)は、距離3 mから打撃したもので、大きさ3 cm×4 cm程度のクレータが生じていることがわかる。写真-4(b)と写真-4(c)は、距離4 mからと5 mからの打撃の結果である。距離が離れるほどクレータの大きさが小さくなっているのがわかる。これは距離が遠くなると、打撃力の分布が狭くなるというわけではなく、ある値以上の打撃力が発生する領域が狭くなるということである。

以上の結果から、ノズル直径4 mm、水圧1 MPaにおいては、距離3 m, 4 m, 5 mからのウォータージェットで打撃では、打撃力の分布は数センチ以内に入ると言える。

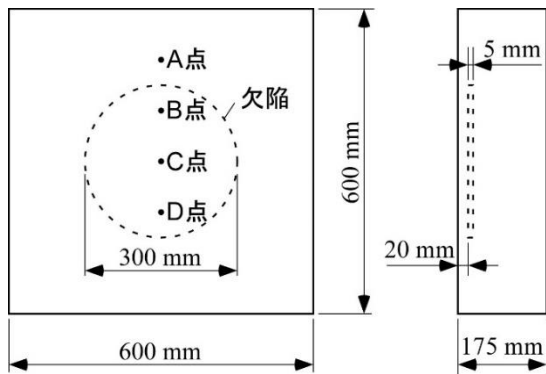


図-3 試験片

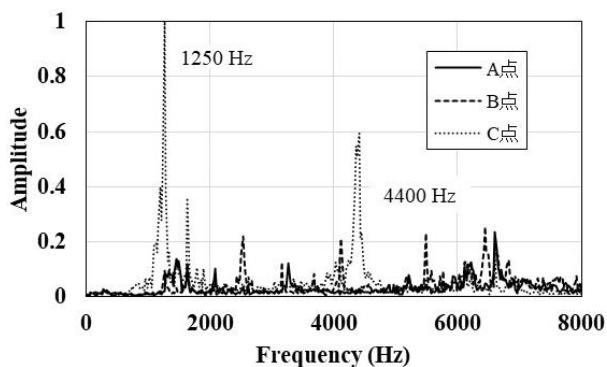


図-4 打診棒による打音の周波数スペクトル

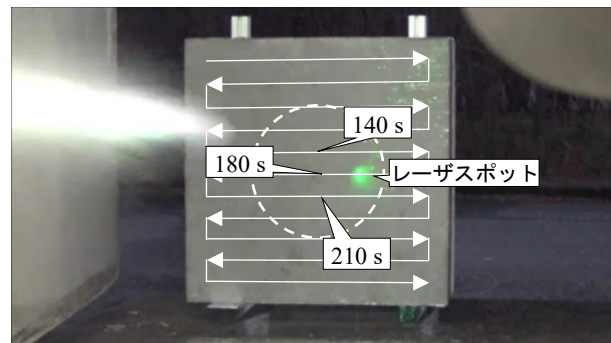


写真-3 計測用カメラで撮影された映像と打撃点

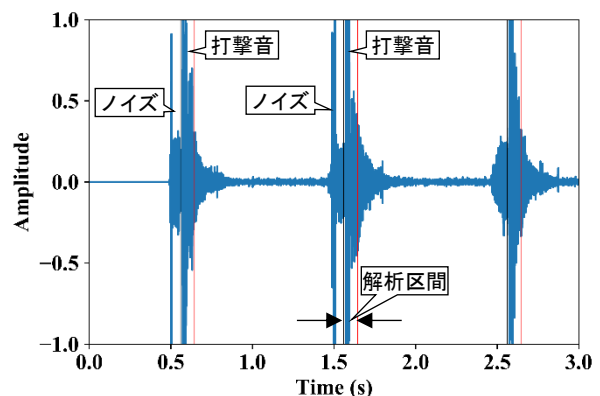
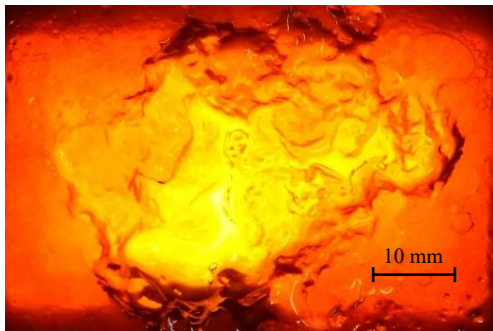
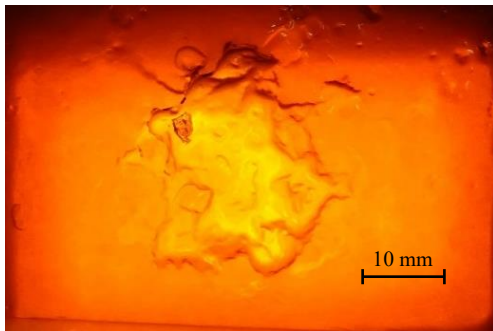


図-5 ガンマイクで収集された音響

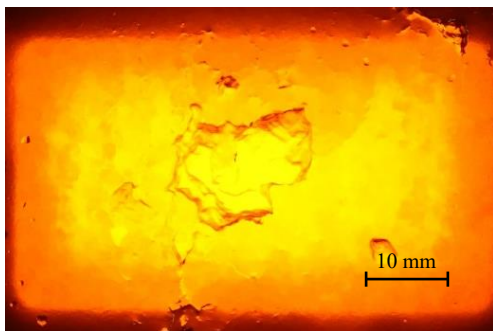
なお、5%ゼラチンは、距離5mからの打撃ではクレータが形成されず、最終的に2.5%ゼラチンを使用した。



(a) 3 m からの打撃



(b) 4 m からの打撃



(c) 5 m からの打撃

写真-4 パルスウォータージェットの打撃力の分布

4.4 遠隔打音試験

写真-2 に、遠隔打撃試験の様子を示している。試験片とノズル先端との距離を3m、4m、5mの3種類とした。打撃試験は、レーザスポットの位置を目標打撃点に合わせて打撃を行った。打撃点の移動は、ギヤ付き雲台のハンドルで仰角および水平角の微調整を行い、600mm角の試験内の500mm角を5cm間隔の格子状に打撃した。打撃点数は、縦11×横11の121点であった。各格子点を3回ずつ打撃した。従って、計測時間は、1Hz×3×121=363sであった。10cmの欠陥を検出するためには、打点間隔を5cm程度以下にする必要があると思われる。なぜなら、10cm間隔で格子状に打撃を加えた場合、直径10cmの空洞欠陥が打撃を受けずに見逃される可能性がある。また、空洞欠陥の縁近くを打撃しても、空洞と表面の間の部分は振動しないためである。

試験片との距離が3mの場合の試験片上部より打撃点を水平に移動しながら試験を行って得られた音響のスペクトログラムを図-6に示している(周波数解像度:11.7Hz)。距離が4mと5mの場合も同様なスペクトログラムとなった。スペクトルの計算に用いた音響は、図-5の解析区間の音響を用いた。時刻180sは、試験片の中央部(図-3のC点)を打撃している時刻に当たり、図-3のピーク周波数である1250Hz近くで音響強度が高くなっていることが確認できる。時刻140sと210sは、図-3のB点とC点の midpoint と、C点とD点の midpoint を打撃している時刻に相当する(写真-3参照)。

図-6のピーク周波数は、1100Hz程度で、図-4のピーク周波1250Hzより低くなっているが、これは試験片の表面に付着した水の質量による慣性質量の増加によるものであると推測される。

図-7と図-8は、図-6の各時刻における、一般的な欠陥の固有振動数の周波数域である500Hzから1500Hzの音響強度の和を用いて判定したものである¹⁰⁾。周波数

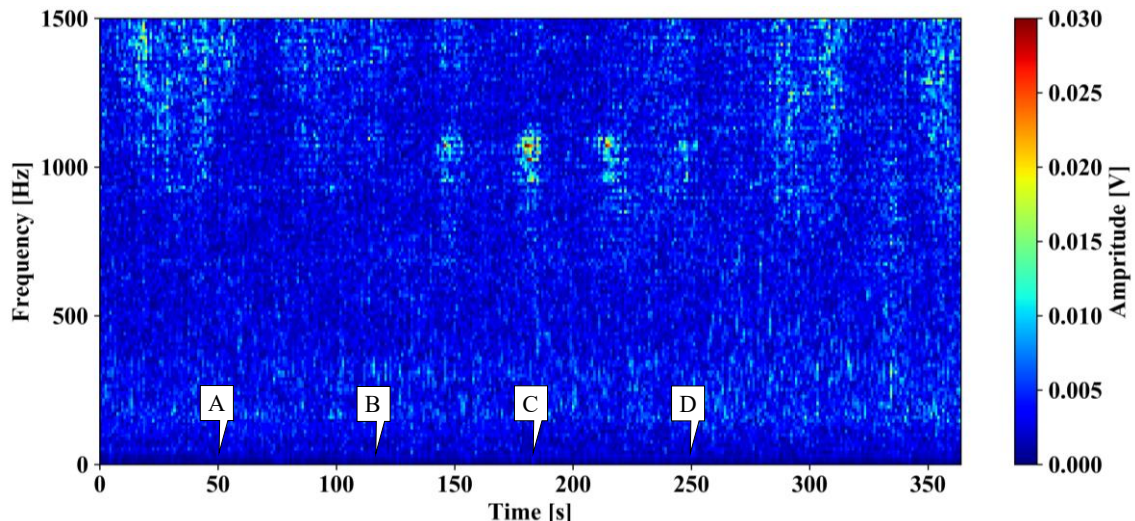
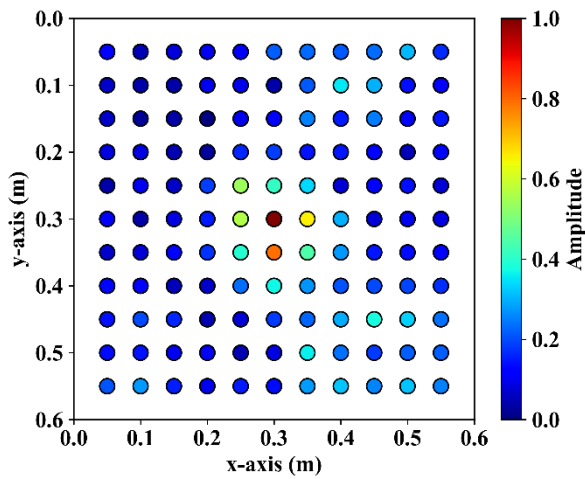
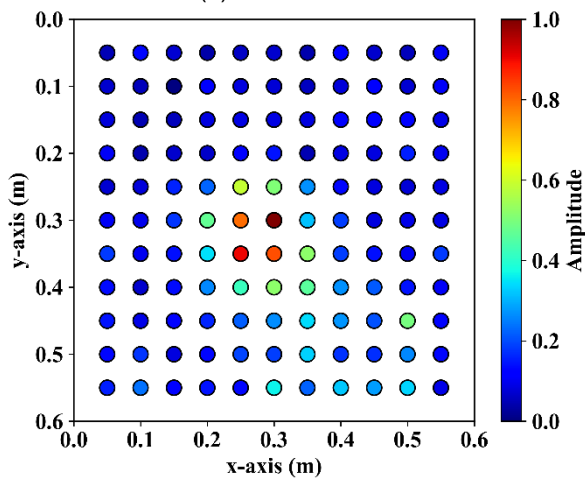


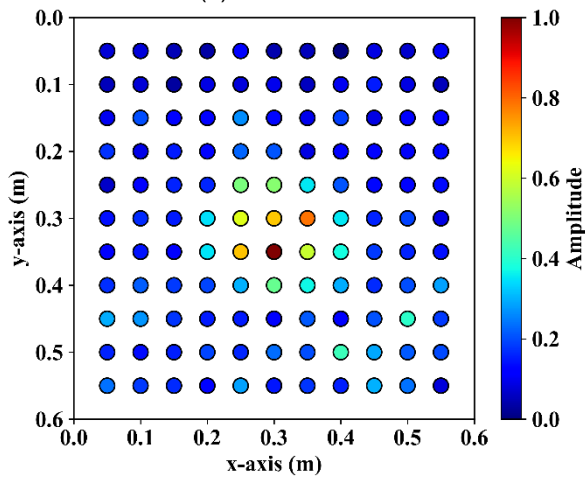
図-6 収集された音響のスペクトログラム(距離3m, A~Dは図-3の打撃点)



(a) 3 m からの打撃

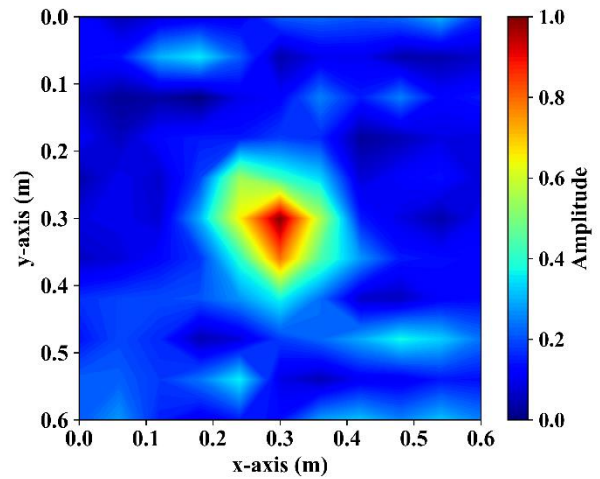


(b) 4 m からの打撃

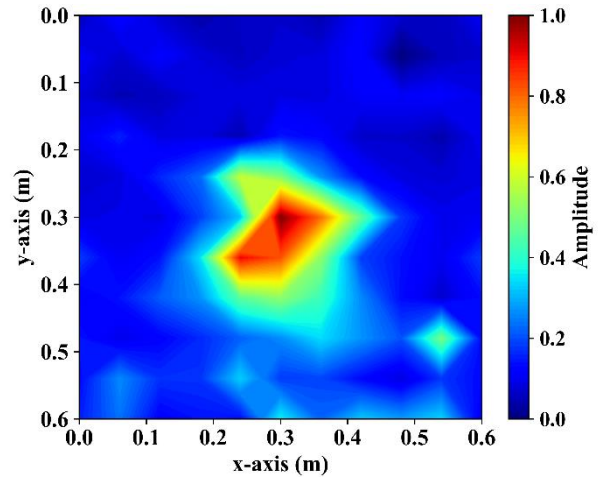


(c) 5 m からの打撃

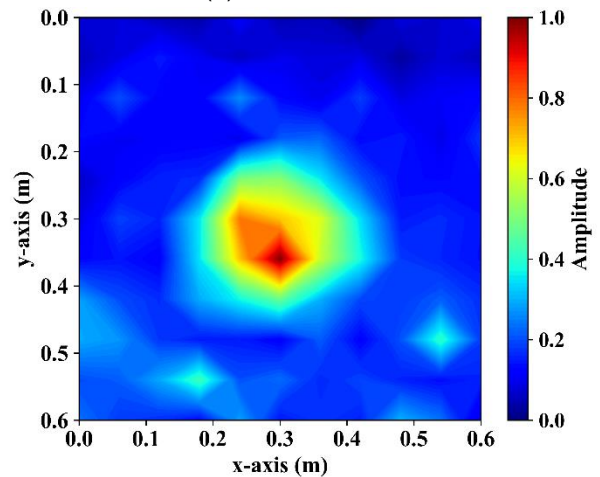
図-7 打撃点に音響強度をプロットした結果



(a) 3 m からの打撃



(b) 4 m からの打撃



(c) 5 m からの打撃

図-8 音響強度を等高線でプロットした結果

幅が 1000 Hz であるので、 $1000 \text{ Hz} / 11.7 \text{ Hz} = 85$ 個の和である。図-7 と図-8 とともに最大値で正規化している。

図-7 は、打撃点に音響強度の和の大きさを点の色で表したものであり、図-8 は、等高線図として表示したものである。いずれの結果においても、欠陥に相当する部分において音響強度の和は大きな値を示しており、欠陥は判別できていると言える。以上の結果より、ノズル

直径 4 mm、圧力 1 MPa のパルスウォータージェットによって、距離 3 m から 5 m において、深さ 20 mm に位置する直径 300 mm の空洞欠陥を検出できると言える。

5. 考察

ここでは、空洞欠陥の固有振動数の推定法を示し、4.1 試験片において打撃試験で発生した音響が空洞欠陥と試

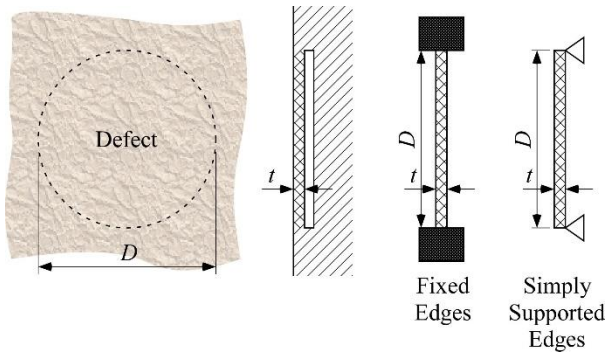


図-9 空洞欠陥の固有振動数

験片表面の間の部分のたわみ振動によるものであることを示す。

図-9 に示すように、空洞欠陥と試験片表面との間の部分のたわみ振動は、円盤のたわみ振動として考えることができる。ここで、欠陥の深さ t は円盤の厚さ t となり、欠陥の大きさ D は円盤の大きさ D となる。

この円盤の周辺部は、完全に固定された状態より回転しやすく、単純支持された状態より回転が制限されている。従って、この部分の固有振動数は、周辺が完全に固定された円盤の固有振動数と単純支持された円盤の固有振動数の中間に位置する。円盤や矩形盤の固有振動数はいろいろなサイトで求めることができる¹¹⁾。そこで、図-3 の試験片の空洞欠陥の固有振動数を推定してみる。

空洞欠陥と試験片表面との間の部分はモルタルで、材料定数を、動弾性係数 35 GPa、ポアソン比 0.2 と仮定し、密度 2300 kg/m³、 $D=300$ mm、 $t=20$ mm とすると、周囲が完全に固定された円盤の固有振動数は 1660 Hz、周囲が単純支持された円盤の固有振動数は 811 Hz となる¹¹⁾。

4.1 試験片において打撃試験で発生した音響の周波数である 1235 Hz は、1660 Hz と 811 Hz の中間に位置している。このことから、欠陥の中央部 C 点を打撃したときに発生した音響は、空洞欠陥と試験片表面との間の部分がたわみ振動したことによると言える。空洞欠陥の固有振動数はこの方法で、矩形空洞でも推定可能である。

6. まとめ

パルスウォータージェットの高圧打撃を用いた非破壊検査法の実用化を目指して、実用化の数値目標として、検査面と検査装置との距離を 5 m、打撃位置精度を 2~3 cm、欠陥検出最小寸法を 10 cm と定めて検討を行った。以下のような結果を得た。

- (1) 高水圧 1 MPa、ノズル径 4 mm の水流条件で、検査距離を 3 m、4 m、5 m において、深さ 20 mm の位置にある直径 300 mm の欠陥の検出が可能であった。
- (2) 打撃位置精度は、ギヤ付き雲台とレーザーポイントの利用により、検査面との距離が 3 m~5 m において、

2 cm~3 cm 以下を実現した。

- (3) 2.5 %ゼラチンを用いて打撃力の分布を測定し、検査距離 3 m では 3 cm~4 cm のクレタが、距離 4 m および 5 m ではそれぞれ 2 cm、1.5 cm の小さなクレタが生じた。
- (4) 空洞欠陥の固有振動数を推定し、打撃による振動が空洞欠陥と試験片表面との間の部分のたわみ振動によるものであることを示した。

参考文献

- 1) 森 和也, Andrea Spagnori, A., 近藤悟郎, 村上敬宜, 鳥越一平: 衝撃波を用いたコンクリート構造物の非接触非破壊検査法の開発とその自動化に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 70, No. 695, pp. 986-994, 2004
- 2) 古川武英, 栗林健一, 秋山保行, 栗原陽一, 松橋貫次: ロボットを活用したコンクリート橋鉄筋かぶり測定の高効率化検討, 令和 3 年土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会講演論概要集, VI-356, 2021.9
- 3) 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
- 4) 和田秀樹: 近接目視・打音検査等を用いた飛行ロボットによる点検システムの研究開発, https://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/booklet/51_wada.pdf (閲覧日: 2024 年 1 月 4 日)
- 5) 島田義則, オレグコチャエフ: レーザー超音波リモートセンシングを用いたコンクリート内部欠陥検出, 電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 7, pp. 1192-1197, 2009
- 6) 森 和也, 徳臣佐衣子: ストリングシュータを用いた遠隔打音検査, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 1426-1431, 2023.7
- 7) 国土交通省: 無人航空機の飛行禁止空域と飛行の方法, https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000041.html (閲覧日: 2024 年 1 月 4 日)
- 8) 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, Vol. 38, No. 1, pp. 2097-3002, 2016.7
- 9) 森 和也, 徳臣佐衣子, 白石 暁: パルスウォータージェットを用いた水撃音響法試験, コンクリート工学, Vol. 41, No. 1, pp. 1721-1726, 2019.7
- 10) 稲葉洋平, 柳田克巳, 森 和也, 大嶋康敬: 水滴の衝突を用いた非破壊検査法によるタイルの浮き検出の自動化, コンクリート工学, Vol. 44, No. 1, pp. 1396-1401, 2022.7
- 11) Calculators for Engineers: <https://calcdevice.com> (閲覧日: 2024 年 3 月 14 日)