

論文 ストリングシュータを用いた遠隔打音検査法

森 和也*1・徳臣 佐衣子*2

要旨：遠隔にて打音検査を行うことができるストリングシュータ（ストリングを打出す装置）を用いた打音検査方法を開発した。大きき数ミリの打撃球を取り付けた環状のストリングを2個のローラで空中に打ち出し、打撃球を検査壁面に打ち当てて打音検査を行う方法である。ストリングシュータから1.5m離れた位置にあるコンクリート試験片中の直径200mmの空洞欠陥の検出に成功した。この方法は、移動しながらの打音検査も可能で、検査の自動化、高効率化、コストダウンが期待できる。

キーワード：非破壊検査, 打音検査, 遠隔, ストリングシュータ, コンクリート, 浮き, 剥離

1. 緒言

全国にある73万の橋梁及び1万のトンネルは、法令により5年間隔での定期点検が義務付けられている^{1),2)}。定期点検は、「近接目視により行うことを基本とし、必要に応じて打音等の非破壊検査等を併用して行う。」と定められている。近年、高性能なカメラやドローン等の開発によって、目視自体は離れた位置から近接目視に準ずる点検が可能になっている。そこで、遠隔にて打音検査を行うことができれば、国が定める近接目視を遠隔にて実施することが可能になり、点検の大幅な簡易化が実現する。

遠隔にて打音検査を行う方法としては、**写真-1**に示すような吸着式移動ロボットに打音検査装置を搭載するものや³⁾、**写真-2**に示すようなドローンに打音検査装置を搭載するものなどがある^{4),5)}。これらの装置の課題としては検査速度が挙げられる。吸着式移動ロボットは、

確実な吸着を行うために、高速の移動は難しい。ドローンを用いた検査装置も、打音試験装置を確実に検査面に近接させて移動させるためには移動に時間を要する。

筆者らも遠隔にて打音検査を行うことを目的として、水滴の打撃を利用した「水撃音響法」の開発を進めてきた^{6),7),8)}。この方法は、水滴を検査面に打ち当てて、その音響から欠陥を検出する方法である。この方法は高速の移動が可能であるが、コンクリートの比較的大きな浮きや剥離を検出するためには、大量の水を必要とし、水の供給が課題であった。また、検査後の水は高所から落下するため、その処理も問題となることがある。

そこで、今回、水流をストリングに置き換えて打音検査を行う新たな方法を提案する。この方法は、検査しながらの高速の移動が可能で、固体の打撃力を利用した打音検査であるので信頼性も高い。また、水を使用しないため作業性および経済性においても優れている。



写真-1 吸着式打音検査装置³⁾



写真-2 ドローンを用いた打音検査装置^{4),5)}

*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

2. 水滴の打撃からストリング打撃へ

本研究は、図-1 に示すようなストリングシュータを用いて、遠隔にて構造物を打音検査する方法を提案する。これまで、著者らは、図-2 に示すような水滴の衝突を利用した打音検査方法を開発してきた^{6),7),8)}。水の直噴

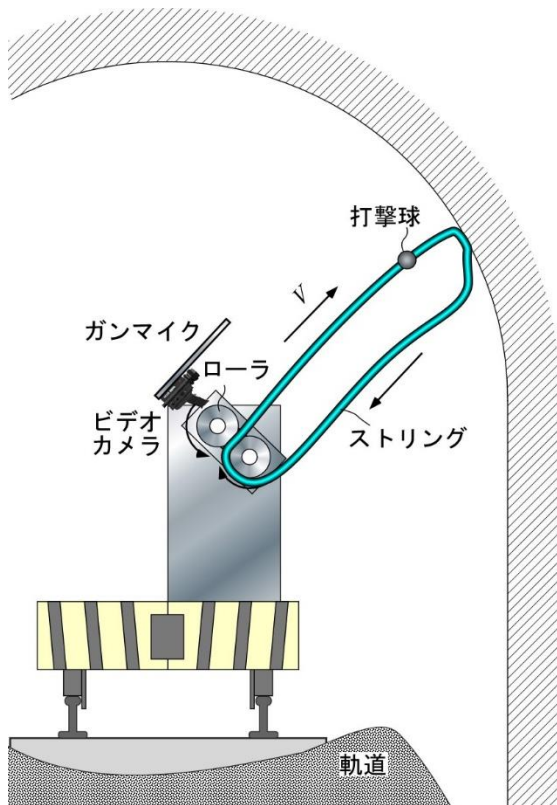


図-1 ストリングシュータを用いた打音検査

流をノズルから放出すると、水流はやがて水滴化する。この水滴を検査壁面に衝突させて加振する。検査壁面に浮き・剥離があると、浮き・剥離部は振動し、健全部とは異なる音響を発生する。この音響を収集し、浮き・剥離を検出する。問題点としては、水の供給が挙げられる。コンクリート構造物の浮きや剥離を検出するためには、毎分十リットル以上の水を必要とするのである。

そこで筆者らは、壁面を打撃した後の水を回収し、再度ノズルから放出する方法を試みた。すなわち、水流の無限軌道化である。しかしながら、衝突後に拡散する水流を遠隔にて回収することは困難であった。最終的には、この水流の無限軌道を、図-3 に示すようなストリングに置き換えて打音検査を行う方法に至った。

軽量のストリングをローラで挟んで押し出すと、ストリングは空中を浮遊する^{9),10)}。この装置は、一般的には玩具として知られているが、宇宙空間への物体の輸送方法としても検討されている¹¹⁾。ストリングを水平に打ち出した場合の浮遊距離は、ストリングの速度、線密度(単位長さ当たりの質量)、空気抵抗によって決まる。それぞれ限界はあるが、ストリングの速度が速いほど、線密度が低いほど、空気抵抗が大きいほど、ストリングはより遠くまで浮遊する。

このストリングを検査面に打ち当てて打音検査を行うが、軽量のストリングの打撃のみでは加振の効果は得られないので、ストリングに打撃球を取り付ける。すると、周期的に打撃球が検査面を打撃し、連続打音検査が実現する。

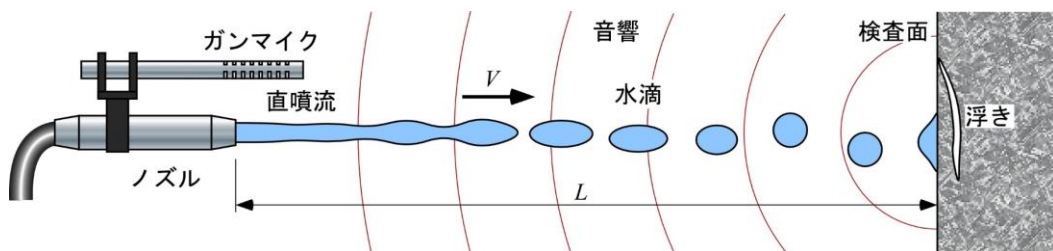


図-2 水撃音響法の原理^{6),7),8)}

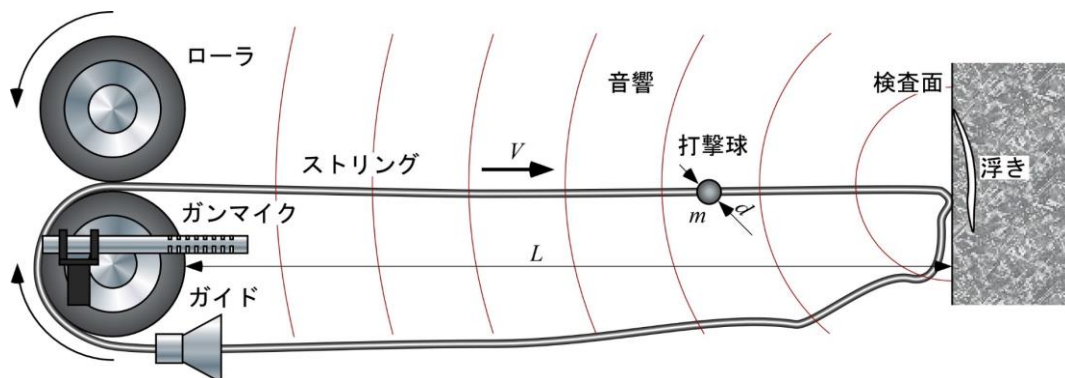


図-3 ストリングシュータを用いた打音検査の原理

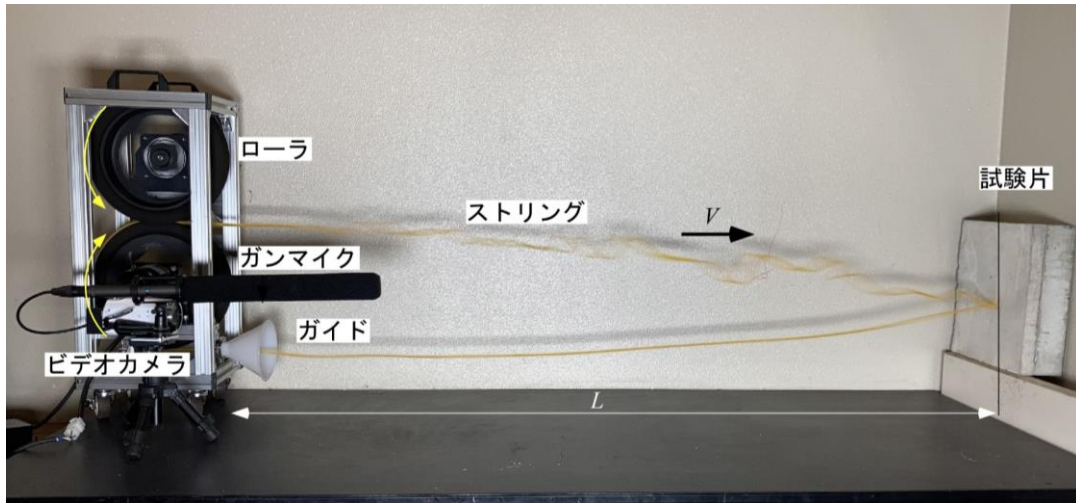


写真-3 Stringシュータを用いた打音試験

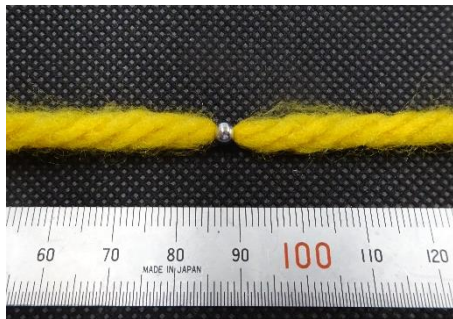


写真-4 Stringと打撃球

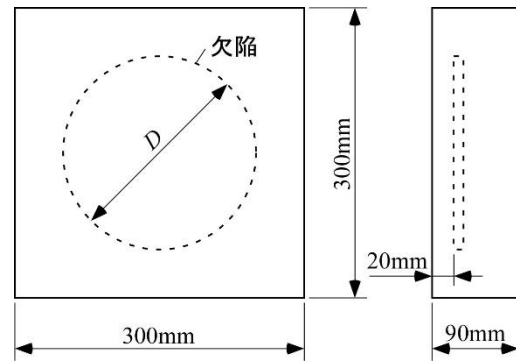


図-4 試験片

3. 試験装置および試験片

Stringシュータを用いて、実際に打音検査が可能であるかどうかを試験した。

3.1 試験装置

写真-3 に、Stringシュータを用いた打音試験の様子を示している。Stringシュータの構成は以下の通りである。外周にスポンジゴムを有する直径 250 mm のローラ 2 個を、それぞれスピードコントロールモータ（回転数 90 rpm-1600 rpm）で駆動した。Stringの長さは $S = 4$ m で、直径約 5 mm、線密度は 1.6 g/m であった。Stringに取り付けた打撃球を写真-4 に示している。打撃球は直径 4 mm のステンレス製で、直径 2 mm の穴を有し、質量は 0.14 g であった。Stringの取り入れ部には、円錐形のガイドを配置した。

3.2 試験片

図-4 は、打音試験に用いた試験片である。試験片は 2 種類で、欠陥を有しない試験片と、空洞欠陥を有する試験片である。それぞれの試験片の大きさは、300 mm x 300 mm の正方形であり、厚さは 90 mm である。試験片の製作方法は、厚さ 60 mm、一辺 300 mm の正方形コンクリート平板に、モルタル（配合比：水 13.4%、セメント 21.6%、砂 64.9%）を 30 mm 厚貼りつけた。欠陥入り

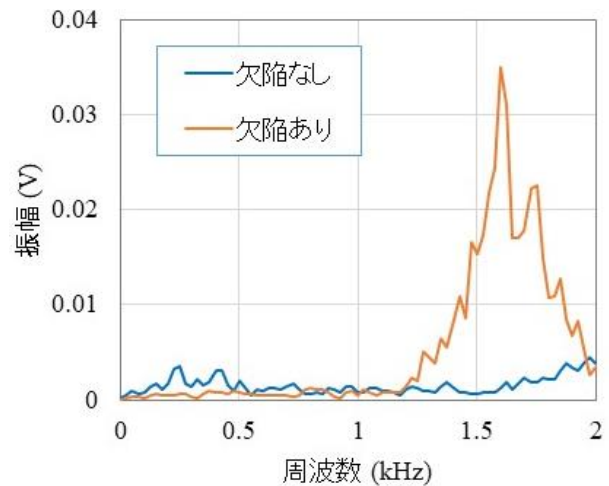


図-5 打診棒による打音の周波数スペクトル

の試験片は、コンクリート板の上に厚さ 10 mm、直径 $D = 200$ mm の発泡ポリスチレンの板を置いて空洞を模した。欠陥の深さは、試験片表面より 20 mm である。

Stringシュータを用いた試験に先立ち、図-4 の試験片を、打診棒を用いて打音試験を行った（玉径 17 mm）。図-5 は、それぞれの打音の周波数スペクトルである（サンプリング時間 50 ms、周波数分解能 20 Hz）。

打撃力は、ほぼ同じになるようにした。欠陥を有する試験片の打撃音は、欠陥が無い試験片の打撃音より大きく、その周波数は 1.4 kHz から 1.8 kHz であることがわかる。

4. ストリングシュータによる打音試験

写真-3 に示すように、ストリングシュータを用いて打音試験を行った。ストリングシュータと試験片の距離を $L = 1.5 \text{ m}$ とした。ストリングの打出し速度は、 $V =$ 約 12 m/s とした。ガンマイクを用いて打音を収集し、打撃映像と共にビデオカメラに記録した。

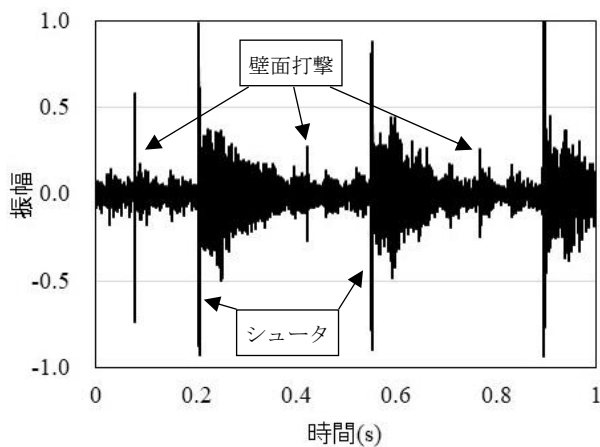
図-6 は、欠陥なし試験片と欠陥あり試験片の打音の信号である。横軸は時間、縦軸は最大値で無次元化した信号の振幅である。まず、図-6 (a)欠陥なし試験片において、0.20 s, 0.55 s, 0.90 s において大きな音響が発生している。これは打撃球がストリングシュータを通過する際に発生した音響である。ガンマイクとストリングシュータが近い位置にあるために、通過音が大きく表れている。

0.07 s, 0.42 s, 0.77 s に小さく表れているピークは、打撃球が壁面を打撃した時の音響である。

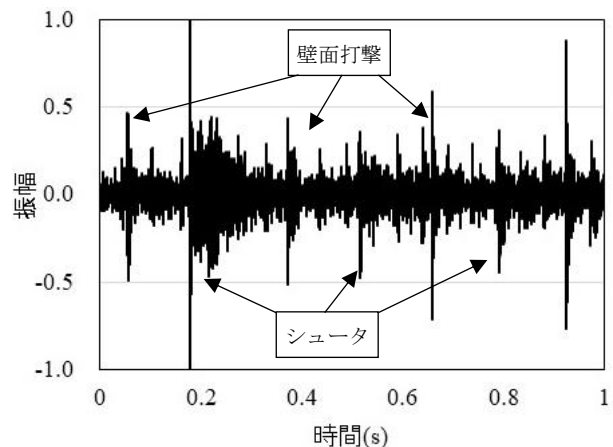
図-6 (b)欠陥あり試験片においても同様の波形を示したが、壁面打撃の音響は、図-6 (a)欠陥なし試験片の音響より相対的に大きいことがわかる。これは、図-5 における波形の大きさの違いに対応している。

図-7 は、図-6 の音響波形における打撃球が、壁面を打撃した時、ストリングシュータを通過した時、空中を移動している時の音響を周波数スペクトルで表した図である (サンプリング時間 20 ms, 周波数分解能 50 Hz)。

図-7 (a)の欠陥なし試験片の結果と図-7 (b)の欠陥あり試験片の結果を比較すると、欠陥あり試験片では、1.2 kHz から 1.5 kHz において大きなピークが現われていることが確認できる。この結果から、本検査装置は、図-4 の試験片の欠陥を検出できることがわかる。また、図-7 の結果は図-5 の結果ともほぼ一致する。次に、連続した打撃音響の解析結果を説明する。

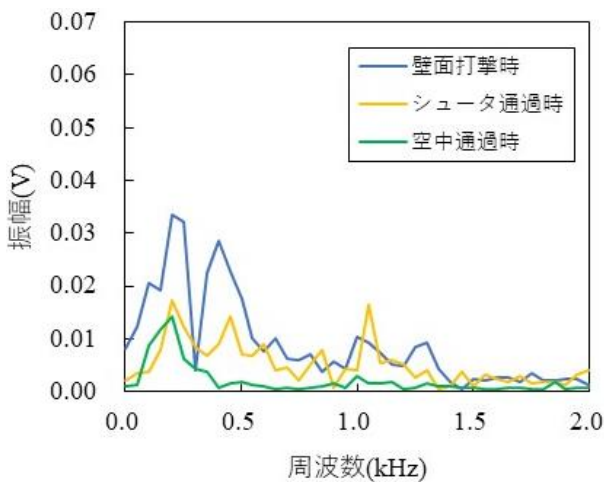


(a) 欠陥なし試験片

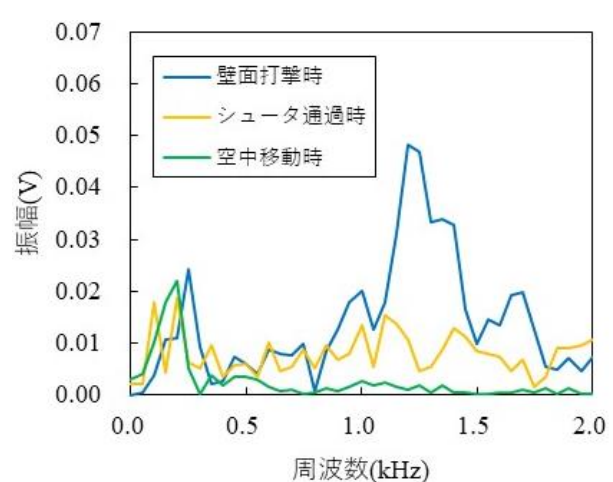


(b) 欠陥あり試験片

図-6 ストリングシュータを用いた打音試験の打撃音



(a) 欠陥なし試験片



(b) 欠陥あり試験片

図-7 打撃球の壁面打撃時/シュータ通過時/空中移動時の音響の周波数スペクトル

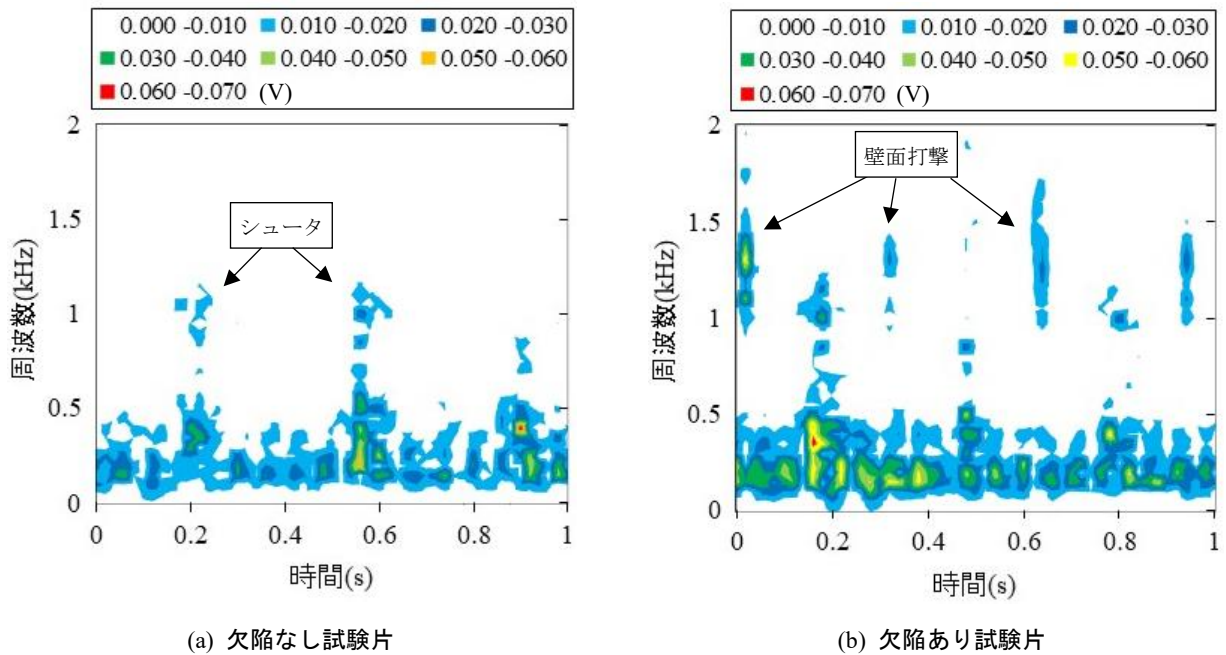


図-8 スtringシュータを用いた打音試験の打撃音響のスペクトログラム

図-8 は、(a)欠陥なし試験片と(b)欠陥あり試験片の 1 秒間の連続する打撃音をスペクトログラム（周波数スペクトルの時間変化）で表した図である。連続する打撃音を、0.02 秒間隔に分割し、各区間の周波数スペクトルを求め、スペクトログラムとして表した。横軸は時間(s)、縦軸は周波数(kHz)で、暖色系の色が音響の強度が強いことを表している。図-8 (a)欠陥なし試験片は、壁面打撃音響が確認できないが、図-8 (b)欠陥あり試験片は、壁面打撃音響が確認できる。この音響は欠陥の存在によって発生した音響である。

ここで、打撃球のstringシュータ通過音と壁面打撃音響の分離方法について説明する。stringの長さを S 、速度を V とすると、打撃球が 1 個の場合、打撃球がシュータを通過する時間間隔は S/V となる。打撃位置にかかわらず、この時間間隔で発生する音響は、打撃球がシュータを通過する際に発生する音響である。また、この音響のほぼ中央に発生する音響は打撃球が壁面を打撃した音響である。したがって、打撃球がシュータを通過する際に発生させる音響間の中間位置の音響を解析すれば、欠陥の有無を判定できる。

5. 考 察

本検査方法の実用性を、まず、打撃エネルギーにおいて検証する。前章で説明した実験では、打撃球として直径 $d = 4 \text{ mm}$ 、質量 $m = 0.14 \text{ g}$ のステンレス球を使用した。打撃速度は $V = \text{約 } 12 \text{ m/s}$ であった。したがって、この打撃球の打音検査に用いられる運動エネルギー E_s は次式のようにになる。

$$E_s = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \times 0.0014 \times 12^2 = 0.10 \text{ J} \quad (1)$$

打音検査で用いられる一般的なハンマの質量は、113 g (1/4 ポンド) あるいは 227 g (1/2 ポンド) である。打音検査における打撃速度は多様であるが、実際に打音試験を行って、その様子をビデオで撮影してハンマの打撃速度を測定したところ、1 m/s から 2 m/s であった。

質量 227 g のハンマを用いて、1 m/s の打撃速度の場合の運動エネルギー E_H を求めてみると次式のようにになる。

$$E_H = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \times 0.227 \times 1^2 = 0.11 \text{ J} \quad (2)$$

式(1)と式(2)の値はほぼ等しく、本手法による打撃エネルギーは、ハンマの打撃エネルギーに匹敵することがわかる。

次に、加振周波数帯域について検討する。本研究で提案する打音検査法は、作業者による打音検査を代替することを目的としているため、加振周波数は可聴音の周波数帯域 (20 Hz から 20 kHz) をカバーする必要がある。物体の衝突によって発生する音響の周波数帯域は、衝突の接触時間 t_c によって決定される^{12), 13), 14)}。鋼球がコンクリート面に衝突した場合の接触時間 t_c (s) は、鋼球の直径 d (m) から次式で求められる¹⁴⁾。

$$t_c = 0.0043 d \quad (3)$$

式(3)は、鋼球の速度の変数が省略されているが、その理

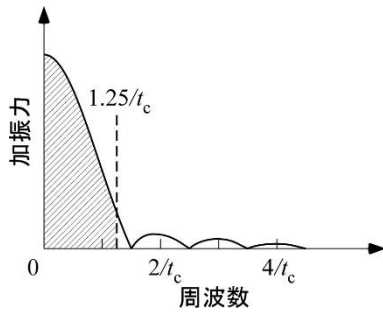


図-9 球の弾性衝突によって生じる加振力の周波数

由は接触時間に及ぼす速度の影響が小さいからである。

図-9 は、球の弾性衝突によって生じる加振力の周波数を示している¹⁴⁾。加振力は、周波数がゼロの位置で最大となり、 $1.5/t_c$ でゼロとなる。 $1.25/t_c$ までを有効な周波数の上限 f_{\max} とすれば、本試験で用いたステンレス球 ($d = 4 \text{ mm}$) の場合、 f_{\max} は次式のようになる。

$$f_{\max} = \frac{1.25}{t_c} = \frac{1.25}{0.0043 \times 0.004} = 73 \text{ kHz} \quad (4)$$

式(4)より、可聴音の周波数帯域 (20 Hz から 20 kHz) を十分カバーしていることがわかる。

本研究の検査方法の課題としては、ストリングの摩耗がある。ストリングは、検査壁面で常に擦過しているので摩耗し易い。ストリングが空中を浮遊するためには、ストリングが軽い必要があるが、軽いストリングは一般に摩耗に弱く、軽くて摩耗に強いストリングの選定が課題となる。

今回の研究では、1 試験条件のみの結果を示したが、検出対象によって最適な試験条件は異なるので、今後は多様な検出対象に対して試験を行う予定である。

6. 結 言

空中に打ち出すストリングに打撃球を付けて検査面を打撃する、ストリングシュータを用いた遠隔打音検査法を提案した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) ストリングシュータを用いて、4 mm の打撃球を取り付けたストリングを検査面に当てると、直径 200 mm の空洞欠陥を距離 1.5 m の位置から検出することができた。
- (2) 打撃試験で収集される音響には、打撃球が検査面に衝突する音響と打撃球がストリングシュータを通過する際に発生する音響が含まれるが、検査面に衝突する際に発生する音響は、シュータ通過音響の間に発生するため、分離が可能である。
- (3) ストリングシュータを用いた打音検査の打撃エネルギーは、作業者によるハンマの打撃エネルギーに匹敵す

る。

- (4) 摩耗に強い軽量なストリングの選定が課題である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，国土交通省，2019.2
- 2) 国土交通省道路局国道・技術課：道路トンネル定期点検要領，国土交通省，2019.3
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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：2023年1月9日)
- 6) 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
- 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法（水撃音響法）の走行試験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39, No. 1 pp. 1897-1902, 2017.7
- 8) 森和也，徳臣佐衣子，大嶋康敬，水滴の衝突を利用した橋梁やトンネルの高所の地上からの打音検査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 44, No. 1 pp. 1354-1359, 2022.7
- 9) Yeany, B.: String shooter-String launcher – physics of toys, <https://youtu.be/rffAjZPmkuU> (閲覧日：2023年1月9日)
- 10) Margaux, A., Courson, J., Maury, M. and Renaud, J.: String Shooter's overall shape in ambient air, Emergent Scientist 4, pp. 1-8, 2020.1
- 11) Lofstrom, K: The Launch Loop: A Low Cost Earth-to-High-Orbit Launch System, 2009 Space Elevator Conference, pp. 1-40, 2009.6
- 12) Goldsmith, W.: Impact: The theory and Physical Behavior of Colliding Solids, Edward Arnold Press, Ltd., pp. 24-50, 1960.1
- 13) Sansalone, M. and Carino, N. J.: Impact-Echo: A Meth for Flow Detection in Concrete Using Transient Stress Wave, NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, 1986.9
- 14) Sansalone, M. and Streett, W.: Impact-Echo, Bullbrier Press, pp. 29-34, 1997.6