

打音検査の自動化と検査精度向上を目的とした回転式打撃装置の開発

岩本 達也¹

有明工業高等専門学校

社会インフラの老朽化に対してメンテナンスサイクルの構築が急速に進められており、目視や打音検査による点検は事故の未然防止において重要な位置づけである。本研究はトンネルや橋梁などの打音検査の自動点検を目的として、多様な形状・凹凸に対して安定した打撃が可能な回転式打撃装置を開発し、その有効性について検証した。

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早急な老朽化対策が社会問題となっている。国土交通省では道路橋定期点検要領¹⁾や道路トンネル定期点検要領²⁾を策定し、長期的な維持管理を目的としたメンテナンスサイクルの構築を進めている。また、点検用ロボットやセンシング技術などの技術開発も進んでいる。飛行型ドローンを用いた点検は、検査車両が侵入できない場所でも検査可能であるため、橋梁点検などでの利用を期待されている。検査は主にカメラによる近接目視と打音検査である。カメラによる近接目視は、飛行型ドローンが空撮などで利用されていたこともあり、既に実用化されているが、打音検査は検査精度が十分でない。平成 29 年に実施された実証試験（九州地方整備局「コンクリート構造物のうき・剥離を検出可能な非破壊検査技術」技術評価）では、うき及び剥離の検出率が約 50%であった。これは打撃性能と計測性能が不十分だったためと考えられる。打撃装置には、バネやソレノイドによる往復運動を用いた機構が多く採用されている（図 1）が、この機構では打撃装置と壁面との距離が適切でなければ十分な強度の打撃を与えることができず、また、打撃時の反動も大きいため打撃は安定しない。したがって、変状個所の検出率向上には打撃装置の改良が必要である。

本研究の目的は、打音検査の自動点検を目的として、コンクリート用の回転式打撃装置の開発である。回転式打撃装置（図 1）とは、回転体にリンクで接続された打撃体を高速回転させて壁面を打撃する装置で、リンクの長さを適切にすることで、壁面と打撃装置との距離が変化しても安定した打撃が可能となる。

2. 回転式打撃装置の製作

打撃装置の概要を図 2 に示す。打撃装置は、フランジにチェーンで打撃体が接続された構造に

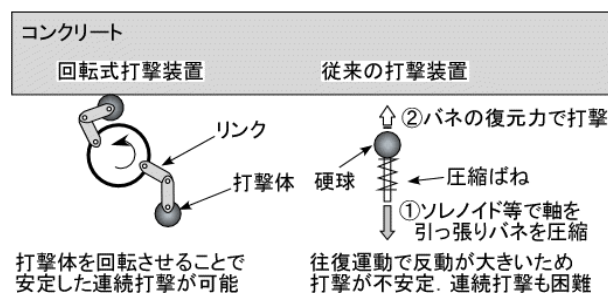


図 1 打撃装置の比較

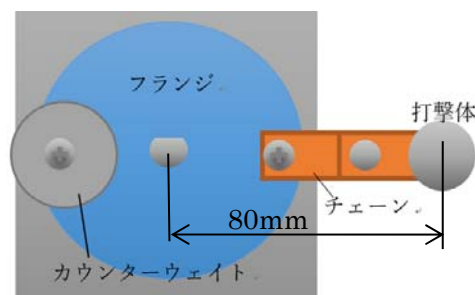


図 2 回転式打撃装置の概要

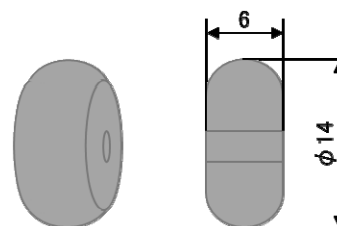


図 3 打撃体形状

表 1 打撃体の材質

材質	S45C	PC
比重	7.8	1.1~1.6
硬さ	201~269HBW	110~120HRR

なっており、モーターでフランジを回転させることで打撃体が回転運動するため、連続して打撃ができる。フランジの回転中心から打撃体中心までの距離は 80 mm とした。図 3 に打撃体の形状を示す。打撃体は直径 14mm のリング形状

で、材質は S45C とポリカーボネート (PC) の二種類を製作した. 表 1 に打撃体の材質を示す.

3. 打撃波形の計測

鉄板に荷重センサ (PCB 208C05) を取り付け、そのセンサを打撃装置で打撃した時の出力波形より荷重と接触時間を評価した. 図 4 に実験の概要図を示す. 図 5 に打撃波形測定実験の概要図を示す. 打撃位置 a は、打撃体回転半径の最下点から打撃位置までの距離を示す. サンプリング周波数は 100kHz とした.

図 6 および図 7 に各打撃体の打撃波形 (5 回分) を示す. また、図 8 に直径 11mm の鋼球を高さ 100mm から落下させたときの打撃波形を示す. 図 8 より、回転式打撃装置による打撃は、直径 11 mm の鋼球を落下させたときと同様の打撃波形が得られた. 図 6, 図 7 より、打撃波形は、5 回ともほぼ同じであることから、打撃の安定性が確認できた.

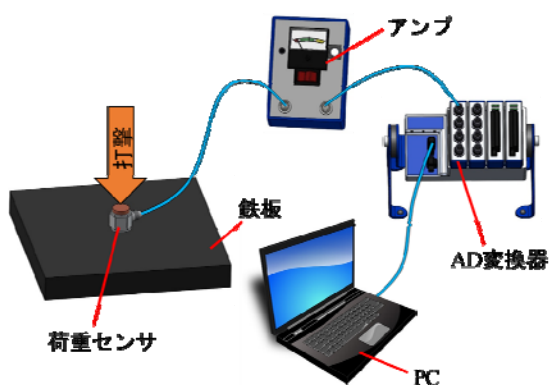


図 4 打撃波形の計測

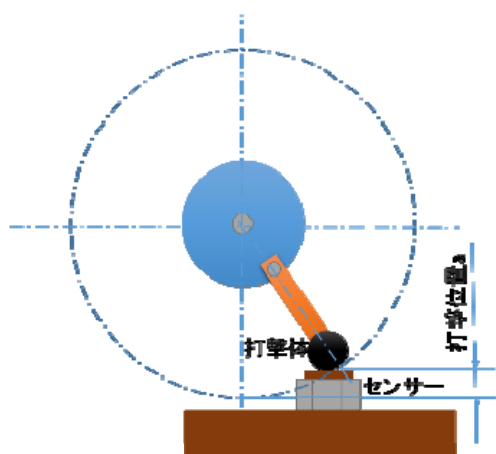


図 5 打撃位置 a

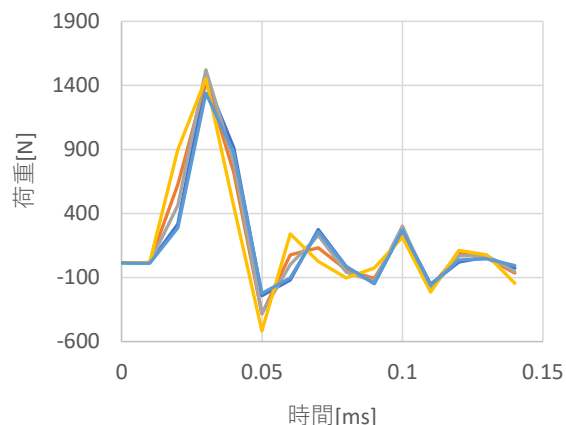


図 6 打撃波形 (S45C, 打撃位置 a=10mm)

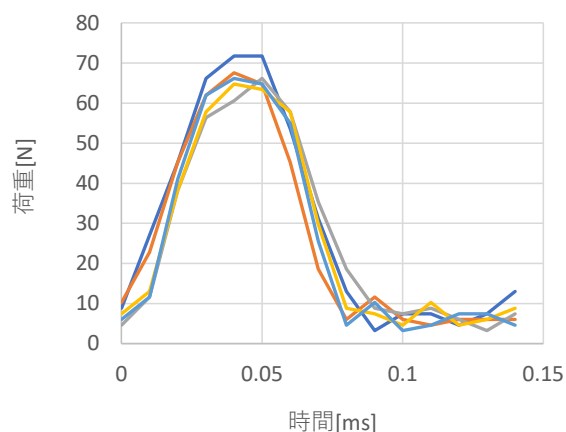


図 7 打撃波形 (PC, 打撃位置 a=10mm)

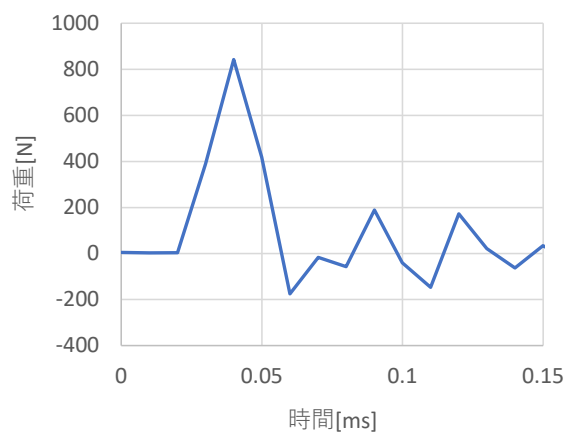


図 8 打撃波形 (鋼球, 直径 11mm, 落下高さ 100mm)

次に、打撃波形を測定して、打撃力と接触時間を求めた. 波形測定例を図 9 に示す. 図 10 および図 11 に打撃位置と打撃力の関係を示す. 図 10 より、打撃位置 a が小さくなる

と打撃力が小さくなっている。これは、回転運動をしている打撃体の位置により、打撃体速度のセンサ表面に対して垂直方向成分が変化するためであり、打撃距離が小さいほど、打撃体の進行方向と表面との角度(衝突角度)が小さいため、打撃力は小さくなる。図11の打撃体PCの場合も同様の傾向が確認できた。また、表2に、打撃体ごとの接触時間と加振周波数を示す。なお、加振周波数は接触時間の逆数とした。

表2より、打撃体S45Cの場合、加振周波数には可聴音域以上のため、打音検査への適用が可能であることが分かった。

表2 接触時間と加振周波数

	接触時間(ms)	加振周波数(kHz)
S45C	0.04	25
PC	0.08	12.5
鋼球(10mm)	0.04	25

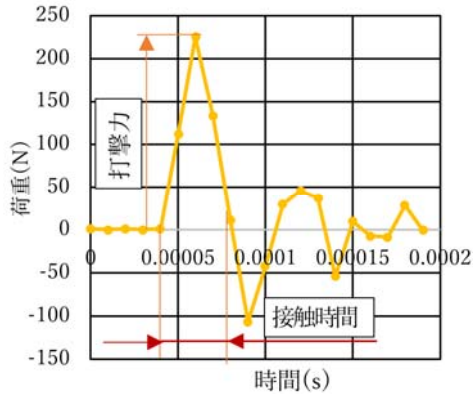


図9 波形測定例

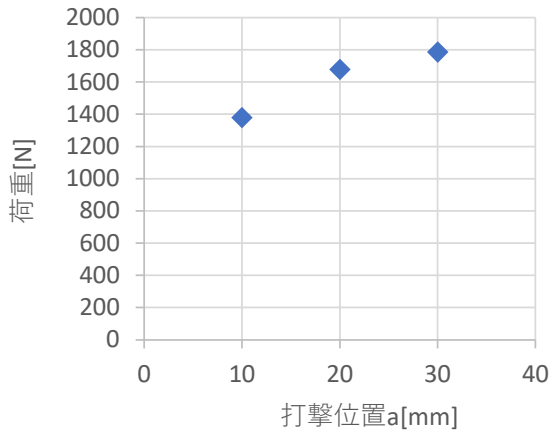


図10 打撃位置と打撃力の関係 (S45C)

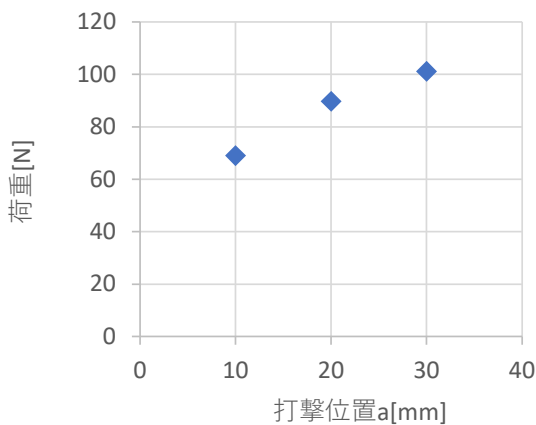


図11 打撃位置と打撃力の関係 (PC)

4. テストピースの打撃

回転式打撃装置の打撃によるコンクリート表面の損傷を評価するために、テストピースを打撃し、打撃痕を観察した。テストピースは呼び強度の異なる3種類を作製した。作製したテストピースの配合比を表3に示す。また、圧縮試験の結果を表4に示す。

打撃試験は、回転式打撃装置を用いてテストピース表面を打撃した。実験条件は、打撃距離 $a=10\text{mm}$ 、回転数 300rpm 、打撃時間 5min (打撃回数約 1000 回) とした。また、打撃痕を分かりやすくするために、試験箇所を予め油性マジックで黒く塗りつぶした。図12に打撃痕の例を示す。

図13~図15にマイクロスコープによる打撃痕の観察結果を示す。図13(a)より、打撃体の回転方向に対して、 7.5mm 幅で長さ 13mm の打撃痕が確認できた。また、図13(b)は、打撃痕の最深部を基準としたときの等高線を示している。図13(b)より、打撃痕の深さは約 2mm であった。また、試験体BおよびCにおいても同程度の結果が得られた。打撃時に打撃体の挙動をハイスピードカメラで観察したところ、回転数 300rpm 以上で回転が安定した。

表3 コンクリート配合比

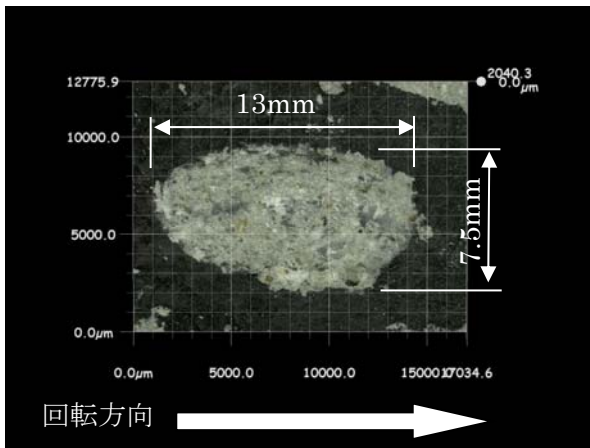
試験体名	A	B	C	
呼び強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	18	24	30	
水セメント比 [%]	55	50	43	
単位質量 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	水	170	178	178
	セメント	309	356	414
	細骨材	748	705	661
	粗骨材	1028	1011	1005
混和材	1.55	1.78	2.07	

表4 圧縮試験結果 (28日強度)

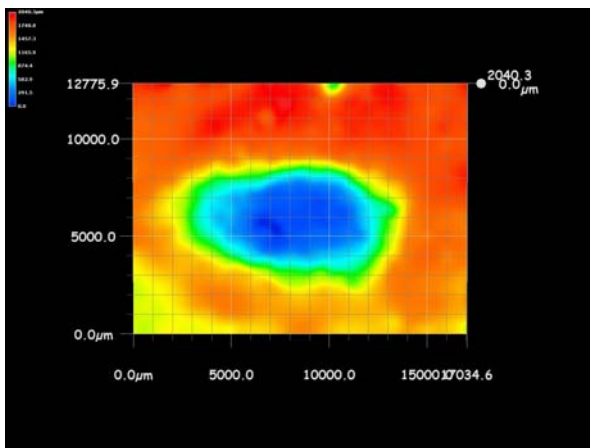
試験体名	A	B	C
圧縮強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	25.5	28.6	37.9



図 12 打撃痕の例

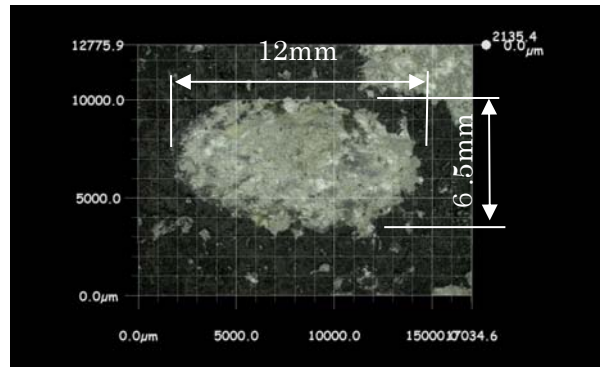


(a)形状

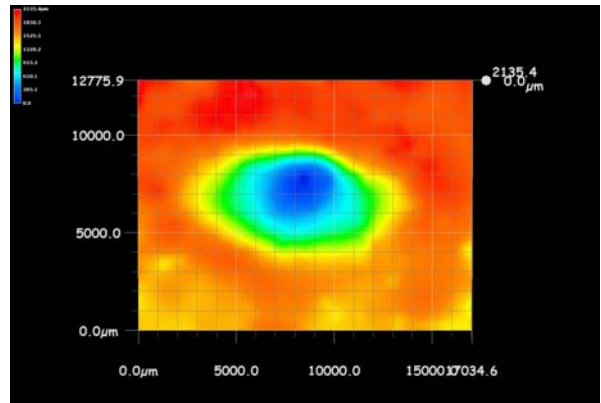


(b)等高線図

図 13 打撃痕の観察(打撃体 S45C,試験体 A)

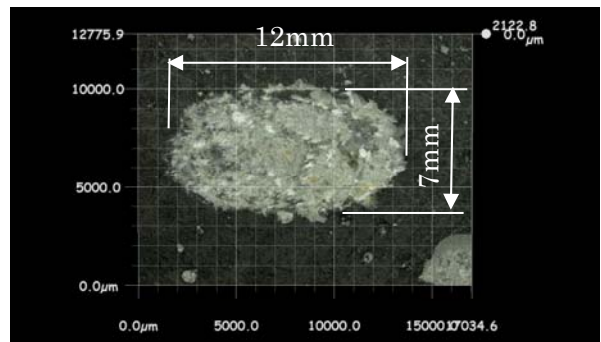


(a)形状

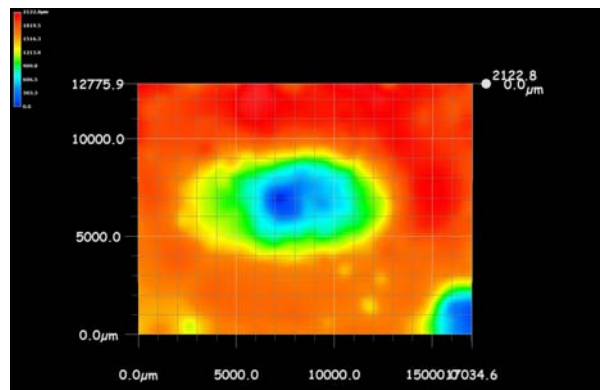


(b)等高線図

図 14 打撃痕の観察(打撃体 S45C,試験体 B)



(a)形状



(b)等高線図

図 15 打撃痕の観察(打撃体 S45C,試験体 C)

5. 弾性波伝播シミュレーション

円運動する打撃体の衝突によるコンクリート内部の弾性波の伝播を確認するために、有限要素シミュレーションを行った。解析ソフトにはLS-DYNAを用いて、動解析（要解法）を行った。図16に解析モデルを示す。解析モデルは、幅100mm(x方向)、奥行き100mm(y方向)、高さ50mm(z方向)のコンクリート部材と直径15mmの鉄球の2分の1モデルを採用した。要素は一辺が1mmの6面体ソリッド要素とした。解析は、衝突した状態から開始し、衝突角度 θ に応じたx方向速度 V_x およびz方向速度 V_z を初期条件として与えた。表5に打撃距離 a と初期条件の一覧を示す。なお、打撃体は、回転半径80mmで、回転数300rpmで回転運動するものとして、周方向速度は2.512m/sとした。境界条件は、底面を固定、xz平面の対称面に対称境界条件を定義した。

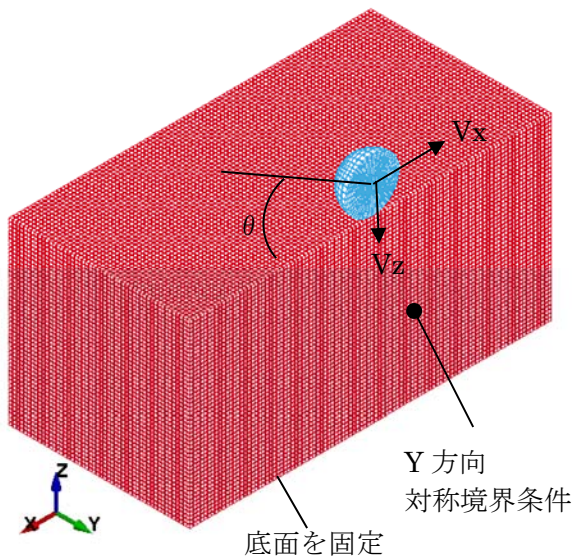


図16 解析モデル

表5 初期条件

衝突角度 $\theta [^\circ]$	V_x [m/s]	V_z [m/s]	打撃距離 a [mm]
30	2.175	1.256	10.7
45	1.776	1.776	23.4
60	1.256	2.175	40
90	0	2.512	-

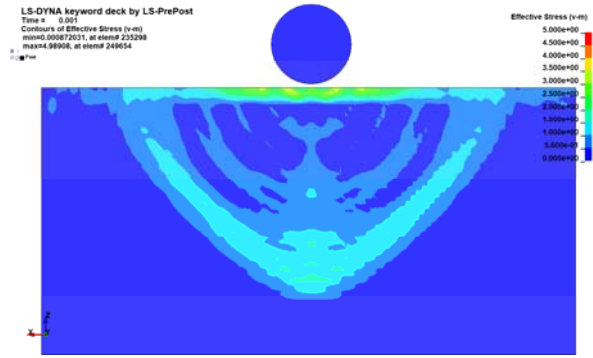


図17 応力分布 ($\theta = 90^\circ$)

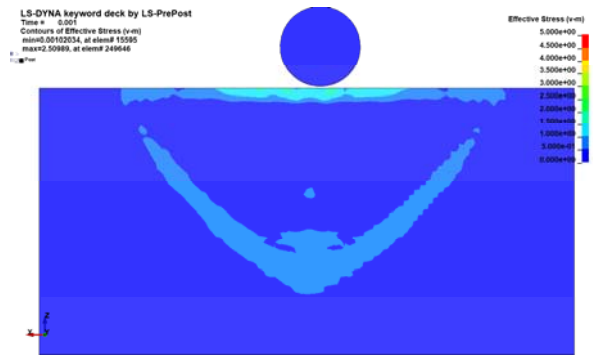


図18 応力分布 ($\theta = 30^\circ$, $a = 10.7$ mm)

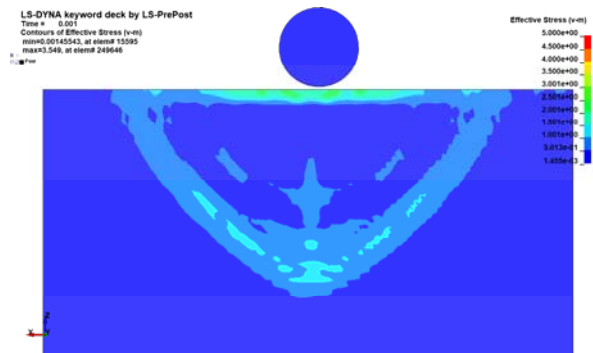


図19 応力分布 ($\theta = 45^\circ$, $a = 23.4$ mm)

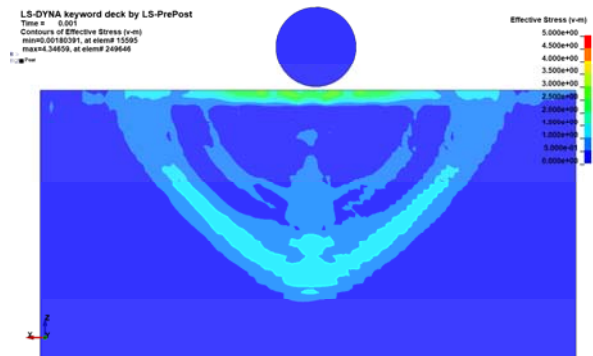


図20 応力分布 ($\theta = 60^\circ$, $a = 40$ mm)

図17から図20に、解析結果として、時刻 $t = 0.001$ sにおけるミーゼス応力の分布を示す。

応力分布より、衝突角度が大きくなるほど、応力は大きくなっており、図 10 および図 11 と同様の傾向が確認できた。また、図 18 から図 20 のように斜め方向から衝突する場合は、応力波の対称性がわずかに崩れるが、応力波の進行方向は、打撃点から垂直方向下向きであった。このことから、打撃点から垂直方向の欠陥に対して、円運動する打撃体による打撃の有効性が確認できた。

6. 打音検査

回転式打撃装置による欠陥検出性能を検証するために、空洞のあるコンクリート試験片に対して打音検査を行った。図 21 に打音検査の様子を示す。また、図 22 にコンクリート試験片を示す。打撃条件は、打撃体 S45C、打撃距離 $a=10$ mm、回転数 300rpm とした。また、打撃音は、マイクロフォン (PCB 378B02) を試験片表面から 200 mm だけ離して計測した。サンプリング周波数は 50kHz とした。打撃音の例を図 23 に示す。

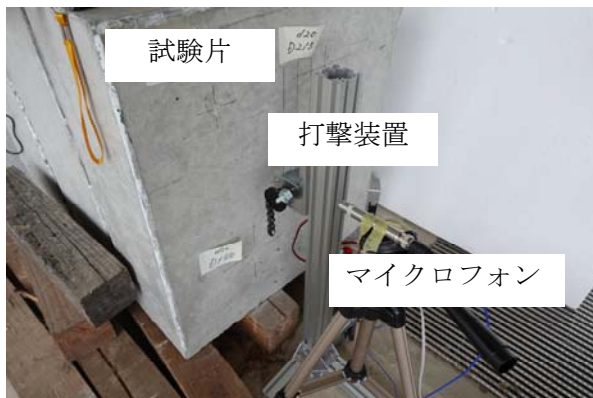


図 21 打音検査の様子

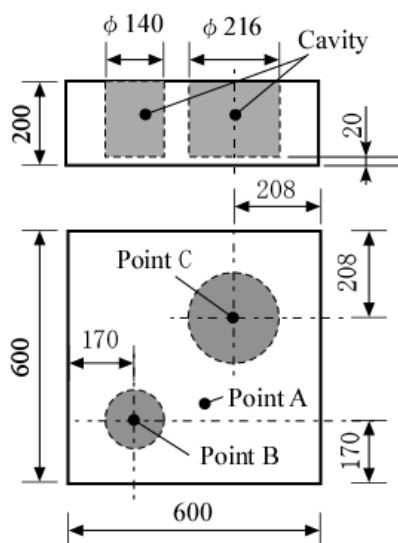


図 22 コンクリート試験片

図 24 に、直径 216mm の空洞部を打撃したときの打撃音の周波数分布を示す。図 24(a) および図 24(b)は、どちらも同じ個所を打撃した結果である。図 24(a)(b)より、約 2kHz 付近に卓越したピークが確認でき、空洞上部(厚さ 20mm)のたわみ振動と考えられる。また、図 24(a)と図 24(b)を比較するとわずかに周波数分布に違いが確認できる。

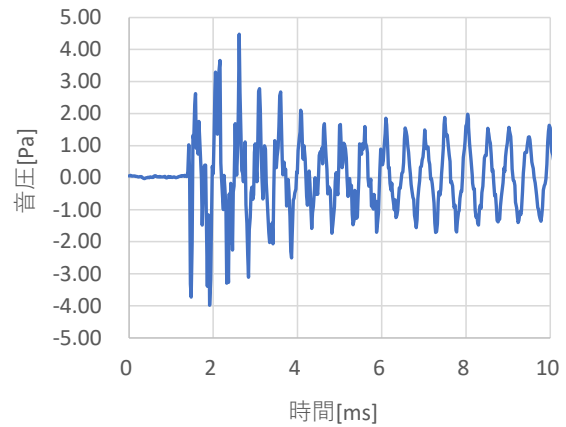
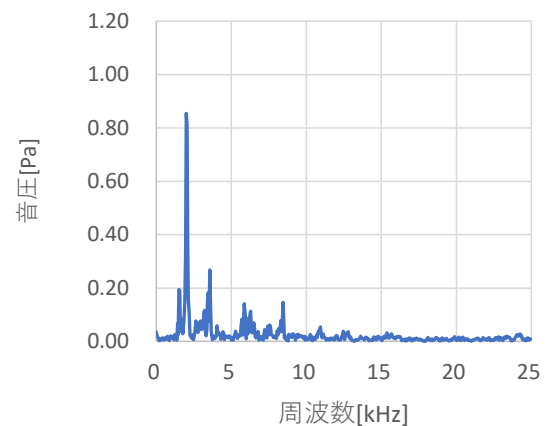
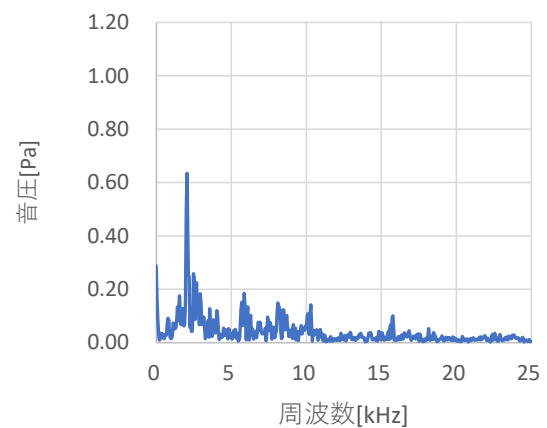


図 23 打撃音の例 ($\phi 216$)



(a)



(b)

図 24 周波数分布 (打撃回数 1 回, $\phi 216$)

図 25 に、打撃音の周波数分布を 50 回加算平均した結果を示す。加算平均することで、卓越したピークとそのほかのピークとの差が明確になった。

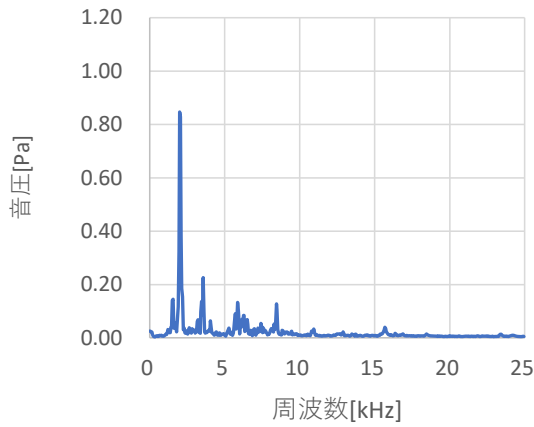
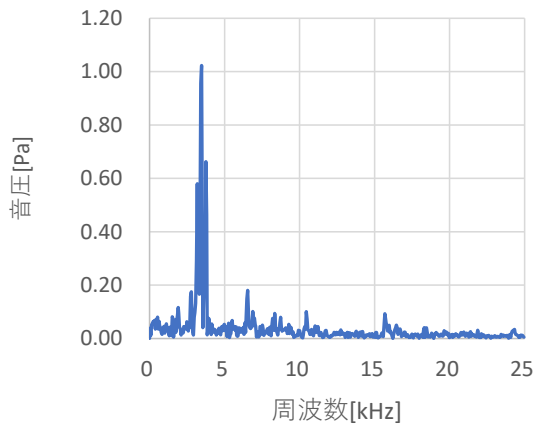
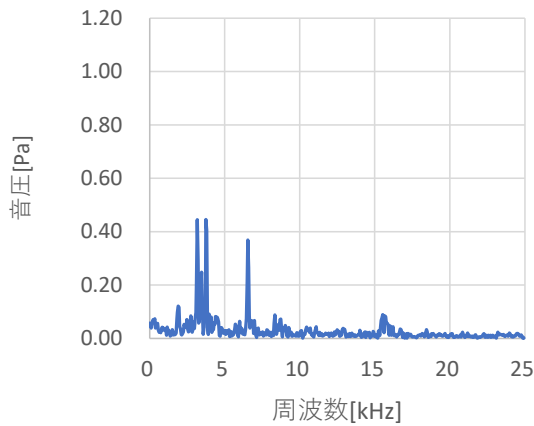


図 25 周波数分布（打撃回数 50 回， $\phi 216$ ）



(a)



(b)

図 26 周波数分布（打撃回数 1 回， $\phi 140$ ）

図 26 に、直径 140mm の空洞部を打撃したときの打撃音の周波数分布を示す図 26(a)および図 26(b)は、どちらも同じ個所を打撃した結果である。図 26(a)(b)より、約 3.5kHz 付近に卓越したピークが確認でき、空洞上部のたわみ振動と考えられる。また、図 26(a)と図 26(b)を比較すると周波数分布に違いが確認できる。特に図 26(b)では、3.5kHz 付近のほかにも、6.5kHz 付近にもピークが確認できるため、卓越したピークの判定が難しい。

図 27 に、打撃音の周波数分布を 50 回加算平均した結果を示す。加算平均することで、卓越したピークとそのほかのピークとの差が明確になり、判定が容易になった。なお、内部に欠陥のない場合は、図 28 に示すように、振幅が小さく卓越したピークも見当たらないため、欠陥と健全部の判定は容易にできると考えられる。

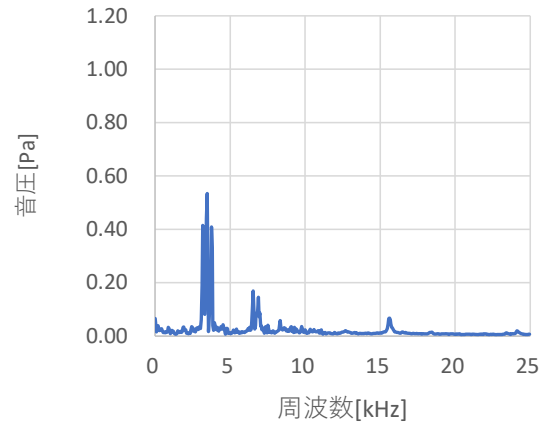


図 27 周波数分布（打撃回数 50 回， $\phi 140$ ）

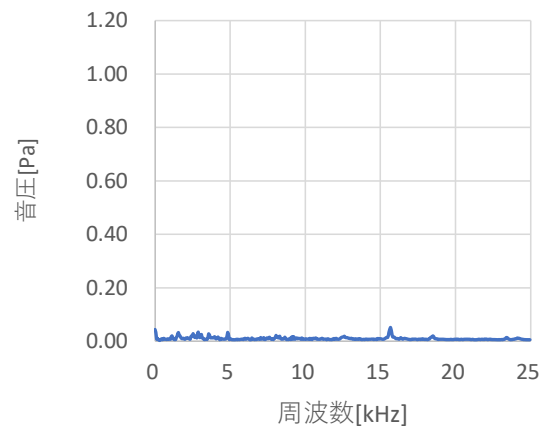


図 28 周波数分布（打撃回数 50 回，健全部）

7. おわりに

本研究では、コンクリート構造物に対する打音検査のための回転式打撃装置の有効性について検証した結果、以下の成果が得られた。

- (1) 荷重センサを用いた打撃波形の測定より，回転式打撃装置による打撃は，打音検査に十分な周波数成分を含んでいることが確認された．
- (2) 弾性波伝播シミュレーションの結果より，回転する打撃体の衝突により生じる弾性波は，打撃点の垂直方向に進行することが確認された．
- (3) 内部に空洞のあるコンクリート試験片に対する打音検査の結果より，直径 140 mm 以上で，深さ 20mm 程度の欠陥が検出可能であった．また，打撃音の加算平均により，卓越したピークの明確化が確認された．

8. 謝辞

本研究は，(一社)九州建設技術管理協会より助成を受けたものである．ここに謝意を表する．

9. 参考文献

- 1) 国土交通省，道路橋定期点検要領，平成 31 年 2 月
- 2) 国土交通省，道路トンネル定期点検要領，平成 31 年 3 月