

論文 コンクリート打撃音の周波数特性とその欠陥評価への適用

浅野 雅則^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・六郷 恵哲^{*3}・遠藤 友紀雄^{*4}

要旨：本研究では、鋼球直径の違いによる打撃音の周波数特性の変化と、欠陥評価のためのパラメータとしての周波数特性の適用性について検討した。その結果、鋼球直径が周波数分布に与える影響は大きいことを確認した。健全部における周波数分布との対比により、欠陥の有無が把握できるとともに、ピーク周波数は欠陥の平面的な大きさと相関があることを明らかにした。さらに、欠陥がある場合の打撃音におけるピーク周波数はたわみ共振現象に支配されるものであることが明らかとなった。

キーワード：非破壊試験, 打音法, 弾性波, 周波数分布, 欠陥評価

1. はじめに

打音法は、コンクリート表面を打撃することによって生じた打撃音を利用してコンクリート中の欠陥等を評価する手法である。

打音法における欠陥評価のパラメータとしては、打撃音の最大振幅値、波形の実効値、周波数特性などが考えられており¹⁾、いずれも研究途上にあるのが現状である。これに関連して著者らは、直径 30mm の鋼球を落下させることにより打撃を行った実験において、打撃音の最大振幅値が欠陥の寸法や深さと良い相関を持つことを明らかにしている²⁾。一方、この実験において、周波数分布に着目した実験を行ったところ、欠陥の影響によりピーク成分の大きさに変化はみられるものの、ピーク周波数自体に明確な変化は認められなかった。

そこで本研究では、これに引き続いて、打撃音における周波数特性の欠陥評価への適用性を検討するため、鋼球直径をさらに小さくし、入力する弾性波の周波数範囲を広く³⁾した条件を加えて検討を行った。そして、鋼球直径の違いが打撃音の周波数特性に与える影

響を確認するとともに、欠陥の存在が周波数分布におよぼす影響について検討した。さらに欠陥がある場合に出現するピーク周波数の発生要因を明らかにするため、加速度計による表面振動計測もあわせて行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

本実験では、**図-1**に示すように内部に円盤状の人工欠陥(スチレンボード、厚さ:0.5cm)を埋設したコンクリート床板供試体(長さ:400cm, 幅:200cm, 板厚:20cm)を作製した。コンクリートの配合および物理的性質を**表-1**に示す。この寸法であれば、側面からの弾性波の反射の影響はないものと考えられる。人工欠陥は、直径が5, 10, 15, 20, 30 および 50cm であり、表面からの深さはそれぞれ3, 10 および 17cm である。なお欠陥を配置しない箇所を「健全部」とした。また**写真-1**に示すように、欠陥より上側に鉄筋がある場合とない場合を設け、鉄筋の存在が欠陥評価に与える影響についても検討した。

*1 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 工修(正会員)

*2 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

*3 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

*4 昭和コンクリート工業株式会社 技術開発部 工修(正会員)

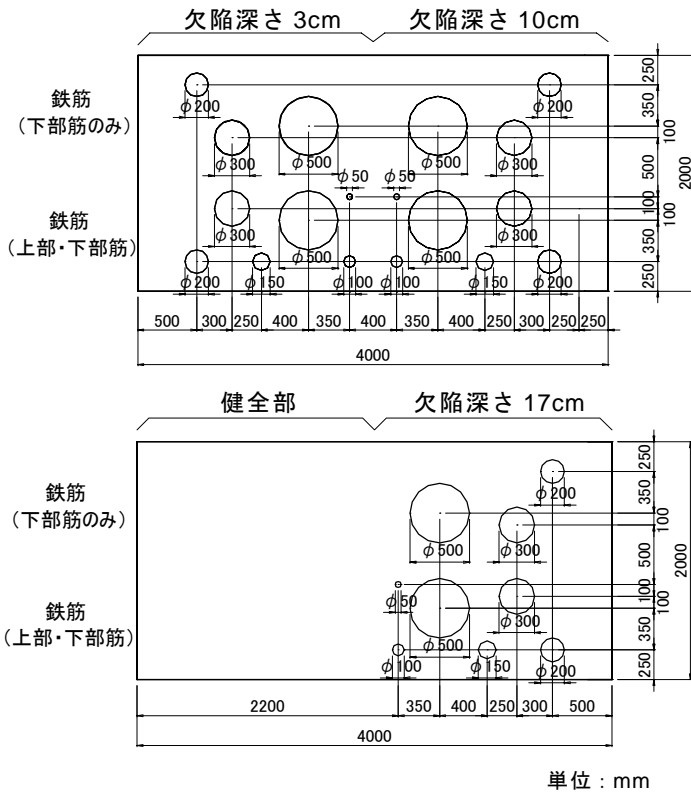


図-1 供試体平面図

表-1 コンクリートの配合および物理的性質

W/C (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C ¹⁾	F ²⁾	S	G	Ad ³⁾
50.0	33.5	175	350	173	817	841	6.8

- 1) 普通ポルトランドセメント, 2) 高炉スラグ微粉末
3) 減水剤

強度 (N/mm ²)	超音波伝播速度 (m/s)	動弾性係数 ¹⁾ (GPa)
69.4	4500	41.9

- 1) 超音波伝播速度より算出

2.2 打撃方法

打撃は、鋼球を高さ 10cm の位置から落下させることにより行った。鋼球直径（以降、球径とする）を表-2 に示すように 3 ケースとして条件を変えて実験を行った。なお、表-2 中の接触時間 T_c (sec) および上限周波数 f_{max} (Hz) は既往の研究³⁾を参考にしてそれぞれ式(1)および式(2)により求めた。ここで、 D は鋼球の直径 (m) である。

$$T_c = 0.0043D \quad (1)$$

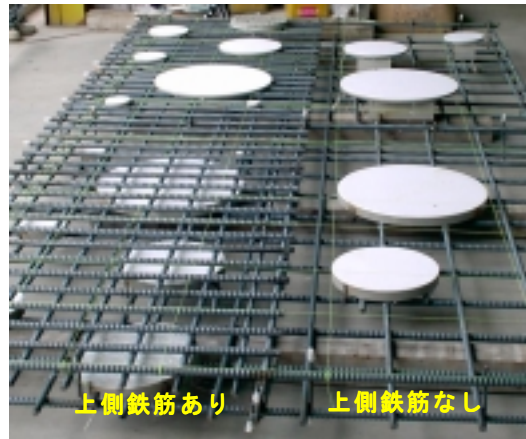


写真-1 人工欠陥設置状況

表-2 弾性波入力条件

ケース	鋼球直径 (mm)	接触時間 T_c (μ s)	上限周波数 f_{max} (kHz)
①	9.53	40.98	30.5
②	19.05	81.92	15.3
③	30.16	129.7	9.63

$$f_{max} = \frac{1.25}{T_c} \quad (2)$$

打撃位置は人工欠陥の中央部とした。また供試体は厚さ 20cm の砂層上に設置した。

2.3 弾性波計測方法

打撃音の計測にはコンデンサマイクロフォン（周波数範囲：0~30kHz）を、表面振動の計測には加速度計（周波数範囲：0~45kHz）を用いた。マイクロフォンおよび加速度計で受振された波形は、それぞれアンプを介し AD 変換器を通してパソコン上に記録した。その後 FFT（高速フーリエ変換）により周波数分布を求めた。本研究では、センサの感度特性曲線を用いて、得られた周波数分布の補正を行いセンサ特性の影響を除去した。なお、マイクロフォンは打撃点より水平方向に 7.5cm、鉛直上方向に 10cm の位置に配置した。加速度計は、打撃点より水平方向に 7.5cm の位置に配置した。計測状況を写真-2 に示す。

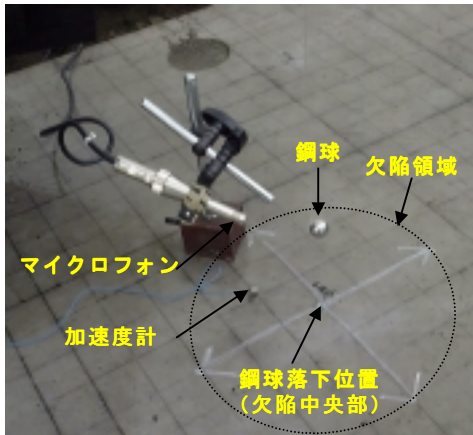


写真 - 2 計測状況

3. 実験結果および考察

3.1 健全部における周波数分布

図-2 に、各球径ごとの健全部における周波数分布を打撃音と表面振動の両方について示す。これらの図によれば、球径が小さいほど、周波数成分はより高い周波数領域まで存在することがわかる。これは、表-2 に示した入力条件における上限周波数と対応しているものと考えられる。表面振動では、ケース および ケース の両方において、11kHz 付近に明確なピークが出現している。これは(3)式により計算される板厚 ($T=20\text{cm}$) に相当する縦波共振周波数 ($f_T=11.25\text{kHz}$) であると考えられる。

$$f_T = \frac{V}{2T} \quad (3)$$

一方、打撃音においては、これに対応するピークは得られていない。これにより、本実験の範囲内においては、上限周波数が十分に高い打撃条件を用いたとしても、打撃音にはコンクリート中における 20cm 程度の距離での縦波共振現象は感知されないことが明らかとなった。またケース では、打撃音はもとより表面振動においても、板厚に相当する縦波共振は現れていない。これは打撃条件としての上限周波数が縦波共振周波数よりも低いことによるものと考えられる。

続いて次節以降では、健全部での周波数分

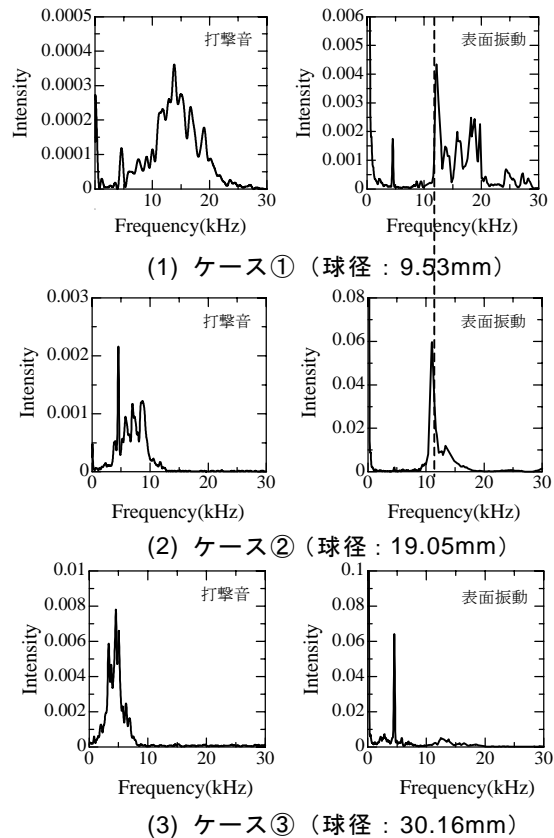


図 - 2 健全部における周波数分布

布との比較の上で、欠陥の深さごとに、欠陥の直径が周波数特性に与える影響を検討した。なおケース では、既報²⁾でも示したとおり欠陥がピーク周波数に与える影響が小さかったため、検討を省略した。また、欠陥深さ 17cm の場合は、～ の全てのケースにおいて、健全部との差異が極めて小さかった。本実験の範囲では、検出の限界を超える欠陥条件であったものと考えられる。

3.2 欠陥深さ 3cm における周波数分布

図-3 に、各球径ごとの周波数分布をケース および の欠陥直径 20 および 30cm の場合について示す。これらの図によれば、いずれの周波数分布においても、健全部のもの(図-2)と比較すると、明らかに分布形状は異なっており、いずれも明確なピークを有している。また、ケース および とともに打撃音と表面振動で同様の傾向を示している。さらに、欠陥直径が大きいほど、スペクトルピークが低い周波数領域へ移動しているのがわかる。これらにより、欠陥の存在によって供試体内

部に共振現象が励起され、これが打撃音においてもスペクトルピークを出現させたものと考えられる。

板の曲げ振動においては、板厚が一定の場合、板の面積が大きくなるにしたがって曲げ共振周波数は低下する⁴⁾ことが知られている。ここで見られたスペクトルピークのシフト現象より、スペクトルのピーク成分は、欠陥上側のコンクリート部のたわみ共振によるものと考えられる。なお、本実験においては、周波数分布に与える供試体内部の鉄筋の影響はほとんどなかった。

図-4に、周波数分布に現れたピーク周波数を、欠陥直径と対応させて、打撃音および表面振動の両方について示した。ピーク周波数についてはケースととではほとんど同じであったため、ここではケースについて示してある。この図によれば、欠陥直径が大きくなるにしたがってピーク周波数は低い方へ移動することがわかる。この図において、図中の網掛け部分が、打撃音と表面振動の両方の特性が一致する領域であり、この範囲において打撃音のピーク周波数により欠陥の評価が可能であると考えられる。

3.3 欠陥深さ 10cm における周波数分布 (1) ケース の場合

図-5に、欠陥深さが 10cm でケースとした時の欠陥直径 20 および 30cm の場合における周波数分布を示す。欠陥直径が 20cm の場合には、打撃音の周波数分布は健全部と同様の形状となった。これに対し表面振動では、5.5kHz 付近に卓越するピークが出現するとともに、24kHz 付近にも健全部には見られない明確なピークが出現した。一方、欠陥直径 30cm の場合では、打撃音は健全部と似ているものの、成分は小さいながらも、図中に矢印で示す 4kHz 付近の新たなピークが存在している。また、表面振動では、直径 20cm の場合と比較して、5kHz 付近のピークはやや低い方へシフトし、23kHz 付近のピークがより強

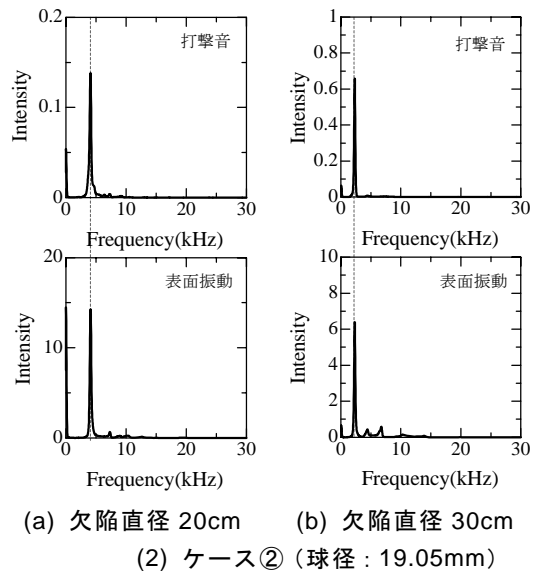
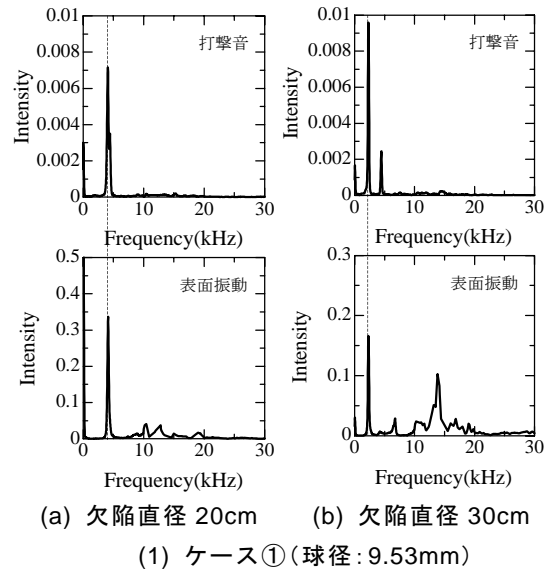
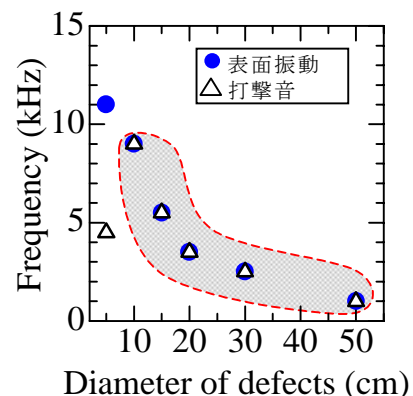


図 - 3 深さ 3cm の周波数分布



調される傾向がある。

これらより、まず欠陥直径 20cm については、打撃音には欠陥の影響が現れておらず、

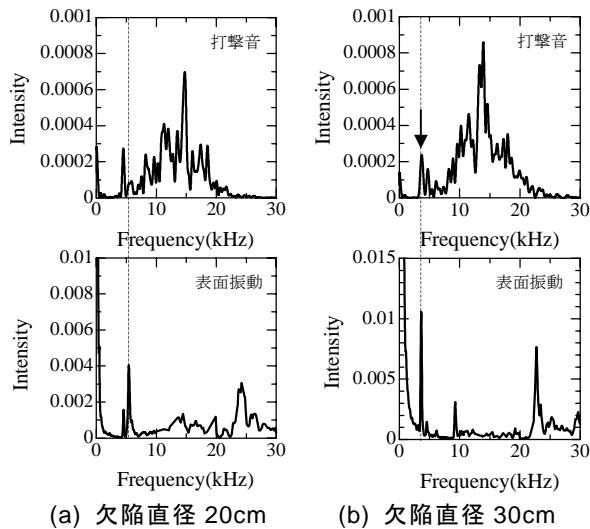


図 - 5 深さ 10cm の周波数分布
(ケース 球径 : 9.53mm)

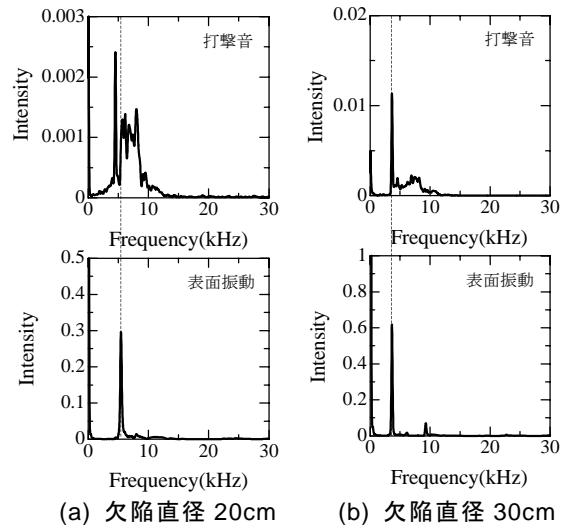


図 - 7 深さ 10cm の周波数分布
(ケース 球径 : 19.05mm)

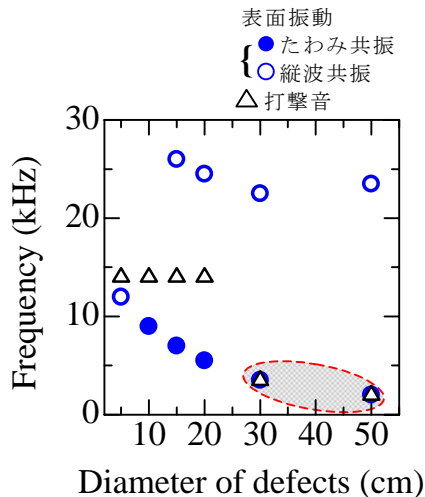


図 - 6 ピーク周波数 (ケース)

周波数分布による欠陥の検出は困難である。しかしながら表面振動では、図-3 でみられた 5kHz 付近のたわみ共振周波数に加えて欠陥深さに相当する縦波共振周波数 (3式により計算すると 22.5kHz となる) に近い周波数が卓越したものと考えられる。これはケースの場合には、入力条件としての上限周波数が上記の縦波共振周波数よりも十分大きく、供試体における共振現象を的確に把握できたことを示している。

また、欠陥直径 30cm の場合は、打撃音にたわみ共振に相当するピークが確認できたことから、これを用いて欠陥評価が可能となるものと考えられる。

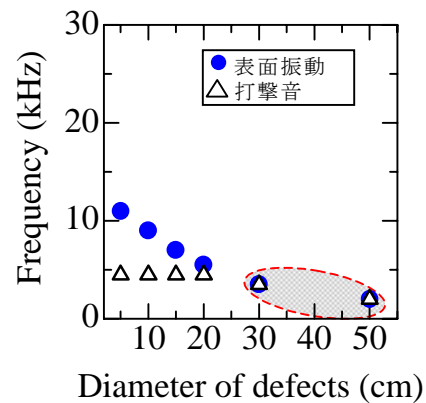


図 - 8 ピーク周波数 (ケース)

図-6 に、深さ 10cm の場合のケース におけるピーク周波数を欠陥直径と対応させて示す。この図によれば、欠陥直径が大きくなるにしたがって曲げたわみ共振に起因するピーク周波数は低い領域へ移動していることがわかる。また欠陥直径が同じ場合、深さ 3cm の場合と比較すると深さが大きい分だけたわみ共振周波数が高くなっていることもわかる。ピーク周波数から評価が可能な欠陥の直径は、表面振動の場合は 10cm 以上であるのに対して、打撃音では図中に網掛け領域で示した 30cm 以上であり、検出の限界は異なった。

(2) ケース の場合

図-7 に欠陥深さ 10cm で欠陥直径 20 および 30cm の場合のケース における周波数分布

を示す。これらの図によれば、欠陥直径 20cm ではケース と同様打撃音では欠陥の特徴を検出できなかった。また、表面振動ではケース よりも球形が大きくなり上限周波数が低くなったため、23kHz 付近の欠陥深さに相当する縦波共振周波数は出現していない。一方欠陥直径 30cm では、ケース とは傾向が異なり、打撃音においても明確なピークが現れるとともに、そのピーク周波数は表面振動の場合と一致している。本実験で扱った欠陥条件の範囲内では、欠陥の影響が打撃音の周波数分布におけるたわみ共振現象として現れるため、ピーク周波数はおおむね低い領域に存在することになる。この場合は、たわみ共振周波数がカバーできる範囲で、できる限り球径を大きくし、低周波のピークが強調されるよう配慮することが欠陥評価には有効と考えられる。

図-8 にケース の場合のピーク周波数を示す。これによれば、ケース ではケース よりも上限周波数が小さいため、表面振動においても 20kHz 以上の縦波共振周波数は全く認められない。

打撃音では、欠陥直径 20cm 以下ではピーク周波数の変化は見られず、この周波数を欠陥によるものと断定することは難しい。直径が 30cm 以上であれば、周波数分布上において欠陥の存在を明らかにすることが可能である。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 鋼球直径が小さいほど、打撃音の周波数分布は、より高い範囲にまで広がりを示すことが明らかとなった。
- (2) 本実験の範囲内では、鋼球直径の小さい場合、健全部においては打撃音と表面振動の周波数分布は大きく異なることがわかった。これは、この条件下では、打撃音の周波数特性に、板厚に相当する縦波

共振現象による成分が含まれないためである。

- (3) 欠陥部におけるピーク周波数は、欠陥深さが一定であっても欠陥直径が大きくなるとともに低くなる傾向を示した。これから、このピークは縦波共振によるものではなくたわみ共振に支配されるものであると考えられる。
- (4) 欠陥の有無を把握するためには、打撃音の周波数分布を健全部におけるものと対比させることが有効である。
- (5) 本研究の範囲内では、欠陥深さ 3cm の場合は、ピーク周波数と欠陥直径の相関図を用いることによって、欠陥の大きさを把握することが可能である。

謝辞 本研究の実施に当たり、(株)オーデックスより援助を受けた。また、実験の実施やデータの整理においては、岐阜大学学部生の浜田大剛君に多大なるご助力を頂いた。記してここに謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書，pp.72-75，2001
- 2) 浅野雅則，鎌田敏郎，国枝稔，六郷恵哲：コンクリート内部欠陥の寸法および深さと打音特性値との定量的関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.589-594，2001
- 3) M. J. Sansalone and W. B. Streett：Impact Echo，Bullbrier Press，Ithaca，N. Y.，1997
- 4) たとえば，伊東良浩：打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究，東京大学博士論文，p.12，1997