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

淺野 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¹¹,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²¹。一 方,この実験において,周波数分布に着日し た実験を行ったところ,欠陥の影響によりビ ーク成分の大きさに変化はみられるものの, ビ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、人力する弾性波の周波数範囲を広く³¹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	単位置(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	超音波伝播速度	動弾性係数 ¹⁾
(N/mm ²)	(m/s)	(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。

$$T_c = 0.0043D$$
 (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	接触時間	上限周波数	
	(mm)	$T_C (\mu s)$	f _{max} (kHz)	
1	9.53	40.98	30.5	
2	19.05	81.92	15.3	
3	30.16	129.7	9.63	

$$f_{\rm max} = \frac{1.25}{T_C} \tag{2}$$

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 オン(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①およ びケース②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=20cm) に相当する縦波 共振周波数 (f_T =11.25kHz) であると考えられ る。

$$f_T = \frac{V}{2T} \tag{3}$$

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③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③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、①~③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 ①および②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①および②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①と②とではほとんど同じ であったため、ここではケース②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①の場合

図-5 に、欠陥深さが 10cm でケース①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



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,



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① 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-6 に、深さ 10cm の場合のケース①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②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②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①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①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①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②の場合のピーク周波数を 示す。これによれば、ケース②ではケース① 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

- (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) 淺野雅則,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
- 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