論文　鉄筋コンクリート内部の空隙検出におけるSIBIEの有効性

森田　貴史[*1]・渡辺　健[*2]・橋本　親典[*3]・大津　政康[*4]

要旨：内部欠陥の検出における新たな評価手法として，インパクトエコー法で得られた周波数スペクトルに基づいたイメージングによる画像処理法SIBIEが開発されている。これまでは，無筋コンクリートにおける内部空隙の検出の有効性が示されているが，本研究では，鉄筋を有するコンクリート内部の空隙の検出を試み，鉄筋間隔が変わることでイメージング画像にどのような影響を及ぼすかを評価し，SIBIE の有効性を検討した。その結果，鉄筋の間隔が密になってくると，入力波が鉄筋の影響を受けてSIBIEでは評価できない可能性があることが示された。

キーワード：インパクトエコー法，画像処理，内部空隙，周波数スペクトル，鉄筋

1. はじめに

既存建設構造物の維持管理が重要視され，適切な補修・補強時期を判断するためにも，構造物の状態を常に把握しておく必要がある。しかし，構造物内部の状態を簡単に把握することは困難であり，そのため多くの非破壊検査手法が開発されている。弾性波を利用した非破壊検査手法のひとつにインパクトエコー法[1)]があり，この方法によってコンクリート内部に入力した弾性波が欠陥などの境界面から反射することを利用して，検査断面のどの位置からの反射の影響が大きくなっているかを画像化し評価するSIBIEという手法が考案されている[2)]。この手法は現在，プレストレストコンクリートのグラウト充填度の評価や無筋コンクリートにおける空隙の検出などでその有効性が示されている[2)3)]が，鉄筋の影響については明らかにされていない。

そこで本研究では，インパクトエコー法に基づいたイメージングによる画像処理法によって，鉄筋コンクリート内部に人工的に埋設した空隙を，鉄筋の間隔および内部空隙の深さが異なる供試体を作製し，その内部空隙を検出できるかを実験的に試み，鉄筋の影響とSIBIEの有効性について検討した。

2. 実験概要

2.1　供試体

本実験では，鉄筋コンクリート内部の空隙探査を行うため，**図－1** に示すような内部に人工空隙を有した 600×600×200mm のコンクリートブロック供試体を作製した。コンクリート中の鉄筋のかぶりは 30mm として，鉄筋間隔を50mmおよび100mmの二体と無筋コンクリートを一体作製した。なお，内部空隙はスチロール材によって模擬し，鉄筋の直上，直下および供試体上端から深さ 150mm の位置に埋設した。ここで，コンクリートの配合を**表－1**に，28 日水中養生後の力学的特性を**表－2** に示す。

インパクトエコー法およびSIBIEによる欠陥検出には，コンクリート供試体中を伝播する P 波の伝播速度 C_p が必要であることから，予備実験として，超音波を利用した透過法を用いて測定したところ，伝播速度 C_p は3937m/sであった。

*1　徳島大学大学院　工学研究科建設工学専攻（正会員）
*2　徳島大学助手　工学部建設工学科　博士（工学）（正会員）
*3　徳島大学教授　工学部建設工学科　工博（正会員）
*4　熊本大学大学院　自然科学研究科環境共生科学専攻　工博（正会員）

表－1　コンクリート配合表

最大粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				混和剤 (kg)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
25	53.0	43.0	146	276	728	1076	2.93	8	5.0

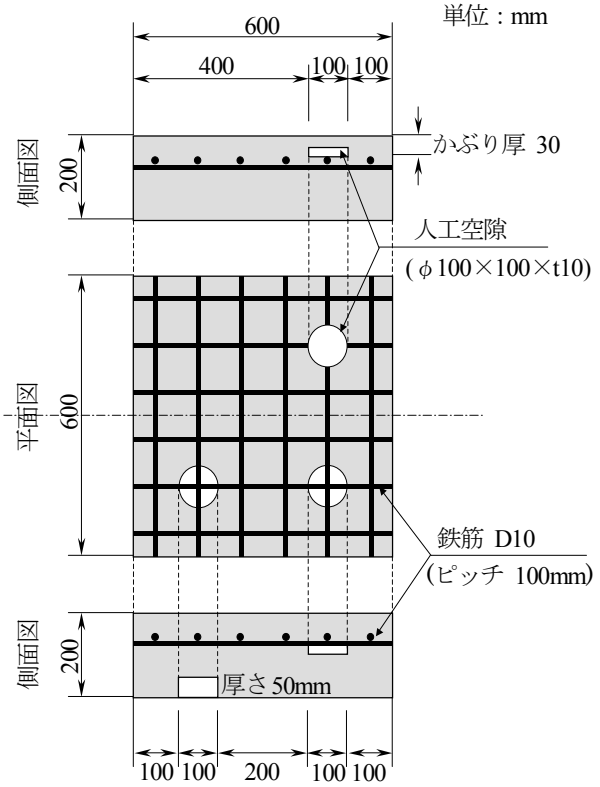
2.2　インパクト試験

コンクリート供試体に高周波数の外力を入力するために，鋼球を自由落下させることによりインパクト試験を行った。一般に，鋼球落下により生じる衝撃力の上限周波数は，鋼球とコンクリートの接触時間によって決まり，接触時間は鋼球の直径に大きく依存するとされている。ここで Sansalone ら [1)]によれば，接触時間 T_c(sec)は鋼球の直径を D(m)とすると，もっとも簡潔な式として式(1)のように表される。

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

また，式(1)より衝撃力による上限周波数 f_c は式(2)より決定される。

$$f_c = 1.25/T_c \qquad (2)$$



図－1　コンクリート供試体(鉄筋間隔 100mm)

表－2　コンクリートの力学的特性値

引張強度 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	ポアソン比
2.4	25.8	24.6	0.2

インパクト試験では，衝撃力による上限周波数 f_c が内部欠陥によって生じると考えられる共振周波数まで含むことが重要である。今回使用した鋼球は，直径が 9.5mm および 19.0mm のものであり，式(1)，(2)より上限周波数はそれぞれ f_c＝30.6kHz および 15.3kHz となる。

ここで，インパクトエコー法の原理によると内部欠陥によって生じる共振周波数 f_{void}(Hz)およびそれよりさらに高周波数帯によって検出する f'_{void}(Hz)は，コンクリート中を伝播する P 波の波速を C_p(m/s)，コンクリート表面から空隙までの深さを d(m)とすると次式にように表される [1)2)]。

$$f_{void} = 0.96C_p/2d \qquad (3)$$

$$f'_{void} = 0.96C_p/d \qquad (4)$$

また同様に，板厚によるピーク周波数 f_t ならびに鉄筋によるピーク周波数 f_{steel} は次式により示される [1)]。

$$f_t = 0.96C_p/2T \qquad (5)$$

$$f_{steel} = C_p/4d \qquad (6)$$

ただし，T は部材の厚さを示しており，式中に見られる係数 0.96 は P 波測定の補正係数とされており，インパクトエコー法の原理と直接関連するものではない。

上式より，f_{void} の影響は浅い空隙で約 63.0kHz，深い空隙で約 12.6kHz となり，深い空隙に対しては両鋼球とも十分にその上限周波数を含んでいる。f'_{void} は，深い空隙において約 25.2kHz となり，直径 9.5mm の鋼球であれば含んでいる。

f_t および f_{steel} は，それぞれ約 9.4kHz，32.8kHz となる。

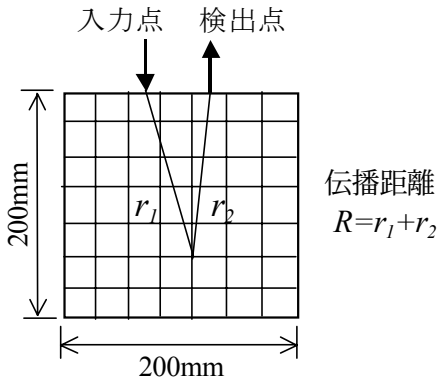
本実験でのインパクト試験は，供試体を支点間隔およそ 500mm の両端自由で支持した状態で行い，各空隙上部または健全部は空隙が存在しない断面上部において計測を行った。計測波は加速度計を用いて検出し，加速度計と鋼球落下点間の距離は 40mm とした。その後，検出した弾性波の波形FFT処理することにより必要な周波数スペクトルを得た。本計測における計測条件としては，基本周波数Δf＝100Hz，サンプリング数 N＝400 である。

3. スペクトルイメージングの原理

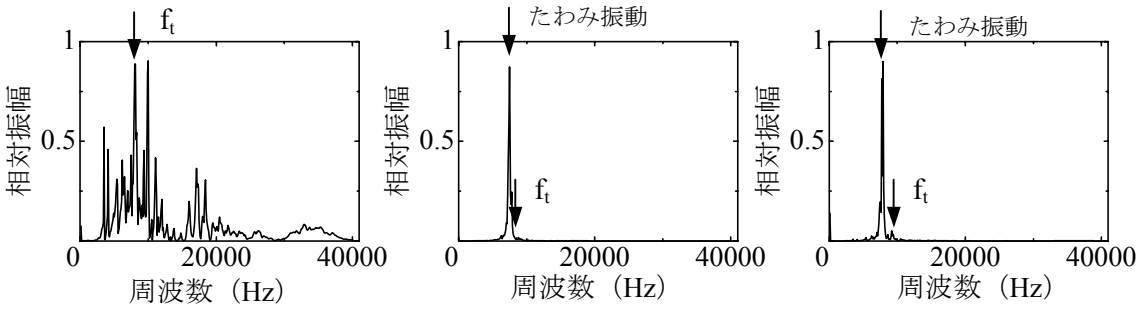
内部欠陥の有無をインパクト試験によって得られた周波数スペクトルのピーク周波数のみで判断するのではなく，周波数スペクトルの測定値を用いて，検査断面のどの位置からの反射が周波数スペクトルに大きく影響しているかを，断面を画像化することにより評価するスペクトルイメージング手法 SIBIE(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact-Echo)が開発されている[2)]。

解析手順としては，始めに検査対象の断面を正方形要素に分割し，モデル化する。今回使用した解析モデルを**図－2** に示す。解析モデルとしては，供試体および実際に埋設している空隙の寸法を考慮し，200×200mm の断面をモデル化し，正方形要素は 10×10mm とした。

次に，分割された各要素の交点を仮想点として，そこからの弾性波の反射による共振周波数

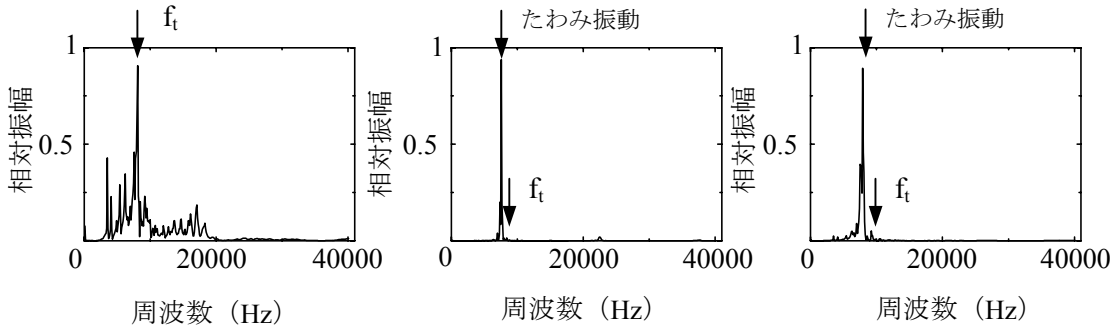


図－2　供試体断面のイメージングモデル



（a）健全部　（b）欠陥部(鉄筋上側)　（c）欠陥部(鉄筋下側)

図－3　鉄筋間隔 50mm の供試体における周波数スペクトル



（a）健全部　（b）欠陥部(鉄筋上側)　（c）欠陥部(鉄筋下側)

図－4　鉄筋間隔 100mm の供試体における周波数スペクトル

を求める。その際，供試体内部に弾性波の反射源となる境界面が存在するならば，そこからの反射波の一部が供試体表面のセンサによって検出される。そこで，解析において弾性波は，入力点→各要素点の交点→出力点という伝播経路を通ると仮定し，各要素での最短伝播経路を R とすると式(7)のように表される。

$$R = r_1 + r_2 \tag{7}$$

ここで，式(3)および式(4)中の d を R/2 として，理論的な反射による共振周波数に一致する実測した周波数スペクトルを抽出し，その振幅値を合計することでイメージングを行い，各要素点からの反射の影響を検出する。

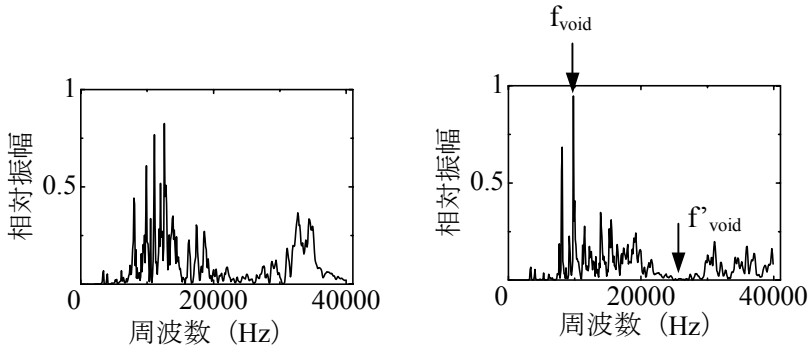
4. 結果および考察

4.1　浅い空隙の検出

図－3 および**図－4** に直径 19.0mm の鋼球で鉄筋間隔 50mm および 100mm の供試体上でインパクト試験を行って得られた健全部と浅い空隙上での応答スペクトルを示す。**図－3** および**図－4** において，浅い空隙が存在する断面では，健全部と比較して明らかに得られた周波数スペクトルに違いが見られるが，鉄筋の有無による周波数スペクトルの違いはほとんどなかった。健全部では，板厚による理論ピーク周波数 f_t＝9.4kHz 付近に，実際の供試体底面からの強い反射の影響が見られた(図中矢印参照)。浅い空隙位置に見られるピーク周波数は，板厚よりも低い周波数域にピークが存在して，また，欠陥が浅くて大きい場合は，たわみ振動の影響が板厚による振動より卓越する [4] ことから，この突出したスペクトルはたわみ振動による影響と考えられ(両図(b)および(c)参照)，この現象は健全部との違いを可聴音としても確認できた。本供試体においては，鉄筋の影響および空隙位置の影響はほとんど表れなかった。

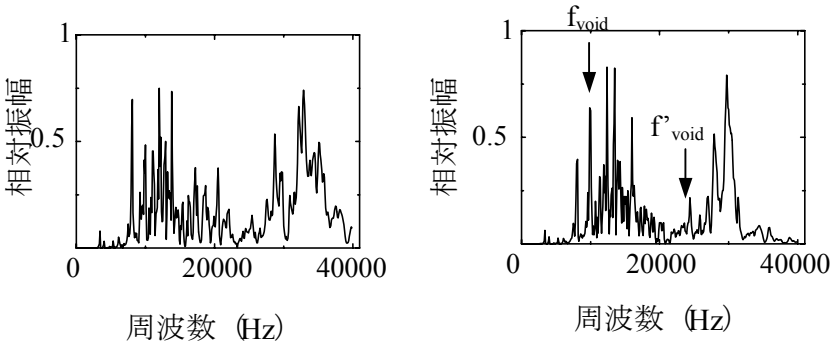
4.2　深い空隙の検出

図－5 および**図－6** に鉄筋間隔 50mm および 100mm の供試体において，深さ 150mm の内部空隙上で直径 9.5mm の鋼球を使用して得られた周波数スペクトルを示す。**図－5** および**図－6** を比較すると，鉄筋を有する断面では 30kHz 付



(a) 健全部　　(b) 欠陥部

図－5　鉄筋間隔 50mm の供試体における周波数スペクトル(深い空隙)



(a) 健全部　　(b) 欠陥部

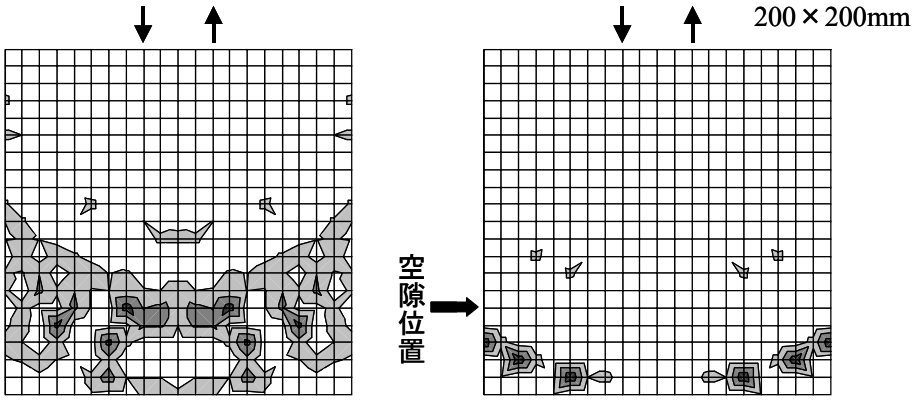
図－6　鉄筋間隔 100mm の供試体における周波数スペクトル(深い空隙)

近の高周波数域で突出したスペクトルピークが見られ，鉄筋の理論ピークによる f_{steel}＝32.8kHz に一致することから，これは鉄筋からの反射よる影響であると考えられる。また，空隙が存在する断面で空隙からのピーク周波数 f_{void} の影響は，12kHz 付近に確認することができるが，f'_{void} の影響はほとんど表れていない。

次に，得られた周波数スペクトルに SIBIE によるイメージング手法を適用し，断面画像による内部空隙の検出を試みた。鉄筋間隔 50mm および 100mm のコンクリート供試体で，抽出するスペクトルを f_{void} および f'_{void} としてイメージング処理を行った結果をそれぞれ**図－7**，**図－8** に示す。図中で，断面画像は色が濃いほど，その位置からの周波数スペクトルの振幅値の合計が大きいことを示し，その要素からの反射の影響が強いことを表している。また矢印はインパクトの入力点および計測点を示している。

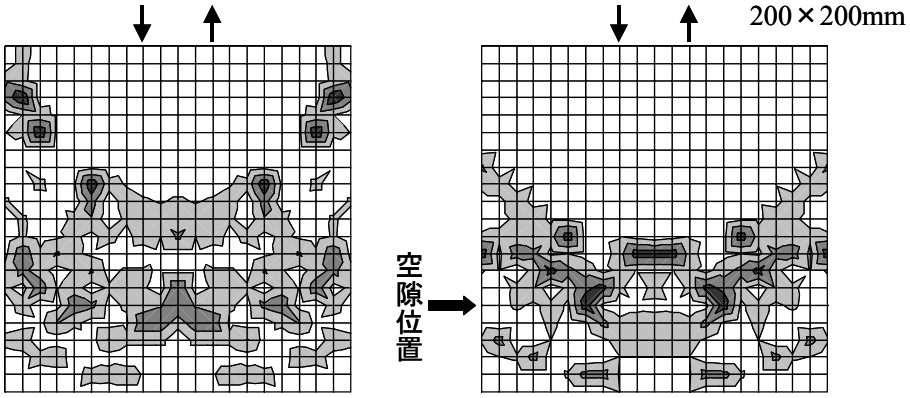
図－8 において，健全部および欠陥部を比較してみるとその画像に違いは確認でき，空隙が存在する断面では，実際の空隙深さ 150mm の位置付近に反射の影響が見られる。特に，空隙端部付近からの影響が強く表れていることが確認できる。しかし、**図－7** の鉄筋間隔が 50mm の断面のイメージング画像においては，空隙からの影響が画像に表れていない。また，鉄筋による影響は，イメージング条件で鋼球のもつ周波数を上限値としていることから画像には表れていない。

そこで，イメージング条件で理論値と一致する抽出する周波数スペクトルを f_{void} のみに絞ってイメージングを行った。この結果を**図－9** および**図－10** に示す。**図－10** の鉄筋間隔 100mm の断面画像においては，先ほどの条件同様に空



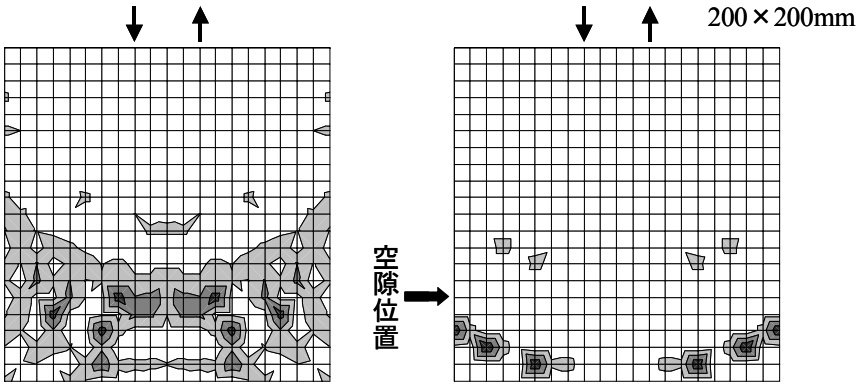
(a)健全部　　(b)欠陥部

図－7　鉄筋間隔 50㎜ の供試体におけるイメージング画像



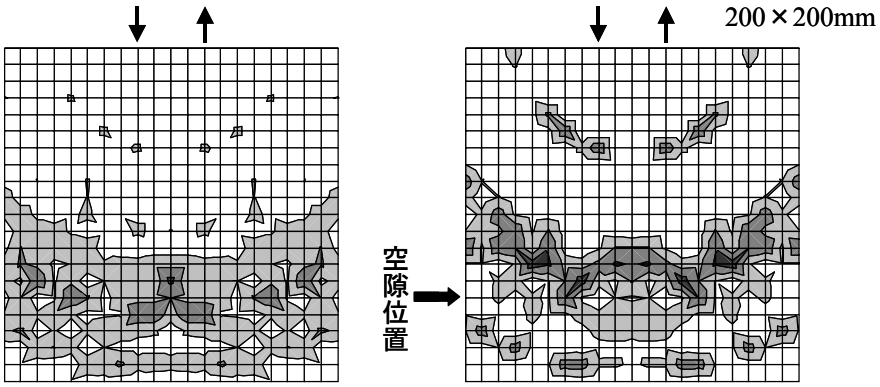
(a)健全部　　(b)欠陥部

図－8　鉄筋間隔 100㎜ の供試体におけるイメージング画像



(a)健全部　　(b)欠陥部

図－9　鉄筋間隔 50㎜ の供試体における f_{void} のみのイメージング画像



(a)健全部　　(b)欠陥部

図－10　鉄筋間隔 100㎜ の供試体における f_{void} のみのイメージング画像

隙付近からの強い反射の影響が確認できるが，**図－9** に示した鉄筋間隔 50mm の断面画像ではこの条件においても空隙の検出はできなかった。これは鉄筋間隔が密になると，コンクリートの変形が拘束され波の減衰や散乱が生じて，実際の空隙からの反射の影響が，他の影響より相対的に小さくなったことで埋もれてしまったと考えられる。

5. まとめ

1)浅い空隙の検出は，インパクトエコー法によって得られた周波数スペクトルに，たわみ振動の影響が低周波数域に強く表れることから，評価が可能である。

2）深い空隙に SIBIE を適用した結果，鉄筋間隔 100mm の供試体に関しては空隙の評価ができる可能性が示されたが，鉄筋間隔がそれ以上密になってくると，入力波が鉄筋の影響を受けて SIBIE では評価できないことが示された。

参考文献

1)Sansalone, M.J. and Streett, W.B. :Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca,N.Y.,1997

2)渡辺　健，渡海雅信，小坂浩二，大津政康：インパクトエコー法の画像処理に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.1，pp.391-396，2000

3)渡辺　健，橋本親典，大津政康，一宮桂一郎：インパクトエコー法に基づいたイメージング手法によるコンクリート内部空隙の検出，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.1581-1586，2002

4)坂田康徳：打撃応答法による RC 構造物中の欠陥評価，セメント技術大会講演要旨 2001，pp.112-113