

論文 超音波 SIBIE 法によるコンクリート表面ひび割れ深さの評価

荒巻 新^{*1}・園田 崇博^{*2}・大津 政康^{*3}

要旨: コンクリートの非破壊検査手法であるインパクトエコー法では弾性波を入力し、検出される波形の周波数スペクトルから内部欠陥の位置あるいは大きさを同定する。従って入力される弾性波及び検出装置であるセンサの有する周波数領域は、内部欠陥に対応する共振周波数を含んでいる必要がある。しかし、著者等が従来から使用してきた入力装置による弾性波の周波数領域は、浅い位置に存在する欠陥を検出するのに不十分である可能性が示されている。そこで、浅い位置の欠陥を検出するのに適した周波数領域を持つと考えられる AE センサによる入出力装置および解析法を開発し、表面ひび割れ深さの検出性能の評価を行った。

キーワード: コンクリート, 表面ひび割れ, 超音波, 非破壊検査, SIBIE

1. はじめに

メンテナンスフリーであると考えられていたコンクリート構造物であったが、現在、供用期間中に様々な劣化が生じ社会的に大きな問題となっている。従って構造物の維持管理が重要視され、非破壊検査もその手法の一つとして重要性が増している。

コンクリート構造物の非破壊検査の中でもよく知られているインパクトエコー法¹⁾では、鋼球やハンマー等を用いて弾性的な衝撃力を構造物表面に入力し、その弾性波が内部欠陥および境界面から反射することにより生じる共振周波数により、構造物内部の情報を得る。しかし、その周波数スペクトルの評価には経験や知識といった個人のスキルが求められ、検査手法として確固たる成果をあげきれていない。そこで現在、インパクトエコー法において得られる周波数スペクトルにより、調査断面において弾性波の反射・回折の影響を二次元画像化し欠陥部を評価する SIBIE(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo)法²⁾を研究中である。インパクトエコー法により欠陥検出を行う場合、用いる入出力装置の周波数領域は、対象とする欠陥に対応するピーク周波数を含んでいる必要がある。しかし、従来の SIBIE 法で用いられていたアルミ飛翔体及び加速度計による入出力では、表層部の欠陥を検出するのに十分な周波数領域を有さない可能性が示された。

本研究では浅い位置に存在する欠陥に対する適用性を向上させるべく、鋼球やインパクトハンマー、アルミ飛翔体より高周波数成分を有していると考えられる AE センサをインパクトエコー試験における入力装置および検出装置として導入した。そして試験により得

られる周波数スペクトルを用いて、インパクトエコー法の画像化手法である SIBIE 解析を行い、インパクトエコー法における表層部欠陥検出法の評価を行った。

2. 理論

2.1 インパクトエコー法

インパクトエコー法によれば図-1に示すように板厚による共振周波数 f_T 、内部欠陥反射による共振周波数 f_{crack} が出現するとされている。供試体中を伝わる P 波の伝播速度を C_p とすると、出現するピーク周波数は図-1に示す値を用いることにより以下の式(1)、式(2)で表される。

$$f_T = C_p / 2T \tag{1}$$

$$f_{crack} = C_p / 2d \tag{2}$$

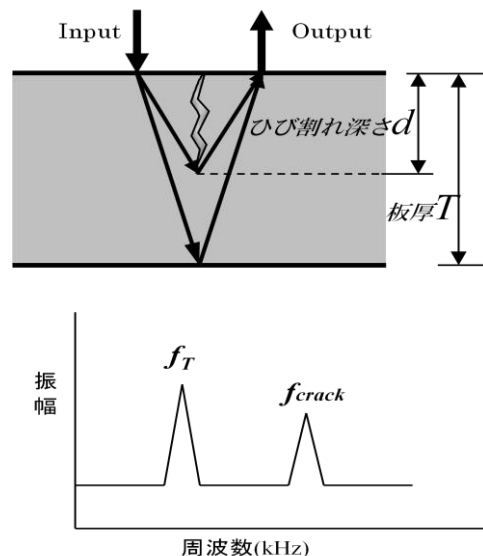


図-1 インパクトエコーにおける欠陥検出原理

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域専攻教授 工博 (正会員)

2.2 SIBIE の原理

周波数スペクトルの共振周波数は、理論的には入力された弾性波が不連続面で反射することにより生じる。そこで、供試体断面での弾性波の反射位置を画像化する SIBIE 法という画像処理法が考案されている。手順としては、まず解析対象の断面を図-2 のように正方形要素に分割しモデル化する。

次に、分割された各要素の中心からの弾性波の反射による共振周波数を求める。その際、弾性波は入力点から要素中心そして出力点といった伝播経路を通るが、その最短伝播経路を R とすると式(3)のように表される。

$$R = r_1 + r_2 \quad (3)$$

解析対象中を伝わる P 波の波速を C_p 、分割された要素の中心で反射することにより生じる共振周波数 f_R は、これまでの議論により次のようになる。

$$f_R = C_p/R, \quad f_{R_2} = C_p/(R/2), \quad (4)$$

各要素において、これらの共振周波数に対応する振幅を足し合わせるにより図-3 に示す反射や回折の影響の大小が画像化され、欠陥の位置や大きさが推測される。

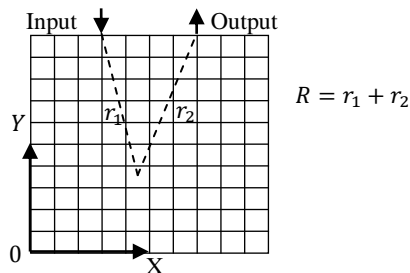


図-2 SIBIE のイメージングモデル

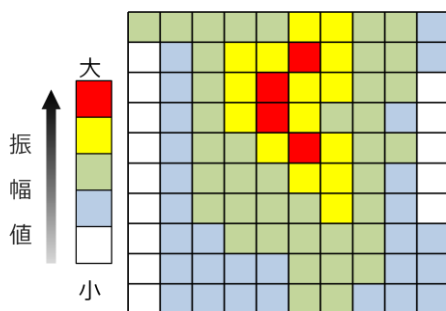


図-3 SIBIE 解析の例

2.3 入出力装置の周波数特性

インパクトエコー法において鋼球やインパクトハンマーといった衝撃入力装置が広く用いられるが、より広帯域の周波数を有する衝撃入力としてアルミ飛翔体による衝撃入力を考案していた³⁾。それに対し、園田

らの研究⁴⁾において半無限弾性体中を伝播する弾性波の理論解である Lamb 解を用いて衝撃力の周波数帯域を明らかにした。その結果を図-4 に示す。アルミ飛翔体を用いた衝撃入力装置の周波数帯域は約 30kHz までであることが明らかとなった。また、出力装置である加速度計においても同様に Lamb 解・レーザー振動計を用いて検出できる周波数帯域を明らかにした。その結果を図-5 に示す。加速度計は 30kHz より高い周波数帯域においてセンサ特性によって振幅を増幅してしまうことがわかった。

欠陥に対応するピーク周波数は、欠陥が浅い位置にあるほど高周波であるため入出力装置も高周波をカバーできるものでなくてはならないが、この結果から分かるように検出可能な周波数の上限が 30kHz である現在のインパクトエコー試験では表面ひび割れのような浅い欠陥の検出は困難で、かつ加速度計の特性を分析している恐れがある。

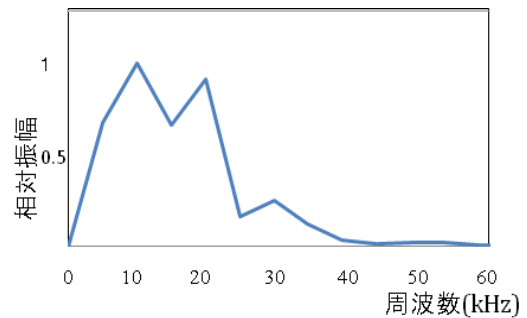


図-4 入力装置の周波数スペクトル

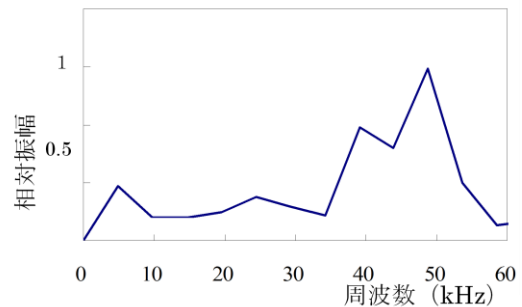


図-5 加速度計検出装置の周波数スペクトル

この 30kHz はインパクトエコー法においてコンクリート表面から約 10cm の位置に存在する欠陥の共振周波数と対応している。つまり、表層部欠陥のような 10cm 以下の浅い位置に存在する欠陥に対する共振周波数をカバーするような高周波域を含んでいないため、欠陥検出が困難となることが示されている。そこでアルミ飛翔体及び加速度計より高周波を含んでいると考えられる AE センサ (UT1000) を用いた超音波法として入出力を行うことにした。

表-1 コンクリートの配合

骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m ³)				AE 減 水剤 (g)	AE 助剤 (g)
					W	C	S	G		
20	55	8	6	45	165	300	800	1109	1044	6

2.4 センサ特性の除去

センサの周波数特性は、実験により得られる周波数応答に大きな影響を与える。この影響を理論的に表すと式(5)に示す合成積となる。

$$u(t) = s(t) * a(t) \tag{5}$$

ここで、 $u(t)$ はセンサにより検出される波形、 $s(t)$ はセンサの特性、 $a(t)$ は対象表面での実際の応答を表す。式(5)に FFT 処理を施し、周波数領域で表せば式(6)が得られる。

$$U(f) = S(f) \cdot A(f) \tag{6}$$

上式より、実際の表面上の応答の周波数スペクトルは次の式(7)で表される。

$$A(f) = \frac{U(f)}{S(f)} \tag{7}$$

この $A(f)$ を逆フーリエ変換することにより表面上の実際の応答 $a(t)$ が導かれると考えられる。

本研究では供試体を用いたインパクトエコー試験により得られる波形を $u(t)$ とし、入力センサと検出センサを張り合わせた Face-to-face 試験により得られる波形を $s(t)$ とした。その後 $u(t)$ 及び $s(t)$ に FFT 処理を施し、 $U(f)$ 及び $S(f)$ を得た後式(7)で表される除算を行うことによりセンサ特性を除去し表面上の実際の応答 $a(t)$ を求め、SIBIE 解析に用いた。

3. 実験概要

3.1 実験供試体

実験では無筋コンクリートの供試体を 2 種類、鉄筋コンクリートの供試体を 1 種類用いた。供試体の配合は表-1 に示す。まず無筋コンクリートの 2 種類の供試体(400mm×400mm×200mm)を図-6 に示す。内部にひび割れを模したスチレンボード(2mm×400mm×120mm)が挿入されている。補修深さ 50mm の供試体 A、70mm の供試体 B を用いた。また図-7 に示す鉄筋コンクリートの供試体 C(400mm×100mm×100mm)は荷重をかけひび割れを入れたものを用いた。鉄筋はかぶり 30mm の位置で、直径 13mm (D13SD295) を適用した。

3.2 AE センサを用いたインパクト入力試験

インパクトエコー法および SIBIE 法を用いる際、弾性波 (P 波) は重要なパラメータである。超音波速度

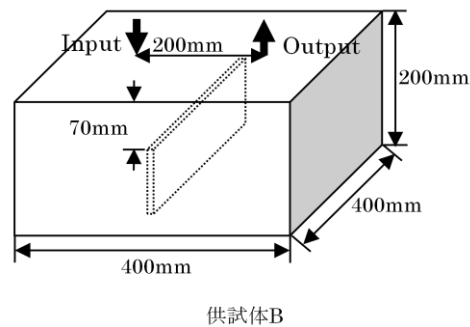
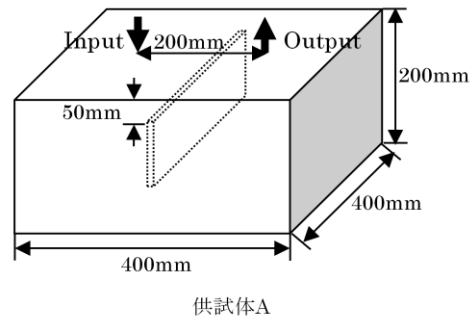


図-6 無筋コンクリート供試体

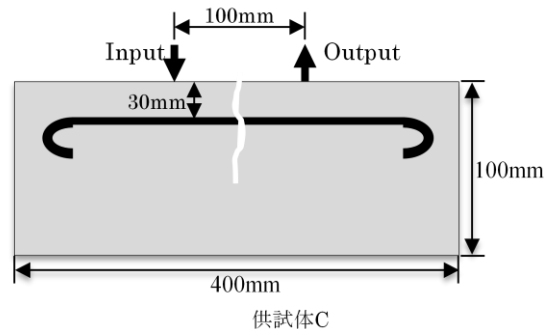


図-7 鉄筋コンクリート供試体

測定装置で透過法により P 波測定を行い、供試体 A は 4319m/s、供試体 B は 4538m/s、供試体 C は 4422m/s であった。高周波帯域まで含めた欠陥検出を行うために広帯域型の AE センサ(UT1000)を入出力装置として用いた。圧電センサである AE センサに対してファンクションジェネレータを用いて図-8 に示す 100kHz のパルス波を印加して弾性波を発生させた。供試体 A 及び供試体 B のセンサ間隔はひび割れ直上から左右に 100mm の位置に、供試体 C についてはひび割れ直上から左右に 50mm の位置に設置した。

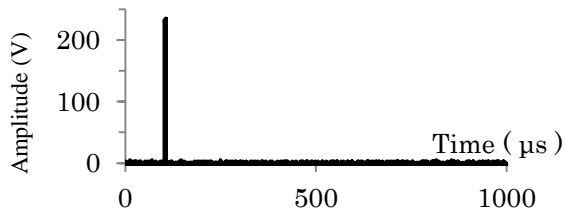


図-8 入力に用いたパルス波形

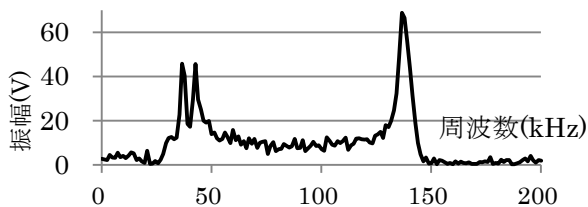


図-9 センサの周波数特性

得られた波形にFFT処理を施すことにより、周波数スペクトルを求めた。尚、計測におけるサンプリングタイムは $\Delta t=0.4\mu\text{sec}$ 、データ数は $N=2048$ とした。

また、センサの周波数応答を得るため、Face-to-face試験を行った。供試体を用いた実験と同様に、図-8に表される電気信号を用いた。もう一方のセンサ検出することにより得られた波形をFFT処理して求めたセンサの周波数特性を図-9に示す。AEセンサ(UT1000)は広帯域にフラットな感度を持つと考えられているが、40kHz及び140kHz周辺に特定のピーク周波数が観測された。

4. 結果及び考察

4.1 得られた周波数スペクトル

実験から得られた供試体Aの周波数スペクトルを図-10に示す。約40kHzのピーク周波数は、図-9のセンサ特性によるものだと考えられる。従って、このスペクトルをSIBIE解析に用いた場合誤った箇所を同定してしまう可能性がある。センサ特性を除去するために、式(7)に基づき図-10に示す周波数スペクトルを図-9に示すセンサ特性の周波数スペクトルで除した。その結果を図-11に示す。約40kHzのピーク周波数が除去されたのが観測される。

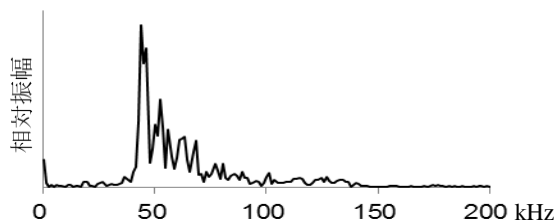


図-10 供試体Aの周波数スペクトル

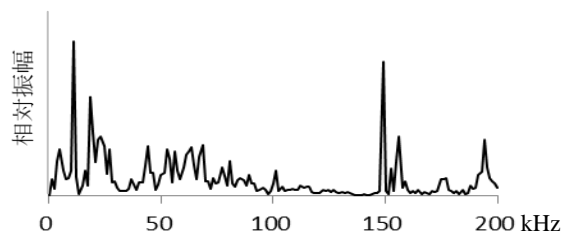


図-11 補正した供試体Aの周波数スペクトル

4.2 補修ひび割れのSIBIE解析結果

供試体A及び供試体Bにおいてそれぞれ補正された周波数スペクトルを基にSIBIE解析を行った。その結果を図-12、図-13に示す。尚、図-11に示す周波数スペクトルを基に、解析に不必要な反射や回折の影響を考慮し使用する周波数帯域を10~80kHzとした。供試体A及び供試体B共に、補修深さの位置に明確な振幅の増大が確認され、補修深さを検出できたといえる。

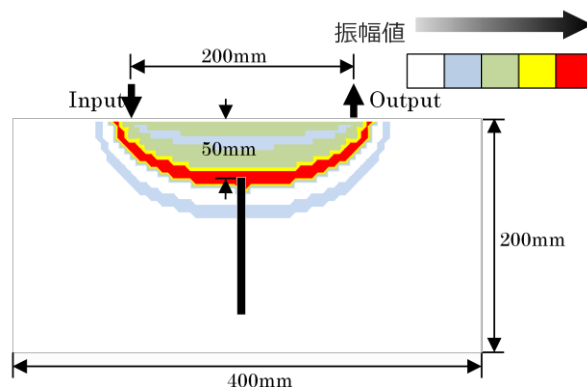


図-12 供試体AのSIBIE解析図

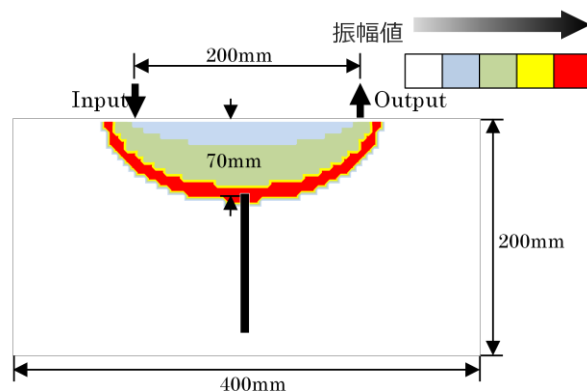


図-13 供試体BのSIBIE解析図

4.3 鉄筋コンクリートのSIBIE解析結果

まず、クラックゲージを用いて表面ひび割れを測定した結果、図-14でわかるようにおよそ70mmの深さまで外観上発生していると思われる。しかし、コンクリート内部の実際のひび割れの深さは不明である。

表面ひび割れ深さを適切に同定するため、解析に用いる周波数の上限を 40kHz とした。この場合、図-9 に見られる約 40kHz のピーク周波数は、解析上鉄筋コンクリート表面から深さ 0cm を表しておりセンサ特性の影響が表面ひび割れ深さの検出に影響を及ぼすことは無く、センサ特性の除去は不要だと考えられる。周波数帯域を 10~40kHz に設定して解析を行った結果を図-15 に示す。30mm の深さに強い反応が確認できるが、鉄筋のかぶりが見事に一致している。しかし、表面ひび割れの深さははっきりとは確認できなかった。そこで鉄筋による影響を除去するため、用いる周波数を 20~40kHz に設定し SIBIE 解析を行った。その結果を図-16 に示す。このように表面ひび割れの深さが明らかに同定された。

このことより、SIBIE 解析に用いる周波数の範囲を診る対象によって使い分けることで鉄筋の影響を分離できることが明らかとなった。

5. 結論

本論文では SIBIE 法における入出力装置に AE センサを採用し、Face-to-face 試験結果を用いてセンサ特性の除去、及び解析に用いる周波数帯域を制限することに



図-14 供試体 C の外観

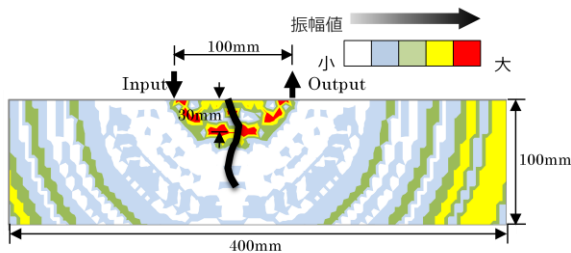


図-15 供試体 C の SIBIE 解析図

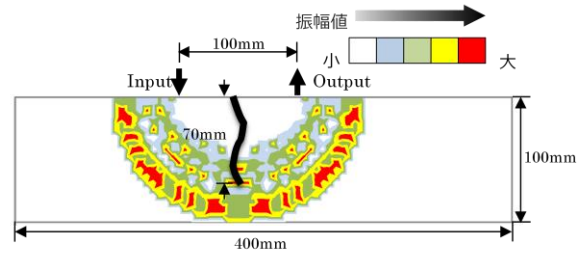


図-16 供試体 C の鉄筋深さ以深での SIBIE 解析図

より、表層部のような浅い位置にある欠陥の検出法を考案した。以下に結論を列挙する。

- (1) 入力センサと検出センサを張り合わせた Face-to-face 試験により、センサの周波数特性が得られた。
- (2) SIBIE 解析に用いる周波数帯域にセンサのピーク周波数が含まれている場合、Face-to-face 試験から得られる周波数スペクトルを用いて除算を行うことによりセンサの周波数特性を除去し、コンクリート表面ひび割れの補修深さを同定できた。
- (3) SIBIE 解析に用いる周波数の範囲を診る対象によって使い分けることにより、鉄筋の影響を分離できることが確認された。
- (4) 従来のインパクトエコー試験の代わりに、AE センサを用いた試験を行うことにより表層部欠陥に対する SIBIE 法の適用性が改良された。

参考文献

- 1) Sansalone, M. J. and Streett, W. B.: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- 2) 渡海雅信, 小坂浩二, 大津政康: SIBIEを用いたコンクリート中の欠陥検査法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, vol.23, No.1, pp.499-504, 2001
- 3) Ohtsu, M., Watanabe, T: "Stack Imaging of Spectral Amplitudes based on Impact-Echo for Flaw Detection", *NDT&E International*, 35, pp.189-196, 2002
- 4) 園田崇博, 山田雅彦, 大津政康: インパクトエコー法における衝撃入力の定量的評価法の開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, vol.11 pp.247-254, 2011

