

論文 SIBIE を用いたコンクリート中の欠陥検査法に関する考案

渡海 雅信^{*1}・小阪 浩二^{*2}・大津 政康^{*3}

要旨:インパクトエコー法は超音波法における定量的な測定法の一つとして、欠陥検査への有用性が注目を浴びている。しかし、コンクリート内部の欠陥調査への適用性についてはまだ確立されおらず、早期の実用化が注目されている。そこで、インパクトエコー法を用いるに当たり最も重要とされている弾性波の波速の検討を行った。そして、内部欠陥調査として、ひび割れ部のひび割れ深さの評価を行った。評価には、インパクトエコー法による実験で得られた弾性波の反射の状況をスペクトルイメージングする SIBIE により、調査対象の断面をビジュアル化する手法を用いた。

キーワード:インパクトエコー法、周波数スペクトル、弾性波、ひび割れ深さ、スペクトルイメージング

1. はじめに

コンクリート構造物の内部欠陥を検出する非破壊検査手法のひとつに、インパクトエコー法がある¹⁾。インパクトエコー法は、トンネルの欠陥調査において広く行われている打音法に類似した手法で、周波数スペクトルのピーク周波数から内部欠陥の位置を判断する検査手法である。しかし、理論的には検出可能な内部欠陥の影響によるピーク周波数そのものを、実際の計測により得られた周波数スペクトルのピーク周波数から同定することはかなり困難であった。

そこで、内部欠陥をインパクトエコー法によって得られる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、検査対象である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検討し、その断面画像をビジュアル化することにより評価する手法としてスペクトルイメージング(SIBIE)²⁾手法を開発した。

このインパクトエコー法の画像処理手法の有効性をさらに検証するために、人工的にひび割れの入った供試体を作成しひび割れ深さの評価

を実験的に検討した。その場合に、インパクトエコー法を用いるに当たり最も重要とされている弾性波の波速の測定法についても検討を行った。

2. 欠陥検出の原理

2.1 インパクトエコー法

インパクトエコー法の概念を本問題に適用すれば、供試体の板厚による共振周波数およびひび割れなどによる内部欠陥からの反射による共振周波数により得られる周波数スペクトルは、P波の伝播速度を C_p とすると、板厚による周波数 f_t 、ひび割れによる周波数 f_r 、鉄筋によるピーク周波数 f_{steel} が出現すると考えられており、式(1)、式(2)、式(3)のように表される。図-1にその概要を示す。ただし、以下の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。

$$f_t = 0.96C_p / 2t \quad (1)$$

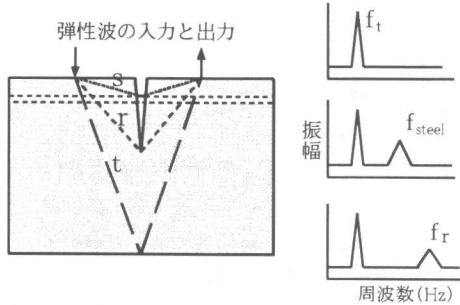
$$f_r = 0.96C_p / 2r \quad (2)$$

$$f_{steel} = C_p / 4s \quad (3)$$

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻

*3 熊本大学大学院教授 自然科学研究科環境共生科学専攻 工博 (正会員)



f_t : 板厚によるピーク周波数
 f_r : ひび割れによるピーク周波数
 f_{steel} : 鉄筋によるピーク周波数

図-1 インパクトエコー法によるひび割れ部検出の原理

次に、波動現象と欠陥位置までの深さについて考察する。波動現象は時間と空間の両者に依存する場であることより、入力周波数に対する攪乱が確実に生じる条件の重要性が指摘されている。これについては寸法と波長の寸法パラメータとして、

$$\alpha = fL/v = L/\lambda \quad (4)$$

が導かれている。式(4)において f : 周波数, L : 部材長, v : 弾性波の波速である。また, λ : 波長となっている。波動の攪乱は、このパラメータを用いれば、 $\alpha \geq 1$ のときにひび割れの反射の影響による攪乱が顕著に現れるとされる³⁾。したがって、 v を C_p 、ひび割れ深さ r に置き換えると、 $\alpha = 1$ の場合に

$$f_r' = C_p/r \quad (5)$$

となる。したがって、ひび割れ深さによる反射の影響のスペクトルピークが発生する周波数として式(5)が導かれることになる。ここで式(2)と式(5)の差異は、スペクトルピークに弾性波の反射による影響が、1波長で現れるか2波長で現れるかに過ぎず、式(5)は高周波数帯のピーク周波数の存在を示唆している。

2.2 スペクトルイメージングの原理

周波数スペクトルのピーク周波数は、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ためにスペクトルイメージング：SIBIE(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo)という画像処理法を考案した。手順として、解析対象の断面を正方形要素に分割しモデル化する。使用したコンクリート供試体断面をモデル化したものを図-2に示す。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(6)のように表される。

$$R = r_1 + r_2 \quad (6)$$

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、ひび割れ先端での回折により生じる共振周波数は、式(7)のように考えられる。

$$f_1 = C_p/(R/2), \quad f_2 = C_p/R, \\ f_3 = C_p/2R, \quad f_4 = C_p/3R \dots \quad (7)$$

ただし、下限周波数は f_t となる。周波数スペクトルにおいて、式(7)で求められる理論的な反射による共振周波数の振幅値を合計することにより各要素からの反射の影響を検出する。

次に、モデル化する際の分割する正方形要素の大きさについて考える。P 波の伝播速度 C_p と波形計測時のサンプリングタイム Δt の関係を図-2で考えると、最短経路を与える正方形要素の一辺の長さ Δx は次式のようになる。

$$\Delta x = 1/2C_p\Delta t \quad (8)$$

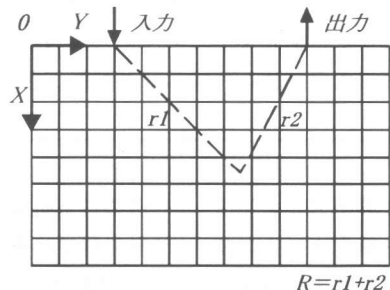


図-2 供試体断面のイメージングモデル

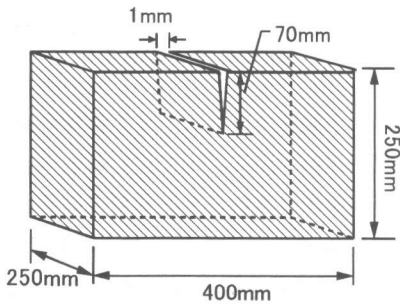
表-1 ひび割れ供試体の配合設計

最大粒径 (mm)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤 (cc)	スランプ値 (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G			
20	50	172	344	830	1021	103	12.1	8.7

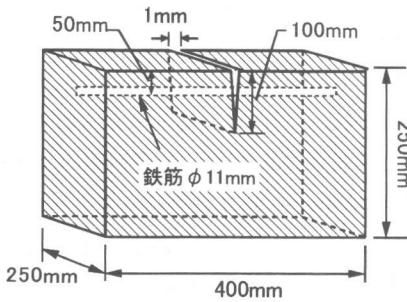
3. 実験概要

3.1 供試体

ひび割れ部分を検討するため図-3 のような 250×250×400mm の角柱供試体を作成し、幅 250mm、深さ 70mm と 100mm のひび割れを供試体上面中央に作成した。そして、100mm の場合には、ひび割れ作成に際して、φ11mm の鉄筋を供試体上面からかぶり 50mm の位置に配置した。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。



(a) ひび割れ入り供試体



(b) ひび割れ及び鉄筋入り供試体

図-3 供試体図

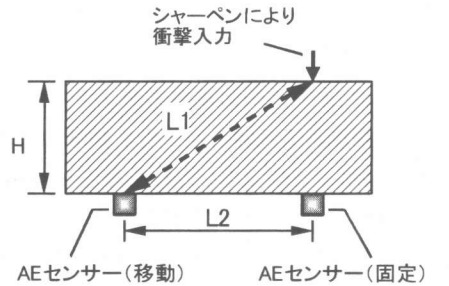
表-2 コンクリートの力学特性値

圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)	ポアソン比
35.8	29.7	0.20

3.2 弾性波の波速測定試験

インパクトエコー法を用いる際、最も重要とされているパラメータの弾性波(P波)の波速測定試験を行った。

まず、100mm の厚さのコンクリート供試体を用い、供試体上部にシャープペンシルで衝撃入力により弾性波を発生させた。そして、供試体下部の測定点(2点)での弾性波伝播の時間差を測定し弾性波の波速を求めた。測定点では AE センサー(500kHz 共振)を用い、衝撃入力点の真下のセンサは固定とし、もう片方のセンサを移動させた。AE センサ間は 50mm・100mm・150mm とした。実験概要を図-4 に示す。



H: 100mm L2: 50mm、100mm、150mm

$$L1 = \sqrt{(H^2 + L2^2)} \quad t: \text{伝播時間差}$$

$$\text{波速: } Vp = (L1 - H) / t$$

図-4 AE センサーと用いた測定試験

次に、100mm の厚さのコンクリート供試体を用い市販の時間差測定装置により透過法によって測定した。図-5 のように供試体上部で探触子により発振させ、供試体下部で探触子により受振させた。そして伝達時間を測定し弾性波の波速を求めた。

いずれの試験も測定回数を 20 回とし、その平均値を弾性波の波速とした。

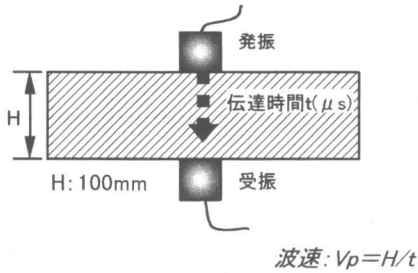


図-5 透過法を用いた測定方法

表-3 弾性波の波速の各試験の平均値

AE センサを用いた試験(m/s)			透過法 (m/s)
L2:50mm	L2:100mm	L2:150mm	
4380	4070	4300	4230
Average:4250			

結果を表-3 に示す。弾性波の波速は AE センサを用いた試験では平均として 4250m/s が、透過法では 4230m/s が得られた。この結果より両者がほぼ一致することが確認された。よって今回は透過法で得られた波速を採用した。

3.3 インパクト試験

ひび割れ供試体に高周波数の外力を入力するために、鋼球落下試験を行った。鋼球の直径は 4.8mm のものを使用し、これを高さ 200mm より落下させた。インパクト試験は供試体を両端単純支持し、ひび割れ部分を跨るように計測を行った。その断面に対する計測を図-6 に示す。実験のデータ処理では、加速度計より検出した弾性波の波形をパーソナルコンピュータに記録し、それと FFT 処理することにより周波数スペクトルを求めた。

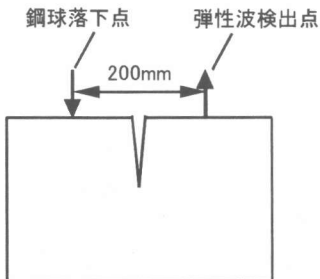


図-6 インパクト入力点及び弾性波検出点

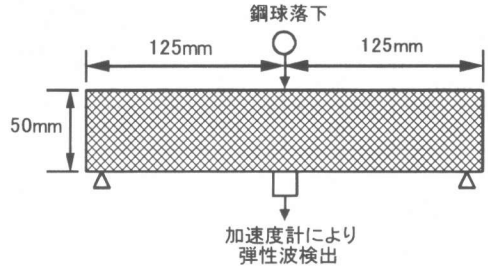


図-7 インパクト入力の上限周波数確認試験

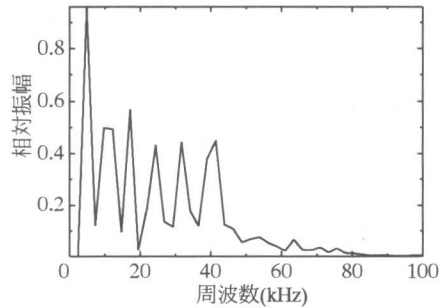


図-8 鋼球の持つ周波数成分

インパクト試験では、入力する衝撃の持つ上限周波数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。ひび割れ供試体の寸法によるピーク周波数 f_i は、 $t=0.269m$ 、弾性波の波速 $C_p=4230m/s$ であるので式(1)より f_i は 7600Hz 付近に現れると考えられる。また、ひび割れによるピーク周波数 f_r はひび割れ先端までの深さ $r=0.141m$ であるので式(2)より 15000Hz 付近に、同様に f_r は式(5)より 30000Hz 付近に現れると考えられる。

そこで供試体に入力される周波数の上限を、 $50 \times 250 \times 250mm$ のコンクリート供試体で鋼球落下によるインパクト入力を行い確認した。実験は図-7 のような配置で行い、インパクト入力により発生した波形を計測及び解析した周波数スペクトルの結果を図-8 に示す。

結果によると鋼球落下による衝撃の入力は、40kHz 付近までの入力成分を有しており入力周波数の上限がほぼ f_i 、 f_r 、 f_r まで含んでいることが確認できた。

4. 結果及び考察

4.1 インパクトエコー法による結果

ひび割れ供試体で鋼球落下によるインパクト試験を行った。供試体は図-3に示すように供試体上部にひび割れの入った供試体とひび割れおよび鉄筋の入った供試体である。計測時のサンプリングタイム Δt は $5\mu\text{sec}$ である。

ひび割れのみ供試体で得られた波形および計測波形よりFFT処理した周波数スペクトルを図-9、図-10に示す。一方、ひび割れおよび鉄筋の入った供試体のものを図-11、図-12に示す。

図-9の鉄筋なしの状態の波形と図-11の鉄筋ありの状態の波形を比べてみると、鉄筋ありの状態の場合で初期振動(0.0015s)付近では振幅が大きく振れていることがわかる。これはかぶり5cmの位置に鉄筋が入っていることが影響していると考えられる。

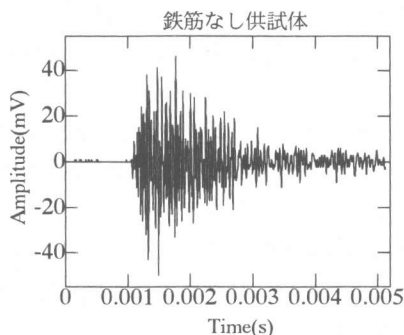


図-9 計測波形

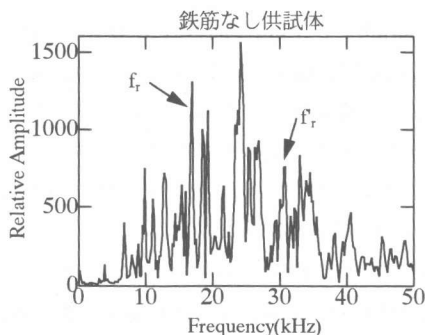


図-10 周波数スペクトル

図-10、図-12に示す周波数スペクトルにおいて、ひび割れによるピーク周波数 f_r は15000Hz付近に、 f_r' は30000Hz付近に現れると予想される。図-10、図-12で矢印で示す付近には $f_r \cdot f_r'$ によると考えられるピーク周波数が見られる。しかし、 $f_r \cdot f_r'$ と考えられるピーク周波数は共に他のピーク周波数と混在しているために明瞭に検出されているとは言い難い。

以上の結果より、周波数スペクトルには多くのピークが存在しており、ピーク周波数のみからひび割れ部を判断することは容易ではない。これは、計測波形にP波以外の波の成分も混在しているためと考えられる。

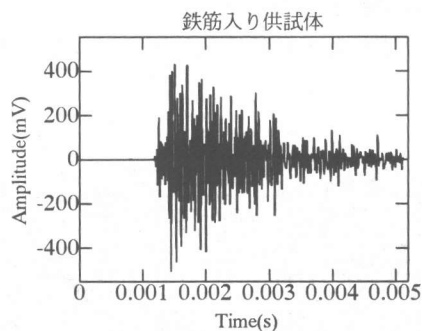


図-11 計測波形

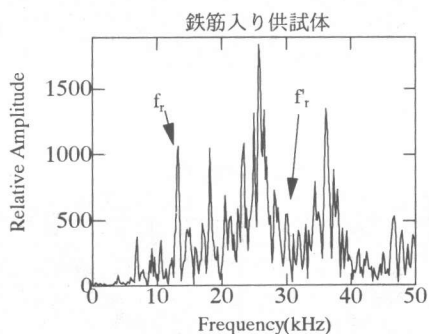


図-12 周波数スペクトル

4.2 スペクトルイメージング(SIBIE)の結果

図-2に示すイメージングモデルと図-10、図-12に示す周波数スペクトルを用いて、スペクトルイメージング(SIBIE)による画像処理を行

った。P波の伝播速度 C_P は 4230m/s、波形計測時のサンプリングタイムは $5\mu\text{sec}$ である。イメージングモデルで分割した正方形要素の一边の長さ Δx は式(8)より 11mm 程度と決定される。そこで、 Δx を 10mm としたモデルを用いてスペクトルイメージングを行った。その結果を図-13 に示す。結果の見方として断面画像は色が濃いほど、その要素での周波数スペクトルの振幅値の和が大きいことを示すようにしており、その要素からの反射の影響が強くなっていることを意味する。

ひび割れのみのお供試体での結果は、供試体中心部で深さ約 70mm の位置で色が濃く反射の影響が大きくなっている。これは、70mm のひび割れ深さと一致している。

ひび割れおよび鉄筋入りの供試体での結果

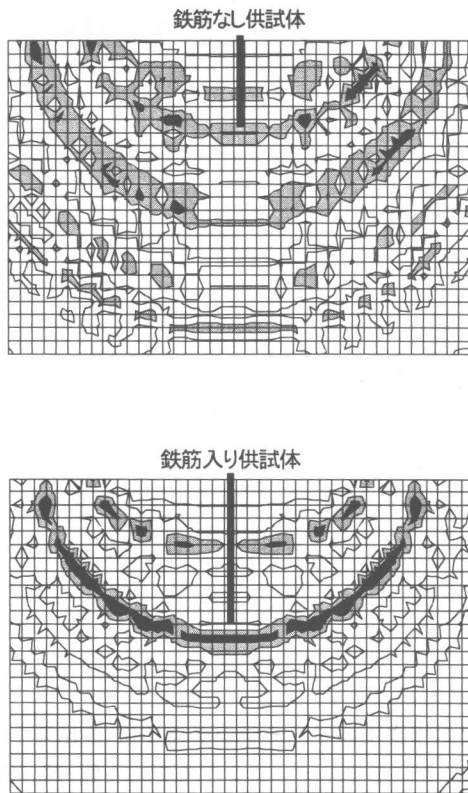


図-13 $\Delta x 10\text{mm}$ のイメージングモデルを用いたイメージング結果

は、供試体中心部で深さ約 50mm と約 110mm の位置で色が濃く反射の影響が強くなっている。これは、かぶり 50mm の位置の鉄筋と 100mm のひび割れ深さに相当していることが明らかである。

これらより、スペクトルイメージング (SIBIE) を用いることによりひび割れ深さおよび鉄筋位置の確認が視覚的に検出できる可能性が示された。

結論

インパクトエコー法に関してスペクトルイメージングという画像処理を開発し、その有効性を検証するためにコンクリート供試体に人工的にひび割れを挿入しひび割れ深さの実験的に検討した。得られた結果を以下に示す。

(1)従来のインパクトエコー法に基づき、計測波形の周波数スペクトルからひび割れ深さの決定を試みた。しかし、インパクトエコー法で理論的に発生すると考えられるひび割れ深さでの反射によるピーク周波数を同定することは困難であった。

(2)スペクトルイメージング (SIBIE) 処理を行った結果、ひび割れ部先端からの反射の影響を視覚的に表されることが明らかとなった。さらに、鉄筋の存在も明示できた。よって、鉄筋コンクリート部材でひび割れ深さが検出できる可能性が示された。

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) M. Ohtsu: On High-Frequency Seismic Motion of Reinforced Concrete Structure, J. Materials Concrete Structures and Pavement, JCSE, 544/V-32, pp.277-290, 1992