

論文 グラウトの硬化過程がインパクトエコー法による充填評価に与える影響

藤垣 博敏^{*1}・渡辺 健^{*2}・橋本 親典^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨: インパクトエコー法による内部欠陥の検出に関して、充填材を充填後の評価において、凝結硬化過程での評価に与える影響は明確にされていない。そこで本研究では空隙を設けたコンクリート供試体を使用し、空隙にグラウト充填直後から計測をおこない、周波数スペクトルの経時変化を調べた。その結果、充填直後から凝結硬化が進むにつれて、空隙によるピークの振幅が減少していくことが確認された。そしてグラウト硬化後は、グラウト部より奥の境界からの反射によるピークが見られた。また、グラウトの充填が不完全な場合は、空隙によるピークと、グラウト部より奥の境界面でのピークが見られた。

キーワード: インパクトエコー法、周波数スペクトル、グラウト、非破壊検査

1. はじめに

現在、環境問題への関心の高まりや、日本経済の変化、既存構造物の劣化などにより、コンクリート構造物の維持管理が重要視されてきている。そこで劣化状況を把握し、補修・補強工事を適切に行うために、検査・評価技術の発達強く望まれている。現在では、対象物を広範囲に損傷を与えることなく調査できる非破壊検査が注目されている。その一つにインパクトエコー法¹⁾が挙げられ、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を利用したスペクトルイメージング SIBIE(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo)を用いたグラウト充填評価が提案されている²⁾。

インパクトエコー法によるグラウトの充填評価は、既往の研究によって有効性が示されている²⁾が、グラウトの凝結硬化過程での評価に与える影響は明確にされていない。そこで本研究では空隙を設けたコンクリート供試体にてインパクトエコー法による計測をおこない、グラウトの凝結硬化過程が評価に与える影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体

本実験では、内部欠陥の評価を行うために、図-1に示すように 100×100×150mm と 100×100×200mm のコンクリート供試体を使用し、空隙幅 20mm を設けて木製型枠で固定した。そして未充填での計測後に、空隙充填用のグラウトの注入を行い、注入直後から計測をはじめた。ここで、コンクリートの配合表を表-1に、28日水中養生後の力学特性を表-2に示す。

インパクトエコー法および SIBIE による空隙検出には、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 4206m/s であった。

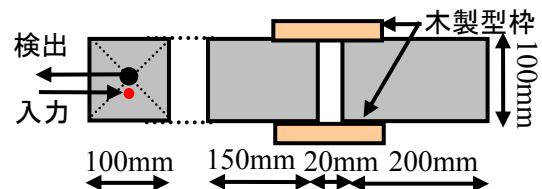


図-1 コンクリート供試体

*1 非破壊検査株式会社 技術本部 安全工学研究所 修士(工学) (正会員)

*2 徳島大学大学院助手 ソシオテクノサイエンス研究部 博士(工学) (正会員)

*3 徳島大学大学院教授 ソシオテクノサイエンス研究部 工博 (正会員)

*4 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)

表－1 コンクリート配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメン ト比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤 <i>A</i>
20	16	52	4.5	46	189	363	775	893	2.18

表－2 コンクリートの力学的特性

圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
41.2	25.5	0.17

2.2 インパクトエコー法による試験

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、鋼球打撃によるインパクトエコー法による試験を行った。一般に、鋼球打撃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。

Sansalone¹⁾らによれば、接触時間 $T_c(\text{sec})$ は鋼球の直径を $D(\text{m})$ 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。

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

また、式(1)より衝撃力により生じる弾性波の上限周波数 f_c は式(2)より決定される。

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

インパクトエコー法による試験では、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 5.5mm のものであり、式(1)、(2)より上限周波数は $f_c = 52.9\text{kHz}$

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 1 次モードの共振周波数 $f_{\text{void}}(\text{Hz})$ および 2 次モードの共振周波数 $f'_{\text{void}}(\text{Hz})$ 、板厚によるピーク周波数 $f_t(\text{Hz})$ は、コンクリート中を伝播する P 波の波速を $C_p(\text{m/s})$ 、コンクリート表面から空隙までの深さを $d(\text{m})$ とすると次式のように表される。

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

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

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

ただし、 T は部材の厚さを示しており、式の中に見られる係数 0.96 は P 波測定 of 補正係数である。上式より、深さ 150mm の f_{void} は 14.0kHz となり、 f'_{void} は、28.0kHz となる。直径 5.5mm の鋼球で十分含んでいる。 f_t は、5.7kHz となる。

本実験でのインパクトエコー法による試験は、図－2 に示すように、供試体を木製型枠で固定した状態で行った。計測波は加速度計を用いて検出し、加速度計と鋼球打撃点の距離は 10mm とした。その後、検出した弾性波の波形を FFT 処理することにより必要な周波数スペクトルを得た。計測条件は、基本周波数 $\Delta f = 100\text{Hz}$ 、サンプリング数 $N = 800$ である。また周波数スペクトルの振幅の最大値を 1 として補正し、評価した。



図－2 供試体の状況

3. スペクトルイメージングの原理

内部欠陥の有無および位置をインパクトエコー法による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。今回使用した断面のイメージングモデルを図-3 に示す。断面のイメージングモデルとしては、供試体および実際に埋設している空隙の寸法を考慮し、100×400mm の断面をモデル化し、正方形要素を5×5mm 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(6)のように表される。

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

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検出し、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. 音響インピーダンス

弾性波が伝播する上で、媒体組織の微小粒子

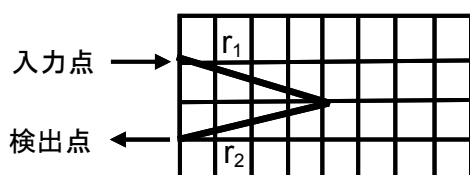


図-3 供試体断面のイメージングモデル

が疎密な変化をきたす場合、各々のポイントの圧力は下がったり上がったりする。この圧力の差に対する粒子速度の比を音響インピーダンスと言い、Z で表す³⁾。音響インピーダンスは、式(7)のような媒質の密度と P 波の波速の積により決まる。

$$Z=\rho \cdot C_p \quad (7)$$

2 つの異なる媒体の境界面で反射される弾性波の反射特性は、互いの媒体の音響インピーダンスに依存する。

5. 結果および考察

5.1 音響インピーダンス

図-4 に今回使用したグラウトの音響インピーダンスの経時変化を示す。図-4 は超音波法により求めたグラウト中を伝播する弾性波伝播速度を用い、音響インピーダンスを式(7)から求めた。なお図-4 では、グラウトの密度は材齢 3 時間において計測したものを使用している。

今回使用したグラウトは超早強型で、カタログデータによると 35 分から 80 分で凝結が終了することが示されている。図-4 よりグラウトの硬化が進むに従って、音響インピーダンスが大きくなっていることが分かる。また材齢 3 時間以降においてもグラウトの音響インピーダンスは緩やかに増加し、材齢 1 日で $7.49 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ 、材齢 3 日で $7.99 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ であった。

一方、コンクリートの密度と P 波の伝播速度は、インパクト試験時に計測を行い、その結果より音響インピーダンスは、 $9.73 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ であった。

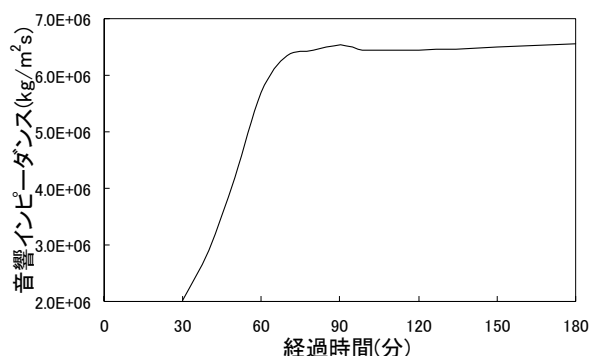


図-4 音響インピーダンス

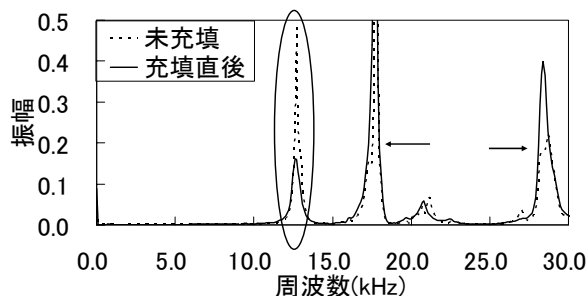


図-5 周波数スペクトル

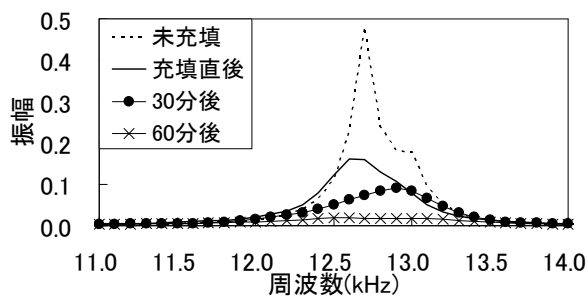


図-6 空隙によるピークの経時変化

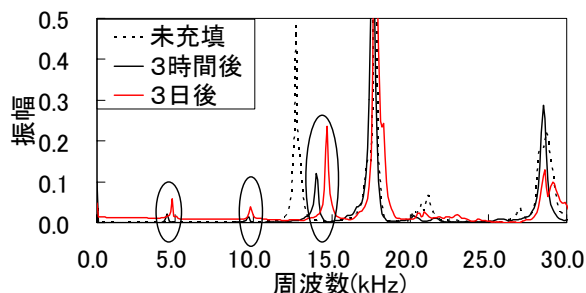


図-7 3日後までの経時変化

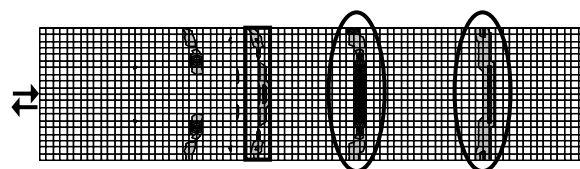


図-8 充填前のSIBIE

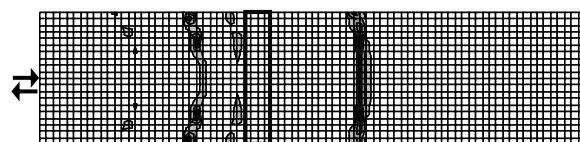


図-9 充填直後のSIBIE

5.2 周波数スペクトル

図-5 にグラウト未充填および完全充填直後において、直径 5.5 mm の鋼球でインパクト試験で得られた周波数スペクトルを示す。ここで、30kHz より高い周波数帯域ではほぼピークが見られなかったため 0kHz～30kHz の範囲で示した。図中の○印で示したピークが f_{void} であり、矢印で示したピークが供試体側面での反射によるピークである。この図からグラウトを充填することで空隙のピークの振幅が減少していることが分かる。これはグラウトが充填されたことによって音響インピーダンスが変化したためである。一方、矢印で示した供試体側面での反射によるピークは、実構造物のようなある程度大きな断面を持つものであれば減少すると考えられる。

図-6 はグラウト未充填および充填後 60 分までの経時変化を、 f_{void} 付近を拡大して示したものである。図よりグラウト充填前の空隙のピークが 12.7kHz 付近に現れており、充填後は振幅が低くなり、硬化が進むに従ってピークの振幅がどんどん小さくなっていくことが分かる。これは図-4 に示すように、経時変化と共にグラウトの音響インピーダンスが変化するためである。

図-7 は、グラウト充填後 3 時間後から 3 日後

の経時変化を示したものである。3 時間後、3 日後のスペクトルでは、12kHz 付近に存在した空隙によるピークは消えて、新たに○印で示した、5kHz、10kHz および 15kHz 付近にピークが発生している。このピークはグラウトが充分硬化したことにより、弾性波がグラウト中を伝播し、供試体の端部より反射しているためである。一方、供試体の端部での反射によるピークは 3 時間後から 3 日後にかけて、ピーク位置が移動している。これは、弾性波がグラウト部を伝播するため、グラウトの伝播速度の変化がピーク位置の変化として表れている。なお、グラウトの圧縮強度は、材齢 3 時間において 11.8N/mm^2 、材齢 3 日においては、 46.5N/mm^2 であった。材齢 3 日においてコンクリート供試体の圧縮強度を超えている。

5.3 SIBIE による断面画像処理

図-8 にグラウト充填前の周波数スペクトルから画像処理を行ったものを、図-9 に充填直後のイメージング画像を示す。図中の□で示した

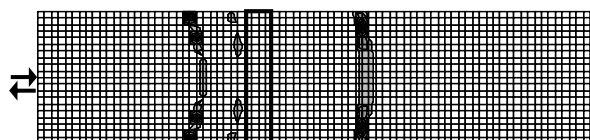


図-10 充填してから3時間後のSIBIE

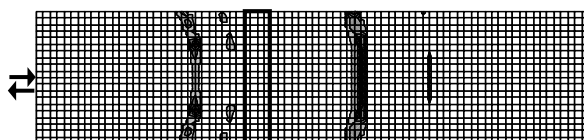


図-11 充填してから3日後のSIBIE

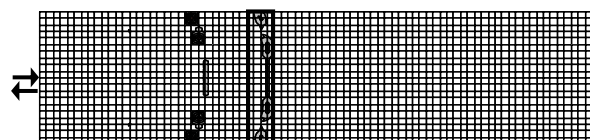


図-12 充填前のSIBIE (式(3)のみ)

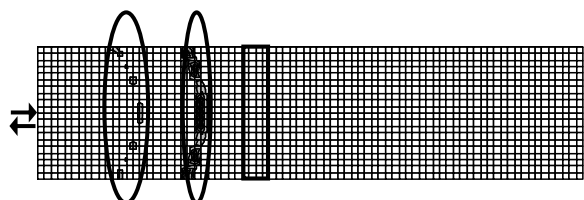


図-13 充填直後のSIBIE (式(3)のみ)

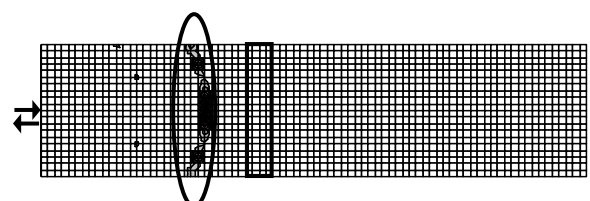


図-14 3時間後のSIBIE (式(3)のみ)

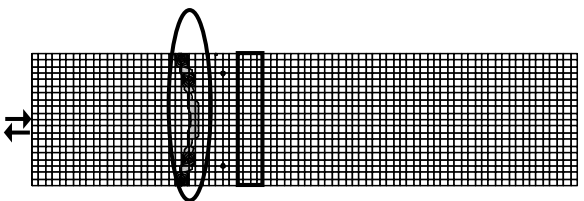


図-15 3日後のSIBIE (式(3)のみ)

部分が空隙部を示している。図-8 から、空隙部分での反射の影響が確認できる。図中の○印で示した影響は、イメージングの際に空隙および側面での反射による2次共振の f_{void} が表れているためのものである。図-9 では充填前に見られた空隙の影響が減少している。これは、グラウトが充填されたことで、音響インピーダンスが変化したためである。

図-10 に充填してから3時間後、図-11 に充填してから3日後のイメージング画像を示す。図-10、図-11 とともに空隙の影響は見られない。これは、グラウトが十分に硬化し、弾性波がグラウトを透過しているためである。

5.4 条件を変更したSIBIEによる断面画像

図-8 で○印で示した影響を除くため、式(3)、式(4)のうち、式(3)のみによるイメージングを試みた。図-12 にグラウト充填前のイメージング画像を示す。この結果から、図-8 で○印で示した影響を除くことができたことが分かる。このことから、場合に応じてイメージングの条件を適切に設定することが重要であると言える。

図-13 に充填直後、図-14 に充填してから3

時間後、そして図-15 に充填してから3日後のイメージング画像を示す。これらの図からわかるように、グラウトが充填されたことで空隙の影響が減少したことが確認できる。一方、図中に○印で示した影響は図-5 で矢印で示した供試体側面での反射によるものである。

6. グラウトの充填が不完全な場合

次に、グラウトの充填が不完全な場合を想定した実験を行った。グラウトを空隙高さの半分まで充填し実験を行った。図-16 にグラウトを半分充填した状況を示す。弾性波の入力点および検出点は図-1 に示したものと同一であり、グラウトと空隙の境界面上になる。

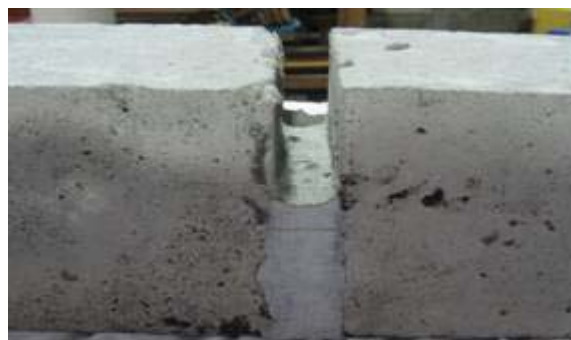


図-16 グラウトを半分充填した状況

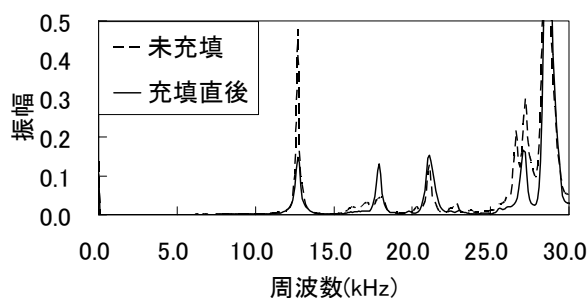


図-17 周波数スペクトル（半分充填）

図-17 にグラウト充填前および充填直後の周波数スペクトルを示す。図-17 よりグラウトを半分充填した場合でも、充填直後に空隙によるピークの振幅が減少していることがわかる。図-18 にグラウト充填前および充填後3日までの周波数スペクトルを示す。図-18 より 12kHz 付近には空隙によるピークが見られ、15kHz 付近には供試体端部での反射によるピークが見られる。このことから、グラウトの充填が不完全な場合には空隙によるピークと、グラウト部よりも奥からの反射の影響によるピークが同時に表れる可能性があることがわかった。

図-19 に充填してから3日後の fvoid のみのイメージング画像を示す。図-19 より、空隙による反射の影響およびグラウト部より奥からの反射の影響は見られずに、図-15 と同様に供試体側面での影響が見られる。これは空隙やグラウト部より奥の境界面によるピークよりも、供試体側面での反射によるピークが卓越しているために、イメージング画像上に表れないためである。SIBIE による断面画像化においても、実構造物のようなある程度断面の大きいものであれば、供試体側面での反射の影響は小さくなると考えられる。

7. 結論

グラウトの凝結硬化過程における評価についてインパクト試験によって検討した。その結果、以下のような結果が得られた。

- (1) グラウト充填直後において、空隙によるピークの振幅が減少することが確認された。
- (2) グラウトの凝結が進むにつれて、空隙による

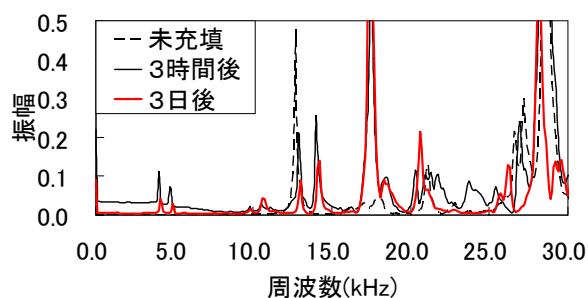


図-18 3日後までの経時変化（半分充填）

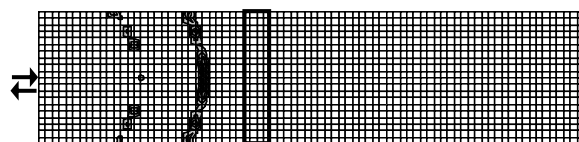


図-19 半分充填3日後（式(3)のみ）

ピークの振幅がだんだんと減少していくことが確認された。

- (3) グラウトの硬化後には、グラウト部よりも奥の境界面による反射の影響が確認された。
- (4) グラウトを空隙部に半分充填した場合においても、充填直後に空隙によるピークの振幅が減少することが確認された。
- (5) グラウトを空隙部に半分充填した場合において、グラウトの硬化が進むと、空隙による反射およびグラウト部より奥の境界面での反射の影響が確認された。

なお、空隙幅が異なる場合でも、グラウトの硬化過程による影響があると予想される。また、グラウトの充填が不完全な場合には、センサーの位置と空隙状況の違いによって、結果が異なる可能性がある。

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) Malholtra, M.and Carino, N.J:Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC PRESS, Inc, pp.275-304, 1991.