

論文 衝撃応答解析に基づくコンクリート部材の版厚評価のための可視化手法

西上 康平^{*1}・内田 慎哉^{*2}・鎌田 敏郎^{*3}・李 相勲^{*4}

要旨:本研究では、衝撃弾性波法による計測を有限要素法による衝撃応答解析を用いてシミュレーションし、解析で得られた周波数スペクトルを対象として、調査対象断面内における弾性波の反射源を画像化することが可能な SIBIE に対して周波数スペクトルの平滑化、入射角補正および画像の重畳処理を新たに加えた「Accumulated SIBIE」を適用し、コンクリート部材の版厚を2次元画像により可視化することを試みた。その結果、本手法では、版厚が一定のモデルおよび版厚が変化するモデルにおける底板部分を、2次元の画像として可視化できることを明らかにした。

キーワード: 非破壊試験, 衝撃弾性波法, コンクリート版厚, Accumulated SIBIE, 可視化, 衝撃応答解析

1. はじめに

土木学会 コンクリート委員会の中の「コンクリートの非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会」では、図-1 に示す信頼性の構図¹⁾を示している。この委員会では、非破壊試験の信頼性を向上させるための一つの方法として、試験により得られた結果を、誰もが分かりやすい形で伝達することの重要性についての提言¹⁾がなされている。

そこで本研究では、コンクリート部材の版厚評価を例に、試験結果の説明を容易にするためのコミュニケーションツールとして可視化手法についての検討を行った。具体的には、衝撃弾性波法で得られた周波数スペクトルを対象として、調査対象断面内における弾性波の反射源を画像化することが可能な SIBIE²⁾に対して周波数スペクトルの平滑化、入射角補正および画像の重畳処理を新たに加えた「Accumulated SIBIE」を適用し、コンクリート部材の厚さを可視化する非破壊評価手法の検討を行った。

2. コンクリート部材の版厚評価のための可視化手法の概要

コンクリート部材の版厚評価のため行う調査断面の可視化手順を図-2 に示す。具体的な手順としては、まず、衝撃弾性波法での計測を複数箇所で行い(走査)し、各計測点において周波数スペクトルをそれぞれ求める。その後、得られた全ての周波数スペクトルを対象に Accumulated SIBIE を適用し、部材断面の2次元画像を取得する。以下にそれぞれの詳細を示す。

2.1 衝撃弾性波法による版厚評価の原理

衝撃弾性波法によるコンクリート部材の版厚評価の原理を図-3 に示す。鋼球を用いてコンクリート表面を打撃することによりコンクリート中へ弾性波を入力し、コンクリート表面と底面との間で多重反射する波を、打撃側のコンクリート表面に設置した振動センサで受信すると、図-3 a)に示す周期的な時刻歴波形を測定することができる。得られた時刻歴波形を周波数分析することにより、図-3 b)に示す周波数スペクトルを算出することができる。衝撃弾性波法による版厚評価は、この周波数スペクトルにおいて波の多重反射によるピーク(図中の矢印)を特定し、その周波数の値から版厚を評価するものである。なお、部材厚さ方向に伝搬する弾性波の多重反射による理論上の共振周波数(以降、縦波共振周波数)は、次式により算出できる。

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

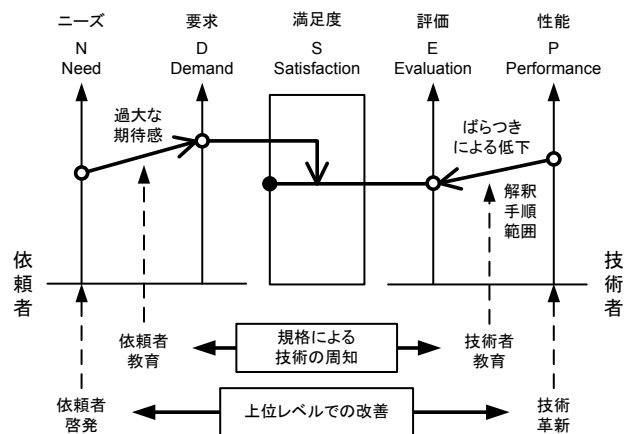


図-1 依頼者と技術者との相互関係により生じる信頼性の構図

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 博士前期課程 (学生会員)
 *2 佐賀大学大学院 工学系研究科都市工学専攻助教 博士(工学) (正会員)
 *3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)
 *4 東北学院大学 工学部環境建設工学科准教授 博士(工学) (正会員)

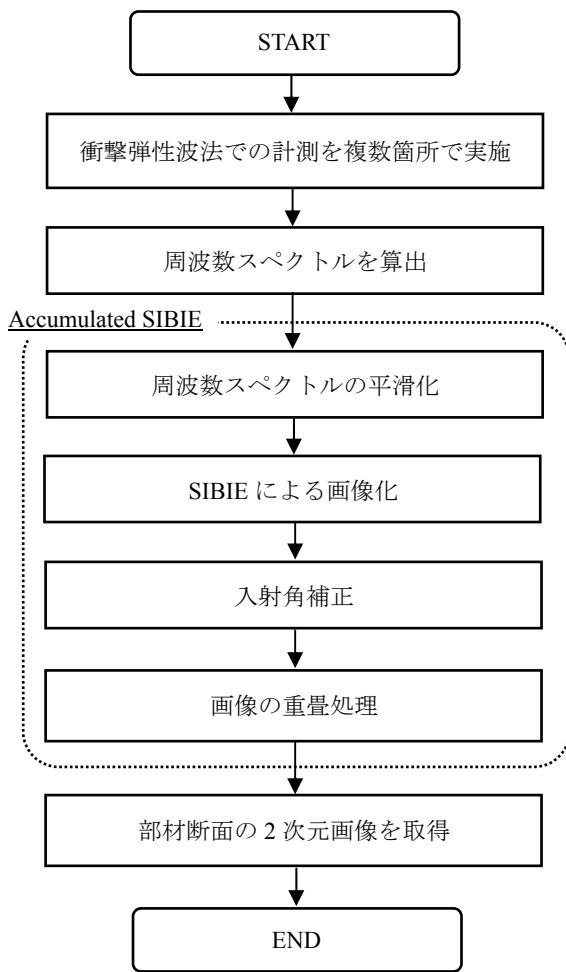
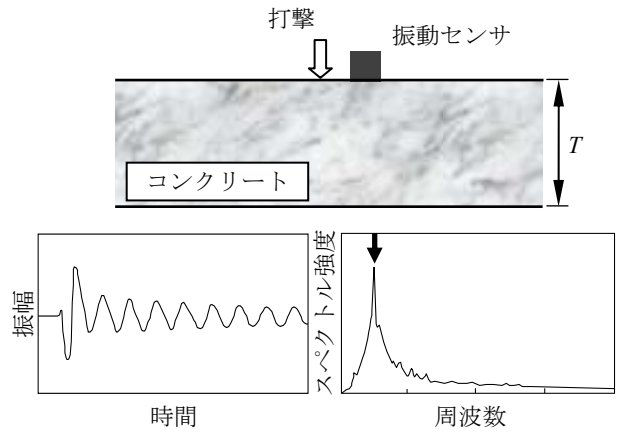


図-2 可視化手順



a) 時刻歴波形 b) 周波数スペクトル
図-3 衝撃弾性波法による版厚の推定原理

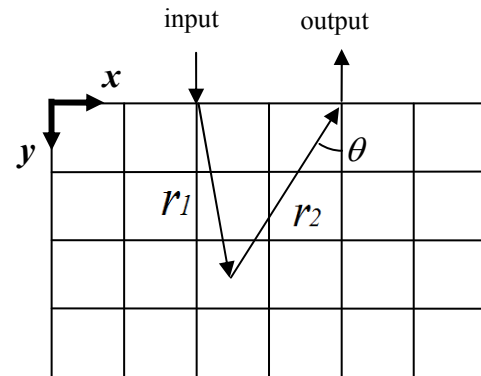


図-4 SIBIE の断面モデル

ここで、 f : 縦波共振周波数(Hz), C_p : コンクリート中を伝搬する縦波の速度(m/s), T : コンクリート部材の版厚(m)である。

2.2 Accumulated SIBIE による可視化の原理

この方法では、まず、複数の計測点で求めた周波数スペクトルそれぞれに対して「平滑化 ((1)参照)」を行った後、「SIBIE ((2)参照)」により弾性波の反射源を画像化する。続いて、各画像に対して「入射角補正 ((3)参照)」により反射強度を再計算する。最後に、全画像を「重畳 ((4)参照)」し、調査対象断面の2次元画像を求める。以下に各過程の詳細を示す。

(1) 周波数スペクトルの平滑化

受信波形に対してラグ・ウィンドウによる処理後に高速フーリエ変換を行うことで平滑化処理を行った。平滑化処理の目的は、次項に示す SIBIE で得られる画像中の要素間の反射強度の不連続性を解消するためである。なお、ラグ・ウィンドウのバンド幅は、受信波形の周期的特徴を歪めないために 800Hz とした。

(2) SIBIE²⁾

ここでは、まず、対象断面を図-4 に示すように正方

形要素に分割する。続いて、弾性波の入・出力位置と要素中心との距離 R に対応した換算共振周波数: f_R を次式から算出する。

$$f_R = C_p / R \quad (2)$$

ここで、 $R=r_1+r_2$ である。この式により求めた換算共振周波数を、衝撃弾性波法により算出した周波数スペクトル上から検出し、そのピーク強度を各要素における反射の大きさ (反射強度) と設定する。以上の計算を対象断面内の全ての要素に対して行い、弾性波の反射源を画像化する。図-5 に SIBIE により求めた断面画像の一例を示す。また、比較のため、図-6 に平滑化処理後の断面画像を示す。要素間の反射強度の連続性が確保され、反射強度がより明確に表現できていることがわかる。

(3) 入射角補正

衝撃弾性波法で用いられる一般的な加速度センサは、センサ鉛直方向に伝搬する弾性波を感度良く受信できる構造になっている場合が多い。しかしながら、図-5 に示すとおり、反射強度の大きい領域が同心円状に分布しており、あたかもセンサに対して全方位から波が入射したような画像になっている。そこで、要素中央から出

力位置へ向けた直線と鉛直方向とのなす角： θ (図-4 参照) を入射角として定義し、入射角： θ を考慮した補正を行った。具体的には、要素全てに対して、各要素の反射強度に方向余弦を掛けて垂直成分を求め、これを反射強度として再計算した。図-7 に入射角補正後の画像を示す。図より、同心円状の強度分布が改善されていることが確認できる。

(4) 画像の重畳

上記(1)から(3)の一連の操作を、対象部材の表面上で得られた周波数スペクトル全てに対して行うことにより複数の断面画像を求め、各要素の反射強度を全て足し合せて調査断面内の反射源を可視化した1つの2次元画像を算出した (図-8)。

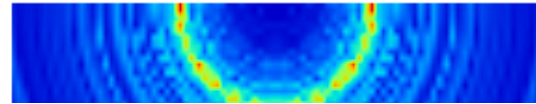


図-5 SIBIE による断面画像

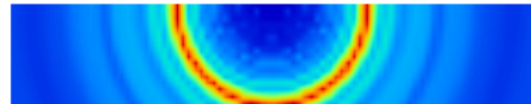


図-6 平滑化後の画像

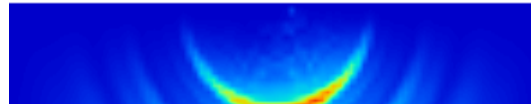


図-7 入射角補正後の画像

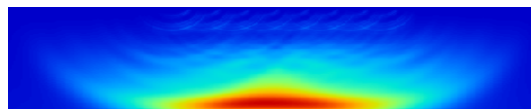
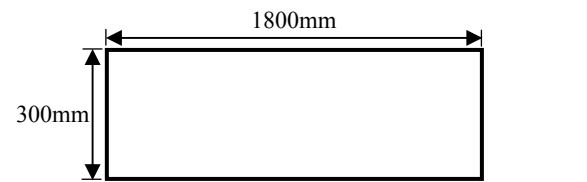


図-8 画像の重畳処理

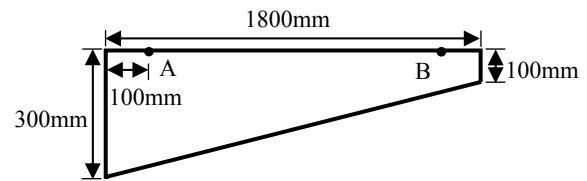
3. 衝撃応答解析の概要

3.1 解析モデル

衝撃弾性波法による計測を有限要素法による衝撃応答解析を用いてシミュレーションした。図-9 に解析モデルを示す。本研究で対象としたモデルは、「部材の厚さが一定のモデル (「版厚一定モデル」と呼ぶ)」と「部材の底板部分が傾斜したモデル (「変断面モデル」と呼ぶ)」の2 ケースである。いずれのモデルも平面ひずみ要素として計算した。また、両モデルとも、モデル両端面において弾性波が反射しないように、モデル両端部の全ての節点を無反射となるように設定した。モデルの要素寸法は、連続体中の弾性波の伝播と時間増分との関係式 (クーラン条件)³⁾に基づき 10×10 (mm) とした。モデルの物性値は表-1 に示す通りである。



版厚一定モデル



変断面モデル

図-9 解析モデル概要

3.2 解析条件

鋼球打撃による弾性波入力をモデル化するために、図-10 に示す入力関数を用いた。図中の鋼球接触時間： T_c (s) は、既往の研究⁴⁾より鋼球直径： D (m) の関数として次式により算出した。

$$T_c = 0.0043D \quad (3)$$

一方、図-10 中の最大荷重： F_{max} (N) は次式⁵⁾で与えた。

$$F_{max} = \frac{m\sqrt{2gH}}{0.637T_c} \quad (4)$$

ここで、 m ：鋼球の質量(kg)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 H ：鋼球の落下高さ(m)である。なお、本研究で対象とした鋼球直径は、コンクリートの部材厚さに相当する理論上の縦波共振周波数： f (式(1)参照) を十分に上回ることが可能な3 ケース (6.4, 12.8 および 19.6mm) とした。なお、鋼球直径とそれにより入力される弾性波の上限周波数： f_{max} との関係は次式⁴⁾により算出できる。

$$f_{max} = \frac{291}{D} \quad (5)$$

表-1 解析モデルの物性値

密度(kg/m ³)	弾性係数(N/mm ²)	ポアソン比
2.3×10^3	2.0×10^4	0.2

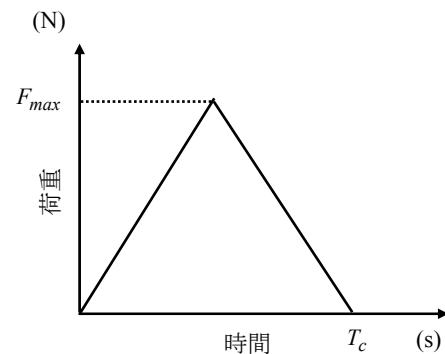


図-10 入力関数

全ケースについて、上記(3)および(4)から接触時間および最大荷重をそれぞれ算出し、図-10に示す入力関数で弾性波入力をそれぞれ模擬した。

衝撃荷重の入力は図-9に示す部材上面とし、端部から100mmの位置にある節点(端部A)から1700mmの節点(端部B)まで100mm間隔で入力位置を走査した。したがって、入力位置は計17点となる。弾性波の出力位置は、いずれの入力の場合も、入力位置から50mm離れた節点とした。

4. 衝撃応答解析の結果および考察

4.1 版厚一定モデルでの周波数スペクトル

衝撃応答解析によって得られた波形のうちモデル中央における解析結果を元に算出した周波数スペクトルを代表例として鋼球直径ごと図-11に示す。図上の矢印は、理論上の縦波共振周波数の位置を示している。図より、いずれも、鋼球直径に関わらず、縦波共振周波数の位置近傍にピークが出現していることがわかる。ここで、鋼球直径6.4mmの場合に着目すれば、縦波共振周波数の位置にピークが見られるものの、縦波共振周波数位置でのピーク強度よりも、高周波領域における成分のスペクトル強度が大きい。このような現象は、鋼球とコンクリート表面との接触による影響と考えられる。これに対して、鋼球直径19.6mmでは、単独の鋭いピークが出現しており、しかもそのピークの周波数の値と縦波共振周波数の値とは概ね一致している。以上より、コンクリートの部材厚さに相当する理論上の縦波共振周波数を十分に上回ることが可能な鋼球を使用しても、周波数スペクトル上におけるスペクトル強度が最大となる周波数から版厚を推定することは困難なケースがあることが確認された。

4.2 変断面モデルでの周波数スペクトル

図-12に、変断面モデルで得られた周波数スペクトルを鋼球直径ごとに示す。図中に示す矢印は、出力点直下のコンクリート厚さに相当する縦波共振周波数を示している。いずれの鋼球直径の場合も、縦波共振周波数の位置にピークが出現しているものの、依然として縦波共振周波数よりも高い周波数領域において、縦波共振周波数の位置に出現したピークと同程度あるいはそれよりも大きい強度を有するピークも複数出現している。しかもこのような傾向は、コンクリートの厚さが小さくなるほど、また前述の版厚一定モデルよりも顕著となっている。この原因としては、底面が水平でないことにより、底面で反射して出力点で受信される弾性波の成分が減衰したことが挙げられる。

5. Accumulated SIBIE による断面の可視化

5.1 版厚一定モデルでの可視化画像

Accumulated SIBIE による可視化画像の範囲は、反射源位置をより明確に把握するため、解析モデルの寸法(図-9参照)よりも若干大きく設定(1800mm×400mm)した。また、版厚の寸法が可視化画像から判読できるように、モデル表面からの深さに対応した目盛り軸を設けた。

図-13に版厚一定モデルに対して得られた可視化の結果を鋼球直径ごとに示す。いずれの場合も、底面に相当する位置での反射の大きさが、それ以外の領域と比較して大きくなっていることが確認できる。しかしながら、鋼球直径6.4mmの場合では、衝撃入力位置側の表層部分にも反射強度の大きい領域がある。このような現象は、図-11に示す縦波共振周波数よりも高い周波数領域における周波数成分の分布の影響と考えられる。表層部分での反射強度は、版厚位置でのそれと比較して小さいものの、場合によっては版厚推定における不確実性が増すものと考えられる。

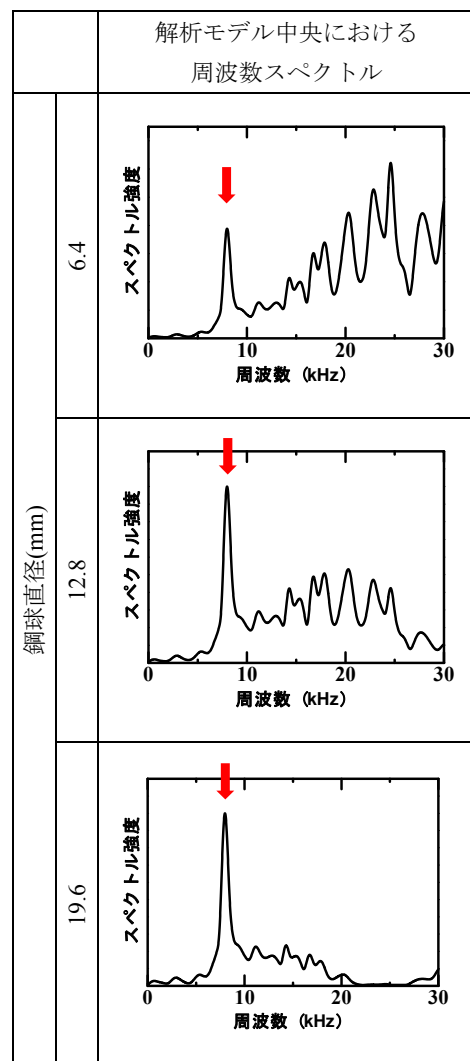


図-11 版厚一定モデルでの周波数スペクトル

ここで、一つの試みとして、図-13に示した各鋼球直径の可視化画像全てに対して、2.2(4)に示す重畳処理をさらに実施した。その結果を図-14に示す。図より、版厚部分にのみ強度の大きい領域が出現していることを確認できる。したがって、この方法では、厚さに相当する理論上の縦波共振周波数を十分に上回ることが可能な鋼球直径を複数選択できる条件下であれば、周波数スペクトル上でのピークの出現状況を判断することなく、可視化画像で版厚を評価できる可能性があることが示唆された。

5.2 変断面モデルでの可視化画像

図-15に変断面モデルにおいて得られた可視化画像の結果を鋼球直径ごとに示す。図-15より、底面が水平でない場合であっても、Accumulated SIBIEにより部材底版部を可視化できることが明らかとなった。ただし、鋼球直径6.4mmの場合には版厚一定モデル同様、表層部分において鋼球とコンクリート表面との接触に起因する

と考えられる反射強度の高い領域が存在する。また、鋼球直径の違いによりコンクリート内部へ入力できる弾性波の周波数範囲が異なるため、画像内の反射強度の高い領域が直径によりそれぞれ異なっていることがわかる。これらの影響を改善するため、先の版厚一定モデル同様に各鋼球直径で得られた画像を重畳処理することとした。その結果を図-16に示す。図に示す可視化画像において、表層部分における反射強度が、図-15のそれと比較して小さくなっていることがわかる。また、選択した鋼球直径ごとに異なった深さに出現していた反射強度の高い領域は、一つの可視化画像にまとめることで、概ね底版位置においてのみ出現していることが確認できる。

以上より、変断面モデルにおいても版厚一定モデルと同様に本手法を用いることで版厚評価が可能であることがわかった。

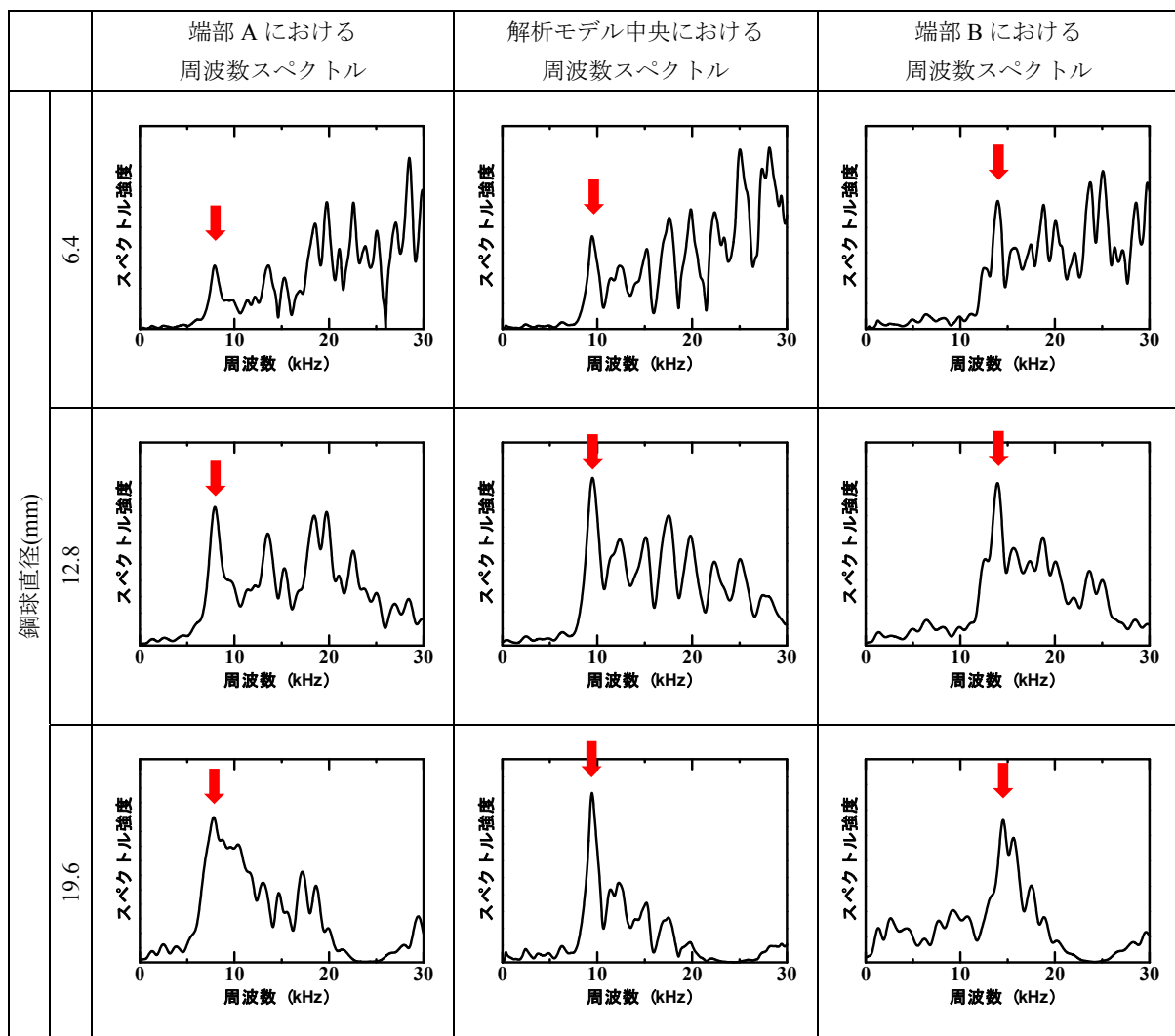


図-12 変断面モデルでの周波数スペクトル

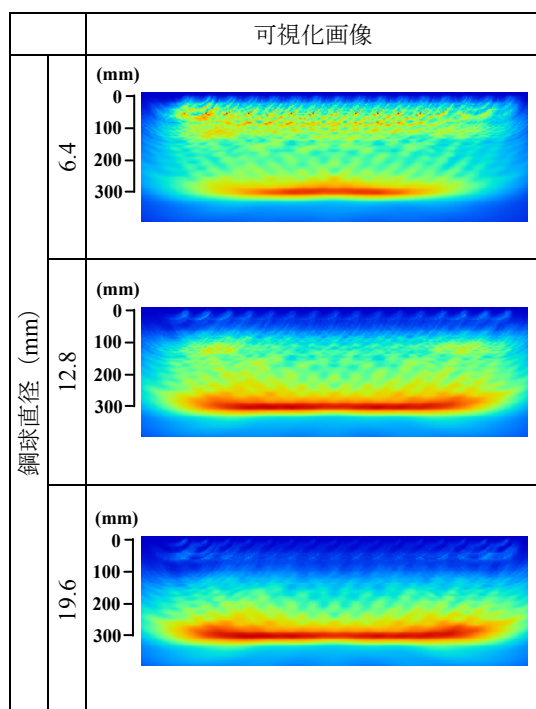


図-13 版厚一定モデルに対して得られた可視化結果

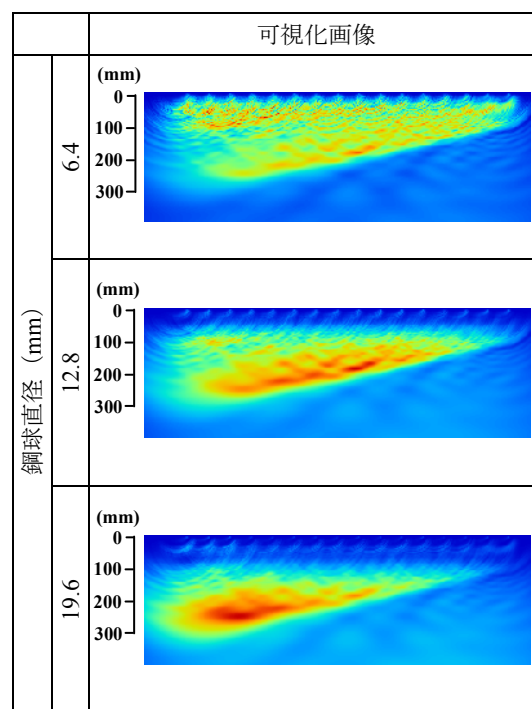


図-15 変断面モデルに対して得られた可視化結果

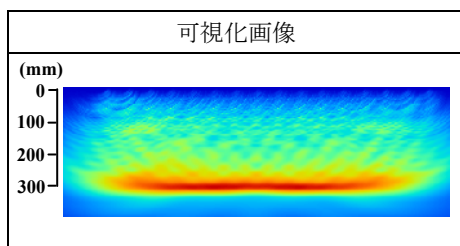


図-14 版厚一定モデルにおける各鋼球直径の可視化画像の重ね合わせ

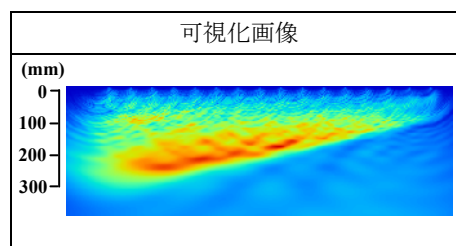


図-16 変断面モデルにおける各鋼球直径の可視化画像の重ね合わせ

6. 結論

本研究では、衝撃弾性波法による計測を有限要素法による衝撃応答解析を用いてシミュレーションし、解析で得られた周波数スペクトルに対して Accumulated SIBIE を適用して、コンクリート部材の版厚を2次元画像により可視化することを試みた。その結果、本手法では、版厚が一定のモデルおよび版厚が変化するモデルにおける底版部分を、2次元の画像として可視化できることを明らかにした。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会 (339 委員会) (第

II 期) 報告書ならびにシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 100，2012.

- 2) Ohtsu, M. and Watanabe, T.: Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, *NDT&E Int.*, Vol.35, pp.189-196, 2002
- 3) Benson, D.J.: Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 99, pp.235-394, 1992.
- 4) Sansalone, M. J. and Streett, W. B.: Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.159-166, 1997.
- 5) 白鳥雅也，桧貝 勇，岡村雄樹：軽い衝撃荷重を受けるコンクリート部材の応答解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.679-684, 1992