

# 報告 衝撃応答解析に基づくコンクリート部材の水平ひび割れ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・石田 卓也\*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3次元衝撃応答解析を用いてシミュレーションし、コンクリート部材内部に生じている水平ひび割れを可視化により評価する手法についての検討を行った。解析で得られた受信波形から表面波に相当する範囲を取り除いた波形に対して高速フーリエ変換して周波数スペクトルを算出し、このスペクトルに基づき本研究で提案した可視化手法を適用した結果、水平ひび割れまでの深さや平面的な広がりなどを、2次元の可視化画像として表すことが可能であった。

**キーワード:** 非破壊試験, 衝撃弾性波法, 水平ひび割れ, 表面波, 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」によれば、図-1に示す信頼性の構図<sup>1)</sup>を示し、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<sup>2)</sup>がなされている。これに対して著者らは、これまでに、コンクリート部材の版厚推定において、衝撃弾性波法に基づく可視化手法に関する検討を行ってきた<sup>3)</sup>。この一連の流れのもと、本研究では、道路橋RC床版などに生じる水平ひび割れを対象として、衝撃弾性波法による計測を3次元衝撃応答解析によってシミュレーションし、水平ひび割れを可視化する手法についての検討を行った。

## 2. 衝撃弾性波法による水平ひび割れの既存の評価原理とその課題

衝撃弾性波法によるコンクリート部材の水平ひび割れ評価の原理を図-2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水平ひび割れ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-2 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-2 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水平ひび割れ評価は、波の多重反射により生じるピーク(図中の矢印)を周波数スペクトル上で特定し、その周波数の値からひび割れ深さを評価するものである。そのため、いかにして波の多重反射による周期的な成分を抽

出するかが重要となる。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ひび割れに伴うピーク(以降、縦波共振周波数)は、次式により算出できる。

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

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),  $d$ : コンクリート部材内部の水平ひび割れ深さ(m)である。

以上が評価原理であるが、この手法を実際の構造物に適用した場合、著者らの経験によれば、得られた周波数スペクトルの周波数全域にわたり成分が分布する場合や複数のピークが出現する場合などが存在し、縦波共振周波数を周波数スペクトル上で特定することが難しく、水平ひび割れを的確に評価することが困難なケースがある。この原因の一つとして、コンクリート表層を伝搬する表面波が多重反射する波に影響を与え、周波数スペクトル上での縦波共振周波数の判読を困難にしていることが挙げられる。そこで本研究では、解析によりシ

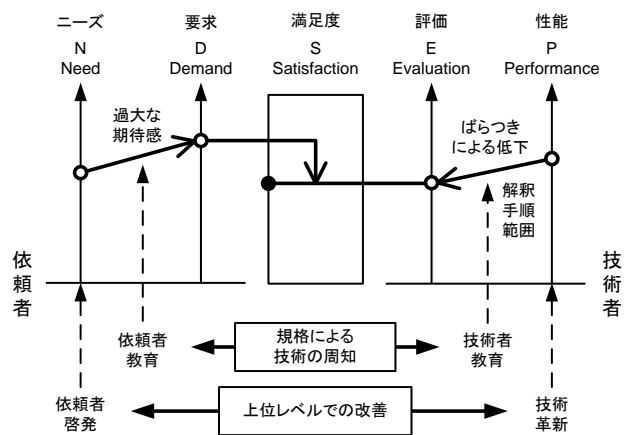


図-1 依頼者と技術者との相互関係により生じる信頼性の構図

\*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 立命館大学 理工学部環境システム工学科講師 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 大阪大学 工学部地球総合工学科 (学生会員)

ミュレートした波形上において表面波を特定し、この表面波が水平ひび割れの検出に与える影響についての検討も行うこととした。

### 3. 衝撃弾性波法に基づく水平ひび割れの可視化手法

本研究において提案する衝撃弾性波法に基づくコンクリート部材内部の水平ひび割れの可視化手法は、まず、複数の計測点において、衝撃弾性波法による計測を行い、各点において周波数スペクトルをそれぞれ算出する。続いて、各周波数スペクトルにおいて、以下に示す計算を行い、計測点直下における深さ方向の反射強度の分布を求めた。すなわち、周波数スペクトル上の横軸の周波数の値を式(2)より計測点直下の見かけの深さ（換算深さ）に置換した。また、各深さにおける反射強度は、深さに対応する周波数の値でのスペクトル強度値（縦軸）とした。最後に、上記の計算を全計測で行い、得られたすべての反射強度を外挿することで、断面のコンター図（2次元の可視画像）を求めた。

$$h = C_p / 2f_h \quad (2)$$

$h$  : コンクリート上面からの見かけの深さ（換算深さ）、 $f_h$  : 周波数スペクトルにおける横軸（周波数）、 $C_p$  : コンクリートを伝播する縦波の速度である。

### 4. 衝撃応答解析の概要

#### 4.1 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3次元衝撃応答解析を用いてシミュレーションした。図-3に解析モデルを示す。モデル寸法は、長さ900mm×幅900mm×高さ230mmである。要素は8節点ソリッドとし、各要素の寸法を10mmに設定した。モデル内部には、水平ひび割れを模擬するために円形の空隙部（内部欠陥）を設けている。空隙部の直径は $\phi$ :250mmとし、深さは $d$ :50, 100, 150mmの3ケースを設定した。また、モデルの四方側面では全節点の変位を固定し、側面からの反射を無視するために無反射条件を設けた。なお、モデルの物性値は表-1に示す通りである。

#### 4.2 解析条件

鋼球打撃による弾性波入力を模擬するため、図-4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<sup>3)</sup>より鋼球直径： $D$  (m)の関数として次式により算出した。

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

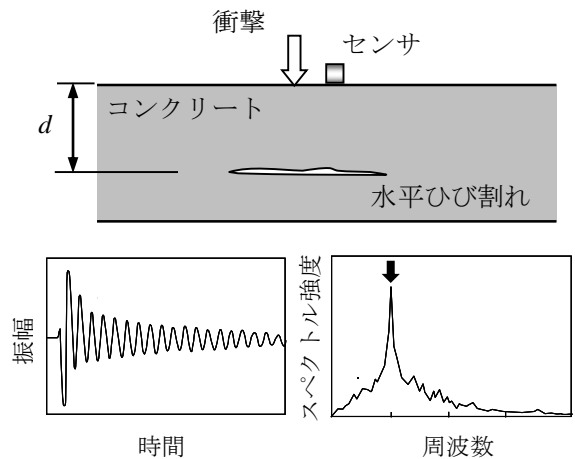
本研究では、鋼球直径の違いが周波数スペクトルに与える影響を把握するため、6.4mmおよび9.6mmの2種類の直径の異なる鋼球を設定した。

一方、図-4中の最大荷重： $F_{max}$  (N)は既往の研究<sup>4)</sup>を参考に次式で与えた。

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

ここで、 $m$  : 鋼球の質量(kg)、 $g$  : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)、 $H$  : 鋼球の落下高さ(m)である。

弾性波の入力位置は、図-3に示す水平ひび割れ上のコンクリート表面の9つの節点とした。各節点の間隔は50mmである。



a) 時刻歴波形      b) 周波数スペクトル  
図-2 衝撃弾性波法による水平ひび割れの評価原理

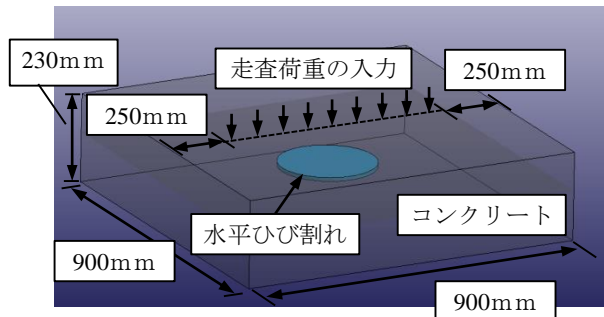


図-3 解析モデル概要

表-1 解析モデルの物性値

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

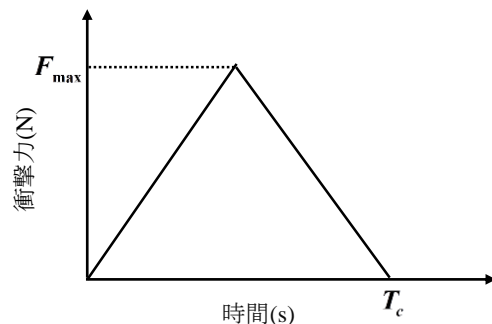


図-4 入力関数

## 5. 衝撃応答解析の結果および考察

### 5.1 弾性波伝搬状況の把握

コンクリート中の弾性波の伝搬状況を把握するため、 $\phi : 250\text{mm}$ 、 $d : 100\text{mm}$  の位置に空隙部を設けた解析モデルでの弾性波伝搬状況を図-5 に示す。図中には経過時間ごとの各節点における深さ方向の加速度分布を表示している。コンクリート中を球面波として伝搬した縦波が空隙部に到達する (図-5 a) と、波はコンクリート表面に向かって反射し、コンクリート表面に到達した反射波は出力点において受信される (図-5 b))。ただし、この間、図中のコンクリート表面に設けた出力点では空隙部からの反射波だけでなく入力点から表層を伝搬した波 (表面波) も受信することになる。その後、コンクリート表面で反射した波は、再度、深さ方向に伝搬し (図-5 c))、コンクリート表面および空隙部において縦波の多重反射が励起されることがわかる。ここで、図中の出力点において得られた受信波形の前半部分を拡大したものを図-6 に示す。赤のそれぞれの点線は、図-5 の各経過時間と対応する時刻を表している。図より、表層を主に伝搬する表面波は、非常に大きな振幅をもつことがわかる。このことから、波形の周期性だけでなく振幅の大きさにも影響を受ける高速フーリエ変換 (FFT) を用いた場合、受信波形における表面波の存在が衝撃弾性波法による評価結果に影響を与える可能性が示唆された。

### 5.2 得られた全波形に対して FFT により算出した周波数スペクトルの特徴

従来通り表面波による影響を考慮せず、受信波形全体から FFT により算出した周波数スペクトルを、鋼球直径およびひび割れ深さごとに図-7 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、いずれの周波数スペクトルにおいても理論上の縦波共振周波数の位置にピークが出現していることがわかる。しかしながら、それ以外の周波数領域においても相対的に大きな成分が分布している。また、ひび割れ深さ 50 および 100mm の場合では、5kHz 以下においても鋭いピークが出現している。しかも深さが大きくなると強度そのものが小さくなっていることもわかる。これは、欠陥上部のコンクリート部分全体が曲げ振動 (たわみ共振) したことにより出現したピークと考えられる。たわみ共振は、欠陥までの深さが浅い場合においてその挙動が顕著にスペクトル上に現れ、深さが深くなるにしたがって挙動が小さくなりピークが出現しにくくなる現象である。図からもこの様子が伺える。

### 5.3 表面波の通過時間を除去した波形に対して FFT により算出した周波数スペクトルの特徴

川嶋ら<sup>5)</sup>は計測により得られた波形において、表面波

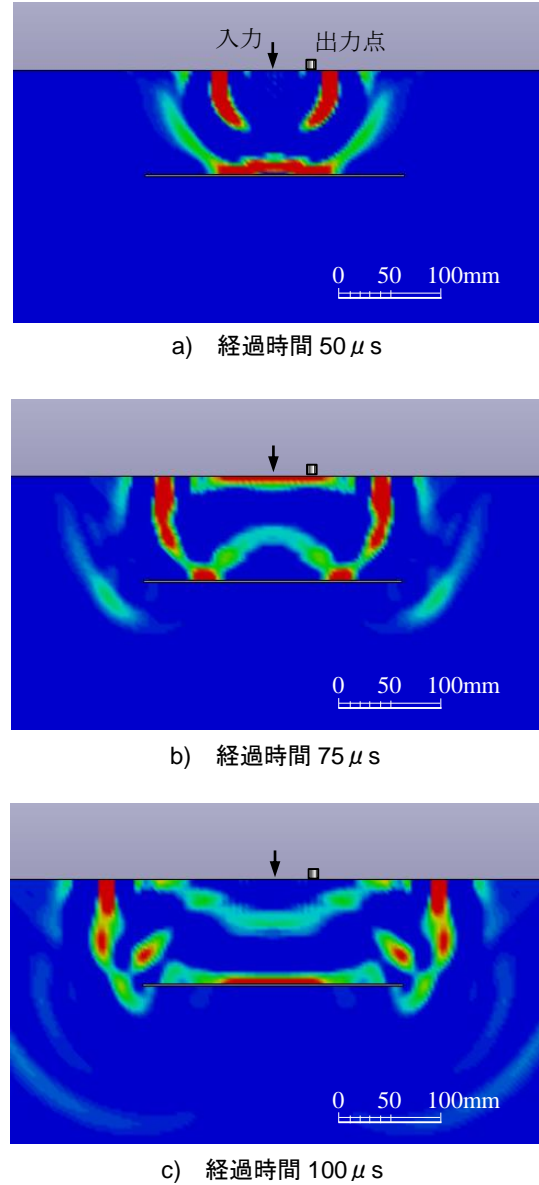


図-5 弾性波の伝搬状況

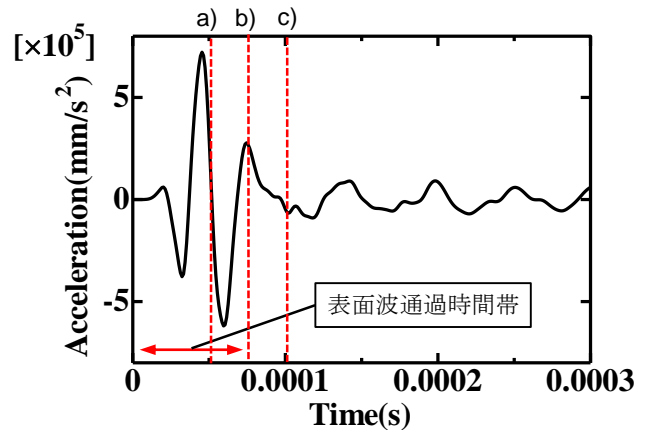


図-6 受信波形の前半部分を拡大した波形

と思われる部分とそれ以前の部分の振幅を全て 0 とすることにより表面波の除去を試みている。しかしながら、表面波に相当する部分は主観により決定しており、その根拠が十分ではない。そこで本研究では、「表面波通過時間帯」を定めそれ以降の波形を対象として FFT を行うことにより表面波の影響を除去することとした。表面波通過時間帯は、鋼球の接触時間に荷重の入力位置から出力点まで表面波の伝搬にかかる時間を加えることにより求めた。表面波の伝搬速度  $C_r$  は式(5)より求めた。

$$C_r = \epsilon_p \times \sqrt{D \rho} \quad (5)$$

ここで、 $C_p$  は以下の式(6)により与えられ、本研究で設定した物性値 (表-1 参照) の下では 3806m/s となる。

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6)$$

例えば、鋼球直径 9.6mm の場合では、以下の計算により表面波通過時刻を算出した。すなわち、式(5)より表面波の伝搬速度は 1713m/s となり、これと荷重の入力位置から受信点までの距離 50mm から、伝搬時間は  $29.3\mu\text{s}$  となる。一方、接触時間は  $41.3\mu\text{s}$  となるため、両者の和をとり、 $70.6\mu\text{s}$  を表面波通過時刻とした。

図-6 に示す表面波通過時間帯を除去した波形に対して FFT により求めた周波数スペクトルを図-8 に示す。図中に示す矢印は、理論上の縦波共振周波数を示している。図より、ひび割れ深さ 50mm 鋼球直径 9.6mm の場合を除いて、いずれの周波数スペクトルにおいても図-7

と比較して縦波共振周波数の位置におけるピークが卓越し、それ以外の成分が低下していることが確認できる。ひび割れ深さ 50mm 鋼球直径 9.6mm の場合において低周波の成分が大きくなった理由を考察すると、ひび割れ深さ 50mm での縦波共振周波数は 39.0kHz であり、直径 9.6mm の鋼球による上限周波数は 30.3kHz である。そのため縦波共振周波数の成分が少なく多重反射が励起されなかったためと考えられる。以上から、衝撃弾性波法による水平ひび割れ深さを評価する際に広い周波数域に分布する周波数成分は表面波による影響を受けて出現している可能性が高いと考えられる。したがって、受信波形から表面波に相当する範囲を除去し、その波形を対象に周波数分析を行うことは、周波数スペクトル上に出現したピーク周波数から水平ひび割れを評価する上では、重要であることが明らかとなった。

## 6. 可視化手法による水平ひび割れの評価

表面波の存在が可視化画像に与える影響を確認するため、まず従来通り表面波の影響を考慮せずに受信波形全体に対して周波数分析を行なった場合における可視化画像を図-9 に示す。可視化画像の横軸は、荷重の入力を行った軸を示し、縦軸は計測点直下の見かけの深さを示している。いずれの鋼球直径の場合においても、水平ひび割れまでの深さが 50mm のように比較的浅い位置にある場合では、水平ひび割れを概ね可視化できていると考えられる。一方、ひび割れまでの深さが深くなると、

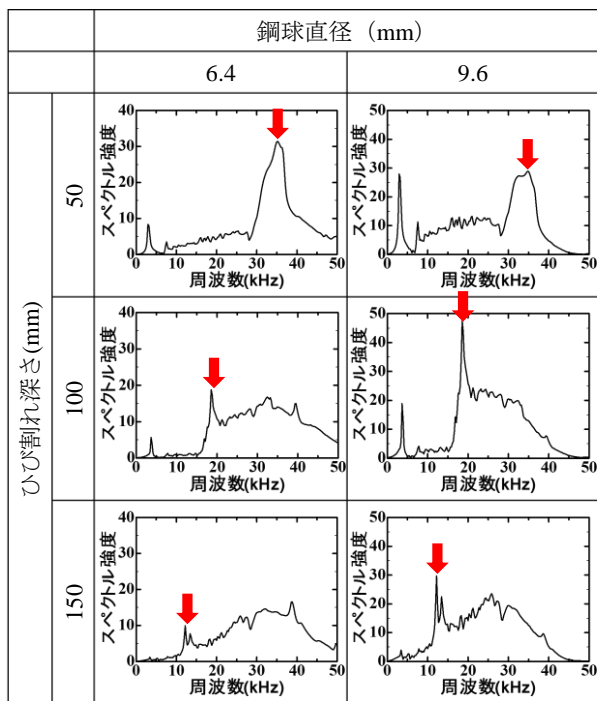


図-7 受信波形全体から FFT により求めた周波数スペクトル

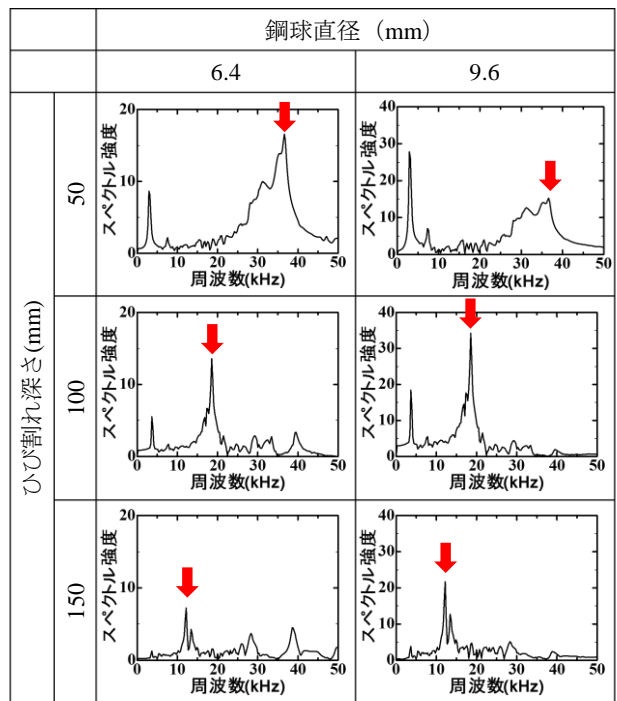


図-8 表面波を除去後に FFT により算出した周波数スペクトル

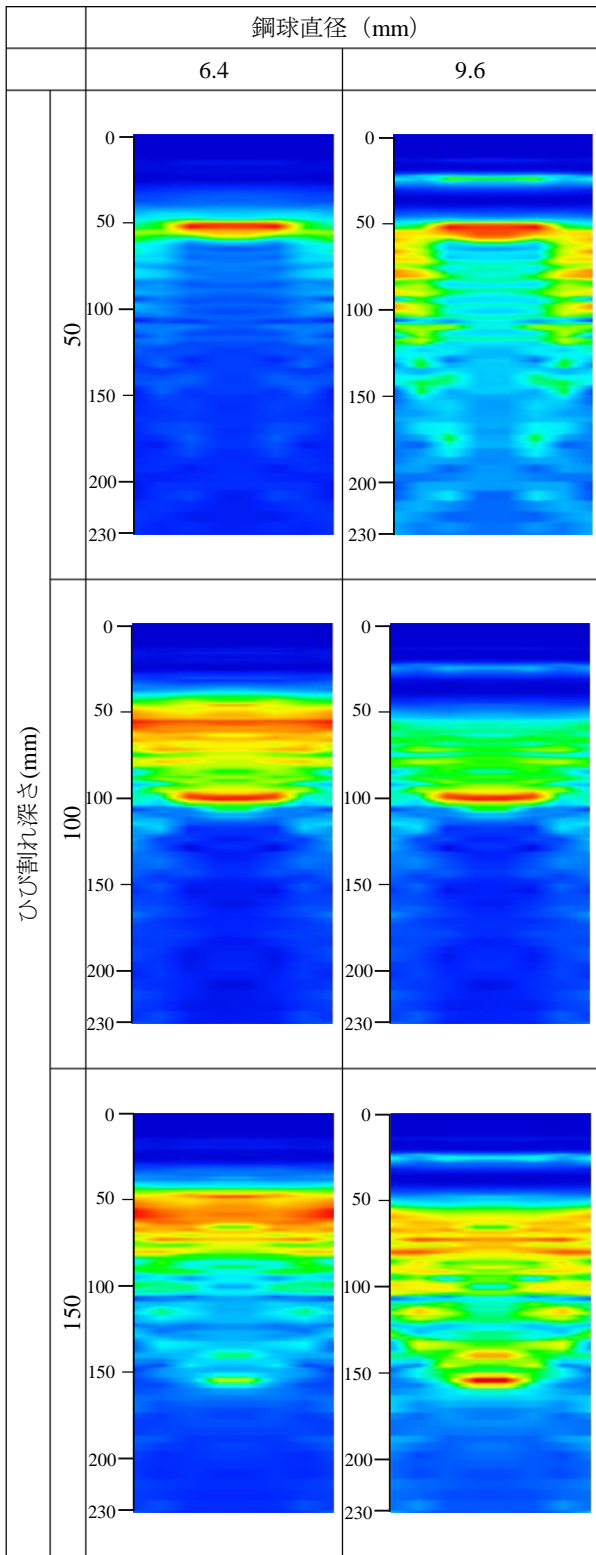


図-9 受信波形全体をもとに求めた可視化画像

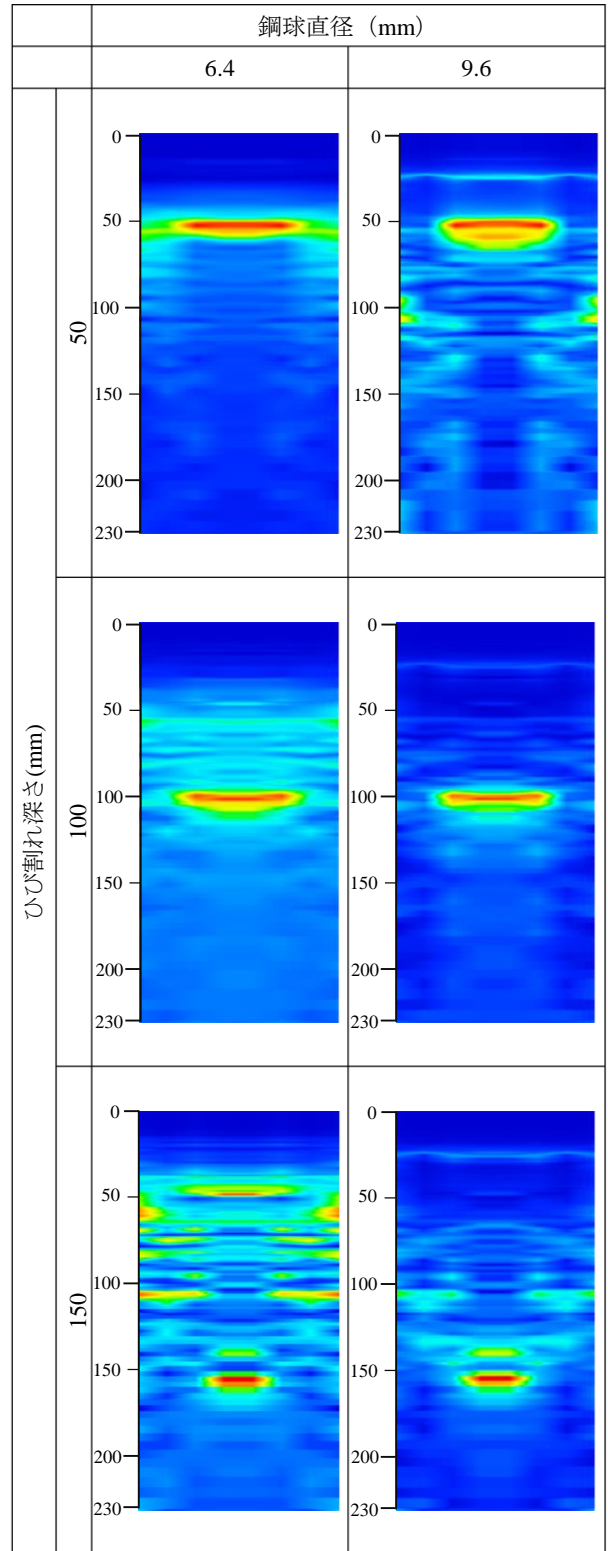


図-10 表面波による影響の除去後に求めた可視化画像

画像全体に反射強度の大きな領域が出現し、水平ひび割れの可視化が困難となっていることがわかる。これは、水平ひび割れの位置が深くなるにつれて縦波共振現象に比較して表面波による影響が相対的に大きくなるため、縦波共振現象による周波数成分が表面波に起因する周波数成分に覆い隠されたように可視化画像に反映されたためであると考えられる。そこで、表面波に相当する時間帯を除去後に周波数分析を行うことで求めた可視化画像を図-10に示す。図より、図-9においてひび割れ深さが深くなるにつれて画像全体に分布していた成分は取り除かれ、水平ひび割れの深さ及びその平面的な広がりを概ね可視化出来ることが明らかとなった。ここで、表面波除去後の可視化画像(図-10参照)において鋼球直径の違いによる影響を考察する。ひび割れ深さ50mmの場合では、直径6.4mmの鋼球を用いて得られた画像の方がひび割れ深さでのスペクトル強度が相対的に高く、直径9.6mmの場合より鮮明に欠陥を可視化できている。この理由として、5.3において考察したとおり、直径9.6mmの鋼球によって入力される周波数の上限が、縦波共振周波数を下回っているためであると考えられる。これに対してひび割れ深さ150mmでは、直径9.6mmの鋼球を用いた画像の方が欠陥をより鮮明に可視化できている。この理由としては、直径6.4mmの鋼球の上限周波数はひび割れに相当する縦波共振周波数を十分に上回っているものの、直径9.6mmに比べ縦波共振周波数でのスペクトル強度が小さいことが考えられる。そのためひび割れとの間で多重反射が生じるものの周波数スペクトル上においてもひび割れの深さと無関係な成分が現れ、それが可視化画像に反映されたものと考察される。

## 7. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 衝撃弾性波法による計測を有限要素法による3次元衝撃応答解析を用いてシミュレーションし、得られた受信波形から表面波に相当する範囲を取り除

いた波形に対して高速フーリエ変換して周波数スペクトルを算出した結果、水平ひび割れによって生じる理論上の縦波共振周波数以外の周波数領域における周波数成分を低下させることが可能であった。

- (2) 本研究で提案した可視化手法を用いた水平ひび割れの評価では、表面波を除去した波形を用いることで、水平ひび割れまでの深さおよびその平面的な広がりの程度を2次元の可視化画像として表すことができた。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)25420462)の援助を受けて行ったものである。また、研究を遂行する過程で、東北学院大学 教授 李 相勲先生にご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 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) 例えば,西上康平,内田慎哉,鎌田敏郎,李相勲,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,コンクリート工学年次論文集,Vol.35, No.1, pp.1903-1908,2013
- 3) 例えば,鎌田敏郎,内田慎哉,前裕史,山本健太:弾性波の入力方法がインパクトエコー法によるコンクリート版厚推定に与える影響,材料,Vol.58, No.8, pp.684-690,2009.8
- 4) Sansalone, M. J. and Streett, W. B.: Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.159-166,1997.
- 5) 川嶋雅道,鎌田敏郎,内藤翔太,六郷恵哲:インパクトエコー法により検出可能なコンクリート中の空隙の大きさや深さについて,コンクリート工学年次論文集,Vol.27, No.1, pp1693-1698,2005