

論文 衝撃弾性波法と開口合成法を併用した RC 床版の水平ひび割れ検出手法の提案

大野 健太郎*1・萩原 将*2・上野 敦*3・宇治 公隆*4

要旨：本研究では、RC 床版内の水平ひび割れ位置を非破壊にて推定するため、人工欠陥を埋設した供試体に衝撃弾性波法を適用し検討した。弾性波の多重反射理論に基づく水平ひび割れの検出方法では、床版厚に応じた鋼球径を選定することで平面的な欠陥位置は推定可能であるが、その深さを推定することは困難であった。次に、可視化による欠陥位置推定のため、欠陥直上での測定波形から健全供試体での測定波形を差し引いた差分波形を開口合成法の入力値とし、水平ひび割れの検出性能評価を行った。その結果、欠陥深さ 115mm および 125mm では欠陥径 60mm 以上の位置が推定可能となり、浅い欠陥では位置の推定精度が低くなった。

キーワード：鉄筋コンクリート床版、水平ひび割れ、衝撃弾性波法、開口合成法、差分波形

1. はじめに

道路橋 RC 床版は、交通荷重による疲労損傷や凍結防止剤由来の塩化物イオンの供給による鉄筋腐食、および鉄筋腐食に伴う水平ひび割れの発生など、劣化の進行が懸念されており、国土交通省国土技術政策総合研究所の調査結果¹⁾によれば、上部構造の損傷による架替理由の中で床版損傷の割合が比較的高いことが記されている。

RC 床版の損傷の中でも、図-1 に示すような床版内部に生じる水平ひび割れは、床版上面や床版下面などの外観からは目視確認することができず、各種非破壊試験およびコア削孔による目視確認などによる調査が実施されている。ここで、非破壊試験による水平ひび割れ検出の検出性能が比較的高いとされる衝撃弾性波法を用いた既往の研究²⁾によれば、アスファルト舗装上からの適用において、水平ひび割れを模擬した人工欠陥の直径が 200mm 以上の場合に検出可能とされ、直径 100mm 以下では検出が難しいと報告している。また、RC 床版を対象とし、インパルスハンマと加速度計を用いて打撃試験を行い、得られた周波数応答関数を入力値として自己組織化マップを適用した事例³⁾では、直径 200mm 以上の欠陥は判別可能であるが、直径 100mm の場合は検出できないとされている。すなわち、水平ひび割れを模擬した内部欠陥の直径が小さい場合、衝撃弾性波法の適用性は十分ではないことがわかる。

これらの既往研究は、検出された弾性波の時刻歴波形に対し、フーリエ変換による周波数解析を行い、卓越周波数や周波数分布の特性から水平ひび割れ検出の評価を試みたものである。すなわち、弾性波がセンサに到達してから減衰するまでの波形を対象とし、弾性波がセンサ

設置面と欠陥の間で多重反射する原理に基づくものである。一方、弾性波の内部欠陥から生じる反射波の第 1 波を捉えることができれば、内部欠陥の位置を特定できる可能性があるが、衝撃弾性波法では入力周波数が低く、入力信号中に反射波成分が埋もれる課題がある。

本研究では、RC 床版内に生じた水平ひび割れの深さ方向を含めた位置の推定を目的とし、衝撃弾性波法により得られた時刻歴波形に対し、弾性波の多重反射理論に基づく周波数解析⁴⁾を用いた水平ひび割れ検出手法について課題を整理した。次に、課題解決のために、健全コンクリートでの測定波形と水平ひび割れ位置での測定波形を比較し、水平ひび割れから生じる反射波成分の抽出を試み、開口合成法を援用した可視化手法により水平ひび割れ位置の推定手法を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の概要図を図-2 に示す。供試体は、800×800×160mm とし、鉄筋は昭和 39 年鋼道路橋設計示方書に準じて配置した。供試体は 4 体作製し、Case1 を健全供試体(水平ひび割れ無し)とし、Case2, Case3 および Case4

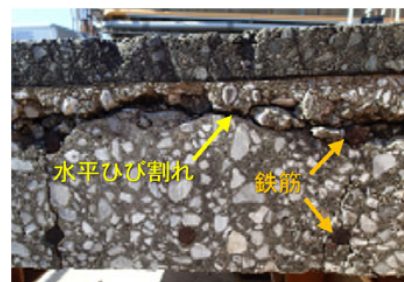


図-1 RC 床版の水平ひび割れの例

*1 首都大学東京 都市環境学部都市基盤環境学科助教 博士(工学)(正会員)

*2 首都大学東京 都市環境学部都市基盤環境学科

*3 首都大学東京 都市環境学部都市基盤環境学科准教授 博士(工学)(正会員)

*4 首都大学東京 都市環境学部都市基盤環境学科教授 博士(工学)(正会員)

の供試体中には、図-2に示すように直径 60, 120, 180, 240mm, 厚さ 1mm のスチレンボード (以降, 人工欠陥と称する) を埋設した。人工欠陥埋設位置は, Case2 では深さ 35mm (上縁鉄筋直下), Case3 では深さ 115mm (下縁鉄筋直上), Case4 では深さ 125mm (下縁鉄筋直下) とした。表-1 にコンクリートの計画配合を示す。コンクリートの材齢 28 日における圧縮強度は 39.2N/mm², 弾性係数は 25.0kN/mm² であった。

2.2 衝撃弾性波法の測定概要

(1) 1 点入力 1 点検出による方法

図-3 に示すような格子点を供試体上面に 50mm 間隔で設定し, それぞれの格子点上を鋼球で打撃し, 打撃位置から右側 25mm の位置に加速度計を設置して弾性波を記録した。なお, 使用した鋼球は, 床版厚が 160mm であることから, 版厚推定時に推奨される鋼球の直径を文献⁴⁾を参考に 11.0mm とした。さらに, 水平ひび割れ直上では, 弾性波の反射源となる人工欠陥までの距離が短くなることを想定し, 入力弾性波の周波数成分がより高くなる直径 3.2mm および 6.4mm の鋼球も併せて使用した。

弾性波の検出には圧電型加速度計 (感度 20mV/m/s², 周波数範囲 (±3dB) 0.1~10,000Hz) を 1 個使用し, 両面テープにより接着した。検出信号は, サンプル時間間隔 0.1μs にて 50,004 個の振幅値データとして記録した。なお, 本検討では測定波形のうち 32,678 個の振幅値データを高速フーリエ変換し, 卓越周波数を求めた。

(2) 開口合成法のための 5 点入力 4 点検出による方法

本検討では, 床版内の人工欠陥を対象に深さ方向を含めた位置の推定を目的として計測を行った。すなわち, 2.2(1)と同じ加速度計を 50mm 間隔で 4 個供試体に貼付し, 図-4 に示す位置にて鋼球で打撃し, 弾性波を検出した。センサの設置位置および打撃位置は人工欠陥直上とした (図-3)。なお, 使用した鋼球は 2.2(1)と同じ 3 種類である。弾性波の検出は, サンプル時間間隔 0.1μs にて 5,004 個の振幅値データとして記録した。

3. 弾性波の多重反射理論に基づく水平ひび割れの検出

本検討では, 弾性波の多重反射理論に基づいた卓越周波数による部材厚さの推定方法⁴⁾を利用して, 人工欠陥検出性能を検討する。図-5 に示すように, 鋼球により励起された弾性波は, 床版底面あるいは水平ひび割れで繰り返し反射が生じ, その結果, 周波数スペクトル上には反射距離に応じたピークが出現する。すなわち, 水平ひび割れが存在する場合は, 健全部と比較して卓越周

波数が高くなると考えられる。

ここで, 卓越周波数を用いた部材厚さ推定は, 式(1)を用いて算出される。

$$L = \frac{V}{2f_0} \quad (1)$$

ここに, L : 部材厚さ(m), V : 弾性波伝搬速度(m/s), f_0 : 基本周波数(Hz)である。

なお, 式(1)中の基本周波数 f_0 は, 弾性波の入力面とこれに対向する面との間で 1 波長となるときの振動による周波数のことを指し⁴⁾, 通常, 周波数解析結果の卓越周波数を用いることが一般的である。ここで, 弾性波伝搬速度を 4,000m/s, 部材厚さを供試体厚さの 0.16m とすると, 式(1)より基本周波数は 12.5kHz となる。すなわち, 本手法において 12.5kHz 近傍の卓越周波数が得られた場

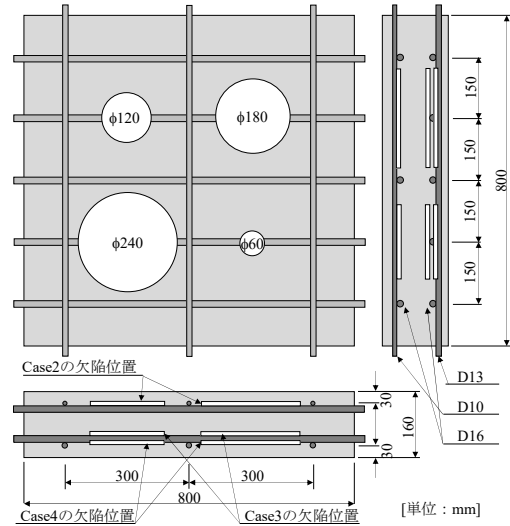


図-2 供試体概要

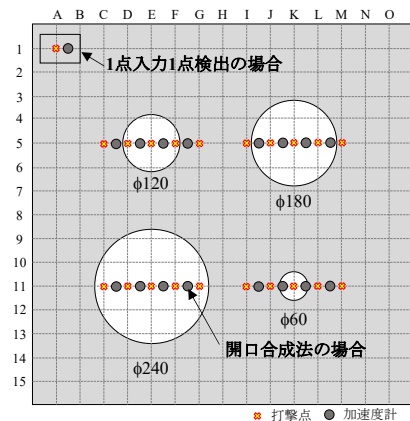


図-3 弾性波の入力点と検出点

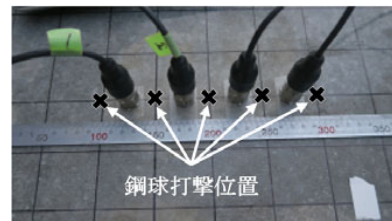


図-4 5 点入力 4 点検出のセンサ設置状況

表-1 コンクリートの計画配合

粗骨材の最大寸法 [mm]	スランブ [cm]	水セメント比 [%]	空気量 [%]	細骨材率 [%]	単位量[kg/m ³]				
					W	C	S	G	A
20	8.0	50	4.5	45.6	172	344	790	957	1.376

合には測定箇所において水平ひび割れは無いと判断され、水平ひび割れが存在する場合には水平ひび割れとコンクリート打撃面との間で弾性波が多重反射し、卓越周波数は高くなることが予想される。

図-6に1点入力1点検出での卓越周波数分布を示す。なお、コンター図のカラー指標は、0~25kHzの範囲とし、卓越周波数が25kHzの場合には深さ80mm位置近傍に水平ひび割れが存在することを示唆するものである。

まず、健全供試体においては、鋼球径11.0mmの場合のみに想定された卓越周波数が供試体のほぼ全面で得られ、鋼球径3.2および6.4mmでは想定された卓越周波数の2倍の周波数が得られている。これは、鋼球径3.2および6.4mmにより入力される弾性波の周波数が床版厚に対応する基本周波数よりも高いために生じた結果であると考えられる。すなわち、本供試体における版厚推定に適切な鋼球径は、11.0mmであることを裏付けるものである。次に、人工欠陥を埋設したCase2, Case3およびCase4の結果では、版厚推定に適する鋼球径11.0mmにおいて、直径120, 180, 240mmの人工欠陥直上で版厚相当の基本周波数よりも低い周波数が得られており、直径60mmの欠陥上では周波数の変化は認められない。また、鋼球径3.2mmおよび6.4mmの結果では、人工欠陥埋設位置が35mmの場合には版厚による基本周波数よりも低い周波数が得られ、埋設位置115mmおよび125mmでは人工欠陥上において周波数の変化は認められない。さらに、Case2, Case3およびCase4の鋼球径6.4mmの場合で

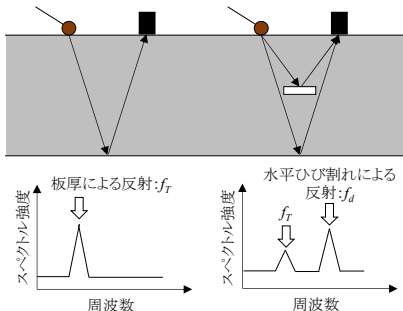


図-5 多重反射理論に基づく水平ひび割れの検出原理

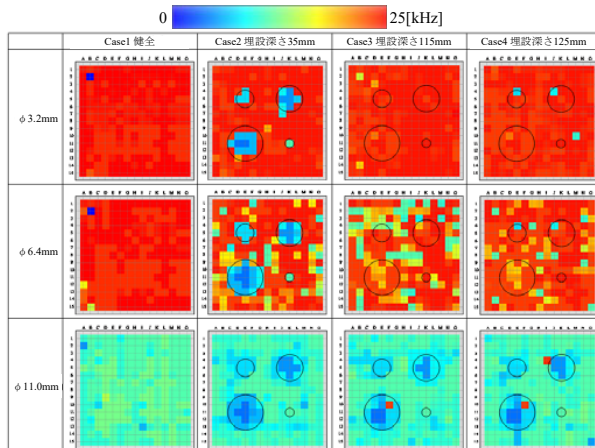


図-6 1点入力1点検出での卓越周波数分布

は、健全な領域において健全供試体とは異なる周波数が得られた。

以上のことから、卓越周波数のみに着目した弾性波の多重反射理論に基づく水平ひび割れの検出手法は、版厚に応じた鋼球径を選択し、版厚に相当する卓越周波数以外の周波数が検出される場合には水平ひび割れの存在が示唆されるが、その深さは判断できない結果となった。

4. 差分波形を用いた開口合成法による水平ひび割れ可視化手法

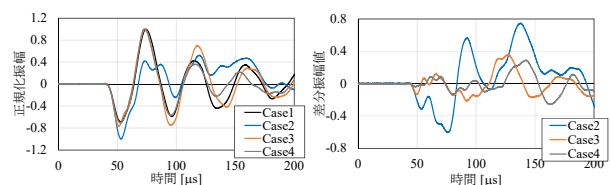
4.1 開口合成法の入力値

3章での検討において、弾性波の多重反射理論に基づく方法では、水平ひび割れの平面的な位置はある程度推定可能であるが、その深さの推定は困難とされた。本章では、水平ひび割れの位置および深さ推定について、開口合成法を採用した推定手法を検討した。

弾性波の反射は、弾性体中を伝搬する過程において、音響インピーダンス（密度と弾性波速度の積）の差により生じるとされる。すなわち、検出された弾性波には人工欠陥からの反射波が含まれると考えられるが、弾性波入力点からの直達波（主に、表面波）成分が卓越し、直接反射波を捉えることは困難である。そのため、ここでは、健全なコンクリートを伝搬した波形と人工欠陥直上で得られた波形を比較し、両者の関係から人工欠陥からの反射波を捉える方法を検討した。

図-7に各供試体のK5地点にて、直径3.2mmの鋼球で打撃した際の受信波形（振幅値は各波形の最大値で正規化）および人工欠陥直上部の波形から健全供試体Case1の波形を引いた差分波形を示す。図-7(a)より、健全供試体Case1と比較して人工欠陥直上では受信波形が時間経過に伴い異なり、Case2, Case3, Case4では人工欠陥埋設深さに応じてCase1の波形との差が生じている。さらに、図-7(b)より差分値の大きさは人工欠陥埋設深さが浅いCase2が最も大きく、Case3やCase4のように埋設深さが深いほど小さいこともわかる。すなわち、差分波形は人工欠陥からの反射情報を有すると考えられる。

本研究では、水平ひび割れ位置を可視化により推定するため、衝撃弾性波法との組合せ実績がある開口合成法⁵⁾を適用した。開口合成法は、反射源から到達する弾性波を複数のセンサにて受信し、要素分割した計測対象内にて振幅値を重ね合わせることで反射位置をより鮮明に表



(a) 測定波形

(b) 差分波形

図-7 鋼球径3.2mmでの測定波形と差分波形

現する手法であり、測定波形中のノイズなどの反射源とは関係のない情報を相殺することができる。本検討においても開口合成法に差分波形を適用することで、断面内の水平ひび割れ位置の推定が視覚的に可能と考えられる。

ここで、開口合成法の入力値は、前述の健全供試体を基準とした差分波形において、反射とは関係ないと想定される振幅の影響を低減させる目的で式(2)に示す極性を反映させた差分二乗値を入力値とした。

$$A(i, j) = (W_2(i, j) - W_1(i, j)) \times \frac{|W_2(i, j) - W_1(i, j)|}{|W_2(i, j) + W_1(i, j)|} \quad (2)$$

ここに、 $A(i, j)$: 開口合成法の入力値、 $W_1(i, j)$: i 点で弾性波を入力したときの j 点で測定された波形を最大振幅により正規化したものであり基準波形と称する、 $W_2(i, j)$: i 点で弾性波を入力したときの j 点で測定された波形を最大振幅により正規化したものであり比較波形と称する。

4.2 健全供試体間での測定結果としきい値設定

開口合成処理された結果は、断面内のコンター図として表現されるが、その際、コンターの指標（最小値と最大値）が解析結果によって変化する。ここでは、健全な供試体同士の波形を差分することで、人工欠陥が存在しない場合の最大値を求め、水平ひび割れ検出のためのコ

ンター指標の下限値について検討した。

図-8 に健全供試体 Case1 の K5 地点を測定の中央部とした測定波形セット（基準波形）と、K11 地点を測定の中央部とした測定波形セット（比較波形）および両者の差分波形を示す。これより、両測定点において1~3CHの測定波形は比較的似た波形を示し、差分波形の振幅は小さい。一方、4CHの場合ではK5地点の測定波形において負の振幅が大きく、差分波形が他のセンサと比較して最も大きくなっている。これは、4CHセンサの設置状態が要因と考えられ、健全な供試体間においてもこのような測定誤差を有することがわかる。次に、これらの差分波形に開口合成法を適用した解析結果を図-9に示す。なお、図中のカラーバー中にコンター指標の最小値および最大値を示している。これら計測点は、計測位置の違いはあるものの、同一供試体のコンクリート部分を打撃した結果であり、この領域に反射源に相当するものは版厚以外に存在しないと考えられる。よって、本結果の最大値以下は水平ひび割れ位置推定に影響を及ぼさないと考え、図-9で得られた最大値よりも大きい値をコンター指標の下限値とし、0.3をしきい値として水平ひび割れ位置の推定を行うこととした。

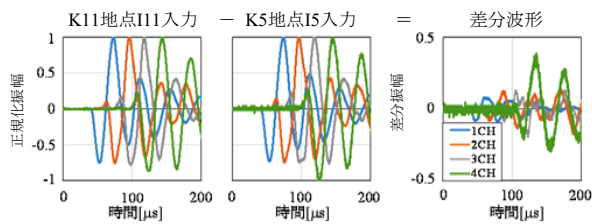


図-8 健全部の測定波形

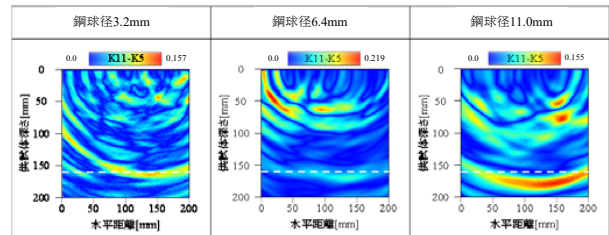


図-9 健全供試体間の開口合成解析結果

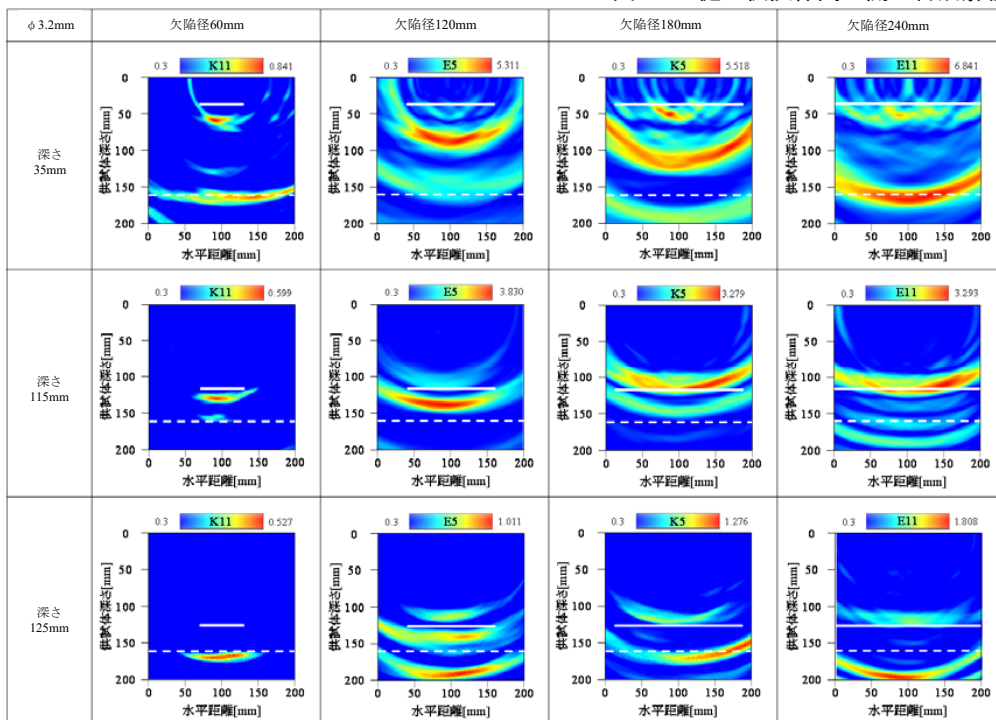


図-10 鋼球径 3.2mm の開口合成解析結果

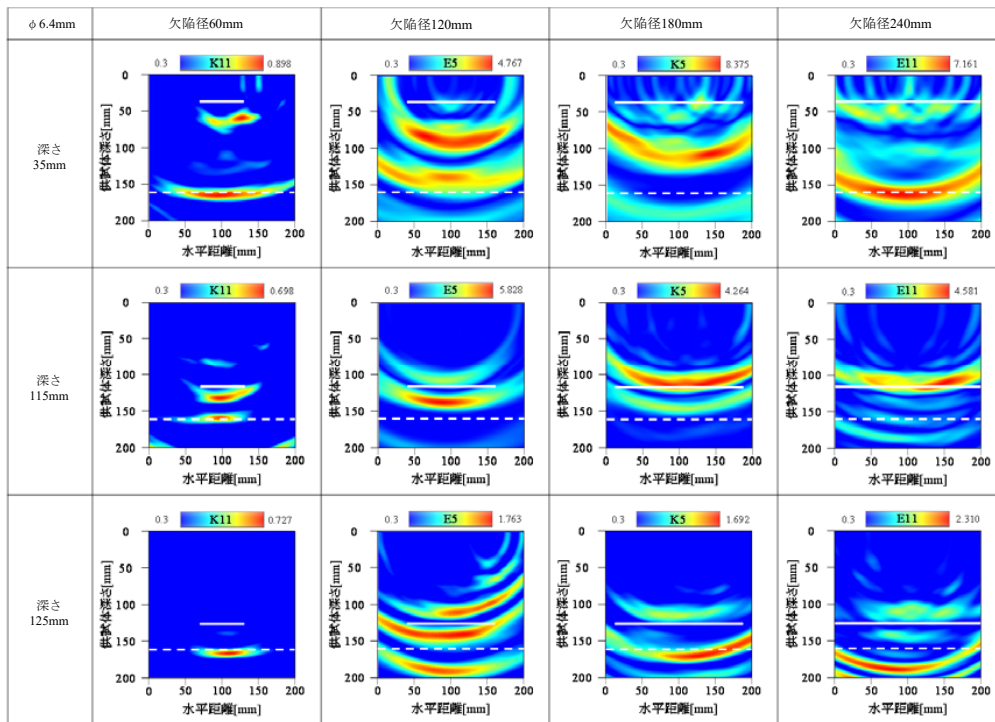


図-11 鋼球径 6.4mm の開口合成解析結果

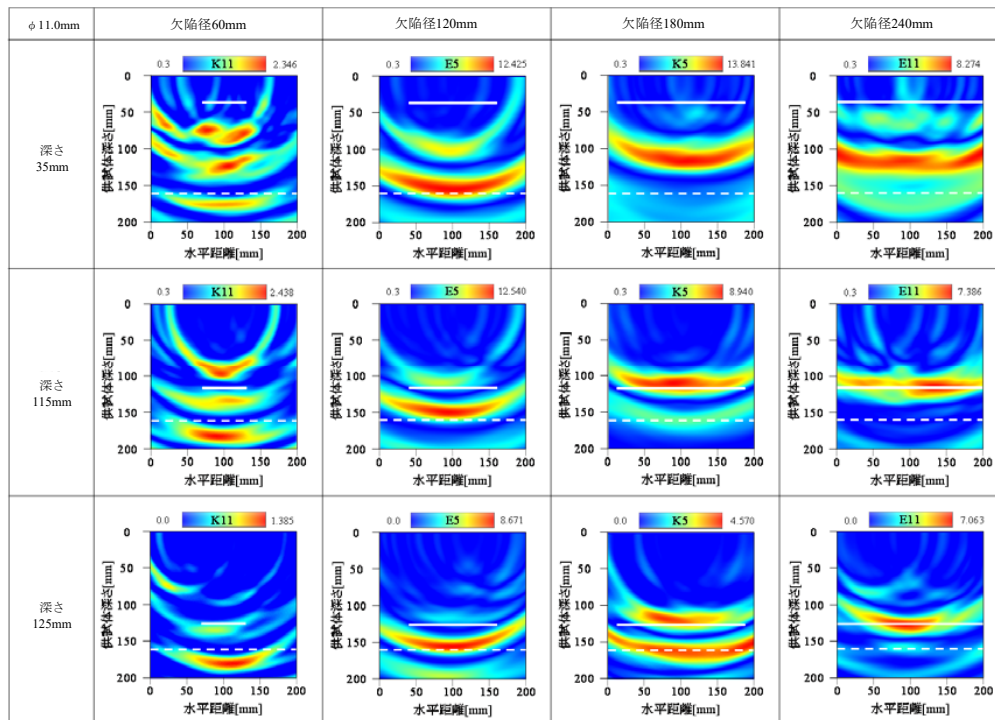


図-12 鋼球径 11.0mm の開口合成解析結果

4.3 差分波形を用いた開口合成の解析結果

図-10 から図-12 に直径 3.2mm, 6.4mm および 11.0mm の鋼球における開口合成法による解析結果をそれぞれ示す。なお、図中のコンター指標は、下限値を 0.3 とし、最大値はそれぞれの解析結果の最大値とした。図中の白破線は供試体の厚さ 160mm を表しており、白線は人工欠陥埋設位置を示している。

図-10 に示す鋼球直径 3.2mm の結果では、人工欠陥

埋設深さが浅い 35mm の場合、人工欠陥位置よりも深い位置で差分二乗値（以降、反射強度と称する）が高く、人工欠陥幅が大きくなると人工欠陥位置に相当する位置で反射強度が高くなり、さらに部材厚相当の位置においても高反射が出現している。人工欠陥埋設深さ 115mm では、全ての欠陥径において高反射が得られており、欠陥位置と対応する結果となっている。また、深さ 125mm の欠陥では、欠陥径 60mm では検出ができていないが、

表-2 本手法による欠陥検出性能の一覧

		欠陥深さ	欠陥径			
			60mm	120mm	180mm	240mm
鋼球径	3.2mm	35mm	△	△	△	○
		115mm	○	○	○	○
		125mm	×	○	○	○
	6.4mm	35mm	△	△	△	○
		115mm	○	○	○	○
		125mm	×	○	○	○
	11.0mm	35mm	△	△	△	△
		115mm	○	○	○	○
		125mm	○	○	○	○

○：人工欠陥の存在と位置を推定可能
 △：欠陥の存在は示唆されるが、深さの推定精度は低い
 ×：推定不可

120mm 以上の欠陥径では欠陥部で反射が得られている。ここで、人工欠陥埋設深さが浅い場合には、欠陥直上コンクリートのたわみ振動が生じると考えられ、欠陥からの反射波以外にたわみ振動が影響した結果、高反射強度出現位置が欠陥位置と対応しない可能性が考えられる。

次に、図-11 に示す鋼球径 6.4mm では、人工欠陥埋設深さ 35mm および 115mm では鋼球径 3.2mm と同様の結果となり、浅い人工欠陥の検出精度は高いとはいえず、115mm 深さの人工欠陥は的確に捉えていると考えられる。また、人工欠陥深さ 125mm では、鋼球径 3.2mm の結果よりもやや高い反射が得られ、欠陥径 60mm を除き欠陥検出ができていていると考えられる。

鋼球径 11.0mm (図-12) では、鋼球径 3.2mm および 6.4mm と同様に、人工欠陥深さが 35mm では、高い反射が断面内に認められるが欠陥位置との対応は取れていない。一方、埋設深さ 115mm および 125mm では欠陥径が 60mm 以上の全ての場合にその位置を的確に表している。

本手法による欠陥検出性能について、欠陥径と欠陥深さおよび鋼球径の関係を表-2 に示す。ここでは、4.2 の検討よりコンクリート中に反射源となる欠陥が存在しない場合のしきい値を設定しており、供試体厚さ 160mm までの範囲において反射源が得られた場合を欠陥有りと判断し、その位置が欠陥位置と対応する場合を○、反射源位置が不正確であるが反射源が供試体断面内に認められる場合を△、断面内に反射源が存在しない場合を×として評価した。表より、欠陥埋設位置が浅い場合には全ての鋼球径において欠陥の存在は示唆されるが推定位置の精度が低い。ここで、岩立ら⁹⁾によれば、開口合成法の分解能は弾性波の周波数に依存することが示されており、埋設深さが浅い欠陥を検出するためには、入力周波数を高くする必要があると考えられ、今後、弾性波の入力方法および検出方法を含めて検討する必要がある。一方、欠陥埋設深さが 115mm 以上の場合には、欠陥検出精度は高く、特に鋼球径 11.0mm では埋設深さ 115mm および 125mm では欠陥径 60mm 以上の欠陥が検出可能であることが確認された。

なお、本手法の実構造物への適用に際しては、3 章にて検討した弾性波の多重反射理論に基づく水平ひび割れの検出方法にて、健全と認められる箇所にて基準波形を取得する、あるいは測定対象と同一配合のコンクリート供試体にて測定したものを基準波形とし、水平ひび割れの存在が疑われる箇所にて本手法を実施することで、水平ひび割れの深さを推定することができると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) 弾性波の多重反射理論に基づく水平ひび割れの検出方法では、床版厚に応じた鋼球径を使用することで水平ひび割れの平面的な位置を推定できるが、その深さを評価することはできなかった。
- (2) 欠陥直上で得られた波形と健全供試体で得られた波形の差分波形を開口合成法に適用した結果、鋼球径 11.0mm で弾性波を入力した場合、欠陥深さ 115mm および 125mm にて欠陥径 60mm 以上の欠陥が検出可能となった。

謝辞

本研究は、一般財団法人上田記念財団の 2019 年度研究助成を受けて実施した。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：橋梁の架替に関する調査結果 (IV)，国土技術政策総合研究所資料，No.444，pp.18-20，2008.4
- 2) 中山和也，鎌田敏郎，内田慎哉，大西弘志：衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.2113-2118，2009.6
- 3) 野内彩可，村上祐貴，井山徹郎，外山茂浩：周波数応答関数を入力値として自己組織化マップに適用したコンクリート内部の欠陥領域評価，コンクリート工学論文集，第 29 巻，pp.87-100，2018.
- 4) NDIS2426-2²⁰¹⁴：コンクリートの非破壊試験－弾性波法－第 2 部：衝撃弾性波法，一般社団法人日本非破壊検査協会，pp.13-18，2014.9
- 5) 大野健太郎，内田慎哉，岩野聡史：衝撃弾性波法による部材厚 8m の RC 供試体の反射源可視化への開口合成法の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1787-1792，2019.6
- 6) 岩立次郎，田中雅人，館石和雄，三木千壽：回転探触子を用いた開口合成システムによる超音波探傷の分解能向上の試み，土木学会論文集，No.507/I-30，pp.121-127，1995.1