

論文

非接触弾性波検出による供用中の RC 床版に対する SIBIE 法の適用

橋本勝文*, 塩谷智基**, 和田圭仙***, 河田直樹****, 上田憲寿*****

*工博, 京都大学特定准教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C3-b4S15)

**工博, 京都大学特定教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C3-b4S14)

***工修, 西日本高速道路 (株), 技術環境部構造技術課 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20 堂島アバンザ 18F)

****工博, 西日本高速道路エンジニアリング関西 (株), 土木事業本部構造技術部 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町 5-4 STD 茨木ビル 6F)

*****工学, 西日本高速道路エンジニアリング関西 (株), 土木事業本部構造技術部 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町 5-4 STD 茨木ビル 6F)

RC 床版下面からの非破壊検査手法として, 著者らが開発している SIBIE 法に基づく床版内部の三次元可視化手法について検討した. コンクリート表面での鋼球ハンマによる複数箇所の打撃とともに, 計測作業の効率化のため, 遠隔からの弾性波検出を目的としてレーザードップラー振動計を用いた非接触手法を適用した. また, 以上により得られた床版内部の三次元可視化画像と小径コア削孔による床版内部の観察結果との比較を行った.

キーワード: 非破壊検査, SIBIE 法, 弾性波, レーザードップラー

1. はじめに

我が国の社会基盤を主として構成するコンクリート構造物の老朽化に関して, 適切な維持管理システムを確立することが鋭意検討されている中で, 経年劣化に伴い発生したひび割れを対象とした保守保全作業は喫緊の課題である. このうち, コンクリート構造物の適切な維持管理を目的とした点検技術に関して, 非破壊検査手法および試験方法の簡素化ならびに効率化と, 健全性評価手法としての高い妥当性が求められており, 様々な研究開発がなされている.

道路橋を構成する鉄筋コンクリート (RC) 床版においては, 交通荷重の繰返し载荷により疲労損傷が顕在化する事例が多く報告されている¹⁾. また, RC 床版が上記の環境に曝される場合, 床版内部に補強鉄筋に沿った水平ひび割れが進展することが知られている²⁾. さらに, 繊維補強コンクリート等による増厚補強された床版においては, 新旧界面に接着性が十分に確保されていなかったことで, 上面増厚コンクリートの界面剥離を生じる場合があることが報告されている³⁾. これらの水平ひび割れは目視点検により確認することは困難であり, ひび割れの進展とともに, 所定の構造性能を発揮できなくなることは容易に想像できる⁴⁾. なお, 交通量が多い都市高速

道路を構成する RC 床版においては, 深刻な課題となっている⁵⁾.

道路交通ネットワークを維持しながら, 構造物の健全性を把握して維持管理を進める上では, 効率的な点検手法が強く求められる. この場合, 交通量の妨げとならないように, 規制を必要としない床版下面からの簡便な点検方法が適切であると考えられる. さらに, 構造物に近接する必要が無い非接触計測技術を活用することで出来る限り近接する人員を削減できることは, 調査・点検業務の効率化を推進する上では非常に重要である.

インパクトエコー法⁶⁾は, コンクリート内部の損傷あるいは欠陥を検出可能な簡便な非破壊検査手法として広く適用されている. 同手法においては, 対象とするコンクリート表面において鋼球打撃等により発生する弾性波を入力し, コンクリート内部や境界面での反射により生じる共振周波数に着目した受信信号を解析することで, ひび割れや空隙等の内部の情報を検出できる手法とされている. また, 上記の手法に基づいて, コンクリート内部を可視化することを目的として, 加速度センサあるいは AE センサにより観測される弾性波のスペクトルのピーク周波数とひび割れや空隙などの損傷からの伝搬時間に基づいた, スペクトル振幅のスタックイメージングによる後述の SIBIE 法⁷⁾が提案されている.

本論文では、上述した接触型の AE センサや加速度センサに替わって、レーザードップラー振動計 (以下, LDV) を用いて弾性波を非接触検出し、コンクリート表面を鋼球ハンマによる複数箇所の打撃を行うことで励起した弾性波の受信信号から、SIBIE 法に基づくコンクリート内部の三次元可視化手法を適用することとした。なお、供用中の高速道路床版において、アスファルト舗装上面からの赤外線画像に基づく異常箇所の検出および RC 床版下面からの打音検査による浮き・剥離箇所の検出に加えて、小径コア削孔による内部観察を行った領域に対して本手法を適用して妥当性を検証した。

2. SIBIE 法による損傷検出と三次元可視化

2.1 インパクトエコー法の原理

インパクトエコー法においては、図-1 に示すように、入力した弾性波の受信信号を FFT 処理により周波数スペクトルを求めることにより、部材厚に依存した反射による共振周波数、内部の損傷による共振周波数が観測できる。すなわち、コンクリート中を伝搬する弾性波 (P 波) の速度を C_p とすると、検出されるピーク周波数は以下の式により表されることになる。

$$f_T = C_p / 2T \quad (1a)$$

$$f_d = C_p / 2d \quad (1b)$$

ここで、 f_T : 部材厚に依存した反射による共振周波数、 f_d : 内部の損傷による共振周波数、 T および d : 部材厚および損傷深さである。

受信信号の周波数スペクトルにおいて検出される共振周波数は、コンクリート内部の損傷 (ひび割れや空隙などの不連続面) において入力された弾性波が反射することにより生じていることを利用して、任意の部材における二次元断面内での弾性波の反射位置と周波数スペク

トルにおいて求められる振幅値から弾性波の反射位置を画像化する手法が SIBIE 法である。

2.2 SIBIE 法に基づく三次元解析

従来の SIBIE 法においては、解析対象となる二次元断面を正方形要素に分割することでイメージング処理を行うとされるが、本論文では、図-2 に示すように床版下面における鋼球打撃による弾性波の送信点 (4 か所) と LDV による弾性波の受信点 (1 か所) を設定して、三次元空間内の格子点 (空間位置座標) における弾性波の伝播および反射を想定した共振周波数のスペクトルを用いる。

図-3 に示すように解析対象を三次元空間内 (格子点の間隔は 10mm) の弾性波の上述の各送信点および受信点を結ぶ直線上の床版深さ方向への平面内としながら以下の手順により計算を行うものである。

- ① 対象床版において計測位置となる 300mm×300mm の範囲を設定する。
- ② 計測範囲の中心に LDV ターゲットを貼付け、上記範囲の角部 (4 点) を鋼球打撃 (各 10 回) する。
- ③ 300mm×300mm の範囲に対する深さ方向 (部材厚 z 方向) を解析対象空間とする。
- ④ 弾性波の反射に着目する格子点は $x=y$, $x+y=300$ 上の点のみとする。
- ⑤ 分割された各要素を構成する格子点から弾性波の送受信点への伝搬経路長さ R を求める。
- ⑥ 伝搬経路長さ R は弾性波の送信点～格子点～受信点を結ぶ最短経路とする。
- ⑦ P 波の速度を C_p として格子点で反射することで生じる共振周波数 f_R を求める。
- ⑧ 各格子点において f_R に対応する振幅を正規化して合計することにより反射強度を数値化する。
- ⑨ 数値化した反射強度と格子点の座標に基づいて三次元画像処理を行う。

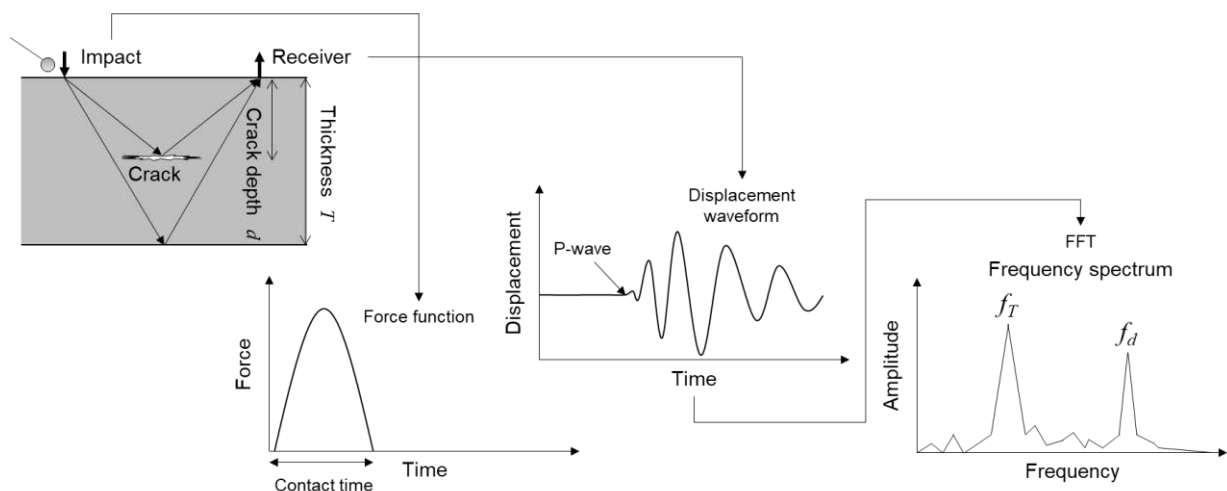


図-1 インパクトエコー法による内部損傷の検出概念

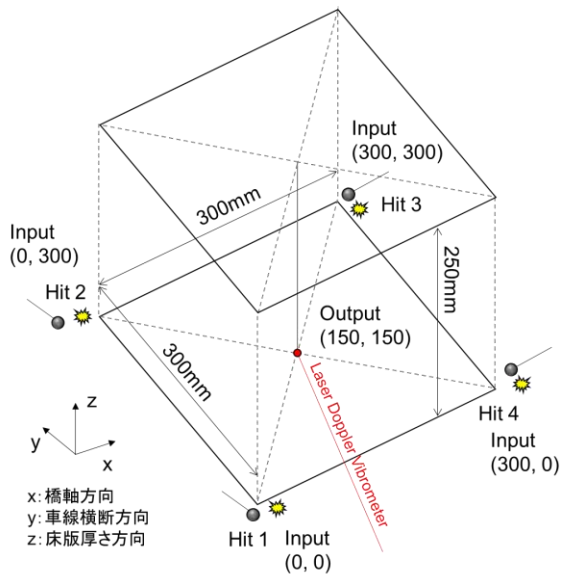


図-2 鋼球打撃および弾性波検出

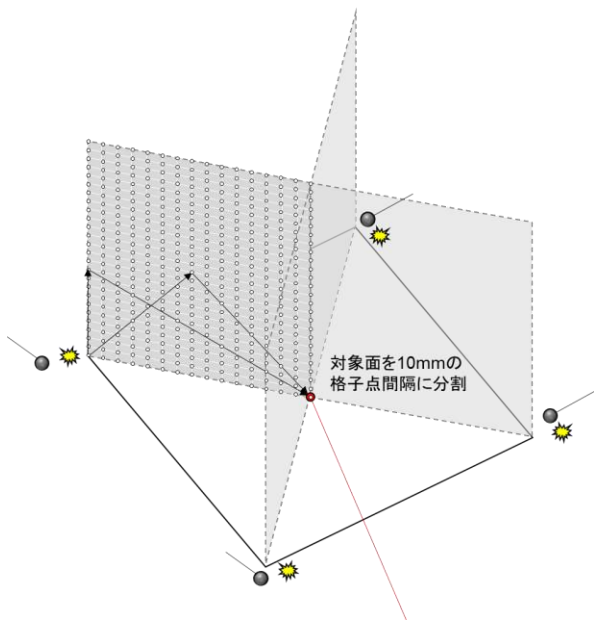


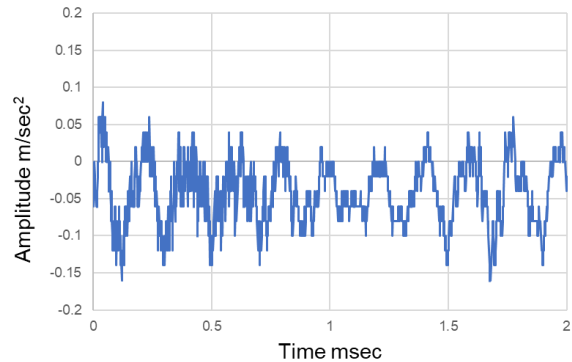
図-3 RC床版内部の解析対象面

2.3 車両交通に伴うRC床版の固有振動

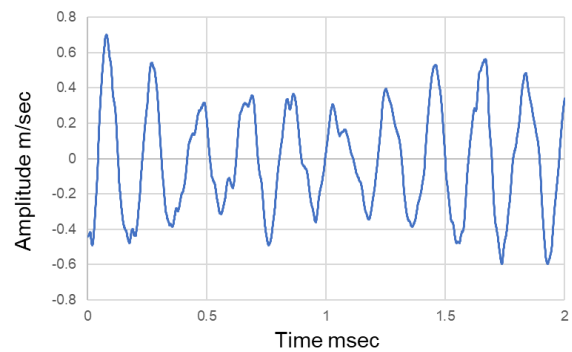
図-4 に適用した提案手法による計測の様子を示す。このとき、LDV には打撃により発生した周波数の高い弾性波成分と車両の通行に伴う橋梁の固有振動成分が受信される。計測対象床版下面に設置した LDV のターゲットと同じ位置に加速度センサを設置して、車両走行に伴う自由振動の波形（サンプリングレート：1kHz）を取得した結果を図-5 に示す。また、振動波形の FFT 解析（2048 サンプル）による周波数スペクトルを図-6 に示す。これより、加速度センサおよび LDV の受信波形から 10.7Hz、13.7Hz、20.5Hz のピークが同様に観測できていることがわかる。これらの周波数成分が鋼球打撃により LDV で検出される受信信号のノイズとなって周波数解



図-4 提案手法による計測の様子



a) 加速度センサ



b) LDV

図-5 RC床版の自由振動波形

析に影響を及ぼす可能性が考えられた。しかしながら、図-2 に示した床版厚さ方向（250mm）で床版の下面とアスファルト舗装上面で P 波の多重共振が起こる場合、仮に弾性波速度を 4000m/s とすると、共振周波数 f_R は 8kHz ($f_R=4000\text{msec}/250\text{mm}\times 2$) である。また、鋼球打撃による周波数の高い弾性波成分を検出する際には、図-7 と図-8 に示すように、自由振動による低周波成分は、LDV の受信信号（サンプリングレート：100kHz）と FFT スペクトルに基づく上述の SIBIE 法を目的とした周波数解析の範囲外があることがわかる。そのため、鋼球打撃により LDV で検出される受信信号の周波数解析においては、固有振動による低周波成分は考慮せずに周波数解析を行うことで SIBIE 法を適用した。

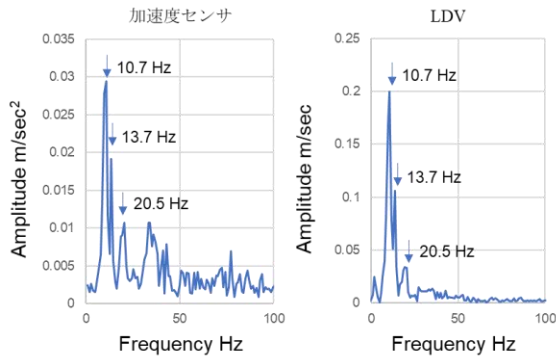


図-6 RC床版の自由振動のFFTスペクトル

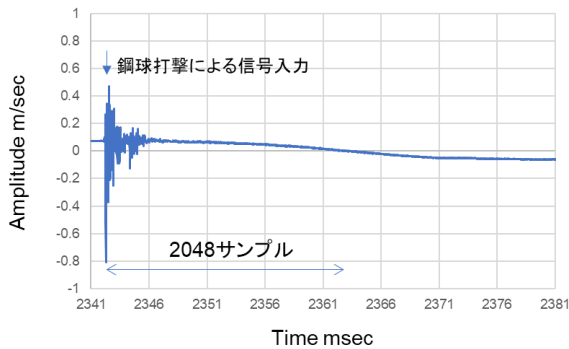


図-7 鋼球打撃によるLDVの受信信号

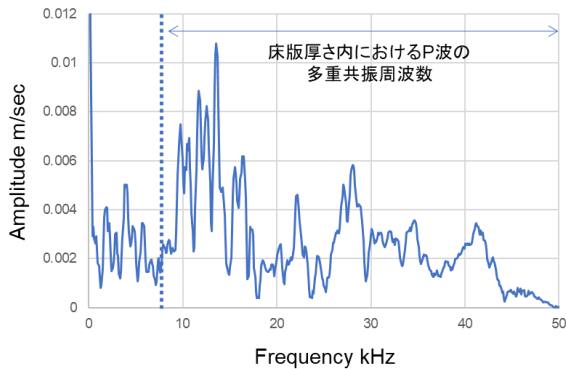


図-8 FFTスペクトル

3. 高速道路RC床版における調査結果

3.1 床版上面調査および下面調査

供用下の実際の高速道路橋RC床版を対象に事前に床版上面からの赤外線画像による異常箇所の調査、ならびにRC床版下面からの打音点検による詳細調査を行った。アスファルト舗装上面の赤外線画像に基づいて、ひび割れや土砂化による変状箇所および周辺部においては、健全箇所と比較して低い温度分布が示されることが知られている^{8),9)}。本論文に示す床版上面からの調査においても、同手法により床版内部のひび割れや土砂化などが示唆される箇所を判定した。

図-9に床版上面調査(赤外線)の結果、図-10に床

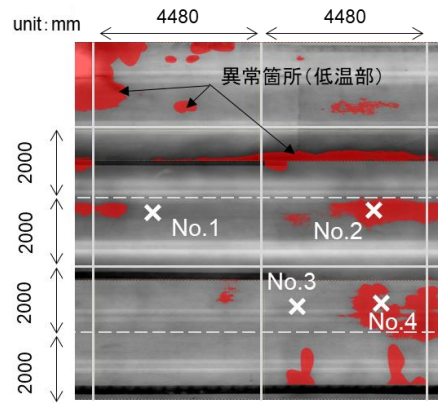


図-9 床版上面調査(赤外線)結果

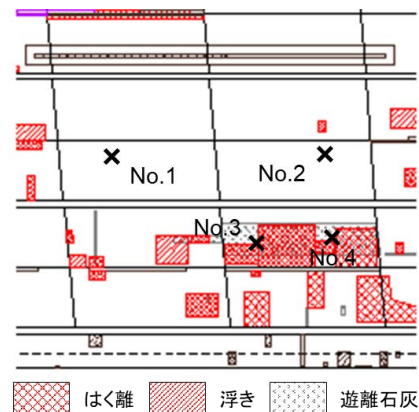
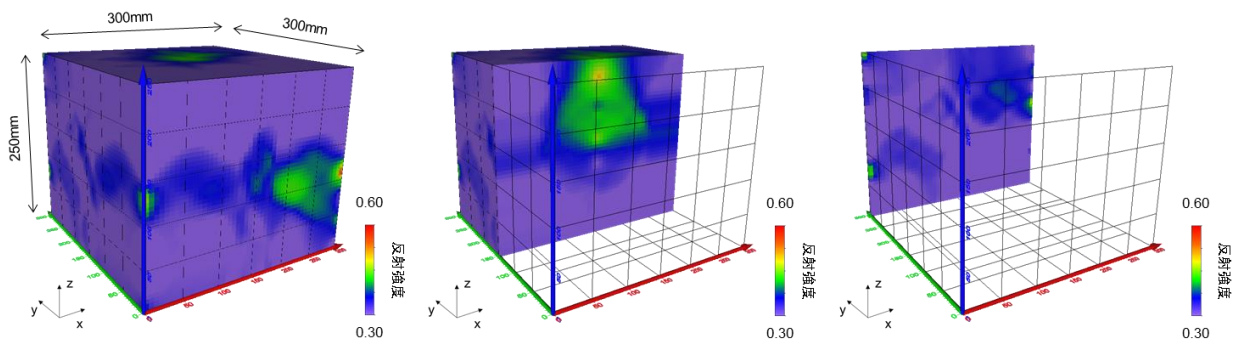


図-10 床版下面点検(詳細点検・打音検査)結果

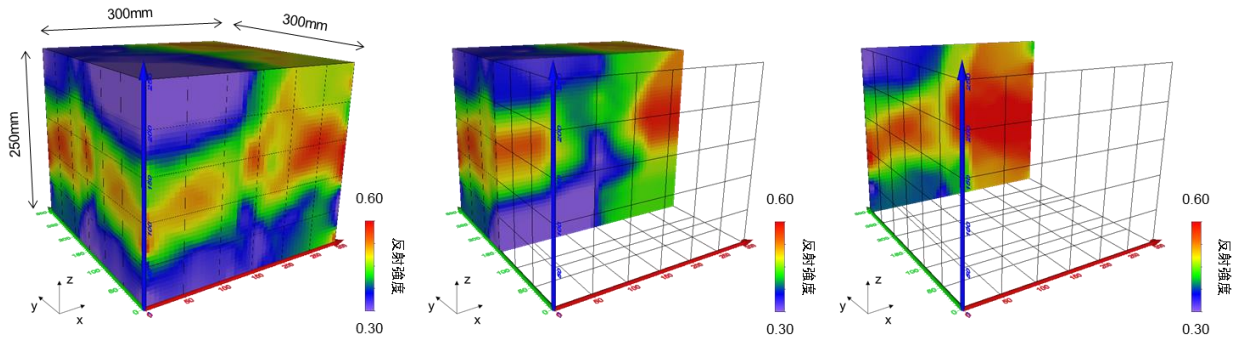
表-1 対象床版の異常箇所と断面構造

		床版上面(赤外線結果)	
		異常無	異常有
床版下面(打音検査)	浮き無	No.1	No.2
		増厚コンクリート 30~34mm	増厚コンクリート 22~30mm
	浮き有	No.3	No.4
		増厚コンクリート 16~21mm	増厚コンクリート 14~25mm
		既設RC 179~184mm	既設RC 175~186mm

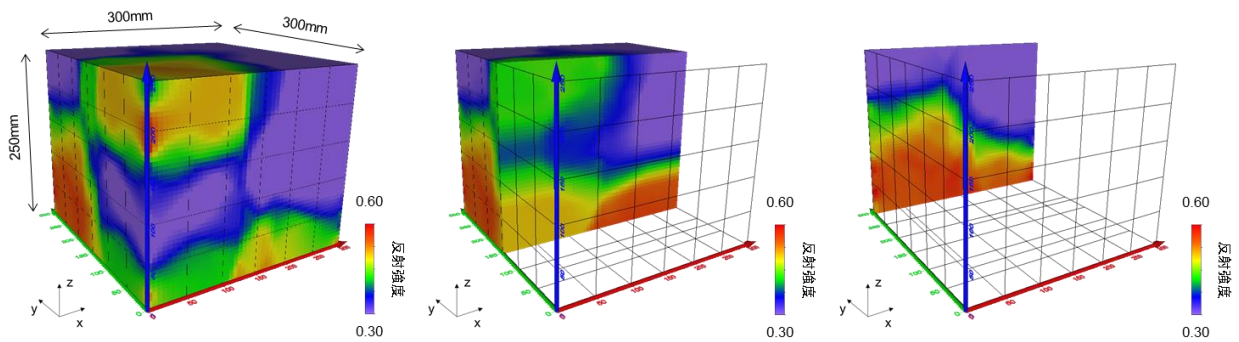
版下面点検(詳細点検・打音検査)の結果を示す。床版下面の詳細な調査により、はく離・浮き・遊離石灰が確認された箇所を位置情報として示している。以上より、床版上面増厚工法が施された床版を対象として、上面あるいは下面からの「異常あり」と「異常なし」を把握した小径コア削孔による内部観察による調査箇所の図中の4点(No.1~No.4)について、既設RC床版の厚さ、増厚コンクリートの厚さを表-1に示す。なお、上述のように、床版全体の厚さはアスファルト舗装を含めて250mmである。



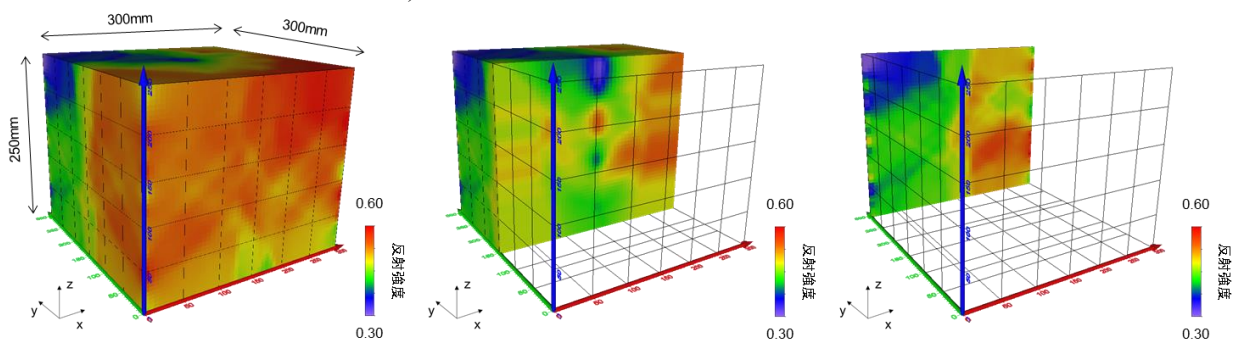
a) No.1 (上面異常：無, 下面異常：無)



b) No.2 (上面異常：有, 下面異常：無)



c) No.3 (上面異常：無, 下面異常：有)



d) No.4 (上面異常：有, 下面異常：有)

図-11 SIBIE 法に基づく反射強度の床版内部三次元可視化画像 (小径コア削孔位置: $x=150\text{mm}$, $y=150\text{mm}$)

3.2 SIBIE 法による床版内部の三次元可視化結果

図-11にSIBIE法に基づく反射強度の床版内部三次元可視化画像を示す。なお、橋軸直角方向について $y=150\text{mm}$ および 300mm の断面図とともに示す。ここでは、 $\phi 10\text{mm}$ の鋼球打撃により弾性波を励起して計測を行

った際の結果であり、ノイズと判断できる波形はデータから取り除いたうえで、10回の鋼球打撃による各スペクトルを正規化した後にスタッキング処理を施すことで反射強度の算定を行った。特に、本論文においては、各ケースの差異を明瞭に確認するため、本論文内での取り扱いとして、正規化(0~1)した弾性波の反射強度が0.3(健

全) ~0.6 (異常) となる範囲で図示している。

No.1 の結果に関して、解析対象領域内の反射強度は低く、床版からの深さが 100mm~150mm となる領域にブロードな反射の弱いピークが認められるものの、後述する異常箇所と比較しても反射強度は低く 0.4 程度となっている。健全部と判断できる反射強度が解析対象領域内全体で得られているが、ブロードに広がる他よりも比較的反射強度がやや高い部分は、既設 RC 床版と増厚コンクリートの打継ぎ面に近いために、既設部のハツリ処理に発生することが報告されている微細な損傷領域¹⁰⁾を示している可能性がある。

No.2 の結果に関して、床版からの深さが 100mm~200mm となる領域に反射の強いピークが認められる。既設部と増厚コンクリートの界面においては、小径コア削孔による内部観察によりひび割れが発生していることを確認しており、0.5~0.6 以上の高い反射強度の領域として可視化されていると考えられる。一方で、床版の深度方向すべてにおいて反射強度の高い領域も同定されているものの、深度 100mm 以下の範囲内においては概ね RC 床版下面の反射強度は低く (0.3~0.4)、下面からの詳細点検の結果 (異常 (浮き) : 無) と整合性がある。

No.3 の結果に関して、解析対象領域内では RC 床版下面に高い反射強度が分布していることが分かる。これは、下面からの詳細点検により把握したコンクリート表層部の浮き箇所に存在する水平ひび割れによるものと考えられる。また、床版からの深さが 200mm~250mm となる領域で一部に強い反射ピークが認められるが、一部を除いて上面側は反射強度が低く健全なデータを示しており、上面および下面からの点検結果 (上面異常 : 無, 下面異常 : 有) を可視化できている。

No.4 の結果に関して、一部 (打撃点: x=0mm, y=300mm) の床版下面からの深度方向は健全箇所のようにも見えるが、解析対象領域内の反射強度が高い結果となっている。上述しているように、異常箇所は反射強度が高く可視化され、健全箇所は反射強度が低く可視化されることを踏まえれば、上面および下面のいずれにも異常が有るとして判定された点検結果と同様のことが可視化画像から同定できる。

4. まとめ

本論文では、レーザードップラー振動計を使用して、鋼球打撃により励起された弾性波の受信信号の周波数スペクトルに基づいて三次元モデルに拡張した SIBIE 法を適用して RC 床版内部の可視化による異状検知に関する実構造物を対象とした場合の検討を行った。その結果、供用環境下において車両の通行により発生する固有振動の発生による低周波成分は SIBIE 法において解析対象とする周波数帯域の範囲外であり、床版上面および下面か

らの詳細な調査により把握した上面増厚コンクリートの既設 RC 床版との界面剥離による上面の異常箇所、ならびに下面の浮きが発生していた異常箇所において、提案する手法により上面あるいは下面からの「異常あり」と「異常なし」を 4 段階に判定することが可能であることが示された。今後は、ひび割れ等の変状や弾性波速度や動弾性係数等で示されるコンクリートの物性値について、SIBIE 法による可視化画像により示される反射強度との定量的な整合性について整理を進める。

参考文献

- 1) ACI Committee 215 : Consideration for design of concrete subjected to fatigue loading, ACI journal, Vol.71, No.3, pp.97-121, 1974.
- 2) Fujiyama, C. and Maekawa, K. : A computational simulation for the damage mechanism of steel-concrete composite slabs under high cycle fatigue loads, Journal of Advance Concrete Technology, Vol. 9, No.2, pp.193-204, 2011.
- 3) 稲葉尚文, 本間淳史, 今村壮宏, 徳光卓 : 増厚された RC 床版の静的載荷試験による検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.403-408, 2007.
- 4) Fathalla, E., Tanaka, Y. and Maekawa, K. : Effect of crack orientation on fatigue life of reinforced concrete bridge decks, Applied Sciences, Vol.9, No.8, 1644, 2019.
- 5) Toutlemonde, F. and Ranc, G. : Fatigue tests of cracked reinforced concrete slabs for estimating the service life of composite bridge decks, Revue Française de Génie Civil, Vol.5, No.4, pp.483-494, 2001.
- 6) Carino, N.J. and Sansalone, M. : Detecting voids in metal tendon ducts using the impact-echo method. Materials Journal of the American Concrete Institute, Vol.89, No.3, pp.296-303, 1992.
- 7) Ohtsu, M. and Watanabe, T. : Stack Imaging of Spectral Amplitudes based on Impact-Echo for Flaw Detection. NDT&E International, Vol.35, pp.189-196, 2002.
- 8) 丸山記美, 星卓見, 木村孝司, 赤外線カメラによるポットホール事前検知技術に関する基礎検討, 舗装, Vol.52, No.4, pp.14-19, 2017.
- 9) 永易慎二, 橋本和明, 松田靖博, 赤外線調査トータルサポートシステム “J システム”, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.9, pp.583-584, 2016.
- 10) 渡邊晋也, 後藤昭彦, 松本政徳, 宮永憲一, 打撃工法によるハツリ処理で生じた微細ひび割れの定量的評価方法と打継ぎ界面の付着強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.775-780, 2013.

(2020年7月17日受付)