

上面増厚コンクリート床版の内部剥離部検出へのSIBIE法の適用

(株)富士ピー・エス 正会員 博(工) ○山田 雅彦
 京都大学大学院 工博 大津 政康
 (株)富士ピー・エス 正会員 八木 洋介

キーワード：非破壊検査・弾性波・インパクトエコー法・SIBIE法

1. はじめに

近年、寒冷地や山間部の橋梁のコンクリート床版において、凍結防止剤の散布により塩害が進行し、鉄筋の腐食に伴うコンクリートのひび割れや浮き・剥離の発生が問題視されている。塩害対策として、上面を増厚したコンクリート床版についても、上面増厚部と既設床版部の界面で再劣化（剥離）が報告されている¹⁾。この再劣化については、舗装上から内部の剥離状況を把握することが困難であるため、剥離状況を調査する手法の確立が課題となっている。

そこで本稿では、上面増厚部と既設床版部の界面で剥離を有する撤去床版について、コンクリート床版内の剥離部の調査を目的として、舗装上からインパクトエコー法の画像化手法であるSIBIE法を適用した。その結果、SIBIE法を用いることで、舗装を撤去することなく、上面増厚部と既設床版部の界面での剥離部の評価ができる可能性を示したことについて報告する。

2. 欠陥検出の原理

2.1 インパクトエコー法の原理

インパクトエコー法は、弾性的な衝撃力により入力された弾性波を用いる非破壊検査手法の一種で、弾性波の周波数スペクトルのピーク周波数には、理論的には入力された弾性波が不連続面で反射することを利用し、ピーク周波数の有無により欠陥の有無を評価する手法である²⁾。その手順としては、調査対象物の表面に衝撃を加えることで弾性波を入力する。入力された弾性波は調査対象物中を伝播し、その伝播した弾性波をセンサーで検出記録し高速フーリエ変換（FFT）処理により周波数スペクトルを求める。供試体中を伝わる P 波の伝播速度を C_p 、供試体の板厚を T 、内部欠陥までの距離を d とすると、出現するピーク周波数は、式(1)、式(2)のように表される。

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

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

こうして得られた周波数スペクトル上には図-1 に示すように底部の反射による共振周波数 f_T がピーク周波数として出現し、内部欠陥部が存在する場合には、内部欠陥部からの反射による共振周波数 f_{void} でピーク周波数が出現する。

2.2 SIBIE 法の原理

前述の通り、インパクトエコー法は、弾性波の伝播状態が変化する空気などと接触する面（不連続面）から反射する弾性波を基に欠陥の有無を評価する方法であるが、弾性波が伝播する結果として得られる反射波には、欠陥部からの影響のみならず、部材の形状や大きさの影響を受けるため、周波数スペクトルにはこれらの成分が複雑に含まれる。そのためコンクリート内の欠陥部を評価するには、複雑な反射波の周波数スペクトルから欠陥部特有の成分を同定することが必要となる。

SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo) 法³⁾はこの問題を解決する

ことを目的としたインパクトエコー法の解析方法であり、反射波のスペクトル解析を行い、その結果を2次元画像に変換して可視化するものである。以下にその手順について示す。

まず、**図-2**のように解析対象の断面を正方形要素に分割する。次に、分割された各要素の中心で弾性波が反射すると仮定する。弾性波は入力点から要素中心で反射し出力点までの伝播経路を通る。その最短伝播経路を R とすると式(3)のように表される。

$$R = r_1 + r_2 \quad (3)$$

解析対象中を伝わる弾性波の速度を C_p とすると、ある分割された要素の中心で弾性波が反射することにより生じる共振周波数は、式(4)のように考えられる。

$$f_R = C_p / R \quad (4)$$

実測した周波数スペクトルにおいて、式(4)で求められる共振周波数の振幅値をその要素での反射の強さとする。この作業を各要素で行い、反射の強さを数値の大小で5段階に分類し、コンター図化することで計測対象断面の2次元画像が得られる。この画像により、欠陥部を評価する。

なお、上記の作業を行う際、足し合わせる周波数に上限・下限を設定するとする精度良く評価を行うことができる⁴⁾。本稿では、上限は剥離部以外の欠陥部が未知であるため、後述する加速度計の使用帯域の上限である40kHzとし、下限を板厚 T の反射による共振周波数である $f_T = C_p / 2T$ とした。モデル化する際の分割する正方形要素の大きさ（メッシュサイズ） Δx については計測機のサンプリングタイム Δt により次式で与えられる値とした。

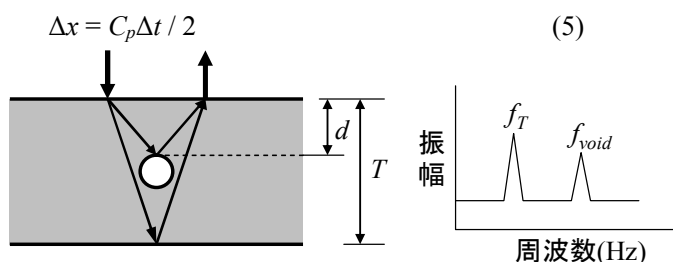


図-1 インパクトエコー法による欠陥検出の原理

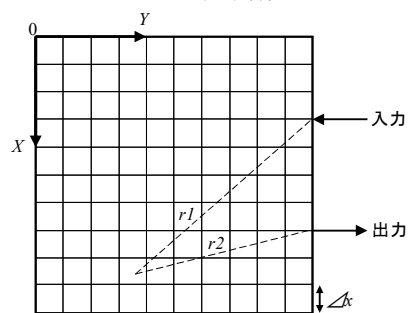


図-2 SIBIE 解析イメージングモデル

3. 調査概要

3.1 調査対象の撤去床版について

写真-1 に示す上面増厚部と既設床版部の界面の一部に内部剥離を有する撤去床版（舗装厚 70mm，床版厚 250mm）を用いて、床版内の欠陥部の調査を行った。調査位置は、**写真-2** に示す上面増厚が行われていない健全部（以降、健全部とする），および**写真-3** に示す上面増厚が行われている部分の健全部（以降、上面増厚健全部とする）と**写真-4** に示す上面増厚の剥離部（以降、上面増厚剥離部とする）の3ヶ所で行った。



写真-1 試験対象床版全景



写真-2 健全部

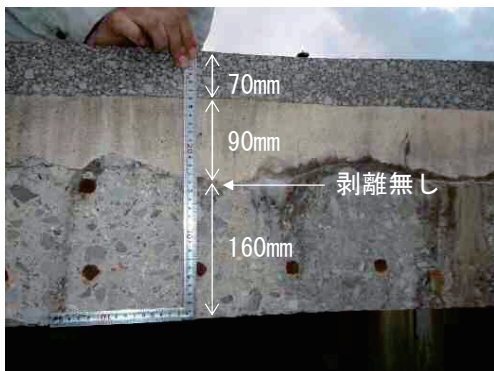


写真-3 上面増厚健全部

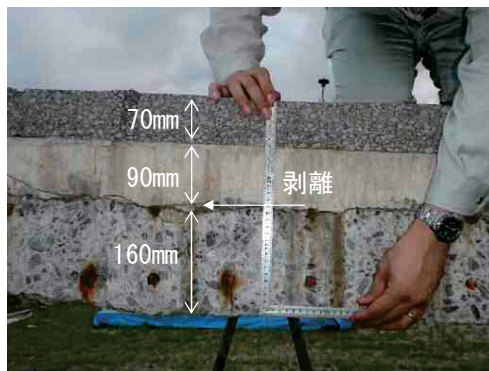


写真-4 上面増厚剥離部

3.2 調査方法

調査は、写真-5 に示すバネ式の衝撃入力装置により弾性波を入力した。反射波の計測は、図-3 に示すように、弾性波入力点の左右 50mm 離れた 2 箇所に設置した加速度計を用いて行った。計測波形は、写真-6 に示すアンプにて加速度計で検出した反射波の波形を増幅し、オシロスコープに記録した。反射波の波形データをコンピュータで高速フーリエ変換 (FFT) 処理することにより周波数スペクトルを求めた。波形記録のサンプリングタイムは $4\mu\text{s}$ とし、サンプリング数は 2048 とした。

SIBIE 法を用いる際、弾性波速度は重要なパラメータである。今回は、床版が舗装されていることから、伝播時間差を利用した弾性波速度の計測⁵⁾は適当ではないと判断し、多重反射の周波数特性を利用した弾性波速度の計測⁵⁾を行った。その結果、弾性波速度は 4500m/s であった。



写真-5 バネ式の衝撃入力装置

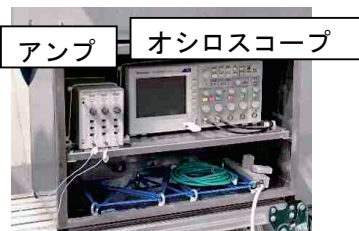


写真-6 波形記録装置一式



図-3 計測点概要

4. 実験結果

4.1 健全部での調査結果

健全部での調査結果を図-4 に示す。コンター図は床版厚 320mm, 幅 500mm の範囲を画像化し、メッシュサイズは式(5)より 10mm とした。

調査結果を画像化すると、床版の底面からの反射が確認でき、他の位置からの反射は認められない。このことから、舗装と床版は一体化していると考えられ、健全部では内部に欠陥は存在しないと評価できる。

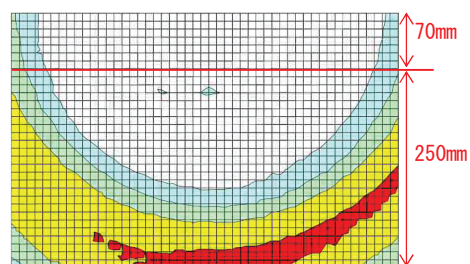


図-4 健全部の結果

4.2 上面増厚健全部での調査結果

上面増厚健全部での調査結果を図-5 に示す。舗装と床版の界面である 70mm 付近に弱い反射が表れているものの、底面からの反射が卓越している結果が得られた。舗装と床版の界面での弱い反射については、コンクリートとアスファルトコンクリートの密度が違うことにより、弾性波の反射がわずかに生じたものであると考えられる。床版の底面からの反射が卓越していることから、上面増厚部と既設床版部の界面では弾性波は反射せずに透過し、床版の底面で反射したと考えられる。以上のことから床版に欠陥は生じていないと判断できる。

4.3 上面増厚剥離部での調査結果

上面増厚剥離部での調査結果を図-6 に示す。舗装と床版の界面である 70mm 付近に弱い反射、および底面からの反射が認められるが、最も反射が卓越している領域は深さ 140mm～150mm 付近に表れている。これは上面増厚部と既設床版との界面に剥離が生じ、その剥離で弾性波が反射したものと判断できる。底面に認められる反射は、剥離が生じていない部分から回折した弾性波の反射によるものと考ええる。

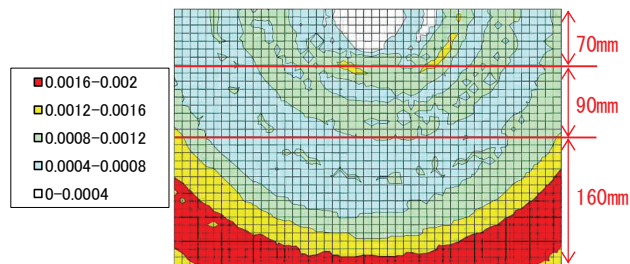


図-5 上面増厚健全部の結果

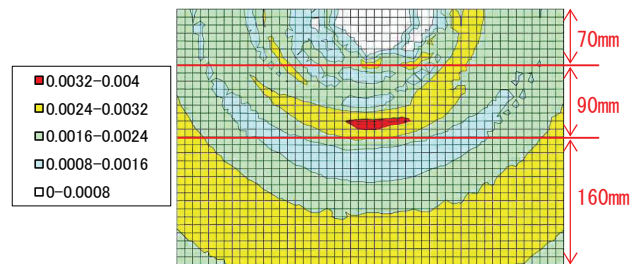


図-6 上面増厚剥離部の結果

5. まとめ

撤去したコンクリート床版の舗装上から、SIBIE 法による床版の内部欠陥調査を行い、床版コンクリート内の欠陥部の評価を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 健全部では床版に欠陥は生じていないという調査結果が得られた。
- (2) 上面増厚健全部においても、床版に欠陥は生じていないという調査結果が得られた。
- (3) 上面増厚剥離部では、上面増厚部と既設床版部に剥離が生じているという結果が得られた。

以上の結果により、SIBIE 法を用いることで、舗装上からの床版内部の剥離調査が可能であることが示された。今後は、高機能舗装など様々な舗装の条件で、SIBIE 法の適用可能性を検討したい。

参考文献

- 1)たとえば、稲葉尚文，横山和昭：増厚された RC 床版の損傷状態の調査および評価について，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.487-492，2006.7
- 2) Mary J. Sansalone & William B. Streett：Impact-echo, Ithaca, N.Y., Bullbrier Press, 1997.
- 3) Ohtsu Masayasu and Takeshi Watanabe：Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, NDT & E international, Vol.35, No.3, pp.189-196, 2002.
- 4) たとえば，山田雅彦，大久保太郎，大津政康，内田昌勝：SIBIE による PC グラウト未充填部のモデル試験による検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.2047-2052，2009.7
- 5) NDIS 2426-2: 2014 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，JSNDI，2014.9