

## 論文

## AE法によるRC床版健全性評価手法の温度依存性調査

高峯英文\*, 文倉智也\*, 渡部一雄\*, 奥村橋一\*\*, 中野慶彦\*\*\*

\*(株)東芝, 研究開発センター (〒212-8582 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1)

\*\*東芝プラントシステム(株), 産業システム事業部 系統・変電フィールドサービス部  
(〒212-8585 神奈川県川崎市幸区堀川町72-34)

\*\*\*福岡北九州高速道路公社, 福岡事務所 保全課 (〒812-0055 福岡市東区東浜2-7-53)

AE法を用いた床版の健全性評価手法を開発している。車両走行時に路面で発生する弾性波を床版下面に設置したAEセンサで観測すると、床版の劣化が進むほど弾性波の伝搬が妨げられ、観測される弾性波源の密度が薄くなる。この弾性波源密度を健全性評価指標として用いる場合、指標の変動要因として、温度変動に伴う弾性波の伝搬特性の変化が考えられる。

実橋において夏期と冬期で同じ計測を実施し、温度変動の影響を調査した。

キーワード: AE, RC床版, 健全性評価, 温度特性

## 1. はじめに

国内の道路橋は高齢化が進んでおり、それらの維持管理は重要な社会課題である。道路橋床版の維持管理を正しく効率的に進めるにあたって、床版の健全性を正確に把握することが求められる。しかしながら、目視や打音による従来の点検では、床版内部の劣化状態まで把握することは難しい。これに対し、AE(Acoustic Emission)法を利用することで、床版内部の損傷を検出することができる。我々は、床版下面にAEセンサを設置して路面で発生して床版内を伝搬する弾性波を計測することで、床版内部の健全性を非破壊で評価する手法を開発した<sup>1)</sup>。ひび割れへの樹脂注入補修が実施された高速道路床版において、本手法を適用することにより、補修の前後で床版の健全性が回復する様子を可視化することができた<sup>2)</sup>。

本手法では、床版が劣化するほど弾性波が床版内を伝搬しにくくなることを利用して床版の健全性を評価する。一方で、弾性波の伝搬特性は、床版の温度によって変化する。このため、本手法を用いて床版の健全性をより正確に評価するためには、本手法の温度依存性を把握する必要がある。そこで、過年度の点検において健全と評価された床版を対象に、夏期、冬期の二度、本手法による同様の計測を実施することで、温度変化の影響を調査した。

## 2. AE法による床版健全性評価

AE法による床版内在損傷の検出手法の概要を図-1に、同手法により床版の健全性を評価する手法のフローチャート

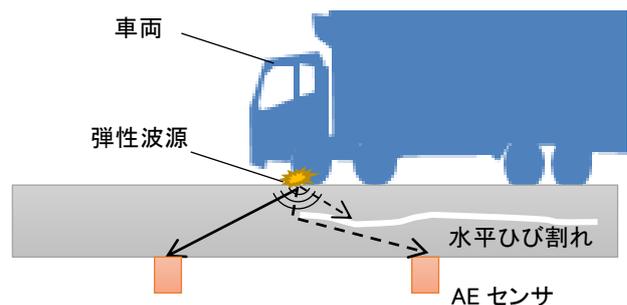


図-1 AE法による内在損傷検出

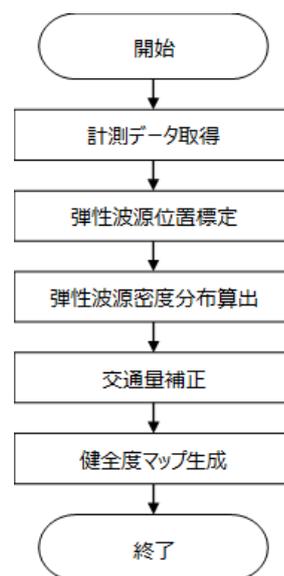


図-2 AE法による健全性評価フローチャート



図-3 計測対象橋梁

ートを図-2 に示す。 AE センサは、数十 kHz～MHz 帯の非常に微小な振動 (AE) を検出することができる。このセンサを、床版下面表面に貼り付け、車両が床版上を通過する際に発生する弾性波を計測する。

弾性波は主に、通過車両の荷重が床版にかかった際に、舗装とタイヤとの相互作用などにより発生する。これらの弾性波は床版内を伝搬して、下面の AE センサに到達し、検出される。複数のセンサを配置すれば、各センサへの到達時刻の差から逆算することにより、一つ一つの弾性波の発生源の位置を標定することができる<sup>3)</sup>。床版が健全な場合は、弾性波が遮られずにセンサまで到達するため、容易に弾性波源の位置を標定できる。しかしながら、床版内部に水平ひび割れが存在するなど、劣化が進んでいた場合、弾性波は劣化箇所で遮られたり、減衰したりするため、弾性波源の標定ができなくなったり、ずれたりする。結果として、床版内部の劣化が進んだ領域では、標定される弾性波源の数が少なくなる。このため、計測領域内で標定された弾性波源の密度分布を見ることで、領域内の相対的な健全性を評価することができる。ただし、長時間計測して多くの車両が通過するほど、標定される弾性波源は増えていくため、弾性波源密度が増加する。このため、計測中に計測領域を通過した交通量で弾性波源密度を正規化し、弾性波源密度マップを生成することで、異なる計測結果間での健全性評価結果を比較できるようにした。

### 3. AE 計測概要

計測対象の橋梁を図-3 に示す。対象の橋梁は、福岡北九州高速道路公社管理下の供用 19 年 (計測実施時) の 4 径間連続非合成箱桁橋である。計測を実施した床版は RC 床版で、床版下に裏面吸音板が設置されており、裏面吸音板上に機材を設置して計測作業を実施した。

AE 法による健全性評価手法の温度依存性を調査するにあたって、温度差の出る夏期、冬期の二度にわたり、同じ床版を計測し、結果を比較した。対象床版としては、



図-4 AE 計測の様子

表-1 計測日時と床版温度

	計測日時	床版下面温度 [deg.]
夏期	2021.9.30 11:50 - 14:00	29.8
冬期	2022.1.15 11:17 - 13:17	8.0

温度差の影響のみを評価しやすいように、過年度の点検において健全と判定された床版を選定した。2 度の計測は同年度内での健全床版の計測であり、計測間での劣化進行等の健全性の変化はほぼなく、温度条件のみによる変化を検証できると考えられる。

計測の様子を図-4 に示す。 AE センサには共振周波数 50 kHz、プリアンプ内蔵型の富士セラミックス社製 AE503SA40 を使用した。 AE センサは、床版下面に専用のホルダを用いて設置し、ホルダの固定には着脱が容易な粘着テープを使用した。 AE 計測装置は Vallen 社製 AMSY-6 を使用し、ノート PC により操作を行った。計測に必要な電力は全てポータブルバッテリーにより供給した。写真では 28 個の AE センサを設置しているが、今回の解析では、そのうち 18 個を使用した。

表-1 に夏期、冬期それぞれの計測日時と計測時の床版下面温度の測定値を示す。夏期、冬期ともに、昼間の時刻に約 2 時間の計測を実施した。計測時の床版温度としては、床版下面を放射温度計により計測した。夏期が 29.8 °C、冬期が 8.0 °C で、夏期と冬期とで 20 °C 以上の差が出ており、温度依存性の影響による差異が十分観測されることが考えられる。

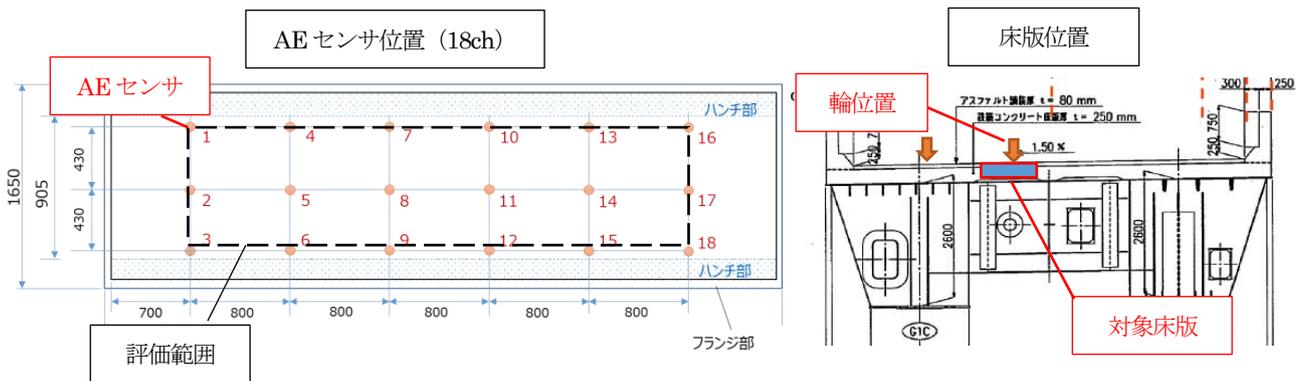


図-5 センサ配置

表-2 位置標定解析条件

項目	設定
計測閾値 [dB]	50
弾性波速度 [m/s]	2205
ノイズフィルタ	$0 \leq \text{LUCY}(\text{※}) \leq 400 \text{ mm}$

(※)LUCY (Location UnCertaintY)<sup>4)</sup>:

位置標定解析の際の演算結果の信頼性の指標。信頼性が低いほど、値が大きくなる。

図-5にAEセンサの配置を示す。センサ配置図は、計測対象床版を見下げて表示している。センサは3×6列の18チャンネルを格子状に配置した。センサ間隔は、橋軸方向に800mm間隔、橋軸直角方向に430mm間隔とした。本計測における有効な評価範囲は、センサに囲まれた領域であり、図中に点線で示した。計測対象の床版は、第1走行車線の位置に相当し、計測領域の中央付近を車両の片輪が走行する位置関係となっている。

## 4. 計測結果

### 4.1 弾性波源位置標定

表-2に弾性波源の位置標定解析に用いた条件を示す。50 dB以上の振幅を有する弾性波を抽出したうえで、弾性波源の位置を標定した。位置標定解析に用いるコンクリート内の弾性波速度に関しては、コンクリートの物性の温度変化は小さいとみなし、夏冬ともに弾性波速度として2205 m/sを用いた。

図-6にノイズ除去処理を行った後の弾性波源位置標定結果を示す。図は、計測対象床版を見下げて表示した平面分布となっており、計測期間中に標定された弾性波源の位置をプロットしたものである。弾性波源分布とともに、標定された弾性波源の数と、計測路線を通過した車両の数を記載した。通過車両数は、計測箇所近隣で上流

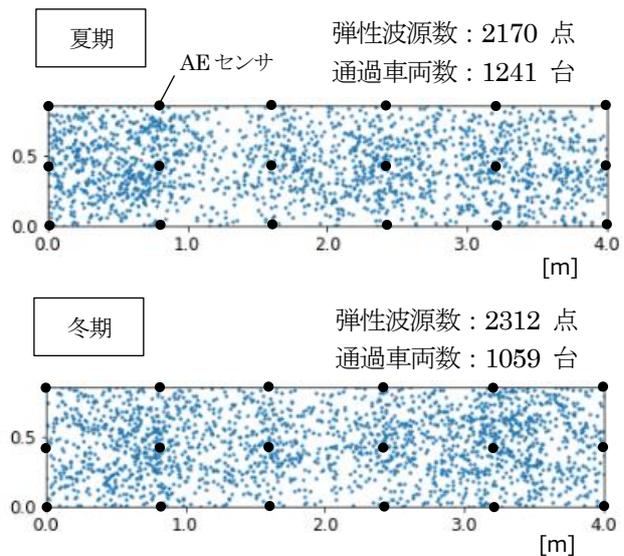


図-6 弾性波源位置標定結果

に位置するトラフィックカウンタで計測された走行車線の通過車両数を参照した。弾性波源の分布を見ると、夏期、冬期ともに、大きな分布の欠けは見られず、計測領域全域に弾性波源が標定されている。輪位置に目立った集中が見られないのは、車両ごとの通過位置の違いや、荷重による舗装の歪みなどに伴う輪位置以外でのAE発生などのためと考えられる。弾性波源分布が概ね一樣であることから、対象床版には大きな内在損傷はないと評価することができる。

夏期と冬期を比較すると、夏期よりも冬期において通過車両数が少ないのに対して、弾性波源が多く標定されている結果となった。

### 4.2 健全性評価

より厳密に比較を行うため、弾性波源密度を計測期間中に対象床版を通過した車両数で除することで正規化し、平面内の弾性波源密度のマップを作成した。マップを図

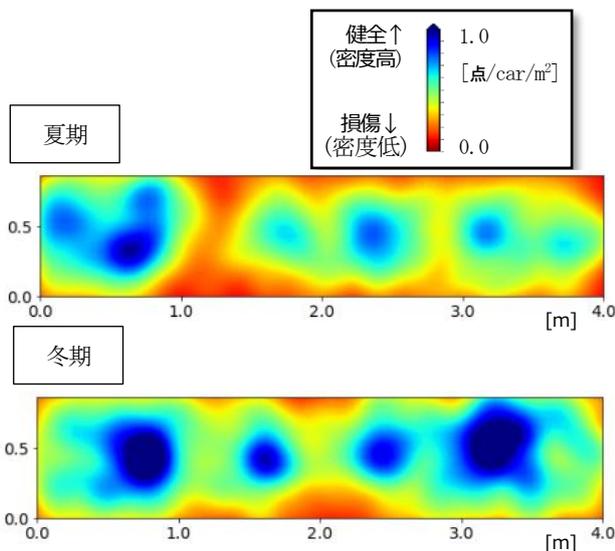


図-7 弾性波源密度マップ

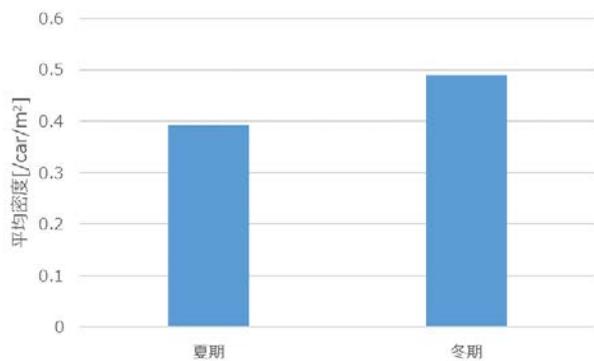


図-8 平均密度比較

図-7に示す。コンター表示で、青く表示された部分ほど標定された弾性波源の密度が高く健全で、赤く表示された部分ほど標定された弾性波源の密度が低く、損傷が進んでいることを示す。分布では橋軸方向に周期的に弾性波源密度が高いパターンが見られるが、これは位置標定の演算手法上、中央のセンサ近傍が濃くなる傾向が出ているものであり、床版の健全性自体が変動しているわけではないと考えられる。夏期と冬期の結果を同じ基準でコンター表示したところ、冬期の方が全体的に弾性波源密度が高い結果となった。

更に、計測領域内の弾性波源の平均密度を比較したグラフを図-8に示す。平均密度として、車両一台あたりの弾性波源標定数を計測領域の面積で除したものを算出した。比較の結果、冬期の平均密度は夏期の1.25倍となり、冬期で密度が高い結果が得られた。

以上の結果を総合的に判断すると、計測領域内に弾性波源の密度が著しく低下する領域は見られず、全域で十

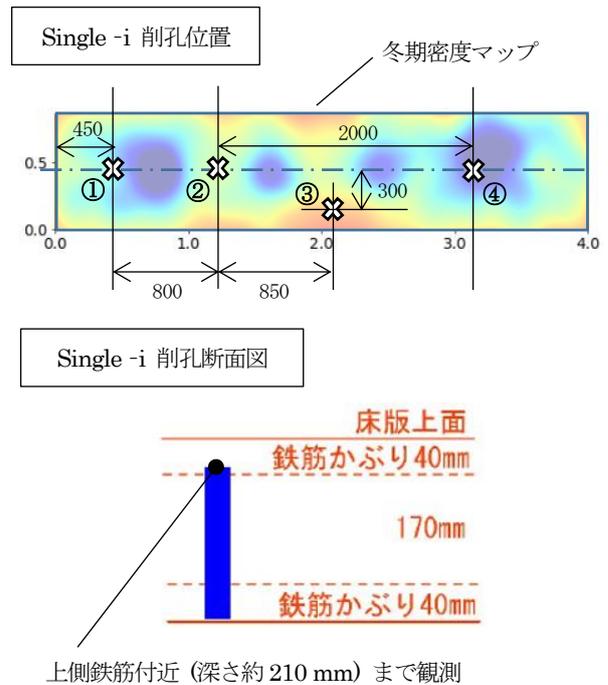


図-9 Single-i 削孔位置

分な弾性波源密度が得られているため、対象床版は全域で概ね健全であると評価できる。また、床版温度が低い方が、弾性波源密度が高くなる傾向が見られた。

#### 4.3 削孔調査による検証

AE法による健全性評価の妥当性を確認するため、AE計測後に小径削孔(Single-i工法)<sup>9)</sup>を利用した調査を実施した。本手法では、 $\phi 5.0\text{ mm}$ の小径削孔した部分よりカラー樹脂を注入し硬化させた後、同じ位置で再度 $\phi 10.5\text{ mm}$ で削孔し、削孔内壁をファイバースコープにより観察して、カラー樹脂が充填されたひび割れ位置を確認する。図-9に示すように全部で4か所の削孔位置を選定した。①～④の位置のうち、①、②、④については、十分な弾性波源密度が得られており、健全と判定できる箇所を選定した。一方で、削孔③については、夏期、冬期ともに、他の領域と比較して相対的に弾性波源密度が低く出ている箇所を選定した。

図-10に削孔調査結果を示す。図は、削孔の側視写真で、削孔奥側先端を0 mmとして表示しており、写真の下端が床版下面に相当する。削孔①、②、④については、特にひび割れ等は見られず、健全であった。一方、他の削孔結果と比較して相対的に弾性波源密度が低い位置で採取した削孔③については、床版下面近傍に僅かにひび割れが認められた。

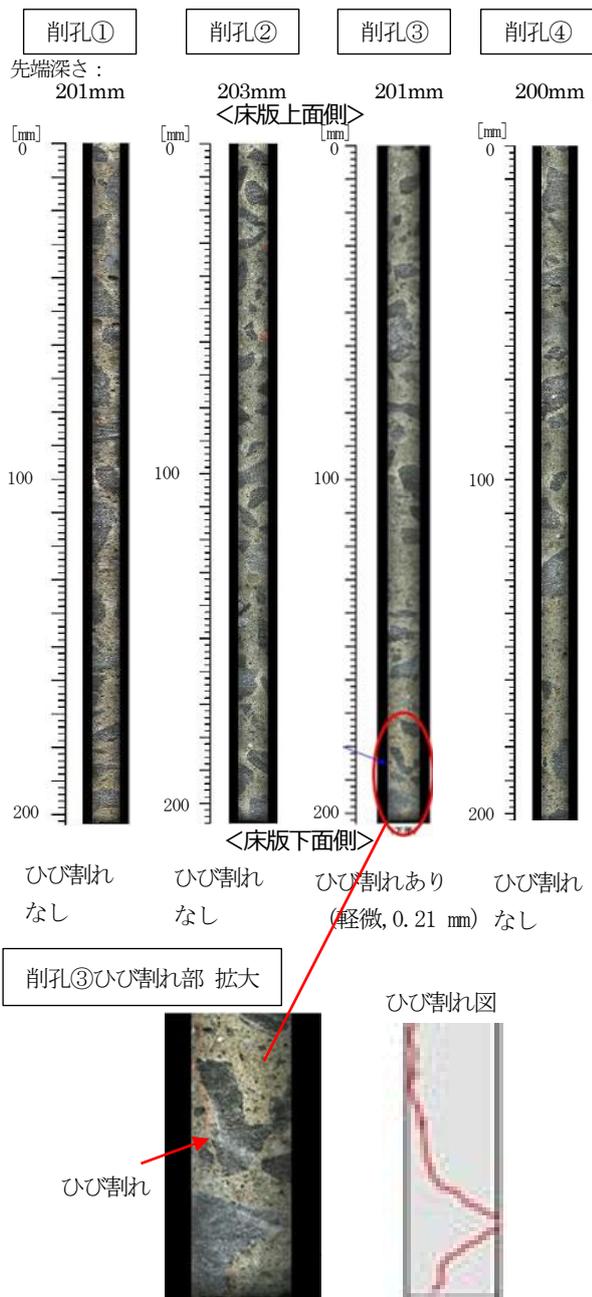


図-10 小径削孔調査結果

ひび割れは軽微で、床版の健全性に問題はないレベルであったが、今回の計測では、この段階のひび割れであっても、弾性波源密度の低下として表れたと考えられる。

以上より、削孔調査結果と AE 法による健全性評価結果とはよく一致しており、対象床版が健全であることが確認された。

## 5. 温度の影響

冬期の弾性波源密度が夏期に比べて高くなった要因について考察した。温度以外の条件はほぼ同じ計測を実施したため、両者の差は温度差が主要因と考えられる。温度差の影響が大きい要素として、舗装のヤング率の温度

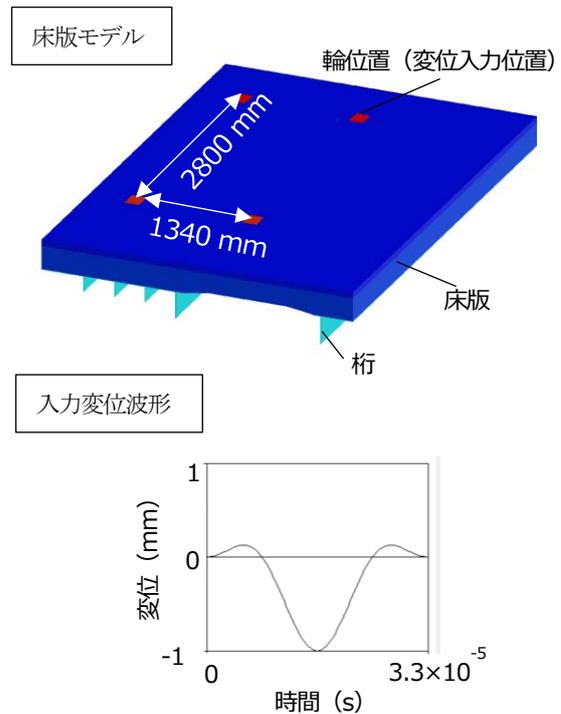


図-11 弾性波伝搬解析概要

依存性が大きいことが挙げられる。そこで、温度変化にともなうヤング率の変化の影響を明らかにするために、超音波伝搬解析を実施した。解析の概要を図-11に示す。解析にはボクセル有限要素法による大規模超音波解析ソフト ComWAVE (Ver.11, 伊藤忠テクノソリューションズ社製) を用いた。ComWAVE は立方体要素 (ボクセル) で形状モデルを構成し、有限要素法により方程式を離散化している。本解析ではボクセルの要素サイズを 3 mm とし、計測箇所の床版部および桁部をモデル化した。モデル端部は弾性波が反射しない設定とした。弾性波源としては、路面のタイヤ接地面を想定した位置の要素を振動子として、4 か所のタイヤ位置に同時に鉛直方向に強制変位を与えることで弾性波を発生させた。図-11に示した入力変位は、RC 床版で多く検出される 30 kHz の信号を想定した時間波形とした。

表-3 に、解析に用いた各部材の材料物性値を示す。コンクリート床版のヤング率は温度依存性が小さいため、夏期、冬期ともに 28.0 GPa、温度依存性の大きい舗装のヤング率は夏期 1.0 GPa、冬期 4.5 GPa と想定した。舗装のヤング率の変化については、舗装設計便覧<sup>9)</sup>を参照した。弾性波速度は、密度、ヤング率、ポアソン比より算出した値を用いた。

図-12 に解析結果を示す。弾性波が舗装から床版に透過した直後の変位伝搬の様子を抜粋した。弾性波が透過した直後の変位は冬期の方が大きくなっていることが分かる。弾性波は、異なる媒質に入射する際、境界面で一部が反射する。その反射率は、媒質固有の音響インピーダンスの差により定まり、媒質間の音響インピーダンス

表-3 弾性波伝搬解析条件

弾性波伝搬解析入力値

材料	縦波速度 [m/s]	横波速度 [m/s]	密度 [kg/mm <sup>3</sup> ]	縦波の固有音響インピーダンス [kg/m <sup>2</sup> ・s]	横波の固有音響インピーダンス [kg/m <sup>2</sup> ・s]	ヤング率 [GPa]	ポアソン比 [-]
舗装(夏期)	826	397	$2.35 \times 10^{-6}$	$1.94 \times 10^6$	$0.93 \times 10^6$	1.0	0.35
舗装(冬期)	1753	842	$2.35 \times 10^{-6}$	$4.12 \times 10^6$	$1.98 \times 10^6$	4.5	0.35
RC床版	3600	2205	$2.40 \times 10^{-6}$	$8.64 \times 10^6$	$5.29 \times 10^6$	28.0	0.2
鉄鋼材料	5944	3177	$7.85 \times 10^{-6}$	$46.7 \times 10^6$	$25.0 \times 10^6$	206	0.3

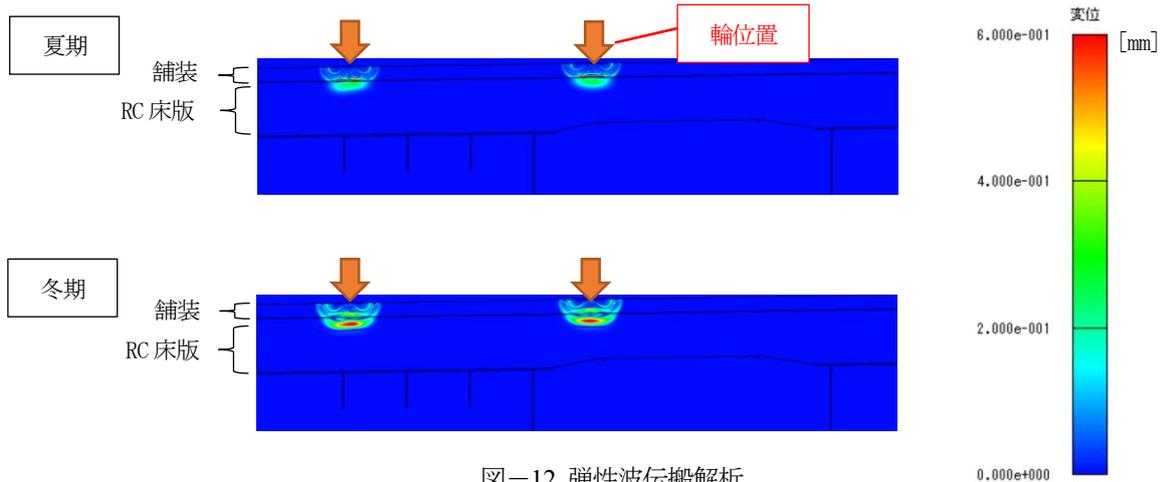


図-12 弾性波伝搬解析

の差が大きい方が反射率が高くなる。このため、温度が高い夏期の方が、舗装-床版間の音響インピーダンスの差が大きく、反射率が高くなる。今回の解析では、床版進入時、冬期の変位が夏期の変位の2.3倍となった。

以上の解析結果より、弾性波は冬期の方がより強い弾性波がセンサに到達し、弾性波源の標定も容易になると考えられる。したがって、弾性波源密度は、床版温度が低い冬期の方が大きくなると推測され、今回の計測結果と合致している。

6. まとめ

AE法によるRC床版の健全性評価手法の温度依存性を明らかにするため、健全床版を対象に、夏期と冬期で同様のAE計測を実施し、温度差による評価結果の違いを調査した。評価の結果、21.8℃の床版温度低下に対して、弾性波源密度の平均値が1.25倍に増加する結果が得られた。弾性波伝搬解析により、床版温度が低い方が、路面から伝搬する弾性波が床版下面まで伝わりやすいことが分かり、AE計測結果との整合性を確認した。

今後の課題として、より正確な評価を実現するには、計測時の舗装温度と床版温度の差なども反映すべきと考えられる。また、弾性波源密度の差異には、温度以外に

も交通状況やセンサ個体差や設置状況による計測誤差、標定解析の誤差など、様々な要素が含まれると考えられる。今後、データを蓄積し、密度の変動要因の切り分け、温度依存性の再現性確認を行い、床版の健全性を判定できるような評価指標の定量指標化を進めて行く。

参考文献

- 1) H. Takamine, et al. : Efficient Damage Inspection of Deteriorated RC Bridge Deck with Rain-induced Elastic Wave, Const. Build. Mat., 162, 2018
- 2) 高峯英文, 他 : AE法によるRC床版内在損傷補修効果の可視化, 第十一回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.11-16, 2020.
- 3) 仲佐 : アコースティックエミッションの理論と実際, 地人書館, 1994
- 4) M. A. Hamstad : ACOUSTIC EMISSION SOURCE LOCATION IN A THICK STEEL PLATE BY LAMB MODES, J. AE, 25, 2007
- 5) 国土交通省 NETIS, 登録番号:HK-150004-VE, Single i 工法
- 6) 社団法人 日本道路協会, 舗装設計便覧, 2006

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)