

論文

床版内部健全度マッピングにおける車両走行条件依存性の定量評価

渡部一雄*, 高峯英文*, 文倉智也*, 碓井隆*, 市山仁**, 勝島龍郎**

*株式会社東芝, 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)

**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)

走行する車両によって発生し、コンクリート床版内部を伝搬する弾性波を元に床版の健全性を評価する手法「床版内部健全度マッピング」を開発した。橋梁を走行する車両の条件（荷重、速度、輪位置など）は現場により様々に変化するため、これらの条件による結果への影響を定量的に把握することが求められる。そこで、複数のコンクリート床版供試体を作製して模擬橋梁に設置し、様々な車両条件で走行し、その影響を定量評価した。

キーワード：非破壊検査, アコースティック・エミッション, RC 床版

1. はじめに

国内インフラ構造物、なかでもコンクリート構造物は 1950 年代半ばにはじまる高度経済成長期に多くが建設され、その経年劣化が大きな社会課題となりつつある。また、2012 年 12 月の笹子トンネル天井板落下事故をきっかけに、道路法が改正され、近接目視による 5 年に 1 回の点検が義務化されている。老朽化が進むインフラ構造物を厳格化された法令に従って維持管理することは、人的リソース的にも、財政的にも、早晚困難な状態に陥ることが予測され、新たな効率化への取組みが急務である。損傷が深刻化してから大規模な修繕を行う、「事後保全型」から、損傷が軽微なうちに補修を行う「予防保全型」への転換はその基本となる取組みである。

一方で、予防保全そのものを効率化する取組みも必要となる。予防保全の判断材料となる点検が、人手、特に目視に頼っているためである。そこで人手に出来るだけ頼らずに健全性を判断する手法、例えばセンサーを用いた劣化評価技術の導入が期待されている。

当社では、材料が壊れるときなどに発生する微弱な弾性波であるアコースティック・エミッション (AE) に着目し、コンクリート構造物の劣化評価システムを開発してきた¹⁾。そして、コンクリート床版の健全性評価に応用し、外観からは分からない床版内部の健全度を解析し可視化する技術「床版内部健全度マッピング」を開発した。本技術は 2024 年 4 月に、国土交通省が道路構造物点検の効率化・高度化に活用可能な技術を取りまとめた「点検支援技術性能カタログ」に掲載された²⁾。この技術は、床版の評価のために路上を走行する車両を規制する必要がなく、一般車が通常走行することにより発生する微弱な波動を積極的に利用して内部の損傷を評価することが

特徴である。これまでに、本手法を高速道路橋梁に適用し、ひび割れ補修効果の可視化³⁾、および健全性評価結果の温度依存性評価⁴⁾について報告した。

この手法を床版調査で活用する際には、対象箇所における車両走行条件（荷重、速度、輪位置など）による結果への影響を把握しておくことで、異なる場所での結果を定量的に比較することができる。しかし、実橋で任意の車両走行条件を再現して所望のデータを収集することは難しい。そこで、本稿では、複数のコンクリート床版供試体を模擬橋梁に設置し、実橋梁では検証困難な車両条件による走行試験を実施し、本技術の評価結果に与える影響について定量的に検討したので報告する。

2. 床版内部健全度マッピングの概要

本技術は、コンクリート床版内部を伝搬する弾性波を損傷検知に利用するものである。図-1 に、床版上面で発生した弾性波が床版内部を伝搬する様子を示す。車両が走行すると、車両荷重によりタイヤが床版上面の舗装にひずみを生じさせて弾性波が発生する。発生した弾性波はコンクリート床版内部を伝搬し、床版下面に設置された AE センサーに到達する。内部にひび割れなどの損傷がない場合は（図-1 左）、発生した弾性波は直線的な経路をたどって AE センサーへ到達する。一方、ひび割れがあると（図-1 右）、弾性波はひび割れの端で回折して経路が屈曲したり、ひび割れで減衰して AE センサーまで十分な強度で到達しなかったりと、影響を受ける。複数の AE センサーで弾性波を検出した信号を利用すると、弾性波の震源を特定することができる（弾性波源位置標定とよぶ）。これは震源と各 AE センサーとの距離がそれぞれ異なると、弾性波信号の検出時刻が異なること

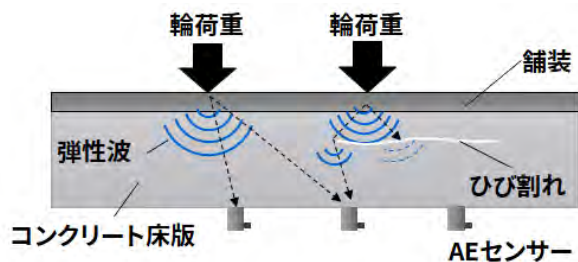


図-1 床版内部の弾性波伝搬のようす

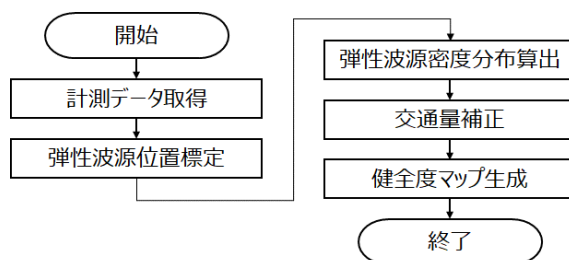


図-2 健全性評価の流れ

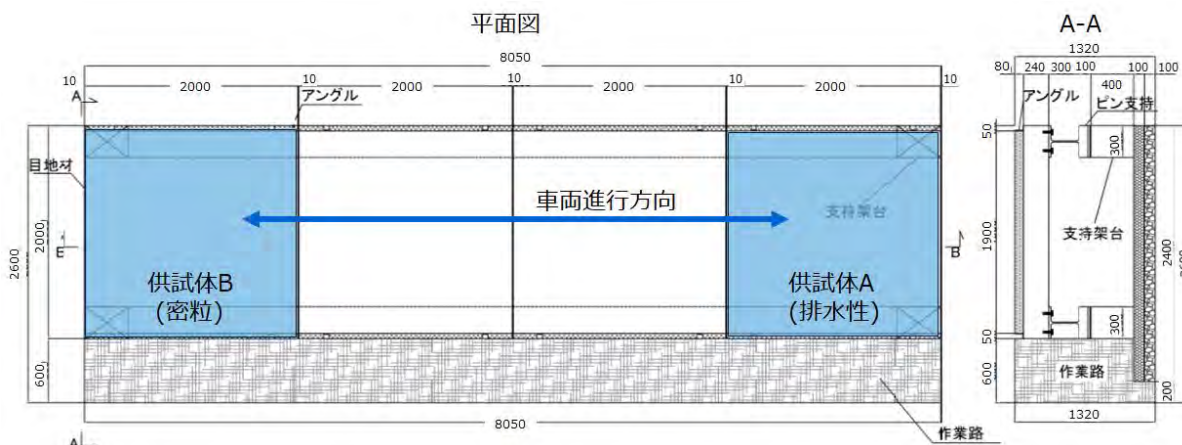


図-3 床版供試体の配置

を利用したものである。床版上面で発生した弾性波の伝搬経路に内部損傷がある場合、震源の標定位置にずれが生じたり、標定できなかったりする。このため、内部ひび割れ部分の上面には震源が標定されにくくなる。この作用を利用すると、上面で発生した多数の弾性波源を平面上に位置標定したマップにおいて、弾性波源の疎密から内部損傷領域を推定することができる。すなわち、弾性波源密度が低い領域を内部損傷領域として検出することが可能となる。この原理に基づいた床版健全性評価を行う手順を図-2に示す。橋梁床版下面に設置したセンサーにより路面で発生する弾性波信号を取得する。次に弾性波源の位置標定を行い、床版を見下ろした平面上に展開した弾性波源分布を求める。得られた弾性波源分布から、弾性波源密度を算出し、弾性波源密度マップを作成する。その後、計測期間内の交通量の多寡による変動を補正し、弾性波源密度の高低に応じて、対象箇所ごとに健全度を評価する。弾性波源密度が高い場合が健全、弾性波源密度が低い場合が損傷と評価される。

3. 試験の概要

前章で述べた検出原理に基づいた内部損傷検知について、車両荷重や速度、床版に対する走行位置などの条件による結果への影響を評価する試験を実施した。(一社)施工技術総合研究所の保有するテストコース内の模擬橋梁に鉄筋コンクリート床版供試体を設置し、荷重車によ

表-1 床版供試体の構成

供試体		A	B
舗装	表層	排水性 ^{a)}	密粒 ^{b)}
	基層	SMA ^{c)}	
	防水層	As系塗膜防水層(加熱型)	

a) ポーラス As(13) 改質 AsH 型

b) 密粒度 As(13) 改質 AsII 型

c) 碎石マスチック As(13) 改質 AsII 型

る走行試験を行った。床版供試体の構成を表-1に示す。供試体は2種類作製した。舗装仕様は高速道路橋梁に準じ、基層を碎石マスチック As(13) 改質 AsII 型とし、表層をそれぞれポーラス As(13) 改質 AsH 型(排水性舗装)および密粒度 As(13) 改質 AsII 型(密粒舗装)とした。また、床版上面には As 系塗膜防水層(加熱型)を施工した。供試体の配置図を図-3に示す。テストコースを掘削してピットを設け、その中に、両側を縦桁で支持する形で、2つの供試体を模擬橋梁の両端に設置した(中央部は別試験で用いる床版供試体を設置している)。各供試体寸法は、2000 mm×2000 mm×厚さ 240 mm とし、舗装厚は基層 40 mm、表層 40 mm とした。床版と床版の間には車両走行時に床版同士が接触しノイズとなる弾性波を励起するのを避けるためアスファルト系加熱注入材(目地材)を挿入した。供試体下に設けた作業スペースを利用して、供試体下面に AE センサー(富士セラミックス AE503SA40)を設置した。各供試体における AE センサ

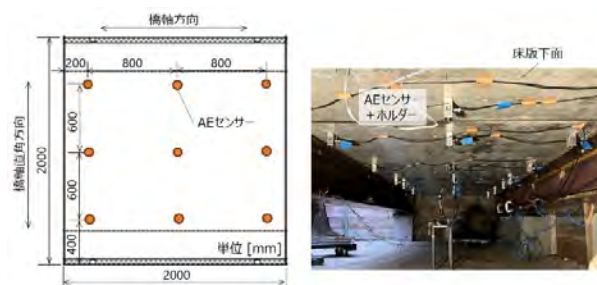


図-4 AE センサー配置

一の配置と、センサー設置の様子を図-4 に示す。一つの供試体につき、9 個の AE センサーを橋軸方向には 800 mm 間隔で、橋軸直角方向には 600 mm 間隔で格子状に配置した。各 AE センサーは専用のホルダを用いて床版下面に設置する（図-5）。ホルダを床版下面に粘着テープにて固定し、AE センサーの受信面は床版下面とグリースを介して接触させる。これらの AE センサーは舗装面を車両が走行する際に発生する弾性波を検知する。試験において床版供試体に荷重を付加する試験車両は、表-2 に示す 3 台を用い、車両荷重による応答の違いを検証した。図-6 は荷重車（8t）の走行時の様子である。車両走行における輪位置の影響を検証するため、左タイヤが床版中央を走行するケース（左）と床版端を走行するケース（右）の 2 ケースを実施した。また、車両速度は、10 km/h の低速、および 40 km/h の高速の 2 条件で実施し、速度による影響を評価した。試験では、各条件において走行方向を変えた場合を含み計 20 回程度、床版上を走行した。5 章に示す分析結果は約 20 回の走行で得られた弾性波信号データを蓄積した上で、解析・導出したものである。

4. 構造解析

本手法において AE センサーが検知する弾性波は、車両走行による活荷重に伴い舗装がひずみ、発生すると考えられる。そこで、供試体による試験結果をより詳細に裏付けるため、FEM に基づく構造解析により車両荷重による床版供試体のひずみを評価した。ソルバには汎用コード Abaqus2017 / Standard を用いた。図-7 に作成した解析モデルを示す。表層、基層、床版および目地材はソリッド要素（6 面体 20 節点）、H 鋼はシェル要素（4 角形 8 節点）によりモデル化した。また、床版内には断面形状が円柱の梁要素により鉄筋をモデル化した。なお、試験は前述のように床版供試体 A および床版供試体 B を用いて実施したが、実際の供試体は中央部の 2 床版を含めた 4 供試体で構成されているため、解析では 4 供試体すべてをモデル化した。表-3 に本報告における各部材の材料物性値を示す。表-3 に示すように全ての部材を弾性体として扱った。舗装の表層および基層の材料物性値は久利らが報告した文献⁵⁾を参考に決定した。



図-5 AE センサーの床版への設置状態

表-2 試験に使用した車両

名称	車両総重量	前輪荷重	後輪荷重
荷重車(8t)	8,020 kg	3,100 kg	4,890 kg
荷重車(4.4t)	4,440 kg	2,700 kg	1,730 kg
普通車(1.4t)	1,410 kg	800 kg	600 kg



図-6 車両走行状況（左：床版中央、右：床版端）

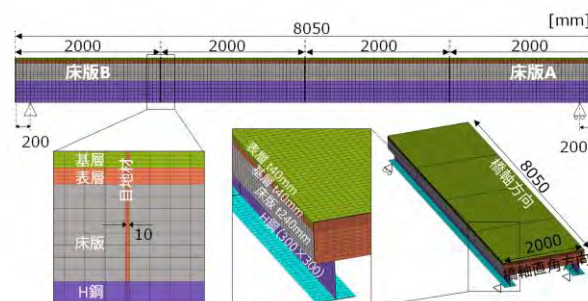
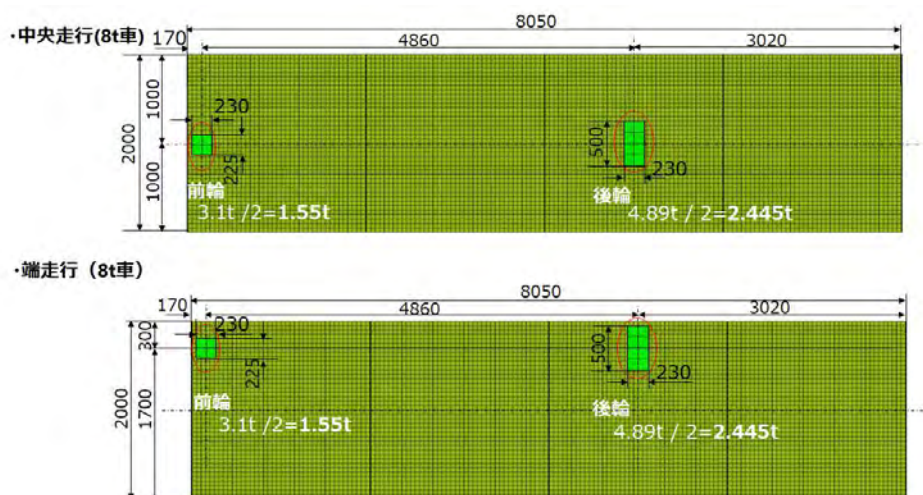


図-7 FEM 解析モデル

表-3 構造解析に用いた各部材の材料物性値

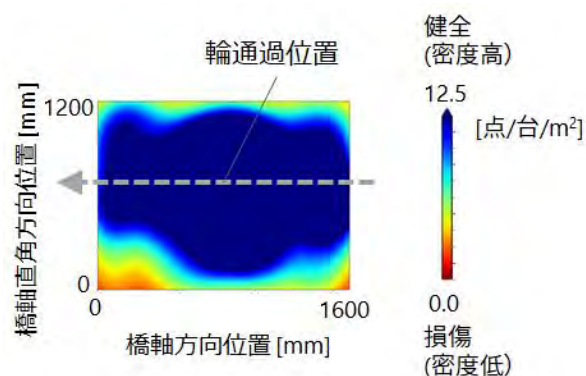
	弾性率 (MPa)	ポアソン比
表層 (排水性)	1.83×10^3	0.35
表層 (密粒)	3.31×10^3	0.35
基層 (SMA)	3.68×10^3	0.35
コンクリート床版	2.80×10^4	0.20
鉄筋	2.06×10^5	0.30
H 鋼	2.06×10^5	0.30
目地材	2.57	0.49

静解析により荷重車の走行を再現する解析を行った。



図－8 載荷条件（上：床版中央走行，下：床版端走行）

図－8 に載荷条件を示す。床版供試体の橋軸直角方向中央をタイヤが通ることを想定した条件（上段）および床版供試体の橋軸直角方向の端から 300 mm をタイヤが通ることを想定した条件（下段）の解析を実施した。荷重車は前輪 3.1t、後輪 4.89t の荷重車（8t）を想定した。供試体は実橋梁と比較して小さく、左右両輪が同時に供試体上に載ることはないため、前後輪の片輪のみをモデル化し供試体解析モデルに負荷した。タイヤの接地長はタイヤの種類、空気圧および車両荷重などによって変化するが、過去の実測結果を基準に 230 mm とした。荷重は前輪および後輪の重量の 1/2 を仮定しそれぞれ負荷した。



図－9 走行試験結果に基づく健全度マップの例

5. 結果

5.1 試験結果の例

車両走行試験により得られたデータを元に、図－2 の手順に基づいて健全度マップを算出した結果の例を図－9 に示す。この結果は、供試体 A（排水性舗装）を荷重車（8t）が速度 40 km/h で左側タイヤが概ね床版中央を走行した結果をまとめたものである。図－2 の手順に従って得られた弾性波信号から弾性波源位置標定を行い、弾性波源分布を求めた。図－9 では弾性波源の単位面積当たりの密度を求め、さらに通過車両台数で除したものの値を指標値（単位：点/台/㎡）として、コンター表記している。マップでは輪通過位置を中心に弾性波源密度が高い領域、すなわち、健全領域が広がっていることが分かる。

5.2 車両走行位置（輪位置）の影響評価

車両走行時の輪通過位置と健全度マップへの影響を評価した。図－10 に FEM 解析結果の橋軸直角方向の舗装上面におけるひずみ分布と車両走行試験に基づく健全度マップを示す。健全度マップは荷重車（8t）が供試体 A（排水性舗装）を 40 km/h で走行したときの結果である。図

－10 上段は床版供試体の中央をタイヤが通る場合を想定したひずみ分布および健全度マップであり、下段は床版供試体の端をタイヤが通る場合である。床版供試体における計測範囲（センサー設置範囲）を FEM 解析結果に黄色枠で表示した。図－10 より床版中央走行の場合（上段）は計測領域全体に強い圧縮ひずみが分布しているのに対して、床版端をタイヤが通過する場合（下段）には、圧縮ひずみの領域が床版端方向にシフトしているのが分かる。健全度マップに着目すると健全領域の分布が、FEM 解析結果の圧縮ひずみ領域の分布と概ね一致していることが分かる。健全度マップにおける健全領域は 2 章で述べたように弾性波源密度が高い領域であり、圧縮ひずみの強い領域で弾性波源が多く発生していることを示唆している。この結果に鑑みると、実橋において、車線位置の関係で計測対象床版パネルの端部を片輪が走行する位置関係の場合、圧縮ひずみが偏った分布となるため、圧縮ひずみの範囲に応じた有効評価領域を設定することが望ましい。

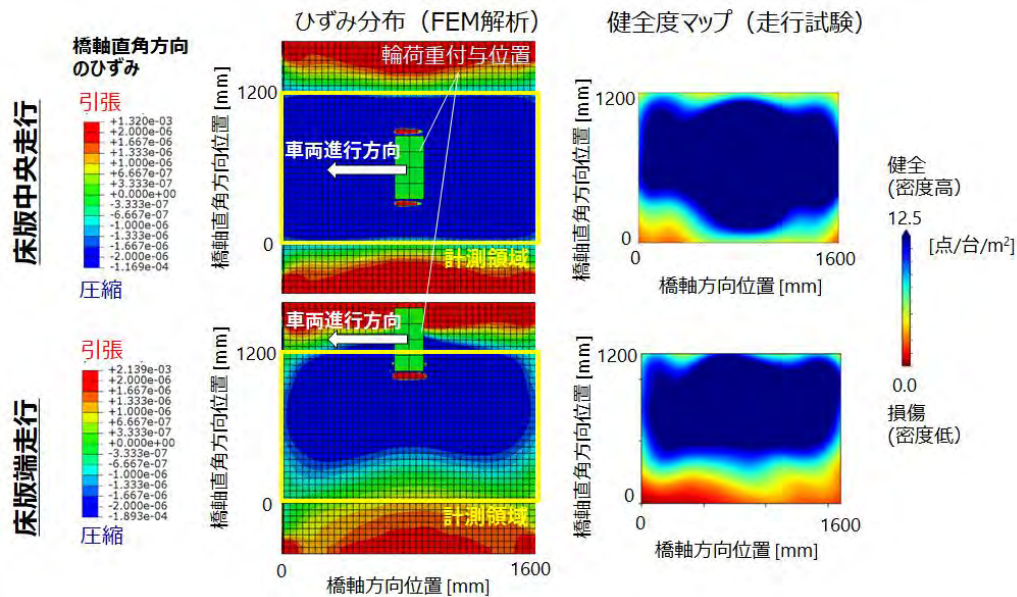


図-10 車両走行位置による橋軸直角方向ひずみ（左）と健全度マップ（右）の比較

5.3 車両重量の影響評価

次に、車両重量の影響を評価した。供試体 A（排水性舗装）の 40 km/h 走行時における車両重量に対する弾性波源の平均密度の変化を図-11 に示す。車両重量が大きいほど平均密度が増加する傾向にあることが分かる。また、輪位置が床版中央の場合よりも床版端を走行した場合の方が、車両重量による変化が顕著である。普通車（車両総重量 1.4t）では、タイヤが床版中央を走行する場合と床版端部を走行する場合で、大型車の場合よりも舗装のひずみの差が顕著となることが要因と考えられる。この結果から、車両荷重により健全度マップへの定量的影響が生じると考えられることから、実橋を走行する車両構成が大きく異なる場合は健全度マップの評価指標値を補正するなどの措置が必要となる。

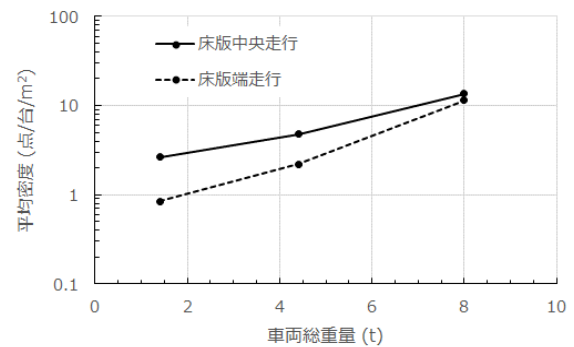


図-11 車両荷重による弾性波源密度への影響

5.4 車両速度の影響評価

次に、車両速度による影響を評価した。各床版（供試体 A：排水性舗装、供試体 B：密粒舗装）において各車両が床版中央を走行した際の、車両速度（10 km/h および 40 km/h）に対する弾性波源の平均密度の変化を図-12 に示す。車両速度が高い場合に弾性波源密度が増加する傾向が見られ、この増加の割合は車両重量にはあまり依存していない。全車両による結果を平均すると、低速 10 km/h 走行時の平均密度は、40 km/h 走行の場合には約 3.3 倍となった。試験では保安の観点で 40 km/h までの車両速度としたが、より高速のケースについて実橋と比較した。図-13 に、実橋において混雑により車両の平均速度が 44 km/h まで低下した期間を抽出し、全体（平均速度 73 km/h）の平均密度と比較した結果を示す。混雑時に平均密度が低下する傾向は確認されなかった。したがって、車両速度については渋滞時など車両速度が著しく低い状

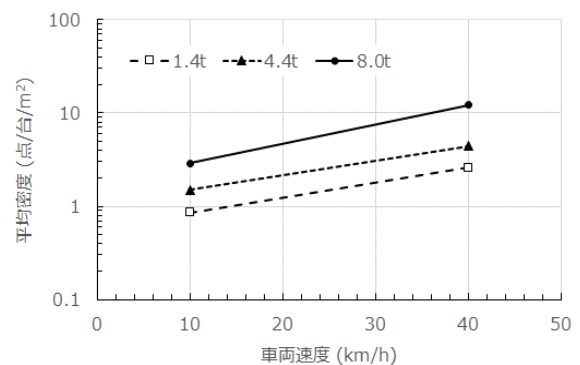


図-12 車両速度による弾性波源密度への影響

態が続く場合には補正する等の配慮が必要と考えられるが、平均速度 40 km/h 以上では補正は不要である。

5.5 舗装種別の影響評価

最後に、舗装表層の違いによる影響を評価した。供試体 A（排水性舗装）、供試体 B（密粒舗装）においてそれ

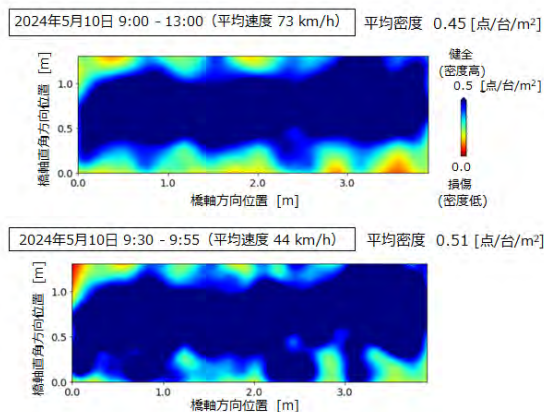


図-13 実橋における速度の影響

ぞれ床版中央を片輪が走行する条件で取得したデータの分析結果を図-14に示す。排水性舗装に対して、密粒舗装では弾性波源密度が低くなっており、異なる表層間での評価指標値補正が必要となることが示唆された。

以上、車両走行の条件として輪位置、重量、速度、舗装種の影響を床版供試体結果に基づき評価した。本結果を実橋梁に適用して評価する場合には、供試体試験特有の状況も加味すべきことに注意されたい。すなわち、供試体では、仮設の都合上、既設舗装と供試体の間にわずかに段差が生じ、乗り上げる際に衝撃が発生していた。また、供試体走行試験では、他車両によるノイズが全く発生せず、床版間が目地材で分離されており外部ノイズの混入がほとんどない環境での試験であった。これらの影響が供試体試験に一定の影響を与えていると考えられ、実橋梁への適用に当たっては車両条件の違いによる評価指標値の補正について定量的な整理を進めていく。

6. おわりに

道路橋を走行する車両が発生する弾性波を利用したコンクリート床版内部の健全性評価技術「床版内部健全度マッピング」を開発した。実橋梁の一部を模した模擬橋梁に床版供試体を設置し、車両条件による結果への影響を定量評価するための試験を実施した。走行車両条件の変化に伴う一連のデータから、本技術の結果に与える影響について以下の知見を得た。

- ・床版の端部をタイヤが走行する場合は、弾性波源分布に偏りが生ずるため、健全度判定エリアを限定する等の対応が必要となる
- ・車両重量が大きいほど、弾性波源密度が大きくなる。このため、車両構成に応じた評価指標値の補正などの措置が必要となる。
- ・平均車速が40 km/hの場合、10 km/hの場合と比較して平均弾性波源密度は約3.3倍となった。一方、実橋計測では73 km/hで平均弾性波源密度の増加がみ

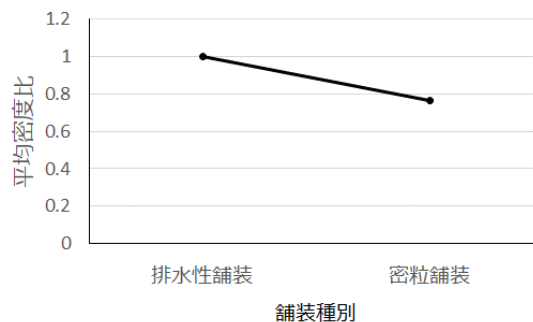


図-14 舗装種別による弾性波源密度への影響

られなかったため、著しく低速の渋滞に限り評価指標値の補正などの対応を検討する。

- ・排水性舗装では、密粒舗装よりも弾性波源密度が高くなり、評価指標値の補正の必要性が示唆された。

今回得られた知見を元に、実橋梁での計測・評価結果を適切に補正することにより、様々な条件の実橋梁において本技術を適切に広く適用することが可能となる。

謝辞

開発に際し、貴重なご意見をいただいた京都大学 塩谷智基特命教授に感謝の意を表します。また、供試体試験の実施にあたり、多大な協力をいただいた、施工技術総合研究所 松本政徳氏、橋本雅行氏、菊地新平氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高峯英文，渡部一雄，塩谷智基：アコースティックエミッションモニタリングによる橋梁内部のひび割れ検出技術，東芝レビュー，Vol.72，pp.49-52，2017.5.
- 2) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ（橋梁・トンネル）全文，非破壊検査技術（橋梁2）BR020040，<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/zenbun.html>（参照 2024-06-28）.
- 3) 高峯英文，碓井隆，上田祐樹，渡部一雄，二村大輔：AE法によるRC床版内在損傷補修効果の可視化，第11回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.11-16，2020.11.
- 4) 高峯英文，文倉智也，渡部一雄，奥村橋一，中野慶彦：AE法によるRC床版健全性評価手法の温度依存性調査，第12回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.79-84，2022.11.
- 5) 久利良夫，佐藤彰紀，鎌田修，芳賀潤一，児玉孝喜：高温域を考慮したアスファルト混合物のスティフネス測定に関する研究，土木学会舗装工学論文集，Vol.13，pp.39-46，2008.12.

（2024年7月12日受付）