

# 実構造物 RC 床版を用いた AE 法による補修後のコンクリート一体性の評価

前田建設工業(株)	正会員	○齋藤 知弥	前田建設工業(株)	正会員	三坂 岳広
(株)東芝	正会員	高峯 英文	(株)東芝	正会員	上野 佳祐
(株)東芝	正会員	渡部 一雄	愛知道路コンセッション(株)	正会員	山本 和範

## 1. はじめに

日本の道路インフラは高度経済成長期に集中的に整備され、それらが供用開始から 50 年を迎えようとしており、今後、それらのインフラが急速に老朽化することが懸念される。国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）（第 2 期）によると、所管するインフラの中でも供用 50 年を迎える道路橋は、2020 年でおおよそ 72.6 万橋あり全体の 30%だが、10 年後で約 55%、20 年後で約 75%になるとされており、老朽化の割合は加速度的に増加することが予測される。道路橋の RC 床版は、老朽化の中でも過積載車両を含む重車両の繰り返し走行による疲労劣化でのひび割れ進展が床版下面にて、主な損傷として視認される。疲労劣化の進行に伴いひび割れが格子状に進展し、最終的にコンクリートの剥落が発生することから、床版の劣化対策としてひび割れ注入工法等の補修が実施されてきた。しかし、疲労劣化によるひび割れの補修を行った後、補修材と既設床版との間から劣化が進行し、既設床版に新たな劣化が進行してしまうことで補修から短期間で再補修を行う事例が報告されている<sup>1)</sup>。原因としては、ひび割れ補修時にひび割れ内部に十分な補修材の充填が出来ておらず、補修材と既設コンクリートが一体化していないことで、既設コンクリート部に新たな劣化を発生させてしまうことが挙げられる。そのため、ひび割れ注入工法による補修の確実性を確認することは重要とされているが、注入材の充填確認手法が注入箇所のコアを採取して行う破壊検査になってしまい、ひび割れ注入後の非破壊での充填確認手法が確立されていないのが課題である<sup>2)</sup>。現状の施工では、ゴムの復元力やスプリング等を使用した専用の低圧注入器を用いて注入量で管理を行っているが、実際に床版内部のひび割れ深部まで充填されているかを確認することは難しい。これらの課題に対し、RC 床版を長寿命化し、できる限り再補修までの期間が延長可能となるように、非破壊でひび割れ内部の補修材の充填による既設コンクリートの一体性を評価できる手法が必要である。本論文では、AE 法がひび割れ注入工法における RC 床版の補修効果の確認手法として適用できるかを、疲労によって劣化した愛知道路公社が保有する有料道路猿投グリーンロードの道路橋 RC 床版に対するひび割れ注入による補修工事の施工前後で計測した結果について述べる。

## 2. 検証概要

### (1) AE 法による床版内部状況の推定について

AE 法は、部材が変形あるいは破壊する際に内部に蓄えていた弾性エネルギーが放出されて生じる弾性波(AE:Acoustic Emission)を AE センサによって電気信号に変換し検出することで、損傷や変形の様子を非破壊で検出する手法である<sup>3)4)</sup>。この手法を活用し、車両の通過等で励起された床版上面からの弾性波を床版下面に設置した AE センサにて受信することで、床版内部の損傷を広域に検出することを考えた。車両通過に伴う路面上での弾性波源の検出の例を図-1 に示す。

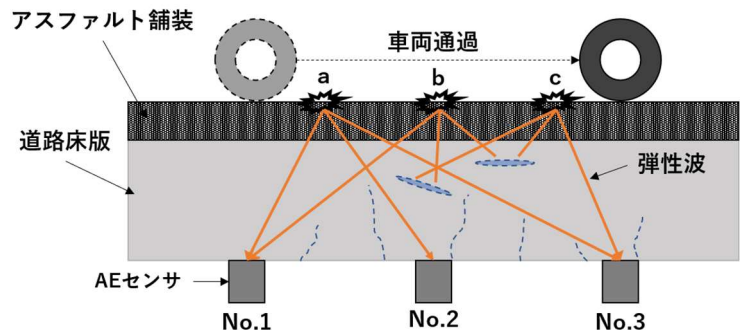


図-1 車両通過に伴う弾性波源検出の例

キーワード AE 法, AE センサ, 弾性波, 補修効果, RC 床版

連絡先 〒302-0021 茨城県取手市寺田 5270 ICI 総合センター TEL 0297-85-6171

図-1 中の a～c は路面弾性波源，各路面弾性波源からの矢印線は伝搬する弾性波，No.1～3 は AE センサの番号，道路床版内の点線および楕円図形は内部損傷を示す．床版上面より車両通行に伴い，励起された弾性波は床版内部を伝搬しセンサで検出される．RC 床版内部に損傷が内在した場合，弾性波は損傷個所で迂回または伝搬が阻害されるため，下面センサで検出する弾性波源の標定数に変化が発生する．ここで弾性波源の標定数とは，床版下面に設置した AE センサにより発生源が特定できた弾性波源の数をいう．弾性波源 a の場合，センサまでの伝搬経路に損傷が少なく，3 つのセンサで弾性波を検出できる．3 つ以上のセンサで弾性波を検出できた場合，各センサへの弾性波の到達時刻の差から，発生源の位置を標定することができる．しかし，弾性波源 b, c においては損傷によりセンサまでの弾性波伝搬が阻害されている箇所があり，1 つのセンサでしか検出できておらず，弾性波源が標定できない．この場合，損傷部を迂回して届く弾性波もあるが，迂回して到達した弾性波は回折等により波形が変化する．今回の計測では迂回して変化した波形は検出しないとした．このように，損傷が進んだ領域では下面で検出される弾性波源標定数が減少する．このことから，床版下面における損傷個所が補修により既設床版と一体化することで，計測エリア内で検出できる弾性波源標定数が増加すると考えられる．このように補修工事前後で検出できる弾性波源標定数を比較することで，ひび割れ注入工により補修材が充填され，既設床版と一体化することで弾性波の伝搬経路が回復しているかどうかを計測した．

## (2)実施橋梁および補修工事の概要

実験は，愛知県豊田市の猿投グリーンロード（起点：力石 IC，終点：八草 IC）に属する橋梁（以下，対象橋梁と表記する）で実施した．対象橋梁の橋梁諸元を表-1，外観を写真-1 に示す．対象橋梁は，橋長が約 152m，支間長 16.7m の RC4 径間連続中空床版橋と支間長 16.68m の RC5 径間連続中空床版橋の合成桁橋である．対象橋梁は，共用後 52 年が経過しており，疲労劣化によるひび割れが散見された．対象橋梁の計測エリアの損傷図を図-2 に示す．床版全体を通して，疲労劣化による幅 0.05～0.4 mm のひび割



表-1 橋梁諸元

竣工	1970 年
橋長	約 152m
支間長	16.7m (対象部)
構造	合成桁橋 (対象部は RC4 径間連続中空床版橋)

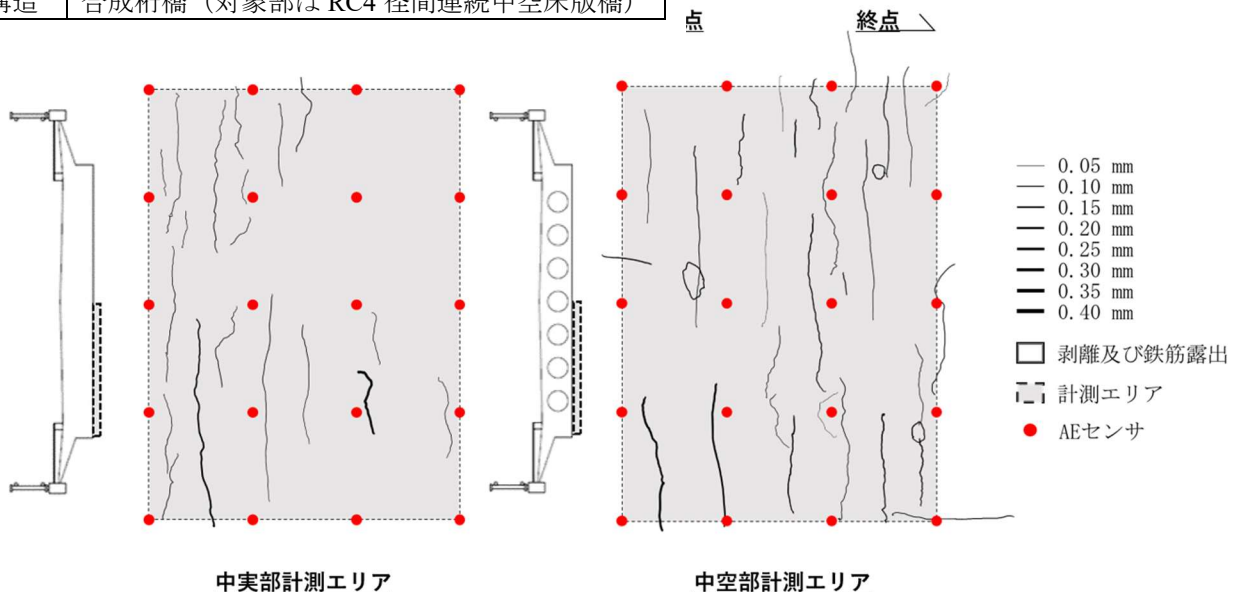


図-2 計測エリアの損傷図

れと剥離及び鉄筋露出が確認できた。

補修工事は、ひび割れ箇所へのひび割れ注入工と剥離及び鉄筋露出箇所での断面修復工の補修工事を実施した。ひび割れ注入工は低圧注入工法で実施し、エポキシ樹脂系注入材を圧入し充填させた。断面修復工は剥離及び鉄筋露出部を研り取り、エポキシ樹脂系プライマーを塗布後、左官工法により断面補修材（ポリマーセメント系モルタル）を充填させた。

### (3)実験概要

本検証では、補修工事前と補修工事後の計2回の計測を行った。AEセンサの設置状況と固定方式の模式図を図-3に示す。AEセンサは、再剥離可能な粘着テープと抑え治具を用いて床版下面に固定した。抑え治具とセンサ間にはバネを備え、バネの反発力によって、センサの感受面を床版表面に密着させた。センサと床版下面の間には弾性波の伝搬を促すカプラントとしてシリコングリースを少量塗布した。

計測箇所の詳細位置を図-4、AEセンサ配置図を図-5に示す。センサの設置場所は、比較的ひび割れや剥離の多い力石IC寄りの橋梁端部の第1径間で行い、中空部と中実部の2か所とし、床版の構造様式で弾性波源の検出結果に差異が生じるかも合わせて検討した。床版下面に20個のAEセンサを約700mm間隔で格子状に配置し、1回の計測は約18時間とした。700mm間隔としたのは、RC床版内での弾性波の減衰を考慮し、通常800~1000mm程度のところ、間隔を狭めて配置した。計測条件を表-2に示す。AEセンサで得られた信号に対して弾性波源の位置標定解析を行った。解析の信頼性向上のため、信号振幅が小さくS/Nの低い信号は除去して解析を行った。

補修工事・AE計測フローを図-6に示す。車両通過に伴い励起され、床版内部を伝搬する弾性波信号をAEセンサで取得後、弾性波源の位置評定解析を行い、弾性波源を検出する。

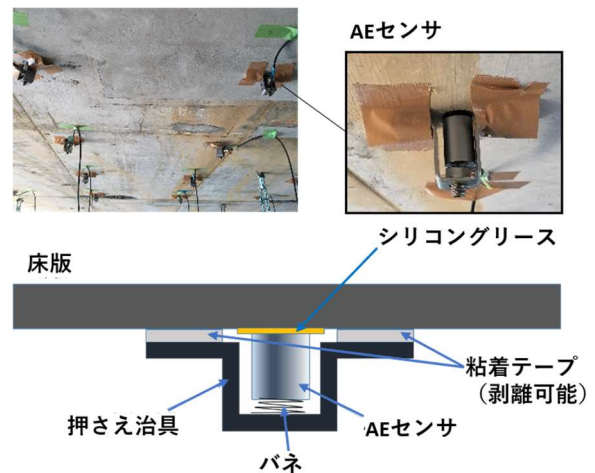


図-3 AEセンサ設置状況と固定方式模式図

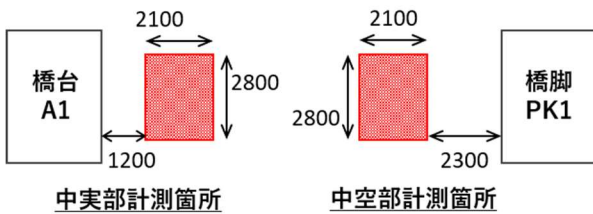


図-4 計測箇所の詳細位置

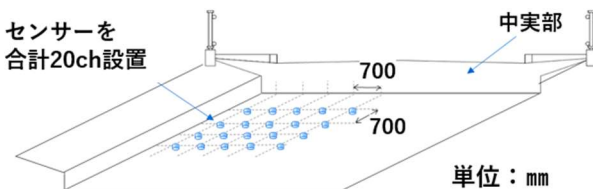


図-5 AEセンサ配置図

表-2 計測条件

AEセンサ	AE503SA40-BNC (富士セラミックス製)
計測帯域	20 - 400 kHz
サンプリング周波数	10 MHz

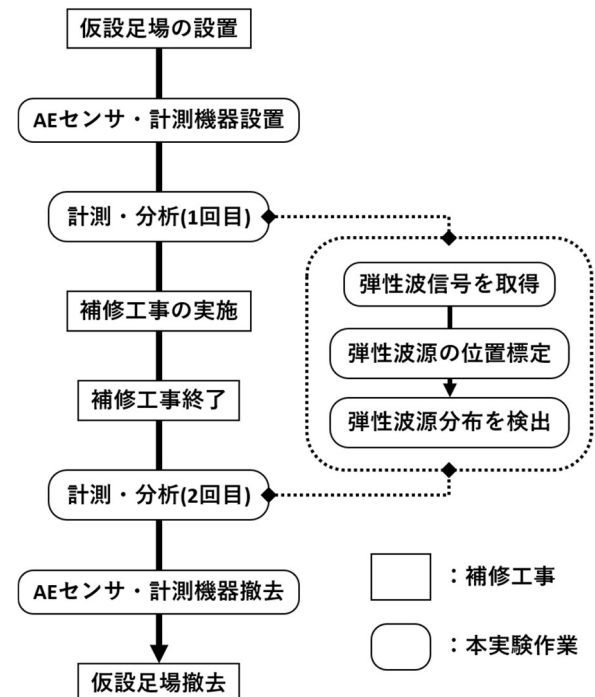


図-6 補修工事・AE計測のフロー



使用した計測機器は、AE 評価装置、モニタリング用ノート PC で商用電源(100V)より給電し、補修工事のために設けられた足場上で計測作業を実施した。AE センサにて受信した弾性波を電気信号に変換して出力し、出力された電気信号を計測装置にて収集を行い、解析用 PC で床版上面での弾性波源の密度分布を分析・観測した。

### 3. 実験結果

本検証で、得られた計測エリアの弾性波源の標定数を図-7 に示す。中実部および中空部共に、補修前後で弾性波源の標定数が約 2.3 倍程度に増加しており、

標定数の総計にも中実部および中空部で大きな差異は見られなかった。

これは、床版上面で励起された弾性波の床版下面に設置した AE センサまでの伝搬経路がひび割れ注入工により補修材が充填され既設床版と一体化したことによる影響と考えられる。したがって、疲労劣化により発生した床版下面のひび割れ箇所が補修により十分に充填されたと考えられる。

位置標定解析により算定した弾性波源をプロットした中実部計測エリアの散布図を図-8 に、中空部計測エリアの散布図を図-9

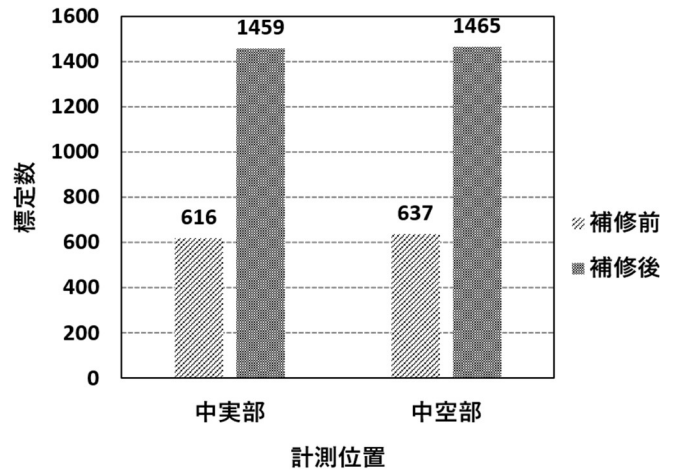


図-7 計測エリア内の弾性波源の標定数

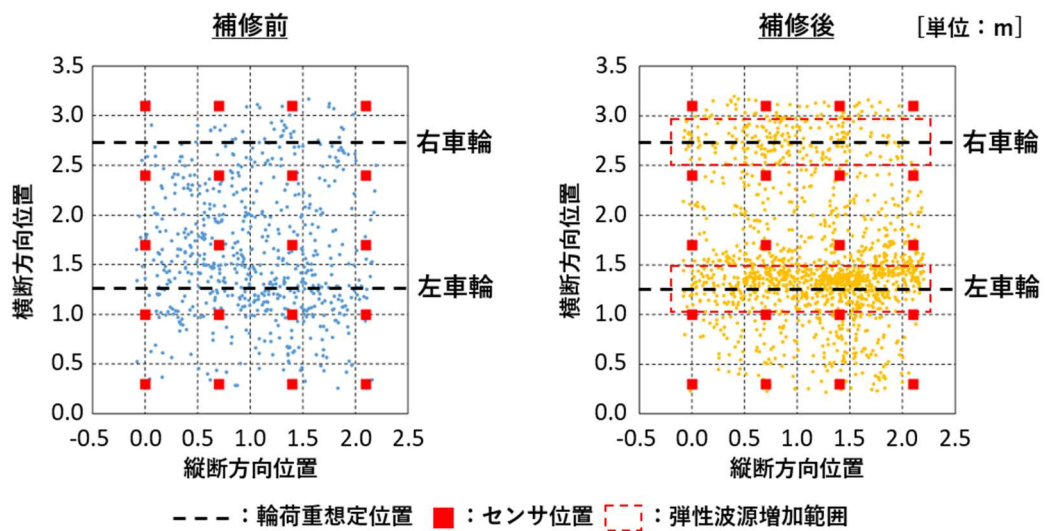


図-8 中実部計測エリアの補修前後の弾性波源の散布図

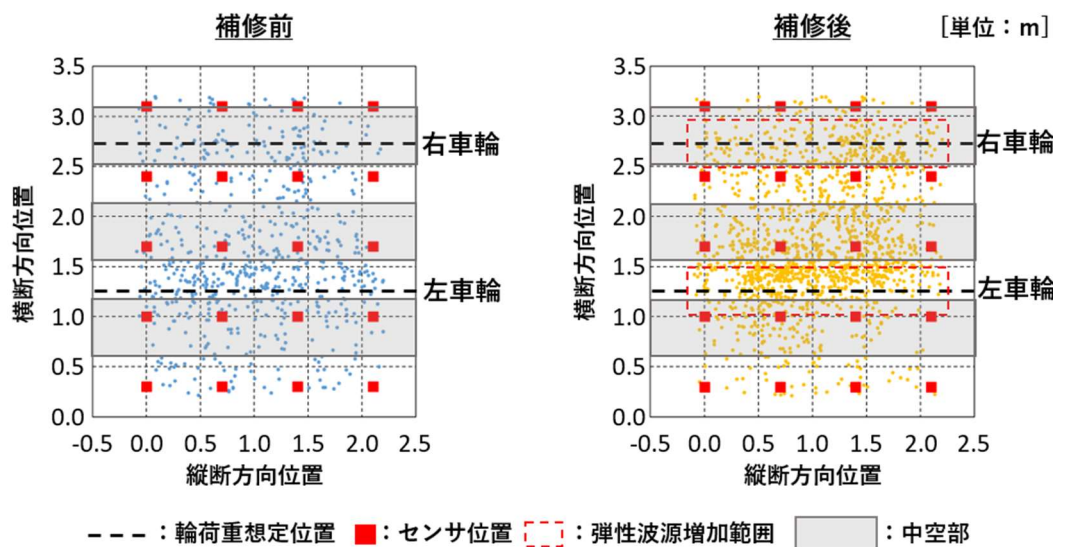
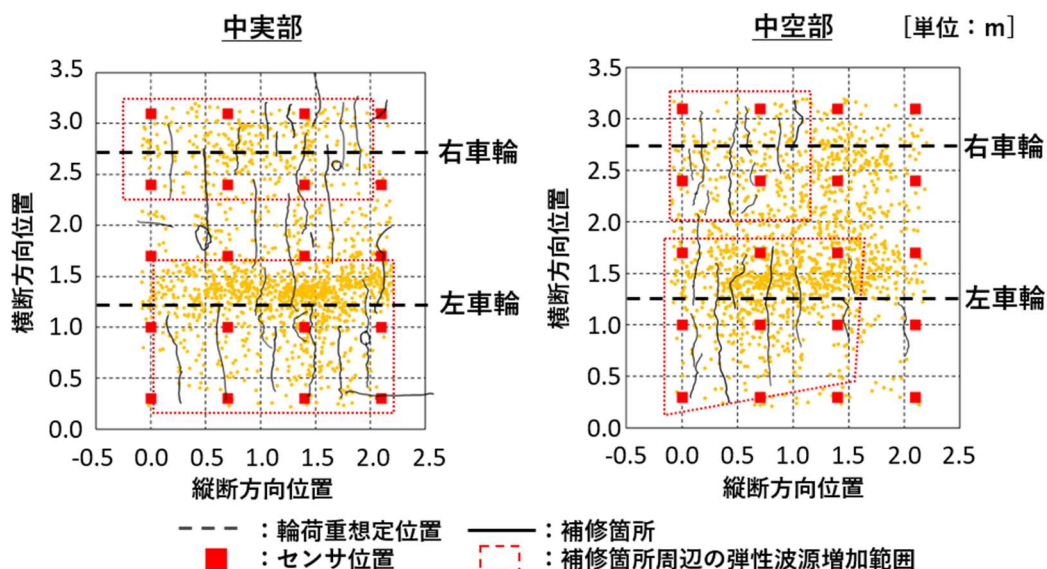


図-9 中空部計測エリアの補修前後の弾性波源の散布図

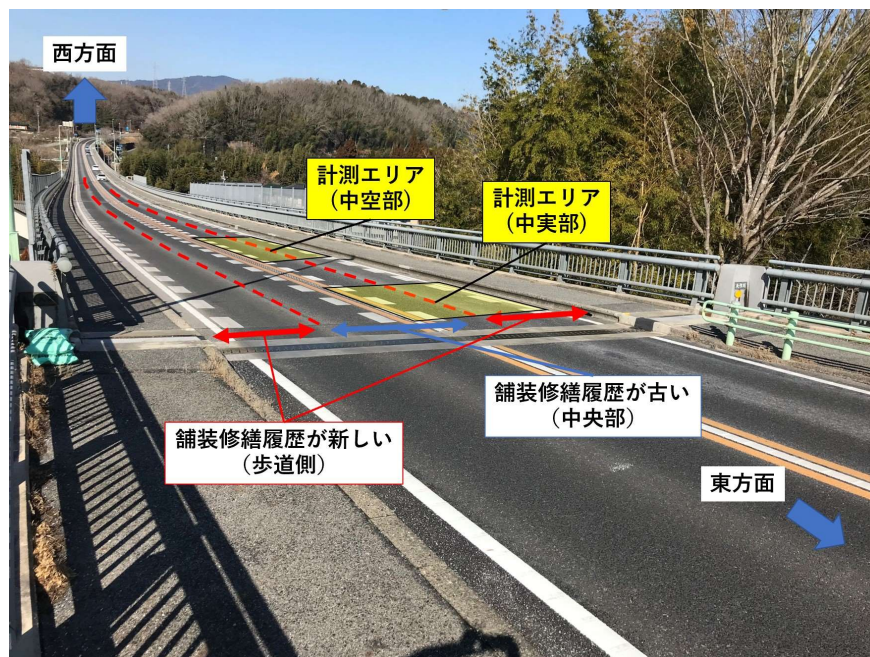
に示す。散布図内の点線は輪荷重のかかる想定位置であり、中空部および中実部共に輪荷重位置の周辺に密集して標定されている。輪荷重位置から外れて標定されているのは、車両ごとの輪位置のずれ、および二輪車による弾性波源を標定している、もしくは床版のたわみに伴って弾性

波が発生したことなどが想定される。標定数及び散布図を比較しても中空部と中実部で大きな違いは見られず、中空部が存在しても問題なく弾性波源を推定できた。補修前後で比較すると中空部及び中実部共に点線で囲われている輪荷重想定位置の周辺で標定数が増加している。これは、車両通行に励起された弾性波のセンサまでの伝搬経路が、床版下面の補修により既設床版と一体化したことで標定数が増加したと考えられる。

次に、中実部および中空部の散布図と補修箇所を重ねた図を **図-10** に示す。 **図-10** 中の点線で囲った範



**図-10** 散布図と補修箇所の重ね図



**図-11** 対象橋梁上面の舗装状況

囲内を確認すると、中実部および中空部の計測エリア共に、補修箇所周辺で弾性波源の標定数が密集して増加していることが分かる。また、ひび割れ注入箇所に沿って標定数が増加している部分も確認できる。このことから、ひび割れ注入補修により床版下面付近のコンクリートの一体性が向上したことが推定できた。また、弾性波源の標定数が左側輪荷重位置に偏っており、右側輪荷重位置周辺の標定数は増加の傾向にあるが、左側輪荷重位置と比較すると少ない。この原因として、対象橋梁の舗装修繕履歴を確認したところ、 **図-11** に示すように、通行帯中央部と端部で舗装修繕の時期がずれており、舗装の新旧により AE 計測の標定数に影響を及ぼした可能性が挙げられる。ひび割れ注入工により床版下面付近で弾性波の伝搬経路が回復したが、中央部の舗装の古い範囲においては舗装面に損傷が残存し弾性波の伝搬が阻害されていることが考えられ、右側輪荷重位置周辺では弾性波源の標定数が少なくなっていると考えられる。

#### 4. おわりに

本実験の結果から次のことが分かった。

- ・中実部および中空部共に、補修前後で弾性波源の標定数が約 2.3 倍程度に増加しており、標定数の総計にも中実部および中空部で大きな差異は見られなかった。
- ・標定数及び散布図を比較しても中実部と中空部で大きな違いは見られず、中空部が存在していても問題なく弾性波源を推定できた。
- ・中実部および中空部の計測エリア共に、補修箇所周辺で弾性波源の標定数が密集して増加していることが分かった。
- ・ひび割れ注入工により床版下面付近で弾性波の伝搬経路が回復したが、中央部の舗装面に損傷が残存し弾性波の伝搬が阻害されていることが考えられた。

以上より AE 法を活用することで、補修前後での弾性波源の標定数が増加していることを捉えることができ、補修箇所の周辺に密集して弾性波源の標定数が増加していることから、非破壊で補修部と既設コンクリート部の一体化を推定できることが示唆された。これは補修効果としてコンクリートの一体性が向上することにより、補修時の充填不足により生じる隙間からの劣化因子の侵入に伴う既設床版部への塩害等の耐久性も向上していると考えられる。また、RC 床版の補修によるコンクリートの一体性が向上しているかを評価するために AE 法が適用できるかを実構造物で検討したが、舗装の新旧と弾性波源の分布密度から、床版の一体性のみでなく舗装の状態も反映した結果が得られることが分かった。今後、床版上面における弾性波源の検出に限らず、床版内部を伝搬する弾性波の詳細解析等を行うことで、床版内部の深度方向の損傷検出など 3 次元的に床版内部状況を推定し可視化することができれば、不可視領域である床版内部の詳細調査が非破壊で実施することが可能になると考えられる。

#### 5. 謝辞

本検証は、愛知アクセラレートフィールド<sup>®5)</sup>の活動で実施したものである。検証を行うに際し愛知県道路公社のご協力を賜った。ここに感謝の意を表します。

#### 6. 参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会道路橋床版の維持管理評価に関する検討小委員会 道路橋床版の維持管理マニュアル 第 2 章 1 節 1 項(4) p.20 2012
- 2) 日本コンクリート工学会 コンクリート診断技術'19【基礎編】 5.5.2.(2) p.285 2019.2.22
- 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) H. Takamine, et al., Efficient Damage Inspection of Deteriorated RC Bridge Deck with Rain-induced Elastic Wave, Const. Build. Mat., 162, 2018
- 5) 愛知アクセラレートフィールド <https://www.acceleratefield.com/outline/>