

論文

AE 法による RC 床版内在損傷補修効果の可視化

高峯英文*, 碓井隆*, 上田祐樹*, 上野佳祐*, 渡部一雄*, 二村大輔**

* (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)
 ** 福岡北九州高速道路公社, 企画部技術管理課 (〒812-0055 福岡市東区東浜 2-7-53)

道路橋床版の長寿命化にあたって、適切な補修を行うことが必要不可欠である。しかし、補修が適切に行われ、十分な効果が得られたかを把握することは難しい。この課題に対し、AE センシングにより補修効果の可視化を試みた。我々の手法では、床版下面に AE センサを設置し、交通時の弾性波を計測することにより、弾性波伝搬を妨げている内在損傷の分布を推定する。補修前後の分布の変化から、補修効果を面的に把握できた。

キーワード: AE, RC 床版, 内在損傷, 補修効果

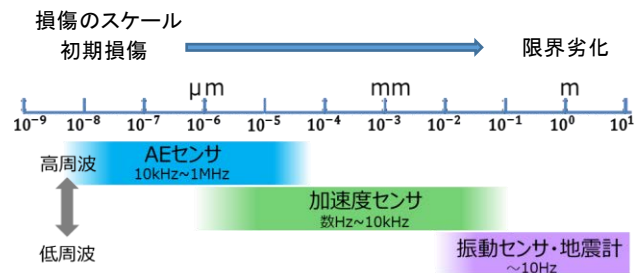
1. はじめに

国内橋梁の高齢化が進む中、橋梁の維持管理の効率化が求められている¹⁾。効率的な維持管理を進めるにあたっては、適切な補修を実施していくことが重要である。そのためには、補修の効果を適切に評価できる必要がある。しかしながら、補修の効果を正確に把握するのは必ずしも容易ではなく、補修効果の確認が不十分なまま供用することで、補修後の早期の再劣化につながる場合もある。

RC 床版のひび割れに関しては、補修方法のひとつとして樹脂注入工法が用いられる。この工法では、ひび割れに樹脂を注入してコンクリートと一体化させ、水分等の侵入を防ぎ、耐久性能の向上を図る。一方で、補修の作業により、内部のひび割れに樹脂が正しく注入され、効果が得られたかを確認するのは困難であり、消費された樹脂の量等が補修効果の目安として利用されている。しかしながら、ひび割れ内の接着、充填状況を直接示す指標ではないため、実際の補修の効果や充填が不十分な箇所等を把握することができない。

本報告では、樹脂注入工法のひとつである IPH 工法²⁾を用いた補修が実施された RC 床版を対象に、AE (Acoustic Emission) センシングを用いて、補修の効果を可視化することを試みた。我々の手法では、AE センサを用いて床版内部の損傷を検出する³⁾。本手法を用いて樹脂注入前後の内部損傷の状態を比較することにより、樹脂注入の効果を直接観測できると考えられる。本稿では、橋梁上の交通により発生する弾性波を計測して分析し、補修の前後で比較した結果について報告する。

(a) センサの周波数帯域



(b) 弾性波の波形例

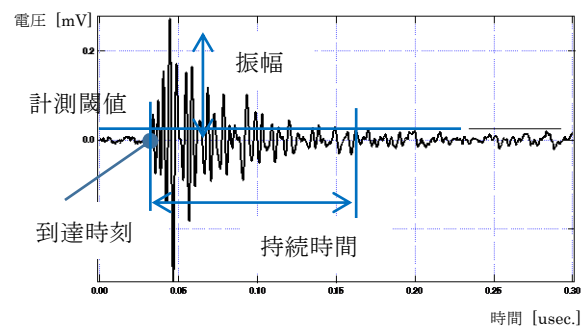


図-1 AE センシングの概要

2. AE センシングによる内在損傷検出

図-1 に、AE センシングの概要を示す。AE センサは材料の破壊に伴い放出される非常に微小な振動 (AE) を検出するセンサである。対象とする周波数帯域は一般的に加速度センサより高く、数十 kHz ~ MHz 帯である。図-1 (b)に例を示したような信号波形が得られ、計測閾値を超えたひとまとまりの波を AE ヒットと呼ぶ。個々

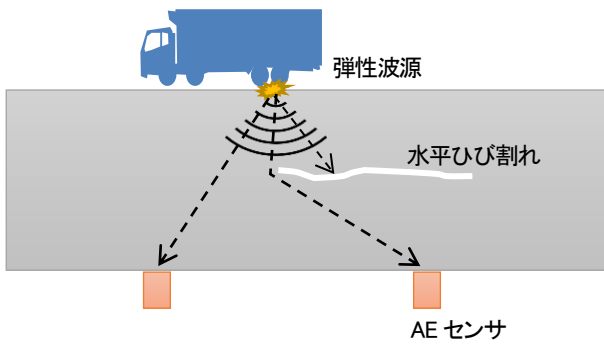


図-2 弾性波による内在損傷検出

のヒット波形から、センサに到達した時刻、最大振幅、持続時間、といった特徴量を抽出し、分析を行う。

図-2 に AE センシングを利用した、床版の内在損傷検出手法の概要を示す。本手法では、床版下面表面に AE センサを設置する。計測対象の床版上を車両が通過する際、微小なひび割れの進展やこすれ、タイヤと路面の接触等ともない、弾性波が発生する。床版で発生した弾性波は、床版内部を伝搬し、床版下面に設置された AE センサで検出される。複数の AE センサを用いれば、弾性波がそれぞれのセンサに到達する時刻の差が得られる。

そこから逆算することで、弾性波が発生した位置を推定することができる。この弾性波源位置標定により、計測期間中に発生した弾性波源の分布を得ることができる。健全な床版においては、弾性波は遮られることなくセンサに到達するため、弾性波源の位置が容易に標定される。一方で、弾性波の伝搬経路にひび割れ等があった場合、弾性波は反射、減衰、迂回等により正しくセンサに到達しない。このため、標定される弾性波源が減少したり、位置がずれたりする。結果として、床版の内在損傷を有する領域では、標定される弾性波源が少なくなる。一定期間の計測の後、弾性波源の密度分布を見ると、床版内部に損傷を有する領域では密度が低下して見えることとなる。これにより、計測した床版の内在損傷領域の分布を得ることができる。

3. 計測概要

図-3 に計測の概要を示す。対象の橋梁は福岡北九州高速道路公社管理下の、供用中の高速道路橋梁である。同一径間内にある床版 A、B の 2 パネルを対象に、一般車両の交通ともない発生する弾性波を計測した。両パネルとも、下面にひび割れが見られ、炭素繊維シートに

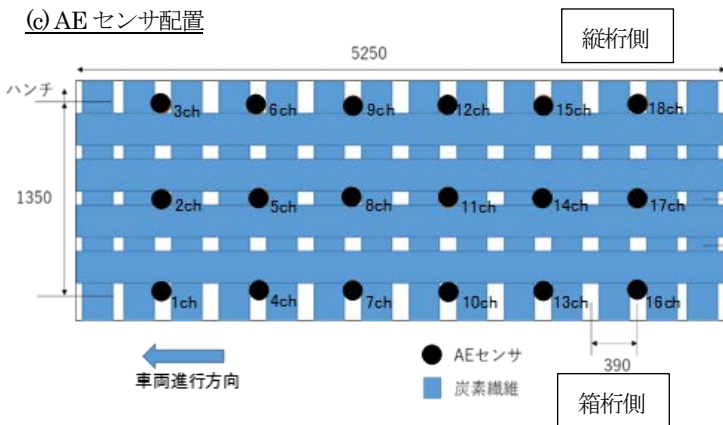
(a) 計測対象橋梁



(b) 計測の様子



(c) AE センサ配置



(d) 車両通過位置

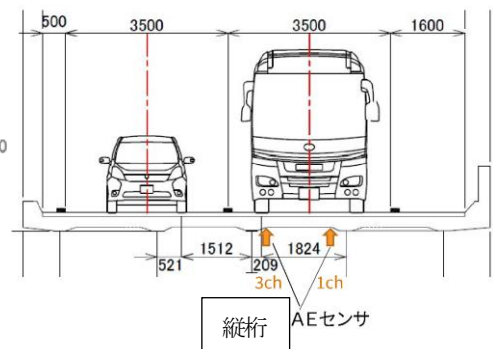


図-3 計測概要

よる補強が実施されていた。下面の目視点検結果としては、床版 B でより変状が多く見られていた。

計測装置は、Vallen 社製 AMSY-6 を、AE センサは、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。計測機器類は、床版補修工事のために設けられた足場内に設置した。センサは、粘着シートを利用した専用の治具で、床版下面表面に直接固定した。対象床版には、図に示した形で炭素繊維シートが施工されていたため、シートの隙間部分にセンサを配置した。

各パネルのセンサ配置を、図-3 (c) に示す。全 18ch で、3×6 列の格子状の配置を基本とした。図は見下げ配置を示している。図中の左右方向が橋軸方向に対応し、図の右側から左側に向かって車両が通行している。センサ間隔は、橋軸方向に 780 mm、橋軸直角方向には 700 mm を基本とした。1 パネルの計測としては、約 4 m×1.5 m の範囲をカバーした。一部、床版下面のひび割れ等により表面部分が平坦でなくセンサ設置に不適切であった個所では、隣の区画の平坦な個所にずらしてセンサを配置した。補修後の計測にあたっては、下面表面の状態は改善されていたが、補修前の計測に合わせたセンサ配置とした。計測した床版と車両の通行位置との関係を図-3 (d) に示す。計測領域は大型車両の車幅より狭く、片輪が計測領域の端かその外側を通過するくらいの位置関係となっている。

4. 分析結果

図-4 に計測データの一部を示す。図は、計測した時系列データのうち約 2 分間分を抜き出したものである。横軸は時間、縦軸は得られた各ヒットの信号振幅を示し、1 点 1 点がひとつのヒットを表している。ヒットのピークが断続的に観測されているのが分かる。それぞれのピークは、概ね車両 1 台の通過に対応している。車両 1 台分の固まりを見ると、車両が計測領域を通過する 1 秒未満の間に多くのヒットが観測されている。これらの弾性

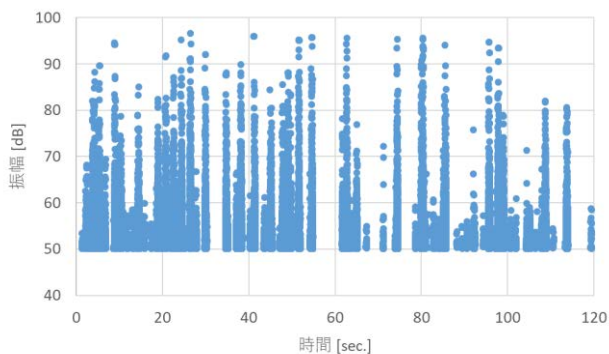


図-4 車両通行時の取得データ

波の発生源としては、床版に輪荷重が作用したことによるひび割れ進展やこすれのほか、タイヤと路面とのこすれや衝撃などが主であると推測される。このような床版のモニタリングで観測されるヒットのうち多くは、複数の波が連続的に連なったような波形を持ち、単独の波としてセンサ到達時刻を特定することが難しい。このため、この種のヒットに対して単一の弾性波源の位置を標定することはできない。一方で、一部のヒットでは、単発的な波形の立ち上がりが見えられており、複数のセンサで同一の波の立ち上がりを特定できる。この場合には、複数のセンサ間の到達時刻差から弾性波源の位置標定が可能である。床版の計測データから、上記のような標定可能なヒットを抽出し、分析を行った。

図-5 に補修前の床版計測で得られた位置標定結果を示す。図にはセンサ配置とともに、弾性波の到達時刻差から標定した弾性波源の位置をプロットした。各弾性波が最初に到達したセンサで検出された信号振幅ごとにプロットしている。また、参考までに大型車の片輪が平均的に通行する位置も合わせて表示した。位置標定にあたっては、振幅の低い信号をノイズとして除去したうえで計算を行った。更に、得られた結果のうち、センサの位置や組み合わせに対して到達時刻の矛盾が大きかった信頼性の低いデータをフィルタリングして、最終的

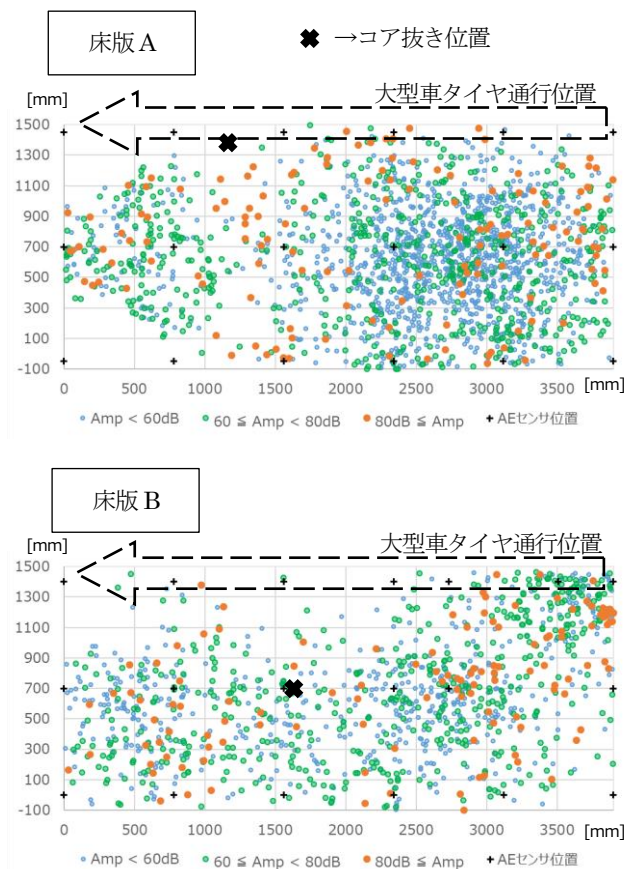


図-5 弾性波源位置標定結果 (補修前)

な標定結果を得た。

床版 A, B ともに、深夜を含む約 8 時間分の計測データを分析した。床版 A の結果では、図の右半分では比較的多くの弾性波源が標定されているのに対して、左半分では標定された点が非常に少なかった。特に、振幅 60 dB 未満の弱い弾性波源がほとんど標定されていない領域も見られる。2 節で述べた手法に基づくと、こういった弾性波源の少なく見える領域では、大きな水平ひび割れなど、弾性波の伝搬を妨げるような大きい損傷が生じている可能性が考えられる。

床版 B では、全体的に床版 A よりも弾性波源密度が低く、より内部の変状が進んでいる可能性が高いと推測される。特に、図中左上の領域において、顕著な密度の低下が見られた。

目視においても表面の変状がより進んでいた床版 B の方が、弾性波源の標定が少ないという結果が得られており、両者の結果で整合性が取れている。

図-6 は、各床版で抜いた $\phi 25$ mm の小径コアのサンプルである。コア抜き位置は図-5 に示した。コアは割れていたが、穴側には一見して分かるほどのひび割れは見られなかった。小径コアであり、コア抜きの際に折れた可能性があるが、近隣の床版では水平ひび割れが確認されており（後述、図-8）、折れた位置が脆弱になっていた可能性もある。そのため、ひび割れか脆弱部位の影響で弾性波が伝搬しにくくなり、弾性波源の標定密度が低下したと考えられ、今回の計測結果と既設床版の内

部損傷状況には一定の相関があったといえる。

上記の計測後、床版 A, B ともにひび割れ補修が実施された。補修完了後に、再び同じ床版を対象に AE 計測を実施した。計測データから、補修前と同様に位置標定を行った結果を図-7 に示す。こちらは夕刻の約 6 時間分のデータを分析した結果である。床版 A, B どちらに

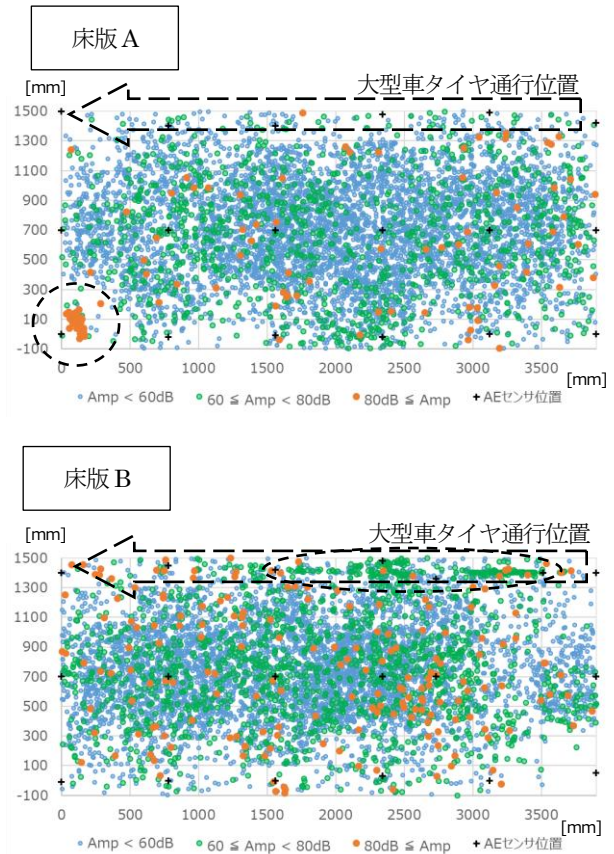


図-7 弾性波源位置標定結果（補修後）

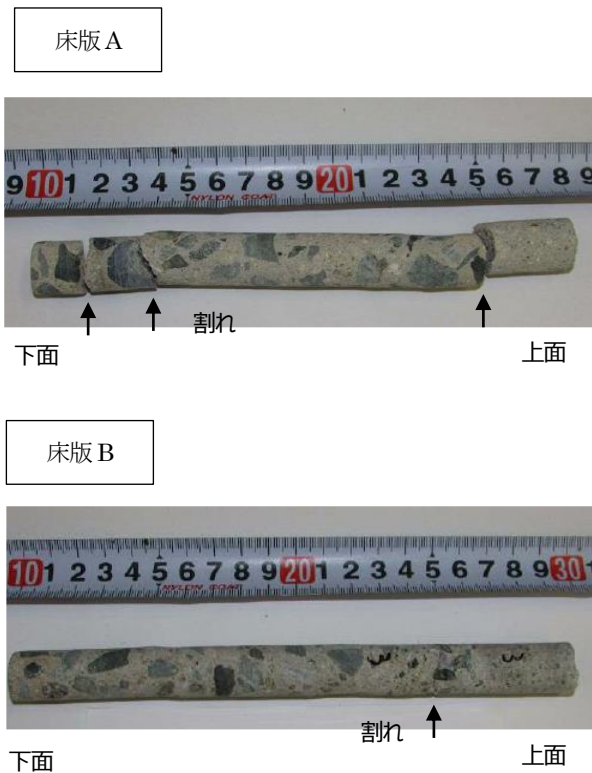


図-6 補修前床版のコアサンプル

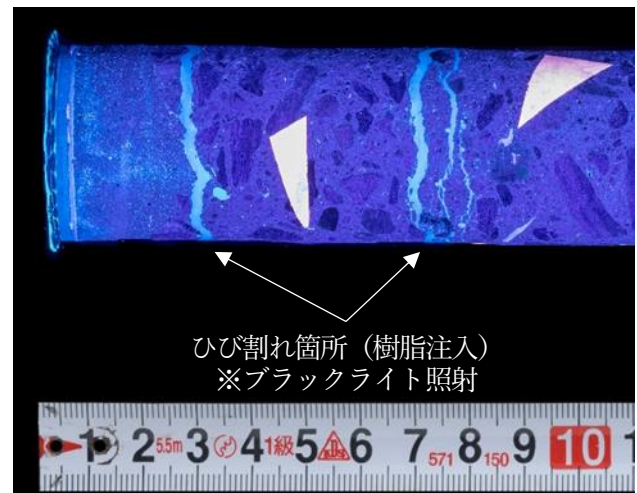


図-8 近隣床版補修後のコアサンプル

においても、全体的に標定された弾性波源の数が大幅に増えたことが分かる。また、補修前に比べて、計測領域全体にわたって一様に近い分布に変化している。一部、図中に点線で示したように、センサで囲まれた領域の端部に弾性波源の集中が見られる。これらは、領域範囲外の何らかの弾性波源から伝搬してきたものが端に配置されたセンサに検出され、この領域に集中的に標定されたと推測される。したがって、計測領域内の損傷とは関係がないと考えられる。以上の結果より、補修によって、床版全域において弾性波が伝搬しやすくなったと推測することができる。

図-8に、参考として、今回 AE 計測を実施した床版の近隣にある床版の補修後のコア抜き結果を示す。同床版は、計測対象床版と同様に、IPH 工法による補修が実施された。蛍光観察により、補修前に生じていた水平ひび割れに、注入された樹脂が充填されていることが確認できる。近接している計測対象の床版においても、同様の状況であったと推測することができ、今回の分析結果と整合していると考えられる。

以上のように、標定結果より補修前後の分布の変化を確認できたが、両計測における計測条件が異なるため、このまま補修前後を定量的に比較することは難しい。表-1 に各計測データの条件比較を示す。計測時間は補修前より補修後の方が短いにもかかわらず標定数は大幅に増加しており、補修による標定数の増加は明らかである。ただし、弾性波は基本的に、車両が通過するごとに発生するものであるため、計測時間帯により交通量が異なる条件下では、単純に時間あたりで比較するのは適切でないと考えられる。参考までに統計では、対象橋梁における計測時期の平均的な交通量は、日中のピークで約 3,000 台/時間、深夜で約 100 台/時間と変動し、1 日で約 3 万台程度であった。したがって、交通量を基準に、異なる計測の結果を比較することを検討した。

交通量については、図-4 に示したように、AE 計測データから、計測対象の床版上を車両が通過するのを検出することができる。これを利用して、計測データから計測期間の通過車両数を推定した値を表-1 に記載してい

表-1 各計測時の条件比較

床版	計測時間 [h]	推定車両数 [台]	実測車両数[台]	標定数
A 補修前	8	4140	3828	2094
B 補修前	8	4351	4886	1250
A 補修後	6	3261	2759	6576
B 補修後	6	3984	3172	6841

る。また、実際の交通量を併記した。大まかな車両数や傾向は推定値と一致している。分析では、この通過車両数の推定値を元に弾性波源の密度を正規化したものを、健全性の指標とした。この指標により、異なる計測間での健全性の比較が可能であると考えられる。

以上の処理により得られた各床版の健全性の分布を図-9 に示す。床版 A, B それぞれについて、補修の前後の分布を並べて示した。健全な領域ほど白く、健全性の低い領域ほど黒く表示した。健全性の低い領域ほど、標定された弾性波源の密度が低く、弾性波源の伝搬が妨げられる損傷が多いことを示している。床版 A, B ともに、補修により健全性が大幅に改善していることが見て取れる。補修後であっても、計測領域の周辺部の健全性が不十分に見えるが、これは位置標定の特性によるものである。位置標定では、複数のセンサで同じ弾性波を検出する必要があるが、周辺部は中央部に比べてセンサが少ないため、同じ弾性波を検出するセンサ数が少なくなる。結果として標定確率が下がり、特に周辺部で近くにセンサがない位置では弾性波源密度が低下する傾向がある。したがって、この結果のみから周辺部の健全性低下を示唆するものではない。一方で、床版 B の右方の領域では、健全性が少し改善しているものの、他の領域に比べて健全性が低い部分が見られる。この領域では樹脂の充填が完全ではない部分が残っていることを検出している可能性も考えられる。

今回図-9 で表示した健全性は、あくまでも補修前と補修後の間のレンジ内で比較したものであり、補修後の健全性が、例えば新設橋梁レベルと比較してどの程度に相当するものかを絶対的に示すものではないことには注意が必要である。しかしながら、本手法は、補修により健全性が回復したことを検出できており、補修効果を面的に可視化できることが分かった。今後、本指標は、他の評価指標との対応付け等を通して、健全性の絶対的な評価指標になり得るものと考えられる。

5. まとめ

AE センシングを用いた床版の内在損傷検出技術を応用して、床版のひび割れ補修効果の可視化を試みた。

補修前後の弾性波源の標定密度の比較結果から、補修後は、弾性波源の標定密度が全面的に上昇することが確認できた。これは樹脂注入によるひび割れ補修に伴いコンクリートの一体性が改善され、弾性波の伝播挙動の大幅な改善を反映したものと推定される。

本手法を用いることで、補修の効果を面的に可視化することができた。効果の可視化により、補修により床版の状態が相対的に改善したことが確認できた。一方で、相対的な評価だけでなく、床版が十分健全な状態にまで回復したかを絶対的に判断できる指標とすることが今後の課題である。

参考文献

1) 国土交通省, ”国土交通白書 2020”, 国土交通省ホームページ, <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/pdfindex.html>

2) 渡邊, 他: 内圧充填接合補強工法によるコンクリート中への樹脂充填性能と補修効果, コンクリート工学年次論文集, vol.34, No.2, 2012

3) H. Takamine, et al. , Efficient Damage Inspection of

Deteriorated RC Bridge Deck with Rain-induced Elastic Wave, Const. Build. Mat., 162, 2018

4) Shiotani T, et al., Global monitoring of large concrete structures using acoustic emission and ultrasonic techniques: case study. J Bridge Eng 14(3):188–192, 2019

5) 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, 1994.11

(2020年7月17日受付)

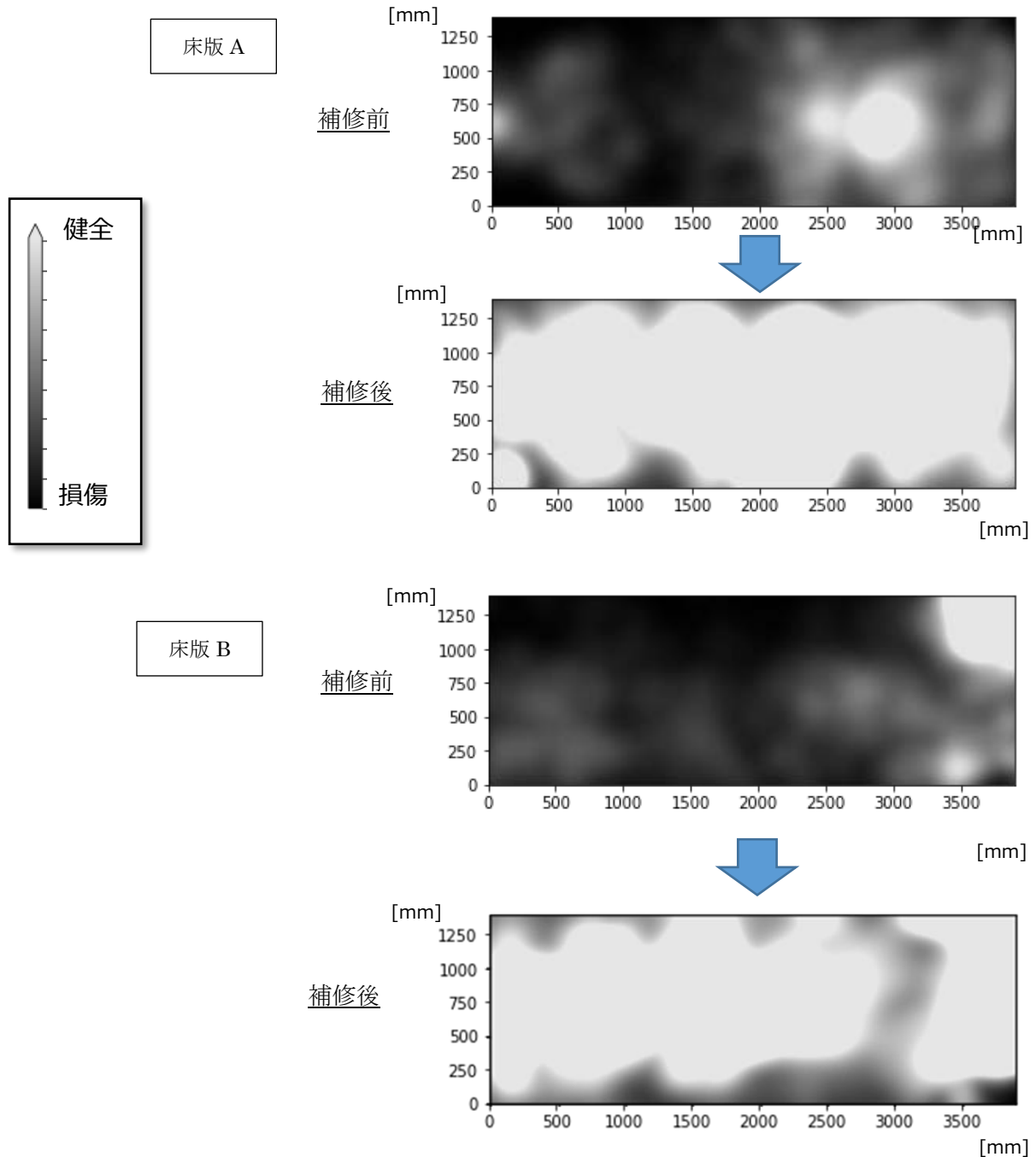


図-9 健全性分布