

走行する車両による微弱な弾性波を利用した 橋梁床版の劣化評価技術

Deterioration Assessment Technique for Bridge Decks Using Weak Elastic Waves Generated from Crossing Vehicles

渡部 一雄 WATABE Kazuo 高峯 英文 TAKAMINE Hidefumi 奥村 橋一 OKUMURA kyoichi

橋梁(きょうりょう)などのインフラ構造物の経年劣化が顕在化しつつあり、維持管理の効率化による人手とコストの削減が社会的要請となっている。

東芝グループは、材料が壊れるときなどに発生する微弱な弾性波(AE^(注1): Acoustic Emission)を用いたコンクリート構造物の劣化診断システムを開発してきた。この技術を応用して、車両通行時に発生するAEから橋梁床版内部の劣化をデジタル化し、健全度を解析して可視化する劣化評価技術を開発した。高速道路での実証試験で、劣化状況を精度良く評価できることを確認した。これにより、橋梁床版の劣化状態に応じた補修計画の策定や工事の実施が可能になり、人手やコストを削減できる。

Because aging social infrastructure in Japan including bridges, etc. is deteriorating, it is necessary to streamline maintenance to save on labor as well as costs.

The Toshiba Group has developed a deterioration diagnosis system for concrete structures which detects acoustic emissions generated from internal cracks. Using this technology, we have developed a new deterioration assessment technique capable of analyzing and visualizing the internal soundness of bridge decks based on digitized data from weak elastic waves generated on the road surface as vehicles cross bridges. Demonstration experiments on an actual expressway confirm that this method can assess bridge deck internal deterioration with a high degree of accuracy. This technique will enable formulation and implementation of repair and maintenance plans at the optimal times, reducing manual labor and costs.

1. まえがき

国内インフラ構造物、特にコンクリート構造物は、1950年代後半に始まる高度経済成長期に多くが建設され、その経年劣化が顕在化しつつある⁽¹⁾。また、2012年12月の笹子トンネル天井板崩落事故をきっかけに、道路法施行規則の一部が改正され、橋梁・トンネルなどの、5年に1回の頻度での近接目視による点検が定められた。一方で、我が国の人口は2008年をピークに減少に転じており、生産年齢人口(15～64歳)はそれより前の1994年から減りはじめて2035年にはピーク時の25%以上の減少が予測されている。このため、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、人的リソースの面でも、財政の面でも、早晚困難になると推定され、点検作業の効率化が急務である。劣化が深刻化してから大規模な修繕を行う“事後保全型”から、劣化が軽微なうちに補修する“予防保全型”への転換は、その基本である。

一方で、予防保全そのものの効率化も必要となる。従来は、予防保全の判断材料となる点検を、人手、特に目視に

頼っていた。そこで、できるだけ人手に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。

東芝グループは、AEに着目し、コンクリート構造物の劣化診断システムを開発してきた⁽²⁾。この技術を橋梁の重要部材である床版の劣化評価に応用し、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を開発した。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、車両が通常走行するときに発生するAEを積極的に利用して、内部の劣化を評価することが特徴である。ここでは、橋梁床版の劣化評価技術概要と、高速道路橋での実証試験の結果について述べる。

2. コンクリート内部劣化の検出原理

2.1 橋梁床版内を伝搬するAEの様子

橋梁を走行する車両によってAEが発生し、コンクリート床版内部を伝搬の様子を、**図1**に示す。車両が走行すると、タイヤは、はがきサイズ程度の接地面を介して舗装と接触する。走行中、連続的に接地面が走行方向に移動し続ける動きを、タイヤが連続的に舗装をたたく動作と捉えられる。また、接地面に掛かる荷重により舗装(アスファルト)

(注1) ここでは、骨材(碎石)同士のこすれなどによる弾性波も含む。

がひずみ、舗装内部の骨材（碎石）同士のこすれも生じる。このため、タイヤが通過する舗装面からは連続的にAEが発生する。発生したAE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。

図1は、トラックの前方にある2本のタイヤの接地面からAEが発生して伝搬する様子を、模式的に示している。内部にひび割れなどの劣化がないと、発生したAEは直線的な経路をたどってAEセンサーへ到達する。ひび割れがあると、AE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、影響を受ける。

2.2 震源位置標定

2.1節で述べた一つ一つのAEを小さな地震と捉え、AEの発生源、すなわち震源を特定する。図2に、AEセンサーが捉えた信号から震源を特定する方法を示す。ここでは分かりやすくするために、2次元平面での震源特定の方法を

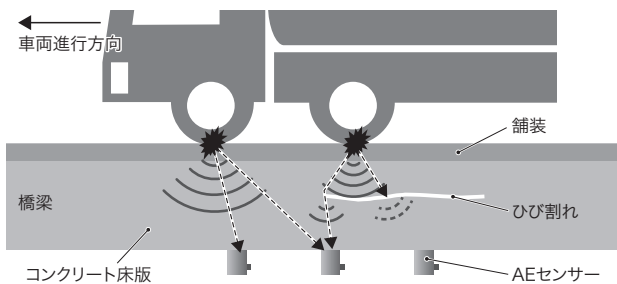


図1. AEが床版内部を伝搬する様子

コンクリート床版にひび割れがあると、AEは影響を受けて、方向が変わったり、減衰したりする。

Elastic wave propagation through concrete deck

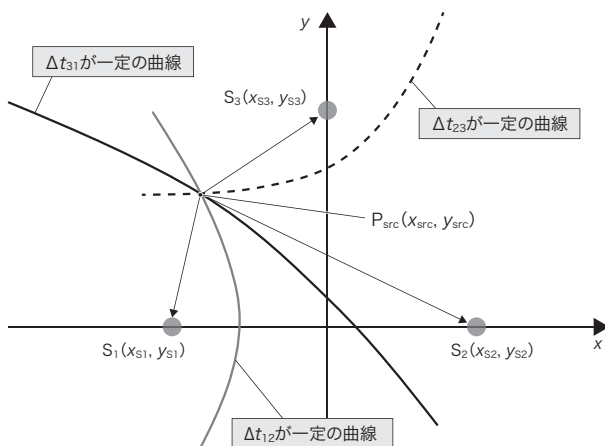


図2. AEの震源位置標定の概要

各AEセンサーに弾性波が到達する時刻の差から、震源位置を特定する。

Method to determine elastic wave source locations

述べる。

震源 $P_{src}(x_{src}, y_{src})$ から発生したAEは、三つのAEセンサー $S_1(x_{s1}, y_{s1})$, $S_2(x_{s2}, y_{s2})$, $S_3(x_{s3}, y_{s3})$ まで伝搬して検知される。このとき、AEセンサーへの到達時刻は、震源からの距離に応じて異なる。AEセンサー S_m とAEセンサー S_n への到達時刻の差を Δt_{mn} 、構造物内のAEの伝搬速度を v とすると、 P_{src} の座標と S_1 , S_2 の座標との間には式(1)の関係が成り立つ。

$$\Delta t_{12} \cdot v = \sqrt{(x_{src} - x_{s1})^2 + (y_{src} - y_{s1})^2} - \sqrt{(x_{src} - x_{s2})^2 + (y_{src} - y_{s2})^2} \quad (1)$$

式(1)は、震源が二つのAEセンサーの位置を焦点とする双曲線（二つのうちのひとつ）上にあることを表している。同様に、 S_2 と S_3 、及び S_3 と S_1 の到達時刻差を基に二つの双曲線を描く。こうして作成された三つの双曲線の交点、震源地と特定できる。これを、震源位置標定と呼ぶ。

2.3 内部劣化の検出

橋梁の舗装面上を大量に車両が走行すると、多量のAEが発生する。しかし、2.1節のように床版内部の経路上にひび割れがあるとAEの伝搬が阻害され、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。こうした作用により、内部ひび割れ部分には震源が標定されにくくなる。

内部に劣化を模擬する砂利を埋め込んだ実物大のコンクリート床版を用いて、震源位置標定の試験を行った（図3）。床版上面を一様にハンマーで打撃することで発生させたAEの震源を標定し、2次元平面上にプロットした。内部劣化エ

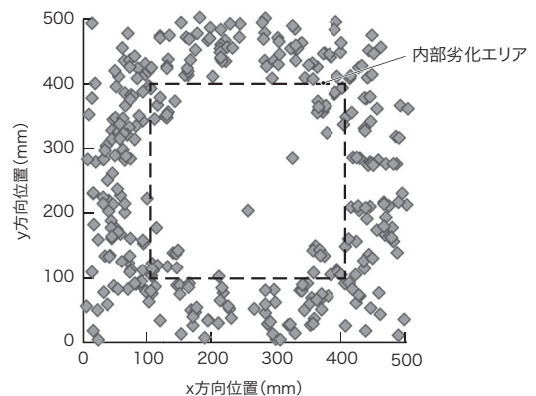


図3. 震源位置標定の模擬試験の結果

内部劣化を模擬する砂利を埋め込んだコンクリート床版を用いて震源位置を標定したところ、内部劣化エリアの震源分布が少ない結果が得られた。

Results of tests to determine elastic wave sources using simulated concrete deck

リアには、震源がほとんど標定されないことが分かる。

このように、車両走行で発生するAEの震源分布を算出し、震源密度の高低から床版内部の劣化状態を定量的に評価する。

3. 橋梁床版の劣化評価

2章の原理に基づく道路橋床版の劣化評価の手順を、次に示す。

まず、橋梁床版に設置したAEセンサーにより、路面で発生するAE信号を取得する。次に、AEの震源位置標定を行い、震源分布を求める。得られた震源分布から、震源密度を算出し、床版を見下ろした平面に展開した震源密度マップを作成する。計測期間内に路面を走行する車両数は計測場所ごとに異なるため、期間内の走行車両数で正規化する補正を行い、最終的に健全度マップを生成する。対象箇所ごとの健全度は、震源密度の基準値と比較し、震源密度が高い場合が健全、震源密度が低い場合が劣化と評価する。

4. 実際の高速道路橋梁での実証試験

福岡都市高速の橋梁で、劣化評価技術の実証試験を行った⁽³⁾。橋梁を走行中の車両で発生したAEを、鉄筋コンクリート床版下面に設置したAEセンサーで計測した(図4)。計測時間は約2時間である。AEセンサーは、縦430 mm

及び横800 mmの間隔で3行6列、計18個設置した。AEセンサーで囲われたエリアが有効な評価エリアであり、ここでは約4,000×860 mmである。コンクリート面へのAEセンサーの設置には専用のセンサーホルダーを利用した。

実証試験の結果を図5に示す。震源位置標定では、AEセンサーが検知した信号振幅が小さいものや、誤差が大き

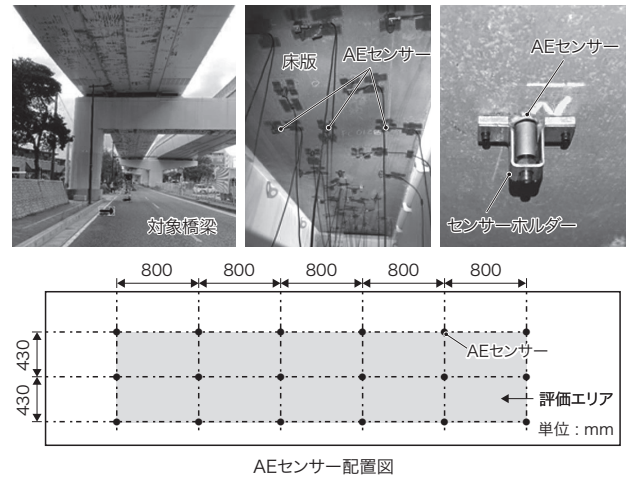


図4. 高速道路での実証試験の概要

AEセンサーを床版下面に設置して、通行する車両によるAEを観測するので、車両の通行規制は必要ない。

Overview of demonstration experiments on actual expressway

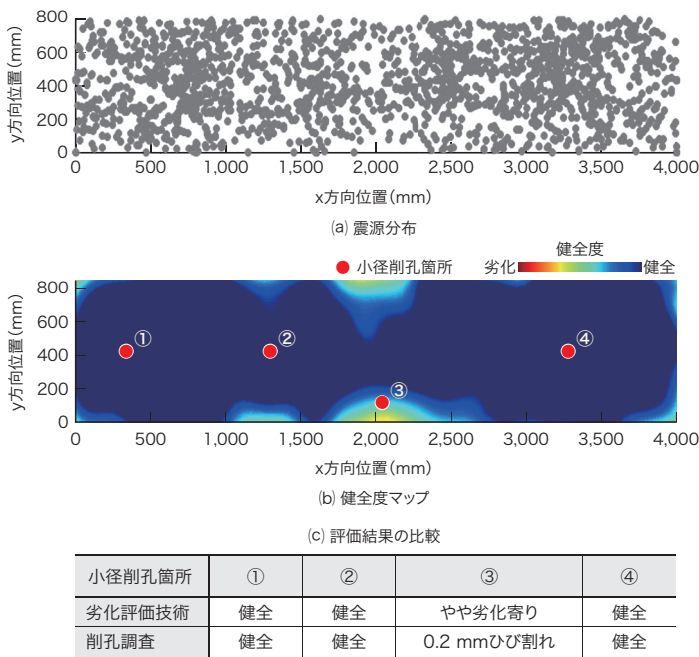
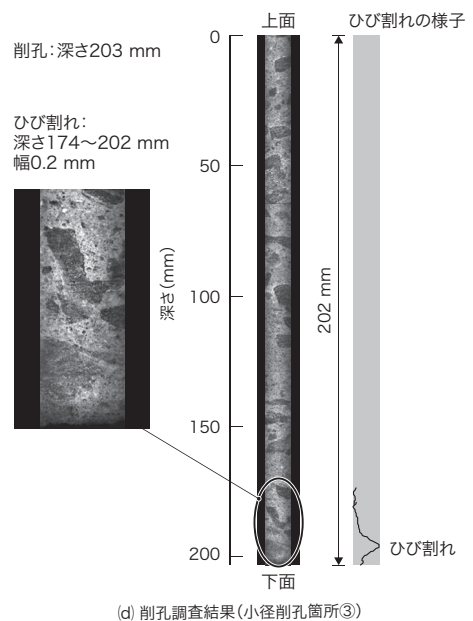


図5. 実証試験の結果

健全度マップでやや劣化寄りと評価された箇所の床版を削孔して調査したところ、微小なひび割れが見つかった。

Comparison of soundness map and drilling survey data obtained by demonstration experiments



(d) 削孔調査結果(小径削孔箇所③)

いもの(図2の3本の双曲線の交点のずれが大きいもの)はノイズとみなして除外した。この結果では、評価エリア全体にわたって震源がほぼ一様に分布していることが分かる(図5(a))。震源分布から変換した健全度マップ(図5(b))から、一部のエリアでやや劣化寄りであったものの、全体に健全と評価された。

この結果の妥当性を評価するため、コンクリート床版の削孔調査を行った。健全度マップ上の①～④の4か所を直径10 mmのドリルで削孔し、内視鏡で内部を観測した(図5(c), (d))。開発劣化評価技術でやや劣化寄りと評価した箇所から、微小なひび割れが検出されるなど、削孔調査結果とよく一致し、劣化評価技術の妥当性が確認できた。

鉄筋コンクリート床版の補修の前後に、この劣化評価技術を適用した結果を、図6に示す。劣化して補修対象となった床版の、補修前後の内部状態を比較し、補修効果を可視化した。補修前は全体に劣化エリアが広がっていたが、補修後に健全度が回復した様子が明らかである。この技術が、補修効果の評価としても有効であることを確認した。

5. あとがき

道路橋を走行する車両が発生するAEを利用したコンクリート床版内部の劣化評価技術を開発し、高速道路で実施した実証試験で、劣化状況を精度良く評価できることを確認した。

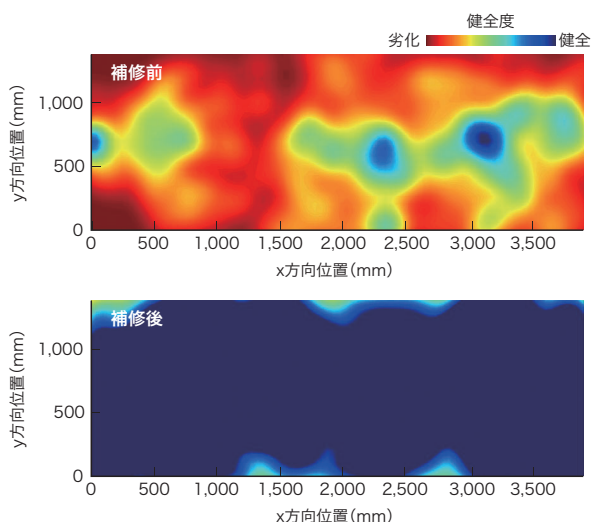


図6. 床版補修前後の健全度マップの比較

高速道路において、コンクリート床版のひび割れ補修工事の前後で健全度マップを比較したところ、全体に健全度が改善したことが示され、補修の効果が確認できた。

Comparison of soundness maps showing repair effectiveness in concrete deck before and after repairs

この劣化評価技術を適用すると、従来の目視点検では確認できなかった内部の劣化度合いを健全度マップとして可視化できるため、橋梁内部の劣化状態に応じた補修計画策定や工事の実施が可能になる。

2024年度に、東芝プラントシステム(株)から、道路事業者向けのサービスとして提供開始を予定しており、実用化に向けて引き続き実証を進めていく。

謝辞

開発に際して貴重なご意見を頂きました京都大学成長戦略本部 塩谷智基特定教授、及び実証試験の実施にあたって多大なご協力を頂きました福岡北九州高速道路公社に、感謝いたします。

文献

- (1) 国土交通省, “社会資本の老朽化の現状”. インフラメンテナンス情報. <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/roukyuukanogenjou.pdf>, (参照 2024-02-18).
- (2) 高峯英文, ほか. 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. 2017, 72, 2, p.49-52. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2017/02/72_02pdf/f04.pdf>, (参照 2024-02-18).
- (3) Watabe, K. et al. "Damage visualization of in-service RC bridge deck utilizing elastic wave measurement". 26th International Acoustic Emission Symposium (IAES-26). Kawasaki, 2022-11. Japanese Society for Non-Destructive Inspection (JSNDI), 2022, p.156-161.



渡部 一雄 WATABE Kazuo
 研究開発センター 知能化システム研究所
 機械・システムラボラトリー
 土木学会・日本コンクリート工学会・日本非破壊検査協会会員
 Mechanical Systems Lab.



高峯 英文 TAKAMINE Hidefumi
 研究開発センター 知能化システム研究所
 機械・システムラボラトリー
 土木学会・日本非破壊検査協会会員
 Mechanical Systems Lab.



奥村 橋一 OKUMURA Kyoichi
 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
 Toshiba Plant Systems & Services Corp.