

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

Technology for Detection of Internal Cracks in Bridges by Monitoring Acoustic Emissions

高峯 英文 渡部 一雄 塩谷 智基
 ■ TAKAMINE Hidefumi ■ WATABE Kazuo ■ SHIOTANI Tomoki

橋梁(きょうりょう)をはじめとする社会インフラ構造物の老朽化対策が社会の大きな課題になっている。インフラ整備に必要な予算と人手が増大するなかで、維持管理の効率化が求められている。

東芝は、損傷部などから発生するアコースティックエミッション(AE)を橋梁に設置したAEセンサーで検出し、これを分析することで構造物の健全性を診断するシステムを開発している。今回、この技術を実際の道路橋に適用した結果、内部のひび割れを検出することに成功した。この手法では、人手によらず非破壊で橋梁内部の健全性を把握することが可能なので、省力化及び高度化による、維持管理の効率向上への貢献が期待される。

The deterioration of social infrastructure, including bridges and other systems, is a serious social issue. With the increases in costs and human resources required for the maintenance of such infrastructure, it has become necessary to improve the efficiency of maintenance management systems.

As a solution to this issue, Toshiba has been developing a diagnostic technology to monitor the deterioration of bridges by analyzing data obtained from the measurement of acoustic emissions (AE) generated from internal cracks using sensors attached to the bridge surface. We have applied this technology to a road bridge in service and successfully detected cracks in the bridge floor slab. This technology is expected to contribute to improved efficiency of maintenance work by providing an easy means of evaluating the soundness of the interior sections of bridges.

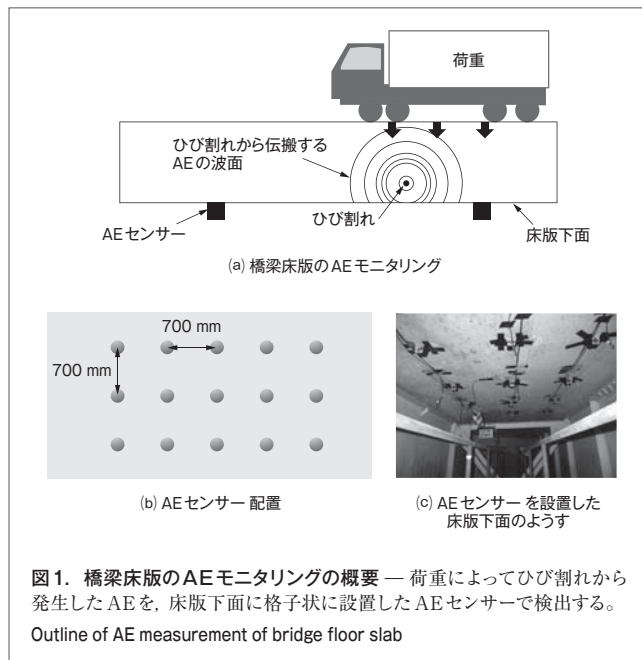
1 まえがき

わが国の社会インフラ構造物は、高度経済成長期に集中的に整備された。橋梁について見ると、高速道路などの大規模なものをはじめ、長さ2m以上の橋梁が70万橋以上存在する。橋梁の耐用年数は50年が目安と言われており、2023年にはこのうちの約43%が建設後50年を超えるため⁽¹⁾、老朽化した橋梁の急増が懸念される。

老朽化による重大事故のリスクを低減するには、社会インフラ構造物の適切な維持管理が必要である。予算や人手に限られるなか、膨大な社会インフラ構造物を十分に維持管理するために、効率化が強く求められている⁽²⁾。

効率的に維持管理するには、点検で正確に現状を把握し、それを基に優先順位を決め、限られたリソースを必要な箇所に適切に配分して、補修及び更新を進めていく必要がある。しかし、現状を正確に診断し把握するには、近接が困難な場所の点検や、定性的で変動が多い診断結果の定量化、外観には現れない内部の損傷の把握など、より高度な点検技術が求められる。多くの構造物に対してこれらを実現しようとする時、点検コストの増加につながる懸念がある。

こうした状況のなか、様々なセンサーを活用して、人手やコストを抑えつつ、正確に構造物の劣化を診断する技術の開発が盛んに進められている。東芝は、材料が壊れるときなどに発生する微小な弾性波であるアコースティックエミッション



(AE)を検出するAEセンサーを利用した診断システムを開発している⁽³⁾。AEセンサーで構造物をモニタリングし、得られたデータを分析することで、表面の検査ではわからない内部の劣化を診断する。

ここでは、橋梁を対象としたAEモニタリングによるひび割れ検出技術について述べる。

2 供用中の橋梁でのAEモニタリング試験

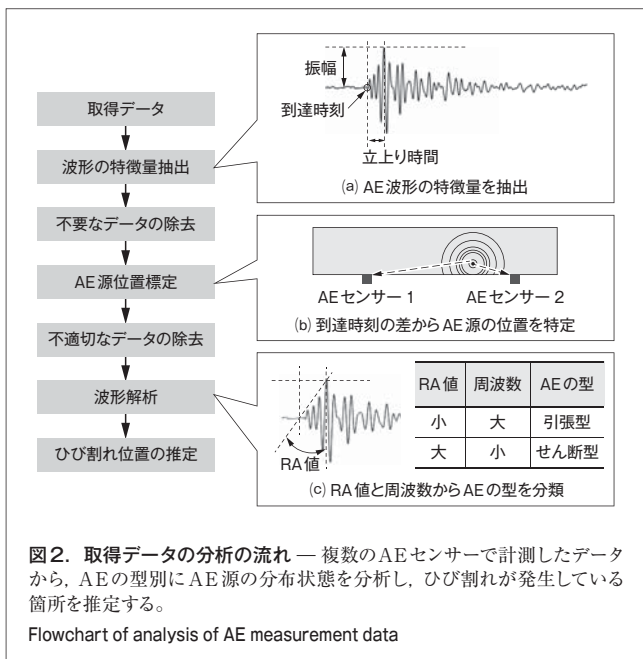
今回、供用中の道路橋にAEセンサーを設置し、モニタリング試験を実施した。橋梁の、人や車の荷重を支える床の部材は床版と呼ばれており、多くはコンクリート製又は鋼製である。橋梁床版のAEモニタリングの概要を図1(a)に示す。車両などの通行で荷重が掛かると床版がたわみ、床版の内部でひび割れが広がったり、ひび割れた内側どうしが擦れたりすることによってAEが発生する。AEは微小な振動として床版の表面まで伝わり、床版下面に設置されたAEセンサーで検出される。AEセンサーで計測された信号を基に、AEの発生源となったひび割れを検出する。

床版下面にAEセンサーを700 mm間隔で格子状に15個接着した(図1(b))。今回対象としたのは鉄筋コンクリート製の床版で、寸法約2×4 m、厚さ約200 mmである。AEセンサー設置後の床版下面の様子を図1(c)に示す。床版の表面には細かいひび割れが見られたが、視認できるような大きな損傷はなかった。計測は約1週間(稼働135時間)にわたって行われた。

3 取得データの分析と内部のひび割れ状態の推定

取得データの分析の流れを図2に示す。

橋梁の計測では、車両などが通過するたびに、数百ものAEが観測される。一つのAEは、図2(a)のような短い波としてAEセンサーで検出される。個々のAEについて、AEセンサーに到達した到達時刻や、振動の振幅、振幅が最大値に達するまでの立上り時間、振動の周波数など、波形の特徴を表



す量を抽出し、扱いやすい形に整理する。このとき、波形の特徴量に基づいて、後の分析に不要なデータは除去する。

次に、個々のAEの発生箇所を特定するAE源位置標定を行う(図2(b))。位置標定では、AEが複数のAEセンサーに達するときの到達時刻の違いと、AEがコンクリート中を伝搬する速度から、AEが発生した位置を逆算する。三つ以上のAEセンサーからのデータを使用することで、AEが発生した平面内の位置を特定でき、AE源の分布が得られる。また、位置標定を行うことで、AEセンサー間で到達時刻の整合がとれず信頼性が低いものなどを不適切なデータとして除去できる。これらの処理を経て、より詳細な分析に有用なデータを総量の約6%まで絞り込んだ。

絞り込んだデータを使って、波形の特性を分析した(図2(c))。ひび割れから発生するAEには、引張型とせん断型があり、両者は波形の違いによって分類できる⁽⁴⁾。引張型のAEは、“RA値^(注1)”が小さく周波数が比較的高い。逆にせん断型のAEは、RA値が大きく周波数が低い傾向がある。

データを用いてAE源の位置評定と型の分類を行い、床版上の縦横位置にプロットした結果を図3に示す。中央部分でAE源の密度が低くなっており、この低密度の領域では、ほぼせん断型の傾向を持つAEだけが観測されている。そして、この領域を囲むように、引張型のAEが集中している。

通常、構造物の内部で損傷が進むとき、AEの特徴に次のような変化があるとされている。

- (1) ひび割れの発生と進展に伴って大量の引張型のAEが発生する。
- (2) ひび割れが進展した後は、ひび割れの擦れで生じるせん断型のAEが主になる。
- (3) 更に進展してひび割れ幅が大きくなると、擦れることが減り、AEの発生や伝搬もなくなっていく。

これらと図3の分析結果を合わせると、今回計測した床版では、中央部分のAE源密度が低い領域に、進展した大きなひび割れが生じていると考えられる。一方、その周囲の引張型のAEが活発に発生している領域では、ひび割れが進展しつつあると推定できる。

4 破壊検査による検証

今回の試験には、取替工事で撤去される予定の床版を使った。そこで試験後に、撤去された床版の破壊検査で内部状態を確認し、ひび割れの推定結果と実際の内部状態との整合性を検証した。

3章で述べたひび割れ推定結果を基に、内部のひび割れが

(注1) 波形の立上りの緩慢さを表し、立上り時間を振幅で除したもの。

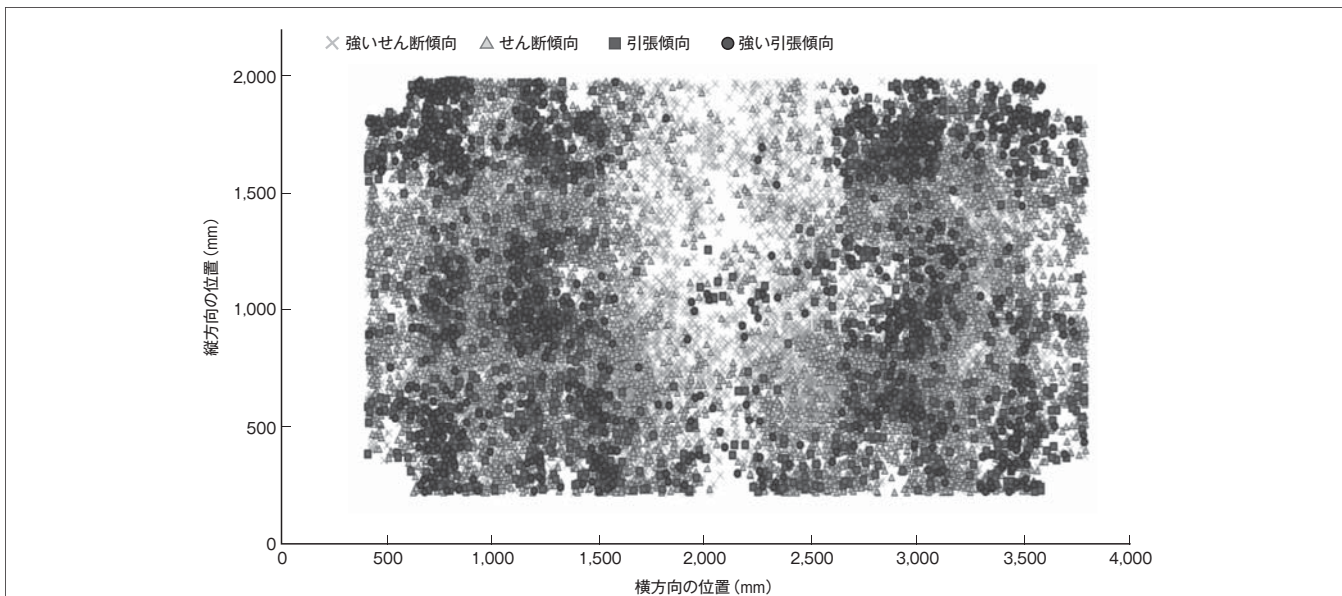


図3. 取得データの分析結果 — 中央部ではAE源の密度が低く、せん断型が主になっており、ひび割れが広がっていることが示唆される。
Result of analysis of AE measurement data

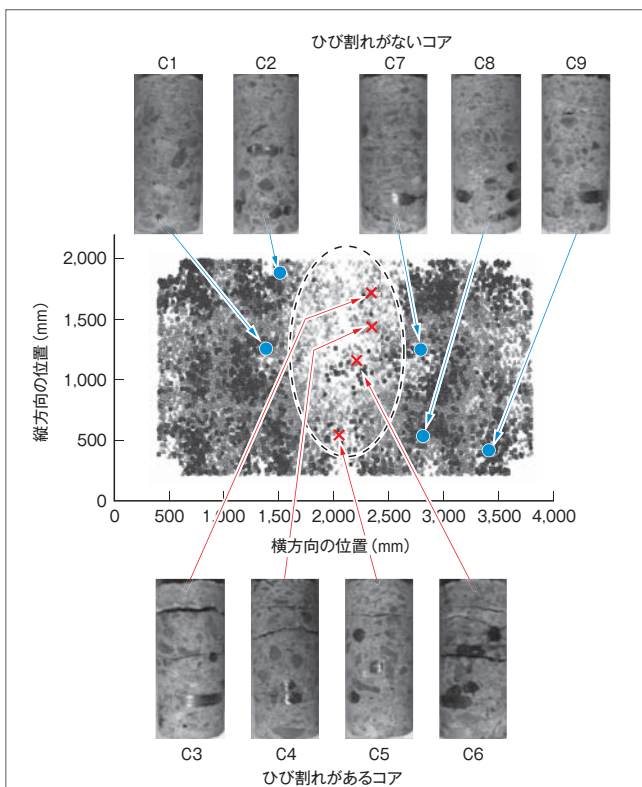


図4. 分析結果の検証 — 床版から円柱状のコアを抜き取って検査したところ、データの分析でひび割れがあると推定した領域に、実際にひび割れが生じていた。
Comparison of analysis result and results obtained by tests of core samples

疑われる領域とそれ以外の領域から、数か所ずつ円柱状に床版を抜き取って内部を観察した(コア抜き試験)。比較結果を

図4に示す。C3～C6のコアは水平にひび割れが入っている。これらのコアの位置は、データの分析でひび割れの存在が疑われたAE源の密度が低い領域とよく一致している。また、それ以外の領域から採取したコアには目視で明らかなひび割れは観測されなかった。

このことから、データの分析で、内部に大きなひび割れが存在する領域を検出できることが示された。

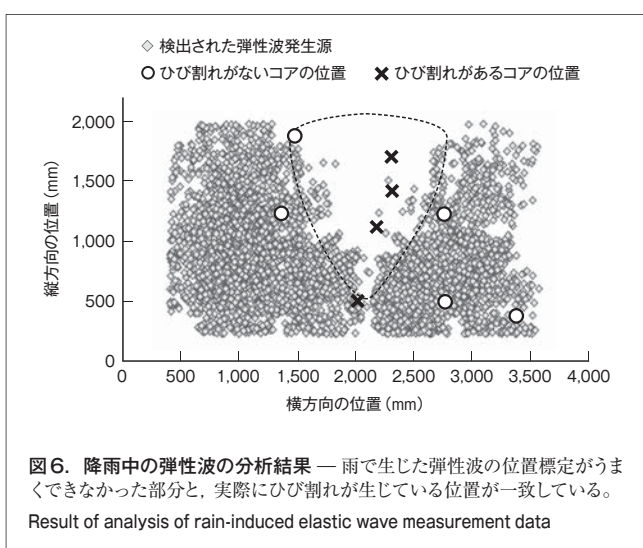
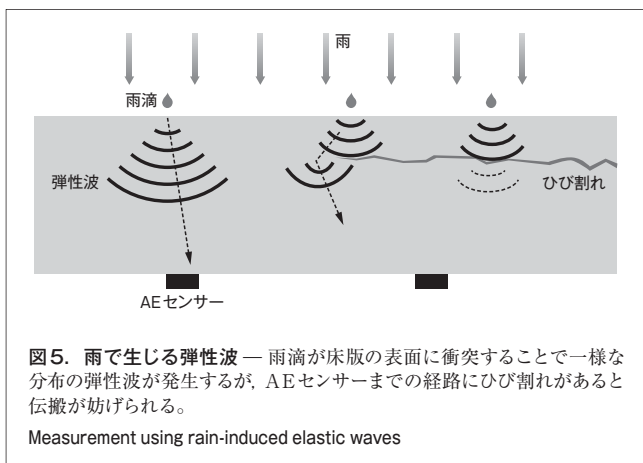
5 雨を利用したひび割れ検出

ひび割れから生じるAEで床版内部のひび割れを検出できることを示したが、更に簡便な手法として、雨を利用することを検討した。

路面に雨滴が衝突すると、内部のひび割れとは関係のない弾性波が発生する。AEセンサーは感度が高いので、これがひび割れで生じるAEと同様の振動波形として計測されるため、通常の分析ではノイズとして除去する必要がある。しかし、雨は短時間で多数の弾性波を一様な分布で発生させるという特長があり、これをひび割れ検出に利用できると思った。

雨滴により路面で一様に発生した弾性波が床版内部を伝わるようすを図5に示す。床版内部にひび割れがあると、弾性波の伝搬が妨げられる。したがって、降雨中のデータを用いて弾性波発生源の位置標定を行うと、損傷の直下では分布の一様性が崩れると予想される。

2章で述べた道路橋の計測期間中にも、短時間に集中した強い降雨があったため、この期間のデータだけを分析した。降雨中のデータの分析結果を図6に示す。図3などと同じ床



版の、弾性波発生源分布をドットで示し、そこにコア抜き試験を行った箇所を重ねて表示した。弾性波発生源の密度が低い領域とひび割れの入ったコアの位置がよく一致していることが確認できる。

雨で生じる弾性波は、損傷から発生したAEとは異なるが、その伝搬のメカニズムを考慮することで、床版内部のひび割れを検出できることがわかった。この分析に使用したのは約700s間という短時間のデータであり、効率の面で非常に優れている。

検出精度は、長期間のデータを詳細に分析したものが優れている一方、雨を利用した手法は計測時間が短く簡便で、手軽な見積りに使用できる。

6 あとがき

AEモニタリングによる橋梁内部のひび割れ検出技術について述べた。この技術により、橋梁の劣化状態の人手によらない監視や、短時間での簡便な内部の診断が可能になり、橋

梁の維持管理の省力化に有効である。また、現状の把握が容易になり、維持管理のより適切な優先順位付けができる。

今後は、分析手法の改善による診断の高精度化や効率化とともに、実用上の効果的な運用方法の検討などを進めていく。また、この技術は、橋梁以外の構造物を対象とした診断への応用展開も期待される。

この成果の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究業務「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」で得られたものである。

文献

- (1) 国土交通省. “国土交通白書 2014”. 国土交通省. <<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/index.html>>, (参照2017-02-13).
- (2) 国土交通省. “今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について (答申)”. 国土交通省. <http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/sogo03_sg_000048.html>, (参照2017-02-13).
- (3) 大森隆広 他. アコースティックエミッション計測を適用した橋梁モニタリングシステムの開発. 東芝レビュー. 70, 9, 2015, p.20-23.
- (4) Ohtsu, M. et al. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures. Journal of Acoustic Emission. 25, 2007, p.21-32.



高峯 英文 TAKAMINE Hidefumi

技術統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー 研究主務。インフラヘルスマニタリング技術の研究・開発に従事。土木学会, 日本非破壊検査協会会員。
Mechanical Systems Lab.



渡部 一雄 WATABE Kazuo

技術統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー 研究主幹。インフラヘルスマニタリングシステムの開発に従事。土木学会, 日本コンクリート工学会, 米国光学会 (OSA) 会員。
Mechanical Systems Lab.



塩谷 智基 SHIOTANI Tomoki, Ph.D.

京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 特定教授, 博士 (学術)。土木構造物非破壊評価の先端技術などの研究に従事。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。
Graduate School of Engineering, Kyoto University