

論文 AE 法および AE トモグラフィにより推定された実橋梁 RC 床版の損傷検証

塩谷 智基*1・麻植 久史*2・西田 孝弘*3・宮田 弘和*4

要旨: AE 法および AE トモグラフィにより推定した RC 床版の損傷度の検証を目的に, 実橋梁 RC 床版において取得された AE 源を解析した後, 同床版を切り出して作製した試験体に AE トモグラフィを実施して得られた速度構造と AE 活動の特徴抽出を行った。これらより導かれる解釈の整合性を確認するために, 同床版からコア試料を採取し, 検証を行った。その結果, AE および AE トモグラフィにより合理的に損傷が評価可能であることを示した。

キーワード: 速度構造, 非破壊調査, ひび割れ, 実構造物

1. はじめに

我が国において, 建設後 50 年を経過する橋梁は, 全体の約 18% を占めている。この割合は 10 年後に約 42% と急増することが分かっており¹⁾, 老朽化問題に直面する橋梁 RC 床版が急増していく状態にある。これらを限られた予算の下で効率的に維持管理するためには, 構造物に変状が現れる前に対策を行い, その長寿命化を可能とする予防保全が重要である。この予防保全を行うには, 内部損傷の初期変状を非破壊で正確にかつ, 網羅的に評価する必要がある。しかし, 現状では合理的適用手法がなく, 目視による診断に実施されるのみといえる。つまり, 現状, 予防保全に十分資する手法がなく, 実施には多くの課題が山積している。

一方, 既往の調査診断技術として, コンクリート構造物, 橋梁構造物, 組積造構造物, 岩盤構造物などを対象に AE 法や AE トモグラフィなどの非破壊評価に関する研究が行われてきた。AE 法は広範囲を計測対象とした相対的な損傷評価²⁾ が可能であり, 実橋床版のように比較的大きい対象物に対して有効に適用できる非破壊調査手法の一つである。また AE 計測は, 主に車両通行など活荷重を用いた 2 次 AE を計測するため, AE 源発生に特別な装置を用いる必要がなく, 実構造物に適した計測法と言える。これらの手法の有用性は既に確認されているが, 実橋床版における解析結果と実際の損傷状況との関係は明らかになっておらず, 結果の工学的解釈において課題を残してきた。

そこで本研究では, 実橋梁 RC 床版において交通荷重により生じた 2 次 AE を計測し, 計測時にアクティブな損傷領域を推定した後, 同床版を切り出して AE トモグラフィを実施し, 速度分布により損傷領域の評価を行っ

た。これらの解析結果より導かれた解釈の整合性を確認するために, 同床版からコア試料を採取し, 検証材料とした。これより, AE 法と AE トモグラフィによる実橋梁 RC 床版の損傷が合理的に評価可能となる。

2. 計測対象と計測条件

本研究では, 塩害や床版疲労の要因により, 鉄筋腐食などの損傷が生じている実橋梁 RC 床版を計測対象とした。対象床版として, 2 個所の床版を選び, それぞれで AE 計測を行った。各床版の形状と AE センサの位置関係を図 - 1 に示す。ここで, 下面から見た床版形状が台形のを床版 A, 長方形のを床版 B と称する。床版厚は両者共に 235 mm であった。各床版の外観を図 - 2 に示す。床版 A には漏水跡のある大きなひび割れが確認されたが, 床版 B に大きなひび割れは見られない。ここで使用した AE センサは, PZT 圧電素子センサであり, 最大感度は 80 dB, 共振周波数は 30 kHz である。これを, 各床版の下面に 15 個ずつ設置した。AE 計測は 2015 年 9 月 25 日から 10 月 2 日まで行った。データ取得の閾値は 50 dB とし, 計測データ数は, 53,800,520 個とした。RC 床版上部では, 車両が走行しており, 計測される AE は主に過去に生じた損傷 (ひびわれ) 界面の内部摩擦により生じる 2 次 AE である。

3. AE 解析

計測期間内における 1 時間ごとの AE ヒット数を図 - 3 に示す。床版 A, B 共に 10 月 1 日の深夜に相当する 120 ~ 130 時間で顕著な AE ヒット数が見られる。この時間は強い風雨が確認されている時間帯である。雨滴は固体材料に衝突する際に AE を生じる因子として知られてお

*1 京都大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻特定教授 工博 (正会員)

*2 京都大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻特定准教授 工博

*3 京都大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻特定准教授 工博(正会員)

*4 西日本高速道路株式会社 技術本部

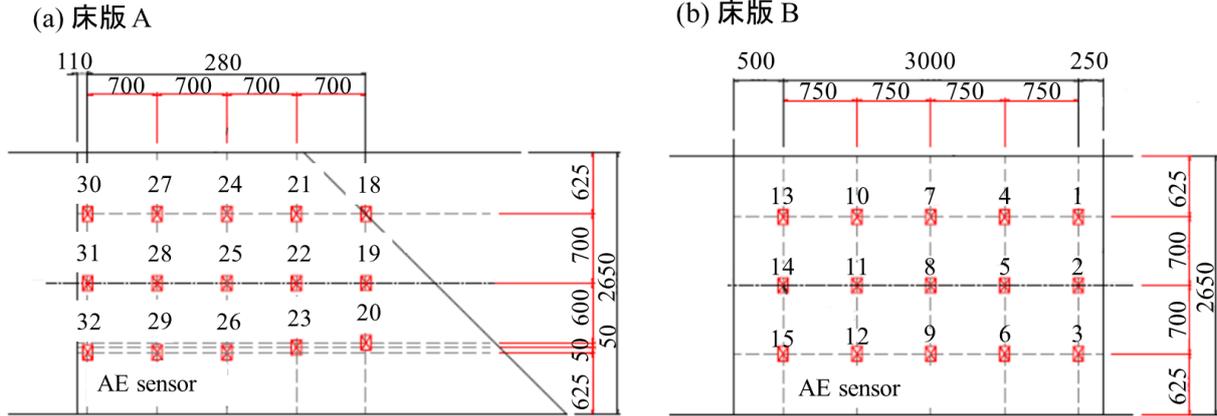


図 - 1 床版形状と AE センサの位置関係
(図中の番号はセンサ番号に対応する)

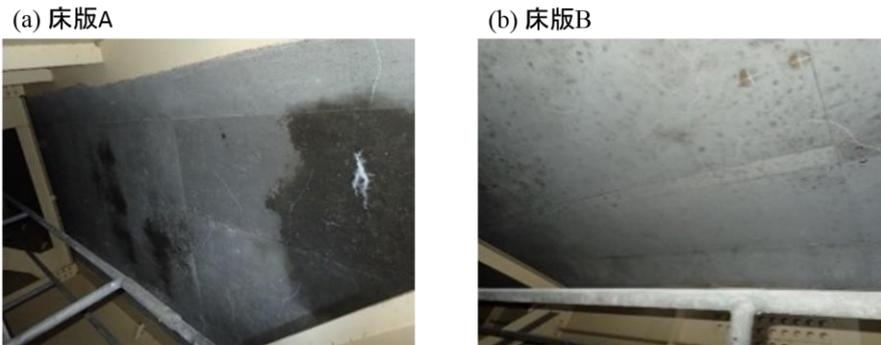


図 - 2 各床版の外観

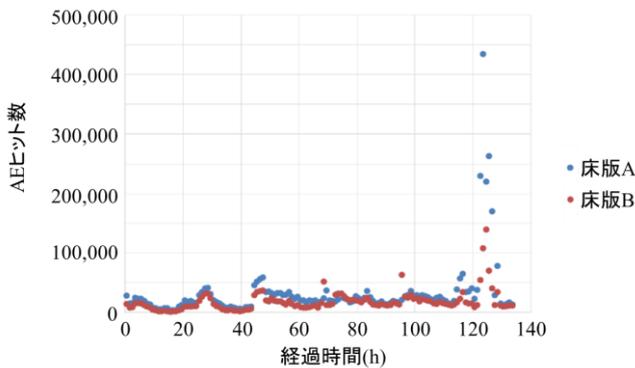


図 - 3 1 時間毎の AE ヒット数

り³⁾、得られたパラメータ特長も勘案したところ、これらの AE ヒットは雨滴によるものが、ほとんどであると考えられた。そこで、雨滴による AE ヒットは内部損傷とは無関係と考え、本研究の AE 解析対象から除いた。

図 - 4 に AE 位置標定の結果を示す。位置標定精度を意味する LUCY (Location uncertainty) の閾値は解析精度を考慮してセンサ間隔の最小距離の半分である 300 mm とした。

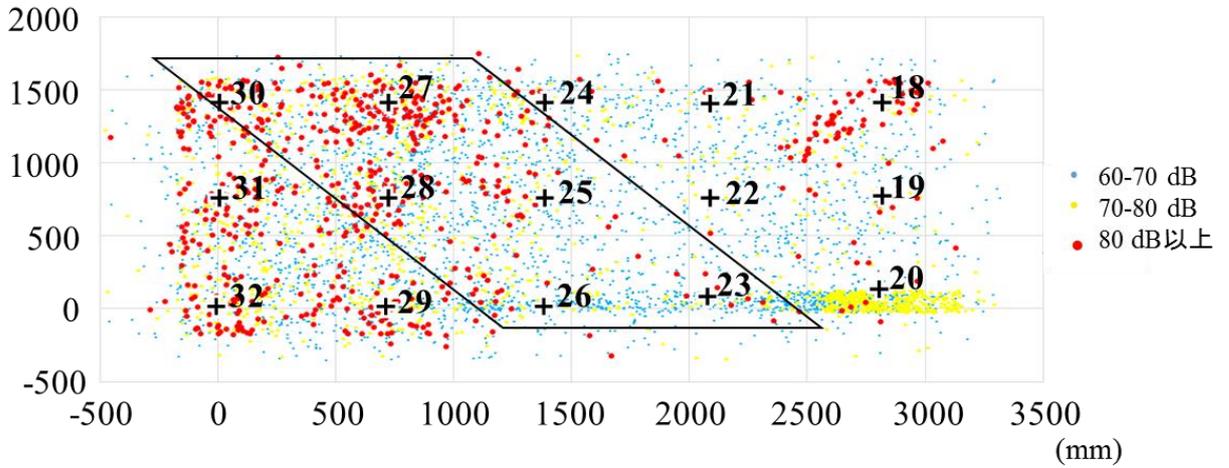
図より、ひび割れの多い床版 A より、少ない床版 B の

方で、振幅の大きな AE が卓越する傾向にある。床版 A においては、センサ番号 20 付近に集中した AE の分布が見られる。また、センサ番号 18, 27~32 付近で振幅の大きな AE が卓越している。床版 B においては、中央付近のセンサ番号 7, 8 付近における AE の振幅が周囲の AE に比べ小さくなっていることが特徴的である。両床版の AE の発生傾向と外観の損傷に直接的な関係が見られないため、目視での内部損傷の推定を精確に実施するのは困難であることが再確認された。

4. 床版の切り出しと AE トモグラフィ

AE 解析の結果と速度構造、および実際の損傷程度を比較するために、床版を切り出して、供試体を作製した。図 - 5 に切り出し位置を示す。供試体は、AE 計測を実施した範囲外をウォルソーにて切断し、成型されている。供試体 A と B の重量は、それぞれ 2.1 ton と 2.4 ton であり、クレーン車で運搬可能 (2.9 ton) 以下になるように調整している。まず、供試体の速度構造を推定するために 3 次元 AE トモグラフィ^{4), 5)}を実施した。AE センサは図 - 6 のように各供試体に 12 個ずつ、切り出す前と同様に床版下面側に設置した。実地計測時よりも計測範囲が小さくなり、センサ間隔を密に配置したため、使用し

(a) 床版 A



(b) 床版 B

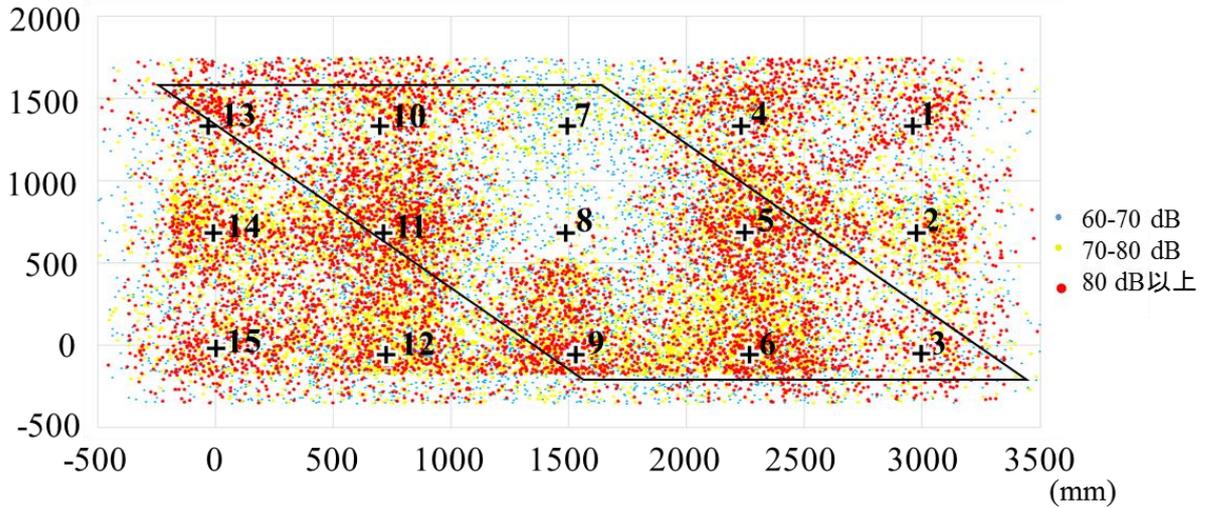


図 - 4 各床版における AE 位置標定結果 (図中の黒四角内は図-5, 6 の供試体の位置に対応)

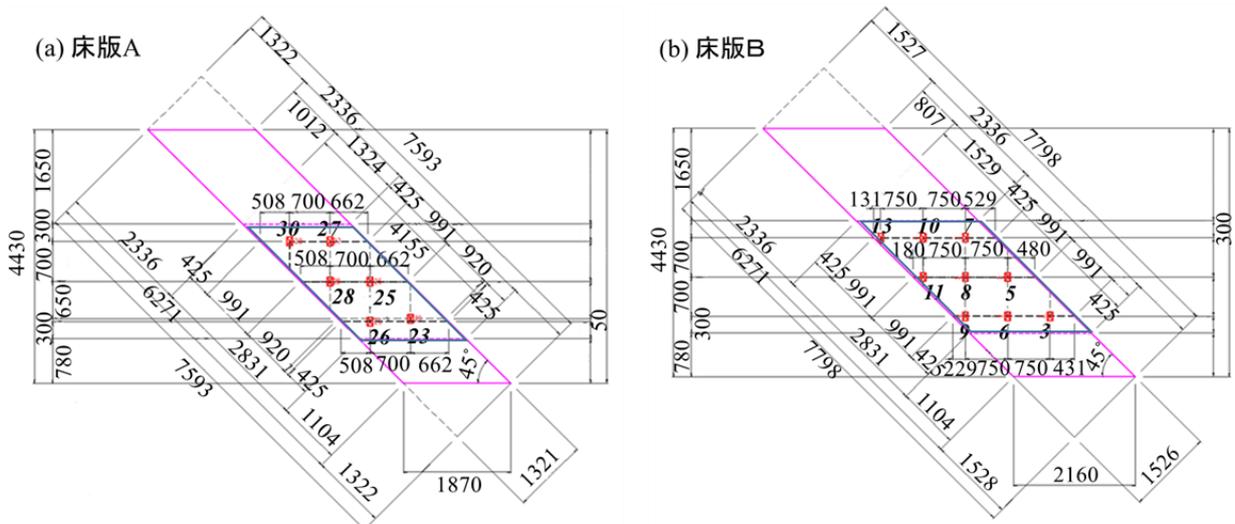


図 - 5 床版から切り出した供試体の位置関係図, 図中のセンサ番号は図-1 と対応する。
赤線で切り出した後, 青線の形に成型した。

た AE センサを, PZT 圧電素子センサ, 最大感度 75 dB, 共振周波数 60 kHz と実地計測時とは異なるものを使用している。AE 波の入力として, センサ設置対面 (床版上面側) において, $\phi 11.0$ mm のハンマによる打撃を, 位置の偏りを生じないようにランダムで行った。トモグラフィで使用するパラメータは, P 波初動到達時刻であり, 結果に対する打撃方法の影響は小さいと考えられる。解析には, センサのヒット数 5 以上, LUCY が 300 mm 以下, および位置標定の結果が供試体の内部に収まったものを使用した。その結果, 供試体 A の入力は 51 打点, 供試体 B の入力は 24 点となった。解析対象モデルの節点数は供試体 A, B 共に 12 (供試体長軸方向) \times 12 (供試体

短軸方向) \times 4 (厚さ方向) と設定した。得られた結果を図 - 7 に示す。供試体 A においては, 各断面図に現れている右下付近の低速度構造 (図 - 7) と, 床版 A のセンサ番号 20, 23 間の AE 分布の密な部分 (図 - 4) がよく対応している。また, 床版中央と床版下面のセンサ番号 2, 3, 6 付近 (図 - 6) に存在する高速度構造に, 床版 A の 23, 25, および 26 で囲まれた AE 源の少ない部分の境界 (図 - 4) が現れている。供試体 B においては, 各断面図の中央部に見られる低速度構造 (図 - 7) と, 供試体 B の中央部にある AE 源の少ない場所 (図 - 4) が良く対応している。また, 特に床版中央において, 低速度構造と高速度構造の境界部に, 振幅の大きい AE 源が密に分布する

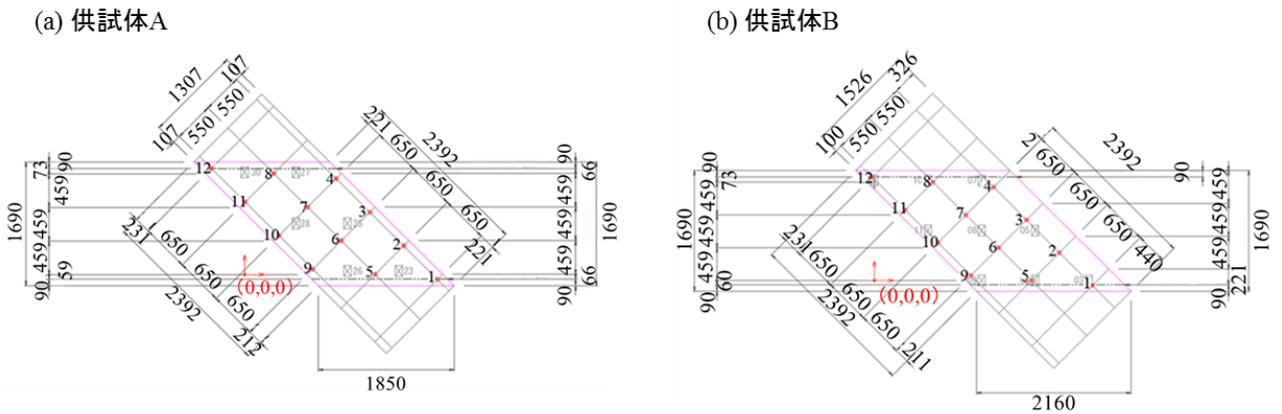


図 - 6 供試体と AE トモグラフィ用のセンサ位置関係

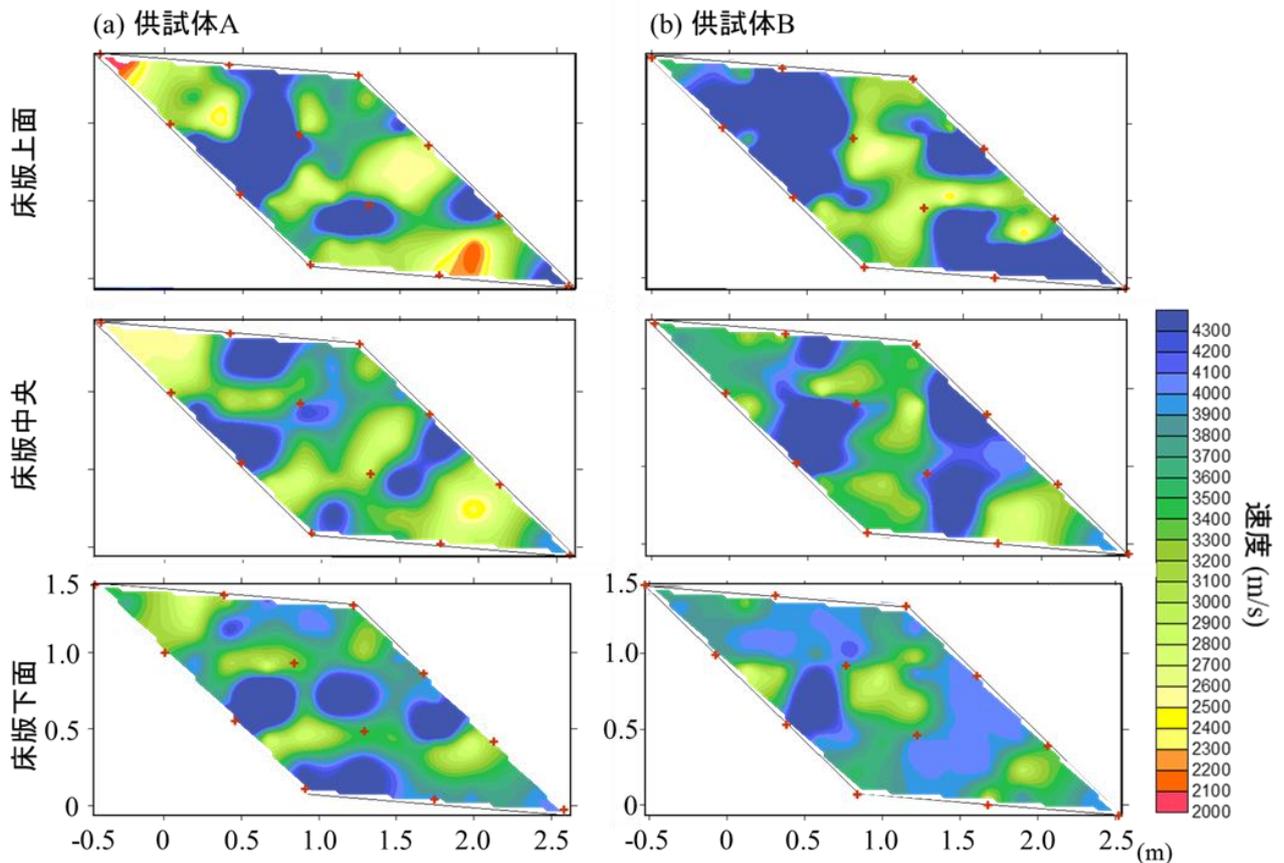
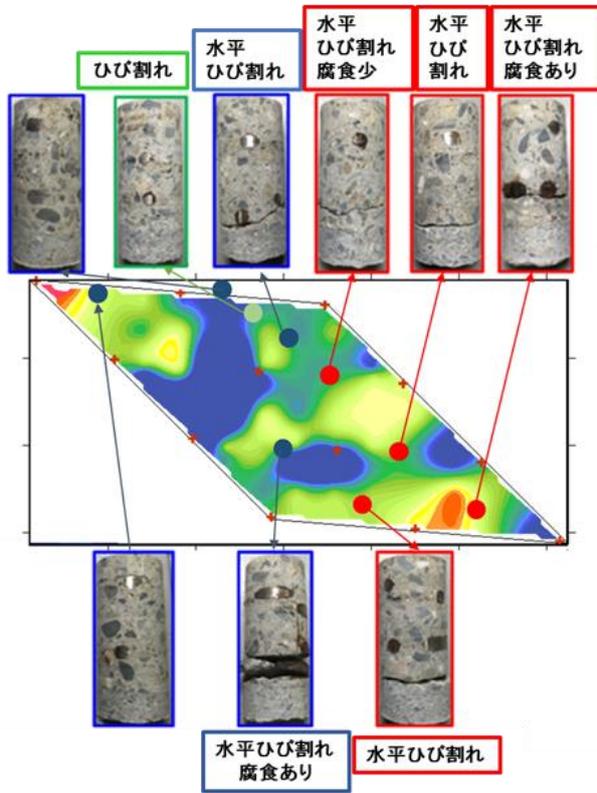
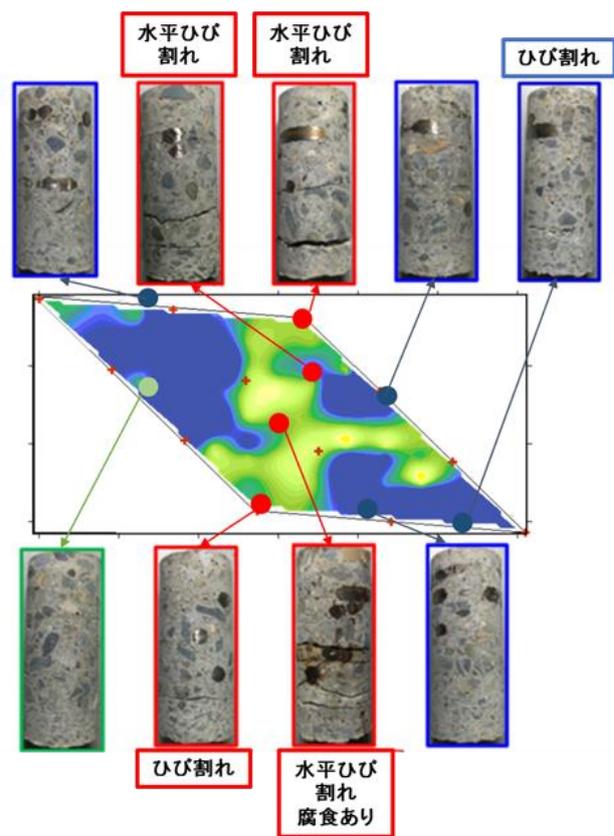


図 - 7 供試体における AE トモグラフィ結果 (図中の赤十字はセンサ位置)

(a) 供試体A



(b) 供試体B



- 低速度構造で、AE源が少ない場所
- 低速度構造と高速度構造の境界部で、振幅の大きいAE源が多い場所
- AE源が最も多い場所

図 - 8 供試体におけるコア試料写真と採取位置

特徴が見られる。

5. コア試料を用いたAE解析、およびAEトモグラフィ結果の検証

各供試体から採取したコア試料の写真と、その位置関係を図 - 8 に示す。コア試料は、AE 解析と AE トモグラフィの結果より、低速度構造で AE 源が少ない場所 (図中の赤丸)、低速度構造と高速度構造の境界部で振幅の大きい AE 源が多い場所 (図中の青丸)、および AE 源が最も多い場所 (図中の緑丸) を選定し、コア試料を採取した。低速度構造で AE 源が少ない場所のコア試料を見ると、供試体 A, B 共にほとんどのコア試料で、水平ひびわれ、腐食および、これらによる大規模水平損傷が発達している。これより、大規模な水平損傷が進行している位置では、交通荷重による AE が生じにくいことが明らかとなった。次に、低速度構造と高速度構造の境界部で振幅の大きい AE 源が多い場所のコア試料では、水平ひび割れ損傷や腐食の卓越したものと、損傷が少ない、あるいは確認できないものが混在している。この理由とし

て、大規模損傷と健全での境界領域では、交通荷重による疲労損傷が、計測時点でも進展している、あるいは、微細な損傷が生じて間もないもの (クラック界面がほとんど接触している) と考えられ、目視では確認できない場合も、内部に微細なひび割れが既に生じている可能性が高いといえる。AE 源が最も多い場所のコア試料でも、ひびわれが確認できないものと、ひび割れが確認できるものが混在している。これは、既に生じた微細クラックの大小を示しており、確認できないものは、境界域と同様にその内部において、微小ひび割れが多数存在していると考えられ、交通荷重によりひび割れ界面がアクティブに擦れ合い、その際に大小の振幅をもつ 2 次 AE が多く生じたものと考えられる。

以上の結果は、これまでの本分野で知られている AE と損傷との関連事象 (損傷規模と AE 活動は調和する) とは相反し、別の実施した別の床版での結果⁹⁾と合致している。したがって、実橋梁 RC 床版の AE など弾性波による損傷評価においては、表面損傷が現れる前の内部ひび割れ進展評価に資する重要な成果と考えている。本

研究により、AE法とAEトモグラフィを組み合わせること
で、実橋梁RC床版の合理的損傷評価の一助となる可
能性を示せた。

6. 結論

本研究では、実橋梁RC床版で取得されたAEを用い
て解析を行い、さらにその床版の一部を切り出し、AE
トモグラフィにより速度構造を推定した。その後、試験
体よりコア試料を採取し、AE解析と速度構造の結果と
の整合性を検討した。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) AE活動から得られる損傷域は主に進展過程にある
損傷、あるいは、生じて間もなく、ひび割れ界面同
士が接触し、交通荷重により容易に生じられる領域
と判断できた。
- (2) ひび割れ界面の接触が少ない、顕在化したひび割れ
からは交通荷重によるAE発現は少なく、これらは
AEトモグラフィで得られる低速度領域で推定可能
であった。本成果は、本分野で得られたこれまでの
報告とは明らかに相反する事象であることから、特
に水平ひび割れなどをともなう破壊が重要な損傷指
標とされる構造物については注意が必要である。

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合
開発機構(NEDO)の委託研究業務の結果得られたもの
である。また、本研究の実施に当たっては、(株)東芝の渡
部一雄氏と高峯英文氏、および京都大学工学部地球工学
科4年の土橋和也氏に多大なる協力を頂いた。ここに深

甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省:平成26年度道路メンテナンス年報
2015.
- 2) T. Shiotani, D.G. Aggelis and O. Makishima: Global
monitoring of large concrete structures using acoustic
emission and ultrasonic techniques: case study, ASCE,
Journal of Bridge Engineering, Vol. 14, No. 3, pp.
188-192, 2009.
- 3) 塩谷智基, 三輪滋, 門間敬一: 岩盤AEモニタリ
ングに影響を与える雨滴の弾性波特性, 第6回地下と
土木のAE国内コンファレンス論文集, 資源・素材
学会, pp. 7-12, 1999. 8.
- 4) 塩谷智基, 奥出信博, 桃木昌平, 小林義和: AEト
モグラフィによるインフラ構造物の健全性評価
手法の提案, 日本非破壊検査協会, 第18回AE総合
コンファレンス論文集, 39-42, 2011.
- 5) Y. Kobayashi, T. Shiotani, D. G. Aggelis, H. Shiojiri:
Three-dimensional seismic tomography for existing
concrete Structures, Proceedings of Second International
Operational Analysis Conference, Vol. 2, pp. 595-600,
2007
- 6) 麻植久史, 塩谷智基, 高峯英文, 渡部一雄, 大原基
憲: AE法による実橋床版の健全性評価, 第20回ア
コースティック・エミッション総合コンファレンス
論文集, pp.61-64, 2015.7