

AE法を用いたトモグラフィ解析による 鉄筋コンクリート床版の内部損傷検出性能の検証

福本伸太郎^{*1} 塩谷 源二^{*2} 塩谷 智基^{*3} 麻植 久史^{*4}
Fukumoto Shintaro Shioya Genji Shiotani Tomoki Asaue Hisafumi

当社では、鉄筋コンクリート（RC）床版の内部損傷の検査手法としてAE法によるトモグラフィ解析（AET）法に着目し、京都大学と共同研究をしてきた。今回、さまざまな損傷を導入した4つの床版試験体を用いて、損傷検証を実施した。AET法により、アスファルト上から平坦な水平ひび割れ（幅1mm）や波型のひび割れなどの内部損傷を検出することができた。

キーワード：非破壊検査、アコースティック・エミッション（AE）法、インフラ保全技術、弾性波、トモグラフィ

1. はじめに

建設から50年以上経過した橋梁の増加に伴い、鉄筋コンクリート（RC）床版の検査に関する技術者不足とコスト増大が懸念されており、効率的な維持管理手法のニーズが高まっている。これまでは近接目視により損傷箇所を確認し、触診や打音調査を用いて、変状の確認および評価をしてきた。しかし目視検査では、内部損傷の定量的な診断が困難である。このためRC床版などの予防保全を実施するためには、目視では検出できない内部損傷を評価する必要がある。なお、本稿における内部損傷とは、コンクリート部材の品質あるいは性能が本来あるべき姿でない状態と定義し、代表的な損傷としては、水平ひび割れや土砂化が挙げられる。

京都大学のインフラ先端技術産学共同講座では、コンクリート構造物の内部の状況を可視化する手法として、アコースティック・エミッション（AE）法を用いたトモグラフィ解析（AET）法に関する研究を進めている⁽¹⁾。当社では、RC床版の内部損傷の検査手法としてAET法に着目し、本研究室との共同研究により、事業化を目指してきた。

本稿では、さまざまな種類の損傷を導入した4つのRC床版試験体を用いて、AET法による損傷検出性能の検証を実施した。

2. AE法を用いたトモグラフィ解析（AET）法とは

まずAEとは、材料に応力を加えたときに材料に蓄積されたひずみエネルギーが、変形や破壊に伴い開放される過程で、その一部が超音波領域の弾性波として放出される現象である⁽²⁾。この弾性

*1：研究開発センター 研究開発グループ

*2：計測事業部 計測技術部 福浦グループ 課長

*3：国立大学法人京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 博士（工学）

*4：国立大学法人京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 特定准教授 博士（工学）

波を AE 波と呼び、AE 法とは AE 波を計測し、その発生頻度や波形特徴などから、材料の強度や健全性を評価し、AE 波の到達時間差から損傷位置の標定をする方法である。

またトモグラフィとは、物理探査、医療診断等で用いられる逆解析技術の一つであり、対象領域を取り囲むように AE センサの設置、および AE 源の励起をすることで、内部の物性（音速、比抵抗、音響インピーダンス、密度など）分布を調べる技術である。AET 法は、部材内での弾性波速度の分布を算出し、弾性波速度分布図を作成する手法である。図 1 に計測・解析の一例を示す。部材の両面、または片面に AE センサを取り付け、パルス発信や打撃により励起される部材内部を伝播する弾性波を計測する（図 1 (a)）。その後、図 1 (b) のように、各センサで取得した弾性波より到達時間を算出する。各打撃による弾性波の到達時間、およびセンサの位置情報を用いて AET 法を実施することで、部材内部の弾性波速度を取得し、図 1 (c) のような弾性波速度分布図（コンター図）を作成する。

内部損傷があると、弾性波の到達時間が健全時より遅くなるため、低速度領域を損傷部と判断できる。なお、これまでの知見より、RC 床版では 2700m/s 以下を損傷部と判断している⁽³⁾。

3. 試験概要

3.1 試験体

本試験では、過去に電磁波レーダ⁽⁴⁾性能評価用に作製した、模擬 RC 床版試験体を用いた。この電磁波レーダ性能評価試験は、IHI が実施したものであり、非接触かつ高速に広範囲のひび割れを測定可能な技術で、供用中の RC 床版の劣化状態を把握し、補修要否を判断するための損傷スクリーニング技術として期待されている⁽⁵⁾。

これらの試験体は、主に供用中の交通载荷などの劣化によって生じる損傷を模擬している。試験体の寸法は、1000×2250×300mm（縦×横×厚さ）であり、厚さ 300mm のうちの上部 100mm はアスファルトである。また試験体は 4 体あり、図 2 に各試験体の損傷の種類、および位置を示す。図 2 (a) では、床版を上から見た方向からの各試験体の損傷の種類、および位置を示し、各損傷を表 1 に示す。また図 2 (b) では、断面方向の損傷位置を示し、すべての損傷は上段鉄筋近傍（アスファルト上縁から 150mm）にあることがわかる。

3.2 試験装置

試験装置および使用センサを以下に示す。

- (1) AE 装置：Valen Systeme 社製 AMSY-6 MB19
- (2) 受信用 AE センサ：Valen Systeme 社製 VS150-RIC（周波数帯域：100～450kHz、寸法：直径 φ28.6mm×高さ 31.5mm）

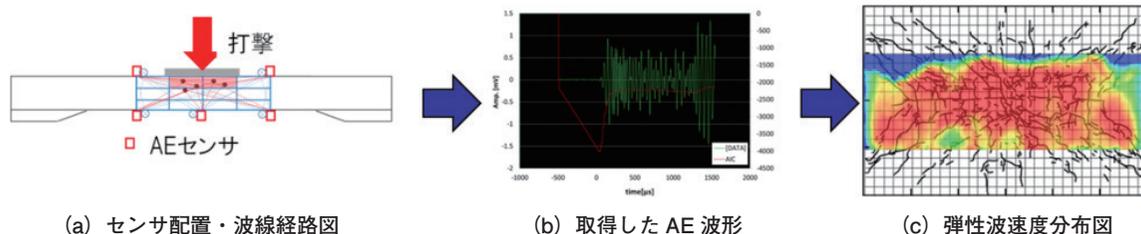


図 1 AET 法の一例

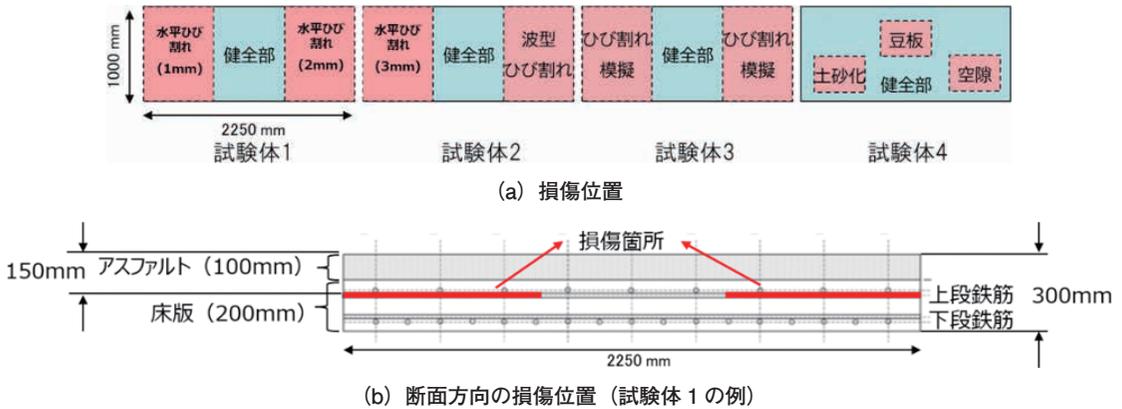


図 2 各試験体の損傷の種類、および位置

表 1 RC 床版試験体の各損傷

| 試験体番号 | 損傷の種類 |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 平坦な水平ひび割れ (幅1mm、および幅2mm) |
| 2 | 平坦な水平ひび割れ (幅3mm) 波型ひび割れ (幅2mm) |
| 3 | 水平ひび割れ模擬劣化 (コンクリート打設時に約2mm厚さのエポキシ樹脂を充てんしたもの) |
| 4 | 空隙 (幅2mm) 豆板 (セメントペースト、モルタルの充てん不良によって、粗骨材が多く集まり、空隙の多くなったもの) 土砂化 (コンクリートが骨材とモルタルに分離し、土砂のような状態なもの) |

3.3 計測条件

供用中の RC 床版で計測する場合では、下面にセンサを設置し、上面から弾性波を励起させるが、今回の試験の場合での試験体の設置は図 3 のようにした。図 3 より、試験体を架台により地面から浮かせて設置し、センサ設置のため床版下面へアクセスした。次に、階段で床版上面に登り、弾性波を励起させた。図 4 に床版下面の受信用 AE センサ設置状況を示す。図 5 中の青丸に示すように 23 個のセンサをセンサ間隔 $400 \times 450\text{mm}$ の千鳥配列で設置した。なお、試験体 1、3 については 18 個のセンサを同様の間隔で設置した。

本試験では、弾性波の励起を $\phi 19\text{mm}$ 鋼球ハンマによる打撃とした。打撃位置は、図 5 中の赤丸に示すように、 $200 \times 225\text{mm}$ の等間隔で 45 か所とした。試験体 1、3 については、35 か所とした。



図 3 試験体の設置状況



図 4 受信用 AE センサ設置状況

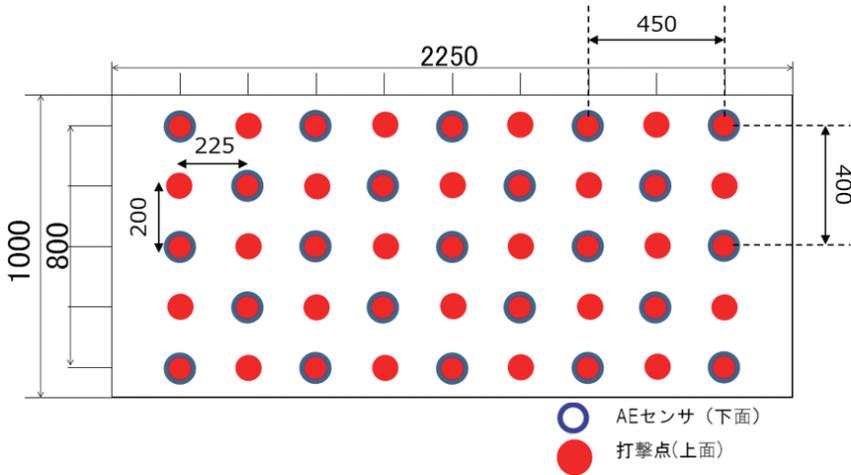


図5 受信用 AE センサ位置および打撃位置

3.4 解析方法

計測で得られた各弾性波の到達時間を求めた。この算出には、AIC（赤池情報量規準）⁽⁶⁾を用い、これは地震波などの検出に用いられている手法である。到達時間は式(1)より AIC が最小になる時間とした。

$$AIC_k = k \cdot \log\{\text{var}(X[1, k])\} + (N - k) \cdot \log\{\text{var}(X[k, N])\} \quad (1)$$

k : 波形のある点

$\text{var}(X[1, k])$: 波形振幅値 $X1$ から Xk の分散

N : 全データ数

$\text{var}(X[k, N])$: 波形振幅値 Xk から XN の分散

次に AET 法において、解析領域に対してメッシュ分割をした。メッシュ分割は $4 \times 8 \times 3$ (縦×横×高さ)、エレメント数は 96 個とした。エレメント全体の寸法は、 $900 \times 1600 \times 450\text{mm}$ (縦×横×高さ)、また 1 つ当たりのエレメントの寸法は、 $225 \times 200 \times 150\text{mm}$ (縦×横×高さ) になる。また解析開始時の、各エレメントの初期速度は、健全なコンクリートの音速である 4000m/s とした。なお、試験体 1、3 については、メッシュ分割を同様とし、エレメント数を 72 個とした。

上記の解析方法により、各試験体のエレメント

に対して弾性波速度が算出される。例として、図 6 に試験体 2 における AET 法結果を示す。試験体 2 では、左側に幅 3mm の水平ひび割れが、右側に波型の割れが導入されている。図 6 より青色は健全なコンクリートの速度 3500m/s 以上を示し、黄色は中間損傷状態の 2701m/s 以上 3500m/s 未満を示し、赤色は限界損傷状態の 2700m/s 以下を示している。これより、損傷がある場所が赤くなっていることがわかる。4 章では、他の試験体での AET 法および電磁波レーダの結果をコンター図にして示す。

4. 計測結果および考察

AET 法および電磁波レーダ法による各試験体の上段鉄筋近傍の劣化判定結果を表 2 に示す。コンター図において、健全部から損傷度合が大きくなるにつれて、青、緑、黄色、赤と色を変化させた。また、詳細を以下に示す。

4.1 試験体 1

結果：平坦な水平ひび割れ (幅 2mm) は、AET 法および電磁波レーダ法において検出できた。また平坦な水平ひび割れ (幅 1mm) についても、両者

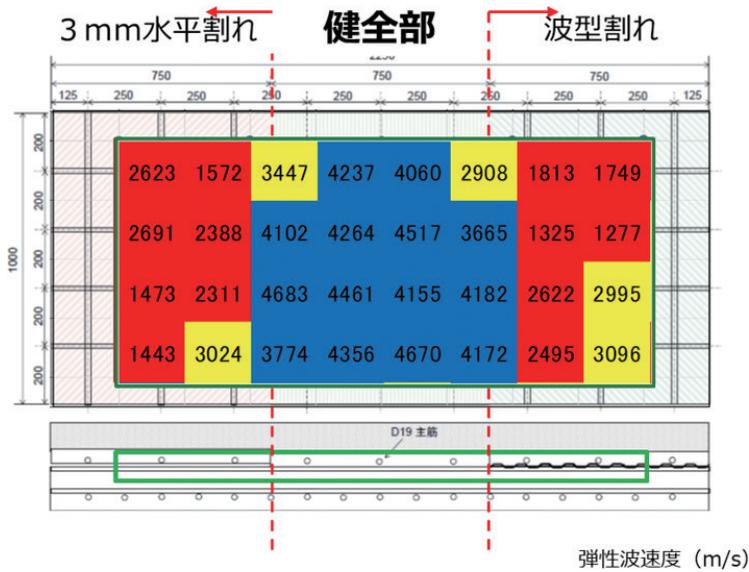
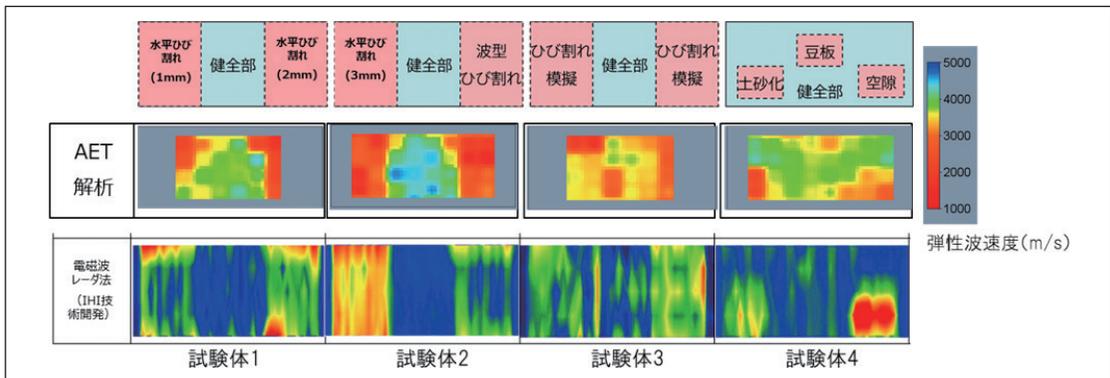


図6 試験体2におけるAET法結果（床版を上面から見た場合）

表2 AET法と電磁波レーダ法による各試験体の結果



において弾性波速度が低下している範囲が狭かったが、損傷があると判定できた。

考察：AET法では、床版下面に複数のセンサを配置することで、内部を伝播する弾性波を多方向から受信するため、平坦な水平ひび割れ（幅1mm）も検出できたと考えられる。また電磁波レーダ法では、高周波数の電磁波を用いているためひび割れからの反射波検出ができたためと考えられる。

4.2 試験体2

結果：平坦な水平ひび割れ（幅3mm）は、AET法および電磁波レーダ法において検出できた。またAET法では、波型ひび割れを明確に検出できた。

考察：AET法は、多方向から複数のセンサで受信するため、損傷形状による減衰などで一部のセンサで受信できなかった場合も、その他のセンサで受信したデータを使用して検出できたと考えられる。一方電磁波レーダ法は、割れ表面がギザギザであるため、反射波が異なる方向に反射し拡散してしまったことが考えられる。

4.3 試験体 3

結果：ひび割れ模擬において、AET 法は明確ではないが、弾性波速度が低下しており損傷部の検出ができています。しかし、健全部においても弾性波速度が低下していた。電磁波レーダ法では、損傷部と健全部に差が見られ、検出できた。

考察：AET 法では、エポキシ樹脂内を弾性波が伝播するため、明確な速度変化が得られなかったと考えられる。一方電磁波レーダ法は、エポキシ樹脂であっても電磁波が反射したため、検出できたと考えられる。

4.4 試験体 4

結果：空隙、土砂化は、AET 法および電磁波レーダ法において検出できた。また AET 法では、豆板は明確ではないが変化が確認できた。

考察：AET 法および電磁波レーダ法では、空隙および土砂化は、平坦な水平ひび割れと同様に、空気層があるため検出できていたと考えられる。AET 法における豆板の検出は、導入位置が解析範囲の境界付近であったために明確な検出結果ではなかったと考えられる。また、電磁波レーダ法に

おいても豆板を明確に検出ができていなかったことから、空気層が少なかったことも考えられる。今後試験体を切断し確認する予定である。

4.5 全試験体の計測結果と考察

これらの結果より、AET 法による各損傷の判定結果を表 3 に示す。限界損傷状態である 2700m/s 以下の弾性波速度が明確に確認できたものを○とし、損傷部と健全部に明確な差が見られなかったものを△とした。表 3 より、幅が 1～3mm の平坦な水平ひび割れ、波型のひび割れ、土砂化、および空隙においては、明確な検出ができたため○とした。一方で割れ部がエポキシで充てんされている模擬ひび割れや、空気層が少ない豆板においては、弾性波速度の低下が確認できたが明確な検出ではなかったため△とした。

電磁波レーダ法はセンサ設置のために床版下面にアクセスする必要がなく、車載化により計測時間の短縮が可能である特徴がある。AET 法は、初期の計測準備としてセンサ設置が必要である。しかし、図 7 に示すように、450mm の深い位置でも 3 次元で計測できるという特徴がある。本試験で

表 3 AET 法による各損傷の判定結果

| 手法 | 試験体1の計測結果 平坦な水平ひび割れ (左：幅1mm, 右：幅2mm) | 水平ひび割れ | | | 波型 ひび割れ | 模擬 ひび割れ | 空隙 | 土砂化 | 豆板 |
|-----------|--------------------------------------------|--------|-----|-----|------------|------------|----|-----|----|
| | | 1mm | 2mm | 3mm | | | | | |
| AET 解析 | | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | △ |

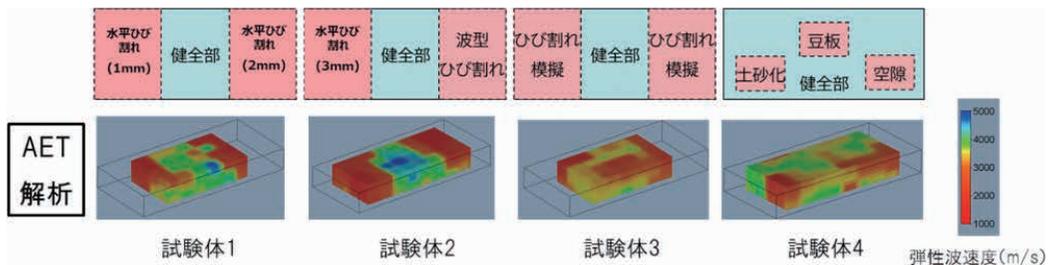


図 7 AET 法による各試験体の 3 次元計測結果表示

は弾性波の励起をハンマリングとしたが、交通荷重(自動車やトラックなど道路を走行するもの)を用いることも可能である。将来的に AET 法では、交通規制できない場合でも計測できることから、同じ場所を継続してモニタリングする場合などに適していると考えられる。

5. おわりに

AET 法の計測原理の概要について紹介し、さまざまな損傷が導入された4つのRC床版試験体を用いて、AET 法による損傷検出性能の検証を実施した。AET 法はアスファルト上からでもコンクリート内部の損傷を検出できた。また、1mm の水平ひび割れや波型のひび割れにおいても検出できた。

AET 法では床版下面にセンサを設置する必要がある。しかし、300mm 以上の深い位置でも3次元で計測できる点や、交通規制ができない場合においても、同じ場所であれば継続してモニタリングできる点などメリットもある。近年、床版厚さが400mm を超える2主桁床版、鋼繊維補強コンクリートなどがあり、電磁波レーダ法では困難な対象でも計測できることが予想されるため、ニーズを調査し、適用先を拡大することが課題である。

参考文献

- (1) T. Shiotani, D. G. Aggelis and O. Makishima : Global monitoring of large concrete structures using acoustic emission and ultrasonic techniques: case study, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.14, No.3, 2009, pp.188-192
- (2) 一般社団法人日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッション試験Ⅰ、2006、pp.5-6
- (3) H. Asaue, T. Shiotani, S. Fukumoto, Y. Tanaka and T. Maeshima : Fatigue Damage Evolution of RC Slabs Considering Water Infiltration in Wheel-loading Test by means of 3D AE Tomography, *PROGRESS in ACOUSTIC EMISSION XIX*, 2018, pp.133-138
- (4) 一般社団法人日本非破壊検査協会：NDIS3429 電磁波レーダ法によるコンクリート構造物中の鉄筋探査方法、2011
- (5) 大橋タケル、春田英介他：電磁波レーダを用いたコンクリート床版の損傷スクリーニング技術の開発、平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会、2018、pp.855-856
- (6) 赤池弘次他、土谷隆編：赤池情報量規準 AIC — モデリング・予測・知識発見 一、pp.135-137



研究開発センター
研究開発グループ
福本伸太郎

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



計測事業部
計測技術部
福浦グループ 課長
塩谷 源二

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3541



国立大学法人京都大学大学院
工学研究科 社会基盤工学専攻
教授 博士(工学)
塩谷 智基

TEL. 075-383-3495
FAX. 075-383-3495



国立大学法人京都大学大学院
工学研究科 社会基盤工学専攻
特定准教授 博士(工学)
麻植 久史

TEL. 075-383-3495
FAX. 075-383-3495