AEトモグラフィ法による 土木構造物の損傷評価に関する研究

平成 23 年 3 月 4 日

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 河合啓介

要旨

近年、我が国で土木構造物の老朽化が問題になっており、これらを限られた予算の下 で効率的に維持管理することが強く望まれている.戦略的な維持管理を行う上で、構造 物に大規模な変状が生じる前に補修・補強を行うという予防保全の重要性は認識されて いるが, 現状では予防保全に十分に資する診断法は確立されているとはいえない. 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, 組積状構造物などを対象に AE 法や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が、実構造物に適用す る場合に要する費用や時間や、更には結果の工学的解釈など実務面に多くの課題を要し てきた. そこで本研究では新たな損傷評価手法として, AE トモグラフィ法を提案する. 本手法は AE 波を用いて減衰トモグラフィ解析を行う手法であり、構造物の内部で生じ る破壊や既往損傷の摩擦などで生じる AE 波を弾性波の発信源として用いるため, AE 計 測により,これまで別途実施されていたトモグラフィ解析を可能とする手法である.通 常のトモグラフィと比較しても,弾性波の発生が任意に数多く得られることからセンサ 配置を広く設定することが可能となり、また計測される AE 源の増加とともに解析に用 いるデータ数が増加し、解析精度が向上するという利点を有する。本研究ではまずコン クリート材料に焦点をあて,小規模なコンクリート供試体の破壊試験や実橋梁の損傷床 版などを対象に本手法を適用した、その結果、本手法で得られる減衰勾配と試験体内部 の損傷状態に良好な関係性が認められ, 手法の損傷評価手法としての有用性が示された. また、それぞれの実験で、本解析法の現時点での精度が明らかになるとともに、更なる 解析精度の向上のための課題も示された.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究	3
1.3 研究の目的	4
1.4 本論文の構成	5
第2章 アコースティック・エミッション法とトモグラフ	ィ法6
2.1 アコースティック・エミッション法の概論	6
2.1.1 AE 計測の基本原理	6
2.1.2 AE 法の計測機器	7
2.1.3 波形特性パラメータ	8
2.2 トモグラフィ法の概論	17
2.2.1 速度トモグラフィ法	17
2.2.2 減衰トモグラフィ法	18
第 3 章 AE トモグラフィ法	20
3.1 弾性波の減衰	20
3.1.1 基礎理論	20
3.1.2 減衰値と損傷の定義	21
3.1.3 シミュレーション	22
3.2 AE トモグラフィ法	26
3.2.1 AE 源の振幅推定法	27
3.2.2 トモグラフィ解析	34
第 4 章 弹性波励起実験	39
4.1 実験概要	39
4.2 3 次元 AE トモグラフィ解析	44
第5章 劣化した実道路橋床版の簡易載荷実験	59
5.1 実験概要	59
5.2 各種 AE 解析とインパクトエコー法	61
5.2.1 周波数特性を用いた床版全体の損傷評価	61
5.2.2 Calm 比による損傷評価	62
5.2.3 AE 波発生数と AE 源	63
5.2.4 インパクトエコー法	64
5.3 1 次元 AE トモグラフィ解析結果	66

第 6	章 健全供試体の曲げ試験	70
6.1	実験概要	70
6.2	表面クラックと AE 源の分布	73
6.3	速度トモグラフィ	74
6.4	3 次元 AE トモグラフィ	30
第 7	章 結論と今後の展望	34
参考	文献87	
謝辞	§90	

第1章 序論

1.1 研究の背景

我が国の建設投資は90年代後半を境に建設する時代から更新,維持管理する時代に明らかに変遷している. 図 1-1¹⁾に示すように、政府の建設投資額の推移は1988年以降減少の一途をたどっており、2009年度はやや回復したものの、2010年度は2008年度の額を大きく下回る試算がなされている. 一方、近年の少子高齢化の問題や、民主党の「コンクリートから人へ」のスローガンに代表されるような福祉や教育への投資の気運が高まる中で、今後公共事業費の大幅な増加は予想され難い. 表 1-1に示すように、日本の土木構造物の多くは近い将来供用年数50年を迎え、今後さらに維持管理に必要な費用は増大することが予想される. 近年の建設投資額の推移と維持管理費の増加から、2021年度以降に新規構造物がゼロになるという極端な試算がなされた例も存在する²⁾. これより、建設投資額に占める維持管理費の増加は必要不可欠といえ、土木構造物を効率的に維持管理することで、可能な限り維持管理費を最小限に抑える戦略的管理法の確立が強く望まれる.

コンクリート構造物においても同様の問題をかかえているが、コンクリート構造物の補修・補強が適切に施されていないことに起因する、図 1-2 に示すようなコンクリート床版の抜け落ちや、コンクリート片の欠落などの事故が近年多数報告されている³⁾. アメリカのミネアポリス道路橋の崩落事故は記憶に新しいが、先述のように日本における老朽化する構造物の数が年々増加することを踏まえると、図 1-2 に示すような程度の事故に留まらず、橋梁の崩壊事故が発生する危険性が高まっていることが懸念される.

図 1-3 に我が国の都道府県、および地方自治体の橋梁の管理状況を示す. 都道府県の管理する橋梁の約 7 割が点検されているのに対し、市長町ではほとんど点検されていない現状にある. 橋梁の適切な維持管理手法を検討する場合、上記のように橋梁の管理団体が都道府県であるのか市町村であるのか、あるいは民間であるのかという管理団体の相違、橋梁の規模、維持管理に投資可能なコスト、崩落あるいは事故が発生した場合の被害の規模、また社会的な重要性など、その橋梁がおかれている条件により、適切な維持管理手法は異なるものと推測される. 実際、予防保全の観点からの点検・補修の重要性が認識されつつも、既に損傷が大幅に進行しており、適切な補修時期を経過している橋梁は多数存在する. これらの橋梁に関しては、通行者に著しい危険をもたらすような状態まで橋梁が劣化し、その時点ではじめて通行止めや架け替えなどの措置を実施することが補修時期の最適解になる可能性もあり得る. 一方で、都市部などにおける重要度の高い橋梁、特に長期にわたる通行止めなどの措置が事実上不可能な橋梁も存在する. これに関しては、やはり予防保全の観点から、ある程度のコストをかけても、精度の高いモニタリング技術により適切な補修時期、および補修方法を決定する必要がある. 損傷が甚大な状況で補修・補強、また

は架け替えを実施するよりも,損傷初期段階から適切に補修・補強するほうが LCC のトータルコストが最小となる研究報告も存在する⁴⁾⁵⁾.

先述のように、モニタリング技術を用いた点検技術、あるいは損傷評価技術が目視点検 と比較して高コストであるのは当然ではあるが、現状よりも安価で簡易な計測手法が望ま れていることは言うまでもない。また、計測コストと計測の適用範囲、その精度を明らか にし、技術者側から橋梁の管理団体にその計測技術を提案することも重要である。そこで 本研究はここに述べたモニタリング技術として AE トモグラフィを用いた新たな橋梁の床 版の損傷評価手法を提案する。

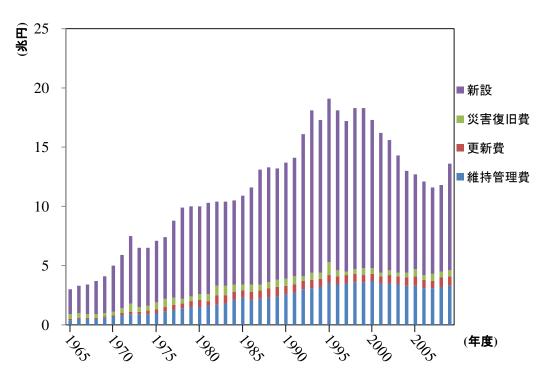


図 1-1 建設投資額の推移

表 1-1 供用 50年以上の土木構造物

	2009年度	2019年度	2029年度
道路橋	約8%	約25%	約51%
河川管理施設(水門等)	約11%	約25%	約51%
下水道管きょ	約3%	約7%	約22%
港湾岸壁	約5%	約19%	約48%



(a) 床版の抜け落ち



(b) コンクリート片の欠落

図 1-2 橋梁の損傷事例

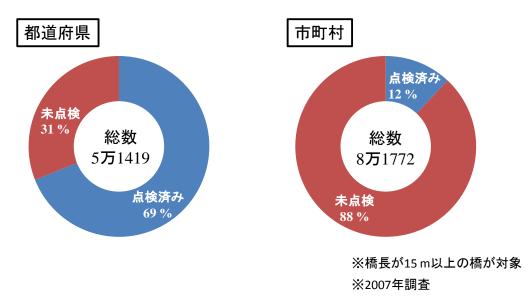


図 1-3 都道府県、および市町村の橋梁の点検実施状況 3)

1.2 既往の研究

本節では、道路橋床版やコンクリート構造物に AE 法やトモグラフィ法を適用した既往 研究に関して、その概要、および課題を述べる.

AE 法,およびトモグラフィ法は両手法とも'弾性波'を用いてコンクリート内部の損傷状態の評価,あるいは内部のクラックの可視化を行う非破壊検査技術である.いずれの手法でも,弾性波の周波数やセンサ間隔を変化させることにより,計測可能な範囲の広さや得られる結果の計測精度が決まる.

広い計測対象領域を有する研究として、塩谷らのは橋梁に一台の車両を走行させ、AE源の位置、そのヒット数、およびエネルギーなどの変化を検討し、AE源が集中している範

囲を抽出して相対的に劣化が進行している領域を推定した。センサを広範に設置することで、計測の対象となる領域は広がるが、相対的な損傷評価に留まるという点に留意する必要がある。また、ある程度の範囲内でセンサを3次元的に配置し、これにより得られた AE源の位置からクラックの位置や規模を推定する研究も行われている。大津ら⁷⁾⁸⁾は AE源の発生位置とクラックの位置に密接な関係があることを示し、さらに SiGMA 解析により、より詳細な AE 発生源の特徴を推定することで、AE 発生挙動を推定した。また、AE 計測による定量的な損傷評価手法として、Calm 比や Road 比が考案されており⁹⁾、これらの2つの指標を組み合わせて構造物の劣化を推定する試みが多くの機関で研究されている。

一方、AE 計測のみで実際の構造物の損傷評価をするには、多くの課題が残されているため、多くの場合、AE 解析法に加えてトモグラフィ技術などの透過計測が必要となる場合が多い. 塩谷ら 1011)は、測定領域を取り囲むようにして、センサを複数の表面に設置し、弾性波の送受信を行う断面トモグラフィ法により得られる各セルの速度構造、あるいは減衰構造により、各領域の損傷レベルの推定、あるいは損傷部の可視化を検討した. ここで、実構造物を対象とする場合、多数のセンサ設置や、弾性波励起が必要となること、また広範な計測を行う場合時間とコストを要することなどから、実構造物への適用には限界があった. そこで、本研究では、任意点から多数発生が見込まれる AE 源を利用することで、センサの配置をある程度広くすることが可能で、AE 計測データを再利用して実施できる、減衰トモグラフィ解析を提案する. 本手法が実現可能になれば、AE 計測の副次的成果として対象物の損傷がトモグラフィにより可視化できるとともに、表面からの弾性波の発信が困難な構造物でもトモグラフィ解析を行うことができる. さらに、既存のトモグラフィの場合、人工的に弾性波を励起させ各センサで受信するが、本手法は AE 源を弾性波の発信点として用いるため、AE 源の増加にともないその解析精度が良くなることも特徴である.

1.3 研究の目的

前節までの背景,既往の研究を踏まえ,本研究は新たな材料診断手法である AE トモグラフィ法を提案する. AE トモグラフィ法とは 'AE 波を用いて減衰トモグラフィを実施する手法'である. 換言すると, AE 実験で得られた計測結果を用いて, 弾性波の減衰に着目した減衰トモグラフィ手法を実施することを目的とする. 具体的に,既存の AE 源の振幅,あるいは減衰値算定法に改良を加えるとともに,その振幅を用いて減衰トモグラフィ解析を実施する.本研究では主に3種類の実験を行い,本手法の適用性,今後の課題,および改良点を明確にすることが本研究の目的である.

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全7章からなる.

第1章において、序論として研究の背景、目的、及び既往の研究との関連を述べた.

第2章では、本研究で用いた既往のAE解析手法を述べるとともに、AEトモグラフィ法で用いるAE法、およびトモグラフィ法の基礎理論を述べる.

第3章では、弾性波の減衰と損傷の関係を検討した後、AE トモグラフィの基礎理論、 計算手法を述べる.

第4章では、損傷を模擬する空隙を包含するコンクリート試験体を用いて、表面で励起させた弾性波を擬似 AE 波として用いて、AE トモグラフィ解析を行い課題を抽出した.

第5章では、大規模の実道路橋の床版に1次元AEトモグラフィを適用した.

第6章では、破壊試験を実施し、各載荷段階、すなわち各損傷レベルで3次元AEトモグラフィ解析を実施し、本手法の精度、課題を検討した.

第7章では本研究で得られた知見についてまとめる.最後に、本手法の問題点と今後の 展望について示す.

第2章 アコースティック・エミッション法とトモグラフィ法

本章では、AE 法の概念、基礎理論、計測器機、およびこれまで提案、実施されてきた種々の解析手法と、トモグラフィ法の概要について述べる。これらの理論は、3 章で示すAE トモグラフィ解析の基礎理論を構成するものである。また、種々の解析手法より得られる損傷程度に密接に関連する指標は、第4章以降での実験結果に適用し対象構造物の損傷評価を行い、さらにAE トモグラフィによる損傷評価の結果との比較を行うものとする。

2.1 アコースティック・エミッション法の概論

アコースティック・エミッション (Acoustic Emission, 略して AE) とは,直訳すると「音響の放出」という意味である.「固体材料内部の微小な破壊,あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」と定義されている¹²⁾. AE 法は古くから金属分野,岩盤および地震学の分野,コンクート分野などで用いられ,近年では,セラミック,繊維補強プラスティックスなどの先端複合材料から医療分野まで広く適用されている. AE は「微小破壊の監視手法」として特に有効な手段であるため,圧力容器などの状態監視やインフラ構造物の予防保全にも活用できる計測法として近年特に注目されている.

2.1.1 AE 計測の基本原理

AE は原理的には図 2-1 に示すような計測装置で検出される. AE 現象により生じた弾性波は物質内を伝播し、表面に設置された AE センサによって電気信号 (一般的には電圧、増幅器の特性によっては電流)に変換される. その後、信号は増幅器により増幅され、帯域通過型フィルタでろ過されて検出される. 検出波形は、縦波 (P波)、横波 (S波)、表面波、境界での反射波などが重なり合って複雑な形となる. センサで弾性波から電気信号に変換された時点で、数 μ V-数 mV の電圧で数 kHz-数 mHz の周波数成分を有する波形となる.

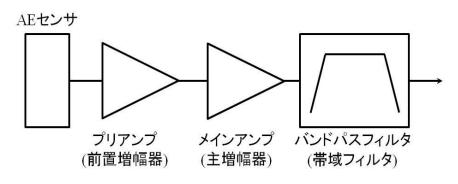


図 2-1 基本的な AE 計測装置

2.1.2 AE 法の計測機器

(1) AE センサ

AE センサは図 2-2 に示すように様々な形状,周波数特性を有するセンサが存在する. AE センサは,AE 信号が非常に微弱なため PZT などの圧電材料を使用し,圧電素子の共振特性を利用して設計される.近年では,周波数特性が平坦な電気容量型のセンサや,レーザー光干渉型のセンサなども考案されているが,いずれも圧電型に比べて感度が低く,室内実験での小規模試験体や市販のセンサの較正¹³⁾などに限定して用いられているのが現状である.本研究では一般的な供試体規模からある程度大規模なコンクリート構造物で用いられている 60 kHz 共振型の AE センサを用いた.



図 2-2 各種 AE センサ

(2)増幅器とフィルタ

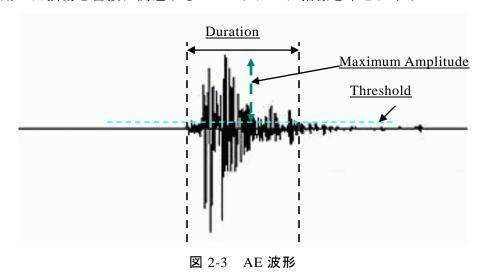
増幅器やフィルタと呼ばれるものは音響機器でよく見られるものであり、電気信号に変換された音のひずみをできる限り小さく処理するための仕様は、AE でも同じように必要となる. 増幅器は、小エネルギーの現象に対して飽和しないように増幅可能な振幅域を大きくとり、雑音を低くし、微小な AE も感度よく検出できるように S/N 比 (増幅信号の振幅に対する雑音レベルの比)も大きくとる必要がある.

また、回路の影響によって、センサにより変換された電気信号にひずみが生じないようにするためには、入力インピーダンスの大きなプリアンプで受け、その後にメインアンプで増幅することが必要になる.

フィルタの目的は、本質的には雑音の除去である.最近では機器の性能の向上により雑音の問題といえば基本的には載荷装置等から発生する機械的雑音が中心で、数 kHz 以下の振動雑音が主のため、低周波数を遮断する適当なハイパスフィルタが用いられている.本研究では、いずれの実験でも可能な限り広範囲の周波数成分を抽出することが望まれるため、ハイパスフィルタとして 1 kHz、およびローパスフィルタとして 400 kHz を設定した.

2.1.3 波形特性パラメータ

図 2-3 に示すように得られた AE 波形から、様々な波形特性パラメータを用いて分析することができる. ここでは、はじめに弾性波の伝播挙動と波形モードについて述べた後、本研究で用いた損傷と密接に関連する AE パラメータ指標を中心に示す.



(a) 弾性波の伝播挙動

3 次元の弾性体に加わる応力 (σ) は、図 2-4 に示すように、 σ_x 、 σ_y 、 σ_z を垂直応力、 τ をせん断応力とすると式(2.1)のように表される.

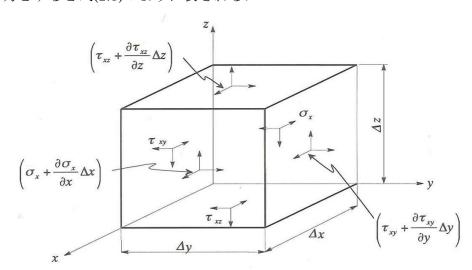


図 2-4 3 次元座標と応力

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$
(2.1)

ここで、局所的な回転がなく弾性体が静止するためには、式(2.2)が成り立つため応力 (σ) の独立成分は 6 個である.

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} \tag{2.2}$$

応力と慣性力とのつり合いから,以下の運動方程式が得られる.

$$\rho \frac{\partial^{2} u}{\partial t^{2}} = \frac{\partial \sigma_{x}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^{2} v}{\partial t^{2}} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{y}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^{2} w}{\partial t^{2}} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{z}}{\partial z}$$
(2.3)

ここで、u、v、wはx,y、z方向の変位であり、 ρ は媒体の密度である。式(2.3)の右辺を変位の関数として表すために、応力とひずみの間のフックの法則と呼ばれる線形関係と Lame の定数(λ , μ)を用いた以下の関係を用いる。

$$\sigma_{x} = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\sigma_{y} = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{z} = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$
(2.4)

ここで,

$$\lambda = \frac{Ev}{(v+1)(1-2v)}, \quad \mu = \frac{E}{2(v+1)}$$
 (2.5)

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$
 (2.6)

式(2.4)を式(2.3)に代入すれば、以下の直角座標による 3 次元弾性体内の運動方程式が得られる.

$$\rho \frac{\partial^{2} u}{\partial t^{2}} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^{2} u$$

$$\rho \frac{\partial^{2} v}{\partial t^{2}} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^{2} v$$

$$\rho \frac{\partial^{2} w}{\partial t^{2}} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^{2} w$$

$$\nabla^{2} = \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} + \frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}}$$
(2.7)

式(2.7)に従う波動は2種類の伝播速度を有し、以下の式で表される.

$$C_{p} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$$C_{s} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$
(2.8)

ここで、 C_p はP波速度、 C_s はS波速度である. さらに2つの速度の比をとると、

$$\frac{C_p}{C_s} = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu} + 2} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$
 (2.9)

となる. 通常 λ と μ は正の値であるので、P波が S波よりも速く伝播することが式(2.9)より確認できる. さらに、弾性係数 E、質量密度 ρ 、およびポアソン比 ν を用いると P 波と S 波の波速は次式で示される.

$$C_{P} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$
 (2.10)

$$C_{s} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}$$
 (2.11)

以上より、P 波は最も速い速度で進行し、S 波、R 波と続く. 理論上、P 波、S 波、R 波の速度の比はポアソン比のみによって決まる. ポアソン比が 0.18 の場合、S 波速度 P 波速度は 0.62、R 波速度/P 波速度は 0.57 となる.

(b) 振動モード

無限に広がる一様な等方弾性体中を伝播する波には、縦波 (P波)と横波 (S波)の2種類が存在する. さらに弾性体に表面がある場合は、表面を沿って伝播する波である表面波 (R波)が存在する. また、弾性体の厚さが励起した弾性波の波長より小さい場合には板波 (ラム波)が発生する. このような波の種類を振動モードといい、試験体の表面や他の物質との境界面、および試験体内の欠陥箇所などで振動モードが変化することをモード変換という. 以下に各振動モードについて述べる.

縦波

縦波とは粒子の振動が波の伝播する方向と平行な方向,すなわち縦方向に生じる波のことで,粒子が粗密を繰り返しながら伝播する.粒子が密になっている部分と疎になっている部分が一定の間隔となっており,密と密あるいは疎と疎の間の距離を波長という.縦波は P 波,粗密波,あるいは圧縮波とも呼ばれている.この波は体積変化が可能な媒質を伝播するため,固体,液体,および気体の中を伝播することが可能であり,弾性波の中では速度が最大である.また,弾性波の中で P 波のエネルギーは全体の約 10%を占める.

横波

横波とは粒子の振動が波の伝播する方向と直角 (垂直)な方向,すなわち横方向に生じる波のことで,表面と平行に加えられたひずみが,その方向を変えながら繰り返されて伝播する.横波はS波,あるいはせん断波とも呼ばれている.この波は固体中では伝播するが,せん断弾性がない液体および気体中ではひずみを戻す作用が起こらないので伝播しない.また,弾性波の中でS波のエネルギーは全体の約20%を占める.AEトモグラフィ法では,このS波の波動成分から構成される振幅を主に用いて減衰が算出される.

• 表面波

表面波とは材料の表面部分のみを伝播する波のことで、最初の発見者の名をとってレイリー波、あるいは R 波と呼ばれている.表面波はコンクリートの場合、表面から約 1 波長

分の浅い層にエネルギーの大部分が集中する.表面付近の粒子の挙動には、表面に対して平行に動く縦振動 (粗密)と表面に対して上下方向に動く横振動 (横ずれ)がある.したがって、伝播時にはこれらが合成されたような楕円状の動きをする.表面波は反射境界面を持つ反無限弾性体を伝播するため、そのエネルギーは円柱状に伝播する.また、表面波のエネルギーは弾性波の中で最大で、全体の約70%を占めている.さらに、実体波よりも減衰しにくいという特徴がある.このように表面波のエネルギーは大きく、かつ、減衰しにくいという特徴があることから、広範囲な計測が可能となり、原位置計測では特に有効な弾性波のモードといえる.本研究では、表面励起により発生させた弾性波を対象にする場合、波形の主要動は表面波が中心となることに注意されたい.つまり、一般にAE波は試験体内部で発生するため、表面波の影響は小さいものと推測されるが、例えば第4章で示す実験のように、試験体表面で弾性波を発生させる場合は、発信点と同一平面上に存在するセンサの受信波形には表面波が主に含まれる.したがって、S波振幅の減衰を検討する場合は、表面波を主に検出する励起面と同一面に設置したセンサで得られた信号は解析の対象から除外することとする.

・ 板波 (ラム波)

板波とは波の伝播方向と直角 (垂直)な断面の寸法が波長と同程度になると、側面で反射 した波が互いに干渉することで生じる被導波である. 板,棒,管などを伝播する被導波は、 すべて板波と呼ばれる. 特に、板を伝播する波はラム波と呼ばれ、対称モード S と非対称 A モードがあり、表面波と同様に楕円状の動きを示す.

(c) AE 最大振幅值

AEトモグラフィ法で最終的に得られる各セルの減衰量は、受信センサで得られた AE 波形の最大振幅値から算定される。よって、本指標は本研究の解析結果に直接影響を与える重要な指標であるといえる。AE の最大振幅とは図 2-3 に示すように波形の尖頭値を示す。これは、AE 発生源での破壊の規模と関係しているパラメータと考えられており、破壊の規模に応じて大小の振幅値が得られる。ただし、減衰の影響を考慮する必要があり、例えば岩質材料では、金属材料に比べ減衰が大きいため、伝播距離により振幅は大きく減少する。その結果、センサ近傍で発生した規模の小さい AE 波と、センサから離れた位置で発生した規模の大きい AE 波が、同じ大きさの波形としてセンサで受信される場合があることに注意する必要がある。これを踏まえた上で、本研究はセンサで計測された波形の最大振幅値、および AE 源の位置とセンサの位置から算出される伝播距離(波線の長さ)を用いて、AE 源の規模と各波線の減衰勾配を推定する。詳細は第3章で示す。

(d) AE 位置標定

本研究では信号到達時間差法を用いて AE 源の位置標定を行う. 信号到達時間差法は, 複数個の AE センサを配置して到達時間差を測定する方法で、位置標定を行う上で最も基 本的,かつ一般的な方法である.信号の到達時間差を算出するために必要な信号到達時間 を決定する際、包絡線検波波形を用いる場合と、入力した波形そのものに着目する場合の 2 通りが考えられる. 通常用いられる手法は前者であり、最初にしきい値を超えた時点を 到達時刻とする場合と,最大振幅に至った時刻を到達時間とする場合の2つの検出法があ る. ここで注意すべきは、外部雑音が大きくしきい値を高く設定する場合や微弱な AE 信 号で P 波初動振幅値が小さい場合、AE 波形がしきい値を超過する時の時刻が P 波初動と 一致せず,エネルギーが大きい S 波や表面波などの初動部を誤検出する可能性もある. S 波には AE 伝播速度に分散性はないが、表面波と板波は分散性を有し、伝播速度は周波数 に依存する. したがって、これらの波のモードでは、設定しきい値がいずれの波の初動検 出を行うのか試験に先立ち検討する必要がある. 一方で, 本研究の AE トモグラフィ法の ように高い位置標定精度が望まれる場合,入力した AE 波形そのものに着目し,第一到達 波である P 波到達時間を信号到達時間とすることが多い. また, 近年, 受信波形の P 波初 動の自動読み取り技術の研究が進み、AIC 14 (Akaike Information criterion) を用いた手法が 提案されているが、S/N 比が良い場合にのみ有効であることから、本研究では目視により 受信波形の P 波到達時間を読み取ることとした.

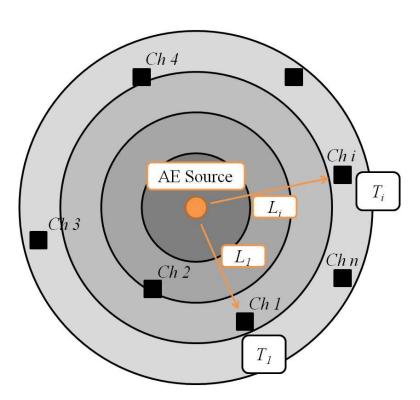


図 2-5 AE 信号到達時間差法の原理

AE 信号の到達時間による位置標定原理を図 2-5 に示す.n 個の AE センサ ($Ch\ 1$, $Ch\ 2$,..., $Ch\ i$,..., $Ch\ n$) が図 2-5 のように配置される場合,AE 波の伝播速度を V,AE 源から $Ch\ i$ センサまでの伝播距離 L_i ,そのときの到達時間を T_i とすると, $Ch\ 1$ センサと $Ch\ i$ センサの到達時間差 T_{i-1} は, T_{i-1} = T_i - T_I である.AE 源(x,y,z)から $Ch\ i$ センサの位置(X_i,Y_i,Z_i)までの伝播距離を L_i とすると,AE 伝播方程式は,

$$V \cdot (T_1 + T_{i-1}) = L_i \tag{2.12}$$

となる. ここで、Liは対象とする AE 波伝播媒体により異なるが、3 次元媒体では、

$$L_i^2 = (x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2$$
(2.13)

となり、また平面や円筒のように平面展開が可能な場合は、

$$L_i^2 = (x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2$$
(2.14)

となる. さらに Ch 1 センサの座標を原点として、原点と AE 源の距離を L_0 とすると、 L_0 と L_i には以下の関係がある.

$$L_i - L_0 = V \cdot T_{i-1} \tag{2.15}$$

式(2.15)を平方し,i 番目とj 番目の方程式の差をとることにより,以下の線形連立方程式を得る.

$$A_{ij}x + B_{ij}y + C_{ij}z + D_{ij}V = E_{ij}$$
 (2.16)

ここで,

$$A_{ij} = 2 \cdot (X_{i}T_{j-1} - X_{j}T_{i-1})$$

$$B_{ij} = 2 \cdot (Y_{i}T_{j-1} - Y_{j}T_{i-1})$$

$$C_{ij} = 2 \cdot (Z_{i}T_{j-1} - Z_{j}T_{i-1})$$

$$D_{ij} = T_{i-1}T_{j-1} \cdot (T_{i-1} - T_{j-1})$$

$$E_{ij} = T_{j-1} \cdot (X_{i}^{2} + Y_{i}^{2} + Z_{i}^{2}) - T_{i-1} \cdot (X_{j}^{2} + Y_{j}^{2} + Z_{j}^{2})$$
(2.17)

 $T_{i\cdot J}$ (i=2,...,n)がいずれも 0 でないなら、式(2.17)で一次独立な式は n-2 個存在する. AE センサの数は n 個であるので、このように連立方程式により破壊源探査 (未知数 x, y, z の決定)を行うには n-2=3 であるべきなので、n=5 となり 5 チャンネルの計測システムが必要となる. 6 チャンネル以上の計測システムを用いた場合、式(2.17)で P 波速度 V も未知数として決定することも理論上可能であるが、式(2.17)で V は平方で与えられているため、座標の未知数 x, y, z と同じような精度で決定することは困難である.したがって、P 波の伝播速度は、外部から撹乱を入力し、その伝播時間と伝播距離から決定することが必要である.本研究では、擬似 AE 波発生装置(パルサー)を用いてセンサにインパルス電圧を付加して弾性波を励起させ、受信波形の到達時間と受信センサの位置により P 波の速度を求めた.また、試験体が小規模である場合は、圧縮試験を行いポアソン比と弾性係数を測定し速度を推定した.

(e) Calm 比と RTRI 比

AE波の発生挙動に関してはKaiser¹⁵⁾が示したカイザー効果というAE波の発生挙動に関する現象が存在する.端的に言えばある材料が以前に受けた最大履歴載荷値を超えて載荷されなければAE波がほとんど検出されないというものであり,Kaiserが金属材料で発見後,コンクリート分野ではRüschの研究で,岩石ではGoodman¹⁶⁾の研究によって同様の現象が確認されている.

複合材料分野ではカイザー効果は、Felicity ratioと呼ばれる値で利用されている。それらは $Fowler^{17)}$ が提案したもので、先行荷重を P_{Ist} 、次回の載荷過程でAE波が頻発し始めた荷重を P_{AE} としたとき、

Felicity ratio (FR) =
$$\frac{P_{AE}}{P_{1st}}$$
 (2.18)

で示される. カイザー効果が存在する荷重レベルでは、FRが1以上であり、内部不安定な 状態ではFR < 1となる. これらの結果を考慮して、非破壊検査協会の規格NDIS2421¹⁸⁾では、以下のCalm比とLoad 比を提案している.

・ Load比 (Ratio of load at the onset of AE activity to previous load) 漸増繰り返し荷重のサイクル中に AE の発生が観測された荷重を P_{AE} , それ以前の履歴荷重を P_0 とすると、Load 比は以下の式で示される.

$$Load \not \! \! \perp = \frac{P_{AE}}{P_0} \tag{2.19}$$

• Calm比 (Ratio of cumulative AE activity under unloading to that of previous maximum loading cycle)

履歴サイクル中に計数されたAE発生数 eN_0 , 除荷時に計数されたAE発生数 eN_{unload} とすると、Calm 比は以下の式で示される.

$$Calm \not \! \! \perp = \frac{N_{unload}}{N_0}$$
 (2.20)

Load比の算出法は現場適用性を考えた場合,実務上困難な場合がある.式(2.19)に示すように,Load比を算定する場合,前提として供用開始から現在に至るまでの最大履歴荷重が必要である.この場合,室内試験においては履歴最大荷重を計測あるいは,特定することは可能である.しかし,原位置に設置した構造物が経験してきた最大の履歴荷重推定は容易ではないものと思われる.

これらの問題点を解決するために,塩谷らはRTRI比 $^{19)20)}$ (Ratio of repeated train load at the onset of AE activity to relative max load during a inspection period) を提案している. 計測期間 における最大変位を P_{0} , AEが発生した時の変位を P_{AE} とし,以下の式でRIRI 比は定義される.

同算出法は,荷重以外のパラメータも許容するとともに,これらの計測期間における最大

値(一般には供用荷重)を対象とする構造物や材料の履歴最大荷重として仮定していることが Load 比と異なる.

(f) AE ヒット

AE センサに入力された AE 信号の 1 つの波形を 1 ヒットという. つまり, 発生した AE 事象が 1 個 (1 イベント) の場合でも, 複数個の AE センサで検出されれば AE センサ個数分のヒット数として計数される. クラックの発生, 進展などの突発型 AE の発生頻度や発生形態を推定するのに適した指標とされる. 各実験により設定する記録波形のしきい値を超えた振幅を有する波形は全て AE ヒットとして計数するため, 反射波を 2 重記録する場合や, 減衰した波形が記録されない場合があるが, 信号の計測時間や, 不感時間を適切に設定することでこれらは解決できる. また, 相対的にセンサ毎に得られたヒット数からセンサ設置近傍の AE アクティビティーが比較検討できる.

2.2 トモグラフィ法の概論

本節では、AE トモグラフィ解析の基礎理論であるトモグラフィ法について概要を示す. コンクリート、岩盤、および地盤などの内部構造は速度や速度に密度を乗じた音響インピーダンスなどで表されることが多い. 一般に欠陥が空気や水で構成されれば、その弾性波速度は 340 m/s-1500 m/s 程度と考えられることから、他のインタクトな範囲がそれよりも十分大きな弾性波速度の場合、間隙(欠陥)は低速度域として弾性波速度で識別可能である. そこで、弾性波速度分布を推定する速度トモグラフィ法が多くの研究・実務分野で利用されている. また近年、地震学の Q 値解析と同様の手法である受信波形の振幅に着目した減衰トモグラフィの研究も行われているようになっている. 以下に、この 2 つのトモグラフィ法の概要を示す.

2.2.1 速度トモグラフィ法

速度トモグラフィは、調査断面、あるいは調査空間を多数の格子状のセルに分割し、まずセル内の伝播速度が一定であると仮定し、調査領域を透過させた多数の波線の伝播時間を用いてそれぞれの波線の伝播速度を求め、観測値に近づけるよう各セルの速度値を更新させて、最終的に速度により調査領域の2次元あるいは、3次元の速度分布を求める手法である。弾性波トモグラフィの解析手順を図2-6に示す。入力情報としてセンサの位置と弾性波の発信点の位置、およびセルの領域、幅を定める。さらに実験で得られた各センサでの受信時刻より各波線を伝播した時間を入力し、各セルの初期伝播速度、すなわち初期スローネス(距離に伝播速度の逆数を乗じたもの)を算出する。この初期スローネスを用いて計算された各波線の理論到達時刻と実験で得られた時刻との差を求め、それを各セル

に振り分け、再計算し、モデルの修正をするという流れである。モデルの修正の際には、通常、レイトレーシングが行われる。これは、初期スローネスの段階では弾性波の直進経路が仮定されているが、実際には、発信点と受信点の間に異なるインピーダンス (密度と伝播速度の積)を有する媒体や、ひび割れなど空隙が存在する場合、波動は屈折または回折する。このことを考慮し、再計算の際には迂回する経路も検討するという解析法である。後述するが、AE トモグラフィでは振幅の減衰を利用するトモグラフィ法であるため、レイトレーシングは行わないこととした。

2.2.2 減衰トモグラフィ法

速度トモグラフィが対象領域の各セルの速度を求め、全体の速度分布を推定する手法であるのに対し、減衰トモグラフィは弾性波の振幅に着目し、その振幅の単位長さあたりの減衰値 (dB/m) の分布を推定する手法である。具体的に、試験体の表面の特定のセンサの近傍でハンマやパルサーにより弾性波を励起させ、そのセンサで受信された振幅の大きさを弾性波の発信源の振幅とみなし、その他のセンサの受信波形の振幅との関係から波線の減衰量を算出する手法である。すなわち、弾性波の発信点の位置、その振幅の大きさは既知情報として用いることが AE トモグラフィ解析手法との違いである。弾性波の減衰については以降で詳説するが、基本的に振幅を dB 単位として用いる場合、距離に比例して振幅値が減少することを仮定している。すなわち、距離に比例して増加する伝播時間を想定している速度トモグラフィと基本的な解析手法は同様である。ただし、減衰トモグラフィにおいては迂回経路を考慮せず直線経路のみを想定するため、レイトレーシングは実施しない。この点に関しては次章で述べる。

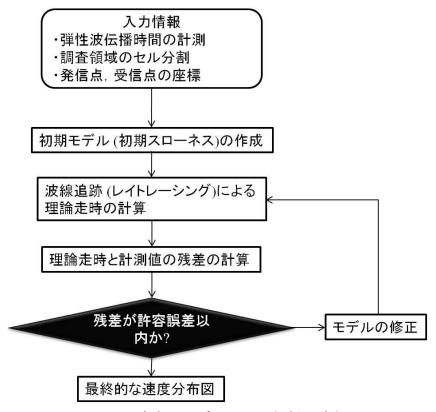


図 2-6 速度トモグラフィの解析の流れ

第3章 AE トモグラフィ法

3.1 弾性波の減衰

本節では弾性波の減衰に関する基礎理論をまとめるとともに、数値解析シミュレーションを用いて AE トモグラフィ法で仮定している弾性波の減衰の近似式の妥当性を検証し、さらに AE トモグラフィ法で得られる減衰勾配と損傷の関係を一つの代表的なモデルで表現した.

3.1.1 基礎理論

一般に、弾性波は伝播距離の増加にともない様々な要因で減衰する.減衰量は、厳密に は周波数、温度、および振動モードなどに依存するがここでは主要な要因のみ記述する.

弾性波の減衰には,まず一点から 3 次元的に広がっていく球面発散による拡散減衰が考えられる.ある点から発生した弾性波が幾何学的に拡散しながら伝播する場合に,その波面は伝播とともに大きくなるため,単位面積を通過するエネルギーは減少する.球面波は,半径をrとすると球面の表面積は $4\pi r^2$ であるので,単位体積あたりのエネルギー E は,距離の増加にともなって $1/4\pi r^2$ の割合で減少する.無限体を伝播する実体波では,振幅値は 1/r に比例して減少する.

また、異なるインピーダンスを有する媒体に弾性波が伝播する場合は透過損失が生じる. コンクリート中にクラックなどの欠陥が存在する場合、理論的には空気とコンクリートのインピーダンスの差異から透過損失が生じるものと推測される.しかし、クラックを形成するような空隙は完全な空隙とはならずインターフェイスが微小に接触する場合や、水分を含む場合もあるので、簡単に透過損失の理論式でこの減衰を表現することは困難である.

媒質が完全弾性体ではない場合には、粘性損失が生じる. 粘性による減衰は次式で表される.

$$u = u_0 \exp\left\{-\alpha(\omega)x\right\} \tag{3.1}$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{2OC} \tag{3.2}$$

ここで、 u_0 は弾性波発生点の振幅、x は伝播距離、u は計測位置 x の振幅、 ω は角振動数、C は伝播速度、および Q は媒質の減衰特性を表す無次元量である.

弾性波は材料を構成する結晶粒の境界 (結晶粒界) で反射や屈性をすることにより散乱 減衰が生じる. 弾性波が伝播する際の,減衰の主要因はこの散乱減衰と考えられている. コンクリート内部に空隙が存在する場合,その大きさは目に見えるものから,材料の結晶 程度の大きさのものまで存在し,いずれの場合でも空隙の割合が増加すれば,散乱減衰の 大きさに直接影響を及す.上記の粘性減衰と散乱減衰の2つの減衰に関して以下の式が示 されている.

$$\alpha = \frac{1}{x} 20 \log(\frac{u}{u_0}) \tag{3.3}$$

$$\alpha = Af + Bf^{n} \tag{3.4}$$

A, B, および N は定数, f は周波数である。式(3.4)の第1項は粘性減衰であり、式(3.1)、および式(3.2)が組み込まれた式となっている。式(3.4)の第2項は散乱減衰の項であり弾性波が伝播する媒体の材質の差異によりn が決まる。

以上,減衰の要因は様々であるが,要因毎に減衰式が定義され,また周波数や伝播速度にも依存することから,全ての固有の減衰係数を精度良く得ることは困難となる.これより,地震学やコンクリートの分野で波動の減衰を検討する場合,一般に,式(3.3)より伝播距離と波の振幅値のみを用いて α が推定される場合 $^{21)22}$ や,周波数を考慮して,すなわち式(3.2)や式(3.4)も含めて α を推定される場合 $^{23)24}$ がある.本研究では,実験によってはデータ数が限定されていることから,周波数の影響を考慮しない式(3.3)を用いて弾性波の減衰を検討する.式(3.3)には拡散損失の項が含まれていないが,近似的に α に拡散損失の損失分が計上されているものと仮定する.**3.1.3** の数値解析シミュレーションを用いてこの仮定について検討を加える.

3.1.2 減衰値と損傷の定義

本研究で提案する AE トモグラフィ法により,対象領域の弾性波の減衰特性が推定されるが,この減衰特性は既述のとおり材料の物性や劣化状態に依存して決まる値である.すなわち,その値を直接的に材料の健全性指標として現状では定義できないことから,材料中の空隙率,クラックの規模や本数,および密度など他の一般的な評価指標と関連付ける必要がある.ここで,コンクリート構造物の損傷が進行する原因はコンクリートの中性化,凍害,疲労劣化,および施工不良など様々考えられるが,いずれの場合も生じている物理的現象は,コンクリート内部の空隙の増加,それにともなう耐力の減少である.空隙の大

きさは大小様々であり、物質の結晶と同じナノスケールのものから、実際に目に見えるマクロスケールのものまで存在する.例えば、損傷力学の分野では、媒体内の空隙の数、体積、形状、および分布を微小レベルで議論するのではなく、広範な視点から空隙の数や密度が試料の中で変化するのかという点で損傷をとらえられている²⁵⁾.以上より、本研究では直接的に材料の耐久性に影響を与え、かつ直接的な材料の健全性の判断指標となり得る空隙率に着目し、その空隙を広範な視点でとらえ、具体的に空隙率と減衰値との関係を数値解析シミュレーションで検討する.また既に規格化²⁶⁾されている、弾性波の P 波速度による損傷評価手法との関係も加えて検討する.

3.1.3 シミュレーション

本項では、数値解析シミュレーションにより弾性波の減衰挙動が式(3.3)として近似可能 かどうか、さらに減衰値と空隙率の関係を加えて検討する.

本研究に用いた数値解析ソフト Wave2000 (サイバーロジック社製) は 2 次元の弾性波動 方程式について近似解を計算するものである.このアルゴリズムは有限差分法を基本とし, 粘性損失も含め,式(3.5)で示す弾性方程式を用いている.

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left[\mu + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla^2 w + \left[\lambda + \mu + \phi \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta}{3} \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla (\nabla \bullet w)$$

ρ: 単位体積重量

λ, μ:ラメ定数

n: せん断粘性係数

(3.5)

 φ : 体積粘性係数

∇:勾配演算子

∇•:発散演算子

t:時間

(a) 弾性波の減衰式

はじめに、拡散損失、および散乱減衰の2つの減衰要因で構成される波形の減衰量が式(3.3)の近似直線として表現可能であるのかを検討する.

図 3-1 に示すように、弾性波の発信点と受信点を設定し、その距離 L を 25 cm - 200 cm で 25 cm 間隔で変化させ、受信センサで得られた横振動を S 波の成分とみなし、最大振幅値を抽出した。送信波は本実験のセンサ共振周波数である 60 kHz の周波数で発生させ、媒質は 4000 m/s の P 波速度を有する健全なコンクリートを模擬した物性と、2000 m/s の P 波速度を有する劣化コンクリートを想定した物性の 2 種類で数値解析を行った。 P 波速度

4000 m/s, および 2000 m/s の場合の伝播距離と振幅の関係を図 3-2 に示す. 同結果より, いずれの物性の場合でも距離の増加にともない減衰値は直線的に減少し, 媒質による損傷 を想定した 2000 m/s の場合に,4000 m/s の場合と比べて大きな値となることが確認された. これより, 弾性波が拡散減衰と散乱減衰の両者の影響を受けて伝播する場合, 近似的に式 (3.3)を用いて表現可能であることが確認された.

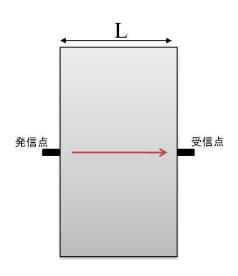


図 3-1 数値解析の設定条件

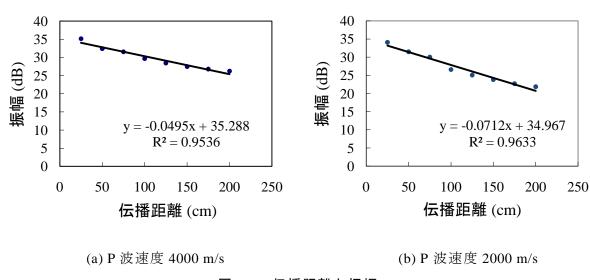


図 3-2 伝播距離と振幅

(b) 空隙率と減衰の関係

空隙率と減衰の関係を、均等に分布する空隙を用いて数値解析シミュレーションで検討する.数値解析の設定条件は図 3-3 に示すように、弾性波の発信点と受信点の距離を 20 cm とし、媒体に 16 cm の損傷領域を設けた. 損傷領域には大きさが一定の円空隙を等間隔で

設定し,その半径を 1.0 mm, 2.0 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, および 4.6 mm と変化させて解析 した.表 3-1 は空隙半径と空隙率の関係を示す.空隙半径の 1.0 cm から 4.6 cm の変化にと もない、空隙率は約3%から66%となる.送信波は、実際のAE波の発生挙動を点源と仮 定し、片面の中間位置より放射状に発信させた、空隙の物性は空気と同じ値と設定し、健 全部は前項と同様に P 波速度が 4000 m/s の健全なコンクリートの物性値を用いた. 図 3-4 に空隙半径 1.0 mm の場合の、数値解析シミュレーションの様子を示す. 同図より P 波と S波の順に弾性波が伝播する様子が確認されるが, AE トモグラフィ法では AE 波の最大振幅 であるS波が主因と考えられる振幅を対象とするため,受信振幅波形から最大振幅を抽出 する場合はS波の到達時刻付近で、かつ横振動の振幅の値に着目し抽出した. 図 3-5 (a) は 空隙率と各センサで得られた波形の減衰量の関係を示しており、空隙率の増加にともなう 減衰量の増加傾向が明らかである.本結果で示される減衰量は、コンクリート領域、およ び減衰領域の両領域での減衰の影響を受けていることから、空隙領域に限定した減衰量を 得るために図 3-2 (a)の減衰勾配の値 (4.95 dB/m)を用いた. 具体的に, 本解析で弾性波は健 全領域を4cm, および空隙領域を16cm 伝播するため, 得られた振幅から4cm×0.0495 dB/cm=0.198 dB の値を差分し, その値を空隙領域の長さ 16 cm で除して, 減衰勾配の値を 算出した.図 3-5 (b)はこれにより得られた各空隙率での減衰勾配の値と,比較のため P波 伝播速度と空隙率の関係も加えて同じ図に表記する.同図より,先述の減衰値の変化と同 様に、減衰勾配も空隙率の上昇にともない増加し、空隙率と減衰勾配が密接に関係する指 標であることが明らかとなった. さらに, P波速度の結果と比較すると, 減衰勾配は空隙 率の変化にともない敏感に反応し大きな増減量を示し,一方で P 波速度は微小に変化する に留まった.この知見は既往の研究²⁷⁾でも示されており,内部に多数の空隙が存在する場 合, 弾性波は空隙を迂回, あるいは微小な通過可能領域を通過し, 結果として到達時間 (伝 播速度)に大きな違いはみられないが、波形のエネルギー (振幅)は迂回や微小領域の通過 にともない大きく減衰するものと推測される. 損傷の高精度評価という観点から, 損傷の 程度が微小で,内部の空隙の規模も小さい領域を検出できるエネルギーに類する指標であ る減衰勾配を用いることが有効であるといえる.減衰勾配と P 波速度の関係に関しては, 6章でも述べるので、そちらも参照されたい.

以上より減衰勾配と空隙率は密接に関係することが明らかになるとともに、同じ空隙率の変化でも、減衰勾配とP波速度で変化傾向には大きさ相違が認められた。本研究では、試験的にある特定の条件下で数値解析シミュレーションを行ったが、今後さらに多くの条件下で実験やシミュレーションを実施し減衰値と空隙率やその他の指標との関連性を一般化する必要がある。

表 3-1 空隙の半径と空隙率

空隙の半径 (mm)	空隙率 (%)
1.0	3.14
2.0	12.57
3.0	28.27
4.0	50.27
4.6	66.47

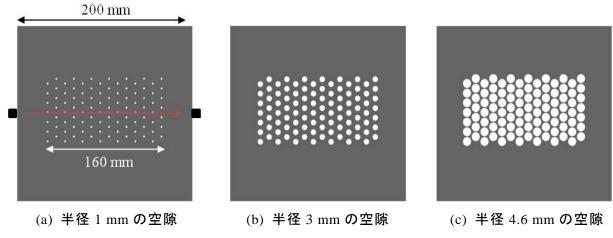


図 3-3 数値解析の設定条件 (試験体のサイズと空隙)

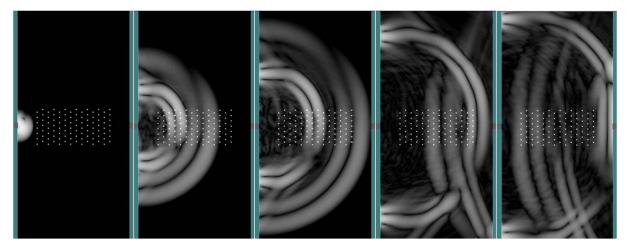
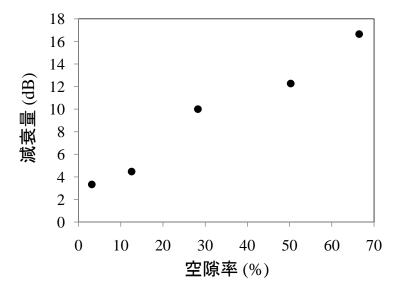
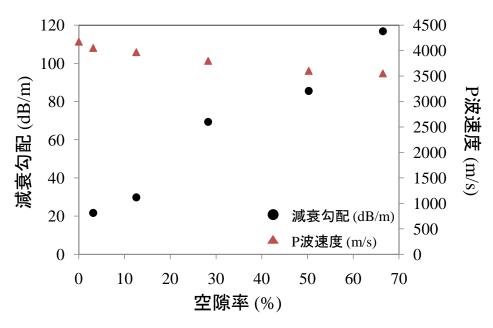


図 3-4 弾性波の伝播挙動シミュレーション



(a) 空隙率と減衰量



(b) 空隙率と減衰勾配, および P 波速度 図 3-5 空隙と減衰の関係

3.2 AE トモグラフィ法

本節では、AEトモグラフィ法について述べる. AEトモグラフィ解析のプログラムで重要な入力情報の一つである AE源の振幅の推定方法、AEトモグラフィ解析の概要、基礎理論などを記載する.

3.2.1 AE 源の振幅推定法

一般的な減衰トモグラフィ法の場合、特定のセンサの近傍で弾性波を励起させ、そのセンサで受信された最大振幅の値を弾性波発信点の振幅とみなして解析が行われる.一方、AEトモグラフィの場合、弾性波の発生点は試験体内部のAE源を利用するため、その振幅を直接計測することはできず、各センサで受信されたAE波形の振幅を用いて推定する必要がある.以下にこれまで実施されてきたAE源の振幅の推定法、および本研究で提案する推定法に関して述べる.

一般に AE 源の振幅を推定する場合、センサの位置、および AE 源の位置の関係から得られる波線長さと、その波線を伝播した弾性波の振幅の関係が複数のセンサから得られ、それらに対して最小 2 乗法を用いることで解 (AE 源の振幅)が算出される. 具体的に、1 つの AE 源から発生した弾性波が n 個のセンサで受信される場合、センサ番号 i と AE 源の距離 L_i (i=1,2,...,n) と、センサ番号 i で受信された振幅 A_i (i=1,2,...,n) の関係は図 3-6 のように示される. 前節で述べたように弾性波の減衰が式(3.3)を満たすと仮定した場合、同図を直線回帰し、最小 2 乗法を用いて以下の式で AE 源の振幅 A_0 が得られる.

$$A_{0} = \frac{n \sum_{i=1}^{n} L_{i} A_{i} - \sum_{i=1}^{n} L_{i} \sum_{i=1}^{n} A_{i}}{n \sum_{i=1}^{n} L_{i}^{2} - \left(\sum_{i=1}^{n} L_{i}\right)^{2}}$$
(3.6)

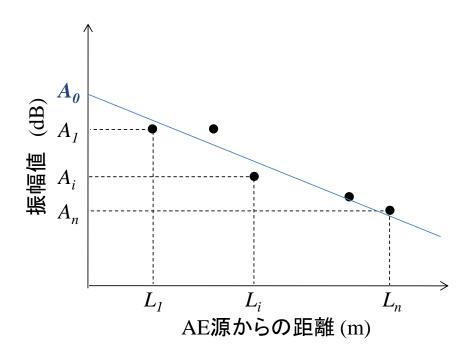


図 3-6 伝播距離と振幅

さらに図3-7(a)のように複数のAE源より減衰値を推定する場合,上記の手法のように それぞれの回帰直線から推定される AE 源の振幅や減衰勾配をそのまま用いるのではなく, 図 3-8 (b)のように、データを一つの関係となるよう補正してから再度、計算する手法も提 案されている. 具体的に、2つ目の AE 源のセンサ番号をj(j=1,2,...,m) とすると、回帰直 線により得られた AE 源の振幅 A_{i0} 、および A_{i0} を、基準となる任意の振幅値 A を用いて以 下の式で補正する.

$$A_{i} = A_{i} + (A - A_{i0})$$

$$A_{i} = A_{i} + (A - A_{i0})$$
(3.7)

補正された A_i 'と A_i 'を用いて再度、最小 2 乗法により A_0 を求め、それぞれの AE 源の振幅 A_{i0} ' と A_{j0} 'を以下の式で得る.

$$A_{i0} = A_0 + (A - A_{i0})$$

$$A_{i0} = A_0 + (A - A_{i0})$$
(3.8)

同手法は解析結果に誤差データが含まれる場合に有効であることで知られている.

以上に示した2つの手法は各波線が一定の減衰勾配,つまり材料全体が同程度の損傷を 有することを前提としている.しかし,実際の材料は部分的に劣化する場合や,一部の領 域にクラックが密集する場合などが考えられ、AE 源の振幅を算定する際に通過した各波 線で減衰勾配の差異を考慮する必要がある. そこで, 本研究では, 以下に示す減衰勾配の 差異を考慮した AE 源の振幅推定法を提案する.

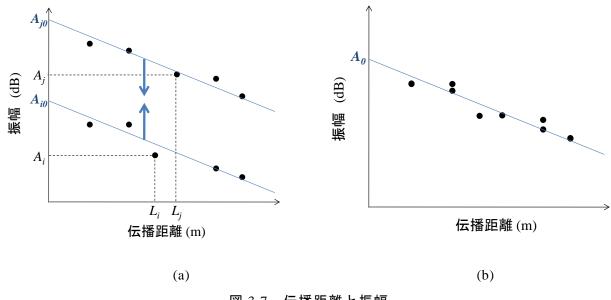


図 3-7 伝播距離と振幅

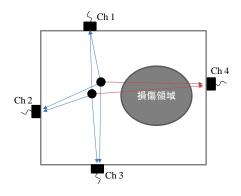


図 3-8 弾性波の伝播経路

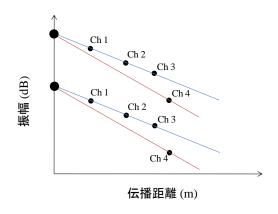


図 3-9 2 つの AE 源の伝播距離と振幅の関係

図 3-8 はある材料内部の,近い位置で 2 つの AE 源が発生し,それぞれ弾性波が各セン サに伝播する様子を模式的に示している. Ch 4 のセンサに伝播する波形は, どちらの AE 源から発生する弾性波も損傷領域を通過し,他の3つの波線に比べ,減衰量が大きくなる. この現象を伝播距離と振幅の関係で表したのが図3-9である. Ch1-Ch3で受信される波 形は損傷領域を通過していないため、距離に応じて一定の割合で減衰する. 一方で Ch 4 で受信される波形は損傷領域を通過することで大きく減衰し、受信される波形の振幅は小 さくなる. Ch 4 に伝播する波形は健全部と損傷部の両方伝播するため, 実際には図 3-9 の ように直線にはならず,段階的に減衰することが予想されるが,ここでは AE 源の振幅と, 受信波形の振幅、および見かけの減衰勾配を議論するので、便宜的に直線と見なす。ここ で、この2つのAE源の振幅が未知数である場合を考える.上記の2つの手法では波線の 長さと振幅値の関係に近似直線を挿入するが, 本手法は"特定のセル内で生じる複数の AE 源から発生し,同一のセンサに伝播する弾性波の各波線の減衰勾配が一定になる"という 仮定を設ける. ここで特定のセルとは、基本的に AE トモグラフィ解析で減衰勾配の分布 を得る際に設定するセルを指すが、AE 源の数が少数の場合はこのセルの拡大を許容する ものとする. 実際、図 3-8 で 2 つの AE 源から発生し Ch4 に伝播する 2 つの弾性波は、波 線の長さが異なり、さらに損傷領域の通過長さも異なるので減衰量や減衰勾配に差異が生 じることが予想される.しかし,ここでは近傍で発生した AE 源を用いることでこの誤差を可能な限り小さくする.今1つの AE 源からセンサ Chi(i=1,...,n)に伝播する波線長さを L_i ,その受信振幅を A_i とし,もう一方の AE 源も同様に,波線長さを $L_j(j=1,...,n)$,受信振幅を A_j とする.波形を受信するセンサの数が AE 源により異なる場合は 2 つの AE 源から発生した弾性波が共通に受信されたセンサを用いるものとする.2 つの AE 源の振幅を未知数 A_{0I} ,および A_{02} とすると,各波線の減衰勾配が一定であるという条件を満たすためには以下の式が成り立つ必要がある.

$$\frac{A_{01} - A_{i}}{L_{i}} = \frac{A_{02} - A_{j}}{L_{j}}$$

$$(i, j = 1, 2, ..., n)$$

n は 2 つの AE 源から共通に受信されたセンサの数であり、この n 個の連立方程式で未知数 2 個の方程式を最小二乗法で解くと、振幅 A_{01} は

$$A_{01} = \frac{n \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{L_{j}}{L_{i}}\right) \left(\frac{L_{i}A_{j} - L_{j}A_{i}}{L_{i}}\right) - \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{L_{j}}{L_{i}}\right) \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{L_{i}A_{j} - L_{j}A_{i}}{L_{i}}\right)}{n \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{L_{j}}{L_{i}}\right)^{2} - \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{L_{j}}{L_{i}}\right)^{2}}$$

$$(3.10)$$

$$(i, j = 1, 2, ..., n)$$

で算出され、 A_{02} も同様にして得られる.

以上が既往の AE 源振幅の推定法と本手法の推定法であるが,式(3.6),および式(3.10)を比較しても精度は明らかにすることは困難であるため,以下に簡単なモデルを作成し,これらの手法の推定精度を比較した.

図 3-10 に示すように、一辺 100 mm×100 mm×200 mm の仮想の試験体を設定し、30 mm×30 mm×40 mm と 20 mm×60 mm×60 mm の損傷領域を設けた。この試験体の内部から AE 波が発生した場合の、各センサ (表 3-2 参照) で得られる振幅を計算で求め、その値を 用いて上記の 3 つの手法により逆解析的に AE 波の振幅を推定した。 Case 1 – Case 4 は試験体の減衰勾配、AE 源の座標、および AE 源の振幅を一定とし、損傷領域の減衰勾配を 30 dB/m – 100 dB/m と変化させた (表 3-3 参照)。 Case 1 – Case 4 の条件で、各手法を用いた AE 源の振幅の推定結果を表 3-4 に示す。上述の回帰直線を用いた手法の結果を手法 1、伝播距離と振幅の関係を一つの関係として計算する手法を手法 2、本研究の手法を手法 3 とし、Case 1 – Case 4 の条件で AE 源振幅を推定した結果を表 3-4 に示す。同結果より損傷領域における減衰量の増加にともない、いずれの手法でも推定精度が低下することが確認

された.これは、AE 源の位置標定を実施する場合にも同様であり、損傷が進行すると伝播速度が一定とならず、標定精度が低下するためであると考えられる.次に、各手法の精度を比較するために、Case 1 - Case 4 で各手法の理論値と推定値の比を算出し、平均した結果を図 3-11 に示す。同結果より、本手法が他の手法に比べやや精度が良好で、その誤差の平均は約 1.8%となった。次に、AE 源の位置による結果を比較するために、損傷領域の減衰勾配を 30 dB/m 一定の下、Case 5 - Case 6 と弾性波の発生位置を変化させ、本手法で振幅を推定した結果が表 3-5 である。同表より、AE 源の位置が極端に近い場合、推定精度が低下することが確認された。以上、AE 源の振幅の推定を目的に、本手法と既往の手法との比較、および AE 源の位置による推定精度の変化を検討した。ここでは定性的な考察に留まったが、今後幾何学的条件、センサのばらつきなどを変化させ、本手法の適用性を更に検討する必要がある。以上より、本手法を実験結果に適用する場合、上記の理由から誤差データの除去、データ厳選が必要となる。

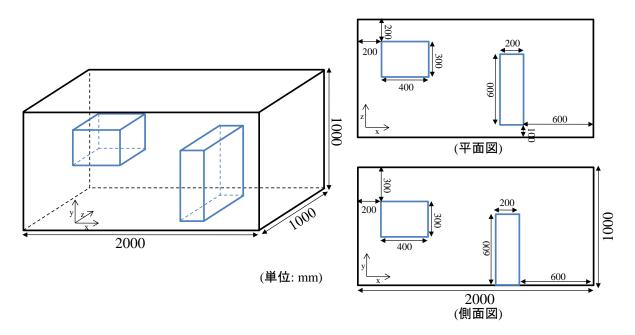


図 3-10 設定条件

表 3-2 センサ配置 (単位: mm)

センサ番号		位置	
センリ番号	X	y	Z
1	500	0	250
2	1500	0	750
3	500	1000	750
4	1500	1000	250
5	0	500	250
6	2000	500	250
7	600	300	0
8	600	700	1000
9	0	500	750
10	2000	500	250
11	1400	700	0
12	1400	300	1000

表 3-3 AE 源の振幅推定精度の検討(設定条件)

		AE			AE源の	損傷領域の減衰勾配	
		X	у	z	振幅 (dB)	(dB/m)	
Case 1	波形①	0.4	0.1	0.3	50	30	
Case 1	波形②	0.4	0.6	0.4	80	30	
Case 2	波形①	0.4	0.1	0.3	50	40	
Case 2	波形②	0.4	0.6	0.4	80	40	
Cose 2	波形①	0.4	0.1	0.3	50	60	
Case 3	波形②	0.4	0.6	0.4	80	60	
Casa 4	波形①	0.4	0.1	0.3	50	100	
Case 4	波形②	0.4	0.6	0.4	80	100	
Cose 5	波形①	0.8	0.5	0.5	70	30	
Case 5	波形②	1.4	0.5	0.5	70		
Casa	波形①	0.9	0.5	0.5	70	30	
Case 6	波形②	1.1	0.5	0.5	90		

表 3-4 AE 源の振幅の推定結果

理論値		50	80
Case 1	手法 1	50.43	79.76
	手法 2	50.48	79.81
	手法 3	49.86	79.47
Case 2	手法 1	50.85	79.51
	手法 2	50.96	79.62
	手法 3	49.71	78.94
Case 3	手法 1	51.71	77.20
	手法 2	53.00	78.49
	手法 3	49.43	77.88
Case 4	手法 1	53.41	78.05
	手法 2	53.85	78.48
	手法 3	48.86	75.76

(単位: dB)

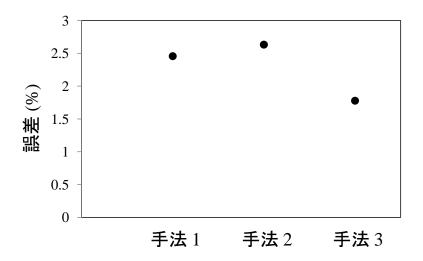


図 3-11 各手法の推定誤差の平均

表 3-5 AE 源の振幅の推定結果

Case 1	理論値	50	80
	推定値	49.86	79.47
Case 5	理論値	70	90
	推定值	72.12	92.06
Case 6	理論値	70	70
	推定値	65.55	66.21

3.2.2 トモグラフィ解析

3.2.1 の式 (3.9), および式 (3.10)で推定された AE 源の振幅を用いて,減衰トモグラフィ解析を実施する.減衰トモグラフィ解析は先述のように,基本的な計算法は速度トモグラフィと同様である.減衰量が距離に比例して大きくなることから,速度トモグラフィでの伝播時間を減衰トモグラフィでは減衰量に置き換えて計算することで,解析が可能となる.既往の減衰トモグラフィは,発信点の座標が試験体表面に限定されるが,AE 減衰トモグラフィは AE 源を弾性波の発信源として取り扱うため,発信点の位置を試験体内部の任意の位置に設定することが必要となる.また,既往のトモグラフィは当然ながら対象領域内の表面のみでの発信となるが,AE トモグラフィの場合,セル設定領域以外の位置での AE 源 (発信点)も場合によっては解析に含めることが必要となる.これより,本研究は試験体内部の位置や,セル領域外の位置でも発信点とすることができるように解析プログラムを作成した.

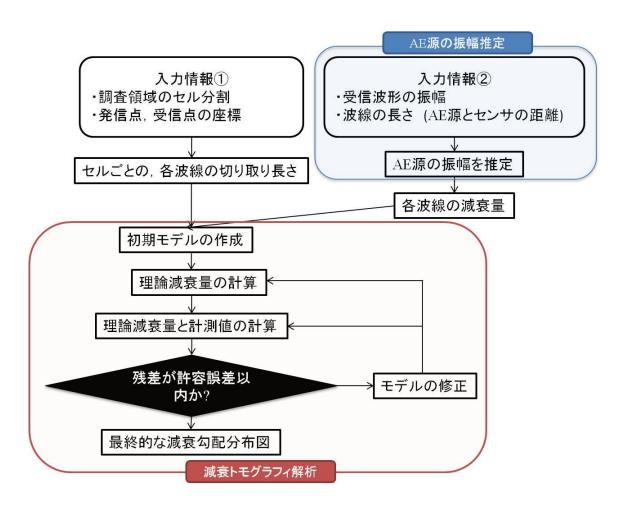


図 3-12 AE トモグラフィ解析

AE トモグラフィ解析の流れを図 3-12 に示す. はじめに, 3.2.1 に示した本研究で提案する手法で推定された AE 源の振幅値を用いて各波線の減衰量を求め, それをセルごとに振り分けて初期モデルを作成する. 次に対象領域を M 個のセルに分割し, それぞれのセルに減衰係数 A_k (k=1, 2, ..., M)を与え, AE 源と受信点の波線長さを L_i (i=1, ..., n), i 番目の波線の観測減衰量を A_{0i} とすると, この波線が通過するセルの平均減衰勾配は $\overline{A_i}$ は,

$$\overline{A}_i = \frac{A_{0i}}{L_i} \tag{3.11}$$

で表される. そして AE 源から受信点に至る i 番目の波線が k 番目のセルを区切る長さを l_{ik} とすると k 番目のセルの減衰勾配 A_k は以下の式で算出される.

$$A_{k} = \frac{\sum_{i} \left(l_{ik} \cdot \overline{A}_{i}\right)}{\sum_{i} l_{ik}}$$
(3.12)

このようにして A_k を 1 から M まで順次求めれば、これが減衰勾配分布の初期モデルとなる.

このあと一般的な速度トモグラフィの場合、レイトレーシング (波線追跡)が行われる. レイトレーシングとは、発信点で励起された弾性波は受信点まで伝播する際に、直進経路 以外にも様々な経路を伝播するが、その中で最も早く受信点まで到達する経路の時間を用いて、モデルを修正し、繰り返し計算を行う手法である. レイトレーシングにより得られた理論走時と観測データである実測走時を比較し、両者の差が許容誤差範囲でなければモデルが修正される. ここで、通常、減衰トモグラフィ法においてはレイトレーシングを実施されていない ²⁵⁾. これは、減衰トモグラフィは伝播距離に応じて弾性波の減衰量が低下することを前提とする理論であるが、迂回経路を想定する場合、この前提が成り立たなくなると推測されることが理由である.

これを確認するために、以下の数値解析シミュレーションを実施した。モデルは図 3-13 に示すように、弾性波の発信点と受信点の間に損傷を模擬した高減衰領域を設けたものとなっている。物性は 3.1.3 で用いた P 波速度 4000 m/s (健全領域)と 2000 m/s (損傷領域)の値であり、減衰勾配は近似直線により得られた 4.95 dB/m (健全部領域)、7.12 dB/m (損傷領域)の値を用いた。ここで、発信された弾性波は図 3-13 に示すように、伝播経路① (直進経路)と伝播経路② (迂回経路)の 2 つの経路を伝播する。各領域の伝播距離、および各領域の S 波速度より、理論上の S 波の到達時間は伝播経路①で 810 μs、伝播経路②で 653 μs と算出

される. 図 3-14 は本シミュレーションで得られた受信波形の時間と振幅の関係を示しており、各経路を伝播した S 波の振幅を上記の到達時間より決定した. ここで、弾性波の振幅が伝播経路に関わらず伝播距離にのみに依存して減衰する場合、理論減衰量は上記の各領域の減衰勾配の値を用いて算出される. 算出された理論振幅値と図 3-14 の振幅値により得られた減衰量を比較した結果を図 3-15 に示す. 同図より、経路② (直進経路)を伝播した波形は理論値とシミュレーション値がほぼ一致したが、経路① (迂回経路)を伝播した波形はシミュレーション値が理論値より著しく小さな値を示した. これより、迂回波形は伝播距離による減衰だけでなく、迂回するときに屈折、回折などにより波が分散し、減衰が大きく影響することが示された. したがって、本減衰トモグラフィ法では迂回経路は考慮せず、最短経路 (直線経路)に基づいて解析を実施する.

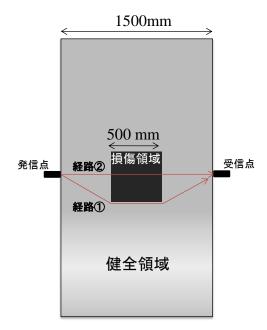


図 3-13 数値解析の設定条件

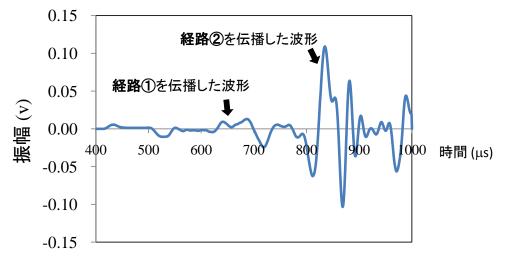


図 3-14 受信波形

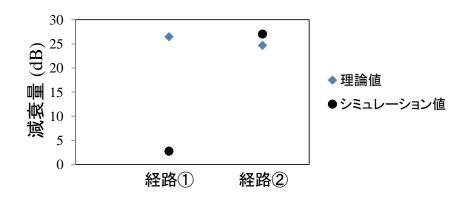


図 3-15 理論減衰量とシミュレーション値

式(3.12)で得られた減衰勾配の初期値を用いて、同時反復法 (SIRT)により繰り返し計算を行った。同時反復法とは、得られたモデルで得られた理論減衰量 A_{ci} と観測減衰量 A_{oi} との差を、波線が通過したセルに通過した長さに応じて振り分け、さらに、それぞれのセルについて、振り分けられた減衰量差、および波線がセルを切る長さを用いて、そのセルの減衰勾配を求めるという方法である。通常の速度トモグラフィの場合、理論減衰量 A_{ci} を求める場合にレイトレーシングによる最短伝播時間が得られるが、AEトモグラフィ解析では上記のようにレイトレーシングを行わないため、直線経路のみ考慮して理論減衰量を算出する。このようにして得られた理論減衰量と観測減衰量の差 ΔA_i を、式(3.13)ですべての波線について求める。

$$\Delta A_i = A_{oi} - A_{ci} \tag{3.13}$$

つづいて、式(3.14)を用いて、減衰量差が波線を通過するセルに振り分ける.

$$\Delta A_{ik} = \frac{\Delta A_i \cdot l_{ik}}{L_i} \tag{3.14}$$

セル k の減衰量補正量 ΔA_k は,

$$\Delta A_k = \frac{\sum_{i} \Delta A_{ik}}{\sum_{i} l_{ik}} \tag{3.15}$$

より得られるので、I回目の反復計算によって求められるセルkの減衰勾配 $S_k^{(l)}$ は、(I-1)回目の反復計算によって得られている減衰勾配を $S_k^{(l-1)}$ とすると、

$$A_{k}^{(I)} = A_{k}^{(I-1)} + \Delta A_{k} \tag{3.16}$$

で求めることができる. 以上が,減衰トモグラフィ解析の流れであり,本研究のAEトモグラフィ法は3.1.1 で得られたAE源の振幅値を入力情報として用いて,本項の減衰トモグラフィ解析を行うものとする. 次章以降で,様々な実験により本手法の適用性を検討する.

第4章 弹性波励起実験

3章で述べた AEトモグラフィ法の適用性を本章以下で検討する.本章は、定位置に擬似損傷とみなした発砲スチロールが挿入されたコンクリート試験体を用いて、供試体表面から弾性波を励起させ、それを擬似 AE 源とみなし AEトモグラフィ解析を実施した. AEトモグラフィにより推定される高減衰領域と空隙の関係を検討し、本提案手法の妥当性を検証するとともに、課題を抽出し5章以降の実験につなげるものとする.

4.1 実験概要

本実験はコンクリート内部の空隙が AE トモグラフィで可視化できるかを検討するため、 あらかじめ擬似損傷とみなした発砲スチロールをコンクリート打設前に設置した. コンク リート供試体は, 図 4-1 に示すように, 150 mm×150 mm×550 mm の大きさで, 表 4-1 に 示す物性値のコンクリートを用いた. 本供試体の内部に, 直径 7 cm と 9 cm の発砲スチロ ールを包含させ、針金で固定した後にコンクリートを打設した. センサは図 4-2 (a)に示す 60 kHz 共振型センサ (富士セラミック製)を用い、得られた波形をプリアンプ (フィジカル アコースティク社製)で 40 dB 増幅した後, 16 チャンネルの AE 計測処理装置 (SAMOS, フィジカルアコースティック社製) にサンプリング周波数 4 MHz, 1 波形 1000 μs の長さで 収録・記録した (図 4-2 (b), (c)参照). センサは、図 4-3 に示すように、4 つの側面に 12 個 のセンサを、図 4-4 のエレクトロンワックス (フルウチ科学社製)を介して 3 次元的に配置 した. 周波数による検討を行うため、弾性波の発信は図 4-5 (a)に示す最大周波数 60 kHz の 5 mm ハンマ, および図 4-5 (b)に示す最大周波数 30 kHz のパルサー (FieldCAL, フィジ カルアコースティック社製)の2種類を用いた.ハンマの場合,供試体の4側面に対し,1 つの側面で 6 箇所, 計 24 点の発信点を設け, 各発信点で約 10 回打撃し, 異なる AE 源の 振幅を得るために 5 cm 以内の範囲で位置を変化させながら計測した. パルサーの場合も同 様に、4側面に対し、1つの側面で約6箇所、計24点の発信点を設け計測を行った。

単位 (mm) 150 120 120 120 120

(a) 供試体の寸法



(b) コンクリート打設前の状態 図 4-1 コンクリート供試体

表 4-1 コンクリートの物性

圧縮強度	ヤング係数	10	弾性波理論速度
(N/mm ²)	(N/mm^3)	ポアソン比	(m/s)
47.3	37100	0.16	4050~4150



(a) 60 kHz 共振センサ



(b) プリアンプ



(c) 計測装置

図 4-2 計測器機

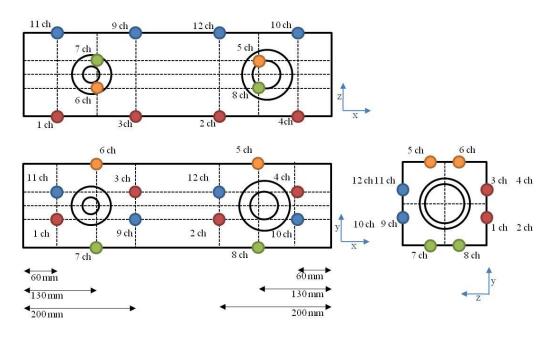


図 4-3 センサ配置



図 4-4 接着剤



(a) 5 mm ハンマ (囲んだもの)



(b) パルサー

図 4-5 弾性波発信器

まず、各 AE センサの感度を検討した. 通常、センサ感度の誤差は 1-2 dB 程度であり、AE 源の位置標定、および AE 波の頻度や発生挙動を検討する場合、この振幅の差異は許容できる誤差範囲といえる. しかし、本実験で用いたコンクリート供試体の表面は荒い面が存在し、センサ位置毎で表面粗さが異なっており、通常よりも大きな差異が生じることが予想された. さらに本供試体は比較的小さなサイズであるため、微小な感度の違い (波形の振幅の大きさの誤差)が結果に大きく影響を与えると推測される. これより、本実験結果を解析する際には、センサ設置およびセンサ特性に起因するセンサ毎の感度の差を推定し、その値に応じて受信波形の振幅値を補正した. 実際の構造物で計測を行う際に、各センサで接触状態の大きな差異が予想される場合は、センサの近傍でパルサーなどにより一定の大きさの波形を発信し、各センサの受信波形の振幅の差から補正を行う必要があるが、本実験は材質が既知の健全な供試体を用いているため、以下の簡易な方法で補正を行った.

図 4-6 に示すように、弾性波の発信点の位置とセンサの位置、および空隙の位置の関係より、表面で発信させた弾性波の各波線の中で、健全部を伝播する波線と空隙を通過する波線に分類可能である。図 4-7 は 1 つの発信源に起因する波線の中で、健全部を通過する波線のみ抽出し、その長さ (伝播距離)と受信センサで得られた振幅の関係を示している。健全部を通過する波線のみ抽出することで、減衰勾配が一定であると仮定することが可能となり、同図のように直線近似できる。ここで、弾性波の発信点と同一の表面に設置されているセンサは健全部のみを伝播するが、表面波を受信するため、単純に振幅値の比較が困難であるのでデータから除外した。このようにして、減衰勾配とその差を推定したのが図 4-8 である。同図は、3.2.1 で示した複数の波線の長さと振幅の関係のデータを一つの関係として扱う手法(手法 2)で得られた図であり、算出される近似直線と各センサで得られた振幅の差分をそのセンサの補正量とした。この例のように、他の弾性波の発信源でも同様にして、センサごとに補正量を推定しそれを平均した結果が表 4-2 である。この表より、最大で約3dBの誤差が生じており、実験試験体では表面が荒い部分が存在したため、測定誤差が大きくなったものと推測される。本実験では、同表の値をすべての受信波の振幅値に加算、および減算して、各センサで得られた波形の振幅を補正した。

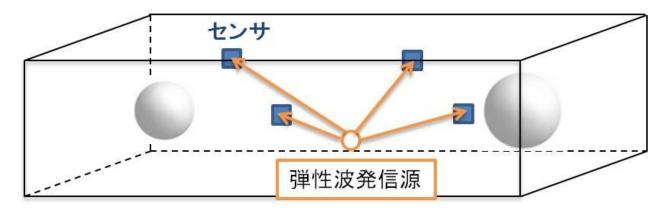


図 4-6 弾性波の発信源と波線の経路

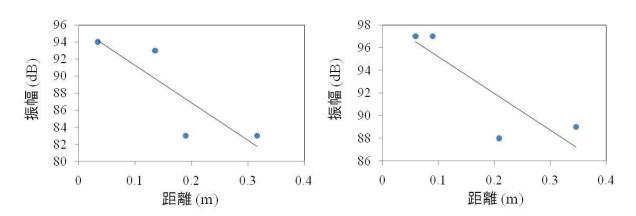


図 4-7 1 つの発信源での波線の長さと振幅の関係

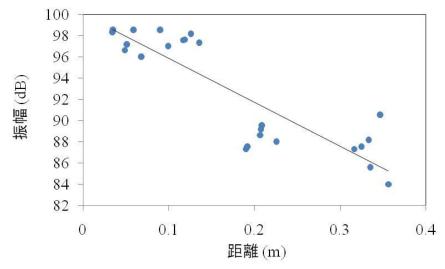


図 4-8 波線長さと振幅の関係

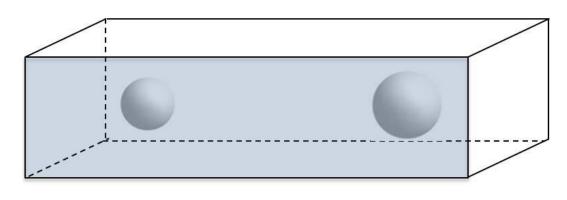
表 4-2 各センサの補正量

センサ番号	振幅 (dB)	
1	-1.82786	
2	-2.02167	
3	3.270731	
4	-0.26054	
5	-0.4188	
6	2.805529	
7	3.29548	
8	-0.67708	
9	2.672616	
10	-2.26055	
11	-2.03825	
12	-2.90241	

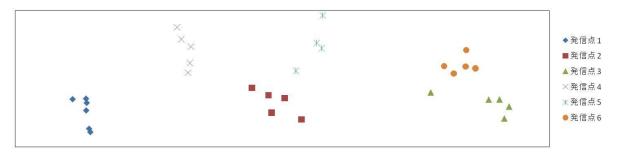
4.2 3 次元 AE トモグラフィ解析

前節の各センサによる感度の補正量を,受信波形の最大振幅に加算,または減算し,得 られた最大振幅値を用いて,以下のAEトモグラフィ解析を実施した.

弾性波の発信点の一例を図 4-9 に示す. 同図の (b)に示すように, 各側面につき 6 つの 領域に分類し, かつ各領域でハンマの打撃位置を変化させ 10 個の弾性波を励起させた. この 10 個の打撃により発生した弾性波を各センサで受信し, その受信波形の中で比較的ノイズが低い 5-6 波形を選択し, 発生源の振幅を推定した.



(a) 側面 A



(b) 側面 A における発信点

図 4-9 弾性波の発信点の例

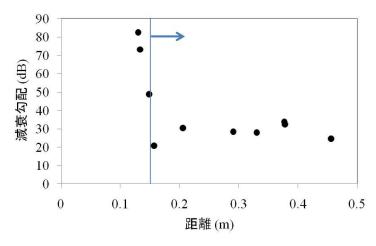


図 4-10 発信点のセンサの距離と減衰勾配

上記の方法で推定された AE 源の最大振幅より、各波線の減衰量が得られ、この減衰量を波線の長さで除し各波線のみかけの減衰勾配を得た.このみかけの減衰量と波線の長さの関係の一例を図 4-10 に示す.同図より、波線長さが 0.13 m 付近の場合に、70 dB/m 以上と高い減衰勾配を示すデータが確認された.この例に限らず、弾性波の発信点とセンサの距離、すなわち波線長さが小さい場合に、減衰勾配のばらつきが大きくなる傾向が確認された.これは、波線の長さが小さいために、微小な振幅の変化が減衰勾配の値に大きく影響を及ぼすことが原因と考えられた.そこで本実験では小規模の供試体を用いているため、波線の長さが 0.15 m 以上のデータのみ用いて、AE トモグラフィ解析を実施した.

本実験は、弾性波をすべて供試体表面から発生させているため、弾性波の発生点と受信点が同一の面に存在する場合がある。これより、弾性波の発信点と同一の面に設置されたセンサは、本研究が対象とするS波の振幅よりもエネルギーが大きいR波の主要モードを受信している可能性がある。これより、トモグラフィ解析をする場合、上記の波線が0.15m以下のデータに加え、弾性波の発信点と同じ面に設置されているセンサで得られたAE波形は用いないこととした。その結果、本実験では600本の波線が上記の条件を満たす解析データとなり、この波線を用いてAEトモグラフィ解析を実施した。

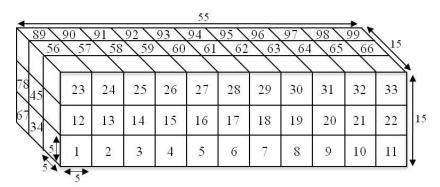
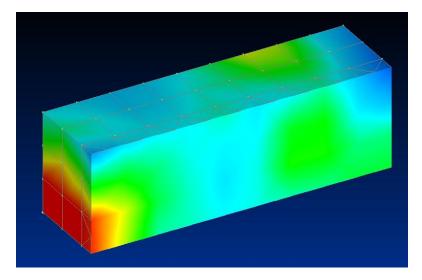
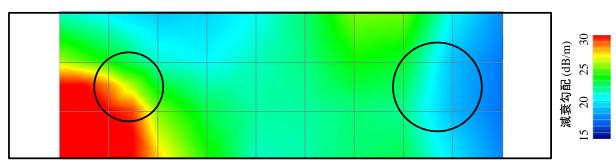


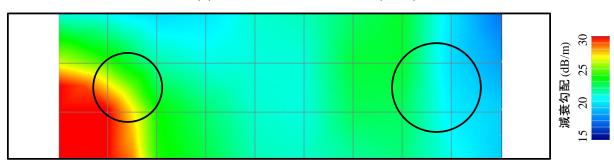
図 4-11 セルの設定 (単位: cm)



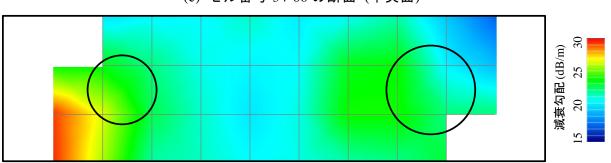
(a) 3 次元図



(b) セル番号 67-99 の断面 (背面)



(c) セル番号 34-66 の断面 (中央面)



(d) セル番号 1-33 の断面 (前面)

図 4-12 AEトモグラフィ解析結果 (波線数考慮せず 繰り返し計算回数 1回)

波線を選別した後図 4-11 に示すように、セルの大きさを 50 mm×50 mm×50 mm と設定 し, 3.2.2 で示した同時反復法 (SIRT)により, セル番号 1-99 の各セルの減衰勾配を算出し た. 同時反復法の繰り返し回数はここでは1回とし,得られた各セルの減衰勾配の値と各 セルの位置関係から算出されるコンター図を図 4-12(a)-(d)に示す. 同結果は図 4-11 のセル 番号 1-33, 34-66, 67-99 の断面の結果であり波線が通過せず減衰量が得られなかったセル は除いている. 同図より, 他のセルに比べ極端に高い減衰値を示す領域が供試体の隅にあ たる位置で確認され、この領域はコンクリート内の空隙の位置とは完全には一致しなかっ た. 既往の報告により, 各セルの波線密度にトモグラフィ結果は影響することから²⁸⁾, AE トモグラフィ解析で算出された各セルを通過する波線の数を確認した. 図 4-13 は各セル番 号とそのセルを通過する波線の本数を示している. 同図より,波線の本数は供試験体の中 心に近いセル程多く、逆に中心から離れるほど極端に少なくなり、中には波線が10本以下 のセルも確認された.特に図 4-12 で減衰勾配が異常に高い値が確認されたセル番号 34, および67を通過する波線は1本であり,著しく少ない波線の影響が直接的に結果に表れた ものと推測される. そこで、波線が 10 本以下のセルは除外し図 4-14 のコンター図を再描 写した. 図 4-14(a) は各セルの 3 次元的な位置関係によりコンターを示した図であり,図 4-14 (b) - (d) はセル番号 67-99 (背面), 34-66 (中央面), 1-33 (前面)の断面の結果である. さらに同時反復法による繰り返し計算回数による結果の比較を行うため、図 4-15 に示す ように 100 回に繰り返し計算を行った. その結果を図 4-16 に示す.

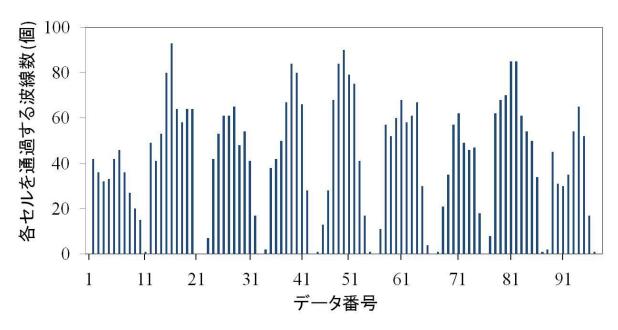
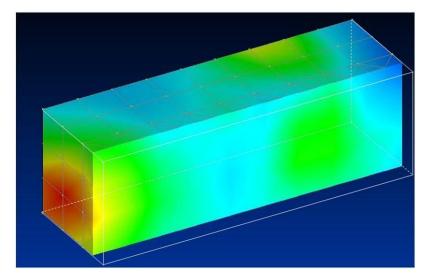
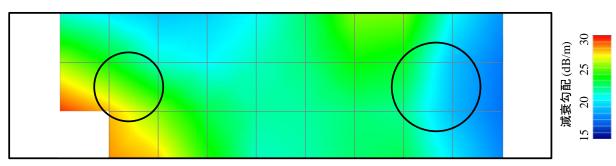


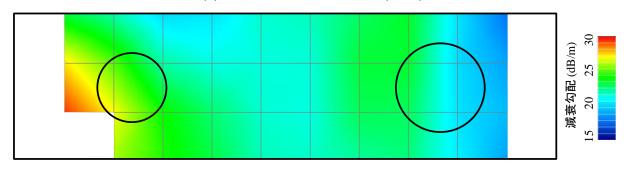
図 4-13 1つのセルを通過する波線の本数



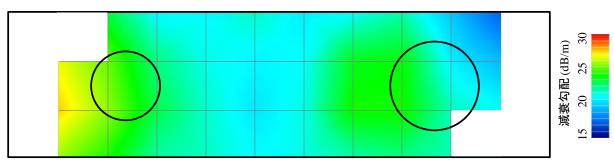
(a) 3 次元図



(b) セル番号 67-99 の断面 (背面)



(c) セル番号 34-66 の断面 (中央面)



(d) セル番号 1-33 の断面 (前面)

図 4-14 AEトモグラフィ解析結果 (波線数考慮 繰り返し計算回数 1回)

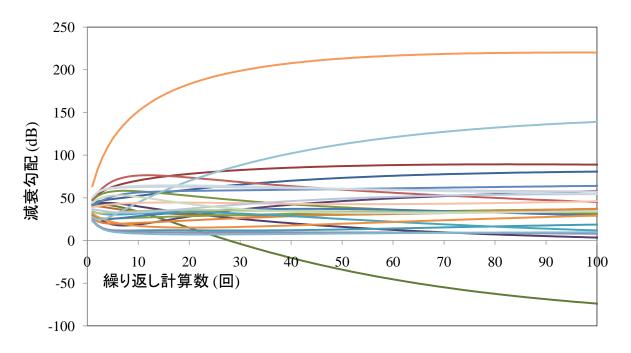
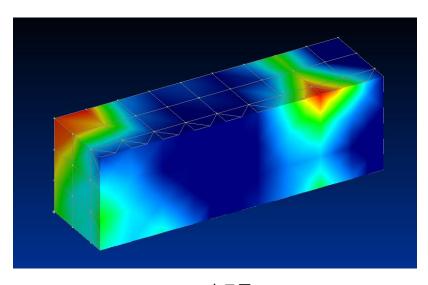
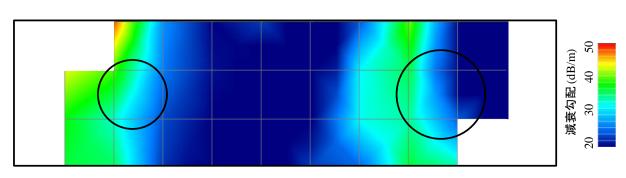


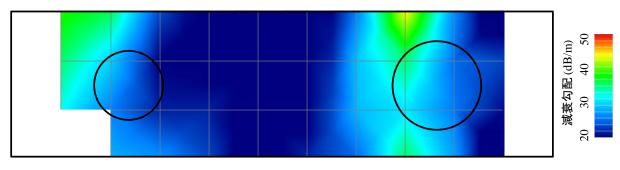
図 4-15 同時反復法による繰り返し計算回数と減衰勾配



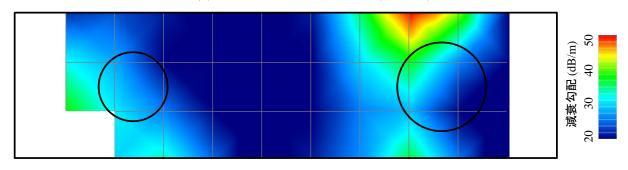
(a) 3 次元図



(b) セル番号 67-99 の断面 (背面)



(c) セル番号 34-66 の断面 (中央面)



(d) セル番号 1-33 の断面 (前面)

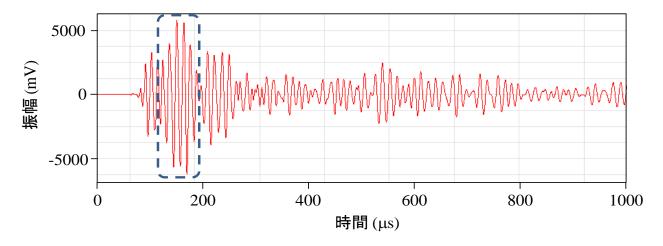
図 4-16 AE トモグラフィ解析結果 (波線数考慮 繰り返し計算回数 100回)

図 4-14, および図 4-16 の両結果ともに、空隙の近傍で減衰勾配の値が高い領域が確認され、一方で空隙が存在せず損傷していない供試体の中央部では低い減衰勾配を示した。また、供試体内部の空隙の位置は厳密には高減衰領域と一致しておらず、空隙と高減衰領域は最大で 10 cm のずれが生じており、さらに高減衰領域は空隙の大きさに比べ広い範囲に分布した。本供試験体の右側には直径 9 cm の空隙、左側には直径 7 cm の空隙が位置しているが、供試体の左右で減衰勾配の値あるいはその領域の大きさに明確な差異は認めらない。さらに 2 つの空隙の中心は中央面に位置するため、中央断面(図 4-14 (c)、図 4-16 (c)参照)が最も空隙の占める割合が大きいが、3 つの断面で減衰勾配に有意な差異は確認されない。以上をまとめると、本実験では、空隙の大きさ、および位置を詳細に推定できる程度の可視化はできなかったが、7 cm、および 9 cm の空隙の有無、およびおおよその位置は可視化可能であった。今後、より多くの波線を波線密度の小さいセルに与える弾性波を励起させることで更なる精度の向上が期待される。

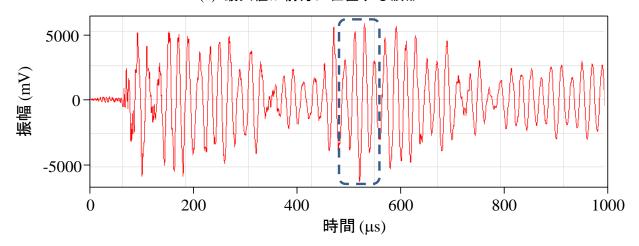
次に、図 4-14 と図 4-16 で同時反復法の繰り返し計算回数による結果の比較を行う.繰り返し計算 100 回の結果は 1 回の結果よりも、供試体の中央部と空隙近傍の領域で減衰勾配の値の差が大きい. これは同時反復法の特性上、必然の結果であり、通常の速度トモグラフィの場合も、繰り返し計算回数の増加にともない、各セルの値はより真値に収束し、かつ繰り返し計算 1 回では各セルの値に大きな差は生じない. したがって、通常のトモグラフィ解析の場合、各セルの値が収束するまで繰り返し計算を行い、各セルの値を推定する場合が多い. しかしながら、本実験結果は図 4-15 に示すように、一部のセルで 200 dB/m、

-50 dB/m と実現象に即さない異常値に収束し,図 4-16 でも局所的に極端に高い減衰値を示す領域が生じる結果となった.これは、先述のように一部のセルで波線の数が十分に得られていないセルが含まれていることや、あるいは AE 源の振幅の推定精度に問題があり繰り返し計算1回では概ね良好な結果であっても繰り返し計算過程でその推定誤差が大きく表れることが原因と考えられる.いずれにしても本研究では、上記の理由により、繰り返し計算を増加させた場合に、極端に大きな、あるいは小さな値に発散する傾向が生じた場合は、繰り返し計算1回の結果を用いるものとする.これより、本実験では図 4-14 の繰り返し計算1回の結果をもとに考察を加える.

本実験で用いた供試体は実際の構造物に比べ、小さいサイズであることに留意する必要がある。このため、大規模コンクリートでの実験と比較して、AE 源から伝播し直接センサで受信される弾性波のみならず、反射波が重合し、受信波形の最大振幅値が変化する場合がある。このとき実験で設定した、1つの波形の記録時間は1000 μs であり、P 波は4.1 m、S 波は2.76 m 伝播する時間分に相当する。この1000 μs の時間内に、多くの場合、AE 源からセンサに直進した S 波の到達時間がその波形の振幅の最大値となるが(図 4-17 (a)参照)、ごくまれに S 波に起因する振幅の卓越が確認された時間以降に、反射波やその重合波に起因する振幅の卓越が再び確認される波形が計測された。これより本解析を行う場合には、最大振幅が後方に位置するデータは可能な限り除いた。しかしながら、反射波と AE 源から直進する S 波の識別が困難な場合もあり、この影響が解析結果の誤差要因となったものと推測される。さらに、供試体のサイズが小さいことで、センサの微小な感度誤差が各セルの減衰量に大きく影響したことも要因と思われる。本実験でセンサの感度補正は実施したが、弾性波の入射方向や波形のモード変換などによりセンサの感度は若干変化することが想定され、例えば受信波形の振幅に 2 dB の誤差が生じた場合、本実験の最小波線長さ15 cm で計算すると、約13 dB/m の減衰勾配の変化が生じる結果となる。



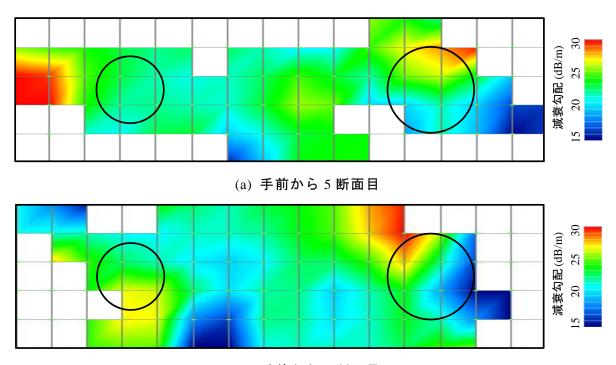
(a) 最大値が前方に位置する波形



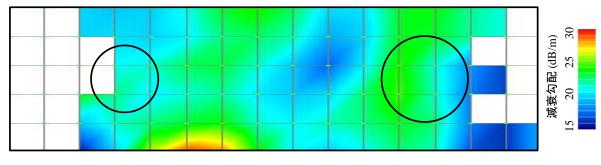
(b) 最大値が後方に位置する波形 図 4-17 記録波形

その他の誤差要因としてセル分割が挙げられる. 一般にトモグラフィ法は、対象領域を特定の大きさのセルで分割し、そのセル内の物理量を一定と仮定し計算する手法である. すなわち、実際の供試体に存在する損傷の領域あるいは減衰勾配の値と、トモグラフィ解析により推定される結果の差異 (推定誤差)は、トモグラフィ法自体が有する誤差 (セル設定)によっても生じるものと推測される. 具体的に、本実験のように損傷領域と健全領域が明確に分かれ、その境界を厳密に推定する場合には、セルを細かく設定することが望まれる. 本解析の場合、セルは一辺 5 cm の立方格子であるため、空隙とコンクリート部の両方を包含するセルは、直径 7 cm、および 9 cm の空隙のそれぞれの位置で 26 個存在し、空隙が存在する領域とコンクリートの領域の境界を明確に判断するためにはセルを細かく設定する必要がある. セルの設定可能サイズは波線の数、すなわちデータ数に依存するため、求める精度により、用いるデータ数を考慮する必要がある. 図 4-18 は本供試体を大きさ 3 cm×3 cm×3 cm の 225 個のセルで分割し、AE トモグラフィ解析を行った結果である. 先述のように波線密度が 10 個以下のセルは解析結果から除外した. 同図より、セルを細かく

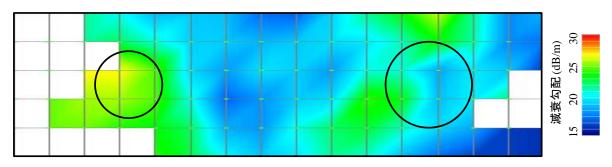
設定したことにより、セル1つあたりを通過する波線の数は減少し、最終的な減衰勾配が得られない領域 (空白で示したセル)が増加する結果となった。また、本結果は図 4-14 の結果と同様に、高減衰勾配を示す領域は、厳密には実際の空隙の位置と一致しているとはいえない。これより、図 4-14 で生じた推定誤差は、トモグラフィ法自体 (セル設定)の誤差ではなく、先述したその他の誤差が影響しているものと推察される。しかしいずれにしても、このようにセルを細かく設定した場合でも図 4-14 の結果と同様に、空隙の大きさ、および位置を詳細に推定することは難しいが、空隙の有無、およびおおよその位置は推定可能な程度の精度を有することが明らかとなった。図 4-19 は 7.5 cm×7.5 cm×6.875 cmと大きなセルを設定し、AEトモグラフィ解析を実施した結果であるが、図 4-14 と比較して、やや健全部と空隙部の減衰勾配値の差は小さくなったが、概ね同様の減衰勾配分布を示した。以上より本実験では、セルの大きさを変化させた場合でも、空隙のおおよその位置、および有無の推定は可能であると推察された。なお、供試体の体積は約 1.24×10^{-2} m³ で、解析で用いた波線は 600 本であり、その長さの合計は約 152 m である。この条件では 5 cm×5 cm のセルでほぼ全ての領域の減衰勾配が得られ、かつ内部の損傷状態を上述の精度で推定可能であるという知見は今後の実験で参考になるであろう。



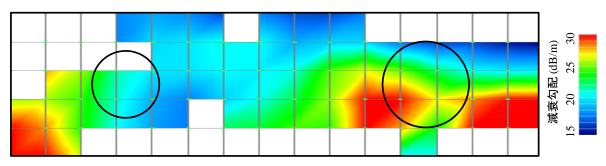
(b) 手前から 4 断面目



(c) 手前から3断面目



(d) 手前から2断面目



(e) 手前から1断面目

図 4-18 AE トモグラフィ解析結果 (セルの大きさ: 3 cm × 3 cm×3 cm)

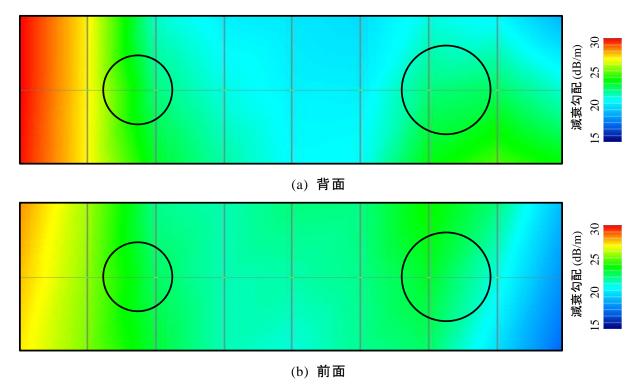


図 4-19 AE トモグラフィ解析結果 (セルの大きさ: 7.5 cm×7.5 cm×6.875 cm)

次に周波数が AEトモグラフィ解析結果に与える影響について考察を加える. 図 4-20 , および図 4-21 は, 4.1 で示したパルサーにより発生させた最大周波数 30 kHz の弾性波を用いた場合の, それぞれ繰り返し計算回数 1 回と 100 回の AE トモグラフィ解析結果である. ハンマの実験結果と同様に, 繰り返し計算回数が増加すると, 高減衰領域と低減衰領域の値の差は明確に大きくなるが, 例えば図 4-21 (a)のように想定しえない領域で局所的に高い減衰勾配を示す例が確認された. また, ハンマの場合と比較して, 内部の空隙の位置と高減衰領域のずれ量は若干大きくなっており, これは弾性波の周波数が高いために波長が大きくなり (最大周波数 30 kHz, 弾性波速度 4000 m/s から波長は約 17 cm と算出される), 本実験のような小規模供試体でセンサが密に配置されている場合, その損傷を厳密に推定することが困難であることを示唆している. しかし, 内部の損傷の有無は特定可能な程度の精度で推定されることは確認された. 実際に内部の微小亀裂から生じる AE 波は高低様々な周波数成分を有し, 5 章で後述するように損傷の進展にともない受信される弾性波の周波数も変化する. 本実験ではハンマによる 60 kHz の周波数, およびパルサーによる 30 kHz の周波数成分が卓越するような, 比較的低い周波数の弾性波を用いたが, 今後は高い周波数で弾性波を励起させ再度検討する必要がある.

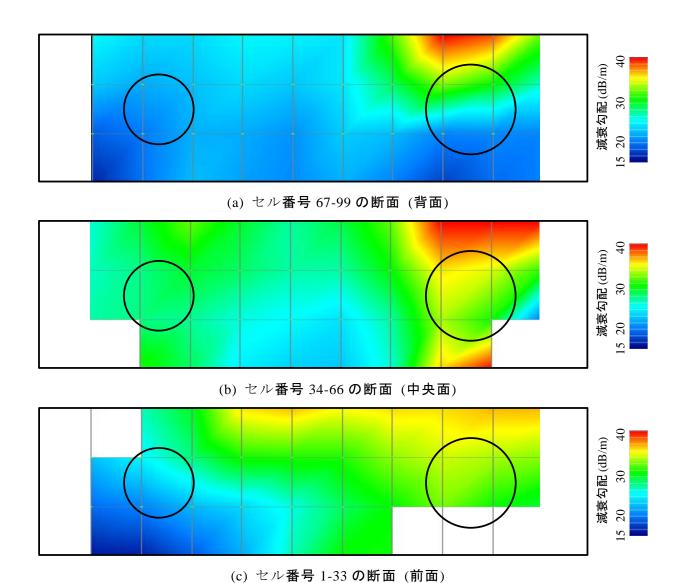


図 4-20 AEトモグラフィ解析結果 (パルサー発信 繰り返し計算回数 1回)

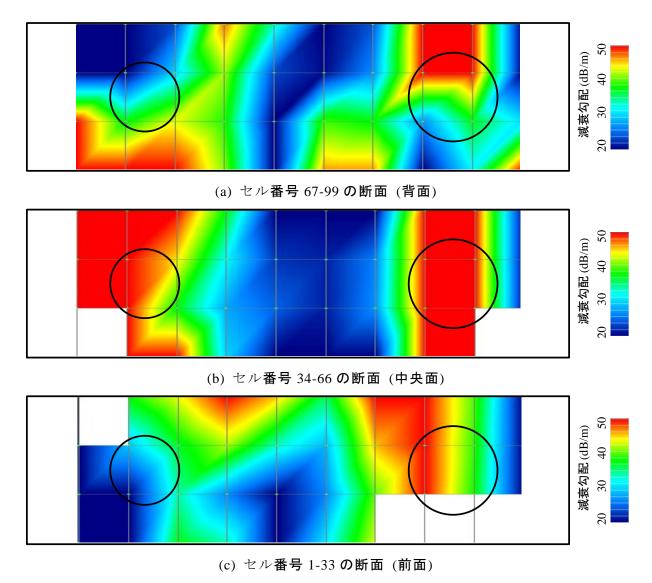


図 4-21 AEトモグラフィ解析結果 (パルサー発信 繰り返し計算回数 100回)

本実験の AE トモグラフィ解析結果の誤差要因は、トモグラフィ法自体が有する誤差、センサ感度や供試体のサイズなど実験条件に依存する誤差、および本研究の AE トモグラフィ解析法が有する誤差の3つが挙げられる。トモグラフィ法自体が有する誤差は、先述のように対象領域をセルで分割し各セルの物理量を一定と仮定することに起因する誤差、および各セルの値を得られた各センサの計測値から繰り返し計算により算定する時に生じる誤差に分けられる。本実験結果の誤差要因は先述のように、セル設定(セルの大きさ)に起因するものではないと考えられ、これに関しては解析データ数を増やしセルを細かく設定することで再度検討する必要がある。また、本実験結果から各セルの減衰勾配の値を詳細には議論することは困難であると考えられるが、今後実際に AE トモグラフィ法を原位置試験に適用する際には減衰勾配の値による損傷の絶対評価が必要となり、その際に本実験で適用した同時反復法やその他の最小2乗法などのインバージョン解析によりセルの物理量が真値に近づいているのかという議論が必要になるであろう。実験条件に起因する

誤差は,センサや計測器の種類,および供試体の規模によって決まり,これは通常の速度 トモグラフィ法や減衰トモグラフィ法も共通に有する要因である.供試体が小規模である が故にセンサの微小な感度な差が結果に大きく影響することなどが先述のように推察され た. 最後に, 本研究の AE トモグラフィ解析手法が有する誤差について考察を加える. 通 常の速度トモグラフィや減衰トモグラフィは弾性波の発生位置は既知情報であるのに対し、 本解析手法は AE 源の位置を弾性波の発信点とみなすため、AE 源の位置推定の精度が重要 となる. AE 源の位置標定は弾性波速度一定の下で計算が行われるため, 本供試体のよう に大きな損傷を有する場合や、広範に損傷が進行した試験体を対象とする場合、弾性波速 度が一定とならず AE 源の推定位置に誤差が生じることが懸念される. 2.1.3 (d)に示したよ うに AE 源の位置標定は 4 つ以上のセンサの受信波形で標定可能となるが、対象試験体が 著しく劣化していることが予想される場合などは、可能な限り多くのセンサの受信波形を 用いて位置標定をすることが望まれる. 本実験では、上記の理由から8個以上のセンサで 受信された AE 信号のみを対象に標定を行ったが、多少の標定誤差は含まれるものと推測 される、しかしながら、本解析手法がトモグラフィ解析手法であり、ある一定の大きさを 有するセルの減衰勾配を推定することを目的としていることを踏まえると、AE 源の標定 位置が設定したセル内で多少ばらつく程度の誤差であれば、解析結果にはあまり影響を与 えないものと推測される、いずれにしても、AE源の位置標定の誤差を検討し、それが AE トモグラフィの結果にどの程度の影響を与えるかについては実験を重ね検討する必要があ る. さらに本実験結果には、AE 源の振幅の推定誤差が影響しているものと推察される. 3.2.1 で述べたように、本研究の AE 源の振幅算定法は、既存の算定法に比べ精度は向上し たものの、実験に適用した場合の推定誤差を直接推定することは困難である.これに関し ては、一般的なトモグラフィ法よりも解析データ数を増やすことでその誤差の相殺を図る ことが必要となり、その検討は今後の課題となる.

本実験では以上の知見が得られた.ここで、供試体のサイズが大きい場合、つまり原位置規模での計測・解析を実施した場合、以上の規模試験体で示した反射波の重合の影響、およびセンサ感度誤差が AE トモグラフィ解析結果に与える影響は小さくなると予想される.しかし、大きな試験体を対象とすると、センサ間隔は必然的に広くなり、セルを大きく設定する必要があることなど、他の要因を考慮する必要がある.次章は実際の道路橋床版を対象に AE トモグラフィ法を適用し、その適用性を更に検討する.

第5章 劣化した実道路橋床版の簡易載荷実験

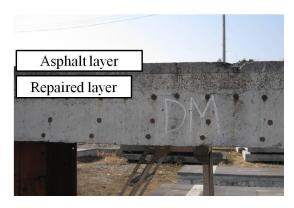
前章おいて、人為的に発生させた弾性波を擬似 AE 源とみなし逆解析的に AE トモグラフィ解析を実施した.本章は、損傷した道路橋床版を対象に、コンクリートブロックの段階的載荷により AE 活動を誘発させ、1次元 AE トモグラフィを実施した. AE ヒット、AE イベント、既存の減衰算出法などの AE 特性パラメータや、インパクトエコー法の結果も含めて、AE トモグラフィ手法の適用性や課題を検討する.

5.1 実験概要

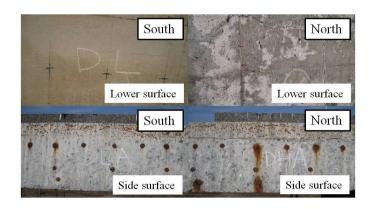
本実験は、実際に供用され劣化が進行した橋梁から切り出したコンクリート床版を用いた. 寸法は図 5-1 (a)に示すように 6300 mm×2000 mm×350 mm で、アスファルト層、補修層および既存の RC 層の 3 層で構成されている(図 5-1 (b)参照). 図 5-1 (c)に示すように、床版北側で、側面に RC 層と補修層の境界に水平クラックが確認され、下面では多数のクラックや遊離石灰が確認された. 一方、床版南側には、側面と下面にクラックや損傷は確認されなかった. AE 活動を誘発させるため、1 ton、および 3 ton のコンクリートブロックを用意し、床版への設置に木片を挿入させ、フォークリフトを用いて各ブロックともに載荷・除荷を 3 回繰り返した(図 5-2 参照). 図 5-3 に示すように AE センサはすべて床版の下面に、図 5-4 に示す配置で設置した. AE 計測は 60 kHz 共振のアンプ内蔵型センサ(フィジカルアコースティック社製)を用い、床版全体の劣化度を推測するために最大センサ間隔で 140 cm とやや広めに設置した. 両センサともに、先述のエレクトロンワックス を用いてセンサを床版に設置した. 受信された AE 波形は 40 dB のしきい値を超えた波形のみ、AE モニタリングシステム(SAMOS、フィジカルアコースティック社製)で記録した.



(a) 床版の寸法



(b)層構成



(c) 側面, および底面の外観 図 5-1 床版の外観



図 5-2 載荷状況



図 5-3 センサ設置状況

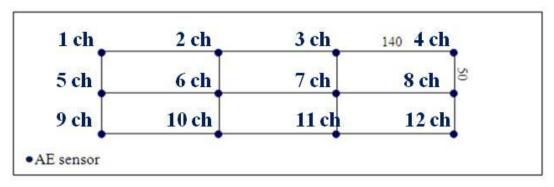


図 5-4 センサ配置

5.2 各種 AE 解析とインパクトエコー法

本項では様々な AE 解析手法とインパクトエコー法により床版の損傷度を検討する.

5.2.1 周波数特性を用いた床版全体の損傷評価

既往の研究²⁹⁾で、輪荷重走行試験機でのコンクリート床版の疲労試験において、生じる AE 波の最大周波数の平均と床版の劣化度の良い関係が示されている. 図 5-5 は輪荷重試験機の走行回数と受信波形の最大周波数の平均値の関係を示しており、走行回数の増加、すなわち床版の損傷の進行にともない、周波数は著しく低下する結果が得られている. コンクリート内部のクラックや損傷から発生する AE 波が、クラックや空隙など劣化領域を伝播することで、高周波成分が減衰し、結果として得られる周波数が低下したものと考えられる. 本実験でも同様に各センサで得られた AE 波形の最大周波数の平均値を算出したところ、1トン載荷で43.93 kHz、3 トン載荷で38.86 kHzを示した. これらの周波数より、試験床版は、輪荷重走行試験における10000回~20000回走行時に相当する劣化度であると推測された. 以上のように、床版やコンクリート構造物全体の劣化度を推定する場合は、最大周波数に着目することが有効である. ただし、上記のように AE 発生源での周波数は広い周波数成分を有するため、伝播距離に応じて卓越する周波数が低下することに注意が必要である. そこで5.2.3、5.2.4、5.3 ではその他の指標を用いて、各領域の詳細な損傷状態の推定を検討する.

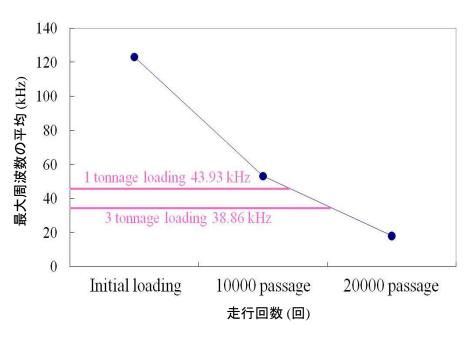


図 5-5 走行回数と最大周波数の平均

5.2.2 Calm 比による損傷評価

本項では Calm 比を用いて床版全体の損傷度の推定を行う. 3.1.3 (e)で述べたように、Calm 比はカイザー効果を利用した指標であり、5.2.1 と同様に試験体全体の劣化度を推定する場合に用いられる。本実験では、フォークリフトを用いてコンクリートブロックを上載させたため、正確な載荷、および除荷に要した時間を計測することは困難である。図 5-6 より、AE 活動が卓越した代表的な時間領域を決定し、その時間内に発生した AE ヒットを計数することで Calm 比を算出した。一回目の載荷時間は 10-20 sec、除荷時間は 40-50 sec、2回目の載荷時間は 70-80 sec、除荷時間は 100-110 sec、および 3 回目の載荷時間は 120-130 sec、除荷時間は 145-155 sec とした。3 回の載荷サイクルにおける、上記で決定された載荷と除荷で計数された AE ヒットを表 5-1 に示す。これより各載荷サイクルで得られた Calm 比の値は 0.25-0.55 の範囲の値となった。既往の研究結果30 より、本研究の Calm 比の値は本床版が劣化していることを表している。

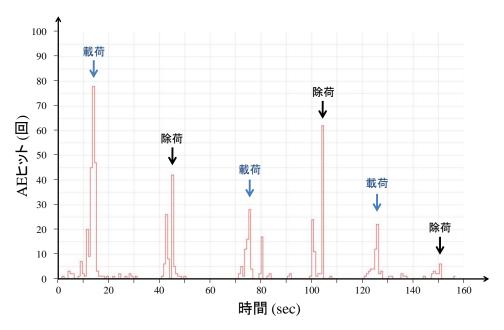


図 5-6 AE 波の発生頻度 (3 ton 荷重)

表 5-1 各載荷サイクルでの載荷時と除荷時の AE ヒット数と Calm 比

	AEヒット数 (回)		Calm比
	載荷	除荷	CallilL
1回目	209	92	0.3056
2回目	89	104	0.5388
3回目	52	18	0.2570

5.2.3 AE 波発生数と AE 源

本項では AE 試験で最も一般的で容易に解析が可能である AE ヒットと AE 位置標定について検討する. 図 5-7 は Iton 載荷時の各チャンネルの AE ヒットの累積数を示す. ここで AE ヒットは 2.1.3 (f) で触れたように, センサ近傍の AE 活動に頻度を表す指標であるため, 各チャンネルで明確なヒット数の差が認められれば, 相対的に各領域の損傷度が推定可能となる. 図 5-7 より 6 ch, および 10 ch のセンサ近傍で多くのヒットが確認され, 同領域の内部で多数のクラックなどの損傷 (欠陥)が存在するものと推察される. 次に, AE 位置標定結果を図 5-8 に示す. 本実験は上述のようにセンサ間隔を比較的広く設定していることから, 1 つの AE 源から発生した AE が 3 つ以上のセンサに到達せず, 結果 2 次元で位置標定された AE 源は少数となった. これより, 図 5-8 には 1 次元の AE 位置標定結果も加えて示している. 同図より 1 次元 AE 位置標定分布は前項の AE ヒットの結果と同様に, 6 ch と 10 ch のセンサ近傍で集中しており, 2 つのセンサで同時に受信可能な比較的大規模の AE 活動が同領域で生じたものと推測される. ここで, 前述したように, 表面の損傷状態, すなわち表面クラックや, 遊離石灰が確認されたのは床版の北側であるにも関わらず, AE ヒット, AE 位置標定による損傷評価では, 南側で内部の劣化が推定された. これより,表面の劣化状態は必ずしも内部の劣化状態を反映していない可能性が明らかとなった.

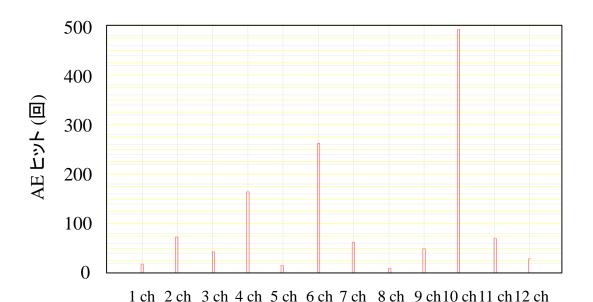


図 5-7 各チャンネルの AE ヒット

チャンネル

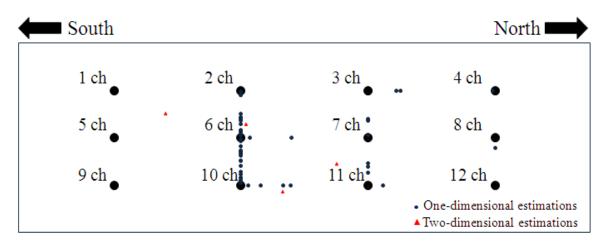


図 5-8 AE 位置標定 (1 次元標定と 2 次元標定)

5.2.4 インパクトエコー法

本研究結果と他の解析結果と比較するために一般に実施される損傷 (クラック面)探査に利用されるインパクトエコー法³¹⁾を実施した。インパクトエコー法はコンクリートや組積構造物の非破壊試験法であり、試験体の表面をハンマなどで打撃し弾性波を励起させ、試験体内部の欠陥や境界で反射する弾性波を計測し、その位置や範囲を推定する手法である。

加速度センサ (SAF51, 富士セラミックス社製 図 5-9 参照)を用いて, 床版上面で励起 させた弾性波を下面で受信し,波形収録装置 (GX-1, TEAC 社製)で波形を取得・記録した. 図 5-10 に示すように, 5.2.3 で内部の劣化が確認された床版の南側の 32 点の測定点で, 8 mm ハンマと 25 mm ハンマにより上面から弾性波を励起させ、その真下の下面の位置で波 形を受信した. 図 5-11 に 8 mm ハンマで, 実験的に得られた代表的な波形の周波数解析結 果を示す.表面で励起された弾性波は床版の下面,あるいは床版内部のクラックで多重反 射を繰り返すため, 受信された波形は, 床版厚さと床版内部のクラック位置に対応する周 波数成分が卓越する、換言すれば、受信波形の卓越周波数の中で、低い周波数成分は床版 底面から反射した波形の多重反射に起因するもので、高い周波数成分は上面と下面の間の クラック間の多重反射に起因するものであると推測される. ここで, 本研究は低い周波数 成分に着目し、即ち下面からの反射波に着目し、その周波数の値と床版厚さ 350 mm によ り弾性波の P 波速度を推定した. 具体的に, 一般的なコンクリートを伝播する弾性波の P 波速度は 4000 m/s であり、この値と床版厚さから約 5.7 kHz の周波数得られる. 先述のよ うに本床版は損傷していることから、弾性波速度がこの一般的な速度より遅くなることが 予想されるため、5.7 kHz 以下の周波数領域から卓越周波数を抽出し、その値により速度を 算出した. 図 5-12 は 8 mm ハンマ, および 25 mm ハンマにおいて推定した速度構造を示 している. 同図より 8 mm ハンマの場合各領域で弾性波速度の大きな差異は認められない が, 25 mm ハンマの場合, 測定範囲の中心部で低速度領域が確認された. この中心部は 6 ch

と 10 ch のセンサの位置に相当することから, 前述の AE ヒット, AE イベントが卓越した 領域で弾性波の速度も変化を示すことが確認された. 本結果は, 既往の研究でも同様の結 果が報告されており³²⁾, 高い周波数の弾性波は波長が小さいため媒体の欠陥やクラックが 存在する場合でも微小な通過域を伝播可能となり, 速度低下は顕著とならないが, 低周波 数の波形は波長が長く伝播材料の不均質の影響を強く受け, 結果速度が低下するものと推 測される.



図 5-9 加速度センサ

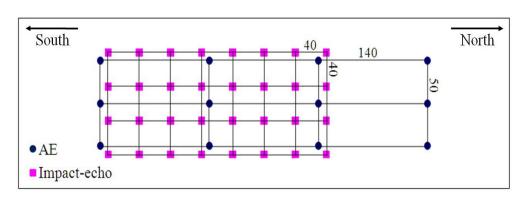


図 5-10 インパクトエコー法の弾性波発生位置

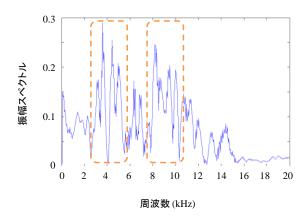


図 5-11 得られた波形の周波数と振幅スペクトル

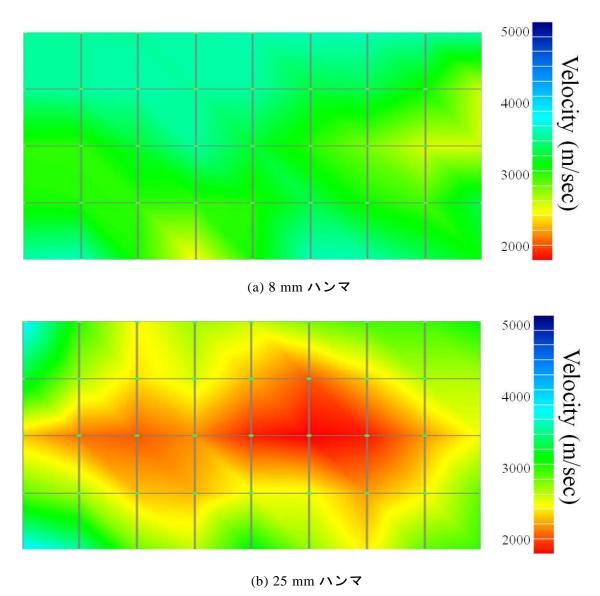


図 5-12 インパクトエコー法により得られた各領域の P 波速度の分布

5.3 1 次元 AE トモグラフィ解析結果

前節まで AE ヒット、AE イベント、およびインパクトエコー法により床版の損傷領域の推定を実施した.これらの結果から内部の床版の損傷度が高いと推定される 2 ch、6 ch、および 10 ch 近傍の領域で AE トモグラフィ解析を実施した.本実験では、5.2.3 で示したように 2 次元的に分布した AE 源が得られなかったため、図 5-13 に示す幅 10 cm の 10 個のセルを設け、これらのセル内で発生した 45 個の 1 次元標定された AE 源を用いて 1 次元 AEトモグラフィ解析を実施した.通常、ここで設定されたセル内で発生した AE 源ごとに、それぞれのセルで AE 源の振幅を推定するが、AE 源の数が限られているため、幅 20 cm と広い範囲で AE 源を分類し、これらの AE 源ごとに 3.2.1 の推定法を用いて各 AE 源の振幅を推定した.これより推定された AE 源の振幅を用いて AEトモグラフィ解析を実施し、

得られた各セルの減衰勾配をコンター図で表した結果を**図** 5-14 に示す. 同結果より、 $2 \, \text{ch}$, $6 \, \text{ch}$,および $10 \, \text{ch}$ の順に減衰勾配が高い値を示し,この傾向は $AE \, \text{ヒットの結果と整合性のある結果となった.}$ これより,大規模な試験体を用いた場合でも $1 \, \text{次元} \, AE \, \text{トモグラフィを適用することで,各領域の損傷度が推定できる可能性が示された.}$

さらに、本計測結果を用いて 3.2.1 で述べた AE 源の振幅推定法の結果比較を以下に示す. 比較のため図 5-15 のように、2 ch 周辺を Area 1、6 ch 周辺を Area 2、10 ch 周辺を Area 3、およびその他の領域を Other Area と分類する. 同領域ごとに波線の長さと振幅の関係 (図 5-16 参照) 3.2.1 で述べた手法 2 で減衰勾配の値 (AE 源の振幅)を推定した結果を図 5-17 (a) に示す. これより、Other area に比べ、Area 1-3 の減衰勾配は全体として高い値を示したが、Area 1、Area 2、および Area 3 で比較すると、AE ヒットの結果とは異なる傾向を示した. 一方、図 5-17 (b)は図 5-14 の AE トモグラフィで推定された各セルの減衰勾配を便宜上、Area ごとに分け平均化した結果を示しているが、図 5-17 (a)の結果とは異なり、AE ヒットの結果と整合性のある結果となった.これより、大規模な試験体を用いた試験体でも既存の AE 源推定法に比べ、本研究の AE 源推定手法は有用であると推察される.

以上より、実橋梁の大規模なコンクリート構造物の損傷領域を推定する場合に、1 次元 AE トモグラフィ法が有効であることが示された.

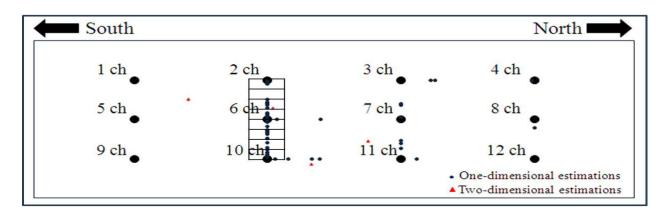


図 5-13 1次元 AE トモグラフィのセル設定

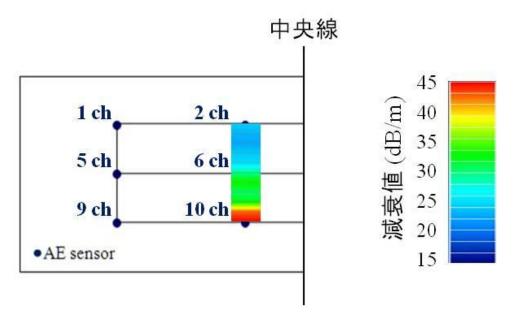


図 5-14 1 次元 AE トモグラフィ解析結果

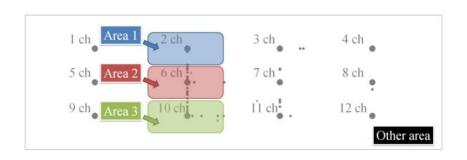
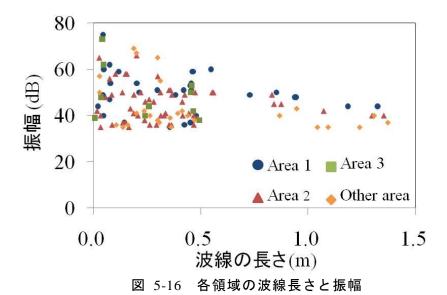


図 5-15 領域分割



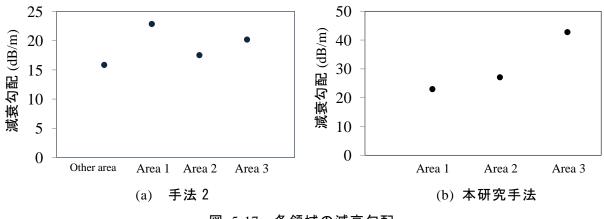


図 5-17 各領域の減衰勾配

第6章 健全供試体の曲げ試験

4章の弾性波励起実験で明らかになった課題を踏まえ,5章では実道路橋床版を対象に,簡易な載荷方法により得られた AE 波を用いて,1次元 AE トモグラフィ解析を実施し,損傷と減衰値の関係性が確認された.本章では,小規模のコンクリート供試体を用いた曲げ破壊実験を行い,得られた結果に3次元 AE トモグラフィ法を適用する.表面のクラック,AE 源の分布,および速度トモグラフィ結果と比較しながら,本手法の適用性,および課題を検討する.

6.1 実験概要

実験で用いたコンクリート試験体の寸法は 150 mm×150 mm×530 mm であり,直径 13 mm の異形鉄筋が底面から 30 mm の位置に設置されている(図 6-1 参照). 破壊試験は 4 点曲げ載荷で行い,図 6-2 に示す載荷試験機で試験体が破壊するまで段階的に荷重を与えた(図 6-3 参照). AE 計測は、図 6-3 の 5 段階の載荷段階で実施した. センサは、図 6-4 に示すように 12 個の 60 kHz 共振型センサ (R6,フィジカルアコースティック社製)を供試体表面に 3 次元的に配置した.センサはすべて先述のエレクトロンワックスを介して接着させ、各センサで受信された波形はプリアンプで 40 dB 増幅された後、波形記録装置 (PAC DiSP 16-channel system,フィジカルアコースティック社製)で記録した.

図 6-5 は図 6-3 の載荷がすべて終了し、供試体が破壊した後に生じている表面クラックの状態を表している。図 6-5 (a)より、供試体左側にせん断破壊による幅最大 4 mm の大規模なクラックが確認され、このクラックは背面(図 6-5 (c)参照)まで貫通していた。供試験体の下面にも曲げクラックが数本確認され、前面と背面でクラックの位置、および大きさが多少異なっている。供試体の表面に生じているクラックはこの 2 種類であり、他の位置で顕著なクラックは確認されなかった。以下に、AE 位置標定結果、速度トモグラフィによる後領域の速度分布、AE トモグラフィ法による減衰勾配の分布の結果を示す。

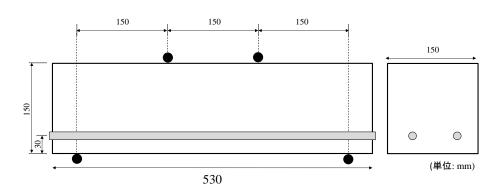


図 6-1 供試体の寸法. および載荷位置



図 6-2 載荷試験機

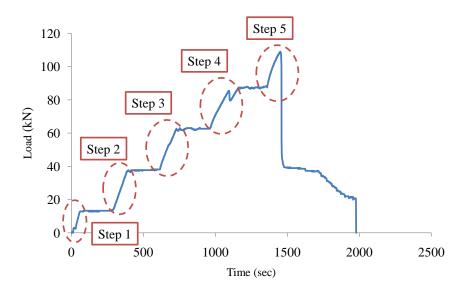


図 6-3 載荷段階

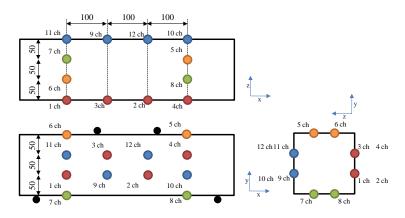
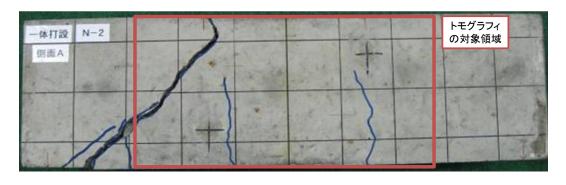
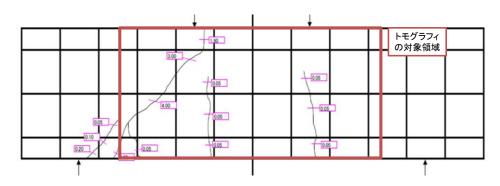


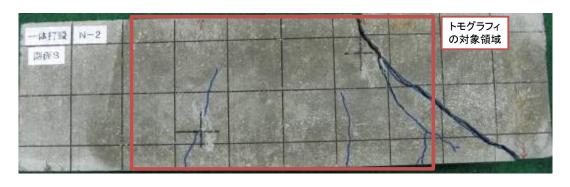
図 6-4 センサ配置



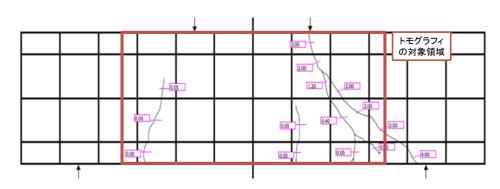
(a) 前面の外観



(b) 前面のクラックの位置、および太さ



(c) 背面の外観



(d) 背面のクラックの位置、および太さ

図 6-5 破壊後の供試体の側面の状態

6.2 表面クラックと AE 源の分布

はじめに、各載荷重ステップで、AE 源の位置標定結果と表面クラック位置の関係を検 討した. step 1 では AE イベントがほとんど計測されなかったので, step 2-step 5 までの 4 段階の結果を図 6-6 (a) - (d)に、破壊後に得た前面の表面クラックの位置と合わせて示す. はじめに、step 2 で供試体の下面で曲げクラックに起因する AE 源が発生し始め、step 3 step 4 にかけて AE 源は上面方向へ発生位置を変化させていく過程が確認される. この AE 源の位置が上に移動すること, および AE 源の位置と表面クラックの位置が概ね一致して いることから, step 2, および step 3 での AE 源は初期段階での微小き裂の発生をとらえて おり、この微小き裂が集積した後に表面で観察できる大規模き裂が発生したものと推測さ れる. さらに、step 4 で AE 源は下面から生じたき裂の先端付近 (供試体の下面からある程 度離れた位置)のみに分布していることから, step 4 ではクラックの発生にともなう AE波, すなわち一次 AE のみ発生しており,step 2 – step 3 で発生した既存の微小き裂のインター フェースの摩擦に起因する 2 次 AE は発生していないものと推測される. したがって, AE 計測の計測時間内に微小き裂が発生、および進展しない状況下で AE 計測を行う場合、換 言すれば 2 次 AE を用いた損傷評価を試みる場合は、本実験のように既存き裂に起因する AE 源としての検出が困難な場合があるということに注意する必要がある. これに関して は速度トモグラフィ, および AE トモグラフィの結果と比較して, 6.3, および 6.4 で再度 考察を加える.

step 5 の載荷段階では、供試体の破壊の直接の原因であるせん断クラックに沿う位置に AE 源が認められる. step 5 以前の載荷ステップで、このせん断クラックの位置に AE 源が確認されないことから、step 4 までの荷重ではこの位置でせん断クラックを生成するような微小破壊は存在していない、あるいは存在したとしても AE 源が評定されるある程度の規模を有する破壊ではなかったものと推察される. これについてはトモグラフィ結果、および AE トモグラフィ結果を踏まえて再度考察を行う. また step 5 でこのせん断クラックに沿う位置に生じた AE 源の多数は表面のせん断クラックの位置から多少ずれていることから、内部に生じたせん断クラックが広範囲に、かつ多数生じておりその一部が表面クラックとして生じたものと推測される.

以上より、材料の内部の劣化状態は表面クラックの位置、および規模のみでは推定できないことが確認された、また、AE 源の分布により、載荷初期段階の表面クラックが生じていない損傷レベルでも、微小破壊を検出できることが確かめられた。しかしながら、試験体の内部で発生した微小破壊(微小クラック)がすべて AE 源として検出されるとは限らないことから、以下で示す速度トモグラフィや AE トモグラフィ結果と比較を行いながら、再度検討する.

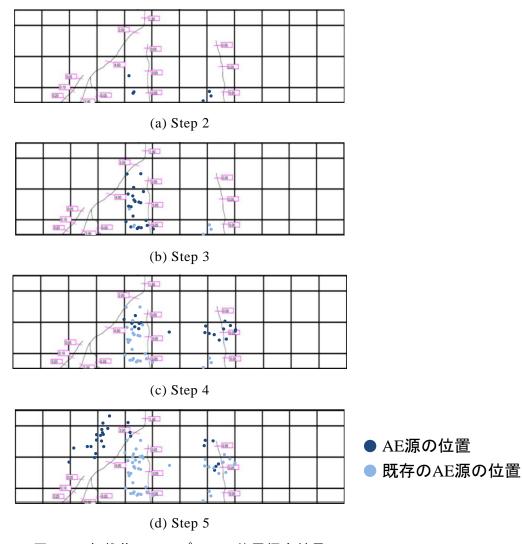


図 6-6 各載荷ステップの AE 位置標定結果

6.3 速度トモグラフィ

コンクリートの劣化度と弾性波の速度に密接な関係があることは多くの研究で報告されている $^{33)34)35}$. 本試験においても前述の表面クラック,および AE 源の分布との比較のため図 6-7 に示す載荷段階ごとに 3 次元速度トモグラフィ計測を行った.センサの種類,センサ配置,プリアンプ,および記録装置はすべて AE 計測と同様であり,セルは図 6-5 の赤枠の領域内に $50~\text{mm} \times 50~\text{mm}$ の大きさで設定し (図 6-8 参照),各セルの速度を速度トモグラフィ解析により推定した.

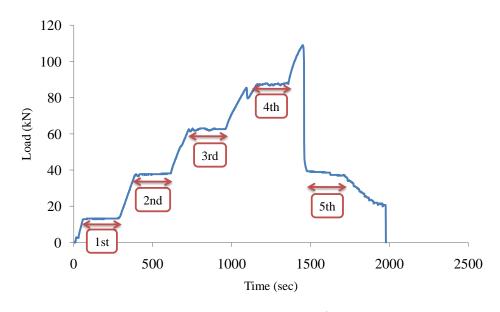


図 6-7 各載荷段階での速度トモグラフィ計測

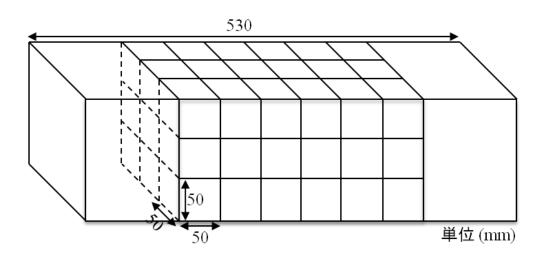


図 6-8 セルの設定

表 6-1 縦波伝播速度とコンクリート品質の関係36)

縦波速度 Vp (m/sec)	評価
4,570 以上	優
3,660-4,570	良
3,050-3,660	やや良
2,130-3,050	不良
2,130以下	不可

載荷段階 step 2 - step5 での前面、中央面、および背面の速度トモグラフィ法による各セルの速度構造の分布を図 6-9 (a) – (l)に示す。表 6-1 に示すようにコンクリートの縦波伝播速度と健全性のおおよその指標が既往の研究で得られていることから、同表を参考に各セルの速度を最小 2000 m/s,最大 5000 m/s でコンター図として作成した。図 6-9 の左図はセルの値のみ反映させた図で、右図がコンター図である。以下に、表面クラック、および AE 源の分布を参照しながら同結果を考察する。

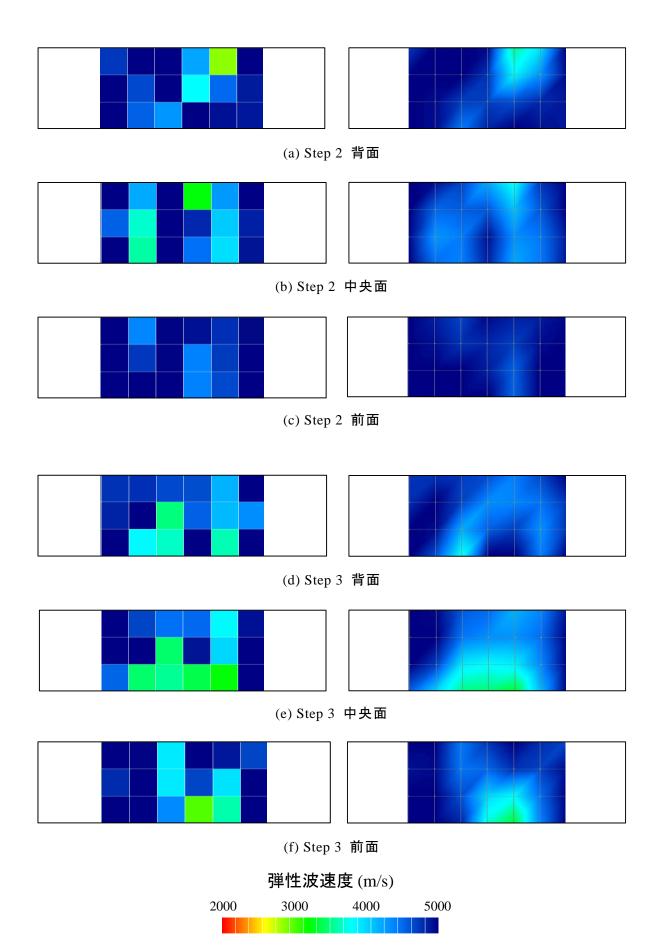
載荷の初期段階にあたる step 2 において、供試体の下部で曲げクラックに起因する AE 源の発生した位置と、速度トモグラフィ解析で得られたコンター図の低速度領域は概ね一致した.この供試体下部の低速度帯は、載荷段階が step 3、step 4 と進むほどさらに低く、かつその領域も拡大する様子が確認される (図 6-9 (d) – (i)参照).これは、AE 源の分布と同様に、表面に表れないような供試体の下部における微小き裂の発生、進展を、弾性波速度の低下により可視化できたものと考えられる.さらに、6.2 で述べたように 2 次 AE が複数のセンサで検出されないために既存のクラックなど損傷位置や領域の特定が困難な場合があるが、速度トモグラフィを用いると step 4 の速度分布図より既存クラックの位置でも低速度領域として評価可能である.

供試体の最終破壊の直接の原因となったせん断クラックに起因する AE 源は step 5 では多数発生したが、step 4 以前の載荷段階では生じていないことは 6.2 で述べた. これを速度トモグラフィの観点から検討する. step 5 の弾性波速度分布よりせん断クラックが位置する領域で速度が著しく低下しているセルが確認され、その値が表 6-1 で品質が不可と判断される弾性波速度 2000 m/s より小さい値となったセルも存在する. 3.1 で述べたように、弾性波速度は内部の空隙率が著しく変化した場合でも、その変動は緩やかであることが多数の研究で報告されている. しかしながら、本実験でせん断クラックの位置付近で 2000 m/s程度の低速度を示した. よって、供試体を破壊に導くような大規模き裂が存在する場合、そのき裂を低速度領域として明確に識別可能であることが示された. 一方、step 4 以前の載荷段階では、上記のせん断クラックの位置で弾性波速度の微小な低下のみ確認されるが、その速度は 4000 m/s を僅かに下回る程度である. これより、せん断クラック位置で明確な速度の変化が生じるのは step 5 の載荷段階に入ってからであり、これは AE 源の発生結果と合致した.

最後に step 2 で、中央断面、および背面の右側上部で確認された低速度領域 (図 6-9 (a), (b)参照)に着目する. 同領域では、表面クラックや AE 源の分布が確認されなかったが、左側の表面せん断き裂の位置の対称の位置に存在し、載荷点の位置関係より、せん断クラックが発生する可能性が十分にあり得る領域である. 同領域は step 3 では step 2 に比べ弾性波速度はやや高い値を示すが、step 4 では再び低い値に変化し、step 5 の背面では 3000 m/s以下の値を示している. step 3 で同領域の弾性波速度が高い値に戻ったこと、さらに同領域を全体でとらえれば低速度領域であるがセルごとの速度変化には載荷段階によりばらつ

きが生じていることより、速度トモグラフィの推定値に誤差が生じている可能性がある. しかしいずれにせよ、試験体の右側上部に載荷初期の段階で、せん断クラック、あるいは せん断クラック予備軍いえる微小き裂が発生していたことが推定された.これに関して AE トモグラフィ結果と比較して再度検討を加える.

以上、速度トモグラフィ結果について、表面クラック、および AE 源の分布と比較し考察した. 弾性波の速度分布は、AE 源の位置と表面クラックの位置と概ね合致し、さらに先述した AE 源が発生していないような領域でも低速度帯が確認された. これらの知見を踏まえ、以下に AE トモグラフィの結果を考察する.



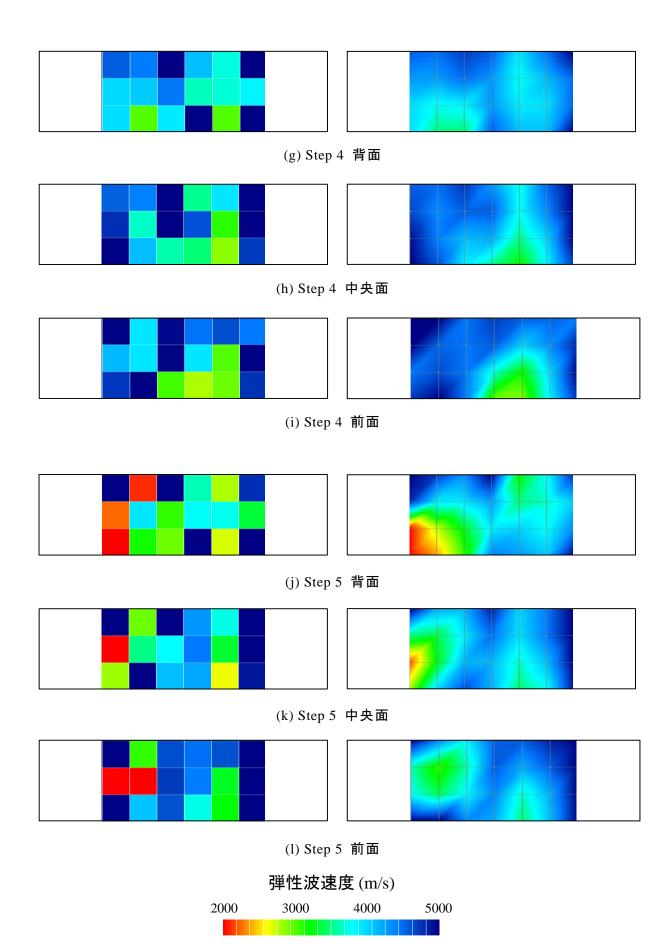


図 6-9 速度トモグラフィ結果

6.4 3 次元 AE トモグラフィ

図 6-3 に示すように載荷段階は 5 段階で、先述のように step 1 では AE が発生していないため、step 2 – step 5 で得られた AE 源より、AE トモグラフィ解析を実施した.4 章で、一つのセルを通過する波線の数が少数の場合に減衰値の推定精度が低下することから有用な知見として得られているため、本解析は一つのセルを通過する波線が 10 本以上のみを解析の対象とした.ただし、ある載荷段階で波線が 10 本以下であり上記の基準によりセルの値が得られない場合でも、直前の載荷段階でそのセルの減衰勾配が得られている場合は、以下の式で得られる A_i (i は載荷段階で i = 2, 3, 4, 5) を近似的に求め、そのセルの値とした.

$$A_i = A_i' \cdot n_i + A_{i-1}' \cdot n_{i-1} \tag{6.1}$$

ここで、 A_i 'は載荷段階 i での減衰勾配、 n_i はその載荷段階で得られた波線の本数である.このようにして得られた、各載荷段階での減衰勾配の分布を $\mathbf Z$ 6-10 (a) - (e)に示す.step 2 - step 4 はコンター図を作成するのに十分なデータ数が得られていないので、セルの値を色で表すのみとし、また各載荷段階において各断面 (前面、中央面、および背面)で得られた $\mathbf A \mathbf E$ 源の分布を合わせて示す.

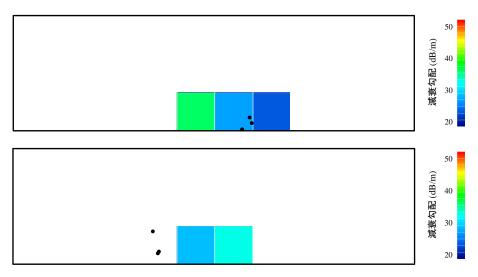
はじめに、AE源、および速度トモグラフィによる弾性波速度に関連性が認められた供 試体の下部の曲げクラック近傍の領域について, AE トモグラフィによる減衰勾配の分布 を検討する. 図 6-10(a)-(c)より step 2-step 4 で供試体の下部で高減衰領域が確認され, その値は載荷段階が進むほど高くなる傾向が確認された、特に、供試体の背面と前面の右 側下部で、step 3 の載荷初期段階でも減衰勾配が 40 dB/m - 50 dB/m と他のセルに比べて高 い減衰値を示した (図 6-10 (b)参照). この領域で AE 源が生じ始めるのは step 4 の載荷段階 になってからであるが、step 3 の時点で AE 源として検出されない微小き裂が生じ、このき 裂に減衰値が敏感に反応した可能性を示唆している. つづいて, この右側下部の領域で, 前面,中央面,背面の 3 断面を比較すると,中央面は step 3 の段階で 20 dB/m - 30 dB/m と 残りの2つの断面と比較して低い減衰勾配を示しているが(図 6-10(b)参照), step3におけ る速度トモグラフィ結果である図 6-9 (d) - (f)にはその傾向が確認されない. これより, コ ンクリート内部の微小き裂の状態が同じであっても、速度と減衰値は異なる挙動を示す場 合があると推察される. あるいは、4章でAEトモグラフィの解析結果に最大で10cmの 程度の誤差が生じていることから,本解析の精度誤差が生じ,速度トモグラフィ結果との ずれが生じた可能性もある.この点に関しては今後,各セルの波線数を増やし,結果が変 化するかを確認する必要がある.

つぎに、供試体の左側の、破壊を誘発させたせん断き裂に着目する.このき裂の近傍では、step 3 の載荷段階で中央面で約 50 dB/m の高い減衰値を示し、その後この高減衰領域

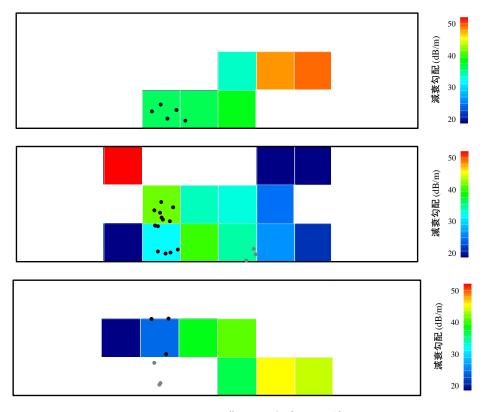
は荷重の増加とともに拡大していく. 先述のように本領域で AE 源の発生, あるいは低速度値が確認されたのは step 5 に移行した後である. したがって AE 波が発生せず, 弾性波速度も低下しないような損傷状態であっても, 3.1.3 (b)で議論したように, 弾性波の減衰値は敏感に変化することが本結果からも確認された.

最後に、速度トモグラフィ解析で、供試体の右側上部で低速度帯が確認されたが、AEトモグラフィ解析結果でも step 5 で高減衰領域の広範囲にわたる分布が確かめられた.これより、AE源が検出されず、また表面クラックが生じない領域であっても、損傷が進行している可能性は十分にあり、これを速度や減衰値で検出できるものと推測される.

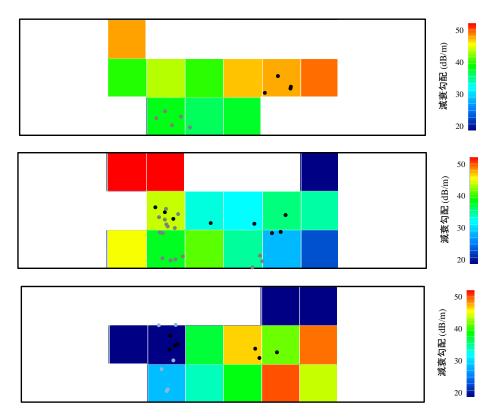
以上より、AEトモグラフィによる減衰勾配の分布は、表面クラック、AE源、および速度トモグラフィの結果と概ね整合性のある結果となった。さらに注目すべきは、表面クラックやAE源からは検出できない、微小な損傷領域であっても速度や減衰値は変化を示した。その変化量は減衰値の方が大きく、初期の微細な変化をとらえる場合は減衰値にすることが有用であると推察される。本実験では破壊が局所に集中することで、データ数が限定されていたが、このデータ数の問題は今後も引き続いて検討すべき課題である。また AEトモグラフィの精度の問題も今後の課題である。



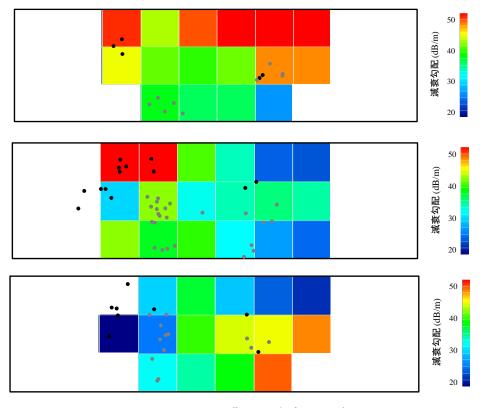
(a) step 2 (上から中央面, 前面)



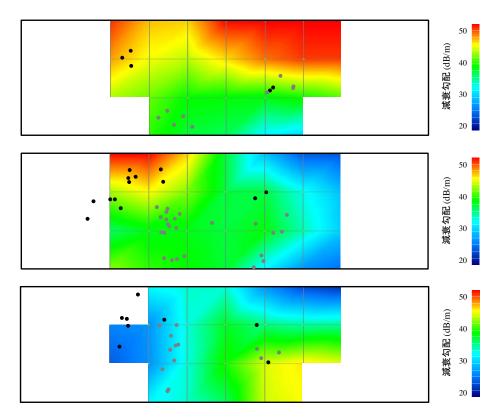
(b) step 3 (上から背面, 中央面, 前面)



(c) step 4 (上から背面,中央面,前面)



(d) step 4 (上から背面,中央面,前面)



(e) step 5 コンター図 (上から背面, 中央面, 前面)

図 6-10 AE トモグラフィ結果 (黒い点はその荷重段階で観測された AE 源, 灰色の点はその荷重段階以前で観測された AE 源を示す)

第7章 結論と今後の展望

本研究は、材料や構造物より生じる AE 源 (損傷位置や範囲)を利用した AE トモグラフィ法を提案し、様々な実験により手法の有用性、原位置適用性を検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

- (a) AEトモグラフィ解析において重要な入力情報である AE 源の最大振幅に関して、振幅推定法を提案し、既往の推定法との比較を行った. その結果、簡単なモデルと実橋梁床版の載荷実験で、本推定法が既往の推定法に比べ精度よく AE 源の振幅を推定できることが明らかとなった.
- (b) 損傷を模擬した空隙を包含する小規模コンクリート供試体を用いて、その表面からハンマ、およびパルサーを用いて弾性波を励起させ、これを擬似 AE 源とみなし、3 次元 AE トモグラフィ解析を実施した. その結果、本手法で空隙の有無や、そのおおよその位置を推定可能であることが示された.
- (c) 大規模な実橋梁の損傷した床版を用いた簡易載荷実験で,1次元 AEトモグラフィ解析を実施し,得られた高減衰勾配の分布は,AEヒット,および AE位置標定から推定される損傷領域と整合性のある結果となった。またこのような大規模の試験体の場合,表面の劣化状態は必ずしも内部の損傷状態を反映していない可能性があることが明らかとなった。
- (d) 健全なコンクリート供試体の曲げ破壊試験で得られた AE 源を用いて,3次元 AE トモグラフィ解析を実施した結果,損傷レベルが低い載荷段階でも,減衰勾配により損傷領域が推定された.特に注目すべきは,AE 源が検出されず (AE 源が特定できるほど大きな規模の AE が得られない段階),かつ速度構造からも推定できない初期損傷領域を,減衰値により推定できた.これより,減衰値は微小な損傷を検知する場合に有効であることが示された.

このことに加え、本研究で得られた副次的な結果を以下に示す.

- (e) AE トモグラフィ解析をする場合,各セルを通過する波線の数を考慮する必要があり、セルを通過する波線数が10本以下のセルを解析対象外とすることで,より信頼性の高い結果を得ることができた.また波線数に応じて、セルの限界分割数が決まることから,求める精度に応じてAE波の計測時間を長くするなどして、AE源の数すなわち解析データを増加させる必要がある.
- (f) 小規模試験体の場合で、波線が極端に短い場合は、各センサの微小な感度誤差から減 衰勾配に大きなばらつきが生じることから、必要に応じて波線の短いデータを解析対

象から除外するべきであることが明らかになった. さらに, 小規模試験体の場合, センサのわずかな感度誤差が結果に大きく影響を与えることが示された. これより, 本実験のように伝播距離と得られた振幅の値の関係よりセンサ感度の補正を行うことや, あらかじめ実験前にパルサーなどを用いて擬似 AE 波を発信しその受信波形の振幅の大きさの差異から, センサ感度を補正することが重要となる.

- (g) AEトモグラフィ解析を行う際に、AE源のデータが十分に得られない場合は、過去に得られた AE源を用いることで近似的に減衰勾配の分布が推定可能であることが示された.これは、実構造物の劣化の進行を経時的に評価する場合に有効であり、得られた AE波の増加にともない逐次結果を更新させていくことでその結果の信頼性が高まると同時に、減衰勾配の値の変化により、経時的な損傷進行が可視化できるものと推察される.
- (h) 小規模試験体の場合, AE 源から直進する弾性波の S 波の波形成分のみならず, 反射波が重合した波形を検出し, 強調された最大振幅値を検出することが懸念される. これより, 小規模試験体では得られた波形モードの選別を行う必要があることが明らかとなった.

以上のような知見を得たが、今後解決していく課題もあり、それらは以下のようにまとめられる.

- (a) 本研究では小規模の試験体で、最大で 600 本の波線データを用いて解析を行った. 今後、解析データ (波線)を増加させることで、可視化精度を検討する必要がある. これを検討することで、求められる推定精度に合わせて、センサ配置、およびデータ数を計測の前段階で推測することが可能となる.
- (b) 本研究で提案した AE 源の振幅の推定法は既往の手法と比較して、推定精度は向上したが、さらに改良を加える余地がある。本手法は設定範囲内に生じた AE 源から伝播し同一のセンサで得られる弾性波の減衰勾配を一定と仮定している。場合によっては同一のセンサで受信される弾性波の減衰量が、損傷領域の位置関係から、大きな差異を示すことも想定される。本研究では、推定された AE 源の振幅から明らかな誤差データを除くことで、上記の誤差による影響を低減させたが、今後 AE 源の振幅の推定式にこの各波線の異常値を除くアルゴリズムを組み込むことで、AEトモグラフィ解析の精度が向上することが期待される。
- (c) 本研究では、小規模な供試体を用いて、3次元 AEトモグラフィ解析を実施したが、実構造物のように大規模な供試体でも同解析を行い、その精度を検証する必要がある. 上述のように、大規模な試験体を対象とした場合、センサの感度誤差の影響や、反射波の重合波の影響は小さくなるものと推測される.しかし、試験体が大規模であるが

故に生じる誤差要因が新たに問題となることも推測される. 上述のように広いセンサ間隔により, 検出される AE 源が減少することや, あるいは大規模試験体での AE 源の位置推定精度が悪くなることも考えられる. いずれにしても, 様々なセンサ配置間隔で, 大規模試験体により 3 次元 AE トモグラフィを実施し, その精度を検証する必要がある.

- (d) 本研究は、実験あるいは損傷(破壊)様式により各領域で推定される減衰勾配の大きさ、およびその分布が異なった.したがって、同じ試験体内で相対的な損傷の推定は可能であったが、減衰勾配による損傷度の定量評価までは至っていない.今後、減衰勾配の値を用いた損傷度の絶対評価が望まれ、その際には本研究で用いた同時反復法以外の様々なインバージョン解析法を適用し、適切にセルの値が推定されているのか、そしてその解析法は損傷の絶対評価が可能程度の精度を有するのかといった点を検討する必要がある.さらに、受信される振幅の値はセンサの種類(共振周波数や感度)により異なることが予想される.これより、実際に生じている弾性波の伝播挙動と特定のセンサで得られる受信波形を関連付ける必要がある.具体的に、ある一定のエネルギーの弾性波をパルサーなどで励起させ、様々な種類のセンサで受信し、その波形の形状や振幅値を比較、補正することで、センサの種類が異なった場合でも一定の弾性波の挙動とし、この減衰勾配を用いて損傷を絶対評価することが望まれる.
- (e) 本研究の弾性波の減衰式に周波数の項は考慮されていない. 3 章で述べたように,周波数の変化にともない AE トモグラフィ解析結果が多少変化した. 今後,特定の周波数域の波形に限定し同解析を実施することや,周波数を含む減衰式を用いて解析することで周波数 (波長)に依存した損傷規模ごとの損傷分布が可視化できる可能性がある.
- (f) 健全供試体の曲げ試験において、各載荷段階で得られた AE 源は局所的に発生したため AE トモグラフィ解析を実施する際に用いる波線の分布、および数が限定された. 今後、供試体の種類、および載荷方法を変化させ、AE 源が広範に分布した場合には、AE トモグラフィ解析の精度は向上することが予想される. さらに、実構造物の AE 試験で計測される AE 源の数、および分布を検討するとともに、その数、分布と解析精度の関係を検討することは今後の課題である.

今後は本研究が提案する AE トモグラフィ解析を用いて、上記のようにより多くの構造物に適用し、データベースの構築を図ることが必要である.

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局情報管理部情報安全・調査課建設統計室: 平成 22 年度建設投資 見通し, 2010.
- 2) 国土交通省: 平成 21 年度国土交通省白書, 2010.
- 3) 日経コンストラクション: 長寿命化時代のコンクリート補修講座, 日経 BP 社, pp. 6-13, 2010.
- 4) 中林正司, 西岡敬治, 小林潔司: 阪神高速道路の維持管理の現状と課題, 土木学会論文集 F, Vol.63 No.4, pp.494-505, 2007.
- 5) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, 第 374 号, I-6, pp.419-426, 1986.
- 6) 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.
- 7) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久: AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発, 非破壊検査, Vol. 42, No. 10, pp. 570-575, 1993.
- 8) 大野健太郎, 下園晋一郎, 沢田陽佑, 大津政康: AE-SiGMA 解析による鉄筋コンクリート梁のせん断破壊機構の考察, 土木学会論文集 E, Vol. 64, No. 1, pp. 72-81, 2008.
- 9) コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法,(社) 日本非破壊検査協会, NDIS2421, 2000.
- 10) Chai, H.K, S. Momoki, D.G. Aggelis, Y. Kobayashi and T. Shiotani: Recent development in tomography techniques for non-destructive evaluation of concrete, Proceedings of the Second Asia-Pacific Young Researchers and Graduates Symposium (YRGS 2010), pp. 10-18, 2010.
- 11) Kobayashi, Y., T. Shiotani, D.G. Aggelis and H. Shiojiri: Three-dimensional seismic tomography for existing concrete structures, Proceedings of Second International Operational Analysis Conference, Vol. 2, pp. 595-600, 2007.
- 12) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1988.
- 13) F. R. Breckenridge: Acoustic Emission Transducer Calibration by Means of the Seismic Surface Pulse, Journal of Acoustic Emission, Vol. 1, pp. 87-94, 1982.
- 14) 大野健太郎, 下薗晋一郎, 沢田陽佑, 大津政康: AE 波初動部の自動読み取りの開発によ

- る SiGMA 解析の改良, 非破壊検査第 57 巻 11 号 (2008), pp. 531-536, 2008.
- 15) V. J. Kaiser: Knowledge and Research on Noise Measurements during the Tensile Stressing of Metals, Arkiv für das Eisenhüttenwesen, 24, pp. 43-44, 1953.
- 16) R. E. Goodman: Subaudible Noise during Compression of Rocks, Geological Society America Bulletin, Vol. 74, pp. 487-490, 1963.
- 17) T. J. Fowler: Experience with Acoustic Emission Monitoring Chemical Process Industry Vessels, Progress in Acoustic Emission III, The Japanese Society of NDI, pp. 150-162, 1986.
- 18) コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法,(社)日本非破壊検 査協会, NDIS2421, 2000.
- 19) X. Luo, H. Haya, T. Inaba, T. Shiotani and Y. Nakanishi: Damage evaluation of railway structure by using train-induced AE, Construction and Building Materials, 18, No. 3, pp. 215-223, 2004.
- 20) 羅休, 羽矢洋, 稲葉智明, 塩谷智基, 中西康博: AE 法による鉄道橋梁下部工の損傷調査 法に関する実験的検証, 鉄道総研報告, Vol. 17, No. 3, pp. 29-34, 2003.
- 21) 津村紀子, 阿部信太郎, 青柳恭平: 稠密微小地震観測データに基づく Q 構造の推定-鳥取県西部地震震源域を例として-, 土木学会地震工学論文集, 27 巻, 340, pp. 1-5, 2003.
- 22) H. K. Chai, S. Momoki, Y. Kobayashi, D.G. Aggelis and T. shiotani: Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound, NDT and International Non Destructive Testing and Evaluation, Vol. 44, No. 2, pp. 206-215, 2011.
- 23) T. Hashida and K. shimazaki: Determination of seismic attenuation structure and strength by inversion of seismic intensity data: Method and numerical experiment, J. Phys. Earth, 32, pp. 299-316, 1984.
- 24) 中村亮一, 島崎邦彦, 橋田俊彦: 震度データトモグラフィによる日本列島下の3次元減衰構造および広域地震予測, 地震2,47,pp21-32,1994.
- 25) 井上達雄: 損傷力学とはなにか, The Society of Material Science, 1985.
- 26) T. A. Whitehurst: Evaluation of concrete properties from sonic tests, ACI Monograph No. 2, 73, 1966.
- 27) T. Shiotani, D. G. Aggelis: Wave propagation in cementitious material containing artificial

distributed damage, Springer, Material and Structures 42, pp. 377-384, 2009.

- 28) D. G. Aggelis, N. Tsimpris, H. K. Chai, T. Shiotani and Y. Kobayashi: Numerical simulation of elastic waves for visualization of defect, Construction and Building Materials, in print.
- 29) T. Shiotani, S. Yoshimi, T. Kamada, H. Ohnishi, S. Momoki and HK Chai: Visualization of fatigue damage for concrete bridge deck with stress wave techniques, Engineering Technics Press, Structural Faults and Repair 2010, 13th International Conference and Exhibition, CD-ROM, 2010. 30) T. Shiotani, D. G. Aggelis and O. Makishima: Global monitoring of concrete bridge using acoustic emission, Acoustic Emission Group, Journal of Acoustic Emission, Vol. 25, pp. 308-315, 2008.
- 31) M. J. Sansalone and W. B. Streett: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997.
- 32) D. G. Aggelis and T. Shiotani: Effect of inhomogeneity parameters on wave propagation in cementitious material, ACI, ACI Materials Journal, Vol. 105, No. 2, pp. 187-193, 2008.
- 33) M. F. Kaplan: The effect of age and water/cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength, Mag. Con. Res, Vol. 11, No. 32, pp. 85-92, 1959.
- 34) A. Van Hauwaert, J. F. Thimus and F. Delannay: Use of ultrasonics to follow crack growth, Ultrasonics Vol. 36, pp. 209 217, 1998.
- 35) S. Popovics: Analysis of the Concrete Strength versus Ultrasonic Pulse Velocity Relationship, Material Evaluation, Vol. 59, No. 2, pp. 123 130, 2001.
- 36) 岡田清, 六車熙: 訂新版コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 520-530, 1981.

謝辞

本論文を締め括るに当たり、本研究にご協力いただいた方々やお世話になった方々への 感謝の意を表したいと思います.

京都大学大学院工学研究科教授・大津宏康先生には、学部 4 回生の時から 3 年間にわたりご指導頂きましたことを心から感謝いたします。「若者は海外へ飛び出せ」という強いメッセージを頂き、私が将来の仕事や生活を考える上で、今でもこの言葉が軸となっています。また 4 回生、M2 の時は、研究室の中間発表で様々なアドバイス、ご指摘を頂きました。2~3 週間に一回と、多くの中間発表の機会を頂けたことで、その度学生同士で士気を高めあいながら研究に励むことができました。私は 3 回生の時に大津先生の授業を受講し、その時に大津研究室に入ろうと決意をしましたが、その決意は正しかったものと確信しています。心よりお礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科准教授・塩谷智基先生には、公私にわたり大変お世話になりました。エジンバラや熊本での国際学会の発表機会をいただいたことは、本当に貴重な体験となりました。また、私が研究発表や論文作成で何度失敗しても、厳しくも前向きな言葉で背中を押して頂いたことで、何事にも精一杯取り組むことができました。そして、何より研究、実験、エジンバラでの発表や食事会、飲み会など先生との思い出は私の中に今でも残っており、常に楽しく、そして有意義な時間でした。心より感謝しております。

京都大学大学院工学研究科助教授・稲積真哉先生には学部の1回生の頃からチューターとしてお世話になりました.研究室に入ってからも,研究に関してご指摘を頂いたり,飲み会でおもしろく興味深いお話を聞かせて頂きました.心よりお礼申し上げます.

飛島建設株式会社の桃木昌平様と蔡華堅様には、実験の際には様々な計測法や計測器機の取り扱いなど教えて頂き、また度重なるメールでの質問にも丁寧に答えて頂き、誠に感謝しています。また、社会人という立場から様々な興味深いお話を聞かせて頂きましたことを心より感謝しています。

財団法人東海技術センターの奥出信博様には、実験やミーティングで研究に関して多く のことを教えて頂きました。また、静岡での実験や、公私にわたり相談に乗ってもらった ことは貴重な思い出として私の中で残っています。

Chaleiwchalard Nipawan さんには研究やその他様々なことに関してお世話になりました. 特に、英語での発表練習には何度も付き合って頂き、やさしくご指導頂いたことは誠に感謝しています.

京都大学大学院工学研究科土木施工システム分野の同回生のおかげで、非常に有意義な

研究室生活をおくることができました. 谷澤君とは一緒に激励しあった卒業論文のことが 思い出されます. 米澤君が M1 のはじめに研究室に入ってきてくれたことで, 研究室の雰 囲気が明るくなり, 時には笑いに包まれることもありました. 幹君とは, 隣の席で過ごせ たことでよい刺激になり, また幹君のがんばっている姿にいつも私自身励まされていたよ うな気がします. それぞれ, 社会人になって違う道に進みますが, 共にがんばっていけた らと思います.

京都大学大学院工学研究科土木施工システム分野の大川淳之介君,川合良治君,後藤基芳君,磯田隆行君,岩本勲哉君,太田康貴君,木許翔君,古賀博久君のおかげで非常に楽しい研究室生活をおくることができました。修士一回生には,飲み会,研究室旅行,野球大会など様々なイベントを企画して頂き,また研究室の雰囲気を盛り上げて研究と息抜きのメリハリがついたと思います。学部の4回生とは共に発表や論文に取り組み,4回生のがんばっている姿に私自身多くの刺激を受けました。研究を共にした後藤君と岩本君には,実験や解析に協力して頂き,時には深夜遅くまでの作業でも,いやな顔一つせずに笑顔で手伝ってくれたことは本当に助けにました。本当に感謝しています。

最後に、研究に関わって頂いたここに書ききれないほどの方々や人生を共にした友人、そ してこれまで人生を支えてくれた家族にあらためて感謝の意を示します.本当にありがと うございました.