高度化した AE トモグラフィ法による 構造物の損傷評価に関する一提案

平成 24 年 3 月 2 日

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 後藤基芳

# 要旨

近年、我が国では高度経済成長期などの時期に建設された膨大な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必要不 可欠となっている.維持管理を行う上で,構造物の変状が小さい段階で補修・補強を行 う予防保全の考え方を用いた戦略的な維持管理が重要となっているが、費用を抑える手 法として、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 速度トモグラフィ法を提案する. 本手法は AE 波を用いて速度ト 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. また, 作成したプログラムは位置 標定とトモグラフィ解析を同時に行うことで計測対象内部の速度構造を反映した位置 標定を行うことができる、本研究ではまずコンクリート材料に焦点をあて、破壊が局所 的に生じず、離散分布した各繊維で分散して生じることが期待される繊維補強コンクリ ートの押抜きせん断試験を対象に本手法を適用した. その結果, 試験体内部の損傷を推 定することが可能であり、本手法が損傷評価手法として有用であることが示された。ま た, プログラムの検証や実験で, 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	4
第2章 弾性波を用いた計測技術	6
2.1 AE 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
2.1.4 AE 位置標定	. 14
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	. 19
第 3 章 AE トモグラフィ法	21
3.1 AE 速度トモグラフィ	.21
3.1.1 改良プログラムの位置標定	. 22
3.1.2 改良プログラムのトモグラフィ解析	. 23
3.2 プログラム検証	.24
3.2.1 位置標定の更新	. 26
3.2.2 発信数と波線密度	. 27
3.2.3 AE 源標定位置の偏在	.33
3.2.4 発信位置に対する影響	. 37
3.2.5 位置標定に関する検証	. 41
3.2.6 プログラム検証のまとめ	. 43
第 4 章 擬似 AE 能動発信試験	45
4.1 試験概要	.45
4.2 位置標定に関する検証	.49
4.2.1 2 次元と 3 次元の比較	. 49
4.2.2 しきい値と AIC の比較	. 50
4.2.3 波形の信頼性指標	. 56
4.3 まとめ	.57

第5章 繊維補強コンクリートの押抜きせん断破壊	試験59
5.1 試験概要	59
5.2 試験結果と AE トモグラフィの適用	62
5.2.1 試験結果	62
5.2.2 AE トモグラフィ解析	66
第 6 章 結論と今後の展望	83
参考文献	86
謝辞	89

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

我が国では、戦後の復興期から高度経済成長期にかけて、数多くの社会資本が設備された.したがって、図 1-1 <sup>1)</sup>に示すように、供用 50 年を経過する土木構造物は今後、一気に増加する.これら数多くの土木構造物を維持管理していくにはこれまで以上の多額の予算が必要になるが、図 1-2 <sup>2)</sup>に示すように、我が国の建設投資額は 1990 年代をピークに減少の一途を辿っている.また、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災(東北地方太平洋沖地震)の復興に多大な予算が必要となるため、今後我が国の維持管理にかけられる予算が圧迫される可能性もある.このように、新たに社会資本を建設する時代から今ある社会資本を更新・維持管理していく時代に変遷しているにもかかわらず、建設投資額が減少している背景を踏まえると、土木構造物を効率的に維持管理し、維持管理費を可能な限り最小限に抑える戦略的な維持管理手法が必要不可欠となっている.

我が国の社会資本に数多く利用されているコンクリート構造物においても,維持管理に関する同様の問題をかかえている. コンクリート構造物の問題の例としては,橋梁では図1-3 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・はく落などがある. これは,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し,現在の点検手法に改良の余地があることを示唆している. また,今後,膨大な土木構造物が老朽化することを踏まえると,図1-3に示すような小規模の事故だけではなく,崩落事故につながる大規模な事故が生じることが懸念される.

土木構造物の中でも橋梁に着目すると、橋梁の点検は主に目視や音から得られる情報を用いて性能を判定している。例えば、点検項目としては、鋼部材の腐食や亀裂、定着部の異常などがあり、コンクリート部分では、ひび割れや剥離・鉄筋露出、漏水などがある。コンクリート床版の疲労損傷に関しても、最も簡便であり最も広く実施されている点検方法は目視点検である。これは「ひび割れ法」と呼ばれるもので、コンクリート床版下面のひび割れ進展方向やひび割れ密度などのひび割れ特性から劣化度を判定する手法である。しかし、コンクリート表面の情報がコンクリート内部の状況を必ずしも反映しているとは限らない。図 1-4 は実際に使用された床版を切り出したものであるが、中央部分に水平クラックが入っている。このような内部の情報を表面の情報から得ることは実務上非常に困難である。

仮に構造物の劣化度を正確に判断することができれば、予防保全に大きく寄与することができる。予防保全とは、構造物の劣化が顕在化してから対策を行う事後保全とは対照的に、構造物の劣化が顕在化する前の段階で補修・補強を行うことである。劣化が顕在化する前に補修・補強を行うと初期の維持管理費用は事後保全よりも多くかかるが、構造物の

長寿命化を図ることができる.その結果,構造物にかかるライフサイクルコストを小さくすることが可能であり <sup>4)5)</sup>,年々建設投資額が減少している我が国にとって予防保全は重要な概念といえる.実際に青森県は橋梁アセットマネジメントを導入し,50 年で約 700 億円もの維持管理費を削減できるという試算がなされている <sup>6)</sup>.そこで対象構造物の劣化度を正確に診断できる手法が確立されれば,予防保全に貢献することができるが,膨大に建設された構造物の損傷度を正確,かつ効率的に計測できる手法は現在のところない.以上を背景に膨大な数存在する土木構造物を効率的かつ簡便に計測する技術が強く求められている.

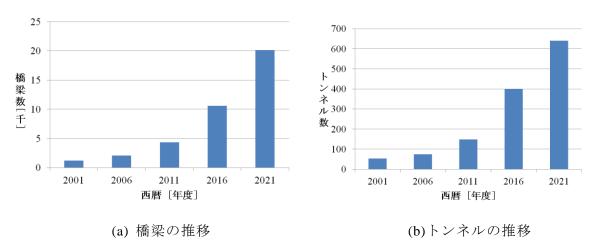


図 1-1 建設後 50 年以上が経過した橋とトンネルの数の推移

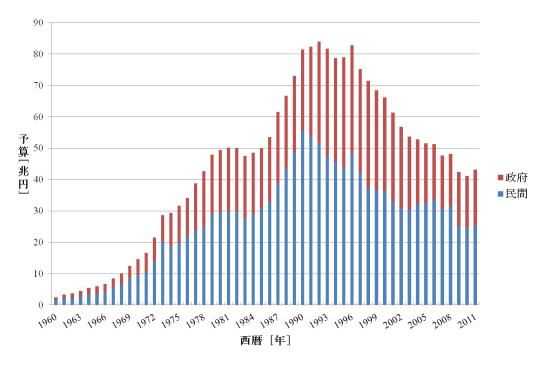


図 1-2 建設投資額の推移



(a) 床版の抜け落ち



(b) コンクリート片の欠落

図 1-3 橋梁の損傷事例



図 1-4 床版中央部の水平クラック

# 1.2 既往の研究

現在,構造物内部の情報を得るために超音波法や赤外線サーモグラフィ法,電磁波レーダ法など様々な非破壊検査手法が施行されている.本研究ではその中でも小規模な破壊にも敏感であり,かつ対象破壊規模を用いる周波数により変更可能な AE 法と弾性波トモグラフィ法に着目する.2 章においてその概要を述べるため,本節ではそれぞれの適用事例に関して述べる.

AE 法を橋梁の健全性評価に適用した研究として,塩谷ら<sup>6)</sup>は車両の走行荷重により道路 床版内から AE 波を誘発させ,その AE 波を利用して床版の劣化について検討した.また,羅ら<sup>7)</sup>は供用中の列車荷重により鉄道橋梁の損傷部から誘発した AE 波を利用し,橋梁下部工に適する経済性と信頼性の優れた震害検査法を考案した.AE 法の解析手法としては,収録した波形から AE 源の位置や AE ヒット数,エネルギーや周波数成分などのパラメータを抽出し,その場所や変化から構造物内部で相対的に劣化が進行している領域を推定した. AE ヒット数や荷重の関係を用いた解析手法としては, Calm 比や Load 比を組み合わせて劣化の程度を推定する手法が提案されている<sup>8)</sup>.また,大津ら<sup>9)10)</sup>は AE 計測で収録し

た波形をもとにモーメントテンソルを用いた SiGMA 解析によりクラックの発生挙動を推定する手法を提案している。AE はミクロ的損傷に対応して生じる弾性波であるが,一方で AE 計測では比較的大規模な損傷をターゲットとした損傷範囲のスクリーニングが低周波をターゲットとして実現できる。この場合センサ間隔を大きく設定しても弾性波の収録が可能であるため,AE 計測は対象物のマクロ的評価にも利用できる。より定量的に損傷評価を行うために Calm 比と Load 比を改良した i-Calm 比や i-Load 比も新たに考案されている  $^{11}$ ).

一方,広範囲の対象領域を有する AE 計測であるが、二次 AE 発生源が得られた位置のみでしか破壊(損傷)位置が判断できない。つまり、既存の損傷位置で二次 AE が発生しない場合は損傷が評価できないという限界がある。そのため、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 <sup>12)13)</sup>は、道路橋床版やダムなどの土木構造物に対して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から、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。トモグラフィ解析では、セルを通過する弾性波の波線が密であるほど解析精度が高くなることから、限られたセンサの数ではセンサ配置を広範囲にできず、広範囲の計測を行うには多数のセンサ設置、もしくは複数回の計測が必要となる。さらに、能動的な弾性波の励起が必要であるため、実構造物への適用には多くの課題がある。

#### 1.3 研究の目的

本研究では、上述の AE 法とトモグラフィ法の利点を活用し、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、トモグラフィ解析で行う能動的な弾性波励起の代わりに構造物内部から励起される AE 源を用いてトモグラフィを行う計測手法である. この利点は、AE 法のセンサ配置を利用して人工的弾性波励起なしでトモグラフィ解析ができる. 加えて、利用する AE 源が増加することで利用できる波線が増加することから、利用する AE 源の数に比例して解析精度が向上するものと考えられる. トモグラフィ解析には弾性波速度を用いる場合と弾性波の振幅などエネルギーの減衰を用いる場合があるが、本研究では弾性波速度を利用した AE 速度トモグラフィに関して検討を行う. AE 速度トモグラフィを検討するにあたり、まず本研究では作成したプログラムを検証する. そして、室内試験への適用性を検討し、AE 速度トモグラフィの実用性について検討を行い、最後に今後の課題、および改良点を明確にする.

#### 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、弾性波の波形パラメータや、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、本研究で新たに考案する AE 速度トモグラフィのプログラムの概要とその 検証を行うとともに、必要な入力情報や条件について検討を行った.

第4章では、健全供試体の下面にセンサを平面に配置し、その対面から擬似 AE を能動的に発信し、3次元的な位置から発生する AE 源を2次元位置標定によって推定する場合の影響と、その AE 源を利用する AE トモグラフィ結果を考察し、またしきい値を用いた初動読み取り手法とAICを用いた初動読み取り手法の比較を行うことで初動読み取りの精度向上についても検討した。

第5章では、破壊が広範に及ぶであろう繊維補強コンクリートの押抜きせん断試験の AE 計測を行い、 AE 速度トモグラフィを適用した.

第6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 弾性波を用いた計測技術

弾性波を用いた計測技術を大きな枠組みでとらえると、AE 法、超音波法、衝撃弾性波法、弾性波トモグラフィ法、打音法など様々な種類がある. その中で、本章では3章で示す AE トモグラフィ法の基礎理論を構成する AE 法と弾性波トモグラフィ法に関しての概念、基礎理論、計測器機、および特性パラメータやこれまで提案、実施されてきた種々の解析手法について述べる.

## 2.1 AE 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」となり、この音響の放出は物体の破壊や変形に起因する。ここで実際の破壊の現象を考えると、まず微小なレベルの破壊があり、それらが集積されて最終的な大規模な破壊に至る。AE はそもそも破壊の予知に適用しようと注目されたものであるため、AE を正確に定義すると「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」といえる <sup>14)</sup>. AE 法が適用されている分野は金属分野、岩盤および地震学の分野、コンクリート分野などにおよび、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り先述のような幅広い適用範囲からもわかるように、微小破壊が問題となる材料には何にでも適用可能であると言える。また近年では、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特に注目されている。

# 2.1.1 AE 計測の基本原理

AE 法の計測は原理的には図 2-1 に示すような計測装置で検出される. AE 現象により生じる物質内を伝播してきた弾性波は、表面に接着された AE センサによって検出され、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. 弾性波の計測対象域としては、通常音声周波数以上の超音波領域(数 10 kHz~数 MHz)となる. この AE 検出器出力は、前置増幅器によって信号増幅とインピーダンス変換が行われ、フィルタにかけて低周波の外部雑音を除去した後に主増幅器で再び増幅され検出されるか、もしくは前置増幅器・主増幅器で増幅させ帯域通過型フィルタでろ過されて検出される. 総合的な増幅度は計測対象によって異なるが、40 dB から 120 dB 程度の増幅度が用いられる. 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 μV-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.

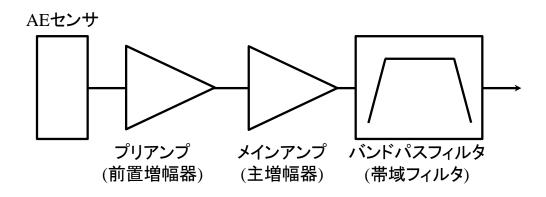


図 2-1 基本的な AE 計測装置

## 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が、一般的に PZT などの圧電素子からできている。AE センサは、ある特定の周波数で高感度となる共振型と広い周波数範囲で一定の感度を有する広帯域型の AE センサがある。共振型は検出素子の機械的共振を利用して特定の周波数に高感度を得るが、広帯域型は AE センサの検出素子 (PZT) の上にダンパー材を貼りつけて、圧電素子の共振性を押さえこみ、広い帯域で一定の感度を得る。しかし、広帯域である代わりに共振を押さえこんでいるため感度は共振型と比較して低くなってしまう。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 15)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室内実験で用いる供試体規模から実橋梁など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 計測でも同じように必要となる. 小振幅の AE は、雑音レベルが高いとそのレベルの中に埋もれてしまうので検出の際はできる限り雑音レベルを低くおさえる必要がある. 前置増幅器は、AE 計測系のノイズレベルを定める重要なパーツであり、通過帯域幅を狭くすることで S/N 比 (増幅信号の振幅に対する雑音レベルの比)を良くすることができる. また、入力インピーダンスが大きく出力インピーダンスが小さいため、AE センサからプリアンプまでの距離が長くなると得られた信号電圧が小さくなる. したがって、AE センサとプリアンプの距離は短くする必要があり、前述したアンプ内蔵型のセンサも市販されるようになっている. このように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入力インピーダンスの大きなプリアンプで受けた後は、メインアンプで増幅する必要がある.

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.

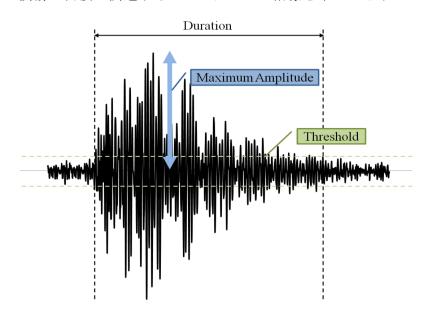


図 2-3 AE 波形

# (a) 弾性波の伝播挙動 <sup>16)</sup>

3 次元の弾性体に加わる応力  $(\sigma)$ は、 $\mathbf{Z}$  2-4 に示すように、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ を垂直応力、 $\tau$  をせん断応力とすると式(2.1)のように表される.

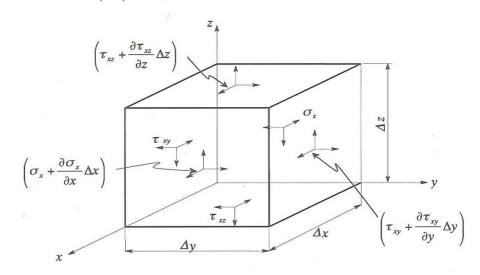


図 2-4 3 次元座標と応力

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{x} & \boldsymbol{\tau}_{xy} & \boldsymbol{\tau}_{xz} \\ \boldsymbol{\tau}_{yx} & \boldsymbol{\sigma}_{y} & \boldsymbol{\tau}_{yz} \\ \boldsymbol{\tau}_{zx} & \boldsymbol{\tau}_{zy} & \boldsymbol{\sigma}_{z} \end{bmatrix}$$
(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 $(\sigma)$ 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.

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

$$\rho \frac{\partial^{2} v}{\partial t^{2}} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{y}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}$$
(2.3)

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}$$

ここで、u、v、wはx、y、z方向の変位であり、 $\rho$ 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( $\lambda$ , $\mu$ )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.

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

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

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w$$
(2.7)

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

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 $\lambda$ と $\mu$ 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  $\rho$ 、およびポアソン比 $\nu$ 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

収録波形の中で最も大きい振幅を指す.この振幅は計測状況によって変化する様々な波のモードのエネルギーに起因する.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.この指標は減衰トモグラフィを行う上で重要な指標といえる.

#### (d) Duration

#### (f)カウント数

しきい値を超えた AE 波の振動回数を指す.事象の振幅の重み付けとしての意味をもつが, AE 波形は伝播媒体, AE センサの周波数特性に大きな影響を受けるため, カウント数もこれらに強く依存する. AE 発生個所および計測個所が同じ場合には, カウント数の大小は破壊規模を反映したものと考えられる.

#### (e)エネルギー

AE 計測機器により定義が異なり、AE の包絡線検波波形の面積、AE 波形の積分値、あ

るいは最大振幅の2乗などとされる.発生したAE事象のエネルギーを相対的に比較するには最適パラメータである.一般にはカウント数と類似した発生傾向を示すが、機器の分解能により異なる傾向を示す場合がある.

#### (g)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.

### 2.1.4 AE 位置標定

AE 法を用いることで得られる重要な情報の一つに AE 源の位置情報がある. AE 源の位 置標定には種々の手法があり、計測対象材料が等方均質である場合、縦波の運動方向と AE 源の方向が一致し、縦波・横波間の到達時間差が AE 源までの距離に対応することを利用 する手法がある. しかし, このような単一センサによる標定法では高度な信号処理や複雑 な計測が必要となるため、特殊なケースに限られている.基本的かつ一般的な手法として 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、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は、通常包絡線検波波形を用いる、その中 でも、計測時に設定したしきい値を最初に超えた時点を到達時刻とする方法が一般的とな っている. ここで注意すべきは、外部雑音が大きい場合、しきい値を高く設定する必要が あるが, AE 信号が微弱であると P 波初動振幅値が小さくなるため AE 波形がしきい値を超 過する時刻がP波初動と一致せず、P波以降のエネルギーが大きいS波や表面波などを誤 検出する可能性がある. したがって, 本試験の計測を行う前に, 計測環境を考慮した外部 ノイズのみの計測を行い,適切なしきい値をあらかじめ考慮する必要がある.また,近年 では、しきい値を用いる手法以外にも、受信波形の初動を自動で読み取る技術の研究が進 み,元々は統計モデルの良さを評価するための指標である AIC <sup>17)</sup>(Akaike Information criterion) を用いた手法などが提案されている. AIC を用いる場合に注意する点としては, 高精度を保つためには S/N 比が良い必要があることである. 本研究では, 一般的な AE 計 測の場合,収録する波形の数が膨大となることから自動読み取り手法に着目し,一般的な しきい値を用いる位置標定と AIC を用いた位置標定の精度検証を 4 章で行い両者を比較す ることとした.

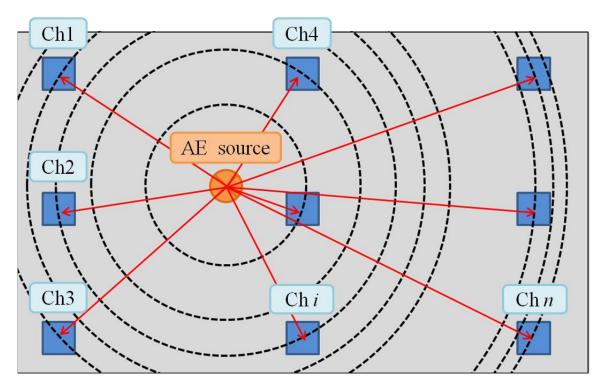


図 2-5 AE 信号到達時間差法の原理

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、 $L_i$ 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、それぞれの係数は以下のようになる.

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

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

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

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

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

 $T_{i-1}$  (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.また,求める未知数よりも方程式の数が多くなる場合,最小二乗法を適用して最終的な位置標定を行う.

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.

既往の位置標定は対象材料内部の速度構造を一定と仮定して標定を行うが,実際に計測の対象となる構造物には様々な材料が使用されている.最も一般的で大量の構造物に使用されているコンクリート材料を例にすると,コンクリート材料はセメント,細骨材,粗骨材および水が練り混ぜられており,骨材に偏りが生じた場合は構造物内部の速度構造が均一にならず,速度の異方性が生じる.また,構造物を供用する過程で損傷が生じた場合,損傷領域の速度構造が低下することが知られている.加えて,コンクリート構造物のほとんどが鉄筋を有しており,鉄筋内の弾性波速度はP波で約6000 m/s であるので,鉄筋コンクリートの場合は構造物内部の速度構造は異方性を有している.したがって,位置標定にはある程度の誤差を含む可能性があることを考慮する必要がある.本研究では,既往の位置標定の他に,3章において,新たに内部の速度構造が一定でない場合にも適用できる新たな位置標定手法を提案する.

## 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説する. 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 <sup>18)</sup>トモグラフィは、調査断面、もしくは調査空間を複数のセルに分割し、調査対象内部の速度構造をセルごとに求めることで内部の損傷領域を検出するという手法である. 具体的な手法としては、ハンマやパルサーを用いて複数配置したそれぞれのセンサ近傍において弾性波を励起し、そのセンサで収録された受信時刻を弾性波の発信時刻とみなすことで弾性波の発信時刻を既知とする. このように、弾性波の発信時刻と受信時刻が既知である多数の波線を調査領域に透過させる. 次に、セル内の伝播速度が一定であると仮定し、そ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る. 最終的には調査領域の内部構造を 2 次元あるいは、 3 次元の速度分布として求め、内部の不均質性や損傷を推定する. 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、およびセルの領域情報を

入力する. さらに計測で得られた発信時刻と各センサでの受信時刻に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(伝播速度の逆数)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、ひび割れなどの空隙が存在する場合、波動は屈折または回折することで伝播時間が最短となる経路を通過する. 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. また、この繰り返し計算には同時反復法(SIRT)を用いた. 同時反復法に関しては以下に詳述する.

#### ● 同時反復法(SIRT) <sup>19)</sup>

得られたモデルについて求めた理論走時を  $T_{oi}$ 、観測走時を  $T_{ci}$ とすると、その差である 走時残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、ついで、それぞれのセルについて、振り分けられた走時残差と波線がセルを切る長さとを用いて、そのセルのスローネスの補正量を求めるという方式である.

すなわち、式(2.18)に示したように、すべての波線について走時残差 $\Delta T_i$ を求める

$$\Delta T_i = T_{oi} - T_{ci} \tag{2.18}$$

ついで、式(2.19)を用いて、走時残差を波線が通過するセルに振り分ける.

$$\Delta t_{ik} = \frac{\Delta T_i \cdot l_{ik}}{L_i} \tag{2.19}$$

セルkのスローネス補正量 $\Delta S_k$ は

$$\Delta S_k = \frac{\sum_{i} \Delta t_{ik}}{\sum_{i} l_{ik}} \tag{2.20}$$

として求められるから、I回目の反復計算によって求められるセルkのスローネス $S_k$  (I-1) 回目の反復計算によって得られているスローネスを $S_k$  (I-1)とすると、

$$S_k^{(I)} = S_k^{(I-1)} + \Delta S_k \tag{2.21}$$

で求めることが出来る.

## 2.2.2 減衰トモグラフィ法

減衰トモグラフィも、速度トモグラフィが対象領域内部の速度構造を求めることと同様に、対象領域内部を複数に分割した各セルの減衰を求め、その減衰量から調査対象の内部を推定する手法である。各セルの減衰とは、ここでは弾性波の振幅の単位長さあたりの減衰値 (dB/m) を用いてセルの減衰量としている。具体的には、速度トモグラフィと同様にハンマやパルサーによりセンサ近傍で弾性波を励起させるが、この場合は発信時刻ではなく励起させた弾性波の発信時の振幅を利用する。得られた発信の振幅と受信センサで収録された受信振幅を用いて波線の減衰量を算出する。一般的な減衰トモグラフィで取り扱う振幅は収録波形の最大振幅であるが、弾性波を励起させた調査対象の面と受信するセンサが設置された面が同一である場合、受信センサでは P 波、S 波の他に表面波が収録されるため、その表面波の振幅を利用した減衰トモグラフィも可能となる。

速度トモグラフィと減衰トモグラフィのどちらにも言えることであるが、各セルを通過する波線を利用してセルのスローネスもしくは減衰量を算出すること、そして、弾性波の発信位置が設置したセンサ近傍でないといけない事がいえる、このことから、センサ間隔を AE 計測よりも狭くとる必要がある. 仮にセンサ間隔を広くとると、波線が通過しないセルが生じる、もしくはセルを通過する波線が減少することで精度が担保できなくなる事が考えられる. したがって、同一センサ数では、AE 法よりもトモグラフィ法の方が一度に計測できる範囲が小さくなることに留意する必要がある.

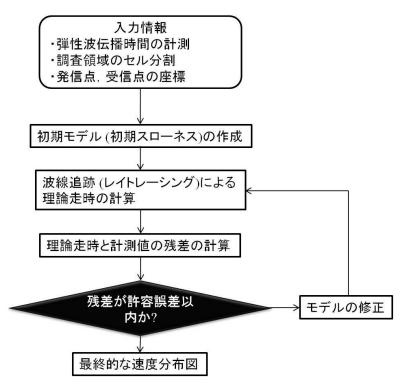


図 2-6 速度トモグラフィの解析の流れ

# 第3章 AE トモグラフィ法

先述したように、弾性波トモグラフィには、内部の速度構造を用いる速度トモグラフィと内部の弾性波減衰量を用いる減衰トモグラフィがある。したがって、AE トモグラフィでも AE 速度トモグラフィと AE 減衰トモグラフィがある。ここでは、本研究で取り組んだ AE 速度トモグラフィについて検討を進める。AE 速度トモグラフィ解析を実施するにあたり、本研究では新たに AE 源の位置標定と速度トモグラフィを同時に実行可能なプログラムを作成した。そのプログラムに用いた理論を概説した後に、本プログラムの検証を行う上で、必要な入力情報の条件に関しても検討を行う。

## 3.1 AE 速度トモグラフィ

本節では、新たに取り組んだAE速度トモグラフィ法<sup>20)21)22)</sup>の概要と基礎理論を述べる. AE 速度トモグラフィも先述した速度トモグラフィも基本的な考えは同じであるが、AE 速度トモグラフィの場合は、能動発信ではなく対象物中でのき裂の発生、あるいは既存き裂同士の摩擦などで発生する AE 源から受信センサまでの波線を利用してトモグラフィ解析を行うことになる. ここで、速度トモグラフィには発信源の時刻が必要であるが AE 源は位置標定によって推定されるものであるため、AE 源の発信時刻が未知となる. したがって、AE 源の発信時刻の推定が必要となる. しかし、既往の AE 源位置標定は内部の速度構造が一定と仮定して解析するため、その標定された AE 源を用いてトモグラフィを行っても内部の速度構造は一定という結果となるか、もしくは位置標定の際に生じる誤差を含む速度構造が出力されるものと考えられる. そこで、本研究では、位置標定とトモグラフィを同時に行うプログラムを新たに作成した. このプログラムの特長は以下の 2 点である.

- I. 位置標定とトモグラフィ解析を交互に行い、位置標定にレイトレーシングを用いる ことで対象内部の速度構造を考慮した位置標定を行い、さらに更新された標定点を 用いてトモグラフィ解析を行うことができる.
- II. 既往の位置標定は発信源に対して1つずつ位置の推定を行うが、本プログラムでは、 複数の発信源を同時に推定する.この理由としては、複数の発信源を用いることで 多数の波線を利用して対象内部の速度構造を更新させる必要があるからである.

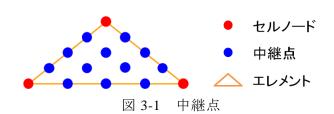
以下に、本プログラムの位置標定手法とトモグラフィ解析手法に関してそれぞれの概要 を述べる.

# 3.1.1 改良プログラムの位置標定

既往の AE 源の位置標定手法は記述のとおりであるが、本プログラムは供試体に位置標定点の候補となるノードを設定し、計測結果からの最尤のノードを位置標定点とするアルゴリズムとした。ここで、プログラムに必要な入力情報としては、以下の情報となる.

- ① 受信点の位置データ
- ② 標定点候補のノード
- ③ 観測データ(センサ間の受信時間差)
- ④ 調査対象内部の速度構造

ここで、②のノード設定には、後に行われる速度トモグラフィで用いるセル(エレメン ト)と『中継点』という概念を用いる.既往の速度トモグラフィは,セルを設定するため にノードを決定するが,本研究の位置標定では標定点の候補としてノードを利用するため, ノードを細かく設定する必要がある.しかし、ノードを細かく設定すると、トモグラフィ 解析を行うときの1つのエレメントが小さくなる.これはトモグラフィの分解能が高くな ることを意味するが、エレメントが小さくなることで2つの問題点が生じる.1つ目は、1 つのエレメントを通過する波線の数が少なくなる, もしくは通過する波線がなくなること によりトモグラフィ解析に供せないエレメントが生じ、結果として精度低下を引き起こす ことが考えられる.したがって,トモグラフィ結果の精度を保持するためには最適なセル サイズを決定する必要がある. 2 つ目は、エレメントの数が多くなると計算量が増えるた め、長い計算時間を招くことである、以上の問題を解決するために、セルの設定はこれま でと同様にセルを決定するノード(本研究ではセルノードと名付ける)で行い,セル間隔 を分割する中継点を設定する、中継点を複数設定すれば分割数は多様に決定でき、例えば 分割数を 4 とする場合、図 3-1 のような中継点が設定される. このセルノードと中継点が 求めるべき位置標定点の候補となる. 以下セルノードと中継点をまとめてノードと称する こととする.



次に、位置標定手法について図 3-2 のようなセンサを n 個用いたノードを m 個有するモデルの場合を例とする. まず、ある特定のノード i から発信した弾性波をセンサ j で時刻  $t_j$  に受信するための "ノード i を発信するべき時刻  $T_{ij}$ " を内部の速度構造を考慮して算出する. この作業を全てのノードで試行し、各ノードでセンサの個数が n 個の推定発信時刻 T が算出される. この発信時刻の推定にはレイトレーシングを用いる. その概要を以下に

述べる.

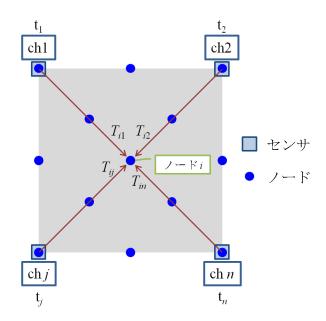


図 3-2 発信点の推定

まず、そのステップの速度構造において受信点から全てのノードに波を出し、発信点からの走時を計算して、その走時の値と波の射出方向の値とをそのノードに記憶させる。ついで波が到達した全てのノードから他のノードに波を出し、発信したノードから到達したノードの走時を求める。以前の計算の段階でそのノードにすでに波が到達しておれば、両方の走時が比較され、小さい方の走時がそのノードの走時として採用される。このような作業を繰り返し、その中で最短の走時を得た波線を用いる。次に、センサの数だけ求められた推定発信時刻の分散を式(3.1)で全てのノードについて計算し、得られた分散が最も小さいノードを標定点とする。

$$s_T^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - \overline{T}_i)^2$$
 (3.1)

ここで $S_T^2$ は分散,nはセンサ数, $T_{ij}$ は観測値,Tは観測値の平均値である.

# 3.1.2 改良プログラムのトモグラフィ解析

AE トモグラフィで用いる手法は 2 章で説明した既往の速度トモグラフィと基本的には同様であるが、異なる点としては、発信点に上述した位置標定で求めた AE 源を用いることである。前述したように、AE トモグラフィでは発信源の発信時刻が未知であるため発信時刻を推定する必要がある。この発信時刻は、位置標定の過程でセンサの数n個分得ら

れた T の平均値とした.

その標定位置と発信時刻,そして対象内部の速度構造とレイトレーシングを用いて理論 走時を求める.また,発信時刻と各センサの受信時刻を用いて観測走時を求め,その残差 とセルを通過する波線から同時反復法を用いて繰り返し計算を行う.

改良プログラムでは上述した位置標定とトモグラフィ解析を交互に行う仕組みになっている。まず、初期に入力したスローネスで位置標定を行い、その標定位置と発信時刻を用いてトモグラフィ解析を行う。そうして更新された対象内部の速度構造を用いて位置標定を行い、更新された標定位置と発信時刻を用いてトモグラフィ解析を行う。このように位置標定とトモグラフィ解析を繰り返し計算する。以上を踏まえて図 3-3 に AE 速度トモグラフィ解析の手順を示す。

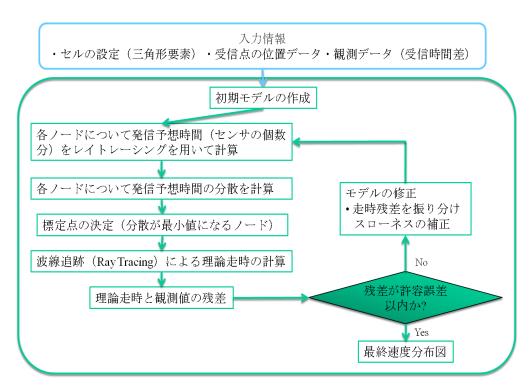


図 3-3 AE 速度トモグラフィ解析のフロー

# 3.2 プログラム検証

本項では作成したプログラムの精度検証を行う.実施項目は以下の通りである.

- A) 位置標定の精度検証
- B) 対象内部の速度構造の推定精度検証

検証にあたり複数のモデルを作成し、そのモデル内の弾性波伝播挙動を考慮して各センサ間の受信時間差を計算する. その弾性波伝播挙動や伝播時間は弾性波伝播シミュレーションソフト Wave2000 (サイバーロジック社製) を用いて算出した. 本ソフトは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(3.2)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

η: せん断粘性係数

(3.2)

 $\varphi$ : 体積粘性係数

▼:勾配演算子

∇•:発散演算子

t:時間

本プログラムは位置標定結果を用いてトモグラフィ解析を行い、トモグラフィ結果を用いて位置標定結果が更新される.このとき、位置標定結果は1つのAE源からの情報のみを扱っているが、トモグラフィ解析は全てのAE源から発生した波線を用いて行うためより扱う情報量が多く、かつ先述したように位置標定結果はトモグラフィ結果に依存する.したがって、検証の優先度としてはトモグラフィ解析が優先されると仮定し、そこで得られた条件を考慮して位置標定の検証を行うことにした.

トモグラフィの精度を検証する上で重要な要素として、セルを通過する波線の長さがある。トモグラフィ解析は先述したように、発信点と受信点間の波線に対して理論走時と観測走時の残差を各セルの切り取り長さに応じて各セルに振り分ける作業を繰り返す。したがって、セルを通過する波線の長さが大きく、本数が多ければ、より精度の高いスローネス推定を行うことができると考えられる。本研究では、セルを通過する全ての波線の長さをセルの面積で除した値を波線密度と定義し、トモグラフィ解析の精度検証に関するパラメータとした。単位は m/m² である。以下、波線密度が変化する条件を考慮して検証を行う。

波線密度が変化する条件としては以下の条件が考えられる.

- (a) 発信点の数
- (b) 発信点の場所

(a)の発信点の数は、その増減によって波線数が増減するため波線密度に直接影響を与える項目であり、(b)の発信点の場所に関しても、場所によって通過するセルと通過しないセルが変化するため重要な項目である.

検証には、まず図 3-4 に示す条件のモデルを用いる。センサは一辺 400 mm の正方形の四隅に配置し、センサに囲まれた 400 mm×400 mm の領域に対してトモグラフィ解析を行うためエレメントは図 3-4 のようにセンサを囲んだ領域を全部で 16 個のエレメントに分割した。このモデルにおいて、白い部分で表わされている領域は健全部分であり、その P 波弾性波速度を 4000 m/sec とした。黒色で表わされている領域は損傷部分を想定して P 波弾性波速度を 2000 m/sec とした。発信点の位置や位置標定結果を示す場合は、ch1 センサの位置を原点とし、ch1 センサから ch2 センサの向きに x 軸、ch1 センサから ch4 センサの向きに y 軸として、位置情報を(x,y)と表示する。波線密度の単位を  $m/m^2$  としているので座標単位も m とした。

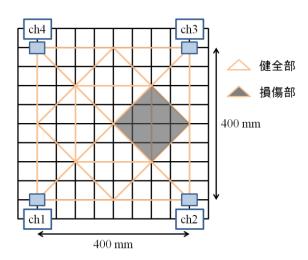


図 3-4 プログラム検証用モデル

# 3.2.1 位置標定の更新

本プログラムが内部構造を反映した位置標定を行うかを確認するために、上述したモデルとは別に図 3-5 のモデルを用いて検証を行った.健全部と損傷部の弾性波速度はそれぞれ 4000  $\mu$ /s,2000 $\mu$ /s と設定し、中継点は 4 とした.発信点は損傷領域の周りに合計 12 点設定した.図 3-6(a)は本プログラムの繰り返し回数を 1 回としたときと 20 回としたときの位置標定結果であり,図 3-6(b)は繰り返し計算回数と残差の関係を示している.この図から繰り返し回数が 1 回のときはわずかではあるが標定誤差が生じたのに対し,繰り返し回数を増やすことで標定点が発信点と同位置になった.この位置標定は繰り返し計算 10 回目で全ての位置標定が正しい位置に更新された.しかし,残差の収束は繰り返し回数が約 20 回以上の場合であるため,残差の収束状況を見て繰り返し計算回数を決定する必要がある

と考えられる.この結果より、繰り返し回数を増やすことにより内部構造を反映した位置標定結果が得られる事が確認され、本プログラムの優位性が証明された.

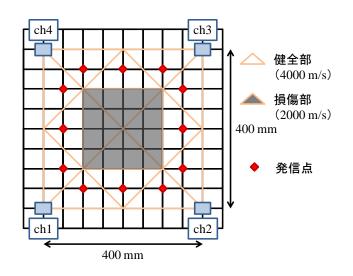


図 3-5 プログラム検証用モデル

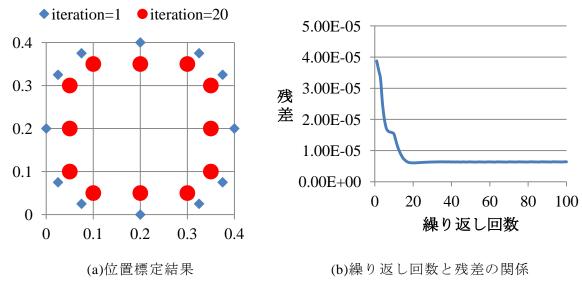


図 3-6 解析結果

# 3.2.2 発信数と波線密度

波線密度の変化要因として,まず発信点数について検討する.図 3-7 に示す位置に発信点を(a)4点,(b)8点,(c)12点,(d)16点と変化させた.図 3-8 には発信点の数ごとの波線を示している.図 3-9 には発信点を変化させて得られたトモグラフィ結果と位置標定結果を示している.ここでプログラムの繰り返し回数を 30 とした.この回数の根拠を以下に示す.図 3-10 に発信点数変化の解析における各繰り返しサイクルの残差を示す.図より判断できるように,いずれの解析でも繰り返し回数が  $20\sim30$  回で残差が収束している.したがって,本解析の繰り返し回数は 30 回までとした.

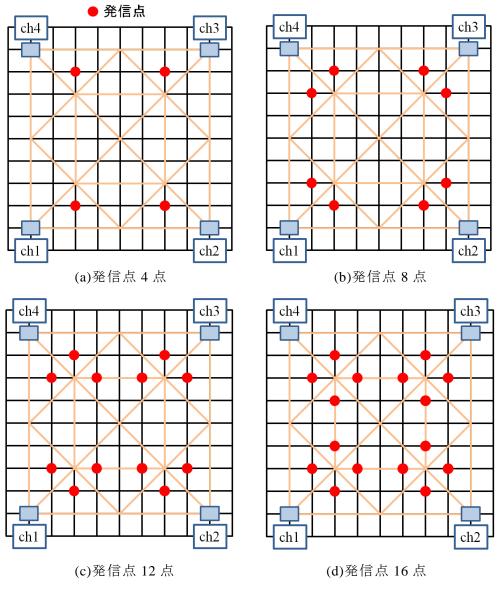
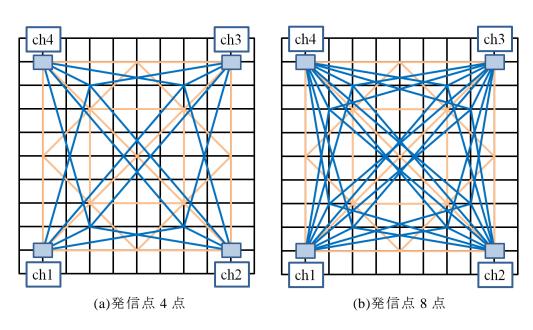


図 3-7 発信点変化と位置



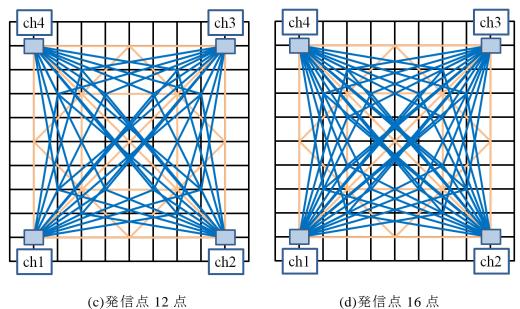


図 3-8 発信個数別の波線

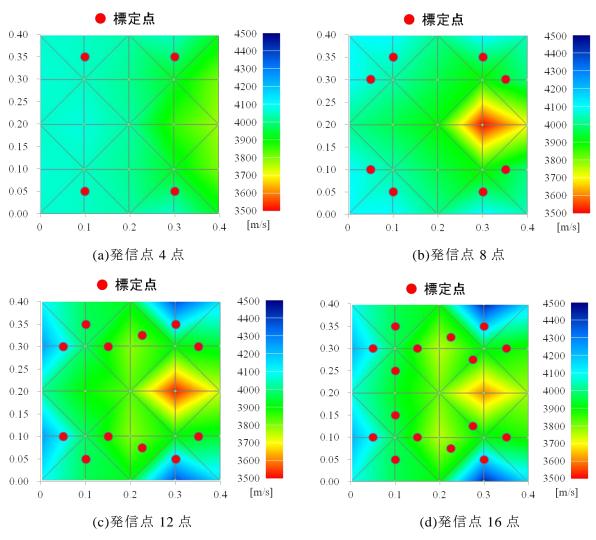


図 3-9 発信点数変化にともなうトモグラフィ結果

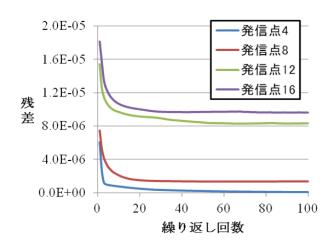


図 3-10 繰り返し回数検証

図 3-9 より、発信点が 4点(a)の場合はモデル右側の領域に若干の速度低下が見られたもののモデル全体が等しい速度に近い速度構造となり、損傷領域での顕著な速度低下は見られなかった。その理由としては、発信点が 4点であるため、絶対的な波線の量が少ないことから設定した条件とは異なるトモグラフィ結果が出力されたと考えられる。したがって、AE 源が少ないと精度の良いトモグラフィ結果が得られないことが確認できた。次に、同図(b)の発信点 8点に関しては、損傷部分に速度低下が見られ、それ以外の部分は 4000 m/s 近傍のほぼ等しい速度となった。これは発信点が 4点から 8点に増加することで波線数が増え、その結果トモグラフィ結果の精度が向上したと推察される。この二つの結果から波線の増加、すなわち AE 源の増加によってトモグラフィ解析精度が向上することが確認された。

次に、図 3-9(c)(d)に示すように、発信点を 12 点、16 点と増加させると、4000 m/s 以上の高速度領域が出現し、同時に損傷領域の速度低下は発信点 8 点の場合に比べて小さくなった.この結果には、位置標定誤差が影響しているものと思われる.つまり、図 3-9(c)では、本来(0.25,0.30)で発信された発信点が(0.225,0.325)で標定され、(0.25,0.10)で発信された発信点が(0.225,0.075)で標定されている.また図 3-9(d)では、(0.25,0.30)、(0.25,0.10)、(0.30,0.25)、(0.30,0.15)で発信された発信点が、それぞれ(0.225,0.325)、(0.225,0.075)、(0.275,0.275)、(0.275,0.125)で標定されている.このように発信点の位置標定に誤差が生じる場合、解析上の波線長さが実際の波線長さと異なるため、理論走時と観測走時の残差に位置標定の誤差の影響が含まれてトモグラフィ解析結果に影響を及ぼすものと考えられる.図 3-9(c)のトモグラフィ結果に生じた影響について具体的に考察する.図 3-9(c)のモデルと発信点条件は上下対称であるため、標定点(0.225,0.325)のずれに関する影響のみ考察する.まず ch3 センサと発信点、標定点との距離を考えると、標定点と ch3 センサとの距離は発信点と ch3 センサとの距離よりも大きい.したがって、トモグラフィ解析で得られる結果

として標定点と ch3 センサの間のセルには設定した速度よりも速い速度構造を有するセルが存在する結果となる. さらに、ch2 センサと発信点、標定点との距離を考えると、ch3 センサの場合と同様に標定点と ch2 センサとの距離は発信点と ch2 センサとの距離よりも大きい. したがって、トモグラフィ結果では標定点と ch2 センサの間には設定した速度よりも速い速度構造を有するセルが生じ、本解析では損傷領域のセルが発信点 8 点の場合よりも速い速度構造を有する結果となっている. また、標定点と ch1 センサとの関係は標定点と ch3 センサとの関係と等しく、トモグラフィ解析結果では標定点と ch1 センサとの間に設定した速度よりも速い速度を有するセルが存在する. このような理由でトモグラフィ解析と設定条件に差異が生じた. 図 3-9(d)のトモグラフィ結果も図 3-9(c)と同様の構造でトモグラフィ結果に影響を与え、損傷領域の速度構造は図 3-9(c)よりも速い速度構造を有する結果となった.

発信点数の変化による波線密度の変化と損傷領域の弾性波速度について図 3-11 に示す. この結果より,発信点が 16 点の場合は少し傾向が異なるが,基本的には波線密度が増加すると損傷領域を弾性波の速度低下として捉えやすくなっている.ここで,損傷領域の弾性波速度は 2000 m/s と設定したが,本解析結果では速度低下が 3500 m/s 程度にとどまっている.この原因は弾性波速度結果にモデルの初期スローネスが影響することが挙げられる.今回の場合初期スローネスに 4000 m/s に相当するスローネスを入力し,それをもとに同時反復法で残差を振り分けているため,損傷領域の速度低下が十分に起こらなかった.したがって,損傷の定量評価には本解析はまだ不十分でありプログラムの改良が必要である.しかし,損傷領域の速度低下は捉えられていることから,現段階でも相対的な損傷領域の特定は可能であると考えられ,この技術をスクリーニング技術として用いることが可能だと考えられる.

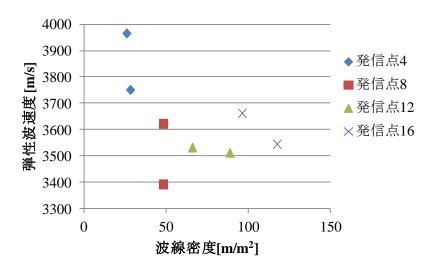


図 3-11 損傷領域におけるセルの波線密度と弾性波速度

次に、全セルの波線密度と弾性波速度の関係を図 3-12 に示す. 前述のように発信点が 4 点の場合は損傷部分のセルは他のセルと比べても大きな速度低下を起こしていないため、発信点は 4 点では不足していることがいえる. 発信点が 8 点の場合は損傷部の弾性波速度は健全部に比べて速度低下が大きく、相対的な損傷領域の特定が可能といえる. 発信点 12 点と 16 点の場合は損傷部の弾性波速度は健全部よりも比較的低速度になっているが、健全部の弾性波速度にも低速度の領域が見られる. これは位置標定の誤差によるものと考えられるが、この詳述は図 3-13 の説明と同時に行う.

ここでトモグラフィ解析結果の誤差を各セルの波線密度と比較する. 図 3-13 はモデル設定時に健全部として設定したセル全ての'波線密度と弾性波速度の関係'を発信点数別に示している. モデルの健全部の弾性波速度は 4000 m/s と設定しているため, 弾性波速度が 4000 m/s に近いほど精度が良いと言える.

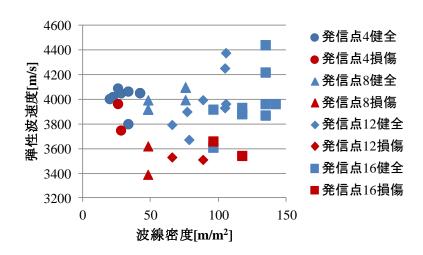


図 3-12 全セルの波線密度と弾性波速度係

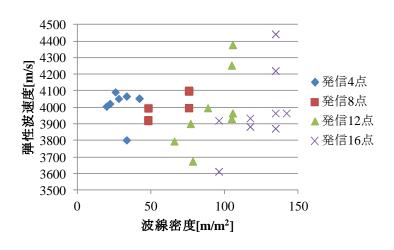


図 3-13 健全領域におけるセルの波線密度と弾性波速度係

まずこの図 3-13 を発信 4 点・発信 8 点と発信 12 点・発信 16 点という二つのグループに分けると、解析に利用した AE 源が正確な位置に標定された発信 4 点・発信 8 点は全体的に弾性波速度が 4000 m/s 付近に集まっており、逆に位置標定に誤差を含む AE 源を用いて解析を行った発信 12 点・発信 16 点は速度のばらつきが大きくなった。また図 3-13 全体からは、これまで一般的に考えられてきた'波線密度が大きくなればトモグラフィの精度が向上する<sup>23)</sup>'という事象が AE トモグラフィの場合は認められなかった。したがって、AE トモグラフィ解析を精度よく行う上で最重要となるのは、多数の AE 源を利用し波線密度を増加させることではなく、正確に位置標定された AE 源を利用することであると思われる。この波線密度が精度向上の最重要項目でないという結論は発信点を未知として実行する AE 速度トモグラフィにのみ適用される事象であり、既往の弾性波トモグラフィには適用されないことに留意したい。

次に、発信 12 点と発信 16 点をそれぞれ個別に分けて検討する. どちらも位置標定に誤差を含む AE 源を利用しているため弾性波速度にばらつきを有しているが、傾向としては相対的に波線密度が小さいと弾性波速度が小さくなり、波線密度が大きくなると弾性波速度が大きくなっている.この結果は検証に用いたモデル独自の性質である可能性があるが、発信点をモデルに対して対称な位置に設置していることから損傷の位置によってこの傾向が大きく変化する可能性は小さいと推察される. 波線密度の増加にともなって弾性波速度が増大する理由としては、波線密度が増加することで誤差を含む AE 源からの波線がセルに多く含まれるようになり、その影響で設定以上の弾性波速度となったと考えられる. 波線密度の減少にともなって弾性波速度が低下する理由としては、位置標定の誤差によりセンサまでの波線が短くなると設定よりも小さい弾性波速度が算出されるが、その波線が波線密度の多くを占めてセルの速度構造の決定に大きく影響したと推察される. また位置標定に誤差を含む AE 源を多く利用した場合弾性波速度のばらつきも大きくなっている.

これまでの結果より、基本的にトモグラフィ解析に利用する AE 源が増加すると解析に利用できる波線が増加することから相対的に損傷領域を特定できることや解析精度が向上することが言える。ただし、位置標定誤差を有する AE 源が多く存在する場合は、その誤差が原因となりトモグラフィ結果にも誤差が生じ、健全部分が低速度を有することがある。また波線を多く利用してもトモグラフィ結果に精度の向上が見られない可能性がある。またトモグラフィ解析を行うにあたって、波線が全てのセルを十分に通過していることが必要となるが、正確に標定された AE 源を用いるのであれば少数の AE 源でも正確なトモグラフィ解析を行うことができるものとみられる。

#### 3.2.3 AE 源標定位置の偏在

前項で行った AE 源の数の変化による検証では、AE 源の位置は対象領域内に対して偏りなく増加さるモデルを扱った.しかし、実際の AE 源は対象構造物内部から自然発生する

ものであるため、発生位置を指定することができない. さらに構造物は損傷初期の場合、クラックなどの微小破壊が局所的に発生、成長することが多く、AE 源が偏在することがしばしばおこる. 本研究は土木構造物の予防保全に寄与できる計測手法の確立を目的としているため、本解析手法は損傷が終局段階になる前の現象に対応できるかどうかの検証も必要である. したがって、図 3-3 のモデルを利用して図 3-14 に示すような偏りのある発信位置に対してトモグラフィ解析精度を検証した. 図 3-15 には発信点の偏在パターン別の波線を示しており、図 3-16 はそのトモグラフィ結果を示している.

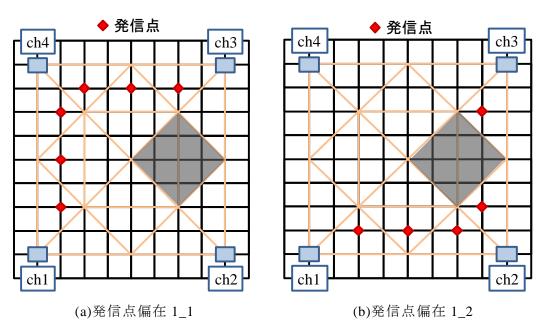


図 3-14 発信点の偏り

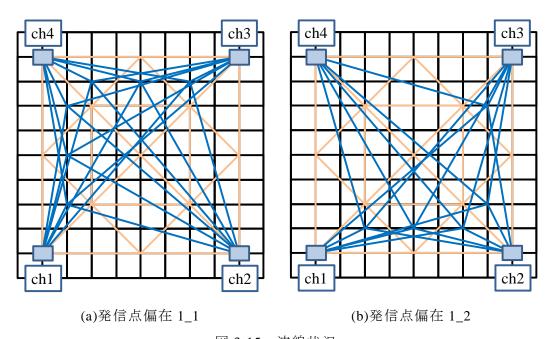


図 3-15 波線状況

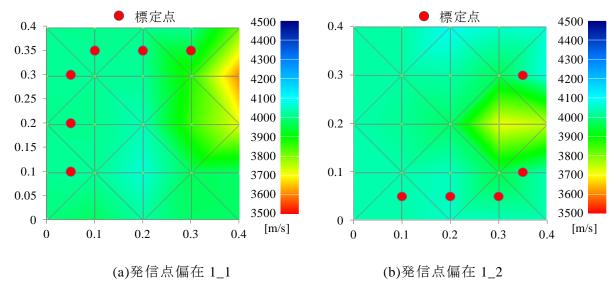


図 3-16 解析結果

図 3-16 に示すように、発信点がセンサの対角線を越えないような場合、発信点と損傷領域の配置によっては正確に損傷位置を捉えることができない場合があることが確認された。まず、発信点偏在 1\_1 で損傷位置が捉えられなかった理由としてごく短い波線しか通過しないセルが存在することが挙げられる。その場合、十分とはいえない量の波線によって決定される弾性波速度がセルの代表値となるので、正確にそのセルの情報を反映していない場合が想定される。図 3\_15(a)と図 3\_16(a)から発信点偏在 1\_1 では対象領域右下半分の右上と左下のセルはほとんど波線が通過していない。左下のセルは損傷領域を通過する波線がそのセルを通過していないため健全な弾性波速度が出力されたが、右上のセルは損傷を通過する波線がそのセルを通過するためモデルとは異なる速度構造が出力されたと考えら

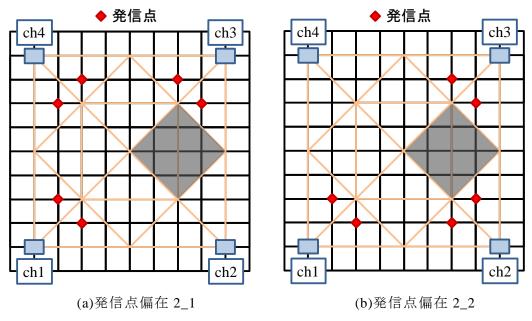


図 3-17 発信点の偏り

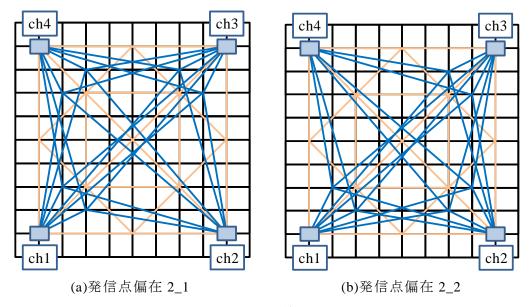
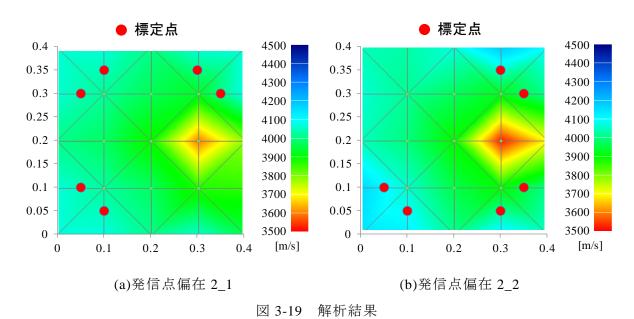


図 3-18 波線状況



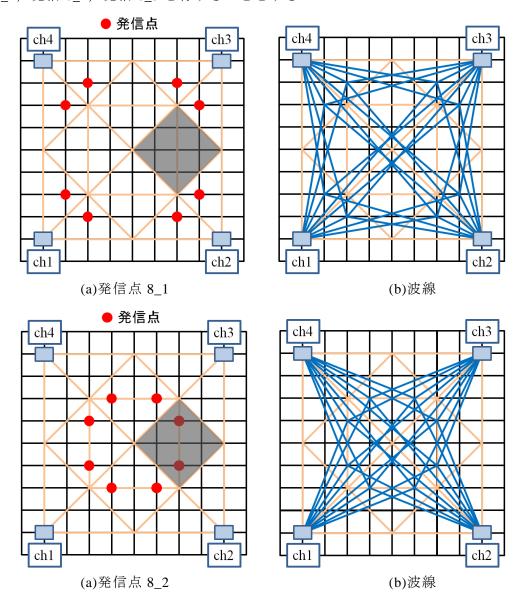
れる. ここから、解析に用いる発信点にセンサの対角線を越えないような発信点を用いた場合正確に損傷領域を捉えられない可能性がある.

次に図 3-17 に示すモデルを用いて解析を行った. 図 3-18 は発信点別の波線,図 3-19 は解析結果である.このモデルは発信点が偏在しているが,図 3-14 との違いは発信点がセンサの対角線を越えて位置していることである. その結果,全てのセルで複数の波線が複数の角度から通過し,どちらの AE 源が偏在するパターンでも損傷領域を正確に捉えた結果となった. (a)ではモデルの右下斜め半分に位置する二つの発信点が損傷領域と健全領域を効果的に通過しているためだと考えられる.また,二つを比べると発信点が右側に偏在する解析結果の方が発信点が左側に偏在する解析結果よりもより損傷領域を捉えている.この理由としては,二つのモデルで共通していない AE 源の波線が挙げられる.右偏在の AE

源のうち(0.3,0.05)と(0.35,0.1)の AE 源からは損傷領域を通過するセルは合計で 3 本存在するが、左偏在の AE 源のうち(0.05,0.3)と(0.1,0.35)の AE 源からは損修御領域を通過するセルは合計で 1 本のみ存在する. この損傷領域を通過する波線の差がトモグラフィ解析結果に反映されたと考えられる. このことから利用する AE 源に偏りが存在する場合、偏り方によって解析精度に差異が生じるが、その影響が小さいことが確認された.

## 3.2.4 発信位置に対する影響

本項では発信点の数を固定して発信点の位置を変化させて波線密度を変化させた場合のAE 速度トモグラフィ精度に関して検討した. モデルは図 3-4 と同様のモデルを用いて図 3-20 に示すように 8 点の発信点を 3 つのパターンに分けて解析を行った. また,図 3-20 には発信点別の波線も示しており,図 3-21 にそれぞれの解析結果を示す.以後この発信パターンは,発信点がモデルの端部に位置しているものからモデル中央に位置している順に,発信 8\_1,発信 8\_2,発信 8\_3 と称することとする.



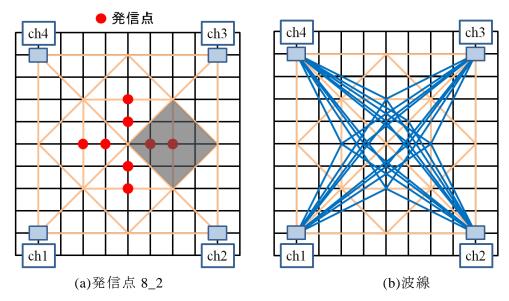


図 3-20 発信点の場所と波線の変化

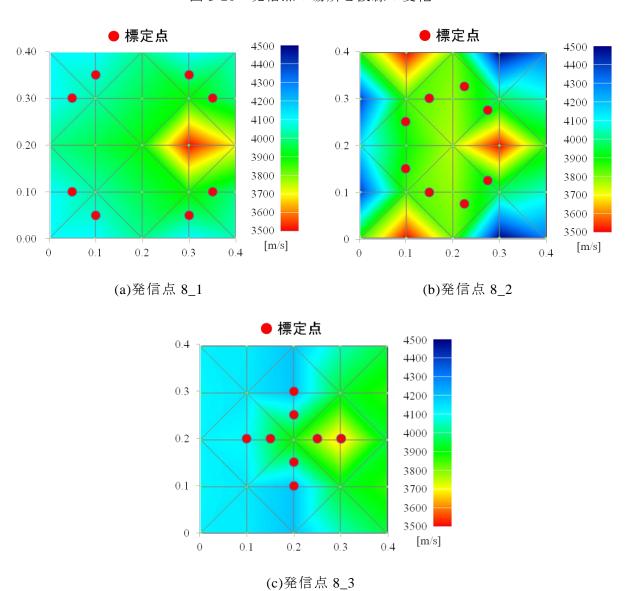


図 3-21 解析結果

まず、それぞれの解析結果から分かるように、発信81と発信83は設定した発信点を 正確に標定しているのに対し、発信8\_2は8点の発信点中4点の発信で位置標定に誤差が 生じている.トモグラフィ結果に注目すると,位置標定に誤差を含んでいる発信 8\_2 は, 損傷領域の速度低下は表現できているものの健全部と設定している領域が高速度構造、も しくは低速度構造を有している部分が生じた. 健全部分が高速度構造と推定された原因と しては、3 章でも述べたように、位置標定の誤差にともなって実際の発信点と受信センサ の波線長さより標定点と受信センサの波線長さの方が大きくなることにより、その間の速 度が速く推定されることが挙げられる.健全部が低速度構造と推定されたメカニズムは高 速度構造の場合と逆である. すなわち, 位置標定の誤差にともなって実際の発信点と受信 センサの波線長さより標定点と受信センサの波線長さの方が小さくなることにより、その 間の速度が遅く推定されることとなる. この発信 8\_2 の位置標定誤差は 3 章の発信点 16 点の位置標定誤差と同様の誤差である.しかし、トモグラフィ結果は発信点 16 点の結果の 方がトモグラフィ解析の誤差は小さくなっている.この理由は発信点が16点の場合は発信 82の発信点以外にも8点の発信点が存在するため波線の数が多く,その波線がトモグラ フィ解析誤差の大きいセルを通過している.加えて,その8点全てが設定された発信点の 位置を正確に標定しているためトモグラフィ解析誤差を緩和させたと考えられる. このこ とから, 正確に位置標定をされている AE 源に起因する波線密度が大きくなるとトモグラ フィ解析の精度が向上することが確認された.

次に、位置標定が正確に行われた発信 8\_1 と発信 8\_3 に着目する. どちらも発信点を正 確に位置標定しているにもかかわらず発信 8\_1 の場合のみが精度の高いトモグラフィ解析 を行え、発信8\_3はおおまかな損傷領域を捉えることはできているが精度が高いとは言い 難い.正確には損傷領域の速度低下が不十分であることが言える.この二つの違いが生じ た原因としては発信点の一部が損傷領域内部に存在することが挙げられる.まず,発信83 で損傷領域内に存在する AE 源を正確に位置標定出来た理由としては、AE 源から生じる波 線全てがバランスよく損傷領域を通過したことが考えられる.本研究の位置標定に関して は、一部の波線が損傷領域を通過するとその波線を用いて逆算される発信推定時刻と健全 部を通過したセルを用いて逆算された発信推定時刻との間に差異が生じることが原因で, 位置標定結果に誤差が生じる可能性がある.しかし,発信8\_3の場合では全ての波線が損 傷領域を通過するため、全ての波線に対して実際の発信時刻よりも早い発信推定時刻が推 定される、その結果、発信推定時刻は実現象とは異なるものの位置標定が正確に行われた ものと推察される.したがって、トモグラフィ解析結果は発信推定時刻が実際よりも早く 推定されることにより各波線の弾性波速度は速く算出される. 図 3-22 は本項で検証した発 信81,発信82,発信83において健全部と設定したセルの波線密度と弾性波速度の関係 について示している. この図から分かるように, 発信 8\_3 はほとんどのセルで弾性波速度 が 4000 m/s 以上を有しており、損傷領域の弾性波速度が比較的大きい値を有している理由

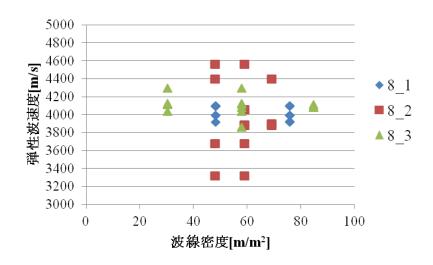


図 3-22 健全領域のセルの波線密度と弾性波速度

もこれに起因する.また、おおまかな損傷領域を捉えた理由としては、損傷領域外に存在する正確に位置標定された AE 源に起因する波線が要因となっていると考えられる.さらに、AE 源が中央に集中することにより損傷領域を通過する波線が限定された方向になっている.トモグラフィ解析結果において、損傷領域右側上下のセルが解析結果左側と異なる速度構造を有する理由はこの波線の偏りに起因すると推察される.

次に波線密度に関して検討を行う.この図からも波線密度が大きいことが精度の向上に必ずしもつながらない事が確認できる. AE 源の標定位置が正確であった発信 8\_1 と発信 8\_3 は波線密度のばらつきが大きいが,波線密度の大小にかかわらず設定した弾性波速度近傍を推定している. 発信 8\_2 は他の二つの発信に比べて波線密度のばらつきが小さい,すなわちセルに比較的均等に波線が分配されているが弾性波速度の推定値に大きな推定誤差が見られる.これは位置標定の誤差に起因している.

以上より,本項では以下の知見が確認された.

- ① トモグラフィ解析精度の精度を確保するためには、正確に位置標定をされた AE 源を利用することが重要である
- ② 弾性波速度の推定の精度は波線密度の大小やばらつきに依存しない
- ③ 正確に位置標定された AE源をトモグラフィ解析に用いることは推定精度の向上 につながる
- ④ 損傷領域内部から発生するAE源は波線全てが損傷領域を通過し全ての発信推定 時刻に影響が生じるため、正確に位置標定される場合がある
- ⑤ AE 源が対象領域中央に偏在すると波線が通過する領域が限定されてしまうため 推定誤差が生じる可能性がある

④より,正確に位置標定がなされた AE 源を用いても AE 源が中央に偏在する場合にはおおまかなトモグラフィ結果は得られるものの精度が高い結果にはならない事が確認された.このことから,用いる AE 源の場所も重要になってくる.具体的には,対象領域中央ではなく端部領域に発生する AE 源を用いることが必要だと推察される.これは端部の AE 源を利用することで対象領域端部のセルに波線を通過させ,反対側のセンサへの波線で中央部分を通過できるからである.対象領域が四角形の場合,4 つの端部の AE 源を用いることが理想だと言える.

## 3.2.5 位置標定に関する検証

これまでの検討で AE 源位置標定の精度が重要であることが分かった.したがって,本項では AE 源位置標定の精度に関して検討を行う.既往の位置標定手法で誤差が生じる原因としては2つ考えられ,1つは対象物内部構造の不均質性による速度の不均質性である.具体的には対象物の劣化が進行することにより損傷部分の弾性波速度が低下することや,鉄筋など内部伝達速度が異なる部材が混入している場合の速度の異方性などが挙げられる.もう1つは初動の読取り誤差である.波線は損傷領域を通過していない場合でも受信センサに到達した波のエネルギーが小さく初動振幅が小さいためにしきい値で正確な初動を読み取れない場合がある.初動の読み取りに関しては4章で検討するため,ここでは対象内部の速度不均質性に起因する位置標定誤差に関して検討を行う.

本研究のプログラムは対象領域の内部構造を反映した位置標定を行うことを目的としている. したがって, 速度の不均質性に起因する位置標定誤差はどのような条件によって生じるか明らかになっていないため, 簡単なモデルと具体的な数値を用いて検証することとした.

内部速度の不均質性による影響を検討するにあたり、位置標定に用いた波線が損傷領域を通過する具体的なモデルを設定することは難しいため、本検討では '損傷領域を通過すること'を '受信時間の遅延'と置き換えることとした.例えば、理論的には発信点から受信点まで 50  $\mu$ s 必要な波線上に損傷領域が存在する場合、この損傷領域により波が受信点に到達する時間が  $\alpha$  遅れたとするとその遅延時間は  $\alpha$  であり、波の伝播時間は『50  $\mu$ s +  $\alpha$ 』となる.このように受信時刻が  $\alpha$  遅れることにより各センサの受信時間差が変化することで標定位置に影響が生じる.損傷の度合いで遅延時間は変化すると考えるが遅延時間に関しては無限通り考えられるが、本検討では遅延時間を 5  $\mu$ s,10  $\mu$ s,15  $\mu$ s の 3 通り設定して考察を行う.この遅延時間を各波線に全ての組み合わせで与えることでその影響を検討する.検討に用いたモデルは図 3-23 で利用するセンサは 4 つ,発信点はモデル中央に設定し、モデルは健全な状態での弾性波速度を 4000  $\mu$ s とした.この場合発信点からの波線は 4 本となり、全ての波線長さが等しいため受信時間差は生じない.そこに 3 通りの遅延時間を各波線に全ての組み合わせで分配し位置標定を行い、位置標定誤差とその個数

についてまとめた結果が図 3-24 である.このモデルはモデル中央の発信点で点対称なため、遅延時間と方向の組み合わせなどの条件が等しいものは 1 つと数えた.したがって、この遅延時間の組み合わせは全部で 53 個である.図 3-25 は損傷領域を通過、すなわち遅延時間を加えた波線数ごとの誤差の内訳とその割合である.

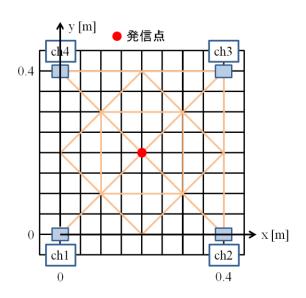


図 3-23 検討用モデル

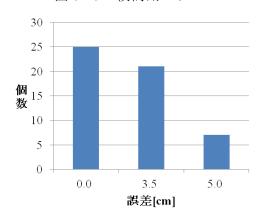


図 3-24 誤差とその個数の内訳

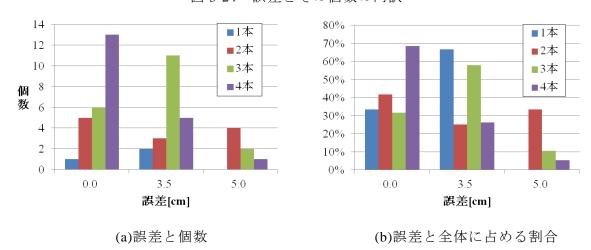


図 3-25 損傷領域通過波線ごとの誤差と個数の関係

図 3-24 より、いずれの遅延時間を振り分けても位置標定誤差は最大で 5 cm となった. この結果よりこのセンサ配置と発信点の設定では 15 μs 以下の遅れをともなう損傷領域がどの部分に存在してもある程度精度が高い位置標定が行えることを示している. この 15 μs という遅延時間は、本章のトモグラフィ解析の検証に用いたデータの中で最も遅延時間が大きいものを利用したため、この値はさらに大きくなり位置標定誤差がさらに変化する可能性はある.

次に、図3-25からは、損傷領域を通過する波線が1本であると大きな標定誤差が生じず、4本の場合も全体の7割近くが標定誤差なしという結果になった。まず、損傷を通過する波線が1本の場合は健全部を通過した3つの波線の影響で位置標定に用いる時間の分散が設定した発信点から大きく外れないことが予想される。次に、損傷領域を通過する波線が4本の場合は、それぞれの波線が遅延時間を有していることから受信時間差は最大で10μsとなる。本研究のプログラムは受信時間差から位置標定を行っているため、結果的に遅延時間の影響が小さくなり標定誤差も小さくなる結果となった。この結果より損傷が進み損傷を通過する波線が増加することで位置標定の誤差が大きくなる訳ではないことが確認された。遅延時間を変えれば誤差の大きさは変化すると考えられるがおおまかな傾向は変化しないと考えられる。また本検討では位置標定に用いたセンサの数は4つのみであるが、利用するセンサの数が増えることでさらに組み合わせが増えて複雑になる。この結果を受けて、損傷領域を通過する波線の本数によって生じる誤差は、そのときのセンサ数、センサ配置、遅延時間によって様々に変化することが想定されるといえる。

## 3.2.6 プログラム検証のまとめ

これまでのプログラム検証で得られた知見をまとめる.

- i. 本プログラムの位置標定は繰り返し回数を増やすことで内部の速度構造を反映した 位置標定が行えることが確認された.また繰り返し計算回数は残差の収束具合を確 認して決定する必要がある.
- ii. 既往の弾性波速度トモグラフィでは波線密度が大きくなることでトモグラフィ解析 精度を向上するのと同様に、AE 速度トモグラフィでも基本的には波線密度が大きく なることで解析精度は向上するが、位置標定結果に誤差を含む AE 源を用いると波 線密度が大きくなっても精度が向上しない場合がある.
- iii. AE 速度トモグラフィは、全てのセルを波線が十分に通過していることを条件に、少数の AE 源でも精度が高いトモグラフィ解析を行うことができ、トモグラフィ解析精度を向上させるために最も重要な項目の一つとして正確な位置標定がなされた AE 源を利用することが挙げられる.
- iv. AE トモグラフィに用いる AE 源の位置が重要であり, 対象領域の中央部ではなく端

部に存在する AE 源を利用することが望ましい.

- v. トモグラフィ解析に用いる AE 源がセンサの対角線を越えないように偏在すると、 セルを通過する波線が一本でその長さが短くなる場合があり、発信点とセンサの位 置関係によって損傷を正確に捉えられない場合がある. また発信点の偏り方がセン サの対角線を越えるような場合,偏り方によって精度に多少のばらつきは生じるが、 精度の高いトモグラフィ結果が得られることが確認できた.
- vi. トモグラフィ解析に用いる AE 源が対象領域の中央に集中すると波線が通過する領域が偏ってしまうため、AE 源は対象領域の端部のものを利用することが必要となる.

以上を踏まえると、トモグラフィ解析精度は位置標定に依存し、位置標定の精度はトモグラフィ結果に依存するという '卵が先か鶏が先か'と同様の議論となる.しかし、本プログラムは繰り返し計算を増やすことで内部構造を反映した位置標定を行うことができる.これは位置標定の誤差でも内部の不均質性による標定誤差であれば、本プログラムのトモグラフィ解析により正確な位置に AE 源が推定されることを示している. 逆に初動読取り誤差に起因する位置標定誤差はトモグラフィの精度を低下させる可能性がある.したがって本プログラムの最重要項目は『各センサで初動を正確に読み取ること』となる.

本検討では、プログラムの検証と位置付けて様々な発信点を設定し最も良い発信点位置の検討を行ったが、本来の AE 源は受動的に得られることから AE 源は局所的に得られることが想定される。また本研究が利用しようと考えている AE 源は二次 AE であるため、損傷領域付近で発生するが本検討では実際の現象を考慮するには至っていない。しかし、本検討は対象構造物のキャリブレーションショットを行う位置には有意義な結果であり、その結果をもとにして AE トモグラフィを行うことで精度の高い解析結果が期待できる。

# 第4章 擬似 AE 能動発信試験

3章で述べた新プログラムは、現在2次元まで対応可能である.しかし、実際に発生す る AE 源は構造物内部で生じるため、理想的には 2 次元ではなく 3 次元 AE 源位置標定を 行うべきであり、本プログラムも将来的には 3 次元にまで拡張する必要がある.一方,2 次元で解析を行うメリットもある.まず、一般的なセンサ配置について考えると、2次元 AE 源位置標定は平面的なセンサ配置を用いて実施されるが <sup>24)</sup>, 3 次元 AE 源位置標定は対 象領域を囲むように3次元的にセンサを配置するのが最も標定精度が高いセンサ配置とい える. しかし、構造物内部から AE 源が発生するが 3 次元的にセンサを配置できない場合 がある、例えば橋梁の床版の場合、供用下ではセンサは床版下面にのみ設置可能で、かつ 断面方向の調査を次段階と考えれば調査すべきは平面的な損傷となる.このようにセンサ 配置を限定される対象物には2次元位置標定が適していると考えられる.また,3次元で トモグラフィを行うと計算時間が長くなるが、2次元トモグラフィ解析ではその時間が比 較的短い. これらを踏まえ 3 次元で発生する AE 源を 2 次元で位置標定することの適用性 を検討する、主な検討項目は、位置標定に与える影響とトモグラフィに与える影響の2項 目である. また、3章で述べたように、AEトモグラフィ解析の精度は"利用する AE源の 位置標定誤差が小さいこと"ではなく"正確な受信時間を入力すること"で精度が向上す る. しかし, 位置標定が重要でないとしたわけではない. その理由は既往の位置標定と本 研究の位置標定の共通点にある. 本研究の位置標定で最初に行われる AE 源の推定は、対 象内部の速度構造を一定として入力するため,最初のステップで行われる位置標定は既往 の位置標定と同じ条件となる. したがって, 計算手法による多少の違いが生じる可能性は あるが、本プログラムにおける最初のステップでの位置標定と既往の位置標定がほぼ等し い結果が出力されると考えられる。本プログラムでは、この最初のステップで得た標定点 を利用してトモグラフィ解析を行うため、この位置標定結果に大きな誤差を含む場合、そ の後のトモグラフィ結果の精度が低下すると考えられる. 以上を踏まえ, 既往の位置標定 手法に関しても精度を高めることでより精度が向上した AE トモグラフィ結果を提示でき ると期待できる.このことから,既往の位置標定の精度向上に関して検討を行う.そこで 供試体の片面にセンサを配置し、もう一方の面から能動的に弾性波発信を行うことでその 発信を擬似 AE 源とする試験を行った.

#### 4.1 試験概要

本試験は**図 4-1** に示すように、 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  の健全なコンクリート供試体を使用した. 供試体の詳細は表 4-1 に示す. ここで供試体の弾性波速度は約 4300 m/s であった.

表 4-1 コンクリートの詳細

材齢28日 圧縮強度 (N/mm2)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	セメント の種類
24	20	12	4.5	N

表 4-2 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位容積質量(kg/m3)				
(%)	(%)	水 セメント 細骨材 粗骨材				骨材
		W	C	S	G1	G2
55.0	45.5	165.0	300.0	815.6	606.6	404.4

図 4-2(a)に示すように、計測装置には DiSP 16-channel system (フィジカルアコースティッ ク社製)を用い,サンプリング周波数 1MHz, 1 波形 1024 μs の長さで処理・記録した. セ ンサは図 4-3 に示すように供試体下面に 4 つ配置し、図 4-4 のエレクトロンワックス (フ ルウチ科学社製)を介して接着した. 受信センサは図 4-2(b)に示す 60 kHz 共振型センサ(富 士セラミック製)を用い,得られた波形は図4-2(c)に示すプリアンプ(1220A,フィジカル アコースティク社製) で 40 dB 増幅して収録を行った. 擬似 AE は図 4-5(a)に示す PUNDIT (C.N.S ELECTRONIC LTD 製) と図 4-5(b)に示す FUNCTION SYNTHESIZER (NF ELECTRONIC INSTRUMENT 製)(以下 FSと称す)を用いて供試体の上面から発信した. 発信位置は図4-1に示す50mm間隔の格子点100箇所とした.また,発信に用いたセンサ は**図 4-6** に示す広帯域型の 1045S (富士セラミック製) を用いた. PUNDIT と FS を比べる と、発信エネルギーは PUNDIT が大きく、本試験で用いる供試体サイズでは十分なエネル ギーを有した弾性波の伝播を確認している.また、PUNDIT が発信できる周波数は単一で あるが、FS は発信する信号の周波数を任意に設定することができる. したがって、能動発 信は PUNDIT の 1 種類と FS の周波数が 30 kHz, 60 kHz, 120 kHz の 3 種類の, 計 4 種類と した. 本試験では、発信の情報を入手するために、発信機から供試体に発信すると同時に 図 4-7 に示すように直接計測装置にも信号を分岐させ発信時刻を得た.

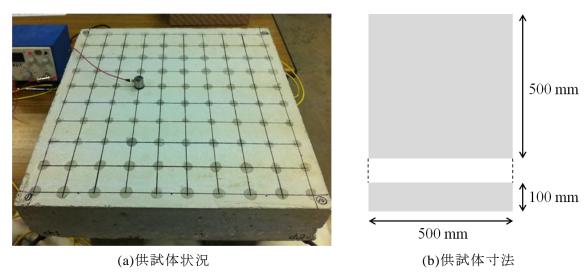


図 4-1 コンクリート供試体



(a)計測装置



(b) 60 kHz 共振センサ



(c) プリアンプ

図 4-2 計測器機

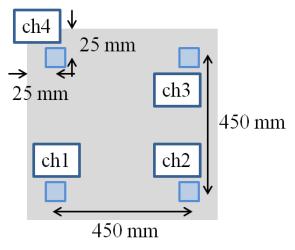


図 4-3 センサ配置



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



図 4-6 発信用センサ

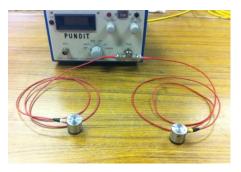


図 4-7 送信波収録用器具

# 4.2 位置標定に関する検証

本節では、3 次元発信される AE 源を 2 次元 AE 源位置標定で標定するときの影響を検討する.この影響に関しては既往の位置標定で検討  $^{25)}$ を行った.まず、結果の扱い方であるが、3 次元空間( $X_{III}$ , $Y_{III}$ , $Z_{III}$ )で発信された弾性波が 2 次元平面に投影されたとして検討する.

## 4.2.1 2 次元と 3 次元の比較

まず、発信に PUNDIT を用いた結果を図 4-8 に示す。同図(a)は、実際に発信を行った位置と既往の位置標定で得た擬似 AE 源の推定位置の x-y 平面上の差を表わしたものであり、図 4-8(b)はその標定点の座標を示している.

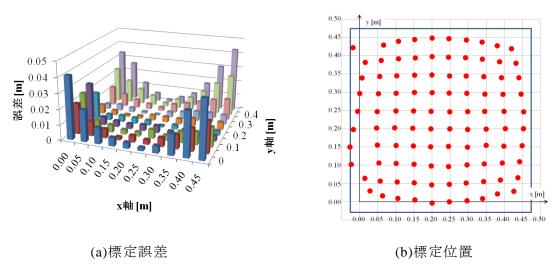


図 4-8 PUNDIT 発信結果

発信機に PUNDIT を用いた場合,図 4-8(a)から,供試体中央部分の標定誤差は小さく標定精度が良いものの,センサ近傍になるほど誤差が大きくなる.その誤差は図 4-8(b)に示すように供試体中央の方向に向かって偏っている.この理由としては,擬似 AE の発信位置がセンサ設置平面と同一でないことが挙げられる.具体的に,あるセンサの対面から発信された場合について検討する.位置標定手法は各センサの受信差から発信源を推定するため,3次元で位置標定する場合は図 4-9 に示す緑の波線に相当する時間差で位置標定を行う.この時間差を有する標定点は図 4-9 に示す標定点となり実際に発信を行った x-y座標と標定点の x-y座標には誤差が生じることになる.この緑の波線は供試体中央に向かうにつれて短くなるので本来の発信点との誤差が小さくなっていたが,逆にセンサに近付くにつれて緑の波線が長くなるため標定誤差が大きくなった.この結果により,3次元的に発生する AE 源を2次元で位置標定を行うと各センサとの距離が等しい,もしくはそれに近ければ x-y座標での位置標定誤差はほとんど見られないが,AE 源がセンサに近付くと位

置標定結果に誤差が含まれることが確認された.またこの誤差は AE が生じる奥行きに依存することも ② 4-9 から分かり,その大きさはセンサ間隔の半分が最大誤差となる.したがって,本試験のような条件で AE トモグラフィを行う場合はセンサ近傍の AE 源にはこのような誤差が含まれていることを考慮して,構造物の奥行きを踏まえた解析を行う必要がある.しかし,本試験では奥行きが 10~cm であることから生じた誤差は最も大きいもので 5~cm 未満であり,センサ間隔が 45~cm であることから位置標定精度としては高いものと考えられる.

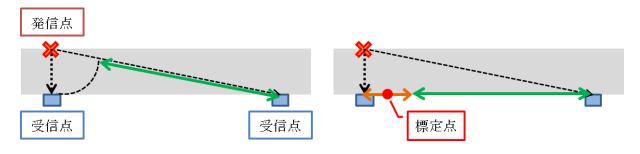
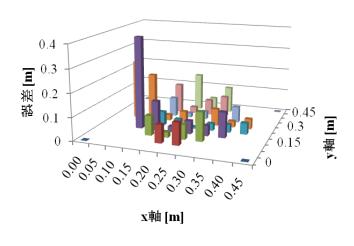


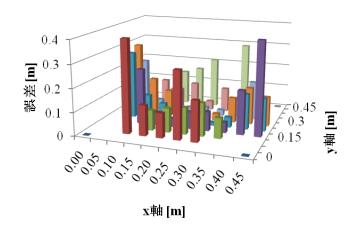
図 4-9 標定誤差の原因

## 4.2.2 しきい値と AIC の比較

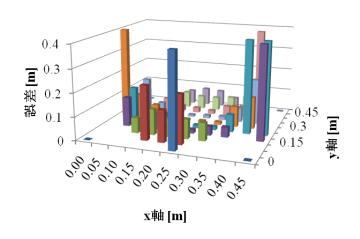
前項で示した位置標定結果は擬似 AE 発信器 (PUNDIT) のエネルギーが大きく受信センサに到達する弾性波初動の振幅が十分に大きかった.このため、しきい値を用いた信号の初動読み取りを行う場合、精度良く初動を読み取ることができたと思われる.そこで、次に発信エネルギーの小さい FS を発信器として用いた場合、実際に発信位置と既往の位置標定で標定された擬似 AE の推定位置との x-y 平面上の差を周波数ごとに図 4-10 に示す.ここで、各周波数において最大の標定誤差が 1000 m を超えるものが得られたため、全ての誤差数値を示すのではなく誤差の表記の上限を 0.4 m とし、標定誤差が 0.4 m を超えるものではその誤差を 0.4 m としている.



(a)30 kHz 発信



(b)60 kHz 発信



(c)120 kHz 発信 図 4-10 FS 発信時の標定誤差

全ての周波数に共通して、センサ近傍の位置標定が行えていないことである.これは FS の発信エネルギーが小さいことに起因していると考えられる.1 つのセンサ近傍で発信を行うとその対角線上のもう1つのセンサとの距離が長くなるため、エネルギーが小さい FS の発信では弾性波が伝播により減衰し初動を読み取ることができなかったと考えられる.よって、発信点より離れたセンサは初動以降の振幅がしきい値を超えた時刻を受信時間とし、そのため各センサ間の受信時間差が大きくなり位置標定が範囲内を超えたため表示できなかった.また中央部分の位置標定はほぼ誤差なく行われていることが確認できる.これは発信点から各受信センサまでの距離が最も短く、エネルギーが小さい FS の発信でも初動を正確に読み取ることができたものと考えられる.しかし、その領域は PUNDIT 発信の場合よりも狭く、さらに PUNDIT で正確に位置標定されていた発信点でも誤差が大きくなった.以上より、精度の高い位置標定を行うためには、受信時における弾性波の初動の振幅がしきい値を十分に超えるほど大きなエネルギーでの AE 源が必要といえる.一方で、AE 源は構造物内部から発生するものでありエネルギーには大小存在することから、AE ト

モグラフィでは可能な限り大振幅の AE 源を用いることが精度の高い結果を導くものといえる

次に、各周波数について比較・検討を行う.標定点の数を比較すると 30 kHz の発信では 39 点、60 kHz の発信では 49 点、120 kHz の発信では 59 点と周波数が高くなるにつれて標定点の数も多くなっている.これは発信器の周波数を上げるにつれてそのエネルギーが大きくなったことに起因すると考えられる.実際に、30 kHz 発信は最大振幅が 94 dB に対して、60 kHz、120 kHz 発信では 100 dB であった.また一般に、弾性波は高周波ほど減衰しやすく低周波では減衰しにくいことが知られている <sup>26)27)28)</sup>.したがって、60 kHz、120 kHz の結果を見てわかるように、供試体中央から離れた発信点での標定誤差は大きくなっている.逆に低周波はエネルギーの減衰が高周波に比べて小さいため、供試体中央から離れた発信点での標定誤差は他の二つの発信と比べると小さいことが確認できる.

このように、しきい値を用いた初動読み取りを用いるとエネルギーの違いによって標定 誤差が大きくなる事が確認された.また標定誤差もセンサ間隔が 0.45 m なのに対し、その 半分の長さを超える誤差の生じる割合が多くなっている.このしきい値を用いた初動読み 取りの課題に対して、赤池情報量基準 (AIC) を用いた初動読み取りを本試験に適用し、 しきい値を用いた初動読み取りとの比較を行いその適用性について検討を行う.

赤池情報量基準 (AIC) とは元々統計モデルの良さを評価するための指標であり、統計学の世界では非常に有名な指標である。その指標を波形の初動読み取りに応用している。ここで収録した波形のサンプル数を N とし、その i 番目の振幅を  $X_i$  (i=1,2,...,N) とする。このとき i=k のときの  $AIC_k$  はい以下の式(3-1)によって計算される。

$$AIC_k = k \cdot \log{\{var(X[1,k])\} + (N-k) \cdot \log{\{var(X[k,N])\}}}$$
 (3.1)

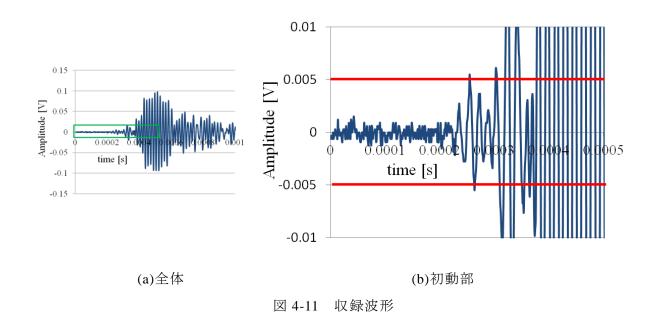
 $T_k$ {}を i=k の場合の時刻とし、 $\Delta$ T を波形収録のサンプリング数とすると、初動時刻 P1 は以下の式(3-2)で表わされる。また、本試験の収録で用いたサンプリング数は $\Delta$  T= $1.0 \times 10^{-6}$   $\mu$ s である。

$$P1 = T_k \{ Min(AIC_k) \} - \Delta T$$
(3.2)

この指標は式(3-2)からわかるように、i=k より前半部分の振幅と後半部分の振幅の分散を それぞれ求めそれらの和を算出している。したがって、k が初動の時刻の場合その前半部 分に関してはノイズの分散を求めることとなり、後半部分に関しては波の分散を求めるこ ととなる。このとき各分散の和は最小となるため AIC を用いると初動を正確に求めること ができる. ただし、分散を求めるため波形の相対的な振幅の大小のみで AIC の値を算出するため、波形の形状によっては AIC が正確に初動を捉えられない事があることに注意する必要がある. この点も考慮に入れながら検討を行う.

ここで AIC の適用方法にいくつか注意点がある. まず, しきい値を用いた初動時刻よりも AIC を用いた初動時刻が大きい値を取ることは考えられないがそのような結果が得られる場合がある. 図 4-11 はその具体的な波形で図 4-11(b)は全体波形において緑で囲まれた部分の波形であり, 赤線はしきい値となっている. また図 4-12 はこの波形を AIC で計算した結果である. この図 4-11 からしきい値を超えるよりも前に初動部分が存在することが確認できる. しかし, 図 4-12 からわかるように, AIC を用いた場合の初動時刻は 301 μsとなった. これは初動部分の振幅が小さいため 301 μs 以前と以後の分散が最も小さくなったと考えられる.

AIC で算出された初動時刻がしきい値を用いて算出された初動時刻よりも遅れている場合は波形の前半部分でもう一度 AIC を実施した.本検討では計測の設定により、波形はしきい値を用いた初動から 256  $\mu$ s 前を収録波形の先頭にして収録しているため、2回目の AIC は収録波形の先頭から 256  $\mu$ s の波形に関して適用し初動を算出した.



53

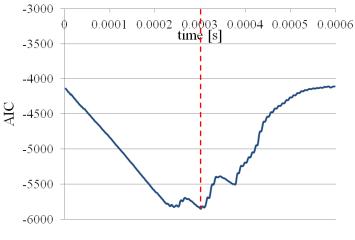
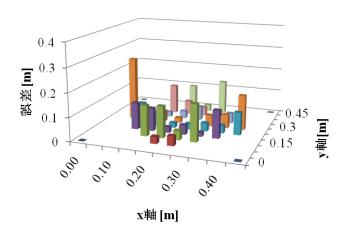
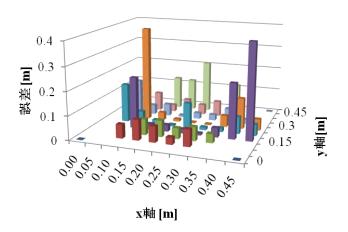


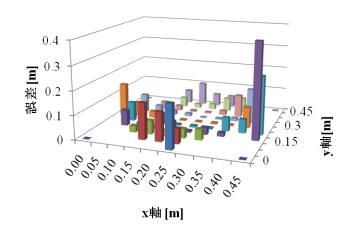
図 4-12 AIC 結果



(a)30 kHz 発信



(b)60 kHz 発信



(c)120 kHz 発信 図 4-13 AIC 適用後の標定誤差

図 4-13 は発信機に FS を用いた AE 源の波形に AIC を適用して初動を求め、その初動を 用いて位置標定を行った結果を周波数ごとに示したものである。全ての周波数において AIC を用いた位置標定結果はしきい値を用いた位置標定結果よりも誤差が小さくなってい ることが確認できる. いくつかの発信点ではまだ大きい誤差を有するものが見られるが, その数は明らかに激減している.この結果より AIC を用いることで初動読取り精度が向上 することが確認できた. ただし, 依然標定誤差が大きい場合がある. これについては具体 的に収録した波形に基づき考察する. 図 4-14 は座標 (0.45, 0.15) から 60 kHz の発信を行 った場合に ch3 センサで収録された波形とその AIC 結果である. この波形での受信時刻は, しきい値を用いた場合は 256 μs, AIC を用いた場合は 244 μs と算出されている. しかし, この波形を目視で確認するとさらに前の 200 μs 付近で初動とみられる挙動が確認される. これは AIC 結果でも若干ではあるが実際の初動部の影響が見られるが、初動部の振幅が小 さすぎることにより正確に読み取ることが出来ていない. この ch3 センサの受信時刻を AIC 結果の一つ目の谷である 209 μs を用いて位置標定を行うと誤差が元々の 1269 m から 0.064 m になった. このような現象はその他の誤差が大きく標定されたものにも含まれて おり、この作業を行うことで精度をさらに向上させることができる.しかし、このような 波形では'AICで求めた受信時刻がしきい値で求めたものよりも遅い'という条件が使え ないため実際の波形と AIC 結果を確認しないといけない. 仮に AE 源の数が多数である場 合, 誤差が大きい AE 源全てにこの作業を行うことは現実的ではないと思われる.

以上より、AIC を用いた初動読み取り手法を用いることで既往のしきい値を用いた初動 読み取りよりも精度の高い読み取りができることが示された。また1度のAIC で不十分な場合、2度のAIC を実施することで更なる精度の向上が図れることが示された。またAIC を適用することによって位置標定の精度が向上したことから、AIC による初動読取りの信頼性が高いことが明らかとなった。

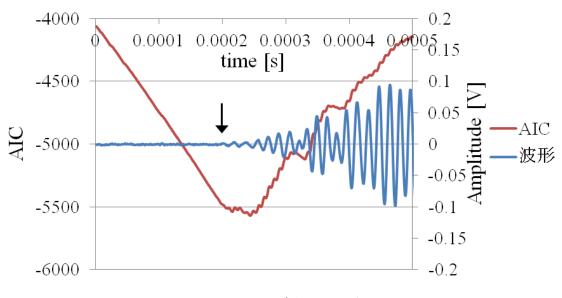


図 4-14 AIC 適用不可の例

#### 4.2.3 波形の信頼性指標

前項により、AIC を用いることで波形の初動読取り精度が向上することが確認された. これは本プログラムにおける最初のステップの位置標定精度を向上させると同時に、受信 時刻を正確に読み取ることができることから AE トモグラフィの解析精度の向上が図れる ことを示唆している.

ここで弾性波が伝播する過程で大きく減衰する場合について考える. AE 計測では通常弾性波の初動は P 波を想定している. しかし P 波のエネルギーは他のモードに比べ著しく小さいため伝播の過程で大きく減少し、時にはノイズに埋もれてしまう事がある. その場合は AIC を用いて初動を読み取ってもノイズに紛れた P 波を読み取ることはできないため、その後に伝播してくるエネルギーの大きい別のモードを初動として捉えてしまう可能性がある. このように収録された波形に想定していない波のモードを用いた場合標定誤差が大きくなるものといえる. したがって、以降で波形の信頼性を決定するパラメータについて検討する. 検討するパラメータとしては AE 計測時にリアルタイムに得られるパラメータを選ぶことで実用性にも注意した.

まず、P波がノイズ振幅以下の場合、波形のエネルギーは小さい.しかし、具体的にその値を示すことは難しく、現在のところ経験則により判断するか、もしくは確実に信頼性がないエネルギーがゼロの波形を消去するにとどまる.次に、エネルギーが小さいことからカウント数も少なくなると考えられる.しかし、このカウント数は弾性波の周波数によって変化することが考えられるため、こちらも具体的な数値を示すことは難しい.ここでDuration に着目する.前述の通り、Duration は波形の継続時間を示す指標であり、AE 計測時にリアルタイムに得られる信号パラメータである.通常、弾性波の初動はP波が想定さ

れ、その後S波などの波が到達する. したがって、Duration はある程度の大きさを有する と考えられるが,実際の計測では最小の 1 μs を記録することがある.この理由としては, 弾性波励起のエネルギーが小さい、もしくは伝播中の減衰が大きいため受信時の弾性波の 振幅が小さくなることが挙げられる. このように小さい Duration の値を有する波形は信頼 性が低いと推察されるため、このパラメータを用いて標定された AE 源を除去する必要が あると考えられる. 本研究では Duration が 1 us の波形を除去した. 次に具体的な Duration の基準値は、P波とS波の伝播速度の差を利用する. 位置標定により AE源から受信点ま での距離が算出できるため,P 波と S 波の弾性波速度からそれぞれの波の受信時間差を計 算することができる. 仮に P 波の初動を正確に読み取った場合は確実にその後のモードの 異なる波が収録されると考えられるため, 計算した P 波と S 波の受信時間差が Duration の 最小値となる. 実際に受信される弾性波は P 波と S 波のみではないためさらに大きい Duration の値が予想されるが、理論的に値を設定するにはこの設定法は確実である.参考 ではあるが、本章の試験で発信に FS を用いた場合に位置標定が行われなかった波形を確 認すると,すべての波形で Duration は 1000 μs 以上であった.しかし,本試験では寸法が 小さい供試体を使用していることから反射波の影響が考えられ、また能動発信に発信機を 用いたためその継続時間によっても Duration が変化する. したがって, 最適な Duration の 基準値を設定するには更なる検討が必要とされる. その基準値の最小値として P 波と S 波 の弾性波速度から求められる受信時間差が位置づけられる. この基準値を用いた場合は, 確実に信頼性が低い波形を除去することはできるが,基準を通過した波形の中には信頼性 の低い波形が含まれる可能性があることに留意する必要がある.

最後に波形パラメータのエネルギー,カウント,Durationの関係について述べる.基本的にこれらのパラメータには相関性があると考えられ,Durationが小さくなると必然的にエネルギーとカウント数が少なくなると推察される.したがってここからもDurationを基準にする有用性が示される.

# 4.3 まとめ

本章で得られた知見を以下に挙げる.

- i. 3次元的に発生した AE 源を平面に配置したセンサによって 2次元 AE 位置標定を行うと、供試体中央部(各センサと発信点とを結ぶ波線長さの差が小さい領域)では位置標定結果に含まれる誤差はごく微量であったがセンサ近傍に近付くにつれてその誤差が大きくなった。またその誤差は発信点の奥行き長さに依存するため、計測対象構造物の奥行きに注意する必要がある。
- ii. 弾性波受信時のエネルギーが大きい場合は P 波の振幅がしきい値を十分に超えるた

- め、しきい値を用いた既往の位置標定手法でも精度が高い位置標定を行うことが可能である.
- iii. 発信のエネルギーが小さい場合は受信時の弾性波のエネルギーも小さくなるため, しきい値では正確に初動を読み取れない可能性がある.
- iv. 初動読み取りに AIC を適用することで、位置標定の精度が向上した。また、AIC を 用いて算出される初動時刻がしきい値で求められる初動時刻よりも遅れることがな いため、そのような結果の場合は波形の前半部にもう一度 AIC を適用することで正 確に初動時刻を読み取ることが出来る.
- v. AIC を用いることで位置標定の精度が向上したことから、AIC を用いた初動読み取りの信頼度は高いと言える.
- vi. AIC を用いることで正確な受信時刻を求めることが出来ることは、AE トモグラフィ の精度向上にも貢献する.
- vii. 波形の信頼性を議論する際に、Duration を用いることで明らかに P 波の初動を読み 取れない波形を選別することが出来る.

# 第5章 繊維補強コンクリートの押抜きせん断破壊試験

本章では、繊維補強コンクリートの押抜きせん断破壊試験に AE 速度トモグラフィを適用し、その適用性について検討した。本試験では AE 源がセンサ配置面外で生じる 3 次元的な取り扱いとなる。ここで、3 次元的な位置に発生する AE 源を 2 次元配置のセンサで 2 次元的に位置標定することの妥当性は既に 4 章にて検証している。

## 5.1 試験概要

本試験は、繊維補強コンクリートのはく落防止性能を照査する試験が主目的で、それに 併せて AE 計測を行った. AE トモグラフィプログラムの実破壊にともなう AE 源を用いた 検証を行う上で AE 源が一部に偏らず、できる限り広範囲で生じることが精度を高める上 で望ましい、繊維補強コンクリートの押抜きせん断破壊試験は破壊が局所的に生じず離散 分布した各繊維に分散して生じることが期待されるため、AE トモグラフィ法の適用性を 検討するには適した試験といえる.本試験に使用したコンクリートの配合等を表 5-1、表 **5-2** に示す. また, 供試体 (700 mm×600 mm×200 mm) は図 **5-1** に従って作成した. 図 **5-2** はコンクリートの打設状況である. 使用した繊維はバルチップ JK (40 mm) で、表 5-2 に 示すように2種類の繊維混入率を有する試験体で試験を行った.計測装置は図5-3に示す DiSP 16-channel system (フィジカルアコースティック社製) を用い, サンプリング周波数 1MHz, 1波形 1024 μs の長さで処理・記録した. センサ配置は図 5-4 に示すように, 4章 で行った疑似 AE 能動発信試験と同様に供試体下面に 4 個配置し、図 5-5 のエレクトロン ワックス (フルウチ科学社製)を介してセンサと試験体を接着した. 受信センサは図 5-6(a) に示す 60 kHz 共振型センサ(富士セラミック製)を用い、得られた波形は図 5-6(b)に示す プリアンプ(1220A,フィジカルアコースティク社製)で 40 dB 増幅して収録を行った. 図 5-7 は試験状況である.

表 5-1 コンクリートの種別

材齢28日 圧縮強度 (N/mm2)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	セメント の種類	混和剤	最大塩化物 含有量 (g/m3)
30	20	60.0	4.5	ВВ	高性能AE減水剤	300

表 5-2 コンクリートの配合

			単位容積質量(kg/m3)						
繊維量	W/C (%)	s/a (%)	水 W	セメント C	石粉 LS	細骨材 S	粗骨材 G	繊維 F	混和剤 Ad
0.3 vol %	48.4	49.5	170	351	170	798	827	2.73	3.126
0.5 vol %	48.4	49.5	170	351	170	798	827	4.55	3.126

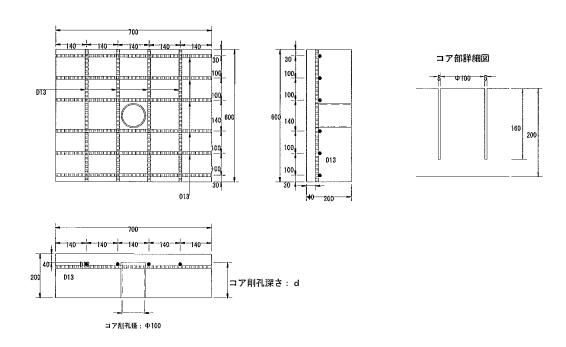


図 5-1 試験体標準図





図 5-2 試験体作成状況



図 5-3 計測装置

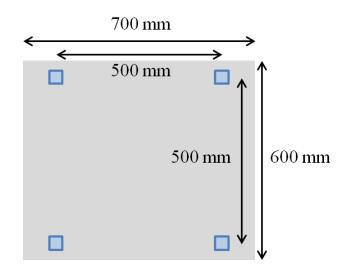


図 5-4 センサ配置



図 5-5 接着剤



(a)60 kHz 共振センサ



(b)プリアンプ

図 5-6 使用機材





図 5-7 計測状況

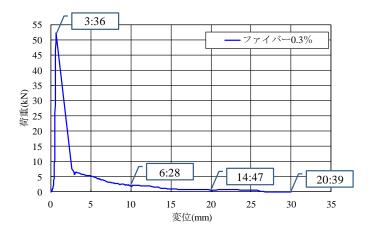
試験は以下の手順で行われた.

- a) 試験体中央に φ 100 mm, 長さ 160 mm のコア削孔を行う.
- b) 供試体は、スパンを 600 mm とし H 鋼上にガタがないようにセットする.
- c) コア中央部に鉛直,均等に荷重がかかるように球座を挟み載荷を行う.
- d) 載荷は1 mm/min の速度でコンクリートのはく離面が形成されるまで載荷する.
- e) その後(目安として初期ピーク値が確認されたら)5 mm/min で載荷し,押抜き最大荷重を計測する.その間10,20,30 mm の各変位において載荷を停止し,はく落範囲を供試体にマーキングするとともに,写真を記録する.さらに耐荷力を有すると判断できた場合には載荷を継続し,最大50 mm 程度まで確認する.

# 5.2 試験結果と AE トモグラフィの適用

# 5.2.1 試験結果

2 種類の試験体での結果を以下に示す. 図 5-8 は試験体ごとの荷重-変位曲線である. 図には最大荷重,変位 10 mm, 20 mm, 30 mm 時点の計測経過時刻を記している. また,図 5-9,図 5-10 では変位 10 mm, 20 mm, 30 mm, および計測終了時点の試験体破壊状態を繊維混入率別に示している.



(a)ファイバー0.3 %

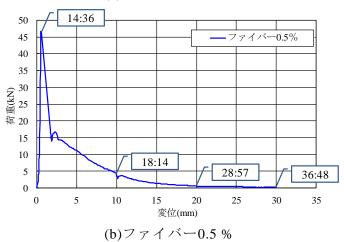


図 5-8 荷重-変位曲線



(a)変位 10 mm



(b)変位 20 mm



(c)変位 30 mm



(d)破壊状況 図 5-9 ファイバー混入率 0.3 %の試験経過



(a)変位 10 mm



(b)変位 20 mm



(c)変位 30 mm



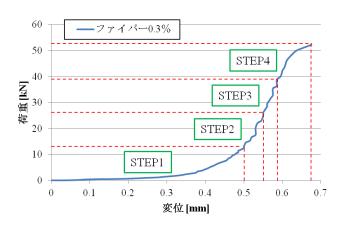
(d)破壊状况

図 5-10 ファイバー混入率 0.5%の試験経過

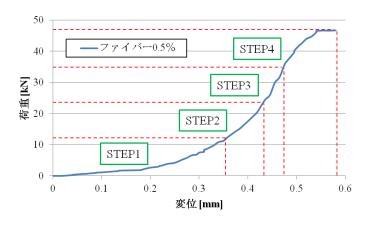
図 5-8 より,繊維混入率が大きい方が変位 2 mm~15 mm の範囲において耐荷重が大きくなっている. したがって,繊維混入率が大きくなるとはく落防止性能が向上することが確認された. また,図 5-9,図 5-10 より試験体中央の同心円状に破壊が進行していることがわかる. 次項ではこれらの観察結果と AE トモグラフィを適用した結果について比較・検討を行い、AE トモグラフィの適用性について考察する.

## 5.2.2 AE トモグラフィ解析

本節では、繊維補強コンクリートの押抜きせん断試験において得られた AE 源を用いて AE トモグラフィについて検討を行う. 本研究では構造物の初期損傷から検討できるよう に、計測開始から最大荷重を得るまでの間の AE データを用いることとした. 図 5-11 は最大荷重までの荷重-変位曲線で、表 5-3 はその詳細である. 図 5-12 は AE 計測で得られた AE 源である. これを最大荷重の 25、50、75%で区切り、計測開始から最大荷重までを 4 つのステップに分けた.



(a)繊維混入率 0.3 %



(b)繊維混入率 0.5 %

図 5-11 最大荷重までの荷重変位曲線

表 5-3 最大荷重までの詳細 (a)繊維混入率 0.3 %

荷重レベル	25%	50%	75%	100 % (MAX)
荷重(kN)	12.542	25.128	38.786	52.264
計測時刻(計測開始 を0秒とする)	111秒	131秒	147秒	163秒
AE源の個数	1	4	4	45

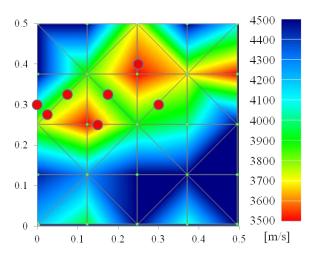
(b)繊維混入率 0.5 %

荷重レベル	25%	50%	75%	100 % (MAX)
荷重(kN)	11.256	20.662	31.732	46.704
計測時刻(計測開始 を0秒とする)	84秒	96秒	104秒	132秒
AE源の個数	94	91	31	41

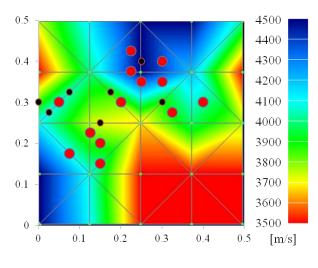
まず、AE 発生数が少ない繊維混入率 0.3 %の試験体に AE トモグラフィを適用する. 図 5-11 に示すように、荷重レベルで段階を設定すると AE 源の個数が偏り  $STEP1\sim3$  までは AE 源の個数が少なく AE トモグラフィプログラムの定量的評価が困難といえる. また AE トモグラフィは複数の AE 源を用いて解析を行うため解析結果は解析に供した AE データ を得た計測時間の代表値といえる. その結果、解析に用いる初期の AE と後期の AE では その AE 源が有する試験体内部の情報が異なる. そのため用いる AE は同程度の損傷状態

で発生していることが望ましい.そこで内部破壊の進行度合いの指標として AE ヒット数を挙げることができる.AE は内部の微小な破壊にともなって生じる弾性波であり,まさしくその数は破壊源の数を示している.しかし,AE ヒットごとの破壊エネルギーはそれぞれ異なることや,既存の損傷位置から二次 AE が発生する場合が考えられるため一概に損傷の進行を AE ヒットのみで判断することは容易ではないと考えられる.したがって,AE ヒット数は破壊の進行の指標として用い,繊維混入率 0.3 %の試験体は AE トモグラフィ解析に必要な AE 源の数で段階を区分し,AE ヒット数は考察にのみ用いた.段階区分は表 5-3(b)の STEP4 の AE 源数を 3 つに分割し,それ以前の  $STEP1\sim3$  の AE 源を一つにまとめた.この分割をそれぞれ 0.3  $STEP1 \sim 0.3$  STEP4 とする.各ステップの AE トモグラフィ結果を図 5-12 に示す.また,図 5-13 に各ステップの既往の位置標定結果,図 5-14 に AE ヒット数と累積 AE ヒット数を示す.

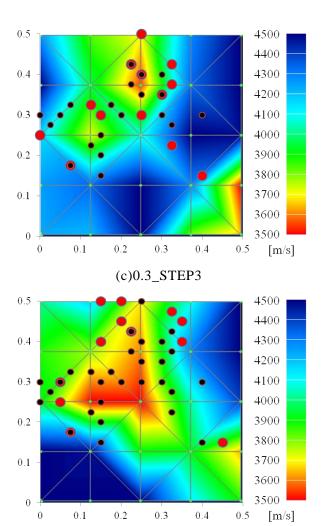
# ● 標定点 ● 既存の標定点



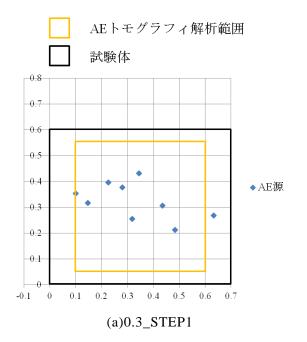
(a)0.3\_STEP1

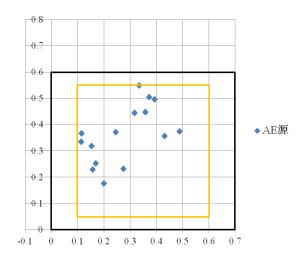


(b)0.3\_STEP2

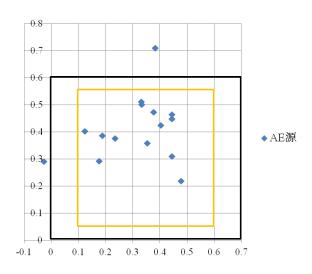


(d)0.3\_STEP4 図 5-12 トモグラフィ結果





(b)0.3\_STEP2



(c)0.3\_STEP3

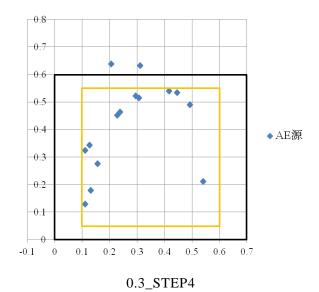


図 5-13 位置標定結果

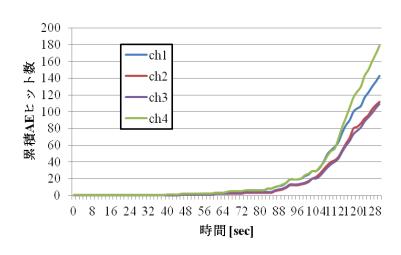


図 5-14 累積 AE ヒット数

まず、0.3\_STEP2 について検討する.解析結果の験体右下に低速度構造が出現しているのに対し、センサ毎の累積 AE ヒットは ch4 が最大で、次いで ch1 であり、既存 AE 源も試験体左側に位置している.これより、試験体右下側に低速度領域が出現している0.5\_STEP2 の結果は信用性が乏しい.その原因は解析に用いた AE 源のほとんどが試験体左上側に位置していることに起因していると考えられる.3章の検証では AE 源に偏在が生じてもトモグラフィ解析が可能であるとしたが、検証ではモデルの右下斜め半分の端部に離れた2つの発信点を与えた.しかし、03\_STEP2 の右下斜め半分には試験体中央部にのみ AE 源が存在する.さらに AE 源の推定に用いた波形は図 5-15 に示すような AIC を用いても正確に初動が読み取れない波形がほとんどであった.これは破壊が初期段階であるためそのエネルギーが小さかったに起因した結果と考えられる.したがって、AE 源位置標定結果もセンサ間の受信時間差も大きな誤差を含んだトモグラフィ解析結果が出力されたと推察できる.0.3\_STEP1 も同様で、用いた AE 源は図 5-13(a)や図 5-12 に示す標定点のように中央に集まっていることと波形の振幅が小さく初動時刻を正確に読み取れていないことから、解析結果の信用性は低いと考えられる.

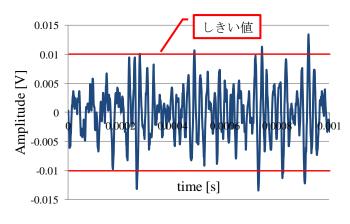
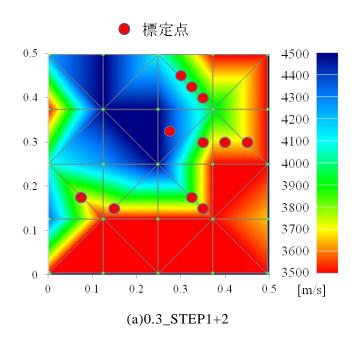


図 5-15 初動時刻読み取りが難しい波形

次に、0.3\_STEP3 と 0.4\_STEP4 に関しては、波形の振幅が大きいものが比較的多く、正確に初動時刻が読み取れた.0.3\_STEP3 は用いた AE 源が左上斜め半分に偏在しているが、比較的 ch2 センサ近傍にある AE 源も用いていることからセルごとの精度に多少のばらつきは想定されるが、モデル左上に生じた低速度構造部分は損傷を反映したものだと推察される. 低速度構造の部分と既存の AE 標定点が生じた領域が一致することからもそのことがいえる. 0.3\_STEP4 も同様に、解析に利用した AE 源に偏在は見られるが、ch2 センサ近傍の AE 源を用いていること、さらに全体的に AE 源が端部に寄っていることから解析の条件が揃っている. 中央部分の低速度構造が既存の AE 源と対応していることと実際の破壊も試験体中央部で起こっていることから、この結果は試験体内部の損傷を反映した結果であると推察される. また、0.3\_STEP3 と 0.3\_STEP4 の結果を比較すると破壊が進行していることを反映した結果となっている. 0.3\_STEP3 や 0.3\_STEP4 のように既存の AE 源の位置(既に破壊した領域)をそれ以外の領域で発生した AE 源を用いて AE トモグラフィ解析で捉えることができたことは、既存の AE 源(損傷域)が未知となる実構造物の診断に大きく寄与できると考えられる.

これまでの解析は AE 源を 15 個使用したが、AE 源の数が変化した場合についても検討を行う. 0.3\_STEP1 と 0.3\_STEP2 で利用した AE 源を組み合わせた 0.3\_STEP1+2 と、0.3\_STEP2 と 0.3\_STEP3 で利用した AE 源を組み合わせた 0.3\_STEP2+3 と、0.3\_STEP3 と 0.3\_STEP4 で利用した AE 源を組み合わせた 0.3\_STEP3+4 の解析結果を図 5-16 に示す.



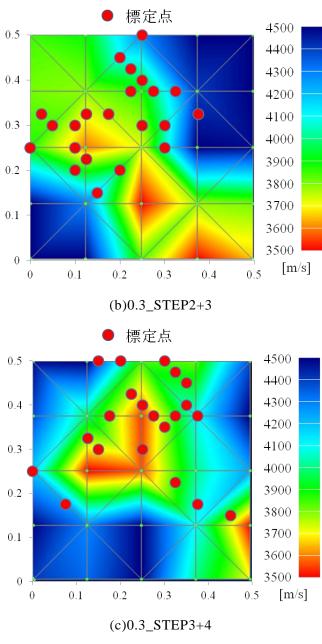


図 5-16 トモグラフィ解析結果

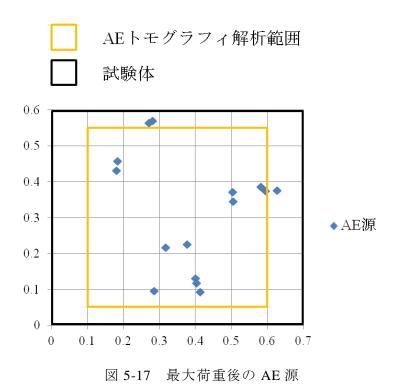
図 5-16(a)より、用いた AE 源の初動読取りに大きな誤差が含まれているためモデルとはかけ離れたトモグラフィ結果が出力された.この場合、図 5-13 から用いる AE 源の位置による推定精度の低下はないと考えられるが、初動読取り誤差の影響が大きく寄与したものと考えられる.トモグラフィ結果が想定される損傷と大きく異なっているため、図 5-12、もしくは図 5-13 と比べても位置標定結果が大きく異なっている.この結果より本プログラムで標定された AE 源はトモグラフィ結果の信用性を議論した後に用いる必要がある.

次に、0.3\_STEP2+3 は中央の損傷部分と既存の AE 源が生じた場所が低速度構造となっているが、右下の健全部と思われる領域も速度が低下している. これは初動を精度よく読み取った 0.3 STEP3 の AE 源により試験体中央の損傷領域が出現しているが、0.3 STEP2

の AE 源の影響により試験体右下の低速度構造が出現したと考えられる. したがって, 初動が正確に読み取れている AE 源と読み取れていない AE 源が混在するデータを同程度使用した場合, どちらのデータの影響も受ける結果が出力される. これは正確な初動読取りのデータが増加するとトモグラフィ精度が向上することを示唆している.

最後に 0.3\_STEP3+4 の結果は図 5-16(c)より,実際の破壊が起きた試験体中央部の損傷を反映した結果といえる. 波形の初動を正確に読み取ることができたもの同士を混在させたため,妥当な結果といえる. また 0.3\_STEP3+4 の結果は 0.3\_STEP4 の結果よりも低速度構造の領域が中央に移動し,範囲もより実際の領域に近付いている. この結果からも正確な初動読み取りが行われた AE 源を増加させることが精度の向上につながることが示された.

さらに最大荷重を越えたあとは試験体中央に確実にせん断破壊による損傷が存在することから、最大荷重後に発生した AE 源を用いて AE トモグラフィ解析を行った。AE 源は計測開始後 266,88 秒から 268,82 秒までの約 1 秒間に発生した 15 個を用いる。その AE 源は図 5-17 に示し、トモグラフィ結果を図 5-18 に示す。これらの AE 源は解析範囲内に広がっており、正確に初動が読み取られている AE 源を用いた。



74

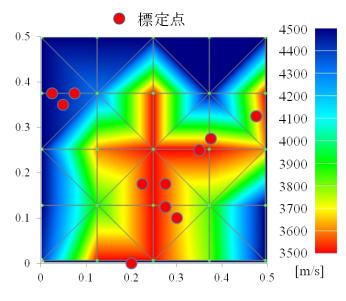
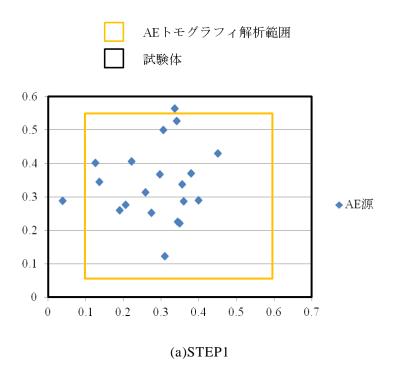
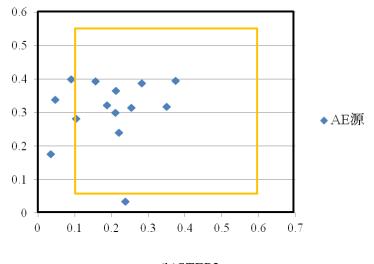


図 5-18 最大荷重後の AE トモグラフィ結果

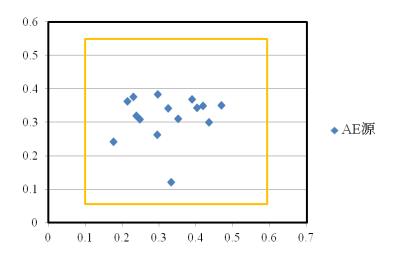
図 5-18 は試験体中央部が破壊された後の AE トモグラフィ結果であるため、試験体中央の損傷部分が正確に反映された結果といえる. また低速度構造の範囲も広がっており、破壊の進行を反映した結果といえる.

繊維混入量 0.5 %の試験では表 5-3 のように最大荷重を基準とした段階分けの方法でも各ステップで十分な AE 源が得られているため、このステップごとに結果を示す. 各ステップで AE 源はそのステップの終了時刻から 30 個の AE 源を用いて解析を行った. 図 5-19 は用いた AE 源の座標、図 5-20 はトモグラフィ結果を示している.





## (b)STEP2



(c)STEP3

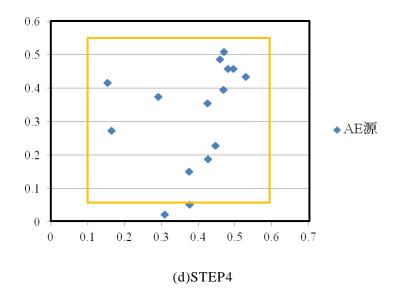
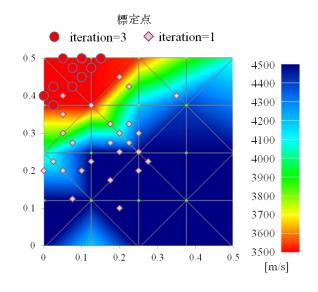
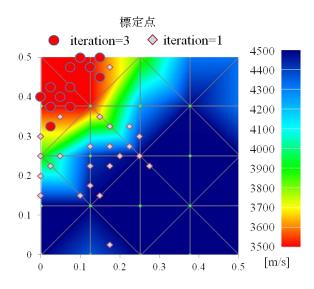


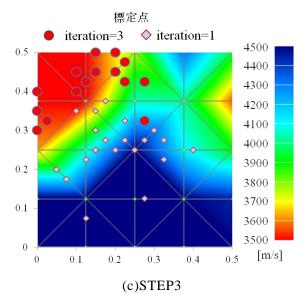
図 5-19 各ステップで用いた既往の位置標定結果



(a)STEP1



(b)STEP2



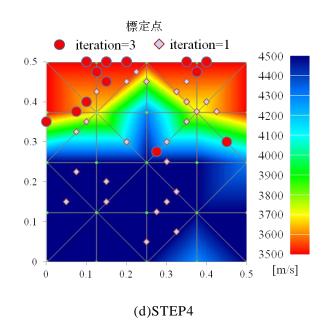


図 5-20 トモグラフィ結果

いずれのステップのトモグラフィ結果も試験体左上に低速度構造が出現し、最後のSTEP4では右上にも出現している。これは実際に破壊が生じた中央部の損傷に一致しない結果となっている。また、繰り返し回数1回の位置標定結果は試験体全体に広がっているのに対し、繰り返し回数3回では低速度構造の領域付近に集まっている。このような結果になる原因としては、まず載荷の偏心にともなう損傷が載荷初期の段階で ch4 センサ近傍に生じたと考えられる。図 5-21 に各センサの累積 AE ヒット数を示し、図 5-22 に最大荷重までの位置標定結果を示す。また STEP1で生じた 94 個の AE 源を 20 個ずつ分けてそれぞれ順に STEP1\_1~STEP1\_4(STEP1\_4 は AE 源が 14 個)として図 5-23 にそれらの位置標定を示す。図 5-21 より ch1 センサと ch4 センサの AE ヒット数が大きくなっており、AE 源も供試体中央より ch4 側に寄っている。この傾向は繊維混入率 0.5 %の試験でも見られたため偏心が生じていると思われる。また、図 5-23 より STEP1 の AE 源の増加は試験体中央から ch4 センサ側に集中している。

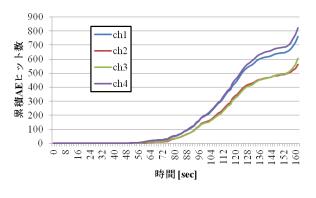


図 5-21 累積 AE ヒット数

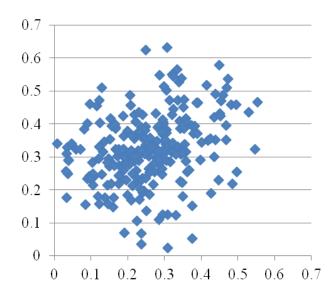


図 5-22 最大荷重までの位置標定結果

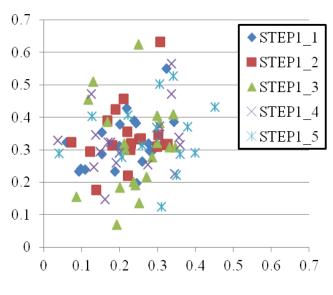
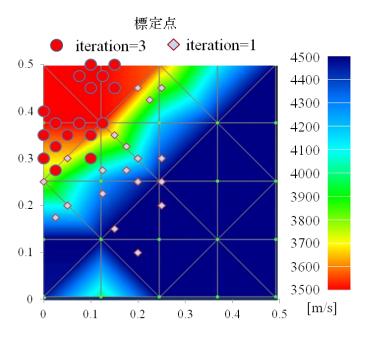


図 5-23 STEP1 中の AE 源増加の様子

ただし、載荷初期で AE トモグラフィが不可能なほどの損傷が生じるとは考えづらい. 載荷初期に損傷が生じたかを STEP1 と STEP2 に AE 速度トモグラフィ解析を適用して確かめる. 仮に初期損傷が存在しても STEP1 では比較的規模の小さい破壊にとどまると考えられる. 図 5-24 は STEP1\_1 と STEP2\_2 の解析結果である. 解析に用いた AE 源が偏在しているため多少の誤差は考えられるが、この結果から最も載荷初期である STEP1\_1 で ch4 センサ付近に低速度構造が現れるため、この低速度構造は損傷でない可能性が高まった.



(a)STEP1\_1

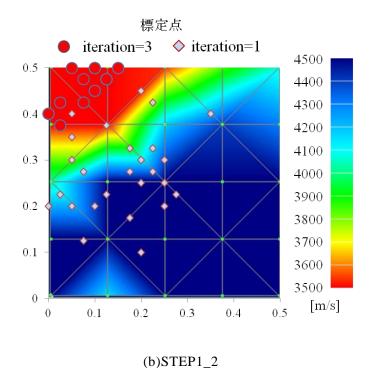
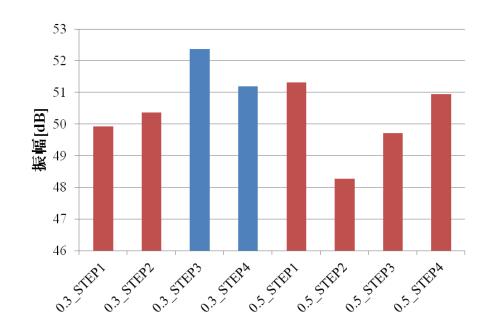


図 5-24 トモグラフィ結果

次に、AE 源のエネルギーを検討するため、AE トモグラフィで損傷を捉えることができた繊維混入率 0.3 %の AE 源と損傷を捉えることができなかった 0.3 %、0.5 %の AE 源を振幅の大きさで比較する。 図 5-25 はその結果である。振幅は AE トモグラフィ解析に利用した AE 源を推定するのに用いた全ての波形の平均値である。この結果より、AE トモグラフ

ィ解析で損傷を捉えることができたステップは、できなかったステップよりも比較的振幅が大きいことが分かる.この原因は、繊維の混入率が増加したため 0.3 %の混入量の場合よりもさらに破壊が各繊維に分散し、その結果一つ一つの破壊エネルギーが小さくなったものと考えられる.繊維混入量 0.5 %の試験体で発生した AE 源の実際の波形も図 5-15 のような初動が正確に読み取れない波形が大半を占めていた.また繊維が増加することで不均質度も高まり、加えて載荷の偏心により ch4 センサ側に損傷が生じ、小さい振幅を減衰によってさらに小さくした可能性がある.



以上より、本試験で得られた知見を以下に示す.

- i. 繊維混入率 0.3 %の試験体を用いた押抜きせん断試験に AE 速度トモグラフィを適用 することで、最大荷重に至る前に内部の損傷領域を捉える結果が得られた. これよ り、AE トモグラフィの適用性が確認された.
- ii. AE 源を 15 個用いて解析を行った場合でも損傷を捉えた結果が得られたことから, 計測で数多く得られる AE 源からエネルギーが大きい AE 源のみを抽出し, AE トモ グラフィに利用できることが示唆された.
- iii.  $0.3\_STEP2$  と  $0.3\_STEP3$  を組み合わせたように,信頼性の低い AE 源に信頼性の高い AE 源を加えると,解析精度が向上することが確認された.
- iv. 繊維混入率 0.5 %の試験体を用いた押抜きせん断試験に AE 速度トモグラフィを適用 したが、損傷を正確に捉えることができなかった. その理由は繊維量が増えること で試験体の破壊が各繊維に分散し、一つ一つの破壊エネルギーが小さくなったため 初動の振幅も小さくなったと考えられる. それにともない初動の読取りに誤差が生

じ、AEトモグラフィの精度が低下したと考えられる。また、繊維が増加することで 内部の不均質度が増し減衰が弾性波の減衰が大きくなることや、載荷の偏心により 試験体の損傷が一部だけ速く進行したことでその部分の減衰が大きくなった可能性 もある。

このように、AEトモグラフィは実際に生じる AE源を用いた適用性が示され、AE源のエネルギーに注意して解析を行えば解析精度が向上することが確認できた.

## 第6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 トモグラフィ法でも AE 速度トモグラフィについて検討を進めた. 位置標定と速度トモグラフィを同時に繰り返し行うことで内部の不均質性を考慮した位置標定を行うことができるプログラムを作成し、室内実験により有用性と適用性を検討した. その結果は以下のようにまとめられる.

- (a) AE 速度トモグラフィ解析において、AE 源の数が増加することでトモグラフィの精度が向上することが検証により確認できた. しかし、位置標定誤差を有する AE 源を解析に用いた場合、トモグラフィ結果に誤差が生じることから標定精度が高い AE 源を解析に用いることが望ましい. また、少数の AE 源で AE トモグラフィ解析が可能であることが確認できたため、十分な数確保されている場合、精度向上のため用いる AE 源を選択することができる.
- (b) AE 源の位置が対象領域の中央に偏ると波線が通過する領域が限定されトモグラフィ解析に誤差を生じる可能性がある.一方,AE 源が解析領域端部にある場合は,全てのセルに複数波線が通過していれば,損傷を捉えたトモグラフィ解析が可能であることが検証により示された.
- (c) 既往の位置標定では誤差が生じる場合でも、本プログラムはトモグラフィが精度良く行われた場合、位置標定とトモグラフィの繰り返し計算により正しい位置に AE 源が標定されることを検証により示した. これより AE 源の位置標定誤差が内部速度構造の不均質性に起因する場合、位置標定とトモグラフィを同時に行う本プログラムの特長により AE 源は正確な位置に標定されると考えられる.
- (d) (a)(b)(c)を踏まえ、解析に用いる AE 源で最も重要なことは『初動が正確に読み取られていること』である。それには初動振幅が大きいことが必要である。したがって、エネルギーが大きい AE 源を選ぶことで AEトモグラフィ解析精度が向上すると考えられる。
- (e) プログラムの検証では実際に得られる AE 源を想定した発信源は考慮できていないが、 キャリブレーションショットを行う場所の検討としては有意義な検討であり、その結 果を用いて AE トモグラフィ解析を行うことでより正確な AE トモグラフィ結果が期待 できる.
- (f) 繊維補強コンクリートの押抜きせん断試験により、試験体中央の損傷部分を試験体内 部から発生する AE を用いて推定することができた. これより AE 速度トモグラフィ法 の適用性が確認できた.
- (g) プログラム検証と同様に、実際の破壊試験で解析に用いた AE 源が少数であっても (本

研究では15個)解析に利用するAE源のエネルギーが大きい場合,計測対象内部の損傷を捉えることができた.

- (h) センサ配置が 2 次元平面配置であっても計測対象内部から生じる AE 源を用いることで対象内部の情報が得られた.
- (i) 損傷部分である既存のAE源位置をそれ以降に生じたAE源を用いて推定することができた. 既存の構造物は過去のAE源が未知情報であるため,AE速度トモグラフィ解析によりその損傷部分を推定できる可能性があることを示した.

さらに、本研究で得られた副次的な結果を以下に示す.

- (j) 3 次元から発生する弾性波を 2 次元に投影した場合, センサの中央になるほど誤差が 小さく, センサ近傍となるほど誤差が大きくなることが明らかとなった. その誤差は 対象物の奥行きに依存しセンサ間の中央に寄ることが確認できた.
- (k) 赤池情報量基準 (AIC) は波形の初動読取りの精度を大きく向上させた. ただし, エネルギーが小さい波形の場合, 初動を読み取ることが困難となるが 2 度 AIC を用いることで正確に初動が読み取れる場合がある. AIC でも読み取れない初動を有する波形は AE 速度トモグラフィ解析から除外することで解析精度の向上につながる.
- (I) AE 速度トモグラフィ解析は用いる AE 源を選択できるため、エネルギーや AE カウント数、Duration などを用いることで解析精度を低下させる要因となる AE 源を除去することができる.

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) AEトモグラフィの精度を向上させる定性的な条件として、AE源のエネルギーが大きいことや AE源が対象領域端部にあること、AE源が計測対象領域中に広範に存在することなどを提示したが、その条件の最適化を図る検討が必要である。本研究ではセンサ配置は全て正方形で、数も全て 4 個であったため、センサの個数が増加した場合も検討を行う必要がある。
- (b) 精度の良い解析を行うためには AE 源の取捨選択に寄与する波形の信頼性指標を確立する必要がある. 特に初動を正確に読み取るためにはエネルギーが大きい波形により標定された AE 源を選択する必要がある. したがって, 波形の信頼性指標にはエネルギーに関係の深いカウント数や Duration などのパラメータをさらに検討していく必要がある.
- (c) 本研究ではAEが分散して生じる繊維補強コンクリートを用いた試験をAEトモグラフ

ィの検証として行った.本試験で適用性が確認できたため、今後は実構造物において本手法の適用性を検討する必要がある.また実構造物では局所的に AE が生じるような場合が想定されるためその対策についても検討を行う必要がある.現在 AE 源が局所的に生じることへの対応として、任意の位置から能動的に弾性波を励起する手法を考えているが、その方法の適用性を検討することも必要である.

(d) 様々な計測対象に AE トモグラフィを適用するために、現在の 2 次元だけではなく 3 次元にまでプログラムを拡張することが必要である.

今後は本研究が提案する AE トモグラフィ解析を用いて、より多くの実構造物に適用し、 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)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.
- 2) 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.
- 3) 川村宏行:青森県橋梁アセットマネジメントの取り組み,建設マネジメント技術 5月号, pp.56-60, 2008.
- 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) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 桃木昌平, 宮永孝志, 塩谷智基, 蔡華堅: AE トモグラフィによるコンクリート構造物のグラウチング補修効果検証, アコースティック・エミッション総合カンファレンス論文集, 17 巻, pp.57-60, 2009.
- 12) 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.

- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) F. R. Breckenridge: Acoustic Emission Transducer Calibration by Means of the Seismic Surface Pulse, Journal of Acoustic Emission, Vol. 1, pp. 87-94, 1982.
- 16) 土木工学会: 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集, pp.100-104, 2004.
- 17) 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.
- 18) 塩谷智基, Dimitrios G. Aggelis, 桃木昌平: 弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評技術, とびしま技法, No.52, 2007.
- 19) 佐々宏一, 芦田譲, 菅野強: 物理探查, pp.122-123, 森北出版, 1993.
- 20) Oawald G dos Samtos Filho: Acoustic Emisson Tomography to Improve Event Locations and Diagnostics of Inhomogeneous Equipments and Structures, Proceedings of World Conference on Acoustic Emission 2011, Beijing, pp.310-314, 2011.
- 21) Schubert, F.: Basic principles of acoustic emission tomography, Journal of Acoustic Emission, Vol.22, pp.147-158, 2004.
- 22) Schubert, F.: Tomography Techniques for Acoustic Emission Monitoring, 9<sup>th</sup> European Conference on NDT September 2006 Berlin (Germany) ECNDT 2006.
- 23) D. G. Aggelis, N. Tsimpris, H. K. Chai, T. Shhiotani and Y. Kobayasi: Numerical simulation of elastic waves for visualization of detect, Construction and Building Materials, in print.
- 24) T. Shiotani: Single-side access tomography for evaluating interior detect of concrete, Construction and Building Materials, in print.
- 23) 仲佐博裕: アコースティックエミッションの理論と実際-非破壊検査におけるフラクタル評価法-, pp.61-108, 地人書館, 1994.
- 24) 土木学会: 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, pp.46-55, 2004.

- 25) Aggelis G. D, T. Shiotani: Effect of inhomogeneity parameters on wave propagation in cementitous material, ACI Materials Journal, vol.23, No.6, pp.629-637, 2008.
- 26) 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.

## 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。B4, 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。そこでマネジメントや工学の考え方に触れたことを今後の社会人生活に役立てたいと思います。また、私がたばこを吸わないのでたばこ部屋で会話することができなかった代わりに飲み会の時はよく隣に座らせていただき、その都度様々な興味深いお話を聞けたことも財産になっております。心より感謝申し上げます。

京都大学大学院工学研究科准教授・塩谷智基先生には、3年間研究をみていただきました。すぐに細かい議論に進みがちであり、頑固で出来の悪い私に辛抱強く丁寧に指導して頂いたことに本当に感謝しています。また、学会や委員会に行かせていただいた経験は何事にも代えがたい経験となっております。そして、研究、実験、飲み会など先生との思い出はとても楽しく、そして有意義な時間でした。深くお礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科准教授・西山哲先生には、本論文の副査を務めていただき、的確かつ貴重なご指摘を頂きました。また、関大や学内で行われた中間発表でも度々ご質問を頂いたことで本論文を充実させることができました。本当に感謝致します。

京都大学大学院工学研究科助教授・稲積真哉先生には、研究面だけでなく生活面においても研究に集中できる環境を作って頂き、安心感を持って研究を進めることができました. 心よりお礼申し上げます.

日本大学理工学部土木工学科・小林義和先生には、本研究の核となるプログラムを作成して頂きました。このプログラムがなければ私の研究はどのようになっていたか想像がつきません。そのような重要なプログラムを作成して頂き、また質問にも懇切丁寧に答えていただき深く感謝しております。

京都大学大学院工学研究科准教授・大島義信先生には、研究に必要なプログラムを作成して頂き、時には研究室の垣根を超えて助言を頂き、本当に助かりました。心から御礼申し上げます。

飛島建設株式会社の桃木昌平様には、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、誠に感謝しております. さらに、技術研究所でお世話になった時は研究面だけではなく生活面でもサポートして頂き、いつも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.

お名前は割愛させていただきますが、本研究に関する AE トモグラフィ研究会に参加して 頂きました先生方や企業の方には様々な助言を頂きました。様々な方々と知り合うことが できたおかげで学ぶことがたくさんありました。心から感謝しております。

秘書の伊東さんには、出張の際の手続きを丁寧にして頂き、こちらがミスをした時も優しく対応して頂き心より感謝しております.

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。 きっちりとした性格の大川君、川合君には分からないことを質問すると嫌な顔せず教えてくれたりと何度も助けられ、無事に卒業できたと思います。本当にこのメンバーで良かったと思っております。

京都大学大学院工学研究科土木施工システム分野の磯田隆行君,岩本勲哉君,太田康貴君,木許翔君,古賀博久君,奥野直紀君,高田雄大君,益田浩君,松塚直也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。また,クセの強い私たち M2 にすごく気を配ってくれて本当に良い後輩を持ったと思っております。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。ゼミの直前まで準備をしなければならないことが多くあまり研究で良い手本になれなかったですが,一緒に研究を進めていた時間はとても楽しかったです。研究を共にした岩本君と高田君とは研究会や実験などでともに過ごす時間が多く思い出ができました。岩本君が夜遅くまでの作業をお願いしたときに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なりました。高田君には千葉での実験を手伝ってもらい助かりました。また去年の先輩である河合啓介さんには、夜に研究のことでお電話をさせていただいたこともありました。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両親をはじめとする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.