# AEトモグラフィによる

インフラ構造物の損傷可視化に関する研究

平成 25 年 2 月 20 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

大澤智

要旨

1996年に発生した豊浜トンネルの岩盤崩落事故や記憶に新しいも のでは 2012年の笹子トンネルの天井板崩落事故など、インフラの機能 低下は多くの犠牲をともなう。このように、近年、我が国では橋梁や トンネルなどのインフラ構造物の老朽化や岩盤斜面の脆性崩壊を起因 とした事故が問題となっている。また、年々削減される建設投資額も 考慮すると、今後は構造物を効率的に維持管理していくことが重視さ れると予測できる。一般に、土木構造物は複合材料であり、様々な条 件下で使用されている。しかし、計測箇所が限定される中で、不均質 な内部の損傷を精度良く評価することは困難であると考えられる。ま た、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手法は確立されていない。そこで、内部損傷を早 期に定量的に診断する手法が求められているのである。

そこで、既往の研究において、非破壊診断技術の一つである AE 法 とトモグラフィ法を応用した AE 速度トモグラフィ法が新たな損傷評 価手法として提案された。この手法は位置標定とトモグラフィ解析を 同時に行うことで検査対象内部の速度構造を反映した解析を行うもの であるが、十分に適用性が検討されていない。

本研究では、上述の AE 速度トモグラフィの適用性を検討するため、 以下の材料・構造物で本手法の有用性を検討した。具体的には、コン クリート床版と岩盤より採取した岩石供試体に AE 速度トモグラフィ を適用した。その結果、構造物内部の損傷を AE 速度トモグラフィに より推定することが可能であることが明らかとなった。また、得られ た結果より精度向上に資する課題を明らかにすることができた。

i

## 目次

第1章序論1
1.1 研究の背景1
1.2 研究の目的2
1.3 既往の研究2
1.4 本論文の構成
第2章 AE(アコースティック・エミッション)4
2.1 概説
<b>2.2 AE 計測法</b> 4
2.3 AE の波形特性
2.4 AE パラメータ
第3章 AE トモグラフィ10
<b>3.1 AE 位 置 標 定 法</b>
3.2 トモグラフィ法10
<b>3.3 AE 速度トモグラフィ法</b> 13
3.3.1 AE 速度トモグラフィの AE 位置標定手法14
<b>3.3.2 AE</b> 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法14
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法
<ul> <li>3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法</li></ul>
<ul> <li>3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法</li></ul>
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法       14         3.4 既往の研究の成果       15         第 4 章 新幹線高架橋コンクリート床版への AE 速度トモグラフィの適用       17         4.1 目的       17
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法       14         3.4 既往の研究の成果       15         第 4 章 新幹線高架橋コンクリート床版への AE 速度トモグラフィの適用       17         4.1 目的       17         4.2 概要       17
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法       14         3.4 既往の研究の成果       15         第 4 章 新幹線高架橋コンクリート床版への AE 速度トモグラフィの適用       17         4.1 目的       17         4.2 概要       17         4.2.1 計測概要       17
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法       14         3.4 既往の研究の成果       15         第 4 章 新幹線高架橋コンクリート床版への AE 速度トモグラフィの適用       17         4.1 目的       17         4.2 概要       17         4.2.1 計測概要       17         4.2.2 AE 速度トモグラフィ計測方法       18
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法       14         3.4 既往の研究の成果       15         第 4 章 新幹線高架橋コンクリート床版への AE 速度トモグラフィの適用       17         4.1 目的       17         4.2.1 計測概要       17         4.2.2 AE 速度トモグラフィ計測方法       18         4.2.3 表面波トモグラフィ計測方法       18
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法       14         3.4 既往の研究の成果       15         第 4 章 新幹線高架橋コンクリート床版への AE 速度トモグラフィの適用       17         4.1 目的       17         4.2 概要       17         4.2.1 計測概要       17         4.2.2 AE 速度トモグラフィ計測方法       18         4.2.3 表面波トモグラフィ計測方法       18         4.3 実験結果と考察       18
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法       14         3.4 既往の研究の成果       15         第 4 章 新幹線高架橋コンクリート床版への AE 速度トモグラフィの適用       17         4.1 目的       17         4.2 概要       17         4.2.1 計測概要       17         4.2.2 AE 速度トモグラフィ計測方法       18         4.2.3 表面波トモグラフィ計測方法       18         4.3.1 表面波トモグラフィ結果       19
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法       14         3.4 既往の研究の成果       15         第 4 章 新幹線高架橋コンクリート床版への AE 速度トモグラフィの適用       17         4.1 目的       17         4.2 概要       17         4.2 概要       17         4.2.3 表面波トモグラフィ計測方法       18         4.3 実験結果と考察       18         4.3.1 表面波トモグラフィ結果       19         4.3.2 AE 速度トモグラフィ結果       19
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法       14         3.4 既往の研究の成果       15         第 4章 新幹線高架橋コンクリート床版へのAE 速度トモグラフィの適用       17         4.1 目的       17         4.1 目的       17         4.2 概要       17         4.2.1 計測概要       17         4.2.2 AE 速度トモグラフィ計測方法       18         4.3.3 表面波トモグラフィ計測方法       18         4.3.1 表面波トモグラフィ結果       19         4.3.3 AE 速度トモグラフィ解析精度を向上させる方法       20

4.4 まとめと課題	
第5章 三軸圧縮試験中の岩石供試	体への AE 速度トモグラフィの適用
5.1 目的	
5.2 概要	
5.2.1 供試体概要	
5.2.2 実験方法	
5.3 実験結果と考察	
5.4 まとめと今後の課題	
第6章 結論と今後の展望	
6.1 本研究で得られた知見	
6.2 今後の課題と展望	

参	考	文	南	犬	••	••	 ••	•••	 •••	••	• • •	••	••	••			•••	•••	 ••	••	••	 	••	••	••	 	•••	 ••		 ••	 ••	•••	 •••	••	••	 •••	 	3	1
謝	辞			•••			 •••	•••	 	•••		•••	•••		•••	•••	• • •	•••	 		•••	 		•••	•••	 	•••	 •••	•••	 •••	 	•••	 •••	•••	•••	 	 	3	3

## 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、現在もその多くが継続的に使用されており、図1.1のように今後供用50 年を経過する社会資本は大幅に増大する<sup>1)</sup>。また、2012年には中央自動車道、笹 子トンネルにおいて、老朽化した天井板の崩落により9名の尊い命が奪われると いう事故も発生している。そこで、今後は老朽化した社会資本を維持・管理する 時代の到来が考えられ、土木構造物の維持・管理に資する手法が必要とされる。

ここで、コンクリートや岩盤構造物など様々な実構造物や構造物材料の維持・ 管理について考える。床版などの土木構造物においては、損傷の進展は穏やかで 補修の緊急性が低い。そのため、コスト面を考慮した補修時期の決定が一般的で、 アセットマネジメントの考え方に基づき、いかに LCC (ライフサイクルコスト) を最小にするかに重点が置かれる。そこで、構造物の補修・保全を考えると、そ の作業を行うタイミングの違いから、事後保全と予防保全が存在する。前者は構 造物の劣化が顕在化してから補修を行うのに対し、後者は損傷を目視できない、 顕在化前の段階で補修を行うというものである。また、図 1.2 より LCC の観点か ら予防保全は事後保全よりも、少ない予算で構造物の長寿命化を図ることが可能 であり<sup>2)3)</sup>、より優れた保全方法だと考えられている。ここで、予防保全を実施 するためには目視では検知できない内部の初期損傷から評価する必要がある。

一方で、岩盤などの土木構造物の補修はリスクマネジメントの観点から検討さ れる。リスクマネジメントにより、岩盤崩壊確率と被害規模をもとに補修工事の 優先順位が決定される。崩壊確率の算定には岩盤内部を定量的に評価することが 重要である。また、岩盤斜面崩壊は脆性的で外部変状が発現してから崩壊に至る までの時間が非常に短く、早期の補修が必要である。そこで、外部変状が発現す る以前の早期の内部損傷を定量的に評価する手法が確立されれば、リスクマネジ メントによる適切な優先順位をもとに補修が実施され、岩盤崩壊事故の軽減につ ながると考えられる。ここで、危険な岩盤斜面を求めるためには、多数の岩盤斜 面からそれを絞り込む必要がある。現在までにボーリングコアを用いたティルト 試験と簡易安定性評価手法を組み合わせるスクリーニング技術 4)や GPS 測量など により対策の必要性の高い岩盤斜面を絞り込む試みが行われているが、確立には

至っていない <sup>5)</sup>。仮に、危険斜面の特定が行われたとしても、一部の斜面ではデ ジタル画像計測 <sup>6)</sup>等により危険岩盤における外観での変状箇所の特定が行われて きたが、変状箇所の特定された岩盤内部の損傷の定量的な診断には至っていない。 以上のように、コンクリートや岩盤など、様々な土木構造物にも広く適用可能 で、内部の損傷位置と損傷規模を早期に検出可能な手法が求められている。しか し、そのような内部損傷を定量的に評価する手法が確立されていないのが現状で ある。現在までに提案されている非破壊検査手法としては、超音波法や光ファイ バーひずみセンサ法など様々な手法が挙げられる。しかし、これらの手法は適用 可能対象やコスト、あるいは損傷の早期検出において多くの課題を抱えている<sup>7)</sup>。

本研究では、クラック形成における微視的破壊からクラック形成後の巨視的破壊に至るまで評価可能で、かつ対象破壊規模に応じた周波数を用いることで微視的損傷から巨視的損傷まで対応可能な AE トモグラフィ法について研究を進める。

#### 1.2 研究の目的

先述のように、顕在化以前の損傷により第三者に甚大な被害をもたらす事故が 今後増大していくと考えられるが、その健全性判断に必要となる内部損傷領域を 定量的に診断できる技術は未だ確立されていない。本研究では、これらの健全性 評価に寄与できるであろう AE トモグラフィに着目し、原位置での土木構造物の 損傷可視化を目指し研究を進める。まず、実構造物である新幹線高架橋のコンク リート床版に AE トモグラフィを適用する。また、岩石供試体への同プログラム の適用性を検討するために、岩石供試体の破壊過程を同手法により検討する。そ して、今後の課題を抽出する。

#### 1.3 既往の研究

本節では、AEトモグラフィ法を構成する AE法とトモグラフィ法に関して既往研究を概観する。

AE 法をコンクリート床版の疲労損傷評価に適用した研究として、湯山ら<sup>8)</sup>は繰り返し荷重試験によりコンクリート床版内から AE 波を発生させ、その AE 波を利用して床版の損傷について検討した。その結果として、ひび割れ密度の履歴と AE 活動度の履歴を対照することにより、疲労荷重下における損傷の進展を AE の 計測により予測・評価できることを示した。そして、ひび割れの目視観察結果と

AE発生源の平面位置標定結果を比較することで、AE源位置標定を用いて、ひび 割れ発生部位をある程度特定化できることも明らかにしている。また、AE法を 用いて損傷の進展を評価するには、必ずしもその全期間にわたり連続的な計測を 行う必要はなく、一定周期ごとに短期間の計測を行えば、実用的には十分有効で あることも示した。以上より、定期的な AE計測で損傷進展が評価できるため、 AE法は実用的・経済的に有効な手段であることが示唆された。

しかし、AE 法は既存の損傷位置で二次 AE が発生しない場合には損傷が評価で きないという欠点がある。そこで、弾性波を励起させるトモグラフィ法による追 加計測が必要となる場合が多い。塩谷ら<sup>9)10)</sup>は、道路橋床版やダムなどの土木構 造物に対して計測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の可能性を示した。しかし、 トモグラフィ法においては、セルを通過する波線密度が大きいほど解析精度が良 くなるためセンサ配置を広範囲にできず、また、能動的な弾性波の励起が必要と なるなどの計測条件を必要とした。

#### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は全6章からなる。

第1章では、序論として研究背景、目的、および既往の研究との関連を述べた。 第2章では、AEの概説をするとともに AE計測法や特性パラメータを説明する。 第3章では、まず、本研究に用いた AE トモグラフィについての概要と基礎理 論を説明する。その後既往の研究について述べ、既往の研究で得られた知見を、 後述する実構造物での実験の考察に用いるために示しておく。

第4章では、新幹線高架橋に利用されているコンクリート床版の内部損傷評価 に AE 速度トモグラフィを適用し、その原位置適用性を検討する。検討には既往 手法、ここでは打音検査や表面波トモグラフィ結果を用いて考察する。

第5章では、崩落した岩盤のコアボーリングから得られた岩石供試体の三軸圧 縮試験で得られた AE を利用して内部の損傷領域の評価が可能か、さらには損傷 の進展が可視化できるか検討を行う。

第6章では、第4、5章で得られた知見からまとめを示し、また今後の課題についても考察を行う。

## 第2章 AE(アコースティック・エミッション)

本章では、AE の概説や計測法などを述べ、本研究で用いた表面波などいくつ かの弾性波についても述べる。また、損傷と密接に関係する AE パラメータ指標 についても説明する。

#### 2.1 概説

AE とは、アコースティック・エミッション (Acoustic Emission)の略であり、 直訳すると「音響の放出」である。この音響の放出は物体の破壊や変形に起因す るものである。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 は微小な破壊や それと同様なエネルギー解放過程によって発生し、「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」とも 定義できる<sup>11)</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多岐におよび、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及んでいる。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いえる。そ こで、今後の維持管理時代の到来に向けて、AE 検査法の展開が注目されている。

#### 2.2 AE 計測法

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。発生した弾性波は 物体内を伝播し、表面に取り付けられた AE センサで受信され、電気信号に変換 される。そして、信号はプリアンプで増幅され、AE 計測装置本体内でエネルギ ーや到達時刻などのパラメータの抽出、演算が行われ、得られた結果が出力され る。ここで、AE は非常に微弱であるため、センサは高感度である必要がある。 また、検出された波形は縦波 (P 波)、横波 (S 波)、表面波、境界での反射波な どが重なりあい非常に複雑な波形を取っており、数 μV-数百 μV の電圧で数 kHz-数 MHz の周波数成分を持っている。そこで、センサは対象とする破壊の規模や 材料により適切な周波数を選択し、それに見合った周波数特性のセンサを用いる 必要がある。

#### 2.3 AEの波形特性

図 2.2 のように AE が弾性波動として AE センサに到達する過程では、縦波(P 波)、横波(S波)、表面波など多数の波動が確認される。このうち、P 波、S 波は AE 発生源に直接関係し、実体波とも呼ばれる。また、次節以降説明するが、AE 速度トモグラフィに有効な情報は初動の読み取り時間であり、そのことからも到 達時間の最も速い P 波の到達時間が利用されている。一方、AE として伝わる弾 性波の波長に比べて板厚の薄い材料では、表面波の Rayleigh 波が卓越して発生す る。この節では、このような波の種類(振動モードという)に着目し、特徴やそ れを利用した有効な手法などを述べる。

#### 1. 縦波(P波)

縦波とは粒子の振動が波の進行方向と平行な方向、つまり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であれば伝播するので、固体、液体、および気体の中を 伝播することが可能である。また、弾性波の中では速度が最大であり、P 波のエ ネルギーは弾性波全体の約 10%を占める。ここで、弾性係数 E、質量密度ρ、お よびポアソン比 vを用いると P 波の波速は次式で示される。

$$C_{p} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$
(2.1)

#### 2. 横波(S波)

横波とは粒子の振動が波の伝播する方向と垂直な方向、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。 また、P 波と同様に弾性係数 E、質量密度ρ、およびポアソン比vを用いると S 波 の波速は次式で示される。

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \tag{2.2}$$

#### 3. 表面波(Rayleigh 波)

表面波とは材料の表面部分を楕円状の動きをしながら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。ここで、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。伝播時の楕円状の動きはこれらが合 成されて生み出される。また、表面波の振動範囲は 1 波長分にほぼ等しく、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。

このような特徴を生かして、塩谷ら<sup>12)</sup>は、表面波トモグラフィといわれる物体 内部を片側表面から診断する技術を開発した。ここで、表面波トモグラフィの仕 組みについて説明する。まず、図 2.3 に示すように、表面に打撃を行い、表面波 を発生させる。ここで、表面波が物体表面を伝播する際、表層付近に空隙やひび 割れ等の欠損箇所が存在すると、表面波の反射や散乱により伝播距離は最短経路 を取らない。つまり、センサ到達までに時間を要し、伝播経路を直線と仮定して 計算すると伝播速度は低下する。そこで、構造物の片側表面に配置されたセンサ で収録した波形データから、表面波の卓越周波数に応じた伝播速度を算出してト モグラフィを適用することで、内部の速度低下、つまり内部損傷を広域的に評価 可能となる。伝播速度は次式で示される。

$$V_{ph} = \lambda f = \left(\frac{2\pi\Delta x}{\Delta\varphi}\right) f \tag{2.3}$$

ここで、*V<sub>ph</sub>*は伝播速度、λは波長、*f*は表面波の卓越周波数、Δ*x*は走査線間距離、Δ*φ*は走査線間の卓越周波数に応じた位相差を示す。

このとき、式(2.4)より、卓越周波数から求められる波長に相当する深さが、表面波の最大評価深さと考えられる。また、式(2.5)より打撃を加える剛球直径を大きくすることによって周波数を変えることができ、その結果、より深くまでの診断が可能となる。しかし、表面波トモグラフィの評価深さは最大でも厚さの半分であることも確認されている。

$$\lambda = \frac{V_{ph}}{f} \tag{2.4}$$

$$f = \frac{291}{D} \tag{2.5}$$

ここで、V<sub>ph</sub>は伝播速度、λは波長、f は表面波の卓越周波数、D は剛球直径を 示す。

#### 2.4 AE パラメータ

図 2.4 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得る ことができる。本節では、破壊の進展に密接に関連している 7 つの AE パラメー タについて記す。

#### 1. 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。これに対して、 各センサで受信された同波形をまとめて 1イベントという。つまり,発生した AE 事象が 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。 AE ヒットの計測方法と しては次の 2 つが知られている。1 つは、図 2.5 のように最初にしきい値を越え る振幅が発生すると 1 パルスを送信し、その後信号が減衰するまで不感時間を設 けるパルス方式である。もう 1 つは、図 2.6 のように包絡線検波を行ってその検 波信号の個数を計測する包絡線検波法である。このような方法により、反射波の 重複記録などを小さくすることができる。このパラメータから微小な破壊の発生 頻度が得られ、ある条件下において、いかにひび割れがアクティブに発生してい るかが検討できる。

#### 2. 立ち上がり時間(Rise Time)

弾性波がしきい値を越えた時刻から最大振幅を取るまでの時間であり、各波形 の立ち上がりの鋭さに関する情報を与える。

#### 3. リングダウンカウント数

しきい値を超える振幅に対してそのすべての振動回数を指す。AE の発生頻度 は微小ひび割れの発生回数に依存するが、どの程度のひび割れに対応して計測さ れたかは計測条件に大きく依存する。そのため数字そのものにはあまり意味はな く、AE ヒットと同様に、ある条件下でいかにアクティブに発生しているかどう かの相対的な指標と考えるべきである。例えば、AE 発生個所および計測個所が 同じ場合には、カウント数を比較することによって、破壊規模の大小を検討でき ると考えられる。

#### 4. エネルギー(Energy)

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。このように、いずれの方法も振幅 値を利用していることが分かるが、前述したように振幅値は相対的な指標である。 つまり、発生した AE のエネルギーも相対的な比較を行う上では最適なパラメー タといえる。

#### 5. 継続時間(Duration)

収録された1つの波形の継続受信時間を指す。この時間は最初にしきい値を超 えた時刻から最後にしきい値を超えた時刻までの時間である。一般的に弾性波は, 上述しているように P 波と S 波が発生し、それらが表面波や反射波も発生させ、 それらが混在するために Duration はある程度の長さ観測される。しかし、弾性波 のエネルギーが小さい、もしくは弾性波が発信源からセンサまでの間に大きく減 衰してしまう場合、受信時のエネルギーが小さくその波形の最大振幅付近のみが しきい値を超える場合がある。

## 6. AE 最大振幅值(Amplitude)

収録されている 1 波形の中で最も大きい振幅を指す。一般的には、AE 発生源 での微小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、破壊規模の大 小に応じて振幅値が得られる。ただし、二つの注意点があり、一つは、減衰の影 響を考慮する必要があるということである。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、AE 発 生源が不明な場合、センサ近傍の微小な振幅を持った AE 波形と離れた地点で発 生した大きい振幅の AE 波形が減衰して、結局は同程度の振幅値の AE として検 出される。この点に注意しなければならない。二つ目は、最大振幅は一般的に実 体波でない表面波によってもたらされるということである。つまり、厳密にいえ ば、その振幅は AE 発生源の規模とは関係していない。しかし、表面波の振幅は それを発生させた P 波、S 波のエネルギーに依存するので、相対的に最大振幅は AE 発生源の規模を代表しているパラメータといえる訳である。

#### 7. 周波数(Frequency)

一般的な AE 波形にフーリエ変換を施すと、図 2.7 のような周波数分布が得ら れる。この周波数分布に関して、最も卓越した周波数を卓越周波数 (Peak-Frequency)、周波数分布の重心を中心周波数(Center-Frequency)と呼ぶ。また、 リングダウンカウント数を継続時間で除したものを平均周波数(Average Frequency)と呼び、後述する破壊種別の分類方法に利用する。

#### 8. RA 值 /平均周波数(RA value/Average Frequency)

RA 値は最大振幅値を波の立ち上がり時間で除した値の逆数であり、いわば波 の急峻度の逆数を取ったものである。ここで、そもそも AE はき裂が生じる際の 一次 AE とき裂が摩擦などによって進展する際の二次 AE に分類される。一次 AE は破壊を突発的に引き起こすものなので、波の急峻度は大きく、平均周波数も大 きくなる。また、二次 AE は破壊の進展を連続的に引き起こすものなので、急峻 度は小さく、平均周波数も小さくなる。そこで、塩谷ら<sup>13)</sup>は図 2.8 のようにこれ らのパラメータを用いて、検出された AE の発生原因の分類方法を提案した。こ こで、RA 値は波の急峻度の逆数であることを考慮する必要がある。

## 第3章 AEトモグラフィ

本章では、解析に用いる AE トモグラフィの概要と基礎理論、および既往の研 究成果について述べる。まず初めに、AE トモグラフィを構成する 2 つの手法で ある AE 位置標定法とトモグラフィ法について述べる。

#### 3.1 AE 位置標定法

AE 法は内部欠陥の位置情報を得るために行う手法である。基本的かつ一般的 な手法としては、複数個のセンサを物体表面に設置し、供用荷重によって内部の 微小な破壊から生じる AE が各センサに伝わる到達時間差を利用してき裂箇所の 位置を決定する方法がある。

AE法の利点としては、自然発生する信号を利用することで、能動的に弾性波 を励起する手間が省ける点や、内部からの信号を利用することで、発信時間を計 測するセンサが不要で、センサの取り付け位置が片側表面だけでも十分である点 が 挙 げ ら れ る 。 ま た 、 損 傷 が 進 展 し て い る 箇 所 か ら AE が 発 生 し 、 位 置 標 定 を 行 うので、リアルタイムで損傷箇所を検出することができる。しかしその反面、過 去に発生した損傷から AE が発生しない場合、過去の損傷箇所の検知は難しいと いう欠点も挙げられる。その他にも、ノイズが大きい場合にしきい値を高く設定 すると、AE信号が微弱であるために、到達時刻が P波の初動と一致せず、エネ ルギーの大きいS波や表面波の到達時刻と誤ってしまう可能性がある。また、構 造物内部に損傷が存在すると弾性波はその箇所を迂回して進むので、センサ到達 時間が遅くなり、損傷領域の速度構造が低下することが知られている。しかし、 このAE法は対象構造物内部の速度構造を一定と仮定して標定を行っており、内 部の 速 度 構 造 が 一 定 で は な い 実 構 造 物 や 逐 次 進 行 す る 破 壊 源 を 有 す る 材 料 に お い ては、AE法による標定点は必ずしも正しいとは限らない場合がある。このよう に、従来の AE 法では位置標定にある程度の誤差が含まれることを考慮せざるを 得ない。

#### 3.2 トモグラフィ法

トモグラフィ法には大きく速度トモグラフィ法と減衰トモグラフィ法がある。 一般的に、クラックに水や空隙が存在すると、それらを透過する弾性波速度は 340-1500 m/s 程度と考えられるので、健全部分がそれに比べて十分大きな速度構造の場合、クラックは低速度構造として識別可能である。また近年、地震学のQ 値解析と同様に、受信波形の振幅に着目した減衰トモグラフィの研究も精力的に行われている。しかし、コンクリートのような振幅減衰量の大きな材料では、弾性波伝播中に損傷部分を通過すると、過敏な反応により急激に振幅の減衰が生じるため、損傷評価が難しい<sup>14</sup>)。また、振幅の減衰量と損傷度には定量的な関係が示されていない。そこで、損傷部分を弾性波が伝播する際にも適度な速度低下がみられ、速度低下と損傷度にも関係性が示されている速度トモグラフィ法の方が多くの研究や実務で利用されている。以上より、既往の研究では速度トモグラフィ法を中心に研究が進められてきた。

速度トモグラフィ法は、調査断面、空間を複数のセルに分割し、調査対象内部 の速度をセルごとに求めることで構造物内部の速度構造を検出する手法である。 具体的な方法として、まず、対象物体を取り囲むようにセンサを設置し、それぞ れのセンサ近傍でハンマやパルサーを用いて弾性波を励起する。そして、そのセ ンサで波形を受信した時刻を発信時刻とみなし、発信時刻を得る。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、図 3.1 のような解析手順を踏み、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低速度として推定 する。

以下に、その原理を説明する。図 3.1 に示すように、入力情報として、弾性波 の伝播時間、調査領域のセル分割、発信・受信点座標を入力し、各セルの初期ス ローネスを算出する。ここで、スローネスとは伝播速度の逆数である。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間と実際に得られた時刻との 差を各セルに振り分け、再計算を行い、モデルの修正を行うという流れになって いる。モデル修正の際にはレイトレーシングが行われ、繰り返し計算には同時反 復法が用いられている。また、同時反復法とレイトレーシングについては以下に 示す。

**1.** 同時反復法<sup>15)</sup>

得られたモデルについて求めた理論走時を *T<sub>oi</sub>*、観測走時を *T<sub>ci</sub>*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、そ して、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。 つまり、式(3.1)に示したように、すべての波線について走時残差 Δ*T<sub>i</sub>*を求める。

$$\Delta T_i = T_{oi} - T_{ci} \tag{3.1}$$

次に、式(3.2)を用いて、走時残差を波線が通過するセルに振り分ける。

$$\Delta t_{ik} = \frac{\Delta T_i \cdot l_{ik}}{L_i} \tag{3.2}$$

セル kのスローネス補正量  $\Delta S_k$ は

$$\Delta S_k = \frac{\sum_{i} \Delta t_{ik}}{\sum_{i} l_{ik}}$$
(3.3)

として求められ、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<sub>k</sub><sup>(1)</sup>は、(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<sub>k</sub><sup>(I-1)</sup>とすると、

$$S_k^{(I)} = S_k^{(I-1)} + \Delta S_k \tag{3.4}$$

で求めることができる。

#### 2. レイトレーシング

レイトレーシングとは最短の走時となる波線を求めるために、再計算の際に迂回する経路も検討を行う手法である。迂回経路を検討する理由としては、初期計算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によって直進経路を必ずしも通らないからである。以下にその方法について説明する。まず、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。そして、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すことによって、その中で最短の走時となった波線を得ることができる。

速度トモグラフィ法は、発信時刻と受信時刻の既知である多数の波線を透過さ せるために、既知の情報が多く、最終的な速度構造の精度が高いことが知られて いる。しかし、センサ配置に関しては、波線密度の向上のために間隔を小さくと ることや対象を取り囲むように両面に設置する必要がある。また、能動的に弾性 波を励起する必要があるなど課題も多い。

## 3.3 AE 速度トモグラフィ法

本節では、本研究で利用されている AE 速度トモグラフィ法の概要と基礎理論 を述べる。AE 速度トモグラフィ法も先述した速度トモグラフィ法も基本的な考 え方は同じであるが、AE 速度トモグラフィ法は、能動的に発信させた弾性波を 用いるのではなく、構造物中から発生する AE 波を利用している点が異なってい る。つまり、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、従来の速度トモグラフィには発信源の時刻が必要となる 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 源の発信時刻は未 知であり、その推定が重要となる。しかし、既往の AE 法の位置標定では、内部 の速度構造を一定と仮定して解析を行うため、その標定された AE 源を用いてト モグラフィ解析を行っても速度構造は誤差を含んだほぼ一定の値として検出され るのみである。そこで、AE 速度トモグラフィと称して位置標定とトモグラフィ を同時に行うプログラムが新たに考案された。

このプログラムの特徴として次の 2 点が挙げられる。1 つ目の特徴は、レイト レーシングを用いた位置標定とトモグラフィ解析の交互作動を取り入れている点 である。これによって、対象構造物内部の速度構造を考慮した位置標定を行うこ とが可能になり、さらにその更新された位置標定点を用いてトモグラフィ解析を 行うことができる。2 つ目の特徴は、既往の AE 法は発信源に対して 1 つずつ位 置標定を行っているのに対し、AE 速度トモグラフィでは複数の発信源を同時に 推定するという点が挙げられる。この理由としては、複数の発信源を用いること によって多数の波線の利用が可能で、対象内部の速度構造の更新を精度良く行う ことができるからである。

以下に、AE 速度トモグラフィの位置標定手法とトモグラフィ解析手法につい

てそれぞれの概要を述べる。

## 3.3.1 AE 速度トモグラフィの AE 位置標定手法

AE 速度トモグラフィにおいては、試験体に位置標定点の候補となるノードを 設定し、計測結果から最充のノードを位置標定点とするアルゴリズムを取り入れ ている。ここで、プログラムへの必要な入力情報は、受信点の位置データ、標定 点候補のノード、センサ間の到達時間差、調査対象内部の平均伝播速度の4つで ある。ここで、ノード設定に関して、セルと中継点という概念を用いる。AE 速 度トモグラフィではノードが位置標定点の候補となるため、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、1 つのセルを通過する波 線が減少し精度が低下することや、セルの数が多くなるにつれて計算時間が長く なるといった問題が生じる。そこで、AE 速度トモグラフィにおいては、セルを 決定するセルノードとセル間隔を分割する中継点を設定することとした。例えば、 分割数を4とする場合、図 3.2 のような中継点が設定される。このセルノードと 中継点全てが位置標定点の候補となるのである。

次に、位置標定手法について説明するために、例として図 3.3 のようなセンサ を n 個用いたノードを m 個有するモデルを考える。初めに、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<sub>j</sub>に受信するための "ノード i を発信する べき時刻 T<sub>ij</sub>"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が用いられている。そして、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、 $\overline{T_i}$ は観測値の平均値である。

#### 3.3.2 AE速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法

AE 速度トモグラフィと速度トモグラフィの手法は基本的に同様であるが、1つ 大きく異なる点として、発信点に上述した位置標定手法で求めた AE 源を用いる ことが挙げられる。前述したように、AE 速度トモグラフィでは発信源の発信時 刻が未知であるので、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。

このように本プログラムでは、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。図 3.4 に AE 速度トモグラフィの解析の手順を示した。 まず、初期に入力されたスローネスで位置標定を行い、その初期位置標定点とセ ンサまでの到達時間差を用いてトモグラフィ解析を行う。その結果更新された対 象内部の速度構造を用いてさらに位置標定を行い、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 繰り返し計算することが、従来の方法に比べて大きく改善された点である。

#### 3.4 既往の研究の成果

既往の研究では、上記の特徴を持った AE 速度トモグラフィを用いて室内実験 でコンクリート供試体への適用性を検討し、以下の知見を得ている。

- AE 源の数が増加することでトモグラフィ精度が上昇する。しかし、その中 に位置標定誤差を含んだ AE 源を用いた場合、解析精度が低下することも確認 された。また、少数の AE 源でも位置標定精度の高い AE 源を用いることでト モグラフィ解析が可能である。したがって、精度の高い結果を得るためには、 正確な位置標定が行われた AE 源を選択して用いることが重要である。
- 2. AE 源の位置に関して、対象領域の中央に偏ってしまった場合、波線の通過 するセルが限定されてしまい、解析結果に誤差が生じる可能性がある。それ に対して、領域端部に AE 源が存在する場合はセルを通過する波線がある程度 存在するため、トモグラフィによって損傷領域を検証可能であった。つまり、 波線密度を大きくすることで解析精度が向上する。
- 3. 既往の AE 法では内部の不均質性により位置標定結果に誤差が生じる場合 でも、AE 速度トモグラフィで位置標定とトモグラフィを繰り返し計算させる

ことによって正しい位置にAE源が標定されることが検証された。

- 4. 既往の研究では、センサ配置が 2 次元平面配置であっても、直方体供試体 中央に存在する損傷部分から発生する AEを用いて、中央の損傷箇所を推定す ることができた。これによって、小さな供試体における AE 速度トモグラフィ の適用性が明らかとなった。
- 5. 解析に用いる AE 源が少数であっても、それらのエネルギーが大きい場合、 対象内部の損傷を捉えることが可能である。
- 6. 現在使用されている構造物では、過去に生じた損傷で2次AEが発生しなければAE源は未知であるが、既往の研究では損傷部分における既存のAE源位置をそれ以降に発生したAE源を用いて推定することができた。つまり、過去の損傷部分をそれ以降に生じたAEによって評価できる可能性が示唆された。

以上の結果を踏まえ、AE 速度トモグラフィには位置標定精度の高い AE 源を用 いることが最も重要であると考えられる。ここで、位置標定精度を向上させるた めには AE 弾性波の初動を正確に読み取ることが大切である。そのためには P 波 の初動振幅が大きいことが必要であり、5 の結果とも合わせて、エネルギーの大 きい AE 源を選択することで AE 速度トモグラフィの精度が向上すると考えられ る。

既往の研究においては、室内実験により擬似損傷を与えた小規模実験体に AE 速度トモグラフィの適用を検証し、その適用性が確認された。しかしながら、実 構造物の適用性の検証には至っていない。そこで、本研究では、コンクリート構 造物の実例としての新幹線高架橋に用いられているコンクリート床版と実際の岩 盤から採取した岩石供試体に AE 速度トモグラフィを適用し、本手法の実材料・ 構造物への適用性を論じる。次章以降では、この実構造物への適用性の検証に関 して上記に得られた知見を活かしつつ、結果に考察を加えていく。

## 第4章 新幹線高架橋コンクリート床版への AE 速度トモグラフィの適用

#### 4.1 目的

既往の研究で、室内実験においてコンクリート供試体への AE 速度トモグラフィの適用性が検証されたが、実構造物への同プログラムの適用性検証までは至っていない。そこで、本研究では実構造物として新幹線高架橋のコンクリート床版での本手法の適用性を検証する。ここで、図 4.1 に示すように、本実験対象のコンクリート床版では、打音検査により床版表面に空隙による浮きが確認されている。しかし、その表面近傍における損傷が内部損傷と一致しているのか未知である。そこで、以後に説明する評価深さまでの内部損傷を表面波トモグラフィで評価し、その結果と内部損傷から発生した AE を用いた AE 速度トモグラフィ結果を比較し、AE 速度トモグラフィ法の有用性を検討する。

AE 速度トモグラフィの適用性が確認されれば、打音検査や目視点検で損傷の 可能性が指摘された箇所の精査が可能となり、打音検査や目視点検では評価でき ない深度における損傷領域も明らかにすることができる。つまり、外部変状が発 現する以前の早期の内部損傷が評価可能となり、その結果が予防保全、しいては LCC の最小化に資すると考えられる。

#### 4.2 概要

#### 4.2.1 計測概要

本実験を行った場所は JR 姫路駅近くの補修工事前の新幹線高架橋のコンクリート床版である。AE 速度トモグラフィを行うため、センサ設置には、コンクリート表面をサンドペーパーにより平滑に処理した後、ホットメルト接着剤(HST-01K、ヘンケルジャパン社製)を使用し、センサにはプリアンプ内蔵型の 60 kHz 共振型 AE センサ(AE603SWA40、富士セラミックス社製)を使用した。実験対象領域は全床版面積の約半分である縦、横ともに 2400 mm の正方形を対象とし、図 4.2 のようにセンサを 13 個設置した。ここで、60kHz 共振型のセンサを用いる場合、AE 波形の観測可能距離は 1-2 m 程度であることが知られており、この対象領域内で発生する AE 波はセンサまで十分到達可能であると考えられる。また、図 4.2 には、打音検査によって推定された表面損傷箇所 I、II、IIIもあわせて示されており、図右上のIVに関しては、本実験以前にマーキングされたものである

が、補修を実施したか否かは未知である。その後、表面波トモグラフィを行うために同ホットメルト接着剤を使用し、図 4.3のように 16個の加速度センサ(SAF51、 富士セラミックス社製)を設置した。

#### 4.2.2 AE 速度トモグラフィ計測方法

本実験では、AE 弾性波の計測機器には DiSP(フィジカルアコースティクス社 製)を用い、ソフトは AEWin(フィジカルアコースティクス社製)を使用した。 まず、新幹線が通過していない状況で計測を行い、周辺の環境雑音を計測しな いような計測しきい値を求めた。次に新幹線の通過予定時刻に計測を開始し、1 台あるいは複数台通過が終了すると記録を終了するという作業を 10 回行った。こ こで、計測 1~7 回目まではしきい値を 40 dB、8~10 回目においては、より小さ な振動についても計測を行えるようにしきい値を 35 dB に設定した。この計測で は、新幹線通過にともなう内部損傷より発生する二次 AE による弾性波や新幹線 振動そのものに起因した弾性波など様々な弾性波が混在していると考えられる波 形データが得られた。

#### 4.2.3 表面波トモグラフィ計測方法

本研究では、AE 計測と合わせて表面波トモグラフィの計測を行った。本計測 では、計測機器として加速度収録機器(GX-1、TZAC 社製)を使用した。表面波ト モグラフィを行うことで、以後に説明する評価深さまでの損傷評価が可能となり、 打音検査の結果とあわせて AE 速度トモグラフィの有用性の検討に用いる。

実験方法に関して、各センサの近傍で2種類のハンマ(剛球直径11 mm、剛球 直径15 mm)によって能動的に20回程度打撃を行い、弾性波を励起させ、その時 刻を発信時刻とした。弾性波励起により、その他のセンサとの到達時間差が求め られ、さらに20回の平均を取ることで誤差を小さくできると考えられる。

#### **4.3** 実験結果と考察

計測で得られた表面波や新幹線通過にともなう弾性波を用いて解析を行い、以下にその結果を示す。また、新幹線通過にともなう弾性波には通過に伴って発生する、既存損傷からの二次 AE、振動に起因する弾性波およびノイズが混在していると考えられ、その分類を行うための方法についても示す。

#### 4.3.1 表面波トモグラフィ結果

表面波トモグラフィは先述したように、剛球直径の大小に応じて評価深さを変えることができる。今回用いた 11 mm と 15 mm の剛球径では評価深さはそれぞれ約 18 cm と約 20 cm となり、15 mm の剛球径のハンマを用いた方がより深い位置までの評価が可能となる。

次に表面波トモグラフィの結果を図 4.4 に示す。この図には表面損傷箇所 I ~ Ⅲとその外枠の補修予定箇所もあわせて示してある。表面波トモグラフィ結果に 関して、それぞれ約 18 cm と約 20 cm の深さまでは損傷評価が可能だと考えられ る。ここで、打音検査による表面近傍の損傷箇所と表面波トモグラフィでの評価 深さまでの内部損傷箇所を比較すると、Ⅲに関してはほぼ一致、 I 、 Ⅱ に関して はある程度一致するという結果が得られた。 Ⅳ に関しては、打音検査や表面波ト モグラフィでは損傷が検出できなかった。また、表面波トモグラフィの評価深さ は最大でも床版厚の半分であり、打音検査は表面近傍の損傷のみ検出可能である。 つまり、両手法の結果から、浅層での損傷は図の右下(Ⅲ付近)と中央部左下(I、 Ⅱ付近)に存在すると考えられる。ここで、両手法は全床版厚に対して浅層部分 のみしか評価できず、それ以深にも内部損傷が存在する可能性があることに留意 する必要がある。

#### 4.3.2 AE速度トモグラフィ結果

まず、AE 速度トモグラフィを行う上で、どの程度の繰り返し計算で値が収束 するのかを検討した。ここで、セルの区切りの設定に関して、より細かく検証を 行うため図 4.5 のように 32 分割を適用することとする。32 分割セルで繰り返し 計算を行った結果、各セルの速度構造が収束していく状態を示す図 4.6 が得られ た。図中の 0-31 までの番号は 32 分割された各セルを示している。この結果より、 繰り返し計算は 100 回で十分速度構造が収束していると考えられるので、今後は 繰り返し計算回数を 100 回とした。

次に AE 速度トモグラフィ結果を示す。一回目に計測を行った際、終了までに 計4台の新幹線通過が観測された。図 4.7、図 4.8 は、それぞれの新幹線通過時に 発生した AE の位置標定点を用いて AE 速度トモグラフィ解析を行った結果を示 している。今回、計測前の P 波の平均伝播速度を測定したところ、3500 m/s であ ったので、上限値を 3500 m/s、中央値を表(4.1)で不良値とやや良の境界値を示す

3000 m/s、下限値を不良以下の損傷を示す 2500 m/s とした。 図中の青点は初期の 位置標定点を示している。 図よりすべての結果には整合性はなく、ばらつきのあ る結果であった。ここで、誤差が生じた原因として初期の位置標定点の個数が少 なく、波線の通過しないセルが存在することが挙げられる。そこで、位置標定点 を増やすために一回目の計測で得られた位置標定点をすべて使用して解析を行っ た結果が図 4.9 である。 短時間の新幹線通過に伴って床版内部の損傷はほとんど 進展しないと考えられるので、幾つかの計測データをまとめて取り扱っても問題 はないと考えられる。また、この結果と比較を行うために二回目の計測で得られ たすべての位置標定点を用いて解析を行った結果も図 4.10 に示す。これらより、 位置標定点の個数は十分であるが、AE 速度トモグラフィより推定される低速度 領域と他手法より推定された浅層損傷範囲が一致しないことから、用いている位 置標定点そのものに問題があると考えられる。既往の研究により、AE 速度トモ グラフィを行う上で最も重要なことは、初期の位置標定点に誤差が含まれないこ とであると考えられる。そこで、次節では二次 AE のみを抽出して、これらより 求められた AE 速度トモグラフィ結果について考察する。

## 4.3.3 AE速度トモグラフィ解析精度を向上させる方法

AE 速度トモグラフィ解析精度を向上させるには、第一に既存損傷から生じる 二次 AE のみを利用することが重要となる。しかし、本計測では、大きく 3 つの 因子に起因した波形を検出している。1 つ目は、しきい値で除くことのできなか った新幹線通過に関係のないノイズなどを起因とした波形である。2 つ目は、新 幹線振動そのものに由来する波形である。そして、3 つ目が、今回注目したい内 部損傷から発生する AE による波形である。これら 3 つの波形が混在することに より、AE 速度トモグラフィ解析精度が大きく低下しているものと考えられる。 そこで、立ち上がりが分かりやすい二次 AE のみを抽出することによって初動の 読み取り誤差を軽減し、解析精度の向上を図る。

初めに、新幹線通過に関係のない波形データを取り除くことを考える。表(4.2) は、新幹線通過時とそれ以外に得られた波形データの各種パラメータを計3回の 計測に基づいて示したものである。表より Count、Energy、Duration の3つのパ ラメータに大きく違いが見られる。ノイズは瞬間的に小規模で発生するものであ り、一般にエネルギーが小さく、また、既往の研究によりエネルギーの大きい位

置標定点に注目することが重要であると考えられている。そこで今回はエネルギーに着目する。新幹線通過時以外の波形データにはエネルギーが 0-1 と極端に低いものが多く見られたので、それらを除去した。この作業によってノイズによる 波形はある程度除去できたと考えられる。

次に多数の新幹線振動に起因する波形と AE に起因する波形の区別を定量的に 行う方法を考える。新幹線振動による波形と AE による波形の分類方法としては、 一般に周波数の違いによる定性的な分類が考えられるが、定量的な分類法は確立 されていない。そこで、定性的な特徴を元に目視によりこれら 2 種類の波形を抽 出し、周波数分布を求める。この時点で、既往の研究による知見と本実験での周 波数分布を比較し、問題なく 2 種類の波形を抜き出せているか検討する。その後、 各波形をいくつか抽出し、パラメータを平均化して AE 弾性波に特徴のあるパラ メータを用い、多数の波形をフィルタリングすることにより AE による波形のみ を抽出するというフローで分類を行う。

ここで、AEによる波形は立ち上がりが明白で、さらに時間経過に伴って減衰 するという特徴が挙げられる。一方で、新幹線振動に起因する波形は AE 波に比 べて周波数が小さいと考えられる。図4.11は定性的な特徴を元に目視により振動 による波形と AEによる波形を抽出した結果であり、図 4.12 はそれらのスペクト ル図である。このスペクトル図より、新幹線振動による波形の卓越周波数は 10 kHz 付近に現れ、二次 AE による波形は 20-40 kHz の周波数が卓越していることが 分かった。既往の研究により、前者の卓越周波数は 10 kHz 程度、後者のそれは 30-40 kHz 程度となる知見が得られているので<sup>16)</sup>、目視により2つの波形を区分 できていると考えられる。また、表(4.3)は振動波形と AE波形を計測ごとに 10 個 程度抽出し、そのパラメータを平均した結果である。この結果から、2 つの波形 にはさまざまな違いが読み取れるが、顕著な差異が確認された P-FRQ に注目する。 振動波形の P-FRQの平均値は約7であったので、新幹線振動による波形を取り除 くために P-FRQ が 7 以下の波形を除去した。その結果、表(4.4)に示すように大幅 に 位 置 標 定 点 が 減 少 し た 。 そ こ で 、波 線 密 度 の 低 下 を 防 ぐ た め に 、 計 測 1-10 回 で 得られた位置標定点をすべて用いて AE 速度トモグラフィ解析を行う。その結果 を次節に示す。

## 4.3.4 AE速度トモグラフィ解析精度を向上させた結果とその考察

精度向上させた位置標定点を全て用いた結果を図 4.13 に示す。図中の青点は初 期の位置標定点、朱点は最終的な位置標定結果である。最終的な位置標定点が検 査対象内に分散しており、各セルを通過する波線密度に差異があまりないため、 各セルの解析精度はほぼ同程度であると考えられる。ここで、AE 速度トモグラ フィ結果において図中の中央、中央下部と右下の損傷領域は打音検査、表面波ト モグラフィの結果と一致しており、AE 速度トモグラフィにより浅層付近の損傷 が評価できたものと考えられる。さらに、打音検査や表面波トモグラフィでは健 全とされた右上の損傷領域で、AE 速度トモグラフィでは低速度領域を示した。 この理由としては、2 つの手法はある程度の深さ(浅層)の損傷しか検出できな いが、AE 速度トモグラフィではそれ以深の領域にも適用できることから、深い 位置に損傷がある可能性も示唆された。

しかし、目視で検証した結果、この波形データの中にも振動による波形とも AE による波形とも読み取れるような波形が存在していた。そこで、そのような波形 を目視により取り除いた結果を図 4.14 に示す。この結果より、図右下の損傷部分 では最終位置標定点が減少し、波線密度の低下により、正しい評価が難しくなっ たと考えられる。しかし、図中央、中央下部と右上の損傷部分に関しては、最終 位置標定がより正確に行われたため、解析精度のより良い評価が可能になったと 考えられる。

#### 4.4 まとめと課題

本実験では、ENERGY と P-FRQ の大きい波形に着目することで、既存損傷から の二次 AE のみを抽出し、解析結果の精度が向上することが示された。この理由 として、AE に起因する弾性波は立ち上がりが明白であるため初動読み取りに誤 差が小さく、結果として位置標定点の精度が高くなることが考えられる。

打音検査や表面波トモグラフィの結果における損傷箇所を AE 速度トモグラフ ィでも評価することができた。また、両手法では検出することができなかった、 右上の低速度領域に関しては表面波トモグラフィの評価深さを越えた深さにおけ る損傷を示している可能性も考えられた。

このように、実際の供用下にある新幹線高架橋のコンクリート床版での AE 速度トモグラフィの適用性が確認でき、AE 波形のみを抽出することによって解析

精度が向上することが確認できた。そして、打音検査や目視点検で危険と推定された箇所に AE 速度トモグラフィを適用することで、危険推定箇所の内部状態を評価可能となり、予防保全に資すると考えられる。以下に今後の課題について示す。

- 図(4.14)の右下部分(Ⅲ付近)において波線密度の低下により解析精度の低下が考えられる。つまり、位置標定点の数が少なく、位置も偏っているのでこのような問題が生じたと考えられる。そこで、新幹線通過の観測回数を増加させることによって、精度の高い位置標定点を多く得ることが可能となり、その中から位置標定点を対象領域内に分散するように選び出せば、どの領域においても解析精度の高い検証が行えると考えられる。
- 2. 今回、AE弾性波とそれ以外の波形の区別を行ったが、2次元平面に投影した結果においての判断しか行えていない。今後は3次元 AE速度トモグラフィを行い、床版の厚さを考慮し、検査領域に含まれている位置標定点のみに着目することによって、さらに損傷箇所の特定精度が向上すると考えられる。
- 今回の検証においては、ENERGY と P-FRQ に着目し、それらを用いて分類 を行った。今後は多くの検証実験を行うことで、鉄道振動に起因する波形デ ータを増築し、フィルタリングを行う際のパラメータをより厳密に検証して いく必要がある。
- 本研究では、各セルを通過した波線密度の差については検討を行わなかった。今後は、波線密度の差が各セルの解析精度にどう影響をもたらすのかについても検討を行う必要がある。
- 5. 内部損傷領域に関しては、AE速度トモグラフィで評価可能であった。しかし、予防保全に資する手法としては、損傷の定量化も必要となる。本研究ではコンクリート中を伝播する P 波の速度による健全性評価をもとに不良以下の損傷領域を示した。しかし、実際に内部損傷がどの程度まで悪化すると補修を行えば良いかの定量的な基準については、本研究では検討されておらず、 今後検討を行う必要がある。

## 第5章 三軸圧縮試験中の岩石供試体への AE 速度トモグラフィの適用

#### 5.1 目的

第4章においては、実構造物の一例として、新幹線高架橋のコンクリート床版 での AE 速度トモグラフィの適用性が認められた。本章では、他の材料である、 岩質材料への AE 速度トモグラフィの適用性を検討する。試験体は、北海道の立 岩履道地区で観測された岩盤崩落事故の現場から採取された円柱岩石供試体であ る。実験は三軸圧縮試験を用い、軸差応力の増加にともなう内部損傷の進展時の AE データを用いる。

#### 5.2 概要

#### 5.2.1 供試体概要

供試体のセンサ配置を図 5.1 に示す。供試体は北海道立岩履道地区での岩盤崩 落現場からコアボーリングにより採取されたコアを直径 100 mm、高さ 200 mm に 整形したものである。本供試体は凝灰岩を基礎岩石とし、その中に礫が含まれて いる。AE 計測は、図 5.1 に示されるように 8 個のセンサを 3 次元に配置して行わ れた。一方で、現在の AE トモグラフィ解析は 2 次元にのみ対応しているので、 評価対象は赤枠の断面のうちセンサ 1、2、5、6 で囲まれた範囲とした。その断面 を図 5.2 に示すように 16 分割し、セル設定とした。本実験で使用した AE センサ は 60 kHz 共振型で、シリコンシーリング剤を用い、供試体に直接接着させた。し きい値は 50 dB とした。その他、供試体にはひずみゲージを 4 枚設置し、供試体 のひずみ量を求めることにより、ひずみ量と AE を時系列で比較検討可能な配置 とした。

#### 5.2.2 実験方法

本実験では、圧密排水条件のもと、三軸圧縮試験を行った。拘束圧は 294 kPa とし、1 kN/minの載荷速度で軸圧を増大させた。実験時の供試体を図 5.3 に示す。 最終破壊は、経過時間が 3965 s、最大主応力差 25.723 MPa となった時に生じた。 せん断破壊直後の供試体を図 5.4 に示す。

#### 5.3 実験結果と考察

試験終了までに 907 個の AE イベントが検査対象断面周辺において得られた。 図 5.5 は、時間と累積 AE イベント数、時間と横ひずみの関係をそれぞれ示して いる。ここで、供試体がせん断破壊されるまでの累積 AE イベント数の増加傾向 にしたがい、破壊の進展を図のように A、B、C の 3 つの段階に分類した。A は初 期のミクロクラックの発生段階であり、B は安定的なミクロクラック成長を示す 段階、そして C は、急速にマクロ破壊が進行し、最終破壊に至る段階である。

以下では、上記の各段階における内部の速度構造の変化を AE 速度トモグラフィで検討するために、図 5.5 に示すように 0-3 の時刻帯を設けた。ここで、AE 速度トモグラフィは、多数の AE 源を用いて内部の速度構造を推定する手法であるが、本実験では軸圧が刻々と変化し、内部損傷が急速に進展すると考えられる。しかし、内部損傷の異なる時刻で計測された AE 源を同時に解析してしまうと、異なる時刻の AE 源は異なる内部損傷を反映したものであるため、解析結果は真値と大きく異なってしまう。そこで、各段階の損傷領域を精度よく示すためには、内部構造の変化が起こらないような時間での位置標定点を複数用いることが重要である。つまり、対象時間あるいは破壊区分最終直近の AE 源を用いることが解析精度向上に大きく寄与することとなるので、0-1 の時刻帯においては直近の 10個の AE イベントを利用した。

AE 速度トモグラフィを用いて解析を行うにあたって、速度が収束するまでに 必要な繰り返し計算回数を求めた。その結果、0-15 の 16 分割した各セルの速度 構造が収束していく状態を示す図 5.6 が得られた。図 5.6 より、繰り返し計算は 50 回で十分であると確認された。そこで、本実験では繰り返し計算回数を 50 回 で解析を行う。また、載荷前の弾性波の平均伝播速度が 2700 m/s であったため、 速度構造の上限値を 2700 m/s とした。時刻帯 0-3 のそれぞれの AE イベントに関 して解析を行った結果を図 5.7-図 5.10 に示す。

図 5.7 により、損傷の初期段階においては大部分の領域で低速度域による損傷 箇所は見られなかった。図 5.8 においても、時刻帯 0 の結果と比較しても大部分 の領域で損傷の進展は見られなかった。図 5.9 においては、時刻帯 1 の結果と比 較すると、全体的な速度低下が若干認められた。また、横ひずみに着目すると、 時刻帯 0 から 1 では顕著な変化が生じなかったが、1 から 2 において安定増加が 認められた。図 5.10 より、大部分の領域で低速度域、つまり損傷が進展している

ことが確認され、また、横ひずみに関しても2から3においては急激な増加が示 された。つまり、横ひずみの増加が示す大規模な破壊と調和的な結果が AE 速度 トモグラフィの結果から得られた。以上より、AE 速度トモグラフィによって、 試験体内部の破壊の進展を可視化できたものと考えられる。一方で、本供試体で は最終的にせん断破壊が観測されたが、せん断破壊面の位置や角度などは確認が 行われなかった。しかし、図 5.10 の最終破壊段階の解析結果において、低速度帯 が左下から右上にかけて示されており、この低速度帯がせん断破壊面を含んだも のである可能性も考えられた。

#### 5.4 まとめと今後の課題

本実験により、AE 速度トモグラフィを用いた岩石供試体の内部損傷の進展が 評価できたと考えられる。ここで、損傷の進行に沿ってすべての AE を計測する 必要はなく、ある段階において直近の複数の AE イベントを用いて AE 速度トモ グラフィ解析を行うことで損傷の進展は十分評価可能であった。また、横ひずみ の増加により内部に大規模破壊が生じ、これらは AE 速度トモグラフィにより確 認できた。以下に、この実験で得られた知見を示す。

- 各時刻帯のAE速度トモグラフィ結果と横ひずみを比較すると、横ひずみの 増加にともない、AE速度トモグラフィ結果における内部の速度構造の低下が みられた。つまり、横ひずみの増加とAE速度トモグラフィ結果における損傷 の進展には調和的な関係が考えられる。
- 時刻帯 3 の結果より、最終破壊段階の損傷領域が左下から右上に帯状に示 されている。この損傷領域には、最終破壊における岩盤供試体のせん断破壊 面が含まれている可能性が示唆された。
- 3. 1、2より、岩質材料においても、AE速度トモグラフィの適用可能性が検証 できたと考えられる。

本研究では横ひずみの増加に伴う内部損傷を AE 速度トモグラフィで評価できたが、早期の内部損傷の評価に関しては、今後取り組んでいく必要がある。ここで、今後の課題を以下に示す。

- 本研究においては、岩盤供試体の 3 次元における内部損傷位置を検討でき るようなセンサ配置を行ったが、2 次元断面の損傷領域を検証するまでに留ま った。そこで、今後はプログラムを 3 次元に対応可能なものに更新し、3 次元 での AE 速度トモグラフィ解析を行い、対象領域内の位置標定点や速度構造、 さらには最終破壊段階におけるせん断破壊面を 3 次元的に検証することが重 要である。
- 本研究においては、直径 100 mm、高さ 200 mmの小規模な岩盤供試体への AE速度トモグラフィの適用性が確認できた。今後は、大規模な岩石供試体や 原位置斜面など実構造物に同プログラムが適用可能か検討を行う必要がある。
- 3. 本実験により、岩質材料の内部損傷の進展は AE 速度トモグラフィにより評価可能であった。今後は早期内部損傷の定量的診断が可能であるかを確認することが重要である。原位置斜面は損傷が外部変状として発現してから崩壊までの時間が短いために、AE 速度トモグラフィによる岩盤内部損傷の早期の定量的評価が確立されれば、崩壊確率評価、しいてはリスクマネジメントに寄与できると考えられる。

## 第6章 結論と今後の展望

#### 6.1 本研究で得られた知見

本研究では、様々な実構造物や構造物材料の中でも、供用下にある新幹線高架 橋のコンクリート床版と岩石供試体に着目し、AE 速度トモグラフィの適用を検 討した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1. 既往の研究により、AE速度トモグラフィ解析で位置標定精度が向上すると、 解析精度も向上するという知見が得られている。本研究では、新幹線高架橋 のコンクリート床版で AE計測を行い、内部損傷から発生する二次 AE、振動 に起因する弾性波、およびノイズが混在する波形が得られた。その中から、 初動読み取りの誤差が小さく、位置標定精度の向上に寄与すると考えられる 二次 AEのみを抽出した。その結果、AE速度トモグラフィによる解析精度が 向上することが示された。(第4章参照)
- 2. 本研究では、打音検査や表面波トモグラフィで示された損傷領域と AE 速度トモグラフィで得られた損傷領域の比較検討を行った。その結果、打音検査や表面波トモグラフィでの浅層付近の損傷領域を AE 速度トモグラフィでも評価できたと考えられる。また、両手法は浅層での損傷しか評価できないが、AE 速度トモグラフィ結果で低速度領域が示されており、打音検査や表面波トモグラフィの評価深さを越えた深さにおける損傷領域を示している可能性が考えられる。(第4章参照)
- 1、2より、新幹線通過時の荷重により内部損傷から生じる二次 AE を利用 することで、供用下での新幹線高架橋のコンクリート床版の内部損傷領域を AE 速度トモグラフィで検証可能であることが示された。(第4章参照)
- 4. 供用下に多数存在するコンクリート床版の中から、打音検査や目視点検で 危険と判断された床版に AE 速度トモグラフィを適用することで、浅層だけ でなく内部損傷を考慮した評価を行うことができた。つまり、損傷が浅層に 発現する以前の早期の内部損傷領域を検出可能となり、予防保全に寄与でき る可能性が示唆された。(第4章参照)
- 5. 本研究では、構造物材料の一例として岩石供試体で AE 速度トモグラフィ を適用し、横ひずみが示す大規模な破壊と調和的な結果が AE 速度トモグラ

フィ解析結果より得られた。つまり、岩石供試体においては、AE速度トモグ ラフィ解析結果から損傷の進展が可視化可能であることが確認された。(第5 章参照)

- 6. 破壊最終段階で得られた AE 速度トモグラフィ結果において、低速度帯が 左下から右上にかけて示された。本実験において、最終破壊におけるせん断 破壊面の位置や角度などの観測は行われていないが、解析結果の低速度帯は せん断破壊面を示したものである可能性が示唆される。(第5章参照)
- 4、5より、室内実験レベルにおいて、小規模な岩石供試体で AE 速度トモ グラフィの適用性が確認できた。

#### 6.2 今後の課題と展望

本研究において今後検討すべき課題を以下のようにまとめ、今後の研究に繋げ るものとする。

- 1. 二次 AE のみを抽出することで解析精度は向上したが、位置標定点の減少 や偏りによって波線密度が低下した箇所に関しては、損傷評価が行われなか ったと推定される。今後の検証においては、新幹線通過の計測回数を増加さ せることが重要である。その結果、精度の高い位置標定点を多く得ることが 可能となり、その中から位置標定点を対象領域内に分散するように選び出せ ば、波線密度が大きくなり、どの領域においても精度の高い検証が可能とな ると考えられる。
- 2. 本研究では、2次元平面に投影した位置標定点を利用した AE 速度トモグラフィ解析を元に研究を進めた。今後は 3次元 AE 速度トモグラフィを行い、 床版の厚さを考慮し、対象領域に含まれている位置標定点のみに着目することによって、損傷箇所の特定精度の向上が考えられる。
- 波形分類を行う際、ENERGY と P-FRQ に着目した。今後は多くの検証を実構造物に行うことで、鉄道振動に起因する波形データを増築し、フィルタリングを行う際のパラメータをより厳密に検証していく必要がある。
- 4. 供用下のコンクリート床版の内部損傷領域に関しては、AE速度トモグラフィで評価可能であった。しかし、予防保全に資する手法としては、損傷の定量化も必要となる。本研究ではコンクリート中を伝播する P 波の速度による

健全性評価をもとに不良以下の損傷領域は示せたが、実際に内部損傷がどの 程度まで悪化すると補修を行えば良いかの定量的な基準については今後検討 を行う必要がある。

- 5. 岩石供試体への適用性の検証においては、岩石供試体の3次元的な内部損傷位置の検討可能なセンサ配置を行ったが、2次元断面の損傷領域を検証するに留まった。そこで、今後はプログラムを3次元に対応可能なものに更新し、3次元 AE 速度トモグラフィ解析を行い、対象領域内の位置標定点や速度構造、さらには最終破壊段階におけるせん断破壊面を3次元的に検証することが重要である。
- 6. 本研究で検証された岩石供試体は直径 100 mm、高さ 200 mmの小規模なものであったが、今後はより大規模な岩石供試体や原位置斜面などの実構造物に同プログラムが適用可能か検討を行い、適用可能な実構造物や構造物材料のデータを増やしていくことが重要である。
- 7. 今後は、AE速度トモグラフィによる原位置斜面での早期内部損傷の定量的 評価の可能性を確認することが重要である。原位置斜面は損傷が外部変状と して発現してから崩壊までの時間が短いために、岩盤内部損傷の早期の定量 的評価が確認されれば、岩盤崩壊確率の評価、しいてはリスクマネジメント に寄与できると考えられる。

## 参考文献

- 国土交通白書 2012:社会資本の的確な維持管理・更新,第I部,第2章,第1 節,6,図表 150, 2012.
- 2) 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. 130-133, 2010.
- 3) 松井繁之:道路橋床版,設計・施工と維持管理,森北出版,pp. 216-219. 2007.
- 4) 小嶋正樹,鷲見武富,山口誠,八嶋厚,沢田和秀,森口周二:ボーリングコアから得られるデータを利用した岩盤斜面のスクリーニング手法の提案,地盤 工学ジャーナル, Vol. 4, No. 1, pp. 47-57, 2007.
- 5) 大西有三,西山哲:岩盤崩落と落石問題に関する現状と課題, Journal of the Japan Landslide Society, Vol. 39, No. 1, pp. 1-13, 2002.
- 6) 龍明治:地盤・岩盤斜面動態観測のためのデジタル画像計測手法に関する研究,京都大学博士学位論文,2008.
- 7) 社団法人地盤工学会北海道支部,岩盤崩落の機構解明と計測技術に関する研究委員会:岩盤崩壊の発生機構と計測技術,社団法人地盤工学会北海道支部, pp. 143-149, pp. 170-174, 2000.
- 8) 湯山茂徳,李正旺,友清剛,吉沢勝,魚本健人:AE法による鉄筋コンクリート 床版の疲労損傷評価,土木学会論文集,No. 627, Vol.44, pp. 251-259, 1999.
- 9) H.K, Chai, 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.
- Y. Kobayashi, 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.
- 11) 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, pp. 2, 2005.
- 12) 桃木昌平,蔡華堅,寄川光博,望月泰彦,塩谷智基,小林義和:表面波の特性 を用いた一面配置型弾性波トモグラフィの開発,とびしま技報,No. 61, pp.

41-46, 2012.

- 13) TC212-ACD, Recommendation of RILEM TC 212-ACD:acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete/Test method for classification of active cracks in concrete structures by acoustic emission, Materials and Structures, Vol. 43, 2010.
- 14)桃木昌平,蔡華堅,塩谷智基,小林義和:弾性波の減衰特性を用いたコンクリート内部損傷可視化技術の開発,とびしま技報,No. 58, pp. 27-32, 2009.
- 15) 佐々宏一, 芦田譲, 菅野強: 物理探查, 森北出版, pp. 122-123. 1993.
- 16) T. Shinomiya, H. Morishima, Y. Nakanishi, and T. Shiotani: Damage diagnosis technique for brick structures using acoustic emission, 6<sup>th</sup> World Congress on Railway Record, Edinburgh, 2003.

## 謝辞

最後になりましたが、本論文の作成にあたって、お世話になった方々に感謝の 意を表します。

まず、ご多忙の中、熱心にご指導していただいた京都大学大学院工学研究科都 市社会工学専攻・大津宏康教授には心から感謝致します。ゼミを通して貴重な発 表の場を提供して頂くと共に、研究を進める中で、自分では気づくことのなかっ た観点からの的確なご助言を頂きました。厚くお礼申しあげます。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・塩谷智基准教授には、筆者が研 究で行き詰った時に度重なるご指導と的確な方向性を示して頂きました。先生の 親身なご指導のおかげで本論文を書き上げることができました。深く感謝致しま す。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・西山哲准教授には、本研究の副 査を務めて頂き、審査では的確な指示を頂きました。深く感謝致します。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・稲積真哉助教授、元秘書の伊東 宏美さん、大八木智子さんには、研究面だけでなく生活面においても大変お世話 になりました。研究に励む環境を作って頂き、充実した研究生活を送ることがで きました。本当に感謝しております。

京都大学大学院工学研究科社会基盤安全工学講座・大島義信准教授には、解析 に必要なプログラムを作成して頂き、研究室の垣根を越えてご助言を頂き、研究 の大きな支えとなりました。心よりお礼申し上げます。

飛島建設株式会社・桃木昌平氏には、年末のお忙しい時期に何度も質問させて 頂いた時にも、親切に答えて下さいました。また、現場での様々な計測機器の使 い方など技術的な面の知識をつけることができました。心からお礼申し上げます。

大津研究室の諸先輩方、ならびに同回生の方々のおかげで、非常に有意義な研 究生活を送ることができました。特に岩本さんと高田さんには、同じ系列の研究 をしている先輩として、的確な助言を頂き、頼りない筆者をいつも助けて頂きま した。また、同回生の方々とはともに助け合い、切磋琢磨しながら研究に取り組 むことができました。本当にありがとうございました。

また、研究以外にもたくさんの人たちと関わることができ、多くのことを学ば せて頂きました。心より感謝しております。

最後に、本論文を書き上げることができたのも、大学で勉強できるという環境 を与えていただき、あらゆる面においてサポートしていただいた両親のおかげで あります。心から感謝の意を表します。

	平成22年度	平成32年度	平成42年度					
道路橋								
<b>※</b> 約15万5千橋	約8%	約26%	約53%					
(橋長15m以上)								
排水機場、水門等	約920%	<u> 終</u> 行 2 7 0 %	<b>約</b> 60%					
※約1万施設	承当と 3 90	赤りつ 7 70	赤り00%0					
下水道管きょ								
※総延長約43万km	約2%	約7%	約19%					
(注)								
港湾岸壁	約504	※10504	※15.2.04					
※約5千施設	市10%0	ホリと ひ %0	利53%					
(注)岩手県、宮城県、	福島県は調査対象	<b>7</b>						
試料)国土交通省								

図 1.1 建設後 50年以上経過したインフラの割合



図 1.2 保全方法によるライフサイクルコストの縮減



図 2.1 基本的な AE 検出装置



図 2.2 AE 波動の伝播過程



図 2.3 表面波トモグラフィの仕組み







図 2.5 パルス方式







図 2.7 周波数分布



図 2.8 RA 値と平均周波数による発生原因の分類



図 3.1 速度トモグラフィ解析の流れ



図 3.2 セルの設定と中継点





図 3.4 AE 速度トモグラフィ解析のフロー



図 4.1 コンクリート表面の浮き





図 4.2 AE 速度トモグラフィ用センサの設置位置



図 4.3 表面波トモグラフィ用センサの設置位置



図 4.4 表面波トモグラフィ結果



図 4.5 32 分割セル



図 4.6 AE 速度トモグラフィ解析における繰り返し計算回数



図 4.7 新幹線通過1回目、2回目における解析結果



図 4.8 新幹線通過3回目、4回目における解析結果



図 4.91回目の計測において新幹線通過4台分を全て合計した結果



図 4.10 2 回目の計測における新幹線通過を全て合計した結果

縱波速度 Vp (m/s)	評価						
4570以上	優						
3660-4570	良						
3050-3660	やや良						
2130-3050	不良						
2130以下	不可						

表(4.1) コンクリート中の伝播速度と健全性評価の関係

表(4.2)3回の計測の新幹線通過時とそれ以外における各種パラメータの平均値

		Rise Time	Count	Energy	Duration	Amplitude	Average Frequency	Center Frequency	Peak Frequency
							riequency	riequency	riequency
計測1回目	通過時	425	193.5	222.5	18714	45.5	67.7	34.3	9.3
	それ以外	304	17.1	12.4	1209	45.3	86.4	39.1	25.0
計測2回目	通過時	332	96.9	115.1	8661	46.2	49.9	24.9	6.2
	それ以外	151	10.1	9.9	1116	43.0	125.2	29.6	6.4
計測3回目	通過時	288	82.3	91.5	7720	45.6	62.9	27.9	7.7
	それ以外	164	18.5	16.4	2143	43.7	118.7	21.9	4.6



図 4.11 目視により各波形を抜き出した結果



図 4.12 各波形の周波数分布

		Rise Time	Count	Energy	Duration	Amplitude	Average Frequency	Center Frequency	Peak Frequency
1回目計測における平均	AE波形	301	35.2	30.6	3213	51.1	14.3	32.8	18.4
	振動波形	564	47.0	54.1	7834	48.8	6.9	33.0	6.8
2回目計測における平均	AE波形	376	88.8	101.0	7478	58.4	13.8	28.9	21.7
	振動波形	494	95.8	95.0	10295	50.5	10.0	29.4	7.2
3回目計測における平均	AE波形	312	107.2	117.2	9199	52.8	11.8	31.7	21.8
	振動波形	474	104.8	100.2	9976	50.6	9.9	30.8	7.0

表(4.3) 計測ごとのパラメータの平均結果

表(4.4) フィルタリング前後の位置標定点数

	初めに得られた位置標定点数	フィルタをかけて得られた位置標定点数
計測1回目	138	8
2回目	123	9
3回目	278	14
4回目	33	1
5回目	220	3
6回目	102	5
7回目	19	0
8回目	118	3
9回目	94	0
10回目	235	6



図 4.13 フィルタリング後、全計測での位置標定点を用いた解析結果



図 4.14 さらに目視によって精度を向上させた結果



図 5.1 供試体のセンサ配置



**図 5.2** 検査断面図



図 5.3 実験時の供試体



図 5.4 せん断破壊直後の供試体



図 5.5 時間と累積 AE イベント数、横ひずみの関係



図 5.6 AE速度トモグラフィによる繰り返し計算結果



## 図 5.7 時刻帯 0 における解析結果



図 5.8 時刻帯1における解析結果



図 5.9 時刻帯 2 における解析結果



図 5.10 時刻帯 3 における解析結果