

論文審査の結果の要旨

氏名：QIAO XIN

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：Acoustic Emission Tomography Based on Lasso Regression

（ラッソ回帰に基づく AE トモグラフィ法による土木構造物の非破壊検査）

審査委員：（主査） 教授 小林 義和

（副査） 教授 梅村 靖弘

静岡理工科大学教授 西田 孝弘

日本は 1960 年代から 1970 年代にかけて高度経済成長期を迎え、多数の社会資本施設が建設された。これらの構造物は年月の経過とともに劣化が進み、その維持管理が重要性を増している。このような問題は日本国内に限定されたものでなく、インフラ整備が十分に進んだ先進国のみならず、発展途上国においても大きな問題となりつつある。このような背景のもと、例えば国土交通省の道路橋定期点検要領においては、5 年毎の近接目視や打音検査等による診断をすることが定められているが、この方法では、例えばコンクリート構造物内部に雨水がクラックなどから侵入する事によって生じた内部空洞などを検出することは困難であることから、構造物内部を効率的に検査する手法の開発が求められている。

このような手法の一つとして、弾性波速度トモグラフィ法より派生した Acoustic Emission Tomography 法 (AET) が挙げられる。本手法は、弾性波速度トモグラフィ法が構造物の表面を人為的に打撃する事によって発生した弾性波が、構造物上に設置されたセンサー迄伝播するための時間である初動走時によって対象構造物内の弾性波速度分布を同定する手法であるのに対し、弾性波速度トモグラフィ法のアルゴリズムに弾性波の発信位置の位置標定を組み合わせる事によって、弾性波の各センサーへの到達時刻のみから弾性波速度分布を同定することを可能にしている。この弾性波速度分布の同定を行う際に、逆解析手法の一つである同時反復法が採用されてきたが、この同時反復法は最小二乗法と同様の傾向を有する解を与えることから、局所的な損傷がより大きく同定されたり、センサー配置や観測値に含まれる誤差などの観測条件によっては、損傷がないところに損傷のようなものが同定されたりする虚像が生じることが知られている。これらの虚像の存在は、本来損傷が生じていない領域を損傷箇所として判断させる要因となるものであり、実構造物の健全性診断をより適切に実施するためには、解決しなければならない問題の一つである。

そこで本論文では、弾性波速度分布の同定を行う逆解析手法として、ラッソ回帰を導入することを試みている。ラッソ回帰は、過剰適合を避けるための手法の一つとして 逆解析を実施する際の損失関数に L1 正則化項を加算することによって目的関数を定め、この目的関数を最小化するように説明変数を最適化することによって同定を行う手法である。これにより、対象となる説明変数の同定において、影響が比較的大きい変数の値が変動し、それ以外の変数については、予め設定された値に拘束されるような効果を与えることを可能としている。これを、弾性波速度を同定される変数とし、AET による弾性波速度分布の同定に応用すると、拘束される値として対象構造物の健全時の弾性波速度を与えることによって、損傷領域のみの弾性波速度が大きく低下し、損傷をより明確に同定することが可能となる。これは、土木構造物の損傷においては、損傷を受けていない領域については弾性波速度が健全な状態から大きく低下していないことが多く、損傷を受けている領域の弾性波速度が局所的に低下している例が多く見られることから、その局所的に弾性波速度が低下している領域を適切に発見しうる方法を提案することを意図している。

提案法は、数値実験と模型実験によってその妥当性を検証がなされている。数値実験では、二次元モデルを対象として、その対象領域内にランダムに発信源を定め、そこから対象領域上で直線波線を仮定してセンサー設置位置での初動走時を求め、それをセンサー設置位置での弾性波の到達時刻として弾性波速度分布の同定を行なっている。ここで、弾性波の初動走時を到達時刻として利用しているが、これは、弾性波の発信時刻が 0 となっていることに相当する。なお、AET では、弾性波速度分布の同定結果が弾性波の発信時刻に依存しないことから、このシミュレーション手順に問題はない。その数値実験の結果に基づき、提案法は、対象領域に広く分布するような損傷パターンよりも、局所的に損傷が存在する

ような損傷パターンでの同定結果に有効であることが示されている。また、その検証においては、正則化項に含まれるパラメータを様々に変化させることによる同定結果の変化について検討することによって、検証に使われたモデルにおいて適正な弾性波速度分布を同定する λ の範囲について検討を行っている。また、模型実験による検証では、アルミニウム板にスリットが設けられた金属供試体、PC 構造物を模擬した未充填のシー스가埋め込まれた大型コンクリート供試体、RC 床版を模擬した削孔された小型コンクリートスラブに対して AET による損傷の検出を試みている。この結果、計測条件に起因する不完全さが見受けられる場合もあるものの、提案法は、すべてのケースにおいて従来の同時反復法によって同定された弾性波速度分布よりも良好な結果が得られることが示されている。また、削孔された小型コンクリートスラブの例においては、対象モデルの三次元効果を限定的にはあるが考慮することができる擬似三次元解析を試み、良好な結果を得ている。

以上の検討結果から、本論文において提案された AET とラッソ回帰を組み合わせることによる損傷同定手法は、特に観測値に誤差が混入しやすい模型実験において特に良好な結果を示しており、従来の AET における虚像の問題を解決し、更には観測値への誤差混入に対する安定性を高めたものであると考えられる。

本論文は 1 章から 6 章の章立てによって構成されている。各章の概要を以下に示す。

第 1 章「Introduction」では、研究の背景を述べた上で様々な非破壊検査についてその特徴を紹介し、それぞれの利点と欠点について紹介している。その中で AET も紹介され、その開発経緯と実構造物の適用を述べたのち、本研究の目的を明らかにした上で、論文の構成を述べている。

第 2 章「Theory of AE tomography and proposed method」では、AET の解析手法を紹介した上で、本研究の新規性の主たる部分となるラッソ回帰の AET への組み込みについて述べられている。

第 3 章「Verification of elastic wave velocity tomography based on compressive sampling」では、ラッソ回帰と AET を組み合わせる前段階として、弾性波速度トモグラフィ法における逆解析手法として、ラッソ回帰に基づき、尚且つランダムに観測値を選択することによって同定精度を維持しつつ観測数を低減できる Compressive sampling 法 (CS) を採用した手法について検討を行っている。この弾性波速度トモグラフィ法の逆解析手法として CS を採用した手法は良好な結果を示し、ラッソ回帰に類する逆解析手法と弾性波速度トモグラフィ法に類する手法の組み合わせが良好な結果を示す見通しを得たことが述べられている。しかし、この検討の段階において、AET においては、位置標定を行う際に CS の前提が崩れるためにそのまま適用することが不可能なことが明らかとなり、本研究ではラッソ回帰と AET を組み合わせることに決定している。

第 4 章「Numerical simulation of AE Tomography」では、様々な損傷パターンにおいて提案法による弾性波速度分布の同定を行い、提案法の性能を明らかにすることを試みている。この検討においては、提案法は対象に対する損傷領域の面積比が同じでも、損傷領域が局所的に存在している場合に良好な結果を示すことが明らかにされている。また、様々な λ を変化させることによる弾性波速度分布の同定精度の変化について検討し、良好な同定精度を示す λ の大凡の範囲を明らかにしている。また、対象の三次元効果を限定的にはあるが考慮することが可能な擬似三次元 AET についても基礎的な検討を行っている。

第 5 章「Experiment of AE tomography」では、提案法を、スリットを有するアルミニウム板、未充填シー스가埋め込まれた大型のコンクリート供試体、削孔された鉄筋コンクリートスラブに適用し、その妥当性について検討を行っている。この結果、提案法は従来法と比較して良好な結果を示すことが明らかになっている。前章の数値実験では、弾性波の到達時刻に誤差が含まれていない前提で検討が行われていたが、この模型実験においては、観測誤差が含まれている状態での検討となるため、提案手法が観測誤差に対しても耐性が高いことが示されている。

第 6 章「Conclusions and prospects」では、以上の結果を取りまとめ、将来の研究の方向性を示した。

以上に示したとおり、本論文では、対象構造物に設置されたセンサーに到達した弾性波の到達時刻のみを使って対象構造物内の弾性波速度分布を同定する AET に対し、その逆解析手法としてラッソ回帰を導入することによって虚像の回避や観測誤差に対するロバストネスを向上させる手法を提案している。これにより、AET の実構造物への適用へ向けて大きく貢献する有用な知見を得たものであると判断する。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和 5 年 2 月 1 6 日