

論文の内容の要旨

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)

社会・経済の急速な発展に伴い、ビル、高速道路、橋梁、トンネルなどインフラの規模も同時に拡大している。それらの社会資本整備において、コンクリートは広範で汎用性の高い建設資材であり、経済性や成形の容易さから、交通機関、水利施設、産業・公共インフラ施設などに広く利用され、かけがえのない建築材料となっている。コンクリート構造物は、経年劣化や地震などの自然災害の影響を受け、目視では確認しにくい様々な欠陥が構造物内部に発生する。これらの欠陥は、構造物の耐荷力に影響を与え、安全性に悪影響を与える可能性がある。このような背景から、老朽化したコンクリート構造物の性能と安全性の評価は、その安全な利用の観点から喫緊の課題となっている。コンクリート構造物の非破壊検査技術は、構造物内部の欠陥を可視化することによって、コンクリート構造物の維持管理に必要な情報を迅速かつ正確に与えることができ、さらに、事前に安全のための警告を与え、安全のための隠れた危険を迅速に発見し排除する時間と機会を提供し、人々の生命と財産を保護することができる。一方、不具合箇所の補修・補強処理により、構造物は健康で安全な状態を維持し、耐用年数を延ばすことも可能となる。したがって、一連の総合的な安全性評価を行うことは、社会基盤施設の安全な運用において重要な役割を担っている。

コンクリート構造物の非破壊検査は、構造物自体に影響や損傷を与えない方法で内部の欠陥を検出し、それを評価する技術である。このような非破壊検査手法としては、近接目視や打音検査、衝撃弾性波法等が挙げられるが、これらの多くは構造物の表面付近の状態を評価することを得意としており、クラックから侵入した雨水等の影響によって生じる構造物内部の土砂化などの評価をすることは困難である。このような内部の損傷を評価するための方法として弾性波速度トモグラフィ法や AE (アコースティック・エミッション) 試験の利用等が試みられているが、弾性波速度トモグラフィ法では、加振点の位置及び発信時刻の記録が必要であり、多数の観測データを短時間で取得することが困難だったり、AE 試験では、損傷が進んだ領域からは AE が発生しにくいことから、損傷が存在するにもかかわらずその損傷を発見できなかったりするため、それぞれにその適用が難しい状況が存在することが指摘されていた。

AE トモグラフィ法は、これらの問題を解決するための方法として、弾性波速度トモグラフィ法と AE 試験における位置標定法を組み合わせることによって提案されたものである。AE トモグラフィ法の基本原理は、発信時刻と発信位置が未知の AE 等の弾性波の到達時刻を対象構造物に設置された AE センサー等によって計測し、その計測された到達時刻とその時点での弾性波速度分布から弾性波の発信位置や発信時刻の推定を行い、更にその推定された発信時刻と発信位置から、センサー位置での弾性波の到達時刻を算出し、その算出された弾性波の到達時刻と計測された弾性波の到達時刻の差を最小化するように弾性波速度分布を再構築する手法である。一般に弾性波速度と材料の健全度に相関があることが知られていることから、その弾性波速度分布を精査することによって対象となる領域の状況を評価することが可能になる。AE トモグラフィ法は、Shubert らによって 2000 年代初頭に提案されたが、そこでは、波線が直線で表現されることを仮定し、AE 試験で利用されてきた AE 位置標定法を弾性波速度トモグラフィ法と組み合わせることによって実現されていた。しかし、この実装では、対象の弾性波速度分布の不均一性が強く、弾性波の回折や屈折の影響が強い場合には、正確な評価が容易ではなかったことから、その後、小林らによって弾性波の回折や屈折を考慮するために波線追跡法が導入され、更に AE 発信位置の標定法が導入された波線追跡法の効果を適切に取り込むように変更された。これによって、対象の弾性波速度分布の不均一性を適切に考慮することが可能となったが、それでも、計測条件や計測誤差の影響により、本来存在しない低速度領域が同定されるなどの虚像が生じたり、局所的な損傷が大きく同定されたりすることが指摘されていた。これは、弾性波速度分布の再構築に、最小二乗推定に準ずる方法である同時反復法等が用いられていることが原因の一つであり、この問題の解決が望まれていた。また、同時反復法では、よ

り高精度な弾性波速度分布を同定するためには、十分な量の観測情報が必要となることも知られていた。本研究では、これらの問題を解決するため、ラッソ回帰と AE トモグラフィ法を組み合わせた手法の提案を行なった。

本研究では、AE トモグラフィ法とラッソ回帰を組み合わせる準備段階として、弾性波速度トモグラフィ法とラッソ回帰に基づいて観測数の低減を行う圧縮サンプリング法を組み合わせた手法の特性について検討を行なった。その結果、弾性波速度トモグラフィ法と圧縮サンプリング法の組み合わせは、より少ない観測情報で高精度な弾性波速度分布を同定しうることを確認したが、圧縮サンプリング法に基づく観測数の低減が AE トモグラフィ法の場合には解析手法の差から適用できないことが明らかとなり、最終的にはラッソ回帰と AE トモグラフィ法を組み合わせた方法の開発を行うことを決定した。

提案された手法は数値実験と模型実験によって検証された。数値実験では、二次元モデルを対象として、損傷パターンの違いによる弾性波速度分布の同定精度について検討を行い、ラッソ回帰の特徴通り、提案法ではより損傷が局所化している場合に良好な結果が得られることを明らかにした。また、ラッソ回帰における L1 正則化項に乗じられている λ と同定された弾性波速度分布の精度について検討を行い、検証に使われたモデルにおける適正な λ の範囲を提案した。模型実験では、損傷を模擬したスリットを有するアルミニウム板、PC 構造物を模擬した未充填シー스가埋め込まれたコンクリート供試体及び削孔された RC スラブに対して提案法を適用し、より実際の適用に近い状態で、その弾性波速度分布の同定精度について検討を行なった。この検討の結果、数値実験と比較して、模型実験の場合には、提案法によって弾性波速度分布の同定精度が大幅に向上することが確認された。これは、模型実験の場合には、その計測された弾性波の到達時刻に誤差が含まれており、これによる影響が提案法では従来法である同時反復法と比較して抑制されているものと考えられ、提案法の有用性を確認することができたと考えている。

本論文の構成を以下に示す。

第1章では、研究背景、標準的な非破壊検査技術の分類、各技術の長所と短所、AE トモグラフィ法の特徴と利点、AE トモグラフィ法の開発と実用化、本研究の目的と主たる新規性について簡単に紹介する。また、本章の最後に本論文の各章の概要を紹介する。

第2章では、AE トモグラフィ法の基礎理論とその計算過程、更に、提案手法であるラッソ回帰と AE トモグラフィ法の組合せについて紹介する。

第3章では、圧縮サンプリング法に基づく弾性波速度トモグラフィ法の検証を数値シミュレーションによって行なった。本章の前半では、圧縮サンプリング法の基礎理論を弾性波トモグラフィ法と組み合わせた理論、およびその計算過程を説明し、圧縮サンプリング法に基づく数値シミュレーション結果を、同時反復法を用いたものと比較した。その結果、圧縮サンプリング法は同時反復法よりも少ない観測情報で良好な精度で弾性波速度分布を同定することが可能であることを確認した。

第4章では、ラッソ回帰を AE トモグラフィ法に適用しながら、数値シミュレーションにより λ の範囲を検討し、提案手法の損傷検出能力を調査した。さらに、代表的な3種類のコンクリート損傷を数値シミュレーションで解析し、同時反復法と比較した。最後に、擬似3次元 AE トモグラフィ法の方法論と数値シミュレーションについて詳述した。

第5章では、損傷を模擬したスリットを有するアルミニウム板、PC 構造物を模擬した未充填シー스가埋め込まれたコンクリート供試体及び削孔された RC スラブの3種類の供試体によって模型実験を行い、その観測結果を用いて同時反復法と提案法によって弾性波速度分布の同定を行い、それらと比較することによって提案法のより実用に近い状況での妥当性の評価をおこなった。その結果、センサー配置密度に対して小規模な損傷を検出するのが困難な事例も見受けられたが、全ての結果で、提案法では同時反復法と比較して、虚像の抑制が行われており、より高精度な弾性波速度分布を同定しうることを示された。これは、より大きな観測誤差が含まれるような状況においても良好な弾性波速度分布を同定しうることを示唆する結果であり、提案法が、弾性波速度分布の同定精度を従来の手法と比較して改善していることが明らかとなった。

第6章では、本研究を総括し、今後の研究の展望を詳述した。