

論文審査の結果の要旨

氏名：中 村 勝 哉

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：教師なし学習を用いた乾燥砂における AE 位置標定の精度向上に関する研究

審査委員：（主査） 教授 小 林 義 和

（副査） 教授 梅 村 靖 弘 准教授 小 田 憲 一

静岡理工科大学教授 西 田 孝 弘

東京大学教授 渡 邊 健 治

アコースティック・エミッション(AE)は、対象構造物内部におけるクラックの発生や、既存のクラックの摩擦が開放されること等によって開放されたひずみエネルギーが弾性波として放出されるものである。この AE を検出して対象の損傷の様子を非破壊的に評価する手法が AE 試験である。以前より、この AE 試験では、AE の発生位置を位置標定法と呼ばれる手法によって同定し、その分布から損傷状況が判断されてきた。AE 試験では、一般に対象領域の周辺に設置されたセンサーに AE が到達した到達時刻から AE の位置標定が行われており、最近では、当初の適用対象であった機械工学の分野だけではなく、コンクリート構造物の健全性診断や、地盤材料における進行性破壊の可視化等へ応用が広がっている。また、AE 試験と弾性波速度トモグラフィ法を組み合わせ、AE の到達時刻のみから対象内の弾性波速度分布を同定し、その結果から対象の健全性診断を行う手法なども提案されている。

これらの手法では、観測値として利用される AE の到達時刻の読み取り精度が、その精度を大きく左右することが一般に知られている。この AE の到達時刻の検出については、観測された AE の振幅が予め設定されたしきい値を超えた場合に、その時刻を到達時刻とする方法等が利用されている。その中でも、特に AIC-Picker と一般的に呼称される手法は、その読み取り精度の高さから広く利用されているが、振幅の大きな AE が重複して到達した場合や、AE の発振点からセンサーまでの距離が長かったり、伝搬経路上に損傷領域が存在し、AE の回折等が発生したりすることによって、AE の S/N 比が低下する場合等については、到達時刻の正確な読み取りが困難であることも知られており、より高精度な結果を得るために、より高精度に AE の到達時刻の読み取りを行うための手法が必要とされてきた。

そこで本論文では、AE の到達時刻の読み取りをより高精度に行うための手法の開発を目的として、観測された AE の実効値に基づく AE の到達時刻の読み取り手法と、到達時刻の読み取りが困難な AE を除外するために教師なし学習に分類される手法である自己組織化マップ及び k 平均法を組み合わせた手法を提案している。AE の実効値に基づく AE の到達時刻の検出法については、本研究における第一段階として、AE の時系列において、有意な AE が存在しないことが明らかである区間でその実効値を算出し、それに基づいて AE の時系列が初めてその実効値を大幅に上回る点を強調するような関数を作成し、その関数より AE の到達時刻を読み取る手法として検討が行われている。この手法は、模型実験によってその妥当性が検証され、その結果から、AIC-Picker では困難であった複数の AE が重複して計測されるような場合においても、高精度に AE の到達時刻を検出できることが示されている。一方で、この手法においても、S/N 比が低いような AE からは正確に到達時刻を検出することが困難であることが明らかとなっている。一般的な AE 試験においては、AE の位置標定結果に多少のばらつきが生じる程度であれば、そのような S/N 比の低い AE の到達時刻が読み取り結果に混入することも容認されてきたが、地盤構造物の進行性破壊の可視化など、より高精度な位置標定結果等が要求されるような場合には、このような精度の低い到達時刻が観測値として利用されることは好ましくない。

このため、本論文では、第二段階として、位置標定結果を悪化させる低 S/N 比の AE を処理対象から除外する方針を立て、それに基づいて、自己組織化マップと k 平均法を組み合わせる手法を提案している。自己組織化マップは、対象となる情報を、類似した特性を有する情報で構成されたものに分類することを得意としており、これに k 平均法を組み合わせることによって、自己組織化マップ上に分類されたもののグループ分けを行っている。このため、自己組織化マップと k 平均法を利用することによって観測された AE の時系列を類似した波形を有するグループに分類し、それらのグループから、S/N 比が高い時系列のグループを選び出し、そのグループに分類された AE のみを位置標定のための観測値として利用することにより、低 S/N 比の AE の除外を行っている。これにより、位置標定に利用

することが可能な到達時刻数が減少し、併せて位置標定対象となるイベント数も低下する一方で、解析対象となるイベントの位置標定精度は向上することが予想され、結果として対象の進行性破壊のメカニズムを明らかにする一助となることが期待されている。

提案された手法は、アルミニウム板で製作された供試体に発生させた疑似 AE を対象としてその妥当性が確認されている。これらの疑似 AE に対して従来法と提案法にて位置標定を行い、提案法による位置標定結果が従来法に基づいたものと比較して、より高精度であることが確認されている。また、アルミニウム板に対してより減衰が大きく、位置標定が困難である豊浦標準砂で作製された供試体に対して 1G 場で杭の貫入試験を行い、それによって供試体内部で生じた AE の位置標定を提案法によって行い、個々の AE の位置標定結果が、工学的な観点及び既往の研究との比較から、破壊の進行を適切に表していることを示唆している。

以上の検討結果から、本論文において提案された実効値に基づく AE の到達時刻の検出法と、自己組織化マップ及び k 平均法によって到達時刻の検出が困難な AE を解析対象から除外する手法を組み合わせた方法は、解析対象となる AE の到達時刻数及びイベント数を低下させる一方で、同時に AE の到達時刻の検出精度を向上させるため、結果として高精度な位置標定を可能にするものであることが示唆されている。

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「序論」では、研究の背景を述べた上で AE を用いた非破壊検査を紹介し、それに関連する解析手法について言及し、それぞれの利点と欠点について紹介している。その中で 特に利用されることが多い AIC-Picker の特徴について言及し、他の手法と比較して優れている点が多いが、到達時刻を誤検出する事例が紹介されている。また、地盤材料においては、その材料としての減衰の大きさから、計測される AE の S/N 比が小さく、AE 試験の適用が困難な場合があることを述べている。このような背景に基づき、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「AE 計測装置及び計測パラメーター」では、一般的に利用されている AE 計測装置の仕様を述べるとともに、計測条件を決定するためのパラメーターについて言及している。その上で、計測パラメーターの調整のみでは、対象となる AE のみを選択的に記録することの難しさが述べられている。

第 3 章「到達時刻検出方法の開発」では、低 S/N 比の波形を対象とした到達時刻検出手法に必要な性能について述べ、観測された AE の実効値に基づく AE の到達時刻の読み取り手法について紹介をしている。また、アルミニウム板に疑似 AE を発生させる模型実験を行い、それに基づいて、到達時刻を適切に検出するために必要なパラメーターについて検討を行っている。また、提案法と AIC-Picker で検出された到達時刻に基づいて、波線追跡に基づく位置標定を行い、提案法が AIC-Picker と比較して良好な結果を示したことが述べられている。また、検出された到達時刻を用いて、弾性波速度トモグラフィ法、AE トモグラフィ法によって弾性波速度分布を同定し、それらにおいても提案法は AIC-Picker と比較して良好な結果を示すことが述べられている。

第 4 章「AE 波の分類」では、自己組織化マップと k 平均法を組み合わせ、記録された AE 波を分類し、それに基づいて低 S/N 比の波形を除外するための方法が提案されている。この方法は、前章で実施されたアルミニウム板に疑似 AE を発生させた模型実験の結果に適用され、その分類結果と解釈について述べられている。また、低 S/N 比の波形が除外された疑似 AE を対象に到達時刻を検出し、その結果に基づいた AE の位置標定結果が示されている。これによれば、前章で提案された AE の到達時刻の検出法を単独で適用した場合よりも、更に良好な結果を得ることができたことが報告されており、本手法の有効性が述べられている。

第 5 章「乾燥砂に発生した AE 源の位置標定」では、提案された手法を、乾燥砂によって作製された供試体に対して、杭の貫入試験を行うことによって計測された AE に対して適用し、提案された手法の妥当性について検討を行っている。その結果、提案法は従来法と比較して、疑似 AE に加えて、実際の AE へ適用しても、良好な結果を示すことが報告されている。

第 6 章「結論」では、以上の結果を取りまとめ、将来の研究の方向性を述べている。

以上に示した通り、本論文では、実効電圧に基づく AE の到達時刻検出法と自己組織化マップ及び k 平均法を組み合わせた AE の分類法を併せた手法を提案し、解析対象となる到達時刻の数やそれに伴う解析対象イベント数の低下などが生じるものの、AE の位置標定等をより高精度に行うことを可能にしている。さらに、砂地盤を模した実験により、その有効性が地盤材料への適用においても実証されており、社会基盤施設の設計や維持管理技術の発展に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 6 年 2 月 1 5 日