

論文の内容の要旨

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

社会基盤施設の設計において施設の安定性を検証する際には、地盤が土粒子、水及び空気の混合材料であることから、地盤の挙動を粒状体として評価することが望ましい。しかし、地盤は他の建設材料と比較して対象地盤毎に諸量のばらつきが多く、粒状体としての統一した評価が容易ではない。そのため、施設の安定性を検証する際には地盤を連続体として評価している。また、地盤を連続体として算定した支持力等に安全係数を掛けることで進行性の破壊といった粒状体としての挙動を考慮し、照査結果が安全側となるように評価している。したがって、地盤の粒状体としての力学的挙動を精緻に把握できれば設計の合理化が期待できる。

地盤材料の力学的挙動の把握には、地盤内部に生じる破壊を可視化することが有効である。地盤内部の破壊状況を把握する方法として、X 線 CT を用いて破壊の進行を可視化した例がある。しかし、X 線 CT の適用には被曝に対する安全性の観点から X 線を十分に遮蔽できる防護壁が必要となり、模型実験等においては供試体寸法が限定される場合がある。また、屋外作業における被曝対策が困難であり、原位置試験への適用が容易ではない。

一方で、地盤内部に生じる破壊を Acoustic Emission(以下、AE と称する)を用いて可視化する試みが行われている。AE は対象の破壊、変形によって対象の内部で発生する弾性波であり、AE の発生源を標定することで破壊を可視化することができる。また、AE 位置標定は特殊な安全性対策を必要としないため、多様な材料、計測条件への適用が期待できる。しかし、現状では岩を除く地盤材料に AE 位置標定を適用した例は少ない。

岩を除く地盤材料では、砂質土に AE 位置標定を適用した例が報告されている。この適用例では、標定した AE 源が集中している箇所をコンター図として強調することで地盤内部を可視化している。しかし、AE 源が集中している箇所をコンター図によって強調した可視化を行うことで、AE 源が集中している箇所以外は相対的に目立たなくなり、標定された AE 源が比較的少ない破壊箇所の判別が難しくなると考えられる。加えて、コンター図によって可視化する理由として、砂質土を対象とした AE 位置標定は標定誤差を多く含むことから、個別の AE 源の位置から破壊の傾向を検証することが容易ではないことが挙げられる。しかし、破壊の初動をより細かく評価できることが期待できるため、AE 源は個別に評価することが望ましい。

AE 源を標定した際に生じる誤差の要因として、AE 位置標定の入力値である AE 波がセンサに到達する時刻の検出誤差が挙げられる。AE 到達時刻は、計測された時刻歴波形において、一般にノイズと信号の境界とされている。このため、検出手法としてノイズと信号の境界を定量的に評価できる AIC-picker が適用されることが多い。しかし、AIC-picker は信号が連続な関数で近似できることを仮定しており、S/N 比が比較的低い波に対して振幅の大きな波と共に計測された場合、波の立ち上がりを正しく検出することが難しい。そのため、検出された到達時刻に誤差が生じる場合がある。また、減衰の影響が大きい時刻歴波形において、信号とノイズの振幅差が小さくなることで到達時刻の判読が難しく、先行研究では任意の閾値を用いて到達時刻を検出する波形の分類を行っている。しかし、閾値の設定は計測者の経験則に依存している。そのため、AE 計測の適用例が少なく、S/N 比が低くなる傾向にある地盤材料を対象とした場合、適切な閾値の設定が容易ではなく、計測データに到達時刻の検出が難しい波形を混在させる恐れがある。以上のことから、地盤材料を対象とした AE 位置標定に生じる誤差は、計測された AE 波の S/N 比が低い傾向にあるため、AE 到達時刻の検出が困難となることが要因として挙げられる。

本研究では、地盤材料に生じる AE 源の標定精度を向上させることを目的として、「計測された AE 波の形状に対する検出精度の依存を緩和した到達時刻検出手法の開発」、及び「正確な到達時刻の検出が期待できる高 S/N 比の波形を分類する手法の提案」を行った。また、提案した検出手法と分類手法によって、地盤材料に生じる AE 源の標定精度の向上を確認するために、減衰の影響が大きいことが予想

される乾燥砂の供試体にコーン貫入試験を実施し、発生した AE 源の位置標定を実施した。

本論文は全 6 章で構成しており、各章の内容を下記に記載する。

第 1 章「序論」では、研究背景として先行研究を整理し、地盤の力学的挙動を検証するための課題について述べた。先行研究では地盤の力学的挙動を検証するため、X 線 CT が行われている。しかし、X 線 CT には防護壁が必要となり供試体寸法が限定される場合があった。そのため、特殊な安全性対策が必要ない AE 位置標定を地盤材料に適用する手法の優位性を述べた。しかし、地盤材料に AE 位置標定を適用した例は少なく、特に砂質土においては、個別の AE 源の位置から破壊を検証した例は確認できない。さらに、地盤材料に AE 位置標定を適用した場合、既存の手法では入力値に検出誤差が多く含まれる可能性があり、標定精度が低下することが予測される。したがって、AE 位置標定を地盤材料に適用した例が少ない要因として、破壊位置を適切に近似していない AE 源が標定結果に含まれることが挙げられる。また、本研究の目的は、前述の背景を踏まえて提案した到達時刻検出手法及び AE 波の分類手法を用いた地盤材料における AE 位置標定の精度向上であることを述べた。

第 2 章「AE 計測装置及び AE 計測パラメーター」では、AE 計測装置の仕様及び AE 計測に係るパラメーターについて述べた。また、AE 計測パラメーターの設定は経験則に依存しており、高 S/N 比の波形のみを計測することが容易ではないことを述べた。

第 3 章「到達時刻検出手法の開発」では、低 S/N 比の波形から到達時刻を検出する上で、ノイズから得られる実効値電圧を基準とした到達時刻検出手法の提案及び妥当性の検証について述べた。提案手法の妥当性は、損傷があるアルミニウム板上に Pencil Lead Break (以下、PLB と称する) テストによって疑似 AE を発生させた模型実験を行い、計測した疑似 AE 波から到達時刻を検出することで確認した。損傷を回折した疑似 AE 波を対象とした検証では、従来手法である AIC-picker を適用した場合、到達時刻は波形の中間から得られ、明確な誤差が生じていた。一方で、提案手法では目視で確認した結果と概ね同様の位置で到達時刻が検出された。また、AIC-picker と提案手法で検出した到達時刻を用いて AE 位置標定を実施した結果、提案手法を用いた場合は、AIC-picker と比較して標定精度が優れていることが明らかとなった。しかし、提案手法を用いた AE 位置標定の結果に、真値に近似しない AE 源が含まれており、提案手法でも改善されない到達時刻の誤差が存在することを示した。このことから、提案手法でも改善されない到達時刻の誤差を、AE 位置標定に適用しないことが妥当であるため、正確な位置標定を行う上で AE 波の分類が必要であることを明らかにした。

第 4 章「AE 波の分類」では、データの分類に統一した基準を必要としない教師なし学習を用いて、AE 波を分類する手法の提案及び妥当性検証について述べた。ここでは、教師なし学習手法である Self-Organizing Map (以下、SOM と称する) と k 平均法を AE 波の分類に適用し、分類手法としての妥当性を検証した。この検証には第 3 章で計測した疑似 AE 波を用いた。SOM を疑似 AE 波に適用した結果、クラスターの形成が期待できる特徴マップが得られた。また、k 平均法を特徴マップに適用することによって、高 S/N 比の疑似 AE 波を分類するクラスターが形成された。高 S/N 比の波形を示すクラスターから分類された波形を対象に得られた到達時刻を用いて AE 位置標定を実施した場合は、分類を行わずに全ての波形を対象として AE 位置標定を実施した場合と比較して標定精度が向上することが明らかとなった。加えて、回折波が高 S/N 比の波形に分類されない結果が得られたことから、提案手法によって弾性波速度分布の不均一性を考慮せずに不均一な速度分布で発生した疑似 AE 源が標定できる可能性が示された。以上を踏まえ、損傷したアルミニウム板で、AE 位置標定を実施した結果、不均一性を考慮した結果と比較して同程度の精度が得られた。このことから、SOM と k 平均法を、AE 波の分類に適用した提案手法によって、弾性波速度分布の不均一性を考慮せずに AE 位置標定を実施できる可能性を示した。

第 5 章「乾燥砂に発生した AE 源の位置標定」では、乾燥した豊浦珪砂の供試体にコーン貫入試験を実施して AE 波を計測し、計測した AE 波に提案した実効値電圧に基づく到達時刻の検出手法、SOM 及び k 平均法を適用した結果について述べた。計測した AE 波は、相対密度 90%以上で調整した乾燥状

態の豊浦珪砂を対象に、底面積が 3.23cm^2 の貫入コーンを 8.22mm/s で貫入させることで発生させた。この実験により検出した AE 波の到達時刻を用いて、AE 位置標定を行い提案した検出手法及び分類手法の妥当性について述べた。検証の結果から、AE 波の分類を行わない場合、標定された AE 源から破壊の挙動を確認することが出来なかった。一方で、分類した AE 波より検出した到達時刻から位置標定を行った結果、供試体内部のすべり面が可視化される可能性が示唆された。また、AE 源によって可視化されたすべり面は、先行研究で報告されている乾燥砂の挙動と比較しても妥当な結果であることが示された。

第 6 章「結論」では本研究で得られた知見をまとめ、地盤材料の力学的挙動を AE 位置標定によって明らかにすることが期待できることを述べた。