

論文 弾性波の速度変化を考慮した AE 源位置標定手法の提案と数値実験による検証

中村 優*1・大野 健太郎*2・上野 敦*3・鎌田 知久*4

要旨: アコースティック・エミッション (AE) 法による位置標定解析により, コンクリートのひび割れ進展および破壊挙動の把握が可能であるが, 破壊進行に伴う弾性波速度の低下に起因した AE 源位置標定精度の低下が指摘されている。本研究では, 弾性波速度の低下を考慮した位置標定手法を提案し, 数値実験にて従来法と比較することで提案法の妥当性を検討した。その結果, 健全な状態では従来法と提案法の精度は比較的高いことが確認され, ひび割れ発生時では従来法よりも提案法の位置標定精度が著しく高いことが明らかとなった。さらに, センサ配置方法により位置標定精度が異なることが示された。

キーワード: AE 法, AE 源位置標定, 弾性波速度, 到達時間差, センサ配置, 残差平方和

1. はじめに

材料内の微細ひび割れの生成に伴う弾性波の検出技術をアコースティック・エミッション (AE) 法と言う¹⁾²⁾。AE 法は地震の震源探査と同様の手法により破壊源探査がリアルタイムで可能であり, 材料内部の破壊を三次元的に捉えることが可能な手法である。従来行われてきた AE 源位置標定では, 測定対象物の健全時の観測波形から初動到達時刻を読み取って弾性波速度 (一般に P 波速度) を予め定め, その弾性波速度と複数センサの到達時間差から位置標定が実施されていた³⁾。ところが, コンクリート部材の載荷試験など, 測定対象物の破壊および損傷が進行するような場合には, 弾性波速度はひび割れの発生などの影響により初期値から低下することが想定されるため, 従来行われてきた弾性波速度一定による AE 源位置標定手法では, ひび割れ発生後の位置標定精度が低くなることが考えられる。AE 法は他の測定手法と比較して時間的および空間的に制約の少ないモニタリング技術であり, この特徴を生かしたコンクリートの破壊挙動把握において, ひび割れ発生後の位置標定精度の低下は解決すべき課題であると考えられる。特に, 近年ではコンクリートのひび割れ発生後も比較的靱性の高い挙動を示す材料および部材が開発および実用化されており, 3 次元的に最終破壊まで破壊進展を追従できるモニタリング技術の開発が望まれている。

このような背景の中, これまでいくつかの AE 源位置標定手法が提案されている。例えば, 塩谷らが提案している AE トモグラフィ法は, AE 計測対象領域を複数のセルに分割し, そのセル内の全ての速度構造と AE 源を同時に取得可能な画期的な方法であり, 鉄筋コンクリート

床版のモニタリングなどに適用されている⁴⁾⁵⁾。また, Zhou ら⁶⁾⁷⁾は, 事前に弾性波速度を測定せずに位置標定を行う手法を提案しており, 無載荷の花崗岩において, シャープペンシルの芯圧折法により人工的に疑似 AE 源を生成し, その疑似 AE 源に対する位置標定精度の検討を行っている。

しかしながら, 様々な位置標定手法が提案されているものの, コンクリートの破壊進展のように, 動的に弾性波速度が変化し, 1 つの AE 源と 1 つの AE センサ間の伝搬速度を反映させた手法は未だ提案されていない。そのため, 1 つの AE 源に対し複数のセンサ間の伝搬速度を個別に設定した位置標定手法を構築することで, コンクリートの破壊をより詳細に捉えることができると考えられる。

本研究では, コンクリートの破壊進行に伴う弾性波速度の低下を考慮した AE 源位置標定手法の構築を目的に, 個々の AE 源に対し, 記録されたセンサ間の到達時間差と計算上得られるセンサ間の到達時間差の残差平方和 (RSS: Residual Sum of Squares) が最小となるように 1 つの AE 源から各 AE センサへの弾性波速度を個別に設定する手法を提案する。その後, 提案法の妥当性を検証するため, ひび割れ導入による速度低下を想定した数値実験を実施し, 従来法と提案法の結果を比較検討した。

2. AE 源位置標定手法

2.1 従来 of AE 源位置標定手法³⁾

材料の弾性波速度を V_p , AE センサ T_i の座標を (a_i, b_i, c_i) , AE 源の座標を $S(x, y, z)$, AE 源から AE センサ T_i へ観測される到達時刻を t_{oi} とすれば, センサ T_i お

*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 准教授 工博 (正会員)

*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 准教授 工博 (正会員)

*4 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 助教 工博 (正会員)

よび T_j で観測された到達時間の差 $t_{oi} - t_{oj}$ と距離に関する次式が得られる。

$$\left\{ \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2} - \sqrt{(x - a_j)^2 + (y - b_j)^2 + (z - c_j)^2} \right\}^2 = V_p^2 (t_{oi} - t_{oj})^2 \quad (1)$$

この式を解くことで、AE 源の座標 $S(x, y, z)$ を得ることができる。

2.2 提案する AE 源位置標定手法

提案手法のフローを図-1、AE 波の伝搬模式図を図-2 に示す。AE 源を $S_k(x_k, y_k, z_k)$ とし、 S_k から AE センサ T_i へ弾性波が速度 V_l ($V_{min} \leq V_l \leq V_{max}$) で伝搬する際の計算上の到達時刻を tc_{kil} とする。このとき、センサ T_i および T_j で観測された到達時間の差 $t_{oi} - t_{oj}$ と計算上の到達時間差 $tc_{kil} - tc_{kjm}$ の残差平方和 $RSS(k, l, m)$ は以下の式で表される。

$$RSS(k, l, m) = \sum_{l=V_{min}}^{V_{max}} \sum_{m=V_{min}}^{V_{max}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{ (tc_{kil} - tc_{kjm}) - (t_{oi} - t_{oj}) \}^2 \quad (2)$$

ただし、 $i \neq j$ である。

このとき、残差平方和 $RSS(k, l, m)$ は速度 l および m に依存して変動し、 $RSS(k, l, m)$ が最小となる速度 l_k および m_k と残差平方和の最小値 $RSS(k)$ を求める。これにより解析範囲の点 $S_k(x_k, y_k, z_k)$ における残差平方和が決定される。次に、同じ操作を解析範囲内で点 $S_k(x_k, y_k, z_k)$ が取りうる全範囲に対し求め、最終的に $RSS(k)$ が最小値を示す点を AE 発生源 (x, y, z) として求めることとした。ただし、式(2)の残差平方和 RSS の最小値を求める際に、全てのセンサ方向（本検討では 6 方向）に対し解析速度 $V_{min} \leq V_l \leq V_{max}$ を設定し、かつ全解析領域に対し計算を実施するとすれば、後述する数値実験の 1 条件の位置標定結果を得る場合には、汎用の PC (Intel Core i7 2.9GHz, メモリ: 8GB 程度) であれば約 1 ヶ月、場合によってはそれ以上の時間を要することとなる。そこで、本研究では、解析時間を極力抑える工夫として、速度の設定について以下の制約を設けた。すなわち、1 つの AE 源 $S_k(x_k, y_k, z_k)$ に対し速度は健全時の初期速度 V_1 および速度低下を考慮した V_2 ($V_{min} \leq V_2 \leq V_{max}$) の 2 種類のみとした。なお、後述する数値実験結果より、速度に制約を設けても高い位置標定精度が保持されることがわかった。

3. 数値実験による検討

3.1 数値実験条件

提案法の妥当性および精度検証を目的に、コンクリー

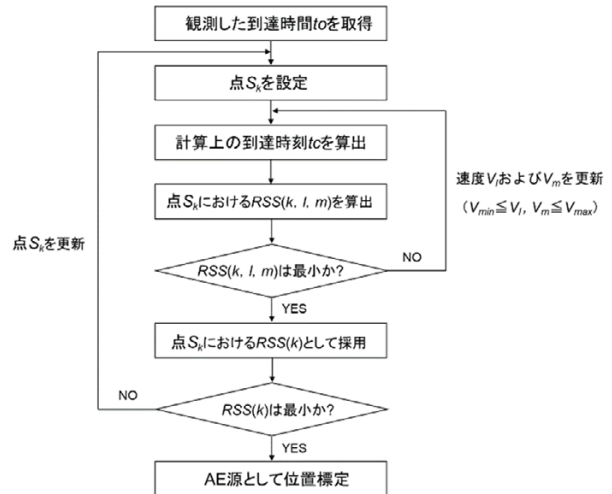


図-1 提案する AE 源位置標定手法の流れ

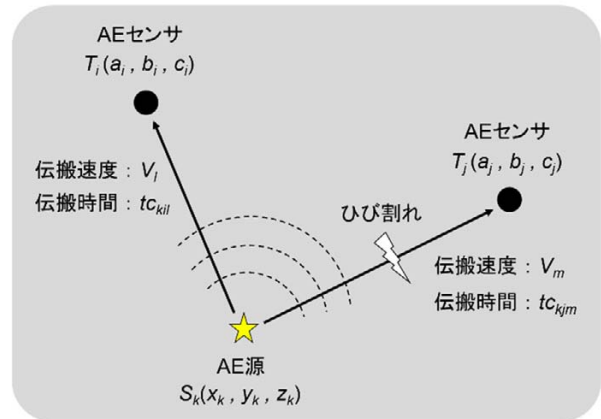


図-2 AE 波の伝搬模式図

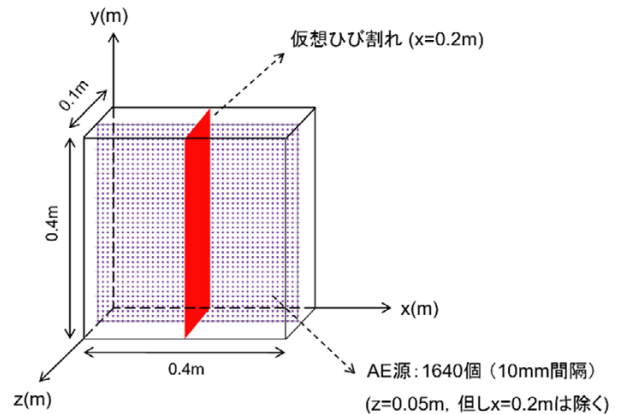


図-3 供試体概要

トのひび割れ導入に伴う弾性波速度低下を模擬した数値実験を行った。数値実験で設定した供試体は図-3 に示すように長さ 0.4m、高さ 0.4m、厚さ 0.1m の直方体とした。また、供試体中央部の $x=0.2m$ の位置に仮想ひび割れを導入し、この位置を AE 波が通過する場合に速度低下が生じるように設定した。AE 源は $z=0.050m$ の面にひび割れ位置を除く箇所に 10mm 間隔で 1640 個設定した。なお、本研究では、健全部分の弾性波速度は健全なコンクリートの一般的な速度とされる $4000m/s^8)$ とした。また、

表一 標定誤差による分類

プロット	●	●	●	●	●
標定誤差 $E(m)$	$E \leq 0.025$	$0.025 < E \leq 0.05$	$0.05 < E \leq 0.075$	$0.075 < E \leq 0.1$	$0.1 < E$

仮想ひび割れを通過する場合の速度は、既往の検討⁹⁾で実施した円盤コンクリート供試体（ $\phi 395\text{mm} \times$ 厚さ 100mm ）の割裂試験時の超音波速度を参考とした。すなわち、AE センサを円盤供試体高さ中央部の左右に設置し、載荷試験中に荷重と超音波速度を記録した。その結果、図-4 に示すように、最大荷重後に円盤中央部に割裂ひび割れが発生し、その時の超音波速度がひび割れを跨いで 2500m/s 程度であると得られた。したがって、本研究では、設定した AE 源と AE センサ間を AE 波が直線で伝搬すると仮定し、ひび割れ通過を伴う直線経路の速度は 2500m/s とした。

次に、AE センサ配置図を図-5 に示す。仲佐ら¹⁰⁾によれば、センサの配置方法が位置標定精度に影響を与えることが報告されている。そのため本研究では、AE センサの配置条件が位置標定結果、精度に及ぼす影響を併せて検討することとし、図に示すような3つの配置を設定した。CH1~CH4 はいずれの条件においても固定し、これらは供試体全体を網羅するように配置している。また、CH5 および CH6 の位置を各センサ配置パターンで変化させ、配置 A では、供試体の外側かつ高さ（ y 方向）の中間地点に配置した。配置 B では、高さ（ y 方向）の中間に配置することでセンサの y 座標を3ケース、さらにセンサ x 座標が4ケースになるように設定した。配置 C では、センサの x, y, z 方向のバリエーションが2つとなっている。以上の条件において、各 AE 源から各 AE センサへ弾性波が到達する時間を求め、これを各 AE センサでの観測された到達時間とした。なお、本研究では、仮想ひび割れ無しの場合（健全な状態）と仮想ひび割れ有りの場合の2水準で比較検討した。

3.2 位置標定解析方法

従来法による AE 源位置標定解析ではコンクリートの一般的な弾性波速度である 4000m/s を使用した。提案法では2.2で示した手法より、初期速度 4000m/s 、解析速度範囲 $1 \sim 4000\text{m/s}$ 、 x, y, z 方向の解析範囲を $-0.005 \sim 0.405\text{m}$ 、 $-0.005 \sim 0.405\text{m}$ 、 $-0.005 \sim 0.105\text{m}$ 、 x, y, z 方向の解析ステップ幅をそれぞれ 0.0005m とした。なお、サンプリング時間間隔は $1\mu\text{s}$ とした。

3.3 数値実験結果と考察

本稿で示す AE 源位置標定結果については、設定した AE 源（真値）と解析で標定された AE 源位置との誤差を表-1に示す5段階に分け、標定誤差の大きさと共に位置標定結果を表示する。

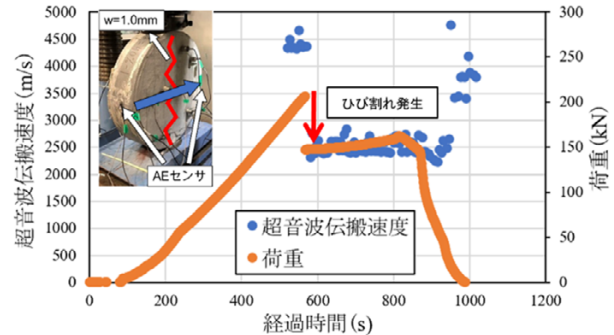


図-4 荷重と超音波伝搬速度の関係⁹⁾

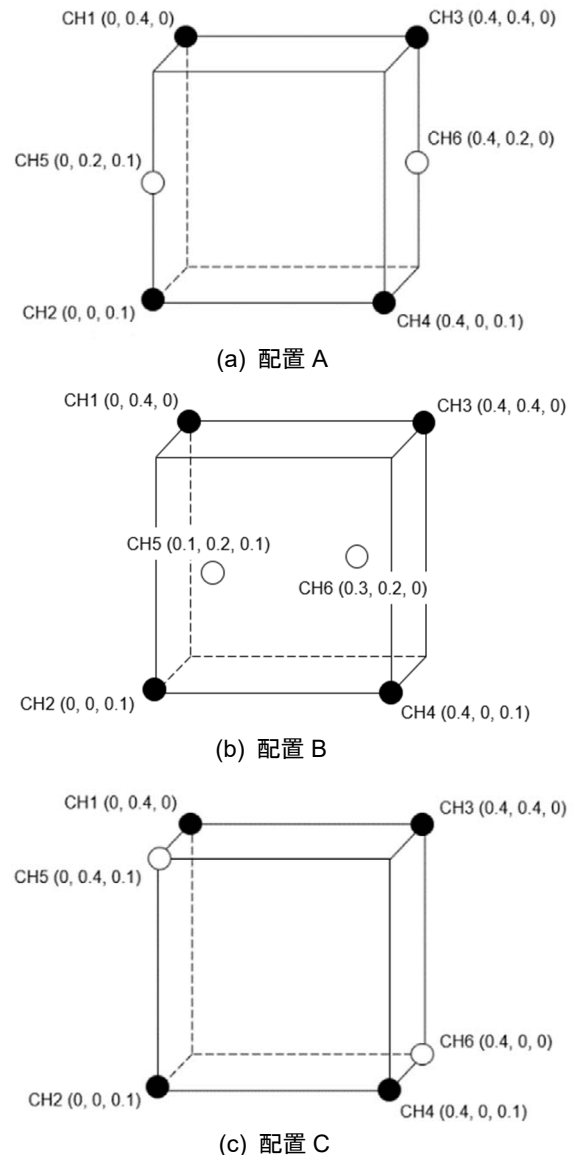


図-5 AE センサ配置の概略図

(1) 仮想ひび割れ無しの場合（健全時）

仮想ひび割れを導入しない場合の従来法と提案法の

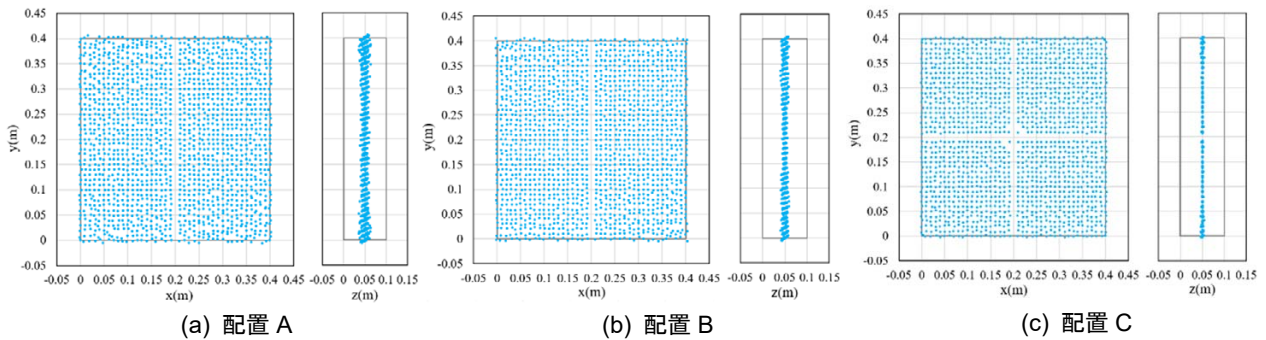


図-6 AE 源位置標定結果 (従来法・仮想ひび割れ無し)

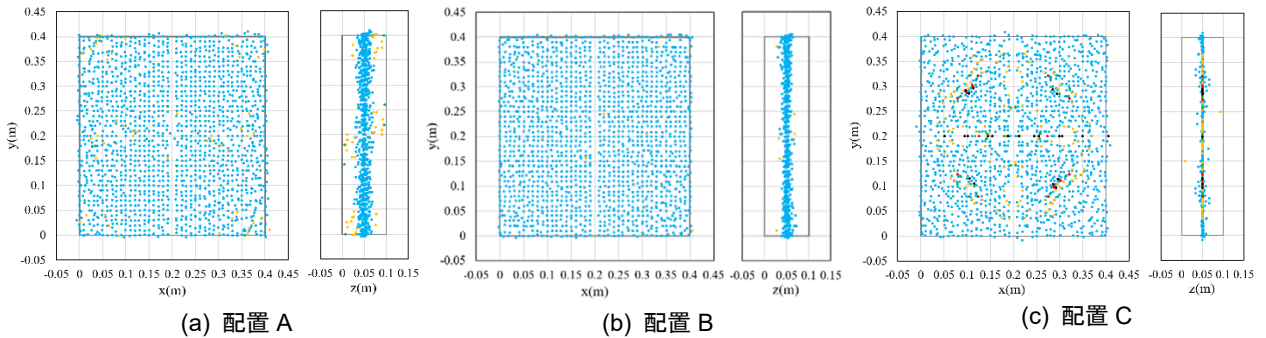


図-7 AE 源位置標定結果 (提案法・仮想ひび割れ無し)

AE 源位置標定結果を図-6, 図-7, 標定誤差別の標定数を図-8 に示す。なお, 解析上, 計算値が発散するなどして位置標定出来なかったものについては, $0.1 < E$ として図-8 中に示した。

従来法と提案法の結果において同じセンサ配置で比較すると, 標定誤差 0.025m 以下を示す AE 源の数はセンサ配置 A および B で同程度であることがわかる。一方, 配置 C においては, いずれの手法も配置 A および B よりも僅かに 0.025m 以下の標定数が少なく, また従来法の配置 C より提案法の配置 C の標定誤差がやや大きく, 精度の低下が確認できる。これは, センサ配置が上下端点のみで y 方向に 2 水準しかなく, AE 源から各センサへの到達時間差が生じにくかったためと考えられる。その結果, 図-6(c)に示すように, $y=0.2\text{m}$ に設定した AE 源では適切な到達時間差が得られず, 位置の特定は不可(計算不可)になったと考えられる。しかしながら, 図-6 および図-7 の z - y 平面の標定結果を確認すると, 配置 A および B よりも, 配置 C において z 方向の標定誤差が非常に小さいことがわかる。现阶段では, 配置 C で z 方向の標定誤差が小さく抑えられた理由は不明である。

以上より, 仮想ひび割れを導入しない場合, 供試体内の弾性波速度が一定となるため, 従来法と提案法の位置標定精度は配置 A および B で同程度となった。

(2) 仮想ひび割れ有りの場合

仮想ひび割れを導入した場合の従来法と提案法の AE 源位置標定結果を図-9, 図-10, 標定誤差別の標定数を図-11 に示す。なお, 位置標定出来なかったものについて

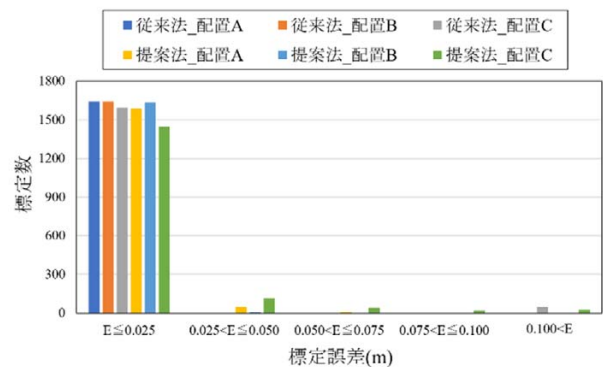


図-8 標定誤差別の標定数 (仮想ひび割れ無し)

は, $0.1 < E$ として図-11 中に示した。

従来法では, 仮想ひび割れを導入しなかった場合と比較して, 導入した場合は位置標定精度が著しく低下し, 標定誤差 0.025m 以下のものは無く, ほとんどが計算不可となった。一方, 提案法では配置 A, B での位置標定精度が仮想ひび割れを導入しない場合と同程度であり, 配置 C では位置標定精度が低下しているが, 仮想ひび割れを導入した場合の従来法よりは位置標定精度が高いことがわかる。これは, 従来法では初期に設定した弾性波速度で AE 源位置標定解析を行っているため, 仮想ひび割れ導入に伴う弾性波速度低下の影響を大きく受け, 計算が発散したためであると考えられる。一方, 提案法では AE 源から各 AE センサへ伝搬する弾性波の速度を個別に考慮しているため, 従来法と比較して顕著に位置標定精度が高い結果となった。これより, コンクリートの破壊進行に伴う速度低下を考慮しない場合, ひび割れ発生後の位置標定結果の信頼性が低下することが示された。

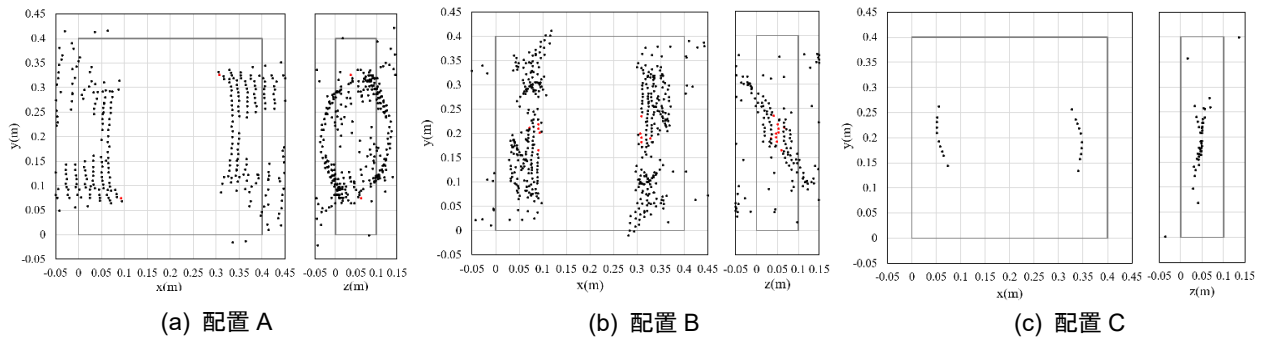


図-9 AE 源位置標定結果（従来法・仮想ひび割れ有り）

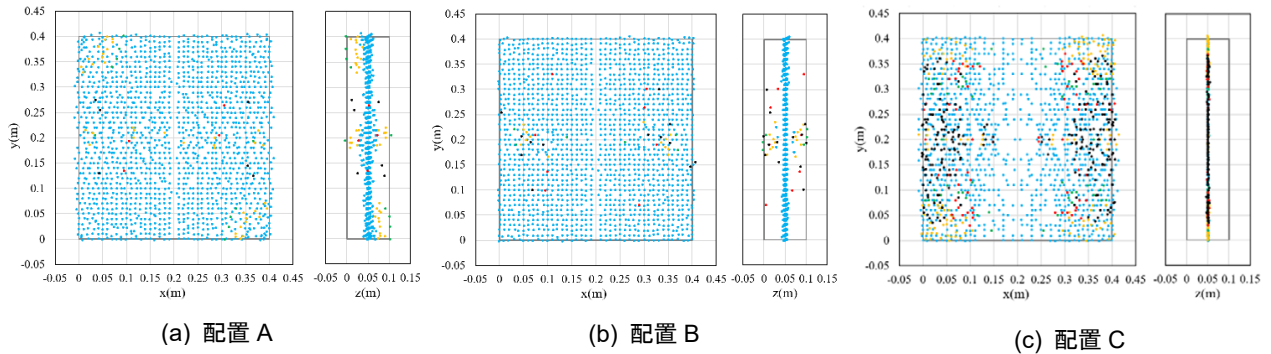


図-10 AE 源位置標定結果（提案法・仮想ひび割れ有り）

また、提案法の位置標定結果をセンサ配置別に比較すると、仮想ひび割れを導入しない場合と同様に、配置 C の位置標定精度が最も低い結果となった。また、仮想ひび割れを導入しなかった場合と比較して、導入した場合はセンサ配置による位置標定結果が大きく異なり、標定誤差 0.025m 以下を示す AE 源の数は、配置 A, B の方が配置 C と比較して 1.5 倍程度多いことがわかる。ここで、図-10 の提案法の配置 C における z 方向の標定結果に着目すると、配置 A および B と比較して標定誤差が非常に小さいことがわかる。これは、仮想ひび割れ導入前においても同様の結果を示しており、配置 C が z 方向での標定精度に大きく貢献していることを示唆している。しかし、どのような理由で配置 C が z 方向の安定性に貢献したかは現段階で明らかではなく、今後、センサ配置条件を多くして検討を継続することとする。

(3) 位置標定誤差と残差平方和の関係

これまでの検討結果より、より信頼性の高い AE 源を得るためには、センサ配置に留意し、センサ座標の 1 方向において最低 3 段階の配置が望ましいことが示唆された。ここで供試体や構造物等での計測で得られる AE 波を用いて位置標定を行う場合、同定された AE 源が正しい位置を表しているかどうかを判断することは難しい。そのため、本研究では数値実験の結果に基づき、位置標定された AE 源の誤差が大きい場合は、その AE 源を排除することで、より信頼性の高い AE 源のみを抽出できると考え、その抽出方法について検討することとした。ここでは位置標定誤差と残差平方和 RSS の関係に着目し、

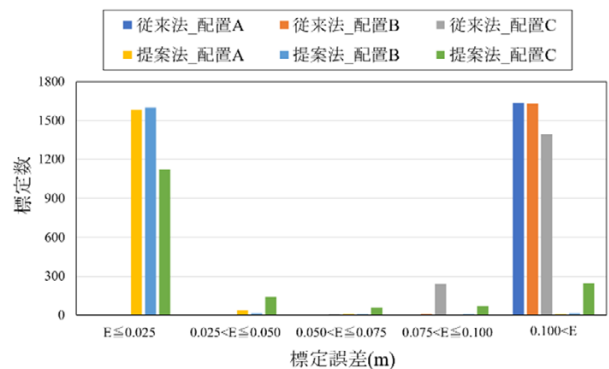


図-11 標定誤差別の標定数（仮想ひび割れ有り）

より信頼性の高い AE 源の抽出方法の可能性を検討した。

提案法における AE 源の位置標定誤差と残差平方和 RSS の関係を図-12 に示す。仮想ひび割れ無しの場合では、いずれのセンサ配置においても仮想ひび割れ有りの場合と比較して RSS が小さいことがわかる。仮想ひび割れを導入することで、 RSS は大きくなるが、標定誤差との相関は仮想ひび割れの有無に関わらず低い結果となった。また、配置 C の仮想ひび割れ有りの場合に着目すると、配置 A および配置 B よりも RSS は小さいものの、標定誤差が大きいことがわかる。

以上のことから、位置標定誤差と残差平方和に明確な相関は確認できず、残差平方和を基により位置標定精度の高い AE 源を抽出することには課題があると考えられる。ただし、提案法における位置標定精度は従来法と比較して非常に高く、今後、より信頼性の高い抽出方法に関する取組みが必要である。

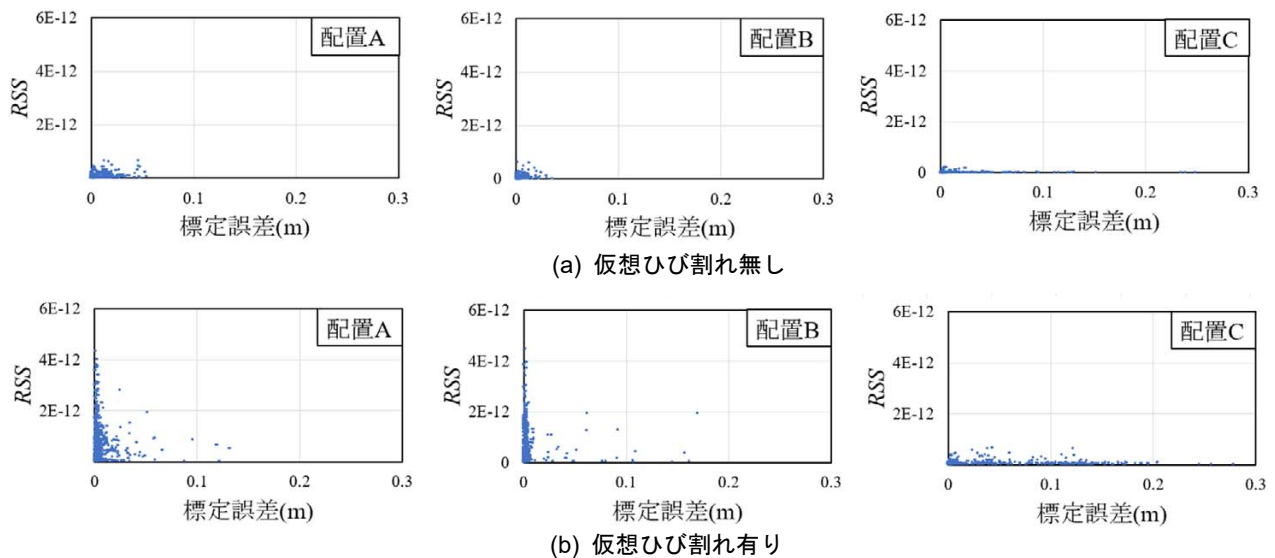


図-12 残差平方和 RSS と位置標定誤差の関係

4. まとめ

本研究では、AE 源から各センサへ弾性波が伝搬する際に、健全時速度およびそれ以下の速度で伝搬すると仮定した際の各センサ間の計算上の到達時間差と観測される到達時間差の残差平方和が最小となる AE 源を求める手法を提案し、数値実験にて従来法および提案法による位置標定結果を比較検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 仮想ひび割れを導入しない場合、供試体内の弾性波速度が一定となるため、従来法と提案法の位置標定精度は同程度となるが、AE センサの配置条件によっては提案法において精度が低くなる場合があることがわかった。
- (2) 仮想ひび割れを導入した場合、従来法では初期に設定した速度で AE 源位置標定解析を行うため、仮想ひび割れ導入に伴う速度低下の影響を大きく受け、位置標定精度が著しく低下したのに対し、提案法では真値に対し 0.025m 以内に位置標定された AE 源の数が大多数を占め、位置標定精度が高く維持される結果となり、提案法の妥当性が示された。
- (3) センサ配置が位置標定結果に及ぼす影響が確認され、本研究の範囲内では、センサ座標の 1 方向において最低 3 段階の配置が望ましいことが示唆された。

参考文献

- 1) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論—構造物の診断と破壊現象解析—第 2 版，pp.1-4，森北出版，2005
- 2) (社)日本非破壊検査協会：非破壊検査シリーズ ア

コースティック・エミッション試験I， pp.4-21， 2008

- 3) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論—構造物の診断と破壊現象解析—第 2 版，pp. 51-54，森北出版，2005
- 4) 塩谷智基，麻植久史，西田孝弘，宮田弘和：AE 法および AE トモグラフィにより推定された実橋梁 RC 床版の損傷検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2085-2090，2016.6
- 5) 茅野茂，西田孝弘，服部篤史，橋本勝文，塩谷智基：輪荷重走行載荷を受ける鋼板接着補強 RC 床版の AE トモグラフィによる損傷進展評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.19，pp.629-634，2019.10
- 6) Zilong Zhou et al. : A New Algebraic Solution for Acoustic Emission Source Localization without Pre-measuring Wave Velocity, Sensors 2021, 21, 459 (<https://doi.org/10.3390/s21020459>)
- 7) Zilong Zhou et al. : A Closed-Form Method of Acoustic Emission Source Location for Velocity-Free System Using Complete TDOA Measurements, Sensors 2020, 20, 3553 (<https://doi.org/10.3390/s20123553>)
- 8) (社)日本非破壊検査協会：非破壊検査シリーズ アコースティック・エミッション試験I， p.9， 2008
- 9) 中村優，大野健太郎，上野敦：コンクリートの弾性波速度変化を考慮した AE 源位置標定手法の検討，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集，Vol.7，pp.245-250，2022
- 10) 仲佐博裕：アコースティックエミッションの理論と実際—非破壊検査におけるフラクタル評価法—，pp.61-108，地人書館，1994