

論文 到達時間差の最小残差平方和に基づく速度可変型 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*2・鎌田 知久*3

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, コンクリートの破壊進展の把握が可能であるが, ひび割れ発生による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, 1つの AE 源から複数の AE センサへの弾性波速度を個別に設定する手法を提案し, 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, 提案法の位置標定精度は解析条件に依存し, 健全な状態では従来法の方が提案法より位置標定精度は高く, ひび割れ発生時では従来法よりも提案法の方が位置標定精度は高いことが明らかとなった。

キーワード: AE 法, AE 源位置標定, 弾性波速度, 到達時間差, 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実用化するためにアコースティック・エミッション (AE) 法と言われている¹⁾²⁾, 検出される AE 信号からその発生源の位置標定や破壊領域の推定が行われている。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に弾性波速度 (一般に P 波速度) を予め求め, 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, Tsangouri ら³⁾の検討によると, コンクリートの載荷試験中, ひび割れは全てのセンサ方向への弾性波の速度と伝搬に影響を与え, 損傷が進行するにつれて位置標定精度は低下することが報告されている。位置標定解析によるコンクリートのひび割れ進展および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。

これまで多数の位置標定手法が提案されており, コンクリート分野で普及している手法の一つに大津ら⁴⁾が提案している解析手法があり, 解析領域をメッシュ分割せずに AE 源位置を標定するものである。一方, 解析領域をメッシュ分割する手法の一つに格子探索法⁵⁾と呼ばれる手法がある。Zhang ら⁶⁾⁷⁾は格子探索法を用いて, ひび割れが位置標定結果に及ぼす影響を数値解析により検討した結果, ひび割れ発生により位置標定精度が低下する結果を報告している。位置標定精度低下の要因は, 測定対象物の弾性波速度を一定と仮定していることが原因として考えられ, 1つの AE 源から複数の AE センサへの弾性波速度を個別に考慮する必要があると考えられる。

そこで筆者ら⁸⁾は, 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した。その結果, ひび割れ導入による速度低下を想定した数値実験により, 速度一定とした従来法と比較して位置標定精度の向上が確認された。しかし, 既往の検討では解析時間を極力抑える工夫として, 1つの AE 源に対し解析上の設定速度は健全時の初期速度および速度低下を考慮した速度の2種類のみとしていた。ひび割れの影響による速度低下の大きさは各センサ方向で異なることが考えられるため, 速度を3種類に増加させ, 提案法の更なる位置標定精度向上を図ることとした。本研究では, 解析対象内にひび割れによる弾性波速度低下を模擬した数値実験を実施し, 解析時間を考慮しながら従来法と提案法の位置標定精度を比較した。

2. AE 源位置標定手法

2.1 従来 AE 源位置標定手法^{1) 4)}

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 to_i とすれば, センサ T_i および T_j で観測された到達時間の差 $to_i - to_j$ と距離に関する次式が得られる。

$$\left\{ \begin{aligned} & \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2} \\ & - \sqrt{(x - a_j)^2 + (y - b_j)^2 + (z - c_j)^2} \end{aligned} \right\}^2 = V_p^2 (to_i - to_j)^2 \quad (1)$$

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, 解析サイクル別の計算順

*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 博士 (工学) (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 助教 博士 (工学) (正会員)

域のイメージ図を図-2にそれぞれ示す。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_i ($V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$) 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 $to_i - to_j$ 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。

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

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 V_l および V_m に依存して変動し、 $RSS(k, l, m)$ が最小となる速度 V_{lk} および V_{mk} 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 $RSS(k)$ が決定される。次に、解析範囲内に一定の間隔（解析ステップ幅 d ）で設定された点 S_k に対し前述の操作と同様に $RSS(k)$ を求め、最終的に解析範囲全体の中で $RSS(k)$ 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。

3次元位置標定を行う場合では一般的に6個のセンサを使用するため、式(2)の残差平方和 RSS の最小値を求める際に、全てのセンサ方向に対し解析速度 $V_{CH1} \sim V_{CH6}$ ($V_{min} \leq V_{CH1} \sim V_{CH6} \leq V_{max}$) を設定し、かつ解析範囲内に設定した全ての点 S_k に対し計算を実施する場合、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、筆者らが使用した PC (Intel Core i7 2.9GHz, メモリ: 16GB) であれば約1年以上の時間を要する場合も生じ、より現実的な時間での解析が望まれる。そこで筆者らの既往の検討⁸⁾では、解析時間を極力抑える工夫として、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種類のみとし検討を実施した結果、位置標定精度の向上が確認された。本研究では、更なる位置標定精度向上を目的とし、3種類の速度選択が可能な方法を提案するとともに、解析時間を抑える試みを行った。

すなわち、速度の設定については、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_3 ($V_{min} \leq V_2, V_3 \leq V_{max}$) の3種類とし、計算時間を抑える工夫として解析領域を2サイクルに分け、1サイクル目では粗い格子間隔で AE 源の位置を推定し、2サイクル目ではより密な格子間隔を設定して計算を行うこととした。計算の1サイクル目では、解析ステップ幅 d_1 、解析速度の増加幅 v_1 で解析範囲内に対して計算を行い、 $RSS(k)$ が最小値を示す点(図-2(a)中の青星)を選択する。次に、計算の2サイクル目では、1サイクル目に選択された点を中心として、その周囲において解析ステップ幅 d_2 ($\leq d_1$)、解析速度の増加

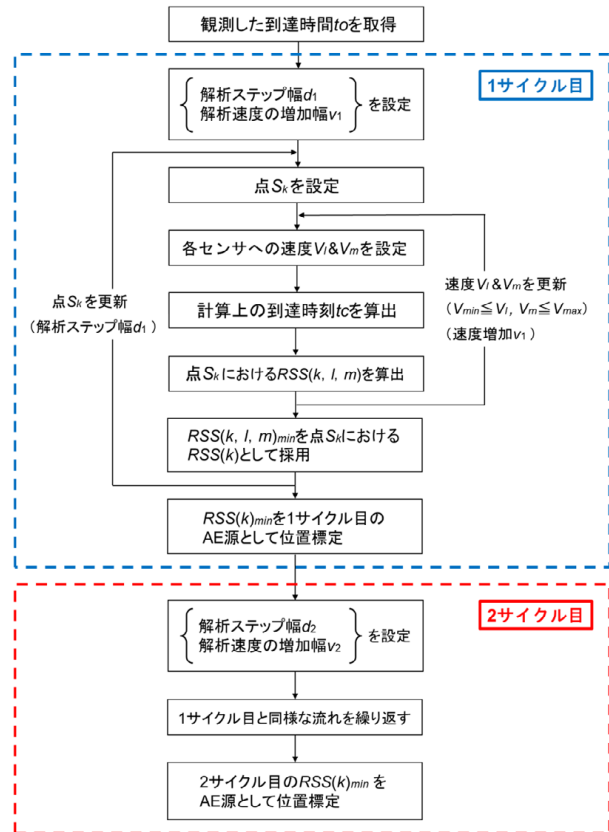


図-1 提案する AE 源位置標定手法の流れ

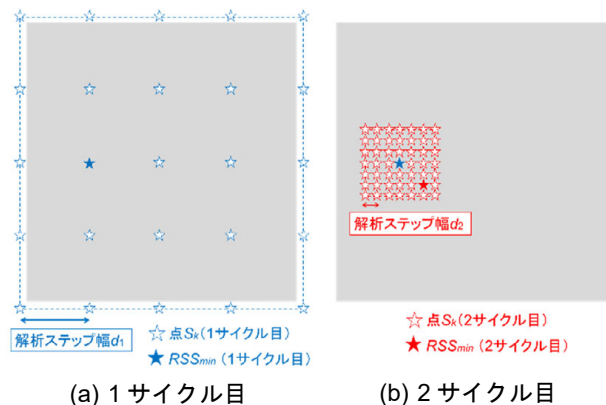


図-2 計算領域のイメージ図

幅 v_2 ($\leq v_1$) で計算を実施し、 $RSS(k)$ が最小値を示す点(図-2(b)中の赤星)を AE 発生源 (x, y, z) として求めることとした。

3. 数値実験による検討

弾性波速度一定による AE 源位置標定手法（従来法）と、2種類もしくは3種類の解析速度を用いた提案法の位置標定精度を比較するために、弾性波の伝搬経路上に速度低下を生じさせるモデルによる数値実験を行った。なお、以降では、解析速度を2種類使用する提案法を2種類型、3種類使用する提案法を3種類型と呼称する。

3.1 数値実験条件

数値実験で設定した供試体と AE センサ配置は、図-3に示すように長さ 0.4m、高さ 0.4m、厚さ 0.1m の直方

体に 6 個の AE センサ CH1~6 を配置した。また、供試体の $y=0.1, 0.3\text{m}$ の位置に仮想ひび割れ面（以降、仮想ひび割れ）を導入し、ひび割れ生成に伴う弾性波速度の低下が AE 源位置標定結果に及ぼす影響について検討した。AE 源は図-4 に示すようにランダムな位置に 420 個設定した。

まず解析の第一段階として、設定された各 AE 源から各 AE センサへ最短の直線経路で弾性波が到達する時間を算出し、これを観測された到達時間 t_0 （サンプリング時間間隔 $1\mu\text{s}$ と設定）とする。このときの設定速度は、従来法と提案法の解析速度 2 種類および 3 種類の位置標定精度を比較するため、3 種類の速度を設定した。すなわち、仮想ひび割れを通過しない場合は健全なコンクリートの一般的な速度とされる 4000m/s^2 とし、仮想ひび割れを 1 回通過する場合は速度は 3250m/s 、2 回通過する場合は速度は 2500m/s 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。

提案法の解析速度 2 種類と 3 種類では 2.2 で示した手法より、初期速度 4000m/s 、解析速度範囲 $2000\sim 4100\text{m/s}$ 、 x, y, z 方向の解析範囲を $-0.005\sim 0.405\text{m}$ 、 $-0.005\sim 0.405\text{m}$ 、 $-0.005\sim 0.105\text{m}$ とした。ここで、 x, y, z 方向の解析ステップ幅 d_1 を 5, 10, 20, 30mm, d_2 を 5mm, 解析速度の増加幅 v_1 を 10, 20, 30, 40m/s, v_2 を 10m/s とした時、解析速度 3 種類において 1 つの AE 源を位置標定するのに掛かる解析時間を表-1、図-5 に示す。解析条件が細かいほど、解析時間は指数関数的に増加し、解析ステップ幅 d_1 が 5mm の場合では 10mm 以上の場合と比較して解析時間が非常に長いことがわかる。本研究では、本数値実験の 1 条件の位置標定結果を 1 週間以内に得るように目標設定し、 x, y, z 方向の解析ステップ幅 d_1 を 10, 20, 30mm, d_2 を 5mm, 解析速度の増加幅 v_1 を 20, 30, 40m/s, v_2 を 10m/s とし、9 通りの解析条件と位置標定精度の関係について併せて検討することとした。

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-2 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。なお、本研究ではひび割れ進展時の粗骨材による迂回を把握できる程度まで AE 源の位置標定精度を保持したいと考え、表-2 のように 25mm 間隔で表現することとした。

(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 (d_1

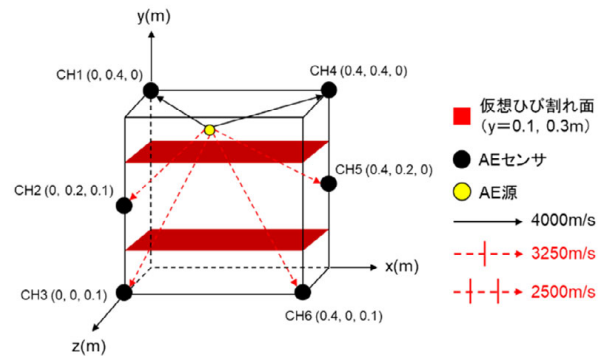


図-3 供試体概要と AE センサ配置

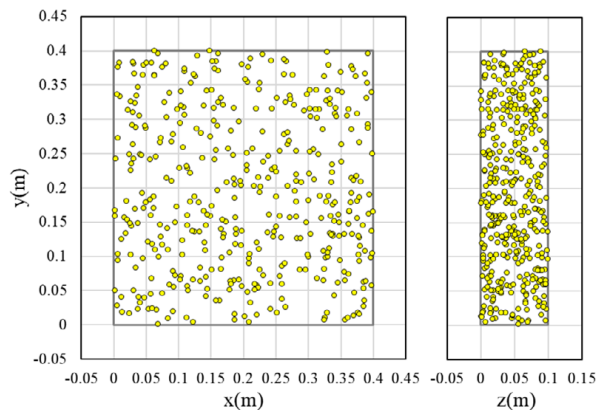


図-4 設定した AE 源 (420 個)

表-1 解析条件と解析時間の関係

解析時間(min/AE源)	解析速度の増加幅 $v_1 \rightarrow v_2$ (m/s)				
	10→10	20→10	30→10	40→10	
解析ステップ幅 $d_1 \rightarrow d_2$ (mm)	5→5	378	93	43	24
	10→5	49	13	6	4
	20→5	7	2	1	0.5
	30→5	3	1.5	1	1

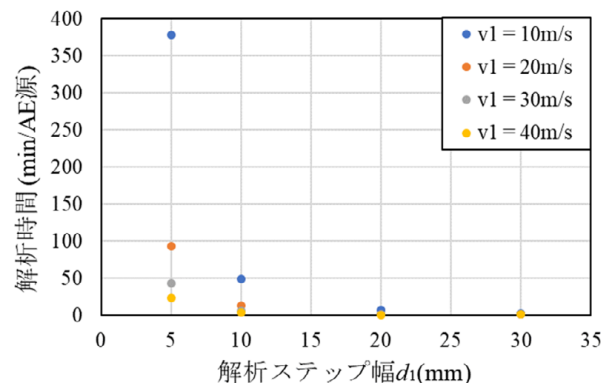







図-5 解析条件と解析時間の関係

$= 10\text{mm}$, $v_1=20\text{m/s}$) の解析速度 2 種類と 3 種類の AE 源位置標定結果を図-6、提案法の解析条件と位置標定精度の関係を図-7 に示す。

従来法では、全体の 99%以上 (419/420) の AE 源が標定誤差 25mm 以下に標定され、非常に位置標定精度が高いことがわかる。

提案法では、解析ステップ幅 d_1 が 30mm から 10mm へと小さくなるほど、位置標定精度は高くなる傾向にある

表-2 標定誤差による分類

プロット色					
標定誤差 $E(\text{mm})$	$E \leq 25$	$25 < E \leq 50$	$50 < E \leq 75$	$75 < E \leq 100$	$100 < E$

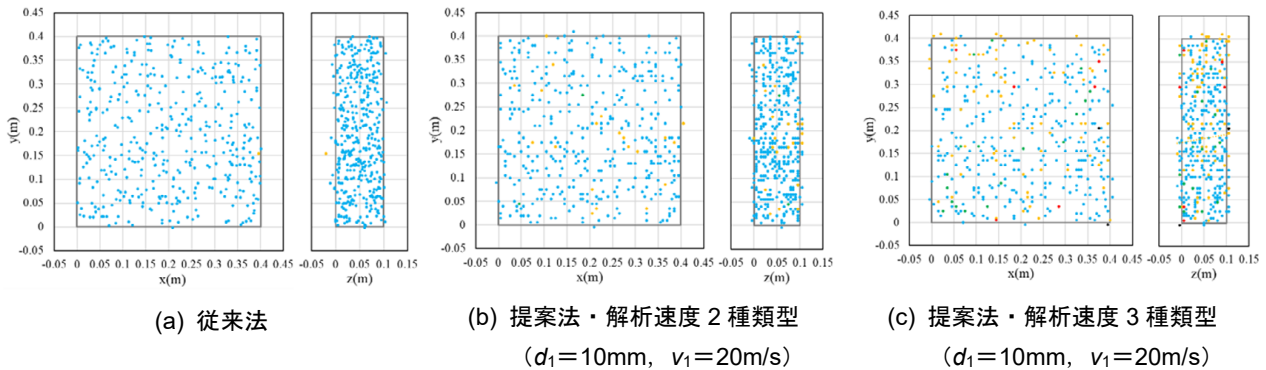


図-6 AE 源位置標定結果 (仮想ひび割れ無し)

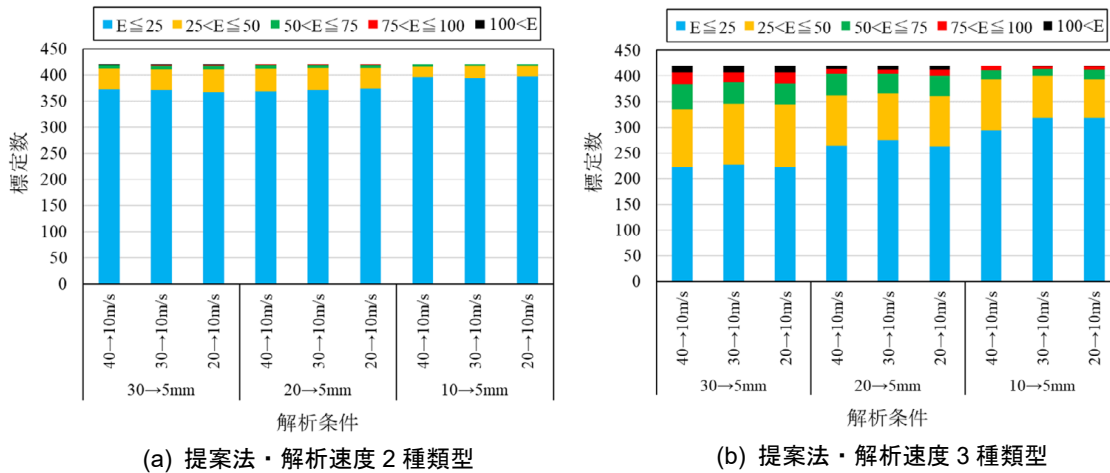


図-7 解析条件と位置標定精度の関係 (仮想ひび割れ無し)

が、解析速度の増加幅 v_1 が位置標定精度に与える影響は小さいことがわかる。そして、 $d_1=10\text{mm}$ の時、解析速度 2 種類型では全体の 94%，3 種類型では 74% が標定誤差 25mm 以内であることがわかる。

以上より、仮想ひび割れを導入しない場合、解析領域内の弾性波速度が一定であり、メッシュ分割しないため、本研究の解析条件では、従来法が最も位置標定精度が高く、提案法では解析速度 2 種類型が比較的高い精度を有することがわかった。

(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 ($d_1=10\text{mm}$, $v_1=20\text{m/s}$) の解析速度 2 種類型と 3 種類型の AE 源位置標定結果を図-8，提案法の解析条件と位置標定精度の関係を図-9 に示す。

従来法では、仮想ひび割れ無しの場合と比較して、ひび割れを導入した場合は位置標定精度が著しく低下し、ほとんどが計算不可となった。

提案法では、解析ステップ幅 d_1 が小さいほど、位置標定精度は僅かに高くなる傾向にあるが、仮想ひび割れ無

しの場合と比較して、解析精度向上の傾向は小さく、仮想ひび割れ導入に伴う速度低下の影響を受けていると考えられる。また、解析速度の増加幅 v_1 が及ぼす影響は小さいことがわかる。これは仮想ひび割れ無しの場合にも同様な傾向を示しており、解析速度の増加幅が 20~40m/s 程度変動しても、計算上得られる到達時間差は概ね同一であることが要因として考えられる。そして、 $d_1=10\text{mm}$ の時、解析速度 2 種類型では全体の 40%，3 種類型では 44% が標定誤差 25mm 以内に標定され、従来法より位置標定精度が高い結果となった。

一方で、提案法も仮想ひび割れ無しの場合と比較して同一の解析条件では位置標定精度が低下しており、仮想ひび割れ導入に伴う速度低下の影響を受けていると考えられる。また、図-8(b)より、解析速度 2 種類型では設定速度が 2 種類 (4000m/s, 3250m/s) となる $0.1\text{m} < y < 0.3\text{m}$ の範囲では位置標定精度が高いが、設定速度が 3 種類 (4000m/s, 3250m/s, 2500m/s) となる $y < 0.1\text{m}$ および $y > 0.3\text{m}$ の範囲では、位置標定精度が著しく低下していることがわかる。また、図-8(c)より、解析速度 3 種類

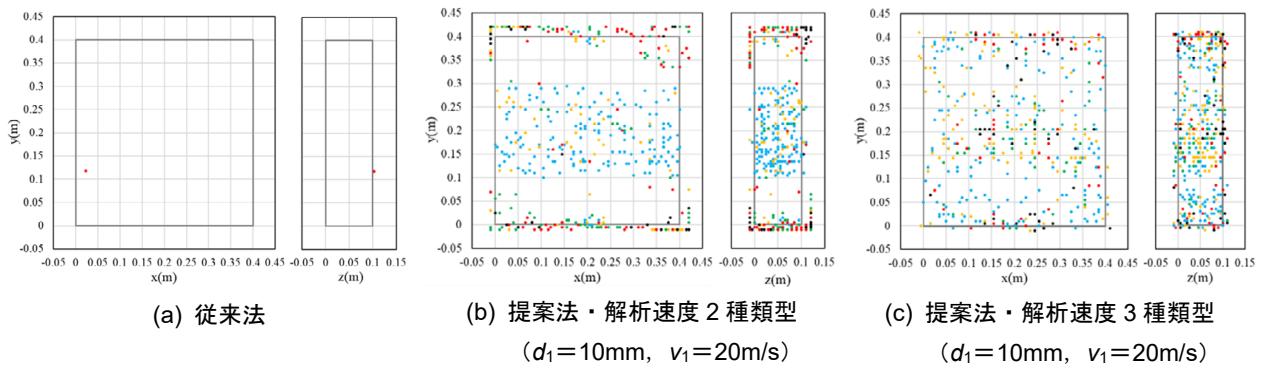


図-8 AE 源位置標定結果 (仮想ひび割れ有り)

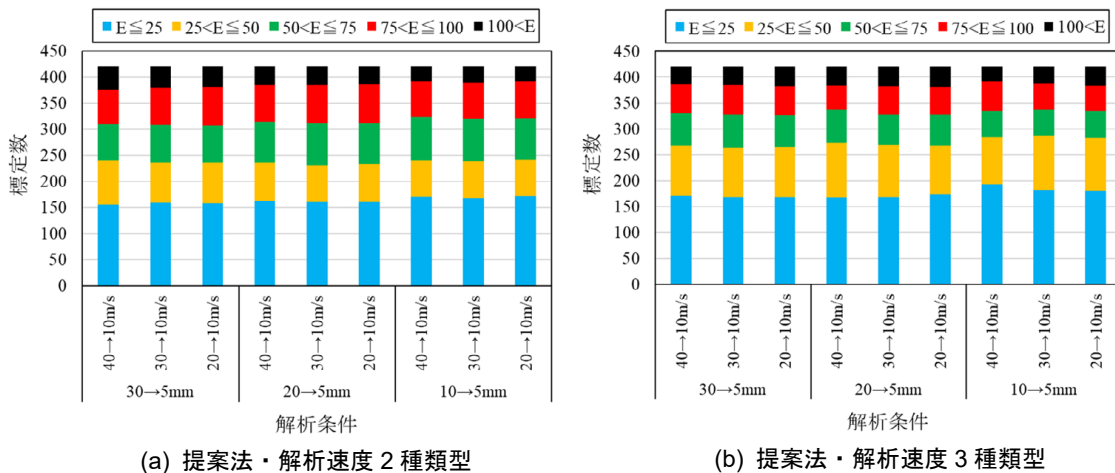


図-9 解析条件と位置標定精度の関係 (仮想ひび割れ有り)

型では位置標定精度が低い AE 源が一定の領域に集中するようなことはないことが確認できる。

以上より、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受け、仮想ひび割れ無しの場合と比較して位置標定精度が大きく低下した。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、従来法と比較して位置標定精度が高い結果となった。また、仮想ひび割れの有無に関わらず、本研究における提案法の解析条件では、解析速度の増加幅よりも設定する AE 源の解析ステップ幅の方が位置標定精度への影響が大きく、解析ステップ幅が小さいほど、位置標定精度は高い傾向にあることがわかった。

(3) 位置標定誤差の要因

仮想ひび割れ有りの場合において、設定した AE 源位置が (0.327, 0.098, 0.052) の場合を例に、提案法の解析速度 3 種類型 ($d_1=10\text{mm}$, $v_1=20\text{m/s}$) で計算を実施した場合 (2 サイクル目の計算は未実施) における、解析領域内に設定された全 21168 点の残差平方和 RSS と標定誤差の関係を図-10 に示す。RSS と標定誤差に正の相関が確認できるが、真値から 106mm 離れた位置に RSS の最小値が存在することがわかる。この結果から、本研究の

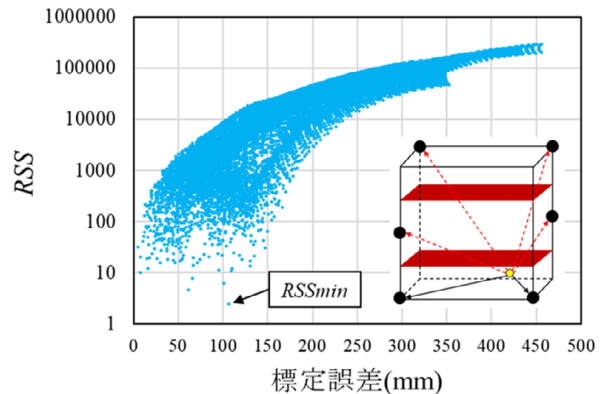


図-10 残差平方和 RSS と標定誤差の関係

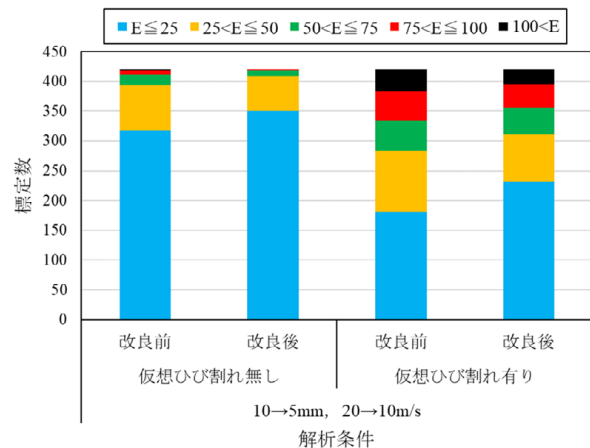


図-11 提案法・解析速度 3 種類型の改良

解析条件では、RSS が最小となる位置が必ずしも AE 源に該当するとは限らないことを示唆している。これは、解析速度 3 種類型で多く出現する現象であり、位置標定解析を実施する際の速度の選択肢が増えることで局所的に RSS が最小あるいは極小を示す位置が増加することにより起因すると考えられ、解析速度選択肢の増加が位置標定精度向上に寄与するとは断言できないと考えられる。また、仮想ひび割れ無しの状態において、提案法の解析速度 3 種類型が 2 種類型よりも位置標定精度が低い結果となったことから、解析速度 3 種類型の方が解析条件による位置標定精度の変動が大きく、図-10 に示すような標定誤差が比較的大きい位置に RSS の最小値が発生する可能性が高いと考えられる。

そこで、提案法の解析速度 3 種類型において、1 サイクル目の RSS の下位 10 個を抽出し、それらの点の周囲を 2 サイクル目で計算し、その中の RSS 最小値を AE 源として標定する手法を試みた。本研究における解析条件が最も細かい場合 ($d_1=10\text{mm}$, $v_1=20\text{m/s}$) での結果を図-11 に示す。仮想ひび割れの有無に関わらず、改良後の方が位置標定精度は僅かに向上したことがわかる。一方で、位置標定精度が低い AE 源も比較的多く残る結果となり、図-10 に示すような例が計算の 2 サイクル目においても発生していると考えられ、更なる改善が今後必要である。

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、2 種類もしくは 3 種類の解析速度を用いて得られる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した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 仮想ひび割れ無しの場合、解析範囲内の弾性波速度が一定でメッシュ分割を実施しないため、本研究の解析条件では、従来法が最も位置標定精度が高い結果となった。
- (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 AE 源から各 AE センサへの速度を個別に考慮しているため、従来法と比較して位置標定精度が高い結果となった。

- (3) 本研究における提案法の解析条件では、解析速度の増加幅よりも設定する AE 源の解析ステップ幅の方が位置標定精度への影響が大きく、解析ステップ幅が小さいほど、位置標定精度は高い傾向にあることがわかった。
- (4) 本研究の解析条件では、必ずしも残差平方和 RSS の最小値において位置標定精度が高くなることはないことを確認され、仮想ひび割れ無しの状態において、提案法の解析速度 3 種類型が 2 種類型よりも位置標定精度が低い結果となり、解析速度選択肢の増加が位置標定精度向上に寄与するとは断言できないと考えられる。今後、位置標定精度向上に向けて、更なる提案法の改良が必要である。

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.1-54，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) Eleni Tsangouri et al. : Assessment of Acoustic Emission localization accuracy on damaged and healed concrete, Construction and Building Materials 129, pp.163-171, 2016
- 4) 丹羽義次，小林昭一，大津政康：アコースティック・エミッションによる破壊源探査，土木学会論文集，第 276，pp.135-147，1978.8
- 5) Christian U. Grosse et al. : Acoustic emission testing Basic for Research-Application in Engineering, Springer, p.404, 2008
- 6) Fengqiao Zhang, Lotfollah Pahlavan, Yuguang Yang : Evaluation of acoustic emission source localization accuracy in concrete structures , Structural Health Monitoring, Vol.19, pp.2063-2074, 2020
- 7) Fengqiao Zhang et al. : Influence of Cracks on the Reliability of Acoustic Emission Monitoring of Concrete Structures, 2nd international RILEM/COST conference on early age cracking and serviceability in cement-based materials and structures, pp.119-124, 2017
- 8) 中村優，大野健太郎，上野敦，鎌田知久：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.45, No,1, pp.1492-1497, 2023