

コンクリートの破壊進展に伴う弾性波速度の変化を考慮した AE 源位置標定手法の検討

東京都立大学 学生会員 ○中村優 正会員 大野健太郎 上野敦

1. はじめに

コンクリート内部の破壊過程を 3 次元でリアルタイムに把握可能な手法にアコースティック・エミッション (AE) 法があり、破壊位置推定は AE 源位置標定結果に基づいて行われる。AE 源位置標定は、初期に設定した弾性波速度を用いて実施されるが、コンクリートの破壊進行に伴い弾性波速度は低下するため、破壊進行に伴う弾性波速度の変化を考慮した AE 源位置標定手法が必要となり、本研究ではその基礎検討を実施した。

2. AE 源位置標定手法

2.1 従来の AE 源位置標定手法¹⁾

材料の弾性波速度を V_p として、図-1 に示すように、AE センサ T_0 の位置を原点とする 3 次元座標系を考え、他の AE センサ T_1, T_2, \dots, T_N での弾性波の到達時刻とセンサ T_0 への到達時刻 t_0 との時間差を t_1, t_2, \dots, t_N とする。このとき、AE 源の座標を $S(x, y, z)$ 、センサ T_i の座標を (a_i, b_i, c_i) とすれば、座標原点に位置するセンサ T_0 とセンサ T_i への弾性波の到達時間差 t_i と距離 R_i に関する次式が得られる。

$$\begin{aligned} R_i &= \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2} \\ R_0 &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ R_i - R_0 &= V_p t_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 i は 1, \dots , N の範囲を示す。

2.2 提案する手法による AE 源位置標定手法

提案手法のフローを図-2 に示す。弾性波速度 V_k (1~5000m/s) で式(1)より AE 源位置標定を行い、AE 源の位置 $S_k(x_k, y_k, z_k)$ を得る。次に、得られた位置 S_k から弾性波速度 V_k で各 AE センサへ弾性波が到達した場合の計算上の時間差を $t_{k1}, t_{k2}, \dots, t_{kN}$ とし、式(2)に示すように、到達時間差の残差平方和 SD を求め、 SD が最小となる弾性波速度 $V_{min(SD)}$ と AE 源 $S(x_{min(SD)}, y_{min(SD)}, z_{min(SD)})$ を得ることとした。

$$SD = \sum_{i=1}^N (t_{ki} - t_i)^2 \quad (2)$$

3. 従来法と提案法の比較

3.1 供試体概要および AE 計測

従来の AE 源位置標定手法と提案した手法の精度を比較するために、図-3 に示すような円盤状コンクリート供試体に割裂によりひび割れを導入し、ひび割れ導入に伴う AE 信号を 6 個の AE センサ (60kHz 共振) で取得した。さらに、図中に示す超音波入出力点間の超音波伝搬速度を測定した。コンクリートの計画配合を表-1 に示す。また、材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は 47.6N/mm^2 , 28.0kN/mm^2 である。

キーワード コンクリート, AE 法, AE 源位置標定, 残差平方和, 弾性波速度, ひび割れ

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL 042-677-1111

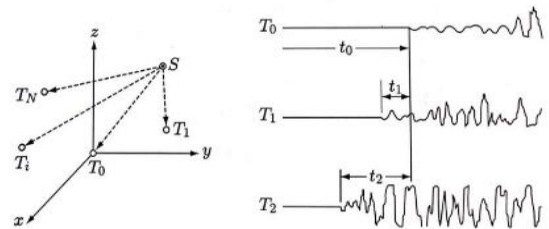


図-1 AE センサ配置と記録波形¹⁾

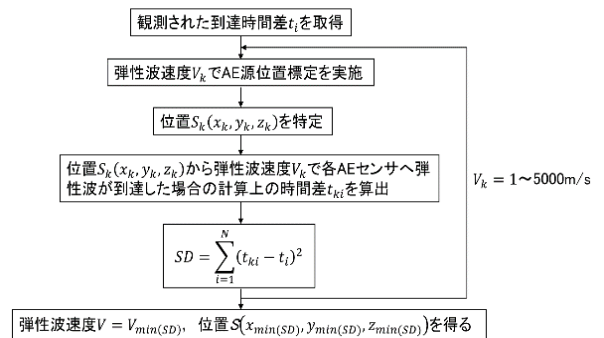


図-2 提案する手法の流れ

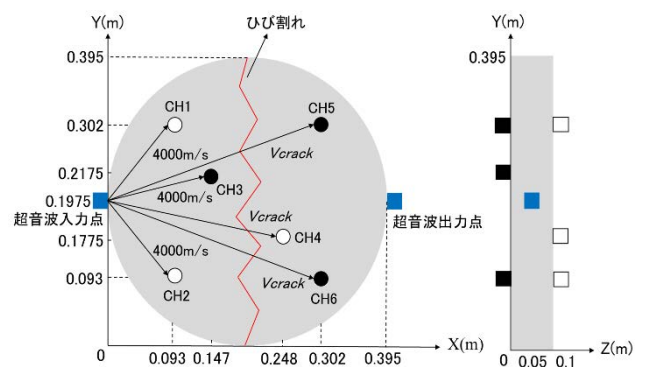


図-3 供試体概要と AE センサ配置

表-1 コンクリートの計画配合

Gmax (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
20	8	40	4.5	44.4	172	430	741	935	1.505

数値実験では超音波発信源を AE 源とし、ひび割れ導入による弾性波速度の低下が位置標定精度に及ぼす影響について検討した。設定した弾性波速度は、図-3 に示すように超音波発信源から CH1~3 間は 4000m/s, CH4~6 間を V_{crack} ($=4000, 3500, 3000, 2500\text{m/s}$) とした。

3.2 数値実験による検討

図-4 に超音波発信源と各位置標定手法から得られた AE 源座標の差と弾性波速度 V_{crack} の関係を示す。従来法では、 $V_{crack}=3000, 2500\text{m/s}$ の場合、AE 源は算出不可となった。また、弾性波速度 V_{crack} が低速度となるにつれて、どちらの手法も AE 源位置標定精度が低下しているが、提案法では従来法と比較して AE 源位置標定精度が改善されていることがわかる。

3.3 载荷実験による検討

図-5 に荷重と超音波伝搬速度の関係を示す。なお、測定の都合上、超音波伝搬速度は最大荷重付近から除荷時までの約 500 秒間のみのデータ取得となった。超音波伝搬速度は最大荷重付近では約 4300m/s であり、ひび割れ発生後には約 2500m/s まで低下していることが確認できる。

図-6 にひび割れ発生前に超音波を発信・受信した波形を対象に、提案法により AE 源位置標定を実施した結果を示す。超音波発信源付近に位置標定された AE 源の SD は 11.1 以下であったことから、 SD の上限を 11.1 とすることでより信頼性の高い AE 源を抽出できる可能性が示唆された。

次に、 SD が 11.1 以下となった AE 源位置標定結果を図-7 に示す。従来法では、超音波発信源付近にほとんどの AE 源がプロットされ、ひび割れ近傍では位置標定された AE 源が少ないことがわかる。一方、提案法では従来法と比較して、ひび割れ発生前後を問わずひび割れ付近に数多くの AE 源がプロットされていることが確認できる。さらに、提案法では、ひび割れ発生前の段階においても多くの AE 源がひび割れ近傍に集中しており、微細ひび割れの集積過程から主ひび割れ形成に至る過程が現れていると推察される。これらの結果は、図-4 に示す数値実験の結果からもわかるとおり、従来法ではひび割れ発生に伴う弾性波速度の低下の影響を受け、ひび割れ発生後に位置標定された AE 源が少なく、提案法では弾性波速度を変化させることで破壊に直結した AE 源を的確に捉えることができたと考えられる。

4. まとめ

コンクリートの破壊進展に伴う弾性波速度の変化を考慮した AE 源位置標定手法として、実験により得られたセンサ間の到達時間差と計算上得られる到達時間差の残差平方和が最小となる速度を用いて AE 源を特定する手法を提案し、数値実験と载荷実験を行った。その結果、提案手法の位置標定精度が従来法よりも高く、手法の改善が認められた。

参考文献

- 1) 天津政康: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

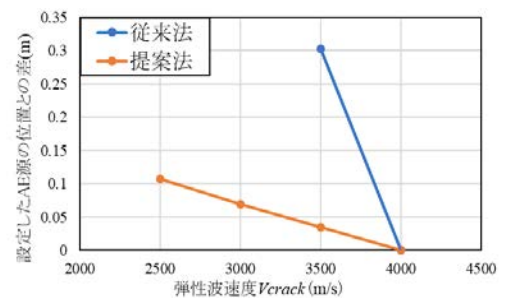


図-4 AE 源位置標定精度の比較

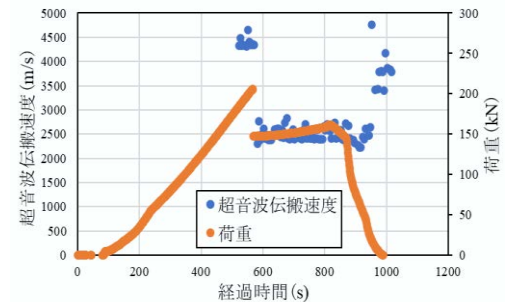


図-5 荷重と超音波伝搬速度の関係

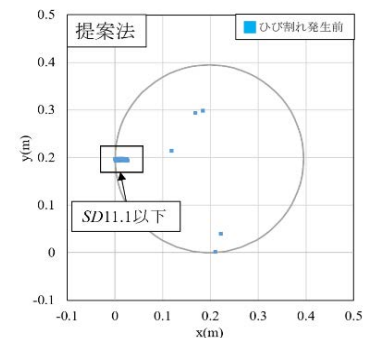


図-6 AE 源位置標定結果 (超音波データ)

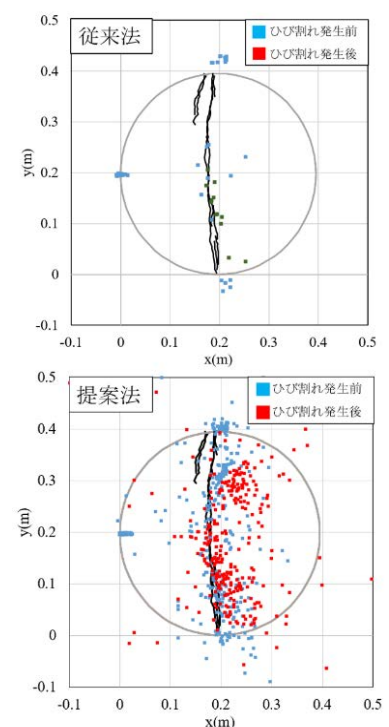


図-7 AE 源位置標定結果 ($SD \leq 11.1$)