

# 論文 AE 波形解析によるモルタルにおける微小ひび割れ規模の同定

重石 光弘\*1・大津 政康\*2

**要旨:** 材料破壊過程において発生するアコースティック・エミッション (AE) の検出波形を用いて, AE 発生源すなわち材料内部に発生した微小ひび割れの規模を定量的に評価する手法を考案した。そのために必要な AE センサの絶対感度を得るために, デービス棒を用いた較正実験を行った。そしてこれらをモルタルで作成した板供試体の面内一軸圧縮載荷実験において検出された AE 波形に適用し, AE 発生源となった微小ひび割れの規模の同定を試みた。

**キーワード:** AE 波形解析, 微小ひび割れ, 弾性波動, センサ, 絶対感度較正

## 1. はじめに

アコースティック・エミッション (Acoustic Emission; 以後 AE と略) は, 「固体材料内部の微小な破壊あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」と定義される [1], 材料内部を伝播する弾性波動現象である。その原因の代表的なものには, クラックと呼ばれるひび割れ現象が挙げられる。クラックは, 蓄積された内部エネルギーが, 表面エネルギーすなわちひび割れ面を形成することによって解放される現象であるが, その際に解放されたエネルギーの一部が弾性波動として材料内を伝播する現象を AE, その弾性波を AE 波と呼んでいる。

今日では, AE 波の発生頻度や発生パターンを検証したり, AE 波のエネルギー値や減衰傾向を調べることによって, 材料および構造物の物性や品質の定性的評価に用いられている [2]。ここでの目的は, 検出された AE 波形から, その発生源となった微小なひび割れを定量的に評価するための解析手法を開発し, 弾性材料におけるひび割れの発生および破壊機構を解明することにある。

これまでの研究成果として, AE の発生源となった微小ひび割れの発生した位置, 微小ひび割れの発生モードおよび微小ひび割れ面の運動方向を同定する手法 **SiGMA** を開発しており, 多くの AE 現象の事例に対して適用してきた [3]。本手法を用いた AE 波形解析において解析に必要な AE 波形パラメータは, 各観測点の AE 波の P 波初動部の相対的な到達時刻とその時の振幅値だけでよく, 簡素化された解析手順により, 高速に解析結果が得られ, 研究あるいは実地現場への導入が非常に容易であることが最大の利点となっている。本研究では, この解析理論をさらに拡張し, 微小ひび割れの規模を定量的に評価するための手法を考案した。

## 2. SiGMA による微小ひび割れ規模の定量的評価

境界要素法に基づいた微小ひび割れの発生に伴う弾性波動, すなわち AE 波動の基礎式は, SiGMA においては AE 波初動部の到達直後のみを取り出して, 次式で表わされる [4]。

$$A(x) = \frac{1}{4\pi\rho v_p^3} \frac{1}{r} \operatorname{Re}(s_i, \gamma_i) \gamma_p \gamma_q m_{pq}(x') \cdot DF \quad (1)$$

ここに,  $A(x)$ : 観測点  $x$  における AE センサの出力,  $\rho$ : 伝播媒体の密度,  $v_p$ : 伝播速度,  $r$ : 観

\*1 熊本大学助教授 工学部環境システム工学科, 工博 (正会員)

\*2 熊本大学教授 工学部環境システム工学科, 工博 (正会員)

測点から発生源までの距離,  $Re(s_i, \gamma_i)$ : AE 波の入射角による補正係数,  $\gamma_i$ : 観測点から発生源への方向ベクトル,  $s_i$ : AE センサの感度方向ベクトル,  $m_{pq}(x')$ : 発生源  $x'$  に関するモーメントテンソルおよび  $DF$ : 微小ひび割れ面積である。また, モーメントテンソル  $m_{pq}$  は, 次式で表わされる。

$$m_{pq} = \lambda b l_k n_k \delta_{pq} + \mu b l_p n_q + \mu b l_q n_p \quad (2)$$

式中において,  $\lambda, \mu$ : Lamé's Constants,  $\delta_{pq}$ : Kronecker's Delta,  $bl_q$ : Burger's Vector,  $l_k$ : ひび割れ面の運動方向ベクトルおよび  $n_p$ : ひび割れ面の法線方向ベクトルである。

3次元解析の場合には, 6点以上の観測点における AE 波初動部の到達時間差とセンサ出力が得られれば, AE が発生した位置が決定でき[5], さらに式(1)による連立方程式によりモーメントテンソルの各要素が決定できることになる。このとき, 式(1)においてセンサ出力  $A$  として各観測点の相対的な振幅値を用いてもモーメントテンソルを求めることはできるが, AE 発生源である微小ひび割れの規模までを定量的に決定しようとするならば, 変位, 速度, 加速度といった距離の次元を含む物理量に対するセンサの出力すなわち絶対感度を用いる必要がある。

モーメントテンソルに固有値解析を適用すれば, その主値および主方向は, ポアソン比  $\nu$  を用いて, それぞれ式(3)および式(4)のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{最大(第一)固有値: } e_1 &= \mu b \left( \frac{l_k n_k}{1-2\nu} + 1 \right) \\ \text{中間(第二)固有値: } e_2 &= 2\mu b \nu \frac{l_k n_k}{1-2\nu} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{最小(第三)固有値: } e_3 = \mu b \left( \frac{l_k n_k}{1-2\nu} - 1 \right)$$

$$\begin{aligned} \text{第一固有ベクトル: } e_1 &= I + n \\ \text{第二固有ベクトル: } e_2 &= I \times n \\ \text{第三固有ベクトル: } e_3 &= I - n \end{aligned} \quad (4)$$

さらにこれらの固有値は, せん断成分  $X$ , 引張偏差成分  $Y$ , 引張釣合成分  $Z$  に分解することができ[6], 各成分の構成比は次式により一意的に導くことができる。

$$\begin{aligned} e_1 &= X + Y + Z \\ e_2 &= -0.5Y + Z \\ e_3 &= -X - 0.5Y + Z \end{aligned} \quad (5)$$

これにより, AE 波の発生源である微小ひび割れの発生モードを, せん断成分の含有率によって定量的に分類することができ, 式(4)で表わされる固有ベクトルとの関係から微小ひび割れの開口方向, あるいは微小ひび割れ面の法線方向およびその運動方向を決定することができる。

次に, その規模を同定しようとする場合は, 式(1)によって得られたモーメントテンソルは既に正規化されているため, 各成分を本来の値に復元する必要がある。正規化されていない本来のモーメントテンソル  $m_{pq}$  において各要素の中で最大の要素を  $|m_{pql}|$  とおけば, 正規化後のモーメントテンソル  $m'_{pq}$  に対して,  $m_{pq} = |m_{pql}| \cdot m'_{pq}$  の関係が成り立つから, 式(1)は次のように書き改められる。

$$\frac{A r}{Re(s_i, \gamma_i) \gamma_p \gamma_q m'_{pq}} = \frac{1}{4\pi\rho v_p^3} |m_{pq}| \cdot DF \quad (6)$$

一方、式(2)を  $\lambda = 2\mu\nu / (1-2\nu)$  の関係を用いて整理すると、次式のように書き改められる。

$$m_{pq} = b\mu \left( \frac{2\nu}{1-2\nu} l_k n_k \delta_{pq} + l_p n_q + l_q n_p \right) \quad (7)$$

したがって、式(4)から  $l = (e_1 + e_3) / 2$  および  $n = (e_1 - e_3) / 2$  の関係を得るので、これらを正規化して式(7)に代入し、その最大要素を  $\max(m)$  とすれば、

$$|m_{pq}| = b\mu \max(m) \quad (8)$$

となり、式(6)に代入して、整理すれば次式を得る。

$$\frac{A r}{Re(s_i, \gamma_i) \gamma_p \gamma_q m'_{pq}} = \frac{1}{4\pi\rho v_p^3} \mu \max(m) (b \cdot DF) \quad (9)$$

ここに、 $(b \cdot DF)$  が得られ、AE の発生源である微小ひび割れの規模が求められることとなる。

### 3. デービス棒による AE センサの感度校正

前述した手法を用いて微小ひび割れの規模を同定する場合は、距離の次元を持つ物理量に対する絶対的な振幅値が必要で、AE センサの動的特性を定量的に評価することが不可欠となる。この時の必要条件は、センサへどのような信号が入力されたかを知る原理が存在し、物理的な把握が可能な単純な現象であること、精度向上が可能で取り扱いが簡単なことなどがあげられる。これらの条件を満たすために、本研究ではデービス棒を用いた AE センサの特性評価を行なった[7]。図1に AE センサの特性評価装置の概念図を示す。本手法では変位入力に対するセンサの周波数特性評価を行なうことができる。

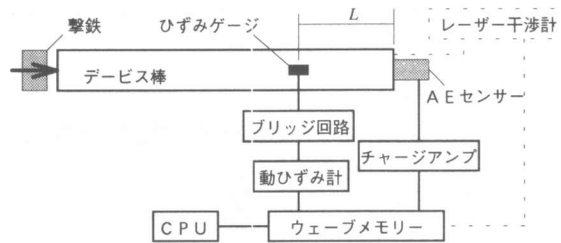


図-1 AE センサの絶対感度校正装置

撃鉄とデービス棒の端面との衝突によって生じた圧縮応力波は、デービス棒の弾性限度内では棒中を弾性波として伝播する。この時、一次元の弾性波の波動方程式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (10)$$

$$C = \sqrt{E/\rho} \quad (11)$$

ここに、 $u$ ：棒の軸方向変位、 $t$ ：時刻、 $z$ ：軸方向の空間座標、 $C$ ：弾性波伝播速度、 $E$ ：棒のヤング率および  $\rho$ ：棒の密度である。圧縮波は、棒の他方の自由端で反射し引張波となって逆方向に伝播する。反射の際に生じる棒の端面の変位  $d(t)$  は、軸ひずみ  $\varepsilon(t)$  によって次式で与えられる。

$$d(t) = 2C \int \varepsilon(t) dt \quad (12)$$

ここで、AE センサの断面積および密度はデービス棒のそれに比べて十分に小さく、棒の自由端での応力波の反射に AE センサが及ぼす影響は無視できると仮定する。棒の自由端から  $L$  だけ離れた位置に貼られたひずみゲージによって検出された入力波を  $\varepsilon_m(t)$  とすれば、式(12)により自

由端での変位が求められ、これを AE センサへの入力として AE センサの出力波形  $\alpha_m(t)$  を AE センサの応答とすれば、AE センサの伝達関数は次式で表わされる。

$$G(j\omega) = \frac{j\omega L[\alpha_m(t)]}{2CL \left[ \epsilon_m(t) \left( t - \frac{L}{C} \right) \right]} \quad (13)$$

ここに、 $\omega$ : 角周波数,  $L$  [ ]: ラプラス変換,  $j$ : 虚数単位である。また、変位入力に対する AE センサの応答に関する周波数特性  $g_d(\omega)$  および位相に関する周波数特性  $\phi_d(\omega)$  はそれぞれ式(14) および式(15)で与えられる。

$$g_d(\omega) = |G_d(j\omega)| \quad (14)$$

$$\phi_d(\omega) = \arg[G_d(j\omega)] \quad (15)$$

ここで、観測波形データの個数を  $N$ 、サンプリング間隔を  $\Delta t$  とした実験により、得られたひずみゲージの出力波形の高速フーリエ変換の結果を  $F_E$ 、AE センサの出力波形の高速フーリエ変換の結果を  $F_A$  とする。この速度成分を含んだひずみゲージの結果  $F_E$  から、時間関数を考慮した AE センサへの入力変位  $\epsilon$  はフーリエ変換の概念から次式で表わされる。

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi f} F_E \quad (16)$$

したがって、AE センサの感度  $S$  は次式により求められる。

$$S = \frac{F_A}{\epsilon} = \frac{F_A}{\frac{1}{2\pi f} F_E} = 2\pi f \frac{F_A}{F_E} \quad (17)$$

実際には、計測系および AE センサを装着した状態でのデべイス棒を含めたひずみゲージの実変位に対する応答も考慮する必要があるが、これにはレーザー干渉計などの非接触型の変位計を用いて較正を行なうことになる。

#### 4. モルタル板供試体の面内一軸圧縮载荷実験への適用

これまでの理論的考察を踏まえ、モルタル板供試体を使用しての面内一軸圧縮载荷を行って、その際に検出された AE 波形に対して適用を試みた。

まず、実験に使用する PZT 系圧電型広帯域型 AE センサの絶対感度較正を行った。一次元弾性波の伝播媒体となるデべイス棒に供試体と同じ配合で作製した、長さ 1350 mm、直径 20 mm のモルタル棒を使用した。打撃側端面より 400 mm の位置の表裏に、長さ 10 mm の Cu-Ni 系合金箔ひずみゲージ 2 枚をそれぞれ棒軸方向に貼り付け、同径の鋼鉄製ハンマを用いて、棒中に弾性波を発生させた。ひずみゲージ

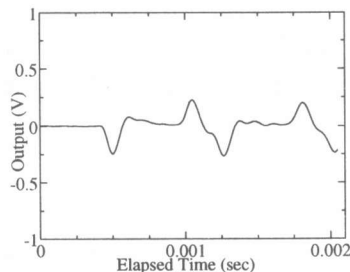


図-2 ひずみゲージ出力

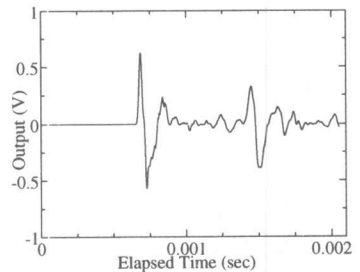


図-3 AE センサ出力

ジによる出力波形は  $5000\mu\epsilon/V$  となるよう増幅され、AE センサによる出力については増幅せず、ともにサンプリング間隔  $0.5\mu\text{sec}$  でデジタル変換して記録した。

本実験に用いた歪みゲージの長さは、モルタルに用いた標準砂の粒度 ( $200\mu\text{m}$ ) に比べて十分に長く、超音波の伝播速度を実測した結果が  $3543\text{m/sec}$  であったことから理論上はおよそ  $350\text{kHz}$  までの歪み速度の検出が可能であると

考えられる。また、本実験では AE センサの取り付けはシリコングリスを塗布して軽く圧着させて、センサ面と対象面との間の空隙を除く程度とし、後述の AE 計測実験も同様とした。したがって、この較正実験によって得られた較正結果は、センサ単独にたいするものではなく、センサ取り付けから AE 信号記録装置に至る計測系に対する較正結果と考えることができる。

較正実験により得られたひずみゲージおよび AE センサによる信号波形の例を図 2、図 3 に、また、それぞれの FFT 変換の結果をそれぞれ図 4、図 5 に示す。そして、AE センサの出力に関する周波数特性曲線は図 6 のように得られた。これより、この AE センサが  $300\text{kHz}$  以下の周波数帯域においてはおよそ  $60\text{kHz}$  に共振周波数を持つことがわかる。したがって、本研究では  $60\text{kHz}$  での AE センサの出力に対する較正值を用いることとし、これらを表 1 にまとめた。

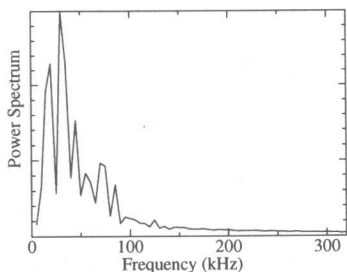


図-4 ひずみゲージ出力 FFT

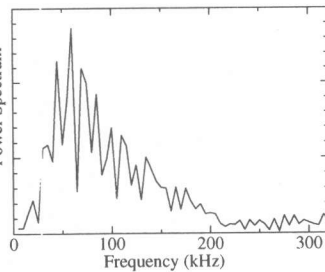


図-5 AE センサ出力 FFT

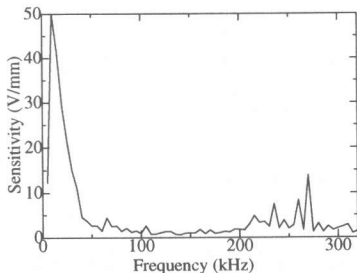


図-6 出力周波数特性曲線

表-1 AE センサ較正表

Sensor Ch. Number	Sensitivity (V/mm)
#1	3.15
#2	3.22
#3	3.62
#4	2.92
#5	3.52
#6	3.44

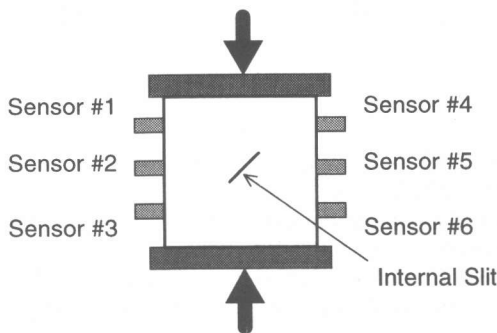


図-7 実験概念図

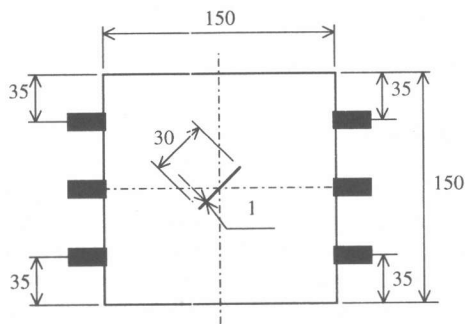


図-8 モルタル板供試体

次に、図 7 に示すように、軟練りモルタル（配合は質量比で、セメント 1、標準砂 2、水セメント比 0.65）で作製した方形板 ( $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 15\text{mm}$ ) が面内一軸圧縮荷重を受ける際に発生する AE 波形の検出を行った。供試体には、中央部に長さ  $30\text{mm}$ 、幅  $1\text{mm}$  のスリットを載荷軸に対して  $45^\circ$  の傾きを成すように加工した。これに面内一軸圧縮荷重を載荷して、供試体にひび割れが発

生, 進展する際の AE を検出した。較正済み AE センサは図 8 に示すように板供試体の両側端部に配置し, AE 信号波形は増幅 (40dB) されて, サンプリング間隔  $1.0\mu\text{sec}$  にて記録した。

波形解析においては, SIGMA を 2 次元モデルに対応させた SIGMA-2D[8]を適用し, その結果より, それぞれの発生源である微小ひび割れの形成モードを類別した。これらの解析結果を図 9 に示す。せん断型微小ひび割れをひび割れ面の運動方向を示す線分とその法線方向を示す線分とを交差させた X で示し, 引張型微小ひび割れをその引張方向すなわちひび割れの開口方向を示す両端矢印線分  $\leftrightarrow$  で示した。また, 表面より肉眼にて観察されたひび割れは, 図中に破線にて示した。これらの AE 発生源の中から無作為に抽出した 10 点に対して AE 発生源となった微小ひび割れの規模の試算を行った結果, 微小ひび割れの体積は,  $100\sim 300\text{ mm}^3$  程度と推定された。このような見かけのひび割れ幅と比較して大きすぎる算定結果となったが, 内部の微小ひび割れを実際に露出させて観察する手法が無いために, これらの結果を評価することはできず, 現時点では破壊規模の相対的な指標と考えることができる。

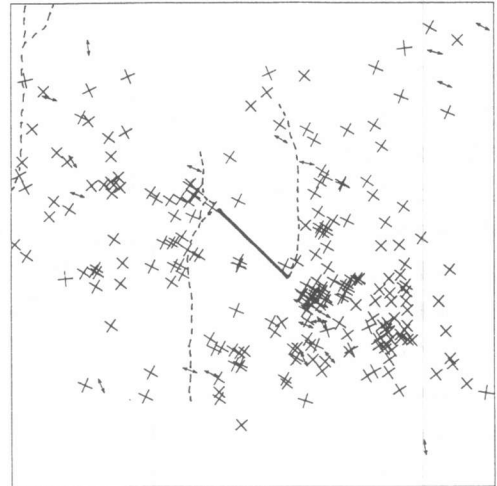


図-9 AE 発生源の同定結果

## 5. まとめ

従来の AE 発生源の逆解析手法である SIGMA を拡張して, 絶対感度較正を施した AE センサを用いて検出した AE 波形から, AE 発生源である微小ひび割れの幾何学的諸量すなわち, 発生位置, 発生モード, 開口方向, さらに規模を定量的に求める手法を考案した。また, この際に必要となる AE センサの周波数特性評価について解説した。さらに, モルタル板供試体が面内一軸圧縮荷重を受ける際に検出された AE 波形に対して, これらの手法を適用し, AE 発生源となった微小ひび割れの規模の同定を試みた。今後は, これらの実際の AE 波形に適用して得られた結果の正当性について検証を行なっていく必要がある, AE センサの感度較正法に対しても精度の向上を進めることを考えている。

## 【参考文献】

- [1] 大津政康: アコースティック・エミッションの理論と特性, 森北出版, 1988.
- [2] アコースティック・エミッション, 日本非破壊検査協会, 1990.
- [3] M.Ohtsu, M.Shigeishi, H.Iwase: 'AE Observation in the Pull-out Process of Shallow Hook Anchors', *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, No.408 / V-11, pp.177-186, 1989.
- [4] M.Ohtsu: Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of Acoustic Emission Source: Application to in situ Hydrofracturing Test, *Journal of Geophysical Research*, Vol.96, pp.6211-6221, 1987.
- [5] 大津政康: アコースティック・エミッションの理論と特性, 森北出版, 1988.
- [6] Kunopoff, L. and M.J.Randall: The Compensated Linear Vector Dipole: A Possible Mechanism for Deep Earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.75, No.26, pp.4957-4963, 1970.
- [7] 上田和永, 梅田 章: デービス棒による加速度計の特性評価に関する研究 第 1 報, 日本機械学会論文集(C編), 57 巻, 533 号, pp.143-147, 1991.
- [8] 重石光弘, 大津政康: 2次元モデルにおけるアコースティック・エミッション波形解析, 材料, 第 45 巻, 第 9 号, pp.1055-1060, 1996.8.