

アコースティック・エミッションと ひびわれ発生機構

ACOUSTIC EMISSION AND MECHANISMS OF MICROFRACTURING

大津 政康* 新関 茂**

By Masayasu Ohtsu and Sigeru Niizeki

Acoustic emission (AE) is defined as elastic waves due to microfracturing in solids. Consequently, the mechanisms of microfracturing have been investigated by employing the quantitative AE waveform analysis, which is called as the source characterization of AE. Recent developments on the source characterization are reviewed. Following historical findings and theoretical backgrounds, the simulation analysis and the moment tensor analysis are discussed. In the case of crack kinematics are known, AE waveforms can be simulated, including the amplitudes. To determine crack types and crack orientations, the eigenvalue analysis of the moment tensor is required.

As examples of the source characterization, results of a bending test in a notched beam of mortar and a pull-out test of anchor-bolt in concrete are shown.

1. まえがき

固体材料の微小破壊に伴って弾性波が放出され、破壊音として空气中を伝播することは、古くから知られていたが、これが破壊現象解明のための計測法として利用され始めたのは1950年頃のことである^{1), 2)}。そして、アコースティック・エミッション (Acoustic Emission, 略してAE) と名付けられ、材料研究に広く適用されるようになったのは1960年代後半のことである³⁾。

1970年代になってAEの発生機構に関して、固体材料の微視的な破壊機構の解明への幾つかの試みがなされたが、弾性波動であるという点に着目したものは、Malen and Bolinの研究⁴⁾が見られる程度で、転位論とか材料的な視点に立った取り扱いが主であった。AEが弾性波として、理論的に解明できることを初めて明らかにしたのはBreckenridgeである⁵⁾。彼はLambの解として知られている衝撃力に対する半無限弾性体での弾性波動が、鋼製ブロック上でのガラス細管の破壊により発生した弾性波として彼等の開発した変位型AEセンサで検出しうることを明らかにした。

この研究は、彼の所属するNBS (National Bureau of Standards) の研究グループ⁶⁾以外にも大きな刺激を与え、イギリスのHarwell原子力研究所のWadley, Scruby⁷⁾、アメリカのCornell大学のPao, Sachseら⁸⁾が同じセンサを用いてクラックにより生じたAE波動の理論的研究を行い始めた。これらの研究の特徴は、AEが弾性波動であることが既に確認されたという見地に立ち、後述のクラックの発生時間関数を逆問題として決定しようと試みたことである

* 工博 熊本大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒860 熊本市黒髪2-39-1)

** 工修 東北大学助手 工学部土木工学科 (〒980 仙台市荒巻字青葉)

。このあたりから、A E計測はひびわれ機構の解明に適用され始めた訳である。そして、逆解析手順としてデコンボリューションが話題となり、また、クラックに等価な数学的モデルとしてdipole force couple forceなどが発生機構解明のために注目される結果となった。これらの取り扱い、我が国では原波形解析という名でも紹介されている⁹⁾。

著者の一人も、上述のLamb解の研究に強く刺激を受け偶然にも同じ時期にA Eの理論的研究に取り組むこととなったが、当初に着手したのは逆問題ではなく順問題であり、コンクリート材料を中心として、弾性体内に生じる変位のくいちがい(転位)によって発生する弾性波としてA E波形がシミュレートできることを明らかにした^{10), 11)}。その後、さらに一般的なモデルとその解析手法について研究を行い、これまでに提案されている理論式が境界要素法の基礎式から誘導できることを明らかにした^{12), 13)}。これらの結果より、A Eを用いた微視的破壊機構を決定する逆問題についても検討し、発生源の時間関数のみでなくクラックの種類ならびに方向まで、逆問題の解として決定可能な段階となってきている¹⁴⁾。

本報告は、これらの解析手法をその理論的背景とともに紹介し、筆者等の研究における解析例を述べたものである。

2. 波動理論

境界要素法(BEM)の基礎式に基づけば、動弾性問題の解としての弾性波動 $u_i(x, t)$ は、次のような積分表示式により表現することができる。

$$u_i(x, t) = \int_{S+F} [G_{ik}(x, y, t) * t_k(y, t) - T_{ik}(x, y, t) * u_k(y, t)] dS \quad (1)$$

ここで、Sは弾性体の外部境界、Fは内部に発生するクラック表面としての境界を意味している。*は時間に関する合成積(convolution、コンボリューション)を表し、 $t_k(y, t)$ 、 $u_k(y, t)$ は境界上の力と変位である。 G_{ik} は、BEMでよく知られた基本解(グリーン関数)であり、 T_{ik} は第二種グリーン関数とも呼ばれ、 G_{ik} と材料定数テンソル C_{pqik} と境界面上の法線方向ベクトル n_j を用いて、次のように表される。

$$T_{ik} = C_{pqik} G_{ip,q} n_j \quad (2)$$

ただし、 $G_{ip,q}$ は G_{ip} の y_q に関する空間微分を意味している。

クラックの発生による動的な弾性変位を式(1)で表現するには、積分境界Fが二つの表面 F^+ と F^- からなると仮定する。そして、この二つの面上では力、変位は連続していたが、クラック(転位)の発生により不連続量が生じたと考える。この場合、外部境界S上の力と変位は一般に0とおけるので、式(1)はクラック面F上のみの積分によって表されることになる。

初期のA Eの波形理論では^{7), 9)}、クラックに等価なdipoleとかcoupleなどと呼ばれる力のモデルを考えることが行われ、力の不連続量のみを考慮すれば良いかのような認識が支配的となり、式(1)の右辺第一項の積分に F^+ および F^- 面での力の食い違い量 f_k を考慮して、

$$u_i(x, t) = \int_F G_{ik}(x, y, t) * f_k(y, t) dS \quad (3)$$

を波形解析に適用することが試みられた⁶⁾。実際には、それらの研究で対象としたのは、Lambの問題であり、クラックの発生によるA E波動への適用が詳しく論じられたわけではなかった。しかし、これがA E

の波形解析にはグリーン関数が知らればよいという誤った概念を持たせる残念な結果も招くこととなった¹⁵⁾。グリーン関数とはある点 y における y_k 方向の外力による点 x での x_i 方向の時刻 t における変位を与えるものである。そして、Hsu 等の研究⁶⁾によりシャープペンシルの芯の破断による外力はステップ関数と考えられる時間依存性を持つことが明らかにされていた。つまり、任意の物体の AE センサ設置位置でのグリーン関数は AE の発生予想位置でシャープペンシルの芯を破壊させ、波形を検出すれば実験的に得られるとされていたのである。そこで、クラックにより発生した AE の記録波形を式 (3) の左辺に代入し、実験的に得られたグリーン関数を用いて合成積の逆演算 (逆合積、convolution の反対で deconvolution、デコンボリューション) を行えば、 $f(t)$ が決定できると考えられた。しかしながら、dipole とか couple というクラックに等価な力は、反対方向も含めた一対の力から構成されており、後述のように式 (3) とは別に誘導されたもので式 (3) 自身は AE センサの較正に有用であるにすぎない¹⁶⁾。

クラックを考慮するには式 (1) の右辺第二項で F^+ と F^- 面での変位の食い違い $b_k = u_k^+ - u_k^-$ を考えるのが、地震波と同様に一般的である。このとき、過渡的な変位波動 $u_i(x, t)$ としての AE 波は、次のような積分式により表示することができる。

$$u_i(x, t) = \int_F T_{ik}(x, y, t) * b_k(y, t) dS \quad (4)$$

ここで、 $b_k(y, t)$ はクラックの転位関数であり、結晶学では、バーガースベクトルに相当する。一般に転位とは結晶の格子配列の不連続と考えられているが、地震学の断層モデルでも明らかになっているように、数学的には、変位の不連続が存在しているにすぎない。したがって、クラックの発生により、その端部での応力の擾乱が大きな影響を波動に与えないと考えられるならば、単に変位ベクトル b_k が食い違っているとおくことができる¹¹⁾。

3. シミュレーション解析 (順問題)

クラックの面積 F が、物体および伝播波動の波長に対して微小であれば、式 (4) で T_{ik} は積分から出すことができ、

$$u_i(x, t) = T_{ik}(x, y, t) b l_k * S(t) \quad (5)$$

と置くことができる。ただし、

$$\int_F b_k(y, t) dS = b l_k S(t) \quad (6)$$

である。ここで、 l_k はクラック変位の方向ベクトルであり、 b はクラック開口量のクラック面 F での積分値を意味している。そして、 $S(t)$ はクラック変位の時間関数で、発生源関数と呼ばれている。

式 (5) の合成積が計算可能ならば、これによって AE 波形のシミュレーションが可能となる^{11), 12)}。この目的で、筆者の一人がこれまでの解析で用いてきた発生源関数は、次のようなものである。

$$S(t) = t/T_r - 2 \sin(2\pi t/T_r) / 3\pi + \sin(4\pi t/T_r) / 12\pi, \quad (0 \leq t \leq T_r) \quad (7)$$

ここで、 T_r は立ち上り時間を表している。

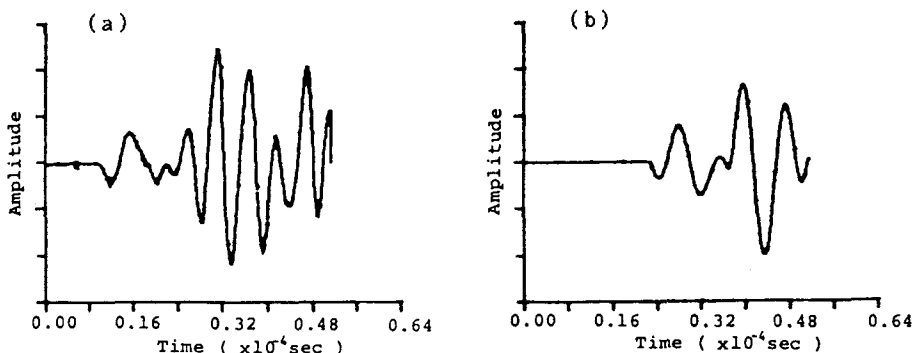


図-1 (a) コンクリートの割裂試験でのAE検出波形と (b) シミュレーション解析波形

式(5)の合成積のためには、クラックの発生位置 y の決定は不可欠であるが、それにはP波初動の到達時間差に基づいた破壊源探査¹⁷⁾が利用できる。これによるシミュレーション解析の一例を図-1に示す¹⁰⁾。図-1(a)はコンクリートの割裂試験の際に検出されたものであり、図-1(b)はそれを検出面に垂直な引張クラックとして半無限弾性体における T_{ix} ¹²⁾を用いて解析したものである。クラックの大きさは評価していないため、式(5)での b の値は与えていない。それゆえ、振幅値は相対値であり、また、図-1(a)の初動到着以前の時間は波形記憶装置のトリガー時間に依存するため意味はない。解析では、半無限解を用いたため、図-1(a)の前半部の反射波の到達前の部分が、解析の図(b)と非常によく一致していることがわかる。この例では、式(7)の立ち上がり時間として $14\mu s$ を用いている。

式(6)のクラック面での積分が評価できる程に、クラックの幾何的な情報が得られているならば、シミュレーション解析により振幅値まで一致させることも可能である。図-2(a)は、鋼製の压力容器に溶接されたステンレス鋼の剝離の際に検出されたAE波形である。破壊源探査により、クラックの発生位置を決定したが、顕微鏡観察により剝離クラックはほぼ半径 $20\mu m$ 、開口量 $2\mu m$ のベニー型引張クラックと考えられた¹⁸⁾。そこで、これらの情報により式(6)の積分を評価し、式(5)を計算した結果が図-2(b)に示されている。ここで、立ち上がり時間は $2\mu s$ と仮定した。図より振幅値も含めて二つの波形はよく一致していることが認められる¹³⁾。

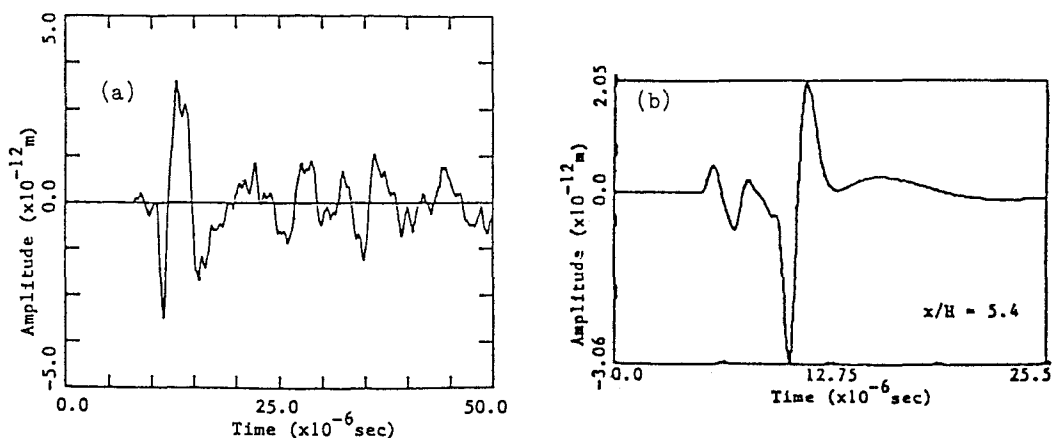


図-2 (a) ステンレス鋼の剝離によるAEと (b) シミュレーション解析波形

4. モーメントテンソル解析

式 (2) の第二種グリーン関数の表示において材料の等方性を仮定し、式 (5) を書き変えれば、

$$u_i(x, t) = G_{ip,q}(x, y, t) m_{pq} * S(t) \quad (8)$$

$$m_{pq} = b \{ \lambda (l_i n_i) \delta_{pq} + \mu (n_p l_q + n_q l_p) \} \quad (9)$$

を得る。ここに、 λ 、 μ は Lame の定数である。式 (9) で定義された m_{pq} は、地震学でモーメントテン

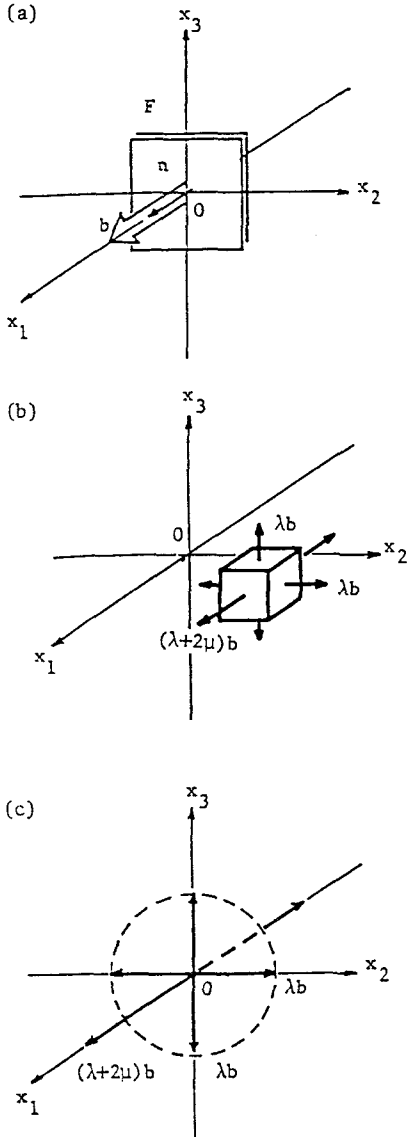


図-3 (a) 引張クラックのモデルと
(b) モーメントテンソル成分ならびに
(c) 対応する dipole force

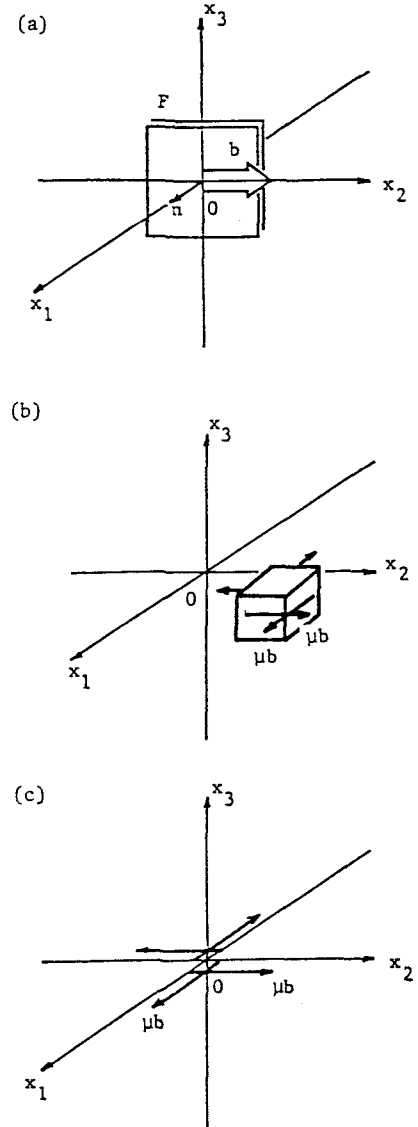


図-4 (a) せん断クラックのモデルと
(b) モーメントテンソル成分ならびに
(c) 対応する couple force

ソルと呼ばれる2階のテンソル量である¹⁹⁾。例えば、図-3 (a) のような引張クラックおよび図-4 (a) のようなせん断クラックにおいて、式 (9) より成分を求めれば、図-3 (b) および図-4 (b) のようになる。前述の初期のA Eの波形解析で提案されたdipoleおよびcoupleの力のモデルとは、モーメントテンソルとして地震学での理論が確率される以前に第二種グリーン関数 T_{ik} と転位 b_k の積をグリーン関数の空間微分を用いて表現する際に導入されたものであり²⁰⁾、物理的に特に重要なモデルというわけではない。例えば、図-3 (a) に対するdipole modelを求めれば、図-3 (c) のようになる。図-4 (a) に対するcouple modelは図-4 (c) のとおりである。これらの図からわかるように、A Eの波形解析における等価な力学モデルとはテンソルの成分を表示しているにすぎない。式 (8) で重要なことは、クラックの発生機構を説明するにはグリーン関数 G_{ik} ではなくて、その空間微分 $G_{ik,q}$ が必要であるということである。Hsuの提案したシャープペンシルの芯の圧壊による実験的グリーン関数を得る方法は、その意味で空間微分が求められないかぎりクラックのA Eの解析には適用不可能となる。実際には、時系列データの空間微分というのは一般に処理できないため、前述のようにA Eセンサの較正以外には適用不可能と言うことになる。

モーメントテンソルは、2階のテンソルにすぎないので、その主要な成分は固有値解析により取り出すことが可能である。式 (9) のモーメントテンソルの一般形を固有値解析すれば、次のような固有値と固有ベクトルが得られる。

$$\begin{aligned} \text{第一固有値} &: \mu b (1, n_1 / (1 - 2\nu) + 1) \\ \text{第二固有値} &: \mu b (2\nu 1, n_1) / (1 - 2\nu) \\ \text{第三固有値} &: \mu b (1, n_1 / (1 - 2\nu) - 1) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{第一固有ベクトル} &: 1 + n \\ \text{第二固有ベクトル} &: 1 \times n \\ \text{第三固有ベクトル} &: 1 - n \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 ν はポアソン比であり、 $1 \times n$ はベクトルの外積を意味している。

実際のクラックの場合には、せん断成分と引張成分が混在していることが考えられる。これを、バーガースベクトルとひびわれ面の法線ベクトルのなす角で表現しようとする試みも行われているが²¹⁾、一般的に角度に対してどちらの成分が卓越しているかを見ことは容易ではないと考えられる。そこで、固有値をせん断成分 X と引張成分の内のcompensated liner vector dipole (CLVD) (成分 Y ²²⁾と等方成分 Z に分解することにする。その様子を図-5に示す。CLVDとは、例えば図-

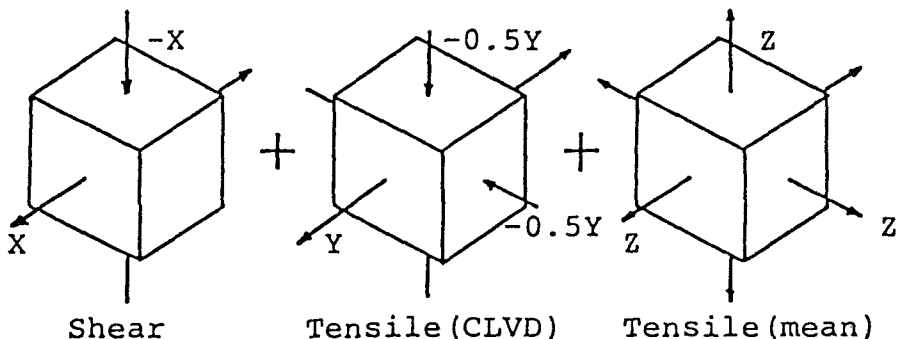


図-5 モーメントテンソルの固有値のせん断とCLVDと等方成分への分解

3 (b) のような引張クラックに対するモーメントテンソルの偏差成分のことであり、せん断クラックに対するモーメントテンソルも偏差成分のみ（等方成分は存在しない）であることより、最近になって地震学で couple のみのモデルからの誤差の原因の一つとして注目されているモデルでもある²³⁾。

固有値の関係を相対値として寄与率で表すことにし、他の固有値を第一固有値に対する比 A, B で表現することにすれば、固有値はそれぞれ次のように分解できる。

$$\begin{aligned} 1 &= X + Y + Z \\ \text{第二固有値/第一固有値} &= A = -0.5 Y + Z \\ \text{第三固有値/第一固有値} &= B = -X - 0.5 Y + Z \end{aligned} \quad (12)$$

式 (12) の X, Y, Z の比率は、モーメントテンソルを求め、その固有値解析が行われたならば、簡単に決定することができる。このとき、上の各固有値の一般式との関係よりベクトル l とベクトル n のなす角は、次式により得られる。

$$\cos^{-1}(l_k n_k) = \cos^{-1} \{ (1 + B - 2A) / (1 - B) \} \quad (13)$$

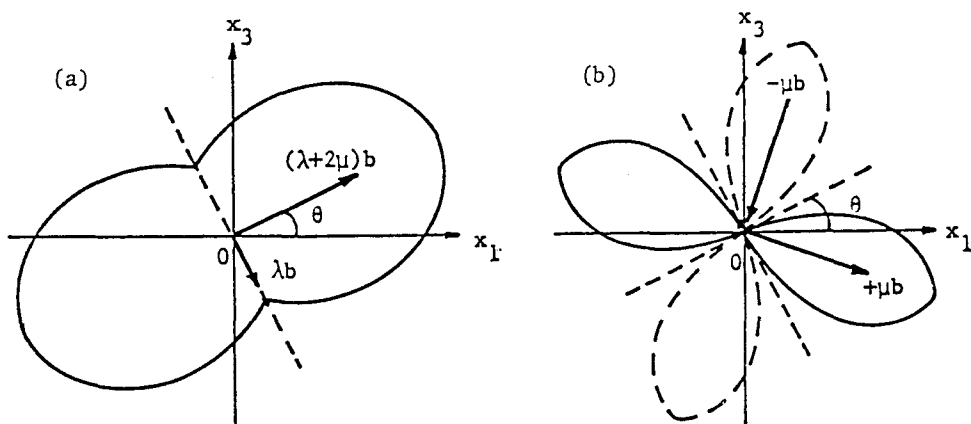


図-6 モーメントテンソルの固有値の方向とP波の放射形式の対応、
(a) 引張クラックおよび (b) せん断クラック

クラックのタイプがわかっているのならば、式 (11) よりクラックの運動方向を決定することが可能となる。P波の放射形式との関係より¹³⁾、図-6のように固有ベクトルの方向が放射形式の主軸を構成することが知られている。ここで、放射形式とはAE発生源であるひびわれから等距離の地点でのP波の振幅値を発生源からの放射方向の距離としてプロットしたものであり、図-6 (b) での第2象限と第4象限に見られる破線は負の振幅を意味している。図-6 (a) のように引張クラックでは最大固有値に対応する固有ベクトルの方向とクラックの開口方向が一致する。また、図-6 (b) のようにせん断クラックでは二つの固有ベクトルがクラックの法線方向と運動方向の中間となる。このことは、式 (11) の第一固有ベクトルと第三固有ベクトルの和をとればクラックの法線方向 n か運動方向 l のどちらか（固有値解析によっては式 (11) と全ての符号が逆になることもありうる）が得られることになる。

以上の議論により、次のような判定基準が提案できる。

(a) せん断の寄与率 X が50%以下ならば、AE発生源は引張りびわれに属すると考える。このとき、引張りびわれの開口方向は第一固有ベクトルの方向にある。

(b) 寄与率 X が50%以上ならば、AEはせん断びわれによって発生したと考える。そのとき、ベクトル l あるいはベクトル n の方向は、第一固有ベクトルと第三固有ベクトルの和で決定されるベクトルの方向にある。

5. 逆解析手順

これまでの結果に基づいて逆解析法としてまとめると図-7のようになる。AEの波形解析の第一歩は破壊源探査である。これは、理論的には式(5)の第二種グリーン関数 $T_{ik}(x, y, t)$ が静止過去を持っていることに由来する。つまり、P波が点 x と y の距離 r を伝播して点 x に到達するまで T_{ik} の値は常に0となっている。これより、同一のAE現象に対して多点でAEを検出すれば伝達距離に応じて到達時間差が生じることになる。したがって、逆に発生位置を決定することが出来る。三次元の場合には、5チャンネル以上の計測点があれば、破壊源探査の可能なことが明らかになっており、さらに、速度の異方性のある場合にも適用できる手法が開発されている²⁴⁾。

次に、モーメントテンソルの成分を決定する方法について述べる。式(8)の $G_{ip,q} * S(t)$ の関数形を無限弾性体の場合に書き下せば、次のようになる。

$$\begin{aligned} G_{ip,q} * S(t) &= \{15\tau_i\tau_p\tau_q - 3(\delta_{ip}\tau_q + \delta_{iq}\tau_p + \delta_{pq}\tau_i)\} / 4\pi\rho r^2 \cdot \int_{1/v_p}^{1/v_s} \lambda S(t - \lambda r) d\lambda \\ &+ \{6\tau_i\tau_p\tau_q - (\delta_{ip}\tau_q + \delta_{iq}\tau_p + \delta_{pq}\tau_i)\} / 4\pi\rho r^2 v_p^2 \cdot S(t - r/v_p) \\ &+ \{-6\tau_i\tau_p\tau_q + 2\delta_{ip}\tau_q + \delta_{iq}\tau_p + \delta_{pq}\tau_i\} / 4\pi\rho r^2 v_s^2 \cdot S(t - r/v_s) \\ &+ \{\tau_i\tau_p\tau_q\} / 4\pi\rho r v_p^3 \cdot dS/dt(t - r/v_p) \\ &+ \{\delta_{ip}\tau_q - \tau_i\tau_p\tau_q\} / 4\pi\rho r v_s^3 \cdot dS/dt(t - r/v_s) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 r はクラックの発生点 y から検出点 x までの距離であり、 τ_i はその方向ベクトルを意味している。 ρ は弾性体の密度であり、 v_p および v_s はP波、S波の伝播速度を表している。

式より、P波に関係する項は第一、第二、第四項であることがわかる。特に、第四項は地震学では遠方項(far-field term)として知られている¹⁹⁾。これは、他の項が $1/r^2$ で距離減衰するのに対して、この項は $1/r$ で減衰することより遠方において卓越した影響があるとして名付けられたものである。AE現象はこれに対して、近距離で検出されるため遠方項が卓越するとは考えがたい。ところが、式(14)で発生源関数の式(7)を考慮すれば、その微分 dS/dt を行うことによって、係数 $1/T_r$ が第四項には掛かることになる。したがって、第二項と第四項の係数の比較をすれば、

$$1/r^2 v_p^2 : 1/r v_p^3 T_r$$

となる。AE波形の立ち上がり時間 T_r は一般に μs 程度と非常に短いものであるため、結果的にAEでもP波の振幅値については第四項(遠方項)が卓越することがわかる。

このように考えて、P波の振幅値のみに着目し、AE変換子の検出波動成分方向の単位ベクトルを e とすれば、式(8)と式(14)の第四項より検出点での初動の振幅値は、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} u_i e_i &= C(\tau_i e_i) / r \cdot (\tau_1\tau_1 m_{11} + 2\tau_1\tau_2 m_{12} + 2\tau_1\tau_3 m_{13} + \tau_2\tau_2 m_{22} \\ &+ 2\tau_2\tau_3 m_{23} + \tau_3\tau_3 m_{33}) \end{aligned} \quad (15)$$

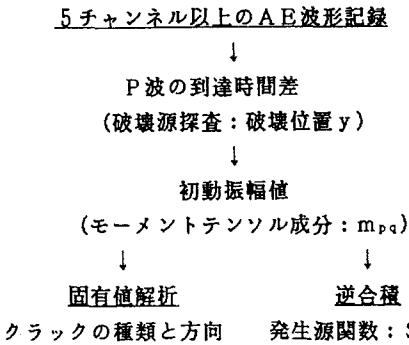


図-7 AE波形の逆解析手順

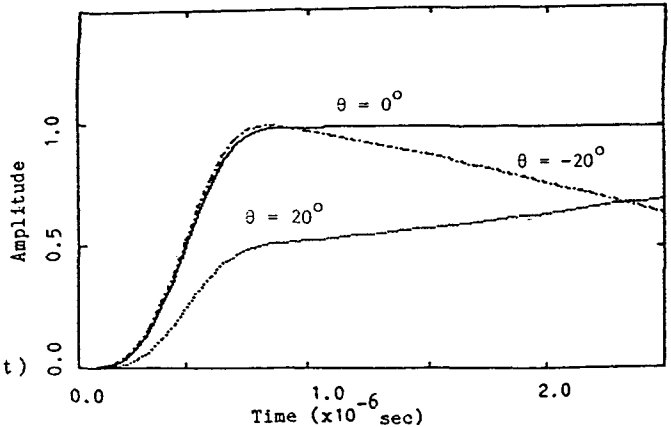


図-8 逆合積結果の例

ただし、 C は $1/4\pi\rho v_p^3 \cdot dS/dt$ に検出装置の感度らびに表面での反射係数を考慮した定数である¹⁴⁾。

これより、破壊源と各検出点の位置が決定されているAE事象に対して、各検出点での初動の振幅値は式(15)により近似できることがわかる。その時、6チャンネル以上の検出点での振幅値が得られているのであれば、6個の未知数 m_{11} から m_{33} の値は決定することが出来る。実際には、式(15)によりモーメントテンソルの成分を決定するためには振幅の各箇所における相対値が必要なだけであるので、5チャンネルの計測システムでも実施は可能である。さらに、特別な変換子は不用であり、各検出チャンネルの感度が等価であればよいことに注意されたい。

このようにして、初動の振幅値の相対値からモーメントテンソルの値が決定されたならば、4節で述べた固有値解析によりクラックの種類と方向に関する情報が決定される。さらに、グリーン関数の空間微分が解析的に得られる場合には、式(8)で未決定な発生源関数 $S(t)$ は逆合積により求めることができる。逆合積自身は、初期の研究でも報告されていたが、クラックの方向が正しく決定されていなければ、かなりの誤差の生じることが知られており、モーメントテンソルの成分をたとえ相対値であっても決定しておかないと正しい関数を決定できない。方向の誤差による関数 $S(t)$ の変化の例を図-8²⁵⁾に示す。モーメントテンソルの解析で明らかになったように相対値でも成分が与えられていれば、方向に関する情報は得られているので逆合積を用いて発生源関数を正しく決定することができる。

式(5)および式(8)を参照すればわかるように、クラックの種類と方向と発生源関数が決定されれば、残されている情報はクラックの規模あるいは開口体積 b にかんする情報である。これには、シミュレーション解析例からもわかるようにAE波動の感度較正された振幅値が必要となる。残念ながら、現状ではそのような性能を持ったAE計測システムは、ないわけではないが非常に感度が悪く、一般的な計測に使用可能とはいえない。したがって、これに関する情報が決定できる程の計測法としてAEが用いられるには、もう少し時間が必要なようである。

6. クラック機構の解析例

これまで述べてきたように、現在のAE計測システムではクラックの方向までの解析は、5チャンネル以上のどのような計測システムでも波形記録がなされていれば可能である。図-9は、ノッチ付モルタル供試体の曲げ試験で8チャンネルの計測システムで記録された波形を解析し、破壊源探査を行い、さらにモーメントテンソルを式(15)により決定し、式(13)からクラックの法線と運動方向のなす角を求めた結果

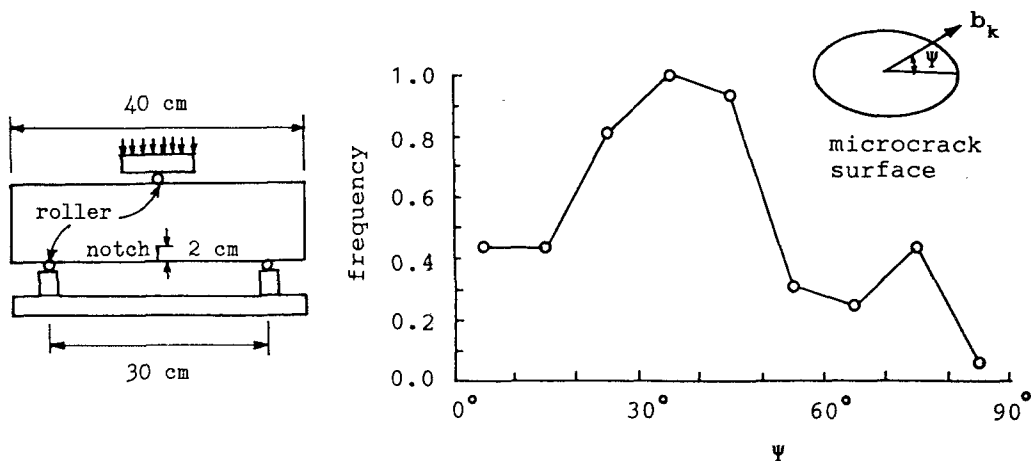


図-9 モルタルの曲げ試験におけるクラック面とクラック運動方向のなす角度の発生頻度

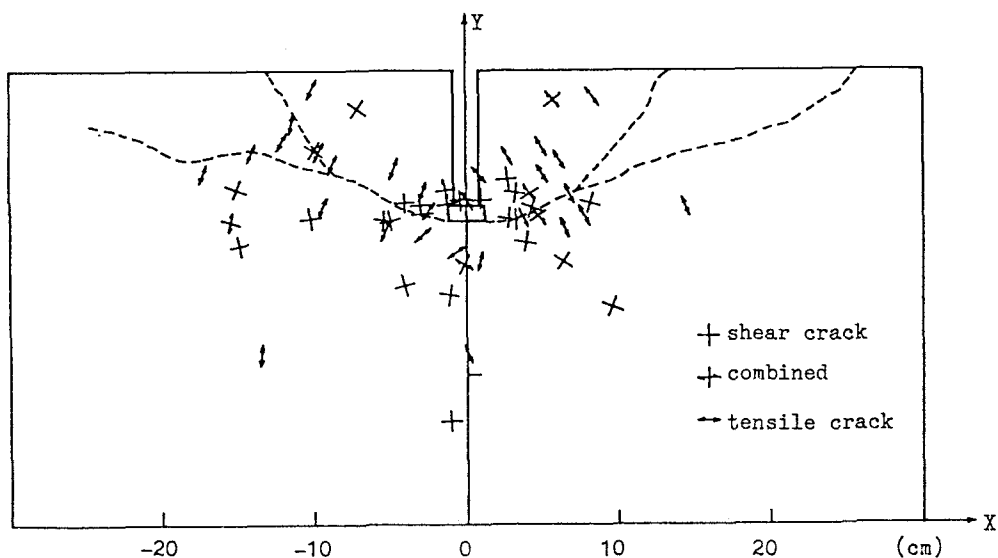


図-10 アンカーボルトの引抜き試験における逆解析結果の例

である²⁶⁾。ここでは、6本のモルタル供試体で決定された274個の事象で決定された角度を10度毎の頻度分布として最大頻度に対する割合で示している。一般にノッチ付はりの曲げ試験では引張クラックのみが検出されると考えられているが、この結果によれば、30度-40度の角度のものが最も多く発生しており、混合モードのクラックが多く発生することが認められる。このように、混合モードのものが多く、角度だけではクラックの分類は困難であるため、どうしても式(12)を用いた分類が必要となる。

コンクリートブロックからのアンカーボルトの引抜き試験の5チャンネルのAE検出波形の解析結果の例を図-10に示す²⁷⁾。ここでは、式(12)によりXの割合を決定したが、45%-55%となった事象に対しては、せん断か引張かを論じるのは誤差が大きいと考えられたため、両方の場合を記入することにした。図中には破壊源探索された位置に引張、せん断それぞれの方向を記入している。せん断クラックの場合

はベクトル l と n が直交することがわかっているので、その方向を示している。これより、図に記入した最終ひびわれの開口方向と引張ひびわれの位置ならびに方向が非常によく一致していることがわかる。また、せん断ひびわれはアンカーボルトの定着部に多く見られ、アンカーとコンクリートのすべりにより発生したと考えられる。これらの二例からも明らかなように、A E の波形解析によれば、微視的破壊機構はかなりなレベルまで解明できる段階であると考えられる。

参考文献

- 1) L. Obert, "The Microseismic Method of Predicting Rock Failure in Underground Mining, Part I, General Method," U. S. Bureau of Mines Report, No. 3797, 1945.
- 2) V. J. Kaiser, "Knowledge and Research on Noise Measurements during Tensile Stressing of Metals," Arkiv fur das Eisenhuttenwesen, 23, 1953, 43-44.
- 3) A. T. Green, "Necessity: The Mother of Acoustic Emission Testing (1961-1972)," Materials Evaluation, 43, 1985, 600-610.
- 4) K. Malen and L. Bolin, "A Theoretical Estimate of Acoustic Emission Stress Amplitudes," PPhys. Stat. Sol. (B), 61(2), 1974, 637-645.
- 5) F. R. Breckenridge, C. E. Tschiegg and M. Greenspan, "Acoustic Emission: Some Applications of Lamb's Problem," J. Acoust. Soc. Am., 57(3), 1975, 626-631.
- 6) N. N. Hsu and S. C. Hardy, "Experiments in Acoustic Emission Waveform Analysis for Characterization of AE Sources, Sensors and Structures," ASME, AMD-Vol. 29, 1978, 85-106.
- 7) H. N. G. Wadley and C. B. Scruby, "Acoustic Emission Source Characterization," Advances in Acoustic Emission, Dunhart Publishers, 1981, 125-153.
- 8) K. Y. Kim and W. Sachse, "Characteristics of Acoustic Emission Signals from Indentation Cracks in Glass," Progress in Acoustic Emission II, JSNDI, 1984, 163-172.
- 9) 大平貴規、岸 輝雄、大久信広、"A E の原波形解析"、006 研究委員会資料 No. 64、1-24, 1982.
- 10) 丹羽義次、小林昭一、大津政康、"アコースティック・エミッションの発生機構に関する考察" 土木学会論文報告集、314, 1981, 125-136.
- 11) M. Ohtsu, "Source Mechanism and Waveform Analysis of Acoustic Emission," Journal of Acoustic Emission, 2(1), 1982, 103-112.
- 12) M. Ohtsu and K. Ono, "A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Functions in A Half Space," Journal of AE, 3(1), 1984, 27-40.
- 13) 大津政康、"アコースティック・エミッションの波形解析理論とモーメントテンサー解に関する考察、材料、36(408), 1987, 111-117.
- 14) M. Ohtsu, "Source Inversion of Acoustic Emission Waveform", 土木学会論文集 (投稿中) .
- 15) 中尾哲也, "Source Wave Analysis of Large Amplitude Acoustic Emission in the Breaking of Glue Lines," 繊維学会誌、43(12), 1987, 637-643.
- 16) M. Ohtsu and K. Ono, "A New Method of Acoustic Emission Transducer Calibration," Journal of Acoustic Emission, 3(2), 1984, 59-68.
- 17) 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" 土木学会論文報告集、No. 276, 1978, 135-147.
- 18) S. Yuyama, T. Imanaka and M. Ohtsu, "Quantitative Evaluation of Microfracture due to Disbonding by Waveform Analysis of Acoustic Emission," J. Acoust. Soc. Am., 83(3), 1988,

976-983.

1 9) K. Aki and P. G. Richards, Quantitative Seismology Theory and Methods, Vol. 1 & Vol. 2, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1980.

2 0) R. Burridge and L. Knopoff, Body Force Equivalents for Seismic Dislocations," Bull. Seism. Soc. Am., 54, 1964, 1875-1888.

2 1) M. Enoki, T. Kishi and S. Kohara, "Determination of Microcracking Moment Tensor of Quasi-cleavage Facet by AE Source Characterization," Progress in Acoustic Emission III, JSNDI, 1986, 763-770.

2 2) L. Knopoff and M. J. Randall, "The Compensated Linear-Vector Dipole : A Possible Mechanism for Deep Earthquakes," J. Geophys. Res., 75(26), 1970, 4957-4963.

2 3) B. R. Julian and S. A. Sipkin, "Earthquake Processes in the Long Valley Caldera Area, California," J. Geophys. Res., 90(B13), 11155-11169, 1985.

2 4) M. Ohtsu and K. Ono, "AE Source Location and Orientation Determination of Tensile Cracks from Surface Observation," NDT International, 21(3), 1988, 143-150.

2 5) M. Ohtsu and K. Ono, "The Generalized Theory and Source Representation of Acoustic Emission," Journal of AE, 5(4), 1986, 124-133.

2 6) 谷口哲也、"AE波形解析によるコンクリートの破壊機構の研究"、東北大学大学院工学研究科修士論文, 1988.

2 7) M. Ohtsu, "Source Inversion Procedure for Acoustic Emission", Proceedings of International AE Symposium, November, 1988.

(1988年10月12日受付)