

# [44] A E 波動によるコンクリート材料の破壊機構の解明

正会員 大津 政 康 (熊本大学工学部)

## 1. はじめに

アコースティック・エミッション (A E) 現象とは、固体内部の微小破壊により発生する弾性波動現象である。それは、主破壊前の微小破壊の段階で検出されることから、欠陥箇所の検出などを目的とする非破壊試験として様々な分野への A E の適用が試みられている。材料の破壊挙動と関連した A E の諸特性は、いくつかの分析パラメータにより研究されているが、主に周波数分析などによって検討されている個々の A E 波動は発生機構と直接に関係した情報を含む注目すべきパラメータである。したがって、コンクリート材料の破壊機構の解明にも有益な情報をもたらすものと期待される。

本報告は、このような意図のもとに、コンクリート材料の破壊機構の解明を目的とした A E 波動の波形解析法について考察を行ったものである。

## 2. A E 波動の発生機構と波形解析法

A E 現象とは、系内の微小破壊により生じる弾性波動現象である。微小破壊は、数学的には弾性体内部の動的な転位 (変位のくい違い、クラック) として記述しうる。ここで、転位とは図-1に示すように弾性体内部に開曲面  $\Sigma$  を考え、これに沿って切り口をいれた場合に切り口の両側の面  $\Sigma^+$ 、 $\Sigma^-$  で生じる変位の不連続を意味している。

コンクリート材料の A E 波動では、その波長に比較して伝播する系は大きく、材料の不均質性、空隙などによる回折、攪乱の影響が大きくなければ、等方弾性体を伝播する弾性波と考えることができるであろう。

これより、A E の発生機構を、面  $\Sigma$  が系全体に対して微小であるような転位と考えるならば、検出点での加速度  $\ddot{U}_i(t)$  は、次のように表わされる<sup>1)</sup>

$$\ddot{U}_i(t) = \int_0^t T_{ij}(t-t') [\ddot{U}_j(t')] dt' \quad (1)$$

ここで、 $[\ddot{U}_j]$  は転位面  $\Sigma$  上での変位の不連続量、 $T_{ij}$  はそれに対応するグリーン関数である。

供試体内で生じた A E は、系内を伝播し供試体境界で変換子により電気信号に変換され、増幅器とフィルターを経て検出される。式 (1) は、それを A E 変換子および検出システムにより加速度を検出していると考えた場合の式である。<sup>2)</sup>

A E 波動からコンクリート材料の破壊機構を解明することは、式 (1) に基づいて A E 発生源での種々のパラメータを決定することである。式 (1) の右辺のグリーン関数  $T_{ij}$  を求めるために基本的に必要な情報は破壊源と検出点の位置関係である。A E 計測では、それは破壊源探索法<sup>3)</sup>によって決定される。 $T_{ij}$  および  $[\ddot{U}_j]$  の指標は、転位の形式とその方向に関係している。例えば、式 (1) の  $[\ddot{U}_j]$  には基本的に2つの場合が考えられる。それは、転位面の法線方向に一致する変位成分と接線方向に一致する変位成分の不連続であり、それぞれ引張クラック、せん断クラックに対応している。このような転位モデル<sup>4)</sup>の運動学的な要因は、A E 波動の放射形式から決定することが可能

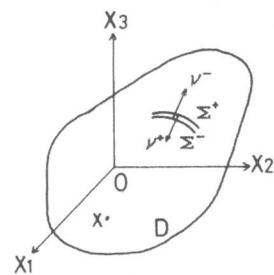


図-1 転位モデル

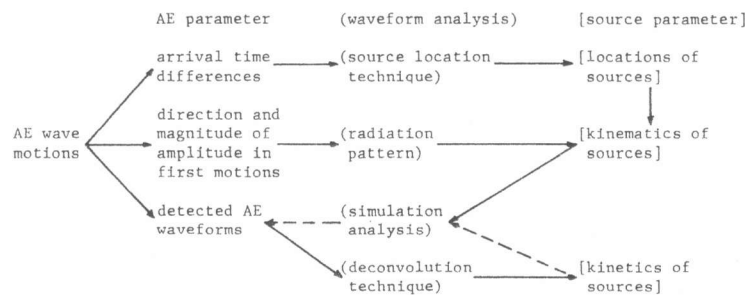


図-2 破壊機構と A E 波動の波形解析

である。そして、残された破壊源の動力学要因である $[U_j(t)]$ の時間関数形は逆合積<sup>5)</sup>により決定される。

以上のパラメーターと波形解析法の関係を示せば、図-2のようになる。本報告では、この図に基づいて破壊機構を説明するための波形解析法の考察を行うが、特に、動力学的要因の決定法について検討する。

破壊源探索により破壊源の位置が求められ、放射形式から転位面および転位の変位成分の方向がわかれば、式(1)において $T_{ij}$ が決定されたことになる。したがって、転位の時間関数形さえ与えれば、式(1)によってA E波動をシミュレーション解析することができる<sup>2)</sup>。この場合、A E波動は供試体表面で検出されることより自由表面での波動であり、グリーン関数は半無限弾性体に対するものを用いる必要がある。

さらに、A E波動が式(1)により表わされるならば、検出波動を式(1)の左辺の $\ddot{U}_i(t)$ と考えることにより、右辺の $[U_j(t)]$ を求めることができるであろう。その場合、式(1)はVolterra型の積分方程式と考えることができる。これを解くことは式(1)の右辺が合成積で表わされていることより、逆合積と言われる。

### 3. 実験概要

実験としては、引張クラックの破壊機構と発生するA E波動について検討を行った。

半無限弾性体のモデルとして、表-1に示すような配合のコンクリートにより $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ の供試体を作製した。予備試験の結果によれば、このコンクリートの縦波伝播速度は、 $4300\text{ m/sec}$ であった。

モデル供試体に引張クラックを発生させるために、図-3に示すような割裂試験を行った。図のように供試体の上、下面に線荷重を載荷し、 $x_2-x_3$ 平面の近傍に引張クラックを生じさせた。その引張クラックの転位モデルを図のb)に示す。載荷は、 $20\text{ kg/sec}$ 程度の

低速度で行い、A Eの発生が確認されるごとに停止させた。発生するA E波動は、図のa)の点Eに設置したA E変換子により検出し、同時に、供試体側面の点A、B、C、Dにも変換子を設置して、4チャンネルの計測システムによる破壊源探索<sup>3)</sup>を行った。ここで、実験に使用したA E計測装置は、既報のもの<sup>2)</sup>と全く同じである。また、この実験では、転位モデルは図のb)のようなものと仮定している。そこで、破壊源探索の結果、破壊源が $x_2-x_3$ 平面の近傍に求められなかったA E現象は、割裂による引張クラック以外の破壊機構に起因する可能性があるため除外することにした。

### 4. 結果および考察

シミュレーション解析に際しては、図-3のb)に示すような転位面に垂直な変位成分が不連続となる引張クラックであると考えた。図のようについで異なる変位成分の方向を $x_1$ 軸方向にとれば、A E変換子は縦方向の振動子と考えられることより、点Eで検出される加速度波形は式(1)を参照して、次式で表わされる。

$$\ddot{U}_3(t) = \int_0^t T_{31}(t-t') [U_1(t')] dt' \quad (2)$$

実験により検出されたA E波形と式(2)によりシミュレーション解析を行った加速度波形の例を図-4に示す。図のb)の解析波形は、破壊源探索の結果より転位の位置を求め、そこで図-3b)に示すような引張クラックが生じたとして、検出点Eにおける波形を式(2)によって解析したものである。ここで、 $[U_1(t)]$ の時間関数は、終局の不連続量を持ち、開始時および終結時において転位速度が0となる立ち上がり時間 $T_r$ の滑らかな関数と仮定している。図で縦軸は、実験結果では電圧であり、解析結果では加速度となるが、実際の変換率がわからないため

表-1 コンクリートの配合

骨材最大付法(mm)	W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )
10	63	34	197	313	626	1252

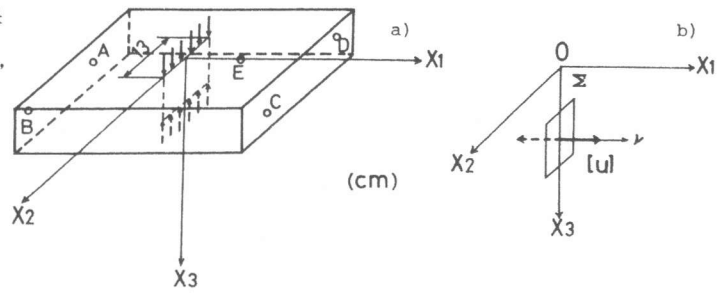


図-3 a) 割裂試験供試体とb) 転位モデル

スケールは示していない。また、初動の到達時刻は、b)の解析波形では転位から検出点までの距離に対応しているが、a)の検出波形ではウェーブメモリのトリガーした時刻が不明であるため、図中の初動到達前の時間に意味はない。

図より検出波形では、波動の後半部で振幅が飽和しているのが見られる。しかし、検出波形の初動部分は、シミュレーション解析波形とよく一致していることがわかる。

この結果は、前述のように検出波形を式(2)の左辺と考えることによって、逆合積により $[\ddot{U}_1(t)]$ を決定する可能性を示唆している。

Volterra型の第1種積分方程式(2)においては、積分方程式の核(式(2)では $T_{31}$ )が特異性を有する場合には、数値解析の際に解は非常に不安定となることが知られている。そこで、これを避けるために、式(2)をフーリエ変換することにより周波数領域で逆合積を行うことにした。その場合、式(2)は、次のようになる。

$$DU_1(f) = DU_3(f) / FT_{31}(f) \quad (3)$$

ここで、 $DU_1(f)$ 、 $DU_3(f)$ 、 $FT_{31}(f)$ は、それぞれ $[\ddot{U}_1(t)]$ 、 $\ddot{U}_3(t)$ 、 $T_{31}(t)$ のフーリエ変換を表わしている。これより、転位の時間関数 $[\ddot{U}_1(t)]$ は、フーリエ逆変換により求めることができる。このフーリエ変換、逆変換にはFFT法を使用した。また、破壊機構の動力学的要因を時間領域と周波数領域の2つの領域で考察するために、式(3)の絶対値であるフーリエスペクトルも求めた。

図-4 a)の検出波形に上述のような逆合積を行った結果を図-5に示す。図でa)は、周波数領域での逆合積を行ってフーリエスペクトルを求めた結果であり、b)はフーリエ逆変換によって求めた転位の時間関数 $[\ddot{U}_1(t)]$ である。図で破線は、シミュレーション解析で仮定した転位の時間関数の加速度波形とそのフーリエスペクトルを表わしている。つまり、図-4 b)の解析波形の時間領域と周波数領域における逆合積結果に相当する。図-5 b)の結果を見れば、逆合積により求められた転位関数とシミュレーション解析において仮定した関数は、時間領域では非常によく一致していることがわかる。これよりシミュレーション解析において仮定した関数の妥当性ならびに逆合積法の有効性が認められた。

図のa)の実験結果では、破線で示された転位の仮定関数のフーリエスペクトルと全く異なるピークが20 kHz付近の周波数域に現われている。 $f = 1/T$ の周期との関係から考えれば、20 kHzに対応する周期は50  $\mu\text{sec}$ となり、図-4 a)からわかるように検出波形の全継続時間と一致する。したがって、これはデータの有限長さの影響と考えられる。これより、データの有限長さの影響は、時間領域の結果では顕著でないが、周波数領域では、強調されて現われる可能性が認められた。また、検出波形は、波動の途中で振幅が飽和している。この影響が逆合積結果に現われるかも知れないと考えられたが、図-5の結果によれば、そう問題とはならないようである。

図-5 b)で20 kHzのピークが、上述のような理由から無視できる

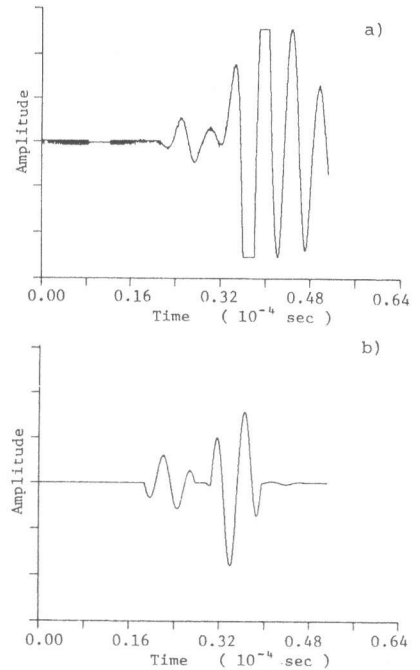


図-4 割裂試験結果の例 a) 検出波形、b) 解析波形

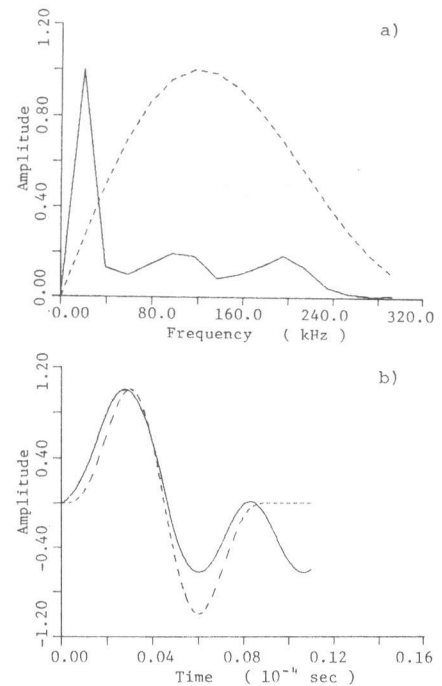


図-5 逆合積結果 a) 周波数領域、b) 時間領域

ものならば、次のピークは100kHz付近になる。この周波数は、シミュレーション解析で採用した立ち上がり時間  $Tr=9\mu\text{sec}$  とよく対応する。これをもう少し詳細に検討するために、図-5 a) のスペクトルから20kHzのピークを除いた後、Hanningのウィンドーを用いてスペクトルの平滑化を行った結果を図-6 a) に示す。この平滑回数は10回である。図では、シミュレーション解析と逆合積結果のスペクトルは、よく一致していることがわかる。

FFT法の離散化およびデータの有限性に関する問題を別にすれば、式(3)の  $DU_1(f)$  は、数学的には転位関数をフーリエ級数展開した場合のフーリエ係数に他ならない。そして、転位の仮定関数のフーリエ級数展開の結果からは、転位の立ち上がり時間  $Tr$  を周期とするフーリエ係数が最大であることがわかっている。したがって、フーリエスペクトルでは、 $f=1/Tr$ の周波数にピークが現われることになる。

そこで、図-6 a) の逆合積結果のフーリエスペクトルのピーク周波数を求め、その逆数として転位の立ち上がり時間  $Tr$  を決定した。図-6 b) は、この結果に基づいて、図-5 b) の逆合積結果が  $[U_1(t)]$  であることから、その波動の始めから  $Tr$  時間の部分を2回積分することによって求めた  $[U_1(t)]$  である。破線は、シミュレーション解析で仮定した転位の時間関数である。図のように、実験より求めた転位関数の立ち上がり部は、解析で仮定した関数と一致している。このように、AE波動から破壊機構の動力学的要因を決定しうることが示された。

## 5. 結論

本報告では、コンクリート材料の破壊機構の解明を目的としたAE波動の波形解析法について検討を行った。そして、引張クラックにより発生したAE波動に逆合積法を適用し、破壊機構の動力学的要因について考察を行った。これより、次のような結果が得られた。

- (1) AE波動の波形解析法について考察し、破壊機構が転位モデルの諸量を決定することにより解明できることを明らかにした。それは、転位の位置と運動学的要因と動力学的要因の3種類である。
- (2) 割裂試験により得られたAE波動に周波数領域での逆合積法を適用し、破壊機構の動力学的要因の決定を試みた。その結果、逆合積の有効性が確かめられ、さらに、周波数領域でのスペクトルから転位関数の立ち上がり時間を決定する可能性が認められた。また、転位関数も求めたが、その結果によれば立ち上がり時間は  $10\mu\text{sec}$  程度であった。

## 参考文献

- 1) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康; コンクリート材料におけるAEの波形解析と発生機構, 第3回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, 29-34, 1981
- 2) 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, 第314号, 125-136, 1981
- 3) 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, 第276号, 135-147, 1978
- 4) 大津政康; アコースティック・エミッション波動の放射形式に関する考察, 材料(投稿中)
- 5) Niwa, Y., M. Ohtsu and H. Shiomi; Waveform Analysis of Acoustic Emission in Concrete, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University (in printing)

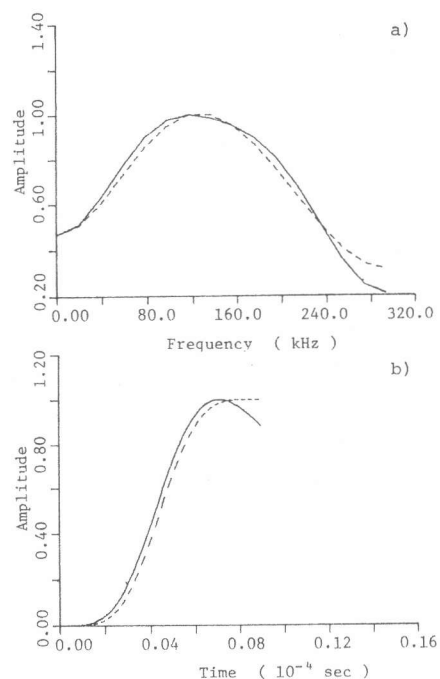


図-6 a) フィルター操作を行った後のフーリエスペクトル  
b) 検出波形より決定された転位の時間関数  $[U_1(t)]$