

アコースティック・エミッションの周波数特性に関する考察

FREQUENCY SPECTRA OF ACOUSTIC EMISSION

丹羽 義次*・小林 昭一**・大津 政康***・奥田 和男****

By Yoshiji NIWA, Shoichi KOBAYASHI, Masayasu OHTSU and Kazuo OKUDA

1. はじめに

材料が破壊する際に発生するアコースティック・エミッション(AE)現象は、さまざまな分野への適用^{1),2)}が試みられており、材料の破壊挙動と関連したAEの諸特性は、いくつかの分析パラメーターにより研究されている。

AE現象の材料研究、非破壊試験などへの適用に際しては、これらAEのパラメーターと材料の破壊機構、破壊過程との関係を明らかにし、基礎資料を集積することが必要であろう。

われわれは、このような意図のもとに、コンクリート材料におけるAEの発生特性について基礎的研究を進めており、発生頻度、振幅分布、破壊源探査法^{3),4)}などのAEパラメーターについて検討してきた。

本論文は、AEのパラメーターとしてAE波動の周波数成分に着目し、周波数分析法とコンクリート材料の周波数特性について基礎的考察を行ったものである。

AEの周波数成分は、古くからパラメーターとして提案されていた⁵⁾が、AEが過渡的な現象であり、低周波数から高周波数にわたる広い帯域の周波数成分をもつことより、現象の分析は、非常に困難とされていた⁶⁾。さらに、計測において、AE変換子の周波数応答特性が大きな問題であり、これを考慮した研究は、2, 3^{7),8)}にすぎず、また、較正法^{9),10)}としても確立されたものがない。

しかしながら、検出されたAE波動の周波数成分は、個々の破壊現象に対応し、材料の内部構造の変化に関連した情報を含んでいると考えられ、材料の破壊機構およ

び構造系の破壊度に直接に関与したパラメーターとなることが期待される。

以下では、AEの周波数成分に影響を与えるいくつかの要因を線形システム論により明らかにし、AE変換子の周波数応答特性を検討する。そして、実験で検出されたAEの周波数成分の特性を発生位置と発生機構の関連より考察する。

2. AE波動と周波数分析

(1) スペクトル解析法

AEの周波数分析法は、他の波動現象におけるスペクトル分析¹¹⁾となら変わるところはないが、後の実験データの処理のためにここで簡単にふれることにする。

いま、時刻歴 $x(t)$ のフーリエ変換を $X(f)$ とすれば、これは、次のように定義される。

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \dots\dots\dots (1)$$

また、フーリエ逆変換は、次のようになる。

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{i2\pi ft} df \dots\dots\dots (2)$$

このとき、周波数領域で、周波数 f に対する振幅 $|X(f)|$ が、フーリエスペクトル、 $x(t)$ の継続時間を T としてエネルギーに関係した量 $\frac{1}{T}|X(f)|^2$ がパワースペクトルと定義される。上式を、標本点間隔 Δt 、標本数 N の離散的な時系列 $x_m = x(m\Delta t)$ に適用すれば、有限フーリエ変換、逆変換として、次のように表わされる。

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i2\pi km/N} \dots\dots\dots (3)$$

$$x_m = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{i2\pi km/N} \dots\dots\dots (4)$$

このとき、継続時間 $N\Delta t$ を T として、フーリエスペクトル、パワースペクトルは、それぞれ $T|C_k|$ 、 $T|C_k|^2$ で与えられる。ここで、基本周波数 f_1 は、 $f_1 = 1/(N\Delta t)$

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科
 **** 正会員 工修 日本電信電話公社

であり、よく知られているように、 $f_k = k/(N\Delta t)$ として上述のスペクトルは $f_{N/2}$ に対して対称であり、 $f_{N/2}$ は分解可能な限界の周波数で、Nyquist 周波数とよばれる。

(2) AE 計測システムとデータ処理

AE 波動の周波数スペクトルを得るためには、式 (3) により C_k を求めればよい。しかし、AE のように過渡的で、低周波数から高周波数にわたる広い周波数帯をもつ現象を分析するには、時系列 x_m の収録に関して特別な配慮が必要である。

そこで、本研究では、Fig. 1 に示すようなウェーブメモリとデジタルカセットを用いた計測システムを考案した。検出された AE 波動は、サンプリング間隔 Δt のデジタル量として、ウェーブメモリに記憶され、カセットテープに収録される。サンプリング間隔 Δt は、最高で 50 nsec まで可能であり、Nyquist 周波数は、10 MHz である。また、一波形の標点数 N はすべて 1024 である。後の実験に際しては、フィルターの周波数帯を 10~300 kHz に設定したため、サンプリング間隔は 1 μ s (Nyquist 周波数 500 kHz) に設定して使用した。

カセットに収録された波形は、TSS 端末より計算機に転送し、FFT 法を用いて C_k およびフーリエスペクトルを求めた。このとき、Hanning のウィンドウ¹¹⁾を用いてスペクトルの平滑化を行った。この平滑回数 10 回である。また、波形データは、後の破壊源探索および P 波初動の向き判読にも使用した。

(3) 伝達特性

供試体内で生じた AE は、系内を伝播し、境界で変換子により電気信号に変換され、増幅され、フィルターをかけられた後、検出される。この伝達経路を線形システムとして模式的に表わせば、Fig. 2 のようになる。

線形システムの理論に従えば¹²⁾、図より、次のような関係が得られる。

$$r(t) = w_u(t) * w_t(t) * w_s(t) * s(t) \dots (5)$$

ここで、* は合成積を意味している。フーリエ変換により周波数領域で考えれば、上式は次のようになる。

$$R(f) = W_u(f) \cdot W_t(f) \cdot W_s(f) \cdot S(f) \dots (6)$$

ここで、 R, W, S などの大文字でフーリエ変換を表わ

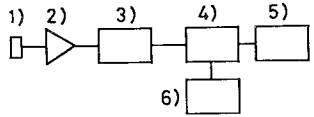


Fig. 1 A block diagram of the AE monitoring and recording system.

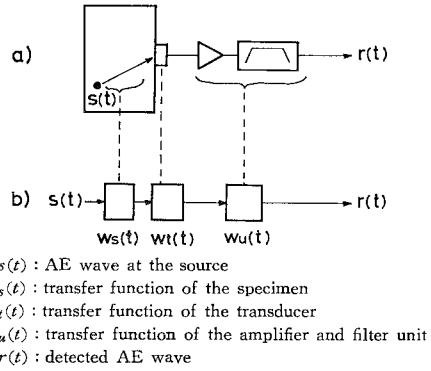


Fig. 2 The transmission path of AE for a) the experimental arrangement and b) the linear system.

した。

式 (6) において、 $S(f)$ は、AE 発生源での周波数特性を表わす項であり、これが材料の破壊機構に基づいた特性を示すものと考えられる。 $W_s(f)$ は、発生源と検出点の幾何的位置に関係した供試体固有のものであり、供試体の共振特性、境界での多重反射、距離による減衰などが複雑に関連するであろう。 $W_t(f)$ 、 $W_u(f)$ は、計測システムによるものであり、基本的には、計測周波数領域の各周波数成分に対し、平坦な特性を示すものが望ましい。 $W_u(f)$ は、位相特性を除けば、つまり $|W_u(f)|$ については、多くの市販の機器に関して確かめられており、問題はないと考えられる。したがって、周波数分析を行うに際して最も問題となるのは、変換子の応答特性 $W_t(f)$ であり、これについては次章で検討を加えることにする。

(4) 発生機構と P 波初動の方向依存性

上述の AE の発生源での周波数特性 $S(f)$ は、破壊機構により異なると考えられる。AE の周波数特性を検討する際には、破壊機構つまり AE の発生機構に関しても考慮する必要があるであろう。

AE の発生機構については、従来よりいくつかの研究がなされている¹³⁾が、ここでは、地震学において著名な弾性体中に生じた転位(変位の食い違い)と発生する弾性波動の関係式から、P 波初動の向きにより発生機構を分類することを試みる。

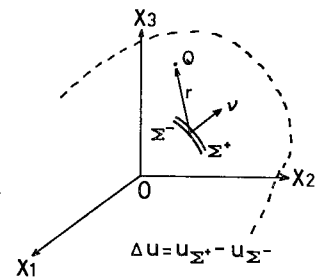


Fig. 3 The dislocation surface Σ , situated entirely in the interior of the homogeneous, isotropic, and elastic body.

いま, Fig. 3 のように, 無限弾性体中に直交座標系をとり, Σ 面上で変位の食い違い $\Delta u(t)$ が生じたとすれば, Σ 面の法線方向ベクトルを ν とし, 時刻 t において点 Q に生じる m 方向の変位 $u_m(Q, t)$ は, 次式で与えられる¹⁴⁾.

$$\left. \begin{aligned} u_m(Q, t) &= \int_{\Sigma} T_{kl}{}^m[\psi_k]\nu_l d\Sigma \\ \psi_k &= \int_0^t dt' \int_0^{t'} \Delta u_k(t'') dt'' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

ここで, $T_{kl}{}^m$ は, Σ 面から点 Q への距離 r が, 波動の波長に比して, 十分大きいと仮定すれば, P波の寄与する成分に対しては, 次のように表わされる.

$$T_{kl}{}^m = \frac{1}{r} [\lambda \delta_{kl} r_{,m} + 2\mu r_{,k} r_{,l} r_{,m}] \cdot \left[\frac{1}{v_P^3} \psi_k''' \left(t - \frac{r}{v_P} \right) \right] \dots\dots\dots(8)$$

ここで, λ, μ は Lamé 定数, v_P は P波速度, $r_{,m}$ は r の m 方向への方向微分を表わしている.

a) 引張クラック

Σ 面で引張クラックが発生した場合は, Δu の方向と ν の方向が一致すると考えられる. いま, Σ 面が原点にあり, $\nu = (0, 1, 0)$, $\Delta u = (0, \Delta u_2, 0)$ とし, 点 Q を極座標 (r, φ, θ) で表わせば, r 方向の変位成分 u_r は, 次のようになる.

$$u_r = u_m \cdot \cos(r, x_m) \dots\dots\dots(9)$$

ここで, $\cos(r, x_m)$ は r と x_m 方向の方向余弦である. 式 (7) で, Σ 面が微小 $\Delta \Sigma$ あるとすれば, 式 (8), (9) より, 次のようになる.

$$u_r = \frac{1}{r} (\lambda + 2\mu \sin^2 \varphi \sin^2 \theta) \frac{1}{v_P^3} \Delta u_2' \left(t - \frac{r}{v_P} \right) \Delta \Sigma \dots\dots\dots(10)$$

式 (10) より, 変位成分 u_r はすべての方向に同符号であることがわかる. x_1-x_2 面上での u_r の分布を Fig. 4 に示す.

b) せん断クラック

せん断クラックが発生した場合は, Δu の方向と ν の方向が直交すると考えられる. いま, $\nu = (1, 0, 0)$, $\Delta u = (0, \Delta u_2, 0)$ とすれば, 式 (8) より同様にして次式を得る.

$$u_r = \frac{1}{r} (\mu \sin^2 \varphi \sin 2\theta) \frac{1}{v_P^3} \Delta u_2' \left(t - \frac{r}{v_P} \right) \Delta \Sigma \dots\dots\dots(11)$$

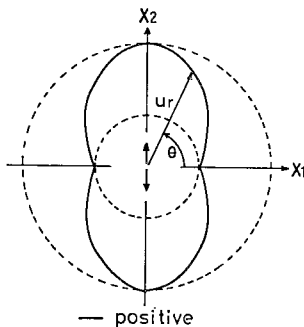


Fig. 4 P-wave radiation patterns for the tensile crack.

Fig. 4 と同様な x_1-x_2 面上での u_r を Fig. 5 に示す. 図より変位成分 u_r は, 4つの象限で正負交互に現われることがわかる.

a), b) の結果より, P波初動の向きに着目すれば, AE の発生機構を分類できることがわかる.

実際には, 実験での変換子の位置とクラック面の方向によっては, せん断クラックの場合の4象限モデルが得られないこともある. さらに, 上記の2つの機構のみにより AE が発生するとは限らない. そこで5チャンネルの破壊源探査において, すべてのP波初動が同じ向きになるものを引張クラックによるもの, そうでないものをその他の機構によるものと分類することにした.

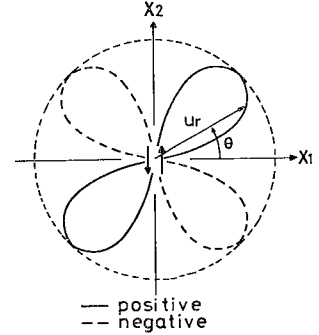


Fig. 5 P-wave radiation patterns for the shear crack.

3. AE 変換子の周波数応答特性に関する考察

AE の周波数特性を求めるに際しては, AE 変換子の周波数応答特性を知る必要がある. これが, AE の周波数分析結果に非常に大きな影響を及ぼすことは, すでに知られている¹⁵⁾. そこで, 本章では, AE 変換子の応答特性について数値解析, 実験の両面から検討し, 検出された AE 波動のスペクトルをこれに関して補正する方法について考察を加える.

(1) 圧電素子変換子の共振特性の解析

AE 変換子は, 基本的には, 圧電材料に電極を設けたもので, Fig. 6 に示すような縦効果, 横効果をそれぞれ独立に考え, 共振特性を一次元的近似により決定している¹⁶⁾. しかし, 実際に, 共振周波数, 共振モードを決定するには, 圧電効果を考慮した三次元解析が必要であろう. そこで後の実験で使用した PZT 圧電素子 900

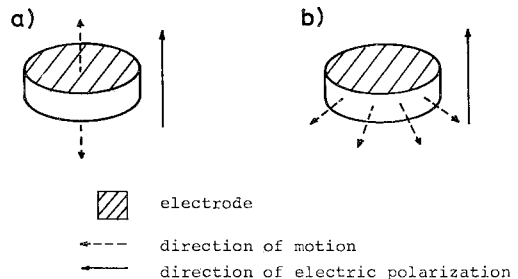


Fig. 6 The piezoelectric transducer for a) the longitudinal effect and b) the transverse effect.

BA (φ4 mm×2 mm) を軸対称物体と考え、FEM により固有値解析を行った。

解析手法は、一般の弾性固有値解析の場合とほとんど同じであるが、要素特性が以下になる点が異なる。

軸対称要素に対しては、応力 $\{T\}$ [Nm⁻²] と電界 $\{E\}$ [Vm⁻¹] が同時に作用する場合、ひずみを $\{S\}$ 、電束密度を $\{D\}$ [cm⁻²] とし、次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} S_{zz} \\ S_{rr} \\ S_{\theta\theta} \\ S_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{33}E & -\nu s_{33}E & -\nu s_{33}E & 0 \\ -\nu s_{33}E & s_{11}E & -\nu s_{11}E & 0 \\ -\nu s_{33}E & -\nu s_{11}E & s_{11}E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1-\nu)s_{33}E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{zz} \\ T_{rr} \\ T_{\theta\theta} \\ T_{rz} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{33} & 0 \\ d_{31} & 0 \\ d_{31} & 0 \\ 0 & d_{15} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_z \\ E_r \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} D_z \\ D_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{33} & d_{31} & d_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{zz} \\ T_{rr} \\ T_{\theta\theta} \\ T_{rz} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_0 \epsilon_{33} T & 0 \\ 0 & \epsilon_0 \epsilon_{11} T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_z \\ E_r \end{Bmatrix} \quad (12)$$

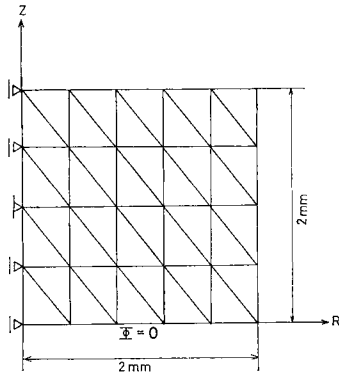


Fig. 7 The axisymmetrical finite element model of the transducer 900 BA.

Table 1 Elastic, piezoelectric, and dielectric constants of the piezoelectric material: PZT-5.

Elastic compliance at constant electric field [m ² /N]	s_{33}^E	20.7×10^{-12}
	s_{11}^E	16.5×10^{-12}
Poisson's ratio	ν	0.3
Permittivity of vacuum [F/m]	ϵ_0	8.854×10^{-12}
Dielectric constant at constant stress	ϵ_{33}^T	3 400
	ϵ_{11}^T	3 130
Piezoelectric constant [C/N]	d_{33}	593×10^{-12}
	d_{31}	-274×10^{-12}
	d_{15}	741×10^{-12}

ここで、 s^E 、 ϵ^T 、 d および ϵ_0 のそれぞれの値は、圧電材料が PZT-5 であるとして Table 1⁶⁾ に示す値を用いた。

解析に用いた軸対称モデルの要素分割と境界条件を、Fig. 7 に示す。図中で、 ϕ は電気ポテンシャルであり、これと変位 $\{u\}$ を未知量として三角形要素内で線形な形状関数を仮定し、変分原理より定式化¹⁷⁾を行った。

式 (12) において、圧電ひずみ定数 $[d]$ 、誘電率 $[\epsilon^T]$ を考慮しなければ、弾性固有値問題となる。この場合も比較のために解析した。解析では、特性方程式の固有値 (共振周波数)、固有ベクトル (共振モード) を求めた

が、結果を Table 2 に示す。表より、弾性体 비해、圧電材料は同次モードで、はるかに高い共振周波数をもつことがわかる。また、後の実験では周波数帯を 10~300 kHz に設定したが、この場合には一次モードのみが

Table 2 The resonant frequency of the transducer 900 BA and the elastic circular disk for each resonant mode.

Resonant mode	Piezoelectric material [kHz]	Elastic material [kHz]
1 st	212	74
2 nd	670	375
3 rd	683	443
4 th	857	651
5 th	932	681

表われることになる。900 BA の共振モードについて検討すれば、2 次モードまでは、縦方向の変位が卓越し、3 次以上のモードでは、横方向の変位も加わり複雑な変位モードを示すようになる。例として一次および三次モードを Fig. 8 に示す。

この結果より、AE 変換子 900 BA は、10~300 kHz の周波数帯では一次共振のみが表われ、共振モードより近似的に縦効果の変換子と考えてよいことがわかる。

(2) AE 変換子の周波数応答特性に関する実験的検討

本節では、AE 変換子 900 BA の周波数応答特性を

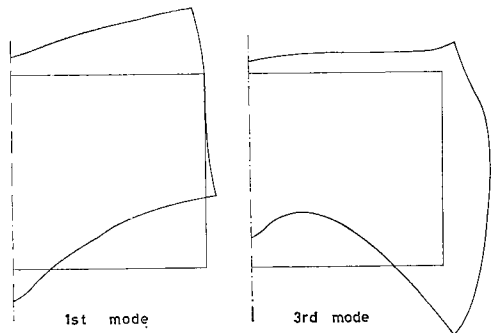


Fig. 8 The first and third resonant mode of the displacement for the transducer 900 BA.

接触法により実験的に検討する。

Fig. 9 のように AE 変換子を貼り合わせた場合を考える。このとき、線形システム論によれば、出力電圧 $r(t)$ のフーリエ変換 $R(f)$ は、次のように表わされる。

$$R(f) = Z(f)W_t(f)E(f) \dots (13)$$

ここで、 $E(f)$ は入力電圧 $e(t)$ のフーリエ変換である。

入力電圧が電圧一定、周波数 f_k の周期関数ならば、

$$e_k(t) = E_0 e^{i2\pi f_k t} \dots (14)$$

と、表わされることより、 $E(f)$ は、次のようになる。

$$E(f) = E_0 \delta(f - f_k) \dots (15)$$

ただし、 δ はデルタ関数である。式 (14) の入力に対する出力 $r_k(t)$ は、式 (13) に式 (15) を代入し、逆変換することにより、次のように求められる。

$$r_k(t) = E_0 Z(f_k) W_t(f_k) e^{i2\pi f_k t} \dots (16)$$

これより、入力電圧 $e_k(t)$ と出力電圧 $r_k(t)$ の間には、次のような関係式が成立する。

$$\left| \frac{r_k(t)}{e_k(t)} \right| = |Z(f_k) W_t(f_k)| \dots (17)$$

次に、入力電圧がステップパルスの場合には、

$$E(f) = \frac{1}{i2\pi f} \dots (18)$$

となることより、式 (13) から、その出力 $R_S(f)$ は、次のようになる。

$$R_S(f) = \frac{1}{i2\pi f} Z(f) W_t(f) \dots (19)$$

これより、入力電圧がステップパルスの場合には、以下のような関係式が成立する。

$$|i2\pi f R_S(f)| = |Z(f) W_t(f)| \dots (20)$$

したがって、式 (17)、(20) より個々の周波数 f_k に対しては、次のような関係が成立することになる。

$$\left| \frac{r_k(t)}{e_k(t)} \right| = |i2\pi f_k R_S(f_k)| \dots (21)$$

この線形システムでの議論が実際に成立するかどうかを検討し、さらに、 $|Z(f) W_t(f)|$ を求めるために、

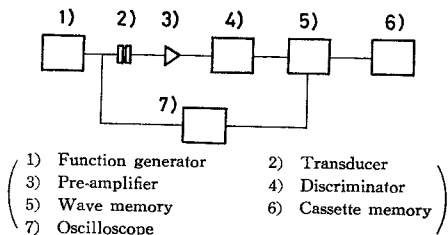


Fig. 10 The experimental set-up for the frequency response of AE transducers.

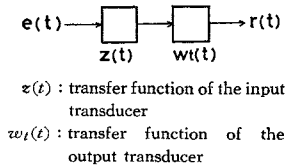
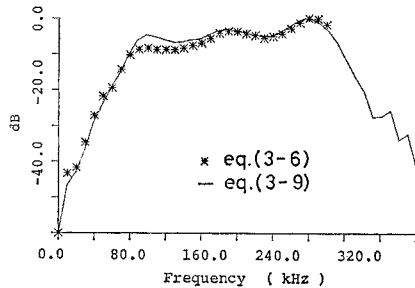


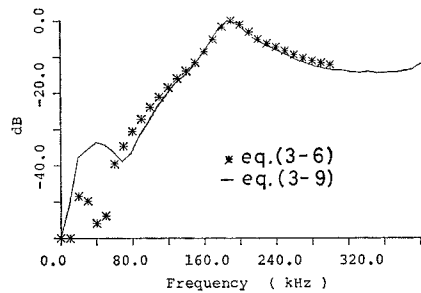
Fig. 9 The linear system diagram of the input and output transducers.

Fig. 10 のような計測システムを用いて実験を行った。

AE 変換子は、前述の 900 BA と比較のため 905 S¹⁸⁾ を用いた。実験では、同じ変換子を貼り合わせ、まず、式 (17) の値を求めるために、10 kHz から 300 kHz まで 10 kHz ごとに振幅一定の SINE 波形電圧を一方に入力し、そのとき他方からの平均出力電圧を求めた。次に、ステップパルス電圧を入力し、そのときの出力波形を、SINE 波形電圧入力に対応するようにサンプリング間隔 100 ns ($f_s=10$ kHz) でウェーブメモリに記憶した。そして、2. で述べた方法でフーリエ変換を行い、式 (20) の値を求めた。式 (17)、式 (20) により得られた結果をピーク値で正規化し、周波数軸に対してプロットしたものを Fig. 11 に示す。図より、900 BA、905 S のどちらの結果においても、式 (17) と式 (20) による結果は非常によく一致しており、式 (21) が成立することが確かめられた。また、図の曲線は、 $|Z(f) W_t(f)|$ の値を示していることより、変換子の周波数応答特性 $|W_t(f)|$ に関係した量を表わしていると考えられる。変換子 900 BA では、200 kHz 付近にのみ 1 つのピークをもつ応答特性を示しており、これは解析結果とよく対応している。さらに、変換子 905 S は、100~300 kHz の周波数帯でかなり平坦な応答を示すことがわかる。



(a) 905 S



(b) 900 BA

Fig. 11 The frequency response curve of the transducers.

(3) AE 変換子の周波数応答特性の補正法

以上の結果より、AE 変換子 900 BA は、10~300 kHz の周波数帯において、200 kHz 付近にピークをもち、これが解析より求めた一次共振周波数に対応することが確かめられた。AE 変換子 900 BA を用いて AE 波動を検出し、スペクトル分析を行えば、スペクトルにこのピークが表われることが予想される^{15),16)}。したがって、供試体の境界まで到達した実際の AE 波動のスペクトルを求めるとは、検出された AE 波動のスペクトルよりこの影響を除去することが必要であろう。

式 (6) に基づいて考察すれば、

$|W_u(f)|$ は平坦な応答特性を示すことより、位相特性を除けば、次式により AE 変換子の設置された位置での AE の周波数特性が得られることになる。

$$\left| \frac{R(f)}{W_i(f)} \right| = |W_s(f)S(f)| \dots\dots\dots(22)$$

前節の結果より、 $|Z(f)W_i(f)|$ はすでに求められており、変換子 900 BA は、検出の周波数帯ではほぼ縦効果の振動子と考えてよいことがわかっている。ところが、縦効果の圧電素子変換子では、変位と電圧が比例することが知られており¹⁹⁾、その場合は、式(13)の $Z(f)$ は定数となる。これより、式 (21) の $|Z(f)W_i(f)|$ は、近似的に $|W_i(f)|$ を表わしていると考えられ、式 (22) は、次のようになる。

$$\left| \frac{R(f)}{Z(f)W_i(f)} \right| \approx |W_s(f) \cdot S(f)| \dots\dots\dots(23)$$

上式の妥当性を確かめるために、次章での実験に用いた $\phi 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ のモルタル供試体の割裂試験を行った。

割裂試験では、破壊源探査の結果⁹⁾より、载荷軸を含む面の近傍に破壊源が存在することが知られている。そこで、载荷軸を含む面に対称な供試体側面の相対する位置に、変換子 900 BA と 905 S を設置し、载荷の初期に発生する AE 波動を検出した。そして、検出された AE 波動のフーリエスペクトルを求め、式 (23) の左辺の計算によりこれを補正した。この場合、変換子は破壊源に対し対称の位置にあり、式 (23) の $W_s(f)$ は、2つの変換子のどちらに対してもほとんど同じであると考えられる。それゆえ、本実験より得られる補正した AE 波動のスペクトルは、変換子 900 BA と 905 S のどち

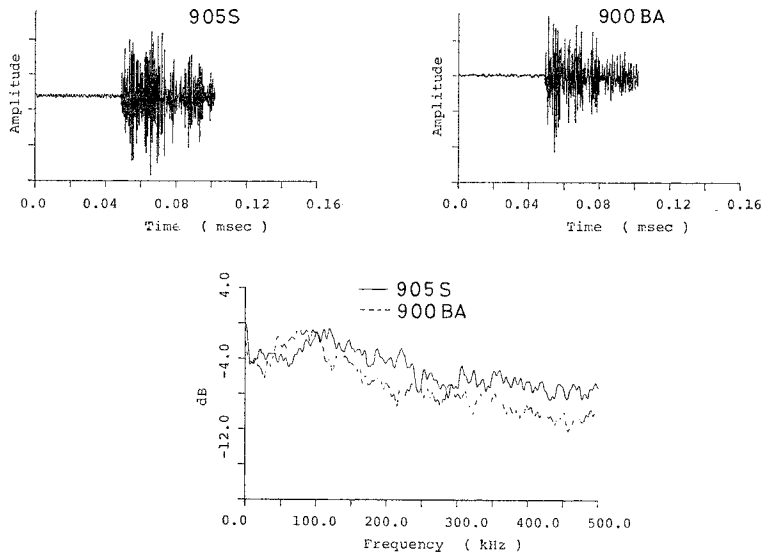


Fig. 12 Detected AE waveforms and calibrated spectra of the same AE phenomenon generated during the split test of mortar.

らから検出されたものも、ほとんど変わらないことが期待される。

実験結果の一例として、AE 変換子 905 S と 900 BA それぞれより検出された AE 波動と、補正したスペクトルを Fig. 12 に示す。2つのスペクトルは、完全には一致していないが、広い周波数帯にわたり、かなり類似していることがわかる。実際には、発生機構、発生源の位置、発生源の位置、伝播経路等の影響があると考えられるため、本補正法により、変換子の周波数応答特性の影響はほぼ除去し得たと考えられる。

4. AE 波動の周波数特性に関する実験的考察

前章での検討により破壊源で発生し、供試体の境界に到達した AE 波動の周波数特性は、式 (23) により得られることになった。そこで本章では、AE 波動の周波数特性を発生位置と発生機構の面から考察を加える。つまり、式 (23) における $W_s(f)$ と $S(f)$ の影響を実験的に検討する。

(1) 実験概要

実験に用いたコンクリート、モルタルの配合を Table 3 に示す。供試体としては、一軸圧縮試験供試体 ($\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$)、割裂試験供試体 ($\phi 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$)、単鉄筋はり曲げ試験供試体 ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$, D10 1本使用)を作成し、打設1日後に脱型し、20°C で水中養生を行った。それぞれの配合における28日強度を Table 4 に示す。また、単鉄筋はりまげ試験における配筋および载荷方法などの詳細は、Fig. 23 を参照さ

Table 3 Mix proportion of mortar and concrete.

	Maximum gravel size (mm)	W/C (%)	s/a (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
Mortar	—	60	—	595	357	1 190	—
Concrete	10	63	39	316	119	727	1 138

Table 4 Strengths of concrete and mortar specimens at twenty-eight days.

	Concrete kg/cm ² (MPa)	Mortar kg/cm ² (MPa)
Compressive strength	330 (32.3)	337 (33.0)
Splitting tensile strength	29 (2.8)	21 (2.1)

Table 5 P-wave velocities of concrete and mortar specimens.

Testing method	Materials of specimen	Velocity (m/s)			
		Load	X	Y	Z
Compression	Concrete		4 428		
	Mortar		3 896		
Split	Concrete		4 410		
	Mortar		3 846		
Bending	Reinforced Concrete	0 t	4 301	4 444	4 348
		1 t	4 301	4 444	4 348
		2 t	4 255	4 444	4 348
		3 t	4 124	4 396	4 255
		4 t	4 061	4 167	4 000
		5 t	4 000	4 167	4 000

りたい、

AE の検出には、Fig. 1 の計測システムを 5 チャンネル使用した。AE 変換子としては、前章で検討したことより 900 BA を用いることにした。これは、900 BA は 905 S に比べ変換子の径が小さく、破壊源探査の精度もよくなると考えたためである。増幅率は 60 dB、周波数帯は 10~300 kHz として、5 か所に設置した AE 変換子 900 BA から検出されたすべての AE 波形をサンプリング間隔 1 μs でカセットに収録した。これを計算機により処理し、5 か所からの AE の初動の到達時間差と方向を読み取り、破壊源探査法^{4),20)}を適用し、発生位置の決定と 2. での考察による発生機構の分類を行った。

破壊源探査に対しては、予備実験により P 波速度を決定したが、その結果を Table 5 に示す。単鉄筋はりでは、鉄筋の存在により、鉄筋の軸方向(表中の y 方向)の伝播速度が速くなり、さらに、ひびわれの発生により伝播速度が変化する。そこで、載荷実験により 3 方向それぞれの P 波速度を求めた。単鉄筋はり曲げ試験に際しては、表中の値を各荷重段階で使い、P 波速度の異方向性を考慮した破壊源探査²⁰⁾を行った。

AE 波動の周波数特性を検討するために、破壊源探査の結果、解の収束性がよく計算誤差も少なく発生位置が決定された現象に対して、5 か所より検出された AE 波動それぞれのフーリエスペクトルを求めた。

ここで、すべてのスペクトルは、前章の方法により補正し、変換子 900 BA の周波数応答特性を除去した。

(2) 実験結果および考察

検出された AE 波動のスペクトル特性を支配する要因としては、AE 発生源での破壊機構、破壊規模、破壊の進行速度等の $S(f)$ に関するものと、発生源から変換子への距離、伝播経路中のクラックあるいは骨材の存在による波の攪乱、変換子への入射角、供試体境界での波の反射、供試体の共振特性等の $W_s(f)$ に関するものが考えられる。これらは、非常に複雑に関係しており、実験より得られた結果に対し、それぞれの影響を考慮する必要がある。以下では、実験において発生位置が求めたいくつかの AE 現象に対し、おもに発生機構と変換子の位置に着目して周波数特性を考察する。

モルタル供試体の 1 回目の一軸圧縮試験において得られた 2 つ破壊源の位置を Fig. 13 に示す。発生機構はどちらも引張クラックによるものであり、これを ●印で示した。図中には、A~E で変換子 900 BA の位置も示した。

破壊源 1 と各変換子の位置は、A 点への入射角が非常に浅いことを除けば、A, B, D, E はほぼ等距離にあり、C 点のみが少し離れた位置にある。A, B, C, D, E 各点で検出された AE 波動のスペクトルは、すべて 100 kHz 付近にピークをもち、その概形はほとんど同じであった。

例として、A, C, D 点でのスペクトルを Fig. 14 に示す。A 点でのスペクトルは、ピーク付近で少し変動が

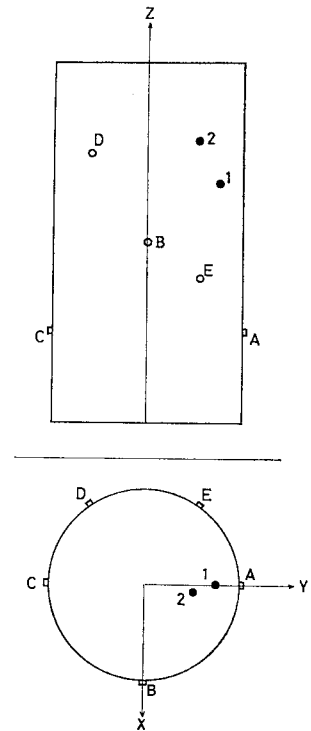


Fig. 13 The location of transducers A, B, C, D, E and sources 1, 2 by tensile cracks in the uniaxial compression test of mortar.

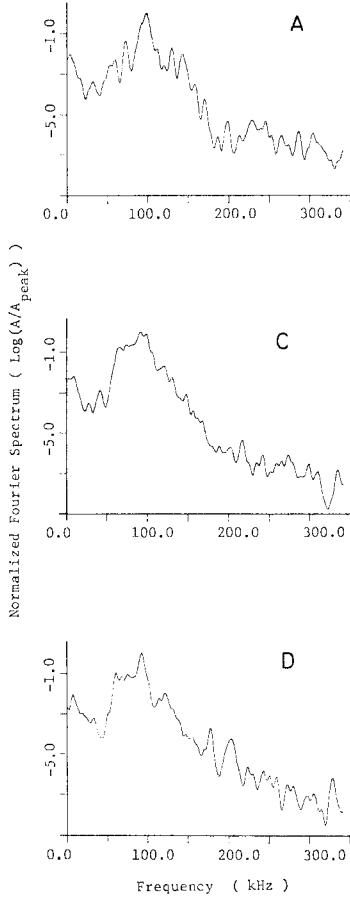


Fig. 14 Fourier spectra of AE waveforms generated at the source 1 (at 52.6% of failure load), detected by the transducer A, C, and D shown in Fig. 13.

激しいが、これは入射角の影響と思われる。

破壊源 2 に対する各点でのスペクトルは、D 点を除き、破壊源 1 の場合とほとんど同じであった。C, D 点でのスペクトルを Fig. 15 に示す。Fig. 14 と比較して、C 点でのスペクトルは変わらないが、D 点でのスペクトルは、100~150 kHz の成分もかなり存在していることがわかる。Fig. 13 によれば、点 D は破壊源 2 に最も近く、入射角もほぼ垂直になっている。

モルタル供試体の 2 回目の試験より得られた 3 つの破壊源の位置を Fig. 16 に示す。発生機構、すべて引張り以外のその他に分類されたものであり、これを×印で示した。ほぼ同じ位置にある破壊源 1 と 3 に対する点 E でのスペクトルを Fig. 17 に示す。スペクトルは、引張りクラックの場合に比べ、かなり平坦になっている。今回の一軸圧縮試験では、テフロンシートとシリコングリースにより、載荷面での端面拘束を減じた。したがって、破壊の進行に伴って、載荷の軸方向に伸びた縦割れ

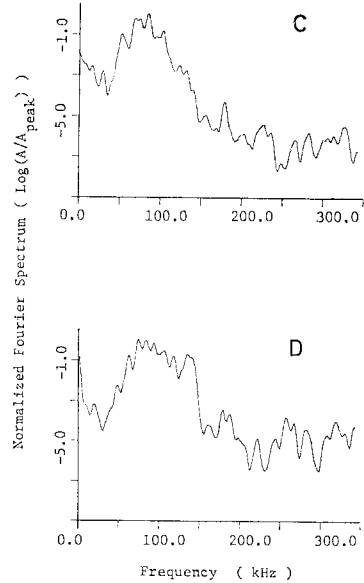


Fig. 15 Fourier spectra of AE waveforms generated at the source 2 (at 84% of failure load), detected by the transducer C and D shown in Fig. 13.

クラックが存在するようになるため、終局破壊に近づけば位置による差異が現われる。例として、破壊源 2 に対して最も近い点 B と反対側の点 E で検出されたスペクトルを Fig. 18 に示す。点 B でのスペクトルは、同様に平坦なのに比べ、点 E でのスペクトルは高周波成分がかなり少ない。これは、クラックを通過することにより、高周波成分の減衰が現われたのである。

次に、コンクリート供試体の割裂試験で得られた破壊源の位置を Fig. 19 に示す。図中には、最終破断面を破線で示した。またそれぞれの破壊源に対し、発生機構を前と同様に分類してある。

割裂試験では、載荷軸を含む面の近傍にクラック

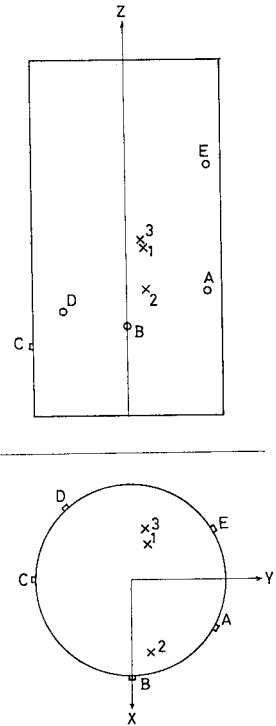


Fig. 16 The location of transducers A, B, C, D, E and sources 1, 2, 3 by shear cracks and otherwise in the uniaxial compression test of mortar.

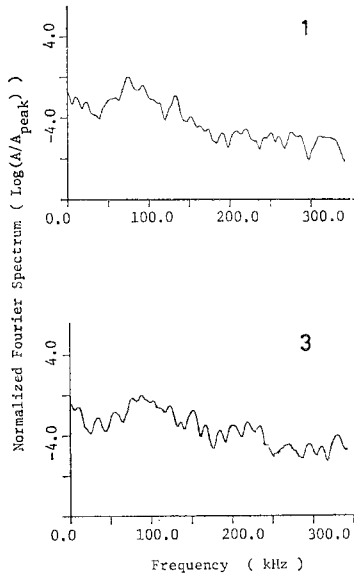


Fig. 17 Fourier spectra of AE waveforms generated at the source 1 (at 71% of failure load) and the source 3 (at 93% of failure load), detected by the transducer E shown in Fig. 16.

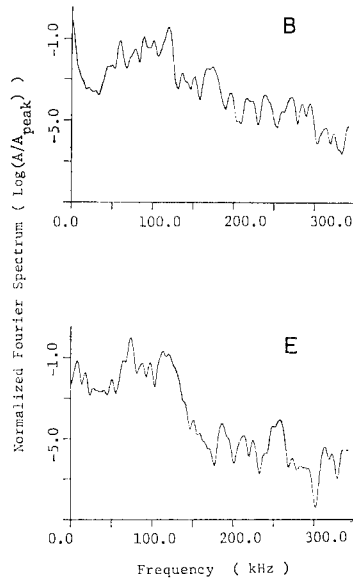


Fig. 18 Fourier spectra of AE waveforms generated at the source 2 (at 85.4% of failure load), detected by the transducer B and E shown in Fig. 16.

した異なる機構による破壊源 4 と 7 に対して、点 E より検出されたスペクトルを Fig. 21 に示す. 破壊源 7 は、破壊荷重の 80% の段階で載荷点付近で発生した現象であり、発生機構としては、クラックの閉塞、コンクリートの圧壊などが考えられるであろう. 図によれば、破壊源 4 に対するスペクトルには、ピークが存在するが、破壊源 7 ではスペクトルは平坦になっている. モルタルの一軸圧縮試験において得られた引張クラックとその他の発生機構に対するスペクトルの相違が、ここでも認められた.

クラックの影響をみるために、破壊源 6 に対する点 C、点 D でのスペクトルを Fig. 22 に示す.

点 C でのスペクトルは、発生機構に対応して平坦であるが、点 D では、高周波数成分の減衰が著しい.

終局破壊直前に、表面ひびわれは、点 D のある面で最初に観察され、破壊源 6 は終局荷重の 77% の段階で検出されたものであることより、

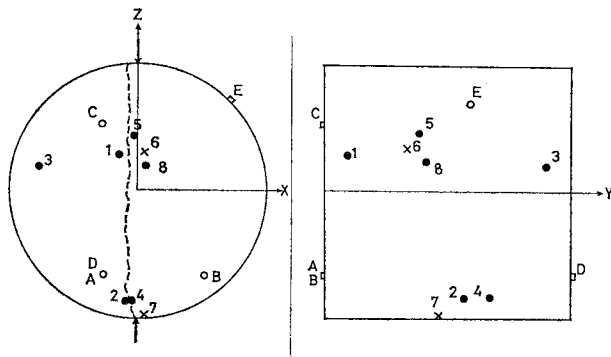


Fig. 19 The location of transducers A, B, C, D, E and sources 1~8 in the split test of concrete. Tensile crack ●, and otherwise ×.

クが集中する⁴⁾ため、このクラック群を通過しない伝播経路では、高周波の減衰は生じないであろう. しかし、コンクリートでは粗骨材があるため、この影響が考えられる. 載荷の初期に検出された破壊源 1 に対する点 C と点 D でのスペクトルを Fig. 20 に示す. 2 つのスペクトルには、引張クラックの発生機構に対応してピークがあるが、発生位置から遠い点 D でのスペクトルでは高周波成分が減少している. これは、クラックの影響は少なく、不均質な材料など距離減衰が大きいと思われることより伝播経路中の骨材の影響であると考えられる.

発生機構について考察するため、ほぼ同じ位置で発生

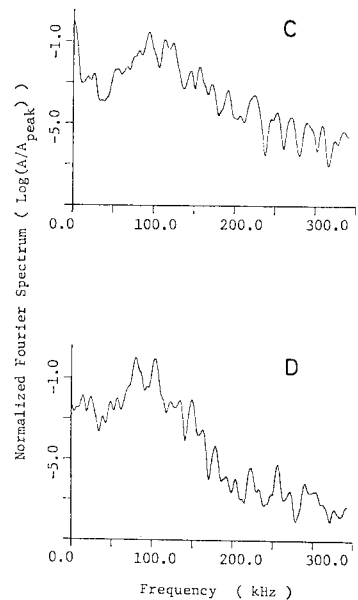


Fig. 20 Fourier spectra of AE waveforms generated at the source 1 (at 12% of failure load), detected by the transducer C and D shown in Fig. 19.

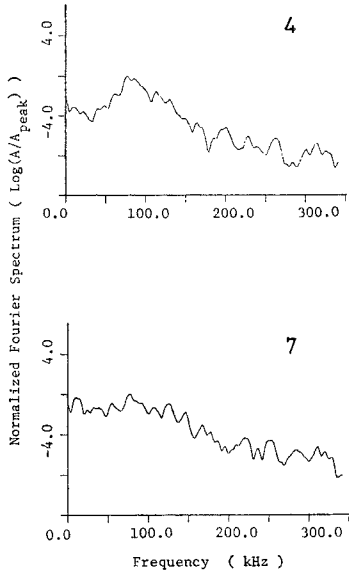


Fig. 21 Fourier spectra of AE waveforms generated at the source 4 (at 19% of failure load) and the source 7 (at 80% of failure load), detected by the transducer E shown in Fig. 19.

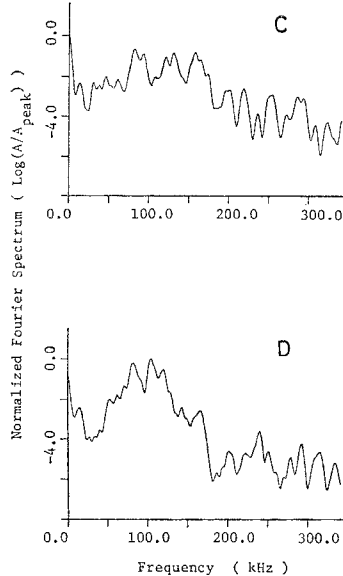


Fig. 22 Fourier spectra of AE waveforms generated at the source 6 (at 77% of failure load), detected by the transducer C and D shown in Fig. 19.

との付着部のずれにより AE が発生したと考えられる。図によれば、スペクトルは平坦になっている。破壊源 2 では、これもその他の発生機構によるものであるが、コンクリート供試体の割裂試験での結果と同じように、50 kHz 付近の成分が少なく、高周波成分の減衰が著しい。この荷重段階では、すでに表面ひびわれが、供試体中央部まで発達していたことより、クラックの影響と思われる。

以上の結果より、AE 波動のスペクトル成分には、発生機構と発生位置から変換子までの伝播経路の影響が明瞭に現われることがわかる。また、供試体の境界での多重反射、供試体の共振特性等、それほど大きな影響を与えないようである。

5. 結 論

本論文は、コンクリート材料の AE の特性に関する基礎的研究の一環として、AE の周波

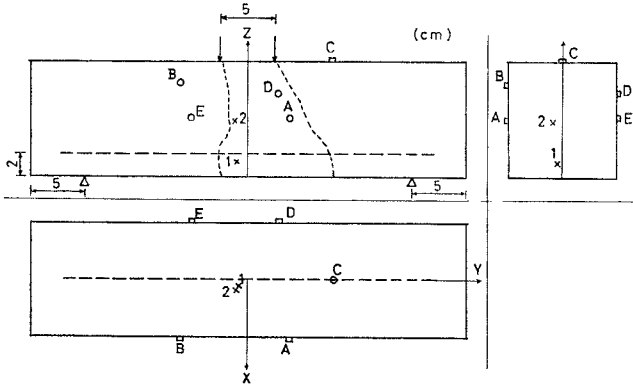


Fig. 23 The location of transducers A, B, C, D, E and sources 1, 2 by shear cracks and otherwise in the bending test of the reinforced concrete beam.

この破壊源から点 D への伝播経路には、クラックが存在したと考えられる。ただ、点 D でのスペクトルでは、50 kHz 付近のスペクトル成分も少なくなっている。これは、クラック群と骨材とによる局所的な共振特性なども影響しているのかもしれない。

単鉄筋コンクリートはりの曲げ試験における破壊源探索図を Fig. 23 に示す。2つの破壊源に対し、点 E で検出された AE 波動のスペクトルを Fig. 24 に示す。破壊源 1 は、鉄筋の近傍にあり、引張クラック以外の発生機構に分類されたものであることを考慮すれば、鉄筋

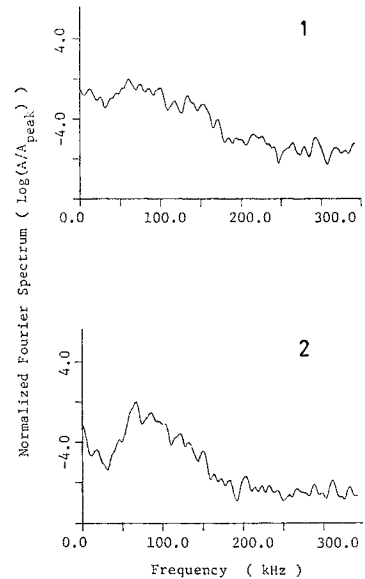


Fig. 24 Fourier spectra of AE waveforms generated at the source 1 (at 36.9% of failure load) and the source 2 (at 54% of failure load), detected by the transducer E shown in Fig. 23.

数特性について考察したものである。材料の微小破壊により発生する AE 波動の周波数成分は、発生機構のみならず伝達経路における多くの因子にも影響されると考えられる。

本論文では、周波数領域でのこれらの因子を線形システム論により検討し、計測システムで特に問題となる AE 変換子の周波数応答特性を補正する方法を考察した。AE の周波数特性に関する実験としては、モルタル、コンクリート供試体の一軸圧縮試験、割裂試験、単鉄筋はりの曲げ試験を行った。実験では、破壊源探査を行い、発生機構を分類して、検出された AE 波動の周波数特性を、発生位置と発生機構の関係から考察した。

これより得られた結論は、以下のようである。

(1) 検出される AE 波動の伝達経路を線形システム論により検討し、周波数成分に影響を与えるいくつかの因子を明らかにした。さらに、AE の発生機構との関係を検討するため、AE 波動の P 波初動の向きより発生機構を分類する方法を提案した。

(2) AE 変換子 (900 BA) の周波数応答特性に関する解析と実験の結果より、900 BA は計測周波数帯では一次共振周波数のみをもつ縦効果振動子であることがわかった。ここで検出された AE 波動の周波数成分に対する変換子の周波数応答特性の一補正法を提案し、この妥当性をモルタル供試体の割裂試験により確かめた。

(3) 破壊源探査を行った結果、AE 波動の周波数成分は、発生位置の影響を受け、検出点の位置および供試体内の伝播経路により異なることがわかった。特に、伝播経路中にある既存のクラックとか骨材の影響が大きかった。

(4) 発生機構の分類により、AE の周波数特性が、材料内部の AE の発生機構と関連していることが明らかになった。結果によれば、引張りクラックによる AE 波動のスペクトルには、1つの明確なピークが存在するが、その他の機構により発生した AE 波動のスペクトルは、平坦であることが認められた。

6. あとがき

本研究により、AE 波動の周波数特性の一部が解明されたと考えられる。実際に、周波数特性を AE のパラメーターとして、構造物の健全度の推定、非破壊試験等に使用するためには、さらに破壊過程との関連について多くの検討が必要であろう。しかしながら、発生機構との関連なども明らかになったことより、今後、AE のパラメーターとしての位置づけが行われたと考えられる。

AE の周波数特性は、材料の内部構造の変化の把握に適したパラメーターであり、破壊機構の解明などにも適

用し得ると期待される。

参考文献

- 1) Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems, ASTM, STP 697, ASTM, 1979.
- 2) Miyata, N., H. Minakuchi and H. Jinno: Study on the Interaction of a Moving Crack Front with an Inhomogeneity by Means of Acoustic Emission, Proc. 23rd Japan Congr. Mat. Res., 1980.
- 3) 丹羽義次・小林昭一・大津政康: コンクリート構造物のアコースティック・エミッション特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No. 261, 1977.
- 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, 土木学会論文報告集, No. 276, 1978.
- 5) Hardy, H.R., Jr.: Application of Acoustic Emission Techniques to Rock Mechanics Research, ASTM, STP 505, ASTM, 1972.
- 6) Chugh, Y.P., H.R. Hardy, Jr. and R. Stefanko: An Investigation of the Frequency Spectra of Microseismic Activity in Rock under Tension, Proc. 10th Rock Mech. Sympo., 1968.
- 7) Graham, L.J. and G.A. Alers: Acoustic Emission in the Frequency Domain, ASTM, STP 571, ASTM, 1975.
- 8) Hatano, H.: Quantitative Measurements of Acoustic Emission Related to Its Microscopic Mechanisms, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 57, No. 3, 1975.
- 9) Hatano, H. and E. Mori: Acoustic-Emission Transducer and Its Absolute Calibration, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 59, No. 2, 1976.
- 10) Breckenridge, F.R., C.E. Tschiegg and M. Greenspan: Acoustic Emission: Some Application of Lamb's Problem, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 57, No. 3, 1975.
- 11) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1976.
- 12) 近藤次郎: フーリエ変換とその応用, 培風館, 1975.
- 13) 栗林一彦: AE の発生機構, 第2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, 1979.
- 14) Maruyama, T.: On the Force Equivalents of Dynamical Elastic Dislocation with Reference to the Earthquake Mechanism, Bull. Earthq. Res. Ins., Vol. 41, 1963.
- 15) 谷川恭雄・山田和夫・桐山伸一: コンクリートのアコースティック・エミッションの周波数特性, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1980.
- 16) 川端 昭: 超音波圧電振動子とその応用 (I), 材料, Vol. 22, No. 232, 1973.
- 17) Allik, H. and T.J.R. Hughes: Finite Element Method for Piezoelectric Vibration, Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 2, 1970.
- 18) Niwa, Y., S. Kobayashi and M. Ohtsu: Frequency Analysis of Acoustic Emission, Proc. 23rd Japan Congr. Mat. Res., 1980.
- 19) Redwood, M.: Transient Performance of Piezoelectric Transducer, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 33, No. 4, 1961.
- 20) 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 の波動特性に関する基礎的考察, 第2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, 1979.