

モルタルおよびコンクリートの一軸圧縮により 発生する微小破壊音について(I)

長谷川 武 司

藤 嶋 幸 成**

武 藤 正 文**

Acoustic Emissions in Mortar and Concrete under Uniaxial Stresses(I)

Takeshi HASEGAWA,
Kousei FUJISHIMA, and
Masabumi MUTO

(昭和54年10月31日受理)

This is a preliminary report of acoustic emissions during the deformation of mortar and concrete specimen (10cm in diameter and 20cm in length) under uniaxial compression.

The results may be summarized as follows :

- (1) The parameter m in the Ishimoto-Iidas's frequency-amplitude relation decreases with increase in axial stress.
- (2) The m -value in the case of higher strength sample is relatively small compared to the m -value in the case of lower sample.
- (3) The spectra of acoustic emissions, that are equivalent to acceleration, are characterized by one predominant frequency (F_p) and the decay of spectral amplitude across the F_p . According to the earthquake source model, the estimated sizes of microcracks range from 5 mm to 10 mm for each sample.
- (4) In the case of concrete sample, higher predominant frequency appears with increase in axial stress.

§ 1. は じ め に

圧縮応力下にある岩石においては、破壊応力よりも低い段階から微小破壊が起こり、これに伴う弾性波 (Acoustic Emission, 以下では略称 AE を用いることにする) を発生することが知られている。これは岩石が、ガラスのように脆性的ではあるが均質な材料や、金属・プラスチックなどのように著しい延性を示す材料とは異なったメカニズムで破壊することを示唆しており、AE の測定による岩石の破壊に至る過程の研究がこれ迄多くの研究者によって報告されている⁽¹⁾。それらの中で、軸応力と AE のスペクトルに着目した研究では楠瀬ら (1978)⁽²⁾のように、軸応力の上昇に伴って高周波成分が卓越するという報告と、Shamina (1956)⁽³⁾のように軸応力の上昇に伴って低周波成分が卓越するという報告のように互いに相反するものがある。

AE のスペクトルを解析する際は、大中ら (1979)⁽⁴⁾

が指摘しているように測定系に対する十分な吟味が必要であるとともに、得られた結果を一般化するに当って、供試体である岩石の材質にも配慮がなされなければならない。この為、我々は特に後者の点に重点を置き、成分や配合比および材令についてコントロールのできるモルタル、コンクリートを供試体を選び一軸圧縮下における AE 測定を行なった。実験は現在まだ進行中であるが、振幅別頻度分布と AE スペクトルについて、これまでの研究^{(2), (5)}などと定性的に一致する結果が得られているので、第 1 報として報告する。

§ 2. 実 験 方 法

供試体は、直径10cm、長さ20cmの円柱状に作られたモルタルおよびコンクリートである。作成時における配合を Table 1 に示す。型枠に打込まれたモルタル、コンクリートは水分の蒸発を防ぐためのシートをかけられ24時間放置される。その後、水温20℃

**機械工学科 第11期卒業生

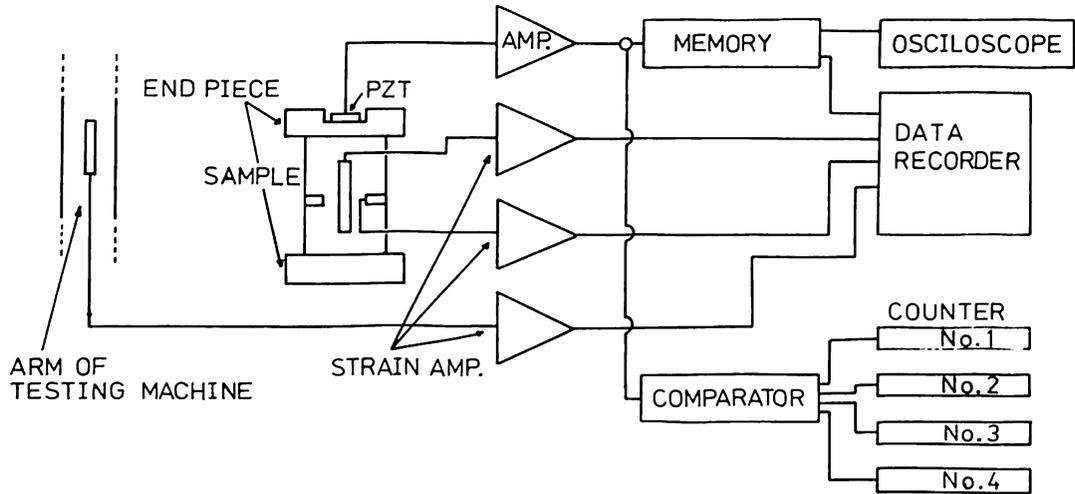


Fig 1 . Experimental system for measurements of axial stress, strains and acoustic emissions.

の水槽で4週間養生された。

この実験におけるブロック図をFig. 1に示めす。ここで使用された一軸圧縮試験機は、最大100トンの載荷が可能な、東京試験機製作所製のコンクリート簡易耐圧試験機である。圧縮応力の上昇は手動で行なわれるため、一定歪速度を正確に保つことは困難である。一方この実験においては、一定の圧縮応力のもとで発生する比較的大振幅のAEを観測しスペクトルを調べる目的のために、最大20分程度の昇圧停止を適宜行なっているが、昇圧中の歪速度は、ほぼ $10^{-7} \sim 10^{-5}/\text{sec}$ である。

供試体に加えらるる圧縮応力の測定は、試験機のアームが載荷荷重によって変形することを利用した。即ち試験機のアームの変形と載荷荷重（ループダイナモによって検定）との間には、Fig. 2に示めす関係がある。図で実線は昇圧時、点線は減圧時におけるものであり、再現性は良好である。従ってこの実験のように昇圧—停止—昇圧という過程では、アームの変形と載荷荷重の関係は直線的と考えてよい。

供試体の歪は、圧縮軸方向に2枚、円周方向に2枚の歪ゲージ（長さ67mm、幅0.6mm）をそれぞれ供試体側面の対称な位置に直接接着することにより、縦歪 e_z 、接線方向歪 e_θ を測定した。これらの値は、切換によって直接メータ上で読みとられるほかデータレコーダにも記録される。圧縮応力および歪の読取精度はそれぞれ2MPaおよび 1×10^{-5} である。なお体積歪 Δ は

$$\Delta = e_z + 2e_\theta$$

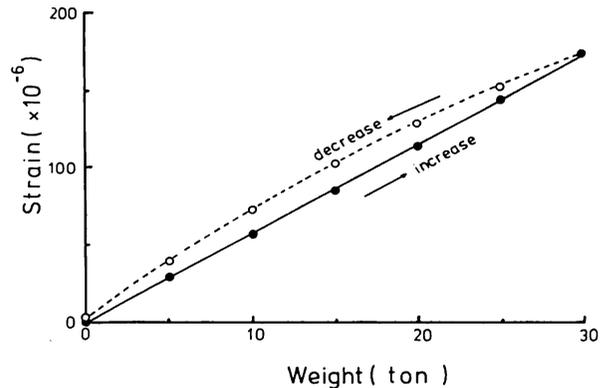


Fig 2 . Strain of testing machine's arm against calibrated weight.

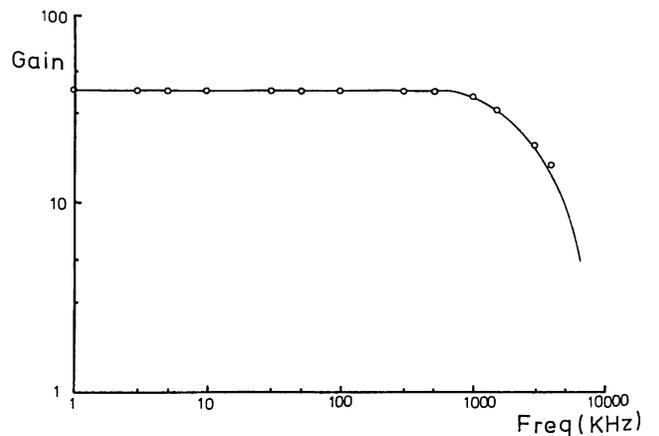


Fig 3 . Frequency response of amplifier.

モルタルおよびコンクリートの一軸圧縮により発生する微小破壊音について(I)

として求めた。

AEはFig. 1に示めされるように供試体の上部エンドピースに取付けられた圧電センサーにより電気信号に変換される。このセンサーは厚さ0.3mm、一辺3mmの正方形型をしたチタン酸ジルコン酸鉛系の厚み方向振動子である。電気信号に変換されたAE信号は、Fig. 3に示す特性の増幅器によって増幅された後、デジタルメモリーおよびバッファアンプを介しコンパレータに導かれる。ここで前者はスペクトル解析を、後者は振幅別頻度分布をそれぞれ目的としたデータ収集用の機器である。

デジタルメモリーは内部トリガーモードとし、サンプリング速度 $0.5\sim 1\mu\text{sec}/\text{point}$ で使用され、トリガーがかかった場合はオシロスコープで確認したうえ、読出速度を $10\text{msec}/\text{point}$ にしデータレコーダに記録する。従って最悪の場合、約3分間のデッドタイムを生ずるが、S/N比が良くないとスペクトルを求めても意味がないのでやむを得ない。

コンパレータに導かれたAE信号は、4段階の比較電圧 (V_{ref}), 50mV , 150mV , 300mV , 600mV と比較され、これを越える全てについてカウントアップする出力に変換される。なおこの部分のタイムチ

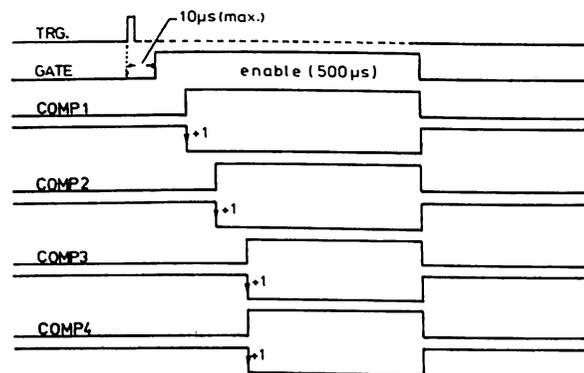


Fig 4. Timing diagram of comparator circuit.

ャートをFig. 4に示めす。図で、トリガ (TRG) の立上りとゲート (GATE) の立上りの間に設けたデッドタイムは、実験室周辺で時々混入する $10\mu\text{sec}$ 以下の継続時間を有するノイズをミスカウントしないために設けたものである。またゲートが開いている時間 (最大 $500\mu\text{sec}$) はデッドタイムであり、もし2個のAEがこの時間内に到来した場合はミスカウントを起こす可能性があり今後の課題であろう。

Table 1. Mix proportion of Mortar and Concrete Mortar

W/C (%)	S/C	unit content (kg/m ³)		
		W	C	S
40.0	1.72	280	700	1204

f.m. = 2.65

Concrete

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	unit content (kg/m ³)			
				W	C	S	G
25	8.0	40.5	39.7	183	458	671	1022

§ 3. 実験結果および検討

(i) 応力-歪曲線とAE

Fig. 5にモルタルおよびコンクリートの軸圧に対する縦歪 e_z , 接線方向歪 e_θ および計算された体積歪 Δ を示めす。図で縦軸が軸圧であり、横軸は 10^{-3} で規格化された歪量である。今回は供試体をモルタル、コンクリートそれぞれについて5個ずつ用いて実験を行なったが、歪ゲージが昇圧時に破断する例が多く、破壊直前までのデータがとれたのは図にあるよ

うに各1例である。しかし、各供試体について、歪ゲージ破断までのデータや破壊強度 (モルタルは $57\sim 60\text{MP}_a$, コンクリートは $50\sim 52\text{MP}_a$ 但し例外的に小さい 31MP_a が1例ある) が比較的そろっていること考えあわせ、図はモルタル、コンクリートそれぞれについて代表的なものを見なしてよい。このデータから弾性定数を求め、弾性波速度を推定したものをTable 2に示めす。

図によると、体積歪は破壊強度の約9割付近までほぼ直線的に減少を続け (Stage I), その後増加に転じ急激な体積歪の増大, そして破壊へと至る (Stage II)。これ迄の多くの研究によれば, Stage Iに

相当する部分では、AEがわずかではあるが発生し、Stage IIにおいては多量のAEの発生をみると報告されている。今回の実験も全く同様に、Stage I ではAE発生総数の約1割、Stage II では残りの9割という発生頻度を示した。Fig. 6に、低軸圧時および高軸圧時におけるモルタル、コンクリートそれぞれ

の供試体より発生したAEのオシロスコープ写真を示す。これらはいずれもデジタルメモリに書込まれたAEであり、S-P時間が約20 μ sec、即ちエンドピースの厚さ2cmを含めセンサーから7~10cmの距離の位置で発生したものと推定される。

Table 2. Elastic constants of Mortar and Concrete

Sample	E ($\times 10^{10}$ N/m ²)	K ($\times 10^{10}$ N/m ²)	σ	V _p (km/s)	V _s (km/s)
Mortar	2.4	1.5	0.23	3.3	1.9
Concrete	1.0	0.6	0.20	2.2	1.3

(ii) 振幅別頻度分布について

実験方法で述べたように、センサーで検出されたAEは増幅された後、4段階の比較電圧を有するコンパレーターに導かれ、振幅別の累積頻度分布がとられる。この方法で問題となることは、AEが供試体のどの位置で発生したものを判定していないこと、デッドタイムが適正かどうかという点である。前者を解決するためには多点測定による発生位置の

標定が必要であり、後者については試行錯誤的に選択せざるを得ない。今回、我々がデッドタイムを500 μ secに選択した理由は、センサーから十分に遠方で発生したAEの振動継続時間は近い点で発生したものに比べ長くなる可能性があること、1個のAEを2個にミスカウントするよりは2個のAEを1個とする過誤の方が確率的に低い可能性を持つと考えている為である。こうして各供試体のAEについて振幅別頻度分布を調べたものをFig. 7(a), (b)に示す。図で、Stage I に対応する区間のデータによる点は

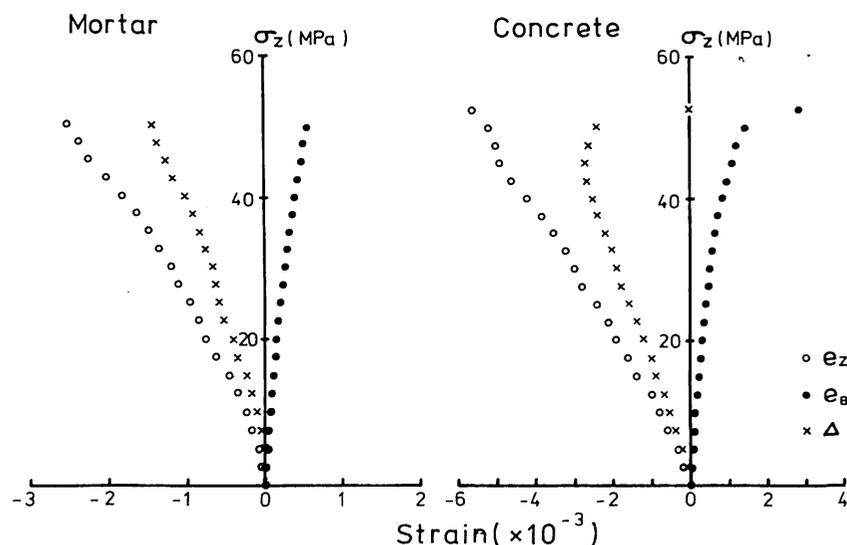


Fig 5. Stress-strain relation of mortar and concrete. The open circle and the solid circle indicate axial strain e_z tangential strain e_θ , respectively. The cross mark denotes volumetric strain Δ derived from $\Delta = e_z + 2e_\theta$.

モルタルおよびコンクリートの一軸圧縮により発生する微小破壊音について(I)

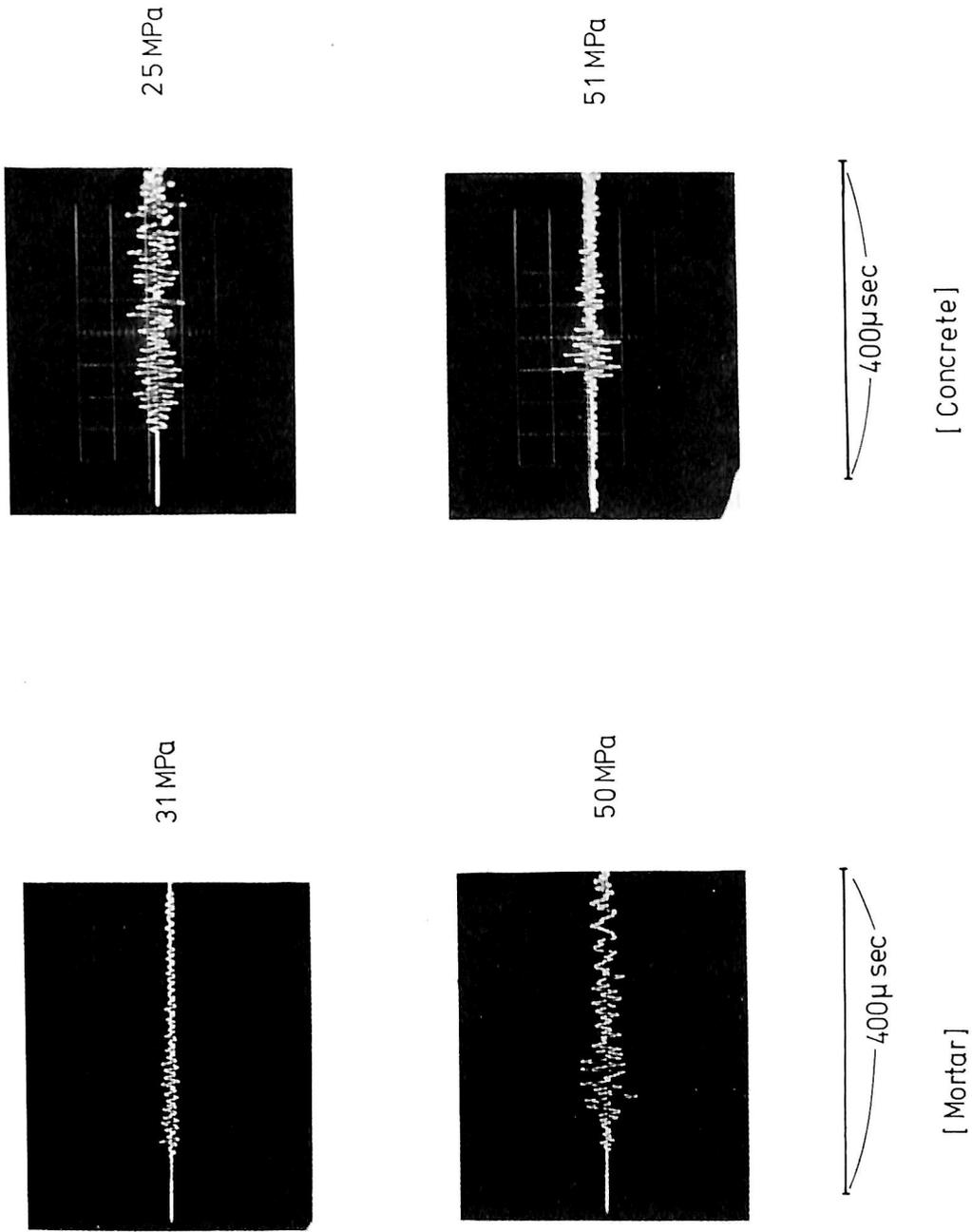


Fig 6 . Records of acoustic emission at low and high stress.

黒くぬりつぶしてあり、Stage II の区間のデータについては白く抜いてある。なおFig. 7(b)はコンクリート2例についてプロットしてあるが、四角印は特に強度の低い供試体No. 4についてのものである。これらの図の縦軸は累積度数、横軸は比較電圧でありいずれも対数であらわしている。図から明らかに点がほぼ直線的に並んでおり、振幅別頻度がべき分布であることを示めしている。しかし比較電圧が少ないために宇津(1965)の式に従って石本一飯田のm値を決めることは出来ず、ここでは目の子で線を引きm値を求めてみた。その結果(1)Stage I ではm値が大きく、Stage II では小さくなること、(2)Stage II におけるm値の比較をすると、強度の小さいコンクリート No. 4 は、他の強度の大きい例(モルタ

ル、コンクリートNo. 1) より大きい値を示めすことが判る。(1)について、特にStage I のデータが少ないので確定的なことは言えないが、花崗岩のサンプルを使用した山本ら(1977)⁽⁵⁾の実験結果、単軸圧縮の場合、m値は差応力の増加に伴って減少するという事実と定性的に一致するといえる。また(2)については、今後のデータの蓄積を待って検討したい。

(iii) AEのスペクトルについて

今回解析されたAEは、モルタルで3例(高軸圧時のみ)、コンクリートで10例(低軸圧~高軸圧)である。いずれの例もS-P時間が $20\mu\text{sec}$ 以内、S/N比が3以上であるP波初動付近のみに限定した。こ

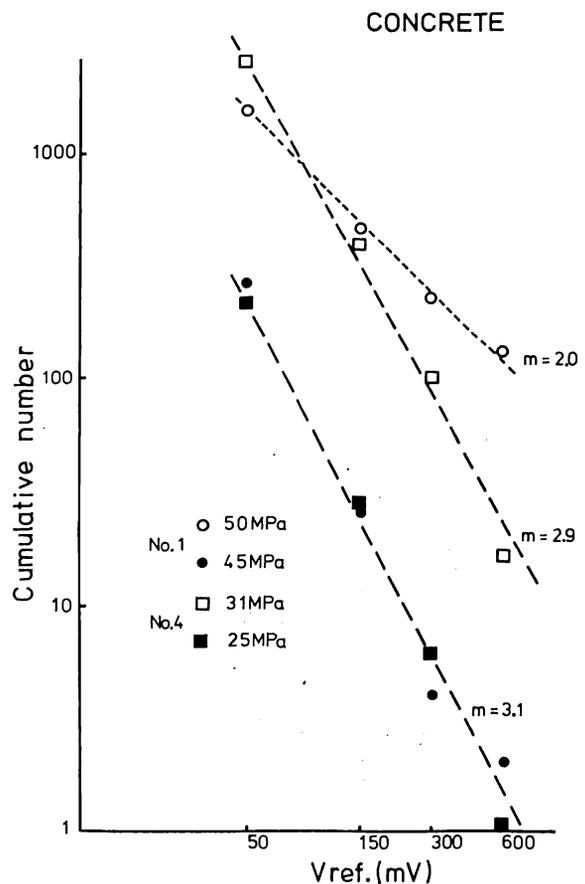
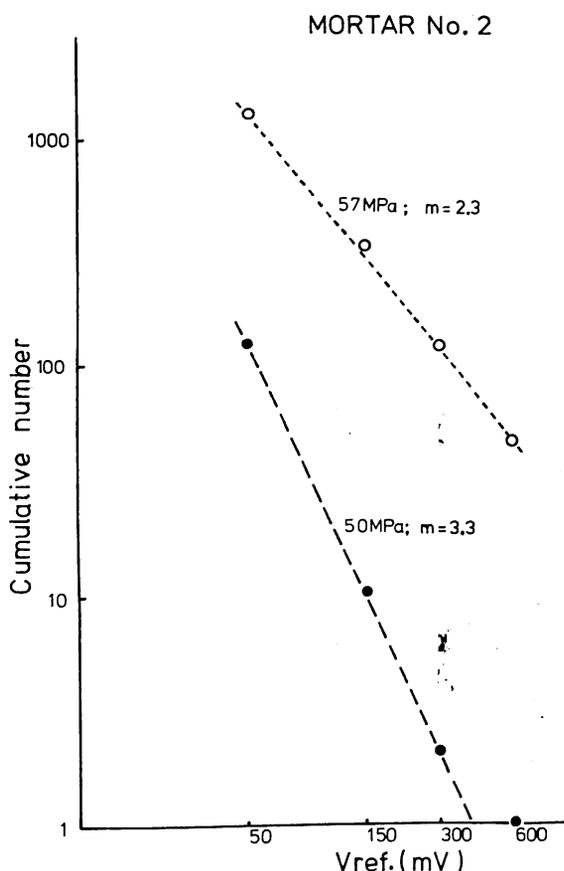


Fig 7. Cumulative frequency versus reference voltage of acoustic emission.
 (a) Mortar. The open circle and the solid circle define the cumulative frequency at stresses above nearly 90% of maximum stress and below that, respectively.

(b) Concrete. The open and solid marks give the same definition as (a)

モルタルおよびコンクリートの一軸圧縮により発生する微小破壊音について(I)

これはセンサーが殆んど no-damper の状態にある 加速度計であり、後続波には変換波だけではなくセンサーの固有振動も含まれている可能性を除去したいと考えたためである。Fig. 8(a)にモルタルの例を、同図(b),(c)にコンクリートの例を示めす。この図で縦軸は正規化されたスペクトル密度を対数であらわし、横軸に周波数をとった。ここで特徴的なことは、100 KHzを中心として卓越周波数が存在することである。これはセンサーが今問題にしている周波数域で加速度計であること、波の減衰を考慮していないこと、AEの発生機構として地震学における震源モデル(ω^2 モデル)を適用すること等を考えあわせるならば、近似的にコーナー周波数に対応するものといえる。従って卓越周波数を用いて、近似的なクラック半径、応力降下量の推定が可能となる。

今回のデータについて、Sato and Hirasawa(1973)⁽⁶⁾の剪断型クラックモデルを用い、 $v/\beta=0.7$ (v は破壊の伝播速度、 β はS波速度)にとると、クラック半径が5~10mmと求められる。一方応力降下量については、センサーの感度測定を行っていないため絶対値を決めることは出来ないが、解析されたAEの振幅がほぼ等しいことを考慮し、相対的には卓越周波数のみに依存するものと考えてよい。こうして軸圧(σ_2)と応力降下量の関係を探るため卓越周波数 F_p と σ_2 の相関をFig 9 にとってみた。図で白丸がコンクリートNo. 2、黒丸がコンクリートNo. 5である。これによると、軸圧の高い場合、卓越周波数が顕著に上昇する例もあるが、一方低軸圧時に較べ変

化のないものもある。従って、定性的には、前に述べた楠瀬ら(1978)⁽²⁾の結論と一致するといえるが、自然地震の応力降下量の分布について著者の一人、長谷川の報告⁽⁷⁾にあるように分布の型が変化している可能性も考えられる。

なお減衰をあらわすQ値について、卓越周波数よりも高域で、AEのスペクトルが平坦になるようにして求めてみると、 $10 < Q < 20$ が各供試体のP波について得られる。なおコンクリートの場合、軸圧によ

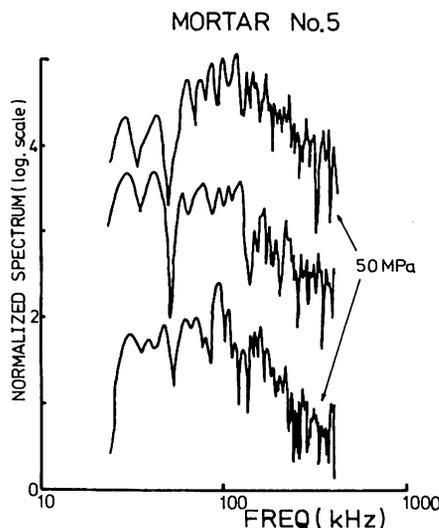


Fig 8 (a)

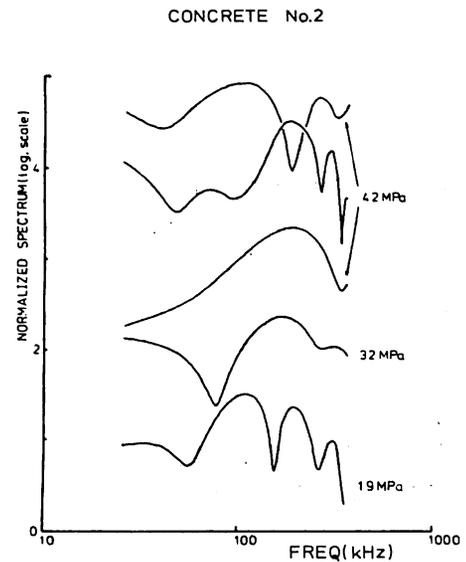


Fig 8 (b)

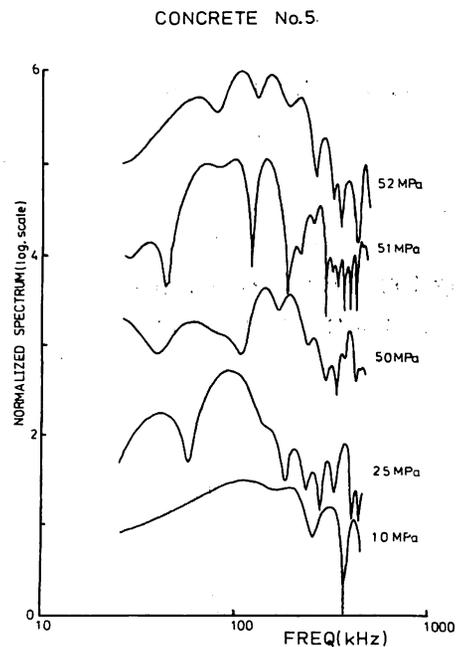


Fig 8 (c)

Fig 8. Fourier spectra of acoustic emissions (a) Mortar, (b) and (c) Concrete

ってQ値が変化することはなかった。

§ 4. お わ り に

モルタルおよびコンクリートのAE測定を行なうため、標準的なサンプルを作成し実験を行なった。測定は、サンプルの変形、AEの振幅別頻度分布、スペクトルを目的としており、第一段階として次のような結果を得た。

- (1) 石本一飯田のm値は差応力の増加に伴ない減少する傾向がみられる。
- (2) 強度の小さいサンプルのm値は、強度の大きいものに比較し大きい値を示めす例がある。
- (3) 剪断型クラックモデルに従うと、解析されたAEのクラック半径は5~10mmである。
- (4) コンクリートの例で、高軸圧時において、卓越周波数の高い、即ち応力降下量の大きいAEの発生が認められる。

なお ω^2 モデルを仮定するとQ値は10~20であり、コンクリートの例では、応力依存性は認められない。

本報告は、実験を開始し最初のものであり、殆んど定性的な議論に終始せざるを得なかった。従って今後データの蓄積を行ない、議論を深めていくつもりである。

謝 辞

本研究を始めるに当たり、有益な御教示、励ましを贈った東北大学理学部の鈴木次郎教授、高木章雄教授に深く感謝致します。

また同学部地震予知観測センターの平澤朋郎教授、山本清彦博士、楠瀬勤一郎博士（現在、地質調査所）には、実験全般にわたる有益な議論をいただきました。さらに、供試体の作成に当たり本校土木工学科の庄谷征美助教授には懇切な御指導をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

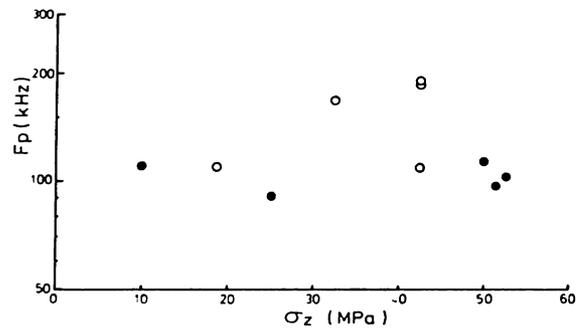


Fig 9. Predominant frequency of AE spectrum versus axial stress. The open circle and the solid circle indicate concrete No. 2 and 5, respectively.

参 考 文 献

- 1) 例えば、茂木清夫, 材料, 23, 248, 2-13, 1974
- 2) 楠瀬勤一郎・山本清彦・平澤朋郎, 地震学会講演予稿集, No. 1, 227, 1978
- 3) O・G・Shamina, Bull. Acad. Sci. USSR., No. 5, 513-518, 1956
- 4) 大中康誉・茂木清夫, 地震学会講演予稿集, No. 1, 63, 1979
- 5) 山本清彦・楠瀬勤一郎・平澤朋郎, 地震, 30, 477-486, 1977
- 6) Sato, T. and T. Hirasawa, J. Phys. Earth, 21, 415-431, 1973
- 7) 長谷川武司, 地震学会講演予稿集, No. 2, 97, 1979