

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(II)

長谷川 武 司・伊 藤 哲 也*・長 岡 信 一*

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

Takeshi HASEGAWA, Tetsuya ITO, Shin-ichi NAGAOKA

(昭和57年10月30日受理)

Summary

The focal process of acoustic emission (AE) is examined for an uni-axial compression test of mortar formed specific fine aggregate. In order to make an exact study for AE wave characteristics, a response of AE detection system and an attenuation of sample are tested. The transfer function, between sample and endpiece, seems nearly flat response more than 0.3(stress/fracture strength). The Q-value is independent to axial stress less than 90% of fracture strength and estimated as 18 ± 2 .

The Kaiser effect is detected for 3 samples. P wave velocity spectra indicates predominant frequency, clearly. This frequency seems to be constant for each sample and to suggest the size of inclusion.

1. は じ め に

圧縮応力下において、コンクリートやモルタルは岩石と同じように、最終破壊応力よりも小さい圧縮応力段階から微小破壊が起こり、これに伴う弾性波(AE波)を発生する。これは、コンクリートやモルタルが岩石と類似の性質を持つことに依るが、これらに発生するAE波の発生様式を自然地震の発生機構と関連づけた研究は少なく、殆んど非破壊検査の一手法として工学的見地からの研究が主なものとなっている。〔例えば、小林・大津(1978)〕

この理由は必ずしも明らかでないが、例えばコンクリートやモルタルの圧縮強度が自然の岩石に比較し低いこと、空隙率が10~20%にも及ぶことからAE波発生の機構が複雑と考えられることその他、自然地震の発生する地殻内の岩石と物質が異なることなどが挙げられる。しかし、最近では大型構造物や長大構造物の建築用材料として軽量かつ堅ろうなコンクリートが要求され、空隙率が十分に小さく強度がほぼ自然の岩石に匹敵する製品も開発されている。従

って、前述の困難さは、第三の点を除き回避され得るものであり、むしろ初期荷重を考えなくてもよいこと、実験的に合わせ整形しやすいこと、破壊強度を人為的に変化させ得ること等によって、コンクリートやモルタルは有用な実験材料というべきである。

本文は以上の観点により、モルタルを供試体とし粒径の異なる細骨材を含む場合の、一軸圧縮応力下におけるAE波の特性を論ずる。

2. 実 験 方 法

コンクリートやモルタルは、物理的・化学的に安定な骨材をセメントペーストによって固めた複合材である。従って、準巨視的にみた場合、この複合材の最大の弱点は骨材周辺部であり、比較的軸圧の段階で生ずるAE波の発生源は、ここに原因があるとされている。〔藤田・佐伯(1978)〕

そこで、骨材のサイズの範囲が異なる供試体を作成し実験するならば、AE波発生のパターンや更には破壊強度に差異の出ることが期待される。供試体の作成に当たり、骨材は0.148, 0.297, 0.59, 1.19,

* 機械工学科第12回卒業生

2.38, 4.76の6種類のフルイによって分類され、水-セメント比40%, 砂-セメント比1.4を目標とした。混合比および供試体の名称と骨材粒径範囲をTable1に示す。

供試体は、セメント強度試験で使用される4cm×4cm×16cmの直方体であり、打込後24時間湿処理され、続いて150日間水温20°Cの水槽において水中養生された。

供試体に加える荷重は、手動式のコンクリート試験機を用い、約600kPa/minの割合で応力を増加させた。全ての実験でAE計数率におけるカイザー効果を調べる為、載荷は2回に亘って行なわれ、初荷重時は破壊強度の60~80%, 再荷重時は破壊する迄とした。最終破壊時における供試体の形状をFig. 1に示す。これによると、最終破壊時のクラックは圧縮方向に対し約20~30°の傾きを有しており、一方、加圧板を接する端部の崩落も比較的少ないと見られることから、圧縮力はほぼ一様に供試体へ加えられたと考えられる。

AE波測定系については、前報(長谷川他, 1980)とはほぼ同様であるが、AE変換子を感度校正されたAE-906U(NF社製、共振周波数1.5MHz)としたこと、アンプの増幅度を20db上げ60dbとしたこと、

AE事象率の計数における比較電圧を入力換算値で90μVに設定したこと、が変更された点である。

3. 実験結果および解析

(1) 弾性定数

供試体の変形は、側面に直接接着された歪ゲージにより測定され、応力-歪曲線より弾性定数が求められた。Fig. 2はMR-1における応力-歪線図であり、黒丸は縦歪、×印は横歪、三角印は体積歪をそれぞれ表わす。これによると初荷重時、再荷重時のいずれも傾きの等しい曲線であることが判る。この特徴は、他の供試体についてもほぼ同様であり、ヤング率 2.3×10^{10} N/m², 体積弾性率 1.3×10^{10} N/m², ポアソン比0.2が平均値として得られる。従って、密度の平均値2.2 g/cm³を上記の弾性定数と組み合わせP波速度として3.4 km/secが期待される。

一方、P波速度は発振子と受波器により独立に測定された。Fig. 3は、圧縮試験に用いた供試体と同一条件の下で作成されたモルタル試料を2cm, 4cm, 8cmの長さに切断し、これらを組合わせて測定された走時曲線である。図で明らかなように、P波速度は各供試体についてはほぼ同じ4.1 km/secとなる。この

Table 1. Mix proportion of sample and range of size of inclusion(fine aggregate)

| SAMPLE | UNIT CONTENT(kg/m ³) | RANGE (mm) |
|--------|----------------------------------|------------|
| MR-1 | Water 303 | 0.15 ~ 0.3 |
| MR-2 | Cement 700 | 0.3 ~ 0.6 |
| MR-3 | Sand 1002 | 0.6 ~ 1.2 |
| MR-4 | | 1.2 ~ 2.4 |
| MR-5 | (W/C=0.43; S/C=1.4) | 2.4 ~ 4.8 |

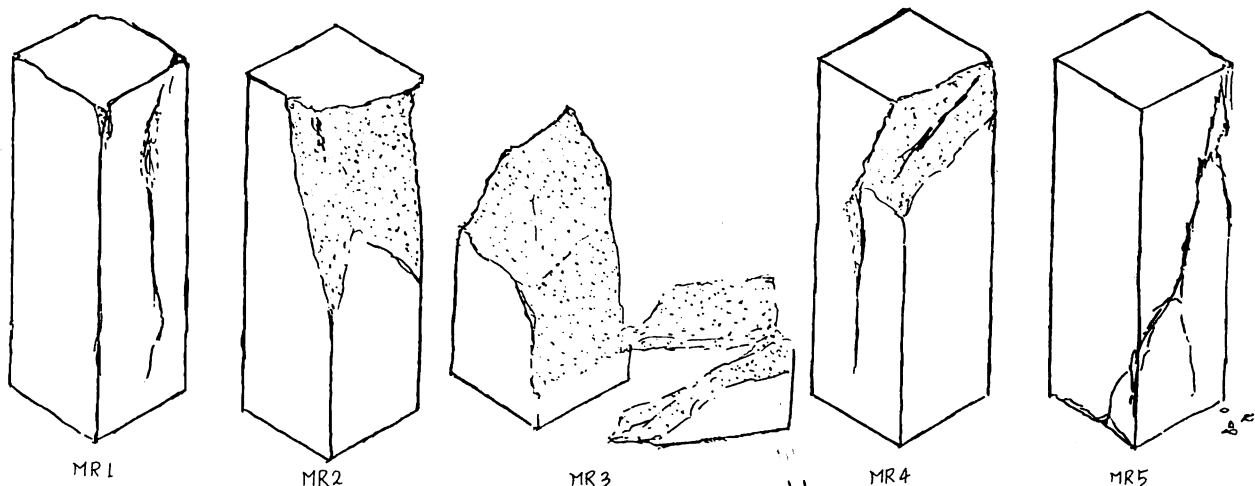


Fig. 1 Fractured sample

値は、静的荷重による値に比較し約20%大きく、P波速度より見積られる弾性定数が大きいことを示している。即ち、弾性定数の時間依存性がみられるといえる。

(2) 測定系の伝送特性および供試体内のQ値

AE変換子は、供試体上部に接する加圧板となっている当て金中に取り付けられている。AE波は、供試体内部を伝播し、当て金を経て変換子に入るがその波長がミリメートル及至センチメートルの桁である為、供試体と当て金の接触が十分に良くなければ、見かけ上振幅は載荷荷重に依存することになる。

観測されるAE波のフーリエスペクトル $U(\omega)$ は一般に次式によって与えられる。

$$U(\omega) = S(\omega) \cdot I(\omega) \cdot T(\omega) \cdot P(\omega) \quad (1)$$

ここに、 $S(\omega)$: AE源の時間関数スペクトル

$I(\omega)$: 観測系の周波数特性

$T(\omega)$: 供試体・当て金間の伝送特性

$P(\omega)$: 供試体内部における波の減衰特性

AE振源として、AE変換子を送波器とする擬似AE源を使用するならば、その特性 $S(\omega)$ は明らかであり(長谷川, 1982)しかも載荷荷重の影響を受けない。また $I(\omega)$ についても荷重の影響はない。しかるに、 $P(\omega)$ は供試体内部にクラックが発生し成長することに伴ない変化することが予想される。従って、載荷荷重の各段階において、 $U(\omega)$ を求め、基準となる荷重時におけるフーリエスペクトルとの比をとると、この比のスペクトルには、 $T(\omega)$ および $P(\omega)$ の影響が含まれると考えられる。Fig. 4は、擬似AE源による受波信号スペクトルの荷重依存性を調べたものであり、荷重の代わりに破壊強度で正規化した σ_N で示してある。図によれば、応力の増加に伴ない振幅値が変化するのみであり、スペクトルの全体的なパターンには変化が見られない。即ち、(1)における $T(\omega)$ は周波数に殆んど依存せず、荷重の増加に伴ない定数のみの変化であること、 $P(\omega)$ は $\sigma_N \approx 0.9$ までは変化が小さいこと等が判る。振幅値の応力による変化を見る為、50kHzより1MHzの間のスペクトル振幅を $\omega_N = 0$ における各値で正規化しプロットしたものをFig. 5に示す。図によれば、低軸圧時($\sigma_N < 0.3$)で振幅値は応力の増加に伴ない増大するが、 σ_N が0.3以上ではほぼフラットになる。従って、振幅値を用いたAE波の特性に関する定量的な議論は、 σ_N が0.3以上で行なうことにする。

AE波の減衰特性を示す $P(\omega)$ は

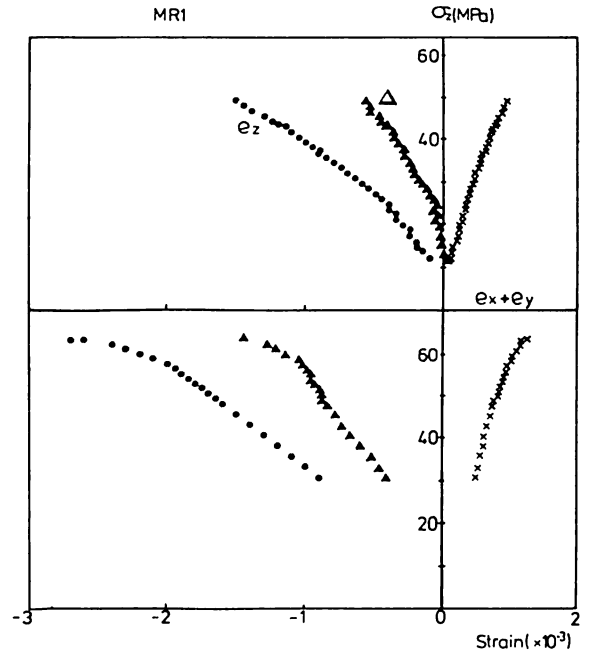


Fig. 2 Stress-strain behavior of sample in pre-failure stage. Upper is first run and lower is second run. Solid circle, cross and closed triangle indicate axial strain, tangential strain and volumetric strain, respectively.

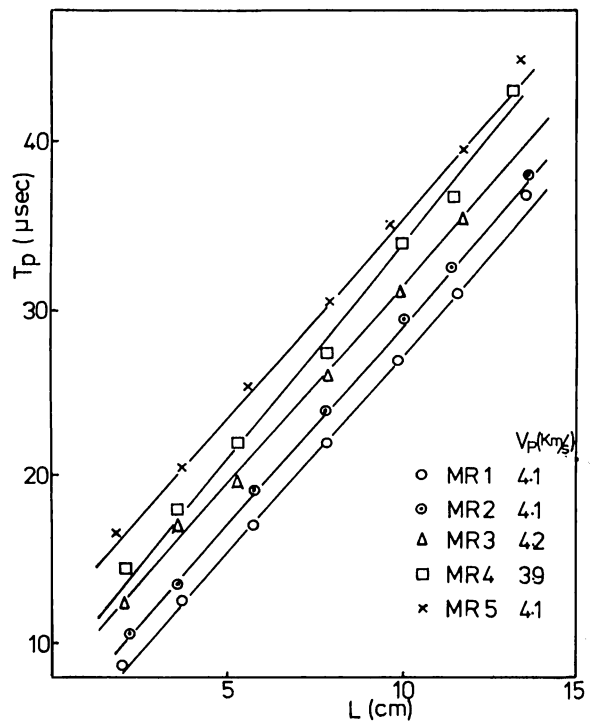


Fig. 3 P wave travel time data. The straight lines correspond to average dt/dL for each sample.

$$P(\omega) = G \exp(-\omega T/2Q) \quad (2)$$

で表わされる。ここに、 G は波面の拡がりによる幾何学的減衰項、 T は波の走時、 Q は振動吸収係数である。供試体内を伝播するP波速度は、既に求められており、 G は波動の種類と距離で決まる量であるから、(2)を用いて周波数領域で Q を求めることは可能である。しかし、ここではより簡易な時間領域における振幅値から Q を決めることにする。

媒質内を伝播する弾性波の振幅は、振源より距離 r の点で次式で表わされる。

$$A(r) = A_0 r^{-n} \exp(-\omega T/2Q) \quad (3)$$

ここに、 A_0 は振源における振幅値、 n は距離によるてい減率をそれぞれ表わす。擬似AE波は、供試体下部の当て金中にある厚み3.7mm、直径10mmのチタン酸バリウム振動子から送られており、供試体から見たAE源は点振源と考えてよい。また、この振動子による最大パワーの波は300kHzであることから、供試体内での波長は約1.3cmとなり伝播する波は球面波で近似してよい。このことを(3)によって考えると、P波初動の振幅 A_i と距離 r_i を両対数グラフ上で表わした場合、 $\omega T/2Q$ が小さければほぼ直線的にプロットは並ぶはずである。Fig. 6は、各供試体についてこれを調べたものであり、振幅および距離は2cmの長さでの値を用い正規化されている。またMR-5については測定ミスがあり除いた。このデータから、距離によるてい減率を求めると $\bar{n} = 1.37$ となり、球面波による値 $n = 1$ に比較し大きいことが判る。即ち、この差が Q によるものであり、最小2乗法を用いて決めてやると $Q = 18 \pm 2$ となる。この値は、長谷川ら(1980)によるコンクリートに関する $Q = 10 \sim 20$ と調和的である。

(3) AE計数率

Fig. 7にAE計数率を示す。図で白丸は初荷重時、黒丸は再荷重時におけるものであり、計数率に変動がない場合は、各供試体の破壊強度で正規化された応力 σ_N でおおよそ0.05間隔にプロットしてある。初荷重時における計数率は、いずれの供試体についても50~100個/分であるが、MR-5は $\sigma_N = 0.7 \sim 0.8$ の間に局所的破壊と見られる急激な上昇がある。再荷重時において、MR-1~MR-3にはカイザー効果と思われる計数率上昇が現われている。しかし、局所的破壊を起したMR-5および初荷重時に応力を0.8以上迄上昇させたMR-4については、全ての

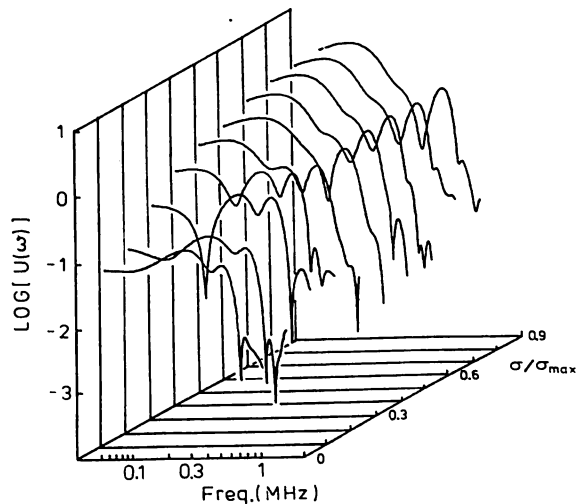


Fig. 4 Stress dependence of observed spectra on P wave caused by artificial AE source. Stresses are normalized by fracture strength(σ_{max}).

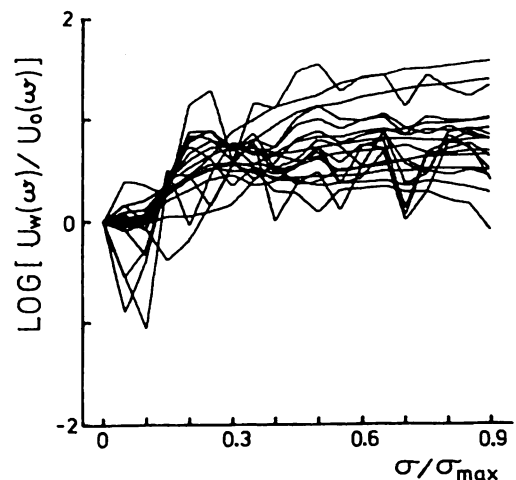


Fig. 5 Variation of spectral amplitudes versus normalized stresses. Amplitudes are normalized by the values under $\sigma/\sigma_{max} = 0$.

供試体に共通の傾向である0.8以上での計数率の急激な増加に覆われカイザー効果は不明である。AE計数率は、供試体内部に生ずるクラックの数と対応する。初荷重時における計数率のレベルはMR-5が最も高く、MR-1~MR-4ではほぼ同程度である。従って、粒径の大きい骨材を含む供試体は、人為的に弱点を多く作り出すのに適しているものと考えられる。

(4) AE波形のスペクトル解析

AE波形は、7ビットのデジタルメモリーによ

って、ディレイストップモードと呼ばれる方式で記録された。これは、メモリー内のアンプで設定されるトリガーレベルを越えた振幅のAE波が観測された場合、あらかじめ決められたワード数だけその前後が記憶される方式である。実験では1読み取り値当り0.2 μ sに設定した為、トリガー前25.6 μ sトリガー後25.6 μ sの記録となった。こうして得られた記録は、前田(1979)とほぼ同様な手法で一度FM方式のデータレコーダを用いて磁気テープに記録された。なお、MR-2についてはデータレコーダに記録する際にミスがありAE波形が録れなかった。従って、以下ではMR-1, 3, 4, 5のデータについて述べる。

Fig. 8はMR-3における初荷重時(左側)および再荷重時(右側)に発生したAE波形とその速度スペクトル例である。応力 σ_N の範囲は、初荷重時が0.3~0.5, 再荷重時が0.7~0.9であり、各スペクトルにはそれぞれ卓越周波数が存在する。この卓越周波数は、AE発生メカニズムが主として張力型クラックによるにせよ、剪断型クラックによるにせよ、その発生源のクラックの拡がりに関連する量である。 $\sigma_N \geq 0.3$ において解析されたAE数は全体で445個である。これらに対するクラックの大きさ分布や、応力降下量分布については次報で詳しく論ずる予定であり、ここでは卓越周波数と応力レベルの関係を調べることにする。Table 2に各供試体での解析値を示すがここに見られるように卓越周波数はMR-5を除いて、350kHz~400kHzの間にあり、その標準偏差は小さい。この傾向はAE計数率において見られたMR-5の特異性と密接に関係していると考えられる。すなわち、粒径の大きな骨材を使用したMR-5では、クラックが一度生成されると骨材の寸法で規定されるある範囲まで容易にクラックが成長し、これによる応力集中が次のクラック発生に関与するのであろう。 σ_N が0.7~0.8の段階で発生した急激なAE計数率の上昇は、この一連の繰り返しが集中的に起きたと見ることが出来る。なお、各供試体においてそれぞれ固有の卓越周波数が存在すると見られ、クラックの拡がりに下限のあることを示唆しているのかもしれない。

4. おわりに

粒径の異なる骨材を使用した、5種類のモルタル供試体を作成し、一軸圧縮応力下におけるAE波の特性を解析した。

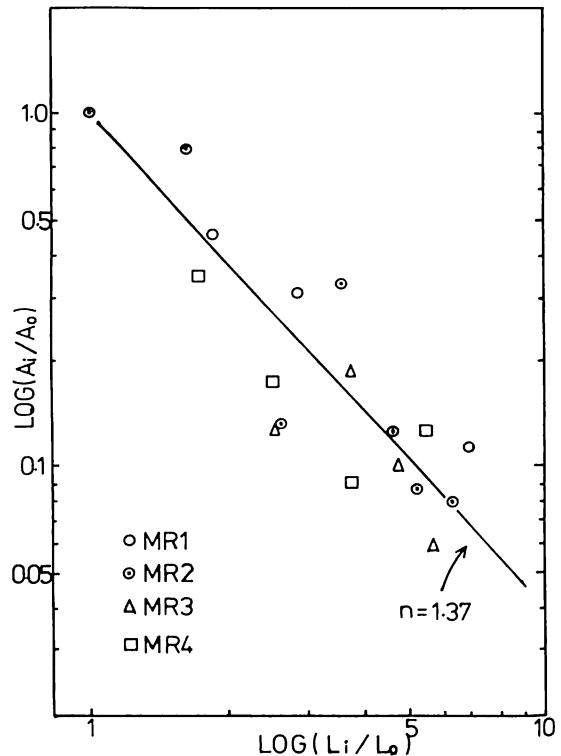


Fig. 6 Relation between amplitude of initial motion and distance from source to receiver. The straight line denotes attenuation factor n in equation(3).

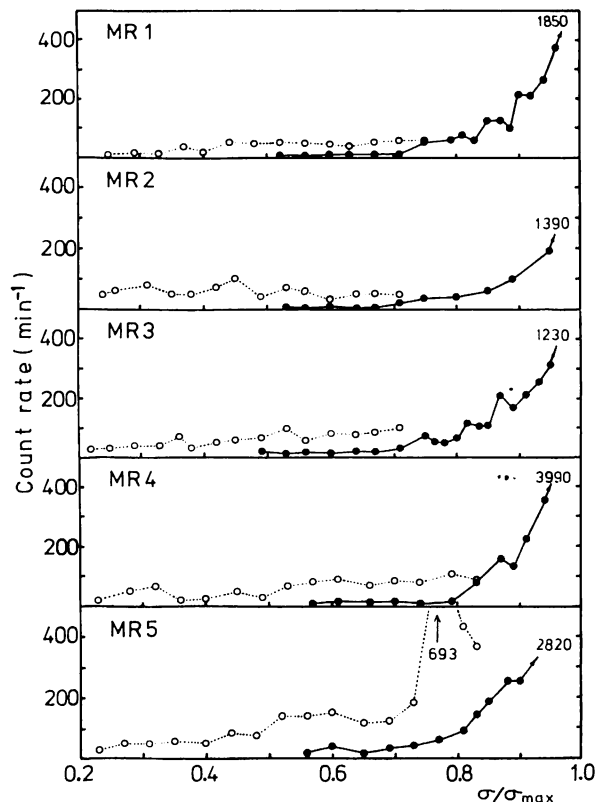


Fig. 7 AE count rate. Open circle and solid circle indicate the data derived from first run and second run, respectively.

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(II)

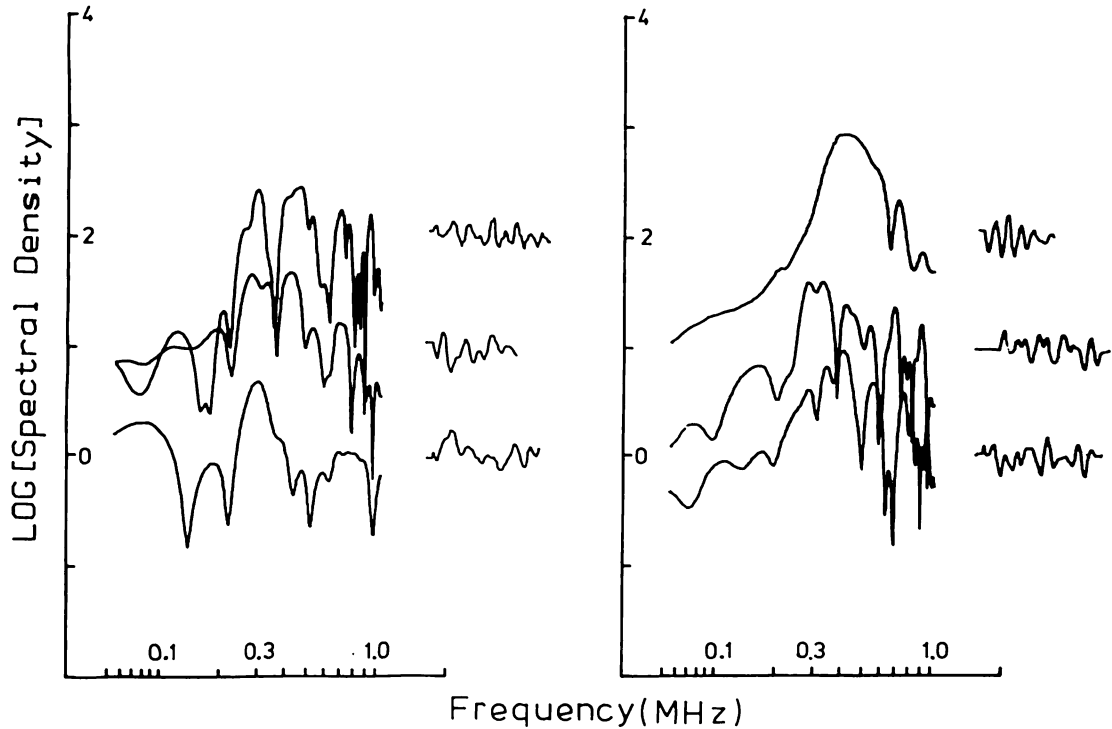


Fig. 8 Examples of AE waves and those spectral density of velocity.

Table 2. Average predominant frequencies (kHz) derived from velocity spectrum of AE waves.

| $\sigma_N(\sigma/\sigma_{max})$ | MR-1 | | MR-3 | | MR-4 | | MR-5 | |
|---------------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| | 0.35 | 361 | — | — | — | — | — | 318 |
| 0.45 | 379 | — | 372 | — | 354 | — | 277 | — |
| 0.55 | 368 | — | 381 | — | 376 | — | 239 | — |
| 0.65 | 423 | — | 402 | 384 | 351 | 353 | 275 | — |
| 0.75 | — | 413 | — | 384 | 330 | 372 | 235 | 212 |
| 0.85 | — | 386 | — | 386 | 392 | 366 | 250 | 223 |
| 0.95 | — | 360 | — | 352 | — | 334 | — | 259 |
| Average | 388* | 376** | 388* | 374** | 361* | 351** | 261* | 224** |

* first run
** second run

実験は、供試体の変形と弾性定数を調べ、P波速度の測定値から推定される弾性定数とオーターでは同じがやや小さいことを明らかにした。次に、供試体・当て金間の伝送特性は、破壊応力の30%以上では余り変化がないこと、供試体内における波の減衰特性は、破壊強度の90%までは変化が無く、Q値として 18 ± 2 であることを明らかにした。

AE波の特性では、AE計数率および卓越周波数を調べ、カイザー効果が3種類の供試体で見られたこと、最大の粒径の骨材を含む供試体では、計数率、卓越周波数ともに他の供試体と明らかに異なった傾向をもつことが判った。

なお、AE波の地震学的手法による解析は次報で論ずる予定である。

謝 辞

本稿をまとめるに当り、東北大学理学部地震予知観測センターの平澤朋郎教授、山本清彦博士からは種々の議論をして載しました。

供試体の作成、コンクリートやモルタルの一般的な性質に関し、本校土木工学科の庄谷征美助教授から種々の指導や助言を載しました。

記して深甚なる謝意を表わす次第です。

参 考 文 献

- 藤田嘉夫・佐伯 昇, コンクリート工学, vol.16,
No.11, 1—9頁, 1978
長谷川武司・藤嶋幸成・武藤正文, 秋田高専研究紀
要, No.15, 27—34頁, 1980
長谷川武司, 地震学会講演予稿集 (1982, No. 1,
210, 1982
小林昭一・大津政康, コンクリート工学, vol.16,
No. 7, 9—17頁, 1978
前田 亟, 地震第2輯, vol.32, No. 3, 233—241
頁, 1979