

岩石微震音に関する研究^注 (第1報)

— 一軸圧縮破壊過程におけるその発生特性について —

土木課 前 郁 夫
江 頭 正 州

Experimental Study on Micro-Seismic Noise of Rocks (Ist Report)

— Generation Characteristics of its under Uniaxial Compressive Load —

by Ikuo MAE
Masakuni EGASHIRA
(Civil Eng. Section)

Stressed rocks in instability produce sub-audible noises (micro-seismic noises) and they are related with destruction of rocks.

In order to establish the forecasting method for roof falls in tunnelling works or slope failures in excavation works by detection of the micro-seismic noise. The fundamental study is made in the laboratory.

The paper describes the results obtained from the experiments of the micro-seismic noise during destruction of rock samples under the laboratory condition.

The main results are summarized as follows.

The relationship between occurrence of the micro-seismic noise and load (stress) depends on the properties of the rocks. The frequency distribution of number of the micro-seismic noise with respect to the energy possesses a statistical regularity, and it is expressed following statistical equation:

$$n(e) = k \cdot e^{-m}$$

where e is energy of the micro-seismic noise, $n(e)$ is number of micro-seismic noise having energy e and k and m are both constants.

In above equation, m differs for various rocks and depends on deformation rate during the process of destruction.

It is suggested that value m is an important index for predicting rock failures.

1. 序 論

最近のトンネル建設技術は、施工法の改良、とくに機械化工法、鋼アーチ支保工の全面的採用等により著しい進歩を遂げてきた。これと同時に、これまでしばしば発生していた落盤災害も年々減少の傾向をみせている。しかしこの種の災害を完全に防止するまでには至っていない。落盤はトンネル掘削に伴い、その周辺の地山の局所的な破壊、崩落とみることができる。しかるに、現段階においては、掘削に伴う周辺応力の変化、応力そのもの大きさ、支保工に作用する土圧等に関する問題は充分解明されていない。これは対象が自然の岩盤あるいは地層で

あり、地質構造の複雑性、不均一性等にその因がある。

したがって落盤の発生の可能性の判断が岩石の層理、節理、風化の程度、あるいは支保工への荷のかかり方、支保工の変形といった、外見的なものについてなされ、しかも責任者個人の経験やカンに頼らざるを得ない現状で、これが落盤災害発生の大きな原因となっている。

地山、あるいは岩盤の安定、不安定の状況を何等かの方法により察知し得ることができれば、上述の判断は、客観性のある、確実なものとなり、落盤の災害防止に非常に有効であると考えられる。

この手段の一つとして岩石微震者の利用がある。一般に材料の破壊には、ある種の衝撃の音響を伴う。岩石のような脆性物質の破壊に際しては、とくにこの現象はいちじるしい。しかし、破壊の際に限らず、応力をう

注) 土木学会 第19回および第21回年次学術講演会において一部発表

けている岩石では微少な振動をその内部から放出する、という現象が知られている。

この振動を岩石微震音 (Micro-Seismic Noise) と名付ける。微震音の発生機構は、およそつぎのように考えられる。すなわち、荷重をうけた岩石は、弾性、塑性歪やその他のかたちで、内部にエネルギーが蓄積される。このとき岩石のような不均質な物質では、局所的な弱点が内部に介在するため、応力集中が起り、微少な局部破壊を生ずることになる。このとき同時に歪エネルギーの解放が行われ、これが一種の衝撃的な振動となって伝播、放出される。このように微震音は、岩石の局部微少破壊に伴って発生する衝撃的弾性波と考えられ、これが可聴周波数を有することから、増巾することにより可聴音として検出することが可能となる。

微震音に関する研究は、1940年代に米国鉱山局応用物理研究所の R. Overt 博士らが、ある実験の過程で、落盤の発生の前に微少な振動を検出し、これが落盤と関連があることが確認されたことから始まった。彼等はその後の実験を続け、とくに金属鉱山の鉱柱の安定度などについて、微震者の検出による判定を試み、成果を得たという報告もある。しかし、落盤の予知を完全になし得るまでには至らなかったようである (文献 1, 2)。その後1950年に至り、同じく米国ニューヨーク州のイーストデラウェアトンネル建設工事において Crandell が微震音の検出を試みた。地質は主として砂岩、真岩等の軟岩であったが、微震音が検出され、その発生頻度が増加したときに落盤が起ったこと、また支保工の補強によってその発生頻度が減少した事実などから、この方法が落盤防止に有効であったと報告している (文献 3)。

最近、わが国においても、地震の予知の研究の一環として、東大、地震学研究所の茂木博士は岩石の破壊に関してこの種の研究を行った報告がある (文献 6)。鉱山の方面でも坑内の保安対策上から、同様な研究が進められている (文献 9~10)。特に最近では、ソビエト、チェコスロバキアの石炭坑山においてこの種の研究が積極的に行われている (文献 7)。

この他、コンクリートのひびわれの検出に関して、音響的観測による類似の研究が行われている (文献 11)。

上記の研究報告によると実験の方法や、その結果も、それぞれ異っており、微震音の発生特性なども充分に解明されていないように思われる。

本研究の目的は、岩石微震音の発生特性を究明し、トンネル建設工事における落盤の予知や、掘削工事における崩壊の予知の実用化に有用な基礎的データを求めることにある。

この報告では、岩石の一軸圧縮破壊の過程において発

生する微震の状況、発生パターン、および微震音のエネルギー別発生頻度等を明らかにし、これらと岩石固有の性質との対応について考察した。

2. 実験装置および実験方法

2-1. 実験装置

2-1-1. 防音防振実験室

本実験は岩石破壊過程において生ずる微少な振動を捉えることが主力となっており、岩石の近傍に騒音源、振動源がある場合測定不能となるため、岩石圧縮試験装置を設置する場所は防音防振構造のものとした。

2-1-2. 岩石圧縮試験装置

岩石専用の圧縮試験装置を特に設計したがこの特徴は岩石のような圧縮強度の高いものが対象であるだけに300トンの圧縮能力をもたせた。高能力であると同時に防音防振室に設置することから小型化する必要がある。在来の圧縮試験機とは異ったフレーム構造のものとした、荷重の制御はリモートコントロールとし別室に操作盤を設けた、また電動油圧ポンプも騒音、振動源となるため、操作盤よりもさらに離れた場所に分離設置した。

2-1-3. 微震音検出、記録再生装置

微震音の検出装置としては、圧電型のピックアップを使用した。これを、岩石試料の側面に合成樹脂により接着したこのピックアップは岩石の内部からの振動を加速度として取出す方式で、感度は500mV/Gである。

これに前置増幅器および増幅器として、振動計各2チャンネルを用いた。

発生する微震音は再現性がないので、これをすべてデータレコーダーに記録した。使用したデータレコーダーは4チャンネル同時録音可能で、うち3チャンネルはDR方式、1チャンネルはP.W.M方式である。

2-1-4. 微震音自動計数装置

データレコーダーに記録された微震音は、実験後再生し、各種の解析データをとるため、自動計数装置を開発した、これはレコーダーの再生信号を受信し、任意に設定されたレベル以上のもののみを計数し電子管表示を行うもので、更にこの微震音は後述するように急激に減衰するような多数の合成振動であるため、その中の最大振幅のもののみを計数するような機構をもっている。

2-1-5. その他の装置

この他、微震音の波形を観測する装置として、二素子ブラウン管オシログラフ、微震音の周波数分析を行う万能フィルター、直視型周波数アナライザー、荷

重の変化を記録する電気抵抗線歪計を応用したロードセル及び自動平衡型記録計等である。

以上の実験装置をブロックダイアグラムで表示したものが次の図-2-1であり、図-2-2、図-2-3は装置を示す写真である。

Fig. 2-1 Block-diagram of the measuring system.

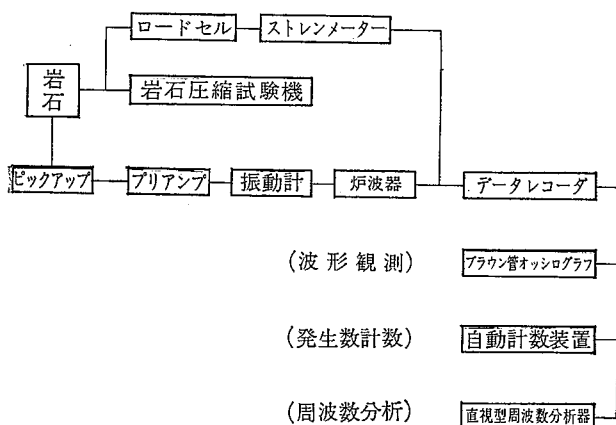
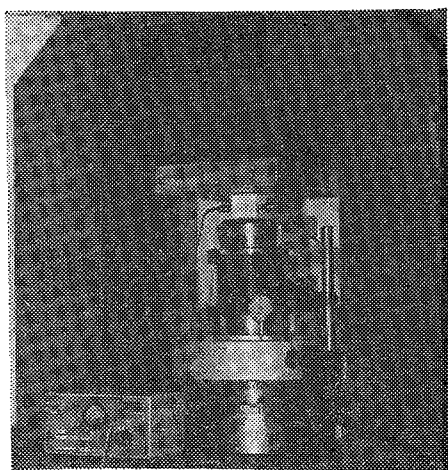


Fig. 2-2 Rock specimen mounted in test machine.



2-2. 実験資料

Fig. 2-3 Detecting and recording apparatus.

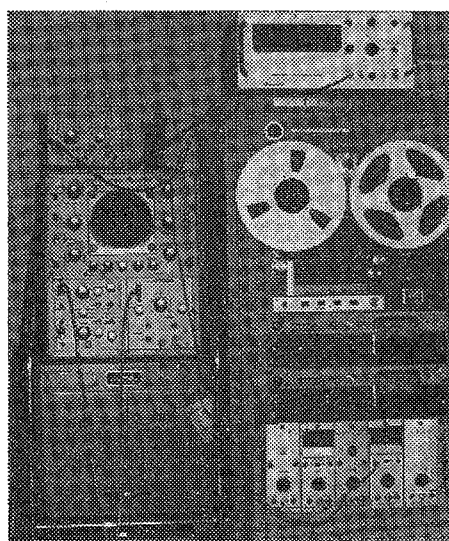


Fig. 2-3 (a)



Fig. 2-3 (b)

Table 1 Some Properties of Rock Specimens

名 称	産 地	見掛け比重	吸水率	孔隙率	試験片寸法	平均圧縮強さ	略 号
花 崗 岩	稲 田	g/cm ³ 2.62	% 0.27	% 1.14	cm 5×5×5	kg/cm ² 1,583	G
花 崗 閃 緑 岩	新清水	2.86	0.31	0.90	5×5×5 10×10×10	1,790	D
安 山 岩イ	由 良	2.43	2.49	9.82	5×5×5	724	Aイ
安 山 岩ロ	"	2.41	3.65	10.27	"	683	Aロ
安 山 岩ハ	新小松	2.51	1.79	8.09	"	937	Aハ
砂 岩	和 泉	2.56	1.41	6.30	"	1,273	Sイ
大 理 石		2.86	0.14	0.40	"	1,600	M
蛇 紋 岩		2.59	0.56	14.69	"	1,189	Se
ト ラ バ ー チ ン		2.36	1.70	4.20	"	429	T
凝 灰 岩		—	—	—	10×10×10	120	Tu
人 造 石		2.65	0.20	0.40	"	899	C

実験に用いた岩石材料は、火成岩、水成岩、変成岩など、表-1に示すものである。試料の大きさは $5 \times 5 \times 5$ cm, または $10 \times 10 \times 10$ cmで、ダイヤモンドカッターで整形し、その表面は、水みがき仕上げを施し平滑にした。試料はいずれも気乾状態で試験を行った。

2-3. 実験方法

2-3-1. 荷重裁荷の条件

試験は、すべて連続増加荷重による一軸圧縮試験とし、破壊が起るまで荷重を増加させた、荷重の増加は一定速度で行い、その増加速度は、いずれの試料についても、ほぼ一定で約 $5 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ と設定した。(註)

試料と試験機との間には吸取紙を敷き、応力の均一化を図るとともに、載荷初期における不要の摩擦雑音の発生を防止した。

2-3-2. 微震音検出測定条件

振動計の増幅度は、内部較正により、どの試験片についても、常に同一条件となる様に設定した。すなわち、振動計指示は、2チャンネルのうち1チャンネルは最大30gal, 他の1チャンネルは100galとした。このフルスケールを示す信号がデータレコーダー-VUメーターで100%になるようデータレコーダーの録音条件を統一した。この条件で録音されたものを、再生する場合、較正信号の出力を一定値(3V)に設定し再生条件も、いずれの場合にも同一とした。

これにより、微震音の増幅利得は約2000倍、すなわち60dBとなる。

2-3-3. その他の測定

微震音の発生の検出の他、この検出と同時にまたは別図に次の測定をも行った。

- i) ヤング率等の測定
- ii) 変形の測定
- iii) その他物理的性質の測定

2-4. 測定データの解析

2-4-1. 微震音の発生状況の解析

荷重の載荷直後から破壊に至るまでの間に発生した微震音について、その発生数、荷重の大きさとの関連等を解析した。この場合、記録再生された微震音のうち、最大振幅が2-3-2で述べた条件で0.5V以上のものを計数の対象とした。0.5V以下のものでも信号として検出記録されているが測定器系のノイズとの関係もあり、一応計数の対象から除外した。

0.5V以上の微震音について、次のものについて検討した。

i) 荷重～区間微震音発生数

ii) 荷重～累積微震音発生数

2-4-2. 微震音の最大振幅別発生頻度

上記0.5V以上の微震音について、その最大振幅の大きさ別に計数を行って整理した。この場合2-1-4で述べた自動計数装置によって処理した。これによって

i) 発生した全微震音について、エネルギー(最大振幅の二乗)の大きさ別発生頻度

ii) 載荷から破壊までの過程を、荷重の大きさにより4分割し、そのそれぞれの区間における、微震音のエネルギーの大きさ別発生頻度

iii) 試料の変形と微震音のエネルギー別発生頻度の関係

iv) 上記の発生頻度と、岩石の諸性質との関連等

2-4-3. 岩石の微震音の音響的解析

i) 微震音の振動波形

ii) 微震音の周波数分析

3. 実験結果と考察

3-1. 微震音の波形および周波数

3-1-1. 波 形

微震音として検出される振動波形は、図3-1にみられるごとく、急速な立ち上りを示し、かつ、減衰のはやい、振動である。この様な振動波形は、荷重が低いときに発生したもので、破壊近くに発生したものでも形状はほぼ同じであることが認められる。したがって最大振幅が大きいものは減衰時間も大きくなる。しかし立ち上りから、振動の消失までの時間はせいぜい10msec程度が普通である。ただし破壊直前になって発生するものは、これらの波形が重合あるいは連続することが多く、20msec以上となるものも検出される。

後述する微震音のエネルギー大きさ別発生頻度の解析でも明らかであるが、荷重が増大すれば、大きな微震音、すなわち、最大振幅の大きなものが目立ってくる。

岩石の種類による波形の相違は写真でみるごとく、特にはっきりとは表れてこない。

3-1-2. 微震音の周波数

微震音の振動波形は前述のように、大多数のものは10msec程度で減衰してしまい、一種の過渡的現象に類似しており、これらの振動の周波数分析は一般に困難である。

今回は、直視型周波数分析器を使用して分析を行った。これは、オーバーオールを含む中心周波数20%から

・(註)国際地圧会議事務局(東ベルリン)の提案による岩石強度試験法に関する基準によれば $5 \sim 10 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ と規定されている。

Fig. 3-1 Records of M. S. Noise.

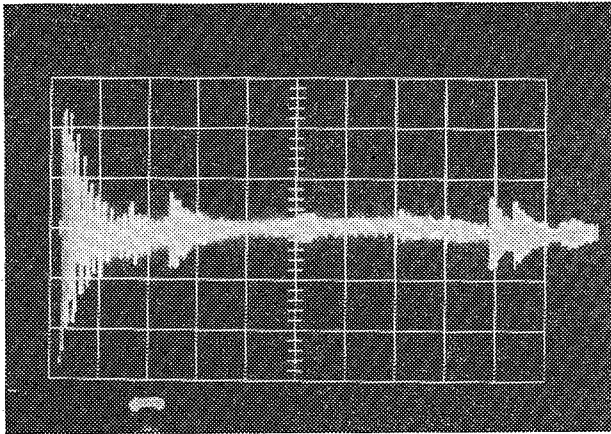


Fig. 3-1. (a) Diorite 5 msec/div

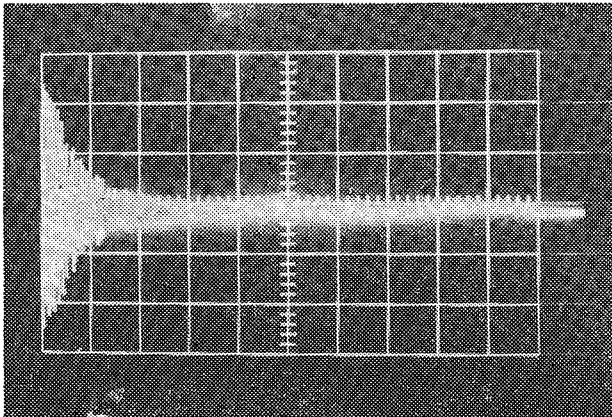


Fig. 3-1. (b) Tuff 5 msec/div

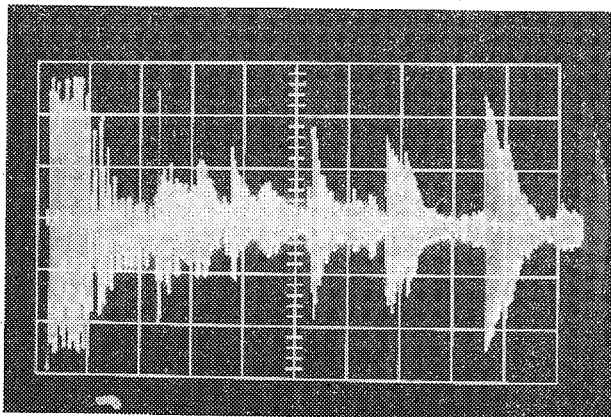


Fig. 3-1. (c) Granite 5 msec/div
Nearly Destruction

12.5kcに至る約30個のフィルターを内蔵し、このフィルターを直過した波形のレベルが、夫々ブラウン管に指示される、なお分析時間は約20msecで、一つの微震管の分析に十分な時間である。ブラウン管面に指示された分析を撮影したものが図-3-2である。

縦軸にレベル、横軸に中心周波数が示されている。全体的な傾向を知るために、多くは各荷重の大きさ毎にその間に発生した微震音の分析結果を重複させて、卓越周波数を求めた。

各種の岩石の微震音について、上記の方法により得られた卓越周波数は、表-2に示した。

Fig. 3-2 Records of Audio-Frequency of M. S. Noise.

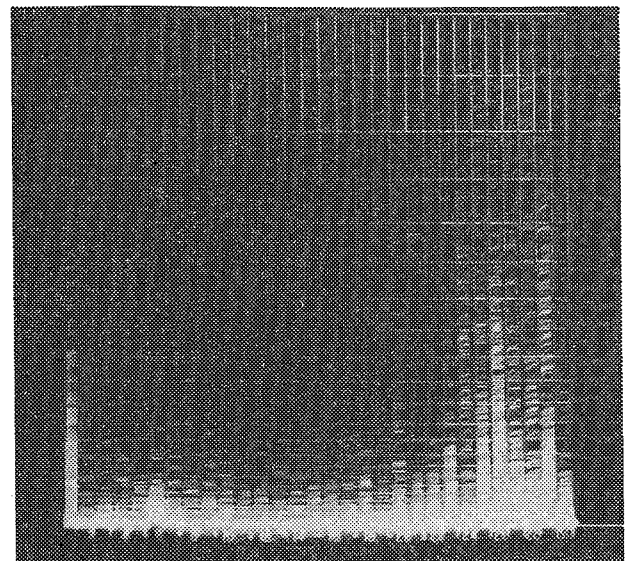


Fig. 3-2. (a) Diorite

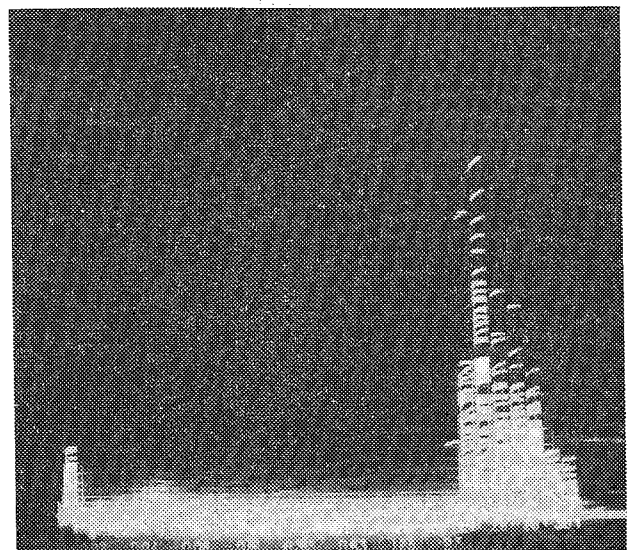


Fig. 3-2. (b) Tuff

Table 2 Audio-Frequency of Microseismic Noises

岩石種類	卓越周波数		
	初期	中期	破壊
花崗岩	2,500%	12.5kc	2~10kc
花崗閃緑岩	10~12.5kc	10~12.5kc	5~10kc
安山岩(i)	10kc	10kc	10~12.5kc
安山岩(ii)	10kc	10kc	10kc
安山岩(iii)	—	12.5kc	12.5kc
砂岩(i)	—	10kc	5,000~8,000%
大理石	2,500%	300%~10kc	2,500%
蛇紋岩	2,000%	2,500kc	2,000%
凝灰岩	6,000%	6,000kc	5,000%
トラバーチン	—	8~10kc	1,250~2,000%
人造石	—	1,000~1,250kc	500~2,000%

3-2. 破壊過程における微震音の発生形態

3-2-1. 微震音の発生と荷重の関係

各種岩石について、微震音の発生数を荷重の大きさに対応させてグラフに示したのが、以下の図-3-3である。横軸には荷重をとり、縦軸は微震音の数を示す。

荷重の大きさは、破壊荷重を100とした%で表示し、荷重0から、破壊荷重までを、ある区間に分割し、その分割された区間内で発生した微震音の数を計数しグラフを作成した。

さらに、微震音の計数のほか、エネルギーの算出を行い荷重との関係を見た。その結果、微震音のエネルギーと荷重の関係は、微震音の数と荷重との関係にはほぼ類似している。

エネルギーの算定は、発生微震音の振幅の最大値を二乗して行い、したがって各区間内での微震音エネルギーは、次式

$$W = \sum a^2$$

で表される。ここにaは微震音の最大振幅を前述のボルトの単位をもった数値である。このためエネルギーの単位はボルトの2乗の単位となるが、この場合は単に、エネルギーの量的比較を行うためのものであるので、単位そのものは問題にしていない。

この他、微震音の発生状況を示すものとして、累積微震音発生-荷重グラフを作成した縦軸は対数目盛とした。発生数を、横軸は荷重を破壊荷重に対するパーセントで表示した(図-3-4)。

i) 安山岩

安山岩(i)、安山岩(ii)、安山岩(iii)の微震音発生数と荷重の関係は、図-3-3(a)~(c)、図-3-4(a)~

(c)となる。これによると、最初に微震音が発生するのは、安山岩(i)では、20~30%附近で、50~60%附近から、発生が顕著になり、これ以上の荷重の増大とともに発生数も増加する。安山岩(ii)、(iii)については、40~50%附近で最初の発生があり、試料によって、多少の差異があるが、70%以上になって、頻発する。(ii)では80~90%になって、はじめて発生が急増する。破壊までに発生する全微震音数は、同一種類の岩石にあってもかなり大きなバラつきを示す。微震音の数と荷重の関係と、エネルギーと荷重の関係は、ほぼ同一の傾向を示している。

ii) 花崗岩

図-3-3(d)、図-3-4(d)花崗岩の発生状況を示すものである。花崗岩では、荷重初期から発生する。すなわち10~20%附近で一つのピークを有し、30~60%附近で減少の傾向があり、60~70%附近から再び増加傾向を示す。

iii) 花崗閃緑岩

この岩石では、花崗岩で示されたと同様の傾向の載荷初期に発生し、その後減少し、70%附近から増大するものと、初期にはほとんど発生をみないで、40%附近から発生しはじめ、次第に増加し、80~90%附近から急増する型のもの、この他、初期から徐々に増加をみせるもの、40%附近で発生し、その後発生せず、80%附近から急増するもの等、種々の型がみられ、統一的形態を示さない。

全微震音数は、2,000~4,000にも達する程の多くの発生をみる。図-3-3(e)、図-3-4(e)

iv) 大理石

破壊荷重の約を超える頃から、微震音の発生がみられるが、その数は余り多くない。80%を超えて、頻発する傾向にある。しかし、その全発生数は、花崗岩、安山岩に較べて非常に少く、100~200程度である。図-3-3(f)、図-3-4(f)

v) トラバーチン

この岩石は、石灰質の溶液から化学的に沈澱した石灰岩の一種である。

発生数も初期に僅かみられ、80%附近から発生数がふえるが、破壊まで、ほとんど発生しないものである。したがって全発生数も非常に少いのが特徴である。図-3-3(g)、図-3-4(g)

vi) 蛇紋岩

荷重初期から、若干の発生をみるが、全体的にみると、僅かなものである。ほぼ50%附近から頻発する傾向にあり、破壊に近づくにしたがって急増するが、途中一時増加が鈍ることがある。全発生数は、

大体 1,000 以上である。図一 3-3 (h), 図 3-4 (h) vii) 凝灰岩 (大谷石)

この岩石は、周知の如く多孔質の軟岩である。これは、荷重初期から、多くの微震音の発生をみる。荷重の初期 20% 以内に一つのピークがあり、その後荷重の増大とともに、発生は減少する傾向がみられた。そうして破壊荷重に近づくにつれて再び発生数は増加する。図一 3-3 (j), 図一 3-4 (j)

viii) 砂岩

砂岩と称せられる岩石も、多種多様なものがあるが、本岩石は、細粒の粒度配合もかなり良く、緻密な岩石である。強度的にも最強の部類に属するものと思われる。

この岩石では微震音の発生は 70% 附近までほとんどなく 70% 附近から発生しはじめ、その後破壊までに急激に発生数が増加する。図一 3-3 (i), 図一 3-4 (i)

ix) 人造大理石

この試料は石灰岩を高圧、高温下で圧着したものである。40% 附近から僅かに発生をみるが、再び発生がなく、90% を超えた附近から頻発する傾向にある。全数としても非常に少く、せいぜい 100 個位のものであった。

3-2-2. 岩石の種類による微震音の発生形態。

荷重と微震音の関係は、以上述べてきたとおり、岩石の種類によって、種々の形態を示すことが明らかとなった。これは微震音の発生が岩石の局部微小破壊に伴って起るものと考えられることから、当然の帰結である。したがって岩石の組織・強度等が微震音の発生に大きな関係のあることは明白である。試料として採用した岩石から得た発生傾向から、岩石の性質との対応を行ってみると、おおむねつぎのようなことが言える。

- i) 結晶構造が発達しているものほど、微震音の発生が起り易く、潜晶質のものは発生し難い。
- ii) 粒状組織のものは、緻密なものに較べて微震音の発生が多い。
- iii) 緻密な結晶質の岩石では、結晶間の結合度が大きければ大きいほど、破壊近くになって急激な発生の傾向を示す。すなわち、外力は、内部エネルギーとして蓄積され、破壊直前に一時に放出される。
- iv) 多孔質のルーズな組織のものは、裁荷の初期から多く発生し、応力が増加してもむしろ減少の傾向にある。
- v) 微震音の発生する時期は、結晶質のもの、粒状のもの、およびルーズなものほど、小さい荷重段階で

発生し、潜晶質のもの、緻密なものほど遅れて発生する。

vi) 大部分の岩石は、特徴的な微震音の頻発点が存在するがその点は、いずれも破壊荷重の約 70~90% 附近である。

Fig. 3-3. Frequency Curves of M. S. Noise.

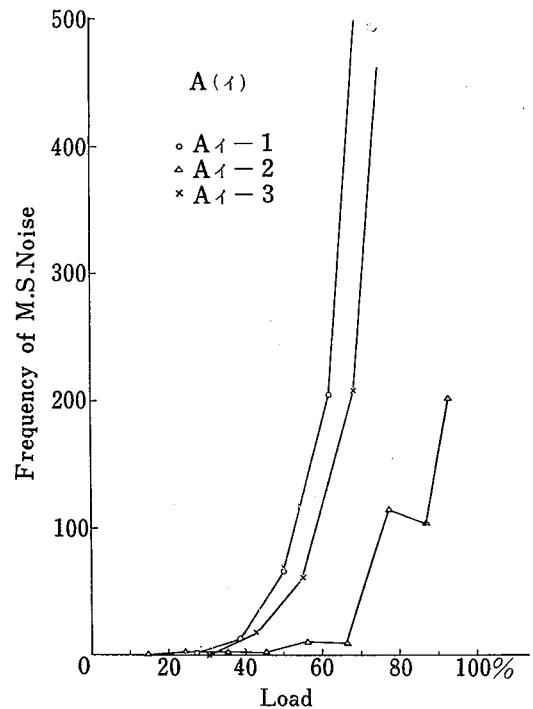


Fig. 3-3. (a)

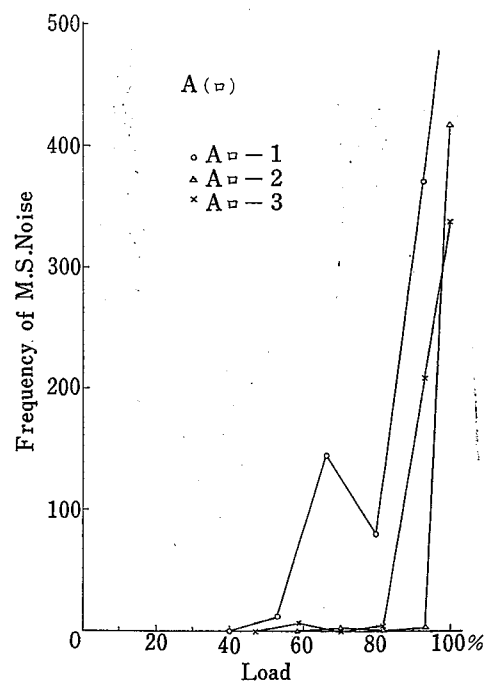


Fig. 3-3. (b)

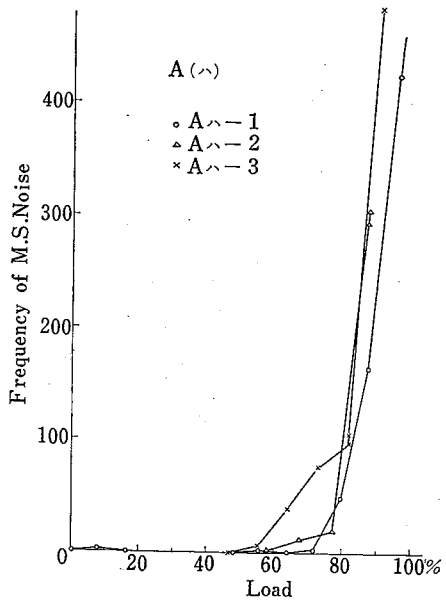


Fig. 3-3. (c)

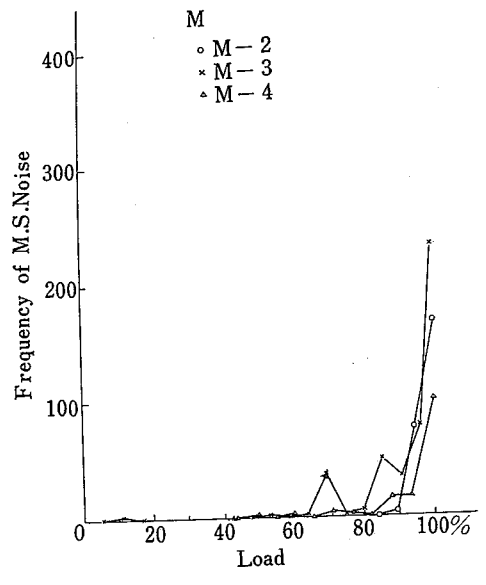


Fig. 3-3. (f)

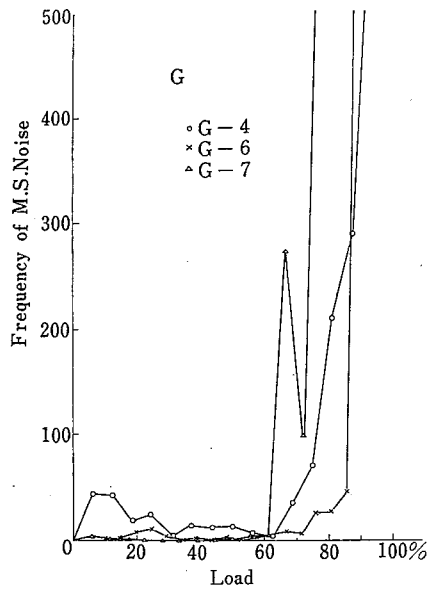


Fig. 3-3. (d)

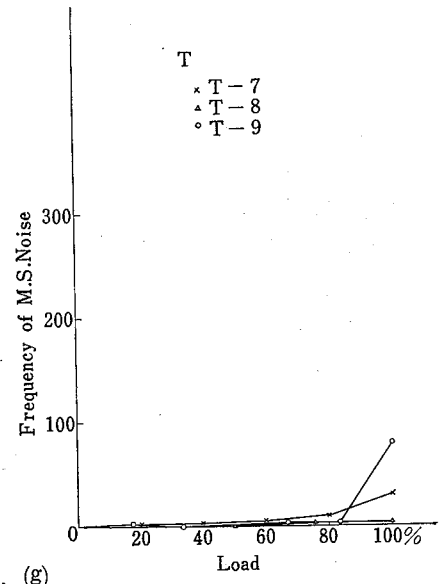


Fig. 3-3. (g)

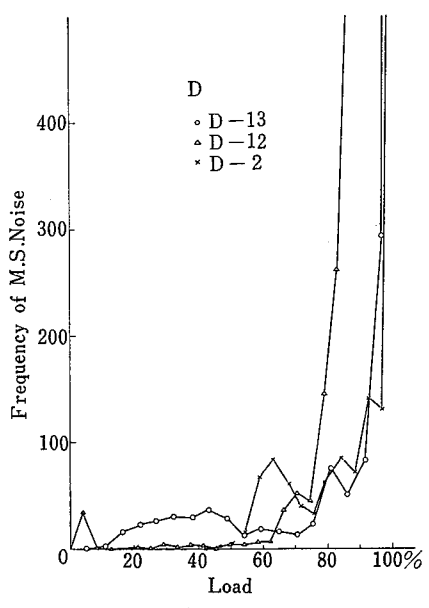


Fig. 3-3. (e)

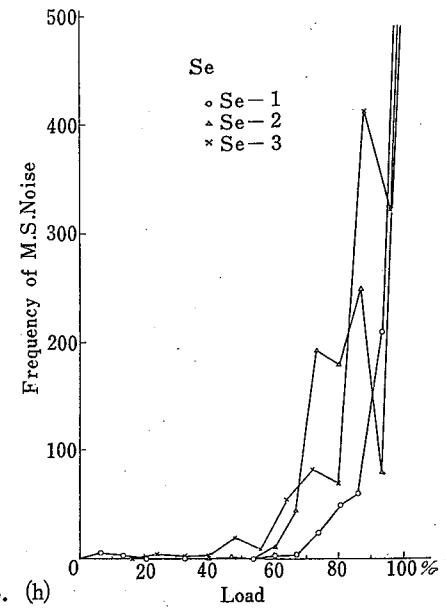


Fig. 3-3. (h)

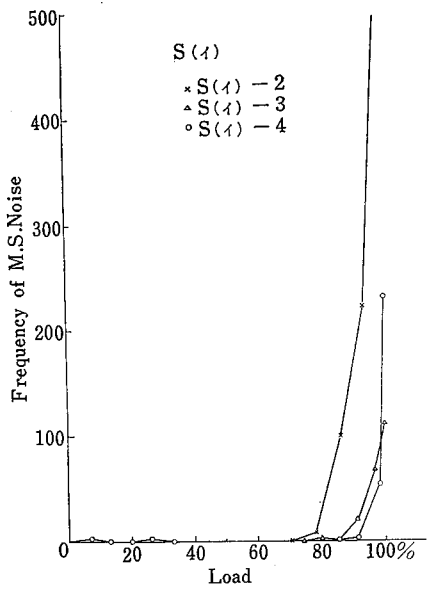


Fig. 3-3. (i)

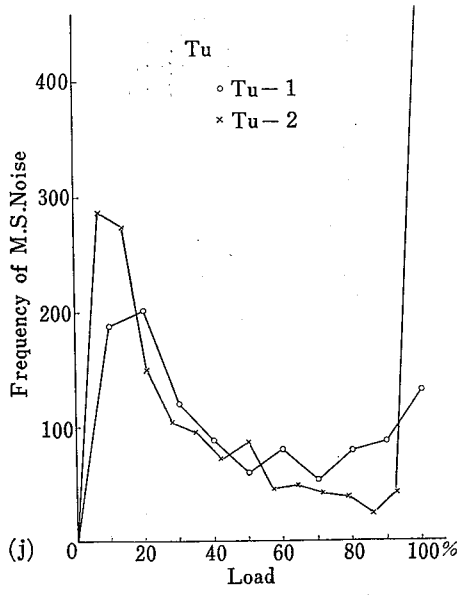


Fig. 3-3. (j)

Fig. 3-4.

Accumulated Frequency Curves of M. S. Noise.

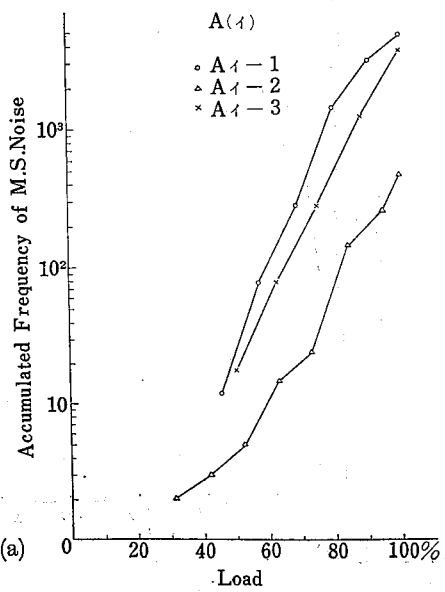


Fig. 3-4. (a)

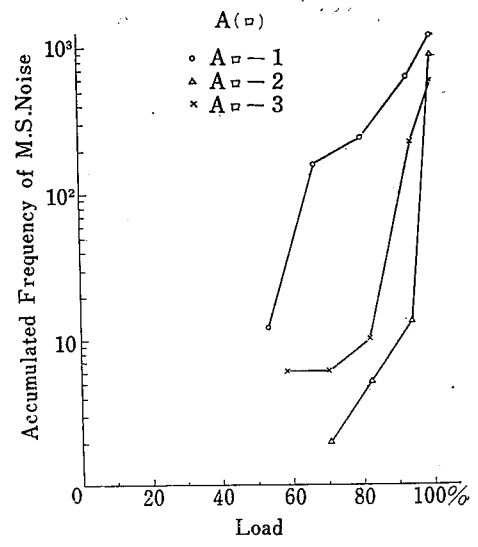


Fig. 3-4. (b)

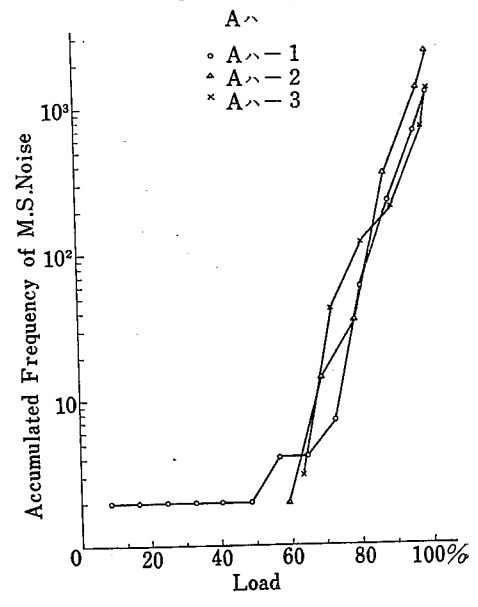


Fig. 3-4. (c)

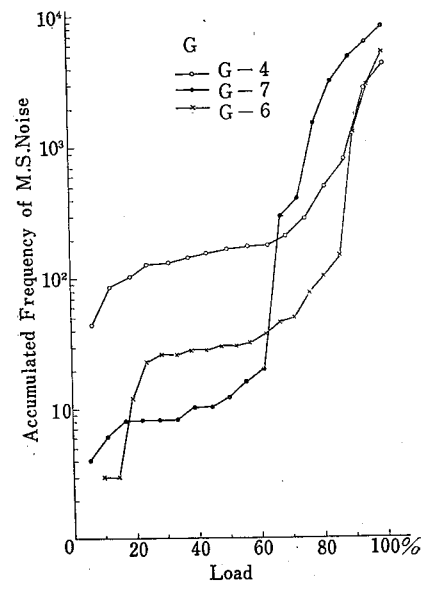


Fig. 3-4. (d)

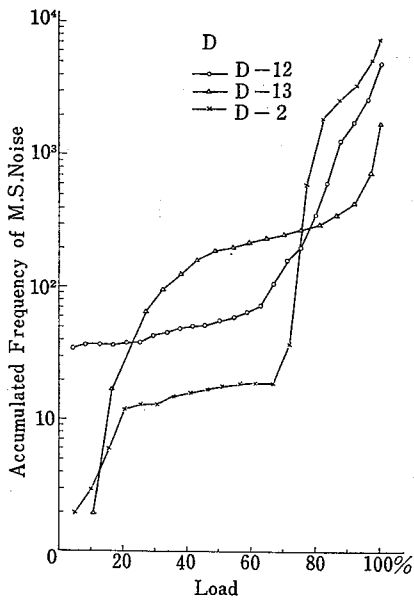


Fig. 3-4. (e)

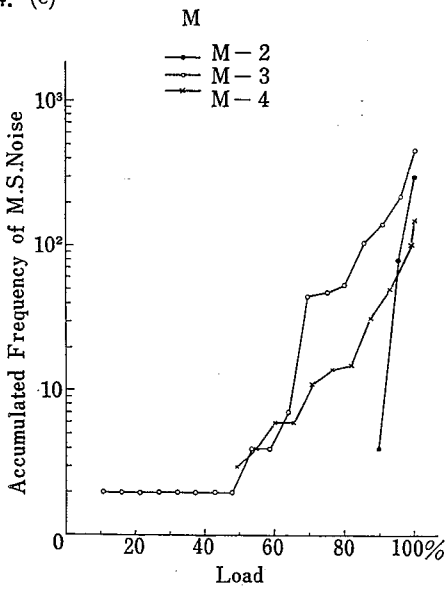


Fig. 3-4. (f)

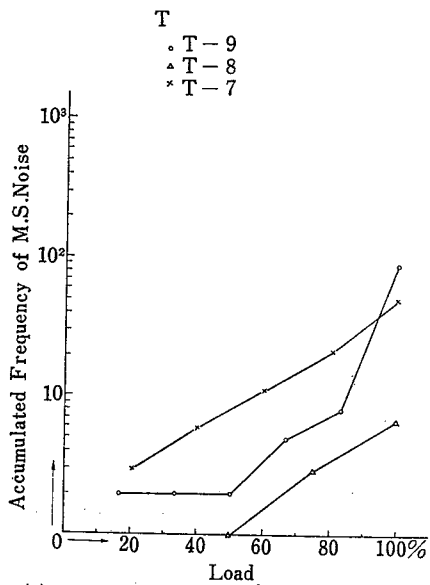


Fig. 3-4. (g)

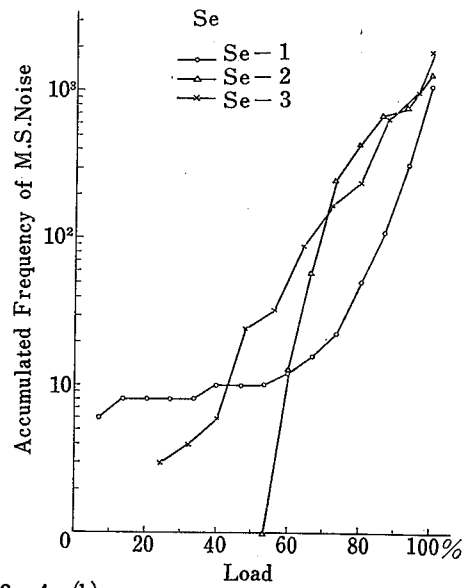


Fig. 3-4. (h)

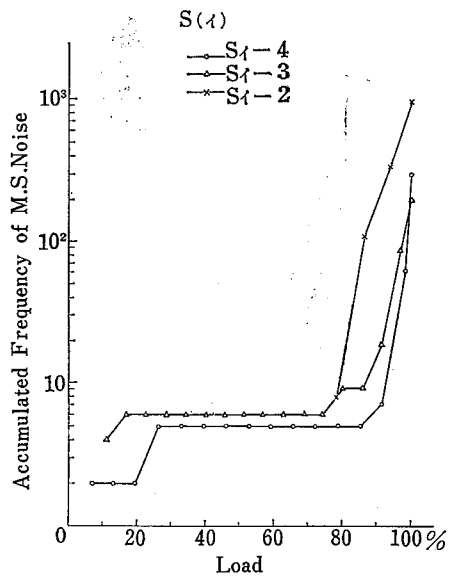


Fig. 3-4. (i)

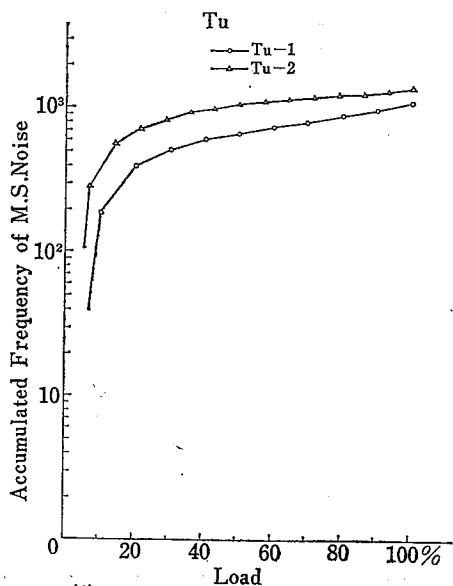


Fig. 3-4. (j)

3-3. 微震音のエネルギーの大きさ別発生頻度

微震音の発生特性の究明に当って、とくにそのエネルギーに着目し、破壊過程において発生し全微震音について、そのエネルギーの大きさ別に分類整理した。その結果、一見偶発的現象とみられる微震音の発生が、ある特徴を有することが認められた。

3-3-1. 破壊に至るまでに発生した微震音の全数のエネルギーの大きさ別発生頻度。

一個の岩石試料について、荷重の載荷直後から破壊時まで発生した微震音の全部を、その最大振幅、すなわち、エネルギーの大きさ別に分類し、その頻度を調べた。

横軸には最大振幅の二乗値、縦軸には微震音の数を、いずれも対数目盛にとり、プロットすると、図-3-5に示したように、各試料ともそれぞれ一つの直線上にのる。

これは微震音のエネルギー大きさ別頻度が次式で表されることを示している。

$$n(e)de = k \cdot e^{-m} de$$

ここに、 $n(e)de$ は、微震音のエネルギーが e から $e+de$ の範囲のもの、発生度数であり、 e は微震音エネルギー、 k 、 m はそれぞれ、実験定数である。この m がグラフ上に示された直線の勾配を表している。

そうして m の値は同一種類岩石について、若干のばらつきは示しているが、ほぼ一定の値をとり、岩石の種類によって、異った値をとることが明らかである。これは m の値が岩石のもつ他の性質と何等かの関連があることが考えられる。

また、この式は、東大地震研の茂木博士により、報告された、岩石の曲げ破壊時に発生した弾性衝撃波の振幅別発生頻度を示す式と同種のものである。(文献6)

表-3 Table 3 Value of m for various Rocks

岩	石	m (平均値)
安山岩イ	Aイ	1.03
安山岩ロ	Aロ	1.34
安山岩ハ	Aハ	1.07
花崗岩	G	0.76
花崗閃緑岩	D	1.00
砂岩イ	Sイ	0.97
大理石	M	1.06
蛇紋岩	Se	0.78
トラバーチン	T	0.99
凝灰岩	Tu	1.24
人造大理石	C	1.06

なお、地震関係の研究において、地震の振幅別発生頻度を示す統計式が求められているが、この場合にも振幅の大きさと、その頻度との関係は、上述の微震音のエネルギーとその発生頻度との関係と同様の式で表される。しかも、その分布グラフの勾配 m の値は、火山地震の場合を除くと、1.5~2.0の範囲にあるとされている。この値はグラフの横軸に振幅をとっているのので、これをエネルギーにとった場合の m 値に換算すると、1.5~2.0の1/2、すなわち、0.75~1.0となり、表-3に掲げた値と比較すると、ほぼ近似していることがわかる。

Fig. 3-5.

Frequency Distribution of Energy of M. S. Noises.

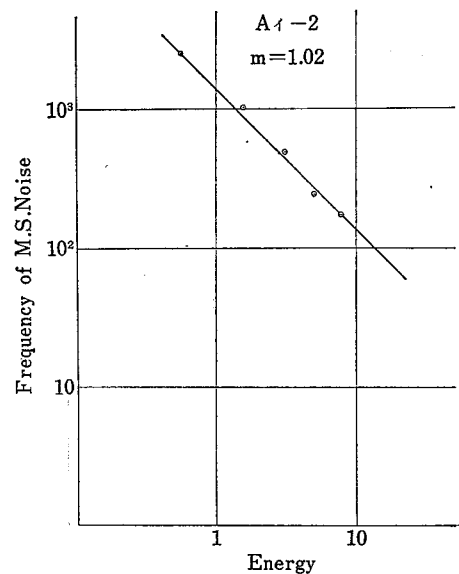


Fig. 3-5. (a)

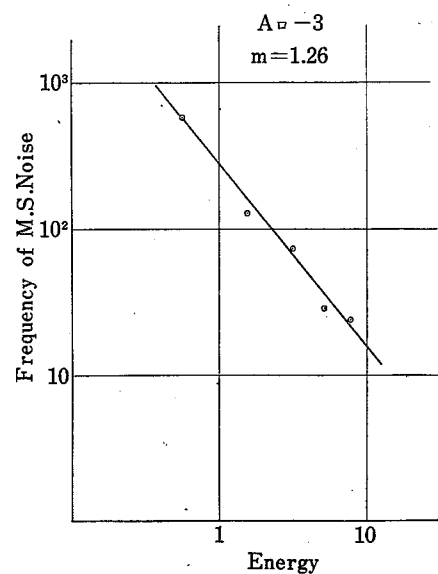


Fig. 3-5. (b)

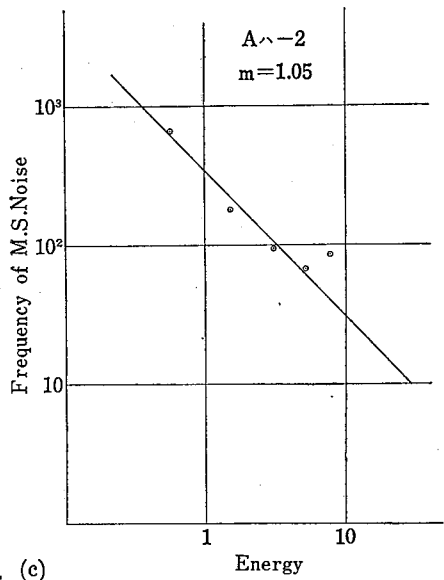


Fig. 3-5. (c)

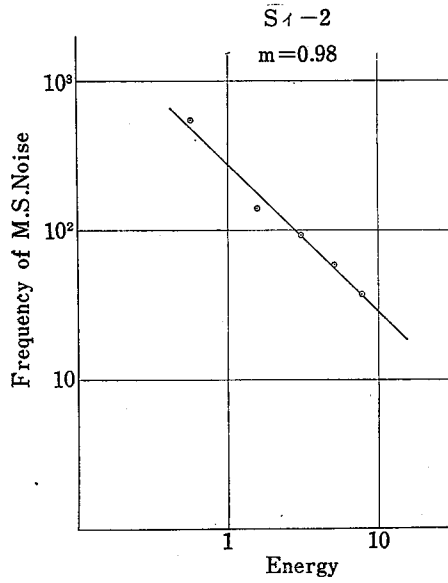


Fig. 3-5. (f)

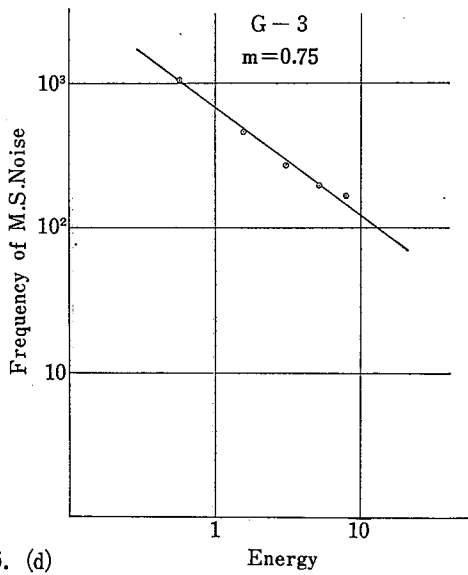


Fig. 3-5. (d)

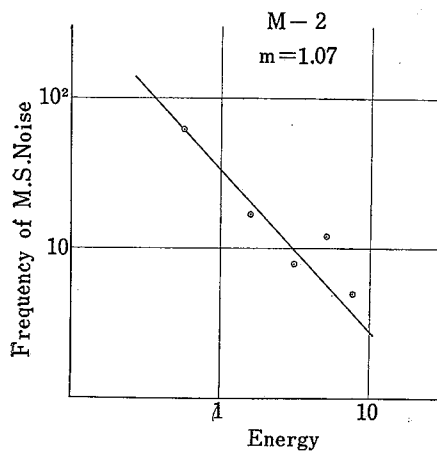


Fig. 3-5. (g)

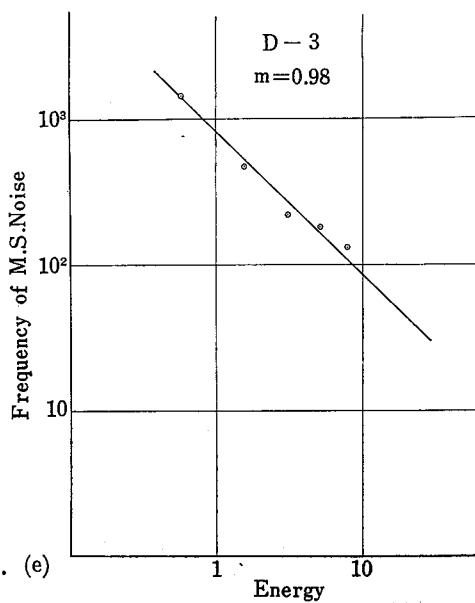


Fig. 3-5. (e)

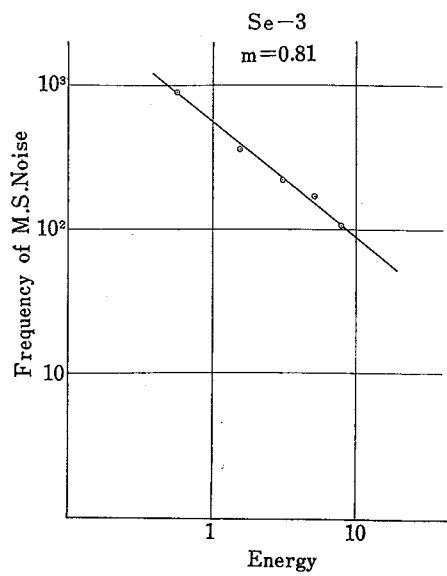


Fig. 3-5. (h)

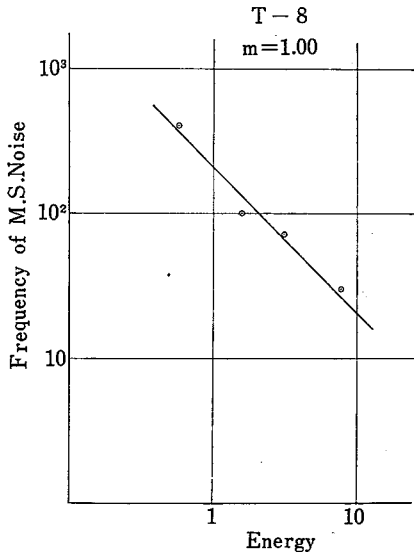


Fig. 3-5. (i)

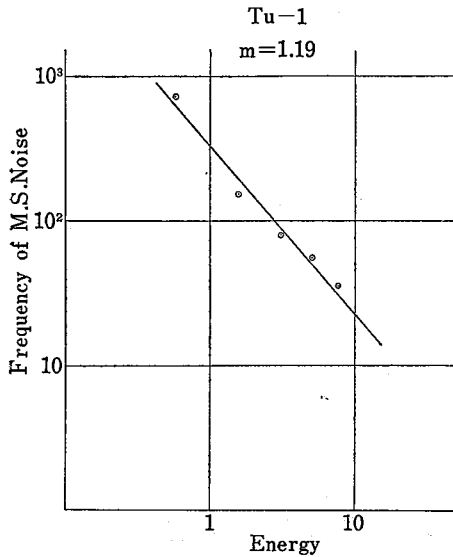


Fig. 3-5. (j)

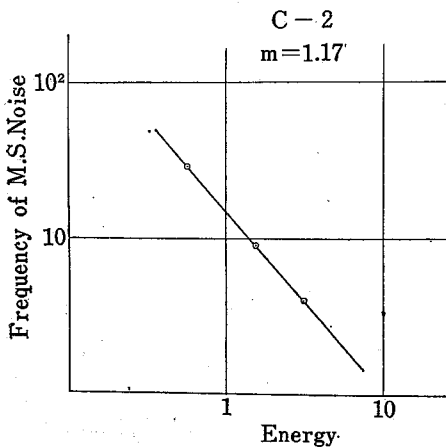


Fig. 3-5. (k)

3-3-2. 異った応力域における微震音のエネルギー 大きさ別発生頻度

裁荷から破壊に至るまでの過程を、応力の大きさで4分割し、その4区間の応力域内で発生した微震音について、エネルギー大きさ別発生頻度を、前項と同様の手法で求め、これをグラフで表すと、4つの区間内それぞれにおける頻度グラフは、前と同様、いずれもある一つの直線にのり、しかも、第二、第三、第四象限に進むにしたがって、これら直線の勾配は、ゆるやかになる。すなわち、 m 値が減少する。そうして、破壊の生じた最後の区間は、 m 値の減少が極端になる例が多い。図-3-6(a)~(f)は、以上のことを示すグラフである。

これは、任意区間において、微震音の大きさ別発生頻度を求め、その勾配を知ることにより、その応力域が破壊応力に近いか否かの判定を試みる一つの手段となり得ることを示している。

Fig. 3-6. Frequency Distribution of Energy of M. S. Noises for Various Stages of the Stress.

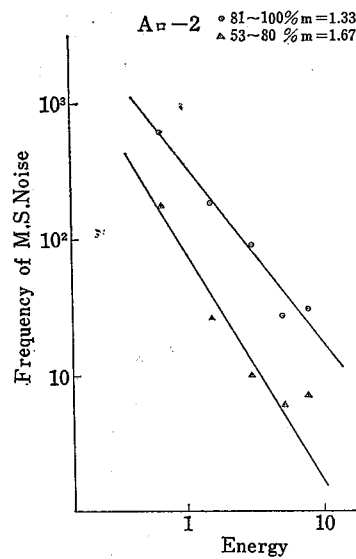


Fig. 3-6. (a)

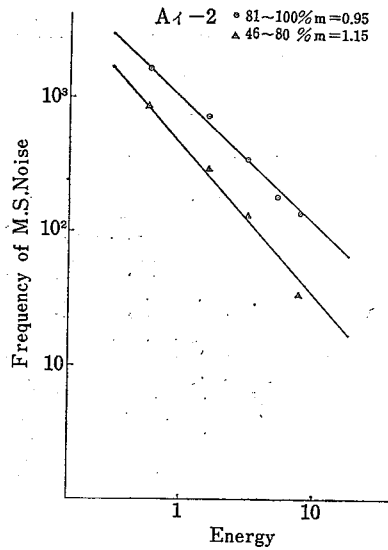


Fig. 3-6. (b)

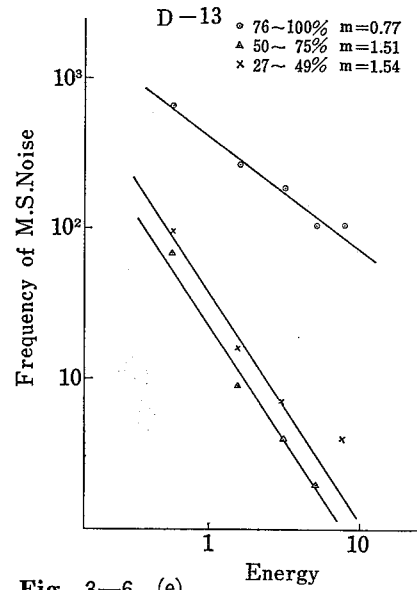


Fig. 3-6. (e)

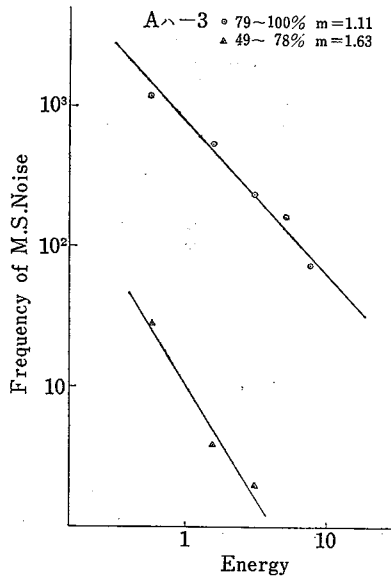


Fig. 3-6. (c)

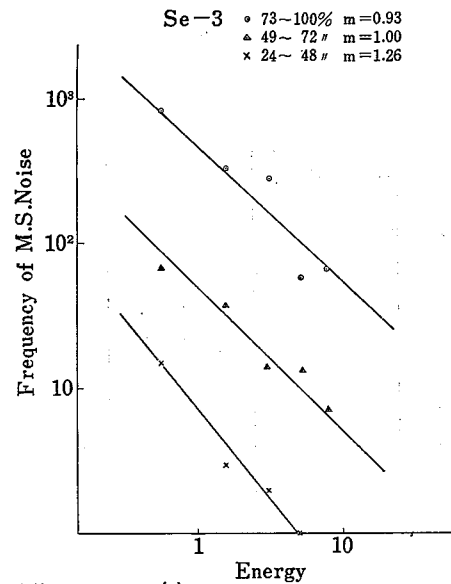


Fig. 3-6. (f)

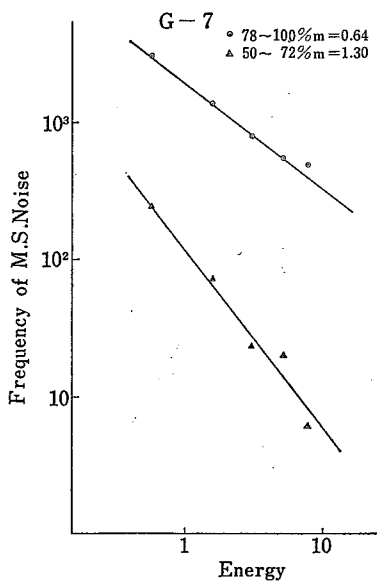


Fig. 3-6. (d)

3-3-3. 微震音の大きさ別発生頻度グラフ勾配 m と岩石の圧縮強度, ヤング率および剛性率の関係

破壊までに発生した微震音の全数について, 微震音のエネルギー大きさ別頻度グラフの勾配 m とその岩石の破壊応力 σ_u との関係を見ると, 図-3-7に示すように, とくに, m と σ_u の相関はないように思われる。

試料にワイヤーストレージを貼り測定した歪から得られた割線ヤング E_s 率, 横方向歪の測定から得られたポアソン比により計算される剛性率 G_s および, 共振周波数から求めた動弾性係数 E_d と m 値の対応をみた。これらの値と各試料の m の関係を示すと図-3-8, 図-3-9になる。これによると, m の値とヤング率 E_s (ワイヤーストレージによるもの), 動弾性係数 E_d および剛性率 G_s との間には, いずれも逆比的関係にあることが認められた。

Fig. 3-7.
Ultimate Compressive Stress Versus Slope m .

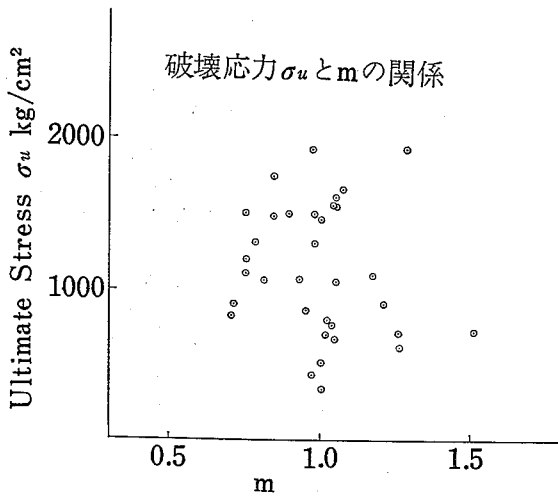


Fig. 3-8. Static Young's Modulus E_s and Modulus Rigidity G_s versus Slope m .

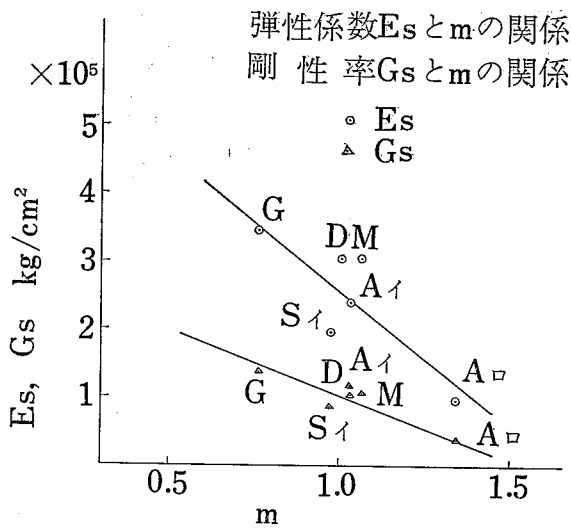
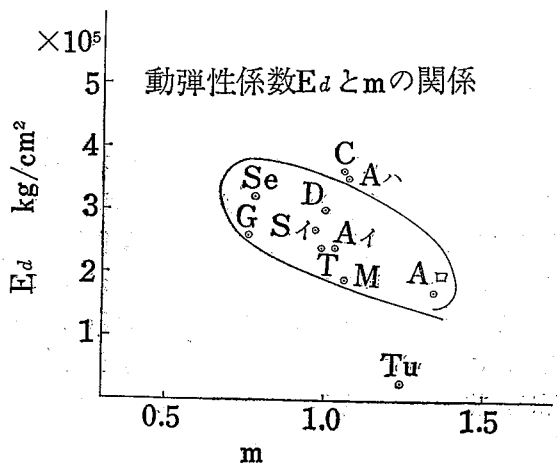


Fig. 3-9.
Dynamic Young's Modulus versus Slope m .



3-3-4. 頻度グラフ勾配 m と岩石の歪応力図における切線係数との関係

荷重の増加に応じて生ずる岩石試料の変形を微震音の記録と同時に測定した二、三の試料について、その変形状況との関連を調べた。図-3-10は花崗閃緑岩試料の歪応力曲線である。図で明らかなように、変形の状態は、荷重の変化とともに変化する、いま $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \gamma$ とおき、これを切線係数と名付けることにする。 γ は荷重0から破壊まで大略5つの異った区間において異った値をとる。なお、この γ のデイメンションは、ヤング率と同じ kg/cm^2 をもっている。

上述の異った γ の値をとる区間をそれぞれ a, b, c, d および e 領域とし、各領域内において発生した微震音について、そのエネルギー大きさ別の頻度をグラフに示すと、図-3-11(a)~(e)となり、これらもまた、一つの直線上にのり、それぞれ、異った m 値を有している。

Fig. 3-10.

Stress-Strain Relationship on Diorite Specimen.

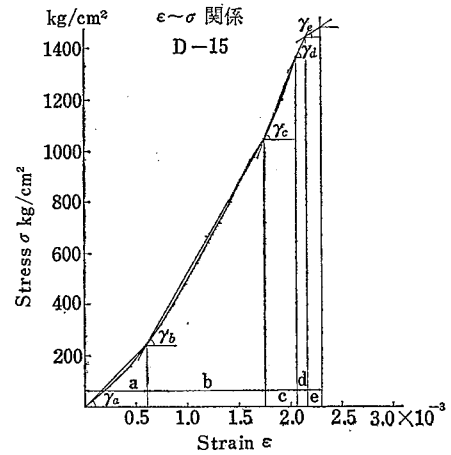


Fig. 3-11. Frequency Distribution of Energy of M. S. Noise for Different Tangential Coefficients.

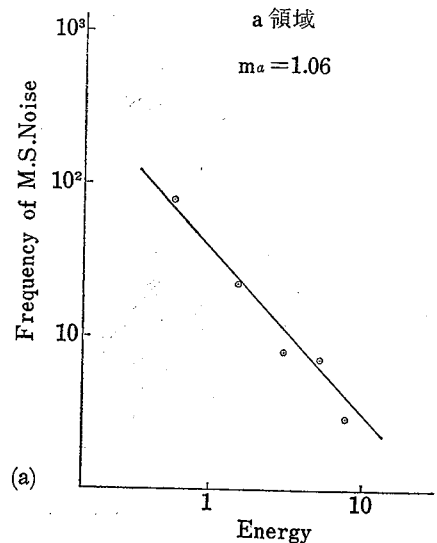


Fig. 3-11. (a)
a Region

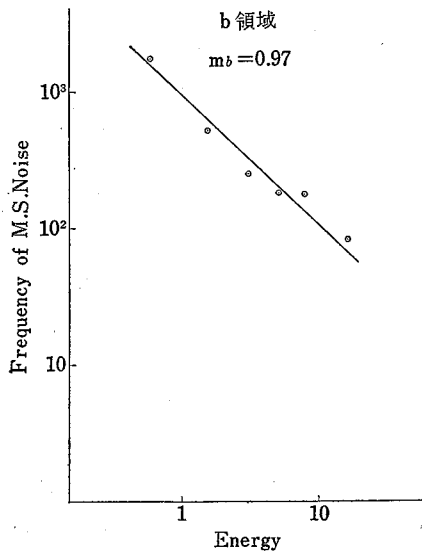


Fig. 3-11. (b) b Region.

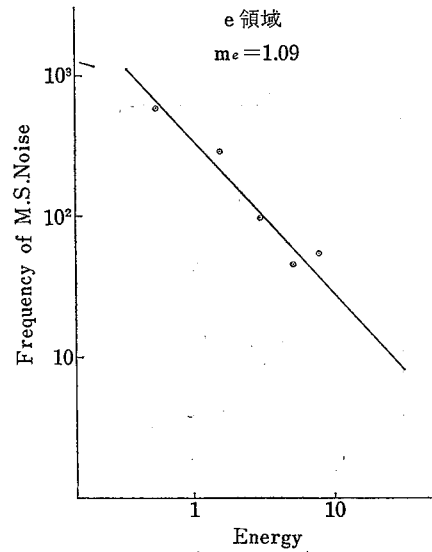


Fig. 3-11. (e) e Region.

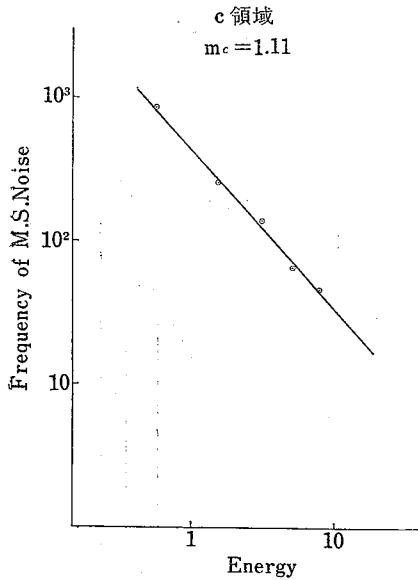


Fig. 3-11. (c) c Region.

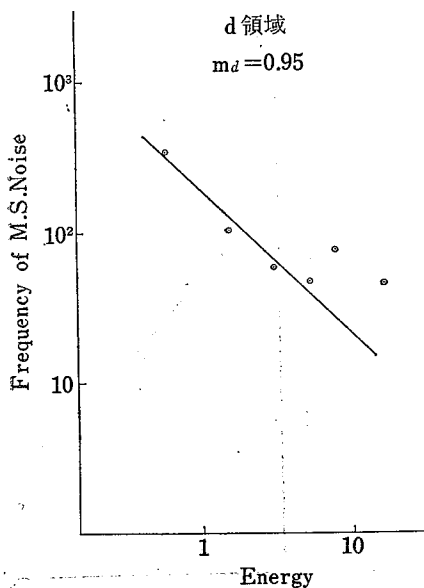
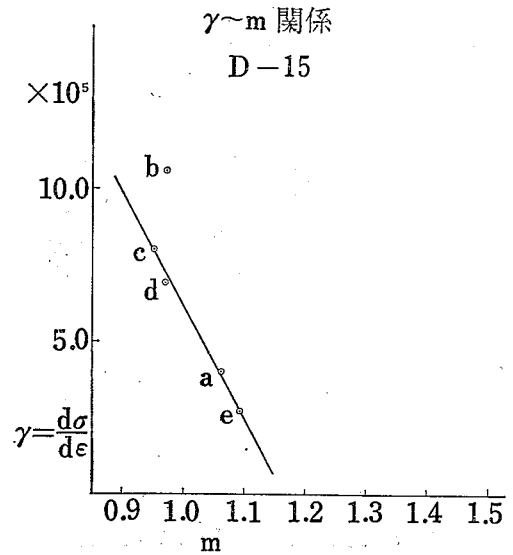


Fig. 3-11. (d) d Region.

これら頻度グラフの勾配 m 値と、各領域内での切線係数 γ との関係を、図に示すと、図-3-12となり、 m と γ とは逆比の関係にあることが明らかである。

Fig. 3-12. Various Tangential Coefficients r versus m on Diorite Specimen.



つぎに軟岩の代表として凝灰岩試料について、同じく変形比との関係を求めた、図-3-13は、歪-応力曲線である。花崗岩と同様、この場合も切線係数 γ は5区間、a~e領域において異った値をとる。これらの区間内の微震音のエネルギー別発生頻度をそれぞれとり、これから求めた、頻度グラフの勾配 m と γ の関係は、前と同様、逆比の関係が認められる。図-3-14

Fig. 3-13.
Stress Strain Relationship on Tuff Specimen.

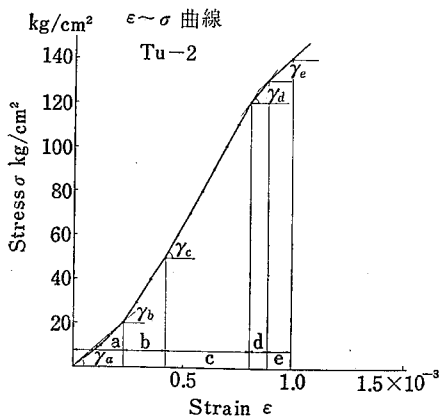
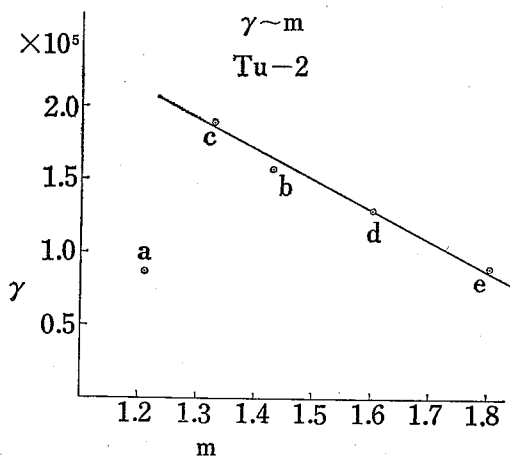


Fig. 3-14. Various Tangential Coefficients γ versus m on Tuff Specimen.



ここに得られた m との γ 関係は、応力をうけた岩石の変形状況が微震音の大きさ別発生頻度を知ることから、求められるという大きな意義がある。さらに図3-10、図3-13に示したように、一定速度増加圧縮応力下にある岩石の変形が異った切線係数 γ をもつ、いくつかの領域に分けられ、その γ が、载荷初期と、破壊直前において、その中間領域よりも大きい値をとることは、注目すべきことである。

ここにパラメーターとして取り上げた切線係数 γ は前述のように、ヤング率と同じデイメンジョンを有しており、3-3-3において求めた、破壊までに生じた全微震音数の大きさ別頻度グラフにおける勾配 m 値

と、ヤング率の関係で、やはり、 m 値とヤング率が逆比例の関係にあることから、変形と微震音の発生状況との間に何等かの関連があり、変形が大きい岩石、および、同一岩石にあっては、変形速度が大きいときに m 値が小、すなわち、大きなエネルギーを有する微震音の発生が多いということが言える。

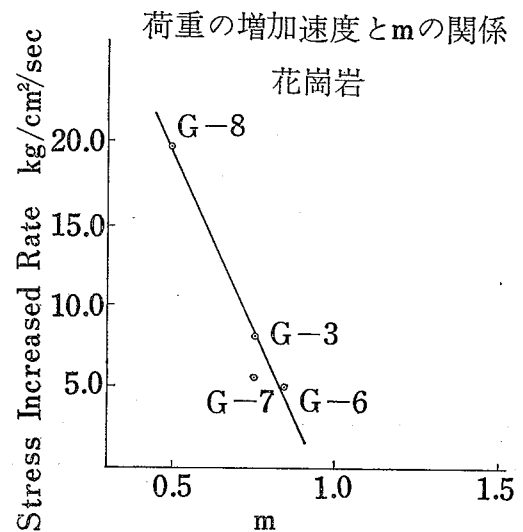
3-3-5. 微震音のエネルギー大きさ別発生頻度グラフの勾配 m と荷重速度の関係

既に述べたように、頻度グラフの勾配は、岩石の種類により異り、その相違は、主としてヤング率のような岩石固有の性質によるものと考えられるが、この他切線係数 γ が影響を及ぼすことが考察された。

さらに m に影響を及ぼすものとして、荷重の増加速度が考えられるので、これについて調べた。

試料として花崗岩をえらび、各試料の増加速度と値の関係をプロットすると、図3-15のようになり、同一岩石にあっては、荷重速度がはやければ、 m 値は小さくなる傾向を有していることが判明した。

Fig. 3-15. Stress Increased Rates versus Slope m on Granite Specimens.



4. 結 論

岩石の破壊過程において、発生する微震音について、とくにその発生の特性に焦点をおいた本研究の結果の主要なものはつぎの通り要約される。

- ① 一定速度増加荷重による一軸圧縮による破壊過程において発生する微震音の発生形態は、その岩石の材質により異ったものとなる。
- ② 最初に微震音が発生する時期は、結晶質のものほど、粒状のものほど、さらに結合の弱いものほど、破壊応力に対する比が小さい応力のときから発生する、これに反し潜晶質のものほど、また緻密なもの

ほどその比が大きくなってから発生する。

- ③ 緻密な結晶質の岩石では、結晶間の結合度が大きければ、太きいなど破壊直前に急激な微震音の発生をみる。
- ④ 結合度の弱い岩石では、破壊直前に発する微震音の数は少ない。
- ⑤ 大部分の岩石について、微震音の発生頻度の急激な増加をみるのは応力とその岩石の破壊力70~90%の程度に達したときである。
- ⑥ 微震音の発生数と、個々のエネルギーの和は、全域にわたってほぼ比例の関係にある。
- ⑦ 破壊過程において発生する微震音の全数についての大きさ別頻度を示すグラフは、両対数グラフで直線となり、次の関係が明らかとなった
$$n(e)de = k \cdot e^{-mde}$$
ここに $n(e)de$ は、微震音のもつエネルギーが e から $e+de$ の範囲のもの発生度数である。 k 、 m は定数である。
- ⑧ 上式の m の値は、岩石によって異り、これはYoung率等の物理的指標との関連もある。
- ⑨ ある限られた応力区間で発生する微震音についても大きさ別頻度の関係は上式と同様の形をとる。ただし、この場合、同一岩石であっても各応力域によって m の値は異り、しかも、破壊に近づくにつれて m の値は減少する。
- ⑩ 荷重と変形の間をみると、破壊に至るまでの過程は切線係数 $\gamma = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ の値の異なるいくつかの領域に分割され、かつ、この領域内での⑨項に述べた m 値との関連がある。すなわち、 γ が大きいほど m の値は小となる。

以上述べた結論のうち、特に頻度グラフ勾配 m は、岩石の破壊を予測する上に大きな意味を持ち、今後、落盤の予知の実用化の上で、重要な要素となるものと思われる。

謝辞、本研究を行うに当って、大成建設(株)技術研究所中尾氏の協力を得たことを感謝する。

参 考 文 献

1. L. Obert and W. Duvall, Microseismic Method of Determining the Stability of Underground Openings, Bull. 573 U. S. Bureau of Mines, 1949
2. ……., The Microseismic Method of Predicting Rock Failure in Underground Minings Part II Laboratory Experiments, R. I. 3803 U. S. Bureau of Mines, 1945
3. F. J. Crandell, Determination of Incipient Roof Failures in Rock Tunnels by Microseismic Detection, Journal of B. S. C. E., Jan. 1955
4. F. D. Beard, Micro-Seismic Forecasting of Excavation Failures, Civil Engineering, May 1962
5. The Seismitron, Walter Nold Co.
6. K. Mogi, Study of Elastic Shocks Caused by the Fracture of Heterogeneous Materials and its Relation to Earthquake Phenomena, Bull. of Earthquake Research Inst., Vol. 40 1962
7. Vinogradov, Experimental Study of the Distribution of the Number of Fractures in Respect to the Energy Liberated by the Destruction of Rocks, Izv. Acad. Sci. USSR Geophysics, Ser. 1962
8. R. E. Goodman, Sabaudible Noise During Compression of Rocks, Bull. of Geological Society of America, 63 1962
9. 水田, 鈴木, 岩石の亀裂音に関する研究, 日本鉱業会誌 Vol. 77 No. 882 1962
10. 佐々木他, 岩石の破壊音の測定, 岩の力学シンポジウム '64講演集
11. 横道他, コンクリートにひびわれが生ずるときの弾性波の伝達現象について, セメントコンクリート No. 12 1964