

DEC. 1972

RIIS-RR-21-2

UDC 624.1214 : 622.353

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-21-2

岩石微震音に関する研究

(第2報)

—大谷石微震音の発生特性について—

前 郁 夫
鈴 木 芳 美

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

岩石微震音に関する研究 (第2報)

—大谷石微震音の発生特性について—

前 郁 夫*
鈴 木 芳 美*

Experimental Study on Micro-Seismic Noises in Rocks (2nd Report)

—Characteristics in the Generation of Micro-Seismic
Noises in Rhyolitic Tuff (Ōyaishi)—

Ikuo MAE, Yoshimi SUZUKI

There is a fact that rocks in instability under stress generate micro-seismic noises (a kind of elastic shock wave) with microfractures.

It is expected that micro-seismic noise detection is an effective method for predicting accidents such as roof falls and pillar failures in quarrying works.

In order to apply micro-seismic method to the abovementioned purpose, the necessary studies of fundamental facts are being made in the laboratory and in the quarry.

The present paper describes the results obtained from the experiments of the micro-seismic noise activities during the course of failures of the specimens under increasing load, sustaining load and repeating load.

The several results are summarized as follows.

The increasing stress is applied to specimen, occurrence of m.s. noises increases immediately after the stress application; thereafter activity of m.s. noises reduces at the middle stage, however it again begins to increase abruptly before the failure.

The pattern of occurrence of m.s. noises under increasing stress seems to be related to the properties of rhyolitic tuff.

The sustaining constant stress is applied to specimen, there is no high micro-seismic activities at the early or middle stage, and preceding to the failure m.s. noises occur frequently.

Under these stress condition, the frequency of m.s. noise depends on the increment of strain in rock.

The frequency distribution of number of the m.s. noise with respect to the energy possesses a statistical regularity which is expressed by the exponential equation.

There is a relative relationship between the distance from the source of m.s. noises and attenuation of them through the rock.

* Construction Division

1. 序 言

落盤・崩壊など岩盤の破壊現象に伴う災害は、岩盤力学の研究と施工技術の進歩などによってかなり減少をみせてはいるものの、岩盤強度の不明確さや掘削に伴う挙動の多様性などもあって岩盤破壊に関連する上記の災害の防止を困難なものにしている。

このように不確定要素の多い破壊現象に関連する災害の防止の手段のひとつとして危険の予測技術つまり災害発生に連なるなんらかの前兆を検出し、それにより適切な処置を講ずることが有効であると考えられる。岩石微震音は岩盤破壊の前駆的現象として発生するもので、すでに第一報¹⁾に述べたとおり落盤・崩壊の予測・予知の手段として利用できる可能性は高い。筆者らは、この岩石微震音の性状について研究を進め、とくにその発生特性を追求してきた。

たまたま、栃木労働基準局管内にある大谷石採石場で落盤による（6名の死亡者を出す）労働災害の発生があり、これを契機として大谷石の岩石微震音の検出による落盤、崩壊の予知の可能性を検討すべく室内実験、現場実験を実施し、大谷石岩石微震音の発生特性について考究した。

大谷石と称される岩石は、岩石学上は流紋岩質軽石凝灰岩と呼ばれるものであり、新第3紀中新世の火山噴火による堆積物が圧力変成をうけて生成されたものとされている。外観は粗く、多孔質^{*1}で風化侵食に弱い節理に乏しい。圧縮強度は、気乾試料では 120 kg/cm² 程度、湿潤試料では 60 kg/cm² 程度でかなり弱い、おもに土留、塀など建築用石材として用いられている。

2. 実 験

2.1 室内実験

2.1.1 実験装置

今回報告する実験に用いた装置、測定計器類は、すでに第一報で詳細に報告してあるものとほぼ同様である。すなわち、遮音設備を施した隔室内に圧縮試験機を設置し、遠隔操作による荷重制御により、岩石試料

より発生する微震音と他の各種騒音、振動などが混入することを避けた。微震音の検出は圧電型加速度ピックアップを試料に接着する方法により行なった。大谷石から発生する微震音のエネルギーレベルが他の岩石のそれとくらべて相対的に低いことが判明したので、前回に使用した電圧増幅型の振動計のほかに電荷増幅型のチャージアンプを併用した^{*2}。検出、増幅された微震音はすべてデータレコーダに収録し、再生解析を行なった。大谷石は軟岩で変形量が比較的大きいことから、変形測定には、差動トランス型変位計、摺動抵抗式変位計などを採用した。

解析装置のうち、今回新しく導入したのは、微震音発生数の計数および微震音の大きさ別頻度を自動的に求めることができる波高分析器およびその付属機器である。

Fig. 1(a) には測定装置、収録装置のブロックダイヤグラムを、Fig. 1(b) には解析装置のブロックダイヤグラムを示した。

2.1.2 実験方法

室内実験では、以下に述べる(1)～(5)の5種類の実験を行なった。このうち(1)～(3)は圧縮試験であるが、いずれも実験機器等の制約で一軸圧縮試験である。各実験とも破壊に至らしめるまでに発生する微震音を検出した。微震音の検出・記録に際しては基準信号を用いて、記録・再生の際の増幅度がどの試料についても常に同一となるように設定した。さらに一部を除いて変形測定を同時に行なった。Fig. 2はこれらの装置を示すものである。

(1) 単純増加圧縮試験

試料に連続的に増加する一軸圧縮荷重を加えて破壊に至らしめる。荷重の増加速度はいずれの試料もほぼ 0.2～0.3 kg/cm²/sec で一定である。

実験に供した試料はI採石場より採取作製した細目^{*3}のもので、寸法を 7×7×15 cm の直方体に整形した。試料はビニール等にてカバーを施し実験に供するまでは現場と同じ湿潤状態を保持した。

(2) 一定荷重持続圧縮試験^{*4}

持続して作用させる一定荷重は(1)で示したいく

^{*2} 振動計による利得は約 65 dB, チャージアンプによる利得は約 90 dB である。

^{*3} 大谷石には生成条件の差に起因するとされている組織の相違により、細目、荒目と呼ばれる二種があり、前者は結晶粒が比較的小さく均質であるのに対して、後者は結晶粒も大きく岩石礫が多く含まれている。

^{*4} 一種のクリープ試験である。

^{*1} 見掛け比重(湿潤状態) 1.8 程度、空隙率 20% 程度、含水率 15% 程度である。

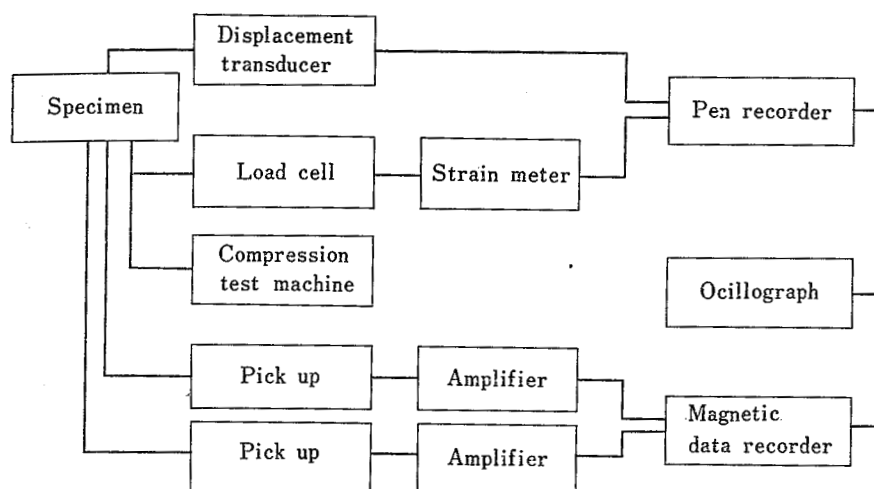


Fig. 1 (a) Block diagram of the measuring system.
測定装置のブロックダイアグラム

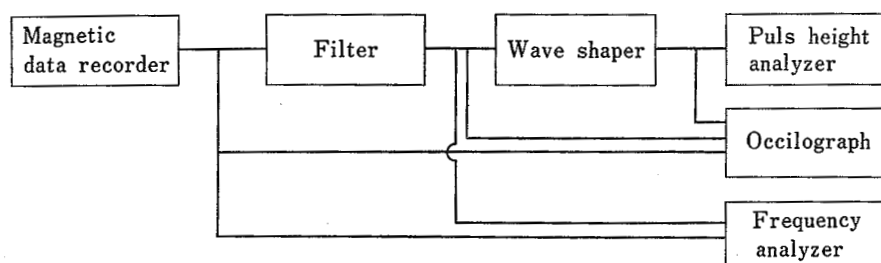


Fig. 1 (b) Block diagram of the analyzing system.
解析装置のブロックダイアグラム



Fig. 2 Specimen mounted in test machine.
(laboratory)
室内実験状況

つかの単純増加圧縮試験の結果から平均破壊荷重を求め、その85~90%に設定した。設定荷重に至るまでは(1)と全く同様に圧縮荷重が設定荷重に到達後は破壊に至るまで荷重の変動を生じないよう圧縮試験機を操作した。実験に供した試料はW採石場より採取したものでば(1)と同様のものである。

(3) 繰返し荷重圧縮試験

破壊荷重に至るまでに前もって何点かの荷重値(便宜的に繰返し荷重値と呼び、小さな荷重値からおのの第1荷重値、第2荷重値…と呼ぶことにする。)を定めておく。(1)と全く同様の方法で荷重を増加させるが第1荷重値に荷重が達したのち、荷重をゼロあるいはゼロ近くまで減少させる。つぎに第2荷重値まで荷重を増加させ、到達後は再びゼロあるいはゼロ近くまで荷重を減少させる。このような方法で破壊に至るまで何回かの応力履歴を試料に与えながら破壊に至らしめる。

(4) 単純曲げ試験

今回の室内実験では JIS に規定されているコンクリ

ート曲げ試験方法を準用し、2点荷重による曲げ試験を行なった。ピックアップの位置は最大曲げモーメントを生ずる中央部側面である。

試料はW採石場より採取・整形した細目のものであり、その寸法は $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}$ の直方体である。

(5) 一定荷重持続曲げ試験

曲げ試験についても(2)と同様に定荷重の載荷試験を実施した。実験に供した試料は(4)と同種のものを使用した。載荷方法は、単純曲げ試験の平均破壊荷重の90%に至るまで荷重を増加し、以後はその荷重値を保持するよう制御した。

2.2 現場実験

2.2.1 実験装置

岩盤のジャッキ試験として試験体を圧縮するメインの300トンジャッキ基、側圧用のサブの50トンジャッキ四基を用いた。これらの操作は、手動ポンプにより行なった。

また変形量の測定はダイヤルゲージを用いた。

微震音検出のため使用した測定システムは室内実験において使用したものとほぼ同様である。なお、一部の試験は遠隔計測化の試みとして試作したテレメータを使用した。

2.2.2 実験方法

現場での実験場所としては、I採石場(細目、地下60m)及びS採石場(荒目、地下70m)の2カ所を選んだ。両者とも Fig. 3 に示すように、床面から天盤までの高さが約1.8mのカキネ*5の床面に深さ45cm一辺1.65mの大きさに掘り下げた矩形の試験ピット

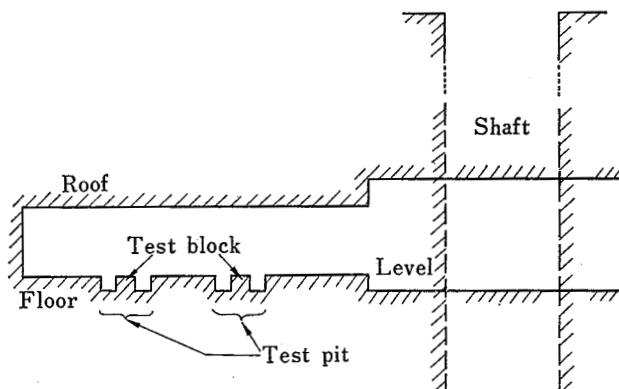


Fig. 3 Schematic diagram of location of field test.

現場実験模式図

*5 大谷石採石場の水平採掘場の俗称

ットを作製する。その際、中央部には、45cm四方の立方体状の角柱を残し、これを試験体とした。

各現場毎にいくつかの試験体を作製し(1)~(4)に述べる4種類の実験および(5)で述べる打撃音減衰試験を行なった。

(1) 一軸圧縮試験

Fig. 4 に示すように試験体と天盤の間に、メインジャッキをはさみ、試験体を加圧した。ジャッキと試験体の間には鉄板をはさみ試験体に荷重が均等に加わるようにした。また天盤とジャッキの間にはスペーサーとしてH鋼を用いた。荷重は破壊時まで連続的に増加させる単純増加荷重である。

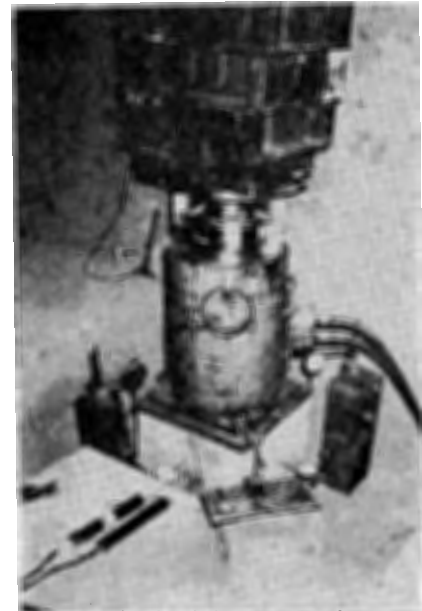


Fig. 4 Uniaxial compressive test. (field)

現場一軸圧縮試験

変形は床面に固定したダイヤルゲージにより読み取った。ダイヤルゲージで試験体上面(たてひずみ)4カ所、試験体側面(よこひずみ)4カ所のひずみを測定し、ひずみ量としてはおのおの四つの測定値の平均値を用いた。

微震音の検出は、実験を行なうカキネの一部にステーションを設け増幅器・レコーダ等を設置し、ピックアップを接着剤にて試験体に直接固定させて行なった。

また一部の現場では、実験を行なうカキネに隣接し、かつ、実験実施場所から50m程離れた廃坑の底部にステーションを設け、検出した微震音をテレメータを使用し、レコーダに送信・収録させた。

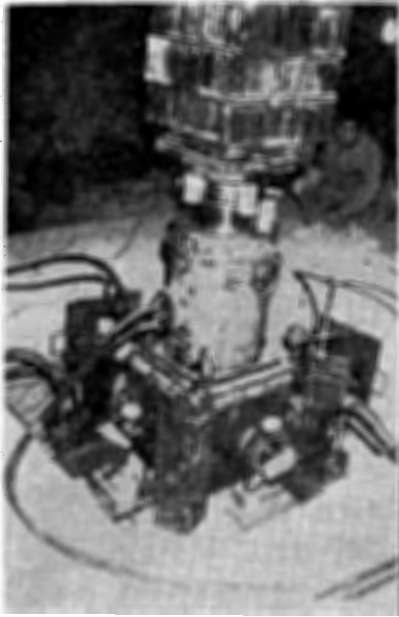


Fig. 5 Triaxial compressive test, (field)
現場三軸圧縮試験

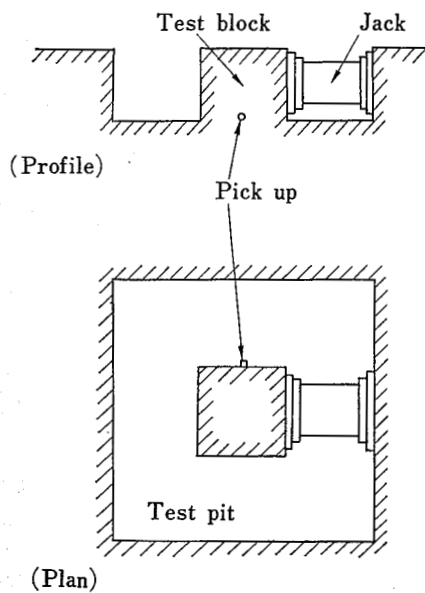


Fig. 6 Schimatic diagram of bending test, (field)
現場曲げ試験模式図

(2) 三軸圧縮試験

実験方法は前項(1)の一軸圧縮試験と全く同様であるが、Fig. 5に示すようにさらに試験体側面と試験ピット側面との間に側圧用ジャッキをはさみ、四方の側面から側圧を加えることによって三軸圧縮試験とした。

(3) 繰返し荷重圧縮試験

実験は(1)と同様の試験体および装置を用いた。載荷の手順は2.1.2(3)で述べた室内実験における繰返し荷重圧縮試験と同様である。

(4) 曲げ試験

現場での曲げ試験は、試験体・試験器具等の制約からFig. 6に示すように試験体のひとつの側面と試験ピットの側面の間にジャッキをはさみ試験体を横押しする方法を採用した。

(5) 打撃音減衰試験

微震音の伝達距離と減衰の関係を知る手がかりのひとつとして、打撃音の伝達距離と減衰の関係を調べた。すなわちカキネ側壁にピックアップを設置し、この点より一定間隔毎に離れた距離でハンマーにて側壁岩盤を打撃しその際の弾性衝撃波を検出し記録した。ハンマーによる打撃は、打撃力がどの場合も一定になるように、かつ一点において数回繰返し測定した。

3. 結果と考察

3.1 微震音の波形および周波数

3.1.1 波 形

第一報にて報告したように微震音は一種の弾性衝撃波と考えられ、立上りがはやく、かつ減衰もはやいラップ状の振動波形を示す。その波形は各種の岩石についてとくに顕著な相異は認められておらず、今回の大谷石についても上記のような形態を示す波形であったFig. 7(a)。ただし多少異なる点は、大谷石の微震音の中には立上り部で最大振幅を示さずFig. 7(b)にみられるようなかたちのものが多数発生していたことである(これは大谷石の微震音の発生メカニズムと関連のある現象とも岩石試料の湿潤状態と関係あるものとも考えられる)。室内実験と現場実験での微震音についてもとくに判然とした差は認められていない。

また各種の荷重状態に応じて波形の相違を観察したが曲げ破壊過程で発生した微震音波形は、圧縮破壊過程の場合と異なりやや振動の持続時間が短い。すなわち減衰率が大きい波形がみられた。ほかはいずれも大きな差はなかった。

3.1.2 周 波 数

微震音周波数分析は直視型周波数分析器を用い卓越周波数を求めた。その結果、各種の破壊過程とも0.5～

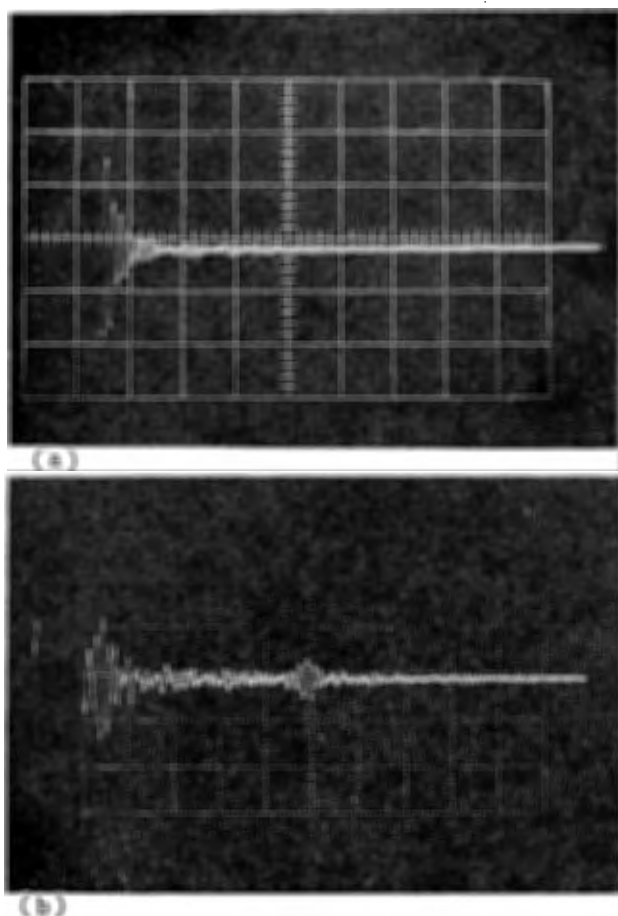


Fig. 7 Record of m. s. noise (1 div : 1 msec, 0.5 volt)
微震音の波形

12.5 KHz の成分をもっているが卓越周波数は 6 KHz 前後で荷重の大小による差異も破壊時にやや卓越周波数が 8 KHz ~ 12.5 KHz のものが増加する傾向がある程度でとくに明瞭なものはあらわれていない。

3.2 発生パターン (荷重および変形と微震音発生との関係)

実験方法 (2.1.2 および 2.2.2) で述べた各種の荷重条件の下において微震音の発生がどのようにあらわれるか、おのおの荷重の大きさ・変形の様相との関連についてその発生パターンを求めた。

3.2.1 単純増加圧縮

室内実験および現場実験のいずれの場合においても微震音は荷重初期に頻発した後急激に減少し応力が増加しても、その発生はむしろ少なくなる傾向がある。そして破壊近くになって再び頻発するというパターンが得られた。これはすでに第一報でも報告したとおり

大谷石に特有のパターンで、花崗岩をはじめ安山岩・砂岩など他の種類の岩石では微震音は荷重直後に頻発することではなく破壊応力の 60 ~ 70 % の応力に達した後に発生数が多くなりその後破壊に至るまでに頻発するというパターンとは大きな差異がある。

このような大谷石にみられた発生パターンは大谷石のもつ固有の性質すなわち構成物質およびそれらの組織の特殊性に依存するように思われる。すなわち大谷石の組織を偏光顕微鏡により観察した結果によると、岩石の大部分は軽石および火山ガラスからなり、一部に結晶鉱物 (石英、長石類など) と火山岩礫 (がんれき) が点在している。また軽石部分には発泡の瘍跡がみられ、ガラス質は粘土鉱物に変化していることが認められる^{*6} (Fig. 8)。

したがって、低応力下において発生する微震音は、岩石組織内に存在する空隙の閉塞、あるいは粘土化した軽石部分のすべりまたはキレツの発生に伴うものと推定され、その後全体破壊にいたる過程で発生する微震音は結晶鉱物とガラス部の境界、あるいは結晶鉱物内部に生ずる微小破壊ならびにその伝播に伴うものと推定される。

Fig. 9 (a), (b)^{*7} は応力—歪曲線^{*8}および応力—微震音累積発生数の関係を示したものである。これによると両曲線はかなりの類似性をみせている。この類似性は微震音の発生が大谷石の変形と関連があることを示すものである。

微震音の発生と変形との対応をさらに詳細に示したのが Fig. 10 (a), (b) である。この図は横軸は応力で、ゼロから破壊までをいくつかに分割し、その分割された各応力区間 $\sigma_{i-1} \sim \sigma_i$ における微震音の発生数 N_i とその区間の歪の増加分^{*9} $\Delta \epsilon_i = \epsilon_i - \epsilon_{i-1}$ を縦軸におおの表示したものである。これによると荷重初期あるいは破壊近くで微震音が頻発する場合にはひずみの増加量が大きく、中間領域での微震音の発生の少ない区間ではひずみの増加量も少ないことがわかる。

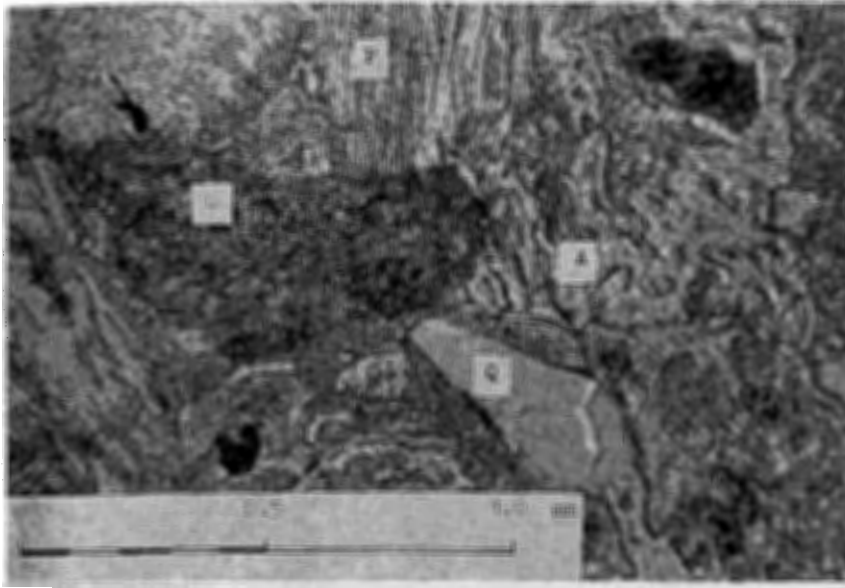
この類似性は微震音の発生が岩石内部の微小破壊によるものという仮定が正しいことを証明しているように思われる。すなわち岩石が不均質集合体であり応力

^{*6} X線回折試験の結果、粘土鉱物はほとんどモンモリロナイトであった。この粘土化した軽石部分は俗称「ミソ」と呼ばれている。

^{*7} 図は、(a)が室内実験、(b)が現場実験の結果である。

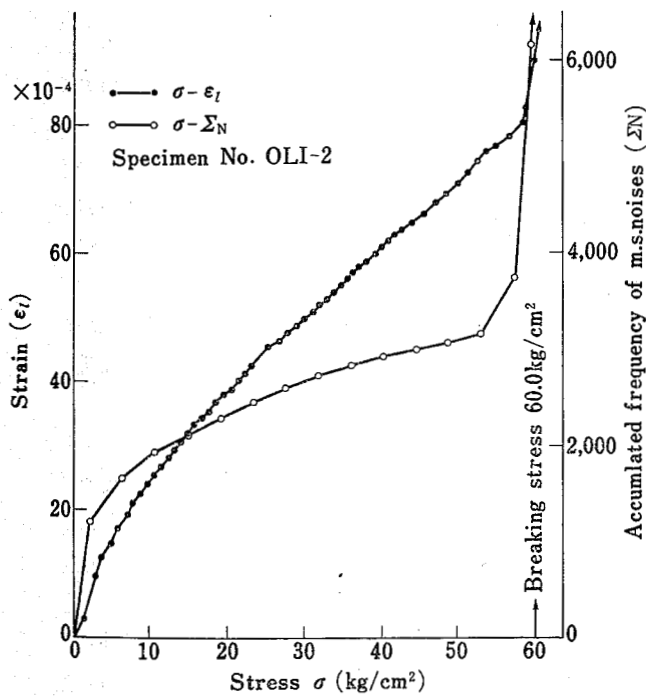
^{*8} たて歪を ϵ_1 、よこひずみは ϵ_2 (ただし ϵ_1 とは符号は逆) で表示した。室内実験では ϵ_2 の測定は行っていない。

^{*9} σ の増加速度が一定でないため厳密には、ひずみ速度として表わすことはできないがひずみ速度と考えると差しつかえない。



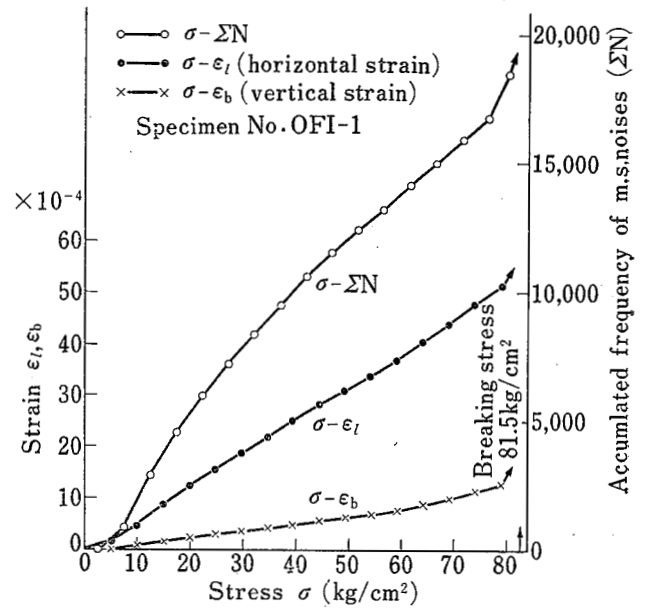
P : pumice
Q : quartz
C : clay
A : volcanic ash
(glass).

Fig. 8 Photomicrograph of "Oya-ishi".
(Thin section, // nicol)



[laboratory]

Fig. 9 (a) Stress-strain relationship and accumulated frequency curve of m. s. noises. (increasing uni-axial compressive load)
応力-ひずみ曲線と応力-微震音累積発生数曲線 (一軸圧縮)



[field]

Fig. 9 (b) Stress-strain relationship and accumulated frequency curve of m. s. noises. (increasing uni-axial compressive load)
応力-ひずみ曲線と応力-微震音累積発生数曲線 (一軸圧縮)

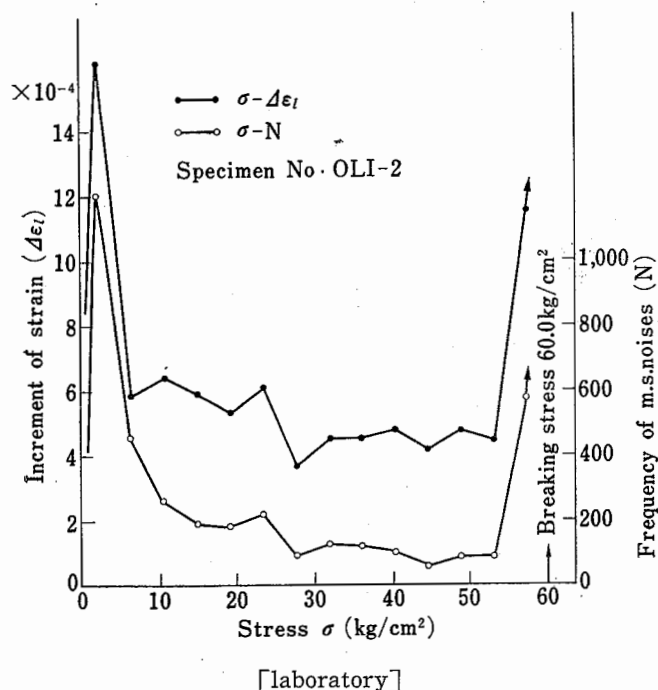


Fig. 10 (a) Correlation between frequency of m.s. noises and increment of strain. (increasing uni-axial compressive load)
微震音発生頻度曲線とひずみの変化量曲線（一軸圧縮）

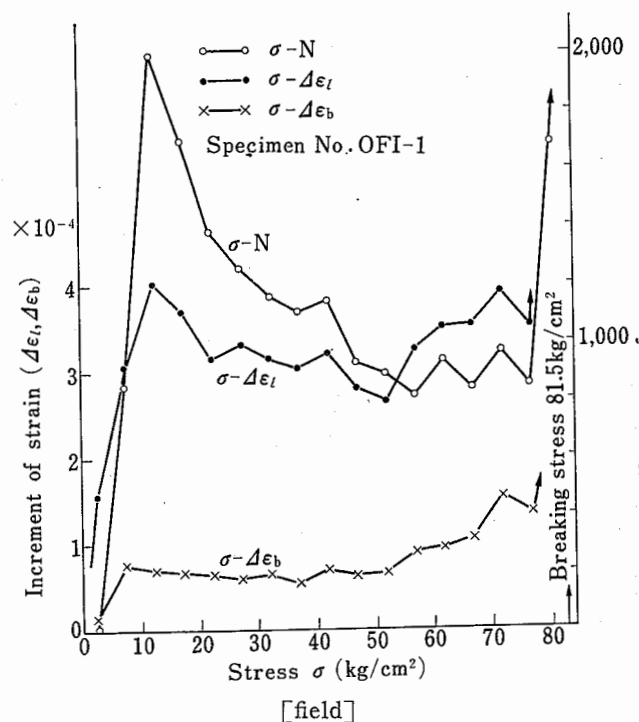


Fig. 10 (b) Correlation between frequency of m.s. noises and increment of strain. (increasing uni-axial compressive load)
微震音発生頻度曲線とひずみの変化量曲線（一軸圧縮）

をうけている岩石はその構成物質あるいはそれらの境界に潜在する欠陥の周辺に応力集中による微小クラックが発生する。これらの微小クラックが集積されマクロ的にみると変形となってあらわれるものと解釈すると **Fig. 10(a), (b)** にみられた微震音の発生数とひずみの増加量とが対応を示すことも肯定されるであろう。

そして大谷石の場合には、前述したように岩石の構成鉱物、組織の特殊性に起因して、微震音の発生と変形の相関がより顕著にあらわれる結果となったように思われる。

3.2.2 一定荷重持続圧縮

Fig. 11 はクリープ破壊^{*4}過程のときの変形および累積発生頻度を示したものである。縦軸はひずみ ϵ および累積発生頻度 $\sum N$ 、横軸は一定荷重値まで荷重を増加していくときには応力 σ を、一定荷重値に到達したのちは経過時間 t をとって表示した。

荷重増加中の変形の推移は前に述べた単純増加圧縮の場合と同様である。

一般に岩石のクリープはひずみの増加の様相によっ

てつぎの3期間に分けられる。すなわち、第1期としてひずみ速度が減少する期間、第2期はほぼ一定のひずみ速度で変形する期間、第3期はひずみ速度が増加し破壊にいたる期間である。**Fig. 11** をみると一定荷重に到達した直後を除けばほぼ上述の関係が認められる。ただし、ひずみ速度が急激に増加するのは破壊の直前になってからで、これは遅れ破壊に似た現象といえる。なおこの遅れ破壊は比較的高応力下のクリープ破壊にみられるものであるとされている⁷⁾。また一定荷重に到達した直後のひずみ速度の大きいことはまだ荷重増加中の影響^{*10}が残っているためのものであろう。

Fig. 12 は、荷重増加中、一定荷重下における微震音の発生頻度とひずみの増加を示した図である。荷重増加中の発生パターンは単純増加圧縮のパターンと同じでありこの場合にも微震音の発生頻度はひずみの変化量と対応していることがわかる。一方、クリープ区間のほうは前述のようにひずみ速度は3区間に分けられるが、微震音の発生もこのひずみ速度にほぼ対応し

*10 遅れ弾性による一種の余効があると考えられる。

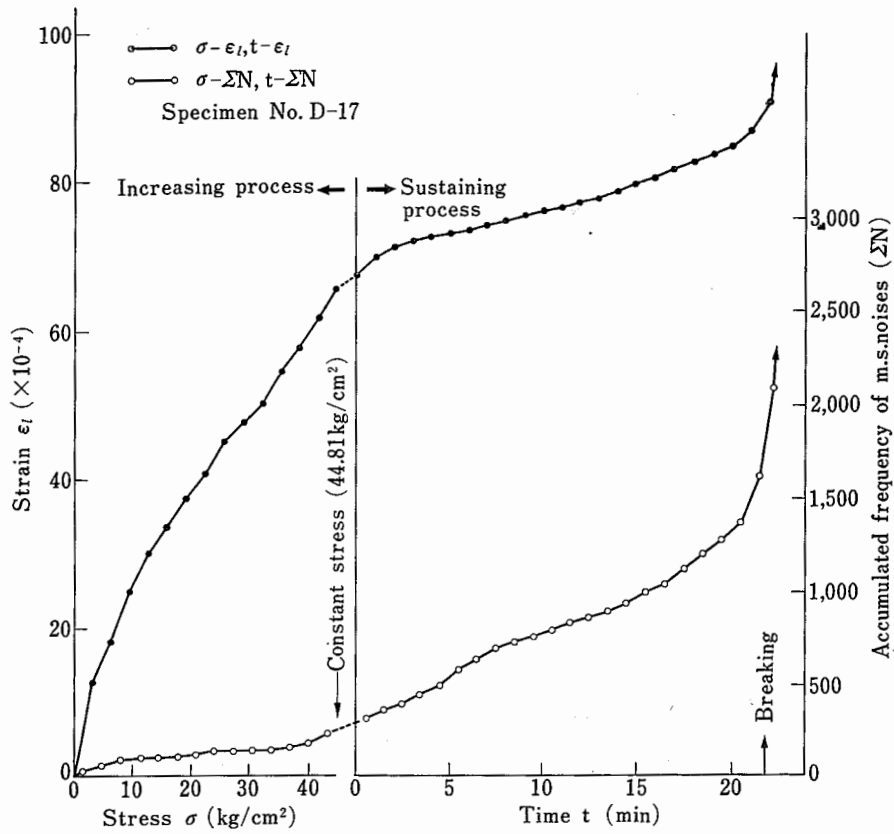


Fig. 11 Stress-strain relationship and accumulated frequency curve of m. s. noises.
(laboratory, sustaining uniaxial load)
応力-ひずみ曲線と応力-微震音累積発生数曲線 (一定持続荷重)

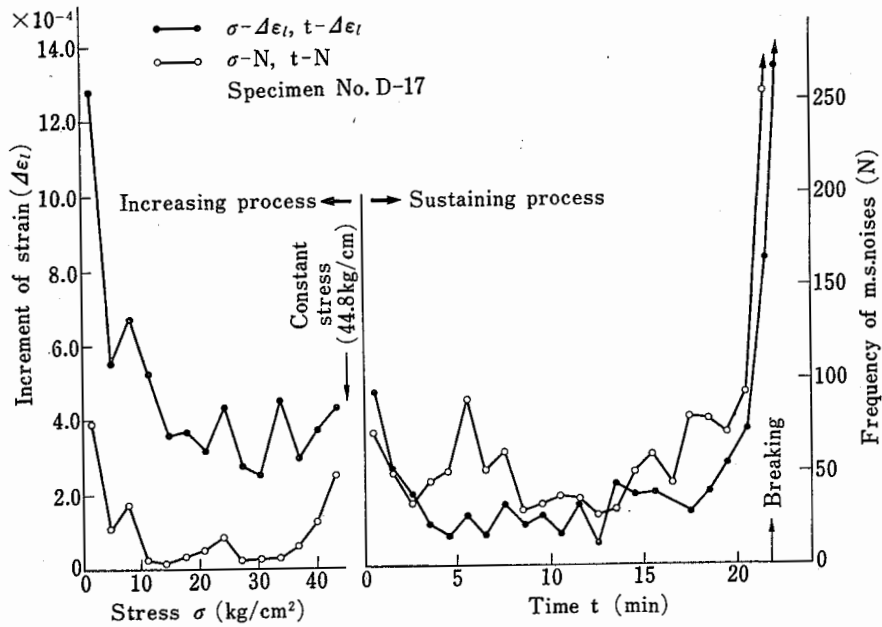


Fig. 12 Correlation between frequency of m. s. noises and increment of strain.
(laboratory, sustaining uni-axial compressive load)
微震音の発生頻度曲線とひずみの変化量曲線 (一定持続荷重)

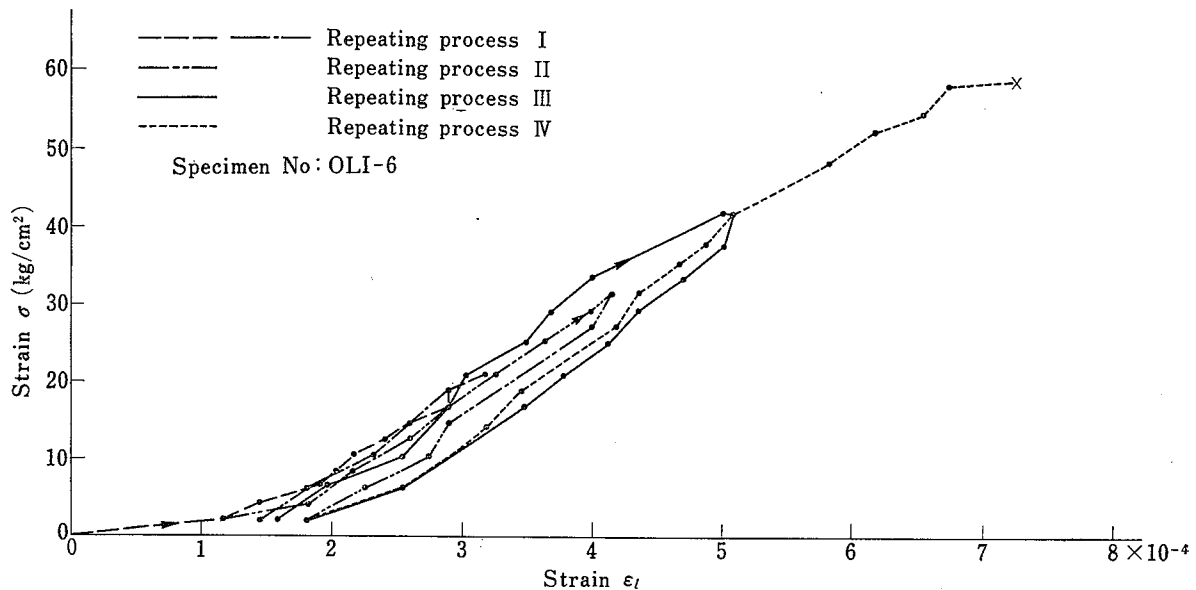


Fig. 13 Stress-strain curve. (laboratory, repeating uni-axial compressive load)
応力-ひずみ曲線 (繰返し荷重)

た発生パターンを有している。すなわち、一定荷重状態に入った直後は、荷重増加中の影響をうけて荷重増加中と同じ程度の発生数を示すが、その後ひずみ速度が減少するにつれて発生も減少し、ひずみ速度が一定となる第2期に入ると発生数も少ない状態で推移する。さらに時間が経過すると再び微震音の発生頻度が増加しはじめ、破壊の開始とほぼ同時に急激な頻発を示した。この第3期への移行を示すひずみ速度の増加があらわれるときと微震音の頻発が出る時期を比較するとわずかに後者が先行しているようである。しかしそれも破壊の開始を決定づける先行指標となりうるほどの明確さは有していないように思われる。

3.2.3 繰返し圧縮

Fig. 13 は繰返し圧縮試験の際の応力-ひずみ曲線の一例を示した。Fig. 14 は Fig. 13 を書き替え、圧縮応力を横軸に、変形と累積発生数を縦軸に表示した。荷重速度の増加または減少が正確に一定とできなかったため、圧縮応力と経過時間は完全に対応していないが横軸は時間軸と考えてもよい。

図からわかるように荷重増加区間における微震音の発生に比して、荷重減少区間およびすでに応力履歴をうけた区間での発生数は極端に少ない。これは Fig. 13 のヒステリシスカーブが示すように荷重が小さい段階から永久ひずみが残っているということから載荷の

初期から弾性変形ばかりでなく塑性変形をも生じていることを証明している。これも前に述べたような大谷石の構成物質・組織に依存する現象と思われる。微震音の発生が構成物質の粒子および粒界の微小破壊によるものとすれば、一度応力をうけた材料ではその応力に対応した微小破壊がほとんど完了してしまうために、その後の応力減少区間および前に受けた応力までの応力増加区間での微震音の発生が少なくなることになる。

Fig. 15 は各応力区間における微震音発生頻度 N 、ひずみの増加量 $\Delta \epsilon$ を示したものである^{*11}。 N - σ 曲線、 $\Delta \epsilon$ - σ 曲線の類似性は前述の単純増加圧縮の場合ほど明瞭ではないが認められる。とくに応力履歴をうけてない区間ではその類似性は高いようである。

応力履歴をうけていない区間のみの微震音の発生頻度はやはり載荷初期と破壊近くで大きいという発生パターンを示し、これも単純増加圧縮の場合と変わらない。したがって応力履歴の有無が発生パターンを変えることになる。(1)の単純圧縮の場合の室内実験と現場実験の結果の発生パターンを比較すると現場実験における載荷初期の発生ピークがやや右にずれているのは現場実験の場合には載荷の前に若干のプレロードを

*11 荷重減少区間は、微震音の発生がほとんどみられないことから、荷重減少区間を省略して図を作成してある。

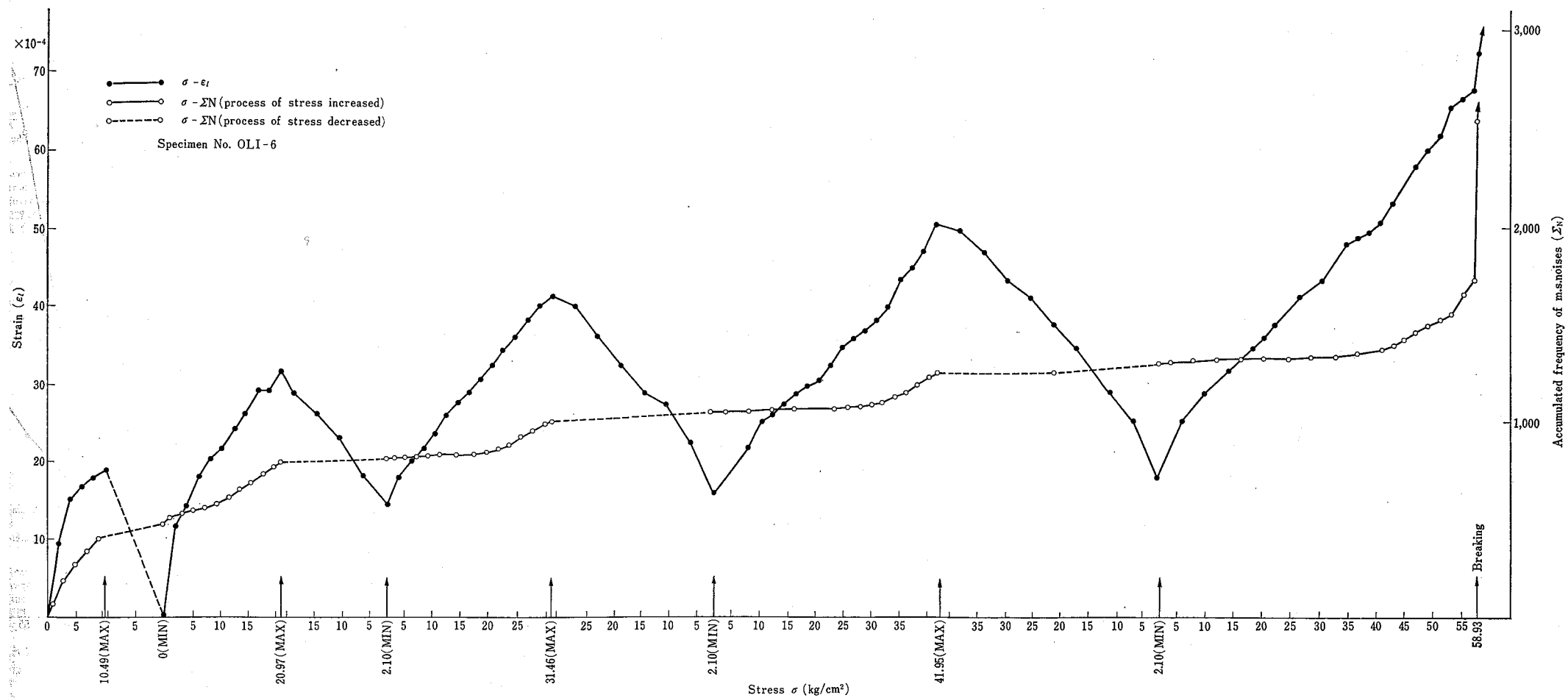


Fig. 14 Stress-strain relationship and accumulated frequency curve of m. s. noises.
(laboratory, repeating uniaxial compressive load.)

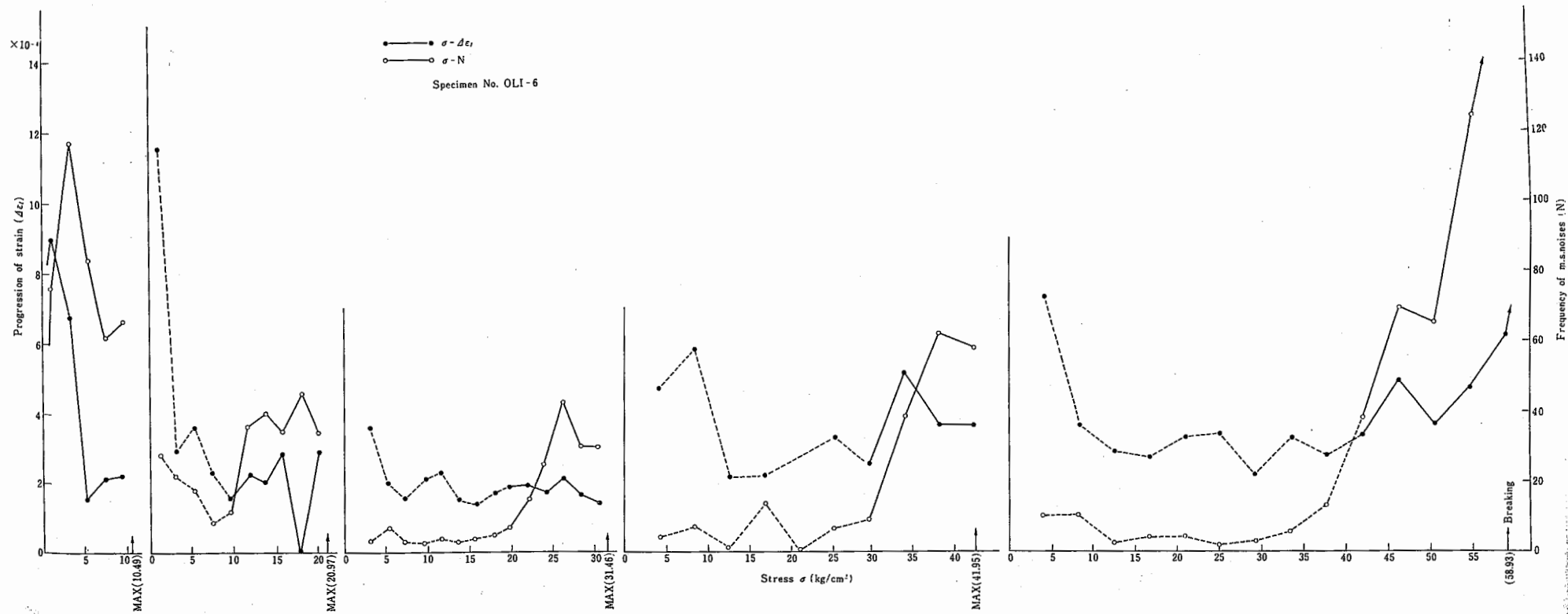


Fig. 15 Correlation between frequency of m.s. noises and increment of strain (laboratory, repeating uniaxial compressive load)

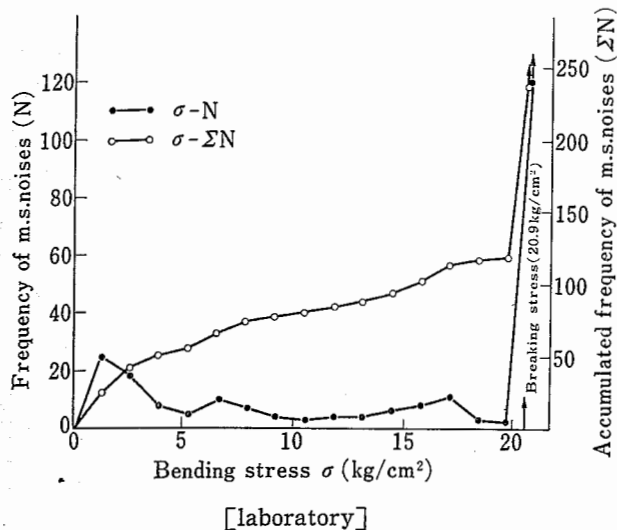


Fig. 16 (a) Accumulated frequency curve and frequency curve of m. s. noises. (increasing flexural load)
微震音累積発生頻度曲線と発生頻度曲線 (曲げ荷重)

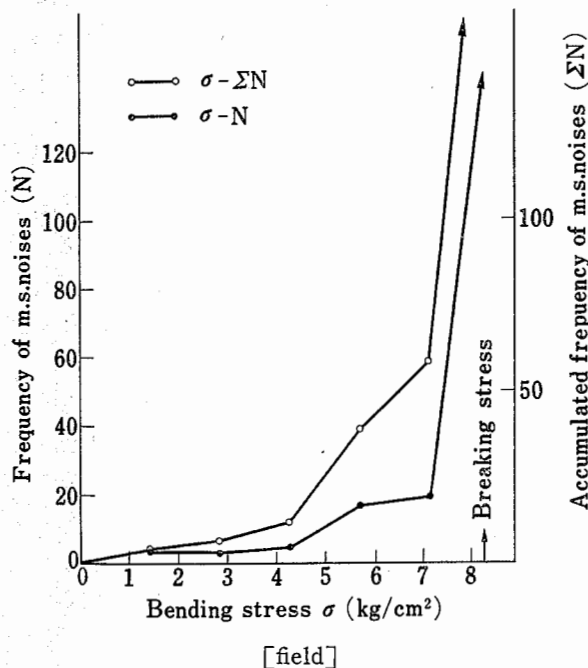


Fig. 16 (b) Accumulated frequency curve and frequency curve of m. s. noises. (increasing flexural load)
微震音累積発生頻度曲線と発生頻度曲線 (曲げ荷重)

かけたためにこれも一種の応力履歴とみなされ、荷重直後の発生数が少なくなったためによるものと説明できる。

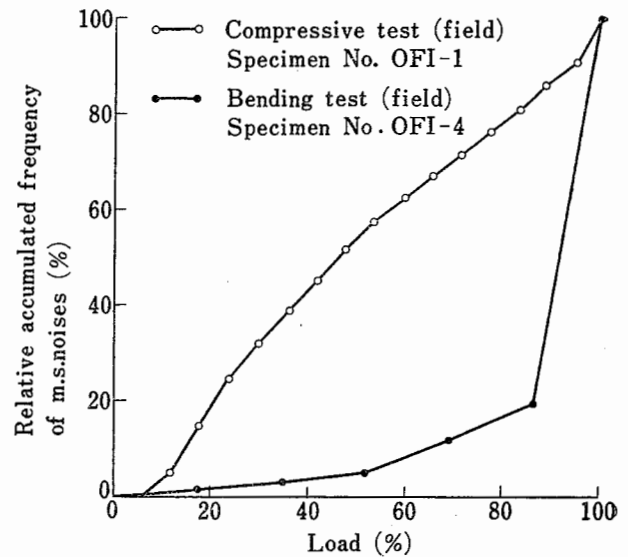


Fig. 17 Relative accumulated frequency of m. s. noises
微震音相対累積発生率

3.2.4 曲 げ

曲げ破壊過程における微震音の発生パターンはいままでの各種の圧縮破壊過程における発生パターンとは多少異なったものとなっている。Fig. 16 (a), (b) に示すように発生する微震音の数は圧倒的に少なく、荷重の初期においても、きわだった頻発がみられず、破壊の直前になって頻発するという傾向をみせている。なお室内実験では、荷重初期に若干微震音の発生がみられ、圧縮破壊過程における発生パターンにやや近いようであるが、現場実験では発生パターンは全く異なっている。

曲げ破壊・圧縮破壊過程における両者の発生の様相の差異は Fig. 17 の相対累積発生率でみるとより明らかである。図の縦軸はおのの破壊過程において発生した微震音全数を 100 として、各応力区間で発生した微震音の数を累積しパーセント (%) で表示し、横軸は破壊応力を 100 として応力をパーセント (%) で表示している。

以上のように曲げ破壊における微震音の発生が少ないことはそれが破壊のメカニズムの相異からくるものであろう。すなわち岩石の引張強度は圧縮強度に比べてはるかに低く、そのため曲げ破壊はほとんど引張破壊に支配されることになる。そうして岩石の引張破壊は一般的には岩石を構成する粒子を結合する接着物質の

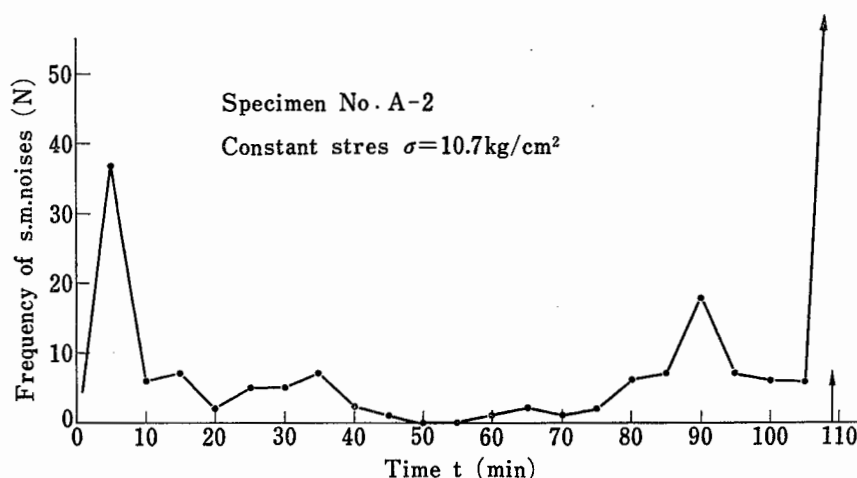


Fig. 18 Frequency curve (laboratory, sustaining flexural load)
発生頻度曲線 (室内, 持続荷重曲げ試験)

破壊によるものと考えられるから、圧縮破壊のような微小クラックが発生することが少なく、接着物質の引張強度をこえることによる微小破壊が直ちに全体破壊に連なると考えると微震音の発生の少ないことも説明できる。

なお室内実験で試験材の引張応力側と圧縮応力側におのおのピックアップを取り付け同時に測定を行なった実験の結果では、引張側に比して圧縮側で検出される微震音の数はやはり多く、かつ微震音の振幅も圧縮側のそれが大きい傾向を示した。

つぎに Fig. 18 は室内実験での一定持続曲げ荷重を加えたときの発生パターンである。一定荷重値 (予想破壊荷重の90%) まで増加中は前の Fig. 18 に示したものと相異はない。この図では一定荷重値に到達後、約100分経過したのちに破壊したことを示しているが、圧縮クリープの場合と同様、最初は荷重の連続増加の影響で若干発生している。しかしその後は10回/5min程度の発生頻度で極端に少なく破壊とほぼ同時に頻発する。したがってこのパターンからは破壊を予測する明らかな徴候は認められない。ただ破壊の20分以前のあたりから微震音の数がやや増加したことを示しているが、これも決定的なものとはいえないであろう^{*12}。

3.3 微震音エネルギー大きさ別発生頻度

前節 3.2 では微震音の発生数について荷重あるいは変形などとの関連を求めたのであるがここでは微震音

の大きさについて検討する。

破壊過程において発生する微震音はその振幅には大小さまざまなものが含まれており、すでに第一報で報告したようにこれらを大きさ別に分類しそれらのおのおの発生度数をとるとこの微震音の大きさとその発生度数との間にはある統計的規則性が存在することが認められている。すなわち

$$N(e) = k \cdot e^{-m} \quad (1)$$

なる関係が成立する。ここに $N(e)$ はエネルギー e を有する微震音の数、 k および m は実験定数である。なおエネルギー e は、検出された微震音の片振幅 (電圧で示される。) を2乗して得られた数値で単位はとくに決めていない。

なお m 値は岩石によって異なることがすでに知られている。また m の値は変形との関連があり、したがって同種岩石であってもその変形状態によって若干変化することが認められ、その結果については第一報においても報告した。今回の実験についても微震音のエネルギー大きさ別頻度分布をとり、これについて考察した。

3.3.1 単純増加圧縮

Fig. 19 (a), (b)^{*7} は単純増加圧縮過程において発生した全微震音について大きさ別頻度分布を示したもので縦軸は発生度数、横軸に微震音エネルギーの大きさをとり両軸とも対数目盛で表わしている。図にみられるように室内実験でも現場実験でもプロットされた点はほぼひとつの直線に沿っており上述の実験式(1)が成立していることを示している。

^{*12} これら曲げ破壊に際しては変形 (歪) の測定を実施していないため、変形と微震音の発生の対応については知ることができなかった。

として m の値は、1.8 前後であった。現場実験と室内実験との結果を比較するとエネルギーレベルにはとくに差はみられない。ただ微震音の発生数は現場実験のほうがはるかに多い。これは微震音の発生が試料の大きさに依存するいわゆる寸法効果といえるものであろう。なお現場実験での三軸圧縮破壊過程における微震

音のエネルギー大きさ別発生頻度も一軸圧縮のそれと差異は認められなかった。

Fig. 19 (a), (b) に示した実験例を荷重の大きさ別すなわち载荷初期から破壊までをほぼ4分割し、この各区間内で発生した微震音のエネルギー大きさ別頻度分布を Fig.19 と同様の手法で示したのが Fig.20 (a),

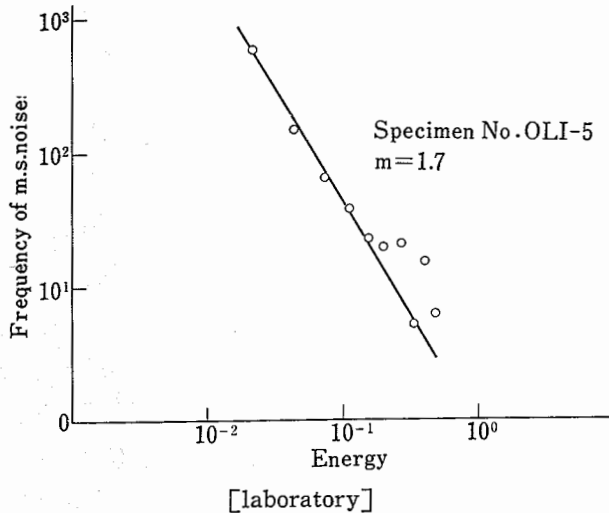


Fig. 19 (a) Frequency distribution of energy of m.s. noises. (increasing uni-axial compressive load)
 エネルギー大きさ別発生頻度分布 (一軸圧縮荷重)

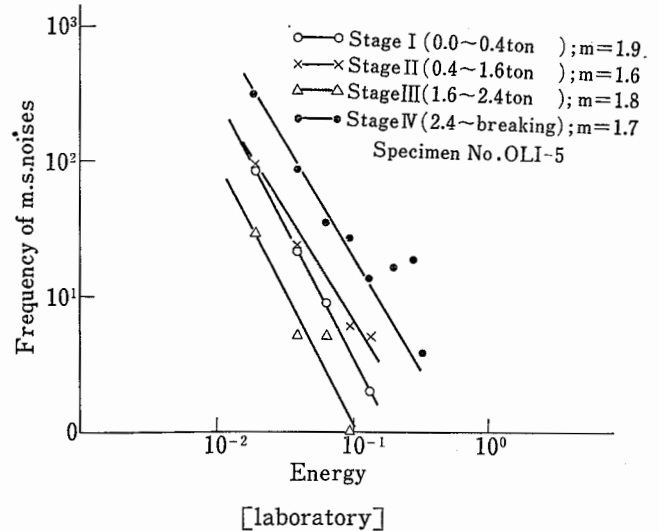


Fig. 20 (a) Frequency distribution of energy of m.s. noises for various stages of stress. (increasing uni-axial compressive load)
 エネルギー大きさ別発生頻度分布 (一軸圧縮荷重, 荷重域別)

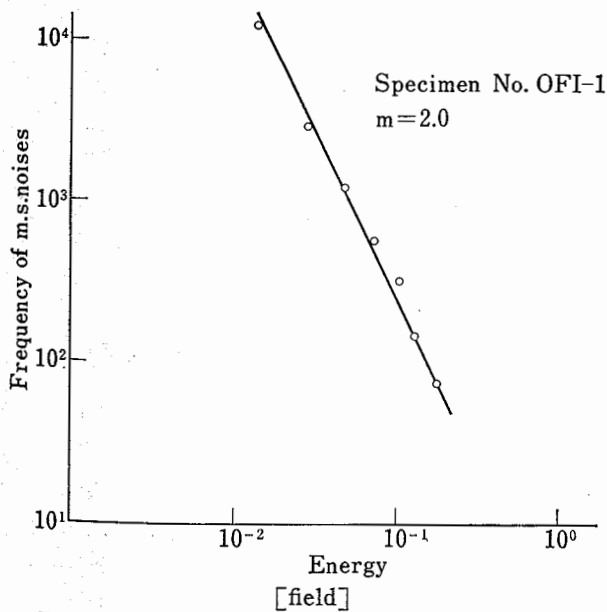


Fig. 19 (b) Frequency distribution of energy of m.s. noises. (increasing uni-axial compressive load)
 エネルギー大きさ別発生頻度分布 (一軸圧縮荷重)

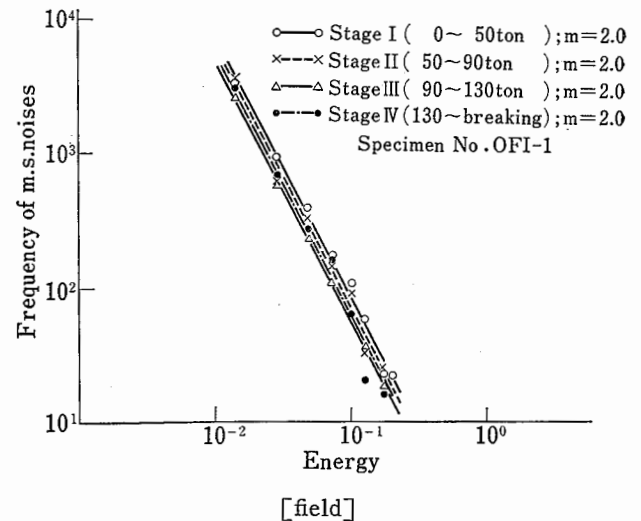


Fig. 20 (b) Frequency distribution of energy of m.s. noises for various stages of stress. (increasing uni-axial compressive load)
 エネルギー大きさ別発生頻度分布 (一軸圧縮荷重, 荷重域別)

(b) である。各荷重域毎に実験式 (1) の関係が成立している。また m 値は荷重帯域ごとにほぼ一定の値をとる例 (Fig. 20 (b)), ある程度ばらつく例 (Fig. 20 (a)) があった。第一報では, m 値が規則的に多少変動することすなわち, 荷重が大きくなると m 値が小さくなることが明らかにされていた。しかし大谷石の場合には実験結果からわかるように m 値の変化と荷重帯域との間には破壊の予測となるような明瞭な指標は得られなかった。したがって m 値の変動のみから大谷石の破壊の予測を行なうことはむずかしい。

3.3.2 一定荷重持続圧縮

Fig. 21 は一定荷重連続圧縮過程における微震音エネルギー大きさ別の頻度分布である。一定荷重値に達するまでの連続増加期間と一定荷重持続期間とに分けてプロットした。Fig. 21 にみられるように増加区間は前項の場合と同様であると同時に一定荷重区間においてもその分布形態はほとんど差が認められず, m 値は両者とも 1.6 程度となっている。

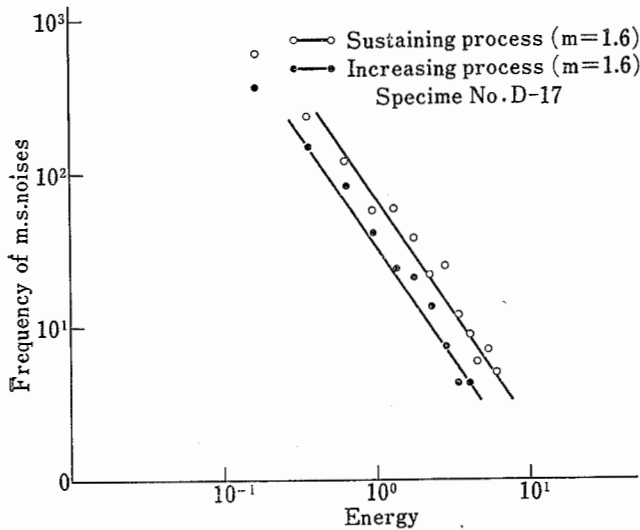


Fig. 21 Frequency distribution of energy of m. s. noises. (laboratory, sustaining uni-axial compressive load)
エネルギー大きさ別発生頻度分布 (一定持続荷重)

また一定荷重区間で経過時間別の同様のグラフを求めたが, 前項の荷重域別のグラフに差があらわれていなかったと同じく経過時間による差は m 値にもあらわれていない。このことはクリープ破壊過程においても, m 値により破壊の予測を行なうことが困難であることを示している。

3.3.3 繰返し圧縮

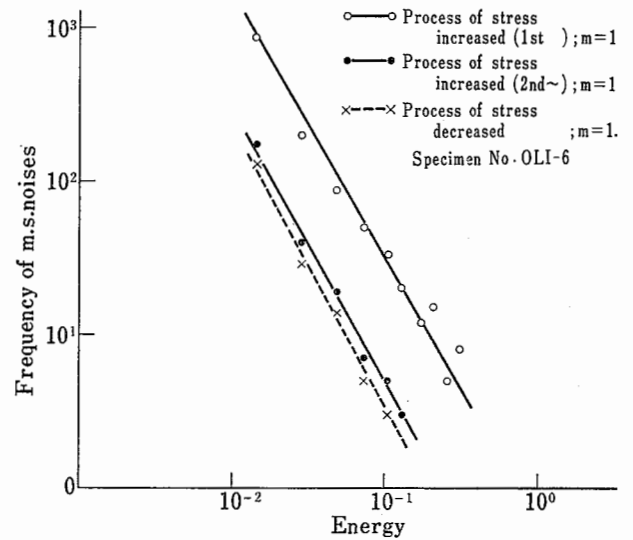


Fig. 22 Frequency distribution of energy of m. s. noises. (laboratory, repeating uni-axial compressive load)
エネルギー大きさ別発生頻度分布 (繰返し荷重)

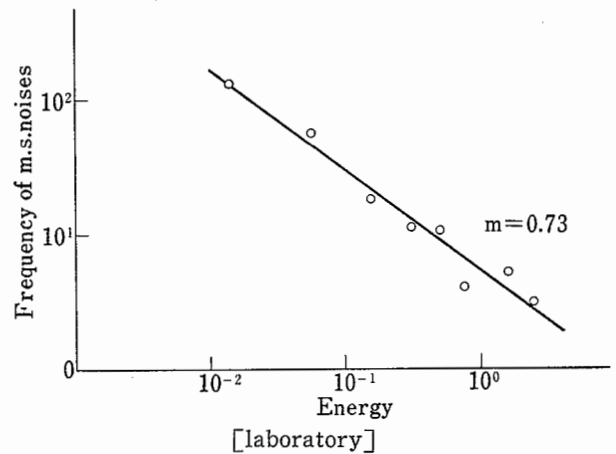


Fig. 23 (a) Frequency distribution of energy of m. s. noises. (increasing flexural load)
エネルギー大きさ別発生頻度分布 (曲げ荷重)

繰返し圧縮過程において発生した微震音についてもエネルギー大きさ別の頻度分布を求めたが, この場合 2.1.2(3)で述べたような荷重の増加・減少・増加……という荷重サイクルごとに分布がどのような変化を示すかに興味を持たれたが結果としては Fig. 22 に示すようにおのおのの区間で実験式 (1) が成立すること, また指数 m にはとくに変化があらわれないことが判明した。すなわち応力履歴の有無, 応力履歴の回数, 荷

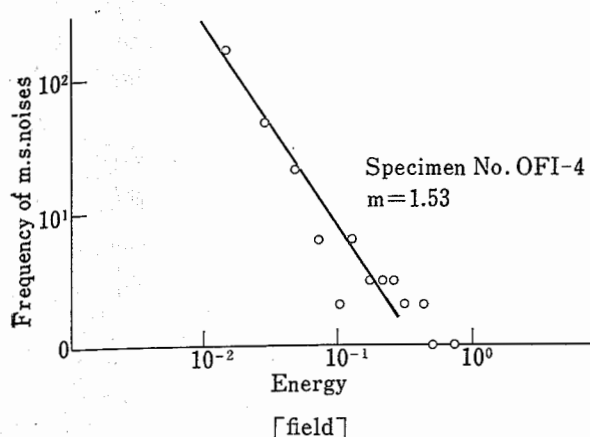


Fig. 23 (b) Frequency distribution of energy of m.s. noises. (increasing flexural load)
エネルギー大きさ別発生頻度分布 (曲げ荷重)

重の増加, 減少などによってその発生数は異なるけれども, 微震音のエネルギーの大小関係に依存する m 値はほとんど一定であるといえる。

以上のことは室内実験, 現場実験を通じていえることである。

3.3.4 曲 げ

Fig. 23 (a), (b) は曲げ破壊過程において発生した微震音についてのエネルギー大きさ別発生頻度のグラフである。実験式(1)の成立はいままでの各種の破壊過程における場合と全く同様である。ただし圧縮の場合と異なるのは m 値が小さく, グラフ上の直線の勾配がゆるくなる傾向が認められる。すなわち室内実験では 0.7, 現場実験においても 1.5 程度となっている。これは曲げ破壊の場合には相対的に小さなエネルギーをもつ微震音の数が少ないという結果を示したものであり, 3.2.4 でも述べたように破壊のメカニズムが圧縮の場合と本質的に相違することから生じた現象であろう。

3.4 微震音の減衰

室内実験・現場実験とも実験に供した試料においては微震音の発生源である微小破壊部からのピックアップまでの距離ははなはだ小さく, その伝播中の減衰についてはほとんど無視できるものと考えられることから微震音の解析には減衰についてはとくに考慮を払っていない。しかし現実の問題として, 検出ピックアップの位置と微震音の発生源との距離は近接し得るとは限らず, その場合当然微震音の減衰性状が問題となるであろう。

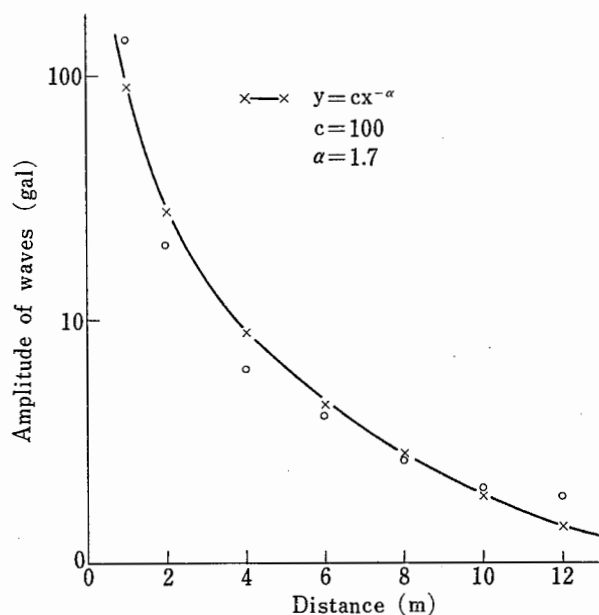


Fig. 24 Relationship between attenuation of shock waves and their transmitting distance.

打撃衝撃波の減衰試験

実際の実験方法は2.2.2(5)で述べたとおりであるが, 側壁岩盤の打撃による衝撃波は岩盤表面を伝わる表面波であり, 微震音のような岩盤内部から伝達される衝撃波とは異なったものであるが, 一応いずれも同媒質を伝わる弾性波であるという考え方から, この方法によって微震音の減衰性状を推定した。

ピックアップから一定間隔毎に離れた各点で打撃した場合に得られた各衝撃波形の解析の結果, 加速度と打撃距離の関係は Fig. 24 に示すとおりとなる。

一般に地震波については, 振幅は震源距離の増大によって減少し次式によってあらわされる。

$$y = c \cdot x^{-n} \exp[-\alpha x]$$

ここで y は振幅, x は震源距離, n は P 波 S 波では 1, 表面波では 0.5, 地震波では 0.5~0.2 程度とされ, α は地盤の粘性による係数で, 地盤の粘性に逆比例し周期の 2 乗ないし 1 乗に逆比例することが知られている。

また発破振動の減衰については, いくつかの実験式が示されているが, これらも

$$y = c \cdot W^a \cdot x^{-b}$$

の形であらわされている。ここに y は振幅, c は係数, W は発破薬量, x は距離で $a=1/2 \sim 1$, $b=1 \sim 2$ 程度の値となっている。前記の Fig. 24 に示した実験値を上式の型式であらわすと

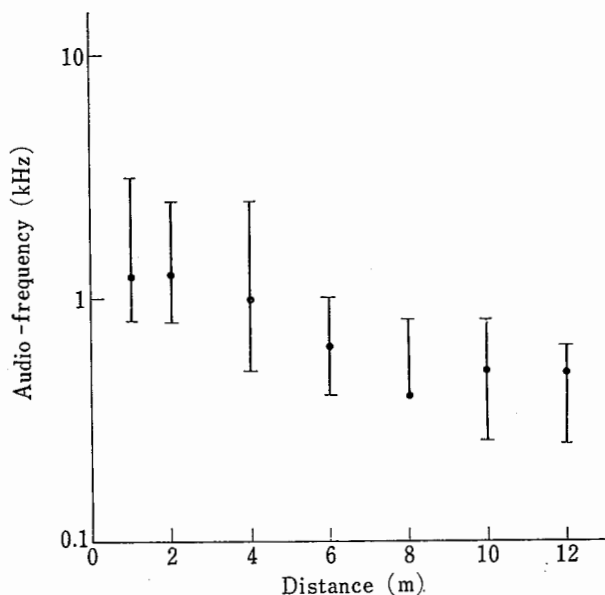


Fig. 25 Relationship between audio-frequency of shock waves and their transmitting distance.

打撃衝撃波の減衰試験 検知される卓越周波数

$$y = c \cdot x^{-b}$$

ここで c は打撃エネルギー、岩盤の状態を含めた定数として $c=100$, $b=1.7$ という実験定数の下で近似される。図中に実線で示した曲線がそれである。

$$y = 100 \cdot x^{-1.7} \quad (2)$$

Fig. 24 からわかるとおり、到達距離による減衰効果はかなり大きく、これは大谷石の微震音のエネルギーが小さいことを考えあわせ、ピックアップの設置位置を選択する場合にかなり考慮しなければならない事項となることを示している。

つぎに打撃による弾性波の周波数を解析した結果、これにも伝播距離の影響があらわれている。Fig. 25 は表面波の伝播距離毎の卓越周波数を示したものである。これによると多少のパラッキはあるが距離が離れるにしたがって周波数が小さくなる傾向を示していることがわかる。

一般に周波数の高い成分は低い成分にくらべて減衰度は大きいとされているから Fig. 25 の傾向は当然のことといえるかもしれない。

4. 結 果

大谷石微震音について、室内実験・現場実験におい

て各種の破壊過程の下での発生状況をとらえ、その発生特性などを考慮し、破壊予測の可能性について検討した。そのおもな結果はつぎのようなものである。

- (1) 大谷石（湿潤状態）の微震音は他の岩石にくらべるとその有するエネルギーは小さいものが多い。
- (2) 微震音の発生パターンは载荷初期の低応力下で頻発して、そのうち荷重の増加とともに発生頻度は減少し、破壊近くなって再び頻発する傾向がある。このパターンは大谷石に特有のもので他の岩石ではほとんどみられない。これは大谷石の構成物質の結合力の弱さや内部に存在する空隙あるいは粘土に依存する現象と考えられる。
- (3) 曲げ破壊過程で生ずる微震音は圧縮破壊過程で生ずる微震音よりもはるかにその数は少なく、かつそのエネルギーレベルも小さい。また頻発するのは破壊直前においてである。これは両者の破壊メカニズムの相違に起因するものと考えられる。
- (4) 一定持続荷重をうけているクリープ破壊過程では微震音の発生は荷重増加中にくらべると少ないが、破壊の開始にわずかに先行して発生数の増加が認められる。
- (5) 繰返し荷重をうける場合の微震音の発生についてみると、一度でも応力をうけた場合には、その応力の区間内で発生する微震音の数は、全く応力履歴のない場合の発生数にくらべてかなり少ない。
- (6) 微震音の発生パターンと試料の変形との相関はかなり高く、微震音の発生数が多い区間では変形量も多い。このことは前記のクリープ破壊過程における発生頻度と歪速度の関係においても認められた。
- (7) 微震音のエネルギー大きさ別発生頻度分布は指数式で示され他の岩石の場合と同様、微震音の発生に統計的規則性が存在する。指数式に含まれる指数 m の値は、圧縮破壊過程と曲げ破壊過程の場合に相違がみられるが、単純増加荷重・クリープ荷重・繰返し荷重などの荷重条件による差異は認められていない。
- (8) 微震音が岩盤を伝播する際の減衰は比較的大きく、検出される微震音のエネルギーの小さいことの要因になっている。

以上のような微震音の発生特性から、今後採石現場において微震音の検出による落盤・崩壊の予知を試み

るに際して以下のようなことを考慮すべきであろう。

微震音の発生パターンから考えて、岩盤（残柱・天盤）の荷重状態に変動が生ずれば必ず微震音の発生があり、その発生頻度が増大すれば破壊の進行がはじまったものと解釈できる。なお微震音の頻発時期と全体破壊（落盤・崩壊）の生起する時期との時間的間隔は小さいものと思われる。

微震音の発生頻度とひずみとの間の相関が高いことから岩盤の変形量の測定を同時に実施し、両者の結果から岩盤の応力状態を推定することが必要と思われる⁴⁾。

微震音を検出するためのピックアップ位置はクラックなどの顕在欠陥の周辺、隅角部の応力集中が予想される場所など過去の災害事例などを参考にして危険個所に近接した場所を選定する必要がある。

微震音の検出による落盤・崩壊の予知方法を確立す

るためには、今後長期測定を実施し、微震音の発生の状況を連続的に記録すると同時に、周辺岩盤の挙動とくに変位の状況などを観測し、両者のデータの相関を求めるなど、数多くのデータの集積と、それらの解析を行なう必要があるであろう。

謝 辞

本研究の一部は元当所研究員（現東京労基局）河原節雄氏が担当した。また試料の提供や現場実験にご協力頂いた栃木労働基準局、栃木労働基準監督署、大谷石材組合災害対策協議会の関係各位に対して謝意を表します。さらに採石現場のジャッキテストを計画されその実施に際してわれわれに現場実験の機会を与えてくださった早稲田大学理工学部資源工学科探査工学研究室遠藤講師はじめ研究室の諸氏に対して御礼を申し上げます。

（昭和47年9月30日受理）

参 考 文 献

- 1) 前，江頭：産業安全研究所研究所報告 Vol. 16-No. 1 (1968)
- 2) 前，中尾：材料 Vol. 17-No. 181 (1968)
- 3) 栃木労働基準局監督課編：大谷石と労働 (1967)
- 4) 遠藤，田中，楠：日本鉱業会昭和46年度秋季大会分科研究会資料 A2-2 (1971)
- 5) たとえば，久野：“火山と火山岩” 岩波 (1954)
- 6) たとえば日本粘土学会編：“粘土ハンドブック” 技報堂 (1967)
- 7) たとえば日本材料学会編：“岩石力学とその応用” 丸善 (1966)
- 8) たとえば土木学会：“振動便覧” 技報堂 (1966)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-21-2

昭和 47 年 12 月 30 日

発行所 労働省産業安全研究所

東京都港区芝 5 丁目 35 番 1 号

電話 (03) 453-8441 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

UDC 541.25 : 661.91 : 661.96

水素の爆発危険性についての研究 (第2報)

—水素-空気混合物の爆発圧力—

柳生昭三・松田東栄

産業安全研究所研究報告 RIRS-RR-21-4 1~7

水素-空気混合物の爆発圧力を常圧から 50 kg/cm^2 までの圧力下で測定し、水素の爆発圧力に及ぼす高圧の影響を検討した。また同時に、最高圧力到達時間および圧力上昇平均速度も求めた。実験は直径 7.5 cm 、長さ 50 cm の筒形耐圧容器中で、火炎の上方伝ばにより行なった。

(図7, 参3)



UDC 541.25 : 661.91 : 661.96

Studies of Explosive Characteristics of Hydrogen. (2nd Report) Explosion Pressures of Hydrogen-Air Mixtures at High Pressures.

S. Yagyu and T. Matsuda.

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety.

RIIS-RR-21-4 1~7 (1973)

Explosion pressures of hydrogen-air mixtures were measured at the pressures from atmospheric to 50 kg/cm^2 , in a 7.5 cm diameter and 50 cm high cylindrical bomb. From the records, the times to attain maximum explosion pressures and average rates of pressure rise were determined.

(Fig.7, Ref.3)

