

岩石内でのアコースティック エミッションの特性とその観測

京都大学大学院 〇柳田 俊, 佐野 橋

京都大学工学部 正会員 寺田 亨

1. 緒言

Acoustic Emission (以下 AE という) は近年金属材料の分野で非破壊検査の一手段として注目されているが¹⁾, 鉱山学, 岩石学の分野では Rock Noise として従来から知られていた²⁾。レベル, Rock Noise として検出されていた波動の周波数が高々可聴周波数帯域にとどまっていたが, Scholz は 100 KHz ~ 1 MHz までの AE 波を検出し, 従来の数百倍の AE のカウント数を検出するようにした³⁾。筆者らは, 岩石のような脆性材料内での AE 波の波の観測から研究を始め, 波動的な特徴を考慮して AE の発生数をカウントし, これらの結果について考察した。今回は岩石力学の分野で近年話題とよんでいる剛性試験機を用いて岩質試料の応力ひずみ関係とあわせて, その間に発生する AE を観測し, 試料が破壊していく状況と AE との関連性を見出す実験的研究を行なったので, その結果について報告する。

2. AE の測定原理

岩石のような脆性材料内に Micro-fracture が生じた時には, その周辺にたくわえられていたひずみエネルギーは表面エネルギーと運動エネルギーに変わって 解放され AE が発生する。脆性材料内に存在する既存の小さなクラックや空隙・構成粒子の大きさに近敵するものと考えられているから, 実際の Micro-fracture が生じる時には, その大きさは構成粒子の大きさに等しいかあるいはその数倍にとどまると考えられる。既存のクラックの閉塞や Micro-fracture を検出するためには, (クラックの長さ) ÷ (クラックの進展速度) = (Micro-fracture の継続時間) の関係から, 約 1 μsec の分解能を持つ測定システムが必要となる。実際には AE 波の伝播にもとより高い周波数の急激な減衰などがあって, 測定システムの周波数特性は 10 KHz ~ 2 MHz 位が適当と考えられる。Fig. 1 に

筆者らが AE の観測に用いた測定装置のブロック図を示す。Fig. 2 は岩石を加熱し, 熱応力によって発生した AE を本装置によって観測した一例を示したものである。参考のために従来から用いられている破壊音測定装置 (周波数特性 600 ~ 16,000 Hz) によって

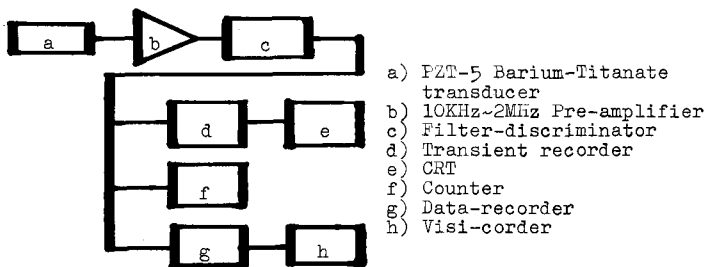


Fig. 1 Block diagram of AE detection and Monitoring system

も同時観測を行なっている。すなわち, 岩石の熱応力による破壊も構成粒子の大きさに近敵するものと考えられるので, この程度の規模の Micro-fracture は従来の可聴域の検査装置では検

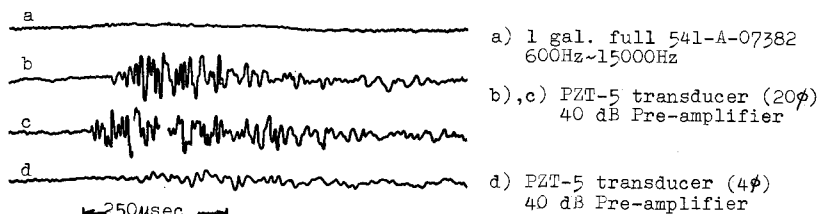


Fig. 2 Wave form of AE in Kitagi Granite by thermal stress

おぼろげにわがわが。

3. 実験方法

測定に用いた Frequency-discriminator は、1つの Micro-fracture によって発生した AE 波の信号が Band-pass filter を通った後、ある一定基準レベル(可変)以上のものであれば必ず一つのパルスとしておぼろげにようにするために不感時間とパルス発生機構と、ある一定基準レベル以上の信号を全てパルスに変換して発生する機構とを備えている。つまり、センサーに感知される AE 波の継続時間を推定することができれば、Micro-fracture の発生数がカウントできる。また、トランジェントレコーダは、信号が設定されたトリガーレベルに達する以前の波も観測することのできる過渡現象記憶装置である。Fig. 3 は、熱応力を加えて花崗岩中に発生させた Micro-fracture からの距離が 20cm の点での AE 波をトランジェントレコーダを用いて観測したものである。Fig. 2 に示したデータレコーダによる波とは異なり、SN 比も改善されており、P 波、S 波がはっきりと識別できる。しかも 300 μ SEC $\sim$ 1m SEC 位で完全に減衰することおぼろげである。Fig. 4 は掃引を長くして AE の発生頻度を調べたものであるが、急激な加熱にもかかわらず、AE は全く独立して発生していることおぼろげである。そこで、上記の実験結果にもとづいて、Micro-fracture の数をカウントする場合の Frequency-discriminator の不感時間と 300 μ SEC または 1m SEC に設定することにした。このようにして、トリガーレベルを越える AE 波は全部パルスに変換してカウントするだけでなく、1つの Micro-fracture にもとづいて AE を 1つのパルスに変換してカウントすることにした。高周波振動現象については従来は必ずデータレコーダに記録しておき、低速で再生、ダビングして最終的に電磁オシログラフで観測する方法を用いるのが通常であったため、SN 比が悪く、観測周波数も 200 KHz が上限で、P 波の到着時や、押し引き等、多くの情報(ノイズ)レベル以下にかくされてしまっていた。一方シンクロスコープによる観測もトリガーをとることが難しく、データレコーダでの観測と同様に AE に関する多くの情報をとらえることがおぼろげであった。Fig. 3 の波のからも推察できるように、何處かにセンサーを置いて同時観測すれば、Micro-fracture

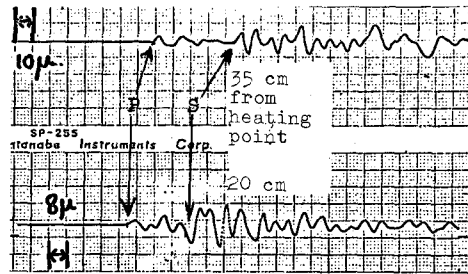


Fig. 3 Wave form of AE in Kitagi-Granite by thermal stress

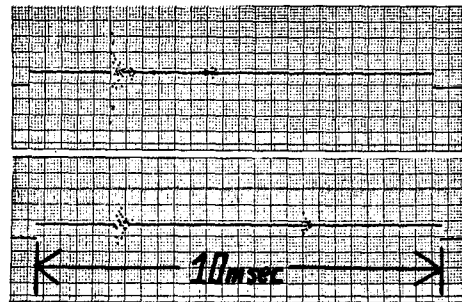


Fig. 4 AE by thermal stress; long sweep

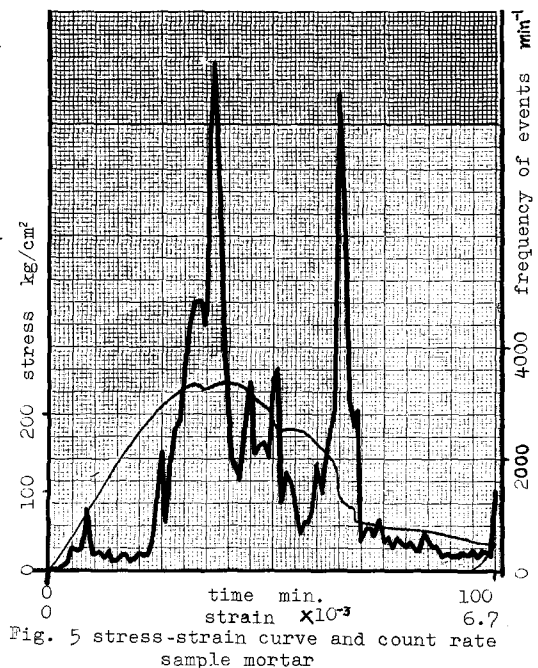


Fig. 5 stress-strain curve and count rate sample mortar

の発生位置と決定することも可能と考えられる。

4. 実験結果

Fig. 5はセリタルの応力-ひずみ曲線とAEの頻度を示したもので、約16万個のMicro-fractureが観測できた。強度の約半分位からAEのカウント数が増え始め最大応力を少し越えたpost-failure領域で頻発していることがわかる。なお剛性試験開始時より8分経過した所で発生数が増大してゐるが、これは既存クラックの閉塞による影響とも考えられる。AEの頻度は応力-ひずみ曲線の凹凸と正確に対応してゐること、および応力緩和が認められる附近ではAEが多くカウントされていることは極めて興味深い現象である。また、post-failure領域でAEの発生が減りクラッキングが起らなくなることは、セリタルの一軸圧縮試験時の載荷方向に直交する方向における弾性波の伝播速度に夫々の寄与の実験結果によってもよく裏づけられている。Fig. 6⁴⁾

ところでクラッキングにおいて、新しい表面を作るためには、表面エネルギーが供給されなければならない。AEの運動エネルギーも考えられると次のようになる。

$$\Delta \text{ひずみエネルギー} = \Delta \text{表面エネルギー} + \Delta \text{運動エネルギー}$$

剛性試験機は大きな変形が生じるやいばや、油圧ポンプが閉じて外部エネルギーを供給しなくなるので、クラッキングには必要表面エネルギーは試料中にたくわえられたエネルギーから供給されなければならない。すなわち、これらの伝播は応力緩和を引き起こす。応力緩和時には非常に巨視的クラックが現れるとの報告がある⁵⁾。特に応力-ひずみ曲線上の応力緩和と考えられる所でAEのカウント頻度が増えることは上述のエネルギー関係と実証されるものと考えられる。Fig. 7はコンクリートの応力-ひずみ曲線とAEの頻度を示したもので、aの場合は不惑時間とわけてあるのでMicro-fractureの発生頻度が示されている。bの場合はトリガーレベル以上のAE波を全てカウントしたもので、図示されている頻度は各々の時間ごとに解放されたエネルギーに対応するものと考えられる。この場合も同様にdilatancyの領域に入るとAEのカウントが増えはじめ、最大応力点以後にカウント頻度が急増している。Fig. 8は各々のステージでのAEの波である。最大応力点以前ではセンサーに到着するエネルギーはひずみが増すにつれて大きくなっていく傾向が認められる。つまり応力が破壊強度に近づくにしたがってMicro-fractureの頻度や規模が大きくなると思われる。強度を越えると載荷方向にクラックが入るため、個々の現象は大きくてもAE波がセンサーに到着するまでに途中のクラックをよこさるので必ずしも

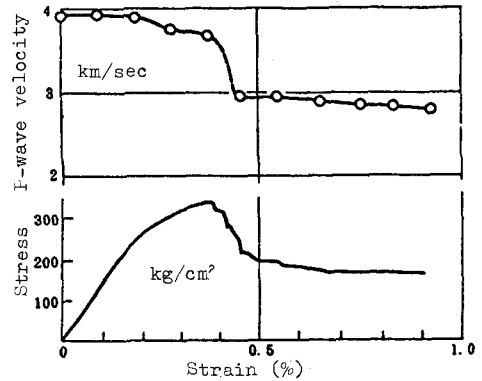


Fig. 6 Relation between diametral-I-wave-velocity and stress-strain curve after Saito⁴⁾

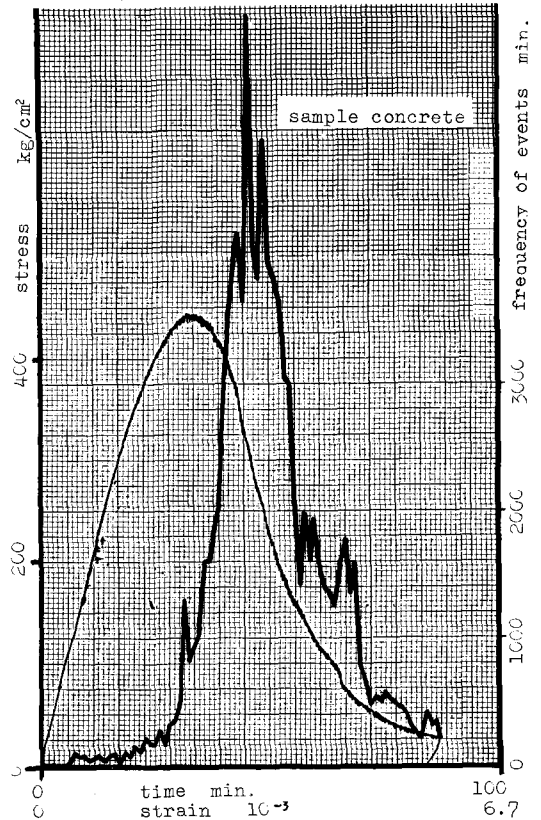


Fig. 7a stress-strain curve and count rate

測定される波の大きさはばらばらである。また破壊が進むにしたがって高い周波数の波が通らなくなるので波の大きさは減るようである。また、各々の波の立ちあがりには明確に識別できる。このことは各々の現象が μsec のオーダーでは独立して起っているものと考えられる。

5. 結論

今回の実験結果を要約するとつぎのようである。

- 1) コンクリートやセメント、試料内で発生する AE の発生頻度が最大になる点で主破壊が起る。すなわち、応力が破壊強度に達した時点でもなお試料には Load Carrying Capacity が存在し、主破壊がその後におこれて出現する。
- 2) 応力-ひずみ曲線に見られる応力緩和現象はクラッキングと密接に関連し、AE の発生頻度は急激に増加する。
- 3) コンクリートやセメントは、ひずみ速度が十分に低い場合には、荷重が強度を越えてもクラックが急激に不安定にはって破壊してしまうのではなく、応力集中→クラックの進展→進展の停止→新しい応力集中というサイク

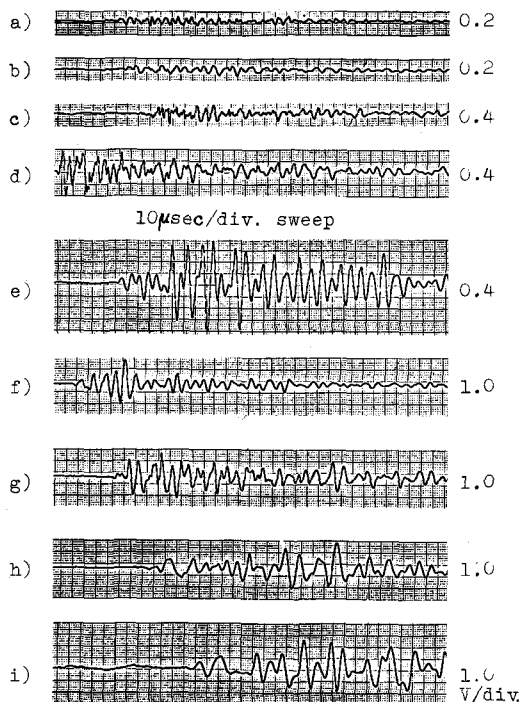


Fig. 8 wave forms of AE a), b), ..., in stage of Fig. 7b

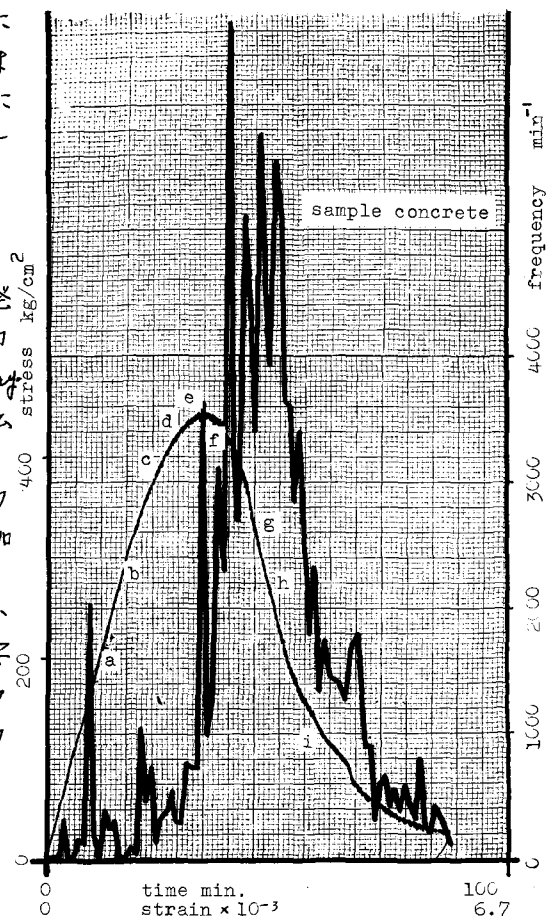


Fig. 7b stress-strain curve and count rate (dead-time: 0)

ルをくりかえし繰り返す巨視的破壊 (Load Carrying Capacity の喪失) をおこす。

AE の観測は、鉋山坑内やトンネルの周辺岩盤内における破壊の進行状況のモニター、および山崩れの発生機構などの解明にも役立ってあろう。

Reference

- 1) Dunegan: Chap. 4, The Experimental Stress Analysis, S.E.A., 1973
- 2) Knill: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 5
- 3) Scholz: J.G.R., Vol. 71, No. 6
Vol. 73, No. 4 and No. 10
Bulletin Seism. Soc. Am., Vol. 58 No. 1
- 4) Saito: Doctor of Engin. Thesis, Kyoto Univ., 1973
- 5) Peng et al: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9, 1972
Vol. 10, 1973

The Observation of the Acoustic Emission in Rock-like Materials

Takashi Yanagidani, Osamu Sano and

Makoto Terada

Dept. of Mineral Science and Technology,

Faculty of Engineering,

Kyoto University

In this study, the acoustic emission in rock-like materials subjected to the stiff-uniaxial compression has been investigated.

A strain rate constant closed-loop servo-controlled stiff loading machine was used so as to study fully the process of fracturing in the post-failure region.

The acoustic emission was monitored using a system which was composed of a PZT-5 barium titanate transducer, a 10KHz~2MHz pre-amplifier, a filter-discriminator and a counter. Wave forms were also monitored simultaneously using transient recorder and a CRT.

The main results obtained in this study can be summarized as follows.

- (1) When the count rate of acoustic emission became maximum, the first macroscopic fractures were observed. In other words, rocks can retain their load-carrying-capacities beyond their ultimate strengths, and macroscopic fractures mainly develop in the post-failure region. The explosive rapid failure is merely due to the release of excess energy from the loading machine.
- (2) When the stress relaxation takes place, the count rate of acoustic emission increases rapidly.
- (3) Wave forms which are appeared in the acoustic emission in the brittle material suggest that in μ sec monitoring, the micro-fracturing develops one by one independently except the case of final macroscopic fractures.

Monitoring the acoustic emission in the rock-like materials subjected to the stiff loading affords an important tool of assessing the in-situ fracturing occurred in the mines and tunnels and useful informations concerning the onset of rock-burst in the deep underground.