

岩盤試験におけるアコースティック・エミッションの適用

平 間 邦 興 丸 山 誠
桑 原 徹

Application of Acoustic Emission to Rock Testing

Kunioki Hirama Makoto Maruyama
Tohru Kuwahara

Abstract

Various studies for utilizing Acoustic Emission (AE) have recently been going on in materials science concerning objects such as metal and steel. AE is especially applied to non-destructive testing of steel structures and also monitoring of material rupture. AE is elastic waves released instantaneously when plastic deformation or rupture of a solid material occurs. In rock mechanics, AE is applied as a means of examining the stability of bedrock, for example, estimation of initial earth stress. This AE analysis is thought will be widely used in the future for large underground structures. This paper describes measurements of AE accompanying large, on-site shear and deformation tests as well as uni-axial compression tests of core samples. As a result, some fundamental properties of AE and their applied effects are clarified.

概 要

最近、アコースティック・エミッション (Acoustic Emission, 略してAE) を利用した各種調査が金属や鋼材関係を中心に実施されている。特に、鋼構造物の安全性を調べるための非破壊検査や材料の破壊特性の研究に適用されている場合が多い。AEとは、固体が塑性変形もしくは破壊するときに、瞬間的に弾性エネルギーが解放されて弾性波が発生する現象である。岩盤関係では、初期地圧の推定など岩盤の安定性を検討するための一手段として試みられているが、今後、岩盤内構造物などに広く適用されることが予想される。ここでは、AEの岩盤調査や岩盤試験への適用例として、原位置でのせん断試験や変形試験並びに岩石試験においてAE測定を併用し、その利用方法や得られたAE特性について基礎的な傾向を得ることができた。

1. まえがき

AEとは、いわゆる音響放出であり、固体が変形するときに弾性波を発生する現象で、その周波数は可聴領域を超える超音波の場合が多い。AEの基本的特性の一つに、材料試験におけるAE発生の特徴的な傾向が挙げられる。すなわち、塑性域から破壊に至るまでにAEの発生率が急増し最大値を示すことにある。また、ある載荷荷重でAEを発生させたのち除荷すると、再び載荷しても既載荷荷重まではAEが発生しない、いわゆるカイザー効果も基本的特性の一つである。このようなAE特性を利用して、多くの分野で種々の研究が行なわれてお

り、岩盤を対象とした初期地圧の推定法にもAE特性を利用した方法が開発されている。

ここでは、岩盤調査・試験への適用例として、原位置でのせん断試験や変形(ジャッキ)試験にAE測定を併用し、その利用方法や得られたAE特性についての検討を行なった結果を示す。

2. AE特性とその基本パラメータ

原位置試験の場合測定されるAE信号から、岩盤におけるAE特性すなわちどのようなAE事象がどのような時間間隔と頻度で、かつどの位置より発生したかを調べる必要がある。AE信号から得られる情報としてはつき

のようなものを挙げる事ができる。

- (1) AE 信号波形とその最大振幅値と周波数成分
- (2) 単位時間当りの AE 信号の発生数とその振幅分布と周波数分布
- (3) AE 信号の発生位置

これらの AE 情報が荷重、変位、温度並びに時間などどのような関係にあるかを調べる事が重要な課題となる。

具体的なパラメータについて示したのが図-1で、以下に代表的なパラメータについて述べる。

AE しきい値: AE 信号を測定するために設定された電圧レベル値で、地盤状況により異なる。

AE 事象: AE しきい値を越えて測定された AE 信号の集合。

AE 累積事象計数, 事象計数率: 事象総数あるいはある時間での事象計数。

AE リングダウン計数: AE しきい値を越えた AE 信号の数で、センサーの特性に大きく依存する。

最大振幅値(波高値): 発生した AE 事象の大きさで、変形や破壊の程度により異なる。

AE エネルギー: $E = k \cdot V_p^2$ (k : 定数, V_p : 最大振幅値), あるいは発生した AE の全エネルギー $E = k \int V_p^2 dt$ で示され、亀裂進展に伴う解放エネルギー量と比較できる。

この他に、発生した AE 事象のエネルギー分布や振幅分布を求め、AE 信号の分布性状を推定することができる。一般に、最大振幅 V_p と $V_p + dV_p$ 間の AE 事象計数を N とすると、

$$NdV_p = kV_p^{-m} \cdot dV_p$$

の関係が成り立ち、このうち m 値は破壊の進展を示す因子である。

3. 岩盤試験と原位置 AE 測定方法

3.1. 岩盤試験方法

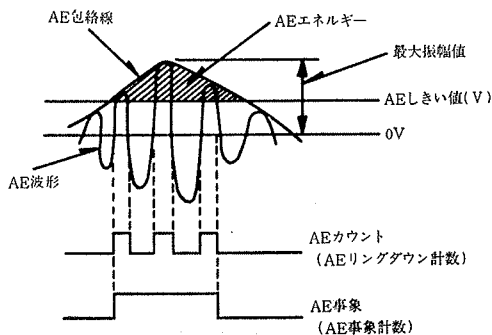


図-1 AE 信号と基本パラメータ

原位置における変形試験とせん断試験は、土木学会岩盤力学委員会の「平板荷重による原位置岩盤の変形試験法の基準」および「原位置岩盤のせん断試験—指針と解説」に準拠して実施した。

変形試験では、予備荷重を 6 kgf/cm^2 、段階荷重を $10, 20 \text{ kgf/cm}^2$ とし、最大荷重 30 kgf/cm^2 で繰り返し荷重を 3 回行なった。荷重の保持時間は 5 分間、載荷・除荷速度は $2 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ である。

せん断試験では、最初に垂直荷重を所定の $1, 2, 3, 5 \text{ kgf/cm}^2$ に設定し、つぎにせん断荷重を、試験面に対して 15° 傾けて載荷した。載荷速度は $0.5 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ である。

3.2. 測定装置

今回用いた AE 測定装置は、AET 204G と M3400AE A の 2 機種である。

AET204G は現場測定用の携帯型であり、AE 情報としては 1 秒間あたりのリングダウン計数あるいは事象計数がある。測定結果は X・T レコーダーの記録紙上に示される。

M3400AEA は室内試験用であり、AE 情報としては事象計数・エネルギー・最大振幅値・事象位置等がある。測定結果は、フロッピーディスクに記憶させながら内蔵プログラムを利用して必要な AE 情報をディスプレイ上あるいはプリンターに示される。

3.3. 測定条件

AE 測定装置のしきい値レベルと増幅度は、事前に試験面付近の岩盤中のノイズを調べ、表-1 のように設定した。また、AE センサーの周波数特性についても、事前に供試体を用いて AE の発生状態を調べた上で選定した。試験面は凝灰角礫岩からなる。AE センサーはいずれも共振型を用いた。

AE センサーは図-2 のように、地質観察によって決められた岩盤上とブロックに設置した。センサーにはシリコングリスを塗り錘を載せて、センサーと岩盤あるいはブロックとの密着性を良好にした。AET204G では、センサーは、ブロックから $2 \sim 5 \text{ cm}$ 離れたブロック背面の岩盤上に設置した。M3400AEA では、事象位置決定のために 4 個のセンサーを用いた。うち 2 個のセンサーはブロック両側面の下部にそれぞれ設置した。他の 2 個

機種	AEしきい値(V)	増幅度(dB)	AEセンサー(KHz)
AET204G	2.56~3.56	96	175
M3400AEA	0.4	69	30

表-1 AE 測定装置のしきい値レベル、増幅度、およびセンサーの周波数

のセンサーは、ブロック側面から 60 cm 離れた岩盤中に打ち込まれた、ウェーブガイドに取り付けた。ウェーブガイドは $\phi 20 \times 250$ mm の棒鋼 (SS41) で、AE 信号を捕えやすいように、ブロックの方向にやや傾けて打ち込んである。

なお今回の測定では、AET204G と M3400AEA でリングダウン計数と事象計数についても比較、検討を行なった。

4. 岩盤試験における AE 特性

4.1. せん断試験と AE 発生傾向

原位置 AE 測定に先立って行なった供試体の室内 AE 測定結果は、図-3 の通りである。AE 発生率は载荷後しばらく一定値を示したのち、徐々に漸増し、降伏点を過ぎると急激に増加し、せん断破壊点で極大に達する傾向が明確に把握できる。原位置でのせん断試験に伴う AE 発生状況の例を示したのが図-4、5 である。これによると AE の発生率は、载荷後から漸増し、破壊直前から急

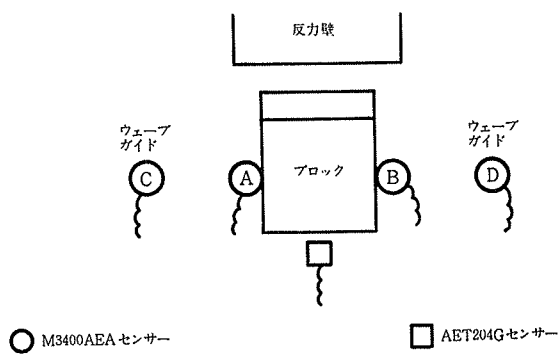


図-2 AE センサーの設置状況

増し、破壊点で極大値を示す。またせん断破壊直後の水平変位に伴っても、AE は引き続き多数発生していることがわかる。

このように、室内 AE 測定では単調増加载荷、原位置 AE 測定では荷重保持を伴う段階载荷という違いはあっても、供試体と岩盤でのせん断破壊に至るまでの AE 発生状況にはほぼ同様な傾向が認められる。AE エネルギーや最大振幅値の傾向も AE 発生率のそれとほぼ一致している。

4.2. 変形試験と AE 発生傾向

原位置変形試験の AE 発生状況の一例を図-6 に示す。変形試験時の段階载荷や荷重保持に伴って表われる、特徴的な AE 発生状況は以下の通りである。

(1) AE の発生は载荷が段階的に繰り返されるごとに減少し、最大荷重でのクリープ試験ではきわめて少なく

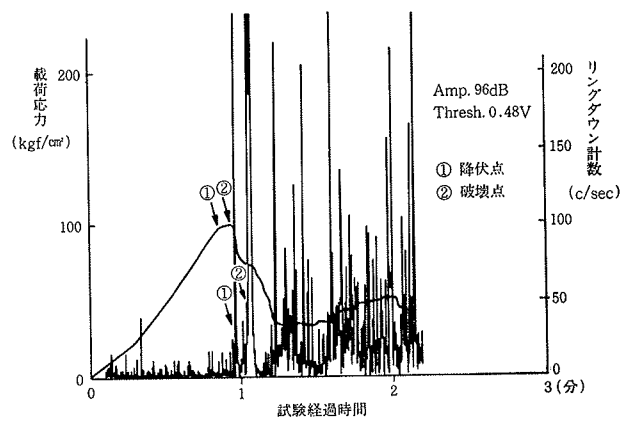


図-3 供試体による室内 AE 測定

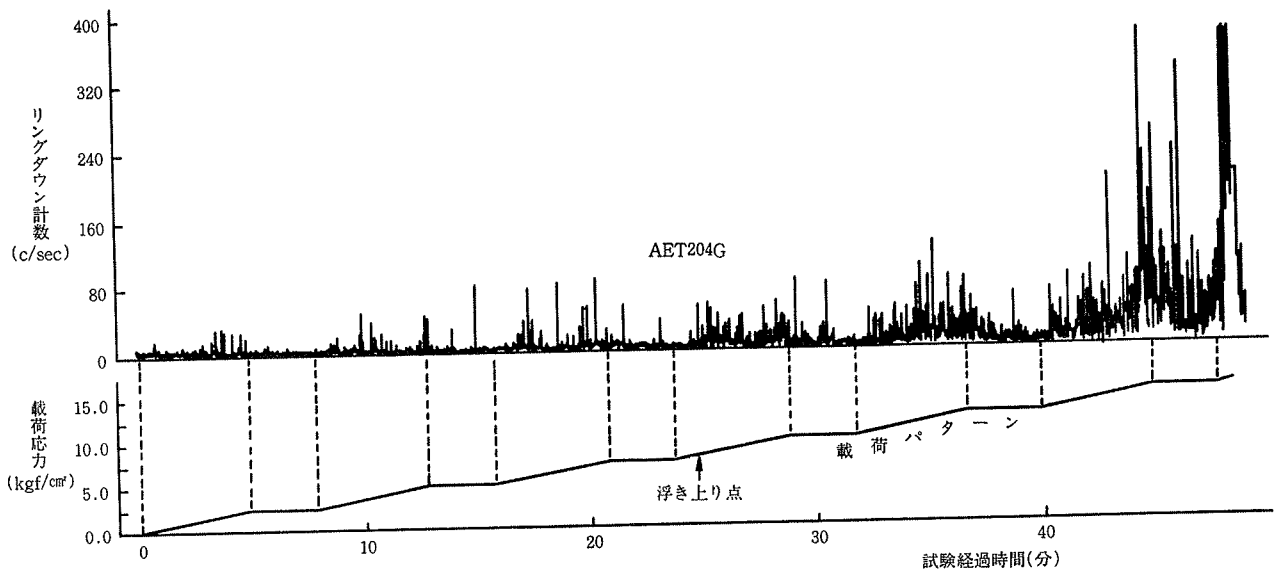


図-4 せん断試験と AE 発生状況

なる。AE エネルギーや最大振幅値も、このような AE 発生率に対応して段階荷重に伴って減少する傾向が認められる。

(2) 各段階で荷重を保持すると、荷重時に多量に発生していた AE はしだいに減少する傾向が認められる。また、除荷時並びに無荷重保持の際も、AE 発生率は同様に低レベルにある。

(3) 荷重の開始時及び除荷の終了時に、AE が突発的に多量に発生する。

以上のように原位置荷重試験時には、十分な AE 発生が認められることが多い。しかし岩盤によってはノイズが多いため、しきい値を高くとったにもかかわらず、岩盤中のノイズから AE 信号を良好に分離することができないこともあった。このような場合、AE 発生がみかけ上きわめて少なく、荷重による AE 発生率の変化もほとんど認められないため、解析することは困難である。

5. AE の解析結果とその適用

5.1. 岩盤中のカイザー効果

変形試験の結果、岩盤中でも明瞭なカイザー効果が認められた。各荷重段階における累積事象計数を表わしたのが図-7 である。矢印は前の荷重段階での先行応力を表わすが、10, 20, および 30 kgf/cm² 荷重時には図から明らかなように、先行応力を越えた付近から AE 発生率

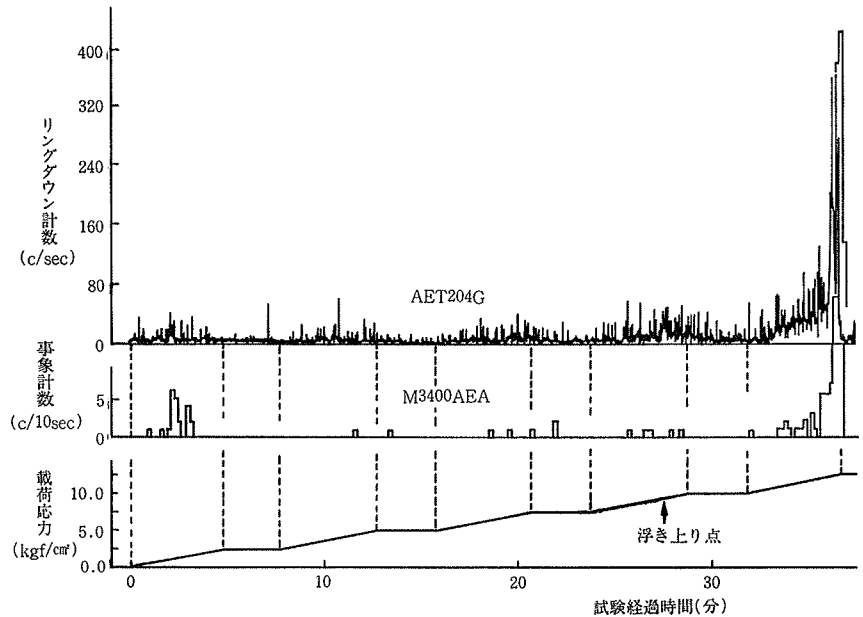


図-5 せん断試験と AE 発生状況

が急増している。一方、2 回目以降の 30 kgf/cm² 荷重時にはカイザー効果は認められない。カイザー効果が現われた時の処女荷重に対する AE 発生率は、10, 20, 30 (1 回目) kgf/cm² の順に少なくなっており、荷重が繰り返されるごとに AE の発生が減少するという点とも一致している。これらは累積事象計数についてだけでなく、累積エネルギー量についても同様に認められる。

5.2. 岩盤中でのエネルギー分布と振幅分布

材料の破壊過程で発生する AE エネルギーと事象計数、最大振幅値と事象計数は、一般にはそれぞれつぎの関係式で表わされる。

$$\log N = a_1 - m_1 \cdot E \quad \dots\dots\dots(1)$$

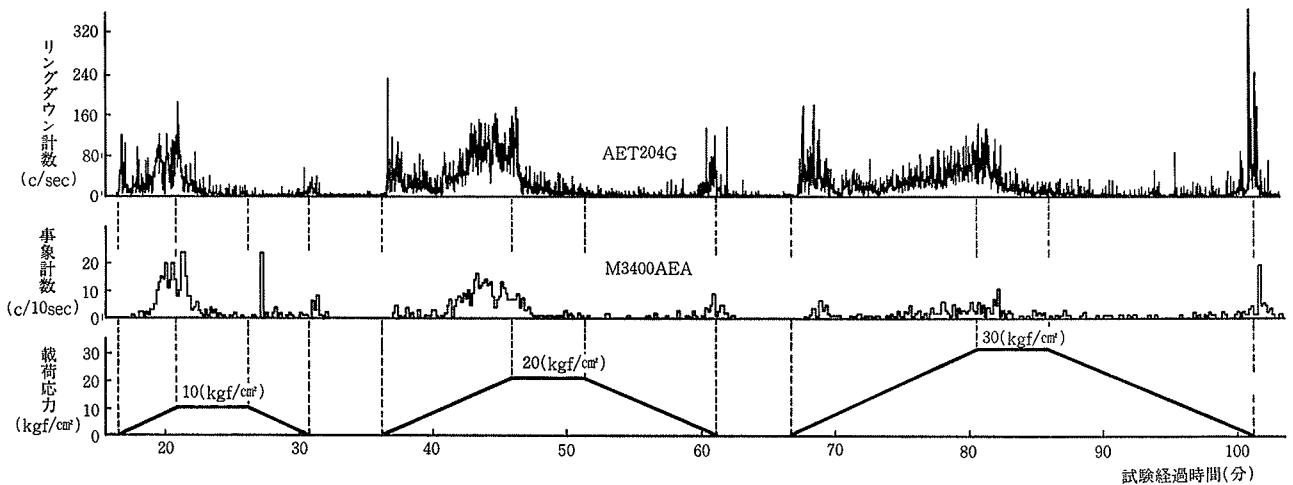


図-6 変形試験と AE 発生状況

$$\log N = a_2 - m_2 \cdot \log V_p \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、N: 事象計数, E: エネルギー, V_p: 最大振幅値, a₁, a₂, m₁, m₂: 定数である。

岩盤の AE 特性のうちエネルギー分布, 振幅分布は, それぞれ図-8, 9 に示す。ほぼ(1)式, (2)式に合った傾向が得られた。しかしエネルギー分布については, (1)式からずれるような高いエネルギーを持った AE が多く認められる。このような高エネルギーの AE は, 载荷中あるいはせん断破壊直後に発生しており, 载荷開始時や除荷終了時にみられるノイズとは思われない。

振幅分布については, 小さい振幅の AE が少ないという点で(2)式からのずれが見受けられる。これはしきい値レベルの関係で, 小さい振幅の AE がノイズとして処理されているためと思われる。

5.3. 浮き上り点と AE 発生

せん断試験における垂直変位の「浮き上り点」は, ひずみ増分の変曲点とほぼ一致し, したがってダム基礎岩盤の局所せん断摩擦安全率は, この浮き上り点でのせん断応力が採用されている。浮き上り点と AE 発生率の関係を検討することは, 原位置試験での AE モニターという点から重要な課題となる。せん断試験中の AE 発生率との関係を示した一例が図-4, 5 である。図中には, 浮き上り点を示したが, これらの測定例は浮き上り点が比較的明瞭に表われた場合である。図-4 では浮き上り約 1 分後に AE 発生率が増加し, 図-5 では浮き上りに伴って AE 発生率の増加が認められる。したがって, 浮き上り点と AE 発生率の増加はほぼ対応しているようであるが, AE 発生率だけでは浮き上り点の判別が困難な場合もある。せん断試験における AE 発生率の急増点は浮き上り点以外にも認められ, これらは岩盤の降伏変形に対応しているものと思われる。

6. あとがき

岩盤試験における原位置 AE 測定によって, 岩盤中の AE 特性のいくつかについて把握することができた。AE 測定は岩盤の変形挙動を確認する上で有効な手段であり, 測定装置・測定方法の改良を行ないながら, 各種岩盤での AE のデータを集積する予定である。

参考文献

- 1) 尾上守夫, 他: アコースティック・エミッションの基礎と応用, コロナ社
- 2) 平間, 丸山, 桑原: 岩盤試験におけるアコースティ

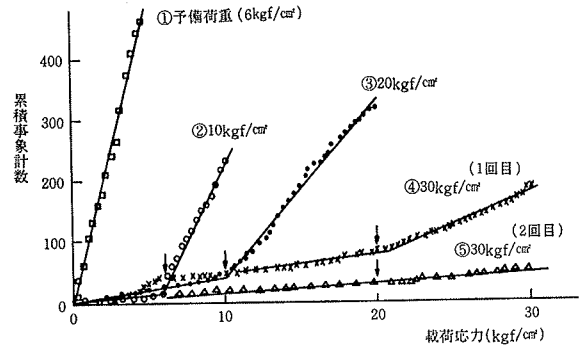


図-7 変形試験にみられるカイザー効果

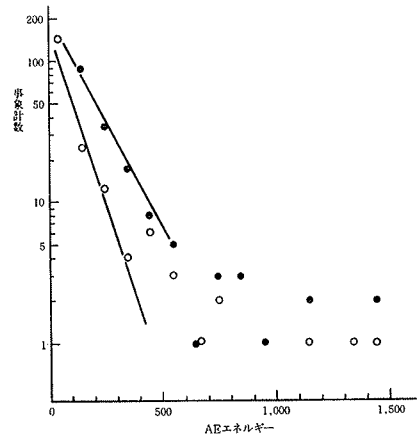


図-8 AE エネルギー vs 事象計数

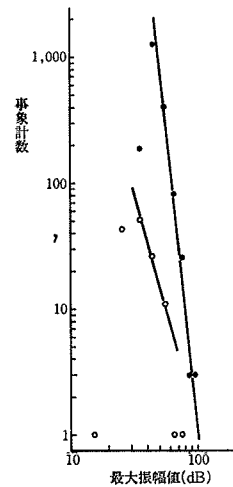


図-9 最大振幅値 vs 事象計数

- ック・エミッションの適用について, 第18回土質工学研究発表会講演集, (1983), pp. 825~826
- 3) 斎藤, 白江: 原位置岩盤せん断試験時における岩盤内ひずみ測定, 土木技術資料, Vol. 23, (1981), pp. 15~20