

AE カイザー効果と電磁放射による岩石の応力履歴の推定法

日大生産工(院) ○高橋尚行 日大生産工 森 康彦 小幡 義彦

1. まえがき

AE のカイザー効果は、岩石についても古くから観察され¹⁾、地殻中で岩石が曝されていた応力 (in-situ stress) の推定にしばしば用いられている。しかしながら、カイザー効果が明瞭でないケースがある。その理由は、カイザー効果試験のための単調増加応力下で、岩石試料に既に存在していた無数の微視的なき裂の表面間の摩擦が、かなり低い応力レベルにおいても生じ、それによる AE が観測されることが多いからである。したがって、AE で岩石の応力を推定するには、応力負荷の過程で新たなき裂の発生に伴う AE だけを検出しなければならない。そのための比較的簡便な方法として、Yoshioka と Mogi²⁾ は、1 回の応力負荷サイクルの AE 活動では応力の推定は難しいため、繰返し負荷試験を行い、1 回目と 2 回目の負荷の AE 活動の違いを観察することによって、予応力を推定する方法を提案している。また、Shiotani ら³⁾ は、AE 振幅分布の勾配 b を得る振幅範囲の最小と最大値を、分布の平均値と標準偏差という統計量を用いて制限し、これを改良 b 値 (Ib 値) と定義し、その変化から破壊の進行過程を解析する手法を提案している。

一方、岩石試料の圧縮変形で、AE の発生に伴って電磁放射の現象がしばしば観察されることが知られている^{4,5)}。筆者らは岩石試料の単軸圧縮変形、単純曲げ変形あるいはまた繰返

し曲げ変形試験における電磁放射と AE の同時測定を行い、電磁放射はき裂面上での電荷の再配分により発生する、すなわち電磁放射はき裂の新たな生成に伴ってのみ発生することを明らかにし、その工学的応用の一つとして、電磁放射の測定で岩石の応力を直接的に推定できることを提案してきた⁵⁾。そこで本研究では、この電磁放射を計測する方法に関し、AE を用いた応力履歴の推定法として提案されている前述の二つの方法、そしてまた、力学的な変形レート解析 (deformation rate analysis)⁶⁾などと比較しつつ、その有効性を検討した。

2. 試験の方法

岩石試験片は稲田花崗岩の断面 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 、高さ 80 mm の角柱とし、これに単軸圧縮変形荷重を加えた。試験片は、図 1 に示すように、鉄製エンドピースにエポキシ樹脂で取り付け、エポキシ樹脂の厚さはエンドピースから試験片の中央に向けて緩やかに減少させ、岩石と鋼の接触部の応力集中を取り除いている⁷⁾。さらに、試験片に生じる曲げ荷重成分を最小にするために、試験片の両端面をできるだけ平行に保つとともに、上部エンドピースの中央で小さな領域に荷重を荷した⁷⁾。これらの手順によって、均一な圧縮応力を、相当な応力集中なく加えることができる。

A Method for Estimation of Current Stress Level subjected to Rock Sample
by using AE Kaiser Effect and Electromagnetic Emission

Naoyuki TAKAHASHI, Yasuhiko MORI and Yoshihiko OBATA

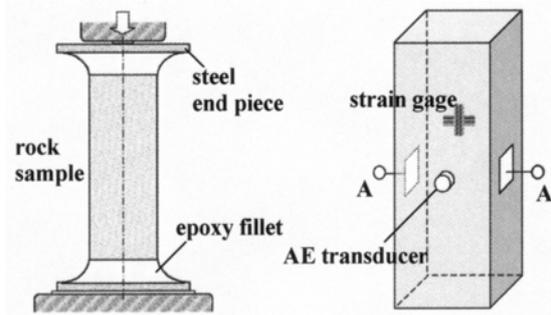


図1 岩石試験片の組立て

使用した計測装置の構成を図2に示す。電磁放射の計測は、図1に示されるように、試験片の側面に対向する一対の電極（A-A）を導電性接着剤を塗布することで形成し、この電極間に生じる電位変化として検出した。一つの電極面積は $20 \times 30 \text{ mm}^2$ である。検出された電位信号（EP）は、超低雑音増幅器（3S Sedlak 社, PA21, 500 Hz - 10 MHz, 3 nV/sqrHz）で20 dB増幅した後、さらに40 dB増幅（PAC 社, 1220A）した。AE計測は、AE変換子（富士セラミックス社, M53M）一つを試験片の側面中央に接着で取り付け、40 dB増幅（PAC 社, 1220A）した。増幅された電位信号とAE信号は、AE計測装置（PAC 社, Mistras2001）に入力し、事象計数方式で解析した。計測しきい値は、電位信号は70dB、AE信号は60dBであった。同時に、試験片の軸ひずみと試験荷重を計測した。圧縮変形試験の工程は、実験結果に示すが、荷重荷重はすべて変位速度0.5mm/min.で行った。供試岩

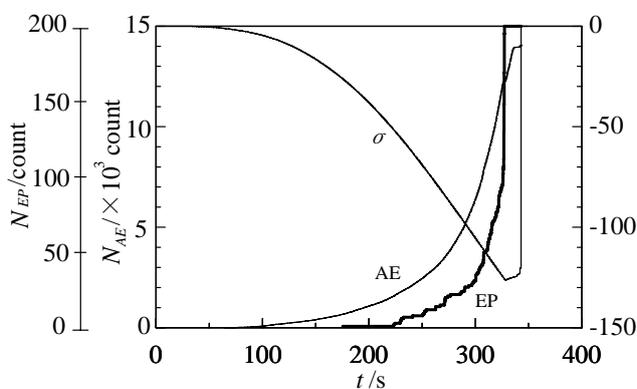


図3 単調増加圧縮変形試験の結果

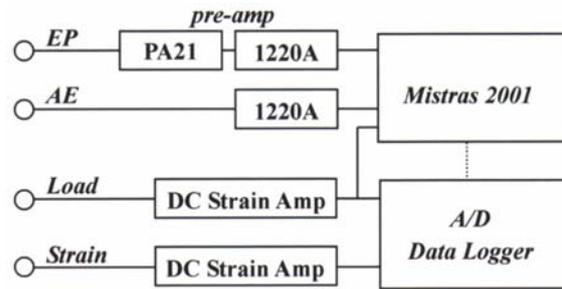


図2 計測装置の構成

石の単軸圧縮強さは、およそ110 MPaである。

3. 試験の結果と考察

3.1 単調増加圧縮変形試験

圧縮荷重を岩石試料の破壊まで単調的に負荷していった場合のAEと電位信号の変化を、それぞれ累積事象数 N_{AE} と N_{EP} で、試験経過時間 t に対して負荷応力 σ の変化とともに図3に示す。また、図4に電位信号とAE信号の波形例を示す。この例では、目視で三つのAE事象と電位信号が記録されている。岩石試験片が小さくAE波の伝搬距離が短いので、電位信号とAEの発生はほぼ同時に観察されている。圧縮変形試験におけるAEは、かなり低い応力レベルから発生が始まり、その後連続的に増加していく（図3）。一方、電位信号の発生はAEの発生開始からやや遅れるが、AEの発生状況とよく対応し、岩石試料中に生じる微視破壊に伴って発生していることがよくわかる。

3.2 カイザー効果試験

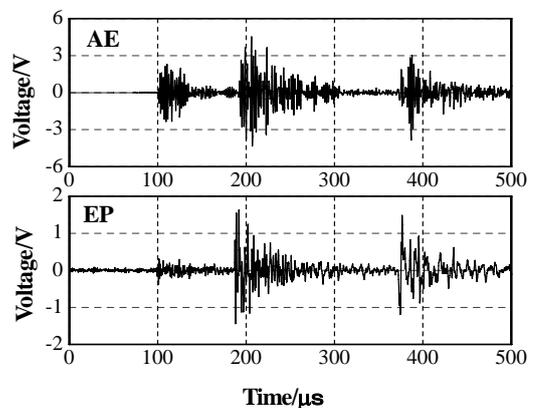


図4 同時に記録されたAEと電位信号波形の例

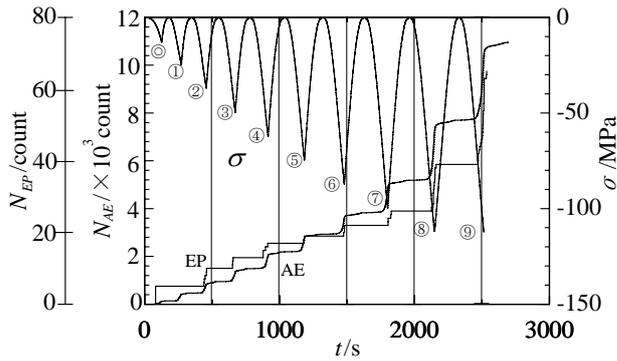


図5 カイザー効果試験の結果

カイザー効果試験の結果を図5に示す。試験は、負荷応力曲線 σ に示した工程0から9で示すように、負荷-除荷-再負荷の繰返しを、最大圧縮応力をおよそ12.5 MPaずつ増しながら試験片が破壊するまで行った。電位信号とAEは、試験開始からの累積事象数で示している。

この結果について、それぞれの負荷過程でAEが急増し始める応力を σ_{AE} 、また、電位信号が発生した応力を σ_{EP} として、それぞれの負荷工程における予応力を推定してみた。その結果を、予応力 σ_{pre} に対して整理して図6に示した。図5の試験結果については、破壊応力のおよそ75%の範囲で、かなりカイザー効果が観察され、誤差10ないし15%で予応力を推定できるが、その値は過小評価となっている。この過小評価は、き裂面の摩擦のAEが発生していることからと思われる。一方、電位信号による予応力の推定は、破壊応力のおよそ90%まで、誤差10%以内で安全側に推定しており、電位信号は、き裂の発生に直接的に関係しているからと考えられる。

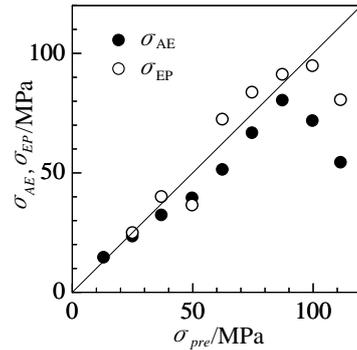


図6 電位信号とAEによる予応力の推定

つぎに、図7は、YoshiokaとMogi²⁾の提案による予応力の推定を試みた結果である。この方法は、図中に模式的に示す負荷工程のように、予応力 σ_{pre} を推定するのに、き裂面間の摩擦によるAEには繰返し再現性があるということから、最低2回の負荷を行い、1回目のAE活動から2回目の活動を差し引いたとき、その差が予応力から著しく増加し始めるというものである。応力の推定範囲は破壊応力の40%までとしているが、供試岩石の場合、図6のように、予応力が高くなるにつれ、推定される予応力は過小評価側にあつて推定誤差が大きくなるという結果となった。

図8は、図5の結果のうち、負荷工程⑤、⑥、⑦についてShiotaniら³⁾による Ib 値を解析した結果である。彼らによるAE振幅分布の勾配 Ib 値は次のように定義されている。すなわち、従来の振幅分布で、振幅の平均値 μ と標準偏差 σ を求めた上で、振幅の範囲を $w_2 = \mu + \alpha_1 \sigma$ と $w_1 = \mu - \alpha_2 \sigma$ との間に制限し、その間の分布直線の勾配を

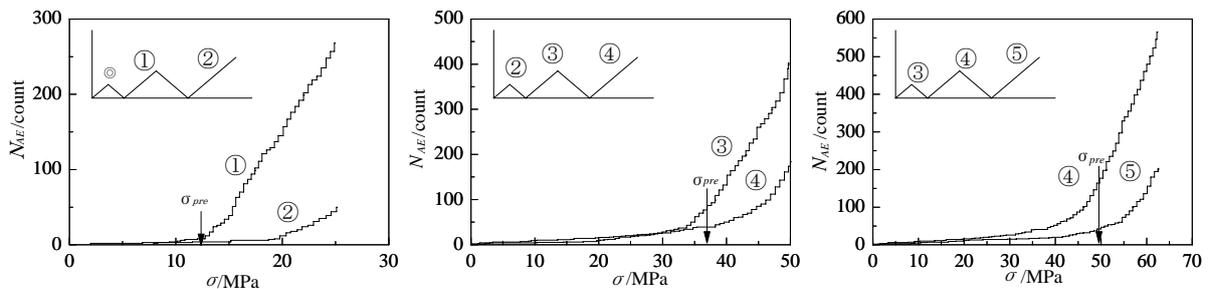


図7 YoshiokaとMogiの繰返し負荷方式による予応力の推定

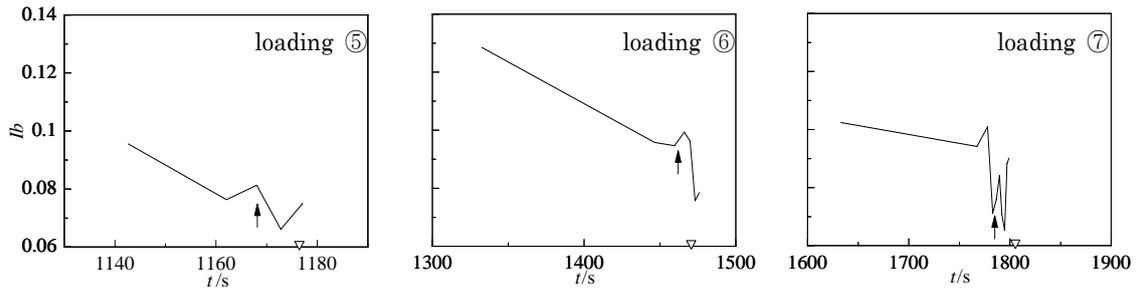


図8 Shiotani らの提案による Ib 値の解析結果

$$Ib = \frac{\log_{10} N(w_1) - \log_{10} N(w_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma} \quad (1)$$

とするものである。ここで、 $N(w_1)$ と $N(w_2)$ は w_1 と w_2 以上の累積頻度、 α_1 と α_2 は定数である。

図8に示した Ib 値の解析では、振幅データのサンプル数は100、 $\alpha_1 = 1$ 、 $\alpha_2 = 0.5$ とした。図中には、矢印で実際の予応力に達した時刻を、また、▽印で電位信号の発生開始時刻を示している。 Ib 値による破壊過程の解析は、 Ib 値が低下することをもって破壊事象の発生と評価するものである。図7に示した解析の結果は、負荷工程⑥、⑦については、 Ib 値の明瞭な低下が認められ、それはかなり実際の予応力に近い値であり、また、電位信号による予応力の推定値にも近い。

最後に、変形レート解析⁶⁾は、予応力を受けた試料について、予応力の15~20% 高い応力まで2回の繰返し負荷を行い、最初と2回目のひずみの差を応力に対してプロットし、その曲線を2直線で近似したときの交点の応力が予応力に相当するとするものである。図5の結果について解析した結果、破壊応力のおよそ25%以下の予応力を推定できたが、それ以上では困難であった。

4. おわりに

岩石の予応力 (in-situ stress) の推定評価の方法に関し、電磁放射を測定する方法と、AE法で提案されている、カイザー効果を直接利用する方法、摩擦AEとき裂のAEを分離する繰返し負荷法あるいは修正したAE振幅分布の勾配

Ib 値解析法、そしてまた変形レート解析法とを比較検討した。それぞれの方法には一長一短があり、一概にどの手法が予応力の推定法として優れているとは言えない。電磁放射は、き裂の発生に直接関係していることから有望であるが、SN比の一層の向上が必要である。

「参考文献」

- 1) 例えば、R. E. Goodman, Subaudible noise during compression of rocks, Geol. Soc. Am. Bull., 74 (1963), 487-490.
- 2) Sumio Yoshikawa and Kiyoo Mogi, A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: Laboratory study in the case of uniaxial compression, Tectonophysics, 74 (1981), 323-339.
- 3) T. Shiotani, S. Yuyama and M. Ohtsu, Application of improved b-value to quantitative evaluation of fracture process in concrete materials, J. Acoustic Emission, 19 (2001), 118-133.
- 4) Y. Mori, K. Sato, Y. Obata and K. Mogi, Acoustic emission and electric potential changes of rock sample under cyclic loading, Progress in AE, IX (1998), II-1-8.
- 5) Y. Mori, Y. Obata, J. Pavelka, J. Sikula and T. Lokajicek, AE Kaiser Effect and electromagnetic emission in the deformation of rock sample, J. AE, 22 (2004), 91-101.
- 6) S. P. Hunt, A. G. Meyers, V. Louchnikov, Modelling the Kaiser Effect and deformation rate analysis in sandstone using the discrete element method, Computers and Geotechnics 30 (2003), 611-621.
- 7) K. Mogi, Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive stress, Rock. Mech. Eng. Geol., 4 (1966), 43-55.