

(33) 繰り返し載荷時のAE特性と変形率変化法による先行応力の推定

公害資源研究所	正会員	○ 歌川 学
同	同	瀬戸政宏
同	同	木山 保
同	同	勝山邦久

Estimation of Geostress from AE Characteristics and Deformation Rate in Cyclic Loading of Rocks

Manabu UTAGAWA, National Research Institute for Pollution and Resources
Masahiro SETO
Tamotsu KIYAMA
Kunihisa KATSUYAMA

Abstract

Cyclic loading tests of the pre-stressed rocks and cored rocks were conducted in order to estimate the prestress and geostress of the rocks. In these test, Acoustic Emission (AE) and strain in the rock were measured. Pre-stressed rocks used in this test were sandstone, granite, and tuff. Cored rocks were sampled in Mozumi Pit in Kamioka Mine. In these tests, 4 AE transducers and 4 strain gages were attached to the surface of the rocks. Pre-stress were applied to the rocks by 50 to 70 cyclic loadings. Two directions of pre-stresses, one is axial stress and another is lateral stress, were applied. The obtained results were as follows; (1) In cyclic loading, AE increased rapidly at the stress corresponding to the axial pre-stress at first. And then, with the increase of cyclic loading, the rapid increase of AE at the axial pre-stress became extinct and next AE increased at the stress corresponding to the lateral stress. The deformation rate curve had two refractive points, at the axial pre-stress and lateral. So, it is possible for the AE Method and Deformation Rate Method (DR Method) of Cyclic loading to estimate the lateral stress.

(2) The estimate values from cored samples by the AE and DR Method of cyclic loading coincided with the values measured by the overcoring and hydro fracturing Method. So, it is demonstrated that the AE and DR Method of cyclic loading is useful for the estimation of geostress from cored samples.

1. 緒言

近年、地下水の挙動や地下空間の開発など、地下に対する関心が高まっている。地圧はこれらの基礎的データとして重要である。この計測法は、大きく次のふたつに分けられる。すなわち、応力解放法や水圧破碎法などのように原位置のボーリング孔を利用する方法と、原位置にて採取したボーリングコアを実験室に持ち帰っての室内実験法とである。本報告で取り上げるAE法や変形率変化法はいずれも後者に属する室内実験法であり、原位置計測技術と比較して実験が容易であるという特徴がある。

AE法とは岩石のカイザー効果を利用し、原位置にて採取したボーリングコアに対して載荷実験を行ない、岩盤内応力を推定する方法である。カイザー効果とは一度応力履歴を受けた材料は再び応力を加えても以前

の応力の最大値に達するまではA Eの発生が見られないという現象を指す。本方法についてはこれまでに様々な適用結果や問題点などが報告されている¹⁾²⁾。試験片に対し、徐々に荷重を加えて行なった時のA E急増点をもって先行応力値とする本方法は、急増点が複数個存在する場合、逆に急増点が明確でない場合に推定値の決定が困難になる。本方法における他の問題点のひとつに先行応力の方向性が挙げられる。これまでに載荷軸方向の先行応力については三軸応力場においても推定可能であることが報告されている¹⁾²⁾。

変形率変化法は、一軸圧縮時に既存のき裂が開閉する際の変形特性と、新たにき裂が形成されたときのそれとが異なることを利用し、A E法と同様、原位置にて採取したボーリングコアに対して載荷実験を行ない、地圧を推定する方法である³⁾。岩石試験片に対して複数回の載荷を行ない、異なる載荷過程における同一応力に対応する歪の差をとり、応力-歪の差・曲線に現れる屈折点をもって先行応力値とする本方法は、しかし曲線が複数の屈折点を持つ場合には推定値の決定が困難になる。本方法においても先行応力の方向性は問題となる。

本報告では以上の問題点を解決するため岩石試験片に対して複数回の載荷を行ない、A Eと歪の双方を計測してA E法と変形率変化法による応力推定値を比較、検討した。まず、人為的に先行応力を加えた試料を用いて上記の実験を行い、二軸応力下における先行応力の推定可能性について検討した。ついで原位置より採取したボーリングコアに対して本方法の適用を試みた。

2. 実験の概要

2. 1 模擬載荷実験

実験に用いた岩石試料は砂岩、花崗岩、凝灰岩の三種類である。これらを底面が一辺30mmの正方形、高さが60mmの正四角柱に加工した。端面の平行度は $\pm 1/50\text{mm}$ 以内とした。

岩石試料に対する先行応力は砂岩と花崗岩については10または20MPa、凝灰岩については5または10MPaとした。この二つの値の応力を試験片の軸方向から（以下軸圧とする）、およびそれに垂直な方向から（以下側圧とする）それぞれべつべつに作用させた。模擬載荷は図1に示す時間経過により、50～70回繰り返し行なった。この回数は当載荷によるA E発生が無くなる載荷数の約2倍である。

2. 2 原位置採取コア

実験に用いた岩石試料は神岡鉱山茂住坑より採取された角閃石・黒雲母片麻岩である。コア採取場所付近では既に応力解放法、水圧破壊法などによる地圧の計測が為されている⁴⁾。試験片の形状は直径47mm、高さ94mmの円柱であり、側面にはA Eセンサー接着面として幅6mmの平面を60°間隔に6面設けた。端面の平行度は $\pm 1/100\text{mm}$ 以内とした。

2. 3 実験方法

2. 1にて述べた方法により人為的に先行応力を与えた岩石試料及び2. 2の原位置採取コアに対する繰り返し載荷実験においては原則として2回目以降の載荷速度を1回目の2倍とし、4～7回の繰り返し載荷を行った。載荷に際してはMTS社製810型材料試験機を用いた。荷重速度制御で実験を行なったが、載荷に際しては載荷軸方向成分歪増加速度が試料の各側面（原位置採取コアにおいては側面各部分）にはりつけた歪ゲージにおいてほぼ一定になるように実験開始前に載荷板を調整した。

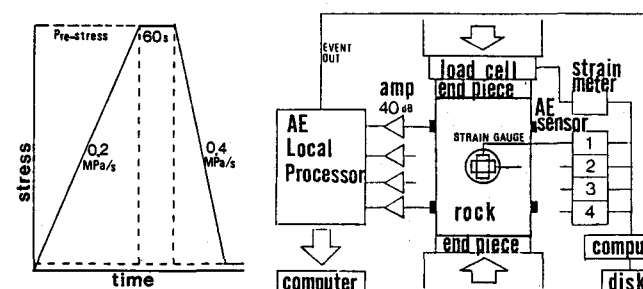


図1 載荷パターン

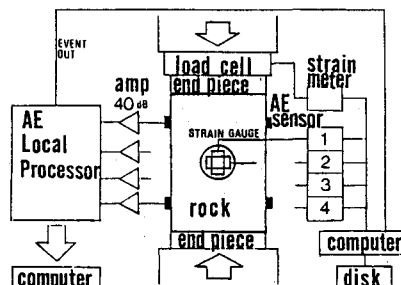


図2 実験装置

荷に際しては載荷軸方向成分歪増加速度が試料の各側面（原位置採取コアにおいては側面各部分）にはりつけた歪ゲージにおいてほぼ一定になるように実験開始前に載荷板を調整した。

本実験に用いたA E、歪および荷重計測システムの概略を図2に示す。A E計測においては岩石試料側面にA Eセンサーを4個配置した。使用したA Eセンサ

ーはNF社製AE-904DM型であり、共振周波数は500kHz、200から550kHzで高い利得を有している。A Eセンサーからの出力はまずプリアンプにて40dB増幅された後A E解析装置（NF社製9600型ローカルプロセッサー）に送られて更に40dB増幅される。その後ディスクリベルを越えたA E信号のみを取り出し、コインシデンス処理という二次元ソースロケーションを行いノイズを取り除く。こうして岩石試料内部からのA E信号のみを抽出、計数の上ディスクに記録した。実験終了後に記録されたA EデータよりA Eの主要パラメータを解析した。本報告で用いたA E特性パラメータは次の3つである、すなわちイベントカウント、リングダウンカウント及び最大振幅の2乗（厳密には違うもののエネルギーと見なし、以下エネルギーと呼ぶ）である。

試料の各側面（原位置採取コアにおいては側面各部分）に張り付けた3または4枚の歪ゲージの出力は1秒毎にA/D変換の上コンピューターに取り込み、実験終了後ディスクに保存した。

3. 実験結果

3. 1 模擬载荷実験

人為的に先行応力を与えた砂岩に対する繰り返し载荷におけるA E発生を図3に示す。岩石試料に与えた先行応力は軸圧が10MPa、側圧が20MPaである。また繰り返し载荷は最大応力を30MPaとし、これを4～7回行った。図3より、2回目で見られた軸圧に相当する10MPaは载荷3回目以降は見られなくなり、代わって側圧に相当する20MPaにてA Eの急増がみられる。変形率変化法による結果を、図4にあわせて示す。図4は载荷3回目の歪から2回目のそれを引いたものである。軸圧に対応する10MPa付近と、値は少し小さいが側圧に相当する17MPaとの2点で屈折点が認められる。

次に同じく先行応力を与えた花崗岩に対する繰り返し载荷におけるA E発生を図5に示す。この試料に対する先行荷重は前述の砂岩と同様である。図5より、载荷2～3回目においてA Eの急増が認められた軸圧に相当する10MPaが载荷4回目では不明瞭になり、代わって側圧に相当する20MPaにおいてはA Eの急増が回

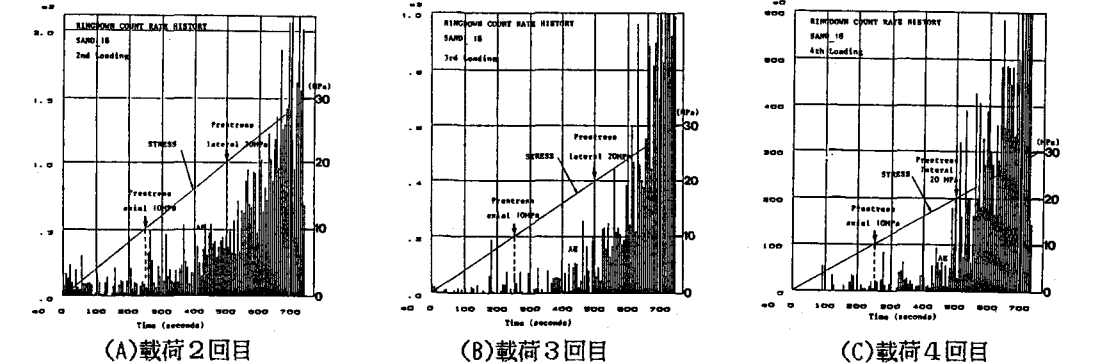


図3 模擬载荷砂岩のA E発生曲線

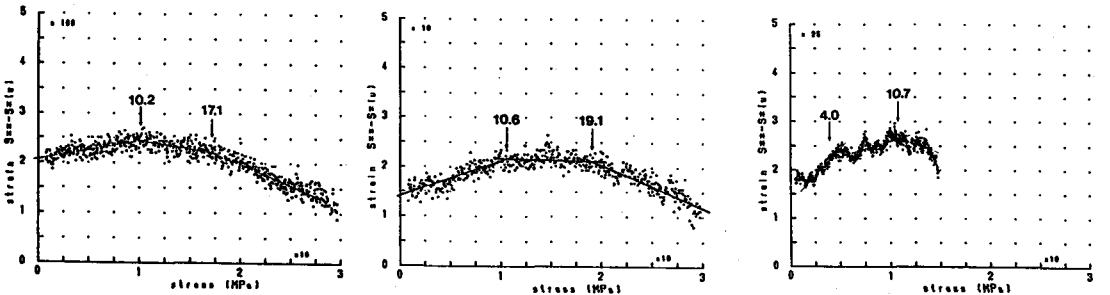


図4 模擬载荷砂岩のDR曲線

図6 模擬载荷花崗岩のDR曲線

図8 模擬载荷凝灰岩のDR曲線

を追って明確になっていることがわかる。同じ試験片の変形率変化法による解析結果を図6に示す。図6は
 載荷5回目の歪から載荷2回目の歪を引いたものである。軸圧、側圧に相当する10および20MPa付近にて屈折
 点が認められる。

最後に先行応力を与えた凝灰岩に対する繰返し載荷時のA E発生を図7に示す。当試験片に与えた軸圧
 は10MPa、側圧は5MPaである。図7より、載荷1回目でA Eの急増が明確だった軸圧に相当する10MPa付近で
 は載荷2回目ではA Eの急増が認められなくなり、それに代わって側圧に相当する5MPaにてA Eの急増が目
 だって来るのがわかる。同じ試験片の変形率変化法による解析結果を図8に示す。当図は載荷4回目の歪か
 ら2回目の歪を引いた結果である。軸圧、側圧に相当する5および10MPa付近にて屈折点が認められる。

各載荷時におけるA Eの発生特性を検討すると、まず軸圧に相当する点でのA E急増が見られ、載荷回数
 の増加と共に徐々にA E発生数の急増は見られなくなる。そして入れ替わりに側圧に相当する点にてA Eの
 急増が見られるようになることが明らかになった。側圧相当点でのA E急増が繰返し載荷回数の増加に従
 って消滅するのは、軸圧によって岩石内部に形成された微小き裂が繰返し載荷の過程で進展、拡大し、繰
 返し載荷試験時の最大軸応力に対応したA E発生状態に徐々に変化して行くためと思われる。また、側圧
 相当点でのA E急増が繰返し載荷回数の増加に伴って明確になるのは側圧により岩石内部に形成された微
 小き裂も繰返し載荷の過程で進展、拡大するが、き裂の配列方向の違いにより軸圧によるき裂よりもその
 進展が緩やかなために軸圧によるき裂の状態が変化した後もまだ進展、拡大が行われ続けるためと思われる。

変形率変化法では前述の通り二箇所にて曲線の折れ曲がり方が確認されるが、これは軸圧と側圧とでは形成
 されたき裂の方向が異なり、それが変形特性の違いとなって現れているものと思われる。

以上のA E法による地圧推定結果と変形率変化法によるそれとを比較すると、両者は非常に一致を示
 していることがわかる。なお、凝灰岩試験片への変形率変化法適用の結果、軸圧、側圧にかかわらず、相対

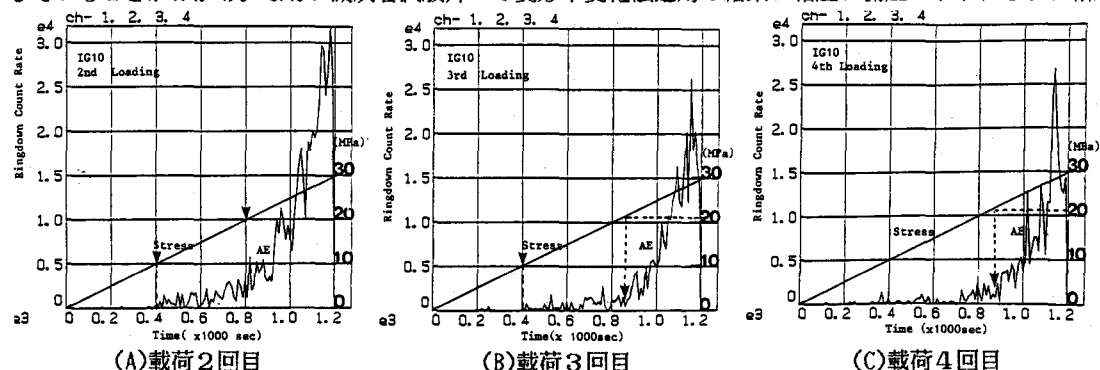


図5 模擬載荷花崗岩のA E発生曲線

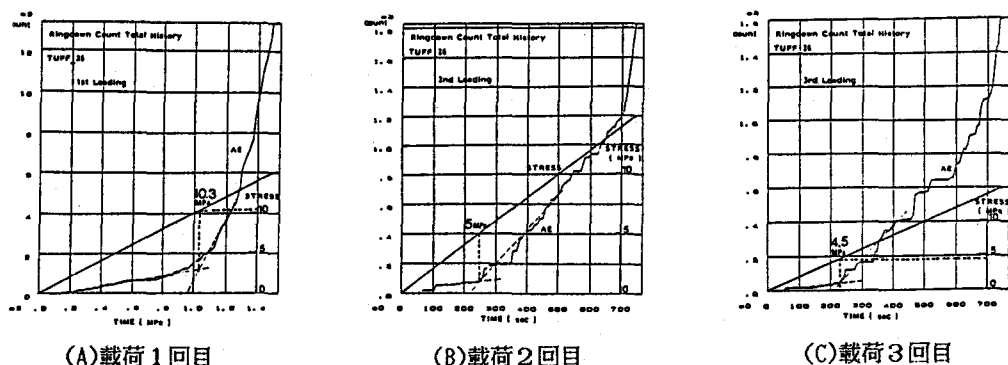


図7 模擬載荷凝灰岩のA E発生曲線

的に大きな先行荷重に対しては屈折点が認められるものの、相対的に小さい先行荷重に相当する点では屈折点が認められないものも数多く存在した。この理由としては凝灰岩の強度が砂岩や花崗岩に比べて小さく、き裂の進展、拡大が起こりやすいこと、5MPaという先行応力の値が小さすぎることの2点が考えられる。

3. 2 原位置採取コア

図9に原位置採取コアに対する繰り返し载荷時のAE発生を示す。繰り返し载荷時の最大応力は40MPaである。15MPa付近のAE急増点は载荷2～3回目において見られるものの、载荷4回目では消滅している。代わって、载荷3回目までは見られなかった27MPa付近でのAE急増が確認される。前節の考察により、当岩石コアの軸方向に作用する地圧は15MPaと推定される。図10に変形率変化法による解析結果を示す。縦軸は载荷3回目の歪から载荷2回目の歪を引いた値である。13、および27MPa付近にて曲線が屈折していることがわかる。

この値をコア採取箇所近傍にて実施された応力解放法などによる地圧計測結果⁴⁾と比較する。地圧計測結果から算出される载荷軸方向の岩盤内応力は14MPaであり、AE法および変形率変化法による地圧推定値とよく一致することがわかる。

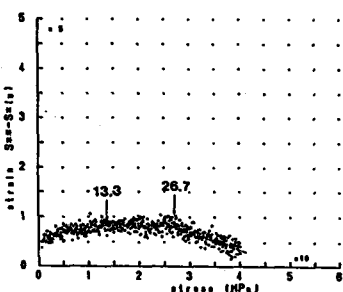


図10 原位置片麻岩のDR曲線

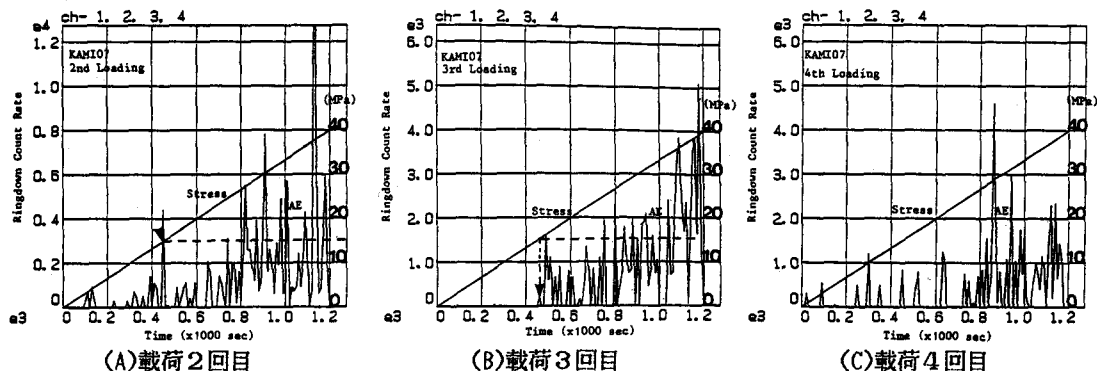


図9 原位置片麻岩のAE発生曲線

4. まとめ

人為的に先行応力を与えた岩石および、原位置より採取した岩石コアを用いて繰り返し载荷時に発生するAEおよび、同過程における歪を計測した。得られたAE発生特性と歪の変化により両者に及ぼす先行応力の影響について考察し、以下の結果を得た。

(1)軸圧と側圧の2方向先行応力を受けた岩石に対して繰り返し载荷を行った場合、AE法ではまず軸圧相当点にてAE急増点が出現するも、繰り返し载荷回数の増加に伴い消滅する。代わって側圧相当点でのAE急増が顕著になる。変形率変化法では軸圧、側圧に相当する2点にて屈折点が認められる。但し、凝灰岩においては少なくとも相対的に大きい先行荷重に対する屈折点が出現する。

(2)本方法を原位置採取コアに適用し、応力解放法などによる地圧計測結果とよい一致を見た。

参考文献

- 1) 金川忠・他2名,土木学会論文報告集268(1977),P63.
- 2) 村山朔郎・他4名,土木学会論文集364(1985),P107.
- 3) 山本清彦・他2名,地震学会講演予稿集1(1983),P245.
- 4) 田中達吉・他1名,岩盤力学シンポジウム講演論文集(1989),P206.