

花崗岩のクリープひずみとカイザー効果の関係

RELATIONSHIPS BETWEEN CREEP STRAIN AND KAISER EFFECT ON GRANITE

村山朔郎*・道広一利**・藤原紀夫***・畑 浩二****

By Sakuro MURAYAMA, Kazutoshi MICHIIHIRO, Toshio FUJIWARA and Koji HATA

In order to investigate the pre-stress of rock mass by applying the Kaiser effect of AE (Acoustic Emission), three kinds of experiments were performed on the granite specimens subjected to creeping under a constant load until their creep strain ceased. Such condition of the specimen was designated as the "strain saturated condition".

Obtained results are as follows :

- (1) If the specimens were in strain saturated condition, the applied loads were able to be estimated almost correctly by the Kaiser effect.
- (2) When the specimens in strain saturated condition were left under various loads less than the initially applied creep loads for some periods and the residual strains decreased, the stresses estimated by the Kaiser effect became less than the applied load according as the decrease of residual strains.

1. はじめに

アコースティック・エミッション（固体の変形および破壊に伴って解放されるエネルギーが音響パルスとなり、伝播する現象、以下AEと記す）のカイザー効果（AEの発生状況は応力に対して非可逆的であり、過去にある荷重を加えた材料に再び載荷すると、過去の荷重で生じた応力の最大値を超えるまではAEが発生しない現象¹⁾）を利用し、岩盤が受けている地圧を推定する試みは、これまで二、三行われている^{2)~4)}。しかしながら、解明されなければならない問題点も数多く残されている。その問題点の1つに、カイザー効果により推定された見掛けの先行応力がはたしてどのような場合の値を意味するのか、過去に受けた最大の応力なのか、あるいはそれがなんらかの影響を受けているのかということである。地山における岩盤の応力状態は複雑で、一般に三次元応力状態のもとで長期間にわたり種々の応力を受

け、また、その応力は厳密に言えば、時とともに変化しているが、その応力下でのクリープ変形はほぼ完了していると考えられる。

著者らは、これまでの研究で、岩石におけるカイザー効果は、供試体に与えた応力よりも、供試体の残留ひずみと大きく関係していることを述べてきた。たとえば、繰返し荷重を与えた岩石供試体でのAE試験によると、繰返し回数を多くし、残留ひずみの増加がなくなった状態（この状態をひずみ飽和状態という）であれば、繰返しにより与えた応力値においてAEが発生し始めるが、繰返し回数が少ない、すなわち残留ひずみの増加が認められる状態（ひずみ不飽和状態という）では、繰返しにより与えた応力よりも小さい値でAEが発生し始めることを報告³⁾している。

ここでは、岩石の受けていた地圧をAEによって推定するうえで、問題点の1つと考えられるクリープによる残留ひずみとカイザー効果の関係を調べるために、供試体に一軸圧縮応力を与えて、クリープさせたのち、AE試験を行った。その結果、この場合においても岩のカイザー効果はクリープ応力により生じる残留ひずみに大きく依存することが明らかになった。またAEのカイザー効果を利用して、岩石が受けていた地圧を推定する場合に、供試体の残留ひずみの重要性に対する1つの

* 正会員 工博 京都大学名誉教授
(〒603 京都市北区紫竹上梅ノ木町26)

** 正会員 工修 摂南大学工学部土木工学科 講師
(〒572 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

*** 正会員 工修 (株)大林組技術研究所室長
(〒204 清瀬市下清戸4-640)

**** 正会員 (株)大林組技術研究所研究員(同上)

知見を得ることができた。

2. 試料, 実験装置および実験方法

実験に用いた試料は、生駒トンネル建設工事現場（土被り約 260 m）から採取した花崗岩塊を直径 30 mm でコアボーリングし、高さ 60 mm に切断した直径 30 mm、高さ 60 mm の円柱供試体である。また、供試体の両端面の整形精度は 1/100 mm とした。生駒産の花崗岩の性状は一軸圧縮強度は 60~90 MPa の範囲で、単位体積重量は 25.8 kN/m³ である。

使用した実験装置は供試体に一軸圧縮を与えるためのクリープ試験機と載荷試験機ならびに AE の観測装置からなっており、供試体には最大荷重 14.7 kN の簡易軟岩用クリープ試験機でクリープひずみを与え、AE 試験に用いた載荷試験機は最大荷重 98.0 kN の万能試験機である。AE 観測装置の概略を図-1 に示す。AE トランスデューサーはジルコン酸チタン酸鉛磁器振動子（PZT）を用いた不平衡型のもので、その共振周波数は 140 kHz である。AE トランスデューサーでとらえられた信号は、プリアンプとディスクリミネーターに内蔵されたメインアンプを通して 80 dB の利得で増幅され、ディスクリミネーターによってあらかじめ定めた閾値（高レベル 400 mV、低レベル 380 mV）を超えた信号をパルスに変換し、包絡線検波された信号はイベント・カウントとしてデュアルカウンターによって計数表示される。計数表示されたデータはデュアルカウンターに接続されている計算機で処理し解析した。

AE 測定時に端面の不整による雑音の発生を防ぐために供試体の両端面と載荷板との間にはスポンジを挟んだ。

実験手順は、今回用いた新鮮な花崗岩供試体について一軸圧縮試験を行い、同時に発生する AE を測定してカイザー効果からこの供試体の受けていた先行軸応力を求めたが、その結果は図-2 のように、カイザー効果より求めた供試体の見掛けの先行軸応力は 8.08 MPa であった。次にこの先行軸応力 8.08 MPa の約 1.8 倍

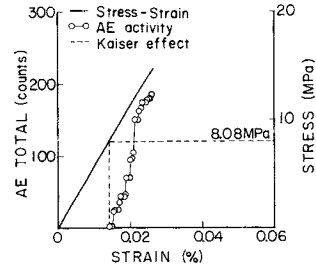


図-2 新鮮な供試体における AE のカイザー効果から推定した先行軸応力

(14.70 MPa) の応力まで 9.80 MPa/min の載荷速度で応力を上げ、その応力のもとでひずみの増加が停止するまでクリープさせた。なお、供試体のひずみは供試体の中央部分の表面に取り付けた 2 個のひずみゲージ（一軸ゲージ、長さ 30 mm）によって軸ひずみを測定した。なお、上記のように一定荷重下でひずみの増加が停止する状態をクリープによるひずみ飽和状態といい、これに反し、ひずみの増加が認められる状態をひずみ不飽和状態ということにする。

この供試体を用いた試験としては、次の 3 種類のケースである。ケース A は供試体に一定のクリープ荷重を加えてひずみ飽和状態になるまでクリープさせた後除荷し、ただちに AE のカイザー効果を見るもの、ケース B はケース A と同じ載荷方法でひずみ飽和状態とするが、除荷後種々の長さの期間放置し、放置することに起因するひずみの回復がカイザー効果に及ぼす影響を調べるもの、ケース C は供試体に載荷するクリープ荷重の大きさを減少させ、減少後の荷重でひずみ飽和にさせた場合のカイザー効果を見るためのものである。以上のそれぞれ 3 種類の試験について方法、その結果および考察を次に述べる。

3. 実験の方法, 結果およびその考察

(1) 実験ケース A における結果と考察

クリープ試験機を用いて供試体に載荷し、14.70 MPa の一定軸応力下で、軸ひずみの増加がなくなる、いわゆるひずみ飽和状態となるまでクリープさせたのち除荷し、ただちに一軸圧縮試験を行い、同時に AE を測定した。なお、クリープ載荷期間は試料によって差はあるが、およそ 7~10 日間であった。図-3 に実験結果の一例を示す。図-3 の (a) は軸応力と軸ひずみおよび AE カウント・レートを示し、(b) は軸応力と軸ひずみおよび AE 累計数を示している。図中破線は AE 試験でのカイザー効果より推定した先行軸応力である。この結果推定された見掛けの先行軸応力は 14.73 MPa で、最初に与えたクリープ応力 14.70 MPa との間には

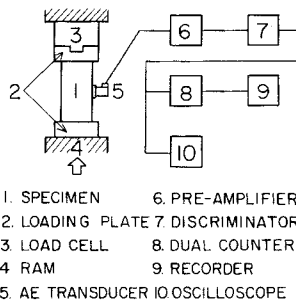


図-1 AE 観測装置

ほとんど差のないことがわかる。また、14.70 MPaの応力下で生じたクリープひずみと除荷した直後の残留ひずみは図-3の応力～ひずみ曲線よりみれば、ほぼ等しいことが認められた。一方、他の供試体による同種の試験結果からも、AEにより推定される見掛けの先行軸応力と与えたクリープ応力との差は数パーセント以内であった。このことより、岩石供試体にクリープ荷重によってひずみ飽和状態となるまで载荷すれば、すでに報告³⁾した、繰返し荷重によるひずみ飽和状態におけると同様に、与えた応力をAE試験により数パーセントの誤差内で推定することが可能といえる。

(2) 実験ケース B における結果と考察

供試体への载荷方法はケース A と同じで、14.70 MPaの応力下でクリープ試験機にかけ、ひずみ飽和状態となるまで载荷したのち除荷するが、ケース A と異なる点は除荷後恒温、恒湿の場所で種々な長さの期間放置し、その間にひずみを回復させたのち、一軸圧縮試験を行い、AEを測定した点である。放置期間は、1.5日、3日、4日、5日、6日、7.5日、9日、11.5日、14日および20日間の10種類である。一例として、放置期間が7.5日、11.5日および20日の場合に対して軸ひずみがどれほど回復するかを示したのが図-4～6である。図より、放置期間が長ければ長いほど軸ひずみの回復量 ϵ_b が大きく、残留ひずみが小さくなっていることがわかる。そこで、これら各種期間放置した試料についてAE試験を行った。それらの一例として7.5日、11.5日および20日間の放置に対応するAE試験の結果が図

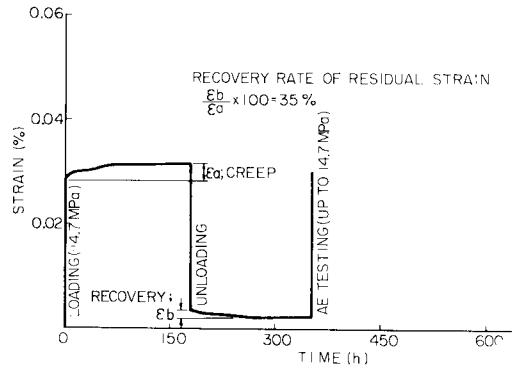


図-4 放置期間が7.5日におけるひずみの回復

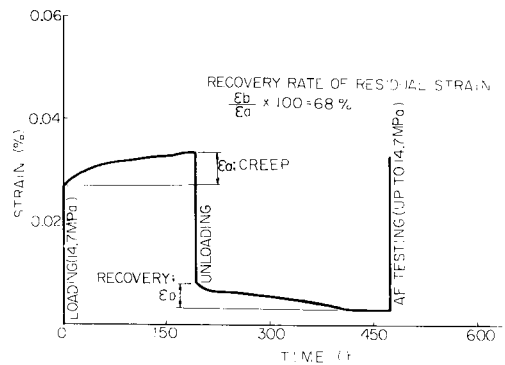


図-5 放置期間が11.5日におけるひずみの回復

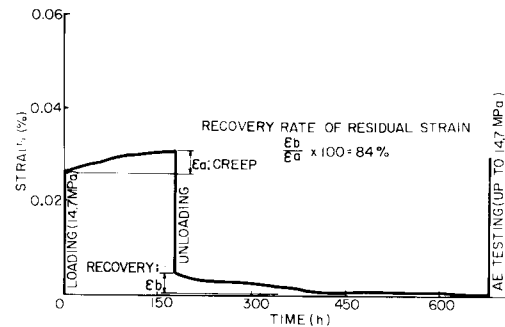
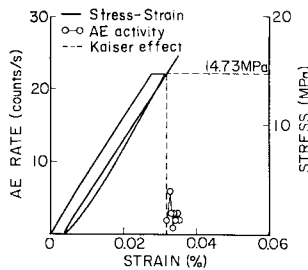
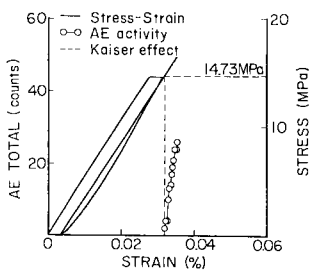


図-6 放置期間が20日におけるひずみの回復



(a) 応力～ひずみ～AE レート関係



(b) 応力～ひずみ～AE 累計数関係

図-3

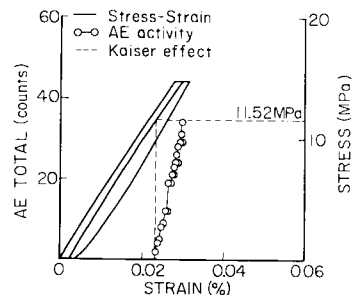


図-7 放置期間が7.5日における応力～ひずみ～AE 累計数関係

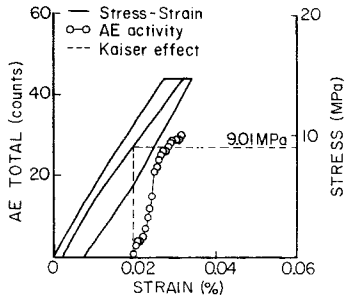


図-8 放置期間が11.5日における応力～ひずみ～AE累計数関係

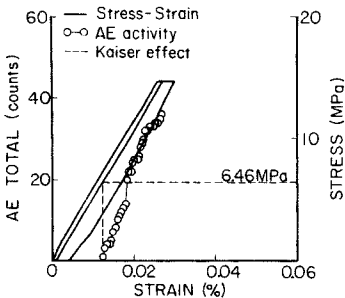


図-9 放置期間が20日における応力～ひずみ～AE累計数関係

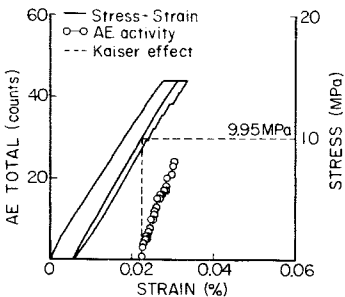


図-10 載荷重を段階的に減じたときの応力～ひずみ～AE累計数関係

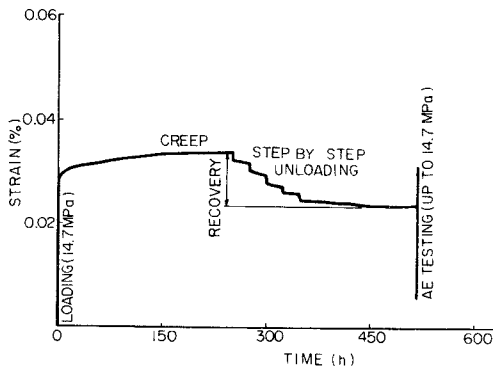


図-11 ひずみの回復と時間関係

一7～9である。いずれの図も軸応力と軸ひずみおよびAE累計数関係を示している。これらの図よりAEが発生し始めたときの軸応力、すなわちカイザー効果より求めた見掛けの先行軸応力は図-7では11.52 MPa(放置期間7.5日)、図-8では9.01 MPa(放置期間11.5日)および図-9では6.46 MPa(放置期間20日)となった。このように、放置期間が長ければ長いほど軸ひずみの回復量が大きく、一方カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は小さくなっている。

(3) 実験ケースCにおける結果と考察

まず実験ケースAで行ったと同様に供試体を一定のクリープ荷重(14.70 MPa)のもとでひずみ飽和状態とし、そののち、載荷重を14.70 MPaの2/3(9.80 MPa)の値となるまで1日間隔で5段階に分けて除荷したもので、1回に除荷した荷重は0.98 MPaであり、これを毎日続けた。5日後には、載荷重は9.80 MPaとなり、その後9.80 MPaの応力をかけたまま7日間放置した。この放置後除荷してただちに一軸圧縮試験を行い、AEを観測した。その結果を軸応力、軸ひずみおよびAE累計数関係で示した一例が図-10である。この図より、カイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は9.95 MPaで、5段階に分けて除荷された最終の軸応力値は9.80 MPaであることを考えれば、カイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は実際に載荷した最終軸応力とよい対応を示している。なお、図-11は、載荷重を段階的に除荷したことによるひずみの回復を示す経時変化曲線である。図より、軸ひずみは段階的にかつ経時的に回復し、最終応力の時点では残留ひずみの回復はほぼ完了している様子がうかがわれる。したがって、岩石が受けている地圧が時とともに減少し、岩石のひずみが最終の応力のもとでひずみ飽和状態であれば、AE試験によって求められる見掛けの先行軸応力は、最終時の載荷応力状態での地圧を示すであろうと推定される。

4. 試料放置期間とカイザー効果より求めた見掛けの先行軸応力の関係

前述の実験ケースBの結果をまとめると、図-12のようになる。図は種々の長さの期間放置されたひずみ飽和の試料について放置期間を横軸に、カイザー効果より求めた見掛けの先行軸応力を縦軸にとってプロットしたものである。図より、放置期間が4日目くらいまでは与えた真の軸応力とカイザー効果より求めた見掛けの先行軸応力とはほぼ等しくなっており、それ以上の期間放置すれば、それに応じて与えた真の軸応力よりも小さな値になっている。

実験ケースBにおいて図-4～6に示すように載荷直

後からのクリープによる飽和ひずみ量を ε_a 、放置期間中に生じた回復ひずみ量を ε_b として $\varepsilon_b/\varepsilon_a$ の百分率を残留ひずみ回復率 (recovery rate of residual strain) とすると、これは次式で示される。

$$\text{残留ひずみの回復率} = (\varepsilon_b/\varepsilon_a) \times 100 \quad (\%)$$

そこで、図-12の横軸を残留ひずみの回復率にとれば図-13となる。図-13よりみれば、残留ひずみの回復率が20%くらい以内であれば、カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力はあらかじめ与えた真の軸応力にはほぼ等しくなっているが、残留ひずみの回復率が20%以上になると、回復率が大きくなればなるほどカイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は与えた真の軸応力よりも小さな値となることがわかる。

図-12, 13をみると、試料がひずみ飽和の試料であっても、それを長期間放置すると、それだけ残留ひずみは回復し、同時にAEのカイザー効果から求められる見掛けの先行軸応力はあらかじめ与えた真の軸応力よりも小さく測定される傾向が一層明らかにわかる。

ただし、ここに述べた実験は試験室内で、ひずみ飽和状態とほぼ認められる程度になるまで载荷した試料についてのものである。そのため、クリープ期間はさほど長いものではなかった(载荷期間7~10日)。一方、地山の岩石は一般にきわめて長期間载荷状態にあり、ほぼ完全なひずみ飽和状態であると考えられる。したがって、

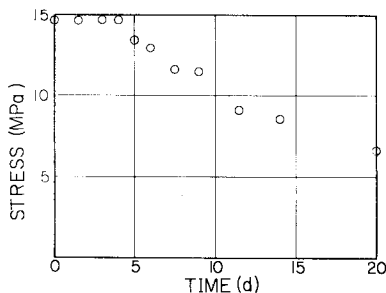


図-12 放置期間とカイザー効果より求めた見掛けの先行軸応力の関係

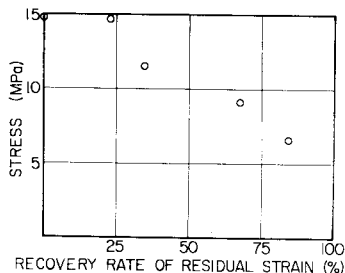


図-13 残留ひずみの回復率とカイザー効果より求めた見掛けの先行軸応力の関係

現地より採取した岩石と試験室で短期間の载荷をした岩石とでは、残留ひずみの回復の様相が異なるかもわからない。また、現地における岩石は三次元応力状態下でのクリープであり、今回の実験では一軸圧縮応力下におけるクリープ試験の結果である。これらの点はさらに検討を要することで今後究明するつもりである。

いずれにしてもAEのカイザー効果に対して図-12, 13の傾向が存在していることが認められるので、地山から岩石試料を採取した後は、残留ひずみがあまり回復しないうちにAE試験を行わなければ、カイザー効果より得られる地山での地圧を正確に求めることができないことが十分に推定される。

5. おわりに

AEのカイザー効果を利用し、岩盤の受けていた地圧を推定する際の基本的な問題の1つと考えられるクリープひずみとカイザー効果の関係を解明するため、花崗岩供試体を用いて3種類の実験を行った。その結果、AEのカイザー効果は残留ひずみに大きく依存することが明らかになった。これら3種類の実験から得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 岩石供試体が一定軸応力(一軸圧縮状態、以下同様)を長期間受け、クリープひずみが増加しない状態になった場合—ひずみ飽和状態—には、あらかじめ与えた軸応力はカイザー効果により数パーセント以内の誤差で推定される。ここでの試験結果では除荷時の残留ひずみは载荷以後にクリープによって生じたひずみにほぼ等しかった。

(2) 岩石供試体に一定軸応力をひずみ飽和状態になるまで(今回の実験では7~10日間)与えたのち、除荷して放置すれば、放置期間が長ければ長いほど軸ひずみの回復量は大きくなり、それに伴ってカイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は小さく測定されるが、残留ひずみの回復率が約20%以内(今回用いた試料では放置期間が4日以内)まででは、カイザー効果により求められる見掛けの先行軸応力は与えた真の軸応力にはほぼ等しかった。しかしながら、残留ひずみの回復率が84%の場合では、カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は、あらかじめ与えた真の軸応力の約半分となった。

(3) 岩石供試体にクリープひずみの増加が停止するまで一定軸応力を与え、いわゆるひずみ飽和状態としたのち、荷重を段階的に減じ、減じた軸応力のもとでクリープひずみが一定となるまで(今回の試験では7日間)放置した場合、カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は、あらかじめ与えた先の軸応力値ではなく、減じた最終の軸応力値にはほぼ等しくなる。いいかえれば、

カイザー効果によって推定される見掛けの先行軸応力は必ずしも過去に受けた最大の軸応力ではなく、AE試験の時点において、その試料に残留ひずみを生じさせた軸応力が測定されることとなる。

以上の結論は短期間の一軸圧縮载荷の室内試験により得たものであって、実際の地山の岩石のような長期間三次元応力を受けたものではない。しかし、地山における岩石の地圧をカイザー効果によって求めようとする場合、クリープひずみとカイザー効果の関係についての本試験の傾向からみれば、地山から岩石試料を採取したのうち、残留ひずみがあまり回復しないうちにAE試験を実施しないと、地圧を正確に求めることができないことは十分に推察される。

カイザー効果によって地山の地圧を求めようとするとき、今後の問題点としては、室内試験と地山内における岩石に与える载荷方法、载荷時間の差異を検討していくことが必要であろう。

最後に本研究を進めるにあたり、(株)大林組技術研

究所の齊藤二郎次長ならびに吉岡尚也研究員から援助を受けた。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Kaiser, J. : Untersuchungen über das Auftreten Geräuschen beim Zugversuch, Arkiv für das Eisenhüttenwesen, Vol. 24, pp. 43~45, 1953.
- 2) 金川 忠・林 正夫・仲佐博裕：岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み，土木学会論文報告集，第 258 号，pp. 67~75, 1977.
- 3) Murayama, S., Michihiro, K., Saito, J., Fujiwara, T., Yoshioka, H. and Hata, K. : The Kaiser effect on a granite under various loadings, Proceedings of The 7th International Acoustic Emission Symposium, pp. 586~593, 1984.
- 4) Yoshikawa, S. and Mogi, K. : A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples, Laboratory study in the case of uniaxial compression., Tectonophysics 74, pp. 323~339, 1981.

(1985. 1. 25・受付)