

# 載荷方法が花崗岩のカイザー効果に及ぼす影響

## THE KAISER EFFECT OF GRANITE CAUSED BY VARIOUS LOADING METHODS

村山朔郎\*・道広一利\*\*・斉藤二郎\*\*\*・吉岡尚也\*\*\*\*

By Sakuro MURAYAMA, Kazutoshi MICHIIHIRO, Jiro SAITO and Hisaya YOSHIOKA

In order to know the Kaiser effect of AE (Acoustic Emission) in triaxial directions of a rock mass, the Kaiser effect of AE in the granite specimens were investigated by applying the compressive pre-stresses of various intensities repeatedly on the respective directions to the specimens.

From the testing results, it was found that the pre-compressed principal stresses were precisely estimated by the Kaiser effect, provided the specimens had been repeatedly pre-compressed until the increment of the residual strain ceased.

### 1. はじめに

岩盤に対するアコースティック・エミッション (Acoustic Emission 以下 AE と記す) は、主に鉱山における切羽の安定性を研究することから始められた。Obert<sup>1)</sup>は、鉱山における山はねを予知するために、1940年代前半から AE の観測を行っていた。1953年には、Kaiser<sup>2)</sup>は金属材料において AE の発生が先に加えた応力以上、すなわち先行応力以上の応力で発生することを見出した。これがよく知られている Kaiser effect (カイザー効果) である。岩石に繰返し応力を与えた場合にも、カイザー効果が存在することは Goodman<sup>3)</sup>によって確認されている。また、金川<sup>4)</sup>は原位置から採取した岩石供試体に単調に増加する応力を与えて、そのときの AE 累積曲線の変曲点で先行応力を推定している。この先行応力は、オーバーコアリング法から求めた地圧に比して十数パーセントの誤差範囲で推定できるこ

とを述べている。

本報文は岩石として花崗岩を用い、その AE のカイザー効果に関して研究した報告である。本研究の意図するところは、第1には、岩石における AE のカイザー効果は先行して岩石に加えられた応力値そのものに依存するよりは、むしろ先行応力によって岩石に生じたひずみのうち AE 試験時に残留している残留ひずみに依存すると考えられたことを実験的に検証することであり、第2には、空間に互いに直行する3方向の面のうち、ある方向の面に対するカイザー効果が、他の方向の各面に別々に加えられた先行軸応力とどのような関係にあるかを実験的に明らかにすることである。

### 2. 実験試料と実験装置および実験方法

実験に用いた試料は生駒産と稲田産の2種類で、生駒産は約250mの土被りを有するトンネル建設現場から採取し、稲田産は約300mの土被りを有していた切取地あとから大塊の岩塊として切り出した。これらの大塊の岩石をさらにのみで小割りし、それを供試体に仕上げた。供試体の形状・寸法は直径3cm、高さ6cmの円柱体と、15×15×15cmの立方体の2種類とした。生駒産の単位体積重量は25.8kN/m<sup>3</sup>、一軸圧縮強度は60~90MPaであり、一方、稲田産の単位体積重量は25.8

\* 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 摂南大学講師 工学部土木工学科

(〒572 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

\*\*\* 正会員 工博 (株)大林組技術研究所次長

(〒204 清瀬市下清戸4-640)

\*\*\*\* 正会員 工修 (株)大林組技術研究所研究員(同上)

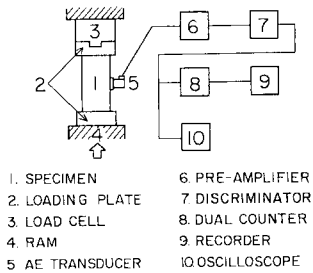


Fig. 1 Block diagram of AE apparatus.

$\text{kN/m}^2$ ，一軸圧縮強度は80～100 MPaであった。供試体のサンプル数は生駒産、稲田産とも円柱供試体100個、立方供試体20個であった。

実験装置の概略をFig. 1に示す。実験において測定される量は、一軸圧縮試験の際の軸圧と軸ひずみおよび供試体が軸圧を受けた際に発生するAEである。Fig. 1において、AE検出器で検出された信号はプリアンプとメインアンプ(ディスクリミネーターに内蔵)で増幅され、ディスクリミネーターに装備されたフィルターと振幅弁別器で信号処理が行われたのち、パルス化されてカウンターで計数される。なお、フィルターはAE検出器(共振周波数140 kHzの圧電素子)の特性を生かすため、100 kHz～200 kHzのバンドパスフィルターに形成した。また、スレシヨルドレベルは、5種類の組合せで予備実験を行い、とらえられるAE数は異なっても、AE累積曲線の変曲点は変わらないことを確かめたので、先行軸応力以下の応力で発生するAEが高レベルのスレシヨルドレベル以下になるよう低レベル $V_L$ を380 mV、高レベルの $V_H$ を400 mVとした。これによって包絡線検波された信号は $V_H$ を越えたのち、その包絡線が $V_L$ 以下になれば1つのイベント・パルスとして観測されることになる。なお、載荷試験は応力制御方式で9.8 MPa/minで行い、また、供試体の軸ひずみは供試体の中央部分の表面に貼りつけた2枚のひずみゲージ(一軸ゲージ、長さ30 mm)により計測した。

AE計測を行ううえで注意しなければならない事柄の1つとしてノイズの除去がある。一般にノイズには、計測器自体から発生する電気的なものやハムノイズ等がある。これらのノイズは適当なアースを施すことによって処理した。このほかに、載荷試験機の載荷板と供試体上下端面との不整な接触によるノイズがある。この研究では、この接触によるノイズは供試体の両端面に薄いスポンジを敷くことによって除去することができた。その検証をした例がFig. 2とFig. 3である。これらの図は、円柱供試体に14.7 MPaの軸応力を10回の繰返し載荷によって与え、その後29.4 MPaまで単調載荷したときの応力と軸ひずみおよびAE累計数の関係を示したも

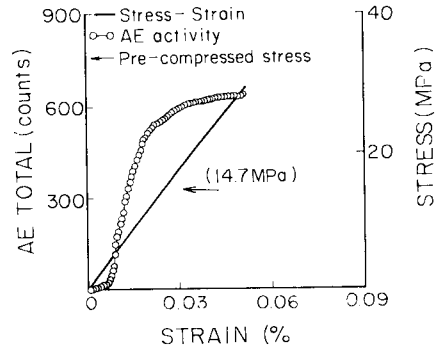


Fig. 2 Relationships among stress, strain and AE activity obtained without sponge pads between loading plates and specimen.

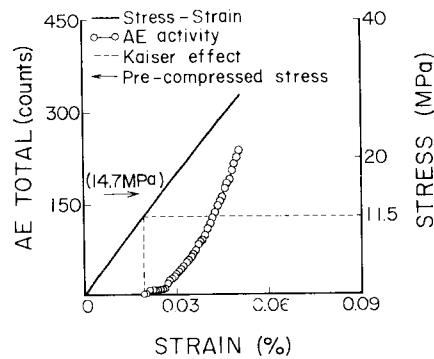


Fig. 3 Relationships among stress, strain and AE activity obtained with sponge pads between loading plates and specimen.

のである。Fig. 2はスポンジを敷かない場合で、載荷直後より連続的にAEが発生している。一方、Fig. 3は供試体の上下端面にスポンジを敷いた場合で、与えられた先行軸応力付近まではAEの発生はみられない、スポンジを敷くことによってノイズが除去できるのは、いずれの供試体でもFig. 3の例と同様であるが、供試体自体にマクロなクラックがある場合は供試体端面以外からも載荷直後からAEが出るのでFig. 3のようにはならない。そのため供試体にクラックなどの不連続部がない限り、端面の不整により発生するノイズはスポンジを敷くことによって完全に除去できることがわかる。

また、供試体のどのあたりからAEが多く発生しているかを調べるために、AE検出器を供試体の上部、中央部、下部に設置して観測結果を比較した。その結果、従来から報告<sup>5)</sup>されているように、供試体中央部に設置した場合AE検出器の応答が最も顕著に現われた。したがって、今回の実験では、AE検出器をFig. 1で示すように、供試体中央部に置く一点観測方式とした。

### 3. 実験とその結果の考察

地山から採取した岩石試料を用いて、岩盤が地中で受けていた地圧を AE のカイザー効果を利用して求める場合、原位置の岩盤は、三次元応力状態下であり、長時間にわたり地盤応力を受けてクリープはほぼ完了し、ひずみの増加がほとんど終了している状態と思われる。岩石は载荷を受けると、ひずみははだいに増加しつつ増加が停止するが、ひずみの増加が停止した状態をここではひずみ飽和状態と定義することにす。室内において、ひずみ飽和状態を作り出す方法には長期間のクリープ载荷もあるが、それに代わる方法として、ここでは同一荷重による繰返し载荷法を用いた。この方法によれば、同一荷重を残留ひずみの増加が認められなくなるまで繰返し载荷した状態を、ひずみ飽和状態とする。一方ひずみ飽和状態への繰返し载荷途中で载荷を中止した供試体の状態をひずみ不飽和状態と称することとする。このようにして作成した両種の試料を用いて、AE のカイザー効果から求められる先行軸応力がどのようになるかを比較した。実験した項目は次のようである。なお、現地より採取整形したままの各試料の先行応力を一軸圧縮試験の際のカイザー効果を利用して推定した結果、先行応力の最大値は生駒産で 8.08 MPa、稲田産で 7.58 MPa であった。

1) 実験Ⅰ 円柱供試体に一定軸応力の繰返し载荷を与え、残留ひずみの増加が認められなくなった状態、すなわちひずみ飽和状態とした供試体と残留ひずみの増加がなお進行中の状態、すなわちひずみ不飽和状態の場合の 2 つの状態の供試体について AE のカイザー効果から求めた先行軸応力を比較した。

2) 実験Ⅱ Fig. 4 (a) の立方供試体に大きさの異なる 2 方向の繰返し軸応力 (X 方向 : 9.8 MPa, Y 方向 : 14.7 MPa, Z 方向は繰返し応力は無载荷) を順次与えて、ひずみ飽和状態とひずみ不飽和状態の供試体を作り、それぞれの供試体のカイザー効果から X 方向と Y 方向のそれぞれの先行軸応力を求めて比較した。

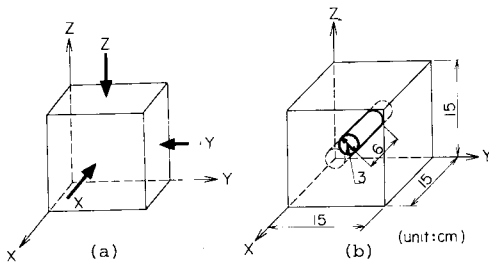


Fig. 4 (a) Cubic specimen of 15×15×15 cm and directions of stresses applied  
(b) Cylindrical specimen cored from cubic specimen

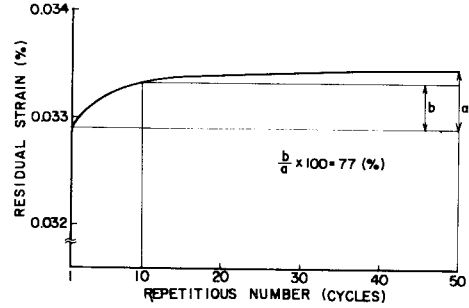


Fig. 5 Relationship between residual strain and repetitious number.

3) 実験Ⅲ Fig. 4 (a) の立方供試体に大きさの異なる 3 方向の繰返し軸応力 (X 方向 : 9.8 MPa, Y 方向 : 14.7 MPa, Z 方向 : 19.6 MPa) を順次与え、各方向ともひずみ飽和状態とした供試体における各方向の先行軸応力をカイザー効果から求めて比較した。また、上述した 3 方向ともひずみ飽和状態とした立方供試体の中央部から Fig. 4 (b) に示すように X 方向を軸とする円柱供試体を切り出し、その円柱供試体の先行軸応力をカイザー効果から求めた。

#### (1) 実験Ⅰの結果と考察

供試体直径 3 cm、高さ 6 cm の円柱供試体に 14.7 MPa の繰返し軸応力を 50 回与えると残留ひずみの増加がほとんど認められなくなったので、この場合をひずみ飽和状態とした。また、ひずみ飽和状態への繰返し载荷途中のものとして繰返し回数 10 回の供試体をひずみ不飽和状態の試料とした。そのときの残留ひずみの増加と繰返し回数の関係を Fig. 5 に示す。図よりみれば、1 回目の除荷時の残留ひずみを除いた繰返し 10 回における残留ひずみの量 (Fig. 5 の b) はひずみ飽和とみなした 50 回の繰返し载荷の残留ひずみから 1 回目の残留ひずみを除いた量 a の約 77 % になっていた。なお、50 回の繰返し载荷後の残留ひずみの量 (約 0.0334 %) は同種の花崗岩をひずみの増加が止まるまでクリープ (その期間約 7 日) させたときの残留ひずみ量とほぼ等しかった。

上述の方法で作成したひずみ飽和状態とひずみ不飽和状態の供試体に、応力制御方式で応力を単調増加させて一軸圧縮試験を実施し、同時に AE の観測を行い、応力-軸ひずみ-AE 累積数関係を表わしたのが Fig. 6 である。図より、繰返し回数が 10 回 (ひずみ不飽和状態) では、与えた軸応力が 14.7 MPa であるにもかかわらずカイザー効果より求めた先行軸応力は 12.6 MPa となり、かなり低い値となっていた。一方、繰返し回数 50 回 (ひずみ飽和状態) の供試体では、与えた軸応力 14.7 MPa に対し、カイザー効果を利用して求めた先行

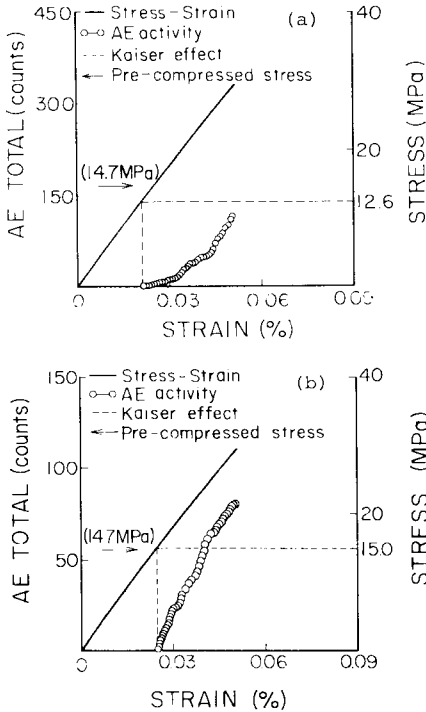


Fig. 6 Relationships among stress, strain and AE activity on a specimen subjected to cyclic compressive stress of (a) 10 cycles and (b) 50 cycles.

軸応力は 15.0 MPa となっていた。したがって AE のカイザー効果を利用して先行軸応力を求める場合、少なくともひずみ飽和状態の供試体でなければ正確な値を求めることができないことが確かめられた。ここに挙げた試料は生駒産の花崗岩についての一例であるが、稲田産においても同様な結果が得られた。

## (2) 実験Ⅱの結果と考察

Fig. 4 (a) に示した、大きさ  $15 \times 15 \times 15$  cm の立方供試体に大きさの異なる 2 方向の応力 (X 方向: 9.8 MPa, Y 方向: 14.7 MPa, Z 方向: 繰返し応力は無载荷) を順次繰返し载荷によって与え, X, Y 両方向とも 10 回の繰返しと 50 回の繰返しの違いが AE のカイザー効果より求められる先行軸応力にどのような影響をもたらすかを調べた。まず, 立方供試体の X 方向に 9.8 MPa の応力で繰返し载荷を 10 回行い, 供試体を  $90^\circ$  回転させて Y 方向に 14.7 MPa で 10 回の繰返し载荷を行ったのち, 再び X 方向に供試体の軸の向きを変えて, X 方向の応力を 9.8 MPa 以上 11.6 MPa まで単調に増加させた。その結果, 応力-軸ひずみ-AE 累積数関係を示したのが Fig. 7 (a) である。図より, X, Y それぞれの方向に与えた繰返し载荷の軸応力が 9.8 MPa と 14.7 MPa であるにもかかわらず X 方向の载荷

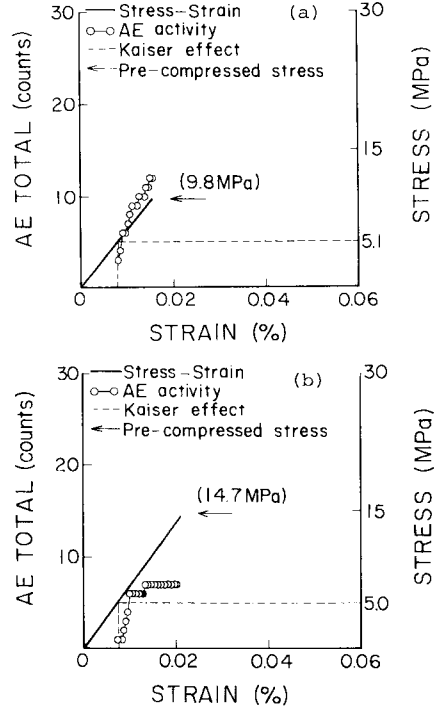


Fig. 7 Relationships among stress, strain and AE activity on a specimen subjected to cyclic compressive stress of 10 cycles

(a) pre-compressed stress of 9.8 MPa

(b) pre-compressed stress of 14.7 MPa

で得られた AE のカイザー効果より求めた X 方向の先行軸応力は 5.1 MPa であった。次に供試体軸を Y 方向に向きを変え 16.7 MPa まで単調载荷を行ってカイザー効果より Y 方向の先行軸応力を求めた結果は Fig. 7 (b) のように 5.0 MPa であった。このことは, Fig. 5 に示した供試体への载荷の際, 残留ひずみの増進がみられる段階 (ひずみ不飽和状態) で载荷を終えたことにも一因があると考えられる。

一方, 上述のような载荷順序でひずみ飽和状態とした供試体を用いた場合のカイザー効果は, X 方向については Fig. 8 (a) のように 10.0 MPa において, また Y 方向については Fig. 8 (b) が示すように 14.2 MPa から AE の発生がみられ, X, Y 両方向とも与えた軸応力付近から AE が発生しており, カイザー効果から推定される先行軸応力は X, Y 両方向ともそれぞれの方向に与えた軸応力を 2~3% の誤差範囲で推定することができている。ゆえに AE のカイザー効果から各方向の先行軸応力を求めるには, 上述の実験のように, 各方向の残留ひずみの状態がともにひずみ飽和状態の試料であることが必要であることがわかる。

## (3) 実験Ⅲの結果と考察

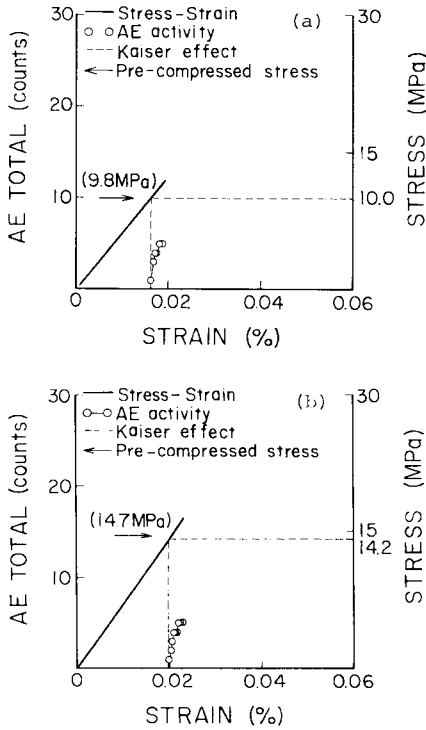


Fig. 8 Relationships among stress, strain and AE activity on a specimen subjected to cyclic compressive stress of 50 cycles  
 (a) pre-compressed stress of 9.8 MPa  
 (b) pre-compressed stress of 14.7 MPa

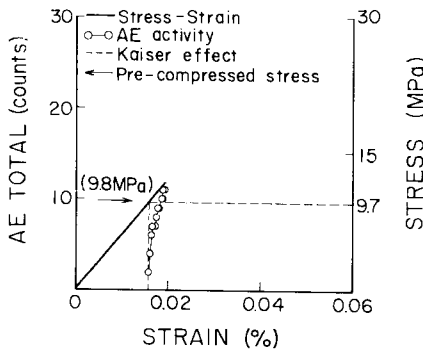


Fig. 9 Relationships among stress, strain and AE activity in X direction of specimen subjected to 3 principal stresses.

次に大きさの異なる3方向の軸応力を別々に与えたひずみ飽和状態の供試体の各方向に与えた軸応力がAEのカイザー効果から推定される先行軸応力とどのような関係にあるかを調べた。大きさ15×15×15 cmの立方供試体に、Fig. 4 (a)のようにX方向に9.8 MPa、Y方向に14.7 MPaそしてZ方向に19.6 MPaの応力

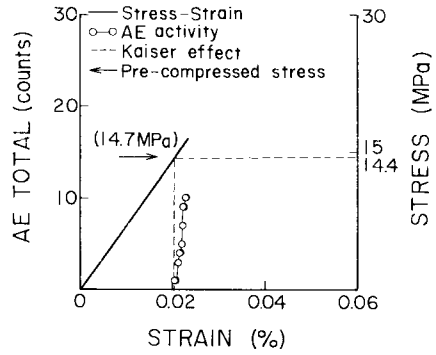


Fig. 10 Relationships among stress, strain and AE activity in Y direction of specimen subjected to 3 principal stresses.

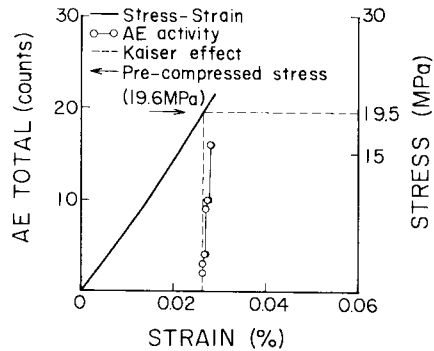


Fig. 11 Relationships among stress, strain and AE activity in Z direction of specimen subjected to 3 principal stresses.

Table 1 Comparison between applied stresses and estimated stresses by the Kaiser effect.

	X方向	Y方向	Z方向
A. 繰返し50回により与えた応力	9.8 (MPa)	14.7 (MPa)	19.6 (MPa)
B. カイザー効果より得られた先行応力	9.7 (MPa)	14.4 (MPa)	19.5 (MPa)
C. 誤差 $[C=100 \times (1 - \frac{B}{A})] \%$	1.0%	2.0%	0.5%

を50回の繰返し载荷によって順次与えた。そのうち、この供試体のX方向に再び11.6 MPaまで応力を単調载荷したときの応力-軸ひずみ-AE累積数の関係を示すとFig. 9のようになる。図よりカイザー効果から推定される先行軸応力は9.7 MPaであり、この供試体のX方向にあらかじめ与えた軸応力が9.8 MPaであることを考えれば、X方向に関するカイザー効果より求められる先行軸応力は他方向(Y: 14.7 MPa, Z: 19.6 MPa)からの応力の影響を受けていないことがわかる。試験順序を(方向: 主応力値), 添字として繰返し回数の記号で、

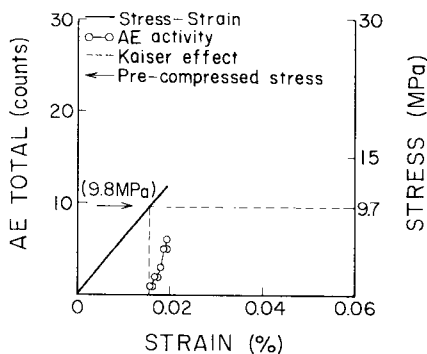


Fig. 12 Relationships among stress, strain and AE activity in cylindrical specimen cored from X direction of cubic specimen subjected to 3 principal stresses.

また矢印を試験順序で略記することにし、上記を記号化すれば、 $(X : 9.8)_{50} \rightarrow (Y : 14.7)_{50} \rightarrow (Z : 19.6)_{50} \rightarrow (X : 11.6)_1$ となる。同様に、 $(X : 9.8)_{50} \rightarrow (Y : 14.7)_{50} \rightarrow (Z : 19.6)_{50} \rightarrow (Y : 16.7)_1$ と $(X : 9.8)_{50} \rightarrow (Y : 14.7)_{50} \rightarrow (Z : 19.6)_{50} \rightarrow (Z : 21.6)_1$ の場合の結果をそれぞれ Fig. 10, Fig. 11 に示す。Fig. 9~11 により得られた結果をまとめると Table 1 のようになる。Table 1 より、各方向に初期に与えられた軸応力は、他方向へ全く影響しないことがわかる。以上より残留ひずみが一定になるまで繰返し载荷によって3方向の軸応力が与えられた供試体においては、カイザー効果を利用することにより、それぞれの方向に与えた軸応力を約2%の誤差内で推定できる。

同様にひずみ飽和になるように、大きさの異なる3方向の軸応力を順次繰返し与えた立方供試体の中央部から Fig. 4 (b) のように円柱供試体(直径3 cm, 高さ6 cm)を切り出し、X方向の先行軸応力を求めたのが Fig. 12 である。Fig. 12 は、 $(X : 9.8)_{50} \rightarrow (Y : 14.7)_{50} \rightarrow (Z : 19.6)_{50}$ の軸応力を受けた立方供試体のX方向を軸方向として切り出した円柱供試体に11.8 MPaまで軸応力を単調载荷したときの応力-軸ひずみ-AE累積数の関係を描いたものである。図より、カイザー効果から推定される先行軸応力は9.7 MPaとなっている。したがって、X, Y, Zの各軸方向において残留ひずみがほぼ飽和した試料では、AEのカイザー効果を利用することにより、その試料の各面に与えた軸応力を精度よく求めることが可能であると考えられる。また、他方向(Y, Z)から切り出した試料においても同様な結果が得られた。なお、図の例に示したサンプルはすべて生駒産であるが、稲田産の試料においても同様なことが認められた。

#### 4. おわりに

種々な载荷方法であらかじめ軸応力を与えた花崗岩の

カイザー効果について得られた結果をまとめると以下のようなになる。なお、この報告においては、载荷中最初にAEが発生した応力をAEのカイザー効果より求めた先行軸応力とみなした。

(1) 载荷時における载荷板と供試体端面との不整によるノイズは、供試体の両端面に薄いスポンジを敷くことによって除去できる。

(2) 大きさの異なる軸応力を各面に繰返し载荷によって与えた立方供試体においては、各軸応力方向において残留ひずみが一定になるまで载荷が行われた供試体(ひずみ飽和状態の場合)のみ、カイザー効果から载荷方向ごとの先行軸応力を高い精度で見出すことができる。これに対し、残留ひずみの増加がなお認められる状態で载荷を中止した、いわゆるひずみ不飽和の供試体においては、AEより求められる先行軸応力は当初与えた軸応力よりも小さい値となる。このことより、花崗岩におけるAEのカイザー効果は、ひずみ飽和の程度に影響していると考えてよい。

(3) 上記(2)と同じ载荷方法で、残留ひずみが一定になるまで軸応力を繰返し与えた立方供試体の中央部から一表面に垂直に円柱供試体を切り出し、この供試体のカイザー効果から先行軸応力を推定した結果は、その面に与えた軸応力の1%の誤差内にあった。したがって、载荷方向の岩石試料がひずみ飽和状態であれば、AEのカイザー効果を利用することによって、その载荷方向に与えた軸応力を他の方向の载荷と無関係に精度よく推定することが可能であるといえる。

最後に本研究を遂行するにあたり、(株)大林組技術研究所の藤原紀夫室長ならびに畑 浩二研究員から受けた援助に対してここに謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) Obert, L. and Duvall, W. : Use of subaudible noises for the prediction of rock bursts, parts 2, U.S. Bureau of Mines, 1942.
- 2) Kaiser, J. : Untersuchungen über das Auftreten geräuschen beim zugversuch, Arkiv für das Eisenhüttenwesen, Vol. 24, pp. 43~45, 1953.
- 3) Goodman, R. E. : Subaudible noise during compression of rocks, Geol. Soc. Bull. Vol. 74, pp. 487~490, 1963.
- 4) 金川 忠・林 正夫・仲佐博裕 : 岩石における地圧成分のアカコースティック・エミッションによる推定の試み, 土木学会論文報告集, 第258号, pp. 63~75, 1977.
- 5) 楠ノ瀬勤一郎・西沢 修・伊藤久男・石土経士・長谷川 功 : 岩石の一軸圧縮試験におけるAE発震機構, 地震, 第34巻, 第2号, pp. 241~250, 1981.

(1984.12.10・受付)