

(92) 地圧測定のためのカイザー効果に関する検討
— AE法、DR法、および音弾性法を用いて —

(財)電力中央研究所 正会員 金川 忠

(財)電力中央研究所 正会員 ○ 新 孝一

A STUDY ON KAISER EFFECT FOR GEO-STRESS MEASUREMENT

- ACOUSTIC EMISSION, DEFORMATION RATE AND ACOUSTO-ELASTICITY METHOD -

KANAGAWA, TADASHI

SHIN, KOICHI

;CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF ELECTRIC POWER INDUSTRY

ABSTRACT

In-situ rock stress measurement is required when underground rock caverns for pumped hydro-power station, compressed air energy storage station, etc. are excavated. Among various geo-stress measuring methods, that utilizing the Kaiser effect is a relatively economic and easy way to know the in-situ rock stress, for it requires only to take core samples from the site, then to test in laboratory and does not need to be performed the laborious in-situ test. Although Kaiser effect is originally said of AE, other related phenomenon of deformation rate has been found. AE and DR methods utilizing the phenomena are now being studied to precisely measure the in-situ rock stress.

The authors have found another phenomenon that acoustic wave velocity also has the potential to show the pre-loaded stress level. That is, acoustic wave velocity change rate as a function of stress changes at the point of pre-stressed level. This is also a sort of Kaiser effect related phenomenon. And this acousto-elasticity method as well as AE and DR methods were tested whether these can show the pre-loaded stress level of Komatsu Andesite and Inada Granite. And further, the effects of lateral stress and time after unloading till Kaiser test were examined in the case of the granite. As a result, lateral stress history after axial loading seemed not to have some influences. And the time between unloading and Kaiser test seemed no effects on Kaiser effect within the range from two days to about 300 days.

1. はじめに

各種の地下空洞の建設に際しては、岩盤に作用している初期地圧を計測する必要がある。初期地圧の計測方法には大別して、応力補償法、応力解放法、水圧破碎法、カイザー効果による方法等がある。カイザー効果を用いる方法は前三者と異なり、原位置からボーリングコアを採取してくれば実験室で簡易に計測を行うことができるという特徴を持っているので、実績の多い応力解放法との比較やその他の基礎的な検討によって精度・信頼性の向上のための研究が行われている。また、カイザー効果はもともとAEで見いだされたものであるが(AE法)、近年ではひずみを測定することにより変形率変化からも先行応

力を計測できることも見いだされている（DR法）¹⁾。ここでは広義に、これらの地圧計測法をカイザー効果を用いた方法と呼ぶことにする。

本報告では、AE法、DR法とあわせて弾性波の伝播特性から先行応力を推定することも試み（音弾性法）、さらにカイザー効果に対する側圧履歴の影響や先行応力からカイザー試験までの時間の影響について若干の検討を行った結果について述べる。

2. 実験の概要

2.1 各計測手法について

AE法というまでもなく、カイザー試験時の载荷過程においてAEの発生率が増加する時点の载荷応力から、先行応力を見いだす方法である。ここで用いた計測システムではイベント、リングダウン、エネルギーを適宜計数した。

DR（変形率変化、Deformation Rate）法¹⁾では载荷・除荷を数回繰り返して、各载荷時の軸ひずみの差を荷重に対してプロットし、その変化点から先行応力を見いだす。この方法ではひずみの測定を精度よく行う必要があるので、ひずみ計測をアクティブ・ダミーの4枚ゲージ法とし、さらにこのふたつの和をとることを基本とした。また、貼付したひずみゲージの表面にシリコンゴムを塗り気温変化の影響を避けた。

音弾性法は、载荷中に弾性波の伝播速度を計測し、応力による音速変化率の変化点から先行応力を見いだそうとするものである。この方法では特に弾性波の速度変化を精度よく測定する必要があり、このため通常用いるパルス波でなく連続した正弦波を用いて測定した。周波数を f 、伝播距離を l 、伝播速度を v とすれば、発振波に対する受振波の位相遅れ ϕ は、次式で表わされる。

$$\phi = 2\pi f \frac{l}{v}$$

まず、载荷前に周波数を変えて位相遅れを測定した $f-\phi$ 勾配から速度 v_0 を測定²⁾しておけば、载荷時に一定周波数の弾性波の位相変化を測定することにより、速度変化を求めることができる。今回の実験では载荷軸に対して直交方向に伝播するP波についてこの測定を行った。また、ここで用いた計測システムでは受振波を5nsec 間隔で1024点だけサンプリングし、計算機で自動処理した。なお、用いた周波数は1.2MHzである。

2.2 供試体ならびに実験の装置・方法

実験に用いた岩石試料は主に稲田花崗岩であり、これを用いて側圧履歴の影響、時間効果（先行载荷とカイザー試験の時間間隔）の検討を行った。また他に、小松安山岩を用いてカイザー効果の基本的な確認試験も行った。試験片の寸法は、稲田花崗岩の場合2.5×2.5×7.5cm、小松安山岩の場合5.0×5.0×

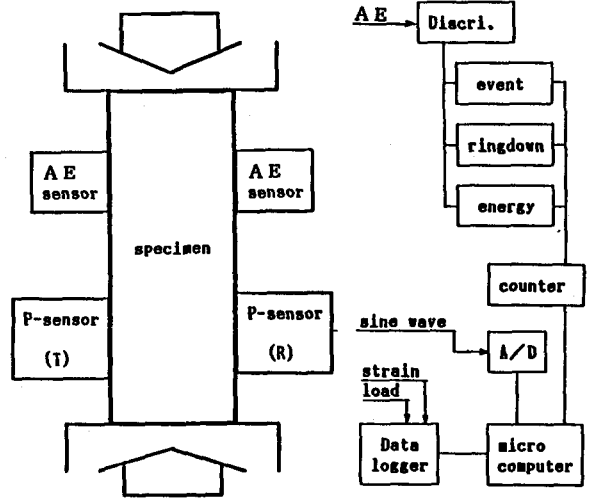


図-1 供試体と計測システムの概要

表-1. 稲田花崗岩供試体の先行応力の概要

先行応力(軸) 回数(kgf/cm ²)×	側圧履歴×回数 (kgf/cm ²)	カイザー試験 までの日数
300×72	500×72	2
300×72	—	2
300×50	—	9
400×5	—	24
200×5	—	300

10.0cm である。

載荷に用いた試験機は10ton 容量の油圧式サーボコントロール試験機である。 載荷速度はほぼ毎分1～5Kgf/cm² に設定した。 AE測定には共振型(200KHz)の圧電センサーを用いた。 また、弾性波の伝播特性はAEセンサーより広帯域の感度特性を持ち中心周波数およそ1MHzの圧電式P波センサーを用いて測定した。 なお、このP波センサーによって強制発振された弾性波のAE計測への影響は、バンドパスフィルターまたはAEカウンターのゲート化によって除くことができた。 また、有効長1cmのひずみゲージを用いて軸ひずみの測定を行った。 こうして、載荷中の荷重、ひずみ、AEのカウント数(イベント、リングダウン、エネルギー)、強制発振波の受振波形等をマイクロコンピュータに取り込んだ。 計測の概要を図-1に示す。

稲田花崗岩では、カイザー効果に及ぼす側圧履歴の影響と、カイザー試験までの放置時間の影響を調べるために次のようにした。 すなわち、側圧履歴の影響を調べる実験では2個の供試体に応力レベル300Kgf/cm²で72回の軸方向繰返し載荷を行ったのち、さらにこのうち1個の供試体について一側面から応力レベル500Kgf/cm²、72回の繰返し載荷を1日後に行った。 この2種類の供試体を軸方向載荷から2日後にカイザー効果計測の試験に供した。 また、カイザー試験までの時間の影響を調べる実験では、軸方向に200、300、400Kgf/cm²のいずれかの応力レベルで何回かの繰返し載荷を行い、最大300日後にカイザー試験を行った。 これを表-1に示す。 なお、供試体は年間を通じほぼ24±2℃の室内に放置して試験に供した。

3. 実験結果

3.1 AE、ひずみ、音弾性によるカイザー効果の確認

稲田花崗岩については次項以降に示すのでここでは小松安山岩について示す。 図-2、図-3はそれぞれ先行応力75、254Kgf/cm²の場合の結果を、横軸に応力、縦軸にAEエネルギーのレートと弾性波の位相変化(進みを正とする)ならびにDR法によるひずみ差をとって示したものである。 小松安山岩では供試体の表と裏の軸ひずみを別々に計測し、別々に表示してある。 なおフルスケールの位相変化に対応する速度変化の割合を同時に示してある。 載荷前のP波速度はほぼ3860m/secであった。

AEでみると先行応力の付近でエネルギーの発生率が増加していることがわかる。 DR法では時間的に早い載荷過程のひずみから遅い載荷過程のひずみを引いた場合に下に凸のカーブが得られ、極小値をとるときの荷重が先行応力の付近となっている。 弾性波の速度変化でみると、載荷にともない伝播速度は

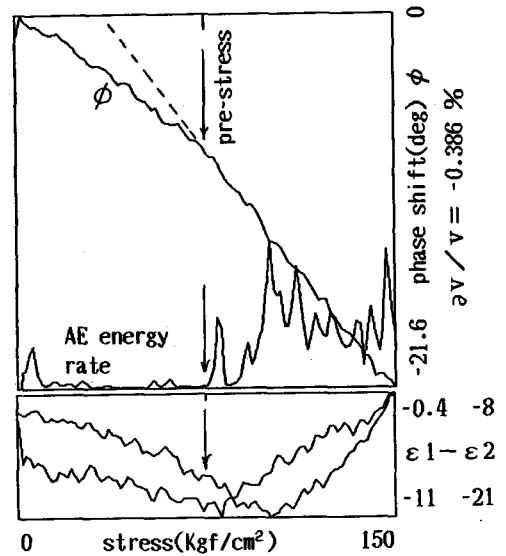


図-2 小松安山岩 先行応力74.8Kgf/cm²×3回

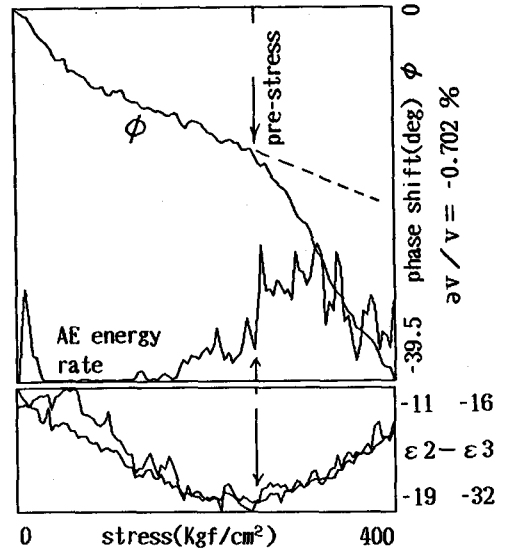


図-3 小松安山岩 先行応力254Kgf/cm²×3回

減少し先行応力の付近に変曲点が見られる。

3. 2 側圧履歴の影響について

実際の地山における応力は一軸ではないので、先行応力として側圧も作用しているときのカイザー効果はどうなるのかを明らかにしておく必要がある。 AEのカイザー効果に対する側圧の影響を検討した吉川・茂木の報告³⁾によれば、一軸の先行応力を与えた新小松安山岩のブロックから方向を変えて取り出した試料にて

試験したところ、各方位の先行応力を概略ながら記憶しているとしている。 また筆者の一人が以前行った検討⁴⁾によれば、モルタル試料に2軸の先行応力を与えて試験

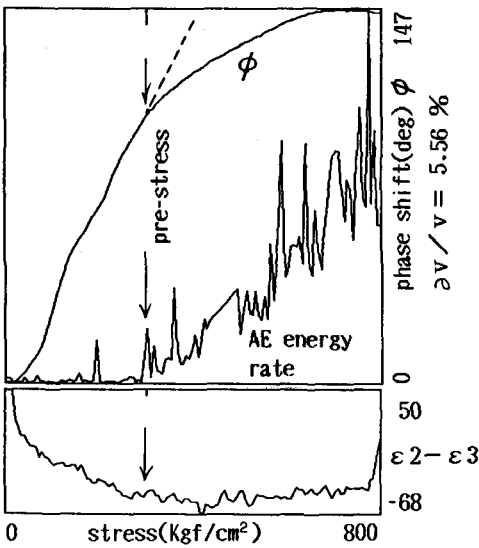
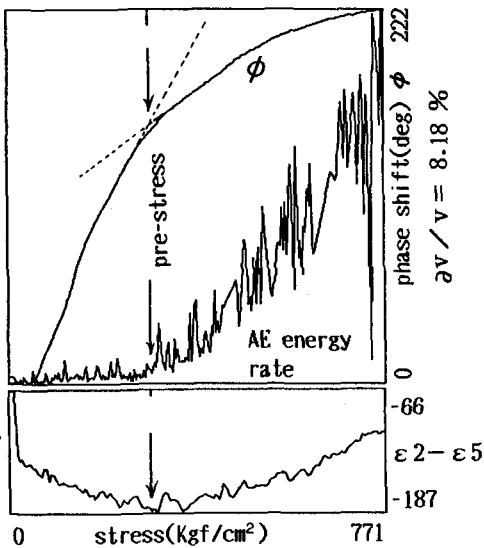


図-4 稲田花崗岩(横載荷履歴あり)(2日後) 図-5 稲田花崗岩 (2日後)

したところ、それぞれの方向でそれぞれの方向の先行応力が検出され、側圧の影響は認められなかった。

ここでは稲田花崗岩に応力レベル 300Kgf/cm² で軸方向に先行載荷・除荷した後に、応力レベル500Kgf/cm² で横方向に載荷・除荷したときの、いわば側方応力履歴の影響をAE法、DR法、音弾性法を用いて調べた。結果を図-4、図-5に示す。側方応力履歴の有無に関わらず軸方向の先行応力の付近でAEの発生率が増加し、DR法でのひずみ差も極小値をとる。弾性波は先の小松安山岩と異なって載荷にともない伝播速度が増加するが、やはり軸方向の先行応力の付近に変曲点を持つ。なお載荷前のP波速度はほぼ4330m/secであった。

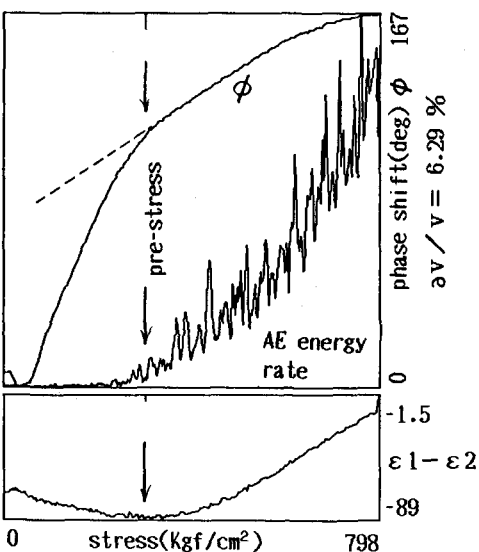


図-6 稲田花崗岩 (9日後)

3. 3 放置時間の影響について

現地から採取した岩石コアを実験室に持ち帰りカイザー試験を行うまでの時間は通常1カ月程度から1年ほどである。そこでカイザー効果に対する時間依存性、すなわち先行応力が作用していたときからカイザー試験を行うまでの時間の影響を明らかにする必要がある。 AEのカイザー効果に対する時間の影響を調べた吉川らの報告⁵⁾によれば、新小松安山岩で破壊応力の40%以下の先行応力を除荷した後3年経過しても先行応力の推定誤差は20%程度であるとしている。 また栗田・藤井⁶⁾は花崗岩において、～数日

までは明瞭に、2～3週間まではなんとかカイザー効果を認めることができ、その後は未確認としている。

ここでは稲田花崗岩に先行応力を載荷・除荷したのち2日から約300日経過した試料を用いてAE法、DR法、音弾性法で調べた。試験個数が少ないので先行応力の推定精度について詳細な議論はできないが、2日から300日の経過時間の範囲ではほぼ同様に先行応力を推定することができ、時間の影響は認められないようである。

4. まとめ

小松安山岩と稲田花崗岩を用い、AE法、DR法と併せて弾性波速度の変化率を利用する音弾性法を用いてカイザー試験を行った結果、3者はいずれも先行応力の付近に特徴点を示した。この3つの方法は1個の供試体で同時に実施できるので、これらを併用することによりより信頼性の高い地圧計測が可能になると思われる。

また、稲田花崗岩で側圧履歴の影響を調べたが、500Kgf/cm²の側圧は300Kgf/cm²の軸方向先行応力に対するカイザー効果に影響しないようであった。

さらに、稲田花崗岩でカイザー効果に対する時間効果を調べたが、室温変化が比較的少ない実験室に2日～約300日間放置して試験した範囲では、放置時間がカイザー効果に及ぼす影響は認められなかった。

参考文献

- 1) 山本・他：変形率変化を用いた先行応力の推定、地震学会講演予稿集、1983年度春季大会
- 2) 新：連続波を用いた岩石の音響異方性の測定、土木学会第21回岩盤力学に関するシンポジウム論文集
- 3) 吉川・茂木：岩石のAE活動度の応力履歴効果による応力推定法(AE法)第7報、地震学会講演予稿集、1983年度春季大会
- 4) 金川・他：岩石のAE測定によるカイザー効果を利用した地圧推定法と二、三の課題、土木学会第11回岩盤力学に関するシンポジウム論文集
- 5) 吉川・茂木：岩石のAE活動度の応力履歴効果による応力推定法(AE法)第6報、地震学会講演予稿集、1983年度春季大会
- 6) 栗田・藤井：岩石変形におけるKaiser効果のRecoveryとH₂O効果、地震学会講演予稿集、1977年度秋季大会
- 7) 金川・他：AE法と変形率変化法を併用した室内試験による地圧測定、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1987.12

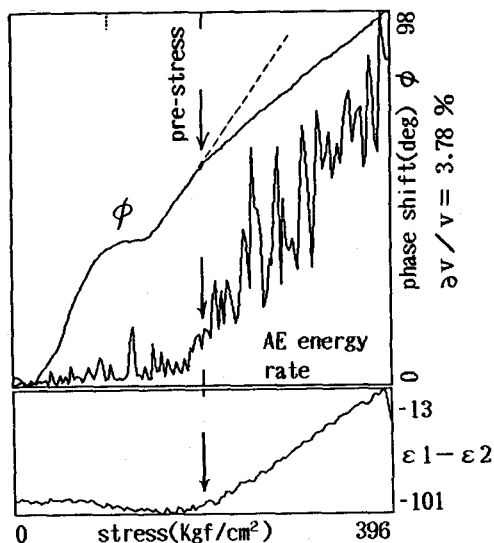


図-7 稲田花崗岩 (300日後)