

岩石のカイザー効果に及ぼす拘束圧の影響

渡辺英彦

正会員 工修 日本大学助教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

E-mail:hidehiko@civil.ce.nihon-u.ac.jp

A E法を用いた初期地圧の推定において再載荷時の拘束圧の影響に関する実験を行い、得られた実験結果よりカイザー効果のメカニズムを検討した。原位置での応力状態を模した三軸圧縮の先行載荷を行った供試体に対し、先行載荷とは異なる大きさの拘束圧で再載荷を行った。このときのA E発生傾向には二つの急増点が観察され、先行載荷時の軸差応力と軸応力とに対応している。軸差応力と軸応力をそれぞれ記憶したクラックの存在が考えられ、これらは拘束圧の大きさに影響されない。この結果をもとに軸差応力を記憶しているクラックモデルとして2次クラックが再載荷時に成長する際にA Eが発生するモデルが実験結果とよく対応することを示した。

Key Words : *kaiser effect, acoustic emission, triaxial compression test, confining pressure, in-situ stress*

1. はじめに

初期地圧の推定結果は地下空洞配置の検討や空洞内壁の補強設計に用いられるなど、地下空洞の設計施工において重要である。初期地圧を計測する方法には、原位置で行う水圧破砕法や応力解放法などがあり多くの計測実績がある。しかし、装置が大がかりとなり多大の経費を必要とすることが問題である。一方、ボーリング孔より採取したコア試料を用いて行う室内試験がある。この室内試験は岩石コアの力学的特性の変化（圧縮下における非線形性や非弾性）から初期地圧を推定しようとするものであり、原位置試験に比べ安価で比較的簡便である。

室内試験の一つにAcoustic Emission（以下A Eと記す）のカイザー効果を利用した方法がある。このA E法は金川ら¹⁾によって提案され、採取したコア試料に一軸圧縮を行い、このときのA E急増点から初期地圧の推定が行われている。また、コア試料の一軸圧縮強度を越える領域の応力推定について、一軸圧縮の剛性試験²⁾や三軸圧縮^{3), 4), 5), 6)}を用いたA E法も検討されている。しかし、コア試料に載荷する一軸圧縮は原位置での応力状態と異なっている。三軸圧縮を用いた試験でも原位置での応力状態

とは完全に同じではない。そこで、原位置の応力状態と室内試験の一軸圧縮状態との違いがカイザー効果に及ぼす影響についての検討が行われている。これは、先行載荷として三軸圧縮を行った供試体に対して、一軸圧縮の再載荷を行った場合のカイザー効果に関する実験であり、Hughson and Crawford⁷⁾はA Eの急増点が軸差応力に対応すること、道廣ら⁸⁾と瀬戸ら⁹⁾は再載荷を行った方向の軸応力に対応することを報告している。A Eは岩石内部の損傷と関係しており、初期地圧という先行履歴によって生じている損傷が再載荷によってさらに進展し、このときに発生するA Eを計測することにより損傷履歴を推定するのがA E法であると考えられる。瀬戸ら¹⁰⁾は、一軸圧縮下における砂岩のA E位置標定を行い、再載荷時のA Eが先行載荷時に形成された損傷領域の縁部から発生する場合にカイザー効果が明瞭であることを報告している。しかし、コア試料に再載荷する一軸圧縮が先行載荷時のどのような応力条件を満たすときに岩石内部の損傷がさらに進展しA Eが発生するのか、というカイザー効果のメカニズムについての検討は十分ではない。一軸圧縮の繰り返し載荷におけるカイザー効果のメカニズムは、小島・松木¹¹⁾がガラス板のクラック観察から検

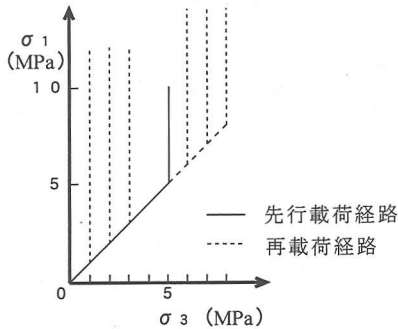


図-1 荷経路

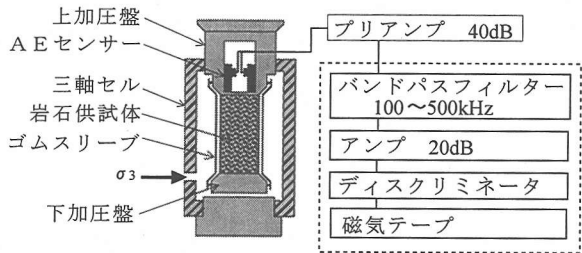


図-2 A E 計測システム

討を行っているが、先行荷時と異なる応力状態で再荷を行った場合のカイザー効果については検討されていない。

本研究は、A E 法を用いた初期地圧の推定における拘束圧の影響とカイザー効果のメカニズムを調べる目的で、原位置での応力状態を模した三軸圧縮の先行荷を行った供試体に対し、先行荷とは異なる大きさの拘束圧で再荷を行った。なお、本研究での三軸圧縮は液圧による拘束圧を荷した後に軸方向に荷重を荷している。このとき得られたカイザー効果の特徴に着目して検討を行う。本研究での実験結果から一つの供試体に対して二つのA E 急増点が観察され、それらの急増点と先行荷時の軸差応力や軸応力との対応を検討する。また、軸差応力を記憶しているクラックとして、2次クラックが再荷時に成長するときにA E が発生する微小クラックモデルと実験結果との対応について検討する。

2. 実験方法

(1) 試料

試料は宇都宮市大谷町瓦作地区より採取した細目の凝灰岩(大谷石)である。深度45mの地点よりブロック状の試料を採取し、実験室内で $\phi 5 \times h 10$ cmの円柱供試体(端面の平行度 $1/20$ mm以内)を作製した。その後、 110°C で24時間乾燥させ、室温にもどした状態で実験に用いた。

(2) 荷方法

先行荷として拘束圧5 MPaを荷した後に軸差応力を5 MPa荷し、先行軸応力を10 MPaとした。試料の採取深度における被り圧は $\sigma = \gamma H$ より約0.8 MPaであり、先行荷の大きさはこの被り圧に

比べて十分に大きく、採取地点の応力が実験結果に影響を及ぼさない大きさである。この三軸圧縮状態をA E がほとんど発生しなくなるまで保持した。

カイザー効果に関する従来の研究では、先行荷方法を、①一度だけ荷し直ちに除荷する、②繰り返し荷する、③長時間荷する、などが行われている。経過日数の影響を調べる場合には②③の荷方法が用いられている。カイザー効果の有無を調べる場合には①の荷方法が用いられ、除荷後に直ちに再荷が行われている。原位置での状態に近づけるためには②③のような先行荷とすべきであるが、本研究では保持時間が30分を経過したときにはA E はほとんど発生していないこと、また、除荷後に直ちに再荷を行いカイザー効果の有無を調べることから先行荷の保持時間を30分とした。

再荷は拘束圧の大きさを0(一軸圧縮)、1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 MPaとし、ひずみ速度を $0.1\%/\text{min}$ として軸差荷重の荷を行った。先行荷時と再荷時の荷経路を図-1に示す。ただし、軸差応力の大きさの影響を検討するために軸応力を次の大きさとした場合がある。これは再荷時の拘束圧が0 MPa(一軸圧縮)の場合に先行軸応力を8 MPa、拘束圧が1, 2 MPaの場合に先行軸応力を9 MPa、拘束圧が7, 8 MPaの場合に先行軸応力を13 MPaとした実験である。

(3) A E 計測

三軸圧縮下におけるA E の計測は図-2に示すように、上部の加圧盤内に設置したA E センサー(共振周波数140 kHz)により計測を行った。A E センサーからの出力は、プリアンプで40 dB増幅し、さらにメインアンプで20 dB増幅している。また、システムの応答周波数帯は100~500 kHzとした。ディスクリレベルは荷を行っていない状態でノイズを計測しない程度の40 mVとした。なお、上加圧盤と

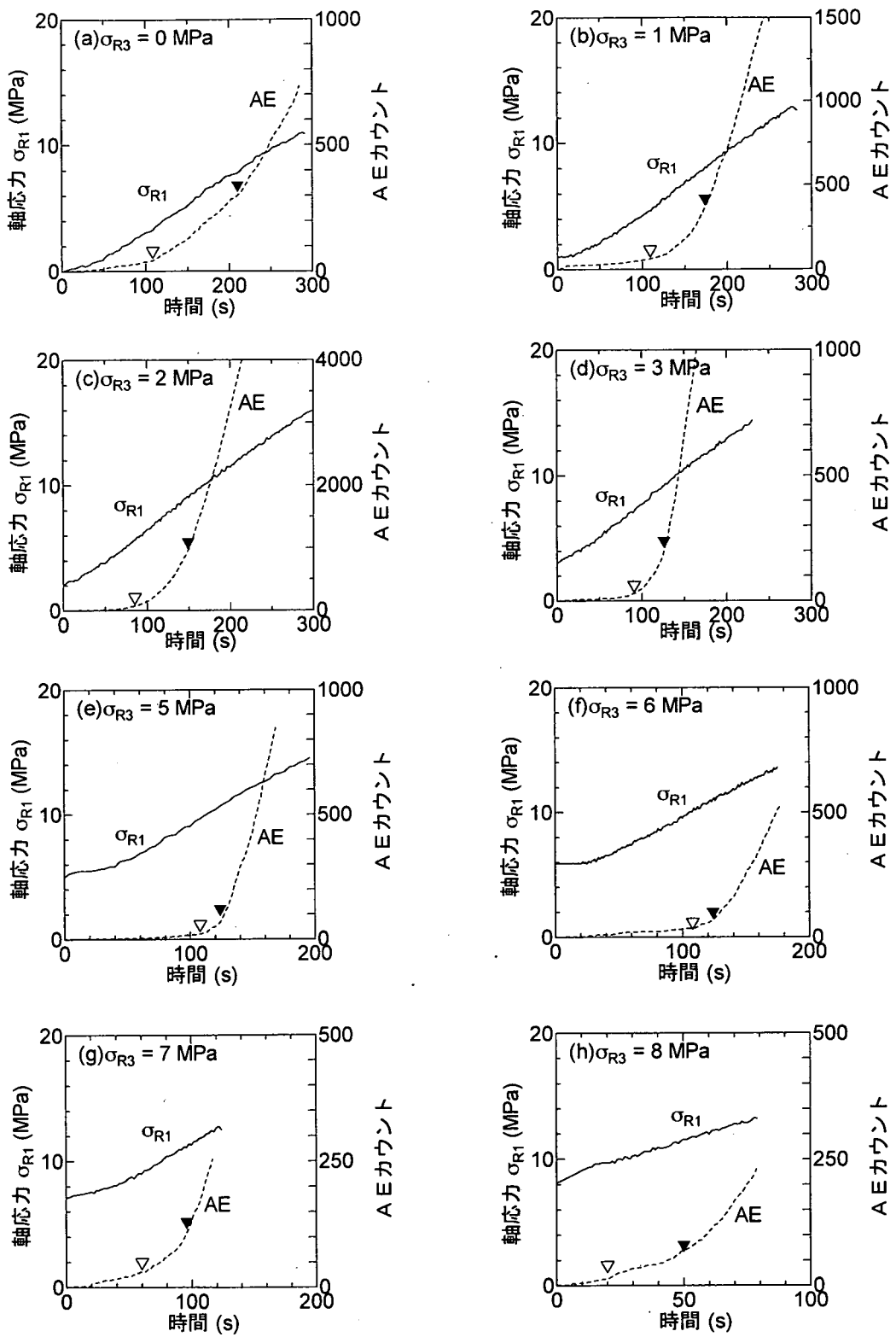


図-3 再載荷時の軸応力とAE発生状況

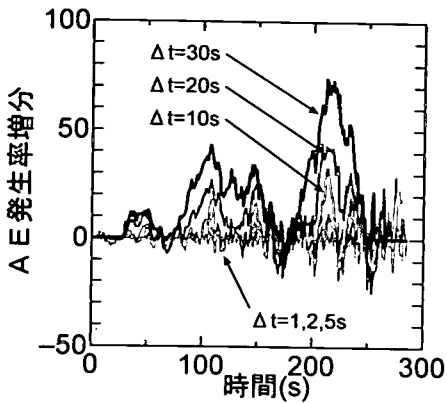


図-4 AE発生率増分 ($\sigma_{R3} = 0$ MPaの場合)

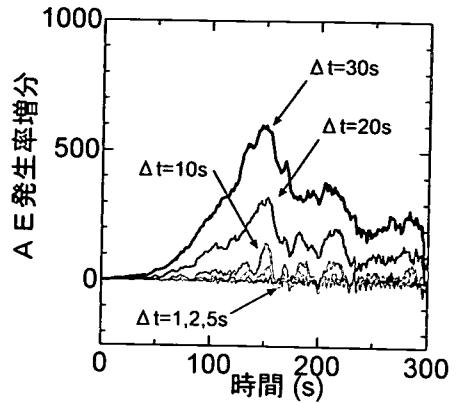


図-5 AE発生率増分 ($\sigma_{R3} = 2$ MPaの場合)

三軸セルの接触部分からAEの発生が考えられるため、予備実験として供試体を三軸セルにセットしない状態で加圧盤をひずみ速度一定で三軸セルに挿入し、ここで設定した計測条件ではAEが計測されないことを確認している。AEカウントにはAEの1事象を1カウントとするイベントカウントと、ディスクリレベルを越える振幅の回数すべてをカウントするリングダウンカウントがある。ここでのAEカウントはイベントカウントを用いている。

3. 実験結果

(1) AE急増点の判定

再載荷時の軸応力とAE発生状況を図-3に示す。全ての供試体でAEは再載荷直後より発生している。図-3(a)の拘束圧0 MPaの再載荷を例にすると、載荷直後のAE発生傾向はほぼ直線的であり、経過時間が100 sを越える付近で増加し、さらに、200 sを越える付近でも増加している。このようにAEの発生傾向には急増点が二つ観察された。これまで行われている一軸圧縮による再載荷では、一つの供試体に対してAE急増点の一つの点だけを対象としている^{12), 13), 14)}。これらの実験においては推定応力をAEの発生点として求めている場合もあるが、目視によるAE急増点から判定している場合もある。本実験では客観的に急増点を判定するためにAE発生率増分を用いた。

AE発生率増分とは時間間隔 Δt のAEレートカウントの増分である。AEレートカウントは時間間隔 Δt における発生数であることからAEの発生速度に対応し、AE発生率増分はさらにその増分である。

したがって、AEの発生加速度に対応するものであり、AEの急増点は発生率増分のピーク点から求められる。図-3(a)の場合に $\Delta t = 1, 2, 5, 10, 20, 30$ sとし、計測時間間隔の1 sごとに求めたAE発生率増分の変化を図-4に示す。 Δt が5 s以下ではピーク点は明瞭ではないが、 $\Delta t = 10$ s以上の場合に110 s付近と210 s付近に明瞭なピークがみられる。このようにAE発生率増分に二つのピークが生じる場合には、それぞれを第1急増点と第2急増点とした。

次に、図-3(c)に示す拘束圧2 MPaの再載荷時のAE発生率増分の変化を図-5に示す。 $\Delta t = 10$ s以上の場合に150 s付近にピークがみられる。図-3(c)に示すAEカウントでは90 s付近から急増傾向にあり、AE発生率増分のピーク点である150 s付近でさらに急増している。このようにAE発生率増分にピーク点の一つだけの場合には、他の大きさの拘束圧で再載荷を行った場合の急増点から判断して、その点を第2急増点とした。そして、第1急増点は載荷初期の直線的なAE発生傾向から離れ始める点を目視により決定した。以上のようにして求めたAEの第1急増点と第2急増点を図-3に▽、▼で示す。この第1急増点と第2急増点のそれぞれの軸差応力($\sigma_{AE} - \sigma_{R3}$)、軸応力(σ_{AE})と先行載荷時の軸差応力($\sigma_{P1} - \sigma_{P3}$)、軸応力(σ_{P1})との対応について以下で検討を行う。なお、 σ の添字 P は先行載荷時、 R は再載荷時を表し、 AE はAE急増点の軸応力を表している。

(2) AE急増点の軸差応力と拘束圧の関係

AE急増点の軸差応力($\sigma_{AE} - \sigma_{R3}$)と先行載荷時の軸差応力($\sigma_{P1} - \sigma_{P3}$)との応力比を図-6に示す。第1急増点を○、第2急増点を●で示した。

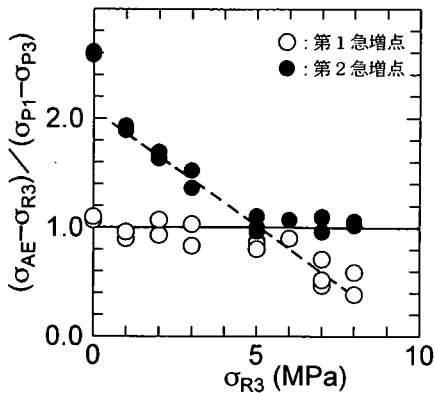


図-6 AE急増点の軸差応力と拘束圧の関係

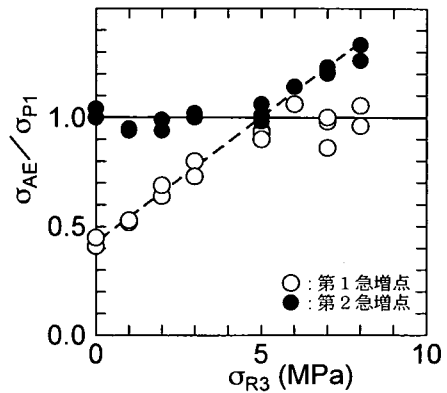


図-7 AE急増点の軸応力と拘束圧の関係

この図には先行軸応力を8, 9, 13MPaとした場合の結果も含まれている。図中の応力比が1の実線はAE急増点の軸差応力が先行載荷時の軸差応力に等しい場合である。先行載荷時の拘束圧5MPaより小さな拘束圧で再載荷を行った場合には、第1急増点の値はその実線付近にあり先行載荷時の軸差応力に等しいことがわかる。第2急増点の値は拘束圧が0から5MPaに近づくにしたがい2以上の値から徐々に1に近づく傾向にある。

拘束圧が5MPa以上の場合には、第2急増点が1に近い値を示している。第1急増点の値は拘束圧が大きくなるにしたがい1から徐々に小さくなっている。拘束圧の大きさによるこの変化傾向は図中の破線で示すように拘束圧5MPa以下での第2急増点の変化と同じ延長線上にある。

以上の結果より、先行載荷時より小さい拘束圧で再載荷を行った場合にはAEの第1急増点、大きい場合には第2急増点が先行載荷時の軸差応力に対応している。また、軸差応力を記憶しているクラックの存在を考えると、そのクラックは再載荷時の拘束圧の大きさに影響されないことがわかる。

(3) AE急増点の軸応力と拘束圧の関係

AE急増点の軸応力(σ_{AE})と先行載荷時の軸応力(σ_{P1})との応力比を図-7に示す。第1急増点を○、第2急増点を●で示した。図中の応力比が1の実線はAE急増点の軸応力が先行載荷時の軸応力に等しい場合である。先行載荷の拘束圧5MPaより小さな拘束圧で再載荷を行った場合には、第1急増点は0.5程度の値から拘束圧が大きくなるにしたがい1に近づく傾向を示している。また、第2急増点は1に近い値を示している。

拘束圧が5MPa以上の場合には、第1急増点の値

にばらつきがみられるがほぼ1に近い値を示している。第2急増点は拘束圧が大きくなるにしたがいその値は1から少しずつ大きくなる傾向にある。拘束圧の大きさによるこの変化傾向は図中の破線で示すように拘束圧5MPa以下での第1急増点の変化と同じ延長線上にある。

この結果より、先行載荷時より小さい拘束圧で再載荷を行った場合にはAEの第2急増点、大きい場合には第1急増点が先行載荷時の軸応力に対応している。また、軸応力を記憶しているクラックの存在が考えられ、そのクラックは再載荷時の拘束圧の大きさに影響されないことがわかる。

(4) 軸差応力と軸応力の推定

実験結果を模式的に図-8に示す。先行載荷時の履歴応力(軸応力 σ_{P1} 、拘束圧 σ_{P3})を○で示した。また、太い破線はAEの第1急増点の応力、太い実線は第2急増点の応力を示している。先行載荷時の拘束圧 σ_{P3} を境として、 σ_{P3} より小さな拘束圧で再載荷を行った場合には(第I領域)、第1急増点は先行載荷時の軸差応力($\sigma_{P1} - \sigma_{P3}$)に対応し、第2急増点は先行載荷時の軸応力(σ_{P1})に等しい。 σ_{P3} より大きな拘束圧で再載荷を行った場合には(第II領域)、第1急増点は軸応力(σ_{P1})に等しく、第2急増点は軸差応力($\sigma_{P1} - \sigma_{P3}$)に対応する。ただし、第II領域の上限は先行載荷時の軸応力の大きさ以下であり、拘束圧をこの大きさ以上として軸応力の載荷を行った場合のAE急増点と先行軸差応力との対応については、今後検討が必要である。

三軸圧縮の先行載荷に対して一軸圧縮や異なる大きさの拘束圧で再載荷を行った従来の研究においては、カイザー効果による推定応力が先行載荷の軸応

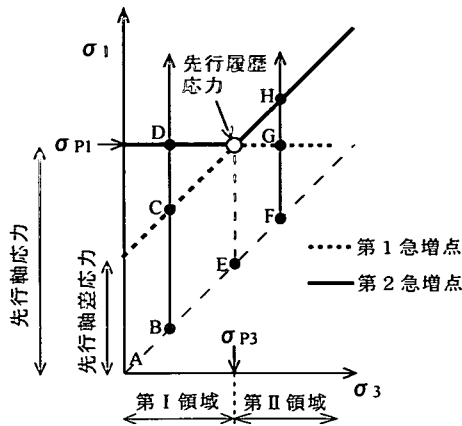


図-8 AE急増点の応力と拘束圧の関係

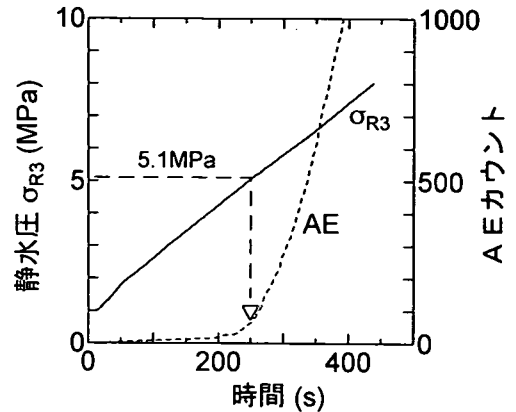


図-9 静水圧荷重過程のAE発生状況

力に一致する場合^{8), 9), 15)}と、軸差応力に対応する場合^{7), 16), 17), 18)}が報告されている。本研究では、第1急増点、第2急増点が軸差応力または軸応力に対応することから、従来の研究結果のそれぞれに対応する結果となった。また、一軸圧縮の再荷重による推定応力を再荷重方向の軸応力として初期地圧の推定が試みられている^{1), 8), 9), 19)}。一軸圧縮による再荷重は本実験の第I領域であり、従来のように一つの急増点を対象とする場合にはAE発生率増分が一番大きな値を示す点、つまり第2急増点の軸応力が推定応力となり、従来のAE法による初期地圧推定での対応に一致する。

以上の結果から軸差応力と軸応力を記憶している2つのクラックの存在が考えられ、それぞれが記憶している応力は再荷重時の拘束圧の影響を受けていないことがわかる。また、以上の傾向は先行軸差応力の大きさを変えて行った場合（先行軸差応力を8, 9, 13MPaとした実験）も同じであり、先行軸差応力の大きさによる違いはないようである。

このように一つの供試体から二つのAE急増点が観察され、二つの応力の推定が可能であると考えられる。しかし、実際には先行荷重の大きさが未知であるため先行拘束圧がわからない。そのために三軸圧縮の再荷重を行った場合には、第1急増点が軸差応力に対応するのか、または軸応力に対応するのかの判定が必要である。図-9は再荷重時の静水圧荷重過程におけるAE発生状況である。このときの先行荷重は拘束圧5MPa、軸応力10MPaであり、静水圧を1MPaまで除荷した後に再荷重の拘束圧まで静水圧を荷重している。AE発生率増分を用いて推定した値は5.1MPaであり、先行荷重時の拘束圧に近い値を示している。このように再荷重時の静水圧載

荷過程（図-8の荷重経路ABEF）においてカイザー効果が観察された場合には、図-8のE点を超えた第II領域における再荷重となる。その後の荷重経路FGHにおいては、G点で軸応力を記憶しているクラックからのAE発生による第1急増点、つぎにH点では軸差応力を記憶しているクラックからのAE発生による第2急増点が生じる。また、再荷重時の静水圧荷重過程においてカイザー効果が観察されない第I領域の場合には、荷重経路BCDとなる。この場合には、C点において軸差応力を記憶しているクラックからのAE発生による第1急増点、D点において軸応力を記憶しているクラックからのAE発生による第2急増点が生じると考えられる。以上のように再荷重時の静水圧荷重過程のカイザー効果により再荷重時の拘束圧と先行荷重時の拘束圧の大小関係を推定することができ、AEの第1急増点として推定した応力が軸差応力に対応するか軸応力に対応するかを判定できると考えられる。

4. 微小クラックモデルとカイザー効果

4章では軸差応力を記憶しているクラックについて検討する。カイザー効果は過去の応力履歴による損傷がさらに進展するときにAEが発生する現象であり、岩石に内在する微小クラックの挙動が影響していると考えられる。試料の大谷凝灰岩には微小な空隙が多数存在することから、荷重によりこの微小な空隙は閉塞し、そこから新たにクラックが進展する。軸差応力を記憶しているクラックモデルとして図-10(a)に示すように最大主応力の作用方向に対し

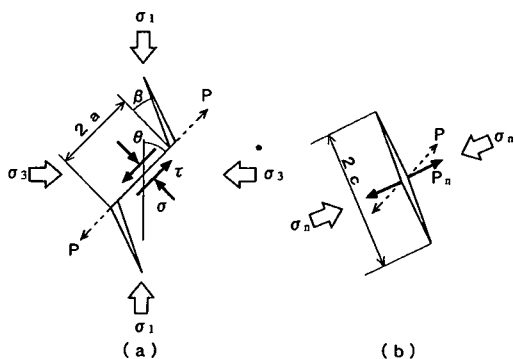


図-10 軸差応力記憶クラック

て傾斜している微小な1次クラックを考える。荷重により1次クラック先端より2次クラックが発生し、この2次クラックを図-10(b)のように長さ2cの単一クラックと仮定する。再載荷時にこの2次クラックがさらに進展するときにAEが発生し、カイザー効果の現象が生じると考える。Horii and Nemat-Nasser²⁰⁾はこの微小クラックモデルを用いて、破壊力学により圧縮応力下の岩石のクラック進展を議論している。里²¹⁾は岩石のダイランシーについて、児玉ら²²⁾は強度の時間依存性についてそれぞれ理論的検討を行っている。

(1) 2次クラックの進展

1次クラック面に作用する有効せん断応力によりすべり変形が生じ、図-10(a)に示すように2次クラックが開口する。また、1次クラック面上のすべり変形に対応する集中荷重Pは図-10(b)に示すように2次クラックの中央に作用すると考える。このとき、2次クラックの成長にはこの集中荷重Pの2次クラック面の法線方向成分 P_n とこの面に遠方から作用する圧縮応力 σ_n が関係する。これらは次式で与えられる。

$$P_n = 2 a \tau^* \cos \beta \quad (1)$$

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2(\theta + \beta) + \sigma_3 \sin^2(\theta + \beta) \quad (2)$$

ここで、 $2a$: 1次クラック長、 τ^* : 1次クラック面上の有効せん断応力、 β : 1次クラック面の法線方向と2次クラック面のなす角、 θ : 1次クラックと最大主応力のなす角度である。有効せん断応力は次式で示される。

$$\begin{aligned} \tau^* &= \tau - \mu \sigma \\ &= (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta \\ &\quad - \mu (\sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_3 \cos^2 \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 τ : 1次クラック面上のせん断応力、 σ : 1次クラック面上の垂直応力、 μ : 摩擦係数である。

2次クラックを開口させる力Fは2次クラックの長さを2cとすると次式で示される。

$$F = P_n - 2c \sigma_n \quad (4)$$

先行荷重により発生した2次クラックが再載荷によりさらに進展するときにAEが発生し、カイザー効果が観察されるとする。具体的には、先行載荷時の拘束圧を5MPa、軸応力を10MPaとして式(4)より先行載荷時の F_p を求める。異なる大きさの拘束圧で再載荷を行った場合の F_R が先行載荷の除荷直前に2次クラックに作用していた力 F_p を越えるときに2次クラックが進展しAEが発生するとし、次式を満たすときの軸応力 σ_{AE} の値を求めた。

$$F_R - F_p > 0 \quad (5)$$

なお、計算では1次クラックと2次クラックの長さの比 c/a と摩擦係数 μ を与え、1次クラックの θ は5~85度の5度きざみ、2次クラックの角度 β はFが最大となる値とした。また、先行載荷時に $\tau^* \leq 0$ の場合、および $F \leq 0$ の場合には2次クラックは発生進展していないとして対象外とした。

(2) 摩擦係数 μ の影響

1次クラックと2次クラックの長さの比 c/a を0.01、摩擦係数 $\mu=0, 0.05, 0.1, 0.15$ とした場合の結果を図-11に示す。なお、1次クラックの θ が20,45,70度の場合について、2次クラックの進展し始める軸応力 σ_{AE} と先行載荷時の軸応力 σ_{p1} との応力比で示した。先行載荷時と同じ拘束圧5MPaのときに応力比=1を通る直線で示されている。先行載荷と同じ大きさの拘束圧による再載荷の場合には先行載荷の軸差応力を越えるときにAEは発生することになり、さらに、軸応力を記憶しているクラックからのAE発生もあるためにこのときのカイザー効果はより明瞭となると考えられる。

また、 μ が大きくなるほどその直線の傾きが大きくなる傾向にある。 $\theta=45$ 度では μ の違いによる差は小さいが、 $\theta=20$ 度ではその差がやや大きく、 $\theta=70$ 度ではさらにそれらの差が大きくなっている。 μ の値がさらに大きな場合には先行載荷時に $\tau^* \leq 0$ となる場合が多くなる傾向にある。実験結果との対応は μ が0または0.05の場合によく一致するようである。岩石の不連続面での μ はおおよそ0.2~0.8であり大部分は0.4~0.7であることが報告されて

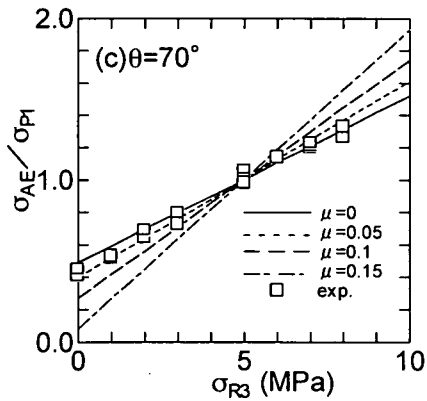
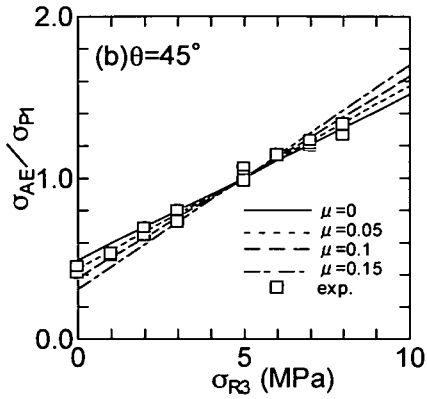
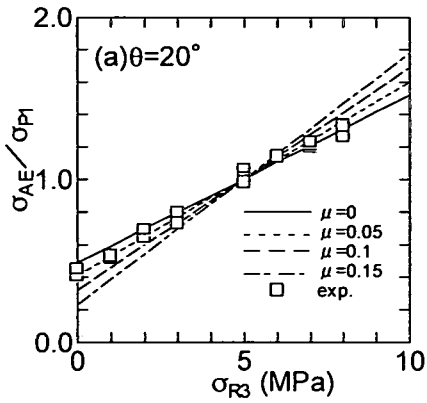


図-11 摩擦係数 μ の影響

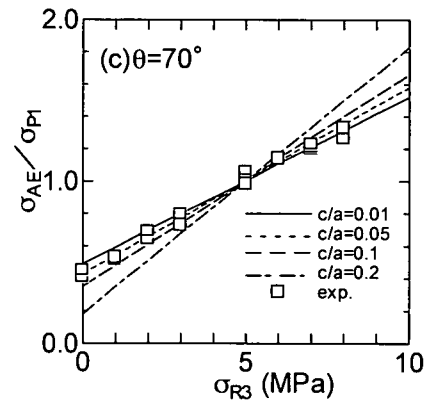
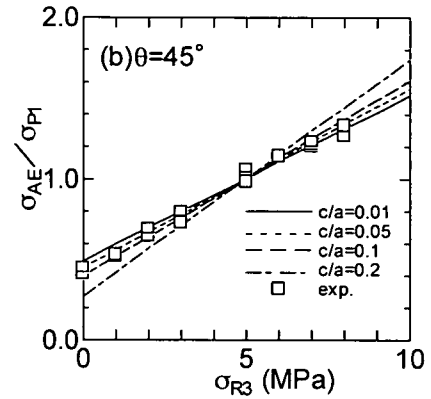
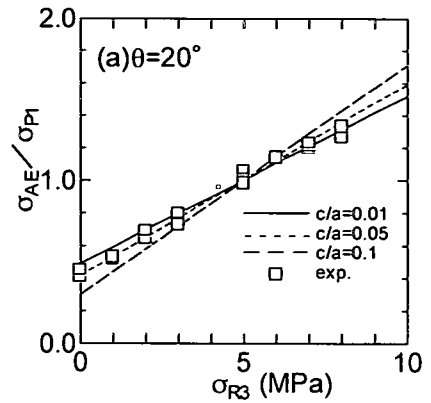


図-12 c/a の影響

いる²³⁾。この値に比べると実験結果に対応する μ は小さい値である。 $\mu = 0$ は 1 次クラックが接していない状態である。先行载荷の除荷過程において AE がほとんど計測されていないことから 1 次クラックは開口して接していないか、または、わずかに接している程度であると推察される。

(3) c/a の影響

2 次クラック長 $2c$ と 1 次クラック長 $2a$ による影響を検討するために、 $c/a = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2$ とした場合の結果を図-12 に示す。なお、1 次クラックの $\mu = 0$ 、 θ が $20, 45, 70$ 度の場合について示した。先行载荷時と同じ拘束圧 5MPa のときに $\sigma_{AE}/\sigma_{P1} = 1$ を通る直線で示され、 c/a が大きくなるほど傾きが大きくなる傾向にある。 $\theta = 20$ 度、 c/a

$=0.2$ の場合は先行載荷時に $F \leq 0$ となるため図示していない。 $\theta = 45$ 度では c/a の違いによる差は小さく、 $\theta = 20, 70$ 度では c/a による差は大きくなっている。 c/a が $0.01 \sim 0.1$ の場合に実験結果と一致するようである。実験での先行載荷レベルは強度の 50% 以下であることから、最終破断面に関する巨視的なクラック以前の微小クラックが進展しているレベルにあり、2次クラックも小さい値であると思われる。また、ここでのクラックモデルは他のクラックの影響を受けないと仮定しているが、 c/a が大きい場合にはクラック間の力学的相互作用も考慮した検討が必要であると考えられる。

5. 結論

A E法による初期地圧推定において、原位置を模した三軸圧縮の先行載荷を行った供試体に対し、異なる大きさの拘束圧で再載荷を行い、このときのカイザー効果について検討した。A E発生率増分を用いてA E急増点を判定し、第1急増点と第2急増点を求めた。それらの急増点と先行載荷時の応力との対応を検討した。さらに、軸差応力を記憶している微小クラックモデルを提案し、実験結果と比較した。得られた結果を以下に要約する。

①先行載荷時よりも小さな拘束圧で再載荷を行った場合は、A Eの第1急増点は先行軸差応力に対応し、第2急増点は先行軸応力に等しい。

②先行載荷時よりも大きな拘束圧で再載荷を行った場合は、A Eの第1急増点は先行軸応力に等しく、第2急増点は先行軸差応力に対応する。ただし、このときの拘束圧の上限は先行載荷時の軸応力の大きさ以下である。

③上記の結果より、一つの供試体から軸差応力と軸応力の二つの応力が推定可能であり、また、軸差応力と軸応力をそれぞれ記憶したクラックの存在が考えられ、これらは再載荷時の拘束圧の大きさに影響されない。

④軸差応力を記憶しているクラックモデルとして、2次クラックが再載荷時に進展するときにA Eが発生するモデルを提案し、実験結果との対応から、その有意性が示された。

本研究での載荷は、液圧による拘束圧を載荷した後軸応力を載荷しており、これとは異なる載荷経路の場合については今後さらに検討する必要がある

と考えられる。

参考文献

- 1) 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.63~75, 1977.
- 2) 石橋孝治, 小長井一男, 御手洗良夫, 松本嘉司: A E法による一次地圧の推定に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第364号/Ⅲ-4, pp.23~30, 1985.
- 3) 石橋孝治: 三軸圧縮応力下における人工軟岩のA E発生特性, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.156~160, 1989.
- 4) 石橋孝治: 三軸圧縮試験を利用したA E法による先行応力推定, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.376~380, 1992.
- 5) 渡辺英彦, 田野久貴, 赤津武男: 三軸圧縮下におけるピーク強度以降のカイザー効果に関する実験, 土木学会第50回年次学術講演会, Ⅲ-A, pp.630~631, 1995.
- 6) 渡辺英彦, 田野久貴: 三軸圧縮再載荷による岩石のカイザー効果に関する実験, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.81~85, 1996.
- 7) Hughson, D.R. and Crawford, A.M.: Kaiser effect gauging: The influence of confining stress on its response, Proc., 6th Int. Congress on Rock Mechanics, Montreal, Vol.2, pp.981~985, 1987.
- 8) 道廣一利, 畑浩二, 藤原紀夫, 吉岡尚也: 種々な岩石のA Eによる初期応力推定のための基礎的考察, 材料, Vol.37, No.423, pp.1449~1455, 1988.
- 9) 瀬戸政宏, E. Villaescusa, 歌川学, 勝山邦久: AE法とDRAによるコアからの原位置地圧計測, 資源と素材, Vol.114, pp.845~855, 1998.
- 10) 瀬戸政宏, 歌川学, 勝山邦久: 岩石のA Eカイザー効果と3次元A E震源分布からみたマイクロクラッキングとの関係, 資源と素材, Vol.108, pp.719~724, 1992.
- 11) 小島隆, 松木浩二: 低応力レベルにおける岩石のカイザー効果に関する基礎的研究, 資源と素材, Vol.110, pp.435~440, 1994.
- 12) 金川忠, 林正夫, 北原義浩: 岩石のA E測定によるカイザー効果を利用した地圧推定法と二, 三の考察, 第11回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.61~65, 1978.
- 13) 村山朔郎, 道廣一利, 齊藤二郎, 吉岡尚也: 載荷方法が花崗岩のカイザー効果に及ぼす影響, 土木学会論文集, 第364号/Ⅲ-4, pp.107~112, 1985.
- 14) 吉川澄夫, 茂木清夫: 岩石のA E活動度の応力履歴効果による応力推定法 (A E法) 第7報 異方性応力場

- の推定の可能性, 地震学会講演予稿集, No. 2, p.105, 1983.
- 15) Nag, D.K., Seto, M. and Vutukuri, V.S. : The effect of confining pressure on the Kaiser effect of AE in two types of rock, *Mining Science and Technology*, pp.657-660, 1996.
- 16) Holcomb, D.J. : Localization studies under triaxial conditions, *Rock Mechanics*, pp.661-670, 1992.
- 17) Wang, F., Vutukuri, V.S. and Watson, J.O. : Kaiser effect study on determining rock stress in triaxial loading, *Mining Science and Technology*, pp.365-368, 1999.
- 18) Filimonov, Y.L., Lavrov, A.V., Shafarenko, Y.M. and Shkuratnik, V.L. : Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurement in a rock mass, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.34(4), pp.275-291, 2001.
- 19) 畑浩二, 道廣一利, 吉岡尚也, 杉原弘造 : A E法を利用した初期地圧推定とその適用例, 材料, Vol.44, No.502, pp.885~890, 1995.
- 20) Hori, H. and Nemat-Nasser, S. : Brittle failure in compression: splitting, faulting and brittle-ductile transition, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. A319, pp.337-374, 1986.
- 21) 里優 : 乾燥した岩石のダイラタンシーに関する理論的研究, 材料, Vol.41, No.466, pp.1068~1074, 1992.
- 22) 児玉淳一, 石塚与志雄, 安部透, 石島洋二 : 微視構造モデルによる花崗岩の強度特性の時間依存性に関する理論的検討, 資源と素材, Vol.110, pp.195~200, 1994.
- 23) パターソン, M.S. 著, 荻野正二, 水田義明, 佐野修共訳 : 実験岩石力学, 古今書院, 1981.

(2001. 1. 22 受付)

INFLUENCE OF CONFINING PRESSURE ON THE KAISER EFFECT OF ROCKS

Hidehiko WATANABE

Triaxial compressive re-loading testing was conducted under laboratory confining pressures to examine the Kaiser effect on rocks in the different stress state from that of rocks in situ. Two rapidly increasing points of cumulative AE count were to be observed. The two stresses of 1st and 2nd kaiser effect points were then compared with pre-axial stress and pre-differential stress. The estimated axial stress and the estimated differential stress are not influenced by confining pressure. Micro-crack model which generates AE at the secondary crack growth, is a good explanation of the experimental results. This model testing is found to be able to explain the Kaiser effect even under a different confining condition from that of pre-loading.