

# 軟岩（大谷石）を用いた三軸圧縮時の カイザー効果に関する基礎的研究

渡辺英彦<sup>1</sup>・田野久貴<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 日本大学専任講師 工学部土木工学科（〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1）

<sup>2</sup>正会員 工博 日本大学教授 工学部土木工学科（〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1）

岩石の三軸圧縮下におけるカイザー効果について検討するために、大谷石を用いて拘束圧下での繰り返し漸増載荷を行った。拘束圧の大きさの違いにより異なる変形挙動を示したが、ひずみ軟化傾向を示す領域のカイザー効果は先行載荷の除荷直前の応力に対応している。また、三軸圧縮試験での静水圧載荷過程においてもカイザー効果が観察された。A Eの急増点が明瞭でない場合にはA E発生率増分を用いて急増点の判定を行った。静水圧載荷と軸差応力の載荷時のA E急増点は、先行載荷時の拘束圧、ピーク強度と残留強度に対応しており、1つの供試体から3つの応力が推定可能であった。この時の各A E急増点では波形パラメータの平均周波数も変化する傾向を示した。

*Key Words* : kaiser effect, acoustic emission, triaxial compression test, hydrostatic re-loading

## 1. はじめに

大規模な地下空間の建設においては、岩盤を構成する岩石の力学的特性だけでなく岩盤内の応力状態を把握する事も重要である。岩盤内に作用している地圧を計測する方法には、水圧破碎法や応力解放法などの原位置試験とボーリング孔より採取した岩石供試体を用いて行う室内試験がある。室内試験は岩石の力学的特性の変化から初期地圧を推定しようとするものであり、この試験法の一つにアコースティック・エミッション (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。

現在行われているA E法は原位置で三軸応力状態にあった岩石供試体に一軸圧縮を行い、この時に計測したA Eのカイザー効果から地圧を推定している。このような一軸圧縮による再載荷ではピーク強度付近で破壊が急激に進行するためにカイザー効果が不明瞭となることが報告されている<sup>1)</sup>。このことは、例えば地下深部や空洞周辺の局所的な応力集中域のように、原位置での応力レベルが岩石供試体の一軸圧縮強度に近い場合やそれを越えるような場合には、

現在行われている一軸圧縮による載荷方法では地圧を推定できないことを示しており、A E法の適用限界となっている。一軸圧縮下のピーク強度以降のカイザー効果については、石橋ら<sup>2)</sup>が剛性試験により検討を行っているが、一軸圧縮強度以上の応力推定は行われていない。一方、三軸圧縮による載荷では拘束圧の存在により一軸圧縮強度を上回る応力レベルやピーク強度以降までの載荷が可能であることから、この領域での応力推定が期待できる。また、一軸圧縮による再載荷では、1つの岩石供試体から1つの応力のみが推定されている。一方、三軸圧縮による再載荷では、拘束圧のための静水圧載荷過程と軸差応力のための軸応力載荷過程がある。この2つの載荷過程においてそれぞれカイザー効果が存在すれば、1つの岩石供試体から拘束圧と軸応力の2つ応力が推定可能となり、また、三主応力の大きさが異なる先行載荷の場合には三つの主応力推定の可能性が考えられ、少ない試料数でより多くの地圧情報を収集することが可能となる。

著者らは、岩石の三軸圧縮下におけるカイザー効果に関する研究を行ってきた<sup>3)~5)</sup>。本研究では、

大谷石を用いて先行载荷と再载荷の軸方向が一致する場合を対象として、まず、三軸圧縮下における繰り返し漸増载荷を行い、カイザー効果に及ぼす拘束圧の大きさと変形特性の影響について検討を行った。この結果をもとに、先行载荷が供試体のピーク強度以前の場合とひずみ軟化傾向を示してピーク強度を越える場合について、静水圧载荷過程および軸応力载荷過程のカイザー効果について実験検討を行い、1つの供試体から先行载荷時の拘束圧と軸応力の2つの応力推定、さらに残留強度を含めた3つの応力推定の可能性について検討を行った。

## 2. 既往の研究

A E法を地圧推定に最初に用いたのは金川ら<sup>9)</sup>であり、その後、载荷方向の影響、再载荷までの時間の影響<sup>7)~9)</sup>やA E発生源との対応<sup>10)</sup>などに関する実験的研究が行われている。载荷方向の影響については、金川ら<sup>10)</sup>はモルタルの立方供試体に先行载荷として二軸圧縮を行い、载荷を行った各方向から切り出した供試体に一軸圧縮の再载荷を行うことにより各方向の先行応力を推定している。また、村山ら<sup>12)</sup>は立方体の花崗岩に先行载荷として三方向から一軸圧縮を順次行い、その三方向にそれぞれ一軸圧縮の再载荷や採取したコア試料に一軸圧縮を行うことにより、カイザー効果が再载荷を行った方向の先行応力に対応し、他方向の応力の影響を受けないことを報告している。吉川と茂木<sup>13)</sup>は一軸圧縮を行った大型の供試体から種々の方向に供試体を採取し、この供試体の一軸圧縮再载荷よりカイザー効果は再载荷を行った方向の垂直応力に対応していることを報告している。このように一軸圧縮による再载荷では、カイザー効果は再载荷を行った方向に作用していた先行载荷時の垂直応力に対応していることが報告されている。

また、地盤内部での応力状態は三軸応力状態にあると考えられることから、道廣ら<sup>14)</sup>、瀬戸ら<sup>15)</sup>は先行载荷として三軸圧縮を行い、一軸圧縮の再载荷を行うことにより先行载荷時の拘束圧の影響について報告している。Hughson, D. R. と Crawford, A. M. <sup>16)</sup>は三軸圧縮を行った砂岩供試体からコア試料を採取し、このコア試料に一軸圧縮の再载荷を行い先行载荷時の拘束圧の影響とコア採取による影響について検討している。石橋<sup>17), 18)</sup>は人工軟岩を用いて先行载荷として比較的小さな拘束圧での三軸圧縮を行い、一軸

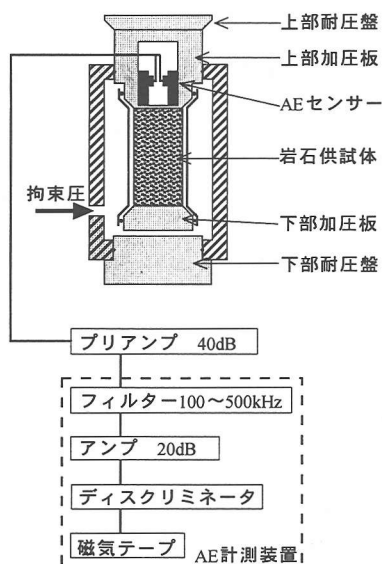


図-1 AE計測システム

圧縮または三軸圧縮の再载荷により先行载荷の軸応力の推定を行っている。このように一軸圧縮時のカイザー効果に関する報告がほとんどであり三軸圧縮を用いたカイザー効果に関する研究は少なく、1つの供試体を用いての軸応力以外の応力推定に関する検討は行われていない。

## 3. 繰り返し漸増载荷におけるカイザー効果

### (1) 実験方法

試料は宇都宮市大谷町周辺より採取された細目の凝灰岩（大谷石、一軸圧縮強度は約13MPa）である。ブロック状の試料よりφ5×h10cmの円柱供試体（端面の平行度1/20mm以内）を作製し、110℃で24時間乾燥させた後、室温にもどして実験を行った。

载荷は拘束圧を一定とした繰り返し漸増载荷を行った。拘束圧は0.98MPaと9.8MPaの2通りとした。ひずみ速度を毎分0.1%として、軸ひずみを0.3%ずつ増加させ、1.5%までの5回载荷する繰り返し漸増载荷である。このとき、各設定ひずみで軸変位を5分間一定とし、その後、除荷を行った。なお、ひずみは三軸セル外に設置した変位計より求めた。

三軸圧縮下におけるA Eの計測は図-1に示すように、上部の加圧板内に設置したA Eセンサー（共振周波数140kHz）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40dB増幅し、さら

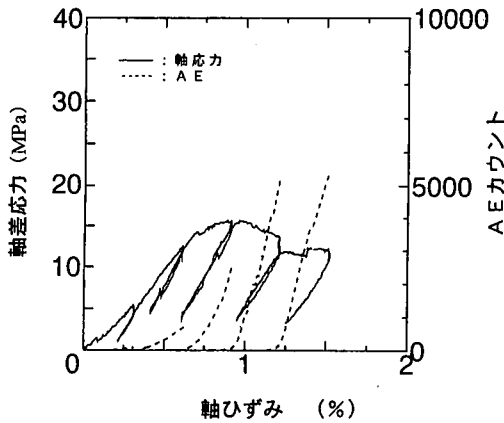


図-2(a) 繰り返し漸増荷重 (拘束圧0.98MPa)

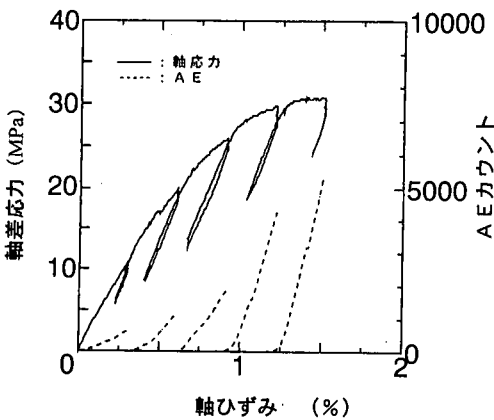


図-2(b) 繰り返し漸増荷重 (拘束圧9.8MPa)

にメインアンプで20dB増幅した。また、システムの応答周波数帯は100~500kHzとした。ディスクリレベルは荷重を行っていない状態でノイズを計測しない程度の40mVとした。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。ただし、5.(4)ではリングダウンカウントを用いて平均周波数を求めた。

## (2) 応力-ひずみ関係とAE発生状況

各拘束圧における軸差応力-軸ひずみ-AE発生状況を図-2(a)(b)に示す。AEカウントはイベントカウントの累積であり、各繰り返し荷重の除荷直前までを示している。拘束圧0.98MPaの場合にはピーク強度以降に耐荷力が減少するひずみ軟化の傾向を示している。ピーク強度以前のAE発生状況はその一つ前の荷重での最大応力付近より発生している。拘

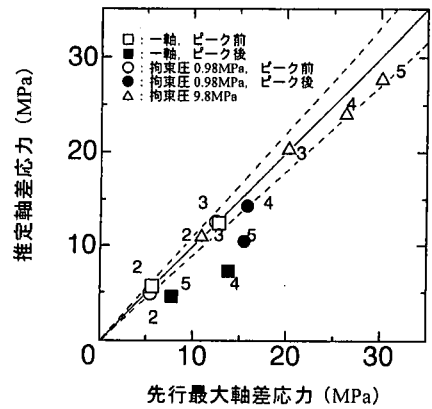


図-3 最大軸差応力の推定

束圧9.8MPaでは応力-ひずみ関係に明瞭なピーク強度はみられず、荷重5回目で耐荷力はほぼ一定の値を示している。この場合のAEは各先行荷重の最大応力付近より発生している。

AEの発生傾向には、荷重にともないわずかにAEが発生した後に急増する場合と、発生後しばらく直線的に増加した後に急増する場合があった。いずれの場合もAE急増点は明瞭であり、先行荷重の推定はこれらの急増点を用いて行った。

## (3) 先行応力の推定

最大軸差応力の推定結果を図-3に示す。最大軸差応力とは各設定ひずみまでの荷重過程における最大の軸差応力である。一軸圧縮で同様な荷重を行った場合の結果も同図に示す。繰り返し漸増荷重を行っているため、各先行最大軸差応力はその一つ前の荷重における最大値となる。図中の番号nは荷重n回目を表し、点線の区間は推定精度(推定応力/先行応力)が90~110%の範囲である。一軸圧縮(□)と拘束圧0.98MPaのピーク強度以前の場合(○)、カイザー効果は最大応力に対応している。また、ピーク強度以降はひずみ軟化傾向を示し、この領域では先行最大応力を越える応力レベルまで荷重することができない。そのため、この領域の推定応力(■, ●)は各先行応力に対して30~40%の過小評価となった。このことは、先行荷重がひずみ軟化域の場合には、同じ大きさの拘束圧で再荷重を行ってもピーク強度を推定できないことを示している。一方、拘束圧9.8MPaの場合(△)には荷重3回目までの推定は非常によく対応しており、それ以降の荷重4, 5回目の推定では精度がわずかに低下している。

AE発生傾向と応力-ひずみ関係は図-2に示すように、再荷重時の応力-ひずみ曲線が先行荷重時の

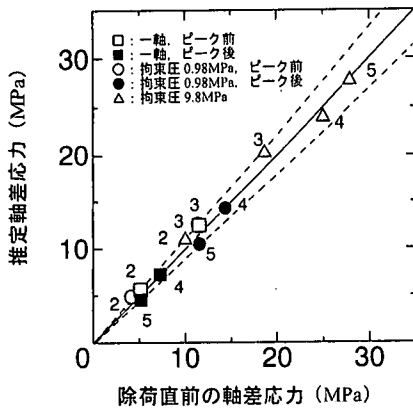


図-4 除荷直前の軸差応力の推定

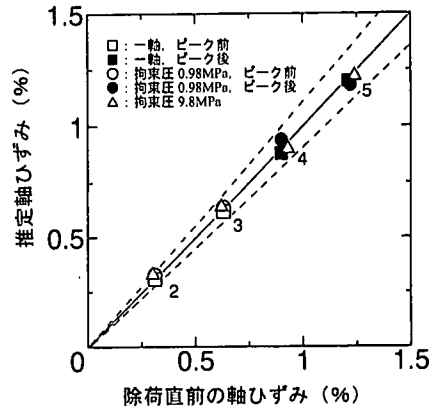


図-5 除荷直前の軸ひずみの推定

応力-ひずみ曲線の延長線上をたどる付近より発生している。そこで、A Eの急増点と各先行載荷時の除荷直前の軸差応力、軸ひずみとの対応について検討を行った。除荷直前の軸差応力とは、各設定ひずみで約5分間の軸変位を一定とした後の軸差応力である。応力緩和現象のため設定ひずみまで載荷した直後の軸差応力より小さな値となっている。図-4に除荷直前の軸差応力との対応関係を示す。一軸圧縮(■)と拘束圧0.98MPa(●)のピーク強度以降のひずみ軟化域においても推定誤差10%以内で対応しており、拘束圧9.8MPa(△)の4,5回目の載荷においても誤差は小さくなっている。次に、軸ひずみとの対応関係を図-5に示す。推定軸ひずみはA Eの急増点における軸ひずみであり、三軸セル外に設置した変位計より求めた。各拘束圧とも先行軸ひずみ1.2%までほぼ推定誤差0%を示す直線上にプロットされており、ピーク強度以降においても非常によく対応していることがわかる。通常の一軸圧縮による再載荷ではダイレイタンスー開始応力以上の応力推定ではカイザー効果が不明瞭となることが報告されている<sup>1)</sup>。これは、破壊の進展が急激であるためと考えられる。三軸圧縮の再載荷において、拘束圧の存在によりピーク強度付近およびピーク強度以降においても破壊の進展が安定している場合には、カイザー効果は明瞭に観察されることが考えられる。

次に、載荷過程におけるA E急増点と最大応力となる点の関係は、先行載荷がピーク強度以前の場合にはA E急増点は最大応力以前に観察され、先行載荷がピーク強度を越えている場合にはA E急増点は再載荷時の最大応力付近で生じている。このような傾向は石橋ら<sup>2)</sup>の行った一軸圧縮での試験結果と同様であり、A E急増点とピーク強度時のひずみの対応関係より三軸圧縮の再載荷においても供試体がピ

ーク強度以前に除荷されたのか、ピーク強度以降に除荷されたのかを判断することができる。この判定例は5.(3)で示す。

以上の結果より、一軸圧縮を含めた3種類の拘束圧(0, 0.98, 9.8MPa)での繰り返し漸増載荷では、拘束圧の大きさにより応力-ひずみ曲線は異なる変形挙動を示したが、一軸圧縮と拘束圧0.98MPaのピーク強度以前の領域および拘束圧9.8MPaでの同じひずみレベル(載荷2, 3回目での推定)ではカイザー効果は最大応力に対応している。また、一軸圧縮と拘束圧0.98MPaのピーク強度以降のひずみ軟化域および拘束圧9.8MPaでの同じひずみレベル(載荷4, 5回目での推定)ではカイザー効果は除荷直前の応力に対応している。このことから採取した岩石コアに採取地点と同じ大きさの拘束圧を用いて三軸圧縮を行うことによりピーク強度以降の領域における応力の推定も可能であると考えられる。この拘束圧の推定について、次の4章では先行載荷がピーク強度以前の場合、5章ではピーク強度以降の場合に静水圧載荷過程での推定について検討する。また、ひずみ軟化域まで載荷された場合に推定できるのは除荷直前の応力であり、ピーク強度の推定は不可能であったが、5章では静水圧載荷過程でのピーク強度の推定についても検討する。

#### 4. ピーク強度以前の場合のカイザー効果

##### (1) 実験方法

試料は3章での実験と同じ細目の凝灰岩(大谷石)を用いた。試料の大きさ、乾燥方法は3.(1)と同じである。

先行載荷として三軸圧縮の載荷を行った。この先

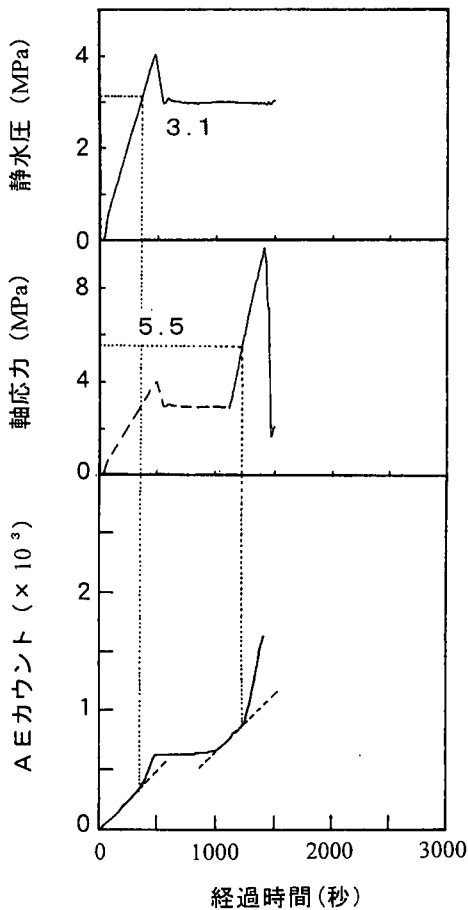


図-6 拘束圧と軸応力の推定例

行載荷をAEがほとんど発生しなくなるまでの約1時間保持した。

再載荷は、まず、AEカウントをリアルタイムで表示させながら静水圧の載荷を行った。AEの急増点を確認されるまで静水圧の載荷を行い、先行載荷の拘束圧を推定した。次に、推定した拘束圧のもとで軸差荷重の載荷を行い先行載荷の軸応力の推定を行った。

## (2) 拘束圧と軸応力の推定

再載荷時の静水圧、軸応力とAE発生状況を図-6に示す。図中の軸応力において破線区間は静水圧載荷によるものを示し、実線は拘束圧を一定とした軸差応力の載荷区間を示している。

先行載荷の拘束圧は3.0MPa、軸応力は5.6MPaである。静水圧の再載荷過程において、載荷初期よりAEは発生しているが400秒付近で明らかに急増傾向を示している。この急増点の応力は、先行載荷時

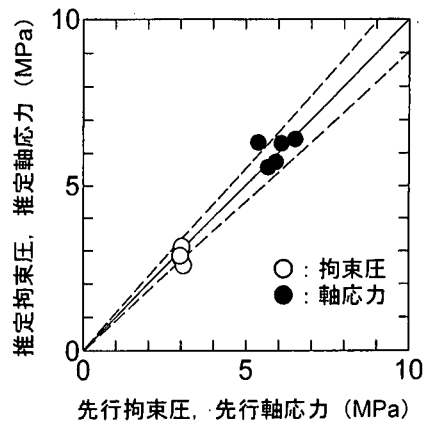


図-7 拘束圧と軸応力の推定結果

の拘束圧に近い値を示している。引き続いて行った軸差応力の載荷過程では、載荷直前の1000秒付近からAEが発生している。これは、静水圧載荷のために供試体に接する下部加压板と下部耐圧盤との間に隙間を設けており、軸荷重の載荷過程においてこの隙間を埋める際にそれらの接触の影響によりAEが発生したものであると思われる。AEはこのように載荷直前から発生しているがその発生傾向は1200秒付近まで直線的であり、その後急増傾向を示している。この急増点での応力は先行載荷の軸応力5.6MPaに近い値である。

AEの急増点から求めた拘束圧と軸応力を図-7に示す。破線の区間は推定誤差(推定値/先行応力)が90~110%の区間であり、その中の直線は推定誤差0%の場合である。静水圧載荷過程でのカイザー効果は先行載荷の拘束圧に対応し、その後の軸応力載荷過程でのカイザー効果は先行載荷の軸応力に対応していることがわかる。

静水圧載荷過程において先行載荷時の拘束圧に対応してAEが発生しているのは以下の理由によると考えられる。一軸圧縮による再載荷では再載荷を行った方向の垂直応力が推定される。種々の方向から岩石コアを採取した場合には、それらの採取方向の垂直応力が推定されることとなり<sup>11)~13)</sup>、このことは岩石があらゆる方向の垂直応力を記憶していることを示している。静水圧の載荷は全ての方向への垂直応力の載荷と考えられることから静水圧載荷過程において最小の垂直応力つまり拘束圧に対応した点でカイザー効果が観察されたものと考えられる。

引き続き行った軸応力載荷過程は、先行載荷と同じ拘束圧での載荷である。この載荷は、3章で行った実験でのピーク強度以前での載荷状態と同じであり、精度良く先行載荷の軸応力が推定されている。

このように、1つの供試体を用いて静水圧载荷により先行载荷の拘束圧が、その後の軸応力载荷により先行载荷の軸応力が推定可能であった。

## 5. ピーク強度以降の場合のカイザー効果

### (1) 実験方法

試料は3章での実験と同じ細目の凝灰岩(大谷石)である。先行载荷は拘束圧を1.3MPaとしてピーク強度以降までの载荷を行った。载荷はひずみ速度を毎分0.1%とし、ひずみ1.5%まで载荷した。その後、約5分間変位を一定とし先行载荷を終了した。

再载荷は、先行载荷を行った一本の供試体に、まず、静水圧载荷により拘束圧を推定し、次に、軸応力の载荷により除荷直前の応力(残留強度)の推定を行った。さらに、本章ではピーク強度を推定するために、全ての荷重を除荷した後、再び静水圧の载荷を行った。

### (2) 先行载荷時の応力とA E発生特性

先行载荷時の応力とA Eの発生傾向を図-8に示す。ピーク強度の17.2MPa以降はひずみ軟化傾向を示し、耐荷力がほぼ一定となった時点で変位を一定に保持した。この時の応力11.9MPaを先行载荷時の残留強度とした。A Eは载荷にともない発生し、ピーク強度付近で急増している。変位一定区間ではA Eはほとんど発生していない。

### (3) A E発生率増分による推定

再载荷時のA E発生状況を図-9(a)~(c)に示す。図-9(a)は先行载荷時の拘束圧(1.3MPa)を推定するための静水圧の载荷であり、図-9(b)は残留強度(11.9MPa)を推定するための軸応力の载荷である。図-9(c)はピーク強度(17.2MPa)を推定するために再び静水圧载荷を行ったときのA E発生状況である。図-9(c)に示すピーク強度の推定では、これまでに示したA Eの発生傾向と同じく、その急増点は明瞭である。図-9(a)に示す拘束圧の推定では、静水圧の载荷初期よりA Eが発生している。この傾向は4章に示した先行载荷がピーク強度以前の場合の拘束圧推定(図-6)と同様であるが、ここでのA Eには先行载荷時に生じた破断面の密着によるA Eも含まれていると思われる。A Eの発生数は少ないが先行拘束圧の1.3MPaで急増傾向にある。また、図-9(b)に示す残留強度の推定においては、軸差応力の载荷される350秒付近からA Eは発生し700秒と800

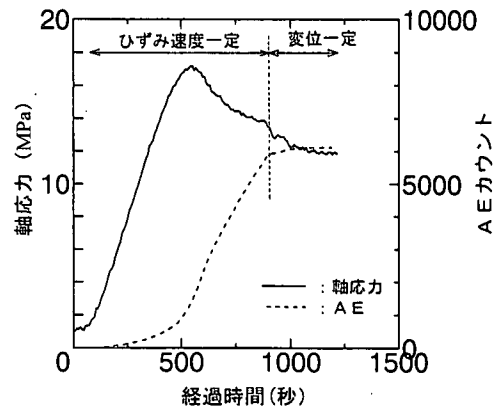


図-8 先行载荷時の軸応力とA E発生状況

秒付近で急増する傾向にあるが、図-9(c)に比べ急増点は明瞭ではない。

そこで、A Eの急増点を判定する方法としてA E発生率増分を用いた。時間 $t$ におけるA E発生率増分は、時間 $t \sim (t+\Delta t)$ の間に発生したA Eカウントと時間 $(t-\Delta t) \sim t$ の間に発生したA Eカウントとの差、つまり時間間隔 $\Delta t$ のA E発生率の増分として求められる。A E発生率はある時間間隔に発生するA EカウントであることからA Eの発生速度に対応し、発生速度の増加する点から急増点を求めることになる。A E発生率増分はさらにその増分であるからA Eの発生加速度に対応し、そのピーク点から急増点を求めることとなる。時間 $t$ はA Eの計測間隔で、4秒ごとのA Eカウントを用いた。そのためA E発生率増分も4秒ごとに求めた。 $\Delta t$ が小さい場合のA E発生率増分は、わずかなA Eの増加にも敏感となるためにA E発生傾向を微視的にみたときの急増点となる。 $\Delta t$ が大きい場合にはA E発生傾向を巨視的にみたときの急増点となる。ここでは $\Delta t$ を8, 20, 40秒として求めた。図-9(a)~(c)に対応するA E発生率増分を図-10(a)~(c)に示す。

$\Delta t$ の設定により発生率増分の値は異なり、 $\Delta t$ が8秒では小さな振幅となるが、 $\Delta t$ が大きくなるほど大きな振幅を示し、ピーク点(▼)が見出せる。図-10(a)では $\Delta t$ が20秒と40秒の場合にピーク点の位置が異なっている。これは、A Eの発生数が少ないために $\Delta t$ の設定によってはわずかなA Eの増加に影響され、ピークの位置が異なったと思われる。A E発生数が多い場合には、図-10(b)(c)に示すように時間間隔 $\Delta t$ が大きいほど同じ位置にピーク点が大きくなって生じる。図-9(c)のような明瞭な急増点がある場合には図-10(c)のように各 $\Delta t$ の発生率増分のピークは一ヶ所に集中する。A E発生率増分に明瞭なピ

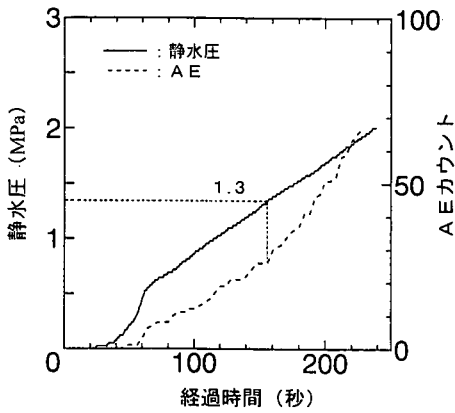


図-9(a) 静水圧荷重によるAE発生状況

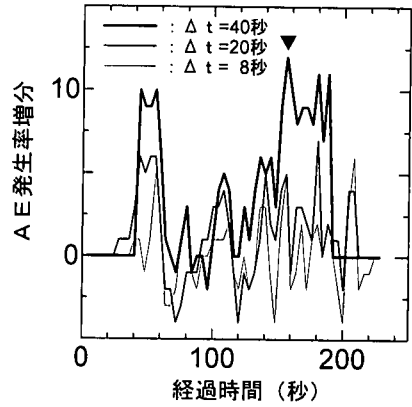


図-10(a) 拘束圧推定時のAE発生率増分

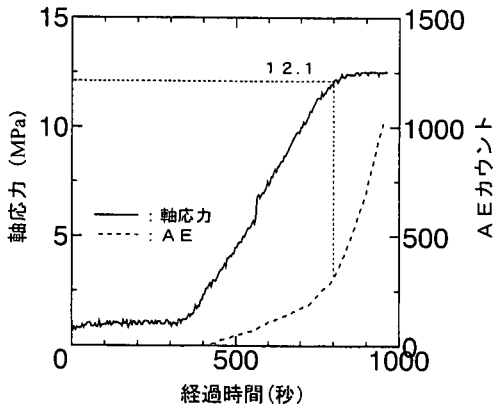


図-9(b) 軸応力荷重によるAE発生状況

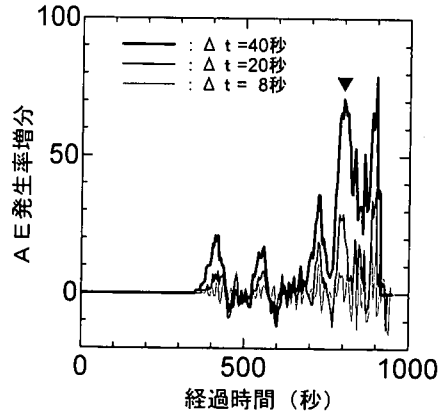


図-10(b) 残留強度推定時のAE発生率増分

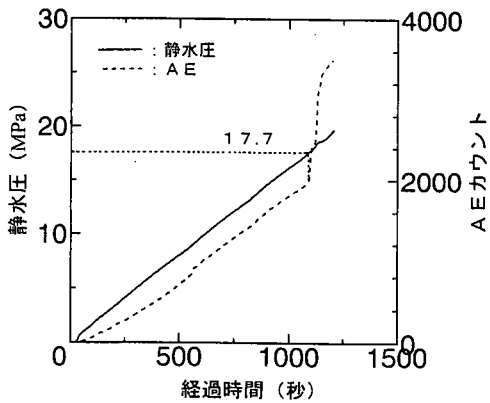


図-9(c) 静水圧荷重によるAE発生状況

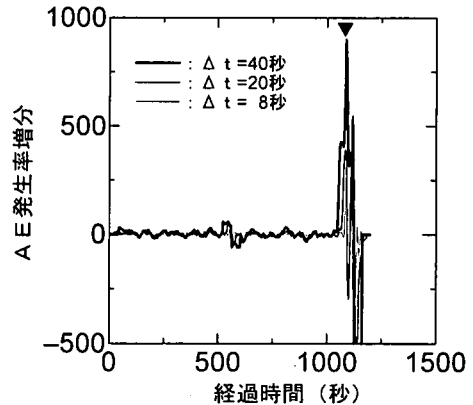


図-10(c) ピーク強度推定時のAE発生率増分

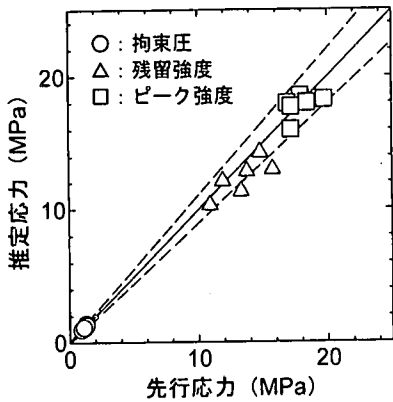


図-11 拘束圧、残留強度、ピーク強度の推定結果

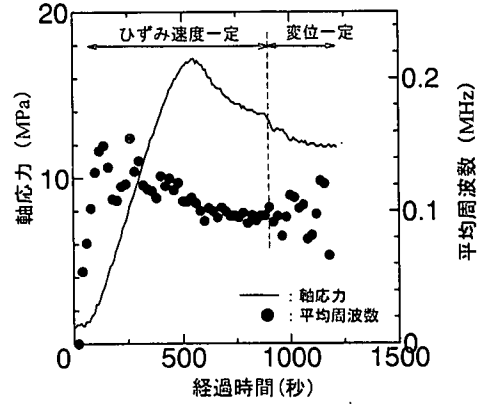


図-12 先行載荷時の平均周波数

一ク点を見出せる $\Delta t$ はA E発生数と計測時間に関係しているものと考えられるが、ここでは $\Delta t$ を40秒とした場合のピーク点をA E急増点と判定した。 $\Delta t$ の影響に関しては今後の検討課題である。図-10(b)では800秒と900秒付近の2ヶ所で大きな値を示している。900秒での軸応力はすでに一定の値となっていることから巨視的な破断面上ですべりが生じている状態にあると思われる。これは、次の5.(4)に示す平均周波数の変化からも推測できる。そこで、800秒の点から残留強度を推定した。このようにして求めた拘束圧(○)、残留強度(△)、ピーク強度(□)の推定結果を図-11に示す。A E発生率増分を用いた急増点の判定は容易であり、このA E急増点の応力は先行載荷の拘束圧、残留強度そしてピーク強度に対応していることがわかる。

また、図-9(b)より先行載荷がピーク強度以降に除荷されたことが判定できる。これは3.(3)で述べたように、載荷過程におけるA E急増点と最大応力となる点の関係において、A E急増点が最大応力付近にあることから判定することができる。

#### (4) A Eの平均周波数

A E急増点ではA Eカウントが増加するだけでなく、A Eの波形特性が異なることが考えられる。簡易的に求められる波形パラメータとして式(1)で定義される平均周波数<sup>19)</sup>を求めた。

$$\text{平均周波数} = \frac{\text{A Eリングダウンカウント}}{\text{継続時間}} \quad (1)$$

コンクリートを用いた実験では、割裂引張試験時の平均周波数が一面せん断試験時の値より高い傾向にあることが報告されており<sup>20)</sup>、破壊形式の識別に

有用であると考えられる。本研究では時間間隔20秒ごとに求め、A E急増点での変化、先行載荷時と再載荷時の対応について検討した。

図-12に先行載荷時の平均周波数を示す。用いたA Eセンサーの共振周波数は140kHzであり、その影響を受けていると考えられるが、ピーク強度の前後で以下のような周波数特性が得られた。ピーク強度以前では変動は大きく比較的高い周波数を示している。ピーク強度以降ではそれ以前に比べて変動は小さく低い周波数を示している。その後の変位一定区間では、再び変動は大きくなり平均周波数も高くなる場合がある。ピーク強度以降の巨視的な破壊が進行している区間にくらべ、それ以前の微視的破壊が進行している区間や変位一定区間では平均周波数は高い値を示す傾向にあることがわかる。

再載荷時の平均周波数を図-13(a)~(c)に示す。図-13(a)では、発生数も少なく明瞭な傾向が見られないがA E急増点以降の200秒付近から平均周波数が高くなるようである。図-13(b)の残留強度推定ではA E急増点と判定した800秒付近から変動が小さくなり、また、その値は先行載荷時のピーク強度以降での値とほぼ等しくなっている。このことは、このA E急増点以降では、軸差応力の再載荷によって先行載荷時のピーク強度以降の巨視的な破壊がさらに進展していることを示していると考えられる。

図-13(c)のピーク強度推定では、A Eの急増点と判定した1100秒付近で平均周波数がそれ以前に比べて大きく、その値は先行載荷時のピーク強度以前の値と近い傾向を示している。このように、A E急増点と判定した付近で平均周波数も変化する傾向を示し、その値は先行載荷時のピーク強度以前の微視的クラックによる破壊が進行している区間や、ピーク強度以降の巨視的クラックによる破壊が進行している区



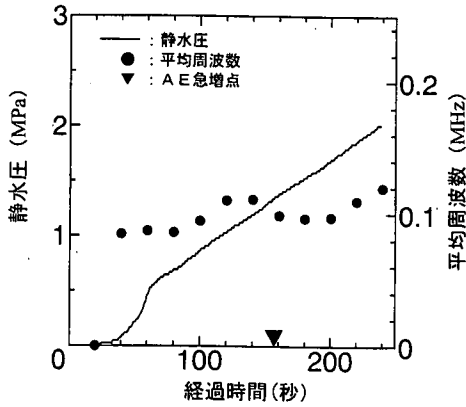


図-13(a) 拘束圧推定時の平均周波数

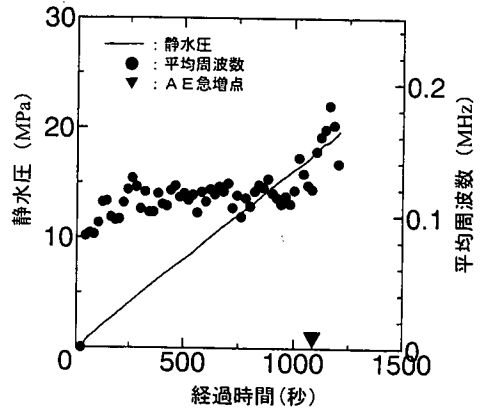


図-13(c) ピーク強度推定時の平均周波数

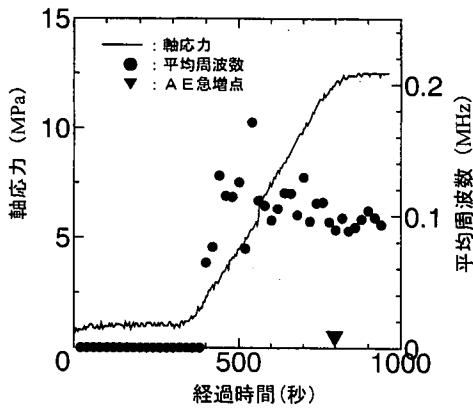


図-13(b) 残留強度推定時の平均周波数

間での値に対応する傾向を示している。

### (5) 静水圧と軸差応力の載荷によるカイザー効果

拘束圧の推定は4章でのピーク強度以前の実験結果と同様に可能であったが、ここでの先行載荷はピーク強度以降まで載荷している点で異なる。先行載荷を除荷した供試体には最終破断面に巨視的クラックが生じており、このような巨視的クラックを持つ岩石コアにも静水圧載荷により拘束圧が推定可能であることを示している。これは、再載荷の静水圧載荷過程においては最終破断面の巨視的クラックを進展させる軸差応力が作用しないために破壊は進展せず、それ以外のまだ巨視的クラックが発達していない部分で記憶されている最小の垂直応力に対応してA Eが発生するためと推察される。その後の軸応力載荷過程は、先行載荷と同じ拘束圧での軸応力載荷であり、3章のピーク強度以降での載荷状態と同様であることから最終破断面での巨視的クラックがさらに進展する際にA Eが急増したと考えられ、平均

周波数の値もA Eの急増点以降は先行載荷時のピーク強度以降の値に対応する傾向を示している。

また、静水圧の載荷は全ての方向への垂直応力の載荷と考えられることから、最小の垂直応力だけでなくそれと直交する方向の最大垂直応力に対応したカイザー効果も考えられる。ピーク強度を推定するための静水圧載荷におけるA E急増点では、平均周波数の値はピーク強度以降の巨視的クラックによる破壊が進行している区間での値よりもそれ以前の微視的クラックの破壊が進展している場合の値に近い傾向を示していた。このことから、この静水圧載荷過程では、巨視的クラックが発達していない部分で記憶されている最大の垂直応力つまりピーク強度に対応したカイザー効果が観察されたものと考えられる。

## 6. 結論

三軸圧縮を用いたカイザー効果に関する基礎的研究を行った。実験は大谷石に繰り返し漸増載荷を行い、拘束圧の大きさによる変形性の違いが三軸下のカイザー効果に及ぼす影響について検討した。この結果をもとに、先行載荷がピーク強度以前の場合と、ピーク強度以降までの場合について、三軸圧縮試験での静水圧載荷過程、その後の軸応力載荷過程におけるカイザー効果に関する検討を行った。

得られた結果を以下に要約する。

- (1) 一軸圧縮と拘束圧0.98MPaのピーク強度以前の領域および拘束圧9.8MPaでの同じひずみレベルでは、A E急増点は最大応力に対応している。
- (2) 一軸圧縮と拘束圧0.98MPaのピーク強度以降のひずみ軟化域および拘束圧0.98MPaでの同じひ

ずみレベルでは、A E急増点は除荷直前の応力に対応している。

- (3) 先行載荷がピーク強度以前の場合に、静水圧載荷過程でカイザー効果が観察され、その時の応力は先行載荷の拘束圧に対応している。引き続き行った軸応力載荷過程でのA E急増点は先行載荷の軸応力に対応し、1つの供試体から拘束圧と軸応力の2つの応力が推定可能であった。
- (4) 先行載荷がピーク強度以降のひずみ軟化域の場合に、A E発生率増分を用いてA E急増点を判定した。静水圧載荷過程でのA E急増点は先行載荷の拘束圧に対応し、その後の軸応力載荷過程でのA E急増点は残留強度に対応している。
- (5) さらに、除荷後の静水圧載荷でのA E急増点はピーク強度に対応しており、1つの供試体から先行載荷時の拘束圧、残留強度、ピーク強度の3つの応力が推定可能であった。
- (6) この時の各A E急増点では波形パラメータの平均周波数も変化し、その値は先行載荷時のピーク強度以前やピーク強度以降の値に対応する傾向を示した。

一軸圧縮による再載荷では、岩石供試体の一軸圧縮強度を超える応力レベルまでの載荷は不可能である。また、ピーク強度以降のひずみ軟化領域では、供試体に巨視的クラックが生じており一軸圧縮による載荷では推定が困難である。このような一軸圧縮によるA E法の適用限界に対して三軸圧縮の再載荷を行うことにより、これらの領域における推定が可能となり、また、1つの供試体を用いて拘束圧、ピーク強度、残留強度の3つの応力が推定可能であった。ただし、本実験のピーク強度以降の推定において使用した岩石は、低拘束圧ではひずみ軟化傾向を示し、その破壊進行は安定していたが、拘束圧下においても破壊が急激に進行するような岩石については異なる傾向を示すことも予想され、岩種と拘束圧が及ぼす影響について今後さらに検討することが必要と考えられる。

また、本実験では静水圧を用いて拘束圧とピーク強度の推定を行ったが、静水圧載荷を用いた地圧推定法にDSCA法<sup>21)</sup>がある。これは静水圧の載荷過程における立方供試体の6方向の応力ひずみ関係の変化点より三次元的に地圧の三主応力の比とその方向を推定する方法である。静水圧の載荷による変形挙動に対応してA Eの発生特性も変化すると考えられることから、静水圧載荷によるA E法とDSCA法との対応関係についても検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 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.
- 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) 渡辺英彦, 田野久貴, 赤津武男, 武井 孝: 三軸圧縮下における岩石のA Eカイザー効果に関する基礎実験, 土木学会第49回年次学術講演会, Ⅲ-A, pp.690~691, 1994.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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6報 時間依存性について, 地震学会講演予稿集, No.1, p.232, 1983.
- 8) 村山朔郎, 道広一利, 藤原紀夫, 畑 浩二: 花崗岩のクリープひずみとカイザー効果の関係, 土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-5, pp.41~46, 1986.
- 9) 瀬戸政宏, 歌川学, 勝山邦久: 繰り返し載荷時のA E発生特性を用いた応力履歴岩石からの先行応力推定, 土木学会論文集, 第445号/Ⅲ-18, pp.93~100, 1992.
- 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) 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.
- 12) 村山朔郎, 道広一利, 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.
- 13) 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.
- 14) 道広一利, 畑浩二, 藤原紀夫, 吉岡尚也: 種々の岩石の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.

- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 石橋孝治: 三軸圧縮応力下における人工軟岩のAE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.
- 18) 石橋孝治: 三軸圧縮試験を利用したAE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.
- 19) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 渋谷豊茂: 一方向強化炭素繊維/エポキシ樹脂複合材料の引張破壊特性とAE波解析, 日本機化学会論文集 (A編), Vol. 56, No. 528, pp. 72~79, 1990.
- 20) 岩波光保, 鎌田敏郎, 長瀧重義, 大即信明: 曲げを受ける鉄筋コンクリートはりのAE発生特性とその劣化評価への適用生に関する基礎的検討, 土木学会論文集, 第606号/V-41, pp. 89~102, 1998.
- 21) 山口勉, 及川寧己, 佐藤嘉晃, 厨川道雄, 天満則夫, 小林秀男, 松永烈: DSCAによる原位置応力の推定に関する実験的研究, 資源と素材, Vol. 107, pp. 434~440, 1991.

(2000. 7. 24 受付)

## THE ESTIMATION OF PRE-STRESS OF OYA-TUFF USING THE KAISER EFFECT UNDER TRIAXIAL COMPRESSIVE RE-LOADING

Hidehiko WATANABE and Hisataka TANO

Triaxial compressive stress was re-loaded to estimate the pre-stress using the Kaiser effect. In the case of cyclic incremental loading of differential stress until post-failure region, the remarkable AE increase appeared at pre-releasing stress level. The stress level at which the Kaiser effect was observed under the re-loading of hydrostatic stress corresponded to the pre-confining stress. The pre-confining stress, peak strength and residual stress were also able to be estimated under the re-loading of hydrostatic stress and differential stress from the Kaiser effect. Frequency estimated from ringdown counts and duration time of AE signal changed at the Kaiser effect point, which was determined by calculating the AE event count rate increment.