

AE のカイザー効果を利用した初期地圧測定法 — いくつかの研究課題 —

横山幸也

深田地質研究所

Initial stress measurement method by using the kaiser effect of AE — Some study issues —

YOKOYAMA Tatsuya

Fukada Geological Institute

要旨：AE のカイザー効果を利用した初期地圧測定法は半世紀前に発想され、多くの基礎的な研究と実証実験、他の初期地圧測定手法との比較などを経て実用化されてきた。この方法は「カイザー効果」という現象を測定原理としている。これは、ある脆性材料が繰り返し荷重を受けたとき、前に受けた荷重の大きさまではAEがほとんど発生しないという現象である。この方法は「AE法」と呼ばれ、現場測定法としての応力解放法や水圧破砕法に対し、室内試験としてのコア法に分類される。一方、カイザー効果には理論的、実験的に未解明な問題があるため、これら課題別の研究も進められてきた。岩石試料から応力状態を決定するためには、岩石が受けていた地圧の方向の独立性、岩石が記憶している地圧の時間依存性、岩石が過去に受けた応力履歴の影響、岩石の乾湿や熱履歴の影響などいくつかの課題がある。ここでは、未解決の課題も含めて具体的な研究成果について整理する。

キーワード：初期地圧、AE法、カイザー効果、コア法

Abstract: The initial stress measurement method by using the Kaiser effect of AE was conceived half a century ago and has been put into practical use after much basic research, empirical testing, and comparison with other initial stress measurement methods. The method is based on the phenomenon called “Kaiser effect” as its measuring principle. It is a phenomenon that when a brittle material is cyclically loaded, AE almost never occurs up to the magnitude of the previous load. This method is called the “AE method” and is classified as a core-based method for laboratory testing, as opposed to the stress relief method or the hydraulic fracturing method as an in-situ measurement method. On the other hand, since the Kaiser effect has unresolved theoretical and experimental issues, studies have been conducted on specific issues. There are several challenges in determining the stress state from rock samples, such as the independence of the stress direction, the time dependence of stress memory, and the effects of stress history and dry or thermal history. This paper summarizes specific research results, including unresolved issues.

Keywords: initial stress, AE method, Kaiser effect, core-based method

1. はじめに

本稿は「岩の力学連合会・国際技術委員会」の「AE法による地下応力測定法に関するサブワー

キンググループ」で2005年にまとめられた「AE法による地圧測定法に関する解説案」の主要な部分を抜粋し編集したものである。

AE法に関する標準的な方法の確立をめざして

1988年にワーキンググループがつくられ、その中では共通の岩石コア試料を使った共通実験も行われた。この時は、AE法の標準化に関するコンセンサスを得るまでの研究データの蓄積が不十分であったこともあり、AE法の標準化は果たせなかった。

この後、基礎的な研究も含めて数多くのAE法を実用化するための研究開発が行われた。この時点でも未だカイザー効果のメカニズムについて未解明な課題が残っていたが、「AE法による地下応力測定法に関するサブワーキンググループ」では、それまでの数多くの研究開発に基づいて活発な議論が行われ、AE法に関する標準的な方法がまとめられた。ここでは、この標準的なAE法の概要を紹介し、特にカイザー効果に関するいくつかの課題についての実験結果についてとりまとめた。

2. AEのカイザー効果

AE (Acoustic Emission) とは、岩石などの塑性材料が圧縮や曲げなどの変形の生じるような荷重を受けたときに発生する微小破壊音のことをさし、AEの周波数は可聴帯域を超えることが多い。AE法は、材料が一度受けた荷重の大きさまではAEがほとんど発生しない「カイザー効果」と呼ばれる現象を利用して初期地圧を求める方法である。1950年代初めにKaiser (1953) は、多結晶金属材料の引張試験時において繰り返し荷重履歴を受けた材料について、過去の最大履歴荷重に達するまではAEがほとんど発生しない現象を発見した。のちにこの現象は、金属材料の非破壊検査によく用いられるようになった。

カイザー効果を利用して初期地圧を推定する方法は、金川など (1977)、瀬戸など (1990) によって提案された。この方法では、岩石供試体の一軸

圧縮荷重時において、供試体に密着させた圧電素子からなるAEセンサを用いてAEを計測する。作製した試験片の方向別に初期地圧成分の値を推定することができるため、独立した6方向以上の試験片を用いることにより、三次元での初期地圧を算定することができる。図1に岩石の繰り返し荷重時に見られるAEのカイザー効果の概念図を示す。

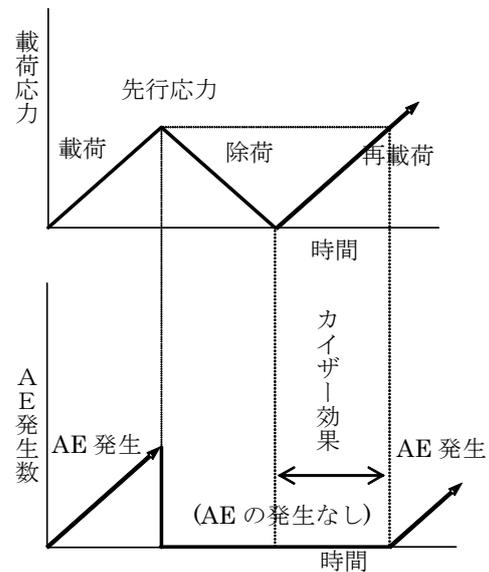


図1 岩石の繰り返し荷重時に見られるAEのカイザー効果の概念図。

2.1 岩石におけるAEのカイザー効果の原理

カイザー効果を地山内部の岩石に適用して説明すると、図2に示すようになる。まず、地山内部の岩石には初期地圧が生じている。この岩石をボーリングなどにより採取すると、その岩石は初期地圧から解放される。この応力解放された岩石について圧縮装置などで再び荷重すると、初期地圧レベルまではAEの発生が少なく、それ以上の応力になるとAEが発生する。すなわち、岩石の荷重によりAEを測定しAEの発生が顕著となる応力値を求めれば、それが初期地圧に相当することになる。図3は、この測定法の概念を模式的に示したものである。

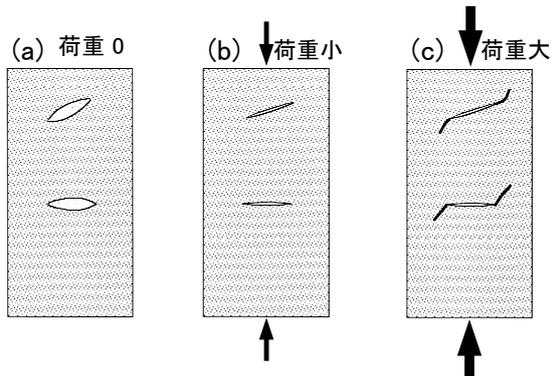


図2 AE法による地圧測定を説明するための概念図。(a): 応力解放による微小き裂の開口, (b): 初期地圧レベルまでの载荷による微小き裂の閉そく, (c): 初期地圧レベルを超える载荷による新たな微小き裂の発生。

2.2 カイザー効果と微小き裂の形成との関係

カイザー効果のメカニズムに関しては、現在の段階では十分な解明がなされているとは言えないが、AEの発生はボーリングによって採取された岩石コア内部に含まれる微小き裂と密接に関係しているとみられ、次のように仮説的に考えられる。

2.2.1 応力解放による微小き裂の開口

地山内部にボーリングを行うことによって岩石コアを採取すると、その岩石コア内部には、ボーリングによって解放された初期地圧状態（大きさと主応力の方向）に対応する微小き裂群が形成される。この微小き裂は、岩石コア採取直後においては主に開口状態にあると考えられる。また、そのき裂の開口量は、解放された初期地圧の大きさと方向に依存し、各方向において異なる大きさを持つと仮定される。

2.2.2 初期地圧レベルを超える载荷による微小き裂の閉そく

圧縮装置によって、求めたい地圧の方向から圧縮応力を载荷すると、岩石コア内部の開口状態にある微小き裂は閉そくするとともに、き裂面に

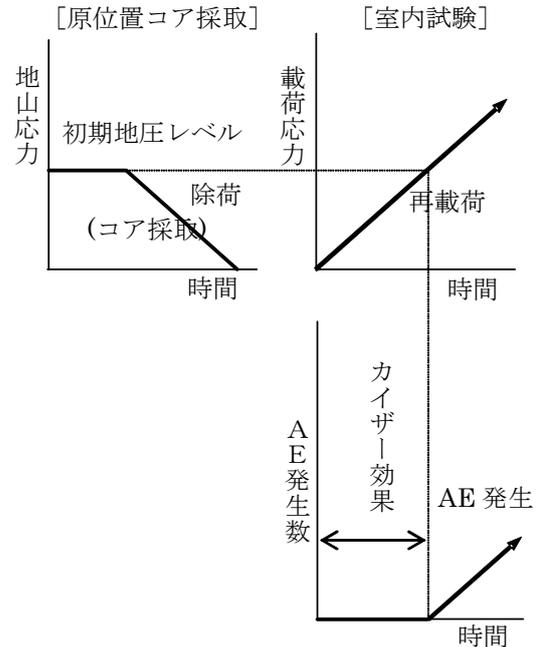


図3 カイザー効果による地圧測定法の概念図。

沿ったせん断変形が発生すると考えられる。カイザー効果により、加える圧縮応力が初期地圧になるまでAEは発生しない。これは、この微小き裂の変形が弾性的であり、新たなき裂形成を伴わないためではないかと考えられる。

2.2.3 初期地圧レベルを超える载荷による新たなき裂の発生

岩石コアに载荷する圧縮応力が初期地圧の値に達すると、岩石コア内部の微小き裂は閉そく状態となり、かつき裂面に沿って作用するせん断応力によって、微小き裂先端部の応力拡大係数は破壊靱性に達し、微小き裂先端部に新たなき裂が形成される。このき裂形成に伴ってAEが発生するものと考えられる。

2.3 カイザー効果と微小き裂に関する実験例

カイザー効果と微小き裂の進展との関係について、岩石（白浜砂岩）に対し繰り返し载荷により10MPaの先行応力を与えた後、25MPaまで

載荷を行って AE 震源分布の変化を検討した結果を図 4 に示す。

先行応力の載荷は、載荷中に AE が発生しなくなるまで行った。これは、応力レベルと微小き裂の進展とが対応すると仮定し、岩石内部に応力 10MPa に対応した微小き裂形成領域を生成させることを想定したためである。

実験の結果、先行応力に対応して十分発達した微小破壊領域を有する岩石に載荷した場合には明瞭なカイザー効果が認められた。また、先行応力以上の応力を加えた際の AE の発生領域は、先行応力を加えた際に得られた AE 発生領域と異なり、その発生領域縁部からその外側で顕著であった。これは、微小き裂の進展と AE 発生との対応関係を示唆するものであり、カイザー効果と微小き裂形成との関係についての仮説と調和的である。

また、AE の発生とき裂進展との関係を明らか

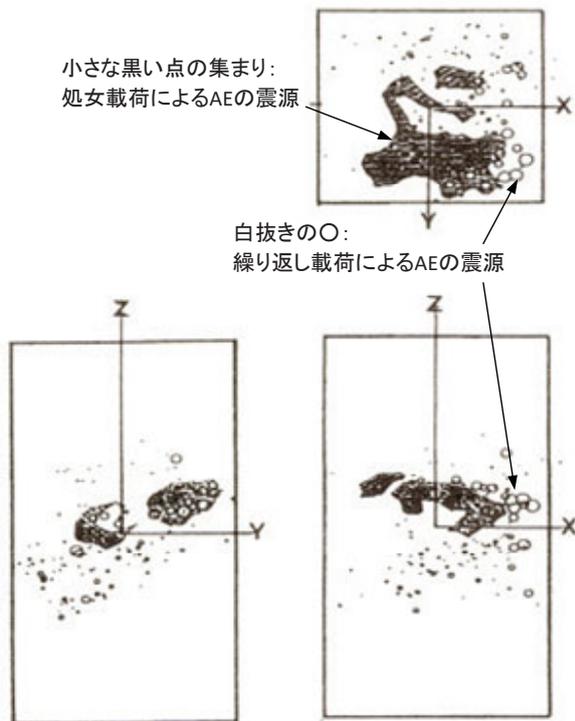


図 4 再載荷時に発生した AE の震源分布の変化と、繰り返し載荷によって発生した AE の震源分布との関係 (瀬戸ほか, 1992 の一部に加筆).

にするため、あらかじめスリットを入れた岩石試験片 (白浜砂岩) を用いた一軸載荷試験を行い、このときの AE の発生状況とき裂の発生・進展状況の観察を行った例を示す。図 5 には、試験に用いた岩石試験片と繰り返し載荷時の AE の発生状

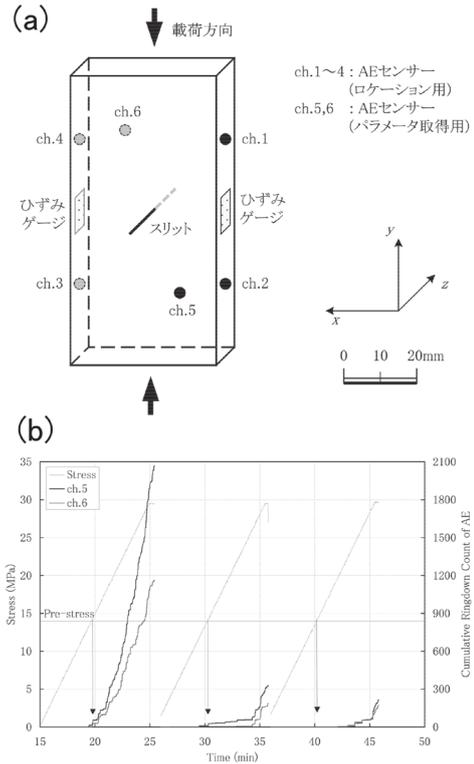


図 5 スリットを入れた岩石試験片を用いた AE 発生と、き裂発生状況に着目した実験。(a): 岩石試験片の形状と AE センサ、ひずみゲージの接着位置を示す図、(b): 載荷パターンと AE 発生状況を示す図。

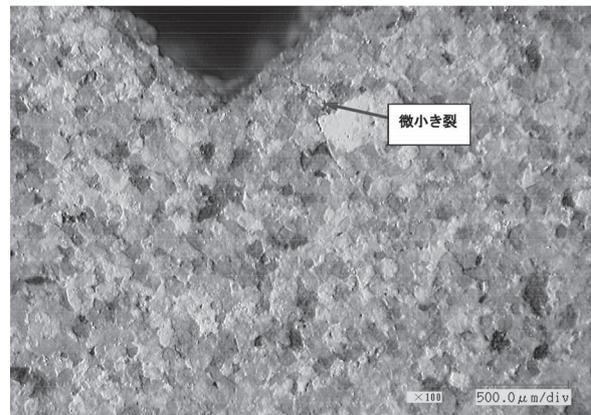


図 6 岩石試験片のスリット端部に発生したき裂 (矢印の先端).

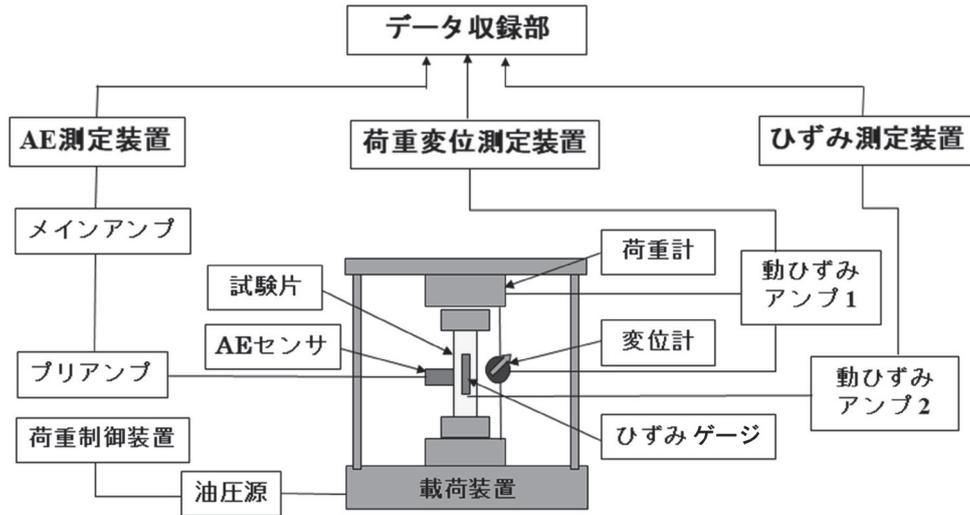


図7 AE試験装置の概念図。

況を示す。図6には、岩石試験片のスリット端部にマイクروسコープで観察されたき裂の発生状況を示す。同図から、先行応力 15MPa を超えた段階でスリット下端部のやや右上方の付近からき裂が進展していることを確認した。また、同様の観察から、同じ応力レベルの繰り返しにおいてき裂はほとんど進展しないことを確認した。なお、繰り返し荷重試験時の除荷過程ではき裂が開口することを確認した。このように、先行応力を超えると、スリット先端の新領域でき裂が発生して AE が急増するが、同一応力レベルの範囲内での繰り返し荷重過程ではき裂は既存領域内でのき裂の開閉挙動のみであり、新たなき裂進展はない。

3. AE 法の実際

3.1 AE 試験装置

AE 試験装置は、荷重装置とデータ収録装置からなる。荷重装置は、荷重フレーム、荷重制御装置、データ収録装置は、AE センサ、ひずみゲージ、プリアンプ、動ひずみアンプ、AE 測定装置、ひずみ・荷重・変位測定装置などで構成される。こ

れら試験装置の概念図を図7に示す。

3.2 試験片

岩石試験片（供試体）の作製には、ボーリングコアを用いる場合が多い。AE 法により三次元の応力状態を決定するためには、ボーリングコアが定方位で採取されていることが必要である。AE 試験で得られる 1 つの軸方向の応力値から三次元の応力状態を求めるためには、独立した 6 方向以上の試験片が必要になる。図8には、鉛直ボーリングによる定方位コアを用いた試験片の作製方

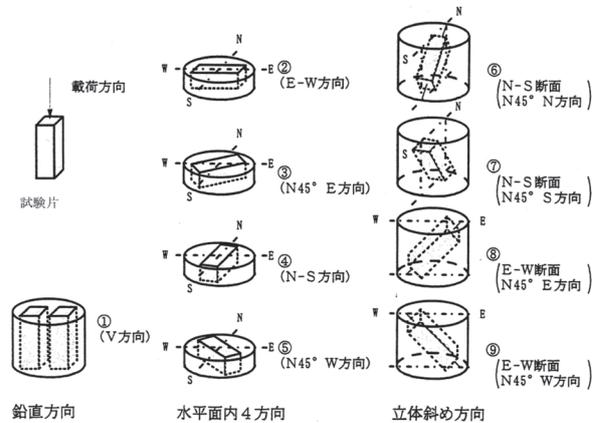


図8 鉛直ボーリングによる定方位コアを用いた試験片の作製方向の一例（金川，1999）。

向の例を示す。また、代表的な試験片の形状を図9に示す。

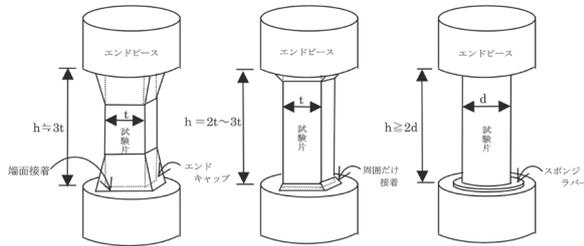


図9 AE試験に用いる試験片の形状の例。

3.3 試験片端部で発生するノイズの除去

カイザー効果を利用したAEを測定するとき、荷重に伴って発生する岩石試験片内部からのAEを的確に捉える必要がある。応力が乱れやすくなるので、試験片端部から発生するAEをできるだけ除去し、試験片中央部からのAEだけを測定することが重要となる。そのため、試験片端部は図9に示したように応力集中が緩和できる工夫がされている(金川ほか, 2002)。実際の測定においては、図10に示すような4つのAEセンサを配置し、AEの震源位置標定を行うことにより試験片端部からのAEを除去することが行われる。例えば同図において、ある1つのAEが試験片の中央付近から発生したとき、試験片の両端にある1chと4chのAEセンサで捉えられたAEの初動は、試験片の中央にある3chと4chのAEセンサで捉えられたAEの初動に比べ遅れて記録される。この場合は空間的な一次元での位置標定を利用して、両端で発生したAEを除去することができる。

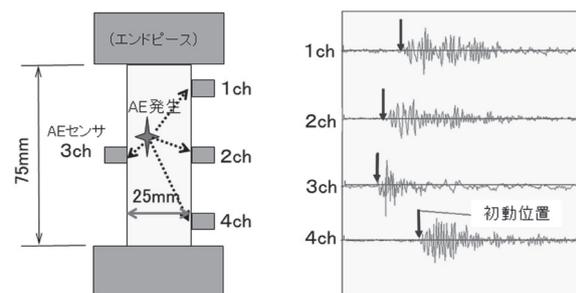


図10 AEの発生位置と収録波形の例(金川ほか, 2002)。

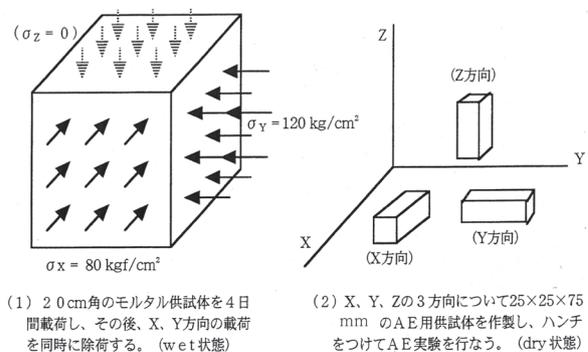
4. カイザー効果に係わる課題

4.1 荷重方向における独立性

AE法による初期地圧測定では、試験片の一軸荷重時に認められるカイザー効果を利用して先行応力としての初期地圧を求めている。一般に、地下に存在する岩石は三次元的な応力状態下にあるが、本測定法では採取された岩石試料から試験片を作製し、この試験片の荷重方向の地圧成分が測定されるという前提にたっている。つまりカイザー効果は、荷重方向以外の先行応力の影響を受けず、荷重方向に独立であることが必要となる。ここでは、この荷重方向の独立性が成り立っていることを確認するため、5つの既往の研究成果について以下に整理する。これらの実験結果では、いずれも荷重方向の独立性が認められると結論されている。

4.1.1 モルタルの二軸同時荷重試験片を用いた3方向試験

金川ほか(1981)は、三次元応力場を表現するために、二軸荷重装置を用いて2方向から異なる応力を同時にモルタル供試体に与えた。供試体の形状は1辺20cmの立方体で、与えた応力は独立する3面にそれぞれ $\sigma_x = 80 \text{ kgf/cm}^2$ (7.8 MPa),



(1) 20cm角のモルタル供試体を4日間荷重し、その後、X、Y方向の荷重を同時に除荷する。(wet状態)
(2) X、Y、Zの3方向について25×25×75mmのAE用供試体を作製し、ハンチをつけてAE実験を行なう。(dry状態)

図11 二軸荷重の方向と試験片の作製方法(金川ほか, 1981)。

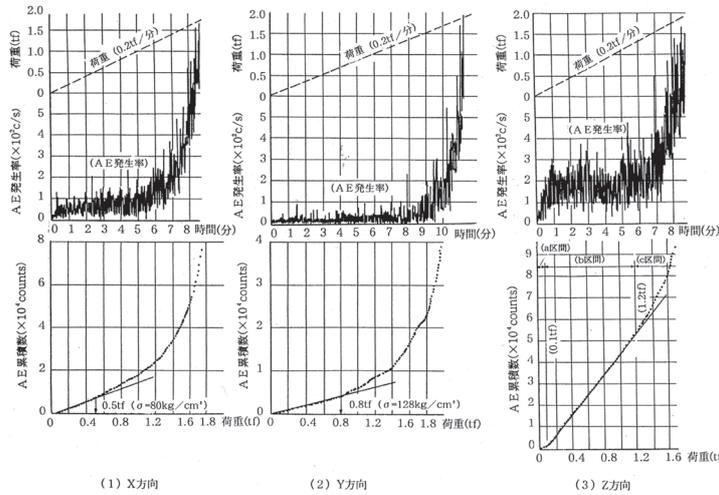


図 12 二軸载荷を行ったモルタル材料の各方向のカイザー効果測定例 (金川ほか, 1981 に一部加筆).

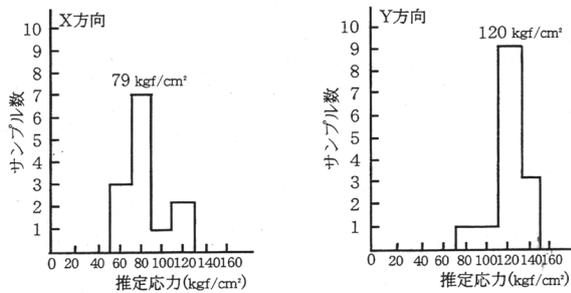


図 13 二軸方向载荷を行ったモルタル材料の先行応力の推定結果 (金川ほか, 1981).

$\sigma_y = 120 \text{ kgf/cm}^2$ (11.8 MPa), $\sigma_z = 0 \text{ kgf/cm}^2$ (0 MPa) とし, 4 日間一定応力を保った. その後, 荷重を同時に除荷した供試体から X, Y, Z の 3 つの軸方向に試験片を作製した. 試験片の形状は, $25 \times 25 \times 75 \text{ mm}$ の直方体である. このときの二軸载荷の方向と試験片の作製方法を図 11 に示す. これら試験片を用いた AE 試験によって得られた AE 発生率と载荷時間の関係および AE 累積数と载荷荷重の関係の一例を, 図 12 に示す. X 方向, Y 方向はともにその方向の先行応力付近で AE の急増が認められ, Z 方向については载荷初期から多くの AE が発生し, 急増点は認められない. AE 試験は各方法とも 10 個以上の試験片について実施され, X 方向, Y 方向全ての先行応力推定結果が図 13 にヒストグラムで示されている.

4.1.2 新小松安山岩の一軸载荷試験片を用いた方向別試験

吉川・茂木 (1983) は, 新小松安山岩に先行応力として一軸载荷を行った試験片を用いた. 試験片の形状は $250 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ の直方体で, 試験片は载荷軸方向を含め 5 つの異なる角度から切り出している. 図 14 には実験方法と測定結果が, 先行応力を与えた試験片に生じる理論的な応力分布と合わせて示されている. その結果によれば, 载荷軸方向側では理論値に比べ測定値がやや小さいものの, 測定値は理論値と同じ傾向を示している.

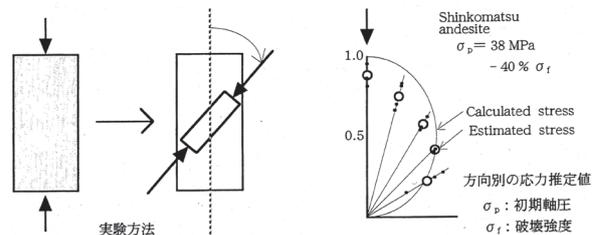


図 14 一軸圧縮応力場における各方向の応力測定例 (吉川・茂木, 1983).

4.1.3 新小松安山岩の一軸载荷試験片を用いた方向別試験

村山ほか (1985) は, 三次元応力場を表現するために, 一軸载荷装置を用いて異なる応力を逐次花崗岩試験片に与えた. 試験片の形状は 1

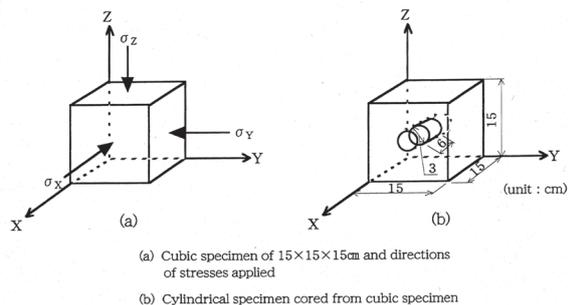


図 15 三軸先行応力と試験片の方向 (村山ほか, 1985).

辺 15cm の立方体で、与えた応力は独立する三面にそれぞれ $\sigma_x = 9.8\text{MPa}$, $\sigma_y = 14.7\text{MPa}$, $\sigma_z = 19.6\text{MPa}$ とし、各载荷ともひずみが飽和するまで繰り返し行った。その後、荷重を除荷した試験片から X, Y, Z の 3 つの方向に試験片を作製し

た。試験片の形状は、 $\phi 30 \times 60\text{mm}$ の円柱である。これらの载荷方向と試験片の作製方法を図 15 に示す。AE 試験によって得られた AE 累積数-载荷応力-ひずみの関係の一例を図 16 に示す。X 方向, Y 方向, Z 方向ともその方向の先行応力付近で AE の急増が認められる。

4.1.4 稲田花崗岩, 白浜砂岩の側圧を受けた試験片を用いた 1 方向試験

瀬戸ほか (1990) は、側圧を受けた試験片の応力状態を表現するために、一軸载荷装置を用いて 2 つの方向に異なる応力を図 17 に示すように与えた。岩石試料は、稲田花崗岩と白浜砂岩を用

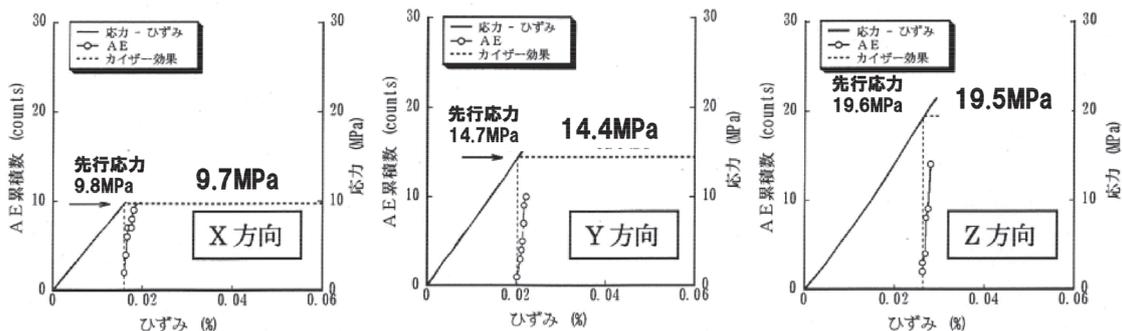


図 16 3 方向 (X, Y, Z) における試験結果 (村山ほか, 1985 に一部加筆).

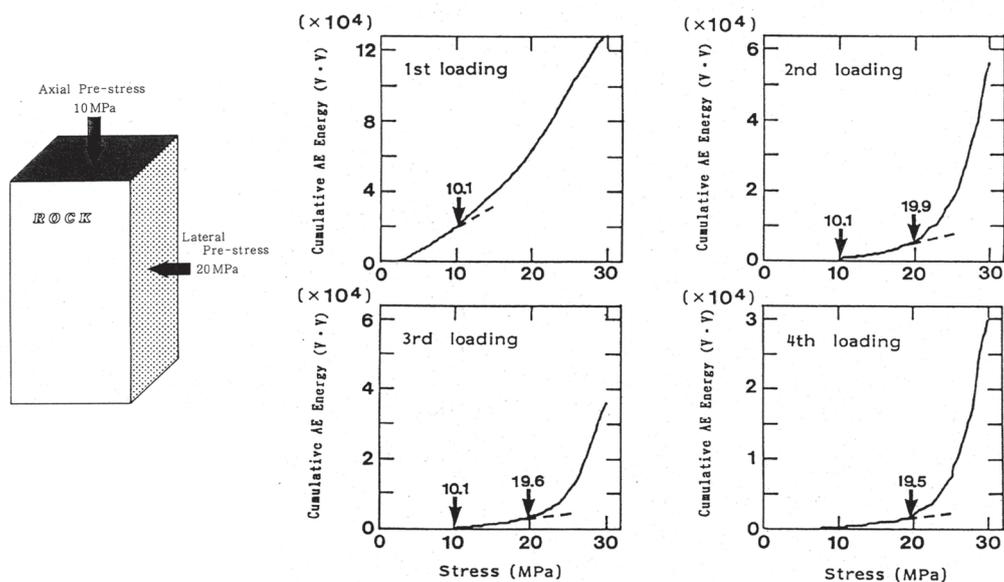


図 17 3 方向 (X, Y, Z) における試験結果 (瀬戸ほか, 1990 に一部加筆).

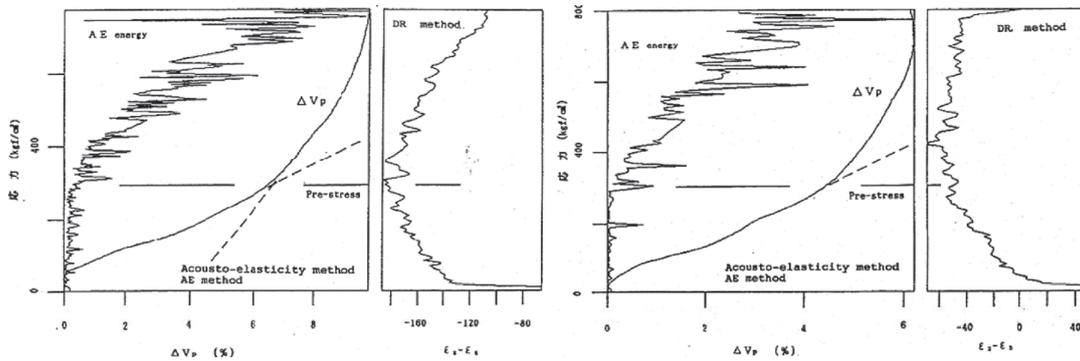


図 18 2 方向から先行応力を受けた花崗岩の繰り返し载荷時の AE エネルギー変化 (新・金川, 1993).

いている。試験片の形状は $30 \times 30 \times 60 \text{ mm}$ の直方体で、与えた応力は AE 試験を行う軸方向に 10 MPa 、側圧として軸と直交する一面に 20 MPa とし、各载荷ともひずみが飽和するまで $50 \sim 70$ 回繰り返し行った。除荷後 1 週間において AE 試験を行った。AE 試験によって得られた AE 累積数(エネルギー) - 载荷応力関係の一例を図 17 に示す。ここでは、先行応力 10 MPa の方向に 4 回の繰り返し载荷を行っている。同図では、1 回目から 3 回目の载荷時において、軸方向の先行応力に相当する 10.1 MPa 付近に AE の急増点が認められる。また、2 回目以降においては、 19.9 MPa 、 19.6 MPa 、 19.5 MPa 付近にも AE の急増点が認められる。

4.1.5 新小松安山岩の一軸载荷試験片を用いた方向別試験

新・金川 (1993) は、側圧を受けた試験片の応力状態を表現するために、一軸载荷装置を用いて 2 つの方向に異なる応力を与えた。岩石試料は、稲田花崗岩を用いている。試験片の形状は $30 \times 30 \times 60 \text{ mm}$ の直方体で、与えた応力は AE 試験を行う軸方向に 300 kgf/cm^2 、側圧として軸と直交する一面に 500 kgf/cm^2 とし、各载荷ともひずみが飽和するまで 70 回繰り返し行った。除荷した 2 日後に AE 試験を行った。AE 試験によって得られた AE 発生率 (エネルギー) - 载荷応力関

係の一例を図 18 に示す。ここでは、比較のため側圧としての先行応力を与えていない試験片での例も合わせて示している。この結果では、側圧の有無にかかわらず軸方向の先行応力が AE の急増点として認められる。なお、この実験においては、AE 法のほかに DRA と音弾性法も併用し、AE 法と同様の結果が得られている。

4.2 時間依存性

AE 法を地圧測定に利用するに当たって従来から議論になる項目の一つが、カイザー効果の「時間依存性」の問題である。これは、岩石コアを採取してから試験までに経過する時間が試験時のカイザー効果に影響を与え、AE 法による地圧測定の精度を低下させるという議論である。この問題に関して、長年多くの研究によって検討されてきているが、岩石コアがどの位の期間地圧情報を保持できるかについての見解には、数日から数年単位まで大きな開きがある (Kaiser, 1953; 瀬戸ほか, 1990; 瀬戸ほか, 1992; Seto et al., 2002; 金川ほか, 1975; 道廣ほか, 1990)。ここでは、地圧の記憶時間は数年以上持続することを支持する立場での実験結果について紹介する。

4.2.1 人為的な先行応力の記憶時間

ここでは、花崗岩に強度の約 15% 程度の先行

応力 (20.44 MPa) を与えた後、7年間実験室内 (温度 10 ~ 35°C) に放置しておいた岩石試験片からの先行応力の測定結果について述べる。図 19 は先行応力を与えてから7年後に一軸圧縮試験を行ったときの1秒当たりのリングダウンカウントレートと応力との関係を示している。この結果では、一軸圧縮応力下での繰り返し载荷試験時の1回目と2回目の結果を示している。1回目の载荷では、载荷直後からAEが発生しているが、図中に矢印で示した先行応力に近い応力レベル (20.1 MPa) でAEの発生率が増加している。また、2回目载荷時には低応力レベルでのAEの発生が減少し、先行応力に近い図中に矢印で示した 20.3 MPa の応力レベルに载荷1回目より明瞭にAE急増点が認められる。つまり、この花崗岩については、7年という長い経過時間にもかかわらず、人為的な先行応力のカイザー効果が明瞭に出現することが認められた。

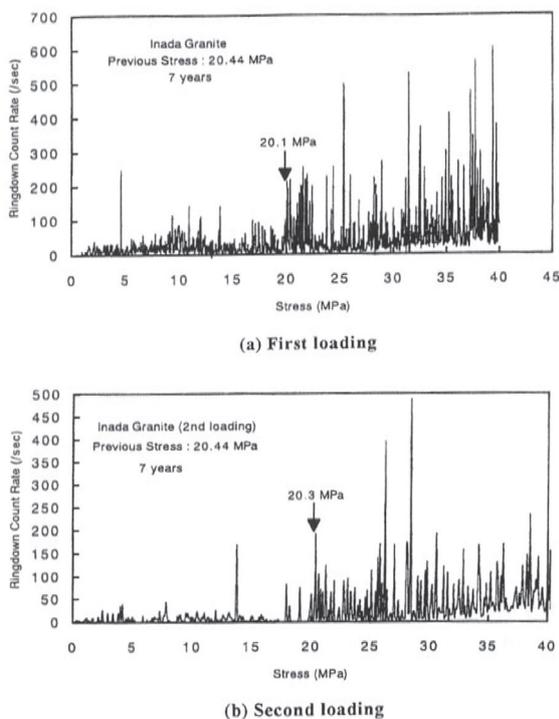


図 19 先行応力 20.44 MPa 载荷し、その試験片による7年後の繰り返し一軸圧縮試験時の AE 発生状況。(a) : 1回目载荷時、(b) : 2回目载荷時 (Seto, et al., 2002)。

4.2.2 地圧を受けた岩盤から採取した岩石のカイザー効果の時間依存性

AE 試験を行った岩石の初期地圧は不明であるが、1回目と2回目の試験間隔を2年程度おいてもカイザー効果が同じような応力値で再現された例を示す。図 20 は、ある地点で採取された安山岩のボーリングコアを用いて作製した AE 供試体 (試験片) において、コア採取2カ月後 (1回目) と同じ供試体でコア採取2年後 (2回目) に AE 試験を行ったときの AE 発生状況のデータである。1回目に比べ2回目ではAEの発生数は半減しているが、AEの急増点の応力レベルは1回目で 3.6 MPa、2回目では 4.0 MPa と近い値が得られている。

この実験結果からは、仮に1回目のAE急増点が初期地圧を表していると仮定すると、試料採取から2年後においてもまだ初期地圧が記憶されていることになる。さらに、一度初期地圧の値より大きな応力で载荷されても、初期地圧はカイザー効果として岩石に記憶されていることになる。

図 21 は、ある地点で採取された安山岩のボーリングコアを用いて作製した AE 供試体において、コア採取1年10カ月後に図左上にある载荷

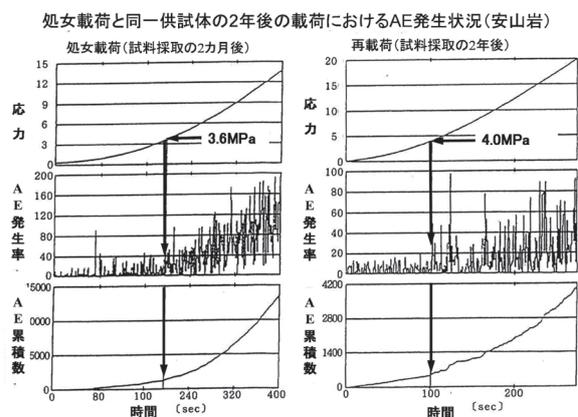


図 20 コア採取2カ月後の処女载荷 (1回目) と、同一供試体の2年後の载荷 (2回目) における AE 発生状況。AE の発生数は再载荷時には処女载荷時から半減しているが、AE の急増点の応力レベルは類似している。

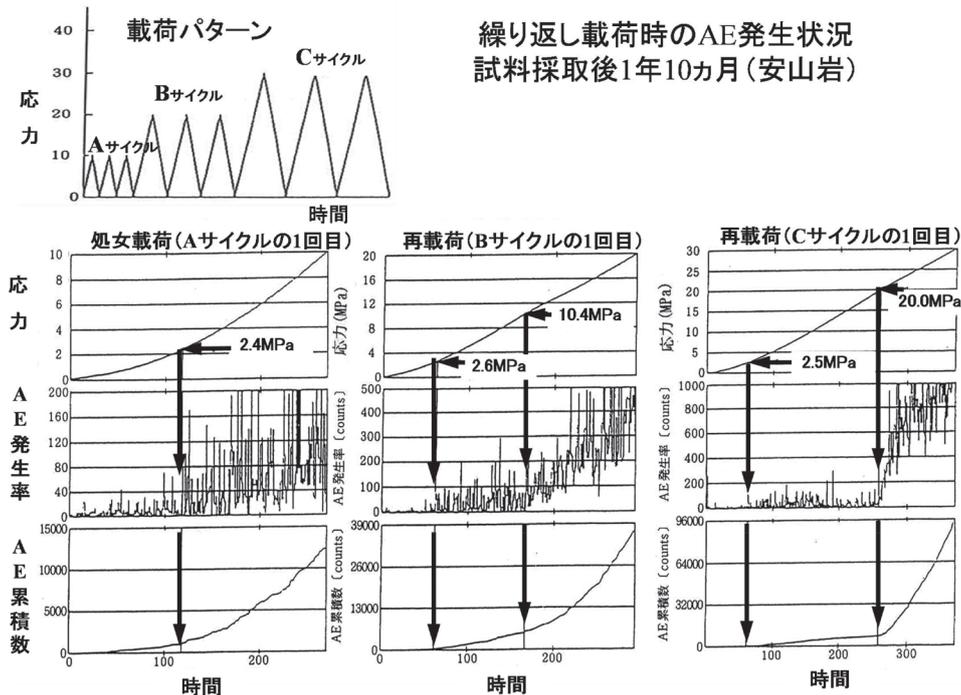


図 21 コア採取 1 年 10 カ月後の処女荷荷 (A サイクル) と、その直後の応力レベルを増加した繰り返し荷荷 (B サイクル, C サイクル) での AE 発生状況. 繰り返し荷荷を受けても初期地圧と思われる応力レベルでの AE 急増点は消滅しない.

パターンで繰り返し荷荷を行った時の AE 発生状況を示したものである. 図に示した AE 発生状況は、各 3 サイクルの内の 1 回目のデータが示されている. 処女荷荷 (A サイクル) での AE 急増点の応力レベルが 2.4 MPa に対して、その直後に行った再荷荷 (B サイクル), 再荷荷 (C サイクル) でもそれに近い 2.6 MPa と 2.5 MPa で、AE の急増点を読み取られている.

この実験結果からは、仮に A サイクルでの AE 急増点が初期地圧を表しているとする、図 20 で示した実験例と同様に、初期地圧以上の応力で何回も荷荷されても、先行応力としての初期地圧はカイザー効果として岩石に記憶されていることになる. また、人為的な先行応力である A サイクルでの 10 MPa は B サイクルの 1 回目で、B サイクルでの先行応力である 20 MPa は C サイクルの 1 回目で明瞭なカイザー効果として読み取ることができる.

4.2.3 人為的な先行応力の記憶時間

AE 法によって推定される応力値が“いつ”の時点で作用していた応力であるのかを明らかにすることは、本方法を利用するうえで重要であり、過去においてもいくつかの検討結果が報告されている.

金川ほか (1975) は、原位置での応力解放法による地圧測定結果と、AE 法による測定結果を比較した結果、全体的に AE 法による結果の方が大きい傾向があると報告している. この理由として、AE 法では長時間作用した最大応力履歴を検出するのに対し、応力解放法では測定した時点の応力値が計測されるためとしている. この結論は、AE 法の基礎となっているカイザー効果に基づく理解しやすい結論である. しかし、この議論が時間依存性の議論と併せて、AE 法に対する理解を難解にしている. すなわち、もし AE 法によって最大履歴応力を測定できるとするのであれば、

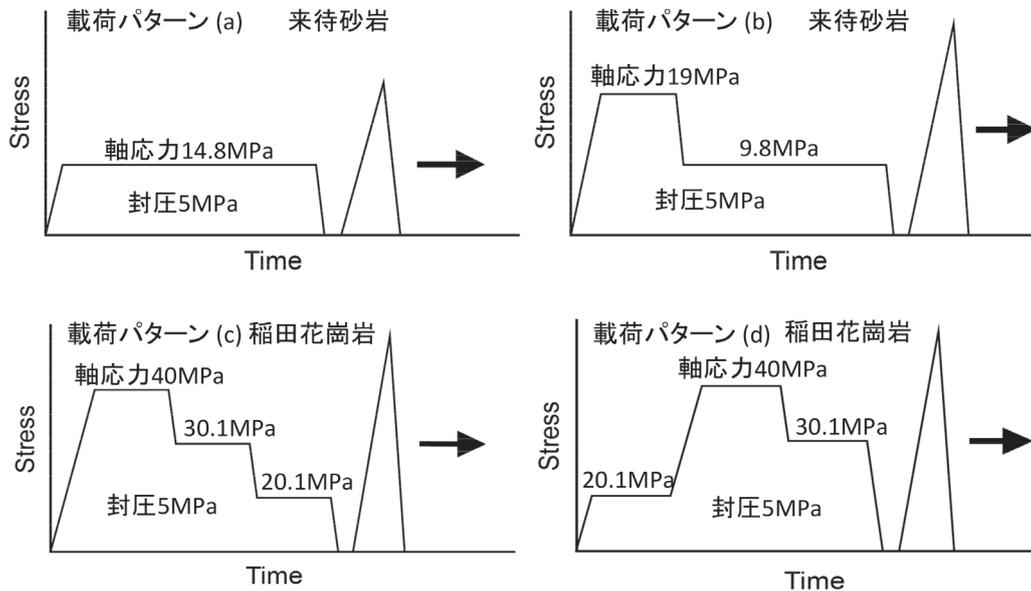


図 22 先行応力载荷パターン (a) ~ (d).

その履歴応力が時間依存性の影響で消失した後、再び加えられた最大応力が記憶され、それが再現されるという議論に入り込むこととなる。その結果として、AE法によって測定される応力が“いつ”のものなのかという疑問に行き着くことになる。

一方、道廣ほか(1990)は、推定される応力は、試験時の载荷1回目の軸ひずみ量が、先行応力が解放された時に弾性的に解放された軸ひずみ量に達した時の応力に等しいとしている。これは、AE法によって測定される応力に対する一つの示唆であると考えられる。すなわち、AE法によって測定される応力は、解放された弾性ひずみエネルギーに相当するエネルギーを再载荷によって岩石コアに与えたときに、それに相当する応力ではないのかということである。このことは、AE法によって測定される応力は、コア採取時の応力解放が弾性的になされる場合には、コア採取時の応力に相当するのではないかということを示していると推察できる。

そこで、室内実験において地下での状況を想定した条件(封圧下)での試験を実施し、上記の

仮説に対して実験的に検討を行った例を以下に示す。地下に空洞を掘削した場合、空洞周辺には応力集中が起こり、地圧分布が変化する。いわゆる初期応力状態から2次応力状態に変化する。ここでは、この地圧変化パターンをいくつか想定し、実験室内において人為的に载荷パターンを変えて先行応力を与えた後、繰り返し载荷試験を行い、AE法により先行応力を推定し、推定される応力値が人為的に载荷したいつの応力に相当するのかについて調べた結果を示した。先行応力の载荷パターンとしては、図22に示す4種類の载荷パターンがある。

- 1) 载荷パターン (a) : 原位置での初期応力の代わりに、任意の先行応力を約3時間クリープ的に载荷した後に、その応力以上の応力レベルで载荷試験を行うパターン。この载荷パターンは採掘区域における初期応力を想定しており、他の全载荷パターンの基本型である。
- 2) 载荷パターン (b) : 任意の応力を約1時間クリープ的に载荷した後に、その応力の約半分

の応力を約 3 時間クリープ的に荷重し、その後、最初に与えた応力以上の応力レベルで繰り返し荷重を行うパターン。これは、空洞掘削後に空洞の側面付近が緩み域となり、初期応力に比べ、応力が減少している状態を想定したものである。

- 3) 荷重パターン (c) : 3 段階の応力レベルにおいて、それぞれ 1 時間クリープ的に荷重した後、その最大先行応力以上の応力レベルで繰り返し荷重を行うパターン。3 段階の応力をそれぞれ σ_a , σ_b , σ_c ($\sigma_a > \sigma_b > \sigma_c$) とすると、 $\sigma_a \rightarrow \sigma_b \rightarrow \sigma_c$ の順で荷重するパターン。原位置での地圧が空洞掘削などにより、段階的に減少した状態を想定したものである。
- 4) 荷重パターン (d) : パターン (c) と同様であり、応力の荷重順序を $\sigma_c \rightarrow \sigma_a \rightarrow \sigma_b$ ($\sigma_a > \sigma_b > \sigma_c$) としたパターン。空洞掘削などにより応力集中が起こり、その後応力が解放され、初期応力よりも最終応力が大きい状態を想定したものである。

図 23 に、荷重パターン (a) で先行応力を与えた来待砂岩の DRA 法と AE 法による試験結果を示す。5 MPa の封圧下で先行軸応力 14.8 MPa を与えた後、一軸応力下において 22 MPa まで 5 回の繰り返し荷重試験を行った。DRA 法による推定応力値は 15.1 MPa (推定誤差 2%)、AE 法による推定応力値は 15.8 MPa (推定誤差 6.1%) であり、高い精度で軸方向から与えた先行応力が推定された。

同図に、荷重パターン (b) で先行応力を与え

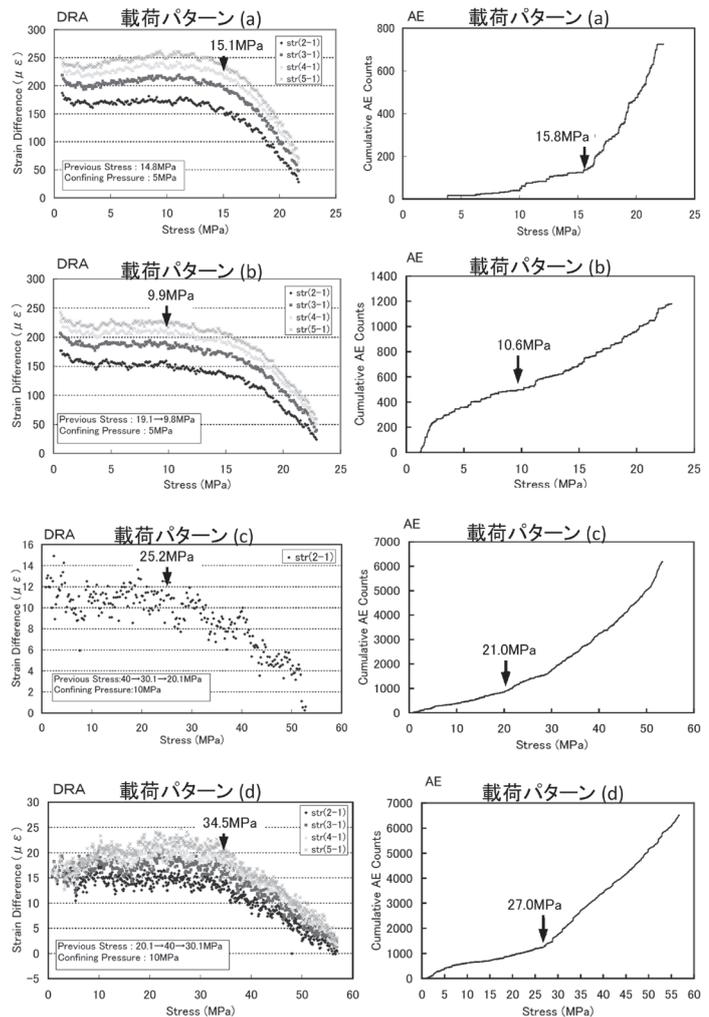


図 23 先行応力荷重パターン (a) ~ (d) での試験片を用いた DRA 法と AE 法の同時試験結果。

た来待砂岩の試験結果を示す。5 MPa の封圧下で先行軸応力 19.1 MPa を 1 時間クリープ的に荷重した後、9.8 MPa まで応力を低下させ、その後 3 時間クリープ的に 9.8 MPa の応力を継続して与えた。DRA 法による推定応力値は 9.9 MPa (推定誤差 1%)、AE 法による推定応力値は 10.6 MPa (推定誤差 8.2%) であり、推定応力値は最大履歴応力 (19 MPa) ではなく直近の先行軸応力 (9.8 MPa) に近い応力値が推定された。

同図に、荷重パターン (c) で先行応力を与えた稲田花崗岩の試験結果を示す。10 MPa の封圧

下で先行軸応力を 40, 30.1, 20.1MPa と段階的に低下させ、各応力レベルでそれぞれ1時間ずつクリープ的に载荷した。DRA 法による試験では、25.2MPa (推定誤差 26%) と推定された。一方、AE 法による推定結果は 21MPa (推定誤差 4.5%) となり、直近の先行軸応力に近い値が推定された。

同図に载荷パターン (d) で先行応力を与えた稲田花崗岩の試験結果を示す。10MPa の封圧下で先行軸応力を 20.1, 40, 30.1MPa と段階的に減少させ、各応力レベルでそれぞれ1時間ずつクリープ的に载荷した。DRA 法による推定応力値は 34.5MPa (推定誤差 15%)、AE 法による推定応力値は 27MPa (推定誤差 10%) と推定された。

これらの結果から、封圧下において先行応力を与えた場合、DRA 法と AE 法により推定される応力値は、最大履歴応力ではなく、直近の先行応力に近い値が推定される傾向にある。

以上のように、本実験によって、AE 法によって測定される応力は、先行応力が解放されたときの応力であり、最大履歴応力ではないことが推察できる。

4.3 岩石の乾湿・熱履歴の影響

岩石のカイザー効果は、岩石のミクロな組織構造に深く関係しているものと考えられる。このため組織構造を乱すような要因、すなわち乾湿や熱履歴がカイザー効果に対してどのような影響を持つのかということも、解明すべき大きな課題である。そのような観点からの基礎的な実験研究や、地圧測定への適用例などが若干報告されている。ただし、岩石の組織構造が多岐にわたること、例えば岩石の種類を大別すると火成岩、堆積岩、変成岩があり、これらはさらに多くの種類に分類され、その組織構造は全く異なる。乾湿・熱履歴に関する既往研究例はこれら岩種のごく一部についての実

験結果であるため、現段階で乾湿・熱履歴の影響についてはまだ十分には解明されたとはいえないが、以下に既往研究結果を参考として示すことにする。

4.3.1 乾湿の影響

金川ほか (1975) は、原位置から採取した泥岩で作製した供試体を用い、一つは原位置での泥岩の湿潤状態を保ったものと、もう一つは室内で数

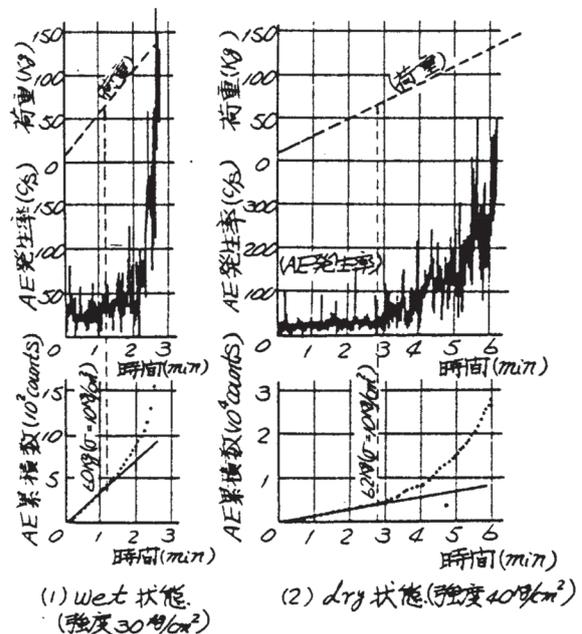
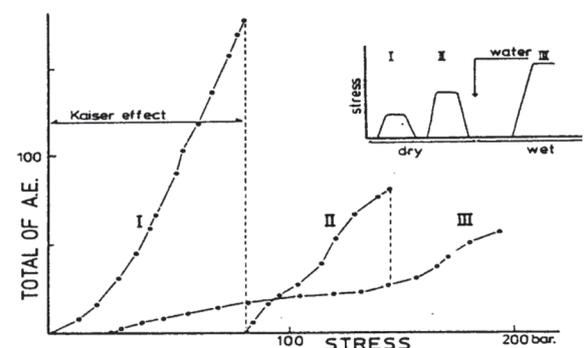
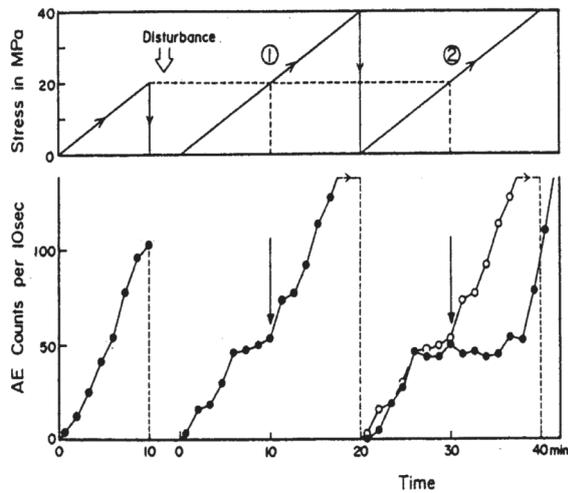


図 24 原位置の湿潤状態を保った wet 状態と室内乾燥させた dry 状態でのカイザー試験 (金川ほか, 1975)。



Effect of water content on emission numbers. Experiment-I, II are in a dry condition and experiment-III are done in a water bath.

図 25 乾燥状態でのカイザー効果 (I→II) と、湿潤状態でのカイザー効果 (II→III) (Kurita and Fujii, 1979)。



Acoustic emission activity for the previous loading, the first and second reloading, and stress as function of time. Open circles; acoustic emission count rate for the first reloading. Other symbols same as in Fig.

図 26 乾湿の影響を受けた岩石のカイザー効果 (Yoshikawa and Mogi, 1981).

日間放置し乾燥させたものとの AE 法による初期地圧測定を行ったところ、両者ともほぼ同じ応力の推定値が得られたことを報告している (図 24)。

Kurita and Fujii (1979) は、花崗岩を用いて先行応力除荷後の供試体を 1 日水浸した後に、カイザー効果の検証を行っている (図 25)。この結果、乾燥状態のままのカイザー効果の明瞭さに比較するとやや不明瞭となっているが、湿潤状態においてもカイザー効果は認められる。

Yoshikawa and Mogi (1981) は、新小松安山岩を用いて乾燥・湿潤・加熱の三状態の組み合わせを設定してカイザー効果の検証を行った (図 26)。これらの結果では、供試体の状態の変化にかかわらずカイザー効果が確認されたことが報告されている。

乾湿の影響についての上の既往報告 3 件は、それぞれ原位置の含水条件を保った試験と乾燥させた試験の比較、室内での先行载荷後に湿潤させたものとさせなかったものの比較など、湿潤の与え方が異なるが、岩石の乾湿の繰り返し状態におか

れてもカイザー効果が認められるようである。

4.3.2 熱履歴の影響

金川ほか (1993) は熱履歴の影響の基礎実験として、真壁花崗岩、真鶴安山岩、白河溶結凝灰岩を用いた実験検討を行った。先行応力を岩種ごとに 30 MPa, 10 MPa, 5 MPa のレベルで 60 回程度の繰り返し载荷を与えた。その終了後すぐに電気炉を用いて 250°C および 500°C で加熱した。加熱は、20 ~ 40°C/h で行い所定の温度で 24 時間保持した後、同じ速度で降温した。カイザー効果を検出する試験は、先行応力载荷後 10 日目に行った。

花崗岩の結果は、加熱しない場合には AE 増加点が明瞭に観察されるが、加熱した場合には载荷の初期から多くの AE が発生するようになり、先行応力レベルで AE 発生が増加がわずかに認められる程度であった (図 27 (a))。安山岩と溶結凝灰岩の場合には、加熱の有無にかかわらず先行応力レベルに AE 増加点が観察された (図 27 (b) (c))。

新ほか (2000) は、地熱地帯の地下 1000m から採取した定方位コアを用いて AE 法による地圧測定を試みた。該当深度にてコアは 230°C の温度下にあった。また、カイザー効果検出試験はコアの採取後およそ 6 年後に行われているが、コアは室内に保管してあった。AE 法の結果の妥当性の検証は、試料採取のごく近傍で観察されたポテトチップス状のコアディスキングによる方向性の一致、および、コアディスキング発生条件との比較によって行われている。AE の読み取りを客観的に行うために、2 直線の回帰分析を用いる方法 (2 直線回帰スキャン法) を用いた。その結果を図 28 に示す。AE 法とコアディスキングとの比較の結果、水平面内の最大地圧方向は両者がよく一致した (図 29)。また AE 法から得られた地圧は、当

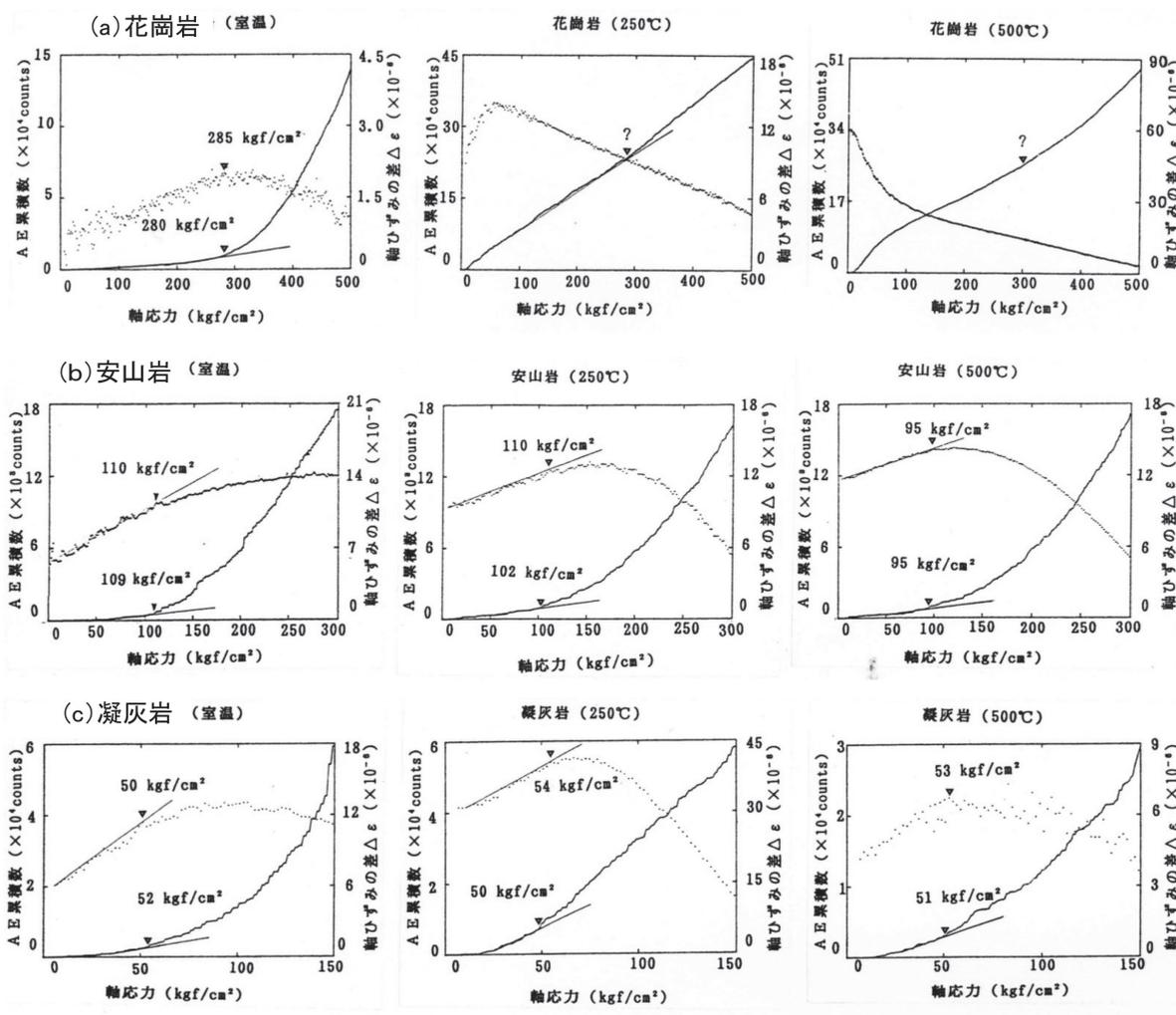


図 27 先行応力載荷後、加熱履歴を与えてから行ったカイザー効果の確認実験。(a):花崗岩, (b):安山岩, (c):凝灰岩(金川ほか, 1993).

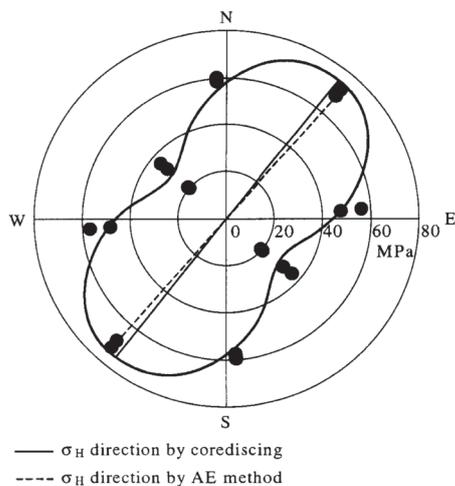


図 28 地熱地帯から採取した花崗岩試料で行ったカイザー効果確認実験 (AE 発生率とその増加点検出線/新ほか, 2000).

地点の引張強度を用いたコアディスキング発生基準 19 (菅原ほか, 1978) とも整合した. この結果から, 230°C 程度の熱履歴があっても AE 法により地圧を測定することができたと報告している.

熱履歴の影響についての上記 2 つの報告でも, 乾湿条件の場合と同様に熱の与え方が異なる. 前者の場合, 室内で先行応力載荷後に加熱した実験では, 花崗岩のみに先行応力を検出しにくくなる傾向が見られているが, 他岩種では熱履歴の影響は見られなかった. しかし, 後者の場合, 原位置で熱と先行応力を同時に受けていた花崗岩では地圧の検出が可能であったことが特筆される.

表 1 各種測定の実施内容.

項目	埋設法 (BDM)	円錐孔底ひずみ法 (CCBO)	水圧破砕法 (HFM)	AE 法
ボーリング孔径 試験片寸法	ひずみ計埋設孔 $\phi 46\text{mm}$, オーバーコリング $\phi 222\text{mm}$	ひずみ計設置孔 $\phi 76\text{mm}$, オーバーコリング $\phi 76\text{mm}$	$\phi 66\text{mm}$, 破砕区間長 300mm	幅 25×奥行き 25×高さ 75mm の角柱試験片 (埋設 法コアから採取)
試験孔	水平 2 方向, 鉛直下向	水平 1 方向	水平 2 方向, 鉛直下向	1 つのコアから水平 4 方向, 鉛直下向
試験数	各孔 3 点, 計 9 点	1 孔 5 点	各孔 3 点, 計 9 点	各方向 3 点, 計 15 点
初期応力算出	三次元および 二次元応力状態	三次元および 二次元応力状態	三次元および 二次元応力状態	水平面内と 鉛直応力

5. ケーススタディ

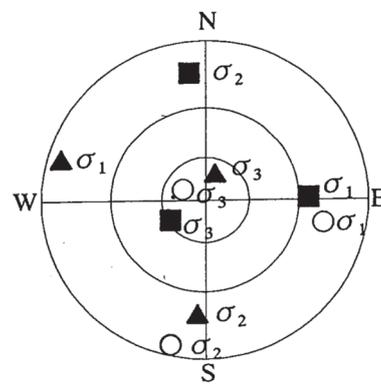
5.1 他の地圧測定法との比較

被り深さ 550m での調査横坑内で実施された
原位置応力測定法である埋設法 (BDM), 円錐
孔底ひずみ法 (CCBO), 水圧破砕法 (HFM) と
AE 法による測定結果を比較する. 測定地点の岩
種は一軸圧縮強度で 150 ~ 200MPa の堅硬な花
崗岩である. 各種測定の実施内容については表 1
に示す. ただし, AE 法では水平二次元での応力
測定のため, 他の測定方法との比較は水平面内の
応力状態と鉛直応力値の比較を行う. なお, AE
法は, 採取から半年経過した埋設法のオーバーコ
ア ($\phi 198\text{mm}$) より試験片を切り出して測定を
行った.

表 2 原位置応力測定法による応力状態
(Ishiguro et al., 1997).

Table 3. Initial rock stresses observed at Site II.

Stress	BDM	CBT	HFM
σ_1 (MPa)	21.9	28.1	26.9
azimuth	N102° E	N89° E	N286° E
dip	17°	25°	5°
σ_2 (MPa)	11.2	11.4	14.2
azimuth	N193° E	N353° E	N184° E
dip	3°	13°	18°
σ_3 (MPa)	6.1	7.5	8.5
azimuth	N293° E	N239° E	N21° E
dip	73°	62°	71°
σ_{AVE} (MPa)	13.1	15.7	16.5
σ_v (MPa)	7.4	11.3	9.2



- : Borehole deformation method (BDM)
- : Conical - ended borehole technique (CCBO)
- ▲ : Hydraulic fracturing method (HFM)

Figure 6. Orientation of principal stress at Site II.
(Stereographic lower hemisphere projection)

図 29 原位置法による測定結果
(Ishiguro et al., 1997).

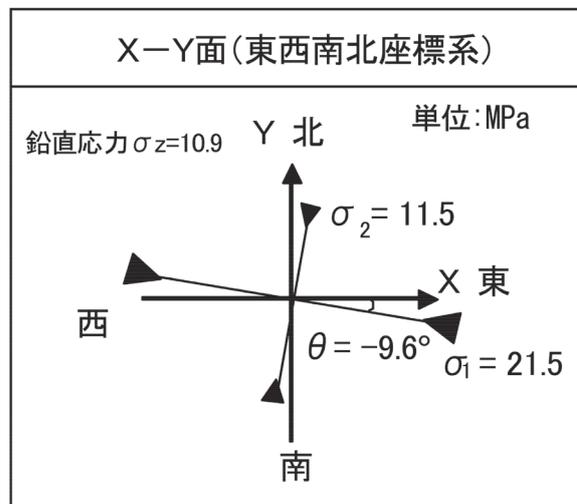


図 30 AE 法による測定結果.

埋設法 (BDM), 孔底ひずみ法 (CBT) および水圧破碎法 (HFM) で得られた三次元応力状態を表 2, 図 29 に示す (Ishiguro, Y., 1997). これらの結果から, 最大主応力 σ_1 の方向は東西方向で応力値は 20MPa ~ 25MPa 程度と大きく, 鉛直応力は 10MPa 以下と小さくなっている. また, 最大主応力の値に多少のばらつきがみられるが, 方向についてはよく一致している. また, A 方により求められた水平面内の応力状態を図 30 に示す.

図 29 と図 30 の応力の表記法は異なるが, 両者とも最大主応力 σ_1 はほぼ東西方向に 22 ~ 28 MPa, 鉛直応力は 10MPa 程度であり, AE 法と他の測定法による応力状態はよく一致している.

5.2 深度別の地圧測定結果

Yokoyama et al. (2003) は, 既に公表されている測定データに新たな測定データを加え, 地殻応力の深度分布について整理した. 測定された期間は, 1971 年から 2001 の 31 年間, 採用したデータ数は 123 点である. 測定方法は応力解放法 (埋設法, 孔底ひずみ法), 水圧破碎法, コア法 (AE 法, DRA 法) であり, 測定深度は最深で 1600m である.

全データの鉛直応力と深度との関係を図 31 (a) に示す. 鉛直応力は深度との相関がよく, 概ね直線関係にある. AE 法で得られた測定値も他の手法と同じ傾向を示している. 今回採用されたデータの岩盤密度 ρ は 17 ~ 28kN/m³ の範囲にあるため, 同図に $\rho = 17\text{kN/m}^3$ と $\rho = 28\text{kN/m}^3$ での被り圧-深度関係の直線を示されており, 測定値は両直線で囲まれた範囲内に概ねプロットされる.

全データの側圧比 (水平最大応力/鉛直応力) と深度との関係を図 31 (b) に示す. 側圧比と深度との関係は, 側圧比の最大値と最小値を深度方

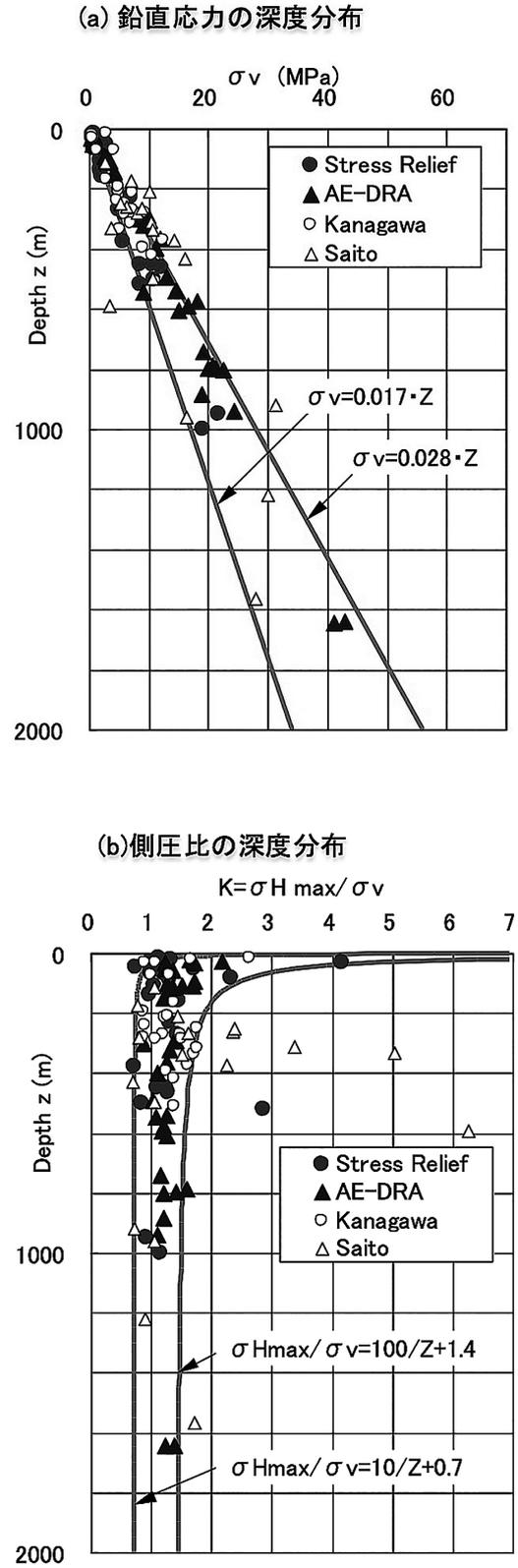


図 31 深度別地圧測定結果. (a): 鉛直応力の深度分布, (b): 側圧比の深度分布.

向に包絡する双曲線で示されている。ここでも AE 法で得られた測定値は他の手法と同じ傾向を示している。

6. まとめ

AE のカイザー効果を利用した初期地圧測定法は我が国で開発され、これまでも多くの地点で利用されてきた。特に、地下構造物建設時の土木分野においての実績が多い。AE 法の大きな特徴は、ボーリングコアを利用したいわゆるコア法であることからコアさえ採取できれば測定深度を選ばないことであることと、室内試験であることから比較的少ない労力で測定できることである。

第 2 章では岩石のカイザー効果の基本的な概念を説明し、実験例をふまえてカイザー効果の発生原因について言及した。第 3 章では一般的な「試験方法」の概要を示した。第 4 章では AE のカイザー効果に関するいくつかの課題を示し、これらの研究成果について整理した。第 5 章ではケーススタディとして、同一箇所での他の原位置測定法との比較と 2001 年までに測定された多くの地圧測定データと共に AE 法による深度別の測定結果を示した。

謝辞

ここに示した内容は、出版には至らなかった「AE 法による地圧測定法に関する解説案 (2005)」を基に、その主要な部分を抜粋して整理した。上記解説案は、下記委員会でもとめられた。

- ・ 岩の力学連合会・国際技術委員会、岩盤工学への物理探査手法の適用ワーキンググループ、AE 法による地下応力測定法に関するサブワーキンググループ

- ・ ワーキンググループメンバー (所属は当時)
委員長：瀬戸政宏 ((独) 産業技術総合研究所)
委員兼幹事：横山幸也 (応用地質 (株))
委員：金川 忠 (日特建設 (株))
委員：新 孝一 ((財) 電力中央研究所)
委員：歌川 学 ((独) 産業技術総合研究所)
委員：畑 浩二 ((株) 大林組)
委員：田仲正弘 (日特建設 (株))

- ・ 活動期間：2000 年 8 月～2005 年 3 月

AE 法による地下応力測定法に関するサブワーキンググループでは、広くこの手法が利用されることを願い、この解説版で AE 法の基礎的概念や実際の手法、あるいは課題や実測例をできるだけ多く紹介した。当サブワーキンググループのメンバーは全員が実務に携わった研究者や技術者で構成されていたため、詳細な測定方法や実測例をまとめる時点ではより具体的な議論を行うことができた。一方、問題点あるいは課題をまとめる時点においては、各人の経験や考え方の相違のため多くの時間を要した。

ここに記して、瀬戸政宏委員長はじめ、全ての委員の方に深く感謝します。

文献

- Ishiguro, Y., Nishimura, H., Nishino, K. and Sugawara, K. (1997): Rock stress measurement for design of underground powerhouse and considerations. *Rock stress: Proceedings of an International Symposium on Rock Stress*, 491–498.
- Kaiser, J. (1953): Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*,

- 24(1/2), 43–45.
- 金川 忠・林 正夫・日比野 敏 (1975) : 初期地圧測定に関する二, 三の考察. 第9回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 46–49.
- 金川 忠・林 正夫・仲佐博祐 (1977) : 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, **258**, 63–75.
- 金川 忠・横山幸也・小倉 均 (1993) : 熟履歴を受けた岩石の AE 法と DR 法によるカイザー効果の実験的研究. 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 541–545.
- 金川 忠 (1999) : 地下空洞建設における Acoustic Emission の利用技術に関する研究, 京都大学学位申請論文, 39.
- 金川 忠・北原義浩・林 正夫 (1981) : 岩石のカイザー効果を利用した地圧測定法 — 一軸試験による測定法の詳細と適用例 —. 電力中央研究所報告研究報告, 381004.
- 金川 忠・田仲正弘・中山芳樹・森 孝之 (2002) : AE 地圧測定法の適用性の拡大. 第11回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, A15.
- Kurita, K. and Fujii, N. (1979): Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission. *Geophysical Research Letters*, **6**(1), 9–12.
- 道廣一利・畑 浩二・藤原紀夫・吉岡尚也 (1990) : AE による岩盤破壊予知のための基礎的考察, 材料, **39** (442), 1019–1025.
- 村山朔郎・道廣一利・斎藤二郎・吉岡尚也 (1985) : 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, **364**(III–4), 107–112.
- 瀬戸政宏・歌川 学・木山 保・勝山邦久 (1990) : 繰り返し載荷時の AE 特性による地圧の推定. 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 321–326.
- 瀬戸政宏・歌川 学・勝山邦久 (1992) : 岩石の AE カイザー効果と3次元 AE 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, **108** (10), 719–724.
- Seto, M., Utagawa, M. and Katsuyama, K. (2002): Some fundamental studies on the AE method and its application to in-situ stress measurements in Japan. *Proc. the 5th International Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering*, 67–71.
- 新 孝一・金川 忠 (1993) : 岩石試料の弾性波速度変化を利用した初期地圧測定法開発のための基礎検討. 電力中央研究所報告研究報告, U92046.
- 新 孝一・及川寧己・伊藤久敏 (2000) : コアディスクキングなどとの比較による DSCA 法および AE 法の検討. 資源と素材, **116**, 965–971.
- 菅原勝彦・亀岡美友・斎藤敏明・岡 行俊・平松良雄 (1978) : コアディスクキング現象に関する研究, 日本鉱業会誌, **94** (1089), 797–803.
- Yokoyama, T., Ogawa, K., Kanagawa, T., Tanaka, M. and Ishida, T. (2003): Regional in-situ stress states in Japan based on measurements. *Rock Stress '03 Kumamoto: Proc. the 3rd International Symposium on Rock Stress*, 335–341.
- Yoshikawa, S. and Mogi, K. (1981): A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: Laboratory study in the case of uniaxial compression. *Tectonophysics*, **74**(3–4), 323–339.
- 吉川澄夫・茂木清夫 (1983) : 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 異方性応力場の推定の可能性. 地震学会講演予稿集 1983, **2**, 105.