

岩の力学連合会

「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 研究成果」

AE 法による地圧測定法

平成 18 年 6 月

岩の力学連合会 国際技術委員会
「岩盤工学への物理探査的手法の適用」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
委員長 瀬戸 政宏
(独立行政法人 産業技術総合研究所)

ここに取りまとめた「AE法による地下応力測定法に関するワーキンググループ研究成果」——AE法による地圧測定法——は、岩の力学連合会 国際技術委員会の「岩盤工学への物理探査的手法の適用」ワーキンググループ（主査：佐々宏一京都大学名誉教授）内に組織されている AE 法による地下応力測定法に関するワーキンググループ（委員長：瀬戸政宏 独立行政法人 産業技術総合研究所）による長年の活動の成果である。

そもそも「岩盤工学への物理探査的手法の適用」ワーキンググループは、ISRMのCommissionの一つである「Application of Geophysics to Rock Engineering (Commission President: K. Sasa)」の活動を日本国内で展開・支援する目的で設立されたものである。その国内活動の一環として、AE法による近応力測定法に関するワーキンググループを平成12年に立ち上げ、以後5年にわたる活動を続けて来た。その集大成として、

1. 「Suggested method for In-situ Stress Estimation from a Rock Core Using the Acoustic Emission Technique」の原案（英文）
2. 「AE法による地圧測定法に関する解説案」

が取りまとめられた。

1. の ISRM 指針原案については、その後、上記 ISRM Commission の審議を経て、2004 年の ISRM Council meeting で承認されている。まだ、公刊はされていないが、いずれ Int. J. of Rock Mechanic and Mining Science 誌上で公表されることになろう。2. については、下記の委員の方々の研究成果の総括であり、大変貴重な資料である。有効に活用されることを期待するとともに、引用時においては必ず出典を明記していただくよう切にお願いする次第である。

平成 18 年 6 月

国際技術委員長 亀村勝美

AE法による地下応力測定法に関するワーキンググループ

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））

ISRM Suggested Method for in-situ Stress Estimation from a Rock Core using the Acoustic Emission Technique

M. Seto ^{**1}

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-3-1 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8921

1. INTRODUCTION

Knowledge of the in-situ stress is very important to many engineering disciplines that conduct work within the Earth's crust. In mining and civil engineering definition of the in-situ stress is required in order to apply rock engineering principles to produce safe and serviceable excavations. Of the many methods of stress measurement, the overcoring technique and hydraulic fracturing technique has withstood the rigors of scientific and commercial selection to become the premier method for determination of the stress tensor.

The in-situ stress field is particularly critical for a large and growing number of mine and excavations where high stress fields are becoming experienced. The reliance on the technique mentioned above and their unfortunate requirement for an underground excavation has restricted measurement to underground development area. However, mine feasibility planning and commercial investment decisions for mining in high stress conditions now demands knowledge of the stress tensor at depth in underground regions.

A new technique for estimating the rock stress based on the Kaiser effect of Acoustic Emission (AE) has been developed. The AE technique of stress estimation uses the Kaiser effect to determine the normal stress experienced by individual rock core sampled.

Basically, the method involves a sequence of six steps:

- 1) An oriented sample volume, usually common exploration hole core (term here, main core) is isolated from the rock mass.
- 2) The main core is transported to a laboratory, then re-sampled by a number of smaller sub-cores that are taken at certain orientations relative to the axis of the main core.
- 3) The oriented sub-cores are precision ground for rightness and flatness then fitted with AE sensors.

- 4) Each sub-core is tested under monotonically increasing uniaxial load (stress). The AE sensors measure the "AE count" attributed to the deformation and propagation of pre-existing cracks and the initiation of new cracks as the stress is increased.
- 5) The applied stress versus the count rate is approximately bi-linear with the change of relationship indicated by a demonstrable increase in noise count rate at a certain stress level. This transition point is taken to indicate the largest contemporary stress experienced by the sub-core in the direction of the sub-core-axis.
- 6) The stress estimations for the oriented sub-cores are used in conjunction with their orientations relative to the original oriented core to determine the largest contemporary stressfield experienced by the main core.

2. SCOPE

- (a) The intention of this method is to measure the acoustic emissions generated in a cored rock specimen tested under uniaxial compression. One of the application of the AE technique is to determine *in situ* rock stress in a rock core sample based on the Kaiser effect.
- (b) The test uses rock material in the form of core specimens. The core axis should be parallel to the stress orientation as determined in the test.

3. TERMINOLOGY

- (a) **Acoustic emissions (AE):** transient elastic waves generated by the rapid release of energy from localized sources within a material. The sources of these emissions in rocks are closely associated with the initiation and extension of cracks under stress.
- (b) **Kaiser effect:** the phenomenon in which AE activity is generally quiet until the stress level of the previous maximum level of applied stress is exceeded.
- (c) **Sensor:** a detection device that transforms the particle motion produced by an elastic wave into an

electrical signal.

(d) **Couplant:** a material used at the rock specimen-to-sensor interface to improve the transfer of acoustic energy across the interface.

(e) **Event:** the number of AE excitations detected by a single sensor.

(f) **Threshold:** the voltage level over which pulses are counted in order to detect AE excitations.

(g) **Amplitude:** the highest peak voltage attained by an AE waveform.

(h) **Energy:** usually the measured area under the rectified signal envelope, but in some cases the value of the amplitude squared.

(i) **Count:** the number of threshold-crossing pulses detected by the AE signal processor.

4. APPARATUS

4.1 Loading system

(a) The minimum loading system consists of a testing machine, load cell, and controller. To obtain the necessary data for stress determination, the testing system must also include a displacement measurement device and two strain measurement devices. (Fig.1)

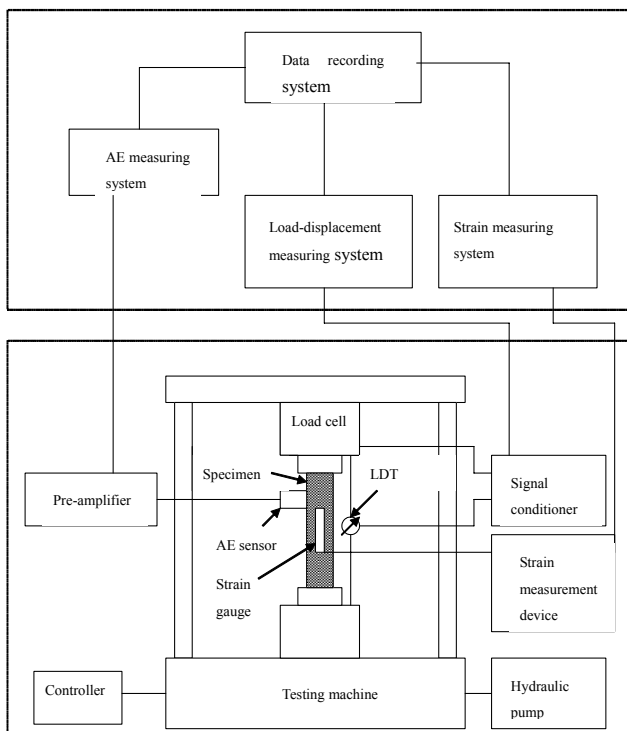


Fig.1 Testing System

(b) The testing machine must be of a type having sufficient capacity and stroke for the maximum load required, and it must be capable of applying the load at a rate conforming to the requirements in Section 4(p). It should be verified at suitable time intervals and should comply with accepted national requirements, such as those prescribed in one of the following: ASTM Methods E4: Verification of Testing Machines; British Standard 1610, Grade A; or Deutsche Normen DIN 51 220, DIN 51 223, Klasse 1, and DIN 51 300.

(c) Steel platens in the form of discs having a Rockwell hardness of not less than HRC58 should be placed at the specimen's ends. The diameter of the platens should be between D and $D+2$ mm, where D is the diameter of the specimen. The thickness of the platens should be at least 15 mm or $D/3$. The surfaces of the discs should be ground and their flatness should be better than 0.005 mm.

(d) One of the two platens should incorporate a spherical seat. The spherical seat should be placed on the upper end of the specimen. It should be lightly lubricated with mineral oil so that it locks after the dead weight of the crosshead has been picked up. The specimen, platens, and spherical seat must be accurately centered with respect to one another and to the testing machine. The curvature center of the seat surface should coincide with the center of the top end of the specimen.

(e) The load measurement device (load cell) should have sufficient capacity and be accurate to within 1.0% of the maximum load measured in the test.

(f) The equipment used to control the testing machine should be capable of providing the rates of compressive loading prescribed in Section 4(p). To obtain the necessary AE data for stress determination, the controller should be a closed-loop type.

(g) The strain measurement device should use electrical resistance strain gauges or other suitable measuring device. Its design should be such that the average of two axial strain measurements, equally spaced, can be determined for each increment of load. The sensors should be robust and stable, with a strain sensitivity of the order of 5×10^{-6} .

The axial strains should be determined within an accuracy of 2% of the reading and to a precision of 0.2% of full scale.

If electrical strain gauges are used, the length of the gauges over which axial strain is determined should be at least ten-rock grain diameters in magnitude. The gauges should not encroach within $D/2$ of the specimen ends, where D is the diameter of the specimen.

4.2 AE measuring system

- (i) The minimum AE measuring system consists of a sensor, pre-amplifier, and AE signal processor.
- (j) The AE sensor is generally a piezoelectric device, which should be mounted to ensure proper signal coupling. The frequency range of the sensor may be as high as 1 MHz, and either a wideband or a resonant sensor may be employed. The higher frequencies can be used to achieve greater discrimination against airborne or mechanical background noise.
- (k) The functions of the pre-amplifier are to amplify the signal to eliminate environmental disturbances and to convert it to low impedance for transmission over long distances. The pre-amplifier should provide a gain of at least 40 dB, and may include a high-pass or bandpass filter to eliminate the mechanical and acoustical background noise that prevails at low frequencies.
- (l) The pre-amplifier should have sufficient gain to allow the signal processing equipment to detect the level of acoustic background noise on the testing system. It should be placed as close as possible to the sensor to minimize pickup of electromagnetic interference. The sensor/pre-amplifier should be selected to minimize background noise.
- (m) The minimum AE signal processor incorporates a filter, amplifier, threshold detector, and counter. It measures AE parameters such as event and count of the continuous AE signal. The AE signal processor may be a real-time data acquisition system with capabilities of storage and parametric display of incoming signals.
- (n) A filter should be used to eliminate mechanical (low frequency) and electromagnetic noises. It may be incorporated in both the pre-amplifier and the AE signal processor.
- (o) The electric signals detected by the AE sensor are transferred via coaxial cable to a pre-amplifier and into the AE signal processor through an adjustable-gain linear amplifier, which provides up to 40 to 60 dB additional gain. The output from the AE signal processor can be displayed in terms of cumulative AE counts or as a rate for events or counts.
- (p) A digital oscilloscope may be used to check the AE waveform.

4.3 Recording

- (q) An analog or digital data acquisition system is required to record and display the applied load, and the processed AE parameters with time simultaneously throughout the test.

5. PROCEDURE

5.1 Mounting the AE sensor

- (a) The AE sensor should be securely mounted in a fixed position on the test specimen in a way that ensures that the acoustic coupling between the sensor and the structure is both adequate and constant.
- (b) The sensor should be coupled directly to the test specimen with a fluid couplant. It is secured with tape or a suitable adhesive bond, which acts as the couplant.
- (c) After the sensor is installed and connected to the AE measuring system, the system performance should be checked by a “lead break” test before testing of the sample begins: The breaking of a lead pencil near the sensor delivers a reproducible signal that closely matches “point impulse loading” to verify the response from an acoustic signal.

5.2 Mounting requirements

- (a) The correct sensor should be chosen to optimize the testing. Among the sensor parameters to be considered are the following: size, sensitivity, frequency response, surface motion response, and environmental and material compatibility.
- (b) The contacting surface should be cleaned and in some cases may be mechanically prepared. This will enhance the detection of the desired acoustic waves by assuring reliable coupling of the acoustic energy from the test specimen to the sensor. Possible losses in acoustic energy transmission due to surface curvature at the contact area must also be considered.
- (c) The thickness of the couplant may alter the effective sensitivity of the sensor. The thinnest practical layer of continuous couplant is usually the best. Care should be taken that there are no entrapped voids in the couplant. Unevenness, such as a taper from one side of the sensor to the other, can also reduce sensitivity or produce an unwanted directionality in the sensor response.
- (d) A useful method for applying a couplant is to place a small amount of the material in the center of the sensor face, then carefully press the sensor onto the specimen surface, spreading the couplant uniformly from the center to the outside of the sensor face.

5.3 Discriminating noise, and setting the amplification and threshold levels for the AE measurement

- (e) Signal noise arises from two main sources: electromagnetic disturbances and mechanical

vibration. Electromagnetic noise can be reduced by grounding and shielding electrical components, and by using coaxial-shielded cable for transmission lines. Mechanical vibration occurs predominantly in the low-frequency range, and low frequency electromagnetic noise can be eliminated by using a low-frequency cutoff analog filter.

(f) The suggested frequency range is 100 to 300 kHz, encompassing the 150 kHz resonant frequency of the most commonly used sensor. Other frequency ranges may be used, but there are some limitations. At lower frequencies, there are increasing problems with mechanical background noise. At higher frequencies, the wave attenuates more rapidly due to microcracks in the specimen, and the detection range of the sensor is smaller. The choice of frequency range is therefore a trade-off between noise and detection range.

(g) The appropriate amplification level to provide the maximum amplification of the AE signals, yet discriminate against transient and background noise, should be determined before testing begins by placing the AE sensor on the platen with all electrical components and the testing machine turned on. The threshold level of the AE signal processor is then set to its lowest point to pass all noise transients, then the amplification is reduced by minimum increments from the highest setting, where noise saturation occurs, until the background counts per event are very few.

(h) The threshold level of the AE signal processor should be raised above the background noise level to further discriminate AE signals from the background noise level.

5.4 Testing and AE measurement

(i) Test specimens should be right circular cylinders having a height to diameter ratio of 2.0–2.5 and a diameter of preferably not less than 20 mm.

(j) The ends of the specimen should be flat to 0.02 mm and should not depart from perpendicularity to the axis of the specimen by more than 0.001 radians.

(k) The sides of the specimen should be smooth, free of abrupt irregularities, and straight to within 0.3 mm over the full length of the specimen.

(l) The diameter of the specimen should be measured to the nearest 0.1 mm by averaging two diameters measured at right angles to each other at about the upper height, mid-height, and lower height of the specimen. The average diameter should be used for calculating the cross-sectional area.

(m) Moisture can have a significant effect on the deformation of the test specimen. When possible, *in*

situ moisture conditions should be preserved until the time of the test. The moisture condition should be reported in accordance with the “Suggested method for determination of the water content of a rock sample”, Method 1, ISRM Committee on Laboratory Tests, Document No.2, First Revision, December 1977.

(n) At least one AE sensor is mounted in the middle height of the specimen. The cementing material for installation of the AE sensor should securely fix the sensor, yet allow it to be easily removed without damage after testing.

(o) After all measuring devices and the AE sensor are connected to the data acquisition systems, the specimen should be placed in the testing machine. Next, the uniformity of the loading should be checked from the strain gauge outputs under about 1%–2% of the peak load. Loading platens and spherical seat adjustments should be made until the necessary uniformity is achieved.

(p) After uniformity of loading is achieved, the load on the specimen should be applied at a constant loading rate such that the peak load will be achieved after 5–10 min of loading. The load should then be decreased to approximately 1% of the peak load. The peak load should be decided on the basis of the depth at which the rock core sample was obtained and the bulk density of the rock material.

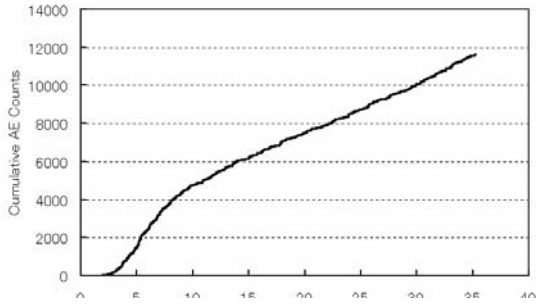
$$P_p = (2 \text{ to } 3) \times \rho g H A$$

with an explanation that P_p is the peak load, ρ is the bulk density of the overlying rocks, g is gravity, H is the depth at which the rock core sample was recovered from the rock mass, and A is the initial cross-sectional area of the specimen.

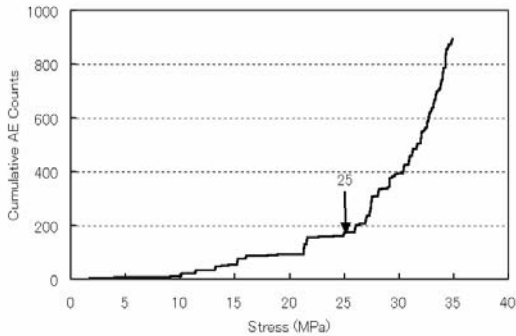
Load, axial strains or deformations, and the processed AE parameters should be recorded continuously by the data acquisition systems during the test.

Repeat this procedure at least twice while recording the load, axial strains or deformations, and the processed AE parameters. In this method, the first loading cycle often produces noise associated with crack closure or compaction that can sometimes obscure the Kaiser effect. This noise in the first cycle of loading, however, can be suppressed by subsequent unloading-reloading cycles at stress levels below the Kaiser effect (Fig.2), thereby making the onset of an increase in AE activity associated with the Kaiser effect more pronounced.

(q) The number of specimens tested under a specified set of conditions should be determined based on practical considerations, but at least two specimens are preferred.



(a) AE behavior at the first loading of a rock core specimen



(b) AE behavior at the second loading of a rock core specimen

Fig.2 Cumulative AE counts versus stress at the first and second loading of a rock core specimen. Subsequent reloading enhances the Kaiser effect.

6. CALCULATION AND INTERPRETATION OF RESULTS

(a) The compressive stress in the test specimen, σ_z , is calculated by dividing the compressive load P on the specimen by the initial cross-sectional area, A . Thus,

$$\sigma_z = P / A$$

where, in this test procedure, compressive stress is considered positive.

(b) In this method, the stress level at which the AE rate begins to increase above the background rate observed in the linear elastic region should be identified in the curve of cumulative AE counts or rate for events, counts, or energy as a function of the compressive stress. Fig. 3 shows a typical plot of cumulative AE counts versus the compressive stress. The typical curve of AE behavior of rock materials from zero stress up to peak stress clearly indicates the take-off point (Kaiser effect), by which *in situ* rock stress can be determined.

7. REPORTING OF RESULTS

The report should include the following:

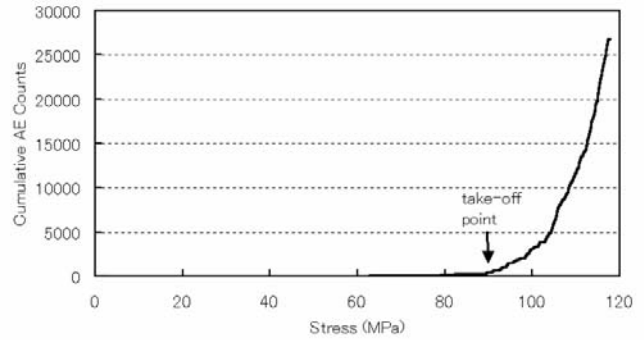


Fig.3 Typical plot of cumulative AE counts versus compressive stress in the stress measurement from a rock core specimen using the AE technique

- (a) Lithologic description of the cored rock sample.
- (b) Orientation of the axis of loading described by the plunge and the bearing, where *plunge* is the acute angle measured in a vertical plane between a given line and the horizontal plane, and *bearing* is the geographical azimuth, measured in clockwise rotation from true north (0°), of the vertical plane containing the given line. Example: *bearing/plunge* ($025^\circ/45^\circ$).
- (c) Source of the sample, including geographic location, depth and orientation, dates and method of sampling, and storage history and environment.
- (d) Number of specimens tested.
- (e) Specimen diameter and height.
- (f) Water content at time of test.
- (g) Test duration and loading rate (stress rate or deformation rate).
- (h) Date of testing and type of testing machine.
- (i) Type of AE sensor and signal processor.
- (j) Threshold level and amplification for the AE measurement.
- (k) Values of applied peak load, stress.
- (l) Value of *in situ* stress determined for each specimen together with average result for the sample.
- (m) Plots of the cumulative AE count or rate for events, counts, or energy for each specimen. The pascal (Pa) or a multiple should be used as the unit of stress.
- (n) Should it be necessary in some instances to test specimens that do not comply with specifications as stated above, it should be noted in the test report.

Acknowledgement

The author wish to acknowledge the encouragement and support given by the members of the working group, Prof. E. Villaescusa, Prof. X.T. Feng, Dr. K. Shin, Dr. T. Yokoyama, Dr. K. Hata, Prof. M. Kwabiewski, and Prof. H.R. Hardy for estimating the primary state of stress in a rock mass using the acoustic emission technique. The coordinator is also most grateful to Prof. K. Sassa of Department of Civil Engineering, Fukui University of Technology in Japan for his kind support and interest on the suggested method. The author would like to appreciate the beneficial comments on the draft of the suggested method from Prof. E. Brueckel, Prof. R. P. Young, Dr. C. Cosma, Prof. G. Borm, Dr. B. Lehman, and Prof. C. Lee. I would like to express my sincere gratitude to useful discussion with Dr. T. Kanagawa and Mr. M. Tanaka.

REFERENCES

1. ISRM Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.16, pp.135-140 (1979).
2. Standard guide for mounting piezoelectric acoustic emission sensors, ASTM E 650-97 (1997).
3. ISRM Suggested method for determination of the water content of a rock sample”, Method 1, ISRM Committee on Laboratory Tests, Document No.2, First Revision, (1977).

AE 法による地圧測定法に関する解説

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」

<活動期間>

平成 12 年 8 月～平成 17 年 3 月

<ワーキングメンバー>

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 技術研究所)

委員：田仲正弘 (日特建設(株))

目 次

1. 緒言	1
2. 岩石のカイザー効果	2
2.1 岩石のカイザー効果の原理	2
2.2 カイザー効果を利用した初期地圧測定	2
2.3 カイザー効果と微小き裂の形成との関係	4
1) 応力解放による微小き裂の形成とその状態	4
2) 初期地圧レベルまでの载荷による微小き裂の閉そく	4
3) 初期地圧レベルを超える载荷過程での新たなき裂の発生	4
4) カイザー効果と微小き裂に関する実験例	5
3. 試験方法	8
3.1 試験装置	8
1) 载荷部	8
2) 測定装置部	9
3.2 試験片の準備	11
1) 試験片の作製方向	11
2) 試験片の形状と細長比	12
3.3 試験片端部で発生するノイズの除去	13
1) 試験片の端部処理による方法	13
2) AE 震源の位置標定による方法	15
4. 各種要因の検討	16
4.1 各種岩石におけるカイザー効果の確認	16
4.2 カイザー効果の载荷方向における独立性	21
1) モルタルの二軸同時载荷試験片を用いた 3 方向試験	21
2) 新小松安山岩の一軸载荷試験片を用いた方向別試験	23
3) 花崗岩の三軸逐次载荷試験片を用いた 3 方向試験	23
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	24
5) 花崗岩の側圧を受けた試験片を用いた 1 方向試験	25
4.3 時間依存性	26
1) 時間依存性に関する一考察	26
2) 基礎的な試験による確認例	26
4.4 载荷履歴の影響	29
4.5 岩石の乾湿・熱履歴の影響	41
1) 乾湿の影響	41
2) 熱履歴の影響	43

5. ケーススタディー	46
5.1 他の地圧測定法との比較	46
5.2 深度別の地圧測定結果	48
5.3 カイザー効果が不明瞭な例	49
6. 結言	50
【参考文献】	51

1. 緒言

地下構造物の建設や鉱山の開発などの地下開発においては、開発によって建設される岩盤内構造物の安全と安定を確保するために岩盤の強度特性のみならず初期地圧を評価することが重要である。初期地圧の測定法としては原位置で測定する応力解放法や水圧破碎法などが一般的であるが、1980年代後半以降、初期地圧を安価で簡易に測定する方法として岩石コアを利用する方法が着目され、特にAEのカイザー効果に基づく初期地圧測定法(以下、AE法という。)の研究開発及び現場への適用が活発に行われてきている。しかしながら、AE法の基礎となる岩石におけるカイザー効果のメカニズムについて明らかにされていない、AE法によって初期地圧を決定する際のAEの測定法について標準的な方法が確立されていないなどの指摘、問題点などがあり、近年のAE法の適用拡大の一方でこれら解決すべき課題が残されていた。

AE法に関する標準的な方法の確立については、1988年に故林正夫先生のリーダーシップのもとワーキンググループがつくられて検討された。この検討は約2年に及ぶもので、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。しかしながら、この段階ではまだ、共通実験は行われたもののAE法の標準化に関するコンセンサスを得られ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、ワーキンググループの目的であったAE法の標準化は果たせなかった。

しかし、このときのワーキンググループに参加したメンバーを中心に、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。現時点でも未だカイザー効果のメカニズムについては明解な説明は不十分であるが、1990年代に生み出されたこの研究成果によって、現在では「AE法は使える」という認識が海外も含めて広く共有される段階にまで達したのではないかと思われる。

「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(以下、サブWGという。)」では、1988年に設置されたワーキンググループにも参加したメンバーがほとんどであり、当時の議論やこれまでの数多くの研究開発に基づいて活発な議論を行うことができた。その結果、AE法の基本となるカイザー効果のメカニズムに関してはまだまだ議論は尽くせたとはいえないが、AE法を実際に使用するときの測定法、測定における留意点、数多くの測定事例について活発に議論し、“AE法による地圧測定に関わるすべての技術者が、AE法に関する知識、留意点を共有して、自分以外の他者のデータとも相互比較できる試験法”といえるようなAE法に関する標準的な方法を確立できた。本解説は、この標準的なAE法を利用するときの留意点を分かりやすく実例を含めて解説した。

サブWGメンバー全員が、本解説が多くの地圧測定に携わる技術者、研究者によって利用して頂けることを念願すると共に、有益な指摘や助言を今後ともお願いする次第である。

2. 岩石のカイザー効果

2.1 岩石のカイザー効果の原理

AE の大きな特徴の一つであるカイザー効果を利用して、地山内部の初期地圧を求める方法 (AE 法) の原理について示す。カイザー効果とは「応力履歴を受けた固体材料は再び载荷しても、その先行応力までは AE がほとんど発生しないという現象」である。具体的には図 2.1.1 で説明される。すなわち、横軸に時間、縦軸に応力をとると、最初に先行応力を経験した材料は、再载荷した場合に先行応力レベルまでは AE がほとんど発生せず、それ以上の応力になると AE が発生する。

カイザー効果はもともと金属材料で発見された。AE に注目すれば同様の現象だが、金属と岩石材料では AE 発生メカニズムが異なることに注意する必要がある。

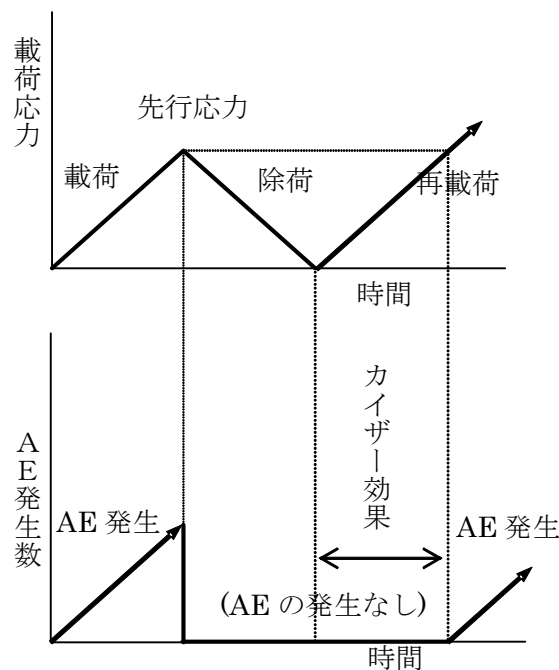


図 2.1.1 カイザー効果説明図

2.2 カイザー効果を利用した初期地圧測定

岩石におけるカイザー効果を利用し、地山内部の初期地圧を求めることができる。すなわち、初期地圧を前述の先行応力とし、AE 発生点に相当する応力をもって初期地圧とするものである。初期地圧がいつの時点のものかについては諸説あるので後に紹介することとする。

なお、カイザー効果の定義からは、再载荷した時に先行応力以下の応力レベルでは AE がほとんど発生しないことになる。しかし、実際には同じ応力レベルで再载荷を繰り返した場合、少なからず AE の発生が観測されることがあるため、「再载荷」を複数回行い、その際に発生した AE 全てを分析に用いることがしばしば行われる。

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 2.2.1 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载荷すると、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、载荷実験により 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 2.2.2 は、この測定法の概念を模式図的に示したものである。

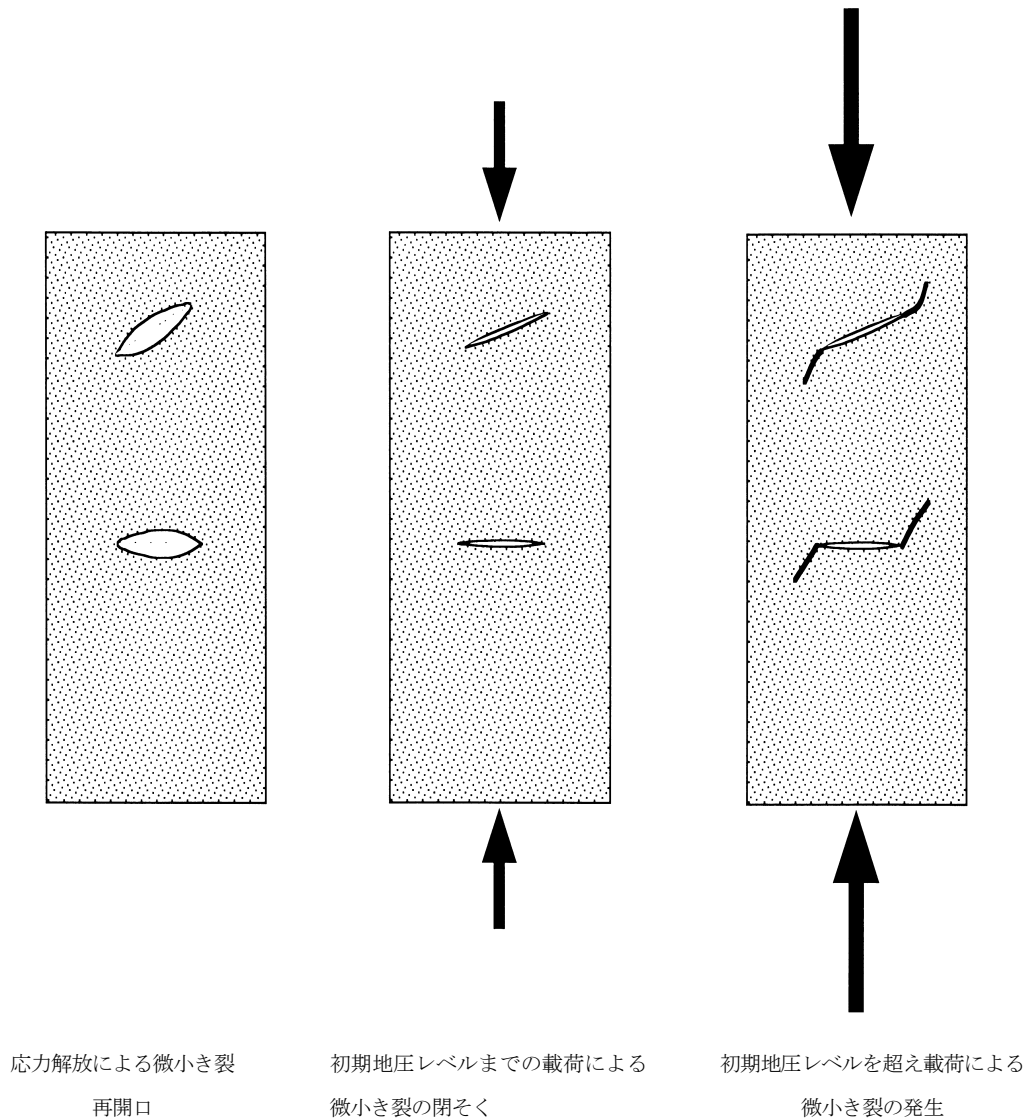


図 2.2.1 AE 法による地圧測定法を説明するための概念図

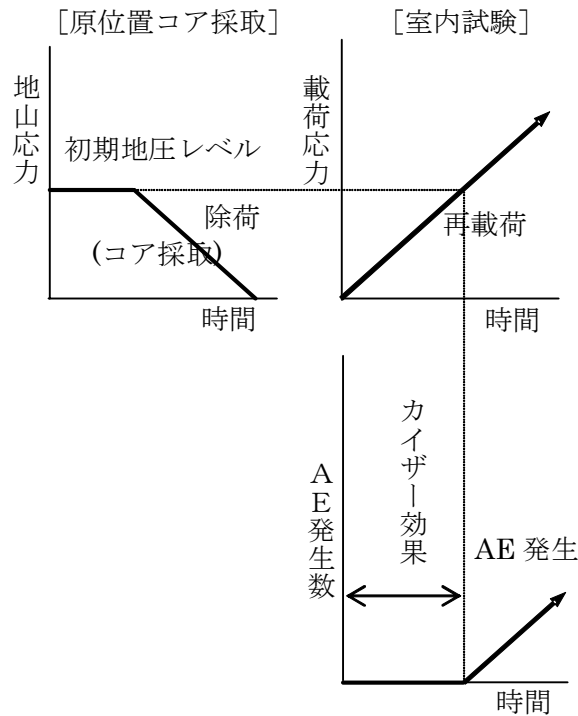


図 2.2.2 AE 法による地圧測定法の概念図

2.3 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、次のように仮説的に考えられる。

1) 応力解放による微小き裂の形成とその状態

初期地圧状態にある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、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) 初期地圧レベルまでの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。

3) 初期地圧レベルを超える载荷過程での新たなき裂の発生

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、このき裂形成に伴ってAEが発生するものと考えられる。

4) 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）に対し繰り返し載荷により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2.3.1¹⁾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。

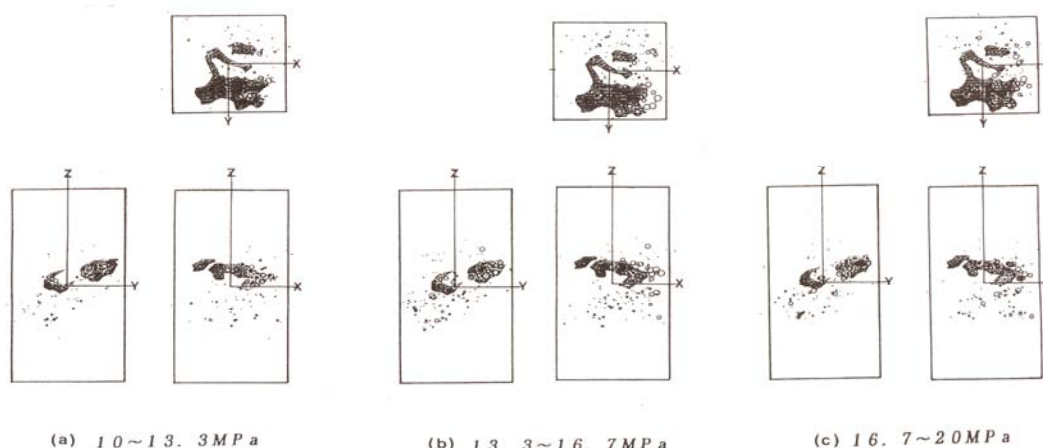


図 2.3.1 再載荷時に発生したAEの震源分布の変化と
繰り返し載荷によって発生したAEの震源分布との関係¹⁾

また、AEの発生とき裂進展との関係を明らかにするため、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2.3.2には試験に用いた岩石試験片と繰り返し載荷時のAEの発生状況を示す。図2.3.3には岩石試験片のスリット端部にマイクロスコープで観察されたき裂の発生状況を示す。

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亀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、繰り返し载荷試験時の除荷過程では亀裂が閉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亀裂が発生して AE が急増するが、同一応力レベルの範囲内での繰り返し载荷過程では亀裂は既存領域内での亀裂の開閉挙動のみであり、新たな亀裂進展は発生しない。

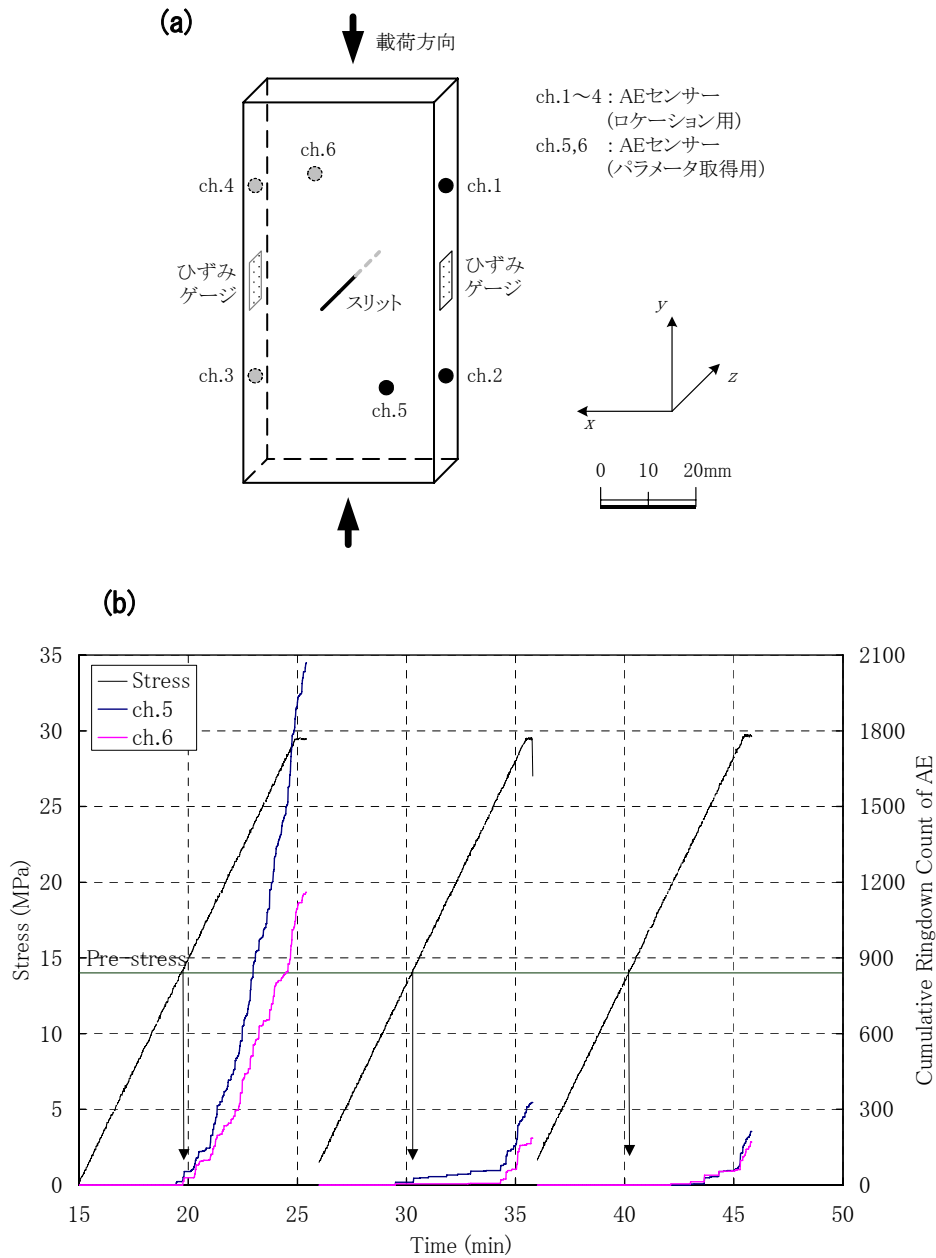


図 2.3.2 スリットを入れた岩石試験片を用いて
AE 発生とき裂発生状況に着目した実験

- (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) : 载荷パターンと AE 発生状況を示す図

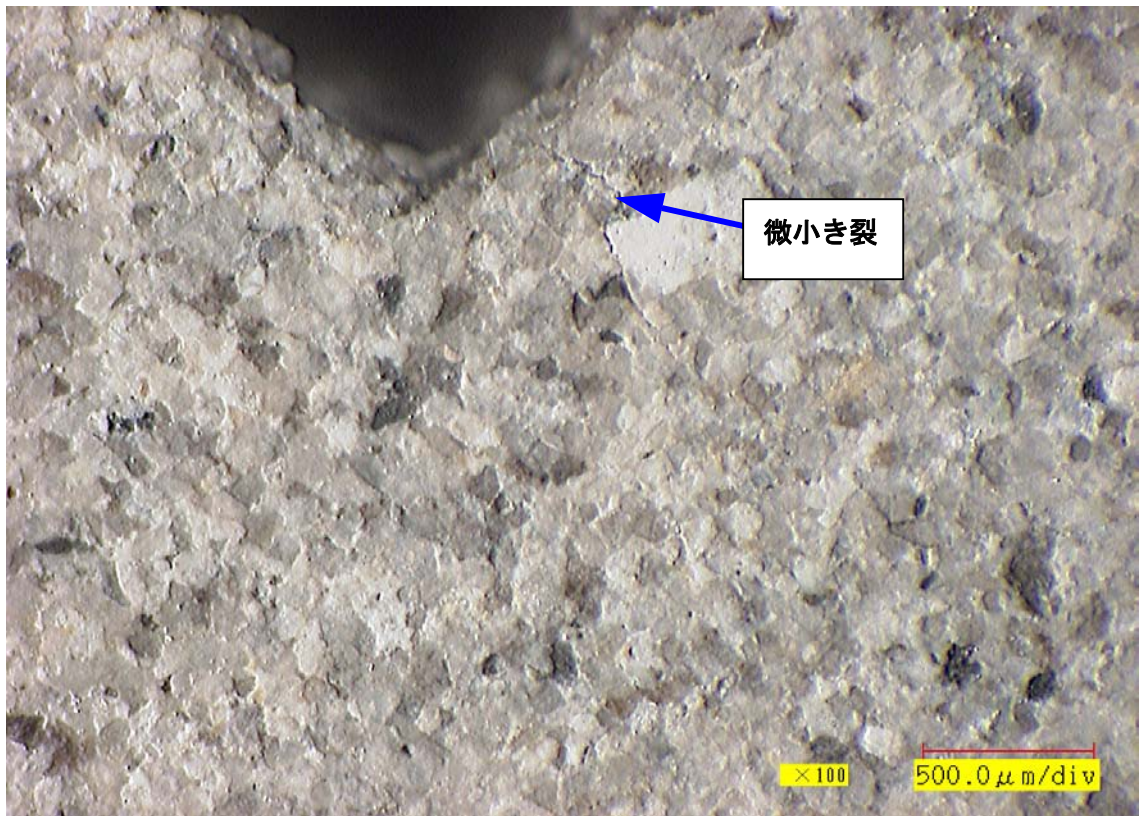


図 2.3.3 岩石試験片のスリット端部に発生したき裂 (矢印の先端)

3. 試験方法

ここで述べる試験方法は、AE 法による地圧測定に使用する試験装置と試験片の形状および試験片の端部処理に関する事項である。試験装置は、一般に岩石の圧縮試験に用いられる載荷部に加え、載荷時に AE を同時に測定・収録可能な測定装置部で構成される。また、試験片の形状と端部処理についてはこれまでに研究・議論されてきた成果をもとに、AE 試験を精度よく行うためのより合理的と思われる形状について整理した。

3.1 試験装置

AE 試験装置は、載荷部と測定装置部とからなる。載荷部は、圧縮装置、球面座、荷重速度制御装置、変位速度制御装置、装置制御部等で構成される。また、測定装置部は、AE センサ、ひずみゲージ、プリアンプ、動ひずみアンプ、AE 測定システム、ひずみ・荷重・変位の測定装置等で構成される。これら試験装置のブロックダイアグラムと測定装置部の機能を図 3.1.2 に示す。

1) 載荷部

① 圧縮装置

圧縮装置は、試験片の長手軸方向と平行に圧縮力が載荷できる加圧板を有していなければならない。このため、上下の加圧板は十分な剛性を有し、かつ加圧面は油圧装置のピストン軸と直交する平滑な面を有する構造でなければならない。

② 球面座

上下の加圧板の中心は油圧装置のピストン軸と一致し、上部加圧板の面上に中心を有する球面座をもち、できるだけ圧縮荷重のほかの力が加わらない構造でなければならない。また、球面座は着脱できるか、この機能を固定できる構造でなければならない。

③ 荷重速度制御

荷重速度制御とは圧縮装置に内蔵される荷重計からの電圧信号をフィードバックして、荷重の増加速度が一定になるように制御できる機能である。

④ 変位速度制御

変位速度制御とは載荷装置に内蔵される変位計からの電圧信号をフィードバックして、変位の増加速度が一定になるように制御できる機能である。

⑤ 装置制御部

圧縮装置に内蔵される荷重計、変位計ともにこれらの容量は試験機の有する容量を満たすものが用いられているが、各載荷パターンを決めるときの最大容量が荷重計あるいは変位計の最大容量未満の場合、設定する各載荷パターンの最大容量の時に電圧信号が載荷装置の制御電圧の最大となるよう調整可能なものが望ましい。この調整により、よりなめらかで正確な荷重速度あるいは変位速度の制御が可能となる。

2) 測定装置部

① AE センサ

AE センサは、その特性によって、特定の周波数帯域で高い感度を有する共振型(図 3.1.1(a)¹⁾) と、広い周波数帯域で同程度の感度を有する広帯域型(図 3.1.1(b)¹⁾) の 2 種類に大きく分けられる。共振型は共振点での感度が高いため、測定される波形は共振周波数が卓越する波形となる。カイザー効果を判定する測定のように微小な AE の発生を感度良く検出するためには、共振型 AE センサの方が広帯域型 AE センサより高感度であるため有利である。岩石を対象とした場合は、100~500kHz 程度の範囲に共振点を持ち、かつ十分な感度を有する AE センサを選択することが望ましい。

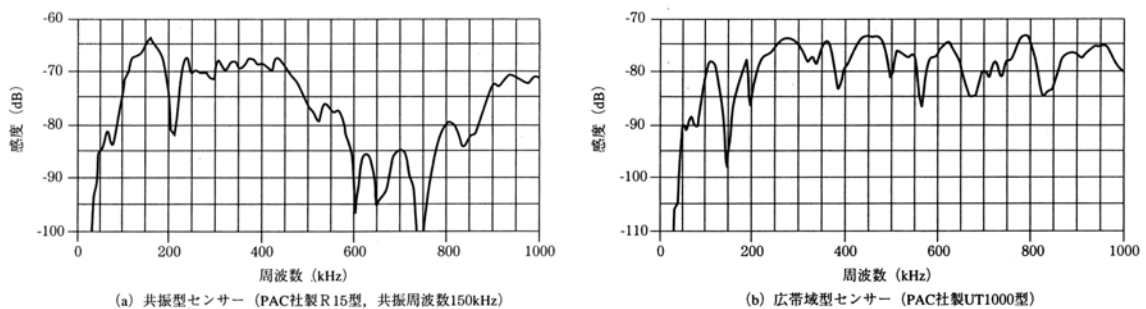


図 3.1.1 共振型および広帯域型 AE センサの周波数特性の例¹⁾

② ひずみゲージ

ひずみゲージは、試験片の大きさに合わせてゲージ長 5~20mm 程度の箔ひずみゲージを使用する。

③ プリアンプ

プリアンプ (AE 前置増幅器) は、AE センサ 1 個につき 1 台を使用する。また、プリアンプの周波数特性は 10kHz~2MHz で、利得は 40dB 程度を有するものが望ましい。

④ 動ひずみアンプ

動ひずみアンプは、載荷装置に内蔵される荷重計、変位計および試験片に設置するひずみゲージの出力信号を電圧信号に変換・増幅するために使用する。動ひずみアンプは感度調整可能で、応答周波数は DC~10kHz 程度、またローパスフィルタを有するものが望ましい。

⑤ AE 測定システム

AE 測定システムはメインアンプ (AE 主増幅器) および AE パラメータ測定装置から構成されるものが一般的で、例えば図 3.1.2 に示すような機能を有するものが用いられている。

⑥ ひずみ・荷重・変位の測定装置

ひずみおよび荷重、変位の測定では、上記の AE 測定システムに含まれる外部パラメータを利用するか、外部パラメータ機能を有さない場合にはデータロガーまたはパーソナルコンピュータのデータ収録機能を用いる。

測定装置部の例

<AE 測定機能>

- チャンネル数 : 4ch
- 利得 : 40dB (プリアンプ) 、0~50dB 可変 (メインアンプ)
- 周波数帯域 : 10kHz~2MHz
- フィルタ : ハイパスフィルタ : 10kHz 100kHz 200kHz THRU
ローパスフィルタ : 200kHz 500kHz 1MHz THRU
- AE パラメータ : イベントタイミング検出、持続時間計測
オシレーションカウント、立ち上がり時間計測
バックグラウンドレベル、エネルギー値計測

<その他の機能>

- 外部パラメータ : 4~8ch、0~5V、A/D 変換、12 ビット以上
- コインシデンス処理 : 2ch2 系統または 4ch (リアルタイム位置標定機能)
- データ処理 : 高速演算処理によるリアルタイムモニタ
- データ収録 : HDD、MT 収録
- インターフェイス : GP-IB、RS232C

試験装置のブロックダイアグラムの例

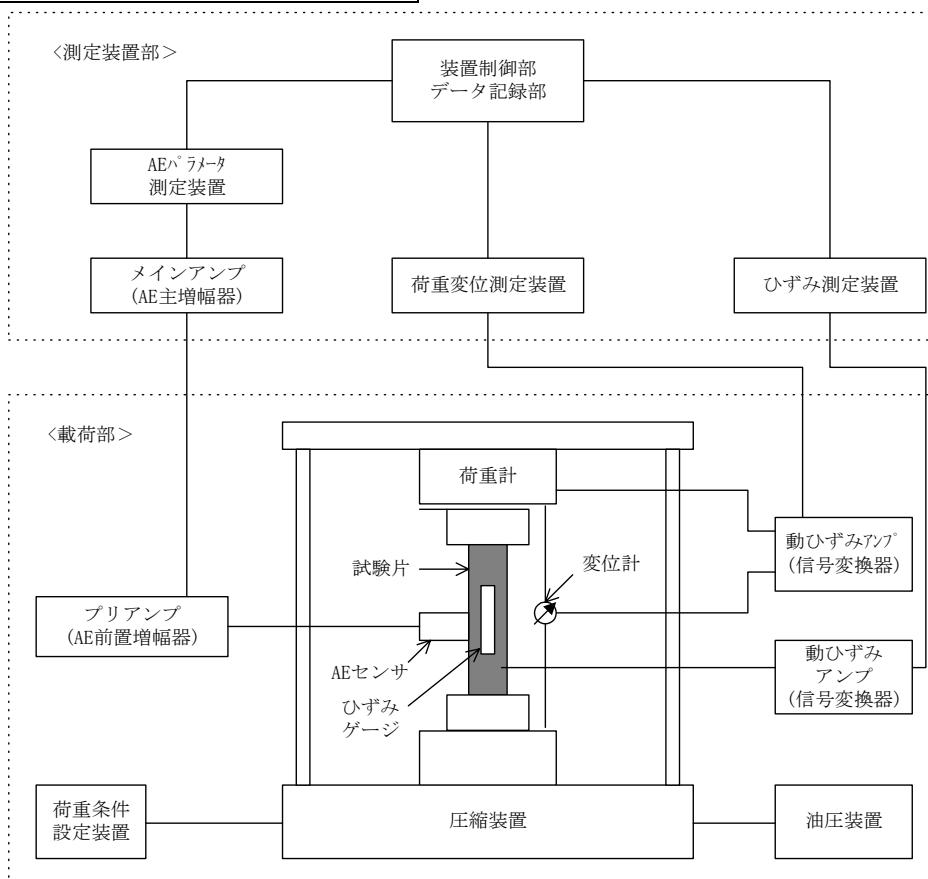


図 3.1.2 試験装置のブロックダイアグラムと測定装置部の機能

3.2 試験片の準備

1) 試験片の作製方向

岩石試験片（供試体）は、通常、岩石コア（ボーリングコア）等を用いることが多い。また、カイザー効果の測定では、前述のように試験片の载荷軸方向の初期地圧を求めることになる。したがって、現場で採取される岩石コアから特定の方向の試験片を切り出すためには、岩石コアに採取位置（場所・深度等）と方位が明記されていることが必要となる（定方位コア）。

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を図 3.2.1²⁾に示す。この例では、次の 2) で述べる角柱供試体を 9 方向について作製しており、三次元応力状態（三次元主応力）を求める場合に用いられる。9 方向について作製しているのは、各試験片の測定結果を弾性論の不変量に照らし合わせてチェックすることができる利点を有しているためである。三次元主応力を求めるための最小の試験片の方向としては、例えば図中の②～⑤のうちの 3 方向と⑥～⑨のうちの 3 方向の合計 6 方法の試験片を作製すればよい。また、二次元主応力（面内主応力）だけを求めればよい場合は、図中の②～⑤の 4 方向の試験片を作製することが望ましいが、最小方向としては同一平面内の 3 方向でよい。なお、いずれの場合も鉛直方向の試験片を作製して測定し、その測定結果を被り深さから推定される鉛直応力（＝岩盤の単位体積重量×被り深さ）と比較検討しておくこと、他の方向の測定データを検討する場合の参考になり、測定結果の信頼性向上を図ることができる。

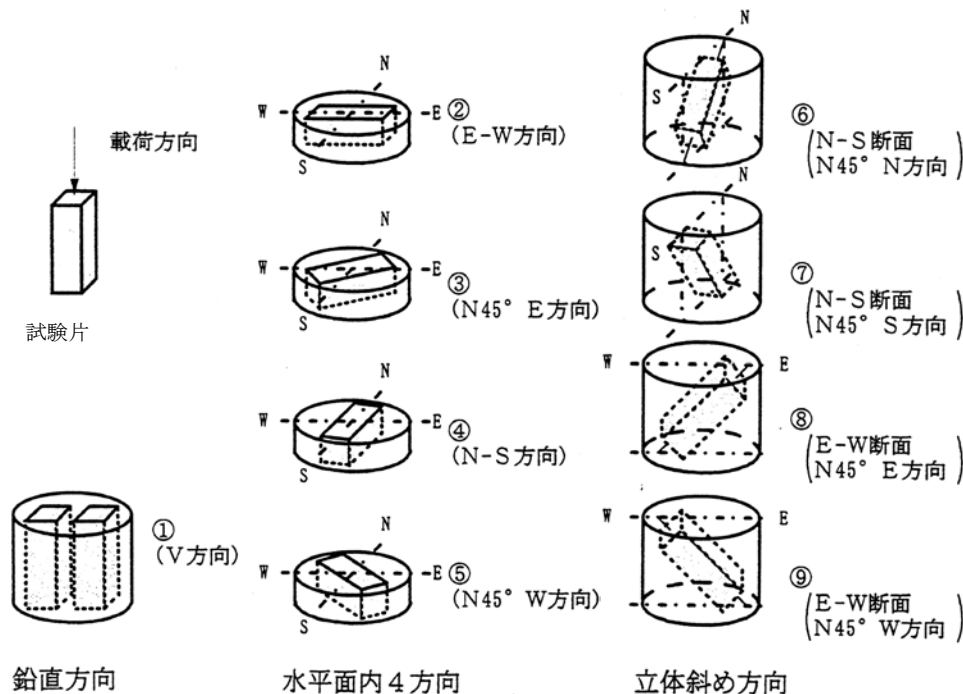


図 3.2.1 鉛直ボーリングによる定方位コアを用いた試験片の作製方向の一例²⁾

2) 試験片の形状と細長比

通常用いられる岩石試験片は、円柱もしくは角柱の形状である。円柱形状の場合は、岩石コアから方向を定めてコア抜きをするか、ボーリングの孔軸方向の初期地圧を求めることとしてコアそのものを用いる。角柱形状の場合は、図 3.2.1 に示した通りである。両者の特徴を示すと、角柱試験片では AE センサの受圧面が通常は平面であることから試験片側面に密着できることおよび比較的短いコアで多くの試験片が作製できる点で有利だが、円柱形状の場合は試験片の作製が容易である利点を有している。これらの試験片の大きさは、角柱で $(20\sim30) \times (20\sim30) \times (40\sim80)$ mm、円柱で $(\phi 20\sim50) \times (40\sim100)$ mm 程度である。なお、円柱試験片に対して角柱試験片は角部近傍の応力場が複雑になる可能性が懸念されるが、これまでの測定結果では両者に特段の相違があるとの報告はなされていない。

試験片の細長比（縦横比）については、AE 法が一軸試験であることから、通常の岩石一軸強度試験に関する JIS M0301（岩石の強さ試験用試料の採取方法および試験片の作成方法）および JIS M0302（岩石の圧縮強さ試験方法）に基本的には準拠するものとするが、これらの JIS 規格では考慮されていない AE という特殊な測定が主体であることから、試験片端部の応力集中等の影響により AE 測定が阻害されることがない状態であればよいと考えられる。これまでの報告では、細長比が 2.0～2.5 およびそれ以上のものが多い。ただし、採取された岩石コアの寸法により細長比が 1.5 程度の場合でもとくに問題なく初期地圧測定が実施できたとの報告もある。

3.3 試験片端部で発生するノイズの除去

カイザー効果を測定する上で最も大切なことは、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、荷重に伴う応力との関係を明確にすることである。すなわち、荷重に伴う応力が乱れ易い試験片端部から発生する AE（カイザー効果の測定としてはノイズとなる）をできるだけ除去し、一様な応力場となり易い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。そのためには、試験片の形状や効率的な AE の測定方法を検討する必要がある。

ここでは、これまでに検討されてきた方法として、

- ・試験片端部の加工により試験片中央部から発生する AE を抽出する方法、
- ・ソースロケーションにより試験片中央部から発生する AE を抽出する方法

について以下に示す。

1) 試験片の端部処理による方法

試験片の端面付近から発生する AE は、主に剛性の異なる試験片とエンドピースの接触による応力集中に起因するものである。したがって、両端面付近からの AE 発生が極力少なくなる試験片形状が望ましい。これまで検討された形状としては、以下の形状が挙げられる。

① 試験片両端部を拡幅させる方法

試験片の中央部に比べて端部の断面積を大きくし、端部の応力集中を緩和させようとする方法であり、図 3.3.1 の A に示したように端部を拡幅した形状である。泥岩のような軟岩では、中央部を刃物等で削り取る方法もあるが、硬岩の場合にはそのような方法をとることができない。そこで、エポキシ系樹脂とセメントの混合材料で作製したエンドキャップを試験片両端部に接着させ、さらにそれをエンドピースに接着させて見かけ上端部の断面積を大きくする方法が提案されている³⁾。試験中は後述するソースロケーションにより試験片中央部から AE が発生していることを確認している。

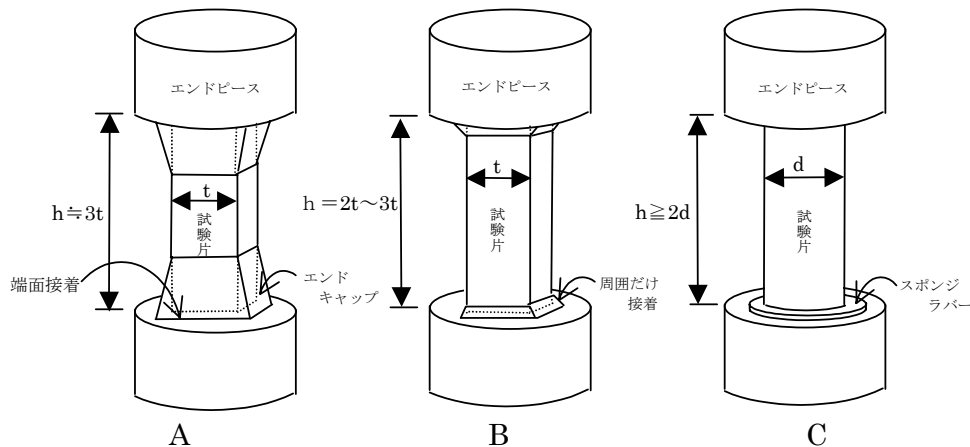


図 3.3.1 代表的な試験片形状

また、図 3.3.1 の B に示した形状は、試験片をエンドピースに接着せず、端部周囲とエンドピースに接着剤を塗る方法⁵⁾である。この方法は、試験片端面を平滑に研磨して通常の岩石一軸強度試験と同様に行うが、端部の周囲だけ接着剤で肉盛りし、A に示した端部拡幅の影響を若干取り入れたものである。試験中は後述するソースロケーションにより試験片中央部から AE が発生していることを確認している場合が多い。

② 試験片両端部にスポンジラバーを挟ませる方法

円柱の試験片の両端面を平滑に研磨し、エンドピースとの間に軟質なスポンジラバーを挟ませ、エンドピースによる試験片の拘束を緩和させようとする方法であり、図 3.3.1 の C に示した形状⁶⁾である。

2) AE 震源の位置標定による方法

① 一次元簡易ソース・ロケーション

AE の発生位置を標定（ソース・ロケーション）し、試験片中央部付近から発生したと確認された AE だけをカウントする方法である。図 3.3.2⁴⁾に示したように、試験片の十字印位置で AE が発生した場合は、AE センサへの到達波形の順序は右図の

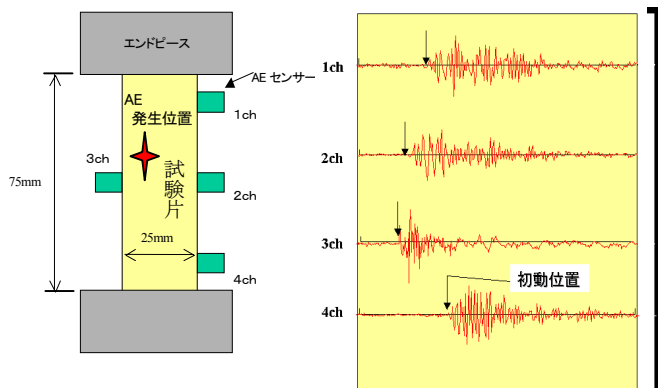


図 3.3.2 AE の発生位置と収録波形の例⁴⁾

ように 3ch、2ch、1ch、4ch の順となる。しかし、試験片は直方体であるため、正確に AE の発生位置を算出するには AE センサの数をさらに増設する必要がある。

ソース・ロケーションの目的が試験片中央部付近から発生する AE だけを捉えれば良いとすれば、同図のようなセンサ配置により 2ch もしくは 3ch に最初に到達した AE 事象だけをカウントすれば良いことになる。このように簡易的なソース・ロケーションであれば、試験中に自動的に測定が可能となる。

試みに、試験片端部に亀裂が存在している場合の AE 測定例を図 3.3.3⁴⁾に示す。同図によれば、1ch の AE 発生率の測定結果を見ると载荷初期に多くの AE が発生している。2ch の測定結果も受振した全ての AE をカウントすると 1ch の結果とほぼ同様である。しかし、2ch に最初に到達した AE（第一受振 AE）だけをカウントすることにより、亀裂から発生する AE は取り除かれて 2ch の AE センサ近傍、すなわち試験片中央部の AE だけをカウントすることができる。

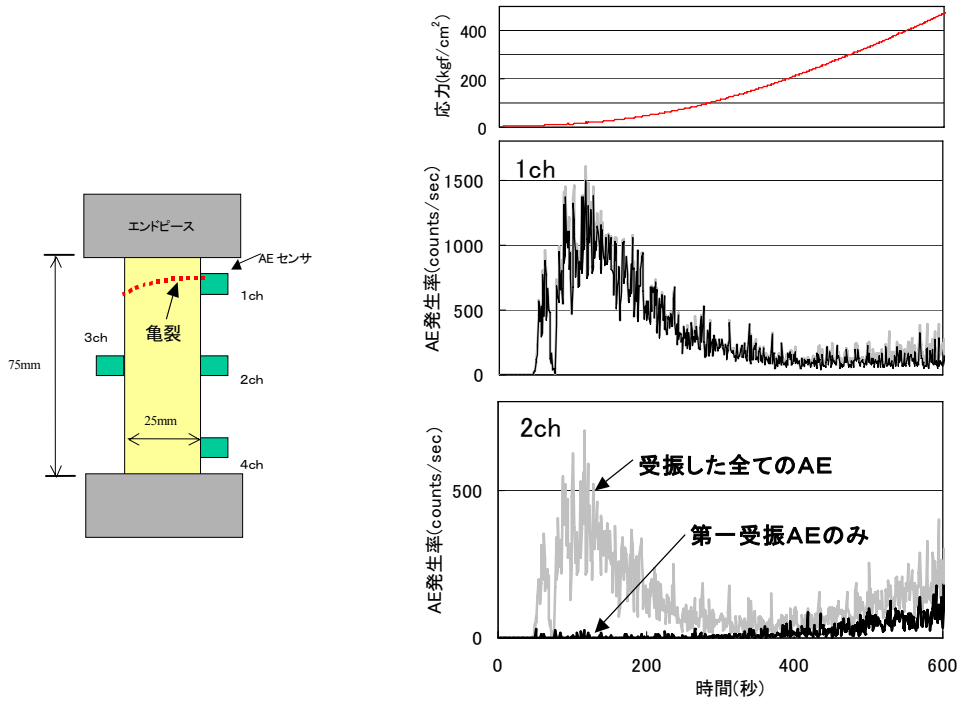


図 3.3.3 試験片端部に亀裂が存在する場合の簡易ソース・ロケーションの例⁴⁾

② 三次元ソース・ロケーション

図 3.3.2 のセンサ配置により各 AE センサへの到達時間差を求めて AE の発生位置を算出すれば、平面への投影面での AE 発生位置を表記することができる。二次元ソース・ロケーションを行ったことになるが、試験片が直方体であることから正確なものではない。そこで、AE センサを 8 個使用して三次元ソース・ロケーションを実施した例を図 3.3.4⁵⁾ に示す。AE の発生位置は、繰り返し载荷に対して前回発生した位置を囲むように発生することがわかる。ただし、測定作業およびデータ整理等が非常に煩雑となることから、通常の初期地圧測定ではあまり適用されていない。

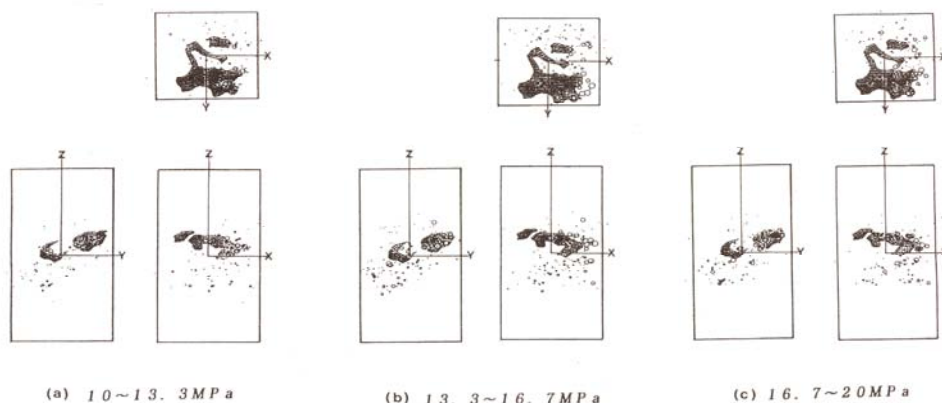


図 3.3.4 再载荷時に発生した AE の震源分布の変化と
繰り返し载荷によって発生した AE の震源分布との関係⁵⁾

4. 各種要因の検討

4.1 各種岩種におけるカイザー効果の確認

岩石にカイザー効果が存在するか否かの検討は、種々行われている。検討結果の概略を以下に示す。

Goodman¹⁾は砂岩と閃緑岩に繰返し圧縮荷重を作用させ AE を測定した。測定結果を図 4.1.1 に示す。(a)図は、試験対象岩石における処女荷重時の破壊に至る AE 発生状況である。(b)図は、破壊荷重の約 80% を先行応力 (図中矢印 B) とし、繰返し荷重を数回行った後、再度破壊に至る荷重を行った時の AE 発生状況である。繰返し荷重後の再荷重時において先行応力近傍を境にして、AE が頻発することからカイザー効果が存在すると結論づけている。

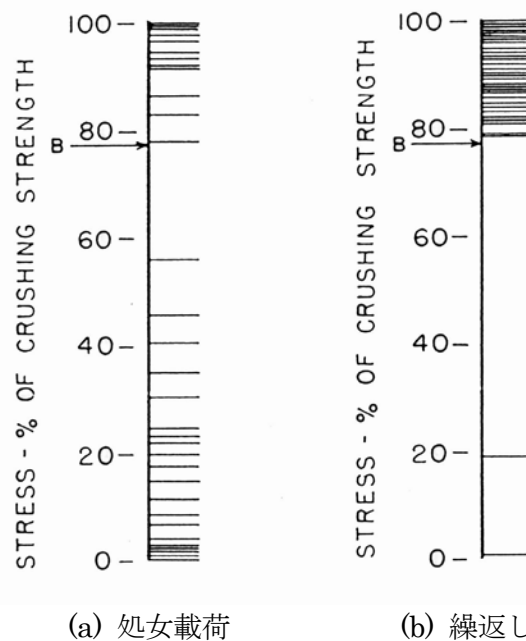


図 4.1.1 Goodman による試験結果の一例¹⁾

金川ら²⁾は凝灰岩とモルタル試料に圧縮繰返し荷重を行い、AE の発生状況を調べている。その結果、岩石材料にもカイザー効果が成り立つことを明らかにしている。凝灰岩の測定結果を図 4.1.2 に示す。この試験では、先行荷重として 2t を一度作用させ、除荷後先行荷重を越えて荷重したものである。結果は、先行荷重 2t を境にして AE が頻発することになり、カイザー効果が確認されたものである。同様に緑色片岩、泥岩でもカイザー効果が存在することを確認している³⁾。瀬戸らは AE 震源分布特性を明らかにすることで、砂岩においてカイザー効果が存在することを確認している⁴⁾。また、石炭や金鉱石についてもカイザー効果が存在することを確認している⁵⁾。

畑ら⁶⁾は花崗岩を初めとする 11 岩種 (花崗岩、花崗斑岩、ひん岩、流紋岩、安山岩、砂岩、凝灰岩、粘板岩、泥岩、結晶片岩、大理石) について、一軸圧縮繰返しで先行応

力を作用させた岩石に再載荷することで AE の発生状況を調べ、カイザー効果成立の有無を調べている。その結果、一部の岩石を除き試験に供したほとんどの岩石でカイザー効果が存在することを明らかにしている。図 4.1.3 にカイザー効果が存在する例を示す。図に示すように、ほとんど全ての岩石試料で、繰返し載荷後の再載荷時において先行応力近辺から AE が発生し始めることから、カイザー効果が存在することを明らかにしている。カイザー効果の存在に関して、各研究機関で実施された試験結果の一覧を表 4.1.1 に示す。表中、カイザー効果が存在する場合は○印で示した。

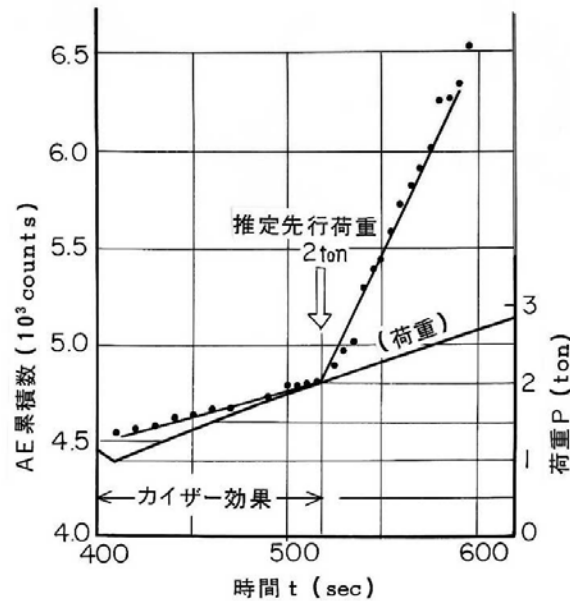


図 4.1.2 金川らによる試験結果の一例（凝灰岩）²⁾

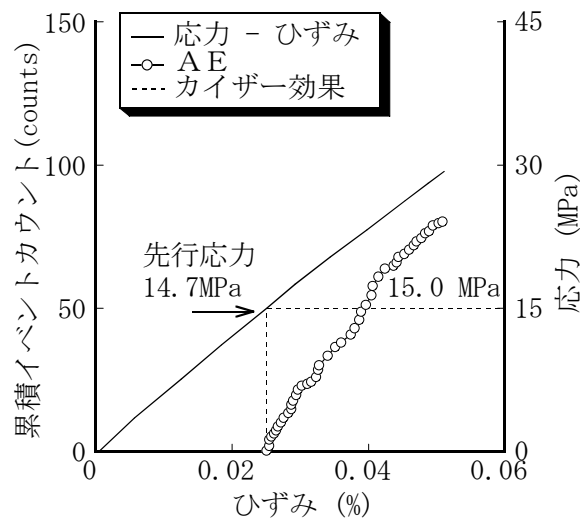


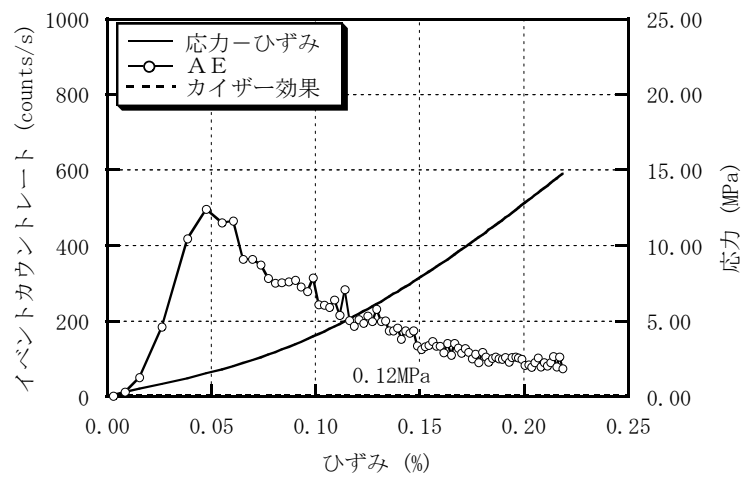
図 4.1.3 畑らによる試験結果の一例（花崗岩）⁶⁾

表 4.1.1 岩種によるカイザー効果の存在一覧

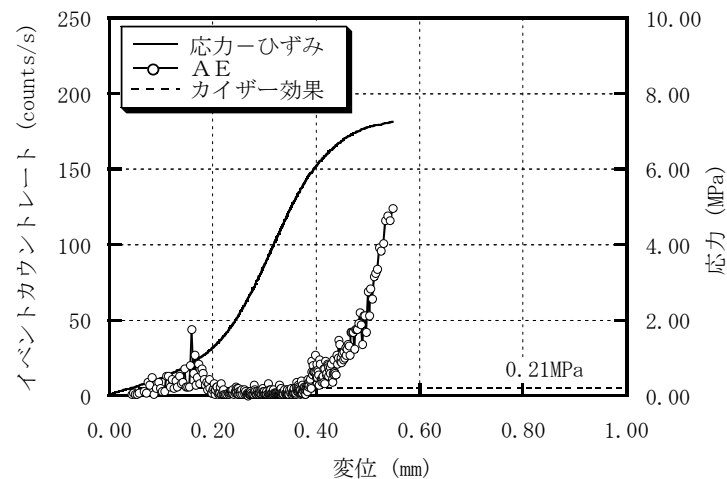
成因分類	岩種	採取場所	強度 (MPa)	単位体積 重量 (kN/m ³)	カイザー効果の存在	参考文献
火成岩	花崗岩	奈良県生駒	132	25.8	○	6)
		茨城県稲田	90	25.8	○	6)
	花崗斑岩	岐阜県阿木川	83	26.3	○	6)
	ひん岩	兵庫県大河内	200	26.5	○	6)
	流紋岩	群馬県水上	120	26.4	○	6)
	安山岩	長野県稲荷山	112	26.0	○	6)
堆積岩	砂岩	愛知県愛岐	210	25.9	○	6)
	砂岩	和歌山県白浜	(30)	(25)	○	4)
	凝灰岩	兵庫県道場	84	24.3	○	6)
	凝灰岩	青森県青函	(50)	—	○	2)
	粘板岩	京都府宇治	95	26.9	○	6)
	泥岩	東京都町田	4	18.3	○	6)
		長野県板倉	8	18.0	○	6)
		岐阜県土岐	6	16.7	○	6)
		福島県双葉	(3~4)	—	○	3)
		静岡県小笠	(7)	(20)	○	3)
		新潟県柏崎	(3.5)	(17)	○	9)
礫岩	群馬県沼田	(120)	(25)	○	3)	
石炭	北海道	(30)	(20)	○	5)	
変成岩	結晶片岩	群馬県藤岡	71	28.9	○	6)
	緑色片岩	愛媛県伊方	(100)	(27)	○	3)
	金鉱石	オーストラリア	(150)	(24)	○	5)
	大理石	イタリア	74	26.5	×	6)

()は推定値

カイザー効果を利用した AE 試験では、新鮮でクラックの存在しない試料を使用することを基本とする。岩石試料の状態によりカイザー効果が認められなかった例を図 4.1.4 に示す。(a)図は花崗岩、(b)図は凝灰岩の例である。いずれも、コア採取後所定の寸法(直径 30mm、高さ 60mm)に整形した供試体に、短調载荷を行った場合の AE 発生挙動である。両試料とも、载荷開始直後から AE は頻発し、AE 発生数曲線には変曲点が認められずカイザー効果が認識できなかった事例である。原因として、花崗岩の場合は風化劣化が著しく、結晶粒界の固結度が低かったことから、载荷初期の段階で結晶粒界部からの有意でない AE が頻発したものと考えられる。一方、凝灰岩では粘土鉱物が含有しており、整形後の養生時に乾燥によるクラックが生じ、载荷初期の段階でこのクラック部からの有意でない AE が頻発したものと考えられる。



(a) 花崗岩の場合



(b) 凝灰岩の場合

図 4.1.4 カイザー効果が認められなかった例⁷⁾

AE法による初期地圧測定では、通常AEの発生を感度良く検出するため共振型のセンサを用いる。道廣ら⁸⁾は、各種岩石を用いて、単調载荷の条件の下で破壊に至る際に発生するAEの特性を調べている。稲田花崗岩を用いた試験結果の一例を図4.1.5に示す。(a)図は破壊過程における応力とひずみと累積イベントカウントの関係である。図中A~Dの応力レベルにおいて発生したAEの周波数解析結果を(c)図に示す。卓越周波数は100~500kHzの間で推移していることから明らかになった。なお、試験に使用したAEセンサの周波数応答特性は(b)図に示すように、明確な共振点がない広帯域型と称されるものである。ここで得られた結果から、初期地圧測定においては、感度の高い測定を実施するためには、100~500kHzの範囲で共振周波数特性を有するAEセンサの使用が好ましいことが示唆された。

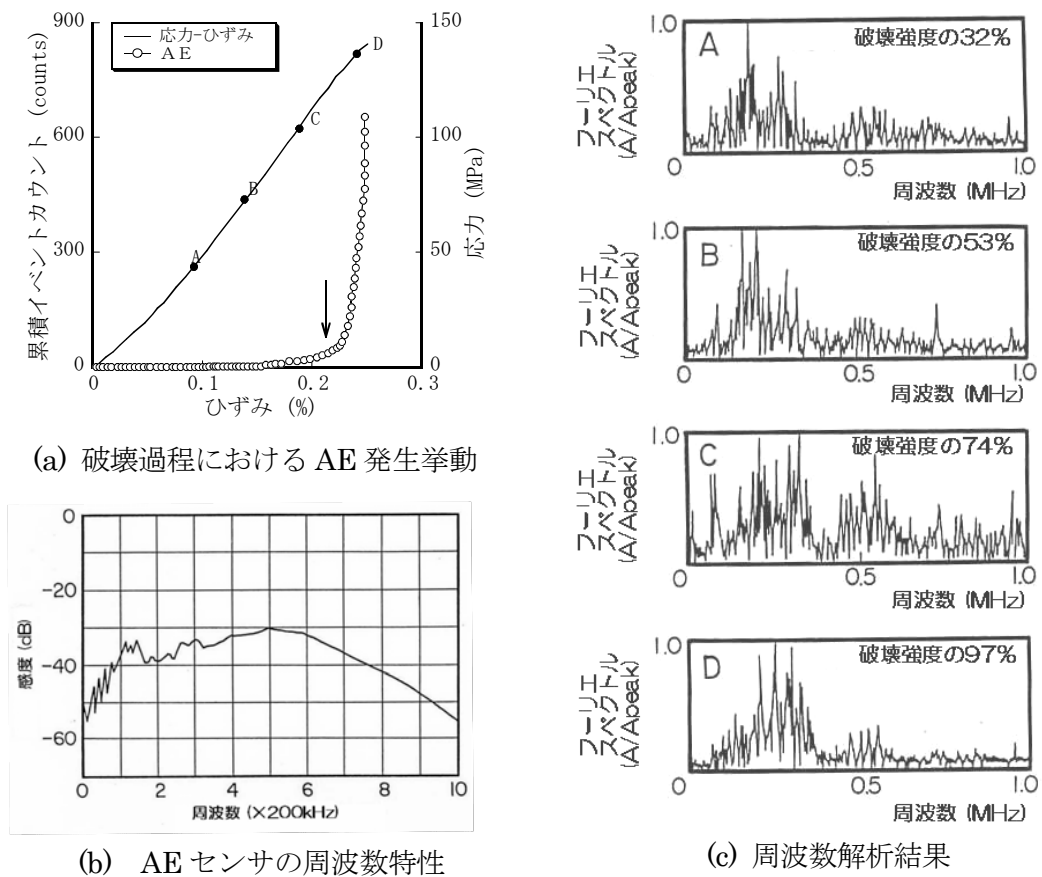


図 4.1.5 花崗岩の破壊過程での周波数変化例⁸⁾

4.2 カイザー効果の荷重方向における独立性

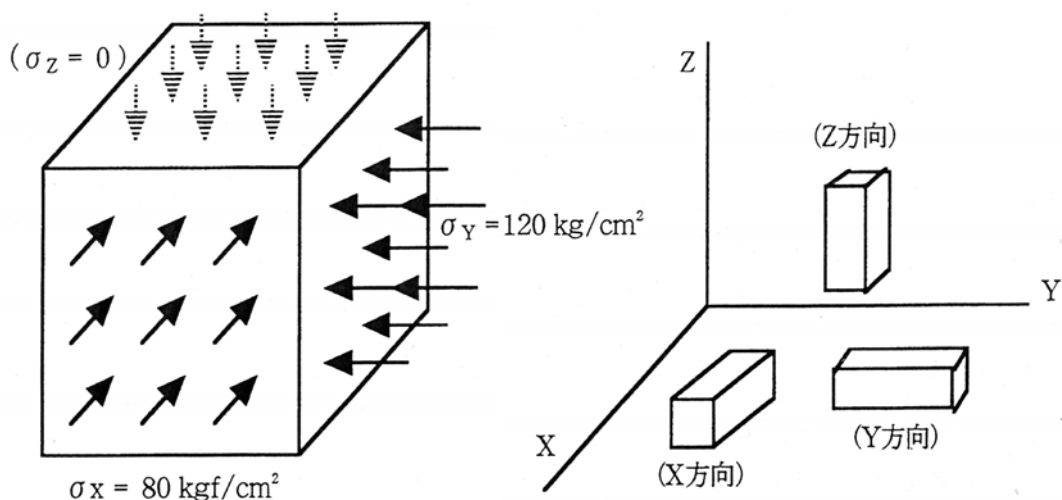
AE 法による初期地圧測定では、試験片の一軸荷重時に認められるカイザー効果を利用して先行応力としての初期地圧を求めている。一般に、地下に存在する岩石は三次元的な応力状態下にあるが、本測定法では採取された岩石試料から試験片を作製し、この試験片の荷重方向の地圧成分が測定されるという前提にたっている。つまりカイザー効果は、荷重方向以外の先行応力の影響を受けなく、荷重方向に独立であることが必要となる。

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。

1) モルタルの二軸同時荷重試験片を用いた3方向試験

金川ら⁹⁾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二方向から異なる応力を同時にモルタル試験片に与えた。試験片の形状は一辺20cmの立方体で、与えた応力は独立する三面にそれぞれ $\sigma_x = 80 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_y = 120 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_z = 0 \text{ kgf/cm}^2$ （荷重応力なし）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、 $25 \times 25 \times 75 \text{ mm}$ の直方体である。これらの二軸試験の荷重方向と試験片の作製方法を図4.2.1に示す。

AE試験によって得られたAE発生率-荷重時間の関係およびAE累積数-荷重荷重の関係の一例を図4.2.2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方向については荷重初期から多くの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4.2.3にヒストグラムで示されている。



(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 $25 \times 25 \times 75$ (cm)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 4.2.1 二軸試験の荷重方向と試験片の作製方法⁹⁾

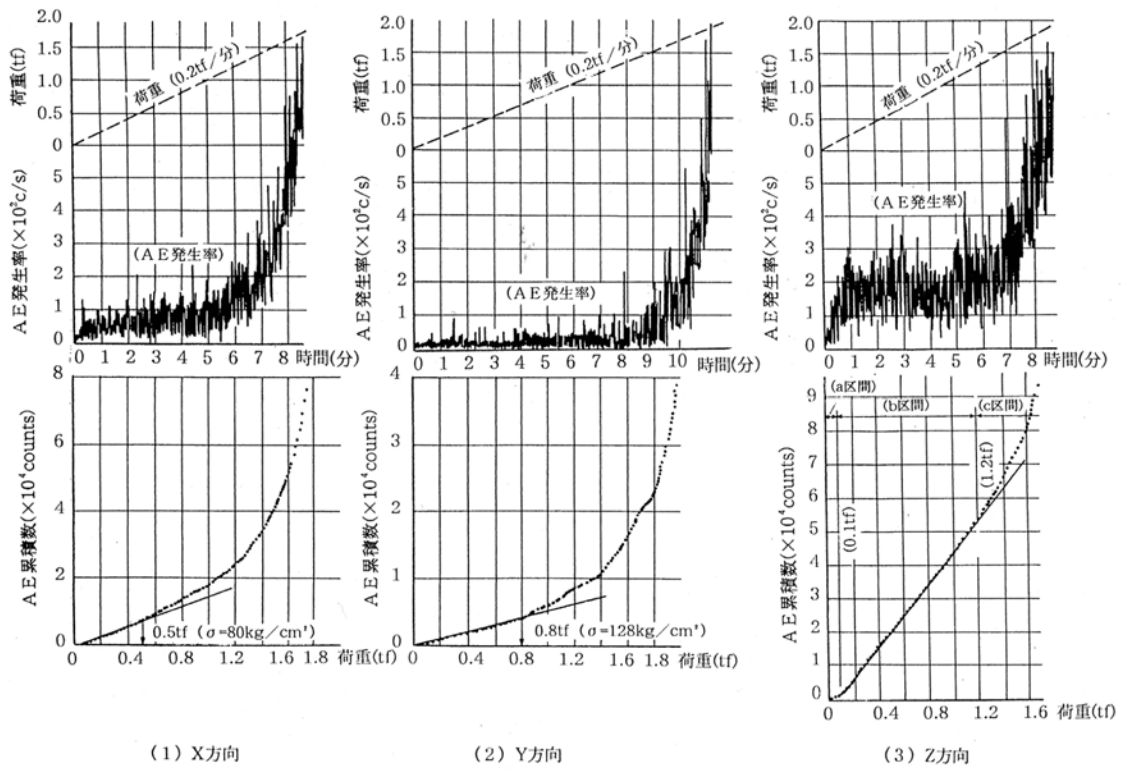


図 4.2.2 二軸载荷を行ったモルタル材料の各方向のカイザー効果測定例⁹⁾

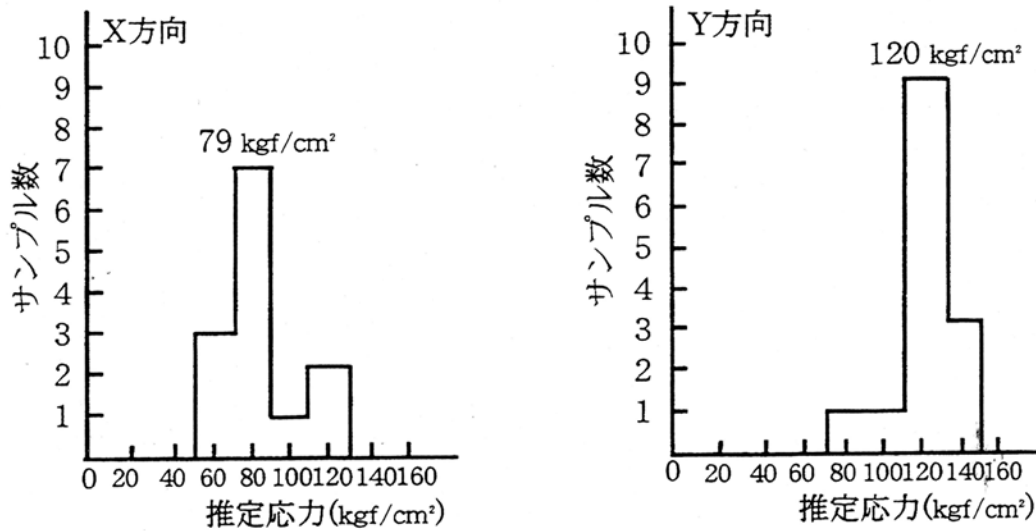


図 4.2.3 二軸方向载荷を行ったモルタル材料の先行応力の推定結果⁹⁾

2) 新小松安山岩の一軸荷重試験片を用いた方向別試験

吉川ら¹⁰⁾は、新小松安山岩に先行応力として一軸荷重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、試験片は荷重軸方向を含め 5 つの異なる角度から切り出している。図 4.2.4 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、荷重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。

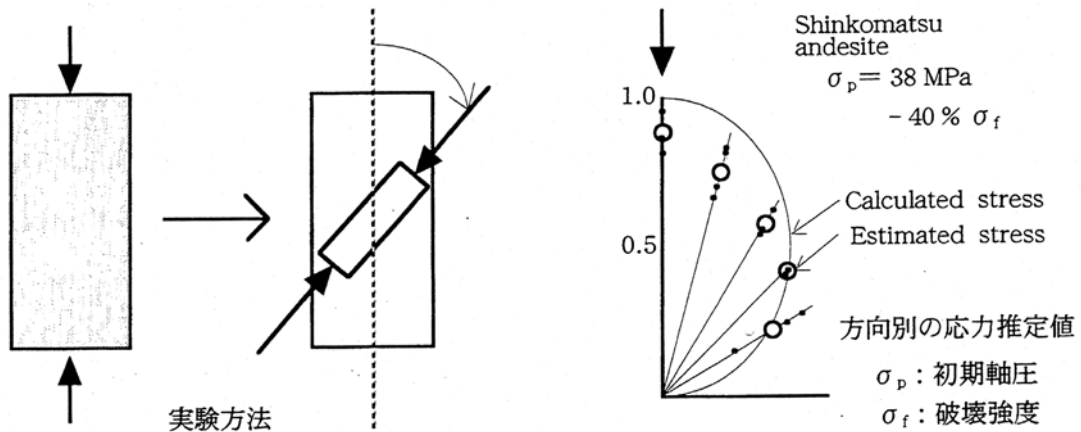


図 4.2.4 一軸圧縮応力場における各方向の応力測定例¹⁰⁾

3) 花崗岩の三軸逐次荷重試験片を用いた 3 方向試験

村山ら¹¹⁾は、三次元応力場を表現するために、一軸荷重装置を用いて異なる応力を逐次花崗岩試験片に与えた。試験片の形状は一辺 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、各荷重ともひずみが飽和するまで繰返し行った。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。これらの荷重方向と試験片の作製方法を図 4.2.5 に示す。AE 試験によって得られた AE 累積数-荷重応力-ひずみの関係の一例を図 4.2.6 に示す。X 方向、Y 方向、Z 方向ともにその方向の先行応力付近で AE の急増が認められる。

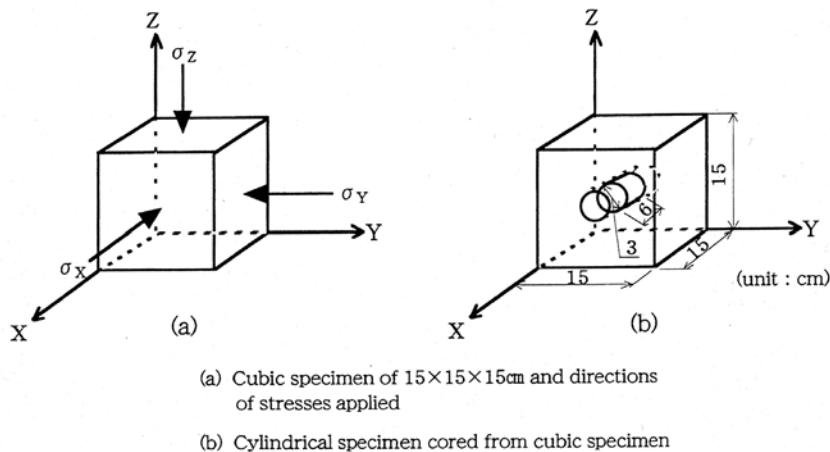


図 4.2.5 三軸先行応力と試験片の方向¹¹⁾

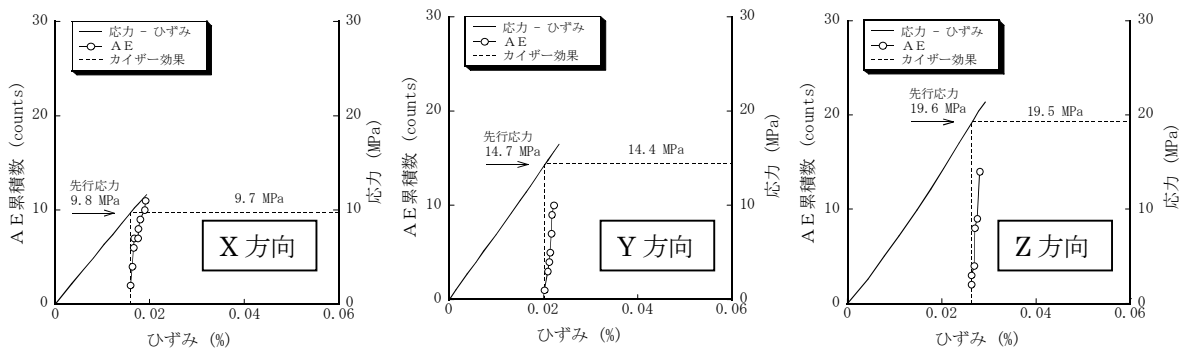


図 4.2.6 三方向(Y,Y,Z)における試験結果 1)

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

瀬戸ら¹²⁾は、側圧を受けた試験片の応力状態を表現するために、一軸載荷装置を用いて 2 つの方向に異なる応力を図 4.2.7 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いている。試験片の形状は 30×30×60mm の直方体で、与えた応力は AE 試験を行う軸方向に 10MPa、側圧として軸と直交する一面に 20MPa とし、各載荷ともひずみが飽和するまで 50~70 回繰返し行った。除荷後 1 週間おいて 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) - 載荷応力関係の一例を図 4.2.7 に示す。ここでは、先行応力 10MPa の方向に 4 回の繰返し載荷を行っている。図 4.2.7 では、1 回目から 3 回目の載荷時において、軸方向の先行応力に相当する 10.1MPa 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、19.9MPa、19.6MPa、19.5MPa 付近にも AE の急増点が認められる。

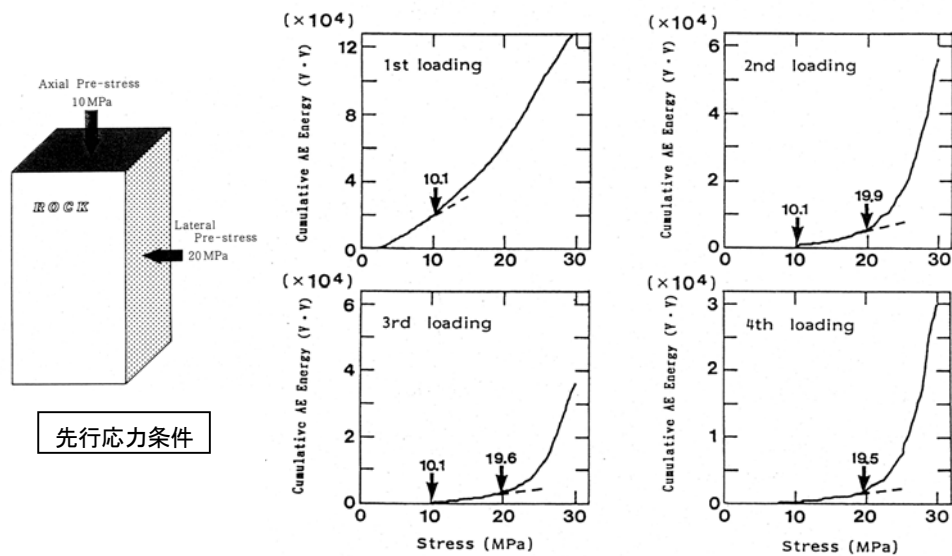
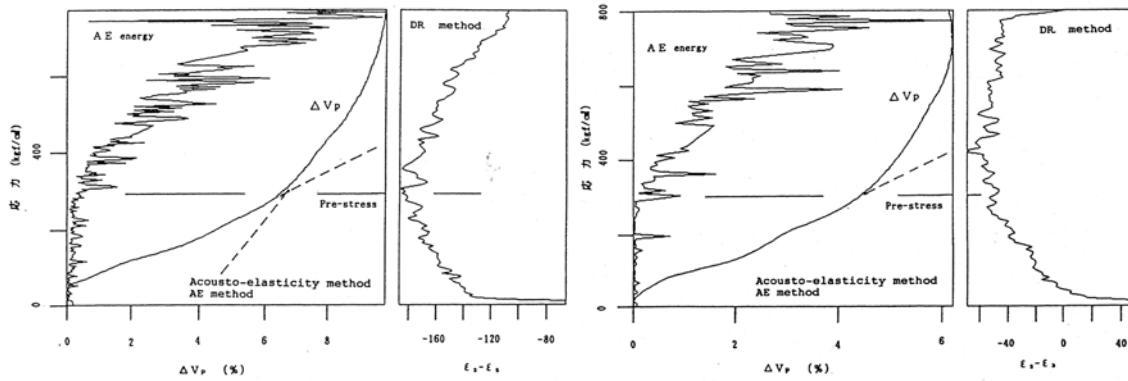


図 4.2.7 二方向から先行応力を受けた花崗岩の繰返し載荷時の AE エネルギー変化¹²⁾
(軸圧 : 10MPa、側圧 : 20MPa)

5) 花崗岩の側圧を受けた試験片を用いた 1 方向試験

新ら¹³⁾は、側圧を受けた試験片の応力状態を表現するために、一軸荷重装置を用いて 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 300kgf/cm^2 、側圧として軸と直交する一面に 500kgf/cm^2 とし、各荷重ともひずみが飽和するまで 70 回繰返し行った。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) - 荷重応力関係の一例を図 4.2.8 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、側圧の有無に係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。



a (側方荷重履歴あり)

b (側方荷重履歴なし)

図 4.2.8 二方向から先行応力を受けた花崗岩の繰返し荷重時の AE エネルギー変化¹³⁾

4.3 時間依存性

1) 時間依存性に関する一考察

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、数日から数年のオーダーまで大きな開きがあるのが実状である^{1),3),4),15),16),20)}。この議論は、岩石コアがどのようなメカニズムで地圧情報を記憶しているのか、地圧情報を消失するとすれば何が影響するのかの議論に収束する。

まず、岩石コアが地圧情報を記憶するメカニズムについて考える。地下において地圧を受けて拘束された状態から、ボーリングによって地圧が解放されると、そのとき採取された岩石コアは圧縮応力が解放された瞬間から引張り変形する。このときの引張り変形は、方向によってその変形量、変形速度ともに異なっているが、潜在亀裂が存在しなかったとすれば、この引張り変形の原因は、岩石コア内に地圧の解放によって新たに形成された微小な亀裂の開口に起因していると考えられる。AE 法においては、この引張り変形後の岩石コアに圧縮応力を作用させたときの、開口亀裂の閉塞・進展に伴う AE を測定することによって先行応力を測定する。地圧の測定は、この微小亀裂の開口による変形が弾性的な変形に限られ、試験時に加えられる圧縮応力によるひずみエネルギーと亀裂開口による解放ひずみエネルギーが一致するとき、高い精度での測定が実現すると考えられる。

しかし、開口変形後も非線形な変形が継続するとすれば、圧縮応力によって加えられるエネルギーと解放エネルギーとの差が大きくなるに伴って測定誤差が大きくなると考えられる。岩石コア採取後の非弾性的な変形が継続する要因としては、岩石の強度に対する解放された地圧の比率、水分や温度等の環境条件、岩石の構成粒子の違い等が考えられる。例えば、非弾性的な変形が発生しにくい条件を考えると、i) 地圧の大きさは岩石の強度に比較して十分に小さい、ii) 岩石コアが水分や温度の影響を受けない条件に存在し、かつ採取後も適切に保管されている、iii) 岩石が不連続面や礫等を含まない均質である、等が挙げられる。これらの条件が満足されれば、継続的な非弾性的な変形が発生するとは考えにくく、時間依存性の問題は発生しないものと考えられる。

2) 基礎的な試験による確認例

ここでは、花崗岩に強度の約 15%程度の先行応力を与えた後 7 年間実験室内（温度 10～35℃）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。つまり、時間依存性は発生しないことを想定した条件での確認試験の結果を示す。

図 4.3.1 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。同図に示した試験片の先行応力は 20.44MPa である。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

回目から 4 回目までの AE の結果を示している。1 回目の荷重では、荷重直後から 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 (20.1MPa) で AE の発生率が増加していることが分かる。つまり、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、応力レベルが強度に対して十分に小さく、かつ保管状態が適当であればカイザー効果が明瞭に出現することが確認できた。また、2 回目荷重時において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 20.3MPa の応力レベルに荷重 1 回目より明瞭に AE 急増点が認められる。

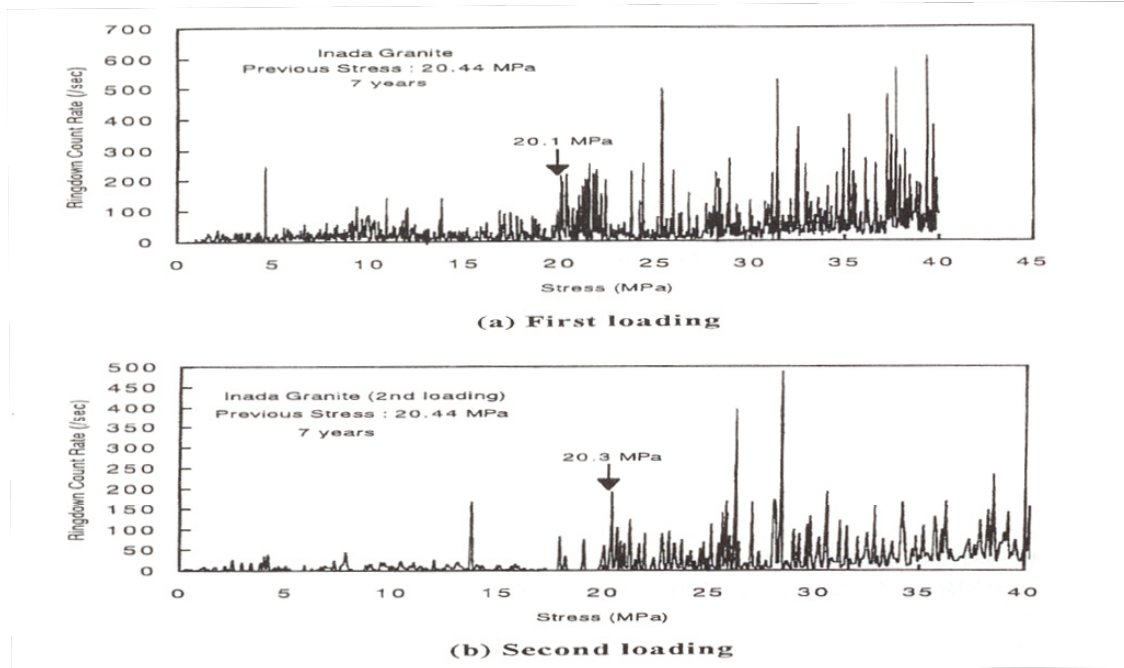


図 4.3.1 先行応力を除荷後 7 年後に実施した繰り返し一軸圧縮試験時の AE 発生特性 (1 回目荷重時と 2 回目荷重時の結果)

図 4.3.2 は、図 4.3.1 で示した AE 試験と同時に測定した DRA による先行応力推定結果を示している。ここで示したひずみ差-応力線図は、それぞれ 2 回目から 5 回目荷重時でのひずみから 1 回目荷重時のひずみを差し引いた時のひずみと応力との関係を示している。すべてのひずみ差-応力線図に明瞭な屈曲点が認められ、かつその屈曲点は 7 年前に与えた先行応力に近い応力レベルに出現しており、この 4 つの解析結果から求められる推定値はほぼ一致している。その応力レベルは、約 19MPa であり、7 年の経過時間を有する岩石試験片についても、DRA によっても精度良く先行応力を推定できることが明らかとなった。

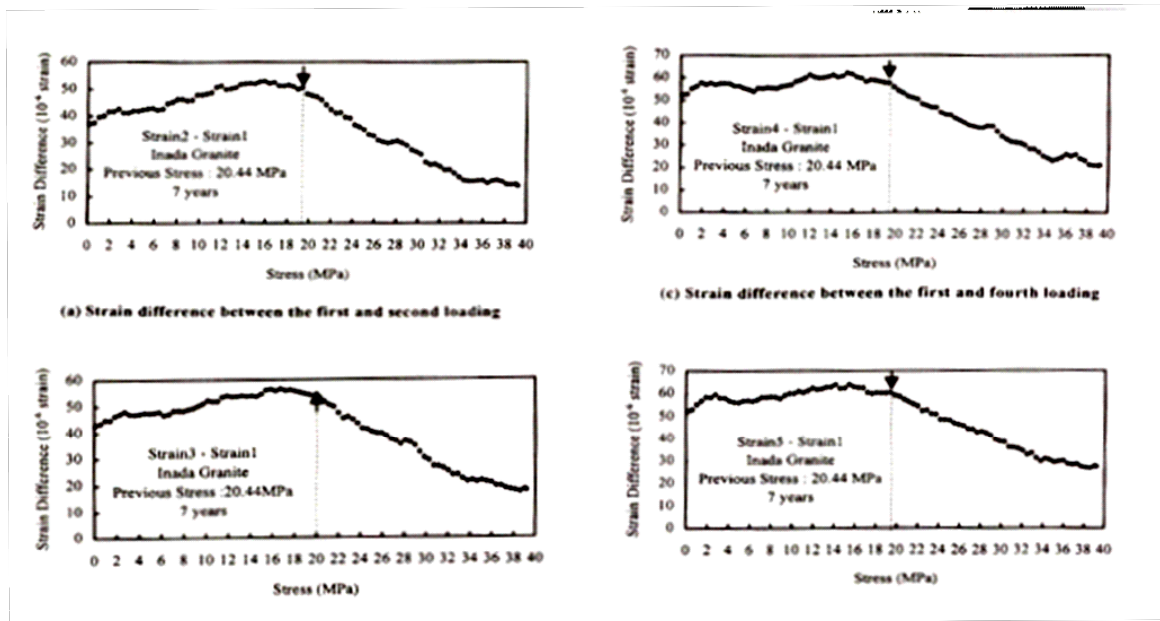


図 4.3.2 先行応力を除荷後 7 年後に実施した繰り返し一軸圧縮試験から実施した DRA の結果

繰り返し载荷時の AE 発生挙動と DRA によって推定される先行応力の推定精度と経過時間との関係を図 4.3.3 に示す。同図から分かるように、AE と DRA による推定結果は経過時間が 7 年の長期になっても 10% 程度の精度で推定可能である。したがって、本研究で対象とした稲田花崗岩については経過時間が数日オーダーから 7 年までの長い範囲にわたって、経過時間の影響を無視できる精度で先行応力を推定できる。なお、ここに示した結果に関する実験はすべて先述したのと同じ条件で行い、先行応力を与えてから試験までの間の試験片の保存はすべて同じ室内で行った。

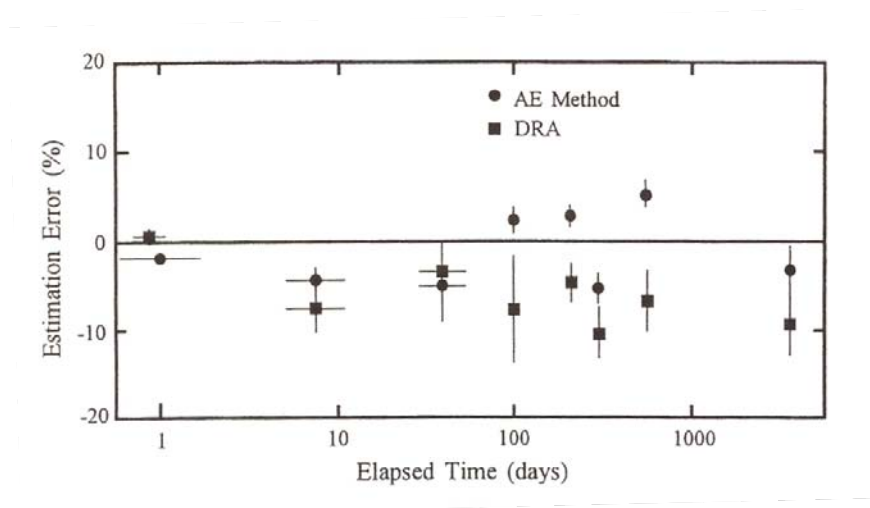


図 4.3.3 AE 法と DRA による先行応力推定誤差と経過時間との関係

4.4 載荷履歴の影響

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。

金川ら¹⁴⁾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 法では地質年代的に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を検出しやすい傾向があるとしている。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、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議論に行き着くことになる。

一方、道廣ら⁸⁾は、推定される応力は、試験時の載荷 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載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れ、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載荷パターンを変えて先行応力を与えた後、繰り返し載荷試験を行ない、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載荷したいつの応力に相当するのかについて調べた結果である。

先行応力の載荷パターンとしては以下に示す 5 種類の載荷パターンである。

- 1) 載荷パターン 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 時間クリープ的に載荷した後に、その応力以上の応力レベルで繰り返し載荷を行なうパターン（図 4.4.1(a)）。この載荷パターンは採掘処女区域における、初期応力を想定しており、他の全載荷パターンの基本型である。
- 2) 載荷パターン B：任意の応力を約 1 時間クリープ的に載荷した後に、その応力の約半分を約 3 時間クリープ的に載荷し、その後、最初に与えた応力以上の応力レベルで繰り返し載荷を行なうパターン（図 4.4.1(b)）。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なうパターン。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 (図 4.4.1(c))。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 $\sigma_b \rightarrow \sigma_a \rightarrow \sigma_c$ ($\sigma_a > \sigma_b > \sigma_c$) としたパターン (図 4.4.1(d))。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小さくなった状態を想定したものである。
- 5) 荷重パターン E : パターン C、D 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 (図 4.4.1(e))。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。

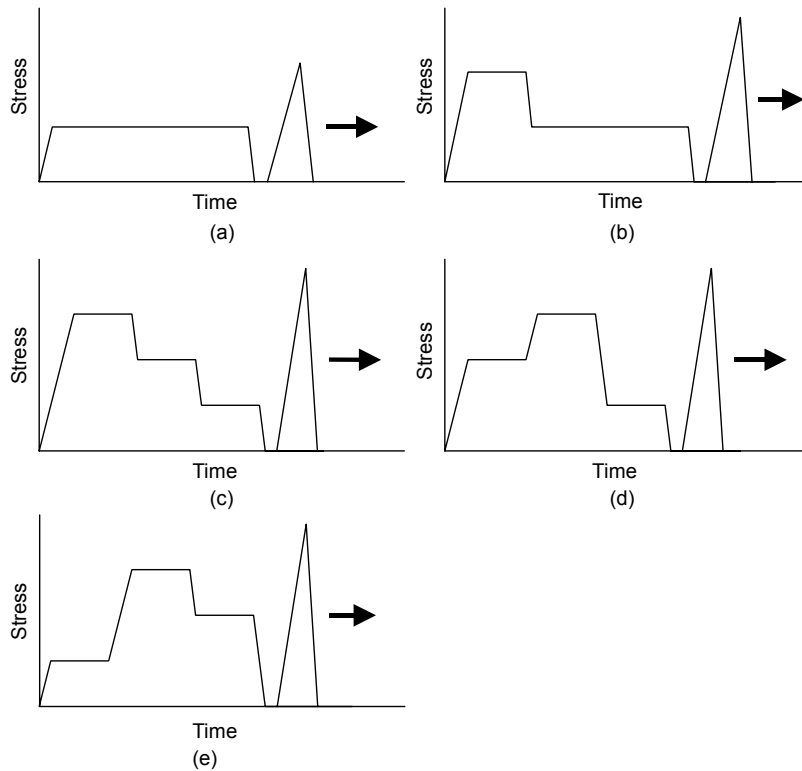


図 4.4.1 先行応力荷重パターン (a)~(e)

図 4.4.2 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。5MPa の封圧下で先行軸応力 14.8MPa を与えた後、一軸応力下において 22MPa まで 5 回の繰り返し荷重試験を行なった。DRA 法による推定応力値は 15.1MPa (推定誤差 2%)、AE 法による推定応力値は 15.7MPa (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。

図 4.4.3 に、載荷パターン B で先行応力を与えた来待砂岩の試験結果を示す。5MPa の封圧下で先行軸応力 19MPa を 1 時間クリープ的に載荷した後、9.8MPa まで応力を低下させ、その後 3 時間クリープ的に 9.8MPa の応力を与えた。DRA 法による推定応力値は 9.9MPa (推定誤差 1%)、AE 法による推定応力値は 10.6MPa (推定誤差 8.2%) であり、推定応力値は最大履歴応力(19MPa)ではなく直近の先行軸応力(9.8MPa)に近い応力値が推定された。

図 4.4.4 に、載荷パターン C で先行応力を与えた稲田花崗岩の試験結果を示す。10MPa 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載荷した。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。

図 4.4.5 に載荷パターン E 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載荷した。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

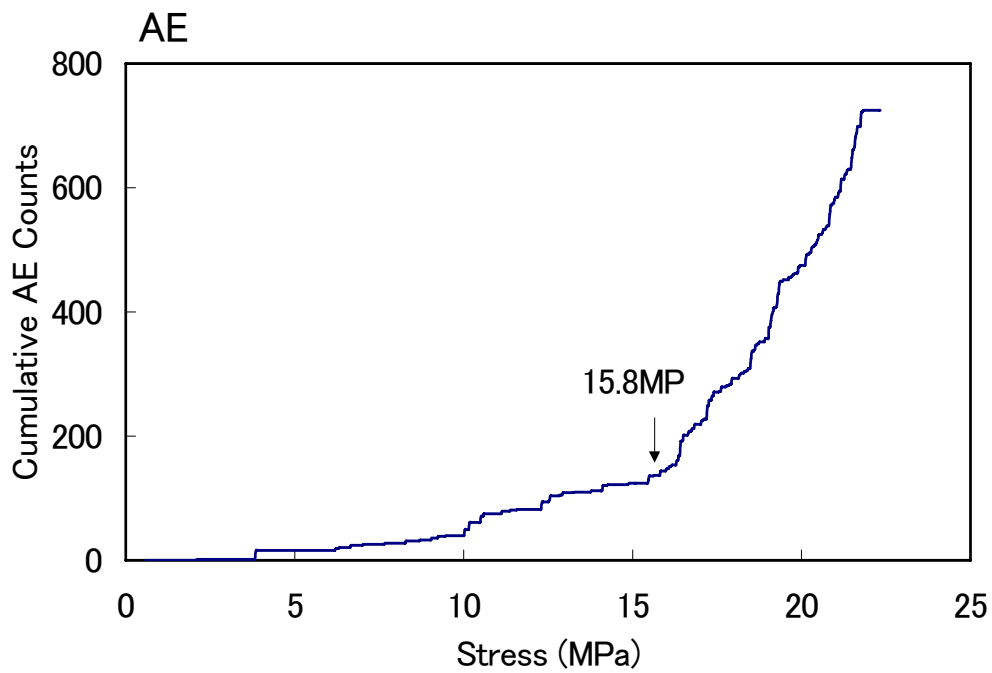
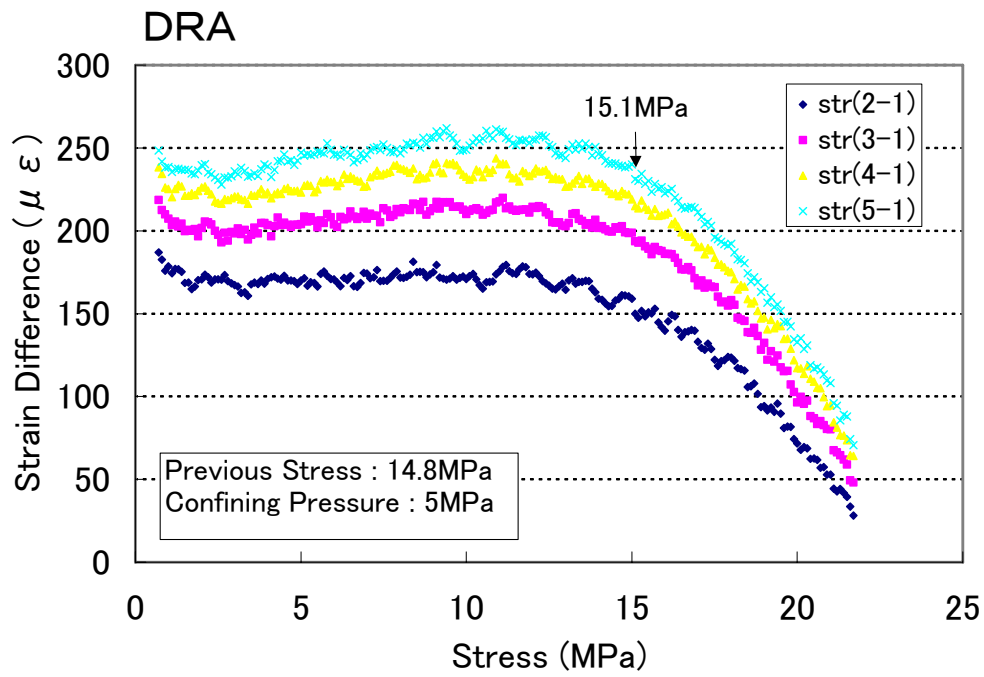


図 4.4.2 DRA と AE 法による先行応力推定結果（来待砂岩、先行軸応力：14.8MPa、封圧：5MPa、↓は推定応力値）

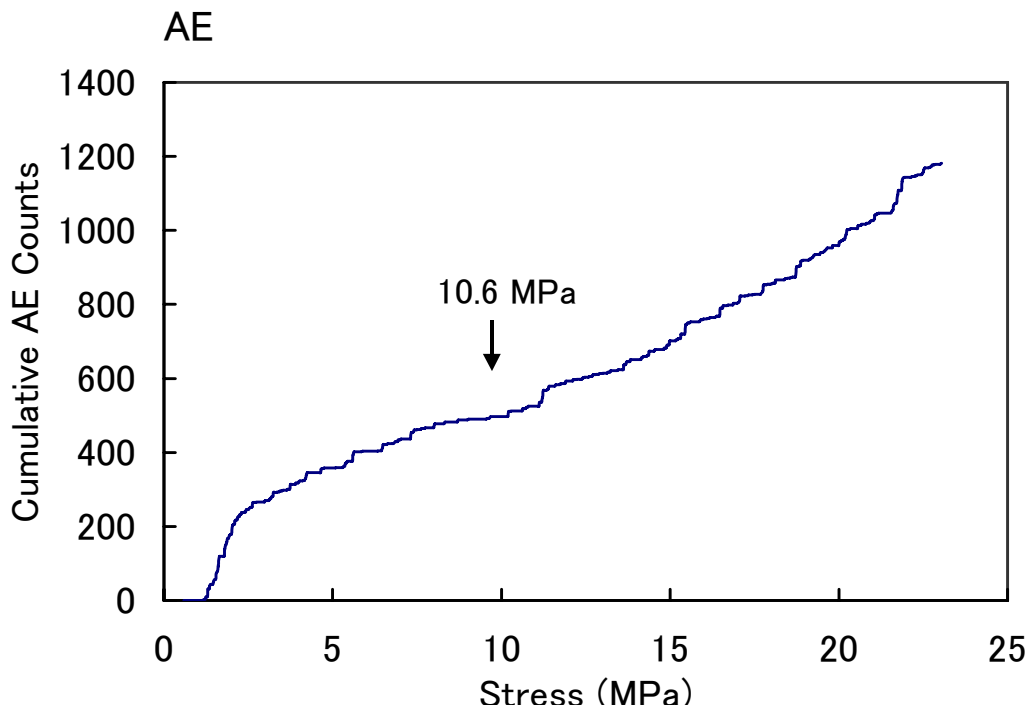
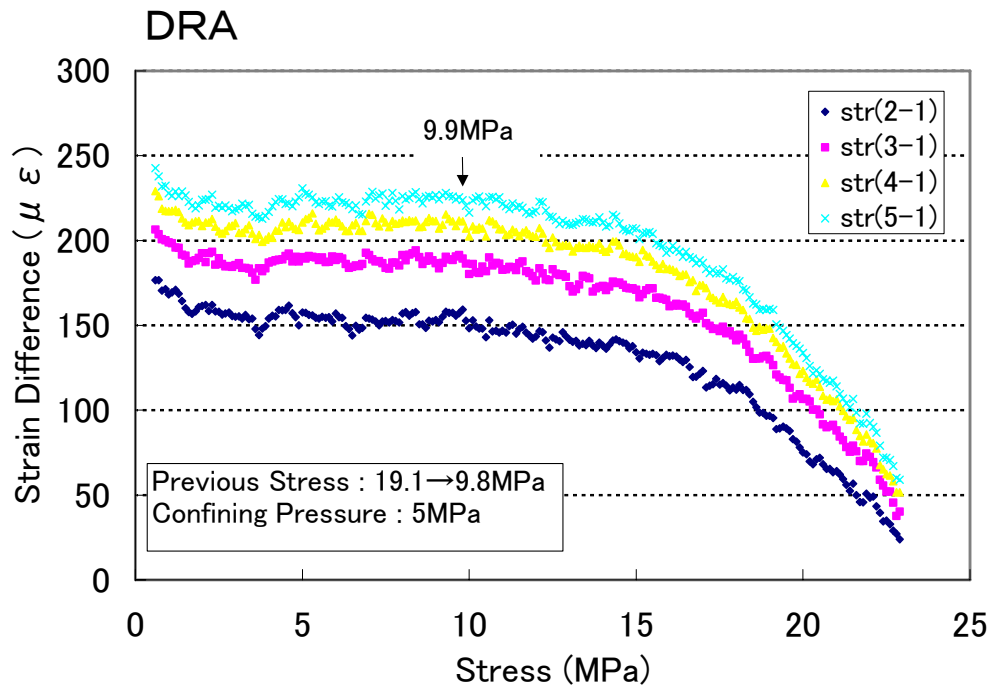


図 4.4.3 DRA と AE 法による先行応力推定結果 (来待砂岩、先行軸応力: 19→9.8MPa、封圧: 5MPa、↓は推定応力値)

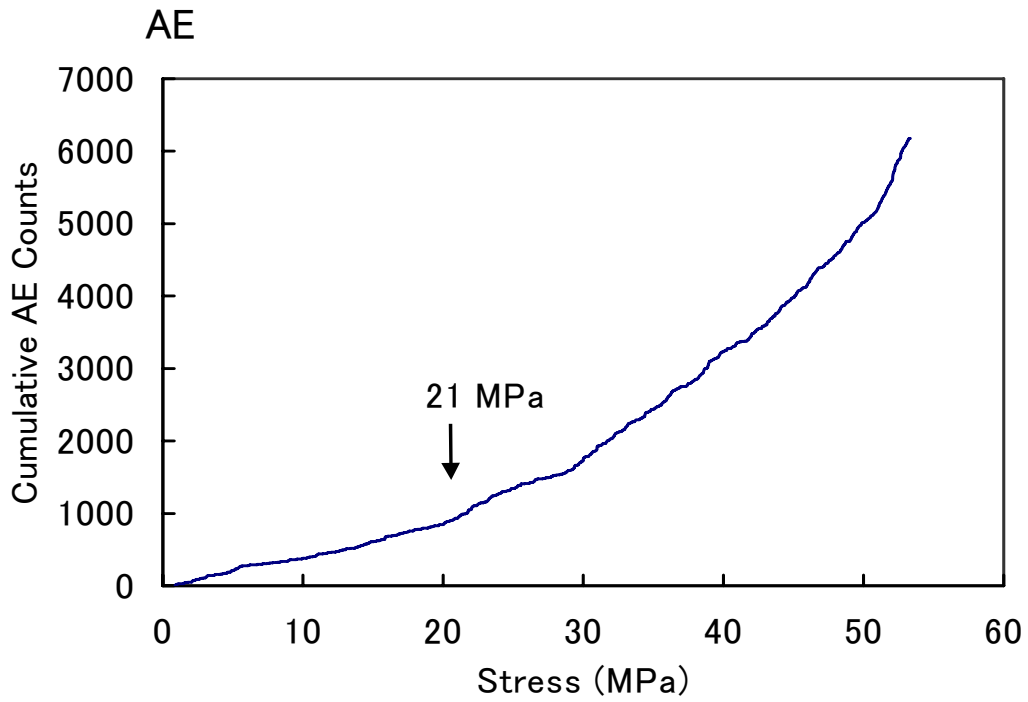
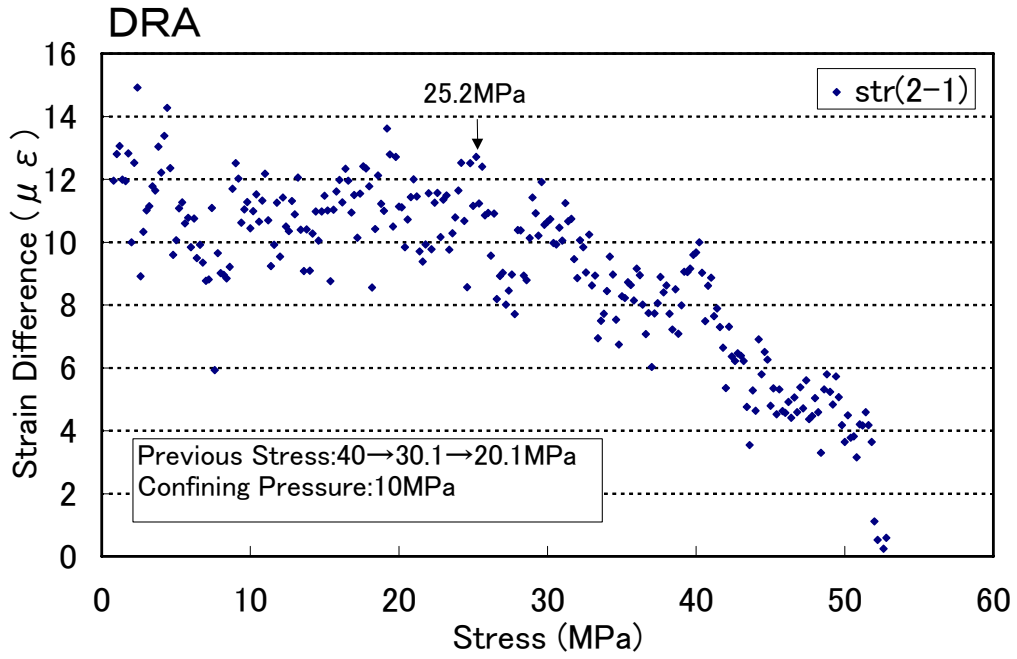


図 4.4.4 DRA と AE 法による先行応力推定結果（稲田花崗岩、先行軸応力：40→30.1→20.1MPa、封圧：10MPa、↓は推定応力値）

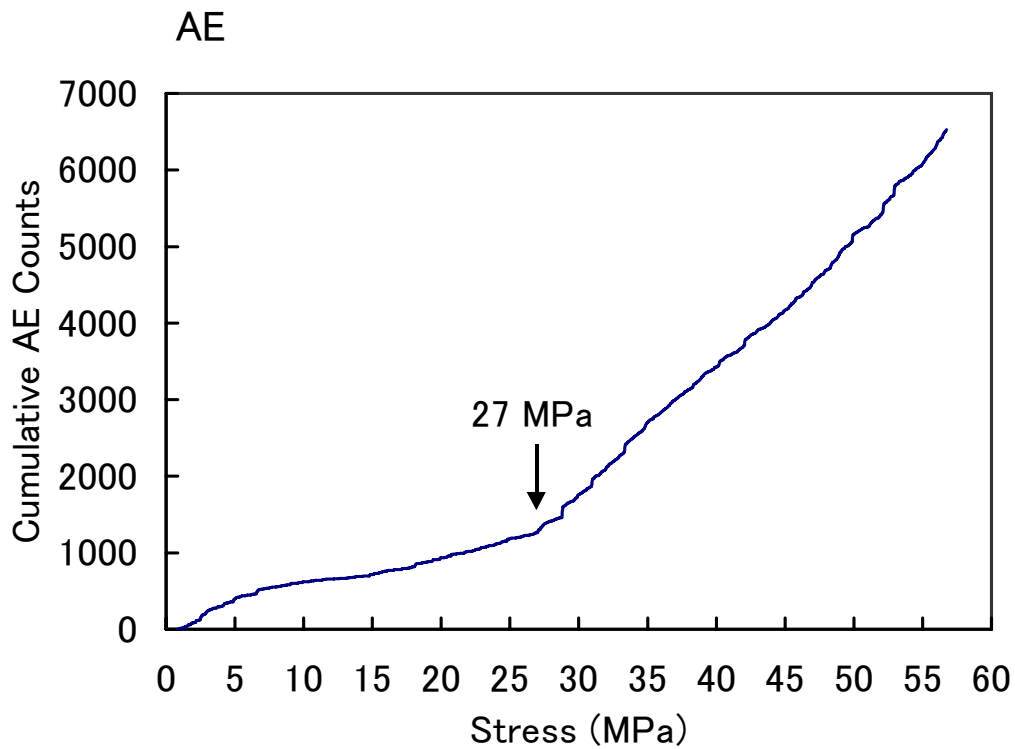
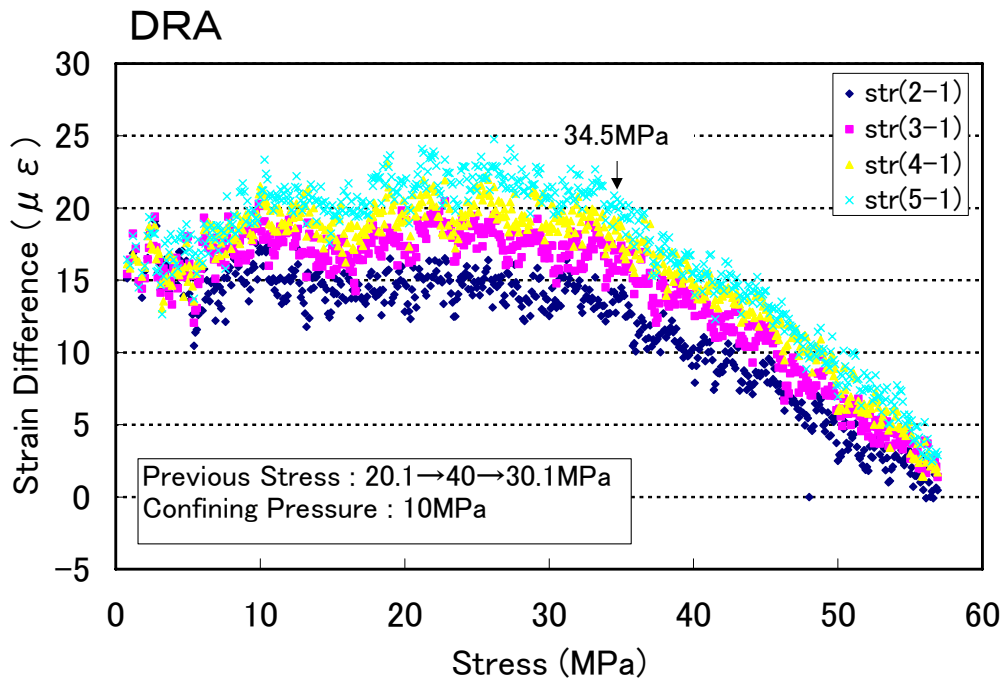
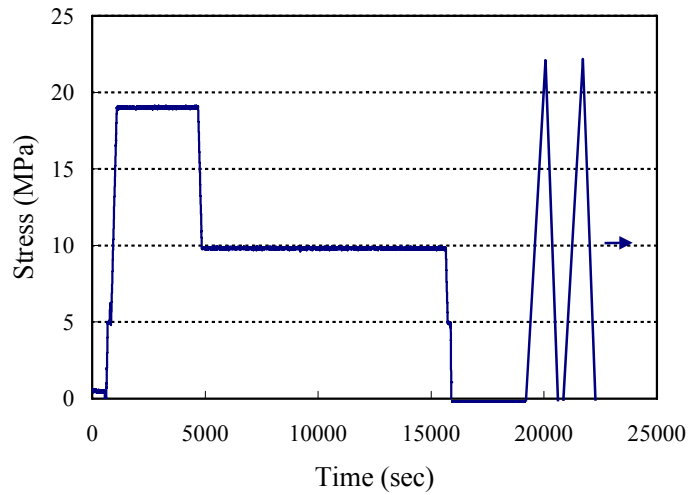


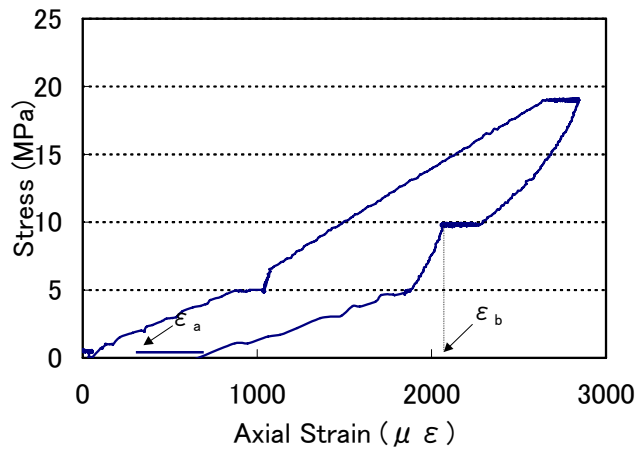
図 4.4.5 DRA と AE 法による先行応力推定結果 (稲田花崗岩、先行軸応力 : 20.1→40→30.1MPa、封圧 : 10MPa、↓は推定応力値)

DRA 法と AE 法により推定された応力値での軸ひずみ量と、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との関係について、以下に述べる。

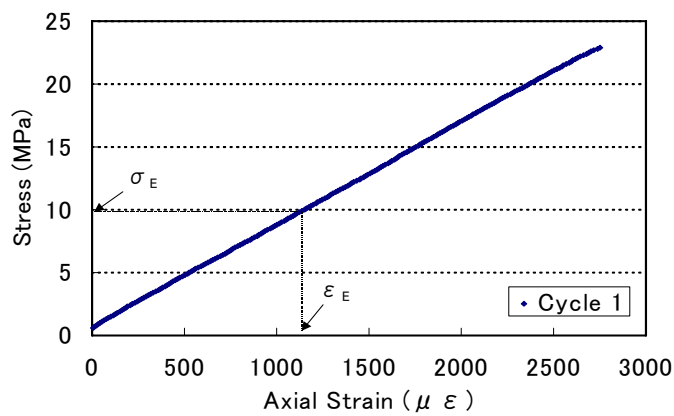
まず、一例として、図 4.4.6 に载荷パターン B での来待砂岩における実験結果を示す。5MPa の封圧下において、载荷軸方向の応力を 19MPa で 1 時間与えた後、9.8MPa で 3 時間作用させた。図 4.4.6 (a) は、実験の载荷パターンである。繰り返し载荷試験直前に作用していた応力値は 9.8MPa である。図 4.4.6 (b) は、先行応力载荷時の応力-軸ひずみ関係である。ここで、応力を解放する直前の軸ひずみ量を ε_b 、応力を解放した後の残留軸ひずみ量を ε_a とすると、解放された弾性軸ひずみ量 ε_R は、 $\varepsilon_R = \varepsilon_b - \varepsilon_a$ で表わされる。ここでは、 $\varepsilon_R = 1800 \mu\varepsilon$ である。図 4.4.6 (c) は、繰り返し一軸载荷試験の载荷 1 回目における応力-軸ひずみ関係である。DRA 法により推定された先行応力は 9.9MPa であり、その推定応力値での軸ひずみ量は $\varepsilon_E = 1100 \mu\varepsilon$ である。したがって、 $\varepsilon_R \neq \varepsilon_E$ であり、弾性的に解放された軸ひずみ量と推定された応力値での軸ひずみ量は一致していない。



(a) 応力—時間関係 (5MPa の封圧下で先行軸応力 19→9.8MPa)



(b) 先行応力荷重時の応力—軸ひずみ関係 (5MPa の封圧下で先行軸応力: 19→9.8MPa)



(c) 試験時荷重 1 回目の応力—軸ひずみ関係 (一軸圧縮応力下)

図 4.4.6 先行応力時の軸ひずみ量と試験時荷重 1 回目の軸ひずみ量

DRA 法と AE 法により推定された応力値でのひずみエネルギーと、先行応力解放時に弾性的に解放されたひずみエネルギーとの関係について述べる。

図 4.4.7 に载荷パターン B での来待砂岩における実験結果を示す。5MPa の封圧下において、载荷軸方向の応力を 19MPa で 1 時間与えた後、9.8MPa で 3 時間作用させた。図 4.4.7 (a) は、実験の载荷パターンである。図 4.4.7 (b) は、先行応力载荷時の応力-軸ひずみ関係である。ここで、直近の先行応力での変位量を D_b 、応力を解放した後の残留変位量を D_a とすると、弾性的に解放されたひずみエネルギー W_R は、

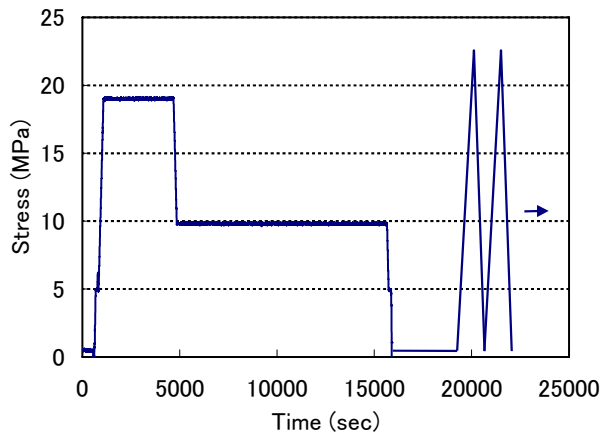
$$W_R = \int_{D_b}^{D_a} P \cdot dD \quad (1)$$

で表わされる。ここでは、 $W_R=2.28 \times 10^{-3}(\text{J})$ である。図 4.4.7 (c) は、繰り返し一軸载荷試験の载荷 1 回目における応力-軸ひずみ関係である。DRA 法により推定された先行応力は 9.9MPa (図 4.4.3) であり、推定応力値までの変位量は $D_E=0.075(\text{mm})$ であり、推定応力値でのひずみエネルギー W_E は、

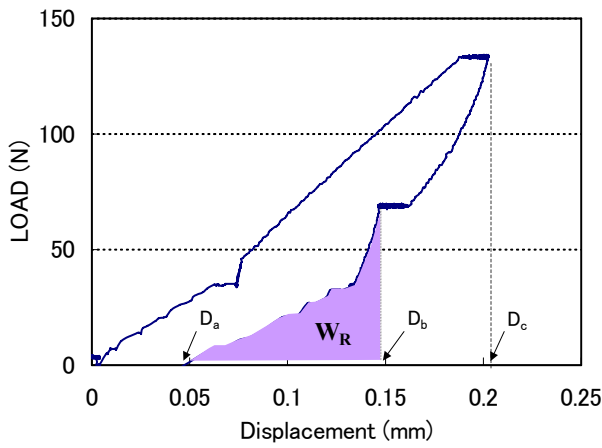
$$W_E = \int_0^{D_E} P \cdot dD \quad (2)$$

で表わされる。ここでは、 $W_E=2.79 \times 10^{-3}(\text{J})$ である。よって、 $W_R \doteq W_E$ となり、弾性的に解放されたひずみエネルギーと推定された応力値でのひずみエネルギーはほぼ一致している。

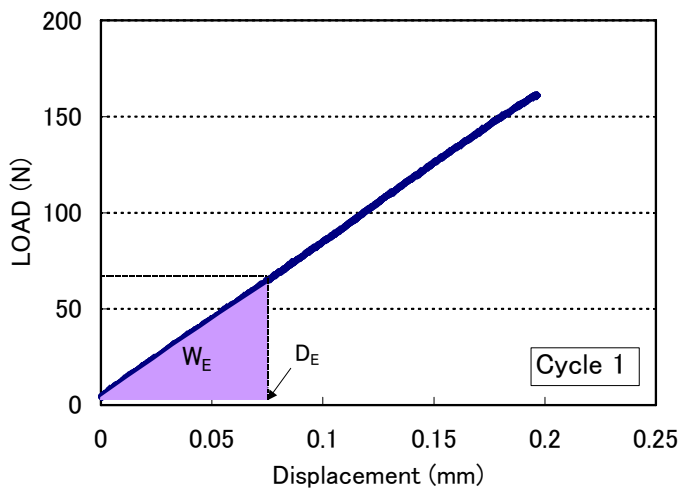
推定応力値とひずみエネルギーについて、载荷パターン毎にまとめた結果を表 4.4.1 に示す。DRA 法と AE 法による推定応力値は最大履歴応力ではなく、直近の先行応力が推定される傾向にあることが確認できる。ここで、直近の先行応力解放時の解放されたひずみエネルギーと、試験時载荷 1 回目における推定応力値までの仕事量がほぼ対応していることが認められる。



(a) 応力－時間関係(5MPaの封圧下で先行軸応力 19→9.8MPa)




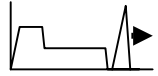


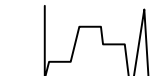
(b) 先行応力載荷時の荷重－変位関係(5MPaの封圧下で先行軸応力 19→9.8MPa)



(c) 試験時載荷 1 回目の荷重－変位関係(一軸圧縮応力下)

図 4.4.7 先行応力時のひずみエネルギーと試験時載荷 1 回目のひずみエネルギー

表 4.4.1 先行応力载荷パターンと軸ひずみエネルギー（封圧下において先行応力を与えた場合）

先行応力载荷パターン ()内は先行応力の大きさ []内は封圧の大きさ	先行応力推定値 上：DRA 下：AE法	直近の先行応力から解放された軸ひずみエネルギー	最大の先行応力から解放された軸ひずみエネルギー	試験時における、推定 応力値に対応する軸ひずみエネルギー
 (14.8MPa) [5MPa]	15.1MPa 15.7MPa	4.52×10^{-3} (J)	4.52×10^{-3} (J)	6.48×10^{-3} (J)
 (19.0→9.8MPa) [5MPa]	9.9MPa 10.6MPa	2.28×10^{-3} (J)	7.39×10^{-3} (J)	2.79×10^{-3} (J) 2.99×10^{-3} (J)
 (40→30.1→20.1MPa) [10MPa]	25.2MPa 21.0MPa	1.32×10^{-3} (J)	4.26×10^{-3} (J)	2.95×10^{-3} (J) 2.45×10^{-3} (J)
 (30→40→20.1MPa) [10MPa]	32.8MPa 20.7MPa	1.90×10^{-3} (J)	4.9×10^{-3} (J)	4.45×10^{-3} (J) 2.80×10^{-3} (J)
 (20.1→40→30.1MPa) [10MPa]	34.5MPa 28MPa	3.36×10^{-3} (J)	4.56×10^{-3} (J)	5.19×10^{-3} (J) 3.52×10^{-3} (J)

4.5 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考えられる。このため組織構造を乱すような要因、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、例えば大別しても粗粒結晶質岩(深成岩)、細粒結晶質岩(火山岩)、硬質堆積岩、軟質堆積岩などがありその組織構造は全く異なることを考慮すると、そのような乾湿・熱履歴に関する既往研究例はごく一部についての結果である。そのため、現段階で乾湿・熱履歴の影響についてはまだ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。

1) 乾湿の影響

金川ら¹⁴⁾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 4.5.1)。

Kurita and Fujii¹⁵⁾は、花崗岩を用いて先行応力除荷後供試体を 1 日水浸した後にカイザー効果の検証を行っている (図 4.5.2)。この結果、乾燥状態のままで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。

吉川ら¹⁶⁾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ている (図 4.5.3)。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、室内での先行載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、湿潤のカイザー効果に対する影響は重大ではないようである。

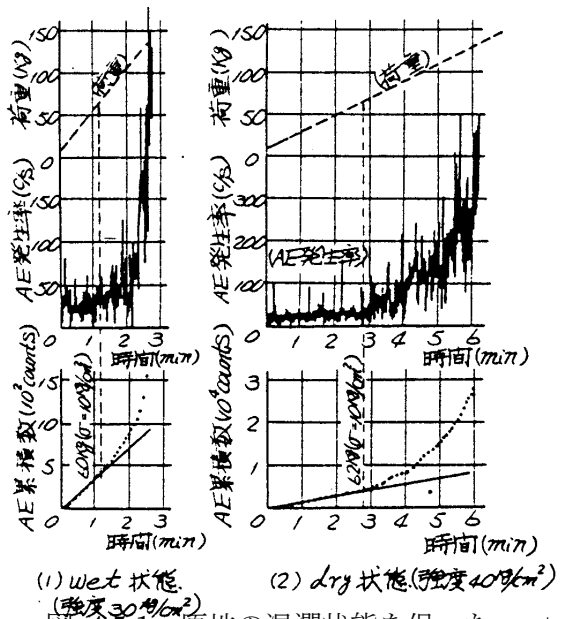
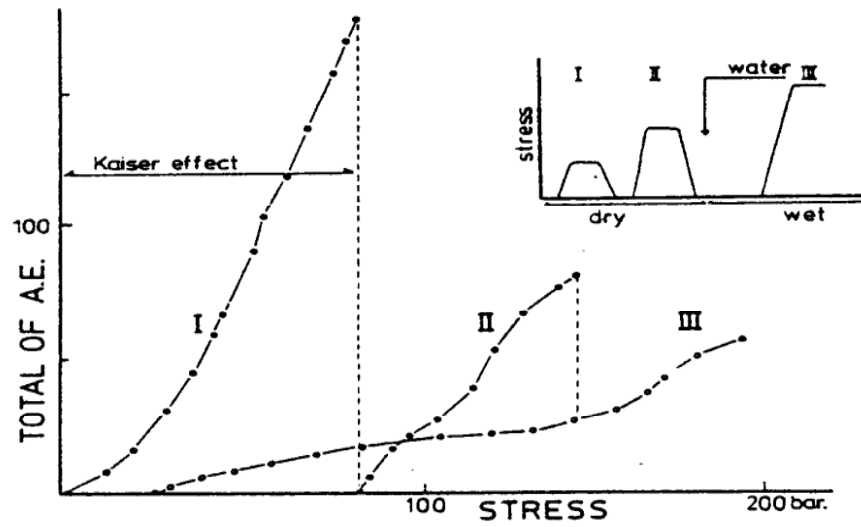
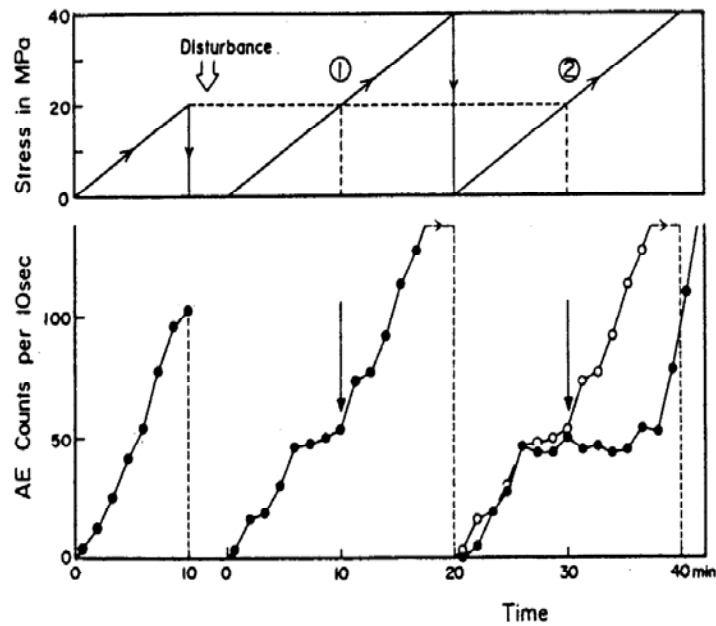


図 4.5.1 原地の湿潤状態を保った wet 状態と室内乾燥させた dry 状態でのカイザー試験¹⁴⁾



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 4.5.2 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)¹⁵⁾



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 4.5.3 乾湿の影響 (吉川ら (1991))¹⁶⁾

2) 熱履歴の影響

金川ら¹⁷⁾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 30MPa, 10MPa, 5MPa のレベルで 60 回程度の繰り返し载荷により与えた。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 発生の増加がわずかに認められる程度であった(図 4.5.4(a))。安山岩と溶結凝灰岩の場合には、加熱の有無に関らず先行応力レベルに AE 増加点が観察された(図 4.5.4(b)(c))。

新ら¹⁸⁾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なうために、2 直線の回帰分析を用いる方法(二直線回帰スキャン法)を用いた。その結果を図 4.5.5 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 4.5.6)。また AE 法から得られた地圧は、当地点の引張強度を用いたコアディスキング発生基準¹⁹⁾ともよく整合した。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。

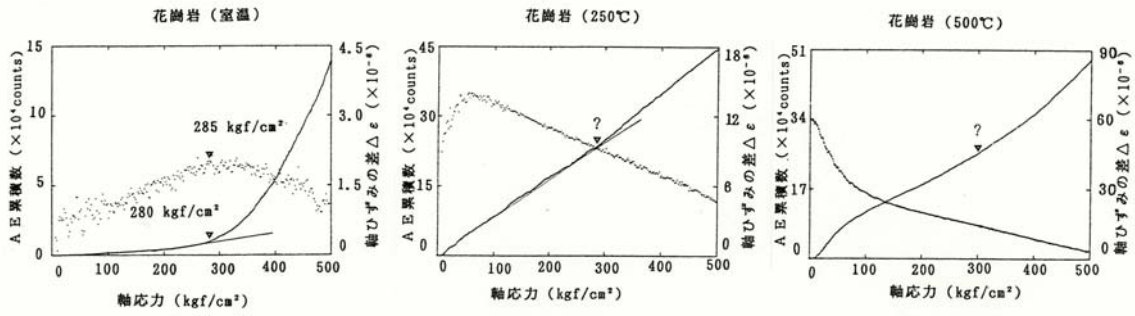


図 4.5.4(a) 花崗岩に先行応力载荷後加熱履歴を
与えてから行ったカイザー試験結果(金川ら 17)

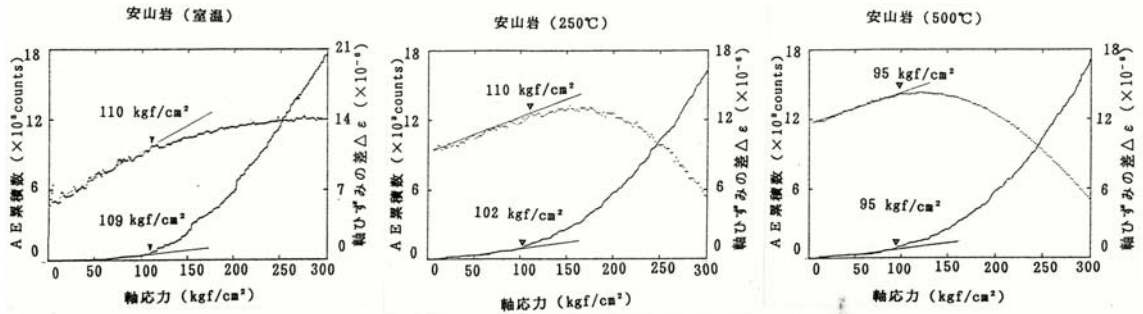


図 4.5.4(b) 安山岩に先行応力载荷後加熱履歴を
与えてから行ったカイザー試験結果(金川ら 17)

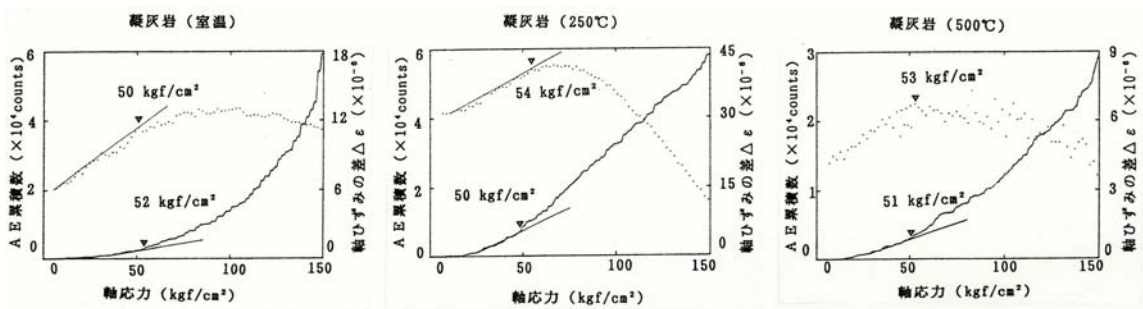


図 4.5.4(c) 凝灰岩に先行応力载荷後加熱履歴を
与えてから行ったカイザー試験結果(金川ら 17)

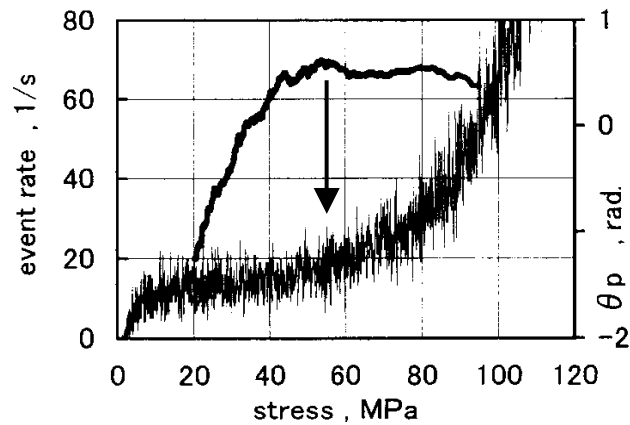


図 4.5.5 地熱地帯から採取した花崗岩試料で行ったカイザー試験(AE 発生率とその増加点検出線)(新ら¹⁸⁾)

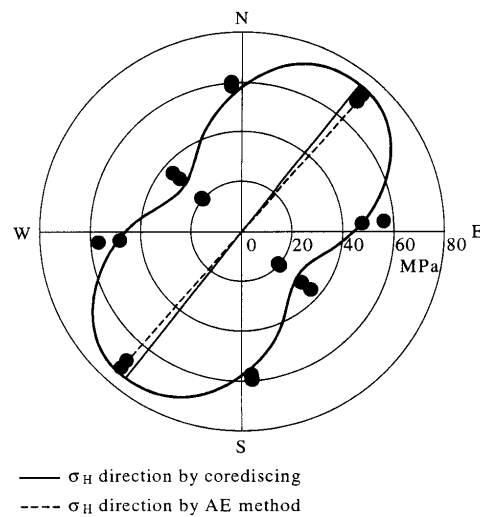


図 4.5.6 地熱地帯の花崗岩試料のカイザー試験による水平面内地圧分布(新ら¹⁸⁾)

熱履歴の影響についての上 2 件の報告でも、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、室内で先行応力载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(先行応力)の検出が可能であったことが特筆される。

5 ケーススタディー

5.1 他の地圧測定法との比較

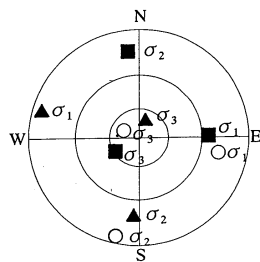
被り深さ 550m での調査横坑内で実施された埋設法 (BDM) ,孔底ひずみ法(CBT)、水圧破砕法(HFM)および AE 法での測定結果を比較する。測定地点の岩種は一軸圧縮強度で 150~200MPa の堅硬な花崗岩である。各種測定の実施内容については表 5.1.1 に示す。ただし、AE 法では水平二次元での応力測定のため、他の測定方法との比較は水平面内の応力状態と鉛直応力値の比較を行う。なお、AE 法は、採取から半年経過した埋設法のオーバーコア (φ 198mm) より試験片を切り出して測定を行った。

表 5.1.1 各種測定の実施内容

項目	埋設法 (BDM)	円錐孔底法 (BMD)	水圧破砕法(HFM)	AE 法
ボーリング孔径及び試験片寸法	ひずみ計器埋設孔 φ 48mm、オーバーコアリング φ 198mm	ひずみ計器埋設孔 φ 76mm、オーバーコアリング φ 76mm	φ 66mm、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	ひとつのコアから水平 4 方向、鉛直下向
試験数	各孔 3 点の計 9 点	1 孔 5 点	各孔 3 点の計 9 点	各方向 3 点の計 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

1) 埋設法および水圧破砕法での初期地圧算出結果

埋設法 (BDM) ,孔底ひずみ法(CBT)および水圧破砕法(HFM)で得られた水平面内の応力状態を図 5.1.1、表 5.1.1 に示す¹⁾。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、方向については良く一致している。



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

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

図 5.1.1 各応力測定結果の比較¹⁾

表 5.1.1 各応力測定結果の比較¹⁾

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

2) AE法の試験結果例と初期地圧算出結果

① 試験結果例（東西方向）

AE法の試験では、200kHzの共振型センサを用い利得は90dBとした。しきい値はバックグラウンドノイズより若干高い値とした。荷重方法は変位制御で、速度は0.2mm/minとし、最大荷重応力は、被り深さが500mであることから高地圧下を考慮して一軸圧縮強度（180MPa）の50%とした。

AE法の試験結果例を図5.1.2に示す。この結果は東西方向の試験片での結果で、埋設法などから得られた水平面内の最大主応力方向とほぼ一致している。図の横軸は経過時間（s）で、縦軸は上図がリングダウン計数法によるAE発生率（counts/s）と荷重応力、下図はAEの累積を示している。

これらの図からAEの急増点をみると、AE発生率、累積ともに経過時間で170sにみられることから、東西方向の応力値は概ね20MPaとなり、埋設法などで得られた東西方向の応力値（最大主応力）と同様な結果となっている。

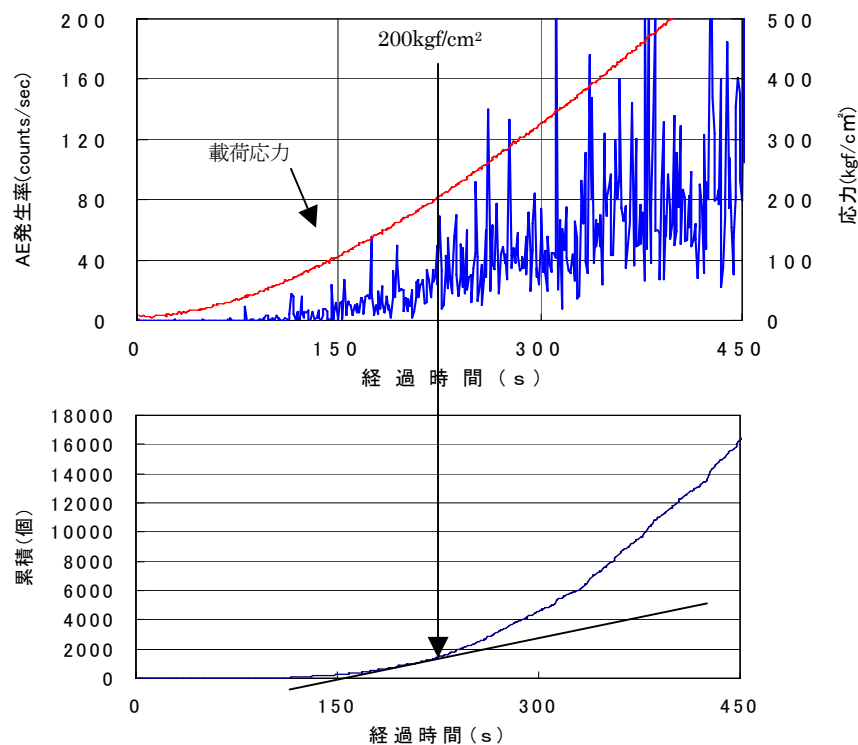


図 5.1.2 AE法による試験結果例（水平方向）

② 応力算出結果

上記のようにして、各方向（水平面内の4方向と鉛直方向）の応力値を読み取り、水平面内の応力状態を求めた。その結果を図5.1.3に示す。同図より最大主応力 σ_1 はほぼ東西方向に21MPa、鉛直応力は10.9MPaであり、埋設法および水圧破砕法の結果と良く一致している。

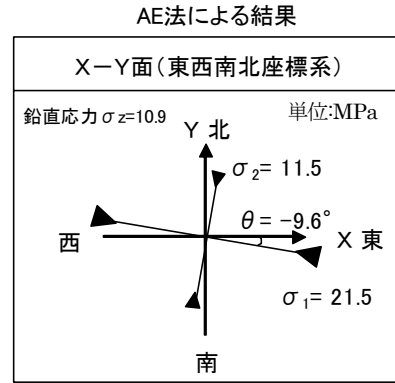
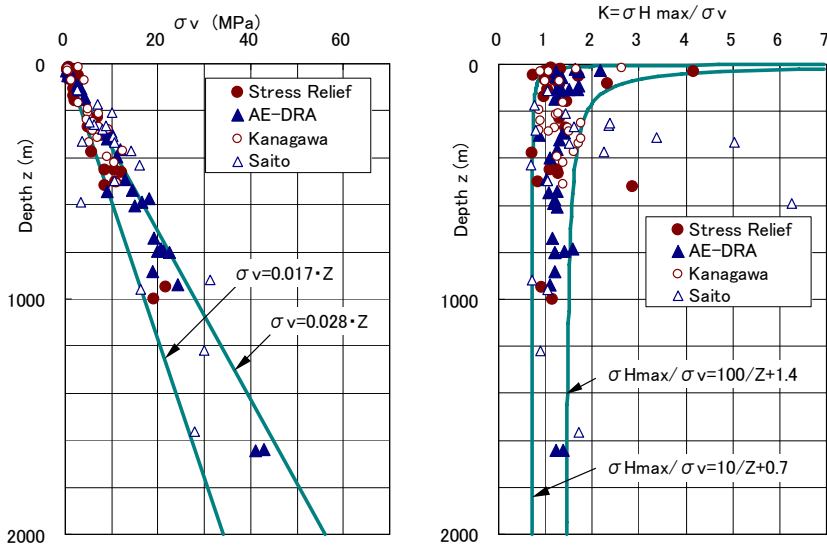


図 5.1.3 AE 法による結果

5.2 深度別の地圧測定結果

Yokoyama et al.²⁾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）、水圧破砕法、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5.2.1(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5.2.1(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。



(a) 鉛直応力の深度分布

(b) 側圧比の深度分布

図 5.2.1 深度別の地圧測定結果²⁾

5.3 カイザー効果が不明瞭な例

図5.3.1は、カイザー効果の検出ができなかった測定例(凝灰岩)である(金川他1977³⁾)。上図は荷重とAE発生率を横軸の時間とともに示したもので、試験片が破壊するまでの測定結果である。下図は300秒までのAE累積数と荷重を拡大して示したもので、この図の左上にAEの発生位置を示すソースロケーションの結果も示してある。ソースロケーションの図は、横軸に試験片の上から下まで(ch. 1~8)を示し、縦軸に各位置でのAE発生数を荷重段階毎に累積して示してある。下図をみると、カイザー効果によると思われる荷重範囲が認められない。そして、ソースロケーションの図をみると、試験片中央付近のch. 4でもAEの発生がみられるが、試験片上部のch. 1での発生数が圧倒的に多い。すなわち、試験片上部にAEを発生させる何らかの原因、例えば目視ではわからない微小な亀裂などの欠陥が存在しその応力集中などによってAEが発生した可能性などが考えられる。

図5.3.2³⁾もカイザー効果の検出ができなかった例である。この場合は、ソースロケーションの図をみると、試験片の端部でなく中央部付近で荷重初期から多くのAEが発生している。中央部付近に微小な亀裂などの欠陥が存在していた可能性が考えられる。

以上のように、岩石試験片の内部に微小な亀裂などの欠陥が存在する場合などは、荷重当初から多くのAEが発生してAEの急増点の判読が難しくなることもある。

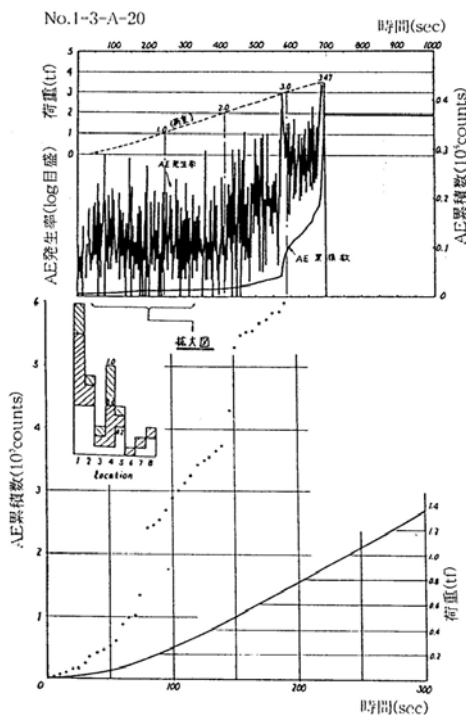


図 5.3.1 試験片端部からの AE 発生が多くカイザー効果の検出ができなかった測定例(凝灰岩)²⁾

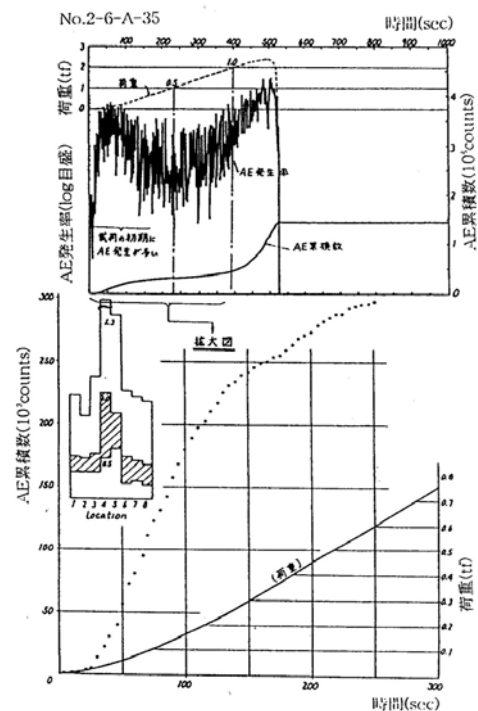


図 5.3.2 荷重当初に AE 発生が多くカイザー効果の検出ができなかった測定例(凝灰岩)²⁾

6 結言

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。

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方法あるいは課題や実測例をできるだけ多く紹介した。すなわち、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、実験例をふまえカイザー効果の発生原因について言及した。第 3 章では「試験方法」を詳細に整理し、今後この方法を利用する技術者や研究者の利便を図った。第 4 章では AE のカイザー効果に影響する「各種要因の検討」を、多くの実験例を示して解説した。第 5 章では「ケーススタディー」として、他の測定法との比較や測定結果の深度分布あるいはカイザー効果の不明瞭な例について紹介した。

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。

岩の力学連合会国際技術委員会から「AE 法による地圧測定法に関する解説案」をまとめることを提案され今日に至るまで約 4 年半の歳月を要したことになる。サブワーキンググループのメンバー全員のモチベーションが長期間維持できたのも、AE 法を今後より発展させ多くの人に利用してもらいたい気持ちが強かったためと思う。

【参考文献】

2 章

- 1) 瀬戸政宏, 歌川学, 勝山邦久 (1991): 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・素材学会誌, 資源と素材, Vol.108 No.10, pp.321-326.

3 章

- 1) 石田毅 (1999): 岩盤破壊音の科学, 近未来社, p.35.
- 2) 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, p.39.
- 3) 金川忠, 林正夫, 仲佐博裕 (1977): 岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み, 土木学会論文集, 第 258 号, pp.63-75.
- 4) 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.
- 5) 瀬戸政宏, 歌川学, 勝山邦久 (1991): 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・素材学会誌, 資源と素材, Vol.108, No.10, pp.321-326.
- 6) 畑浩二, 道廣一利, 吉岡尚也, 杉原弘造 (1995): AE 法を利用した初期地圧測定とその適用例, 材料, 特集岩石力学, 第 44 巻, 第 502 号, pp.885-890.

4 章

- 1) Goodman, R.E. (1963): Sub audible noise during compression of rocks, Geological Society of America Bulletin, Vol.74, pp.487-490.
- 2) 金川忠, 林正夫, 仲佐博裕 (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, Vol.258, pp.63~75.
- 3) 金川忠, 林正夫, 北原義浩 (1978): 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.
- 4) 瀬戸政宏, 歌川学, 勝山邦久 (1992): 岩石の AE カイザー効果と AE 震源分布との関係, 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.371-375.
- 5) Seto, M., Nag, D.K., Vutukuri, V.S.(1997): Possibility of estimating in-situ stress of virgin coal field using acoustic emission technique, Proceedings for International Symposium on Rock Stress, pp.463-468.
- 6) 畑浩二, 道廣一利, 吉岡尚也, 杉原弘造 (1995): AE 法を利用した初期地圧測定とその適用例, 材料, 特集岩石力学, 第 44 巻, 第 502 号, pp.885-890.
- 7) 公開資料, 核燃料サイクル開発機構, 契約業務報告書 (1999): 98SE-01 孔のコアを用いた AE 法による初期応力測定, JNC TJ7400 99-001.
- 8) 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, 第 39 巻, 第 442 号, pp.1019-1025.

- 9) 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.
- 10) 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秋季大会, p.105.
- 11) 村山朔郎, 道広一利, 齋藤二郎, 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, 第364号/III-4, pp.107-112.
- 12) 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, pp.321-326.
- 13) 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.
- 14) 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, pp.46-49.
- 15) Kurita, K. and Fujii, N. (1979): Stress Memory of Crystalline Rocks in Acoustic Emission, Geophysical Research Letters, Vol.6, No.1, Jan. pp.9-12.
- 16) 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.
- 17) 金川忠, 横山幸也, 小倉均 (1993): 熱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, 土木学会第25回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.541-545.
- 18) 新孝一, 及川寧己, 伊藤久敏 (2000): コアディス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, Vol.116, pp.965-971.
- 19) 菅原勝彦, 亀岡美友, 齋藤敏明, 岡行敏, 平松良雄 (1978): コアディスキング現象に関する研究, 日本鉱業会誌, Vol.94, No.1089, pp.797-803.
- 20) 横山幸也 (1991): AE 法による初期地圧測定, 資源・素材学会, 地下計測部門委員会, コアを用いた地圧計測ワークショップ, pp.43-64.

5 章

- 1) Ishiguro, Y., Nishimura, H., Nishino, H., Sugawara, K. (1997): Rock stress measurement for design of underground powerhouse and considerations, The International Symposium Rock Stress Kumamoto, pp.491-498.
- 2) Yokoyama, T., Ogawa, K., Kanagawa, T., Tanaka, M., Ishida, T. (2003): Regional in-situ stress states in Japan based on measurements. Rock Stress '03 Kumamoto, pp.335-341.
- 3) 金川忠, 林正夫, 仲佐博裕 (1977): 岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み, 土木学会論文集, 第258号, pp.63-75.