

アコースティック・エミッションによる初期地圧の推定方法

斎藤 二郎 藤原 紀夫
吉岡 尚也 畑 浩二

Method of Estimating Initial Rock Pressure by Acoustic Emission

Jiro Saito Toshio Fujiwara
Hisaya Yoshioka Koji Hata

Abstract

The purpose of this paper is to discuss a method of estimating initial rock pressure using the Kaiser effect of Acoustic Emission (AE). In a preliminary test to investigate the effect of the configuration of a rock specimen on the characteristics of AE, the Kaiser effect was clearly found with cylindrical specimens, the forms of which are generally easy to shape. Therefore, using cylindrical specimens of a rock mass which were sampled from the face of Ikoma Tunnel with earth cover of 260 m, initial rock pressure was estimated through the AE method. Consequently, the maximum principal stress was estimated to be 66.5 kgf/cm², and the minimum principal stress 16.3 kgf/cm², while the maximum principal stress was inclined 17.9 deg. in the counterclockwise direction from the vertical axis of the tunnel.

概 要

この報告は、アコースティック・エミッション（以下、AE と略す）のカイザー効果を利用して、初期地圧を推定する方法について述べたものである。これに先だち、岩石供試体の形状がAEのカイザー効果に及ぼす影響について考察を行なったところ、整形が簡単にできる円柱供試体を用いてもカイザー効果を確認することができた。そこで、土被りが260 mある生駒トンネル切羽より採取した試料から円柱供試体を作製し、これを用いて初期地圧の推定を試みた。その結果、最大主応力と最小主応力がそれぞれ66.5 kgf/cm²、16.3 kgf/cm²になり、しかも最大主応力がトンネル鉛直軸から反時計方向に17.9度傾いていることがわかった。

1. はじめに

岩盤内に構造物を構築する場合、その空洞の支保設計には、一般に地山と支保材を一体として取り扱える有限要素法が用いられている。この方法は許容応力度法によっているため、鉛直圧を外荷重にするよりは、むしろ初期地圧を外荷重にする方が望ましい。なぜなら、空洞を構築する場所によっては、偏圧が作用したり、あるいは鉛直圧からは説明できないような大きな水平圧が作用したりすることも考えられるからである。

現在、初期地圧を推定する方法として、応力解放法¹⁾や水圧破砕法²⁾などが実施されている。また、AEのカイザー効果を利用した方法³⁾も試みられている。AEのカイザー効果を利用した方法は応力解放法や水圧破砕法に比較して、手軽に数多く実施できる利点をもつ。しか

し、今のところAEのカイザー効果の表現に不自然さがあるように思える。ところで、AEのカイザー効果は、過去に受けた応力最大値を越える荷重を受けるまで、その物体がAEを発生しないのが、もっとも自然なはずである。それゆえ、われわれの実験では、供試体端面から発生しやすい雑音的なAEを取り除くことを試みているので、AEが最初に発生したところをカイザー効果とみなしている。

2. 実験装置

岩石供試体におけるAEを検出するために、図-1のような実験装置を使用した。主な実験装置の概要を以下に示す。

(1) AE センサ ジルコン酸チタン酸鉛磁器 (PZT) を振動子に用いた不平衡形で、共振周波数が140 kHzで

ある。(株)エヌエフ回路設計ブロック製 MODEL AE-901S を使用した。

(2) プリアンプ 利得が40dB固定の MODEL AE-912 を使用した。

(3) ディスクリミネータ メインアンプ, フィルタ, 振幅弁別器, 雑音対策機能から成り立っている MODEL AE-922 を使用した。特に, イベント計数法としての振幅弁別器は, 増幅器から出力される振動波形を図-2 に示したような2レベルのしきい値で弁別してパルスを作り出すようになっている。

(4) デュアルカウンタ 前述のディスクリミネータから発生されるパルス出力を受信し, AE の発生率や累積数を計数するもので, MODEL AE-932 を使用した。

3. 供試体の形状がカイザー効果におよぼす影響について

供試体に繰り返し载荷によって, ヒステリシス曲線が同じ経路をたどるようになるまで所定の先行荷重を作用させる。その後, 先行荷重によって受けた応力最大値以上の荷重を作用させることによって, カイザー効果を確認する実験を行なう。先行荷重によって供試体を受ける応力は 200~300 kgf/cm² である。なお, 供試体には生

駒産の花崗岩を用いた。

3.1. 供試体形状

供試体形状は, 整形の簡単な外径 30 mm, 高さ 60 mm の円柱と, 整形が容易でない受圧面が 25×25 mm, 高さ 75 mm の角柱の2種類である。ただし, 角柱供試体に関しては, 両端面にハンチと称されるアラルダイトとセメントの混合物をとりつけたものと³⁾, とりつけないものを用意した。図-3 (a), (b), (c)に供試体の形状を示す。

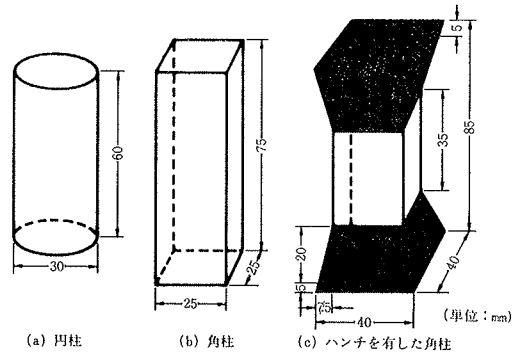


図-3 (a), (b), (c) 供試体の形状

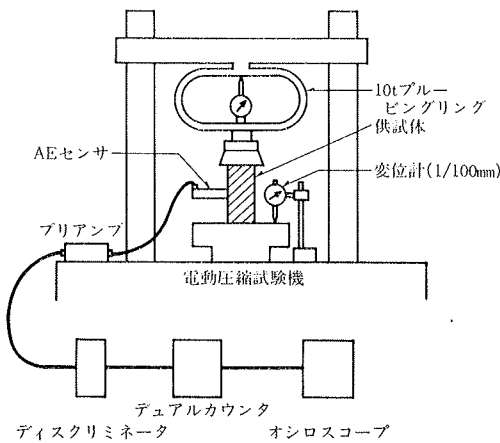


図-1 実験装置の概要

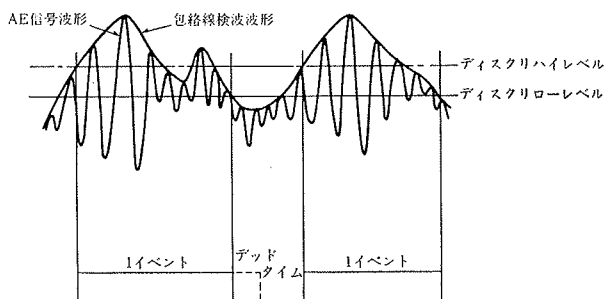


図-2 2レベルしきい値によるイベント判定

3.2. カイザー効果を見るための実験手順

(1) 供試体長手方向の中央にシリコンゴムを介して AE センサをとりつける。ただし, 円柱供試体の場合は, 鋼製のアタッチメントを円柱供試体と AE センサの間に入れることによって AE センサを面接触させる。

(2) 電動圧縮試験機に供試体を設置し, ディスクリミネータのメインアンプ, フィルタ, しきい値, デッドタイムを設定する。

(3) 33.3 kgf/s の载荷速度で所定の先行荷重まで10回の繰り返し载荷を行なう。各载荷時における荷重と変位と AE 発生数を記録する。ただし, AE 発生数はイベント計数法による。

(4) 繰り返し载荷を終えた供試体に, 繰り返し载荷と同じ载荷速度で先行荷重以上の荷重を作用させる。この時も, 载荷時における荷重と変位と AE 発生数を記録する。

3.3. カイザー効果を見るための測定結果と考察

円柱供試体を用いた測定結果の一例を図-4 (a), (b), (c), (d)に示す。(a)は繰り返し载荷時における荷重と変位の関係を, (b)は各繰り返し载荷時に発生した AE の累積数と繰り返し载荷の回数との関係を, (c)は繰り返し载荷を終えた供試体に先行荷重以上の荷重を作用させた時の荷重-変位と AE 発生率の関係である。(d)は(c)の AE 発生率を AE 累積数に書きなおしたものである。(c)と(d)から, 所定の先行荷重で受けた応力最大値を境にして AE の発生している様子がわかる。すなわち, 円柱供試体を

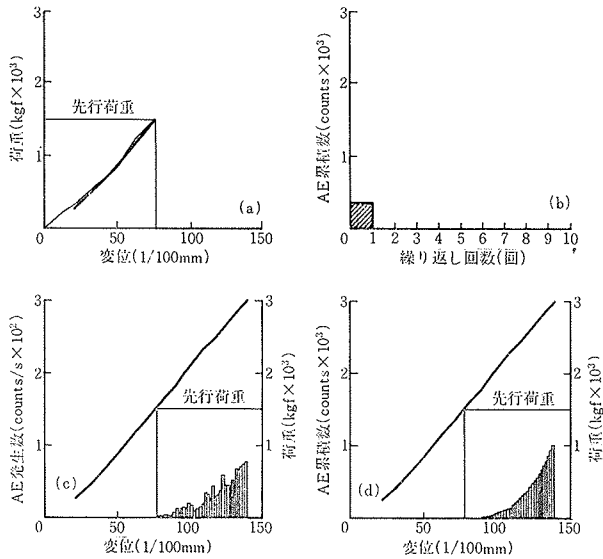


図-4 (a), (b), (c), (d) 円柱供試体における測定結果

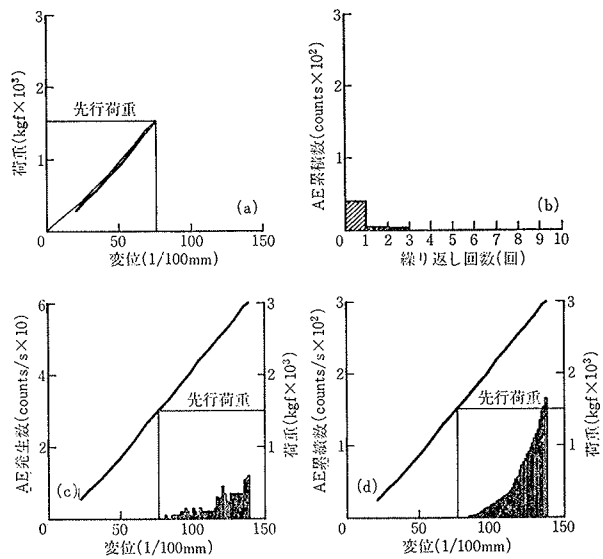


図-6 (a), (b), (c), (d) 角柱供試体における測定結果

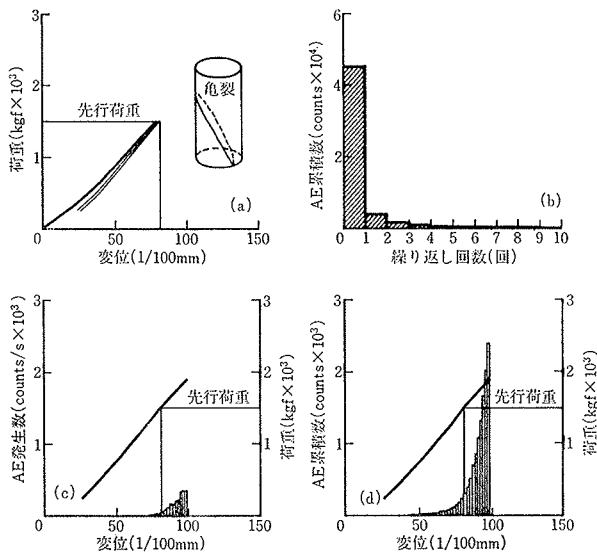


図-5 (a), (b), (c), (d) 目視でわかる亀裂を有した場合の測定結果

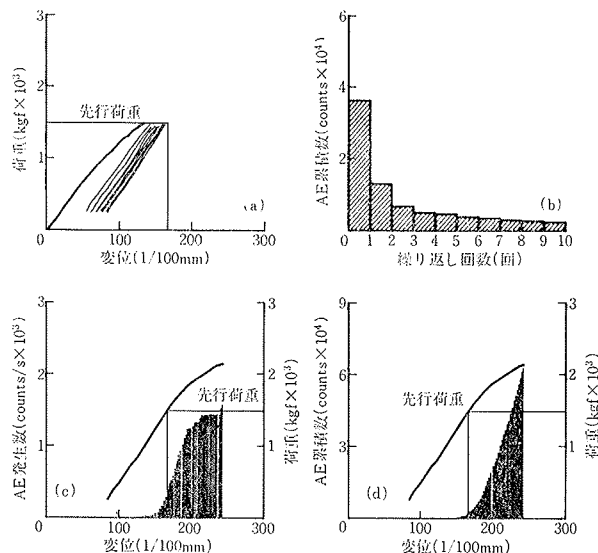


図-7 (a), (b), (c), (d) ハンチを有した角柱供試体における測定結果

用いて岩石におけるカイザー効果をみる事ができる。しかしながら、供試体に目視でわかる亀裂が存在する場合には、カイザー効果をみる事ができない。(図-5 (a), (b), (c), (d)参照)

つぎに、角柱供試体を用いた測定結果の一例を図-6 (a), (b), (c), (d)に示す。(c)と(d)から、円柱供試体の場合と同様、所定の先行荷重で受けた応力最大値を境にしてカイザー効果をみる事ができる。

角柱供試体にハンチをつけた場合は、図-7 (a), (b), (c), (d)からわかるようにカイザー効果がみられない。ア

ラルダイトとセメントの混合物でつくったハンチ材料そのものは、AEを発生しないことがわかっている³⁾、図-7に示されているように、カイザー効果がみられないのは、供試体とハンチとの接合部から生じる摩擦音の原因しているためであろう。

4. 平面内における三つの応力成分から主応力を求める方法

平面内のある1点におけるひずみを求める方法の一つに、直角ロゼットと呼ばれるものがある⁴⁾。この考えを

利用して、平面内における主応力の大きさとその傾きを算定する。

ある平面内において、水平軸方向を基準にとり、鉛直軸方向へ順次45度傾いた3方向から求められる応力成分を $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ とする。また、この平面内における最大主応力と最小主応力をそれぞれ σ_1, σ_2 とし、鉛直軸方向の応力成分 σ_{III} から最大主応力 σ_1 へ傾く角度を θ とする。ただし、ここでは圧縮応力を正、そして最大主応力の傾き θ は鉛直軸方向の応力成分 σ_{III} から反時計まわりを正とする。これらの関係をモールの応力円上に示すと図-8のようになる。図-8より、三つの応力成分 $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ は、最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 と主応力方向 θ を用いて以下の関係式で与えられる。

$$\sigma_I = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos(\pi - 2\theta) = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\sigma_{II} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos\left(\frac{3}{2}\pi - 2\theta\right) = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_{III} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos(-2\theta) = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots(3)$$

また、図-8において、鉛直軸方向の応力成分 σ_{III} に対するせん断応力成分を τ_{III} とすれば、以下のようになる。

$$\tau_{III} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin(-2\theta) = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots(4)$$

一方、最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 は、三つの応力成分 $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ とせん断応力成分 τ_{III} を用いて以下の関係式で与えられる。

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \frac{\sigma_I + \sigma_{III}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{III} - \sigma_I}{2}\right)^2 + \tau_{III}^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ところで、式(4)のせん断応力成分 τ_{III} は、式(1), (2), (3)を用いて以下のように書きなおすことができる。

$$\tau_{III} = \frac{2\sigma_{II} - (\sigma_I + \sigma_{III})}{2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

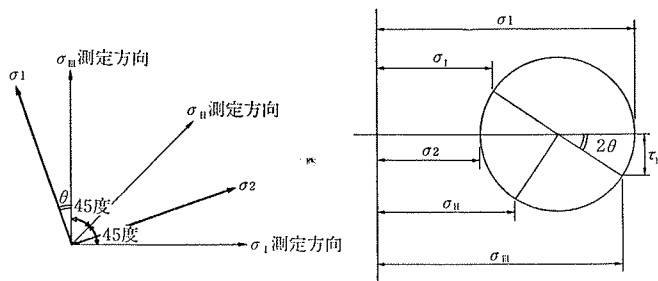


図-8 モールの応力円

したがって、式(6)を式(5)に代入すると、最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 は以下の関係式で与えられる。

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \frac{\sigma_I + \sigma_{III}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

そして、最大主応力 σ_1 の傾き θ も式(1), (2), (3)よりただちに以下の関係式で与えられる。

$$\tan 2\theta = \frac{2\sigma_{II} - (\sigma_I + \sigma_{III})}{\sigma_I - \sigma_{III}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

5. 生駒トンネルにおける初期地圧の測定例

前記3章の供試体の形状がカイザー効果におよぼす影響についての実験において、角柱供試体のみならず円柱供試体を用いてもカイザー効果を確認することができた。それゆえ、ここでは整形の簡単な円柱供試体を用いて初期地圧の推定を試みる。また、低荷重下に発生しやすい雑音的なAEをとり除くために、円柱供試体両端面と載荷板の間にスポンジを配置した。

5.1. 試料の採取と供試体の整形方向

生駒トンネル斜坑切羽(坑口より308.5m地点)より試料を採取した。この試料は切羽発破後の浮石である。試料採取場所を図-9に示す。

この試料から3方向の円柱供試体を整形する。整形方向は、トンネル横断面において、トンネルスプリングライン(以下S.Lと略す)方向を基準にとり、トンネル鉛直軸方向へ順次45度傾いた3方向である(図-10参照)。これら3方向の円柱供試体より求められる初期地圧を $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ とする。

5.2. 実験手順

(1) 円柱供試体長手方向の中央にシリコンゴムを介してAEセンサをとりつける。ただし、鋼製アタッチメントを円柱供試体とAEセンサの間に入れることによってAEセンサを面接触させる。

(2) 両端面にスポンジを配置した円柱供試体を電動圧縮試験機に設置し、ディスクリミネータのメインアンプ、フィルタ、しきい値、デッドタイムを設定する。

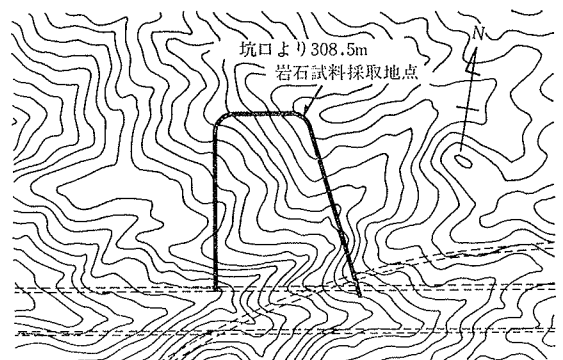
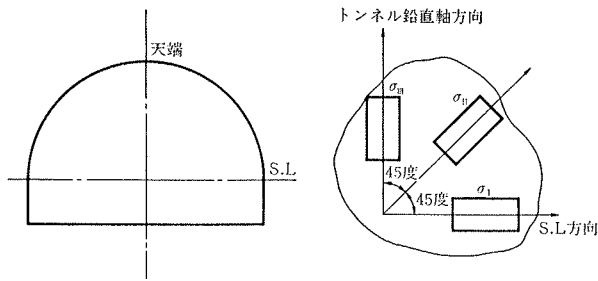


図-9 試料採取場所



図一10 円柱供試体の整形方向

(3) 円柱供試体と載荷板の密着をよくするために、50 kgf の荷重を作用させる。ただし、この荷重は初期地圧を算定する上で影響をおよぼさない範囲である。

(4) 16.7 kgf/s の載荷速度で単調載荷を行なう。

(5) 載荷時における荷重と変位と AE 発生数を記録する。ただし、AE 発生数はイベント計数法による。

5.3. 測定結果とその考察

岩石のカイザー効果を利用して初期地圧を算定するための測定結果の一例を図一11(a), (b)に示す。これは、S.L 方向よりトンネル鉛直軸方向へ45度傾いた方向のものである。(a)は単調載荷時の荷重—変位と AE 発生率の関係である。(b)は(a)の AE 発生率を AE 累積数に書きなおしたものである。(a)と(b)から、荷重 190 kgf を境にして AE が発生している。これより、この円柱供試体の初期地圧は 28.8 kgf/cm² と推定される。従来の方法では、AE 累積数の勾配の変化点までをカイザー効果として初期地圧を推定しているが³⁾、我々の実験では過去受けたと思える応力最大値までは AE が全く発生していないので、自然な形でカイザー効果をとらえることができる。

3 方向の測定結果を表一 1 (a), (b), (c)に示す。また、それぞれの方向における測定結果の平均値をもって 3 方向の初期地圧 $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ とすれば、 $\sigma_I=21.0\text{kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_{II}=26.7\text{kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_{III}=61.8\text{kgf/cm}^2$ となる。これら 3

方向の初期地圧 $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ より平面内における主応力の大きさとその方向を、前記式(7)と式(8)を用いて算定すると、最大主応力 σ_1 は 66.5 kgf/cm²、最小主応力 σ_2 は 16.3kgf/cm² となり、最大主応力がトンネル鉛直軸方向より反時計方向へ17.9度傾いていることがわかった。これらの結果を、試料を採取したトンネル横断面に示すと図一12のようになる。

ところで、表一 1 には測定値のばらつきを変動係数として示している。変動係数は 20~30%とやや高めになっているが、今回得られた結果(主応力の大きさとその傾き)が地山の形状をよく反映しているものと考えられるので、今後カイザー効果を利用して初期地圧を算定する場合には、円柱供試体の数が 5 本以上で、測定値の変動係数が30%以内になることを一つの目安としたい。

(a) S.L方向の初期地圧

寸法 外径×高さ(mm)	荷重 (kgf)	応力成分 (kgf/cm ²)
29.0×60.2	110	16.7
29.0×60.0	140	21.2
28.9×59.7	200	30.5
29.0×60.4	100	15.1
29.0×60.8	150	22.7
29.0×60.3	130	19.7
応力成分の平均値 (kgf/cm ²)		21.0
変動係数 (%)		23.6

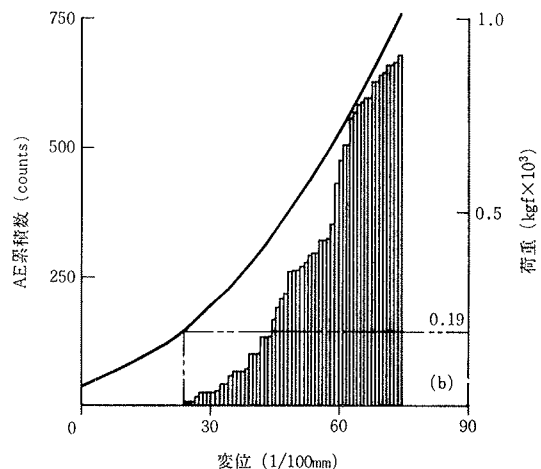
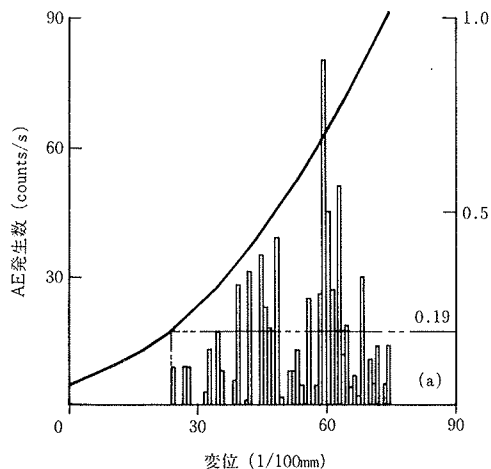
(b) S.L方向よりトンネル鉛直軸に向って45度の傾きをもった方向の初期地圧

寸法 外径×高さ(mm)	荷重 (kgf)	応力成分 (kgf/cm ²)
29.0×60.0	160	24.2
29.0×60.4	170	25.7
29.0×60.2	90	13.6
29.0×60.0	190	28.8
28.9×60.2	230	35.1
28.9×60.4	120	18.3
29.0×61.0	250	37.8
29.0×60.5	200	30.3
応力成分の平均値 (kgf/cm ²)		26.7
変動係数 (%)		28.4

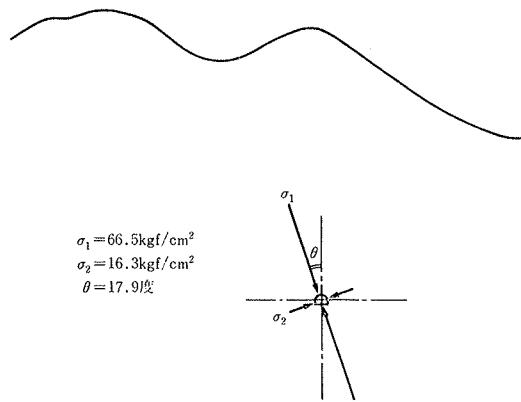
(c) トンネル鉛直軸方向の初期地圧

寸法 外径×高さ(mm)	荷重 (kgf)	応力成分 (kgf/cm ²)
28.9×61.1	350	53.4
28.9×60.8	540	82.3
28.9×60.8	460	70.1
29.0×60.0	310	46.9
28.9×60.0	370	56.4
応力成分の平均値 (kgf/cm ²)		61.8
変動係数 (%)		20.7

表一1 (a), (b), (c) 3 方向の初期地圧



図一11 (a), (b) カイザー効果を用いて初期地圧を算定するための測定結果



図一12 トンネル横断面における主応力の大きさとその方向

6. おわりに

供試体の形状がカイザー効果におよぼす影響についての実験を行なった結果、以下のようなことがわかった。

- (1) 共振周波数 140 kHz のセンサを用いて、岩石材料の AE 信号をとらえることができた。
- (2) 整形が簡単にできる円柱供試体を用いてもカイザー効果を確認することができた。
- (3) したがって、地山の初期地圧を算定する場合には、円柱供試体で十分その役目がはたされる。

一方、岩石におけるカイザー効果を利用して、土被りが 260 m ある生駒トンネルの初期地圧を推定した結果、以下のようなことがわかった。

- (1) 円柱供試体両端面と載荷板の間にスポンジを入れることにより、過去受けたであろうと思われる応力最大値まで AE が発生しないため、最も自然な形でカイザー効果をみることができた。
- (2) 3 方向の初期地圧 ($\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$) から算定した主応力の大きさとその傾きは、地山の形状をよく反映した結果になっているものと思われる。

参考文献

- 1) 金川, 林, 北原: 軟質岩盤における初期地圧の測定法の開発と泥岩岩盤への適用, 電力中央研究所報告, 377003, (1978)
- 2) 土木技術者のための岩盤力学, 土木学会, (1972), pp. 103~104
- 3) 金川, 林, 仲佐: 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, No. 258, (1977. 2), pp. 63~75
- 4) 川本: 応用弾性学, 共立出版社, (1977), pp. 33~36