

岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み

ESTIMATION OF SPATIAL GEO-STRESS COMPONENTS IN ROCK SAMPLES USING THE KAISER EFFECT OF ACOUSTIC EMISSION

金川 忠*・林 正夫**・仲佐 博裕***

By Tadashi KANAGAWA, Masao HAYASHI and Hiroyasu NAKASA

1. まえがき

従来、Acoustic Emission (AE) ないしロックノイズの測定は山はね現象、鉋柱、岩盤掘削面などの保安上のモニターとして利用されてきて、いくつかの研究がある^{1),2)}。しかし、AE のカイザー効果による地圧の推定の研究は見当らず、まして立体応力成分の推定に及ぶ試みはいまだなされていない。

そこで今回はオーバーコアリングされた岩石コアを用い、AE の Kaiser 効果を利用して地圧の立体三成分の推定を試みた。まず脆性材料であるモルタル材料を用い、供試体の載荷面近くの AE 信号の消去法の工夫について予備実験を行い、端面を除く供試体中央部での AE 信号のみをとり出すことに成功した。ついで本実験として、現地採取の岩石試料の中から立体三成分の方向の一軸供試体をそれぞれ作成し、履歴応力以下では AE の発生が少ない現象、すなわち Kaiser 効果に基づいて地圧の推定を行った。その推定結果は、現地で別途実施されたオーバーコアリングによる推定地圧と定量的にもかなりの相関があることが

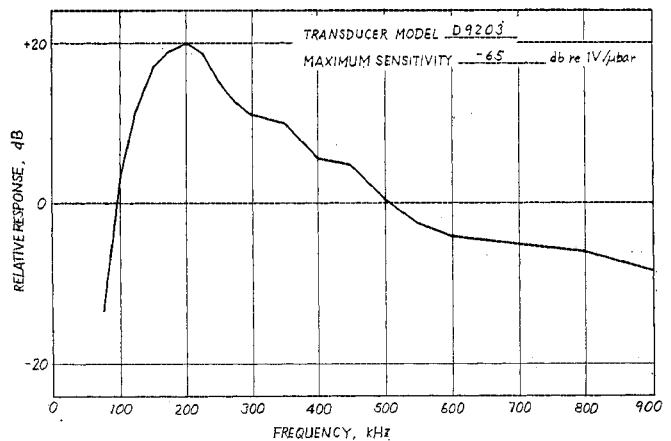


図-2 AE センサーの感度曲線

認められ、今後、多成分の地圧を現地採取の岩片より AE 法によって推定する可能性がひらかれた。

従来のオーバーコアリング法^{3),4)}は現存地圧を検出し易く、今回試みた AE 法は既存の最大地圧を検出し易い特性があるようで、両測定法の結果の差は地圧の変化に対しての情報を与えることにもなる。今後、断層近くの地圧測定などにも応用していく予定である。

2. 測定方法

岩石の AE 測定の手順としては、まず現地採取されたボーリングコアまたは岩片より供試体を作成する。供試体の作成方法は後述するが、この供試体について室内一軸圧縮試験を行いながら、供試体に取り付けた AE センサーで供試体内部より発生する AE 信号を測定する方式をとった。

一軸圧縮試験装置はひずみ制御方式で最大荷重 10 ton の万能材料試験機 (Instoron TT-DM-L 型) であり、今回の AE 測定に関しては載荷速度を 0.2 mm/min. に限定した。載荷パターンは図-1 に示すように、AE 発

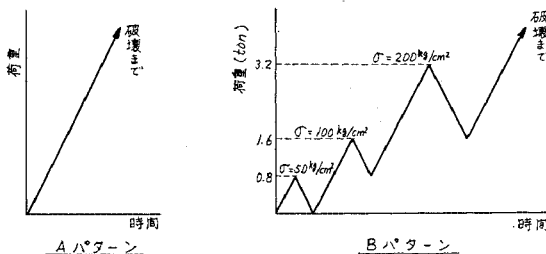


図-1 載荷パターン A, B

* 正会員 電力中央研究所 地盤耐震部
** 正会員 工博 電力中央研究所 地盤耐震部
*** 理修 電力中央研究所 原子力部

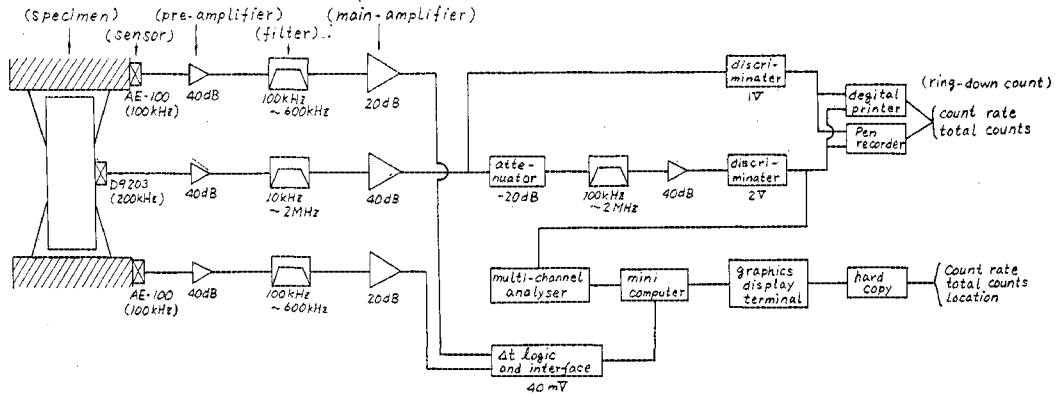


図-3 測定系ブロックダイアグラム

生状況調べるために単調増加させるAパターンと、カイザー効果を調べるために繰り返し載荷するBパターンの2種類とした。

測定に用いた AE センサーの1つは DUNEGAN/ENDEVCO 社製の D 9203 型で、図-2 に感度曲線を示す。これは 200 kHz 共振型の圧電セラミック振動子(チタン酸ジルコン酸鉛系磁器振動子)である。D 9203 の供試体への取付けは、供試体中央部の側面にシリコングリースを塗り、ゴムパンドで取付けた。今回の測定の主体はこの D 9203 によったが、供試体内部における AE の発生位置を確認するために、供試体の上下にもおのおの1個ずつのセンサーを取付けた。この AE 発生位置確認用のセンサーは、富士セラミックス社製の AE-100 型で、100 kHz 共振型の圧電セラミック振動子である。

測定系統図を図-3 に示す。供試体中央部に取付けたセンサー(D 9203)で受信した AE 信号は、バンドパスフィルター 100 kHz~2 MHz を通し、アンプにより 100 dB の増幅をした。また threshold level はノイズを若干カウントする 2 V に設定し、それを超える AE 信号をすべてカウントするリングダウン計数方式により測定した。また、供試体上下に取付けたセンサー(AE-100)で受信した AE 信号は、バンドパスフィルター 100 kHz~600 kHz を通し、アンプによって 60 dB 増幅した。この threshold level は 40 mV に設定し、それを超える AE 信号の第1波を捉え、上下のセンサーへの到達時間差により、供試体内部における AE の発生位置

表-1 ハンチ部の材料試験

ハンチの材料 (比率:重量比)	AE の発生状況	弾性係数 (kg/cm ²)
アラルダイトのみ	破壊近くまで発生しない	2.0×10 ⁴
アラルダイト:セメント=1:1		2.7×10 ⁴
アラルダイト:セメント=1:1.5		4.5×10 ⁴
アラルダイト:砂=1:1		2.1×10 ⁴
アラルダイト:カーボランダム(石英砂)=1:1	低応力時より発生	2.3×10 ⁴

置をブラウン管表示し、記録した。これらの測定記録装置については、参考文献 5) に詳述されているので、ここでは省略する。

3. モルタル材料による予備的検討

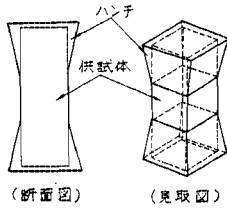
(1) 供試体端部の処理方法の検討

モルタル供試体 (4 cm×4 cm×16 cm) の載荷面の処理について数種の予備実験を行い、AE の発生位置と供試体の破壊状況を検討した。表-2 (1)~(3) に処理方法と実験結果を示す。まず、表-2 (1) に示したように、モルタル供試体に直接載荷板を載せた場合と、間に吸取紙をはさんだ場合についてみると、AE 発生量は供試体端部に多く、中央部では少なくなっている。すなわち、吸取紙をはさむ程度ではまだ端部の応力集中が大きいように思われる。次に供試体と載荷板の間にゴムまたはアラルダイトをはさんだ場合(表-2 (2))についてみると、やはり端部での AE 発生が顕著である。

破壊状況についてみると、前述の直接載荷または吸取紙をはさんだ場合はせん断破壊をしているのに、ゴムまたはアラルダイトをはさんだ場合は縦割れが多く、引張破壊している。ゴムまたはアラルダイトのようなクッションを入れても端部より AE が発生し、最後に引張破壊を生じるということは、応力レベルの低いうちから引張による AE が測定されている可能性もあると思われる。したがって、以上のような端部処理の方法では、一軸圧縮試験による AE 測定には適切でないと思われる。

そこで、表-2 (3) に示すように端部の断面を増加させ、吸取紙をはさんで行ってみた。ただし供試体上面は製作時にキャッピングを行わなかったため粗雑な面であり、下面は型枠の底面により平滑な面となっている。

その結果、AE は上部で多く発生し、底部で少なくっている。しかし中央部でも発生しており、せん断破壊



図—4 供試体形状

していることから端面を平滑な面とし端部の断面積を中央部より大きくすることによって、端部の影響を受けずに供試体中央部より発生する AE が測定できるものと思われる。

(2) 供試体端部の処理材料の検討

前項より、供試体形状は中央部を最小断面とし、端部を大きくすることが好ましいと思われたが、実際の岩石をこのように成形することは困難である。そこで、角柱の供試体端部に図—4のようなハンチをつけることで見掛け上端部の断面を大きくすることにした。ハンチの材料の条件としては

- (1) 材料自身が AE を発生しないこと。
- (2) 剛性を供試体と同程度にできること。
- (3) 供試体と接着できること。
- (4) 製作が比較的容易なこと。

などが挙げられる。そこで (3)、(4) の条件が満足されるアラルダイトを母材とした混合材料について (1)、(2) の条件を検討し、表—1 の結果を得た。

その結果 AE が発生せず、剛性のある程度変化させられるものとして、アラルダイトにセメントを混合した材料が利用できるようなのである。基礎実験では弾性係数が $4 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 程度のモルタル材料を用いているので、ハンチ材料としては配合 1:1.5 のものを用いた。

(3) 供試体の細長比の検討

モルタル供試体の断面は $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ であるので、長さも 4 cm (細長比 1:1) の短い供試体をつくり、その上下面にハンチの部材を接着した方法と、供試体の長さを $12 \text{ cm} \sim 16 \text{ cm}$ (細長比 1:3~1:4) に長くし、供試体端部にハンチを取付けた方法について検討した。その結果、表—3 に例示したように、細長比の相違にかかわらず AE は供試体中央部より発生した。しかし、細長比 1:1 の場合は AE の発生源となるモルタル部が供試体の中央部にしかないので、AE が中央部に

表—2 モルタル材料における載荷状況と測定結果

(1)

測定 No.	測定 月日	載荷状況	供試体		測定結果		
			No.	形状	バタン破断荷重 (kg)	破壊形状	AE発生状況(破断時)
P-1	8/21	①載荷板位置不明の場合 	1-1	角柱 細長比 1:4 	A 4.32 (270.6)	3 	供試体位置 AE発生位置
P-2	8/22		1-4		B 4.18 (261.3)	4 	供試体位置 AE発生位置
P-4	8/21	②破断板位置不明の場合 	1-2	?	A 4.30 (268.8)	3 	供試体位置 AE発生位置
P-5	8/22		1-5	?	B 4.18 (261.3)	4 	供試体位置 AE発生位置

(2)

測定 No.	測定 月日	載荷状況	供試体		測定結果		
			No.	形状	バタン破断荷重 (kg)	破壊形状	AE発生状況(破断時)
P-8	8/21	③ゴムをはさんだ場合 	1-10	角柱 細長比 1:4 	A 3.33 (208.1)	3 	供試体位置 AE発生位置
P-9	8/21		1-6		B 2.85 (178.1)	5 	供試体位置 AE発生位置
P-11	8/28	④アラルダイトをはさんだ場合 	1-12	?	A 3.00 (187.5)	10 	供試体位置 AE発生位置
P-12	8/28		1-13	?	B 3.15 (196.9)	10 	供試体位置 AE発生位置

(3)

測定 No.	測定 月日	載荷状況	供試体		測定結果		
			No.	形状	バタン破断荷重 (kg)	破壊形状	AE発生状況(破断時)
P-14	8/28	⑤端部を平滑にした場合 	7	角柱 細長比 1:1 	B 4.70 (285.4)	68 	供試体位置 AE発生位置
P-15	8/28		8	角柱 細長比 1:1 	B 4.70 (285.4)	68 	供試体位置 AE発生位置

表—3 モルタル材料における載荷状況と測定結果

測定 No.	測定 月日	載荷状況	供試体		測定結果		
			No.	形状	バタン破断荷重 (kg)	破壊形状	AE発生状況(破断時)
S-10	9/9	ハンチを付けた場合 (配合 アラルダイト:セメント 1:1.5) 	2-5-b	角柱 細長比 1:1 	B 3.86 (240.6)	8 	供試体位置 AE発生位置
S-11	9/10	ハンチ (Ar+Ce) 	2-6-a		A 4.20 (262.5)	9 	供試体位置 AE発生位置
S-4	9/3	角柱 細長比 1:3 (アラルダイト) 	1-22		B 7.18 (448.8)	14 	供試体位置 AE発生位置
S-8	9/9	角柱 細長比 1:1 (アラルダイト) 	1-23		A 8.65 (540.6)	21 	供試体位置 AE発生位置

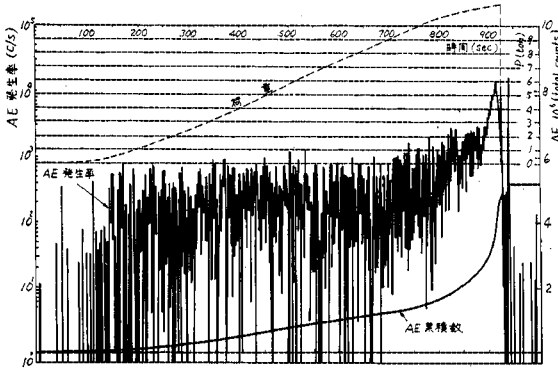


図-5 モルタル材料の AE 発生状況 (単調載荷)

集中したもので、ハンチ部とモルタル部の接着面で異常な AE が発生していても検出できない。

そこで供試体の長さを長くすれば、接着面で異常な AE が発生したときのチェックが可能である。したがって供試体の上部 1/3, 下部 1/3 はハンチをつけ、中央部 1/3 以上が最小断面となるような供試体形状、すなわち、モルタル部は少なくとも細長比 1 : 3 程度は必要であろうと考えた。

(4) AE の発生状況とカイザー効果

供試体形状としてモルタル部は細長比 1 : 3 の柱状、ハンチ部はアラルダイト : セメント = 1 : 1.5 の混合材料を用いることにし、一軸圧縮試験によって AE 特性を調べることにした。

a) モルタル材料における AE の発生状況

載荷パターンは単調増加の A パターンを用いて測定した。結果の一例を図-5 に示す。同図の上半分にある AE 発生率 (counts/sec) は、縦軸が log 表示の発生率で、横軸は時間である。点線および実線は縦軸とともに直線表示で、それぞれ荷重 (tons) および AE 累積数 (counts) である。

発生率により発生状況を調べると、荷重の初期の段階ではあまり発生せず、その後ほぼ同程度の発生率を示す区間が続く、最後に急増して破壊する傾向を示している。

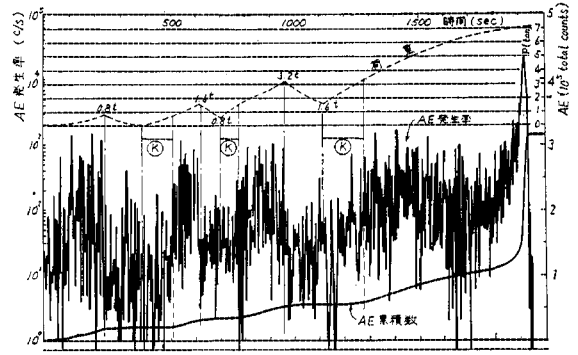


図-6 モルタル材料のカイザー効果 (繰り返し載荷)

同図の下半分に示した荷重と AE 累積数の関係も、荷重とともにほぼ直線的に AE 累積数が増加し、最後に急増して破壊しており、応力-ひずみ曲線ともよく似ている。また、右下の発生位置の状況によれば、供試体の中央部より AE が多く発生しており、端部の影響を受けずに荷重に対応する供試体自身の AE が測定されていることが確認できる。

b) モルタル材料におけるカイザー効果

載荷パターンは繰り返し載荷による B パターンを用いて、AE 測定を行った。結果の一例を図-6 に示す。

繰り返し荷重での除荷の段階および載荷における処女荷重以前の段階では、AE 発生率の増加が少ない。すなわち、モルタル材料においてはカイザー効果が比較的明瞭に認められた。

4. 岩石試料 (凝灰岩) による立体 3 成分の地圧推定の試み

(1) 岩石供試体の方向と数量

現地採取されたボーリングコア (凝灰岩) の方向を図-7 に示す。ボーリングコア採取位置近傍の地質概要 (図中左上) は、凝灰岩のほかに流紋岩・玄武岩などが貫入したかなり複雑な地質状態で、節理は南北方向に卓越しており、その傾斜はほぼ鉛直で 70°~80° 程度である。

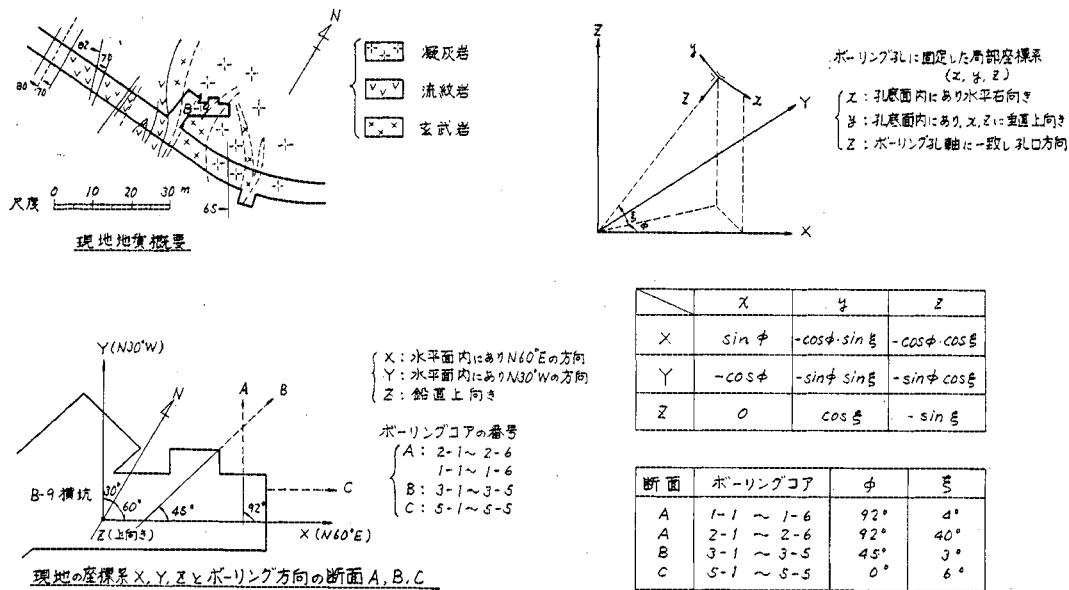


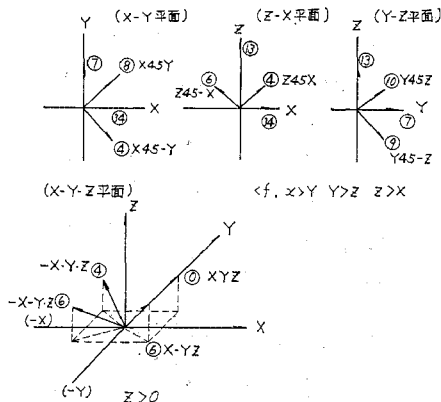
図-7 現地採取されたボーリングコアの方向

表-4 X, Y, Z 座標系で表示した供試体の成形方向

BO-NO		供試体の成形方向							
		A	B	C	D	E	F	G	H
1	供試体個数	21	4	3	4				
	方向	X	Z	Z45X	Z45-X	Y	X45-Y	Y45-X	Y45Z
2	供試体個数	8	5	2	4	6			
	方向	X	Y45-Z	X-YZ	-X-YZ	Y45Z	-XYZ	Y	Z
3	供試体個数	4	4	4	4	6	2	2	
	方向	X45-Y	Z	X-YZ	-XYZ	X45Y	Y	-X-YZ	
4	供試体個数	5	5	4	4	5	2	2	1
	方向	Y	Z	Y45-Z	Y45Z	X	X45Y	Z45-X	Z45X

注：方向とは、坑道に固定した座標系 X-Y-Z で表示した供試体の方向を指す。

供試体の方向	供試体の個数
X	34
Y	7
Z	13
X45Y	8
X45-Y	4
Y45Z	10
Y45-Z	9
Z45X	4
Z45-X	6
XYZ	0
-XYZ	4
X-YZ	6
-X-YZ	6
合計	111



ボーリングコアより切り出した供試体の方向を 図-8 に示す。そして表-4 に現地で定めた座標軸 (X, Y, Z)

に対応する各供試体の方向と数量を示す。

岩石供試体の総数量は 111 個である。

(2) 岩石供試体の形状

供試体の形状はモルタル材料で行った予備実験の結果に基づいて、図-9 に示す形状とした。供試体端面は機械仕上げ(旋盤)によって 3 mm 程度削りとり、平滑な面とした。その結果、端面の断面積は最小断面である中央部の約 2.5 倍となった。

ハンチ部はアラルダイトとセメントの混合材料とし、その重量比は 1:2 とした。

載荷板との接触面はアラルダイトで接着し、端面を完全に固定した。A E 発生位置の標定用セン

サーは、上下の載荷板 (50×50×30 mm) の側面にそれぞれ取付けた。

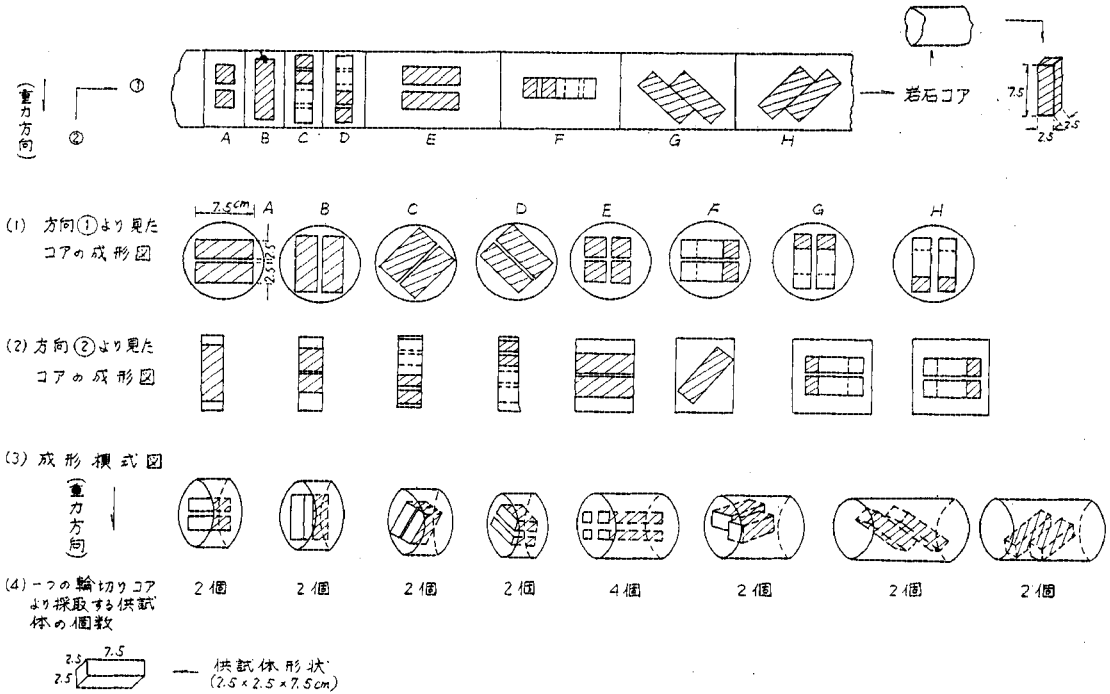


図-8 供試体成形模式図

(3) 岩石供試体の AE 特性とカイザー効果

a) AE 発生率特性

岩石供試体(凝灰岩)の AE 発生状況は, 3. (4) で示したモルタル材料における発生状況とほぼ同様で, 荷重が増加しても発生率がほぼ一定状態となる区間が続き, 破壊近く(破壊荷重の 80~90% 以上)で急増し, そまま破壊する測定例(図-16, 17, 20)が多かった. しかし, 比較的強度が小さい供試体の場合には, 破壊荷重の 30~50% 以上の荷重になると, AE 発生率が徐々に増加しながらついには破壊する測定例(図-18, 21)も見られた.

b) AE 波形と周波数成分

図-10 に岩石供試体の AE 波形を示す. 図中下半分は供試体中央部に取付けたセンサー, 上半分は供試体下部に取付けたセンサーの同時測定記録である. これによると, 中央部のセンサーで検出された AE 波形は立上りが非常に急峻である. 下部のセンサーで検出された AE 波形は立上りが緩やかで, 中央部のセンサーより始動時間が若干遅れている. すなわち, 供試体中央部で発生した AE 信号がまず中央部のセンサーに到達し, 少し遅れて減衰した波形となって下部のセンサーに到達したことがわかる. したがって, AE 波形の立上りが急峻であれば, そのセンサーの近傍の AE 信号であるとみなし得

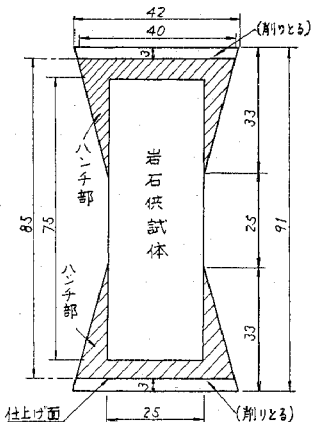


図-9 岩石供試体の形状(断面図)

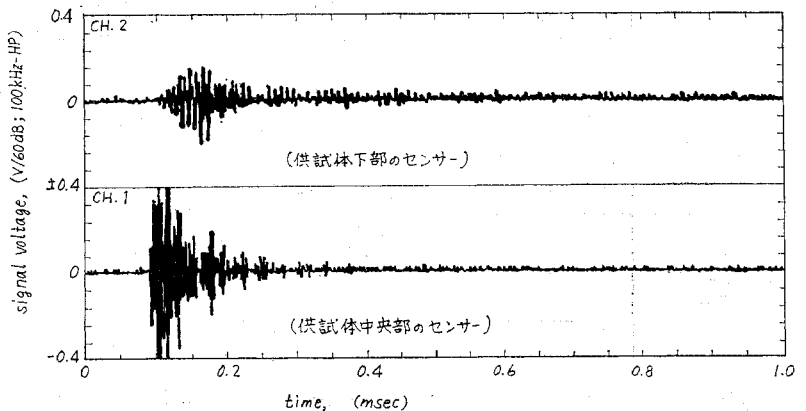


図-10 岩石供試体(凝灰岩)の AE 波形

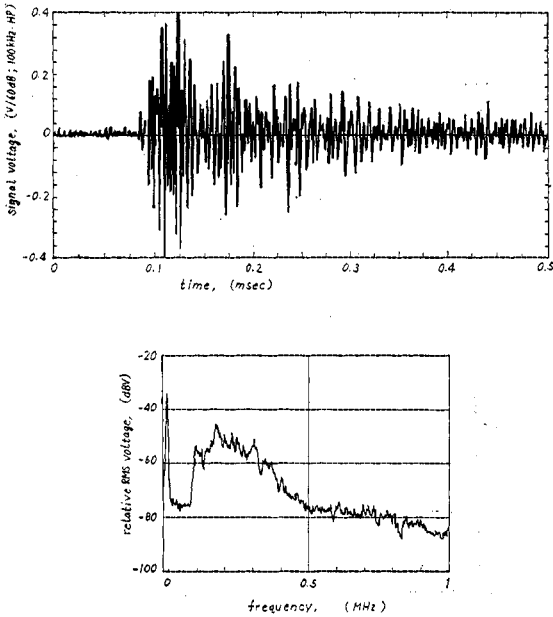


図-11 (1) 載荷初期の AE 波形と周波数成分

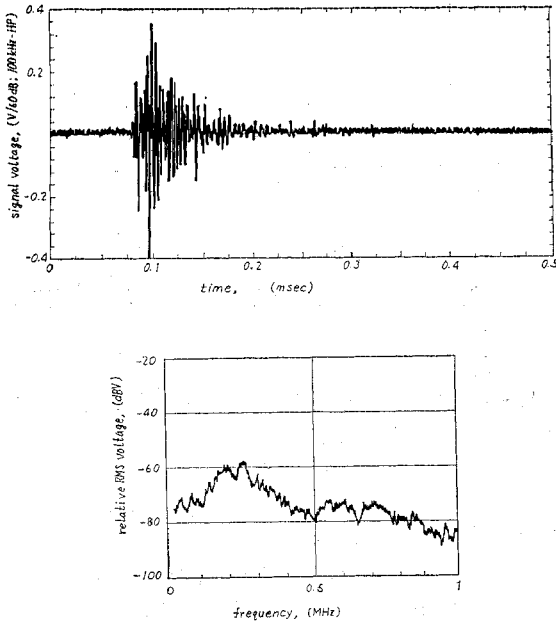


図-11 (2) 破壊近くの AE 波形と周波数成分

る。

図-11 (1) に載荷初期の AE 波形と周波数成分、図-11 (2) に破壊近くの AE 波形と周波数成分を示す。載荷初期では AE 波形の持続時間が比較的長く、周波数成分は比較的的低周波側にある。これが破壊に近づくと持続時間が短くなり、周波数成分は相対的に高周波側になる傾向となった。

また、AE 信号の持続時間は鉄鋼などの混合には 1 msec 以上であるが、今回の凝灰岩の場合にはかなり短

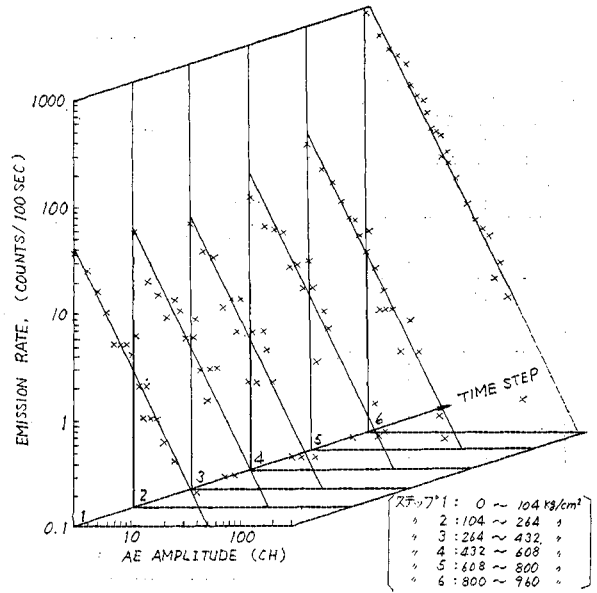


図-12 載荷過程の AE 振幅分布の変化

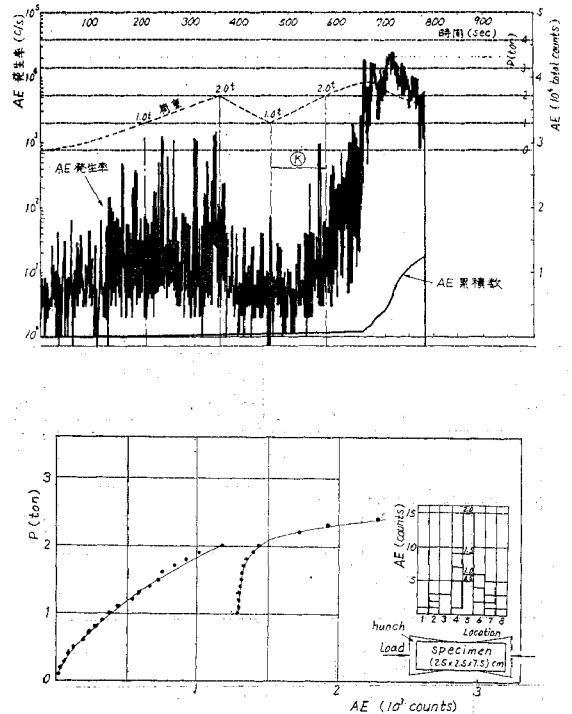


図-13 岩石試料のカイザー効果

かった。

c) AE 振幅分布特性

図-12 に載荷初期から破壊までの振幅分布の変化を各荷重段階に分けて示した。横軸 (log 表示) が振幅の大きさと縦軸 (log 表示) が発生率である。これによると、振幅の大きさは発生率と負勾配の直線関係で示され

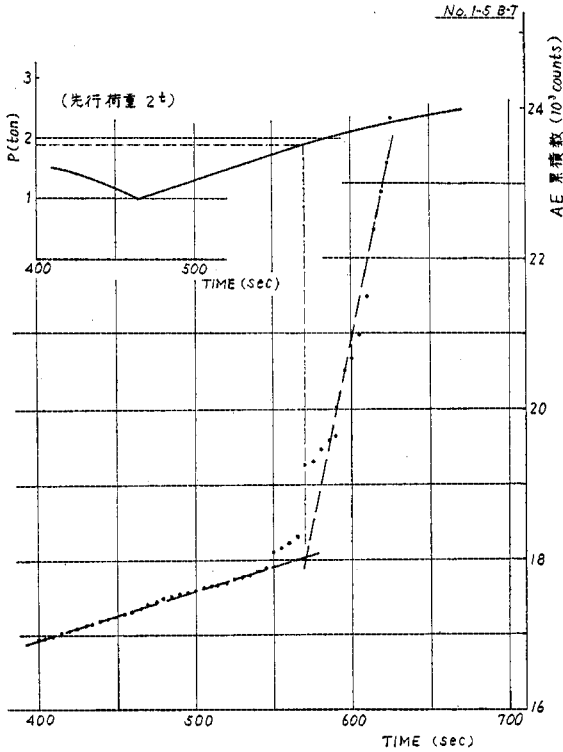


図-14 岩石試料の AE 累積数と時間の関係 (カイザー効果の検定)

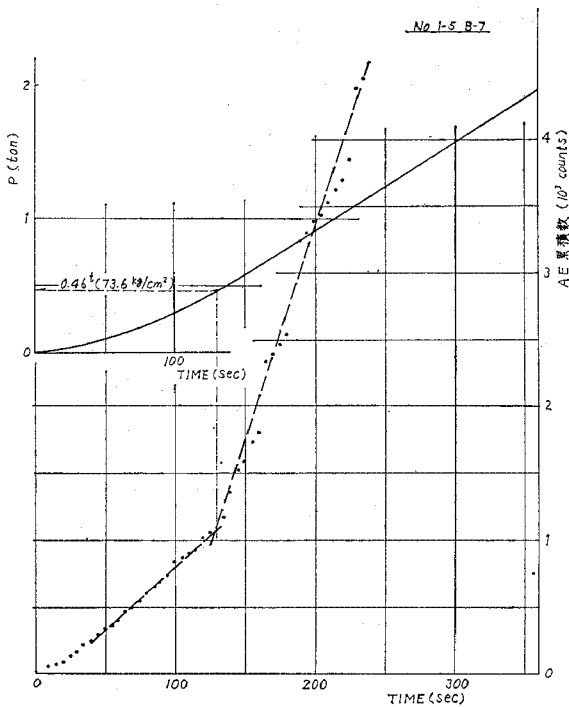


図-15 岩石試料の AE 累積数と時間の関係 (初期地圧の推定)

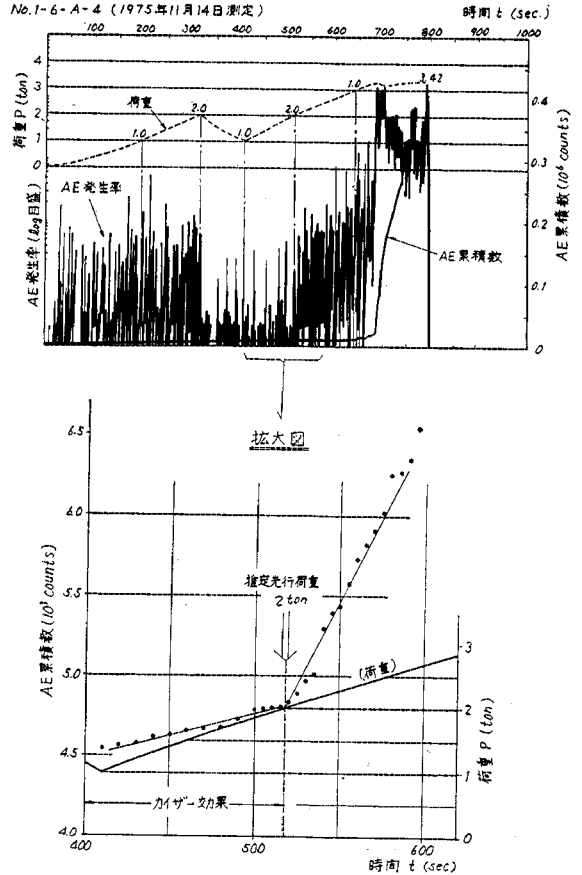


図-16 岩石のカイザー効果のチェック (カイザー効果が明瞭に認められる測定例)

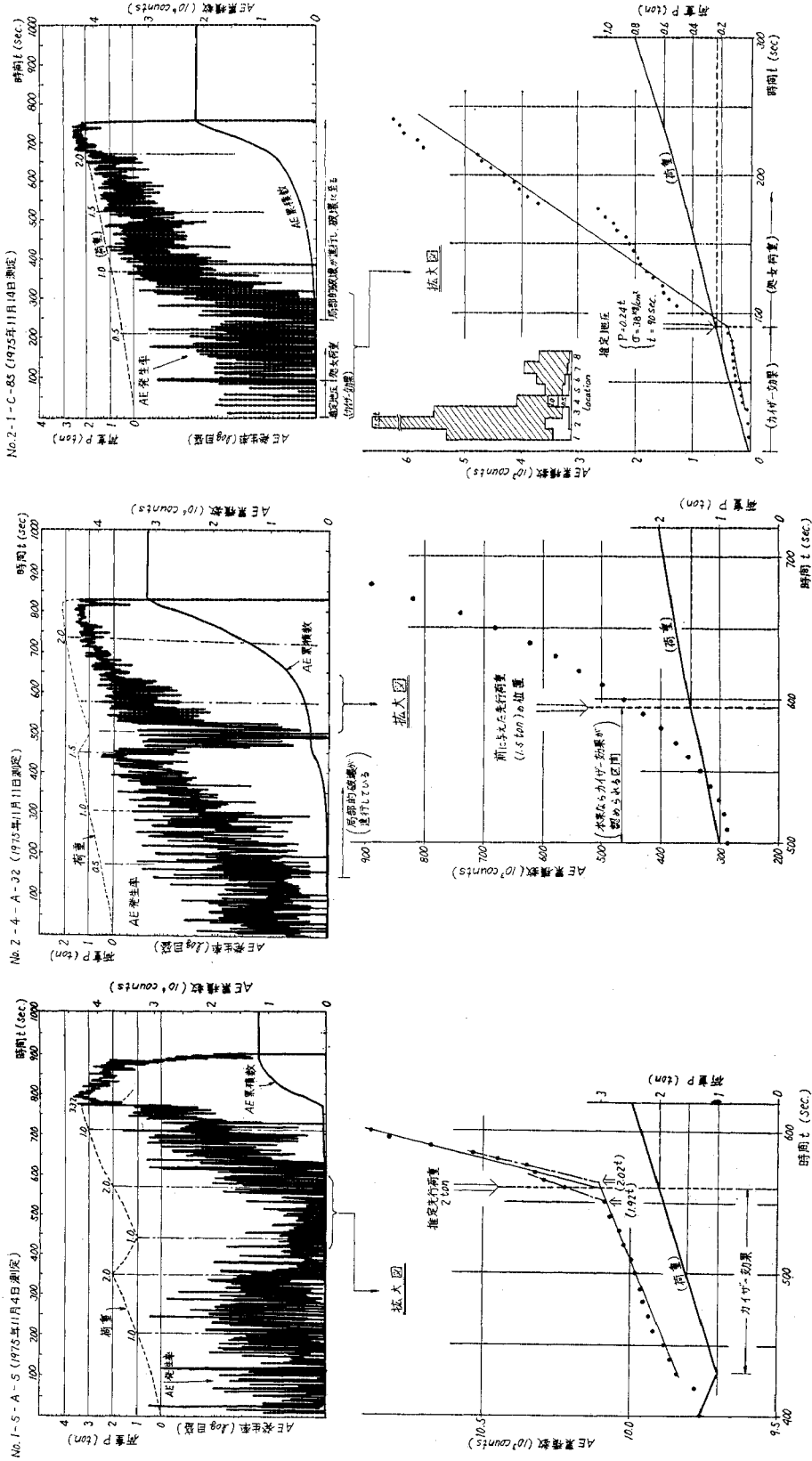
る分布特性となり、荷重初期と後期でその勾配は変化なく、ほぼ一定となった。

d) 岩石供試体のカイザー効果

図-13 にカイザー効果について調べた結果を例示した。モルタル材料の時と同様にカイザー効果の存在が確認される。図-14 に AE 累積数と時間の関係を拡大して示したが、これによればさらに明瞭になる。図-16, 17 にも実測例を示す。そこで、わずかに数例ではあるが、同様に行った結果、与えた先行荷重に対してカイザー効果により求めた推定先行荷重の誤差は、ほぼ 15% 以内であった。しかし、供試体端部からの AE 発生が多かったり、局所的な破壊が進行して AE 発生率が急速に増加していく場合には、カイザー効果は明瞭にあらわれなかった (図-18)。

(4) 岩石供試体による地圧推定の方法

図-13 において 0~2 ton までの AE 発生率を調べると、0.5 ton 付近より発生率が急に増加し、2 ton までにはほぼ同程度の発生率になっている。そこで、AE 累積数と時間の関係を拡大して 図-15 に示すと、0.46



図—19 地圧によると思われるカイザー効果が比較的に明瞭に認められる測定例

図—18 岩石のカイザー効果のチェック (すでに局部的破壊が進行しており、カイザー効果が不明瞭となった測定例)

図—17 岩石のカイザー効果のチェック (カイザー効果が明瞭に認められる測定例)

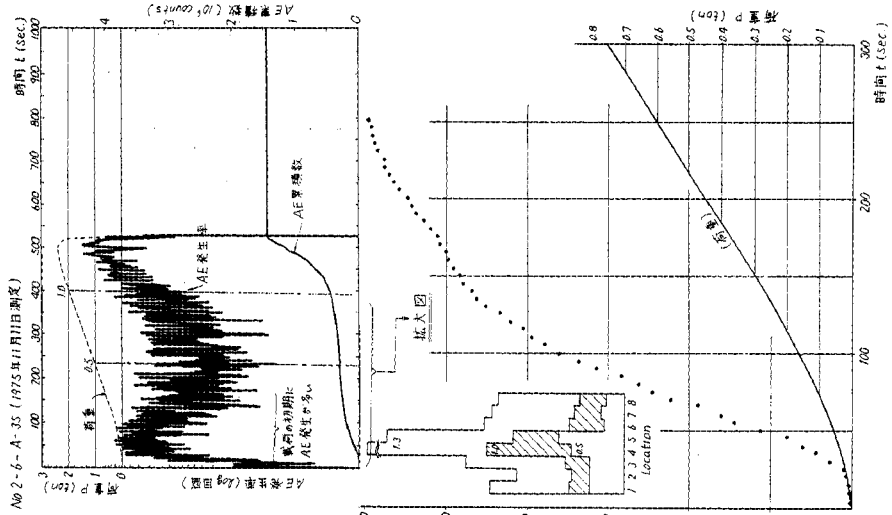


図-20 やや不明瞭であるが地圧によるカイザー効果と思われる測定例

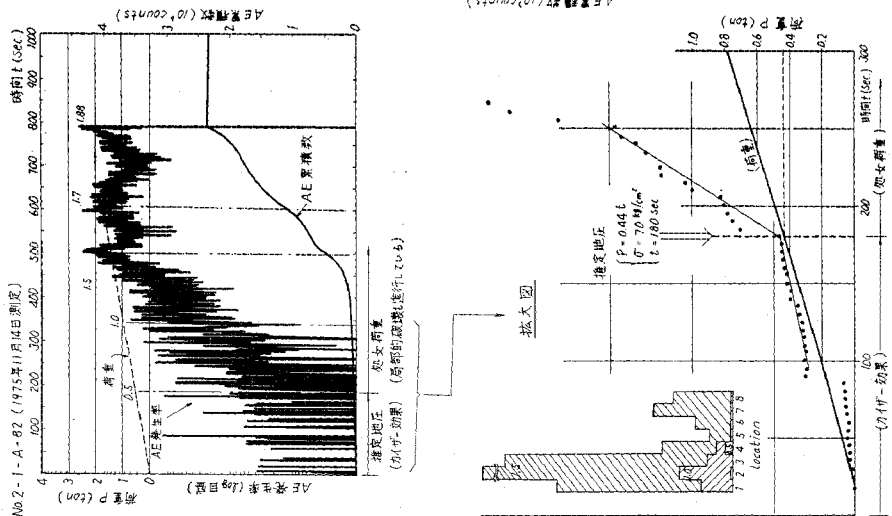


図-21 処女荷重になると同時に局部的破壊が進むと思われる地圧推定測定例

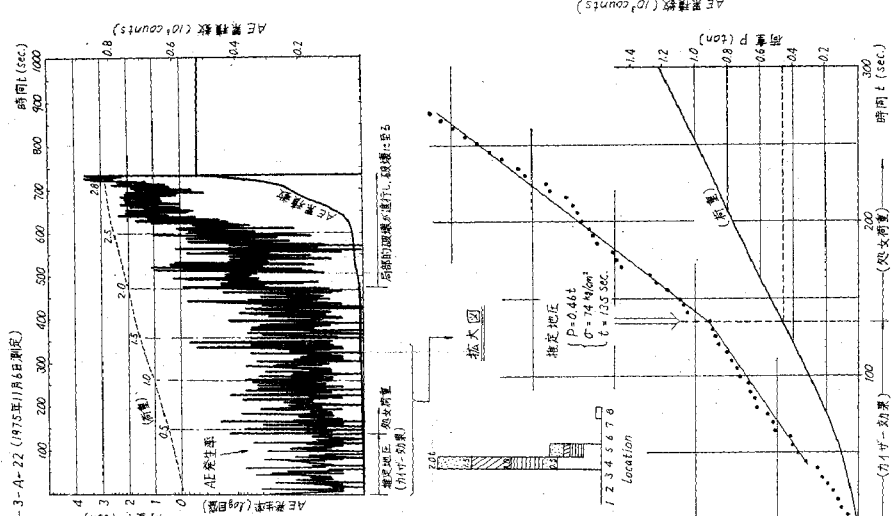


図-22 載荷の初期に供試体端部からのAE発生が多く、カイザー効果の検出ができなかった測定例

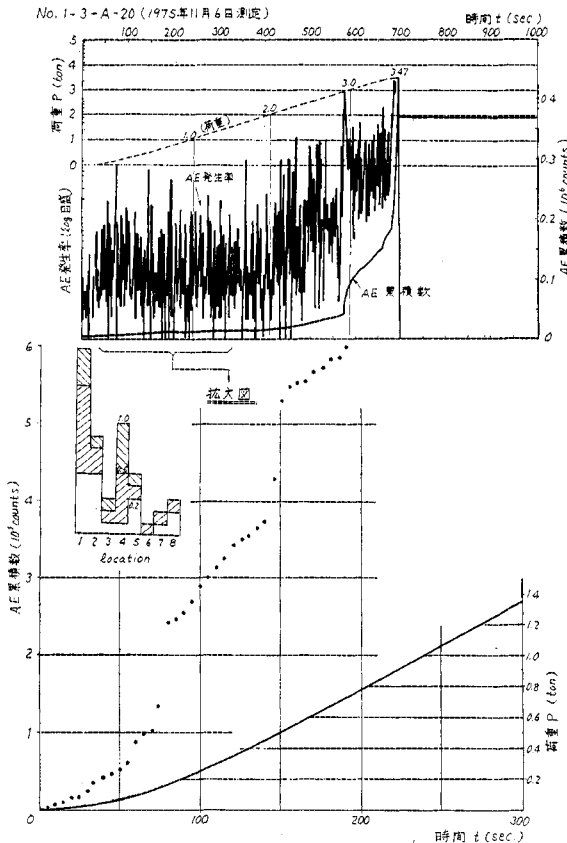


図-23 供試体端部からの AE 発生が多く、カイザー効果の検出ができなかった測定例

ton より AE 累積数の勾配が異なっていることがわかる。この場合は、この 0.46 ton ($\sigma=74 \text{ kg/cm}^2$) を推定地圧とした。図-19, 20 にも測定例を示す。以上のような AE 発生状況 (発生パターン a) を示した供試体は、全供試体 (111 個) の 61% であった。

次に、図-21 に示すようなパターン b を説明する。この種の場合の AE は、処女荷重になると同時に局部的破壊が進行し、そのまま破壊に至るパターンと類推される。供試体の強度がかなり弱い場合にこのような特性が認められる。一般には、前項 図-18 のように局部的破壊が進行している状態では、カイザー効果は不明瞭となる。しかし、図-21 のように一つの変曲点が認められる場合がいくつかあった。その意味について考察する。すなわち地圧によって長時間圧縮された場合には、それまでに生じた局部的破壊の状態で、材料組織的に再び圧密されて安定したとすれば、処女荷重になって初めて局部的破壊が始まることも十分に考えられる。このような理由によって、今回の地圧推定に関してはこの発生パターン b も用いることにした。発生パターン b を示す測定数は全測定数の 24% であった。

地圧推定の試験結果より、カイザー効果の検出ができ

表-5 岩質と推定地圧の関係

測定法	A E 法	オーバーコアリリング法 (孔底法)
I [粗化が進み 柔化している 結晶の粗大化 軟化傾向の 顕著な岩石]		
II [新鮮な結晶 が主であり 比較的硬い 結晶の塊 と認められ る岩石]		

なかった測定例を 図-22, 23 に示す。図-22 は載荷の初期に供試体端部からの AE 発生が異常に多く、それに妨害されてカイザー効果の検出ができなかった例であり、図-23 は初期から供試体端部で AE が多く発生し、そのまま端部より破壊に至る測定例で、やはりカイザー効果の検出ができなかった例である。これらの結果は、発生パターン c とし、今回の地圧推定結果からは除外した (全測定数の 15%)。

(5) 多成分の地圧推定結果

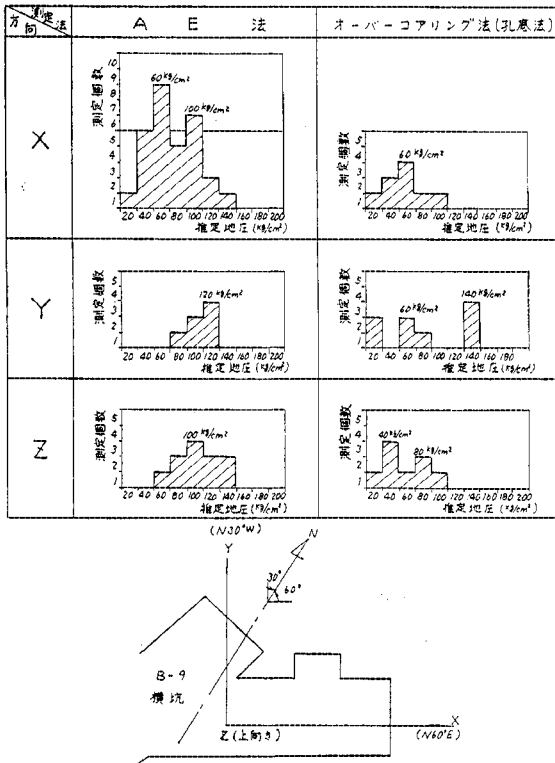
(a) 地圧の大きさは、異なる岩質が近接している場合には、その剛性により異なる値を示すと思われる。そこで、測定された地圧の推定値をまず岩質別にわけてヒストグラムで示すと、表-5 のようになった。その結果、比較的軟らかいと思われる岩質 (I) では平均地圧 $60 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$ 、比較的硬いと思われる岩質 (II) では $120 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$ 程度と推定され、AE 法では硬岩部の地圧の方が大きくなる傾向を示した。

また、別途行われたオーバーコアリリング法 (京大・岡行俊助教授の指導による孔底法) の結果⁶⁾ によれば、岩質 (I) で $40 \pm 20 \text{ kg/cm}^2$ 、岩質 (II) で $80 \pm 20 \text{ kg/cm}^2$ 程度となっており、AE 法と同様に硬岩部である岩質 (II) の方が大きい地圧となっている。

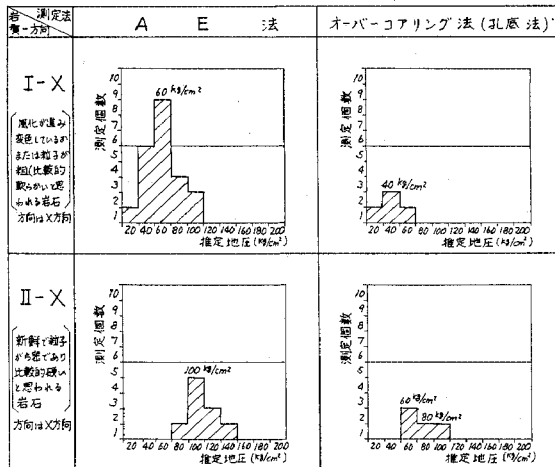
(b) 現地で定めた直交座標 X, Y, Z の各方向における地圧の推定値を表-6 にヒストグラムで示した。

AE 法によると、X 方向は $70 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$ 、Y, Z の方向は測定数が少ないので明確ではないが、Y 方向は 110

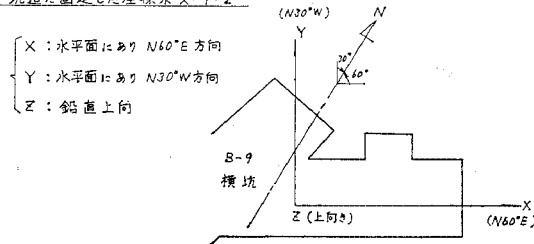
表一6 方向と推定地圧の関係



表一7 X方向の岩質別推定地圧



坑道に固定した座標系 X-Y-Z



±20 kg/cm², Z 方向は 100±30 kg/cm² 程度と推定でき、X 方向の推定値が若干小さめの値となった。

現地のオーバーコアリング法によると、X 方向は 60±20 kg/cm², Y 方向は 60 kg/cm² と 140 kg/cm² 程度の値が多く、Z 方向も 40 kg/cm² と 80 kg/cm² 程度の値が多かった。測定数が少なく明確ではないが、AE 法と同様に X 方向の推定地圧が若干小さめの傾向であると思われる。

(c) 測定数の比較的多い X 方向の推定値について岩質別にわけてみると、表一7 のようになった。

AE 法によれば、比較的軟らかいと思われる岩質 I-X では 60±30 kg/cm², 比較的硬いと思われる岩質 II-X では 100±30 kg/cm² 程度と推定された。

オーバーコアリング法によれば、I-X は 40±20 kg/cm², II-X は 80±20 kg/cm² 程度であった。

この両測定法の推定値について、各岩質別に比較すると、AE 法による推定値の方がオーバーコアリング法による値より大きくなった。その理由の1つは、AE 法では地質年代的な長時間の応力履歴の最大値を検出し易いのにに対し、オーバーコアリング法では現存ひずみに対応した応力値を検出し易い傾向によるものと思われる。

5. 今後の課題

岩石試料による地圧推定を行う場合の今後の基礎的課題としては、次のようなものが挙げられる。

- (1) 応力解放後の時間経過とカイザー効果の関係
- (2) 現地におけるオーバーコアリング法とのケーススタディによる比較
- (3) 含水量の相違がカイザー効果におよぼす影響
- (4) 方向別に異なる先行荷重を与えた後の各方向のカイザー効果の追試
- (5) 長期荷重と地震などの瞬時荷重によるカイザー効果の関係
- (6) 岩石に適切な AE センサーの検討, および AE 測定法・分析法の改善

6. 結 論

従来、AE 法は主として鋼構造物の塑性変形やクラックの発展のモニター、溶接部の遅れ破壊、岩盤掘削における強い地圧地帯での急激な応力解放に伴う山はね現象の保安上のモニターなどに利用されてきた。しかし、AE のカイザー効果による地圧推定の例は見当らず、まして、立体応力成分の推定におよぶ試みはまだ行われていない。

地圧推定に関しては、従来、応力解放法によるオーバ

ーコアリング法を用いており、当所で開発実用化した方法が各方面で用いられている。今回、新しく試みた基礎実験はまったく発想を変え、採取された岩石コアのサンプルについて AE のカイザー効果を利用し、立体的な自然地圧の成分を求め、別途現地で実施したオーバーコアリング法による地圧成分と対比して、AE 法による地圧推定の実証的な見通しを得た。

(1) 現地より採取されたオーバーコアリングの場所の岩石コア(凝灰岩)から各方向のスライスをつくり、そのサンプルについて AE のカイザー効果を利用した自然地圧立体 3 成分の推定を試み、現地オーバーコアリング法の推定結果と対比した。その結果ほぼ岩質区分間の差異および地圧成分間の差異などの計測された事項からみて、本方法が岩盤力学上十分に意味のある応力推定法となり得る可能性を(実験的に)見出した。すなわち、岩盤区分間の差異としては、AE 法では比較的軟らかいと思われる岩質(I)では平均地圧 $60 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$ 、比較的硬い岩質(II)では平均地圧 $120 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$ 程度と推定され、オーバーコアリング法では岩質(I)が $40 \pm 20 \text{ kg/cm}^2$ 、岩質(II)が $80 \pm 20 \text{ kg/cm}^2$ と推定された。ともに岩質(II)の硬岩部の方が大きい値を示した。

次に、地圧成分間の差異としては、現地で定めた直交座標 X (水平で $N 60^\circ E$)、Y (水平で $N 30^\circ W$)、Z (鉛直)の各方向における地圧を比較した。まず AE 法によれば、X 方向は $70 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$ 、Y 方向は $110 \pm 20 \text{ kg/cm}^2$ 、Z 方向は $100 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$ 程度と推定され、オーバーコアリング法によれば、X 方向は $60 \pm 20 \text{ kg/cm}^2$ 、Y 方向は 60 kg/cm^2 と 140 kg/cm^2 程度の値が多く、Z 方向も 40 kg/cm^2 と 80 kg/cm^2 程度の値が多かった。測定数が少なく明確ではないが、両測定法による推定値はともに X 方向が小さめの傾向を示した。

(2) この多成分の応力を岩石サンプルから検出する方法を可能にするために、特に工夫がこらされたのは、サンプルを実験室内で加圧して、AE を発生させていく経過で、サンプルの加圧面近くに発生し易い応力集中による AE 信号を消去する方法であった。すなわち、加圧面近くはあらかじめサンプルに拡幅したハンチをアラルダイトで付着させ、局部応力集中による AE 信号の発生源を消滅させ、サンプル中央部からの所要の AE 信号のみを経時的に計数できたことである。このことは、モル

タルのサンプルによる予備試験において、サンプルの上下面に取付けた 2 個のセンサーで観測される AE 信号の時間差計測によって確認された。

(3) AE 法により測定した 111 個の凝灰岩のサンプルのうち、測定数の比較的多い X 方向(34 個)の推定値について、岩質別にわけてみると、比較的軟らかいと思われる岩質 I—X では $60 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$ 、比較的硬いと思われる岩質 II—X では $100 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$ 程度と推定された。また、オーバーコアリング法によれば、I—X が $40 \pm 20 \text{ kg/cm}^2$ 、II—X が $80 \pm 20 \text{ kg/cm}^2$ 程度であった。この両測定法の推定値について、おのおの岩質別に比較すると、AE 法による推定値の方がオーバーコアリング法による推定値より大きくなった。その理由の 1 つは、AE 法では地質年代的な長時間の応力履歴の最大値を検出し易いのに対し、オーバーコアリング法では現存ひずみに対応した応力値を検出し易い傾向によるものと思われる。

謝 辞 本研究の着想と実験装置および実験など一連の研究は電力中央研究所によるものであるが、岩石の提供と、対比のためのオーバーコアリング法の結果は青函トンネル土圧小委員会より受け、かつ実験にあたっては応用地質調査事務所の鈴木楯夫氏に協力していただいた。関係の各位に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐々木和郎・高田 明：深部探掘に関する諸問題—ロックノイズと山はねとの関連性—，日本鉱業会誌，Vol. 84, No. 965, 1968 年 9 月。
- 2) 丹羽義次・小林昭一・福井卓雄・柳谷 俊・大津政康：岩はねに伴うアコースティック・エミッションに関する考察，第 10 回岩盤力学に関するシンポジウム概要，1976 年 2 月。
- 3) 岡 行俊・平松良雄：ひずみまたは変形測定値からの岩盤内応力の決定，日本鉱業会誌，Vol. 84, No. 957, 1968 年 1 月。
- 4) 金川 忠・林 正夫・日比野敏：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概要，1975 年 2 月。
- 5) 仲佐博裕：音響放出特性を利用する材料診断技法，電力中央研究所報告，No. 29, 昭和 50 年 11 月。
- 6) 土木学会：青函トンネル土圧研究調査報告書，昭和 49 年度。

(1976.7.12・受付)