

AE法による一次地圧の推定に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY FOR ESTIMATION OF INITIAL GEO-STRESS USING THE ACOUSTIC EMISSION

石橋孝治*・小長井一男**・御手洗良夫***・松本嘉司****

By Koji ISHIBASHI, Kazuo KONAGAI, Yoshio MITARASHI and Yoshiji MATSUMOTO

In this paper, the authors deal with the correlation between the releasing stress level on the preceded stress-strain diagram and acoustic emission (AE) under the repetitional loading. Models of soft and hard rock were made with cement mortar and the specimens were loaded by a stiff testing machine. The AE count rate, the mean square of amplitude and the frequency of AE wave were employed as the AE parameter.

It was clarified that the point of inflection in the increasing section of the AE count rate curve corresponds with the maximum hysteresis strain at the pre-loading, and the region included the releasing point on the stress-strain curve can ascertain with the position of the peak on the AE count rate curve. Based on the above test results, a new estimating method of initial geo-stress was suggested.

1. まえがき

近年、鉱山における深部鉱床の開発や構造物の地下設置要求による掘削断面の大型化などに伴って、地下構造物の安全設計や安全管理がますます重要となってきた。地下空洞の安全設計を行うためには、空洞周辺の地山のおかれている状態や力学的性質を的確に把握しておく必要がある。このような地山情報の1つである一次地圧を知ることは最も重要なことであり、Acoustic Emission (AE) のカイザー効果を利用する方法¹⁾が提案されている。カイザー効果とは、R. M. Kaiserが材料研究の手立てとして積極的に取り入れてきたもので、それ以来AEの実用面での利用を目的とした研究が諸々で行われ、安全管理に関しては山はね現象、ガス突出、鉱柱の診断など、保安上の監視と危険予知のモニターとして利用され、これまでいくつかの研究がある^{2)~4)}。

岩石が地山内で三次元の応力状態にあることは周知の

とおりである。三軸圧縮試験機の性能が向上し、岩石の強度破壊点以後の破壊挙動を知ることができるようになり、岩石の応力-ひずみ曲線は拘束応力が小さい場合には強度破壊後ひずみ軟化現象を呈し、ネガティブスロープをもって残留強度に至るのに対して、拘束応力が大きい場合にはひずみ硬化現象を呈し、鋼の応力-ひずみ曲線と似た線形を描き、岩石の破壊挙動は岩石のおかれている周囲の拘束剛性の大きさに支配されることが明らかとなった^{5),6)}。したがって、拘束応力が小さい環境のもとにある地山内の岩石の力学的平衡状態は、応力-ひずみ曲線上では弾性域内、軟化域内、残留域内の3域のどこかに位置していることになり、同一応力レベルであっても破壊の進行度が異なることになる。このため、AE法により一次地圧を推定する際には、応力レベルの評価に加えて、応力履歴についての評価もしておくことが必要である。

本研究は、主応力の方向と試験時の載荷方向が一致する最も単純な場合を対象として、拘束応力が小さい環境を一軸圧縮荷重下での剛性試験を行うことで再現するとともに、モデル軟硬岩に対する繰り返し載荷を行うことにより、先行応力-ひずみ履歴を明確にし、AEと応力-ひずみ曲線の関係を調べ、応力履歴のAEの主要パラメーターによる評価を試みたものである。

* 正会員 工博 佐賀大学助教授 理工学部土木工学科
(〒840 佐賀市本庄町1)

** 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 建設系
(〒949-54 長岡市上富岡町字長峰1603-1)

*** 正会員 工修 熊谷組技術研究所第1技術部
(〒162 新宿区津久戸町17-1)

**** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷7-3-1)

2. 実験方法

(1) AEの検出方法

測定に用いたAEセンサーはNF回路社製のAE-901 D型で、その共振周波数は140 kHzであり、100 kHz～200 kHzの範囲で高い利得を有している。

AEの検出系統図をFig. 1に示す。AEセンサー①で受信したAE信号はプリアンプ②を経て、ディスクリミネータ③に入力される。ここで設定した基準電圧（ディスクリ・レベル）と70 dB増幅した入力電圧の比較が行われ、ディスクリ・レベル以上の振幅を有する入力信号を1つのパルスとして出力する。出力されたパルスはカウンター④に入力されAE事象として計数され、この計数値はD/A変換後X-Yレコーダー⑤に出力される。また、AE波として弁別された信号はメモリスコープ⑥にて波形観察を行い、適宜データレコーダー⑥に収録する。

AEセンサーからディスクリミネータに出力される波はAE波とノイズが混在している。これらの弁別はディスクリ・レベルを設定して行うが、本実験では連続型のAE波にも対処できるよう、2つのディスクリ・レベル（低いしきい値を V_L 、高いしきい値を V_H とする）を設定した。 V_L と V_H のレベルは既往の実験結果^{1),7)}と予備実験の結果を参考にして、 $V_L=100$ mV, $V_H=200$ mVとした。

(2) 実験方法

使用した一軸圧縮試験装置はひずみ制御方式で、最大荷重160 tの試験機(MTS 3151型)であり、そのフレ-

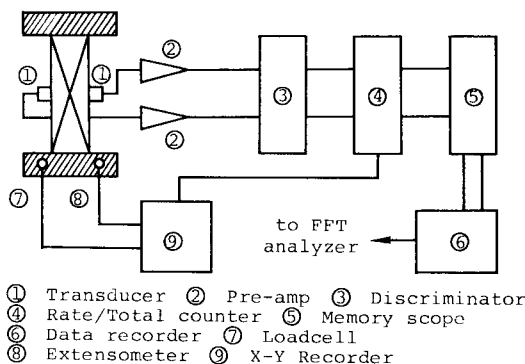


Fig.1 Block diagram of instrumentation setup for acoustic emission measurements.

Table 1 Mix proportion of cement mortar.

standard strength (MPa)	water cement ratio W/C (%)	sand cement ratio S/C	cement C (kg/m ³)	admixture cement ratio (%)	
				material	agent
5	200	4	170.1	100*	—
10	65	4	391.3	—	—
35	65	2	564.6	—	—
150**	31.6	1.42	740.0	20***	1****

sand : TOYOURA standard sand
cement : high-early-strength portland cement.
* : calcium-carbonate ** : autoclave curing.
*** : silica **** : water-reducing agent

Table 2 Mechanical properties of model rocks.

standard strength (MPa)	unit weight (kN/m ³)	compressive strength (MPa)	tensile strength* (MPa)	velocity of elastic wave (m/sec)	
				P-wave	S-wave
5	17.46	6.9	0.65	2,046	1,350
10	18.44	9.7	0.94	2,918	1,542
35	20.30	38.2	2.30	3,807	2,038
150	21.77	159.7	7.30	4,585	2,074

* : test result by Brazilian test.

Table 3 Details of loading pattern.

Pattern	Loading	Position of releasing Point
1	repetition	Pre-failure region (under the strength failure point on the stress-strain curve)
		post-failure region (over the strength failure point on the stress-strain curve)

△剛性は8.73 GN/mである⁶⁾。

モデル軟硬岩供試体の形状は4 cm×4 cm×8 cmの角柱供試体であり、目標とする一軸圧縮強度として、5 MPa, 10 MPa, 35 MPa, 150 MPa以上の4種類の強度を設定し、セメントモルタルを用いておのおの6本を製作し実験に供した。Table 1に各供試体の配合を、Table 2に各供試体の基本的な力学的性質と物性値を示す。

AEセンサーは供試体の対向する2側面の中央に1個ずつ接着剤を用いて取り付けられた。この側面に直交する対向2側面には抵抗線ひずみゲージを貼付した。

実際の岩石供試体は力学的平衡状態にある地山内から抽出される。このときのコア抜き等の抽出作業は先行荷を解除することに相当する。本モデル実験では、この除荷が先行応力-ひずみ曲線上のいずれの領域から行われたかを明確しておくために、Table 3に示した2種類の載荷パターンを設定して載荷を行った。また、載荷は0.015 mm/minの変位速度で行った。

(3) AE信号の処理

AEの性質を評価するパラメーターとして数種類のも

のが用いられているが、本研究では発生頻度、振幅2乗平均値、周波数特性を取り上げた。観測されるAE波は供試体内の伝播経路、センサーの特性、測定機器の特性によってゆがめられたものが検出される。また、Table 2に示した供試体の弾性波速度（P波）はいずれも2000 m/s以上であるとともに、用いた供試体の寸法の大きさを考えれば、供試体の寸法効果の影響がでてくる。このため、周波数分析は出力波形の前半一部分（2.048 ms）を対象とし、AE波のスペクトルとAEセンサーの周波数応答特性をHanning ウィンドウを用いて3回の平滑化を行った後、線形理論⁸⁾に基づいて補正を行い、センサー入力直前のAE波のスペクトルを算出した。なお、FFT解析においてはサンプリング間隔を2 μs、サンプル数を1024と設定した。したがって、Nyquist 遮断周波数は250 kHz、周波数間隔（ $\Delta f=1/N \Delta t$ ）は488 Hzとなる。

3. 実験結果

本論文中においては、繰り返し载荷試験における载荷回数を载荷次数（ n ）で表わす。また、除荷時の応力レベルはピーク強度に対する比（ ξ ）で表わし、载荷次数を添字することとする。

(1) AEの発生頻度と応力-ひずみ曲線

AE事象を表わすパラメーターとして、AEの累積数と発生頻度が挙げられるが、AEの発生挙動に対する感度を考慮して、本実験では発生頻度を主たるパラメーターとして採用した。

a) 弾性域での繰り返し载荷

弾性域における除荷開始の応力レベルは $\xi \leq 60\%$ で行うのを原則とした。

Fig. 2は基準強度が5 MPaの供試体の二次载荷時のAEの発生頻度と応力-ひずみ曲線の関係を示したものである。二次载荷時の応力レベルが、一次载荷時の除荷

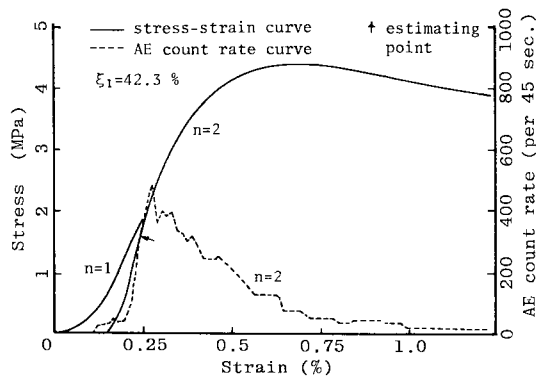


Fig. 2 Relation between AE count rate and stress-strain curve (5 MPa).

応力レベルに達する付近から、AEの発生頻度が急激に高くなり、いわゆるカイザー効果が認められる。

Fig. 3は基準強度が10 MPaの供試体の二次载荷時のAEの発生頻度と応力-ひずみ曲線の関係を示したものである。両者の関係はFig. 2に示した基準強度5 MPaの供試体の場合と同様な関係を示しているが、強度破壊点以降の領域にもAEの発生頻度の小さなピークがみられる。これは極限状態の破壊を決定づけるすべり面での滑動に依存した挙動である。

Fig. 4は基準強度が35 MPaの供試体の二次、三次载荷時のAEの発生頻度と応力-ひずみ曲線の関係を示したものである。二次载荷時にはカイザー効果が認められるが、三次载荷時には、载荷区間の全域にわたってAEの発生頻度の著しい変動はみられない。これは三次载荷時の応力-ひずみ関係が示すように、供試体が予想外に大きな内部欠陥を有しており、これに沿う局所的な破壊が二次载荷時にかなり進行していたことによるものと考えられる。

Fig. 5は基準強度が150 MPaの供試体の二次、三次载荷時のAEの発生頻度と応力-ひずみ曲線の関係を示

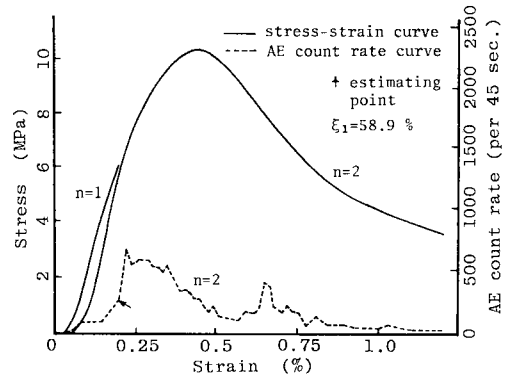


Fig. 3 Relation between AE count rate and stress-strain curve (10 MPa).

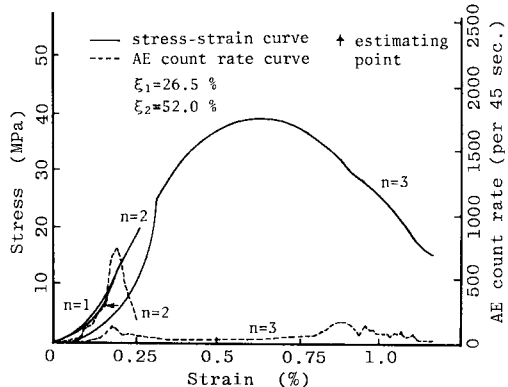


Fig. 4 Relation between AE count rate and stress-strain curve (35 MPa).

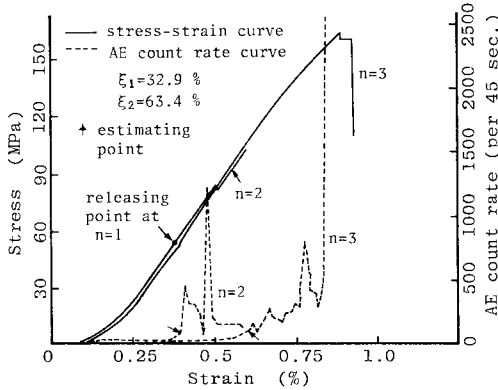


Fig. 5 Relation between AE count rate and stress-strain curve (150 MPa).

したものである。一次荷重時の応力-ひずみ曲線と二次荷重時のそれが重なっているが、二次、三次荷重時とも先行荷重時の除荷応力レベル付近から AE の発生頻度が急増もしくは漸増して最初のピークを生じており、カイザー効果が認められる。

以上のことから、実際の岩石において、コア抜き等による除荷が先行応力-ひずみ曲線上の強度破壊点以前に行われた場合には、カイザー効果を利用して一次地圧を推定できることが確かめられた。

b) 軟化域での繰り返し載荷

弾性域での繰り返し載荷試験の結果、応力-ひずみ関係において、明瞭なひずみ軟化現象を示した基準強度 10 MPa の供試体について、軟化域での繰り返し載荷試験を行うこととした。除荷開始の応力レベルは $\xi=90\%$ 程度を目安として設定した。

Fig. 6 と 7 に二次、三次、四次荷重時の AE の発生頻度と応力-ひずみ曲線の関係を示す。Fig. 7 に示した例においては、一次荷重時の除荷応力レベルとして $\xi=100\%$ の場合を考慮した。Fig. 7 においては、AE の発

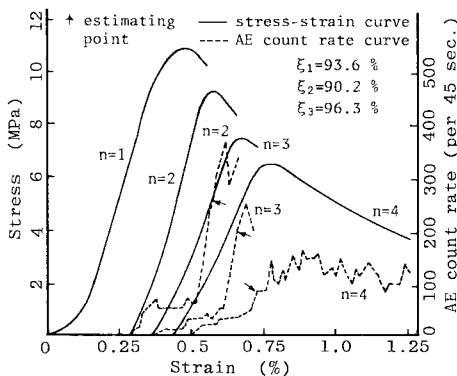


Fig. 6 Relation between AE count rate and stress-strain curve (10 MPa).

生頻度の変動が著しい箇所がみられるが、この変動はある傾向のうえに重なって生じており、Fig. 6 に示した例を含め AE の発生頻度の変化の様子は、弾性域での繰り返し載荷試験の結果と同様な傾向を示している。一方、応力-ひずみ曲線に注目すると、いずれの再荷重時のピーク強度の応力レベルも、先行荷重時のピーク強度はもとより除荷時の応力レベルにも達していない。したがって、実際の岩石において、コア抜き等による除荷が先行応力-ひずみ曲線上の強度破壊点以後に行われた場合には、カイザー効果を利用した一次地圧の推定値は明らかに過小評価となり、推定値の精度は著しく低下する。これは弾性域をはずれば、カイザー効果が成立しないことを示している。

c) 先行最大履歴ひずみ

Fig. 6 と 7 より、AE の発生頻度が急増する区間においてその傾きが変化する点(変曲点)を定め、この変曲点が与えるひずみ量と先行応力-ひずみ関係における除荷時の最大ひずみとの対応関係について検討してみる (Fig. 7 においては AE の累積数曲線も参照した)。

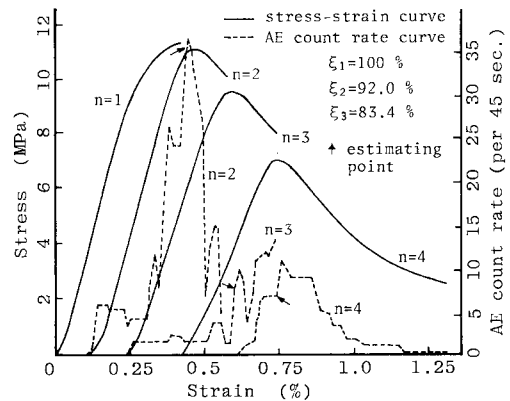


Fig. 7 Relation between AE count rate and stress-strain curve (10 MPa).

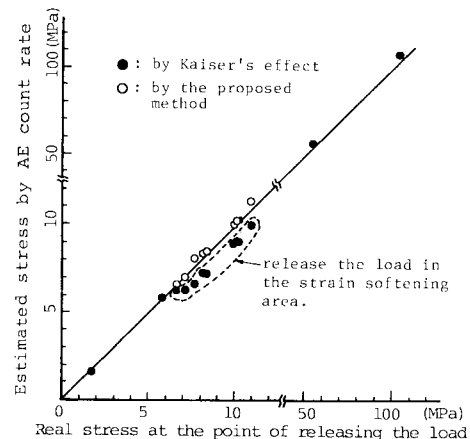


Fig. 8 Relationship between estimated stress and real stress.

Fig. 8は繰り返し載荷試験を行ったすべての供試体について、カイザー効果を利用してAEの発生頻度から推定した除荷時の先行応力と真の除荷時の先行応力との対応関係を示したものである。破線で囲んだ部分は軟化域から除荷した供試体によるもので、直線の下方にずれて位置しており、明らかにカイザー効果が成立していない。そこで、AEの発生頻度から推定した先行最大履歴ひずみと真の先行最大履歴ひずみとの関係をFig. 9に示す。同図においては、除荷が応力-ひずみ曲線上のいずれの領域から行われたかに関係なく、先行最大履歴ひずみの推定値と真値が良好な一致をみせている。このことは、AEの発生頻度の変曲点は先行最大履歴ひずみに対応することを意味し、AEの発生頻度については、“再負荷の際、先行最大履歴ひずみを越えるまではAEの発生は少ない”とひずみで評価した定義づけを行う方が、より適切である。

d) 除荷時の先行応力の推定法について

AEの発生頻度をひずみで評価して定義し、これに基づいて除荷時の先行応力を推定するには、除荷が先行応力-ひずみ曲線上のどの領域から行われたかを判定しておく必要がある。Fig. 2-7に示したAEの発生頻度と応力-ひずみ曲線の関係から、AEの発生頻度のピークの位置がこの判定における有効な情報であることがうかがえる。AEの発生頻度のピークは、先行最大履歴ひずみよりわずかに大きなひずみのところで生じている。弾性域から除荷した場合には、大きな残留ひずみを伴わないので、再載荷時の応力-ひずみ曲線は先行載荷の応力-ひずみ曲線と重なることになる。したがって、この場合にはAEの発生頻度のピークは強度破壊点以前に生じる。一方、軟化域から除荷した場合には、再載荷時の応力-ひずみ曲線は先行最大履歴ひずみを越える軟化域で先行載荷の応力-ひずみ曲線に漸近することになる。し

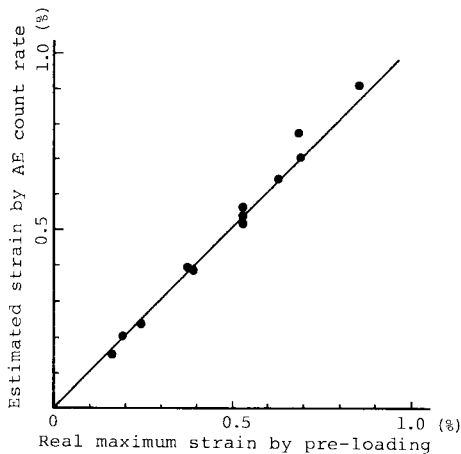


Fig. 9 Relationship between estimated strain and real strain.

たがって、この場合のAEの発生頻度のピークは強度破壊点付近もしくはそれ以後に生じる。

以上の判定基準をもとに、除荷時の応力レベルが応力-ひずみ曲線上のどの領域に位置していたかを判定することができる。弾性域から除荷された場合には、残留ひずみが小さいことから、再載荷時の応力-ひずみ曲線を用いて、AEの発生頻度の変曲点から先行最大履歴ひずみに対応する先行応力を算定することができる。一方、軟化域から除荷された場合には、再載荷時の軟化域における応力-ひずみ曲線を強度破壊点側に延長し、これを先行載荷の軟化域の応力-ひずみ曲線とみなし、AEの発生頻度の変曲点から推定された最大履歴ひずみ (ϵ_e) を用いて、先行応力 (σ_e) を算定することができる (Fig. 10 参照)。Fig. 8中に白抜き丸印で示した点は、この方法で推定した値を示している。真値と良好な一致をみせている。推定値の平均誤差は3.3%であり、推定精度が飛躍的に向上する。

(2) 周波数特性

除荷時の先行応力レベルが応力-ひずみ曲線上のどの領域に位置していたかを判定する情報として、AE波の周波数特性が有効な情報となるか否かについて検討を行った。

一例としてFig. 11と12に基準強度10MPaの供試体から得られたAEセンサー出力時のAE信号のフーリエスペクトルを示す。Fig. 11は一次載荷時における $\xi=35\%$ の応力レベルで発生したAE信号の分析結果であり、Fig. 12は二次載荷時における $\xi=96\%$ の応力レベル(軟化域内)で発生したAE信号の分析結果である。強度の異なる他の供試体から計測されたAEセンサー出力時のAE信号の周波数分析結果によれば、AEセンサーの共振周波数付近にみられる卓越周波数は、強度が大きいほど高くなる傾向がみられるものの、強度や載荷次数に関係なく、おおむねFig. 11, 12に示した2つの型に大別される。

a) 寸法効果について

Fig. 11, 12で示された低周波数域における卓越周波数

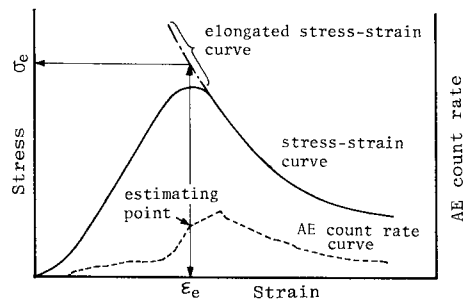


Fig. 10 Generalized estimating process of proposed method.

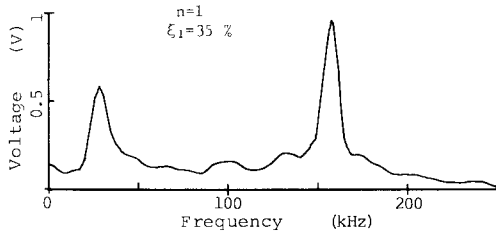


Fig. 11 Fourier spectra of output AE wave from the sensor (10 MPa).

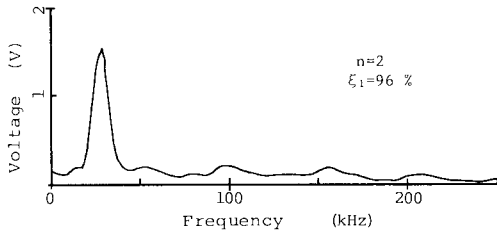


Fig. 12 Fourier spectra of output AE wave from the sensor (10 MPa).

について検討を行ってみた。Table 4 は各基準強度の供試体の低周波数域における卓越周波数と、Table 2 に示した P 波速度を用いて 4 cm×4 cm×8 cm の供試体の AE センサーを取り付けた対向 2 側面を AE 波が往復することによって生ずる側面の揺れの周期を算定した値とをまとめて示したものである。各基準強度ごとの両者の値は非常によく一致しており、低周波数域における卓越周波数は AE 波の多重反射に起因したのもであると判断される。

b) フーリエスペクトルの形状について

使用した AE センサーの周波数特性を考えれば、150 kHz 付近の卓越周波数が AE 波の特性を表わしていることと、前項 a) の検討結果を踏まえて、AE センサー出力時の AE 信号を AE センサーの周波数応答特性により補正し、さらに 50 kHz 以下の周波数帯を削除した周波数分析結果について検討した。

一例として、Fig. 13 と 14 に弾性域から除荷した場合と軟化域から除荷した場合の再載荷時に発生した AE 波の周波数分析結果を示す。軟化域から除荷した場合の一部の AE 波に、150 kHz 付近の卓越周波数がみられな

Table 4 Dominate frequency at the low frequency band and resonant frequency of each specimens.

standard strength (MPa)	dominate frequency at the low frequency band (kHz)	resonant frequency of each specimens (kHz)
5	25	25
10	20 -- 35	18 -- 36
35	25 -- 50	24 -- 48
150	30 -- 60	38 -- 56

いものがあったが、軟化域から除荷した場合には、例示しているように速度がピーク値を示す周波数は、弾性域から除荷した場合のそれに比べ、わずかながら小さくなるとともに、ピーク値も小さくなる傾向を示した。さらに、この場合には速度がピーク値を示す周波数帯において裾野の広がりが大きくなり、減衰が大きいことが認められる。

c) 振幅 2 乗平均値

AE 波のエネルギー指標として振幅 2 乗平均値を与え、先行載荷時の応力-ひずみ曲線上における除荷開始点との関係について検討を行ってみた。AE 波の振幅 2

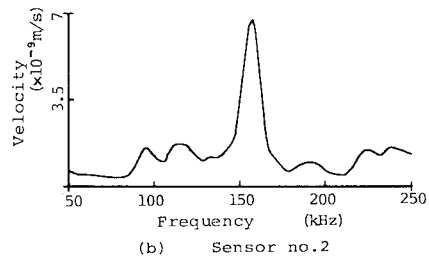
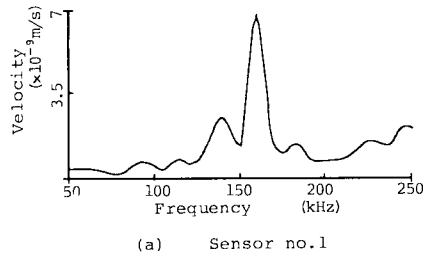


Fig. 13 Fourier spectra of input AE wave to the sensor. (n=2, 10 MPa) (Loading pattern 1)

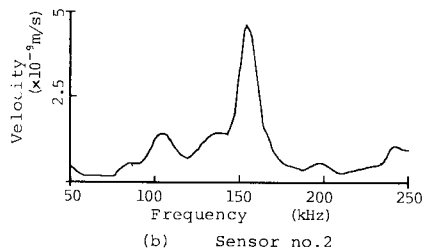
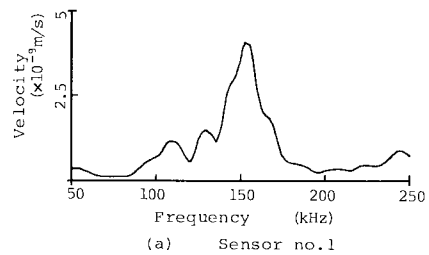


Fig. 14 Fourier spectra of input AE wave to the sensor. (n=2, 10 MPa) (Loading pattern 2)

Table 5 Mean square of amplitude. (standard strength : 10 MPa)

loading order	loading pattern 1		strain level small-large	loading order	loading pattern 2						strain level small-large
	sensor no.				sensor no.		sensor no.				
	1	2			1	2	1	2			
1	74	70	↘	1	132	51	80	110	156	81	↘
	183	144			312	122	113	173	156	185	
	228	198			184	238	281	277	238	110	
2	117	80	↘	2	20	318	18	101	48	93	↘
	159	129			333	333	6	135	66	115	
	160	149			-----*						
	35	57		4	107	17	100			↘	
	-----*			9	13	13	41	400	129		
	624	653		0.5	8			161	133		
	532	522		-----*						↘	
	337	258				5	39				
	187	33		7	125			32	30		
	562	338		-----*						↘	
				0.6	0.02	257	41	84	43		
						12	5	113	256		
				1	43						

unit : 10^{-8} (m/s)² , * : broken line shows maximum hysteresis strain level of pre-loading.

乗平均値はフーリエスペクトルから算出した。Table 5 に繰り返し載荷時に得られた振幅 2 乗平均値を示す。Table 5 に示した値は、ひずみの相対的大ききで振幅 2 乗平均値をまとめたものであり、各行における供試体間のひずみレベルは異なる。弾性域から除荷した場合、再載荷時のひずみが先行最大履歴ひずみを越えると、振幅 2 乗平均値が飛躍的に大きくなる。これは、再載荷によるひずみが先行最大履歴ひずみに達するまでは、先行載荷時の破壊軌道に沿って破壊が進行し、先行最大履歴ひずみに達する付近から新しい破壊状態へと移行してゆくことによるものと考えられる。一方、軟化域から除荷した場合には、再載荷時のひずみが先行最大履歴ひずみに達する前後での振幅 2 乗平均値の急激な変化はみられない。振幅 2 乗平均値は、ひずみが大きくなるにつれて小さくなる傾向を示している。振幅 2 乗平均値が小さくなるということは、高周波成分が少なくなることを意味する。したがって、この現象は先行載荷時に生じた破壊が極限状態の破壊を決定づけるまでに進行しており、この破壊面（亀裂）により高周波成分が減衰して伝達されることを示している。2 個の AE センサーにおいて、同時刻に受信した AE 波の振幅 2 乗平均値が極端に大きな差を生じているのは、この推察の妥当性を明示するとともに、先行載荷による破壊の進行状態をより明確に把握するためには、複数個の AE センサーを供試体に取り付けて試験を行うべきであることを示唆している。

以上のことから、再載荷時に発生する AE 波のフーリエスペクトルの形状と振幅 2 乗平均値の変化の様子を追跡することにより、実際の岩石において、コア抜き等による除荷が先行応力-ひずみ曲線上のいずれの領域から行われたかを概略推定することができる。この方法と、AE の発生頻度についての (1) の d) で提案した方法とを併用すれば、一次地圧をより正確に推定することが

できる。

4. 結 論

本論文では AE 法を用いて地山内の一次地圧を推定する際、軟化域までの先行応力-ひずみ履歴を考慮することが必要であると考え、AE の主要パラメーターである発生頻度、振幅 2 乗平均値、周波数特性を用いて、応力-ひずみ履歴の評価を試みた。実際の岩石においては、先行応力-ひずみ関係が不明であるため、モデル軟硬岩を製作し、これを用いた繰り返し載荷試験を行い、現実の再現化を図った。

本研究で明らかになった事柄をまとめて列挙する。

(1) 弾性域内で除荷が行われた場合には、カイザー効果が成立している。すなわち、AE の発生頻度から先行最大応力を精度よく推定することができる。これに反して、軟化域から除荷が行われた場合には、カイザー効果は成立しない。

(2) 軟化域から除荷が行われた場合には、AE の発生頻度が急増する区間においてその傾きが変化する点（変曲点）は、先行最大応力よりも先行最大履歴ひずみに対応する。すなわち、再負荷の際、先行最大履歴ひずみを越えるまでは AE の発生は非常に少ない。

(3) 軟化域から除荷が行われた場合には、(2) の性質を利用して先行最大履歴ひずみを算定し、軟化域の応力-ひずみ曲線もしくはこの延長線上において、算定したひずみ量に対応する応力を求めることによって、除荷時の先行応力を精度よく推定することができる。

(4) AE の発生頻度がピークを示す点と、応力-ひずみ曲線の関係から、除荷が先行応力-ひずみ曲線上のいずれの領域から行われたかを判定することができる。すなわち、強度破壊点以前にピークが位置すれば、除荷は先行応力-ひずみ曲線上の弾性域から行われたものと、

強度破壊点付近から以後にかけてピークが位置すれば、除荷は先行応力-ひずみ曲線上の軟化域から行われたものと判断される。

(5) AE 波の周波数分析を行う場合には、低周波数域にみられる卓越周波数は供試体の寸法効果によるものと考えられるので、あらかじめ弾性波速度を調べその影響を排除して検討を行う必要がある。

(6) AE センサー入力直前の AE 波の周波数分析結果よりすれば、AE センサーの共振周波数付近にみられる卓越周波数は強度が大きいほど大きくなる傾向がある。

(7) 弾性域から除荷が行われた場合には、再載荷時のひずみが先行最大履歴ひずみを越えると AE 波の振幅 2 乗平均値は、飛躍的に大きくなる。

(8) 軟化域から除荷が行われた場合には、再載荷時に発生する AE 波の振幅 2 乗平均値は小さくなる傾向を示すとともに、フーリエスペクトルのピーク値も小さくなり、その形状は裾野が広がる傾向を示し、高周波成分の減衰が著しくなる。この性質を利用して、除荷が先行応力-ひずみ曲線上のいずれの領域から行われたかを概略推定することが可能である。

まえがきで述べたように、実際の岩石は三次元の応力状態下にある。コア抜き等により取り出した岩石供試体について、このような試験を行う場合には、拘束条件(岩石のおかれていた周囲の力学系の剛性)が変化していることになる。今後は三軸圧縮試験機を用いた繰り返し載荷試験を行い、種々の拘束条件下での検討を加えてゆく必要がある。また、本研究では主応力の方向が試験時の載荷方向と一致する場合のみを対象としたこと、地山全体が一様な応力-ひずみ履歴を受けているとは限らず場所により破壊の進行度が異なることも十分に予想されることから、実地山内の主応力の大きさとその方向および破壊の進行度を評価するためには、サンプリングの位置の選定とその数はもとより、同一のサンプリング位置で

あっても抽出方向の組合せについても十分に配慮して抽出した多数の岩石供試体について、このような試験を行わなければならない。

本研究を遂行するにあたり、東京大学資源開発工学科西松裕一教授、大久保誠介助教授に数々の有益なご助言を頂いた。また、実験の遂行とデータ処理においては、東京大学土木工学科 大嶋孝二助手、同科卒業生 田口治宏氏をはじめ熊谷組技術研究所第一技術部の皆様のご協力を頂いた。末筆ながらここに深甚なる謝意を表す。なお、本研究は文部省科学研究費補助金試験研究(2)、(課題番号 58850105)を受けた。付記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 金川 忠・林 正夫・仲佐博裕：岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み，土木学会論文報告集，No. 258，pp. 63~75, 1977-2.
- 2) 佐々木和郎・高田 明：深部採掘に関する諸問題—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, 1968-9.
- 3) Koerner, R. M., McCabe, W. M. and Lord, A. E. Jr.: Overview of Acoustic Emission Monitoring of Rock Structures, Rock Mechanics, 14, pp. 27~35, 1981.
- 4) Koerner, R. M., Lord, A. E. Jr. and McCabe, W. M.: Acoustic Emission Monitoring of Soil Stability, Jr. of ASCE, GE, pp. 571~582, 1978-3.
- 5) 小林良二・杉本文男：圧縮破壊過程における岩石の力学的挙動について，日本鉱業会誌，Vol. 91，No. 10, 1975.
- 6) 西松裕一・大久保誠介・山口 勉・小泉昇三：岩石の圧縮破壊過程におよぼすひずみ速度の影響，日本鉱業会誌，Vol. 97，No. 11, 1981.
- 7) 松木浩二・西松裕一・小泉昇三：岩石の圧縮荷重下における破壊き裂の発生・成長と Acoustic Emission, 材料, Vol. 27, No. 293, pp. 142~147, 1978-2.
- 8) 丹羽義次・小林昭一・大津政康・奥田和男：アコースティック・エミッションの周波数特性に関する考察，土木学会論文報告集，No. 314，pp. 137~147, 1981-10.

(1984. 6. 9・受付)