

JNC TJ7440 98-003

MIU-1孔のコアを用いた地圧計測

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1998年9月

株式会社 大林組

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺959-31

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター

技術開発課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to : Exploration and Mining Technology Development Section. Tono Geoscience Center. Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 959-31, Jorinji, Izumi-machi, Toki-shi, Gifu-ken 509-5102, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

MIU-1孔のコアを用いた地圧計測

畑 浩二* 大内 一*

【要 旨】

大深度に地下構造物を構築する場合、初期地圧を事前に把握しておくことは重要である。対象地山の初期地圧状態を把握しておくことにより、合理的な設計・施工を実施することが可能になる。我が国では、初期地圧測定にオーバーコアリング法や水圧破碎法が主に利用されてきた。しかし、これら原位置で実施される方法は手軽に実施できるという状況ではなく、かつ非常に高価なものであった。一方、室内で実施可能な方法にアコースティック・エミッション法（以下、AEと略す）と変形率変化法（以下、DRAと略す）がある。これらの方法は、原位置試験法に比べて非常に簡単で、安価に実施できる特徴を有している。AE法ではカイザー効果現象を利用する。カイザー効果とは、履歴荷重を受けた材料に載荷する際、先行荷重値を越えるまでAEはほとんど発生しない現象である。一方、DRA法では岩石の応力-ひずみ関係の非線形性を利用する。

本研究では、土岐花崗岩の初期地圧を地表から深度1000mまで概略的に把握することを目的に、MIU-1孔から採取された花崗岩ボーリングコアを利用して鉛直方向の初期地圧分布状況をAE法とDRA法を併用して測定した。得られた結果の概要を以下に示す。

- (1)土岐花崗岩では、しきい値を230mV、210mV、感度を90dBに設定することによりカイザー効果を確認した。
- (2)AE法では、全ての供試体において鉛直方向の初期地圧成分を算定できた。
- (3)DRA法では、載荷2回目以降のデータを利用して鉛直方向の初期地圧成分を算定できた。
- (4)鉛直方向の初期地圧成分 σ_v と土被りHとの間には、 $\sigma_v=0.027 \times H$ なる関係のあることが判明した。

本報告書は、株式会社大林組が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した研究成果である。

契約番号：08C1585-2

事業団担当部課室および担当者：東濃地科学センター 地質環境研究室 室長 坪田浩二

*：株式会社大林組 技術研究所 土木第四研究室

Measurement of the initial stress in rock cored from MIU-1 borehole

K.Hata* H.Ouchi*

【Abstract】

When constructing underground rock cavern at great depth, it is quite important to estimate the initial stresses. If the initial stresses of the site are known, the most suitable support member and quantity can be determined. Further, the shape, location and selection of the layout can readily be determined. For the determination of the initial stress condition, overcoring method and hydraulic fracturing method have been currently in use. However, these methods are very expensive and laborious for implementation. Therefore, since acoustic emission (hereafter abbreviated "AE") method and deformation rate analysis (hereafter abbreviated "DRA") method can be examined in the laboratory, these are very simple and inexpensive. AE method use the Kaiser effect. The Kaiser effect is a phenomenon that AE activity begins to increase continuously when the compressive stress level exceeds the previous maximum stress. On the other hand, DRA method use a non-linear characteristic of stress-strain curve under compressive load.

It was estimated that the vertical initial stress in rock cored from MIU-1 borehole by AE method and DRA method. The purpose of this investigation is to estimate the initial stress condition about depth 1000m area in Toki. The result can be summarized as follows,

- (1) In Toki granite, the Kaiser effect made clear under the condition that threshold levels were 230mV and 210mV and total-gain was 90dB,
- (2) By AE method, the vertical initial stress could be estimated from all of granite specimens,
- (3) By DRA method, the vertical initial stress could be estimated from strain data after second loadings, and
- (4) It was made clear that the relationship between the vertical initial stress (σ_v) and overburden (H) is $\sigma_v = 0.022 \times H$.

This work performed by Obayashi Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Agreement No. : 08C1585-2

JNC Liaison : Tono Geoscience Center, Geological Environment Research Section, General Manager, K.Tsubota

* : Obayashi Corporation, Technical Research Institute

1138

MIU-1孔のコアを用いた地圧計測

担当者一覧表

実施責任者： 井上 貞文

実施担当者： 畑 浩二

研究業務担当者： 大内 一

河村 秀紀

畑 浩二

田中 達也

MIU-1孔のコアを用いた地圧計測

目 次

	頁
1.はじめに	1
2.測定原理	2
2.1 AE法	2
2.2 DRA法	3
3.測定装置	4
4.試料採取位置	7
5.測定方法および測定条件	8
6.測定結果とその評価	12
7.おわりに	21
8.参考文献	23

巻末資料

- 1.予備試験結果
- 2.初期地圧測定結果
 - 2.1 AE法
 - 2.2 DRA法

1.はじめに

近年、地中構造物の大型化・大深度化に伴い、より合理的な設計・施工が望まれてきている。このような状況の中で、各種の地盤物性を施工前に把握することは極めて重要なことである。しかし、設計外力となる初期地圧に関しては特殊な場合を除いて測定されないのが現状である。多くの場合、土被り、岩石の単位体積重量とポアソン比から初期地圧(土被り圧)を推定しているが、実際に初期地圧を測定してみると、土被り厚や地形などから推察される大きさや方向と異なる場合が少なくない。そこで、実際の地盤条件にあった合理的な設計・施工を実施するためには、対象となる場所の初期地圧を測定し、正しく評価することが望まれている。

初期地圧の測定方法は、原位置試験法と室内試験法の2つに大別される。原位置試験法の代表的なものには、応力解放法と水圧破碎法がある。一方、室内試験の代表的なものにはアコースティック・エミッション法(Acoustic Emission、以下AE法と略す)や変形率変化法(Deformation Rate Analysis、以下DRA法と略す)がある。AE法やDRA法は原位置試験法に比較して、試料が採取できれば手軽に実施できる利点を有している。

本業務では、土岐花崗岩の初期地圧を地表から深度1000mまで概略的に把握することを目的に、MIU-1孔から採取されるボーリングコアを利用してAE法とDRA法を併用して鉛直方向の初期地圧分布状況を測定する。

2.測定原理

2.1 AE法

岩石やコンクリートをはじめとする固体材料は、外力を受けることによって変形が生じる。場合によっては巨視的な破壊へと至ることになる。変形が生じ始める段階から巨視的な破壊に至る過程の中で、材料内部ではマイクロクラックが発生したり、逐次進展したりする。つまり、外力によって材料に蓄えられたエネルギーの一部が、マイクロクラックなどの微小破壊の発生に伴い、波動の形態として材料外部へと放出されることになる。その結果、可聴域の音であったり、熱として感知されることになる。AEとは、材料内部に蓄えられたエネルギーの一部が音響パルスとなり伝播する現象である。金属材料を利用した一軸圧縮試験で、Kaiser¹⁾は履歴荷重を受けた材料に載荷する際、先行荷重値を越えるまではほとんどAEが発生しないことを明らかにした。これがカイザー効果と称される現象であり、「履歴荷重を受けた材料に載荷する場合、先行荷重値を越えるまではほとんどAEは発生しない」と定義されている。地山の初期地圧は、主に岩盤の自重によって生じるが、これに地形、地質構造、地殻変動、地熱などの影響が加わった履歴応力であると考えられる。そのため、上述したAEのカイザー効果を利用して、履歴応力である初期地圧を推定することが可能と考えられている。カイザー効果の概念を図-1に示す。

AEによる初期地圧測定の研究は金川ら²⁾によって行われ始めた。その後、畑ら³⁾⁴⁾などによってカイザー効果に関する基礎的な研究が行われ、AE法を利用した初期地圧測定の実用化が進められている。

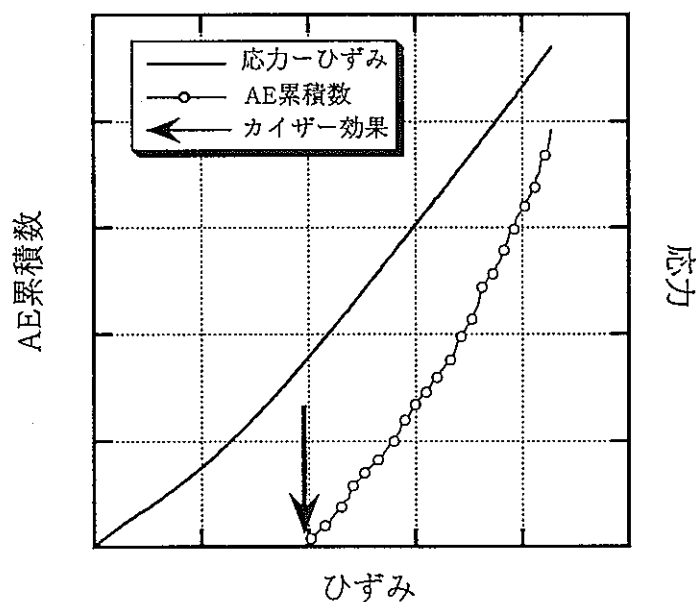


図-1 カイザー効果の概念

2.2 DRA法

DRA法は山本ら⁵⁾によって提案された初期地圧測定法である。この方法は、岩石の一軸圧縮試験時の力学的挙動によって先行応力を測定しようとする方法である。その原理は、岩石の応力-ひずみ関係の非線形性、すなわち先行応力を境にして岩石の変形率が変わることに着目したものである。基本的には以下の二つの考え方に基づいている。

- ①すでに生成されたクラックは低い応力から安定にすべり、応力に対して線形である。
- ②先行応力を越えた応力では、新たなすべり破壊が生ずるため非線形性を呈する。

具体的には、1回目の载荷によるひずみを $\varepsilon_1(\sigma)$ 、2回目を $\varepsilon_2(\sigma)$ とすると、(1)式で示される差ひずみ $\Delta\varepsilon(\sigma)$ は新たなクラックの生成開始応力で線形性を失うことになる。線形性を失った時の応力値を初期地圧とみなしている。DRA法の原理の概念を図-2に示す。

$$\Delta\varepsilon(\sigma) = \varepsilon_2(\sigma) - \varepsilon_1(\sigma) \quad (1)$$

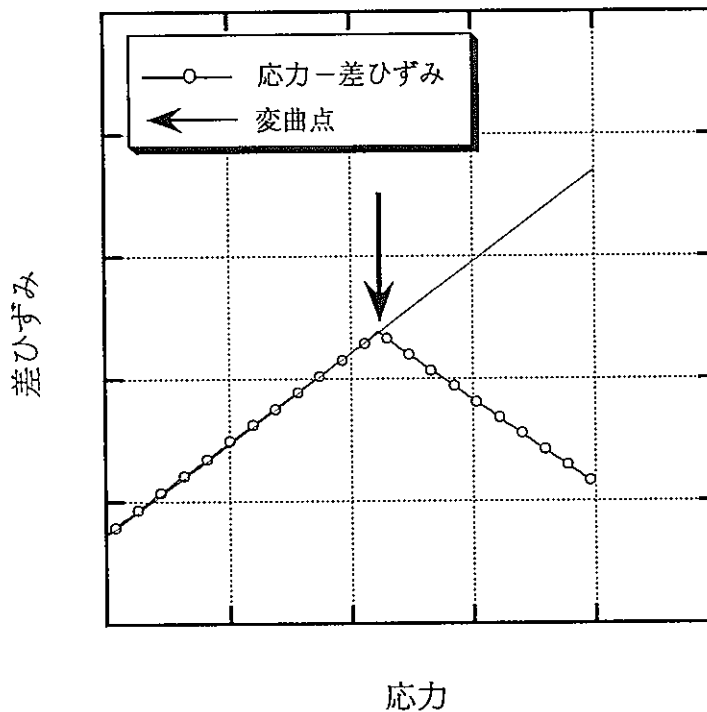


図-2 応力と差ひずみの関係の概念

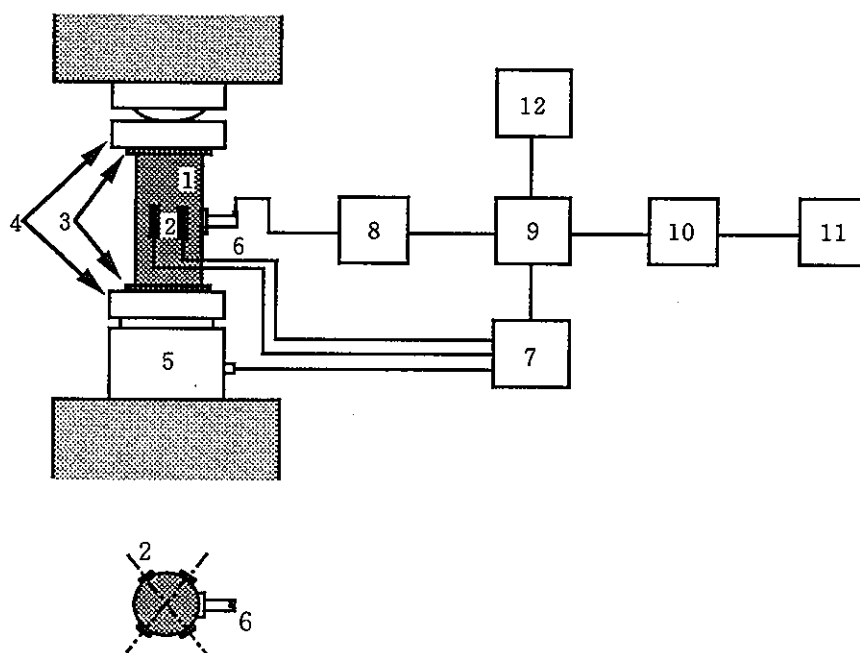
3.測定装置

使用した試験装置はAE法とDRA法が併用できるシステムとなっている。図－3に計測システムのブロックダイアグラムを示す。

AE法による計測では、トランスデューサで受信した超音波をプリアンプで増幅し、ディスクリミネータで弁別した後、発生個数をカウンタで計数する。トランスデューサは共振周波数140 kHzのPZT(ジルコン酸チタン酸鉛磁器振動子)であり、円柱供試体中央部に鋼製アタッチメントを介して接着する。トランスデューサの周波数応答特性を勘案し、100kHz～200kHzのバンドパスフィルタを構成した。AE信号の計数には、1つのAE信号波形を包絡線検波し計数するイベント計数法を用いた。従来、1つのしきい値でイベントの判定を行っていたが、このシステムでは反射波などの影響を少なくするため1組のしきい値 (V_H 、 V_L) を用いた。図－4に1組のしきい値とイベント計数との関係を示す。また、AE計測では微小な弾性波動を取り扱う関係上、環境雑音の除去が極めて重要になる。環境雑音の内、電気雑音は適切なアースを施すことによって除去している。機械雑音、特に載荷板と供試体の接触部から発生する雑音は、独立気泡を有したスポンジパッドを載荷板と供試体端面の間に挿入することにより除去している。

一方、DRA法による計測では載荷時におけるひずみの線形性と非線形性に着目することから、一軸圧縮試験で常用されるひずみゲージを供試体側面の直交する4箇所に貼付し用いた。載荷重は5tロードセルを用いて計測した。

以上示したAE発生数、ひずみおよび載荷重値の計測諸量はパーソナルコンピュータで記録した。圧縮試験機は応力制御が可能な高剛性タイプで、最大150tの容量を有する。表－1に使用した計測装置の仕様を示す。



- | | |
|-------------|----------------|
| 1. 岩石供試体 | 7. ひずみ測定器 |
| 2. ひずみゲージ | 8. プリアンプ |
| 3. スポンジパッド | 9. ディスクリミネータ |
| 4. 載荷板 | 10. カウンタ |
| 5. ロードセル | 11. マイクロコンピュータ |
| 6. トランスジューサ | 12. オシロスコープ |

図-3 AE法とDRA法の併用計測システム

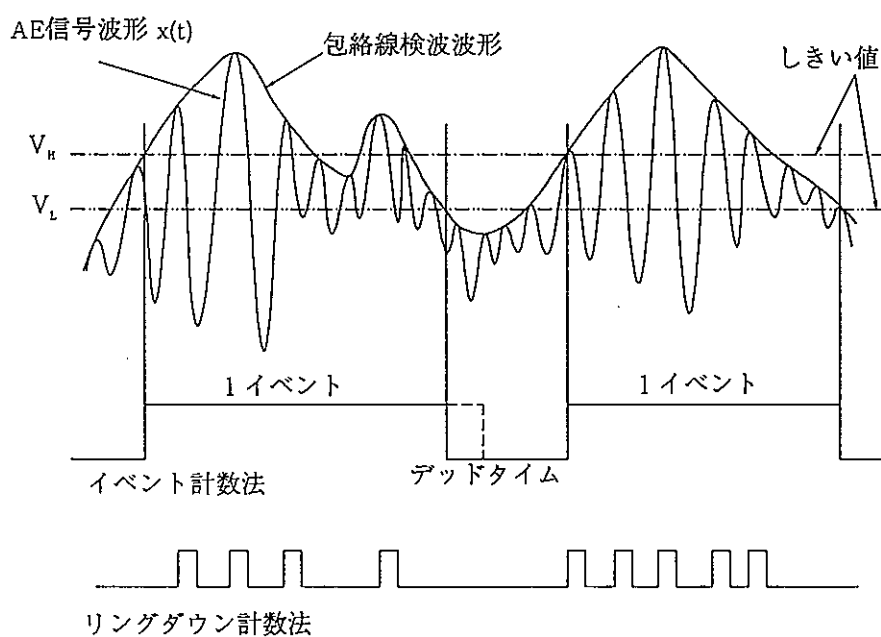


図-4 AE法によるしきい値とイベントの関係

表-1 使用した装置の仕様

装置名称		メーカー	形式	仕様
多目的材料試験機	ロードフレーム	MTS	Model 315.01S	最大圧縮容量：150 t 最大引張容量：100 t 剛性： $7 \times 10^9 \text{ N/m}$
	制御装置		Model 458.91	サーボ機構によるクローズドループ制御方式
	油圧供給装置		506.02E	最大油量：24.2 l/min 動力：11.2kW
AE計測器	トランスデューサ	NF回路設計ブロック	AE-901S	140kHz共振型 高さ40mm、直径12mm
	プリアンプ		AE-912	40dB固定、差動式
	ディスクリミネータ		AE-922	メインアンプ、フィルタ (バイパス、ローパス) 内蔵
	カウンタ		AE-932	2ch出力、AE発生数計測 時間 0.1、1、10、 100sec
ひずみ測定器		東京測器研究所	TDS-301	0.08sec/点サンプリング 測定範囲： $\pm 40,000 \times 10^{-6}$
オシロスコープ		岩崎通信	DS-6121A	デジタルストレージ式 分解能8ビット、25レベル/div、クロックレート40MHz
マイクロコンピュータ		NEC	PC-9801RX	16ビット
ロードセル		東京測器研究所	LU-5TE	容量5 t
ひずみゲージ		東京測器研究所	PFL-10-11	ポリエステル樹脂をベースにした箔ゲージ ゲージ長さ：10mm ゲージ幅：0.9mm

4. 試料採取位置

岩石試料採取地点（MIU-1孔）は岐阜県瑞浪市の正馬様洞用地内に位置する。表層から約90 mは凝灰質砂岩やシルト岩などの堆積岩に覆われているが、それ以深は基盤岩である花崗岩が続いている。本研究で使用する試料は、MIU-1削孔時に回収された鉛直方向のボーリングコア（直径約6.3cm）である。MIU-1孔の位置関係を図-5に示す。

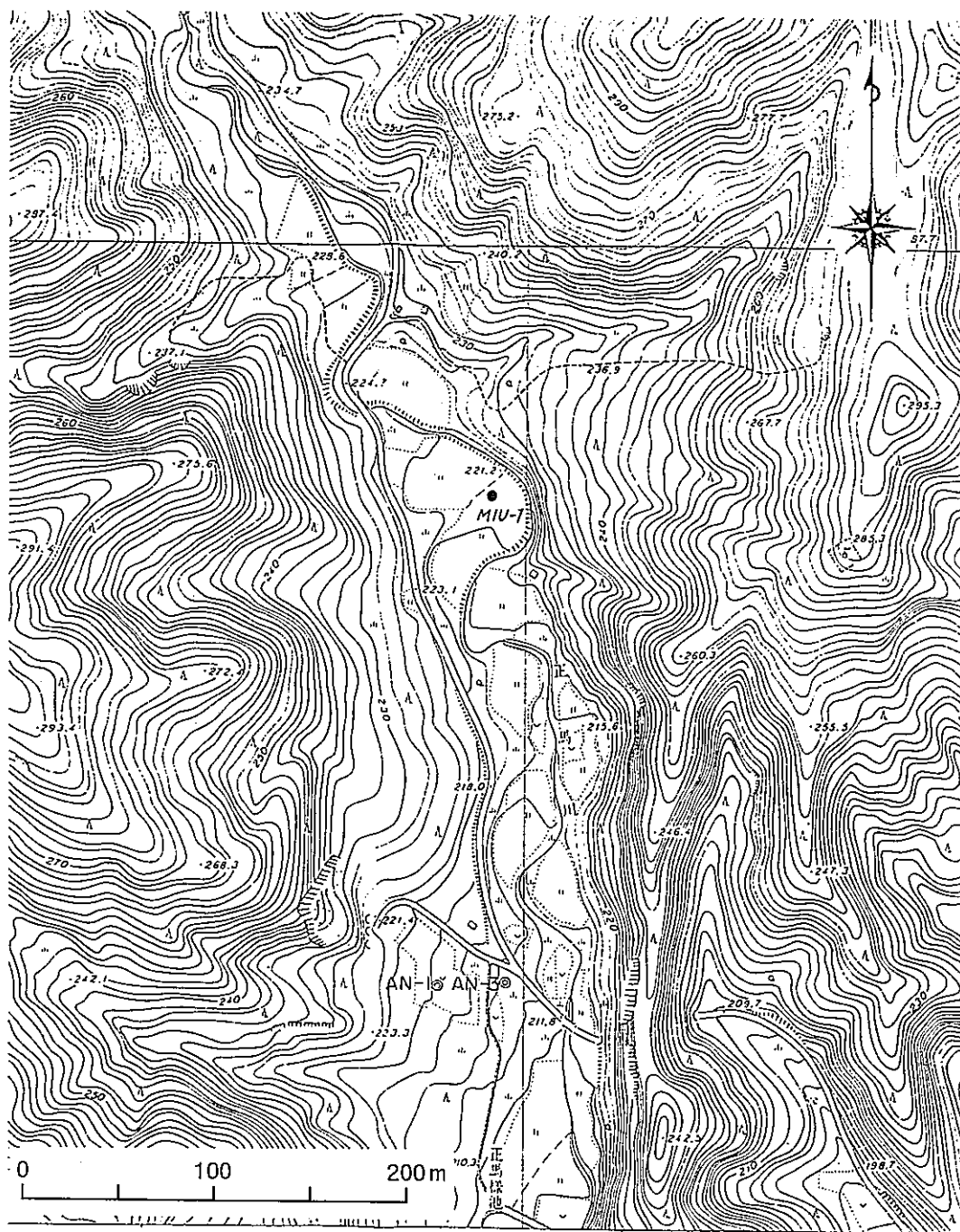


図-5 試料採取位置（MIU-1孔）

5.測定方法および測定条件

初期地圧測定に用いた供試体は、MIU-1孔採取ボーリングコア（直径約6.3cm）から直径30mm、細長比1：2の円柱状に整形した岩石である。整形方法は、まず採取ボーリングコアを長さ30cm程度に小割にし、ダイヤモンドビットでコア中心から棒状コア（直径約30mm）を採取した。次いで、ダイヤモンドカッタにより長さが約60mmとなるよう切削した。最後に供試体の高さが最大値と最小値の差で0.1mm以内になるようカーボランダムを用いて研磨した。所定の深度においてこの方法で供試体を整形し、AE法およびDRA法による初期地圧測定に供した。載荷方向は採取コア軸方向である。

整形した供試体側面にひずみゲージを4箇所それぞれが対角の位置になるように、さらにトランスデューサを1個取り付け、荷重制御により5回の繰返し載荷を行い、荷重、ひずみおよび発生するAEを測定した。繰返し荷重値は、採取コアの土被り圧を勘案し1.5～2倍程度とした。また、載荷速度はJIS M 0302に可能な限り準拠することと、今回の測定では載荷を止めることなく荷重、ひずみおよび発生するAEを計測したためデータスキャン中の誤差をできるだけ小さくすることから、約5MPa/min.とした。図-6に繰返し載荷パターンを示す。

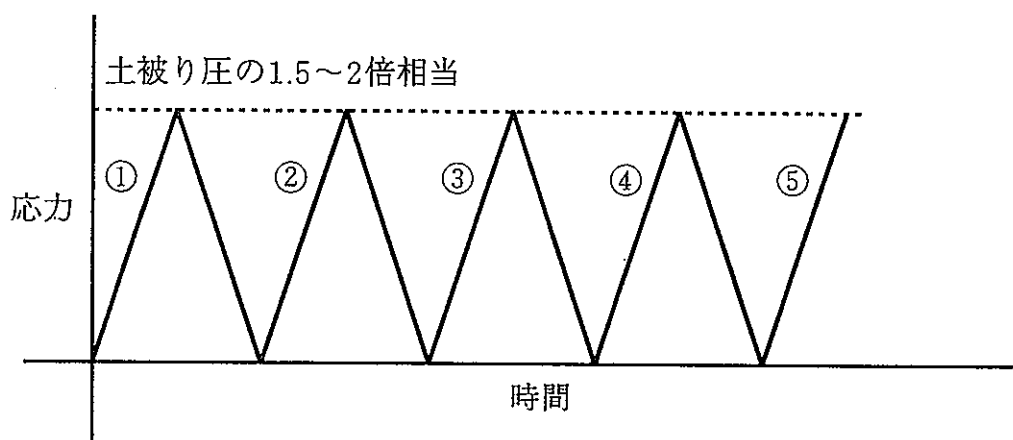


図-6 繰返し載荷パターン

ところで、AE法では連続的なAEの発生し始めるポイントをカイザー効果と評価しているため、対象岩石に適したしきい値と感度の条件を決定しておくことが必要になる。平成9年度に実施した「TM-2孔のコアを用いたAE法による初期地圧測定」⁶⁾において、すでにMIU-1孔（深度99.7 m）から回収した花崗岩のしきい値と感度の組み合わせ条件を表-2のように決定している。ただし、深度196 mで採取した花崗岩は結晶の大きさなどが同程度ではなかったことから、表-2条件の妥当性確認のため深度197 mでの採取コアを用いてしきい値と感度条件を決定するための予備試験を行った。この予備試験は図-7のフローに準拠した。先行応力は採取深度を勘案して約5MPa、7.5MPaおよび10MPaとした。なお、繰返し載荷時における処女載荷（第1回目載荷時）において表-2条件下でAEを感知しなかったことから、AEをより感知しやすくするため表-2条件のしきい値を下げ、かつ1/2程度の230mVと210mVに固定し、感度条件を3種類変えて試験を行った。

測定結果の一例を図-8に示す。この図は、7.05MPaの先行応力を作用させた試料について、しきい値が230mV、210mV、感度を90dBとした場合の試験結果であり、応力-ひずみ-AE累積数の関係を示したものである。図中、矢印で先行応力を、点線で連続的なAEの発生した応力をそれぞれ表している。この試験条件の場合、連続的なAEは7.75MPaから発生し始め、繰返し載荷で作用させた先行応力とほぼ一致した。測定結果を表-3に示す。測定条件の中（表中ハンチングをかけた）で、連続的なAEが発生し始めた応力と、繰返し載荷で作用させた先行応力とがほぼ一致したのは、しきい値を230mV、210mV、感度を90dBとした場合であった。なお、各試験条件における応力-ひずみ-AE累積数の関係は巻末資料に示した。

以上のことから、予備試験を行った花崗岩の場合、先行応力と連続的なAEが発生する応力値がほぼ一致する試験条件は、しきい値を230mV、210mV、感度を90dBに設定する場合と考えられる。そこで、採取コアの結晶粒の大きさや固結度合いを観察し、著しく異なる限り表-4に示すしきい値と感度の組み合わせ条件を用いて初期地圧測定を実施することとした。また、カイザー効果には時間依存性⁴⁾⁵⁾が認められていることから、岩石採取後は5日以内に試験を完了するものとした。

表-2 深度99.7 mから採取した花崗岩コアを用いた場合のAE試験条件⁶⁾

項目		設定条件
しきい値	V _H	450mV
	V _L	430mV
感度		80dB

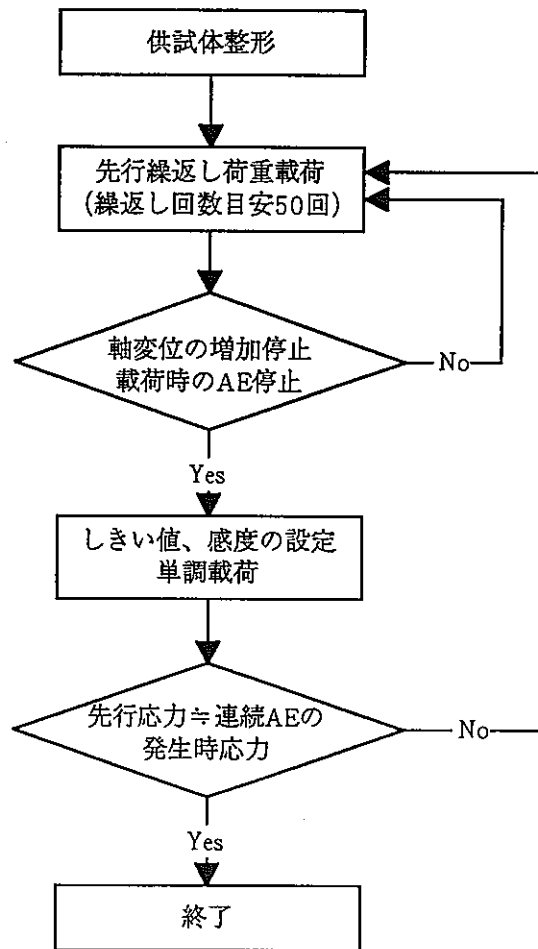


図-7 予備試験フロー

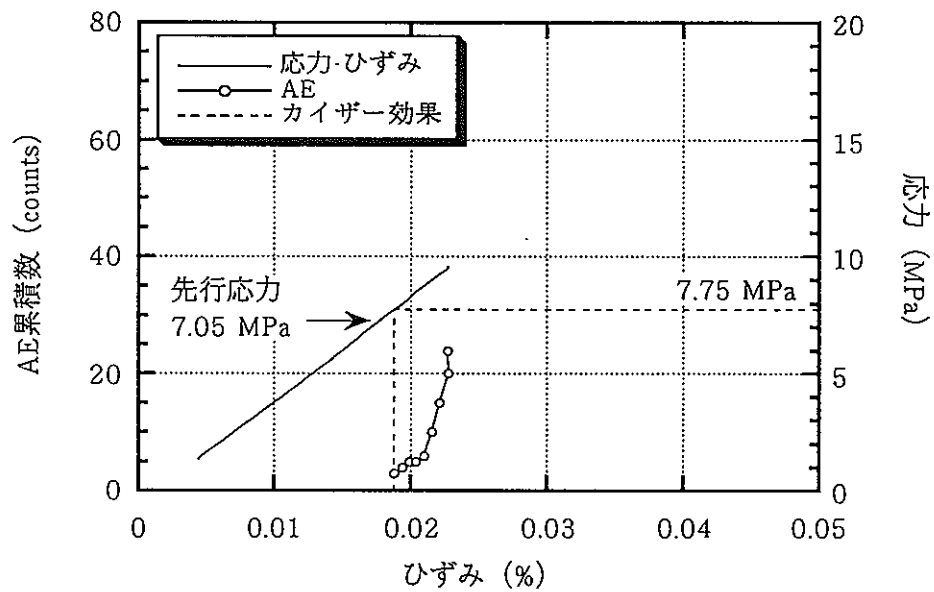


図-8 予備試験結果の一例

(先行応力7.05MPa、しきい値230mV、210mV、感度90dBの場合)

表－3 測定結果一覧

供試体 No.	採取 深度 (m)	寸法 直径×長さ (cm)	単位体 積重量 (kN/m³)	カイザー効 果から推定 される応力 (MPa)	先行繰返 し応力 (MPa)	試験条件		
						感度 (dB)	しきい値(mV)	
							V _H	V _L
MIU197-3	197.67	2.97×6.31	25.69	－*	4.87	80	230	210
				7.75	7.05	90	230	210
				9.62	9.56	100	230	210
MIU197-4	197.47	2.97×6.33	25.60	5.27	4.48	90	230	210
				2.57	7.28	100	230	210
				11.96	10.09	80	230	210

* AEは発生せず

表－4 MIU-1孔の花崗岩におけるAE試験条件

項目		設定条件
しきい値	V _H	230mV
	V _L	210mV
感度		90dB

6.測定結果とその評価

AE法による初期地圧測定結果の一例を図-9に示す。図は、深度504.34mの供試体(MIU504-3)を用いた結果であり、単調載荷時の応力-ひずみ-AE累積数の関係を示したものである。図中の点線で示すように、ある応力を境にして連続的なAEが発生することから明瞭にカイザー効果が確認できた。AE法によれば、この供試体の鉛直方向初期地圧は13.89MPaと評価される。

一方、DRA法による初期地圧測定結果の一例を図-10に示す。図は、AE法と同様深度504.34mの供試体を用いた結果であり、応力-差ひずみの関係を示したものである。図中、測定データには若干のバラツキがあるため重み付き最小二乗法⁷⁾を用いて回帰し、図-2のように非線形性が明瞭になった(ピークが表れた)場合のみ点線で初期地圧を示した。本方法では、「載荷何回目と何回目との応力-差ひずみから初期地圧を評価する」という決め事が無いことから、5回の繰返し載荷の全組み合わせ10通りについて算定した。なお、ひずみが微小であることから4枚のひずみゲージ出力の合算を載荷時のひずみ成分 $\epsilon(\sigma)$ とした。その結果、この供試体では、9.13MPa (5-4)、10.94MPa (5-3)、9.81MPa (5-2)、11.25MPa (4-3)、9.74MPa (4-2)、8.83MPa (3-2)の6つの応力-差ひずみの組み合わせから初期地圧を評価することができた。ここで、例えば(5-1)は5回目と1回目の載荷時の差ひずみを求めたことを示す。

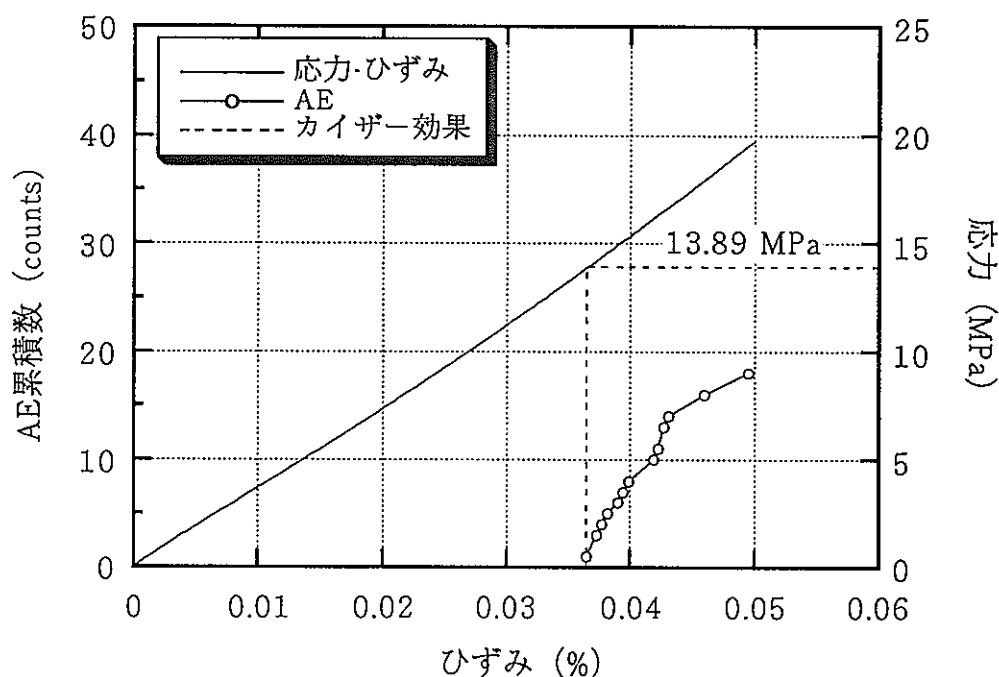


図-9 AE法による初期地圧測定結果の一例

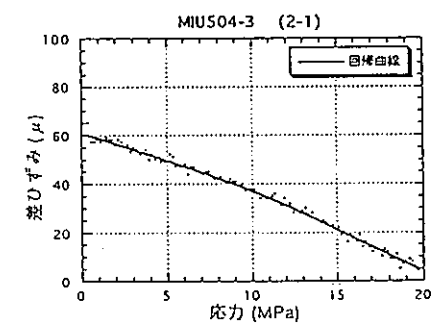
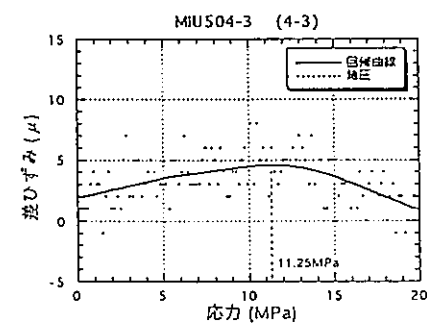
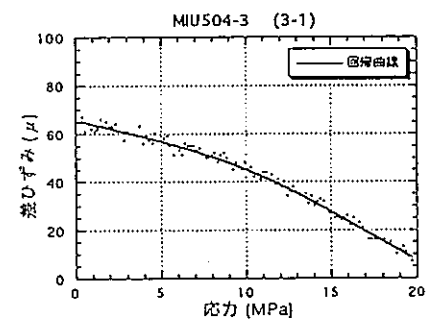
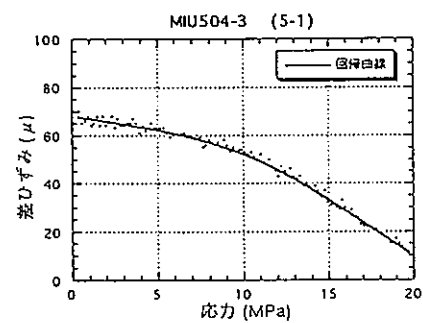
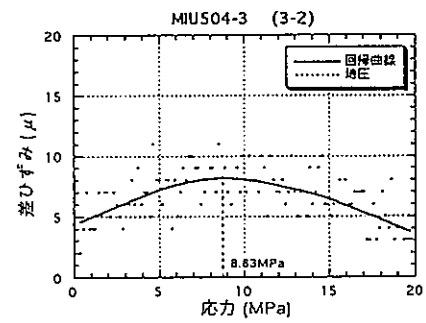
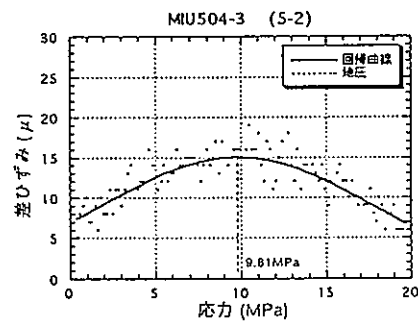
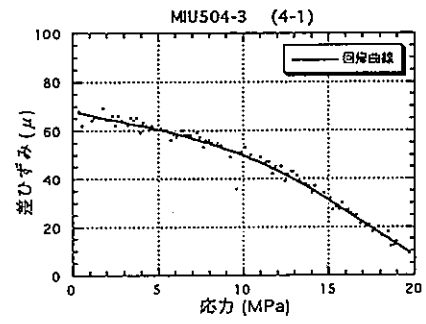
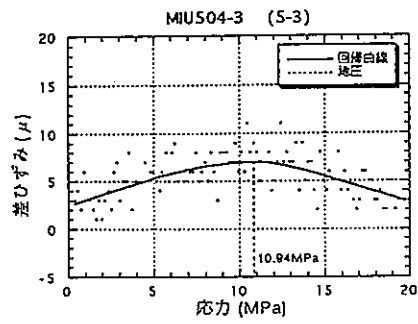
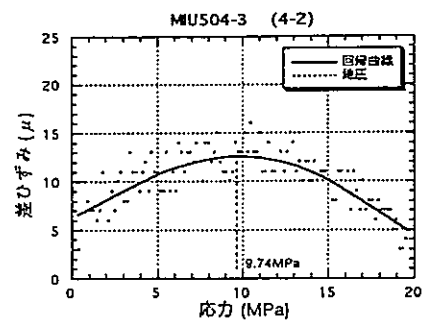
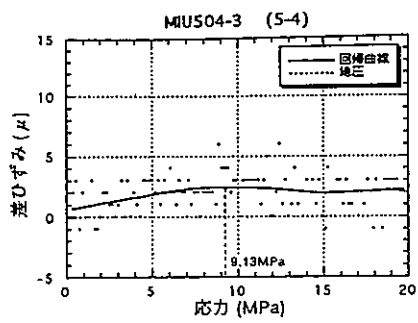


図-10 DRA法による初期地圧測定結果の一例

AE法による初期地圧測定結果の一覧を表-5に示す。試験は深度196mから始まり、深度990mまでの10深度について実施した。供試体番号が連番で無いのは、整形後微小き裂が見つかったり、端面部分に欠けがあった供試体は、試験には供しなかったためである。本方法による測定では、いずれの場合にも明瞭なカイザー効果が確認され、初期地圧を評価することができた。さらに、各深度において、測定値のバラツキは小さい結果となった。

一方、DRA法による初期地圧測定結果の一覧を表-6に示す。供試体番号ならびに試験深度はAE法と同じである。DRA法では繰返し載荷時の応力-ひずみデータから応力-差ひずみ曲線を求め、その変曲点から初期地圧を評価することになる。ただし、繰返し何回目の載荷データを利用すべきかについての指標は示されていない。そのため、何回目の繰返し載荷データを利用するかについては、その時の状況に応じて使い分けているのが現状である。例えば、伊藤ら⁸⁾も状況に応じて種々な差ひずみの組み合わせを試行し、総合的に初期地圧を評価しているようである。そこで、本研究では5回の繰返し載荷の全組み合わせ10通りについて初期地圧を算定した。測定データには若干のバラツキがあったため最小二乗法を用いて回帰し、応力-差ひずみの形状パターンを評価した結果、表-7に示す5通りの形状を表すことがわかった。これらの内、図-2に示すように非線形性が明瞭になった場合のみ初期地圧を求めることが可能となり、その場合の応力-差ひずみの形状は上に凸型となる。つまり、応力-差ひずみの形状が上に凸型とはならない場合には初期地圧を評価することが不可能と判断した。表-6中、初期地圧を評価できなかった場合には、応力-差ひずみ形状のパターン（一、△、×、□印）を記載した。得られた結果について、いずれの場合にも組み合わせによっては初期地圧を評価できないものもあった。特に、載荷1回目のデータを利用する組み合わせ（5-1、4-1、3-1、2-1）は例外を除いて、ほとんどの場合初期地圧を評価できなかった。岩石試料には微小クラックが内在しているため、繰返し載荷を通して漸次微小クラックは閉塞することになる。このような状況の中で、特に第1回目載荷では2回目以降の載荷に比べて微小クラックの閉塞は大きくなる傾向にあり、応力-差ひずみ曲線に変曲点を呈しない原因の一つになっているのではないかと推察される。一方、載荷1回目の載荷データを利用しない組み合わせによって応力-差ひずみを取得すること場合が考えられるが、今回実施した組み合わせにおいて評価される初期地圧が大きく異なることが少なくなかった。そのため、現段階では、定量的に「載荷何回目と何回目との応力-差ひずみから初期地圧を評価できる」という指針的な提案をするには至らなかった。また、深度990mの結果は一部データ（990.12m）を除いて、ほとんどの組み合わせで初期地圧を評価できる応力-差ひずみ曲線が得られなかった。目視観察による岩質や変形特性（弾性係数）は、他の深度の岩石と比較して特に大きな差異は

認められなかったことから、原因を特定するには至らなかった。

以上、得られた測定結果を深度毎に比較したものが表－8である。それぞれの深度における測定値は統計処理⁹⁾し、危険率5%で平均値と変動係数を示した。また、測定結果を採取深度との関係で整理したものが図－11である。(a)図はAE法から求めた平均初期地圧の深度分布を、(b)図はDRA法から求めた平均初期地圧の深度分布を、(c)図は全測定結果の深度分布を示した。図中、●印でAE法の結果を、◇印でDRA法の結果を示した。また、試験に供した花崗岩の単位体積重量は平均的に25.6 kN/m³であったことから、推定土被り圧を点線で示した。表－8と図－11(c)から、AE法による測定結果はDRA法に比較してバラツキが小さいことがわかる。AE法において、深度590 m、896 mおよび990 mの3深度では、土被り圧の深度分布からはずれる結果になった。この内、深度590 mと896 mでは土被り圧の約1/2に、深度990 mでは土被り圧の約1/5と小さくなった。これら深度以外では土被り圧にほぼ等しくなった。一方、DRA法においては深度674 mまでは土被り圧と10～20%程度の違いであるが、深度799 m以深では土被り圧の約1/2と小さくなった。両方法の測定結果を比較すると、深度196 m～504 m、674 mおよび896 mは調和的であった。土被り圧にほぼ等しくなったデータとかけ離れたデータにおいて、AEの発生状況に特徴的な差異は認められなかった。一方、深度896 mを境にして応力－ひずみ曲線の下に凸な領域（潜在クラックの閉塞）が目立って大きくなっており、対応するようにDRA法の結果が小さくなる特徴が認められた。

AE法ならびにDRA法ともに、測定結果が土被り圧と大きくかけ離れる原因の一つとして、地殻変動に伴う局所的な応力集中や応力緩和の発生が考えられる。MIU-1孔岩芯記載図から、試験に使用した深度周辺の岩質を示したものが表－9である。表中の硬軟、コア形状、風化および変質の記号は凡例¹⁰⁾として示した。AE法で土被り圧より小さく評価された3深度において、試料採取深度前後にき裂が多く存在するとともにき裂面の軟質化が認められたことから、地殻変動による局所的な応力変化があったものと推察された。

測定結果のバラツキが少ないことから、AE法の結果（深度590 m、896 m、990 mを除く）を用いて、深度との相関性を直線回帰したところ、(2)式のような関係（図－11中実線部）を得た。式中 σ_v は鉛直方向の初期地圧成分を、Hは土被りを示す。

$$\sigma_v = 0.027 \times H \quad (2)$$

表-5 AE法による初期地圧測定結果一覧

供試体 No.	採取 深度 (m)	寸法 直径×長さ (cm)	単位体積 重量 (kN/m ³)	初期地圧 測定結果 (MPa)	試料採取後試験ま でに要した日数 (日)
MIU196-2	196.13	2.97×6.24	25.71	4.73	4
MIU196-3	196.24	2.97×6.28	25.78	5.09	4
MIU196-4	196.32	2.97×6.30	25.74	5.45	4
MIU297-1	297.77	2.99×6.26	25.58	6.43	4
MIU297-2	297.88	2.99×6.30	25.54	7.14	4
MIU297-3	297.95	2.99×6.06	25.55	6.26	4
MIU298-3	298.21	2.99×6.38	25.56	6.77	4
MIU409-1	409.64	2.99×6.34	25.74	11.01	3
MIU409-2	409.75	2.98×6.41	25.79	9.84	3
MIU409-3	409.83	2.98×6.39	25.78	10.39	3
MIU409-4	409.95	2.98×6.32	25.60	9.32	3
MIU409-5	409.35	2.99×6.39	25.56	10.33	3
MIU409-6	409.43	2.99×6.48	25.53	9.43	4
MIU409-7	409.56	2.99×6.38	25.76	8.52	4
MIU504-1	504.04	2.99×6.02	25.74	14.39	3
MIU504-2	504.24	2.99×6.02	25.76	12.26	3
MIU504-3	504.34	2.99×6.06	25.77	13.89	3
MIU504-5	504.43	2.99×6.17	25.79	14.37	3
MIU590-1	590.64	2.98×6.49	26.21	10.73	4
MIU590-2	590.73	2.99×6.51	25.97	10.67	4
MIU592-1	592.20	2.99×6.55	25.75	9.07	4
MIU592-3	592.39	2.99×6.45	26.11	9.43	4
MIU674-2	674.70	3.00×5.81	25.92	17.12	2
MIU674-3	674.77	3.00×5.97	25.88	18.00	2
MIU674-4	674.96	3.00×6.18	25.92	16.59	2
MIU799-1	799.62	3.01×6.26	25.53	22.03	4
MIU799-2	799.69	3.01×6.45	25.53	24.18	4
MIU799-4	799.87	3.01×6.38	25.57	22.91	5
MIU896-2	896.52	3.01×6.33	25.58	12.46	3
MIU896-4	896.69	3.01×6.15	25.59	14.51	3
MIU896-5	896.78	3.01×6.35	25.59	13.67	3
MIU932-1	932.63	3.01×6.36	25.63	27.14	2
MIU932-2	932.84	3.01×6.25	25.60	25.74	2
MIU932-3	932.91	3.01×6.35	25.59	25.43	2
MIU932-5	932.76	3.01×5.67	25.64	26.81	4
MIU990-1	990.04	3.01×6.46	25.54	5.65	4
MIU990-2	990.12	3.01×6.23	25.59	5.27	4
MIU990-3	990.22	3.01×6.32	25.60	3.54	4
MIU990-4	990.28	3.01×6.35	25.52	5.13	5
MIU990-5	990.36	3.01×6.28	25.57	4.76	5

表-6 DRA法による初期地圧測定結果一覧

供試体 No.	採取深度 (m)	初期地圧測定結果 (MPa)									
		5-4	5-3	5-2	5-1	4-3	4-2	4-1	3-2	3-1	2-1
MIU196-2	196.13	4.73	4.53	9.40	—	8.55	9.68	—	10.08	—	—
MIU196-3	196.24	10.08	5.38	10.53	—	5.38	10.70	—	10.87	×	×
MIU196-4	196.32	□	□	8.89	×	×	5.83	×	6.28	—	×
MIU297-1	297.77	11.65	7.55	8.21	△	7.18	8.03	△	9.12	△	△
MIU297-2	297.88	7.17	9.96	11.09	—	□	□	×	□	×	×
MIU297-3	297.95	11.89	11.35	9.72	—	10.57	9.36	—	8.82	—	×
MIU298-3	298.21	8.68	8.53	8.23	×	11.77	8.00	×	△	×	×
MIU409-1	409.64	—	—	△	—	△	△	—	6.42	—	—
MIU409-2	409.75	7.17	9.89	9.43	—	10.64	10.94	—	9.89	—	—
MIU409-3	409.83	12.53	15.25	15.02	×	□	□	×	15.32	×	×
MIU409-4	409.95	12.38	10.34	9.58	—	—	△	—	8.68	—	—
MIU409-5	409.35	10.42	8.53	8.68	—	—	△	—	△	×	×
MIU409-6	409.43	□	—	—	×	—	—	×	—	×	×
MIU409-7	409.56	15.47	15.32	×	×	—	×	×	×	×	×
MIU504-1	504.04	—	—	△	—	—	△	—	7.17	—	—
MIU504-2	504.24	△	8.75	10.79	△	9.58	10.57	△	11.47	△	△
MIU504-3	504.34	9.13	10.94	9.81	△	11.25	9.74	△	8.83	△	—
MIU504-5	504.43	11.25	10.87	9.96	△	10.34	9.51	△	△	△	△
MIU590-1	590.64	×	×	△	—	□	19.81	—	19.70	—	—
MIU590-2	590.73	10.19	10.64	16.42	—	△	△	—	17.43	—	—
MIU592-1	592.20	12.45	13.81	13.81	—	13.47	15.00	—	17.21	—	—
MIU592-3	592.39	22.19	20.00	17.32	△	19.02	15.06	△	△	△	△
MIU674-2	674.70	□	18.22	21.62	△	△	19.81	△	21.74	△	△
MIU674-3	674.77	□	□	22.19	12.57	□	20.72	11.77	18.45	11.09	8.49
MIU674-4	674.96	14.03	—	18.79	7.47	—	19.36	7.13	22.53	8.94	△
MIU799-1	799.62	—	13.36	13.58	×	15.74	14.94	×	14.15	×	×
MIU799-2	799.69	19.47	—	13.81	×	×	12.57	×	17.43	×	×
MIU799-4	799.87	14.38	13.81	11.78	×	13.47	11.66	×	9.74	×	×
MIU896-2	896.52	—	—	5.55	×	—	9.28	×	12.45	×	×
MIU896-4	896.69	—	△	11.87	×	16.11	13.47	×	12.68	×	×
MIU896-5	896.78	—	6.34	10.83	×	9.51	11.36	×	12.68	×	×
MIU932-1	932.63	15.09	×	×	×	×	×	×	19.17	×	×
MIU932-2	932.84	12.68	13.13	9.66	×	13.28	△	×	—	×	×
MIU932-3	932.91	10.57	10.42	11.62	×	10.87	10.87	12.23	12.83	×	×
MIU932-5	932.76	×	14.19	12.08	×	25.81	14.49	×	△	×	×
MIU990-1	990.04	—	—	—	×	×	—	×	△	×	×
MIU990-2	990.12	14.64	14.08	11.77	×	13.28	10.11	×	△	×	×
MIU990-3	990.22	—	—	△	×	×	△	×	15.55	×	×
MIU990-4	990.28	×	×	×	×	24.30	—	×	×	×	×
MIU990-5	990.36	×	×	×	×	×	—	×	△	×	×

表-7 応力-差ひずみの形状パターンと初期地圧評価の可否

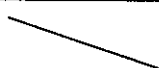
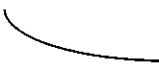
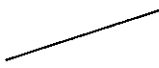
応力-差ひずみ形状	マーク	初期地圧評価の可能性
		可能
	-	不可
	△	
	×	
	□	

表-8 AE法とDRA法の結果比較

深度 (m)	AE法による初期地圧		DRA法による初期地圧		土被り圧・ (MPa)
	平均値(MPa)	変動係数 (%)	平均値(MPa)	変動係数 (%)	
196	5.09	5.77	8.06	28.75	5.02
297	6.65	5.07	9.34	16.39	7.60
409	9.83	7.77	11.10	25.17	10.47
504	13.73	6.34	10.17	8.41	12.90
590	9.98	7.38	16.09	20.77	15.10
674	17.24	3.37	15.83	34.19	17.25
799	23.04	3.83	13.99	16.22	20.45
896	13.55	6.21	11.01	25.88	22.94
932	26.28	2.71	12.27	12.68	23.86
990	4.87	14.86	13.24	13.78	25.34

* 単位体積重量25.6kN/m³と深度から推定

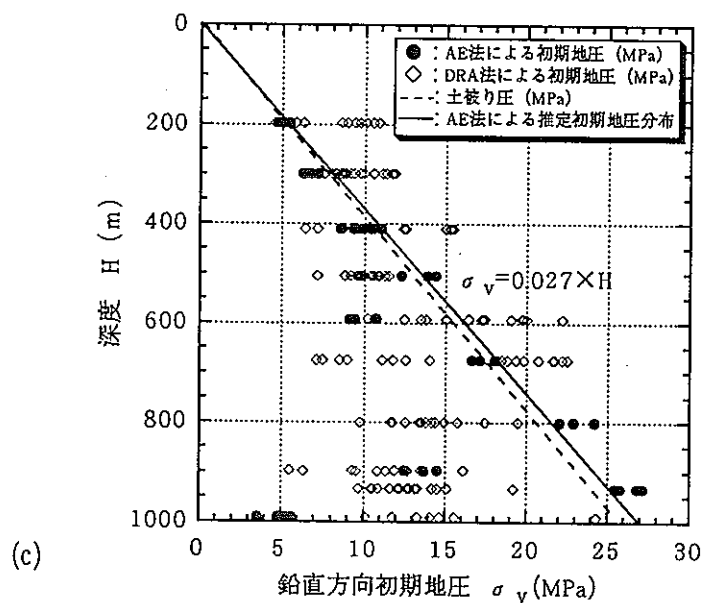
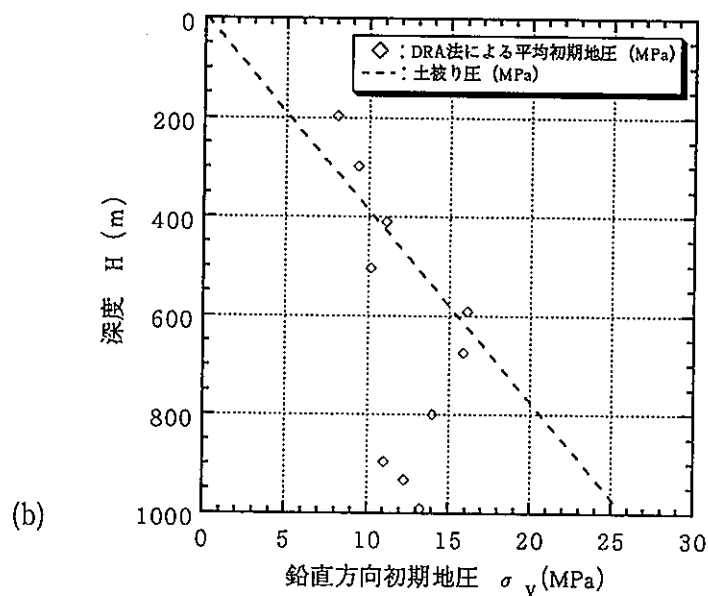
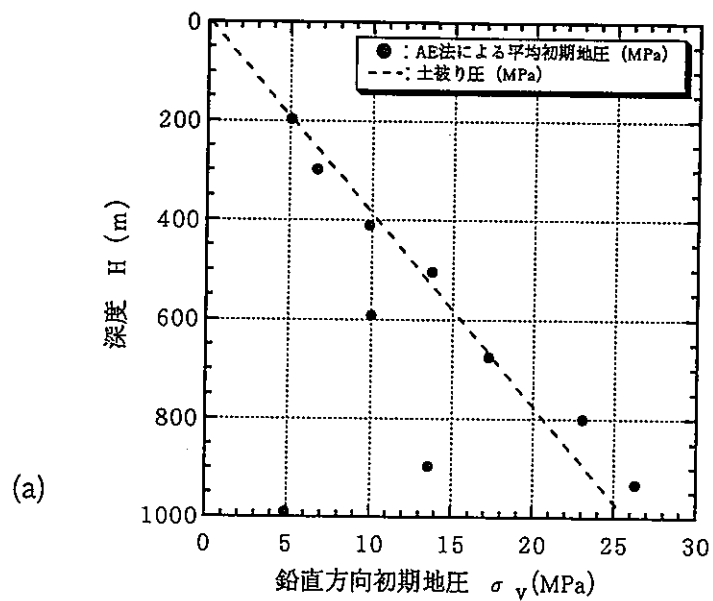


図-11 初期地圧測定結果の深度分布

(a) AE法から求めた平均初期地圧の深度分布、(b) DRA法から求めた平均初期地圧の深度分布、(c) 全測定結果の深度分布

表-9 試料採取地点の岩質

深度 (m)	硬軟	コア形状	RQD* (%)	風化	変質	き裂頻度 (本/m)
196	C	Ⅲ	42	$\beta \sim \gamma$	2	10
297	B	Ⅱ	56	β	2	3
409	B	Ⅰ	98	α	2	1
504	A	Ⅰ	84	α	2	2
590	C	Ⅲ	38	$\beta \sim \gamma$	2	15
674	B	Ⅰ	100	β	2	0
799	B	Ⅱ	51	β	2	4
896	C	Ⅰ	79	β	2	2
932	B~C	Ⅱ	61	β	2	4
990	B~C	Ⅱ	57	β	2	5

* 採取地点近傍1mのコア採取率

凡例

記号	硬軟区分
A	硬硬、ハンマーで容易に割れない。
B	硬、ハンマーで金属音。
C	中硬、ハンマーで容易に割れる。
D	軟、ハンマーでポロポロに砕ける。
E	硬軟、まさ状、粘土状。

記号	風化区分
α	非常に新鮮である。
β	新鮮である。断層面、片理面にそってわずかに変色があり割れやすい。
γ	弱風化している。断層面、片理面にそって風化している。
δ	風化している。岩芯まで風化している。ハンマーで簡単に崩せる。
ϵ	強風化している。黄褐色化し、指先で簡単に崩すことができる。

記号	コア形状区分
Ⅰ	長さが50cm以上の棒状コア。
Ⅱ	長さが50~15cmの棒状コア。
Ⅲ	長さが15~5cmの棒状~片状コア。
Ⅳ	長さが5cm以下の棒状~片状コアでかつコアの外壁の一部が認められるもの。
Ⅴ	主として角礫状のもの。
Ⅵ	主として砂状のもの。
Ⅶ	主として粘土状のもの。
Ⅷ	コアの採取ができないもの。スライムも含む。

記号	変質区分	変質状況
1	非変質	肉眼的に変質鉱物の存在が認められないもの。
2	弱変質	原岩組織を完全に残し、変質限度(脱色)が低いもの。あるいは非変質部の割合が高いもの。
3	中変質	肉眼で変質が進んでいると判断できるが、原岩組織を明らかに残し、原岩判定が容易なもの、または非変質部を残すものおよび網状変質鉱物。
4	強変質	構成鉱物、岩片等が変質鉱物で完全置換され、原岩組織を全くからほとんど残さないもの。

7. おわりに

土岐花崗岩の初期地圧を地表から深度1000mまで概略的に把握することを目的に、MIU-1孔から回収されたボーリングコアを用いて地圧測定を行った。採用した方法はAE法とDRA法である。測定は深度196mから開始し、ほぼ100m毎に実施した。全試験本数は40本であり、各深度に対して3本以上である。一供試体でAE法とDRA法を同時測定した。

AE法では、対象岩石に適したしきい値と感度の条件を決定しておくことが必要になる。MIU-1孔において、平成9年度に深度99.7mから回収した花崗岩のしきい値と感度の組み合わせ条件は決定していた。しかし、深度196mで採取した花崗岩は結晶の大きさなどが同程度ではなかったことから、事前に定めた試験条件の妥当性確認のため再度深度197mでの採取コアを用いて予備試験を行った。その結果、しきい値と感度の条件を修正する必要があることがわかった。MIU-1孔から採取された花崗岩について結晶粒の大きさや固結度合いが著しく異ならない限り、しきい値を230mV、210mV、感度を90dBと定め計測を行った。一方、DRA法では、繰返し載荷時のひずみ差分を利用する。通常のひずみゲージ出力は 10^{-6} レベルであり微小であることから、添付した4枚のゲージ出力の合算で差分ひずみを捉えた。

AE法による初期地圧測定の結果、以下のことがわかった。

- (1)各深度から得られた全ての試料において、カイザー効果が明瞭に現れ、鉛直方向の初期地圧成分を算定できた。
- (2)測定値のバラツキについて、変動係数は（深度990mを除いて）一桁と小さかった。
- (3)深度590mと896mでは土被り圧の約1/2に、深度990mでは土被り圧の約1/5と初期地圧は小さく算定された。これら深度以外では土被り圧にほぼ等しくなった。
- (4)深度590m、896m、990mの結果を除外すると、鉛直方向の初期地圧成分 σ_v と土被りHとの間には、 $\sigma_v = 0.027 \times H$ なる関係のあることが判明した。

DRA法による初期地圧測定の結果、以下のことがわかった。

- (5)応力-差ひずみの形状パターンは5種類有り、その内上に凸型の場合のみ初期地圧を算定できた。
- (6)載荷1回目の載荷データを利用する組み合わせ（5-1、4-1、3-1、2-1）からは初期地圧を評価できなかった。
- (7)測定値のバラツキについて、変動係数は20%前後となりAE測定に比べ大きくなった。

(8)深度674mまでは土被り圧と10~20%程度の違いであったが、深度799m以深では土被り圧の約1/2と小さくなった。

(9)定量的に「載荷何回目と何回目との応力-差ひずみから初期地圧を評価できる」という指針的な提案をするには至らなかった。ただし、原因は未明であるが、繰返し1回目の載荷データを利用しない組み合わせによって応力-差ひずみを取得することが賢明であろう。

AE法とDRA法の結果を比較すると、両方法において一部調和しない結果が得られたり、DRA法でバラツキが大きく一義的に初期地圧を算定することが困難であるなどの問題点が生じたが、概略的に深度1000mまでの初期地圧を把握することができた。

通常、地山は3次元応力状態下にある。弾性論の観点からは鉛直方向の地圧成分が最も大きくなることから、この値を把握しておくことが重要視されている。しかし、実際は地殻変動や褶曲の影響を受け、水平方向の地圧成分が鉛直方向より大きくなることは希ではない。そのため、初期地圧の深度分布を議論する場合、一方向のみの測定では十分とは言えない。特に、今回のように土被り圧よりかなり小さく算定された場合には、最大主応力が鉛直方向から大きく傾いていることが想定される。このような場合、3次元的な初期地圧状況を把握しなければ、最適な空洞形状や支保規模選定は不可能となる。

応力解放法や水圧破碎法などの原位置試験に比較して、AE法ならびにDRA法は試料が採取できれば簡単に初期地圧を測定することができる利点を有している。また、供試体寸法を直径30mm、細長比1:2程度とした場合、86mm以上のボーリングコアが入手できれば3次元初期地圧を算定することが可能である。今後、初期地圧状態を詳しく議論するためにもAE法やDRA法による3次元初期地圧測定を提案したい。ただし、DRA法を利用する場合には、「載荷何回目と何回目との応力-差ひずみから初期地圧を評価する」という指針作りが必要である。

8.参考文献

- 1) J.Kaiser : Untersuchungen uber das auftreten gerauschen beim zugversuch, Archiv fur das Eisenhüttenwesen, Vol.24, pp.43, 1953.
- 2) 金川 忠、林 正夫、仲佐博裕：岩石における初期地圧成分のAcoustic Emissionによる推定の試み、土木学会論文報告集、第258号、pp.63、1977.
- 3) 畑 浩二：AEによる初期地圧計測の実例Ⅱ、－現場技術者のための－ AE技術の応用、pp.388、1994.
- 4) 畑 浩二、道廣一利、吉岡尚也、杉原弘造：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、1995
- 5) 山本清彦、桑原保人、平澤朋郎：変形率変化を用いた先行応力の推定、地震学会講演予稿集、No.1、pp.245、1983.
- 6) TM-2孔のコアを用いたAE法による初期応力測定、動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書、PNC TJ7201 98-001、1998.
- 7) Kaleida GraphTM Reference Guide for Macintosh (Ver.3.0.5), pp.246, 1994.
- 8) 伊藤久男、桑原保人、西澤 修、山本清彦、工藤里絵、横山幸也、AE-DRA法による地殻応力測定 －1995年兵庫県南部地震震源域の結果－、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.689、1998.
- 9) 日本材料学会、建設材料実験、pp.33、1978.
- 10) 土質工学会、岩の調査と試験、pp.96、1989.

卷 末 資 料

1. 予備試験結果

2. 初期地圧測定結果

2.1 AE法

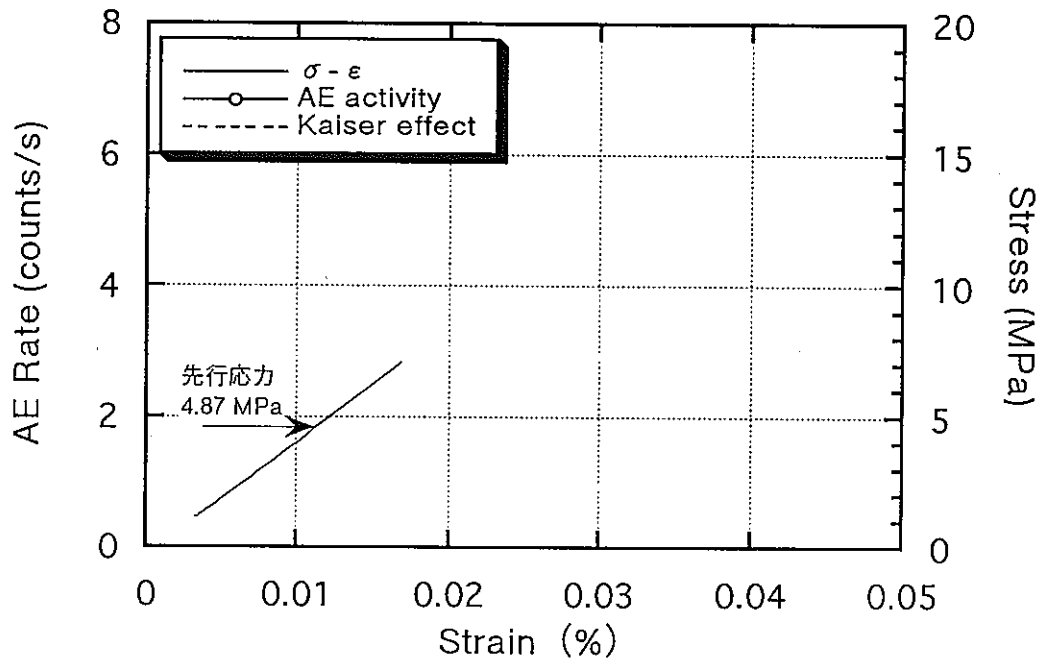
2.2 DRA法

1. 予備試験結果

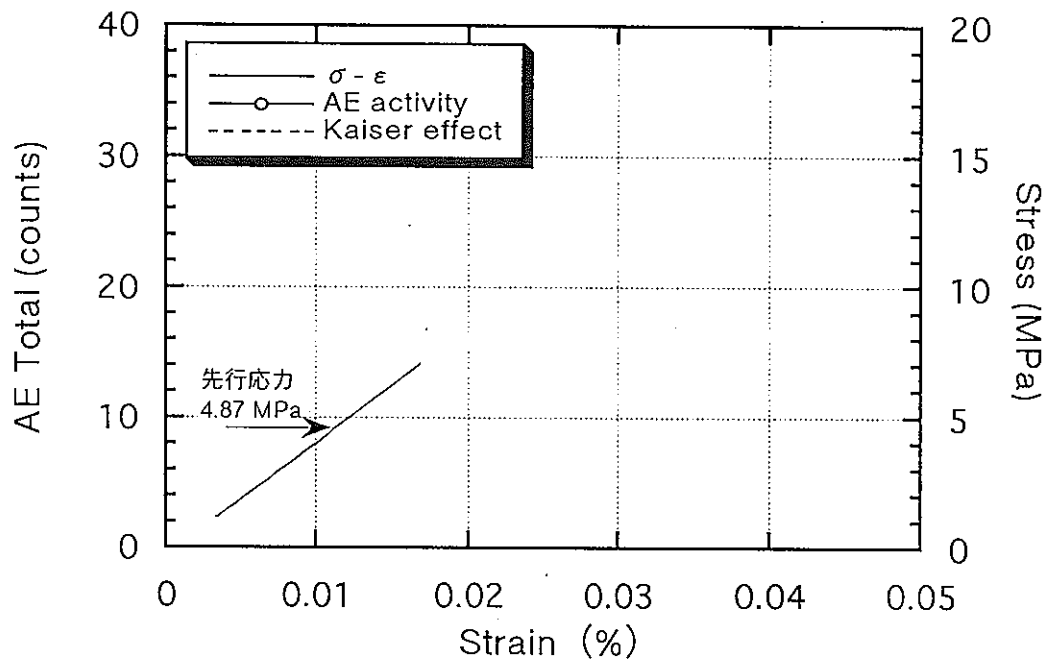
応力－ひずみ－AE発生数の関係

応力－ひずみ－AE累積数の関係

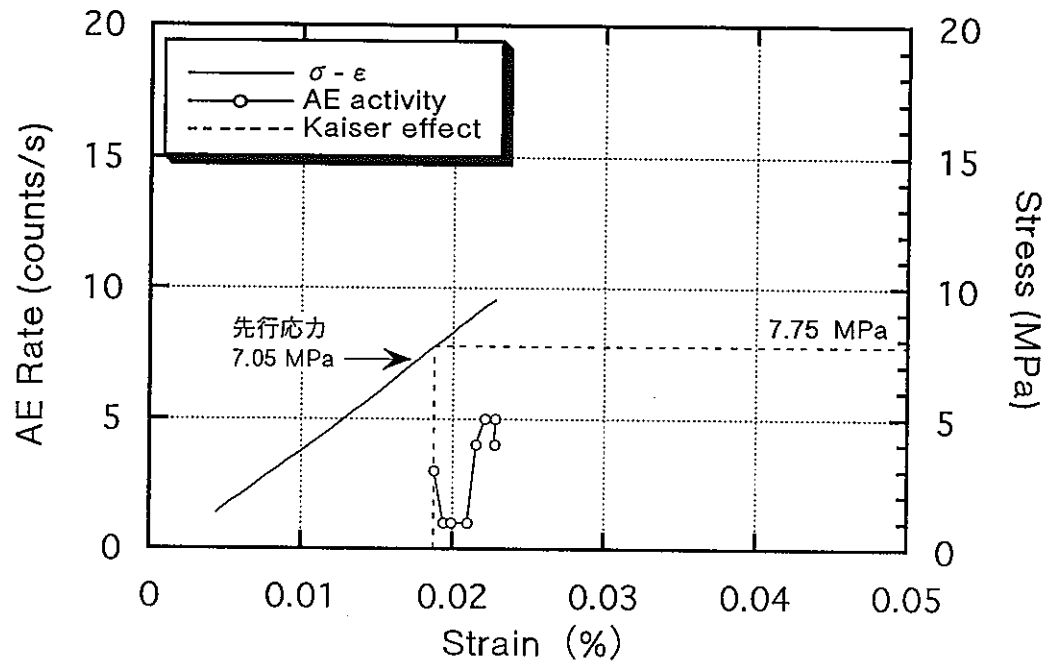
MIU197-3 (197.67m、先行繰返し応力 4.87 MPa)



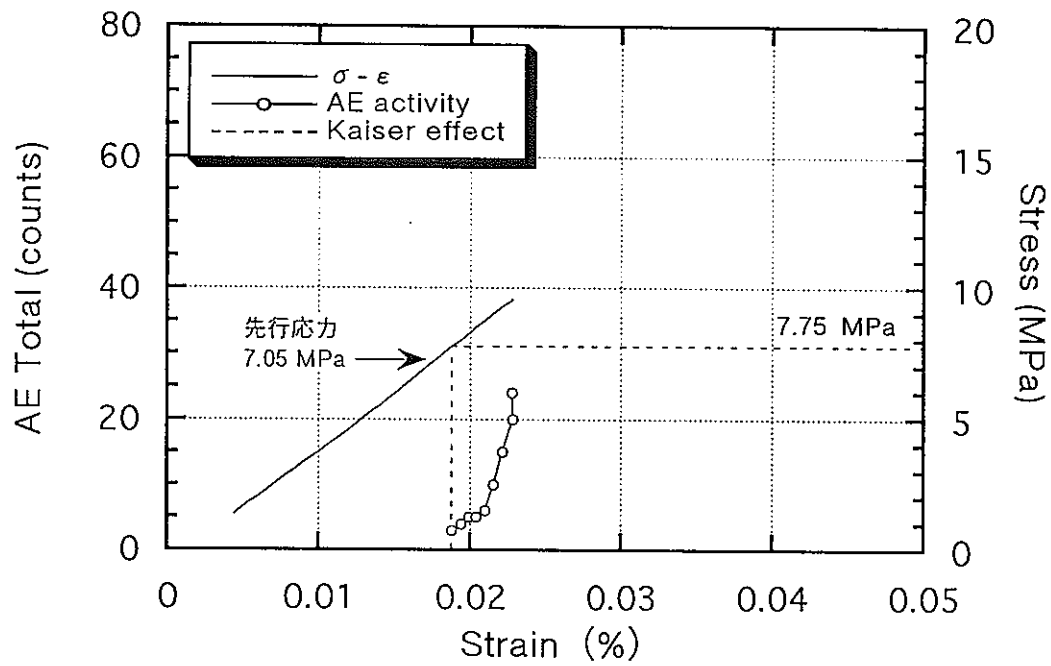
MIU197-3 (197.67m、先行繰返し応力 4.87 MPa)



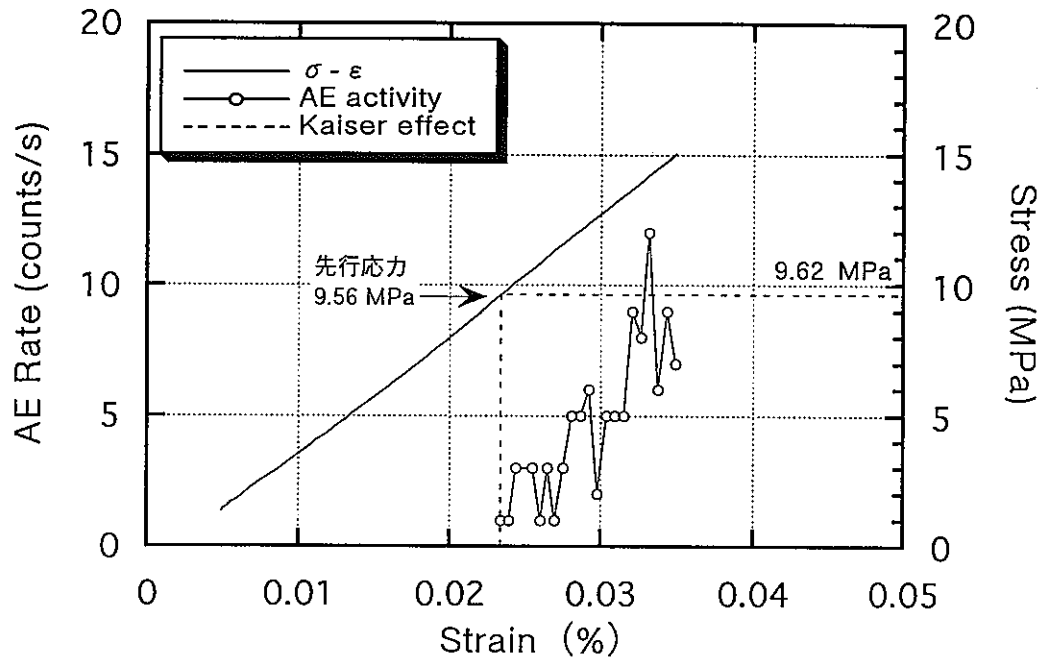
MIU197-3 (197.67m、先行繰返し応力 7.05 MPa)



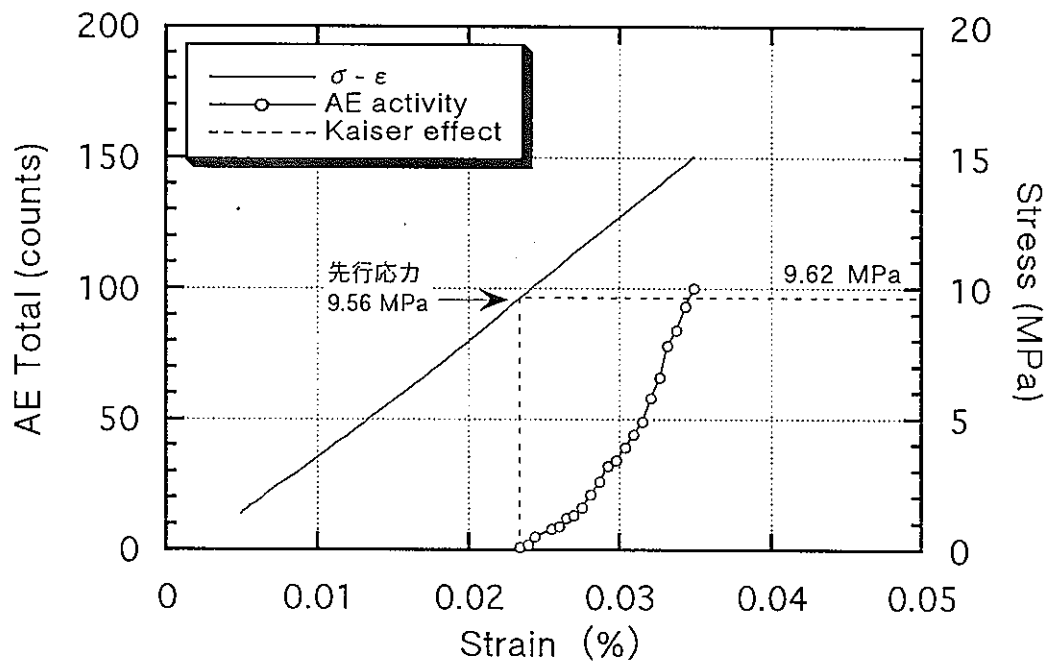
MIU197-3 (197.67m、先行繰返し応力 7.05 MPa)



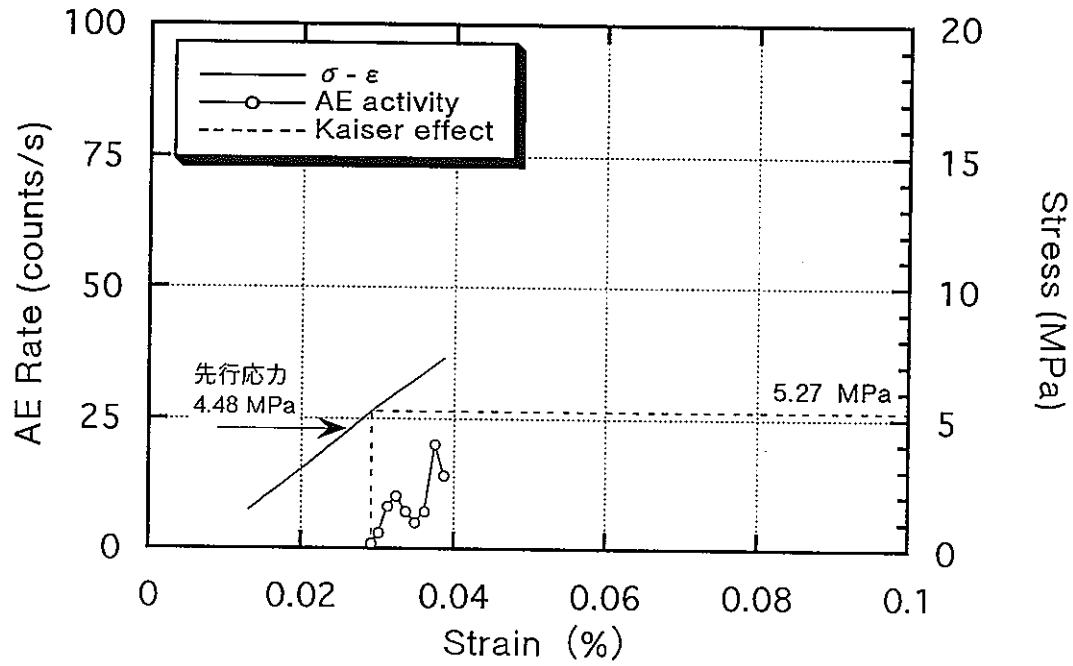
MIU197-3 (197.67m、先行繰返し応力 9.56 MPa)



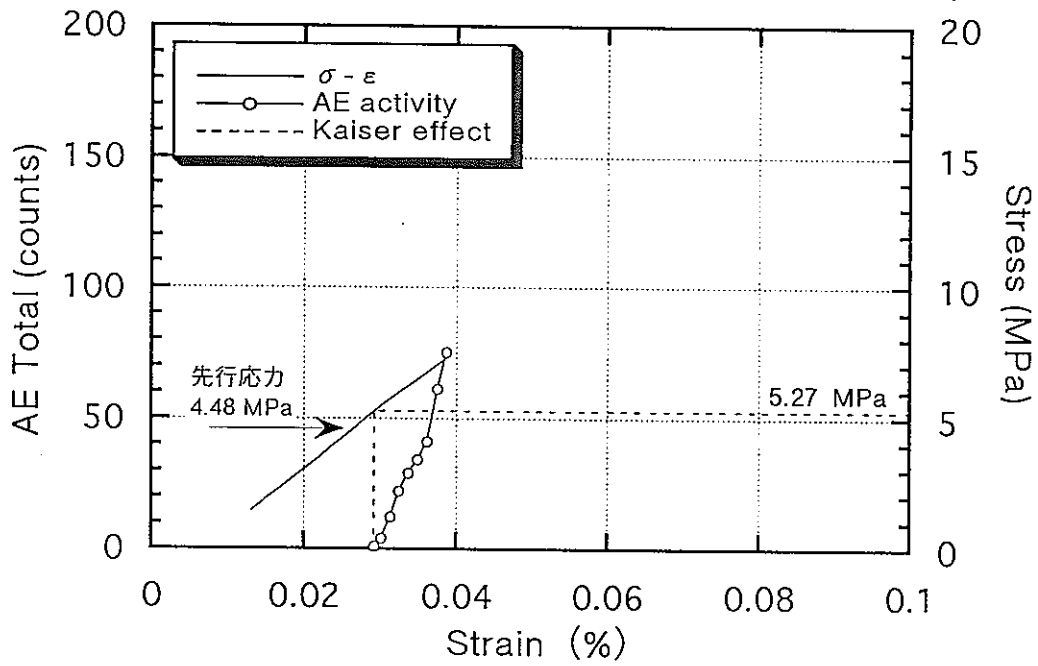
MIU197-3 (197.67m、先行繰返し応力 9.56 MPa)



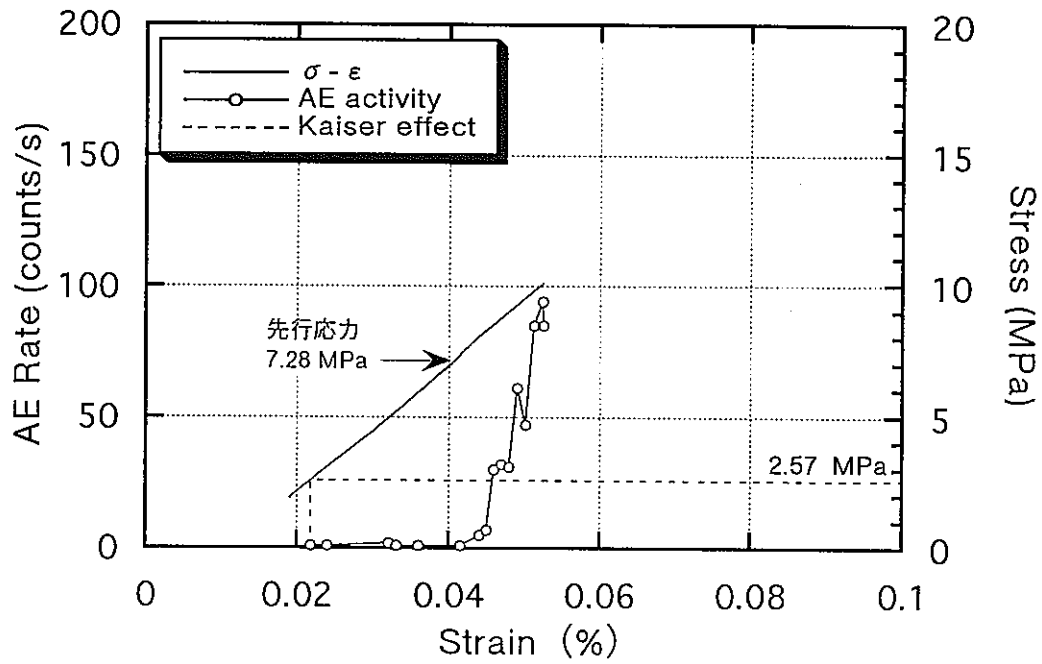
MIU197-4 (197.47m、先行繰返し応力 4.48 MPa)



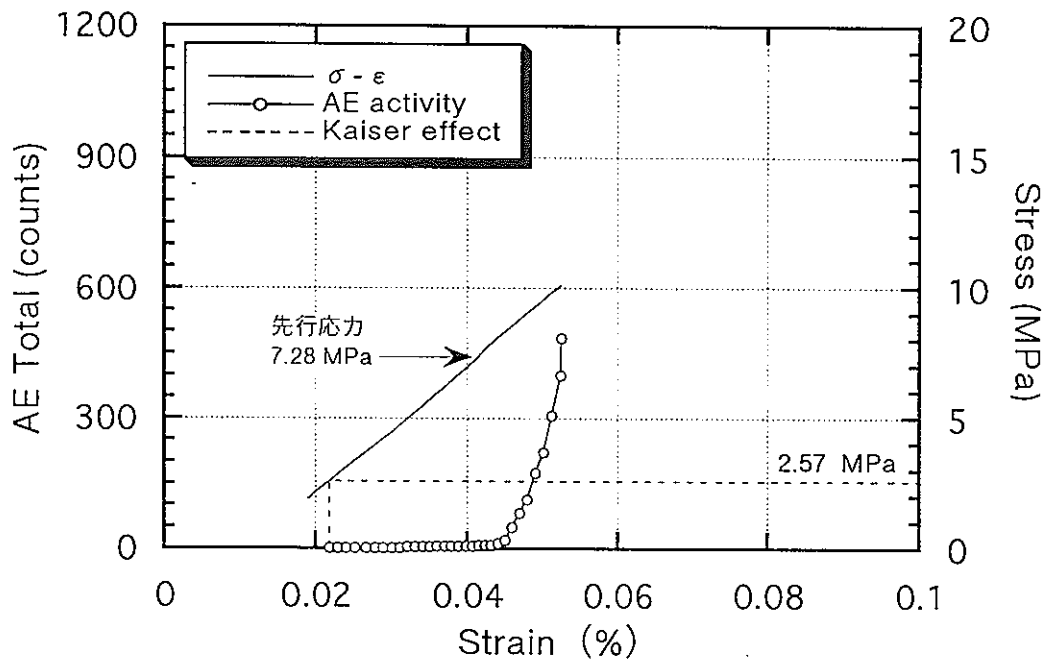
MIU197-4 (197.47m、先行繰返し応力 4.48 MPa)



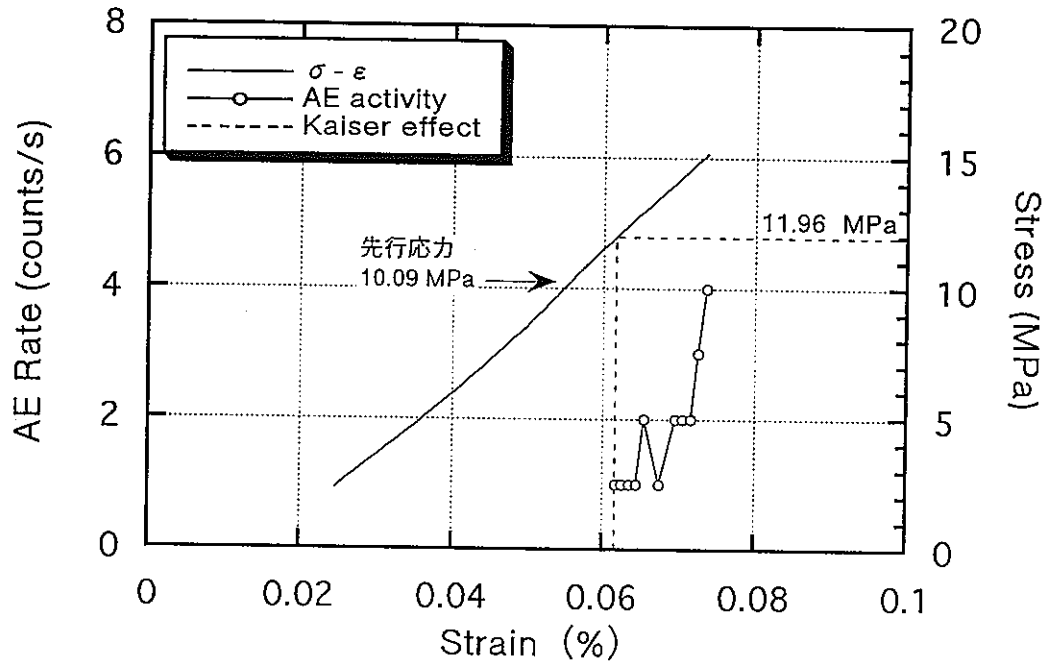
MIU197-4 (197.47m、先行繰返し応力 7.28 MPa)



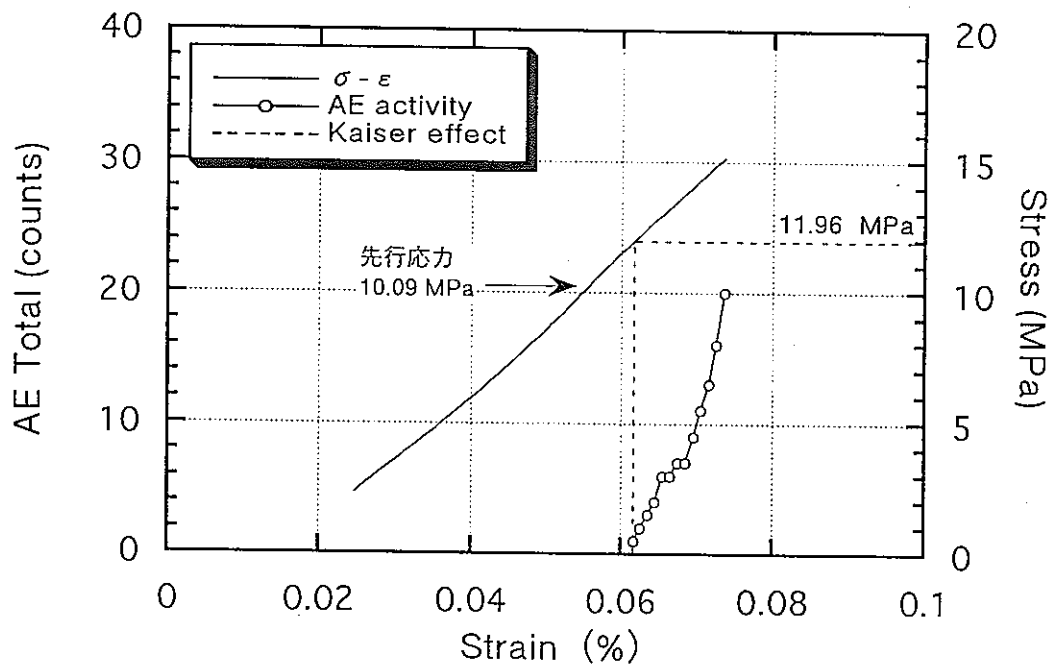
MIU197-4 (197.47m、先行繰返し応力 7.28 MPa)



MIU197-4 (197.47m、先行繰返し応力 10.09 MPa)



MIU197-4 (197.47m、先行繰返し応力 10.09 MPa)

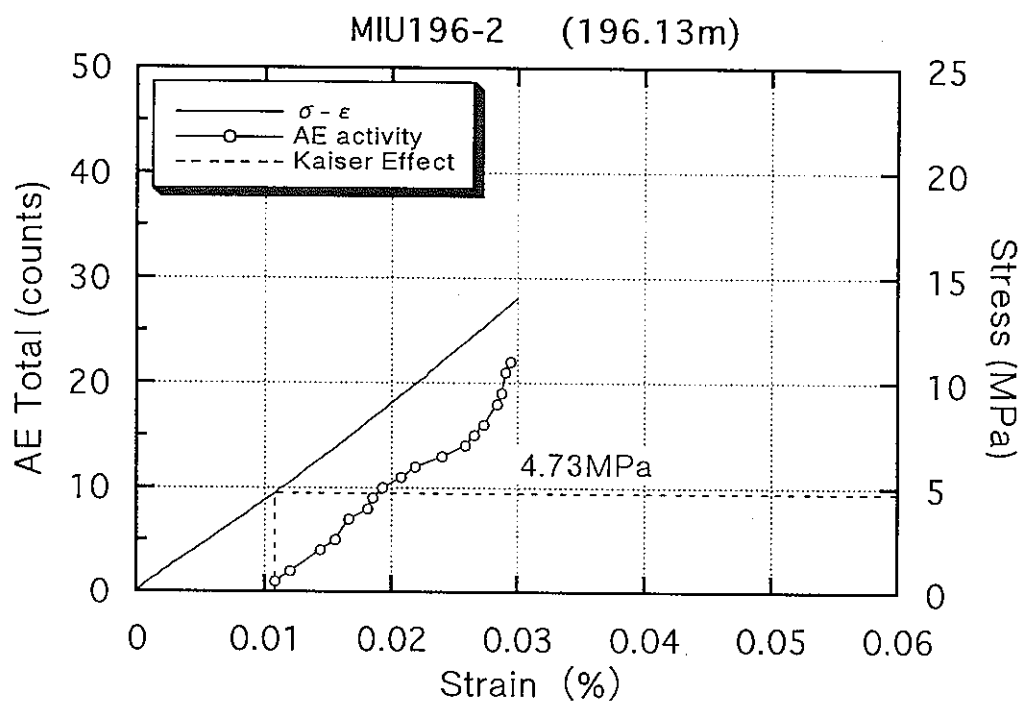
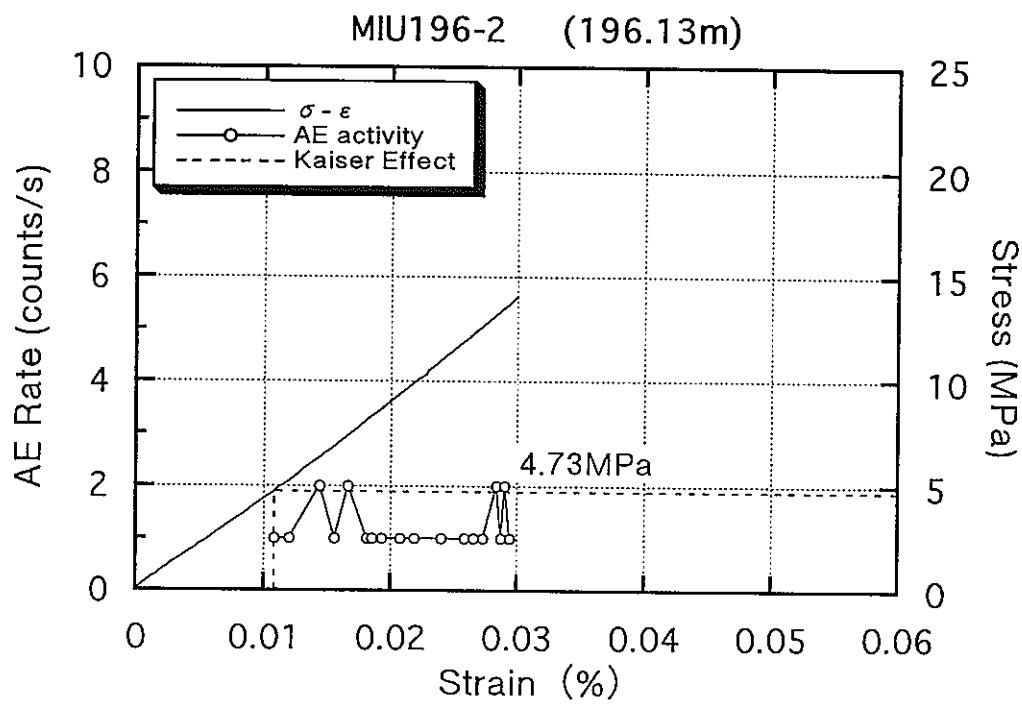


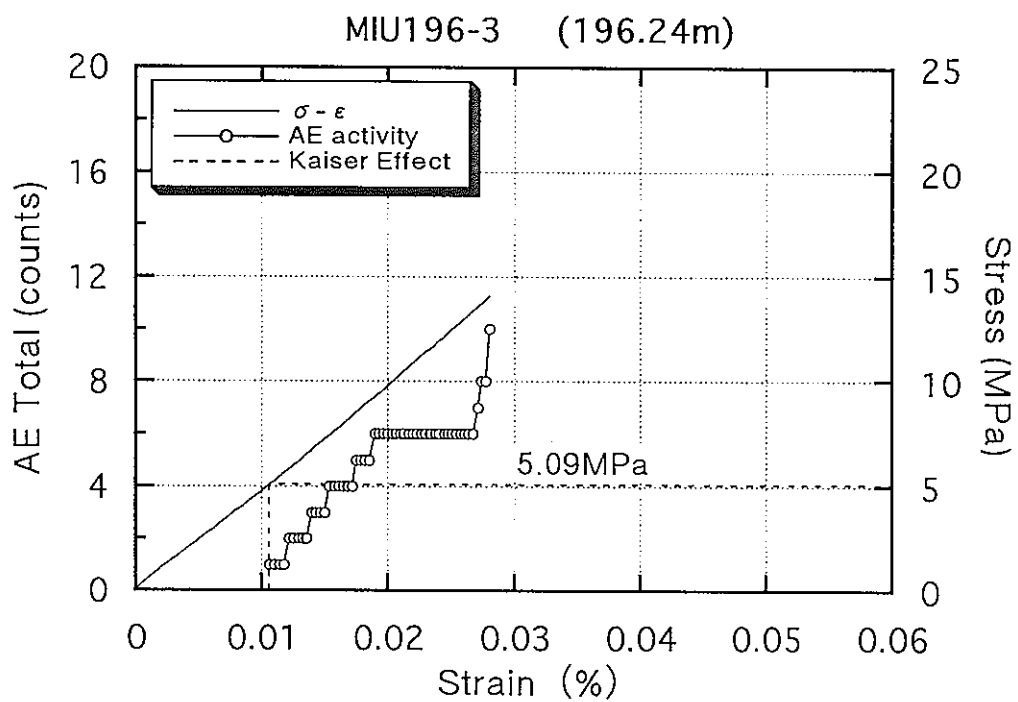
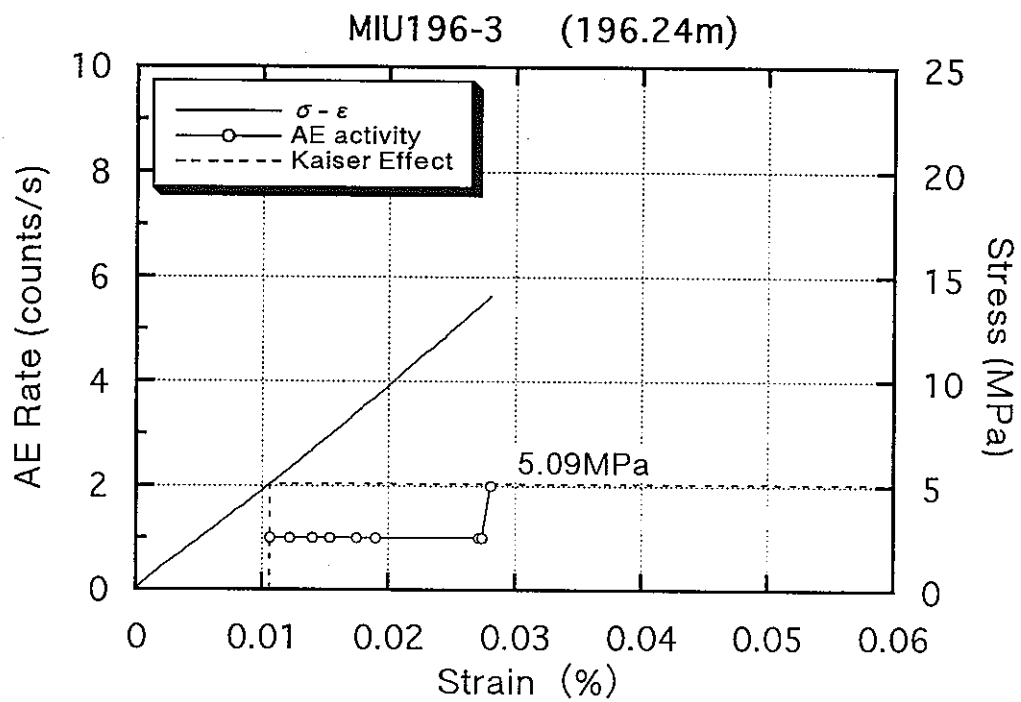
2.初期地圧測定結果

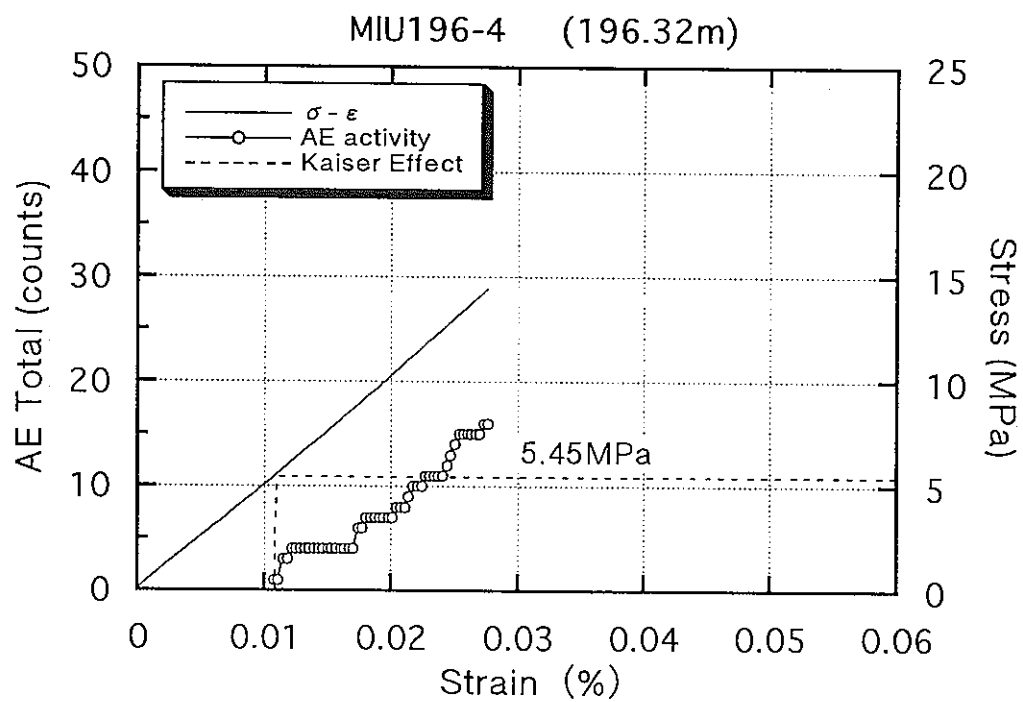
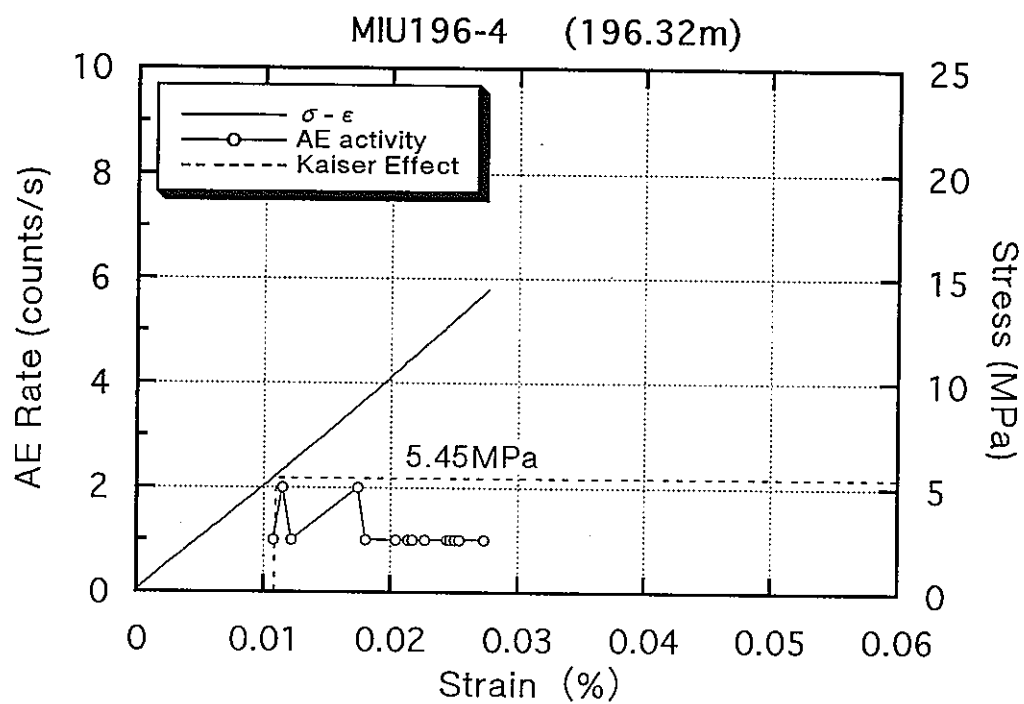
2.1 AE法

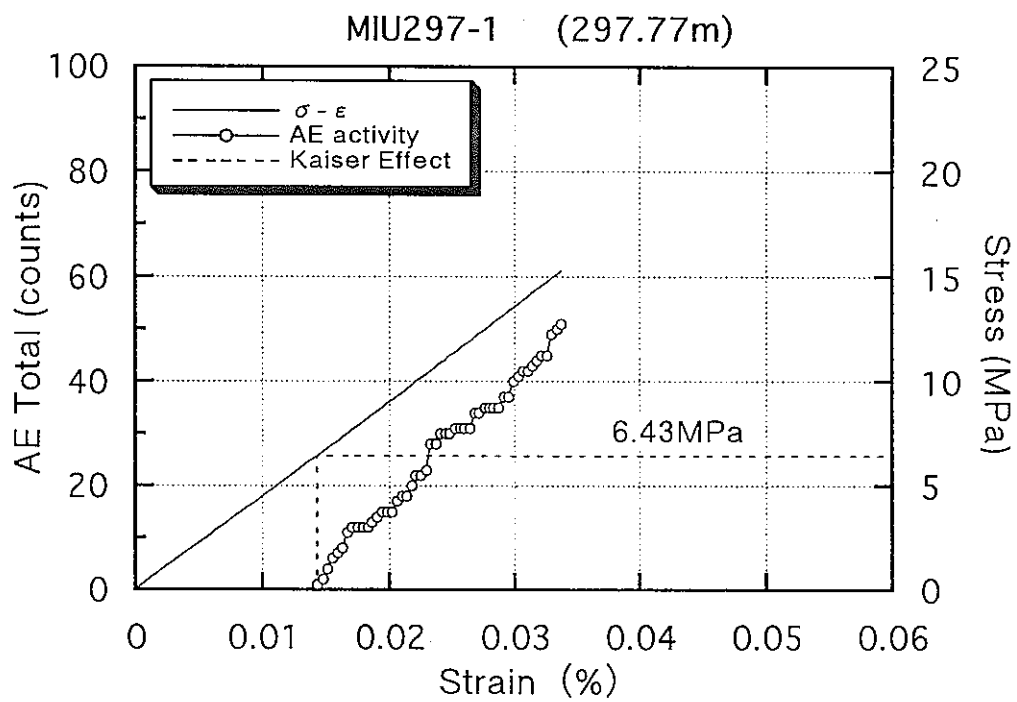
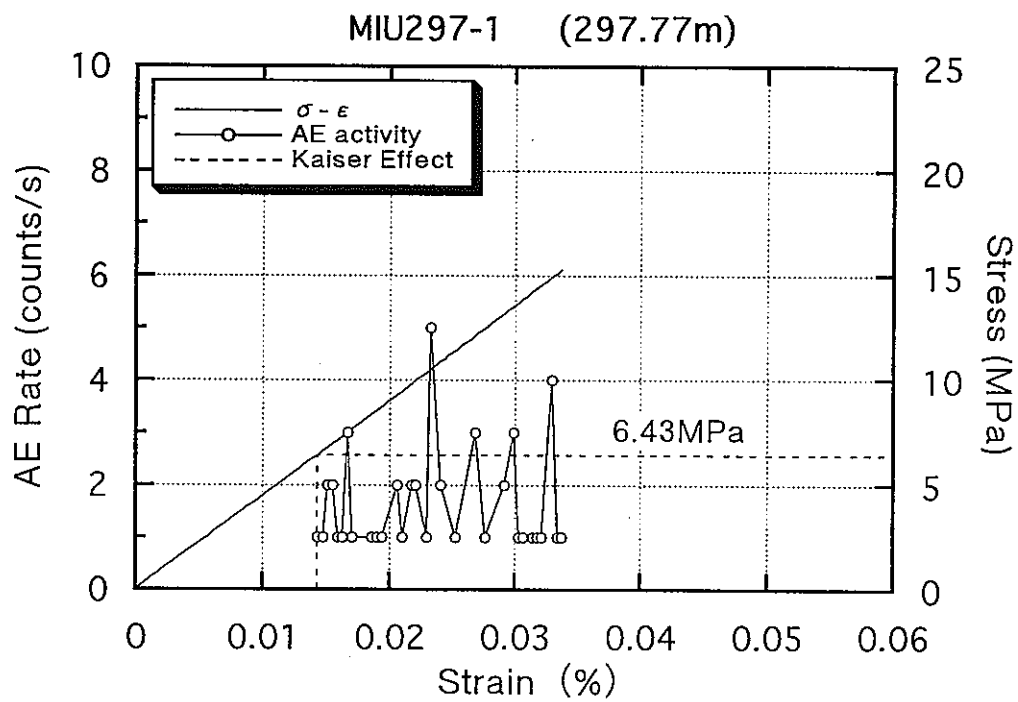
応力－ひずみ－AE発生数の関係

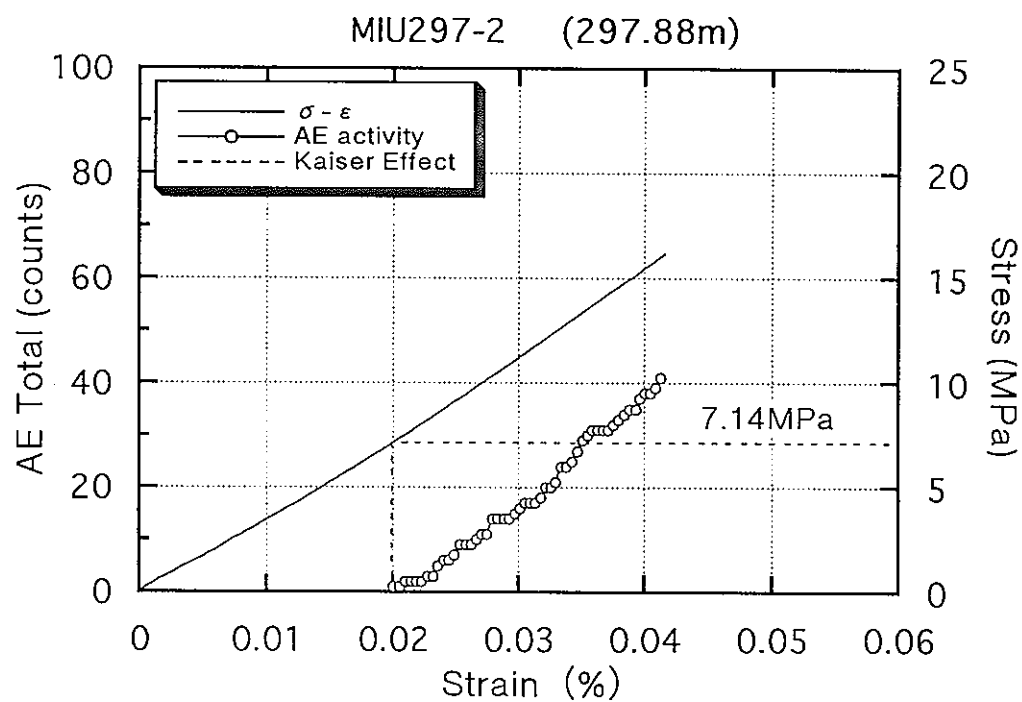
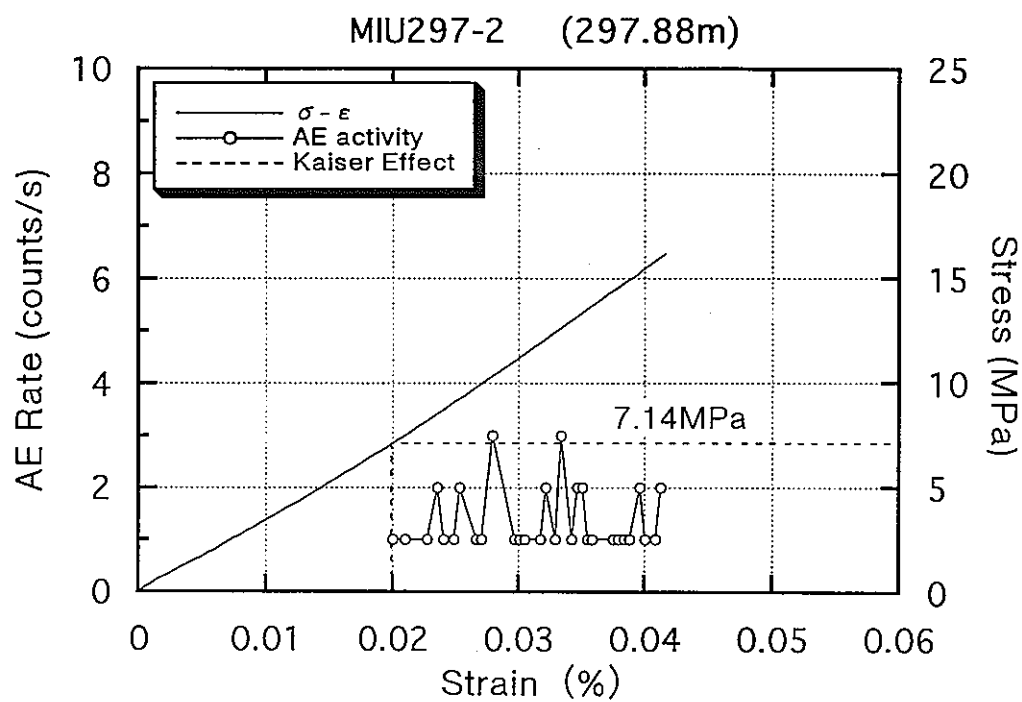
応力－ひずみ－AE累積数の関係

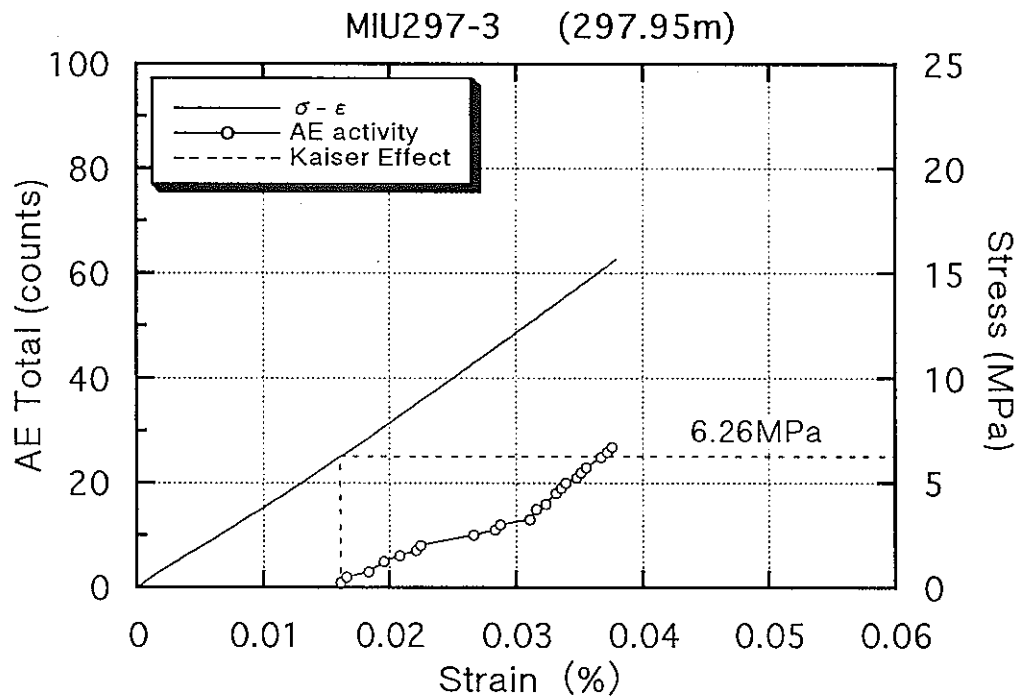
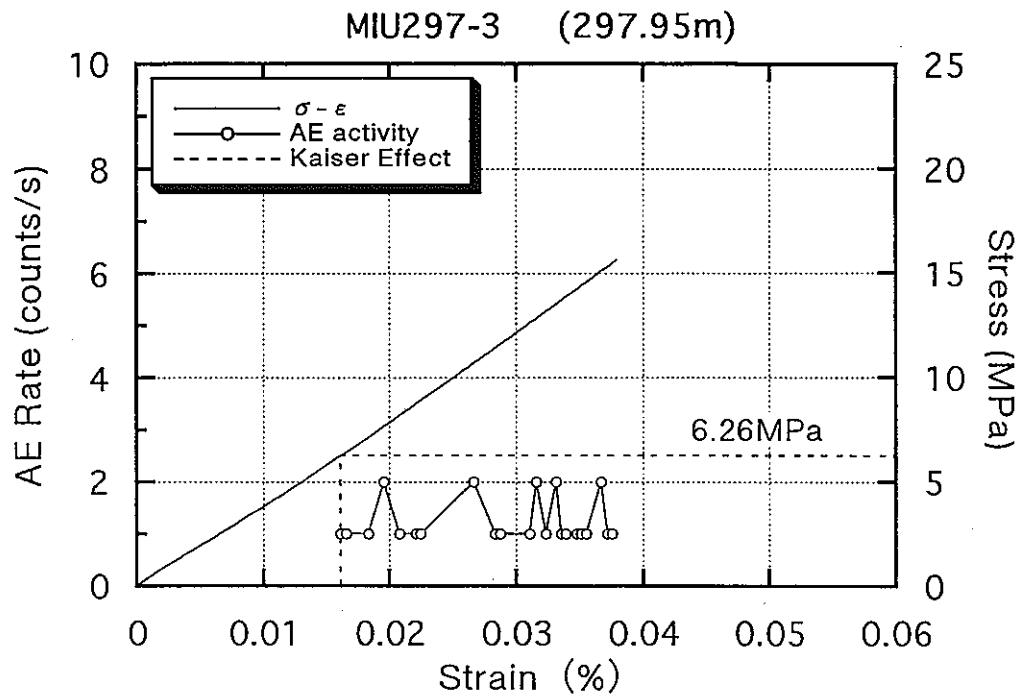


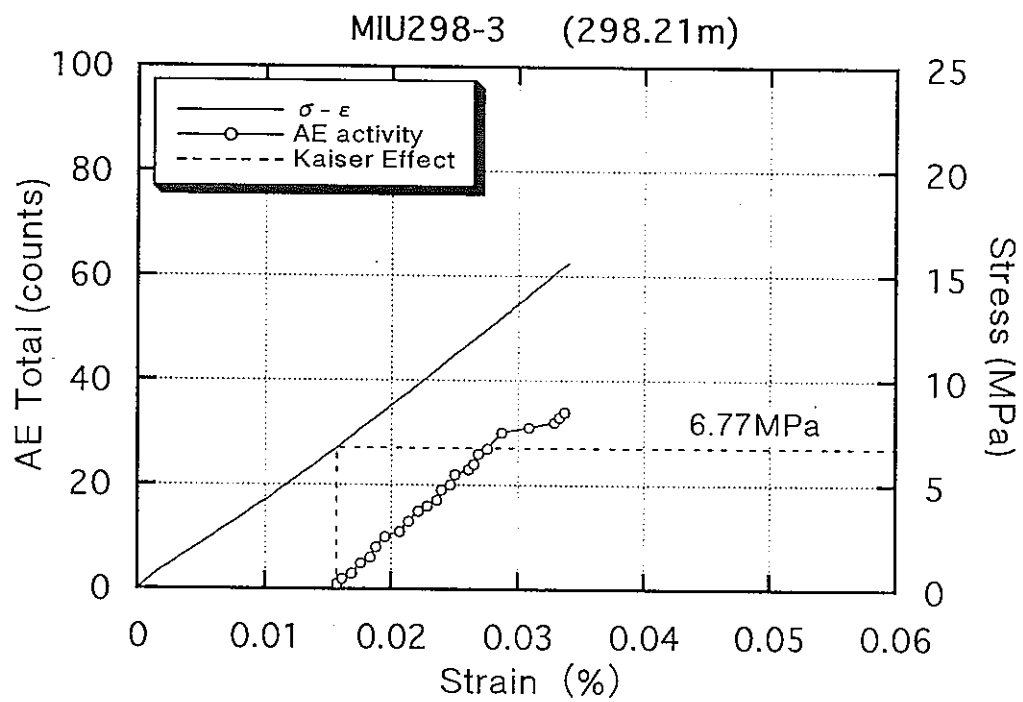
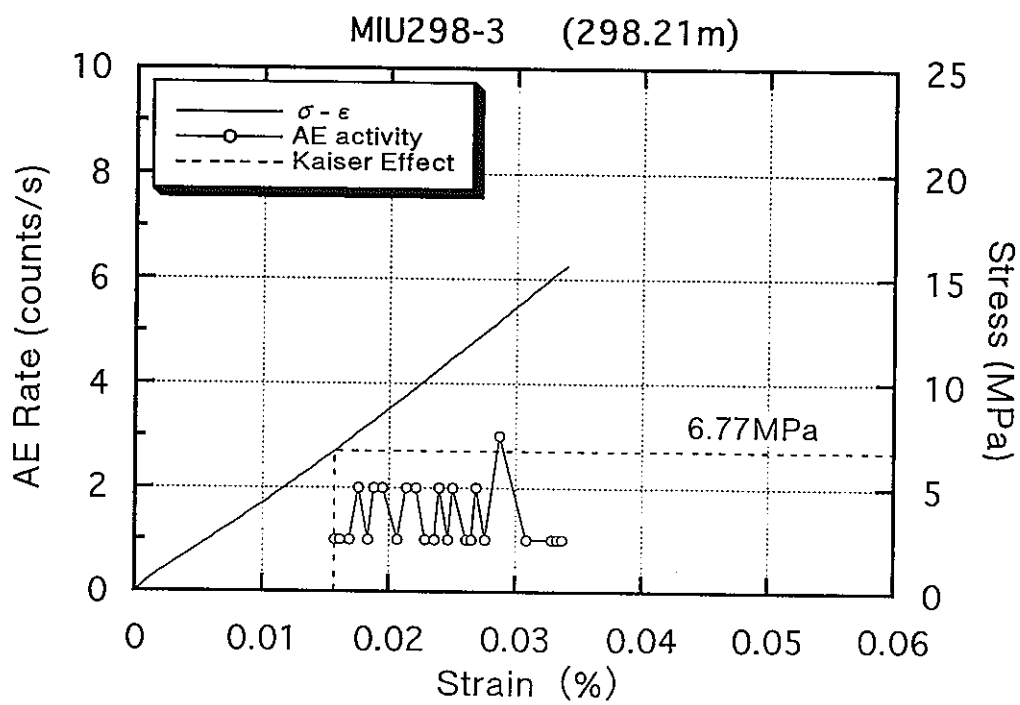


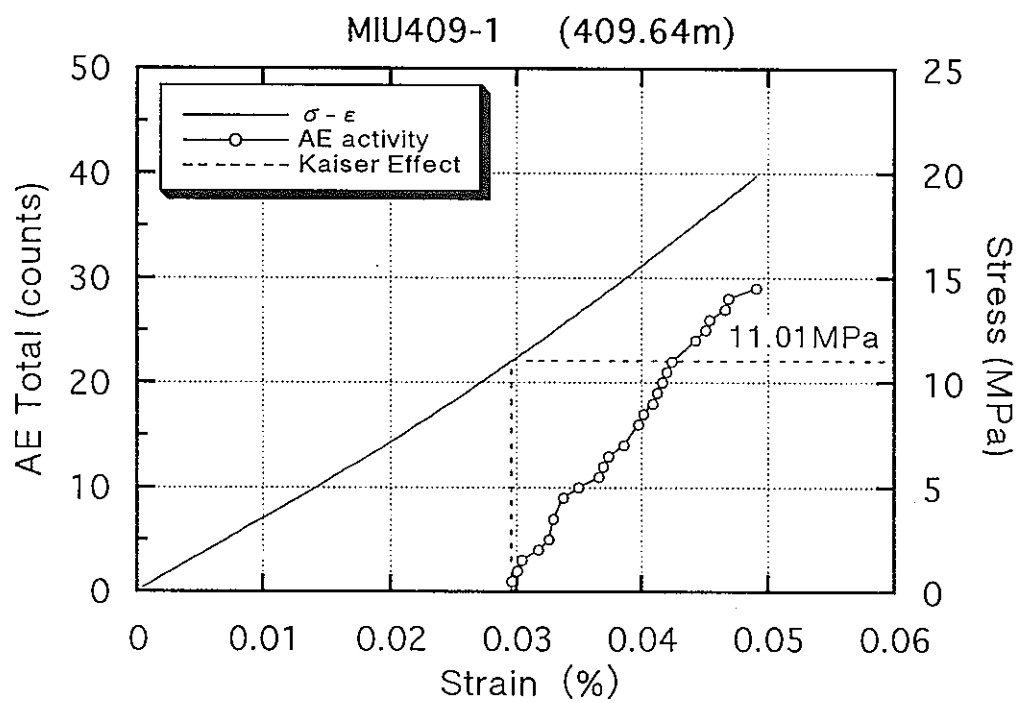
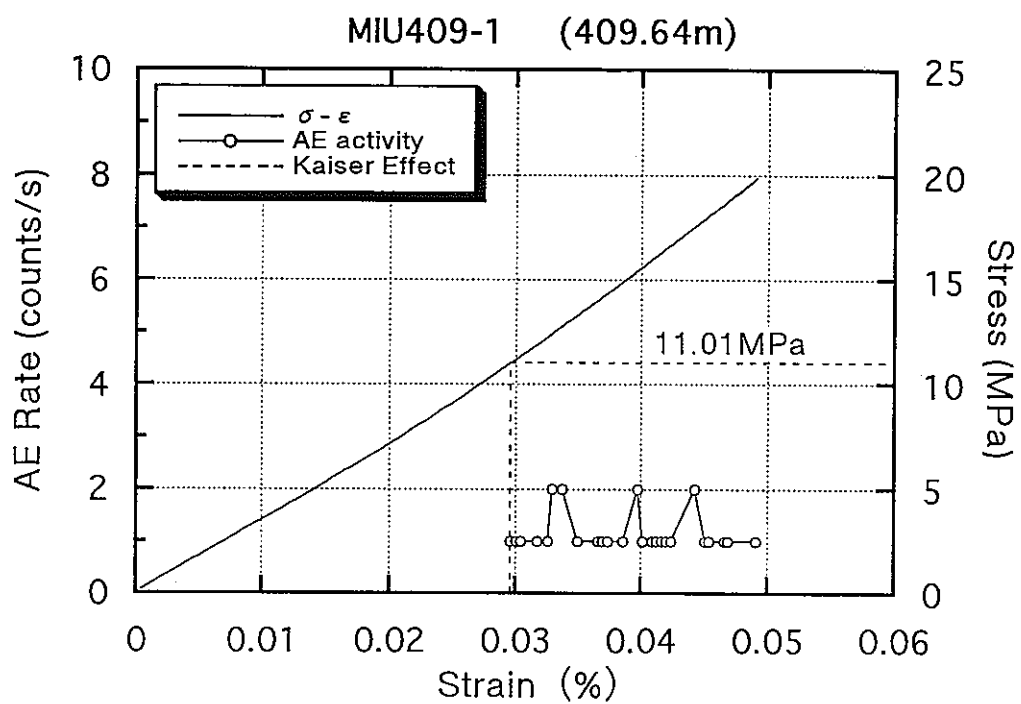


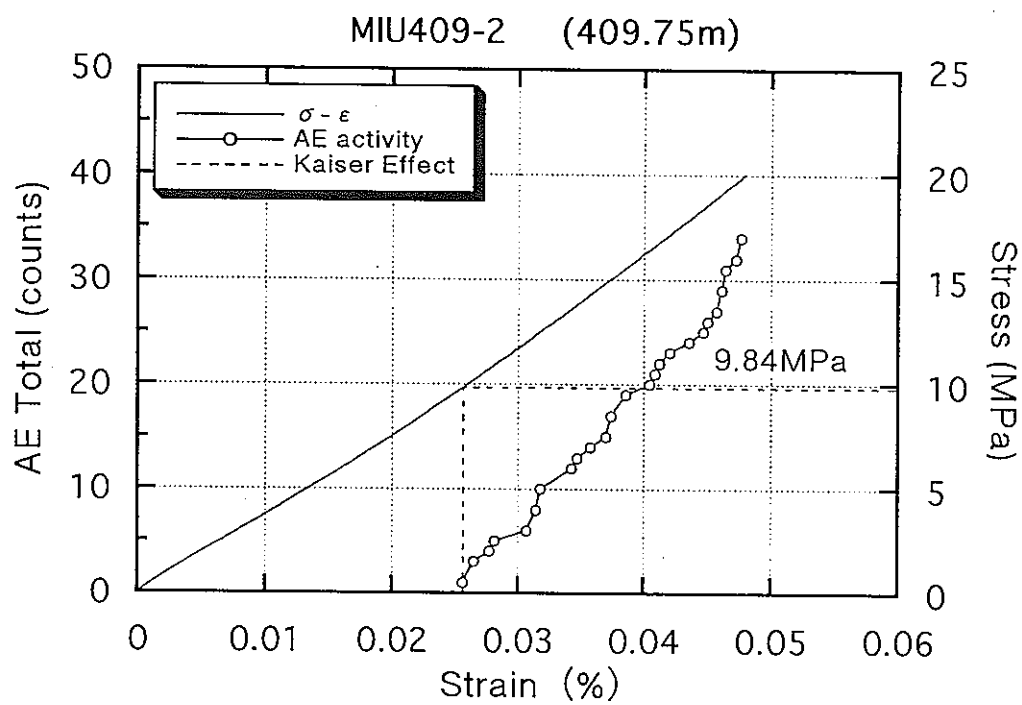
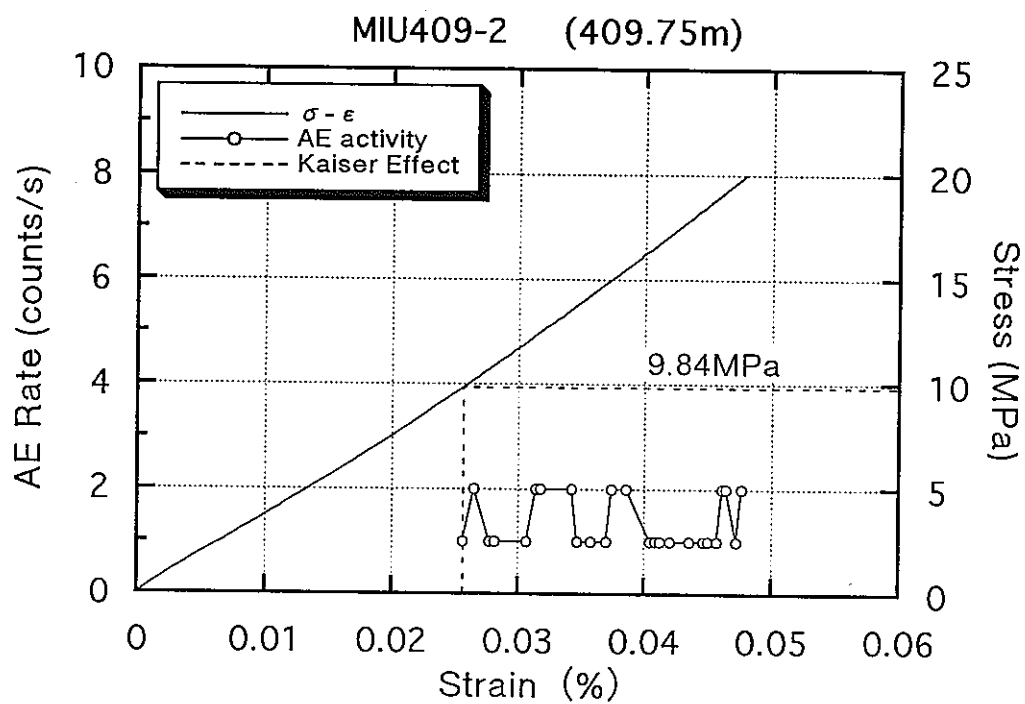


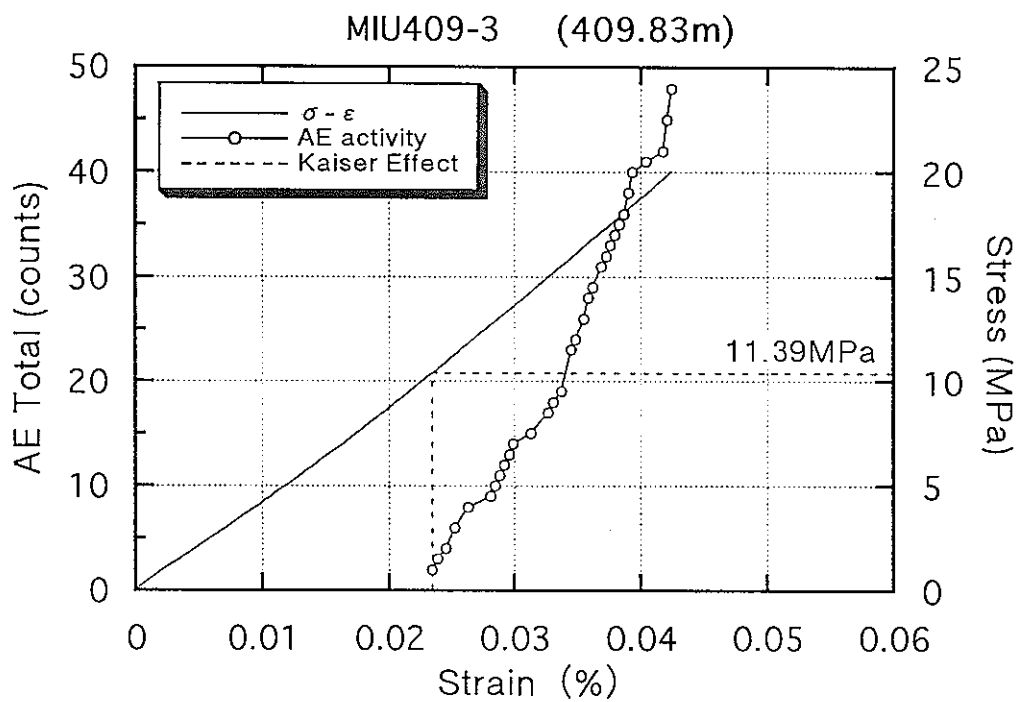
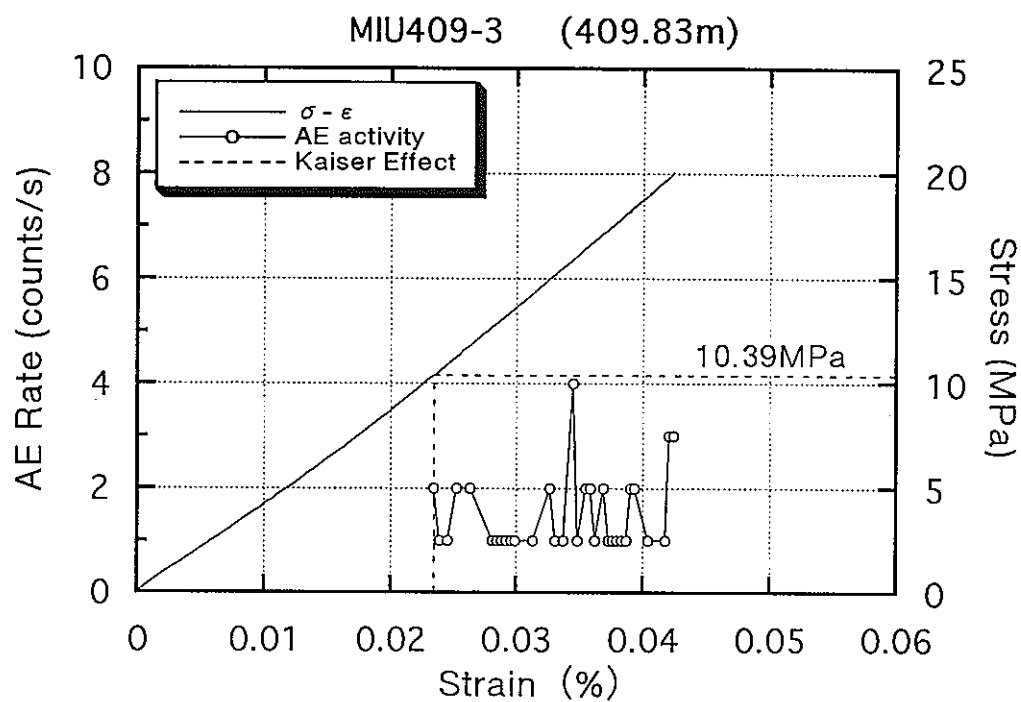


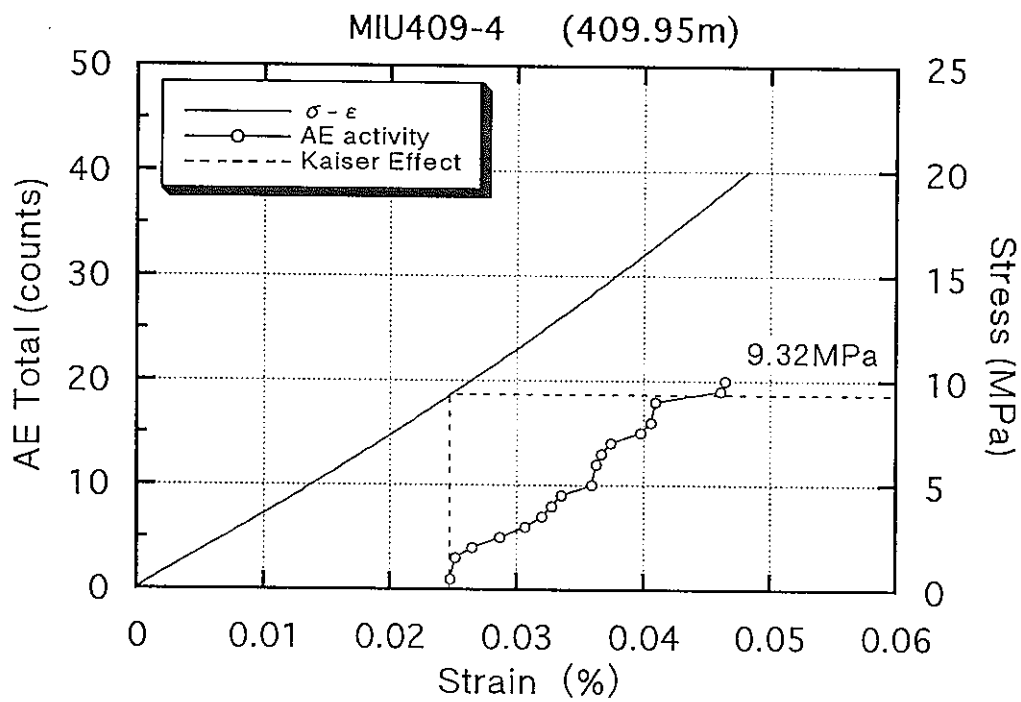
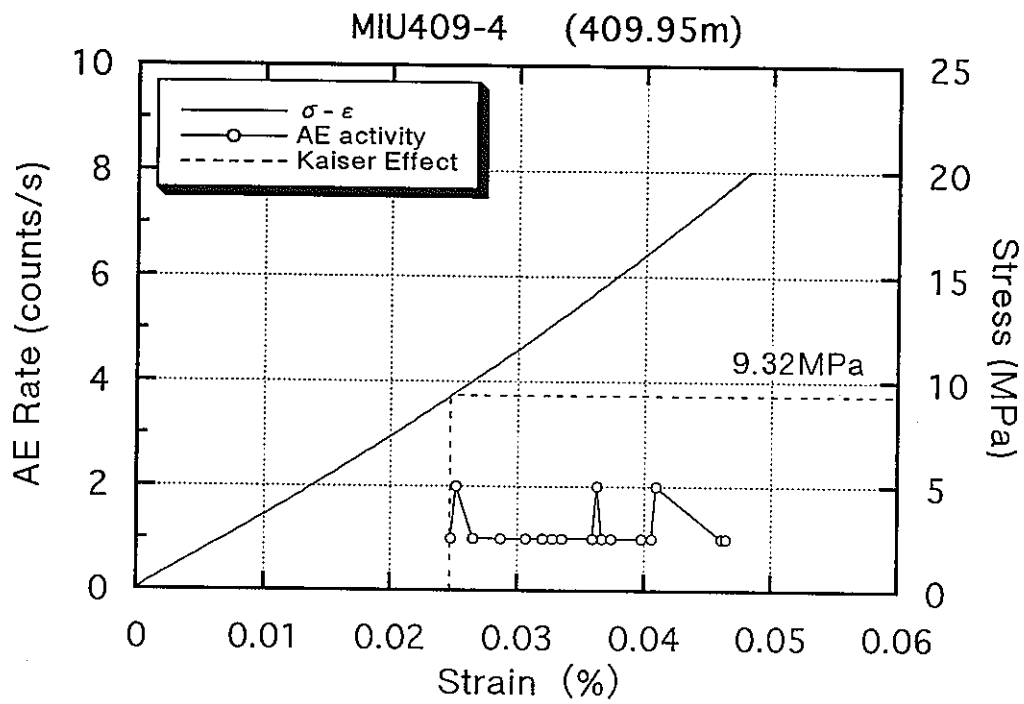


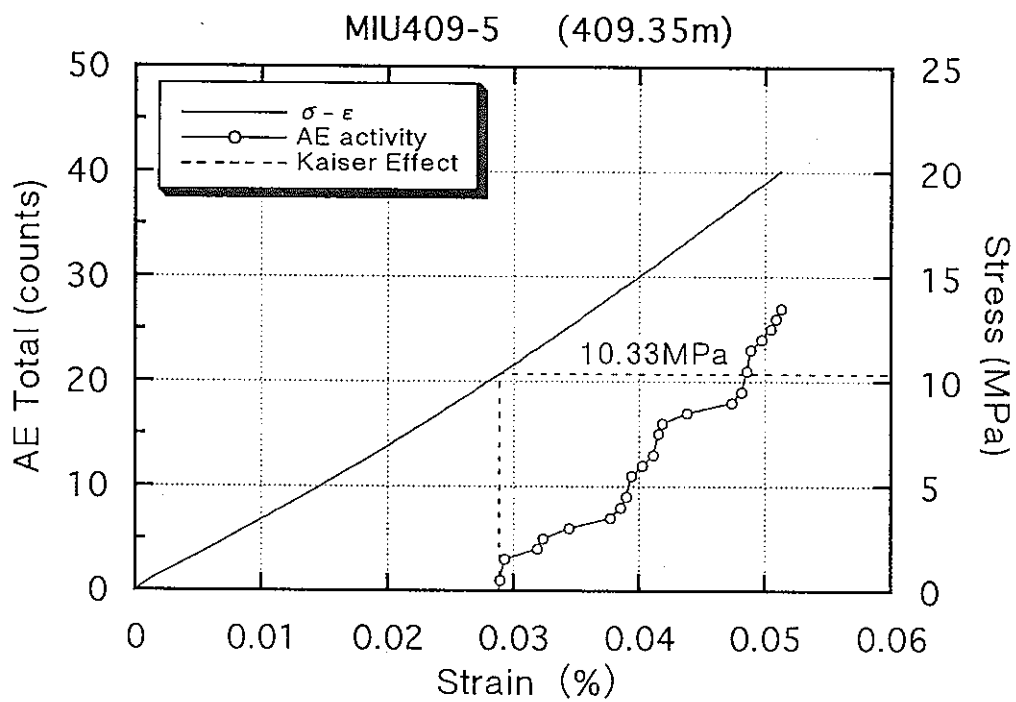
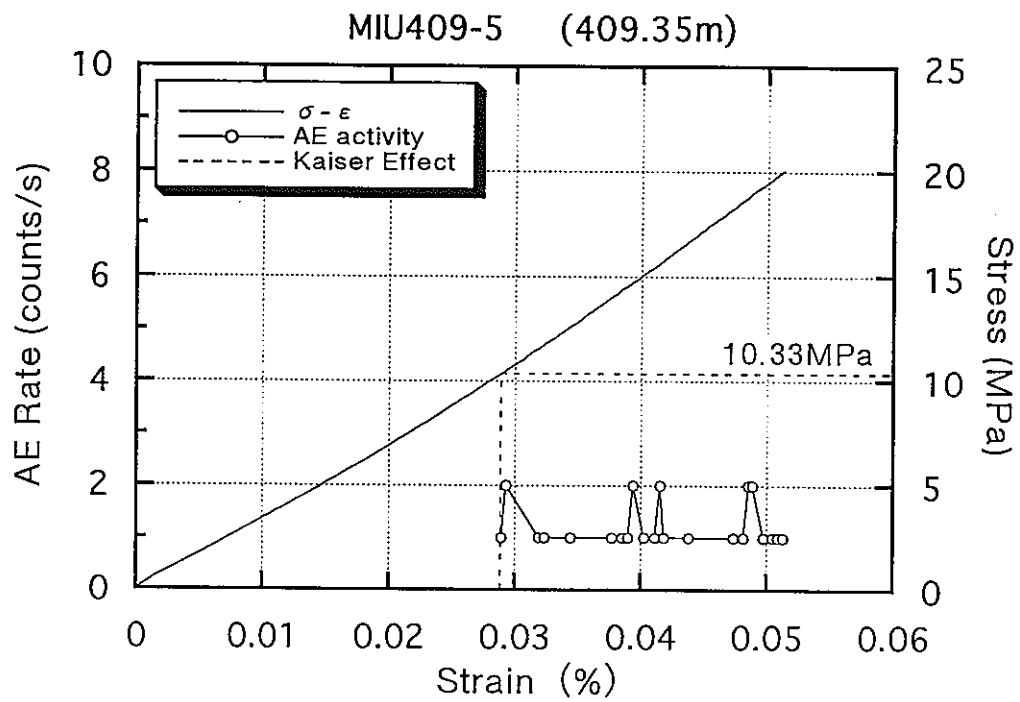


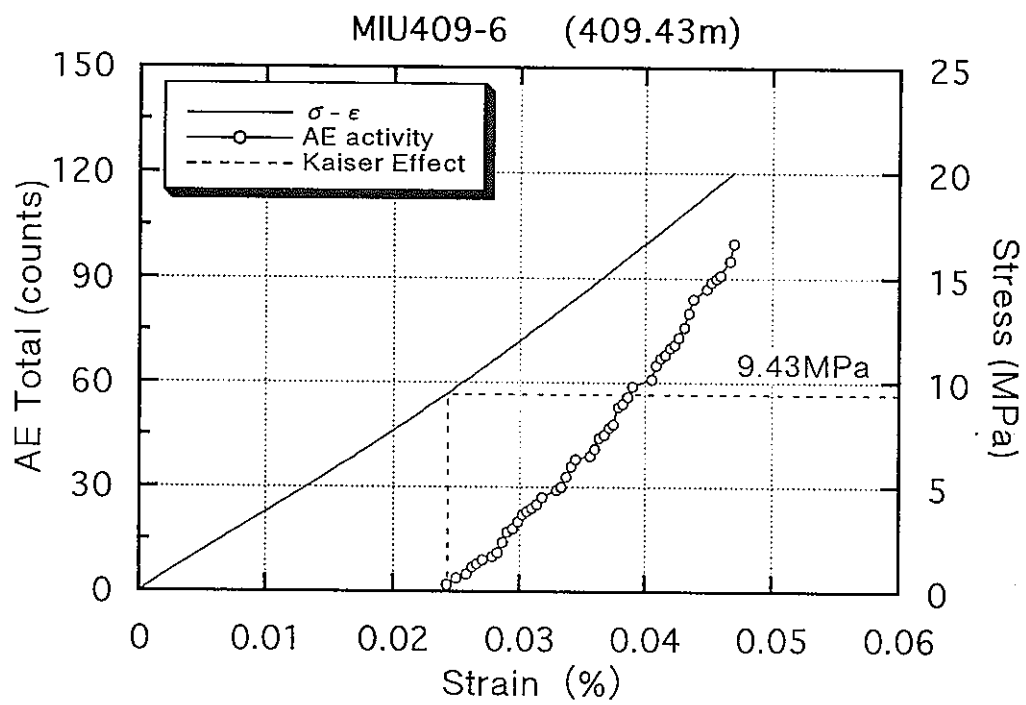
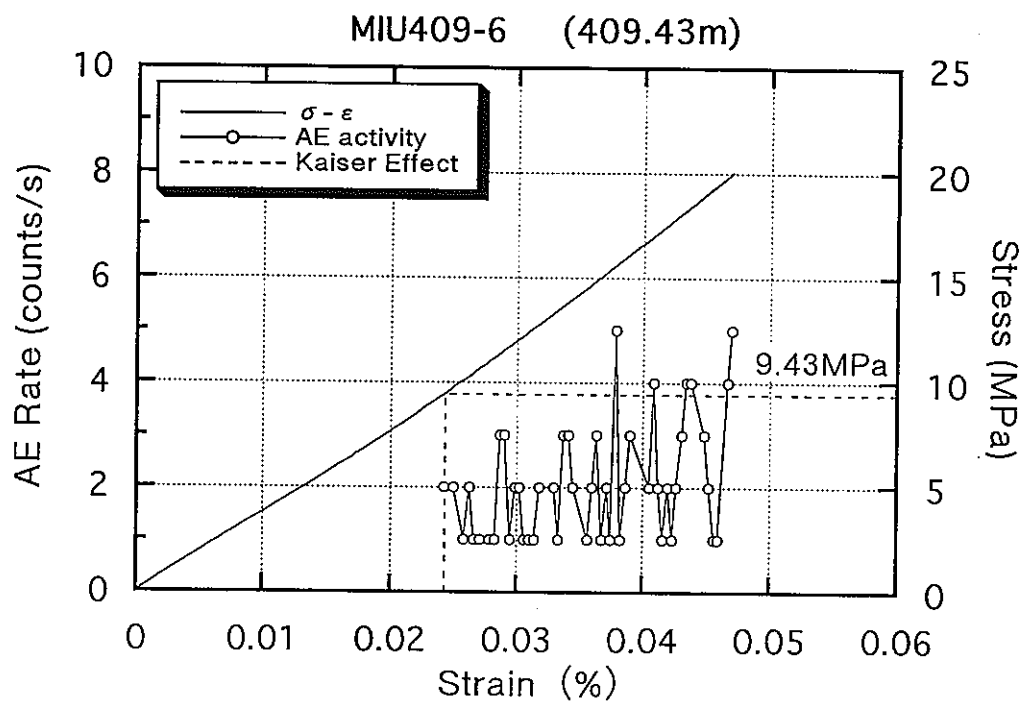


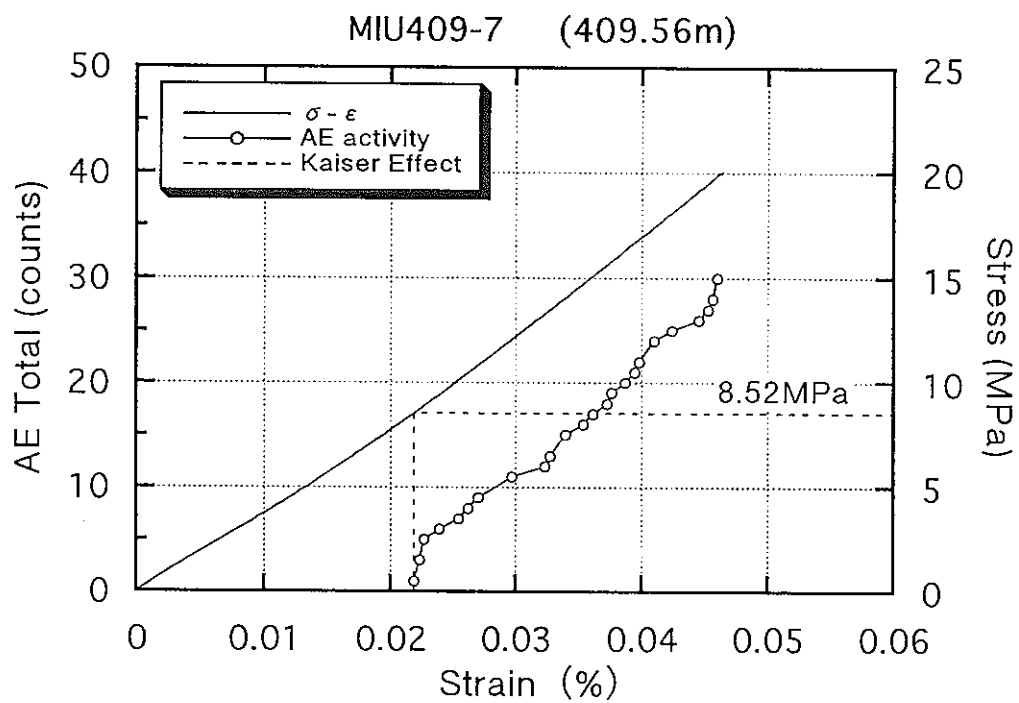
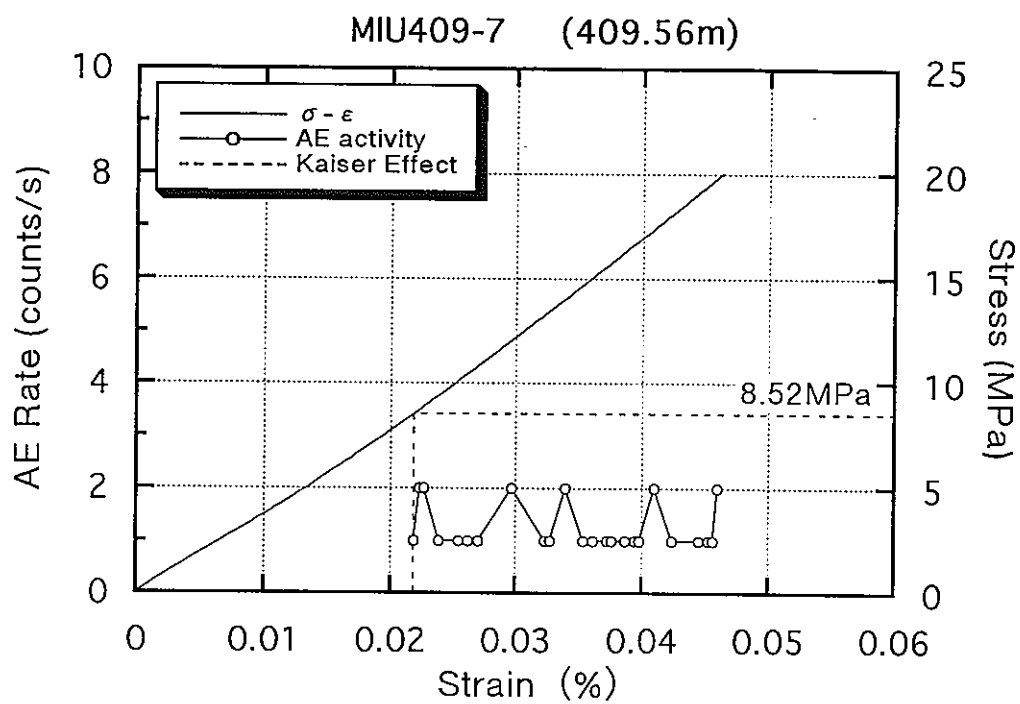


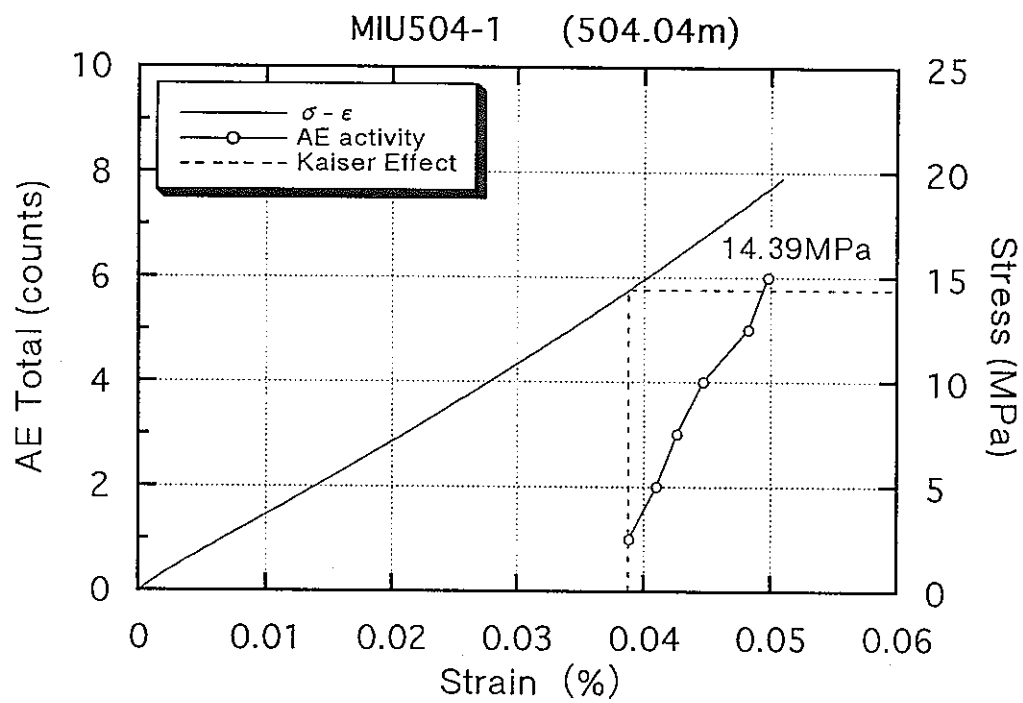
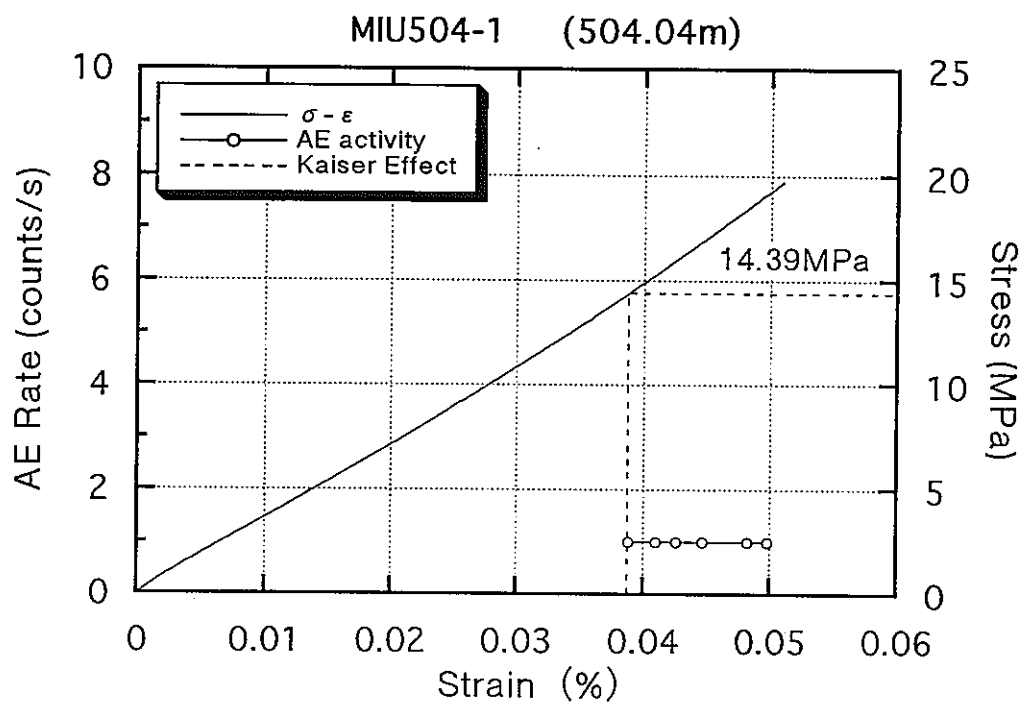


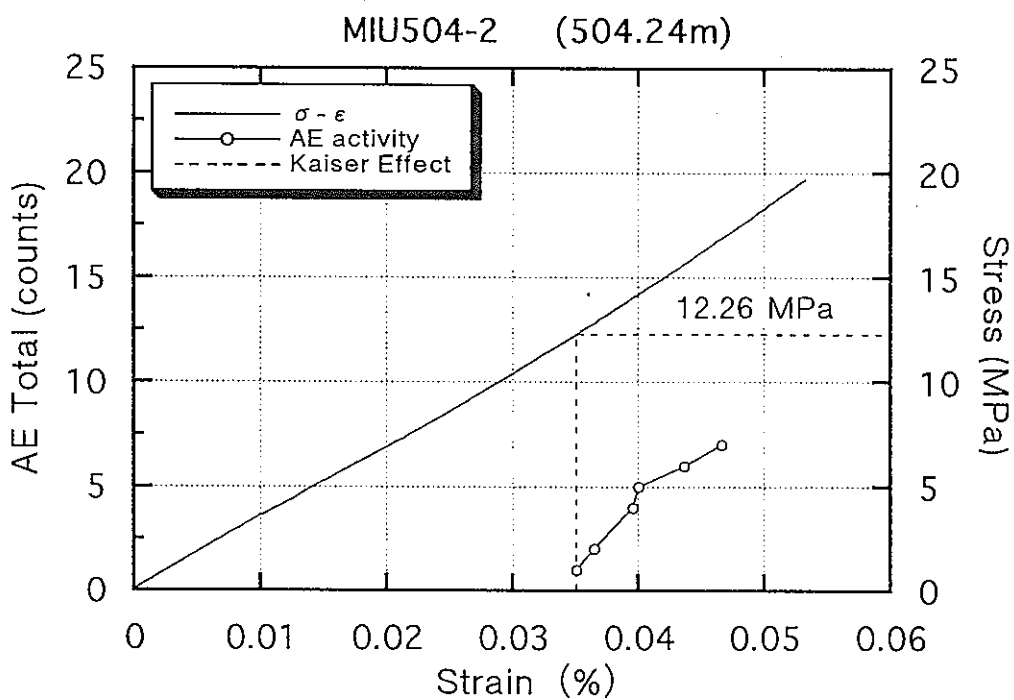
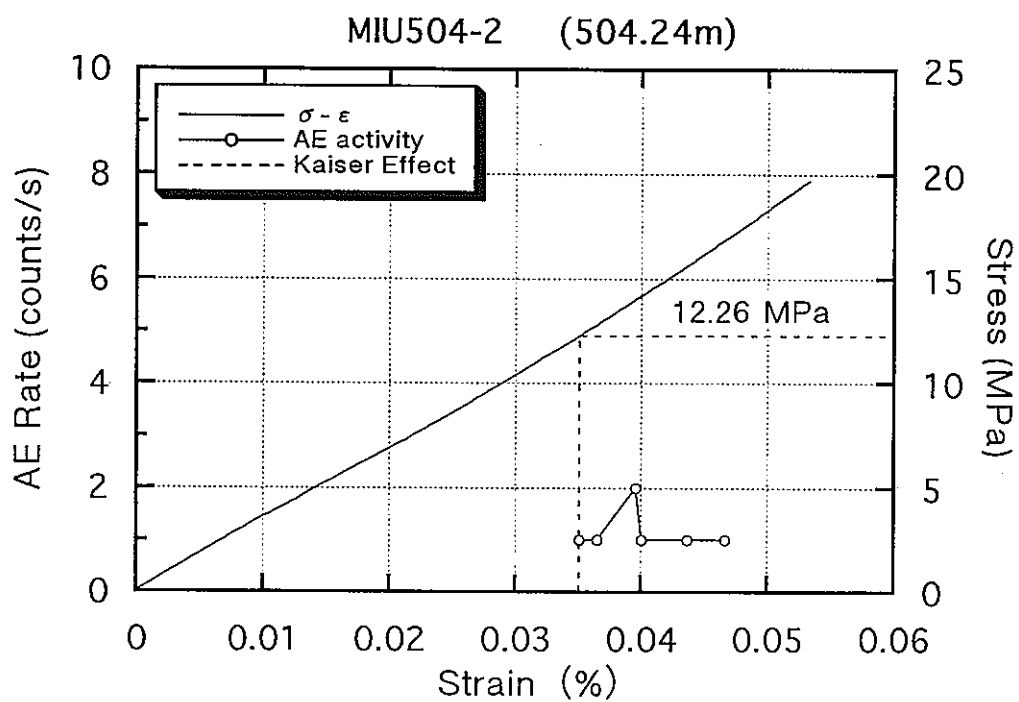


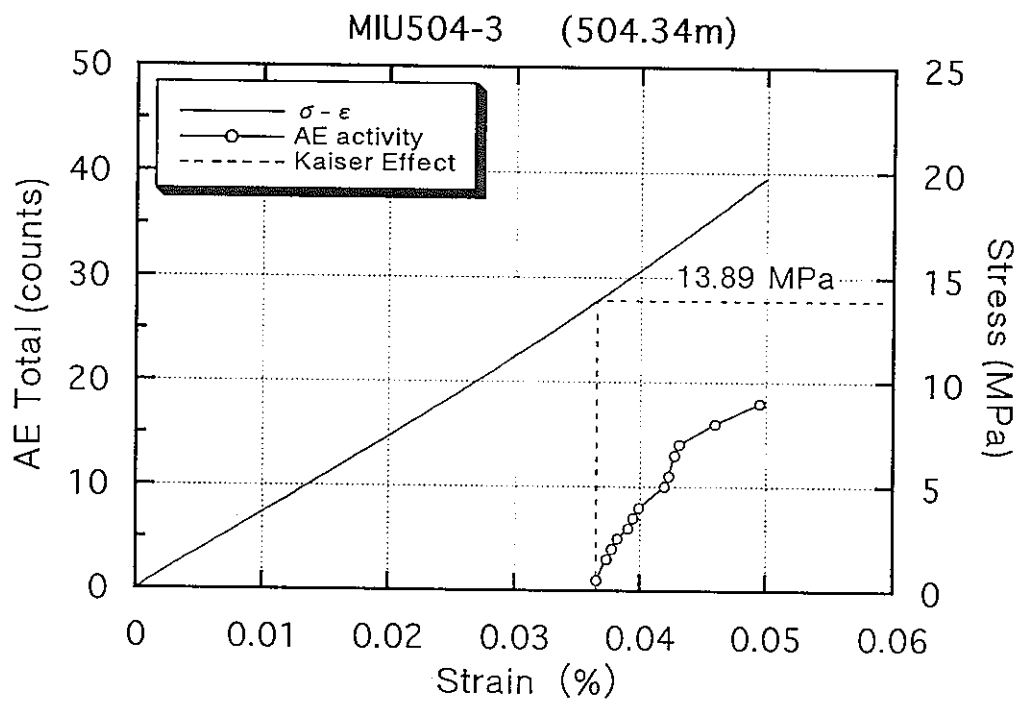
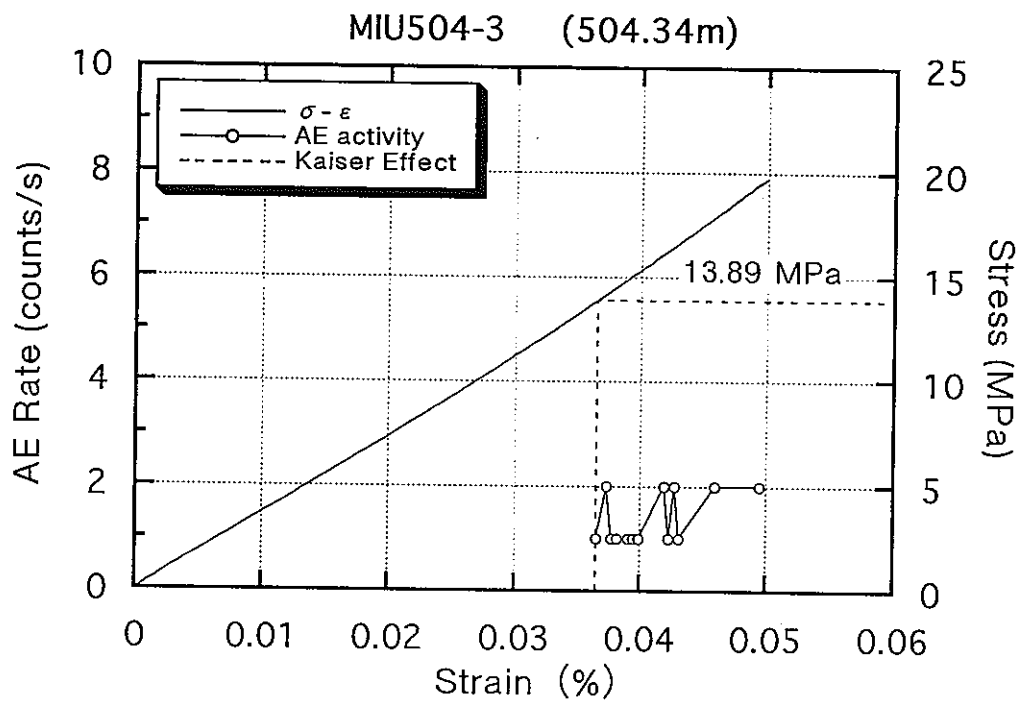


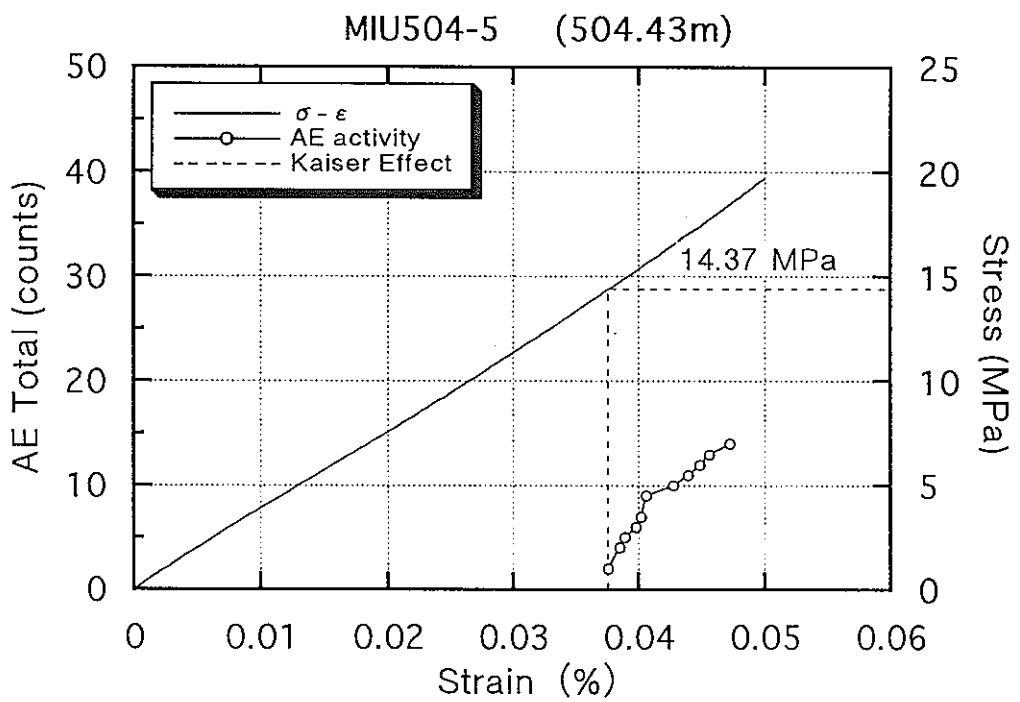
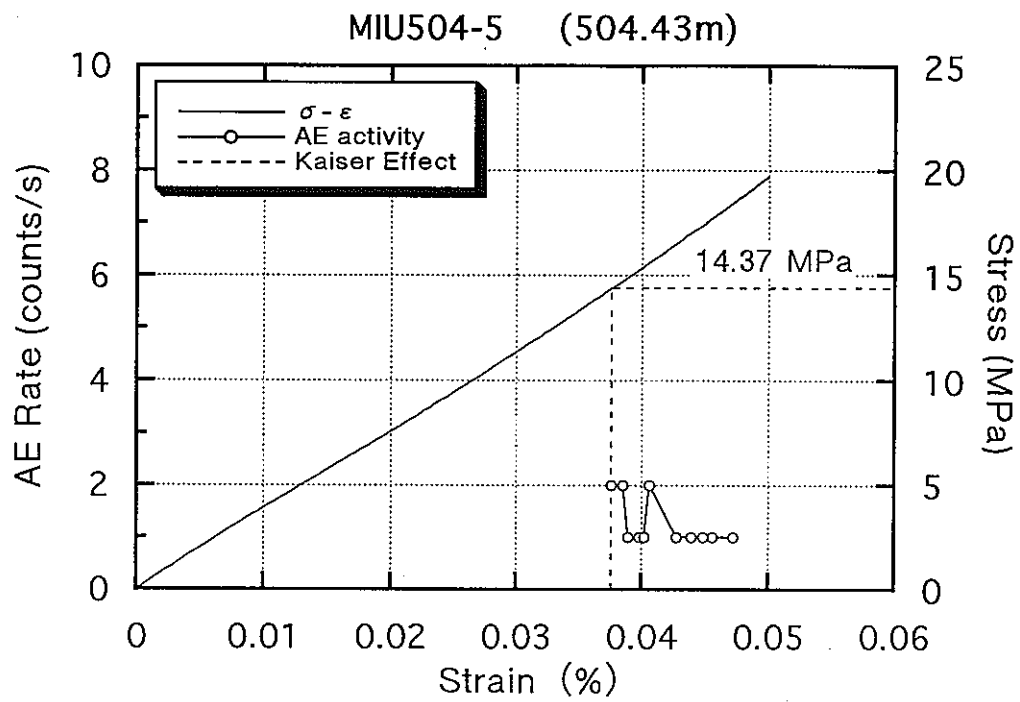


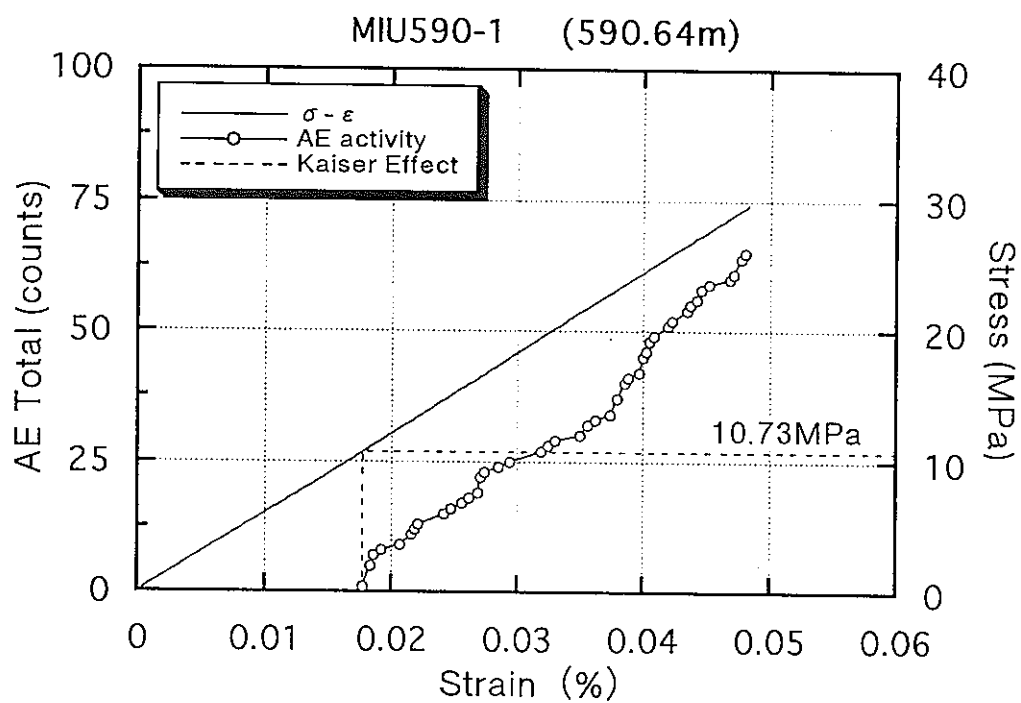
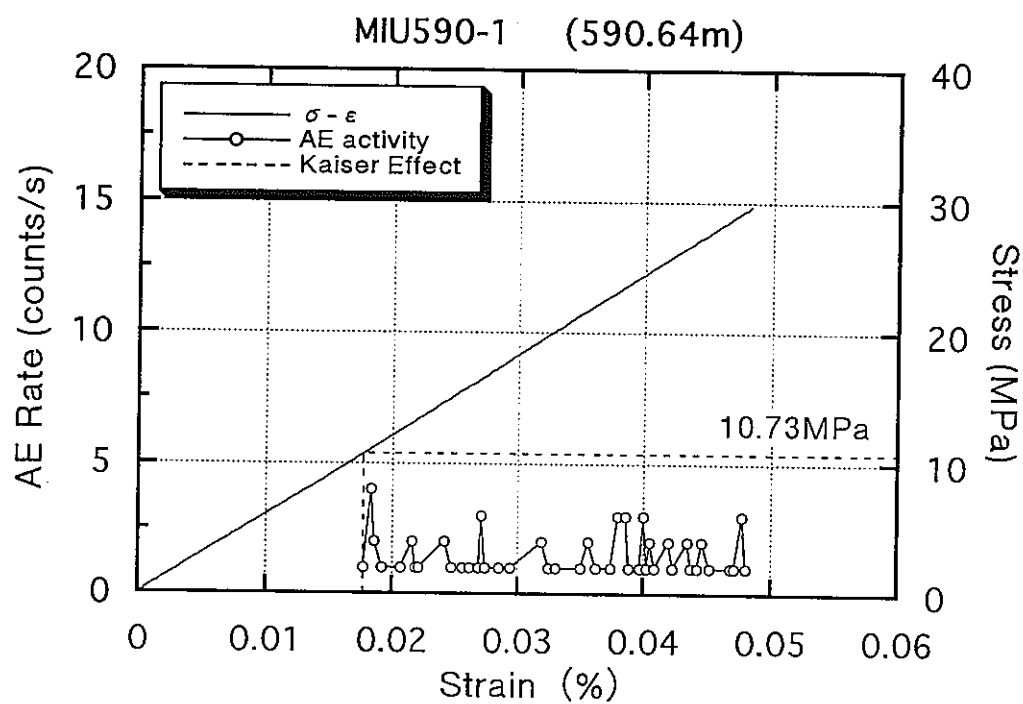


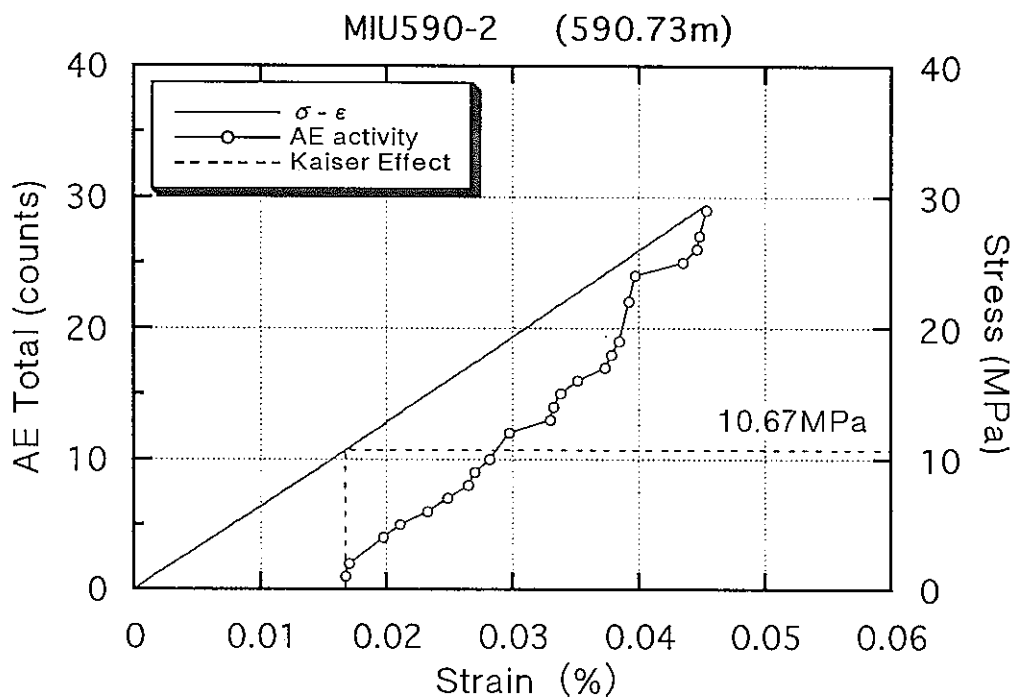
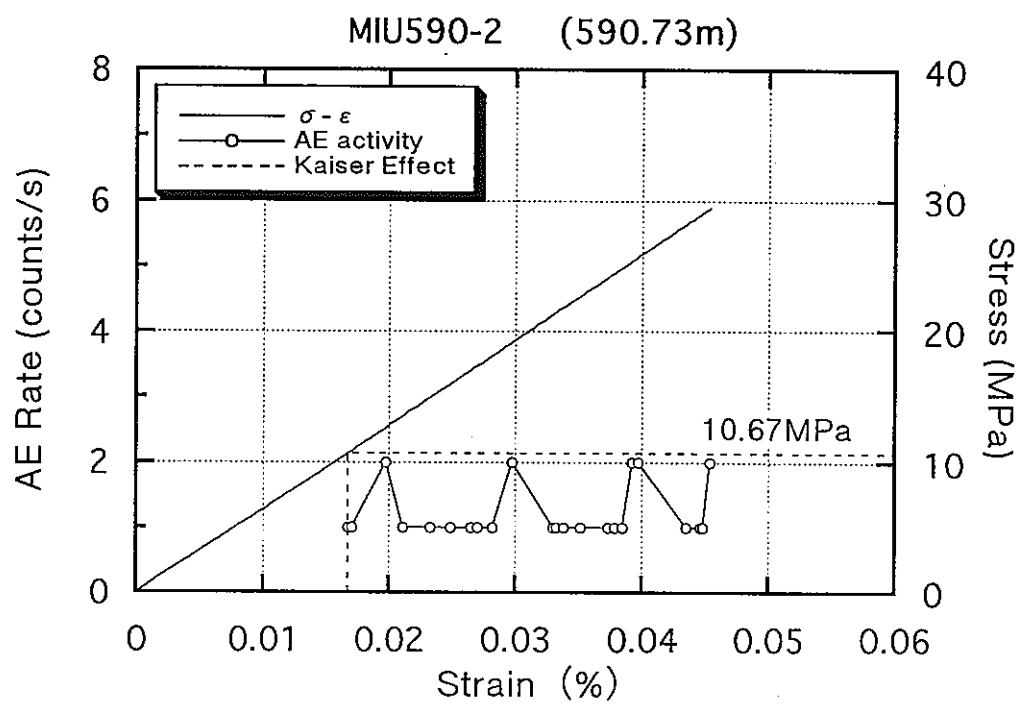


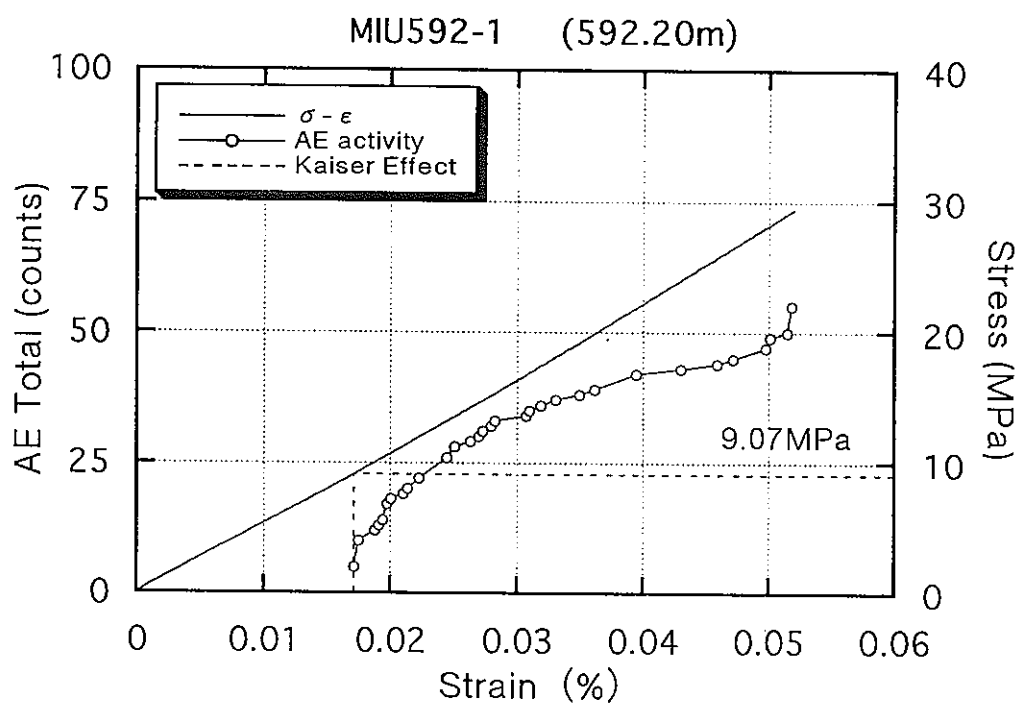
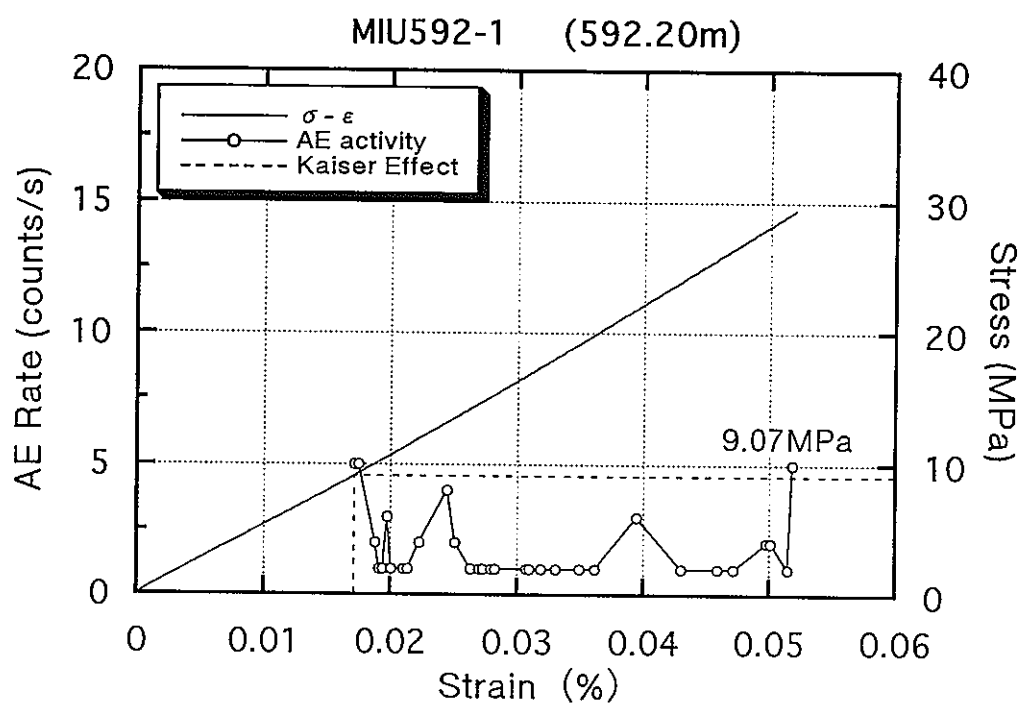


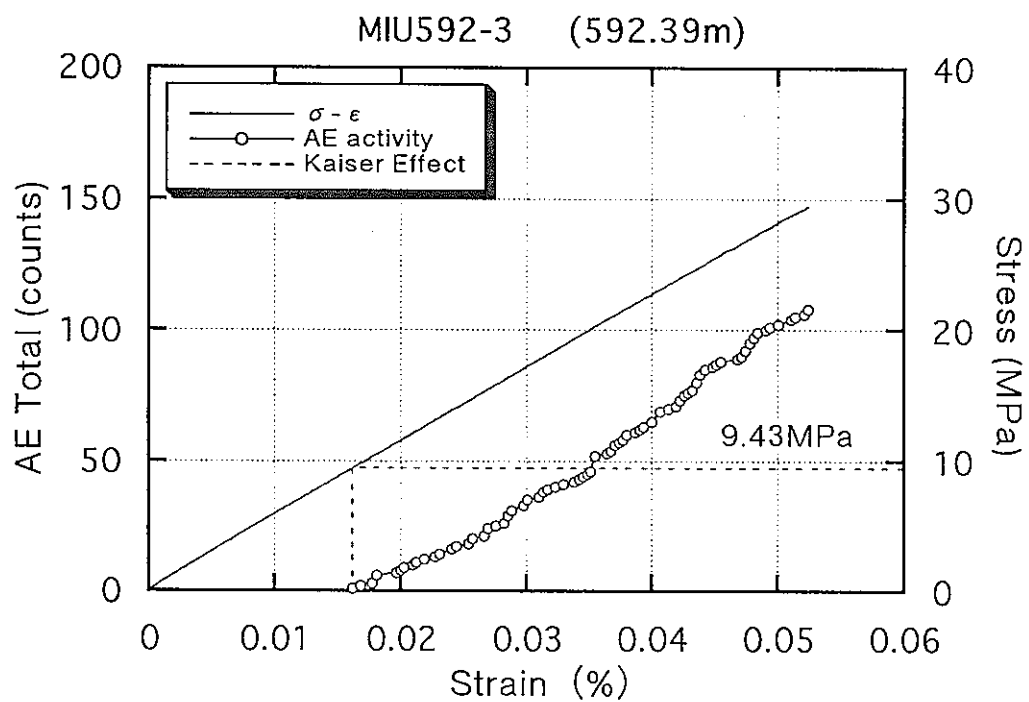
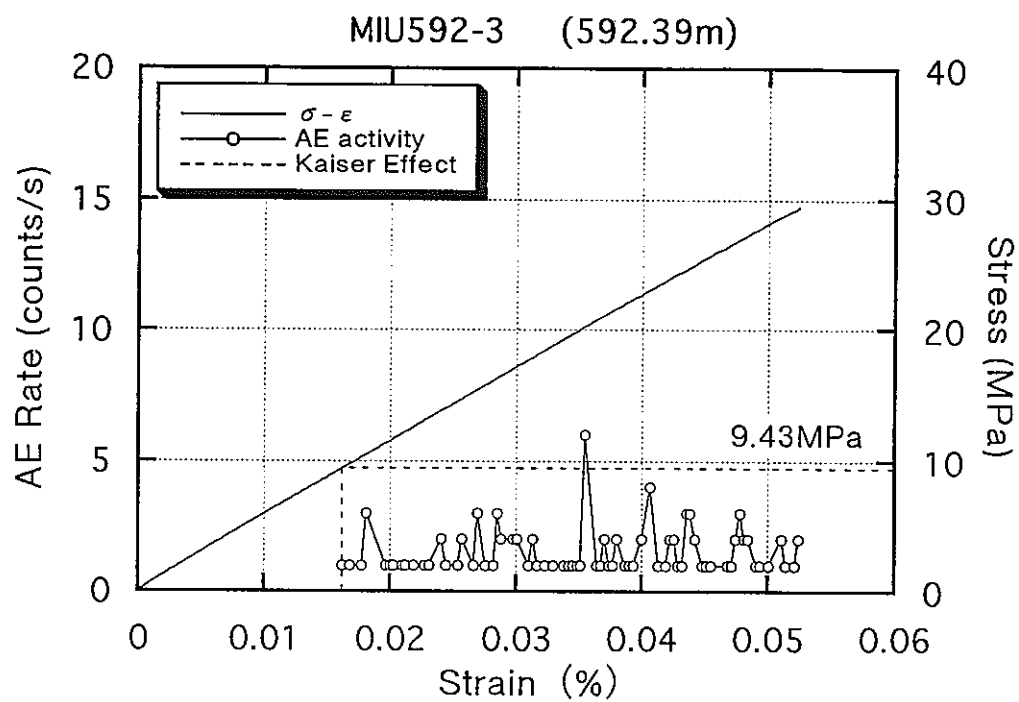


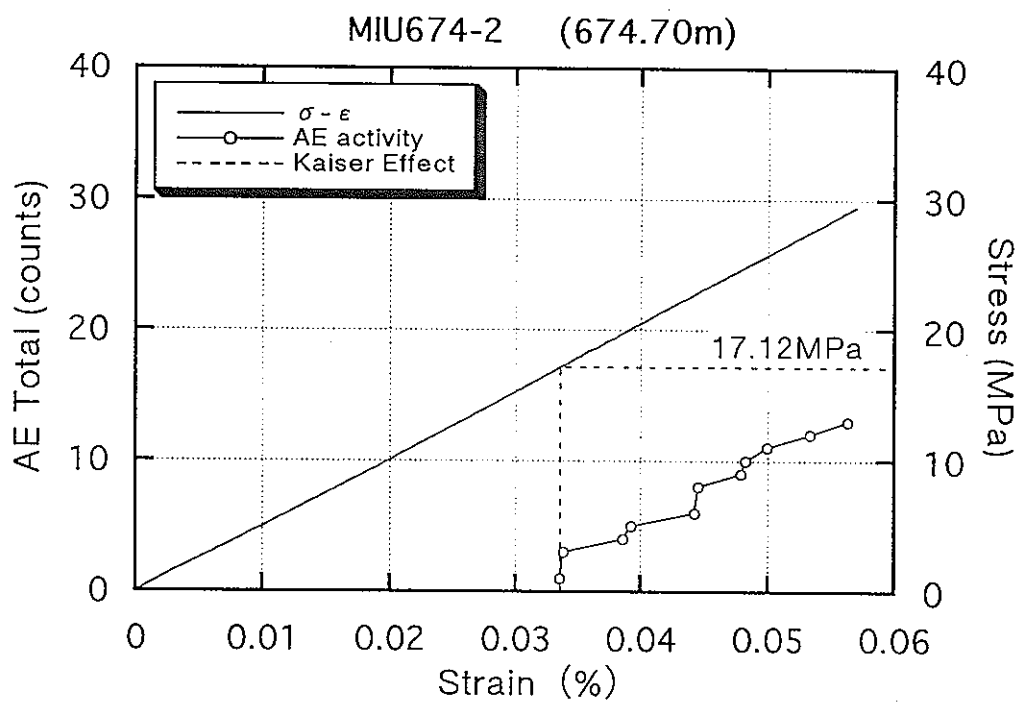
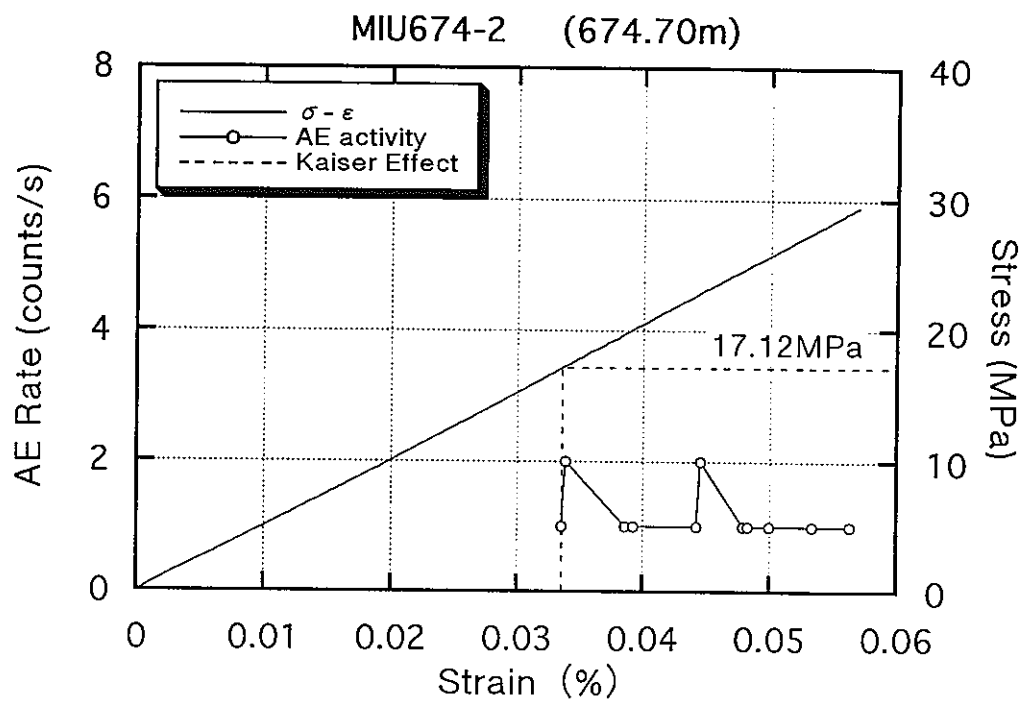


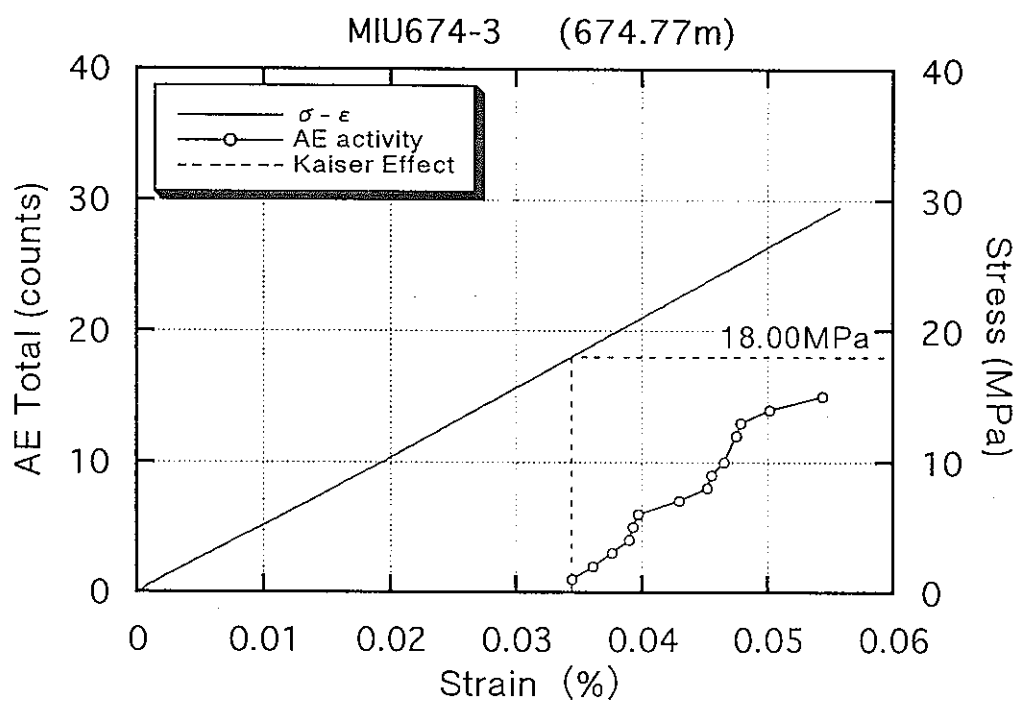
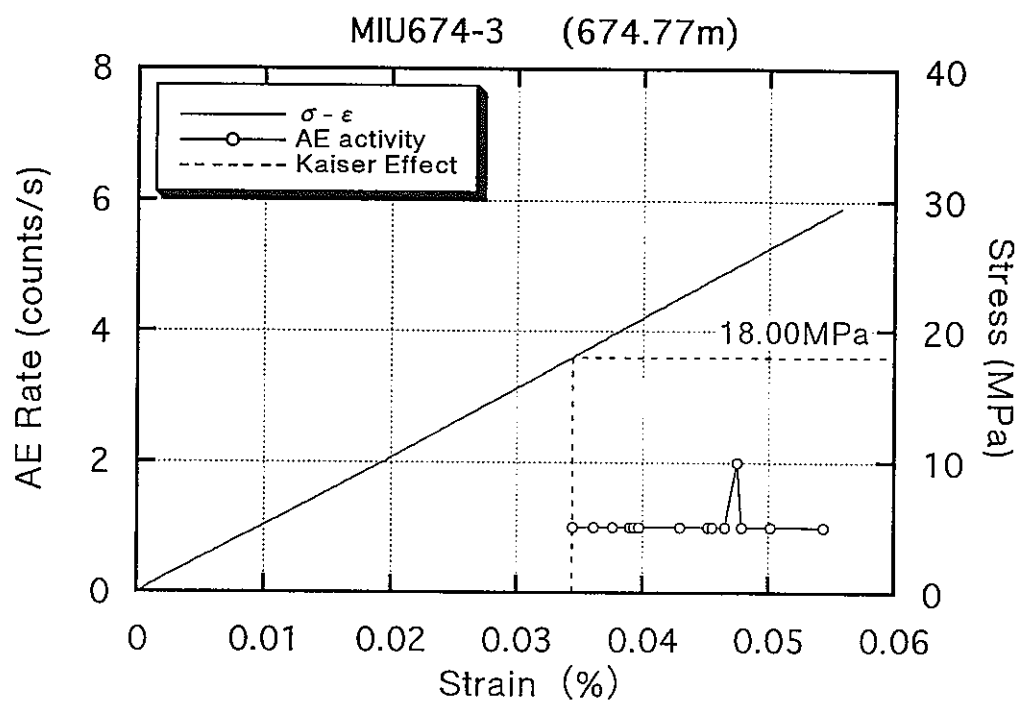


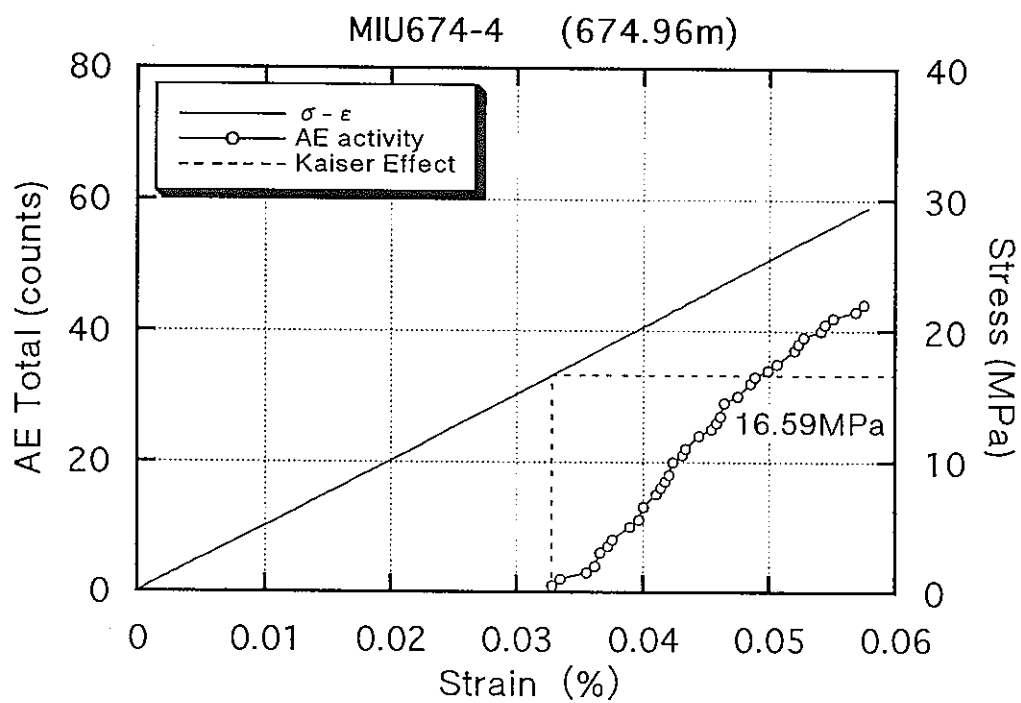
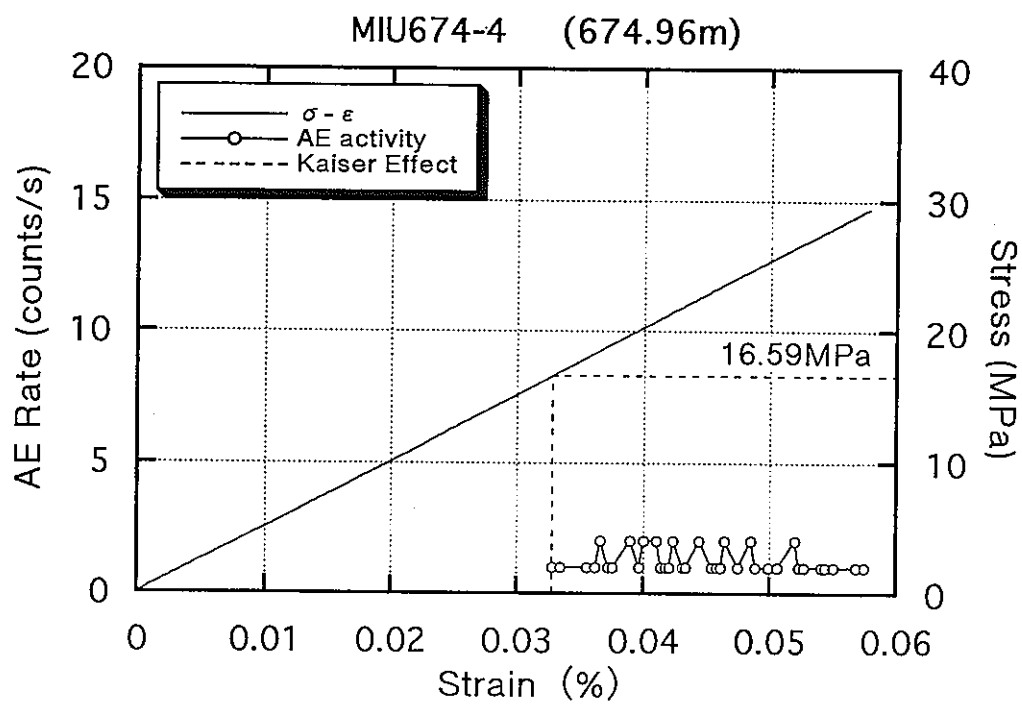


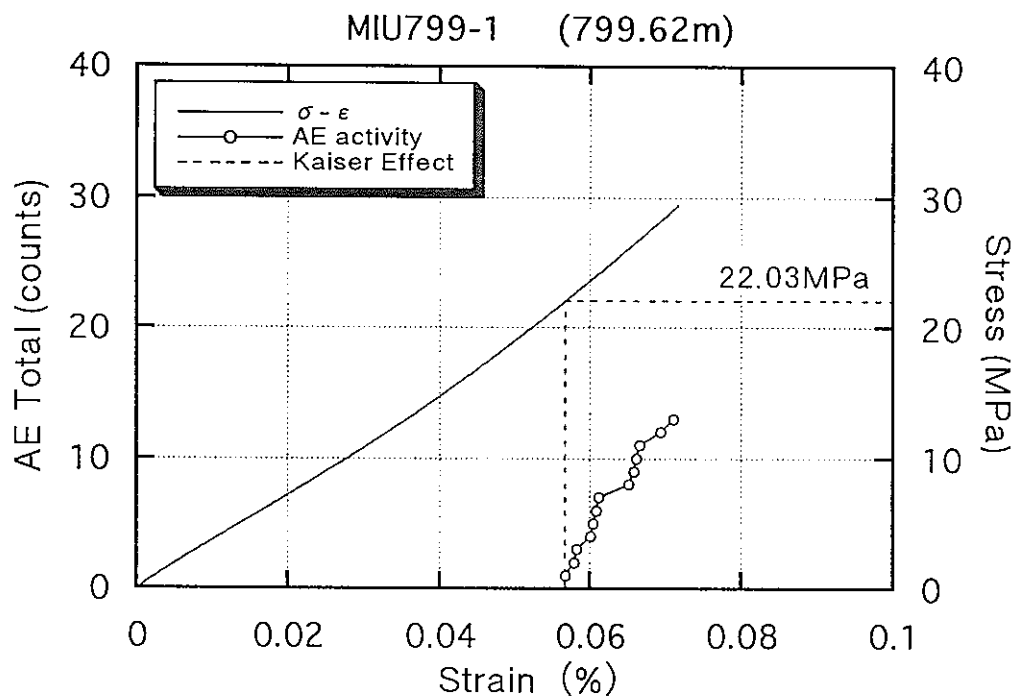
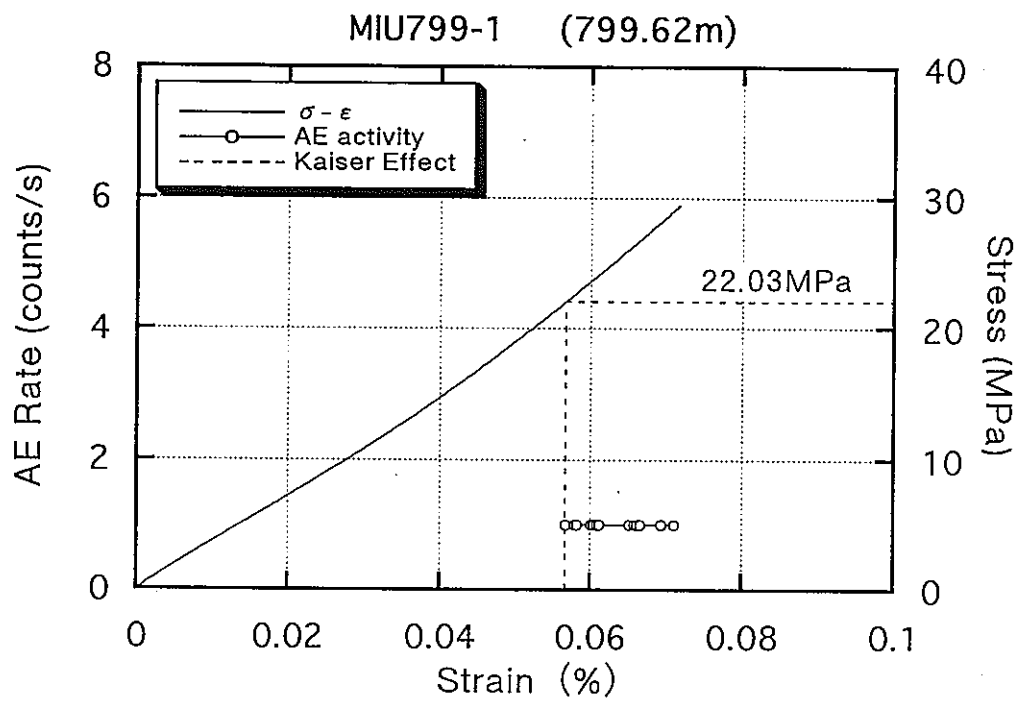


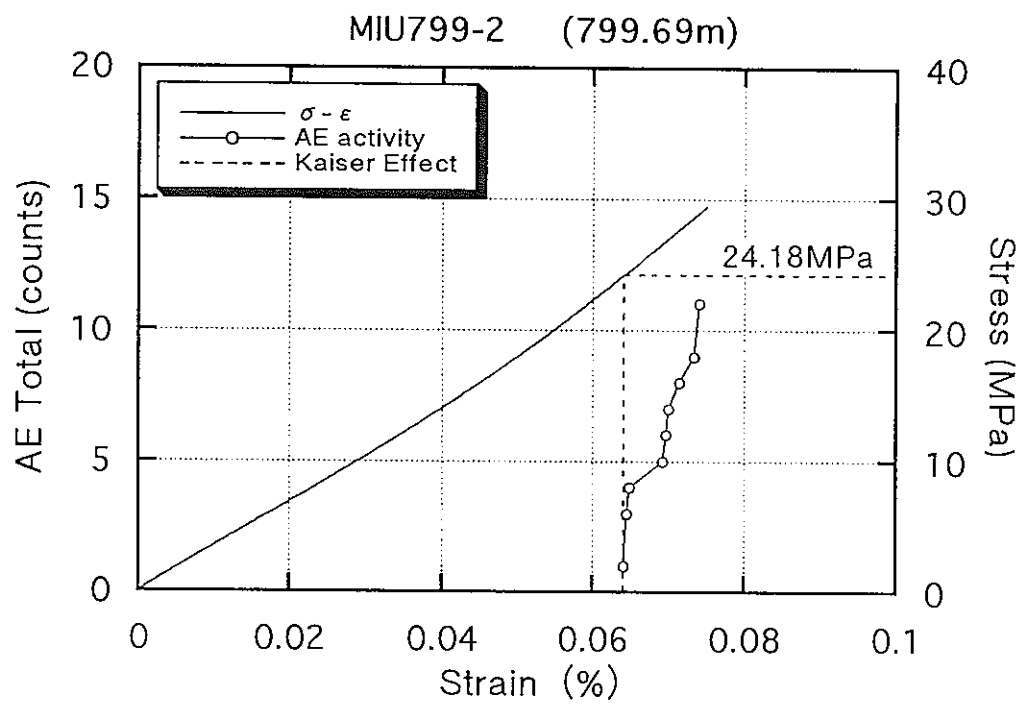
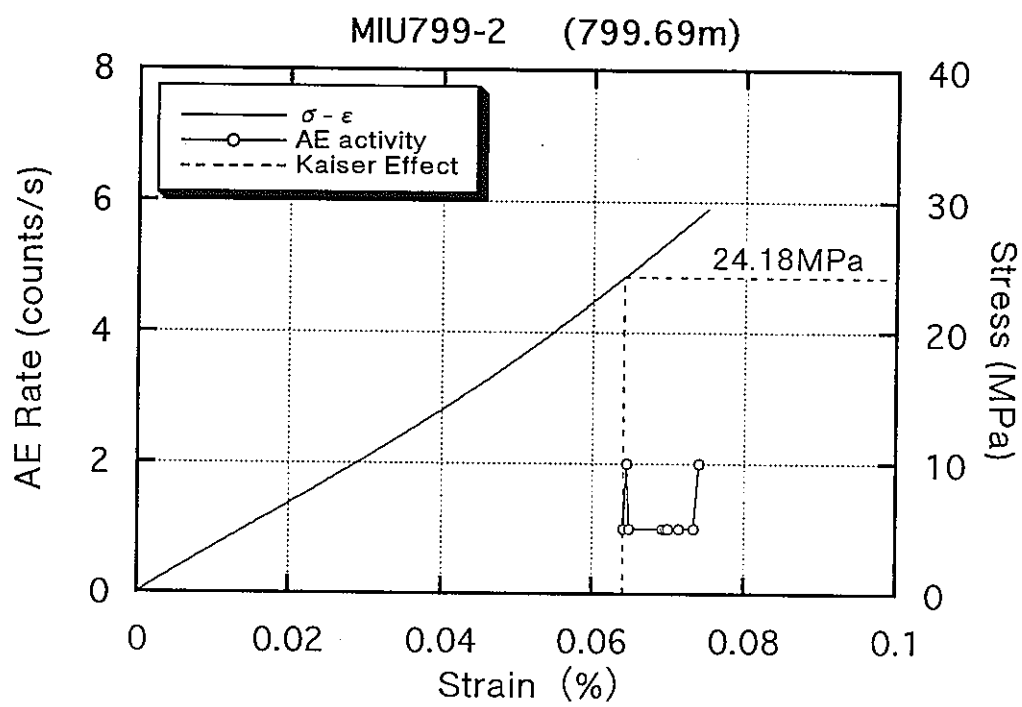


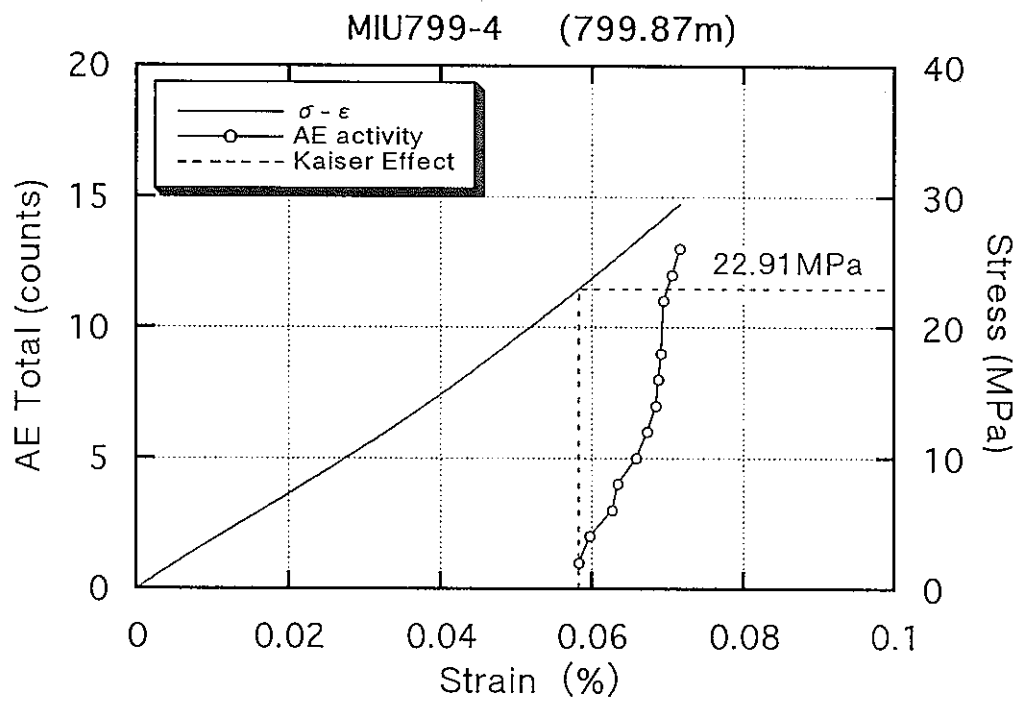
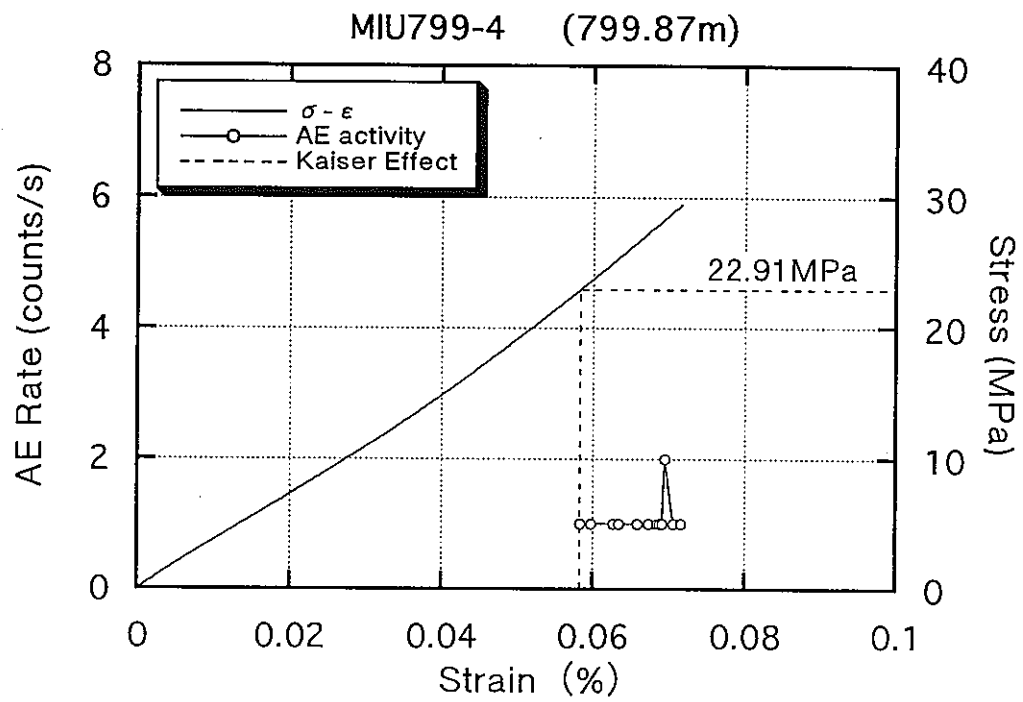


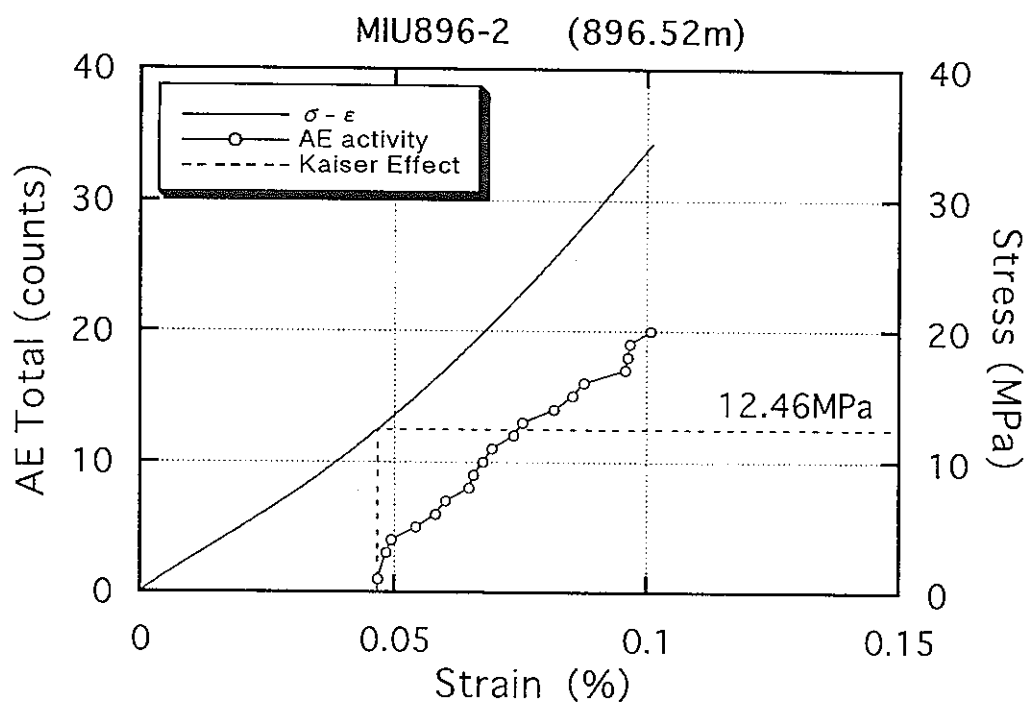
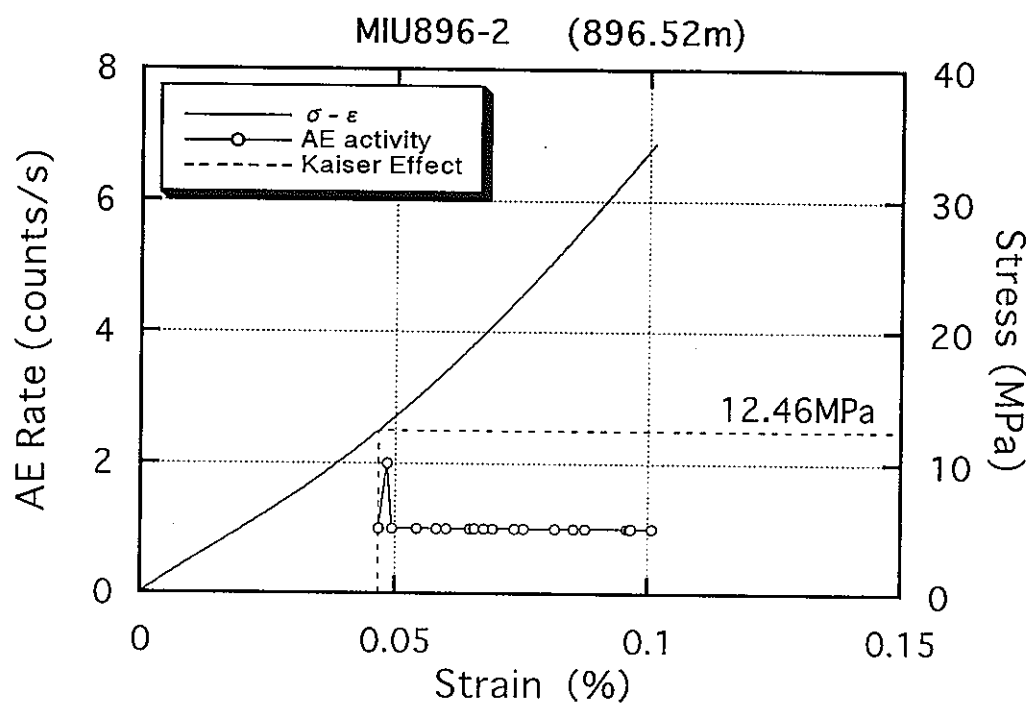


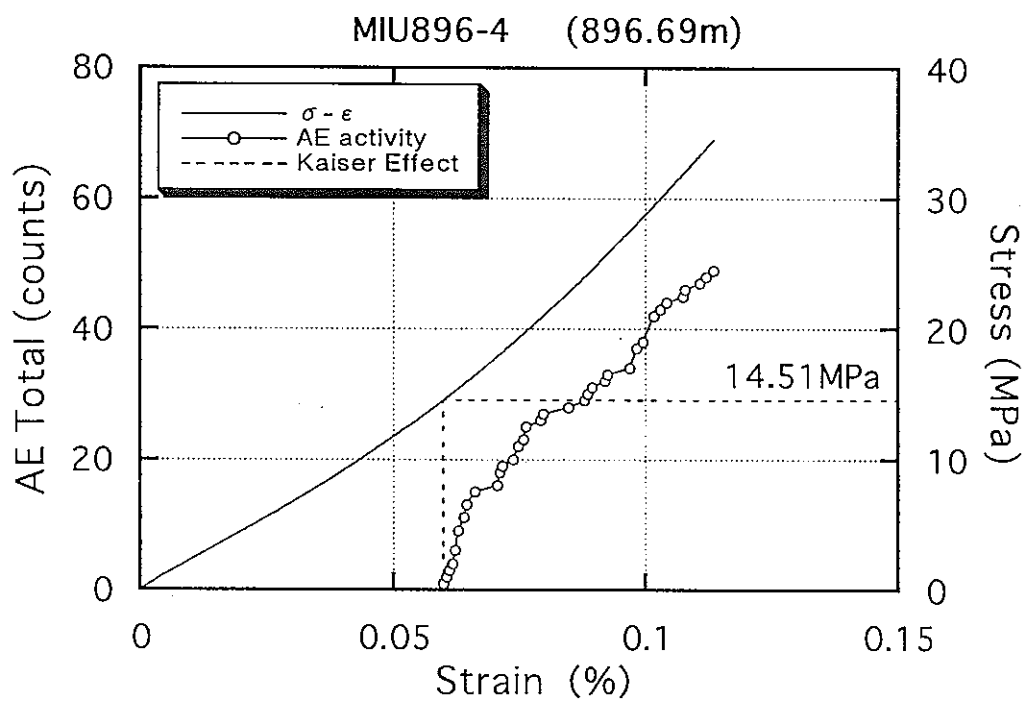
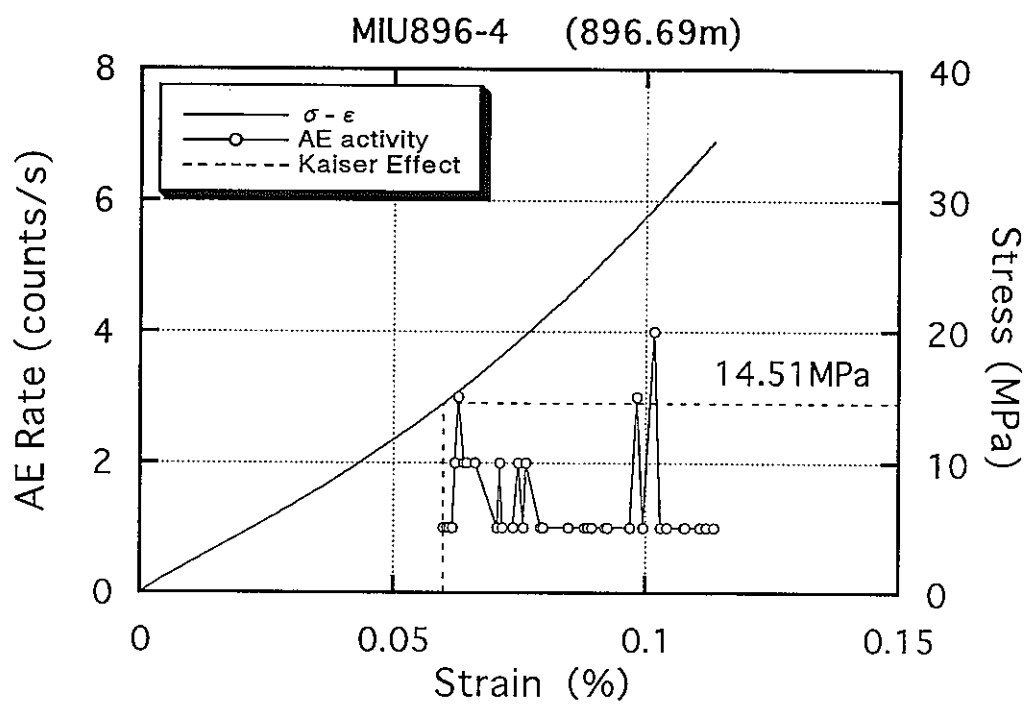


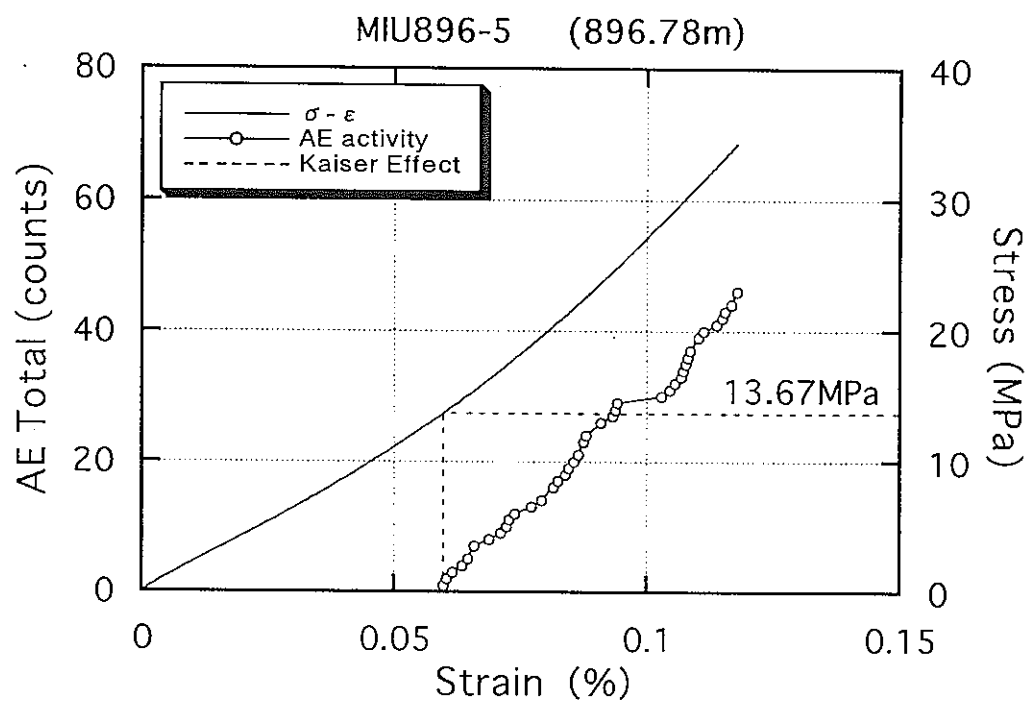
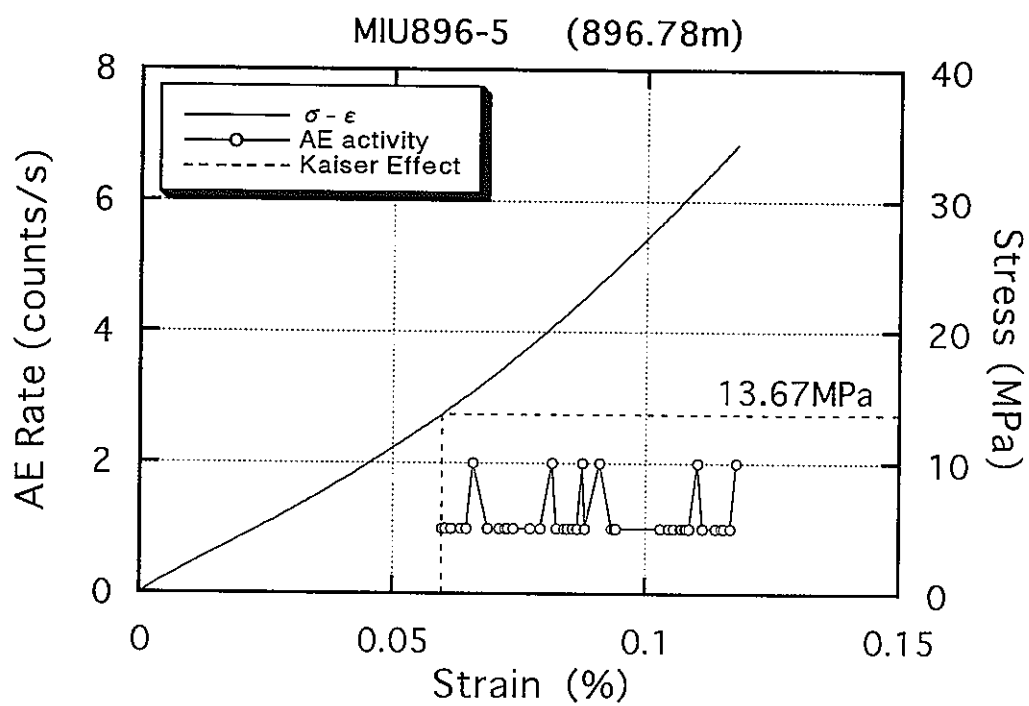


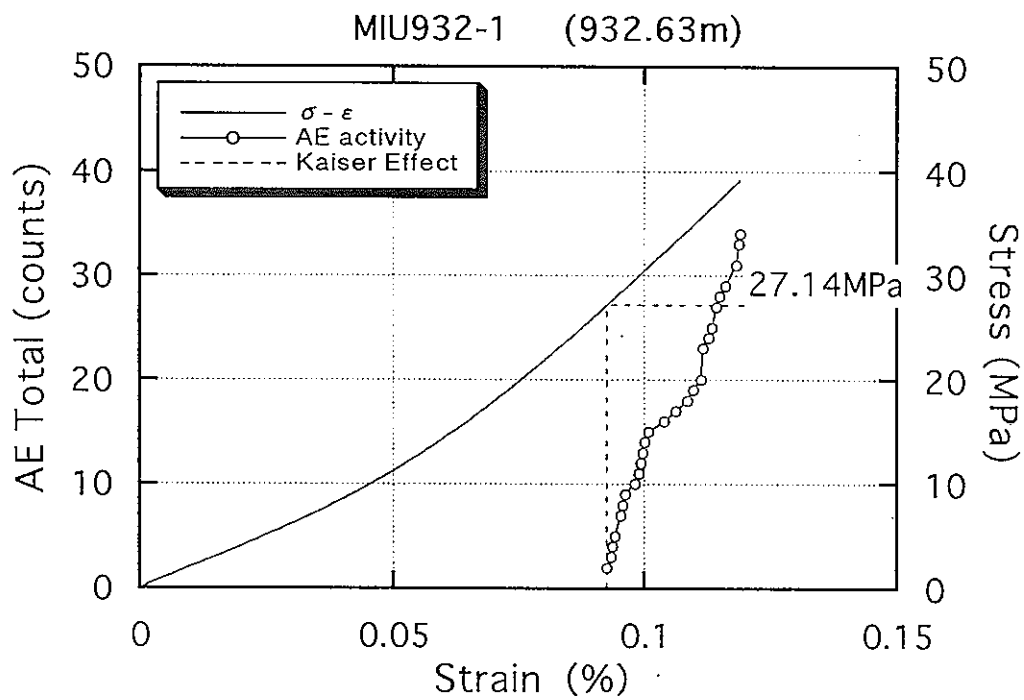
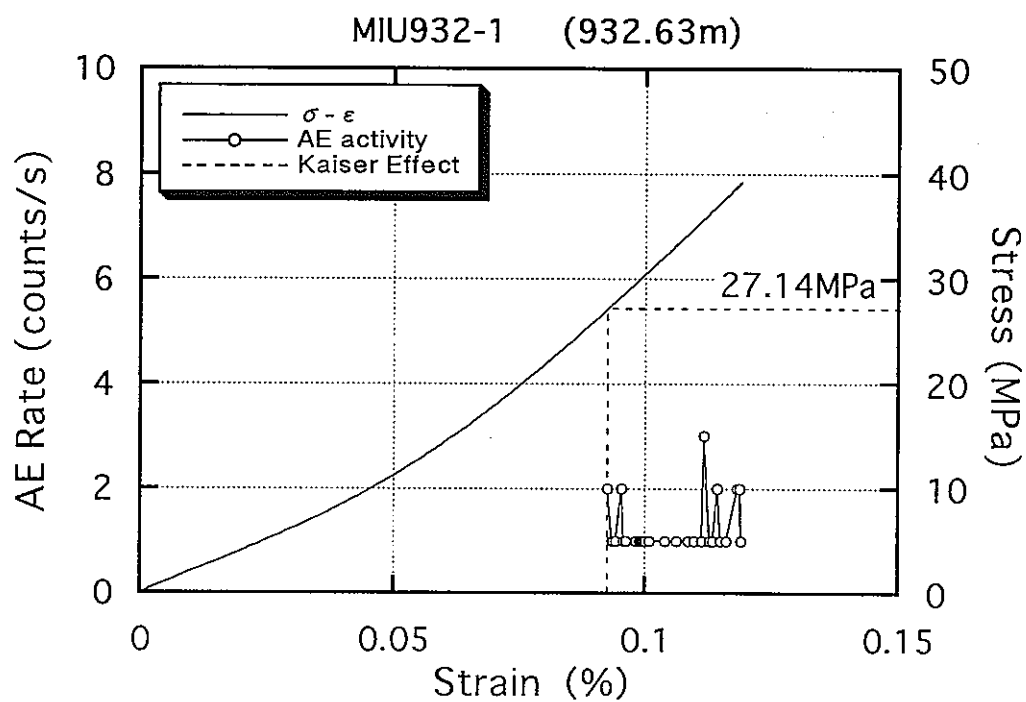


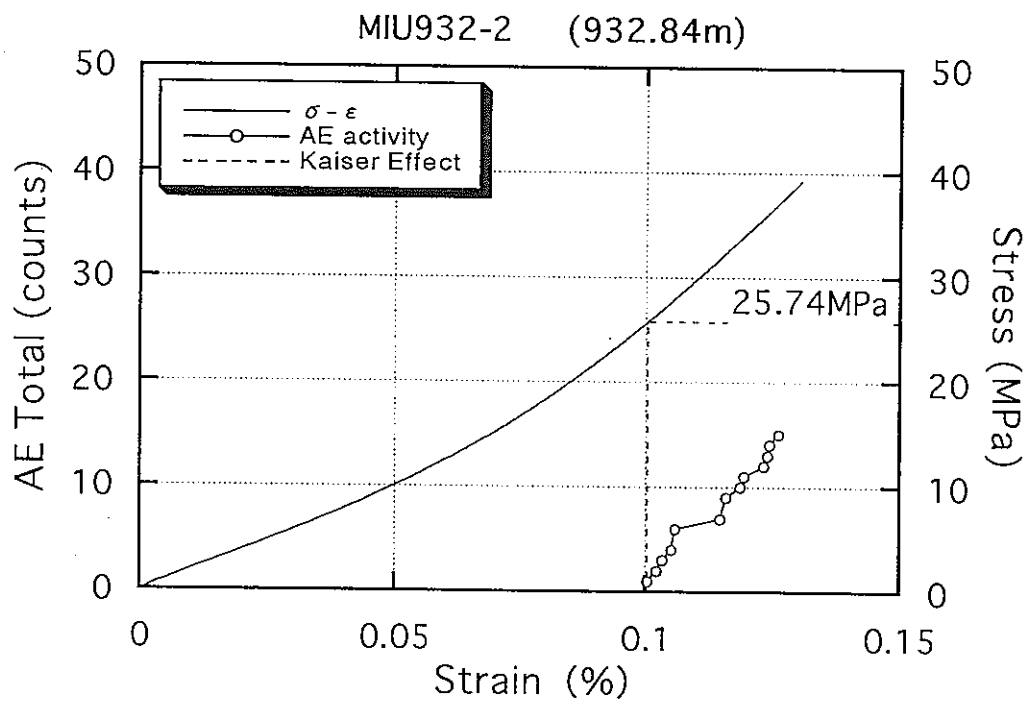
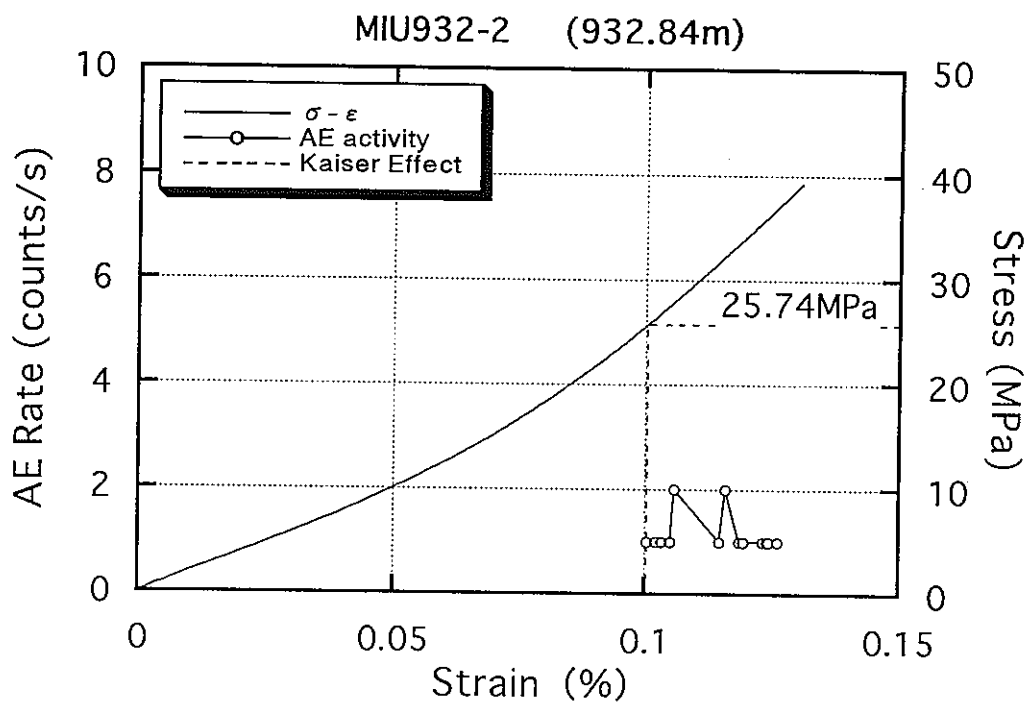


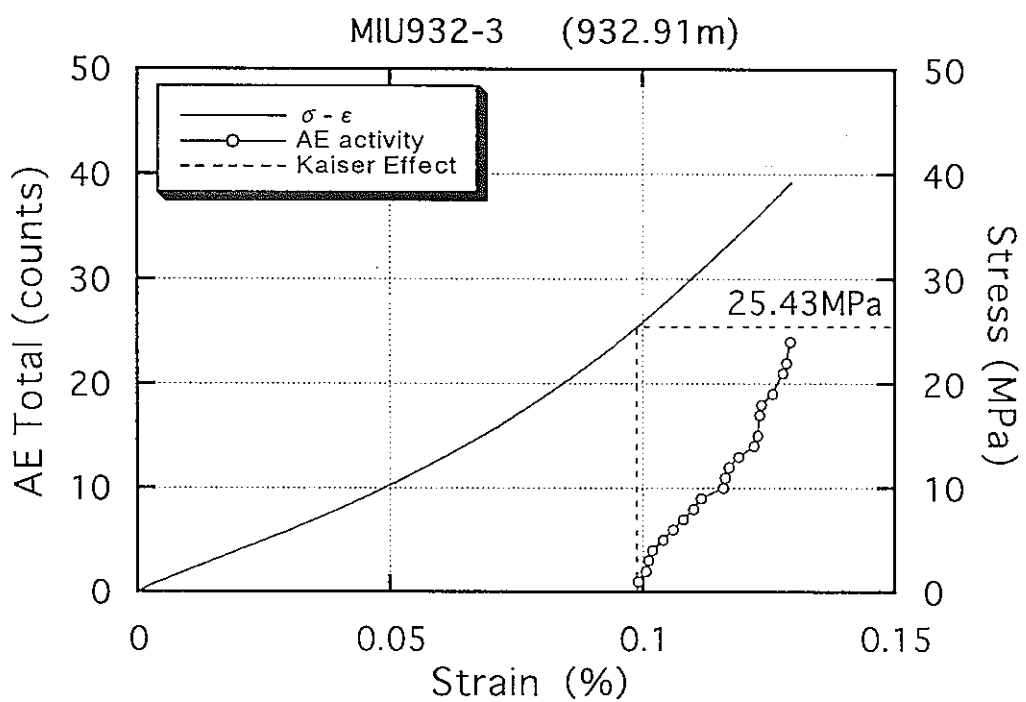
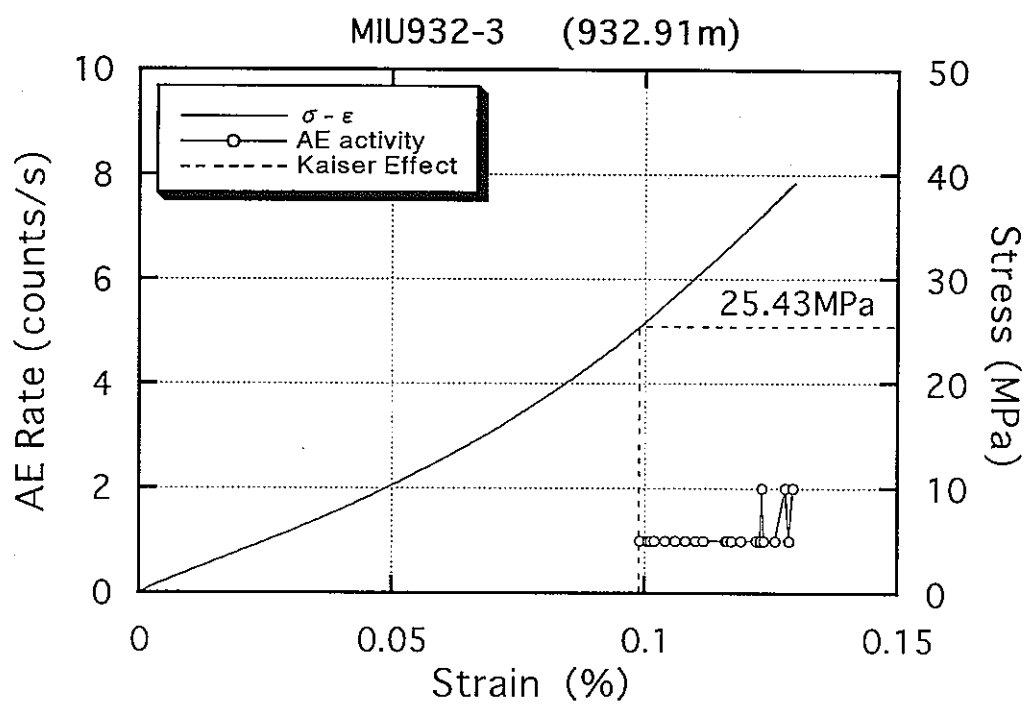


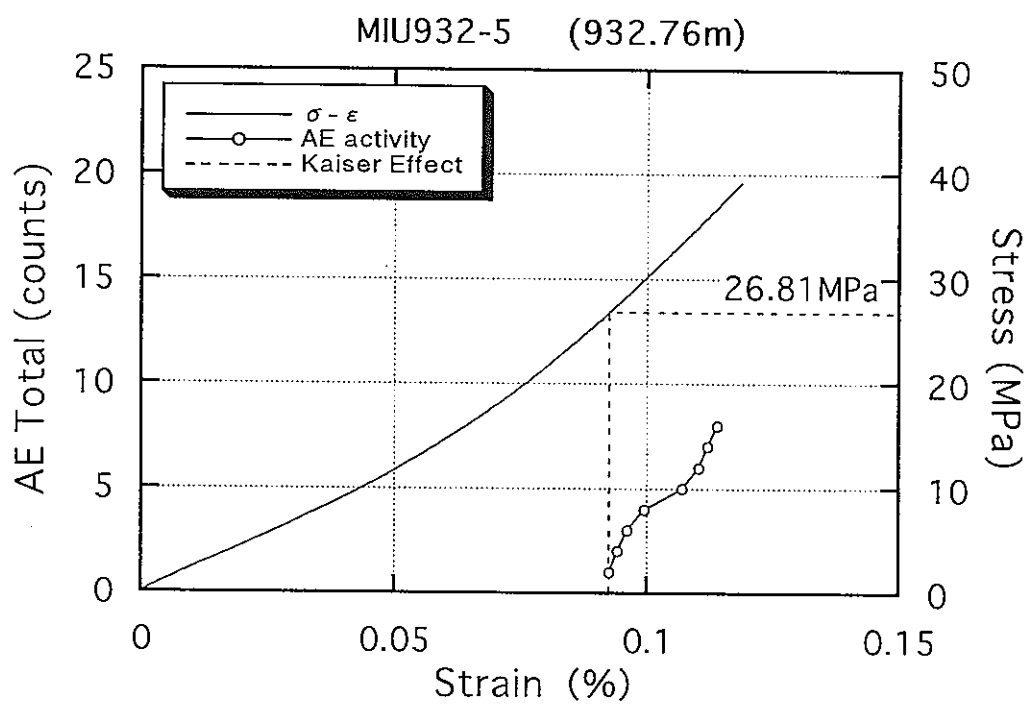
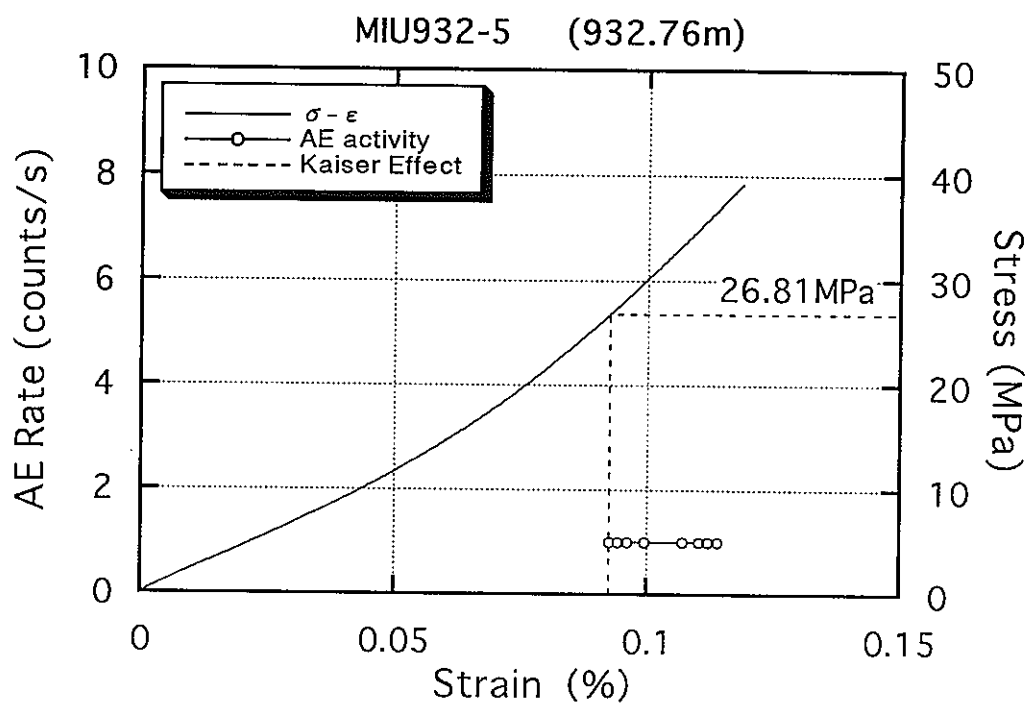


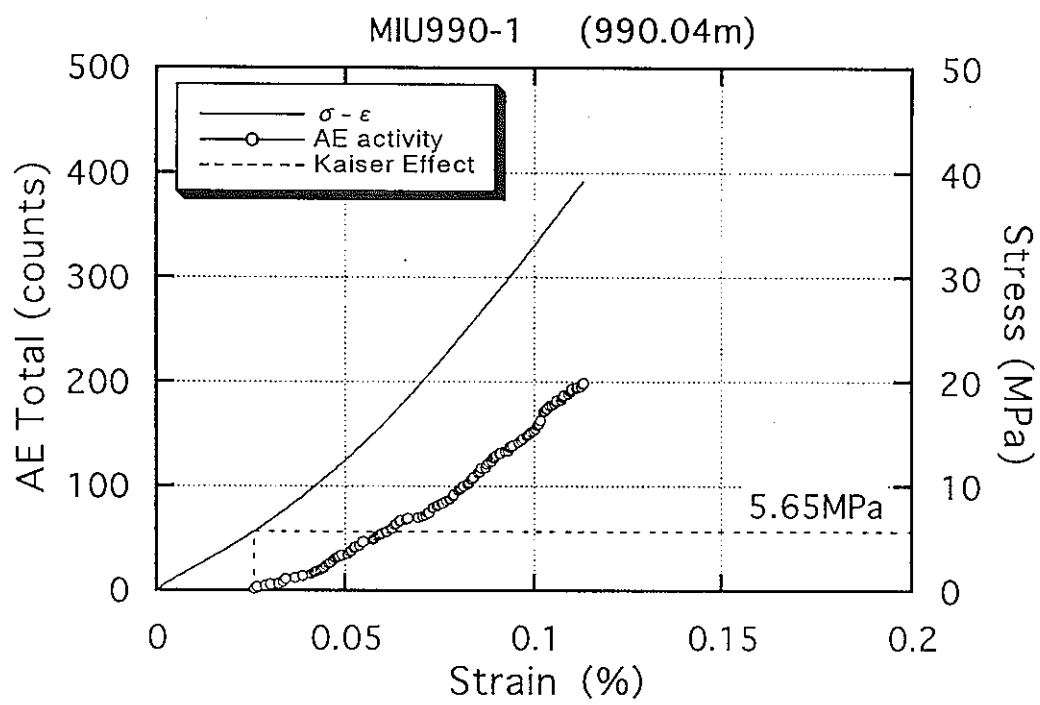
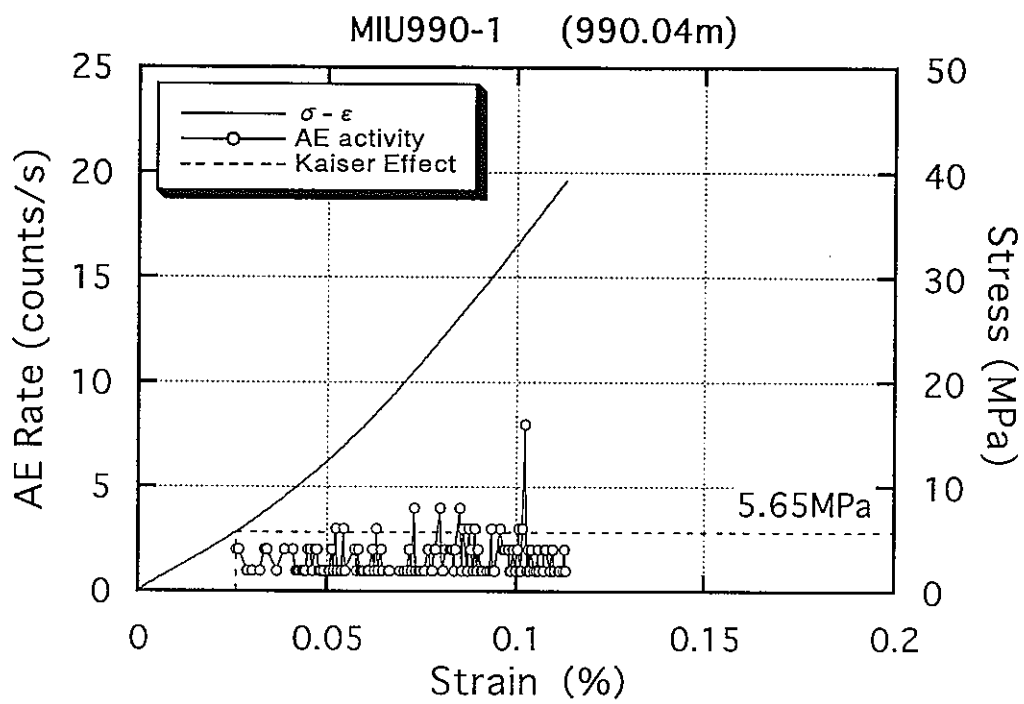


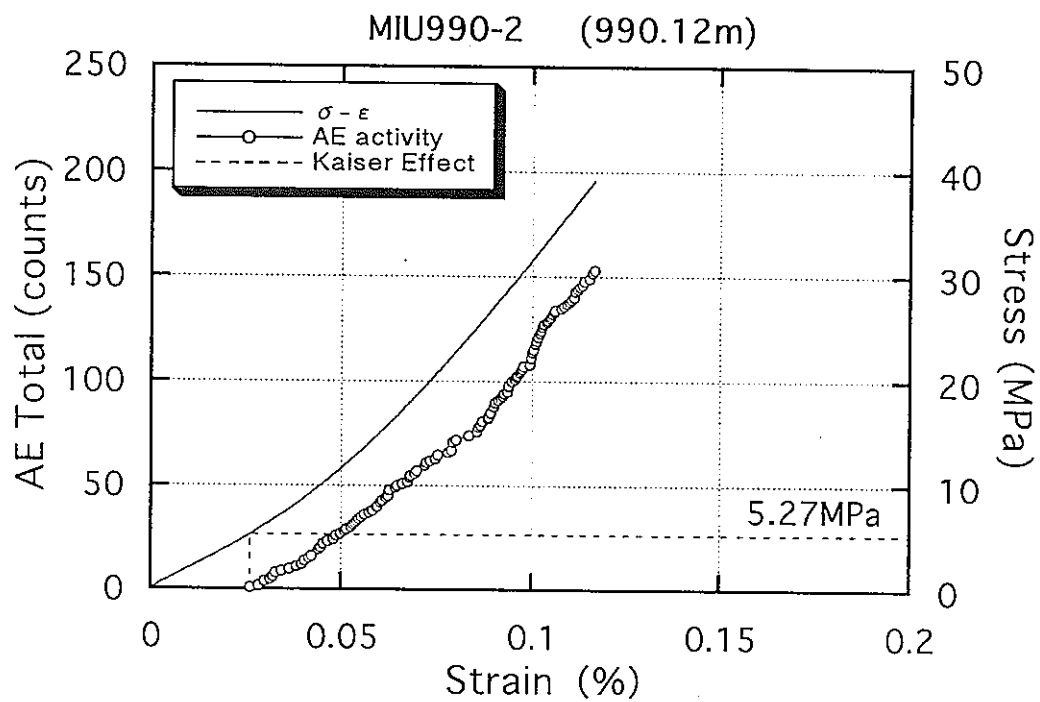
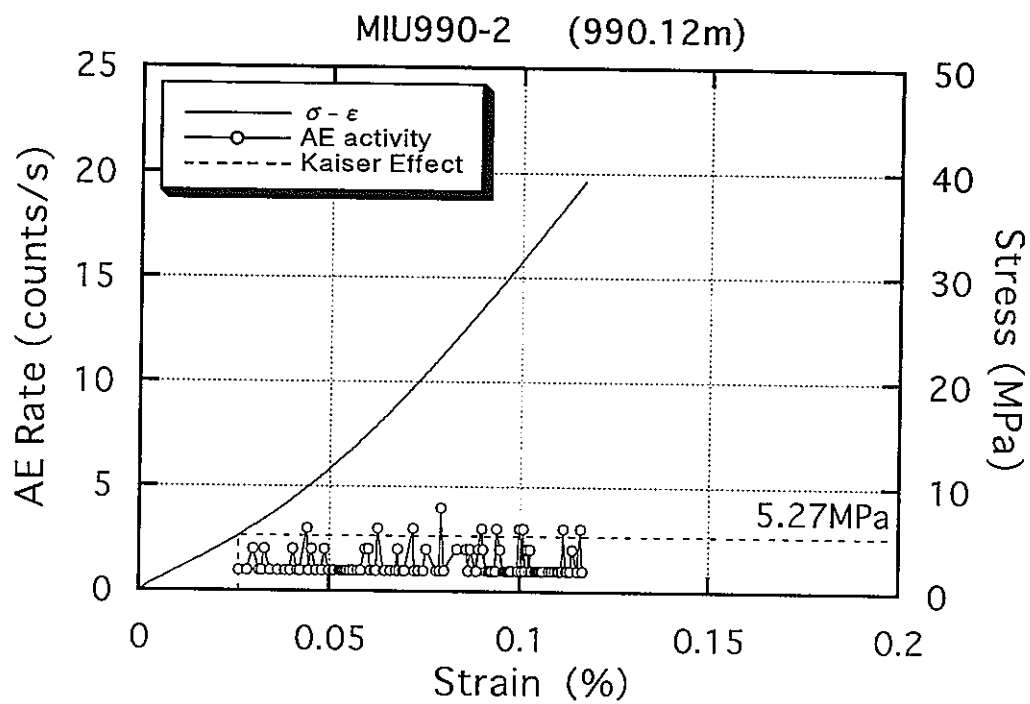


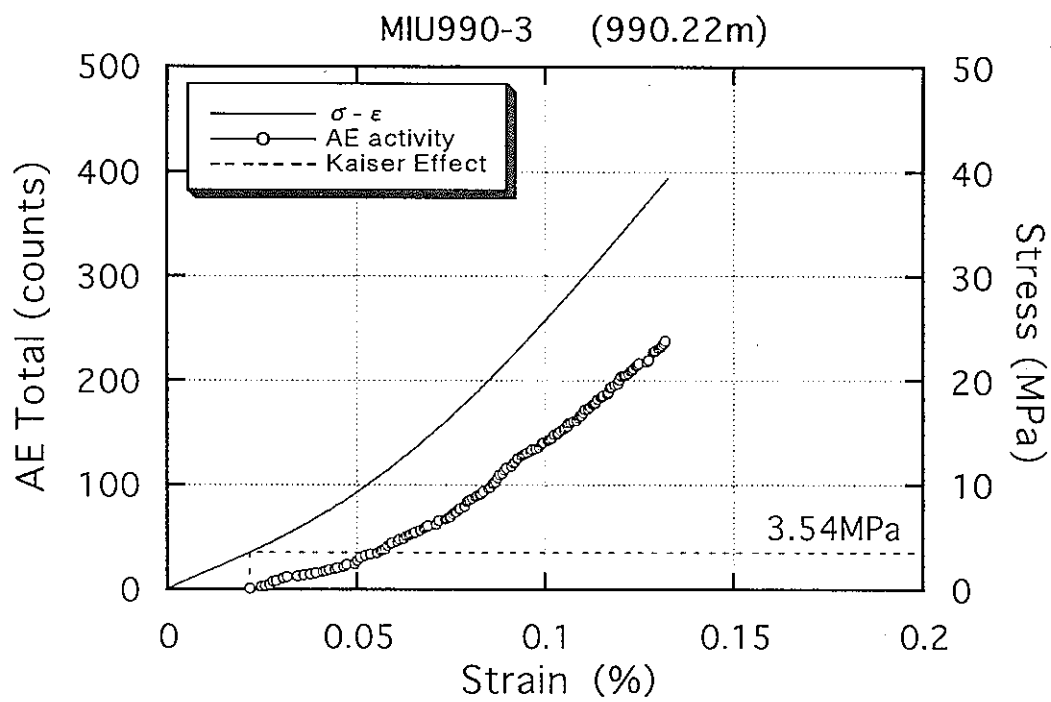
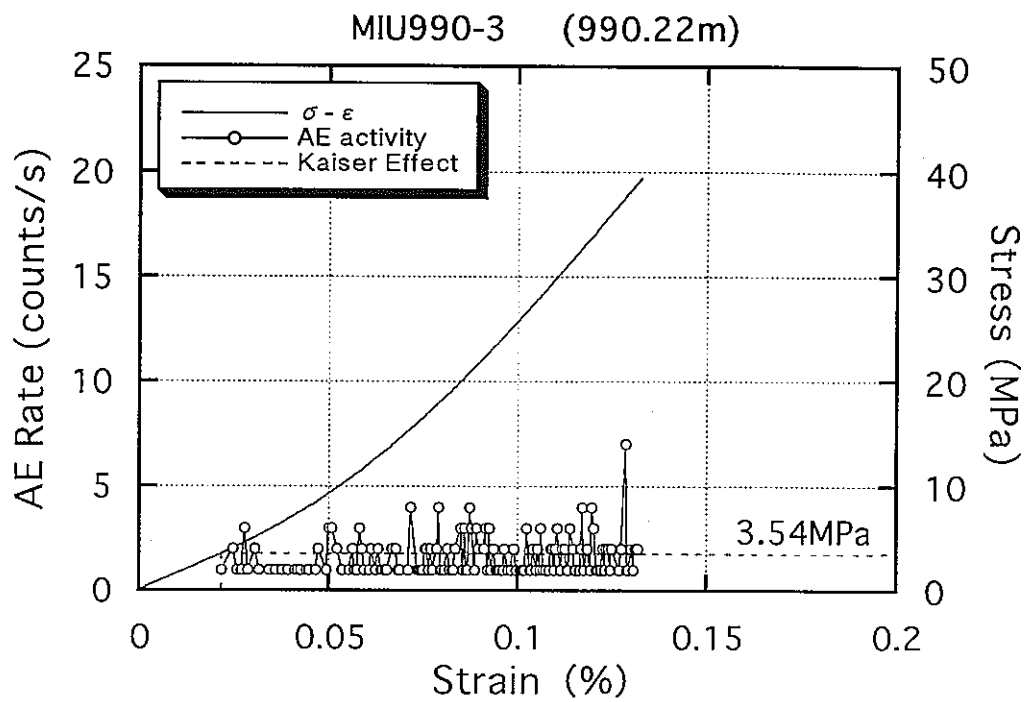


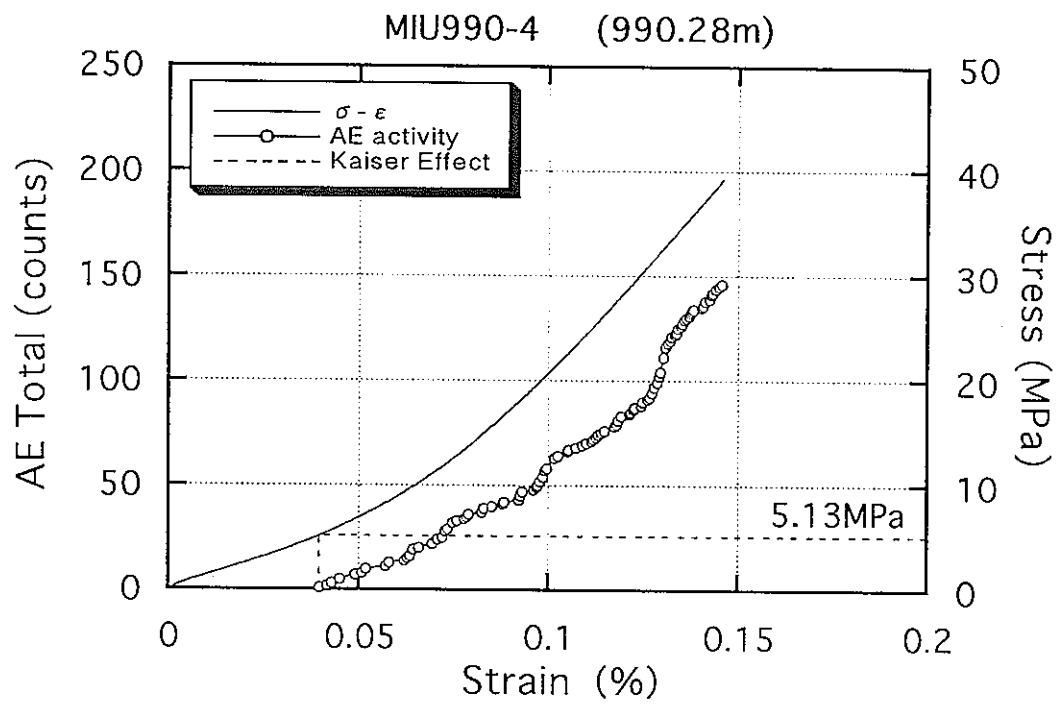
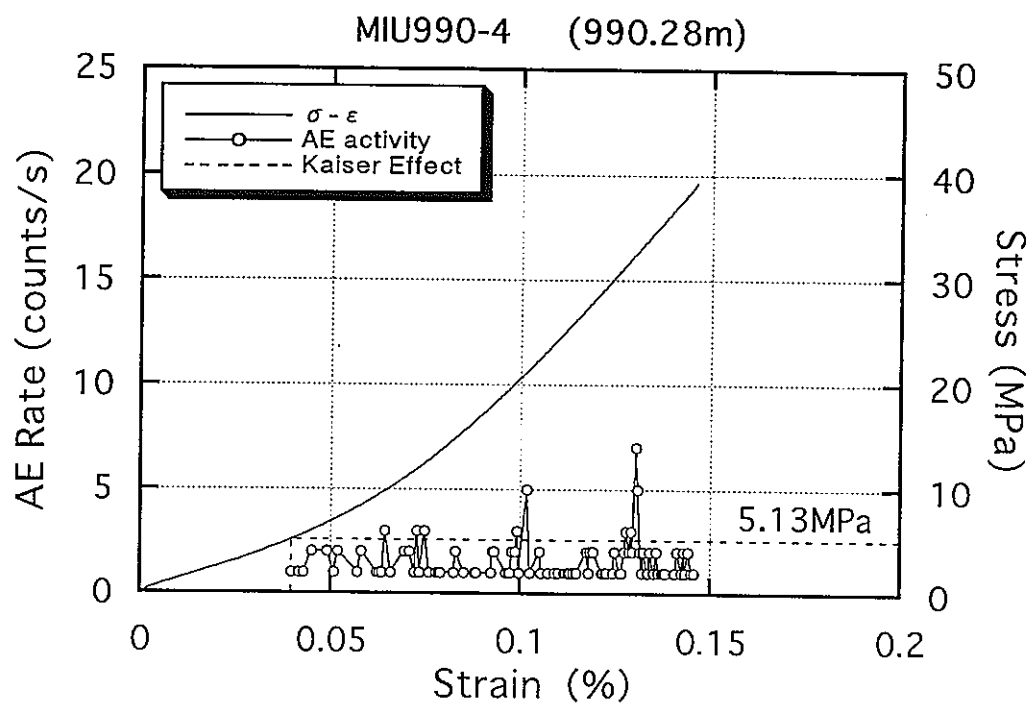


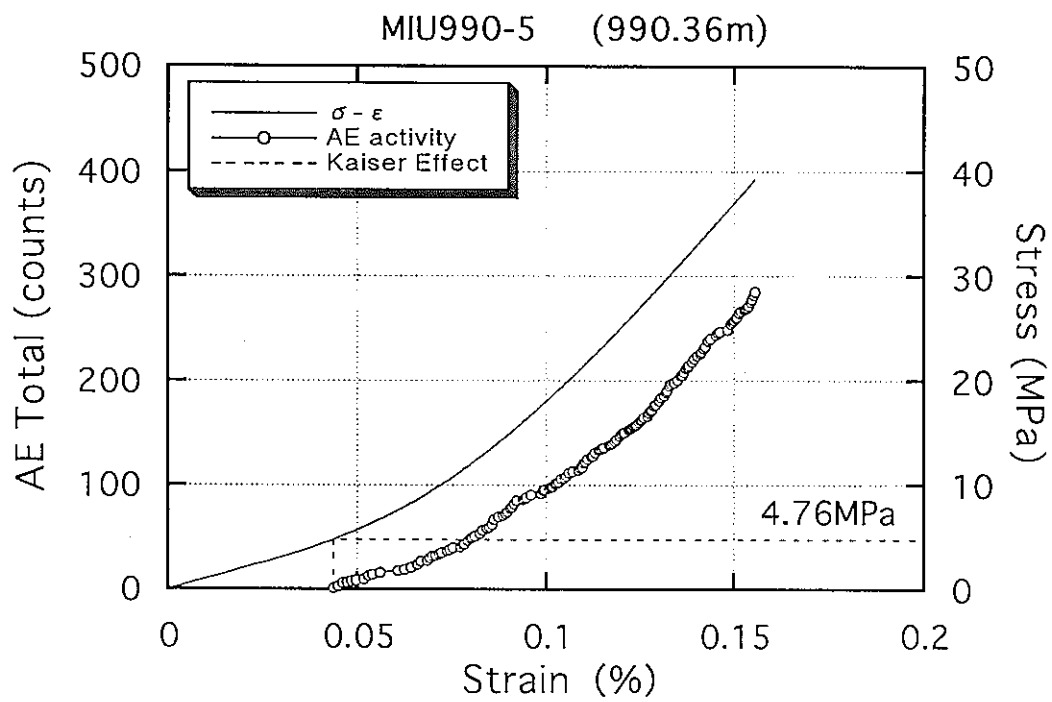
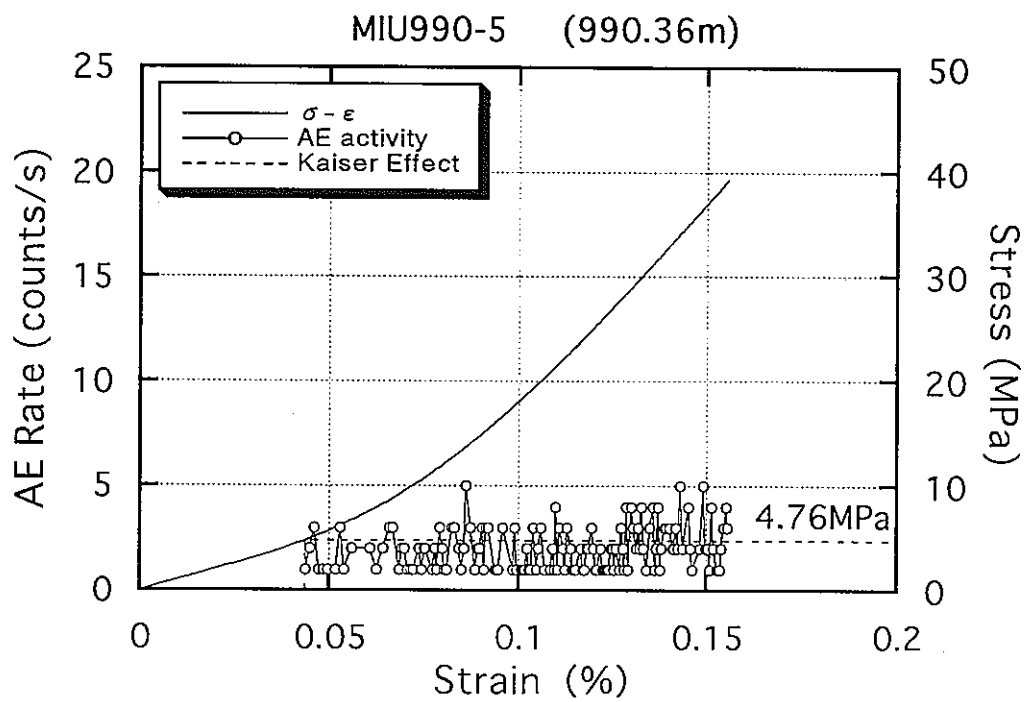












2.初期地圧測定結果

2.2 DRA法

応力－差ひずみの関係

