

# AE による粘性土の先行圧縮応力の推定

道 広 一 利・柴 田 徹

## ESTIMATION OF PRECOMPRESSION PRESSURE ON CLAY BY ACOUSTIC EMISSION

By *Kazutoshi MICHIIRO* and *Toru SHIBATA*

### Synopsis

In this paper, the estimation of precompression pressure on clay was tried measuring AE activity which occurs from specimens during drained isotropic triaxial loading. For this purpose, the experimental studies described following were carried out by using the two type of samples (i.e. remolded-reconsolidated clay and undisturbed diluvial clay).

First, Kaiser effect on clay was checked. Secondary, comparisons between the pressure estimated from Kaiser effect and precompression pressure obtained by consolidation tests using undisturbed diluvial clay were examined. Results obtained by series of tests are follows: (1) Kaiser effect on clay recognized in drained isotropic triaxial tests. (2) Precompression stress of undisturbed clay estimated from AE tests agreed very well with results of consolidation tests.

### 1. ま え が き

地盤沈下量を的確に推定するためには、粘土層の先行荷重  $p_c$  を知る必要があり、一般には圧密試験結果に基づいて **Casagrande** 法が用いられている。しかしこの方法にはいくつかの問題点があり、例えば  $e$ - $\log p$  曲線の間隙比スケールのとり方によって  $p_c$  の値が変動するので、一意的な決定法でないと思われている<sup>1)</sup>。

**Fig. 1** は大阪湾泉南沖水深約 20m 地点における海底粘土層の  $p_c$  特性を示している<sup>2)</sup>。この  $p_c$  値は、上述の方法で求められたものであるが、図より明らかなように、 $M_{12}$  以深の洪積粘土層では、 $p_c$  の値が非常にばらついている。その原因が、粘土の本来的な性質によるのか、あるいはサンプリング時の攪乱などの外的要因に起因するかは不明であるが、以下に述べるように **Casagrande** 法 (圧密試験) 以外の方法で  $p_c$  値を求め、比較検討してみるのも意義あることと考える。

ここでは、**Acoustic Emission** (材料の塑性変形および破壊にともなって解放されるエネルギーが弾性波となり伝播する現象、以後 AE と記す) における **Kaiser** 効果 (一度応力履歴を受けた材料に再載荷しても、その応力に達するまで、ほとんど AE が発生しない現象) と呼ばれる非可逆現象を利用して粘性土への適用を試みた。

AE による土質材料への応用例として、砂質土に関し

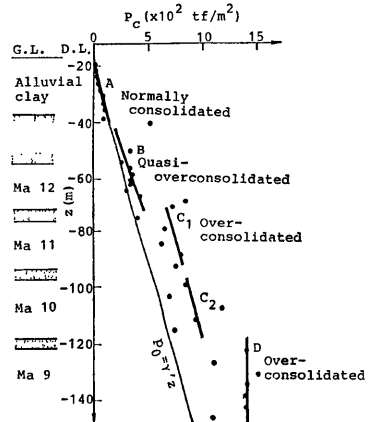


Fig. 1 Overconsolidation characteristics of clay layers under the bed in Osaka Bay (Akai and Sano)

ては、粒子の挙動と AE 発生割合との相関性を求めたものがあり<sup>3)4)5)</sup>、また岩石では破壊にともなう **Source Location** の問題、あるいは地山における岩石のもつ初期地圧の推定などが報告されている<sup>6)7)8)9)</sup>。しかしながら、粘性土におけるこの種の研究は2, 3<sup>10)11)</sup>を除いてはあまり見受けられない。

本論文は、市販粉末粘土および乱さない洪積粘土を用いて、排水等方三軸圧縮試験中に発生する AE を観測することにより、粘性土における **Kaiser** 効果の確認ならびに洪積粘土の  $p_c$  を推定し、圧密試験により求めた先行圧縮応力  $p_{c-con}$  との比較を行ない、その有効性を述べるものである。

2. 実 験

2.1 試料および実験装置

(1) 試 料

実験に用いた試料は、市販の粉末乾燥粘土（通称「藤の森粘土」）をフルイにかけ高含水比で練り返した後、大型圧密リングを用いて圧力 2kgf/cm<sup>2</sup> で予圧密したものと、兵庫県尼崎市の埋め立て地よりデニソンサンプラーで採取した不攪乱海底粘土である。使用した試料の粒径加積曲線を Fig. 2, 物理特性を Table 1, 海底粘土の採取地点における土質構成を Fig. 3 にそれぞれ示す。

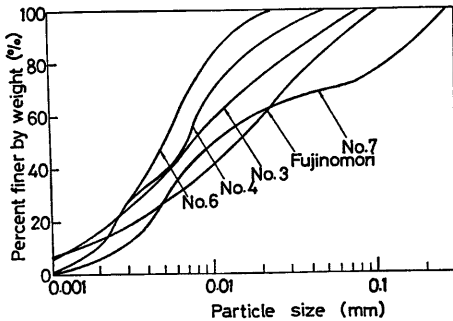


Fig. 2 Grain size distribution curves of Amagasaki diluvial clay and Fujinomori clay

Table 1 Physical properties of Fujinomori clay

$G_s$	$P. L.$	$L. L.$	$P. I.$
2.65	29.3	53.5	24.2

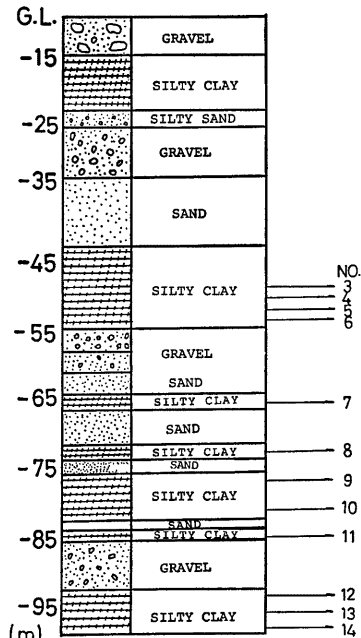


Fig. 3 Columnar section of Amagasaki diluvial clay

(2) 実 験 装 置

今回使用した実験装置は Fig. 4 に示すように、三軸圧縮試験機と AE 観測装置とから構成されている。三軸圧縮試験機は **GEONOR** 社製の **N.G.I.** タイプのものを用いた。AE 観測装置は装置 A, B の二種類を使用した。

装置 A はトランスデューサ、プリアンプ、ディスクリミネータ、カウンター、ウェーブメモリ、シンクロナスコープおよびペンレコーダーで構成されており、供試体内部から発生する信号の波形観測を主に行

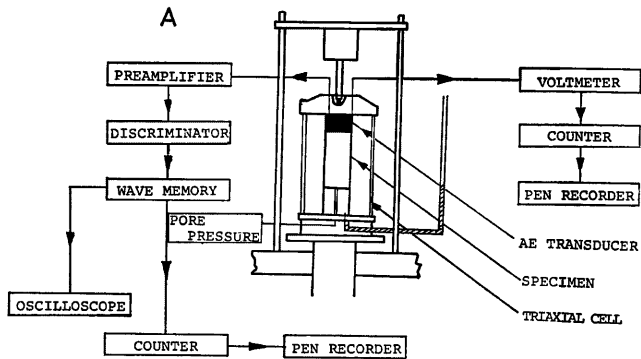


Fig. 4 Block diagram of AE- and triaxial- apparatus

Table 2 Performance of measuring instruments

AE TRANCEDUCER	80 kHz RESONANCE
PRE. AMP.	40 dB
MAIN AMP.	80 dB
B. P. F.	1 kHz~40 kHz
VOLTMETER	160 dB, 4~40 kHz

なった。AE 検出用トランスデューサは、共振周波数 80kHz のジルコン酸鉛のものを使用した。プリアンプは、増幅とフィルターの両機能を有しており、今回の実験では H. P. H. (High Pass Filter) を 1kHz に、利得を 40dB に固定した。ディスクリミネータはフィルター、増幅および敷居値設定の三機能を有しており、フィルターは H. P. F. を 1kHz に L. P. F. (Low Pass Filter) を 40kHz、利得を 80dB に固定し、敷居値を 60mV とした。

一方、装置 B はトランスデューサ、改良型ボルトメータおよびカウンタから成り、主に AE 信号のカウント計測に使用した。改良型ボルトメータはフィルター、増幅および敷居値設定機能を有しており、今回の実験では、それぞれ B. P. F. (Band Pass Filter) を 4kHz~40kHz、利得を 160dB に固定し、敷居値を 60mV とした。なお、主な計測器の特性は Table 2 に示す通りである。

2.2 実験方法

実験は直径 35mm、高さ 80mm の円柱形供試体を

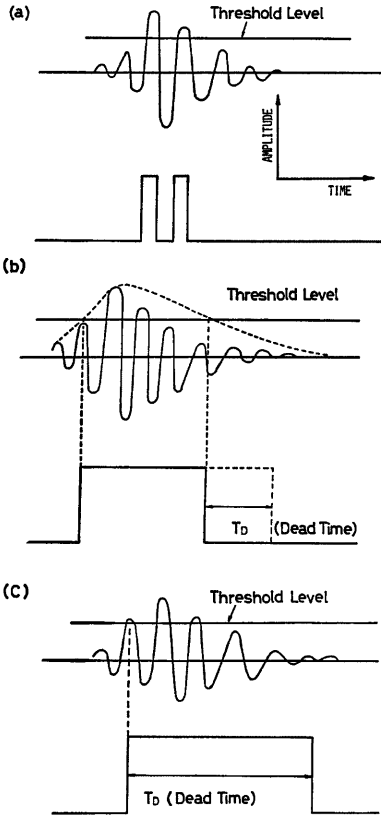


Fig. 5 (a) Ringdown method, (b)(c) Event method

使用し、排水等方三軸圧縮試験を間隙水圧の消散が十分認められる載荷速度  $0.1 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$  の応力制御方式で行なった。

AE の計数測定には通常二種類 (リングダウンとイベント計数法) がある。リングダウン計数法は、あらかじめ設定した敷居値を越えた波の数を全てパルスに変換する方法で、振幅に重みづけがなされている。またイベント計数法は、1 パーストに 1 パルスが得られ、震源の位置標定あるいは震源における信号のエネルギーが大きい場合に用いられる。なおイベント計数法には、原信号を包絡線検波する方法と休止時間を用いる方法とがあり、これらの計数方法を Fig. 5 に示す。本論文では前者のリングダウン計数法を用いた。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 粘性土における Kaiser 効果の確認

Koerner, et al.<sup>3),10)</sup> は原位置におけるボーリング孔内載荷試験への応用を目指した研究の一部として、AE による Kaiser 効果を利用して砂質土および粘性土の先行圧縮応力  $p_c$  の推定を試みている。そこでは、予め圧密試験機で圧密した 5 種類の砂質土と 6 種類の粘性土を用いて種々の含水比のもとで圧密試験中に発生する AE を観測し、AE 発生率と変形量および圧力の関係を求めている。Fig. 6 にその一例を示す。その結果、当初与えた先行荷重は、AE における Kaiser 効果より誤差 10% 以内で推定できるとしている。

本研究では、粘性土における Kaiser 効果の確認のために、圧密圧力  $2 \text{ kgf/cm}^2$  を受けた「藤の森粘土」を用いて、排水等方三軸試験を行なった。Fig. 7 (a)(b)(c) に結果を示す。図の縦軸は AE カウントレートを、横軸は排水等方圧縮における拘束圧  $p$  をとっている。いずれの図においても AE の発生状況は、ある拘束圧力から連続的に発生しているので、ここでは連続的に発生し始める最初の拘束圧力を AE による先行圧縮応力  $p_{c,AE}$  と定義する。この定義によれば、Fig. 7 では  $p_{c,AE}$  がそれぞれ  $1.84$ 、 $1.94$  および  $1.96 \text{ kgf/cm}^2$  となり、予圧密により与えた先行荷

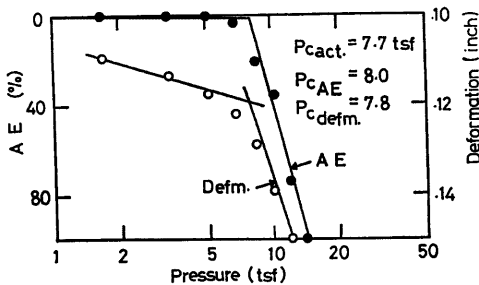


Fig. 6 Pressure versus AE and pressure versus deformation response of high plasticity silt at 55% saturation (Koerner et al.)

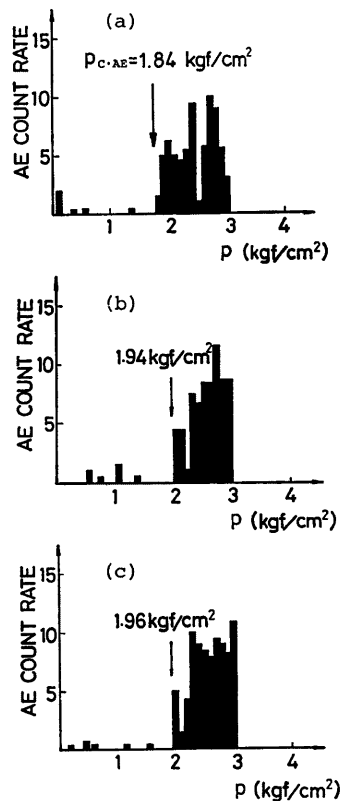


Fig. 7 Relations between  $p_{c,AE}$  and confined pressure of Fujinomori clay

重が  $2\text{kgf/cm}^2$  であることを考えれば、Koerner, et al. の結果と同様に、排水等方三軸圧縮試験での粘性土においても Kaiser 効果が認められる。

### 3.2 洪積粘土における $P_{C-AE}$ の推定

前節において、粘性土の Kaiser 効果の存在を明らかにした。この現象を利用し、乱さない洪積粘土を用いて、排水等方三軸圧縮試験中に発生する AE を観測することにより  $p_{C-AE}$  を求めたのが Fig. 8 (a)(b)(c)(d) である。上述した  $p_{C-AE}$  の定義に従えば、Fig. 8 (a)(b)(c) の各試料では  $p$  が小さい値でも若干 AE は発生しているが、連続的という意味で、 $p_{C-AE}$  はそれぞれ  $5.52$ 、 $5.20$  および  $6.20\text{kgf/cm}^2$  と判定される。しかし(d)の試料では、 $p_{C-AE}$  は認められなかった。その理由は、試験機の容量（最大拘束圧= $7.5\text{kgf/cm}^2$ ）がこの試料の  $p=10.2\text{kgf/cm}^2$  を下回っていたためと考えられる。

これら AE により求めた洪積粘土の  $p_{C-AE}$  と、同一地点で採取した試料の圧密試験による先行圧縮応力  $p_{C-CO}$  との比較を、Fig. 9 に示す。この図において、試料 No. 7 のデータを除いては、若干のバラツキはあるが比較的良い対応を示している。ここで試料 No. 7 のデータで両方法による値に大きなひらきが生じた原因として次のように考えた。

① AE による  $p_{C-AE}$  が小さ目に計測された可能性について——

Fig. 9 における No. 7 以外の試料では、砂質分は約 1% であるのに対して、No. 7 の試料では砂含有率が約 30% であった。粘性土において砂質分が多いほど AE 発生割合も増加することを既に報告した<sup>12)</sup>が、この傾向は Fig. 8 の (a)(b) と (c) において、縦軸のオーダを比較した場合、砂質分の多い No. 7 試料では、AE 発生割合が極めて顕著に増加していることからわかる。このような特徴をベースにして考えると、砂質分の多い洪積粘土では、試料が過圧密から正規圧密状態へと徐々に移行する載荷段階において、粒子に微小な動きがあっても、それが直ちに AE 発生割合に反映し、本来試料の有している  $p_c$  よりも小さな値を計測している可能性がある。

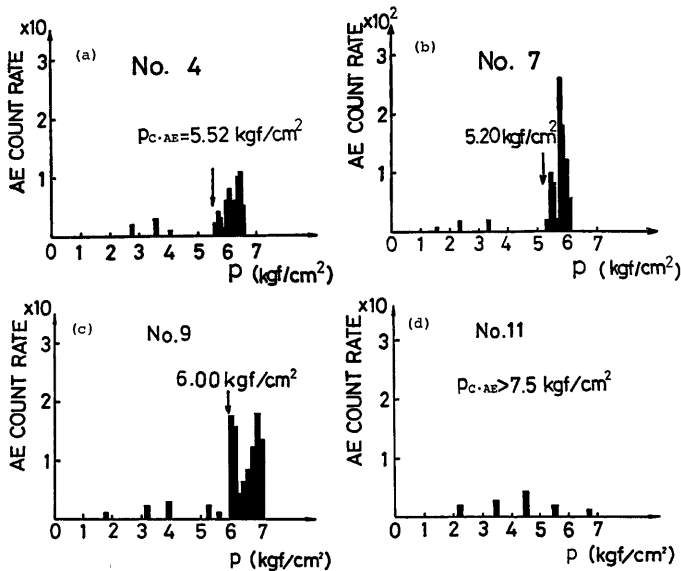


Fig. 8 Relations between  $p_{C-AE}$  and confined pressure of Amagasaki diluvial clay

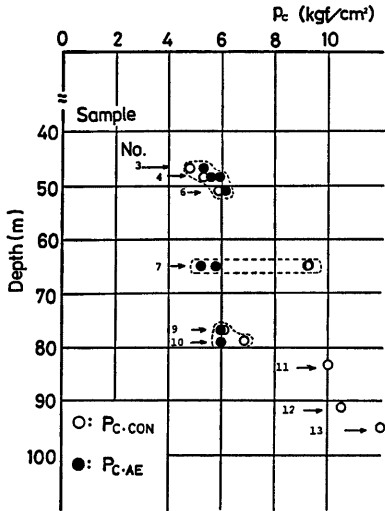


Fig. 9 Comparison of  $p_{c-AE}$  and  $p_{c-CON}$  at various depths

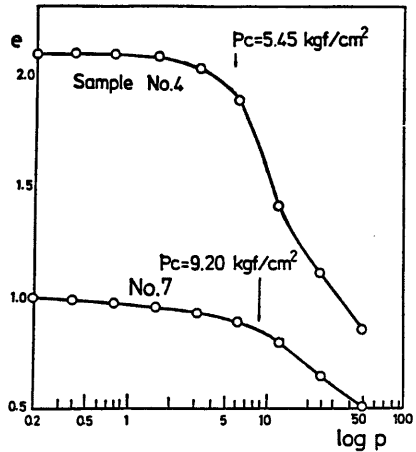


Fig. 10  $e$ - $\log p$  curves of Amagasaki diluvial clay

② 圧密試験による  $p_{c-CON}$  が大き目に出た可能性について—

Fig. 10 は、砂質分の多い土 (No. 7) と少ない土 (No. 4) に対して、それぞれの  $e$ - $\log p$  曲線を描いたものである。No. 4 試料では、曲線の曲率が小さい典型的な粘土の特性を示しており、 $p_{c-CON}$  の推定は比較的容易である。これに対して No. 7 試料では、曲線の曲率が大きいため  $p_{c-CON}$  の推定にある程度の幅を生じざるを得ない。

以上に述べた原因により、両方法における  $p_c$  値に大きな開きが生じたと推定されるが、砂質分を多く含んだ土の  $p_c$  決定法については、まだ結論を出すまでに至っていない。

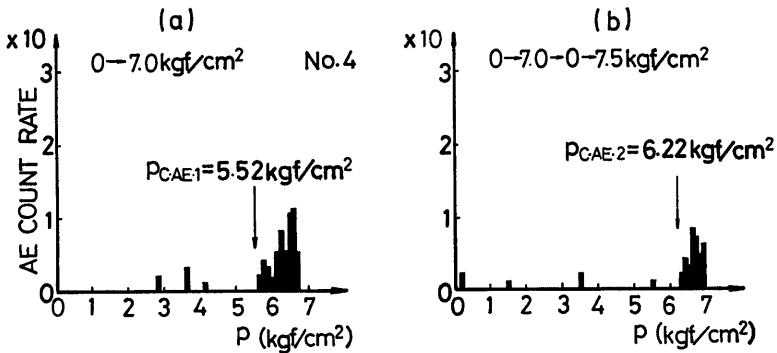


Fig. 11 (a) Relation between  $p_{c-AE}$  and confined pressure of Amagasaki diluvial clay by virgin loading  
 (b) Variation of  $p_{c-AE}$  by reloading (sample No. 4)

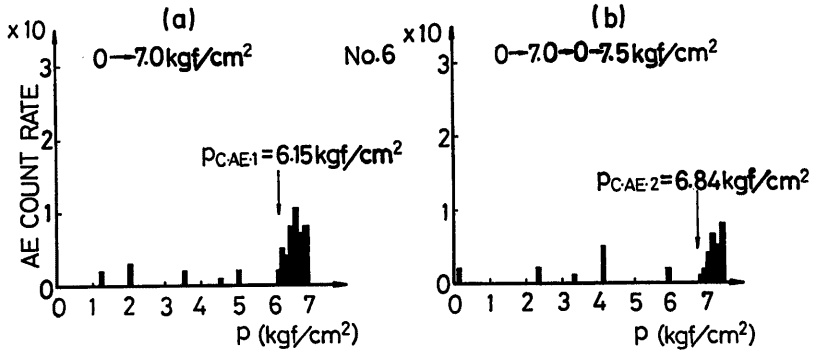


Fig. 12 (a) Relation between  $p_{CAE}$  and confined pressure of Amagasaki diluvial clay by virgin loading  
 (b) Variation of  $p_{CAE}$  by reloading (sample No. 6)

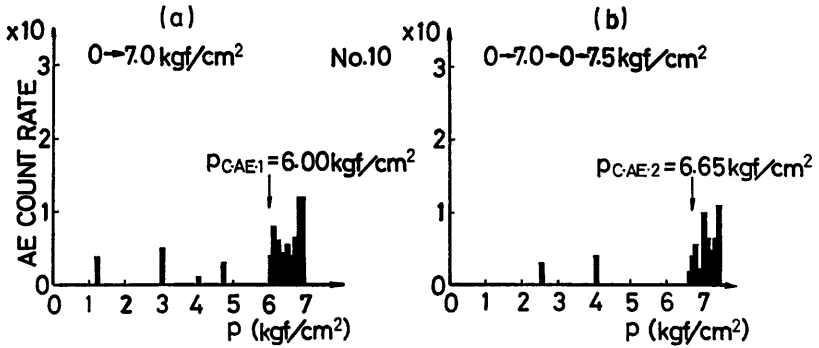


Fig. 13 (a) Relation between  $p_{CAE}$  and confined pressure of Amagasaki diluvial clay by virgin loading  
 (b) Variation of  $p_{CAE}$  by reloading (sample No. 9)

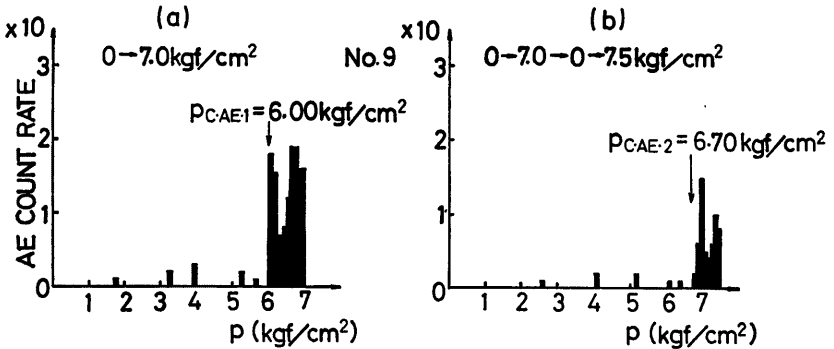


Fig. 14 (a) Relation between  $p_{CAE}$  and confined pressure of Amagasaki diluvial clay by virgin loading  
 (b) Variation of  $p_{CAE}$  by reloading (sample No. 10)

次に、各試料の有する先行圧縮応力以上の荷重を与えた後、除荷→再載荷を行うことにより、当初洪積粘土が有していた  $p_c$  にどのような変化が生じるかを調べた。Fig. 11(a)(b)(c)(d) はそれらの結果である。図中  $p_{c,AE-1}$  は処女載荷によって、拘束圧力をそれぞれ 7.0, 7.0, 7.0 および 6.5kgf/cm<sup>2</sup> まで上げた時に、AE により得られた先行圧縮応力を意味している。また  $p_{c,AE-2}$  は、上記の拘束圧力を除荷した後、それぞれの試料に 7.5kgf/cm<sup>2</sup> まで再載荷した場合の AE による先行圧縮応力を示している。この図より、再載荷によって得られた  $p_{c,AE-2}$  は処女載荷時に得られた  $p_{c,AE-1}$  の値より、いずれのデータにおいても大きくなっており、それぞれの  $p_{c,AE-2}$  は処女載荷時に与えた最大の拘束圧力にほぼ等しくなっていることがわかる。

#### 4. あとがき

本研究は、粘性土における先行圧縮応力を AE における Kaiser 効果を利用して求めたものであり、その結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 金属や岩石にみられる Kaiser 効果は粘性土においても同様に認められ、AE 測定から得た  $p_c$  値は、過去に受けた最大応力にほぼ等しい。
- 2) 排水等方三軸圧縮中に発生する AE を観測することにより、洪積粘土の先行圧縮応力は圧密試験による  $p_{c,CON}$  とほぼ同程度の精度で求められる。

上記2)の結論の例外として、砂質分の多い洪積粘土では  $p_{c,AE}$  と  $p_{c,CON}$  とのあいだに大きな開きがあったが、まだ結論を出すまでに至っていない。

本論文では、主に粘性土における Kaiser 効果の存在の確認と、Kaiser 効果を利用した AE による  $p_{c,AE}$  と圧密試験による  $p_{c,CON}$  との比較検討を行なった。しかし、排水等方圧縮と  $K_0$ -圧密とは、厳密に言えば、載荷応力状態が違うという問題を残している。今後こういった点を考慮しながら、さらに実験を進めたいと考えている。

なお、本研究は、第1著者が研究生として在動中に防災研究所で行ったものであることを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 三笠正人：圧密試験の整理方法について、土木学会第19回年次学術講演会講演概要集，1964。
- 2) 赤井浩一・佐野郁雄：遅延圧密土の一次元変形挙動，京都大学防災研究所年報，第24号 B-2, 1981, pp. 73-82。
- 3) Koerner et al.: Acoustic Emission Behavior of Granular Soils, Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT8, 1976, pp. 837-850。
- 4) Tanimoto et al.: A Study of Shear Deformation Process of Sandy Soils by the Acoustic Emission Response, Proc. Second Int. Conf. on Microzonation, 1978, pp. 971-982。
- 5) 村山朔郎・道広一利：AE からみた砂の粒子挙動，土木学会論文集，第352号，1984, pp. 119-127。
- 6) 柳谷 俊 他：岩石のクリープ時に発生する AE の震源決定について，材料，第33巻，第366号，1984, pp. 272-278。
- 7) 柳谷 俊 他：表面ひずみのマッピングによる岩石のクリープの研究，材料，第33巻，第366号，1984, pp. 279-285。
- 8) 金川 忠 他：岩石における地圧成分の Acoustic Emission による試み，土木学会論文報告集，第258号，1977, pp. 63-75。
- 9) Murayama, et al.: The Kaiser Effect of a Granite under Various Loadings, Progress in Acoustic Emission, 1984, pp. 586-593。
- 10) Koerner et al.: Determination of Prestress in Cohesive Soils Using AE, Proc. ASCE, Vol. 110,



No. GT11, 1984, pp. 1573-1548.

- 11) 道広一利・柴田 徹：AE による洪積粘土の先行圧縮応力の推定，第20回土質工学会研究発表会講演概要集，1985.
- 12) 道広一利 他：混合土の AE 特性，昭和58年度関西支部年次学術講演概要集，1983, pp. 7-1~7-2.