

## (70) 過圧密な材料の $K_0$ 圧密三軸試験について

応用地質株式会社 正会員 ○岩本 健

斉藤英光

西田和範

正会員 田中莊一

### Triaxial $K_0$ -Consolidation Tests on Overconsolidated Materials

Takeshi Iwamoto, OYO Corporation

Hidemitsu Saito, "

Kazunori Nishida, "

Soichi Tanaka, "

#### Abstract

Recently, it has been recognized that the strength and deformation characteristics of the materials of ground are dependent upon the state of stress and stress-history. In order to obtain the accurate ground behavior, the experiments which follow stress-history have been attempted. Also, for the construction of foundation or the deep excavation in overconsolidated clay or soft sedimentary rock, it is important to predict the in-situ stress for stress-deformation analysis.

Triaxial  $K_0$ -consolidation tests are effective methods to carry out the stress-controlled tests and predict the in-situ stress. Although numerous triaxial  $K_0$ -consolidation tests have been performed, they have been not practically in use as yet.

Therefore, in this study to predict the in-situ stress, a closed loop, servohydraulic triaxial apparatus was used. The  $K_0$ -stress condition was controlled precisely by keeping the constant volume of confining fluid with a closed double-cell and volumetric change meter.

The proper results were obtained by the new  $K_0$ -consolidation testing system.

#### 1. はじめに

地盤を構成する材料の強度・変形特性は、応力状態や応力履歴に影響される場合が多いことから、より詳細な地盤挙動を把握するために、原位置での応力履歴を再現した試験が行われる。また、過圧密粘土や堆積性軟岩を主体とする地盤上に構造物を建設したり深い掘削などが行われる場合の応力-変形問題においては、初期の応力状態を把握することが重要となっている。

$K_0$  圧密三軸試験は、原位置の応力履歴を再現し現状の応力状態を把握するといった点で有効な試験手法である。制御法によって、側圧一定型、側方変位計測型、側液体積一定型、垂直変位拘束型など種々の試験法が考案され、それに応じた試験装置も工夫されているが、まだ、研究的段階にあり、十分に実用化された試験法とはなっていない。

筆者らは、多様な要素試験が可能な電気-油圧サーボ型三軸試験機を開発し実験に供している。今回、応力状態を把握することを目的に、密閉型の高圧用二重セルを搭載し側液の体積変化を自動的に検出する装置を開発した。この装置により、過圧密粘土や堆積性軟岩を対象とした、微妙な $K_0$  応力状態の制御を可能にし、妥当な結果を得ることができた。

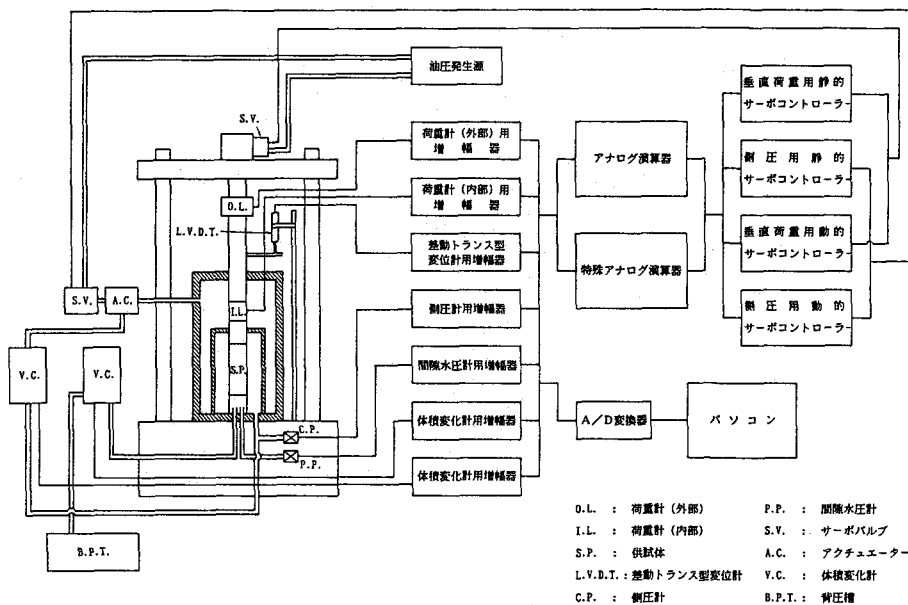


図-1 試験装置ブロックダイアグラム

## 2. 試験装置およびK.制御方法

試験には、内セル容量 $850\text{cm}^3$ の密閉型高圧用二重セル（耐圧 $200\text{ kgf/cm}^2$ ）と新しく開発した測定容量 $5\text{cm}^3$ の電気式自動体積変化計を用い、一定の垂直荷重下で側液の体積が一定となるよう側圧をフィードバック制御することにより、K.状態の制御を行う。この試験装置は垂直荷重ならびに側圧のいずれも電気-油圧サーボによる制御が可能であり、図-1に示すように、垂直荷重、垂直変位、側圧、間隙水圧、体積変化量の信号を垂直荷重ならびに側圧用サーボコントローラにフィードバックすることによって、K.制御や通常のひずみ制御、応力制御、さらには、平均主応力一定や主応力比一定といった多様な制御方式による要素試験を実施することができる。さらに動的サーボコントローラによって、垂直荷重、側圧とも振動させる動的三軸試験を実施することもできる。表-1に試験装置の基本仕様を示す。

本試験装置のように側液の体積を一定にする方法でK.制御を行う場合には、以下の点が問題となる。

- ・ ピストン直径と供試体直径を同一にする必要がある。

表-1 試験装置の基本仕様

| 項 目                                 | 仕 様                                                                                                   |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 垂直荷重載荷装置<br>型 式<br>載 荷 容 量<br>周波数特性 | 油圧サーボ静的及び動的載荷兼用式<br>静的 $20\text{tonf}$ 、動的 $\pm 10\text{tonf}$<br>10 Hz フラット                          |
| 三 軸 室<br>型 式<br>材 質<br>耐側圧          | 高容量二重円筒型<br>全ステンレス鋼製<br>静的 $200\text{kgf/cm}^2$ 、動的 $100\text{kgf/cm}^2$                              |
| 側圧発生装置<br>型 式<br>容 量                | 油圧サーボ型水圧シリンダー式静的及び動的負荷兼用<br>圧力 $200\text{kgf/cm}^2$ 吐出、 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ /ストローク               |
| 油圧発生装置<br>型 式<br>油 圧<br>油 槽         | 電動ギヤーポンプインテグラルマニホールド式<br>$200\text{kgf/cm}^2$ 、吐出 $18\text{ }\ell/\text{min}$<br>200 $\ell$ 、2台の油槽連結式 |
| 背圧負荷装置<br>型 式<br>負荷容量               | 空圧制御水圧増圧置換式<br>$50\text{kgf/cm}^2$                                                                    |
| 電気計測制御装置<br>搭載装置                    | 各種検出器及びその増幅器、アナログ演算器、<br>電気-油圧サーボ制御器                                                                  |

- ・ 側液に水を用いる場合、体積変化を検出する系統内に完全に水で満たすことは難しく、少量の空気が残ることがある。圧力が変動する場合には体積変化の測定結果に影響を及ぼす。

上記の問題のうち、直径を同一にすることについては、軟岩試料を成形して正確にピストン直径と同一に仕上げるには困難な場合があるとともに、仮に正確に仕上げられたとしても $K_0$ 。圧密の前段として等方圧密を実施する場合には供試体直径とピストン直径に差異が生じる。そこで、この問題に対処するため、供試体直径とピストン直径の差異を圧密量の変化に対応させてアナログ演算器で補正している。

また、堆積性軟岩の $K_0$ 。圧密を行う場合には、正規圧密領域における $K_0$ 。値を確認するため側圧を数 $10\text{kgf/cm}^2$  にする必要があり、残存空気による体積変化測定誤差が重要な問題となる。この問題に対しては、側液に脱気水を用い背圧を付加することにより水中および体積変化測定系統内に残存する空気量を少なくするとともに、予め圧力変化に伴う体積変化測定系統内の体積変化量を測定しておき、圧力に応じてアナログ演算器で体積変化量を補正することにした。

### 3. 試験方法および結果

試験結果の一例を図-2に示す。用いた試料は上総層群の固結シルトでその基本的物性値を表-2に示す。

この試験では、①まず、標準圧密試験で得られた圧密降伏応力まで垂直応力を段階的に増加させ、②その後、現状の土被り圧まで垂直応力を段階的に減少させ、③再び、垂直応力を段階的に増加させて正規圧密領域の $K_0$ 。値、すなわち $K_{onc}$  値を確認する、といった手順で実施している。供試体の排水は、側面排水とした。垂直応力の各荷重ステップでの圧密が終了したかどうかは、図-3に例示したように軸ひずみおよび水平有効応力が一定値に収束することで確認している。図-2の応力経路図から、 $\sigma_v'$ と $\sigma_h'$ の間に次の関係があることがわかる。

- ・ 応力履歴はヒステリシスループを描く。
- ・ 垂直応力載荷時には水平応力は時間とともに増加し、一方除荷時には水平応力は時間とともに減少する傾向が認められる。
- ・ この固結シルトの正規圧密領域における $K_0$ 。値、すなわち $K_{onc}$  値は $0.495$  となる。

除荷時の $K_0$ 。値、すなわち $K_{ooc}$  値は、Alpan (1967) らに

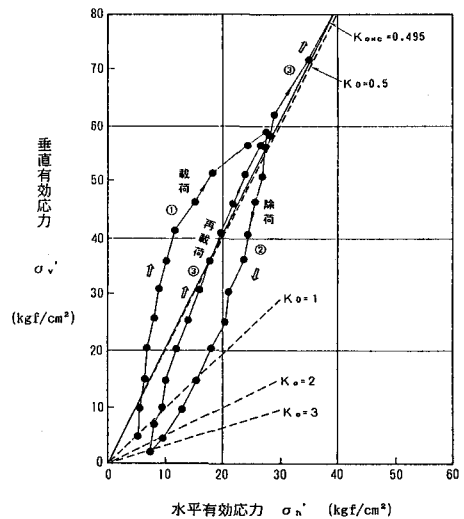


図-2  $K_0$ 。圧密三軸試験の応力経路

表-2 固結シルトの基本的物性値

|                                    |  |         |
|------------------------------------|--|---------|
| 粒 度                                |  |         |
| 砂 礫 分 (%)                          |  | 9.0     |
| シルト分 (%)                           |  | 59.0    |
| 粘 土 分 (%)                          |  | 32.0    |
| コンシステンシー特性                         |  |         |
| $W_L$ (%)                          |  | 62.5    |
| $W_P$ (%)                          |  | 28.5    |
| $I_P$ (%)                          |  | 34.0    |
| 自然含水比 $W$ (%)                      |  | 30.0    |
| 密 度 $\gamma_s$ ( $\text{g/cm}^3$ ) |  | 1.92    |
| 比 重 $G_s$                          |  | 2.68    |
| 間 隙 比 $e$                          |  | 0.82    |
| 圧密降伏応力 $P_c$ ( $\text{kgf/cm}^2$ ) |  | 50 ~ 70 |
| 一軸圧縮強さ $q_u$ ( $\text{kgf/cm}^2$ ) |  | 25 ~ 40 |

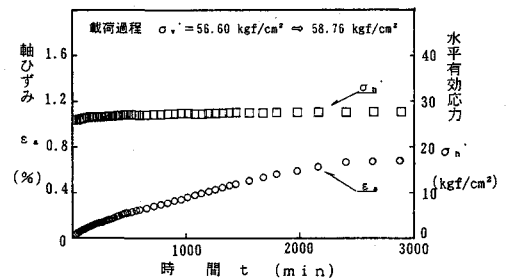


図-3 軸ひずみおよび水平有効応力の経時変化例

よると、

$$K_{ooc} = K_{onc} (O.C.R.)^{\alpha} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし

O.C.R. : 過圧密比 ( $O.C.R. = P_c / \sigma_v'$ )

$P_c$  : 圧密降伏応力

$\sigma_v'$  : 現状の有効土被り圧

の形で表現される。同様の整理を行い図-4に示した。ここで、O.C.R.を算出するための $P_c$ は除荷開始直前の最大垂直応力を用いている。図から明らかとなり、固結シルトについても(1)式の関係が成り立ち、最小二乗回帰より $\alpha=0.59$ という値を得た。

$K_o$ 状態の制御の良否を判定するため、 $K_o$ 圧密での軸ひずみ( $\epsilon_a$ )と供試体内部からの排水量より求めた体積ひずみ( $\epsilon_v$ )を比較した。図-5のように $\epsilon_a = \epsilon_v$ という結果が得られ、側方変形を完全に拘束した $K_o$ 状態を維持していることが確認できた。

#### 4. 原位置における $K_o$ 値の推定

$K_o$ 圧密三軸試験より(1)式を用いて原位置の $K_o$ 値の推定を行う。

図-6に洪積粘土についての $K_o$ 圧密三軸試験結果から推定した $K_o$ 値の深度分布を示す。推定は、7つの試験結果を用い、同一の地層と判断され有効土被り圧が算定されている深度について行った。この図より、30m以深では推定した $K_o$ 値は1ないしは1より小さい値となっているが、深度が浅くなると推定した $K_o$ 値は2を越え3に近い値となっている。

過圧密粘土や軟岩地盤の原位置における $K_o$ 値を推定する場合、 $K_o$ 圧密三軸試験結果を用いる方法のほかに、孔内水平載荷試験からも推定することができる。

図-7に $K_o$ 圧密三軸試験より推定した $K_o$ 値と孔内水平載荷試験より推定した $K_o$ 値との比をとり、過圧密比O.C.R.との関係で整理した結果を示す。ここで孔内水平載荷試験による $K_o$ 値は、圧力クリープ変形量を参考に求めた静止土圧 $P_{31}$ と現状の有効土被り圧 $\sigma_v'$ との比より推定している。これによると、いずれのO.C.R.に対しても $K_o$ 圧密三軸試験より推定した $K_o$ 値が孔内水平載荷試験より推定した $K_o$ 値よりも大きい。また、O.C.R.が10を越えると、O.C.R.の増加につれて $K_o$ 値の比が大きくなり、 $K_o$ 圧密三軸試験による推定値と孔内水平載荷試験による推定値の間に明瞭な差異が生じてくる。

これらの現象については、以下のことが考えられる。

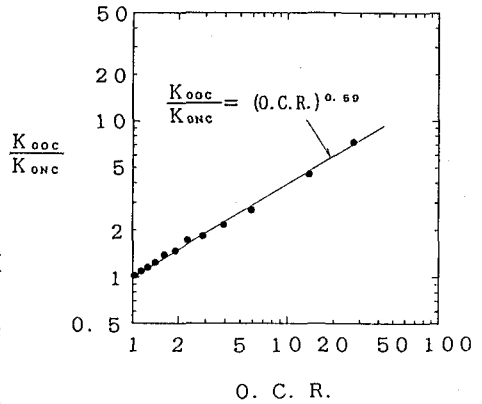


図-4  $K_{ooc} / K_{onc}$  とO.C.R.との関係

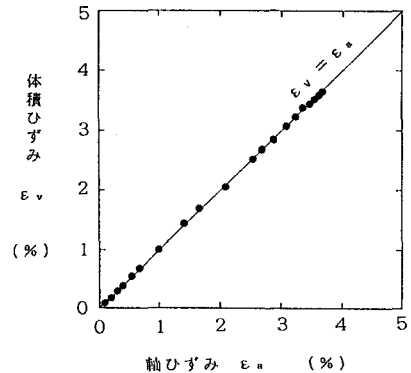


図-5 軸ひずみと体積ひずみとの関係

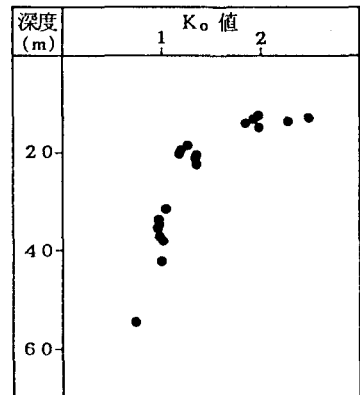


図-6  $K_o$ 圧密三軸試験より推定した $K_o$ 値

- ・  $K_0$ 。圧密三軸試験では単調な載荷除荷の履歴より  $K_0$  値を推定しているが、実地盤では浸食-堆積のサイクルを複雑に繰り返している。これらの履歴の相違が  $K_0$  値推定の差異となって生じている可能性がある。
- ・ O.C.R. の算定は、圧密降伏応力と有効土被り圧との比より行っている。圧密降伏応力と比較して有効土被り圧が小さい場合にはわずかな有効土被り圧の相違によって O.C.R. が大きく変動することから、O.C.R. の値の評価も影響していると考えられる。

## 5. おわりに

洪積粘土、堆積性軟岩といった過圧密な材料を対象に、密閉型高圧用二重セルと電気式自動体積変化計を用いて電気-油圧サーボ式三軸試験装置により  $K_0$ 。圧密三軸試験を行った。この試験装置では、ピストン直径と供試体直径の差異から生じる誤差および側液として水を用いることから生じる体積変化の誤差を補正しながら、側液の体積を一定とする方法により  $K_0$ 。制御を行っており、側方変形拘束状態が維持され  $K_0$ 。状態が確保できることが明らかとなった。

本試験装置を用いて実施した  $K_0$ 。圧密三軸試験より、Alpan らによる除荷時の  $K_0$ 。値を推定する関係式

$$K_{0oc} = K_{0nc} (O.C.R.)^a$$

を用いて過圧密状態の  $K_0$ 。値を推定し、孔内水平載荷試験より推定した  $K_0$ 。値と比較したところ、上式による  $K_0$ 。値の推定には適用限界のあることがわかった。

最後に、本研究では、垂直荷重を段階的に増加させながら  $K_0$ 。圧密三軸試験を実施したが、他の研究例では間隙水圧を生じさせないよう、緩い応力速度で垂直荷重を増加させながら  $K_0$ 。状態を維持する試験も実施されている。今後、筆者らもこのような試験方法により  $K_0$ 。履歴がどのように変化するか、検討を続けていく予定である。

## 【参考文献】

- 1) 大西有三, 安川郁夫:  $K_0$ 。圧密三軸試験, 地質と調査, 第6号, pp.31-35, 1980
- 2) Alpan, I.: The empirical evaluation of the coefficient  $K_0$  and  $K_{0R}$ , Soils and Foundations, vol.7, No.1, pp.31-40, 1967
- 3) 土質工学会編: 土質調査法, pp.408, 1982

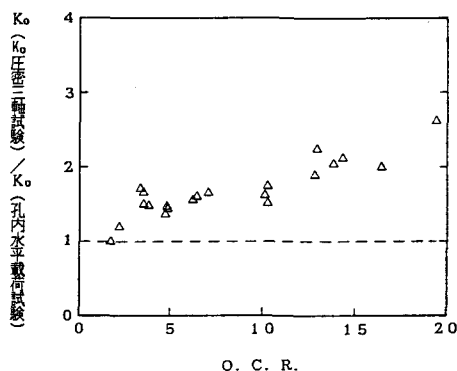


図-7  $K_0$ 。圧密三軸試験と孔内水平載荷試験より推定した  $K_0$ 。値の比較