

## K<sub>0</sub> 圧密状態における月山黒ボクの剪断特性

東 山 勇・吉 田 力・石 田 朋 靖  
大 内 明・下 田 伸  
(山形大学農学部農業造構学研究室)  
(昭和61年9月1日受理)

Shearing Characteristics Under K<sub>0</sub>-Consolidation on the  
Organic Volcanic Ash Soil from Mt. Gassan

Isamu HIGASHIYAMA, Chikara YOSHIDA, Tomoyasu ISHIDA,  
Akira ŌUCHI and Sin SHIMODA  
Laboratory of Soil Mechanics, Faculty of Agriculture,  
Yamagata University, Tsuruoka 997, Japan  
(Received September 1, 1987)

### Summary

The coefficient of earth pressure at rest, K<sub>0</sub>, of a soil is defined as the ratio of horizontal and vertical effective stresses acting on the soil under no lateral strain condition.

This paper presents the stress-strain behavior and strength characteristics of triaxial specimens of organic volcanic ash soil from Mt. Gassan in the Tōhoku region.

These tests were carried out on K<sub>0</sub>-consolidated soil and compared with data isotropically consolidated soil. On that basis, the following conclusions may be drawn :

(1) The deviator stress-strain relationships of the series of tests are displayed in Fig. 3 and Fig. 4, and are clearly different.

(2) Fig. 11 and Fig. 12 show typical stress paths of, respectively, K<sub>0</sub>-consolidated and isotropically consolidated organic soils in the undrained triaxial compression test.

It can be seen that the stress paths tend to be approximately parallel to the strength envelope drawn as a best fit through the points representing maximum deviator stress.

(3) The effective strength parameters C (cohesion) and φ (angle of internal friction) were found to be 0.135 kgf/cm<sup>2</sup> and 32.2°, respectively. In the isotropically consolidated sample, the parameters C and φ were 0.268 kgf/cm<sup>2</sup> and 31.6°, respectively.

### 1. はじめに

土の構成式の研究は、この数年非常に活発であるが、泥炭や黒ボクといった有機質土の剪断特性については、鉍質土に比べてまだ不明な点が多いといわれている<sup>1)</sup>。わが国では、北海道東南、東北、関東、九州の各地に有機質火山灰土が広く分布している。これらの多くは、山地や、丘陵、台地に分布するが、開畑などの農地土工、観光開発などの山岳道路などにおいて、土質工学的な問題を提起している。

ところで、一般に盛土地盤での土の強度の推定には、等方圧密による圧密非排水試験の結果が参考にされる。

しかし、実際の自然地盤では等方圧密は特殊な場合であり、鉛直と水平の応力が異なる K<sub>0</sub> 圧密地盤を形成している。

本研究は低有機質土である月山黒ボクを中心に、比較のために粘性土である月山下層土などを用いて、K<sub>0</sub> 圧密と等方圧密の剪断特性を比較検討し、その特性を明らかにするものである。

### 2. 試料および三軸試験の方法

試料は、月山山麓の表層約 40cm の間より採取した有機質火山灰土である月山黒ボクと、比較のために、同じ場所の深さ約 60~100 cm より採取した茶褐色の粘性土

である月山下層土を用いた。

供試体作製方法は、まず風乾土を塑性限界よりもやや高めの含水比に調節した。直径 3.5 cm の 2 つ割りのマイターボックスに、3 層につめ、乾燥密度が一定になるように、2.5 kgf ランマーで各層一回半落下<sup>1)</sup>して締め固めた。試料の理工学性を表-1 に、供試体の初期状態を表-2 に示す。

次に実験方法であるが、土の強度は、一次圧密および二次圧密の経過時間に影響されるので圧密をいつ打ち切るか、圧密終了時間の決定は重要な問題である。今回は前報<sup>1)</sup>などを参照して次に示した方法で決定した。

まず、等方圧密の体積変化量  $\Delta V$ —時間曲線に最急勾配線を引く。これを右に 3 倍平行移動させた線を引く、この線と体積変化量—時間曲線が交わったときの時間を一次圧密終了時間とした<sup>1)</sup>。その値は、およそ 200 分程度である。

$K_0$  圧密の仕方には二通りあり、軸荷重一定で、側圧を減少させていく方法と、側圧、軸荷重ともに増加させていく方法があるが、今回は後者の方法で行った。

まず、最初に所定の側圧 1/5 程度の側圧をかけ、その約 1.5 倍の軸荷重を応力制御法の載荷板に分銅のをのせることによって載荷する。排水バルブを開き圧密を開始す

表-1 供試土の理工学性

理工学性	月山黒ボク	月山下層土
自然含水比(%)	110.0	60.1
自然湿潤密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.06	1.58
自然乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.57	0.99
比重	2.46	2.73
液性限界(%)	83.8	74.1
塑性限界(%)	59.9	42.3
有機物含有量(%)	19.7	9.3
最適含水比(%)	53.0	38.0
最大乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.93	1.25

表-2 供試体の初期状態

	月山黒ボク	月山下層土
高さ(cm)	8.0	8.0
直径(cm)	3.5	3.5
含水比(%)	70.0	45.0
湿潤密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.5	1.6
乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.8	1.1

る。側方変位が生じないように注意しながら、供試体がふくれてきたら側圧を増加させ、供試体が縮んできたら軸圧を増加させていく。側方変位は、ゴムスリーブに微小な金属板を貼り、渦電流を利用した非接触タイプのギャップセンサー<sup>2)</sup>で測定した。

圧密終了後は、直ちにひずみ制御で軸圧縮を開始するが、ひずみ速度は 0.6%/min 程度とし、軸ひずみが 15% に達したところで軸圧縮を打ち切った。その際、間隙水圧は半導体圧力センサーで測定した。

### 3. データの取り込み

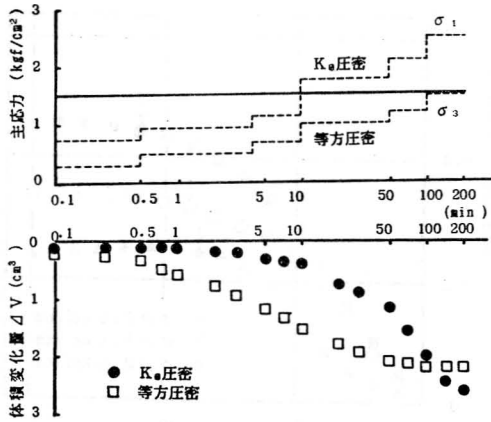
実験で測定した項目は、圧密過程では体積変化量、軸変位、また  $K_0$  圧密の場合は軸荷重、側方変位、軸圧縮過程では軸変位、荷重、間隙水圧である。それぞれの値は、A/D 変換によるデジタル表示で、直接読むこともできるが、同時にパソコンの指令によりフロッピーディスクに自動的に書き込まれる。パソコンは NEC PC-9801 E を使用、A/D 変換はアクシジョンコントローラ 7V14 で、前報<sup>2)</sup>に示したように GP-IB で PC-9801 E に転送する。なお、データはそのつどフロッピーディスクに書き込まれる一方、パソコンの内部でも保存され測定終了後、再度、改めてフロッピーディスクに書き込まれる。この二段階のフロッピーディスクへの書き込みは、長時間にわたる測定の際の不測の事故に備えるためのものである。

### 4. 黒ボクの圧密非排水剪断試験

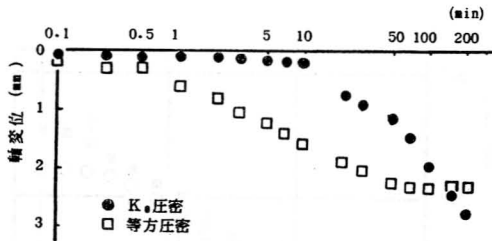
$K_0$  圧密と等方圧密のそれぞれの試料について非排水剪断試験を行う。

#### 4.1 圧密過程

月山黒ボクの体積変化量  $\Delta V$ —時間の一例を、図-1 に、軸変位—時間の一例を図-2 に示した。側圧  $\sigma_3$  の最終値は  $\sigma_3=1.5$  kgf/cm<sup>2</sup> である。 $K_0$  圧密の方は、最初  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  ともに低いため体積変化量も少なく、 $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  を増加させていくにしたがって、体積変化量も増加する。この場合では、 $K_0$  圧密の方が等方圧密よりも圧密が長かかり、体積変化量も多くなっている。また、 $K_0$  圧密が側方変位を生じさせないようにしており、体積変化量も多いため、等方圧密に比べて軸変位が大きく生じている。しかし、軸圧一定で側圧を減少させていく方法では、 $K_0$  圧密の方が体積変化量が少なく、圧密が早く終わっているという報告例<sup>3)4)</sup>がある。



図一 1 K<sub>0</sub> 圧密と等方圧密の比較(体積変化量 ΔV—時間)



図一 2 K<sub>0</sub> 圧密と等方圧密の比較(軸変位—時間)

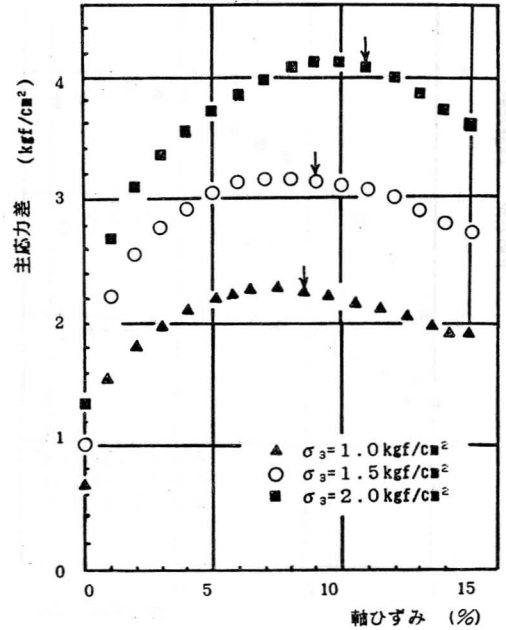
#### 4. 2 軸圧縮過程

##### 4. 2. 1. 主応力差と軸ひずみ

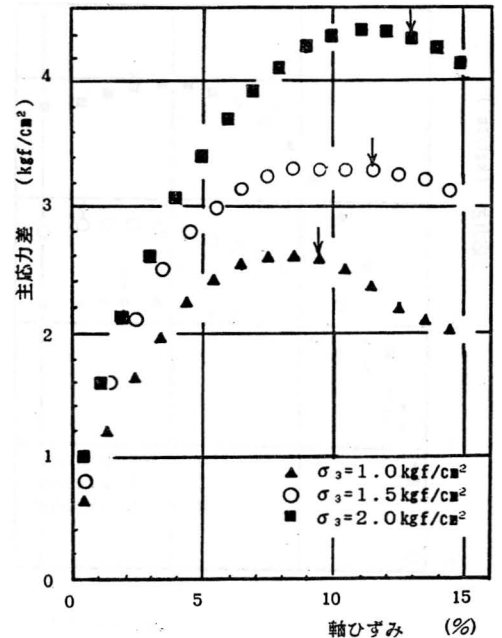
図一 3, 図一 4 は月山黒ボクの主応力差—軸ひずみのグラフで K<sub>0</sub> 圧密と等方圧密を比較したもの, 同じく図一 5, 図一 6 は月山下層土での比較したものである. 等方圧密は原点からスタートしているが, K<sub>0</sub> 圧密は圧密時に主応力差が生じているので主応力差軸上からスタートしている. 破壊基準を有効応力比 ( $\sigma_1'/\sigma_3'$ ) 最大 (矢印がつけてあるところ) とすると, 強度は等方圧密の方が K<sub>0</sub> 圧密よりもやや大になった. また, K<sub>0</sub> 圧密の方が主応力差が上昇していくときの傾きが緩やかで, 小さい軸ひずみで破壊している.

##### 4. 2. 2. 間隙水圧と軸ひずみ

図一 7, 図一 8 は月山黒ボクの間隙水圧—軸ひずみのグラフで K<sub>0</sub> 圧密と等方圧密を比較したもの, 同じく図一 9, 図一 10 は月山下層土での比較したものである. ( $\sigma_1'/\sigma_3'$ ) が最大のところ (矢印がつけてあるところ) で比べてみると, K<sub>0</sub> 圧密の方がやや小さくなっている. K<sub>0</sub> 圧密の方が等方圧密よりも圧密され, 間隙が小さく



図一 3 月山黒ボク (K<sub>0</sub> 圧密) の主応力差—軸ひずみ



図一 4 月山黒ボク (等方圧密) の主応力差—軸ひずみ

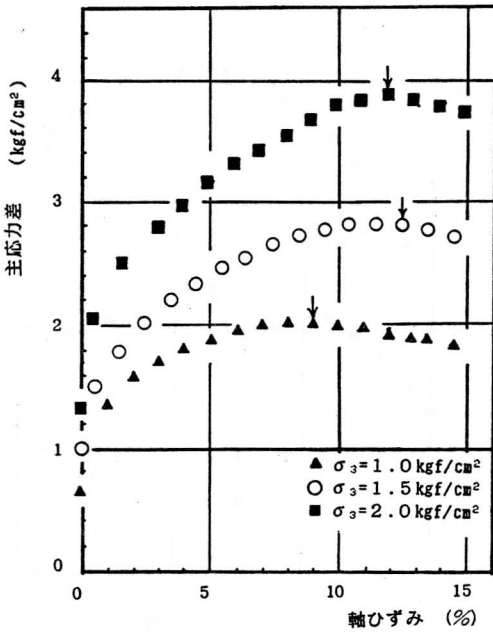


図-5 月山下層土(K<sub>0</sub>圧密)の主応力差-軸ひずみ

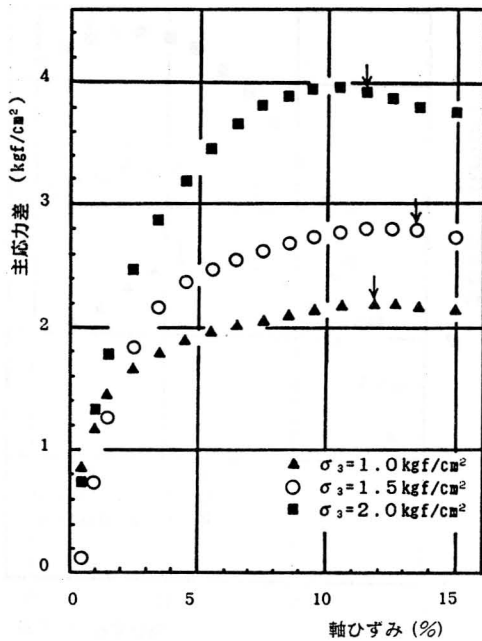


図-6 月山下層土(等方圧密)の主応力差-軸ひずみ

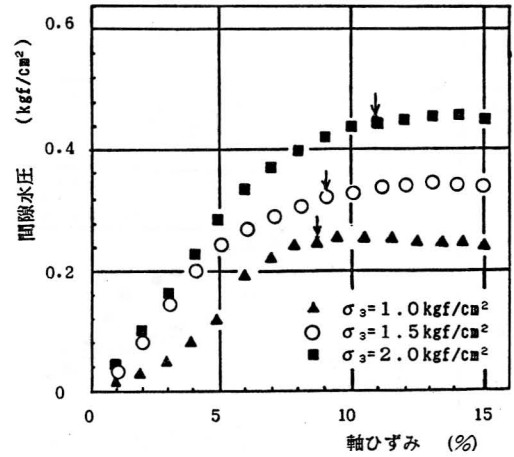


図-7 月山黒ボク(K<sub>0</sub>圧密)の間隙水圧-軸ひずみ

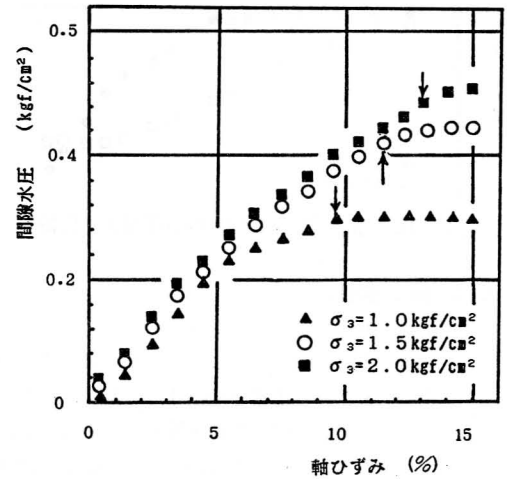


図-8 月山黒ボク(等方圧密)の間隙水圧-軸ひずみ

なるためと考えられる。

### 5. 有効応力経路による考察

#### 5.1 ベクトルカーブ

応力の変化状態を見るために、縦軸に非排水せん断強さ  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 、横軸に平均有効応力  $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$  をとったベクトルカーブを用いて比較してみた。ベクトルカーブでは、間隙水圧を考えない全応力では45度右上がりの直線になる。本実験のように正の間隙水圧が生じている場合はこの直線よう左側にずれ、負の間隙水圧が生じてい

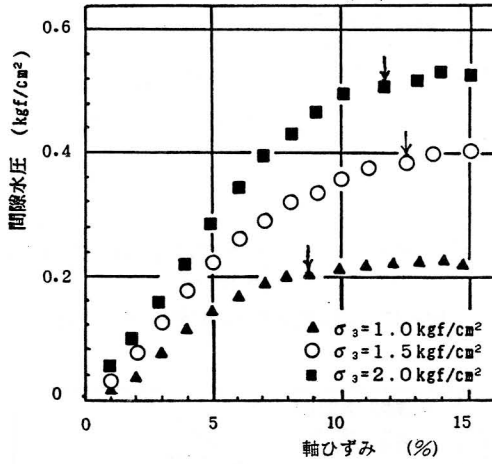


図-9 月山下層土( $K_0$ 圧密)の間隙水圧—軸ひずみ

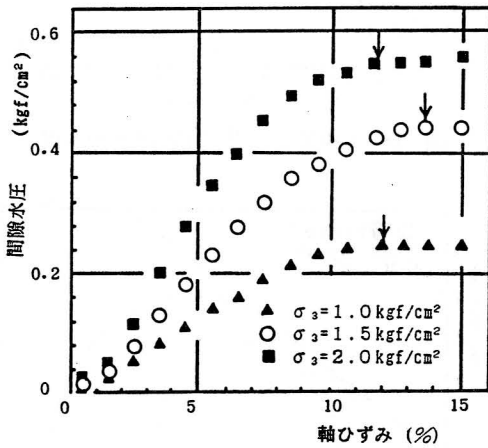


図-10 月山下層土(等方圧密)の間隙水圧—軸ひずみ

る場合は右側にずれることになる。図-11、図-12は月山黒ボクのベクトルカーブで  $K_0$  圧密と等方圧密を比較したもの、同じく図-13、図-14は月山下層土での比較である。等方圧密のベクトルカーブは圧密終了時点には  $\sigma_1$  と  $\sigma_3$  が等しいため非排水せん断強さはゼロになり平均有効応力軸からベクトルカーブはスタートする。それに対して、 $K_0$  圧密では圧密終了時点での  $\sigma_1$  と  $\sigma_3$  は異なっているので、ベクトルカーブは  $K_0$  軸からスタートする。等方圧密のベクトルカーブは、直線的に右上に上昇し、ピークをむかえて方向を左下に変えて下降する。 $K_0$  圧密のベクトルカーブは等方圧密のベクトルカーブ

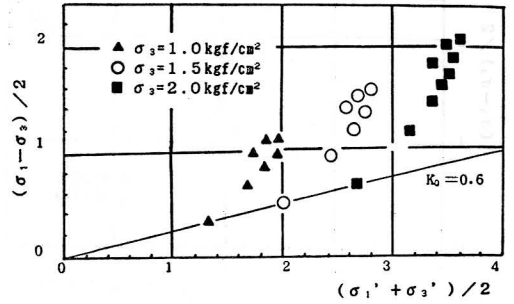


図-11 月山黒ボク( $K_0$ 圧密)のベクトルカーブ

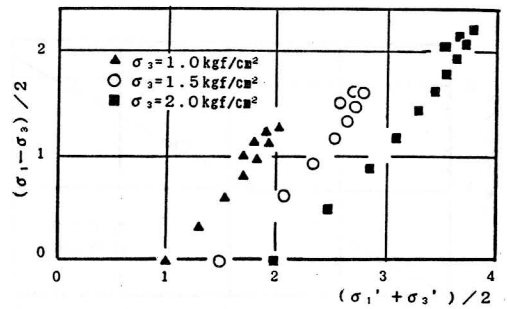


図-12 月山黒ボク(等方圧密)のベクトルカーブ

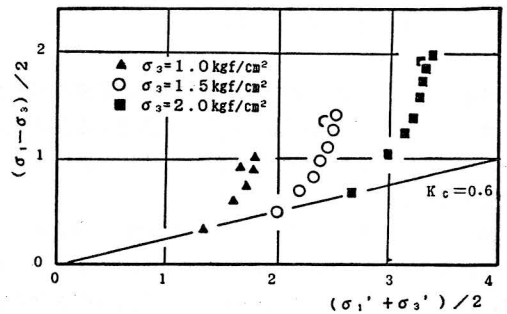


図-13 月山下層土( $K_0$ 圧密)のベクトルカーブ

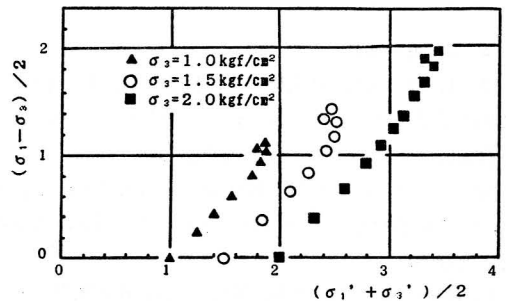


図-14 月山下層土(等方圧密)のベクトルカーブ

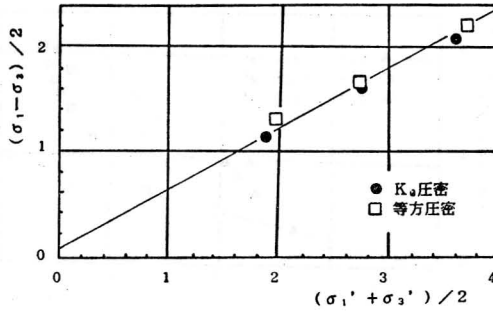


図-15 ベクトルカーブ上の主応力比最大の点のプロット(月山黒ボク)

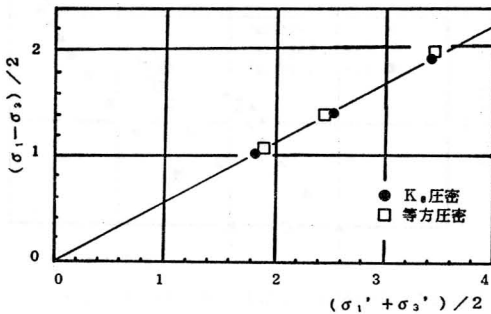


図-16 ベクトルカーブ上の主応力比最大の点のプロット(月山下層土)

よりもややふくらんで見える。これは  $K_0$  圧密のベクトルカーブの傾きが等方圧密よりもやや急であるためである。このことは、 $K_0$  圧密の方が間隙水圧が低いことを意味している。

図-15、図-16はベクトルカーブにおいて  $(\sigma_1'/\sigma_3')$  が最大になる点をプロットしたものである。これらの点は、ほぼ一直線上に並んでいる。この直線は破壊包絡線にあたり、内部摩擦角  $\phi'$  の決定においては圧密時の応力状態の相違は影響しないと考えられる。

### 5.2 モール円

図-17、図-18に月山黒ボク、同じく図-19、図-20に月山下層土についてそれぞれ  $(\sigma_1'/\sigma_3')$  が最大のところの有効応力で書いたモールの円を示した。なお、これらの図はパソコンにより直接描かせたものである。これより、内部摩擦角  $\phi'$  と粘着力  $C'$  を求めてみると、以下のようになる。

月山黒ぼくについて  $K_0$  圧密では、 $\phi'=32.2^\circ$ 、また  $C'=0.135 \text{ kgf/cm}^2$ 、一方、等方圧密では、 $\phi'=31.6^\circ$ 、

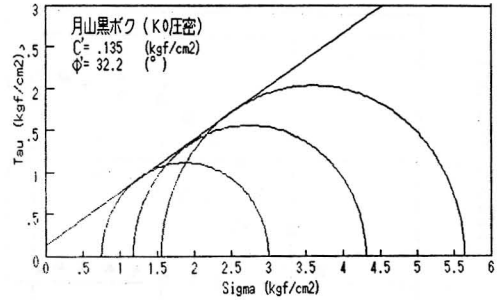


図-17 月山黒ボク ( $K_0$  圧密) のモール円

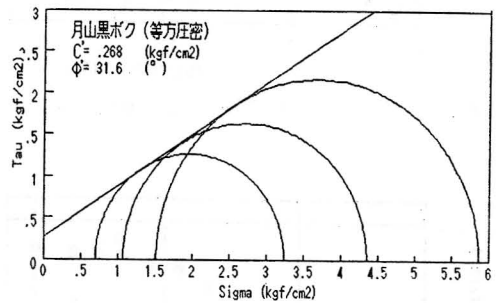


図-18 月山黒ボク(等方圧密)のモール円

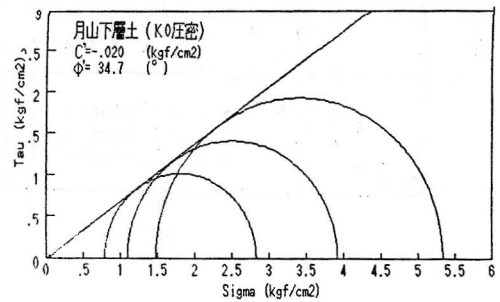


図-19 月山下層土( $K_0$  圧密)のモール円

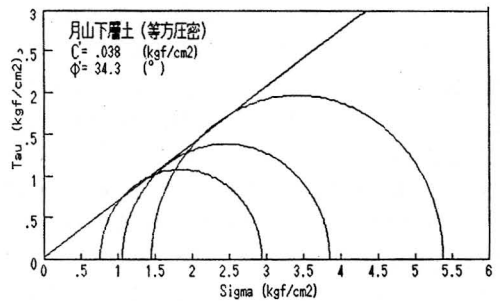


図-20 月山下層土(等方圧密)のモール円

C'=0.268 kgf/cm<sup>2</sup> となる。

また、月山下層土について K<sub>0</sub> 圧密では、 $\phi'=34.7^\circ$ 、 $C'=-0.020$  kgf/cm<sup>2</sup> となり、等方圧密では  $\phi'=34.3^\circ$ 、 $C'=0.038$  kgf/cm<sup>2</sup> となる。

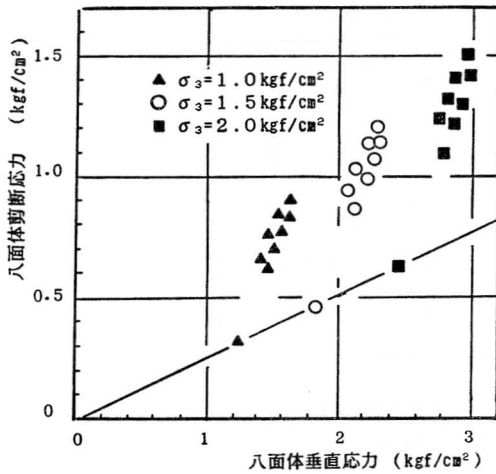
内部摩擦角  $\phi'$  は、K<sub>0</sub> 圧密の方が若干大きくなるがほとんど差がない。粘着力 C' は、月山黒ぼくでは K<sub>0</sub> 圧密が等方圧密の約半分になっているが、一方、月山下層土では若干の違いはあるが両者とも殆どゼロと近似できる。

### 6. 八面体応力による考察

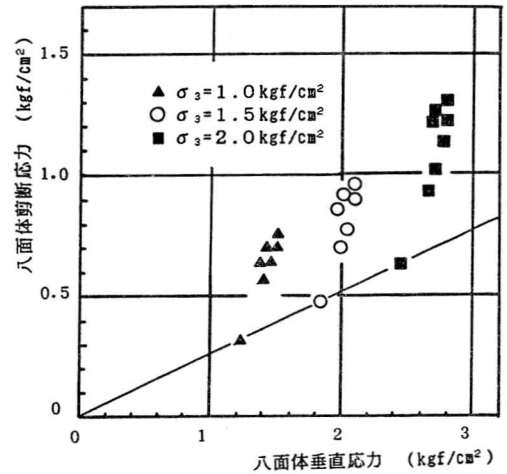
八面体垂直応力を  $\sigma_{oct}$ 、八面体剪断応力を  $\tau_{oct}$ 、八面体垂直ひずみを  $\epsilon_{oct}$ 、八面体剪断ひずみを  $\gamma_{oct}$  として八面体応力<sup>5)6)</sup>による考察を行う。

#### 6.1 八面体剪断応力と八面体垂直応力

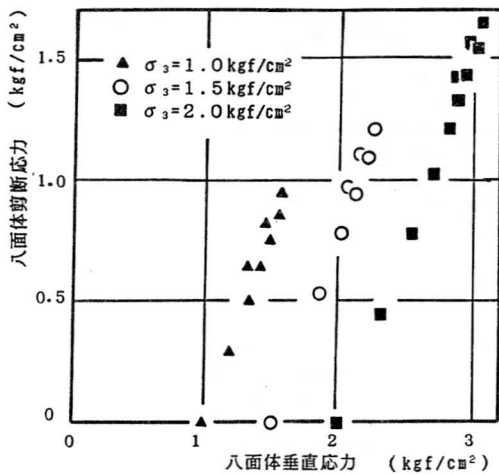
月山黒ボク、月山下層土の K<sub>0</sub> 圧密と等方圧密についての八面体剪断応力—八面体垂直応力のグラフを図—21～図—24に示した。いずれも右上の方向に直線的に上



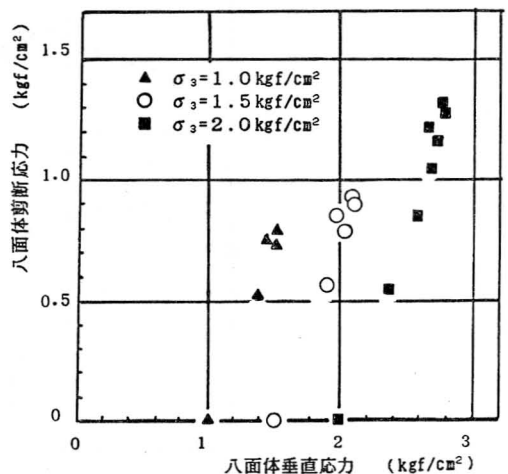
図—21 月山黒ボク(K<sub>0</sub>圧密)の八面体剪断応力—八面体垂直応力



図—23 月山下層土(K<sub>0</sub>圧密)の八面体剪断応力—八面体垂直応力



図—22 月山黒ボク(等方圧密)の八面体剪断応力—八面体垂直応力

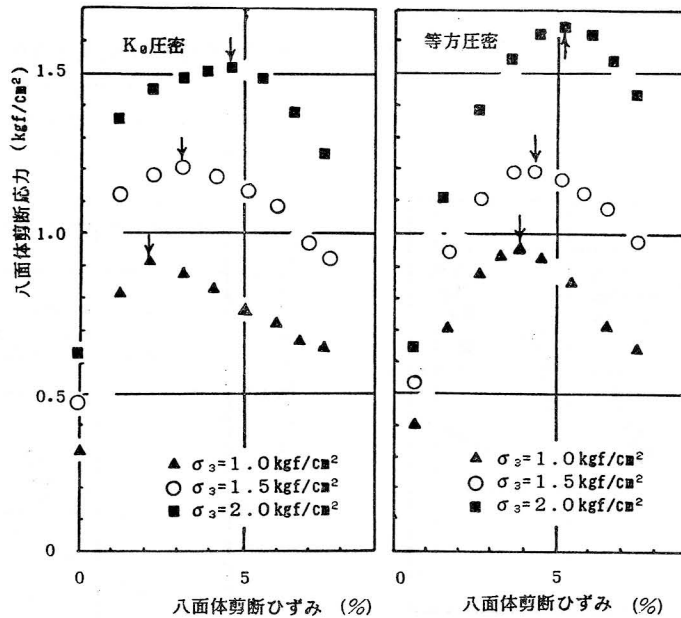


図—24 月山下層土(等方圧密)の八面体剪断応力—八面体垂直応力

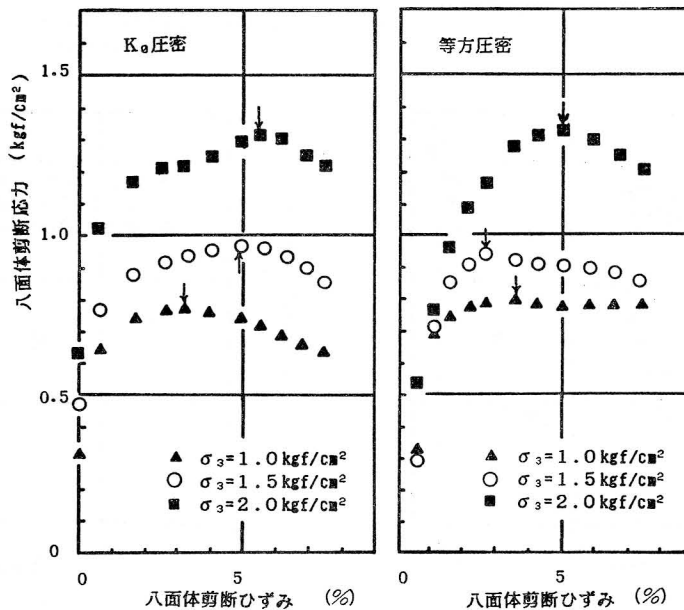
昇しピークをむかえ左下に向きを変え下降する。八面体剪断応力、八面体垂直応力の最大値はともに等方圧密の方が大きくなっている。

6. 2 八面体剪断応力と八面体剪断ひずみ

図一25～図一26に八面体剪断応力—八面体剪断ひずみのグラフを示した。等方圧密は原点からスタートするが、 $K_0$  圧密は  $\tau_{oct}$  軸からスタートしている。同じ応



図一25 月山黒ボクの八面体剪断応力—八面体剪断ひずみ



図一26 月山下層土の八面体剪断応力—八面体剪断ひずみ



力一ひずみ曲線である主応力差一軸ひずみとは、若干違った挙動を示している。月山黒ボクでは K<sub>0</sub> 圧密の方が小さいひずみで八面体剪断応力が最大になっているが、月山下層土では等方圧密の方が小さいひずみで最大になっている。

7. 圧密強度増加率についての考察

圧密圧力 p と非排水剪断強度 Cu の増加割合は圧密強度増加率 (Cu/p) と呼ばれ、圧密による地盤改良工事などにおいては非常に重要な設計指数となる。

7.1 K<sub>0</sub> 圧密と圧密強度増加率

求めた月山黒ボクの圧密強度増加率を表-3に示した。若干のばらつきは見られるが、K<sub>0</sub> 圧密が0.6程度、等方圧密が1.0~1.2となった。黒ボクについての報告例<sup>2)</sup>は見あたらなかったが、等方圧密したときの秋田泥炭の圧密強度増加率が0.5~0.7、北海道泥炭が0.5~1.0という報告<sup>8)</sup>があり、この値は妥当なものと考えられる。また、月山下層土の圧密強度増加率を表-4に示し

表-3 月山黒ボクの圧密強度増加率

側圧(kgf/cm <sup>2</sup> )	K <sub>0</sub> 圧密	等方圧密
1.0	0.63	1.20
1.5	0.60	1.03
2.0	0.58	1.05

表-4 月山下層土の圧密強度増加率

側圧(kgf/cm <sup>2</sup> )	K <sub>0</sub> 圧密	等方圧密
1.0	0.59	1.03
1.5	0.53	0.87
2.0	0.55	0.93

た。月山黒ボク、月山下層土ともに K<sub>0</sub> 圧密の圧密強度増加率は、等方圧密の値よりもかなり小さく、両者とも等方圧密の6割程度になっている。等方圧密は K<sub>0</sub> 圧密よりも危険側にあることになる。

8. おわりに

本研究では次のことが明らかとなった。1. モール円より強度定数を求めると、内部摩擦角 φ' は殆ど差はないが、粘着力に若干の違いがみられる。2. 破壊したときの空隙水圧は、K<sub>0</sub> 圧密の方が若干低めである。3. 圧密強度増加率は、等方圧密に比べて K<sub>0</sub> 圧密はかなり小

さい値を示す。また、本研究では以下の点が今後の課題として残された。1. 今回は、圧密過程において側方変位を生じさせないことよりも、σ<sub>1</sub> と σ<sub>3</sub> の値が異なるということを重視して実験を行ったため若干の側方変位が生じている。よって K<sub>0</sub> 値は必ずしも十分な精度があるとはいいがたい。このことは結果にどれだけ影響しているのだろうか。2. 側圧 σ<sub>3</sub> が同じだとすると、K<sub>0</sub> 圧密の方が等方圧密よりも σ<sub>1</sub> が大きく、圧密する力が強くなるので、強度も大になると考えられる。しかし、今回の実験結果では逆になった。その理由を明らかにすることはできなかった。3. 今回は正規圧密状態のみで実験を行ったが、過圧密状態ではどの様に変わってくるのだろうか。4. K<sub>0</sub> 圧密を行うために側圧と軸圧の両者とも増加させる方法をとったが、軸圧一定で側圧を減少させていく方法での剪断特性は、どの様に異なるのか確かめるまでには至らなかった。

本研究を進めるに当たり当研究室技官の山崎加津子氏の協力を得た。ここに深く深謝の意を表したい。

引用文献

- 1) 東山 勇・吉田 力・石田朋靖・木村真一：泥炭の三軸非排水試験について、山形大学紀要，10巻2号，pp. 49~57，1987。
- 2) 東山 勇：パソコンによる三軸圧密の自動計測，山形農林学会報，第43号，pp. 29~32，1986。
- 3) 中野 坦：サンドドレーンによる K<sub>0</sub>-圧密理論の研究，土木学会論文報告集，No. 200，pp. 63~70，1972。
- 4) 中野 坦・伊藤富雄：K<sub>0</sub>-圧密の理論と圧密挙動，土と基礎，Vol. 32，No. 8，pp. 5~10，1984。
- 5) 土壌物理研究会編：土の物理学，7章，レオロジーと塑性，森北出版，pp. 147~196，1979。
- 6) 東山 勇：泥炭を含む有機質土の弾塑性解析とレオロジー的考察，山形大学紀要，9巻4号，pp. 93~112，1985。
- 7) 月館光三・及川 洋：(山内・前田編)本邦各種粘性土の土構造と工学的性質，6章，多賀出版，p. 181，1985。
- 8) 対馬雅己・宮川 勇：乱さない泥炭性有機質土の強度特性に関する実験的考察，有機質土シンポジウム，pp. 53~56，土質工学会，1977。
- 9) 東山 勇：東北地方のローカルな土 泥炭・黒泥，土質工学会東北支部設立三十周年記念誌，pp. 78~84，土質工学会東北支部，1985。