

投稿論文 (和文ノート)

**TECHNICAL
NOTE**

粘土の三軸伸張試験における供試体直径/高さ比について

小田美明*・三田地利之**

粘土の非排水せん断挙動に及ぼす供試体寸法の影響を検討するため、2種類の練り返した粘土について、一連の圧密非排水三軸伸張試験を行った。高さの直径に対する比は0.5から2.4の範囲とした。実験は、等方圧密条件で行った。その際、供試体周面にはろ紙を巻かず、両端面で排水させた。せん断は、側方応力一定下で軸応力を減少させた。実験結果から三軸伸張試験における適切な供試体高さは、直径と同程度にすべきであることが分かった。

Keywords : cohesive soil, triaxial extension test, specimen size, consolidated undrained shear

1. はじめに

原地盤の強度特性を把握する際、三軸圧縮試験のみでなく、今後三軸伸張試験の行われる機会が多くなるものと思われる。現在行われている三軸伸張試験の供試体寸法は、圧縮試験と同様に供試体高さを直径の2.0~2.5倍としているようである。しかし、圧縮試験の供試体寸法は、上下端面の摩擦の影響¹⁾を考慮したものであり、伸張試験においても、その必要があるかどうか疑問である。

粘性土の三軸伸張試験において、圧縮試験と同じ寸法の供試体を用いた場合、圧密時間短縮のため供試体周面に巻かれるろ紙の形状は、試験結果への影響を避けるため、斜め方向にスリットを入れたものあるいはらせん状のものが有効とされている²⁾⁻⁵⁾。しかし、このような形状のろ紙を用いても試験結果に影響を与えることが報告⁶⁾⁻⁸⁾されている。

供試体周面にろ紙を用いない砂質土の伸張試験において、供試体高さが直径の2倍程度の供試体を用いた場合、局所的に変形が生じ (necking)、破壊時の供試体断面積が、供試体が一樣に変形すると仮定した平均面積よりかなり小さくなり、強度を過小評価する可能性があることがRoscoeらにより報告⁹⁾されている。Barden・Khayat¹⁰⁾は、供試体の高さと同直径の比を1:1とし、端面摩擦を軽減した場合には、局所的変形が生じることなく、変形が均一におこりすべり面が現れると報告している。また、初期高さを直径以下にした実験においても同様な傾向があるが、高さの低い場合は bedding error により軸ひずみを過大に評価する可能性があることが報告¹¹⁾されている。

表-1 試料の物理的性質

Sample	w_L (%)	w_P (%)	I_P	G_s	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Kaolin	85	40	45	2.75	0	8	92
Kucchan	81	40	41	2.68	0	23	77

圧密非排水三軸伸張試験結果に及ぼす供試体高さの影響について、関東ロームを用いた実験結果から山田・龍岡¹²⁾は、以下のことを報告している。軸差応力の初期の立ち上がりおよびピーク時までの強度は寸法比によらずほぼ一致する。供試体高さが高い場合は、neckingのためピーク後強度が急激に低下するが、高さが低い場合は一樣に変形する。さらに、過剰間隙水圧は高さの大きい方が正の間隙水圧が出やすい傾向があるが、有効応力経路はほぼ一致する。カオリンを用いた実験においても同様な結果が報告¹³⁾されている。

上述のように、三軸伸張試験において、高さが直径の2倍程度の供試体では、局所的な変形が生じ強度を過小評価する傾向があるようである。本報告は、供試体高さを変えた圧密非排水伸張試験を実施し、試験結果に及ぼす供試体高さの影響について検討したものである。

2. 試料および実験

試料は、市販のカオリン粘土および北海道倶知安町近郊から採取し粗粒分を除いたものを用いた。これらの粘土を液性限界の2倍の含水比になるよう蒸留水を加えソイルミキサーで十分に攪拌し脱気した後、一次元的に予圧密したものを用いた。その物理的性質を表-1に示す。

実験には、通常の軸対称三軸試験装置を用いた。供試体の直径は50 mmであり、高さは25 mmから120 mmの範囲で変えた。軸力の測定は三軸セル内にセットしたロードセルにより、間隙水圧は供試体底部中央で測定した。

* 正会員 北海道大学助手 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

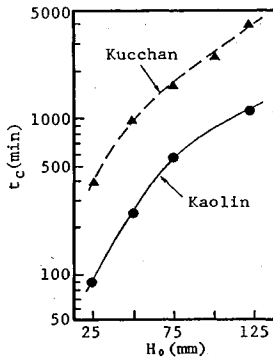


図-1 圧密時間と供試体高さとの関係

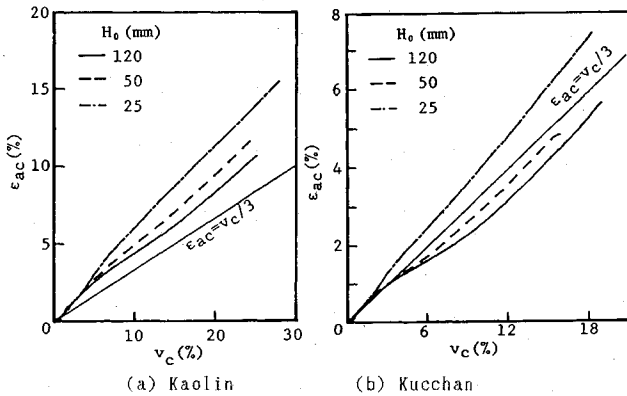
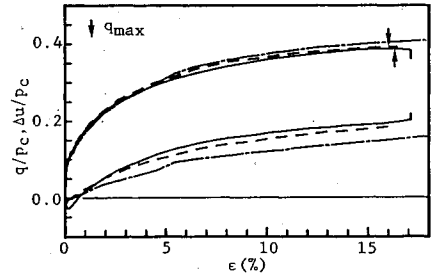
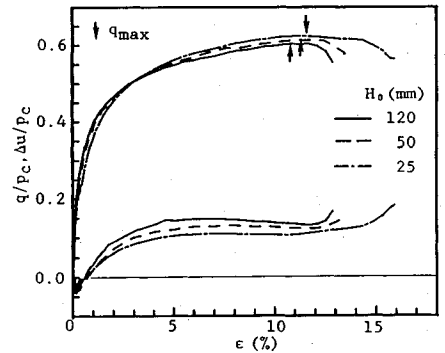


図-2 等方圧密時の軸ひずみと体積ひずみとの関係



(a) Kaolin



(b) Kucchan

図-3 主応力差および発生間隙水圧と軸ひずみとの関係

実験条件は、すべて等方圧密非排水三軸伸張試験とし、圧密過程から 200 kPa の背圧を載荷した。有効圧密圧力は、400 kPa とした。

圧密時間の長短による強度増加の要因を取り除くため圧密終了時間は、すべて 3t 法¹⁴⁾により決定した。軸圧縮過程はひずみ速度一定 (0.01%/min) で行った。排水はすべて両端面排水とし、周面のろ紙は用いていない。ただし、供試体とキャップおよびベDESTAL との摩擦を軽減するため、厚さ 0.05 mm ドーナツ状 (外径: 50 mm, 内径 18 mm) のテフロンシートにシリコングリースを塗布したものを用いた。圧縮試験では、端面摩擦の軽減にゴム膜が用いられる。しかし、伸張試験において、この方法で行った場合、初期のせん断剛性が十分に測定されなかったため、テフロンシートを用いた。

3. 実験結果

(1) 圧密特性

図-1 は、3t 法による圧密終了時間 t_c と供試体の初期高さ H_0 との関係を示している。一次元圧密では、排水長を 1/2 にすれば、圧密終了時間が 1/4 になることが知られている。しかし、今回の実験では、供試体高さを 1/2 にしても、圧密時間は、30~40% 程度しか短縮され

ない。これは、端面摩擦の除去のため供試体端面全てを排水面とせずドーナツ状のテフロンシートを用いているためと考えられる。供試体高さを直径と同じにした場合、高さ 2.4 倍の供試体にらせん状のろ紙を供試体周面積の 50% 巻いた場合⁶⁾よりも圧密が速く終了している。

等方圧密時の軸ひずみ ϵ_{ac} と体積ひずみ v_c との関係を図-2 (a), (b) にそれぞれ示す。供試体が等方的に変形した場合の両ひずみの関係 $\epsilon_{ac} = v_c/3$ も図中に示している。体積ひずみには、ろ紙の圧縮による排水量も含んでいる。カオリン粘土においては、圧密開始から軸方向 (鉛直方向) のひずみが卓越している。また、両粘土とも供試体高さの低い方が軸ひずみが卓越する傾向となっている。この原因として、供試体とキャップおよびベDESTAL 間の排水用のろ紙および端面摩擦軽減層の圧縮性が考えられる。高野ら¹⁵⁾も、豊浦砂を用いて供試体高さを変えた等方圧縮試験の結果から同様な実験結果を報告している。

(2) 変形特性

圧密圧力 p_c で正規化した主応力差 $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$ および発生間隙水圧と軸ひずみとの関係を図-3 (a), (b) にそれぞれ示す。非排水せん断時の軸ひずみは、すべて絶対値で示している。図中の実験結果は供試体初期高さ

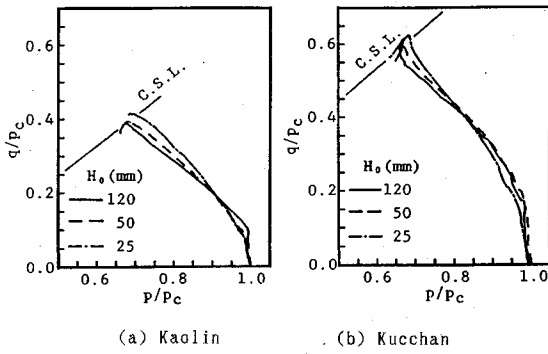


図-4 有効応力経路

$H_0=120, 50, 25$ mm のものである。カオリン粘土においては、せん断初期の変形は、高さの影響をほとんど受けないが、軸ひずみ 1% 程度から供試体高さが低い方が主応力差が大きくなる。図中には、主応力差最大の状態も示している。高さ 25 mm では、22.8% で最大値を得た。

供知安粘土では、供試体高さを低くすることによりせん断初期の剛性が減少する傾向がみられる。軸ひずみ 5% 以上では、カオリン粘土と同様、供試体高さが低い方が主応力差が大きくなる。また、主応力差最大時の軸ひずみは、供試体の高さが低い方が大きくなる傾向となる。

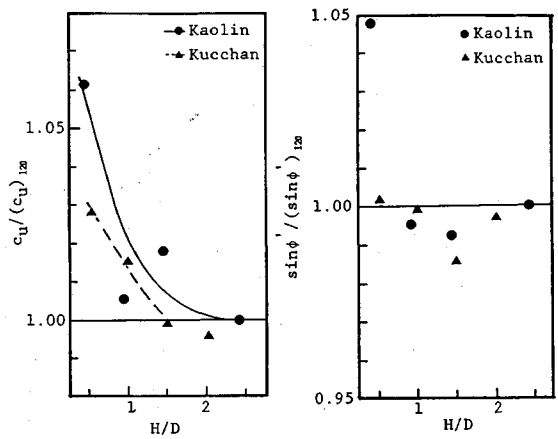
非排水せん断中の間隙水圧挙動は、せん断初期の負の間隙水圧発生量は供試体高さが低い方が低く、正の発生量も高さが低い方が小さくなる傾向となった。

有効応力経路を図-4 (a), (b) に示す。両粘土においてせん断初期は高さの高いものの方が外側に膨らみ、その後、逆転する傾向となる。

(3) 強度特性

両粘土の強度定数と供試体高さとの関係を図-5 (a), (b) にそれぞれ示す。 H/D は、圧密終了時の値を用いた。各強度定数は、高さ 120 mm のものを基準としている。主応力差および主応力比の最大値は、ほぼ一致しており、この状態を破壊とした。

非排水強度 c_u は、最大主応力差の 1/2 とした。両粘土において、供試体の初期高さが低い方が、強度が大きくなる傾向となった。しかし、最大でも 6% 程度である。このような傾向について、龍岡ら¹¹⁾は、供試体高さが高いものは局所的に変形が起こることが原因だとしている。しかし、今回の実験では、主応力差最大時においても変形はほぼ均一であった。一部の試験において、主応力差が最大値を示した後もせん断を続けた場合、necking 傾向は軸ひずみがさらに数% 程度生じた後にみられた。この際、供試体の直径を実験終了後測定してみた結果、最も小さい中央付近は、端面付近より 4~6% 小さくなっていた。



(a) undrained strength (b) Angle of shear resistance

図-5 強度定数

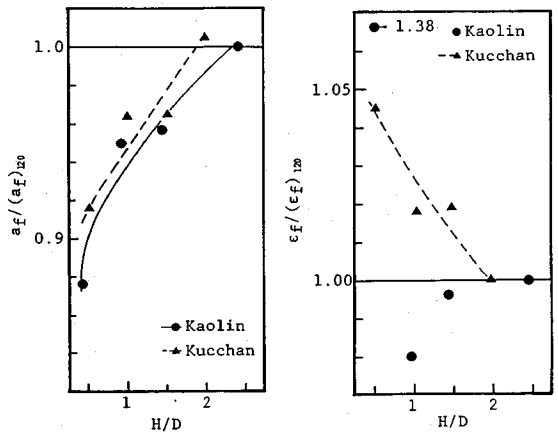


図-6 破壊時の間隙水圧

図-7 破壊時の軸ひずみ

有効応力によるせん断抵抗角 ϕ' は、カオリン粘土の 25 mm のものを除いて高さによらず一定値となった。

破壊時の一般表示の間隙水圧係数 a_f および軸ひずみと供試体寸法との関係を図-6, 7 にそれぞれ示す。供試体高さが低い方が破壊時の間隙水圧係数は小さくなった。高さ 25 mm のものでは、120 mm のものよりも 10% 程度小さくなっている。破壊時の軸ひずみは、供試体高さを低くすることにより大きくなる傾向がある。

4. 結 論

供試体の初期高さを直径の 0.5~2.4 倍に変えた三軸伸張試験から、以下の結論を得た。

- (1) 端面摩擦軽減層を用いた場合、高さすなわち排水長と圧密時間との関係に二乗則は当てはまらない。
- (2) 等方圧密時の変形は供試体の初期高さの影響を受ける。これは、ろ紙および端面摩擦軽減層の圧縮性と

関連がありそうである。

(3) 供試体高さが低い場合、せん断初期の剛性が小さくなる可能性がある。しかし、ある応力レベル以上では供試体高さの低い方がひずみの発生量が少ない。

(4) 供試体高さを低くすると発生間隙水圧の絶対値は小さくなるが、せん断抵抗角は供試体高さの影響を受けない。したがって、非排水強度は大きくなり、破壊時の間隙水圧係数は減少する。

(5) 破壊時の軸ひずみは供試体を低くすることにより大きくなる。

以上の結果から三軸伸張試験における供試体の初期高さは、ある程度、等方圧密および非排水せん断に影響を与えるが、今回の実験の範囲 ($H/D=0.5\sim 2.4$) では、顕著な差はみられない。したがって、供試体高さを圧縮試験と同様に2倍程度とする必要は無い。

供試体高さを高くした場合、圧密時間が増加する。また、 H/D が0.5程度では、せん断面が剛なキャップおよびベDESTALと接することになり、強度が大きくなる可能性もある。また、現状の三軸圧縮試験装置の構造、計測機器の精度から判断すると、同一の実験システムで圧縮および伸張試験を行うには、 H/D を1程度とするのが適当と考えられる。

参 考 文 献

- 1) Bishop, A.W. and Green, G.E. : The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil, *Geotechnique*, Vol.15, No.3, pp.234~266, 1965.
- 2) 土質工学会編：第7章 基準化されていない静的三軸試験，土質試験の方法と解説，土質工学会，p.395, 1990.
- 3) Bishop, A.W. and Henkel, D.J. : *The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test*, Edward Arnold Ltd., London, 1962.
- 4) Berre, T. : *Triaxial testing at the Norwegian Geotechnical Institute* N.G.I. Publication No.134, 1983.
- 5) Mitachi, T., Kohata, Y. and Kudoh, Y. : The influence of filter strip shape on consolidated undrained triaxial extension test results, *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM STP 977, pp.667~678, 1988.
- 6) 小田美明・三田地利之・村木俊介：三軸試験結果に及ぼすペーパードレーンの影響，三軸試験に関するシンポジウム発表論文集，pp.91~96, 1991.
- 7) 中井照夫：粘土の三軸伸張試験におけるろ紙の張力，土と基礎，Vol.31, No.7, p.68, 1983.
- 8) Hanzawa, H. : Field and laboratory behaviour of Khour Al-Zubair clay, Iraq, *Soils and Foundations*, Vol.17, No.4, pp.17~30, 1977.
- 9) Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A. : An evaluation of test data for selecting a yield criterion for soils, *ASTM*, STP361, pp.111~128, 1963.
- 10) Barden, L. and Khyatt, J. : Incremental strain rate ratios and strength of sand in the triaxial test, *Geotechnique*, Vol.16, No.4, pp.338~357, 1966.
- 11) 福島伸二・田所治・龍岡文夫：砂の三軸伸張試験における供試体の寸法効果，第19回土質工学研究発表会講演集，pp.357~360, 1984.
- 12) 山田眞一・龍岡文夫：関東ロームの非排水せん断特性に及ぼす供試体の寸法効果，第18回土質工学研究発表会講演集，pp.465~464, 1983.
- 13) 龍岡文夫：土質せん断試験機の設計と製作一試験法あれこれ一，地質と調査，第3号，pp.53~58, 1986.
- 14) 土質工学会編：第4章 土の圧密非排水 (CU) 三軸圧縮試験，土質試験の方法と解説，土質工学会，p.357, 1990.
- 15) 高野公寿・沢田俊一・龍岡文夫：三軸試験における境界条件の影響一等方圧密試験に与える供試体の寸法効果一，第17回土質工学研究発表会講演集，pp.329~332, 1982.

(1991.4.15 受付)

ON THE SUITABLE SPECIMEN ASPECT RATIO FOR TRIAXIAL EXTENSION TEST ON CLAYS

Yoshiaki ODA and Toshiyuki MITACHI

A series of consolidated undrained triaxial extension tests using remolded samples of two kinds of clays was performed to investigate the influence of specimen size on undrained shear behaviour of clays.

The height to diameter ratio of specimen was changed from 0.5 to 2.4. Triaxial test specimens were consolidated isotropically without lateral filter paper drain and then sheared under undrained extension by decreasing axial stress, while lateral stress was maintained constant.

Based on the test results, it is suggested that the suitable height to diameter ratio of the specimen for triaxial extension test is around unity.