

粘性土の非排水せん断挙動に及ぼす圧密時間の影響

EFFECT OF CONSOLIDATION DURATION ON THE UNDRAINED
SHEAR BEHAVIOR OF COHESIVE SOILS

小田 美明*・三田地利之**・木藤 勇人***

By Yoshiaki ODA, Toshiyuki MITACHI and Hayato KITO

In the consolidated undrained test on cohesive soils, consolidation duration influences on the undrained shear behavior. Consequently, appropriate criterion for judging end of consolidation is required.

In order to study the applicability of the square root time fitting method and the usefulness of 3 t method (JSSMFE, 1979) to determine consolidation duration, a series of consolidated undrained triaxial compression test with different consolidation duration on four normally consolidated cohesive soils was performed. Based on the test results, it was shown that the square root time fitting method can be applicable to triaxial isotropic consolidation, but 3 t method is better to minimize the influence of consolidation duration on the stress-strain-strength behavior of cohesive soil during undrained shear process.

Keywords: cohesive soil, consolidated undrained shear, shear strength

1. はじめに

粘性土の圧密非排水圧縮試験において、圧密時間の増加に伴い、圧縮強さが増加することが知られている^{1)~10)}。したがって、圧密非排水試験を行う際、圧密終了判定のための的確な規準が必要である。しかし、粘性土の変形、強度特性に及ぼす圧密時間の影響についての研究の多くは、二次圧密領域についてのものであり、通常業務として行われる圧密時間の範囲のものは少ない。

三笠ら²⁾は、4種類の粘性土についての改良型一面せん断試験機による実験結果から圧密時間とせん断強さの関係について報告している。これらの結果から通常業務としてせん断試験を行う際の指針として間隙水圧がゼロとなる圧密時間を選ぶのが妥当だとし、一応の目安として曲線定規法による t_{50} の30倍程度が適当だとしている。

三軸等方圧密については、亀井ら¹⁰⁾が、Yoneyama Red Clayを用いた等方および K_0 圧密非排水試験をそれぞれ圧密時間を変えて行い、3 t 法¹¹⁾による一次圧密

終了判定の有効性を報告している。しかし、試験時間の短縮が必要な場合には、2 t 法でも良いとしている。

また、三軸圧密に対して一次元の圧密試験 (JIS A 1217) における \sqrt{t} 法を準用することについては、沔紙の透水性をきわめて大きいと仮定し、沔紙の配置が圧密速度に及ぼす影響を計算した結果から、三軸試験の規格の排水条件では \sqrt{t} 目盛りの曲線に直線部分がなく適用できない¹²⁾とされている。しかし、著者ら¹³⁾は、三軸等方圧密において排水を周面方向のみに限定した場合、 \sqrt{t} 法が適用可能であること、また、圧密の載荷段階数を変えても最終段階の圧密を \sqrt{t} 法による一次圧密量に相当する時間を越えて2時間後に打ち切るように統一すれば、その後のせん断挙動に影響を及ぼさないことを報告している。

三軸等方圧密の終了判定法として、排水速度が0.03 %/h以下になった場合を圧密終了とする方法¹⁴⁾も提案されている。しかし、実用的な反面、載荷段階数や沔紙の被覆面積に影響されることが考えられる。

また、圧密時間の増加に伴う非排水強度の増加に関する研究においては、排水量と時間の対数との関係から得られる逆S字形の曲線において、曲線の中間部のほぼ直線とみなされる部分の延長と二次圧密領域の直線との交点を一次圧密終了とする Casagrande の $\log t$ 法を準用

* 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(同上)

*** 正会員 北海道旅客鉄道株式会社
(〒060 札幌市北区北5条西4丁目)

したもの⁹⁾、あるいは、二次圧密領域の直線の開始部分を一次圧密終了としたもの⁹⁾もあるが、二次圧密領域が明確に現われるまで、圧密を継続する必要があり、通常業務における判定法としては難がある。

さらに、圧密時の体積変化ではなく圧密時の間隙水圧の消散度から圧密時間を決定している場合¹⁵⁾もある。

そこで、本研究は、4種類の粘土を用い、圧密時間を変え圧密非排水圧縮試験を行って、三軸等方圧密試験に対する \sqrt{t} 法の適用性、および $3t$ 法の有効性について検討したものである。

2. 試料および実験

(1) 試料

実験に用いた試料は、市販の2種類のカオリン粘土と笠岡粘土および北海道倶知安町近郊から採取した自然粘土である。市販の粉末粘土は、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、スラリー状態で養生した。また、自然粘土は蒸留水を加え420 μ mのふるいで粗粒分を除いた後、同様にスラリー状態で養生した。このスラリー状態の粘土を大型予圧密セルに真空状態で引き込み十分に脱気した後、カオリン粘土は100 kPa、他の粘土は80 kPaの鉛直応力で一定期間、一次的に予圧密した。各試料の物理的性質をTable 1に示す。

(2) 実験装置

実験には、通常の軸対称三軸圧縮試験装置を用いた。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行った。また、間隙水圧の測定は供試体底部中央で行った。メンブレンの透気性、透水性を考慮して、セル内を脱気水で満たした。供試体の大きさは、直径50 mm、

高さ120 mmである。実験は、すべて、20 \pm 0.5 $^{\circ}$ Cの恒温室内で実施した。

(3) 実験条件

供試体を所定の圧密圧力まで段階的に等方圧密した後、非排水条件でひずみ速度一定でせん断した。圧密時から200 kPaのバックプレッシャーを載荷した。圧密時の排水は、供試体側面に巻かれた沔紙に向かう半径方向排水のみに限定し、上下方向では行っていない。Table 2に実験条件を示す。

3. 実験結果および考察

(1) 圧密特性

Fig. 1は、カオリン-1粘土についての集水方向を変えた場合の圧密挙動である。この図からわかるように、周囲の沔紙からの排水を間隙水圧測定経路に近い下部 (pedestal) で集水した場合、上部 (cap) で集水した場合よりかなり速く過剰間隙水圧が消散する。しかし、体積変化は集水方向にかかわらず同じ挙動を示す。圧密非排水試験において圧密終了の判定を体積変化からではなく、間隙水圧の消散度による例¹⁵⁾もあるが、このように集水位置によって測定される間隙水圧の挙動がかなり異なる。したがって、間隙水圧の消散により圧密終了の判定をするのは適切ではなく、体積変化から判定するのが適切だと考えられる。また、一次元圧密においては、応力による圧密度が沈下量による圧密度より常に遅れることが知られている¹⁶⁾ことから、排水経路に近いところで圧密中の間隙水圧を測定した場合は、その値の信頼性はかなり低いと考えるべきであろう。

各粘土の圧密挙動を時間の平方根および対数で整理し

Table 1 Index properties of samples.

Sample	w_L (%)	w_p (%)	I_p	G_s	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Kaolin-1	76	32	44	2.75	0	1	99
Kaolin-2	85	40	45	2.75	0	8	92
Kasaoka	62	37	25	2.77	18	37	45
Kucchan	81	40	41	2.68	0	23	77

Table 2 Test condition.

Sample	$\frac{\Delta P}{P}$	LS	p_c (kPa)	FPC (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/min)
Kaolin-1	5	1	300	70	0.1
Kaolin-2	1	4	400	50	
Kasaoka		3	200	100	
Kucchan					

$\Delta P/P$: Load Increment Ratio

LS : Loading Steps

p_c : Isotropic Consolidation Pressure

FPC : Filter Paper Coverage

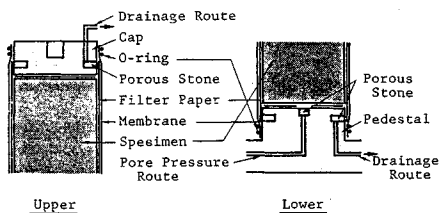
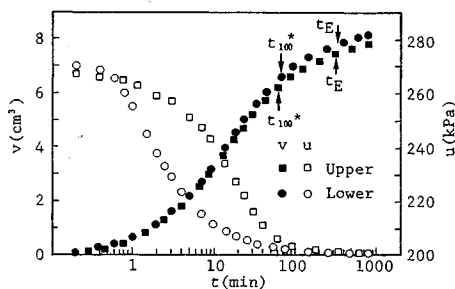


Fig. 1 Consolidation characteristics with different position of drainage outlet.

たものを Fig. 2(a), (b) にそれぞれ示す。Fig. 2(a) からわかるように、すべての粘土において、圧密初期に直線部分がみられ、三軸等方圧密においても \sqrt{t} 法の適用が可能であるといえる。

これらの図から各粘土について求めた \sqrt{t} 法の準用による一次圧密量 v_{100}^* に対応する時間 t_{100}^* と $3t$ 法による圧密終了時間 t_E およびその比 t_E/t_{100}^* を Table 3 に示す。別に行った実験から得られたカオリン-2 粘土の沓紙の被覆面積率 100% の場合の値および早来粘土の値も示してある。この表からわかるように実測された t_{100}^* , t_E には、それぞれかなりのばらつきがある。圧密時間の短いものについては、 $3t$ 法により t_E を求めることができないため、以下の圧密時間の整理にはこの平均値を用いる。また、 t_E/t_{100}^* は、別に行った試験結果から粘土に固有なものではなく、圧密応力の載荷段階数や沓紙の被覆面積率等により変化することがわかっている。なお、Table 3 には、二次圧密係数 C_α も示している。カオリン-1 粘土以外の粘土における圧密試験 (JIS A 1217) から得られた圧密特性を Table 4 に示している。圧密試験の荷重段階は、三軸等方圧密試験と間隙比が近

いものを選定した。これらの表からわかるように、三軸等方圧密における終了時間を一次元の圧密試験から得られる圧密特性で定量的に予測することは難しいが、ある程度の目安とはなるであろう。

2 種類の圧密終了判定法について検討するため、Fig. 3(a), (b) に圧密時間 t を \sqrt{t} 法および $3t$ 法による圧密時間 t_{100}^* , t_E で、排水量 v を同じく v_{100}^* , v_E で正規化したものを示す。これらの図からわかるように \sqrt{t} 法による判定では、圧密開始から t_{100}^* までの圧密挙動は粘土によらず 1 つの曲線で表わすことができる。しかし、一次圧密後の圧密挙動は粘土の種類によりかなり異なり、一次圧密量の 20% 程度圧密が進行する。また、 $3t$ 法による圧密終了では、圧密開始から t_E までは、 \sqrt{t} 法と比べて粘土によりやや異なるが、 t_E 前後の排水量の増加率は \sqrt{t} 法によるものと比べかなり小さい。

本実験の圧密時間の範囲における各粘土の圧密時間の最も長い実験から得られた間隙比と t_E で正規化した圧密時間の対数との関係を Fig. 4 に示している。 t_E 後の間隙比は、時間の対数に比例して減少する傾向となり、各粘土の二次圧密領域の始まりが t_E に対応する傾向が

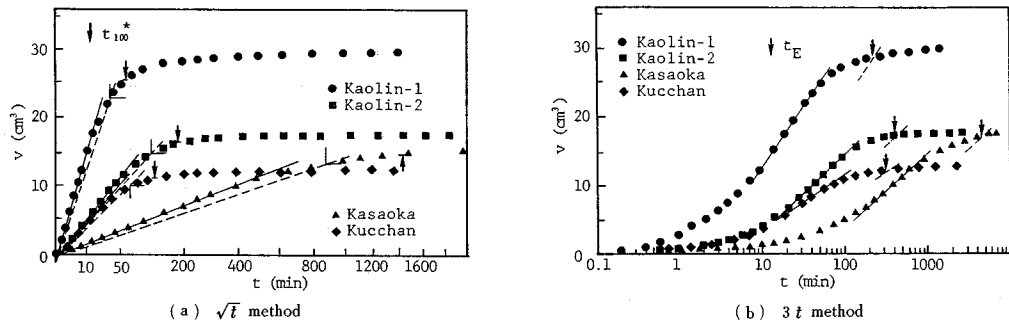


Fig. 2 Determination of end of consolidation by two methods.

Table 3 Triaxial consolidation characteristics.

Sample	FPC (%)	P_c (kPa)	e	t_{100}^* (min)		t_E (min)		$\frac{t_E}{t_{100}^*}$	$C_\alpha \times 10^{-2}$
				Range	Avg.	Range	Avg.		
Kaolin-1	70	50+300	1.73+1.38	45~80	60	180~270	220	3.67	1.8
Kaolin-2	50	200+400	1.56+1.34	140~200	180	380~450	420	2.67	.44
			1.58+1.30	65~110	80	180~300	220	2.75	.44
Kasaoka	100	100+200	1.12+0.95	940~1720	1440	3500~3900	3700	2.57	3.3
Kucchan			1.46+1.31	100~140	120	300~360	320	2.67	1.1
Hayakita		50+300	1.55+1.24	250~500	350	900~1500	1440	4.11	.90

Table 4 One dimensional consolidation characteristics.

Sample	P (kgf/cm ²)	e	t_{100}^* (min)	C_c	$C_\alpha \times 10^2$	C_v (cm ² /d)	m_v (cm ² /kgf)	k (cm/s)
Kaolin-2	1.6+3.2	1.49+1.24	5.5	0.79	.60	1.5×10^2	6.6×10^{-2}	5.5×10^{-8}
Kasaoka	0.8+1.6	1.17+1.00	246	0.57	3.0	1.1×10	1.0×10^{-1}	4.5×10^{-9}
Kucchan		1.39+1.26	17	0.50	1.1	4.5×10	6.6×10^{-2}	2.6×10^{-8}
Hayakita		1.31+1.22	30	0.41	1.0	3.1×10	5.1×10^{-2}	1.5×10^{-8}

1kgf/cm²=98.1kPa

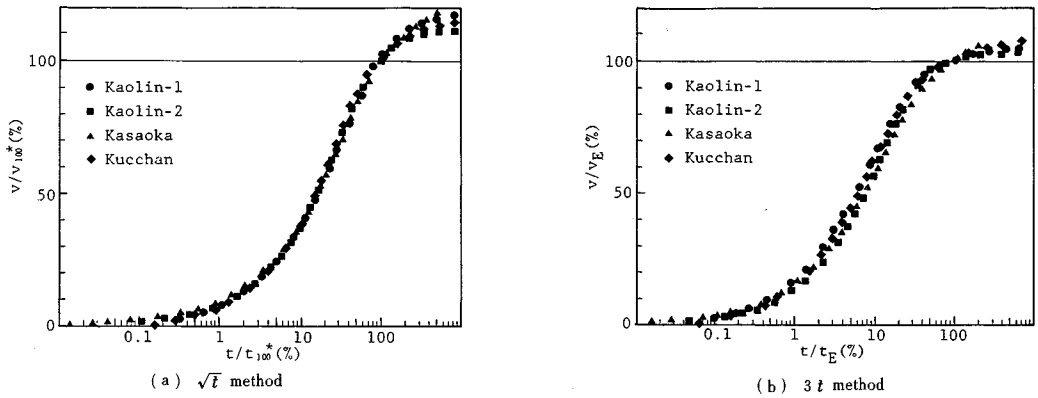


Fig. 3 Normalized consolidation curves for four samples.

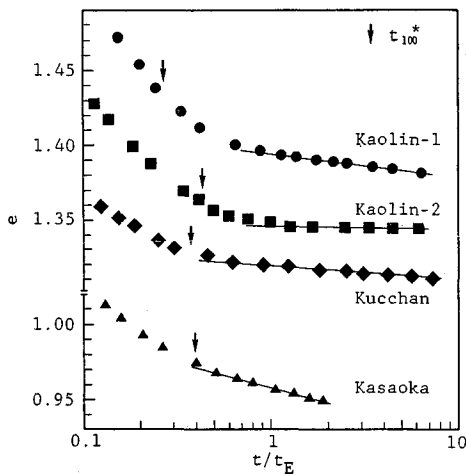


Fig. 4 Void ratio versus elapsed time relationships.

ある。

Fig. 5(a), (b) は、カオリン-2粘土を用い排水用の沱紙の供試体周面積に対する比率 F (%) を変えて行った三軸等方圧密試験の結果を Fig. 3 と同様、 \sqrt{t} 法および

3t法による時間と排水量で正規化したものである。これらの図からわかるように、同一粘土においても \sqrt{t} 法による判定では、一次圧密終了後の圧密挙動が面積率の影響を大きく受ける傾向となる。しかし、3t法で整理した場合は、面積率の影響を受けず1本の曲線とみなすことができる。また、二次圧密係数は、面積率の影響を受けず一定であった。

沱紙も応力の増加により圧縮することが知られている^{17),18)}。本実験で用いた沱紙と粘土において、沱紙の排水量の補正式¹⁸⁾から求めた圧密最終段階の沱紙の排水量は全排水量の3%から9%であった。沱紙の透水性は、供試体よりかなり大きいため、圧密過程の初期で測定される排水量に沱紙からの排水量の影響が含まれる。したがって、沱紙の被覆面積が大きい場合、圧密初期の直線部の勾配から圧密終了を判定する \sqrt{t} 法は三軸等方圧密には不適切だと考えられる。

また、Fig. 1 からわかるように、体積変化から求めた t_{100}^* 付近において、上部集水の場合は10%程度、下部集水では4%程度の過剰間隙水圧が残留している。しかし、 t_E 付近では上部集水においても過剰間隙水圧が

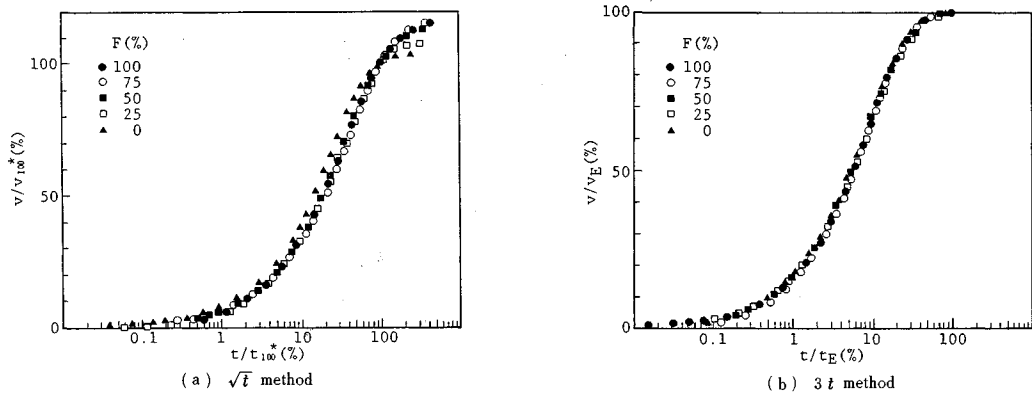


Fig. 5 Normalized consolidation curves for five different filter paper coverage.

十分消散している。

実験終了時の供試体の含水比と圧密時間の関係を Fig. 6 に示す。圧密時間は、各供試体の圧密時間 (t_c) を t_E で正規化したものを用いている。カオリン-2 粘土では、含水比のばらつきがみられるが、その他の粘土においては、Fig. 4 の間隙比と時間の関係と同じような傾向となる。圧密時間が t_E より短い場合は、含水比の差が 1~2% あり、この含水比の差が変形、強度特性に影響を及ぼす可能性がある。

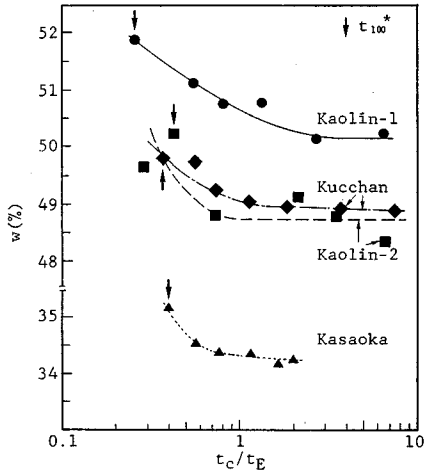


Fig. 6 Water content versus normalized consolidation time.

以上のことを総合すると、三軸等方圧密時の圧密終了判定法としては、 \sqrt{t} 法を準用するよりも $3t$ 法を用いる方が適当であると考えられる。

(2) 変形特性

a) 軸差応力~軸ひずみ挙動

Fig. 7(a)~(d) は、各粘土の軸差応力と軸ひずみとの関係から求めた同一軸ひずみにおける軸差応力と t_E で正規化した圧密時間の関係を示している。カオリン-1 粘土では、最も圧密時間の短いもの ($t_c = t_{100}^*$) を除いて、同一軸ひずみにおける軸差応力は圧密時間に比例して増加する。この増加率はせん断開始から破壊に至るまで変わらない。カオリン-2 粘土においても圧密時間が t_E より短い場合においては、同一軸ひずみにおける軸差応力は圧密時間に比例して増加する傾向にある。しかし、 t_E 以上では圧密時間の影響をほとんど受けない。笠岡粘土では、0.5% 以上の軸ひずみにおいて圧密時間の最も短いもの ($t_c = t_{100}^*$) を除いて、軸差応力は圧密時間に比例して増加する。その増加率は破壊に近づくにつれて小さくなる。俱知安粘土では、軸ひずみ 0.5% 以上において同一軸ひずみにおける軸差応力は圧密時間に比例して増加する。しかし 1% 以上において、圧密時間 t_E を交点とする 2 直線となり、その増加率は t_E より短い方が大きい。 t_E 以上においては笠岡粘土と同じく破壊に近づくにつれて小さくなる。笠岡、俱知安粘土は、圧密時間の増加とともに小ひずみ域で軸差応力が急激に立ち

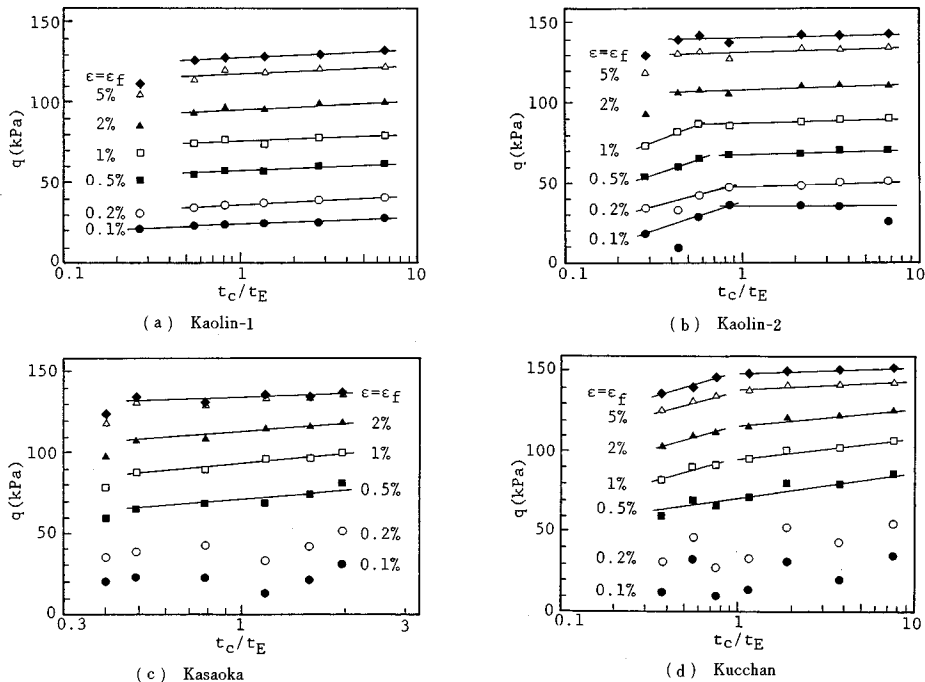


Fig. 7 Deviator stress versus normalized consolidation time.

上がり、その最大値はわずかに増加の傾向を示すとした報告^{1),4),5),8)}と同じ挙動となった。

以上の結果から、圧密時間の増加に伴い同一軸ひずみにおける軸差応力は増加する。この傾向は粘土の種類により差はあるが圧密時間の短いものの方がその影響を大きく受けるので、圧密時間は t_c より長くした方がよいと考えられる。

b) 間隙水圧～軸ひずみ挙動

各粘土のせん断時における発生間隙水圧と軸ひずみとの関係から軸差応力と同様に軸ひずみをパラメーターとした発生間隙水圧と圧密時間の関係を Fig. 8(a)～(d) に示す。圧密時間の短いものでは、せん断開始時にもまだ間隙水圧が残留しているが、せん断開始時からの間隙水圧の発生量で整理している。

これらの図からわかるように、カオリン-1,2 粘土においては、同一軸ひずみにおける間隙水圧は、ひずみの小さい領域では圧密時間の影響を受けないがひずみが大きくなるに従って圧密時間に比例して減少している。また、笠岡粘土においては、軸ひずみ 2～3% において、やや圧密時間に比例して増加する傾向があるが、圧密圧力の影響を受けないといつてよい。倶知安粘土においてはせん断時の間隙水圧は圧密時間の影響をほとんど受けない。各粘土とも軸差応力のように圧密時間の短いものが異なった挙動を示すような傾向はない。

本実験において圧密時間の最も短いものの残留間隙

水圧は、カオリン-1,2 粘土では、それぞれ圧密圧力の 1.7, 1.8% 程度、笠岡粘土は 10%, 倶知安粘土は 5% であった。したがって、笠岡、倶知安粘土の圧密時間の短いものでは所定の有効圧密圧力に達していなかったと考えられ、せん断開始時の有効応力で縦軸を正規化すれば、カオリン粘土のような挙動を示すことも考えられる。しかし、前述のように圧密時間の短い場合は間隙水圧の測定が不確実であり、正確な有効圧密圧力が得られないため行っていない。

Bjerrum ら¹⁾は、せん断時の間隙水圧は圧密時間の影響を受けないことを報告している。また、山口ら⁸⁾は、せん断時の間隙水圧挙動に及ぼす圧密時間の影響について、せん断初期には、圧密時間の長いものほど間隙水圧の発生量が少ないが、破壊時にはほとんど等しくなるとしている。また、ひずみ速度が遅い場合には、せん断中の間隙水圧は圧密時間の影響を受けないとしている。非排水せん断において間隙水圧の均一化に必要なひずみ速度を圧密時の圧密係数の関数として決める方法¹⁹⁾が提案されている。Table 4 から判断して笠岡、倶知安両粘土におけるひずみ速度は、カオリン粘土と比較しても遅いとはいえない。さらに、亀井ら¹⁰⁾は、圧密時間の増加とともに間隙水圧が減少することを報告しているが、彼らは発生間隙水圧に圧密時の残留間隙水圧も含めている。

以上のことからわかるように、非排水せん断時の間隙水圧挙動に及ぼす圧密時間の影響については、過去の研

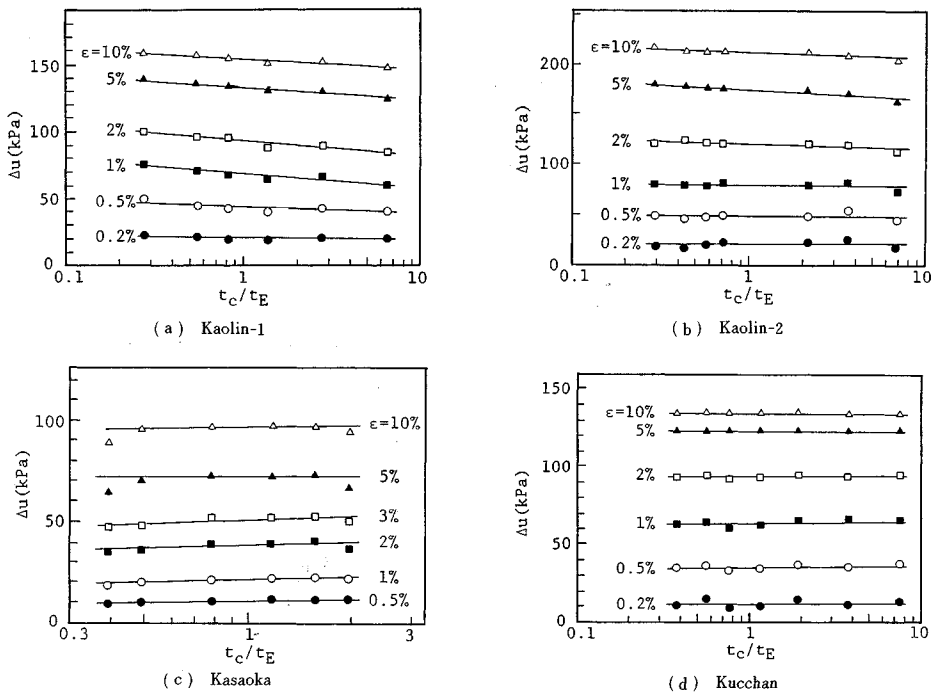


Fig. 8 Induced pore water pressure versus normalized consolidation time.

究においても一致した見解は得られていない。また、本実験の結果からも十分な結論は得られなかった。この点についてはさらに検討を要する。

c) 有効応力経路

Fig. 9(a)~(d) に各粘土の有効応力経路を示す。この図からわかるように亀井ら¹⁰⁾の実験結果ほどには圧密時間の長短によってせん断開始時の応力状態に差は生じていないが、圧密時間の異なる各試料の有効応力経路はほぼ相似な形状を示している。三笠ら³⁾が報告しているように、ひずみ速度を変えて行ったカオリン-1粘土および笠岡粘土の実験^{20),21)}から得られた有効応力経路も同様な傾向を示している。

(3) 強度特性

圧密時間と各強度定数との関係を Fig. 10(a)~(d) に示す。圧密時間は、 t_c で正規化したものを示している。

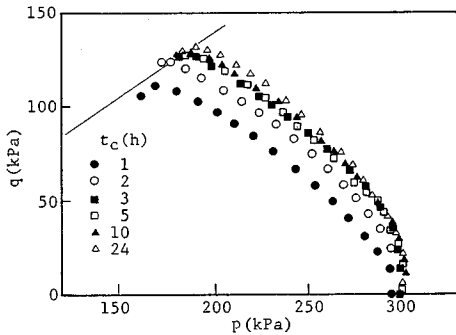
a) 非排水強度

Fig. 10(a) からわかるように、各粘土とも、圧密時間の短い一部のものを除き、圧密時間の対数に比例して非排水強度が大きくなる。この傾向は、二次圧密係数が小

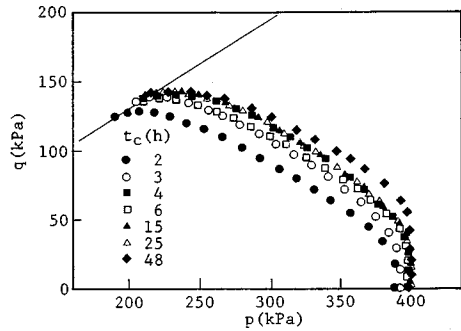
さいカオリン-2粘土が小さいが、二次圧密係数に比例するともいえない。カオリン-2粘土においては t_{100} より小さい場合、カオリン-1粘土、俱知安粘土においては t_{100} の2倍より小さい場合において急激に強度が下がる傾向がある。亀井ら¹⁰⁾も同様な実験結果を報告している。

しかし、本実験では間隙水圧測定経路に近いところで集水しており、圧密中の間隙水圧の値が供試体内の平均値よりも低めに測定されている可能性があり、圧密時間の短い場合には圧密終了時の有効応力を過大に評価していることも考えられる。したがって、供試体の平均有効応力が正しく測定でき、それで正規化すればこの直線上にのる可能性もある。

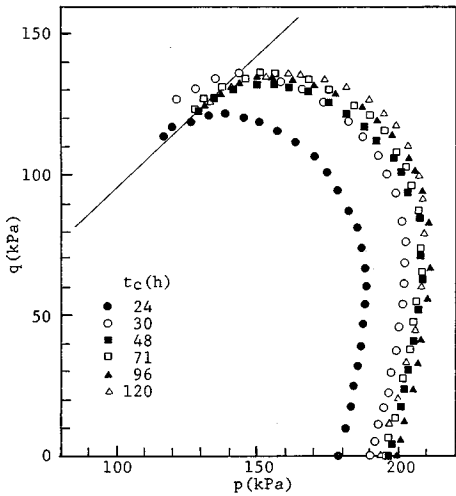
三笠ら³⁾は、圧密時間を長くすることとせん断速度を速めることはせん断時の挙動に類似の影響を与えることを報告している。本実験および他の研究者による実験から得られた、圧密時間およびひずみ速度の増加による強度の増加率を Table 5 に示す。この表からわかるようにこの2つの挙動に類似性があることがわかる。



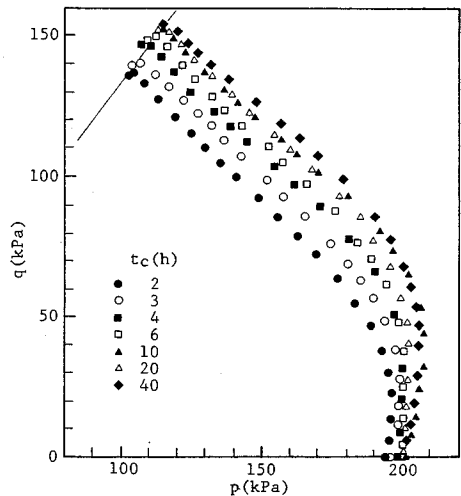
(a) Kaolin-1



(b) Kaolin-2



(c) Kasaoka



(d) Kucchan

Fig. 9 Effective stress paths.

b) 破壊時における軸ひずみ

Bjerrum ら¹¹⁾は、乱さない粘土を用いた圧密非排水試験結果から圧密時間の増加に伴い軸差応力はより小さいひずみでその最大値を与えることを報告している。しかし、本実験の圧密時間の範囲では明瞭な傾向がみられなかった。また、北郷ら⁴⁾や山口ら⁸⁾も繰り返した粘土を用いた実験結果から圧密時間は破壊時の軸ひずみに影響を及ぼさないとしている。三田地ら⁵⁾は、北郷ら⁴⁾の実験と同じ試料を用い K_0 圧密した場合には、破壊時の軸ひずみは、圧密時間の短い方が大きいことを報告している。

本実験は、圧密非排水試験における圧密終了時間の判定を対象としているため圧密時間が比較的短期間であったので、疑似過圧密の挙動が現われなかったことによる

ものと思われる。

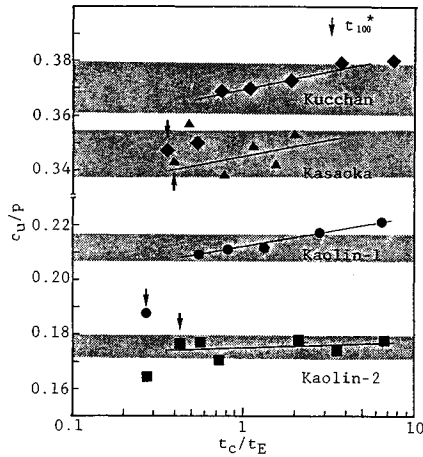
c) 破壊時の間隙水圧係数

破壊時の間隙水圧係数に及ぼす圧密時間の影響について、Bjerrum ら¹¹⁾は、圧密時間の増加に伴い減少することを報告している。また、亀井ら¹⁰⁾は t_E 以下では圧密時間の増加に伴い増加するが、それ以上では一定になる実験結果を示している。

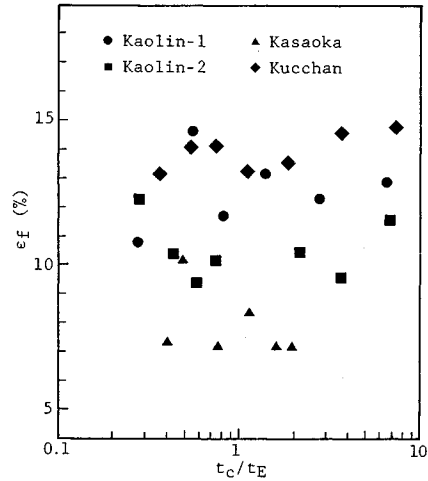
破壊時の間隙水圧係数は、Fig. 10(c) からわかるように圧密時間の増加に伴い減少する傾向となる。しかし、笠岡粘土以外は、 t_E を交点とする2直線で表わすことができ、 t_E より短い範囲で圧密時間の影響が大きい。

d) 有効応力によるせん断抵抗角

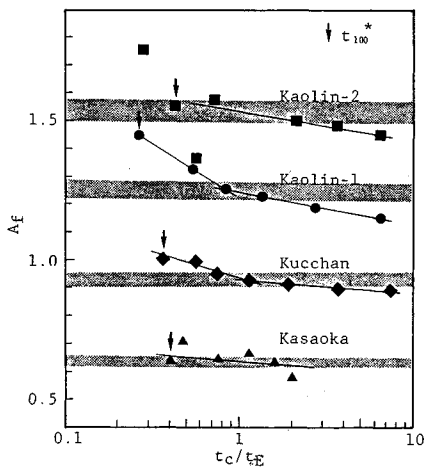
有効主応力比 σ'_1/σ'_3 の最大値から求めた有効応力によるせん断抵抗角を Fig. 10(d) に示す。有効応力による



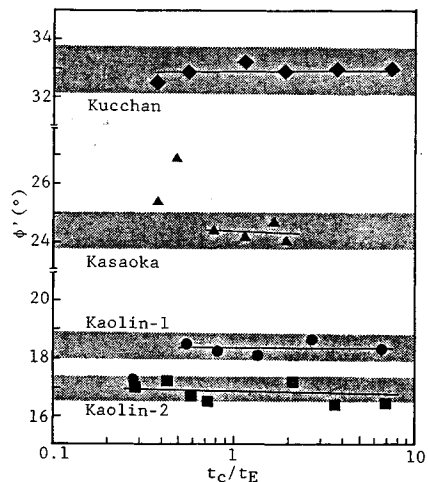
(a) Rate of strength increase



(b) Axial strain at failure



(c) Pore pressure coefficient at failure



(d) Angle of shear resistance (in terms of effective stress)

Fig. 10 Strength parameters.

Table 5 Undrained strength increase by increment of strain rate and consolidation duration.

Sample	Increment for 1 log cycle(%)		Remark
	aging	strain rate	
Kaolin-1	5.3	9.0	
Kaolin-2	1.1	3.5	
Kasaoka	3.6	2.2	
Kucchan	3.5	-	
Haney	7.0	7.0*	Ref. 7)
Ohnegai	3.7	2.8	Ref. 8)

* Constant rate of stress increase

せん断抵抗角は、圧密時間に関係なくほぼ一定となる。過去の研究者も^{1), 3), 4), 8), 9)}同様な結果を報告している。また、北郷⁴⁾は、3種類の繰り返した粘土の圧密非排水試験結果から、12時間で圧密した場合の有効応力によるせん断抵抗角は、2~3時間で一次圧密が終了しているにもかかわらず、すべての試料において24時間以上圧密した場合より大きな値となることを報告している。

e) 各強度定数に及ぼす圧密時間の影響

Fig. 10(a), (c), (d) に t_E における各強度定数の土 2.5% の範囲を示している。これらの図からわかるように非排水強度に及ぼす圧密時間の影響を 5% 以内に抑えるためには、圧密時間を t_E の 0.5 から 3 倍、あるいは \sqrt{t} 法を準用するのであれば、 t_{100}^* の 2 倍から 8 倍とすればよい。また、破壊時の間隙水圧係数においては、 t_E の 0.8 から 2 倍、 t_{100}^* の 3 倍から 5 倍とすればよい。

4. 結 論

4種類の粘性土に対し圧密時間を変えて行った圧密非排水試験の結果から以下のことがわかった。

(1) 三軸等方圧密においても \sqrt{t} 法の適用が可能であるが、圧密終了の判定法として、3t法が適当である。

(2) 軸差応力 \sim ひずみ関係は、粘土の種類によりその傾向は多少異なるがせん断開始から破壊に至るまで圧密時間の影響を受ける。

(3) せん断時に発生する間隙水圧は、圧密時間の増加に伴い減少する可能性がある。

(4) 非排水せん断強度は圧密時間の対数に比例して増加する。その増加率は t_E より短い方が大きい。

(5) 破壊時の間隙水圧係数は圧密時間の増加とともに減少する。その減少率は t_E より短い方が大きい。

(6) 有効応力によるせん断抵抗角は圧密時間の影響を受けず一定である。

(7) t_E の 70~250% の範囲では強度定数の差は、5% 以内となる。

以上の結果から、せん断抵抗角を除いては、強度に関するパラメーターは圧密時間の影響を受けるが、圧密過程

における挙動から判断して三軸圧密非排水試験における圧密終了時間の判定法としては、3t法が適当だと考えられる。

5. おわりに

今回用いた試料はすべて繰り返し予圧密して作成し、三軸セル内で圧密した正規圧密粘土であり、理想的な状態と考えてよい。さらに、種々の応力および時間履歴を受けている乱さない粘土についても検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Bjerrum, L. and Lo, K.Y. : Effect of Aging on the shear strength properties of a normally consolidated clay, *Geotechnique*, Vol. 13, No. 2, pp. 147~157, 1963.
- 2) 三笠正人・木下哲生 : 粘性土の圧密時間とせん断強さについて、第 25 回土木学会年次講演会講演概要集, pp. 159~162, 1970.
- 3) 三笠正人・木下哲生・高田直俊 : 粘性土の圧密時間とせん断強さについて (第 2 報), 第 6 回土質工学研究発表会講演集, pp. 137~140, 1971.
- 4) 北郷 繁・三田地利之 : 粘性土の強度特性に及ぼす圧密時間の影響, 第 7 回土質工学研究発表会講演集, pp. 197~200, 1972.
- 5) 三田地利之・北郷 繁・唐牛義夫 : 粘性土の強度特性に及ぼす圧密時間の影響 (第 3 報), 第 8 回土質工学研究発表会講演集, pp. 299~302, 1973.
- 6) Shen, C.K., Arulanandan, K. and Smith, W.S. : Secondary consolidation and strength of a clay, *Proc. ASCE*, Vol. 99, SM1, pp. 95~110, 1973.
- 7) Vaid, Y.P. and Campanella, R.G. : Time-dependent behavior of undisturbed clay, *Proc. ASCE*, Vol. 103, No. GT7, pp. 693~709, 1977.
- 8) 山口晴幸・三田地利之・北郷 繁 : 繰り返し飽和粘性土の非排水応力 \sim ひずみ-強度挙動に及ぼす二次圧密の影響, *土質工学会論文報告集*, Vol. 21, No. 3, pp. 123~131, 1981.
- 9) Yasuhara, K. and Ue, S. : Increase in undrained shear strength due to secondary compression, *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 3, pp. 50~64, 1983.
- 10) Kamei, T., Ogawa, S. and Tanaka, N. : The variation in undrained shear characteristics during consolidation process, *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 3, pp. 91~98, 1987.
- 11) 土質工学会編 : 三軸圧縮試験, 土質試験法, 第 2 回改訂版, 1979.
- 12) 三軸試験基準化委員会 : 土の三軸圧縮試験法—土質工学会基準案—について, 第 20 回土質工学シンポジウム—軸および三軸圧縮試験法とその応用—, pp. 15~44, 1975.
- 13) 奥田 薫・小田美明・三田地利之 : 粘性土の圧密非排水試験に及ぼす圧密圧力の載荷段階数の影響, 第 43 回土木学会年次講演会講演概要集, pp. 518~519, 1988.
- 14) Berre, T. : Suggested international code of soil engineering practice for consolidated triaxial tests, *Norwe-*

- gian Geotechnical Institute, Internal report 56103-30, 1985.
- 15) 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.
- 16) 三笠正人：軟弱粘土の圧密<新圧密理論とその応用>, 鹿島出版会, 1963.
- 17) Shimizu, M. : Factors affecting the measurement of volume change of cohesive soils in drained triaxial tests, Soils and Foundations, Vol. 21, No. 2, pp. 121~128, 1981.
- 18) 三田地利之・成田 孝：三軸試験の体積変化測定におよぼする紙の圧縮性およびゴム膜の透水性の影響, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp. 186~189, 1985.
- 19) Bishop, A.W. and Henkel, D.J. : The measurement of soil properties in the triaxial test, Edward Arnold Ltd., London, 1962.
- 20) 三田地利之：異方圧密粘土の構成式と土質パラメータ決定法に関する研究, 昭和63年度文部省科学研究費(一般研究C)研究成果報告, 1989.
- 21) 小田美明・三田地利之：正規圧密粘性土の応力-ひずみ-時間挙動, 土質工学会北海道支部技術報告集, Vol. 27, pp. 67~74, 1987.

(1989. 5. 1・受付)