

## 時間効果および温度効果を受けた粘土の非排水せん断強度の評価

Evaluation of Undrained Shear Strength of Clay Subjected to Time Effect and Temperature Effect

上 俊二 Shunji UE (徳山工業高等専門学校 土木建築工学科)



自然堆積粘土地盤は長期間にわたって形成されたため、二次圧密やセメンテーションなどの年代効果の影響を受けており、その力学的特性は短期間に室温で再圧密した粘土とは異なった挙動を示すことが知られている。また、粘土の力学特性は圧密時の温度に影響されることが知られている。本文では、物理・化学的性質の異なる4種類の粘土に対して、温度および時間を定量的に制御した圧密非排水三軸圧縮試験を実施し、時間効果および温度効果を受けた粘土の圧密非排水せん断特性を明らかにし、非排水せん断強度の評価を試みたものである。

キーワード：時間効果, 温度効果, 過圧密, 非排水せん断強度 (IGC : D-05, D-06)

## 1. はじめに

海底地盤などの長時間圧密された自然粘土地盤は、二次圧密やセメンテーションなど年代効果の影響を受けて土の構造が発達し力学的性質が変化すると考えられている。また、そのような年代効果の影響を受けた粘土地盤は、正規圧密状態にあるにもかかわらず土被り圧より大きな圧密降伏応力を示すことが知られている<sup>1)</sup>。一方、粘土の力学的性質は温度に影響されることが知られている。予圧密時に高温まで温度を上昇させた後、室温に冷却した粘土供試体は、高温によってセメンテーション作用が促進され自然粘土の特性に類似した挙動を示すことから、年代効果を実験室で再現する供試体として有効であることが報告されている<sup>2)</sup>。また、二次圧密時についても温度を上昇させることにより圧密が促進され沈下量が増加し、その後室温に戻すことによって過圧密土のような挙動を示すことが報告されている<sup>3)</sup>。また、粘土の堆積環境や粘土鉱物の種類によって土粒子表面の界面化学作用が異なりイオンの種類や濃度によって土粒子間に作用する引力と斥力が異なることが知られている<sup>4)</sup>。このように、粘土に温度効果を与えることにより年代効果を受けた粘土を室内で再現できる可能性が示されているが、粘土の種類や温度条件などによって温度効果を受けた粘土の力学的性質がどのようなメカニズムによって変化するのかについては十分に解明されていない。本研究では、粘土の物理・化学的性質の相違が時間効果および温度効果を受けた粘土の力学的性質に与える影響を明らかにするために、物理・化学的性質の異なる4種類の粘土を用いて、温度制御が可能な三軸試験試験機により二次圧密時の温度・時間・応力を定量的に変化させて圧密非排水せん断試験を行い、得られた試験結果の比較を行うことにより時間効果および温度効果を受けた粘土の圧密非排水せん断特性を明らかにし、非排水せん断強度の評価を試みたものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 試料

実験に用いた試料は岡山粘土、有明粘土、有明粘土(溶脱)、カオリン粘土である。これら4種類の試料の物理・化学的性質を表-1に示す。なお、有明粘土(溶脱)については、人工的に粘土中の陽イオンを除去するために、液性限界の約2倍の含水比でスラリー状にした有明粘土試料約700に過酸化水素水約75mlを2日間にわたり2度に分けて混合・攪拌し、その後予圧密をする作業を2度繰返して行った。

表-1より、カオリン粘土や有明粘土(溶脱)は、有明粘土や岡山粘土などの自然粘土よりも陽イオン濃度が低いことがわかる。

これらの試料を液性限界の約2倍の含水比で十分攪拌

表-1 試料の物理・化学的性質

	岡山粘土	有明粘土	有明粘土(溶脱)	カオリン粘土
液性限界 $W_L(\%)$	77.0	107.0	62.0	78.5
塑性限界 $W_P(\%)$	29.4	48.7	23.7	37.5
塑性指数 $I_P$	47.6	58.3	38.3	41.0
比重 $G_s$	2.62	2.58	2.75	2.65
EC (ms/cm)	3.1	37.5	18.6	4.9
pH	8.4	7.3	7.1	4.3
$Na^+$ (mg/l)	558	966	28	100
$K^+$ (mg/l)	40	92	14	3
$Ca^{2+}$ (mg/l)	61	704	370	17
$Mg^{2+}$ (mg/l)	67	396	65	2
陽イオン合計 (mg/l)	726	2158	476	121
$HCO_3^-$ (mg/l)	227	204	130	0
$SO_4^{2-}$ (mg/l)	492	4220	202	306
$Cl^-$ (mg/l)	738	273	351	17
陰イオン合計 (mg/l)	1457	4698	683	323

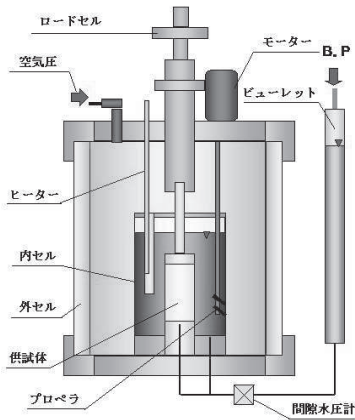


図-1 温度調節が可能な三軸圧縮試験装置

し、大型容器(直径 25cm,高さ 40cm)に入れ、室温(20℃)一定のもと所定の圧密圧力まで段階的に圧力を増加し予圧密を行った。なお、予圧密時の圧密圧力はカオリン粘土については  $\sigma_c=160\text{kPa}$  とし、それ以外の試料については  $\sigma_c=100\text{kPa}$  とした。予圧密して得られた粘土ブロックより供試体(直径 5cm,高さ 10cm)を作成し実験を行った。

## 2.2 実験方法

図-1 は、圧密試験およびせん断試験に用いた温度制御が可能な三軸圧縮試験装置である。この装置は三軸室が二重セル構造となり、内セル内の水をヒーターにより加熱し粘土供試体の温度を変化させることが可能である。本研究では、次に示す 3 シリーズの圧密非排水せん断試験 (CU試験) を行った。

### (1) シリーズ 1 (温度効果)

#### a) 室温→高温→室温

室温(20℃)、圧密圧力  $p_0=200\text{kPa}$  で一次圧密終了後(4時間)、温度を  $T^\circ\text{C}$  ( $T=20,40,60^\circ\text{C}$ )まで上昇させ 4 時間圧密し、再び室温に低下し 24 時間圧密した後、非排水せん断試験を行う。

#### b) 室温→高温一定

室温(20℃)、圧密圧力  $p_0=200\text{kPa}$  で一次圧密終了後(4時間)、温度を  $T^\circ\text{C}$  ( $T=20,40,60^\circ\text{C}$ )まで上昇させ 24 時間圧密した後、温度を  $T^\circ\text{C}$  に保ったまま非排水せん断試験を行う。

### (2) シリーズ 2 (時間効果)

室温(20℃)、圧密圧力  $p_0=200\text{kPa}$  で任意の二次圧密時間  $t_s$  ( $t_s=4$  時間, 1, 7, 14 日)まで圧密した後、非排水せん断試験を行う。

### (3) シリーズ 3 (応力除荷)

室温(20℃)、圧密圧力  $p_0=200\text{kPa}$  で一次圧密終了後(4時間)、圧密圧力  $p_c$  ( $p_c=200, 240, 250, 300\text{kPa}$ )で 4 時間圧密した後、再び圧密圧力  $p_0=200\text{kPa}$  まで除荷し 24 時間圧密した後、非排水せん断試験を行う。なお、過圧密比は、 $n=p_c/p_0$  ( $p_0$ :せん断時圧密圧力,  $p_c$ :先行圧密圧力) で表さ

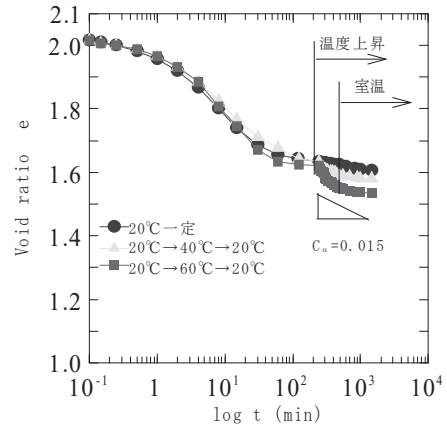


図-2 間隙比と時間の関係(有明粘土)

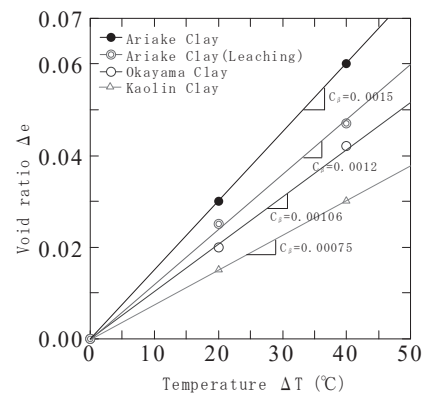


図-3 温度と間隙比の関係

れる。

せん断試験は、ひずみ制御(ひずみ速度 0.01%/min)で行い、供試体に背圧 100kPa を負荷した。また、せん断時の間隙水圧の測定は供試体下部で行い、供試体上部のロードセルにより軸荷重を測定した。

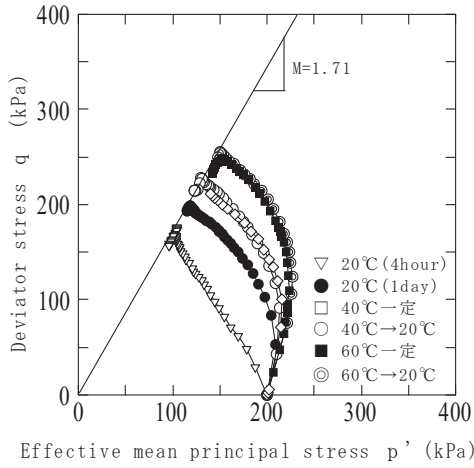
また、これとは別にシリーズ 1 (温度効果) については、標準圧密試験機により圧密圧力  $p_0=200\text{kPa}$  で 1 日間圧密後、増加荷重  $\Delta p=10\text{kPa}$  を 10 分間隔で  $p=640\text{kPa}$  まで載荷する漸増載荷試験を行った。

## 3. 実験結果及び考察

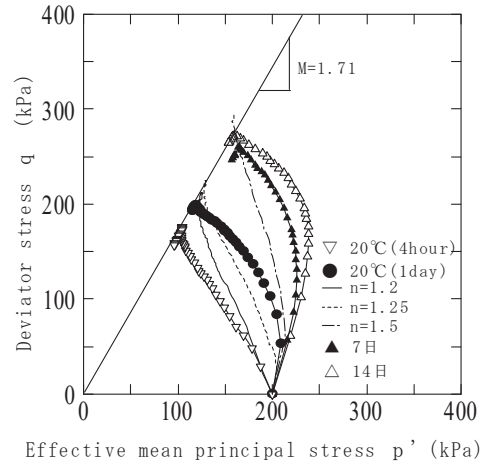
図-2 は、有明粘土の温度効果(室温→高温→室温)の圧密試験から得られた等方圧密時の間隙比と時間の関係を示したものである。図より、二次圧密時に温度を室温から高温に上昇させることにより、圧密が促進され間隙比が減少し、その後温度を室温に低下させても引き続き二次圧密が進行し、直線部の勾配(二次圧密係数  $C_a$ )はどれもほぼ一定となっていることがわかる。なお温度効果(室温→高温一定)の場合も同様の傾向を示した。

また、図-3 は 4 種類の粘土について、温度効果における温度の変化量と間隙比の変化量の関係を示したも

時間効果および温度効果を受けた粘土の非排水せん断強度の評価

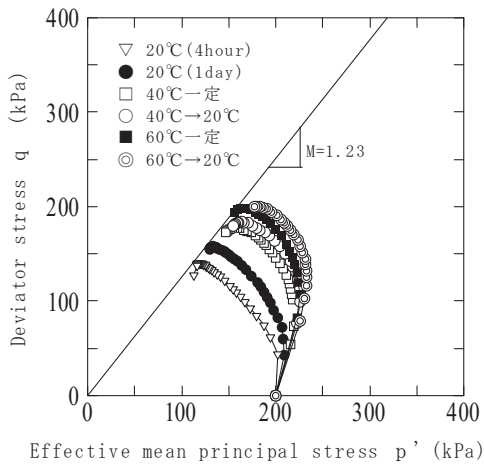


(a) 温度効果

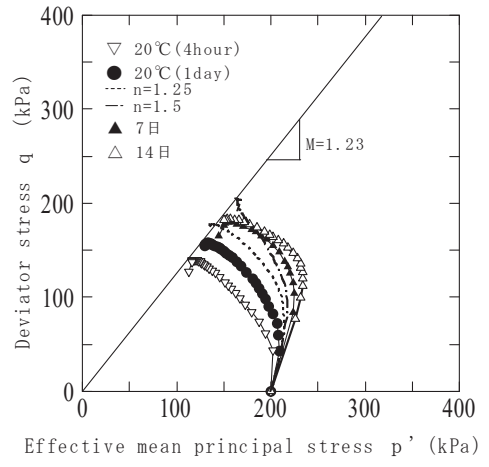


(b) 時間効果・応力除荷

図-4 有効応力経路 (有明粘土)

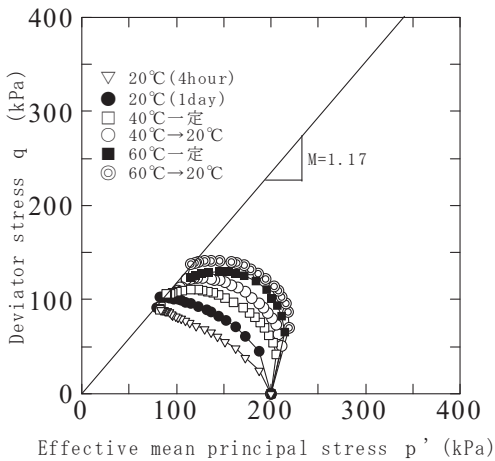


(a) 温度効果

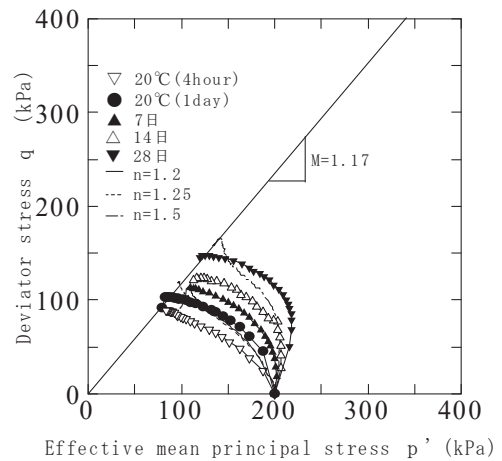


(b) 時間効果・応力除荷

図-5 有効応力経路 (有明粘土 (溶脱))



(a) 温度効果



(b) 時間効果・応力除荷

図-6 有効応力経路 (カオリン粘土)

のである。図より、上昇させた温度が高いほど間隙比の変化量は大きくなり、温度の変化量 $\Delta T^{\circ}\text{C}$ と間隙比の変化量 $\Delta e$ は比例関係にあることがわかる。ここで、この直線の勾配を温度係数 $C_{\beta}$ として求めた。 $C_{\beta}$ について有明粘土と有明粘土(溶脱)を比較すると、溶脱することに

より $C_{\beta}$ は小さくなることがわかる。

図-4、図-5、図-6は有明粘土、有明粘土(溶脱)、カオリン粘土における温度効果、時間効果、応力除荷の3シリーズの条件で行った圧密非排水せん断試験の有効応力経路図を示している。図よりどの実験条件においても、

それぞれの粘土について、破壊時の応力状態は一本の破壊線上にあることがわかる。ここで、この破壊線の勾配を土の有効内部摩擦角  $\phi'$  に関する実験定数  $M$  として求めた。なお  $M$  は、

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (1)$$

で表され、式 (1) から有効内部摩擦角  $\phi'$  を求めることができる。 $M$  の値は図中に示すとおりであり岡山粘土は  $M=1.33$  であった。 $M$  は有明粘土が最も大きく、次いで岡山粘土、溶脱した有明粘土、カオリン粘土の順で小さくなっていることがわかる。 $M$  に関して有明粘土と有明粘土(溶脱)を比較すると、どの条件においても有明粘土(溶脱)は、初期の間隙比が減少し密になっているにもかかわらず  $M$  の値が小さくなり、せん断強度が低下していることがわかる。これは、溶脱することにより粒度分布が悪くなり有効内部摩擦角  $\phi'$  が減少するためと考えられる。また、同じ種類の粘土について3シリーズを比較することにより、温度効果を受けた粘土は正規圧密状態にあるにもかかわらず、見かけ上応力除荷による過圧密土のような挙動を示し、時間効果を受けた粘土に類似した挙動を示すことがわかる。次に図-4、図-5、図-6の(1)温度効果について比較すると、どの試料においても温度を室温から高温に上昇させたものは、圧密時の温度が高くなるほどせん断初期の間隙水圧の発生が抑制され、応力経路の立ち上がり急になりせん断強度が増加することがわかる。さらに、高温一定のものと室温に低下させたものを比較すると、後者の方がせん断強度が増加していることがわかる。これは、温度上昇により水の粘性が低下することで一度減少した粘土粒子表面の吸着水量が温度を高温から室温に低下させることにより増加し粘着力が増加するためと考えられる。ここで、有明粘土と有明粘土(溶脱)、カオリン粘土について、高温一定の場合と高温から室温へ低下させた場合のせん断強度の差について比較すると、有明粘土よりも有明粘土(溶脱)やカオリン粘土の方が、せん断強度に差が出ていることがわかる。これは、有明粘土は陽イオン濃度が高いため、高温一定の場合においても粘土粒子間の結合力が大きいと考えられる。

図-4、図-5、図-6の(2)時間効果について比較すると、圧密時間の長いものほどせん断初期の間隙水圧の発生が少なくせん断強度が増加していることがわかる。また、(3)応力除荷についても、過圧密比が大きくなるほどせん断強度が増加していることがわかる。しかし、応力除荷では有効応力経路の形状が他とは異なっている。これは応力除荷による過圧密状態の粘土はせん断時に負の

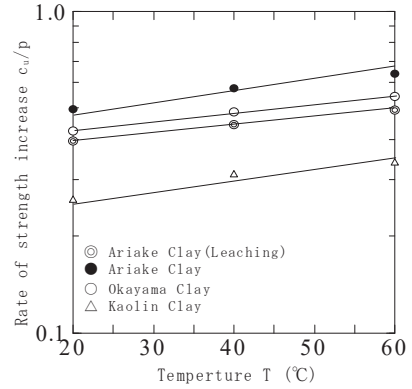


図-7 温度と強度増加率の関係 (温度効果)

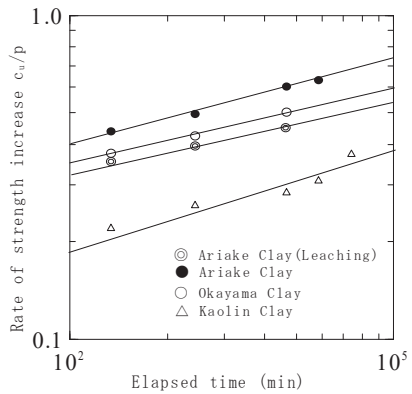


図-8 時間と強度増加率の関係 (時間効果)

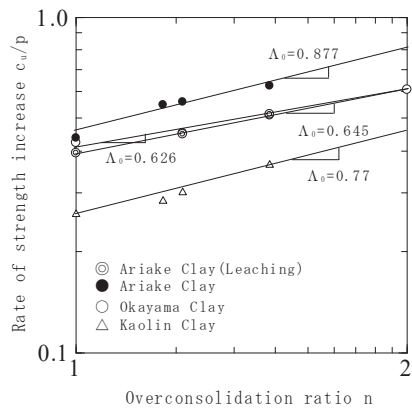


図-9 過圧密比と強度増加率の関係

間隙水圧を発生する傾向があるために間隙水圧の発生が抑制され、ダイランシー特性が他の2シリーズとは異なるためと考えられる。

図-7は温度と強度増加率の関係、図-8は時間と強度増加率の関係、図-9は過圧密比と強度増加率の関係を示したものである。どの実験条件に関しても、強度増加率の間には比例関係があり、強度増加率は有明粘土が最も大きく、次いで岡山粘土、有明粘土(溶脱)、カオリン粘土の順に小さくなっていることがわかる。ここで、図-9の直線の勾配よりそれぞれの粘土の実験定数  $\Lambda_0$  を決定した。

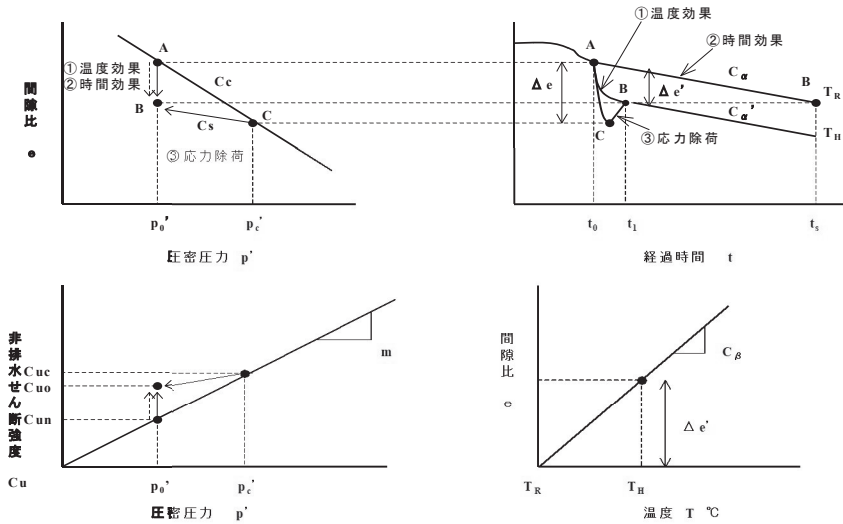


図-10 時間効果および温度効果を受けた粘土の圧密特性とせん断強度の関係（模式図）

#### 4. 時間効果および温度効果を受けた粘土の非排水せん断強度の評価

ここでは以上の実験結果をもとに、図-10に示す模式図のように、二次圧密時に温度効果(室温→高温→室温)を受けた粘土は、室温で二次圧密などの時間効果を受けた粘土および応力除荷による過圧密粘土と同等に扱えるものとして温度効果を受けた粘土の非排水せん断強度の評価を行った。

応力除荷による過圧密粘土の研究は、これまで多くの研究者によってなされてきた。その中で Mitachi<sup>5)</sup>らや Mayne<sup>6)</sup>は、過圧密粘土と正規圧密粘土の非排水せん断強度の比として次式を提案している。

$$\frac{\left(\frac{c_u}{p}\right)_{(OC)}}{\left(\frac{c_u}{p}\right)_{(NC)}} = n^{\Lambda_0} \quad (2)$$

ここで、添字(NC)は正規圧密粘土、(OC)は過圧密粘土を意味する。また、 $n$ は過圧密比、 $\Lambda_0$ は実験定数である。 $p_c'$ より  $p_0'$ まで除荷された過圧密土の非排水せん断強度は  $c_{uc}$  から  $c_{uo}$  まで低下するものと考え、式(2)は次式のように置き換えることができる。

$$\frac{\left(\frac{c_{uo}}{p_0'}\right)_{(OC)}}{\left(\frac{c_{uc}}{p_c'}\right)_{(NC)}} = n^{\Lambda_0} \quad (3)$$

圧密圧力  $p_0'$  における過圧密土の  $c_{uo}$  を既知の正規圧密土の  $c_{un}$  から予測する場合、式(3)は次のようにおきかえることができる。

$$\frac{\left(\frac{c_{uo}}{p_0'}\right)_{(OC)}}{\left(\frac{c_{un}}{p_0'}\right)_{(NC)}} = \frac{c_{uo}}{c_{un}} = n^{\Lambda_0} \quad (4)$$

ここで、正規圧密土の強度増加率を  $m$  とすると、 $p_0'$  における正規圧密土の非排水せん断強度  $c_{un}$  は次式で表される。

$$c_{un} = mp_0' \quad (5)$$

したがって、応力除荷による過圧密土の非排水せん断強度  $c_{uo}$  は次式で表される。

$$c_{uo} = mp_0' n^{\Lambda_0} \quad (6)$$

二次圧密やセメンテーションなどの年代効果を受けた粘土は、土被り圧より大きな擬似先行圧密圧力を有することが知られている。Murakami<sup>7)</sup>はその粘土が有する擬似先行圧密圧力  $p_c'$  を次式で評価できることを理論的に示している。

$$p_c' = \beta p_0' \left(\frac{t_s}{t_0}\right)^{\frac{C_a}{C_c - C_{cq}}} \quad (7)$$

ここで、 $\beta$  はセメンテーション効果による飛び出しを表す実験定数、 $t_s$  は圧密時間、 $t_0$  は一次圧密終了時間、 $C_a$  は二次圧密係数、 $C_c$  は圧縮指数、 $C_{cq}$  は再圧縮指数である。よって、擬似過圧密比  $n_q$  は次式のように定義される。

$$n_q = \frac{p_c'}{p_0'} = \beta \left(\frac{t_s}{t_0}\right)^{\frac{C_a}{C_c - C_{cq}}} \quad (8)$$

応力除荷により非排水せん断強度が  $c_{uc}$  から  $c_{uo}$  に低下した場合と時間効果により非排水せん断強度が  $c_{un}$  から  $c_{uo}$  に増加した場合が等価であると仮定すると、時間効果を



受けた粘土の非排水せん断強度  $c_{uo}$  は次式で表される。

$$c_{uo} = mp_0' \beta^{\Lambda_0} \left( \frac{t_s}{t_0} \right)^{\frac{C_\alpha}{C_c - C_{cq}} \Lambda_0} \quad (9)$$

前述したように、二次圧密時に粘土の温度が上昇すると圧密が促進され間隙比が急激に減少し、温度が一定になると二次圧密係数  $C_\alpha$  は温度の大きさによらず一定となるものと仮定する。また、二次圧密時に室温  $T_R$  から高温  $T_H$  まで温度を上昇させた場合の間隙比の変化量  $\Delta e'$  は温度差に比例して増加することから、二次圧密時に温度効果を受けた粘土の間隙比の変化量  $\Delta e$  は次式で表される。

$$\Delta e = c_\alpha \log \left( \frac{t_s}{t_0} \right) + c_\beta (T_H - T_R) \quad (10)$$

ここで、 $c_\beta$  は実験定数である。また、圧密圧力  $p_0'$  より  $p_c'$  まで載荷後、再び  $p_0'$  まで除荷した場合の間隙比の変化量  $\Delta e$  が式(10)と等価であると仮定すると次式が成立する。

$$c_\alpha \log \left( \frac{t_s}{t_0} \right) + c_\beta (T_H - T_R) = (c_c - c_s) \log \left( \frac{p_c'}{p_0'} \right) \quad (11)$$

これより、二次圧密時に温度効果を受けた擬似過圧密粘土の擬似過圧密比  $n_q$  と非排水せん断強度  $c_{uo}$  は以下のように導かれる。擬似過圧密比  $n_q$  は、

$$n_q = \frac{p_c'}{p_0'} = \beta \left( \frac{t_s}{t_0} \right)^{\frac{C_\alpha}{C_c - C_s}} 10^{c_\beta \frac{T_H - T_R}{C_c - C_s}} \quad (12)$$

となり、非排水せん断強度  $c_{uo}$  は、

$$c_{uo} = mp_0' \beta^{\Lambda_0} \left( \frac{t_s}{t_0} \right)^{\frac{C_\alpha}{C_c - C_s} \Lambda_0} 10^{\frac{T_H - T_R}{C_c - C_s} \Lambda_0} \quad (13)$$

で表される。式(12)、式(13)に含まれる係数を実験結果より決定し、その結果を表-2に示す。

ここで、強度増加率  $m$  の値が二つ存在するのは、応力除荷の圧密時間の基準は一日としているのに対して、時間効果において4時間を基準とし、それぞれの強度増加率を求めたためである。これらの計算式より温度効果を受けた擬似過圧密粘土の擬似過圧密比および温度効果を受けた擬似過圧密粘土、時間効果による過圧密粘土の非排水せん断強度を求めた。ここではセメンテーション効果による飛び出しが全くないものとして実験定数  $\beta = 1$  として計算を行った。以上の計算結果および実測値をそれぞれ粘土ごとに表-3に示す。

図-11 は別に実施した温度効果を受けた有明粘土の漸増載荷圧密試験における間隙比と圧密圧力の関係である。図より、温度効果(室温→高温→室温)を受けた有明粘土の圧密降伏応力は温度差が大きい(擬似過圧密の程度が大きい)ものほど室温における正規圧密線を飛び出しており、セメンテーション効果を受けていることがわ

表-2 実験定数

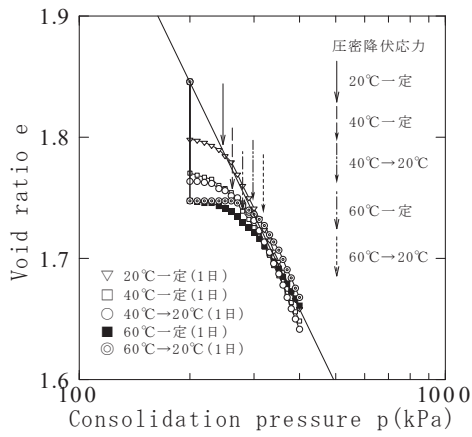
	岡山粘土	有明粘土	有明粘土 (溶脱)	カオリン 粘土
$C_\alpha$	0.026	0.015	0.014	0.011
$C_\beta$	0.0010	0.0015	0.0012	0.0007
$C_c$	0.41	0.470	0.433	0.369
$C_s$	0.016	0.090	0.055	0.045
$m(4\text{hour})$	0.373	0.438	0.352	0.224
$m(1\text{day})$	0.396	0.495	0.395	0.258
$\Lambda_0$	0.626	0.877	0.645	0.770

表-3 擬似過圧密比と非排水せん断強度

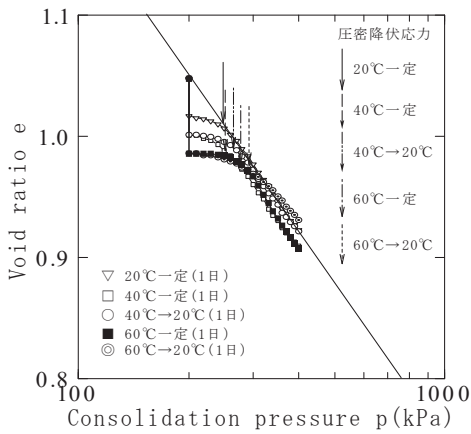
	条件	擬似 過圧密比 $n_q$	実測値	計算値	実測値 $c_u$ 計算値 $c_u$		
			$C_u$ (kPa)	$C_u$ (kPa)			
有明粘土	温度 効果	20°C	1.07	99.0	102.7	0.96	
		40°C	1.26	115.0	113.0	1.02	
		60°C	1.47	127.5	124.1	1.03	
	時間 効果	4hour	1.00	87.6	87.6	1.00	
		1day	1.07	99.0	102.7	0.96	
		7days	1.16	120.0	106.9	1.12	
		14days	1.19	125.0	108.4	1.15	
	応力 除荷	$n=1.0$	/	99.0	102.7	0.96	
		$n=1.2$		106.0	109.0	0.97	
		$n=1.25$		113.0	111.0	1.02	
		$n=1.5$		125.0	122.0	1.02	
	岡山粘土	温度 効果	20°C	1.13	84.4	85.3	0.99
40°C			1.27	96.8	92.2	1.05	
60°C			1.44	108.6	99.6	1.09	
時間 効果		4hour	1.00	74.6	74.6	1.00	
		1day	1.13	84.4	85.3	0.99	
		7days	1.28	100.7	92.4	1.09	
応力 除荷		$n=1.0$	/	84.4	85.3	0.99	
		$n=1.25$		90.2	91.1	0.99	
		$n=1.5$		102.1	102.1	1.00	
		$n=2.0$		122.5	122.3	1.00	
カオリン 粘土		温度 効果	20°C	1.09	51.6	55.1	0.94
			40°C	1.21	58.2	64.1	0.97
	60°C		1.34	66.4	65.0	1.01	
	時間 効果	4hour	1.00	44.0	44.8	0.98	
		1day	1.09	51.6	55.0	0.94	
		7days	1.16	56.4	58.0	0.97	
		14days	1.19	60.4	59.0	1.02	
	応力 除荷	$n=1.0$	/	51.6	55.1	0.94	
		$n=1.2$		56.3	59.4	0.95	
		$n=1.25$		59.7	61.3	0.97	
		$n=1.5$		71.3	70.5	1.01	
	有明粘土 (溶脱)	温度 効果	20°C	1.07	79.0	82.5	0.96
40°C			1.24	91.1	90.6	1.01	
60°C			1.43	100.2	99.6	1.01	
時間 効果		4hour	1.00	70.4	70.4	1.00	
		1day	1.07	79.0	82.5	0.96	
		7days	1.15	87.6	86.4	1.01	
		14days	1.18	90.0	88.0	1.02	
応力 除荷		$n=1.0$	/	79.0	82.5	0.96	
		$n=1.25$		89.7	91.2	0.98	
		$n=1.5$		102.7	102.6	1.00	

かる。一方で、有明粘土(溶脱)やカオリン粘土の圧密降伏応力は、温度効果(室温→高温→室温)を受けた場合においても室温における正規圧密線上に位置し、有明粘土

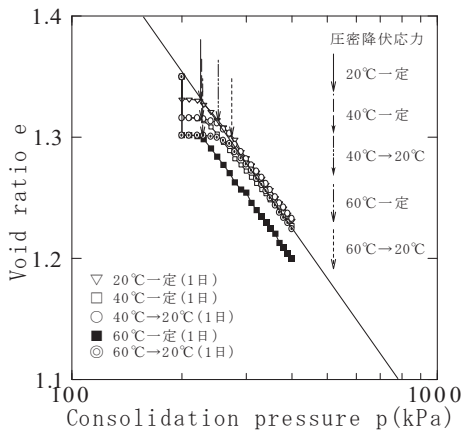
時間効果および温度効果を受けた粘土の非排水せん断強度の評価



(a) 有明粘土



(b) 有明粘土(溶脱)

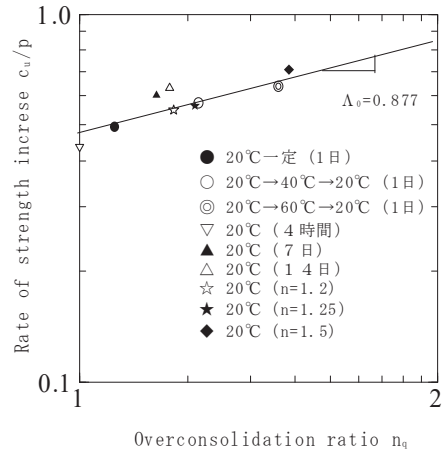


(c) カオリン粘土

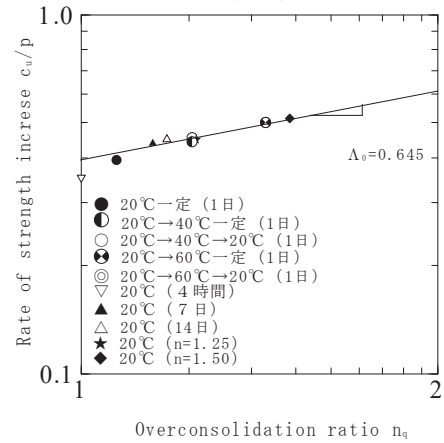
図-11 温度効果を受けた粘土の  $e$ - $\log p$  曲線

のような飛び出し現象は見られないことがわかる。

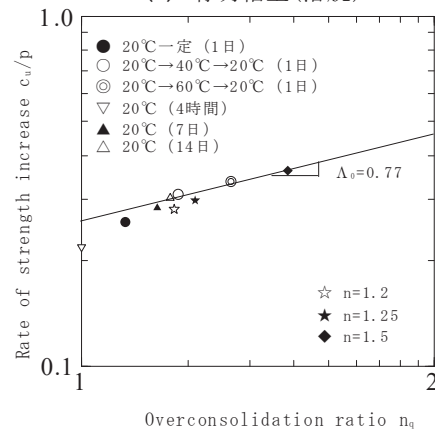
図-12は有明粘土, 有明粘土(溶脱), カオリン粘土について擬似過圧密比と強度増加率の関係を, 実測値と計算値を対応させ比較したものであり, 図-13は非排水せん断強度の実測値と計算値を比較したものである。これらの結果と表-3より時間効果について比較すると, 有明粘土では時間効果を受けて二次圧密が進むと, 擬似過圧密比が大きくなり非排水せん断強度の実測値は計算値の1.0から1.15倍程度の範囲で大きくなっていることがわかる。



(a) 有明粘土



(b) 有明粘土(溶脱)



(c) カオリン粘土

図-12 擬似過圧密比と強度増加率の関係

また, 岡山粘土でも 1.1 倍程度とその傾向が見られ, セメンテーションの効果を受けてせん断強度が増加していることがわかる。しかし, カオリン粘土や有明粘土(溶脱)では 1.0 倍程度と, 有明粘土や岡山粘土ほどセメンテーション効果ははっきりとは見られなかった。また, 温度効果について比較すると, 有明粘土, 岡山粘土については温度の高いものほど擬似過圧密比が大きくなり時間効果と同様にセメンテーション効果を受けて実測値が計算値よりも大きくなり, 温度効果 60°C の試験で有明粘土は 1.03 倍, 岡山粘土は 1.1 倍程度の範囲

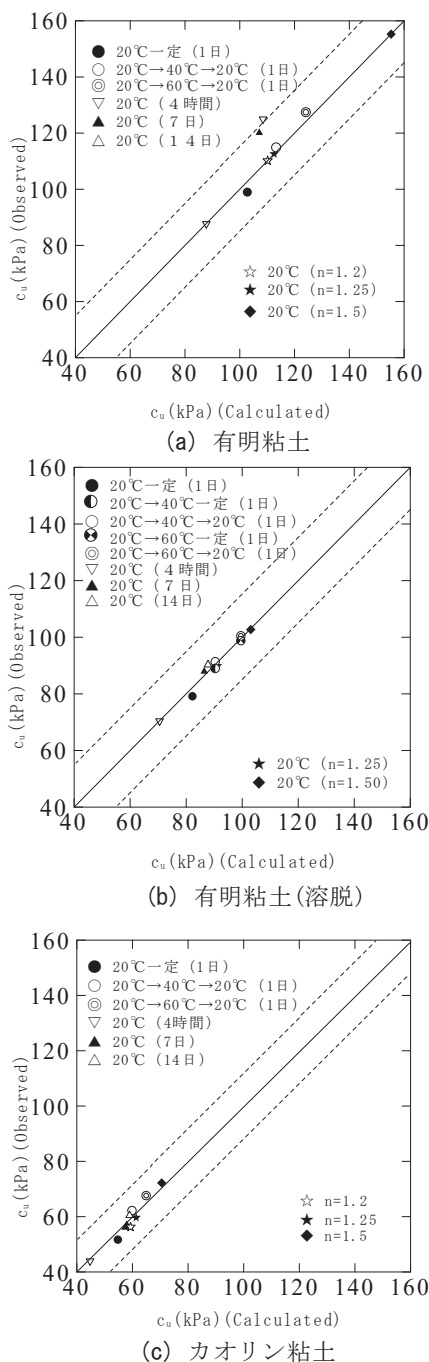


図-13 非排水せん断強度の実測値と計算値の比較

で大きくなっていることがわかる。しかし、カオリン粘土や有明粘土(溶脱)については 1.0 倍程度の値もしくは実測値が計算値よりも低い値を示した。得られた結果から、セメンテーションによるせん断強度の増加や圧密降伏応力の飛び出し現象は、有明粘土(溶脱)およびカオリン粘土では見られなかった。これは、有明粘土(溶脱)については陽イオン濃度が低くなっていることから、セメンテーション効果を受けにくいと考えられる。一方、有明粘土、岡山粘土は自然粘土であり、陽イオンが多く含まれており、粘土粒子間の化学的結合であるセメンテーションの影響を強く受けるため

せん断強度の増加や圧密降伏応力の飛び出し現象が現れたものと考えられる。

## 5. おわりに

本文では、温度制御が可能な三軸試験により物理・化学的性質の 4 種類の試料を用いて時間効果および温度効果を受けた粘土の圧密せん断特性を明らかにした。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 粘土に時間効果および温度効果を与えることにより、見かけ上過圧密土の挙動を示し、このときの圧密降伏応力・せん断強度は二次圧密・セメンテーションの程度によりその大きさが異なることが明らかになった。
- (2) 陽イオン濃度の高い粘土では、二次圧密が促進することにより、セメンテーションの程度も増加するが、陽イオン濃度の低い粘土では、二次圧密が促進してもセメンテーションの程度はあまり増加しないことが明らかになった。
- (3) 時間効果および温度効果を受けた粘土の非排水せん断強度の評価式を提案し、予測値は実測値とほぼうまく対応することを証明できた。

## 参考文献

- 1) Bjerrum, L.: Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, Vol.17, No.2, pp.81-118, 1967.
- 2) 土田孝, 小林正樹, 水上純一, 田中正典: 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現, 港湾技術研究所報告, 第 28 巻, 第 1 号, pp.121-147, 1989.
- 3) 上俊二, 藤原東雄, 勝村雅子: 二次圧密時に温度効果を受けた粘土の圧密特性, 土木学会論文集, No.554/3-37, pp.47-55, 1996.
- 4) Warkentin, B. P. and Yong, R.N.: Shear Strength of Montmorillonite and Kaolinite Related to Interparticle Forces, *Clay and Clay Minerals*, Vol.9, pp.210-218, 1962.
- 5) Mitachi, T. and Kitago, S.: Change in undrained shear strength characteristics of saturated remolded clay due to swelling, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.1, pp.45-58, 1976.
- 6) Mayne, P. W.: Cam-clay predictions of undrained strength, *Proc. ASCE*, Vol.106, GT.11, pp.1219-1242, 1980.
- 7) Murakami, Y.: Excess pore-water pressure and pre-consolidation effect developed in normally consolidated clay with some age, *Soils and Foundations*, Vol.19, No.4, pp.17-29, 1979.

(2019 年 9 月 30 日 受付)