

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

徳山工業高等専門学校	学生会員	○中村裕樹
徳山工業高等専門学校	正会員	上 俊二
徳山工業高等専門学校	正会員	藤原東雄
徳山工業高等専門学校	正会員	桑嶋啓治

1. 序論

粘土は温度効果や時間効果を与えることによりその力学的特性が変化することが知られている¹⁾²⁾が, その力学的特性がどのようなメカニズムによって変化するかについては十分に解明されていない. 本研究では, このような温度と時間の影響を明らかにするために, それぞれ塑性指数の異なる 3 種類の粘土による温度と時間を二次圧密時に定量的に変化させて行った圧密非排水せん断試験を行い, 結果の比較を行うことにより, 温度効果および時間効果を受けた粘土の非排水せん断強度の評価を行った.

2. 実験概要

実験に用いた試料は, 有明粘土 ($W_L=107\%$, $I_p=58.26$, $G_s=2.497$), 岡山粘土 ($W_L=77.0\%$, $I_p=47.6$, $G_s=2.62$), カオリン粘土 ($W_L=78.0\%$, $I_p=41$, $G_s=2.65$) である. これらの試料を液性限界の約 2 倍の含水比で十分攪拌し, 室温 (20°C) に保ったまま $\sigma_c=100\text{kPa}$ まで段階的に再圧密した. また, 三軸実験装置については二重セル構造でヒーターにより加熱が可能なものを使用した. 実験では, 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) 温度効果: a) 高温→室温 室温 (20°C), 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) 高温一定 室温 (20°C), 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) 時間効果: 室温 (20°C), 圧密圧力 $p_0=200\text{kPa}$ で所定の二次圧密時間 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) 応力除荷: 室温 (20°C), 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, 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 200kPa を負荷した. 間隙水圧の測定は供試体下部で行い, せん断時の軸変位, 軸荷重, 間隙水圧を測定した.

3. 実験結果および考察

図-1 は一例として有明粘土の温度効果, 時間効果, 応力除荷における圧密非排水せん断試験の有効応力経路図を示している. この図より温度効果では, 温度を室温から高温に上昇させたものは, 20°C 一定としたものよりもせん断強度が増加しており, 高温一定のものと室温に低下させたものを比較すると, 室温に低下させたものの方がせん断強度が増加していることが分かる. また, 圧密時の温度が高いほどせん断強度が増加し, せん断初期の間隙水圧の発生も少なく, せん断強度が増加していることがわかる. 時間効果についても, 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. また応力除荷についても, 過圧密比 n が大きくなるほどせん断強度が増加していることが分かる. 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. これはせん断時のダイラタンシー特性が異なるためと考えられる. なお, 破壊時の有効応力状態は応力履歴の相違によらず, ほぼ一定の破壊線上に位置することが分かる.

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

ここでは実験結果をもとに, 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. ここで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た³⁾. 二次圧密時に温度効果を受けた粘土の擬似過圧密比 n_q および非排水せん断強度 c_{u0} はそれぞれ次式で表される.

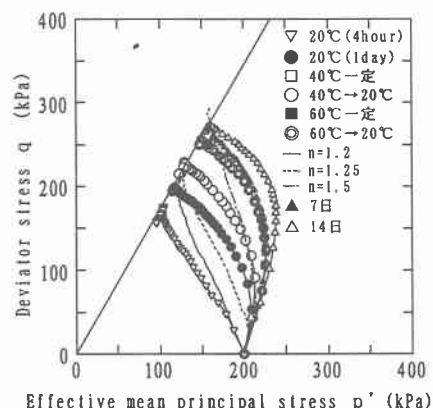


図-1 有効応力経路図 (有明粘土)

$$n_q = \frac{p_c'}{p_0'} = \beta \left(\frac{t_s}{t_0} \right)^{\frac{C_a}{C_c - C_s}} 10^{C_\beta \frac{T_H - T_R}{C_c - C_s} \Lambda_0} \quad (1)$$

$$c_{u0} = m p_0' \beta \left(\frac{t_s}{t_0} \right)^{\frac{C_a}{C_c - C_s} \Lambda_0} 10^{\frac{T_H - T_R}{C_c - C_s} \Lambda_0} \quad (2)$$

ここで β 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、 T_R は室温、 T_H は高温である。式(1)、式(2)に含まれる係数の決定を実験結果より行った。その値を表-1に示す。次に、二次圧密時の応力除荷による過圧密粘土の非排水せん断強度をもとにして、時間効果および温度効果を受けた粘土の擬似過圧密比を求め、非排水せん断強度の評価を行った。なお、計算においてはセメンテーション効果による飛び出しがまったくないものとして実験定数 $\beta=1.0$ とした。計算結果および実測値をそれぞれ粘土ごとに表-2に示している。ここで非排水せん断強度の計算値と実測値の比はセメンテーション効果の程度を表している。

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、非排水せん断強度の実測値は1.0から1.15倍程度の範囲で大きくなっていることが分かる。また、岡山粘土でも1.1倍程度とその傾向が見られるが、カオリン粘土では1.04倍程度と有明粘土や岡山粘土よりも低い値を示した。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実測値が計算値より大きくなっており、60℃で有明粘土は1.03倍、岡山粘土は1.09倍程度の範囲で大きくなっていることがわかる。しかしながら、カオリン粘土については実測値が計算値よりも低い値を示した。これは、カオリン粘土は純粋な粘土鉱物だけから人工的に作られた粘土であり有機物の含有量が少なく、陽イオン濃度が低いいため時間効果および温度効果を受けてもあまりセメンテーションが増加しないと考えられる。一方、有明粘土、岡山粘土は自然堆積粘土であり、粘土鉱物の他に有機物などが含まれ、陽イオン濃度が高く、セメンテーションの影響を強く受けるため飛び出し現象が現れたものと考えられる。

5. 結論

以上の結果より、本研究において二次圧密時に温度効果(室温→高温→室温)を受けた粘土は、室温で長時間圧密された擬似過圧密粘土の非排水せん断挙動に類似していることが明らかになった。また、カオリン粘土と有明粘土、岡山粘土を比較することによりセメンテーションの大小は有機物、陽イオンなどの影響によって起こるものと考えられ、応力除荷による過圧密粘土のせん断強度を評価する式をもとに、二次圧密時に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た。

参考文献

- 1) 村山朔朗：土の力学挙動の理論、技報堂出版、pp. 742-784, 1990.
- 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, 高野義和：二次圧密時に温度効果を受けた粘土の非排水せん断強度の評価、高温環境と土-粘土微視構造から廃棄物の地中処理問題まで—シンポジウム発表論文集, pp. 162-172, 1997.

表-1 実験定数

	有明粘土	岡山粘土	カオリン粘土
C_a	0.015	0.026	0.008
C_β	0.00150	0.00106	0.00155
C_c	0.470	0.410	0.369
C_s	0.0900	0.0160	0.0454
m(4hour)	0.438	0.373	0.224
(1day)	0.495	0.396	0.258
Λ_0	0.877	0.626	0.770

表-2 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	c_u 実測値 kPa	c_u 計算値 kPa	c_u 実測値 c_u 計算値
有明粘土	温度効果	20℃	1.07	99.0	102.7	0.96
		40℃	1.26	115.0	113.0	1.02
		60℃	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
		7day	1.16	120.0	106.9	1.12
		14day	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
岡山粘土	温度効果	20℃	1.13	79.2	80.3	0.99
		40℃	1.27	91.5	86.8	1.05
		60℃	1.44	102.4	93.8	1.09
	時間効果	4hour	1.00	74.6	74.6	1.00
		1day	1.13	79.2	80.3	0.99
		7day	1.28	95.5	87.1	1.09
	応力除荷	n=1.0		79.2	80.3	0.99
		n=1.25		91.1	91.1	1.00
		n=1.5		102.1	102.1	1.00
		n=2.0		122.3	122.3	1.00
カオリン粘土	温度効果	20℃	1.07	51.6	54.1	0.95
		40℃	1.34	61.9	64.1	0.97
		60℃	1.67	70.5	76.0	0.93
	時間効果	4hour	1.00	44.0	45.4	0.97
		1day	1.07	51.6	54.1	0.95
		7day	1.13	56.4	56.1	1.01
		14day	1.15	60.4	56.9	1.04
	応力除荷	n=1.0		51.6	54.1	0.95
		n=1.2		56.3	56.3	1.00
		n=1.25		59.7	59.7	1.00
		n=1.5		83.1	83.1	1.00