

# 不同幅值温度荷载下一种饱和红黏土的固结效应

白冰, 张鹏远, 贾丁云, 蒋思晨

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 通过室内试验, 研究一种饱和红黏土在不同升温幅值温度荷载作用下的固结效应。亦即, 首先将试样在初始温度 20℃ 和一定围压下 ( $\sigma'_3=50, 100, 150, 200$  kPa) 进行固结。然后, 在不排水条件下将试样温度由 20℃ 上升至 40℃ (或 50℃, 60℃, 70℃, 80℃), 再让试样在该温度荷载下进行等温排水固结。试验表明, 温度荷载引起的孔隙水压力最大值随升温幅值的增大而增大, 达到同一温度设定值后的孔隙水压力与围压比随围压的增大而相应减小, 而孔隙水压力值则增大。在温度荷载作用下, 固结体应变随温度幅值的增大而增大, 而随围压的增大而有减小的趋势。在相同幅值温度荷载和相同围压作用下, 红黏土的孔隙水压力增长速率及最大值要明显大于一种低塑性的粉质黏土, 而其固结体应变却要小些。

**关键词:** 红黏土; 矿物成分; 温度幅值; 孔隙水压力; 塑性指数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)11-1972-07

**作者简介:** 白冰(1966-), 男, 教授, 目前主要从事岩土介质热力学特性方面的研究工作。E-mail: baibing66@263.net。

## Consolidation effects of a saturated red clay subjected to temperature loading with different amplitudes

BAI Bing, ZHANG Peng-yuan, JIA Ding-yun, JIANG Si-chen

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The consolidation effects of a saturated red clay subjected to temperature loading with different amplitudes are studied. The specimens subjected to different confining pressures (i.e.,  $\sigma'_3=50, 100, 150, 200$  kPa) are firstly consolidated at a primary temperature of 20℃ and then are heated to different higher temperatures (i.e., 40℃, 50℃, 60℃, 70℃ and 80℃) under undrained and drained conditions at the desired temperature. The test results show that the peaks of the pore pressure induced by heating increase with the increase of the amplitudes of the thermal loading, and the ratios of the pore pressure to the confining pressure decrease with the increase of the confining pressure when the temperature of specimens reaches the same desired value, while the pore pressure increases actually. Under drained conditions, the volumetric strain increases with the increase of the amplitudes of thermal loading and decreases as the confining pressure increases. Besides, in the case of the same thermal loading and confining pressures, the thermal consolidation volumetric strains of the red clays are commonly greater than those of a saturated silty clay with low plasticity index.

**Key words:** red clay; mineralogical composition; amplitude of temperature loading; pore water pressure; plasticity index

## 0 引言

温度荷载作用下, 固体颗粒与孔隙水热膨胀特性的差异可使饱和土中产生明显的孔隙水压力<sup>[1]</sup>, 此时吸附在土颗粒周围的水分子被“激活”, 从而减小了水膜的厚度, 进而产生不可逆的体积收缩, 最终引起土体强度的显著变化。这一所谓“热固结”效应的研究在诸如地热资源开发、热能储存、核废料处置以及岩土工程环境评价和控制等多个领域有着广泛的应用前景。

早先的研究涉及不同的温度幅值、不同的排水条件、不同的土性、不同的固结应力状态和不同的温度

荷载作用路径等。例如, Hueckel 等<sup>[2]</sup>对不同超固结状态的天然黏性土及重塑黏性土进行了不同温度等温条件以及温度-荷载循环的三轴固结试验。Cekerevac 等<sup>[3]</sup>根据排水及不排水条件下的试验结果对温度作用历史和应力历史的影响进行了分析。Hüpers 等<sup>[4]</sup>研究了一种海质黏土的热固结特性及其孔隙水压力的演化机理, 所涉及的温度可达 150℃, 而有效固结压力可达 70 MPa, 讨论了地层中温度与孔隙体积减小的正相

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51279002); 中央高校基本科研业务费专项基金项目 (2012YJS086)

**收稿日期:** 2013-04-28

关性。陈正汉等<sup>[5]</sup>通过自行设计的温控三轴仪, 对一种典型的非饱和土膨胀土进行了温度影响的变形和强度特性试验。Villar 等<sup>[6]</sup>对一种作为高放核废料处置中隔离材料的膨润土的热-水-力耦合特性进行了试验, 考察了不同的密度、不同的含水率下膨润土渗透特性的变化及物理化学过程的相互作用机理。Yilmaz<sup>[7]</sup>研究了温度效应对土的矿物颗粒的大小、含水率、比重、塑性指数、膨胀特性以及压缩指数和抗剪强度特性等各种因素的影响。Monfared 等<sup>[8]</sup>研究了一种低渗透性高岭土的热-水-力耦合特性, 所采用的中空圆柱试样的内侧和外侧均为透水面, 使得试样的透水路径和固结时间大大缩短。最近, Masin 等<sup>[9]</sup>总结了温度引起的饱和与非饱和土热特性的一些基本规律, 并讨论了很多试验资料存在的一些差异和矛盾。

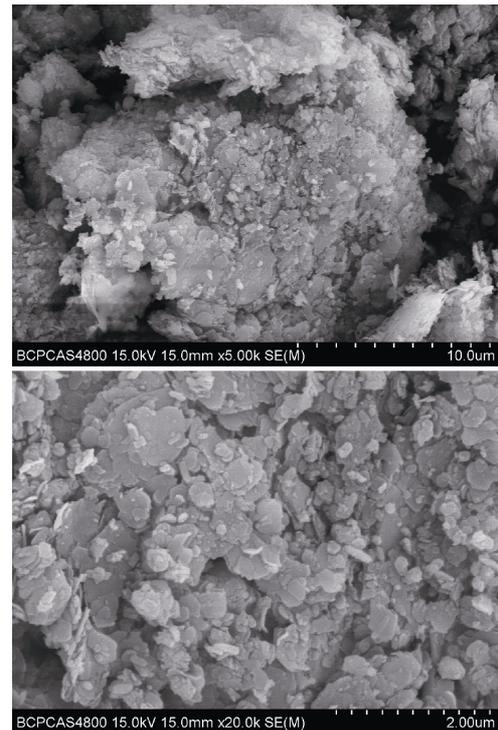
很多学者已建立了考虑温度效应的土体本构模型, Burghignoli 等<sup>[10]</sup>发展了一个考虑热效应的临界状态模型, 并采用数值方法分析圆域及球域热源热固结弹塑性问题。Graham 等<sup>[11]</sup>基于等温条件下的室内试验, 考虑温度效应的影响对剑桥黏土模型进行了修正。Cui<sup>[12]</sup>和 Abuel 等<sup>[13]</sup>基于剑桥黏土模型的基本框架, 建立了相应的可考虑温度影响的基于临界状态理论的弹塑性本构模型。姚仰平等<sup>[14]</sup>建立了一个能够考虑温度影响的统一硬化模型, 该模型可反映由温度变化引起的体积变化以及前期固结压力随温度升高而降低等特性。

本文通过室内试验, 研究一种饱和红黏土在不同升温幅值温度荷载作用下的固结效应, 重点讨论不同温度幅值和围压所引起的孔隙水压力和固结体应变的差异性, 并与一种低塑性的粉质黏土的固结特性进行了比较。

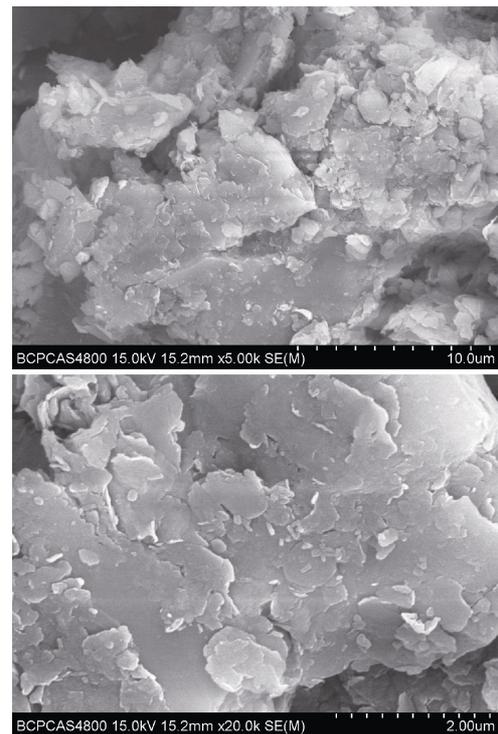
## 1 试验概况

### 1.1 试验红黏土及土样制备

红黏土在中国西南地区广泛存在, 其物理力学性质也因地区差异而十分复杂<sup>[15]</sup>。本文所用红黏土土样为中国广西靖西红黏土, 其扫描电子显微镜 SEM 照片见图 1 (a), 测试时的放大倍数包括 5000 和 20000 两种。经风干、碾散、过 0.2 mm 筛制备重塑土样。土的基本物理性质指标为塑限  $w_p=71.8\%$ , 液限  $w_L=39.2\%$ , 塑性指数  $I_p=32.6$ , 土粒相对密度  $G_s=2.74$ 。经 X 射线衍射分析 (X 射线衍射仪型号: D/MAX 2500), 该红黏土的非黏土矿物成分占 22.2% (其中石英 7.7%, 钾长石 1.0%, 斜长石 1.4%, 三水铝石 12.1%), 黏土矿物成分占 77.8% (其中伊利石蒙脱石混层 45.9%, 伊利石 12.5%, 高岭石 6.2%, 绿泥石类 13.2%)。



(a) 红黏土



(b) 粉质黏土

图 1 试验用土的 SEM 图像

Fig. 1 SEM photos of red clay and silty clay

将充分搅拌的土样制备成具有一定含水率  $w$  的湿土样 (约  $w=30.0\%$ ), 然后把预先称重的土样分 5 层装入制样器内, 制备成高  $h=8$  cm, 直径  $\phi=3.91$  cm 的试样, 其干重度  $\gamma_d=11.97$  kN/m<sup>3</sup>。对试样抽真空加蒸馏水饱和, 抽气时间大于 3 h, 抽气后土样在水中浸泡

12 h 以上, 饱和后含水率  $w=44.8\%$ , 饱和度  $S_r>98.2\%$ 。

## 1.2 对比用粉质黏土

本文试验结果与另外一种塑性指数较低的饱和粉质黏土的孔隙水压力和固结体应变的演化过程进行了比较, 该粉质黏土的扫描电子显微镜 SEM 照片见图 1

(b)。该粉质黏土的塑限  $w_p=17.6\%$ , 液限  $w_L=31.4\%$ , 塑性指数  $I_p=13.8$ , 土粒相对密度  $G_s=2.71$ , 干重度  $\gamma_d=15.5 \text{ kN/m}^3$ , 饱和后含水率  $w=25.1\%$ 。该粉质黏土的塑性指数要比前面红黏土的塑性指数小很多, 而其土样制备含水率也要小很多。

经 X 射线衍射分析, 该粉质黏土的非黏土矿物成分占 71.7%, 其中石英 37.4%, 钾长石 4.9%, 斜长石 18.6%, 方解石 8.0%, 白云石 1.5%, 石膏 0.3%, 角闪石 1%; 黏土矿物成分占 28.3%, 其中伊利石 9.4%, 高岭石 14.7%, 绿泥石类 4.2%。

## 1.3 试验装置简单说明

利用温度控制固结试验装置进行试验<sup>[16]</sup>。该试验装置的压力室为侧壁由不锈钢制作的空腔式结构, 压力室筒状电热板嵌入压力室侧壁内, 其电阻丝的两端与温度调控器连接, 压力室筒状电热板的外侧充填隔热用石棉。压力室电热耦安装在顶盖上, 其一端置于充满水的压力室内, 输出端与温度调控器连接, 以此来控制压力室内温度的变化, 温度控制系统的灵敏度为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

为避免在试样内安装温度传感器带来的扰动, 试样的温度由安装在压力室内水中的热电偶来间接测定。这样做可能会使试样内的真实温度滞后于压力室内水体的温度, 但当试样加热稳定后两者的差异就比较接近。试样内的孔隙水压力由位于试样底部中央的孔隙水压力传感器来测量 (测量范围为  $0\sim 1 \text{ MPa}$ , 精度为  $0.1 \text{ kPa}$ ), 并与数字监控系统连接, 而围压也与另一个位于压力室底部的压力传感器来测量 (测量范围为  $0\sim 1 \text{ MPa}$ , 精度为  $0.1 \text{ kPa}$ )。

## 1.4 试验方法

将试样在初始温度  $T_0=20^\circ\text{C}$  和一定的围压 ( $\sigma'_3=50, 100, 150, 200 \text{ kPa}$ ) 下进行初始固结并达到稳定 (10 h 内变化量小于  $1 \text{ kPa}$ )。当试样固结稳定后, 再在不排水条件下对试样加热, 试样温度将由  $T_0=20^\circ\text{C}$  升至  $T=40^\circ\text{C}$  (或  $50^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  和  $80^\circ\text{C}$ ), 即温度荷载  $\theta=20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  和  $50^\circ\text{C}$  (定义温度荷载  $\theta=T-T_0$ ), 升温时间对应为 120, 120, 120, 180, 240 min, 以保证试样有足够长的时间达到设定温度值。此时, 打开排水阀门让试样排水固结, 直至孔隙水压力消散至稳定。

## 2 红黏土的等温固结过程

图 2 为等温 (即  $T=20^\circ\text{C}$ ) 固结过程中 ( $\sigma'_3=50,$

100, 150 和 200 kPa), 试样的温度、孔隙水压力和固结体应变的变化过程。由图 2 (a) 可见, 初始固结过程中试样温度有一定波动, 但波动幅度和频率不受围压的影响, 波动范围为  $19.3^\circ\text{C}\sim 21.3^\circ\text{C}$ 。温度波动频率一般在前期较快 (如固结初期 500 min 内), 而后后期明显减缓, 这主要与前期试样的排水量较大, 亦即压力室内、外水体交换引起的温度变化有关。

图 2 (b) 表明, 当对试样施加  $\sigma'_3=50, 100, 150$  和  $200 \text{ kPa}$  的围压作用后, 其孔隙水压力与围压比在  $u/\sigma'_3=0.96\sim 0.99$ , 说明试样有较高的饱和度。之后, 孔隙水压力最终消散至接近  $4 \text{ kPa}$  而趋于稳定 (即  $u/\sigma'_3=0.08, 0.05, 0.03, 0.02$ ), 所需时间分别为 35, 108, 140, 270 min, 此时的固结体应变分别为  $\varepsilon_v=5.52\%, 9.06\%, 11.88\%, 13.44\%$  (图 2 (c))。

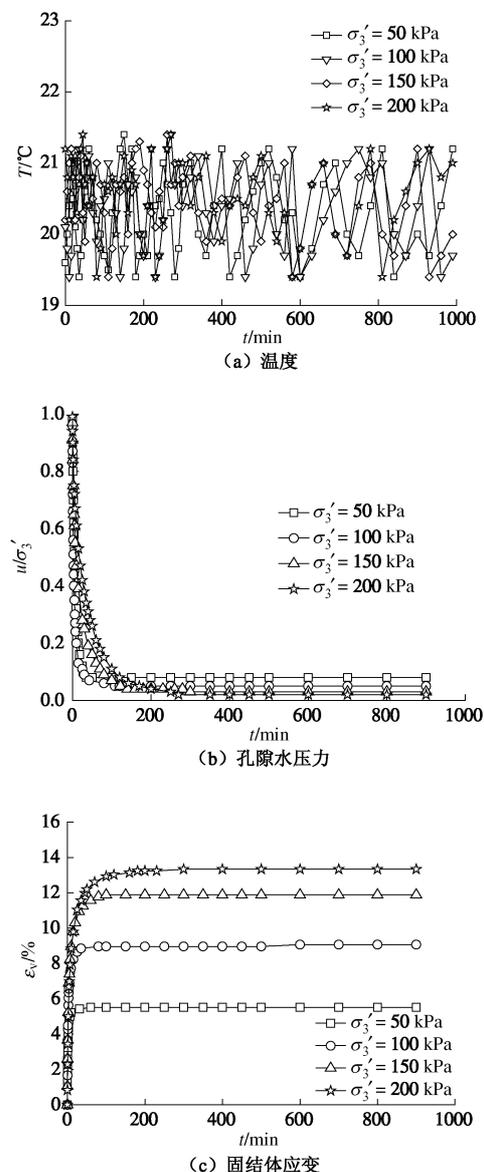


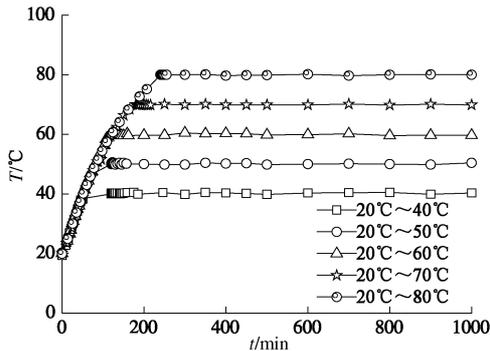
图 2 红黏土的等温固结过程

Fig. 2 Primary consolidation processes of red clay

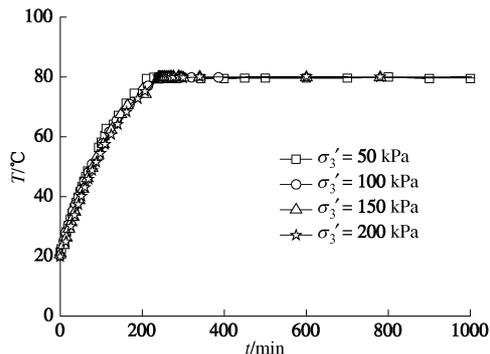
### 3 升温幅值对热固结过程的影响

#### 3.1 温度变化

图 3 (a) 表明, 随升温过程的延续, 由于压力室内与环境温度的差异逐渐增大, 因此试样的温度增长速率逐渐减小, 且达到温度设定值后 (如  $T=40^{\circ}\text{C}$ ) 很快趋于稳定, 而不同围压下试样的升温过程几乎一致 (如图 3 (b))。



(a) 不同升温幅值的比较 ( $\sigma'_3 = 200 \text{ kPa}$ )



(b) 不同围压下温度变化的比较 ( $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$ )

图 3 加热过程中试样的温度变化

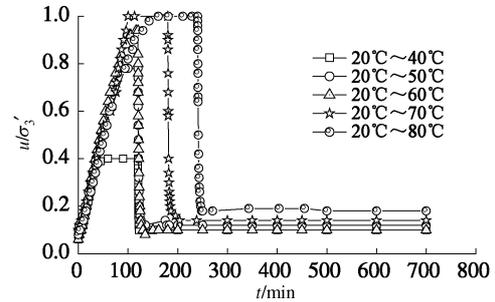
Fig. 3 Temperature variations of specimens by heating

#### 3.2 孔隙水压力变化

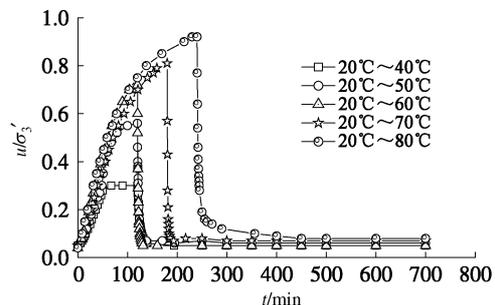
图 4 为当围压  $\sigma'_3=50, 100, 150, 200 \text{ kPa}$  时, 不排水升温过程中孔隙水压力的增长过程以及其后的等温消散过程。可见, 当温度达到设定值后 (如图 4 (a),  $\sigma'_3=50 \text{ kPa}$ ), 5 种升温幅值 (即  $T=20^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}, 50^{\circ}\text{C}, 60^{\circ}\text{C}, 70^{\circ}\text{C}, 80^{\circ}\text{C}$ ) 下的孔隙水压力与围压比分别达到  $u/\sigma'_3=0.4, 0.78, 0.88, 1.0, 1.0$ 。亦即, 随温度荷载的增大, 温度引起的孔隙水压力最大值  $u_{\text{peak}}$  也愈大 (见表 1), 直至达到潜在的最大值 (即  $u/\sigma'_3=1.0$ )。此外, 同一围压下 (如  $\sigma'_3=50 \rightarrow 100 \rightarrow 150 \rightarrow 200 \text{ kPa}$ ), 不同温度幅值作用下的孔隙水压力增长过程一致。之后, 在排水固结过程中, 孔隙水压力迅速消散到稳定。

表 1 表明, 随围压的增大 (即  $\sigma'_3=50 \rightarrow 100 \rightarrow 150 \rightarrow 200 \text{ kPa}$ ), 达到同一温度设定值 (如  $T=40^{\circ}\text{C}$ ) 后的孔隙水压力最大值  $u_{\text{peak}}$  也增大。另一方面, 随围

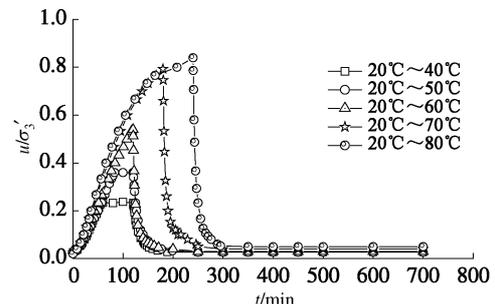
压的增大, 同一温度荷载作用下 (见图 4, 如  $T=20^{\circ}\text{C} \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$ ) 的孔隙水压力增长速率减慢, 其原因可归结为试样先期曾受过较大固结压力下的固结过程, 试样内的孔隙水已有明显减小。



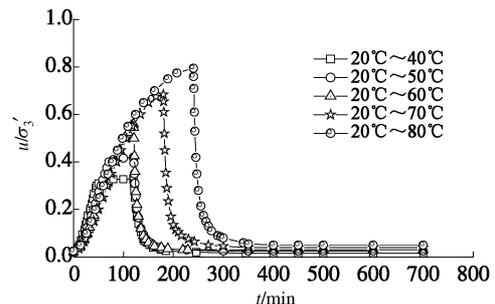
(a)  $\sigma'_3 = 50 \text{ kPa}$



(b)  $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$



(c)  $\sigma'_3 = 150 \text{ kPa}$



(d)  $\sigma'_3 = 200 \text{ kPa}$

图 4 温度荷载作用下孔隙水压力增长和消散过程

Fig. 4 Generation and dissipation of pore pressure induced by heating

#### 3.3 固结体应变变化

在排水条件下, 温度引起的孔隙水压力迅速消散并很快趋于稳定 (见图 4), 这一过程要比初始固结作用下孔隙水压力的消散过程快一些 (见图 2 (b))。此时, 饱和土样的固结体应变迅速增大, 并较快趋于稳

定(见图5)。这里,定义由于温度变化所引起的试样的固结体应变为 $\varepsilon_v = \Delta V/V_0$ (单位取%,其中 $V_0$ 为试样的初始体积, $\Delta V$ 为由温度变化所引起的试样的固结排水量)。例如,当 $\sigma'_3 = 50$  kPa时,5种升温幅值条件下(即 $T = 20^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}, 70^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}$ )的固结体应变分别达到 $\varepsilon_v = 0.52\%, 1.56\%, 2.29\%, 3.01\%, 3.31\%$ ,说明固结体应变 $\varepsilon_v$ 随温度幅值的增大而增大。

表1 升温引起的孔隙水压力和固结体应变

Table 1 Pore pressures and volumetric strains induced by heating for different confining pressures

围压 $\sigma'_3$ /kPa	测定 物理量	升温幅度				
		20°C →40°C	20°C →50°C	20°C→ 60°C	20°C →70°C	20°C→ 80°C
50	$(u/\sigma'_3)_{\text{peak}}$	0.4	0.78	0.88	1.0	1.0
	$u_{\text{peak}}/\text{kPa}$	20.0	39.0	44.0	50.0	50.0
	$\varepsilon_v/\%$	0.52	1.56	2.29	3.01	3.31
100	$(u/\sigma'_3)_{\text{peak}}$	0.3	0.56	0.72	0.81	0.92
	$u_{\text{peak}}/\text{kPa}$	30.0	56.0	72.0	81.0	92.0
	$\varepsilon_v/\%$	0.62	1.25	1.56	2.04	2.22
150	$(u/\sigma'_3)_{\text{peak}}$	0.23	0.36	0.54	0.79	0.84
	$u_{\text{peak}}/\text{kPa}$	34.5	54.0	81.0	118.5	126.0
	$\varepsilon_v/\%$	0.63	1.15	1.46	1.72	1.88
200	$(u/\sigma'_3)_{\text{peak}}$	0.33	0.42	0.56	0.69	0.8
	$u_{\text{peak}}/\text{kPa}$	66.0	84.0	112.0	138.0	160.0
	$\varepsilon_v/\%$	0.52	0.83	1.4	1.61	1.81

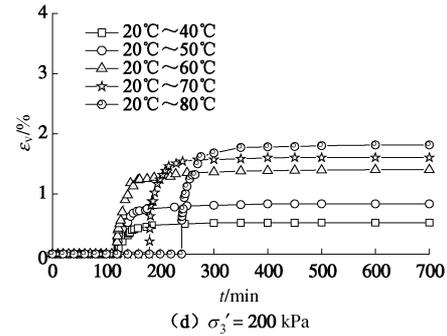
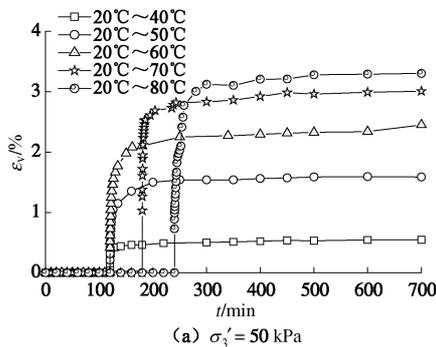


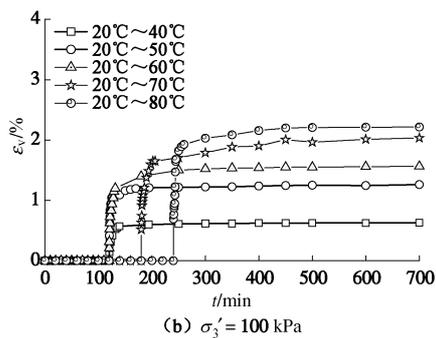
图5 温度引起的红黏土的固结体应变

Fig. 5 Consolidation volumetric strains of red clay induced by heating

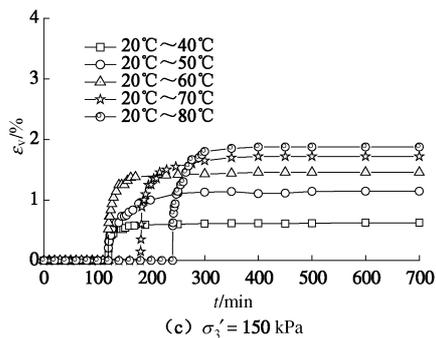
图6表明,当温度荷载 $\theta$ 较大时(如 $\theta > 60^\circ\text{C}$ ),温度荷载作用下的孔隙水压力与围压比 $u/\sigma'_3$ 以及固结体应变 $\varepsilon_v$ 大致随围压 $\sigma'_3$ 的增大而有减小的趋势,这一趋势似乎随温度荷载的增大而更为明显(即变化斜率增大)。实际上,在先前的初始等温固结过程中(即 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,图2),较大的围压(如 $\sigma'_3 = 200$  kPa)作用会使得土样经受过较大的固结体应变,土样的含水率明显减小,因此在后期温度荷载作用下表现出较小的固结体应变。



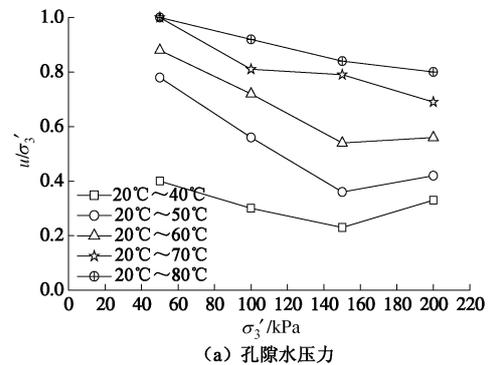
(a)  $\sigma'_3 = 50$  kPa



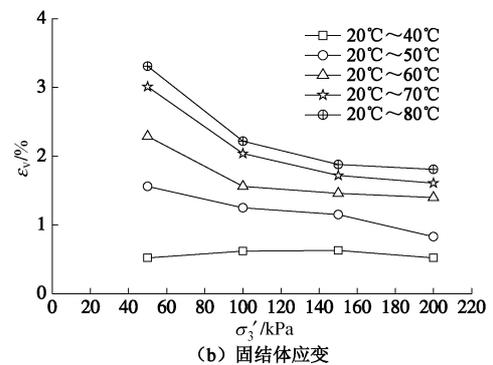
(b)  $\sigma'_3 = 100$  kPa



(c)  $\sigma'_3 = 150$  kPa



(a) 孔隙水压力



(b) 固结体应变

图6 围压对孔隙水压力和固结体应变的影响

Fig. 6 Effects of confining pressures on pore pressure and consolidation volumetric strain

#### 4 与饱和粉质黏土固结效应的比较

图7给出本文所用饱和红黏土与另一种塑性指数

较小的饱和粉质黏土的孔隙水压力演化过程的比较。2 种试验中, 所设定的不排水升温时间由于土性和温度荷载大小的不同而有区别, 所以孔隙水压力消散起始时间略有不同。对于红黏土, 当温度荷载  $\theta=30^{\circ}\text{C}$  和  $50^{\circ}\text{C}$  时, 升温时间分别为 120, 180 min; 对于粉质黏土, 当温度荷载  $\theta=30^{\circ}\text{C}$  和  $50^{\circ}\text{C}$  时, 升温时间分别为 110, 300 min。

图 7 表明, 在相同的温度荷载和相同的围压作用下 (例如,  $\theta=30^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma'_3=50\text{ kPa}$ ), 具有更为分散和细小矿物颗粒骨架的红黏土 (见图 1 (a)) 的孔隙水压力增长速率和最大值  $u_{\text{peak}}$  要明显大于固体颗粒稍大的粉质黏土 (见图 1 (b)) 的孔隙水压力增长速率和最大值  $u_{\text{peak}}$ , 亦即红黏土的孔隙水压力达到稳定所需要的时间要短些。实际上, 在温度荷载作用下, 具有较高含水率的红黏土试样内的孔隙水体积膨胀量要远远大于粉质黏土内孔隙水的体积热膨胀量, 这样红黏土的固体矿物颗粒与孔隙水的体积膨胀差异也就更为明显, 因此所引起的孔隙水压力就大。当然, 当围压较大时 (如  $\sigma'_3=100\text{ kPa}$ ), 由于先前土样的初始固结过程显著, 使得试样含水率明显减小, 因此后期不排水温度升温作用下的孔隙水压力增长速率就明显减慢。

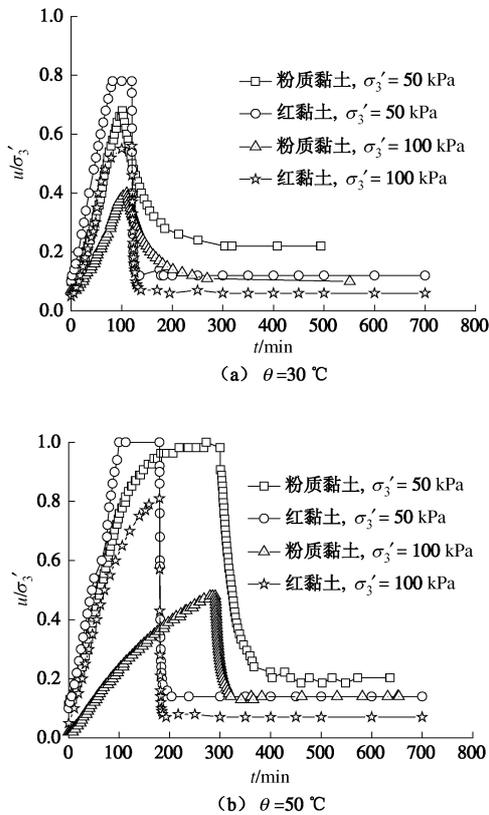


图 7 红黏土与粉质黏土的孔隙水压力的比较

Fig. 7 Comparison of pore pressure induced by temperature between red clay and silty clay

然而, 由图 8 所给出的温度荷载作用下饱和红黏

土的固结过程来看, 在相同的温度荷载和相同的围压作用下, 由于温度效应所引起的红黏土的固结体应变要比粉质黏土小一些。例如, 当  $\theta=30^{\circ}\text{C}$  (即  $T=20^{\circ}\text{C} \rightarrow 50^{\circ}\text{C}$ ) 和  $\sigma'_3=50\text{ kPa}$  时, 两者分别为  $\varepsilon_v=1.59\%$ ,  $2.61\%$ 。实际上, 尽管红黏土试样具有较高的含水率 (即孔隙率, 见图 1 (a)), 但由于其中黏土矿物成分要比粉质黏土矿物成分大很多 (分别为  $77.8\%$  和  $28.3\%$ ), 孔隙呈较为细小和均匀的状态, 且主要为亲水性更强的伊利石蒙脱石混层 (占  $45.9\%$ ), 因此导致土颗粒与孔隙水之间具有较大的黏滞性, 孔隙水多以结合水的形态存在而不宜在温度效应的“激活”作用下向外排出。因此, 温度荷载作用下的固结变形量并不比低的塑性指数的粉质黏土大。当然, 对于本节所述的 2 种黏性土, 温度引起的固结体应变均随围压的增大而减小, 其原因也可归结为升温之前较大围压作用下的试样当然也承受过较大外力荷载作用 (即围压) 的排水固结过程 (即先前产生过较大的固结体应变)。

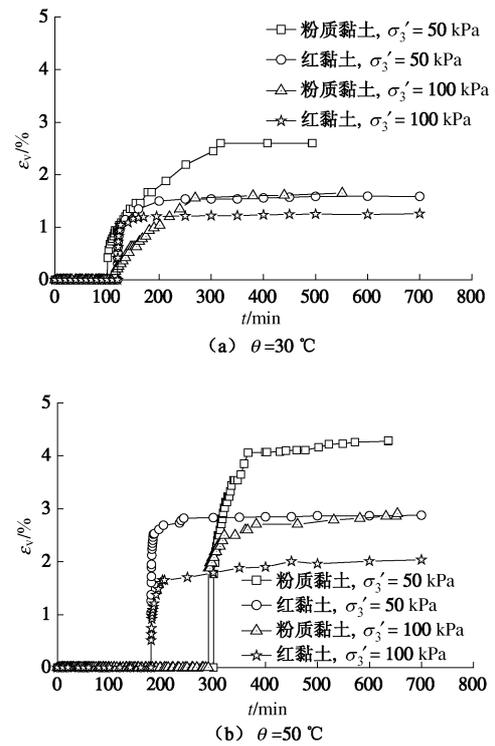


图 8 红黏土与粉黏土的固结体应变的比较

Fig. 8 Comparison of consolidation volumetric strain induced by temperature between red clay and silty clay

## 5 结 论

(1) 随温度荷载幅值的增大, 红黏土试样内的孔隙水压力与围压比明显增大, 即温度荷载引起的孔隙水压力最大值也增大, 其原因可归结为土颗粒与孔隙水膨胀量差异的明显增大。

(2) 当围压增大时, 红黏土试样达到同一温度设

定值后的孔隙水压力增大, 而其增长速率则减慢, 其原因可归结为试样先期曾受过较大外力荷载(即固结压力)作用的固结效应而引起试样内的孔隙水已有明显减小。

(3) 在排水条件下, 固结体应变随温度荷载幅值的增大而增大。实际上, 在初始固结过程中, 较大的围压作用已使得土样经受过较大的固结体应变, 土样的含水率减小, 因此在后期温度荷载作用下将表现出较小的固结体应变, 即固结体应变反而随围压的增大而有减小的趋势。

(4) 在相同的温度荷载和相同的围压作用下, 红黏土的孔隙水压力增长速率和最大值要明显大于粉质黏土的孔隙水压力增长速率和最大值。然而, 红黏土的固结体应变却要比粉质黏土小一些, 其原因是具有较高塑性指数的黏性土将具有较大的黏滞性, 孔隙水多以结合水的形态存在而不易以自由水的状态排出。

#### 参考文献:

- [1] CAMAMPANELLA R G, MITCHELL J K. Influence of temperature variation on soil behavior[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, 1968, **94**(3): 709 - 734.
- [2] HUECKEL T, BALDI G. Thermoplasticity of saturated clays: Experimental constitutive study[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, **116**(12): 1778 - 1795.
- [3] CEKEREVAC C, LALOUI L, VULLIET L. A novel triaxial apparatus for thermo-mechanical testing of soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2005, **28**(2): 161 - 170.
- [4] HÜPERS A, KOPF A J. The thermal influence on the consolidation state of underthrust sediments from the Nankai margin and its implications for excess pore pressure[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, **286**: 324 - 332.
- [5] 陈正汉, 谢云, 孙树国, 等. 温控土工三轴仪的研制及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(8): 928 - 933. (CHEN Zheng-han, XIE Yun, SUN Shu-guo, et al. Temperature controlled triaxial apparatus for soils and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(8): 928 - 933. (in Chinese))
- [6] VILLAR M V, GOMEZ-ESPINA R, LLORET A. Experimental investigation into temperature effect on hydro-mechanical behaviours of bentonite[J]. *Journal of Rock and Geotechnical Engineering*, 2010, **2**(1): 71 - 78.
- [7] YILMAZ G. The effects of temperature on the characteristics of kaolinite and bentonite[J]. *Scientific Research and Essays*, 2011, **6**(9): 1928 - 1939.
- [8] MONFARED M, DELAGE P, SULEM J, et al. A new hollow cylinder triaxial cell to study the behavior of geo-materials with low permeability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, **48**: 637 - 649.
- [9] MASIN D, KHALILI N. A thermo-mechanical model for variably saturated soils based on hypoplasticity[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Mathematical Geomechanics*, 2012, **36**: 1461 - 1485.
- [10] BURGHIGNOLI A, DESIDERI A. Discussion on volume change of clays induced by heating as observed in consolidation test[J]. *Soils and Foundations*, 1995, **35**(3): 122 - 124.
- [11] GATMIRI B, DELAGE P. A formulation of fully coupled thermal-hydraulic-mechanical behavior of saturated porous media, numerical approach[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1997, **21**(2): 199 - 225.
- [12] CUI Y J. A thermomechanical model for saturated clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **37**(2): 607 - 620.
- [13] ABUEL H M, BERGADO D T, BOUAZZA A, et al. Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, **44**(8): 942 - 956.
- [14] 姚仰平, 万征, 杨一帆, 等. 饱和黏土不排水剪切的热破坏[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(9): 2561 - 2569. (YAO Yang-ping, WAN Zheng, YANG Yi-fan, et al. Thermal failure for saturated clay under undrained condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(9): 2561 - 2569. (in Chinese))
- [15] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实红黏土的湿化变形试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(3): 483 - 489. (TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experimental study on wetting deformation of compacted laterite[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(3): 483 - 489. (in Chinese))
- [16] 白冰, 陈星欣. 一种用于饱和土的热固结试验装置及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(10): 1 - 6. (BAI Bing, CHEN Xing-xin. A test apparatus for the thermal consolidation of saturated soil and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(10): 1 - 6. (in Chinese))