

文章编号: 1000-4750(2011)10-0139-06

热-冷反复变化过程中饱和粘性土的热固结试验研究

*白 冰, 陈星欣

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 对热-冷反复变化过程中饱和粘性土的热固结特性进行了室内试验。试验表明, 随着试样温度的升高, 温度的上升速率逐渐减慢, 而在降温过程中则正好相反。而且, 温度变化过程与温度荷载循环次数、试样所受到的围压无关; 不排水加热过程中会诱致显著的孔隙水压力, 而第 2 个温度循环过程要比第 1 个温度循环过程诱致的孔隙水压力要小; 在不排水温度下降过程中, 试样内先产生负的孔隙水压力, 当温度下降至设定的温度值后, 孔隙水压力又开始上升, 随后转化为正的孔隙水压力; 如果允许试样排水(或吸水), 则试样在加热和降温后的等温过程一般表现为收缩排水过程, 且加热后所引起的排水体应变要远大于降温后所引起的排水体应变。

关键词: 温度; 饱和粘性土; 热固结; 体应变; 孔隙水压力

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A

EXPERIMENTAL STUDY ON THE THERMAL CONSOLIDATION OF SATURATED CLAY UNDER CYCLIC HEATING AND COOLING

*BAI Bing, CHEN Xing-xin

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

Abstract: The thermal consolidation characteristics of saturated clay under cyclic heating and cooling are studied by laboratory tests. Test results show that the temperature rising ratio of specimens decreases with the increasing of temperature. However, the temperature dropping ratio is just contrary. Furthermore, the patterns of temperature variation of specimens during the period whether the processes of rising or cooling are independent of the cyclic number of thermal loading and confining pressure. An obvious pore pressure is generated by heating in undrained conditions. It should be pointed out that the pore pressure in the first number of cyclic thermal loading is much larger than that in the second number of cyclic thermal loading. On the other hand, a negative pore pressure is first induced by cooling in undrained conditions. Then, when the temperature is dropped to the required temperature value, the pore pressure begins to rise and subsequently becomes to be a positive pore pressure. Whether after the heating processes or after the cooling processes, a drainage effect of specimens is displayed generally in drained conditions. Furthermore, the volumetric strain induced by heating is much larger than that induced by cooling.

Key words: temperature; saturated soil; thermal consolidation; volumetric strain; pore pressure

近年来, 由于热能贮存、地热资源开发以及工业核废料隔离等相关领域的迫切需要, 关于温度对粘性土力学特性影响的研究又重新引起人们的关注。早期, Houston 等^[1]通过三轴等向固结压力试验

研究了不排水加热过程中, 海质粘土孔隙水压力随温度升高的变化过程。Tidfors 等^[2]对不同地质历史成因和组成的高含水量粘性土进行了等温条件下的常规分级加荷的单轴固结试验。Graham 等^[3]基于

收稿日期: 2010-02-05; 修改日期: 2010-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879003)

作者简介: *白 冰(1966—), 男, 内蒙古包头人, 教授, 博士, 博导, 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); 陈星欣(1984—), 男, 湖南茶陵人, 博士生, 从事环境岩土工程研究(E-mail: caoshangfei332@163.com)。

等温条件下的室内试验结果对剑桥粘土模型进行了修正。Cekerevac 等^[4]根据排水及不排水条件下的试验对温度作用历史和应力作用历史对粘性土强度的影响进行了分析。由于试验设备的限制,这些研究一般基于不同温度下(即等温条件)的试验结果,难以反映温度变化过程中粘性土热力学特性的内在规律性。

Hueckel 等^[5-6]的试验研究中考虑了温度变化过程中饱和天然粘性土及重塑粘性土的热固结效应(温度范围为 18℃~115℃),并认为重塑的超固结粘土的热固结过程是一个可逆的变化过程,后来还分析了等向加热或冷却过程对体积应变的影响及其机理。Cui 等^[7]考察了温度变化速率对粘性土固结特性的影响,并建议了一个考虑体积应变效应的所谓“附加塑性机理模型”。Abuel-Naga^[8]对排水加热条件下饱和粘性土的体积变化进行了试验,并引入一个热弹塑性本构模型来预测正常固结和超固结两种条件下温度诱致的试样的体积变化。

关于饱和多孔介质(或者饱和土)热-水-力耦合固结问题的解析研究也有很大突破,已得到多种基于不同的耦合控制方程及不同的边界条件下的解析解答^[9-10]。例如,Kanj 等^[11]和 Abousleiman 等^[12]给出横观各向同性材料热力学问题的一般控制方程并分析了中空圆柱的热力学特性。Zhou 等^[13]考虑了热动力驱动力的作用,在控制方程中引入热渗效应和等温热流效应的影响。Bai^[14-15]对循环温度荷载作用下的一维热固结波动响应进行求解,后来又基于不可逆热动力学原理的控制方程,对中空圆柱体的热固结问题进行求解。

本文利用笔者研制的一个圆柱形土样的热固结试验装置对温度热-冷反复变化过程中饱和粘性土的热固结特性进行室内试验,试图揭示热-冷反复变化过程中饱和粘性土的热固结演化过程。

1 试验装置和试验方法

1.1 试验装置

通过一个等向受压的温度控制固结试验装置进行试验。热固结压力室的侧壁为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。压力室电热偶安装在顶盖上,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。

将连接压力室与压力控制和量测系统的金属管置于装满水的温度恒定水容器内。电热板嵌入空腔式结构的水容器侧壁内,电热偶固定在水容器侧壁顶部的支架上,其一端插入温度恒定容器内的水中,输出端与水容器温度调控器连接,以此来控制温度恒定水容器内的温度(如 20℃)。

热固结压力室内温度控制在 20℃~100℃ 范围内变化,试验时可根据土样所要模拟的实际承受的温度荷载大小以及变化过程来确定。该装置可用来测定变化温度荷载和外力荷载耦合作用下试样的热固结变形量,并可测定试样的三轴剪切强度。

1.2 试样制备

选用一种中等塑性的饱和粘性土进行试验。经风干、碾散、过 0.5mm 筛制备扰动土样。所用试验土样的基本物理性质指标平均值是:塑限 $w_p=15.8\%$,液限 $w_L=34.9\%$,塑性指数 $I_p=19.1$,土粒比重 $G_s=2.71$ 。试样尺寸为直径 $\phi=3.91\text{cm}$,高度 $h=8\text{cm}$,制备含水量 $w=29.7\%$,干重度 $\gamma_d=15.1\text{kN/m}^3$ 。试样经真空抽气加蒸馏水饱和,饱和度 $S_r>95.1\%$ 。

1.3 试验方法

主要研究温度热-冷反复变化过程中,饱和土样的热固结响应。试样先在某一周围压力 σ'_3 (如 $\sigma'_3=50\text{kPa}$ 、 $\sigma'_3=100\text{kPa}$ 、 $\sigma'_3=150\text{kPa}$,见表 1)作用下完成主固结,然后在不排水条件下通过压力室内水温的变化将试样的温度升高(即由 20℃提高到 50℃,记为 20℃→50℃),同时测定该不排水条件下由于试样固体颗粒和孔隙水的热膨胀效应所引起的试样的体应变。此时,让试样在排水条件下进行固结,孔隙水压力得到消散,试样产生热固结变形。随后,关闭排水阀门,继续将试样温度升高(即由 50℃提高到 80℃,记为 50℃→80℃),同时测定试样在温度进一步升高过程中的热固结响应。

表 1 不排水条件下加热过程中的孔隙水压力
Table 1 Pore pressure induced by heating in undrained conditions

围压 σ'_3 / kPa	第 1 次循环, 20℃→50℃		第 1 次循环, 50℃→80℃		第 2 次循环, 20℃→50℃		第 2 次循环, 50℃→80℃	
	稳定	孔隙	稳定	孔隙	稳定	孔隙	稳定	孔隙
	时间/ min	水压力/ kPa	时间/ min	水压力/ kPa	时间/ min	水压力/ kPa	时间/ min	水压力/ kPa
50	94	36	240	46	94	31	240	46
100	99	54	245	70	99	29	245	50
150	96	51	249	82	96	47	249	71

当试样温度达到 80℃ 并完成固结后,分级降低

试样的温度(即由 80°C 降至 50°C , 记为 $80^{\circ}\text{C} \rightarrow 50^{\circ}\text{C}$ 以及由 50°C 降至 20°C , 记为 $50^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$)。在温度降低过程中, 试样为不排水状态, 温度降至规定值后再打开排水阀门让试样排水(或吸水), 然后再进行下一个阶段的降温过程。这样, 试样完成一个温度循环变化过程和固结过程。

然后, 进行第 2 次温度循环变化过程, 此时温度分级升高和分级降低的试验过程与第 1 次温度循环过程相同, 共完成 2 个温度循环过程。

2 温度升高诱致的孔压和热固结变形

2.1 加热过程

图 1 给出当围压 $\sigma'_3 = 50\text{kPa}$ 时, 第 1 次、第 2 次温度循环过程中两个温度上升阶段试样的温度变化过程。可以看出, 试样温度由 20°C 上升至 50°C (即上升幅值为 30°C) 比其后温度由 50°C 上升至 80°C (上升幅值也为 30°C) 要快, 前者需要约 94min, 而后者需要约 240min (见表 1)。总体来看, 随着温度的升高 (即温度由 20°C 上升至 50°C , 后来再上升至 80°C 的整个连续过程), 温度的上升速率逐渐减慢。应该注意到, 尽管在第 2 次循环过程中, 试样已经过第 1 次温度循环过程中的温度上升、下降以及排水固结的复杂过程, 但第 2 次循环过程与第 1 次循环过程几乎一致。

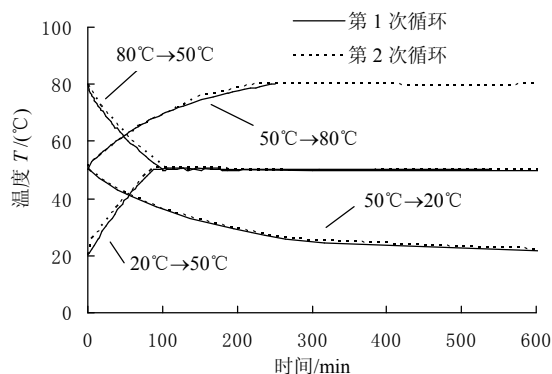


图 1 不排水条件下加热和降温过程试样的温度演化
Fig.1 Temperature variations of the specimens due to heating or cooling in undrained conditions

试验表明, 当 $\sigma'_3 = 100\text{kPa}$ 、 $\sigma'_3 = 150\text{kPa}$ 时, 所得到的两个温度循环过程中温度上升的变化过程与 $\sigma'_3 = 50\text{kPa}$ 时的变化过程几乎一致, 亦即试样的加热过程与试样所受到的周围固结压力无关, 这由表 1 给出的几种情况下的加热过程所需时间可以看到。

2.2 加热诱致的孔隙水压力

图 2 给出 3 种不同围压 ($\sigma'_3 = 50\text{kPa}$ 、 $\sigma'_3 = 100\text{kPa}$ 、 $\sigma'_3 = 150\text{kPa}$) 条件下, 两个温度循环过程以及两个加热阶段 (即 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 50^{\circ}\text{C}$ 和 $50^{\circ}\text{C} \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$) 试样内诱致孔隙水压力的变化过程。

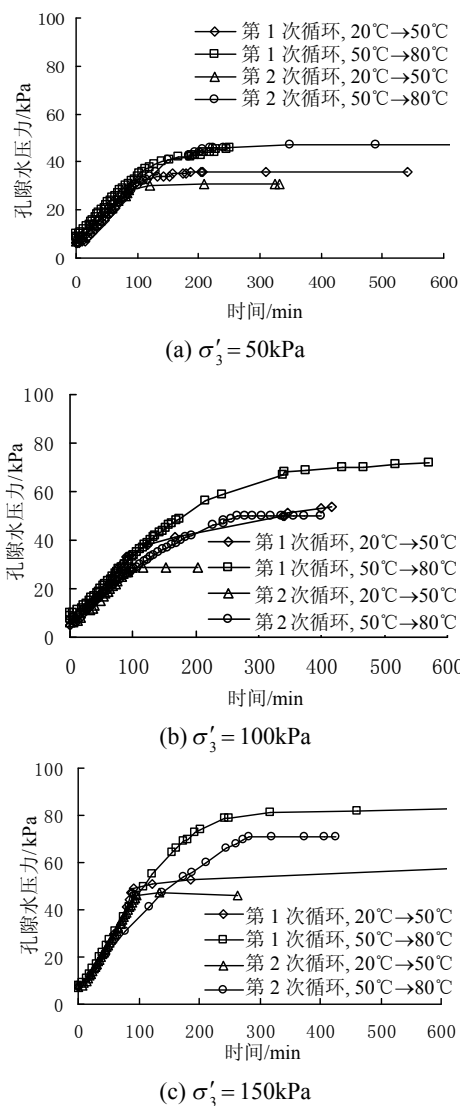


图 2 不排水条件下加热诱致的孔隙水压力

Fig.2 Pore pressure induced by heating in undrained conditions

由图 2 可以看出, 随着温度的上升, 试样内产生明显的孔隙水压力。而且, 就同一个循环过程和同一个阶段, 随着围压的增大 (例如, 图 2(c) 与图 2(a) 的比较), 孔隙水压力也相应增大。就相同的围压和同一个循环过程, 温度由 20°C 上升至 50°C 产生的孔隙水压力要略小于温度由 50°C 上升至 80°C 产生的孔隙水压力, 但前一个阶段温度上升过程 (即达到设定温度值前) 几乎呈直线形态且速率要稍快些, 这与图 1 所给出的对应阶段的温度上升过程比较快是一致的。

另外,在第2个温度循环过程中两个温度上升阶段温度诱致的孔隙水压力均比第1个循环过程中对应阶段温度诱致的孔隙水压力要小些。这一现象实际上反映了温度升高和降低的循环过程中,饱和粘性土的一种老化效应(或衰减效应)。特别是,随着围压的增大,不同的循环过程所产生的孔隙水压力的差异更为明显。例如,当 $\sigma'_3=150\text{kPa}$ 时,第1个循环内两个阶段稳定后的孔隙水压力差异为 $\Delta u=82\text{kPa}-51\text{kPa}=31\text{kPa}$,第2个循环内两个阶段稳定后的孔隙水压力差异为 $\Delta u=71\text{kPa}-47\text{kPa}=24\text{kPa}$ (由表1得到);但当 $\sigma'_3=50\text{kPa}$ 时,两个阶段所诱致的孔隙水压力差异就比较小(两个循环过程中分别为10kPa和15kPa)。

2.3 升温后排水条件下的热固结变形

图3给出3种不同的围压($\sigma'_3=50\text{kPa}$ 、 $\sigma'_3=$

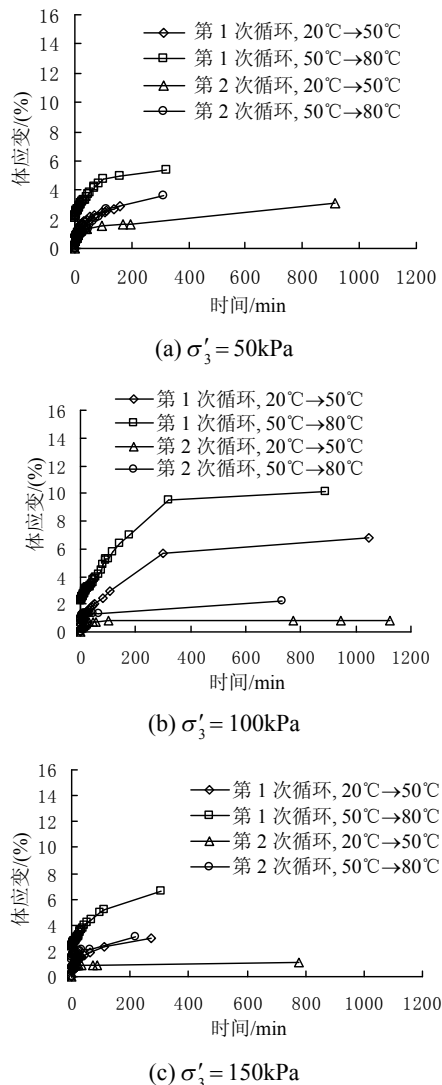


图3 温度升高后等温排水条件下试样体应变

Fig.3 Volumetric strain under isothermal and drained conditions after temperature rising

100kPa、 $\sigma'_3=150\text{kPa}$)条件下,两个温度循环过程中的两个加热阶段(即 $20^\circ\text{C}\rightarrow 50^\circ\text{C}$ 和 $50^\circ\text{C}\rightarrow 80^\circ\text{C}$)温度升高后等温条件下的排水固结过程。

可见,由于孔隙水压力的消散,在同一个循环周期下,试样温度由 50°C 上升至 80°C 后等温条件下的固结排水体应变(正值表示体积收缩)要大于试样温度由 20°C 上升至 50°C 后等温条件下的固结排水体应变,第2次循环过程中的固结排水体应变要相应小于第1次循环过程中的固结排水体应变。

3 温度下降过程中的热固结特性

3.1 降温过程

由图1可以看出,温度由 80°C 下降至 50°C (下降幅值为 30°C)时,其温度下降速率要比温度由 50°C 下降至 20°C (下降幅值也为 30°C)的速率要快。这一过程与对应阶段温度的上升过程的快慢正好相反。

试验表明,与图1中所给出的温度上升过程类似,试样的温度下降过程也与围压(如 $\sigma'_3=50\text{kPa}$ 、 $\sigma'_3=100\text{kPa}$ 、 $\sigma'_3=150\text{kPa}$)和温度循环次数(如第1次、第2次)无关。

3.2 温度下降过程中的孔隙水压力

在温度循环过程中,不排水条件下温度下降引起的试样内固体颗粒和孔隙水的热收缩效应必然会诱致试样内孔隙水压力的变化和体积变化。

由图4可以看出,在温度下降过程中,由于固体颗粒的冷收缩小于孔隙水的冷收缩,因此试样内先产生负的孔隙水压力。当温度下降至大致为设定的温度值后(如当 $\sigma'_3=50\text{kPa}$ 时,第1个循环中温度由 80°C 下降至 50°C ,温度下降时间为100min,见图1),孔隙水压力又开始上升,出现明显的转折,最终产生较大的正的孔隙水压力。分析其原因可认为,当温度达到恒定值后,由于温度荷载和围压荷载的耦合作用,固体颗粒和孔隙水会不断调整,使得围压作用下产生的孔隙水压力最终占主导地位。从这一点来看,降温过程所引起的饱和土的热固结效应是不可逆的。

随着时间的延续,孔隙水压力逐渐趋于稳定(图4)。总体看来,降温过程中不同的温度循环次数、不同的降温阶段、不同的围压条件下的孔隙水压力变化过程稍微复杂些。一般而言,随着围压的增大,同一循环阶段和同一降温阶段的降温过程所引起的负的孔隙水压力增大,而孔隙水压力负、正转换

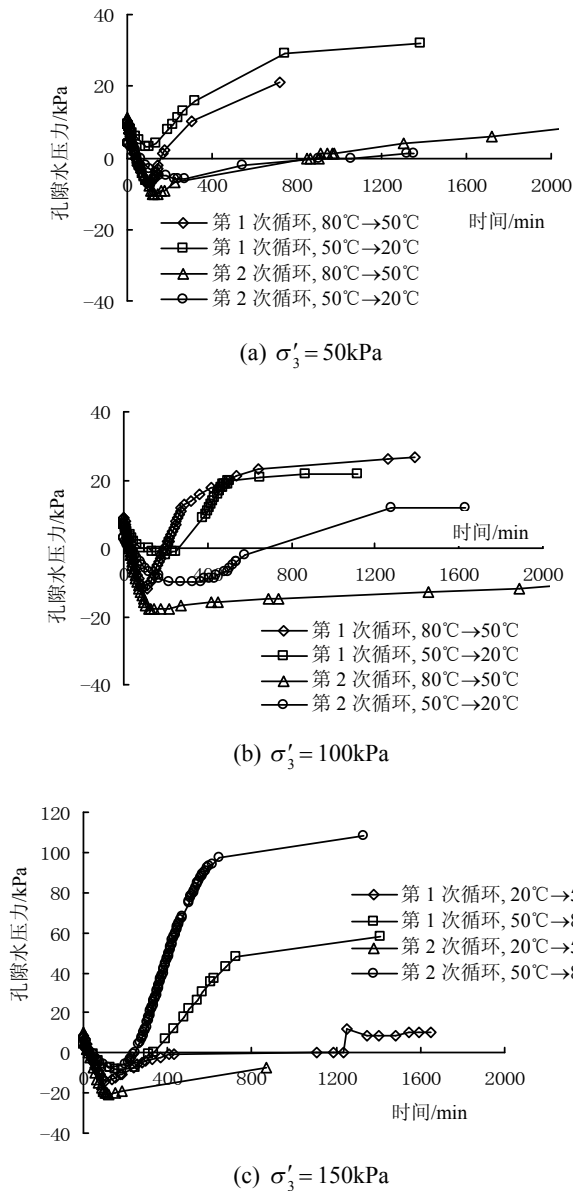


图4 不排水条件下温度下降引起的孔隙水压力

Fig.4 Pore pressure induced by cooling in undrained conditions

后产生的正孔隙水压力也愈大。由图4与图2比较可以看出,降温过程中孔隙水压力达到稳定值所需时间要比升温过程中孔隙水压力达到稳定值所需时间长得多。

3.3 降温后排水条件下的热固结变形

降温后,同样进行了固结排水(或吸水)过程(图5)。由图5可以看出,当围压较小时(如图5(a), $\sigma'_3 = 50 \text{ kPa}$),试样均表现为排水效应;当围压较大时(如图5(b)和图5(c), $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$ 和 $\sigma'_3 = 150 \text{ kPa}$),大多数阶段仍表现为排水效应,而个别阶段则表现为吸水效应(如第2个温度循环过程中,当温度由 80°C 降至 50°C 时)。这与外力荷载(即围压)和温度荷载(升温或降温)复杂的耦合作用有关,这一现象也

随着温度循环次数的增加而趋于复杂。关于这一点,还需要进行大量的试验来验证。这一现象实际上反映了饱和土的热固结过程的不可逆性,是温度诱致的饱和土的“老化效应”的一种表现。

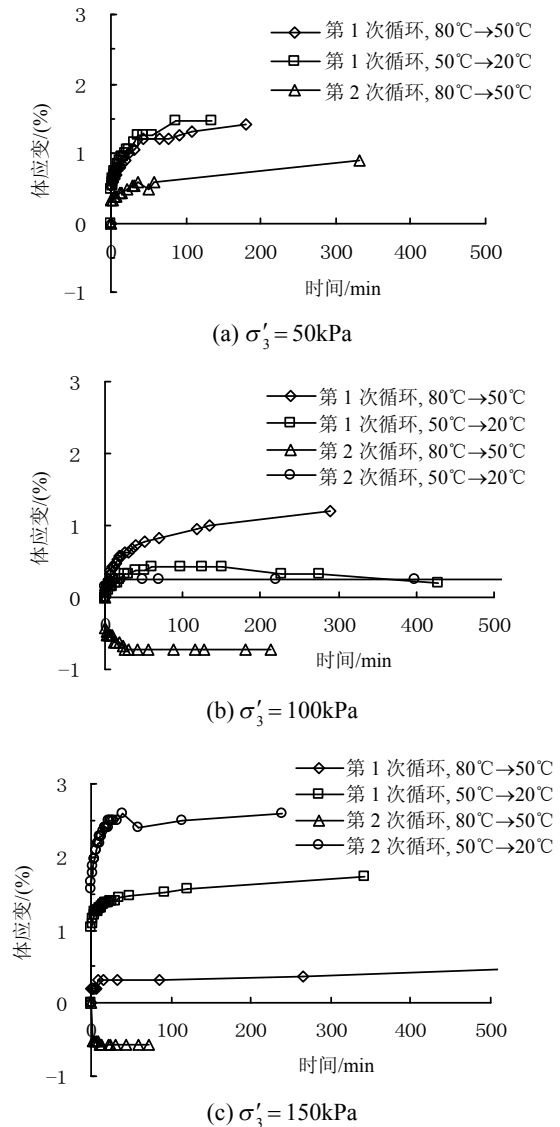


图5 温度下降后等温排水条件下试样体应变

Fig.5 Volumetric strain under isothermal and drained conditions after temperature dropping

总体而言,对于每个温度变化阶段,与加热后的试样排水量相比(图3),降温后的排水量要小得多(如图3(a)和图5(a)的比较)。

4 结论

通过自行研制的温度控制的热固结试验装置对热-冷反复变化过程中饱和粘性土的热固结特性进行了试验。由此得到如下一些结论:

(1) 不排水加热过程中会由于试样固体颗粒和

孔隙水的热膨胀效应的差异性而诱致显著的孔隙水压力。在第2个循环过程中温度诱致的孔隙水压力要比第1个循环过程中诱致的孔隙水压力要小些。这一现象实际上反映了温度升高和降低的循环过程中,饱和粘性土的一种老化效应。

(2) 在温度的下降过程中,试样内先产生负的孔隙水压力。当温度下降至设定的温度值后,孔隙水压力又开始上升,出现明显的转折,然后会产生正的孔隙水压力。这是由于外力荷载(即围压)和温度荷载(升温或降温)耦合过程中,固体颗粒和孔隙水的热膨胀效应的不断调整引起的,表现出饱和土的热固结过程的不可逆性。

(3) 试样在不排水加热后等温排水条件下表现为固结排水过程。试样在不排水降温后等温条件下,除少数过程表现为吸水外,大多数表现为固结排水过程。但是,加热过程所引起的排水体应变要远大于降温过程所引起的排水体应变。

参考文献:

- [1] Houston S L, Houston W N, Williams N D. Thermo-mechanical behavior of seafloor sediments [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(11): 1249—1263.
- [2] Tidfors M, Sallfors G. Temperature effect on preconsolidation pressure [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1989, 12(1): 93—97.
- [3] Graham J, Tanaka N, Crilly T. Modified Cam-clay modelling of temperature effect in clays [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(2): 608—621.
- [4] Cekerevac C, Laloui L. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28: 209—228.
- [5] Hueckel T, Borsetto M, Baldi G. Thermoplasticity of saturated clays: Constitutive equations; experimental constitutive study [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 116(12): 1765—1795.
- [6] Hueckel T, Pellegrini R. A note on thermomechanical anisotropy of clays [J]. *Engineering Geology*, 1996, 41(1): 171—180.
- [7] Cui Y J, Sultan N, Delage P. A thermomechanical model for saturated clays [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(3): 607—620.
- [8] Abuel H M, Bergado D T, Bouazza A. Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: Experimental results and constitutive modeling [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(8): 942—956.
- [9] Blond E, Schmitt N, Hild F. Responses of saturated porous media to cyclic thermal loading [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003, 27(11): 883—904.
- [10] El-Zein A. Laplace boundary element model for the thermoelastic consolidation of multilayered media [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 6(2): 136—140.
- [11] Kanj M, Abousleiman Y. Poroelastoplastic analyses of anisotropic hollow cylinders with applications [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2005, 29(1): 103—126.
- [12] Abousleiman Y, Ekbote S. Solutions for the inclined borehole in a poroelastoplastic transversely isotropic medium [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2005, 72(2): 102—114.
- [13] Zhou Y, Rajapakse R K N D, Graham J. Coupled consolidation of a porous medium with cylindrical or spherical cavity [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1998, 22(6): 449—475.
- [14] Bai Bing. Fluctuation responses of saturated porous media subjected to cyclic thermal loading [J]. *Computers and Geotechnics*, 2006, 33(4): 396—403.
- [15] Bai Bing. Consolidation solutions of a saturated poroelastoplastic hollow cylinder with infinite length [J]. *Engineering*, 2010, 2(1): 37—45.