

DOI: 10.11779/CJGE201501007

内外边界施加温度荷载的中空圆柱试样热固结试验

白 冰, 张鹏远, 闫瑜龙, 秦禄盛, 王明亮

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 研制了一个轴对称的适用于中空圆柱试样的热固结试验装置。该装置可独立施加和控制试样内、外的温度荷载, 并保持试样径向温度梯度的存在, 且可施加径向固结压力, 适用于特定的温度和应力耦合作用路径的试验。进行了一种饱和黏性土的热固结试验, 即在试样内边界和外边界交替逐级施加范围为 25℃~75℃的温度荷载, 包括径向压力为 50, 100, 150, 200 kPa 的 4 种情形, 分析了孔隙水压力及热固结体应变随时间的演化过程。研究表明, 加热等级和加热次序不同, 在同样的最终温度荷载下孔隙水压力稳定后的最大值有较大差异而体应变也不同, 实际上反映了温度荷载作用路径对试样热固结效应的显著影响。

关键词: 中空圆柱试样; 饱和土; 热固结; 试验装置; 温度边界

中图分类号: TU415 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)01-0067-08

作者简介: 白 冰(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂环境条件下岩土介质力学特性的研究。E-mail: baibing66@263.net。

Consolidation tests on saturated soils subjected to thermal loading on inner and outer surfaces of hollow cylindrical specimens

BAI Bing, ZHANG Peng-yuan, YAN Yu-long, QIN Lu-sheng, WANG Ming-liang

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

Abstract: An axial thermal consolidation test apparatus suitable for saturated soils is developed. Using this apparatus, thermal loadings can be applied on both the inner and outer surfaces of a hollow cylindrical specimen separately. Thus, the specimen will be subjected to the effect of a gradient temperature along the diameter and also a lateral mechanical loading. This apparatus can be used for some special heating paths and mechanical loading paths. The consolidation of a saturated soil is accomplished, and the thermal loading on the inner and outer boundaries of the specimen is applied by steps alternately. The temperature range is 25℃~75℃, and the lateral pressures are 50, 100, 150, 200 kPa. The results show that the pore pressures and consolidation volumetric strains of the specimens induced by heating steps and various heating orders are very different even under the same state of temperature loading, which actually indicates the obvious influences of heating paths.

Key words: hollow cylindrical specimen; saturated soil; thermal consolidation; test apparatus; temperature boundary

0 引 言

由于地热资源开发、热能储存、核废料处置以及饱和软土地基热处理等工程问题的需要^[1-2], 关于复杂温度梯度和应力路径作用下(如含内热源、温度梯度变化、有热流存在等)饱和土热固结特性的研究成为一个值得关注的问题^[3]。国内外学者致力于研制和开发能满足不同的试验要求且具有良好性能的仪器设备。然而, 在温度变化过程中, 土的各相物质的体积、孔隙水压力等物理量会产生变化, 而试验仪器及量测系统本身也会受到很大影响, 因此设计一种有较高精度和便于应用的温度控制的试验仪器十分困难。

Mitchell 等^[4]是较早研究饱和黏土的热固结性状和蠕变特性的学者, 所研制的温控三轴试验装置的压

力室置于温度可控的充满气体的空腔中, 而试样的温度通过压力室内与压力室外的储水器中循环流动的热水进行热量交换来实现。Demars 等^[5]研制的试验装置是将铜线圈直接置于压力室内试样周围的水体中进行加热, 通过置于水中的镍铝-镍铬热电偶来间接量测试样的温度, 避免了对试样的扰动, 但缺点是试样内的温度会滞后于周围水体的温度, 差异值可达 2℃。为此, 试验前需首先进行标定, 即先利用放置于试样中心的热电偶来测定试样实际温度, 然后正式进行试验时再将热电偶移出。与以往温控三轴仪相比,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279002, 51478034); 高等学校博士学科点专项科研基金博导类资助课题(20130009110021)

收稿日期: 2014-03-10

Kuntiawattanakul 等^[6]所研制的温控三轴仪具有两个压力室, 内压力室中充满水, 外压力室充满空气, 所用试样尺寸为直径 5 cm 和高度 10 cm。将热棒直接插入内压力室的水体内进行加热, 同时在加热棒周围设置螺旋桨搅动水体来使内压力室内的水温保持均匀, 并通过外压力室内的空气将压力传给内压力室来对试样施加固结压力。De Bruyn 等^[7]所研制的高温三轴仪中试样的加热是通过压力室底座一个空腔内的铜线圈来对进入压力室内的水进行加热, 试样温度通过试样周围水中的温度传感器来间接量测, 而试样体应变通过位移传感器量测。Wiebe 等^[8]研制的温控三轴仪的压力室内充满水或硅油, 可承受 3 MPa 的压力, 用缠绕在压力室外侧的两条硅油带加热, 并用绝热罩将压力室包围, 保证了压力室内温度的均匀和稳定, 而试样中心处装有两个电阻热元件, 实现了可直接量测试样温度的目的。Cui 等^[2]和 Delage 等^[9]所采用的温控固结仪可承受的温度达 100℃和高压 60 MPa, 试样的加热是通过围绕在压力室外的加热线圈来实现, 而温度的控制和量测也是通过压力室内水中的温度传感器实现, 试样的体应变通过试样内部排出的水体积量测, 并给出试样热固结变形量的一套标定和校正方法。而 Cekerevac 等^[10]的热固结三轴试验仪器的供热系统也是由试样周围放置的一个金属螺旋管内的循环水间接完成, 试样温度采用放置在距样品约 0.5 cm 的两个热电偶来间接量测, 需要预先标定所量测温度与试样内真实温度之间的关系。

白冰等^[11]采用的压力室为等向固结压力室(温度设定在 0℃~100℃), 压力室侧壁为不锈钢制造的空腔式结构。该装置的加热线圈嵌入压力室侧壁的空腔式结构中, 试样温度由置于压力室内的电热偶及与之相连的温度调节系统来控制或测量^[12-13]。为加快大尺寸试样的排水过程, Monfared 等^[14]采用一种空心圆柱试样(内直径和外直径分别为 60, 100 mm), 试样的内外界面均允许排水, 因此其排水路径大大缩短。通过配有放在试样周围空腔内的加热带来进行加热和温度控制, 并由绝缘层覆盖加热系统来限制试样与外界环境的热交换。

实际上, 将普通的侧限固结仪加以改进来实现温度控制, 对于开展温度对黏性土的先期固结压力、结构性和次固结效应等影响的试验研究是十分方便的, 也容易精确测定试样的固结变形(可直接测定试样的竖向变形)。为此, Paaswell^[15]较早研制了一个侧限条件下的温控固结仪, 其加热装置由置于水槽中的环形柔性加热圆管来实现, 并由放置于试样顶部和底部的直径小于 1 mm 的铜康铜热电偶对试样温度进行直接

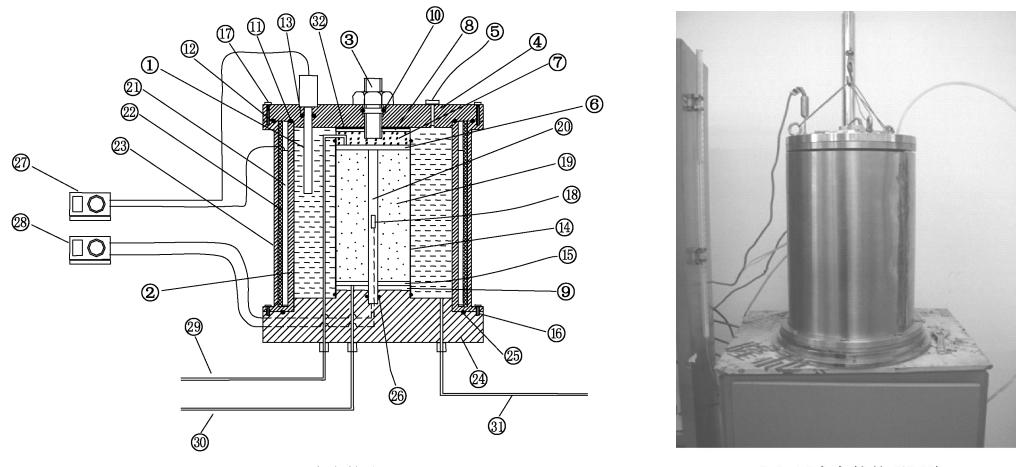
量测。Towhata 等^[16]也是将整个侧限固结仪置于一个可加热的恒温水槽内来实现对试样的温度控制。为防止水槽中水的蒸发, 在水槽顶部加盖一个玻璃板, 同时在水槽外设置一个贮水箱自动进行水量补给, 而试样顶部通过百分表量测试样在竖向荷载作用下的变形。Alexander 等^[17]设计的侧限温控固结压力室很容易控制试样的加热速率, 可实现复杂温度路径变化的试验, 它是通过在不锈钢固结室周围空腔的水体内缠绕一个电热线圈的方式来进行加热, 并可测定加热过程中试样的体积变化和孔隙水压力。Tsutsumi 等^[18]设计了一个温度控制的常应变加载速率(CRS)的侧限固结试验装置, 它可在试样加载过程中同时改变试样所承受的温度, 可用来很好进行不同加载速率和温度耦合作用的固结和蠕变试验。

关于温控非饱和土固结仪方面, Romero 等^[19]利用轴平移技术, 通过试样顶部的透水石施加气压使得其最大竖向荷载可达 2.5 MPa。将试样置于导电性较低的硅油槽内, 将加热器置于硅油中进行加热, 可一定程度上避免短路危险, 同时硅油槽外用软木绝缘层进行包裹, 来避免内部热量的散失, 温度范围为 22℃~80℃。陈正汉等^[20]采用体小轻巧的模块结构, 将三轴仪与恒温箱套装来实现对温度、吸力、应力、应变的精确量测, 该仪器能承受较高的压力和较高的温度, 且传递压力滞后小。蔡国庆等^[21]将所研制的温控压力室系统与非饱和土三轴试验系统套装, 实现了对非饱和土温度、基质吸力及含水率的控制或测定。Zhou 等^[22]发展了一个适用于非饱和土的温度控制的循环三轴试验仪, 可模拟复杂应力路径和温度路径变化的试验过程。

本文研制一个轴对称的适用于中空圆柱试样的热固结试验装置, 该装置可在试样内边界和试样外边界交替逐级施加温度荷载, 并保持试样内温度梯度的存在, 而且还可施加较大的径向固结压力, 适用于特定的温度路径和应力路径的室内试验。利用这一装置, 进行了一种饱和黏性土的热固结试验, 分析了温度荷载和外力荷载耦合作用下试样的孔隙水压力以及热固结变形的演化过程。

1 中空圆柱试样热固结试验装置

轴对称中空圆柱试样温控固结仪见图 1。空心圆柱试样的尺寸如下: 内半径 $a=3.5$ cm, 外半径 $b=7.5$ cm, 高度 $h=28$ cm, 即高径比为 $h/2b=1.87$ 。该压力室可以承受较高的温度(温度设定在 0℃~100℃之间)和较高的径向固结压力(压力可达 1 MPa)。压力室侧壁为由不锈钢制作的空腔式结构, 筒状电热板嵌入压



(a) 压力室构成

(b) 压力室的外观照片

1-压力室电热偶; 2-压力室内侧壁; 3-轴向压力杆; 4-压力室顶盖; 5-注水孔螺栓; 6-上透水石; 7-试样帽; 8, 9-绝热陶瓷板; 10, 11, 12, 13-O型橡胶垫密封圈; 14-筒状橡皮膜; 15-下透水石; 16, 17-固定螺栓; 18-温度传感器; 19-空心圆柱试样; 20-热棒; 21-电热板; 22-石棉; 23-压力室外侧壁; 24-压力室底座; 25, 26-O型橡胶圈; 27, 28-温度调控器; 29-试样排水管; 30-孔隙水压力量测管; 31-侧压力连接管; 32-止水橡胶垫

图1 中空圆柱试样热固结试验装置

Fig. 1 Consolidation test apparatus suitable for hollow cylindrical specimens

力室侧壁内, 压力室内温度由置于压力室内的电热偶及与之相连的温度调节系统来控制或测量, 精度可达 0.1°C (即控制试样的外边界温度 T_o), 加热功率为500 W。空心圆柱试样的中心处放置热棒, 热棒上装有温度传感器, 热棒的导线引出端置于压力室底座中央的盲孔中, 热棒的导线和温度传感器导线与试样中心温度调节系统来控制, 测量精度可达 0.1°C (即控制试样的内边界温度 T_i), 加热功率为500 W。

所设计的轴对称温控固结仪采用模块组合结构, 主要由压力室、水-气-电路控制柜、侧压及反压控制系统以及微机与数据监控系统等部分组成, 附带精密体变量测装置、排水体积量测装置、孔隙水压力量测元件和数字摄像系统。圆柱试样的外围包裹一个特制的不透水的筒状橡皮膜。试样内孔隙水的体积变化由反压力排水系统量测 (双管体变管, 其精度为 0.2 cm^3), 并结合摄像系统加以实施, 然后计算试样的体应变。固结压力、反压力和孔隙水压力分别与常规三轴仪围压控制系统、反压力控制系统 (压力可达1 MPa) 和孔隙水压力量测系统套装, 来施加和自动量测。

通过不锈钢材质的管线连接压力室内水体与侧压施加系统以及试样内与排水量测系统。试样排水管、孔隙水压力量测管、周围压力连接管均采用不锈钢材料制作, 中间段为螺旋状结构, 螺旋状段置入一个温度恒定水容器中 (由另外一套温度控制系统来控制和调节)。从温度恒定水容器中引出的试样排水管与体变管连接, 孔隙水压力量测管与孔隙水压力量测系统连

接, 周围压力连接管与稳压调压系统连接。这样, 试样内的排水体积即可在同一温度 (如规定为环境温度) 下测定, 克服了水的热胀冷缩效应所引起的体积变化, 保证了温度变化过程试样“固结体应变” (定义为孔隙水的排出或吸收引起的体积应变) 的准确量测。

该试验装置可用于模拟地热开发中的热桩或孔洞等可看作一维情形的工程问题^[23-24], 也可以简化试验的温度边界条件, 便于热力学基本参数的测定。

2 一种饱和黏性土的热固结试验

选用一种北京地区开挖基坑内的黏性土进行试验。经风干、碾散、过 0.5 mm 筛制备扰动土样。基本物理性质指标为: 塑限 $w_p=8.6\%$, 液限 $w_L=26.9\%$, 塑性指数 $I_p=18.3$, 土颗粒重度 $\gamma_s=26.39\text{ kN/m}^3$ 。

由于试样尺寸较大, 也为了保证制备试样的均匀性, 专门加工了一个试样制备模具。该模具侧壁由可拆装的3瓣膜组成, 中间为一个直径与试样空腔直径相同的可活动的不锈钢金属柱。按照设定的干重度分层压实土样, 然后将饱和后的土样连同模具侧壁小心放置在压力室的底座上, 同时用压力室中间的热棒将试样中心的不锈钢金属柱替代。需要指出, 在以后的固结试验过程中, 试样只产生径向固结变形, 因此试样与热棒之间的摩擦效应很小, 对固结应变的影响可以忽略。土样制备时的初始含水率为 18.5% , 干重度 $\gamma_d=16.28\text{ kN/m}^3$ 。试样经真空抽气加蒸馏水饱和后的含水率为 $w=36.1\%$, 饱和度

表 1 试样加热方案

Table 1 Schemes of heating specimens

加热路径	固结压力 σ'_3 /kPa	初始温度 T_0 /°C	加热步序	内边界温度 T_i /°C	外边界温度 T_o /°C	温度梯度/(°C·cm ⁻¹)
1	50, 100, 150, 200	25	1	50	40	2.50
			2	75	60	3.75
			3	75	75	0
2	50, 100, 150, 200	25	1	75	60	3.75
			2	75	75	0
3	50, 100, 150	25	1	50	40	2.50
			2	50	50	0
			3	75	60	3.75
			4	75	75	0

$S_r > 97.0\%$ 。

试验设计主要关注试样在径向不同温度梯度(即控制试样的内边界和外边界)条件下, 试样内部平均孔隙水压力和固结体应变等随时间的演化过程。试验所施加的径向压力包括 $\sigma'_3=50, 100, 150, 200$ kPa 4 种。试验时, 内、外边界温度变化范围为 25°C~75°C, 即先将试样设定在环境温度 25°C 下完成某一径向压力下的初始固结, 然后通过试样的内边界和外边界逐渐施加温度荷载, 包括 3 种不同的加热路径(见图 2 和表 1)。这里, 在试样边界加热过程中均为不排水条件, 温度升至设定值稳定后, 再让试样排水固结。

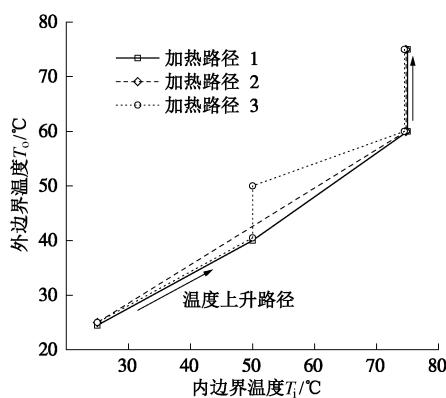


图 2 三种加热路径变化过程

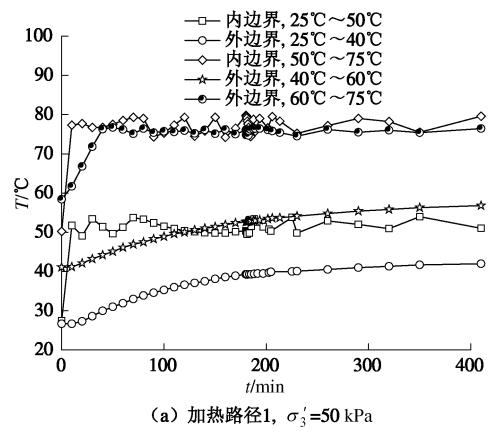
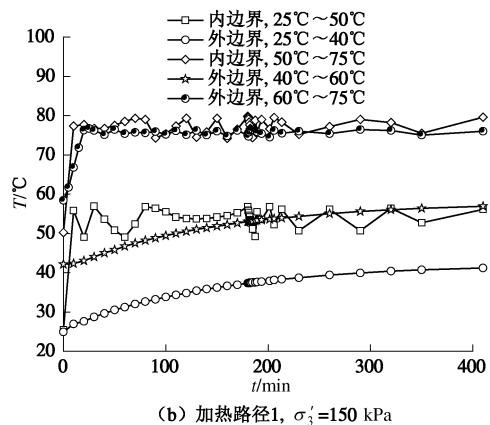
Fig. 2 Three heating paths for consolidation tests

3 温度引起的孔隙水压力和体应变

3.1 试样内边界和外边界加热过程

图 3 给出试样在某一固结压力 σ'_3 作用下初始固结完成后($T_0=25$ °C), 3 种加热路径下的内边界和外边界的温度变化过程。需要说明, 由于试样中心处热棒的加热功率相对较大, 因此内边界的升温过程较陡。这里, 初始固结的孔隙水压力消散过程见图 4 (a)。以加热路径 1(即 3 个加热等级)为例来加以说明(图 3 (a) 和图 3 (b), 即 $\sigma'_3=50, 150$ kPa)。可见, 第 1 个加热等级下, 当试样的内边界加热时, 温度很快上

升至设定温度 $T_i=50$ °C(约需 30 min), 而此时试样的外部边界温度也逐渐上升, 最后经过约 200 min 稳定至 $T_o=40$ °C, 此时内外边界温度差 $\Delta T=10$ °C, 即试样沿径向由内向外的温度梯度为 2.50 °C/cm。当该温度梯度作用下试样固结完成后, 再施加第 2 个加热等级, 即将内边界温度加热至 $T_i=75$ °C(约 20 min), 而外边界温度也逐渐上升至 $T_o=60$ °C, 此时的内外边界温度差为 $\Delta T=15$ °C, 温度梯度为 3.75 °C/cm, 并在该梯度下进行固结。然后, 施加第 3 个等级加热过程, 即将试样外边界加热至 $T_o=75$ °C, 试样重新达到等温状态。图 3 (a) 和图 3 (b) 比较表明, 不同的固结压力下(例如 $\sigma'_3=50$ kPa 和 $\sigma'_3=150$ kPa), 温度变化过程大致相同, 与已有文献得到的结论类似^[13, 25]。

(a) 加热路径1, $\sigma'_3=50$ kPa(b) 加热路径1, $\sigma'_3=150$ kPa

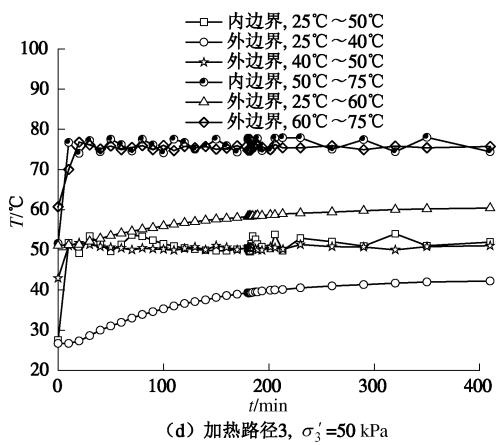
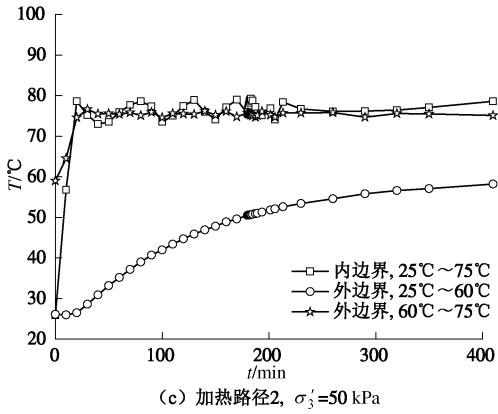


图3 试样的内、外边界温度变化过程

Fig. 3 Variation of temperatures of inner and outer boundaries of specimens

对于加热路径2和3(分别为2个和4个加热等级, 见图2), 与加热路径1有所不同, 但温度上升过程类似, 最终将试样均加热到 $T_i=T_o=75^\circ\text{C}$ 的等温状态。

3.2 孔隙水压力变化过程

图4~6分别给出3种加热路径下, 在试样的内、外边界加热时, 试样内孔隙水压力的增长和消散过程。由图4(a)可以看出, 在等温(即 $T_0=25^\circ\text{C}$)和径向压力(包括 $\sigma'_3=50, 100, 150, 200 \text{ kPa}$)作用下, 孔隙水压力消散很快, 经过200 min, 孔隙水压力即已很小(接近 $u/\sigma'_3=0$)或趋于稳定。

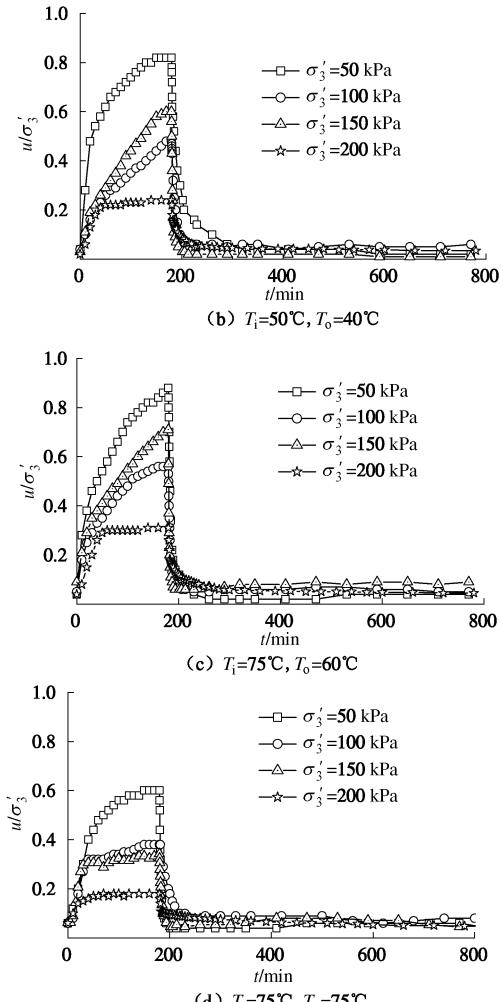
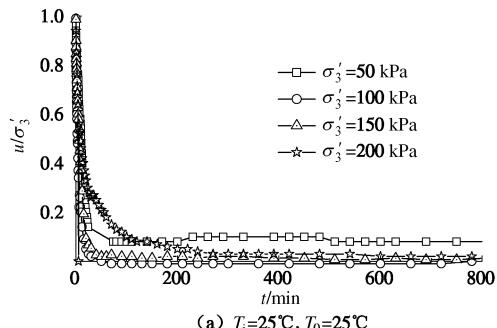


图4 孔隙水压力的演化过程(加热路径1)

Fig. 4 Evolution of pore pressures with time (heating path 1)

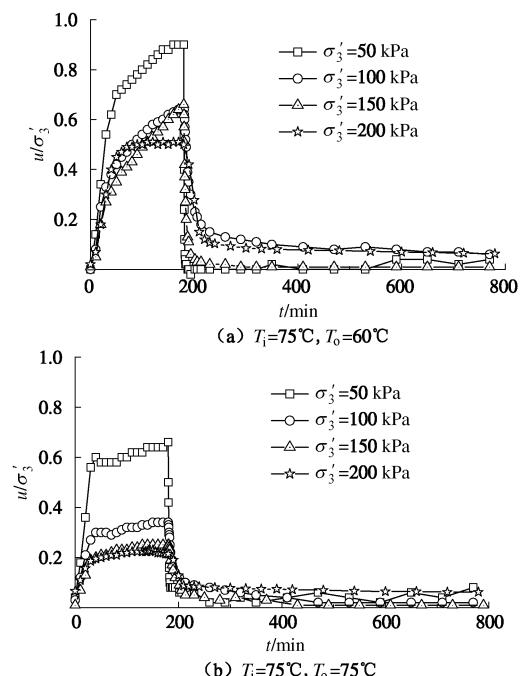


图5 孔隙水压力的演化过程(加热路径2)

Fig. 5 Evolution of pore pressures with time (heating path 2)

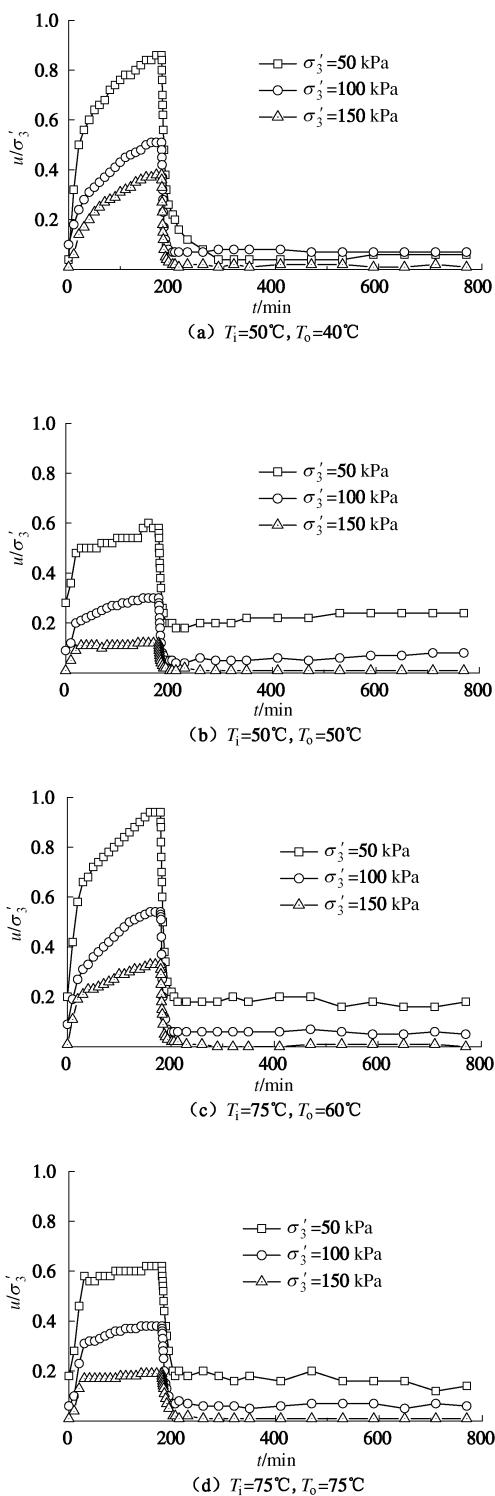


图 6 孔隙水压力的演化过程(加热路径 3)

Fig. 6 Evolution of pore pressures with time (heating path 3)

试验表明,在已有较大的温度效应和固结作用后,再进一步提高温度幅值,其孔隙水压力仍然会有较大幅度的上升。而且,3种加热路径的孔隙水压力演化过程均表明,随固结压力的增大,归一化孔隙水压力 u/σ'_3 减小,孔隙水压力的增长速率也趋于减慢,而实际孔隙水压力一般增大。例如,对于加热路径2(图5(b)),第2个等级的温度升幅仅为 15°C (见表1),

但在 $\sigma'_3=50, 100, 150, 200\text{ kPa}$ 的4种情形下的孔隙水压力仍然可以达到 $u/\sigma'_3=0.66, 0.34, 0.25, 0.23$ (而实际孔隙水压力值为 $u=33.0, 34.0, 37.5, 45.6\text{ kPa}$)。

3.3 体应变

对于本文的制备土样,当 $\sigma'_3=50, 100, 150, 200\text{ kPa}$ 时,在等温(即 $T_0=25^\circ\text{C}$)固结条件下的固结体应变分别为 $\varepsilon_v=2.92\%, 4.05\%, 6.12\%, 7.27\%$ (图7),其孔隙水压力消散过程见图4(a)。

然后,施加边界温度荷载,那么在每次边界温度升高后的排水固结过程中,孔隙水压力消散也非常快,一般在60 min内孔隙水压力即可消散至稳定(见图4~6)。此时,试样将会由于孔隙水压力的消散而产生较大的热固结体应变(图8)。图8中,加热路径1,2和3分别表示三次、两次和四次不排水边界加热后的排水固结过程,而等级1,2,3,...等表示某一加热路径中的加热等级次序。由图8可以看出,在试样的边界温度升至设定值后的排水固结过程中,由于温度荷载的作用使得土颗粒周围的结合水被激活,亦即产生了新的体应变,当然随着孔隙水压力的消散,试样体应变不断增大并最终趋于稳定。

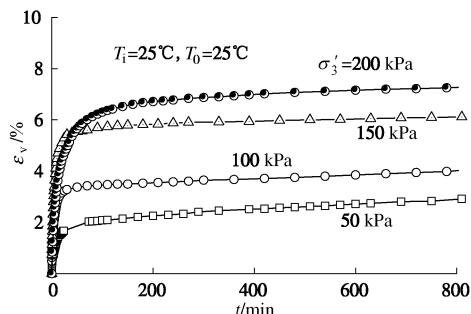


图 7 不同固结压力下试样的等温固结过程

Fig. 7 Consolidation of specimens under isothermal condition

随着加热等级的增加(即按照加热路径3,1,2,分别为4,3,2个等级,见表1),试样加热至同一较高温度下(如 $T_i=T_o=75^\circ\text{C}$,等温状态)的最终固结体应变也增大。由图8(a)~8(d)的比较可以看出,随着固结压力的增大,同一加热路径条件下的固结体应变相应要小。例如,当固结压力 $\sigma'_3=50, 100, 150\text{ kPa}$ 时,在第1种加热路径下(即图8中的加热路径1),第1级加热引起的体应变分别为 $\varepsilon_v=1.12\%, 0.92\%, 0.72\%$;第2级加热引起的体应变增量分别为 $\Delta\varepsilon_v=1.54\%, 1.31\%, 1.09\%$ (即总体应变分别为 $\varepsilon_v=2.66\%, 2.23\%, 1.81\%$)。实际上,固结压力越大,在等温($T_0=25^\circ\text{C}$)初始固结阶段,试样排出的水体积较大,而后续温度荷载作用引起的孔隙水压力(见图4~6)及其体应变就较小。

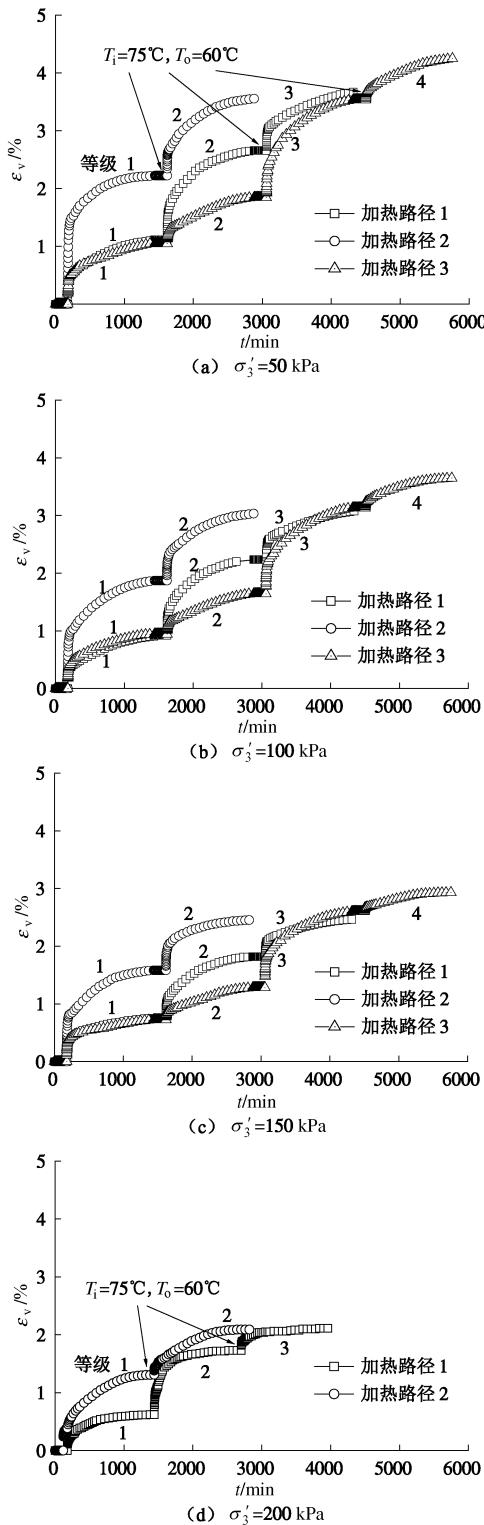


图 8 不同加热路径下热固结体应变的演化过程

Fig. 8 Evolution of volumetric strains with time under various heating paths

由图 8 可以看出, 尽管 3 种加热路径下试样的最终温度值相同(见表 1, 均为 $T_i=T_o=75^{\circ}\text{C}$ 的等温状态), 但最终体应变不同。似乎是, 加热过程中所设置的温度等级愈多, 试样的总固结体应变愈大。例如, 当 $\sigma'_3=50 \text{ kPa}$ 时(图 8(a)), 按照加热等级逐渐增多的 3 种加热路径(即加热路径 2→1→3)的最终体应变分

别为 $\varepsilon_v=3.56\%, 3.67\%, 4.25\%$ 。这实际上反映了温度荷载作用路径对试样热固结效应的影响。由图 8 可以看出, 即使对于试样升温的中间过程, 当试样承受的温度梯度相同时(例如内边界温度升至 $T_i=75^{\circ}\text{C}$, 外边界温度升至 $T_o=60^{\circ}\text{C}$, 见图 8 中的标注), 其体应变仍然随升温等级的增多而增大(即加热路径 2→1→3)。例如, 当 $\sigma'_3=50 \text{ kPa}$ 时, 这 3 种加热路径下的体应变分别为 $\varepsilon_v=2.22\%, 2.66\%, 3.53\%$ 。实际上, 不同的加热幅值下, 由于温度荷载引起的孔隙水压力一般不超过试样所承受的固结压力, 因此孔隙水压力的增长幅值并非是线性的。亦即, 在同样的温度增幅条件下, 所设置的温度等级愈多, 则其孔隙水压力累积增加量就愈大, 即孔隙水压力消散所引起的体应变就愈明显, 这一点在固结压力较小时似乎更为显著, 而在固结压力较大时则趋于一致(见图 8(d))。

4 结 论

(1) 研制一个轴对称的边界条件较为简单的中空圆柱试样的热固结压力室, 可独立施加和控制试样内外的温度荷载, 并保持试样径向温度梯度的存在。它可施加较大的径向固结压力, 且可测定双控温度边界荷载作用下试样内的孔隙水压力以及固结体应变, 适用于特定的温度荷载和应力荷载作用路径。

(2) 对一种饱和黏性土样的热固结试验表明, 加热等级和加热次序不同, 在同样的温度荷载下孔隙水压力稳定后的最大值有较大差异。此外, 在已有较大的温度效应和固结作用后, 再进一步提高温度幅值, 其孔隙水压力仍然会有较大幅度的上升。

(3) 随加热等级的增加, 试样的固结体应变增大, 而随固结压力的增大, 同一加热路径条件下的固结体应变则减小。这是由于, 固结压力大时, 在等温初始固结阶段产生的固结体应变会较大, 而后续温度荷载作用引起的孔隙水压力及体应变就可能较小。

(4) 不同的加热路径条件下, 即便试样的最终温度值相同, 但其体应变也不同。一般而言, 加热过程中所设置的温度等级愈多, 试样的总固结体应变愈大。实际上, 在同样的温度增幅条件下, 所设置的温度等级愈多, 则其孔隙水压力累积增加量就愈大, 即孔隙水压力消散所引起的体应变就愈明显, 实际上反映了温度荷载作用路径对试样热固结效应的影响。

参考文献:

- [1] POTHIRAKSANON C, BERGADO A T, ABUEL H M. Full-scale embankment consolidation test using prefabricated vertical thermal drains[J]. Soils and Foundations, 2010, 50(5):

- 599 – 608.
- [2] CUI Y J, TANG A M. On the chemo-thermo-hydro-mechanical behavior of geological and engineering barriers[J]. Journal of Rock and Geotechnical Engineering, 2013, **5**: 169 – 178.
- [3] GHEMBAZA M S, TAIBI S, FLEUREAU J M. Thermo-hydro-mechanical behavior of a sandy clay on isotropic paths[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2014, **18**(2): 206 – 222.
- [4] MITCHELL J K, CAMPANELLA R G. Creep studies on saturated clays[C]// Laboratory Shear Testing of Soils: a Symposium, ASTM-NRC. Ottawa, 1963: 90 – 110.
- [5] DEMARS K P, CHARLES R D. Soil volume changes induced by temperature cycling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, **19**: 188 – 194.
- [6] KUNTIWATTANAKUL P, TOWHATA I, OHISHI K, et al. Temperature effects on undrained shear characteristics on clay[J]. Soils and Foundations, 1995, **35**(1): 147 – 162.
- [7] DE Bruyn D, THIMUS J F. The influence of temperature on mechanical characteristics of boom clay: the results of an initial laboratory program[J]. Engineering Geology, 1996, **41**(1/2/3/4): 117 – 126.
- [8] WIEBE B, GRAHAM J, TANG G X, et al. Influence of pressure, saturation, and temperature on the behavior of unsaturated sand-bentonite[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**: 194 – 205.
- [9] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of Boom clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(4): 343 – 354.
- [10] CEKEREVAC C, LALOUI L, VULLIEF L. A novel triaxial apparatus for thermo-mechanical testing of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(2): 161 – 170.
- [11] 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**(6): 896 – 900. (BAI Bing, CHEN Xing-xin. Test apparatus for thermal consolidation of saturated soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 896 – 900. (in Chinese))
- [12] BAI Bing, SU Zhong-qin. Thermal responses of saturated silty clay during repeated heating-cooling processes[J]. Transport in Porous Media, 2012, **93**(1): 1 – 11
- [13] BAI Bing, GUO Lan-jie, HAN Song. Pore pressure and consolidation of saturated silty clay induced by progressively heating/cooling[J]. Mechanics of Materials, 2014, **75**: 84 – 94.
- [14] MONFARED M, SULEM J, DELAGE P, et al. Temperature and drainage impact on the permeability of Opalinus clay[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**: 101 – 110.
- [15] PAASWELL R E. Temperature effects on clay soil consolidation[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1967, **93**(3): 9 – 22.
- [16] TOWHATA I, KUNTIWATTANAKUL P, SEKO I, et al. Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests[J]. Soils and Foundations, 1993, **33**(4): 170 – 183.
- [17] ALEXANDER V, CHARLES J R, ABDALLA E, et al. Impact of the rate of heating on the thermal consolidation of saturated silt[C]// GeoCongress. ASCE, 2012: 4476 – 4485.
- [18] TSUTSUMI A, TANAKA H. Combined effect of strain rate and temperature on consolidation behavior of clayey soils [J]. Soils and Foundations, 2012, **52**(2): 207 – 215.
- [19] ROMERO E, LLORET A, GENS A. Development of a new suction and temperature controlled oedometer cell[C]// Proceeding of 1st International Conference on Unsaturated Soils. Paris, 1995: 553 – 559.
- [20] 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))
- [21] 蔡国庆, 赵成刚, 白 冰, 等. 温控非饱和土三轴试验装置的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1013 – 1019. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, BAI Bing, et al. A temperature controlled triaxial test system for unsaturated soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1013 – 1019. (in Chinese))
- [22] ZHOU C, NG C W W. Experimental study of resilient modulus of unsaturated soil at different temperature[C]// Proceeding of the 18th ICSMGE. Paris, 2013: 1055 – 1058.
- [23] BAI Bing, LI Tao. Solutions for cylindrical cavity in saturated thermoporoelastic medium[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2009, **22**(1): 85 – 94.
- [24] BAI Bing. Thermal response of saturated porous spherical body containing a cavity under several boundary conditions[J]. Journal of Thermal Stresses, 2013, **36**(11): 1217 – 1232.
- [25] BAI Bing. Fluctuation responses of saturated porous media subjected to cyclic thermal loading[J]. Computers and Geotechnics, 2006, **33**(8): 396 – 403.