

DOI: 10.11779/CJGE201909021

热-力耦合作用下黏性土体积变形特性试验研究

费 康, 戴 迪, 付长郢

(扬州大学岩土工程研究所, 江苏 扬州 225127)

摘要: 采用温控三轴仪, 对饱和黏性土在热-力耦合作用下的体积变形特性进行了研究。试验中共考虑了温度循环后的应力加卸载试验、升高或降低不同温度后的应力加卸载试验 3 种方案。结果表明, 黏性土温度体积变形的大小与围压无关。温度循环会造成黏性土塑性体积变形持续发展, 但单周塑性应变增量随温度循环周数的增加而减小, 体现了温度历史的影响。将土样继续加载后, 温度的历史效应将被覆盖, 后续温度循环中产生的塑性体积应变量值及发展规律与初始循环下的类似。不同温度下土体的压缩指数和回弹指数基本不变。同一塑性体积应变下, 屈服应力随温度的增加而减小。温度变化引起的塑性体积应变也会造成屈服应力提高, 可近似采用与力学塑性体积应变硬化一致的规律进行描述。

关键词: 黏性土; 室内试验; 热-力耦合作用; 塑性体积应变; 屈服应力

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)09-1752-07

作者简介: 费 康(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事地基基础等方面的教学和科研工作。E-mail: kfei@yzu.edu.cn。

Experimental study on volume change behavior of clay subjected to thermo-mechanical loads

FEI Kang, DAI Di, FU Chang-yun

(Institute of Geotechnical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: The volume change behavior of a saturated clay subjected to thermos-mechanical loads is investigated by temperature-controlled triaxial tests. A total of three test series are carried out: mechanical loading-unloading test after thermal cycles, mechanical loading-unloading test after heating or cooling to different temperatures. The experimental results show that for the tested clay, the thermally induced irreversible compression strain is accumulated with the number of thermal cycles at a decreasing rate. This temperature history effect can be erased by the mechanical loading. After loading to a new normally consolidated state, the magnitude and the trend of the plastic volumetric strain are similar to those under the initial thermal cycles. The compression and the swelling index are nearly constant at different temperatures. The yield stress at constant plastic volumetric strain decreases with the increasing temperature. The plastic volumetric strain induced by heating has the similar effect on the yield stress as that generated by the mechanical loading, and a unified hardening rule can be used.

Key words: clay; laboratory test; thermo-mechanical load; plastic volumetric strain; yield stress

0 引言

在核废料处置、浅层地热能开发、高压电缆和供热管道设计等问题中, 土体温度将发生明显的变化, 热-力耦合作用下的土体力学特性及模拟已成为环境岩土工程领域的重要研究课题之一。

温度变化引起的体积变形是材料的基本性质之一, 塑性体积应变也常被用做黏性土弹性本构模型中的硬化变量, 因此黏性土的温度体积变形特性受到了学者们的广泛关注。Abuel-Naga 等^[1]和 Favero 等^[2]采用一维温控固结仪研究了温度对土体压缩性的影响, 温度变化过程中的体积变化直接根据土样高度的变化确定。虽然温控固结仪的构造和试验过程相对简

单, 但试样并非处于等向固结应力状态, 刚性护环与土体热膨胀系数的差异对试验结果有较大的影响。Baldi 等^[3]、Cekerevac 等^[4]则采用温控三轴仪, 白冰等^[5]、Sultan 等^[6]采用等向固结仪开展了相关研究。

总结前人的试验成果可以发现, 等应力排水升温过程中, 正常固结土出现塑性收缩变形, 强超固结土主要表现为弹性膨胀, 中等超固结土的体积变形随温度增加先膨胀再收缩。降温引起的土体体积变形可视为弹性收缩。为了模拟这些现象, 学者们提出了不同

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778557); 江苏省“青蓝工程”项目(苏教师[2016]15号)

收稿日期: 2018-10-30

的热弹塑性本构模型, 其主要可分为两类。一是基于边界理论的模型^[7-9], 该类模型通常将边界的大小与温度及塑性体积应变相联系, 屈服应力随温度的减小由塑性体积应变的硬化效应相弥补。由于边界内部允许出现塑性应变, 该类模型能较好地模拟弱及中等程度超固结土的温度体积应变特性。另一类模型在常规力学加载屈服面之外, 引入了温度屈服机理^[1, 10]。即使应力保持不变, 当温度达到温度屈服面后, 土体也将产生塑性应变。以上两类模型都能较好地模拟单调变温条件下黏性土的力学特性。

另一方面, 在能量桩等能源结构工程中, 土体将经历多周温度循环^[11-12]。温度循环作用下土体所可能出现的体积变化, 将改变桩土相对位移模式, 影响桩的工作性状, 需要深入研究。有限的试验数据表明^[13-14]土体体积应变随温度循环周数的增加而增加。现有的热弹塑性本构模型尚不能较好地模拟这一现象。在双屈服面类的模型中, 温度屈服面随着温度的增加、塑性应变的发展而扩大, 后续升温只产生弹性应变。边界类模型虽具有模拟塑性应变累积的能力, 但计算得到的塑性体积变形往往过大, 趋于稳定值的速度也偏慢^[15], 模型的模拟能力还需要更多的试验数据验证。

为了进一步了解温度变化对黏性土体积变形特性的影响规律, 本文采用温控三轴仪, 考虑不同热-力耦合作用组合, 对土体温度体积变形特征、屈服应力演化规律、土体温度硬化规律及关键因素进行了研究。

1 试验介绍

1.1 试验仪器

试验采用温控三轴仪进行, 其围压和反压由标准压力/体积控制器控制, 压力分辨率 1 kPa, 体积变化分辨率 1 mm³。孔压由连接到试样底部的孔压传感器测量, 精度 0.1 kPa。

为实现对土样的温度控制, 在三轴压力室外侧依次设置了水浴腔和真空腔。真空腔的目的是降低土样与外界的热交换, 尽可能保持温度稳定性。水浴腔由包裹保温材料的塑料软管与恒温水浴箱相连。试验中通过循环水浴腔中的水达到对土样进行升温或降温的目的, 仪器温度调控范围为 5℃~80℃。为避免对土样的扰动, 温度传感器放置在围压室内, 距离土样外边缘 5 mm, 温度测量精度 0.1℃。

1.2 试验材料

试验用土为取自江苏苏州的粉质黏性土, 液限 41.2%, 塑限 27.4%, 塑性指数 13.8, 相对密度 2.68。重塑试样为直径 39.1 mm, 高度 80 mm 的圆柱体, 采

用压样法制作, 制样含水率 28%, 干密度为 1.45 g/cm³。为保证试样的饱和, 首先进行 24 h 抽气, 然后采用反压饱和, 直至孔隙水压力系数 B 值达到 0.95 以上。

1.3 试验方案

试验在空调房间内进行, 室温在 22℃~25℃。试验设计了 E1~E3 三种温度-应力路径, 各系列试验由不同的等温固结和等应力排水变温阶段组成, 试验编号见表 1, 具体说明如下。

表 1 试验方案

Table 1 Test plan

试验编号	初始有效围压 p'_0 /kPa	超固结比 OCR	温度-应力路径
E1-P100	100	1	温度循环 3 周→固结到 200 kPa→温度循环 3 周→固结到 400 kPa→温度循环 3 周→加卸载
E1-P200	200	1	温度循环 3 周→固结到 400 kPa→温度循环 3 周→加卸载
E1-P400	400	1	温度循环 3 周→固结到 600 kPa→温度循环 3 周→加卸载
E2-T00	100	2	常温下加卸载
E2-T10	100	2	升温 10℃→加卸载
E2-T20	100	2	升温 20℃→加卸载
E2-T30	100	2	升温 30℃→加卸载
E2-T40	100	2	升温 40℃→加卸载
E3-T00	100	1	升温 40℃→降温 40℃→加卸载
E3-T10	100	1	升温 40℃→降温 30℃→加卸载
E3-T20	100	1	升温 40℃→降温 20℃→加卸载
E3-T30	100	1	升温 40℃→降温 10℃→加卸载
E3-T40	100	1	升温 40℃→加卸载

试验系列 E1 是为了确定温度循环变化引起的土体体积变化特征, 屈服应力变化的结果也可与其余两个系列进行对比分析, 试验步骤为

(1) 在室温下将土体在不同有效围压下固结稳定 ($p'_0 = 100, 200, 400$ kPa)。

(2) 在等应力排水条件下对土体进行 3 周温度循环。每周循环中温度在室温的基础上升高 40℃, 然后降回初始值。为使升温产生的超孔压及时消散, 每级温度增量取为 3℃, 当体积变化量小于 5 mm³/10 min 且时间不少于 1 h 后施加下一级温度增量。

(3) 将土体加压固结到新的围压, 再次进行温度循环试验。

(4) 所有温度循环结束后, 进行加载-卸载固结试验。

试验系列 E2 主要比较不同温度下压缩及回弹指数, 根据孔隙比-压力关系斜率的变化可分析温度对屈服应力的影响, 试验步骤如下:

(1) 在室温下将试样固结稳定至有效围压 $p'_0 = 200$ kPa。

(2) 卸载到 100 kPa, 使超固结比 $OCR=2$ 。

(3) 在排水条件下分级升高土体温度, 升温幅度分别取为 0°C , 10°C , 20°C , 30°C 和 40°C 。

(4) 在当前温度下, 进行加一卸载固结试验。

试验系列 E3 的试验步骤如下:

(1) 在室温下将试样固结稳定至有效围压 $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ 。

(2) 在排水条件下将土体温度增加 40°C 。

(3) 待土体体积稳定后, 对试样进行排水降温。降温幅度分别为 0°C , 10°C , 20°C , 30°C 和 40°C 。

(4) 在当前温度下, 进行加一卸载固结试验。

由于降温过程中土体仅产生弹性变形, 因此根据该系列试验结果确定的屈服应力剔除了塑性体积应变的影响, 只反映温度的作用。同时, 压缩、回弹指数等试验结果可以与系列 E2 对比分析。

1.4 土体体积变化的确定

在常规三轴试验中, 土样的体积变化可按照反压控制器的进水量直接获得。若温度发生变化, 需考虑土粒、孔隙水热膨胀量等因素对测量结果的影响。Cekerevac 等^[16]建议土体体积变化 ΔV 按下式确定:

$$\Delta V = \Delta V_m - \Delta V_s - \Delta V_w - \Delta V_e \quad (1)$$

式中 ΔV_m 为反压控制器测得的进水量; ΔV_s 为土颗粒的体积热膨胀量; ΔV_w 为孔隙水的体积热膨胀量; ΔV_e 为系统的测量误差。

土粒和孔隙水的体积热膨胀量分别按下式计算:

$$\Delta V_s = (1-n)V\alpha_s \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta V_w = nV\alpha_w \Delta T \quad (3)$$

式中 n 为孔隙率; ΔT 为温度变化; α_s 和 α_w 分别为土颗粒和水的体积热膨胀系数。根据土的矿物成份 α_s 取为 $3 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$; 水的热膨胀系数与温度有关, 按文献[17]中的建议取值。

系统的测量误差主要来源于透水石、控制器与三轴室连接器管道中水的热胀冷缩, 仪器体系的误差等。为确定 ΔV_e 的大小, 正式试验前用同等尺寸的铝样在相同围压、反压和升温速率等条件下进行了标定。

2 试验结果

2.1 围压对温度体积应变的影响

根据稳定后的排水量, 按公式(1)可确定土体的体积变化, 进而计算对应的体积应变。试验系列 E1 第一阶段 3 周温度循环引起的土体体积应变发展过程如图 1 所示。结果表明, 各有效围压下温度体积应变的量值和发展规律与基本一致, 与围压的关系不大。升温过程中, 试样体积随着温度的提高先略有膨胀(温度增量 $3^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$), 随后转为收缩, 升温结束后出现

压缩体积应变。在随后的降温过程中, 土体主要表现为收缩变形, 即正常固结黏性土试样总体上呈现出“热缩冷缩”的特点。一周温度循环结束后试样有不可恢复的压缩应变。后续温度循环中塑性体积应变持续发展, 但增加的速率逐渐减小。E3-P100 试样 3 周温度循环中产生的单周塑性体积应变分别为 0.29% , 0.16% 和 0.10% , 累积塑性应变分别为 0.29% , 0.45% 和 0.55% , 大约 52.7% 的塑性体积应变发生在温度循环的第一周。单周塑性体积应变增量随温度循环周数逐渐减小的现象体现了温度历史的影响, 即经历过温度变化的土样在后续同等温度增量下的塑性应变逐渐减小。

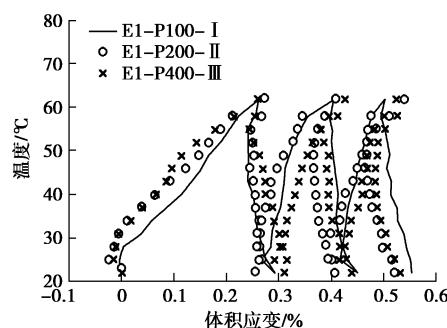


图 1 有效围压对温度体积应变的影响 (试验系列 E1)

Fig. 1 Effects of effective confining stress on thermal volumetric strain (Test E1)

从微观上来看, 土体升温过程中的体变主要受到土颗粒的温度变形、双电层作用力和土颗粒重新排列的影响。其中, 土粒的温度变形可认为是弹性的热膨胀。双电层对温度变形的影响则较复杂^[18], Abuel-Naga 等^[19]认为温度增加会提高双电层电斥力, 土粒间距离增加, 体积膨胀, 并且这一过程大部分是可逆的。Passwell^[20]认为升温使得水膜厚度的减小, 土粒的距离和土体体积减小。但 Towhata 等^[21]指出导致双电层厚度变化的作用基本都是可逆的, 无法解释回温后观察到的残余应变。因而土骨架结构的改变可能是引起塑性应变的主要原因。实际上, 土粒的体积变化、颗粒间作用力的变化以及温度升高引起结合水黏滞阻力的降低都可能改变土骨架原有的结构特征, 土粒重新排列, 引起体积变化。这种土颗粒重新排列引起的体积变化以塑性为主。

2.2 应力历史对温度体积应变的影响

图 2 汇总了所有 3 个试验系列的温度体积应变变化规律。清晰起见, 图中试验系列 E1 只给出了第一周温度循环的数据。结果表明土体存在一个临界温度, 温度小于临界温度时, 土体体积随温度的增加而增加; 温度超过临界温度后, 土体体积随温度的增加而减小, 临界温度随 OCR 的增加而增加。

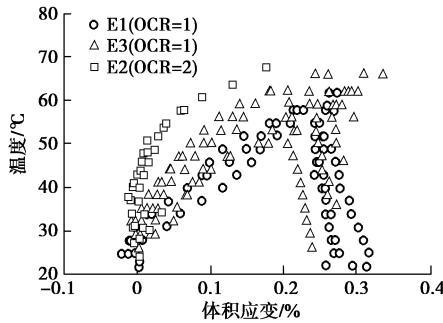
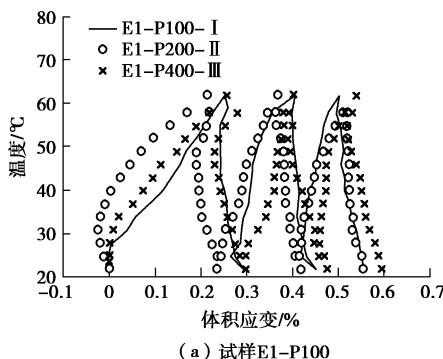


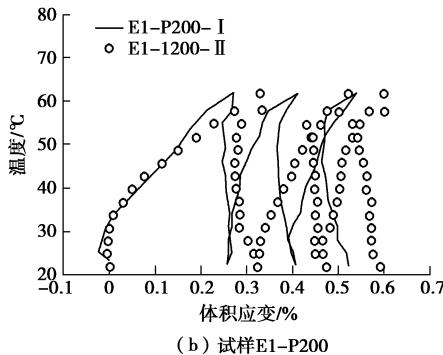
图 2 超固结比对温度体积应变的影响

Fig. 2 Effects of OCR on thermal volumetric strain

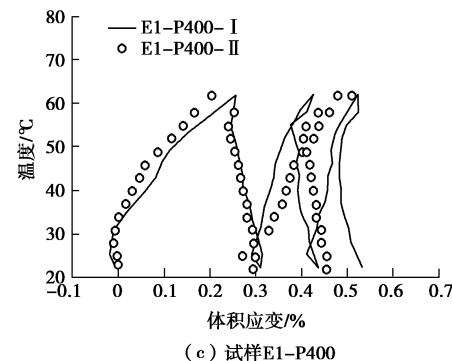
试验系列 E1 中的试样在经历过 3 周温度循环之后, 被再次加载到新的应力状态, 然后重新施加 3 周温度循环荷载, 温度体积应变的发展规律如图 3 所示, 其中图例中的 I、II、III 代表不同的应力状态, 应变自新的应力状态起算。结果表明, 每一阶段中单周塑性应变增量随循环周数的增加而减小, 即土体变形存在温度历史效应。但温度历史的影响会被应力历史覆盖。以试样 E1-P100 为例, 第一阶段 3 周温度循环中产生的单周塑性体积应变分别为 0.29%, 0.16% 和 0.10%。重新加载到 200 kPa 后, 再次施加温度荷载引起的土体体积变化量值和规律均与第一阶段 (未经历过温度荷载) 相近, 单周温度塑性体积应变增量分别为 0.24%, 0.18% 和 0.13%。其它两个试样也存在着类似的规律。由于仪器故障, E1-P400 试样的第二阶段温度循环只进行了两周, 但体变变化规律还是一致的。



(a) 试样 E1-P100



(b) 试样 E1-P200



(c) 试样 E1-P400

图 3 不同应力状态下的温度历史效应

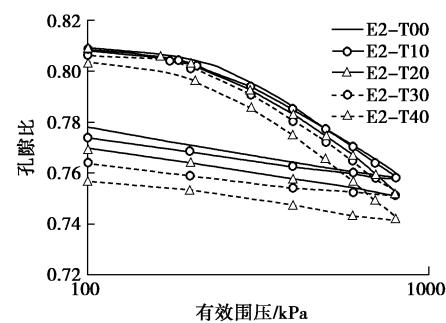
Fig. 3 Effects of temperature history in different stress states

各试验降温段体积应变变化曲线的斜率 κ_T 大致相当, 平均值为 $2.3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。该值略小于土颗粒的热膨胀系数 $3.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。表明变温过程中土颗粒有一定的重新排列, 土颗粒和土骨架的热膨胀系数之间有所差异。变温 ΔT 引起的弹性体积应变 $\Delta\varepsilon_v^e$ 的计算式为

$$\Delta\varepsilon_v^e = \kappa_T \Delta T \quad (4)$$

2.3 温度对压缩及回弹指数的影响

图 4 给出了试验系列 E2 得到的不同温度下的 $e - \ln p'$ 压缩曲线, 各曲线起点孔隙比的差异体现了温度荷载作用下土体体积的变化。由于该系列试验土样初始处于超固结状态, 压缩曲线存在明显的回弹再压缩阶段和正常固结压缩阶段。当压力较大时, 各温度下的压缩曲线近似为直线 (即正常固结线 NCL)。随着温度的增加, NCL 线逐渐向左下方平移, 但斜率 (压缩指数 λ) 变化不大。另外, 各温度下回弹曲线也基本相互平行, 回弹指数 κ 变化较小, 也可认为与温度无关。

图 4 $e - \ln p'$ 曲线 (试验系列 E2)Fig. 4 $e - \ln p'$ curve (Test E2)

试验系列 E3 的相应结果绘制于图 5。该系列是在正常固结状态下升温 40°C 后降温到不同温度, 然后进行加载。在较低的温度下, 压缩曲线存在斜率不同的两个阶段, 起始段的斜率明显要小, 升温一回温使得土体发生了一定的硬化。温度越低, 平台段的范围越大, 表明土样的屈服应力发生了变化, 将在后一小节

进行讨论。虽然各试样经历了不同的升温—降温过程, 但 λ 和 κ 的变化不大, 与试验系列 E1 得到的结果也较为接近 (图 6), 可以认为温度大小及温度历史对 λ 和 κ 没有明显的影响。

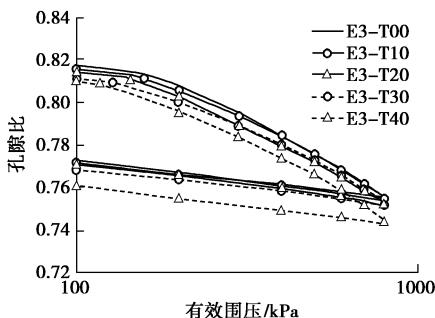


图 5 $e - \ln p'$ 曲线 (试验系列 E3)

Fig. 5 $e - \ln p'$ curves (Test E3)

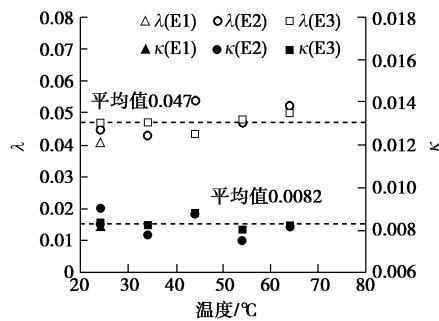


图 6 温度对压缩指数及回弹指数的影响

Fig. 6 Effects of temperature on compression and swelling indexes

2.4 温度对屈服应力的影响

试验系列 E3 的力学加载在升温—降温后进行。通常认为降温过程中土体只发生弹性变形, 因此不同的试样将具有相同的塑性体积应变, 屈服应力的大小直接体现温度的影响。由图 5 中压缩曲线的拐点可确定各温度下的屈服应力, 并绘制在图 7 (a) 之中。结果表明试样 E3-T00, E3-T10, E3-T20, E3-T30, E3-T40 的屈服应力 p_Y 分别为 175, 158, 144, 128, 117 kPa, 屈服应力随温度的增加而减小的规律可用式 (5) 模拟:

$$p_Y(T) = p_Y(T_0) \exp[\eta(1 - T/T_0)] \quad (5)$$

式中 $p_Y(T_0)$ 和 $p_Y(T)$ 分别为等塑性体积应变条件下初始温度 T_0 和当前温度 T 对应的屈服应力; η 为量纲为一的参数, 本例中取 0.24。

图 7 (a) 中同时给出了试验系列 E2 中不同温度下的屈服应力, 该系列是将超固结 $OCR=2$ 的试样升温到不同温度然后进行加载, 屈服应力的变化同时包含了温度和应变硬化的因素。若参照修正桥模型中的塑性体积应变硬化机理, 可将式 (5) 修正为

$p_Y(T) = p_Y(T_0) \exp[\eta(1 - T/T_0)] \exp(\beta \varepsilon_v^p) \quad (6)$

式中, $\beta = (1 + e)/(\lambda - \kappa)$, ε_v^p 是塑性体积应变, 其余参数意义同前。

根据图 2 中体积应变的结果, 扣除弹性膨胀应变 $\Delta \varepsilon_v^e = \kappa_T \Delta T$ 之后可以得到升温产生的塑性体积应变, 代入式 (6) 后可计算屈服应力, 计算中 λ , κ 和 κ_T 均取平均值, 分别为 0.047, 0.0082 和 $2.3 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。图 7 (b) 给出了归一化计算结果, 结果表明温度和力学荷载产生的塑性体积应变对屈服应力有相似的硬化效果, 式 (6) 可以较好地模拟不同温度—力学路径下屈服应力的变化。

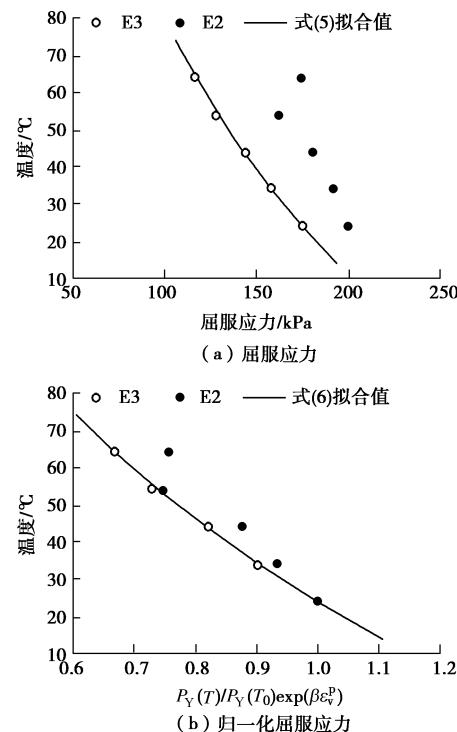


图 7 温度对屈服应力的影响

Fig. 7 Effects of temperature on yield stress

为了进一步验证温度塑性体积应变的硬化作用。将试验系列 E1 的 $e - \ln p'$ 压缩曲线绘于图 8。在每次温度循环 3 周之后, 试样孔隙比减小, 随后的加载过程中屈服应力有所提高, 也即温度循环使得试样处于某种超固结状态。由于再加载阶段的温度与初始温度一致, 屈服应力的变化直接反映温度塑性体积应变的影响。图 9 绘出了温度塑性体积应变与 p_Y/p_{Y0} 之间的关系曲线, 其中 p_{Y0} 是温度循环开始前的屈服应力。结果表明, 温度循环后屈服应力的提高幅度与温度塑性应变有较好的对应关系, 与式 (6) 的预测结果在合理范围之内。这表明从宏观表现来看, 温度塑性体积应变和力学塑性体积应变对硬化的贡献相同, 可采用单一的硬化机理。

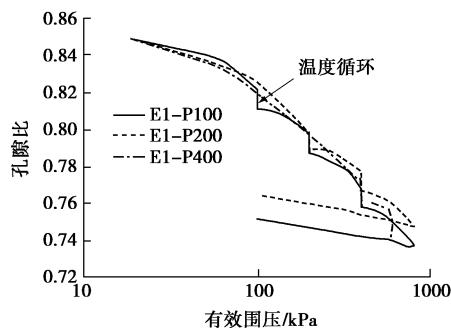
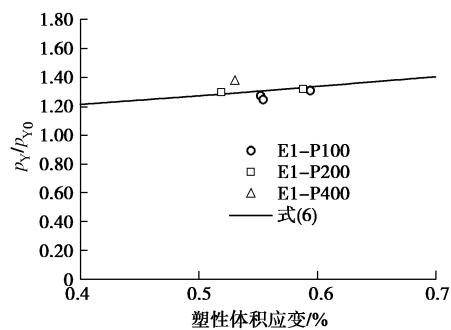
图 8 $e - \ln p'$ 曲线 (试验系列 E1)Fig. 8 $e - \ln p'$ curve (Test E1)

图 9 温度循环对屈服应力的影响

Fig. 9 Effects of temperature cycle on yield stress

3 结 论

本文采用温控三轴仪, 研究了饱和黏性土在不同温度-应力耦合作用下的体积变形特性, 得到以下结论:

(1) 正常固结土升温过程中产生压缩变形, 降温过程中土体变形以弹性收缩为主, 回温后土体有压缩变形残留。温度塑性体积应变随着温度循环的进行而持续发展, 但单周塑性应变增量随循环周数的增加而减小, 存在温度历史效应。

(2) 将土样重新加载到正常固结状态后, 温度循环将引起新的塑性体积应变, 且量值及发展规律与初始温度循环下类似, 温度历史的影响会被应力覆盖。

(3) 温度大小和温度历史对压缩指数和回弹指数的影响不大。

(4) 等塑性体积应变条件下, 屈服应力随温度的增加而减小。温度和力学荷载产生的塑性体积应变对屈服应力有相似的硬化效果, 可用统一的公式表达。

参考文献:

- [1] ABUEL-NAGA 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.

- [2] FAVERO V, FERRARI A, LALOUI L. Thermo-mechanical volume change behaviour of Opalinus Clay[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 90: 15 - 25.
- [3] BALDI G, HUECKEL T, PELLEGRINI R. Thermal volume changes of the mineral-water system in low-porosity clay soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(4): 807 - 825.
- [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(3): 209 - 228.
- [5] 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))
- [6] SULTAN N, DELAGE P, CUI Y J. Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay[J]. Engineering Geology, 2002, 64(2/3): 135 - 145.
- [7] 冯兴, 姚仰平, 李汝宁, 等. 考虑温度 UH 模型的有限元应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 2): 181 - 185. (FENG Xing, YAO Yang-ping, LI Ru-ning, et al. Application of UH model considering temperature to finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 181 - 185. (in Chinese))
- [8] YAO Y P, ZHOU A N. Non-isothermal unified hardening model: a thermo-elasto-plastic model for clays[J]. Géotechnique, 2013, 63(15): 1328 - 1345.
- [9] ZHOU C, NG C W W. A thermomechanical model for saturated soil at small and large strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(8): 1101 - 1110.
- [10] CUI Y J, SULTAN N, DELAGE P. A thermomechanical model for saturated clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(3): 607 - 620.
- [11] 刘汉龙, 孔纲强, 吴宏伟. 能量桩工程应用研究进展及 PCC 能量桩技术开发[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 176 - 181. (LIU Han-long, KONG Gang-qiang, NG C W W. Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 176 - 181. (in Chinese))
- [12] 孔纲强, 王成龙, 刘汉龙, 等. 多次温度循环对能量桩桩

- 顶位移影响分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(4): 958 - 964. (KONG Gang-qiang, WANG Cheng-long, LIU Han-long, et al. Analysis of pile head displacement of energy pile under repeated temperature cycling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(4): 958 - 964. (in Chinese))
- [13] VEGA A, MCCARTNEY J S. Cyclic heating effects on thermal volume change of silt[J]. Environmental Geotechnics, 2014, **2**(5): 257 - 268.
- [14] DI DONNA A, LALOUI L. Response of soil subjected to thermal cyclic loading: experimental and constitutive study[J]. Engineering Geology, 2015, **190**: 65 - 76.
- [15] ZHOU C, FONG K Y, NG C W W. A new bounding surface model for thermal cyclic behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2017, **41**(16): 1656 - 1666.
- [16] 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.
- [17] SENEVIRATNE H N, CARTER J P, AIREY D W, et al. A review of models for predicting the thermomechanical behaviour of soft clays[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1993, **17**(10): 715 - 733.
- [18] 白冰, 赵成刚. 温度对黏性土介质地力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2003, **24**(4): 533 - 537. (BAI Bing, ZHAO Cheng-gang. Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(4): 533 - 537. (in Chinese))
- [19] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, BOUAZZA A. Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay[J]. Engineering Geology, 2007, **89**: 144 - 154.
- [20] PAASWELL R E. Temperature effects on clay consolidation[J]. J Soil Mech and Found Div, ASCE, 1967, **93**(3): 9 - 21.
- [21] TOWHATA I, KUNTIWATTANAKU 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.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

《岩土工程学报》编辑部