

DOI: 10.11779/CJGE201505019

# 高温后上海软黏土的物理性能试验研究

陈正发<sup>1, 2</sup>, 朱合华<sup>1</sup>, 闫治国<sup>1\*</sup>, 王玉朋<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 山东理工大学建筑工程学院, 山东 淄博 255049)

**摘要:** 土的温度效应是岩土工程领域的热点问题, 但对于100°C以上高温环境下土的物理性能的研究并不多。详细介绍了自行研制的高温加热试验装置, 并利用该设备测定了上海软黏土样在105°C, 120°C, 150°C和200°C等高温加热2.5 h和4.0 h后的体积变化、干密度和饱和度的变化, 测定了105°C, 150°C和200°C下恒温4.0 h土的导热情况。试验结果表明土样的体积和饱和度均随温度增加而减小, 土样的干密度随温度的增加而增加, 且随加热时间增加变化趋缓; 湿土和干土的导热系数均随温度升高而增大, 且干土的导热系数小于湿土的导热系数。说明软黏性土在100°C以上高温环境作用下会出现塑性变形和加热硬化现象, 高温对土的导热系数影响显著。

**关键词:** 高温环境; 软黏土; 物理性能

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)05-0924-08

作者简介: 陈正发(1971-), 男, 安徽蚌埠人, 博士研究生, 主要从事岩土灾害、岩土工程材料等方面的研究工作。

E-mail: czf2002@126.com。

## Experimental study on physical properties of Shanghai soft clay under high temperatures

CHEN Zheng-fa<sup>1,2</sup>, ZHU He-hua<sup>1</sup>, YAN Zhi-guo<sup>1</sup>, WANG Yu-peng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** The temperature effect of soil is a hot issue in geotechnical engineering. However, the researches on the physical properties of soil in high-temperature environment over 100°C are still insufficient. A kind of self-developed high-temperature heating apparatus is introduced, by which the variations of mass, moisture content, diameter and height of different soft clay samples from Shanghai are measured in the high-temperature environment of 105°C, 120°C, 150°C and 200°C for 2.5 hours or 4.0 hours. The variations of soil conductivity under 105°C, 150°C and 200°C for 4.0 hours are also examined. The experimental results indicate that the volume and saturation of Shanghai soft clay decrease with the increasing temperature while the dry density of soil samples increases, and the trends of variations turn slow. The longer the heating time is, the greater the variation values of volume, saturation and dry density. The high temperature causes the increase of thermal conductivity for wet soil and dry soil and the thermal conductivity of dry soil is less than that of wet soil. Plastic deformation and heat hardening can be found for the soft clay in high-temperature environment, and the high temperature significantly affects the thermal conductivity of soft clay above 100°C.

**Key words:** high-temperature environment; soft clay; physical property

## 0 引言

近年来, 几乎所有涉及到温度效应的岩土工程问题都会得到研究人员的特别关注和深入研究, 包括地基中岩土结构的能量贮存、地热和地下水能源、高放废物的地下贮存以及火灾引起的结构周围土体温度的变化等<sup>[1]</sup>。然而, 学者们对上述问题的研究大多集中在100°C以下温度对土的物理力学性能的影响进而研

究温度对地基中的结构所产生的影响。对于温度高于100°C时, 温度对地表以下土体的物理力学性能的影响研究并不多。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478345); 土木工程防灾国家重点实验室自主课题资助项目

收稿日期: 2014-02-07

\*通讯作者

地表以下土体中, 温度高于100℃的工程实例比如隧道火灾也很多见, 典型的案例如1977年上海打浦路越江隧道火灾, 2003年韩国大邱市中区地铁1号线中央路车站火灾<sup>[2]</sup>等。由于空间环境的封闭性, 火灾时隧道内排烟与散热条件差, 使得隧道火灾具有升温速度快, 温度高(1000℃以上), 持续时间长的特点。对于软土隧道, 火灾高温除了对衬砌结构本身造成直接损伤(爆裂、剥落、开裂、力学性能劣化等)外, 还会引起土体物理力学性质的变化而导致施加到衬砌结构上的荷载增加<sup>[3]</sup>。对于软土铸铁管片或钢管片盾构隧道, 火灾高温迅速向隧道周围的软土传递, 导致土体温度显著升高。例如, 1985年, 德国在盖尔森基兴市地铁隧道内进行的火灾试验(隧道采用ST52-3型钢管片拼装而成, 长361 m, 直径6.29 m)表明: 由于钢管片衬砌导热性能良好, 周围地层的温升非常明显。实测隧道内热烟流最高温度为880℃; 衬砌外侧3 cm, 30 cm处土体的温度分别达到了122℃和59℃<sup>[4-5]</sup>。因此, 100℃以上时, 温度对土的物理力学性能的影响也应引起足够重视。

学者们对土的温度效应的研究始于20世纪五六十年代<sup>[6-8]</sup>。Campanella等<sup>[9]</sup>详细研究了温度对黏性土的体变和孔压的影响, 最高温度达到60℃, Habibagahi<sup>[10]</sup>研究了加热对黏性土的渗透性的影响。自20世纪80年代后, 岩土工程的热力学问题成为研究热点<sup>[11-12]</sup>, 出现了许多土的热-力耦合, 热-水-力耦合以及热-水-力-化学耦合的数学和本构模型<sup>[13-19]</sup>, 对岩土体在多环境场耦合作用下的物理力学性能进行了深入研究。

上述对岩土体的温度效应问题的研究主要集中在100℃及以下的温度场, 而100℃以上高温对土体性能的影响研究主要集中在森林火灾对地表土(无压力作用)生态环境方面<sup>[20-21]</sup>, 对100℃以上高温环境对地下结构周围土体(在一定压力作用下的土体)物理性能的影响研究未见报道。Morin等<sup>[22]</sup>研究了22℃~220℃范围内4种土体的热传导系数、渗透率、双电层厚度等随温度的变化情况, 认为黏性土颗粒的热传导系数不受温度变化的影响, 黏性土的渗透性在孔隙比一定的情况下随温度增加而增大, 双电层厚度随温度增加而减小。Agar等<sup>[23]</sup>研究了20℃~300℃范围内Athabasca油砂的热膨胀行为, 认为在不排水加热时孔压随温度成非线性变化。Hueckel等<sup>[24]</sup>对18℃~115℃范围内Pontida粉质黏土进行了等向固结排水三轴压缩试验, 研究表明Pontida粉质黏土的剪切强度和硬度随温度的增加而减小。Wang等<sup>[25]</sup>研究了100℃~600℃范围土的矿物成分、比重和塑液限随温度的变化情况, 认为400℃以下土的比重不随温度而改变, 不同黏性土矿物的塑液限随温度的变化不同。Towhata等<sup>[26]</sup>研究了22

℃~200℃范围内塑液限随温度的变化情况, 研究结果和Wang等<sup>[25]</sup>的研究结果相同。Graham等<sup>[27]</sup>研究了100℃~140℃之间伊利黏土矿物成分的不可逆变化, 研究结果和Wang等<sup>[26]</sup>及Seyfried等<sup>[28]</sup>的研究结果不同等。

本文针对火灾高温后地下结构周围软黏土物理性能的变化规律, 研制了用于测试土体高温后物理力学性能变化的温控试验设备(可实现对土样在设定蒸汽压力下进行高温处理, 并实时获得高温下土样的饱和度和含水率), 并基于研制的试验设备, 首次开展了控制蒸汽压条件下软黏土在经历不同高温后的体变行为及干密度和饱和度等物理性能的变化规律。

## 1 试验土样与试验方法

### 1.1 试验用土样

本试验所用土料取自上海市闵行区七莘路东、沪星路南、吴宝路西一厂房工程, 场地位于长江三角洲入海口东南前缘, 其地貌属于上海地区四大地貌单元中的滨海平原类型。土料取自该场地地下10 m, 为全新世Q4<sup>2</sup>海相沉积物, 表面呈灰色的淤泥质黏土。经测定天然土的基本物理性能指标为: 含水率w=46.4%, 重度γ=17.0 kN/m<sup>3</sup>, 比重G<sub>s</sub>=2.74, 塑限w<sub>p</sub>=22.1%, 液限w<sub>L</sub>=41.0%。

把所取天然土样进行晾干、粉碎后装入密闭的容器中。按照(GBT 50123—1999)《土工试验方法标准》(以下简称《标准》)方法制备饱和土样。制备后饱和土样的含水率w=48.3%, 重度γ=17.5 kN/m<sup>3</sup>, 放置在密闭的容器中备用。

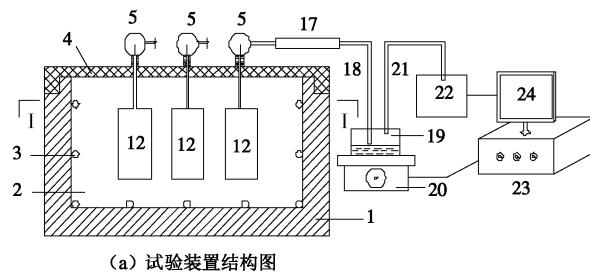
### 1.2 试验设备

为了研究温度对土的物理力学性能的影响, 必须研究一套能够独立控制和测量土体温度的试验设备。20世纪60年代, Mitchell等<sup>[29]</sup>就率先研制了一套温控三轴试验系统用于研究饱和黏性土的蠕变特征, 这套试验设备能够独立控制试样温度在40°F到140°F范围, 精度为0.5°F。1982年, Demars等<sup>[11]</sup>为了研究土的体变行为设计研究了一套温控三轴试验系统, 温度的控制范围是2℃~40℃。到了20世纪90年代, Bergenthal等<sup>[30]</sup>、Lingunal等<sup>[31]</sup>、Kuntiwattanakul等<sup>[32]</sup>、De-Bruyn等<sup>[33]</sup>也都设计和研制了温控三轴试验系统, 温度最高控制在80℃。Delage等<sup>[34]</sup>、Anuchit Uchaipichat等<sup>[35]</sup>及陈正汉等<sup>[36]</sup>也分别设计研制了温控三轴试验系统, 最高设计温度为100℃。除了温控三轴试验装置外, Paaswell<sup>[37]</sup>、Towhata等<sup>[26]</sup>、叶为民等<sup>[38]</sup>为了研究温度对土的固结效应和体变行为的影响分别设计和研制了温控固结仪, 最高控制温度为80℃。以上设备的温度控制均是在100℃以下, 原因是在温控三轴仪中, 一方面橡皮膜的耐高温问题不好解

决,另一方面围压水的沸点温度为100℃,当测试100℃以上土体性能变化时,围压溶液问题不好解决,其次,当温度高于100℃时,传感器的测量精度会受到影响。因此,对高于100℃的温控环境下土体的物理力学性能的研究并不多。

为了测定高温后土的物理力学性能,利用现有的加热和压力控制技术,设计完成了土的高温加热试验装置(获国家发明专利,专利号:ZL 201210292819.0)。该试验装置能够实现对土样在一定高温环境下的蒸汽压力进行控制,同时能测定该高温下土的饱和度和含水率。利用该试验装置,配合饱和、非饱和土三轴试验设备,实现对高温后土的力学性能进行测试。

加热装置概略图如图1所示,由热源1~4、土样密封容器12、气压调节阀5、冷凝管17、冷凝水量测系统19,20、气体分析仪22和数据采集系统23,24等组成。利用加热炉把土样加热到设定温度,利用气压调节阀控制土样内部的压力恒定在设定数值。从土样溢出的蒸汽混合气体,一部分水蒸气经冷凝管冷却变成冷凝水流进冷凝水测试系统,另一部分不溶于水的气体进入气体分析仪。数据采集系统实时对冷凝水和气体分析结果进行采集和处理。通过冷凝水的测量确定土样的饱和度和含水率,通过气体分析仪分析结果分析土样在高温下发生的相变情况。温度控制精度为 $1\pm0.5^{\circ}\text{C}$ ,最高试验温度为300℃。



(a) 试验装置结构图

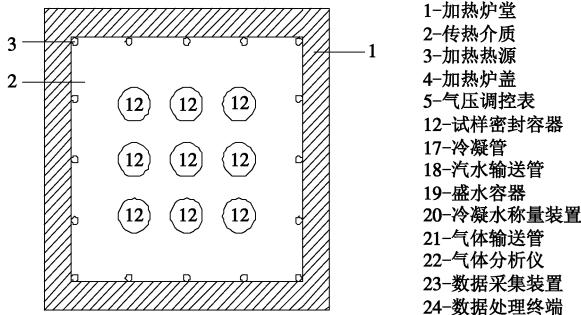


图1 试验装置构成图

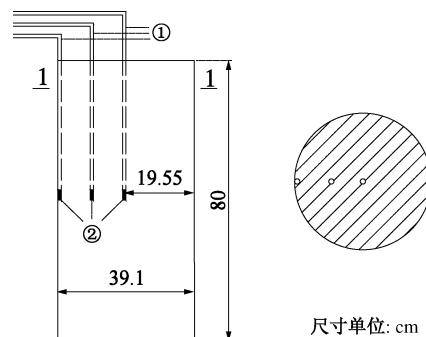
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

### 1.3 试验方法

把制备好的饱和土样装入图1所示的试样密闭容器12中,容器采用不锈钢材料,两端采用螺纹帽加耐高温的橡胶圈密封,容器的内部尺寸为直径 $D=39.1\text{ mm}$ ,高 $H=80\text{ mm}$ 。土样的装入方法,没有采用《标

准》中三轴试验的装样方法,主要是因为若采用《标准》中土膏的装样方法,本试验所用土样的流动性不够,装成的土样分层严重且很不均匀。但若采用《标准》中击实器套筒分层装入的方法,在分层击实时,土样的黏滞性会导致土体部分或全部黏附在击实锤上而击实困难,且从推出的土样来看,土体分层仍较为严重。为此,笔者经过反复装样试验,探索了一种新的装样方法——三分层装样法,即分层装土分层振动并分层刮毛的方法,以确保土样制备均匀。具体做法是:首先将内部涂上凡士林的试样密闭容器套在顶端放有9块透水石的击实器底座上;然后用泥铲将土样均匀放入容器中,使土样高出容器10mm左右;第3步将容器和击实器底座一起在地板上轻轻上下振动25次左右,将容器上表面土样刮平;第4步从击实器底座上取下两块透水石,土样在自重作用下自然下沉;第5步把土样上表面刮毛,再次均匀装入土样;第6步重复上述步骤直至容器下部仅剩下1块透水石,取出击实器底座,继续上述装土步骤;第7步刮平试样密闭容器顶端,放上预先饱和好的透水石和滤纸;第8步轻轻按压透水石顶出底部的最后一块透水石;第9步倒转试样密闭容器并做如上振动;第10步放上预先饱和好的透水石和滤纸并做轻轻挤压直至透水石和容器顶部平齐,装样完毕。

把装好土样的密封容器12两端密封,装配到试验加热装置中。控制土样的蒸汽压力为0.1MPa,并开始对土样进行快速( $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )加热,同时打开数据采集系统。加热炉温度即土样周围介质温度的控制方法是采用电子自动控制方法,土样内部温度的测量是采用高精度探针式K型热电偶进行测量,并同时与Datataker数据采集系统相连,测试原理图如图2所示。土样中的蒸汽压力控制为0.1MPa,主要是考虑土样取自地下10m,且上海市地铁隧道的埋深大约为10m,当隧道发生火灾时,水蒸汽的逸出所要克服的最小压力约为0.1MPa(上覆土的自重应力)。按照试验预定时间给土样加热,加热完成并待加热盒冷却后取出土样,测量土样的质量、高度、直径和含水率。



①-电耦导线, ②-热电耦  
图2 土体温度变化测试原理图

Fig. 2 Principle of soil temperature tests

## 2 试验结果及分析

### 2.1 高温后土体的体积变化

试验测定了 105℃, 120℃, 150℃ 和 200℃ 4 个温度下, 恒温时间为 2.5, 4.0 h 后, 土体的体积变化情况。每个温度下测试 3 组数据, 然后取其平均值, 若离散性过大则重新测量。每个温度下测得的直径  $d$  和高度  $h$  变化的平均值及计算所得体变  $\varepsilon_v$  值如表 1 所示。

表 1 各温度后土样的体变值

Table 1 Volume variations after high temperatures

温度 /℃	加热时间 /h	土样高度 /cm	土样直径 /cm	体积变化 /cm <sup>3</sup>	体积应变 /%
105	2.5	78.01	39.21	1.91	1.99
	4.0	77.01	39.12	3.59	3.74
120	2.5	76.21	37.86	10.25	10.68
	4.0	73.24	36.90	17.72	18.46
150	2.5	74.31	36.72	17.35	18.07
	4.0	72.02	36.43	20.97	21.84
200	2.5	71.14	36.47	21.72	22.63
	4.0	69.10	36.60	23.34	24.31

由表 1 可知随着温度的增加, 土样体积逐渐缩小, 相同温度下加热时间越长, 体积缩小的越多, 这一结果和土体在 100℃ 以下的体变行为<sup>[9]</sup>相似。根据计算得到土样的体变值, 可绘出体变随温度增加和加热时间变化而变化的曲线, 如图 3 所示。由图 3 可以看出, 土体在加热 2.5 h 后的体变行为随温度的变化曲线要比 4.0 h 体变曲线平缓, 根据曲线的变化趋势可以看出, 体变会在某一定值下趋于稳定。从土体的直径和高度变化也可以看出随着恒温温度的升高土体的直径和高度均减小, 且同一温度下恒温时间越长, 减小的值越大。

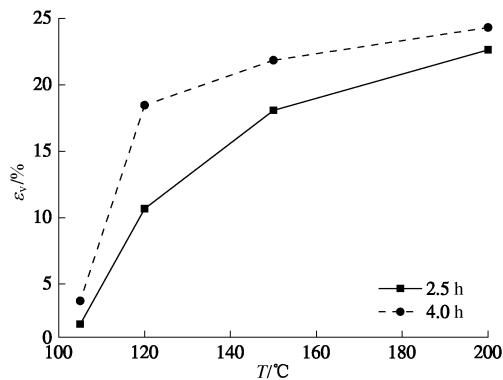


图 3 体应变随温度和时间的变化曲线

Fig. 3 Variation of volumetric strain with temperatures

根据试验中的压力控制, 在加热阶段, 当加热盒中的压力值  $P < 0.1 \text{ MPa}$  时, 由于压力控制阀关闭, 加

热盒中土体体积的变化 ( $\Delta V_1$ ) 以增加为正, 减小为负(下同), 如下式所示:

$$\Delta V_1 = \Delta V_1^T - \Delta V_1^P - \Delta V_{m1}^T - \Delta V_{c1}^T , \quad (1)$$

$$\Delta V_1^T = \Delta V_{s1}^T + \Delta V_{w1}^T . \quad (2)$$

式中  $\Delta V^T$  和  $\Delta V^P$  分别表示由于温度和压力变化所引起的土体体积的变化;  $\Delta V_{s1}^T$  和  $\Delta V_{w1}^T$  分别表示由于温度变化固体颗粒和水的体积变化;  $\Delta V_{m1}^T$  表示由于温度和压力作用所引起的土颗粒的运动而产生的体积变化;  $\Delta V_{c1}^T$  表示由于温度和压力作用所引起土体中的物理(如颗粒的破碎)化学反应(如有机质的分解)而产生的体积变化。

$$\Delta V_{s1}^T = \alpha_s V_s \Delta T_1 , \quad (3)$$

$$\Delta V_{w1}^T = \alpha_w V_w \Delta T_1 , \quad (4)$$

式中,  $\alpha_s$  和  $\alpha_w$  分别表示固体颗粒和水的热膨胀系数,  $V_s$  和  $V_w$  分别表示土样中固体颗粒和水的体积。

$$\Delta V_1^P = \Delta V_{s1}^P + \Delta V_{w1}^P , \quad (5)$$

式中,  $\Delta V_{s1}^P$  和  $\Delta V_{w1}^P$  分别表示由于压力变化固体颗粒和水的体积变化,

$$\Delta V_{s1}^P = a_s V_s \Delta P_1 , \quad (6)$$

$$\Delta V_{w1}^P = a_w V_w \Delta u_1 , \quad (7)$$

式中,  $a_s$  和  $a_w$  分别表示固体颗粒和水的压缩系数。

由于温度升高, 部分液态水变成气态水, 加热盒中压力增大, 增大的压力会引起相同的孔隙水压力增长, 即  $\Delta P_1 = \Delta u_1$ 。

于是上述公式可以表示为

$$\Delta V_1 = \alpha_s V_s \Delta T_1 + \alpha_w V_w \Delta T_1 - a_s V_s \Delta P_1 - a_w V_w \Delta P_1 - \Delta V_{m1}^T - \Delta V_{c1}^T . \quad (8)$$

当加热盒中的压力值等于或稍大于 0.1 MPa 时, 土样开始排水(气态水), 压力阀维持加热盒中的压力值为 0.1 MPa。由于加热盒中的温度和压力不再增加, 土体体积的变化可表示为

$$\Delta V_2 = -\Delta V_{m2}^T - \Delta V_{c2}^T - \Delta V_D , \quad (9)$$

式中,  $\Delta V_D$  表示排出土体的水(液态水)的体积。

当加热停止, 加热盒中的土体开始降温, 压力降低, 当压力值小于 0.1 MPa 时, 土体体积的变化如下式所示:

$$\Delta V_3 = -\Delta V_2^T - \Delta V_2^P - \Delta V_{m3}^T - \Delta V_{c3}^T . \quad (10)$$

仿照式(8), 式(10)可以表示为

$$\Delta V_3 = -\alpha'_s V_s \Delta T_2 + \alpha'_w V_w \Delta T_2 - a'_s V_s \Delta P_2 - a'_w V_w \Delta P_2 - \Delta V_{m3}^T - \Delta V_{c3}^T . \quad (11a)$$

式中  $\alpha'$  和  $\alpha'$  表示土体冷却阶段土颗粒和水的膨胀系数;  $a'$  和  $a'_w$  表示土体冷却阶段土颗粒和水的压缩系数。

由于升温和降温过程温度变化相同, 即  $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T$ , 则式(11a)可写成

$$\Delta V_3 = -\alpha'_s V_s \Delta T + \alpha'_w V_w \Delta T - a'_s V_s \Delta P_2 - a'_w V_w \Delta P_2 - \Delta V_{m3}^{TP} - \Delta V_{c3}^{TP} \quad (11b)$$

把式(8)、(9)、(11b)相加后可以得到总的体积变化为

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 \\ &= V_s \Delta T (\alpha_s - \alpha'_s) + \Delta T (\alpha_w V_w - \alpha'_w V'_w) - V_s (a_s \Delta P_1 + a'_s \Delta P_2) - (a_w V_w \Delta P_1 + a'_w V'_w \Delta P_2) - (\Delta V_{m1}^{TP} + \Delta V_{m2}^{TP} + \Delta V_{m3}^{TP}) - (\Delta V_{c1}^{TP} + \Delta V_{c2}^{TP} + \Delta V_{c3}^{TP}) - \Delta V_D \quad (12) \end{aligned}$$

由于土体在加热和冷却阶段的压缩系数不变<sup>[9]</sup>, 即可认为  $a_s = a'_s$ ,  $a_w = a'_w$ 。同时, 假定  $V'_w = V_w - \Delta V_D$ ,  $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$ , 把式(12)整理化简后得

$$\Delta V = V_s \Delta T (\alpha_s - \alpha'_s) + V_w \Delta T (\alpha_w - \alpha'_w) - \Delta V^P - \Delta V_m^{TP} - \Delta V_c^{TP} - \beta \Delta V_D \quad (13)$$

式中,  $\Delta V^P = \Delta V_1^P + \Delta V_2^P$ ,  $\Delta V_m^{TP} = \Delta V_{m1}^{TP} + \Delta V_{m2}^{TP} + \Delta V_{m3}^{TP}$ ,  $\Delta V_c^{TP} = \Delta V_{c1}^{TP} + \Delta V_{c2}^{TP} + \Delta V_{c3}^{TP}$ ,  $\beta = a_w \Delta P_2 - a'_w \Delta T + 1$ 。

若假定固体颗粒和水在热胀和冷缩过程中的膨胀系数相等, 即  $\alpha_s = \alpha'_s$ ,  $\alpha_w = \alpha'_w$ , 于是式(13)又可以简化为

$$\Delta V = -\Delta V^P - \Delta V_m^{TP} - \Delta V_c^{TP} - \beta \Delta V_D \quad (14)$$

由式(14)可以看出, 土体的体积变化主要来自于 4 个方面: ①温度升高产生的土体压力对土体的压缩; ②土体中的固体颗粒由于温度和压力作用产生的位置移动; ③由于高温和压力作用产生的固体颗粒的破碎、有机质的分解等物理、化学作用所产生的体积减少; ④由于温度和压力作用所排出土体的水分。因此, 可以认为在额定压力下, 软黏土在高温环境作用下的热固结不仅是由于土中水的排出和土中孔隙的压缩, 而且伴随着土体固体颗粒的破碎重组和软黏土中有机质的分解等所产生的体积变化。

## 2.2 高温后土体的干密度和饱和度的变化

试验研究了 105°C, 120°C, 150°C 和 200°C 4 个温度下, 恒温时间分别为 2.5, 4.0 h 后土样的质量  $m$ , 含水率  $w$  和密度  $\rho$  的变化情况, 并由此计算出土体在高温作用以后的干密度  $\rho_d$  和饱和度  $S_f$  的变化。各温度后土样的干密度  $\rho_d$  和饱和度  $S_f$  值如表 2 所示。

根据干密度  $\rho_d$  和饱和度  $S_f$  的变化情况(图 4, 5)可以看出, 随着温度升高干密度逐渐增大, 但增大趋势逐渐变缓且最终趋于稳定; 相同温度下恒温时间越长干密度变化越大(如图 4 所示), 即单位体积土样中固体颗粒的质量分数越大, 说明土的密实程度越高。图 5 所示为土样的饱和度随温度的变化曲线, 温度越高土样排出的水分越多, 饱和度越低, 相同温度下恒温时间越长饱和度也越低。200°C 下恒温 4.0 h 后, 土体的饱和度仅为 0.05。从软黏土样的宏观试验现象也

可以看出, 随温度增加土样逐渐变干、变硬, 即出现加热硬化现象。

表 2 各温度后土样的含水率和密度值

Table 1 Variation of water content and density with temperatures

温度 / °C	加热时间/h	含水率 / %	质量 / g	密度 / (g·cm⁻³)	干密度 / (g·cm⁻³)	饱和度
105	2.5	43.63	167.48	1.78	1.21	0.99
	4.0	39.36	164.65	1.75	1.28	0.91
120	2.5	22.73	146.33	1.71	1.39	0.64
	4.0	17.26	141.72	1.54	1.81	0.61
150	2.5	11.23	133.67	1.70	1.53	0.39
	4.0	5.78	123.52	1.65	1.56	0.21
200	2.5	4.25	120.62	1.62	1.56	0.15
	4.0	1.47	116.27	1.60	1.58	0.05

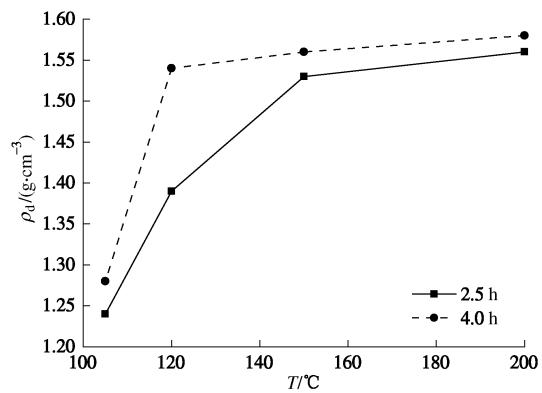


图 4 干密度随温度和时间的变化曲线

Fig. 4 Variation of dry density with temperatures

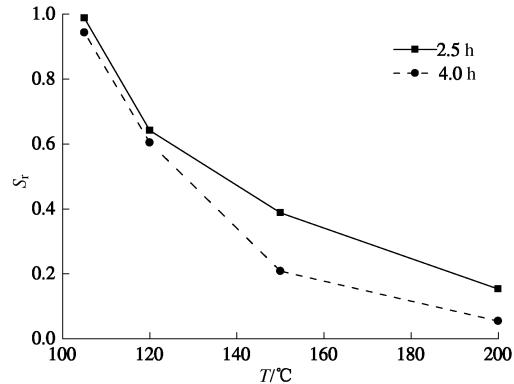


图 5 饱和度随温度和时间的变化曲线

Fig. 5 Variation of saturation with temperatures

## 2.3 高温环境下土的导热系数

试验测定了 105°C, 150°C 和 200°C 下的土体内部温度随时间的变化情况, 土样两端自由排水、排气, 测试原理如图 2 所示。

图 6 为土体温度随时间的变化曲线, 图中  $T$  表示温度,  $t$  表示时间, TC1, TC2, TC3 分别表示土样中

由外而内等距布置的热电偶。由图 6 可以看出, 105 °C 升温曲线大体可以分为两个阶段, 快速升温阶段 I 和恒温阶段 II, 而 150 °C 和 200 °C 升温曲线大体可以分为 4 个阶段, 快速升温阶段 I、恒温阶段 II、再快速升温阶段 III 和再恒温阶段 IV。前两个阶段由于土样初始条件下是完全饱和的, 热的传递主要是通过水土混合体进行传热, 即水和土都起到传导热量的桥梁作用, 这时候由于水完全包围在固体颗粒周围, 可以把水土混合体看成是均匀的导热体, 所以土体内部的温度很快升高, 即快速升温阶段。随着温度的升高, 土中的水蒸气逐渐增加, 随着水蒸气的排出, 土中的孔隙增多, 土中的热传导主要通过固体颗粒、水和水蒸气传递热量, 土体温度会继续增加。当土体中的水分完全汽化后, 土体中的热量传递主要是通过水蒸气传热和固体颗粒导热, 此时由于水蒸气的存在, 土体的温度一直维持在 100 °C 左右而不再升高, 即恒温阶段 II。对于 150 °C 和 200 °C 升温曲线, 由于 TC3 在土体的最外边, 此处的土体最先变为干土所以温度提前升高, 其次是内部的土体变为干土, 由于土体中没有水分, 土体的温度再次快速升高即再快速升温阶段 III, 直到土体的温度达到环境温度即再恒温阶段 IV。

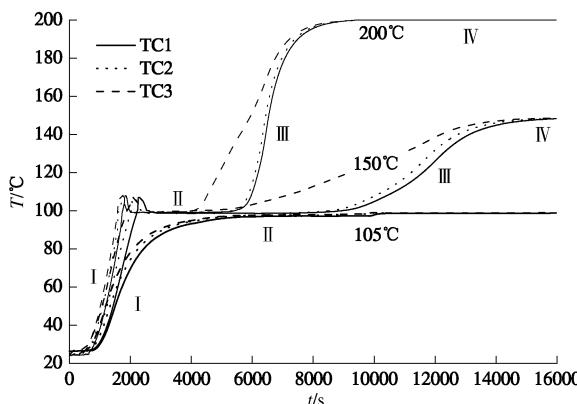


图 6 土体温度随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation of soil temperature with time

由图 6 可以看出, 3 个温变曲线在阶段 I 的斜率大小为  $k_{105^\circ\text{C}} < k_{150^\circ\text{C}} < k_{200^\circ\text{C}}$ , 说明温度越高湿土的导热系数越大。土体从升温开始, 升温速率就表现出差异, 说明不同温度环境下土的导热系数不同, 只是在大约 40 °C 以下表现的不太明显。这是因为, 在低温范围内水的汽化量小, 水蒸气的移动所传递的热量较小, 此时土的热传递主要靠固体颗粒之间的热传导。而在高温环境下水的汽化量大, 水蒸气传递的热量显著, 导致土的有效导热系数增加, 因此表现出升温速率差异明显。150 °C 和 200 °C 曲线经过恒温阶段 II 后, 土中水完全汽化排出, 对比升温阶段 III, 斜率差异更加显著,

说明干土的导热系数也是温度越高值越大, 这一结论和 100 °C 以下干土的导热系数随温度的变化规律相同。150 °C 和 200 °C 曲线的再升温阶段 III 的斜率小于升温阶段 I 的斜率, 说明干土的导热系数小于湿土的导热系数。

### 3 结 论

本文利用自行研制的温控试验设备进行了高温后土的物理性能测试, 并进行了高温环境下土的导热系数测定。研究了土体的体变行为、干密度和饱和度的变化以及高温环境下土的导热系数随温度的变化情况, 得到以下 4 点结论。

(1) 研制了温控加热试验装置。该装置具有升温速度快, 温度控制精度高 ( $1.0^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ ), 土体中的蒸汽压力可控等优点。试样密封容器装卸方便, 且土样的尺寸可配合饱和与非饱和土三轴仪进行土的力学性能测试。

(2) 得到了 100 °C 以上高温后软黏性土样随温度变化的体变行为及机理。随着温度的增加, 土样体积逐渐缩小, 相同温度下加热时间越长, 体积缩小的越多。100 °C 以上高温作用后软黏性土样的体积减小不仅是由于土中水的排出和土中孔隙的压缩, 而且伴随着土体固体颗粒的破碎重组和软黏土中有机质的分解等物理、化学作用所产生的体积变化。

(3) 得到了 100 °C 以上高温后软黏性土样的干密度和饱和度随温度的变化情况。随着温度升高干密度逐渐增大, 饱和度逐渐减小, 相同温度下恒温时间越长干密度越大, 饱和度也越小, 即出现加热硬化现象。

(4) 得到了 105 °C, 150 °C 和 200 °C 高温环境下土的导热系数的变化规律。表明高温环境对土的导热系数影响显著, 温度升高湿土和干土的导热系数增大, 且湿土的导热系数大于干土的导热系数。主要是因为高温环境下水的汽化量大, 水蒸气传递的热量显著, 导致土的有效导热系数增加。

### 参考文献:

- [1] GENS A. Soil-environment interaction in geotechnical engineering[J]. Géotechnique, 2010, **60**(1): 3 - 74.
- [2] VUILLEUMIER F, WEATHERILL A, CRAUSAZ B. Safety aspects of railway and road tunnel: example of the Lötschberg railway tunnel and Mont-Blanc road tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, **17**(2): 153 - 158.
- [3] 刘滔. 火灾高温条件下软土隧道外荷载变化规律研究[D]. 上海: 同济大学, 2012. (LIU Tao. A study on varying law of

- the external load on the tunnel in soft clay with fire high temperature[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese)
- [4] EL-ARABI I, DUDDECK H, AHRENS H. Structural analysis for tunnels exposed to fire temperatures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1992, 7(1): 19 – 24.
- [5] HAACK A. Fire protection in traffic tunnels-initial findings from large-scale tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1992, 7(4): 363 – 375.
- [6] FINN F N. The effect of temperature on the consolidation of soils[J]. ASTM Special Technical Publication, 1951, 126(6): 65 – 72.
- [7] LAMBE T W. The structure of compacted clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1958, 84(2): 1 – 34.
- [8] ANDERSLAND O B, AKILI W. Stress effect on creep rates of a frozen clay soil[J]. Géotechnique, 1967, 17(1): 27 – 39.
- [9] CAMPANELLA R G, MITCHELL J K. Influence of temperature variations on soil behaviour[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(3): 1 – 37.
- [10] HABIBAGAHI K. Temperature effect and the concept of effective void ratio[J]. Indian Geotechnical Journal, 1977, 7(1): 14 – 34.
- [11] DEMARS K R, CHARLES R D. Soil volume changes induced by temperature cycling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(2): 188 – 194.
- [12] 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.
- [13] HUECKEL T, BORSETTO M. Thermoplasticity of saturated soils and shales: constitutive equations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, 116(12): 1765 – 1777.
- [14] THOMAS H R, KING S D. Coupled temperature/capillary potential variations in unsaturated soil[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1991, 117(11): 2475 – 2491.
- [15] SCHREFLER B A, ZHANG X. A fully coupled model for water flow and air flow in deformable porous media [J]. Water Resource Research, 1993, 29(1): 155 – 167.
- [16] CUI Y J, SULTAN N, DELAGE P. A thermomechanical model for saturated clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(3): 607 – 620.
- [17] KHALILI N, LORET B. An elasto-plastic model for nonisothermal analysis of flow and deformation in unsaturated porous media: formulation[J]. International Journal of Solids and Structure, 2001, 38(46/47): 8305 – 8330.
- [18] GATMIRI B, ARSON C.  $\theta$  – STOCK, a powerful tool of thermohydromechanical behaviour and damage modelling of unsaturated porous media[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(6): 890 – 915.
- [19] MONFARED M, SULEM J, DELAGE P, et al. On the THM behaviour of a sheared Boom clay sample: application to the behavior and sealing properties of the EDZ[J]. Engineering Geology, 2012, 124(4): 47 – 58.
- [20] VERMA S, JAYAKUMAR S. Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: a review[C]// Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, 2012: 168 – 176.
- [21] DAVID B V, JOSE A G P, JAVIER M A, et al. Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: soil depth affected by fire[J]. Geoderma, 2014, 213(1): 400 – 407.
- [22] MORIN R, SILVA A J. The effects of high pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments[J]. Journal of Geophysical research, 1984, 89(B1): 511 – 526.
- [23] AGAI J, MORGENSEN N R, SCOTT J D. Shear strength and stress strain behaviour of Athabasca oil sand at elevated temperatures and pressure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(1): 1 – 10.
- [24] HUECKEL T, BALDI G. Thermoplastisity of saturated clays: experimental constitutive study[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, 116(12): 1778 – 1796.
- [25] WANG M C, BENWAY J M, ARAYSSI A M. The effect of heating on engineering properties of clays[J]. ASTM Special Technical Publication, 1990, 1095: 139 – 158.
- [26] TOWHATA I, KUNTIWATTANAKUL P, KOBAYASHI H. A preliminary study on heating of clays to examine possible effects of temperature on soil-mechanical properties[J]. Soil and Foundations, 1993, 33(4): 184 – 190.
- [27] GRAHAM J, CHANDLER N A, DIXON D A, et al. The buffer/container experiment[R]. Atomic Energy of Canada Limited and CANDU Owners Group, AECL-11746 and COG-97-46-I, 1996.
- [28] SEYFRIED W E Jr. Experimental and constraints on

- hydrothermal alteration processes at mid-ocean ridges[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1987, **15**: 317 - 335.
- [29] MITCHELL J K, CAMPANELLA R G. Creep studies on saturated clays[J]. ASTM Special Technical Publications, 1963, **361**: 90 - 110.
- [30] BERGENSTAHL L, GABRIELSSON A, MULABDIC M. Changes in soft clay caused by increases in temperature[C]// Proceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1994: 1637 - 1640.
- [31] LINGUAU B. Consolidated undrained-triaxial behavior of a sand-bentonite mixture at elevated temperature[D]. Manitoba: The University of Manitoba, 1993.
- [32] KUNTIWATTANAKUL P, TOWHATA I, OHISHI K, et al. Temperature effects on undrained shear characteristics on clay[J]. Soils and Foundations, 1995, **35**(1): 427 - 441.
- [33] DE-BRUYN D, THIMUS J. The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: the results of an initial laboratory programme[J]. Engineering Geology, 1996, **41**(1/2/3/4): 117 - 126.
- [34] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of boom clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(3): 343 - 354.
- [35] ANUCHIT U. Experimental investigation and constitutive modeling of thermo-hydro-mechanical coupling in unsaturated soils[D]. Sydney: the University of New South Wales, 2005.
- [36] 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))
- [37] PAASWELL R. Temperature effects on clay soil consolidation[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1967, **93**(3): 9 - 22.
- [38] 叶为民, 张亚为, 陈宝, 等. 温控非饱和高压固结试验系统研制进展[C]// 第三届废物地下处置学术研讨会论文集. 杭州, 2010: 385 - 393. (YE Wei-min, ZHANG Ya-wei, CHEN Bao, et al. Advances on development of suction and temperatrate controlled oedometer cell[C]// Proceedings of The Third Conference on Underground Disposal of the Waste. Hangzhou, 2010: 385 - 393. (in Chinese))

## 《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, 并优先刊用这些稿件。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](http://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 25 元, 全年 300 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。

(本刊编辑部)