

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211004049

## 温度作用下膨胀土的胀缩特性及微观机理\*

曾召田<sup>1,2</sup>, 潘斌<sup>1,3</sup>, 莫红艳<sup>1</sup>, 梁珍<sup>1</sup>, 王平<sup>1</sup>, 张瀚彬<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 温度场作为外部环境要素场之一,对膨胀土的水-力学性质具有显著影响。为研究温度对膨胀土胀缩特性的影响规律及微观机理,以南宁膨胀土为对象,开展了不同温度(5~45℃)下膨胀土的浸水膨胀和失水收缩试验,结果表明膨胀土的胀缩特性具有显著的温度效应,其膨胀率随温度升高而增大,温度越高其增大效果越明显;收缩率随温度升高则呈现出先增大后减小的变化规律,存在临界温度“ $T_c=35^\circ\text{C}$ ”。在此基础上,基于不同温度(5~45℃)下的吸附结合水试验,从土-水作用角度阐释了膨胀土胀缩特性温度效应的微观机理;随着温度的升高,土中结合水量减小,水膜厚度变薄,从而引起两方面的结果:①土颗粒间的吸力减弱而斥力增加,宏观表现为土体的膨胀性增加;②土颗粒间距变小,促进了土颗粒骨架由松散状态向紧密状态转化,颗粒排列更紧密,收缩性增加,而达到一定温度后,水分蒸发时间较短,土-水作用加剧使得土体骨架没有充足的时间向紧密状态转化,是造成土体收缩性减小的主要原因。

**关键词:** 膨胀土; 胀缩特性; 温度作用; 结合水; 微观机理

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1053-08

## Experimental Study on Temperature Effect on Swelling-shrinking Behaviours of Expansive Soil

ZENG Zhaotian<sup>1,2</sup>, PAN Bin<sup>1,3</sup>, MO Hongyan<sup>1</sup>, LIANG Zhen<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>, ZHANG Hanbin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;  
2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;  
3. The Third Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Temperature is one of the most important external environmental elements, which has a significant influence on hydro-physical properties of expansive soils. Taking one typical Nanning expansive soil as the research object, swelling and shrinkage tests were carried out at the temperature of 5~45℃. The results show that the swell-shrinking characteristics of the expansive soil are significantly affected by temperature. The swelling ratios increase with the increase of temperature. The shrinkage ratio increases first and then decreases with rising temperature, and there is a critical temperature  $T_c=35^\circ\text{C}$ . Furthermore the mechanism of temperature effects on the swell-shrinking characteristics of the

\* 收稿日期:2021-10-04;修回日期:2021-11-15

基金项目:国家自然科学基金(41962014,42167020)资助

作者简介:曾召田(1981—),男,教授,博士。主要从事工程地质、环境岩土工程方面的研究。E-mail:zengzhaotian@163.com

通讯作者:莫红艳(1976—),女,讲师,硕士。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:yunqi\_mo@qq.com

expansive soils was explained based on the adsorptive bound water tests at different temperatures (5~45 °C). With the increase of temperature, the amount of bound water decreases, and the thickness of the water film becomes thinner. The change of soil microstructure has caused two results: ① The suction between the soil particles weakens and the repulsive force increases during the process of soil water absorption and expansion. Macroscopically, it is an increase of soil swelling; ② For the loss of water shrinkage, the decrease of the water film thickness makes the reduction of the distance between soil particles and promotes the transformation of the soil particle framework from a loose state to a compact state, the shrinkage increase. After reaching a certain temperature, the water evaporation time is shorter, and the soil-water interaction is intensified. The soil skeleton have no sufficient time to transform into a compact state, which is the main reason for the decrease in shrinkage deformation.

**Keywords:** expansive soil; swell-shrinking properties; temperature effect; bound water; micro-mechanism

## 引 言

膨胀土作为典型的“问题土”,广泛分布于我国多个省市,因其含有蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物,具有强烈的吸水膨胀软化和失水收缩开裂的显著特征,对土体的工程性质变化具有显著影响。在湿热交替环境下,膨胀土反复湿胀干缩的变形特性尤为显著,导致土体的力学性能严重劣化,极易造成基坑隆起,路面翻浆开裂,边坡失稳等重大工程灾害<sup>[1]</sup>。因此,开展膨胀土胀缩特性的研究对膨胀土地区工程实践和灾害防治具有重要指导意义。

膨胀土胀缩特性的研究一直以来受到工程界和学术界的广泛关注。有学者指出膨胀土吸水膨胀的本质是黏土矿物颗粒的吸附作用<sup>[2]</sup>,而收缩开裂则是土中水分蒸发的结果<sup>[3]</sup>。邹维列等<sup>[4]</sup>、刘岩等<sup>[5]</sup>研究了含水率、干密度、上覆荷载等因素对土体膨胀变形的影响;D. J. Miller<sup>[6]</sup>、汪贤恩等<sup>[7]</sup>、王东伟等<sup>[8]</sup>对膨胀土收缩特性及影响因素进行了研究;上述研究成果主要集中于常温下膨胀土膨胀(或收缩)特性单方面的研究,同时考虑其胀缩特性的研究较少,而对于温度作用下膨胀土胀缩特性及微观机理方面的研究更是鲜见报道。

温度场作为非饱和土的一个基本物理场,对黏性土物理-力学-水理性质有显著影响<sup>[9-10]</sup>。近年来,随着国家战略布局的整体推进,核废料处置库、垃圾填埋场、能源地下结构应用等重点工程建设中面

临的“热”问题日益突出。在温度作用下土体的胀缩特性发生显著改变,进而引发一系列工程灾变。如在地下处置库中核物质的衰变放热会导致缓冲层土体产生胀缩变形破坏,甚至产生开裂现象,从而严重影响工程的正常运营<sup>[11]</sup>;膨胀土路基和边坡土体在炎热干燥环境下易发生收缩开裂,导致土体整体强度大幅衰减<sup>[12]</sup>。在上述岩土工程实践建设和安全运行过程中,都需要掌握和了解温度对土体胀缩特性的影响规律及其引起的灾害效应。

鉴于此,本文以南宁膨胀土为研究对象,开展不同温度(5~45 °C)作用下膨胀土试样的膨胀和收缩试验,系统探究不同初始状态(初始含水率 $\omega_0$ 和干密度 $\rho_d$ )下温度对膨胀土胀缩特性的影响规律,同时基于不同温度下的吸附结合水试验,从土-水作用角度阐释膨胀土胀缩特性温度效应产生的微观机理,为解决膨胀土地区由温度作用引起的工程灾变问题提供理论依据和技术指导。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用土料,取自广西南宁市水牛所试验观测场地附近,取土深度2.5 m左右,存在灰白色、灰色-褐色的中-厚层泥岩和泥岩夹粉砂岩的互层,液限较高、黏性较强,属于典型的南宁膨胀土,通过室内土工试验测得上述土样的基本物理性质指标和矿物成分见表1。

表1 膨胀土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of expansive soils

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	比重 $G_s$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性 指数 $I_p$	缩限 $\omega_s/\%$	自由 膨胀率 $\delta_{ei}/\%$	$<2\ \mu\text{m}$ 黏粒 含量/ $\%$	矿物成分及相对含量/ $\%$			
									蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石
45.3	1.76	2.76	65.96	31.43	34.53	21.09	68.9	64.78	27.5	41.5	17.5	13.5

## 1.2 胀缩变形试验

### (1) 试样制备及养护

胀缩变形试验的试样制备和养护过程如下:

①土样准备:将上述所取膨胀土样风干碾碎,过2 mm筛,取筛下土样放入105℃烘箱内烘至恒重备用;分别配置4种不同初始含水率( $\omega_0=21\%$ 、24%、27%、30%)的湿土料,为保证土样含水率分布均匀,密封静置焖土48 h。

②试样制备:用静压法将4种含水率的土样分别压制3种不同干密度( $\rho_d=1.4$ 、1.5、1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ )的环刀试样,试样尺寸为61.8×20 mm(直径×高),每组试验共制备24个试样(膨胀试验和收缩试验各12个),总计4组试验96个试样。

③恒温养护:将上述制备好的试样用保鲜膜密封后分组放置于保湿缸内,在4个不同温度( $T=5$ 、25、35、45℃)条件下恒温养护48 h;整个养护和试验过程均在步入式恒温恒湿实验室内进行,该实验室的控温范围为-40~120℃,温度分辨率为0.1℃,控温精度为±0.5℃。

### (2) 膨胀变形试验

文献[4]中指出,膨胀土边坡土体在水分浸入或浸水饱和状态下常发生浅层失稳,这种情况下浅层土体受侧限压缩约束且上覆压力较小;而室内试验的无荷载膨胀率就是在受侧限约束且无上覆压力条件下测得,与浅表层边坡失稳的约束条件较接近,故本文采用无荷载膨胀率试验分析不同温度下膨胀土的膨胀特性。

无荷载膨胀率试验采用WZ-1型膨胀仪,试验过程如图1(a)所示。以环境温度 $T=25\text{℃}$ (室温)为例,说明具体的试验步骤:①试样养护完成后,首先用游标卡尺测量试样的初始高度 $h_0$ ,然后将试样放入膨胀仪,安装好百分表并记下初始读数 $h_i$ ;②试验时向容器内自下而上注入蒸馏水,并保持水面超过试样顶面5 mm,试验开始后每隔一段时间(2、5、10、20、30、60、120、180、360、540、720、1 140、2 880、4 320、5 760 min)读一次数,待前后两次读数误差不

超过0.01 mm时,视为该温度下膨胀稳定,结束试验;在其他温度( $T=5$ 、35、45℃)下重复上述试验过程。

### (3) 收缩变形试验

同样的,收缩试验过程也以 $T=25\text{℃}$ (室温)为例进行说明:①试样养护完成后,首先用游标卡尺测量试样的初始高度 $h_0$ 和直径 $d_0$ ,然后将试样放置在收缩仪的多孔板上,安装好百分表并记下初始读数,称量整套装置的质量,精确至0.01g;②试验过程中每隔一定时间(试验开始1 h内每30 min读一次数,1~24 h内每120 min读一次数,24 h后每4 h读一次数)测记百分表读数并称重整套装置质量,直至前后两次百分表读数不超过0.01 mm时,视为该温度下土样收缩稳定;③试验结束后,称量整套试验装置质量,将试样放入105℃烘箱内烘至恒重,称烘干试样质量,并用游标卡尺量取烘干试样的高度和直径;在其他温度( $T=5$ 、35、45℃)下重复上述试验过程(图1(b))。



(a) 膨胀变形试验 (b) 收缩变形试验

图1 胀缩变形试验

Fig.1 Swell-shrinking deformation tests

### (4) 胀缩指标计算

本文试验以无荷载膨胀率(简称为膨胀率)和收缩率(线缩率和体缩率)两个胀缩指标来衡量膨胀土的胀缩变形特性。试样无荷载膨胀率、线缩率、体缩率分别按《土工试验方法标准》<sup>[13]</sup>的公式(1)~(3)进行计算。

$$\delta_{ei} = \frac{h_i - h_0}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\delta_{ei}$  为试样某时刻的膨胀率;  $h_i, h_t, h_0$  分别为试验过程中某时刻百分表读数、初始读数、试样初始高度(mm)。

$$\delta_{si} = \frac{H_i - H_0}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $\delta_{si}$  为试样某时刻的线缩率;  $H_i, H_0, h_0$  分别为试验过程中某时刻百分表读数、初始读数、试样初始高度(mm)。

$$\delta_{sv} = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $\delta_{sv}$  为试样体缩率;  $V_0, V_d$  分别为试样初始体积和收缩后体积( $\text{cm}^3$ )。

### 1.3 吸附结合水试验

结合水是控制黏土液塑限、水化膨胀、收缩、强度和变形及孔隙结构、微表面结构的重要因素。膨胀土中黏粒含量丰富, 土中水分含量较高且其结合方式较复杂, 因此, 结合水的存在对膨胀土所表现出来的物理力学性质具有强烈影响<sup>[9-10]</sup>。为揭示膨胀土胀缩特性温度效应的微观机理, 本文采用容量瓶法对不同温度下膨胀土吸附结合水含量进行测定(图2), 尝试从土-水作用角度阐释其胀缩特性温度效应产生的微观机理。

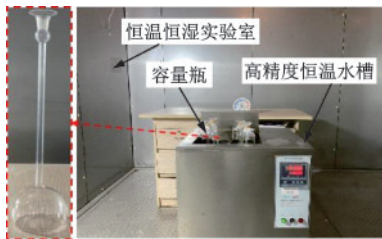


图2 结合水测定试验

Fig.2 Bound water determining test

该方法的原理是烘干土浸水后黏土颗粒高度分散并充分吸附水分, 液相自由水转变为半固相吸附结合水, 其密度增大而体积减小, 从而引起了水的体积变化<sup>[14]</sup>。考虑到容量瓶法存在精度较低、误差较大的不足, 课题组提出了一种科学合理的校正容量瓶测定结合水的方法<sup>[15]</sup>。按照文献[15]中校正容量瓶法测定结合水的试验过程, 测定不同温度(5~45 °C)下膨胀土结合水含量, 不同温度下设置两组平行试验进行测定。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 温度对膨胀特性的影响

#### 2.1.1 膨胀时程曲线

图3为初始含水率 $\omega_0=21\%$ 、干密度 $\rho_d=1.5 \text{ g/cm}^3$ 的试样在不同温度(5~45 °C)下的膨胀率时程曲线。

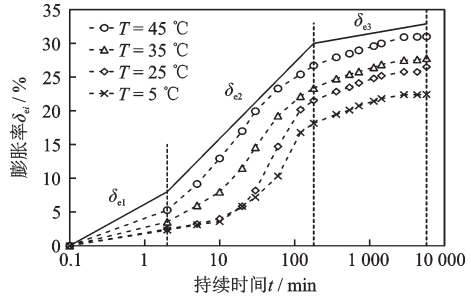


图3 不同温度下的膨胀率时程曲线

Fig.3 Time history curves of expansion rates at different temperatures

如图3所示:(1)不同温度下膨胀率时程曲线形态接近, 但随温度升高曲线不断抬升, 最终膨胀率 $\delta_{ei}$ 逐渐增大。(2)不同温度下膨胀率随时间的变化曲线均符合李志清等<sup>[16]</sup>提出的“S”型曲线的特征, 按照周葆春等<sup>[17]</sup>给出的膨胀率时程界限划分方法, 不同温度下试样膨胀变形也可划分3个阶段, 即初始膨胀段( $\delta_{e1}$ ): 该阶段为浸水膨胀初期, 膨胀速率较为缓慢, 膨胀变形较小, 曲线分布接近, 表明温度对此阶段的膨胀率影响不大; 加速膨胀段( $\delta_{e2}$ ): 随着膨胀土试样不断吸水, 土中孔隙逐渐被水填充, 黏土矿物颗粒开始吸水, 膨胀率急剧增大, 此阶段的膨胀率占最终膨胀率的80%以上, 这一阶段曲线斜率和分布间隔较大, 表明温度对此阶段膨胀速率和膨胀率的影响较大; 缓慢膨胀段( $\delta_{e3}$ ): 膨胀土试样吸水饱和, 膨胀率持续缓慢增长并最终趋于稳定。

#### 2.1.2 吸水量

图4为不同初始含水率( $\rho_d$ 相同)和干密度( $\omega_0$ 相同)下试样吸水量 $\omega_g$ 随温度 $T$ 的变化曲线。

吸水量在一定程度上反映了土体吸水膨胀的能力<sup>[18]</sup>, 不同初始状态的土样最终的吸水量也有所不同。膨胀变形试验中试样吸水量 $\omega_g$ , 即为试样吸水膨胀稳定后的质量与试样初始质量的差值。由

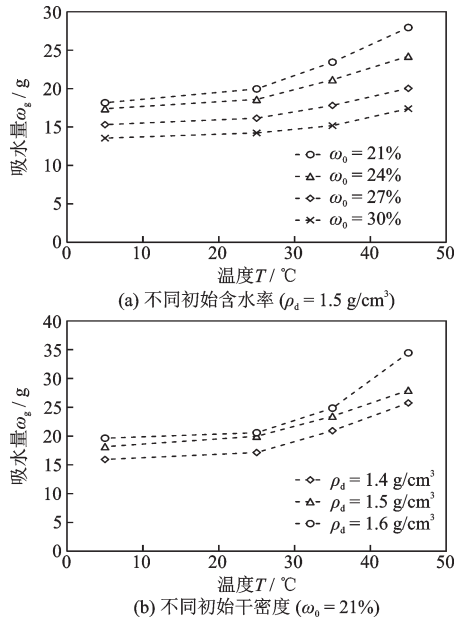


图4 吸水量随温度的变化曲线

Fig.4 Variation curves of water absorption with temperature

图4可知,不同初始状态下,试样吸水量 $\omega_g$ 随温度 $T$ 的升高而增大。土体吸水能力与黏土矿物本身密切相关,温度则仅起到一定的促进作用。相关研究表明<sup>[10]</sup>:升温使得黏土颗粒表面活性增加,吸水能力增强,最终导致膨胀土试样吸水量 $\omega_g$ 随温度 $T$ 的升高而增大。当温度不变时,相同干密度的试样,吸水量 $\omega_g$ 随初始含水率 $\omega_0$ 的增大而减小(图4(a)),这是因为低含水率的试样初始基质势较高,最终的吸水量较大;而相同初始含水率下,干密度越大的试样吸水量越多(图4(b)),可以解释为:干密度大的试样,其单位体积亲水性黏土矿物的含量越多,吸水性越强,最终吸水量越多。

### 2.1.3 最终膨胀率

图5(a)和图5(b)分别为不同初始含水率( $\rho_d$ 相同)和干密度( $\omega_0$ 相同)下试样最终膨胀率 $\delta_{ep}$ 随温度 $T$ 的变化曲线。

如图5可知,不同初始状态下,温度对膨胀土的最终膨胀率影响显著,最终膨胀率 $\delta_{ep}$ 随温度 $T$ 的增大而增大,呈正相关关系,并且随着温度的增大,膨胀率增大效果越明显。

由图5还可看出,同一温度下,相同干密度的试样,最终膨胀率 $\delta_{ep}$ 随初始含水率 $\omega_0$ 增大而减小,相同初始含水率的试样,随干密度 $\rho_d$ 递增大而增大。结合上述试验结果可知,吸水量和膨胀率随温度的变化规律一致,这表明土样膨胀率的变化与吸水量

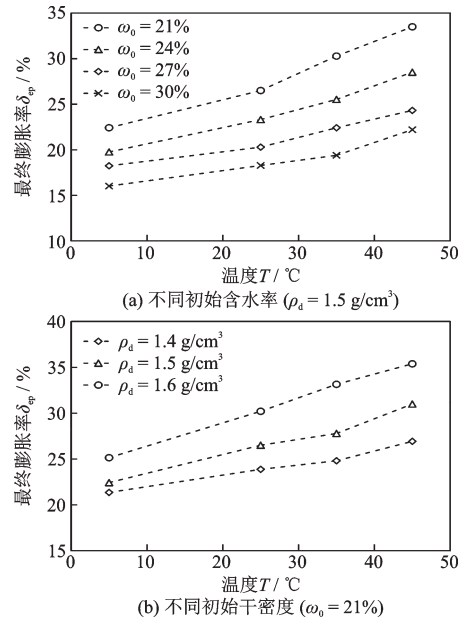


图5 最终膨胀率随温度的变化曲线

Fig.5 Variation curves of final swelling ratios with temperatures

密切相关,相同条件下试样吸水量越大,膨胀率越大。初始含水率越低,因为其吸水量较大,导致最终膨胀率也越大(图5(a))。同时,低初始含水率的试样,其孔隙中填充的自由水较少,大部分孔隙都未被水填充,这为浸入水分的储存和黏土颗粒的吸水膨胀提供了更多空间,土体在吸水膨胀过程中吸水量更大、膨胀变形也更大。而相同条件下,干密度大的试样,最终膨胀率越大(图5(b)),如上文所述,干密度越大试样吸水性越强,吸水膨胀性越大,表现出膨胀率也越大,此外,由于试样在膨胀过程中竖向没有限制,随着水分的浸入整个试样的体积不断增大,孔隙体积也相应增大,相比于干密度小的试样更有利于浸入水分的储存和黏土颗粒的吸水膨胀,表现为膨胀变形更大;因此,试样最终膨胀率随干密度的增大而增大。

## 2.2 温度对收缩特性的影响

### 2.2.1 收缩曲线

如图6可知,不同温度下膨胀土的收缩曲线整体形态相似,均符合谈云志提出的“典型收缩曲线”的特征<sup>[19]</sup>,即随着收缩过程中试样含水率的降低,收缩曲线表现出先快速收缩再减速收缩最后达到收缩稳定的规律,可以将试样收缩过程分3个阶段:快速收缩变形阶段( $\delta_{s1}$ )、减速收缩变形阶段( $\delta_{s2}$ )、稳定收缩变形阶段( $\delta_{s3}$ ),各个阶段收缩变形量明显不

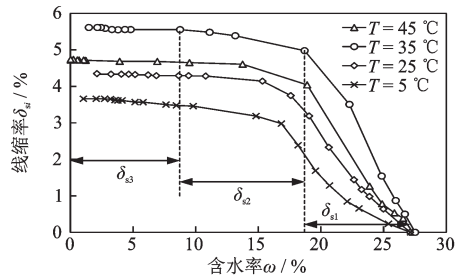


图6 收缩曲线

Fig.6 Shrinkage curves of expansive soil samples

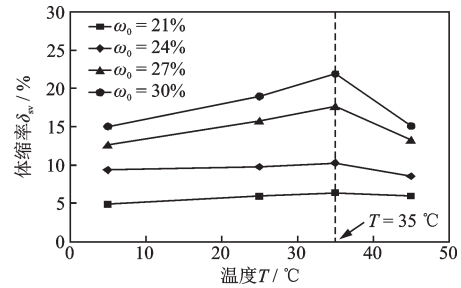
同,总体表现为: $\delta_{s1}$ 阶段( $>85\%$ ) $>\delta_{s2}$ 阶段( $>10\%$ ) $>\delta_{s3}$ 阶段( $<5\%$ )

如图6所示,不同温度下试样收缩稳定后的线缩率(稳定线缩率 $\delta_{sl}$ )均有所不同,具体表现为:当 $T$ 由 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试样稳定线缩率 $\delta_{sl}$ 随温度升高而显著增大,但 $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试样 $\delta_{sl}$ 却有所减小(与 $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比);这说明温度作用未改变收缩曲线的形态,但影响试样最终的收缩变形量, $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是一个分界点,在此之前, $\delta_{sl}$ 随温度增加而递增,温度超过该点后, $\delta_{sl}$ 随温度增加而递减。

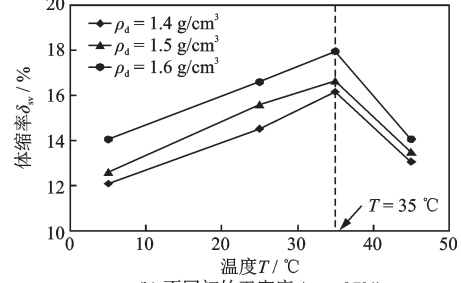
### 2.2.2 体缩率

图7为不同初始含水率( $\rho_d$ 相同)和初始干密度( $\omega_0$ 相同)下试样体缩率 $\delta_{sv}$ 随温度 $T$ 的变化曲线。由图7可知,不同初始状态下,膨胀土体缩率 $\delta_{sv}$ 随温度升高均呈现先增大后减小的变化规律,体缩率峰值均对应一个“临界温度 $T_c=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”。当 $T<T_c$ 时,体缩率随着温度升高呈线性增长趋势;具体分析,不同含水率下 $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试样的体缩率分别为 $T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的1.1~1.5倍,不同干密度下 $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试样的体缩率分别是 $T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的1.28~1.33倍。但 $T>T_c$ 时,体缩率均出现了不同程度的降低。由此可知,温度对膨胀土的收缩特性具有显著影响。

由图7(a)可知,当温度相同时,试样稳定体缩率 $\delta_{sv}$ 随初始含水率 $\omega_0$ 递增而增大,呈正相关关系。这一试验现象可以这样解释:土体初始含水率越低,初始基质吸力越高,这时土颗粒在高吸力的作用下排列紧密,颗粒间距较小,在发生收缩变形前,土体内部已经处于较密实的状态,可供收缩的空间有限,宏观表现为体缩率较小;而较高含水率的试样孔隙中填充的自由水更多,土体在失水收缩过程中,孔隙中自由水的迁出量更大,微孔隙也越多,可供土体收缩的空间更大,同时,高含水率的土样,土颗粒间吸附水膜较厚,颗粒间距较大,颗粒间的作用力较弱,失水收缩时土颗粒重新排列克服的阻力也就越小,从而表现出更大的收缩变形。



(a) 不同初始含水率( $\rho_d = 1.5\text{ g/cm}^3$ )



(b) 不同初始干密度( $\omega_0 = 27\%$ )

图7 体缩率随温度的变化曲线

Fig.7 Variation curves of volumetric shrinkage ratios with temperatures

从图7(b)可看出:当温度相同时,干密度越大的试样体缩率也越大;这是因为:干密度较大的试样中单位体积亲水性黏土矿物的含量较多,相同条件下,吸附水含量更多,失水收缩过程中,水分蒸发量更大,微孔隙增多,可供收缩的空间增大,体缩率也就越大。

### 2.3 温度对吸附结合水含量的影响

按照文献[15]测得不同温度下膨胀土的吸附结合水含量如图8所示。由图8可知,随着温度 $T$ 升高,膨胀土试样吸附结合水含量 $\omega_s$ 呈现出递减的变化趋势,近似呈线性负相关关系。

基于黏性土的双电层理论<sup>[9-10]</sup>,黏土中结合水按其性质及形成机理可分为两大类:①由固定层组成的强结合水;②由扩散层组成的弱结合水(包括次

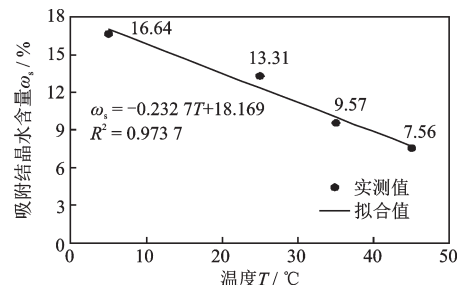


图8 膨胀土吸附结合水随温度的变化曲线

Fig.8 Variation curves of adsorptive bound water contents with temperatures

定向吸附水和渗透结合水)(图9);温度的升高引起结合水形态发生变迁,水从一种形式转变为另一种形式。在本文试验温度范围内(5~45℃),强结合水不受影响,温度主要影响弱结合水和自由水。从微观角度解释:升温引起黏土“表面离子活性”增加、水分子热运动加剧,使得部分次定向吸附结合水和渗透结合水游离出扩散层(图9(b)),次定向吸附结合水和渗透结合水(弱结合水)含量减小,最终导致结合水总量降低,在微观结构上可视为水膜厚度的减小。因此,随着温度的升高,结合水含量表现出下降的趋势。

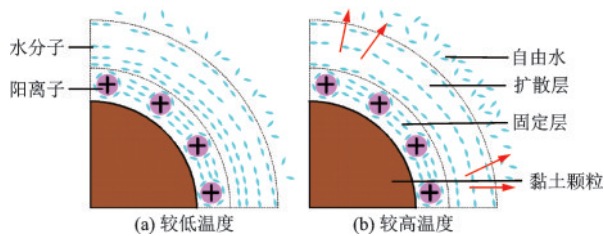


图9 不同温度下吸附结合水微观示意<sup>[10]</sup>

Fig.9 Microscopic diagram of bound water adsorption process<sup>[10]</sup>

### 3 温度对膨胀土胀缩特性的影响机理

膨胀土的胀缩机理极为复杂,土体的胀缩变形是土中各种微观作用力综合影响的结果<sup>[10]</sup>。对于膨胀土的浸水膨胀而言,由于范德华吸引力和粒间吸力的存在使得土颗粒有相互靠近的趋势,而土颗粒相互靠近时,黏土颗粒表面的高浓度水化阳离子可产生斥力,使颗粒分散,如上所述,土中各种微观力的作用使得双电层系统中存在吸引能(吸力)和排斥净势能(斥力),随着水分的浸入,高浓度离子向扩散层渗透,离子浓度降低,排斥净势能增加,土体将发生膨胀变形;而膨胀土的收缩则主要是由于孔隙水的蒸发和结合水的变迁,使得水膜变薄,颗粒间距减小,体积发生收缩所致。

由上述试验结果分析可知,膨胀土胀缩特性的温度效应显著,膨胀性和收缩性随温度的变化呈现出不同的变化规律。膨胀土膨胀率随温度升高而增大,收缩率随温度的升高则呈现出先增大后减小的变化规律,存在临界温度“ $T_c=35^\circ\text{C}$ ”。从微观角度分析,这种温度效应产生的根本原因是升温引起土中结合水量和水膜厚度发生改变,土中各种微观作

用力和土的微结构由此发生变化,最终对宏观水-力学性质产生显著影响。上述的结合水试验表明:膨胀土吸附结合水量随温度升高呈近似线性减小的变化规律,结合水含量减小,表明部分弱结合水脱附,扩散层中的部分水分子游离出扩散层,使得水膜变薄,从而引起膨胀土胀缩特性发生显著改变:

(1)膨胀性方面,温度升高,水膜变薄,颗粒间距减小,土颗粒间的吸力减弱而斥力增加,宏观上表现为膨胀土整体膨胀性的增加。此外,升温使得孔隙水和土颗粒发生一定热膨胀也有益于膨胀性的增加;

(2)收缩性方面,由于升温使得水膜变薄,颗粒间距变小,土颗粒排列更紧密,宏观表现为最终收缩变形更大;同时,因为温度越高,水分蒸发越彻底,孔隙中残余的水分也越少<sup>[12]</sup>,颗粒间距进一步缩小,最终导致收缩变形增大,而达到一定温度后,蒸发时间缩短,土-水作用加剧使得土体骨架没有充足的时间向紧密状态转化,是造成收缩性减小的主要原因。

## 4 结论

(1)膨胀土胀缩特性的温度效应显著,膨胀率随温度升高而增大,温度越高增大效果越明显;收缩率随温度的升高则呈现出先增大后减小的变化规律,存在临界温度“ $T_c=35^\circ\text{C}$ ”。

(2)温度升高,部分次定向吸附结合水和渗透结合水游离出扩散层,次定向吸附结合水和渗透结合水(弱结合水)含量减小,最终导致结合水总量降低,在微观结构上可视为水膜厚度的减小。

(3)膨胀土胀缩特性温度效应的本质在于土中吸附结合水含量的变化。升温导致结合水量减小,水膜厚度变薄,这种微观结构的变化使得土体在胀缩变形过程中产生显著的温度效应。

(4)膨胀土胀缩特性温度效应显著,胀缩性的改变必然对其他工程性质产生强烈影响,从而引发一系列工程灾变,因此,温度对其渗透性、强度等水-力学性质的影响至关重要,课题组将对此进行下一步研究。

### 参考文献:

- [1] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15.  
Bao C G. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1-15. (in Chinese)
- [2] 郭永春, 陈伟乐, 赵海涛. 膨胀土吸水过程的试验研

- 究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 108-112.
- Guo Y C, Chen W L, Zhao H T. Experimental research of water-uptake process of the expansive soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 108-112. (in Chinese)
- [3] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西原状红黏土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568-572.
- Zhao Y W, Kong L W, Guo A G, et al. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 568-572. (in Chinese)
- [4] 邹维列, 陈轮, 谢鹏, 等. 重塑膨胀土非线性强度特性及一维固结浸水膨胀应力-应变关系[J]. 岩土力学, 2012, 33(增2): 59-64.
- Zou W L, Chen L, Xie P, et al. Nonlinear strength property of remolded expansive soil and its stress-strain relationship for soaking after one-dimensional consolidation[J]. Rock & Soil Mechanics, 2012, 33(Sup2): 59-64. (in Chinese)
- [5] 刘岩, 吴天前, 邹维列. 强膨胀土自然膨胀特性的试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 29-35.
- Liu Y, Wu T Q, Zou W L. Experimental study on humidification deformation of expansive soil[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 29-35. (in Chinese)
- [6] Miller D J. Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 1997.
- [7] 汪贤恩, 谭晓慧, 辛志宇, 等. 膨胀土收缩性质的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增2): 107-114.
- Wang X E, Tan X H, Xin Z Y, et al. Experimental study on shrinkage properties of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup2): 107-114. (in Chinese)
- [8] 王东伟, 唐朝生, 李胜杰, 等. 膨胀土干缩变形特性试验研究[J]. 高校地质学报, 2019, 25(5): 756-765.
- Wang D W, Tang C S, Li S J, et al. Experimental study on volumetric shrinkage behavior of expansive soil [J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(5): 756-765. (in Chinese)
- [9] Mitchell J K, Soga K. Fundamentals of soil behavior (3rd Edition) [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [10] Л. И. 库里契茨基. 土中结合水译文集[M]. 李生林, 薄遵昭, 秦素娟, 等编译. 北京: 地质出版社, 1982.
- СВЯЗАННАЯ ВОДА В СИСТЕМАХ. Translation anthology of absorbed water in soils [M]. LI S L, Bo Z Z, Qin S J, et al. Beijing: Geological Publishing House, 1982. (in Chinese)
- [11] Lloret A, Villar M V. Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behaviour of heavily compacted “FEBEX” bentonite [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2007, 32(8): 701-715.
- [12] 唐朝生, 崔玉军, Tang A M, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2181-2187.
- Tang C S, Cui Y J, Tang A M, et al. Shrinkage and desiccation cracking process of expansive soil and its temperature dependent behavior[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2181-2187. (in Chinese)
- [13] 土工试验方法标准: GBT 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [14] 吴凤彩. 粘性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(6): 84-93.
- Wu F C. Some characteristics of adsorption-bonded water measurement and seepage of clay soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(6): 84-93. (in Chinese)
- [15] 云巍扬. 胀缩性土中结合水测试研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2019.
- Yun W Y. Test study on absorbed water in expansive and shrinkable soil [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 李志清, 李涛, 胡瑞林, 等. 蒙自重塑膨胀土膨胀变形特性与施工控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1855-1860.
- Li Z Q, Li T, Hu R L, et al. Expansion characteristics and construction control of remolded Mengzi expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1855-1860. (in Chinese)
- [17] 周葆春, 张彦钧, 汤致松, 等. 不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀—压缩特性[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1275-1283.
- Zhou B C, Zhang Y J, Tang Z S, et al. One-dimensional swelling-compression characteristics of Jingmen weak expansive soil under different compactnesses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1275-1283. (in Chinese)
- [18] 唐朝生, 施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376-1384.
- Tang C S, Shi B. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1376-1384. (in Chinese)
- [19] 谈云志, 喻波, 刘晓玲, 等. 压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 369-375.
- Tan Y Z, Yu B, Liu X L, et al. Pore size evolution of compacted laterite under desiccation shrinkage process effects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 369-375. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)