

DOI: 10.11779/CJGE2022S1021

胀缩性土收缩特性的温度效应试验

潘斌^{1,2}, 曾召田^{*1,3}, 莫红艳¹, 刘兆强¹, 崔哲旗¹

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050;
3. 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)

摘要: 胀缩性土中因含有较多亲水性黏土矿物, 失水收缩开裂现象明显, 对土体工程性质有显著影响。以广西地区两种典型的胀缩性土(桂林红黏土和南宁膨胀土)为研究对象, 在5~45℃温度下开展了土体收缩试验, 对比分析了温度对两种胀缩性土收缩特性的影响规律, 阐释了胀缩性土收缩特性温度效应的作用机理。结果表明: ①两种胀缩性土的收缩特性受温度影响显著, 试样收缩变形随温度的升高均先增大后减小, 存在“临界温度 $T_c=35^\circ\text{C}$ ”。②膨胀土比红黏土的收缩变形更大, 温度效应更显著。③温度对土体胀缩特性的影响, 其本质是土体微观结构的改变和土中水形态的变迁: 升温促进了土体骨架由松散向紧密状态转变, 宏观表现为收缩变形增大; 而达到一定温度后高温引起土颗粒和孔隙水热膨胀、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, 这是造成收缩变形减小的主要原因。
关键词: 胀缩性土; 收缩特性; 温度效应; 微观结构; 热膨胀

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S1-0115-06

作者简介: 潘斌(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事特殊土的工程性质及环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: 995421784@qq.com。

Temperature effects on shrinkage properties of swell-shrink soils

PAN Bin^{1,2}, ZENG Zhao-tian^{*1,3}, MO Hong-yan¹, LIU Zhao-qiang¹, CUI Zhe-qi¹

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

Abstract: The swell-shrink soils are prone to water loss, shrinkage and cracking because they contain more hydrophilic clay minerals, which have a significant impact on the engineering properties of soils. Taking two typical expandable soils (Guilin red clay and Nanning expansive soil) in Guangxi as the research object, the soil shrinkage tests are carried out at the temperature of $5^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$. The effects of temperature on the shrinkage characteristics of the two types of expandable soils are compared and analyzed, and the mechanism of temperature effects on the shrinkage characteristics of the expandable soils is explained. The results show that: (1) The shrinkage characteristics of the two kinds of swelling and shrinking soils are significantly affected by the temperature. The shrinkage deformation of the samples increases first and then decreases with the increase of the temperature. There is a critical temperature 35°C . (2) The shrinkage deformation of the expansive soil is larger than that of the red clay, and the temperature effects are more significant. (3) The essence of the effects of temperature on the soil expansion and shrinkage are the change of soil microstructure and the change of water form in the soil. After reaching a certain temperature, the thermal expansion of soil particles and pore water caused by high temperature and the intensification of soil-water interaction make the soil skeleton have no sufficient time to transform into a compact state, which is the main reason for the decrease of shrinkage deformation.

Key words: swell-shrink soil; shrinkage property; temperature effect; microstructure; thermal expansion

0 引言

胀缩性土是指主要黏粒成分为亲水性矿物的黏性土, 与水相互作用能吸附大量的结合水, 土-水作用效果显著。在炎热干燥环境下, 胀缩性土极易失水收缩产生裂纹, 裂隙导致土体的力学性能严重劣化^[1], 从

而引发建筑物变形破坏、边坡失稳、路面开裂与隆起等一系列的工程灾害^[2-3]。因此, 开展土体收缩特性的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41962014; 42167020); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA138182)

收稿日期: 2022-09-27

*通信作者(E-mail: zengzhaotian@163.com)

表 1 胀缩性土的基本物理性质指标
Table 1 Basic physical properties of swell-shrink soils

土 样	含水率	密度	G_s	液限	塑限	塑性指数	缩限	自由膨胀率	<2 μm 黏粒 含量/%	矿物成分相对含量/%					
	$w/\%$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		$w_L/\%$	$w_P/\%$	I_P	$w_s/\%$	$\Delta_{ef}/\%$		蒙脱石	伊利石	高岭石	针铁矿	石英	其他
S1	27.5	1.98	2.74	51.6	33.5	18.1	25.4	25.0	45.1	—	12.0	30.7	8.1	34.7	14.5
S2	45.3	1.76	2.76	66.0	31.4	34.5	21.1	68.9	64.8	27.5	41.5	17.5	—	—	13.5

研究对胀缩性土地区的工程实践和灾害防治具有重要指导意义。

近年来黏性土收缩变形及裂隙的研究受到了学界的广泛关注，众多学者对此进行了大量研究，取得了较多的成果。谈云志等^[4]研究了红黏土失水收缩过程中孔隙的演化规律，揭示了土体收缩开裂的内在机理；黄丁俊等^[5]着重研究了干湿循环作用对土体胀缩特性的影响，得出红黏土的胀缩变形是不可逆的，干湿循环作用影响土体微观孔隙结构，导致其胀缩特性发生改变；王东伟等^[6]通过室内干燥试验，重点分析了初始含水率和干密度对干缩变形的影响。失水收缩是土体收缩开裂的诱因之一，其本质是土中含水率的变化。但在以往研究中，学者们仅仅关注含水率变化对土体干缩变形的影响，而忽略了温度这一引起土体含水率变化的重要环境因素。因此，土壤温度场引起的水分迁移往往得到的关注很少。目前普遍认为黏性土收缩开裂是土中水分蒸发的结果，而土中水分的蒸发过程则直接取决于环境温度的高低，因此，温度变化将引起土体收缩特性的改变。

综上所述，以往研究多集中于含水率、干密度、干湿循环条件等外在控制因素对土体收缩变形的影响，从温度角度考虑其收缩特性的研究较少，尤其是温度对胀缩性土收缩特性的影响规律及作用机理的研究鲜见报道。

为此，本文以广西地区 2 种典型的胀缩性土为研究对象，通过控制环境温度对不同初始含水率和干密度的土样进行一系列收缩变形试验，对比分析温度对 2 种胀缩性土收缩变形特性的影响规律，从温度角度解释失水收缩诱发土体开裂的内在机制。相关研究成果可为揭示胀缩性土收缩开裂的温度效应提供理论依据，同时为解决胀缩性土地区工程建设及地质灾害问题提供理论依据和技术指导。

1 试验材料和过程

1.1 试验材料

试验所用 2 种土料分别为桂林红黏土（S1）和南宁膨胀土（S2）。红黏土取自广西桂林市雁山区广西师范大学新校区内，取土深度约 2.5 m，属碳酸盐岩形成的典型残坡积胀缩性红黏土；膨胀土取自广西南

宁市水牛所试验观测场地附近，取土深度 2.5 m 左右，液限较高、黏性较强，具有灰白色、灰色—褐色的中—厚层泥岩和泥岩夹粉砂岩互层的特点，属于典型的南宁膨胀土；2 种胀缩性土基本物理性质指标和矿物成分见表 1。

1.2 试验过程

（1）土样准备：将上述 2 种胀缩性土料风干碾碎，过 2 mm 筛，取筛下土样放入 105℃烘箱内烘至恒重备用；分别配置初始含水率为 21.0%，24.0%，27.0%，30.0%的湿土料，为保证土样含水率分布均匀，密封焖土 48 h。

（2）试样制备：用静压法将上述 4 种含水率的土样分别压制成干密度为 1.40，1.50，1.60 g/cm³ 的环刀试样，试样尺寸为 61.8 mm×20 mm（直径×高），按照 4 种 w_0 、3 种 ρ_d 正交制样，每组试验共制备 24 个试样（S1 和 S2 各 12 个），共 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，在不同温度（ $T=5, 25, 35, 45^\circ\text{C}$ ）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。

（4）收缩试验：以 $T=25^\circ\text{C}$ 为例，说明具体试验步骤。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 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 0.01 g；②试验过程中每隔一定时间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。在不同温度下重复上述试验过程。

（5）数据处理：本试验以线缩率和体缩率两个收缩指标来衡量土体的收缩变形特性，线缩率和体缩率按下式进行计算：

试样某时刻的线缩率 δ_{si} 定义为

$$\delta_{si} = \frac{H_i - H_0}{h_0} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

式中， 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）。

试样体缩率 δ_{sv} 定义为

$$\delta_{sv} = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, V_0 , V_d 分别为试样初始体积和收缩后体积 (cm^3)。

2 试验结果及分析

限于篇幅, 本文仅以初始含水率 $w_0 = 27.0\%$ 和 $\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$ 两种初始状态的试样为例分析上述试验过程中 S1、S2 试样收缩特性的温度效应。

2.1 温度对胀缩性土收缩曲线的影响

图 1 为初始状态相同 ($w_0 = 27.0\%$ 、 $\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$) 的试样在不同温度条件 ($5 \sim 45^\circ\text{C}$) 下的收缩曲线。由图 1 可知, 不同温度下 S1、S2 的收缩曲线整体形态相似, 均符合“典型收缩曲线”的特征^[4], 但不同温度下试样收缩稳定后的线缩率 (稳定线缩率 δ_{sf}) 均有所不同, 具体表现为当 T 由 5°C 变化到 35°C 时, 试样稳定线缩率 δ_{sf} 随温度升高而显著增大, 但 $T = 45^\circ\text{C}$ 时, 试样 δ_{sf} 却有所减小 (与 $T = 35^\circ\text{C}$ 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, $T = 35^\circ\text{C}$ 是一个分界点, 在此之前, δ_{sf} 随温度增加而增大, 温度超过该点后, δ_{sf} 随温度增加而减小。

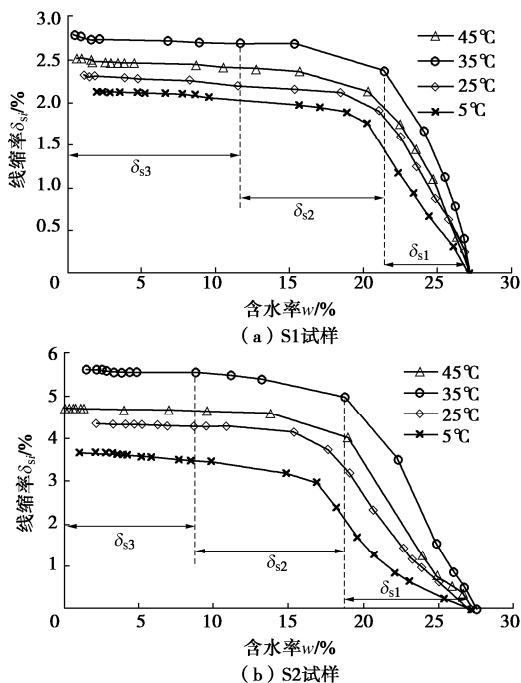


图 1 收缩曲线

Fig. 1 Shrinkage curves of samples

对比图 1 (a), (b) 可知, 不同温度下两种胀缩性土收缩特性的表现是不同的, 具体为不同温度下 S1 的收缩曲线分布间隔较小 (图 1 (a)), 差异较小, 而 S2 的收缩曲线间隔较大 (图 1 (b)), 差异明显增大,

这表明温度升高对膨胀土收缩特性带来的变化更大, 温度效应更显著。此外, 同一温度下 S2 收缩稳定后的线缩率均比 S1 大, 表明相同条件下的膨胀土收缩性大于胀缩性红黏土。

从图 1 的收缩曲线也可以看出: 随着收缩过程中试样含水率的降低, S1、S2 收缩曲线均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为 3 个阶段, 即快速收缩变形阶段 (δ_{s1})、减速收缩变形阶段 (δ_{s2})、稳定收缩变形阶段 (δ_{s3}), 各个阶段收缩变形量明显不同, 总体表现为: δ_{s1} 阶段 ($>85\%$) $> \delta_{s2}$ 阶段 ($>10\%$) $> \delta_{s3}$ 阶段 ($<5\%$), 这与文献[4, 5]中得出的收缩曲线变化规律相一致。

2.2 温度对胀缩性土稳定线缩率 δ_{sf} 的影响

为了更直观地分析温度对胀缩性土稳定线缩率 δ_{sf} 的影响, 分别将不同初始含水率 (ρ_d 相同) 和初始干密度 (w_0 相同) 状态下试样的稳定线缩率 δ_{sf} 随温度 T 的变化绘制成如图 2 所示。

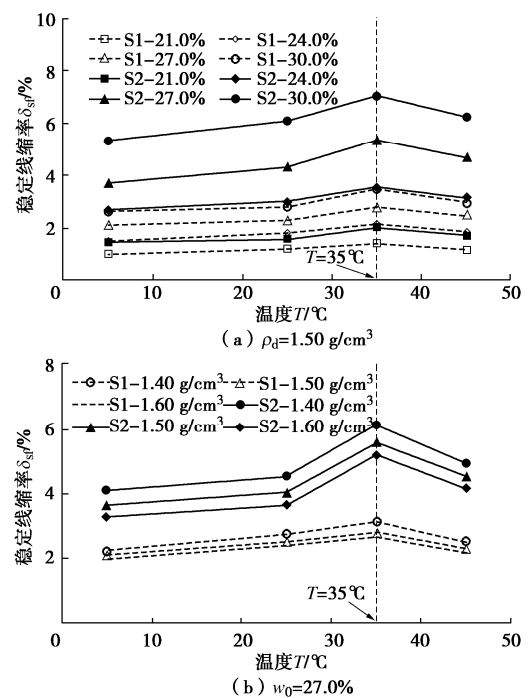


图 2 试样的 $\delta_{sf} - T$ 变化曲线

Fig. 2 $\delta_{sf} - T$ curves of samples

由图 2 可知, S1 和 S2 试样的稳定线缩率 δ_{sf} 均随温度 T 升高呈先增大后减小的变化规律, 具体表现如下: 当温度 $T < 35^\circ\text{C}$ 时, 随着温度升高, 试样稳定线缩率明显增大; 温度 T 由 5°C 升高到 25°C , 稳定线缩率增大得较为缓慢; 而温度 T 由 25°C 升高到 35°C 时, 稳定线缩率增大较快; 而当 $T > 35^\circ\text{C}$ 时, 稳定线缩率 δ_{sf} 均出现不同程度的下降 (相较于 $T = 35^\circ\text{C}$)。

由图 2 (a) 可看出, 当温度相同时, 试样稳定线

缩率随初始含水率增大而增大,呈正相关关系。这一现象可以从土体吸力和微观结构变化两方面进行解释:①土体吸力变化方面,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,宏观表现为线缩率较小;②土体微观结构变化方面,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,从而表现出更大的收缩变形。

由图2(b)可知,相同温度条件下干密度与试样稳定线缩率呈负相关关系,这是因为干密度较小的试样相对处于较松散的初始状态,颗粒间距较大,为土体轴向收缩提供了充足空间,随着干密度的增加,土体内部骨架逐渐密实,可供土体轴向收缩的空间减小,因此,稳定线缩率随干密度增大表现出减小的趋势。

此外,对比图2(a)和图2(b)可知,不同初始含水率下 $\delta_{sf}-T$ 曲线分布稀疏,差异较大,而不同干密度下 $\delta_{sf}-T$ 曲线较为密集,差异较小。这说明相较于干密度对试样稳定线缩率的影响,初始含水率对试样稳定线缩率的影响效果更显著。由图2也可发现相同条件下S2的 $\delta_{sf}-T$ 曲线总在S1之上,这进一步证明了膨胀土的收缩性大于胀缩性红黏土,与上节结论一致。相关研究表明:亲水性黏土矿物是决定土体胀缩性能的内在因素^[7]。上述2种胀缩性土收缩性的不同可以从两者矿物成分的差异进行解释。由表1可知,S1中亲水性黏土矿物主要以高岭石、伊利石和针铁矿为主,且以吸水性相对较弱的高岭石居多,而S2中则主要以吸水性较强的蒙脱石和伊利石为主,亲水性黏土矿物含量越多,其比表面积越大,吸附水含量越多,相同条件下失水收缩过程中孔隙水的迁出量更大,微孔隙增多,可供收缩的空间增大,表现为收缩变形更大。此外,由于红黏土中针铁矿的存在,使得红黏土中赋存游离氧化铁等胶结物质,这些胶结物质对其收缩变形起到了一定的抑制作用^[8],这是因为游离氧化物颗粒非常细小,表面活性高,极易与水作用形成凝胶状胶体,进而形成具有“水稳”特性的集聚体结构和团粒结构^[9],因此削弱和抑制了红黏土的收缩性能,故在相同条件下膨胀土的收缩变形更大。

2.3 温度对胀缩性土体缩率 δ_{sv} 的影响

图3为不同初始含水率(ρ_d 相同)和初始干密度(w_0 相同)下试样体缩率 δ_{sv} 随温度 T 的变化曲线。

由图3可知,不同初始状态下,胀缩性土体缩率 δ_{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 $T_c=35^\circ\text{C}$ ”,这与线缩率随温度变化的规律相一致。

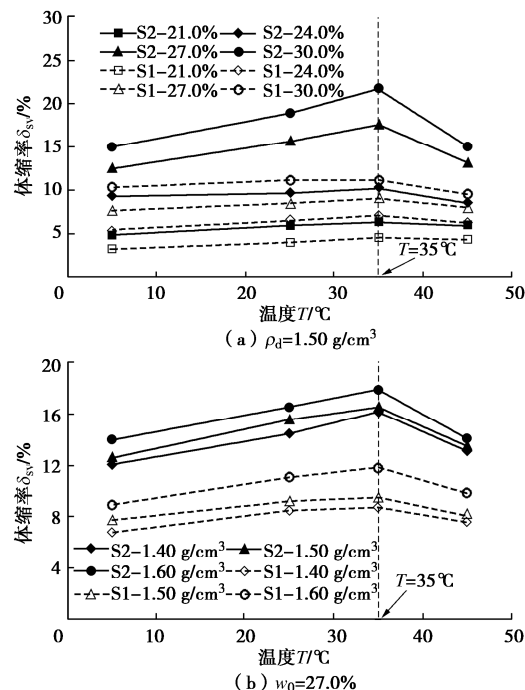


图3 试样的 $\delta_{sv}-T$ 变化曲线

Fig. 3 $\delta_{sv}-T$ curves of samples

从图3(b)还可看出:当温度相同时,干密度大的试样体缩率也越大,这与图2(b)中得出的干密度与稳定线缩率的变化规律相反。产生这一现象的主要原因是试样在收缩过程中存在各向异性^[10],收缩过程中试样的轴向收缩变形和径向收缩变形出现较大的差异,试样在收缩过程中发生了较大的径向收缩变形,最终导致整体收缩变形增大。上述试验现象可以这样解释:干密度较小时,土体内部相对松散,颗粒分布和孔隙分布也比较均匀,受各向异性影响较小,土样径向收缩较小,导致试样最终体缩率较小;而图3(a)中,当温度相同时,试样体缩率随初始含水率的增大而增大,这与图2(a)中试样线缩率随初始含水率的变化规律相一致。

由此可知,温度对胀缩性土的收缩特性具有显著影响。胀缩性土收缩特性产生上述温度效应的原因主要在于温度导致土体微观结构发生了改变:升温使得土颗粒间距减小,结合水膜变薄^[11],促进了土颗粒骨架由松散向紧密状态转变,宏观表现为土体收缩变形增大;而达到一定温度后高温引起了土颗粒和孔隙水热膨胀、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变^[1],因此试样的收缩变形开始减小。

3 胀缩性土收缩特性温度效应作用机理

土体在干燥、炎热环境中易发生失水收缩,宏观

表现为土体体积的减小, 其本质为土体内部微观结构的改变和各种微观作用力共同作用的结果^[4]。目前, 对于土体收缩机理的解释主要有两方面: ①有学者指出^[12-13], 随着土中水分的不断蒸发, 表层土颗粒间的弯液面曲率逐渐变大, 吸力增加, 使表层土体发生收缩变形; ②也有学者认为, 土体收缩变形是土中孔隙体积减小的结果^[4-5]。土体在干燥过程中, 随着自由水和部分薄膜水迁出导致孔隙体积不断减小, 孔隙收缩, 粒间作用力随之增大, 颗粒间距减小, 孔径减小, 宏观表现为土体体积变小。

温度是影响土体收缩变形的重要环境因素, 由上述试验结果可知 S1、S2 收缩特性的温度效应显著。在试验温度范围内线缩率和体缩率随温度升高均呈现先增大后减小的变化规律, 存在“临界温度 $T_c=35^\circ\text{C}$ ”。随着温度的增加 ($T < T_c$ 时), 一方面, 温度越高, 高温环境对应高吸力发展速率, 土体中吸力的增加会导致土颗粒排列更紧密 (如图 4 (a)), 土体收缩变形的空间更大, 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, 颗粒间距进一步缩小^[1], 最终导致收缩变形更大。此外, 相关研究表明^[11], 温度越高, 弱结合水脱附量越大, 水膜变薄, 土颗粒间距变小排列更紧密, 收缩空间更充足, 宏观表现为收缩变形更大。当温度 $T=T_c$ 时, 上述作用两方面作用达到最大, 土样收缩变形达到最大, 表现为线缩率和体缩率最大。随着温度的进一步升高 ($T > T_c$ 时), 线缩率和体缩率均出现了不同程度的下降, 说明高温在促进土体收缩发展的同时, 在达到一定温度后对试样的收缩变形产生了削弱和抑制作用, 尤其当温度较高时, 土中水分蒸发时间较短, 土-水作用相对更加剧烈, 土颗粒没有充足的时间进行重新排列以达到最密实的状态, 同时, 温度的增加导致土颗粒和孔隙水发生热膨胀^[1] (如图 4 (b)), 可供收缩的空间减小, 最终导致收缩变形有所减小。此外, 笔者在试验过程中发现 $T=45^\circ\text{C}$ 下收缩完成后的各试样表面均有一些微裂纹产生, 推测这些微裂纹的产生破坏了土体结构, 土体收缩特性因此也受到了一定影响。

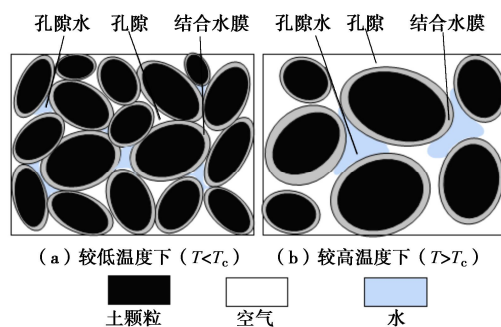


图 4 不同温度下收缩过程中土体微观结构变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of microstructural changes of soil during shrinkage at different temperatures

4 结 论

(1) 2 种胀缩性土收缩特性的温度效应显著。相同条件下膨胀土的线缩率和体缩率均大于红黏土, 且温度升高对膨胀土收缩特性带来的变化更大, 温度效应更显著。

(2) 2 种胀缩性土线缩率和体缩率随温度的升高均呈现出先增大后减小的变化规律, 存在“临界温度 $T_c=35^\circ\text{C}$ ”, $T > T_c$ 时, 线缩率和体缩率均出现了不同程度的降低。

(3) 温度对胀缩性土收缩特性的影响, 其本质在于土体微观结构的改变和土中水形态的变迁。升温促进土体骨架由松散变为紧密, 宏观表现为收缩变形增大; 而达到一定温度后高温引起了土颗粒和孔隙水热膨胀、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变, 表现为收缩变形减小。

参考文献:

- [1] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology, 2008, **101**(3/4): 204 - 217.
- [2] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(2): 263 - 277.
- [3] 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 606 - 609. (YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, CHEN Shou-yi. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(5): 606 - 609. (in Chinese))
- [4] 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 Yun-zhi, YU Bo, LIU Xiao-ling, 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))
- [5] 黄丁俊, 张添锋, 孙德安, 等. 干湿循环下压实红黏土胀缩特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, **42**(1): 79 - 86. (HUANG Ding-jun, ZHANG Tian-feng, SUN De-an, et al. Experimental study of swell-shrinking behaviors of compacted laterite after wetting-drying cycles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, **42**(1): 79 - 86. (in Chinese))

- [6] 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 Dong-wei, TANG Chao-sheng, LI Sheng-jie, et al. Experimental study on volumetric shrinkage behavior of expansive soil[J]. Geological Journal of China Universities, 2019, **25**(5): 756 - 765. (in Chinese))
- [7] 曾秋鸾. 论广西红黏土的胀缩性能[J]. 广西地质, 2000, **13**(3): 75 - 77. (ZENG Qiu-luan. Discussion on expansion and contraction property of red clay of Guangxi[J]. Guangxi Geology, 2000, **13**(3): 75 - 77. (in Chinese))
- [8] 孔令伟, 罗鸿禧. 游离氧化铁形态转化对红粘土工程性质的影响[J]. 岩土力学, 1993, **14**(4): 25 - 39. (KONG Lin-wei, LUO Hong-xi. Effect of the conversion in form of free iron oxide on the engineering property of the red clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, **14**(4): 25 - 39. (in Chinese))
- [9] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红黏土的基本特性与微观结构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 458 - 462. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Fundamental property and microstructure model of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 458 - 462. (in Chinese))
- [10] BRONSWIJK J J B. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils[J]. Journal of Hydrology, 1988, **97**(3/4): 199 - 212.
- [11] 邵玉娴, 施 斌, 刘 春, 等. 黏性土水理性质温度效应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1576 - 1582. (SHAO Yu-xian, SHI Bin, LIU Chun, et al. Temperature effect on hydro-physical properties of clayey soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1576 - 1582. (in Chinese))
- [12] CUISINIER O, LALOU L. Fabric evolution during hydromechanical loading of a compacted silt[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, **28**(6): 483 - 499.
- [13] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer[J]. Applied Clay Science, 2011, **52**(1/2): 69 - 77.

(编校: 明经平)