

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1766

结构性对膨胀土收缩特性影响的试验研究

刘观仕¹, 赵守道², 牟 智³, 莫燕坤³, 赵青松³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 长安大学 水利与环境学院 陕西 西安 710064; 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: 膨胀土的收缩性明显, 容易引发边坡与地基开裂, 但有关结构性对收缩特性影响的认识甚少。采用收缩自动试验装置, 在恒湿恒温条件下对原状膨胀土和重塑膨胀土开展了收缩对比试验和扫描电镜 (scanning electron microscope, 简称 SEM) 测试分析, 结果表明: 与原状土相比, 重塑土在土中水流动阶段的蒸发速率较小, 蒸汽扩散阶段收缩稳定速率较慢, 最终体积分缩应变量更大; 重塑土体积分缩-含水率关系曲线的线性段较长, 斜率较大, 直线段与稳定段之间的过渡不明显, 而原状土则反之; 重塑土和原状土的收缩特征曲线 (soil shrinkage characteristic curves, 简称 SSC) 在较高含水率段基本重合, 随着含水率下降, 重塑土的 SSC 下降更快, 对应的含水率范围更宽, 最后进入残余-零收缩阶段时, 孔隙比明显较小; Chertkov 收缩模型适用于原状膨胀土, 但不适用于重塑膨胀土。SEM 测试结果表明, 原状膨胀土较重塑膨胀土具有更强的原生结构性, 初始密度与湿度相同情况下, 两者颗粒排列、接触方式、胶结状态、孔隙大小与分布特征等微观结构上差异明显, 导致蒸发过程中重塑土的水分迁移速率较小、基质吸力较大, 是重塑土收缩更剧烈的内在原因。研究结果可为膨胀土边坡的坡面工程防护设计提供参考依据。

关 键 词: 膨胀土; 收缩; 微观结构; 孔隙; 扫描电镜

中图分类号: TU 475

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 07-1772-09

Experimental study of the influence of structure on the shrinkage characteristics of expansive soil

LIU Guan-shi¹, ZHAO Shou-dao², MOU Zhi³, MO Yan-kun³, ZHAO Qing-song³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Shrinkage is inherent to expansive soil, usually resulting in slope and foundation cracking, but there is little understanding about the influence of structure on shrinkage characteristics. Using an automatic shrinkage test device, comparison tests on shrinkage and scanning electron microscope (SEM) tests for undisturbed and remolded expansive soil were carried out under the same humidity and constant temperature. The results show that compared with undisturbed soil, remolded soil has smaller evaporation rate in the water flow stage, slower shrinkage stability rate in the vapor evaporation stage and larger volume shrinkage strain in the end. For the remolded soil, the linear section of the curve of volume shrinkage versus water content is longer, the slope is larger, and the transition between the linear section and the stable section not is obvious, while the undisturbed soil is on the contrary. The soil shrinkage characteristic curves (SSC) of remolded and undisturbed soil basically coincide in the section at higher water content; with the decrease of water content, the SSC of remolded soil decreases faster and the corresponding water content range is wider, and when entering the residual-zero shrinkage stage, the void ratio is obviously smaller. Chertkov shrinkage model is suitable for undisturbed expansive soil, but not for remolded one. SEM test results show that the undisturbed expansive soil has stronger primary structure than remolded expansive soil. Under the same initial density and humidity, there exists obvious differences in microstructure, such as particle arrangement, contact mode, cementation state, pore size and distribution characteristics between the undisturbed and remolded expansive soil, resulting in smaller water migration rate and larger matrix suction of remolded soil during evaporation, which is the internal reason why remolded soil shrinks more violently than undisturbed soil. The research results can provide a reference basis for the design of slope engineering protection for expansive soil slopes.

Keywords: expansive soil; shrinkage; microstructure; pore; SEM

收稿日期: 2021-10-21

修回日期: 2022-03-28

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2019YFC1509901); 国家自然科学基金 (No. 51279200)。

This work was supported by the National Key R & D Plan (2019YFC1509901) and the National Natural Science Foundation of China (51279200).

第一作者简介: 刘观仕, 男, 1974 年生, 博士, 副研究员, 主要从事膨胀土裂隙与变形等方面的研究。E-mail: gslu@whrsm.ac.cn。

1 引 言

土的干燥收缩对工程结构和地面建筑等产生不良影响,涉及边坡工程、水库大坝、机场、高速公路、房屋建筑、垃圾填埋场等诸多工程^[1]。而膨胀土主要由蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物组成,剧烈的失水收缩和吸水膨胀造成裂隙发育、强度降低等后果,引发的岩土工程灾害尤甚。膨胀土的裂隙发展与体积收缩过程在本质上密切相关^[1],影响大气影响深度,进而关系到膨胀土边坡综合防护体系的阻隔和保湿防渗设计^[2]。加深胀缩特性的认识对膨胀土防灾减灾非常重要,但目前有关膨胀特性的研究非常多,关于收缩特性的研究相对较少^[3]。

收缩特性的影响因素包括矿物成分、粒度组成、物理化学和微观结构特性等^[4]。Omid 等^[5]指出各黏土矿物中蒙脱石的收缩应变最大,为 16.4%;伊利石次之,为 11.7%。Albrecht 等^[6]发现土体收缩应变随塑性指数和黏粒含量的增大而增大;谭荣等^[4]指出,颗粒粒径小于 2 μm 的黏土矿物对胀缩特性的影响较大,而小于 1 μm 的胶粒对胀缩特性起决定性作用。对于初始干密度, Karumanchi 等^[7]确定干缩过程中线缩率与其基本无关; Birle 等^[8]发现其对压实土收缩的影响可以忽略,但初始含水率对收缩过程曲线影响很大;汪贤恩等^[3]则证实了初始干密度对收缩曲线的明显影响;唐朝生等^[9]对缓冲回填材料的研究也有类似结论。牟智^[10]的研究表明,初始含水率与含砂量对蒙脱土收缩特性的影响明显; Bronswijk^[11]、李志清等^[12]的研究则指出土体结构影响下收缩的各向异性。此外,环境作用会改变土的微观结构性,因而也间接影响土的收缩特性。Liu 等^[13]发现干湿循环对土体持水特性和收缩特性具有显著影响;赵贵涛等^[14]揭示冻融、干湿以及干湿—冻融循环作用会显著改变膨胀土的大孔隙系统,产生结构收缩段。

天然黏土是在长期地质条件下形成的,大都具有结构性^[15],而由于初始结构性的不同,土的力学性质也有不同^[16]。海域软黏土的结构性受到较早关注^[17],而膨胀土以其特定的结构区别于其他黏性土^[18],一些学者也开展了结构性对土体强度的相关研究^[19-20],但没有与重塑土进行对比分析,程展林等^[21]发现黏土岩重塑样的收缩性较原状样更大,并将之归因于原状样较强的结构性,但未作详细论述。公路工程建设中,对具有原始结构性的原状膨胀土进行收缩特性测试往往比较困难,能否将重塑土的试验结果直接应用于路堑边坡的坡面防护设计,是一个值得研究的问题。

此外,对于收缩特性的测试,常规收缩仪只能测量试样轴向变形,且需要人工读数,数据不连续; Li 等^[22]采用一种摄影测量技术测量土样体积,建立土样在干燥过程中的三维模型,误差为 0.43%; Amenuvor 等^[23]采用图像方法实现了对土样表面收缩的快速测量。采用自动、连续、高精度的收缩变形测试方法和装置是发展的必然。

本文以黑龙江佳木斯膨胀土为对象,采用研制的收缩自动试验装置,对具有相同初始干密度与含水率的原状与重塑样进行收缩对比试验,连续监测试样的轴向与径向(体积)收缩变形,同时通过扫描电镜测试了解其微观结构的差异,分析结构性对膨胀土收缩特性的影响与作用机制。研究工作对认知结构性如何影响膨胀土变形特性具有理论意义,也对膨胀土边坡的坡面工程防护设计具有参考价值。

2 试验方法

2.1 试样制备

试验所用土样来自黑龙江佳木斯,黄褐色,含少量铁锰结核,具有弱膨胀性,基本物理参数如表 1 所示^[24],矿物组成如表 2 所示。

表 1 土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of expansive soil

液限 /%	塑限 /%	塑性指数	土的相 对密度	天然含水率 /%	自由膨胀率 /%	孔隙比	颗粒组成/%		
							>0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm
43.8	27.6	16.2	2.67	27.6	55	0.753/0.684	5.8	54.2	40.0

表 2 土的矿物组成(单位: %)

Table 2 Mineral composition of expansive soil (unit: %)

石英	长石	伊蒙混层	蒙脱石	伊利石	高岭石
31.0	34.0	18.9	8.4	6.3	1.4

为对比研究原状重塑膨胀土的收缩特性,分别

进行 2 组原状和重塑膨胀土样的收缩平行试验,试验在相同温度与湿度环境下进行,控制重塑土的初始密度与含水率与对应的原状土相同。

原状土试样制备按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[25]的 3.1.4 条进行。制备的试

样直径为 61.78 mm, 高度为 20.14 mm, 2 个原状样 U1、U2 的初始干密度分别为 1.523、1.586 g/cm³, 初始含水率分别为 27.6%和 27.5%, 饱和度分别为 55.8%和 63.8%, 孔隙比分别为 0.753 和 0.684; 相应重塑样按照上述标准^[25]的 3.1.5 和 3.1.6 条进行, 采用专门设计的压样器进行制样, 控制重塑样 R1 和 R2 的密度与含水率分别与原状样 U1、U2 保持一致。制备好的土样如图 1 所示。

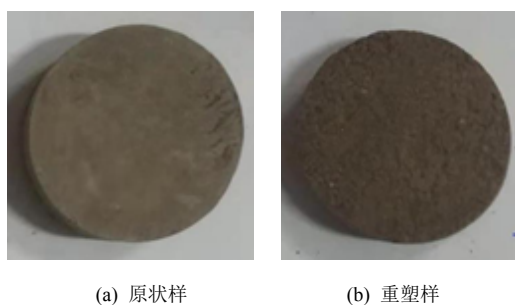


图 1 试验制备的土样

Fig.1 Undisturbed and remolded soil specimen

2.2 试验装置

本试验采用自制的收缩自动试验装置^[10], 如图 2(a)所示。试样的径向变形由间隔 90°对称安装在侧面中心线上的 4 个位移传感器进行测试, 轴向变形由竖向安装在试样中心位置的 1 个位移传感器进行测试, 精度均为 0.01 mm; 试样的重量变化采用梅特勒 MS6002TS 自动天平进行实时测试, 并根据质量变化换算成试样的含水率变化, 测试精度为 0.01 g。为了精确测得试样质量变化, 所有测试传感器及数据采集仪、电源和信号发射装置均放置于电子天平之上, 测试信号通过无线发送与接收装置进行采集, 并实时传送到互联网。与常规收缩仪相比, 本试验装置可实现对土样轴向与径向(体积)收缩的自动连续测试。

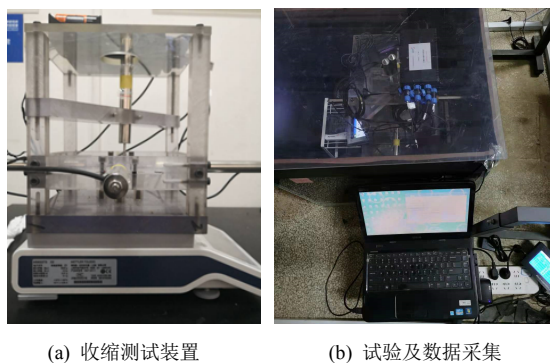


图 2 收缩自动试验装置

Fig.2 Automatic shrinkage test device

上述试验装置及保湿容器一起放置于一个顶部开口的玻璃箱中, 试验时盖好顶盖并用胶水做好密封, 如图 2(b)所示。

2.3 脱湿方法

为了减少环境干扰以获得准确的原状样与重塑样收缩特性差异, 收缩试验在恒温与恒湿条件下进行。

本试验选择的温度条件为 25 °C, 利用实验室空调进行调控。湿度控制采用常用的控制吸力的蒸气平衡技术^[26], 即利用饱和盐溶液获得稳定的空气相对湿度。本试验选择含有大量未溶解晶体的饱和溴化钠溶液, 配合湿度计监测, 证明湿度可以控制在约 58%的稳定水平。

需要说明的是, 试样脱湿过程中收缩均匀, 未发现肉眼可见的开裂现象, 始终保持圆柱形态, 原因在于试样放置于较光滑的带孔有机玻璃板上, 脱湿土体在收缩变形过程中受到的抑制约束作用非常小, 因此试样上、下部分的收缩变形差异很小, 由此产生的拉应力也很小, 不足以引发裂纹的产生^[27-28]。

3 试验结果与分析

3.1 含水率与时间关系

图 3 为原状样 U 与重塑样 R 的含水率变化时程曲线。可以发现, 恒温恒湿环境下, 4 个试样的脱湿过程基本相同, 即在开始阶段含水率快速下降, 处于干燥速率恒定的液体流动阶段^[29]或常速率阶段, 此阶段原状样的平均蒸发速率为 0.163 g/h, 大于重塑样的 0.137 g/h, 幅度约为 19%; 经过约 100 h 形成拐点后, 下降速率明显减小, 进入速率逐渐下降的蒸汽扩散阶段^[29]或减速率阶段, 原状样平均蒸发速率为 0.020 g/h, 略小于重塑样的 0.024 g/h; 历时约 150 h 时, 进入残余稳定阶段, 含水率变化趋稳, 后续基本保持稳定, 原状样的平均蒸发速率为 0.002 g/h, 略小于重塑样的 0.003 g/h。上述脱湿过程变化主要与水在膨胀土中的状态相关。在脱湿的前 100 h 内, 土中自由水不断蒸发而出, 其中前期以表层自由水为主, 因此, 失水速度较快、较稳定, 而后期以较深层自由水迁移到表面后再蒸发为主, 速度有所降低, 出现减缓趋势; 随着土样含水率的进一步降低, 土中自由水量不断减少, 进行到 150 h 左右时, 含水率 ω 降低到 7.3%~9.5%, 已经非常接近按照标准吸湿法方法^[30]测得的膨胀土结合水含水率 (7.8%, 强结合水与弱结合水之和), 此时土

中的自由水含量已经非常少了，而在试验控制的环境温度与湿度条件下，结合水很难再蒸发出去，脱湿自此进入稳定阶段，含水率时程曲线也开始走平。由于试样的厚度较标准吸湿含水率试验采用的薄片^[30]要大得多，且脱湿过程需要的时间更长^[31]，故本试验结束时的稳定含水率为 6.7%~9.2%，高于广西膨胀土的标准吸湿含水率^[30]。

由各试样含水率时程曲线可见，在稳定的外部温度与湿度环境下，相同尺寸与初始含水率及密度的原状土和重塑土试样在蒸发过程中的脱湿曲线形态基本相同，受结构性的影响不明显，但前者开始阶段的蒸发速率明显大于后者。

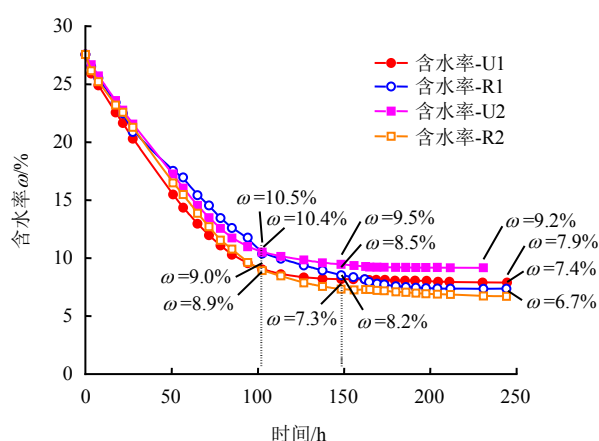


图3 试样含水率变化时程曲线

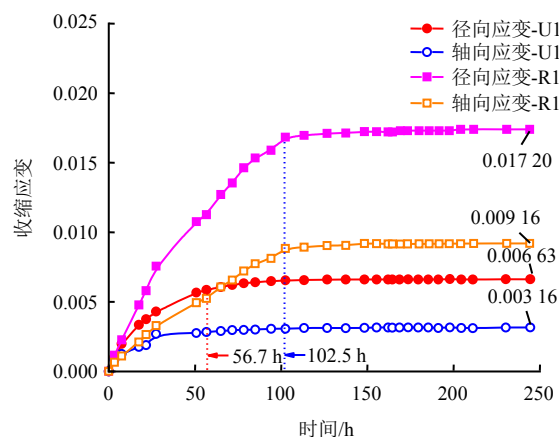
Fig.3 Variation of water content with time

3.2 线缩与体缩特征曲线

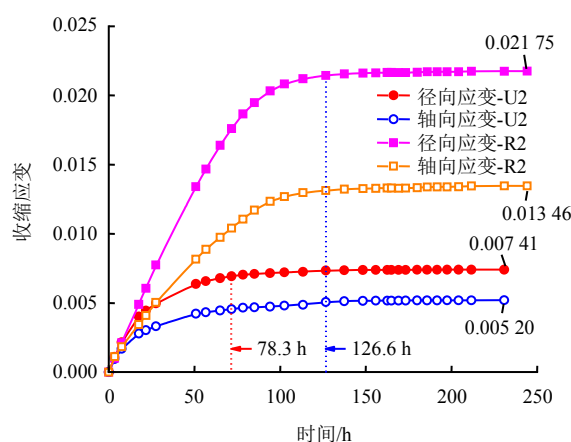
3.2.1 收缩时程曲线

图4为两组原状样(U1、U2)与重塑样(R1、R2)的径向与轴向收缩应变对比曲线。可以看出，重塑样和原状样的收缩过程和收缩应变特征差异明显，重塑样的收缩稳定较慢，稳定时间约为 103 h 和 127 h，而原状样收缩稳定较快，时间约为 57 h 和 78 h，前者约为后者的 1.6 和 1.8 倍；径向与轴向收缩应变之比均大于 1，其中重塑样分别为 1.6 和 1.9 倍，原状样分别为 1.4 和 2.1 倍，两者相差不大；重塑样体积收缩应变变量更大，体缩率是原状样的 2.6 和 2.8 倍。

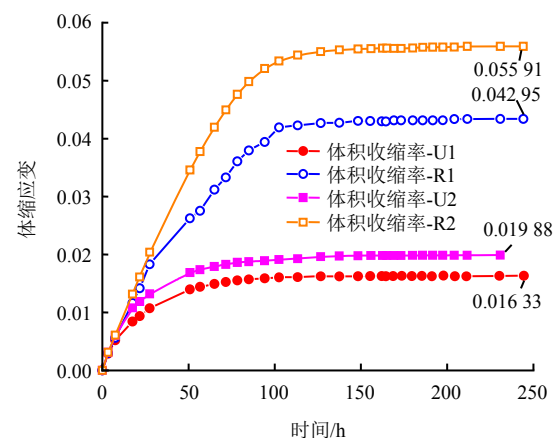
轴向和径向收缩的差异，也见于张琦^[32]对浦口膨胀土、高庙子膨润土和 Romainville 膨胀土 3 种不同土样的研究。为了定量分析这种差异性，参照 Bronswijk^[11]和唐朝生等^[33]的方法，引入收缩几何因子 r_s ，定量描述轴向和径向收缩对总体积收缩量的贡献或在其中所占的比重。相关表达式为



(a) 径向或轴向收缩 (U1、R1)



(b) 径向或轴向收缩 (U2、R2)



(c) 体积收缩 (U、R)

图4 收缩时程曲线

Fig.4 Shrinkage strain with time

$$1 - \frac{\Delta V}{V_0} = \left(1 - \frac{\Delta h}{h_0}\right) r_s \quad (1)$$

式中： V_0 和 h_0 分别为试样初始体积和高度； ΔV 和 Δh 分别为试样在干燥过程中发生的体积和高度变化量。收缩几何因子的变化范围为 $1 \leq r_s < \infty$ 时，为

一维轴向收缩； $1 < r_s < 3$ 时，轴向收缩占主导地位； $r_s = 3$ 时，轴向和径向收缩相等； $r_s > 3$ 时，径向收缩占主导地位。图 5 给出了 2 组试样的 r_s 随时间变化关系，脱湿开始几分钟后， r_s 值均从 0 迅速增大到 3 以上，约在 25~75 h 达到峰值，随后有所下降，并趋于平稳，可见试样脱湿过程中绝大部分时间都处于径向收缩主导状态；到达峰值以后，总体来说 2 个原状样的 r_s 变化较重塑样更加平稳，峰值与稳定值之比接近 1，分别为 1.02 和 1.05，而 2 个重塑样则略大，分别为 1.17 和 1.04。

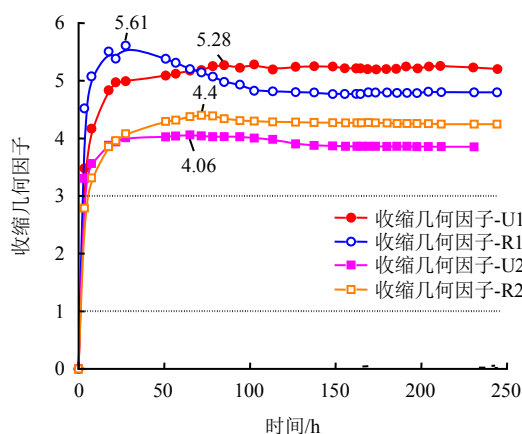


图 5 收缩几何因子随时间变化曲线

Fig.5 Changes of shrinkage geometric factor with time

径向与轴向收缩特征差别较大的原因，一方面在于试样的各向异性^[13, 32]，原状土具有天然各向异性，而重塑试样是在轴向一个方向上主动加压制备而成，在轴向和径向上也具有一定的各向异性；另一方面在于收缩方式的不同，径向收缩总是指向试样的中心线且路径较长，而轴向收缩指向试样中间平面且路径较短。

3.2.2 体积收缩-含水率关系曲线

典型的线（体）缩率-含水率关系曲线可以划分为 3 段，即线性收缩段、收缩过渡段与收缩平稳段。2 组试样的体积收缩-含水率关系曲线见图 6，其曲线形态均符合上述 3 段特征。原状样与重塑样曲线存在显著区别，重塑样的线性段较长、斜率较大，而原状样则反之；重塑样的过渡段不甚明显，而原状样的过渡段则非常清晰。

3.3 孔隙比-含水率收缩特征曲线

土的收缩特征曲线（soil shrinkage characteristic curve, 简称 SSC 或 SSCC）是定量描述土体孔隙率与含水率之间的本构关系，在非饱和土力学中与土-水特征关系曲线（soil water characteristic curve, 简称 SWCC）具有同等重要的地位^[34]。2 组试样收缩

过程的孔隙比-含水率曲线，即收缩特征曲线，如图 7 所示。

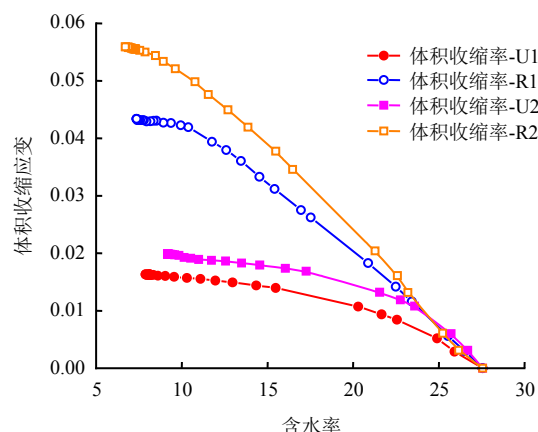


图 6 体积收缩-含水率关系曲线

Fig.6 Relationships between volume shrinkage and water content

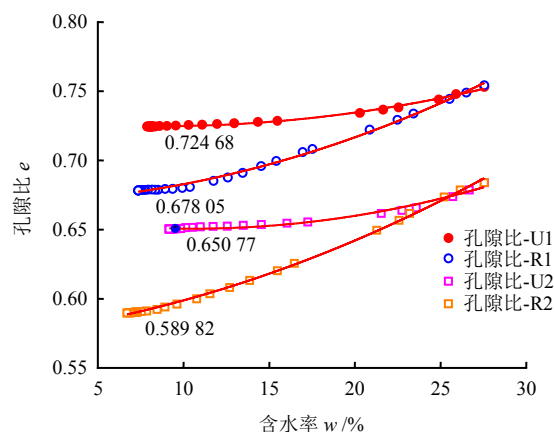


图 7 孔隙比-含水率曲线

Fig.7 Pore ratio versus moisture content

对比分析原状膨胀土和重塑膨胀土的 SSC 可以发现，初期收缩阶段（含水率约为 24%~28%），原状土和重塑土的 SSC 基本重合；随着含水率的下降，原状土 SSC 平缓下降，对应的含水率范围为 24%~16%，而重塑土 SSC 则下降较快，且对应的含水率范围更宽，为 24%~9%，两者差异明显；当含水率进一步下降，试样进入残余-零收缩阶段后，重塑土对应的孔隙比明显小于原状土，前者约为后者的 0.80 和 0.91 倍。

Cornelis^[35]对比研究了多种 SSC 模型，认为效果最好的当属 Chertkov^[36-37]提出的模型，形式如下：

$$e = \begin{cases} e_0, & 0 < \omega \leq \omega_A \\ e_0 + \mu(\omega - \omega_A)^2 \frac{\rho_w^2}{\rho_s}, & \omega_A < \omega \leq \omega_B \\ \omega, & \omega_B < \omega < \omega_L \end{cases} \quad (2)$$

式中： e 为孔隙比； e_0 为收缩平稳后的孔隙比； μ 为模型系数； ρ_w 为水的密度； ρ_s 为土颗粒密度； ω_A 为进入平稳收缩段的含水率； ω_B 为进气值对应的土体含水率； ω_L 为土的液限。拟合结果如图 7 和表 3 所示。从拟合参数来看，2 个原状样的 e_0 值分别大于重塑样，即 $0.725 > 0.622$ ， $0.651 > 0.568$ ；原状样的 μ 值也大于重塑样，分别为 $2.0 \times 10^{-4} > 1.6 \times 10^{-4}$ 和 $2.8 \times 10^{-4} > 2.5 \times 10^{-4}$ ； ω_A 值的规律也类似，分别为 $8.52\% > -19.53\%$ 和 $10.75\% > -8.14\%$ ，但重塑样 ω_A 为负值；拟合相关系数 R^2 都非常接近于 1，均大于 0.98。可见，Chertkov 模型应用于原状膨胀土效果非常好，参数物理意义也较明确，但对于重塑膨胀土样，拟合的 ω_A 为负值，结果不合理。

表 3 Chertkov 模型拟合结果
Table 3 Fitting results of Chertkov model

土样	e_0	μ	$\omega_A/\%$	相关系数 R^2
U1	0.725	2.0×10^{-4}	8.52	0.995
D1	0.670	2.8×10^{-4}	-1.30	1.000
U2	0.651	2.8×10^{-4}	10.60	0.983
D2	0.568	2.5×10^{-4}	-8.10	1.000

若采用张琦^[32]的二次多项式模型，表达式为

$$e = k_1 \omega^2 + k_2 \omega + e_0 \quad (3)$$

式中： k_1 、 k_2 均为相关拟合参数。拟合结果如表 4 所示，原状样与重塑样的参数 k_1 均为正， e_0 值与 Chertkov 模型得到的值相差不大； k_2 相差较大，原状膨胀土样为负，重塑样均为正；各土样的模型拟合相关系数都接近于 1。总体看来，多项式模型拟合效果很好，但缺点是拟合参数 k_1 、 k_2 均无物理意义。

表 4 二次多项式模型拟合结果
Table 4 Fitting results of quadratic polynomial model

土样	二次多项式模型	相关系数 R^2
N1	$e = 0.745 \omega^2 - 0.128 \omega + 0.730$	0.995
R1	$e = 0.603 \omega^2 + 0.236 \omega + 0.645$	0.999
N2	$e = 0.721 \omega^2 - 0.123 \omega + 0.662$	0.995
R2	$e = 0.934 \omega^2 + 0.152 \omega + 0.574$	0.999

3.4 微观结构对比与机制分析

上述结果表明，原状膨胀土和重塑膨胀土的收缩特性具有显著差异性，主要表现为重塑土的体积收缩过程较慢，收缩量更大，收缩稳定时对应的含

水率更低、孔隙比更小。由于原状样和重塑样具有相同的物质成份与组成，以及相同的宏观物理状态（初始干密度与含水率相同），因此应该重点从微观结构上寻找原因。鉴于此，利用扫描电镜（SEM）分别对 2 组试样进行微观特征测试，典型结果如图 8 所示。

原状膨胀土为“紊流”结构，结构单元多为片状和扁平状颗粒，颗粒间以面-边接触和面-面接触为主，总体上看有一定取向趋势。图 8(c)显示孔隙大小分布不均匀，大孔隙数量相对较多且以近似椭圆形为主，长轴多在 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ ，小孔隙以近似圆形为主，直径在 $6 \mu\text{m}$ 左右。

重塑后的膨胀土样，在微观结构上发生了明显变化。颗粒排列变为“粒状堆叠”结构，黏粒聚集体成为结构单元多数，仅存零散且体积较小的片状颗粒，颗粒随机接触与排列，不具取向趋势。这种变化表明膨胀土在重塑过程中，经风干碾碎过筛处理后，较大黏土颗粒被破碎，颗粒之间的天然胶结也被破坏，重新压实后虽然与原状样有相同的密度即相同的颗粒密集程度，但内部颗粒之间的胶结强度却较原状土有所降低，在失水过程中抵抗收缩的能力降低，是造成重塑土体缩率增大、 e_0 值减小的原因之一；同时，重塑土中水附着在更多小颗粒表面或存在于小孔隙中，而原状土中水附着在更多较大颗粒表面或存在于较大孔隙中，蒸发开始（常速率）阶段，重塑土中水迁移到表面的路径更长，蒸发速度更慢，自由水完全蒸发的需时变长，故重塑土的收缩变慢，稳定时间变长，直至土的含水率显著降低自由水量很少之后，重塑土的蒸发速率才与原状土相近。

SEM 照片也显示，重塑膨胀土的孔隙非常细小且分布较均匀。图 8(f)中细孔隙数量较多，最大直径为 $10 \mu\text{m}$ 左右，而微小孔隙数量更多，直径多在 $3 \mu\text{m}$ 以下。由于原状样与重塑样的初始干密度和含水率相同，即孔隙比 e 与孔隙总体积 V_s 相等，但重塑土孔隙数量更多、孔径更小、分布更均匀。毛细理论表明，气-水-土界面上的水膜半径越小，吸力值越大；试验^[13]也证实，经干湿循环后孔隙尺寸变大、数量变少的砂质黏土，监测到的基质吸力显著变小。可见，与原状膨胀土相比，重塑土样的孔隙尺寸变小、分布变均匀，导致相同饱和度下，土颗粒上产生的基质吸力更大，故收缩过程中承受的收缩力更大，被压缩的程度更高，成为重塑土体缩率较大、 e_0 值更小的另一重要原因。

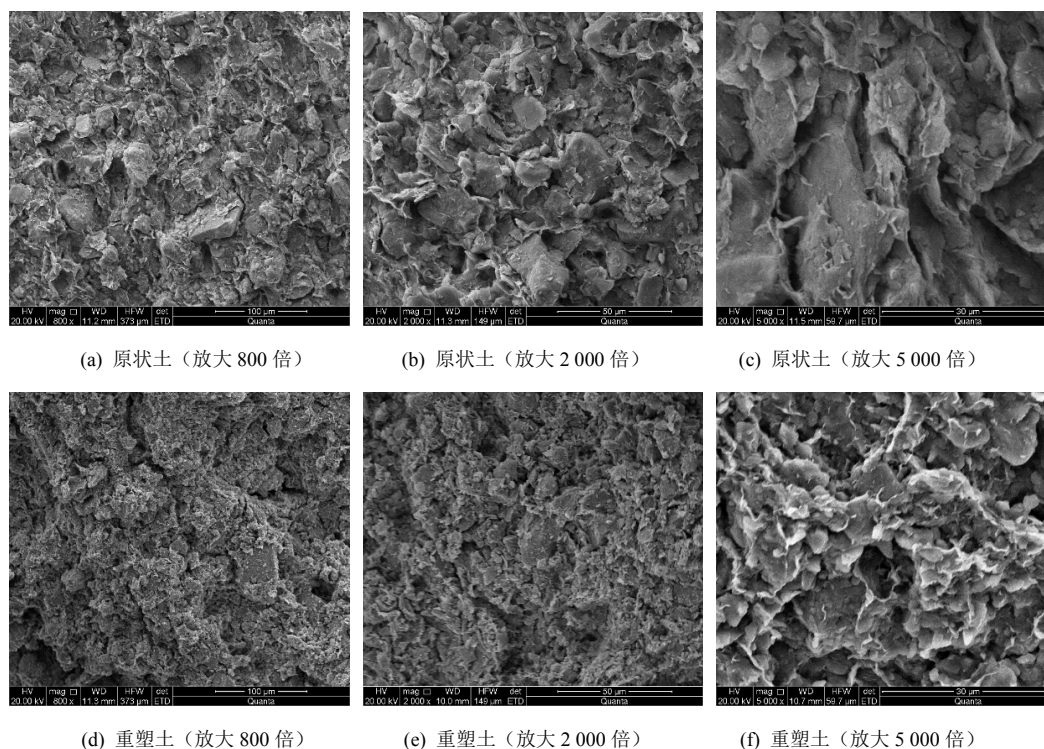


图8 原状样与重塑样 SEM 结果对比
Fig.8 Comparison of scanning results between natural and remolded samples

4 结 论

(1) 蒸发失水过程的脱湿曲线形态基本相同, 受结构性的影响不明显, 但土中水流动阶段原状土的蒸发速率明显大于重塑土。

(2) 收缩过程和收缩应变量差异明显, 重塑土在蒸汽扩散阶段收缩稳定速度较慢, 最终体积收缩应变量更大, 径向与轴向收缩应变之比均大于 1, 而原状土的收缩过程更加平稳。

(3) 体积收缩-含水率关系曲线存在显著区别, 重塑土的线性段较长、斜率较大, 直线段与稳定段之间的过渡段不明显, 而原状土则反之。原状土和重塑土 SSC 在较高含水率段基本重合; 随着含水率下降, 原状土 SSC 平缓下降, 而重塑土 SSC 下降较快; 进入残余-零收缩阶段后, 原状土的孔隙比明显大于重塑土。描述 SSC 常用的 Chertkov 模型, 非常适用于原状土, 但不适用于重塑土; 二次多项式模型均很适用, 但物理意义不明确。

(4) 原状膨胀土较重塑膨胀土具有更强的原生结构性, 初始密度与湿度相同情况下, 两者在颗粒排列、接触方式、胶结状态、孔隙大小与分布特征等微观结构上差异明显, 导致蒸发过程中重塑土的水分迁移速率较小、基质吸力较大, 是重塑土较原状土收缩更剧烈的内在原因。

致谢: 本研究得到了中国科学院武汉岩土力学研究所 2019 年“中国科学院大学生创新实践训练计划”的支持。

参 考 文 献

- [1] 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 Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG Anh-minh, et al. Shrinkage and desiccation cracking process of expansive soil and its temperature-dependent behaviour[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(12): 2181-2187.
- [2] 郑健龙. 公路膨胀土工程理论与技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
ZHEN Jian-long. Theory and technology for highway expansive soil engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [3] 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(增刊 2): 107-114.
WANG Xian-en, TAN Xiao-hui, XIN Zhi-yu, et al. Experimental study on shrinkage properties of expansive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Suppl. 2): 107-114.
- [4] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科

- 学出版社, 2006.
- TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Engineering properties of special rock and soil[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [5] OMIDI G H, THOMAS J C, BROWN K W. Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner[J]. **Water, Air, and Soil Pollution**, 1996, 89(1): 91-103.
- [6] ALBRECHT B A, BENSON C H. Effect of desiccation on compacted natural clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(1): 67-75.
- [7] KARUMANCHI S R, MANDAL A. Moisture variations and its effect on shrinkage and swelling characteristics of unsaturated soil[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2020, 24(1): 1785-1801.
- [8] BIRLE E, HEYER D, VOGT N. Influence of the initial water content and dry density on the soil-water retention curve and the shrinkage behavior of a compacted clay[J]. **Acta Geotechnica**, 2008, 3(3): 191-200.
- [9] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 高放废物地质处置库中缓冲回填材料的收缩特征[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1192-1200.
- TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun. Shrinkage characteristics of buffer-backfilling materials in high-level radioactive waste geological disposal[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(7): 1192-1200.
- [10] 牟智. 密度与含砂量对蒙脱土收缩特性的影响[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2019.
- MOU Zhi. Effects of density and sand content on shrinkage characteristics of montmorillonite[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2019.
- [11] BRONSWIJK J J B. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils[J]. **Journal of Hydrology**, 1988, 97: 199-212.
- [12] 李志清, 余文龙, 付乐, 等. 膨胀土胀缩变形规律与灾害机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 270-275.
- LI Zhi-qing, YU Wen-long, FU Le, et al. Research on expansion and contraction rules and disaster mechanism of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Suppl. 2): 270-275.
- [13] LIU G S, TOLL D G, KONG L W, et al. Matric suction and volume characteristics of compacted clay soil under drying and wetting cycles[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2020, 43(2).
- [14] 赵贵涛, 韩仲, 邹维列, 等. 干湿、冻融循环对膨胀土土-水及收缩特征的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1139-1146.
- ZHAO Gui-tao, HAN Zhong, ZOU Wei-lie. Evolution of soil-water and shrinkage characteristics of an expansive soil during drying-wetting-freeze-thaw cycles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(6): 1139-1146.
- [15] 沈珠江. 结构性黏土的堆砌体模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 1-4.
- SHEN Zhu-jiang. A masonry model for structured clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 1-4.
- [16] 齐吉琳, 谢定义, 石玉成. 土结构性的研究方法及现状[J]. 西北地震学报, 2001, 23(1): 100-104.
- QI Ji-lin, XIE Ding-yi, SHI Yu-cheng. Status quo and method of quantitative study on soil structure[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2001, 23(1): 100-104.
- [17] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002(9): 82-88.
- KONG Ling-wei, LU Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002(9): 82-88.
- [18] 徐永福, 孙婉莹, 吴正根. 我国膨胀土的分形结构的研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(1): 20-25.
- XU Yong-fu, SUN Wan-yin, WU Zheng-gen. On fractal structure of expansive soils in China[J]. **Journal of Hohai University**, 1997, 25(1): 20-25.
- [19] 徐永福. 非饱和膨胀土结构性强度的研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(2): 3-5.
- XU Yong-fu. Structural strength of unsaturated expansive soils[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 1999, 27(2): 3-5.
- [20] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 结构损伤对膨胀土屈服特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1503-1512.
- YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Influence of structural damage on yielding characteristics of expansive soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 1503-1512.
- [21] 程展林, 龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

- CHEN Zhan-lin, GONG Bi-wei. Expansive soil slope[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [22] LI L, ZHANG X. A new approach to measure soil shrinkage curve[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2018, 42.1: 1-18.
- [23] AMENUVOR C A, LI G W, WU J T, et al. An image-based method for quick measurement of the soil shrinkage characteristics curve of soil slurry[J]. **Geoderma**, 2020, 363: 114165.
- [24] LI T G, KONG L W, LIU B H. The California bearing ratio and pore structure characteristics of weakly expansive soil in frozen areas[J]. **Applied Sciences**, 2020, 10: 7576.
- [25] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of People's Republic of China. GB/T50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [26] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by vapour equilibrium technique at different temperatures, application to the determination of the water retention properties of MX80 clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42: 287-296.
- [27] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2161.
- YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(12): 2155-2161.
- [28] 刘观仕, 陈永贵, 曾宪云, 等. 环境湿度与温度对压实膨胀土裂隙发育影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 260-268.
- LIU Guan-shi, CHEN Yong-gui, ZENG Xian-yun, et al. Effects of ambient air humidity and temperature on crack development of compacted expansive soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(2): 260-268.
- [29] SHOKRI N, LEHMANN P, DANI O R. Characteristics of evaporation from partially wettable porous media[J]. **Water Resources Research**, 2009, 45, W02415
- [30] 姚海林, 杨洋, 程平, 等. 膨胀土标准吸湿含水率及其试验方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 856-859.
- YAO Hai-lin, YANG Yang, CHENG Ping, et al. Standard moisture absorption water content of soil and its testing standard[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 856-859.
- [31] 姚海林, 杨洋, 程平, 等. 膨胀土标准吸湿含水率试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(17): 3009-3013.
- YAO Hai-lin, YANG Yang, CHENG Ping, et al. Testing study on moisture content of standard absorption for expansive soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004(17): 3009-3013.
- [32] 张琦. 膨胀土干燥收缩特性试验研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- ZHANG Qi. Experimental study on the drying shrinkage characteristics of expansive soils[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [33] 唐朝生, 崔玉军, TANG Anh-Minh, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1271-1279.
- TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG Anh-Minh, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(8): 1271-1279.
- [34] 陈盼, 向锐, 魏小棋, 等. 考虑土水吸附效应的黏土收缩曲线方程[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(8): 866-872.
- CHEN Pan, XIANG Rui, WEI Xiao-qi, et al. Equation for soil shrinkage curve of clay considering soil-water adsorption effect[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2020, 54(8): 866-872.
- [35] CORNELIS W M. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve[J]. **Geoderma**, 2006, 137(1-2): 179-191.
- [36] CHERTKOV V Y. Modeling the pore structure and shrinkage curve of soil clay matrix[J]. **Geoderma**, 2000, 95(3-4): 215-246.
- [37] CHERTKOV, V. Y. Modelling the shrinkage curve of soil clay pastes[J]. **Geoderma**, 2003, 112(1-2): 71-95.