

# 北疆供水一期工程膨胀土不同循环模式条件下的胀缩特性

张浩<sup>1,2</sup>, 张凌凯<sup>1,3</sup>, 许佳<sup>4</sup>, 徐燕<sup>4</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆科技学院, 新疆 库尔勒 841000;  
3. 新疆维吾尔自治区水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052;  
4. 新疆维吾尔自治区寒旱区水资源与生态水利工程研究中心(院士专家工作站), 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**为深入探讨北疆供水一期工程膨胀土渠坡胀缩机理,通过对膨胀土进行了3种不同循环模式条件下的无荷膨胀率、有荷膨胀率和收缩试验,从宏观角度分析了其胀缩特性规律,并采用扫描电镜试验从微观上揭示其物理机制。结果表明:膨胀土的膨胀变形随时间的延长可分为快速、匀速及稳定3个阶段,膨胀变化主要集中在快速膨胀阶段,上覆荷载越大,有荷膨胀率越小,上覆压力抑制了膨胀土的吸水膨胀作用;随着循环次数的增加,无荷膨胀率、有荷膨胀率和线缩率均呈逐渐减小的趋势,第5次循环后逐渐趋向于稳定值,其中干湿-冻融循环减小幅度最大,干湿循环次之,冻融循环最小。微观机制方面,试样经过循环后,土体孔隙和颗粒总数呈逐渐增大趋势,颗粒总面积等微观指标逐渐减小;土颗粒大小及含量是影响胀缩性的主要因素,循环作用影响黏土颗粒的大小、含量及排列等因素的变化,其中干湿-冻融循环颗粒总面积变化程度最大,膨胀土试样胀缩变化程度最大,冻融循环对微观结构影响最小,膨胀土试样胀缩变化程度最小。

**关键词:**膨胀土;胀缩特性;微观机制;循环模式;北疆供水一期工程

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2023)05-0107-08

**Swelling-shrinkage characteristics of expansive soil under different circulation modes in first phase of Northern Xinjiang Water Supply Project** //ZHANG Hao<sup>1,2</sup>, ZHANG Lingkai<sup>1,3</sup>, XU Jia<sup>4</sup>, XU Yan<sup>4</sup> (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang University of Science and Technology, Korla 841000, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China; 4. Xinjiang Cold and Arid Region Water Resources and Ecological Water Conservancy Project Research Center (Academician Workstation), Urumqi 830052, China)

**Abstract:** To further explore the expansion and shrinkage mechanism of expansive soil of the canal slope in the first phase of Northern Xinjiang Water Supply Project, the free expansion rate, loaded expansive soil rate and shrinkage test of the expansive soil under three different circulation modes were carried out. The law of expansion and shrinkage characteristics was analyzed from a macro perspective, and the physical mechanism was revealed from a micro perspective by scanning electron microscope test. The results show that the expansion deformation of expansive soil can be divided into three stages, including rapid, uniform and stable expansion with the time increase. The expansion change is mainly concentrated in the rapid expansion stage. The larger the overburden load, the smaller the loaded expansion rate. The overburden pressure inhibits the water absorption and expansion of expansive soil. With the increase of the cycles, the unloaded expansion rate, the loaded expansion rate and the linear shrinkage rate all show a decreasing trend, and gradually tends to a stable value after the fifth cycle. Among them, the dry-wet-freeze-thaw cycle decreases the most, followed by the dry-wet cycle, and the freeze-thaw cycle is the smallest. In terms of the microscopic mechanism, after the sample is cycled, the porosity and the total number of particles in the soil increase gradually, while micro indexes such as the total area of particles decrease gradually. The size and content of clay particles are the main factors affecting the expansion and shrinkage. The cycle effect affects the changes of the size, content and arrangement of clay particles. Among them, the total area of dry-wet-freeze-

**基金项目:**2022年新疆维吾尔自治区杰出青年科学基金项目(2022D01E45);2023年自治区水利科技专项资金资助项目(XSXJ-2023-22);新疆维吾尔自治区寒旱区水资源与生态水利工程研究中心(院士专家工作站)项目(2022.C-001)

**作者简介:**张浩(1997—),男,硕士研究生,主要从事膨胀土力学特性试验研究。E-mail:xjauzh@163.com

**通信作者:**张凌凯(1987—),男,副教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:xjau\_zlk@163.com

thaw cycles has the greatest change, and the expansion and shrinkage of expansive soil samples have the greatest change. The freeze-thaw cycle has the least influence on the microstructure, and the expansion and shrinkage of expansive soil samples have the least change.

**Key words:** expansive soil; swelling-shrinkage characteristics; micro mechanism; circular mode; first phase of Northern Xinjiang Water Supply Project

强烈胀缩性、多裂隙性、超固结性是膨胀土的基本特性<sup>[1]</sup>,导致膨胀土的工程性质十分复杂,对各类工程常造成巨大灾害。强膨胀土具有强烈的膨胀潜势,更易造成边坡失稳,如北疆供水一期工程输水明渠 31.6% 的区域经过膨胀土区域,由于季节交替及降水的周期性变化<sup>[2-3]</sup>,会引起膨胀土的胀缩变形,引发渠坡的安全问题<sup>[4-5]</sup>及膨胀土的路堑边坡岩体失稳、建筑地基因吸水体胀而发生破坏等问题<sup>[6]</sup>,这些灾害均与膨胀土的胀缩特性密切相关。

针对膨胀土的胀缩特性,诸多学者从不同角度对此进行了探究。一是进行无荷膨胀率试验,如杨庆等<sup>[7]</sup>对重塑膨胀土试样进行膨胀力试验,发现非饱和膨胀土的膨胀力和含水率之间存在指数关系;刘静德等<sup>[8]</sup>对膨胀岩进行吸湿条件下的膨胀率试验,推导得出膨胀力经验公式,发现膨胀率与干密度线性正相关,与初始含水率线性负相关;Chertkov<sup>[9]</sup>建立膨胀岩膨胀和收缩的物理模型,量化描述膨胀和收缩的变化;尹鑫等<sup>[10]</sup>为准确评价膨胀土胀缩等级,建立直觉模糊集评价模型,对不同指标胀缩性评价结果的敏感性依次排序;吴珺华等<sup>[11]</sup>对重塑膨胀土进行无荷条件下的反复膨胀和收缩试验,结果表明随着干湿循环次数的增加,试样的膨胀率和收缩率逐渐减小。二是进行有荷膨胀率试验,如杨和平等<sup>[12-13]</sup>对膨胀土进行干湿循环条件下有荷条件下的试验研究,得到了膨胀土胀缩变形与强度的变化规律。三是进行收缩试验,如柴肇云等<sup>[14]</sup>采用自主开发研制的膨胀试验装置,分析泥质岩的循环胀缩特性;杨和平等<sup>[12,15]</sup>通过研制相关仪器来模拟太阳光照加热膨胀土试样,以实现试样的失水过程;唐朝生等<sup>[16]</sup>采用全干燥及部分干燥两种干缩途径,发现膨胀土胀缩特征受干缩路径的影响明显;王佩等<sup>[17]</sup>通过无侧限抗压强度试验、收缩试验对水泥改性膨胀土进行系统研究,结果表明掺入水泥可以有效改善膨胀土的土体强度和胀缩特性。四是进行微观试验,如钱苗苗等<sup>[18]</sup>通过电镜试验研究初始含水率对膨胀力影响的微观机理;张善凯等<sup>[19-20]</sup>开展了膨胀岩经历干湿循环后利用扫描电子显微镜(SEM)和氮吸附试验,从微观角度分析了膨胀岩吸水膨胀失水收缩的微观机制;Lin 等<sup>[21-22]</sup>研究了膨胀岩在经历干湿循环后的微观结构变化,解释了干湿循环对膨胀岩微观结构的影响;叶万军等<sup>[23]</sup>利用

X 射线衍射、扫描电镜等技术,从矿物成分等方面对不同条件下古土壤的细微特征进行了系统研究;Hiroaki 等<sup>[24]</sup>采用纳米焦点 X 射线 CT、X 射线衍射结合三维显微结构分析,研究了不同溶胀性能的致密蒙脱石在不同干密度时的显微结构;Qi 等<sup>[25-26]</sup>研究了干湿循环条件下的土壤收缩膨胀特性及微观结构变化;何俊等<sup>[27]</sup>开展干湿循环条件下固化污泥电镜扫描试验,研究了碱渣-矿渣-石灰对固化污泥的微观结构影响。

目前国内外学者在膨胀土的胀缩特性及微观机制方面的研究已取得明显进展,主要集中于干湿循环作用下膨胀土胀缩特性的研究,但不同循环模式条件下全年气温、降水等因素对膨胀土渠坡的胀缩的影响未能得到全面反映。鉴于此,本文以北疆供水一期工程膨胀土为研究对象,采用室内试验模拟干湿循环、冻融循环及干湿-冻融循环模式,对膨胀土在不同循环模式条件下的变形规律进行试验研究,并通过电镜扫描揭示其微观结构,从微观角度探讨其宏观变形的根本原因。

## 1 试验材料与试验方案

### 1.1 试验材料

试验所用膨胀土取自北疆供水一期工程总干渠“13+175”挖方段的黄色泥岩,具有中膨胀性,颜色呈土黄色,带有少量青色杂质,具有较好的代表性。该土粒的不均匀系数为 33,曲率系数为 0.33,属于不良级配。通过室内基本物理特性试验及 X 射线衍射试验,得到其天然含水率为 14.8%,天然干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup>,最大干密度为 1.67 g/cm<sup>3</sup>,最优含水率为 18.9%,矿物成分蒙脱石、石英、长石、方解石和钠长石的质量分数分别为 60.4%、32.7%、6%、0.5% 和 0.4%。

### 1.2 循环模式

试验所用土样最优含水率为 18.9%,采用轻型击实法将配置好的湿土压制成直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀试样,以现场实测干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup> 进行制样。

循环模式分为干湿循环、冻融循环和干湿-冻融循环 3 种。①干湿循环:湿润阶段采用抽气饱和法和模拟膨胀土渠坡湿润过程(试样抽气 2 h,浸泡 10 h),干燥阶段参考取样地历史气象资料,确定干燥阶段边

界温度为 40℃,干燥过程在烘箱中进行(12 h),烘干至天然含水率(约为 14.8%)状态;②冻融循环:设置-20℃和 20℃为北疆膨胀土渠坡冻结及融化环境温度,将膨胀土试样用保鲜膜包裹后放入 GDJ/YH-225L 高低温交变湿热试验箱,冻结及融化阶段均为 24 h,共进行 9 次冻融循环;③干湿-冻融循环:采用抽气饱和法模拟渠基土湿润过程,干燥阶段采用 40℃烘箱烘干至天然含水率状态,冻融阶段均在 GDJ/YH-225L 高低温交变湿热试验箱中进行,冻结及融化阶段均为 24 h。

### 1.3 试验方法

**a. 无荷膨胀率试验。**采用 WG-3A 单杠杆固结仪,对经过 1、3、5、7、9 次不同循环模式条件下的试样进行无荷膨胀率试验,环刀试样共 16 个,向单杠杆固结仪中注水,保持水面高出试样 5 mm,记录注水开始时间,按照试验开始后 5 min、10 min、20 min、30 min、1 h、2 h、3 h、6 h、12 h、24 h 测读百分表读数,当 6 h 内变形不大于 0.01 mm 时终止试验。

**b. 有荷膨胀率试验。**采用 WG-3A 单杠杆固结仪,对经过 1、3、5、7、9 次不同循环模式条件下的试样进行有荷膨胀率试验,上覆荷载分别为 25、50、75、100 kPa,按照试验开始后 5 min、10 min、20 min、30 min、1 h、2 h、3 h、6 h、12 h、24 h 测读百分表读数,当 6 h 内变形不大于 0.01 mm 时终止试验。

**c. 收缩试验。**将进行无荷膨胀率试验的饱和膨胀土试样放入 105℃高温烘箱,烘干 12 h,记录膨胀土环刀试样高度变化,称量膨胀土试样质量,每隔 6h 测记百分表读数并称质量,直至 2 次测量试样质量相差不大于 0.1 g 时终止试验。

**d. SEM 扫描电镜试验。**通过 S-3400N II 型 SEM 对不同循环模式条件下膨胀土试样进行 SEM 试验。试验时在 SEM 放大 250、1 000、2 000、4 000、8 000 和 10 000 倍情况下分析土体微观结构图像,利用 Image-J 软件对 SEM 微观图像进行预处理,定量分析土体微观结构的变化。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 无荷膨胀率试验

采用膨胀率及线缩率来描述膨胀土胀缩变形,膨胀率为膨胀土试样浸水后的膨胀量与初始高度之比,线缩率为膨胀土试样失水后的收缩量与初始高度之比。图 1 为不同循环模式条件下膨胀土无荷膨胀率变化曲线,可以看出膨胀土试样的膨胀变形与时间呈非线性变化,无荷膨胀率变化曲线可分为 3 个阶段:①快速膨胀阶段:在无荷膨胀率试验初期,膨胀率随时间的增加而增大,膨胀速率较大,变化较为强烈,该阶段持续时间在 0~60 min 之间;②匀速

膨胀阶段:在无荷膨胀率试验中期,膨胀率变化较为缓慢,膨胀速率逐渐减小,该阶段持续时间在 60~360 min 之间;③稳定阶段:膨胀率曲线慢慢接近水平,逐渐趋于稳定值。试样在较短时间内即达到较大的膨胀变形。此外,随着循环次数的增加,膨胀土的无荷膨胀率均随循环次数的增加而不断降低,第 1 次循环后无荷膨胀率变化最明显,第 5 次循环后无荷膨胀率逐渐趋向于稳定值。

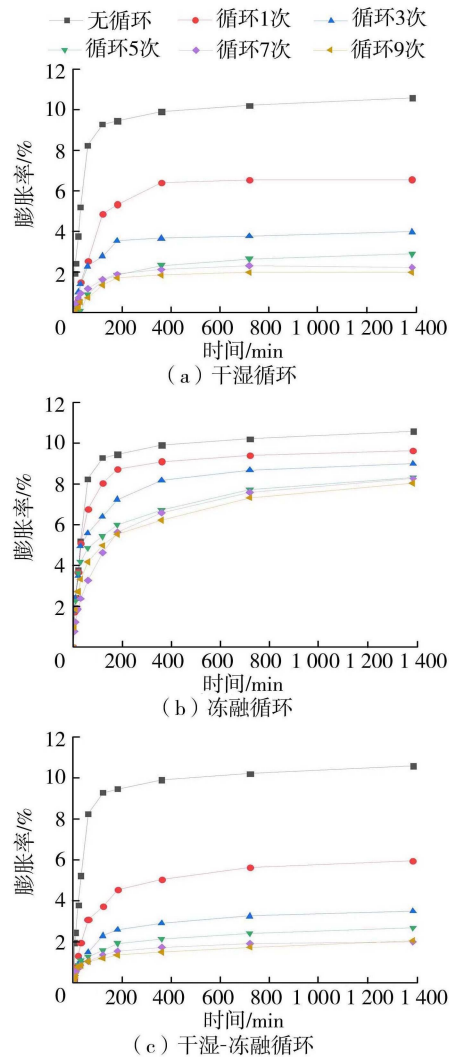


图 1 不同循环模式条件下膨胀土无荷膨胀率变化曲线

图 2 为不同循环模式条件下膨胀土无荷膨胀率与循环次数关系曲线。由图 2 可知,膨胀土试样在干湿-冻融循环作用下无荷膨胀率降低幅度最大,第 1 次循环衰减幅度达 43.7%,最终衰减幅度达 82%;在冻融循环作用下无荷膨胀率衰减幅度最小,第 1 次循环衰减幅度为 8.9%,最终衰减幅度为 24.2%;在干湿循环作用下无荷膨胀率第 1 次循环衰减幅度为 37.9%,最终衰减幅度达 81%。

分析原因可知,试验所用膨胀土中含有较多黏土矿物,黏土矿物的亲水能力决定了土体的膨胀程度,其中蒙脱石膨胀性能最为显著。向 WG-3A 单杠



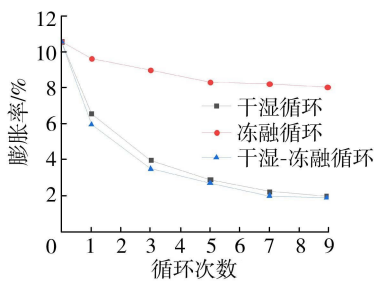


图2 不同循环模式条件下膨胀土无荷膨胀率与循环次数关系曲线

杆固结仪中注水,试样初始含水率较小,孔隙较多,水通过渗透作用更易进入膨胀土试样内部,土体含水率增加,黏土矿物吸水膨胀,试验初期膨胀变形较为强烈,随着时间的延长,膨胀变形逐渐趋于稳定值。膨胀土试样经过干湿循环、冻融循环及干湿-冻融循环,土体出现大量微小裂隙,结构整体性遭到破坏,黏土矿物聚集体分解,无荷膨胀率随循环次数增加逐渐减小,且最终趋于稳定。

膨胀土有荷膨胀率变化曲线。由图3可知,有荷膨胀率试验初期,膨胀变形随着时间的延长而增大,膨胀速率逐渐减小;有荷膨胀率试验后期,膨胀变形逐渐趋于平稳,膨胀速率逐渐趋于零。

图4为不同上覆荷载、不同循环模式条件下膨胀土有荷膨胀率变化曲线,可以看出:①随着循环次数的增加,膨胀土有荷膨胀率逐渐减小,第1次循环变化最为明显,第5次循环后,有荷膨胀率逐渐趋于稳定值;且上覆压力越大,其有荷膨胀率均越低,说明压力抑制了膨胀土吸水膨胀作用。②以25 kPa上覆荷载为例,膨胀土试样在干湿-冻融循环作用下有荷膨胀率衰减幅度最大,第1次循环衰减幅度达70%,最终衰减幅度达153%;在冻融循环作用下有荷膨胀率衰减幅度最小,第1次循环衰减幅度为23.6%,最终衰减幅度达42%;在干湿循环作用下有荷膨胀率第1次循环衰减幅度为62.4%,最终衰减幅度达149.8%。

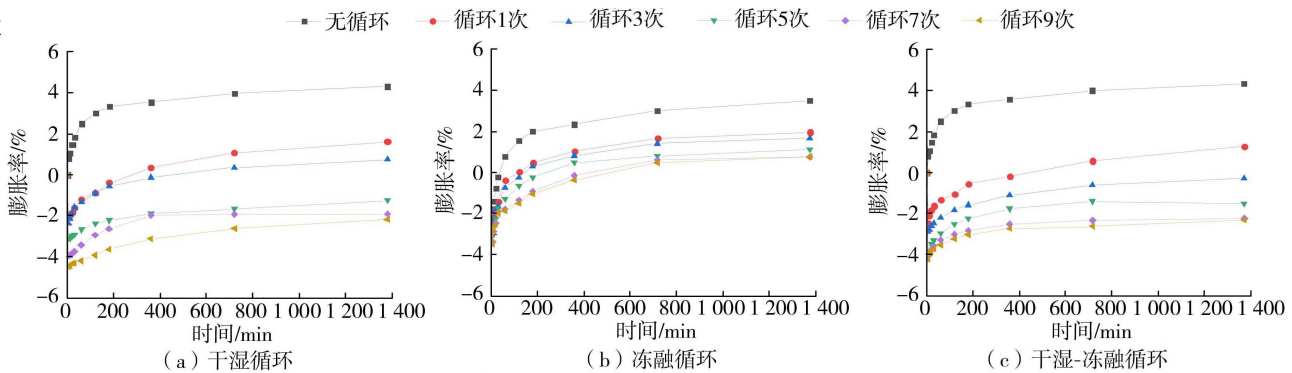


图3 不同循环模式条件下膨胀土有荷膨胀率变化曲线

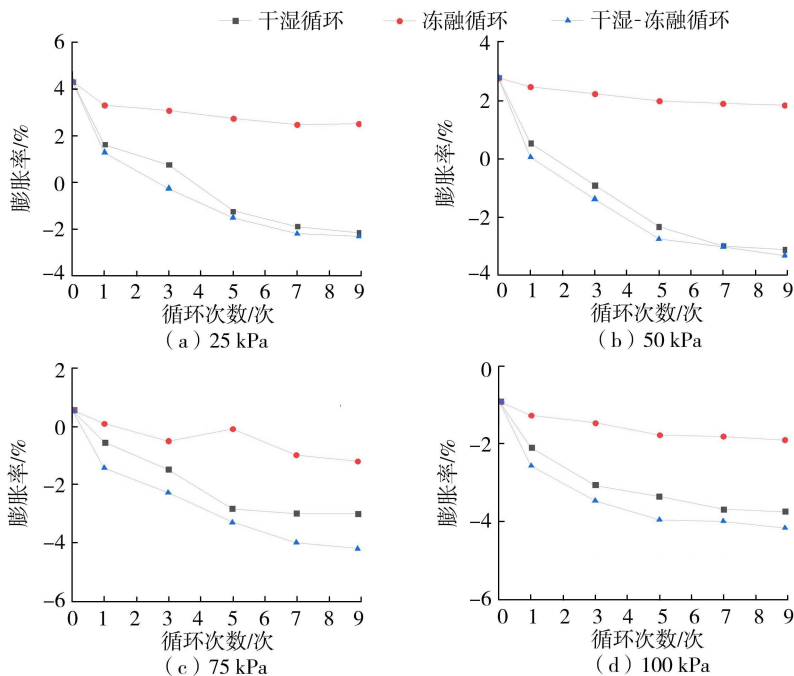


图4 不同上覆荷载、不同循环模式条件下膨胀土有荷膨胀率变化曲线



分析上覆荷载对膨胀率的影响原因可知,由于上覆荷载对膨胀土的膨胀变形具有抑制作用,当膨胀变形受抑制时将产生膨胀力,部分膨胀力用于克服上覆荷载的抑制作用,上覆荷载越大,则抵消的膨胀力越大,以膨胀变形表现出来的膨胀力越小。同时,水是直接导致膨胀土膨胀变形的重要外部因素,上覆荷载的增大导致土颗粒微孔隙面积减小,土体的吸水量减少,使试样的膨胀受到限制,因而膨胀土的膨胀变形随上覆荷载的增大而减小。由于循环作用使土颗粒破碎,黏土矿物吸水能力减弱,有荷膨胀率随着循环次数及上覆荷载的增加而减小。

### 2.3 膨胀土的收缩特性

图5为不同上覆荷载、不同循环模式条件下膨胀土线缩率变化曲线。由图5可知:①随着循环次数的增加,膨胀土线缩率逐渐减小,不同循环模式条件下膨胀土线缩率均在第1次循环后达到最大

值,变化较为明显,在第5次循环后逐渐趋向于稳定值;②相同循环模式条件下,荷载越大,其线缩率越小;③不同循环模式条件下膨胀土在干湿-冻融循环作用下线缩率变化幅度最大,在冻融循环作用下线缩率变化幅度最小。

### 2.4 膨胀土的微观特性

经比较,取放大2000倍SEM图像进行定性分析,图6为不同循环模式条件下膨胀土放大2000倍SEM的图像。由图6可知:①未进行过干湿-冻融循环的膨胀土微观层面相对平整,主要为较大的聚集体,局部黏粒组呈层片状,具有较好的定向性,结构相对牢固;膨胀土吸水膨胀后微观结构发生明显变化,裂隙发育明显,水分更易与土体中黏土颗粒接触,发生膨胀现象;有荷膨胀率试验后,由于荷载作用微观结构较为平整,土体微小孔隙少量增加。②随着干湿循环的进行,膨胀土表面由平整到粗糙

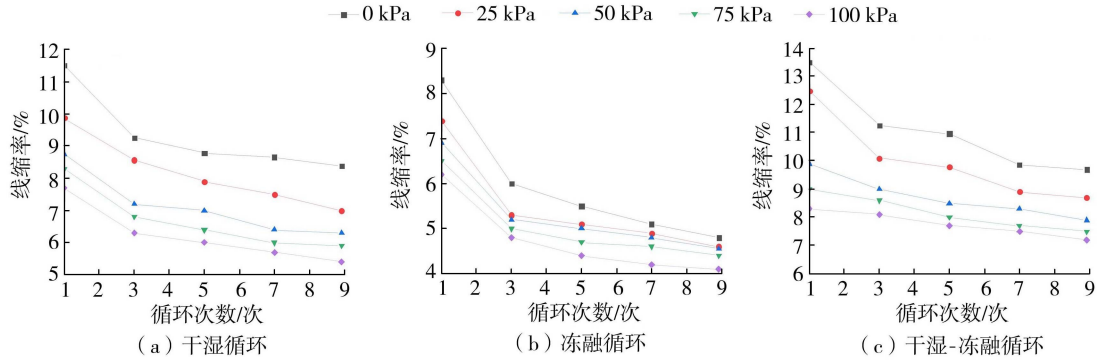


图5 不同上覆荷载、不同循环模式条件下膨胀土线缩率变化曲线

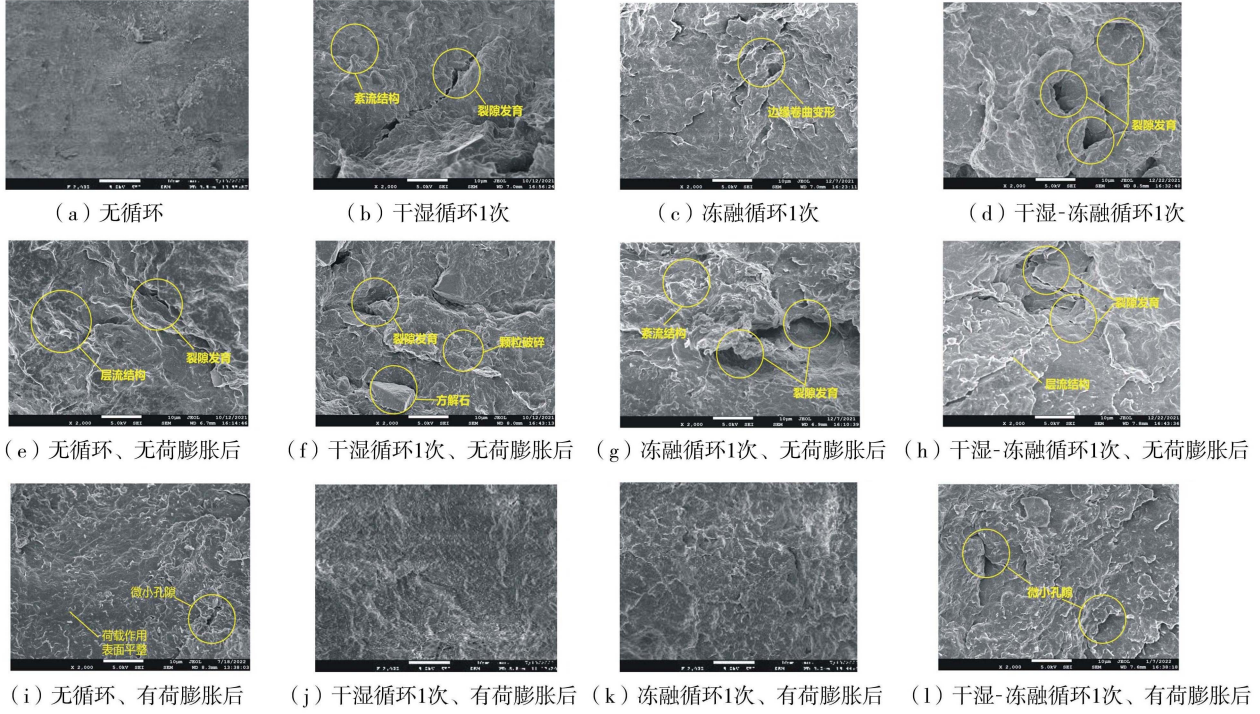


图6 不同循环模式条件下膨胀土放大2000倍SEM图像

乃至出现裂隙,孔隙由开始的小孔隙逐渐发展为中、大孔隙,土体骨架也发生变化;吸水后土样微观裂隙进一步发育,黏土矿物聚集明显且结构松散;有荷膨胀率试验后,膨胀土表面较为光滑。③随着冻融循环的进行,土颗粒之间的联结开始破坏,孔隙增大,局部薄片状颗粒卷曲;无荷膨胀率试验后部分聚集体的颗粒排列呈波浪状或花朵状,形成近似流水形态的紊流结构;有荷膨胀率试验后,接触面以面-面结合为主,形成定向排列的层流状结构,层间孔隙有明显的同向性。④随着干湿-冻融循环的进行,土体孔隙和结构发生了明显变化,部分较大土粒凝块经过干湿-冻融循环逐渐分离变小,土体原有致密结构消失,出现许多新的微小裂隙,土体结构整体变得松散;吸水后裂隙进一步发育,土体颗粒间黏粒矿物不断减少,干湿-冻融循环土体微观结构破坏较干湿循环及冻融循环最为严重;有荷膨胀率试验后,孔隙数量整体呈下降趋势,土体颗粒趋于扁平状。

通过 Image-J 软件对不同循环模式条件下土样的 1 万倍 SEM 图像进行微观信息处理,量化不同循环次数下的土体颗粒形态变化,其结果如表 1 所示。由表 1 可知:膨胀土试样经过无荷膨胀率试验后,颗粒总数增加,其他微观指标呈下降趋势;初始试样经过有荷膨胀率试验后,颗粒总数减小,其他微观指标呈增大趋势,其规律与无荷膨胀率试验相反;微观结构在不同循环模式作用,颗粒总数呈逐渐增大趋势,其他微观指标逐渐减小,其变化幅度干湿-冻融循环最大,干湿循环次之,冻融循环最小,因进行 SEM 微观扫描试验需将试样完全烘干,微观数据存在细小误差。

分析膨胀土微观结构变化可知:①干湿循环过程中水分迁移,反复冲刷原有孔隙,形成新的孔隙,反复的饱和湿润和烘干使土体破碎,颗粒总数增加;冻融循环过程中,水分不断经历冻结、融化,挤压土体颗粒,颗粒总数增加,小孔隙变大;干湿-冻融循环

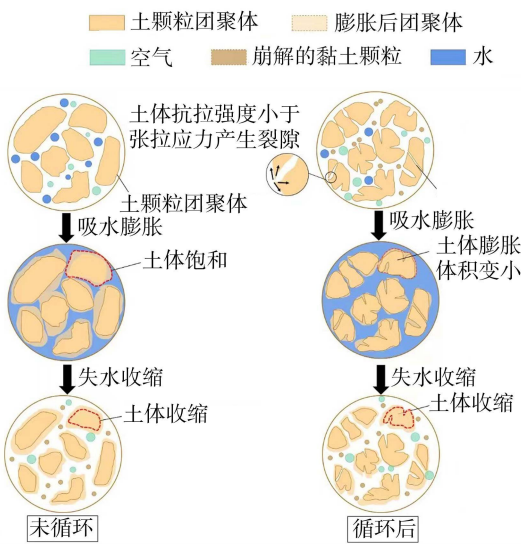
过程中,既受干湿循环的影响,微观结构更为破碎,又受冻融循环的影响,裂隙逐渐扩展。不同循环模式条件下,干湿-冻融循环微观结构破坏最为严重,颗粒总数增加 21.7%,颗粒总面积下降 10.1%,其余微观指标均有不同程度下降,膨胀率试验变化最为显著;冻融循环条件下微观结构破坏最小,颗粒总数增加 7.9%,颗粒总面积下降 3.9%,其余微观指标均有不同程度的微小下降,膨胀率试验变化最小;干湿循环条件下膨胀土微观结构,颗粒总数增加 17.7%,颗粒总面积下降 11.4%,其余微观指标均有不同程度下降。②膨胀土试样出现胀缩特性的主要因素是膨胀土的特殊物质组成成分和微观结构特征,微观结构特征包括土颗粒的大小、排列、含水量及外部环境等因素,其中土颗粒大小及含量是影响胀缩性的主要因素。不同循环模式条件下,循环作用会影响黏土颗粒的大小、含量及排列等因素的变化,导致胀缩特性减弱,其中干湿-冻融循环对微观结构影响最为显著,颗粒破碎最为严重,颗粒总面积变化程度最大,则膨胀率变化程度最大,冻融循环对微观结构影响最小,膨胀率变化程度最小。

图 7 为未循环及循环后胀缩变形机制示意图。由图 7 可知,膨胀土发生胀缩变形是土体内部因素从而决定的,同时受到外部水分条件的影响,膨胀土含水率的变化引起黏土矿物的吸水膨胀和失水收缩,产生胀缩现象。膨胀土试样经过干湿循环、冻融循环及干湿-冻融循环后,土体的整体性遭到破坏,影响黏土颗粒的大小、含量及排列等因素的变化,宏观上表现为膨胀土试样膨胀-收缩能力的变化,其中干湿-冻融循环对微观结构影响最为显著,膨胀率变化幅度最大,冻融循环对微观结构变化最小,则膨胀率变化幅度最小。随着循环次数的增加,膨胀土微观结构不再变化,土体内部呈平衡状态,膨胀土试样循环胀缩特性趋于稳定。

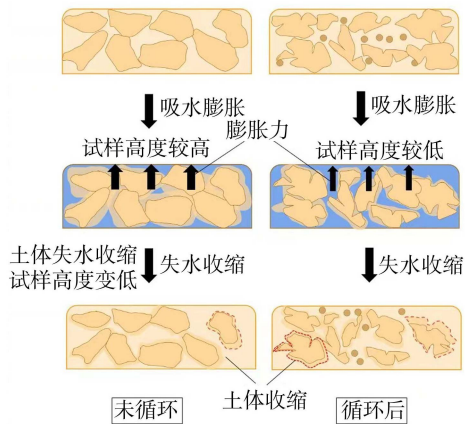
表 1 膨胀土微观定量分析

循环模式及次数	试样状态	颗粒总数/个	颗粒总面积/ $\mu\text{m}^2$	颗粒平均尺寸/ $\mu\text{m}$	颗粒面积占比/%	颗粒平均周长/ $\mu\text{m}$
无循环	初始	428	32.253	0.078	32.984	1.239
	无荷膨胀	488	28.148	0.066	28.035	0.810
	有荷膨胀	382	35.951	0.091	35.447	1.374
干湿循环 1 次	初始	504	28.549	0.060	28.570	0.803
	无荷膨胀后	544	27.116	0.033	26.565	0.786
	有荷膨胀后	453	29.226	0.065	27.055	0.835
冻融循环 1 次	初始	462	30.981	0.069	26.215	0.808
	无荷膨胀后	497	25.931	0.052	23.711	0.789
	有荷膨胀后	443	34.234	0.077	31.434	0.829
干湿-冻融循环 1 次	初始	521	28.981	0.062	26.876	1.109
	无荷膨胀后	580	29.136	0.049	25.943	0.813
	有荷膨胀后	455	30.767	0.071	28.817	1.087





(a) 微观颗粒层面



(b) 宏观颗粒层面

图7 未循环及循环后胀缩变形机制示意图

### 3 结论

a. 在膨胀土无荷膨胀率试验中,随着时间的延长,膨胀土的膨胀变形可分为快速膨胀、匀速膨胀及稳定3个阶段,膨胀变化主要集中在快速膨胀阶段;无荷膨胀率随循环次数增加均呈逐渐减小的趋势,第1次循环后无荷膨胀率变化最为明显,第5次循环后逐渐趋于稳定;受冻融循环作用的试样无荷膨胀率减小程度最小,干湿-冻融循环减小程度最大。

b. 在膨胀土有荷膨胀率试验中,膨胀土的膨胀变形随着时间的延长而增大,膨胀速率逐渐减小,试验后期,膨胀变形逐渐趋于稳定值。上覆荷载越大,有荷膨胀率越低,说明上覆荷载抑制了膨胀土吸水膨胀作用;随着循环次数的增加,有荷膨胀率逐渐减小,第5次循环后逐渐趋向于稳定值;膨胀土试样在干湿-冻融循环作用下有荷膨胀率衰减幅度最大。

c. 随着循环次数的增加,不同循环模式条件下膨胀土试样的线缩率均在第1次循环变化最为显著,随后逐渐减小,在第5次循环后逐渐趋向于稳定

值;相同循环模式条件下,荷载越大,其线缩率越小;膨胀土试样在干湿-冻融循环作用下线缩率变化幅度最大,在冻融循环作用下线缩率变化幅度最小。

d. 扫描电镜结果表明,试样经过循环后,土体孔隙和结构发生了明显变化,颗粒破损,影响黏土颗粒的大小、含量及孔隙分布等因素的变化,不同循环模式条件下微观参数均有不同程度变化,其中干湿-冻融循环变化幅度最大,冻融循环变化幅度最小,影响了胀缩特性,黏土矿物吸水膨胀能力减弱,试样高度变小,宏观上表现为膨胀土试样膨胀-收缩能力的变化。

### 参考文献:

- [1] 陈善雄. 强膨胀土渠坡破坏机理及处理技术[M]. 北京:科学出版社,2016:3-13.
- [2] 谭娇,丁建丽,张钧泳,等. 1961—2014年新疆北部地区气温时空变化特征[J]. 干旱区研究,2018,5(5):1181-1191. (TAN Jiao, DING Jianli, ZHANG Junyong, et al. Temporal and spatial variations of air temperature in northern Xinjiang during 1961-2014 [J]. Arid Zone Research, 2018, 5(5): 1181-1191. (in Chinese))
- [3] 雷雨,龙爱华,邓铭江,等. 1926—2009年额尔齐斯河流域中游地区气候变化及其对水资源的影响分析[J]. 冰川冻土,2012,34(4):912-919. (LEI Yu, LONG Aihua, DENG Mingjiang, et al. Climate change and its impact on water resources in the middle reaches of the Ertsis River Basin during 1926-2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 912-919. (in Chinese))
- [4] 范秋雁. 膨胀岩与工程[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [5] 魏宇伟. 膨胀岩边坡稳定性与处治方案研究[D]. 成都:西华大学,2012.
- [6] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.
- [7] 杨庆,张慧珍,栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(3):420-425. (YANG Qing, ZHANG Huizhen, LUAN Maotian. Testing study on shear strength of unsaturated expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 420-425. (in Chinese))
- [8] 刘静德,李青云,龚壁卫. 南水北调中线膨胀岩膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(5):826-830. (LIU Jingde, LI Qingyun, GONG Biwei. Swelling properties of expansive rock in middle route project of South-to-North Water Diversion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 826-830. (in Chinese))
- [9] CHERTKOV V Y. Physical modeling of the soil swelling curve vs. the shrinkage curve [J]. Advances in Water Resources, 2012, 44: 66-84.
- [10] 尹鑫,王迎超,高杰,等. 基于直觉模糊集的膨胀土胀缩



- 性评价[J]. 土木工程学报, 2018, 51(5): 103-111. (YIN Xin, WANG Jiechao, GAO jie, et al. Evaluation of swelling-shrinkage of expansive soil based on intuitionistic fuzzy sets[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(5): 103-111. (in Chinese))
- [11] 吴珺华, 袁俊平, 杨松, 等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 62-65. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 62-65. (in Chinese))
- [12] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936-1941. (YANG Heping, ZAHNG Rui, ZHENG Jianlong. Deformation and strength variation of expansive soil in dry-wet cycle under load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1936-1941. (in Chinese))
- [13] HOLTZ W G, GIBBS J H. Engineering properties of expansive clays[J]. Transact, ASCE, 1956, 121: 641-677.
- [14] 柴肇云, 张鹏, 郭俊庆, 等. 泥质岩膨胀各向异性与循环胀缩特征[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 346-350, 440. (CHAI Zhaoyun, ZHANG Peng, GUO Junqing, et al. Swelling anisotropy and cyclic swelling-shrinkage of argillaceous rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 346-350, 440. (in Chinese))
- [15] 谈云志, 胡莫珍, 周玮韬, 等. 荷载-干湿循环共同作用下泥岩的压缩特性[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2165-2171. (TAN Yunzhi, HU Mozhen, ZUO Weitao, et al. Effects of drying-wetting cycle and loading on compressive property of mudstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2165-2171. (in Chinese))
- [16] 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 Chaosheng, SHI Bin. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1376-1384. (in Chinese))
- [17] 王佩, 宋新江, 徐海波, 等. 水泥改性膨胀土基本特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 56-60. (WANG Pei, SONG Xinjiang, XU Haibo, et al. Experiments on basic characteristics of cement-modified expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 56-60. (in Chinese))
- [18] 钱苗苗, 冷先伦, 张善凯, 等. 卢氏膨胀岩膨胀力特性试验研究[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 204-208. (QIAN miaomia, LENG Xianlun, ZAHNG Shankai, et al. Experimental study on swelling characteristics of Lushi expansive rock [J]. Yangtze River, 2022, 53(1): 204-208. (in Chinese))
- [19] 张善凯, 冷先伦, 盛谦, 等. 卢氏膨胀岩在干湿循环作用下的胀缩特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4279-4288. (ZAHNG Shankai, LENG Xianlun, SHENG Qian, et al. Study on expansion-shrinkage characteristics of Lushi expansive rock under dry-wet cycles [J]. Geotechnical Mechanics, 2019, 40(11): 4279-4288. (in Chinese))
- [20] 张善凯. 考虑干湿循环效应的膨胀岩边坡稳定性分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [21] LIN B, CERATO A B. Applications of SEM and ESEM in microstructural investigation of shale-weathered expansive soils along swelling-shrinkage cycles [J]. Engineering Geology, 2014, 177(7): 66-74.
- [22] WANG L L, BORNERT M, HÉRIPRÈ E, et al. The mechanisms of deformation and damage of mudstones: a micro-scale study combining ESEM and DIC [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5): 1913-1926.
- [23] 叶万军, 吴云涛, 杨更社, 等. 干湿循环作用下古土壤微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2126-2137. (YE Wenjun, WU Yuntao, YANG Gengshe, et al. Study on the microstructures and macro-mechanical properties of paleosoils under cyclic wetting and drying [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2126-2137. (in Chinese))
- [24] HIROAKI T, YUKIO T. 3D-microstructure analysis of compacted Na- and Cs-montmorillonites with nanofocus X-ray computed tomography and correlation with macroscopic transport properties[J]. Applied Clay Science, 2019, 168: 211-222.
- [25] QI Wei, WANG Ce, ZHANG Zhanyu, et al. Experimental investigation on the impact of drying-wetting cycles on the shrink-swell behavior of clay loam in farmland [J]. Agriculture Basel, 2022, 12(2): 1-15.
- [26] MA Tiantian, WEI Changfu, YAO Chuanqin, et al. Microstructural evolution of expansive clay during drying-wetting cycle [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(8): 2355-2366.
- [27] 何俊, 管家贤, 张磊, 等. 干湿循环对固化污泥微观结构及强度的影响[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 39-44. (HE Jun, GUAN Jiaxian, ZHANG Lei, et al. Effects of dry-wet cycles on microstructure and strength of solidified sludge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 39-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-10-06 编辑: 骆超)