

膨胀土边坡含水率变化及裂隙发展规律

王华煜¹, 张红日^{2,3}, 王桂尧¹, 邓人睿¹, 杨颜齐¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410076; 2. 广西交投集团有限公司, 南宁 530007;
3. 上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘 要: 为研究膨胀土边坡在反复降雨日晒作用下的破坏情况, 以广西崇左市中膨胀土和强膨胀土为研究对象, 通过降雨喷头和光照系统模拟反复降雨日晒循环, 开展室内边坡模型试验, 探究干湿循环作用下膨胀土边坡含水率变化规律和裂隙发展规律。试验结果表明: 干湿循环作用下, 边坡浅层含水率变化程度相较深层更为剧烈, 且干湿循环次数越多, 其含水率变化越剧烈, 浅层土所受影响大于深层土; 强膨胀土对干湿循环下含水率变化更为敏感, 其含水率的峰谷值差距相较中膨胀土更大; 被降雨冲刷下的土颗粒粒径随干湿循环次数的增加而增大, 裂隙深度加深; 强膨胀土边坡在干湿循环作用下裂隙发展程度比中膨胀土边坡更深, 强膨胀土边坡更易发生浅层滑坡。研究为膨胀土边坡在干湿循环作用下含水率变化和裂隙变化情况提供参考。

关键词: 干湿循环; 膨胀土; 裂隙; 含水率; 边坡; 模型试验

中图分类号: TU411.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0092-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.014

The Variation of Moisture Content and the Development Law of Fractures in Expansive Soil Slopes

WANG Huayu¹, ZHANG Hongri^{2,3}, WANG Guiyao¹, DENG Renrui¹, YANG Yanqi¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China;
2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China;
3. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to study the damage of expansive soil slopes under repeated rainfall and solarization, we take the middle expansive soil and highly expansive soil in Chongzuo City, Guangxi, as the research object, simulate the repeated rainfall and solarization cycles through rainfall nozzles and light systems, carry out indoor slope modeling experiments, and investigate the change rule of water content and the rule of fissure development of the expansive soil slopes under the action of wet-dry cycling. The test results show that: under the action of wet-dry cycling, the degree of change of water content in the shallow layer of the slope is more intense compared with that in the deep layer, and the more the number of wet-dry cycling, the more intense the

项目来源: 广西重大人才项目 (Guangxi Major Talent Program); 广西重点研发计划 (编号: 桂科 AB23075184); 国家自然科学基金项目 (No. 42477143, No. 51878071, No. 52178416); 湖南省研究生科研创新项目 (No. QL20220195); 交通部 2022 年度交通运输行业重点科技项目清单 (编号: 2022-MS5-125); 2023 年崇左市科技计划项目-中央引导地方科技发展资金项目“桂西南地区特殊土联合实验室” (合同编号: 崇科 2023ZY0504)。

作者简介: 王华煜 (1998—), 男, 硕士, 研究方向: 生态边坡研究。

通信作者: 张红日 (1983—), 男, 博士 (后), 正高级工程师, 研究方向: 地质路基的勘察设计与研究工作。

收稿日期: 2025-04-28

change of water content, and the shallow soil is more affected than that in the deep layer of the soil; the highly expansive soil is more sensitive to the change of water content under the wet-dry cycling, and the difference between the peaks and valleys of the water content is bigger compared with that in the moderately expansive soil; the grain size of the soil particles washed away by the rainfall is increased with the increase of wet-dry cycling, and the depth of fissure is deepened; the particle size of the soil particles washed away by the rainfall is increased with the increase of wet-dry cycling, and the depth of fissure is deepened; the depth of fissure is deepened with the increase of wet-dry cycling. The particle size of soil particles washed by rainfall increased with the number of wet-dry cycling, and the depth of fissures deepened; the degree of fissure development of highly expansive soil slopes under the action of wet-dry cycling was deeper than that of moderately expansive soil slopes, and highly expansive soil slopes were more susceptible to shallow landslides. This study provides a reference for the change of water content and the change of cleavage under wet-dry cycling of expanded soil slopes.

Key words: wet-dry cycles; expansive soils; crack; water content; slopes; modeling test

0 引言

我国的华南、华北以及西南地区分布着大量的膨胀土^[1]。随着我国基础建设的不断推进,针对膨胀土特性的研究成为重要的研究方向。

王楠等^[2]以合肥地区膨胀土为研究对象,在室内开展饱和膨胀土泥浆试样的蒸发试验和干湿循环试验。研究表明:在蒸发过程中,各裂隙参数均呈现先增大后稳定的规律;郭建华等^[3]开展了仅考虑干湿循环效应的膨胀土裂隙演化试验,系统测量了随时间变化的水分蒸发过程及裂隙动态发育特征。研究表明,干湿循环效应促进了膨胀土裂隙发育,裂隙率增加导致渠坡变形增加和塑性区扩大;杨颜齐等^[4]对素膨胀土和不同泥炭掺量膨胀土开展室内干湿循环试验,研究表明膨胀土掺入泥炭能减缓干湿循环导致的裂隙发展;蔡祎等^[5]开展改良土的胀缩特性试验,并在干湿循环条件下进行复合改良土的力学特性试验。研究表明,粉煤灰能降低膨胀土的膨胀率,单掺粉煤灰改良土胀缩率降低至无膨胀性水平,土体强度提升,黏聚力增幅显著;欧阳森等^[6-7]利用生物质材料对膨胀土进行改良,研究表明生物质材料能有效抑制膨胀土的膨胀特性,并对其抗剪性能有积极影响;张永刚等^[8]利用植物脲酶诱导碳酸钙沉淀技术(PUICP)改善膨胀土路基填料的胀缩性,研究表明反应生成的碳酸钙沉淀填充了孔隙,黏结了相邻土颗粒,使得土体的密实度增大、整体性增强,进而使得膨胀土的胀缩性能得到改善;李珍玉等^[9]采用元素微量分析、X射线衍射、傅里叶红外光谱和土的胀缩性试验,探究微生物促进矿物相变作用对膨胀土胀缩特性的影响。

研究表明,胶质芽孢杆菌能够有效促进蒙脱石向伊利石的转化,降低膨胀土的胀缩性,为膨胀土的微生物改良提供新的技术途径;杨博文等^[10]、姜海波等^[11]关注膨胀土在冻融循环或干湿循环、冻融循环联合作用下的受力和变形特征以及裂隙发展情况,通过试验方法探究膨胀土变形规律和裂隙发展规律,也取得了显著进展;胡其志等^[12]、汪鹏程等^[13]尝试利用橡胶、矿渣等工业废料改良膨胀土,并对改良后的复合土体的力学特性进行研究,取得了丰硕的成果;蔡国军等^[14]、魏星等^[15]对降雨、酸雨等复杂工程环境下膨胀土工程特性,通过宏观试验、微观观测以及神经网络等分析方法,探究得到可靠的规律,为后续研究提供了指引;Yang等^[16]、Zhou等^[17]研究含水量和温度对膨胀土裂隙发育的影响,通过试验证明了裂隙发育程度与温度成正相关,与含水率呈负相关,一定程度上解释了裂隙发育的机理;张红日等^[18]、杨济铭等^[19]利用数字图像技术分析膨胀土裂隙发育情况,为膨胀土裂隙发育规律认知、分析和预测方法提供参考。对于膨胀土边坡稳定性分析,Chen等^[20]、张震等^[21]通过数值模拟或理论分析提出相对应的分析方法,在部分工程条件下取得了很好的预测结果。

目前有关膨胀土的研究飞速发展,各个方面取得了卓越的成就,然而现阶段关于膨胀土边坡浅层滑坡与干湿循环作用下膨胀土的损伤之间的关系尚不明确,干湿循环过程中的水分迁移规律和裂隙发展规律研究较少。为此,基于对膨胀土边坡模型多次干湿循环试验,模拟膨胀土边坡受降雨和日晒反复作用下的破坏特征,对降雨入渗过程进行量化分析,探究其破坏机理,为相关研究提供参考。

岩土力学

1 试验方案

试验选用中膨胀土和强膨胀土堆出坡度为 45°的边坡，在边坡六个位置分别埋设含水率探头用以实时监测边坡含水率变化情况。分别进行 5 次干湿循环试验，每次干循环之后、下一次湿循环之前拍照记录特定区域的裂隙发展情况。

1.1 边坡制作与仪器埋设

1.1.1 制备膨胀土

所用膨胀土来自广西壮族自治区崇左市宁明县崇爱高速公路（K23+800 路段）施工现场，在该路段指定两个采样点。土壤样本从深度为 0.1~0.5 m 的测试点采集。其初始含水量约为 35%，初始干密度范围为 1.20~1.46 g/cm³。

分批将膨胀土放入 110℃烘箱中烘干 24 h，将烘干后的膨胀土用碎土机碾碎，按照 35% 的含水率配置膨胀土若干。通过塑限液限、膨胀率试验等测得膨胀土的物理力学参数见表 1、2。配置好的膨胀土放入塑料桶中，并在桶上方覆盖保鲜膜保湿，以备后续试验使用。

表 1 中膨胀土的物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of moderately expansive soil

塑限	液限 /%	膨胀率 /%	最大干密度 / (g/cm ³)	最优含水率 /%
25	50	75	1.8	18.1

表 2 强膨胀土的物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of highly expansive soil

塑限	液限 /%	膨胀率 /%	最大干密度 / (g/cm ³)	最优含水率 /%
34	73	98	1.7	20.4

1.1.2 制作边坡

将配置好的膨胀土放入定制的亚克力板内，依照试验设计的边坡尺寸、土体密度进行填筑。亚克力板用于约束边坡土体的侧向变形，并在亚克力板相应位置预留小型孔洞，以便含水率探头连接检测仪器。

堆坡时，先在亚克力板内侧标记出边坡形状以及含水率探头预埋位置，采用人工填土方式。最后用手蘸少量水将坡面抹平。

边坡几何形状及预埋设探头位置如图 1 所示，其中 Z1~Z6 为中膨胀土边坡六个探头位置，Q1~Q6 为强膨胀土边坡六个探头位置。

填土堆坡采用分层填土的方式，将土堆至含水率探头所在位置后，将探头放置在土面上，探头所连接的线路通过亚克力板上预留的孔洞与数据传输设备相连；随后再堆下一层土，到达下一层含水率探头所在处后埋设探头并继续堆土，直至埋设完全部探头，最后将土堆至预定位置完成边坡的制作。

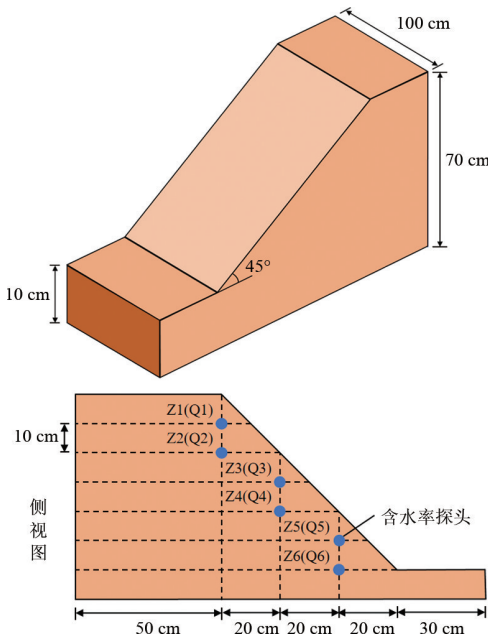


图 1 边坡尺寸和含水率探头埋设位置
Fig. 1 Side slope dimensions and moisture content probe burial location

1.2 干湿循环试验设计

在边坡顶部、距离地面大约 2 m 位置安装固定钢架，在钢架上等间距安装降雨喷头，用以模拟降雨作用下的湿循环。

准备 3 套装有长弧氙气灯的光照装置，作为蒸发模拟装置，通过锁链悬挂于固定钢架上使其直接照射坡面。锁链长度可以调节，通过在坡面上放置智能温度计，调节锁链长度用以控制长弧氙气灯的离地距离，进而调节坡面被照射的温度。长弧氙气灯在湿循环期间会被取下防止影响湿循环的进行。

试验的干湿循环共 10 次，膨胀土和膨胀土边坡各进行 5 轮干湿循环试验并记录数据，各进行 232 h 的干湿循环试验，干湿循环时间具体安排如图 2 所示。

每次干循环结束后对坡面进行拍照，以观察裂隙的发展情况，拍摄时镜头平行于坡面。

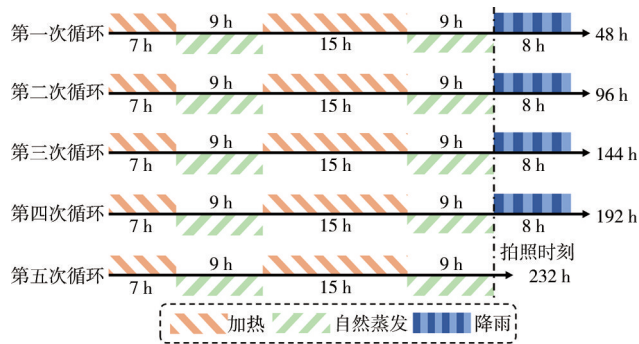


图2 干湿循环时间安排
Fig.2 Wet-dry cycling schedule

表3 试验仪器参数
Table 3 Parameters of the test apparatus

仪器编号	仪器名称	数量	监测精度 (VWC) /%	监测范围 (VWC) /%
EC-5	EC-5 小型土壤水分传感器检测仪	6	±3	0~100
EM-50	EM-50 数据采集器记录仪	2	±3	0~100

2 试验结果与分析

2.1 干湿循环作用下含水率变化规律分析

2.1.1 含水率整体变化

将每半小时记录的数据进行处理分析，由图 3、4 可知，含水率存在 5 个峰值和谷值，通过对比时间也能够看出降雨和日晒对膨胀土边坡的含水率影响显著。无论是中膨胀土边坡还是强膨胀土边坡，埋深较浅处（Z1、Z3、Z5 和 Q1、Q3、Q5）含水率变化比较深处更剧烈。从图中还看出六个测点含水率峰值较谷值更为接近，雨水更易渗入边坡较深处，而日晒对浅层土的含水率影响更剧烈，深层土受影响较小。并且随着干湿循环的进行，深处和浅处含水率变化差异更为明显。

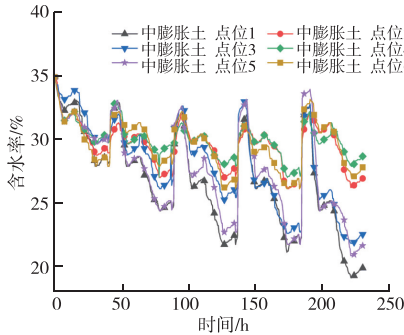


图3 中膨胀土边坡 5 次干湿循环的含水率变化
Fig.3 Variation of water content in 5 wet-dry cycles of moderately expansive soil slopes

1.3 含水率测量

试验测量含水率的仪器为 EC-5 小型土壤水分传感器检测仪。该仪器每 60 s 记录一次含水率探头的数据。所有干湿循环结束后，通过读取接收器所采集的读数，即可获得五次干湿循环中边坡点位的含水率变化。试验仪器具体参数见表 3。

1.4 裂隙发展研究

将试验前和每次干循环后拍摄的边坡表面照片进行二值化处理和去噪，获取裂隙发展情况，通过对裂隙图像的裂隙率、平均宽度和平均长度等计算统计，量化裂隙的发展规律。

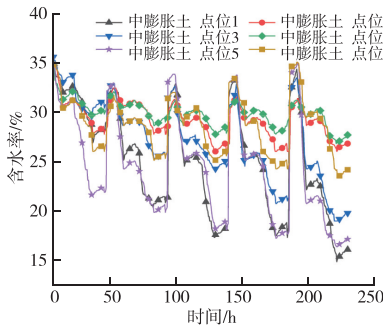


图4 强膨胀土边坡 5 次干湿循环的含水率变化
Fig.4 Variation of water content in 5 wet-dry cycles of highly expansive soil slopes

2.1.2 水分迁移规律研究

根据四次降水过程中不同测点含水率的变化情况，分析出反复干湿循环作用下水分的迁移规律。由图 5、6 可知，降雨的前两个小时，膨胀土边坡六个位置含水率变化都不大，而第 2~3 h 内，六个位置的含水率都突然增大，最终趋于平稳。浅层土因在干循环过程中失水较多，导致含水率突增，而深层土在干循环过程中失水较少，因此整体含水率变化相对平缓。

此外，对比两种不同的膨胀土边坡含水率变化情况，可以发现中膨胀土深浅层位置含水率变化区分很明显，相同深度变化规律更接近，而强膨胀土边坡深浅层区分相对不明显。

对比不同干湿循环阶段，可以发现随着干湿循环的不断进行，含水率在 2~3 h 内突变现象愈发明显，这种突变在浅层土中的表现更为突出。

岩土力学

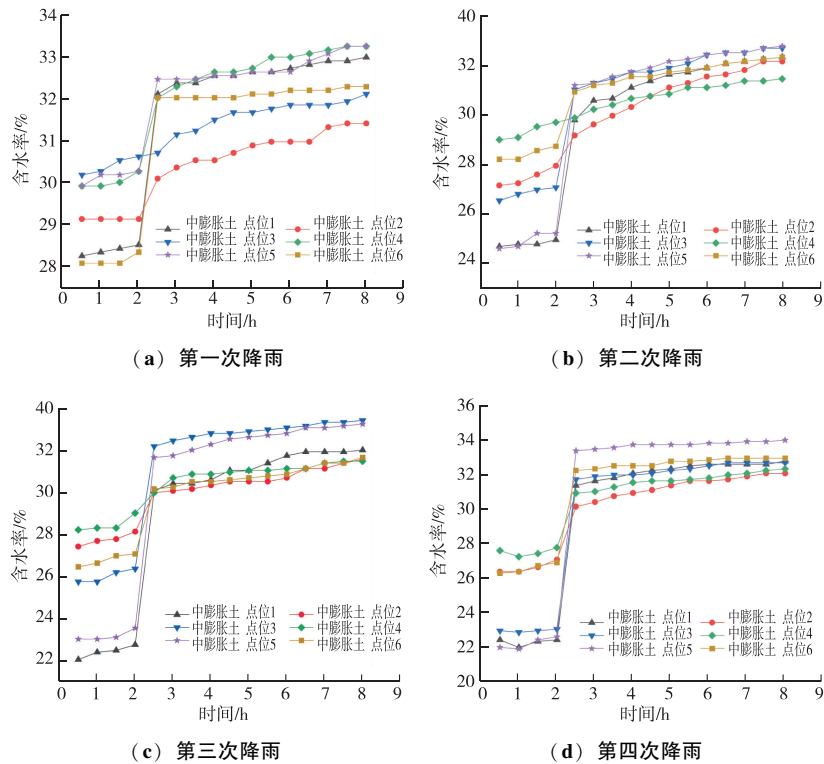


图 5 降雨作用下中膨胀土边坡含水率变化

Fig. 5 Variation of water content in the slope of moderately expansive soil under the effect of rainfall

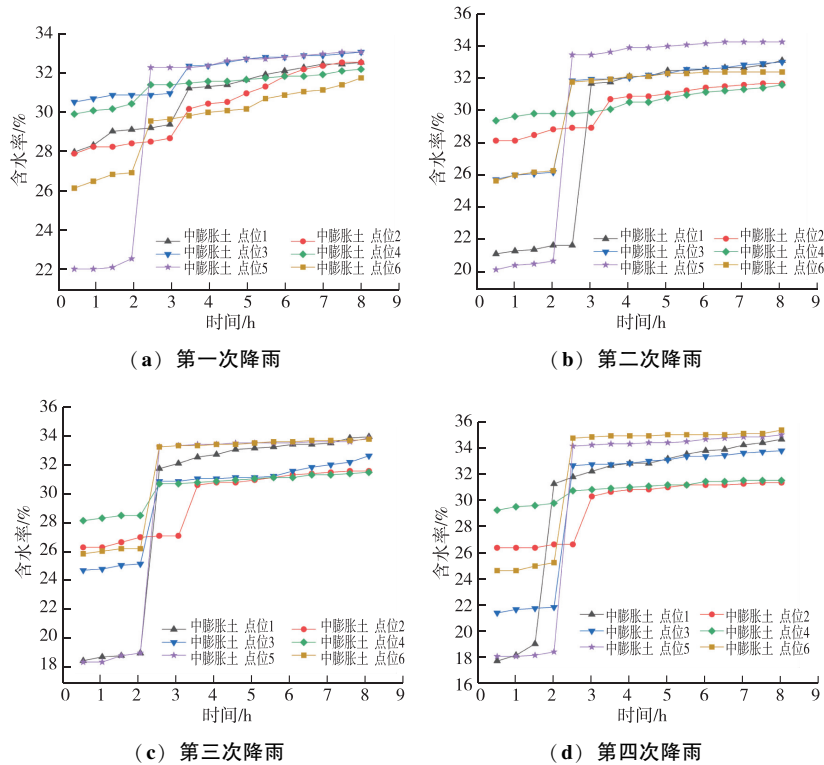


图 6 降雨作用下强膨胀土边坡含水率变化

Fig. 6 Variation of water content in the slope of highly expansive soil under the effect of rainfall

2.2 干循环结束后裂隙发展规律分析

2.2.1 裂纹发展的观察结果

每次湿循环前，拍摄并观察两种膨胀土边坡正中心位置的坡面，如图 7、8 所示。

在累计 40 h 第一次湿循环之前，坡面在长弧氙气灯炙烤下产生了多条裂隙，裂隙深度约为 10~25 mm。宽度较大的裂隙相互连接成若干区域，较小的裂隙则向区域中心发展。累计 88 h 时，经历第一次降雨冲刷后，大部分表面土开始剥落；再经历新一轮的炙烤之后形成了凹凸不平的复杂结构，并且降雨过程中从坡顶被冲刷下来的细小颗粒堆积在

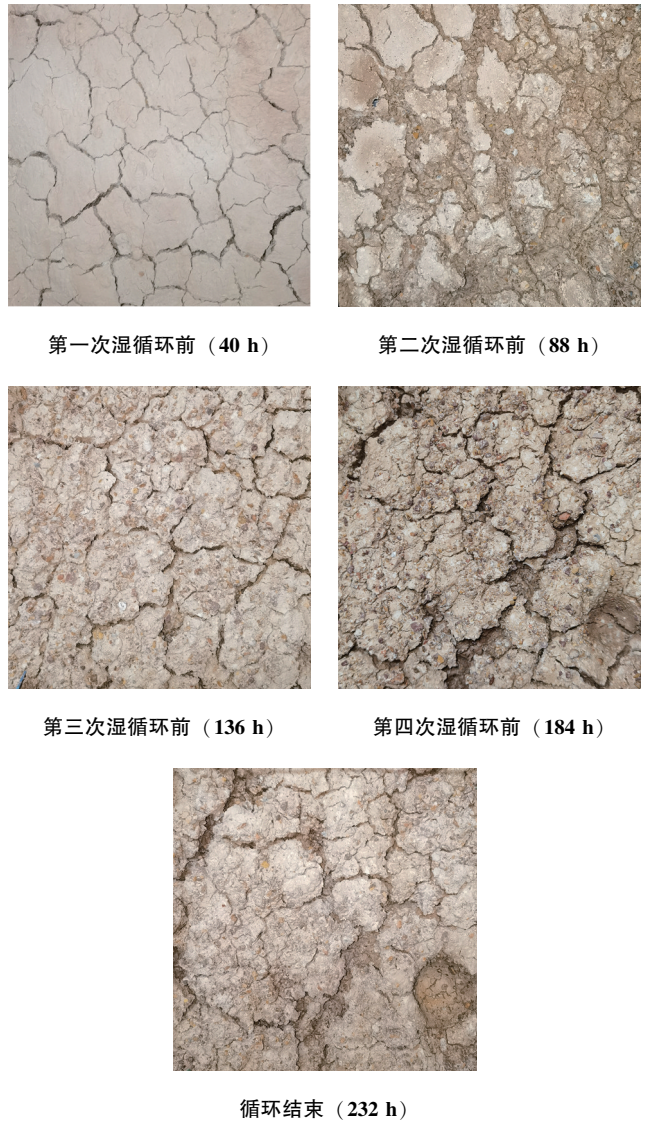


图 7 中膨胀土 5 次干湿循环下裂隙的演化
Fig. 7 Evolution of crack under 5 wet-dry cycling in moderately expansive soil

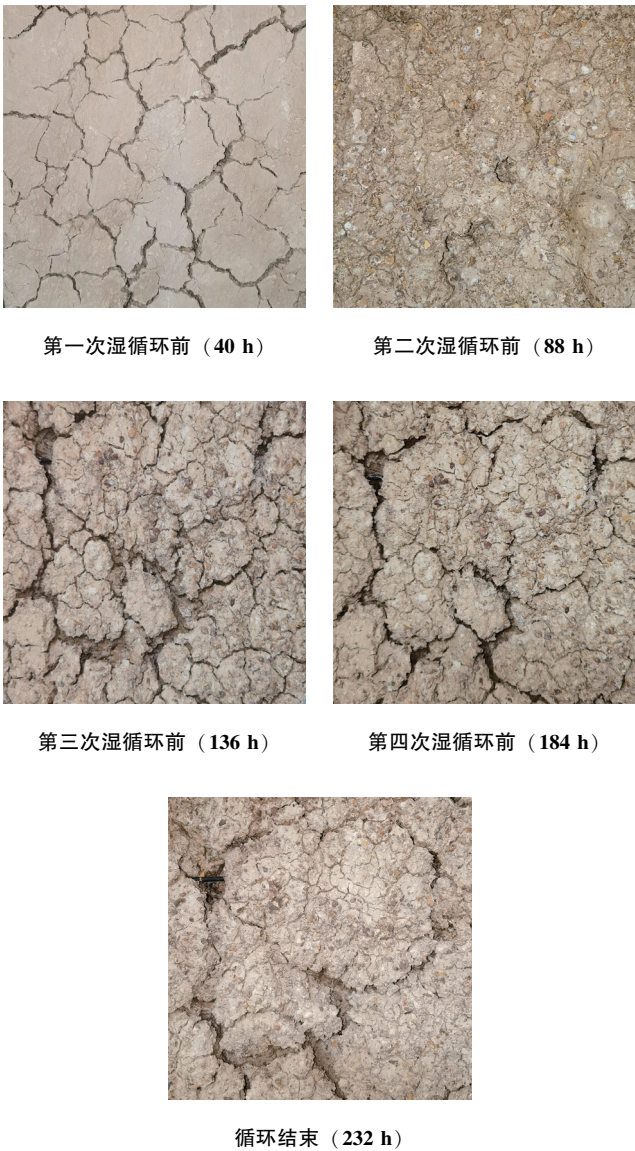


图 8 强膨胀土 5 次干湿循环下裂隙的演化
Fig. 8 Evolution of crack under 5 wet-dry cycling in highly expansive soil

裂隙中，使得裂隙深度减小。累计 136 h 后，几乎无法观察到表层的平整土体，裂隙继续向更深处发展，并且降雨冲刷下的土颗粒粒径变大，裂隙向更复杂的空间结构发展。累计 184 h 时，裂隙进一步向深度发展，多数裂隙连成一片，裂隙深度可达 30 mm 以上，部分裂隙连成的区域结构很不稳定，降雨冲刷下来的土颗粒粒径进一步加大，甚至会有粒径 15 mm 的土块被冲下来。累计 232 h 全部的干湿循环完成后，土体存在大片区域被冲下，形成多处土坑，裂隙宽度进一步扩大。

岩土力学

对比两种膨胀土边坡裂隙演化情况，前几次干湿循环下，强膨胀土边坡坡面的破坏情况相比之下更加严重，而从 184 h 后，由于两种边坡裂隙都已深度发育，此时坡面受到破坏的主要原因是降雨冲刷，但仍可以看出强膨胀土边坡的裂隙深度更大。

2.2.2 裂隙的量化分析

取边坡模型中段 200 mm×200 mm（像素为 2 000 pix×2 000 pix，误差小于 50 pix）的区域拍照，经过二值化和去噪处理，获得裂隙发展的数据。两种膨胀土边坡裂隙发展的量化参数随干湿循环次数的变化情况如图 9~11 所示。

由图 9 可知，强膨胀土边坡的裂隙率大于中膨胀土，并且二者差距随着干湿循环次数增多而变大，因此膨胀土膨胀率越大，边坡越容易被破坏，引发浅层滑坡。由图 10、11 中可知，强膨胀土的平均裂隙长度和宽度均大于中膨胀土，而第一次湿循环前强膨胀土的裂隙长度远大于中膨胀土，这是由于强膨胀土的裂隙相互贯通，而中膨胀土的裂隙未完全

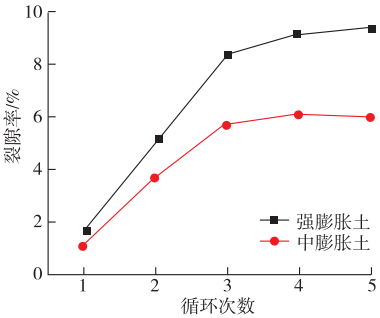


图 9 两种膨胀土边坡的裂隙率随干湿循环次数的变化
Fig. 9 Variation of crack rate with the number of wet-dry cycling for two types of expansive soil slopes

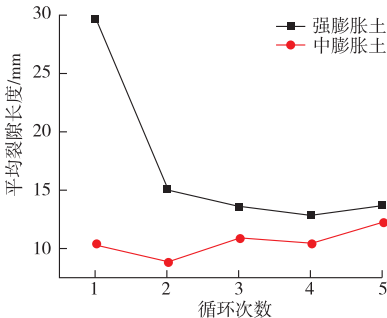


图 10 两种膨胀土边坡平均裂隙长度随干湿循环次数的变化
Fig. 10 Variation of average crack length with the number of wet-dry cycling for two types of expansive soil slopes

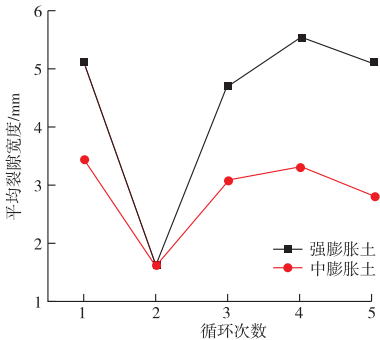


图 11 两种膨胀土边坡平均裂隙宽度随干湿循环次数的变化
Fig. 11 Variation of average crack width with the number of wet-dry cycling for two types of expansive soil slopes

贯通。此外，第二次湿循环前两种膨胀土裂隙宽度十分接近，这可能是由于第一次降雨冲刷坡顶的细小土颗粒，导致小颗粒堆积在裂缝当中，从而填补了裂隙，而试验越往后，被冲刷下来的土粒粒径越大，因此难以填入裂隙当中。

因此，膨胀率大的膨胀土边坡对降雨、日晒循环的敏感性更高，更易发生滑坡。

3 结论

通过对干湿循环作用下膨胀土边坡的含水率和裂隙变化的研究，得出如下结论：

- (1) 膨胀土边坡在干湿循环作用下，其含水率随降雨和日晒而同步变化，浅层土对降雨日晒的敏感性大于深层土，但随着干湿循环的继续，浅层土的含水率变化会更加迅速。
- (2) 膨胀土边坡的裂隙率随着干湿循环的持续而增大，但增长幅度逐渐减小。而裂隙长度方面，开始时强膨胀土边坡大于中膨胀土，随着干湿循环的继续两者趋于平稳，但强膨胀土边坡仍大于中膨胀土，而裂隙宽度呈现先突然减小、再缓慢增大的趋势，这个过程中强膨胀土边坡的裂隙仍大于中膨胀土。
- (3) 对比强膨胀土和中膨胀土边坡，无论是含水率变化情况还是裂隙发展情况，强膨胀土边坡都更为敏感，所形成的边坡更易被破坏。

参 考 文 献

[1] 何霄. 膨胀土干湿循环作用下的工程特性及基坑稳定性研究 [D]. 成都: 西华大学, 2019.

- [2] 王楠, 王琼, 叶为民, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙发育与演化特征 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (12): 4532-4543.
- [3] 郭建华, 王汉辉, 李世昌, 等. 干湿环境下膨胀土裂隙演化规律及渠坡变形研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (增刊 1): 433-442.
- [4] 杨颜齐, 王桂尧, 赵亚, 等. 泥炭处治膨胀土的裂隙演化试验研究 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (2): 61-67.
- [5] 蔡祎, 欧明喜, 陈颖辉, 等. 干湿循环条件下复合改良膨胀土的工程特性及微观机理研究 [J]. 材料导报, 2024, 38 (增刊 1): 1-10.
- [6] 欧阳森, 张红日, 邓人睿, 等. 黄原胶生物聚合物改良膨胀土裂隙演化规律研究 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47 (1): 106-114.
- [7] 欧阳森, 张红日, 王桂尧, 等. 基于响应面法的生物基质改良膨胀土配比优化研究 [J]. 岩土力学, 2025, 46 (5): 1368-1378.
- [8] 张永刚, 李纪岩, 李党刚. 基于膨胀土改良的植物脲酶诱导碳酸钙沉淀技术 [J]. 材料科学与工程学报, 2025, 43 (2): 254-266.
- [9] 李珍玉, 单世杰, 林坤, 等. 微生物促进矿物相变及其改良膨胀土胀缩特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44 (1): 209-220.
- [10] 杨博文, 李凯, 张方祺, 等. 应力-干湿-冻融循环下膨胀土力学特性试验研究 [J]. 中国科技论文, 2025, 20 (2): 137-145.
- [11] 姜海波, 卢燕, 李琳, 等. 干湿-冻融作用输水渠道膨胀土强度特性及损伤演化规律研究 [J]. 岩土力学, 2025, 46 (5): 1356-1367.
- [12] 胡其志, 李俊杰, 陶高梁, 等. 高炉矿渣-电石渣复合改良膨胀土工程特性与机理研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (2): 602-612.
- [13] 汪鹏程, 刘明. 微波改良膨胀土冻融循环作用下的性能研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2025, 48 (1): 119-126.
- [14] 蔡国军, 田宏亮, 刘路路, 等. 复杂环境下膨胀土工程特性演化特征研究进展 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32 (6): 1511-1537.
- [15] 魏星, 陈睿, 程世涛, 等. 成都膨胀土地区深基坑降雨稳定性分析与变形预测 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (增刊 1): 525-534.
- [16] Yang Zhongnian, Lv Jianhang, Shi Wei, et al. Experimental study of the freeze thaw characteristics of expansive soil slope models with different initial moisture contents [J]. Scientific Reports, 2021, 11 (1).
- [17] Zhou Zhe, Chen Shanxiong, Wang Yinhui, et al. Crack evolution characteristics and cracking mechanism of red beds in central Sichuan during seepage and swelling [J]. Geofluids, 2021.
- [18] 张红日, 杨济铭, 徐永福, 等. 基于数字图像相关技术的膨胀土三维裂隙扩展特性研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (增刊 1): 309-323.
- [19] 杨济铭, 张红日, 陈林, 等. 基于数字图像相关技术的膨胀土边坡裂隙形态演化规律分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (1): 225-238.
- [20] Chen Xuanyi, Jing Xiaofei, Li Xiaoshuang, et al. Slope crack propagation law and numerical simulation of expansive soil under wetting-drying cycles [J]. Sustainability, 2023, 15 (7): 5655.
- [21] 张震, 林宇亮, 何红忠, 等. 膨胀土边坡的失稳特征与稳定性分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (1): 104-113.