

DOI: 10.11779/CJGE2019S2049

# 不同降雨强度下红黏土边坡干湿循环试验研究

龙安发<sup>1</sup>, 陈开圣<sup>\*1</sup>, 季永新<sup>2</sup>

(1. 贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州中建建筑科研设计院有限公司, 贵州 贵阳 550006)

**摘要:** 干湿循环过程中红黏土边坡力学参数发生了变化, 红黏土边坡破坏特征和机理与一般土质边坡不同。以贵州红黏土为研究对象, 采用浴霸-人工降雨模拟干湿循环, 在室内制备了较大尺寸边坡模型, 同时在边坡内部不同位置埋设含水率、孔隙水压力和温度传感器, 分析了干湿循环下红黏土边坡力学参数演变规律和破坏机理。研究表明, 随着深度增加, 边坡土体含水率受降雨强度影响逐渐减弱, 表层含水率受降雨强度影响明显。干燥期含水率呈现先增加后减小的现象。同一降雨强度下, 坡脚含水率最大, 其次为坡面、坡肩, 最后为坡顶。表层孔隙水压力在降雨、渗透期上升, 干燥期降低。降雨强度越大, 温度变化幅度越大。随深度增加, 边坡温度变化幅度逐渐减小。坡脚温度变化幅度较其他部位大。边坡破坏特征由溅蚀→面蚀→片蚀→裂缝→冲沟, 未见明显的滑动面。

**关键词:** 红黏土; 干湿循环; 破坏特征; 机理分析

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0193-04

**作者简介:** 龙安发(1993—), 男, 贵州剑河人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的科研工作。E-mail: 1622163491@qq.com。

## Experimental study on wetting-drying cycles of red clay slopes under different rainfall intensities

LONG An-fa<sup>1</sup>, CHEN Kai-sheng<sup>1</sup>, JI Yong-xin<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Construction Science Research & Design Institute Limited Company of CSCEC, Guiyang 550006, China)

**Abstract:** The mechanical parameters of red clay slopes change during the wetting-drying cycles. The failure characteristics and mechanism of the red clay slopes are different from those of the general soil slopes. For the Guizhou red clay, the bath heater-artificial rainfall-simulated wetting-drying cycles are used to prepare a large-scale slope model. The moisture content, pore water pressure and temperature sensors are buried at different positions inside the slope. The evolution law and mechanism of the mechanical parameters of red clay slopes under circulation are analyzed. The results show that with the increase of depth, the soil moisture content of the slope is gradually weakened by the rainfall intensity, and the surface moisture content is obviously affected by the rainfall intensity. The moisture content during the drying period increases first and then decreases. Under the same rainfall intensity, the moisture content at the slope toe is the largest, followed by the slope surface, the slope shoulder, and finally the slope top. The surface pore water pressure increases during rainfall and osmosis, and decreases during drying. The greater the rainfall intensity, the greater the temperature change. As the depth increases, the temperature change of the slope gradually decreases. The temperature at the slope toe changes more than that at other parts. The failure characteristics are as follows: splashing→face erosion→sheet erosion→crack→gulping, and no obvious sliding surface is seen.

**Key words:** red clay; wetting-drying cycle; failure characteristic; mechanism analysis

## 0 引言

大量工程实例表明, 红黏土边坡自身稳定性较差, 长期暴露在自然环境中容易出现破坏, 一些坡率在1:1~1:1.5的边坡虽然初期有较高的试验强度指标, 运营几年后却仍然出现了不同程度的失稳破坏<sup>[1]</sup>。究其原因, 在干湿循环过程中, 红黏土边坡力学参数发生了变化, 破坏形式与传统的圆弧滑动尚有区别<sup>[2]</sup>。

近年来, 国内学者对干湿循环作用下土质边坡破坏特征、破坏机理和裂隙发育规律做出了初步探索。吕海波等根据现场膨胀土边坡的含水率和大气影响深度,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668011, 51368010); 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2016]2005, 黔科合支撑[2018]2833)

收稿日期: 2019-04-29

\*通讯作者 (E-mail: chen\_kaisheng@163.com)

进行不同幅度下的干湿循环三轴试验,初步探讨了其强度指标随干湿循环变化的衰减规律,同时利用理正软件对均质和分层两类边坡模型进行了考虑干湿循环作用下的稳定性分析<sup>[3]</sup>。朱泽勇等在边坡内部埋设土壤水分传感器,对边坡内部含水率开展了监测,同时观测和分析边坡在非降雨、干湿循环和长期干湿循环等3种条件下的破坏特征及破坏机理<sup>[4]</sup>。

由此可见,干湿循环下土质边坡的研究主要集中在膨胀土方面,红黏土边坡的研究较少。全面掌握红黏土边坡在干湿循环过程中力学参数演变规律和破坏机理对完善红黏土边坡设计具有重要的学术和工程应用价值。本文以贵州红黏土为研究对象,采用浴霸-人工降雨模拟干湿循环,在室内制备了较大尺寸边坡模型,同时在边坡内部不同位置埋设含水率、温度、孔隙水压力传感器,分析了干湿循环下红黏土边坡力学参数演变规律、破坏特征和机理。

## 1 试验材料及方案设计

试验所用红黏土取自贵阳甲秀南路某施工现场,根据《公路土工试验规程》(JTGE40—2007)中的有关要求得出其液限为55.9%,塑限为26.1%,塑性指数为29.8,最优含水率为22.2%,最大干密度为1.61 g/cm<sup>3</sup>。

边坡初始含水率设计为最优含水率,压实度设计为90%,坡率为1:1.5。分别在坡顶、坡肩、坡面、坡脚的轴线、轴线左右10 cm的不同深度埋设土壤水分检测传感器(KM30B01)、振弦式孔压计(KYJ-32)以及热环氧热敏电阻传感器各12套,见图1。

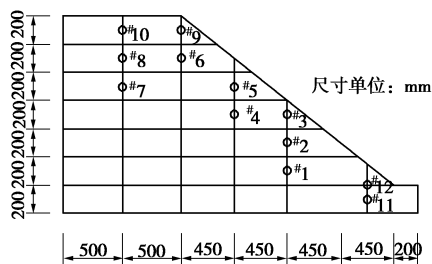


图1 传感器埋设示意图

Fig. 1 Schematic of embedded sensors

采用西安清远测控技术有限公司生产的QYJY-501(502)人工模拟降雨器作为降雨系统;干燥系统采用6个浴霸均匀置于边坡模型上方,同时利用电风扇来增加空气流动。本试验设计降雨强度分别为10, 60, 110 mm/h三种降雨强度。结合贵阳市气候特点,干湿循环方案为:先降雨1 h,然后静置24 h,最后用浴霸升温干燥。干燥期分别在坡顶、坡面选取尺寸为400 mm×400 mm区域观察裂缝变化,长度采用细线沿着裂缝方向测量,宽度采用游标卡尺测量,深度测量采用插针法测量。干燥期每隔1 h测量各区

域选点处裂缝长度、宽度和深度,直至裂缝长度、宽度和深度不再发生变化则关闭浴霸,完成一次干湿循环试验。依此步骤完成5次干湿循环试验。由于篇幅所限,仅取部分数据分析。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 含水率变化关系

由图2(a)可知:边坡表层含水率受降雨强度影响明显,降雨强度越大,含水率增加的幅度越大;随着干湿循环次数的增加,含水率增加的幅度越明显。究其原因,降雨期形成的面蚀、冲沟以及干燥期形成的裂缝随着干湿循环次数的增加,对边坡表面影响程度逐渐增大。降雨强度越大,对边坡冲蚀的程度越大,干湿循环次数增加,边坡表面的裂缝数量增多。边坡表层土体随着干湿循环次数和降雨强度的增加使其变得更加松散。干燥期产生的裂缝为雨水进入边坡内部提供了路径,降雨期雨水对边坡的冲蚀加剧了这种作用。雨水渗入土体,造成边坡含水率逐渐升高。边坡土体含水率在降雨期和渗透期前期增加较快,说明雨水渗透速度较快,渗透后期增加缓慢,干燥期含水率呈现先增加后减小的现象,也就是说干燥期含水率的减小存在滞后现象。原因是干燥前期边坡表层温度较高,由于土体导热性较差,边坡内部温度升高需要一定时间,在此期间水分继续渗入边坡内部,含水率增加。随干燥时间增加,边坡内部温度升高,水分蒸发,含水率降低。由图2(b)可知:在同一降雨强度下,边坡不同位置含水率受干湿循环影响程度不同,坡脚含水率最大,其次为坡面、坡肩,最后为坡顶。究其原因,在降雨过程中,渗入边坡内部的雨水,一部分在重力作用下,逐渐向坡底和坡脚移动。未渗入边坡的雨水沿坡面表层向坡脚流动,最终汇集在坡脚,然后再经坡脚裂缝渗入坡脚内部,进而造成坡脚含水率增大。

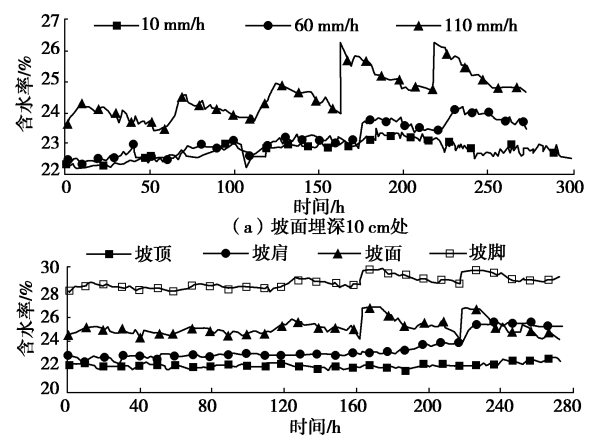


图2 含水率与时间的关系

Fig. 2 Relationship between moisture content and time

### 2.2 孔隙水压力变化关系

边坡超静孔隙水压力的消散和外界水分的渗入和蒸发是造成干湿循环试验过程中孔隙水压力变化的两大主要原因。由图 3 (a) 可知：表层孔隙水压力在降雨、静置期上升，干燥期降低。边坡含水率直接影响其孔隙水压力，在降雨期间，边坡含水率上升，孔隙水压力上升。边坡表层孔隙水压力主要是由外界水分的渗入和蒸发控制。由图 3 (a), (b) 可知：边坡孔隙水压力均呈现出随着降雨强度增大，孔隙水压力增大。而坡脚出现在降雨强度为 110 mm/h 时孔隙水压力在 -15~15 kPa 范围内波动,说明坡脚处孔隙水压力不稳定。由图 3 (c) 可知：同一降雨强度下，坡顶、坡肩和坡面的孔隙水压力随干湿循环次数而变化的幅度并不大，但是坡脚的孔隙水压力受干湿循环的影响明显，在 -5~3 kPa 内波动。主要是因为坡脚受干湿循环影响明显，干湿循环过程中外界水分更加容易渗入和蒸发，造成坡脚含水率波动，而孔隙水压力与含水率密切相关，所以坡脚孔隙水压力产生上述现象。从整体上来看，坡脚孔隙水压力远大于其他部位。根据有效应力原理，孔隙水压力越大，有效应力越低，进而造成边坡抗剪强度降低，故坡脚是边坡最容易破坏的部位。

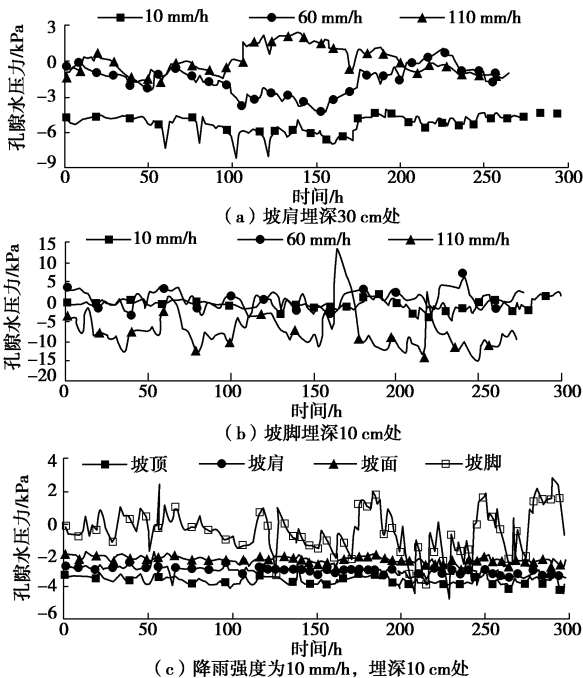


图 3 孔隙水压力与时间的关系

Fig. 3 Relationship between pore water pressure and time

### 2.3 温度变化关系

由图 4, 5 可知：边坡温度变化幅度随干湿循环次数的增加而增加。边坡内部温度变化较稳定，在第 2 次循环之后，温度变化幅度差距逐渐明显。降雨强度

越大，温度变化幅度越大。同一降雨强度下，随着埋置深度的增加，边坡温度变化幅度逐渐减小。相同降雨强度和埋深下，坡脚温度变化幅度较其他部位大。究其原因，边坡温度变化与边坡含水率变化情况密切相关。干湿循环造成坡脚含水率较其他部位高，水的导热性较土体的导热性强，所以坡脚温度受干湿循环影响明显，温度变化幅度较边坡其他部位大。

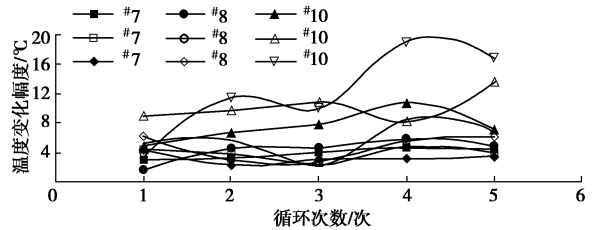


图 4 坡顶温度变化幅度与循环次数的关系

Fig. 4 Relationship between amplitude of temperature at slope top and number of cycles

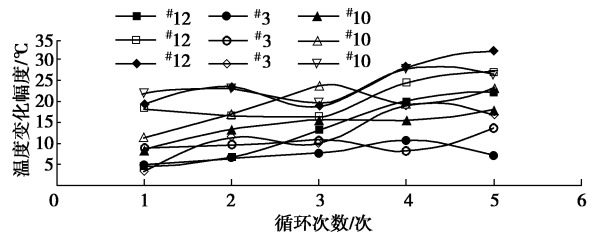


图 5 埋深 10 cm 处温度变化幅度与循环次数的关系

Fig. 5 Relationship between temperature variation amplitude and number of cycles at depth of 10 cm

## 3 干湿循环下边坡破坏特征及机理分析

3 种降雨强度下的边坡破坏形式为：边坡破坏最初由雨滴溅蚀开始，逐渐连接转变为面蚀，径流沿着裂缝冲刷，破坏面积扩大。在雨水冲刷下，坡肩与坡脚处首先出现冲沟，冲沟延伸、贯通，冲沟数量逐渐增多，冲沟变宽、变深。边坡在经历 5 次干湿循环后其最大冲沟深度为 12 cm，绝大部分冲沟深度保持在 10 cm 以内，整个干湿循环过程中未见明显的滑动面，验证了干湿循环下红黏土边坡的破坏和其它土类不同。

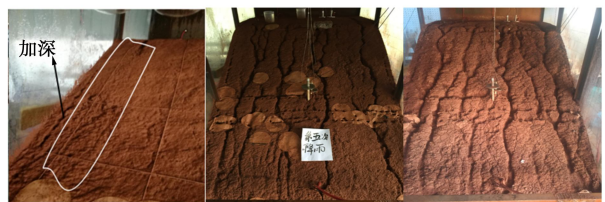


图 6 5 次干湿循环后边坡破坏特征

Fig. 6 Failure characteristics of slope after five wetting-drying cycles

红黏土边坡变形破坏机理与干湿循环有着密切关系。降雨期,雨水沿裂隙渗入到土体内,土体吸水产生膨胀,土粒间的间距增大;土中易溶的矿物遇水溶解,造成土体孔隙增大;雨滴具有较大的重力势能,能对边坡土体产生较大的溅蚀。这3种产生的效果均表现为降低土体的压实度。同时土中胶结物质遇水发生化学反应,胶结物质含量减小将使粒间黏聚力降低。随着降雨的继续进行,土体吸水膨胀、裂隙逐渐愈合,坡面形成径流对坡面土体进行冲刷;由于边坡所有雨水均汇集到坡脚,造成坡脚径流增大,同时坡脚土体含水率增大,孔隙水压力也增大,坡脚抗剪强度降低,所以冲沟现象将首先自坡脚处开始。土体吸水后自重逐渐增大,引起边坡的下滑力增大,同时由于土体抗剪强度的降低,边坡抗滑力也降低。另外红黏土的低渗透性使得裂隙在降雨期具有较好的蓄水能力,在裂隙处产生静水压力,静水压力在坡顶表现为水平推力,在坡面表现为沿破面水平向下的推力。土体裂隙静水压力和内部孔隙水压力剧增,红黏土边坡此时将发生更大范围的失稳坍塌下滑。

## 4 结 论

(1) 随着深度增加,边坡土体含水率受降雨强度影响逐渐减弱,表层含水率受降雨强度影响明显,降雨强度越大,含水率增加的幅度越大。边坡土体含水率在降雨期和渗透期前期增加较快,渗透期后期增加缓慢,干燥期含水率呈现先增加后减小的现象,即滞后现象,同一降雨强度下,坡脚含水率最大,其次为坡面、坡肩,最后为坡顶。

(2) 表层孔隙水压力在降雨、渗透期上升,干燥期降低。坡肩、坡面的孔隙水压力随降雨强度增大,孔隙水压力增大,坡脚在降雨强度为110 mm/h时孔隙水压力在-15~15 kPa范围内波动,说明坡脚处孔隙水压力不稳定。同一降雨强度下,坡顶、坡肩和坡面的孔隙水压力随干湿循环次数变化幅度不大,但坡脚的孔隙水压力受干湿循环的影响明显,在-5~3 kPa内波动。

(3) 降雨强度越大,温度变化幅度越大。同一降雨强度下,随着埋置深度的增加,边坡温度变化幅度逐渐减小。同一埋置深度、同一降雨强度下,坡脚温度变化幅度较其他部位大。

(4) 边坡破坏最初由雨滴溅蚀开始,逐渐连接转

变为面蚀,径流沿着裂缝冲刷,破坏面积扩大。坡肩与坡脚处首先出现冲沟,然后逐步延伸、贯通,冲沟数量逐渐增多,冲沟变宽、变深。整个干湿循环过程中未见明显的滑动面,验证了干湿循环条件下红黏土边坡的破坏和其它土类不同。

(5) 红黏土边坡变形破坏机理与干湿循环有着密切关系。干湿循环导致红黏土开裂和含水率的变化。红黏土内部经历的松弛—饱水—坍塌作用是边坡变形开裂的内因,而降雨和蒸发则是促进这一进程快速发展的外因。

## 参考文献:

- [1] 刘天义, 王俊喆, 吴立坚. 红黏土边坡破坏机理与稳定计算方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015(8): 47 - 490. (LIU Tian-yi, WANG Jun-zhe, WU Li-jian. Study on failure mechanism and stability calculation method of red clay slope[J]. Highway Traffic Science and Technology (Application Technology Edition), 2015(8): 47 - 49. (in Chinese))
- [2] 陈南, 吴立坚, 周勇, 等. 红黏土边坡浅层破坏机理及稳定评价方法[J]. 公路交通科技, 2016, 33(3): 37 - 42, 88. (CHEN Nan, WU Li-jian, ZHOU Yong, et al. Failure mechanism of shallow layer of red clay slope and stability evaluation method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(3): 37 - 42, 88. (in Chinese))
- [3] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环效应及其对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 934 - 939. (ZENG Zhao-tian, LÜ Hai-bo, ZHAO Yan-lin, et al. Wetting-drying effect of expansive soils and its influence on slope stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 934 - 939. (in Chinese))
- [4] 朱泽勇, 贺桂成, 李丰雄, 等. 干湿交替条件下红土边坡破坏机理试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(2): 73 - 77. (ZHU Ze-yong, HE Gui-cheng, LI Feng-xiong, et al. Experimental study on failure mechanism of laterite slope under dry and wet cycles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(2): 73 - 77. (in Chinese))

(责编: 孙振远)