

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.12.008

不同降雨模式下膨胀岩边坡模型试验研究

范秋雁¹, 刘金泉², 杨典森², 袁敬强²

(1. 广西大学 资源与冶金学院, 广西 南宁 530004; 2. 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)

摘 要: 采用原状膨胀岩进行室内边坡模型试验, 研究膨胀岩边坡在连续降雨和湿-干循环模式下的变形和水分入渗特性, 揭示两种模式下膨胀岩边坡的变形破坏模式。试验发现, 连续降雨模式下初期数次降雨对膨胀岩边坡变形影响最大, 有明显的水平方向位移, 后期变形很小且趋向稳定。湿-干循环模式下边坡膨胀变形及深部岩体含水率降雨完成后一段时间才达到峰值, 随循环次数及降雨量增大, 边坡变形速率及变形量都明显增大, 岩体裂隙不断发育, 水分入渗深度增大, 但限于表面一定深度, 对深部岩体影响较小。试验结果对工程应用有一定的指导意义: 连续降雨模式初期膨胀较大, 须加强和完善初期的排水措施, 做好边坡的支挡防护措施; 湿-干循环模式下, 随循环次数增加, 做好坡面的防护措施, 以起到保湿防渗作用; 两种降雨模式均说明纯膨胀性泥岩边坡不发生典型的圆弧滑动等破坏模式, 而工程边坡的滑动多发生在软弱夹层上, 因此, 要做好该类边坡的软弱夹层特性勘察, 对于不含软弱夹层的纯泥岩边坡要重点监测其浅层变形特性。

关键词: 膨胀岩; 边坡; 连续降雨; 湿干循环; 变形; 体积含水率; 模型试验

中图分类号: TU 458+4

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 12 - 3401 - 09

Model test study of expansive rock slope under different types of precipitation

FAN Qiu-yan¹, LIU Jin-quan², YANG Dian-sen², YUAN Jing-qi²

(1. College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The indoor slope model tests were conducted to investigate the deformation, water infiltration and failure characteristics of an expansive rock slope under different types of precipitation. Significant horizontal displacement was found under the initial rainfall in continuous rainfall mode, whereas the later deformation was small and tended to be stable. The peak values of displacement and deep rock moisture content were reached at a period of time after rainfall ceased. With the increase of cycle number and rainfall, the slope deformation and the deformation rate increased significantly, and the rock fissures developed further, resulting in an increase in water infiltration depth. This was observed in the soil layer close to the ground surface, but not in the deep rock. The experimental results imply that, due to initial large swelling-induced deformation in the continuous rainfall mode, the drainage and protective measures should be enforced and improved; in the wet-dry cycles mode, the anti-seepage measures for slope surface should be improved to resist the infiltration of rain with the increase of cycle number. In addition, the typical circular sliding failure of purely expansive rock slope was not found in aforementioned two rainfall modes in the tests. However, the engineering slope failure often occurs in the weak interlayer. Therefore, further investigation into the weak interlayer in expansive rock slope should be conducted, and for the mudstone slope without weak interlayer, more attention should be paid to monitoring the shallow deformation characteristics.

Keywords: expansive rock; slope; continuous rainfall; wet-dry cycles; deformation; volumetric moisture content; model test

1 引 言

膨胀岩是一种对气候环境极其敏感的软岩, 具

有失水干缩、吸水体积膨胀及强度降低等物理力学特性。在连续降雨情况下, 膨胀岩边坡含水率增大, 岩体强度下降, 从而引发边坡变形失稳等地质灾害。

收稿日期: 2014-11-19

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41162012); 广西自然科学基金 (No.2010GXNSFA013005)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41162012) and the Natural Science Foundation of Guangxi (2010GXNSFA013005).

第一作者简介: 范秋雁, 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: qiuyan@gxu.edu.cn

通讯作者: 刘金泉, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事隧道突水突泥灾害致灾机理及控制技术研究。E-mail: jinquanliu99@163.com

而膨胀岩边坡在湿-干循环气候下,反复的干缩不断促使岩体裂隙的扩展,使岩体完整性遭到破坏,在久旱后第1次大的降雨时极易发生失稳破坏。因此,研究膨胀岩边坡在连续降雨和湿-干循环气候下的变形规律、水分入渗特性及破坏模式具有理论和工程意义。

近些年来,关于膨胀土的特性做了很多研究^[1-9],以膨胀岩为研究对象也开展过一系列研究^[10-14]。不少学者开展了膨胀岩土在气候条件下的变形和水分入渗特性研究,周健等^[3]以重塑膨胀土作为研究对象进行室内降雨模型试验,对膨胀土在降雨和蒸发状态下的变形与含水率变化特性进行研究。范秋雁等^[14]利用数值模拟对膨胀岩边坡降雨入渗稳定性进行了研究。但过去研究对象多为重塑膨胀土^[3,4,15],研究方法以理论分析及数值模拟居多^[5,6,16],且研究内容多集中在干-湿循环模式下膨胀土的裂隙发展等对边坡稳定性的影响^[7-9]。而对膨胀岩在干-湿循环模式下的变形及水分入渗特性研究较少,连续降雨模式下的研究更是不足。

考虑膨胀岩的结构性以及实际气候环境的复杂性,笔者以膨胀岩原状岩样为试验对象,开展连续降雨模式下膨胀岩边坡模型试验以及考虑不同降雨量下的湿-干循环模式膨胀岩边坡模型试验,较真实地反应膨胀岩边坡在雨季和旱季下的变形和水分入渗特性。探索两种降雨模式下膨胀岩边坡破坏特征。

2 模型试验

2.1 模型介绍

本试验以广西南宁地区膨胀性泥岩原状样为试验对象,分别切削成两个膨胀岩边坡模型,对两个试样分别考虑连续降雨和湿-干循环两种降雨模式。膨胀岩的物理性质指标见表1。泥岩为中等膨胀性泥岩。

表1 膨胀岩的物理性质指标

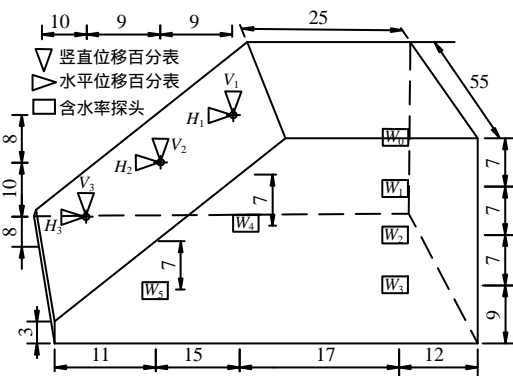
Table 1 Physical indices of expansive rock

天然密度	天然含水率	缩限	自由膨胀率
$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$w / \%$	$w_s / \%$	$\delta_{ef} / \%$
2.1	27.7	7.36	75

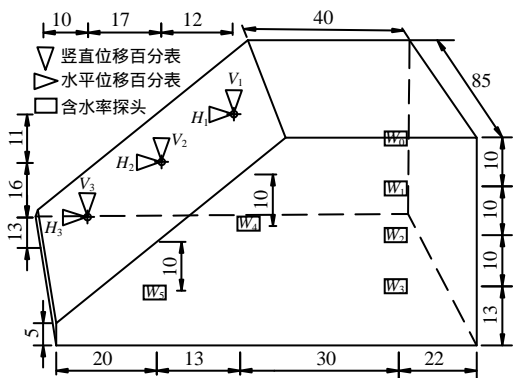
注:文中含水率为体积含水率,且后文中的试验初始含水率由于试验进行时间和静置干缩程度不同而有所不同。

试样均取自南宁市某建设工地的古近系中风化泥岩原状样,取回时岩样呈不规则地六面体,连续降雨模型试验试样经加工成尺寸为(长×宽×高)55 cm×55 cm×30 cm的边坡,坡顶平台长为25 cm,坡角为42°。湿-干循环模型试验试样加工成尺寸

为(长×宽×高)85 cm×85 cm×43 cm的边坡,坡顶平台长为40 cm,坡角约42°。两种降雨模式下的模型尺寸及监测系统布置见图1。试验监测内容包括位移和含水率。位移监测点分别设在坡面坡顶、坡中、坡脚3个位置,位移监测包括含水平和竖直位移,水平位移监测点从坡顶至坡脚分别记为 H_1 、 H_2 、 H_3 ,竖直位移监测点从坡顶至坡脚分别记为 V_1 、 V_2 、 V_3 。含水率由TDR-S型体积含水率探头量测,边坡侧面共布置6个含水率监测点,分别为 $W_0 \sim W_5$ 。其中 $W_0 \sim W_3$ 是竖直方向不同深度的4个点, W_4 、 W_5 是与 W_1 距坡面同深度但不同坡面位置的两个监测点。边坡模型考虑侧限条件限制,采用铁结构模型箱固定,箱子的一侧开孔供含水率监测。



(a) 连续降雨试验模型尺寸及监测系统示意图



(b) 湿干循环试验模型尺寸及监测系统示意图

图1 边坡模型尺寸及监测系统示意图(单位:cm)

Fig.1 Tested slope dimensions and monitoring system (unit: cm)

2.2 试验方案

2.2.1 连续降雨模式

模型边坡按照设计切削完成后,在表面覆盖一层塑料薄膜静置。试验开始前安装及标定好百分表,同时记录初始含水率后开始降雨。降雨采用喷壶洒水模拟,降雨过程做到竖直均匀洒水,降雨强度参考广西南宁6月份日均降雨量,试验降雨持续时间

为 1 h，即 6 mm/h。降雨后位移数据按 5、10、20、30 min、1、2、4、6 h，后续间隔 2 h 记录，直至达到膨胀稳定，膨胀稳定标准参考文献[17]中无荷膨胀试验的膨胀标准，即 2 h 内变形不超过 0.01 mm。而含水率的测量目的是为了总结不同深度的含水率变化规律，因此，其测量按照降雨前初始值、降雨后 1 h、降雨后 2 h、膨胀稳定对应时刻，同时再根据试验中出现的现象及问题需要补充监测次数。膨胀稳定后再开始下一场降雨，每次降雨强度和持续时间、膨胀稳定标准均一致。

2.2.2 湿-干循环模式

边坡模型加工及监测仪器安装完成后，按照预定降雨标准进行模拟降雨，完成湿化过程，然后让模型在自然状况下失水干缩，直至达到干缩标准，干缩标准以文献[18]收缩试验为准：即 24 h 内位移变形不超过 0.01 mm。湿化和干缩过程合称一个完整的湿-干循环过程。该模式考察了不同降雨量对边坡变形及含水率的影响，试验先后共进行了 4 次小雨、2 次中雨、2 次大雨、1 次暴雨的湿-干循环过程。各雨量等级^[19]及试验降雨量选择如表 2 所示。

表 2 雨量等级及试验降雨量
Table 2 Rainfall level and test rainfall

雨量等级	小雨	中雨	大雨	暴雨
降雨量/(mm/24 h)	<10	10~25	25~50	>50
试验选择的降雨量/(mm/24 h)	6	12	30	>200

注：为试验方便，小、中、大 3 个级别降雨的降雨量全集中在 1 h 内降完，其余 23 h 内无雨。暴雨则连续降了 2 d。

位移数据按照降雨后 5、10、30 min、1、2、4、6 h，后续间隔 2 h 记录一次，直至 2 h 内位移变形不超过 0.01 mm，即膨胀稳定。待稳定进入收缩阶段时，视试样的初始湿度及收缩速度，每隔 1~4 h 测记一次读数；两日后，每隔 24 h 测记一次，直至达到干缩标准完成一次循环试验。含水率记录与位移记录时间一致。

3 试验结果及分析

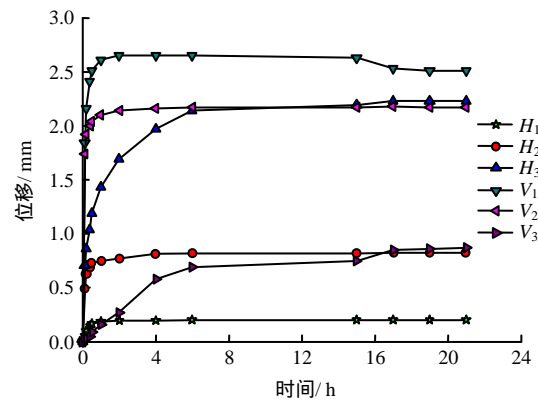
3.1 连续降雨模式下模型试验结果及分析

本次连续降雨模型试验共进行了 30 次降雨试验，边坡从第 24 次降雨后各点位移变化始终在 0.01 mm 内，根据膨胀稳定标准认为，边坡整体变形达到稳定状态，在第 26 次降雨后降雨全部通过坡面排走，只有表层含水率变化，中部及深部含水率变化很小，认为边坡含水率达到饱和状态。故位移及含水率数据分别记录至第 24、26 次降雨止。图 2、3 分别为连续降雨模式下位移及含水率变化曲线（由

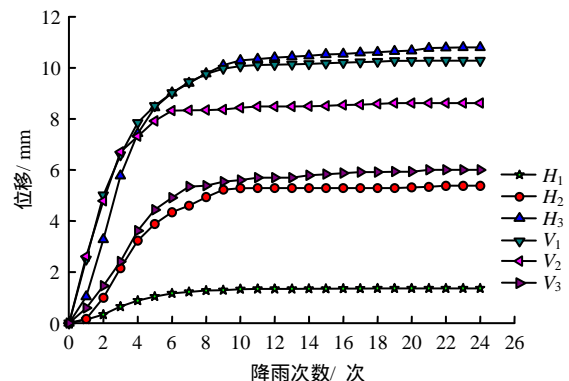
于规律相近，只给出一次降雨位移和含水率时变曲线）。表 3 为全程降雨位移及前 6 次降雨位移。

3.1.1 连续降雨模式下边坡位移变形响应

从单次降雨位移来看（见图 2(a)），降雨后坡面上各点的位移呈明显地快速膨胀-缓慢膨胀-稳定的变形特征，降雨后 4 h 内完成了大部分的膨胀变形。但由于边坡各点膨胀速度不一，尽管其他各点仍在膨胀，但有些位置已经达到稳定状态甚至进入蒸发收缩状态，如图 2(a)中的坡顶竖直位移 V_1 率先达到稳定阶段。



(a) 单次降雨各点位移时变曲线(第 3 次降雨)



(b) 边坡各点位移全程变形图

图 2 边坡位移响应曲线图

Fig.2 Relationship of slope displacement and rainfall times

表 3 全程降雨位移及前 6 次降雨位移
Table 3 Displacements of all rainfall and first six rainfalls

位移	全程位移 / mm	前 6 次位移 / mm	前 6 次变形占全程比重 / %
H_1	1.37	1.17	85.4
H_2	5.38	4.34	80.8
H_3	10.80	9.03	83.6
V_1	10.30	9.02	87.7
V_2	8.62	8.33	96.6
V_3	6.01	4.92	81.9

从全程变形曲线（见图 2(b)）及表 3 看出，随降雨次数增加，各点位移逐步增加，但增速明显放缓，初期 6 次降雨变形最大，占变形总量 80% 以上。全程变形量呈 $V_1 > V_2 > V_3$ ， $H_3 > H_2 > H_1$ 规律，膨胀变形量大小与膨胀岩体临空面及膨胀程度有关， V_1 最

大是因为坡顶处于斜面及坡顶平台两个临空面处，岩体充分膨胀，而 H_3 最大是由于水分流入坡脚底部，在底部积水形成了“水槽”，导致坡脚岩体充分膨胀。

3.1.2 连续降雨模式下边坡含水率响应

通过对边坡含水率分析可得到以下认识：

(1) 从图 3(a)知，膨胀岩不同深度含水率变化规律总体相近，均呈先增大再减小变化。同时不同深度的含水率对降雨的敏感度随深度增加而减弱。这与岩体吸力和吸力平衡有关，降雨后岩体近表面由于吸力作用吸水，随着饱和度增加吸力减小，待

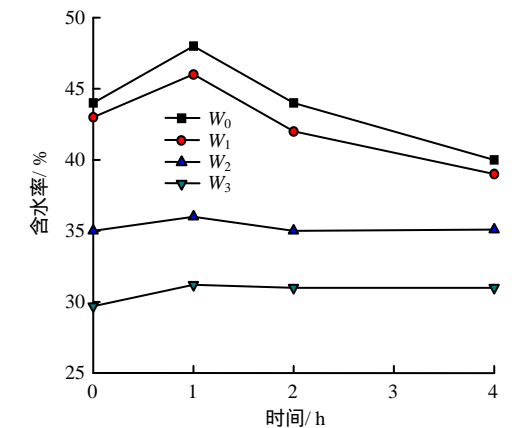
吸力平衡后吸力大幅度下降，此时下部岩体由于水分尚未入渗至此，吸力变化较小，较上层吸水岩体吸力要大，水分在下部岩体吸力作用下开始下渗，下部岩体含水率才开始响应。这就造成岩体含水率对降雨的敏感度随深度增加而减弱。

(2) 从图 3(b)可得到含水率分层变化规律，边坡表层 (W_0 和 W_1) 初次降雨即有响应， W_2 、 W_3 分别在第 4 次和第 6 次降雨才开始响应，第 11 次降雨后边坡深部 W_2 和 W_3 的变化幅度较之前有较大减小，此后一直维持在 35% 和 30% 左右。对于膨胀岩，其饱和含水率受上覆压力不同而不同，上覆压力增大导致岩体孔隙减小，饱和含水率降低。另外，上覆压力的增加导致有效应力的增加，从而阻止水分的入渗，进一步降低深部含水率。

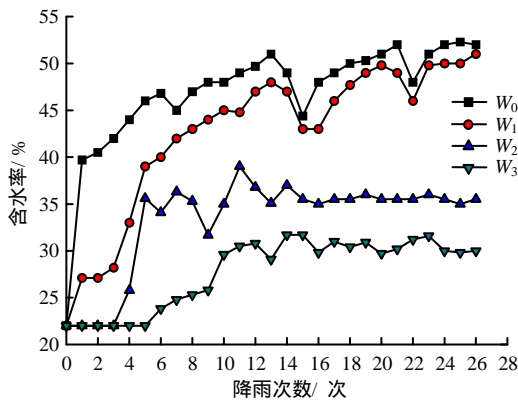
(3) 从图 3(c)知，降雨对膨胀岩边坡各个部分影响区域深度近乎一致，但不同坡面位置含水率变化特性不一样，位于坡顶的 W_1 要大于位于坡中的 W_2 和坡脚的 W_3 ，位于坡脚的 W_3 在整个历程中呈现较大的波动性，坡脚含水率的快速增大和减小是加快形成裂隙以及崩塌滑坡的一大因素。

3.1.3 膨胀稳定时间变化规律

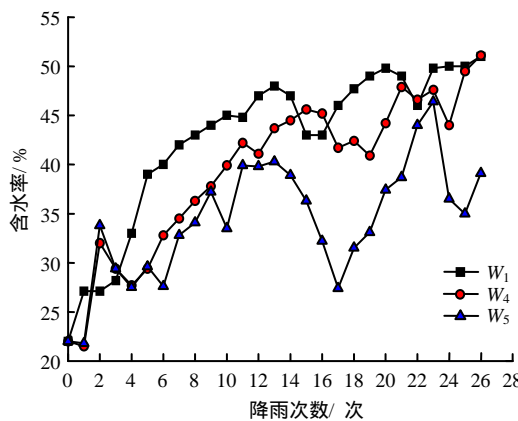
图 4 为各次降雨膨胀稳定时间曲线。



(a) 单次降雨不同深度含水率时变曲线(第 22 次降雨)



(b) 边坡不同深度各点含水率全程变化图



(c) 相同边坡深度不同坡面位置各点含水率全程变化图

图 3 边坡各点含水率响应曲线图

Fig.3 Relationship of slope moisture and rainfall times

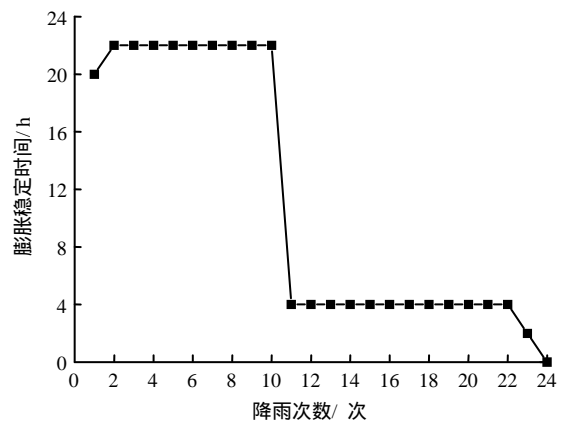


图 4 边坡各次降雨膨胀稳定时间

Fig.4 Slope dilation steady time in every rainfall

从图可知 边坡在前 10 次降雨膨胀稳定时间较长，一般在 22 h 左右，随着岩体含水率增加，变形潜势逐步减小 降雨后更易达到稳定，至 11 次降雨，膨胀稳定时间大幅度下降至 4 h，此后长时间维持此值，结合变形及含水率变化规律知，岩体至 11 次降雨后变形及含水率变化很小，岩体近乎达到饱和，随着进一步的降雨，岩体内部达到终了含水率，边坡不再发生变形，表现为边坡的长期稳定。

3.1.4 连续降雨模式下边坡变形破坏特征

连续降雨模式下，边坡仅在初期降雨时坡脚产生局部崩塌，同时表层膨胀岩泥化、崩解成鳞片状

碎屑松散物不断滑落。初期数次降雨发生了较大的位移，后期变形很小，边坡在连续降雨过程中并没有想象中的快速下滑，相反边坡吸水充分膨胀并保

持一个长期的稳定，这其中原因：一是模型的尺寸效应；另一方面也说明连续降雨不一定会使裂隙不发育的纯膨胀性泥岩边坡产生滑坡。试验照片见图 5。



(a) 试验完成后膨胀岩边坡变形破坏图



(b) 膨胀岩崩解成鳞片状碎屑物图

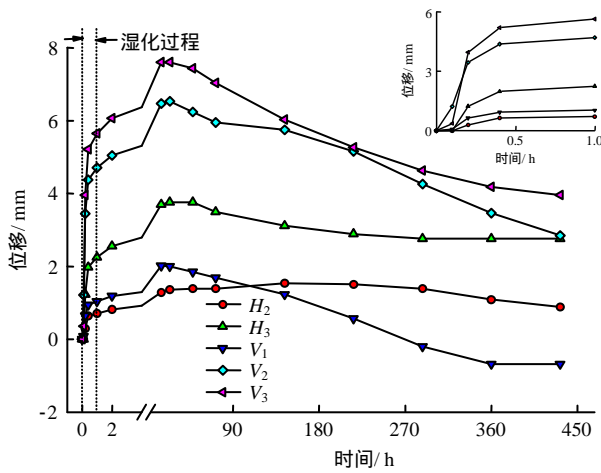
图 5 连续降雨模式下试验照片
Fig.5 Photos of continuous rain mode

3.2 湿-干循环作用下模型试验结果及分析

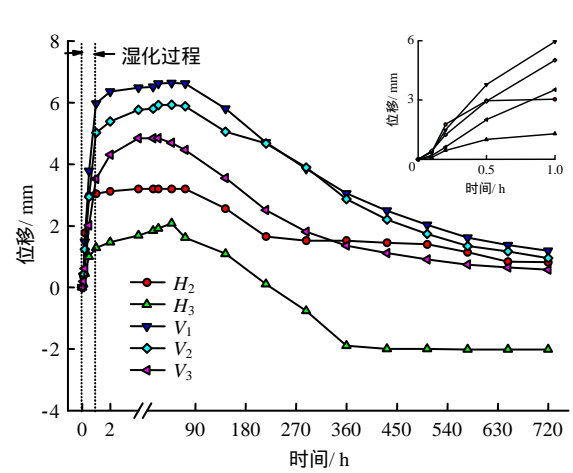
本试验共进行了 9 次循环，含 9 次湿化和 8 次干缩，至第 9 次湿化后经判断认为边坡发生了破坏。

3.2.1 湿-干循环位移响应

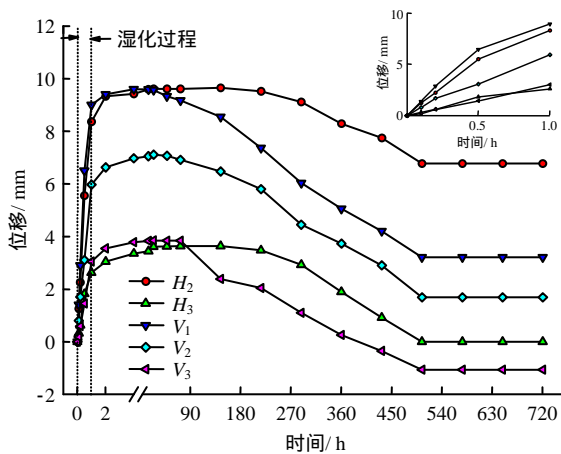
图 6 为各个降雨量循环下的位移-时变曲线（各降雨模式只取一个循环来分析， H_1 测试点由于故障



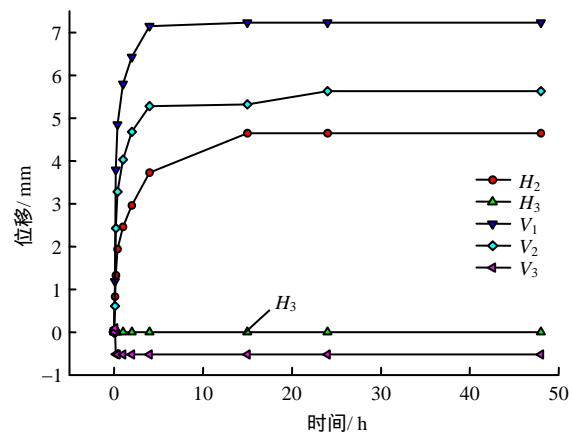
(a) 小雨模式下位移-时变曲线



(b) 中雨模式下位移-时变曲线



(c) 大雨模式下位移-时变曲线



(d) 暴雨模式下位移-时变曲线

图 6 不同降雨量下湿干循环位移时变曲线
Fig.6 Displacement-time curves in the wet-dry cycle process for different rainfalls

不再给出),通过分析各雨量下湿-干循环位移变化得到以下认识:

(1) 整个循环过程中各点位移均呈快速升高,然后下降规律,降雨湿化过程位移增长较大(湿化持续时间为1h,湿化曲线见各图内插小图),但湿化完成时位移并未达到最大值,其各点对应的膨胀量占最大膨胀量的50%~90%(见表4、5)。湿化完成后仍有一定的膨胀,一般在15~24h间膨胀达到最大值,其后才进入收缩状态。收缩过程呈快速收缩—缓慢收缩—平稳状态。

(2) 暴雨较大雨各点湿化过程膨胀变形均有一定下降(见表4),这与边坡表面岩体松散成泥状物流失有关,暴雨时表面岩体大范围的崩塌流失,而深部岩体由于裂隙不发育,水分入渗较少,未能充分膨胀,总体表现出变形增长较小的结果。

表4 不同降雨量下降雨湿化完成位移变形值(单位: mm)

Table 4 Displacement in the wet process for different rainfalls (unit: mm)

测点号	小雨	中雨	大雨	暴雨
H_2	0.71	3.04	8.36	4.65
H_3	2.25	1.29	2.62	0.00
V_1	1.04	5.97	9.00	7.23
V_2	4.71	5.02	5.97	5.63
V_3	5.65	3.52	3.05	-0.52

注:负号是相对位移初始值0计算的,表示收缩。

表5 不同降雨量下各点最大膨胀及收缩位移变化量(单位: mm)

Table 5 Peak values of dilation and shrink displacement for different rainfalls (unit: mm)

类型	雨量	H_2	H_3	V_1	V_2	V_3
最大膨胀量	小雨	1.54	3.76	2.02	6.53	7.6
	中雨	3.20	2.08	6.64	5.93	4.84
	大雨	9.65	3.64	9.60	7.07	3.85
	暴雨	4.65	0.00	7.23	5.63	-0.521
最大收缩量	小雨	0.65	1.00	2.70	3.68	3.64
	中雨	2.38	4.09	5.45	4.98	4.27
	大雨	2.88	3.64	6.39	5.38	4.92
循环位移变化量	小雨	0.89	2.76	-0.68	2.85	3.96
	中雨	0.82	-2.01	1.19	0.95	0.57
	大雨	6.77	0.00	3.21	1.69	-1.07

注:最大膨胀量及循环位移变化量(循环结束位移)是相对初始位移0来计算的,负号表示收缩;最大收缩量是最大膨胀量与循环位移变化量之差。

(3) 由表5可知,随降雨量增大(除暴雨外),边坡膨胀及收缩量均不断增大。从循环位移变化量

知,随降雨量增大,坡顶竖直方向呈膨胀隆起量不断增大的变化,坡中及坡脚竖直方向呈膨胀隆起量不断减小甚至沉降(V_3 在大雨后出现沉降)的变化;水平方向上,坡中位置一直累计较大膨胀变形,坡脚小雨时出现较大位移,后期由于沉降下陷而下降。即,随降雨量增大,边坡坡顶呈较大竖向膨胀变形,沿顺坡向竖向膨胀变形减弱而沉降增大。水平向位移每次都有较大增长。

3.2.2 湿-干循环含水率响应

图7为各雨量下循环过程含水率-时变曲线,曲线内插图为对应循环下的湿化过程时变曲线(湿化持续时间为1h)。分析图7各曲线得到以下认识。

(1) 整个循环过程中各点含水率均呈快速升高,然后下降规律,降雨湿化过程含水率增长较大,湿化完成后,坡面表层和10cm处含水率已经达到峰值;而深部岩体含水率在湿化完成后48~72h间才达到峰值,随后才开始下降直至稳定。

(2) 水分入渗深度随循环次数及降雨量增加而增大,小雨时含水率仅在表层10cm内附近响应(W_0 、 W_1 、 W_4 、 W_5 有变化),较深处的 W_2 、 W_3 分别在中雨和大雨时才开始响应。这是由于边坡表层渗透路径较短,渗透时间短,较深处位置则由于膨胀岩渗透性低及渗透路径较长导致渗透时间更长,这就形成了深部含水率响应相对较晚的情形。

(3) 由表6可知,随着循环次数及降雨量增大,最大含水率、最大含水率变化量总体呈升高趋势、最终含水率呈下降趋势。这是因为随着循环次数增加,裂隙更加发育,水分入渗深度及入渗量均得到增长。同时,裂隙的发育促进了水分蒸发丧失,导致含水率降低更大。结合变形规律分析,湿-干循环是裂隙发育、边坡变形的主要原因,裂隙的发育导致渗透性增大、强度降低更是膨胀岩边坡在降雨入渗下发生变形甚至破坏的主要内在机制之一。

分析位移与含水率变化,边坡位移在降雨停止后仍不断增长的原因与深部岩体有关,降雨停止后表层含水率立即下降,而深部岩体由于水分继续入渗仍在膨胀,只要岩体吸水产生膨胀效应大于上覆自重作用效应,膨胀变形就会继续,直至水分入渗产生的膨胀变形与上覆自重产生的膨胀压力效应相当时,膨胀变形达到最大值,而深部含水率由于水分入渗而增大,同时岩体在不断失水蒸发,当岩体的蒸发量和入渗量一致时,含水率达到最大值。

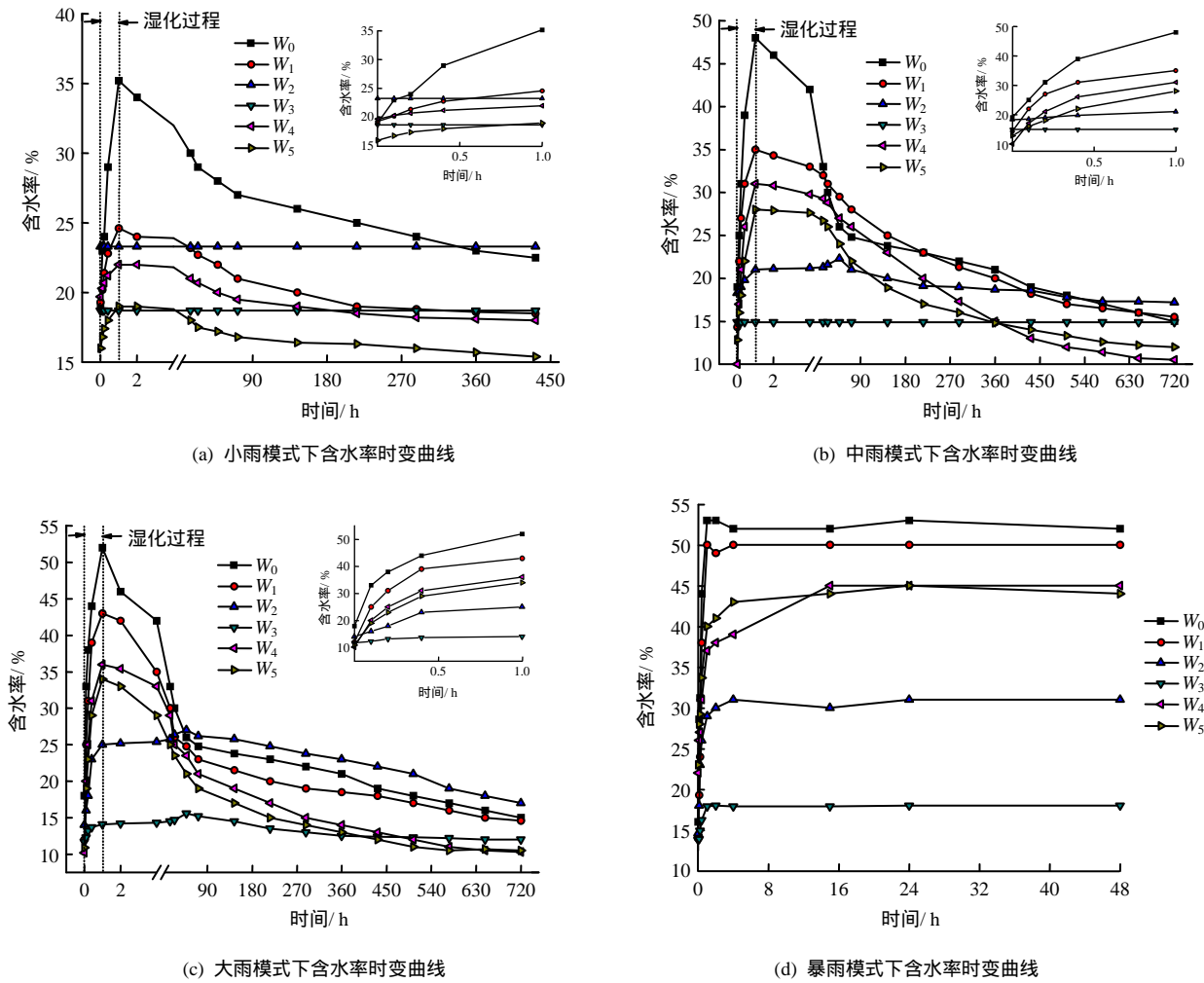


图 7 不同降雨量下湿干循环含水率时变曲线

Fig.7 Moisture-time curves at different rainfalls in wet-dry cycles

表 6 不同降雨量下各点最大含水率及最终含水率 (单位: %)

Table 6 Peak moisture and ultimate moisture at different rainfalls (unit: %)

类型	雨量	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
最大含水率	小雨	35.2	24.6	23.3	18.7	22.0	19.0
	中雨	48.0	35.0	22.3	14.9	31.0	28.0
	大雨	52.0	43.0	27.0	15.6	36.0	34.0
	暴雨	53.0	50.0	31.0	18.0	45.0	45.0
最大含水率变化量	小雨	12.7	6.1	0.0	0.0	4.0	3.6
	中雨	29.0	20.7	4.0	0.0	21.0	15.2
	大雨	34.0	31.0	13.0	3.9	25.8	23.1
	暴雨	37.0	36.0	16.4	4.2	23.0	22.0
最终含水率	小雨	22.5	18.5	23.3	18.7	18.0	15.4
	中雨	15.0	15.5	17.2	14.9	10.5	12.0
	大雨	15.0	14.6	17.0	12.0	10.3	10.5

注：最大含水率变化量是最大含水率与各次降雨初始含水率之差。

3.2.3 湿-干循环模式下膨胀岩边坡变形破坏特征

随着循环次数及降雨量增加，裂隙开展宽度、深度不断加大，裂隙不断变密，最后开展宽度最宽达 15 mm，深度达 12 cm，岩体完整性遭到极大破

坏。边坡在第 8 次大雨循环时，坡脚出现较大范围崩塌滑坡，至第 9 次暴雨时，边坡呈大面积的表面崩塌破坏，崩塌深度与裂隙开展深度相近，此次暴雨持续 2 d，边坡并未发生常见的破坏形式，分析其原因，一是因为试样是不含软弱夹层的纯泥岩；其二是由含水率及变形规律知，低渗透性的膨胀岩即使形成了较发育的裂隙，在较大的雨量下，雨水也很难渗入到边坡内部，或者说渗入量很少且时间很久，影响仅在边坡的浅层，这也解释了无软弱夹层的膨胀岩边坡破坏主要发生在浅层的原因。试验照片见图 8。

4 结 论

(1) 连续降雨模式下，初期数次降雨对边坡变形影响最大，但经过多次降雨后各点各方向变形均达到稳定，边坡并未发生破坏。这就要求雨季连续降雨模式下做好初期降雨下变形及含水率监测，加强和完善排水措施，做好边坡的支挡措施。



(a) 裂隙发育图



(b) 表面崩塌破坏图

图8 湿-干循环模式试验后期相片
Fig.8 Photos of wet-dry cycles mode

(2) 湿-干循环模式下, 膨胀变形及深部岩体含水率均在湿化完成后一段时间后达到峰值, 降雨量对边坡变形影响显著, 变形速率及变形量较前一级雨量都明显增大。因此, 实际工程中随循环次数增加, 一方面要对降雨及降雨后数天内变形做好监测, 同时还要做好坡面的防护措施, 以起到保湿防渗作用。

(3) 连续降雨和湿-干循环两种模式均说明纯膨胀性泥岩边坡不一定发生常见的圆弧滑动等破坏形式, 工程中膨胀岩边坡滑动多发生在软弱夹层上, 这就要求工程中要对这类边坡软弱夹层特性做好勘察, 对没有软弱夹层的膨胀岩边坡, 要重点监测其浅层变形特性。

参 考 文 献

[1] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 气候影响下膨胀土工程性质的原位响应特征试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7):

2069 - 2074.

LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Field response characteristic test of expansive soil engineering behavior under effect of atmosphere[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2069 - 2074.

[2] 杨果林, 黄向京. 不同气候条件膨胀土路堤土压力的变化规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 948 - 955.

YANG Guo-ling, HUANG Xiang-jing. Study on earth pressures in expansive soil road bed under weather influence[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 948 - 955.

[3] 周健, 徐洪钟, 尤波. 膨胀土边坡模型的含水量与变形特征[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 23(4): 101 - 104.

ZHOU Jian, XU Hong-zhong, YOU Bo. Water content and deformation characteristics of expansive soil slopes[J]. **Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)**, 2013, 23(4): 101 - 104.

[4] 周东, 孙义刚, 乐观永, 等. 环境因素对膨胀土边坡温度场影响的模型试验[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 653 - 658.

ZHOU Dong, SUN Yi-gang, YUE Guan-yong, et al. Model test of the influence of environmental factors on temperature field in expansive soil slope[J]. **Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)**, 2011, 36(4): 653 - 658.

[5] 刘洋, 周健, 王国强. 膨胀土基坑边坡降雨入渗的一维数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 158 - 161.

LIU Yang, ZHOU Jian, WANG Guo-qiang. Numerical method of one- dimension for rainfall infiltration in expansive soil slope of excavation[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2005, 33(2): 158 - 161.

[6] 孙即超, 王光谦, 董希斌, 等. 膨胀土膨胀模型及其反演[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2055 - 2059.

SUN Ji-chao, WANG Guang-qian, DONG Xi-bin, et al. Expansive model and black analysis of expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2055 - 2059.

[7] 王国利, 陈生水, 徐光明. 干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2005, (4): 6 - 10.

WANG Guo-li, CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming.

- Centrifuge model test on stability of expansive soil slope under alternation between drying and wetting[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2005, (4): 6 - 10.
- [8] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的CT试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 417 - 422.
LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 417 - 422.
- [9] 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.
- [10] PEJON O J. Effects of strain on the swelling pressure of mudrocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(5): 817 - 825.
- [11] 刘晓丽, 王思敬, 王恩志, 等. 含时间效应的膨胀岩膨胀本构关系[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 195 - 199.
LIU Xiao-li, WANG Si-jing, WANG En-zhi, et al. Study on time-dependent swelling constitute relation of swelling rock[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 37(2): 195 - 199.
- [12] 王军, 龚壁卫, 张家俊, 等. 膨胀岩裂隙发育的现场观测及描述方法研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(9): 74 - 78.
WANG Jun, GONG Bi-wei, ZHANG Jia-jun, et al. Field observation and description method research of expansion rock fracture evolution[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2010, 27(9): 74 - 78.
- [13] 范秋雁. 膨胀岩与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
FAN Qiu-yan. *Expansive rock and Engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [14] 范秋雁, 黄海龙, 王明晓. 考虑降雨入渗条件下泥岩边坡的稳定性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(增刊): 186 - 191.
FAN Qiu-yan, HUANG Hai-long, WANG Ming-xiao. Research on the stability of expansive mudstone slope considering rainfall infiltration[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2007, 39(Supp.): 186 - 191.
- [15] 黄斌, 程展林, 徐晗. 膨胀土膨胀模型及边坡工程应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3550 - 3555.
HUANG Bin, CHEN Zhan-lin, XU Han. Expansion model of expansive soil and its application to slope engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(12): 3550 - 3555.
- [16] 丁金华, 陈仁朋, 童军, 等. 基于多场耦合数值分析的膨胀土边坡浅层膨胀变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 159 - 168.
DING Jin-hua, CHEN Ren-peng, TONG Jun, et al. Research on failure mechanism of shallow instability of expansive soil slope based on multifield coupling numerical analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.1): 159 - 168.
- [17] 中华人民共和国水利部. GB/T50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T50123-1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [18] 广西华蓝岩土工程有限公司. DB45/T 396-2007 广西膨胀土地区建筑勘察设计施工技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Guangxi Hualan Geotechnical Engineering Limited Company. DB45/T 396-2007 Technical code for investigation, design and construction of buildings in Guangxi[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [19] 中国气象报社. 雨量等级[EB/OL]. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2012zhuant/20120420/2012042009/201204/t20120423_170349.html, 2012-04-23.