

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230301003

雨后不同时长基覆型边坡动力失稳破坏研究*

赵宏昱¹, 王国义², 杨兵¹, 宋松科³, 权新蕊³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中电建成都建设投资有限公司, 四川 成都 610212;
3. 四川省交通勘察设计院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 基覆型边坡由于其上部为松散型堆积体, 下部为基岩的特点, 在降雨和地震作用下的失稳过程和破坏特征和其他边坡有较大不同, 而降雨和地震作用的间隔时间会对二者耦合作用产生较大影响。利用自制的模型箱对基覆型边坡开展振动台模型试验, 研究不同降雨停止时长对边坡稳定性的影响以及边坡降雨后静止不同时长在地震作用下的失稳特征和破坏模式。试验结果表明, 降雨后间隔不同时间发生地震, 边坡的破坏方式均呈过渡式破坏。在达到一定降雨强度后, 降雨期间边坡含水率和孔隙水压力突增, 而降雨停止后随着静止时长的增加, 二者不断减小, 之后达到稳定状态; 随着静止时长的不断增加, 基覆型边坡失稳临界加速度不断增加, 大致和静止时长呈一个正相关的函数关系。

关键词: 基覆型边坡; 降雨-地震耦合; 失稳特征; 振动台试验

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0933-07

Study on Dynamic Instability Failure of Base-covered Slope at Different Duration after Rainfall

ZHAO Hongyu¹, WANG Guoyi², YANG Bing¹, SONG Songke³, QUAN Xinrui³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. CLP Construction Investment Co., Ltd., Chengdu 610212, China; 3. Sichuan Transportation Survey and Design Institute Co., Chengdu 610017, China)

Abstract: The instability failure process and characteristics of base-covered slopes, characterized by a loose upper deposit and underlying bedrock, differ significantly from other slopes under rainfall and seismic action. The time interval between rainfall and earthquake significantly affects their coupling effect. Using a self-made model box, shaking table model tests were conducted on base-covered slopes to study the influence of different rainfall cessation durations on slope stability, as well as the instability characteristics and failure modes under seismic action after different stationary durations post-rainfall. The test results showed that the failure mode of the slope exhibited transitional failure regardless of the time interval between rainfall and earthquake. After reaching a certain rainfall intensity, the soil moisture content and pore water pressure of the slope increased sharply during the rainfall, and decreased continuously to a stable state with the increasing stationary duration after rainfall stopped. With the increase of the stationary duration, the critical acceleration of slope instability increased,

* 收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-07-03

作者简介: 赵宏昱(1998—), 男, 硕士。主要从事滑坡灾害控制研究。E-mail: 17860730087@163.com

通信作者: 王国义(1974—), 男, 正高级工程师。主要从事盾构技术研究。E-mail: 482624815@qq.com

showing a positive correlation with the stationary duration.

Keywords: base-covered slopes, rainfall-seismic coupling, instability characteristics, shaking table test

0 引言

基覆型边坡是指下部为基岩,上部为松散堆积体的一类边坡,由于其基覆界面的存在,使其失稳特征和破坏模式和均质边坡有一定区别。降雨和地震是对边坡稳定性影响最大的两个因素,降雨作用造成边坡潜在滑移面处的岩土体渗水软化,边坡整体稳定性降低,而地震作用改变边坡内部结构,产生拉裂缝,二者耦合作用会加剧边坡结构破坏,最终造成边坡失稳。2008年汶川里氏8.0级的地震加上地区强降雨天气,出现了大量由降雨-地震耦合作用下诱发的基覆性边坡破坏^[1]。2009年,印尼西苏门答腊岛巴东省在降雨期间发生了里氏7.6级的大地震,引发了巴东帕里亚曼摄政地区坦迪卡特的山体滑坡^[2]。2013年,甘肃省岷县漳县连续20天降雨后发生6.6级地震,导致山体滑坡^[3-5]。这些工程实例凸显了降雨-地震耦合作用对基覆型边坡破坏作用研究的重要性。

目前降雨-地震耦合作用对边坡的破坏作用研究主要集中在以下方面。在边坡失稳模式和稳定性评价方面,K.Sassa等^[6]分析了2004年日本新潟地震和2006年菲律宾莱特岛地震引起的滑坡特征,研究结果表明地震和降雨耦合作用造成了边坡局部地区的孔隙水压力突增,从而出现了边坡低抗滑阻力区,使边坡滑移面沿该区域演化;K.T.Chang等^[7]采用logistic回归方法研究了降雨后地震对滑坡的影响,建立了黄土边坡地震稳定的快速评价方法,考虑了地震作用前降雨作用对于边坡土体的弱化作用。J.C.Chen等^[8]研究了降雨与地震间隔时间对低角度黄土边坡破坏模式和动力特性的影响,试验结果表明,雨后地震作用下的沉降主要发生在黄土坡顶中部。

在边坡失稳机理方面,F.Faris等^[9]基于孔隙水压力的变化,研究了地震诱发滑坡在降雨过程中的启动机制,他们认为降雨引起的土体饱和与孔隙水压力增加和高孔隙水压力积累下的地震作用造成了边坡失稳破坏王兰民等^[10-11]通过大型振动台试验研究了降雨地震耦合作用下黄土边坡的破坏机理

和动力响应。S.Martino等^[12]分析了意大利Morisse地震(M_w 5.1)诱发滑坡的机理,结果表明降雨增加了土壤饱和度,在地震力作用下发生滑坡;杨兵等^[13-15]通过室内模型试验,分析了不同含水率的均质边坡失稳破坏的物理过程以及在地震荷载作用下边坡动力响应规律,深入探讨了边坡的失稳特性及机理。

综上所述,由于降雨过程以及降雨结束后,边坡含水率和孔隙水压都有一定变化,而随后的地震作用会使边坡更容易发生失稳,但对于降雨和地震间隔时间对二者耦合作用的影响以及二者耦合作用对基覆性边坡的破坏模式和机理还需要深入研究,所以本文采用基覆型边坡作为研究对象,利用模型试验研究降雨后静止时间对边坡动力破坏模式和稳定性的影响。

1 模型试验方案

1.1 试验设备

本次试验采用自制的可调节两段式基覆型边坡试验箱,模型箱尺寸(长×宽×高)为2.0 m×0.3 m×1.7 m,通过平台支架调节基覆型界面的倾角,由侧面玻璃板观测边坡变形,两侧用金属钢条约束侧向位移,振动台底部两侧设置泡沫板,吸收地震波能量。边坡采用分层填筑的方式,并且通过在侧面设置白砂条判断边坡的滑移线位置,在边坡侧面和顶部分别布置高清摄像机记录边坡破坏过程。通过振动台模拟地震作用,振动台台面尺寸1.2 m×1.2 m,最大推力为9 800 N,最大加速度为20g,最大位移为51 mm,最大载荷为500 kg。模拟降雨系统主要包括水箱、水泵和喷头,本次试验共用3个喷头,喷头布置如图1所示,各喷头之间采用内径5 mm的普通塑胶管进行连接。前期测试通过控制水泵的供水压力来模拟不同的降雨强度,并采用雨量计测试和校正降雨强度。试验过程中采用含水率、孔隙水压力以及加速度传感器收集相关数据。

试验设备及其布置示意如图1所示。

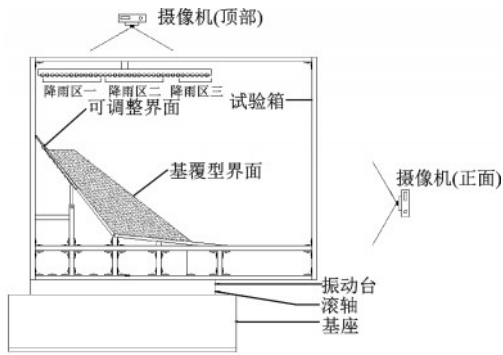


图1 试验箱模型示意

Fig.1 Schematic diagram of the test chamber model

1.2 相似分析与相似材料

利用相似原理和量纲分析,可得各物理量的相似性关系见表1。

表1 边坡模型试验各物理量的相似关系

Table 1 Similarity relationship of physical quantities in slope model test

物理量	量纲	相似关系	备注
边坡高度 H	[L]	C_H	控制量
土体重度 γ	$[ML^{-2}T^{-2}]$	C_γ	控制量
重力加速度 g	$[LT^{-2}]$	C_g	控制量
界面倾角	[1]	1	
摩擦系数	[1]	1	
内摩擦角 φ	[1]	1	
黏聚力 c	$[ML^{-1}T^{-2}]$	$C_c = C_H C_\gamma$	
泊松比 μ	[1]	1	
压缩模量 E_s	$[ML^{-1}T^{-1}]$	$C_{E_s} = C_H C_\gamma$	
含水率 ω	[1]	1	
渗透系数 k	$[LT^{-1}]$	$C_k = C_H^{0.5} C_g^{0.5}$	
地震荷载峰值加速 a	$[LT^{-2}]$	$C_a = C_g$	
地震荷载主振频率 f	$[T^{-1}]$	$C_f = C_H^{-0.5} C_g^{0.5}$	
地震荷载的持续时 t_s	[T]	$C_{t_s} = C_H^{0.5} C_g^{-0.5}$	
降雨强度 q	$[LT^{-1}]$	$C_q = C_H^{0.5} C_g^{0.5}$	
降雨时长 t'	[T]	$C_{t'} = C_H^{0.5} C_g^{-0.5}$	
降雨后静止时长 t	[T]	$C_t = C_H^{0.5} C_g^{-0.5}$	

取土体高度 H , 土体重度 γ 和重力加速度 g 作为基本控制量, 即 $C_H = 1$, $C_\gamma = 1$, $C_g = 1$, 原型基覆型边坡上覆土体高度设置在 10~70 m, 本试验边坡模型高度为 0.6 m, 取几何相似比为 25。根据以上模型与原型的相似比关系, 试验中采用川西某地区砂土, 起始含水率为 8%, 最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.851 \text{ g/cm}^3$, 最小干密度 $\rho_{dmin} = 1.463 \text{ g/cm}^3$, 采用常水头渗透试验测

量砂土饱和渗透系数, 采用直剪仪测量砂土的黏聚力及摩擦角, 根据当地气象资料确定降雨强度, 相关参数见表 2。

表2 模型试验参数的实际取值

Table 2 Actual values of model test parameters

物理量	相似比	模型试验取值
坡高 H	25	60.5 cm
土体重度 γ	1	15 kN/m ³
坡角 α	1	30°
基覆界面倾角 ϑ_1	1	14°
基覆界面倾角 ϑ_2	1	52°
黏聚力 c	25	0.5 kPa
内摩擦角 φ	1	38°
压缩模量 E_s	25	40 MPa
泊松比 μ	1	0.25
含水率 w	1	5%
雨强 q	5	0.006 6 mm/s
渗透系数 k	5	0.031 mm/s

1.3 试验工况设计

根据上述试验参数取值取试验降雨强度为 $q = 0.006 6 \text{ mm/s} = 2.38 \text{ mm/h}$, 根据气象部门的划分, 该降雨等级为暴雨, 取峰值不变主频增大到 5 倍的汶川波作为输入地震波, 具体方案见表 3。

表3 试验工况设计

Table 3 Design table of test conditions

工况 编号	土体 类型	干密度/ 初始体 积含水 率 %	降雨时 长/min	静止时 地震波 长/h	地震波 类型	地震波
						频率/ Hz
1	砂土	1.59	8.1	210	0	汶川波 25
2	砂土	1.58	7.9	210	1	汶川波 25
3	砂土	1.57	9.4	210	3	汶川波 25
4	砂土	1.57	9.1	210	5	汶川波 25
5	砂土	1.58	8.8	210	15	汶川波 25
6	砂土	1.58	8.5	210	30	汶川波 25

通过改变降雨后静止时长分别为 0、1、3、5、15、30 h, 然后进行振动台实验模拟基覆型边坡降雨停止后不同时长后受到地震作用影响的工况, 记录边坡失稳过程, 分析破坏模式, 收集并分析不同长时的滑坡发展过程中体积含水率, 孔隙水压力, 基质吸力的变化和动力响应规律。

2 地震-降雨耦合作用下不同降雨停止时长基覆型边坡失稳的典型特征

降雨阶段边坡的变形发展过程如图2所示。初始时刻如图2(a)所示;降雨2 h 26 min时,坡趾右侧部分土体颗粒发生了流滑,如图2(b)所示;降雨2 h 31 min时,坡趾另一侧土体发生轻微流滑,如图2(c)所示;至降雨结束时,坡趾部分前移,坡趾流滑破坏范围变大,如图2(d)所示。

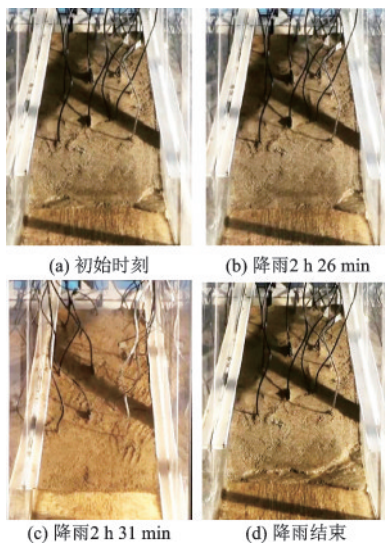


图2 降雨阶段边坡破坏发展过程

Fig.2 Development process of slope failure in rainfall stage

如图3所示,降雨后静止不同时长再施加地震波后,边坡坡顶首先开始下沉,坡面发生土体流动,边坡上部少量土体在边坡下部堆积,直至边坡坡顶下沉量达到破坏标准,同时边坡靠近坡底部分出现滑移面,边坡侧面和坡脚出现拉裂缝,边坡发生破坏,综上所述,降雨后静止时长的增加不会改变基覆型边坡受到地震作用后的破坏过程和失稳特征,且均为过渡式破坏。

降雨后直接施加振动波,边坡在0.79g振动波加载后即发生破坏,在坡体厚度2/3处出现滑移面,同时侧面出现圆弧拉裂缝;静止3 h后施加振动波,边坡在1.02g振动加载时发生滑移破坏,坡顶下沉量达到破坏标准,同时在坡体厚度约3/4处出现滑移面,底部出现拉裂缝;静止5 h后与静止3 h破坏特征相似,但在振动加载增加到1.110g时发生滑移破坏;静止15 h后,边坡临界破坏加速度增加到

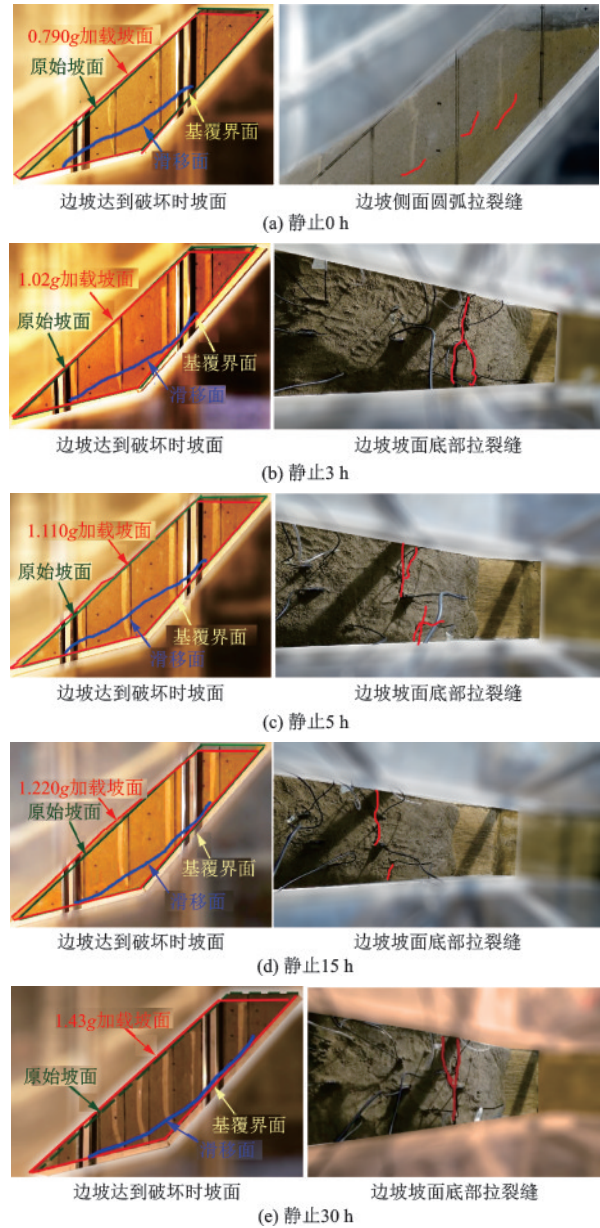


图3 砂土边坡降雨至饱和过程中振动试验振动阶段边坡破坏特征

Fig.3 Failure characteristics of sandy slope in vibration test stage from rainfall to saturation

1.220g,同时边坡滑移面位置在约坡体厚度4/5处,底部出现较多拉裂缝;静止30 h后,在振动波峰值增加到1.43g时边坡才发生滑移破坏,坡顶下沉土体堆积在坡面中下部,坡体厚度5/6处出现滑移面,底部拉裂缝贯通为较长裂缝。综上,随着静止时长的增加,边坡发生整体式滑移的临界破坏加速度逐渐增加,同时边坡下部土体堆积范围随静止时长增加逐渐减小,边坡滑移面逐渐向坡底靠近,但静止时长的增加不会改变基覆型边坡受到地震作用后的破坏模式,均为过渡式破坏,即由于基覆界面的

存在,上部基覆层沿界面滑动,下部基岩沿内部滑动面滑动破坏,与纯土边坡沿单一滑动面滑动的破坏不同。

3 不同静止时长条件下边坡动力响应规律及机理分析

3.1 降雨静止时长对边坡土体动力响应规律

表4给出了降雨至饱和后静止时长分别为0、3、5、15、30 h后边坡临界破坏加速度和边坡破坏模式,可以发现随静止时长的增加,边坡破坏临界加速度有较明显的增大,但破坏模式始终为剪切式滑移破坏(即边坡上部和下部沿基覆界面而中部沿内部滑动的一种破坏模式)。

表4 不同静止时长边坡破坏试验结果

Table 4 Failure test results of slopes with different standing periods

边坡类型	静止时长/h	临界加速度/(m·s ⁻²)	破坏模式
基覆型	0	0.79	过渡式破坏
基覆型	3	1.02	过渡式破坏
基覆型	5	1.11	过渡式破坏
基覆型	15	1.22	过渡式破坏
基覆型	30	1.56	过渡式破坏

图4为破坏临界加速度随静止时长的增长曲线,从图4中可以看出,整体上随着静止时长的增大,边坡振动破坏临界加速度不断增大;临界加速度的增长率随静止时长的增加大致呈逐渐减小的变化趋势。通过拟合图4的曲线,可得到无量纲参数 a/g 与 t/t' 的经验关系为:

$$a = (0.089 + 0.011T - 0.0004T^2)g \quad (1)$$

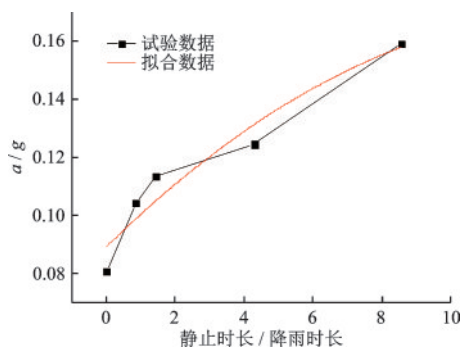


图4 静止时长对振动破坏临界加速度的影响

Fig.4 Influence of standing time on critical acceleration of vibration failure

式中, a 为边坡破坏的临界加速度; g 为重力加速度; t 表示静止时长; t' 为降雨时长; H 为边坡垂直高度; $T(T=t/t')$ 为无量纲参数,表示雨后静止时长占降雨持续时间的比值。

3.2 降雨静止时长对边坡动力响应的机理分析

静止过程中,土体含水率随静止时长的增加而逐渐降低,削弱了降雨过程中土体体积含水率的增长效应。如图5所示,静止过程中,坡趾测点SM-1和坡底测点SM-2的体积含水率分别小幅增加了1.6%、1.3%,原因在于该两测点处于坡脚处,土体完全饱和,边坡上部土体的水分大部分需渗流至此,造成土体水分不容易流失。其余测点的体积含水率随着静止时间的增加缓慢降低并趋于稳定。静止3 h内,各点含水率基本不变或略微增大,3~5 h内,除坡底测点外,其余各点含水率均大幅减小,降幅在6%~9%;5~15 h内,除坡底外其余各测点含水率减小速率逐渐减小,由迅速减小逐渐过渡为缓慢减小;静止30 h后,测点SM-3的体积含水率降幅最大,达16.9%,基覆界面测点SM-4和坡面附近测点SM-7的体积含水率降幅次之,为9.5%、10.4%,坡肩测点SM-5和坡面测点SM-6的体积含水率降幅最小,为3.9%、6.9%,表明静止30 h内,坡趾土体和靠近坡趾的坡底土体的体积含水率小幅增加,坡底在相对高程为0.3处的土体(测点SM-3)体积含水率降幅最大,土体相对高程离0.3越大,体积含水率的降幅越小,而坡面土体则有明显的高程效应,高程越大,体积含水率的降幅越小。其根本原因在于在降雨过程中水力渗流作用改变了土体微观结构,增加了土体孔隙的数量,扩大了土体细

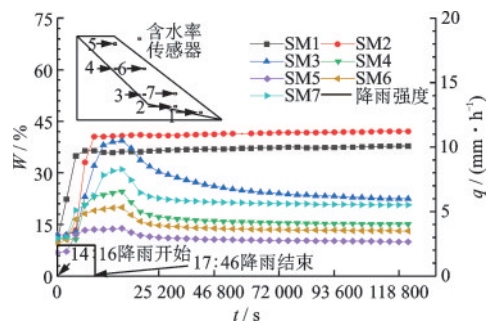


图5 砂土边坡降雨至饱和和再静止30 h过程中振动试验体积含水率的变化

Fig.5 Change of volume moisture content in vibration test during rainfall to saturation and then standing for 30 hours on sand slope

小裂隙,而在静止过程中土体细小裂隙的扩展和相互贯通使自由水在重力作用下下渗(包括两个方向:由边坡外表至内部和相对高程由高至低),使坡趾和附近区域土体含水率小幅增加,坡面和坡底土体含水率大幅减小,这同时也解释了坡面的高程效应。根据周志军等^[16]的研究,如图6所示,含水率的增大会使土体的压缩模量减小,这会导致边坡的下沉量增大;随含水率的增大,土体抗剪强度会出现先增后减的变化^[17],而本实验中土体含水率的减小均在抗拉强度和抗剪强度峰值之后,因此含水率的减小使土体抗拉和抗剪强度增大,进一步造成边坡的临界破坏、加速度增大。

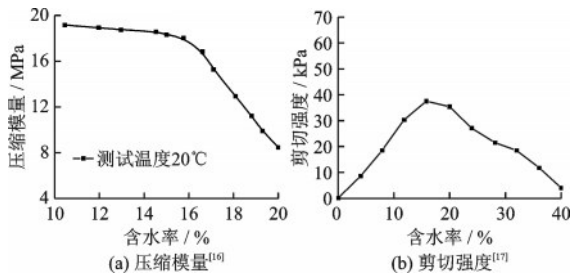


图6 土体压缩模量和抗剪强度随体积含水率的变化

Fig.6 Variation of compression modulus and shear strength of soil with volume moisture content

对于孔隙水压力,如图7所示,降雨过程中边坡各区域孔隙水压力突增,而在静止2 h后,边坡各相应区域的土体孔隙水压力均减少2.5 kPa左右,在2~30 h的静止过程中低孔隙水压力范围进一步扩大。由于降雨和其他荷载作用以及水位升降下,土体孔隙水压力中存在着一部分超静孔隙水压力,根据太沙基最早提出的土体渗流理论,在本实验过程中,土体超静孔隙水压力在2 h左右会消散大部分,

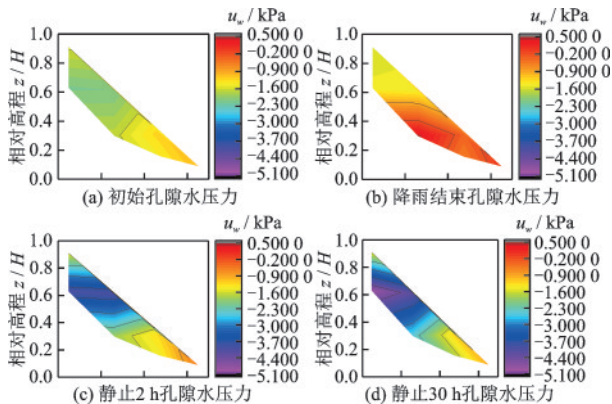


图7 试验过程中不同时期边坡土体孔隙水压力云图

Fig.7 Cloud map of pore water pressure of slope soil at different periods during the test

总应力转移到土骨架上,超静孔隙水压力转化为有效应力,而引起土体的体积压缩和抗剪强度变化的原因,只取决于土体的有效应力的变化,孔隙水压力各方向相等,因此并不能使土体发生变形和强度的变化。土体超静孔隙水压向有效应力的转化造成土体体积压缩,同时使其压缩模量和抗剪强度增大,造成边坡临界破坏加速度增大。

4 结论

利用自制的模型箱做以川西高山亚高山区自然边坡作为原型的模型试验,在降雨后不同的静止时长内施加相同的地震作用使边坡达到破坏,通过破坏监测和PIV运动监测系统分析边坡各区域的失稳形态和速度变化状况,判断边坡的失稳过程和失稳破坏模式始终为过渡式破坏。通过边坡不同点位的加速度传感器,分析边坡动力响应规律得到边坡失稳临界加速度与降雨后静止时间大致呈正相关的函数模型;通过对含水率和孔隙水压力的监测,进一步分析了降雨后静止时长的变化影响边坡动力分析的内部机理,综上所述,可以得出以下结论:

(1)降雨后静止不同时长施加地震作用不会影响基覆性边坡的失稳过程和破坏模式,边坡始终发展为过渡式破坏。

(2)在达到一定强度的降雨后,随着静止时间的不断增加,边坡土体含水率和孔隙水压力会呈现不断减小的趋势,静止2 h后,超静孔隙水压力大部分转化为土体有效应力,孔隙水压力平均减小1.9 kPa,土体有效应力增加,抗剪强度增大,这符合太沙基提出的渗流固结模型和土体有效应力的原理。大约静止4 h后,土体含水率减小约20%,使土体压缩模量和抗剪强度大幅增加,也造成了边坡稳定性增强,失稳临界加速度增大。

(3)随着降雨后静止时间的增加,边坡的失稳临界加速度会不断增大,边坡的稳定性逐渐增强,失稳临界加速度和降雨静止时长大致满足一个正相关的函数模型。

参考文献:

[1] 袁进科,陈杰.汶川地震公路边坡灾害分析及震后边坡灾害发育特点[J].公路,2020,65(5):26-33.
Yuan J K, Chen J. Analysis of highway slope disaster in

- Wenchuan earthquake and its development characteristics after earthquake[J]. Highway, 2020, 65(5): 26-33. (in Chinese)
- [2] Faris F, Wang F W. Investigation of the initiation mechanism of an earthquake-induced landslide during rainfall: a case study of the tandikat landslide, West Sumatra, Indonesia[J]. Geoenvironmental Disasters, 2014, 1(1): 1-18.
- [3] 郑文俊, 闵伟, 何文贵, 等. 2013年甘肃岷县漳县6.6级地震震害分布特征及发震构造分析[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 604-615.
- Zhen W J, Min W, He W G, et al. Distribution of the related disaster and the causative tectonic of the minxian-zhangxian Ms6.6 earthquake on July 22, 2013, GanSu, China[J]. Seismic Geology, 2013, 35(3): 604-615. (in Chinese)
- [4] 王国亚, 任路滨, 吴玮江, 等. 甘肃岷县永光村滑坡特征及其成因研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 392-399.
- Wang G Y, Ren L B, Wu W J, et al. Characteristics and causes of the landslide outbreaking in Yongguangcun, Minxian County, Gansu Province. [J] Glacial permafrost, 2019, 41(2): 392-399. (in Chinese)
- [5] 许冲, 徐锡伟, 郑文俊. 2013年7月22日岷县漳县MS6.6级地震滑坡编录与空间分布规律分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 736-749.
- Xu C, Xu X W, Zhen W J. Compling inventory of landslides triggered by Minxian-Zhangxian earthquake of July 22, 2013 and their spatial distribution analysis [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 736-749. (in Chinese)
- [6] Sassa K, Fukuoka H, Wang F W, et al. Landslides induced by a combined effect of earthquake and rainfall [J]. Progress in Landslide Science, 2007: 193-207.
- [7] Chang K T, Chiang S H, Hsu M L. Modeling typhoon-and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression[J]. Geomorphology, 2007, 89(3/4): 335-347.
- [8] Chen J C, Wang L M, Pu X W, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of low-angle loess slope under the influence of long-and short-term effects of rainfall before earthquake [J]. Engineering Geology, 2020, 273: 105684.
- [9] Faris F, Fawu W. Investigation of the initiation mechanism of an earthquake-induced landslide during rainfall: a case study of the Tandikat landslide, West Sumatra, Indonesia[J]. Geoenvironmental Disasters, 2014, 1: 4.
- [10] 王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 地震和降雨耦合作用下黄土边坡失稳滑移的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增2): 3873-3883.
- Wang L M, Pu X W, Wu Z J, et al. The shaking table test of the instability sliding of loess slope under the coupling effects of earthquake and rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup2): 3873-3883. (in Chinese)
- [11] 王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 地震和降雨耦合作用下黄土边坡动力响应的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1287-1293.
- Wang L M, Pu X W, Wu Z J, et al. Shaking table tests on dynamic response of loess slopes under coupling effects of earthquakes and rainfalls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1287-1293. (in Chinese)
- [12] Martino S, Antonielli B, Bozzano F, et al. Landslides triggered after the 16 August 2018 Mw 5.1 Molise Earthquake (Italy) by a combination of intense rainfalls and seismic shaking. [J] Landslides, 2020, 17(5): 1177-1190.
- [13] 杨兵, 孙明祥, 王润民, 等. 土体含水率对边坡动力破坏模式及动力响应影响的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 759-766, 725.
- Yang B, Sun M X, Wang R M, et al. Shaking table tests on influences of water content of soils on dynamic failure modes and dynamic responses of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 759-766, 725. (in Chinese)
- [14] 杨兵, 杨翔, 杨涛, 等. 地震荷载作用下震裂-溃滑型边坡破坏过程及动力响应振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增1): 3279-3290.
- Yang B, Yang X, Yang T, et al. Shaking table model test on dynamic response and failure process of shatterburst sliding slope under earthquake load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup1): 3279-3290. (in Chinese)
- [15] 杨兵, 刘一飞, 万奋涛, 等. 级配特性对砂土渗透系数影响试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 855-861.
- Yang B, Liu Y F, Wan F T, et al. Experimental study on influence of particle-size distribution on permeability coefficient of sand [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 855-861. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)

(下转第 951 页)