

基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析

胡 华, 吴 轩, 张 越

Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall

HU Hua, WU Xuan, and ZHANG Yue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响

Influence of rainfall on sliding modes of cutting slope of weathered granite stratum: Taking Yunxiao section in the Yunping freeway in Fujian for example

蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 胡长江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 27–35

基于失效概率的边坡降雨阈值曲面探讨

Investigation on slope rainfall threshold surface based on failure probability

邓夕胜, 张元, 唐煜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 70–75

降雨矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡稳定性分析

Analysis on the slope stability of Fushun West Open-pit Mine under superimposed action of rainfall, mine and earthquake

刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 高晗 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 40–46

采煤区地表拉张裂缝演化及其控制因素物理模拟试验

Physical model experiment on formation of surface tension fractures and their controlling factors in a coal mining area

黄河, 冯宇, 严家平, 鲁海峰, 刘伟, 郭宝伟, 尚相春 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 93–98

基于连续小波变换的斜坡动力响应特征分析

Time-Frequency characteristics and seismic response analyses of the 6.0-magnitude earthquake, Changning County of Yibin in Southwest China's Sichuan Province

金刚, 王运生, 何先龙, 史丙新, 周宇航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 1–8

石灰改良高液限土强度特性的函数模型研究

Research on function model of lime-improved high liquid limit soil strength characteristics

胡宏坤, 邵珠山 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 109–117



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-11](https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-11)

基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析

胡 华^{1,2}, 吴 轩^{1,2}, 张 越^{1,2}

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建厦门 361005;
2. 厦门大学深圳研究院, 广东深圳 518057)

摘要:以东南沿海地区花岗岩残积土为代表性土样,以土体斜坡坡度、降雨强度为控制变量,设计了降雨滑坡模拟试验方案,在大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨等四种不同降雨等级条件下对四种不同坡度的斜坡模型进行了强降雨模拟试验,研究降雨强度和斜坡坡度对其滑塌破坏的影响特征。结果表明:降雨强度越大,发生深层破坏或浅层整体破坏的趋势越明显,其变形跨塌滑块尺寸越大,破坏范围越集中,破坏程度增强;同时土体裂纹出现的时间越早,斜坡滑塌破坏所需的降雨时长逐渐减少。随斜坡坡度的增大,破坏形式由滑落滑坡逐步转化散落崩塌破坏,其相应斜坡滑塌破坏所需的降雨时长减少。研究结论对揭示降雨引发残积土滑坡等地质灾害发生规律具有重要的理论和现实意义。

关键词:花岗岩残积土; 模拟试验; 斜坡模型; 降雨强度; 斜坡坡度

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2021)05-0092-06

Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall

HU Hua^{1,2}, WU Xuan^{1,2}, ZHANG Yue^{1,2}

(1. College of Architecture and Civil Engineering of Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;
2. Research Institute of Xiamen University in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract: The granite residual soil in southeast coast area is selected as the representative soil sample and the simulation test schemes of rainfall triggered landslide are designed with the slope gradient and the rainfall intensity as their control variables. Then the heavy rainfall simulation experiment of slope models with four different gradients are performed under four kinds of different conditions, i.e. heavy rain, rainstorm, heavy rainstorm, extreme rainstorm, and the influence characteristics of rainfall intensity and slope gradient on slope slumping destruction are studied. The results show that the greater rainfall intensity is, the larger the slide block size of collapse is and the more concentrated the scope of damage is, while more obvious the trend of deep or shallow overall damage of slope. In addition, the extent of slope damage is enhanced and the less time needed for soil cracks appear and slope slumping destruction at the same time. With the slope gradient increases, the failure modes of slope gradually become scattered collapse from landslide sliding and the rainfall duration of slope sliding damage is reduced. The research results have important theoretical and practical significance for disclosing the rule of residual soil landslides and other geological disasters triggered by heavy rainfall.

Keywords: granite residual soil; simulation experiment; slope model; rainfall intensity; slope gradient

收稿日期: 2020-04-12; 修订日期: 2020-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278437); 广东省自然科学基金项目(2020A1515010928)

第一作者: 胡 华(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土力学、岩土工程减灾、地质灾害防治等教学和科研工作。E-mail: xmhuuh@xmu.edu.cn

0 引言

我国花岗岩广泛分布,其中东南部的广东、福建两省花岗岩出露面积占总面积的30%~40%。花岗岩风化程度因各地的气候环境条件不同差异很大,温度和降雨量越高,风化程度越强烈。因此,东南部工程建设中所遇的山地、丘陵、剥蚀准平原上都分布着花岗岩残积土,是大部分工程建设的地基基础和地质环境重要介质^[1-2]。福建省地处东南沿海,位于亚热带东南季风气候区,中低山和丘陵占全省面积的80%,气候湿热,台风暴雨频繁,降雨集中,岩土渗流强度大,丘陵山地风化与侵蚀作用强烈,导致花岗岩残积土广泛覆盖,其中50%分布在闽东南丘陵、沿海平原等地^[3]。

影响土体斜坡稳定性的因素包括地形地貌因素、降雨或地震等自然因素、开挖或堆载等人为因素^[4]。国内学者阙云等^[5]研究了降雨条件下不同裂隙深度、裂隙开口宽度、裂隙分布位置、降雨强度和降雨持时等对裂隙性黏土斜坡渗流场的影响;詹良通等^[6]研究了东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素;张友谊等^[7]通过降雨与滑坡的统计资料,概括了滑坡与降雨量、降雨强度、降雨形式之间的关系;陈天健等^[8]利用人工降雨系统配合土壤模型试体探讨强降雨滑坡破坏型态与坡体饱和度之关系;李长江等^[9]研究了滑坡频度一降雨量的分形关系;左自波^[10]研究了降雨诱发堆积体滑坡室内模型试验;李鹤^[11]研究了东南沿海残积土地区降雨型滑坡预警预报体系。

该课题在国家自然科学基金的资助下,以东南沿海地区花岗岩残积土为代表性土样,以斜坡坡度、降雨强度为控制变量,设计了强降雨滑坡模拟试验方案,在不同降雨强度条件下对不同坡度的斜坡模型进行了降雨模拟试验,并对模拟试验结果进行宏观统计和对比分析,研究斜坡模型的滑塌破坏特点、坡体滑塌与降雨强度之间的关系,对预防和控制东南沿海地区重大岩土地质灾害意义重大。

1 模拟强降雨条件下花岗岩残积土斜坡模型坡体滑塌试验

1.1 强降雨滑坡模拟试验方案

降雨滑坡模拟试验方案需要综合考虑土体斜坡模型、模拟降雨装置及降雨强度、模拟试验过程监测等方面,最终确定模拟试验方案^[12]。考虑东南沿海地区容易发生滑坡等地质灾害的自然斜坡参数、实际台风强降雨雨量出现的频度情况,模拟试验斜坡模型采用

30°、40°、50°和55°等4种坡度。模拟大雨(25~50 mm/24 h)、暴雨(50~100 mm/24 h)、大暴雨(100~250 mm/24 h)、特大暴雨(大于250 mm/24 h)等四种不同强降雨强度等级条件,共进行16种不同条件下模拟试验。具体模拟试验方案见表1。

表1 不同条件下16种模拟试验方案及编号

Table 1 16 kinds of schemes and numbers of simulation experiment under different conditions

坡度/(°)	1档(大雨)	2档(暴雨)	3档(大暴雨)	4档(特大暴雨)
30(I)	I 1	I 2	I 3	I 4
40(II)	II 1	II 2	II 3	II 4
50(III)	III 1	III 2	III 3	III 4
55(IV)	IV 1	IV 2	IV 3	IV 4

1.2 残积土斜坡模型参数

残积土斜坡模型采用人工方式填筑,考虑工程模型相似模拟原则和条件后,结合该地区一般自然斜坡参数和工程模型制作难度后,将模型总长统一确定为1 000 mm,高度为800 mm,坡顶宽度500 mm,坡底宽度则根据30°、40°、50°和55°等4种不同坡度而改变。在制作模型过程中,土体密度通过采取相近的击实数来控制,含水率通过采取每层相同的加水量和总用水量来控制(表2)。

表2 残积土初始土性参数

Table 2 Initial soil parameters of residual soil

项目	密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	颗粒粒径/cm
取值	<1.6	15.25~19.25	<2

1.3 强降雨量参数及模拟降雨装置

模拟试验采用实验室的自来水作为水源,经过塑料软管的引导,并通过不同流量档位的总阀控制流量,实现四种不同降雨降雨强度的模拟。为了控制各组试验的降雨强度,事先进行降雨装置模拟降雨强度的标定,总阀控制在1、2、3、4档时,依据气象学测量标准,降雨强度参数标定结果分别为30~35 mm/24 h、60~70 mm/24 h、110~120 mm/24 h、250~260 mm/24 h,降雨强度分别在大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨四个等级。为避免较大水滴对土坡模型的破坏,模拟试验使用雾化喷头来模拟降雨场景。模拟降雨装置设备器材使用和布置方案见图1。

1.4 模拟试验过程及坡体滑塌监测

为控制斜坡模型侧面和方便侧面的观测,在侧面采用2 000 mm长、1 000 mm宽、8 mm厚的玻璃板,固定于土坡侧面,并对每个模拟试验斜坡侧面在上、中、下

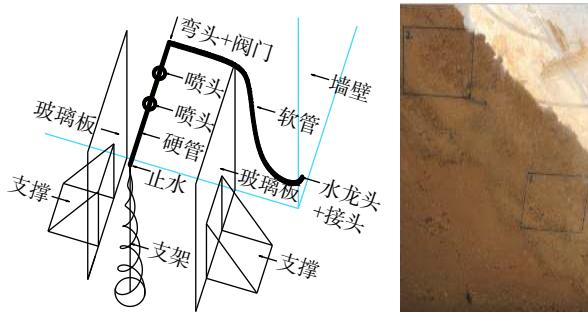


图 1 模拟降雨装置布置方案示意图及坡体侧面上、中、下定点观测框

Fig. 1 Layout of simulated rainfall device and the fixed-point (i.e. Top, middle, bottom) observation box of slope side

三个不同的坡面部位分别设置观测框, 定时进行拍摄记录, 便于对比分析不同斜坡位置土体变形破坏规律。按 40° 、 50° 、 60° 和 70° 在玻璃板上标出土坡轮廓后, 以干土加水的方式逐层填筑土坡, 并控制每层加水量和总用水量, 达到控制土坡模型初始含水率大致相同, 并拍摄记录其正面和侧面的初始形态作为起始参照。模拟试验过程中对土体斜坡模型的正面和侧面进行观测, 选用佳能 EOS 500D 单反相机拍摄试验过程中土坡正面和侧面的变化, 记录土坡的整个变形失稳破坏过程, 同时在滑塌破坏的时间段用高清晰录像机跟拍关键滑塌破坏过程, 用于随后模拟结果的宏观统计分析。对于降雨滑坡模拟试验过程中土体细观演变和变形观测, 采用卧式显微镜分别对坡面上、中、下等三个固定位置观测框进行定点观测(图 1), 同时采用移动性较好的单反照相机进行图像的采集, 为随后土体细观演变和变形分析提供依据。监测方案见表 3。在土坡模型的坡面失稳破坏基本结束后, 继续实施降雨一段时间, 并拍摄记录作为模拟试验结束状态参照。

2 降雨强度对斜坡模型滑塌破坏影响分析

2.1 降雨强度对斜坡模型滑塌破坏模式的影响

模拟试验总共得到 16 组试验结果, 将斜坡滑塌破坏模式进行分类统计, 其滑塌破坏模式主要分为深层整体失稳、深层局部失稳、浅层整体失稳和浅层局部失稳等四大类, 结果见表 4。依据分类统计, 深层失稳较浅层失稳少, 而浅层失稳中整体失稳较局部失稳少, 且浅层局部失稳数量占总数的一半, 并涵盖到各坡度、各降雨强度的情况, 是本次试验主要出现的土坡失稳破坏主要模式。深入分析发现, 深层整体失稳、深层局部失稳、浅层整体失稳主要发生在降雨强度较大的 3 档(大暴雨)和 4 档(特大暴雨), 而浅层局部失稳大部分发生在降雨强度低的 1 档(大雨)或 2 档(暴雨)模拟试验

中。可见, 降雨强度越大, 发生深层破坏或浅层整体破坏的趋势越明显, 数量越多。而随降雨强度减小, 斜坡模型破坏模式由整体失稳破坏向局部失稳破坏转化。坡体浅层出现破坏裂纹及形态见图 2, 边坡浅层局部块体滑塌形态见图 3, 边坡块体滑塌破坏后的形态见图 4。

表 3 模拟试验过程动态监测方案

Table 3 Dynamic monitoring schemes of the simulation test

项目	起始	滑塌出现前	滑塌出现后
正面图像	1~2张	间隔5 min	间隔2 min
侧面观测框图像	各拍1张	间隔10 min	间隔5 min
侧面观测框卧式显微镜 细观演变观测	1~2张	间隔5 min	间隔2 min
正面滑塌破坏的时间段 宏观观测	高清晰录像机跟拍关键滑塌破坏过程		
各种传感器读数	记录初始读数	间隔5 min	间隔2 min



图 2 坡体浅层出现破坏裂纹及形态

Fig. 2 Failure cracks and morphology appeared in the shallow layer of slope body



图 3 斜坡浅层局部块体滑塌形态

Fig. 3 Local block collapse form in shallow layer of slope

2.2 降雨强度对斜坡模型滑塌过程的影响

降雨强度对斜坡模型滑塌过程的影响主要体现在裂缝出现时间、滑块尺寸大小等方面, 按此分类方式对上述试验结果进行统计, 裂缝的出现以有较明显清晰的

坡面裂缝为准,结果见表5。对比分析可见,降雨强度对斜坡模型滑塌过程影响存在一定的规律性,即随降雨强度的增大,土体裂纹出现的时间越早,滑块尺寸由泥状土到小散体状土,再到大散体状土,其破坏范围集中、破坏程度增强。边坡深层整体滑塌失稳破坏形态见图5。

2.3 降雨强度对斜坡模型滑塌破坏所需的降雨时长影响

降雨强度对斜坡模型滑塌破坏所需降雨时长的影响的分类统计和相关时间数据汇总见表5、表6,其中,开始滑塌失稳破坏时间以坡面第一块具有相当尺寸的滑块开始移动为准。按相同坡度条件下整理数据,得到降雨强度与斜坡滑塌破坏所须的降雨时长的关系曲线见图6所示。由表5和图6可以看出,在四种不同坡度条件下,降雨强度对斜坡滑塌破坏所需的降雨时长都有较好规律性。随降雨强度的增大,其相应斜坡变形破坏所需的降雨时长减少。

3 斜坡坡度对斜坡模型滑塌破坏影响分析

3.1 斜坡模型坡度对斜坡滑塌破坏形式的影响

由模拟试验结果可知,不论是整体还是局部的失稳破坏形式,都存在2种坡体的破坏形式:滑块散落和泥块滑落。前者属于崩塌形式的一种,而后者则是属于一种滑坡形式。对模拟试验结果按照破坏形式分类后,结果见表7。

分析可见,斜坡模型坡度对坡体滑塌破坏形式的影响关系十分明显。以40°为界,出现不同的破坏形式。当斜坡坡度在40°以下时,不论降雨强度大小,土坡充分湿润成泥后,才从坡面滑下,其破坏形式以滑落为主,并且单位时间内滑下的泥状土数量少且均匀。当斜坡坡度在40°以上时,不论降雨强度大小,坡体均以散落的破坏形式不断剥蚀土体,促使土体滑块形成,最终脱离土体,其破坏形式以散落为主,并且单位时间内散落的土



图4 斜坡块体滑塌破坏后的形态

Fig. 4 The shape of slope block after collapse failure

表4 斜坡模型滑塌破坏模式分类统计表

Table 4 Classification statistics of sliding mode of model slope

变形破坏模式	深层 整体失稳	深层 局部失稳	浅层 整体失稳	浅层 局部失稳
模拟试验 方案编号	55°1档; 50°4档; 50°3档	40°4档	30°4档; 30°3档	30°2档; 30°1档; 40°3档; 50°2档; 40°1档; 40°2档; 50°1档; 55°4档; 55°3档; 55°2档
数量/个	3	1	2	10



图5 斜坡深层整体滑塌失稳破坏形态

Fig. 5 Failure pattern of overall collapse and instability of deep slope

表5 降雨强度对斜坡模型滑塌破坏过程的影响分类统计表

Table 5 Classification statistics of the effect of model slope gradient on slope sliding process

坡度/(°)	1档(大雨)	2档(暴雨)	3档(大暴雨)	4档(特大暴雨)
30	裂缝出现时间晚, 滑块尺寸小且分散	裂缝出现时间较晚, 滑块尺寸较小且分散	裂缝出现时间较早,滑块尺寸较大 且集中,破坏程度大	裂缝出现时间早,滑块尺寸大 且集中,破坏程度大
40	滑块出现时间晚, 范围大,破坏程度小	滑块出现时间较晚, 范围较小	滑块出现时间较快,范围小, 但破坏程度大	深层局部失稳破坏,破坏程度大
50	滑块出现时间晚,滑块尺寸小 且位置分散,破坏程度小	裂缝出现时间较早,滑块尺寸 较大且位置较集中	深层整体失稳破坏,破坏程度大	裂缝出现时间早,滑块尺寸大 且破坏程度大
55	深层整体失稳破坏	滑块出现时间较均匀,滑块 尺寸小,次数多,位置分散	滑块出现时间较早但滑块尺寸小 且均匀,大滑块出现时间晚	滑块出现时间早,但滑块尺寸小 且均匀,大滑块出现时间较晚

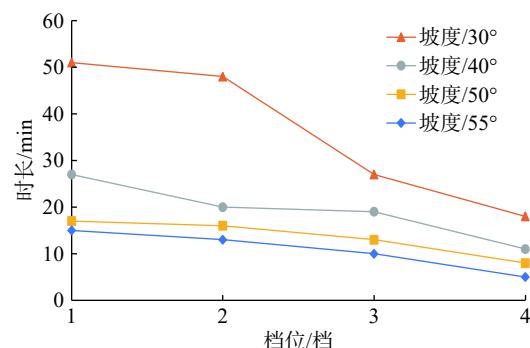


图 6 四种不同坡度条件下降雨强度与斜坡变形破坏所需的降雨时长关系曲线
Fig. 6 The curve of the slope gradient and the time of the slope sliding under four kinds of different gradient conditions

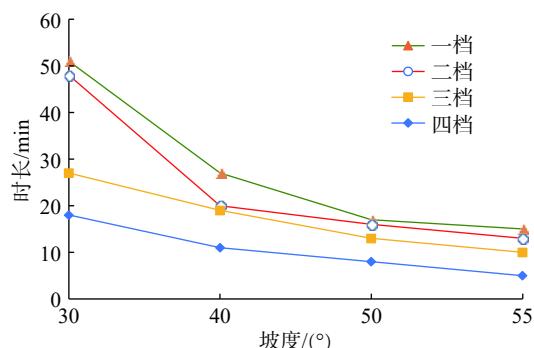


图 7 四种不同降雨强度条件下，斜坡坡度与斜坡滑塌破坏所需的降雨时长关系曲线
Fig. 7 The curve of the slope gradient and the time of the slope sliding damage under four kinds of different rainfall intensity conditions

表 6 斜坡模型开始滑塌失稳破坏时间统计表

Table 6 The time(minutes)of instability and failure of model slope /min

坡度/(°)	1(大雨)	2(暴雨)	3(大暴雨)	4(特大暴雨)
30	51	48	27	18
40	27	20	19	11
50	17	16	13	8
55	15	13	10	5

表 7 斜坡模型坡度对坡体滑塌破坏形式的影响分类统计表

Table 7 Classification statistics of the effect of model slope gradient on slope sliding mode

坡度/(°)	滑塌破坏形式描述	破坏(散落)数量/个	破坏(滑落)数量/个
30	都有裂缝的优先发展而将土体分割为大或小的滑块,之后这些滑块才在不同的降雨强度条件下出现不同的破坏形式	0	4
40	除4档雨强的突破外,其余土坡均由坡上部开始有滑块形成并下滑,且较其他坡度的土坡,其最终的破坏程度最小	2	2
50	都有裂缝的优先发展而将土体分割为大或小的滑块,之后这些滑块又都以散落的形式破坏	4	0
55	都未出现裂缝,土体均在受雨一段时间后形成大或小的滑块,后直接从土体上散落破坏	4	0

体数量较多且不均匀。

3.2 斜坡坡度对斜坡滑塌破坏所需的降雨时长影响

依据斜坡模型坡度与滑塌破坏所需的降雨时长关系的相关时间数据,按相同降雨强度条件下整理数据,得到斜坡模型坡度与斜坡滑塌破坏所需的降雨时长关系曲线见图 7 所示。图 7 可以看出,在四种不同降雨强度条件下,斜坡坡度对坡体滑塌破坏所需的降雨时长都有较好规律性。随斜坡坡度的增大,其相应斜坡滑塌破坏所需的降雨时长减少。

4 结论

以东南沿海地区花岗岩残积土为代表性土样,在大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨等四种不同降雨等级条件下对四种不同坡度的斜坡模型进行了强降雨模拟试验,研究降雨强度和斜坡坡度对其滑塌破坏的影响特征,主要结论如下:

(1) 坡体深层失稳较浅层失稳少,而浅层失稳中整体失稳较局部失稳少,且浅层局部失稳数量占总数的一半,并涵盖到各坡度、各降雨强度的情况,是本次模拟试验主要出现的土坡失稳破坏主要模式。

(2) 深层整体失稳、深层局部失稳、浅层整体失稳主要发生在降雨强度较大的 3 档(大暴雨)和 4 档(特大暴雨),而浅层局部失稳大部分发生在降雨强度低的 1 档(大雨)或 2 档(暴雨)模拟试验中。可见,降雨强度越大,发生深层破坏或浅层整体破坏的趋势越明显,数量越多。而随降雨强度减小,斜坡模型破坏模式由整体失稳破坏向局部失稳破坏转化。

(3) 降雨强度对斜坡模型滑塌过程影响存在一定的规律性,即随降雨强度的增大,土体裂纹出现的时间越早,滑块尺寸由泥状土到小散体状土,再到大散体状土,其破坏范围集中、破坏程度增强。

(4) 降雨强度对斜坡滑塌破坏所需的降雨时长都有较好规律性。在四种不同斜坡条件下,随降雨强度的增大,其相应斜坡变形破坏所需的降雨时长减少。

(5) 斜坡模型坡度对坡体滑塌破坏形式的影响关系十分明显。当斜坡坡度在 40°以下时,其破坏形式以滑落为主,并且单位时间内滑下的泥状土数量少且均匀。当斜坡坡度在 40°以上时,其破坏形式以散落为主,并且单位时间内散落的土体数量较多且不均匀。

(6) 在四种不同降雨强度条件下, 斜坡坡度对坡体滑塌破坏所需的降雨时长都有较好规律性。随斜坡坡度的增大, 其相应斜坡滑塌破坏所需的降雨时长减少。

(7) 本文仅基于相似模拟原理进行相关试验, 因模拟斜坡规模尺寸存在一定的限度, 因此研究结论反映模拟试验结果, 仅供实际斜坡分析判断时参考借鉴。

参考文献 (References):

- [1] 胡华, 蔡亮, 梁建业. 花岗岩残积土冲击损伤与损伤演化特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 872–880. [HU Hua, CAI liang, LIANG Jianye. Experimental research on impact damage and damage evolution characteristics of granite residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 872–880. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 胡华, 梁建业. 花岗岩残积土含水率对动态流变损伤力学特性与损伤度影响试验研究 [J]. 水利学报, 2015, 46(7): 54–58. [HU Hua, LIANG Jianye. Experiment and research on dynamic rheological damage mechanics characteristics and damage degree influence with different moisture content of granite residual soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7): 54–58. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 胡华, 蔡亮. 残积土含水率对其动力特性影响试验研究 [J]. 地震工程学报, 2015, 37(3): 754–758. [HU Hua, CAI Liang. Test study of the influence of moisture content on dynamic characteristics of residual soil [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 754–758. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 胡华, 谢金华. 改进的不等时距灰色马尔科夫模型在斜坡位移预测中的应用 [J]. 水利与建筑工程学报, 2016(6): 1–6. [HU Hua, XIE Jinhua. Application of improved unequal time interval gray markov model in roadbed sloped displacement prediction [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016(6): 1–6. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 阙云, 胡昌斌, 姚晓琴. 降雨入渗对裂隙性粘土边坡稳定性作用机理的分析 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 423–429. [QUE Yun, HU Changbin, YAO Xiaoqin. Mechanism analysis on the influence of the rainfall infiltration on the stability of fissured clay slope [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2009, 37(3): 423–429. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 詹良通, 李鹤, 陈云敏, 等. 东南沿海残积土地区降雨诱发滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析 [J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 872–880. [ZHAN Liangtong, LI He, CHEN Yunmin, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slope in Southeastern coastal areas of China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 872–880. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张友谊, 胡卸文, 朱海勇. 滑坡与降雨关系研究展望 [J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 104–108. [ZHANG Youyi, HU Xiewen, ZHU Haiyong. Prospect of research on relationship between landslide and rainfall [J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(1): 104–108. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈天健, 蔡和伦, 黄彦荣, 等. 人工降雨模型试验研究降雨入渗对滑坡类型之影响 [J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 254–257. [CHEN Tianjian, CAI Helun, HUANG Yanrong, et al. Slope failure mode related to soil infiltration-laboratory rainfall model test [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 254–257. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李长江, 麻土华, 李炜, 等. 滑坡频度-降雨量的分形关系 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 87–93. [LI Changjiang, MA Tuhua, LI Wei, et al. Fractal relation of landslide frequency and rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 87–93. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 左自波. 降雨诱发堆积体滑坡室内模型试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013. [ZUO Zibo. Investigation on rainfall-induced colluvium landslides using laboratory model tests[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李鹤. 东南沿海残积土地区降雨型滑坡预警预报体系的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. [LI He. Study on early warning system for rain-induced slope failure in residual soils in southeast coastal region of China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 常晓军, 王德伟, 唐业旗. 中国滑坡降雨试验的研究现状与发展趋势 [J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(1): 98–102. [CHANG Xiaojun, WANG Dewei, TANG Yeqi. Simulation experiments of the rainfall-induced landslides in China: insights and foresights [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(1): 98–102. (in Chinese with English abstract)]