

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.006

云南红土室内滑坡可行性试验研究

黄英¹,石崇喜^{1,2},张祖连¹,符必昌¹,金克盛¹

(1.昆明理工大学电力工程学院,云南昆明 650500; 2.云南省昭通市水利水电勘测设计院,云南昭通 657000)

摘要:以红土作为室内滑坡模型材料制作红土型边坡,考虑边坡尺寸、土体特性、成型方法、降雨等级的影响,开展降雨作用下红土型边坡的室内滑坡模型试验研究。试验结果表明,直接选用红土开展室内滑坡模型试验的成功率较低,但如果控制好试验条件,红土型边坡仍然可能发生滑坡。室内暴雨作用下,红土型边坡的滑动过程可以分为边坡成型、降雨实施、滑动面形成发展、整体滑动等几个阶段;其滑动特征表现为先坡顶开裂下沉、后坡侧开裂延伸;其滑动条件为坡高、坡角较大,坡顶宽适中,塑性指数偏小,干密度偏小,含水率接近塑限,堆积法成型以及暴雨等方面。

关键词:云南红土;室内滑坡可行性试验;滑动过程;滑动特征;滑动条件

中图分类号:P642 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2014)06-0497-06

Feasibility study of indoor test of Yunnan laterite landslide

HUANG Ying¹, SHI Chongxi^{1,2}, ZHANG Zulian¹, FU Bichang¹, JIN Kesheng¹

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Zhaotong Hydropower Survey and Design Institute of Yunnan Province, Zhaotong 657000, China)

Abstract: A feasibility study of the indoor test of the Yunnan laterite landslide was carried out under simulated rainfall conditions. In the study, the modeling material, the Yunnan laterite, was used to make lateritic slopes, and the effects of the size of the slope, the lateritic properties, the molding method, and the rainfall level were all considered. The tests results show that, the success rate is low if a laterite is directly selected for the indoor test. However, a lateritic slope landslide may occur if the test conditions are well controlled. Under the conditions of indoor rainstorms, the sliding process of the lateritic slopes can be divided into the following stages: the formation of the slope, the implementation of rainfall, the formation and development of the sliding surface, and the overall slide. The sliding characteristics can be expressed as cracking and sinking on the top of the slope first, and then cracking and extension on the sides of the slope. The conditions for sliding include larger values of the height and angle of the slope, a moderate width of the slope top, a lower plasticity index, a lower dry density, a moisture content of approaching the plastic limit, the stacked molding method, and a rainstorm.

Key words: Yunnan laterite; indoor landslide feasibility test; sliding process; sliding characteristics; sliding conditions

滑坡作为一种自然界时常发生的典型地质灾害问题,已有学者进行了大量研究,内容主要包括现场滑坡土体观测、现场土体滑坡试验、室内滑坡模型试验以及滑坡的滑动过程、滑动特征、滑动机理等方面。由于大多数滑坡与降雨有关,所以现场土体滑坡试验和室内滑坡模型试验都是在降雨条件下进行。常晓军等^[1]分析总结了我国滑坡降雨试验研究现状;龙万学等^[2]开展了降雨型滑坡现场模拟试验,结合数值计算,研究降雨情况下滑坡的成灾特征及成灾机理;胡明鉴等^[3]针对蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡,开展了斜坡稳定性及大型野外人工降雨激发滑坡试验研究,阐述了降雨激发滑坡的复杂作用过程;傅鹤林等^[4]开展了人工降雨模拟试验和机械开挖模拟原位试验,研究滑坡触发因素及其对滑坡的影响;罗先启等^[5]建立了室内滑坡试验的控制系统和测试

系统,并结合实例开展了雨水及库水作用下的滑坡模型试验,研究水库型滑坡的变形破坏规律;肖先煊等^[6]针对三峡库区某滑坡,优选滑坡相似材料,建立滑坡地质力学模型,考虑降雨及地表水的作用,开展了滑坡模型试验研究,表明滑坡体前缘可从稳定状态直接进入加速蠕变阶段;肖诗荣等^[7-8]开展了三峡库区千将坪滑坡的模型试验,研究三峡水库水位变化对该滑坡稳定性的影响;胡修文等^[9]开展了三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究;王伟锋等^[10]开展了降雨型与地震型滑坡试验研究,分析了降雨型滑坡的坡度与临界降雨量之间的关系;任伟中等^[11]开展了滑坡变形破坏机理及整治工程的模型试验研究;陈红凯等^[12]开展了散体滑坡室内启动的模型试验研究;孔纪名等^[13]研究了川藏公路拉月滑坡的块状破坏特征;黄涛等^[14]开展了地表水入渗环境下边坡稳定性的模型试验研究;赵晓彦等^[15]开展了云南头寨沟大型岩质高速滑坡碰撞的模型试验研究;雍睿等^[16]开展了推移式滑坡演化过程的模型试验与数值模拟研究等。

滑坡模型试验根据相似理论选用相似材料制作滑坡模型,预先给定其滑动面,即原型滑坡的滑动面。滑坡模型试验可以实现对原型滑坡滑动过程的重现模拟,对于揭示已经发生滑坡的滑动过程、滑动特征以及滑动机理具有重要的作用。

实际上,滑坡的发生是一个渐变过程,滑动面的形成及发展是降雨、入渗、土性、坡性等因素共同作用的结果,具有很大的不确定性和偶然性。自然状态下既发生大型滑坡,也时常发生小型滑坡,都可通过室内滑坡模型试验来模拟。一方面,虽然滑坡模型试验可以直观反映已发生滑坡的滑动过程,但相似材料的选择以及模型与原型之间的对应关系仍然存在很大问题,需要深入研究;另一方面,为了避开相似材料的选择困难以及原型的影响,可以考虑选用土料作为滑坡模型材料,开展室内滑坡模型试验研究,在没有原型参照的情况下,直接观测滑坡的发生发展过程,获得滑坡的发生条件。目前,前一个问题研究相对较多,而后一个问题研究较少。

云南红土分布广泛,山高坡陡,存在大量的红土型边坡,降雨引起的红土型滑坡问题严重,但缺乏相应的研究。为此,本文选用2种云南红土作为滑坡模型材料,制作红土型边坡,开展降雨作用下红土型边坡的室内滑坡模型试验研究,观测降雨过程中红土型边坡的滑动过程、滑动特征及滑动条件。

1 滑坡模型试验方案及试验装置

1.1 土料

为了研究红土型边坡在室内降雨条件下发生滑坡的条件,直接选用红土作为模型材料,制作小尺寸红土型边坡。由于红土颗粒之间较强的黏结力,必然影响室内小尺寸红土型边坡产生滑动的可能。因此,土料考虑选择颗粒较粗、塑性指数较小的粉质红土,并且控制红土型边坡较低的干密度。表1为试验红土的基本特性。

表 1 试验红土的基本特性

Table 1 Basic characteristics of test laterite

土料编号	相对质量	颗粒质量分数/%			稠度指标		
		砂粒	粉粒	黏粒	液限/%	塑限/%	塑性指数
A	2.69	1.9	58.5	39.6	38.5	25.1	13.4
B	2.82	0	43.8	56.2	49.5	33.9	15.6

1.2 装置

室内滑坡模型试验采用自制的装置系统,主要包括降雨系统、模型槽、集水槽3部分,见图1。降雨系统由孔板型雨滴发生器、降雨座架、供水系统3部分组成。图2中的雨滴发生器长50 cm,宽50 cm,高6 cm,有效降雨面积0.25 m²左右。模型槽长80 cm,宽40 cm,高60 cm。

1.3 方案

1.3.1 影响因素

滑坡的发生主要取决于边坡特性、土体特性以及降雨情况,边坡越高、坡角越大,土体密实程度越低、含水率越少,降雨越大,边坡土体产生滑动的可能性越大。因此,试验过程中,要考

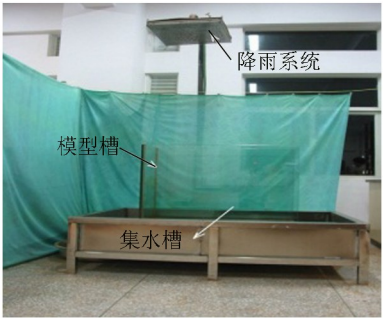


图 1 室内滑坡试验装置

Fig. 1 Indoor landslide test apparatus

虑坡高、坡角、坡顶宽、坡顶长和坡面形状等边坡特性以及边坡土体的含水率、干密度等土体特性的影响。坡高定为 30 ~ 70 cm,坡角定为 50° ~ 70°,坡顶宽定为 15 ~ 30 cm 之间,坡顶长固定40 cm,坡顶面和坡斜面都为平面。边坡红土的含水率定为 24.4% ~ 36.8%,干密度定为 0.95 ~ 1.22 g/cm³。因滑坡一般都是在暴雨条件下发生,所以,本试验控制降雨为暴雨等级,由室内降雨量的率定试验来确定^[17]。

1.3.2 红土型边坡的制作

根据各影响因素的拟定参数,先根据边坡尺寸确定各模型边坡体积,再按照拟定的干密度和含水率制备好红土样,并在模型槽壁用粉笔勾勒出边坡尺寸,然后装入红土样,采用夯实和堆积等成型方法制作室内红土型边坡,共计 11 个,其中,A 料红土型边坡 9 个,B 料红土型边坡 2 个。夯实成型法包括水平分层夯实和竖直分层夯实 2 种,就是通过木槌、垫板等夯实工具分层夯实土料达到边坡的成型尺寸;堆积成型法是将边坡所需的土料全部密实地堆积在边坡尺寸范围内,用夯实工具轻轻地夯实到边坡尺寸。

1.3.3 红土型滑坡模型试验的开展

红土型边坡制作成型后,静置固结 24 h,通过人工降雨,开展降雨条件下的室内滑坡模型试验。整个降雨过程中,采用数码相机和摄像机作为观测设备,观测:(a)降雨量、降雨历时的变化;(b)红土型边坡的变形、溅蚀、土颗粒运移等表面特征;(c)红土型边坡产生滑动的过程,观测滑动过程中边坡的开裂、滑动面的形成发展、滑动面形状、滑动形态、滑动快慢、滑动位置、坡体下滑等滑动特征。找寻不同影响因素下红土型边坡发生滑坡的条件。

1.3.4 红土型滑坡模型试验结果

室内滑坡模型试验结果表明,制作的 11 个红土型边坡只有 2 个 A 料红土型边坡发生了滑坡(滑坡 1、滑坡 2),其余 9 个边坡没有发生滑坡,只是表面特征发生了变化。

2 室内条件下红土型边坡的滑动过程

典型的红土型边坡产生滑动的过程可以分为边坡成型、降雨实施、滑动面形成发展、整体下滑等4个阶段。

2.1 边坡成型阶段

根据试验方案,按照各影响因素的拟定参数,在自制的滑坡模型槽内采用堆积成型法制作红土型边坡,见图 3。成型后的红土型边坡,静置 24 h 使其固结。

2.2 降雨实施阶段

降雨前,先对室内降雨量进行率定^[11],以确定室内降雨量与实际降雨量的关系,根据 12 h 降雨量控制降雨等级为暴雨;并在模型槽周围布置观测点和观测装置;然后对固结后的红土型边坡按照暴雨等级实施降雨,观测降雨过程中红土型边坡的变化。针对每个红土型边坡观测每次降雨过程及降雨后边坡的变化特征,找寻滑坡的发生迹象,判断后续降雨条件,根据滑坡的发生作为红土型边坡的成型标准。11 个红土型边坡,分别进行了多次暴雨等级的降雨,最后观测到 2 个边坡发生了滑坡。滑坡 1 和滑坡 2 的发生都实施了 2 次降雨,滑坡 1 的降雨过程见图 4。

2.3 滑动面形成发展阶段

图 5 为滑坡 1 发生滑动的过程。第 1 次降雨历时 373 s,约在降雨停止后 410 s 时,观察发现坡顶面中上部位置产生裂缝,并贯穿坡顶;同时在边坡侧面产生开裂,形成滑动面,近似圆弧状,并向下延伸发展。

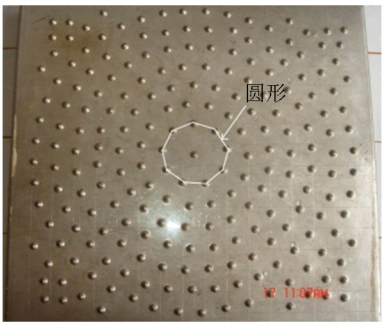


图2 雨滴发生器
Fig. 2 Raindrops generator

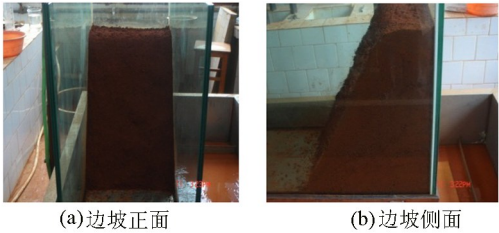


图3 成型的红土型边坡
Fig. 3 Formed lateritic slope

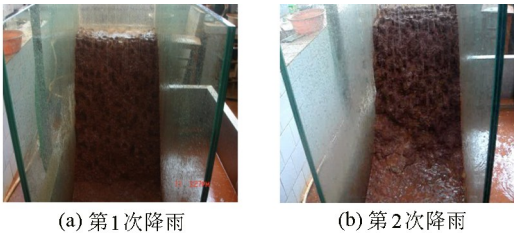


图4 降雨过程中的红土型边坡
Fig. 4 Lateritic slope during rainfall process

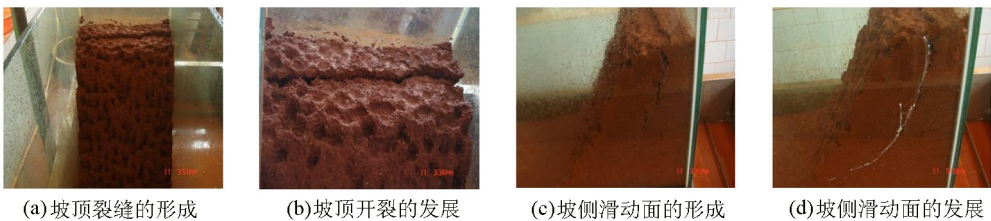


图5 红土型边坡滑动面的形成和发展

Fig. 5 Formation and development of sliding surface of lateritic slope

2.4 整体下滑阶段

对于滑坡1,第1次降雨停止后,滑体相对稳定下来。为了促使其发生2次滑动,进行了第2次降雨。第2次降雨历时265 s,裂缝延伸至坡底,形成完整的滑动面,边坡发生了整体滑动。图6为第2次降雨过程中不同降雨历时边坡的变化。由图6可以看出,边坡整体滑动前坡脚发生了局部破坏,产生临空面,引起坡脚破坏区临空面上方的土体整体向下滑动,滑动过程很短,历时约124 s。滑坡2第1次降雨等级为大雨,没有观测到滑动迹象;第2次降雨等级为大暴雨,发生了整体滑动,历时约67 s。

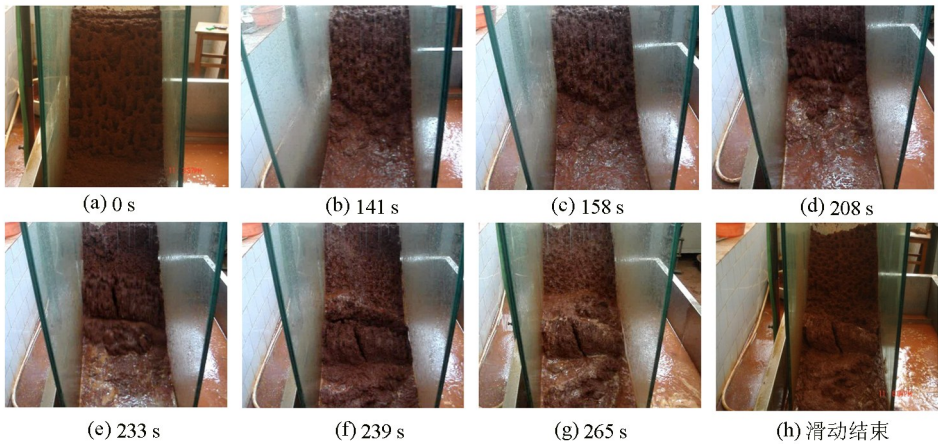


图6 红土型边坡的滑动过程

Fig. 6 Sliding process of lateritic slope

3 室内条件下红土型边坡的滑动特征

滑坡的滑动特征包括裂缝、滑动面、滑带、滑动位置、滑壁高度、滑动历时、滑动方式、滑前征兆等。2个发生滑坡的边坡均为A料粉质红土,滑坡1、滑坡2的坡顶长度均为40 cm,坡角、坡高、坡顶宽度分别为 61.1° 、 59.9° 、58 cm、50 cm、18 cm、20 cm,土体干密度、含水率分别为 0.95 g/cm^3 、 1.01 g/cm^3 、27.5%、28.3%,滑动位置分别距模型槽后壁9~11 cm、5~6 cm,滑后最高点与原坡顶距离分别为4.7 cm、3.6 cm。因滑坡土体延伸到了模型槽后壁,无法测出滑坡1的滑壁高度,滑坡2滑壁高度为7.2 cm。滑坡1坡顶裂缝位于中部,水平贯穿整个坡顶面,距离模型槽后壁9~11 cm,裂缝最大宽度3 cm,最小宽度2 cm,滑坡顶面垂直下降了2 cm,滑带不明显,滑动面近似圆弧状,靠近坡顶面最大缝宽3.5 cm,由坡顶面向下延伸至坡高20 cm处;滑坡2滑动前无明显裂缝产生,滑带明显,最大带宽位于坡底,约为13.8 cm,滑动面近似圆弧状,自坡顶向下延伸至坡底,贯通了整个坡体,缝宽不明显。

2个滑坡比较,滑坡1对应边坡的高度大、坡角大、坡顶宽较小、干密度小、含水率小,所以,相对来说,滑坡1对应的边坡更易发生滑动,室内试验结果也表明滑坡1在暴雨作用下发生了多次崩塌滑动;而滑坡2在大暴雨作用下发生了一次整体滑动。图7为滑坡发生后的量测形状,也表明了2个滑坡的滑动特征。

4 分析与讨论

4.1 滑坡发生的可能性

室内滑坡模型试验结果表明,制作的9个A料、2个B料共11个红土型边坡,只有2个A料的红土型边

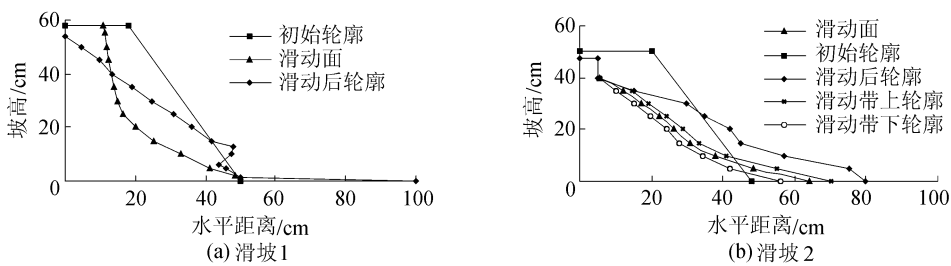


图 7 室内条件下红土型滑坡的量测形状

Fig. 7 Measured shape of lateritic landslide under indoor condition

坡在多次降雨作用下发生了滑坡,其余的 9 个只是发生了局部破坏,整体未发生滑动。说明直接选用红土作为滑坡模型材料制作的红土型边坡,在室内小尺寸条件下滑坡模型试验的成功率很低,发生滑坡的可能性很小。但如果控制好试验条件,红土型边坡仍然可能发生滑坡,不同影响因素下红土型边坡的室内滑坡模型试验结果见表 2。

表 2 不同影响因素下的滑动结果

Table 2 Results of sliding affected by different factors

边坡编号	坡高/cm	坡角/(°)	坡顶宽/cm	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	成型方法	土料	试验结果
S1	30	50.2	15	1.22	36.8	水平分层击实	A	未发生滑坡
S2	30	60.5	23	1.19	35.3	水平分层击实	A	未发生滑坡
S3	30	60.5	23	1.00	36.0	竖直分层击实	A	未发生滑坡
S4	30	69.9	29	1.12	24.4	水平分层击实	A	未发生滑坡
S5	58	61.1	18	0.95	27.5	堆积法	A	发生滑坡
S6	70	69.6	20	1.01	31.3	水平分层击实	A	未发生滑坡
S7	50	59.9	20	1.02	30.2	水平分层击实	B	未发生滑坡
S8	50	59.9	20	1.01	34.8	堆积法	B	未发生滑坡
S9	50	59.9	20	1.01	28.3	堆积法	A	发生滑坡
S10	50	59.9	30	1.00	26.8	堆积法	A	未发生滑坡
S11	40	60.1	20	0.99	28.0	堆积法	A	未发生滑坡

4.2 不同因素对滑动结果的影响

分析表 2 可知,暴雨作用下,边坡尺寸、土体特性、边坡成型方法对红土型边坡是否滑动具有重要影响。密实程度较高的边坡,不易发生滑坡,密实程度较低的边坡,较易发生滑坡;偏干和偏湿的边坡都不易发生滑坡,含水适中的边坡,较易发生滑坡;堆积法成型的边坡发生了滑坡,但不是所有堆积法成型的边坡都发生滑坡,水平分层击实、竖直分层击实成型的边坡没有发生滑坡;从土料来看,粉粒较多、塑性指数偏小的粉质红土 A 成型的边坡发生了滑坡,但不是所有粉质红土 A 成型的边坡都发生滑坡,而粉粒较少、塑性指数偏大的粉质红土 B 成型的边坡没有发生滑坡。

由此可见,室内滑坡的发生与坡高、坡角、坡顶宽、土体特性、密实程度、干湿程度、成型方法以及降雨等级密切相关,这些因素决定了室内红土型边坡可能产生滑坡的条件。在边坡尺寸方面,坡高较高、坡角较大、坡顶宽适中的边坡易产生滑坡;在土体特性方面,塑性指数偏小、干密度偏小、含水率接近塑性的粉质红土易产生滑坡;在成型方法方面,采用堆积法成型的边坡易产生滑坡;降雨等级方面,暴雨作用下的边坡易产生滑坡。

5 结 论

针对 2 种云南粉质红土,考虑边坡尺寸、土体特性、成型方法、降雨等级的影响,开展了一系列降雨作用下云南红土型边坡的室内滑坡模型试验。结果表明:

- a. 采用红土制作的 11 个红土型边坡,只有 2 个在降雨作用下发生了滑坡,说明红土型边坡开展室内滑坡模型试验的成功率很低。
- b. 室内红土型边坡的滑坡过程可以分为边坡成型、降雨实施、滑动面形成发展、整体下滑等几个阶段,其典型滑动特征表现为先坡顶开裂下沉,后坡侧开裂延伸;其滑动条件为坡高、坡角较大,坡顶宽适中,塑性

指数偏小,干密度偏小,含水率接近塑限,堆积法成型以及暴雨等方面。

c. 本文开展了小尺寸红土型边坡的室内滑坡模型试验,没有考虑模型尺寸、相似材料等因素的影响,所得结果只针对具体试验条件。

参考文献:

[1] 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))

[2] 龙万学,吴俊,傅鹤林. 降雨型滑坡现场模拟试验研究[J]. 贵州工业大学学报:自然科学版,2008,37(8):20-24. (LONG Wanxue,WU Jun,FU Helin. Research on on-site simulation test of landslide by artificial rainfall[J]. Journal of Guizhou University of Technology:Natural Science Edition,2008,37(8):20-24. (in Chinese))

[3] 胡明鉴,汪稔,张平仓. 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究:以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡地为例[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):454-457. (HU Mingjian,WANG Ren,ZHANG Pingcang. Primary research on the effect of rainfall on landslide;take the slope piled by old landslide in Jiangjiagou valley as example[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(4):454-457. (in Chinese))

[4] 傅鹤林,李昌友,郭峰,等. 滑坡触发因素及其影响的原位试验[J]. 中南大学学报:自然科学版,2009,40(3):781-785. (FU Helin,LI Changyou,GUO Feng,et al. Situ-test of abduction elements of landslide and its influence[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2009,40(3):781-785. (in Chinese))

[5] 罗先启,刘德富,吴剑,等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):2476-2483. (LUO Xianqi,LIU Defu,WU Jian,et al. Model test study on landslide under rainfall and reservoir water fluctuation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(14):2476-2483. (in Chinese))

[6] 肖先煊,夏克勤,许模,等. 三峡库区某滑坡稳定性模型试验研究[J]. 工程地质学报,2013,21(1):45-52. (XIAO Xianxuan,XIA Keqin,XU Mo,et al. Stability of landslide on Three-Gorges Dam Reservoir with physical simulation model[J]. Journal of Engineering Geology,2013,21(1):45-52. (in Chinese))

[7] 肖诗荣,刘德富,胡志宇. 三峡库区千将坪滑坡地质力学模型研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1459-1464. (XIAO Shirong,LIU Defu,HU Zhiyu. Study on geomechanical model of Qianjiangping landslide,Three Gorges Reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(7):1459-1464. (in Chinese))

[8] 刘波,罗先启,张振华. 三峡库区千将坪滑坡模型试验研究[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2007,29(2):124-128. (LIU Bo,LUO Xianqi,ZHANG Zhenhua. Model test study on Qianjiangping landslide of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of China Three Gorges University:Natural Sciences,2007,29(2):124-128. (in Chinese))

[9] 胡修文,唐辉明,刘佑荣. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(12):2089-2095. (HU Xiuwen,TANG Huiming,LIU Yourong. Physical model studies on stability of Zhaoshuling landslide in area Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(12):2089-2095. (in Chinese))

[10] 王伟锋,耿赞,王青振,等. 降雨型与地震型滑坡试验研究[J]. 地震地质,2012,34(4):810-819. (WANG Weifeng,GENG Yun,WANG Qingzhen,et al. Research on simulation test of rainfall-induced landslide and seismic landslide[J]. Seismology and Geology,2012,34(4):810-819. (in Chinese))

[11] 任伟中,陈浩. 滑坡变形破坏机理及整治工程的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(12):2136-2141. (REN Weizhong,CHEN Hao. Model testing research on deformation and fracture mechanism of landslide and its harnessing engineering[J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering,2005,24(12):2136-2141. (in Chinese))

[12] 陈红凯,唐红梅. 散体滑坡室内启动模型试验[J]. 山地学报,2002,20(1):112-115. (CHEN Hongkai,TANG Hongmei. Research on start up loose landslide in lab[J]. Journal of Mountain Science,2002,20(1):112-115. (in Chinese))

[13] 孔纪名,张小刚,强巴. 川藏公路拉月滑坡的块状破坏特征[J]. 山地学报,2003,21(2):228-233. (KONG Jiming,ZHANG Xiaogang,QIANG Ba. Rock lump of landsilde of Layue destruction feature analysis in Sichuan:Xizhang highway[J]. Journal of Mmountain Science,2003,21(2):228-233. (in Chinese))

[14] 黄涛,罗喜元,郭强,等. 地表水入渗环境下边坡稳定性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(16):2671-2675. (HUANG Tao,LUO Xiuyan,WU Qiang,et al. Model testing study on slope stability under environment of surface water permeation[J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering,2004,23(16):2671-2675. (in Chinese))

[15] 赵晓彦,胡厚田,齐明柱. 云南头寨沟大型岩质高速滑坡撞模试验[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):99-103. (ZHAO Xiaoyan,HU Houtian,QI Mingzhu. Medel experiment of high speed collision of landslide rock masses in Touzhai Gully,Yunnan [J]. Journal of Natural Disasters,2003,12(3):99-103. (in Chinese))

[16] 雍睿,胡新丽,唐辉明,等. 推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学,2013,34(10):3018-3027. (YONG Rui,HU Xinli,TANG Huiming,et al. Model testing and numerical simulation study of evolutionary process of thrust load caused landslide[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(10):3018-3027. (in Chinese))

[17] 石崇喜. 云南红土型滑坡室内试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2011.