

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.020

云南地区地震动特征与堆积体滑坡动力响应分析

周晓靖^{1,2}, 王 进³, 张振平⁴, 李 果⁵, 付晓东⁴

(1. 云南楚大高速公路改扩建工程建设指挥部, 云南 大理 671000;

2. 云南大永高速公路建设指挥部, 云南 大理 671000;

3. 四川高速公路建设开发总公司, 四川 成都 610041;

4. 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;

5. 云南省交通规划设计研究院, 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 昆明 650041)

摘 要: 强震是近几十年来诱发云南地区滑坡地质灾害的主要因素之一。通过对云南地震数据分析及典型滑坡震害的调查与评估, 建立了震级与震中烈度及峰值加速度的对应关系, 构建了堆积体滑坡地质概化模型。基于此, 采用 GeoStudio 软件模拟 5、6、7、8 级地震条件下滑坡的动力响应过程, 分析了位移、应力及安全系数的响应规律, 初步揭示了强震效应对滑坡失稳破坏的影响机制, 为云南地区地震诱发滑坡地质灾害的防灾减灾工作提供了理论支持。

关键词: 云南地区; 堆积体; 滑坡; 地震; GeoStudio 软件

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)03—0108—05

Dynamic Response of Talus Landslides and Features of Ground Motion in Yunnan

ZHOU Xiaojing^{1,2}, WANG Jin³, ZHANG Zhenping⁴, LI Guo⁵, FU Xiaodong⁴

(1. Yunnan Chuda highway extension projection construction headquarters, Dali, Yunnan 671000, China;

2. YunNan Dayong Higway Project Construction Headquarters, Dali, Yunnan, 671000, China;

3. Sichuan Expressway Construction & Development Corporation, Chengdu, Sichuan 610041, China;

4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 5. Broadvision Engineering Consultants,

National Engineering Laboratory for Surface Transportation Weather Impact Prevention, Kunming, Yunnan 650041, China)

Abstract: The trend of activity levels of landslide hazards in Yunnan province has been rising persistently in recent decades and the strong earthquake is one of main factors inducing slope failures. By analyzing history quake data in Yunnan region, the correspondence between the magnitude and epicentral intensity and peak acceleration is built. The talus landslides numerical model is set up from the investigation and evaluation of 50 landslides along Zhaoqiao road in the Ludian earthquake zone. Based on these, the dynamic response process of talus landslides under the magnitude of 5, 6, 7 and 8 is simulated using GeoStudio, from which the response regularity of displacement, stress and safety factor will be found. The influence mechanism of strong earthquake effect on landslide instability is preliminarily revealed, which provides the theoretical support for the work of reduction and relief to the geological disaster inducing landslides in Yunnan earthquake zone.

Keywords: Yunnan region; accumulation body; landslide; earthquake; GeoStudio

中国是亚洲乃至整个世界上滑坡地质灾害最严重的地区, 云南则是我国滑坡最严重的省份之一, 而

且在近几十年来滑坡活动水平处于持续上升的态势^[1]。云南地区的滑坡活动之所以频繁, 主要诱发

收稿日期: 2017-12-21

修稿日期: 2018-02-01

基金项目: NSFC—云南联合基金重点支持项目(U1402231); 云南省交通科技项目“云交科教[2017]33号, 23号”; 国家自然科学基金项目(51779250, 51778609)

作者简介: 周晓靖(1974—), 男, 云南昆明人, 高级工程师, 主要从事公路工程建设管理工作。E-mail: 454290417@qq.com

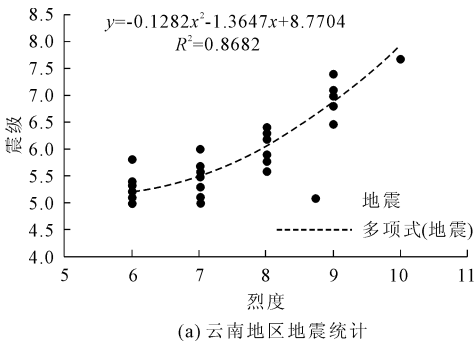
通讯作者: 付晓东(1986—), 男, 四川南充人, 博士, 副研究员, 主要从事岩体工程地震动力响应分析工作。E-mail: xdfu@whrsm.ac.cn

因素之一来自地震。大量文献资料显示,云南的每次地震都会诱发大量的滑坡地质灾害^[2-6]。其中,1996 年丽江 7 级地震,在约 12 000 km² 内诱发了至少 30 处大中型滑坡与 420 处中小型崩塌,同时导致该地区很多老滑坡复活,威胁附近 11 个村寨超过 1.5 万人的生命财产安全^[2];2014 年云南省昭通市鲁甸县 6.5 级地震诱发了中型及以上滑坡 149 个,包括甘家寨、红石岩与王家坡等巨型滑坡,其中红石岩滑坡堵塞牛栏江,形成了长约 1 000 m、顶部宽约 300 m、高约 100 m 的堰塞湖堆石坝,直接威胁沿江的鲁甸、巧家、昭阳三县(区)10 个乡镇、30 000 余人以及下游黄角树、天花板等水电站设施的安全^[6]。

可见,云南地区地震诱发滑坡造成了重大人员伤亡与财产损失,严重制约了社会的和谐发展。因此,针对云南地区的地震滑坡灾情,在地震动特征研究与典型堆积体滑坡地质结构模型构建的基础上,开展滑坡动力响应分析,对云南省乃至我国的经济民生与社会稳定都具有十分重要的意义。

1 云南地区地震动特征分析

云南是我国地震灾害最为严重的地区,其致灾



规模与活动水平居我国前列。云南省土地面积仅为中国国土面积 4%,但是在 20 世纪的 100 年时间内,发生震级大于等于 5 级的地震 285 次,占同期全国范围内地震总数的 14.2%,平均每 1 000 km² 内发生的地震约 7.4 次,居全国之首^[7]。本文基于《西南地震简目(川、滇、黔、藏)》和中国地震台网的数据共享功能,搜集了云南省大于等于 5 级的地震事件 61 起,结合关于时间、地点、震级、震源深度和震中烈度的记载进行分析。其中 90% 以上的地震位于 15 km 以内的地壳中上部,特别是 10 km ~ 15 km 范围内地震相当集中。

针对搜集的地震动资料,采用最小二乘法对震级与震中烈度进行线性回归分析,得到了云南省震级与震中烈度的统计关系,见图 1(a),其经验公式为: $M_s = 0.1282x^2 - 1.3647x + 8.7704$, M 为震级,相关系数为 0.87。通过与相关研究成果的对比^[8-10],如图 1(b)所示,两条曲线总体上差别不大,对于同样震级的地震,云南的震中烈度要比全国其他地区的值偏高。同时,以上述统计结果为基础,我们建立了震级与震中烈度及峰值加速度的对应关系,如表 1 所示。

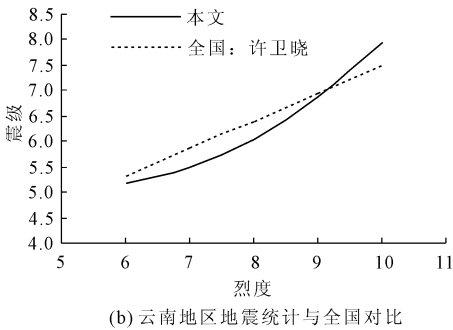


图 1 云南地区震级与烈度的统计关系及与全国数据对比

表 1 云南省震级与震中烈度及峰值加速度的对应关系				
震级	5	6	7	8
烈度	XI	VIII	IV	X
峰值加速度/ g	0.05	0.20	0.40	0.80

2 堆积体地质结构模型

本文地震滑坡地质结构模型以 2014 年云南省昭通市鲁甸 6.5 级地震造成的昭巧公路沿线滑坡为例。通过对震区灾后昭巧公路沿线近 50 个滑坡震害典型工点的调查与评估,总结了它们的共同特征:

(1) 在几何特征方面,自然高度较高,最大超过 200 m,前缘削坡坡度在 50° ~ 80° 之间,上部自然坡面坡度在 20° ~ 40° 之间且基本与下伏基岩面平行。

(2) 在地质特征方面,上覆岩土体为崩坡积体,下部为基岩,为典型的二元结构;崩坡积体为老滑坡崩塌堆积体,呈碎石土、块石土状;各滑坡之间厚度在 2 m ~ 25 m 范围内,差异较大,单个滑坡的厚度基本一致;下伏基岩风化程度一般,呈中微风化,节理裂隙发育,岩层顶面为顺坡向,坡度与自然坡面坡度相差不大。

(3) 在动力失稳模式方面,上覆岩土体震裂松动,发生沿下伏基岩面顺坡向的“震力剪切 - 滑移”破坏。

以上述特征分析为基础,建立了图 2 的概化地质模型:坡高设置为 150 m,下部切坡部分设置为 70°,上部自然部分设置为 25°,基岩顶面与上部自然坡面平行;上覆崩坡积物厚度设置为 15 m,上下地

层分别命名为崩坡积体和基岩。

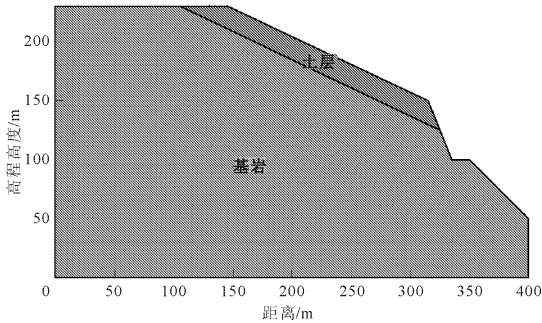


图 2 地质概化模型

本文联合运用 GeoStudio 软件的 QUAKE/W、SIGMA/W、SLOPE/W 模块对地震作用下坡体的动力响应过程进行模拟分析^[11-13],对上覆岩土体与下伏基岩分别采用等效线性模型与线弹性模型进行分析。岩土体力学参数以工程地质类比法为基础,基于前人的研究进行综合取值:陈子华等^[14]对金沙江流域某古滑坡的滑体物质进行了现场原位直剪试验,该滑坡所处的位置以及岩性特征与本文模拟的崩坡积体有一定的相似性,故将其强度指标作为本文对崩坡积体的取值依据;崩坡积体的阻尼系数、剪切模量衰减函数及循环数函数均根据现场调查的结果,并参考相关文献取值^[15-16],采用 GeoStudio 软件自带数据库进行估计。岩土体物理力学参数如表 2 所示。

3 滑坡地震动力响应特征

3.1 地震动输入方法

在地震分析中,动力荷载实际上就是将地震动

记录作用于分析模型所需要施加的力。地震动记录通常采用加速度时间历史曲线的方式来描述,需要输入的地震力通过质量乘以地震加速度进行计算,该地震力被施加在分析模型中的所有节点。该地震动力输入方法理论简单明了,但是不能反映地震波在滑坡数值模型中的动力传播过程。为克服该问题,本文采用将地震力输入到滑坡分析模型边界节点,在 GeoStudio 软件的 QUAKE/W 模块中表现为将地震加速度加到地震入射边界。

表 2 岩土体物理力学参数

地层	天然 重度 /(kN·m ⁻³)	有效黏 聚力 /kPa	有效内 摩擦角 /(°)	泊松 比	残余 强度 /kPa	破坏面 倾角 /(°)
崩坡积体	21	50	30	0.3	30	17
基岩	23	—	—	0.2	—	—

针对地震滑坡的典型地质概化模型,首先,利用地震台站监测或者人工合成方法,获取反映云南地区地震动特征的地震时程曲线,本文采用人工合成的地震记录作为荷载输入,持时为 10 s,根据表 2 建立的云南地区震级与震中烈度及峰值加速度的对应关系,将输入地震动峰值加速度分别调整为 0.05 g、0.20 g、0.40 g、0.80 g,作为 5、6、7、8 级地震所对应的震中高烈度地震动记录,见图 3;然后,对模型两侧施加竖直约束,底部施加水平、竖直双向约束,将地震时程曲线转化为地震力施加在模型底部边界的所有节点;最后,在动力分析过程中,地震波从底部基岩向上部岩土体传播。

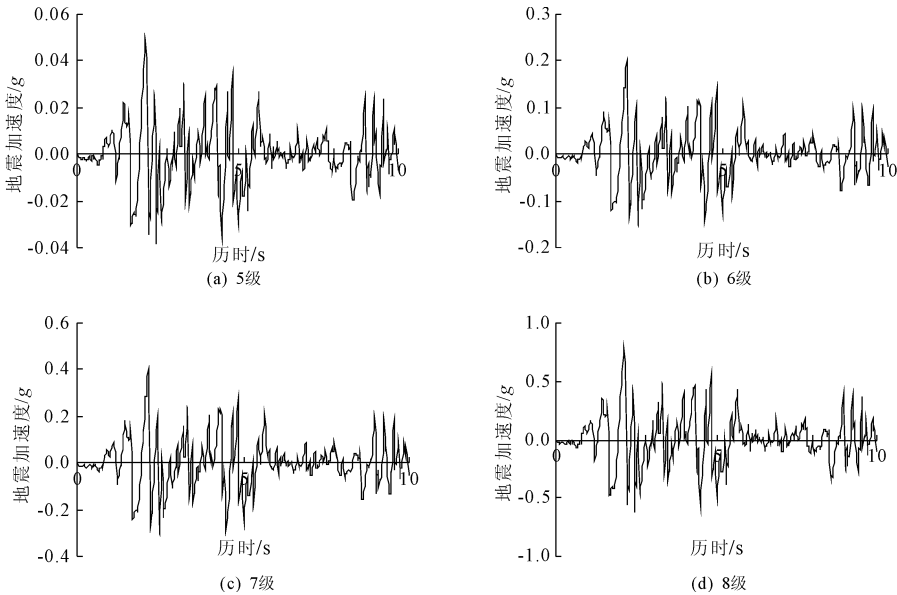
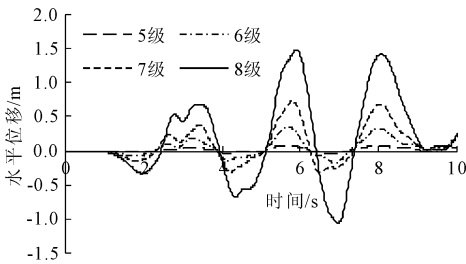


图 3 不同震级条件下的输入地震动记录

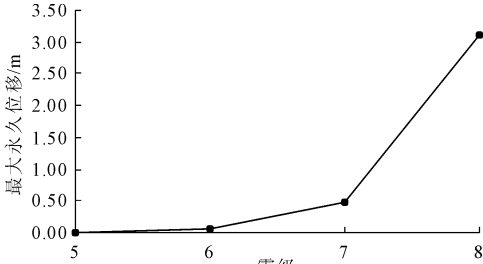
3.2 动力模拟结果分析

(1) 位移。图 4(a) 给出了不同震级下坡顶点的水平位移时程曲线,发现不同震级作用下,顶点的水平位移曲线形状相似,只是幅值不同,5.8 s 时达到峰值;不同震级下坡体的最大位移量统计表明位移量随着震级的增加而增加,增速不断加快。

图 4(b)计算了永久位移随震级的变化,永久位



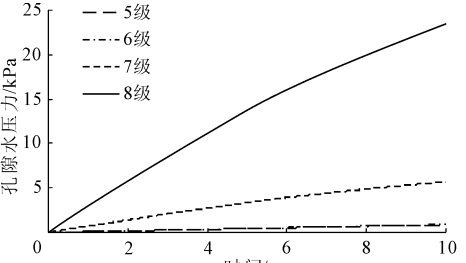
(a) 顶点水平位移



(b) 滑动面永久位移

图 4 震级对水平位移与滑动面永久位移的影响

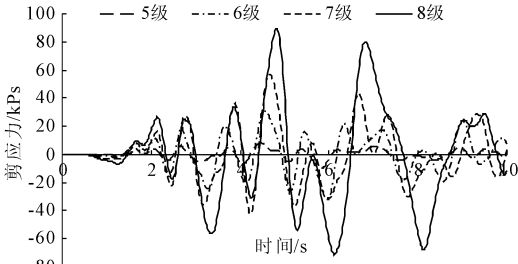
(2) 应力。图 5(a)计算了不同震级作用下的孔隙水压力随震级的变化,选取坡脚典型监测点进行分析。5 级、6 级地震作用下,孔压增幅基本相似且不明显,约 0.9 kPa,7 级、8 级地震作用下,孔压增幅较明显,分别为 5.68 kPa 和 23.23 kPa。随震级的提



(a) 孔隙水压力

高,孔压呈指数增长。

图 5(b)给出了不同震级下坡脚典型监测点剪应力的时程及剪应力峰值的变化规律,随震级的增加,坡脚点的剪应力变化幅值扩大,峰值基本呈线性增长。



(b) 剪应力

图 5 震级对孔隙水压力与剪应力影响规律

(3) 安全系数。图 6 给出了考虑不同因素条件下滑坡最小安全系数随震级的变化。总体看,震级越大,最小安全系数越小;残余强度对最小安全系数没有影响,说明液化并不会影响滑坡的最小安全系数。分析仅考虑惯性力、惯性力加孔隙水压力两种情况的最小安全系数的变化,可以看出:5 级地震下最小安全系数由 1.15 降至 1.13,降低 1.9%;6 级地震下最小安全系数由 0.85 降至 0.81,降低 4.2%;7 级地震下最小安全系数由 0.77 降至 0.70,降低 9.8%;8 级地震下最小安全系数由 0.65 降至 0.54,降低 21%。因此,随着震级的增加,地震引发的孔隙水压力的提升对于安全系数降低的贡献不断增加,坡体的失稳破坏由仅为惯性力控制发展为惯性

力和孔隙水压力共同控制。

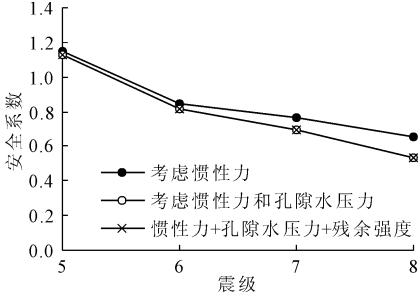


图 6 不同因素下滑坡最小安全系数随震级的变化

4 结 论

本文在研究云南地区地震动特征与构建典型堆

积体滑坡地质结构模型的基础上,综合采用 GeoStudio 软件的 QUAKE/W、SIGMA/W、SLOPE/W 模块,围绕 5、6、7、8 级地震所对应的震中高烈度地震动记录设计了多个分析方案,开展滑坡的动力响应过程模拟,获得了位移、应力及安全系数的响应规律,研究了强震效应对滑坡失稳的影响,获得了以下结论:

(1) 统计了云南地区 61 起大于 5 级的地震历史数据,通过回归分析得到了震级与震中烈度的经验关系,对比我国其他地区发现云南的震中烈度值偏高,建立了震级与震中烈度及峰值加速度的对应关系。

(2) 以鲁甸 6.5 级地震造成的昭巧公路沿线滑坡为例,通过对震区灾后昭巧公路沿线近 50 个滑坡震害典型工点进行调查与评估,总结了它们的共同特征,构建了具有二元结构的堆积体滑坡数值模型。

(3) 通过对比同震级地震波作用下滑坡的响应过程,揭示了强震效应对滑坡失稳破坏的影响机制:震级的提高导致坡体前缘孔压、剪应力的增长,安全系数的范围扩大,最小安全系数降低;同时,失稳破坏由惯性力单一控制向惯性力与孔隙水压力组合控制转变。根据永久位移推断 5 级地震下坡体稳定,6 级地震下坡体较为稳定,而 7、8 级地震下时坡体失稳。

参考文献:

[1] 唐川,朱静.云南滑坡泥石流研究[M].北京:商务印书馆,2003.

[2] 唐川,黄楚兴,万晔.云南省丽江大地震及其诱发的崩塌滑坡灾害特征[J].自然灾害学报,1997,6(3): 78-86.

[3] 吴坤罡,吴中海,黄小龙,等.云南盈江 2014 年 5·30 Ms 6.1 地震的主要震害特征[J].地质力学学报,2015,21

(1):87-96.

[4] 和海霞,李素菊,刘明,等.云南鲁甸 6.5 级地震灾区滑坡分布特征研判分析[J].灾害学,2016,31(1):92-95.

[5] 郭亚永,葛永刚,陈兴长,等.云南鲁甸地震甘家寨滑坡基本特征及失稳机制[J].山地学报,2016,34(5):530-536.

[6] 李石桥,郭俊华,杨晓雨,等.“8.3”鲁甸地震红石岩堰塞湖崩塌成因[J].地质灾害与环境保护,2015,26(3): 6-10.

[7] 李永强.云南人员震亡研究[D].合肥:中国科学技术大学,2009.

[8] 秦嘉政.云南地震烈度与震级的统计分析[J].地震研究,1992,15(1):37-45.

[9] 许卫晓,杨伟松,孙景江,等.震中烈度与震级和震源深度经验关系的统计回归分析[J].自然灾害学报,2016, 25(2):139-145.

[10] 阎志德,郭履灿.论中国地震震级与震中烈度的关系及其应用[J].中国科学(B辑),1984,14(11):1050-1058.

[11] 赵星宇,王卫,戴雄辉,等.SLOPE/W 在某露天煤矿采掘场边坡稳定性分析中的应用[J].水利与建筑工程学报,2013,11(1):187-190.

[12] 王百升,倪万魁,郭叶霞.多种因素作用下非饱和黄土边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15 (5):159-162.

[13] 王可,叶晓冬,潘志成,等.小湾滑坡地震稳定性研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(5):177-180.

[14] 陈子华.金沙江流域某库岸古滑坡静力及动力稳定性分析[D].武汉:中国地震局地震研究所,2012.

[15] 赵能浩,易庆林.三峡库区某滑坡地震动力响应机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(2):10-17.

[16] 杜飞,任光明,夏敏,等.地震作用诱发老滑坡复活机制的数值模拟[J].山地学报,2015,33(2):233-239.



(上接第 97 页)

[12] 贾鹏飞,孔令伟,王勇,等.低幅值小应变振动下土体刚度的非线性特征与表述方法[J].岩土力学,2013, 34(11):3145-3151.

[13] 谷川,蔡袁强,王军,等.循环应力历史对饱和和软黏土小应变剪切模量的影响[J].岩土工程学报,2012, 34(9):1654-1660.

[14] 谢东武,管飞,丁文其.小应变硬化土模型参数的确

定与敏感性分析[J].地震工程学报,2017,39(5):898-906.

[15] 孙海妹,王兰民,刘红玫,等.原状黄土的反压饱和法试验研究[J].防灾减灾工程学报,2010,30(1):98-102.

[16] Standards ABOA. Annual Book of ASTM Standards[M]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1970:850-859.