

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.023

樟木堆积体斜坡动力稳定性与极限承载力评价

王海芝¹, 王颂^{2,3,4}, 周剑⁵, 张路青^{2,3,4,*}, 黄福有^{2,3,4}

(1. 北京市地质研究所, 北京 100120; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029; 3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 4. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 5. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:樟木位于喜马拉雅山中段, 是中国与尼泊尔的重要通商口岸, 也是中尼公路的咽喉。特殊的地质地形条件和丰富的降水为地质灾害的发生提供了充分条件, 区域内滑坡地质灾害发育。大量房屋建筑修建于樟木滑坡堆积体之上, 滑坡灾害严重威胁到当地人民群众的生命财产安全和口岸经济的发展。目前, 大量有关樟木滑坡堆积体稳定性的评价只考虑了暴雨条件和通过强度折减简化的地震作用, 而忽略了地震的动态作用过程和人类活动的影响。为了精确论证该堆积体在动力载荷作用下的稳定程度, 笔者在野外调查的基础上, 计算了地震和车辆震动等极端工况下的动态安全系数, 并按照地形条件、地质特征及已有滑坡分布状况, 分区块评价其极限承载力。结果表明, 堆积体古滑坡基本稳定, 但前缘和后缘区块的承载力偏低; 现代滑坡稳定性较差, 没有进一步的承载空间, 应禁止增加表观荷载。结论为系统治理樟木滑坡灾害, 优化樟木建设用地布局 and 确保口岸的可持续发展提供了科学支撑。

关键词:地质灾害; 樟木滑坡; 动力稳定性; 地震载荷; 车辆载荷; 极限承载力

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)01-0262-12

Dynamic Stability Analysis and Ultimate Bearing Capacity Evaluation of Zhangmu Landslide Deposit

WANG Haizhi¹, WANG Song^{2,3,4}, ZHOU Jian⁵, ZHANG Luqing^{2,3,4,*}, HUANG Fuyou^{2,3,4}

(1. Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 5. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Zhangmu, located in middle Himalayas, is an important trading port between China and Nepal and serves as the regional economic development center. Special geological and topographical characteristics and abundant precipitation provide sufficient conditions for the frequent

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-06-21; 网络发表日期: 2021-12-06; 责任编辑: 穆华一

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究“祁连山-阿尔金-可可西里区重大工程扰动灾害及风险”(2019QZKK0904), 国家自然科学基金面上项目“深埋应力环境下致密储层裂隙渗透率演化与预测方法”(41972287), 西藏区域协同创新项目“西藏樟木滑坡勘查评估综合研究”(13143), “罗布泊地区人类活动的时空变化特征与环境变化”(41772182)。

作者简介: 王海芝(1975-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治与监测研究。E-mail: 418424101@qq.com。

* 通讯作者: 张路青(1973-), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程性质和地质灾害研究。E-mail: zhangluqing@mail.iggcas.ac.cn。

occurrence of geological disasters, especially the landslide disasters in the region. As a large number of house buildings were built on the deposit of Zhangmu landslide, the landslide disasters seriously threaten the safety and property of the local people, and restrict the development of port economy. Previous studies on the stability of Zhangmu landslide deposit only focus on the rain-storm condition and the seismic action simplified by strength reduction method while ignoring the dynamic action process of the earthquake and the influence of human activities. In order to accurately demonstrate the stability of the landslide deposit under dynamic load, this paper calculated the dynamic safety coefficients under extreme conditions such as earthquake and vehicle vibration according to field investigations, and evaluated the ultimate bearing capacity by block based on the characteristics of geology, topography and existing landslides distribution. The results show that the deposit of ancient landslide is generally stable, but the bearing capacity of the front and back edge sections is relatively low. The modern landslide has poor stability and no further load-bearing space. Therefore, it is prohibited for the modern landslide to increase the apparent load. The conclusions of this paper provide scientific support for the systematic control of Zhangmu landslide, the layout of Zhangmu construction land and the sustainable development of the trading port.

Keywords: geological hazard; Zhangmu landslide; dynamic stability; seismic load; vehicle load; ultimate bearing capacity

樟木口岸位于西藏聂拉木县的樟木镇,是中国通向南亚次大陆最大的国际贸易口岸,担负着中国和尼泊尔之间的政治、经济和文化交流。樟木镇地处喜马拉雅造山带核部的高山峡谷,是西藏地质灾害最严重的区域之一,历史上曾多次遭受滑坡、崩塌、泥石流和冰湖溃决灾害(李云贵等,1995)。由于受地形条件的限制和中尼通商的需要,樟木镇和口岸的大多数房屋建筑均修建于樟木滑坡堆积体上。樟木滑坡为一个特大复合型滑坡,坡体上不仅发育有福利院和帮村东古滑坡,而且在古滑坡堆积层上发育有现代滑坡,整个滑坡体积约 1 亿 m^3 。运用自然历史分析法进行推测,樟木滑坡堆积体的形成过程大致可以分为 3 个发展阶段:岩质古滑坡的形成及剥蚀阶段、崩塌积物及冲洪积物在岩质古滑坡上的堆积阶段、堆积层上新老滑坡的发育阶段(易顺民等,1996;毛成文,2008)。

近年来,随着城镇化建设的推进,地质灾害频发,樟木滑坡局部出现复活,造成众多建筑物变形毁坏,道路裂缝发育,地表沉陷,严重威胁城镇的进一步发展(曾建,2006)。1986~2004 年,原公安局、福利院等多处地面出现地裂缝(祝建等,2008)。2005 年雨季期间,福利院滑坡变形加剧,导致管委会宿舍楼地面下沉超过 30 cm、烈士陵园挡墙整体发生前

移和纪念碑底座严重扭曲变形。2010 年 1 月 2 日~2011 年 12 月 14 日,西藏自治区地质环境监测总站樟木滑坡监测点的监测数据表明,樟木滑坡 5 个监测点的累计位移介于 15~112 mm,局部变形强烈(尚文涛,2009)。2015 年 4 月 25 日尼泊尔特大地震进一步加剧了樟木滑坡的变形(陈剑等,2016)。滑坡灾害不仅威胁到当地人民群众的生命和财产安全,也制约着口岸经济社会的发展。

祝建等(2010)对樟木滑坡地表裂缝、地表位移和深部位移进行了长期监测,结果表明,福利院古滑坡中部发生复活。胡瑞林等(2014)综合工程地质结构和岩土类型,初步研究了樟木滑坡堆积体的变形破坏规律和稳定性,认为斜坡整体稳定,但受人类工程活动等因素的影响局部可能会发生滑移。Ma 等(2017)基于樟木滑坡的 100 个钻孔记录、电子自旋共振测年法和年轮宽度测年法,确定了不同部位的复活时间,并结合现场监测结果,发现滑坡活化与降雨密切相关。上述研究指明了樟木滑坡的影响因素及其与斜坡的相互作用关系,但还缺乏对滑坡稳定性的定量评价。

数值模拟是研究滑坡的重要手段,有利于揭示滑坡的形成机理和变形破坏过程。例如,有限元方法可以处理各向异性的复杂边坡工程问题,计算边

坡的塑性区及获取位移场、应力场和应变场,并能够进行承载力分析(Lollino et al.,2010;吴应祥等,2013;Gian et al.,2016;陈豫津等,2019);有限差分法可以考虑边坡的非线性应力和应变关系,并能够基于强度折减法对边坡进行大变形分析(Wang et al.,2020;Zhang et al.,2020;刘畅等,2020);离散元法以牛顿第二定律和单元接触关系为基础,能够再现边坡破坏后的运动学特征(Wei et al.,2019;Zhou et al.,2019;周礼等,2019)。尚文涛(2009)在FLAC 3D 软件中利用强度折减法研究了樟木滑坡的变形和破坏,认为坡体以“压-剪”破坏模式为主;左辉(2009)使用 GeoStudio 软件分析了帮村东滑坡在天然和饱水状态下坡体的稳定性,结果表明,在饱水时坡体处于欠稳定状态。张俊文等(2016)使用有限元强度折减法计算了福利院滑坡在自然、降雨和地震工况下的安全系数,发现强降雨和地震使得坡体的安全系数显著降低。

上述有关樟木滑坡稳定性的研究大多都是针对暴雨工况和采用强度折减简化的地震工况,忽略了地震的动态作用过程和人类活动对坡体的影响。笔者定量分析了地震动和车辆震动等动力变化对堆积层斜坡稳定性的影响,并计算了随动载荷作用而变

化的动态安全系数。在斜坡稳定性分析的基础上,还采用普遍条分法进一步评价了樟木镇堆积层斜坡的极限承载力,以便为樟木镇建设用地的优化布局和可持续发展提供参考。

1 樟木镇滑坡概况及特征分析

1.1 工程地质条件

樟木镇隶属西藏日喀则地区聂拉木县,地处喜马拉雅山南侧的高山峡谷区。滑坡区内分布有自东向西流动的波曲河,河岸两侧地势陡峭,相对高差超过 2 000 m(图 1)。樟木滑坡主要发育于波曲河左岸,坡体平均坡度超过 35°,其中海拔 3 500 m 以上区域的坡度甚至大于 50°。勘探资料显示,樟木滑坡区地层岩性简单,基岩为前寒武纪曲乡岩组片岩等深变质岩,表层为崩坡积物、冲洪积物和部分人工填土。沿滑坡体不同高程处还分布有厚度小于 2 m 的滑带土。整个滑坡区域位于喜马拉雅地槽褶皱区内,活动断裂极其发育,构造运动异常强烈。受此影响,斜坡岩体十分破碎,风化剥蚀速度加快,仅新构造运动以来沟道下切速率超过 10 mm/a。

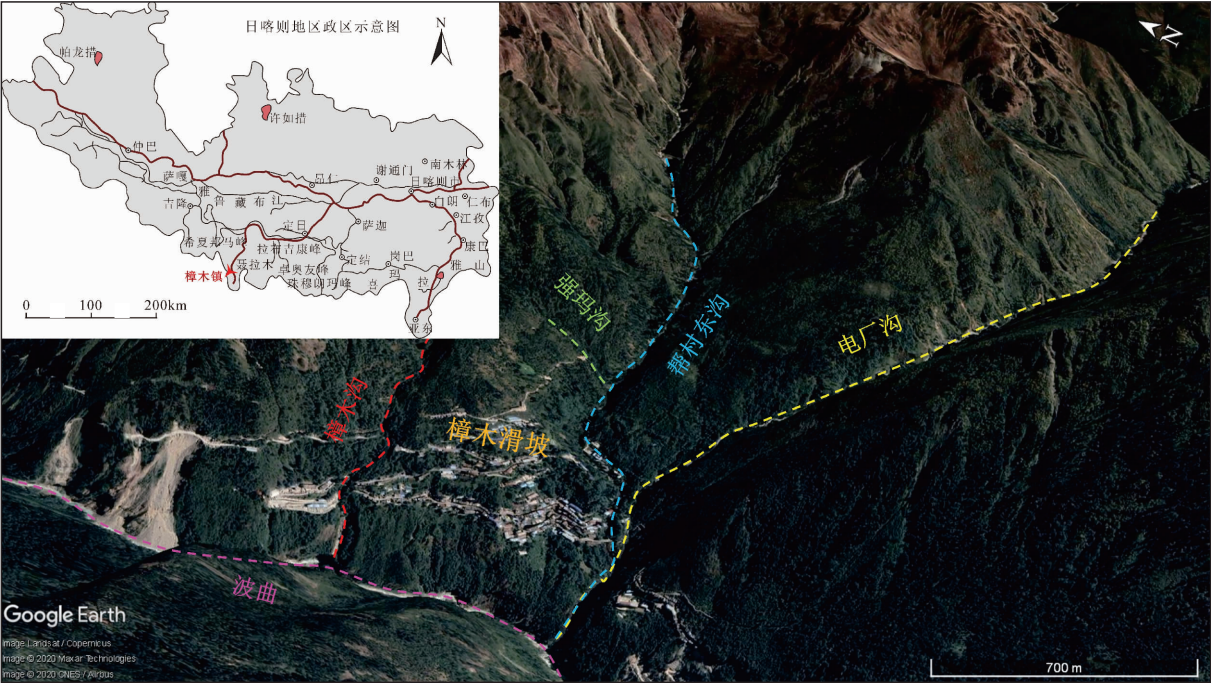


图 1 樟木滑坡堆积体位置示意图(据胡瑞林等,2014)

Fig. 1 Location map of Zhangmu landslide (Modified from Hu et al., 2014)

1.2 滑坡堆积体特征分析

樟木镇滑坡由福利院堆积层古滑坡与帮村东堆积层古滑坡组成(图 2),受降雨、地震和人类工程活动的影响,在古滑坡上又发育有多个具有一定活动

性的现代滑坡。例如,福利院古滑体上的消防队变形区、烈士陵园变形区、中心小学变形体和帮村东现代滑坡。

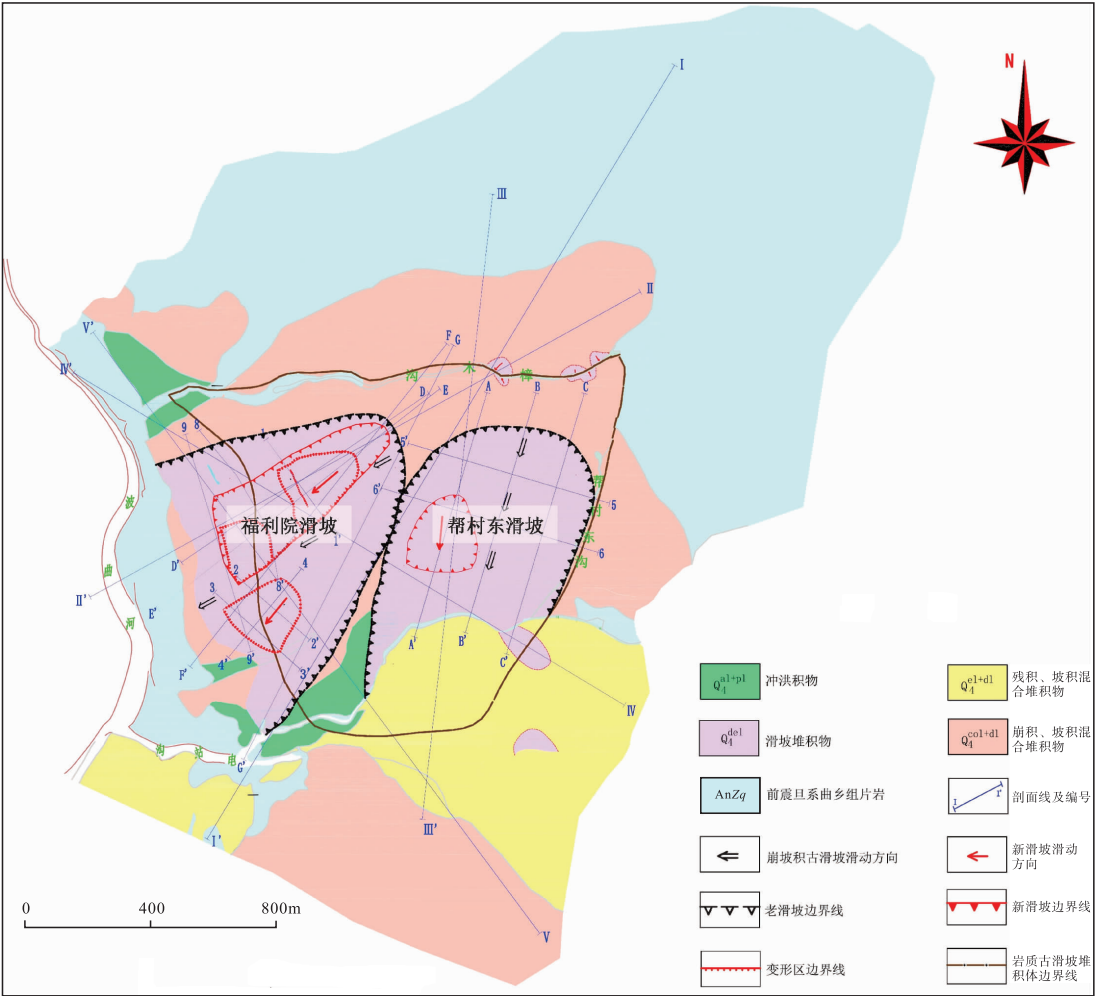


图 2 樟木镇福利院堆积层古滑坡与帮村东堆积层古滑坡图(据张俊文等,2016)

Fig. 2 Location of Fuliuyan and Bangcundong landslides (Modified from Zhang et al. , 2016)

福利院滑坡位于樟木镇西北部,318 国道以“Z”字形穿越滑坡体中下部,坡体陡缓相间,呈明显的“圈椅状”形态。整个地形坡度范围为 25°~35°,滑坡后缘坡度可达 45°,滑坡体中上部还发育有一个坡度小于 15°的缓平台。现场调查发现,福利院滑坡前缘、中部和后缘均出现明显的变形迹象,整个滑坡区内大量房屋倾倒变形且地面裂缝密布。

帮村东滑坡位于樟木镇东南部,覆盖面积约占樟木镇面积的 50%。滑坡体形态与福利院滑坡的类似,坡体亦是陡缓相间。地形上东南高,西北低,

整体坡度范围为 30°~35°,滑坡后缘坡度超过 40°。该处滑坡活动以地表变形为主,滑坡区内地面和建筑物均出现裂缝,斜坡上遍布“马刀树”。

2 堆积体稳定性分析

樟木滑坡是在降雨、地震和人类工程活动等复杂因素作用下形成的复合型滑坡。考虑到堆积体稳定性的影响因素复杂,本节着重分析在地震动力和车辆动载荷作用下斜坡的稳定情况。

2.1 地震动力稳定性分析

常用的斜坡地震稳定性分析方法有拟静力法和Newmark 滑块分析法。拟静力法是将地震荷载简化为静荷载进行计算,斜坡不同高程滑动块体的地震峰值加速度均为设计拟定值,每一滑块的稳定性计算均考虑水平指向坡外惯性力(由滑块质量乘峰值加速度拟定值来确定)。但拟静力法只能计算获得安全系数,而不考虑滑动面的变形,Newmark 滑块分析法则可以克服上述缺陷,因此在斜坡地震安全性评价中得到了较为广泛的应用。在 Newmark 滑块分析法中,首先需要假定滑动面并根据极限平衡原理确定坡体的屈服加速度值,然后通过动力分析判别坡体是否产生滑移,并估算永久滑移位移。笔者假定当永久滑移位移超过 5 cm 时,斜坡失稳。采用这种永久位移标准能够避免重复的数值计算。

Newmark 滑块分析法计算所需的地震动参数根据《中国地震动参数区划图》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2015)确定,樟木的地震动峰值加速度为 0.20 g,地震动反应谱特征周期为 0.45 s,区域地震基本烈度为Ⅷ度,由此合成的地震动反应谱和地震加速度曲线见图 3 和图 4。计算过程中所需的岩土体参数见表 1。

以樟木镇中心小学强变形体为例,分别计算了天然条件和暴雨条件下斜坡在不同时刻随地震动力作用而变化的安全系数,即动态安全系数(表 2)。

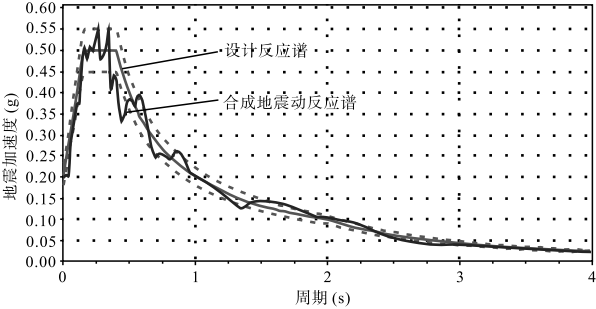


图 3 地震动反应谱图
Fig. 3 Ground motion response spectrum

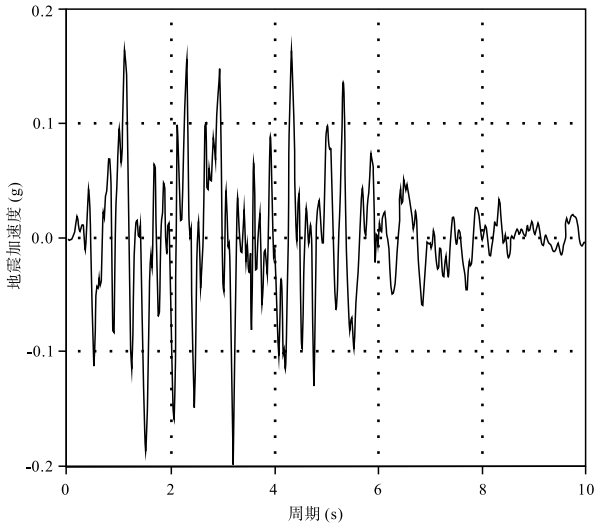


图 4 人工合成的地震动加速度曲线图
Fig. 4 Synthetic seismic acceleration curve

表 1 滑坡体各岩土层参数表(据张俊文等,2016)

Tab. 1 Material parameters of rock and soil mass (After Zhang et al. , 2016)																	
滑坡 体名 称	容重 γ /(kN/m ⁻³)			内聚力(c /kPa)							内摩擦角 φ /(°)						
	天然 状态	饱水 状态	基岩	浅层	浅层	中层	中层	破碎	破碎	基岩	浅层	浅层	中层	中层	破碎	破碎	基岩
				滑体	滑体	滑体	滑体	岩天	岩饱		滑体	滑体	滑体	滑体	岩天	岩饱	
				天然 状态	饱水 状态	天然 状态	饱水 状态	天然 状态	饱水 状态		然状 态	水状 态	天然 状态	饱水 状态	天然 状态	饱水 状态	
福利院滑坡	21	22	26	18	14	21	19	70	50	300	29	26	32	30	37	35	42
帮村东滑坡	21	22	26	18	14	22	17	70	50	300	29	27	32	29	37	35	42

在地震动力作用下,中心小学强变形体安全系数也呈现动态变化,天然条件下该动态系数基本大于 1,地震位移约为 0,但在暴雨条件下,动态安全系数大幅减小,地震位移随时间不断增大。

所有计算结果见表 3。整个樟木滑坡中,福利

院堆积层古滑坡在天然条件下滑移距离为 6 cm,说明在地震作用下会发生失稳;中心小学变形体在暴雨条件下的地震滑移距离达 1.6 m,也将发生整体失稳。

表 2 中心小学变形体在天然条件和暴雨条件下的计算模型及动态安全系数表

Tab. 2 Calculation models and dynamic safety coefficients of deformation body in Central Primary School under natural and rainstorm conditions

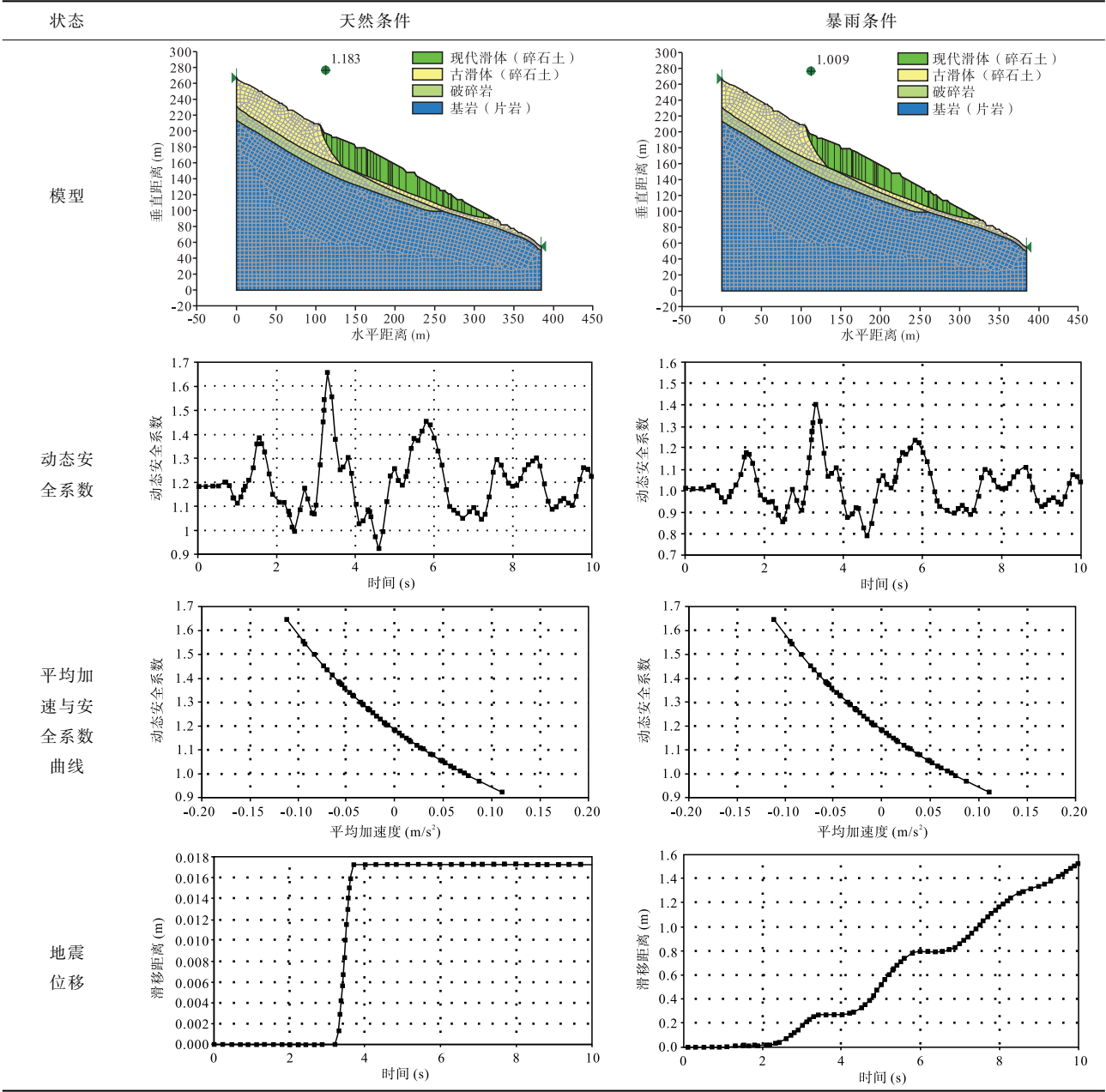


表 3 樟木滑坡动态安全系数表

Tab. 3 Dynamic safety coefficients of Zhangmu landslide

斜坡名称	环境状态	动态安全系数	
		最小值	最大值
福利院堆积层古滑坡	天然条件	0.93	1.23
帮村东堆积层古滑坡	天然条件	1.22	1.40
中心小学变形体	天然条件	0.92	1.65
	暴雨条件	0.85	1.54

2.2 车辆动荷载作用下的斜坡稳定性分析

樟木镇是中国与尼泊尔的重要通商口岸,公路运输是该地区贸易的唯一运输方式。中国境内的318国道建在樟木斜坡体上,行进中的车辆对斜坡稳定性必然会有一定影响,尤其是在雨季期间,斜坡岩土体的力学性质将会明显弱化,载满物品的车辆

完全有可能导致路基坡体产生滑塌。为了定量认识车辆震动对斜坡稳定的不利影响,笔者将对相应的动力学问题进行初步分析。

不同载重的车辆产生的动载荷大小不同,载重量为100 kN、150 kN、200 kN、300 kN和550 kN的相关指标见表4和图5。

表4 汽车的主要技术指标(据高玉峰等,2005)
Tab. 4 Main technical indexes of vehicles (After Gao et al. , 2005)

载重量(kN)	前轴重力(kN)	中轴重力(kN)	后轴重力(kN)	前轮着地宽度×长度 (m×m)	中后轮着地宽度×长度 (m×m)
100	30	—	70	0.25×0.2	0.5×0.2
150	50	—	100	0.25×0.2	0.5×0.2
200	70	—	130	0.30×0.2	0.6×0.2
300	60	—	240	0.30×0.2	0.6×0.2
550	30	240	280	0.30×0.2	0.6×0.2

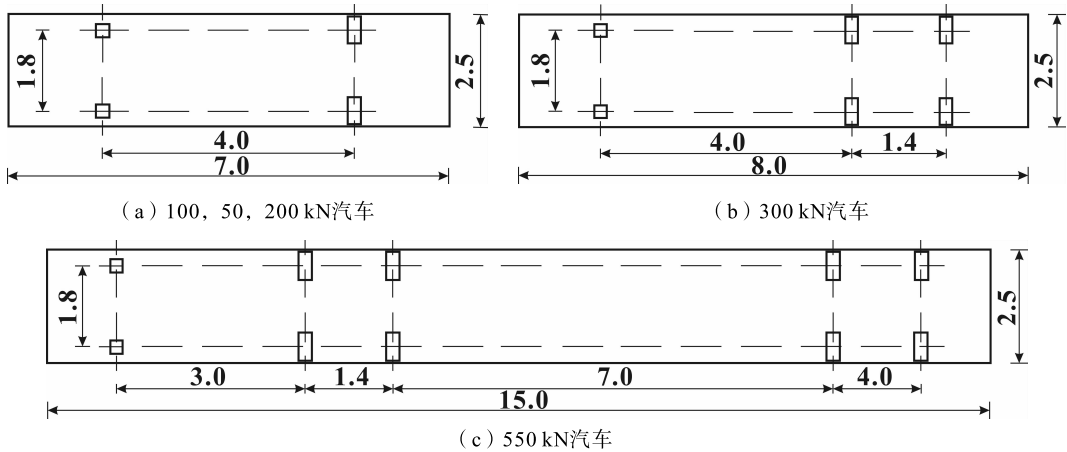


图5 不同载重车辆的平面尺寸图(据高玉峰等,2005)
Fig. 5 Plane dimensions of different vehicles (After Gao et al. , 2005)

比较不同载重车辆车轮与路面的接触力,可以看出550 kN车轮的单个后轮与地面的接触压力为最大(70 kN),因此其对高速公路软基沉降的影响更为显著。将车轮处的荷载处理为作用在公路横截面上的均布荷载,由此得到550 kN车辆后轮作用在公路横截面上的等效压应力为583.33 kPa。550 kN车辆缓慢经过公路某一截面的动荷载可以简化为半正弦动荷载(图6)。

如图7所示,318国道从福利院现代滑坡中消防队强变形区前缘经过,以该剖面为例分析重型车辆对斜坡稳定性的影响。

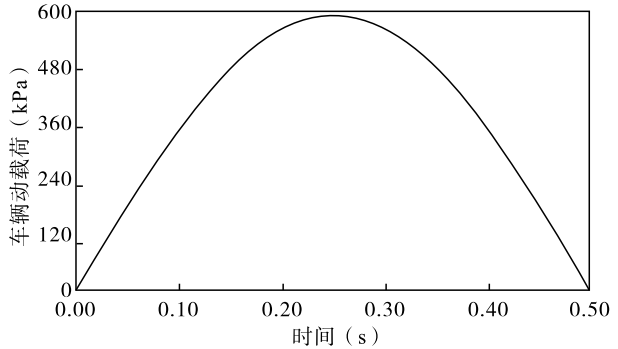


图6 简化为半正弦的车辆动荷载图
Fig. 6 Diagram of vehicle dynamic load

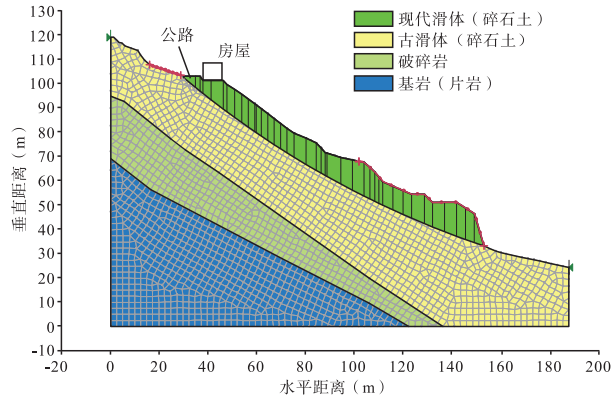


图 7 车辆荷载作用下坡体稳定性的计算模型图

Fig. 7 Calculation model of slope stability under vehicle dynamic load

对图 7 中公路所在位置施加了图 6 所示的动态荷载,潜在滑体的动态安全系数、整体滑移速度及滑移距离分别见图 8、图 9a 和图 9b。计算结果表明,潜在滑体初始安全系数为 1.044,550 kN 的车辆缓

慢行驶在国道上时,安全系数在 0.974~1.065 间变化。动态安全系数小于 1.0 时,潜在滑体产生下滑,下滑速度最大可达 0.023 m/s,而最终滑动位移约为 6 mm。尽管并未造成潜在滑体的失稳,但上述计算结果足以说明重型车辆在潜在滑体上部行驶时对坡体的稳定十分不利,长期作用下导致欠稳定斜坡最终失稳的可能性较大。

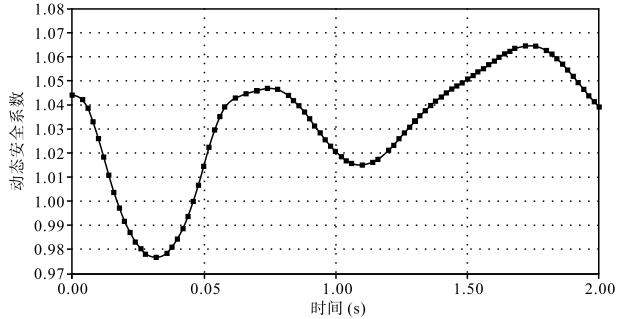
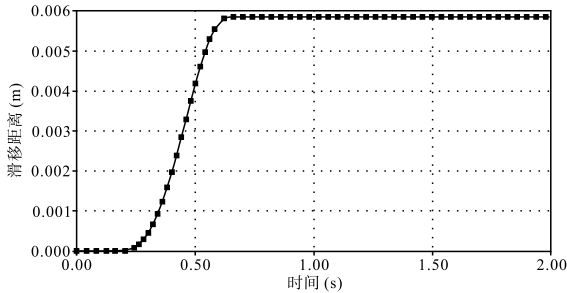
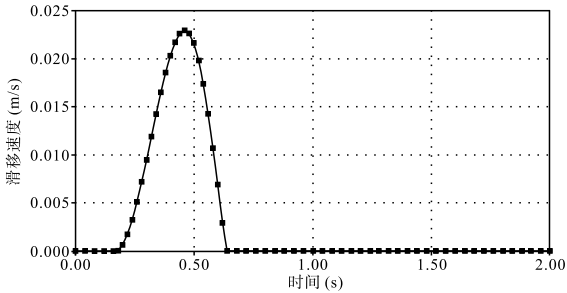


图 8 车辆荷载作用下的斜坡动态安全系数图

Fig. 8 Dynamic stability coefficients of slope under vehicle dynamic load



(a) 滑移速度

(b) 滑移距离

图 9 车辆荷载作用下潜在滑体的整体滑移速度和滑移距离图

Fig. 9 Slip velocities and distances of the sliding mass under vehicle dynamic load

3 堆积层斜坡的极限承载力分析

樟木镇整体处于地质灾害危险区内,而土地利用优化的目的是在其中找到相对安全的区块(段),以实现口岸的持续发展。福利院和帮村东堆积层古滑坡体在暴雨条件下仍有一定的加载空间,应当分析其上部所能承受的极限荷载(斜坡极限承载力)。斜坡极限承载力是指斜坡保持稳定所能承受的极限外部荷载,可以通过最危险滑面(此时的滑体稳定性最低)下滑体的极限平衡条件来确定。这里的外部荷载是指建筑荷载、车辆荷载、挖填堆载等产生斜坡

表观的静荷载。在外部荷载作用下,斜坡内部的应力状态发生改变,当某一点的剪应力达到抗剪强度时,这一点就处于极限平衡状态。随着外部荷载的继续增大,坡体内处于极限平衡状态的范围也加大,并最终发展成为贯通的滑面。

3.1 极限承载力的计算分区及分析方法

在斜坡极限承载力的实际计算过程中,采用增量法逐级增加外荷载,直到所加荷载沿着该滑动面的整体安全系数趋近于 1。对于安全系数的计算采用普遍条分法,其满足 2 个静力学平衡条件:水平方向与铅直方向的力平衡;所有方向的力围绕一点的力矩之和为 0。

坡的东部(其中,区块 22 和 23 的极限承载力分别为 310 kPa 和 300 kPa);樟木镇堆积体后缘(其中,区块 3 和 4 的极限承载力分别为 330 kPa 和 500 kPa)。堆积体古滑坡的前缘(区块 7、10 和 16)

和后缘(亚区 9-2、区块 19、20)的承载力偏低(低于 100 kPa),其他区块(亚区 8-2、区块 1、2、5、6、21)的极限承载力处于 100~200 kPa。

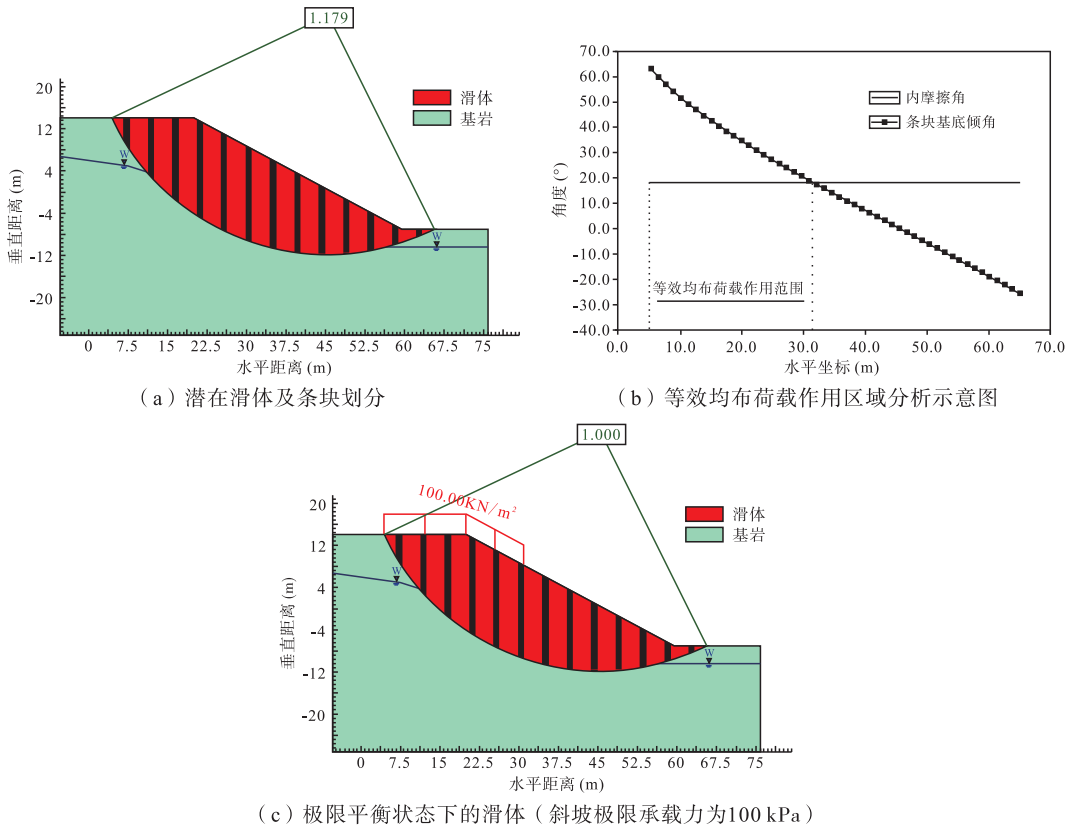


图 11 极限承载力分析方法图

Fig. 11 Diagram of analysis method of ultimate bearing capacity

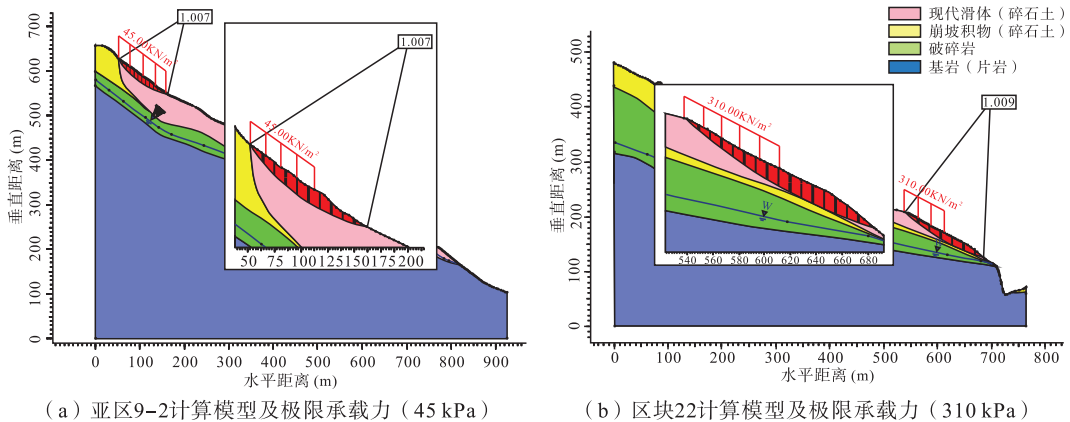


图 12 极限承载力计算模型示例图

Fig. 12 Examples of ultimate bearing capacity calculation models

4 结论

综合宏观调查研究和模拟计算可知,樟木滑坡堆积体的稳定性受区域地形、地质、降水、地表径流、地震及人类工程活动等因素的控制。地表水与地下水入渗、工程活动与地震是滑坡的激发因素。相关结论如下:

(1)地震动力稳定性分析表明,仅地震作用下福利院堆积层古滑坡局部失稳;在极端条件下(地震+暴雨),动态安全系数进一步减小,中心小学变形体将发生整体失稳。

(2)车辆动荷载作用下的斜坡稳定性分析表明,重型车辆缓慢行驶在潜在滑体上部时安全系数在 0.974~1.065 之间变化,潜在滑体下滑速度最大可达到 0.023 m/s,最终滑动位移约为 6 mm。

(3)依据地形、地貌、地层岩性及新老滑坡边界,将樟木堆积层划分为 23 个区块,利用极限平衡法计算了饱水条件和等效均布荷载作用下不同斜坡区块的极限承载力。现代滑坡及强变形区接近极限平衡状态,没有进一步的承载空间,应禁止增加表观荷载;堆积层古滑坡的前缘和后缘区块的承载力偏低,其他区块还具有一定极限承载力。

相关计算结果可为樟木滑坡灾害的治理和樟木镇建设用地的优化布局提供科学依据。

参考文献(References):

陈剑,王全才,李波. 西藏樟木滑坡特征及成因研究[J]. 自然灾害学报,2016,25(02):103-109.

CHEN Jian, WANG Quancai, LI Bo. Characteristics and Cause Analysis of Zhangmu Landslide in Tibet[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(02):103-109.

陈豫津,吴志坚,刘兴荣. 基于有限元的动力稳定性评价方法与应用——以王家墩古滑坡为例[J]. 西北地质, 2019, 52(04):286-293.

CHEN Yujin, WU Zhijian, LIU Xingrong. Evaluation Method and Application of Dynamic Stability based on Finite Element Analysis:Example from the Wangjiadun Landslide in Tianshui City,Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(04):286-293.

高玉峰,黎冰,刘汉龙. 车辆荷载作用下公路软基沉降的拟静力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,

24(S2):5470-5477.

GAO Yufeng, LI Bing, LIU Hanlong. Study on Quasi-static Settlement Computation Method of Highway in Soft Ground Induced by Vehicle Loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5470-5477.

胡瑞林,张小艳,马凤山,等. 西藏樟木堆积体结构及其稳定性[J]. 工程地质学报,2014,22(4):723-730.

HU Ruilin, ZHANG Xiaoyan, MA Fengshan, et al. Structure and Stability of Zhangmu Deposit in Tibet[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 723-730.

李云贵,温清茂. 西藏樟木滑坡变形机理与趋势分析[J]. 水文地质工程地质,1995,(05):32-35.

LI Yungui, WEN Qingmao. Deformation Mechanism and Trend Analysis of Zhangmu Landslide in Tibet[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1995, (05):32-35.

刘畅,张平松,杨为民,等. 税湾地震黄土滑坡的岩土动力特性及其稳定性评价[J]. 西北地质,2020,53(04):176-185.

LIU Chang, ZHANG Pingsong, YANG Weimin, et al. Geotechnical Dynamic Characteristics and Stability Evaluation of Loess Landslides in Shuiwan Earthquake, Tianshui,Gansu[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(04):176-185.

毛成文. 西藏樟木镇福利院滑坡稳定性分析与评价[D]. 西安:西安科技大学,2008.

MAO Chengwen. Analyzing and Evaluating the Stability of Welfare-institute Landslide in Zhangmu Town of Tibet [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.

尚文涛. 基于监测数据的滑坡预测与数值模拟研究——以西藏樟木滑坡为例[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.

SHANG Wentao. Numerical Simulation Study and Prediction of the Landslide Based on Monitoring Data — Taking Zhangmu Landslide in Tibet for Example [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.

吴应祥,刘东升,宋强辉,等. 基于有限元强度折减法的抗滑桩滑坡推力及抗滑桩内力可靠性分析[J]. 岩土力学,2013,34(S1):348-354.

WU Yingxiang, LIU Dongsheng, SONG Qianghui, et al. Reliability Analysis of Landslide-thrust and Internal Forces of Anti-slide Pile Based on Strength Reduction Finite Element Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1):348-354.

- 易顺民,唐辉明. 西藏樟木滑坡群的分形特征及其意义[J]. 长春地质学院学报, 1996, (04):33-38.
- YI Shunmin, TANG Huiming. The Fractal Feature of Zhangmu Landslides Group in Tibet and Its Significance[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1996, (04):33-38.
- 曾建. 西藏樟木滑坡防治技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2006.
- ZENG Jian. Technology Research of Prevention on Zhangmu Landslide in Tibet[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- 张俊文,邹烨,李玉琳. 大型多层次堆积体破坏模式及其稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2479-2489.
- ZHANG Junwen, ZOU Ye, LI Yulin. Failure Mechanism and Stability Analysis of Big Multi-layer Deposit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12):2479-2489.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图(GB 18306-2015)[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
- 周礼,范宣梅,许强,等. 金沙江白格滑坡运动过程特征数值模拟与危险性预测研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(06):1395-1404.
- ZHOU Li, FAN Xuanmei, XU Qiang, et al. Numerical Simulation and Hazard Prediction on Movement Process Characteristics of Baige Landslide in Jinsha River[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(06): 1395-1404.
- 祝建,蔡庆娥,姜海波. 西藏樟木口岸古滑坡变形监测分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(01):66-71.
- ZHU Jian, CAI Qing'e, JIANG Haibo. Deformation Monitoring & Analysis of Ancient Landslide at Zhangmu Port in Tibet[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(01):66-71.
- 祝建,雷英,赵杰. 西藏樟木口岸特大型古滑坡形成机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, (01):49-52.
- ZHU Jian, LEI Ying, ZHAO Jie. Mechanism Analysis of the Outsized Ancient Landslide of Zhangmu Port in Tibet[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, (01):49-52.
- 左辉. 邦村东滑坡类型、特征及稳定性研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.
- ZUO Hui. The Research of the Types, Characteristics and Stability of Bangcundong Landslide[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- Gian Quoc Anh, Nguyen Dinh-Chinh, Tran Duc-Nghia, et al. Monitoring of Landslides in Mountainous Regions Based on FEM Modelling and Rain Gauge Measurements[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2016, 6(5): 2106.
- Lollino P, Elia G, Cotecchia F, et al. Analysis of Landslide Reactivation Mechanisms in Daunia Clay Slopes by Means of Limit Equilibrium and FEM Methods[C]// Asce Special Publication-geoflorida -advances in Analysis, Modeling & Design, 2010, 3155-3164.
- MA Fengshan, LI Zhanlu, WANG Jie, et al. Monitoring and Engineering Geology Analysis of the Zhangmu Landslide in Tibet, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(3): 855-873.
- Wang Li, Wang Shimei, Li Gao, et al. Construction of 3D Creep Model of Landslide Slip-Surface Soil and Secondary Development Based on FLAC3D[J]. Advances in Civil Engineering, 2020.
- Wei Jiangbo, Zhao Zhou, Xu Chong, et al. Numerical Investigation of Landslide Kinetics for the Recent Mabian Landslide (Sichuan, China)[J]. Landslides, 2019, 16(11): 2287-2298.
- Zhou Yuanyuan, Shi Zhenming, Zhang Qingzhao, et al. 3D DEM Investigation on the Morphology and Structure of Landslide Dams Formed by Dry Granular Flows[J]. Engineering Geology, 2019, 258: 105151.
- Zhang Yonggang, Zhang Zhen, Xue Shuai, et al. Stability Analysis of a Typical Landslide Mass in the Three Gorges Reservoir under Varying Reservoir Water Levels[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(1): 42.