

四川炉霍县寿灵寺边坡失稳机理及工程治理

任贺明, 王兴政, 罗 刚

Failure mechanism and controlling measures of cut slope instability at Shouling temple, Luhuo County, Sichuan Province

REN Heming, WANG Xingzheng, and LUO Gang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

露天矿边坡稳定性的层次分析-模糊综合评价耦合分析

Open-pit mine slopes stability analysis based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation model

李志国, 徐涛, 刘永杰, 赵立春, 徐勇超, 杨天鸿, 郑小斌 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 116-123

模糊数学评判和数值模拟相结合的土质边坡稳定性综合评价

Integrated assessment of soil cutting slope stability using fuzzy mathematics and numerical simulation

王崇敬, 张龙, 刘国伟 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(6): 69-76

某砂岩顺层挖方高边坡治理工程施工期变形特征与工程效果评价

Deformation characteristics and engineering effect evaluation of a sandstone bedding excavation high slope treatment project during construction

朱彦鹏, 施多邦, 段新国, 吴林平, 王桢, 吕向向, 滕振银 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(2): 111-119

建房切坡条件下边坡稳定性分析

Analysis of slope stability under the condition of cutting for house-building

杜显祥, 房浩, 曹佳文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 40-47

湖北赤壁东洲大道工程边坡渐进破坏机理分析

Analysis of progressive failure mechanism of engineering slope at Dongzhou Avenue, Chibi of Hubei Province

黄波, 鲁志雄, 何英东, 卢应发 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(5): 20-28

基于因子权重反分析的新近失稳土质边坡稳定性评价云模型

Cloud model for stability evaluation of recently failed soil slopes based on weight inversion of influencing factors

陈忠源, 戴自航, 简文彬 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 125-133



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309033

任贺明, 王兴政, 罗刚. 四川炉霍县寿灵寺边坡失稳机理及工程治理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3): 108-117.

REN Heming, WANG Xingzheng, LUO Gang. Failure mechanism and controlling measures of cut slope instability at Shouling temple, Luhuo County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(3): 108-117.

四川炉霍县寿灵寺边坡失稳机理及工程治理

任贺明¹, 王兴政², 罗 刚¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031;

2. 四川省第三地质大队, 四川 成都 611730)

摘要: 四川炉霍县寿灵寺因建设未来殿需要, 于场地西北侧开挖形成一高 21.8 m 坡度 55°~75°的五级开挖边坡。坡脚出现局部崩塌, 开挖工程活动已威胁周边群众生命财产安全。现场勘察及数值模拟分析结果表明, 边坡于粉质黏土层内形成圆弧形滑动面, 坡脚应力集中, 在降雨条件下, 土体容重增加, 黏聚力与内摩擦角急剧减小, 最大水平位移可达 3.4 m, 边坡失稳形成推动式滑坡。研究区处于高烈度地区, 地震及大型机器作业产生的震动荷载将给边坡带来不良影响, 在地震工况下边坡形成推动式滑坡, 对地基土产生剪切破坏, 影响深度约 5 m。考虑到边坡所需的抗滑稳定性要求及在地震工况下对地基土的破坏影响, 采用抗滑桩加格构锚固对边坡进行加固, 并已应用到本工程中, 治理效果良好, 该分析方法和防治方案可为类似人工开挖边坡工程治理提供参考经验。

关键词: 开挖边坡; 土质边坡; 稳定性分析; 数值模拟; 工程治理

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)03-0108-10

Failure mechanism and controlling measures of cut slope instability at Shouling temple, Luhuo County, Sichuan Province

REN Heming¹, WANG Xingzheng², LUO Gang¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031,

China; 2. The 3rd Geological Brigade of Sichuan, Chengdu, Sichuan 611730, China)

Abstract: The Shouling temple in Luhuo County, Sichuan faces an urgent situation due to the construction of the Future Hall. A five-level excavation slope with a height of 21.8 m and a slope angle of 55° to 75° was formed on the northwest side of the site, leading to local damage at the toe of the slope. Field investigation and numerical simulation analysis indicate that the slope formed a circular sliding surface within the silty clay layer, with stress concentration at the toe of the slope. Under rainfall conditions, the bulk density of the soil increases, while the cohesion and internal friction angle decrease sharply. The maximum horizontal displacement can reach 3.4 m, resulting in a pushing-type landslide and slope instability. The study area is located in a high-intensity seismic zone. The vibration loads generated by earthquakes and large-scale machinery operations will have serious adverse effects on the slope. Numerical simulation analysis shows that under seismic conditions, the slope forms a pushing-type landslide, causing shear failure of the foundation soil with an impact depth of approximately 5 m. Considering the

收稿日期: 2023-09-26; 修订日期: 2024-01-09

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3005704); 国家自然科学基金面上项目(42277143); 四川省自然资源厅科研项目(KJ-2023-004); 四川省自然资源厅科研项目(KJ-2023-025)

第一作者: 任贺明(2001—), 男, 甘肃陇西人, 地质工程专业, 硕士研究生, 主要从事工程地质方向研究。E-mail: 1446252975@qq.com

通讯作者: 王兴政(1992—), 男, 重庆万州人, 地质工程专业, 本科, 工程师, 主要从事水文地质、工程地质与环境地质工作。

E-mail: 342779525@qq.com

stability requirements of the slope and the damage to the foundation soil under seismic conditions, reinforcement measures such as anti-slide piles with grid anchoring were adopted to strengthen the slope, which have been applied to this project with good governance effectiveness. The analysis method and control measures can provide reference experience for the treatment of similar artificial excavation slope projects.

Keywords: excavation slope; soil slopes; slope stability analysis; numerical simulation; engineering governance

0 引言

滑坡指位于斜坡岩土体在地震、降雨等诱发因素的影响下,沿一定滑动面向下滑动的现象。滑坡形态各异,多呈弧形、台阶状,具有发育迅速、规模大、形成机理复杂、危害大等特点^[1]。随着国内对于西南山区的建设力度逐年加大,山区时常由于修建房屋与交通设施等需要,开挖大量的山体边坡,对当地的民生及工程建设造成严重威胁。降雨通常加速滑坡的变形破坏,位于较浅层且在无地下水作用的土质边坡,滑体沿滑面活动状态不一致,滑体后部为主要推动力量,这使得土质边坡裂缝持续发育,为降雨入渗提供条件,导致滑面岩土体抗剪强度逐渐降低,在非饱和状态下发生失稳破坏。相关学者运用定性评价方法分析此类滑坡的形成机理,分析得出坡体结构及岩性为该处滑坡形成的内因,人工开挖与诱发地震为外因,降雨作用加速了滑坡的变形。针对在人工开挖及降雨诱发条件下的变形破坏特征,多采用传递系数法对该滑坡进行稳定性验算,根据稳定性的差异选择合适的治理方案,并提出相应防护措施^[2]。西南地区临近构造活动带,地震的发生扰动了斜坡内部应力状态,即使是一次很小的地震烈度极有可能触发滑坡地质灾害的发生,地震滑坡的发育与地质构造,地形地貌、地层岩性、水文地质等密切相关,因此在进行工程治理时需格外警惕^[3]。

边坡的数值模拟分析技术早在 20 世纪 60 年代就有初步的发展,主要经历了刚体模型阶段、弹性模型阶段、非弹性模型阶段、耦合模型阶段。直至 21 世纪耦合模型已成为当今边坡数值模拟的主流方法,主要以应力、应变、渗流、温度等耦合效应为研究对象,通过考虑边坡土体内外诸多因素综合影响的模式来分析计算边坡的稳定性。如基于 FLAC^{3D} 软件模拟探究降雨前后对滑坡进行成灾机理分析^[4]。以均质黏土边坡为例,FLAC^{3D} 数值模拟软件可以通过控制变量法来研究边坡边界范围对稳定性的影响,并能得出不同形态边坡至边界距离的不同对计算结果的影响^[5]。近年来相关学者二次开发了 FLAC^{3D} 强度折减法的优化,并利用其方法计算某地公路路基边坡的稳定性,依据稳定性结果提出

相关治理措施^[6]。因此本文基于 FLAC^{3D} 数值模拟分析技术的应用,排除其他复杂因素的干扰,更加准确的描述和预测具体的边坡稳定性问题,进一步提高人们的防灾减灾意识和应对能力。

边坡的治理措施已拥有较长的历史,通常人们采用岩锚技术与土工格子栅技术治理,通过打入锚杆或在边坡表面铺设土工格栅来加固稳定边坡^[7];待到一定的钢筋混凝土技术成熟时,通过混凝土塘砌、拱骨架、钢筋网搭设技术及架设抗滑桩来增强边坡的稳定性^[8-10];如今人们更多采用的是通过卫星监测、大数据等人工智能对边坡进行快速统计、分析与识别,提供全面的预警信息^[11-15]。总之,不同阶段的技术和措施都有其优缺点,但未来边坡治理的发展方向更趋于智能化,可有效提高治理效果和降低成本^[16-19]。

本文以四川省炉霍县寿灵寺边坡为例,研究了西南山区典型开挖边坡,分析人类工程活动、降雨以及地震等因素对土质边坡稳定性的影响。通过现场勘查和室内试验来计算开挖边坡后的稳定性,并运用 FLAC^{3D} 进行数值模拟,分析边坡开挖后内部应力状态的改变,分析了在降雨及地震工况下边坡失稳机理,并针对分析结果制定相关的防护措施。

1 边坡工程地质概况

寿灵寺边坡地处四川省甘孜州炉霍县新都镇东北侧斜坡之上,属剥蚀高山峡谷区,区内地形变化相对较小,海拔高程 1 700 ~ 2 600 m,河流众多,冲洪积地形发育,研究区以山地为主,居住环境较好。近年来城市建设项目增多,多数建筑建造在山坡台地之上,主要建造工程有削坡修路、居民房屋建筑等,形成多处开挖边坡(图 1)。

研究区地处地中海至喜马拉雅山大地震带范围内,我国南北地震带中,这一地震带北起甘孜州的东谷,向南至凉山州越西附近。总体走向与邓柯—甘孜断裂带、鲜水河断裂带、石棉断裂带及乾宁康定断裂带等活动强烈地带分布吻合,处于地震频繁地带。

区内主要由第四系全新统人工铺筑混凝土或其他人工堆积物、第四系全新统残坡积层含碎石粉质黏土、



图 1 边坡全貌图(镜像 318°)

Fig. 1 A panoramic view of the study area

第四系全新统崩坡积层碎石土, 现将各岩土层性质分述如下: (1)第四系全新统人工填筑层: 主要分布在公路及居民建筑区, 为修筑公路及房屋时人工铺筑混凝土或其他人工堆积物, 结构较松散。厚度较小, 多在 0.2~0.5 m, 主要成分为砼硬块、人工垃圾等。(2)第四系全新统残坡积层: 分布在斜坡的表层, 以含碎石粉质黏土为主, 结构较松散, 碎石以板岩、砂岩为主。厚度较大, 分布在两岸斜坡上。(3)第四系全新统崩坡积层: 为黄色、褐黄色碎块石土, 成分主要为板岩、粉砂岩, 多呈片状, 强—弱风化状, 次棱角—棱角状, 大小混杂, 分选较差。

2 边坡失稳机理及结构特征

2.1 边坡失稳机理分析

因甘孜州炉霍县寿灵寺未来殿建设占地需要, 开挖形成一高 21.8 m, 坡度 55°~75°的人工开挖边坡, 威胁周边居民建筑生命财产安全, 并于 2021 年 6 月在一级边坡处发生小规模崩塌, 变形迹象明显。图 2 为寿灵寺边坡平面图, 开挖边坡位于场地西北侧, 边坡空间上呈长条形, 开挖长度约为 56 m, 宽度约为 43 m, 其中一级边坡坡度最陡, 五级开挖边坡最长。根据边坡现场勘察分析, 造成边坡失稳的成因主要有:

(1)在长期的自然演变过程中, 该边坡内部已经形成了较为稳定的应力平衡, 本次人类工程活动开挖高陡边坡形成临空面, 改变了坡体内部原始应力分布, 边坡坡脚出现应力集中区, 且应力集中区处于极限平衡状态, 极易受到外地质作用的扰动而失稳, 也是形成滑坡的主要原因。

(2)边坡开挖破坏了表面原有防水结构, 雨水及居民生活用水极易在边坡内部发生渗透, 增加了边坡的滑移力及滑移面的贯通程度, 同时边坡容重增大, 稳定性

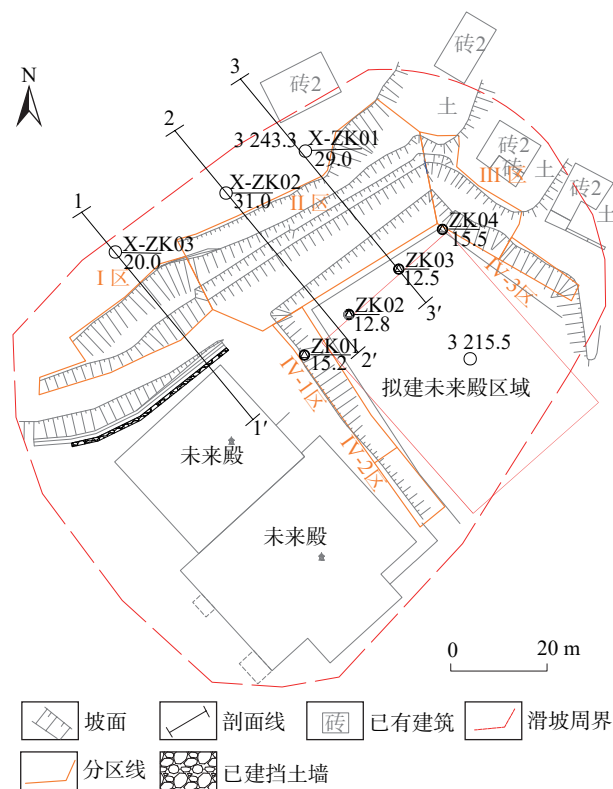


图 2 边坡平面图

Fig. 2 Plan view of the Shouling temple slope

急剧降低, 形成推动式滑坡。

(3)研究区位于地震频繁地带, 加之大型机器在施工现场进行作业产生震动荷载, 得边坡原有裂缝加深、加宽, 雨水加速入渗, 边坡抗滑力急剧降低或边坡应力集中区域被扰动破坏, 最终导致边坡失稳形成牵引式滑动。

2.2 边坡结构特征

研究区坡度较陡, 坡脚处已出现局部崩塌现象, 不易在陡坡中部进行取样, 为减少边坡扰动, 在边坡顶部及坡脚共收集 7 个(坡顶 3 个, 坡脚 4 个)钻孔信息, 整理出各钻孔下岩土体厚度及岩性见图 3。

该边坡主要以粉质黏土、碎石土为主, 厚度分布不均匀, 粉质黏土最厚达到 15.1 m, 平均厚度约 5~10 m, 碎石土多集中于深部, 滑坡区面积约 1 200 m², 体积约 24 000 m³。滑面存在于粉质黏土内部, 地表水入渗导致边坡滑移力、容重增大, 上缘土体向临空面挤压、推动形成局部崩塌。

2.3 开挖边坡危险区划分及变形特征

据现场实地勘察结果, 调查分析寿灵寺边坡剖面形态、坡体结构, 可确定其后缘及左右两侧以陡坎顶部为界, 前缘以坡脚为界。在此基础之上, 根据边坡级数、危险性程度不同, 划分为 4 个区域, 其中 I 区开挖形成

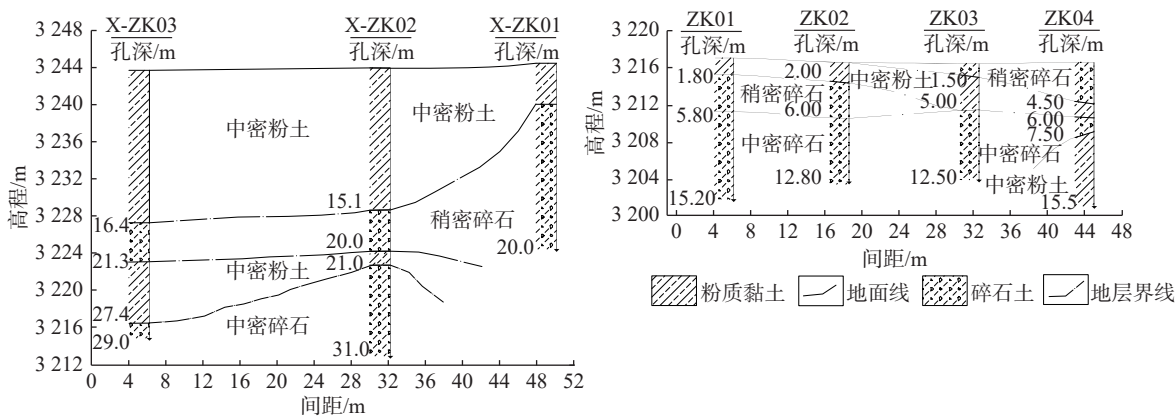


图 3 边坡钻孔岩芯图

Fig. 3 Core sample diagram of the slope drilling

3 级边坡, II 区形成 4 级边坡, III 区形成 5 级边坡, IV 区形成 2 级边坡。以 II 区变形程度最大(图 4)。针对开挖揭露的坡面及变形特征,边坡发育特征见表 1。

剪强度参数的选取结合了室内试验数据和地质测绘对滑坡稳定性的宏观判断,并与滑坡反演结果相结合,保证选取的参数更为合理可靠,综合选取滑带土的抗剪强度指标。

反演分析中根据滑带土饱、试验值和经验值来获取 c 值,根据《建筑边坡工程技术规范》(GB5330—2013)推荐的公式,采用传递系数法进行反演暴雨状态下边坡土体抗剪强度,并最终得到边坡岩土体物理力学参数取值建议表 2。

3.2 边坡稳定性分析

边坡土体为弱透水层,含水微弱,勘查未见地下水。在持续暴雨的情况下,坡体给水能力差,无法形成有效的静水压力,故在计算时,不考虑水压力的作用。结合边坡剖面的形态及岩土体物理力学性质,对 I、II、III 区最危险滑面进行搜索(图 5)。据计算显示暴雨及地震状态下边坡 2-2' 潜在滑面 1, 3-3' 剖面潜在滑面 1 处于失稳状态。

3.3 数值模拟分析

通过 FLAC^{3D} 对该开挖边坡进行数值模拟分析,以最危险滑动区域中 2-2' 剖面为计算模型,分析该边坡在天然、降雨及地震工况下边坡内部位移、应变增量,确定边坡应力集中区域,指导工程治理设计(表 3)。



图 4 边坡基本概况

Fig. 4 Basic overview of the Shouling temple slope

3 边坡稳定性及数值模拟分析

3.1 参数选取

为了得到进行坡体稳定性分析和治理工程所需的岩土物理力学参数,现场采取了 56 件边坡体钻孔土样(包括粉质黏土和碎石),并进行了室内试验。边坡土抗

表 1 不同区域边坡变形特征

影响区域	边坡发育特征	滑坡发育阶段
I 区	该区开挖坡长 15 m, 高 14 m, 坡度 60°, 处于稳定状态, 以粉质黏土为主, 少见后缘拉张裂缝, 两侧无明显剪切裂缝, 前缘已设置重力式挡土墙, 局部未见坍塌, 坡面岩土体易风化剥落的滑落掉块	弱变形
II 区	该区开挖坡长约 10 m, 高约 21 m, 坡度约 65°, 处于稳定状态, 少见后缘拉张裂缝, 前缘一级边坡存在局部坍塌现象, 坡面岩土体常剥离掉落	强变形
III 区	该区开挖坡长约 25 m, 坡度约 60°, 外观上形如三角形, 最大高差达 18 m, 边坡前缘未见明显变化点, 局部未见坍塌, 整体较稳定, 坡顶部位常发生碎块剥离脱落	弱变形
IV 区	划分为三块区域, 其中 IV-I 边坡最大高度约 2 m, 开挖长度约 30 m, 其坡度较缓、无明显变形痕迹, 其余区域均无明显变化	无

表 2 边坡土体物理力学参数建议值表

Table 2 Suggested values for the physical and mechanical parameters of slope rock and soil

类型	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)		泊松比		重度/(kN·m ⁻³)		弹性模量/MPa
	天然	暴雨	天然	暴雨	天然	暴雨	天然	暴雨	天然
粉质黏土	25.0	23.0	32.0	30.0	0.25	0.2	18.5	19.5	10
碎石土	6.0	4.0	40	35.0	0.17	0.15	20.0	21.0	150

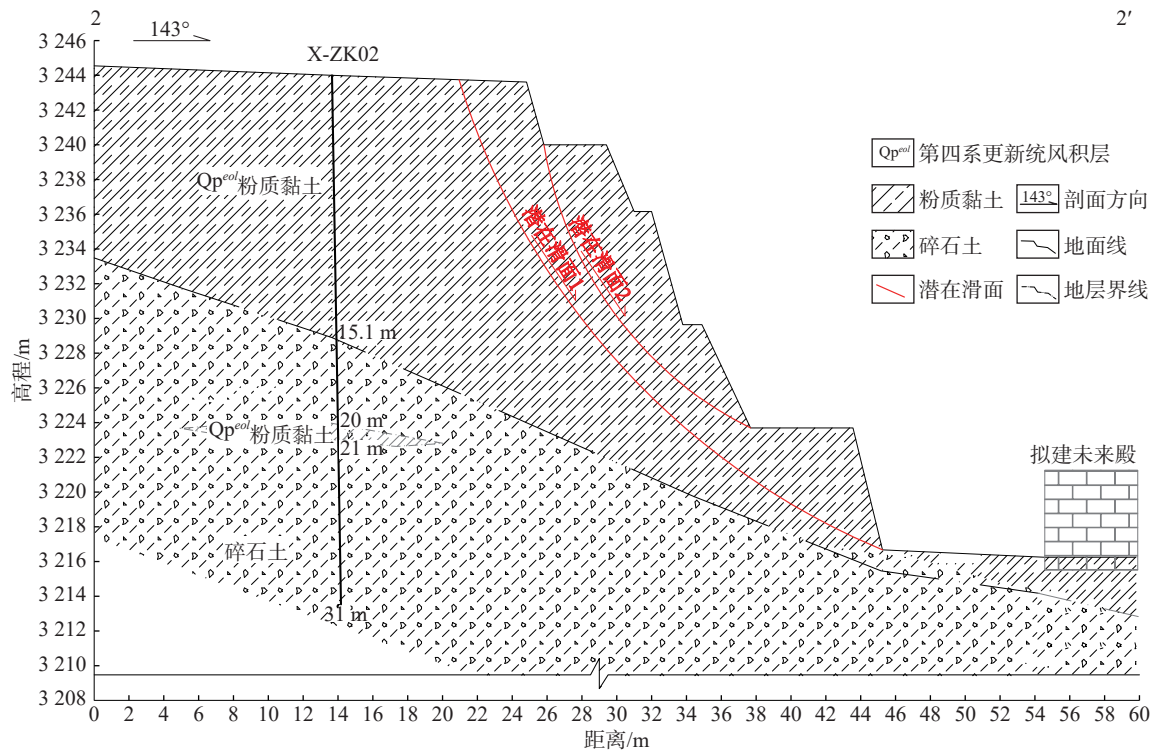


图 5 2-2'剖面潜在滑面搜索结果

Fig. 5 Search results for potential sliding surfaces for cross-section 2-2'

表 3 稳定性计算结果(Bishop 法)

Table 3 Calculation results of slope stability (Bishop method)			
剖面编号	天然状态 稳定系数	暴雨状态 稳定系数	地震状态 稳定系数
1-1'	1.423	1.286	1.325
2-2'	潜在滑面1	1.083	0.979
	潜在滑面2	1.123	1.015
3-3'	潜在滑面1	1.084	0.981
	潜在滑面2	1.209	1.090
4-4'	潜在滑面1	1.119	1.011
	潜在滑面2	1.199	1.076

(1)天然工况

天然工况下边坡应变增量及水平位移如图 6 所示。位移变化较大的部分最先发生剪切破坏,天然工况下寿灵寺边坡的稳定系数为 1.06。边坡的主要抗滑力是由滑动带前缘所提供。一级边坡坡脚为剪出口位置,水平位达到 1.05 m,应力较为集中,模拟结果与勘察结

果相吻合。在防治时应避免坡脚应力集中区域扰动。

(2)暴雨工况

暴雨工况下该边坡应变增量及水平位移如图 7 所示。受到暴雨的影响,滑动带前缘滑移力进一步增大,坡顶滑面贯通处应力增大,拉张裂缝持续发育,边坡稳定性系数为 0.975,边坡失稳产生推动式滑坡,剪出口位于一级边坡坡脚,水平向最大位移可达 3.4 m。

(3)地震工况

地震工况下该边坡应变增量及水平位移如图 8 所示,按《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)的划定,炉霍县属抗震设防烈度Ⅶ度区,设计基本加速度为 0.15g。在地震的影响下,滑动带前缘滑移力增大,水平向最大位移可达 2.5 m,应力集中区受到破坏,形成牵引式滑坡,坡脚下地基土受到剪切破坏作用,影响深度约 5 m,对未来殿的建设将产生影响。在治理该边坡时需考虑地震工况下对地基土的破坏,同时也应在施工过程中

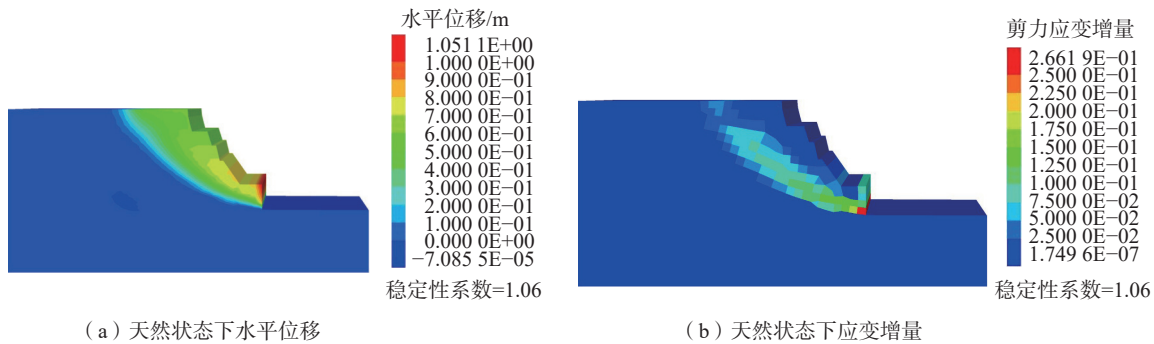


图 6 天然状态斜坡应力及位移分析

Fig. 6 Stress and displacement analysis of slopes in the natural state

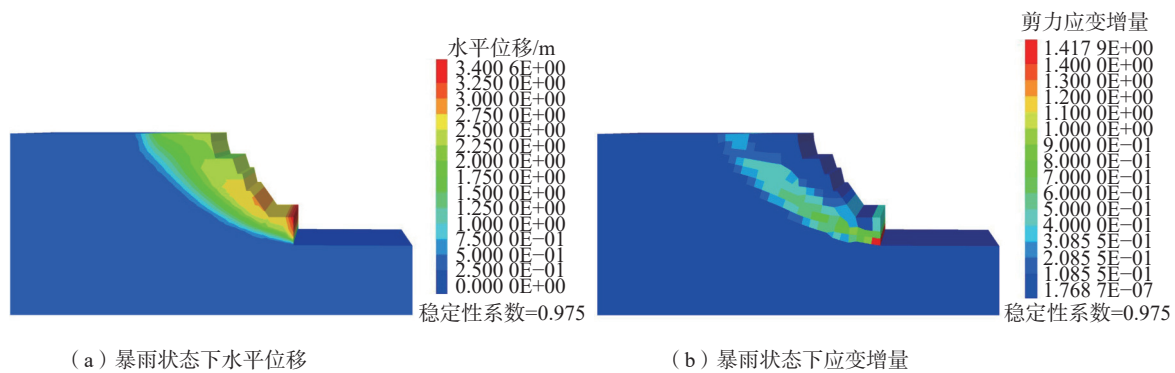


图 7 暴雨状态斜坡应力及位移分析

Fig. 7 Stress and displacement analysis of slopes under heavy rainfall conditions

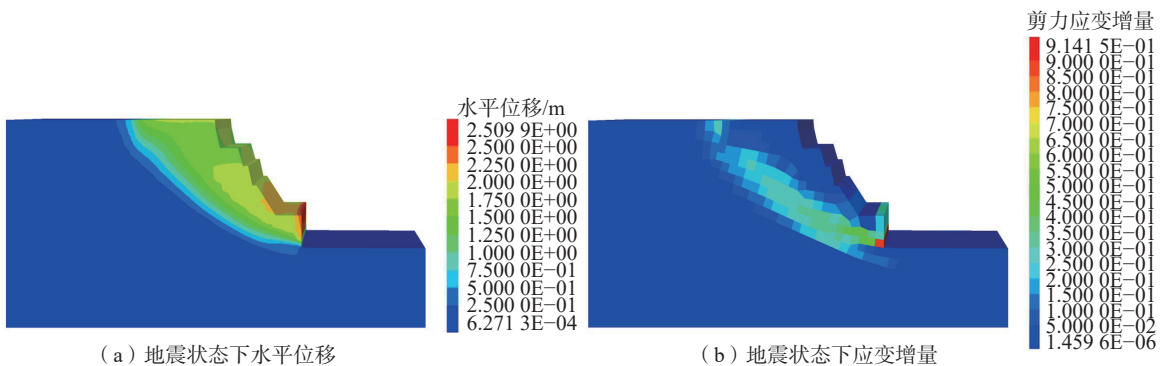


图 8 地震状态斜坡应力及位移分析

Fig. 8 Stress and displacement analysis of slopes under seismic conditions

中避免使用大型震动机械工作。

4 边坡工程治理设计

4.1 治理方案选择

在综合边坡失稳机理及数值分析结果的基础上,为了保持边坡的稳定,首先加固治理一级边坡局部崩塌直至达到稳定,再设置相应的支挡结构加固高陡边坡。此外,需考虑地震工况下边坡对地基土的破坏作用,经过多种方案比选决定采用抗滑桩、加长锚杆、框格梁和截

排水措施进行处治,如图 9 边坡综合治理平面图。

4.2 滑坡推力计算

滑坡推力计算基于极限平衡法理论,将滑体视为理想刚塑材料,一旦滑动面剪应力达到剪切强度,滑体沿滑动面产生剪切变形。采用传递系数法对 2-2'剖面进行滑坡推力计算,采用计算公式为:

$$E_i = KW_i \sin \alpha_i - (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i) + E_{i-1} \psi_i \quad (1)$$

$$\psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi \quad (2)$$

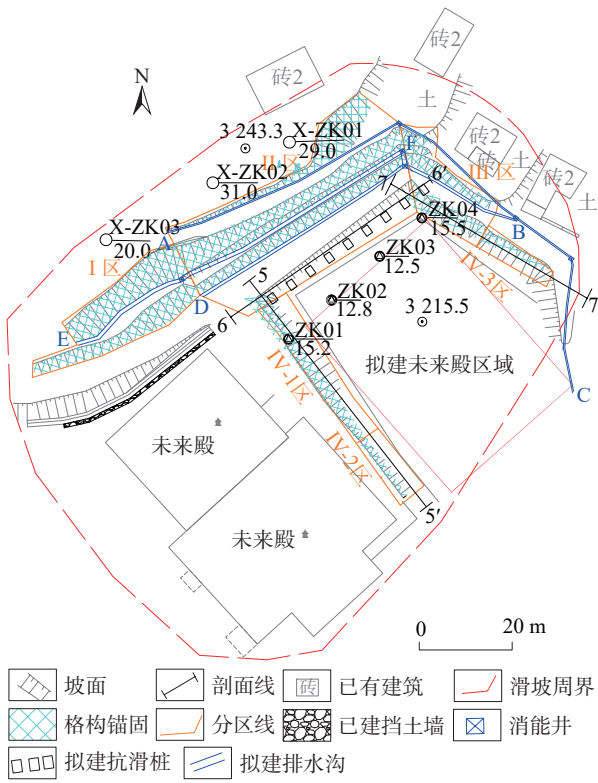


图 9 边坡综合治理平面图

Fig. 9 Plan view of comprehensive slope treatment

式中: E_i 、 E_{i-1} ——任一块 i 与上面一块 $i-1$ 滑动体的基于下滑力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$);

α_i ——任一块 i 滑体滑动面与水平线间的夹角/($^\circ$);

φ_i ——滑动面上 i 块土体的内摩擦角/($^\circ$);

ψ_i ——传递系数;

K ——安全系数,本工程取 1.2。

经计算剩余水平滑推力为 600 kN/m, 据此分别对抗滑桩的受力、最大弯矩、嵌入深度进行验算, 内力计

算采用地基系数 m 法, 忽略桩与土间的摩阻力和黏聚力, 考虑滑坡推力、桩前与桩后土压力, 按普通抗滑桩进行计算。计算结果如表 4 所示。

表 4 抗滑桩设计计算结果

Table 4 Analysis results of anti-slide piles

抗滑桩标高 /m	桩后剩余水平下滑力 /kN	最大弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}$)	最大剪力 /kN	计算嵌入深度 /m
3 216	600	18 661.8	6 944.5	7.0

4.3 截排水工程

降雨及居民生活用水对滑坡的影响是重要的, 截排水措施是边坡治理工程中必不可少的内容。在截排水沟设计时应考虑排水量、位置、环境、抗震、维护与管理等方面的需求, 充分利用现有地形地貌、当地工程材料与工程措施, 力求安全与经济效益最大化。本方案共设置 3 条截排水沟, 3 个沉砂池和 3 口消能井。分别位于五级边坡坡脚(AC 段)、二级边坡坡脚(DC 段)和三级边坡坡脚(EF 段)处, 均采用 C20 混凝土浇筑, 充分利用地形优势将雨水汇集集中处理。此外考虑到地震及不均匀沉降带来的不良影响, 每隔 10 m 设置一道宽为 2 cm 的伸缩缝, 缝中填塞沥青木板, 布置位置见图 9。

4.4 抗滑桩设计

根据上述分析结果, 对抗滑桩位置、间距及尺寸进行设计(图 10), 抗滑桩应深入地下 5 m 以防止地震工况下边坡对地基土的剪切破坏作用, 本方案抗滑桩截面尺寸采用 1.5 m $\times$ 2 m 抗滑桩 9 根, 截面形状为方形, 桩长 14 m, 悬臂段 6 m, 嵌固段 8.0 m, 桩间距 3.5 m, 布置在一级边坡坡脚处。

4.5 坡面防护设计

根据上述分析结果, 边坡在暴雨及地震工况下处于

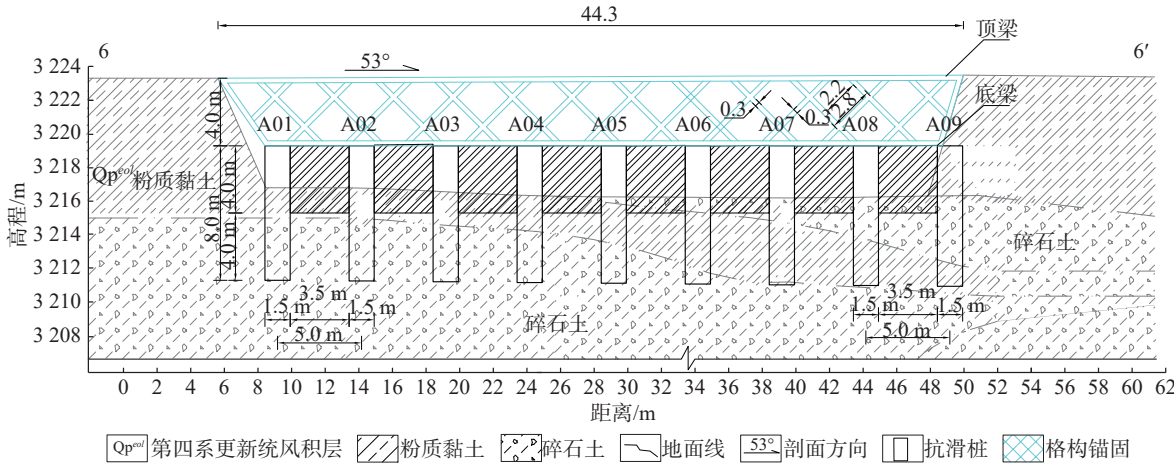


图 10 工程布置 6-6' 剖面图

Fig. 10 Engineering layout diagram of the cross-section 6-6' profile

失稳状态,坡脚在上部土体自重应力的影响下处于应力集中状态,应首先采用锚杆对边坡自上而下进行加固。需重点加固边坡上部以减轻坡脚应力集中状态,坡脚应力集中区域锚杆不易钻入过深,避免因扰动应力集中区发生牵引式滑坡,同时也不易过短形成二次滑面。据滑坡

推力计算结果,本方案以边坡处最大水平推力 100 kN/m 为设计推力,按照相关规定要求及数值模拟分析结果布置锚杆如图 11 所示,本方案设计采用最小锚固段长度为 3.5 m,锚杆横向间距为 2.5 m,竖向间距为 2.5 m,坡面采用菱形布置(图 12)。

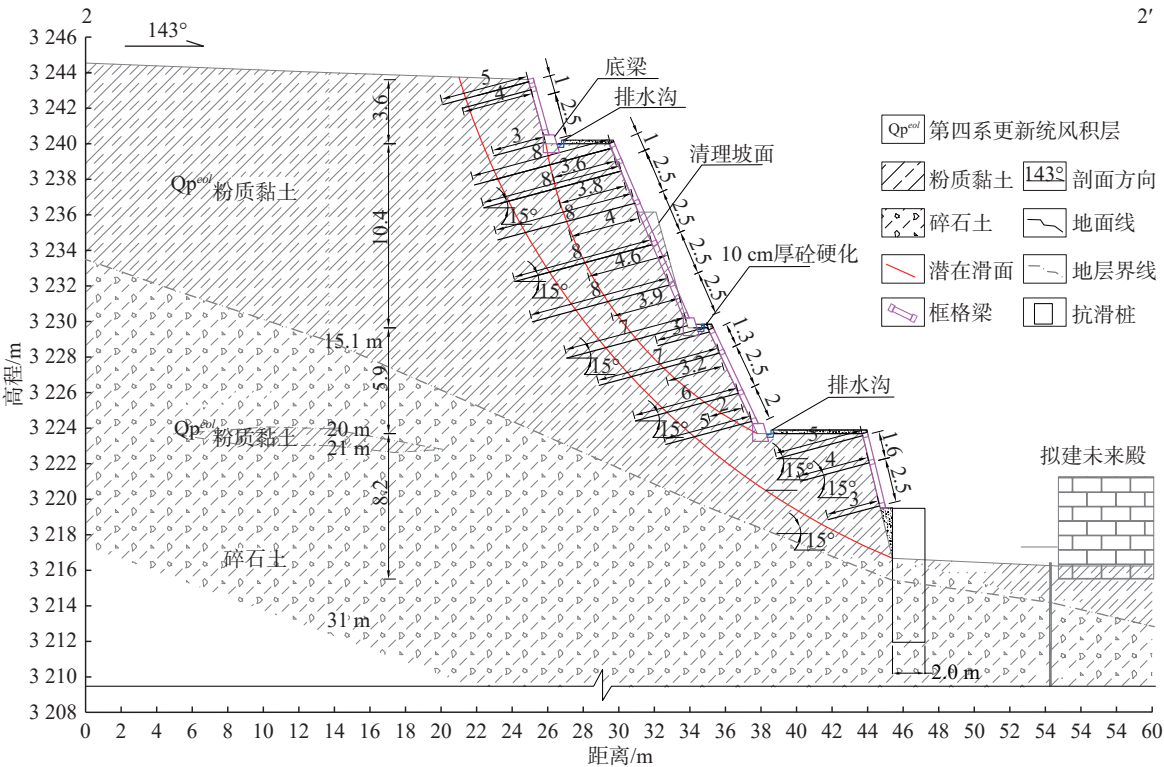


图 11 工程布置 2-2'剖面图

Fig. 11 Engineering layout diagram of the cross-section 2-2' profile

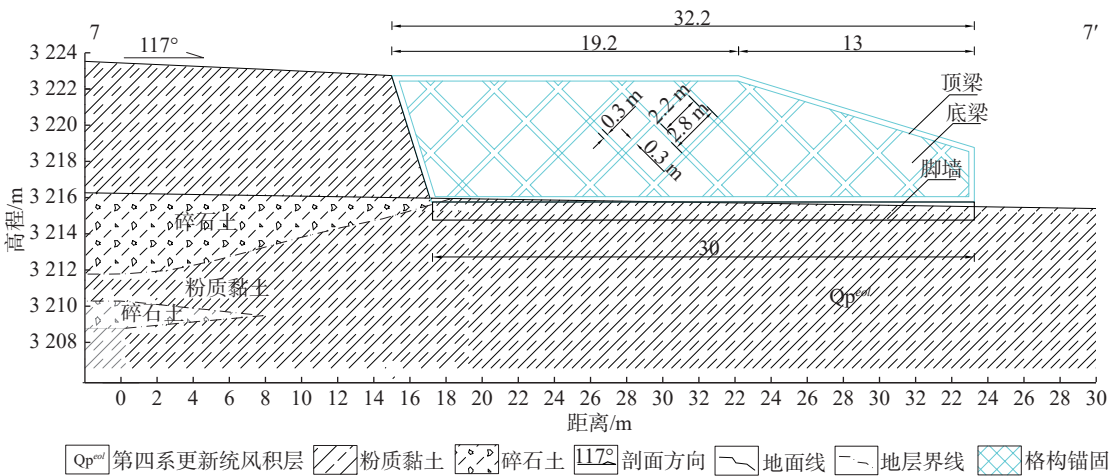


图 12 工程布置 7-7'剖面图

Fig. 12 Engineering layout diagram of the cross-section 7-7' profile

此外,为均匀地将边坡剩余下滑力分配至格构节点处的锚杆,防治雨水对边坡土层的侵蚀损坏,保护区内

生态环境,提高边坡的稳定性与环保性,需采用框格梁进行坡面防护。本方案以稳定性与经济性相统一的原

则,采用尺寸为 250 cm×250 cm,冠梁、底梁截面尺寸均为 300 mm×300 mm。材料采用 C30 砼进行浇筑。考虑到地震及沉降影响,间隔 8~12 m 设置伸缩、沉降缝,并在部分区域将框格梁伸缩、沉降缝优化合二为一,缝内填充 2 cm 厚浸泡沥青后的木板或沥青板,工程布置图如图 11 所示。

4.6 设计效果

寿灵寺边坡依据相关设计规定,设计采用抗滑桩、加长锚杆、框格梁和截排水措施治理,满足相关规范要求,稳定性得到显著提升,目前已采用到实际工程建设中,见图 13。



图 13 施工成果

Fig. 13 Construction result diagram

5 结论

(1)寿灵寺边坡失稳的主要原因是受到人工开挖的影响,坡体内部应力状态发生改变,坡脚出现应力集中区域,在降雨工况下雨水渗入边坡导致土体自重应力增加,物理力学性质急剧减小,形成圆弧形滑动面,最大水平位移 3.4 m,边坡失稳形成典型的推动式滑坡地质灾害。

(2)寿灵寺边坡Ⅱ区在降雨及地震工况下处于失稳状态,地震工况下坡脚应力集中区受到扰动形成牵引滑坡,且对坡脚地基土造成剪切破坏,影响深度达 5 m,采用锚固段为 8 m 的抗滑桩对边坡进行加固对地基土起到保护效果。

(3)考虑到本工程的重要性程度(坡脚为寺庙,每年到访人数众多),避免在施工过程中对边坡坡脚应力集中区域扰动过大,先对二三级边坡进行重点防护,采用加长锚杆加固及框格梁分散下滑力的治理措施。并利用地形优势设置截排水沟。目前该方案已应用至本工程中,实践证明该方案具有可靠性。

参考文献(References):

[1] 顾磊,黄河.滑坡地质灾害防治研究进展[J].地球科

学前沿, 2021, 11(6): 786 - 795. [GU Lei, HUANG He. Research progress on prevention and control of landslide geological hazards [J]. Geoscience Frontiers. 2021, 11(6): 786 - 795. (in Chinese with English abstract)]

[2] 王元战,袁永强,吴林键.降雨入渗条件下内河航道岸坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 403 - 411. [WANG Yuanzhan, YUAN Yongqiang, WU Linjian. Stability analysis of inland waterway bank slope under rainfall infiltration [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 403 - 411. (in Chinese with English abstract)]

[3] 周洪福,方甜,韦玉婷.国内外地震滑坡研究:现状、问题与展望[J].沉积与特提斯地质, 2023, 43(3): 615 - 628. [ZHOU Hongfu, FANG Tian, WEI Yuting. Research situations and suggestions on earthquake-induced landslides [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(3): 615 - 628. (in Chinese with English abstract)]

[4] 穆启超,王万迁,王琦,等.贵州松桃长冲组滑坡形成机理分析[J].中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 40 - 47. [MU Qichao, WANG Wanqian, WANG Qi, et al. Analysis of the formation mechanism of landslide in Changchong Group, Songtao, Guizhou [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 40 - 47. (in Chinese with English abstract)]

[5] 徐伟,孙巍锋,蒋亮亮,等.边坡边界范围对 FLAC^{3D} 数值模拟稳定性计算影响探讨[J].公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(3): 8 - 9. [XU Wei, SUN Weifeng, JIANG Liangliang, et al. Discussion on the influence of slope boundary range on FLAC^{3D} numerical simulation stability calculation [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2019, 15(3): 8 - 9. (in Chinese)]

[6] 徐文刚,余旭荣,年廷凯,等.基于 FLAC^{3D} 的三维边坡稳定性强度折减法计算效率改进算法及其应用[J].吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1347 - 1355. [XU Wengang, YU Xurong, NIAN Tingkai, et al. Optimization and application of FLAC^{3D} strength-reduction computation in three-dimension slope stability analysis [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1347 - 1355. (in Chinese with English abstract)]

[7] 卢乾,朱瑞晨,姜宏军,等.西部某水电站左岸坝肩边坡稳定分析及处理措施[J].人民长江, 2019, 50(增刊 1): 120 - 122. [LU Qian, ZHU Ruichen, JIANG Hongjun, et al. Stability analysis and treatment measures of left bank abutment slope of a hydropower station in western China [J]. Yangtze River, 2019, 50(Sup 1): 120 - 122. (in Chinese)]

[8] 王壮,苏雷,时伟,等.地震作用下不同支护结构对滑坡加固效果研究[J].工程地质学报, 2023, 31(1): 176 - 187. [WANG Zhuang, SU Lei, SHI Wei, et al. Reinforcement

- effect of different support structures against landslide under earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(1): 176 – 187. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 等. 甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(5): 7 – 14. [ZHANG Weixiong, ZHAI Xianghua, DING Baoyan, et al. Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu County of Gansu Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(5): 7 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李怀鑫, 晏长根, 王瑞, 等. 路堑边坡浅层塌滑的控制因素与生态防治措施 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 35(3): 70 – 79. [LI Huaixin, YAN Changgen, WANG Rui, et al. Analysis on factors controlling shallow failures of the cut slopes and its prevention by bio-engineering measures: A case study of the cut slopes along the highway from Shuangcheng to Dajiali [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 35(3): 70 – 79. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 丁戈媛. 考虑监测离群值朱家店滑坡位移预测研究 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(1): 132 – 140. [DING Geyuan. Displacement prediction of the Zhujiadian landslide with outliers [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(1): 132 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘传正. 累积变形曲线类型与滑坡预测预报 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(1): 86 – 95. [LIU Chuangzheng. Three types of displacement-time curves and early warning of landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(1): 86 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [13] SUN Haiqing, LI Weiyue, SCAIONI M, et al. Influence of spatial heterogeneity on landslide susceptibility in the transboundary area of the Himalayas [J]. *Geomorphology*, 2023, 433: 108723.
- [14] 薛廉, 唐侨, 郑杰, 等. 基于实时地质灾害监测数据的预警预报动态阈值分析方法 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(4): 11 – 21. [XUE Lian, TANG Qiao, ZHENG Jie, et al. Dynamic threshold analysis method of early warning and forecast based on real-time geo-hazards monitoring data [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(4): 11 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 朱真, 江思义, 刘小明, 等. 基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统及应用分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 176 – 183. [ZHU Zhen, JIANG Siyi, LIU Xiaoming, et al. The Beidou high precision geological disaster monitoring system based on RTK edge calculation and its application analysis [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 176 – 183. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈林万, 裴向军, 张晓超, 等. 不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(2): 137 – 147. [CHEN Linwan, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, et al. A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 137 – 147. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 余岱金, 黄强兵, 康孝森, 等. 黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 119 – 128. [YU Daijin, HUANG Qiangbing, KANG Xiaosen, et al. A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 119 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 融合斜坡形变特征的复杂山区区域滑坡评价研究现状与展望 [J/OL]. *中国地质*, 2023: 1 – 13. (2023-10-10). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DIZI20230930007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. [YANG Zhihua, WU Ruian, GUO Changbao, et al. Research status and prospect of regional landslide assessment integrating slope deformation characteristics in the complex mountainous area [J/OL]. *Geology in China*, 2023: 1 – 13. (2023-10-10). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DIZI20230930007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 薛强, 张茂省, 高波. 斜坡单元支持下基于土体含水率的陕西省清涧县城区黄土滑坡危险性评价 [J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1904 – 1914. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, GAO Bo. Hazard assessment of loess landslide based on soil moisture content and supported by slope unit in Qingjian City, Shaanxi Province [J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1904 – 1914. (in Chinese with English abstract)]