

## 超大跨桥梁强震动力响应下的岸坡稳定性分析

杜兆萌, 刘天翔, 程强, 雷航, 王丰

### Analysis of bank slope stability under strong seismic response for super long span bridges

DU Zhaomeng, LIU Tianxiang, CHENG Qiang, LEI Hang, and WANG Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309031>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake

王来贵, 向丽, 赵娜, 刘向峰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 18-25

#### 三峡库区典型岩溶岸坡危岩体失稳模式和长期稳定性分析

Analysis of failure modes and long-term stability of dangerous rock mass on typical karst bank slope in the Three Gorges Reservoir area

胡雷, 张鹏, 黄波林 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 64-73

#### 云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析

Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyuan Dammed Lake in Ludian Earthquake

郭延辉, 杨溢, 高才坤, 杨志全 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 30-37

#### 考虑水库岸坡特征的滑坡稳定性计算修正传递系数法

Improved transfer coefficient method for landslide stability evaluation based on reservoir bank slope characteristics

苏培东, 严磊, 邱鹏, 梁宇, 汪意凌 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(1): 40-48

#### 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

#### 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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309031

杜兆萌, 刘天翔, 程强, 等. 超大跨桥梁强震动力响应下的岸坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 107-117.

DU Zhaomeng, LIU Tianxiang, CHENG Qiang, et al. Analysis of bank slope stability under strong seismic response for super long span bridges[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 107-117.

## 超大跨桥梁强震动力响应下的岸坡稳定性分析

杜兆萌, 刘天翔, 程强, 雷航, 王丰

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川成都 610041)

**摘要:** 在高烈度山区设计修建公路桥梁时, 耦合多种不利条件的在强震作用下超大跨径桥梁高陡岸坡稳定性最为复杂, 易形成滑移、碎屑流等岸坡失稳灾害。实际震害调查结果表明不规则地形对地震动力具有明显的放大作用, 对边坡的稳定性和桥梁的安全性构成不利的影 响, 如何考虑复杂地形的地震动力放大效应具有重要的工程价值。以位于四川省凉山彝族自治州高烈度深切峡谷地段的主跨 1 200 m 特大悬索桥岸坡为例, 对此类超大跨径桥梁岸坡在强地震力作用下的基岩面地震危险性概率和失稳破坏模式机理进行研究, 建立了含卸荷裂隙的三维坡体结构模型, 采用动力时程分析方法给出了不同失稳破坏模式下岸坡上各特征点的峰值地震加速度并据此获得了修正的放大系数。基于修正的放大系数对坡体地震稳定性的拟静力计算方法进行改进, 采用改进后的方法对该桥位的稳定性进行了评估。结果表明: 边坡遵循峰值地震水平加速度及放大系数地表最大, 随着坡体深度的增大而递减, 且递减速度减缓并趋于稳定的规律, 且坡度变化率对此影响极大。坡度变化率大且地貌突出部位的地震响应极为强烈。大范围分布的碎块土石覆盖层、变坡率的地貌突出的浅表层、风化卸荷带内的表层风化碎裂岩体极易在地震作用下产生变形, 应当加强防护。未考虑修正放大系数的地震工况计算结果偏于不安全, 安全系数的计算结果减少了 2%~6%。据此提出一整套针对高烈度山区特大跨径桥梁岸坡的地质灾害风险评估方法和与考虑桥梁结构两水准抗震相适应的边坡稳定性计算方法及防护措施建议思路, 为相关工程的研究与设计提供参考。

**关键词:** 岸坡稳定性; 地震动力响应; 动力时程分析; 高陡岸坡; 放大系数; 高烈度

**中图分类号:** TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2025)02-0107-11

## Analysis of bank slope stability under strong seismic response for super long span bridges

DU Zhaomeng, LIU Tianxiang, CHENG Qiang, LEI Hang, WANG Feng

(Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd.,

Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** Designing and constructing highway bridges in high-intensity mountainous areas present significant challenges. The stability of high and steep bank slopes for large span bridges coupled with various unfavorable conditions under strong earthquakes is particularly complex, which is prone to formation of bank slope instability disasters such as sliding and debris

收稿日期: 2023-09-21; 修订日期: 2024-03-05 投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 四川省交通运输科技项目(2023-A-02; 2024-A-04); 四川省科技计划项目(2022YFG0141); 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司科研项目(KYXM2021000049; KYXM2022000038)

第一作者: 杜兆萌(1995—), 女, 山东东营人, 地质资源与地质工程专业, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害防治与特殊支挡结构设计方面的研究。E-mail: 473453892@qq.com

通讯作者: 刘天翔(1980—), 男, 四川自贡人, 地质工程专业, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事公路地质灾害防治设计与监测预警技术方面的研究。E-mail: 411495191@qq.com

flow. Investigations into earthquake damage reveal that irregular terrain has a significant amplification effect on earthquake dynamics, which has an adverse impact on the stability of slopes and the safety of bridges. Assessing the seismic dynamic amplification effect of complex terrain is of important engineering value. This study examines the bank slope of a 1200m-long suspension bridge located in the high-intensity, deep canyon region of the Liangshan Yi Autonomous Prefecture, Sichuan Province. We conduct an in-depth analysis and research on the seismic hazard probability and instability failure mode mechanisms of the bedrock surface under strong seismic forces. A three-dimensional slope structure model with unloading cracks was developed. The peak seismic acceleration of each characteristic point on the bank slope under different instability failure modes was obtained using dynamic time-history analysis method and modified amplification coefficient was derived based on these findings. Improvements were made to the static calculation method for slope seismic stability using this modified coefficient. The improved method was used to evaluate the stability of the construction site. The results indicate that the slope's peak seismic horizontal acceleration and amplification coefficient are highest at the surface and decrease with increasing slope depth, with the rate of decrease slowing and stabilizing. The rate of slope change significantly impacts this response. The seismic response is exceptionally strong in areas with high slope change rates and prominent landforms. Widely distributed fragmented rock and soil cover layers, shallow surfaces with varying slope rates, and surface weathered fragmented rock masses within weathering unloading zones are prone to deformation under seismic action, and protection should be strengthened. The calculation results of seismic conditions without considering the correction of amplification factors are unsafe, with safety factor results decreasing by 2% to 6%. A complete set of geological hazard risk assessment methods, and slope stability calculation methods, and protective measures suitable for considering the two-level seismic resistance of bridge structures are proposed based on this for the bank slopes of ultra large span bridges in high intensity mountainous areas, providing a reference for the research and design of related engineering projects in high-intensity mountainous areas.

**Keywords:** stability slope; dynamic response to earthquake; dynamic time-history analysis; high steep slope; magnification factor; high-intensity

## 0 引言

我国西部山区地处高烈度地区,高陡边坡工程复杂,地震作用下高陡边坡的失稳问题历来是铁路、公路、水电等各行业研究的重点问题<sup>[1-3]</sup>。郭延辉等<sup>[4]</sup>研究地震诱发的红石岩高陡边坡超大规模地质灾害,研究表明该山体受到震损后,岩体裂隙和后缘地表裂缝增多,防护难度增大。胡爱国等<sup>[5]</sup>研究地震作用对位于高陡斜坡结构损伤机理,结果表明地震导致坡体整体稳定性下降,促使裂隙大量发育。周洪福等<sup>[6]</sup>对川藏铁路某特大桥高陡岩质斜坡地质安全风险及稳定性进行评价。国内外相关学者在高边坡变形破坏理论<sup>[7]</sup>及防护与加固技术方面<sup>[8]</sup>做了大量的研究工作,大量理论成果应用于工程实例<sup>[9-10]</sup>,但由于高陡边坡工程不仅地质体本身极为复杂,变形破坏机理及力学模型也多变,高陡边坡工程抗震稳定性亟须研究<sup>[11-12]</sup>。

边坡的地震动力响应分析近年来一直是国内外学者研究的重点<sup>[13]</sup>。郑颖人等<sup>[14]</sup>提出了地震强度折减动力分析法,以极限状态时的强度折减系数作为边坡动力稳定系数。张迎宾等<sup>[15]</sup>进行边坡地形效应的地震动力

响应分析,研究边坡几何形态对边坡地震响应的影响。王来贵等<sup>[16]</sup>研究抚顺西露天矿形成的顺倾岩质边坡在地震作用下多弱层对边坡动力响应的影响,表明地震作用下顺倾多弱层边坡的动力响应规律与弱层的分布位置和作用机理有关。林峻岑等<sup>[17]</sup>通过数值计算分析错距对边坡固有共振频率的影响,使用谐响应分析对坡面各点的共振响应规律及地震作用频率对边坡应力的影响进行探讨。李郑梁等<sup>[18]</sup>探讨入射波参数对地震动力放大效应的影响,因此在山区的工程,特别是高陡斜坡区,地震加速度的放大效应必须加以考虑。

地震动力稳定性的分析方法主要为拟静力法和动力时程分析方法<sup>[19]</sup>。拟静力法是将地震作用简化为水平方向或垂直方向的不变的惯性力,计算边坡的稳定系数,然而地震作用下边坡顶部对振动的反应幅度较边坡底部存在明显的垂直向放大<sup>[20]</sup>,同一高程处的边坡边缘部位的反应幅度较内部也存在水平向放大<sup>[21]</sup>,因此传统的拟静力法将整个坡体均乘以相同的地震系数来模拟地震力是不符合实际的。特别是高山峡谷复杂地形会影响地震波的传播特性,导致不同位置的地震动具有不

同的放大效应,所以在拟静力法中考虑地震随空间变化,对于高陡边坡的稳定性分析及防护设计具有重要的理论意义和实践意义。动力时程分析方法通过加入地震波数据能够得到计算域的地震反应,边坡的残留永久位移以及坡内各点的动力反应时程,从而计算出加速度、速度及峰值放大系数<sup>[22]</sup>。但是永久位移无法像边坡稳定系数那样可以直观反映边坡稳定性,且地震动力时程反应的是一个时间过程,地震波随时间不断变化,最终的应力状态未必是最不利的应力状态,因此要得到边坡在地震工况下最危险状态,需要迭代计算边坡每个时刻的稳定系数<sup>[23]</sup>,计算量过大。动力时程分析方法也无法与工程设计中的两水准地震相适应。因此,考虑复杂地形影响放大效应的强震动力响应的边坡稳定性分析方法亟须研究。

本文以主跨 1 200 m 特大悬索桥岸坡为研究对象,该特大桥位于滇西北横断山高山峡谷与云贵高原接壤地震频发地带,由于流经的雅砻江深切作用,地形错综复杂,岸坡超 600 m。与国内已建和在建特大跨径桥梁工程相比,该特大桥具有两侧岸坡高陡、岩体含风化卸荷变形区、地震烈度高的特点。从工程地质条件着手,重点研究如何合理考虑地震动荷载进行边坡稳定性计算及相应的坡体地震动力响应,据此对该特大桥高陡岸坡提出了防治措施,为此类高烈度地区高陡岸坡的稳定性判定、地质灾害评估及工程防护设计提供重要方法思路。

## 1 桥位区工程地质条件

### 1.1 地形地貌

该主跨 1 200 m 特大悬索桥及两岸地貌如图 1 所示。西昌岸高度为 604 m,坡度约 35°~45°。香格里拉岸高度为 630 m,坡度约 45°~65°,两岸均为高陡斜



图 1 桥梁及岸坡地貌图

Fig. 1 Landscape map of bridge and riverbank slopes

坡。香格里拉岸处于山体突出部位,即三面临空的“鼻梁”状位置,为抗震危险地段。本文将研究该类典型岸坡的强震动力响应情况,分析岸坡上各点的地震放大效应及放大系数,进行岸坡稳定性评估。

### 1.2 强风化卸荷带

两岸岸坡上覆崩坡积层(Qh<sup>c+dl</sup>)碎石和块石,下伏基岩为中生界上三叠统白果湾组(T<sub>3</sub>bg)粉砂质砂岩夹砂岩。基岩内存在因多次构造运动、风化卸荷形成的岩体结构较为破碎的强风化卸荷变形区,钻孔揭示最大深度约 31~49 m,钻孔照片如图 2 所示。



图 2 风化卸荷变形区岩芯特征

Fig. 2 Characteristics of rock core in weathering and unloading deformation zone

为更好揭示强风化卸荷变形区岩体特征,进行了原位试验。试验平洞总长 25.0 m,在平洞内深度 19.0 m、23.5 m 分别出现了卸荷变形裂隙,19.0 m 处张开度为 12 cm,23.5 m 处张开度为 2.5 cm。裂隙产状总体为:42°~45°∠44°~57°,整体外倾向坡外,裂隙面张开且贯通性好,在平洞内贯穿了整个平洞面,裂隙内有一定的泥质充填。平洞内裂隙现场照片如图 3 所示。

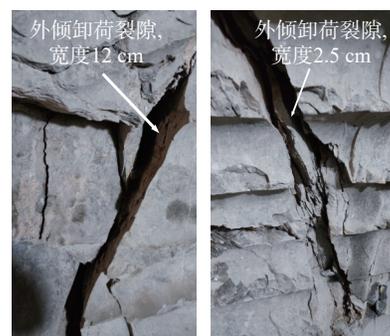


图 3 风化卸荷裂隙特征

Fig. 3 Characteristics of weathering unloading crack

### 1.3 区域活动构造及其地震危险性

对该特大桥工程场地进行了地震安全性评价,区域破坏型地震震中分布表明区域地震活动具有明显的分

区特点,并与活动断裂位置有密切的联系。根据区域地震活动空间分布的实际情况,考虑地震活动对工程场地的影响,如图 4 给出了地震区带划分方案图,两岸岸坡主要位于鲜水河—滇东地震带。

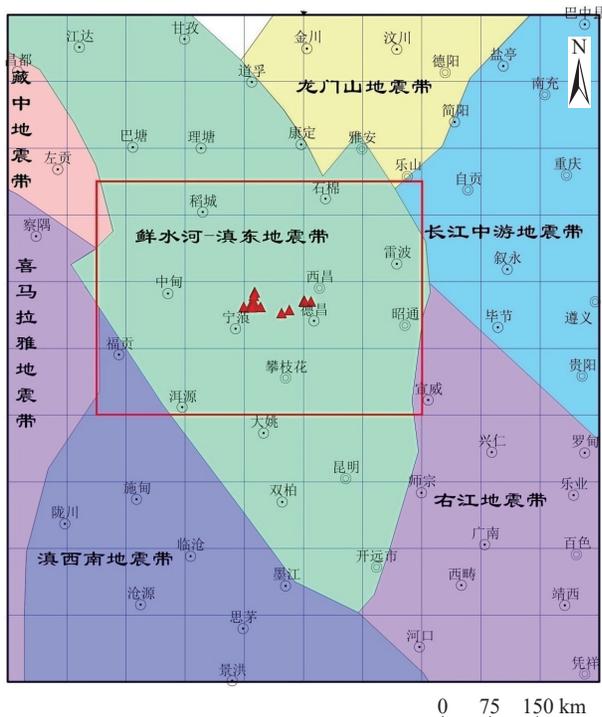


图 4 地震区带划分方案图

Fig. 4 Diagram of seismic zone division plan

鲜水河—滇东地震带西起青藏高原中北部的昆仑山南缘,东到云南昭通、文山,包括了青海南部、四川西部、云南中东部以及西藏部分地区,带内地质构造复杂,边界断裂和块体内部断裂活动强烈,地震活动强度大、频度高。该带新构造运动以水平挤压为主,在强烈挤压作用下块体间产生大规模水平滑动,兼有垂直差异运动。主要断裂在新构造时期均有活动,第四纪以来断裂活动尤为明显,断裂活动具有挤压走滑性质,是我国西部地震活动最强烈的地区之一。

故本文采用与桥梁结构两水准抗震设防相适应的边坡防护设计原则,50 a 超越概率 10% 地震作用,为 E1 地震作用;50 a 超越概率 2% 地震作用,为 E2 地震作用。根据基岩面地震危险性概率分析,E1 地震作用的设计峰值加速度( $PGA$ )取  $0.244 \text{ gm/s}^2$ ,E2 地震作用的( $PGA$ )取  $0.429 \text{ gm/s}^2$ ,该地震动参数应用于后文数值计算中。

## 2 岸坡强震动力响应分析

该特大桥地处高烈度山区,在地震工况下岸坡极易

产生失稳破坏,因此在岸坡地质灾害风险评估时充分考虑地震荷载作用且采用合理的计算方法显得至关重要。

### 2.1 改进的边坡强震动力响应数值计算方法

本文将拟静力法与动力时程分析方法相结合,先通过动力时程分析获得岸坡各点在地震反应过程中随时间变化的地震加速度放大系数,选取岸坡各点的地震加速度峰值放大系数与设计峰值加速度( $PGA$ )的乘积作为的各点水平加速度,再采用拟静力法计算岸坡体至平衡态,以此作为边坡的最危险应力状态,分析该状态的强度特征,可直观评价岸坡在 E1 和 E2 两水准抗震设防下地震边坡稳定性。

### 2.2 含强风化卸荷变形区的数值计算模型

本次数值分析采用三维有限差分计算软件,数值仿真模型试验假定土体的本构行为满足理想弹塑性关系,不产生应变硬化或软化,土体的屈服准则采用摩尔—库仑(Mohr—Coulomb)模型。在模型中从上至下概化出 3 种材料,即碎块石土、风化卸荷带及中风化粉砂质泥岩。

为了更好地反映风化卸荷带内的外倾结构面和基岩层状结构,在计算模型中岩层面和结构面采用无厚度的 Goodman 界面单元。为了充分反映滑体的分层特征,选择遍布节理模型作为滑动体的本构模型。基岩按照岩层优势产状和不等岩层厚度进行划分,风化卸荷带内加入外倾结构面,计算模型如图 5 所示。

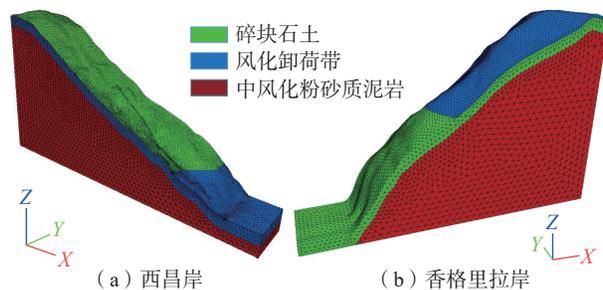


图 5 计算模型分层划分和单元划分

Fig. 5 Calculation model and unit division

### 2.3 基于地质强度指标(geological strength index, GSI)的计算参数选取

土体的物理力学参数通过原位试验获取,岩体抗剪强度指标均采用 Hoek-Brown 准则,通过 Roclab 软件计算得到。根据  $GSI$  考虑的 2 个主要因素岩体结构类型和结构面特征以及勘探钻孔岩性特征,风化卸荷带属于镶嵌结构,结构面差,强风化, $GSI$  取值为 40;中风化粉砂质泥岩岩体结构属于块状结构,结构面好,粗糙微风化, $GSI$  取值为 65。完整岩块的单轴抗压强度,风化卸

荷带岩层取 9 MPa, 中风化岩层取 20 MPa, 粉砂质泥岩与砂岩互层对应的  $mi=10$ ,  $mi$  是  $GSI$  的表达式中的经验参数, 是组成岩体的完整岩块的 Hoek-Brown 准则常数, 在 RocLab 软件中, 该值与岩石的种类有关, 还可以考虑岩体结构进行取值。计算得出岩体的内摩擦角和黏聚力, 参数取值如表 1 所示。

表 1 岩土体的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil

区域	弹模 /MPa	泊松比	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)		容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	
			天然	暴雨	天然	暴雨	天然	暴雨
碎块石土	60	0.32	15	13	27.0	24.0	20.0	21.0
卸荷带	300	0.28	120	108	42.2	38.0	24.0	25.0
中风化岩	800	0.27	507	456	49.9	44.9	26.5	27.0

### 2.4 峰值地震加速度及放大系数

本文分别在西昌岸和香格里拉岸坡体内由坡表至坡内, 由坡顶至坡脚, 各选取 15 个点作为地震加速度的监测点, 采用的模型与监测点布置如图 6 所示。

在两岸坡底面输入地震波, 即水平方向地震时程, 如图 7 所示, 该地震波峰值水平加速度为 7.192 m/s<sup>2</sup>, 时长 70 s, 并全程记录各监测点的水平加速度响应时程曲线, 获得各点的峰值地震水平加速度, 认为其表征整个地震过程中各监测点变形最强烈的状态。将各点的峰值地震水平加速度与地震波的峰值水平加速度的比值定义为该点的加速度放大系数 ( $\xi$ ), 每个监测点的模拟计算结果如图 8 和表 2 所示。

数值计算结果表明, 西昌岸坡和香格里拉岸坡的各监测点均遵循不同深度下的峰值地震水平加速度及  $\xi$  地表最大, 随着深度的增大而减少。这表明地震作用对坡体表层的稳定性影响最为强烈, 向坡体深部地震作用影响逐渐递减, 递减速度减缓并趋于稳定。

西昌岸坡表的监测点 2、3、4 和 5 的峰值地震水平加速度及  $\xi$  由坡顶至坡脚随高程的降低而逐渐递减, 直至坡脚的监测点 1 值又突增。这表明相对顺直的坡表高程越高的位置受地震作用影响越大, 具有更大的地震放大效应, 坡脚也相较于其周围坡表位置受更大的影响。西昌岸放大系数在 1.53 ~ 3.69。

香格里拉岸坡表的监测点 2 的高程高于监测点 3, 峰值加速度及  $\xi$  也大于监测点 3, 与西昌岸结论相吻合。坡表监测点 4 的峰值加速度 15.963 m/s<sup>2</sup>, 监测点 5 的峰值加速度为 43.467 m/s<sup>2</sup>, 这 2 个点的峰值加速度骤增, 表明在地貌形态如监测点 4、5 的突出部位, 地震放大效应更为明显。特别是监测点 5, 位于近似“三角

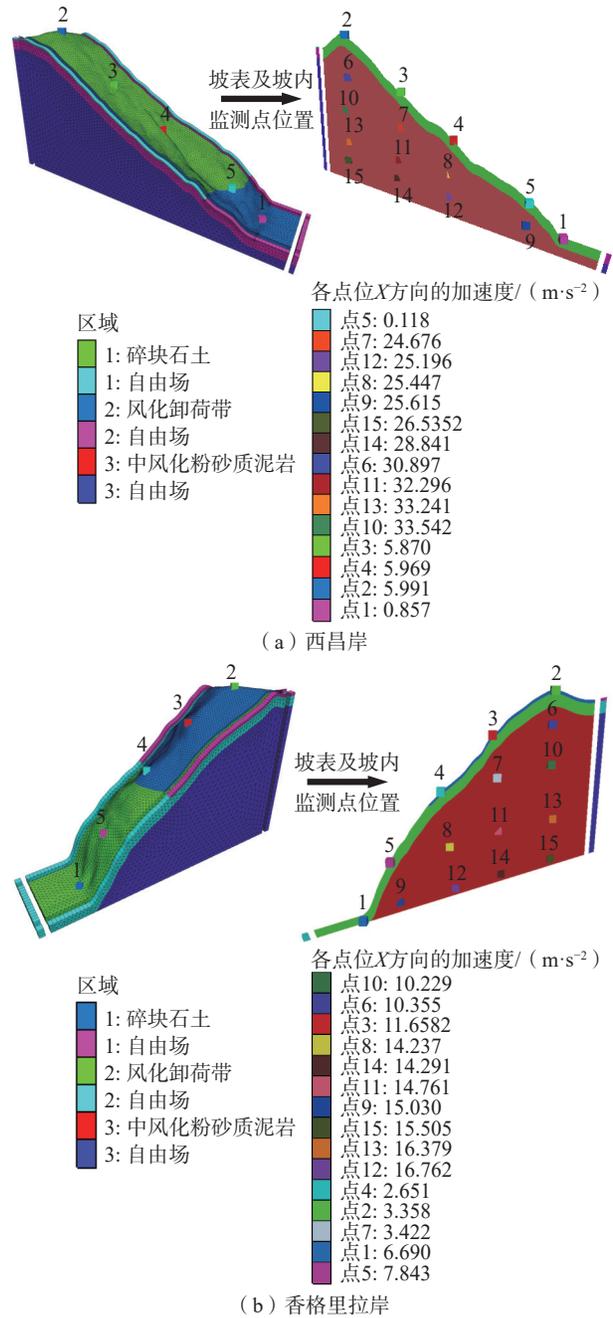


图 6 计算模型与监测点位置

Fig. 6 Calculation model and monitoring point location

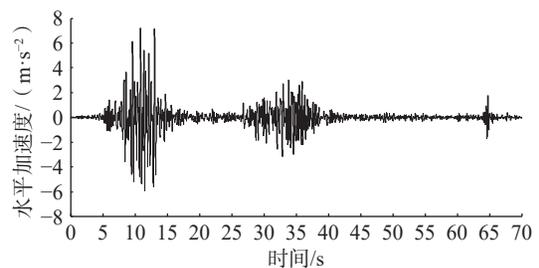


图 7 水平方向地震动时程

Fig. 7 Time history of horizontal ground motion

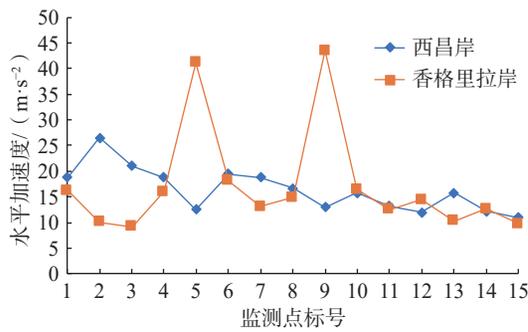


图 8 监测点峰值地震水平加速度折线图

Fig. 8 Peak seismic horizontal acceleration at monitoring points

表 2 监测点峰值地震水平加速度和放大系数( $\xi$ )

Table 2 Peak seismic horizontal acceleration and amplification factor of monitoring points

编号	西昌岸		香格里拉岸	
	峰值地震水平加速度	$\xi$	峰值地震水平加速度	$\xi$
1	18.779	2.61	16.249	2.26
2	26.536	3.69	19.068	1.40
3	21.003	2.92	14.210	1.28
4	18.763	2.61	15.963	2.22
5	12.581	1.75	43.467	6.04
6	19.471	2.71	18.124	2.52
7	18.848	2.61	13.097	1.82
8	16.650	2.32	14.919	2.07
9	12.434	1.80	41.169	5.72
10	15.802	2.20	16.488	2.29
11	13.193	1.83	12.499	1.74
12	11.940	1.66	14.474	2.01
13	15.797	2.20	10.257	1.43
14	12.253	1.70	12.484	1.76
15	10.975	1.53	9.688	1.35

形”山脊前缘,坡体三面临空,放大效应更为显著,放大系数高达 6.04。

分析两岸坡共 30 个监测点的地震水平加速度时程曲线,结果表明坡表坡度的变化率对该点处的  $\xi$ ,特别是加速度峰值有极大的影响。以位于西昌岸和香格里拉岸的高程相近且均位于边坡中下部,坡表坡度变化率不同的 2 个监测点 5 为例,其地震水平加速度时程曲线如图 9 和图 10 所示。其中西昌岸监测点 5 所在坡表坡度变化率更小,坡面更为顺直,其加速度时程曲线可见,在地震时域范围内水平加速度在绝大部分波段里的极大值都保持在  $5.5 \sim 6.5 \text{ m/s}^2$ ,波动较大的几次极大值达到  $10 \text{ m/s}^2$ ,峰值加速度为  $12.581 \text{ m/s}^2$ ,未超出绝大部分波段的极大值太多,整体较为均衡。香格里拉岸监测点 5 所处地貌起伏大的突出部位,坡表坡度变化率大。由其加速度时程曲线可以发现,在监测时域范围内水平加速度在绝大部分时间里的峰值也保持在  $6 \sim 7.5 \text{ m/s}^2$ ,但峰值加速度却达到了  $43.467 \text{ m/s}^2$ ,这表明坡

度变化率大且地貌突出的坡面处,加速度的放大效应表现出更加放大全过程中的峰值的特点。

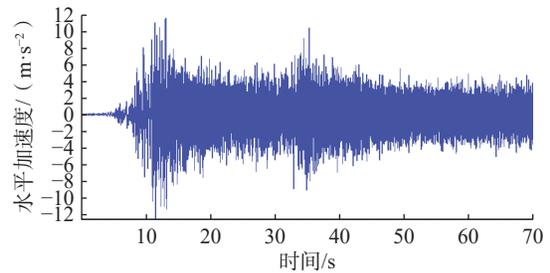


图 9 西昌岸监测点 5 地震水平加速度时程曲线

Fig. 9 Seismic horizontal acceleration time history curve of monitoring point 5 on Xichang bank

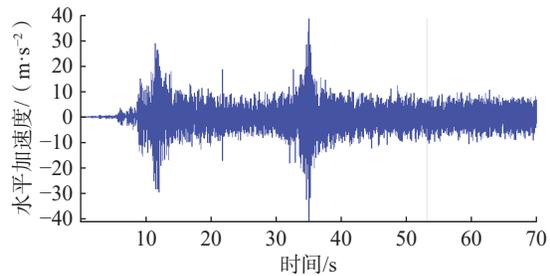


图 10 香格里拉岸监测点 5 地震水平加速度时程曲线

Fig. 10 Seismic horizontal acceleration time history curve of monitoring point 5 on Xianggelila bank

### 2.5 放大系数( $\xi$ )的修正

桥址区位于川滇菱形块体内,属于强烈活动构造和地震活动区,地震波由西昌出发,向香格里拉传播。西昌岸边坡坡向与地震波的传播方向一致为背坡,香格里拉岸边坡坡向与地震波的传播方向相反为向坡。相关学者研究揭示了地震背坡效应,即背坡的地震动放大效应高于向坡,且背坡地震崩塌和滑坡灾害发育密度高于向坡。地震动力时程模拟时将地震波加载在模型底部,而无法考虑背坡效应,因此在实际应用时须将放大系数按照背坡与向坡的不同进行相应修正。

## 3 强震动力响应下边坡稳定性分析

### 3.1 强震动力响应下边坡失稳破坏模式

西昌岸有大面积碎块石覆盖层分布,斜坡主要呈“土层-基岩二元结构”,断面如图 11 所示。由于在主墩附近至隧道锚附近之间存在大面积崩坡积碎块石土层,坡面有明显的两处突出部位且岩土分界面较为顺直主墩上部的大范围覆盖层无明显的抗滑段,在自然条件下基本稳定,但在强震条件下存在很大的稳定性问题,失稳模式主要为主墩附近至隧道锚附近的覆盖层滑移失稳。

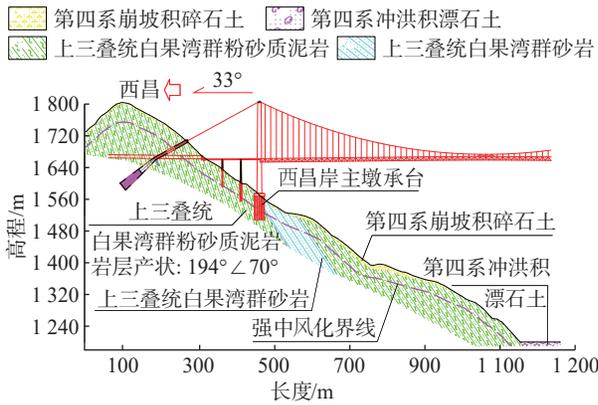


图 11 西昌岸地质及桥梁剖面图

Fig. 11 Geological and bridge profile of Xichang bank

香格里拉岸覆盖层较薄, 有大范围的基岩裸露, 且风化卸荷带的厚度相当大, 属典型的“土层及风化卸荷带—基岩二元结构”, 断面如图 12 所示。香格里拉岸风化卸荷极为强烈, 陡坡段风化卸荷带深度在 25 m 以上, 且风化卸荷带岩体变形强烈, 重力及降雨作用下表层岩体失稳问题突出, 尤其是强震条件下, 风化卸荷带岩体极易失稳。边坡坡脚上部高差 200 m 范围内陡缓变坡点下方及两侧地震诱发斜坡失稳问题将非常突出, 失稳区厚度至少在 10 m 以上。失稳模式为主墩附近至坡顶的覆盖层滑移失稳和风化卸荷带岩体失稳。

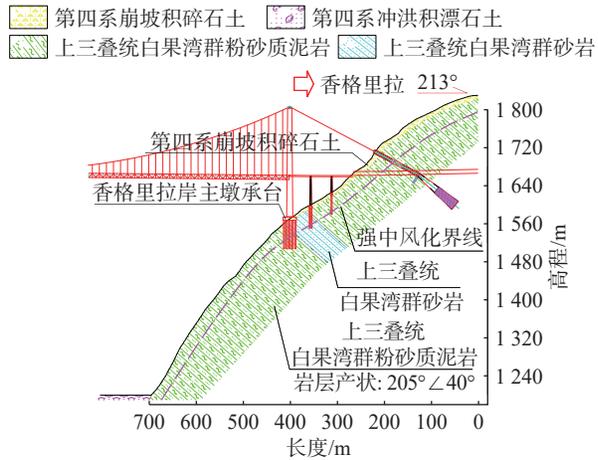


图 12 香格里拉岸地质及桥梁剖面图

Fig. 12 Geological and bridge profile of Xianggelila bank

### 3.2 数值分析计算工况

三维数值模拟计算分为天然、暴雨和地震 3 种工况进行, 其中地震工况分为 E1 和 E2, 根据前文计算得到的坡体各点修正放大系数( $\xi$ ), 分别与 E1 的  $PGA=0.244 \text{ gm/s}^2$  和 E2 的  $PGA=0.429 \text{ gm/s}^2$  的乘积作为坡体内各点水平加速度, 施加此加速度计算两水准抗震设防下边坡稳定性及安全系数。

### 3.3 考虑强震动力响应下数值计算结果分析

考虑动力时程分析法得到的修正放大系数, 采用拟静力法计算模拟强震动力响应下岸坡在 E1 和 E2 两水准抗震设防下地震边坡稳定性。

#### 3.3.1 地震作用下边坡变形及应力分布规律

##### 3.3.1.1 最大/小主应力结果分析

由两岸边坡 E1 和 E2 地震工况最小主应力和最大主应力云图可得: 最大主应力和最小主应力均分布均匀, 等值线平滑, 无畸变点, 随深度增大量值不断增大, 表明两岸坡体内均未出现应力集中。

##### 3.3.1.2 坡体变形结果分析

图 13—16 分别为地震 E1 工况和 E2 工况下两岸边坡坡体弹性阶段变形等值线云图, 结果表明:

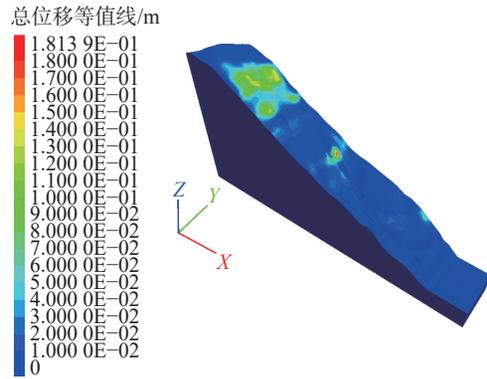


图 13 西昌岸 E1 地震工况总位移图

Fig. 13 Total displacement diagram of Xichang bank under E1 earthquake condition

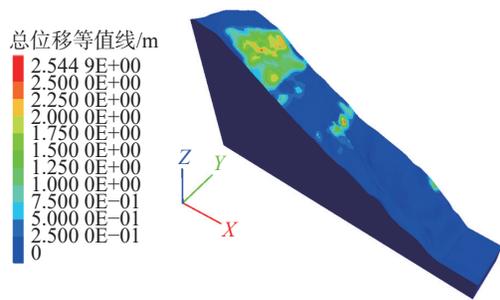


图 14 西昌岸 E2 地震工况总位移图

Fig. 14 Total displacement diagram of Xichang bank under E2 earthquake condition

(1) 两岸坡体最大位移量均位于坡体后缘表层碎块土石中, E2 工况下的失稳范围及位移量均大于 E1 工况, 表现出在强震下覆盖层向临空面方向滑移变形的特征, 失稳从地震动力响应更为强烈的坡体后缘开始启动。

(2) 西昌岸边坡最大位移量在 E1 工况达 18.1 cm, 在 E2 工况达 2.5 m; 香格里拉岸边坡最大位移量在

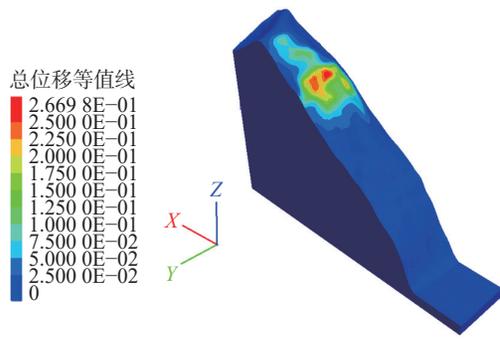


图 15 香格里拉岸 E1 地震工况总位移图

Fig. 15 Total displacement diagram of Xianggelila bank under E1 earthquake condition

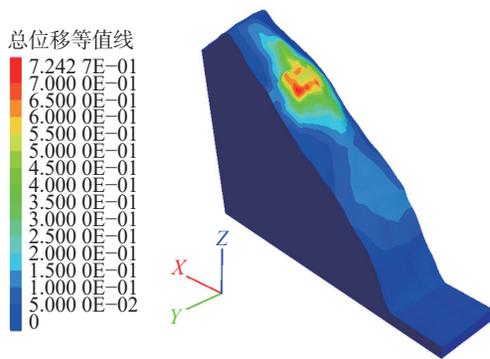


图 16 香格里拉岸 E2 地震工况总位移图

Fig. 16 Total displacement diagram of Xianggelila bank under E2 earthquake condition

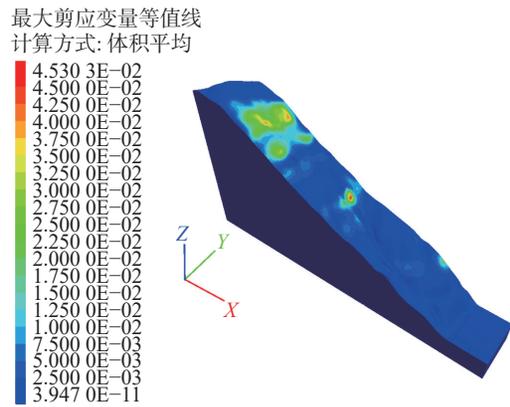
E1 工况达 26.7 cm, 在 E2 工况达 72.4 cm, 表明类似西昌岸这种大范围分布碎块石土覆盖层的稳定性在 E2 强震下的地震动力响应更为敏感, 更易快速崩解失稳; 类似香格里拉岸拥有突出地形的覆盖层在 E1 工况下将产生较大位移量。

(3) 西昌岸失稳模式整体呈现出“土层—基岩二元结构”在强震下覆盖层沿岩土分界面滑移失稳。在 E2 强震下香格里拉岸山脊前缘, 坡体三面临空的风化卸荷带内出现变形, 最大位移量 15 ~ 20 cm, 说明在强震下地貌突出、卸荷裂隙发育强烈的风化碎裂岩体仍有很大失稳可能, 失稳模式呈现出“土层风化卸荷带—基岩二元结构”在强震下向临空面方向变形特征, 均与理论分析相吻合。

### 3.3.1.3 折减至极限状态下剪应变增量结果分析

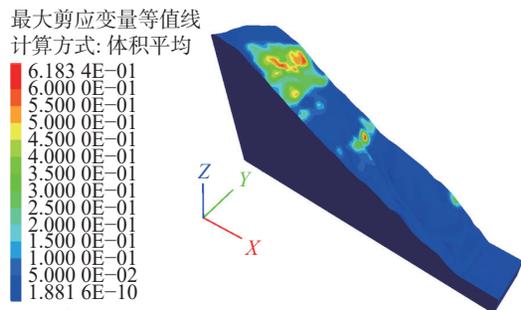
本文采用计算不收敛判据计算得到折减至极限状态的两岸坡体在 E1 和 E2 地震工况下的剪应变增量及稳定系数, 剪应变增量带是否贯通可作为判断整体是否稳定的重要判据, 如图 17—20 所示, 结果表明:

(1) 西昌岸边坡地面高程 1 540 ~ 1 590 m 和 1 690 ~ 1 720 m 以及香格里拉岸边坡地面高程 1 630 ~ 1 790 m



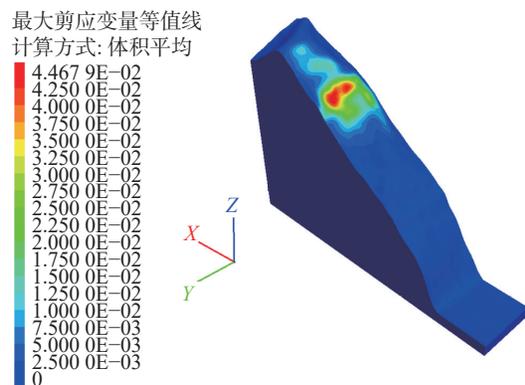
稳定系数值=1.13

图 17 西昌岸 E1 地震工况折减至极限状态的剪应变增量  
Fig. 17 Shear strain increment of Xichang bank under E1 earthquake condition



稳定系数值=0.97

图 18 西昌岸 E2 地震工况折减至极限状态的剪应变增量  
Fig. 18 Shear strain increment of Xichang bank under E2 earthquake condition



稳定系数值=1.06

图 19 香格里拉岸 E1 工况折减至极限状态剪应变增量  
Fig. 19 Shear strain increment and stability coefficient of Xianggelila bank under E1 earthquake condition

的边坡坡表的覆盖层发生滑移失稳, 并有转化为碎屑流的风险。两岸主墩承台均位于高程约 1 569 m 的位置, 说明西昌岸易滑区域范围位于主墩承台的上下范围内高差 20 ~ 30 m 的位置, 且顶部也有易滑区域, 高差约 120 m 的范围; 香格里拉岸易滑区域位于主墩承台的上

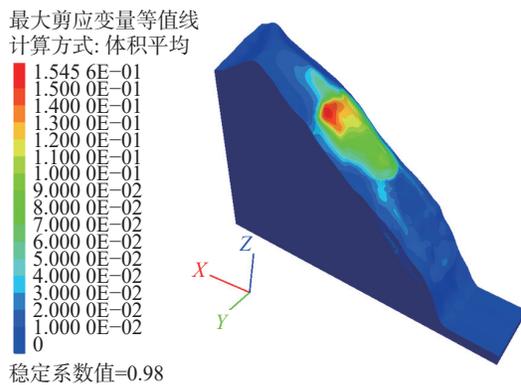


图 20 香格里拉岸 E2 工况折减至极限状态的剪应变增量

Fig. 20 Shear strain increment and stability coefficient of Xianggelila bank under E2 earthquake condition

部, 约有高差 60 m 的范围内。若发生碎屑流或表层土体滑移, 滑移体将对主墩造成严重的毁灭性危害, 对桥梁安全造成极大威胁。

(2) 在 E2 强震下两岸坡体均失稳。

(3) 在 E2 强震下香格里拉岸坡体三面临空的风化卸荷带内出现剪应变增量带, 虽未贯通但有扩大并持续发展的趋势, 说明在强震下地貌突出的风化卸荷变形区岩体地震响应更强烈, 有极大失稳风险。

### 3.3.2 边坡稳定性数值计算结果

本文计算得到了考虑修正放大系数下的天然、暴雨、E1 和 E2 地震工况下的两岸边坡稳定系数, 不同工况下边坡的稳定状态如表 3 所示, 结果表明即便在天然和暴雨工况下稳定的、甚至具有极高的长期稳定性的高陡边坡, 如果坡体内存在较厚的风化卸荷带亦或者是地貌突出、坡面不顺直, 在强震下坡体有极大的失稳可能。计算结果与桥梁结构两水准抗震设防相对应的边坡稳定性计算结果有较大差异, 进一步说明了进行抗震两水准计算的必要性。

表 3 考虑修正放大系数下不同工况边坡  $F_s$  及稳定状态

Table 3  $F_s$  and stable state of various conditions with considering the correction amplification factor

岸坡	天然工况		暴雨工况		E1地震		E2地震	
	$F_s$	状态	$F_s$	状态	$F_s$	状态	$F_s$	状态
西昌	1.35	稳定	1.26	稳定	1.13	稳定	0.97	失稳
香格里拉	1.26	稳定	1.12	稳定	1.06	基本稳定	0.98	失稳

同时, 本文计算得到了未考虑修正放大系数的 E1 和 E2 地震工况下的两岸边坡稳定系数(表 4), 与考虑修正放大系数结果作为对比。结果表明: 未考虑修正放大系数的地震工况计算结果偏于不安全,  $F_s$  的计算结果减少了 2%~6%, 会导致边坡稳定状态判断结果产生

变化, 并且对不规则地形岸坡的影响明显大于坡面顺直岸坡的。也进一步证明了在实际工程的地震稳定性分析中采用本文修正的拟静力法的必要性。

表 4 未考虑修正放大系数下地震工况的  $F_s$  及稳定状态

Table 4  $F_s$  and stable state of seismic conditions without considering the correction amplification factor

岸坡	E1地震		E2地震	
	$F_s$	状态	$F_s$	状态
西昌	1.15	稳定	0.99	失稳
香格里拉	1.11	稳定	1.04	欠稳定

## 4 边坡防护措施建议

(1) 西昌岸边坡在极端工况下有发生浅层滑移失稳、碎屑流等地质灾害的可能, 桥梁基坑开挖将诱发上部坡体覆盖层沿基覆界面发生滑移变形, 故建议以预加固措施为主, 在主墩承台内侧设置桩板墙, 并对桩顶以上及主墩承台以下范围内斜坡采用预应力锚杆+挂网喷砼等措施对潜在失稳坡体进行整体封闭锚固, 并结合疏排结构进行综合处治。

(2) 香格里拉岸边坡在极端工况下有发生覆盖层或基岩风化卸荷带浅层滑移的可能, 且易转化为碎屑流灾害, 桥梁基坑开挖易诱发滑移变形, 故建议采用抗滑桩+桩板墙+坡面锚固+多级拱形抗滑桩排挡结构等锚固+疏排措施进行综合处治。

## 5 结论

(1) 高烈度深切峡谷地区地震活动相当强烈, 必须进行地震安全性评价。针对大跨径桥梁高陡岸坡, 应采用与桥梁结构两水准抗震设防相适应的 E1 和 E2 地震作用下的边坡稳定性分析方法, 即通过基岩面地震危险性概率分析分别得到 E1 和 E2 地震下设计峰值加速度(PGA)并应用于稳定性分析中。

(2) 采用动力时程分析方法确定各岸坡各点的峰值地震加速度及修正放大系数并施加至坡体内, 采用拟静力法计算两水准地震工况下边坡稳定性, 建立一套考虑地震波波动和地表坡度变化且能求得稳定系数的边坡稳定性分析方法。计算结果表明: 坡面顺直的边坡遵循峰值地震水平加速度及放大系数地表最大, 随着坡体深度的增大而递减, 且递减速度减缓并趋于稳定的规律。坡脚的地震响应较其周围更为强烈。坡面不顺直的边坡, 地表坡度的变化率对该点处的峰值地震水平加速度及放大系数影响极大, 坡度变化率大且地貌突出部位的地震响应极为强烈。放大效应更加放大地震全过

程中的震动峰值。

(3) 通过建立含卸荷裂隙单元的复杂三维坡体结构模型对两岸边坡多工况进行稳定性分析,重点分析地震作用下边坡变形及应力分布规律,结果表明坡体内越是地震放大效应明显,地震动力响应强烈的部位越是容易失稳。大范围分布的碎块石土覆盖层、变坡率的地貌突出的浅表层、风化卸荷带内的表层风化碎裂岩体均属于此,极易在地震作用下产生变形,应当加强防护。

(4) 未考虑修正放大系数结果与考虑修正放大系数结果作为对比。结果表明,未考虑修正放大系数的地震工况计算结果偏于不安全, $F_s$  的计算结果减少了 2%~6%,会导致边坡稳定状态判断结果产生变化,并且对不规则地形岸坡的影响明显大于坡面顺直岸坡。

#### 参考文献(References):

- [1] 彭建兵,崔鹏,庄建琦.川藏铁路对工程地质提出的挑战[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):2377-2389. [PENG Jianbing, CUI Peng, ZHUANG Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan—Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2377-2389. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 袁进科,陈杰.汶川地震公路边坡灾害分析及震后边坡灾害发育特点[J].公路,2020,65(5):26-33. [YUAN Jinke, CHEN Jie. Analysis of highway slope disaster in Wenchuan earthquake and its development characteristics after earthquake[J]. Highway, 2020, 65(5): 26-33. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张伯艳,王璨,李德玉,等.地震作用下水利水电工程边坡稳定分析研究进展[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(3):168-178. [ZHANG Boyan, WANG Can, LI Deyu, et al. The research progress on seismic stability analysis of slopes in water conservancy and hydropower projects[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(3): 168-178. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 郭延辉,杨溢,高才坤,等.云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(6):30-37. [GUO Yanhui, YANG Yi, GAO Caikun, et al. Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyuan dammed lake in Ludian Earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 30-37. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 胡爱国,周伟.地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(1):27-34. [HU Aiguo, ZHOU Wei. Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluvion landslide under earthquake and heavy rainfall[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 27-34. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 周洪福,冯治国,石胜伟,等.川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价[J].水文地质工程地质,2021,48(5):112-119. [ZHOU Hongfu, FENG Zhiguo, SHI Shengwei, et al. Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan—Tibet Railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 112-119. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘天翔,杜兆萌,程强,等.红层软岩高边坡的时效变形特性[J].科学技术与工程,2020,20(27):11315-11322. [LIU Tianxiang, DU Zhaomeng, CHENG Qiang, et al. Time-dependent deformation characteristics of high slope in red layer soft rock[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11315-11322. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈廷君,肖世国,程强,等.泸定大渡河桥康定岸重力锚边坡长期变形与稳定性分析[J].工程地质学报,2019,27(3):632-639. [CHEN Tingjun, XIAO Shiguo, CHENG Qiang, et al. Long-term deformation and stability analysis of gravity anchorage slope on Kangding bank of Dadu River bridge in Luding[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 632-639. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 郭鸿俊,姜清辉,孙金山.大岗山水电站右岸高边坡加固方案优化研究[J].人民长江,2012,43(15):16-19. [GUO Hongjun, JIANG Qinghui, SUN Jinshan. Optimization for reinforcement plan of right-bank high slope of Dagangshan Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2012, 43(15): 16-19. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张泽鹏,朱凤贤,黄放军,等.复杂地质条件下高边坡加固设计与综合治理研究——以梅河高速公路某高边坡治理为例[J].中山大学学报(自然科学版),2006,45(4):44-48. [ZHANG Zepeng, ZHU Fengxian, HUANG Fangjun, et al. Research on reinforcement design and comprehensive improvement for high slopes under complicated geological conditions[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2006, 45(4): 44-48. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张江伟,李小军.地震作用下边坡稳定性分析方法[J].地震学报,2015,37(1):180-191. [ZHANG Jiangwei, LI Xiaojun. A review on the stability analysis methods of slope under seismic loading[J]. Acta Seismologica Sinica, 2015, 37(1): 180-191. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 崔玉龙,刘爱娟.区域边坡地震危险性评价理论研究进展[J].地震工程学报,2022,44(3):518-526. [CUI

- Yulong, LIU Aijuan. Advances in the theory of seismic hazard assessment of regional slopes [ J ]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 518 - 526. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 李亮, 褚雪松, 庞峰, 等. 地震边坡稳定性分析的拟静力方法适用性探讨 [ J ]. 世界地震工程, 2012, 28(2): 57 - 63. [ LI Liang, CHU Xuesong, PANG Feng, et al. Discussion on suitability of pseudo-static method in seismic slope stability analysis [ J ]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(2): 57 - 63. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 郑颖人, 叶海林, 肖强, 等. 基于全动力分析法的地震边坡与隧道稳定性分析 [ J ]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增刊1): 279 - 285. [ ZHENG Yingren, YE Hailin, XIAO Qiang, et al. Stability analysis of earthquake slope and tunnel based on full dynamic analysis method [ J ]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(Sup 1): 279 - 285. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 张迎宾, 柳静, 唐云波, 等. 考虑边坡地形效应的地震动力响应分析 [ J ]. 地震工程学报, 2021, 43(1): 142 - 153. [ ZHANG Yingbin, LIU Jing, TANG Yunbo, et al. Dynamic response analysis of seismic slopes considering topographic effect [ J ]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(1): 142 - 153. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 王来贵, 向丽, 赵娜, 等. 地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 18 - 25. [ WANG Laigui, XIANG Li, ZHAO Na, et al. Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 18 - 25. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 林峻岑, 严松宏, 孙纬宇, 等. 三向地震作用下错距岩质边坡共振特性研究 [ J ]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 95 - 102. [ LIN Juncen, YAN Songhong, SUN Weiyu, et al. A study of the resonance characteristics of a staggered rock slope under the tri-dimension earthquake wave [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 95 - 102. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 李郑梁, 李建春, 刘波, 等. 浅切割的高山峡谷复杂地形的地震动放大效应研究 [ J ]. 工程地质学报, 2021, 29(1): 137 - 150. [ LI Zhengliang, LI Jianchun, LIU Bo, et al. Seismic motion amplification effect of shallow-cutting hill-canyon composite topography [ J ]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1): 137 - 150. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 孙强强, 薄景山, 孙有为, 等. 隧道结构地震反应分析研究现状 [ J ]. 世界地震工程, 2016, 32(2): 159 - 169. [ SUN Qiangqiang, BO Jingshan, SUN Youwei, et al. A state-of-the-art review of seismic response analysis of tunnels [ J ]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(2): 159 - 169. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 邓鹏. 单体边坡地形的地震动力响应及其放大效应的数值分析 [ J ]. 地震学报, 2020, 42(3): 349 - 361. [ DENG Peng. Numerical parametric study of seismic dynamic response and amplification effects of slope topography [ J ]. Acta Seismologica Sinica, 2020, 42(3): 349 - 361. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 门妮, 孙有为, 薄景山, 等. 地震作用下边坡动力响应及影响因素研究 [ J ]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 110 - 120. [ MEN Ni, SUN Youwei, BO Jingshan, et al. Study on dynamic response and influence factors of slope under earthquake [ J ]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 110 - 120. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 张江伟, 周爱红, 迟明杰, 等. 边坡地震响应数值模拟中最优边界范围研究 [ J ]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 34 - 41. [ ZHANG Jiangwei, ZHOU Aihong, CHI Mingjie, et al. Research on boundary range in seismic response simulation of slope [ J ]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 34 - 41. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 等. 边坡地震稳定性分析探讨 [ J ]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 173 - 180. [ ZHENG Yingren, YE Hailin, HUANG Runqiu, et al. Study on the seismic stability analysis of a slope [ J ]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 173 - 180. (in Chinese with English abstract) ]