

# 乌长高速金旗特大桥高陡岸坡稳定性分析研究

王浩

(中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043)

**摘要:**贵州省乌长高速公路金旗特大桥跨越猫跳河,两岸岸坡危岩体及崩塌堆积体等不良地质条件较发育,严重影响桥梁选址及其安全。为研究该桥高陡岸坡的稳定性,该文通过空天地一体化综合勘察,查明了桥址区主要不良地质条件。结合数值分析及InSAR等技术手段,定量表征了岸坡危岩体的运动威胁范围,阐明了岸坡堆积体在内外动力作用下的稳定性及变形失稳模式。结果表明:① 桥址区不良地质主要表现为陡崖卸荷带、危岩体和崩塌堆积体,危岩体的失稳破坏模式为拉裂-倾倒式;② W1、W3和W4危岩体失稳后的运动距离分别为65 m、57 m和320 m,影响乌当岸桥台和长顺岸桥墩;③ 乌当岸坡堆积体在天然、降雨、降雨+地震3种工况下均处于稳定状态;长顺岸坡堆积体在天然和降雨条件下较稳定,在降雨+地震工况下上部堆积体与基岩接触面处剪切塑性区完全贯通,处于不稳定状态,其失稳破坏模式为蠕滑-拉裂式。该研究结果可为贵州省深切峡谷及陡崖地区桥梁高陡岸坡的综合勘察和稳定性分析提供参考和借鉴。

**关键词:**公路桥梁;稳定性;数值计算;综合勘察;高陡岸坡;危岩体

**中图分类号:**U416.14

**文献标志码:**A

## Stability Analysis of High and Steep Bank Slope of Jinqi Bridge on Wudang-Changshun Expressway

WANG Hao

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China)

**Abstract:** Jinqi Bridge on the Wudang-Changshun Expressway in Guizhou Province crosses the Maotiao River, and the poor geological conditions such as dangerous rock mass and collapse accumulation body on the bank slope of the river are relatively developed, which seriously affects the site selection and safety of the bridge. In order to study the stability of the high and steep bank slope of the bridge, the paper explored the main poor geological conditions in the bridge site through a comprehensive air-ground investigation. By means of numerical analysis, InSAR, and other technologies, the movement range of dangerous rock mass on the bank slope was quantitatively evaluated. The stability and deformation mode of the accumulation body on the bank slope under the action of internal and external dynamics were elucidated. The results show that: ① The poor geological conditions in the bridge site are mainly cliff unloading zone, dangerous rock mass, and collapse accumulation body, and the failure mode of dangerous rock mass is pulling-toppling; ② The movement distance of W1, W2, and W3 dangerous rock mass after failure is about 65 m, 57 m, and 320 m, respectively, which affects the Wudangan abutment and Changshun pier; ③ The accumulation body on the Wudang bank slope is very stable under normal, rainfall, and rainfall + earthquake conditions. The accumulation body on the Changshun bank slope is stable under normal and rainfall conditions. Under the rainfall + earthquake conditions, the shear plastic zone at the contact surface between the upper accumulation body and the bedrock is completely connected, and the accumulation body is in an unstable state. The failure mode is creep-pulling. The research results can provide a reference for comprehensive investigation and

收稿日期:2024-05-18(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(编号:41831290);国家自然科学基金资助项目(编号:42077263)

作者简介:王浩,男,硕士,工程师.E-mail:365312306@qq.com

stability analysis of high and steep bank slopes of bridges in deep canyons and steep cliffs in Guizhou Province.

**Keywords:** highway bridge; stability; numerical calculation; comprehensive investigation; high and steep bank slope; dangerous rock mass

## 0 引言

贵州省乌当至长顺高速公路(以下简称“乌长高速”)上的金旗特大桥为跨越猫跳河上的一座斜拉桥,桥位区属侵蚀溶蚀中山峡谷地貌区。桥梁横跨猫跳河,地形起伏大,猫跳河两岸出露基岩为中风化石灰岩和白云岩,节理裂隙十分发育,地质条件极为复杂,其岸坡的稳定性直接影响桥梁选址和桥梁孔跨的优化布置。

不同于一般边坡,深切峡谷型大跨径桥梁岸坡一般具有坡度陡、高差大、荷载大等特点,在溶蚀作用与卸荷裂隙的控制下,岸坡往往发生局部崩塌、倾倒等现象,且此类岸坡在贵州地区发育普遍。对于该类岸坡的稳定性分析,需要考虑到桥址区的地形地貌、地层岩性、岩体完整度及结构面强度、水文地质条件、地震荷载及工程荷载等<sup>[1-4]</sup>。当前常规岸坡稳定性评价方法主要有定性和定量评价两种<sup>[5]</sup>。定性分析方法主要运用工程地质学理论对岸坡的宏观稳定性做出评价,包括成因历史分析法、工程地质类比法、边坡稳定性图解法等<sup>[6-8]</sup>。定量分析方法以岩土力学为基础,运用刚体极限平衡理论、弹塑性理论<sup>[5]</sup>,结合有限元、离散元等理论对斜坡的安全系数、应力应变以及失稳后的运动堆积过程进行计算,能够定量表征斜坡的整体稳定性和危险性<sup>[2,9-10]</sup>。对于地质条件复杂的特大桥高陡岸坡,传统的勘察和评价方法很难满足其稳定性评价要求,需要结合 InSAR、工程地质类比法、赤平投影图法、理论分析和多种数值模拟手段,针对不同灾害类型和灾害情景开展综合稳定性研究和危险性评估。郭抗美等<sup>[11]</sup>通过电测深法、钻探、波速测试等综合手段获取地质信息,通过赤平投影、毕肖普法、有限元法多种方法对殷家特大桥岸坡进行分析,判断岸坡趋于稳定,并提出了施工开挖治理意见;赵志明等<sup>[12]</sup>基于 Barton 模型和底摩擦试验,研究了岸坡在自然和工程荷载作用下的稳定性,进而采用离散单元法计算分析岸坡岩体在自然、桥基荷载、地震+桥基荷载作用工况条件下的破坏趋势;蔡磊等<sup>[13]</sup>利用赤平投影分析、刚体极限平

衡法和离散元法对贵州拉密河大桥拱座前缘岸坡稳定性及其附加变形进行了研究,表明灰岩岸坡不会因桥梁荷载作用而发生大变形和破坏。除上述综合分析方法外,近年来,模糊综合评价法、模式搜索法、人工神经网络法、可靠度法、复合法等新理论也不断应用于复杂岸坡稳定性分析研究中<sup>[14-15]</sup>。其中,复合法是确定性分析方法的发展方向,不同数值方法相互耦合、取长补短,是将来合理的发展趋势。然而,无论使用何种方法进行岸坡稳定性分析,都应应以工程地质资料为基础,提高工程地质勘察精度,加强对不良地质现象的孕灾背景分析,加之新技术新方法的应用,方能得到可靠的稳定性分析结果。

针对金旗特大桥岸坡坡度陡、高差大、构造多、地层杂以及溶蚀裂隙和卸荷裂隙十分发育等复杂地质条件,本文综合遥感解译、无人机测绘、现场调查和钻探等综合勘察手段对桥址区开展了精细的工程地质调查研究,基于多种数值方法定量评估岸坡危岩体的运动威胁范围及岸坡堆积体的稳定性,期为桥梁工程的选址、设计和施工提供参考。

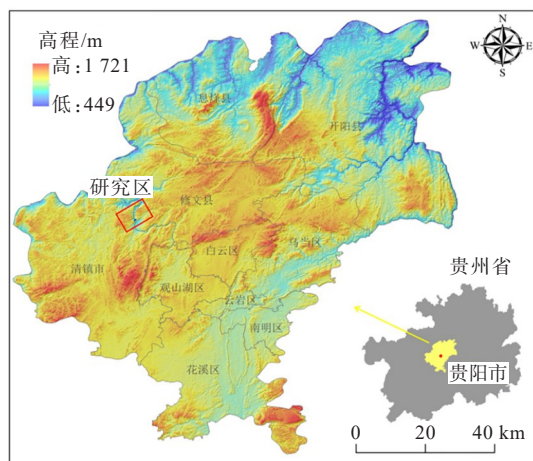
## 1 地质背景

### 1.1 工程概况

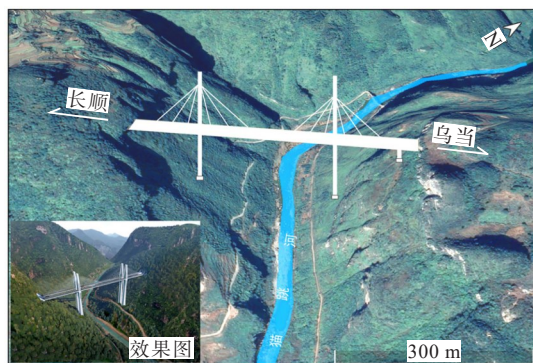
研究区位于贵州省贵阳市修文县和清镇市交接部位[图1(a)],猫跳河为两区的地理分界线。拟建金旗特大桥跨越猫跳河,为贵州省乌长高速公路全线控制性工程,(169+320+169)m双塔双索面双幅钢混组合斜拉桥,下部结构采用空心墩、桩基础,设计高程1154.206~1157.958m,桥梁全长658.0m,荷载等级为公路—I级。桥址区属侵蚀溶蚀中山峡谷地貌区[图1(b)],深切V形峡谷地形,切割深度约430m。桥址区海拔高度895~1230m。河道宽约60m,勘察期间水深0.5~1.5m。桥梁长顺岸桥台位于隧道内部,桥墩位于堆积体正上方。乌当岸桥台位于石灰岩陡崖下部平台,桥墩位于岸坡中下部陡坡。

### 1.2 地层岩性

桥址区地层岩性主要为第四系全新统残坡积( $Q_4^{el+dl}$ )碎石、崩坡积( $Q_4^{col+dl}$ )碎块石夹黏土、块石夹



(a) 研究区所在地理位置



(b) 工程概况

图1 桥址区基本概况

Figure 1 Overview of bridge site

碎石、冲洪积( $Q_4^{al+pl}$ )块石,二叠系下统栖霞组( $P_1q$ )石灰岩、梁山组至栖霞组( $P_1l+q$ )石灰岩夹页岩,石炭系下统摆佐组至大塘组( $C_1b+d$ )石灰岩、铁铝岩,寒武系中上统娄山关群( $\epsilon_{2-3ls}$ )石灰岩、白云岩,寒武系中统石冷水组( $\epsilon_{2s}$ )白云岩。其中,对桥梁建设影响较大的地层分述如下:

第四系全新统:① 碎块石夹黏土( $Q_4^{col+dl}$ ),碎石含量55%~60%,碎石母岩成分为石灰岩、白云岩,主要分布于乌当岸桥台、柱墩位置,钻孔揭示的最大层厚9.6 m;② 块石夹碎石( $Q_4^{col+dl}$ )主要分布于长顺岸桥台、柱墩位置,钻孔揭示的最大层厚51.3 m。

二叠系下统:① 栖霞组( $P_1q$ ),中风化石灰岩,中厚层至巨厚层层状构造,节理裂隙发育,岩体较完整;② 梁山组至栖霞组( $P_1l+q$ ),中风化石灰岩夹页岩,中厚层至巨厚层层状构造,节理裂隙发育,岩体较完整;页岩呈薄层状构造,节理裂隙发育,力学性质较差。

石炭系下统摆佐组至大塘组( $C_1b+d$ ):薄层状,节理裂隙发育,岩体较完整,主要分布于乌当岸桥台、长顺岸桥台与隧道进口,钻孔揭示层厚12.5 m。

寒武系上中统娄山关群( $\epsilon_{2-3ls}$ ):中风化石灰岩,中厚层至巨厚层层状构造,节理裂隙发育,岩体较完整。

### 1.3 地质构造与地震

根据资料收集及现场调查,桥位区主要受谷堡区域断层( $F_6$ )及 $F_1$ 断层影响[图2(a)],两条断层之间次级断层发育,整体呈北东向,岩层产状变化较大,岩体切割严重<sup>[16]</sup>。断裂性质及特征详述如下:

谷堡断层:位于桥位北侧,走向约 $NE75^\circ$ ,微向北突出弧形弯曲,长约30 km,倾角约 $60^\circ$ ,局部直立。该断层性质为压扭性逆断层,两盘发育羽状次级断裂及纵向次级张型断层,其中 $F_2\sim F_5$ 即为谷堡断层的次级断层。

$F_1$ 断层:走向为北东向,产状 $144^\circ\angle 52^\circ$ ,长度约10 km,两侧分别被坛罐窑断层和谷堡断层所截断。该断层性质为正断层,在小里程(乌当岸)可见断层面和断层破碎带[图2(b)],猫跳河谷底寒武系地层受断层影响褶曲较发育[图2(c)]。 $F_2\sim F_5$ 断层均为压扭性断层,是东西向构造在左行扭动挤压过程中形成的次级错断,典型断层现象见图2(d)、(e)。

综上所述,金旗特大桥位于谷堡断层和 $F_1$ 断层夹裹的狭窄区域,区域内发现的 $F_2\sim F_5$ 均为次生断层,因此本次选线在 $F_3$ 断层和 $F_4$ 断层之间的相对稳定地段架设桥梁通过,很大程度上绕避了断层及其引起的次生地质灾害对工程的影响。

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)<sup>[17]</sup>,在50年超越概率10%水平下,场区地震动反应谱特征周期为0.35 s,地震动峰值加速度为0.05g,场区地震基本烈度为VI度。

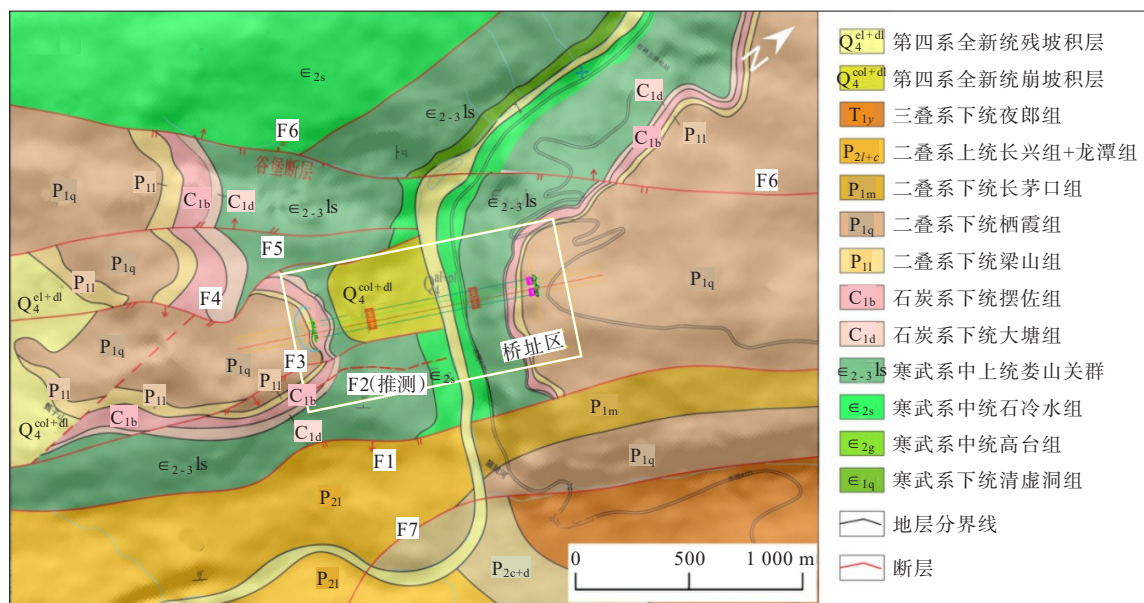
## 2 岸坡主要不良地质条件

在对桥址区地质背景认识的基础上,通过遥感解译、无人机测绘、地面调查和钻探,查明了桥址区的不良地质主要为陡崖卸荷带、危岩体以及岸坡崩塌堆积体[图3(a)、图4(a)]。

### 2.1 乌当岸不良地质条件

乌当岸陡崖总体走向约 $305^\circ$ ,距离陡崖50 m范围内卸荷裂隙较发育[图3(a)~(c)]。其中,距离陡





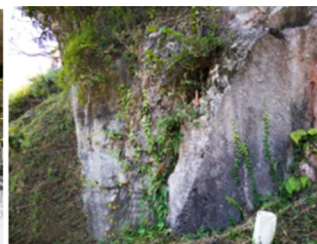
(a) 地质平面图



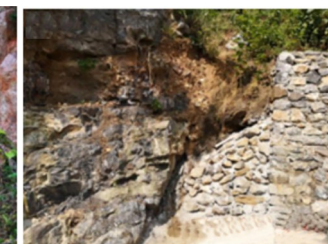
(b) F1断层面



(c) 下部褶曲



(d) F3断层面



(e) F4断层露头

图2 桥址区地质概况

Figure 2 Geological conditions of bridge site

崖面 20 m 范围内卸荷裂隙张开度一般 0.05~0.80 m, 为陡崖强卸荷带。距离陡崖面 20~50 m 范围内卸荷裂隙张开度一般 0.05~0.30 m, 为陡崖弱卸荷带。卸荷带内裂隙产状主要有两组, 一组近平行于陡崖临空面, 一组近垂直于陡崖临空面[图 3(d)]。乌当岸卸荷带整体上属基本稳定~欠稳定, 施工时建议采用锚固+灌浆封闭等措施对其进行综合治理。

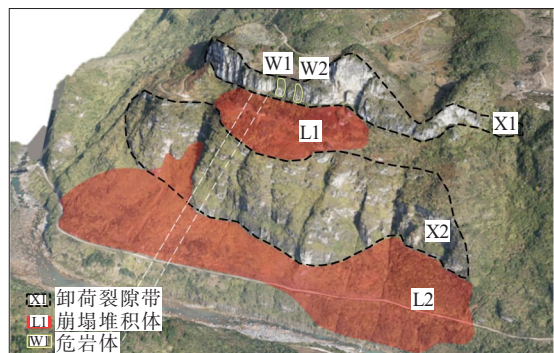
通过无人机贴近摄影方法解译, 乌当岸桥台上方发育危岩体 W1 和 W2, 规模分别为 10.0 m×3.0 m×24.0 m、12.0 m×3.0 m×24.0 m, 两处体积共计约 1 300 m<sup>3</sup>[图 3(e)]。W1 和 W2 危岩体均由近直立的卸荷(或断层牵引)裂隙切割形成, 纵深较小, 在地震条件下底部岩桥易发生断裂, 发生整体倾倒。此外, 乌当岸坡存在两处崩塌堆积体 L1 和 L2[图 3(a)], 堆积体岩性为第四系全新统碎块石夹黏土[图 3(f)、图 5], 中密, 目前未见变形迹象, 现状整体稳定。

## 2.2 长顺岸不良地质条件

长顺岸陡崖总体走向约 46°, 陡崖在形成过程中应力重分布, 在其顶部坡缘附近形成张性应力集中带, 进而产生卸荷裂隙[图 4(a)]。距离陡崖 25 m 范围内, 卸荷裂隙较发育, 裂隙张开度一般 0.01~1.50 m, 最大 1.50 m, 为陡崖强卸荷带[图 4(b)]。距离陡崖面 25~50 m 内范围, 裂隙张开度一般 0.01~0.25 m, 为陡崖弱卸荷带。卸荷裂隙主要由近平行于陡崖走向的一组裂隙发展而来[图 4(c)]。

根据现场地质调绘及无人机摄影解译, 长顺岸坡发育两处危岩体[图 4(a)], W3 危岩体位于隧道进口陡崖卸荷带山体顶部陡崖处, 规模为 33.0 m×15.0 m×30.0 m, 体积约 15 000 m<sup>3</sup>[图 4(d)], 岩层产状为 320°∠12°, 岩层产状倾向隧道进口方向, 对隧道进口施工威胁较大。W4 危岩体位于长顺岸桥台上方[图 4(e)], 该危岩体目前变形明显, 在暴雨、震动等不利因素影响下, 有可能发生整体倾倒破坏。此

外,长顺岸坡存在一处厚度约40 m的崩塌堆积体[图4(a)、图5],堆积体体积约 $4.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,岩性主要为第四系全新统块石夹碎石[图4(f)、图5],中密~密实,目前未见变形迹象,现状整体稳定。



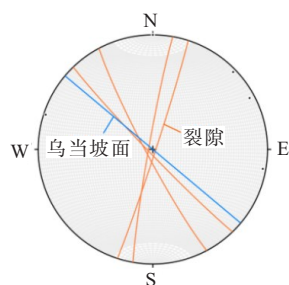
(a) 不良地质分布



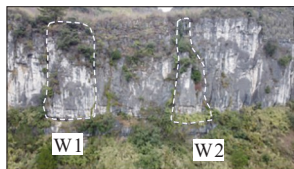
(b) X1 卸荷带



(c) X2 卸荷带



(d) 卸荷裂隙赤平投影图



(e) 危岩体分布



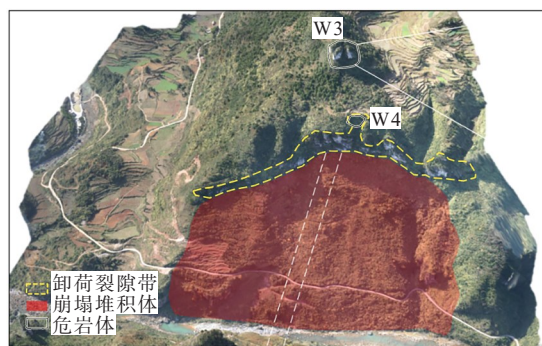
(f) L2 堆积体岩心

图3 乌当岸坡不良地质发育特征

Figure 3 Poor geological conditions of Wudang bank slope

### 3 岸坡危岩体危险性分析

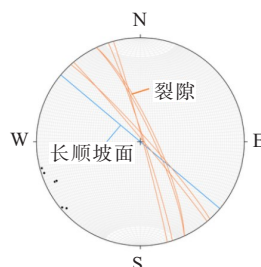
根据调查及现场评估,桥址区两岸危岩体(W1~W4)目前相对稳定,但在地震、降雨和工程扰动等内外动力作用下,很可能发生失稳。根据现场调



(a) 不良地质分布



(b) 陡崖卸荷带



(c) 卸荷裂隙赤平投影图



(d) W3 危岩体



(e) W4 危岩体



(f) 崩塌堆积体

图4 长顺岸坡不良地质发育特征

Figure 4 Poor geological conditions of Changshun bank slope

查,总结其失稳破坏模式主要为拉裂-倾倒式。本次运用Rockfall软件选取3条典型剖面模拟危岩体发生崩塌后滚石运动轨迹,其空间位置及所在剖面如图6、7所示,坡面的基本参数取值见表1,崩塌体初始运动速度、转动速度均设为0。

由图6可知:W1在60 m处运动速度和动能达到峰值,其峰值水平速度、转动速度和动能分别为24.7 m/s、3.5 m/s和596 000 kJ,危岩体与地面碰撞后能量发生损耗,运动速度和动能开始降低,最后滑



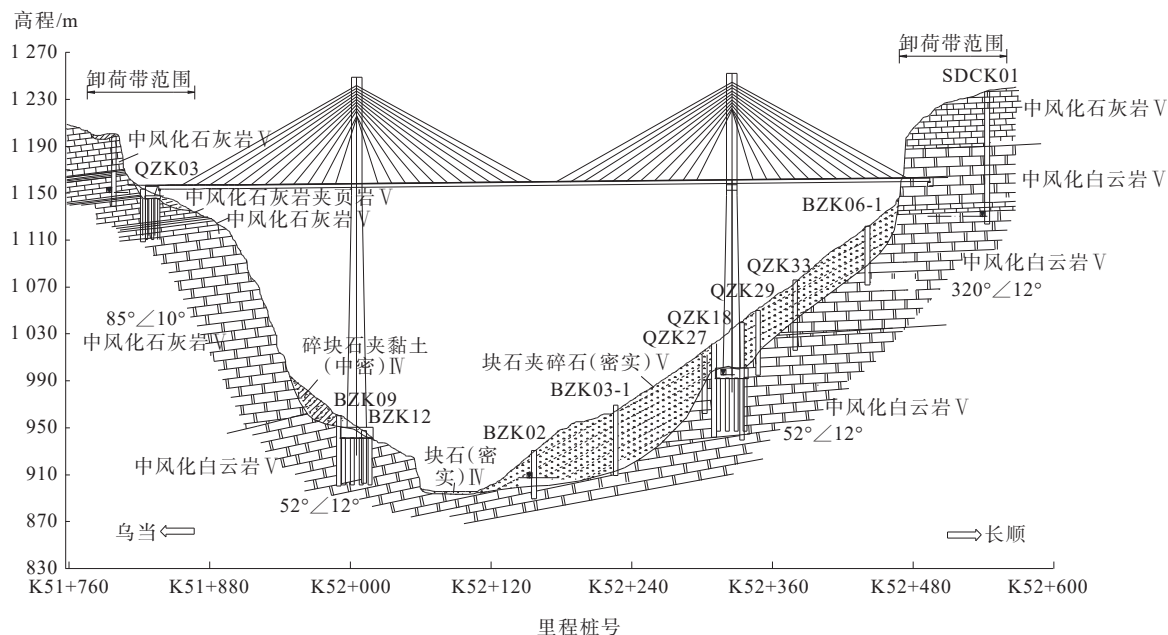
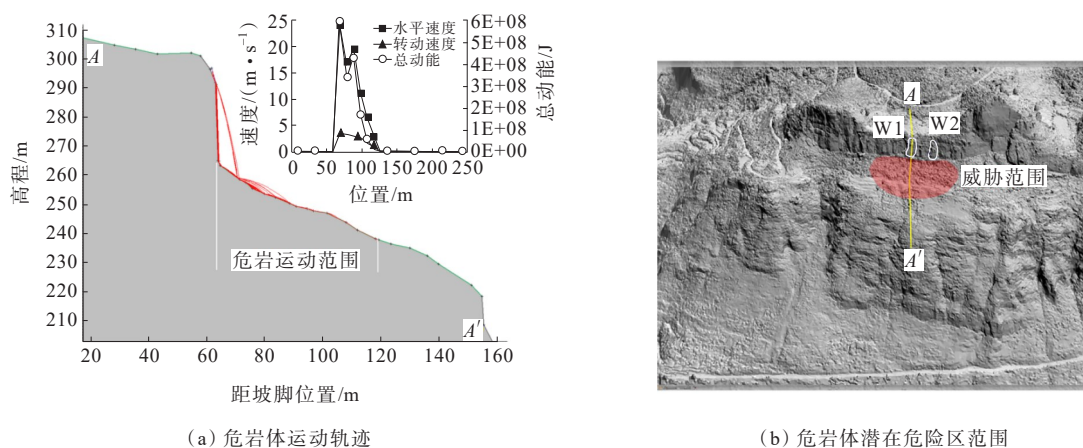


图5 岸坡工程地质剖面图

Figure 5 Geological profile of bank slope engineering



(a) 危岩体运动轨迹

(b) 危岩体潜在危险区范围

图6 乌当岸危岩体危险性评价

Figure 6 Risk assessment of dangerous rock mass on Wudang bank slope

动至 125 m 处停止,其运动距离约为 65 m,会对乌当岸桥台造成冲击破坏,建议施工时对其清除或实施锚索加固,具体威胁范围见图 6(b)。

长顺岸 W3 危岩体在 113 m 处运动速度和动能达到峰值,其峰值水平速度和动能分别为 22.5 m/s 和  $1.37 \times 10^7$  kJ,危岩体与地面碰撞后能量发生损耗,最后滑动至 170 m 处停止,其运动距离约为 57 m,威胁范围见图 7。长顺岸 W4 危岩体在 325 m 处运动速度和动能达到峰值,其峰值水平速度和动能分别为 23.5 m/s 和  $3.2 \times 10^6$  kJ,运动距离约 320 m[图 7(c)]。危岩体会对长顺岸桥墩造成冲击破坏,建议施工时及时清除。

## 4 岸坡堆积体稳定性分析

### 4.1 计算模型及边界条件

为评估岸坡堆积体的稳定性,根据岸坡工程地质剖面图(图 5)建立概化的二维地质模型(图 8),基于 CDEM 连续-非连续单元方法(Continuum Discontinuum Element Method),对岸坡两侧崩塌堆积体在天然、降雨、降雨+地震 3 种工况下的变形破坏特征进行数值仿真分析<sup>[15-16]</sup>。

在开展天然和降雨工况的数值分析时,模型底部和模型两侧施加法向约束条件。在开展地震动力数值计算时,模型底部施加黏滞边界条件,为消除人

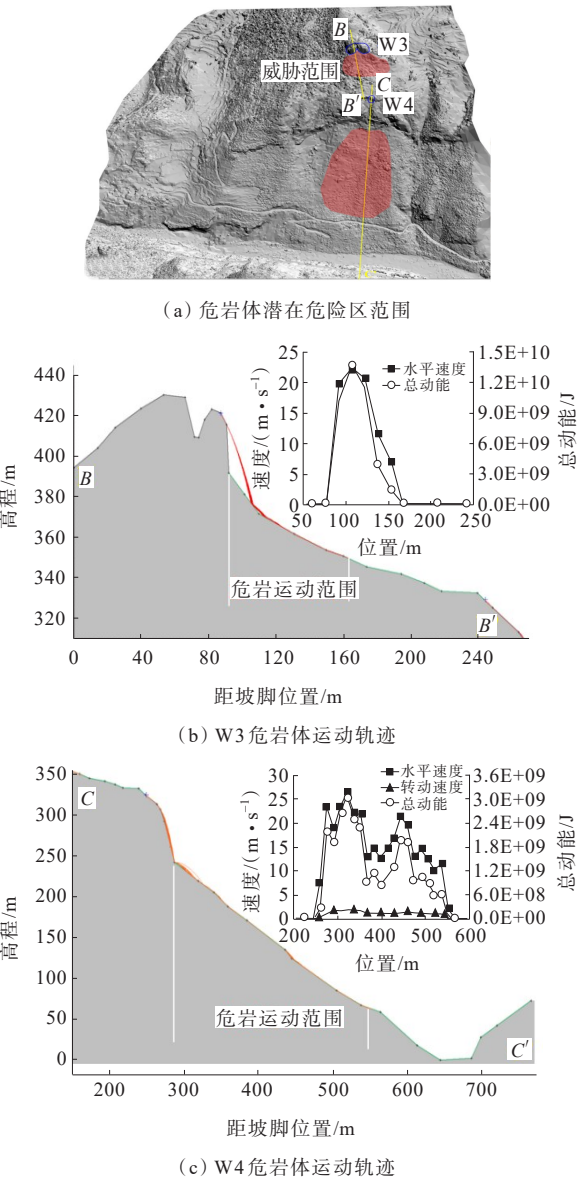


图 7 长顺岸危岩体危险性评价  
Figure 7 Risk assessment of dangerous rock mass on Changshun bank slope

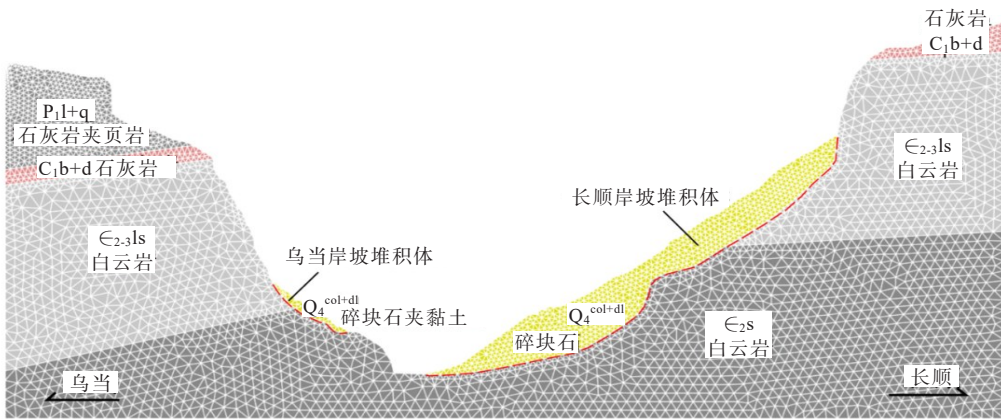


图 8 数值计算概化地质模型  
Figure 8 Generalized geological model by numerical calculation

表 1 斜坡坡面基本参数

Table 1 Basic parameters of slope surface		
坡面类型	法向恢复系数	切向恢复系数
基岩	0.35	0.85
崩塌堆积体	0.32	0.80

工边界的影响,在模型两侧施加自由场边界,动力阻尼选取瑞利阻尼。该区基本地震动(50年超越概率10%)峰值加速度为0.05g,因此罕遇地震动(50年超越概率2%)峰值加速度取值为0.1g<sup>[17]</sup>。本次动力计算输入地震波形为2013年岷县地震波,采用 Seismo-Signal 软件对输入的地震加速度时程曲线进行了基线校正和低通滤波处理,用于消除位移偏移的影响。本次计算的模型本构采用理想 Mohr-Coulomb 模型(含最大拉应力本构)。根据取样测试分析结果,岩土体的物理力学参数取值见表2,采用强度折减法求取岸坡堆积体整体的稳定性系数。

4.2 计算结果分析

岸坡堆积体的永久位移量化了其在内外动力作用下的变形程度,而剪应变云图可以表征潜在滑动面的形状和位置,岸坡堆积体塑性区的出现、发展和重分布可以充分地描绘出其变形和破坏的演化过程。因此,结合三者的计算结果和利用强度折减法计算的安全系数,可以量化地分析判定岸坡堆积体的变形破坏特征以及局部或整体的稳定性。

根据计算结果,乌当岸坡下部崩塌堆积体在天然、降雨、降雨+地震3种工况下的稳定系数分别为2.06、1.79、1.43,位移云图(图9)和塑性剪应变云图(图10)显示乌当岸坡堆积体未发生明显变形和剪切塑性应变,塑性区分布图显示在降雨+罕遇地震条

表 2 岩土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

岩土体	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ Pa	泊松比	黏聚力/ Pa	抗拉强度/ Pa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
P <sub>1</sub> l+q 石灰岩夹页岩	2 650	$3.46 \times 10^9$	0.26	$3.1 \times 10^6$	$1.3 \times 10^6$	35.0
C <sub>1</sub> b+d 石灰岩	2 700	$5.20 \times 10^9$	0.20	$6.0 \times 10^6$	$2.5 \times 10^6$	42.0
Є <sub>2-3</sub> ls 中风化白云岩	2 750	$4.70 \times 10^9$	0.25	$5.4 \times 10^6$	$2.9 \times 10^6$	41.0
Є <sub>2-3</sub> s 中风化白云岩	2 750	$4.50 \times 10^9$	0.25	$4.3 \times 10^6$	$2.5 \times 10^6$	41.0
Q <sub>4</sub> <sup>col+dl</sup> 碎石夹块石	2 600	$9.60 \times 10^7$	0.26	$2.0 \times 10^5$	$5.0 \times 10^3$	37.0
Q <sub>4</sub> <sup>col+dl</sup> 碎块石夹黏土	2 550	$5.20 \times 10^7$	0.26	$1.6 \times 10^5$	$6.0 \times 10^3$	37.0

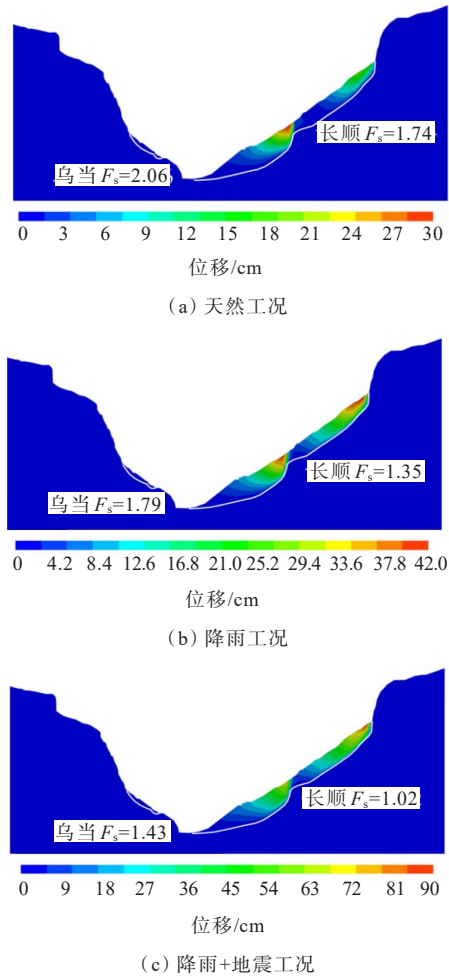


图 9 不同工况下岸坡安全系数及位移云图

Figure 9 Safety factors and displacement of bank slope under different conditions

件下,乌当岸堆积体中上部发生拉张塑性破坏[图 11(c)],深部未形成剪切滑带。因此,综合判定,乌当岸坡堆积体在 3 种工况下均处于稳定状态。

长顺岸坡崩塌堆积体在 3 种工况下的整体稳定系数分别为 1.74、1.35、1.02。由计算结果可知:① 长顺岸坡堆积体在天然状态下的位移和最大剪应变

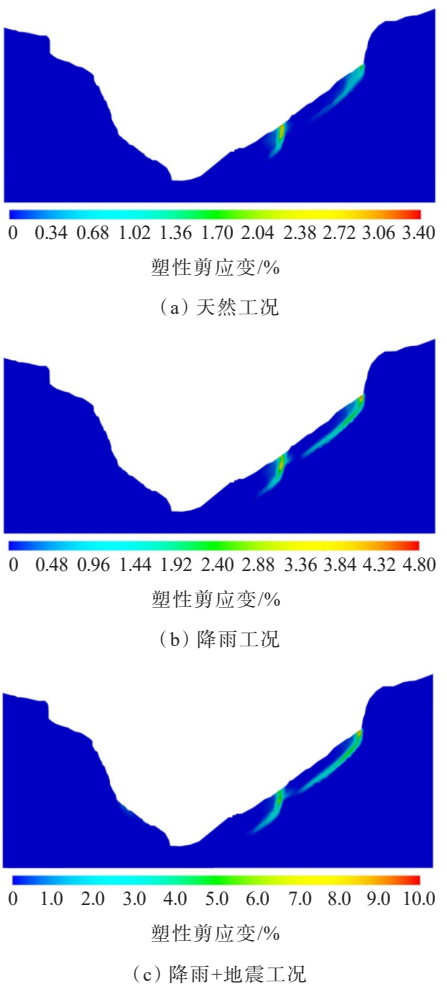


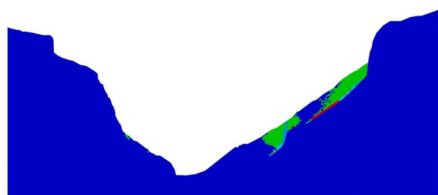
图 10 不同工况下岸坡塑性剪应变云图

Figure 10 Plastic shear strain of bank slope under different conditions

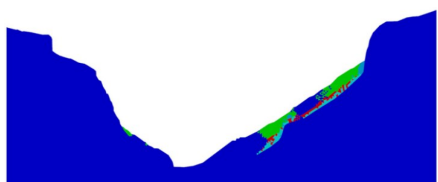
带主要体现在上部和下部堆积体的后缘,最大位移量约为 30 cm[图 9(a)],最大剪应变约为 3%[图 10(a)],两级剪应变带均未贯通;塑性区分布图显示上下两级堆积体后缘主要产生拉张塑性区,局部剪切塑性区出现在堆积体和基岩接触面[图 11(a)];综合判定,长顺岸堆积体在天然状态下较稳定;② 长顺



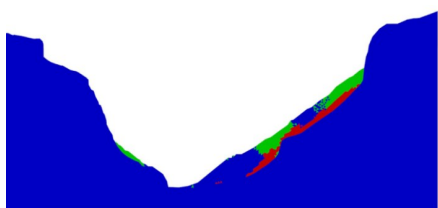
岸坡堆积体在降雨饱和状态下的最大位移量约为 42 cm[图 9(b)],最大剪应变约为 4%[图 10(b)],均发生在上下两级堆积体的上部;上部堆积体的弧形剪应变增高带几乎贯通,堆积体主体仍表现为拉张塑性破坏,但上部堆积体与基岩接触面处剪切塑性区基本贯通[图 11(b)];综合判定,长顺岸堆积体在降雨饱和状态下整体处于稳定状态,但上部堆积体存在局部失稳的可能;③ 长顺岸坡堆积体在降雨饱和+罕遇地震工况下的位移量为 50~90 cm[图 9(c)],主要发生在上部堆积体和下部堆积体后缘;上下两级弧形剪应变带的塑性剪应变为 5%~10%,且上部堆积体的剪应变带基本贯通[图 10(c)];上部堆积体与基岩接触面处剪切塑性区完全贯通,且剪切塑性区厚度较大[图 11(c)];综合判定,长顺岸堆积体在降雨饱和+罕遇地震工况下整体处于欠稳定状态,但上部堆积体已经处于失稳状态,其失稳破坏模式为蠕滑-拉裂式。



(a) 天然工况



(b) 降雨工况



(c) 降雨+地震工况

None Tension-now Shear-now Tension-past Shear-past

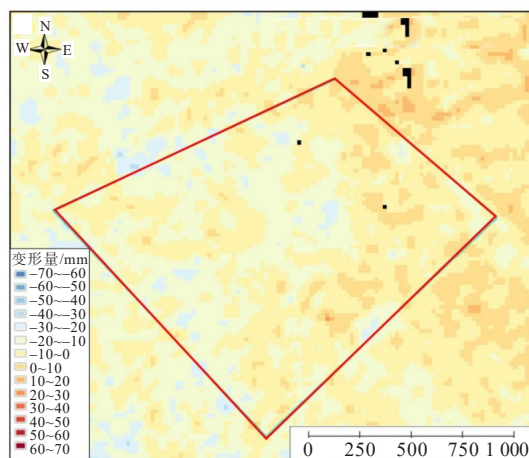
图 11 不同工况下岸坡塑性区分布图

Figure 11 Plastic zone distribution of bank slope under different conditions

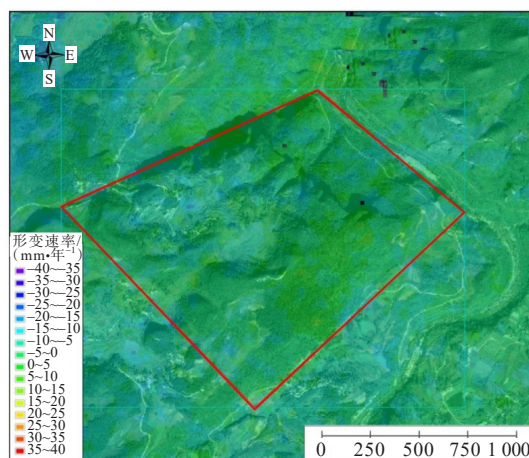
## 5 桥址区 InSAR 形变分析

为进一步评估桥址区的地表变形和稳定性,本次利用合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)对金旗

特大桥附近区域的历史地表形变及活动状况进行分析。结合研究区的植被发育及雷达影像数据存档情况,本次研究选取 2017 年 3 月至 2020 年 8 月存档的哨兵 Sentinel-1A 影像数据,雷达影像拍摄周期为 24 d,测量时间内共获取 51 景数据。经过数据预处理和小基线集干涉数据处理,获得桥址区的累计形变图和年平均形变速率图(图 12)。



(a) 桥址区 3 年累计形变量图



(b) 桥址区平均形变速率图

图 12 InSAR 解译结果

Figure 12 InSAR interpretation results

累计形变图可以直观反映桥址区在 2017 年 3 月至 2020 年 8 月期间地表累计形变情况。从图 12(a)可以看出:桥址区 3 年累计形变量在  $\pm 35$  mm 内,累计形变量量级小,不存在大的累计形变区域;从图 12(b)可以看出:桥址区内像元所覆盖的地区形变速率基本在  $\pm 20$  mm/年以内,绝大部分区域在  $\pm 10$  mm/年以内,研究区域内形变速率小,整个制图范围内整体呈期望值接近 0 的正态分布。年平均形

变速率与累计形变量图趋势大致一致,目标区域内未发现明显沉降区域。

## 6 结论及建议

通过遥感解译、无人机测绘、现场调查、钻探等综合勘察方法,查明了金旗特大桥桥址区的工程地质条件,基于多种数值模拟分析了岸坡危岩体失稳后的运动范围,揭示了岸坡堆积体在内外动力作用下的稳定性及变形失稳模式,对贵州省深切峡谷及陡崖地区桥梁高陡岸坡的综合勘察和稳定性分析具有借鉴指导作用。得到以下主要结论:

(1) 桥址区不良地质主要表现为陡崖卸荷带、危岩体以及崩塌堆积体,危岩体的失稳破坏模式主要为拉裂-倾倒式。

(2) 乌当岸坡 W1、W3 和长顺岸坡 W4 危岩体失稳后的运动距离分别为 65 m、57 m 和 320 m,会对乌当岸桥台和长顺岸主墩产生冲击影响,建议施工时将其清除。

(3) 乌当岸坡堆积体在天然、降雨、降雨+地震 3 种工况下均处于稳定状态;长顺岸坡堆积体在天然和降雨条件下较稳定;在降雨+地震条件下上部堆积体产生了较大的累积位移,且其与基岩接触面处剪切塑性区完全贯通,处于不稳定状态,其失稳破坏模式为蠕滑-拉裂式。

(4) 桥址区地表形变速率基本在  $(\pm 10 \sim \pm 20)$  mm/年,3 年累计形变量在  $\pm 35$  mm 内,累计形变量量级小,不存在大的累计形变区域。

(5) 根据岸坡稳定性评价结果,建议清除桥梁墩台基础以上的堆积体,清方至基岩面,并对基岩面进行相应的防护;同时建议在临河侧施加浸水挡墙,防止水流长期冲刷掏蚀,影响堆积体整体稳定性。

### 参考文献:

### References:

- [1] 毛邦燕,王科,屈科,等.沪昆客运专线岔河双线特大桥岸坡稳定性离散元数值模拟研究[J].铁道标准设计,2014,58(增刊1):157-160.  
MAO Bangyan, WANG Ke, QU Ke, et al. Study on discrete element numerical simulation of bank slope stability of Chahe double-track bridge on Shanghai-Kunming passenger dedicated line[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(sup 1): 157-160.
- [2] 刘朝跃,罗勇.复杂地质条件下桥梁临水岸坡稳定性研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(2):153-155.  
LIU Chaoyue, LUO Yong. Study on stability of bridge waterfront slope under complex geological conditions[J]. Journal of Highway Communication Technology, 2020, 16(2): 153-155.
- [3] 周松,田学军,周攀,等.深切峡谷大跨径桥梁勘察及岸坡稳定性研究[J].中外公路,2021,41(增刊2):118-122.  
ZHOU Song, TIAN Xuejun, ZHOU Pan, et al. Investigation of long-span bridges in deep canyon and study on stability of bank slope[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(sup 2): 118-122.
- [4] 段成刚,方彦林,田叶青,等.含泥化夹层岩质边坡地震响应特征振动台试验及数值模拟[J/OL].中外公路,1-14 [2024-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240422.1932.012.html>.  
DUAN Chenggang, FANG Yanlin, TIAN Yeqing, et al. Shaking table test and numerical simulation of seismic response characteristics of rock slope with muddy interlayer[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-14 [2024-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240422.1932.012.html>.
- [5] SALUNKHE M D P, CHVAN A P G, BARTAKKE M R N, et al. An overview on methods for slope stability analysis [J]. International Journal of Engineering Research and Technology, 2017, 6(3).
- [6] 杨兴振,胡正亮,李小兵.复杂山区公路特大型桥梁岸坡稳定性评价:以川藏高速怒江特大桥为例[J].中外公路,2021,41(增刊2):59-62.  
YANG Xingzhen, HU Zhengliang, LI Xiaobing. Stability evaluation of bank slope of extra-large bridge on highway in complex mountainous areas: Taking Nujiang Bridge on Sichuan-Tibet Expressway as an example[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(sup 2): 59-62.
- [7] 姜楠,张安然,张芳,等.裂隙水作用下岩质边坡平面滑动力学模型[J].公路交通科技,2024,41(2):88-95,104.  
JIANG Nan, ZHANG Anran, ZHANG Fang, et al. A planar sliding mechanical model for rock slope by crack water[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(2): 88-95, 104.
- [8] 陈昱蒙.溶蚀卸荷带特大桥主墩岸坡稳定性研究[D].贵阳:贵州大学,2021.  
CHEN Yumeng. Study on the stability of the bank slope of

- the main pier of a super large bridge with dissolution unloading zone[D].Guiyang:Guizhou University,2021.
- [9] NEWMARK N M.Effects of earthquakes on dams and embankments[J].Géotechnique,1965,15(2):139-160.
- [10] 柴春阳,张广泽,蒋良文,等.金沙江特大桥综合勘察与分析[J].铁道工程学报,2015,32(4):1-5.  
CHAI Chunyang,ZHANG Guangze,JIANG Liangwen,et al.Comprehensive prospecting and analysis of the super major Jinsha River Bridge[J].Journal of Railway Engineering Society,2015,32(4):1-5.
- [11] 郭抗美,滑晶晶.赫六高速殷家特大桥工程地质特征及稳定性评价[J].河北工业大学学报,2020,49(1):91-96.  
GUO Kangmei,HUA Jingjing.Engineering geology and stability evaluation of Heliu high-speed Yinjia Bridge[J].Journal of Hebei University of Technology,2020,49(1):91-96.
- [12] 赵志明,吴光,王喜华,等.金沙江特大桥左岸岸坡岩体结构面强度参数取值及工程稳定性评价[J].工程地质学报,2012,20(5):768-773.  
ZHAO Zhiming,WU Guang,WANG Xihua,et al.Strength of structure surfaces and slope stability evaluation for left rock slope of Jinshajiang Bridge[J].Journal of Engineering Geology,2012,20(5):768-773.
- [13] 蔡磊,田学军.某高速公路特殊结构桥梁岸坡稳定性研究[J].中国水运(下半月),2022,22(9):134-136.  
CAI Lei,TIAN Xuejun.Study on bank slope stability of a special structure bridge on an expressway[J].China Water Transport,2022,22(9):134-136.
- [14] 王玉平,曾志强,潘树林.边坡稳定性分析方法综述[J].西华大学学报(自然科学版),2012,31(2):101-105.  
WANG Yuping,ZENG Zhiqiang,PAN Shulin.Summarization of slope stability analysis method[J].Journal of Xihua University (Natural Science Edition),2012,31(2):101-105.
- [15] 吴兵,梁瑶,李杰,等.注浆微型钢管桩组合结构在公路滑坡处治中的应用[J/OL].中外公路,1-10[2024-04-25].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240423.2006.006.html>.  
WU Bing,LIANG Yao,LI Jie,et al.Application of grouting miniature steel tubular pile composite structure in the treatment of highway landslide[J/OL].Journal of China & Foreign Highway,1-10[2024-04-25].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240423.2006.006.html>.
- [16] 任军平.贵阳乌当构造运动学模式研究[D].贵阳:贵州大学,2007.  
REN Junping.Kinematics model of Wudang structure in Guiyang[D].Guiyang:Guizhou University,2007.
- [17] 中国地震局地球物理研究所,中国地震灾害防御中心,中国地震局工程力学研究所,等.中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2016:189-190.  
Institute of Geophysics,China Earthquake Administration,China Earthquake Disaster Prevention Center,Institute of Engineering Mechanics,CEA,et al.Seismic ground motion parameters zonation map of China:GB 18306—2015[S].Beijing:Standards Press of China,2016:189-190.
- [18] LI S H,WANG J G,LIU B S,et al.Analysis of critical excavation depth for a jointed rock slope using a face-to-face discrete element method[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2007,40(4):331-348.
- [19] FENG C,LI S H,LIU X Y,et al.A semi-spring and semi-edge combined contact model in CDEM and its application to analysis of Jiweishan landslide[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2014,6(1):26-35.