

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.10.011

# 行人荷载下乐山大佛九曲栈道赋存岩体稳定性研究

鲍方伟<sup>1a</sup>, 刘成禹<sup>1a,1b</sup>, 麻润杰<sup>2</sup>, 谢永宁<sup>1a,1b</sup>, 吴昌宇<sup>1c</sup>

(1. 福州大学 a. 紫金地质与矿业学院; b. 地质工程福建省高校工程研究中心; c. 土木工程学院, 福州 350116;  
2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

**摘要:** 针对乐山大佛九曲栈道地形崎岖多变、长年游人如织的特点, 为分析行人荷载对九曲栈道赋存岩体稳定性的影响, 建立了九曲栈道区域的精细化模型, 采用数值计算方法研究了行人静、动荷载作用下九曲栈道赋存岩体的受力状态及变形特征。结果表明, 九曲栈道满载行人时赋存岩体整体稳定, 仅局部表层岩体发生破坏。静荷载下 L1 裂隙底部、L15 中下部及栈道底部佛龕的表层岩体受拉破坏; 栈道上中下部两转角处崖壁、佛脚平台及临江面底部凸出部位的表层岩体易发展为受拉破坏。动荷载下栈道赋存岩体的振动速度均超过规范容许值, 在行人动荷载长期作用下易疲劳破坏; 栈道上部转角处凸出部位的表层岩体还可能发生瞬时受拉破坏。研究结果对掌握行人荷载下九曲栈道赋存岩体的稳定性现状及预防性加固有指导意义。

**关键词:** 九曲栈道; 精细化建模; 行人荷载; 数值计算; 稳定性

**中图分类号:** TU457

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2024)10-149-13

## Stability analysis of the occurrence rock mass in Jiuqu Plank Road of Leshan Giant Buddha under tourist load

BAO Fangwei<sup>1a</sup>, LIU Chengyu<sup>1a,1b</sup>, MA Runjie<sup>2</sup>, XIE Yongning<sup>1a,1b</sup>, WU Changyu<sup>1c</sup>

(1a. Zijin School of Geology and Mining; 1b. Fujian Provincial Universities Engineering Research Center of Geological Engineering; 1c. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, P. R. China;  
2. Power China Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, P. R. China)

**Abstract:** The rugged terrain of Jiuqu Plank Road experiences heavy tourist traffic year-round. To assess the impact of tourist loads on rock mass stability, a refined model was established, using numerical simulations to analyze stress and deformation under static and dynamic loads. The results indicate that when the Jiuqu Plank Road is fully loaded with pedestrians, the rock mass is generally stable, with only partial damage to the surface rock mass. Under static load, the surface rock mass of L1 crack bottom, L15 middle and lower parts, and the Buddha niche at the bottom of the plank road are subjected to tensile failure, and the surface rock mass at the two corners of the middle and lower parts of the plank road, the Buddha foot platform, and the protruding part facing the river are prone to tensile failure. The vibration velocities of the rock mass in the boardwalk under dynamic load all exceed the specification allowable value, and it is prone to fatigue failure under long-term pedestrian dynamic load. The surface rock mass at the protruding corner of the upper part of the plank road may experience instantaneous tensile failure. These findings are essential for monitoring stability and guiding preventive

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272300)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (41272300).

作者简介: 鲍方伟(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事石质文物稳定性研究, (E-mail) baofwei@163.com。

通信作者: 刘成禹, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) Liuchengyuphd@163.com。

reinforcement efforts.

**Keywords:** Jiuqu Plank Road; refined modeling; tourist load; numerical calculation; stability

乐山大佛坐落于四川省乐山市凌云山中部,濒临岷江、青衣江和大渡河汇流处。九曲栈道宽0.60~1.45 m,开凿于乐山大佛右侧崖壁上,崖壁上雕刻众多精美的佛龛,是石质文物的宝贵财富。九曲栈道与乐山大佛同时开凿于公元713年,迄今已有1300多年历史<sup>[1]</sup>,在自然营力的长期作用下,表层岩体风化,物理力学性能下降<sup>[2]</sup>。旅游旺季时游客络绎不绝,九曲栈道受到较大的行人荷载作用,在上述因素的共同作用下,九曲栈道的稳定性受到严重影响。为确保行人安全、栈道稳定,并为栈道的预防性保护提供依据,有必要掌握九曲栈道的稳定性现状及稳定性相对较差的部位,对行人荷载作用下九曲栈道赋存岩体的稳定性进行深入研究具有重要实际意义。

众多学者围绕石质文物的稳定性开展了大量研究,对比理论计算<sup>[3]</sup>及室内外试验<sup>[4]</sup>,数值模拟可以实现更复杂的工况<sup>[5]</sup>、作出更准确的预测,这也对模型的还原度提出了更高的要求。黄蕾<sup>[6]</sup>和高相波等<sup>[7]</sup>基于三维激光扫描信息构建局部精细化的数值模型,并采用数值计算方法分析其稳定性。但这并不适合运用于大场景石质文物的数据采集<sup>[8]</sup>,黄皇<sup>[9]</sup>利用无人机倾斜摄影获得窟体点云,并结合洞内数据共同建立洞窟精细化的三维模型,分析多种工况下的稳定性。在乐山大佛及其周边岩体稳定性的研究方面,何思明等<sup>[10]</sup>在现场调查基础上,采用楔形体稳定性分析方法,得出乐山大佛景云亭危岩体在天然状态下基本稳定,在降雨及地震组合工况下易失稳。杨天宇等<sup>[11]</sup>指出乐山大佛腿部的卸荷裂隙不会造成大佛所在山体整体滑移。马彪<sup>[12]</sup>采用数值计算方法,指出在天然状态下卸荷裂隙对乐山大佛赋存陡崖稳定性的影响较小,整体处于稳定状态,仅局部产生张拉破坏。

虽然,前人采用各种方法开展了石质文物的稳定性研究,但这些研究无法很好地处理研究范围与单元尺寸之间的矛盾。乐山大佛赋存岩体的研究主要聚焦于赋存陡崖的整体稳定性,计算范围和计算模型尺寸都较大,数值计算的单元尺寸也较大,无法精细地反映坡面形貌。此外,也未考虑行人荷载的影响。九曲栈道开凿在凹凸不平、布满佛龛的崖壁上,栈道及其附近岩体的稳定性与坡面形貌密切相关,单元尺寸较大的简单模型无法反映崖壁表层的凹凸不平和栈道的高低起伏,无法较好地对其稳定性进行深入研究。此外,行人荷载直接作用在九曲栈道上,不仅增加了九曲栈道的负重,还会引起岩体振动,因此,对九曲栈道稳定性的研究应考虑行人荷载的作用。为更深入分析九曲栈道赋存岩体的稳定性,文中根据九曲栈道数字化点云扫描结果,建立更加精细的数值模型,对行人静力、动力荷载作用下的稳定性进行研究,结果对游客管理及九曲栈道赋存岩体的预防性保护具有指导意义。

## 1 工程概况

### 1.1 地形地貌

九曲栈道自坡顶的参观平台一路顺着崖壁延伸至底部佛脚平台,上下高差约为60 m,所在山体西侧临江,坡面坡度85°~90°;南侧紧临大佛,坡面接近直立、局部反倾,如图1所示。



图1 九曲栈道全貌

Fig. 1 Full view of Jiuqu Plank Road

### 1.2 地层岩性

乐山大佛及九曲栈道所在区域主要地层为中生界白垩系上统夹关组( $K_j$ ) 岩屑长石石英砂岩,铁质、钙质及泥质胶结、细~中粒结构,以厚层状或块状构造为主。现场钻探结果表明,从上至下可进一步划分为5层:第①~④层为中细粒砂岩,第⑤层为细粒砂岩。第①层的云母和黏土矿物含量少,岩石完整性较差,底部有1.5 m厚溶蚀层,上下两层厚度小;第②层的云母和黏土矿物含量较高,厚层状构造,底部溶蚀层厚1.5 m;第③层的云母和黏土矿物含量较高,块状构造;第④层的云母含量少,颗粒分选性中等;第⑤层的云母含量少,块状构造,颗粒分选性差,为佛脚平台下的溶蚀层;强风化层厚1~3 m,风化层裂隙充填物主要为角砾和粉质黏土,地层分布如图2所示。

### 1.3 地质构造

乐山大佛景区受地质构造的影响较弱,岩层接近水平,产状稳定。受临江侧卸荷和风化作用的共同影响,山体中的裂隙沿崖壁断续发育,以走向与岸坡接近平行或垂直、倾角较陡的裂隙为主,其次是较平直的层间裂隙,主要裂隙分布如图2和图3所示。

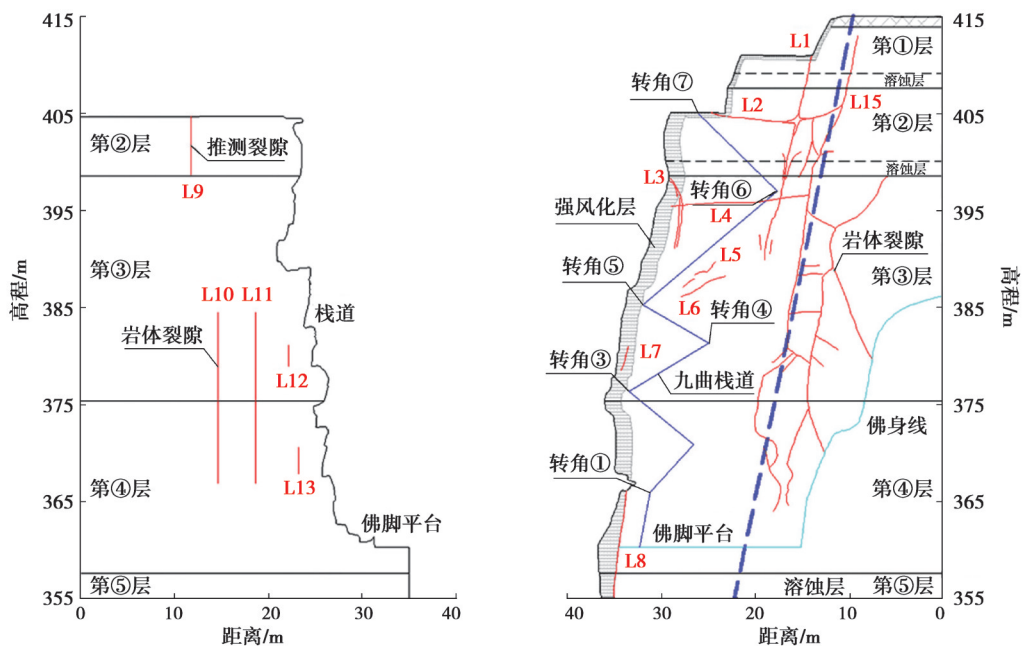


图2 九曲栈道立面图

Fig. 2 Elevation image of Jiuqu Plank Road

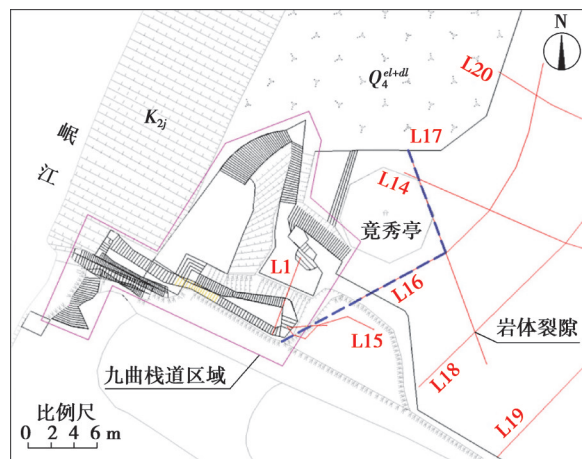


图3 九曲栈道俯视图

Fig. 3 Top view of Jiuqu Plank Road

## 2 九曲栈道稳定性研究方法

数值计算是处理复杂岩土工程问题常用的手段<sup>[13]</sup>,有限差分软件Flac<sup>3D</sup>是岩体稳定性数值分析的常用软件,其中的Interface语句可以模拟节理裂隙<sup>[14]</sup>。九曲栈道及其所在山体地形起伏大、表面凹凸不平,岩体内节理裂隙发育。为此,文中选用Flac<sup>3D</sup>软件进行九曲栈道赋存岩体的稳定性研究。考虑到建模的精细化要求及计算时间,研究区范围不宜选取过大。文献[12]研究表明,九曲栈道区域后方的深、大卸荷裂隙对栈道所在山体的整体稳定性影响较小,故在进行九曲栈道赋存岩体整体稳定性分析时,忽略后方的深、大卸荷裂隙。其中,图2中L15、图3中L16和L17裂隙距栈道区域最近,切割较深、规模较大、彼此联通,天然划分出九曲栈道区域。这既排除了非关键因素影响又合理缩小了研究区范围,故将L15、L16和L17裂隙作为研究区的侧边界(蓝色虚线所示);将佛脚平台以下的第⑤层底部作为研究区的底边界。静力计算时,模型侧边界采用法向固定约束,底部边界采用水平和竖向固定约束,其余表面无约束。动力计算时,为避免荷载波在边界处产生折射和反射,在侧边设置吸收边界,其余边界条件不变。

### 2.1 数值模型构建

基于现场测绘得到的研究区点云数据,使用Autodesk ReCap、3DReshaper、Geomagic Studio、Rhino、Flac<sup>3D</sup>等软件建立三维网格模型。为尽可能地还原研究区表层复杂的地形地貌,考虑风化导致的表层岩体力学性能降低,根据研究区的物探探测成果将模型由外向内2 m范围内的单元划定为强风化区,并对网格进行梯度加密,单元的最小尺寸为0.2 m。模型高60 m、底部宽50 m,单元尺寸为0.2~1.0 m,共215万个网格单元。图4为数值模型局部网格及照片,可以看出,模型较精细地还原了佛龛及栈道的表层形貌。

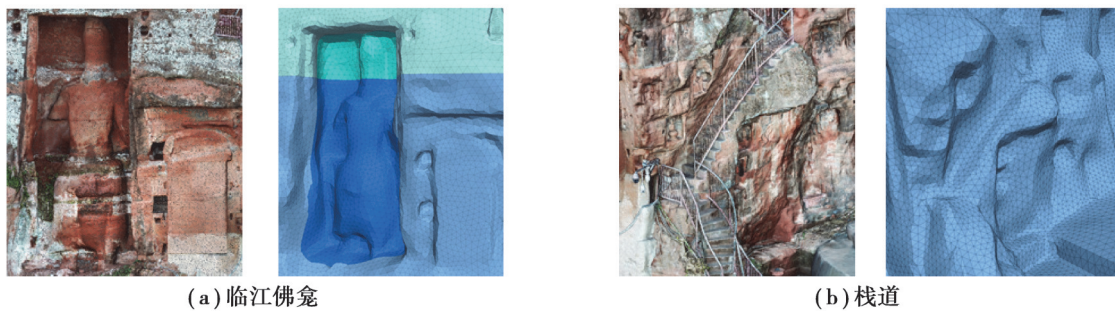


图4 数值模型网格图及照片对比

Fig. 4 Numerical model grid diagrams and photographs

研究区地层分组及栈道的网格划分如图5(a)所示,模型的强风化层及溶蚀层分布位置与图2九曲栈道立面图一致。根据裂隙的空间位置在模型中建立接触面单元,如图5(b)所示。

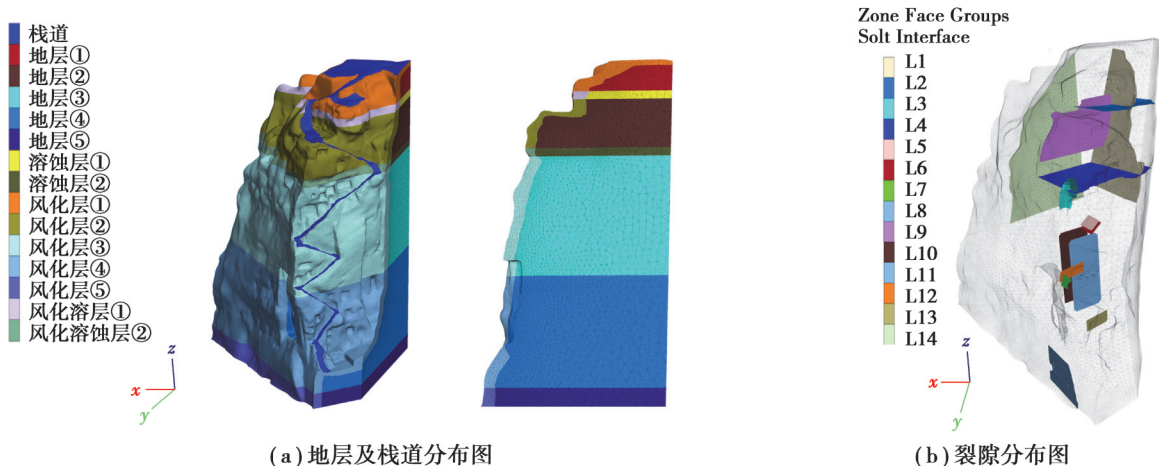


图5 九曲栈道三维模型

Fig. 5 3D model of Jiuqu Plank Road

## 2.2 物理力学参数

九曲栈道赋存岩体采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,裂隙面采用库仑剪切模型。地层物理参数采用《乐山大佛危岩体抢险加固工程方案设计》和《乐山大佛砂岩试验》(分别简称为《设计》和《试验》)中勘测、试验得出的结果。为在数值模型中体现表层岩体因风化导致的力学参数降低,参考《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)中不同风化程度对应的参数指标,将地层的剪切模量和体积模量乘以风化程度系数(0.4~0.8)作为该地层对应的强风化层的剪切模量和体积模量,强风化层的其他参数也根据地层参数进行适当折减。地层的物理力学参数如表 1 所示,括弧内数字为括弧前各地层参数所对应的外强风化层参数。

表 1 岩层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock formation

地层号	剪切模量/MPa	体积模量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/(°)	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	抗拉强度/kPa
①	132 (106)	220 (176)	608 (500)	43 (32)	1890 (1800)	130 (100)
①(溶蚀层)	130 (104)	137 (110)	608 (500)	43 (32)	1840 (1760)	130 (100)
②	395 (158)	534 (214)	1200 (600)	59 (38)	2240 (2160)	440(180)
②(溶蚀层)	208 (158)	184 (147)	1200 (600)	59 (38)	2200 (2100)	440(180)
③	206 (134)	314 (204)	1130 (550)	47 (34)	2130 (2020)	260 (130)
④	258 (155)	263 (158)	1610 (740)	51 (34)	2230 (2140)	30 (30)
⑤	149 (120)	124 (100)	607 (500)	15 (15)	2080 (2000)	30 (30)

裂隙的接触面抗剪强度指标,参考《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013)的结构面标准取值,法向刚度和剪切刚度取不大于周围“最硬”区域的等效刚度的 10 倍,即:

$$k_n = k_s = 10_{\max} \left[ \frac{\left( K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right], \quad (1)$$

式中: $k_n$ 和 $k_s$ 分别为法向刚度和剪切刚度,MPa/m; $\Delta z_{\min}$ 为接触面法向上连接区域的最小尺寸,m; $G$ 和 $K$ 分别为剪切模量和体积模量,MPa。结合规范和计算结果,确定接触面的力学参数为:黏聚力 $c=0$  kPa、内摩擦角 $\varphi=31^\circ$ ,法向刚度和剪切刚度均取 18 GPa/m。

## 2.3 计算工况

为反映行人产生的荷载及振动对九曲栈道赋存岩体的影响,通过改变行人荷载的加载方式来模拟行人荷载作用下的静力反应及动力响应。

### 2.3.1 静力工况

Chen 等<sup>[15]</sup>根据人均站立面积、体重得到峰值游客下,行人的静荷载为 3~6 kPa。参考行人静荷载的取值方法及结果,统计九曲栈道区域可站立面积及日常游客量,得到九曲栈道的人均站立面积为 0.35 m<sup>2</sup>,结合人均体重 700 N<sup>[16]</sup>得出九曲栈道上的行人荷载为 2 kPa。考虑在旅游旺季情况下,栈道的人均站立面积小于 0.35 m<sup>2</sup>,即行人荷载大于 2 kPa,为更突出行人静荷载的作用效果,对静力工况下的行人荷载取值进行放大,最终将栈道上站满游人时的静荷载取为 5 kPa。

### 2.3.2 动力工况

可靠的行人荷载模型是准确计算结构振动的前提条件<sup>[17]</sup>,考虑到行人在栈道上、下台阶主要表现为竖向荷载,忽略其他方向上的荷载。单个行人竖向动荷载的计算公式为<sup>[16,18]</sup>

$$F(t) = G + G \sum_{i=1}^3 \alpha_i \sin(2\pi i f_s t - \varphi_i), \quad (2)$$

式中: $G$ 为行人重量,N; $f_s$ 为步频,Hz; $\alpha_i$ 为第 $i$ 阶简谐动荷载系数; $\varphi_i$ 为第 $i$ 阶动荷载的初相位。 $G=700$  N, $\alpha_1=0.4f_s+0.0006G-0.84$ , $\alpha_2=\alpha_3=0.25(0.4f_s+0.0006G-0.84)$ , $\varphi_1=0$ , $\varphi_2=\varphi_3=\pi/2$ , $f_s=1$  Hz。

由人均站立面积可推出栈道  $1 \text{ m}^2$  内站有 2~3 人, 假定, 有 2 个行人, 拥挤时步频会趋于同步, 采用式(2) 计算得出同步行人荷载下的时程曲线, 如图 6 所示。首先, 对模型进行无阻尼振动计算, 得到模型顶部的速度功率谱, 如图 7 所示, 由图 7 得出自振频率为 9.67 Hz。为模拟岩土体摩擦产生的阻尼, 根据行人步频及图 7 得到的自振频率, 采用 Maxwell 阻尼, 5% 阻尼下的参数为  $f_1=0.5 \text{ Hz}$ ,  $\xi_1=0.038 5$ ;  $f_2=3.5 \text{ Hz}$ ,  $\xi_2=0.033 5$ ;  $f_3=25 \text{ Hz}$ ,  $\xi_3=0.052 0$ 。

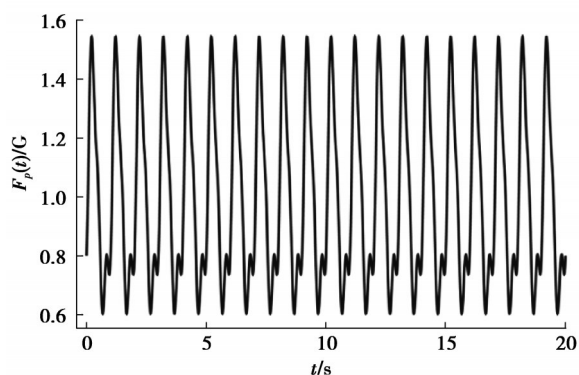


图 6 同步行人荷载时程曲线

Fig. 6 Time history curve of synchronous tourist load

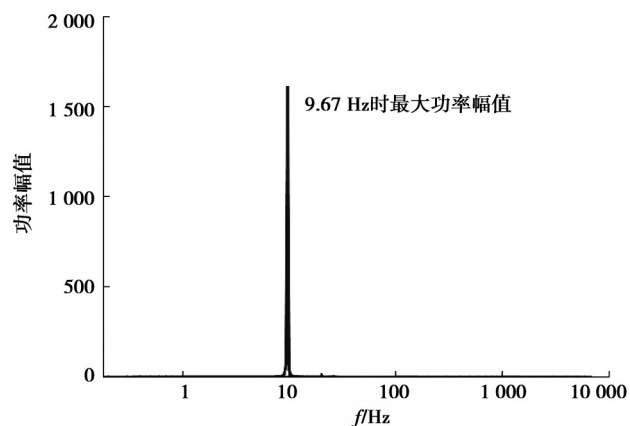


图 7 模型顶部速度功率谱

Fig. 7 Velocity power spectrum at the top of the model

弹性波传至层理、裂隙时, 会出现折射和反射, 使波的传播方向和速度发生较大变化<sup>[19-20]</sup>, 增加动力计算复杂性, 影响结果准确性。由于研究区范围较小, 如果动力计算中考虑节理、裂隙, 可能无法准确模拟行人荷载下九曲栈道赋存岩体的动力响应过程, 因此, 为避免因裂隙导致的动力计算精度降低, 在行人动荷载计算时不考虑节理、裂隙。

由于岩体的静、动泊松比接近, 可用静泊松比代替动泊松比<sup>[21]</sup>。根据《试验》中各层岩样的纵波波速、泊松比测试结果, 按式(3)、式(4)计算得到各研究区地层的动剪切模量和动体积模量。

$$G_d = \rho v_p^2 (1 - 2\mu_d) / [2(1 - \mu_d)], \quad (3)$$

$$K_d = \rho v_p^2 (1 + \mu_d) / [3(1 - \mu_d)], \quad (4)$$

式中:  $G_d$  和  $K_d$  分别为动剪切模量和动体积模量, MPa;  $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v_p$  为纵波波速,  $\text{km}/\text{s}$ ;  $\mu_d$  为动泊松比。行人动荷载计算时, 采用的地层物理参数如表 2 所示。

表 2 岩层动力参数

Table 2 Dynamic mechanical parameters of rock formation

地层号	动剪切模量/ MPa	动体积模量/ MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	抗拉强度/kPa
①	2 220	3 700	608	43	1 890	130
①(溶蚀层)	2 564	2 706	608	43	1 840	130
②	4 592	6 209	1 200	59	2 240	440
②(溶蚀层)	5 067	4 490	1 200	59	2 200	440
③	2 543	3 878	1 130	47	2 130	260
④	5 332	5 428	1 610	51	2 230	30
⑤	2 971	2 464	607	15	2 080	30

### 3 稳定性分析

#### 3.1 行人静荷载作用下稳定性分析

##### 3.1.1 整体稳定性

采用上述精细化数值模型和表 1 的物理力学参数,在栈道区域施加 5 kPa 的竖向应力,进行行人荷载作用下的静力计算。图 8 为行人静荷载作用下,九曲栈道赋存岩体的弹塑性状态分布图,九曲栈道赋存岩体基本处于弹性状态,只有局部区域的表层岩体处于塑性状态。图 9 为行人静荷载作用下,九曲栈道赋存岩体的位移云图,九曲栈道赋存岩体的位移总体较小,顶部位移最大,最大位移仅 0.4 mm。计算结果表明,在行人静荷载作用下,九曲栈道赋存岩体总体处于弹性状态且位移很小,表明九曲栈道赋存岩体整体是稳定的。

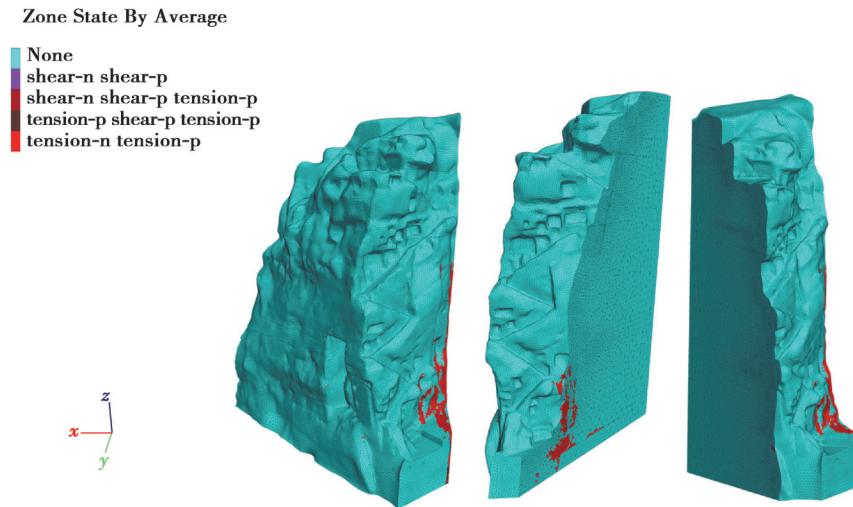


图 8 行人静荷载下九曲栈道赋存岩体弹塑性状态分布图

Fig. 8 Distribution of elastic-plastic state of rock mass in Jiuqu Plank Road under tourist static load

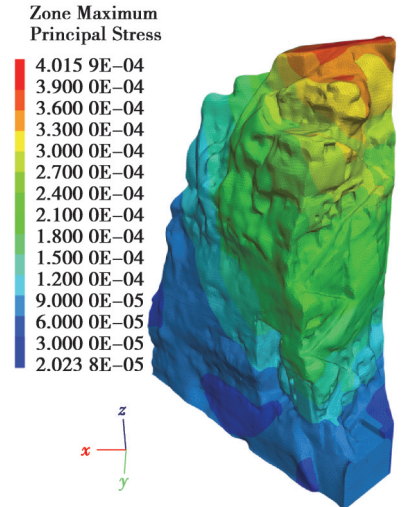
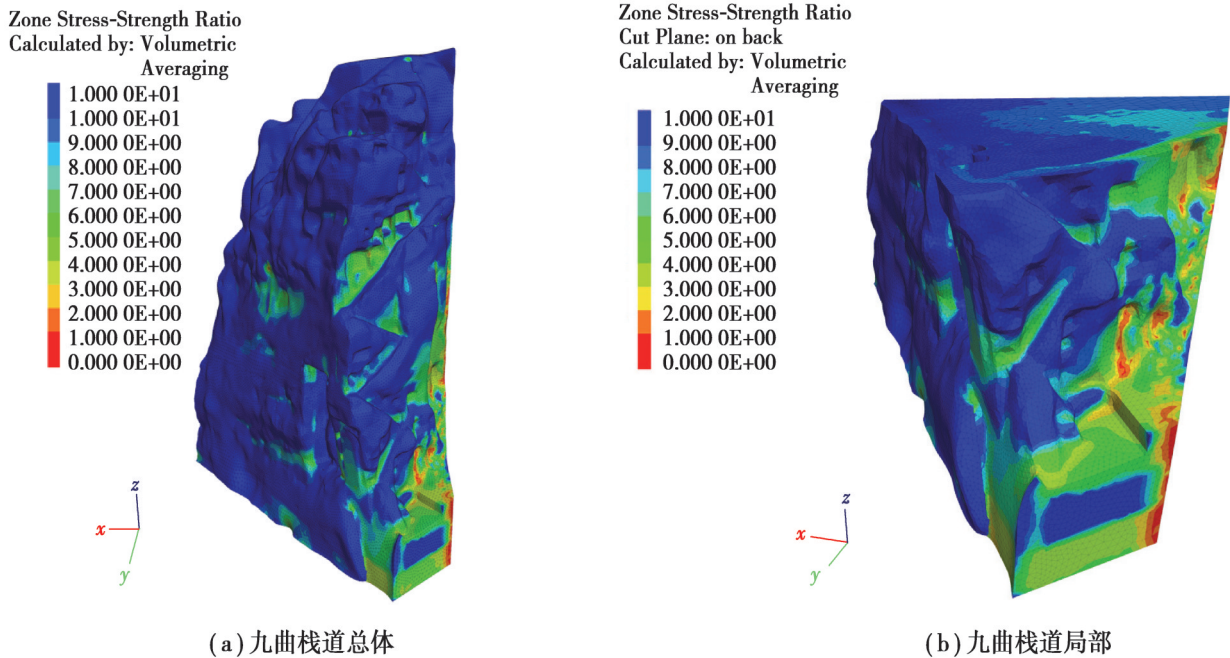


图 9 行人静荷载下赋存岩体位移云图 (单位:m)

Fig. 9 Displacement of rock mass under tourist static load (unit: m)

强度应力比为材料极限强度与当前应力之比,是表征岩体稳定性的重要指标;强度应力比越大表示当前的受力状态越安全<sup>[22]</sup>。图 10 是九曲栈道赋存岩体的强度应力比计算结果,九曲栈道赋存岩体的强度应力比



(a) 九曲栈道总体

(b) 九曲栈道局部

图 10 行人静荷载下赋存岩体的强度应力比云图

Fig. 10 Stress-strength ratio of rock mass under tourist static load

基本大于1,仅局部区域表层岩体的强度应力比接近或小于1。说明九曲栈道赋存岩体总体是安全的,仅局部区域的表层岩体可能发生破坏。这些可能发生破坏的部位与图8中出现塑性区的部位一致,栈道底部佛龕、中下部边界处的表层岩体受拉破坏,栈道两侧边交界处的表层岩体剪切破坏。其中,边界处的剪切破坏单元总体极少且在边界处,综合分析认为,该处的剪切破坏主要是由于边界处形状突变产生应力集中,加之变形受到边界条件的约束所致,并非行人静荷载作用的结果。计算结果表明,行人静荷载作用下,九曲栈道赋存岩体整体位移很小,绝大部分处于弹性状态,强度应力比都大于1,仅局部区域的表层岩体达到塑性状态、强度应力比接近或小于1。九曲栈道赋存岩体整体是稳定的,仅局部区域的表层岩体可能失稳。

### 3.1.2 局部稳定性

为进一步得出局部出现塑性区的准确部位及其稳定性,以地层③底部为界将研究区一分为二进行最大主应力显示。以强风化层的抗拉强度作为最大主应力云图的显示上限。已有研究表明,劈裂法测得的岩石抗拉强度一般比实际值高约10%<sup>[23]</sup>,文中数值计算采用的岩石抗拉强度为《乐山大佛砂岩试验》中用劈裂法测得的强度,因此,以强风化层抗拉强度值的90%作为最大主应力云图的显示下限。若单元的最大主应力处于上述上、下限范围内,将其视作接近抗拉极限的单元。采用上述方法得出的九曲栈道中上部、中下部赋存岩体最大主应力分布,如图11所示,图中蓝色之外的其余区域即为岩体抗拉强度接近极限的区域。由图11(a)可知,L1裂隙底部及栈道中部边界处表层岩体的最大主应力达到该位置的抗拉强度;转角④处崖壁表层岩体的最大主应力接近其抗拉强度。由图11(b)可知,栈道底部佛龕及下部边界处表层岩体的最大主应力达到其抗拉强度;临江面底部凸出部位、转角②处崖壁及佛脚平台表层岩体的最大主应力接近其抗拉强度。对比图8、图10可知,达到抗拉强度的部位处于受拉塑性状态,且强度应力比小于1,接近抗拉强度的部位处于弹性状态,且强度应力比大于1。由于仅局部的表层岩体失稳,失稳单元尺寸与最外层网格相近,根据达到最大主应力上、下限的单元数量,可得出由表及里的厚度。计算结果表明,L1裂隙底部、L15裂隙中下部及栈道底部佛龕处的表层岩体为受拉破坏部位,厚度为0.4 m(占2个单元厚);转角②和④处崖壁、佛脚及临江面底部凸出部位的表层岩体为潜在的受拉破坏部位,厚度为0.6 m(占3个单元厚)。

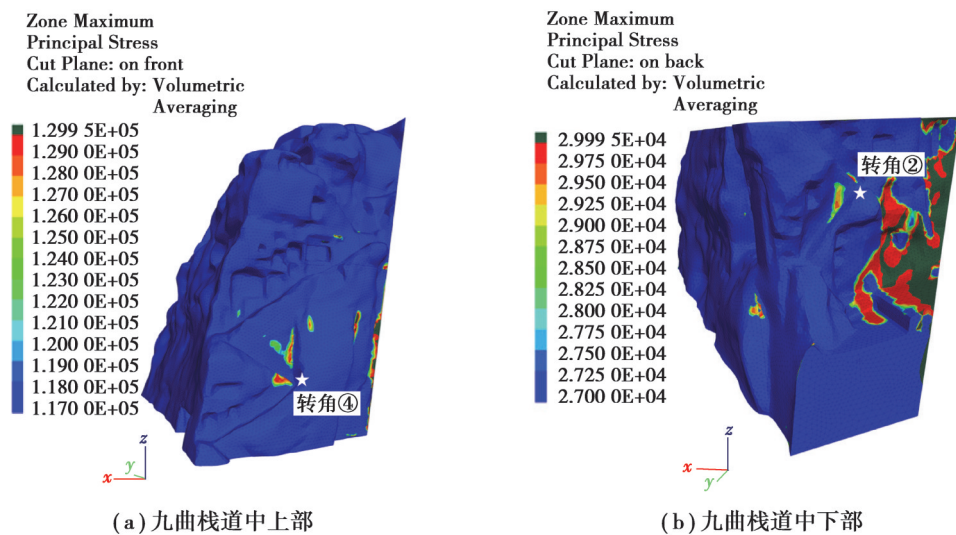


图11 行人静荷载下九曲栈道赋存岩体的最大主应力云图(单位:Pa)

Fig. 11 Maximum principal stress of rock mass in Jiuqu Plank Road under tourist static load (unit: Pa)

## 3.2 行人动荷载作用下稳定性分析

### 3.2.1 九曲栈道赋存岩体速度响应

采用表2中的动力参数,在栈道上施加同步行人荷载,进行行人荷载作用下的动力计算。图12为九曲栈道赋存岩体不同时刻下的速度分布图,在同步行人荷载作用下,整体速度响应水平较低,转角④、⑥、⑦处崖壁及临江佛龕边角处表层岩体的振动速度较大,少数位置速度最大,至25 mm/s,主要是由于该处地形起伏差



异大,荷载波传递至突变处频繁折反射,相互叠加致使速度增大。为掌握崖壁和栈道不同部位在行人动荷载作用下的振动速度,在崖壁西南侧边角、顶部平台、栈道转角及重要佛龕处设置监测点,监测点位置如图 13 所示。

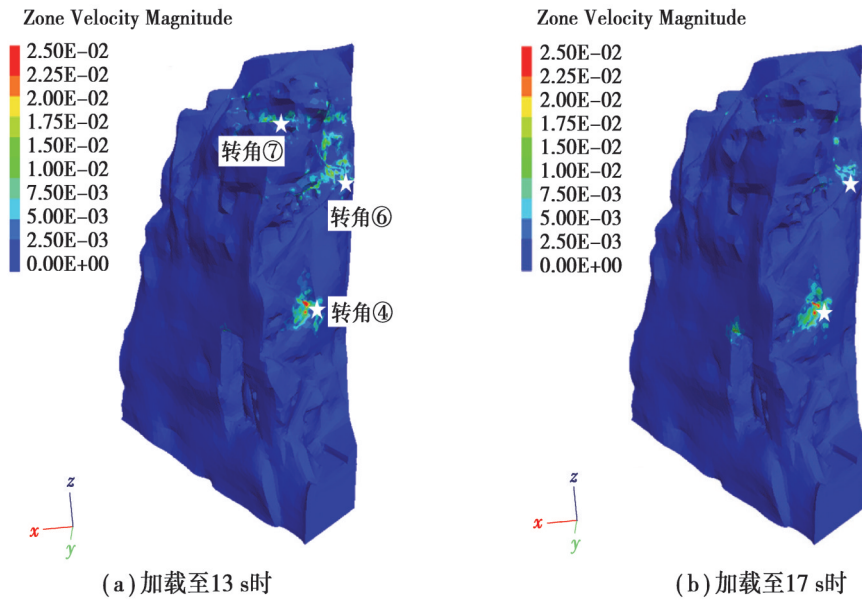


图 12 行人动荷载下不同时刻的速度云图(单位:m/s)

Fig. 12 Speed at different times under tourist dynamic load (unit: m/s)

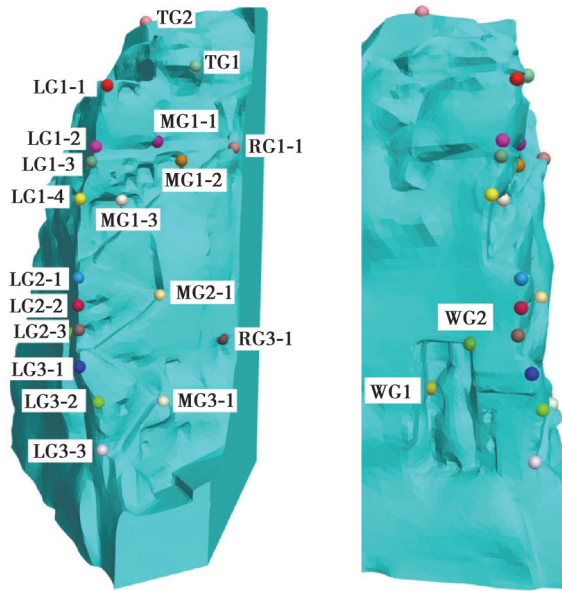


图 13 监测点位置图

Fig. 13 Location of monitoring points

根据数值计算结果,提取监测点 MG3-1 在同步行人荷载作用下的速度时程曲线,如图 14 所示。可以看出,同步行人动荷载作用下,MG3-1 处的水平向、竖向峰值速度分别为 0.73 mm/s、0.82 mm/s。项目实施过程中,在 MG3-1 对应位置布置了振动速度监测点,监测结果如图 15 所示。可以看出,MG3-1 测点实测水平向、竖向峰值速度分别为 0.66 mm/s、1.30 mm/s。将图 14 的计算结果和图 15 的实测结果对比可看出,计算结果和实测结果总体比较接近,水平向振动速度更加接近。对临空陡崖岩体稳定性的影响而言,水平向振动比竖向振动影响更大些。说明采用上述模型和参数进行行人荷载作用下九曲栈道赋存岩体的动力计算是合理的。

图 13 中其余监测点振动速度的计算结果如表 3 所示,栈道满布同步行人条件下,行人动荷载引起的各测

点的水平峰值速度为0.38~31.60 mm/s,其中,MG1-2处最大,TG2处最小;竖向峰值速度为0.25~18.10 mm/s,其中,MG1-2处最大,RG3-1处最小。现行《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T50452—2008)规定:以容许振动速度 $[v]$ 作为古建筑结构完整性保护的控制指标;当石窟砂岩的纵波波速大于1900 m/s时,容许振动速度 $[v]=0.13$  mm/s。九曲栈道赋存岩体实测声波纵波波速均大于2000 m/s, $[v]$ 取0.13 mm/s。行人动荷载作用下振动速度的计算结果及MG3-1测点的实测结果均大于容许值0.13 mm/s,部分测点的计算结果远大于容许值,说明在行人动荷载的长期作用下,九曲栈道赋存岩体可能发生疲劳破坏。

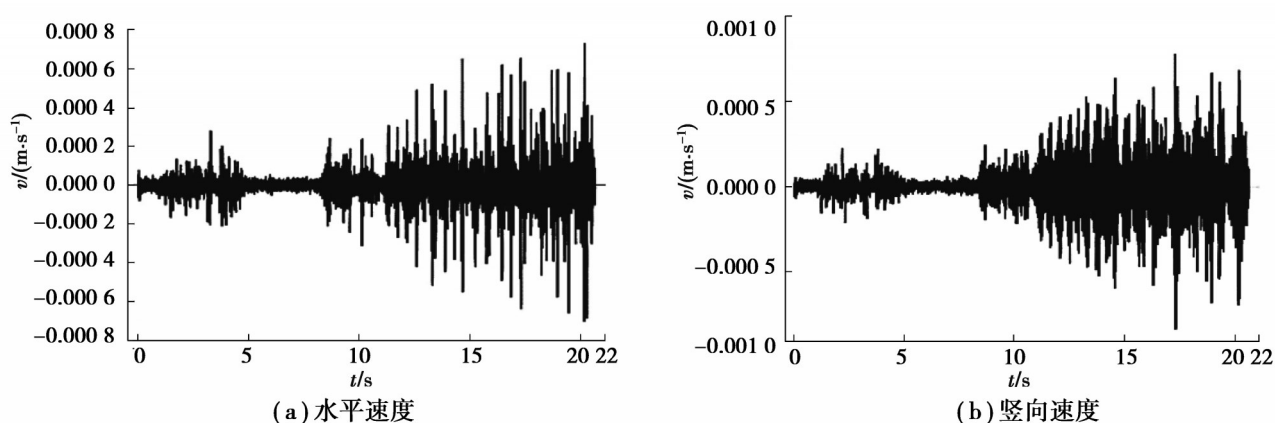


图14 MG3-1测点振动速度时程曲线

Fig. 14 Time history curve of vibration velocity at MG3-1

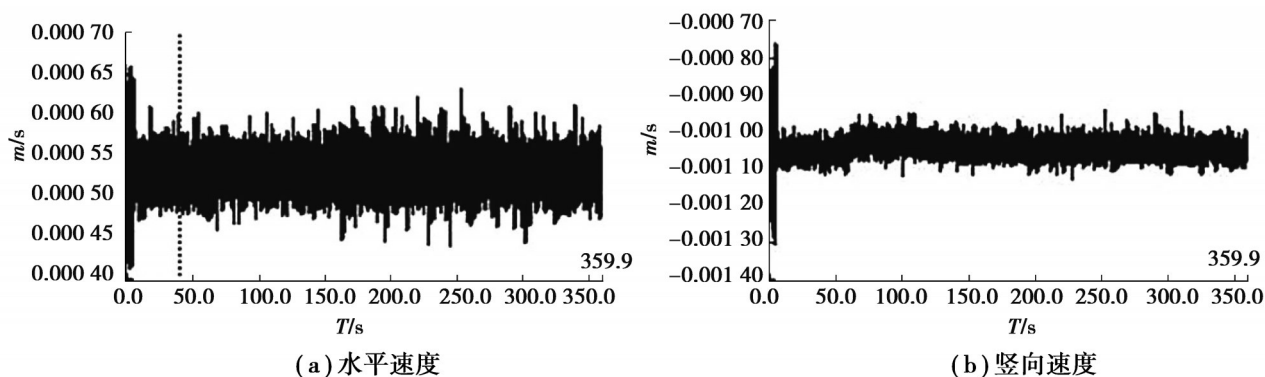


图15 MG3-1测点实测振动速度时程曲线

Fig. 15 Time history curve of actual test vibration velocity at MG3-1

表3 行人动荷载下监测点峰值速度

Table 3 Peak speed of monitoring points under tourist dynamic load

mm/s

监测点	X方向峰值速度	Y方向峰值速度	水平峰值速度	竖向峰值速度
LG1-1	1.39	1.40	1.58	1.52
LG1-2	4.21	4.24	4.82	4.07
LG1-3	7.32	6.75	9.61	8.91
LG1-4	1.46	1.49	1.76	1.27
LG2-1	4.18	1.81	4.21	4.29
LG2-2	5.51	2.32	5.67	1.79
LG2-3	3.61	2.95	3.78	3.57
LG3-1	2.46	0.62	2.53	0.77

续表 3

监测点	X方向峰值速度	Y方向峰值速度	水平峰值速度	竖向峰值速度
LG3-2	0.73	0.53	0.90	0.70
LG3-3	0.69	0.58	0.71	0.64
MG1-1	11.88	8.33	14.17	5.00
MG1-2	26.84	18.69	31.60	18.10
MG1-3	1.03	0.83	1.03	0.66
MG2-1	15.93	12.27	16.73	10.06
RG1-1	16.11	10.27	16.24	10.98
RG3-1	0.36	0.16	0.39	0.25
TG1	5.94	6.72	7.50	7.24
TG2	0.25	0.34	0.38	0.32
WG1	0.62	0.74	0.96	0.49
WG2	2.35	1.77	2.64	2.27

3.2.2 监测点处受力变形特点

选取图 12 中振动速度较大的监测点,根据动力计算结果提取测点对应单元的等效应力、应变最大值和强度应力比最小值,如图 16 所示。可以看出,除测点 RG1-1 外,这些行人荷载作用下振动速度较大部位的等效应力、应变都较小,强度应力比均接近 10。说明除 RG1-1 测点及其附近岩体外,其余部位在行人动荷载作用下不会发生破坏。从图 16 中还可看出,测点 RG1-1 的等效应力、应变相对较大,强度应力比小于 1,可能发生受拉破坏。为深入分析该测点的动力响应,根据计算结果提取 RG1-1 测点的强度应力比时程曲线,如图 17 所示。可以看出,该点的强度应力比只是瞬时小于 1。主要是由于每个计算周期结束后进行应力重分布,使得发生塑性流动的位置在下一循环中得到卸载,进而退出了塑性状态。结果表明,行人动荷载作用下,九曲栈道赋存岩体总体是稳定的,测点 RG1-1 所在的转角⑥处崖壁表层岩体虽未破坏,但属于稳定性相对较差的部位。

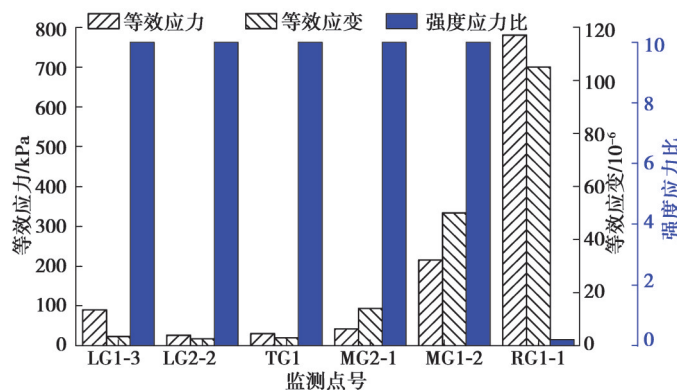


图 16 行人动荷载下监测点受力变形状态

Fig. 16 The stress and deformation status of monitoring points under tourist dynamic load

4 结 论

文中建立乐山大佛九曲栈道赋存岩体的精细化三维模型,采用数值计算方法对行人荷载作用下九曲栈

道赋存岩体的稳定性进行分析,得到以下主要结论:

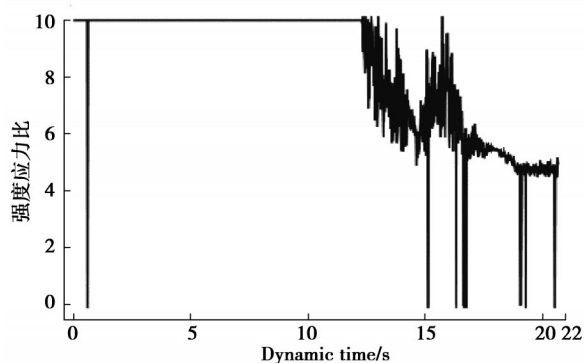


图 17 行人动荷载下监测点 RG1-1 的强度应力比时程曲线

Fig. 17 Time history curve of stress-strength ratio at RG1-1 under tourist dynamic load

1)行人静荷载作用下九曲栈道赋存岩体整体稳定,但 L1 裂隙底部、L15 裂隙中下部及栈道底部佛龕的表层岩体(厚度为 0.4 m)可能出现受拉破坏;转角②和④处崖壁、佛脚平台及临江面底部凸出部位的表层岩体(厚度为 0.6 m)后期也将进一步发展受拉破坏。

2)行人动荷载作用下九曲栈道赋存岩体的振动速度均超过规范容许值,长期作用下可能发生疲劳破坏。其中,转角④、⑥、⑦处崖壁和临江佛龕边角处表层岩体的振动速度较大,转角⑥处崖壁的表层岩体在行人动荷载作用下还可能发生瞬时受拉破坏。

#### 参考文献

- [ 1 ] 周俊其. 乐山大佛及石刻艺术研究[J]. 四川文物, 1995(1):28-34.  
Zhou J Q. Research on Leshan Giant Buddha and Stone Carving Art[J]. Sichuan Cultural Relics, 1995(1):28-34. (in Chinese)
- [ 2 ] Xie L N, Chen X Q, Zhang B J, et al. Preliminary assessment of the efficacy of nano-MgO-based dispersion for the consolidation of artificial weathered sandstone[J]. Archaeometry, 2022, 64(4): 997-1012.
- [ 3 ] Guo Z Q, Chen W W, Zhang J K, et al. Hazard assessment of potentially dangerous bodies within a cliff based on the Fuzzy-AHP method: a case study of the Mogao Grottoes, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76 (3): 1009-1020.
- [ 4 ] Corti G, Costagliola P, Bonini M, et al. Modelling the failure mechanisms of Michelangelo's David through small-scale centrifuge experiments[J]. Journal of Cultural Heritage, 2015, 16(1): 26-31.
- [ 5 ] Chen F L, Xu H, Zhou W, et al. Three-dimensional deformation monitoring and simulations for the preventive conservation of architectural heritage: a case study of the Angkor Wat Temple, Cambodia[J]. GIScience & Remote Sensing, 2021, 58(2): 217-234.
- [ 6 ] 黄蕾. 大足石刻卧佛造像区局部岩体稳定性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.  
Huang L. Evaluation of local rock stability on Dazu Rock Carving Niche of Sakyamuni Entering Nirvana[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023. (in Chinese)
- [ 7 ] 高相波, 李丽慧, 廖小辉, 等. 基于逆向工程建模方法的危岩体稳定性数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 557-564.  
Gao X B, Li L H, Liao X H, et al. Numerical simulation analysis of stability of unstable rock mass with reverse engineering modeling method[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 557-564.(in Chinese)
- [ 8 ] 万天同. 基于无人机倾斜摄影技术的高陡危岩体稳定性分析研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.  
Wan T T. Stability analysis of high steep and dangerous rock mass based on UAV oblique photography technology[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020. (in Chinese)
- [ 9 ] 黄皇. 圆觉洞纹层状砂岩围岩稳定性分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.  
Huang H. Stability analysis of the Yuanjue Cave laminated sandstone enclosure[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021. (in Chinese)

- [10] 何思明, 张晓刚, 沈均, 等. 乐山大佛景区景云亭危岩灾害分析及其防治研究[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 39-45.  
He S M, Zhang X G, Shen J, et al. Analysis and prevention of the unstable rock near jingyun pavilion in Leshan giant Buddha scenic area[J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(3): 39-45.(in Chinese)
- [11] 杨天宇, 刘于源. 乐山大佛岩体卸荷裂隙及影响初探[J]. 鄂州大学学报, 2018, 25(2): 106-109.  
Yang T Y, Liu Y Y. Preliminary study on unloading cracks and their influence in Leshan Giant Buddha rock mass[J]. Journal of Ezhou University, 2018, 25(2): 106-109.(in Chinese)
- [12] 马彪. 卸荷裂隙对乐山大佛右侧山体稳定性影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.  
Ma B. Study on the influence of unloading fissure on the stability of the Right Mass of Leshan Giant Buddha[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese)
- [13] 李红军, 刘成禹, 李云. 锚注联合支护效果的数值模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(7): 1-5.  
Li H J, Liu C Y, Li Y. Research on supporting effect of bolt-grouting combined support by means of numerical simulation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(7): 1-5.(in Chinese)
- [14] Itasca Consulting Group. Fast lagrangian analysis of continua in 3dimensions[M]. MN, USA: Itasca Consulting Group, Minneapolis, 2018.
- [15] Chen W W, Guo Z Q, Zhang J K, et al. Evaluation of long-term stability of mogao grottoes caves under enhanced loading conditions of tourists[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32(4): 04018048.
- [16] 张小青. 行人荷载下人行桥动力响应及振动控制研究[D]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2020.  
Zhang X Q. Study on dynamic response and vibration control of pedestrian bridge under pedestrian load[D]. Foshan: Foshan University, 2020. (in Chinese)
- [17] Chen J, Wang P C, Wang H Q. Pedestrian-induced load identification from structural responses using genetic algorithm with numerical and experimental validation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(3): 127-138.
- [18] Niu S H, Wang C F, Gao S Q. A novel crowd random loads model for pedestrians walking on footbridge[J]. Archive of Applied Mechanics, 2016, 86(7): 1369-1381.
- [19] Zhang P, Nordlund E, Swan G, et al. Velocity amplification of seismic waves through parallel fractures near a free surface in fractured rock: a theoretical study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(1): 199-213.
- [20] Ling F P, Li Q G, Qian Y N, et al. Research on attenuation law and application of elastic wave propagation in multi-coal seam fracture[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 861(5): 052029.
- [21] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 2版. 上海: 同济大学出版社, 2015.  
Shen M R, Chen J F. Rock mechanics[M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2015.(in Chinese)
- [22] Xu Y Z, Zhang F J, Xie P, et al. Numerical simulation research on rockburst prediction of Gaoloushan deep tunnel based on strength-stress ratio method[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 861(6): 062093.
- [23] Wang M, Cao P. Experimental study on the validity and rationality of four Brazilian disc tests[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(1): 63-76.

(编辑 陈移峰)