

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.10.010

川渝地区石窟窟檐的稳定性研究

冯新^{1a}, 刘成禹^{1a,1b}, 吴昌宇^{1c}, 麻润杰²

(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:川渝地区石窟主要开凿在砂泥岩交替出露的山体崖壁上, 崖壁上部自然岩体窟檐对下部造像区具有一定的保护作用。为分析窟檐在自然环境下的稳定性情况, 在对川渝地区石窟地层特点、窟檐岩体结构、窟檐尺寸范围及力学参数等调查基础上, 利用 FLAC^{3D} 对窟檐稳定性进行计算分析后发现, 依据窟檐结构特点的差异、卸荷裂隙是否存在以及发育位置的不同, 川渝地区石窟窟檐主要有 3 种破坏模式: 悬臂拉断破坏、倾倒破坏、软弱基座压溃破坏。进一步分析得到每种破坏模式的破坏特点、影响窟檐稳定性的主要因素及影响规律。最后, 给出窟檐稳定性评价参考表, 可为川渝地区石窟窟檐现场勘察和稳定性评价提供参考。

关键词:川渝石窟; 窟檐; 数值分析; 稳定性

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)10-138-11

Stability of grotto eaves in the Sichuan and Chongqing area

FENG Xin^{1a}, LIU Chengyu^{1a,1b}, WU Changyu^{1c}, MA Runjie²

(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. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, P. R. China)

Abstract: The grottoes in the Sichuan and Chongqing area are mainly carved into cliff walls where alternating layers of sandstone and mudstone are exposed. The natural rock eaves in the upper part of the cliffs provide protection for the sculptures in the lower part. To assess the stability of these eaves under natural conditions, this study investigates the stratigraphic characteristics, rock mass structure, dimensions and mechanical parameters of the eaves. With using FLAC^{3D} for calculation and analysis, three main failure modes are identified: cantilever tensile failure, toppling failure and soft foundation crushing failure. The study also identifies the damage characteristics, key factors affecting eaves stability and their effects. A stability evaluation reference table is provided for field investigations and stability evaluation of grottoes eaves in the Sichuan and Chongqing area.

Keywords: Sichuan and Chongqing grottoes; eaves; numerical analysis; stability

收稿日期: 2023-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(41272300)。

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

作者简介: 冯新(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事石质文物稳定性方向研究, (E-mail)fengxingguanghong@126.com。

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

窟檐作为石窟的重要保护屏障备受学者关注,杨赫赫^[1]指出莫高窟历史上曾修建过大量的窟檐建筑,目前保存较为完好的五座唐宋窟檐是我国古代木构建筑的经典。李庆红^[2]对响堂山石窟传统窟檐调查发现,千佛洞窟檐、华严洞窟檐及般若洞窟檐都是直接在山体崖壁上开凿的仿木构式窟檐。孙蓓^[3]使用仪器对龙门石窟宾阳洞的钢筋混凝土窟檐进行现场实测和结构荷载试验,对其安全性和耐久性进行评估。刘煜^[4]利用 ABAQUS 对宁夏须弥山石窟 5 号窟混凝土窟檐的地震动动力响应进行了数值模拟,发现窟檐整体的破坏模式为拉张-倾倒破坏。

由前文调查可知,目前关于窟檐的研究主要集中在人工建造的木构窟檐或钢筋混凝土窟檐上,而川渝地区石窟多开凿在砂泥岩交替出露的自然山体崖壁上^[5-6],石窟造像区佛像主要雕凿在崖壁下部质地细腻的软砂岩中,其上部整体性较好的坚硬砂岩则向外凸出形成窟檐^[7]。这种自然岩体构成的窟檐不仅对石窟本体影响较小,并且其结构强度和耐久性也远胜木材。典型代表就是大足石刻宝顶山大佛湾摩崖造像^[8],如图 1 所示。在川渝地区气候炎热多雨的情况下,自然岩体窟檐作为石窟寺的重要组成部分,能够防止石窟受到阳光直射和雨水的直接侵蚀作用。因此,针对川渝地区石窟窟檐的稳定性研究对石窟寺的长久保存具有一定的价值。

川渝地区石窟自然岩体窟檐相对下部造像区向外悬挑,可看成悬臂梁结构。针对这类结构的岩体稳定性研究,Kouguret 等^[9]利用悬臂梁模型研究海蚀崖边坡稳定性,指出悬臂岩体的折断塌落很大程度上取决于其凸出程度和后缘卸荷裂隙的发育程度。王健^[10]指出悬臂拉裂式崩塌常发育于近水平层状的陡峻岩质边坡。王朋^[11]结合武当山梳妆台危岩体稳定性影响因素,分析其可能的破坏模式有滑移、块体崩落、拉裂倾倒 3 种,并采用 3DEC 数值模拟对危岩体稳定性进行了评价。由于川渝地区地层特点的复杂性以及石窟保护的的特殊性,这些研究成果能否适用于川渝地区石窟窟檐还需要进一步研究。

本文在对川渝地区石窟窟檐调查基础上,利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对窟檐稳定性进行分析,得到了窟檐可能发生的 3 种破坏模式,同时对每种破坏模式下的窟檐稳定性影响因素进行分析,得到了其稳定性的主要控制因素。依据每种破坏模式的破坏特点和稳定性控制因素,指出其现场识别特征和勘察重点,最后给出窟檐临界失稳状态时的影响因素取值表,可为现场判别川渝地区石窟窟檐稳定性提供直观的数据参考。

1 川渝地区石窟窟檐的岩体结构特点

川渝地区石窟主要分布在西南典型“红层”地区^[12],多开凿在合适进深的自然山体崖壁上,其出露地层岩性变化强烈,以砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩为主,各种不等厚砂岩及砂泥岩地层相互交错。因此,在开凿石窟时因地制宜,利用崖壁上部整体性较好的自然悬挑岩体作为窟檐,对崖壁下部造像区起到一定保护作用。重庆、成都周边摩崖石窟多开凿于红色钙质砂岩山体上^[13-14],钙质砂岩硬度适中,整体结构的强度高,有利于自然岩体窟檐的运用。这种窟檐形式以大足石刻宝顶山大佛湾摩崖造像最为典型,故以其窟檐为例进行分析能很好地说明川渝地区石窟窟檐的普遍结构特点。

大佛湾北崖柳本尊至观经变区段崖壁位于整个大佛湾北岸西侧,由西至东可分为柳本尊、与佛有缘、地狱变、观经变 4 个小区域,各区的剖面图如图 2 所示。

1.1 窟檐结构特点

由图 2 可知,窟檐基本位于崖壁上部中粒砂岩地层,该层砂岩岩性较好,中粒结构,块状构造,完整性高,强度较下部造像区砂岩高。造像区位于崖壁中下部细粒砂岩、中细粒砂岩和泥质砂岩等地层,这些地层部分含泥量较高,岩性完整,裂隙少,质地均匀,属于较软岩,强度适中,是雕凿佛像的理想岩层^[15]。由于开凿在自然山体崖壁上,历经千年,石窟壁后发育有明显的卸荷裂隙^[16],其产状近似平行临空面,延展性及贯穿性较好,多为垂直向下贯通至造像区,成为控制窟檐稳定性的重要结构面。



图 1 宝顶山大佛湾摩崖造像

Fig. 1 Cliff Sculptures of Dafowan at Baodingshan

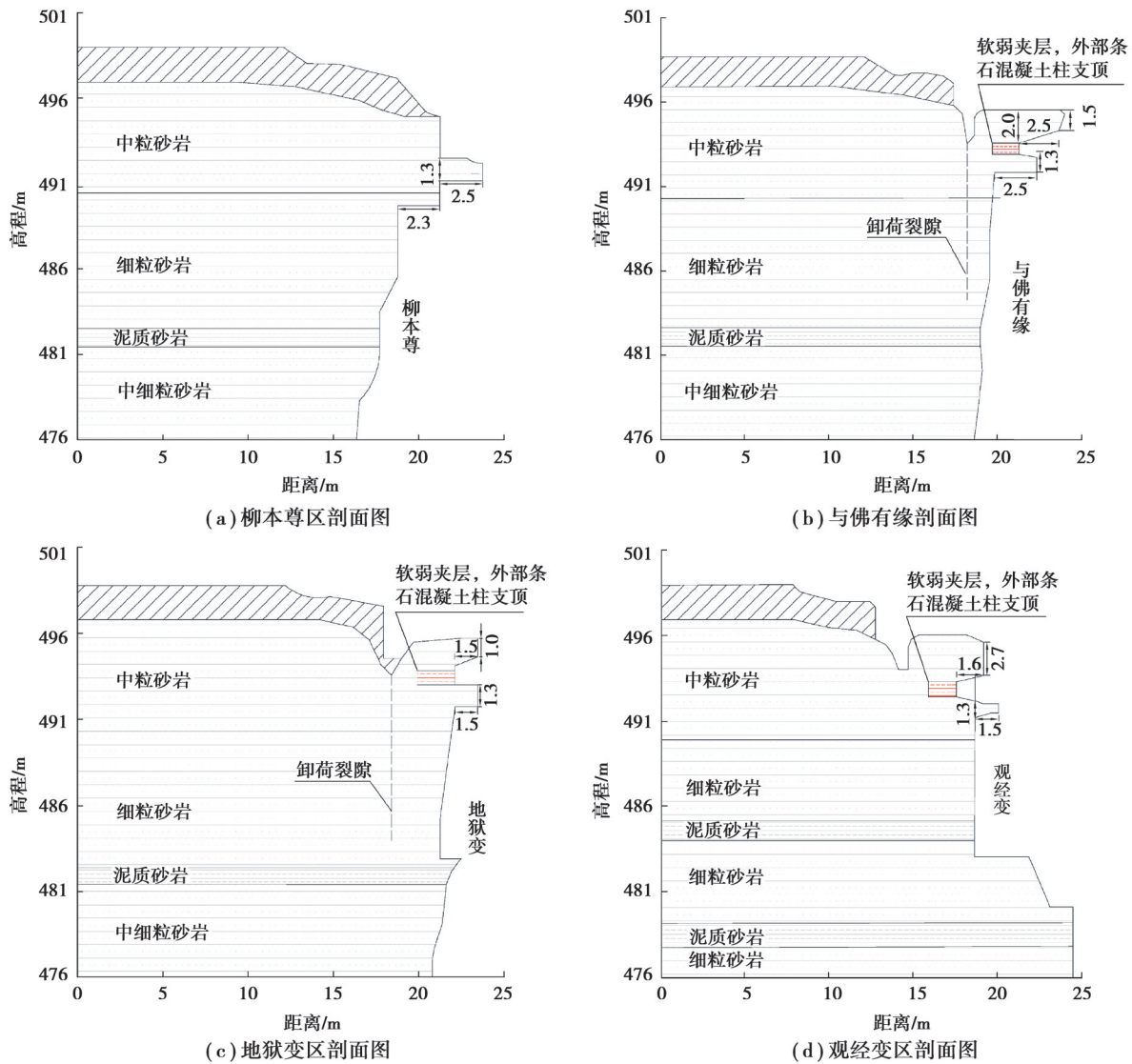
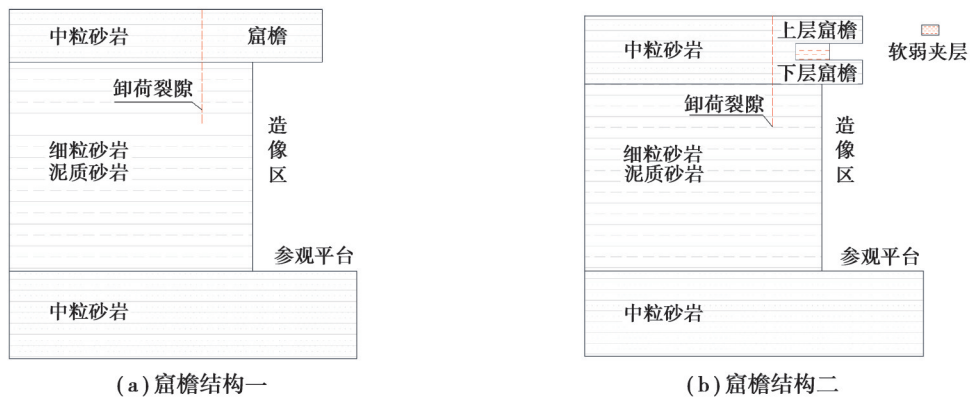


图 2 大佛湾北崖柳本尊至观经变区崖壁剖面图

Fig. 2 Section view of the north cliff at Dafowan from Liubenzun to Guanjingbian

窟檐结构可分为 2 种,第 1 种是 1 层岩体外悬形成的窟檐,比如,柳本尊区最外侧窟檐和观经变区下层窟檐,它们相对下部岩体突出的同时上部无接触岩体,可简化为图 3(a)所示结构。第 2 种是 2 层岩体同时外悬形成的窟檐,比如与佛有缘区窟檐和地狱变区窟檐,2 层窟檐间存在 1 软弱夹层,软弱夹层外部采用条石混凝土柱加固支顶,可简化为图 3(b)所示结构。



(a) 窟檐结构一

(b) 窟檐结构二

图 3 窟檐结构示意图

Fig. 3 Eave structure

1.2 窟檐尺寸范围

由图 2(a)可知,柳本尊区窟檐岩体呈台阶状,外侧窟檐悬挑长度 2.5 m,厚 1.3 m,内侧窟檐悬挑长度 2.3 m,厚 5 m。由图 2(b)可知,与佛有缘区窟檐 2 层悬挑,上层窟檐相对软弱夹层悬挑长度 2.5 m,内侧厚 2 m,外侧厚 1.5 m。下层窟檐悬挑长度 2.5 m,厚 1.3 m。由图 2(c)可知,地狱变区窟檐 2 层悬挑,上层窟檐相对软弱夹层悬挑长度 1.5 m,厚 1 m。下层窟檐悬挑长度 1.5 m,厚 1.3 m。由图 2(d)可知,观经变区窟檐 2 层悬挑,上层窟檐相对软弱夹层悬挑长度 1.6 m,厚 2.7 m。下层窟檐悬挑长度 1.5 m,厚 1 m。上述结果说明,窟檐悬挑长度在 1.5~2.5 m 之间,厚度大部分在 1~1.5 m 之间,较厚的可达 5 m,且窟檐为 2 层岩体外悬形成时,上下 2 层窟檐的尺寸一般较小。

1.3 窟檐与造像区岩体力学参数取值范围

上文分析得到,窟檐岩体岩性较好,主要为中粒砂岩,造像区岩体为细粒砂岩、泥质砂岩等较软岩,含泥量较高。张亦弛^[17]对川渝地区八处摩崖造像的岩石样品进行力学性能分析,发现同一摩崖造像处的若干样品之间也存在较大的力学性能差异,侧面说明窟檐岩体和造像区岩体之间的岩性差异,以同一摩崖造像处力学性能较好的砂岩作为窟檐岩体,力学性能较差的砂岩作为造像区岩体。孟志刚^[18]基于室内岩石实验成果,给出大佛湾南崖壁各地层岩性参数。另外,王俊杰^[19]以重庆地区砂泥岩为研究对象,通过室内实验研究其主要物理力学特性。许强^[20]针对四川盆地红层的强度特性进行了大量研究,总结得到四川盆地主要红层地层力学参数。参考上述学者研究成果,结合《重庆工程地质勘察规范》(DBJ50/T—043—2016),汇总得到川渝地区石窟岩石力学参数取值范围,如表 1 所示。

表 1 川渝地区石窟岩石力学参数调查表

Table 1 Rock mechanics parameters of grottoes in Sichuan and Chongqing

岩层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	重度/(kN·m ⁻³)	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
窟檐	6.80~10.60	4.20~7.30	22.1~25.4	0.12~0.29	1.500~2.300	35.7~46.8
造像区	4.70~8.50	3.40~6.20	21.5~24.9	0.10~0.20	0.900~2.100	26.9~40.6
软弱夹层	0.15~0.43	0.08~0.24	17.3~21.7	0	0.009~0.033	14.1~26.3

2 窟檐可能的失稳模式

由于窟檐外悬结构特点不同、卸荷裂隙发育位置不同,窟檐的受力情况不同,从而产生不同的破坏特点。通过 FLAC^{3D} 对其进行模拟,在对计算模型在自重状态下的主应力场、塑性区分析后,得到窟檐具有 3 种破坏模式:悬臂拉断破坏、倾倒破坏和软弱基座压溃破坏。

2.1 计算模型和参数

由于川渝地区石窟特殊的地层特点,岩石物理力学性质只在垂直方向上不同岩层间变化较大,而沿岩层平面内基本一致,水平方向的宽度变化对计算结果影响较小,可考虑二维模型。本研究着重于窟檐的稳定性分析,因此,建立能够反映出窟檐结构特点的概化模型即可,如图 4 所示。模型 1 为单层岩体外悬形成的窟檐,整个模型高 10 m,宽 10 m,窟檐悬挑长度参考大足石刻大佛湾摩崖造像区窟檐尺寸,取其范围平均值 2 m,厚度取其范围平均值 1 m。模型 2 为 2 层岩体外悬形成的窟檐,整个模型高 12 m,宽 10 m,2 层窟檐的悬挑尺寸一般较小,故取其范围较小值,下层窟檐悬挑长度取 1.5 m,厚度取 1 m,上层窟檐相对软弱夹层悬挑长度取 1 m,厚度取 1.5 m。模型的本构关系选择为摩尔—库伦准则,卸荷裂隙采用 interface 结构面模拟。模型的下边界施加水平和竖直位移约束,左右边界施加水平位移约束,上部和临空面为自由边界。根据模型几何尺寸合理划分网格单元。

岩体力学参数取值参考表 1,取其平均值,计算时主要考虑窟檐和造像区的岩体力学性质差异,下部砂岩与窟檐的岩体力学参数取值相同,卸荷裂隙取值参考相关规范,最后的取值结果见表 2。

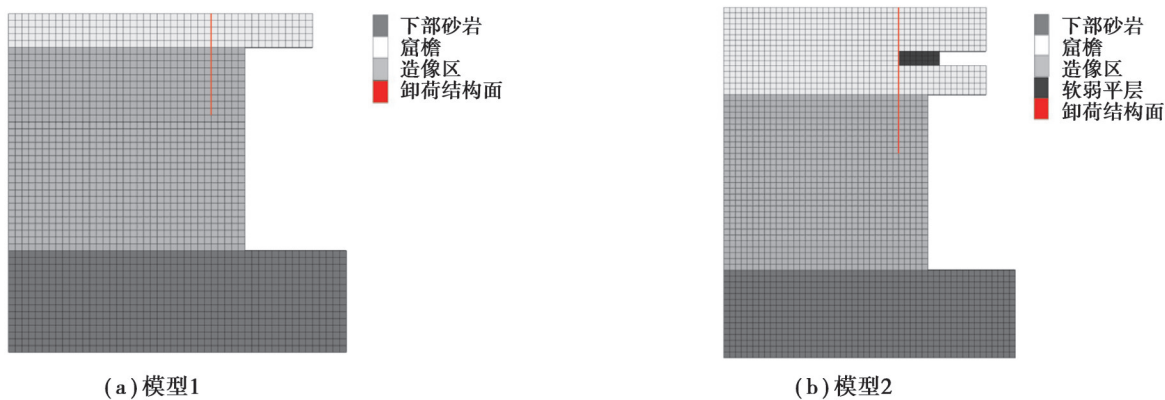


图 4 计算模型

Fig. 4 Calculation model

表 2 计算参数表

Table 2 Calculation parameters

岩层	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗拉强度 /MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	法向刚度 /($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向刚度 /($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)
窟檐/ 下部砂岩	8.70	5.70	23.8	0.20	1.900	41.3	—	—
造像区	6.60	4.80	23.2	0.15	1.500	33.8	—	—
软弱夹层	0.29	0.16	19.5	0	0.021	20.2	—	—
卸荷裂隙	—	—	—	—	0	20.0	1 000	1 000

2.2 悬臂拉断破坏

窟檐由单层岩体外悬形成时,若石窟崖壁后方不存在卸荷裂隙或卸荷裂隙离临空面较远,窟檐可看成一端固定的悬臂梁,在偏心重力作用下,窟檐端部受到较大拉应力,极易发生拉断破坏,其数值模拟结果如图 5 所示(窟檐悬挑长度为 2 m,窟檐厚度为 1 m,卸荷裂隙距临空面 2 m)。

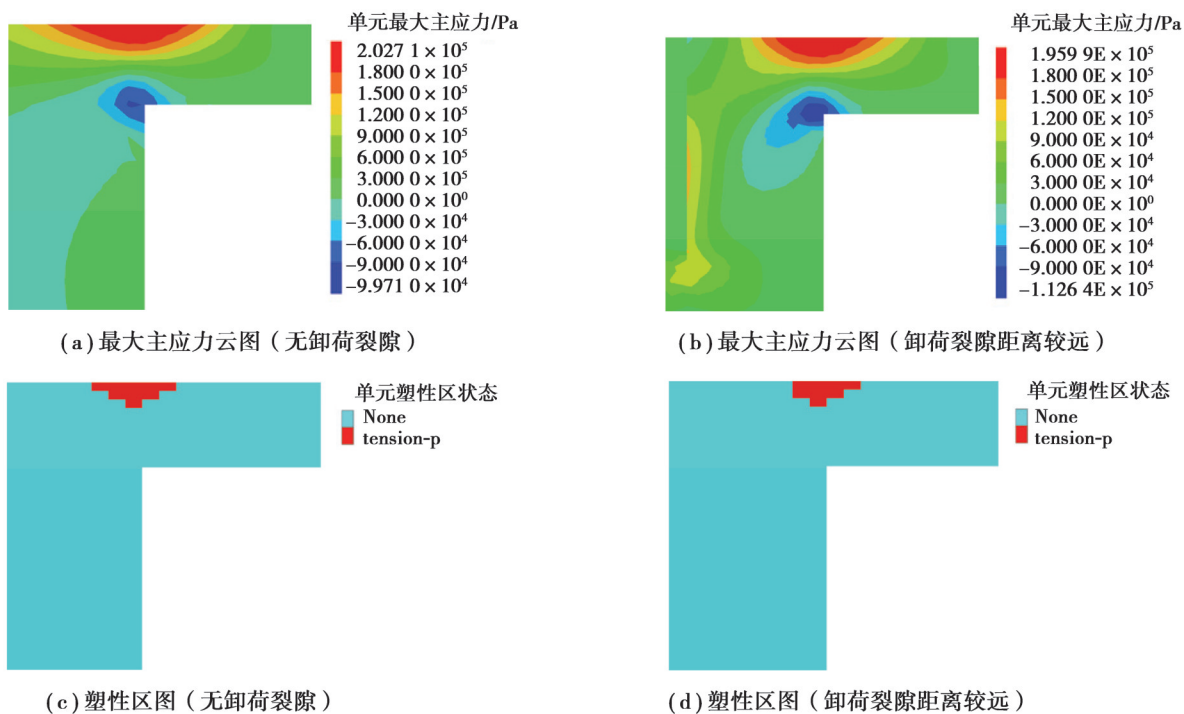


图 5 悬臂拉断破坏模拟结果图

Fig. 5 Simulation results of cantilever tensile failure

由图 5(a)(b)最大主应力云图可知,最大主应力集中在窟檐端部附近,上侧表现为拉应力集中,最大值达 0.20 MPa(窟檐岩体抗拉强度),下侧表现为压应力集中。当卸荷裂隙距临空面 2 m 时(窟檐悬挑长度为 2 m、窟檐厚度为 1 m),卸荷裂隙附近虽然出现拉应力集中现象,但对窟檐受力状态的影响很小。由图 5(c)(d)塑性区图可知,窟檐端部附近表现为受拉破坏塑性区,说明窟檐端部岩体发生受拉破坏。

上述结果说明,窟檐受力状态与一端固定的悬臂梁相似,上侧受拉下侧受压,当窟檐端部上侧岩体受到的拉应力大于其抗拉强度时,发生受拉破坏,产生拉裂隙,外悬窟檐与后侧岩体逐渐分离,在自重作用下崩落,发生悬臂拉断破坏。所以窟檐端部上侧岩体受到的拉应力大小是评价其稳定性的关键指标。计算结果分析发现,窟檐端部拉应力大小主要受窟檐悬挑长度和窟檐厚度的影响,所以悬臂拉断破坏型窟檐的稳定性主要受窟檐悬挑长度和窟檐厚度的影响。

2.3 倾倒破坏

窟檐由单层岩体外悬形成时,若石窟后缘发育有 1 条较深的卸荷裂隙,窟檐与后部岩体组成危岩体。由于窟檐外悬,危岩体重心外移,在重力作用下沿底部发生转动向临空面倾倒。在形成力学机制上为倾覆力矩大于抗倾覆力矩引起岩石块体转动,其数值模拟结果如图 6 所示(窟檐悬挑长度为 2 m,窟檐厚度为 1.5 m,卸荷裂隙距离临空面 1 m)。

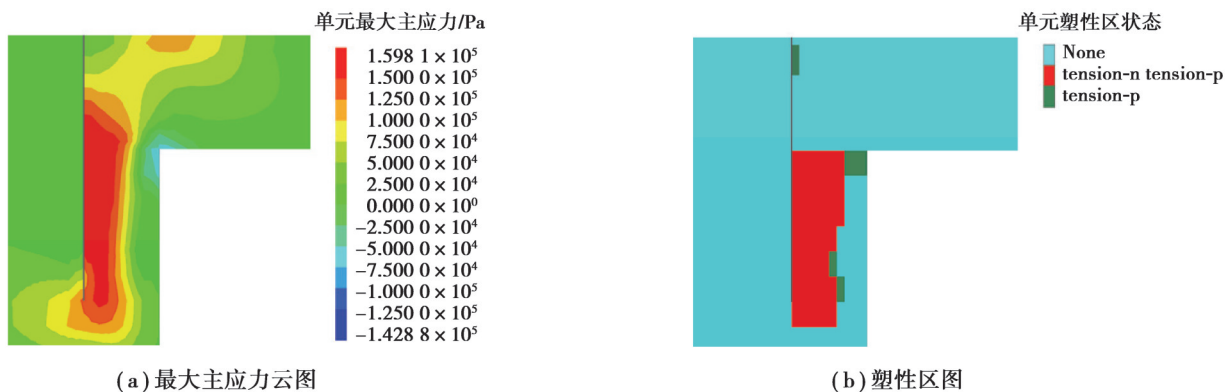


图 6 倾倒破坏模拟结果图

Fig. 6 Simulation results of toppling failure

由图 6(a)最大主应力云图可知,最大主应力集中在卸荷裂隙右侧(靠近临空面一侧)附近,表现为拉应力,最大值达 0.15 MPa(造像区岩体抗拉强度)。由图 6(b)塑性区图可知,卸荷裂隙右侧(靠近临空面一侧)附近表现为受拉破坏塑性区。说明窟檐下部卸荷裂隙右侧岩体发生受拉破坏。

上述结果说明,在窟檐重力作用的影响下,整个危岩体具有向外倾倒的趋势,导致卸荷裂隙附近造像区岩体受到较大的拉应力,当其受到的拉应力大于其抗拉强度时,发生受拉破坏,卸荷裂隙逐渐发育扩展,危岩体沿底部向外转动,发生倾倒破坏。所以卸荷裂隙右侧岩体受到的拉应力大小是评价其稳定性的关键指标。计算结果分析发现,卸荷裂隙右侧岩体拉应力大小主要受窟檐悬挑长度、窟檐厚度、卸荷裂隙离临空面距离的影响,所以倾倒破坏型窟檐的稳定性主要受窟檐悬挑长度、窟檐厚度、卸荷裂隙离临空面距离的影响。

2.4 软弱基座压溃破坏

窟檐由 2 层岩体外悬形成时,2 层窟檐间的软弱夹层在上层窟檐重力作用下出现压溃、鼓胀破坏,上层窟檐失去支撑,在重力作用下向临空面倾倒,其数值模拟结果如图 7 所示(计算模型 2)。

由图 7(a)最大主应力云图可知,最大主应力集中在卸荷裂隙右侧(靠近临空面一侧)附近和下层窟檐端部,表现为拉应力,但软弱夹层处存在压应力集中现象。由图 7(b)塑性区图可知,卸荷裂隙右侧(靠近临空面一侧)附近表现为受拉破坏塑性区,软弱夹层处表现为剪切破坏塑性区。说明软弱夹层在上层窟檐的重力作用下发生压剪破坏。

上述结果说明,软弱夹层在上层窟檐重力作用下产生压应力集中,受到较大的压应力,由于其抗剪强度

较差,极易发生压剪破坏。软弱夹层在上层窟檐长期重力作用下还易产生压溃破坏,向外塑性流动,导致上层窟檐失去支撑发生破坏。所以软弱夹层受到的压应力大小是评价其稳定性的关键指标。计算结果分析发现,软弱夹层受到的压应力大小主要受上层窟檐厚度、上层窟檐悬挑长度的影响,所以软弱基座压溃破坏型窟檐的稳定性主要受上层窟檐厚度、上层窟檐悬挑长度的影响。

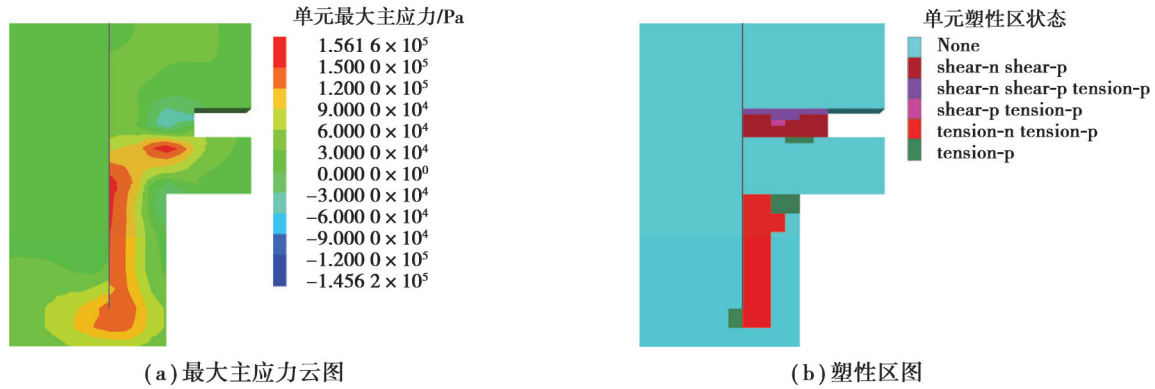


图7 软弱基座压溃破坏模拟结果图

Fig. 7 Simulation results of soft foundation crushing failure

3 影响窟檐稳定性的主要因素及影响规律

3.1 悬臂拉断破坏

窟檐端部受到的拉应力大于其抗拉强度时,发生受拉破坏,导致窟檐失稳发生悬臂拉断破坏。所以以窟檐端部拉应力作为其稳定性的评价依据。保持窟檐厚度一定(0.6 m),改变窟檐悬挑长度多次计算,得到窟檐端部拉应力随窟檐悬挑长度变化曲线图,按相同方法得到窟檐端部拉应力随窟檐厚度变化曲线图(窟檐悬挑长度保持1 m),如图8所示。通过分析窟檐端部拉应力变化趋势,揭示窟檐悬挑长度、窟檐厚度对窟檐稳定性的影响规律。

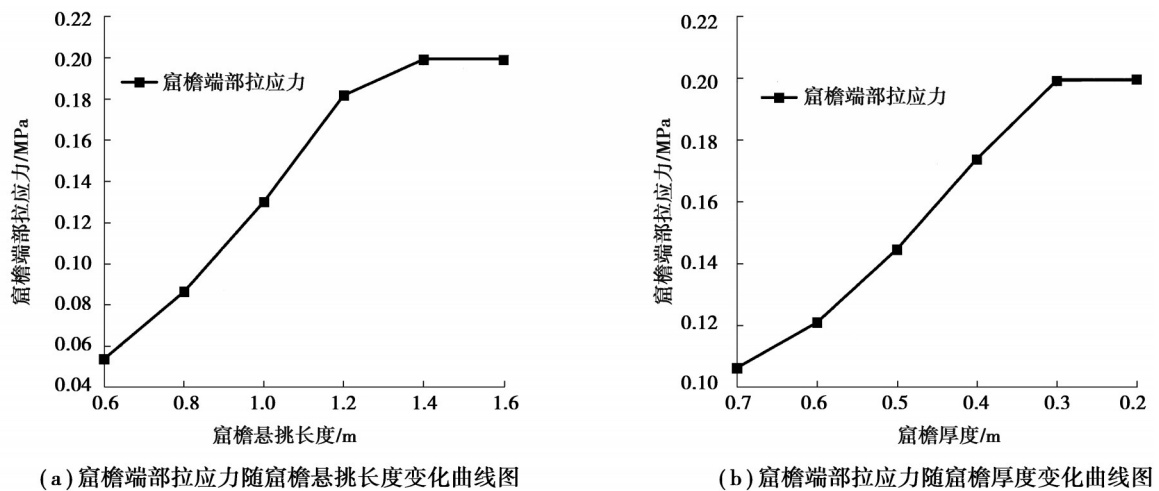


图8 悬臂拉断破坏稳定性分析

Fig. 8 Stability analysis of cantilever tensile failure

由图8可以看出,窟檐端部拉应力随窟檐悬挑长度,窟檐厚度的变化趋势基本相同。随着窟檐悬挑长度的增大,窟檐厚度的降低,窟檐端部拉应力不断增大,说明窟檐稳定性不断降低。当窟檐悬挑长度大于1.4 m,窟檐厚度小于0.3 m时,窟檐端部拉应力不再增加,保持在0.2 MPa(窟檐岩体抗拉强度)附近,说明此时窟檐端部发生受拉破坏。

上述结果表明,当其他影响因素不变时,窟檐悬挑长度越大、窟檐厚度越小,悬臂拉断破坏型窟檐稳定性越差。当窟檐悬挑长度大于 1.4 m(窟檐厚度为 0.6 m),窟檐厚度小于 0.3 m(窟檐悬挑长度为 1 m)时,窟檐失稳发生悬臂拉断破坏。

3.2 倾倒破坏

卸荷裂隙右侧造像区岩体受到的拉应力大于其抗拉强度时,发生受拉破坏,导致窟檐失稳发生倾倒破坏。所以以造像区岩体拉应力作为其稳定性的评价依据。保持其他影响因素不变的情况下,得到造像区岩体拉应力随窟檐悬挑长度、窟檐厚度、卸荷裂隙离临空面距离变化曲线图,如图 9 所示。通过分析造像区岩体拉应力变化趋势,揭示窟檐悬挑长度、窟檐厚度、卸荷裂隙位置对窟檐稳定性的影响规律。

由图 9 可以看出,造像区岩体拉应力随窟檐悬挑长度、窟檐厚度、卸荷裂隙离临空面距离的变化趋势基本相同。随着窟檐悬挑长度的增大、窟檐厚度的增大、卸荷裂隙离临空面距离的降低,造像区岩体拉应力不断增大,说明窟檐稳定性不断降低。当窟檐悬挑长度大于 1.2 m,窟檐厚度大于 1.1 m,卸荷裂隙离临空面距离小于 0.8 m 时,造像区岩体拉应力不再增加,保持在 0.15 MPa(造像区岩体抗拉强度)附近,说明此时造像区岩体发生受拉破坏。

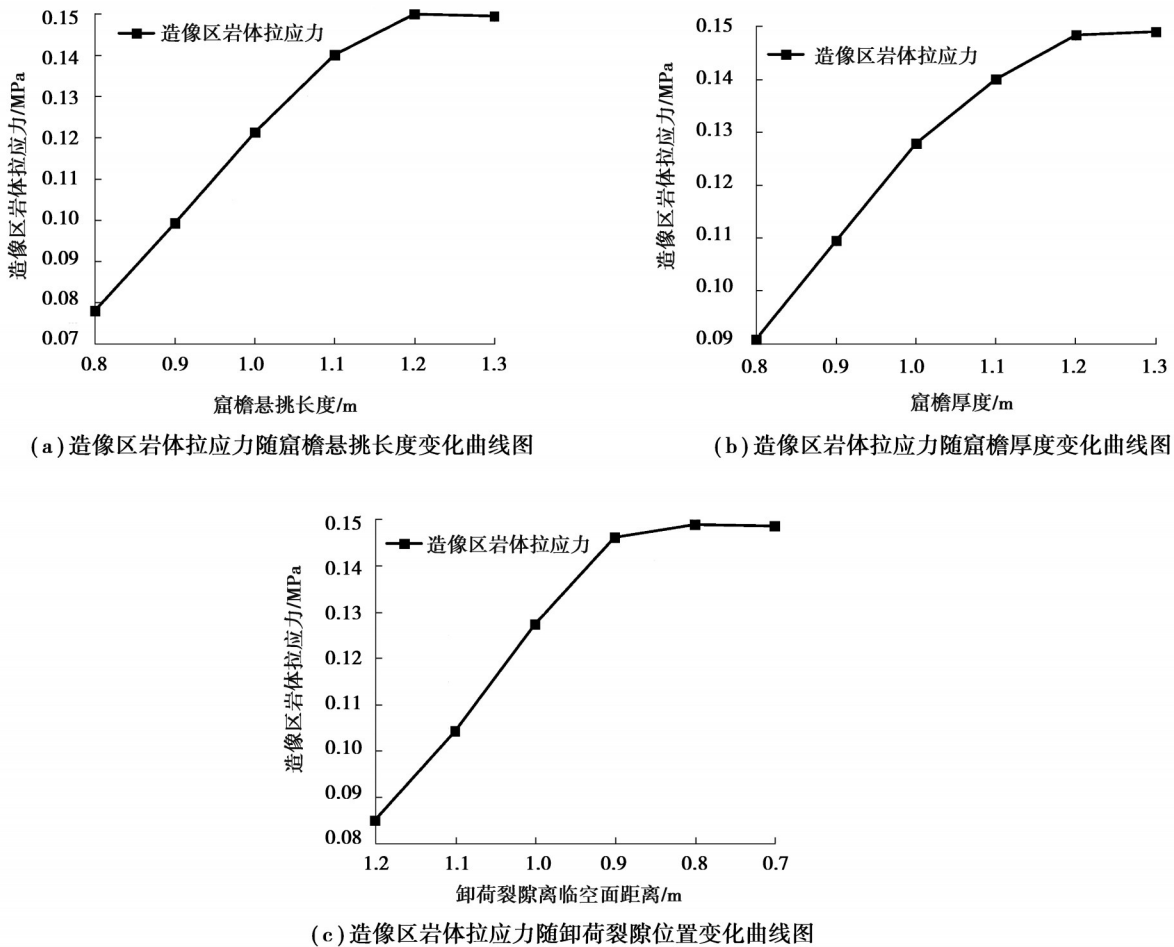


图 9 倾倒破坏稳定性分析曲线图

Fig. 9 Stability analysis of toppling failure

上述结果表明,当其他影响因素不变时,窟檐悬挑长度越大、窟檐厚度越大、卸荷裂隙离临空面越近,倾倒破坏型窟檐稳定性越差。当窟檐悬挑长度大于 1.2 m(窟檐厚度为 1.5 m,卸荷裂隙距离临空面 1 m),窟檐厚度大于 1.1 m 时(窟檐悬挑长度为 1.5 m,卸荷裂隙距离临空面 1 m),卸荷裂隙离临空面距离小于 0.8 m(窟檐悬挑长度为 1.4 m,窟檐厚度为 1 m)时,窟檐失稳发生倾倒破坏。

3.3 软弱基座压溃破坏

FLAC^{3D}中摩尔库伦本构模型压剪破坏方程为

$$f^s = -\sigma_3 + \sigma_1 N_\varphi - 2c\sqrt{N_\varphi} = 0, \quad (1)$$

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}, \quad (2)$$

式中： σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力(压应力为负)； c 为黏聚力； φ 为内摩擦角。

当材料的 c 、 φ 确定后,是否发生压剪破坏与它受到的最大、最小主应力 σ_1 、 σ_3 有关,在数值模拟过程中监测软弱夹层的最大、最小主应力 σ_1 、 σ_3 ,得到 $f(\sigma_1, \sigma_3) = -\sigma_3 + \sigma_1 N_\varphi$ 与定值 $2c\sqrt{N_\varphi}$ (约等于60 kPa)的关系,可作为软弱基座压溃破坏型窟檐稳定性的评价指标。保持其他影响因素不变的条件下,得到 $f(\sigma_1, \sigma_3)$ 随上层窟檐悬挑长度、上层窟檐厚度变化曲线图,如图10所示。通过分析 $f(\sigma_1, \sigma_3)$ 变化趋势,揭示上层窟檐悬挑长度、上层窟檐厚度对窟檐稳定性的影响规律。

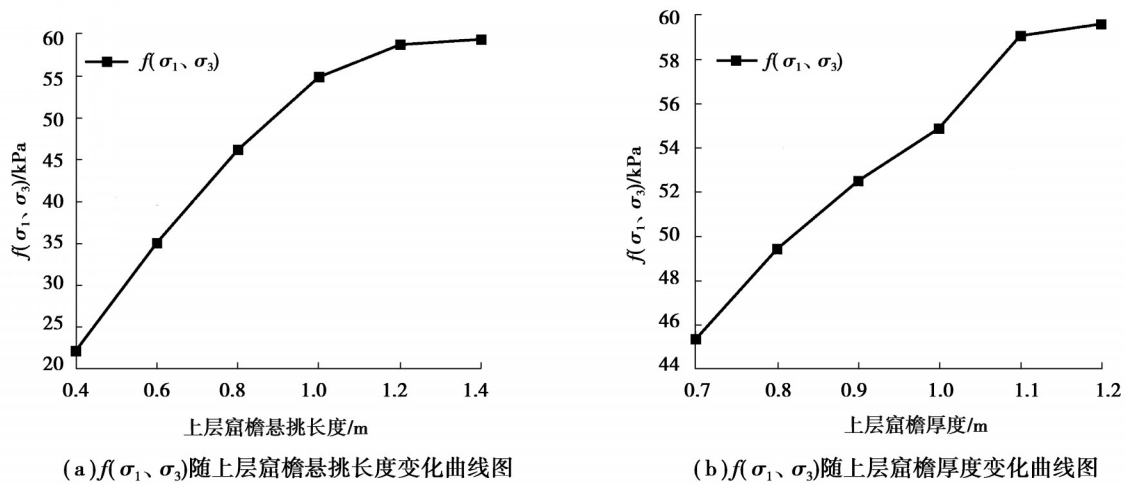


图10 软弱基座压溃破坏稳定性分析曲线图

Fig. 10 Stability analysis of soft foundation crushing failure

由图10可以看出, $f(\sigma_1, \sigma_3)$ 随着上层窟檐悬挑长度、上层窟檐厚度的变化趋势基本相同。随着上层窟檐悬挑长度的增大,上层窟檐厚度的增大, $f(\sigma_1, \sigma_3)$ 不断增大,越来越接近60 kPa($2c\sqrt{N_\varphi}$),说明窟檐稳定性不断降低。当上层窟檐悬挑长度大于1.2 m时、上层窟檐厚度大于1.1 m时, $f(\sigma_1, \sigma_3)$ 不再增加,保持在60 kPa($2c\sqrt{N_\varphi}$)附近,说明此时软弱夹层发生压剪破坏。

上述结果表明,当软弱夹层的 c 、 φ 确定后,上层窟檐悬挑长度越大,上层窟檐厚度越大,软弱基座压溃破坏型窟檐稳定性越差。当上层窟檐悬挑长度大于1.2 m(上层窟檐厚度为1 m)、上层窟檐厚度大于1.1 m(上层窟檐悬挑长度为1 m)时,窟檐失稳发生软弱基座压溃破坏。

4 窟檐稳定性评价

窟檐由单层岩体外悬形成时,若其后部无卸荷裂隙或卸荷裂隙距离较远,可能发生悬臂拉断破坏,若其后部发育有一条贯穿至下部造像区的卸荷裂隙,可能发生倾倒破坏。2层窟檐间存在软弱夹层时,可能发生软弱基座压溃破坏。在开展川渝地区石窟窟檐现场勘察时,先明确窟檐结构类型、是否存在卸荷裂隙以及卸荷裂隙的发育位置,确定窟檐可能发生的破坏模式,再依据每种破坏模式的破坏特点和稳定性影响因素进行精细化勘察,如表3所示。

在利用FLAC^{3D}对窟檐稳定性进行分析时,保持其他影响因素一定,对某一影响因素设置一系列值,可以得到窟檐稳定性评价指标随该影响因素的变化曲线,基于上一章的窟檐失稳判断方法,得到窟檐进入失稳状

态时各影响因素的临界值,表 4 可为川渝地区石窟窟檐的稳定性评价提供依据。

表 3 川渝地区石窟窟檐现场勘察表
Table 3 Field survey of eaves in Sichuan and Chongqing

破坏模式	破坏特点	稳定性影响因素	现场勘察重点
悬臂拉断破坏 (无卸荷裂隙或卸荷裂隙距离较远)	窟檐端部受到较大拉应力,发生受拉破坏,外悬窟檐崩落	窟檐悬挑长度、窟檐厚度影响其端部拉应力大小	窟檐岩体抗拉强度、窟檐悬挑长度、窟檐厚度
倾倒破坏 (窟檐后缘卸荷裂隙向下贯通至造像区)	卸荷裂隙附近岩体发生受拉破坏,窟檐在沿底部发生转动向外倾倒	窟檐悬挑长度、窟檐厚度、卸荷裂隙位置影响卸荷裂隙附近岩体拉应力大小	造像区岩体抗拉强度、窟檐悬挑长度、窟檐厚度、卸荷裂隙位置
软弱基座压溃破坏 (2层窟檐间存在软弱夹层)	软弱夹层在上层窟檐的压力作用下出现压溃、鼓胀破坏,上层窟檐失去支撑向外倾倒	上层窟檐悬挑长度、上层窟檐厚度影响软弱夹层是否发生压剪破坏	软弱夹层力学参数(c 、 ϕ 等)、上层窟檐悬挑长度、上层窟檐厚度

表 4 川渝地区石窟窟檐稳定性评价参考表
Table 4 Stability evaluation of eaves in Sichuan and Chongqing

							m
悬臂	窟檐悬挑长度	窟檐厚度	窟檐悬挑长度	窟檐厚度	窟檐悬挑长度	窟檐厚度	
拉断	0.8	0.2	1.1	0.4	1.4	0.6	
破坏	1.0	0.3	1.2	0.5	1.5	0.7	
倾倒	窟檐悬挑长度	窟檐厚度	卸荷裂隙离临空面距离	窟檐悬挑长度	窟檐厚度	卸荷裂隙离临空面距离	
破坏	1.4	1.0	0.8	1.5	1.1	1.0	
	1.2	1.2	0.8	1.5	1.4	1.2	
	1.2	1.5	1.0	1.2	1.6	1.2	
软弱	上层窟檐悬挑长度	上层窟檐厚度	上层窟檐悬挑长度	上层窟檐厚度	上层窟檐悬挑长度	上层窟檐厚度	
基座	0.6	1.5	1.0	1.1	1.4	0.9	
压溃	0.8	1.3	1.2	1.0	1.6	0.7	
破坏							

5 结 论

本文在对川渝地区石窟窟檐调查基础上,利用FLAC^{3D}数值模拟软件对窟檐稳定性进行计算分析,得到下列主要结论:

1)由于窟檐结构特点的差异、卸荷裂隙是否存在以及发育位置的不同,川渝地区石窟窟檐主要有3种破坏模式:悬臂拉断破坏、倾倒破坏、软弱基座压溃破坏。悬臂拉断破坏型窟檐的窟檐端部发生拉破坏;倾倒破坏型窟檐的卸荷裂隙附近岩体发生受拉破坏;软弱基座压溃破坏型窟檐的软弱夹层发生压剪破坏。

2)窟檐悬挑长度越大、窟檐厚度越小,悬臂拉断破坏型窟檐的稳定性越差;窟檐悬挑长度越大、窟檐厚度越大、卸荷裂隙距离临空面越近,倾倒破坏型窟檐的稳定性越差;上层窟檐悬挑长度越大、上层窟檐厚度越大,软弱基座压溃破坏型窟檐的稳定性越差。

3)依据窟檐每种破坏模式的破坏特点和稳定性控制因素,指出窟檐现场勘察重点并给出稳定性评价参考表,可为川渝地区石窟窟檐现场勘察和稳定性评价提供参考。

参考文献

- [1] Yang H H, Wang Q H. The architectural form and structural characteristics of Dunhuang Mogao grottoes[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022,52(2):199-212.
- [2] 李庆红, 朱伟. 响堂山石窟传统窟檐调查研究[J]. 建筑与文化, 2020(9): 92-94.
Li Q H, Zhu W. Investigation and research on traditional grottoes eaves in Xiangtang Mountain Grottoe[J]. Architecture & Culture, 2020(9): 92-94.(in Chinese)
- [3] 孙蓓, 李文成. 龙门石窟宾阳洞窟檐稳定性评估研究[J]. 南阳理工学院学报, 2022, 14(4): 103-109.
Sun B, Li W C. Evaluation of the eaves stability of Binyang Cave in Longmen Grottoes[J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2022, 14(4): 103-109.(in Chinese)
- [4] Liu Y, Cui D S, Yang H N, et al. Seismic dynamic response simulation of the eaves of cave No.5 of Xumishan Grottoes[J]. Safety and Environmental Engineering,2022,29(4):101-109.
- [5] 李飞. 川渝地区石窟及摩崖造像调查研究综述(2011-2020年)[J]. 四川文物, 2021(5): 83-103.
Li F. An overview of surveys and studies on grottoes and cliff carvings in Sichuan and Chongqing during the recent decade (2011-2020)[J]. Sichuan Cultural Relics, 2021(5): 83-103.(in Chinese)
- [6] 林从华, 张兴国. 巴蜀摩崖石刻中心柱窟探源[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(3): 1-3.
Lin C H, Zhang X G. Exploring the origin of central pillar grotto of bashu Cliffside Carvings[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(3): 1-3.(in Chinese)
- [7] 吕宁. 川渝地区石窟窟檐的建筑学浅析[J]. 中国文化遗产, 2018(5): 14-24.
Lv N. Architectural analysis of the eaves of grottoes in Sichuan and Chongqing areas[J]. China Cultural Heritage, 2018(5): 14-24.(in Chinese)
- [8] 裴强强, 陈嘉睿, 郭青林. 石窟寺窟檐保存现状与保护对策思考[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2022, 52(2): 142-156.
Pei Q Q, Chen J R, Guo Q L. Reflections on preservation status and protection strategy of grotto eaves of cave temples[J]. Journal of Northwest University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2022, 52(2): 142-156.(in Chinese)
- [9] Kogure T, Aoki H, Maekado A, et al. Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan[J]. Geomorphology, 2006, 80(3/4): 236-244.
- [10] Wang J, Wang G L, Song F, et al. Failure mechanism of cantilever beam in near-horizontal layered sand-mudstone interbedded slope—a case study in niugouchuan river bank collapse[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1):207-211.
- [11] Wang P, Jia H B, Ma S Z, et al. Stability evaluation and rockfall movement characteristics of unstable rock block in shuzhuangtai[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022,29(4):139-146.
- [12] Wang J C, Sun J H. Characteristics and stability analysis of rock collapse of low-angled red-bed slope in east sichuan[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(6):1091-1098.
- [13] 宗静婷. 广元千佛崖摩崖石质文物保护的环境地质问题研究[D]. 西安: 西北大学, 2011.
Zong J T. Study on environmental geological problems of stone cultural relics protection in Cliff of Thousand Fo Cliffs in Guangyuan[D]. Xi'an: Northwest University, 2011. (in Chinese)
- [14] Qian Z, Wang J, Sun B, et al. Enhanced mechanical properties of mortar with graphene in the traditional sandstone cultural relics conservation[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021,43(1):155-163.
- [15] 刘小雨, 童邦华. 浅析地形地质特征对大足石刻大佛湾造像开凿的利弊[J]. 华北自然资源, 2021(5): 34-35.
Liu X Y, Tong B H. Groundwater seepage mechanism in the area of the Thousand Armed Guan Yin at Dazu Stone Carvings, Chongqing[J]. Huabei Natural Resources, 2021(5): 34-35.(in Chinese)
- [16] Liu S J, Lan H X, Bo H, et al. Classification system of typical engineering geological deformation and failure modes in grottoes [J]. Earth Science, 2022, 47(12):4710-4723.
- [17] 张亦弛, 刘建辉, 黄悦. 川渝石窟岩石力学性能分析[J]. 中国文物科学研究, 2018(3): 88-96.
Zhang Y C, Liu J H, Huang Y. Geological nature of rock and its deduction for rock mechanics[J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2018(3): 88-96.(in Chinese)
- [18] 孟志刚. 圆觉洞石窟顶板变形机理及控制对策研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
Meng Z G. Study on deformation mechanism and control countermeasures of roof in Yuanjue Cave[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2021. (in Chinese)
- [19] 王俊杰, 方绪顺, 邱珍锋. 砂泥岩颗粒混合料工程特性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Wang J J, Fang X S, Qiu Z F. Study on engineering characteristics of sand-mudstone granular mixture[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [20] Xu Q, Tang R, et al. Study on red beds and its geological hazards[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1):28-50.