

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.085



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



大足石刻石篆山危岩体稳定性评价及加固方案

赵岗¹, 刘丹², 蒋思维¹, 麻润杰³, 彭柳升¹, 陶志刚²

(1. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 2. 中国矿业大学, 北京 100083; 3. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要:在自然营力的长期作用下,石窟寺及石刻类文化遗产极易受构造应力、裂隙扩张、雨水侵蚀等因素影响,产生严重的岩体失稳现象。以大足石刻石篆山摩崖造像为例,通过野外调查和室内试验手段,获取石刻区的工程地质条件及区域岩石的宏观力学特性,结合定性和定量方法分别评价倾倒式和滑移式两种主要破坏模式下危岩体的稳定性,并制定相应的抢险加固方案。计算结果表明,在考虑地震因素影响作用下,倾倒式和滑移式危岩体的稳定性安全系数分别为 1.39 和 1.20。鉴于石窟区文物保存现状和游客参观服务的特殊性,采取“锚杆加固+条石砌筑+裂隙灌浆+做旧处理”综合性加固措施,通过位移和应力监测数据发现,加固后倾倒式和滑移式危岩体的变形量分别控制在 3、6 mm 范围内,验证了加固方案的有效性,并及时消除了石篆山摩崖造像重大险情,确保游客和文物安全。

关键词:大足石刻;危岩体病害;破坏模式;稳定性评价;加固方案

中图分类号:TU457; TU-87 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)04-0037-09

Stability evaluation and reinforcement scheme of dangerous rock mass in Shizhuan Mountain of Dazu Rock Carvings

ZHAO Gang¹, LIU Dan², JIANG Siwei¹, MA Runjie³, PENG Liusheng¹, TAO Zhigang²

(1. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China; 2. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, P. R. China; 3. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, P. R. China)

Abstract: Due to the long-term action of natural forces, the cultural heritages of grotto temples and rock carving are extremely vulnerable to tectonic stress, crack expansion, rainwater erosion, etc., resulting in serious rock mass instability. Taking the Cliff Statues of Shizhuan Mountain in Dazu Rock Carvings as an example, through field surveys and laboratory tests, the engineering geological conditions of the carving area and the macro mechanical properties of regional rock are obtained, and the stability of the dangerous rock mass under the two main failure modes of dumping and sliding are respectively evaluated by combining qualitative and quantitative methods, and reinforcement schemes are formulated. The calculation results show that the stability safety

收稿日期:2023-03-04

基金项目:重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0903)

作者简介:赵岗(1984-),男,副研究馆员,主要从事石窟寺保护与监测研究,E-mail:327009103@qq.com。

刘丹(通信作者),女,博士生,E-mail:liudanq0609@163.com。

Received: 2023-03-04

Foundation item: Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2021jcyj-msxmX0903)

Author brief: ZHAO Gang (1984-), associate research librarian, main research interests: cave temple protection and monitoring, E-mail: 327009103@qq.com.

LIU Dan (corresponding author), PhD candidate, E-mail: liudanq0609@163.com.

factors of dangerous rock masses of dumping and sliding are 1.39 and 1.20 respectively under the influence of seismic factors. Considering the particularity of preservation status of cultural relics and the tourist visit services in the grotto area, a comprehensive treatment of "bolt reinforcement + stone masonry + crack grouting + old treatment" is adopted. By monitoring the displacement and stress, the deformation of dangerous rock masses of dumping and sliding are controlled within the range of 3 mm and 6 mm after reinforcement, which verifies the effectiveness of the reinforcement scheme and minimizes the major danger of Shizhuan Mountain cliff statues in time to ensure the safety of tourists and cultural relics.

Keywords: Dazu Rock Carvings; disease of dangerous rock mass; failure mode; stability evaluation; reinforcement scheme

大足石刻是重庆大足地区境内所有石窟造像的总称。始凿于初唐,历经五代,鼎盛于两宋,是中国石窟艺术史上的最后一座丰碑,代表了公元9世纪至13世纪世界石窟艺术的最高水平,与敦煌、云冈、龙门等石窟一起,构成了一部完整的中国石窟艺术史,1999年被联合国教科文组织列入《世界遗产名录》。作为大足石刻的重要组成部分,石篆山摩崖造像是中国少有的“三教合一”造像区,对于深入研究儒、释、道三教之间的相互交融关系及中国传统文化的发展具有重要价值^[1]。但是,历经千年的自然营力作用,石刻造像区出现岩体失稳、渗漏水、表层劣化、微生物滋生等诸多病害,尤其是岩体失稳最为严重,产生了很多卸荷裂隙、掏蚀悬空面、破碎岩体,岌岌可危,严重威胁游客及文物安全,影响石刻造像的长久保存^[2]。因此,开展石篆山摩崖造像区危岩体病害特性研究,系统性评价危岩体的稳定性,为工程勘察设计和施工提供数据支撑和科学依据,具有十分重要的现实意义。

众多学者围绕石窟病害类型及形成机理进行了大量研究^[3-5]。王旭东等^[6]通过现场调查和测试分析相结合的方法对敦煌莫高窟进行研究,结果表明,破坏类型主要为风化、危岩体、损害、脱落;兰恒星等^[7]以危岩体病害为研究对象,分析了不同因素作用下石窟寺岩体的劣化机制与失稳机理。危岩体病害属于众多病害中的一种常见病害,有必要开展石窟区危岩体的稳定性评价。目前,针对危岩体的稳定性评价方法主要包括现场调研、室内外试验、数值模拟和理论计算^[8-12]。姜云辉等^[13]研发了石窟岩体稳定性监测数据分析系统,获取了岩体表面变形、倾斜及表面温度场分布等特性。Guo等^[14]采用层次分析法和模糊层次分析法相结合的分析方法,探讨了莫高窟岩壁内潜在危岩体的稳定性。Meng等^[15]采用PFC软件对元觉洞附近围岩稳定性进行了研究,并对比分析了数值模拟结果与监测结果。但目前研究手段多以数值模拟和现场监测为

主,在考虑自然因素条件下对石窟危岩体的稳定性理论评估研究鲜有报道。针对石窟区稳定性评估后的欠稳定性状态,需制定有针对性的治理方案。危岩体的有效防护治理措施包括支撑、锚固、拦截、灌浆等^[16-19]。由于石窟区危岩体需要考虑文物保护措施外观与环境协调等特殊因素的影响^[20],导致加固方案制定更复杂。针对马蹄寺石窟群浅表部岩体开裂现象,乔榛等^[21]使用石墨烯纳米片复合材料进行裂隙加固;裴强强等^[22]采用微小型柔性锚杆抑制砂岩石窟平顶窟顶板变形。针对石窟岩体失稳现象,不同学者提出了不同的加固方案^[21-23],由于目前世界文化遗产大足石刻面临严重威胁,也有必要制定有针对性的加固方案,以有效排除危岩体存在的安全隐患,为人民生命安全提供保障。

笔者结合大足石刻石篆山摩崖造像工程案例,通过野外调查和室内试验手段,获取石刻区的工程地质条件及区域岩石的宏观力学特性,发现石窟区的失稳破坏模式主要为倾倒式破坏和滑移式破坏,结合定性和定量方法评价两种破坏模式下危岩体的稳定性,并分别制定相应的抢险加固方案。

1 石刻区地层岩性特征

1.1 区域地质概况

石篆山石刻区地形为“坪状”丘陵,区内至高点海拔高度为444.5 m,西南部及北部地势陡峭,下切形成沟谷。石刻区主要由侏罗系中统遂宁组的紫红色泥岩(Jsn)与紫灰、灰白色砂岩(Js)不等厚互层以及第四纪松散堆积物(Q)组成。山顶处以砂岩为主,地形坡度陡,约60°~80°;山体下部以泥岩为主,坡度变缓,山脚处坡度为20°~30°,如图1所示。

石篆山石刻区出露地层总体特征主要包括构造、岩层较为平缓,地层岩性单一等。石刻区地层十分平缓,近似平直,倾向为15°~25°,倾角为3°~10°。区内岩体完整,砂岩体受区域构造应力作用,但未发生断裂,主要以构造裂隙发育为主。同时,由于互层裂隙与构造裂隙、卸荷裂隙的互相分割和

侵蚀,被切割成块状的巨大岩体形成不同破坏模式的危岩体,并构成区域内的渗透裂隙网络,是地下水渗入的最主要通道和贮存空间。图 2 为构造裂隙走向玫瑰花示意图。

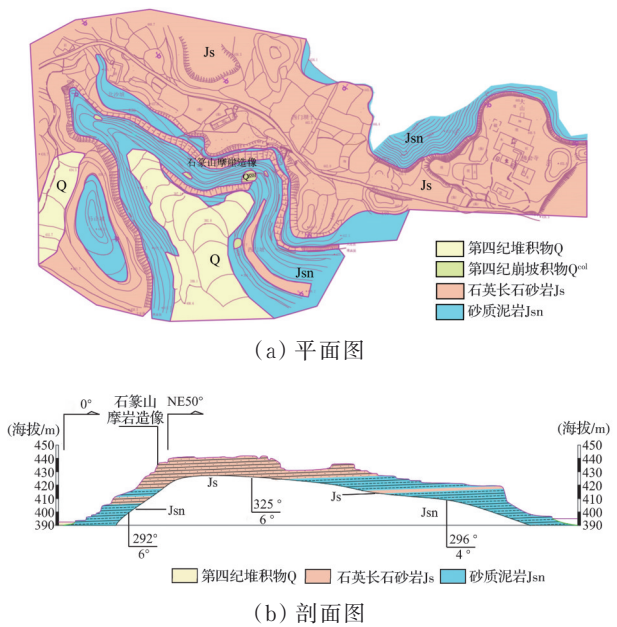


图 1 石篆山工程地质图

Fig. 1 Engineering geological map of Shizhuan Mountain

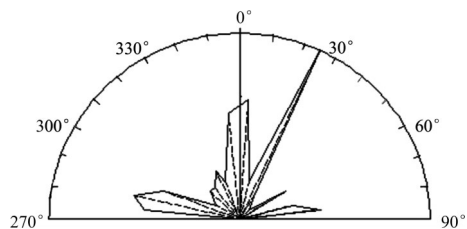


图 2 构造裂隙走向玫瑰花图

Fig. 2 Rose diagram of structural fissure trend

1.2 岩石力学特性调查

石刻区砂岩和泥岩的岩石物理力学指标见表 1,其砂岩和泥岩的天然单轴抗压强度分别为 62.01、15.10 MPa,泥岩强度明显小于砂岩。砂岩的饱和单轴抗压强度为 35.49 MPa,软化系数为 0.57,属于软化岩石。泥岩遇水崩解,测试饱和单轴抗压强度极为困难。

世界文化遗产大足石刻石篆山摩崖造像文物具有重要价值,而危岩体直接威胁文物安全,影响其完整性,故有必要对危岩体进行稳定性评价与加

固,有效排除危岩体存在的安全隐患。石篆山危岩体研究的必要性主要体现在以下几个方面:危岩体稳定性分析按常规破坏模式公式无法计算,需根据岩体具体形态与失稳方式,并结合极限平衡原理、推导公式进行计算;加固措施考虑文物最小干预、外观的要求,采用与文物所处环境协调、扰动小的加固方法,且在加固后对加固效果进行实时监测。

2 危岩体病害定性分析

环境地质病害主要以危岩体病害为主,其破坏机理受多方面因素作用。研究发现,以危岩整体形貌、发育程度及基底和底界层分布等特点,可以将区内危岩体的失稳破坏方式归纳为 3 种基本类型:坠落式、倾倒式和滑移式,示意图如图 3 所示。石篆山石刻区危岩体为受裂隙切割、差异风化形成的孤立巨块石,其可能破坏模式有 2 类。第 1 类危岩体以块石底部风化凹槽最深处为支点,向临空方向发生拉裂倾倒破坏,属于倾倒式破坏类型,编号为 R1 危岩体。第 2 类危岩体发生单滑面滑动破坏,属于滑移式破坏类型,编号为 R2 危岩体。

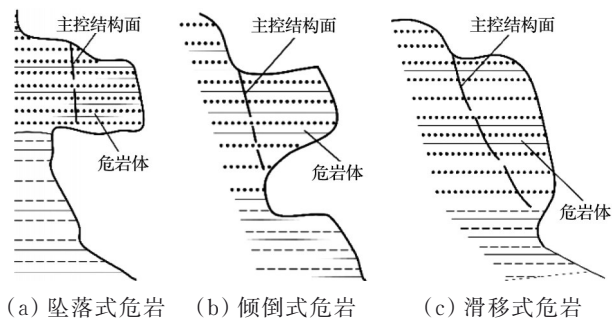


图 3 失稳破坏方式示意图^[24]

Fig. 3 Diagram of instability failure mode^[24]

R1 危岩体高 9 m,位于长廊以西 5.6 m 处,底部掏空,形成宽 8.3 m、深 5 m、高 3.5 m 的凹槽,见图 4。后缘受裂隙切割,切割面产状 290°∠65°,裂隙宽 20 cm,与后侧砂岩完全脱离。该危岩体的形成原因主要是岩体下部为薄层状泥岩,在差异风化作用下,岩体层状脱落,下部形成空腔,造成岩体应力重分布,在岩体后部形成卸荷裂隙。

R2 危岩体位于 R1 危岩体以西,呈孤石状,其后缘受裂隙切割,与第 3、4 号龛岩体脱离,第 5 号龛文殊普贤龛赋存在这块孤石中(图 5(a))。该裂隙走

表 1 岩石物理力学试验成果

Table 1 Test results of physics mechanics of rock

岩性	天然密度/ (g/cm ³)	饱和密度/ (g/cm ³)	天然吸 水率/%	干单轴抗压 强度/MPa	饱和单轴抗 压强度/MPa	软化 系数	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	摩擦 角/(°)
砂岩	2.44	2.49	2.95	62.01	35.49	0.57	6.05(干)、3.34(饱和)	0.35(干)、0.41(饱和)	0.50	32
泥岩	2.30			15.10			1.36	0.24	0.01	23

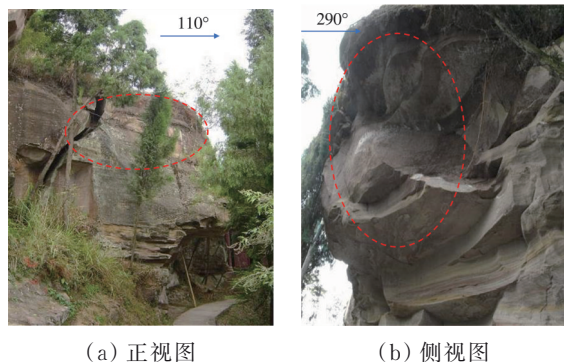


图 4 R1 危岩体

Fig. 4 R1 dangerous rock mass

向为 306°, 隙面近直立, 隙宽达 40 cm (图 5(b))。该危岩体受裂隙切割, 形成上大下小剖面呈倒梯形的孤立危岩体, 其西北面受裂隙切割, 与山体分离, 东南面临空。该危岩体整体处于不稳定状态, 目前靠底部某孤立块石支撑维持稳定。该危岩体顶部为厚 1 m, 长 5.6 m, 宽 3.8 m, 倾角为 28° 的砂岩顶板, 该砂岩存在下滑的危险。

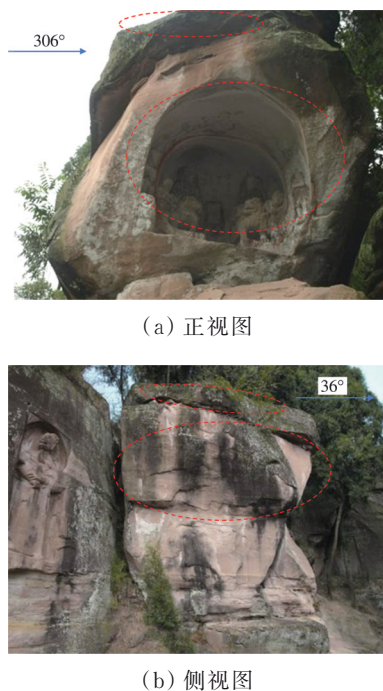


图 5 R2 危岩体

Fig. 5 R2 dangerous rock mass

3 危岩体病害定量分析

3.1 倾倒式危岩体稳定安全系数量化评价

根据重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》(DB 55029—2004), 考虑文物的价值和不可再生的特殊性, 石篆山保护区危岩体的防治安全等级设定为一级, 地震力作用设为 6 度, 水平地震影响系数为 $\alpha_h=0.05$ 。第 1 类和第 2 类危岩体稳定安全

系数最小分别为 1.50、1.40。

R1 危岩体破坏方式是以 O 为支点、 I 为破坏面发生倾覆破坏 (图 6), 分考虑和不考虑地震力作用两种情况进行稳定性计算。针对第一种情况, 砂岩的抗拉强度取 175 kPa, 采用式 (1) 计算稳定安全系数。

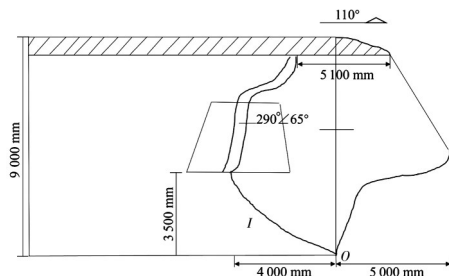


图 6 R1 危岩体稳定性计算简图

Fig. 6 Stability calculation diagram of R1 dangerous rock mass

$$k_1 = \frac{G_2 \times L_2 + F_s}{G_1 \times L_1 + V \times L_3} \quad (1)$$

式中: L_1 和 L_2 分别为不考虑地震作用下右侧和左侧力臂; L_3 为裂隙静水压力对 O 点的力臂; F_s 为破坏面 I 上岩石的抗拉力对支点 O 的力矩, 取 18 156 kN·m; G_1 和 G_2 分别为在支点 O 右侧和左侧的危岩体重力, 可由式 (2) 求得。

$$G = \gamma \times A \times B \quad (2)$$

式中: γ 为危岩体的重度, 取 24 kN/m³; A 为危岩体在平行于剖面方向上的长度; B 为危岩体在垂直于剖面方向上的宽度。 V 为后缘裂隙静水压力, 充水高度取 1/3 裂隙高度, 其计算式为

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \quad (3)$$

式中: h 为裂隙充水高度; γ_w 为水的重度。

针对第 2 种情况, 稳定安全系数计算式为

$$k_2 = \frac{G_2 \times L_2 + F_s}{G_1 \times L_1 + F_{h2} \times L_{h2} + F_{h1} \times L_{h1} + V \times L_3} \quad (4)$$

其中地震作用力的表达式为

$$F_h = \alpha_h \times G \quad (5)$$

式中: L_{h1} 、 L_{h2} 分别为考虑地震作用下右侧和左侧力臂; F_{h1} 、 F_{h2} 分别为在支点 O 右侧和左侧的地震作用力。 R1 危岩体稳定安全系数计算相关参数见表 2。

根据计算结果发现, 在不受地震影响的条件下, R1 危岩体基本保持稳定; 如果考虑地震作用, 则处于失稳状态, 应及时进行加固处理。

3.2 滑移式危岩体稳定安全系数量化评价

R2 危岩体可能的破坏方式为危岩体顶部砂岩顶板单滑面滑移破坏和整个孤石倾覆破坏, 见图 7。

表 2 R1 危岩体稳定安全系数计算参数

Table 2 Stability safety factor of R1 dangerous rock mass									
工况	方位	重力/kN	A/m	B/m	力臂/m	地震作用力/kN	静水压力作用力臂/m	静水压力/kN	稳定安全系数
1	右侧	5 137	25.79	8.3	3.0		4.2	20	1.60
	左侧	3 868	19.42	8.3	1.7				
2	右侧	5 137	25.79	8.3	5.6	257	4.2	20	1.38
	左侧	3 868	19.42	8.3	5.0	193			

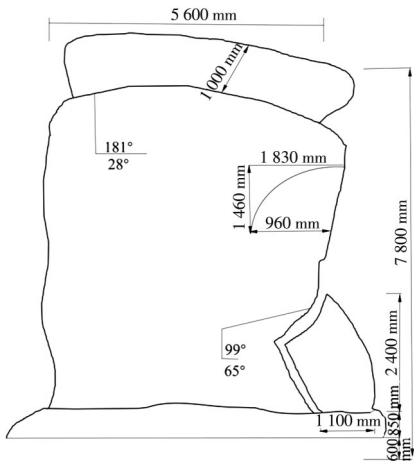


图 7 R2 危岩体稳定性计算简图

Fig. 7 Stability calculation diagram of R2 dangerous rock mass

1)砂岩顶板稳定计算

按单面滑动破坏方式进行计算,不考虑地震力作用影响,按式(2)得到危岩体顶板重力 G_3 为 510.72 kN,稳定安全系数可由式(6)计算得到。

$$K_1 = \frac{W_r}{W_s} = \frac{G_3 \times \cos \alpha \times \tan \phi + c \times S}{G_3 \times \sin \alpha} \quad (6)$$

式中: W_r 为抗滑力; W_s 为滑动力; α 为危岩体滑面与水平方向形成的夹角; c 、 ϕ 分别为危岩体破坏面的黏聚力和内摩擦角,此处破坏面为泥岩,故分别取 10 kPa、23°。 S 为危岩体潜在破坏面的粘着部分面积,其折减系数取 0.6,即实际面积 S 为 12.77 m²。R2 危岩体稳定安全系数计算相关参数见表 3。

考虑地震力作用的影响,按式(5)得到水平地震力 Q 为 25.54 kN,其稳定安全系数计算式为

$$K_2 = \frac{W_r}{W_s} = \frac{(G_3 \times \cos \alpha - Q \times \sin \alpha) \times \tan \phi + c \times S}{G_3 \times \sin \alpha + Q \times \cos \alpha} \quad (7)$$

计算结果表明,在考虑地震影响因素的条件下,危岩体的稳定性系数仅 1.20,接近极限平衡状

态,应及时采取措施进行加固处理。

2)整个孤石稳定评价

整个孤石重心基本位于底部基座的中点处,孤石自重不产生偏心力矩,因此,在保证基座岩体不继续侵蚀和无地震力作用的情况下不会发生整体倾覆。

4 危岩体抢险加固方案

4.1 R1 危岩体加固方案

R1 危岩体最可能的破坏模式为倾倒破坏,因此设计加固措施主要为:1)危岩体下方悬空处采用条石砌体、中小锚杆加固;2)采用锚杆,穿过卸荷裂隙,将危岩体和后部完整山体连接,提高危岩体抗倾覆安全系数;3)对裂隙进行灌浆粘结加固,防止裂隙裸露的岩体风化,增强危岩体的整体性。于 2017 年采用该方案进行加固,图 8 为 R1 危岩体加固施工前后对比图。

1)锚杆加固设计

设置反向锚杆加固后,需考虑锚固作用的影响,计算简图如图 9 所示,当抗倾倒稳定系数 k 为

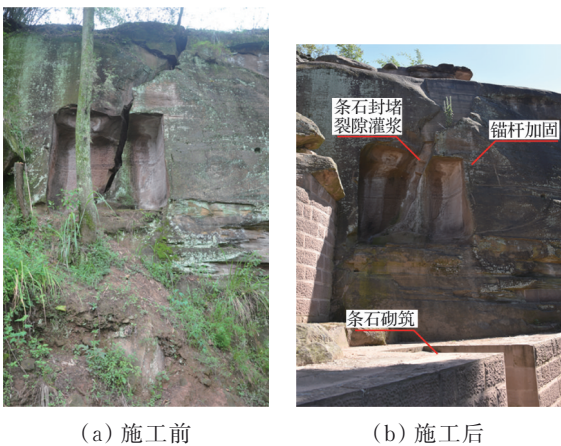


图 8 R1 危岩体加固施工图

Fig. 8 Reinforcement construction drawing of R1 dangerous rock mass

表 3 R2 危岩体稳定安全计算参数

Table 3 Stability safety factor of R2 dangerous rock mass									
工况	重力/kN	A/m	B/m	$\alpha/(^{\circ})$	$\phi/(^{\circ})$	c/kPa	地震作用力/kN	稳定安全系数	
1	510.72	5.6	3.8	28	23	10		1.30	
2	510.72	5.6	3.8	28	23	10	25.54	1.20	

1.5 时,按式(8)计算得到总锚固力 F_{a1} 为 1 816 kN。

$$k_3 = \frac{G_2 \times L_2 + F_{a1} \times L_{a1} + F_s}{G_1 \times L_1 + F_{h2} \times L_{h2} + F_{h1} \times L_{h1}} \quad (8)$$

式中: L_a 为锚固力对 O 点的力臂,取 6 m; F_a 为锚杆总锚固力,单根锚杆所受轴向拉力设计值为 454 kN,其表达式为

$$N_t = \frac{F_a}{n} \quad (9)$$

式中: n 为锚杆数量,取 4 根。

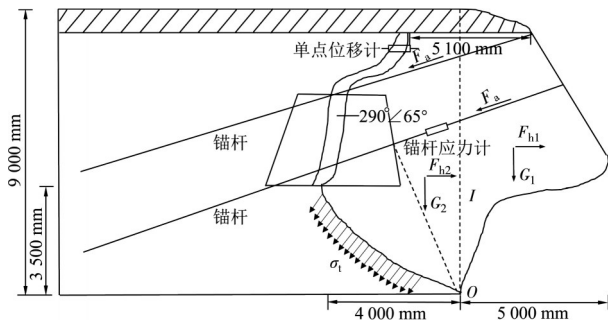


图 9 R1 危岩体加固后稳定性计算简图

Fig. 9 Stability calculation diagram of R1 dangerous rock mass after reinforcement

设计的锚杆采用优质 PSB1080 型螺纹钢,其抗拉强度标准为 1 080 MPa。按照《岩土锚杆(索)技术规程》(CECS 22:2005)的规定,不能低于该规范 (757 mm^2),其计算式为

$$A_s \geq \frac{K_t N_t}{f_{yk}} \quad (10)$$

式中: f_{yk} 为锚杆抗拉强度标准,取 1 080 MPa; K_t 为锚杆杆体的抗拉安全系数,永久性锚杆取 1.8。因此,锚杆选用 $\varphi 32 \text{ mm}$ ($A_s = 804.2 \text{ mm}^2$) 的 PSB1080 级精轧螺纹钢。锚杆锚固段长度可按式(11)、式(12)估算,并取其中的较大值。

$$l_{a1} \geq \frac{K_p N_t}{\pi D f_{mg} \psi} \quad (11)$$

$$l_{a2} \geq \frac{K_p N_t}{n_1 \pi d \xi f_{ms} \psi} \quad (12)$$

式中: K_p 为锚杆锚固体的抗拔安全系数,取 2.2; f_{mg} 为锚固段注浆材料与地层之间的粘合强度标准值,地层为较硬岩石时,粘结强度标准值取 1 200 kPa; f_{ms} 为锚固段注浆体与筋体间的粘结强度标准值,当锚杆采用带螺纹的钢筋时,粘结强度设计值取 2 400 kPa; ξ 为界面的粘结强度降低系数,钢筋或钢绞线不少于 2 根时,取 1.0; ψ 为锚固长度对粘结强度的影响系数,取 1.0; D 代表锚固体的直径,取 110 mm; d 为钢筋直径,取 32 mm; n_1 为钢筋数量,取 1。因此,锚杆锚固段长度应大于 3.8 m。考虑到锚杆需穿过危岩后部的卸荷裂隙,锚杆杆体材料需选用

PSB1080 级精轧螺纹钢,包括 4 根 12 m 的 $\varphi 32$ 锚杆、3 根 7 m 的 $\varphi 25$ 锚杆和 2 根 9 m 的 $\varphi 25$ 锚杆。

2) 裂隙灌浆封闭

首先将危岩体后部卸荷裂隙清理干净,采用砂浆封闭表面,封闭表面略低于岩土表面,以便灌浆完毕后在封闭砂浆面上进行做旧处理,内部灌浆采用水泥浆液。

4.2 R2 危岩体加固方案

R2 危岩体的加固措施主要采用锚杆加固砂岩顶板和局部脱离的岩块,加固后的裂隙进行灌浆封闭。图 10 为 R2 危岩体加固施工前后对比图。



(a) 施工前

(b) 施工后

图 10 R2 危岩体加固施工图

Fig. 10 Reinforcement construction drawing of R2 dangerous rock mass

1) 砂岩顶板加固计算

考虑锚固作用,计算简图如图 11 所示,当危岩体处于稳定状态,即 $K=1.3$ 时,按式(13)计算得到总锚固力为 496 kN,单根锚杆轴向拉力设计值为 124 kN。

$$K = \frac{W_r}{W_s} = \frac{(G_3 \times \cos \alpha - Q \times \sin \alpha + F_{a2}) \times \tan \varphi + c \times S}{G_3 \times \sin \alpha + Q \times \cos \alpha} \quad (13)$$

设计锚杆选用 PSB1080 级精轧螺纹钢,抗拉强度标准值为 1 080 MPa。根据《岩土锚杆(索)技术规程》(CECS22:2005),锚杆截面面积应不小于 207 mm^2 。为增强抗剪性,锚杆选用 $\varphi 32 \text{ mm}$ 的 PSB1080 级精轧螺纹钢。锚杆锚固段长度按式(11)、式(12)估算,取较大值 1.1 m。顶板布置锚杆 2 根,杆体材料为 $\varphi 32 \text{ mm}$ 的 PSB1080 级精轧螺纹钢,长度为 12 m。同时,在滑面位置,设置长度为 2 m、 $\varphi 150 \text{ mm}$ 的抗剪钢管,内灌水泥砂浆。

2) 整个孤石加固

考虑地震作用下孤石可能发生倾覆,采用锚杆

- TONG D J. Protection and outlook of Dazu rock carvings [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2003, 15(3): 57-60. (in Chinese)
- [2] 张荣. 中国石窟寺保护规划分析研究[J]. *中国文化遗产*, 2018(4): 49-60.
ZHANG R. Analysis and research on the protection planning of China cave temple [J]. *China Cultural Heritage*, 2018(4): 49-60. (in Chinese)
- [3] 王龙. 陕西韩城千佛洞石窟调查与初步研究[J]. *考古与文物*, 2023(1): 108-114.
WANG L. Investigation and preliminary study on Thousand Buddha Cave Grottoes in Hancheng, Shaanxi Province [J]. *Archaeology and Cultural Relics*, 2023(1): 108-114. (in Chinese)
- [4] 王金华, 陈嘉琦, 王乐乐, 等. 我国石窟寺病害及其类型研究[J]. *东南文化*, 2022(4): 25-32.
WANG J H, CHEN J Q, WANG L L, et al. Deterioration patterns of grotto temples in China [J]. *Southeast Culture*, 2022(4): 25-32. (in Chinese)
- [5] GUO Z Q, CHEN W W, ZHANG J K, et al. Seismic responses of the densely distributed caves of the Mogao Grottoes in China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(2): 1335-1349.
- [6] 王旭东, 张明泉, 张虎元, 等. 敦煌莫高窟洞窟围岩的工程特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(6): 756-761.
WANG X D, ZHANG M Q, ZHANG H Y, et al. Engineering properties of surrounding rocks of Mogao Grottoes at Dunhuang [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(6): 756-761. (in Chinese)
- [7] 兰恒星, 吕洪涛, 包含, 等. 石窟寺岩体劣化机制与失稳机理研究进展[J]. *地球科学*, 2023, 48(4): 1603-1633.
LAN H X, LV H T, BAO H, et al. Advances in degradation and instability mechanism of grotto temple rock mass [J]. *Earth Science*, 2023, 48(4): 1603-1633. (in Chinese)
- [8] 廖小辉, 王雅南, 刘浩, 等. 关于龙游石窟 23 号古地下洞室 23-1 号斜坡柱稳定问题的讨论[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1406-1414.
LIAO X H, WANG Y N, LIU H, et al. The engineering scientific of the No.23-1 inclined rock pillar in No. 23 cavern in the ancient underground rock Caverns in Longyou [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1406-1414. (in Chinese)
- [9] 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, Beijing, 2021. (in Chinese)
- [10] MENG Z G, CUI X B, QI G, et al. Study on strength damage evolution regulation of sandstone under cyclic erosion [J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 1-11.
- [11] MENG Z G, WANG F N, QI G, et al. Stability monitoring and deformation laws of the Yuanjue cave in the influence zone of the unloading zone [J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 1-13.
- [12] HOU Y L, ZHANG J B, LI B, et al. Stability study of the roof plate of the Yuanjue cave based on the equivalent support stiffness method [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(7): 4451.
- [13] 姜云辉, 王金华, 黎利兵, 等. 石窟岩体稳定性监测系统应用与研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2014, 26(4): 70-75.
JIANG Y H, WANG J H, LI L B, et al. Research on cave rock stability and application of a monitoring system [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2014, 26(4): 70-75. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] MENG Z, FAN F Z, CUI X B, et al. Numerical modeling and stability analysis of surrounding rock of Yuanjue cave [J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 1-11.
- [16] SONG D Q, SHI W P, WANG C W, et al. Numerical investigation of a local precise reinforcement method for dynamic stability of rock slope under earthquakes using continuum-discontinuum element method [J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 2490.
- [17] CUI Z, CHEN P Z, CHU W J, et al. Deformation mechanism and reinforcement design for the flexural toppled slope of Miaowei HPP [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(1): 39.
- [18] YI W H, WANG M N, ZHAO S G, et al. The effect of rock hardness and integrity on the failure mechanism of mortar bolt composite structure in a jointed rock mass [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 143: 106831.
- [19] LI Y Q, HUANG D, HE J Y. Energy evolution and damage constitutive model of anchored jointed rock masses under static and fatigue loads [J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 167: 107313.
- [20] 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.
- [21] 乔榛, 王捷, 赵焯, 等. 马蹄寺石窟群浅表部岩体开裂加固材料试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(9): 3868-3875.

- QIAO Z, WANG J, ZHAO X, et al. Experimental study on surface rock mass crack reinforcing materials of Mati Temple Grottoes [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(9): 3868-3875. (in Chinese)
- [22] 裴强强, 白玉书, 崔凯, 等. 砂岩石窟微小型柔性锚杆锚固性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 352-364.
- PEI Q Q, BAI Y S, CUI K, et al. Study on anchorage performance of miniature flexible anchor rod in sandstone grottoes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 352-364. (in Chinese)
- [23] 刘汉龙, 韩绍康, 陈卉丽, 等. 潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(6): 219-220.
- LIU H L, HAN S K, CHEN H L, et al. Microbial reinforcement and repair method for sandstone grottoes in humid environment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 219-220. (in Chinese)
- [24] 陈鹏宇. 岩质高边坡坡体结构特征分析与稳定性研究: 以焦作市龙寺矿山岩质高边坡为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- CHEN P Y. Structural characteristics analysis and stability study of high rock slope: A case study of Longsi Mine in Jiaozuo City [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese)

(编辑 胡玲)