

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.074



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



大足石刻北山石窟悬吊锚杆加固工程的稳定性

冯太彬¹, 刘珂源², 雷啸天², 蒋思维¹, 陈卉丽¹, 张兵峰³, 麻润杰⁴, 陶志刚²
(1. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室; 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 3. 中国文化遗产研究院, 北京 100029; 4. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要:在多年风化作用和自重应力的影响下,大足石刻北山168窟的石窟壁和顶板位置出现了大量裂缝,导致洞窟顶部围岩的稳定性变差,面临失稳坍塌的风险,为了对平顶石窟顶板破碎围岩进行有效加固,针对现场地质情况,采用悬吊锚杆加固方式。首先通过现场调查确定顶板裂缝的分布规律,分析石窟顶板开裂的主要原因;然后利用新奥法思想,在考虑最不利围岩受力的情况下计算锚杆的锚固长度;最后利用数值模拟手段,分析悬吊锚杆加固方法在降雨条件下石窟顶板的位移变化及应力情况。结果表明:在悬吊锚杆加固下,其顶板各个方向位移均不超过1 mm;石窟洞口位置及靠近洞内位置的应力较为集中,最大拉应力小于砂岩的抗拉强度值,顶板围岩处于稳定状态;悬吊锚杆加固中锚固段承受拉应力,平均所受轴力为31 kN,受力情况较好。从加固前后的监测曲线可以看出,悬吊锚杆加固方式减少了裂缝的波动值,可以认为在悬吊锚杆加固下石窟保持稳定状态。

关键词:大足石刻;石窟;悬吊锚杆;加固;裂缝

中图分类号:TU476 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)05-0167-10

Stability of suspension anchor reinforcement project of Beishan Grottoes in Dazu Rock Carvings

FENG Taibin¹, LIU Keyuan², LEI Xiaotian², JIANG Siwei¹, CHEN Huili¹,
ZHANG Bingfeng³, MA Runjie⁴, TAO Zhigang²

(1. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering; School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, P. R. China; 3. China Acadmey of Cultural Heritage, Beijing 100029, P. R. China; 4. Beijing Enigneering Corporation Limited, Beijing 100024, P. R. China)

Abstract: Under the continuous influence of weathering and self-weight, there are a large number of cracks in the wall and roof of Beishan Cave 168 in Dazu Rock Carvings. These cracks lead to the deterioration of the stability of the surrounding rock at the top of the cave and the risk of instability and collapse. In order to

收稿日期:2023-03-17

基金项目:重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmx0903)

作者简介:冯太彬(1976-),男,副研究馆员,主要从事石质文物保护及修复研究,E-mail:903378283@qq.com。

刘珂源(通信作者),男,博士生,E-mail:lky0313@163.com。

Received: 2023-03-17

Foundation item: Natural Science Foundation of Chongqing (No.cstc2021jcyj-msxmx0903)

Author brief: FENG Taibin (1976-), associate research librarian, main research interests: protection and restoration of stone cultural relics, E-mail: 903378283@qq.com.

LIU Keyuan (corresponding author), PhD candidate, E-mail: lky0313@163.com.

effectively reinforce the broken surrounding rock of the roof of the flat-top grotto, this paper adopts a roof reinforcement method of suspended anchor in accordance with the geological conditions of the site. First, the main reasons for the cracking of the grotto roof are analyzed according to the distribution pattern of the roof cracks. Then, the anchorage length of the bolt is calculated by using the new Austrian method considering the most unfavorable surrounding rock stress. Finally, FLAC3D is used to analyze the displacement and stress changes of the grotto roof under rainfall conditions. The results show that the displacement of the roof in all directions is not more than 1 mm under the condition of suspended anchor reinforcement; the stress at the entrance of the grotto and near the inside of the grotto is relatively concentrated; the maximum tensile stress is less than the tensile strength of sandstone, and the roof surrounding rock is in a stable state; the average axial force of the bolt anchorage section is 31 kN. From the field monitoring data, it could be seen that the suspended anchor reinforcement reduces the fluctuation value of cracks. In summary, the grotto remains stable under the condition of suspended anchor reinforcement.

Keywords: Dazu Rock Carvings; stability of grottoes; suspended anchor; reinforcement; crack

随着地质环境的变迁,在地震、雨水冲刷、岩体风化等自然地质营力和人为破坏等不利因素的持续影响下,石窟会发生裂缝贯穿、风化、开裂、渗水等病害,石窟稳定性受到裂缝^[1-2]、边坡坍塌^[3-4]、窟内渗水^[5]、岩石风化^[6-7]及人为扰动破坏^[8]的影响。作为中国石窟代表之一,大足石刻位于重庆市大足区境内,其中北山 168 窟是大足区域内石窟的典型代表,具有重要的历史意义。在 1 000 多年的卸荷和风化营力作用下,该石窟产生了严重的结构稳定性问题,尤其是洞窟内顶部裂隙纵横交错,导致洞窟顶部围岩的稳定性变差,面临失稳坍塌的风险。

石窟加固与边坡和隧道加固有所不同:一方面,石窟作为古代社会历史的缩影,具有重大的历史意义,石窟的加固需要保证其文物完整,防止其岩石因为风化、开裂等原因造成文物受损;另一方面,石窟作为古代珍贵的艺术品,具有极高的鉴赏价值,需要保证其观赏性,要求石窟内部不能出现较为明显的加固痕迹。边坡体可以通过修筑抗滑桩,对可能产生滑动面的岩体施加锚杆、锚索,利用其抗拉性能进行加固,也可以通过削坡增大边坡的安全稳定性系数;隧道可以通过锚喷、喷射混凝土等对隧道硐室进行加固,而石窟修建在边坡上也兼具硐室的特点,所以需要综合考虑。近些年来,学者们对石窟加固进行了较为细致的研究。何满潮等^[9]利用 FLAC3D 软件研究了不同工况下高句丽将军坟的稳定性,并根据分析结果提出了合理的加固建议;庞磊等^[10]采用贡献率法进行了加固工程与锚杆施工的相关性分析,进而判断石窟在锚杆施工过程中是否处于稳定状态;张国军^[11]通过锚杆和注浆结合的方法对莫高窟北部区域石窟进行了加固处理;高丙丽等^[12]通过将监测结果与相关理论计算分析相结合,得出了龙游石窟顶板裂缝成因规律,提

出了支顶式加固方案;范潇等^[13]利用多种地质调查手段对云冈石窟第 3 窟地质情况进行调查,对裂缝进行灌浆处理,并结合精细化锚杆施工,以减小施工扰动为目的设计了施工工艺流程;张良帅^[14]在云冈石窟开展了 4 种石窟加固材料的加固试验,发现 AMC-E 丙烯酸盐弹性凝胶材料在石质文物保护方面具有优良性能。目前针对崖体、崖面危岩、洞窟等的加固,主要采取预应力锚索、裂隙灌浆、危岩体支顶^[15]、喷锚加固^[16]等措施。针对石窟薄顶板的相关加固措施,主要有钢梁吊顶结构加固^[17]、微型松木锚杆加固^[18]。

大足石刻北山 168 窟属于上覆岩层较厚、顶板较薄、窟内空间较小、石刻分布密集、支顶结构与石刻距离近的石窟,普通锚杆加固、灌浆在本工程中具有一定局限性。为了对石窟破碎薄层顶板进行加固,并减少对窟内造像的扰动,需要利用上覆岩层自身的承载能力对顶板进行支护。基于上述工程特点,笔者以大足石刻北山 168 窟为研究对象,基于现场地质情况,探明该窟失稳原因,并据此提出一种针对平顶石窟顶板加固的悬吊锚杆加固方案。该方案既能使石窟处于整体稳定状态,也能一定程度上减少对石窟内部的干预。通过数值模拟及现场监测数据对该方案进行验证,为类似工程背景的石窟加固方案设计提供经验。

1 工程概况

大足石刻北山 168 窟位于重庆市大足区,背靠佛湾砂岩形成的陡崖,窟口朝西,窟底高程为 506 m。其西侧长廊以下为缓坡,由泥岩构成,植被发育;东侧陡崖上方堆积第四系含碎石砂质黏土,覆盖层厚 0.5~3.5 m,地形上构成陡坡,覆盖层植被发育,以

竹林和灌木为主;南侧陡崖向东凹进形成一个空腔,与陡崖上方的冲沟及排水沟相连通,形成排水通道,168窟全貌如图1所示。



图1 168窟全貌

Fig. 1 Overall view of Cave 168

经现场调查,168窟本体及周围环境存在大量节理裂隙。从168窟周围节理裂隙的调查统计结果可以看出,区内裂隙NE、NW向较为发育,该结果与这一地区区域裂隙分布规律吻合;构造裂隙主要为渗水的贮存、运移提供通道。从裂隙倾角统计结果可以看出,大部分裂隙均为陡倾,以65°以上的角为主,层面倾角较小,多数在10°以内。图2为168窟周边裂隙调查统计结果。

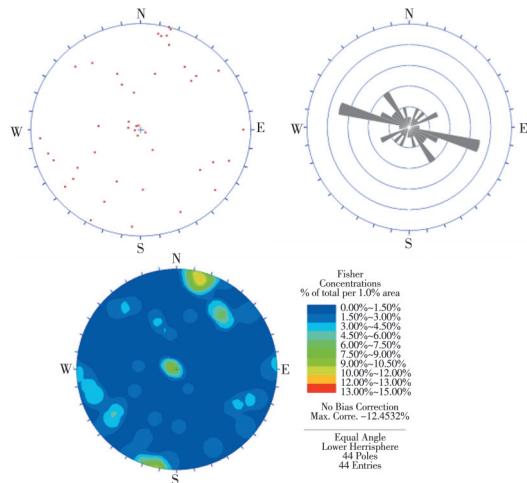


图2 168窟周边裂隙调查统计结果

Fig. 2 Investigation and statistical results of cracks around Cave 168

在1 000多年的卸荷和风化营力作用下,168窟内部出现了大量裂缝病害。随着时间的推移,窟顶岩体裂隙张开度不断变化,对洞窟窟顶稳定性影响较大的裂缝主要有5条。其中近东西向的J1裂缝与近南北向的J2裂缝构成了顶板破坏的主要裂缝;另外3条裂缝J3、J4和J5规模较小,位于洞窟顶板的东北角,如图3所示。

J1裂缝产状为 $215^{\circ}\angle 85^{\circ}$,张开度可达5 mm,长4.9 m,向东西向延伸扩展,被J2裂缝截断;裂缝距南壁的距离为1.70~2.22 m,距北壁的距离为

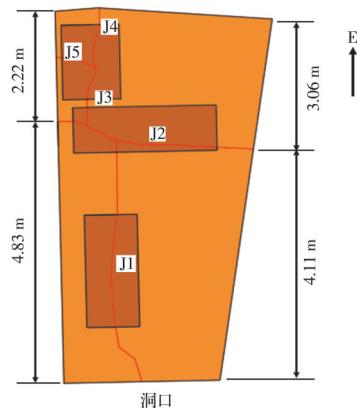


图3 裂缝分布图

Fig. 3 Cracks distribution map

0.92~1.21 m,且与南、北侧壁的距离随窟口进深呈增大趋势。J2裂缝贯穿南北,为石窟顶板主控裂缝,J1裂缝的形成主要受南侧凹腔开挖的影响。由于南侧凹腔开挖,168窟南壁支撑岩体变薄,应力增大并超过砂岩胶结物方解石强度,从而导致J1裂缝形成;长期卸荷作用控制J2裂缝发展。

J2裂缝产状为 $105^{\circ}\angle 87^{\circ}$,张开度可达5 mm,长3.3 m,向南北向延伸扩展,在北墙上向下延伸0.5 m;该裂缝距窟口的距离为4.11~4.83 m,距正壁的距离为2.22~3.06 m。

J3、J4和J5裂缝相互交错发育:J3裂缝产状为 $5^{\circ}\angle 85^{\circ}$,张开度为2 mm;J4裂缝产状为 $190^{\circ}\angle 85^{\circ}$,张开度为2 mm;J5裂缝产状为 $98^{\circ}\angle 85^{\circ}$,张开度为1.5 mm,在北墙向下延伸0.45 m。窟顶裂缝的现状如图4所示。

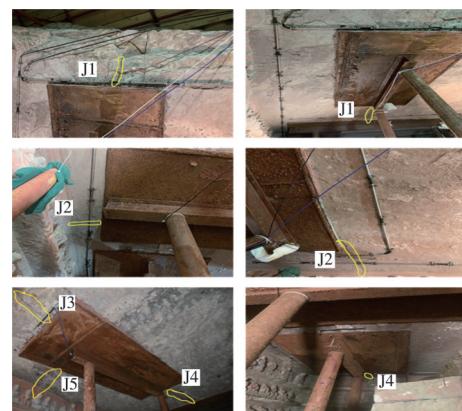


图4 顶板裂缝分布

Fig. 4 Distribution of roof cracks

由于裂缝的发育,裂缝对顶板砂岩进行切割,导致168窟顶板的岩层存在坠落的风险。另外,雨水通过裂缝入渗,导致168窟存在严重的渗水问题,主要发生在南侧顶板裂缝以及南侧砂岩与泥岩交界处;雨水通过底部裂缝渗入石窟内部,对底部泥岩的软化作用不利于石窟侧壁稳定,渗水导致窟内

微生物滋长,石质文物表面风化、变色。

根据现场地质条件及 168 窟实际情况可以看出,168 窟顶板开裂的一个重要原因是窟顶层状岩体在自身重力和上覆岩体压力作用下向内弯曲,从而产生张拉破坏。因此,减轻上覆岩体的压力作用,可以有效控制裂缝的发展。考虑到石窟加固工程的特殊性,在 168 窟顶板上方山体处布置钢筋混凝土梁,并在梁上施加悬吊锚杆,对石窟顶板进行加固。该加固方法不仅能有效减轻顶板上覆岩体的重力,也能降低顶板对南侧壁的压力,防止南侧壁裂缝发展。加固完成之后,采用小型锚杆和碳纤维板将下部开裂岩层与上部完整岩体锚固起来,以增大层面的抗剪强度,防止顶板围岩层状剥落。

2 悬吊锚杆加固设计

2.1 锚固段的确定

根据新奥法的思想,首先让围岩依靠自身能力来提高承载能力;若岩体强度较低,不能满足安全要求,则需要外部支护措施来提高其承载能力。当围岩强度较低、原岩应力较大且各向异性明显时,围岩应力重分布后,其由弹性变形转变为塑性变形,岩体转变为危岩体,出现安全隐患。此时,围岩的应力重分布也将发生相应变化。

1)根据围岩塑性区与弹性区分界面上应力相等(应力协调),并同时满足 $\sigma_e + \sigma_r = 2P_0$,求解得到对应的塑性区半径 R 为

$$R = r_0 \left[(1 - \sin \varphi) \frac{P_0 + C \cot \varphi}{P_i + C \cot \varphi} \right] \frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi} \quad (1)$$

式中: r_0 为石窟等效半径,m; φ 为围岩内摩擦角,(°); C 为围岩内聚力,kPa; P_i 为支护抗力,kN; P_0 为围岩压力,kN; σ_e 为切向应力; σ_r 为径向应力。

当 $P_i=0$ 时,得到不支护时围岩对应的最大塑性区半径 R_0 。代入室内试验得到的围岩内摩擦角、围岩内聚力以及现场测得的围岩压力等岩体参数得 $R=1.3$ m。 $R < r_0$,表明由于顶部覆盖层厚度不大,窟顶岩体内不会发生塑性破坏,窟顶部出现裂缝是由于岩体受力发生的脆性破坏。

在最大限度发挥岩石自承能力的基础上,窟顶以上半圆形范围内为需加固的危险区域。经现场勘察,加固范围确定为 2 m。

2)由于顶板受裂缝切割,南侧窟壁存在多条贯通裂缝,可能失去对顶板的支撑。因此,顶板重力计算需考虑最不利情况,取 J2 裂缝前部顶板整个厚度岩体所受重力。

$$G = \gamma b l h \quad (2)$$

式中: G 为顶板岩体重力,kN; γ 为岩体重度,取 25.4 kN/m³; b 为顶板平均宽度,取 3 m; l 为 J2 裂缝前顶板长度,取 3 m; h 为顶板平均厚度,取 5 m。计算得

$$G = 25.4 \text{ kN/m}^3 \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 1143 \text{ kN} \quad (3)$$

3)悬吊锚杆受力计算。顶板共布置 9 根悬吊锚杆,考虑岩体自身的完整性和钢托板对力的分散,理想化的状态是每根锚杆均匀受力,其承受的拉力标准值为

$$N_k = G/n = 1143 \text{ kN}/9 = 127 \text{ kN} \quad (4)$$

根据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)规定计算,永久锚杆

$$N_d = 1.35 \gamma_w N_k \quad (5)$$

式中: N_d 为锚杆拉力设计值,kN; γ_w 为工作条件系数,一般情况取 1.1; n 为锚杆数量; N_k 为锚杆拉力标准值,N。计算得

$$N_d = 1.35 \times 1.1 \times 127 \text{ kN} = 188.595 \text{ kN} \quad (6)$$

设计选用 1 根 φ25 精轧螺纹钢筋(PS1080 级),抗拉强度设计值 f_{py} 为 900 N/mm²,截面积 A_s 为 490.9 mm²。

$$f_{py} \cdot A_s = 900 \text{ N/mm}^2 \times 490.9 \text{ mm}^2 = 441.810 \text{ kN} > N_d \quad (7)$$

满足要求。

$$L_{a1} \geq \frac{K N_d}{\pi D f_{mg} \psi}, L_{a2} \geq \frac{N_d}{n \pi f'_{ms} \xi} \quad (8)$$

式中: L_{a1} 、 L_{a2} 为锚固段长度(计算锚固长度时取两者最大值),m; K 为抗拔安全系数,取 2.0; f_{mg} 为锚固段注浆体与地层间极限黏结强度标准值,取 1 000 kPa; f'_{ms} 为锚固段注浆体与筋体黏结强度设计值,取 1 400 kPa; D 为锚固体直径,取 90 mm; d 为锚筋直径,取 25 mm; ξ 为界面黏结强度系数,取 1.0; ψ 为锚固段长度对极限黏结强度的影响系数,取 1.0; n 为孔内钢筋根数,取 1.0。计算得

$$L_{a1} \geq \frac{2 \times 189}{3.14 \times 0.09 \times 1000 \times 1.0} = 1.3 \text{ m} \quad (9)$$

$$L_{a2} \geq \frac{189}{3.14 \times 0.025 \times 1400 \times 1.0} = 1.7 \text{ m} \quad (10)$$

因此,当锚杆锚固长度不小于 1.7 m 时,锚杆即能达到设计拉力值。

2.2 钻孔施工

在石窟顶板上方山体处进行钻孔施工,施工顺序为 K1→K3→K2→K4→K6→K5→K7→K9→K8,如图 5 所示。基本遵循由西向东、先北后南再中线的原则。钻孔施工中,每钻进 0.5 m 进行测斜、除

尘、洗孔等工序,确定已完成作业无误后方可继续钻进。窟顶板处的封锚需进行开槽,每排3孔共一槽;封锚钢板为定制条形钢板,做整体封锚。

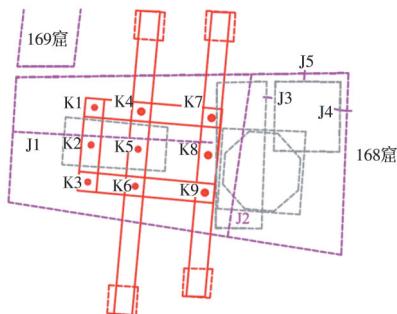
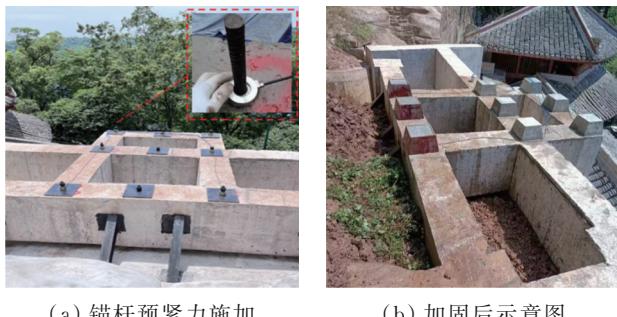


图5 钻孔施工顺序图

Fig. 5 Drilling sequence diagram

2.3 悬吊锚杆施工

钻孔施工完成后,对窟顶山体处的悬吊梁进行施工,布置方式采用3道南北向、4道东西向共计7道钢筋混凝土梁。以窟顶基岩为基础浇筑4个支墩,7道梁采用整体浇筑的方式一次浇筑成型;在悬吊梁养护完成之后,对梁上施加的悬吊锚杆进行张拉并布置锚杆测力计,如图6所示,石窟加固前后对比如图7所示。



(a) 锚杆预应力施加

(b) 加固后示意图



(c) 锚杆封锚

(d) 窟顶板加固

图6 悬吊锚杆加固图

Fig. 6 Suspended anchor reinforcement diagram

表2 地层参数

Table 2 Formation parameters

类别	天然重度/(kN/m ³)	弹性模量E/GPa	泊松比	内黏聚力/MPa	摩擦角φ/(°)	抗拉强度/MPa
粉质黏土层	18.5	0.013	0.3	0.011	19	0.0075
中风化砂岩	25.4	3.03	0.27	2.36	43.2	1.0
中风化泥岩	23.0	1.36	0.24	5.27	31.3	1.0



(a) 施工前



(b) 施工后

图7 石窟加固前后对比

Fig. 7 Comparison of grotto before and after reinforcement

3 悬吊锚杆加固下的稳定性数值模拟分析

3.1 模型建立

为了验证悬吊锚杆在168窟加固方案的可行性,通过数值模拟方法对其加固稳定性进行反演,以指导现场施工。三维建模主要考虑168窟上部顶板裂缝、南侧凹腔对石窟稳定性的影响,所以主要考虑石窟上方的地形及凹腔所在区域,X向考虑范围为29 m,Y向考虑范围为29 m,Z向考虑范围为14 m。其中,石窟东侧为X向正方向,石窟北侧为Y向正方向,石窟顶板沉降方向为Z向负方向。根据地质剖面图,地层厚度取值如表1所示。此外,根据168窟后山3个钻孔数据,结合室内试验分析,确定168窟模拟计算所需要的地层参数,如表2所示。

表1 三维建模分层厚度

Table 1 Layer thickness of 3D modeling

类别	标高/m	厚度/m
粉质黏土层	517.5~519	1.5
中风化砂岩	506~517.5	11.5
中风化泥岩	<506	4.0

通过增加孔隙水压力的方式模拟降雨效果,根据勘察资料以及地质调查确定年降雨量,进而确定地下水位面。利用Rhino6.0软件生成地下水位面,导

入 FLAC3D, 通过导入水位面网格用命令生成 Water Table。设置石窟所在边坡后缘地下水位高度为 7.5 m, 前缘高度为 2.5 m。以水位面为起点, 将其以下所有网格节点参数设置为饱和状态下重度, 即根据勘察资料将水位面下方的中风化泥岩的饱和重度设置为 23.2 kN/m^3 , 将水的重度设置为 10 kN/m^3 , 孔隙水压力按照距离水位面深度设置为 $0 \sim 7.56 \times 10^4 \text{ Pa}$; 水位面上所有网格节点设置为天然重度, 孔隙水压力设置为 0。通过孔隙水压力改变水位面下方的内摩擦角和内聚力, 从而影响有效应力, 进而改变岩体的力学性能, 模拟降雨的产生。生成孔隙水压力及地下水位面如图 8 所示。

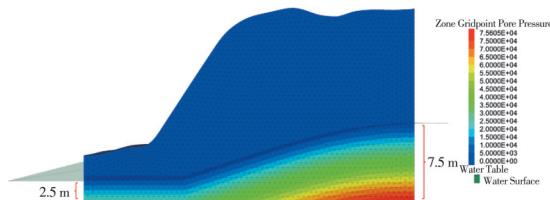


图 8 孔隙水压力生成

Fig. 8 Pore water pressure generation

FLAC3D 中的接触面是单面性质的地质界面, 常用于模拟地质体中的裂缝、节理、断层等。通过将每个四边形区域网格定义为两个三角形单元来实现两个物体接触面的相互滑动, 如图 9 所示。一般通过模型的分组命令来实现接触面的建立, 其接触面之间本构模型以 Mohr-Coulomb 为基础, 通过设置法向、剪切刚度来确定接触面的特性。根据现场裂缝情况, 对石窟顶板上方岩体进行分组, 通过设置接触面来模拟现场裂缝的情况, 如图 10 所示。



图 9 接触面工作原理

Fig. 9 Working principle of contact surface

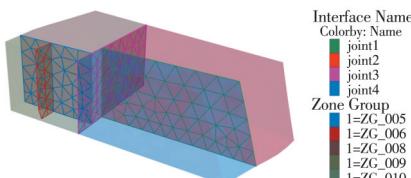


图 10 裂缝的建立

Fig. 10 Establishment of cracks

根据理论计算及现场情况设置悬吊锚杆锚固段及自由端, 通过改变不同段的灌浆刚度与黏聚力来模拟锚杆端头、自由端及锚固段。红色部分为锚杆端头位置, 绿色段为自由端, 蓝色为锚固段, 如图 11 所示, 锚杆参数如表 3 所示。

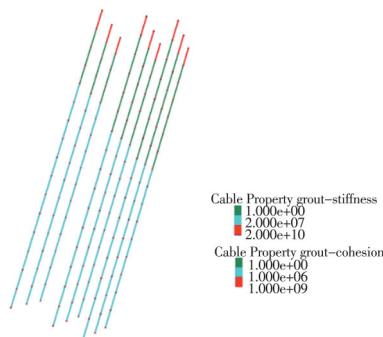


图 11 悬吊锚杆分段示意图

Fig. 11 Sectional diagram of suspended anchor

表 3 锚杆参数

Table 3 Bolt parameters

结构	弹性模量/MPa	锚杆长/m	锚杆锚固段长度/m	锚杆预紧力/kN	黏结强度/(N/m ²)	黏结刚度/(N/m ²)
锚杆	2×10^5	6.5	1.7	150	4×10^5	2×10^9

3.2 数值模拟结果分析

图 12 为降雨条件下石窟位移分布云图。由图 12 可以看出, 石窟周围总位移为 0.46 mm, 其中石窟洞口处最大位移为 0.5 mm, 在降雨工况下石窟整体位移主要是由水平向位移造成的, 顶板基本未发生沉降现象。

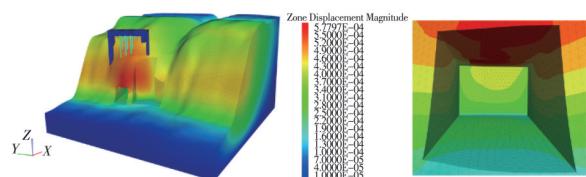


图 12 降雨工况下石窟位移云图

Fig. 12 Cloud diagram of total displacement of grotto under rainfall condition

由局部位移图可以看出, 石窟顶板最大位移为 0.56 mm, 其水平向位移主要集中在 J1 裂缝洞口部位及 J2、J3 裂缝附近。

由此可见, 悬吊锚杆加固时, 在降雨工况下, 石窟顶板沉降基本得到控制; 顶板在洞口及裂缝交叉部位水平向位移较大, 但从总位移来看, 最大总位移为 0.56 mm, 石窟整体处于稳定状态, 该加固方案基本消除了顶板因裂缝切割而坍塌的风险。

由降雨工况下石窟水平应力云图(图 13)可以看出, 主要在洞口位置及靠近洞内位置应力较为集中, 但最大拉应力为 0.057 MPa , 小于中风化砂岩的抗拉强度值, 顶板围岩处于稳定状态。

图 14 为悬吊锚杆加固过程中预应力锚杆的轴向应力图, 从受力特征来看, 主要是锚固段承受拉应力, 锚固段平均所受拉力为 31 kN。

在 168 窟顶板位置设置模拟监测点用于监测石

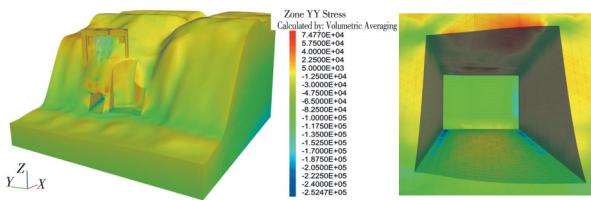


图 13 降雨工况下石窟应力云图

Fig. 13 Stress cloud map of grotto under rainfall condition

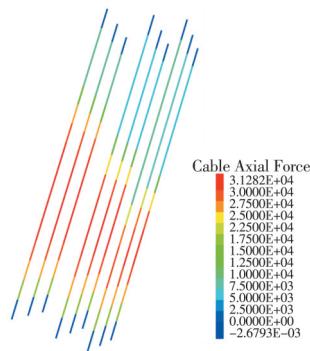


图 14 降雨工况下悬吊锚杆加固受力图

Fig. 14 Stress diagram of suspended anchor reinforcement under rainfall condition

窟顶板位移变化,南北向分别布设 12 个点,东西两向各 6 个点,共计 36 个点,模拟监测点布置如图 15 所示。主要包括自然工况及降雨工况下顶板监测数据分析,用于监测在施加预应力的锚杆加固条件下石窟的顶板是否能保持稳定状态,主要对总位移、水平向位移、沉降位移进行分析。

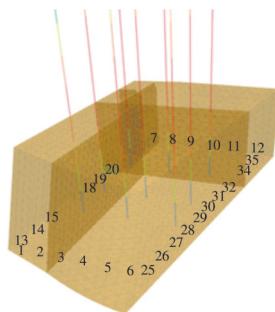


图 15 模拟监测点布置图

Fig. 15 Layout of monitoring points

由表 4、表 5 中自然及降雨条件下石窟顶板位移的监测数据可以看出,在降雨条件下东西向位移增加较多,而沉降量增加较少;其中东西向位移主要

表 4 自然工况下石窟顶板位移

Table 4 Displacement of grotto roof under natural condition

位置	最大总位移/mm	最大水平位移/mm	最大沉降位移/mm
石窟北侧	0.22	0.015	0.12
石窟南侧	0.15	0.01	0.14
石窟西侧	0.11	0.02	0.19
石窟东侧	0.14	0.013	0.15

发生在临空面方向。但不管哪个方向,位移量都较小,控制在 1 mm 之内,说明石窟顶板较为稳定。

表 5 降雨工况下石窟顶板位移

Table 5 Displacement of grotto roof under rainfall condition

位置	最大总位移/mm	最大水平位移/mm	最大沉降位移/mm
石窟北侧	0.55	0.48	0.16
石窟南侧	0.53	0.48	0.23
石窟西侧	0.55	0.51	0.26
石窟东侧	0.45	0.39	0.22

4 石窟现场监测数据分析

4.1 顶板稳定性现场监测系统

为了对比悬吊锚杆施工前后石窟顶板的位移情况,验证悬吊锚杆的加固有效性,在窟顶 J1、J2、J3 裂缝及洞口顶部各布置 1 个裂缝计,用以监测裂缝的开合情况,采用 T-700 型表面裂缝计,其量程为 0~25 mm,精度为 0.025 mm,温度测量的范围为 -20~80 °C,规定裂缝开裂为正,闭合为负。在穹顶均匀布设 5 条三维变形监测阵列测线,能精确测量顶板在三维空间内的变形位移。根据现场工况采用人工和半自动化技术相结合的手段进行施工期跟踪观测。另外,在锚杆施加预应力的同时布设锚杆测力计以监测锚杆轴力,监测点布置图如图 16 所示。

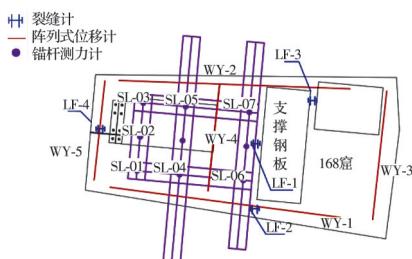


图 16 监测点布置图

Fig. 16 Monitoring points layout diagram

4.2 裂缝计数据分析

图 17 为现场监测的裂缝计数据。对加固前后裂缝计整体数据进行分析可以发现,降雨是裂缝逐渐闭合的一个重要原因,可以认为降雨是裂缝宽度值产生波动的一个重要原因。从加固前后的曲线数据可以看出,悬吊锚杆加固法降低了裂缝的波动值:其中 J1 中部裂缝波动值减小了 0.3 mm,J1 洞口处裂缝波动值减小了 0.21 mm,J2 裂缝波动值减小了 0.2 mm,J3 裂缝数据稳定在 -0.1~0.1 mm 附近。从而可以看出,加固后 J1、J2、J3 裂缝变得更加稳定;其中靠近南侧凹腔的 J2 裂缝在 2022 年 10 月

由于凹腔施工原因出现了一段扩展现象,随后保持在0.41 mm附近。

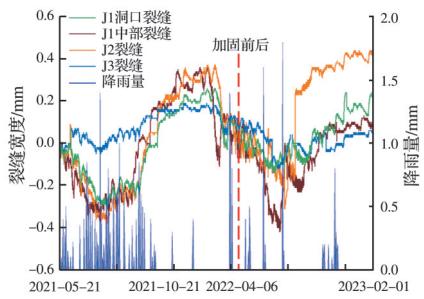


图17 裂缝计监测数据

Fig. 17 Crack meter monitoring data

4.3 位移计数据分析

对加固后6个月位移计监测数据进行分析,如图18所示。石窟顶板南侧位移平均值为0.45 mm,石窟顶板北侧位移平均值为0.5 mm,石窟顶板东侧位移值为0.60 mm,石窟顶板中部位移最大值为0.5 mm,石窟顶板洞口处位移最大值为0.4 mm。综合来看,加固后168窟完全稳定,各个点位的位移值较小,证明加固效果良好,顶板安全问题得以解决。

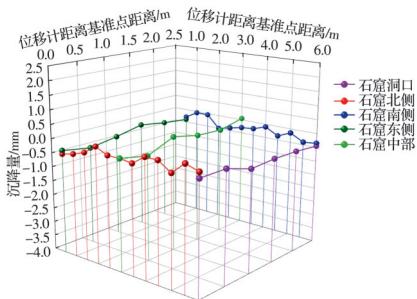


图18 168窟加固后6个月顶板位移量

Fig. 18 Roof displacement of Cave 168 in six months after reinforcement

4.4 锚杆轴力数据分析

通过对悬吊锚杆测力计数据进行分析可以发现,施工后锚杆轴力值基本保持恒定,数值处于15~35 kN范围内,说明石窟顶板受力稳定,锚杆轴力变化情况如图19所示。

4.5 数值模拟与现场数据对比分析

通过降雨工况下的石窟应力云图(图13)可以看出,应力主要集中在洞口及附近,与现场调查及勘察资料相符合。窟顶上方越靠近洞口的岩层弯矩越大,抗拉强度越低,越容易发生张拉破坏;洞内位置应力的集中造成了J3、J4、J5裂缝的形成。

通过对比现场锚杆轴力监测数据与数值模拟结果可以发现,现场锚杆轴力值在15~35 kN范围内,模拟结果中锚固段平均所受拉力为31 kN,与现

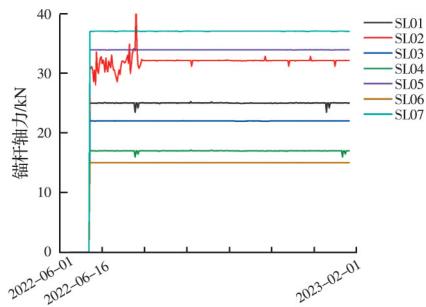
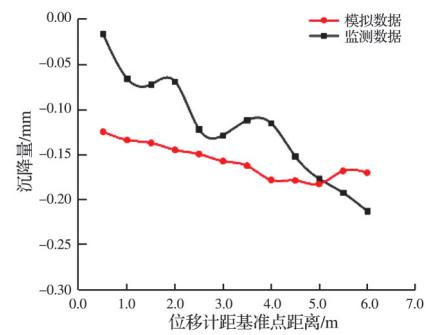


图19 悬吊锚杆测力计监测数据

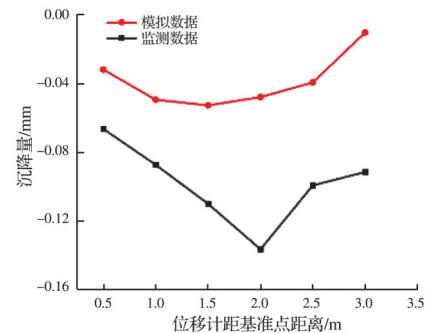
Fig. 19 Monitoring data of suspended anchor bolt dynamometer

场监测结果基本吻合,说明悬吊锚杆在实际中受力较为均匀,能对顶板起到很好的支护作用。

通过将数值模拟计算结果中顶板监测点最大沉降量与现场监测数据进行对比发现:在降雨集中月份,除了石窟东侧,随着与位移计基准点的距离增大,现场和数值模拟分析中石窟顶板的位移量均呈增大趋势;石窟东侧位移表现为先下降再上升的趋势。整体看来,数值模拟与现场监测数据中顶板四周位移保持一致的趋势,数据对比如图20、图21所示。



(a) 石窟西侧数据对比



(b) 石窟东侧数据对比

图20 石窟东西侧位移数据对比分析

Fig. 20 Comparative analysis of displacement data on the east and west sides of the grotto

根据数值模拟计算中应力、轴力及顶板位移数据的变化规律可以看出,数值计算很好地还原了现场情况,也能很好地与勘察资料对应,得到的结果

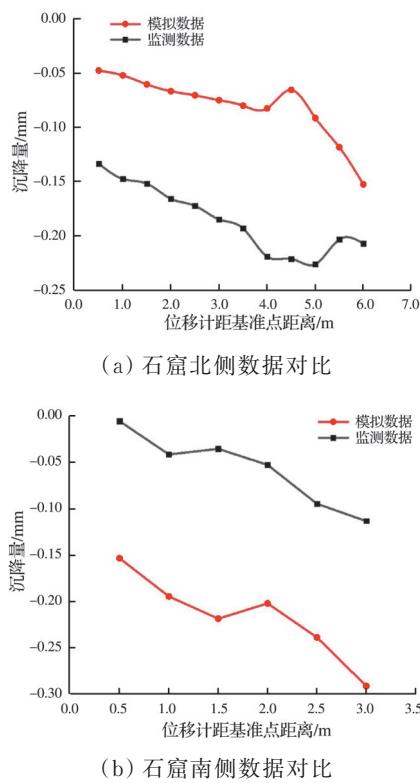


图21 石窟南北侧位移数据对比分析

Fig. 21 Comparative analysis of displacement data of north and south sides of grotto

能为现场施工提供参考,也表明悬吊锚杆在平顶石窟薄板破碎顶板的支护中能达到很好的效果。

5 结论

1) 基于现场调查,对大足石刻北山168窟空间分布特征、石窟所在边坡的岩性以及水文地质条件进行分析,发现影响石窟稳定性的主要因素为:顶板在裂缝作用下被切割成若干个独立单元,造成石窟顶部失稳。因此,需要对裂缝发育的顶板部位进行加固防治。

2) 大足石刻北山168窟顶板开裂的一个重要原因是窟顶层状岩体在自身重力和上覆岩体压力作用下向内弯曲,产生张拉破坏。因此,减轻上覆岩体的压力作用能有效地控制裂缝的发展。据此提出悬吊锚杆加固方案,并确定了相关加固支护参数,该加固方案一方面对顶板进行了加固,另一方面保持了石窟的整体美观性。

3) 针对悬吊锚杆加固方案,通过数值模拟手段进行反演发现,在降雨工况下石窟整体位移主要是水平向位移,主要集中在J1裂缝洞口部位及J2、J3裂缝附近;对应力图进行分析发现,顶板拉应力小于其抗拉强度;由模拟位移监测曲线数据可以看出,位移量都控制在1 mm之内,说明石窟顶板较为稳定。并通过现场监测数据对数值模拟结果进行

验证,结果表明数值计算很好地还原了现场情况,证明悬吊锚杆加固方案对于平顶石窟顶板的加固具有较好的适用性。

4) 悬吊锚杆加固方法在加固前后减小了顶板裂缝的波动值,加固后J1、J2、J3裂缝变得更加稳定;加固后的6个月内顶板位移量基本保持不变,在加固后石窟顶板四周的位移处于稳定状态;悬吊锚杆施工后锚杆轴力值基本保持恒定,说明悬吊锚杆加固效果较好。

悬吊锚杆加固方法对于平顶石窟顶板的加固具有较好的适用性,能够保持平顶石窟破碎顶板的相对稳定,可以为类似石窟顶板的加固提供参考。

参考文献

- [1] 王茜.石窟寺窟体破坏机理及稳定性分析[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
WANG Q. Failure mechanism and stability analysis of cave body in cave temple [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese)
- [2] 赵莽,严绍军,何凯,等.龙门石窟裂隙防渗灌浆新材料试验研究[J].长江科学院院报,2016, 33(6): 115-123, 128.
ZHAO M, YAN S J, HE K, et al. Experimental study on novel grouting materials for fracture seepage of the Longmen grottoes [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(6): 115-123, 128. (in Chinese)
- [3] GUO F, JIANG G H. Investigation into rock moisture and salinity regimes: Implications of sandstone weathering in Yungang Grottoes, China [J]. Carbonates and Evaporites, 2015, 30(1): 1-11.
- [4] GERMINARIO L, OGUCHI C T, TAMURA Y, et al. Taya Caves, a Buddhist marvel hidden in underground Japan: Stone properties, deterioration, and environmental setting [J]. Heritage Science, 2020, 8(1): 1-20.
- [5] PUJARI P R, SONI A, PADMAKAR C, et al. Ground penetrating radar (GPR) study to detect seepage pathways in the Ajanta Caves in India [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(1): 61-75.
- [6] BHARTI G. Ajanta caves: Deterioration and conservation problems (A case study) [J]. International Journal of Scientific and Research Publications, 2013, 3(11): 1-3.
- [7] 刘奔,简文彬,郑智,等.基于结构面特征的合掌岩石窟稳定性分析评价[J].水利与建筑工程学报,2017, 15(6): 168-172.
LIU B, JIAN W B, ZHENG Z, et al. Stability analysis and evaluation of Hezhangyan grottoes based on the fea-

- ture of the structural plane [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(6): 168-172. (in Chinese)
- [8] FRANCIONI F, LENZERINI F. The destruction of the buddhas of Bamiyan and international law [J]. European Journal of International Law, 2003, 14(4): 619-651.
- [9] 何满潮, 王树仁, 杨国兴, 等. 高句丽将军坟稳定性评价及防护对策[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊2): 459-462, 471.
- HE M C, WANG S R, YANG G X, et al. Research on evaluation of stability of Gaogouli's Jiangjunfen and preventing measures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Sup 2): 459-462, 471. (in Chinese)
- [10] 庞磊, 白延, 刘建, 等. 万安禅院石窟文物锚杆加固工程的稳定性研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(35): 14653-14659.
- PANG L, BAI Y, LIU J, et al. Stability of reinforcement of cultural relic anchor in the Wan'an temple grottoes [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(35): 14653-14659. (in Chinese)
- [11] 张国军. 敦煌莫高窟北区崖体的保护加固研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- ZHANG G J. Study on protection and reinforcement of cliff in the north area of Dunhuang Mogao grottoes [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. (in Chinese)
- [12] 高丙丽, 张海祥, 杨志法. 龙游石窟3号洞窟顶板裂缝发育机理及加固支护研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 565-573.
- GAO B L, ZHANG H X, YANG Z F. Crack development mechanism and reinforcement support of the rock roof of No. 3 cavern in Longyou grottoes [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 565-573. (in Chinese)
- [13] 范潇, 闫宏彬, 孟令松, 等. 云冈石窟第3窟后室顶板加固治理与监测[J]. 文物保护与考古科学, 2021, 33(2): 1-6.
- FAN X, YAN H B, MENG L S, et al. Strengthening and monitoring of the back room roof at Cave 3 of Yungang Grottoes [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2021, 33(2): 1-6. (in Chinese)
- [14] 张良帅. AMC-E丙烯酸盐弹性凝胶在劣化石质文物加固中的应用: 以云冈石窟为例[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- ZHANG L S. Application of AMC-E acrylate elastic gel in reinforcement of inferior fossil cultural relics: Taking Yungang Grottoes as an example [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese)
- [15] 郭青林, 王旭东, 范宇权, 等. 砂砾岩石窟灌浆材料PS-F机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3330-3335.
- GUO Q L, WANG X D, FAN Y Q, et al. Study on mechanism of PS-F grouting material for sandy conglomerate grottoes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup 2): 3330-3335. (in Chinese)
- [16] 云冈石窟研究院. 2005年云冈国际学术研讨会论文集·保护卷[M]. 北京: 文物出版社, 2006.
- Yungang Grottoes Research Institute. Proceedings of 2005 Yungang international symposium (protection volume) [M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2006. (in Chinese)
- [17] 满君, 谌文武, 孙光吉. 濒危薄型窟顶石窟加固新技术的应用研究[J]. 敦煌研究, 2009(6): 21-25.
- MAN J, CHEN W W, SUN G J. Study on the new reinforcement measure used for reinforcing folium on the top of grottoes [J]. Dunhuang Research, 2009(6): 21-25. (in Chinese)
- [18] 柴新军, 何春锋, 李爱飞, 等. 孔径对微型木锚杆加固石窟剥落病害抗拔力影响试验[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(1): 100-105.
- CHAI X J, HE C F, LI A F, et al. Experiment of borehole diameter on pullout capacity of pine rod in decreasing the spalling damage of grottoes rock mass [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(1): 100-105. (in Chinese)

(编辑 朱备)