

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.10.004

基于双边滤波石质文物逆向建模及其稳定性分析

张理想^{1a,1b,1c}, 邹红宇^{1a,1c}, 黄蕾^{1a,1c}, 张景科^{1a,1b,1c}, 刘建辉², 李黎², 陈卉丽³, 韩秀兰³

(1. 兰州大学 a. 土木工程与力学学院; b. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室; c. 岩土质文物保护基础科学研究与人才培养甘肃省文物局重点科研基地, 兰州 730000; 2. 中国文化遗产研究院, 北京 100029; 3. 大足石刻研究院, 重庆 402360)

摘要: 石质文物的长期稳定性问题是文物保护工作中的重点。以大足石刻卧佛前的目犍连菩萨像为研究对象, 基于双边滤波算法, 将三维激光扫描仪获取的点云数据导入 PCL 平台, 实现文物表面噪声点的去除, 建立包含裂隙结构面在内的菩萨像三维精细化实体模型。基于强度折减原理采用有限差分软件 FLAC3D, 对菩萨像现存状态展开稳定性分析, 结果表明: 1) 双边滤波法去噪后的菩萨像模型平均偏差为 -5.0~4.0 mm, 标准值为 1.1 mm, 在去除噪声的同时完整保留了文物表面特征; 2) 重力荷载下, 菩萨像颈部受压, 项部受拉; 头部裂隙的出现导致内部应力发生重分布, 峰值拉应力由项部移动至裂隙端; 3) 菩萨像头部位移变化与折减系数呈正相关, 当折减系数为 1.28 时, 头部位移敏感度急剧增大, 向临空面倾倒; 4) 菩萨像破坏面沿裂隙端、颈部向内部延伸, 塑性区体积、最大剪应变增量逐步增大, 在两区域形成抛物线贯通破坏面。该研究方法为小型、具有复杂几何特征的石质文物稳定性分析提供思路。

关键词: 大足石刻; 石质文物; 双边滤波; 强度折减法; Hoek-Brown 准则; 稳定性评价

中图分类号: TU457; TP391.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2024)10-046-15

Refinement modeling and stability analysis of stone cultural relics based on bilateral filtering

ZHANG Lixiang^{1a,1b,1c}, ZOU Hongyu^{1a,1c}, HANG Lei^{1a,1c}, ZHANG Jingke^{1a,1b,1c}, LIU Jianhui², LI Li², CHEN Huili³, HAN Xiulan³

(1a. College of Civil Engineering and Mechanics; 1b. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, The Ministry of Education of China; 1c. Key Scientific Research Base of Basic Science of Rock-Earthen Relics Protection and Talents Cultivation Lanzhou University Cultural Heritage Bureau of Gansu Province, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China; 2. Chinese Academy of Cultural Heritage, Beijing 100029, P. R. China; 3. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China)

Abstract: The long-term stability of stone cultural relics is a key concern in their preservation. This study focuses on the Bodhisattva statue in front of the reclining Buddha carved on Dazu Rock Carvings. Using bilateral filtering algorithm, the point cloud data from a 3D laser scanner were processed in the PCL platform to remove noise,

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1520600)。

Supported by National Key R&D Program of China(2019YFC1520600).

作者简介: 张理想(1992—), 男, 博士, 实验师, 主要从事石窟寺保护方向研究, (E-mail) zhanglx2019@lzu.edu.cn。

通信作者: 张景科, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) zhangjink@lzu.edu.cn。

preserving the surface details of the cultural relics. A refined 3D model of the Bodhisattva statue, including its fissure structure, was established. The statue's stability was analyzed using the strength reduction method with FLAC3D software. The findings include: 1) The denoising method results in an average deviation of -5.0 mm to 4.0 mm and a standard value of 1.1 mm, which completely retained the artifact's surface characteristics. 2) Under gravity load, the statue's neck compressed while the top stretched, with cracks in the head redistributing internal stress, and the peak tensile stress moving from the top to the crack end. 3) The statue's head displacement correlates positively with the reduction coefficient, sharply increasing at 1.28, indicating a tendency to tip. 4) The failure surface extends along the crack and neck into the relic's interior, with the plastic zone and maximum shear strain increment forming a parabola through the two regions. This method offers insights for analyzing the stability of small stone artifacts with complex geometries.

Keywords: Dazu Rock Carvings; stone relics; bilateral filtering; strength reduction method; Hoek-Brown criterion; stability evaluation

中国现存石窟寺及摩崖造像共 5 986 处,因其蕴含的历史、艺术、科学价值受到广泛关注。不可移动石质文物在千百年自然环境与人为因素影响下,其本体结构不断劣化,出现变形、开裂,甚至倾倒等病害,对文物本体稳定性产生不利影响,严重损害了文物价值保存。因此,针对石窟石刻的稳定性研究,一直是中国文化遗产保护工作的重点之一。

目前,围绕石质文物稳定性的研究尚未形成完整的学科体系,缺少规范概念;众多学者借鉴工程地质学、岩石力学等学科知识,将岩土体稳定性分析方法及理论应用于文物研究。随着计算机的发展,数值模拟分析方法成为石质文物稳定性评价的主要方法。Ambraseys 等^[1]通过离散元法(discrete element method, DEM)对阿波罗雕像稳定性做出评估,并将分析结果与地震发生后雕像旋转情况进行对比,以验证分析方法的合理性。Guo 等^[2-3]和 Peng 等^[4]结合现场调查信息,利用 FLAC3D 分别研究了敦煌莫高窟南区洞窟和云冈石窟在静力及动力状态下的稳定性分析。Chen 等^[5]为克服大地测量法在文物研究的局限性,基于差分干涉 SAR(D-TomoSAR)和有限元法(finite element method, FEM),通过有效监测吴哥窟的变形,实现对潜在不稳定结构发生变形破坏的预测。已有研究在对石质文物进行稳定性分析的过程中,以契合研究区域几何特点为主。随着三维激光扫描技术在文物保护领域的应用,大量文物的点云信息被采集,邓小龙^[6]和高相波^[7]提出了一种基于非接触式大空间三维激光扫描仪(3D Laser Scanning, 3DLS)来获取复杂地质体表面信息并将其转化为三维数值计算模型,使用有限差分法(finite difference method, FDM)探讨了危岩体的稳定性。Meng 等^[8]通过 3DSL 方法获取的点云信息建立了圆觉洞复杂裂隙下的高精度围岩分析模型,研究其稳定性。然而,三维扫描获取的点云数据,动辄百万个甚至上亿个,含有较多噪声点,为兼顾模型的精确性和数据处理的快速性,点云数据处理至关重要。Wei 等^[9]提出了一种基于激光扫描获取的点云分割方法并建立云冈石窟 18 窟的曲面模型。赵夫群等^[10]基于层次化,依据点云曲率实现对文物点云数据的去噪滤波处理。Fleishman 等^[11]将双边滤波函数应用于 3D 不规则网格去噪,在平滑光滑区域时较好保存了特征区。曹爽等^[12]提出了利用邻域点信息来判断任意区域是否为特征区域,并赋予其不同双边滤波因子,实现基于特征选择的双边滤波点云去噪。王晓辉等^[13]基于法向量距离识别分类方法,采用加权局部最优投影算法和双边滤波分别对平滑区域和尖锐区域去噪。其中,双边滤波具有保持边缘与降噪平滑的功能,可处理具有复杂特征的石质文物点云信息。但国内外石质文物数值模拟稳定性研究多聚焦于大型洞窟数值模拟结果中稳定性评价,更注重整体稳定性,而对于具有复杂特征的石质文物模型建立精细程度不够,目前未形成一套有效的包含精细化模型建立在内的稳定性分析方法。

鉴于此,研究以大足石刻目键联菩萨像为例,基于双边滤波法,结合 PCL 平台及 Geomagic Studio 逆向工程软件实现石质文物的精细化构建,总结出提高石质文物逆向建模模型精度的方法,并对建立的精细化目键联菩萨像模型运用强度折减法定量分析石质文物稳定性,形成一套适应于具有复杂几何特征的精美石质文物数值模拟建模及分析方法。期望对具有复杂几何特征的石质文物稳定性研究提出科学的指导意义。

1 大足石刻目键连菩萨像概况

大足石刻最早雕刻于唐永辉至乾封年间(公元650–668年),先后雕凿了北山、石篆山、南山、石门山、宝顶山等众多摩崖造像和铭文,现存造像共计 5×10^4 余尊,其中北山、宝顶山2处规模最大、保存完整、造像精美^[14]。

目键连菩萨像(下称“菩萨像”)位于宝顶山大佛湾东侧释迦牟尼涅槃圣迹图(即卧佛)处,菩萨像整体高度2.03 m,是卧佛前众多半身菩萨造像之一(如图1所示)。2018年,菩萨像背部已产生大面积水平裂隙,此时头部左侧裂隙深度小,仅存在于表面;2019年,菩萨像头部裂隙向内延伸,与背部向上延伸裂隙相贯通,稳定性受到威胁,故采取临时支护进行保护;2021年,为增强支护文物观赏性,更换临时支撑,采用木支护结构,将菩萨像面部形象再次展露于游客。现阶段菩萨像头部左侧及后侧出现大范围开裂,左侧花冠处的裂隙L1向下延伸至左耳耳垂,与头部后裂隙贯通,并于1.46 m高度裂隙张开处发现内部有一钢筋,外露钢筋表面局部已发生锈蚀;后侧裂隙向下张开至背部高度0.84 m处,由此向2侧各产生一水平裂隙(如图2所示),菩萨像裂隙统计见表1。

表1 菩萨像裂隙信息统计

Table 1 Statistics of the fissures of the bodhisattva statue

裂隙编号	长度/cm	深度/cm	宽度/cm	倾向/(°)	倾角/(°)
L1	102.0	贯穿	2.2	NW337	77
L2	48.0	3.3	1.5	NE41	15
L3	71.1	2.9	1.2	NW356	41
L4	45.5	2.8	0.8	NW337	89



图1 菩萨像现状图

Fig. 1 Status map of the bodhisattva statue

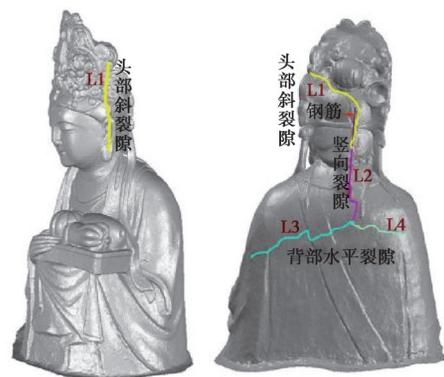


图2 菩萨像裂隙病害发育图

Fig. 2 Development diagram of cracks in bodhisattva statue

2 石质文物逆向建模

基于改进后的双边滤波法,在 PCL 软件开发平台下,结合 Geomagic 逆向建模手段,对获取的目键连造像点云信息进行处理,在提高建模效率的同时,增加稳定性分析结果的可靠性,具体流程图如图 3 所示。

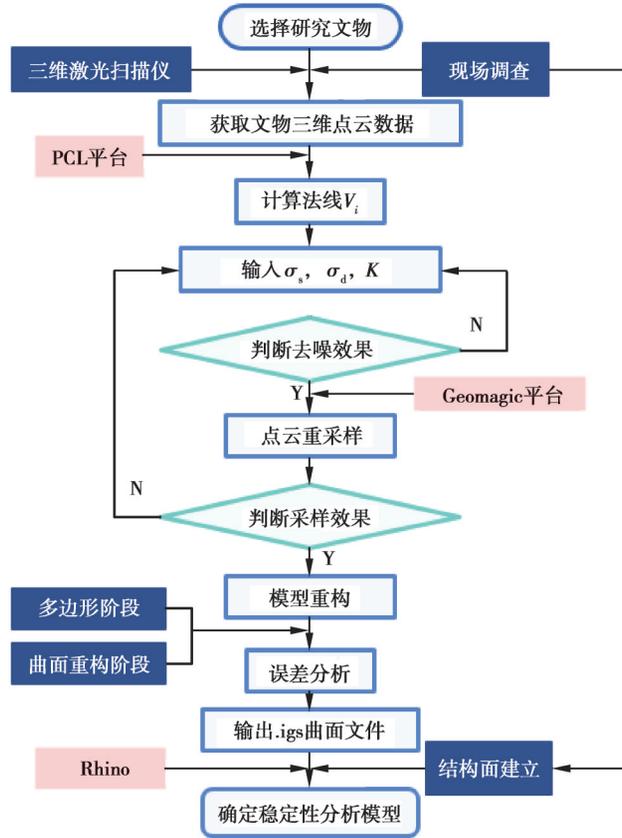


图 3 石质文物建模流程图

Fig. 3 Flow chart for modeling stone artifacts

2.1 法向量估计

点云的法向量估计常采用主成分分析法^[15],为求任意点法向量,需要选取邻域范围的近邻点拟合平面。基于局部点云信息上 1 组坐标建立点集,拟合平面方程为: $ax+by+cz=0$ (去中心化,且 $a^2+b^2+c^2=0$),式中, (a, b, c) 为该平面的单位法向量,为使平面拟合效果最佳,使得近邻点更贴近平面,目标方程如下

$$L(a, b, c) = \min \sum_{i=1}^n d_i^2 = \min \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i)^2, \quad (1)$$

其中: d_i 为邻域点到拟合平面的距离,第 i 个近邻点坐标为 (x_i, y_i, z_i) 。

根据条件极值存在的必要条件

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial a} &= 2x \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial b} &= 2y \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i) = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial c} &= 2z \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

将式(2)用矩阵方程 $AX=0$ 表示

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n y_i z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = 0, \quad (3)$$

令式(3)为 $AX=0, A^T A=0$ 的最小特征值对应的特征向量即为 $AX=0$ 的最小二乘解,即为该点点云的法向量。此时确定的法向量具有二义性,需要为点云集中的 1 点设定方向,以临近点法向方向为参考(如图 4 所示),定义为

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_j \approx 1 & \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_j \\ \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_j \leq 0 & \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_j' \end{cases}, \quad (4)$$

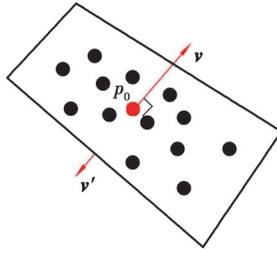


图 4 点云法向量三维示意图

Fig. 4 3D diagram of the normal vector of the point cloud

2.2 双边滤波法

三维点云的双边滤波(bilateral filter, BF)是二维图像双边滤波的拓展^[16]。采用加权平均的方式,依靠局部邻域特征信息,联合色度差权重因子和空间距离权重因子,在实现对噪声光顺的同时,较好保留模型的细部特征。双边滤波可定义为

$$p_i' = p_i + \alpha \cdot \mathbf{n}_i, \quad (5)$$

式中: p_i 为点云数据 P 中任意一点; p_i' 为滤波处理后的点云; α 为双边滤波权重因子; \mathbf{n} 为法向量。

一般情况下,双边滤波采用高斯分布的加权平均,分别为中心点与其邻域半径 r 内的邻域点空间域权重因子 σ_d 和频率域权重因子 σ_s , σ_d, σ_s 分别反应邻域范围内的点对中心点 p 沿切线和法线方向的影响。其对应的高斯核函数可表达为

$$W_d(x) = \exp[-x^2/2\sigma_d^2], \quad (6)$$

$$W_s(x) = \exp[-x^2/2\sigma_s^2], \quad (7)$$

双边滤波权重因子表达式为

$$\alpha = \frac{\sum_{p_j \in N_r(p_i)} W_d(\|p_i - p_j\|) W_s(\|\mathbf{n}_i, p_i - p_j\|) \langle p_i - p_j, \mathbf{n}_j \rangle}{\sum_{p_j \in N_r(p_i)} W_d(\|p_i - p_j\|) W_s(\|\mathbf{n}_i, p_i - p_j\|)}, \quad (8)$$

式中: $\|p_i - p_j\|$ 为 2 点间的欧氏距离, $p_j \in N_r(p_i)$; $\langle x, y \rangle$ 为 x 与 y 的内积; $N_r(p_i)$ 为点 p_i 的邻域集合。

在双边滤波的运用过程中,研究人员发现依赖邻域特征信息^[17]。因此 Digne^[18] 提出改进后的双边滤波因子,以便于处理大尺度噪声。从式(9)中可以得出:当点云信息确定后,邻域点与中心点 p 距离差值越大,影响越小; σ_d 一定时, σ_s 越大,不同频率对应的高斯函数值越大,双边滤波近似退化为高斯滤波,可以看出双边滤波在保留特征信息时是跳跃变化的过程。

$$\alpha' = \frac{\sum_{p_j \in N_r(p_i)} W_d(\|p_i - p_j\|) W_s(\|\langle \mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j \rangle - 1\|) \langle p_i - p_j, \mathbf{n}_j \rangle}{\sum_{p_j \in N_r(p_i)} W_d(\|p_i - p_j\|) W_s(\|\langle \mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j \rangle - 1\|)} \quad (9)$$

2.3 点云去噪实施

在 VS2017 和 PCL1.11.1 开发平台下,对大足目键连菩萨像点云数据进行去噪实验,双边滤波输入参数如表 2 所示。

表 2 双边滤波参数设置

Table 2 Parameter settings for bilateral filtering

点云模型	σ_s	σ_d	K
Model_1	0.10	10	10
Model_2	0.10	3	10
Model_3	0.05	3	10
Model_4	0.10	10	50

原始数据与经过双边滤波处理的菩萨像如图 5 所示。与原始点云数据相比,滤波后菩萨像的主要特征得到了保留,不同参数下的模型表面噪声均有一定程度的降低,例如,服饰表面褶皱留存明显,平滑区域内小凹陷、小突起的数量减少。参数 K 越大, σ_d 越大,表面光滑效果越强;当 σ_s 较大时,表面微小信息保留越多;最邻近点个数 K 的变化对点云去噪效果影响明显,临近点个数选取越小,特征信息保留越多。其中 Model_4 较其他结果的表面信息处理效果更好,构建的菩萨像模型忽略了“无意义的点”,同时较为全面地描述了特征信息。选择 Model_4 进行模型建立。

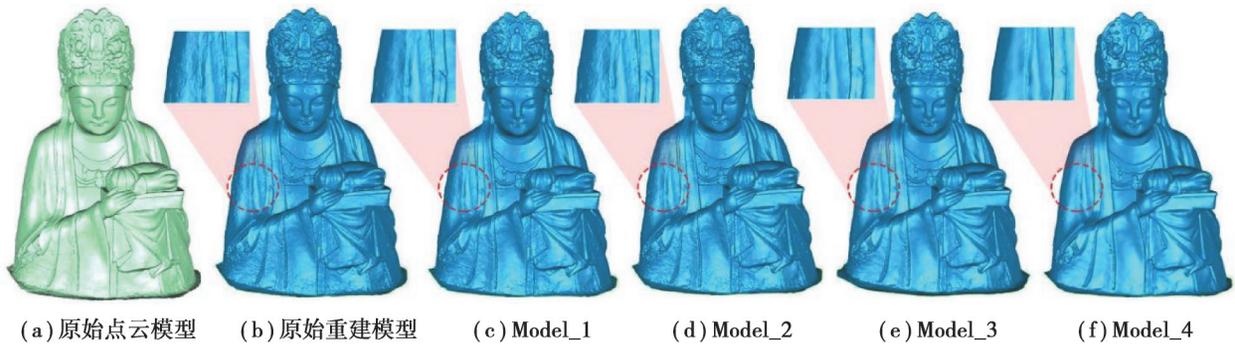


图 5 菩萨像去噪结果对比图

Fig. 5 Comparison of the point cloud denoising results of the bodhisattva statue image

2.4 点云重采样

扫描后石质文物的点云数据密度各不相同,且数据拼接过程中部分点云信息重复叠加,为减少建模工作量,对其进行重采样是必要的^[19-20]。不同方法下的采样效果显示(如图 6 所示):直接进行 70% 曲率采样的菩萨像表面出现多处孔洞,对其进行大量修补及修补效果的检验是不可行的;而采用 70% 随机采样表面噪声过滤效果较差。采用双边滤波去噪后的模型在 70% 重采样下,与单独的曲率采样/随机采样相比,信息保留更完整,在减少点云数量的同时保留菩萨像表面特征信息。

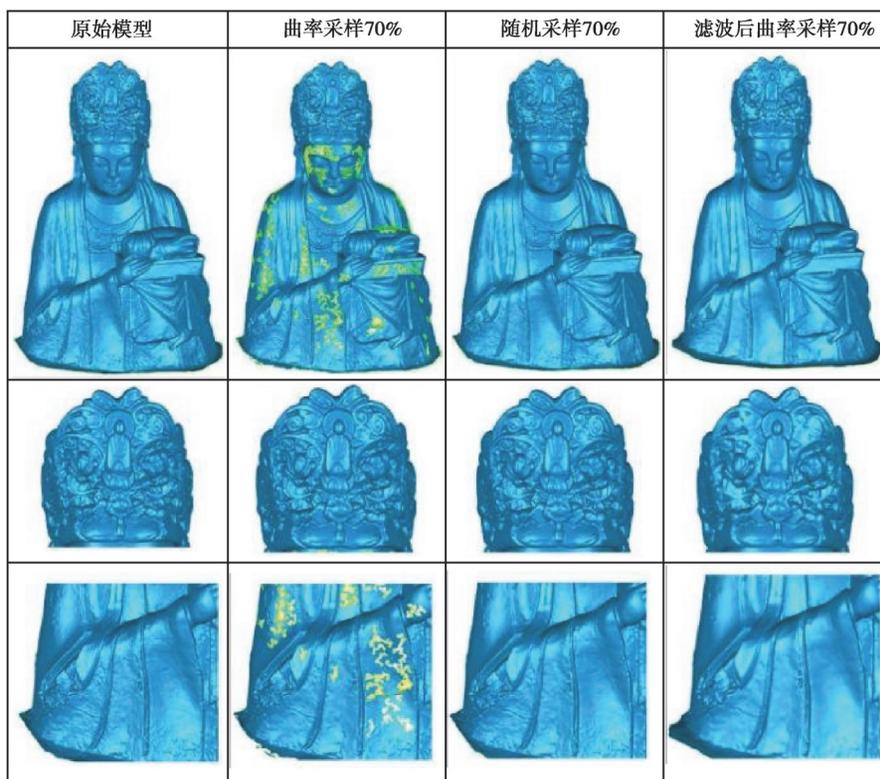


图6 菩萨像点云重采样

Fig. 6 Resampling of bodhisattva point cloud

2.5 目犍连菩萨像建立

将上述预处理后的模型信息,在Geomagic Studio平台下实现三维精细化曲面模型建立。曲面模型菩萨像偏差分析结果表明其均偏差为 $-5.0\sim 4.0$ mm,标准值为1.1 mm,均方根估计误差1.1 mm(如图7所示)。在三维数据扫描期间(2018年),菩萨像背部裂隙张开度小,头部裂隙未贯通至耳部,裂隙结构面平整性差,扫描仪难以获取内部裂隙信息。因此,在曲面模型导入到Rhino中完成结构面添加时,主要依据裂隙现场勘察数据(如表1所示),结合三维激光获取的菩萨像表面裂隙分布形态,重新构建裂隙于对应位置,建立裂隙时将其进行必要的简化处理,删除过于尖锐的裂隙几何特征。利用Hypermesh软件划分高质量2D表面网格,网格尺寸由0.15~0.005 m过渡变化,在此基础上完成三维有限元模型建立,共106 464个单元,模型如图8所示。

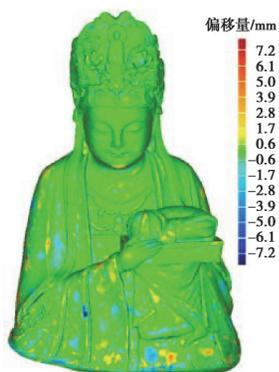


图7 菩萨像偏差分析

Fig. 7 Deviation analysis of bodhisattva model

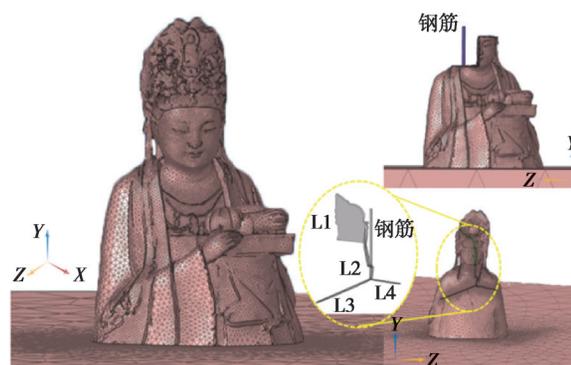


图8 菩萨像三维有限元模型

Fig. 8 Three-dimensional finite element model of the Bodhisattva statue

2.6 力学参数确定

由于文物本体取样困难,且造像经历多次修复,内部存在数量众多的结构面或破碎岩体,获取原位样本进行试验存在诸多困难,难以获得可靠的力学参数。近年来,研究人员将 Hoek-Brown 准则引入力学参数分析过程中,以室内力学试验为基准,通过岩体的超声波测量结果对力学参数进行修正^[21-22]。

以大佛湾岩样的物理力学试验结果(如表 3 所示)^[23]为基准,通过对菩萨像原位进行表面硬度测试(Equotip3(D型))及超声波探测仪探测(Proceq Pundit Lab+),仪器名称内均匀性,并对力学试验结果进行修正。由于菩萨像头部表面起伏变化大,超声波换能器无法紧贴造像表面,故仅测量其身体部分,波速测点及对应波速结果如图 9 所示。

表 3 材料物理力学参数

Table3 Physical and mechanical parameters of materials

名称	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/MPa
砂岩	2 356	4.2	0.26	37.5	13.6
钢筋	7 960	170.0	0.30	—	—

由菩萨像波速及硬度测试结果可知(如图 9~10 所示),由上至下,菩萨像表层硬度、波速均呈现减小趋势,且背部测量结果小于正面测量结果。其中,硬度云图局部出现的几处较大“孤岛”,与波速测试结果表现出一致性。因此,参考菩萨像头部硬度结果,对无法进行波速测量的部分以硬度变化规律作为补充。

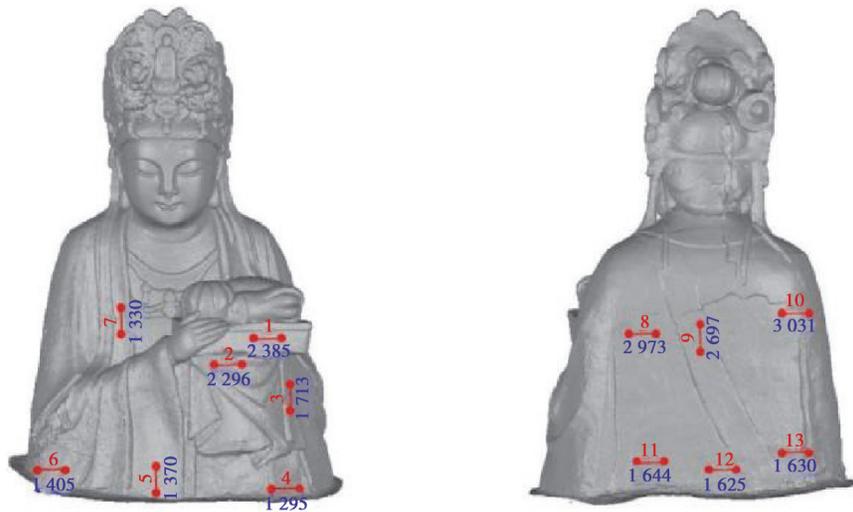


图 9 菩萨像波速测点及结果图

Fig. 9 Wave velocity measurement points and results of bodhisattva statues

根据室内试验测得卧佛高度内新鲜砂岩纵波波速为 3 541 m/s,但菩萨像下部测点波速主要集中于 1 600~2 900 m/s 之间,菩萨像表面岩石完整性较差,且不同位置的力学参数差异性显著。基于 Hoek-Brown 准则^[24],以波速预测岩体力学参数式(11)(12),选用波速算术平均值 1 953 m/s 作为计算依据,此时对应物理力学参数为 $c=25 \text{ kPa}, \varphi=26 \text{ °}$ 。

$$c = \frac{\sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + [6am(s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}] / [(1+a)(2+a)]}}, \quad (10)$$

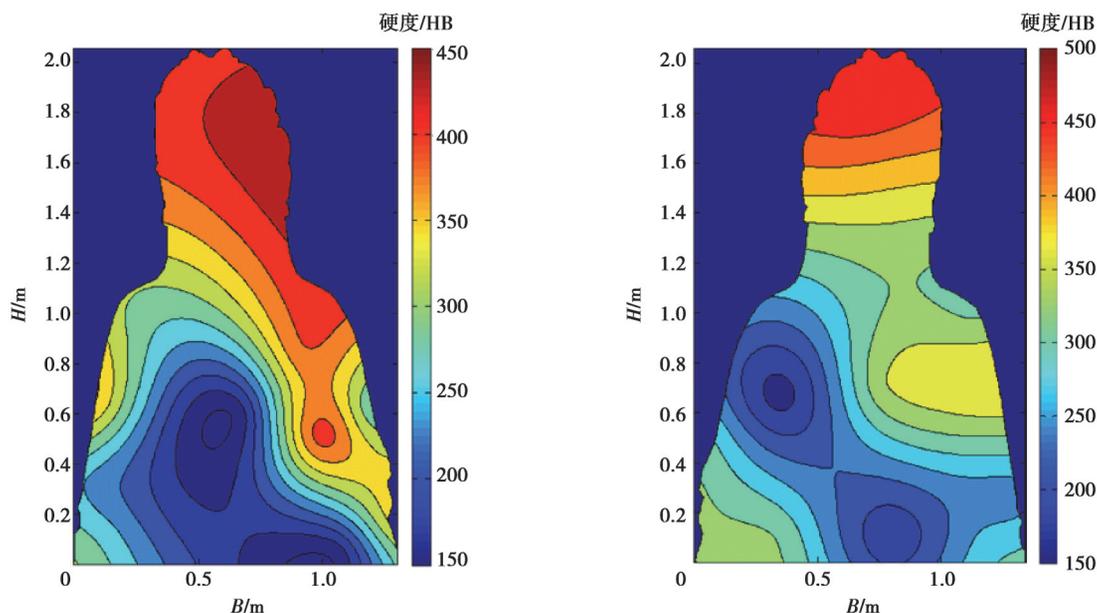


图10 菩萨像硬度云图

Fig. 10 Hardness cloud map of bodhisattva statue

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{3am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) + 3am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right], \quad (11)$$

$$\sigma'_{3n} = \sigma_{3\max} / \sigma_c, \quad (12)$$

式中: $\sigma_{3\max}$ 为最小主应力上限值; σ_c 为岩体单轴抗拉强度。

常数 a, s, m_b 均由地质强度指标 GSI 确定, 修正后的 Hoek-Brown 准则下各参数计算^[21] 如式(13)

$$\begin{cases} m_b = m_i \exp\left(\frac{\text{GSI} - 100}{28 - 14D}\right), \\ s = \exp\left(\frac{\text{GSI} - 100}{9 - 3D}\right), \\ a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-\text{GSI}}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right), \end{cases} \quad (13)$$

式中, GSI 与波速相关联, 实现以波速 V_p 至力学参数的预测, 其计算公式为

$$\text{GSI} = 15V_p - 7.5. \quad (14)$$

局部钢筋外露导致其工作性能劣化, 材料间的黏结性能降低, 本文以丁万涛^[25]对锚固支护钢筋锈蚀的参数折减为依据, 选用9%的锈蚀度, 其中, E 降低10%, f_y 或 f_t 降低21%。

3 目键连菩萨像稳定性分析

3.1 初始状态稳定性分析

固定菩萨像底部边界所有节点的 X, Y, Z 方向, 以菩萨像头部裂隙开裂之前的平衡状态作为初始状态, 利用 FLAC3D 进行自重加载, 并以最大不平衡力 $1 \times 10^{-5} \text{N}$ 作为结束标志。为直观观察菩萨像内部受力情况, 沿菩萨像中部做切面分析, 图 11(a)(b)。自然状态下, 菩萨像呈现低眉颌首姿态, 头部重心外移, 在头部与身体连接处出现了 2 处应力集中区域。其中, 菩萨像颈部受压, 项部受拉, 由应力集中区域向内, 最大主应力值以抛物线形式逐渐减小。菩萨像头部位移层带状分布明显, 沿面部方向和位移增加。

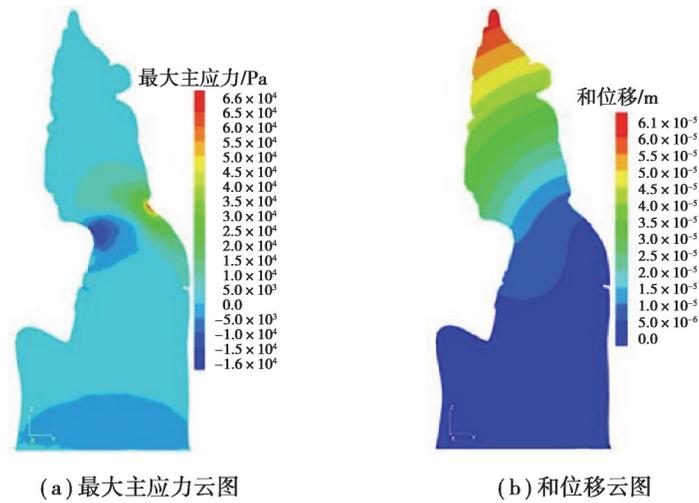


图 11 菩萨像初始状态结果分析

Fig. 11 Analysis of the initial state of the bodhisattva statues

3.2 现存状态的稳定性分析

菩萨像中部切面云图显示头部裂隙的产生使项部应力得到释放(如图 12 所示),菩萨像内部应力发生重分布。此时头部应力最大值增量较小,拉应力集中区由顶部向裂隙端移动,但总体仍表现为前侧受压,后侧受拉的状态。

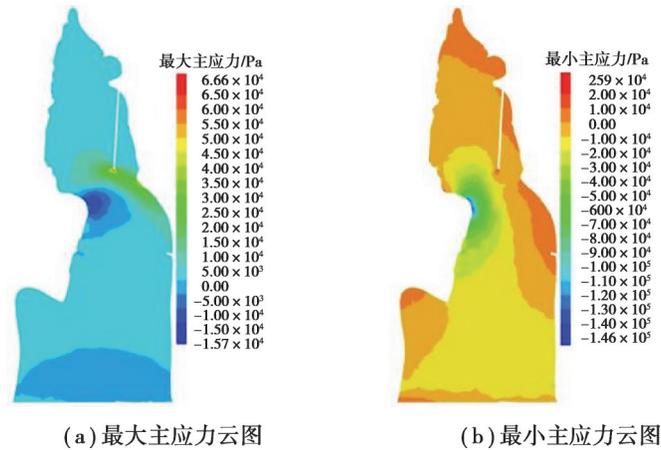


图 12 菩萨像现存状态结果分析

Fig. 12 Analysis of the existing status of bodhisattva statues

以靠近背部一侧的钢筋上部端为起点向下选取一路径(如图 13 所示),钢筋表面应力沿路径方向增大,当到达头部裂隙端时,拉应力迅速增大至最大值(95 kPa)。与菩萨像岩体最大主应力相比,内部钢筋受力明显大于岩体所受应力,由此可见钢筋的存在改善了菩萨像项部及裂隙端的受力,对其稳定性起到了一定的承载作用。

3.3 强度折减分析

3.3.1 塑性区分析

不同折减系数下菩萨像头部的塑性区分布表明,图 14 表示在折减初期,塑性区主要分布颈部、项部的局部区域,仅外侧少量岩体达到剪切破坏,范围较小

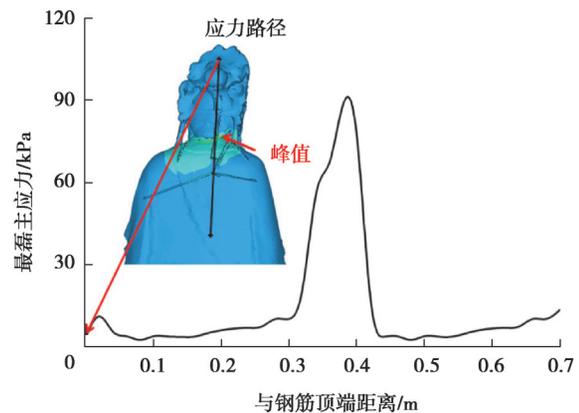


图 13 菩萨像内部钢筋最大主应力曲线

Fig. 13 The maximum principal stress curve of the inner steel bar of the Bodhisattva statue

未出现贯通情况。当折减系数增大, 裂隙端开始出现塑性区, 此时塑性区以颈部、裂隙端为起点, 向内部逐渐延伸, 且延伸速度逐渐加快; 当折减系数 $F_s=1.20$ 时, 在颈部范围内均出现较大范围的剪切塑性区, 此时头部塑性区已基本贯通, 可能出现剪切破坏。

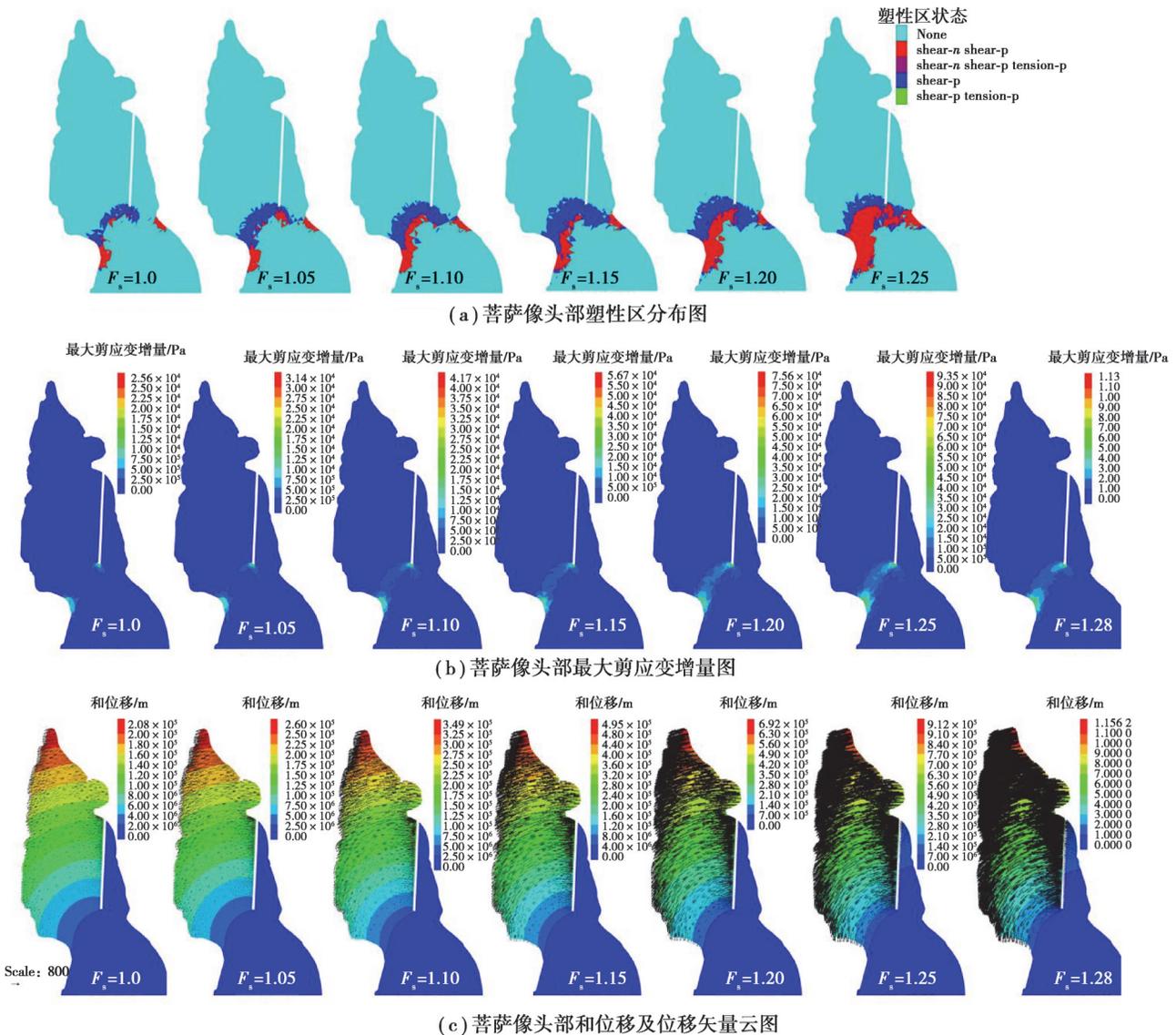


图 14 菩萨像稳定性分析

Fig. 14 Stability analysis of bodhisattva statues

3.3.2 最大剪应变分析

菩萨像的破坏过程受结构面抗剪强度的影响较大, 头部裂隙的产生促进了向颈部前侧剪切带的形成, 同时造成两端剪切应变增量集中, 如图 14(b) 所示。随折减系数增大, 剪切应变分布由裂隙端、颈部同时向内侧扩大。当 $F_s=1.10$ 时, 逐渐呈现出抛物线分布状态; F_s 继续增大, 剪应变增量潜在滑动面增大, 由 7.50×10^{-5} 增大至 6.00×10^{-4} ; 当 $F_s=1.28$ 时, 最大剪应变增量增大至 1.13×10^{-3} , 在菩萨像头部形成剪切滑移带。

3.3.3 位移分析

菩萨像水平位移与竖向位移随折减系数变化基本趋于一致如图 14(c) 所示: 当 F_s 在 1.0~1.2 时, 监测点各向位移量随 F_s 增大缓慢变化, 位移量恒定于较小数值, 基本为 μm 级; 当 $F_s > 1.28$ 后, 菩萨像头部监测点位移突增, 各测点位移量级由 μm 级增加至 mm 级; 在同一折减系数下, 头部前侧监测点位移量大于同高度后侧监测点的位移量, 顶部位移变化大于底部监测点的位移变化。尤其测点 1、测点 3 对折减系数变化最为敏感, 说明

头部前侧监测点位移变化敏感度均大于后侧。最大位移预警值位于 1.28~1.30 之间,即菩萨像头部水平(竖向)位移值达到 $-73.1\ \mu\text{m}$ ($-8.99\ \mu\text{m}$)后,头部极有可能发生破坏。相较于塑性区贯通现象出现的 F_s ,监测点位移发生突变时的 F_s 略大,即塑性区先发生贯通,继而监测点出现位移突变。在菩萨像逐渐发生破坏的过程中,位移变化主要发生于头部前侧,其半身部分及裂隙后头部整体位移量较小(如图 15 所示)。表现为同一高度处,头部裂隙结构面前侧岩体位移大于后侧位移,临空面位移大于内侧位移,裂隙顶端位移大于内部端点位移;沿结构面向外,各点位移矢量方向由垂直裂隙面逐渐向下发展,到达菩萨像表面时各点倾向近似垂直向下,位移矢量方向变化快。由位移矢量变化可知其破坏过程表现为沿头部裂隙下端点向外转动倾倒的趋势。结合上述位移、塑性区分析结果可知,菩萨像头部前侧稳定性最低。

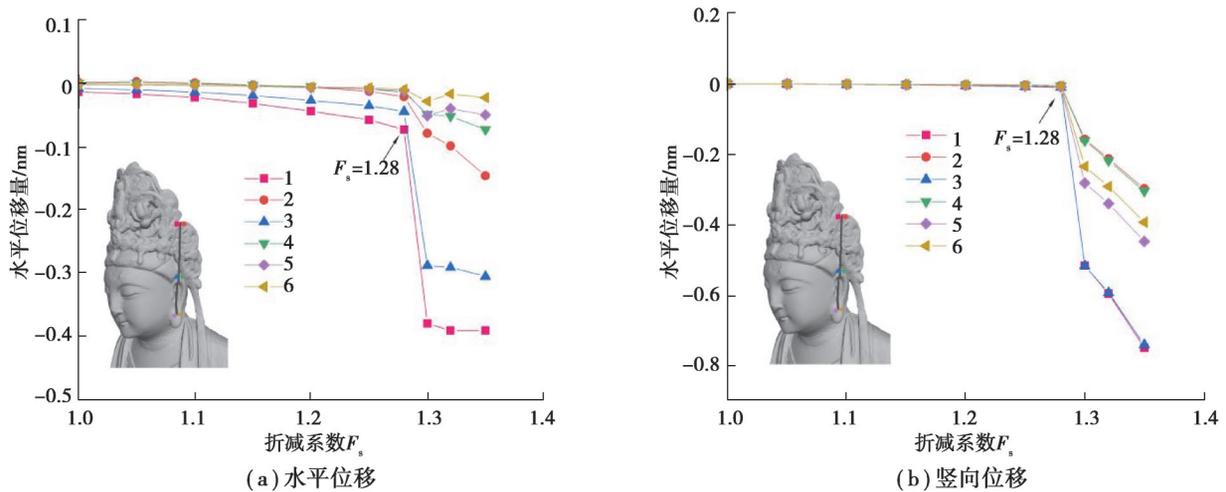


图 15 菩萨像监测点位移

Fig. 15 The displacement of the monitoring point of the bodhisattva statue

4 菩萨像稳定性分析讨论

现存石刻佛像大多呈现低眉颌首、头部前倾的特点,且头部尺寸较大,重心外移。头部裂隙出现后,裂隙两侧岩体相对位移与折减系数变化呈正相关。基于强度折减法,以塑性区贯通为判断依据时的安全系数为 1.20,以监测点位移出现无限位移为判断依据时的安全系数为 1.28。不同判断依据下的安全系数相差 0.08,但菩萨像的破坏形式均表现为沿头部支撑点发生倾倒破坏。

与菩萨像形态类似的倒悬危岩体,也表现出因局部凌空而重心外移的特点。自由端的岩体在重力作用下所产生的复合弯矩,使上部岩体随力学参数降低产生张拉裂隙,降低危岩体稳定性^[26-27]。当危岩体内部出现裂隙后,受结构面切割的危岩体在自身重力的持续作用下,使得裂隙端拉应力增大,沿内部损伤面产生向支撑角点方向的破坏(如图 16 所示)。

依据现阶段对菩萨像的临时支护情况(如图 1 所示),在头部底端施加法向约束。与未支护效果相比,监测点水平位移、竖向位移均得到了大幅度减小;破坏岩体由头部结构面前侧转为后侧部分(如图 17 所示)。当 $F_s=3.88$ 时,头部后侧岩体产生向临空面的破坏。因此,对于菩萨像来说,虽然临时支护增加了头部的稳定性,但从文物的长期稳定性来说,临时支撑仅对头部裂隙前侧岩体进行加固,使得破坏岩体转移至后部,并未增强头部稳定的一致性。内部钢筋为头部的长期稳定性提供了积极作用,但在潮湿多雨的环境下将加速钢筋的锈蚀,会导致连接岩体的开裂及锈胀裂隙的发展。这些对菩萨像的长期保存产生不利影响,因此有必要采取合理的加固手段以增强文物价值的延续。

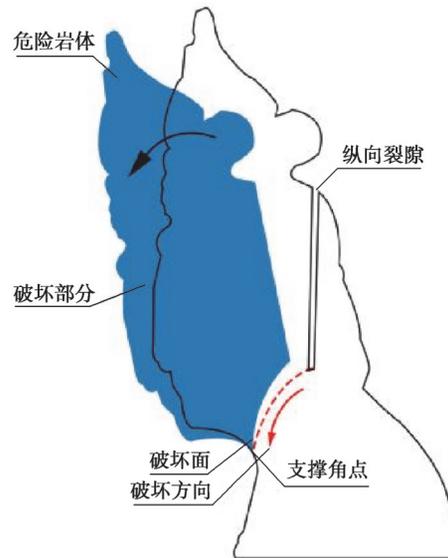


图16 菩萨像头部破坏模式

Fig. 16 Destruction pattern of the head of a bodhisattva

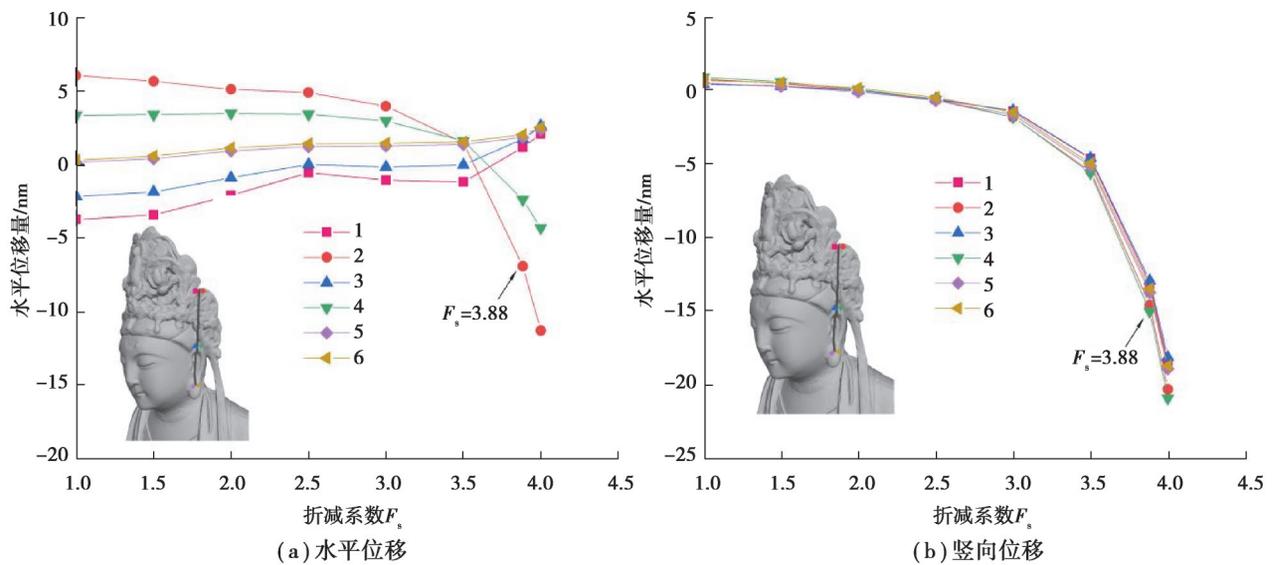


图17 支护后菩萨像监测点位移

Fig. 17 The displacement of monitoring point of Bodhisattva statue after support

5 结论

1) 将基于法向量的双边滤波方法应用于建模前的去噪处理, 经过目键连菩萨像应用及偏差分析, 结果表明良好的去噪方式可以减少建模难度, 完整保留文物特征信息。去噪后的点云模型分布均匀程度得到改善, 增强平滑区光顺效果, 同时较好地保留有尖锐特征信息。

2) 点云处理后得到高精度曲面模型, 基于此建立包含裂隙结构面在内的菩萨像三维精细化实体模型, 并采用基于岩体波速的 Hoek-Brown 准则预测得到石质文物岩体力学参数, 形成了一套“模型前处理-模型建立-岩体参数获取-稳定性模拟分析”高精度石质文物逆向建模及数值模拟流程。

3) 重力荷载下, 菩萨像颈部、项部两侧应力差异大。随着裂隙产生, 应力发生重分布, 最大拉应力集中区向裂隙端移动。以塑性区贯通、发生无限位移为破坏依据, 对菩萨像力学参数进行强度折减。结果表明: 自重荷载下, $F_s=1.20$ 时, 菩萨像头部塑性区贯通; 当 $F_s=1.28$ 时, 头部前侧位移达到临界值, 此时增加安全系数, 位移敏感度剧增。即菩萨像以项部为支撑点, 沿裂隙端发生倾倒破坏。

4)将数值模拟结果与含竖向裂隙的危岩体失稳破坏进行对比,危岩体在自重荷载下裂隙端拉应力集中,沿内部损伤面向支撑角点方向产生破坏,验证了本文理论方法在菩萨像稳定性分析中应用效果的合理性。

参考文献

- [1] Ambraseys N, Psycharis I N. Earthquake stability of columns and statues[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2011, 15(5): 685-710.
- [2] 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.
- [3] 王旭东,张景科,孙满利,等.莫高窟南区洞窟古人开凿智慧初探[J].*岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S2): 4207-4220.
Wang X D, Zhang J K, Sun M L, et al. Study on the ancient wisdom in the excavation of caves in the south area of Mogao Grottoes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S2): 4207-4220.(in Chinese)
- [4] Peng N B, Sun B, Huang J Z, et al. Study on the seismic performance of small-diameter bolts reinforced in grottoes[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 1-12.
- [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] 邓小龙,李丽慧.基于三维激光扫描技术的复杂三维地质体建模方法[J].*工程地质学报*, 2017, 25(1): 209-214.
Deng X L, Li L H. Refined modeling of complex geological body based on there-dimensional laser scanning technique[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1): 209-214.(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] Meng Z G, Fan F Z, Cui X B, et al. Numerical modeling and stability analysis of surrounding rock of Yuanjue cave[J]. *Geofluids*, 2021, 1(11): 6652271.
- [9] Wei P, Li A, Hou M, et al. Equal proportion reproduction method of grotto based on point cloud[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, 4215: 1215-1219.
- [10] 赵夫群,周明全.层次化点云去噪算法[J].*光学精密工程*, 2020, 28(7): 1618-1625.
Zhao F Q, Zhou M Q. Hierarchical point cloud denoising algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1618-1625.(in Chinese)
- [11] Fleishman S, Drori I, Cohen-Or D. Bilateral mesh denoising[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 950-953.
- [12] 曹爽,岳建平,马文.基于特征选择的双边滤波点云去噪算法[J].*东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(S2): 351-354.
Cao S, Yue J P, Ma W. Bilateral filtering denoise algorithm for point cloud based on feature selection [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(S2): 351-354.(in Chinese)
- [13] 王晓辉,吴禄慎,陈华伟.基于法向量距离分类的散乱点云数据去噪[J].*吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(1): 278-288.
Wang X H, Wu L S, Chen H W. Denoising of scattered point cloud data based on normal vector distance classification[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(1): 278-288.(in Chinese)
- [14] 燕学锋,王金华,任伟中.大足石刻保护工程举要[M].武汉:中国地质大学出版社,2019.
Yan X F, Wang J H, Ren W Z. The main points of Dazu Rock Carvings protection project [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2019. (in Chinese)
- [15] 袁小翠,吴禄慎,陈华伟.尖锐特征曲面散乱点云法向估计[J].*光学精密工程*, 2016, 24(10): 2581-2588.
Yuan X C, Wu L S, Chen H W. Normal estimation of scattered point cloud with sharp feature[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 2581-2588.(in Chinese)
- [16] 夏春华,施滢,尹文庆.基于TOF深度传感的植物三维点云数据获取与去噪方法[J].*农业工程学报*, 2018, 34(6): 168-174.
Xia C H, Shi Y, Yin W Q. Obtaining and denoising method of three-dimensional point cloud data of plants based on TOF depth sensor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 168-174.(in Chinese)
- [17] 张铭凯,梁晋,刘烈金,等.基于SR300体传感器人体扫描点云的去噪方法[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(9): 2225-2231.

- Zhang M K, Liang J, Liu L J, et al. Denoising method of body scanning point cloud obtained by SR300[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(9): 2225-2231.(in Chinese)
- [18] Digne J, de Franchis C. The bilateral filter for point clouds[J]. Image Processing on Line, 2017, 7: 278-287.
- [19] 杨璐璟. 点云数据的压缩算法研究-以数字地质博物馆为例[D]. 长沙:中南大学, 2014.
- Yang L J. Research on compression algorithm of point cloud data-taking digital geological museum ad an example[D]. Changsha:Central South University, 2014.(in Chinese)
- [20] 蔡钦镒, 陈中贵, 曹娟. 基于最优传输理论的高质量点云重采样方法[J]. 计算机学报, 2022, 45(1): 135-147.
- Cai Q Y, Chen Z G, Cao J. High-quality point cloud resampling method based on optimal transport theory[J]. Chinese Journal of Computers, 2022, 45(1): 135-147.(in Chinese)
- [21] 夏开宗, 陈从新, 刘秀敏, 等. 基于岩体波速的Hoek-Brown准则预测岩体力学参数方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1458-1466.
- Xia K Z, Chen C X, Liu X M, et al. Estimation of rock mass mechanical parameters based on ultrasonic velocity of rock mass and hoek-brown criterion and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1458-1466.(in Chinese)
- [22] 杨建华, 代金豪, 姚池, 等. 岩石高边坡爆破开挖损伤区岩体力学参数弱化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 968-975.
- Yang J H, Dai J H, Yao C, et al. Weakening laws of rock mass properties in blasting excavation damage zone of high rock slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 968-975.(in Chinese)
- [23] 任伟中. 大足石刻大佛湾水害治理工程对石刻岩体稳定性评估研究报告[R]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2018.
- Ren W Z. Research report on the stability assessment of the rock mass in Dazu Rock Carvings dafo bay by the flood control project[R]. Wuhan:Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018.(in Chinese)
- [24] Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[J]. Proceedings of North American Rock Mechanics Society and Tunnelling Association of Canada(NARMS-Tac), 2002, 1(1): 267-273.
- [25] 丁万涛, 刘金慧, 张乐文. 不同锈蚀度时海底隧道锚固支护结构岩锚相互作用分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1642-1652.
- Ding W T, Liu J H, Zhang L W. Analysis on interaction of rock-bolts in anchorage support structure of subsea tunnel at different corrosion levels[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(5): 1642-1652. (in Chinese)
- [26] 崔宏环, 刘建坤, 张立群, 等. 含纵向裂隙的悬挑式危岩稳定性分析方法研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 11-15.
- Cui H H, Liu J K, Zhang L Q, et al. A stability analysis method of the overhanging crag with longitudinal cracks[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 11-15.(in Chinese)
- [27] 袁维, 郑传厂, 王伟, 等. 基于悬臂梁理论的倒悬危岩体地震弯折崩塌评价方法研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(3): 233-239.
- Yuan W, Zheng C C, Wang W, et al. Evaluation method of earthquake-induced bending collapse of the upside-down dangerous rock-mass based on cantilever beam theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(3): 233-239.(in Chinese)

(编辑 侯 湘)