

三维激光扫描技术在石质文物 数值模拟中的应用

史俊莉

(河南工业职业技术学院 城市建设学院, 河南 南阳 473000)

摘要:为了精确模拟石质文物的稳定性,以云冈11号窟为研究对象,利用三维激光扫描仪快速精确获取石窟的表层点云数据,再利用 ANSYS 进行内部网络结构剖分,最后导入 Flac3d 对石窟整体进行数值模拟计算.结果表明:云冈11号窟岩体现阶段总体位移方向向下并向后倾斜,稳定性较好,随时间推移其应力集中逐渐向下部发展;对于底部风化凹槽部位若不采取防护措施,预测100 a以后,洞窟底部会由于应力集中而导致其失稳、破坏.基于此提出了相应的加固措施.

关键词:三维激光扫描仪;三维数值模拟;石质文物;稳定性

中图分类号:K878;K879.22 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.5/6.014

Application of three-dimensional laser scanning technology in historic stone's numerical simulation

SHI Jun-li

(Institute of Urban Construction, He'nan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China)

Abstract: In order to accurately simulate the structural stability of the stone relics, with Yungang 11th Grotto as object, it used three-dimensional laser scanner quickly to accurately obtain caves surface array data, and ANSYS to make internal network structure split and finally imported Flac3d on Grotto whole seismic response simulation. The result showed that: the overall direction of displacement of rock caves of Yungang the 11th Grotto was a downward tilt with good stability over time and gradually downward portion with stress concentration. It was predicted that without taking protective measures for the bottom of the recessed portion weathering, the bottom of the cave would lead to instability in 100 years due to stress concentration destruction. Based on this corresponding reinforcement measures were proposed.

Key words: three-dimensional laser scanner; three-dimensional numerical simulation; historic stone; stability

0 引言

云冈石窟位于山西大同,在规模和艺术成就上均是国内较为著名的石窟文化遗产.气候环境、地质条件、人为破坏等因素的长期不良影响,导致云

冈石窟的病害发生率逐年升高,亟待修复和保护.现场调查发现,云冈石窟的病害类型主要分为两类:一类病害发生于文物本体表面,如起甲、脱落、裂隙、酥碱等,主要是环境风化作用所导致;另一类病害指文物赋存岩体的工程地质稳定性问题,这类

收稿日期:2015-01-20

基金项目:河南省科技厅青年科学基金项目(61403351)

作者简介:史俊莉(1984—),女,河南省南阳市人,河南工业职业技术学院助教,硕士,主要研究方向为GNSS理论.

病害一旦发生,对文物具有巨大的破坏作用,将造成不可挽回的损失。目前对于石质文物的保护和监测主要通过测绘手段来进行,如曾群华等^[1]将GIS技术应用于三峡库区文物保护监控中,建立了该区域的文物保护信息系统;王莫^[2]利用三维激光扫描技术,将故宫主要建筑群的三维信息点云数据进行收集处理后,生成数字化的古建筑模型资料,为故宫保护工程提供了详实的基础数据;齐文娟^[3]利用三维激光扫描仪,建立了栢灵寺内部石刻雕像的信息库;管斌^[4]系统地总结了测绘手段在古建筑保护中的应用,并指出现阶段测绘技术逐渐从模拟信号到数字信号的转变是一大趋势;黄飒^[5]系统研究了各类古建筑测绘过程中的点云数据、误差剔除、信息提取的处理方法,为古建筑模型的建立提供了参考;张序等^[6-7]运用手持式激光扫描仪探究了其在文物测量方面的技术方法,取得了满意效果。总之,近年来测绘手段在建筑工程、地质矿产、可视化方面的应用研究已有长足发展^[8-11],目前测绘手段在文物保护中的应用主要局限于文物本体信息的留存和变形监测,所采集的数据信息挖掘深度不够。本文将在前人研究的基础上,以云冈石窟为研究对象,利用采集到的三维激光扫描数据建立石窟岩体的三维模型,然后借助数值模拟软件 Flac3d 分析和预测其结构稳定性,并提出有针对性的加固措施,以为石窟的保护提供有效的技术支持。

1 三维激光扫描测绘方案

云冈石窟第11窟位于云冈石窟群的西部,属于五华洞,在五华洞I区第11—13窟的崖顶为古代用砌石形成的一道挡墙。该砌石挡墙目前风化十分严重,墙体破碎,经常出现坍塌和掉块,本次测绘主要集中在这一区域。

1.1 测绘原理

测试所用仪器为Rigel公司所产型号为VZ1000的三维激光扫描仪。该仪器扫描距离长达1.5 km,采集数据效率较高,主要由硬件部分和软件部分组成:硬件部分包括激光发射器、接收器、微处理器和机械传动装置;软件部分主要是控制软件Riscan Pro和数据处理软件。

三维激光扫描仪类似于地质雷达,通过发射微波,用发射时间与反射回来的时间之差来计算被测物体的具体参数,比地质雷达更加精确,能够在测量的同时建立被测物体的三维空间立体坐标,并在

数据处理过程中真实还原被测物体的结构^[12]。在扫描时,以三维激光扫描仪为三维坐标的原点, X, Y 轴为坐标系的水平面方向, Z 轴为垂直方向。采用脉冲式激光发射方式进行坐标点采样,以获得点云数据。这一工作是把实物模型转换为三维模型的基础性工作,数据点直接决定后期建立模型的还原准确度^[13],见图1。

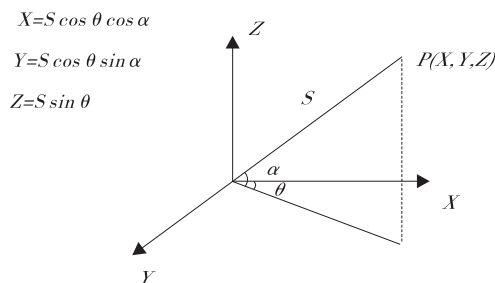


图1 三维扫描仪激光点坐标

1.2 扫描仪设置

扫描仪设置在云冈11号窟前约10 m处。将扫描仪固定在三脚架上,然后调节三脚架水平和高低,使底座上面的气泡居中,以保证仪器在工作过程中的稳定性。在扫描过程中需要考虑如下因素。

1) 扫描仪所处的工作环境。由于三维激光扫描仪对于数据非常敏感,在扫描仪工作过程中必须保证仪器与石窟之间没有车辆、游客的干扰,并且选择晴朗的、空气质量较好的天气进行。另外,扫描仪必须设置在平坦、稳定的地面上,在某一范围的扫描过程中不可随意移动三维激光扫描仪。

2) 扫描仪的扫描范围。三维激光扫描仪实际扫描范围应比理论扫描范围要低10%~30%,这样才能既保证工作进度又保证数据完整性;同时,在相邻两个扫描段的点云数据重复率应保持在15%左右。云冈石窟呈线状分布,测站间距根据石窟高度和仪器入射角度来确定^[14]。

3) 定位靶标的位置。定位靶标的主要作用在于后期模型拼接,测绘进行前在每个区段两端设定靶标点位。需要注意的是:若有3处靶标,靶标不能同时放在同一条线上;若超过3处靶标,则需放置在不同平面上。

1.3 三维模型的生成

数据收集主要由控制软件Riscan Pro来控制,根据石窟当时所处的环境,需要在软件上设定温湿度和气压等环境条件,以保证仪器工作的稳定性。

将采集到的点云数据进行处理即可得到云冈

11 号窟三维模型. 本文采用的算法流程主要分为人工预处理阶段、生成 TXT 点云数据和 Matlab 自处理阶段. 人工预处理主要分为 3 个阶段: 将收集到的点云数据进行拼接; 进行分区段分割; 去除重复部分和明显噪声(环境干扰项). 之后生成 TXT 格式的点云数据. 最后进行 Matlab 处理: 先提取石窟主轴线; 后进行坐标变换、降噪、拟合, 从而得到三维模型. 具体模型生成方式见图 2.

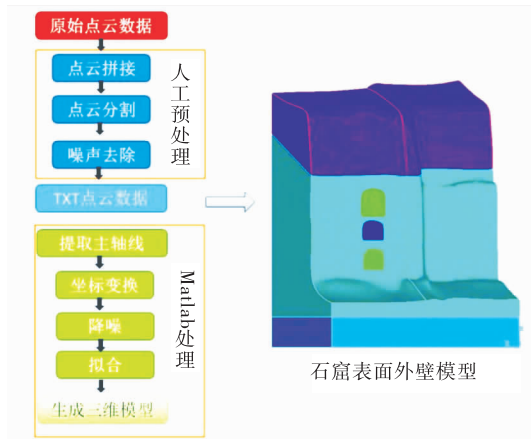


图2 基于点云数据的石窟表面模型生成方式

1.4 内部网格生成

在地质原型基础上进行概化处理是三维有限元分析的前提, 在该前提下得出的三维模型才有实用性. 为了使模型不会因为计算范围和网格离散化等问题而与现实相差甚远, 建模时必须选取足够的计算范围. 经理论分析和试算得知, 石窟开挖对岩体的应力应变及位移都有明显的影响, 影响范围约为开挖尺寸的 2.5 ~ 3 倍. 超过此范围的部分, 影响很小, 可忽略不计.

在作三维有限元分析时, 模型应尽量与实际情况接近, 因为模型的精准程度直接导致模拟结果的正确与否, 但考虑到云冈 11 号窟模型太复杂, 模型复杂可能导致计算困难, 故本文在允许的范围内, 对云冈 11 号窟的模型进行了简化, 见图 3.

利用 ANSYS 对上述模型进行剖分, 得到 71 097 个单元, 云冈 11 号窟网格剖分图见图 4. 进行模型剖分时, 对重点研究区域云冈 11 号窟进行了细分, 对云冈 11 号窟以外的地方稍微粗略些. 模型剖分采用四面体单元, 在 ANSYS 中剖分完成后, 通过进一步的程序转换, 把在 ANSYS 中剖分好的三维模型导入到 Flac3d 中.

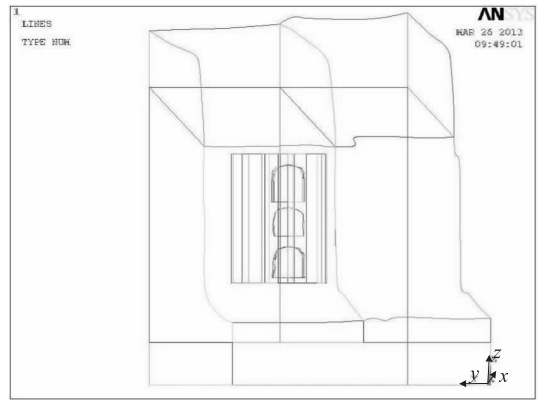


图3 云冈 11 号窟的三维模型图

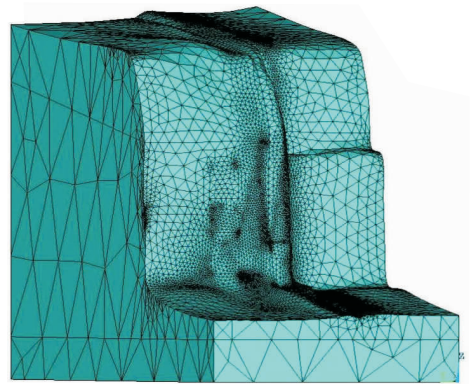


图4 云冈 11 号窟网格剖分图

2 基于三维模型的数值模拟计算

2.1 边界条件和相关参数设定

本模型设定顶面和底面为自由边界, 两侧面(东西两面)为固定端约束, 模型前面即崖壁面为自由边界, 山体后面为固定端约束, 选择摩尔库伦理论中的空间分布模型对云冈 11 号窟进行分析与计算.

石窟赋存岩体主要为砂岩, 其矿物组分含量如下: 长石为 48%, 石英为 50%, 其他矿物合占 2%. 由于石质文物不同于一般岩土体, 不宜采用大规模钻探手段, 现场勘察采用美国便携式轻型绍尔钻机在崖顶进行钻探, 共布置 8 条剖面, 钻孔 20 个, 孔深 1.6 ~ 6.5 m. 在现场取样后进行室内单轴抗压试验, 试验结果表明: 新鲜砂岩天然单轴抗压强度 39.5 ~ 41.5 MPa, 饱和单轴抗压强度 30.7 ~ 35.8 MPa. 砂岩在强风化后力学强度急剧下降, 其天然单轴抗压强度为 32.8 MPa, 饱和单轴抗压强度为 18 MPa, 同比天然单轴抗压强度和饱和单轴抗压强度分别衰

减约 17.0% ~ 21.0% 和 41.4% ~ 49.7%, 风化作用极大地破坏了岩体的强度, 其物理力学参数见表 1.

表 1 岩体的物理力学参数

| 介质类型 | 变形模量 E/MPa | 泊松比 μ | 黏聚力 c/MPa | 内摩擦角 $\varphi/^\circ$ | 容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 抗压强度 σ/MPa |
|-------|---------------------|-----------|--------------------|-----------------------|---|--------------------------|
| 新鲜岩体 | 3 494 | 0.22 | 1.00 | 32 | 24.9 | 30.0 |
| 强风化岩体 | 3 089 | 0.29 | 0.15 | 27 | 24.5 | 19.5 |

注: 部分参数是空间分布模型所要求的特定参数.

对于空间分布模型参数, 本文主要探讨黏聚力和摩擦角的空间分布, 由于变形模量、泊松比和容重差异不明显, 将其作为常量. 根据现场钻探的岩土样本分析其各项特性指标, 换算成二正态分布函数所表示的抗剪强度、黏聚力和摩擦角, 空间分布模型计算用参数见表 2.

表 2 空间分布模型计算参数

| 岩体参数 | 均值 | 方差 | 变异系数 |
|---------------------------------------|-------|------|------|
| 抗剪强度/MPa | 3.50 | 0.23 | 0.2 |
| 黏聚力/MPa | 0.85 | 0.15 | 0.2 |
| 摩擦角/ $^\circ$ | 29 | 5 | 0.18 |
| 变形模量/MPa | 3 224 | — | — |
| 泊松比 μ | 0.25 | — | — |
| 容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 24.6 | — | — |

2.2 计算结果

1) 空间位移分布

导入空间分布模型后, 利用 Flac3d 模拟云冈 11 号窟在重应力场的作用下的分布情况如下: 位移的总方向以竖直向下且沿石窟体向前倾斜为主方向, 最大位移发生在山体顶部, 位移量为 1.8 mm, 表明此处变形较大; 总位移量呈从上到下及从后到前呈逐渐减小的规律, 到模型前方底部位移值为 0, 符合自重应力场下的位移分布规律(见图 5).

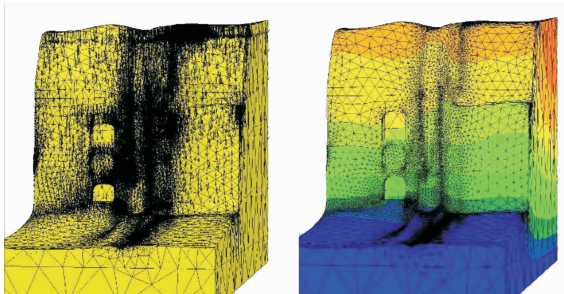
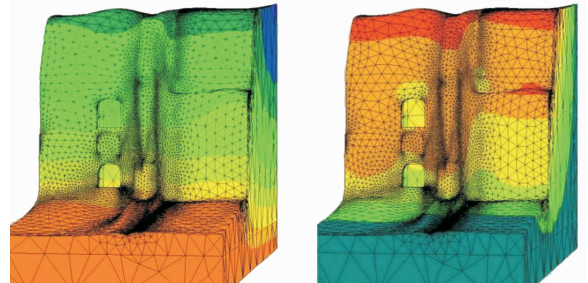


图 5 石窟总体位移分布规律

石窟位移等值线云图如图 6 所示. 从图 6a) 可知, 垂直方向的节点位移以负值为主, 表明整个模型向下沉降, 洞窟受压缩状态, 模型垂直方向位移趋势跟总位移趋势差不多, 位移的最大值发生在山顶后部, 其值为 1.8 mm, 往下垂直位移量逐渐减小. 窟顶处的垂直位移量为 1.6 ~ 1.8 mm, 方向垂直向下, 说明窟顶有向下位移的趋势, 至平台处逐渐降低为 0, 符合重力位移场的分布规律.

由图 6b) 可知, 水平方向位移以正值为主, 少部分区域为负, 说明模型大部分变形呈向石窟后部变形的趋势, 最大位移发生在云冈 11 号窟顶部的泥岩处, 位移值为 0.3 mm, 这表明该处位移量较大, 稳定性较差. 实际调查可知, 该处岩体变形较严重, 模拟与实际相符.



a) 垂向位移等值线云图 b) 水平向位移等值线云图

图 6 石窟垂直及水平方向位移等值线云图

2) 时间尺度预测

在石窟整体分析评价的基础上, 为了更好更全面地分析模拟结果, 选择了洞窟开挖区域西侧进行切割作为一典型剖面, 强度衰减系数 $k = 0.02$, 预测了云冈 11 号窟随时间应力及位移变化情况.

云冈 11 号窟时间变异应力位移分布图如图 7 所示. 从图 7a) 可知, 在云冈 11 号窟现阶段 ($t = 0$), 剖面总体位移方向向下并向后倾斜, 最大位移发生在山顶处, 最大位移值为 1.6 mm, 位移向下逐渐减少, 至平台处减小为 0. 开挖区域顶板处位移为 1.2 mm, 石窟底部位移为 0.6 mm, 方向均指向后下方. 在 $t = 50$ a (图 7b)) 时, 可见剖面位移呈增大趋势, 最大位移出现在开挖区顶部泥岩周围, 最大值为 0.3 mm, 该处位移较大, 属于危险区域. 位移逐渐向下向后迁移, 石窟山脚处位移依然为 0, 稳定性较好. 当 $t = 100$ a (图 7c)) 时, 山顶基本无位移变化, 而石窟山脚位移约为 1.3 mm, 石窟在重力作用下向下运动, 从山顶到平台逐渐减小, 分布较规律.

其中最大沉降发生在山脚处,其值为 17.7 mm,窟内顶板处沉降量为 14 mm,山脚可能发生部分失稳破坏.从现场调查情况来看,云冈 11 号窟坡脚处砂岩受风化剥蚀以及人为影响较严重,存在不同程度的风化凹槽,若不采取防护措施,100 a 以后石窟势必会遭受破坏.

3) 应力场分布

对于应力分布随时间变化情况,见图 7d)~图 7f),在 $t=0$ 时,石窟山顶山脚基本无应力集中现象,随时间推移在山顶和坡脚应力逐渐集中.可以预测 100 a 后,应力由洞窟所在山体向下逐渐增大,在洞窟顶板和前壁洞口处有应力集中现象,从现场调查也能发现这些区域确实发生了多处掉块,模拟结果与现场调查相符.

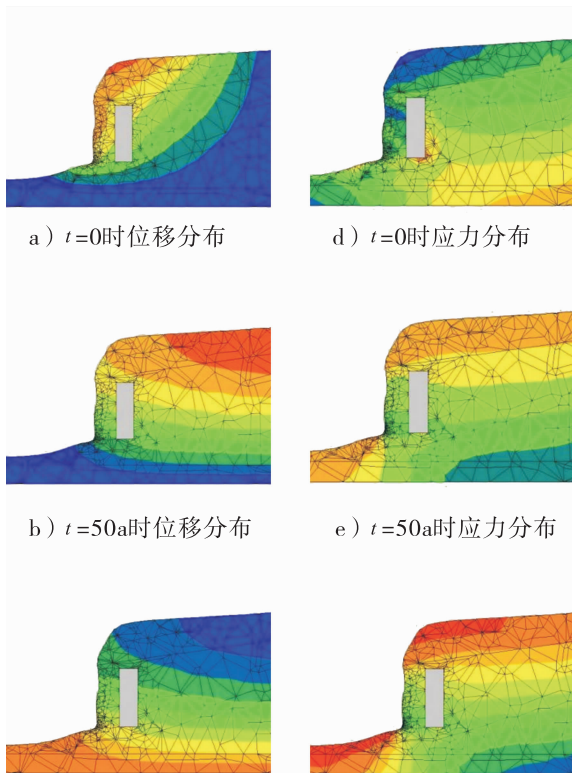


图 7 云冈 11 号窟时间变异应力位移分布图

4) 整体稳定性分析

基于强度折减法理论,用 Fish 语言自编程序,以不平衡力发展是否收敛做为破坏判断依据,分析整体稳定性.为提高计算效率,取折减系数在 1.0~2.5 之间进行试算,当折减系数 $R=1.4$, $t=0$ 时,模型开始发生破坏,如图 8 所示,此时塑性区并没有贯通.当 $t=100$ a, $R=1.4$ 时,模型已发生

大面积破坏且由模型纵剖面图可知此时塑性区已贯通,见图 9.

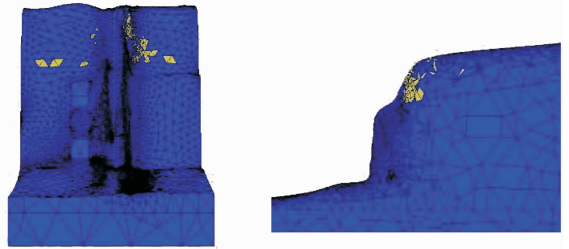


图 8 $t=0$ 时模型破坏塑性分布图及剖面图

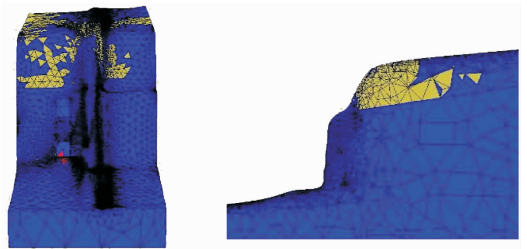


图 9 $t=100$ a 时模型破坏塑性分布图及剖面图

图 9 中红色单元表示张拉破坏,黄色单元表示剪切破坏,蓝色单元表示未破坏.模型首先会在窟顶部泥岩及下部洞口处发生破坏,破坏类型为:底部洞口处发生剪切破坏,顶部泥岩处发生张拉破坏.从图 9 中可看出剪切区较大,表明在临界状态时石窟的破坏主要为剪切破坏.

对于石质文物岩体的容许安全系数,目前尚无明确规定.参照以上建议取值,考虑到云冈石窟属于重要保护文物,防治工程等级为一级,故选择其危岩防治安全系数为 1.40~1.60.根据模拟计算结果,目前云冈 11 号窟整体处于稳定状态.

3 保护和防治措施建议

石窟下部风化凹槽的发展将直接导致其上堆积体的破坏,为了防止堆积体的整体破坏,顶部松散体应进行整理以减少厚度,降低荷载.在此同时,应在上部设置防渗层和排水沟,以减少地表水入渗.

古代人工雕刻体已经出现部分破坏,建议对局部空洞填塞、灌浆,对严重破坏岩石予以置换,清理表层植物等.同时可以考虑采用柔性防护网进行拦截,防止坠石伤人.

对风化凹槽建议采用埋暗梁进行处理,暗梁通过锚杆锚固于山体.窟顶板破坏和顶部危岩体发育有一定联系,因此对顶部深层危岩体进行加固处

理,加固措施以采用锚杆为主.锚杆布置尽量避开文物本体,如不可避免触及彩绘与雕刻,建议尽量采用微型钻孔.整体治理示意图见图10.

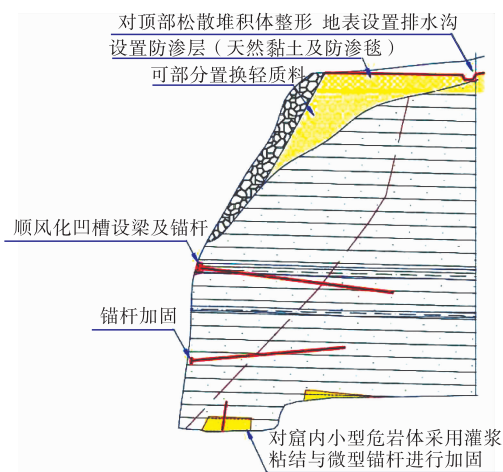


图10 云冈11号窟治理示意图

4 结论

本文借助信息化测绘技术和危岩体稳定性分析软件Flac3d,选取云冈11号窟作为研究对象,将三维扫描仪生成的精确模型融入石质文物稳定性评价中,得出以下主要结论.

1) 由于石窟的开挖,造成了山体整体位移迹线发生改变,石窟模型的总位移方向以垂直向下并向后倾斜为主;随时间推移,最大位移会逐渐移至山脚,在窟下部应力集中增大;100 a后,石窟底部可能会发生严重失稳破坏.

2) 经模拟计算发现,应力大小由石窟所在山体向下逐渐增大,由于石窟的开挖,在石窟顶板和前壁洞口处有应力集中,这些区域稳定性较差,属于危险区域.计算结果与现场调查结论一致.

3) 基于强度折减法理论,以不平衡力发展是否收敛做为破坏判断依据,根据模拟计算结果,目前云冈11号窟整体处于稳定状态.

三维扫描仪生成的石质文物结构模型较传统建模方法更加精确和贴近实际,引入网格剖分方法有效提高了传统数值计算的精度和速度,对于石质文物结构稳定性的预测和分析具有广泛的应用价值.基于以上研究,可针对性地对云冈11号窟进行加固.

参考文献:

- [1] 曾群华,郭跃.基于RS与GIS的三峡库区文物保护信息系统研究[J].地域研究与开发,2004(6):118.
- [2] 王莫.三维激光扫描技术在故宫古建筑测绘中的应用研究[J].故宫博物院院刊,2011(6):143.
- [3] 齐文娟.利用三维激光扫描仪为古文物建立信息库[J].测绘通报,2012(S1):405.
- [4] 管斌.信息化测绘技术在古建筑保护中的应用研究[D].广州:广州大学,2012.
- [5] 黄飒.三维激光扫描技术应用于古建筑测绘及其数据处理研究[D].焦作:河南理工大学,2012.
- [6] 张序,李兆堃,罗小华,等.应用三维激光扫描测量进行文物逆向工程恢复[J].测绘科学,2013(6):169.
- [7] 张序,李兆堃,张婉莹,等.手持式激光扫描仪在文物测量中的应用研究[J].测绘通报,2013(12):41.
- [8] 王健,李雷,姜岩.天宝三维激光扫描技术在数字矿山中的应用探讨[J].测绘通报,2012(10):58.
- [9] 刘求龙,胡伍生,王骢,等.三维激光扫描仪在惠泉变电站三维模型构建中的研究与实现[J].测绘通报,2010(9):35.
- [10] 孙德鸿,王占超.三维激光扫描技术在地形地质研究中的应用(一)[J].测绘通报,2011(3):88.
- [11] 赵小平,刘文龙,高绍伟.基于三维激光扫描技术的校园可视化[J].测绘通报,2011(8):45.
- [12] 李滨.徕卡三维激光扫描系统在文物保护领域的应用[J].测绘通报,2008(6):72.