基于激光扫描和数值模拟的大型溶洞顶板稳定性评价研究

马宁,张新

(贵州有色地质工程勘察公司,贵州 贵阳 550000)

[摘 要]随着岩溶地区城镇建设、房地产开发的快速发展,岩溶地基稳定性成为房屋工程建设 施工的关键问题之一。针对目前溶洞顶板稳定性分析经验的不足,本研究依托某房建施工项 目,在钻孔勘探以及三维激光地质扫描工作的基础上,基于有限元模拟软件建立了溶洞数值分 析模型,且按实际情况楼房和车库荷载对溶洞顶板进行稳定性分析,根据顶板最大主应力数据 判断溶洞稳定性是否满足房建荷载要求,并据此提出合理施工意见。结果表明,三维激光地质 扫描可为后期数值模拟提供很好的基础,有限元计算结果拟通过半定量计算进行验证,发现结 果与数值模拟结果相接近,该方法使分析结果更接近实际情况,工作方法和研究成果可为相似 地质条件下溶洞顶板稳定性评价提供参考。

[关键词]三维激光扫描;有限元建模;稳定性分析;溶洞

[中图分类号]TU47 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2023)01-88-07

1 引言

岩溶地区溶洞遍布,给工程建设增加了不小 难度,对溶洞顶板稳定性进行评价是房建施工前 的重要工作,评价结果成为溶洞处理方案设计的 重要依据(王建秀等,2000;刘之葵,2006;朱永红 等,2017;张寿越,2018)。

现目前,关于溶洞顶板稳定性的研究多采用 可靠性理论和多级模糊评价理论来开展,并结合 层次分析法(AHP)和灰色关联分析法、Dephi法 等,形成溶洞稳定性评判方法和决策模型(程晔 等,2007;曹文贵等,2013;龚先兵等,2011;蒋冲 等,2008;贺建清等,2017;何忠明等,2016)。也 有学者通过三维有限元对洞穴顶板进行分析计 算,结合多元逐步回归方法得出溶洞顶板最小厚 度与影响因素间的优化关系式。(黎斌等,2002; 李炳行等,2003;赵明华,2020)或结合三维Hoek-Brown强度准则和非概率可靠性分析方法,探讨 溶洞顶板稳定性与可靠性(韦立德等,2005;徐进 军等,2010;马俊,2014;马福贵,2018;李冠,2021; 唐江涛等,2021;吴栋浩,2022)。但现有的方法 多基于模型进行,未考虑溶洞顶板空间形态的影 响,分析结果与实际存在一定偏差。因此,急需在 摸清溶洞空间形态特征的基础上建立溶洞顶板稳 定性分析方法。

本次研究工作首先进行了地表勘探与三维激光 地质扫描,确定溶洞的范围和基本地质信息,然后在 考虑了顶部荷载后进行了力学计算和有限元模拟计 算分析,根据顶板最大拉、压主应力数据判断溶洞 稳定性是否满足房建荷载要求,并提出合理施工意 见。研究成果可为相似地质构造项目提供参考。

[[]收稿日期]2022-11-23 [修回日期]2023-01-18

[[]基金项目]贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2016]177)。

[[]作者简介]马宁(1982—),男,高级工程师,主要从事边坡治理、工程勘察。E-mail:ma364367875@163.com。

[[]通讯作者]张新(1968—),男,高级工程师,现从事岩土工程;水文地质、工程地质、环境地质等工作。E-mail:zhouxu-an198826@163.com。

2 研究场地工程概况

本场地属于中低山岩溶缓丘陵斜坡地貌类型 (图1),目前已经对场地整体进行了场平,场地主 要以石灰岩为主,局部地区有少量红黏土分布(平 场时已经清除);最高点位于溶洞的东侧,标高为 1 326.59 m, 最低点位于溶洞的西侧, 标高 1 318.78 m,相对高差为 7.81 m,溶洞区域范围内 的地形相对较平整。



图1 场区外景

Fig. 1 Appearance of the site 拟建建筑由住宅区和商业及地下车库组成,住 宅区由1#~3#、5#~10#楼组成,商业位于场地西 侧。建筑结构类型为框架结构及剪力墙,最大荷载 为10000 kN/柱,总建筑面积为100413.4 m²。基础

形式采用桩基础,基础埋深 15~25 m 不等。 本次勘查工作主要采用的方法包括:资料收

集、工程测量、工程地质测绘、物探工程、室内试 验、三维激光扫描。勘察发现在住宅区 5#楼的西 南侧,发育一大型溶洞,溶洞发育于三叠系下统大 治组(T₁d)浅灰、灰色片状灰岩、夹薄至中厚层灰 岩,岩层产状 290°∠35°。



图 2 溶洞内地质调查 Fig. 2 Geological survey in the cave

三维激光地质扫描 3

(1)通过激光测距仪进行测距激光测距仪主 动发射激光,同时接受由自然物表面反射的信号 从而进行测距(图3)。针对每一个扫描点可测得 测站到扫描点的斜距,在配合扫描的水平和垂直 方向角,可以得到每一个扫描点与测站的空间相 对坐标,得到三维实测数据,进而建构溶洞的三维 实体模型。



图 3 三维激光扫描工作图 Fig. 3 3D laser scanning working diagram

(2)数据处理与解译:探测得到的原始点云数 据通过 Geomagic_Wrap 处理后,得到溶洞的原始 点云文件,对原始点云数据进行滤波处理后,实现 溶洞的三维可视化,建立三维模型(图4)。

根据资料综合整理分析,溶洞发育高程在1

280.10~1311.50 m,该溶洞的长度为59 m,面积 约1600 m²,体积为12174.7 m³。按照洞穴长度 类型划分,本溶洞规模属于大中型半填充型溶洞。 溶洞形态沿东西向呈"树枝状"状,由南往北来 看,逐渐向深部尖灭;溶洞物理模型见图5、图6。





图 4 溶洞三维实体模型(三视图) Fig. 4 Three-dimensional solid model of karst cave(three views)



Fig. 5 Morphology of karst caves (extended from east to west)

4 有限元模型的建立

本次溶洞顶板稳定性的计算选取的参数,在 参照(王伟等,2017;尹君凡等,2018)的工作方法 和对溶洞勘查的结果及室内试验的结果进行确 定。其具体如下:

(1)溶洞顶板厚度:溶洞顶板取平均厚度,即H=14 m;

(2)溶洞顶板重度:本次岩石的天然重度取平均值,即γ=27.0 kN/m³;

(3) 溶洞的跨度:本次溶洞的跨度取最不利的 东西向;跨度多大为 54 m。

(4) 基岩的抗压强度: 拟建场地内岩石的饱和 抗压强度取值为 35.7 Mpa。

(5) 基岩的抗拉强度: 拟建场地内岩石的饱和 抗拉强度取标准值为 4.5 Mpa。

(6) 基岩的抗剪强度: 岩石的粘聚力 c = 300 kPa、内摩擦角取 $\varphi = 42^{\circ}$ 。

(7) 灰岩的弹性模量取 30 000 MPa, 泊松比



Fig. 6 Karst cave morphology(spread from north to south)

0.2。抗拉强度按 2 MPa 考虑,抗压强度按 30 MPa 考虑。

有限元模型见图 7。

本次仿真计算参照强度折减法和 Drucker-Prager 屈服准则(林鲁生,2017),建立的有限元模 型的边坡单元?由六面体和五面体混合组成,构 建的有限元模型如图7所示。

5 有限元计算结果与验证

5.1 应力分析

取最不利工况,其中溶洞顶盖范围塔楼范围 表面大 50 KN/m²(塔楼钢管混凝土桩(CFSTP)穿 过溶洞,与顶盖不发生传力关系),溶洞顶盖以外 塔楼范围表面均布 450 KN/m²。

应力分析:根据模拟计算结果可知,在此工况 下,最大压应力为-4.48 MPa,最大拉应力为0.75 MPa。主要集中在东西两侧及溶洞顶部中部。详 见不同剖面方向上计算结果云图(图8)。



图 7 Midas 实体单元模型

Fig. 7 Midas solid element model



图 8 不同方向上溶洞顶板最大拉、压应力

Fig. 8 Maximum tensile and compressive stress of cave roof in different directions

本工况的溶洞顶板岩体拉应力与自重工况相 比增加了 5.77 MPa,顶板岩体最大压应力值为-8.55 MPa<35.7 MPa(溶洞顶板岩石抗压试验标 准值);最大拉应力增加了 0.87 MPa,最大拉应力 值为 1.07 MPa<岩体允许弯拉应力(石灰岩一般 为允许抗压强度的 1/8=4.5 MPa)。

综上所述,本模拟最不利工况计算下,溶洞顶 板处于稳定状态。

5.2 计算结果比较

本次半定量计算根据力学结构分析方式的使 用条件为已知顶板厚度、岩体裂隙、顶板完整性、 岩体物理力学参数等指标后,对溶洞顶板采用抗 弯、抗剪验算以评价溶洞顶板的稳定性(柏华军, 2016;雷勇等,2017,2018;赵明华,2018)。其计算 公式分别如下:

(1)抗弯、抗剪验算计算公式

测试和调查发现本溶洞的顶板和支座岩层硬 度相对较高,通过测得顶板厚度和摸清裂隙切割 情况,按照抗弯、抗剪验算顶板稳定性,其计算公 式如下:

弯拉应力:σ=6M/H2≤[σ] ······ 5.1 剪切应力:τ=4V/H2≤[τ] ····· 5.2 式中:σ——弯拉应力(kPa); τ——剪切应力(kPa); M——弯矩(kN·m); H——顶板岩层厚度(m)
[σ] ——岩体允许弯拉应力(石灰岩
一般为允许抗压强度的 1/8=4463)kPa);
[τ] ——岩体允许剪切应力(石灰岩—
般为允许抗压强度的 1/12=2975kPa)。



图 9 计算剖面简图

Fig. 10 Sketch of calculation profile 1—溶洞范围;2—计算剖面;3—贯穿性裂缝 (2)自重状态+车库荷载+塔楼载荷 验证最不利工况,溶洞顶部塔楼区域表面按 照均布荷载 450 KN/m²进行计算,溶洞顶部其他 区域按照均布荷载 50 KN/m²。



图 10 1-1'剖面加载图

Fig. 11 1-1' section loading diagram



图 11 1-1' 剖面弯矩(kN・m) 图

Fig. 12 Three bending moments(kN \cdot m) diagram of 1–1' section





图 12 1-1' 剖面剪力(kN)图

Fig. 13 1-1' section shear force (kN) diagram

根据力学结构分析,对自重状态+车库荷载 强度及抗剪强度进行计算,其计算结果详见 +塔楼荷载工况下 B、C、D 端点处处岩体的抗弯 下表。

表1 顶板最大拉、压应力

Table 1	Maximum	tensile	and	compressive	stress	of	top	plate
---------	---------	---------	-----	-------------	--------	----	-----	-------

端点编号	溶洞顶板厚度(M)	弯矩	剪力	弯拉应力	剪切应力
	H(m)	$M(kN \cdot m)$	V(kN)	$\delta(kPa)$	$\tau(kPa)$
В	8.0	13 592.1	50.3	1 411.9	3.5
С	15.4	34 852.5	10 473.2	806.7	161.6
D	25.2	48 014.6	12 957.2	340. 2	61.2

根据计算结果:自重状态+车库荷载+塔楼荷载情况下,溶洞的顶板整体处于稳定,在车库加载的情况下,尽管由于西侧溶洞顶板较薄,但该处的弯拉应力仍小于岩体允许弯拉应力,溶洞顶板处于稳定状态。

6 结语

贵州地处中国南方喀斯特核心区,隐伏溶洞 众多,且空间形态各异,传统的二维剖面图很难直 观而全面地表示溶洞的空间形态,导致难以全面 分析评价隐伏溶洞对基础稳定性的影响。本研究 采用三维地质扫描对溶洞空间形态进行可视化, 通过对洞体不同角度的剖切分析,让溶洞空间形 态分析更加简易化,为后期溶洞顶板稳定性的数 值模拟提供了很好的支撑,弥补了二维剖面的 不足。

基于三维地质扫描后再进行有限元的计算和 建立模型,通过半定量计算进行验证,发现结果与 数值模拟相吻合,该方法和技术值得相似地质构 造项目中推广。本次模拟计算结果再次证明溶洞 的稳定性与溶洞顶板的厚度密切相关。溶洞顶板 越厚,溶洞越稳定,越不容易发生坍塌。

对溶洞进行三维建模是对其稳定性分析的前

提,为保证溶洞三维模型的精确度,需要在数据采 集阶段确保扫描的精度,此次研究也发现,三维激 光扫描技术存在无法扫描洞壁凹部盲区的不足。 建议结合贴近摄影测量技术,获取重要局部细节 形态,以满足工作的需要。

[参考文献]

- 柏华军.2016. 考虑溶洞顶板自重时桩端持力岩层安全厚度计算 方法.岩土力学,37(10):2945-2952.
- 曹文贵,李媛,翟友成,等.2013. 基于 Info-Gap 理论的基桩下伏 岩溶顶板稳定性的主动分析方法.岩石力学与工程学报,32 (2):393-400.
- 程晔,赵明华,曹文贵,等.2007. 路基下岩溶稳定性评价的模糊多 层次多属性决策方法研究[J]. 岩土力学,28(9):914-1918.
- 龚先兵,赵明华,张永杰,等.2011. 桩端下伏溶洞顶板稳定非概率 可靠性分析方法. 湖南大学学报(自科版),38(1):13-17.
- 何忠明,刘森峙,胡庆国,等.2016. 基于尖点突变理论的路基填筑 下伏溶洞顶板稳定性研究[J]. 中南大学学报(自然科学 版),47(7):2456-2462.
- 贺建清,喻畅英,肖兰,等.2017.基于上限定理确定岩溶区桩端极 限承载力及其下伏溶洞顶板安全厚度.自然灾害学报,26 (02):47-52.
- 蒋冲,赵明华,曹文贵,等.2017. 基于模糊和突变理论的岩溶区桩 端溶洞顶板稳定性分析方法研究.公路交通科技,(12):49 -64.
- 雷勇,刘一新,邓加政,等.2018. 冲切破坏模式下溶洞顶板极限承载力计算. 岩石力学与工程学报,37(09):2162-2169.

- 雷勇,尹君凡,陈秋南,等.2017. 基于极限分析法的溶洞顶板极限 承载力研究. 岩土力学,38(07):1926-1932.
- 黎斌,范秋雁,秦凤荣,等.岩溶地区溶洞顶板稳定性分析[J].2002.岩石力学与工程学报,21(4):532-536.
- 李炳行,肖尚惠,莫孙庆,等.2003. 岩溶地区嵌岩桩桩端岩体临空 面稳定性初步探讨[J]. 岩石力学与工程学报,22(4):633 −635.
- 李冠,张立伟.2021. 三维激光扫描技术在地质灾害调查中的应用 研究[J]. 城市勘测:205-208kpa.
- 林鲁生,徐礼华.2017. 岩溶地区高层建筑地基基础设计与施工. 北京:科学出版社:28-79.
- 刘之葵,梁全城.2006. 岩溶区溶洞及土洞对建筑地基的影响.北 京:地质出版社:35-107.
- 马福贵,宋元福,然见多杰.2017. 三维激光扫描技术在地质灾害 调查中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,28(3):101 -105.
- 马俊, 王星华. 2014. 基于 Hoek-Brown 强度准则桩端溶洞顶板非 概率可靠性分析[J]. 中南大学学报, 10(5): 1146-1150.
- 孙岳,冯源,王新宇,等.2013.新疆红海块状硫化物矿床三维地质 建模及勘探应用[J].地质与勘探,49(1):179-184.
- 唐江涛,覃羨安,易琦,等.2021. 基于地质模型快速构建的边坡三

- 维稳定性分析.地质与勘探,57(1):0175-0182.
- 王建秀,杨立中,刘丹,等.2000. 覆盖型无填充溶洞薄顶板塌陷稳 定性研究.中国岩溶,19(1):65-72.
- 王伟,聂庆科,袁维,等.溶洞顶板破坏对穿越溶洞型基桩极限承载力的影响规律研究.2017. 土木工程学报,50(S1):88-93.
- 韦立德,杨春和,高长胜,等.2005. 基于三维强度折减有限元的抗 滑桩优化探讨[J]. 岩土工程学报,27(11):1350-1352.
- 吴栋浩.2022. 基于无人机航测与三维激光扫描的工程地形测绘 技术研究[J].贵州地质,39(3):300-304.
- 徐进军,王海城,罗喻真,等.2010. 基于三维激光扫描的滑坡变形 监测与数据处理[J]. 岩土力学,31(7):2188-2191,2196.
- 尹君凡, 雷勇, 陈秋南, 等. 2018. 偏心荷载下溶洞顶板冲切破坏上 限分析[J]. 岩土力学, 39(08):2837-2843.
- 张寿越,金玉璋.2018. 岩溶(喀斯特)与洞穴研究 60 年[J]. 工程 地质学报,26(1):275-277.
- 赵明华.2020. 基于三铰拱突变模型的岩溶区嵌岩桩溶洞顶板稳 定性分析[J]. 防灾减灾工程学报,40(2):167-173.
- 朱永红,刘锐,李源洪,等.2017. 手持 GPS 在地质调查中的具体 应用实践——以黔西南某地金矿普查为例[J]贵州地质,34 (2):8.

Stability Evaluation of Large Cave Roof Based on Laser Scanning and Numerical Simulation

MA Ning, ZHANG Xin

(Guizhou Nonferrous Geological Engineering Survey Company, Guiyang 550000, Guizhou, China)

[Abstract] With the rapid development of urban construction and real estate development in karst area, the stability of karst foundation has become one of the key problems in housing construction. Aiming at the short-comings of the currently karst cave roof stability analysis, this study based on a housing construction project, the three-dimensional geological scanning laser drilling exploration and analysis on the basis of 1:1 cave was built based on the finite element software simulation entity model, and according to the actual situation of additional buildings and garages load, to the safety of the roof stability analysis, and according to the maximum compressive principal stress data judgment cave roof stability whether meet the requirements of housing load, and accordingly puts forward reasonable construction. The results show that 3d laser geological scanning can provide a good basis for the later numerical simulation, and the results are verified by semi-quantitative calculation, which is consistent with the numerical simulation. This method makes the analysis results closer to the actual situation, The working method and research results can provide reference for similar geological structure projects.

[Key Words] Three-dimensional laser scanning; Finite element modeling; Stability analysis; Karst cave