

溶洞顶板厚度影响穿洞桩水平承载特性的数值模拟分析

姜明映¹, 海军², 陈娥梅¹, 刘永成¹, 朱亚东¹, 崔振华³

(1. 云南省曲靖市交通建设投资集团有限公司, 云南 曲靖 655000; 2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 中交一公局第一工程有限公司, 北京 102200)

摘要: 嵌岩桩广泛应用于基础工程中, 但对刺穿溶洞嵌岩桩的水平承载特性尚不十分清楚。文中建立简化计算模型, 采用非线性有限元软件 ABAQUS 分析溶洞顶板厚度对桩基水平承载性能的影响。结果表明, 桩顶水平位移随溶洞顶板厚度的增大而减小, 且水平荷载越大越显著, 厚径比从 1 增加到 4, 桩顶水平位移显著减小, 再增加溶洞顶板厚度, 桩顶水平位移变化不大; 与常规嵌岩桩相比, 穿洞嵌岩桩进入岩体后, 桩身弯矩减小速度变慢, 传递深度增大, 溶洞顶板厚度变化改变桩身弯矩分布, 溶洞顶板越厚桩身弯矩减小速度越慢, 厚径比大于 4 时溶洞顶板变化对桩身弯矩沿深度分布的影响不大, 弯矩最大值随厚径比的增大非线性减小; 对桩顶水平位移和桩身弯矩最大值而言存在临界顶板厚径比, 约为 4。建议工程建设中提高土-岩交界面处桩身配筋率, 提高穿洞桩抗弯能力, 防止桩体发生弯曲破坏。

关键词: 桥梁; 嵌岩桩; 溶洞顶板厚度; 水平荷载; 水平承载特性

中图分类号: U443.1

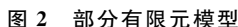
文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)06-0114-04

嵌岩桩承载力大、沉降小, 广泛应用于基础工程。但岩溶地区溶洞的隐蔽性与多样性导致岩溶地区嵌岩桩的承载特性具有不确定性。针对常规嵌岩桩的水平承载特性, 劳伟康、王建华等通过嵌岩桩水平加载试验发现岩土交界处出现附加应力集中, 建议加强该段桩身配筋^[1-2]; 何春林等认为表层土体的密实度及桩径大小对桩基侧向变形影响较大^[3]; 王永艺、牟冬辉等通过有限元分析发现坡度和露头高度与嵌岩桩水平承载力呈负相关, 桩径、嵌岩深度及岩体弹性模量等与嵌岩桩水平承载力呈正相关^[4-5]。针对岩溶地区嵌岩桩的水平承载问题, 刘孟瀚等通过水平加载试验分析椭圆形桩前溶洞对桩基稳定性的影响, 认为相比于横长轴溶洞, 纵长轴溶洞的存在会显著降低桩基水平承载力^[6]; 曹晓强、黄伟利用有限元软件分析桩侧溶洞顶板厚度、水平距离和桩径等因素对嵌岩桩水平承载力的影响, 认为在相同条件下溶洞顶板厚度越大、水平距离越远、桩径越大, 桩基水平承载力越高^[7-8]; 杨鹏帅等开展桩端下部无溶洞和有溶洞抗滑桩对比试验, 得到下部有溶洞桩的水平极限承载力约为无溶洞桩的 57%^[9]; Liang J. H. 等通过数值模拟与试验研究桩侧和桩端下部同时存在溶洞对桩基水平承载力的影

响, 认为当桩侧溶洞和桩端下部溶洞边界距离较小时, 两洞间的岩体会先发生较大塑性变形, 桩基易发生失稳破坏^[10]。

桩基穿越溶洞时, 溶洞边界条件复杂, 其受力与变形特性变化非常大。黄文畅等通过模型试验发现桩基穿越溶洞时水平极限承载力明显下降^[11]; 周德泉等开展溶洞高度影响嵌岩桩轴力传递及桩侧超载响应试验研究, 认为桩身水平位移、弯矩随下穿溶洞高度的增大而增大^[12]; 贺国京等利用现场资料, 结合有限元软件分析溶洞半径等因素对嵌岩桩水平承载力的影响, 认为桩基的水平位移随溶洞半径的增大而增大^[13]; 周德泉等通过室内模型试验分析串珠状溶洞数量对水平受荷桩承载特性的影响, 认为随桩基穿越溶洞数量的增多, 桩身水平位移、最大弯矩均增大^[14]; 刘逸飞等分析水平荷载、桩身抗弯刚度及地基水平抗力比例系数对岩溶区桥梁桩基内力与位移的影响, 认为通过增大桩身抗弯刚度提高桩基水平承载力的方法不可取, 在一定程度上提高地基土体水平抗力系数可有效增强桩基的水平承载力^[15]。现有研究较少考虑桩基穿过溶洞时溶洞顶板厚度对其水平承载力及稳定性的影响。本文采用有限元软件 ABAQUS 建立不同溶洞顶板厚度下穿洞桩模



1.3 数值模型验证

选取顶板厚径比 $h_c/D = \infty$ 和 $h_c/D = 2$ 模型, 采用分级加载方式, 对桩体施加竖向荷载, 竖向荷载以 200 kN 为增量增至 1 600 kN, 图 3 为桩顶荷载—沉降曲线。由图 3 可知: 随着荷载的增大, 无论是穿越溶洞桩基还是未穿越溶洞桩基, 荷载—沉降

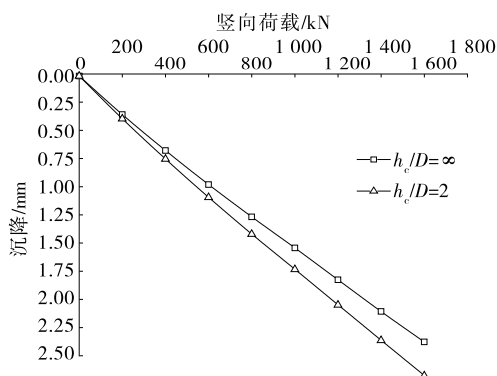


图3 桩顶荷载—沉降曲线

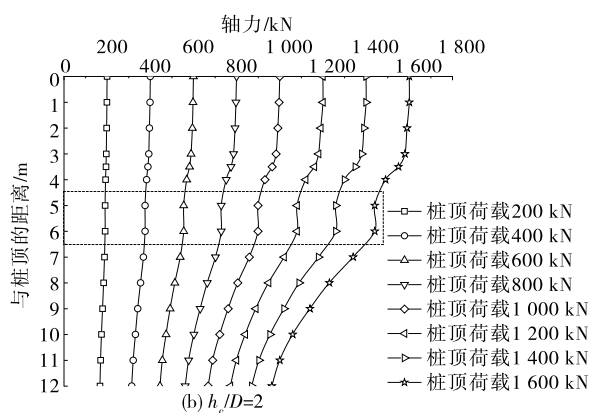
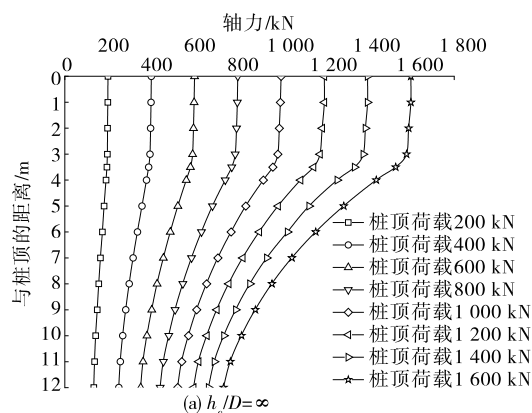


图4 桩身轴力—深度曲线

2 穿洞桩水平承载性能模拟分析

2.1 桩顶水平位移随顶板厚径比的变化规律

桩顶水平位移不仅可以评价穿洞嵌岩桩的嵌固效果, 也可以反映桩水平承载性能的变化。图 5 为水平荷载为 25 kN、50 kN、75 kN 和 100 kN 时桩顶水平位移。

由图 5 可知: 1) 施加的荷载小于 50 kN 时, 不同溶洞顶板厚度下桩顶水平位移相差不大; 随着荷载的增加, 较小溶洞顶板厚度下桩顶水平位移增量大于溶洞顶板较厚的情况。同一水平荷载下, 桩顶水平位移随着溶洞顶板厚度的增大而减小, 这种现象随水平荷载的增大愈发显著。荷载 100 kN 作用下, 厚径比 $h_c/D = 1$ 时, 桩顶水平位移为 7.69 mm, 厚径比从 1 增至 2、3、4、5、6、7 和 ∞ 时, 桩顶水平位

曲线均呈现线性增加的趋势。相同荷载条件下, 穿越溶洞桩的沉降大于未穿越溶洞桩, 且随着荷载的增大差异越显著, 说明溶洞会导致桩顶沉降增加, 与文献[14]和文献[17—19]的结论一致, 分析模型参数设置合理。

提取两个模型对应桩体的桩身轴力, 得到图 4 所示轴力—深度关系曲线。由图 4 可知: 桩顶荷载较小时, 桩身轴力沿深度变化的非线性特征不明显, 接近桩端的轴力减小速度大于桩顶范围内轴力减小速度; 随着桩顶荷载的增大, 桩身截面轴力增大, 轴力衰减速度增大, 覆盖层范围内桩身轴力衰减缓慢, 进入岩层后桩身轴力衰减加快。桩体穿越溶洞时, 溶洞高度范围内桩身轴力呈凹缩状, 且溶洞以下桩身轴力大于未穿越溶洞桩桩身轴力, 与实际情况相符。以上规律与文献[18—19]的结论一致, 进一步说明分析模型可靠。

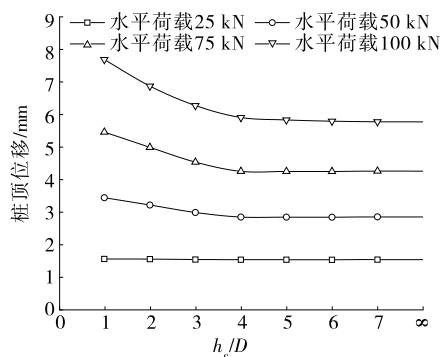


图5 桩顶水平位移随顶板厚径比 h_c/D 的变化规律

移依次为 6.87 mm、6.27 mm、5.90 mm、5.83 mm、5.79 mm、5.78 mm、5.78 mm, 比 $h_c/D = 1$ 时分别减少 10.66%、18.47%、23.25%、23.28%、24.19%、24.71%、24.84%。2) 就桩顶位移而言存在临界厚

径比。厚径比从 1 增加到 4 时,桩顶水平位移显著减小,之后增加溶洞顶板厚度,桩顶水平位移变化不大。这是由于顶板厚度增加使桩身在承受水平荷载时能获得更多岩体抗力,从而提高桩的水平承载性能,荷载传递深度减小。

2.2 桩身弯矩随顶板厚径比的变化规律

提取最后一级加载荷载(1 600 kN)作用下桩身弯矩,得到图 6 所示不同顶板厚径比下桩身弯矩与距桩顶距离关系曲线。由图 6 可知:1) 无论是穿洞嵌岩桩还是常规嵌岩桩,桩身弯矩沿深度的变化曲线整体上呈上大下小的反 S 形,即从桩顶到桩端桩身弯矩先增大后减小,再反向增大后减小至零,弯矩峰值出现在岩—土交界面处。2) 相比常规嵌岩桩,穿洞嵌岩桩进入岩体后桩身弯矩减小速度变慢,传递深度增大,即溶洞顶板厚度变化会改变桩身弯矩分布,溶洞顶板越厚桩身弯矩减小速度越慢,但厚径比大于 4 时溶洞顶板厚度变化对桩身弯矩沿深度分布的影响不大。

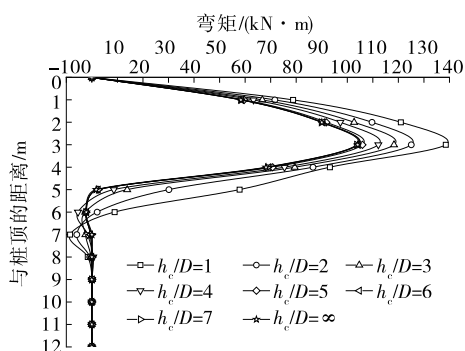


图 6 不同顶板厚径比下桩身弯矩—深度曲线

桩身弯矩峰值大小和位置决定桩身是否发生弯曲破坏及桩身的危险界面位置。为更好地表达溶洞顶板厚度对穿洞嵌岩桩工程效果的影响,提取水平荷载为 75 kN、100 kN 时桩身弯矩峰值,得到图 7 所示桩身弯矩峰值随溶洞顶板厚度变化曲线。由图 7 可知:弯矩最大值与顶板厚径比关系曲线呈明显的非线性,且随着荷载的增大非线性越明显,曲线整体上呈下凹形,弯矩最大值随顶板厚径比的增大而减小。厚径比大于 4 时,关系曲线接近为线性,即弯矩最大值随顶板厚径比的增大而线性减小。说明溶洞顶板厚度越小对桩基水平承载越不利。弯矩峰值出现在岩—土交界面处,该位置的应力较集中,若岩体强度高,溶洞顶板较薄($h_c/D=1$),桩体易发生弯曲破坏。应提高岩—土交界面处桩身的配筋

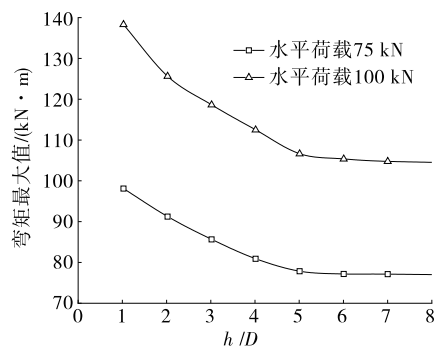


图 7 桩身弯矩最大值随顶板厚径比 h_c/D 的变化规律

3 结论

(1) 水平荷载作用下,桩顶水平位移随溶洞顶板厚度的增大而减小,这种现象随水平荷载的增大愈显著。顶板厚径比从 1 增加到 4,桩顶水平位移显著减小,之后增加溶洞顶板厚度,桩顶水平位移变化不大。

(2) 相比常规嵌岩桩,岩层穿洞嵌岩桩桩身弯矩减小速度变慢,传递深度增大。溶洞顶板厚度变化改变桩身弯矩分布,溶洞顶板越厚桩身弯矩减小速度越慢,顶板厚径比大于 4 时溶洞顶板厚度变化对桩身弯矩沿深度分布的影响不大。弯矩最大值随顶板厚径比增大而非线性减小。

(3) 对桩顶水平位移和桩身弯矩最大值而言存在临界顶板厚径比,约为 4。建议提高土—岩交界面处桩身配筋率,防止桩体发生弯曲破坏。

参考文献:

- [1] 劳伟康,周立运,王钊.大直径柔性钢管嵌岩桩水平承载力试验与理论分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(10):1770—1777.
- [2] 王建华,陈锦剑,柯学.水平荷载下大直径嵌岩桩的承载力特性研究[J].岩土工程学报,2007,29(8):1194—1198.
- [3] 何春林,龚成中,陈亚东.重庆码头大直径深嵌岩短桩水平承载力试验研究[J].工业建筑,2014,44(9):97—100.
- [4] 王永艺,周世良,廖冬.港口工程斜坡上嵌岩桩水平承载能力分析[J].中国港湾建设,2018,38(4):6—11.
- [5] 牟冬辉,乾增珍,谢子璐,等.嵌岩桩水平承载性能影响因素模拟分析[C]//《工程地质学报》编辑部.2021 年全国工程地质学术年会论文集.北京:科学出版社,2021:400—407.

(下转第 122 页)

- 中的应用[J].水运工程,2019(12):123—126.
- [5] 郑志彬.BIM技术在水运工程项目设计中的应用[J].福建交通科技,2020(1):120—123.
- [6] 郭衡,傅战工,谭国宏,等.常泰长江大桥主塔沉井结构BIM正向设计应用[J].铁道标准设计,2021,65(11):170—174.
- [7] 朱德庆,李涛,姚剑,等.基于BIM的山岭隧道施工信息化管理系统研发与应用[J].隧道建设(中英文),2020,40(增刊2):216—224.
- [8] 王建会,张隆,娄树华,等.基于BIM协同应用平台的施工信息化管理[J].建筑技术开发,2021,48(6):98—100.
- [9] 林瑞慧.BIM技术在厦门海沧隧道施工中的应用[J].福建交通科技,2021(7):86—90.
- [10] 张庆广.基于BIM技术的地铁轨行区施工信息化管理系统研究与应用[J].工程建设与设计,2022(4):63—65+86.
- [11] 薛飞宇,赵赛辉,夏诗画.基于BIM技术的公路运维管理系统设计研究[J].公路交通技术,2018,34(2):132—138.
- [12] 陈安京,岳立强,张宇峰,等.BIM在城市桥梁管养中的应用研究[J].建筑技术开发,2019,46(8):110—111.
- [13] 曾俊铖,夏江泉,林志平,等.高墩大跨连续刚构桥基于BIM的管养信息可视化方法研究[J].福建交通科技,2020(1):109—112.
- [14] 李苏生,朱学军,王媛青,等.BIM建模与健康监测预警相融合的桥梁运营管养一体化研究[J].交通与运输,2022,38(4):52—57.
- [15] 南锦顺.智能建造背景下BIM设计及应用现状与发展趋势分析[J].智能建筑与智慧城市,2022(7):82—84.
- [16] 彭文.基于BIM港口智慧监控平台的研究[J].福建交通科技,2021(1):114—116.
- [17] 张杰,马弯.基于BIM的黄黄高铁无砟轨道智能建造创新应用[J].中国铁路,2022(8):68—75.
- [18] 祁润田,堵一凡,吴佳东,等.BIM虚拟施工技术在北盘江大桥纵移悬拼新工艺中的应用[J].湖南交通科技,2021,47(3):132—137.
- [19] 邢立鑫,梁全,王旭东,等.一种波形钢板连续箱梁桥节段悬浇异步施工方法:CN114150586A[P].2021—12—14.
- [20] 许红胜,郭佩云,颜东煌,等.BIM与ABAQUS模型一体化分析应用研究[J].公路与汽运,2022(1):128—132.
- 收稿日期:2022—10—17

(上接第117页)

- [6] 刘孟瀚,范秋雁,李天雨,等.桩前溶洞对抗滑桩嵌固端稳定性影响物理模型试验研究[J].中国岩溶,2022,41(1):59—66.
- [7] 曹晓强.岩溶区桩侧空洞对桩基特性的影响分析[D].石家庄:石家庄铁道大学,2016.
- [8] 黄伟.桩前溶洞对桩嵌固段水平承载特性影响研究[D].南宁:广西大学,2019.
- [9] 杨鹏帅,范秋雁,韩进仕,等.下部溶洞对抗滑桩的稳定性影响试验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(3):583—590.
- [10] LIANG J H, FAN Q Y, QIN K. Influence of karst caves on the pile's bearing characteristics: A numerical study[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 9: 754330—754340.
- [11] 黄文畅,邓飞秀,王学义,等.岩溶地区嵌岩桩的 $p-y$ 曲线模型试验研究[J].江苏科技信息,2016(8):45—49.
- [12] 周德泉,张杨龙,曹勇,等.溶洞高度影响嵌岩桩轴力传递及桩侧超载响应试验[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(7):83—93.
- [13] 贺国京,杨汶东,易锦.多层岩溶区大直径桩在水平荷载下的数值分析[J].中南林业科技大学学报,2012,32(8):154—158.
- [14] 周德泉,海军,高祁,等.串珠状溶洞数量影响灌注桩顶部水平受拉特性试验研究[J/OL].湖南大学学报(自然科学版):1—12[2023—04—28].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1061.N.20230428.1311.001.html>.
- [15] 刘逸飞,王琛.岩溶区桥梁基桩水平承载特性及影响因素分析[J].公路与汽运,2022(6):104—108.
- [16] 中国建筑科学研究院.建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [17] 高祁,张红尘.贯穿多层溶洞灌注桩荷载传递规律试验研究[J].中外公路,2021,41(6):40—43.
- [18] 黄明,张冰淇,陈福全,等.串珠状溶洞地层中桩基荷载传递特征的数值计算[J].工程地质学报,2017,25(6):1574—1582.
- [19] 陈慧芸,冯忠居,蔡杰,等.串珠状溶洞影响下桩基竖向承载特性离心试验[J].哈尔滨工业大学学报,2023,55(6):83—92.
- 收稿日期:2023—05—20