

引文格式:冯忠居,徐博熙,陈慧芸,等.不同溶洞处治措施对桩基承载特性的影响研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(4):151-158.  
FENG Zhongju, XU Boxi, CHEN Huiyun, et al. Study on influence of different treatment measures for karst caves on bearing characteristics of pile foundation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(4): 151-158.

DOI:10.19815/j.jace.2022.07011

# 不同溶洞处治措施对桩基承载特性的影响研究

冯忠居<sup>1</sup>,徐博熙<sup>1</sup>,陈慧芸<sup>1</sup>,夏承明<sup>2</sup>,蔡杰<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 三明莆炎高速公路有限责任公司,福建 三明 365000;  
3. 福建省交通建设质量安全中心,福建 福州 350001)

**摘要:**为探究不同溶洞处治措施对岩溶发育区桩基承载特性的影响,通过有限元软件建立溶洞-桩-岩土体耦合作用模型,对比分析溶洞高度变化情况下,2种不同的溶洞处治措施(回填法和钢护筒跟进法)对桩基承载特性的影响。结果表明:随着溶洞高度增加,2种处治措施下桩基竖向承载力都呈降低趋势;溶洞高度小于10 m时,不同处治措施对桩基竖向承载力影响可忽略,溶洞高度大于10 m则需考虑处治措施对桩基竖向承载力的影响;在回填法处治的溶洞范围内,桩身轴力降幅较大,桩侧摩阻力增加显著,在钢护筒跟进法处治的溶洞中桩身轴力与桩侧摩阻力则基本不变;与钢护筒跟进法相比,回填法更有利于发挥桩侧摩阻力;溶洞高度增加时,2种处治措施下桩侧摩阻力比重均逐渐减小,桩端阻力比重逐渐增大,达到桩基极限承载力时,回填法处治后的溶洞较钢护筒跟进法桩端阻力占整体比例更小。

**关键词:**岩土工程;岩溶区;桩基;竖向承载特性;回填法;钢护筒跟进法

中图分类号:U443

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)04-0151-08

## Study on influence of different treatment measures for karst caves on bearing characteristics of pile foundation

FENG Zhongju<sup>1</sup>, XU Boxi<sup>1</sup>, CHEN Huiyun<sup>1</sup>, XIA Chengming<sup>2</sup>, CAI Jie<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Sanming Puyan Highway Co. Ltd, Sanming 365000, Fujian, China; 3. Fujian Transportation Construction Quality and Safety Center, Fuzhou 350001, Fujian, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of different treatment measures of karst caves on the bearing characteristics of pile foundations in karst areas, a coupling model of karst caves-piles-rock and soil was established through numerical simulation. The effects of two different treatment measures backfilling method and steel casing follow-up method on the bearing characteristics of pile foundations were compared and analyzed under the condition of changing the height of karst caves height. The results show that the vertical bearing capacity of pile foundation decreases with the increase of the karst cave height under the two treatment measures. When the height of the karst cave is less than 10 m, the impact of the karst cave treatment measures on the vertical bearing capacity of the pile foundation can be ignored. When the height of the karst cave

is greater than 10 m, the impact of treatment measures on the vertical bearing capacity needs to be considered. The axial force of the pile body decreases greatly and the pile side friction resistance increases significantly within the scope of the karst cave treated by the backfilling method, but it is basically unchanged in the karst cave treated by the steel casing follow-up method. Compared with steel casing follow-up method, backfilling method is more conducive to exerting the pile side friction resistance. With the increase of the height of the karst cave, the proportion of pile side friction under the two treatment measures gradually decreases, and the proportion of pile end resistance gradually increases. When the ultimate bearing capacity of the pile foundation is reached, the proportion of pile end resistance of karst cave treated by backfilling method is smaller than that of steel casing follow-up method.

**Key words:** geotechnical engineering; karst area; pile foundation; vertical bearing characteristic; backfilling method; steel casing follow-up method

**Author resume:** FENG Zhongju(1965-), male, PhD, professor, E-mail: ysf@gl.chd.edu.cn.

0 引言

随着中国公路建设网的不断延伸,公路桥梁桩基不可避免地要穿过岩溶发育区,这对桥梁桩基承载性能提出更高要求<sup>[1-3]</sup>。受现场施工条件、机械差异以及成本的约束,桩基穿过溶洞的方式会有不同。不同溶洞处治措施会导致岩溶区桩基的承载特性与设计存在差异,探究不同处治措施对桩基承载性能的影响,对指导岩溶区桩基工程实践具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

关于岩溶区桩基承载特性、荷载传递及桩基破坏模式的问题,已有不少学者对此进行了深入的研究<sup>[6-8]</sup>。董芸秀等<sup>[9]</sup>依托实际工程,通过竖向静载试验,对岩溶区桥梁桩基承载特性进行了研究,提出了一种适用于岩溶区桥梁桩基嵌岩深度的计算方法。冯忠居等<sup>[10]</sup>通过不同顶板厚度和不同坡度的正交模拟试验,分析了陡坡-岩溶耦合作用对该特殊环境下桩基承载性能的影响,得到计算陡坡岩溶区桩基承载力的公式。Chen 等<sup>[11]</sup>基于离心模型试验和灵敏度理论模型,研究了桩基穿过不同高度、不同跨度、不同数量的溶洞时的承载力变化,发现桩的承载力随溶洞洞高、跨度及溶洞数量的增加而降低。赵明华等<sup>[12-13]</sup>基于 Griffith 强度准则,通过建立计算模型进行应力求解,对溶洞稳定性进行评价并分析了嵌岩桩顶板冲切破坏模式。夏炼<sup>[14]</sup>通过建立数值模型,模拟研究不同工况下溶洞洞高、洞跨及桩基弹性模量变化对岩溶区桩基承载力的影响,得到桩基承载力随溶洞洞高、洞跨的增加而线性降低,但弹性模量增加会提高桩基承载力的结论。蒋武军等<sup>[15]</sup>研究了特大型溶洞回填体特性对桩基荷载传

递的影响,得到了在岩溶发育区桩周回填碎石时竖向桩、荷载桩的沉降规律。鲁贤成等<sup>[16-18]</sup>通过数值模拟方法,研究发现溶洞洞高、顶板厚度、洞跨、岩体强度及桩径等的变化对桩基承载力影响很大。曹文贵等<sup>[19]</sup>引入 Info-Gap 理论,创建桩基下伏岩溶顶板稳定性的分析模型,并基于区间组合分析法,提出桩基下伏岩溶顶板稳定性的分析方法。李春<sup>[20]</sup>基于上限有限元分析原理,引入参数  $k$  反映溶洞参数变化如何削减桩基极限承载力,讨论了溶洞高度、跨度对桩基极限破坏模式的影响。张慧乐等<sup>[21]</sup>基于室内模型试验,发现溶洞直径较顶板厚度对嵌岩桩承载力影响更敏感;赤道半径对承载力影响最为敏感,极半径次之,溶洞位置的敏感性最小。

目前,国内外对于岩溶发育区桩基承载性能的研究已取得了一定的成果,但是多为溶洞特性对桩基承载性能影响的研究,对于不同溶洞处治措施对桩基承载性能影响的研究则涉及较少。本文通过有限元仿真方法研究实际施工中桩基穿过溶洞时 2 种不同的处治措施(回填法和钢护筒跟进法)对桩基竖向承载特性的影响,分析不同溶洞处治措施下桩基竖向承载力、单位侧阻、端侧阻占比等的变化情况,探明不同溶洞高度下 2 种处治措施对桩基竖向承载力的影响程度,为岩溶发育区桩基设计与施工提供借鉴参考。

1 模型建立

针对桩穿过不同高度溶洞的常见处治措施钢护筒跟进法和回填法,采用 MIDAS/GTS 有限元软件模拟溶洞-桩-岩土体耦合作用,研究处治措施对桩基承载特性的影响。

1.1 模型建立

在有限元分析过程中,建立三维模型,桥梁桩基选用理想弹性本构模型,岩土体、回填体选用弹塑性本构模型,钢护筒选用弹性模型。建模过程中,为保证收敛性及计算结果的精确,对桩基、桩周及溶洞附近土体进行网格加密处理,模型剖面图如图 1 所示。

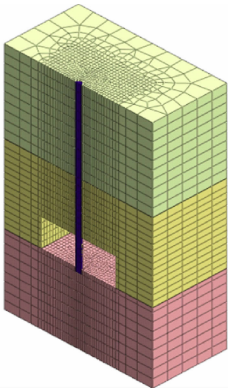


图 1 模型剖面图  
Fig. 1 Model sectional view

1.2 处置方式及参数确定

各分层土的材料参数取值见表 1。  
回填法的回填材料为片石黏土,片石与黏土比例为 3 : 7。回填方式为材料混合后倾倒入桩孔进行回填,回填后继续小冲程冲击钻孔,将回填材料压入溶洞内密实,直至不再漏浆,继续成孔。

1.3 计算工况

采用 30 MN 的竖向荷载进行加载,计算工况见表 2。

2 不同溶洞处治措施对桩基竖向承载力影响分析

2.1 钢护筒跟进法

2.1.1 钢护筒跟进法处治下桩基竖向承载力影响分析

不同溶洞高度下的桩基应力-应变( $P$ - $S$ )曲线、桩基竖向承载力变化规律、桩基竖向承载力影响度 $\alpha$ 如图 2~4 所示。

表 1 有限元模拟模型材料参数

Table 1 Finite element simulation model material parameters					
材料	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/\text{Pa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
桩	$2.5\times10^5$	0.20			25.0
杂填土	13	0.40	$1.0\times10^4$	8	18.5
粉质黏土	40	0.30	$1.8\times10^4$	10	19.5
圆砾	$8\times10^2$	0.30	0	28	24.5
中风化岩	$2\times10^4$	0.23	$2.0\times10^5$	25	25.0
回填材料	90	0.25	$1.5\times10^4$	20	22.5
钢护筒	$2\times10^5$				78.5

表 2 计算工况

Table 2 Calculation condition					
洞高/m	桩径/m	桩长/m	相对位置	洞跨	处治措施
0(无岩溶)、3、5、10、15、20、25	2.0	60	桩底以上 1.5 m	10 m $\times$ 10 m	钢护筒跟进法、回填法

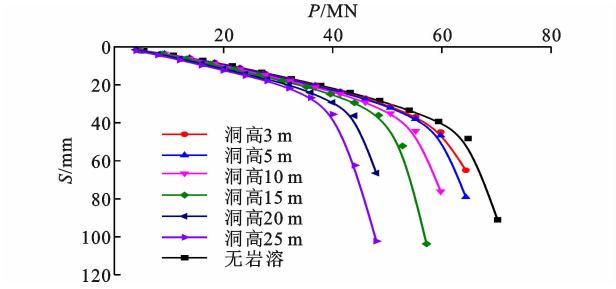


图 2 钢护筒跟进法处理后的不同溶洞高度桩基  $P$ - $S$  曲线  
Fig. 2  $P$ - $S$  curve of pile foundation with different karst cave heights after steel casing follow-up treatment

从图 2~4 可以看出,溶洞处治措施采用钢护筒跟进法时,溶洞高度为 0~25 m 的桩基竖向承载力分别为 64.80、59.80、58.20、55.20、50.30、44.00、

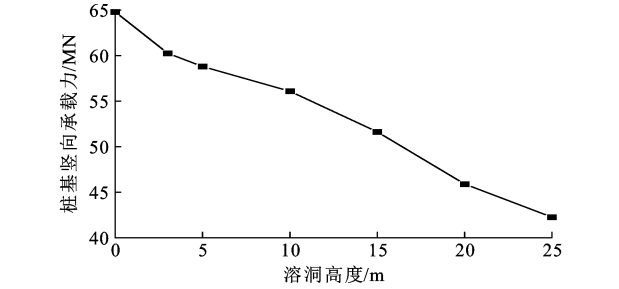


图 3 钢护筒跟进法处理后的桩基竖向承载力变化规律  
Fig. 3 Variation law of vertical bearing capacity of pile foundation after steel casing follow-up treatment

40.00 MN。以无岩溶的桩基竖向承载力为基准,溶洞高度为 3~25 m 的桩基竖向承载力影响度分别为 7.72%、10.23%、14.35%、22.38%、32.10%、

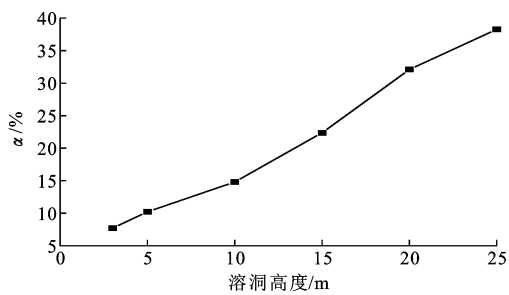


图 4 钢护筒跟进法处理后的桩基竖向承载力影响度  
Fig. 4 Influence degree of vertical bearing capacity of pile foundation after steel casing follow-up treatment

38.27%。主要原因在于,溶洞高度增大导致桩周土体缺失范围增大,采用钢护筒跟进法处治后,溶洞范围内无法提供桩侧阻力,从而使桩基竖向承载力大幅度降低。

2.1.2 钢护筒跟进法处治下桩基竖向荷载传递影响分析

溶洞处治采用钢护筒跟进法时,溶洞高度变化下的桩身轴力变化规律、桩侧摩阻力变化规律分别如图 5、6 所示。

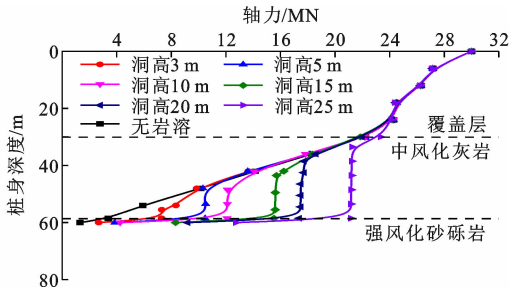


图 5 钢护筒跟进法处理后溶洞高度变化时桩身轴力分布规律  
Fig. 5 Axial force distribution law of pile when karst cave height changes after steel casing follow-up treatment

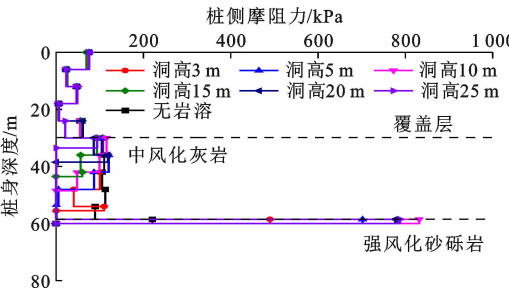


图 6 钢护筒跟进法处理后溶洞高度变化时桩侧摩阻力分布规律  
Fig. 6 Pile side friction distribution law when karst cave height changes after steel casing follow-up treatment

从图 5 可以看出:溶洞处治采用钢护筒跟进法时,桩身轴力均在覆盖层的桩身范围内降低较慢,在

中风化灰岩范围内降低较快,在桩底溶洞范围内的桩身轴力基本保持不变(无岩溶情况除外),桩基进入嵌岩层(强风化砂砾岩)后轴力衰减速度加快,最终达到最小值;溶洞高度越大,进入嵌岩层后桩身轴力越大。

从图 6 可以看出,溶洞处治采用钢护筒跟进法时,桩侧摩阻力在覆盖层内较小,在中风化灰岩范围内逐渐增大,在溶洞范围内近乎为 0,桩侧摩阻力总体在嵌岩层范围内达到峰值。这是因为在相同荷载作用下,溶洞高度越大,桩侧摩阻力在溶洞影响下被削弱的范围越大,桩周土提供的摩阻力越小,从而使桩端阻力的作用增强,导致桩基竖向位移增大。桩基竖向承载力分析中,溶洞高度增大时,桩基竖向位移有所增大,这就使嵌岩层的桩侧摩阻力得以发挥,桩侧摩阻力达到最大值。

2.2 回填法

2.2.1 回填法处治下桩基竖向承载力影响分析

不同溶洞高度下的桩基  $P$ - $S$  曲线、桩基竖向承载力变化规律、桩基竖向承载力影响度  $\alpha$  如图 7~9 所示。

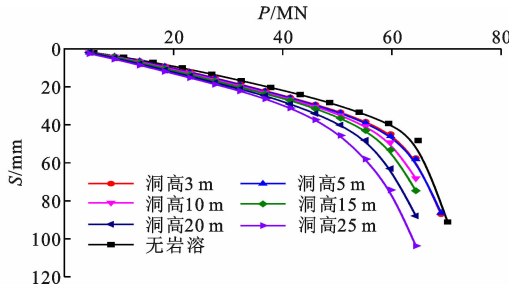


图 7 回填法处理后的不同溶洞高度桩基  $P$ - $S$  曲线  
Fig. 7  $P$ - $S$  curve of pile foundation with different karst cave heights after backfilling treatment

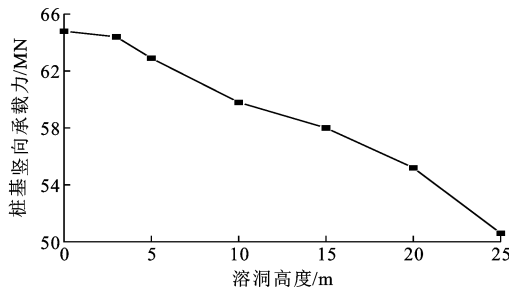


图 8 回填法处理后的桩基竖向承载力变化规律  
Fig. 8 Variation law of vertical bearing capacity of pile foundation after backfilling treatment

从图 7~9 可以看出,溶洞处治措施采用回填法时,溶洞高度为 0~25 m 的桩基竖向承载力分别为 64.80、64.40、62.90、59.80、58.00、55.20、50.60 MN。以无岩溶的桩基竖向承载力为基准,溶洞高

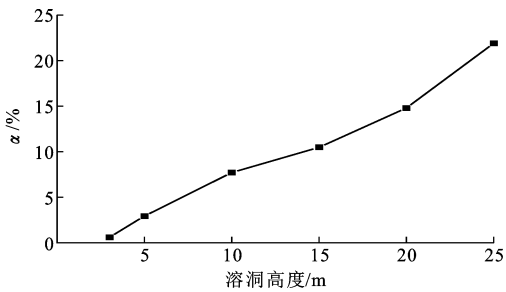


图 9 回填法处理后的桩基竖向承载力影响度

Fig. 9 Influence degree of vertical bearing capacity of pile foundation after backfilling treatment

度为 3~25 m 的桩基承载力影响度分别为 0.62%、2.94%、7.72%、10.49%、14.81%、21.91%。主要原因在于,对于中小型溶洞,回填料提供的侧阻与无溶洞时岩土体提供的侧阻相当,溶洞承载力基本不变。对于大型溶洞,溶洞高度增大对桩侧摩阻力发挥有较为明显的限制,从而使得桩基竖向承载力大幅降低。

2.2.2 回填法处治下桩基竖向荷载传递影响分析

溶洞采用回填法处理时,溶洞高度变化下的桩身轴力分布规律如图 10 所示。

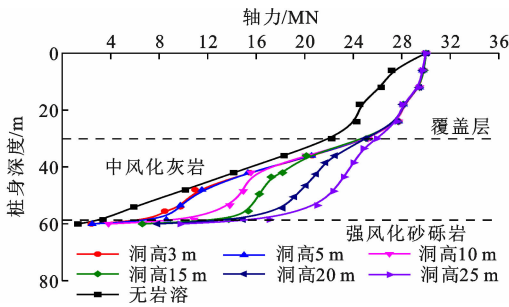


图 10 回填法处理后溶洞高度变化时桩身轴力分布规律

Fig. 10 Axial force distribution law of pile when karst cave height changes after backfilling treatment

从图 10 可以看出:溶洞处治采用回填法时,桩身轴力在覆盖层衰减较慢,在中风化灰岩范围内衰减较快,在溶洞范围内也有较大幅度衰减,进入嵌岩层后轴力衰减速度加快;溶洞高度越大,衰减完成后桩身轴力越大,这说明回填土使桩侧摩阻力得以发挥,分担了部分桩顶荷载,进而增强了桩基承载力。

溶洞处治采用回填法时,大型溶洞高度变化下的桩侧摩阻力变化规律如图 11 所示。从图 11 可以看出,溶洞处治采用回填法时,桩侧摩阻力在溶洞范围逐渐开始增大,在嵌岩层范围内达到峰值。这是因为回填土体对桩身产生较大约束,桩土相对位移较小,桩侧摩阻力增大,进而提高桩基承载力;溶洞范围内的桩侧摩阻力与其他区域相比较小,在相同

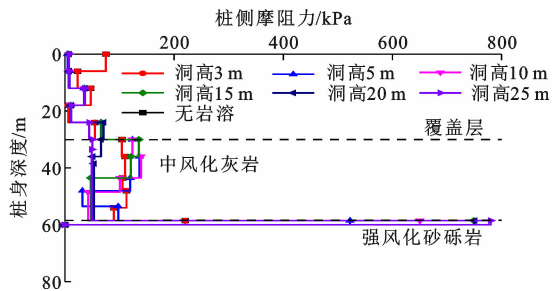


图 11 回填法处理后的溶洞高度变化时桩侧摩阻力分布规律

Fig. 11 Pile side friction distribution law when karst cave height changes after backfilling treatment

的荷载作用下,桩底溶洞高度越大,桩侧摩阻力越低,说明回填土能使溶洞范围内的桩侧摩阻力发挥,但回填法使桩侧摩阻力的发挥程度有限;由于溶洞回填土与嵌岩层的抗剪强度差异较大,桩侧摩阻力在桩基进入嵌岩层后会发生突变。

### 3 钢护筒跟进法与回填法对比

#### 3.1 承载力对比

不同溶洞高度时 2 种处治措施的竖向承载力变化、承载力差值变化如图 12、13 所示。

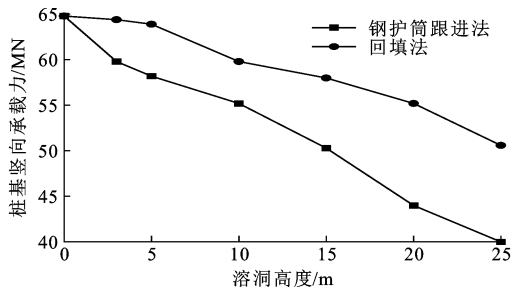


图 12 溶洞高度变化时竖向承载力变化

Fig. 12 Variation of vertical bearing capacity when karst cave height changes

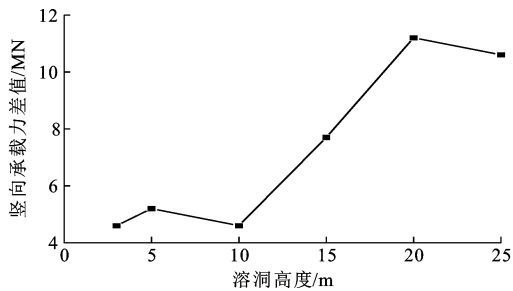


图 13 溶洞高度变化时竖向承载力差值变化

Fig. 13 Variation of vertical bearing capacity difference when karst cave height changes

从图 12、13 可以看出,相同的溶洞处治措施下,桩底溶洞高度增加使桩基竖向承载力呈减少的趋

势。采用钢护筒跟进法时,桩基竖向承载力由溶洞高度 0 m 时的 64.80 MN 减小到溶洞高度 25 m 时的 40.00 MN;采用回填法时,桩基竖向承载力由溶洞高度 0 m 时的 64.80 MN 减小到溶洞高度 25 m 时的 50.60 MN。

桩底溶洞高度为 3~25 m 时,采用钢护筒跟进法与回填法的桩基横轴向承载力差值由 4.6 MN 增加到 10.6 MN。溶洞高度超过 10 m 后,回填法使桩基竖向承载力增长幅度较大,其原因是钢护筒跟进法未改变溶洞内土体缺失的情况,溶洞段桩基无侧摩阻力,回填法填补了溶洞段岩土体的缺失,使该区段桩侧摩阻力得以发挥;溶洞高度小于 10 m 时,2 种处治措施下桩基竖向承载力变化的差值小于 6 MN,说明这种情况下,2 种溶洞处治措施对桩基承载力的影响程度接近。在实际工程中,对于溶洞高度小于 10 m 的情况,可以不再考虑处治措施对承载力变化的影响。

3.2 桩侧摩阻力及端阻力占比对比

溶洞高度变化时 2 种处治措施桩端阻力占比及桩侧摩阻力占比变化规律如图 14、15 所示。

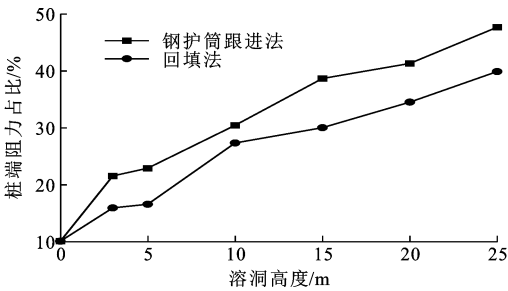


图 14 溶洞高度变化时桩端阻力占比变化规律  
Fig. 14 Variation law of pile tip resistance ratio when karst cave height changes

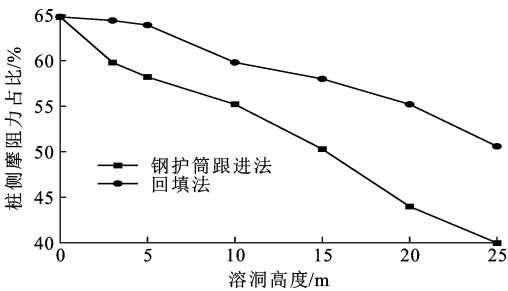


图 15 溶洞高度变化时桩侧摩阻力占比变化规律  
Fig. 15 Variation law of pile side friction resistance ratio when karst cave height changes

从图 14、15 可以看出,随着桩底溶洞高度的增加,桩端阻力与桩侧摩阻力分别呈逐渐增大与减小的趋势,不同溶洞高度对两者的影响程度不同。当

采用钢护筒跟进法时,溶洞高度在 0~25 m 的变化过程中,桩侧摩阻力占竖向承载力的比重由 89.92% 减少到 52.30%,桩端阻力占竖向承载力的比重由 10.08% 增加到 47.70%。采用回填法时,溶洞高度在 0~25 m 的变化过程中,桩侧摩阻力占竖向承载力的比重由 89.92% 减少到 60.10%,桩端阻力占竖向承载力的比重由 10.08% 增加到 39.90%。2 种处治措施表现出相同的规律:桩底溶洞高度增加使得桩侧摩阻力比重逐渐减小,桩端阻力比重逐渐增大,桩基类型由摩擦桩向摩擦端承桩变化。通过对比 2 种处治措施下的桩端阻力与桩侧摩阻力可知,采用回填法处治溶洞会使桩侧摩阻力发挥作用较大,即桩端阻力发挥作用较小,这是因为回填料弥补了溶洞范围土体的缺失,使得桩侧摩阻力能够充分发挥。

4 结 语

(1)溶洞高度增加情况下,采用钢护筒跟进法和回填法处治溶洞后桩基竖向承载力都呈减少趋势;当溶洞高度小于 10 m 时,2 种处治措施下桩基竖向承载力相差幅度小于 9%;当溶洞高度大于 10 m 时,采用钢护筒跟进法处治溶洞后,桩基竖向承载力较回填法降幅高达 26.5%。因此,若溶洞高度大于 10 m,在实际工程中应重点考虑不同处治措施对桩基竖向承载力的影响。

(2)采用钢护筒跟进法和回填法处理桩基后桩身轴力均沿桩身深度降低而降低,回填法处置下桩身轴力降幅较大,但在钢护筒跟进法处置下则几乎没有变化。

(3)桩侧摩阻力在回填法处置的溶洞中明显增大,但在钢护筒跟进法处置的溶洞近乎为 0,这是由于回填法弥补了溶洞范围内土体缺失,桩土相对位移较小,从而提供了更多的桩侧摩阻力。

(4)2 种处治措施下桩基阻力占比表现出相同的规律,即桩侧摩阻力比重逐渐减小,桩端阻力比重逐渐增大。回填法处治溶洞较钢护筒跟进法的桩侧摩阻力占比更大,桩端阻力占比更小。

(5)在实际工程中,应根据溶洞高度、跨度选择不同的溶洞处治措施,合理设计桩基类型。

参考文献:

References:

[1] FENG Z J, CHEN H Y, XIA C M, et al. Prediction of bearing capacity of pile foundation in karst area based



- on model of metabolic GM (1,1)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 189: 042012.
- [2] 姚宏生,冯忠居,袁展,等.岩溶发育区特大桥梁桩基础施工技术研究[J].施工技术,2017,46(19):130-133.
- YAO Hongsheng, FENG Zhongju, YUAN Zhan, et al. Large bridge pile foundation construction technology research in karst development area[J]. Construction Technology, 2017, 46(19): 130-133.
- [3] 郑晓慧.岩溶区桩基力学特性分析及桩型优化设计研究[J].地质与勘探,2018,54(4):824-832.
- ZHENG Xiaohui. Study on mechanical properties of pile foundation and optimum design of pile types in karst areas [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(4): 824-832.
- [4] 方云飞,孙宏伟,阚敦莉.唐山岩溶地区桩基工程问题分析与设计要点[J].岩土工程学报,2013,35(增2):1117-1121.
- FANG Yunfei, SUN Hongwei, KAN Dunli. Analysis and design points of pile foundation engineering in Tangshan karst area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 1117-1121.
- [5] WANG P S, DING H Y, ZHANG P Y. Influence of karst caves at pile side on the bearing capacity of super-long pile foundation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 4895735.
- [6] 雷勇,尹君凡,陈秋南.岩溶区桩端基岩极限承载力及破坏模式试验研究[J].应用力学学报,2017,34(4):774-780,822.
- LEI Yong, YIN Junfan, CHEN Qiunan. The experimental study on limit bearing capacity and failure mode of pile end bedrock in karst region[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(4): 774-780, 822.
- [7] 张永杰,邓俊强,杨兴山,等.考虑溶洞空间形态的岩溶桩基稳定性分析方法[J].中国公路学报,2019,32(1):37-45.
- ZHANG Yongjie, DENG Junqiang, YANG Xingshan, et al. Stability analysis method of pile foundation in karst area base on cavern spatial form[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(1): 37-45.
- [8] DONG Y X, FENG Z J, HAO Y M, et al. Bearing behaviors and reasonable rock-socketed depth of bridge pile foundation in karst areas[C]//SHEHAT H F. Proceedings of Sustainable Civil Infrastructures. Cham: Springer, 2019: 141-161.
- [9] 董芸秀,冯忠居,郝宇萌,等.岩溶区桥梁桩基承载力试验与合理嵌岩深度[J].交通运输工程学报,2018,18(6):27-36.
- DONG Yunxiu, FENG Zhongju, HAO Yumeng, et al. Experiment on bearing capacity of bridge pile foundations in karst areas and reasonable rock-socketed depth[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(6): 27-36.
- [10] 冯忠居,武敏,何静斌,等.陡坡-岩溶耦合作用下公路桥梁桩基极限承载力的计算[J].公路,2021,66(1):115-121.
- FENG Zhongju, WU Min, HE Jingbin, et al. Calculation of ultimate bearing capacity of pile foundations of highway bridges under the coupling of steep slope and karst[J]. Highway, 2021, 66(1): 115-121.
- [11] CHEN H Y, FENG Z J, LI T, et al. Study on the vertical bearing performance of pile across cave and sensitivity of three parameters[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 17342.
- [12] 赵明华,肖尧,徐卓君,等.基于Griffith强度准则的岩溶区桩基溶洞稳定性分析[J].中国公路学报,2018,31(1):31-37.
- ZHAO Minghua, XIAO Yao, XU Zhuojun, et al. Stability analysis of cavity under rock-socketed pile in karst areas based on Griffith criterion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 31-37.
- [13] 赵明华,雷勇,张锐.岩溶区桩基冲切破坏模式及安全厚度研究[J].岩土力学,2012,33(2):524-530.
- ZHAO Minghua, LEI Yong, ZHANG Rui. Study of punching failure mode and safe thickness of pile foundation in karst region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 524-530.
- [14] 夏炼.岩溶地区桩基承载特性影响因素研究[J].公路,2018,63(11):168-171.
- XIA Lian. Study on influencing factors of bearing capacity of pile foundation in karst area[J]. Highway, 2018, 63(11): 168-171.
- [15] 蒋武军,鄢定媛,王明明,等.特大型溶洞回填体基桩荷载-沉降规律与计算研究[J].岩土工程学报,2017,39(增2):67-70.
- JIANG Wujun, YAN Dingyuan, WANG Mingming, et al. Study on load-settlement law and calculation of foundation pile of backfill body in super-large karst cave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 67-70.
- [16] 鲁贤成,陈记,李云安,等.岩溶区大直径嵌岩桩荷载传递特征的数值分析[J].安全与环境工程,2019,26(1):183-190.
- LU Xiancheng, CHEN Ji, LI Yunan, et al. Numerical

analysis of load transfer characteristics of large diameter rock-socketed pile in karst area[J]. Safety and Environmental Engineering,2019,26(1):183-190.

[17] 尹凯丽,郝世龙. 武汉地区岩溶对桩基承载力影响数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质,2015,42(6):96-102.

YIN Kaili, HAO Shilong. A study of the effect of karst on the bearing capacity of pile foundation in Wuhan district based on numerical simulation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2015,42(6):96-102.

[18] 李金良,邢宇铖,崔伟,等. 竖向荷载作用下岩溶区单桩承载特性研究[J]. 济南大学学报(自然科学版),2020,34(4):417-422.

LI Jinliang, XING Yucheng, CUI Wei, et al. Bearing characteristics of single pile under vertical load in karst area[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology),2020,34(4):417-422.

[19] 曹文贵,李媛,翟友成. 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[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(2):393-400.

CAO Wengui, LI Yuan, ZHAI Youcheng. Active analysis method for stability of karst roof under foundation pile based on info-gap theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2):393-400.

[20] 李春. 岩溶区桩基极限承载力有限元上限分析[J]. 中外公路,2019,39(2):28-32.

LI Chun. Finite element upper bound limit analysis of ultimate bearing capacity of pile foundation in karst area[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(2):28-32.

[21] 张慧乐,马凛,张智浩,等. 岩溶区嵌岩桩承载特性影响因素试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(1):92-100.

ZHANG Huile, MA Lin, ZHANG Zhihao, et al. Test research on factors influencing bearing capacity of rock-socketed piles in karst area[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(1):92-100.