

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20240906002

文章编号:1674-599X(2025)01-0140-08

引用格式:雷勇,赵子朝,李鹏甲,等.穿越双层溶洞桩基极限承载力试验研究[J].交通科学与工程,2025,41(1):140-147.

Citation: LEI Yong, ZHAO Zizhao, LI Pengjia, et al. Experimental study on ultimate bearing capacity of pile foundation traversing double-layer karst caves[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 140-147.

## 穿越双层溶洞桩基极限承载力试验研究

雷勇,赵子朝,李鹏甲,李金朝

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**【目的】解决岩溶区穿越多层溶洞桩基承载力的取值问题。【方法】依据相似原理开展了穿越不同高度双层溶洞桩基承载力的室内模型试验。【结果】通过分析桩基与溶洞顶板及隔板的破坏模式,得到桩身稳定系数的取值范围,并总结出桩基极限承载力的变化规律。【结论】1) 桩基极限承载力随溶洞洞高的增加而逐渐减小,在达到6倍桩径的临界洞高时,桩身破坏模式由桩顶材料受压鼓胀破坏转变为桩身屈曲失稳破坏。2) 溶洞顶板与隔板的破坏模式与两侧基岩约束类型及桩侧摩阻力的大小有关。两端固支条件下溶洞顶板、隔板整体破坏模式类似于集中荷载作用下的两端固支板受弯破坏。桩-岩接触处发生局部剪切、冲切组合破坏。3) 在桩周岩土体不发生破坏的前提下,当溶洞洞高小于6倍桩径时,桩基发生桩顶材料受压鼓胀破坏,其极限承载力取决于桩基自身材料的强度;当溶洞洞高大于或等于6倍桩径时,上层溶洞段桩身发生屈曲失稳破坏,其极限承载力取决于桩身临空段的屈曲承载力。

**关键词:**地基基础工程;岩溶桩基;极限承载力;模型试验;破坏模式

中图分类号:TU473.1

文献标志码:A

### Experimental study on ultimate bearing capacity of pile foundation traversing double-layer karst caves

LEI Yong, ZHAO Zizhao, LI Pengjia, LI Jinzhao

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** [Purposes] This paper aims to solve the value-taking problem of the bearing capacity of the pile foundation traversing through double-layer karst caves in karst areas. [Methods] An indoor model experiment on the bearing capacity of pile foundation traversing double-layer karst caves with different heights was carried out according to the similarity principle. [Findings] Through the analysis of the failure modes of the pile foundation and karst cave roof and partition, the value range of the pile stability coefficient was obtained, and the variation law of the ultimate bearing capacity of the pile foundation was summarized. [Conclusions] 1) The ultimate bearing capacity of the pile foundation decreases with the increase in the karst cave height. When the critical karst cave height of  $6d$  ( $d$  refers to the pile diameter) is reached, the failure mode of the pile body changes from the compression and swelling failure of the pile top material to the buckling instability failure of the pile body. 2) The failure mode of the karst cave roof and partition is related to the constraint types of the bedrock on both sides and the size of the shaft frictional resistance. The overall failure mode of the karst cave roof and partition under the condition of fixed supports on both ends is similar to the bending failure of the fixed support plates at both ends under the concentrated load. A combined failure mode of local shear and

收稿日期:2024-09-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51878270、52178332);湖南省自然科学基金项目(2022JJ30253)

通信作者:雷勇(1983—),男,教授,主要从事桩基础及特殊土地基处理方面的研究工作。E-mail:leiyonghnu@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

punching shear occurs at the pile-rock contact position. 3) Under the premise of no damage caused to the rock and soil around the pile, when the karst cave height is less than  $6d$ , the pile top material is subjected to compression and swelling failure, and its ultimate bearing capacity depends on the strength of the pile foundation material. Nevertheless, when the karst cave height is equal to or greater than  $6d$ , the upper karst cave section of the pile body undergoes buckling instability failure, and its ultimate bearing capacity depends on the buckling bearing capacity of the suspended section of the pile body.

**Key words:** foundation engineering; karst pile foundation; ultimate bearing capacity; model experiment; failure mode

岩溶地貌在我国中西部地区广泛分布。岩溶区溶洞的发育具有隐蔽性,致使在岩溶区进行交通基础设施建设难度较大,而在此类区域进行桥梁桩基工程施工则存在下伏溶洞塌陷以及桩基临空段失稳破坏等安全风险。因此,开展岩溶区桩基承载特性研究对桥梁安全具有重大意义。对于岩溶区桩基工程的研究,杨博铭等<sup>[1]</sup>、雷勇等<sup>[2-3]</sup>、赵明华等<sup>[4]</sup>采用多种理论方法,分析了桩端下伏溶洞时溶洞顶板的破坏模式,提出了桩端极限承载力及溶洞顶板安全厚度的计算方法。马缤辉等<sup>[5]</sup>结合理论分析和数值模拟方法,研究了岩溶区桥梁桩基的承载和变形特性。张慧乐等<sup>[6]</sup>通过开展下伏溶洞桩基模型试验,分析了不同几何条件下溶洞对嵌岩桩极限承载力的影响。阳军生等<sup>[7]</sup>利用有限元数值模拟,研究了桩端溶洞顶板承载力及其影响因素。WANG等<sup>[8]</sup>基于数值分析法,分析了溶洞对于超长桩基承载力的影响。王伟等<sup>[9]</sup>通过建立顶板失稳破坏力学模型,提出了穿越溶洞的桩基极限承载力的理论计算方法。张乾青等<sup>[10]</sup>采用有限元软件分析了多种溶洞工况对穿越溶洞桩基承载特性的影响。雷勇等<sup>[11]</sup>依据能量法原理提出了穿越单层溶洞桩基屈曲的临界荷载理论计算公式。上述研究主要对下伏溶洞与穿越单层溶洞桩基承载特性或溶洞的稳定性进行了分析,而在实际桩基工程中由于溶洞发育的复杂性常常会遇到桩基穿越多层溶洞的情况,对于这种情况相关设计与计算方法在规范<sup>[12-14]</sup>中尚不明确。苏冠峰等<sup>[15]</sup>采用数值分析方法深入研究了溶洞参数变化对桩基承载特性的影响。邹新军等<sup>[16]</sup>采用荷载传递法分析了穿越串珠状溶洞桩基的沉降与稳定性特征。室内模型试验的周期较长且较为复杂,因此对于穿越多层溶洞桩基的研究主要集中在桩基极限承载力的数值模拟与理论研究上,而关于桩基承载机理、破坏模式特别是屈曲失稳破坏的室内模型试验研究开展得较少,需进一步有针对性地开展。

鉴于此,本文针对穿越双层溶洞桩基的承载特性开展室内模型试验研究:考虑不同洞高进行双层等高溶洞桩基的极限承载力模型试验,研究穿越不同高度溶洞桩基承载性状的变化规律,分析不同溶洞洞高下穿越双层溶洞时桩基、溶洞顶板与隔板的破坏模式,开展桩基总极限阻力计算方法的研究,为岩溶区穿越溶洞桩基的设计与计算提供借鉴。

## 1 模型试验设计

### 1.1 试验简化及假定

为确保室内试验的可行性以及与实际工程的相似性,本文做出如下假定:

- 1) 嵌岩桩上覆土层与桩基间的侧阻力在桩基极限承载力中占比较小,忽略不计;
- 2) 基岩均匀、连续、完整性良好,溶洞顶板、隔板与基岩两侧的连接方式为固支;
- 3) 为方便安装仪器与观察试验现象,溶洞形状为两侧发育程度不同的相对规则的狭长长方体。

### 1.2 基岩及桩基模拟材料

本文采用 425 普通硅酸盐水泥、石膏粉、水、粒径为 0.4~0.5 mm 的中砂、红黏土按一定配合比混合后模拟基岩。本文设计了多组配合比方案,并分别测试基岩的材料力学参数,经对比后确定最终的基岩配合比,结果见表 1。在该配合比下,基岩的单轴抗压强度值约为 10 MPa。

表 1 基岩配合比

Table 1 Bedrock mixture ratio

| 水灰比  | 水泥/kg | 水/kg  | 中砂/kg | 石膏粉/kg | 红黏土/kg |
|------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 0.75 | 4.125 | 3.080 | 8.250 | 1.000  | 1.000  |

参考某具体桥梁工程背景与室内试验条件,本文取模型的几何相似比为 1:50,试验桩直径为 3 cm,并在外径 30 mm、壁厚 1 mm 的薄壁钢管内灌注砂浆制作桩基模型。薄壁空心钢管的单轴抗压强度为 520 MPa,砂浆由水泥、砂、水按 1:3:1 的质量比

混合而成。桩基整体的单轴抗压强度约为90 MPa。在采用钢管模拟桩基时,为增加桩基与基岩接触处的粗糙程度,本文将环氧树脂涂抹于桩-岩接触处,然后将水泥与砂按1:2的质量比混合后均匀撒在环氧树脂上并压实,重复多次直至接触处形成较为明显的粗糙层。

### 1.3 试验装置

本文试验的加载装置为门式反力框架结构,采用液压千斤顶加载。试验模型的成型装置为钢模架与木模板组合结构,钢模架净空尺寸的长、宽、高分别为1.00、0.55、1.00 m,木模板的尺寸则随着洞高的变化而变化。在桩顶采用压力传感器测量顶部荷载。由于桩端应力较大,无法采用普通土压力盒,因此采用微型压力传感器进行荷载测量。桩顶沉降、溶洞顶板与隔板的变形均通过设置于对应位置的百分表进行测量。桩身变形通过固定于桩身上的拉绳式位移传感器进行测量与统计。试验模型与加载系统如图1所示。

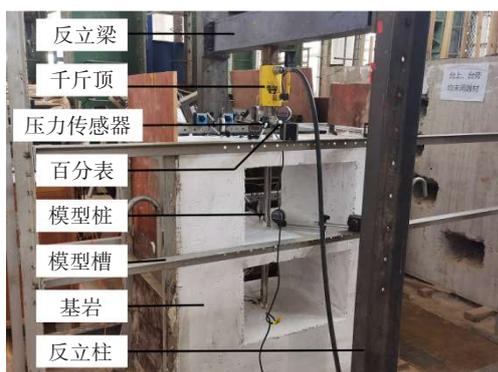


图1 加载系统及模型试验

Fig. 1 Loading system and model experiment

### 1.4 模型试验方案

本文试验模拟的是桩基穿越等高双层溶洞时的情况。溶洞顶板及隔板的厚度均为 $2d$ ( $d$ 为桩径),溶洞处的长边跨径为50 cm,不同工况的洞高分别为 $4d$ 、 $6d$ 、 $8d$ 、 $10d$ 、 $12d$ 。桩端嵌固于底层基岩上,深度为 $2d$ 。桩基顶部出露高度为25 mm。单根桩桩基长 $nd+25$  mm( $n$ 的取值为4、6、8、10、12)。为分析穿越双层溶洞桩基与普通嵌岩桩在破坏模式与受力特性上的差异,本文进行了一组全嵌岩桩的破坏试验,在该试验中桩基的嵌入深度为 $4d$ ,桩顶的暴露长度为25 mm,单根桩桩基长145 mm。

### 1.5 试验方法

本文试验的加载标准与试验步骤参考了文献[12]中的单桩竖向抗压静载试验。本文试验采用

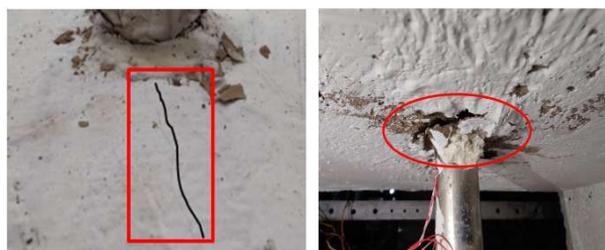
分级加载,根据预估荷载将加载级数分为10~15级,每级荷载为5 kN。破坏的判断标准为:桩头出现明显鼓胀变形或桩身出现明显屈曲变形。破坏荷载为荷载-沉降曲线陡降段起点的荷载值。

## 2 模型试验结果与机理分析

### 2.1 模型试验现象分析

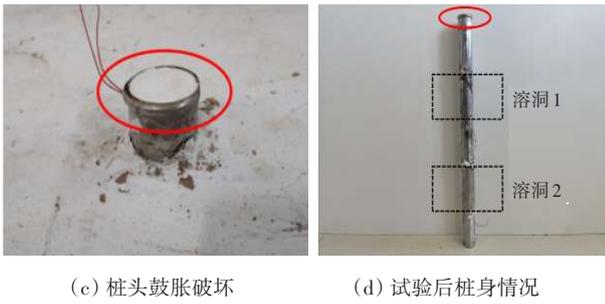
当穿越的溶洞洞高为 $4d$ 、 $8d$ 时,桩基试验破坏现象如图2~3所示。当溶洞洞高为 $6d$ 、 $10d$ 、 $12d$ 时,桩基试验破坏现象相似,故本文只对洞高为 $10d$ 的溶洞的桩基试验破坏现象进行分析,如图4所示。当荷载为15~30 kN时,溶洞顶板、隔板在两侧基岩与桩基接触处出现裂缝,顶板及隔板在破坏后出现较大变形,桩顶沉降明显。在随后的加载过程中,裂缝逐渐发育直至贯穿顶板与隔板,顶板、隔板与桩基接触处发生剪切破坏或冲切破坏,如图2(b)、3(b)、4(b)所示。当穿越溶洞的洞高为 $8d$ 时,在加载过程中溶洞隔板的下表面出现以桩基为轴心的环形裂缝,隔板发生冲切破坏,冲切破坏剖面如图3(b)所示。当穿越溶洞的洞高为 $4d$ 且加载至极限荷载时,桩基的桩头处发生鼓胀破坏,如图2(c)所示。当穿越溶洞的洞高为 $6d$ 、 $8d$ 、 $10d$ 、 $12d$ 时,桩顶的沉降急剧增大,上层溶洞段桩基出现明显的屈曲变形,如图3(c)、4(c)所示。图2(d)、3(d)、4(d)给出了试验结束后,不同溶洞洞高下桩基的破坏模式。桩基发生破坏的前一级荷载即为桩基极限承载力,也就是说当穿越溶洞的洞高为 $4d$ 、 $6d$ 、 $8d$ 、 $10d$ 、 $12d$ 时,桩基极限承载力分别为65、60、55、45、45 kN。

图5给出了全嵌岩桩试验的破坏现象。当荷载加载至70 kN时,桩顶沉降急剧增大,桩头发生明显鼓胀破坏,如图5(b)所示。其极限承载力为桩基发生破坏的前一级荷载,即65 kN,桩基破坏试验现象与洞高为 $4d$ 的桩基试验现象相似,均为桩头处受压而发生的破坏。



(a) 顶板裂缝

(b) 顶板下表面剪切破坏



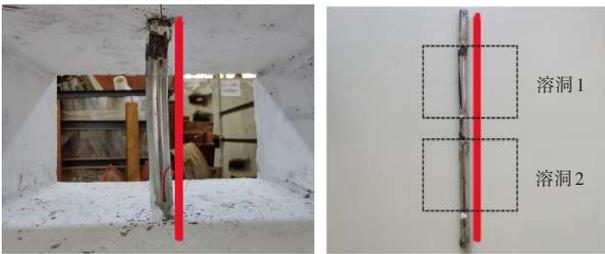
(c) 桩头鼓胀破坏 (d) 试验后桩身情况

图 2 洞高为 4d 工况下的破坏现象

Fig. 2 Failure under karst cave height of 4d



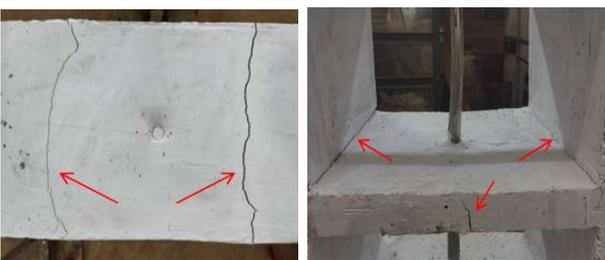
(a) 顶板裂缝 (b) 隔板冲切破坏



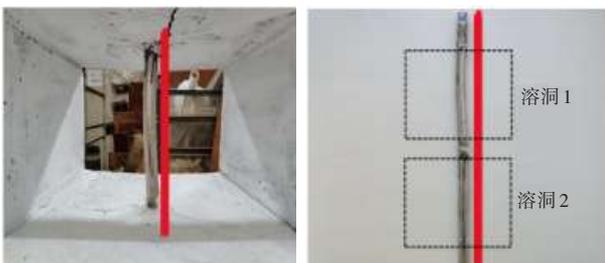
(c) 上层溶洞桩基屈曲破坏 (d) 试验后桩身情况

图 3 洞高为 8d 工况下的破坏现象

Fig. 3 Failure under karst cave height of 8d



(a) 顶板裂缝 (b) 隔板裂缝



(c) 上层溶洞桩基屈曲破坏 (d) 试验后桩身情况

图 4 洞高为 10d 工况下的破坏现象

Fig. 4 Failure under karst cave height of 10d



(a) 试验加载 (b) 桩头鼓胀破坏

图 5 全嵌岩桩试验的破坏现象

Fig. 5 Failure of fully rock-socketed pile experiment

### 2.2 桩基承载特性分析

图 6 所示为穿越不同洞高溶洞时桩基的荷载-沉降曲线。由图 6 可知,在加载过程中全嵌岩桩基的荷载-沉降曲线大致呈线性变化,当桩头发生明显的鼓胀破坏时,荷载-沉降曲线出现陡降。当荷载为 15 ~ 30 kN 时,溶洞洞高为 4d、6d、8d、10d、12d 的桩基的荷载-沉降曲线大多存在陡降段,这与顶板、隔板在该荷载范围内受弯出现裂缝导致桩顶百分表读数变化较大的现象相符。桩基极限承载力试验结果见表 2。

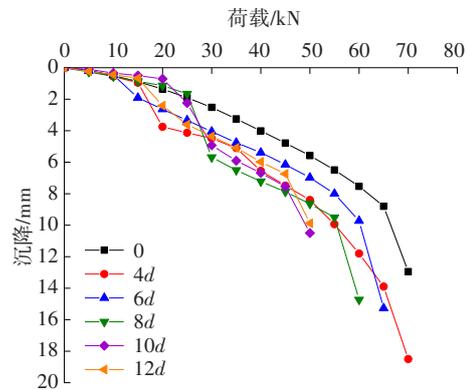


图 6 不同溶洞洞高下的荷载-沉降曲线

Fig. 6 Load-settlement curves for different karst cave heights

表 2 穿越溶洞的桩基的极限承载力

Table 2 Ultimate bearing capacity of pile foundation traversing karst caves

| 溶洞洞高 | 极限承载力/kN | 溶洞洞高 | 极限承载力/kN |
|------|----------|------|----------|
| 0    | 65       | 8d   | 55       |
| 4d   | 65       | 10d  | 45       |
| 6d   | 60       | 12d  | 45       |

图 7 所示为桩基极限承载力随洞高的变化曲线。由图 7 可知,桩基极限承载力曲线的变化趋势与材料力学中不同柔度压杆临界应力总图的变化趋势相近。小洞高试验桩基的极限承载力曲线对应于临界应力总图中小柔度压杆段的临界应力曲线,桩基的破坏形式为材料破坏;大洞高试验桩基

的极限承载力曲线对应于临界应力总图中的大柔度压杆段的临界应力曲线,桩基的破坏形式为屈曲破坏。

为分析桩基桩端荷载分担比及桩侧摩阻力(简称侧阻)的变化,根据桩顶与桩端压力传感器示数之差与桩-岩接触面积,得到大洞高试验加载过程中桩侧平均摩阻力 $\tau_{rs}$ 的计算公式:

$$\tau_{rs} = \frac{Q - Q_b}{\pi dh_{rs}} \quad (1)$$

式中: $Q$ 为桩顶竖向荷载试验值; $Q_b$ 为桩端阻力(简称端阻)试验值; $h_{rs}$ 为桩-岩接触面的总高度。

图8所示为桩侧平均摩阻力随桩顶荷载的变化曲线。由图8可知,在桩顶荷载为25 kN左右时侧阻达到极限值,此时桩-岩界面发生剪切破坏,之后桩侧平均摩阻力略有下降并基本趋于定值。桩侧平均摩阻力的极限值为0.6~0.7 MPa,约为基岩单轴抗压强度的0.06~0.07,符合《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)<sup>[13]</sup>中关于侧阻的规定。在最后的破坏阶段,桩基屈曲变形增大了桩-岩接触面的法向应力,从而导致侧阻有所增大。

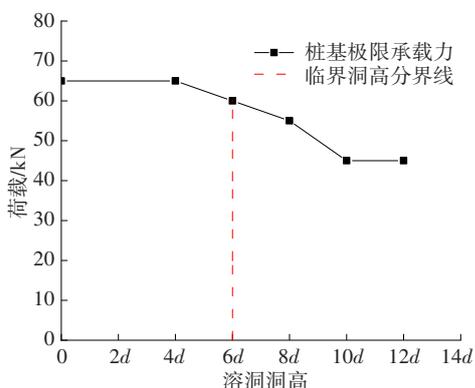


图7 极限承载力随溶洞洞高的变化规律

Fig. 7 Variation law of ultimate bearing capacity with karst cave height

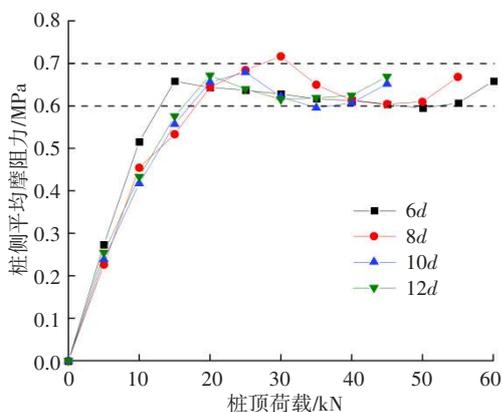


图8 桩侧平均摩阻力变化曲线

Fig. 8 Variation curves of average shaft frictional resistance

在不同溶洞洞高工况下,端阻分担比曲线如图9所示。由图9可知,在桩基穿越溶洞洞高为4d的试验中,溶洞顶板在加载过程中受弯破坏,桩-岩之间发生剪切破坏导致在该试验中侧阻较全嵌岩试验中的更小,端阻发挥的作用较大。在桩基穿越溶洞洞高为4d、6d、8d、10d、12d的试验中,随着洞高的增加,端阻分担比逐渐减小,这是因为洞高的增大使桩基临空段的长细比有所增大,进而桩基更容易发生屈曲失稳,端阻发挥的作用较小。

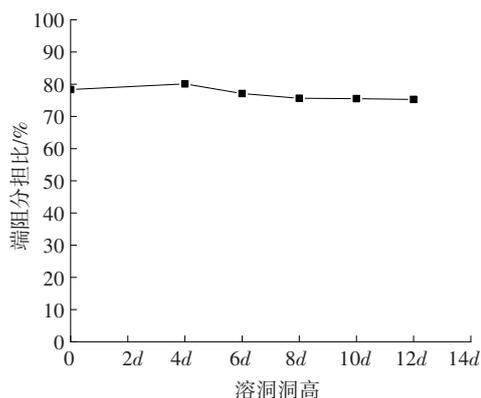


图9 端阻分担比

Fig. 9 Sharing ratio of tip resistance

对于不同溶洞洞高工况,其桩基的侧阻分担比、端阻分担比在加载过程中的变化规律均相似。本文取溶洞洞高为10d的工况进行分析,结果如图10所示。由图10可知,在加载初期,侧阻在桩身的承载中发挥主要作用;当桩顶荷载达到极限承载力时,端阻分担比为75.53%,端阻在桩身的承载中发挥主要作用,桩基的种类为摩擦端承桩。

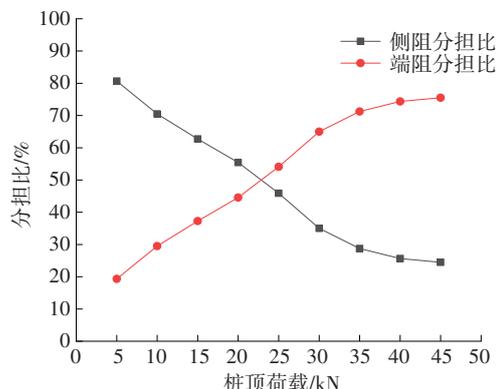


图10 洞高10d工况下侧阻分担比及端阻分担比变化曲线

Fig. 10 Sharing ratio of shaft resistance and tip resistance under karst cave height of 10d

### 2.3 桩基承载破坏模式分析

根据试验现象的不同可将不同溶洞洞高试验分为小洞高试验与大洞高试验,小洞高试验为全嵌

岩试验(洞高为0)与溶洞洞高为4d的试验,大洞高试验为溶洞洞高为6d、8d、10d、12d的试验。

### 1) 桩基破坏模式。

小洞高试验桩基的破坏均表现为桩头出现较大鼓胀变形,其破坏模式为桩头材料受压破坏。

大洞高试验桩基的破坏均表现为上层溶洞段桩身出现明显屈曲,桩顶无明显变形,其破坏模式为桩身段失稳破坏。

### 2) 溶洞顶、隔板破坏模式。

在溶洞洞高为4d的试验中,在溶洞顶板的桩-岩接触处出现裂缝。在大洞高试验中,顶板、隔板与两侧基岩的连接处及与嵌岩桩的接触处均出现了沿溶洞短边方向发展的贯穿式裂缝。在洞高为8d的试验中,隔板由于受力在与桩基接触的地方出现了锥形冲切体。结合上述现象可知,溶洞顶板、隔板的整体破坏模式类似于集中荷载作用下两端固支板的受弯破坏;桩-岩接触处的破坏为局部剪切、冲切组合破坏模式。

## 3 桩基极限承载力计算

根据穿越溶洞桩基试验及桩基设计理论,可将桩基破坏分为三大类:1) 桩周岩土体破坏;2) 桩身材料受压破坏;3) 桩身段屈曲失稳破坏。桩基承载力取决于使上述破坏发生的最小荷载。

### 3.1 桩周岩土破坏模式的极限承载力

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)<sup>[13]</sup>规定了当桩端基岩具有良好完整性时桩基总极限阻力 $Q_{rk}$ 的理论计算公式,并结合总极限侧阻力 $Q_{rs}$ 与总极限端阻力 $Q_{rp}$ 的计算公式给出了综合修正系数。

$$Q_{rk} = Q_{rs} + Q_{rp} \quad (2)$$

$$Q_{rk} = \zeta_s f_{rk} \pi d h_r + \zeta_p f_{rk} \frac{\pi}{4} d^2 \quad (3)$$

$$Q_{rk} = \zeta_r f_{rk} \frac{\pi}{4} d^2 \quad (4)$$

式中: $\zeta_s$ 为侧阻系数; $\zeta_p$ 为端阻系数; $f_{rk}$ 为岩石饱和单轴抗压强度; $h_r$ 为嵌岩深度; $\zeta_r$ 为嵌岩段侧阻和端阻的综合系数。根据试验桩基的嵌岩情况, $\zeta_s$ 取值为0.05, $\zeta_p$ 取值为0.5, $\zeta_r$ 取值为0.9。

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)<sup>[14]</sup>给出了受清孔情况与岩石破碎程度影响的总极限侧阻力以及总极限端阻力的计算公式:

$$[R_c] = c_1 A_p f_{rk} + U_p \sum_{i=1}^m c_{2,i} h_i f_{rk,i} + \frac{1}{2} \zeta_s U_p \sum_{i=1}^n l_i q_{k,i} \quad (5)$$

式中: $[R_c]$ 为单桩轴向受压承载力容许值; $c_1$ 与 $c_2$ 为根据清孔情况与岩石破碎程度等因素而定的端阻与侧阻的折减系数,根据试验基岩的完整情况, $c_1$ 取值为0.6, $c_2$ 取值为0.05; $U_p$ 为嵌岩端桩身周长; $q_k$ 为桩侧土层侧阻标准值,由于不考虑上覆土层的侧阻,故 $q_k$ 取值为0; $A_p$ 为桩端截面面积; $l$ 为土层厚度; $m$ 、 $n$ 分别为岩层、土层的层数。

将试验模型参数代入式(4)后可算得桩基总极限阻力的试验值,为6.36 kN;将其代入式(5)后可算得桩基总极限阻力的规范值,为12.72 kN。对比规范值与试验值,发现规范值明显小于试验值,原因:为保证工程安全,规范中的计算方法将部分桩基阻力作为安全储备,且规范中系数的取值考虑了实际工程中可能存在的各种不确定性因素;而试验中桩基的受力情况相对简单,试验材料较为完整,用规范中的系数取值进行计算导致计算结果出现偏差。

根据文献[17-18]可得桩基总极限阻力的统计经验算法,桩基极限侧阻应力 $\tau_m$ 的计算公式为:

$$\tau_m = \alpha \sigma_c^k \quad (6)$$

$$\tau_m = (0.13 \sim 0.25) (\sigma_c)^{0.50} \quad (7)$$

式中: $\sigma_c$ 为岩石单轴抗压强度。

当 $k$ 取0.5时,桩基极限侧阻应力与岩石单轴抗压强度之间为幂函数关系(指数为0.5),侧阻应力的取值范围为0.41~0.79 MPa。极限端阻应力的计算公式为:

$$q_m = (5 \sim 8) \sigma_c \quad (8)$$

端阻应力的取值范围为50~80 MPa,依据公式(7)~(8)可算得总极限阻力的范围为42.3~70.0 kN,其极值大于桩基极限承载力试验值,且符合桩周土体未发生破坏的试验现象,说明在试验中用该方法计算桩基总极限阻力更合适。

### 3.2 桩身材料受压破坏模式的极限承载力

在试验中全嵌岩桩基与穿越洞高4d的桩基的破坏模式均为桩头材料受压发生鼓胀破坏,其极限承载力取决于桩基自身的材料强度,即桩基极限承载力的计算方法应与桩身材料到达屈服时,其屈服极限的理论计算方法一致。桩基总极限承载力 $Q_{rk}$ 的计算公式为:

$$Q_{rk} = f_p A \quad (9)$$

式中: $f_p$ 为桩基单轴抗压强度; $A$ 为桩身截面面积。

本文在试验准备阶段通过加载模型试验测得短桩的抗压强度约为90 MPa,依据式(9)可算得桩

基受压发生材料破坏时的理论极限承载力为 63.58 kN,与试验中全嵌岩桩基及穿越洞高 4d 的桩基极限承载力相比,误差小于 5%,故可参考该理论公式进行小洞高桩基极限承载力的理论计算。

### 3.3 桩基屈曲失稳破坏模式的极限承载力

《岩溶地区建筑地基基础技术标准》(GB/T 51238—2018)<sup>[19]</sup>中明确规定:当桩基穿越溶洞时位于溶洞顶板与隔板间临空段的桩身部分应进行压屈稳定性验算。

桩基极限承载力为上层溶洞失稳段的屈曲极限承载力与上层顶板桩-岩界面的侧阻之和,其计算公式为:

$$Q = Q_a + Q_s \quad (10)$$

式中: $Q_a$ 为上层溶洞失稳段的屈曲极限承载力; $Q_s$ 为上层顶板桩-岩界面的侧阻。

$$Q_s = \tau_{rs} \pi d h_1 \quad (11)$$

式中: $\tau_{rs}$ 为桩侧平均摩阻力,取 0.65 MPa; $h_1$ 为溶洞顶板高度。

在大洞高试验中桩基的破坏模式均为上层溶洞段桩基发生屈曲并失去承载能力,其极限承载力取决于桩基屈曲承载力。参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[20]</sup>,给出上层溶洞失稳段可承受的竖向荷载  $Q_a$  的计算公式:

$$Q_a = 0.9\phi(f_c A + f'_y A'_s) \quad (12)$$

式中: $f_c$ 为水泥砂浆的单轴抗压强度; $f'_y$ 为钢管的抗压强度; $A'_s$ 为钢管管壁面积; $\phi$ 为桩身稳定系数。

将由式(10)计算得到的  $Q_a$  代入式(12)中求得试验桩身的稳定系数,见表 3。

表 3 试验桩身稳定系数

Table 3 Stability coefficient of test pile body

| 压屈计算长度 | 稳定系数 | 压屈计算长度 | 稳定系数 |
|--------|------|--------|------|
| 0      | 1.00 | 8d     | 0.87 |
| 2d     | 1.00 | 10d    | 0.71 |
| 4d     | 1.00 | 12d    | 0.71 |
| 6d     | 0.96 |        |      |

## 4 结论

本文通过开展穿越双层溶洞桩基极限承载力及破坏模式的室内模型试验研究,得到如下结论:

1) 随着溶洞洞高的增加,桩基极限承载力逐渐降低,同时破坏模式由桩顶受压鼓胀破坏转变为屈曲失稳破坏,6 倍桩径为桩身破坏模式转变的临界

洞高。

2) 溶洞顶板及隔板的破坏模式与边界条件、侧阻的大小有关。可将桩周侧阻近似看作顶板、隔板中心处的集中荷载,这样两端固支条件下溶洞顶板、隔板的整体破坏模式就类似于集中荷载作用下两端固支板的受弯破坏模式。桩-岩接触处发生的是局部剪切、冲切组合破坏。

3) 若桩周岩土体不发生破坏,则当溶洞洞高小于 6 倍桩径时,桩基发生桩顶材料受压鼓胀破坏,其极限承载力取决于桩基自身的材料强度;当溶洞洞高大于或等于 6 倍桩径时,桩基发生上层溶洞段屈曲失稳破坏,其极限承载力取决于桩基屈曲承载力。

### 参考文献(References):

- [1] 杨博铭, 赵明华, 肖尧, 等. 基桩下伏矩形溶洞稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 1265-1272.  
YANG Boming, ZHAO Minghua, XIAO Yao, et al. Stability analysis on rectangle cave under the pile foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 1265-1272.
- [2] 雷勇, 邓加政, 刘一新. 下伏空洞岩石地基极限承载力计算方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 820-826, 834.  
LEI Yong, DENG Jiazheng, LIU Yixin. Study on ultimate bearing capacity calculation method of rock foundation over cavern [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3): 820-826, 834.
- [3] 雷勇, 尹君凡, 陈秋南, 等. 基于极限分析法的溶洞顶板极限承载力研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1926-1932. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.011.  
LEI Yong, YIN Junfan, CHEN Qiunan, et al. Determination of ultimate bearing capacity of cave roof using limit analysis method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1926-1932. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.011.
- [4] 赵明华, 肖尧, 徐卓君, 等. 岩溶区嵌岩桩桩端承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1123-1129. DOI: 10.11779/CJGE201706019.  
ZHAO Minghua, XIAO Yao, XU Zhuojun, et al. Bearing capacity at tip of rock-socketed pile in karst areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1123-1129. DOI: 10.11779/CJGE201706019.
- [5] 马宾辉, 赵明华, 尹平保, 等. 岩溶区某桥梁桩基处治方案分析[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(2): 37-42. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2012.02.006.  
MA Binhui, ZHAO Minghua, YIN Pingbao, et al. Analysis of treatment methods for a certain bridge piles

- case in karst region[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2012, 28(2): 37-42. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2012.02.006.
- [6] 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. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.01.042.  
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. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.01.042.
- [7] 阳军生, 张军, 张起森, 等. 溶洞上方圆形基础地极限承载力有限元分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(2): 296-301. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2005.02.019.  
YANG Junsheng, ZHANG Jun, ZHANG Qisen, et al. Finite element analysis of ultimate bearing capacity of circular footing above karst cave [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 296-301. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2005.02.019.
- [8] 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(1): 4895735. DOI: 10.1155/2020/4895735.
- [9] 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[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(增刊1): 88-93. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2017.s1.016.  
WANG Wei, NIE Qingke, YUAN Wei, et al. Research on the effect of roof failure to the load-bearing characteristics of single pile penetrating karst cave [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(sup 1): 88-93. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2017.s1.016.
- [10] 张乾青, 乔胜石, 邢宇斌, 等. 穿越无充填溶洞时单桩承载特性研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(7): 186-196. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2022087.  
ZHANG Qianqing, QIAO Shengshi, XING Yucheng, et al. Study on bearing characteristics of single pile crossing unfilled karst cave [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(7): 186-196. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2022087.
- [11] 雷勇, 李鹏甲, 刘泽宇, 等. 岩溶区穿越溶洞基桩屈曲临界荷载计算方法与试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(12): 3347-3356. DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0377.  
LEI Yong, LI Pengjia, LIU Zeyu, et al. Method for calculation of buckling critical load of pile foundation crossing karst cave in karst area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(12): 3347-3356. DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0377.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [13] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [15] 苏冠峰, 贺国京, 易锦, 等. 多层溶洞对桥基竖向承载特性的影响分析[J]. *公路工程*, 2017, 42(1): 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.01.018.  
SU Guanfeng, HE Guojing, YI Jin, et al. Experimental study on the vertical bearing capacity of bridge pile in multi-layer cave [J]. *Highway Engineering*, 2017, 42(1): 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.01.018.
- [16] 邹新军, 唐国东, 赵明华. 串珠状岩溶区桩基沉降计算与稳定分析[J]. *建筑结构*, 2013, 43(13): 95-98. DOI: 10.19701/j.jzjg.2013.13.021.  
ZOU Xinjun, TANG Guodong, ZHAO Minghua. Settlement and stability analysis of pile foundation in string-beaded karst area [J]. *Building Structure*, 2013, 43(13): 95-98. DOI: 10.19701/j.jzjg.2013.13.021.
- [17] TENG W C. *Foundation design* [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1962.
- [18] CARRUBBA P. Skin friction on large-diameter piles socketed into rock [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(2): 230-240. DOI: 10.1139/t96-104.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩溶地区建筑地基基础技术标准: GB/T 51238—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standards for building foundations in karst area: GB/T 51238—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [20] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(责任编辑:石月珍)