

## 贯穿多层溶洞灌注桩荷载传递规律试验研究

高祁<sup>1</sup>, 张红尘<sup>2</sup>

(1. 中交四航局第六工程有限公司, 广东 珠海 519000; 2. 长沙理工大学 土木工程学院)

**摘要:**岩溶分布广泛,贯穿多层溶洞灌注桩的质量受到关注。该文设计杠杆加载装置,采用室内模型试验研究采用抛填片石法穿过溶洞时桩身轴力传递规律,结果表明:①土岩分界面面对桩身轴力传递产生显著的影响。桩身从土体进入岩体前,桩身轴力会增加,出现“超前”效应;②桩身采用抛填片石法穿过溶洞时,桩身扩径,轴力减小;桩身穿过多层溶洞时,溶洞段桩身轴力随溶洞位置的降低而减小;③桩顶竖向荷载作用下,溶洞段桩身一般不会率先破坏。上层溶洞底板岩体的厚度和强度越大,桩身承载力显著提高。溶洞位置越低,对桩身承载力的不利影响越小。

**关键词:**桩基工程;模型试验;荷载传递;轴力

## 1 前言

岩溶分布广泛,2017年11月3日中国地质调查局岩溶地质研究所研究得出,全球岩溶地区面积约占陆地面积的12%,约为2000万km<sup>2</sup>。在亚洲,中国是岩溶分布最广泛的国家,岩溶区总面积约为344万km<sup>2</sup>,占中国陆地面积的35.8%,其中裸露面积约为90.7万km<sup>2</sup>,占陆地国土面积的9.5%,中国西南岩溶地区连片集中分布(贵州、云南、广西、湖南、四川、重庆、湖北、广东等省区市),面积达75.5万km<sup>2</sup>。中国部分省(自治区)岩溶分布情况见表1。

表1 中国部分省岩溶分布统计

| 省(自治区) | 面积/( $\times 10^4$ km <sup>2</sup> ) | 占全省面积/% | 省(自治区) | 面积/( $\times 10^4$ km <sup>2</sup> ) | 占全省面积/% |
|--------|--------------------------------------|---------|--------|--------------------------------------|---------|
| 贵州     | 14.48                                | 82.19   | 重庆     | 7.84                                 | 94.95   |
| 云南     | 21.20                                | 55.19   | 湖南     | 9.55                                 | 44.96   |
| 广西     | 12.75                                | 53.83   | 湖北     | 10.03                                | 53.85   |
| 四川     | 27.38                                | 56.53   | 广东     | 2.31                                 | 13.05   |

湖南地区岩溶主要分布在湘西北、湘中与湘东南,其中湘西北数量最多、规模最大,且溶洞主要分布在湘江、资水、沅江与澧水流域的上游。地表出露位置高的断裂(带)附近、特定的断裂带结构发育区和多组裂缝发育区往往是岩溶现象集中成带分布区。

随着基础设施建设不断推进,岩溶地区必然建设桩基础,基桩底部可能有溶洞、基桩可能贯穿溶洞、基桩旁侧可能有溶洞,溶洞对基桩的影响引起了众多学者的关注。赵明华等结合理论分析与数值模拟等方法,研究溶洞顶板厚度对桩端承载力的影响,并提出相应的桩端承载力计算公式;刘洋等以超载系数为目标函数,考虑水平地应力对溶洞顶板承载力的影响,提出溶洞顶板的影响范围;张智浩等基于室内模型试验,提出岩溶区嵌岩桩可能发生冲切破坏、冒落区塌落破坏、扇形塑性区破坏和撕裂破坏4类破坏模式;Pells等依据工程特点,推导出岩溶地区桥梁桩基嵌岩深度计算公式;王忠福等对不同工艺大直径深长钻孔灌注桩进行竖向荷载现场试验研究,结果表明不同工艺下桩承担荷载方式不同;黄明等采用数值方法分析串珠状岩溶桩的桩基荷载传递规律与溶洞稳定性,获得不同岩层厚度与溶洞跨度比下的岩层破坏模式;刘莎等基于双折线模型,建立穿过多层溶洞桩的荷载传递微分方程,采用数值模拟研究武汉市某串珠状岩溶桩竖向承载特性,获得相应的破坏模式;龚平等采用自平衡法测试岩溶区汝(城)郴(州)高速公路赤石特大桥主塔下直径 $\phi 3.1$  m、长度95 m的超长大直径钻孔灌注桩承载力和桩身轴向应力,认为桩侧存在溶沟溶洞时,充分发挥桩侧摩阻力需要很大的桩土相对位移,计算桩的承载力时,桩侧若是溶沟,其侧摩阻力可以忽略不计或者考虑折减;张福友等依据岩溶地区特点,提出一种新型

收稿日期:2021-11-30(修改稿)

基金项目:湖南省交通科技项目(编号:202019)

作者简介:高祁,男,高级工程师.E-mail:644862573@qq.com

异形灌注桩模型,认为新型异形灌注桩具有较强的承载能力。

综上所述,岩溶桩基的现有研究主要集中于结合理论分析与数值模拟分析持力层内溶洞的稳定性、基于室内模型试验研究岩溶区嵌岩桩破坏模式、采用数值方法分析串珠状岩溶桩的荷载传递规律、采用现场试验研究岩溶桩承载力,贯穿多层溶洞灌注桩荷载传递规律的室内模型试验研究很少。该文开展室内模型试验,研究贯穿多层溶洞灌注桩荷载传递规律,为岩溶地区灌注桩基础的设计与施工提供指导。

## 2 模型试验设计

实际岩溶区桩基工程中,浅表常有一定厚度的残坡积层,碳酸盐岩中发育1层或者多层溶洞,岩土界面和地表常常倾斜,如图1所示。

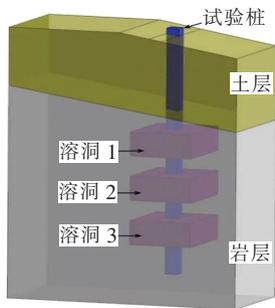


图1 岩溶区桩基示意图

### 2.1 试验方案

参照图1设计模型试验,试验在模型箱进行。模型箱内尺寸为750 mm(长)×350 mm(宽)×1100 mm(高),外骨架采用角钢焊接而成,内部四周由木板切割而成,模型布置如图2所示。试验设置穿过3个等间距、等大小溶洞的模型桩,研究在桩顶施加多级竖向荷载下桩身的承载特性。桩身长度1000 mm,其中岩面下长度为670 mm,土层内桩身长度为300 mm,露出土体表面桩身长度为30 mm。土层表面与岩层表面均设置坡度为12°。为减小边界效应对试验的影响,在灌注基岩前用凡士林涂抹模型箱壁并用聚乙烯薄膜覆盖。

加载系统采用杠杆。用螺栓将一对角钢固定在模型箱体顶面,杠杆一端(宽度为28 mm)与角钢铰接,杠杆保持水平且底面接触桩顶的桩帽,挂钩悬挂在杠杆另一端,挂钩托盘上安装标准砝码。标准砝码的重量通过杠杆施加在桩帽上,再传递到桩顶,实现桩顶竖向恒定加载。

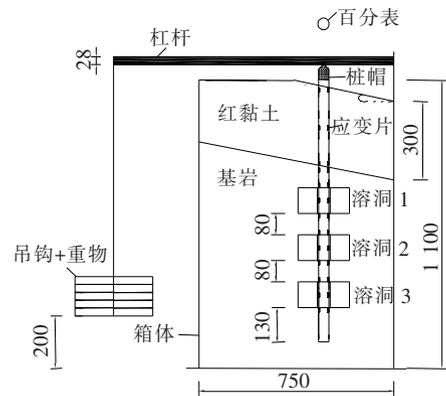


图2 模型试验布置示意图(单位:mm)

测读系统采用百分表和应变计。桩帽上安装电子百分表,获得桩顶沉降量。桩身应变片连接TDS-540型应变仪,获得桩身轴力传递规律。

### 2.2 模型土与模型桩

上部土体采用红黏土。在试验场地附近取材,经曝晒、碾碎、采用5 mm筛网筛分、继续曝晒,将土粒直径控制在5 mm以内,含水率尽量维持0。

下部石灰岩采用水泥石膏砂浆模拟。细砂、325号水泥、石膏、水的配合比为21:7:3:5,用搅拌机充分搅拌,分批灌入模型箱。

模型桩采用方形截面PVC管,内壁粘贴应变片。模型桩长度为1 m,外壁边长为40 mm,内壁边长为31 mm,壁厚为4.5 mm。制作时,将方形PVC管人工切成两个半合管,在半合管内壁对应土-岩交界面、溶洞中部粘贴应变片,其他位置适当粘贴应变片,将导线焊接在应变片端部,用万用表测试应变片的有效性,最后用环氧树脂将两个半合管黏结在一起。经测试,PVC模型桩的弹性模量为 $3.3 \times 10^6$  kPa,泊松比为0.38,重度为 $13.8 \text{ kN/m}^3$ 。

模型桩贴片主要步骤:打磨并清洗桩身贴片面→涂抹薄层环氧树脂→24 h后打磨环氧树脂表面并进行清洗→粘贴应变片并连接好导线→对应应变片涂抹705胶→涂抹环氧树脂。

溶洞内模型桩与溶洞的制作:在溶洞内模型桩四周对应溶洞位置粘贴厚度为4.5 mm的PVC材质贴片,模拟桩体扩径现象;用11 mm厚木板制作3个尺寸均为240 mm(长)×200 mm(宽)×100 mm(高)的空心木盒模拟溶洞;桩体扩径部位固定在3个方盒空腔内,模拟模型桩贯穿3个串珠状溶洞。制成的模型桩见图3。

桩帽设置:模型桩内壁应变片的导线较多,为避免导线被压破,在桩顶设置预留空腔的桩帽,导线通过空



图 3 模型桩实物图

腔引出、砝码荷载通过杠杆传递到桩帽和桩顶。

安装时,将搅拌均匀的水泥石膏砂浆灌入模型箱 70 mm,将模型桩支撑、固定、保持垂直,继续灌注 700 mm,养护 24 h。修整顶面,使桩身露出 330 mm、形成  $12^\circ$  的光滑斜坡,继续自然养护 28 d。将红黏土分 3 层填筑,每层填筑时,用 5 kg 标准砝码从相同高度落下相同次数夯实,确保压实度一致。安装后,红黏土和水泥石膏砂浆的参数见表 2。

表 2 模型土参数

| 名称  | 重度/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 压缩模<br>量/MPa | 内摩擦<br>角/ $(^\circ)$ | 黏聚力/<br>kPa |
|-----|--|--------------|----------------------|-------------|
| 红黏土 | 18.0                                       | 12.5         | 18.15                | 36.21       |
| 石灰岩 | 20.4                                       | 2 400.0      | 40.30                | 350.00      |

注:红黏土含水率为 0,土粒直径小于 5 mm。

### 2.3 加载与测试

加载与测试参照 JGJ 106—2014《建筑桩基检测技术规范》。设计 10 级加载,其中施压钢筋与挂钩重量作为第 1 级荷载(经计算,第 1 级荷载约等于挂钩上悬挂 5 kg 砝码),之后在挂钩上每级悬挂 5 kg 砝码,悬挂 9 级后砝码质量为 45 kg。采用慢速维持荷载法,每级加载 5、15、30、45、60 min 后记录电子百分表的读数并采集瞬时应变,以后每 30 min 测读 1 次。稳定标准为:60 min 内沉降不超过 0.1 mm,并连续出现 2 次。

## 3 模型试验结果与分析

### 3.1 桩顶荷载—沉降曲线

图 4 为试测桩顶荷载—沉降曲线。根据杠杆比计算悬挂砝码质量与桩顶荷载的关系,悬挂 5 kg 砝码等效于对桩顶施加 200 N 竖向荷载。

由图 4 可知:桩顶荷载—沉降曲线整体近似为一条直线,桩顶沉降随着悬挂砝码质量的增加不断增加,最大沉降为 0.275 mm。此规律符合桩顶荷载—沉降曲线规律,说明此次试验的加载、位移测试系统可靠。

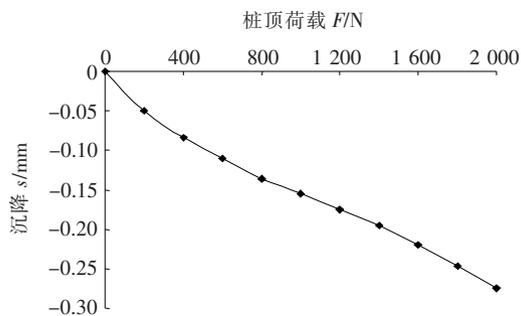


图 4 桩顶荷载—沉降曲线

### 3.2 桩身轴力传递规律

通过 TDS-540 测量并保存每级桩顶加载下桩身截面两侧应变值,求和取平均后得出平均应变值  $\epsilon_i$ ,通过式(1)得出每级加载下各测点的桩身轴力值:

$$F = \epsilon_i EA_i \quad (1)$$

式中: $\epsilon_i$  为桩身应变; $A_i$  为测点处桩身截面面积 ( $\text{m}^2$ ); $E$  为桩弹性模量 (Pa),实测弹性模量  $E = 3.3 \times 10^6$  kPa。

3 个溶洞高度均为 100 mm,空腔内仅在中心处粘贴应变片,分别离桩顶 460、640、820 mm,13 组应变片离桩顶的距离分别为 55、180、305、355、385、460、535、565、640、715、745、820、895 mm。图 5 为各级荷载下轴力随深度传递规律。

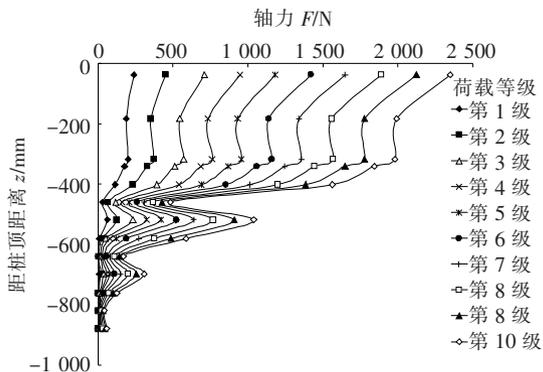


图 5 各级荷载下轴力随深度传递规律

由图 5 可知:

(1) 土体和岩体中,整体线形上,桩身轴力沿深度衰减,符合桩身轴力传递的基本规律,也说明测试方法正确、结果可靠。

(2) 土岩分界面对桩身轴力传递产生显著的影响。桩身从土体进入岩体前,桩身轴力增加,出现“超前”效应。

(3) 溶洞对桩身轴力传递产生显著的影响。一方面,桩身穿过溶洞时,轴力减小;另一方面,桩身穿过多层溶洞时,溶洞段桩身轴力随溶洞位置的降低而减小。

分析认为,溶洞处模型桩周围粘贴的厚度为4.5 mm的PVC片承受了岩体的支承力,从而减小了桩身轴力。

### 3.3 桩身侧摩阻力变化规律

根据应变片数据,通过式(2)求得某一段长度桩身侧摩阻力平均值:

$$q_s = \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (2)$$

式中: $q_s$ 为某段长度桩身侧摩阻力平均值(kPa); $\Delta P$ 为该段上、下截面轴力之差(kN); $\Delta F$ 为该段长度桩侧表面积( $m^2$ )。

选择沿桩身长度方向相邻两个应变片的轴力值求 $\Delta P$ ,因为应变片本身具有一定长度,所以选择应变片中点作为某段桩起点或终点,相邻两个应变片中点之间的距离为某段桩的长度。

图6为模型桩在各级荷载下的侧摩阻力—深度关系变化图。

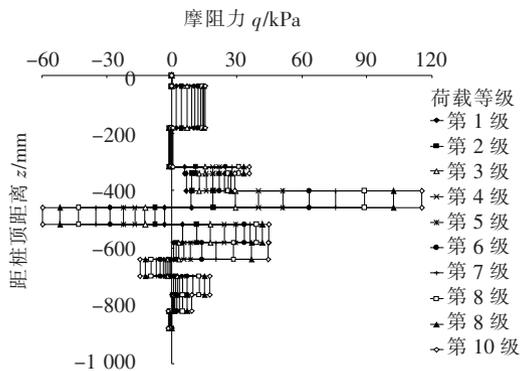


图6 各级荷载下侧摩阻力随深度变化规律

由图6可知:

(1) 桩身从土体进入岩体前( $z=180\sim 305$  mm)出现负摩阻力,实际属于“超前”效应。

(2) 桩身从溶洞进入岩体前( $z=460\sim 535$ 、 $640\sim 715$ 、 $820\sim 895$  mm)出现负摩阻力,客观上不可能,实际上,溶洞内桩身应变相同。

### 3.4 工程启示

岩溶地区桩基工程中,基桩穿过溶洞常常采用抛填片石法或者套管法。抛填片石法常常使桩径扩大。基于轴力传递规律,推理认为:

(1) 桩顶竖向荷载作用下,溶洞段桩身一般不会率先破坏。

(2) 上层溶洞底板岩体的厚度和强度越大,桩身承载力显著提高。

(3) 溶洞位置越低,对桩身承载力的不利影响越小。

## 4 结论

(1) 土岩分界面对桩身轴力传递产生显著的影响。桩身从土体进入岩体前,桩身轴力会增加,出现“超前”效应。

(2) 溶洞对桩身轴力传递产生显著的影响。桩身采用抛填片石法穿过溶洞时,桩身扩径,轴力减小;桩身穿过多层溶洞时,溶洞段桩身轴力随溶洞位置的降低而减小。

(3) 桩顶在竖向荷载作用下,溶洞段桩身一般不会率先破坏。上层溶洞底板岩体的厚度和强度越大,桩身承载力显著提高。溶洞位置越低,对桩身承载力的不利影响越小。

### 参考文献:

- [1] 周宇成,陈清华,孙珂,等. 湖南地区岩溶分布特征及其发育模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020(4).
- [2] 赵明华,朱志仁,黄明华,等. 考虑基桩嵌岩段侧阻的岩溶区顶板安全厚度计算[J]. 岩土力学,2018(11).
- [3] 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(1).
- [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(6).
- [5] 刘洋,郑俊杰,曾彦. 基于极限分析下限法的溶洞顶板承载力研究[J]. 岩土工程学报,2019(S2).
- [6] 张智浩,张慧乐,马凛,等. 岩溶区嵌岩桩的破坏模式与工程设计探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2013(S2).
- [7] PELLIS P J N, TURNER R M. Elastic Solutions for the Design and Analysis of Rock-Socketed Piles [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(3): 481-487.
- [8] 王忠福,刘汉东,贾金禄,等. 大直径深长钻孔灌注桩竖向承载力特性实验研究[J]. 岩土力学,2012(9).
- [9] 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(6).
- [10] 刘莎,李云安,董骏,等. 武汉市某串珠状岩溶区桩基稳定性分析[J]. 低温建筑技术,2015(12).
- [11] 龚平,廖辉煌,周栋梁,等. 岩溶地质桩基自平衡静载实验研究[J]. 中外公路,2012(3).
- [12] 张福友,冯健雪,陆志宇,等. 喀斯特地区新型异形灌注桩承载特性与影响因素实验研究[J]. 长江科学院院报,2021(2).
- [13] 周德泉,罗坤,冯晨曦,等. 一种室内土工模型实验装置: 中国, ZL201520323607.3[P]. 2015-08-26.
- [14] JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S].