文章编号：1671-8496-(2026)-04-0039-09

岩溶地区桥梁工程桩基竖向承载特性研究

林卓轩
（广东冠粤路桥有限公司，广东 广州 511400）

摘　要：针对岩溶地层对桩基承载性能的影响及其给桩基设计带来的问题，采用物理模型试验与数值模拟相结合的方法，系统研究贯穿型溶洞桩基的竖向承载特性，定量分析溶洞几何尺寸对桩基承载性能的影响规律与力学机制。物理模型试验表明：在最大荷载20 kN作用下，溶洞高度从桩径的2倍增加到4倍时，桩顶沉降增大13.3%，桩端承载力提高12.3%；溶洞宽度从桩径的3倍增加到6倍时，桩顶沉降和桩端承载力分别增大5.0%和6.5%。数值分析结果表明：随着桩顶荷载增加，溶洞顶部形成拱形的拉伸破坏区域并逐渐扩大，该区域内的岩体破坏导致岩层与桩基的附着力下降，进而降低桩基的承载力。模型试验结果与数值分析结果相符，验证了二者的一致性。研究成果可为岩溶地区桥梁工程嵌岩桩基的设计提供科学依据及参考。

关键词：岩溶；桩承载力；物理模型试验；数值分析；承载特性
中图分类号：U443.15；TU473.1　　**文献标识码**：A

Research on the Vertical Bearing Characteristics of Bridge Pile Foundations in Karst Areas

LIN Zhuoxuan
(Guangdong Guanyue Road and Bridge Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China)

Abstract: To address the impact of karst formations on the bearing capacity of pile foundations and the challenges they pose for pile foundation design, a combined approach of physical model testing and numerical simulation was employed to systematically investigate the vertical bearing characteristics of pile foundations penetrating karst cavities. This study quantitatively analyzed the patterns and mechanical mechanisms by which the geometric dimensions of the cavities influence the bearing capacity of the pile foundations. Physical model tests showed that under a maximum load of 20 kN, when the cave height increased from 2 times to 4 times the pile diameter, the settlement at the pile cap increased by 13.3%, and the bearing capacity at the pile tip increased by 12.3%; when the cavity width increased from 3 times to 6 times the pile diameter, the settlement at the pile cap and the bearing capacity at the pile tip increased by 5.0% and 6.5%, respectively. Numerical analysis results show that as the load at the pile head increases, an arched tensile failure zone forms at the top of the karst cavity and gradually expands; rock failure within this zone leads to a decrease in the bond strength between the rock layer and the pile foundation, thereby reducing the pile foundation's bearing capacity. The results of the model tests are consistent with those of the numerical analysis, verifying their agreement. These research findings provide a scientific basis and reference for the design of rock-embedded pile foundations in bridge engineering projects in karst regions.

Key words: karst; pile bearing capacity; physical model test; numerical analysis; bearing characteristics

岩溶地貌，亦称喀斯特地貌，是一种由地下水和地表水溶解可溶性碳酸盐岩、石膏及岩盐而发育的地质地貌，在其形成过程中会在岩层内产生裂缝和溶洞；对于易受岩溶地貌影响的地区，

收稿日期：2025-08-25
作者简介：林卓轩，工程师，本科，研究方向为公路工程施工管理

应综合考虑基础设施施工过程中可能出现的溶洞，评估其带来的不利影响[1]。由于各类地质因素的影响，岩溶地区公路桥梁等基础设施的建设极为复杂，岩溶地区基础上部传递的荷载会破坏溶洞顶部并导致地面变形等问题，而钻孔桩可以减少基础设施的不均匀沉降和溶洞的不利影响，因此其在岩溶地区得到了广泛应用[2]。

岩溶溶洞对桥梁基础的施工有显著影响，会导致桩基础的承载能力降低、稳定性降低，从而引起桥墩不均匀沉降和表面塌陷等问题[3]。当溶洞顶部的岩层厚度不能满足极限荷载作用下的承载要求时，桩基需穿透溶洞以满足承载要求。龚先兵等[4]基于广义 Hoek-Brown 准则、溶洞顶临界厚径比的极限分析方法和物理模型试验，分析了溶洞顶岩层厚度对岩溶地区嵌岩桩竖向承载力的影响。何庆华等[5]对溶洞顶板支护边界进行简化，并基于板壳理论计算简化模型，得到了单侧支护条件下桩顶下溶洞顶板安全厚度确定的理论计算公式。

目前对桩基承载机理的研究较为零散，关于桩基竖向承载力的研究尚处于起步阶段。因此，探明桥梁桩基的竖向承载机制、掌握岩溶地区桥梁桩基的荷载传递规律成为亟待深入开展的研究方向。李宇杰等[6]通过离心模型试验和敏感性理论模型研究了钻孔桩的竖向承载特性，发现增加桩高、桩跨、桩孔数均对桩的竖向极限承载力产生不利影响。冯忠居等[7]采用有限元法建立了溶洞桩基三维分析模型，系统分析了不同顶板厚度、不同溶洞大小和位置对不同工况下桥梁基础承载力的影响。雷勇等[8]对岩溶地区桥梁桩基承载特性进行静载试验，建立了不同竖向荷载作用下的承载特性变化机制，并提出了嵌岩桩深度优化方法。近年来，结构健康监测与性能评估领域的前沿方法为桩基工程研究提供了新的思路。例如，基于 Hilbert-Huang 变换与理想带通滤波器的系统识别方法[9]能够精准提取结构动态响应特征，为桩基荷载传递规律的动态监测提供技术支撑；基于非参数贝叶斯方法的结构损伤识别研究[10]可实现桩基在复杂地质条件下的损伤定位与程度评估；基于稀疏贝叶斯学习与改进D-S 证据理论多源数据融合的结构性能评估[11]为整合桩基静载试验、数值模拟等多源数据提供了可靠方法；考虑结构极限状态随机性的多维易损性分析[12]则为量化岩溶地区桩基在不确定因素下的失效风险提供了理论框架。然而，在确定桩基竖向承载力时，多数学者都集中在研究某一特定厚度下溶洞顶部岩层的承载力或稳定性，或根据设计荷载计算其安全厚度[13]，贯穿溶洞的桩基承载特性的相关研究较少，因此，亟需开展溶洞桩基础模型的试验研究。

本文结合岩溶地区广佛肇高速大旺高架桥桩基工程，基于相似原理设计了物理模型试验，研究贯穿溶洞的桩基承载力。通过 2 组 6 根单桩贯穿溶洞桩基的模型试验，得到不同溶洞高度和宽度下桩顶荷载与桩顶沉降的关系曲线以及桩端荷载与桩沉降的关系曲线，进而分析不同条件下单桩的承载特性。在试验模型的基础上，开展数值模型分析，研究贯穿溶洞的桩基承载力传递机理，并对试验结果与数值模拟结果进行了对比验证。本研究可为岩溶地区桥梁工程桩基的设计提供参考。

1 物理模型试验

1.1 相似比

根据相似原理进行物理模型试验。试验涉及的物理量主要包括桩体几何尺寸、材料强度、弹性模量、应力、应变等，相关参数通过对广佛肇高速大旺高架桥桩基工程进行现场地质勘探获得，具体如表 1 所示。

为保证模型试验的可靠性，对模型试验的相似比进行调研。根据调研结果，本试验的几何相似比 α_D 为 30，材料密度相似比 α_ρ 为 1.5。当应变和泊松比均为 1 时，φ、ε、σ 和 c 的相似比分别设为 $\alpha_\varphi = 1$、$\alpha_\varepsilon = 1$、$\alpha_\sigma = 45$ 和 $\alpha_c = 45$，上述材料参数如表 2 所示。骨料为石英砂，采用水泥和石膏作为胶凝剂。为保证模型试验中材料物理参数的有效性，通过匹配试验确定所需相似材料的参数拟合比。

表 1 实际工程的相关物理参数

材料	密度 ρ/（g/cm^3）	强度 σ_c/MPa	弹性模量 E/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/°
强风化石灰岩	2.48	28.3	3 000	800	32
中风化石灰岩	2.70	88	14 000	1 200	38
桩	2.48	—	24 000	2 060	—

表 2　模型试验中相似材料的物理参数

相似材料	密度 ρ/(g/cm^3)	强度 σ_c/MPa	弹性模量 E/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/°
强风化石灰岩	1.67	28.3	66.67	17.77	32
中风化石灰岩	1.80	88	311.11	26.67	38
桩	1.67	—	533.33	45.7	—

1.2 模型试验方案设计

1.2.1 模型简化

考虑模型的尺寸效应，试验中原型的所有组成部分根据几何相似比（$\alpha_D = 30$）等比例缩小，桩基对周围岩体的作用范围为桩径的 5 ~ 10 倍。此外，本文做以下合理假设：将溶洞简化为规则的矩形，桩基础贯穿溶洞；假定岩层内部均匀连续，不存在裂缝或岩石节理等现象，岩层间差异明显；桩基为理想的均匀圆柱形复合结构，桩端荷载与桩顶荷载相似。

1.2.2 预制模型试验系统

桩基模型试验系统主要由模型试验装置、加载系统及数据采集系统组成，如图 1 所示。模型试验装置由模型试验台组成，数据采集系统由位移计、应变计、土压箱、静态应变计和后处理软件组成，加载系统包括顶升反作用力加载装置和向模型桩施加压力的反作用力框架。广佛肇高速大旺高架桥沿线的岩体包括 8 m 的强风化岩层、18 m 的中风化岩层和下面约 20 m 的弱风化岩层，其物理力学参数根据前期调研取得；桩基采用直径为 1 m、长度为 18 m 的钻孔桩，桩未嵌入弱风化岩层。在此基础上，建立了岩溶地区嵌岩桩基础的物理模型，模型箱采用 20 mm 厚的亚克力板制作，长度为 1.2 m，宽度为 0.9 m，高度为 0.9 m。为了保证模型箱的长期性能，在模型箱的中间放置隔板，其宽度可根据试验要求进行调节。桩基模型采用相似材料制成，尺寸为 3.3 cm × 60 cm。岩溶岩层采用最佳混合比例进行分层和充填，中风化岩层为工程原型中的承重层，其位于模型箱的底部，厚度为 60 cm；模型箱顶部的强风化岩层厚度为 27 cm。试验布置如图 2 所示。

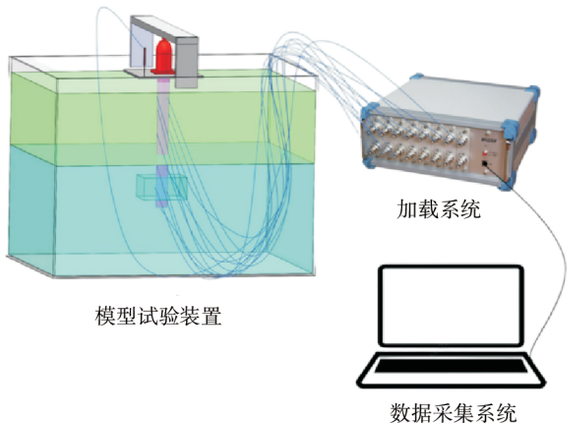
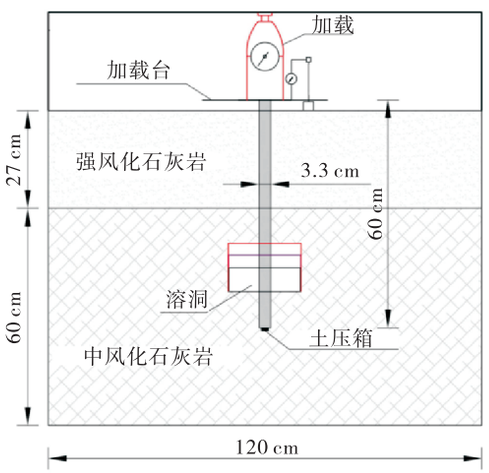
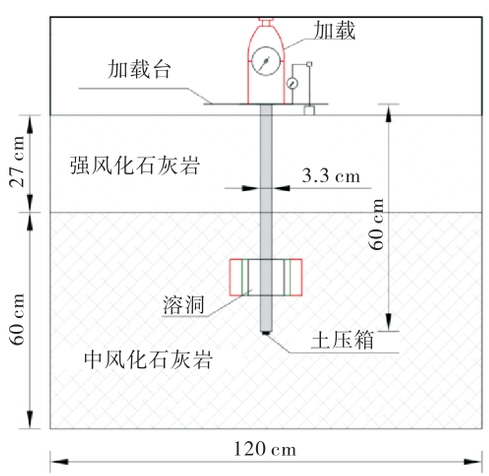


图 1　物理模型试验系统



（a）变溶洞高度



（b）变溶洞宽度

图 2　试验布置示意图

1.2.3 监测元件及加载设备安装

试验中使用的主要设备包括应变测量仪、应变计、百分表、土压计、模型箱和反力加载装置。试验中监测的关键参数包括桩顶沉降、桩端阻力、桩截面轴向力，各参数测量方法如下：

（1）桩顶沉降。桩顶沉降由百分表测量（量程 30 mm），在试验开始前进行校准。

（2）桩截面轴向力。通过测量桩的应变和抗弯刚度来确定的，应变片在模型桩的前后两侧对称放置，每侧均匀布置6个，共12个应变片，每个应变片的尺寸为3 mm×5 mm。在试验过程中，当每个阶段的荷载达到稳定时，采用动阻应变片和静阻应变片测量桩体各点的应变数据。随后计算相应截面的应力和轴向力。通过计算每一截面两侧的应变值，可得截面 i 的平均应变和轴向力，公式如下：

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2}}{2} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

$$N_i = E_p A \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (2)$$

式中，ε_i 为第 i 段对应的应变值，ε_{i1}、ε_{i2} 为第 i 段对称两侧的应变值，E_p 为桩体弹性模量，A 为桩的截面积，N_i 为第 i 段桩体轴向力。

（3）桩侧阻力。图3为桩侧阻力计算原理图。桩身单元两端轴向力可按式（2）计算，且根据静力平衡条件，由式（3）可推导出桩侧单元的平均侧阻力。

$$q_{si} = \frac{N_i - N_{i+1}}{\pi d l_i} \quad (3)$$

式中，q_{si} 为第 i 段桩侧摩阻力单元，N_i 为第 i 段桩身上端轴向力单元，N_{i+1} 为第 i 段桩下端轴向力单元，l_i 为第 i 段桩长单元，d 为模型桩直径。

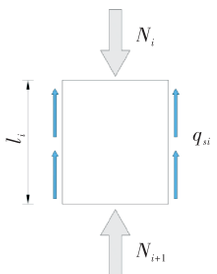


图3 桩侧阻力计算简图

（4）桩端阻力。在桩的底部安装土压计以测量桩端阻力。进行模型试验前，对土压计进行校准，确保测量准确性。

1.3 桩顶竖向加载装置

本试验采用自重加载，为了模拟实际工况并保证试验数据的准确可靠，试验时须满足以下三个要求：①桩顶面平整，桩顶中心线与桩轴上部中心线对齐。②在桩顶放置一块厚度为3 mm的方形亚克力板作为垫层，保证压力均匀分布，避免应力集中。③在浇筑桩的过程中，将其放置在指定位置并固定，当桩体材料达到一定强度则拆除固定装置。

按照《建筑基桩检测技术规范》（JGJ 106—2014）对桩基进行抗压试验。采用逐级施加荷载，待每级荷载达到相应的沉降要求后，再进行下一级荷载试验，直至桩体破坏。考虑到试验所用相似材料的弹性模量、抗压强度和其他物理量与实际工程测量结果之间的比例关系，本试验的加载设计由10级增量加载组成，从0 kN开始加载，增量为每级2 kN。当桩顶每半小时沉降量不超过0.1 mm，且沉降率相对稳定时，施加下一级荷载。在每次加载结束后的5 min、15 min、30 min测量桩顶沉降，并测量其应变数据。

1.4 试验步骤

本试验按照以下步骤进行：①根据前述比例设计，称量模拟岩层所需的物料，加入物料重量3/14的水进行拌合。②模拟岩层填充过程，每次充填厚度保持在10 cm左右，随后进行压实和找平，以提高材料之间的紧密性，确保没有空隙或溶洞。③将溶洞模型定位在指定位置，在溶洞的顶部和底部钻孔，使桩基模型贯穿溶洞，形成溶洞桩基模型。④模型浇筑时，使用辅助夹具将桩基模型固定在合适位置。将填充材料均匀分布在桩基周围并压实，使桩基保持相对垂直状态。⑤模型浇筑完成后，在初始选材试验相同的温度和湿度环境中养护14 d，然后进行后续加载试验。⑥达到规定的养护时间后，对模型进行拆卸。安装测量设备，采用慢速持续加载法进行加载。试验完成后，清理试验场地，整理试验数据。

1.5 数据处理与结果分析

本研究共测试了两组共6个单桩模型，分析了不同溶洞高度和宽度下单桩的承载特性，试验方案如表3所示。根据试验数据生成了 Q-s 曲线、Pb-s 曲线和轴向力分布曲线（图4至图6）。

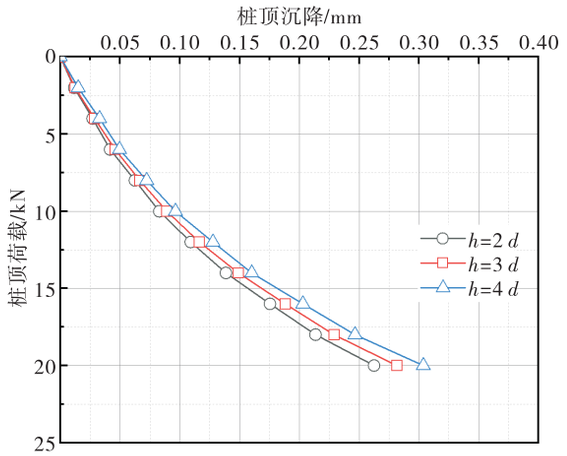
表3 模拟加载试验方案

溶洞高度 h/cm	溶洞宽度 D/cm	桩径 d/cm	溶洞底部距桩底的距离/cm
10	10、13.3、20	3.3	10
6.7、10、13.3	20	3.3	10

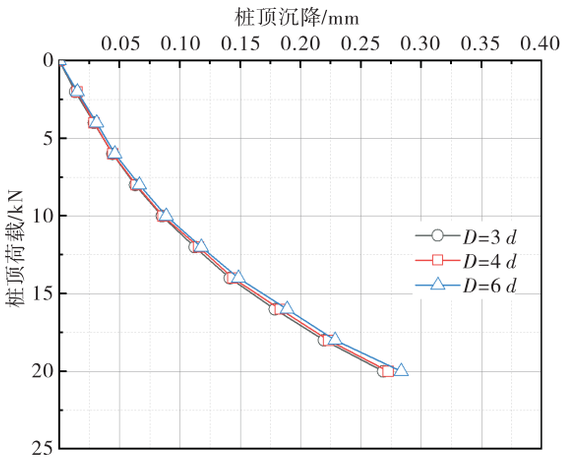
1.5.1 桩顶荷载与沉降的关系

从图4可以看出，在不同溶洞高度下，荷载相对较小时，桩顶沉降明显增大。在荷载 Q=20 kN作用下，当溶洞高度 h 从2d增加至4d时，桩顶沉降增大约13.3%。同样，在相同荷载 Q=20 kN

作用下，当溶洞宽度 D 从 $3d$ 增加至 $6d$ 时，桩顶沉降增大约 5.0%。因此，根据 *Q-s* 试验曲线可以推断，溶洞高度和溶洞宽度对桩基承载特性均有影响，且溶洞高度的影响更为显著。



（a）不同溶洞高度



（b）不同溶洞宽度

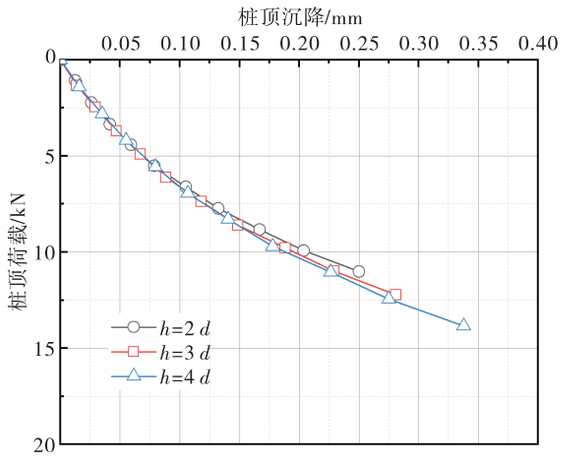
图 4　单桩桩顶 *Q-s* 曲线

1.5.2 桩端荷载与沉降的关系

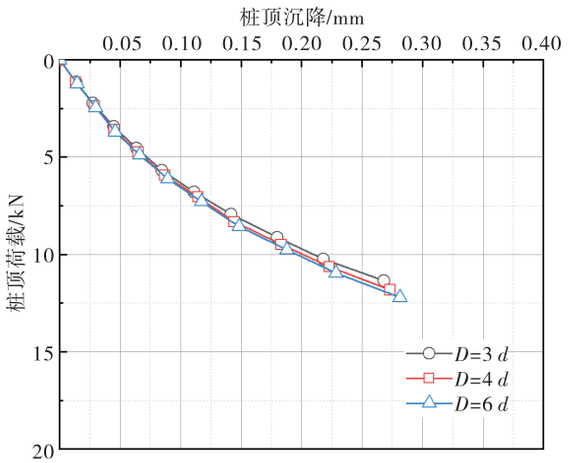
从图 5 可以看出，在相对较小的荷载下，桩端阻力与桩沉降的关系曲线逐渐变化。荷载不变时，桩端承载力随着溶洞高度的增加而逐渐增大。以桩顶荷载 $Q=20$ kN 为例，当溶洞高度 h 从 $2d$ 增加至 $4d$ 时，桩端承载力提高约 12.3%。同样，当溶洞宽度 D 从 $3d$ 增加至 $6d$ 时，桩端承载力增加约 6.5%。因此，*Pb-s* 试验曲线表明，溶洞高度和溶洞宽度对桩端的承载力均有影响，但溶洞高度的影响更大。

1.5.3 单桩轴向力分布

根据桩基各截面的应变值，计算桩的各截面轴向力。不同的溶洞宽度和溶洞高度工况下，桩身轴向力的分布规律相近，因此在分析时根据相



（a）不同溶洞高度



（b）不同溶洞宽度

图 5　单桩桩顶 *Pb-s* 曲线

似比原则对溶洞尺寸进行等比例放大，选取对应溶洞尺寸 $h\times D=3\text{ m}\times 6\text{ m}$ 的轴向力曲线，如图 6 所示。当桩顶荷载较小时，其主要由桩侧阻力承载，在强风化岩与中风化岩的交界处，轴向力降低较快，而在溶洞段，桩身轴向力几乎不降低，本次模型试验中桩端阻力大于桩侧阻力，桩基表现为摩擦端承桩的特点。

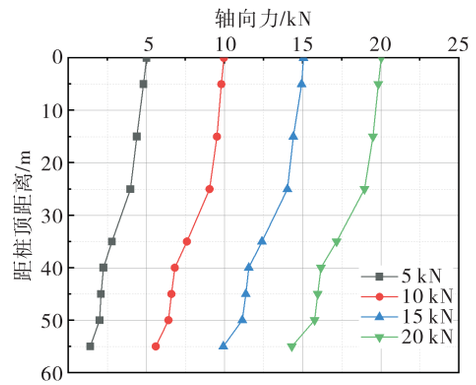


图 6　桩身轴向力分布曲线（$h\times D=3\text{ m}\times 6\text{ m}$）

2 数值模拟分析

2.1 模型创建

在前述物理模型试验的基础上，采用ABAQUS软件进行数值模拟，分析钻孔灌注桩的承载特性。建立的有限元模型如图7所示，模型在X和Y方向的尺寸均为15 m，在Z方向为36 m，可有效避免边界效应。根据实际工程和试验模型的地质条件，模型中的模拟地层由两层组成：上层为强风化石灰岩，厚度为8 m；中间层为中风化石灰岩，厚度为28 m。采用八节点六面体线性缩减积分单元（C3D8R）对模型进行网格划分。为保证计算精度，避免发生应力集中，对靠近洞室和桩侧的区域网格进行加密。在试验模型的基础上，将溶洞简化为规则矩形。此外，为保证模拟结果可靠，对溶洞和桩基周围的网格进一步细化。

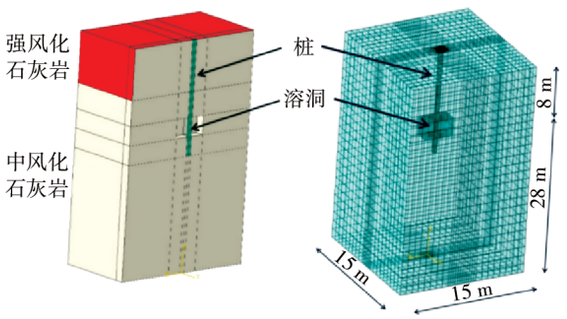


图7 有限元分析模型

采用合适的边界条件是保证数值分析结果可靠性的必要前提。在本研究中，模型的顶部完全自由，而模型的四个垂直边缘在其法线方向上完全约束，但可以在垂直方向上自由移动；模型的底部在所有三个方向上完全约束。

2.2 桩土相互作用模拟

桩土相互作用可分为正向相互作用和切向相互作用两部分；采用库仑摩擦模型来模拟桩土接触面之间的相对滑动，摩擦系数μ表征接触面之间的摩擦行为，切向运动保持为零，直到表面牵引力达到临界剪应力值τ_{crit}。临界剪应力取决于接触面之间的法向接触压力。

$$\tau_{\text{crit}} = \mu p \tag{4}$$

2.3 本构模型及参数

本研究数值模拟分析中共涉及三种材料：砾石、石灰石和桩。采用线弹性模型模拟桩的轴向荷载响应，采用莫尔－库仑（MC）模型作为砾石和石灰石的本构模型。MC模型的定义如下：

$$\tau_n = c - \sigma_n \tan\varphi \tag{5}$$

式中，τ_n为极限抗剪强度，c为黏聚力，φ为内摩擦角，σ_n为剪切面法向应力。在平面应力状态下，MC屈服判据可表示为：

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\sin\varphi - c\cos\varphi = 0 \tag{6}$$

其中σ_1和σ_3分别为最大主应力和最小主应力。利用应力不变量，MC屈服准则可表示为：

$$\frac{I_1\sin\varphi}{3} + \sqrt{J_2}\sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \sqrt{\frac{J_2}{3}}\cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\sin\varphi - c\cos\varphi = 0 \tag{7}$$

其中I_1是应力张量的第一不变量，J_2是偏应力张量的第二不变量。

在ABAQUS计算过程中，有限元模型采用连续光滑的椭圆函数作为塑性势面，可避免计算模型边角处可能出现的尖端奇异问题[14]。采用MC模型对桩周岩层和桩端岩层进行分析，采用线弹性模型对桩体材料进行分析。模型具体材料参数如表4所示。为了模拟桩侧摩阻力对溶洞顶部稳定性的影响，将模型计算的接触面定义为桩－岩接触界面[15]，在桩－岩接触面中，嵌岩桩为主要控制面，嵌岩剖面侧岩体为隶属面，界面滑动摩擦系数为0.4。

表4 有限元模型材料参数

相似材料	容重γ/(kN/m^3)	弹性模量E/MPa	泊松比v	黏聚力c/kPa	内摩擦角φ/(°)
强风化石灰岩	24.8	66.67	0.3	30	32
中风化石灰岩	27	311.11	0.25	300	38
桩	25	533.33	0.2	—	—

2.4 参数化分析方案

在物理模型试验的基础上，考虑不同的溶洞高度和宽度，分析不同高度和宽度下单桩的承载特性，建立了两组6个单桩数值分析模型。数值分析模拟方案如表5所示。

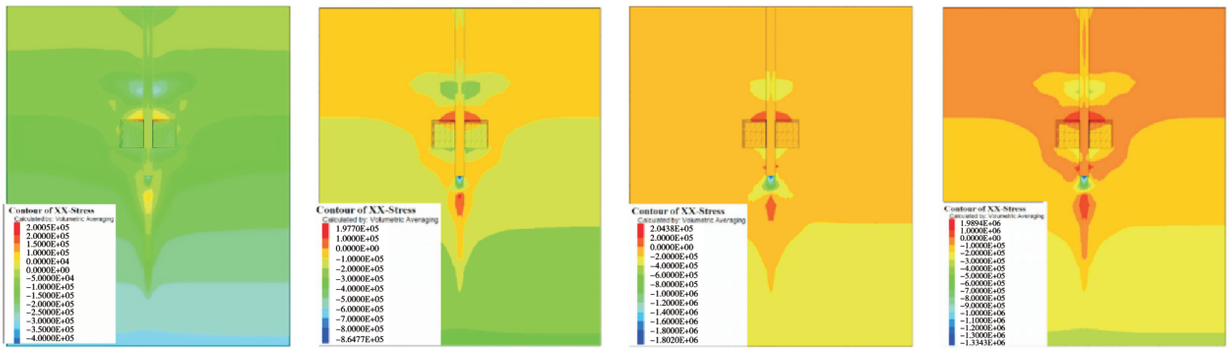
表5 有限元模拟方案

溶洞高度h/m	溶洞宽度D/m	桩径d/m	溶洞底部距桩底的距离/m
3	3、4、6	1.0	3
2、3、4	6	1.0	3

2.5 桩基承载特性分析

溶洞尺寸为$h \times D = 3\ \text{m} \times 6\ \text{m}$时，竖向荷载作用下桩基渐进破坏过程的应力云图如图8所示。从应力云图可以看出，对于单根溶洞桩基础，当桩顶荷载为2 500 kN时，溶洞顶部出现小面积的张拉破坏。随载荷进一步增大，溶洞顶部

的张力不断扩大，逐渐形成拱形的拉伸破坏区。当荷载继续增大至 10 000 kN 时，溶洞顶部的围岩破坏，溶洞顶部坍塌，形成分离拱塌区。因此，在桩基溶洞顶部的拉伸破坏区，桩与岩层接触产生的侧摩阻力为 0。



（a）2 500 kN　（b）5 000 kN　（c）7 500 kN　（d）10 000 kN

图 8　竖向荷载作用下溶洞桩基的应力云图

不同荷载作用下桩身轴向力分布曲线如图 9 所示。可以看出，在强风化岩层以上的桩身沿桩长方向的轴向力变化不明显，而进入中风化岩层后，桩基的侧摩阻力增大，导致轴向力明显减小。在溶洞内，桩体不受来自围岩侧摩阻力的影响，导致溶洞内桩体的轴向力几乎没有变化。不同桩顶荷载作用下，桩身轴向力分别为桩顶荷载的 29.2%、24.8%、28.2%、31.95%，这是由于桩表现为端承摩擦桩，随着桩顶荷载的增大，桩侧摩阻力和桩端承载力均增大，但桩侧摩阻力增幅较快；当荷载继续增大时，侧摩阻力提供的承载力变小，桩端承受的荷载增大。

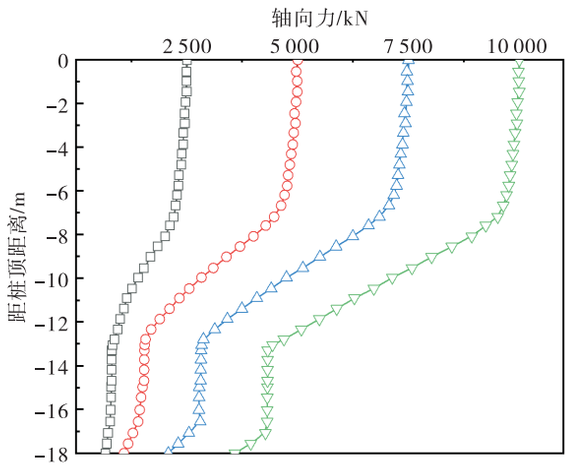


图 9　不同荷载作用下桩身轴向力沿桩长分布曲线

不同桩顶荷载作用下桩侧摩阻力变化曲线见图 10。可以看出，靠近桩顶的侧摩阻力相对较小，而距桩顶 8 m 处的侧摩阻力显著增大，但穿过溶洞后，桩侧摩阻力减小为零。当桩接近溶洞时，桩侧摩阻力发生较小突变，这是由于溶洞上方的岩层被破坏，岩层与桩之间的黏结被削弱，进而造成摩擦阻力突然下降。

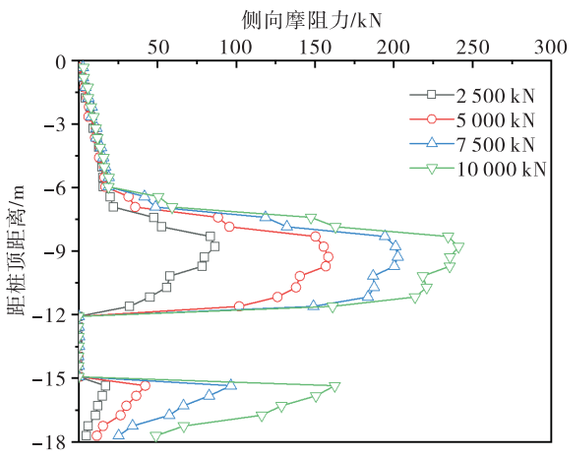


图 10　不同荷载作用下桩侧摩阻力沿桩长分布曲线

结合上述结果以及模型地层信息参数可以看出，上部强风化岩层与桩基础之间的侧摩阻力相对较低，因此，桩截面承受较高的轴向力。然而，随着桩基向中风化岩层深入，桩侧摩阻力显著增加，导致桩体内轴向力迅速减小。

3 对比与讨论

不同溶洞高度和宽度下物理模型试验拟合及数值分析的桩基 *Q-s* 曲线如图 11、12 所示。在数值模拟分析中，随着桩顶荷载的增大，桩基 *Q-s* 曲线变化规律一致；桩顶荷载较小时，随溶洞高度的增加桩顶沉降几乎呈线性增大；随桩顶荷载的增大，桩顶沉降呈现不同程度的非线性缓慢增大。溶洞高度 h 从 $2d$ 增加至 $4d$ 时，桩基极限承载力下降 10.7%。当溶洞底部距桩底长度和溶洞高度一定时，随着桩顶荷载的增加，各溶洞宽度下桩基 *Q-s* 曲线变化规律相似；当溶洞宽度 D 从 $3d$ 增加至 $6d$ 时，桩基极限承载力下降 2.0%。此外，数值模拟结果与物理模型试验拟合的结果

较为吻合，验证了试验方案及其结果的合理性和科学性。

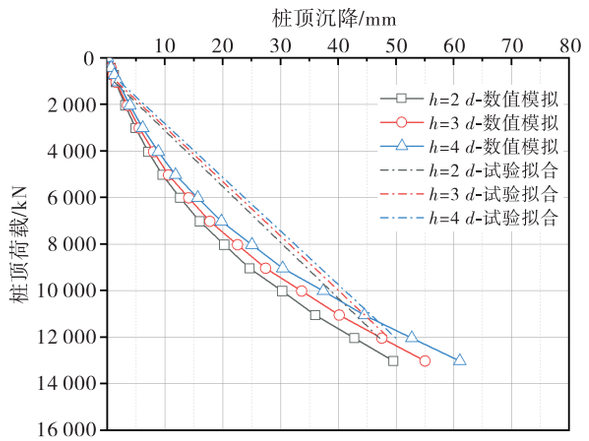


图 11　不同溶洞高度下桩基 *Q-s* 曲线

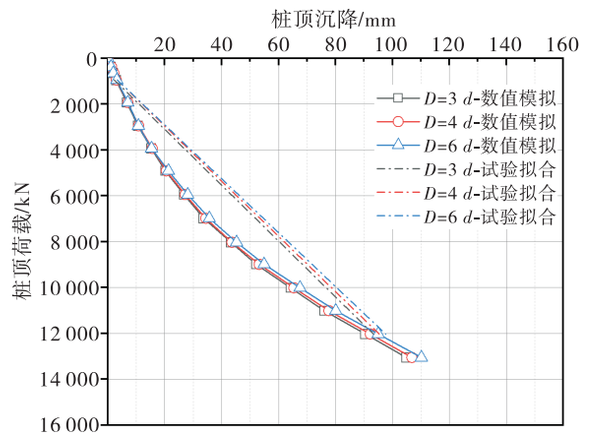
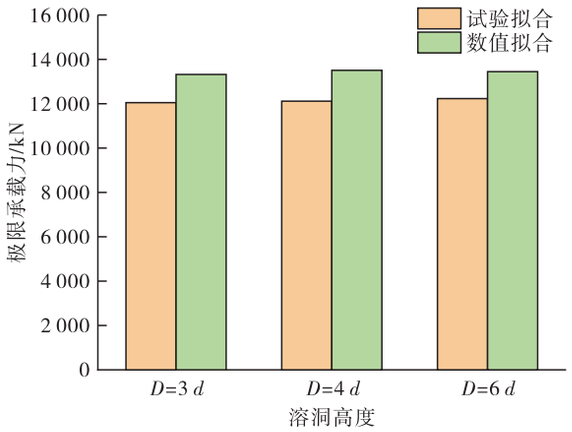


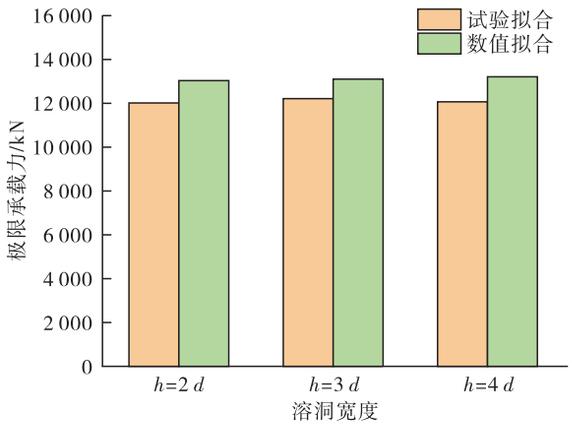
图 12　不同溶洞宽度下桩基 *Q-s* 曲线

不同溶洞高度和宽度下桩基极限承载力的试验拟合结果与数值计算结果对比如图 13 所示。从图中可以看出，数值模拟结果与试验结果能较好地吻合。两者之间存在的差异则是试验条件、数值模型参数和测试参数的差异所导致的误差，因此，可通过数值计算来验证试验结果和结论的准确性，为实际工程中岩溶地区桩基的设计提供科学依据。

需要注意的是，本研究仅针对矩形规则溶洞展开分析，而实际岩溶地区的溶洞形态复杂多样，包括拱形、多分支洞及极端异形溶洞等。拱形溶洞由于其几何形态的受力优势，可能会增强顶部岩层的承载能力，减少桩基沉降变形；而多分支溶洞会使荷载传递路径更加复杂，分支部位可能出现应力集中现象，导致桩基侧摩阻力分布离散性增大；极端异形溶洞则可能因几何形态的不规则性，引发局部岩层过早破坏，显著降低桩基承载力的稳定性。后续研究将通过补充不同形态溶洞的物理模型试验与数值参数化分析，建立



（a）不同溶洞高度



（b）不同溶洞宽度

图 13　桩基极限承载力

溶洞形态系数与桩基承载力的关联模型，量化异形溶洞的影响规律。

此外，本研究聚焦单桩静载工况，而实际桥梁工程中多采用群桩基础，且需承受列车循环荷载等动态作用。群桩效应会导致桩与桩之间相互干扰，使中间桩的侧摩阻力降低、端承力增大，同时溶洞群的存在可能会加剧这种干扰效应，需通过群桩模型试验与数值模拟，分析溶洞分布对群桩荷载分担比、沉降协调特性的影响；列车循环荷载则会使溶洞顶部岩层产生累积损伤，导致桩基侧摩阻力逐渐衰减、沉降变形持续增大，后续将采用疲劳试验结合损伤力学理论，研究循环荷载下桩基承载特性的长期演化规律，并建立相应的设计控制指标。

4 结语

本研究以广佛肇高速大旺高架桥桩基工程项目为研究对象，通过物理模型试验和数值模拟，系统研究了岩溶地区桩基的竖向承载特性。主要结论如下：

（1）物理模型试验结果表明，溶洞高度和宽

度对桩基的承载特性均有影响，其中溶洞高度的影响较为显著。在最大荷载 Q = 20 kN 作用下，当溶洞高度 h 从桩径的 2 倍增加到 4 倍时，桩顶沉降增大 13.3%，桩端承载力提高 12.3%。当溶洞宽度从桩径的 3 倍增加到 6 倍时，桩顶沉降和桩端承载力分别增大 5.0% 和 6.5%。

（2）通过有限元分析模型进一步研究了溶洞桩基的承载特性，结果表明，随着桩顶荷载的增大，桩侧摩阻力和桩端承载力均增大，但桩侧摩阻力增幅较快；当荷载继续增大时，侧摩阻力提供的承载力变小，桩端承受的荷载增大。此外，随着桩顶荷载的增大，溶洞顶部会逐渐形成张拉破坏区，最终导致溶洞顶部岩层坍塌破坏，形成分离拱塌区。

（3）采用有限元分析模型计算的 Q-s 曲线与物理模型试验拟合的结果较为吻合，两者的桩基极限承载力相互验证且基本保持一致。本研究为岩溶地区桥梁工程桩基的设计与研究提供了科学依据及参考。

参考文献：

[1]吴忠杰,古鹏翔,蒙海. 喀斯特地貌山区高速公路工程建设管理技术研究[J]. 西部交通科技,2016(11):7-11,92.

[2]李治锟. 岩溶区桩基承载特性影响因素研究[D]. 西安:西安科技大学,2023.

[3]侯振坤,刘宇鹏,凌造,等. 岩溶区桩基承载特性研究综述[J]. 科学技术与工程,2024,24(11):4369-4379.

[4]龚先兵. 岩溶区基桩荷载传递机理及其竖向承载力研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.

[5]何庆华,于泽泉,岳伟杰,等. 岩溶地区桩基础竖向承载力及岩溶顶板安全厚度计算方法[J]. 广东土木与建筑,2021,28(3):21-28.

[6]李宇杰,冯忠居,何静斌,等. 陡坡段穿越溶洞桩基竖向承载特性离心试验[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(11):2384-2392.

[7]冯忠居,陈慧芸,白少奋,等. 公路桥梁桩基穿越超大型溶洞的荷载传递机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(S1):3700-3711.

[8]雷勇,李鹏甲,刘泽宇,等. 岩溶区穿越溶洞桩基极限承载力及破坏模式试验研究[J]. 应用力学学报,2023,40(6):1343-1353.

[9]王其昂,吴子燕,刘露. 基于 Hilbert-Huang 变换与理想带通滤波器的系统识别[J]. 振动、测试与诊断,2016,36(6):1065-1070,1233-1234.

[10]王其昂,王浩博,周明利,等. 基于非参数贝叶斯方法的结构损伤识别研究[J]. 振动工程学报,2025,38(2):260-267.

[11]王其昂,刘泉,马占国,等. 基于稀疏贝叶斯学习与改进 D－S 证据理论多源数据融合的结构性能评估[J/OL]. 工程力学:1-9[2026-07-16]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20241108.1410.018.

[12]贾大卫,吴子燕,王其昂. 考虑结构极限状态随机性的多维易损性分析[J]. 自然灾害学报,2020,29(1):89-100.

[13]王伟. 岩溶区溶洞型桩基承载机理及溶腔整治技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.

[14]赵香梅. 深厚回填土中大直径嵌岩灌注桩承载特性现场试验及有限元模拟[D]. 青岛:青岛理工大学,2024.

[15]宋晓婷. 溶洞及其处理措施对桩基稳定性影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2022.

（上接第 25 页）

[2]殷胜光,刘博,乔欢,等. 极端高温天气下高速公路沥青路面泛油问题及预防措施[J]. 公路,2025,70(11):145-151.

[3]李秀君,马怀彧,赵麟昊,等. 微观角度下的多功能改性沥青抗水温耦合特性[J]. 公路交通科技,2025,42(11):47-53.

[4]段同军,刘杰,葛均峰,等. 高速公路改扩建工程多孔隙水泥稳定碎石盲沟的施工技术应用[J]. 中国公路,2022(13):90-92.

[5]李刚,冯冬林. 高速公路沥青路面易积水问题专项处治技术[J]. 中国公路,2023(22):94-95.

[6]麻辉东,毛璐凯,张海忠,等. 高等级公路超高过渡段设计 B 值取值的探讨[J]. 公路交通技术,2021,37(2):1-7.

[7]关宏信,李俊资,高煜,等. PAM－10/OGFC－10 沥青混合料渗水性能对比研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(3):107-115.

[8]孙军,王钊栋,李伟雄. 基于介电常数－空隙率模型的排水路面面域水膜厚度模型构建与验证[J]. 广东交通职业技术学院学报,2024,23(4):19-24.

[9]华涛. OGFC 排水性沥青混凝土路面施工技术要点分析[J]. 交通科技与管理,2024,5(17):98-100.

[10]王建华,赖益梁,郭成,等. 成型温度对 OGFC－5 干法高黏复合沥青混合料路用性能的影响[J]. 南昌大学学报(工科版),2023,45(1):59-64,102.

[11]徐俊鹏,郑传峰,包崇昊,等. 寒区大空隙沥青混合料性能衍化效应研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(4):20-29.