

岩溶地区灌注桩施工与承载性能研究发展综述

刘占龙¹ 刘波^{2,3} 楚辉¹ 苏朝¹

(1. 中交第三公路工程局有限公司, 北京 100000; 2. 南京林业大学土木工程学院, 江苏南京 210037; 3. 江苏省城市地下空间开发利用与安全防护工程研究中心, 江苏南京 210041)

【摘要】 灌注桩具有适用性广、承载力高、施工相对便捷等优点, 被广泛应用于岩溶地区的基础工程。然而, 由于岩溶地区地质环境复杂、地层存在溶洞、溶蚀裂隙及不均匀的岩面起伏等问题, 灌注桩的施工质量与承载性能受到较大影响。在系统调研国内外相关文献的基础上, 结合岩溶地区灌注桩工程实际情况, 围绕岩溶地貌特征、灌注桩施工技术、施工质量控制方法、承载力预测与评估技术等方面进行综合分析并评述, 并探讨岩溶地区灌注桩工程的未来发展趋势, 为岩溶地区桩基工程提供参考与借鉴。

【关键词】 岩溶; 灌注桩; 施工技术; 质量控制; 承载特性

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0277

Construction technique and bearing performance of bored pile in karst areas: a review

LIU Zhanlong¹ LIU Bo^{2,3} CHU Hui¹ SU Chao¹

(1. CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100000, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Urban Underground Space Development & Utilization and Safety Protection Engineering Research Center, Nanjing 210041, Jiangsu, China)

【Abstract】 Bored piles have been widely applied in foundation engineering in karst areas due to their advantages of broad applicability, high bearing capacity, and relatively convenient construction. However, the complex geological environment in karst regions—characterized by karst caves, dissolution fractures, and uneven bedrock surfaces—significantly affects the construction quality and bearing performance of bored piles. Based on a systematic review of domestic and international literature and combined with the practical engineering conditions in karst areas, this paper comprehensively analyzes and reviews the geomorphological characteristics of karst landforms, bored pile construction techniques, construction quality control methods, and bearing capacity prediction and evaluation technologies. Furthermore, the future development trends of bored pile engineering in karst areas are discussed, aiming to provide valuable references and insights for pile foundation engineering in similar geological conditions.

【Key words】 karst; bored pile; construction technology; quality control; bearing capacity

0 引言

岩溶地区地质构造复杂、岩石溶蚀剧烈、地层结构呈现多样性, 其地层常见的问题包括: 溶洞密集分布、岩面起伏大、溶蚀裂隙发育等^[1]。这些地质条件导致岩溶地区建筑工程中地基处理、基坑支护和桩基施工均面临较大挑战。桩基础是岩溶地区常用的地基处理方式之一, 其中又以灌注桩应用最为普遍^[2]。灌注桩能够较好地适应岩溶地层不均匀特性, 其竖向承载力与水平承载力对岩溶地基的工程设计起着至

关重要的作用^[3]。

然而, 岩溶地区灌注桩的施工风险也相对较高。由于溶洞和裂隙的不可预测性, 桩孔成孔稳定性受到威胁, 容易出现坍塌或泥浆漏失; 当桩基深度较大时, 需要采取更加先进的施工工艺和灌浆技术, 以保证桩身质量和施工安全^[4]。因此, 本文围绕岩溶地貌特征、灌注桩施工工艺、质量控制、承载力计算与测试方法以及岩溶地区灌注桩工程的技术趋势等进行了系统性综述, 旨在为后续研究与工程实践提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金(52208334); 中交第三公路工程局有限公司科研项目(JZ-SGPG-0617-2024-0001)

作者简介: 刘占龙, 男, 1972 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事土木工程施工与管理工作。E-mail: LZL1536@126.com

通信作者: 刘波, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的科研工作。E-mail: boliu@njfu.edu.cn

1 岩溶地区地质特征与工程难点

1.1 岩溶地貌的形成与特点

岩溶地貌是指可溶性岩石(如石灰岩、白云岩等)在水化学作用下不断溶蚀,形成溶洞、溶槽、落水洞、地下河等多种地表及地下形态特征的地貌类型^[5],如图1所示。岩溶地貌的形成主要与碳酸盐岩分布、地下水流动以及地应力条件等因素相关。岩溶发育的程度取决于岩性、裂隙分布、地下水化学性质及流速等。岩溶地貌对工程建设的主要影响包括:岩层中大大小小的溶洞会导致地基不均匀沉降及局部坍塌等风险;岩面起伏大,影响桩基的持力层深度与分布,给桩长确定与施工方案设计带来难度;因溶蚀作用产生的大量裂隙、孔隙使岩体完整性下降,易出现塌孔、渗水等施工问题;地下水流速大、通道多,可能导致泥浆漏失、桩基冲刷等问题。岩溶地区的复杂性决定了在施工前必须进行系统的地质调查与勘察,充分掌握岩层与溶洞分布情况,才能减少施工风险并优化工程方案^[6]。

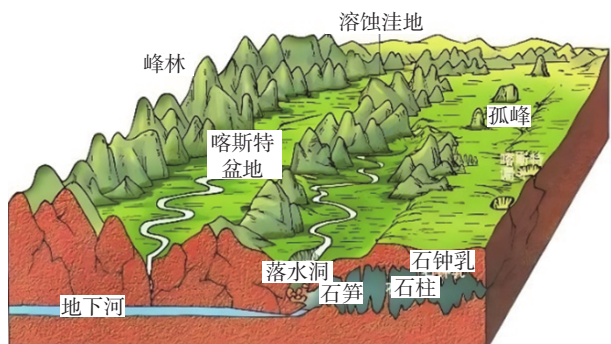


图1 岩溶发育示意图

Fig. 1 Schematic diagram of karst landform

1.2 岩溶地区工程建设面临的主要难点

(1) 溶洞和塌陷风险难以预判

岩溶地区溶洞发育广泛且分布无规律,许多溶洞的规模和位置在施工前很难完全探明。即便采取了详尽的勘察工作,仍可能在钻孔过程中遭遇不可预见的大型溶洞^[7]。例如,有工程项目在桩基施工中,原以为地质情况稳定,但钻至十几米时突然发生孔壁坍塌,泥浆大量流失,导致施工被迫中断。此类情况一旦发生,不仅增加了施工难度,还容易造成桩基承载能力不足的问题。尤其是在溶洞埋藏较浅的情况下,还可能导致“悬空桩”现象,使桩基失去应有的端承力和侧摩阻力。

(2) 地质勘察存在盲区

岩溶地层结构复杂,溶洞形态多样且空间分布不均。尽管当前已经广泛应用电法勘探、地震波探

测和探地雷达等技术,但受限于仪器精度和地层复杂性的影响,一些微小裂隙或深层小型溶洞往往难以准确识别^[8]。这种情况下,工程人员往往需要依靠施工过程中的异常现象(如泥浆突变、钻进阻力异常)来进行辅助判断。这种边探测、边施工的模式增加了不确定性,也给项目管理带来了更高的风险。

(3) 施工工艺与现场管理复杂

在岩溶地区施工,常规的钻孔和灌注工艺往往难以直接套用。施工团队通常需要根据现场情况灵活调整工艺^[9]。例如,当遇到强富水层或大溶洞时,必须立刻采取注浆加固、护筒加长或套管跟进等措施,以保证孔壁稳定和施工安全。一些工程甚至在同一项目中多次切换施工工艺,这无疑增加了施工设备调配和现场管理的复杂性,也容易导致工期延误。

(4) 成本和工期难以准确预估

由于地下情况复杂多变,岩溶地区的工程项目常常面临计划赶不上变化的局面。原本按常规计算的成本和工期,在遇到突发的溶洞处理或地质加固需求时,不得不重新调整预算和施工进度^[10]。一些大型工程在溶洞治理上投入的费用,甚至超过了最初桩基工程预算的20%以上。由此可见,如何平衡好勘察投入与施工阶段的风险管理,是岩溶区工程建设中始终难以回避的课题。

综上所述,岩溶地区桩基工程在地质勘察、设计与施工等各个环节均面临较大挑战。对岩溶地貌形成机理与分布特征的深入研究,有助于提高施工的安全性和效率,降低工程风险。

2 岩溶地区灌注桩施工技术

2.1 施工前的地质勘察

充分的地质勘察是保障岩溶地区灌注桩施工顺利进行的前提^[11]。考虑到岩溶地层中溶洞分布不均、形态复杂且空间变化大,仅依赖单一的勘察手段往往难以准确掌握场地的地质情况。为此,应采用多手段联合探测,包括钻探取芯获取岩层真实信息,结合电法勘探、磁法勘探、地震波探测和探地雷达等物探技术,对潜在的溶洞发育区进行重点排查^[12-17]。此外,通过水文地质测试掌握地下水流动性和渗透特征,为施工阶段的泥浆护壁和注浆加固提供依据。

近年来,随着三维地质建模和信息化技术的引入^[18-19],如分布式光纤传感^[20]、空-地一体化雷达/电磁^[21-22]、宇生 μ 子成像^[23-24]等,可以更直观地展示溶洞分布和岩层起伏情况,从而为桩位优化布置和施工工艺选择提供科学参考。这种多源信息融合的方法,能够有效降低地质不确定性带来的工程风险。

2.2 成孔施工技术

岩溶地区灌注桩的施工流程主要包括: 场地准备、钻机成孔和溶洞处理、清孔、下放钢筋笼和导管、灌注, 如图 2 所示。其中, 钻机成孔是灌注桩施工的关键环节。

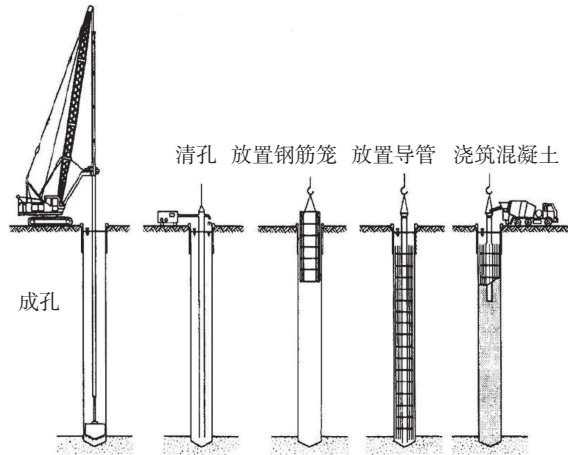


图 2 灌注桩施工过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of construction process of cast-in-place pile

合理选择成孔设备和工艺, 并根据地层变化实时调整施工参数, 是确保成孔质量和施工安全的关键。常用的成孔方式包括旋挖钻、冲击钻和潜孔锤钻进等, 如图 3 所示。

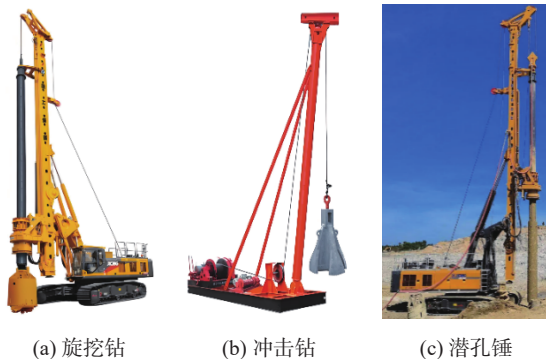


图 3 常用成孔设备示意图

Fig. 3 Schematic diagram of common drilling equipment

(1) 旋挖钻成孔

适用于覆盖层较厚且地层完整性较好的区域, 具有成孔速度快、施工效率高的优点^[25]。然而, 在溶洞发育强烈或岩面起伏剧烈的地层中, 易发生泥浆漏失和孔壁失稳现象。针对这一问题, 应结合现场条件采用护筒或套管跟进措施, 并优化泥浆性能, 以增强孔壁稳定性。

(2) 冲击钻成孔

主要用于硬质岩层和存在坚硬夹层的地层, 其通过强力冲击破碎岩石, 有利于突破局部坚硬层^[26]。

然而, 冲击钻施工对孔壁稳定性要求较高, 需配合分段护壁、注浆加固等技术措施, 确保成孔质量。

(3) 潜孔锤钻进

适用于穿透厚层碳酸盐岩或坚硬岩层, 其钻进效率高、成孔精度好^[27]。对于存在大型溶洞或断裂带的地层, 应评估潜孔锤振动和冲击对周围地层的扰动影响, 必要时可通过调整钻进参数或结合其他成孔工艺降低风险。

2.3 防塌孔方法及其适用性

由于地下溶洞、裂隙水及围岩破碎等因素, 塌孔是桩基施工中常见的问题。常用的防塌孔方法包括泥浆护壁、套管护壁、全套管成孔、灌注充填和冻结法等。表 1 给出了各方法的经济性对比和适用场景。总体来看, 泥浆护壁因经济性突出而成为首选工艺, 套管护壁和注浆充填常用于风险中等的岩溶地段, 能够兼顾成本与安全, 而全套管成孔与冻结法虽经济性差, 却在极复杂工况下具备无可替代的安全优势。

表 1 常用的防塌孔方法对比

Tab. 1 Comparison of hole collapse prevention methods

方法	经济性评价	适用场景
泥浆护壁	低成本, 普遍采用	一般岩溶地层, 涌水量不大
套管护壁	中等成本, 钢材消耗大	溶蚀裂隙发育、局部破碎带
全套管成孔	成本高, 机械设备昂贵	深厚富水、极易坍塌的岩溶地段
注浆充填	成本视溶洞规模而定	存在大溶洞或强渗水裂隙区
冻结法	极高成本, 不常用	特殊高风险、常规手段无效地段

2.4 孔内检查与特殊处理

钻孔完成后, 应采用孔内成像、声波测井、孔径检测等技术对孔壁完整性和溶洞分布进行全面检查。对于检测出的不良地质段, 如大型溶洞或严重裂隙, 应及时采取加固处理措施。常用方法包括^[28-31]:

(1) 注浆加固。通过向溶洞或裂隙中注入水泥浆、超细水泥浆或聚合物浆液, 提高地层稳定性。

(2) 扩大桩径或调整桩长。针对无法有效填充的超大溶洞, 适当加大桩基直径或延长桩长, 以确保桩基稳定性和承载力。

(3) 特殊支护措施。在部分特殊工况下, 可采用桩-岩联合支护技术, 如锚杆加固或喷射混凝土处理溶洞空间, 提高局部承载能力。

采取有效的检测和处理手段, 可显著降低地层不稳定对成桩质量和承载性能的影响。

2.5 灌注与成桩工艺

混凝土灌注质量直接影响桩基的完整性和承载能力。岩溶地区桩孔灌注过程中, 若地下水活动频繁,

极易造成泥浆混入混凝土,导致混凝土离析、冷缝和桩身缺陷。因此,通常采用导管灌注法,通过控制导管埋置深度和灌注连续性,确保混凝土顺利置换孔内泥浆。建议选用自密实混凝土,以减少振捣难度和提高混凝土密实性。同时,应加强混凝土坍落度和初凝时间的控制,避免因地下水稀释或施工延误导致的混凝土性能劣化。为保障成桩质量,需严格按照设计要求控制混凝土灌注速度和连续性,并通过沉渣厚度检测和钢筋笼位置复测等手段加强质量验收,确保桩基满足承载力和使用寿命的双重要求^[32]。

在地下水有限但溶洞发育或岩层破碎条件下,桩孔灌注易产生浆液流失。目前,工程界提出了一些新的控制方法,主要包括新型防渗材料、分层分段灌注与隔离^[33]、预处理与注浆加固、智能监测与实时调控以及复合施工技术等。新型防渗材料(如速凝双液浆、聚氨酯、纳米改性浆液)适用于裂隙和微渗漏区,封堵效果显著但成本偏高。分层分段灌注或导管内衬袋多用于大溶洞或复杂裂隙段,可减少瞬时流失,但工艺复杂、周期较长。预处理与注浆加固(如超前注浆、局部固结注浆)适合已知溶洞裂隙,虽一次投入较大但能显著降低后期失浆风险,综合经济性较优。智能监测与实时调控技术依托声波监测、渗漏预警及流量-压力控制,适合复杂水文地质条件,虽初期成本高,但能避免大规模浆液外泄,综合效益较好。复合施工(如管棚+桩孔、冻结-灌注)多用于大溶洞群或超富水段,安全性最高,但造价极高,仅适用于重大或高风险工程。总体而言,常规工程宜采用“预处理注浆+分层分段灌注”的组合方式,以实现成本与效果的平衡;对于局部微渗漏,可优先采用新型防渗材料;而重大或高风险工程,则需要结合智能监测和复合施工技术,确保施工安全。

2.6 智能化施工新技术

近年来,岩溶区桩基施工正逐步迈向智能化、数字化和闭环化。主要体现为:

- (1)通过 BIM、GIS 与三维岩溶模型及数字孪生,实现施工前地质条件预判和施工模拟。
- (2)利用钻进参数、孔内视频、分布式光纤和声学电法等手段,实时识别溶洞与监测桩身质量。
- (3)在施工中采用自适应钻进、分段注浆闭环控制及智能灌注技术,有效防止塌孔、漏浆与断桩。
- (4)引入人工智能和大数据,对地层识别、风险预警和施工参数进行优化。
- (5)基于物联网与 5G 平台,实现设备与监测数据互联共享,推动设计-施工-检测一体化。

(6)通过多方法联合检测与长期监测,保障桩基全寿命安全。

通过构建“预测—监测—控制—反馈”的智能闭环,显著提升岩溶区桩基施工的安全性、质量可控性。桩基智能施工技术框架如图 4 所示。

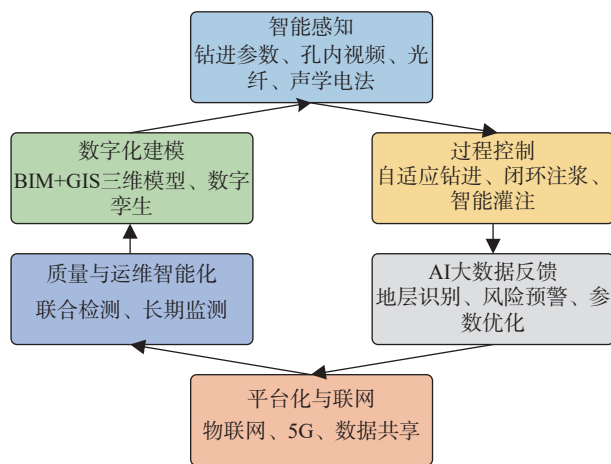


图 4 桩基智能施工技术框架

Fig. 4 Technical framework for intelligent construction of pile foundation

3 岩溶地区灌注桩质量控制与加固技术

3.1 施工质量控制要点

(1) 泥浆性能控制

在成孔过程中,泥浆的稳定性直接影响孔壁稳定与成孔质量^[34]。岩溶地区由于地下水丰富且溶蚀裂隙发育,极易发生泥浆流失和塌孔问题。因此,必须严格控制泥浆的比重、黏度和含砂率,以增强护壁效果并减少渗漏。常规要求泥浆比重控制在 1.1 ~ 1.2 g/cm³,黏度保持在 17 ~ 25 s(马氏漏斗),含砂率不宜超过 4%。施工过程中应定期检测泥浆性能,必要时及时调整配比,以维持良好的流变特性和护壁能力。

(2) 成孔过程监控

成孔过程中应通过实时监测钻机扭矩、钻进速度和出渣状况等参数,判断地层变化和溶洞分布^[35]。当出现钻进阻力异常、泥浆流量突变等情况时,应立即停止钻进,开展必要的地质补勘或孔内探测,并根据实际情况采取套管跟进、注浆加固等措施。岩溶发育强烈区域,宜采用分段成孔与护壁技术,以降低孔壁失稳风险。

(3) 孔底清理质量控制

孔底沉渣厚度直接影响端承桩的承载性能。为确保桩端有效承载力,应采用吸浆、冲洗等方式反复清孔,直至沉渣厚度满足规范要求(一般不大于 5 cm)^[36]。清孔结束后,应通过沉渣厚度检测器等工

具进行验收, 确保孔底干净且满足施工技术标准。

(4) 钢筋笼安装与混凝土灌注管理

钢筋笼下放过程中应保持垂直度和刚度, 防止笼体弯曲或偏位^[37]。钢筋保护层厚度必须符合设计要求, 以保证桩身混凝土质量和耐久性。在混凝土灌注阶段, 应采用导管法连续灌注, 确保导管埋深合理, 避免混凝土离析和断桩现象^[38]。灌注过程中, 应严格控制混凝土坍落度和灌注速度, 防止孔内混凝土产生离析、冷缝及蜂窝麻面等质量缺陷。

3.2 加固与补强技术

岩溶地区灌注桩施工中, 经常面临溶洞发育和地质条件恶劣的复杂情况, 为保障桩基的稳定性和承载力, 需采用有效的加固与补强措施^[39]。

(1) 高压注浆技术

高压注浆是岩溶地层处理中最常用的加固手段^[40]。通过向溶洞、裂隙和软弱夹层中注入水泥浆、超细水泥浆或化学浆液, 能够有效封闭裂隙、填充溶洞, 提高地基承载力和整体稳定性。根据溶洞规模和渗透特性, 注浆材料可选择普通水泥浆、粉煤灰掺合浆液或聚合物浆液, 以满足不同工程需求。常用的注浆技术参数可参考表 2。

表 2 高压注浆技术参数

Tab. 2 Technical parameters of high pressure grouting

类别	技术参数范围
注浆压力	一般 0.5 ~ 3.0 MPa, 常用 1.0 ~ 2.0 MPa; 浅层溶洞或围岩破碎区宜采用低压 (≤ 1.0 MPa); 较深部、顶板厚实的溶洞, 可提高至 2.0 ~ 3.0 MPa
注浆材料与配比	常用水泥浆、水泥-水玻璃浆、水泥-膨润土浆等; 水灰质量比: 0.5 ~ 1.0, 为增加稳定性可掺加膨润土 (3% ~ 8%) 或减水剂; 对于快速固结或止水要求高的溶洞, 常配合速凝剂 (如硅酸钠、早强剂)
注浆量与扩散半径	需根据溶洞规模和渗透条件确定, 注浆量每延米孔长一般为 0.2 ~ 0.6 m ³ ; 扩散半径通常为 1.0 ~ 3.0 m, 局部可达 5 m, 需试注确定
工艺与顺序	多采用分段分级注浆, 由低压小流量起注, 逐步升压; 孔段长度一般 1.0 ~ 2.0 m, 逐段加密, 形成“自下而上”的注浆屏障

(2) 套管跟进法

当遇到大直径溶洞或强富水破碎带时, 采用套管跟进施工可有效隔离不良地层, 减少泥浆流失和孔壁坍塌风险^[41]。该方法适用于成孔过程中孔壁不稳定或溶洞无法及时有效填充的情况, 通过逐段下放套管并同步成孔, 保持孔壁稳定, 为后续施工创造良好条件。

(3) 桩-岩联合支护技术

针对大型溶洞和特殊不良地层, 可采用锚杆加

固、喷射混凝土衬砌等桩-岩联合支护技术, 通过增加桩基与围岩的联结强度, 提高承载性能^[42]。在特殊情况下, 可结合钢筋混凝土框架或支撑体系对大型溶洞进行支护, 以确保上部结构荷载安全传递。

(4) 地基改良技术

对于溶洞分布广泛、地层整体承载力较低的区域, 还可采用换填法、深层搅拌法等地基加固手段, 对地基进行整体性改良。这类方法在工程中多用于场地整体处理, 以减少地基沉降和不均匀变形的风险。

通过以上加固与补强措施的合理应用, 可有效提升岩溶地区灌注桩的施工质量和性能, 降低因地质条件复杂带来的工程风险, 为复杂地质环境下的桩基工程建设提供可靠保障。

4 岩溶地区灌注桩承载性能分析

4.1 承载力影响因素

岩溶地层复杂的岩性特征和不确定性是影响灌注桩承载力的关键因素。主要体现在以下几个方面^[43-44]:

(1) 岩层性质。岩体完整性直接影响桩侧摩阻力的发挥。岩层强度低、裂隙发育时, 摩阻力显著降低, 而高完整性岩体则能提供较高的侧摩阻力和端阻力, 从而提高基桩承载能力。

(2) 溶洞规模、形态及空间分布位置^[45-49]。规模上, 若溶洞规模较小, 桩端仍可能与岩层形成有效接触, 对承载力影响有限; 而当溶洞规模较大时, 桩端可能悬空, 导致端阻力显著下降, 甚至引发整体失稳。形态上, 若溶洞顶部平整规则, 桩端可通过注浆或扩大头形成稳定持力面, 对承载力影响较轻; 若顶部呈拱形或局部破碎, 则容易造成桩端空洞和不均匀沉降, 尤其当溶洞内部充填松散物质时, 在荷载作用下易被压缩或冲刷, 进一步降低长期承载力。空间位置上, 当溶洞位于桩端正下方时, 端承力几乎完全丧失; 位于桩侧时, 侧阻力削弱, 桩身可能倾斜或局部失稳; 若溶洞位于桩端下方较深处, 则对承载力的影响相对较小, 但仍可能因渗水或沉降引发次生风险。

(3) 施工质量^[50]。成孔质量、孔底沉渣清理效果、钢筋笼安装精度以及混凝土浇筑连续性等均直接影响桩身完整性和承载性能。成孔过程中若未及时发现和处理溶洞, 将导致桩基局部承载力不足。

(4) 地下水环境。地下水的流动性和化学特性不仅影响泥浆稳定性和混凝土质量, 还可能引发长期的桩基冲刷和化学侵蚀, 给桩基耐久性带来潜在威胁。

(5) 外部荷载条件^[51-52]。基坑开挖、堆载、动力扰动等外部荷载往往通过改变桩端与桩侧土、岩的

应力状态和结构稳定性,直接影响桩基承载力的发挥与长期性能。

综合来看,承载力计算必须结合地质勘察成果和施工过程中的实际情况,避免单纯依赖规范经验公式而忽视现场复杂性。

4.2 承载力计算方法

针对岩溶地区复杂的地质环境,常用的承载力计算方法包括经验公式法、岩土力学模型法以及数值模拟分析法。

(1)经验公式法

依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),采用式(1)计算单桩极限承载力。

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中: q_{sik} 为桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值,可查表获得; q_{pk} 为桩端第 i 层土的极限端阻力标准值,可查表获得; u 为桩身周长; l_i 为桩周第 i 层土的厚度; A_p 为桩端面积。

当桩端及桩周常存在溶洞、裂隙、软弱夹层或不均匀岩土组合时,需对规范计算得到的端阻力与侧摩阻力进行修正^[53]。若桩端落在溶洞顶部或存在大孔隙、破碎带,不能充分发挥端阻力, q_{pk} 应按规范建议的下限取值,并取折减系数 0.4~0.6;若桩身穿越溶洞,洞内段侧摩阻力不计,在裂隙发育、岩面粗糙度差的区域,侧摩阻力折减系数一般取 0.5~0.7。

(2)岩土力学模型法

通过极限平衡法、弹性地基梁模型或桩土相互作用理论,对桩基承载性能进行分段计算^[54]。对于存在大型溶洞的情况,可将溶洞视为等效软弱夹层或弹性介质,通过简化计算模型分析其对桩基受力状态的影响。这类方法适用于对承载力和变形特性进行理论分析,但需依赖于准确的岩土参数和边界条件。

(3)数值模拟法

随着计算技术的发展,有限元和离散元等数值模拟方法已广泛应用于复杂地层桩基承载性能分析^[55]。采用 ABAQUS、ANSYS、MIDAS GTS 等软件,可建立包含岩溶空间、桩体和围岩的三维耦合模型(见图 5),通过非线性分析预测桩基受力特性和变形规律。特别是在溶洞发育复杂、岩层变化剧烈的场地,通过数值模拟能够有效弥补传统计算方法的不足,提高设计的准确性和安全性。然而,模型的准确性在很大程度上依赖于现场试验和岩土参数的精确获取。

4.3 承载力现场测试方法

现场承载力测试是验证桩基设计合理性和施工

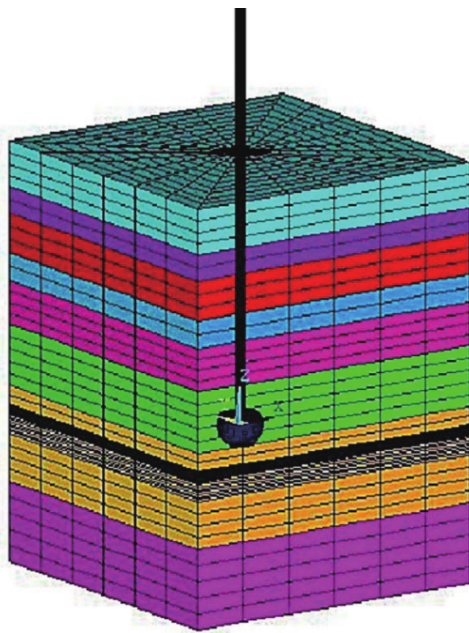


图 5 桩基承载力数值计算模型
Fig. 5 Numerical model of bearing capacity of pile foundation

质量的重要手段,也是岩溶地区灌注桩工程中不可或缺的技术环节。

(1)静载试验

静载试验是评估灌注桩承载力最直观的方法,可通过荷载-位移曲线来判断基桩极限承载力和变形特性^[56]。岩溶地区由于地层中存在溶洞、裂隙及不均匀岩层,静载试验具有较大的可靠性。通过静载试验,可以验证基桩的承载力是否满足工程要求,同时识别施工过程中可能存在的缺陷,如孔壁塌陷、泥浆漏失或桩身缺陷等。静载试验方法主要包括轴向加载试验、水平加载试验和组合加载试验,如图 6 所示。试验设备包括加载装置(如液压千斤顶)、测斜仪、沉降计、应变计等。但静载试验成本高、试验周期长,适用于重大或重要工程的验证性测试。

(2)自平衡检测

基桩自平衡法(O-cell 法)检测是通过在桩身中部或桩端埋设液压加载装置,通过注入高压油使装置上下分离,形成等值的向上和向下反力,从而分别激发桩侧摩阻力与桩端阻力,实现对基桩承载性能的检测^[57-58],如图 7 所示。该方法不依赖地面反力装置,避免了岩溶区因溶洞、软硬不均而导致锚桩施工困难的问题;同时加载能力大,特别适合大直径、超长桩等传统静载试验难以实施的情况;此外,自平衡法可分别获得侧摩阻力与端阻力的曲线,更真实地揭示桩-土(岩)相互作用机理,而传统静载试验仅能得到总承载力。综合来看,自平衡法在岩溶复杂地层条件

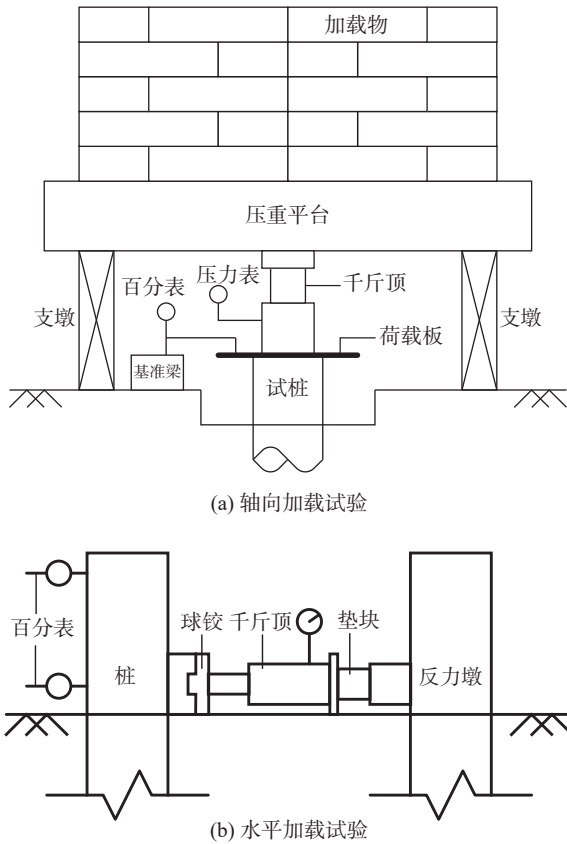


图 6 桩基静载试验示意图

Fig. 6 Schematic diagram of static loading test of pile foundation

下更安全、高效、节约场地和成本,较传统静载试验具有明显技术优势与适用性。

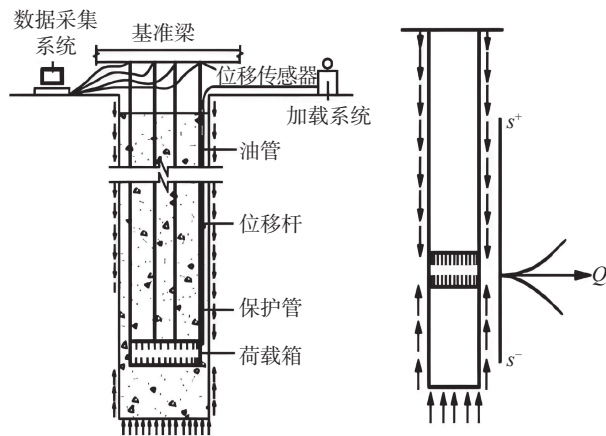


图 7 桩基自平衡检测示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Oseberg-cell test of pile foundation

(3) 动力测试法

动力测试(如高应变动测、低应变反射波法等)是评估桩基承载力和桩身完整性的重要手段。与静载试验相比,动力测试具有无损性、速度快、成本较低、操作简便等优点,能够在较短时间内获取桩基的基本承载特性和成桩质量。测试设备和仪器包括冲

击波发生器、地震仪、数据采集与处理系统等,如图 8 所示。然而,在岩溶地区,由于地层中存在溶洞、裂隙及不均匀岩层,动力测试的实施和结果解释面临更多挑战,需要综合其他信息进行分析^[59]。

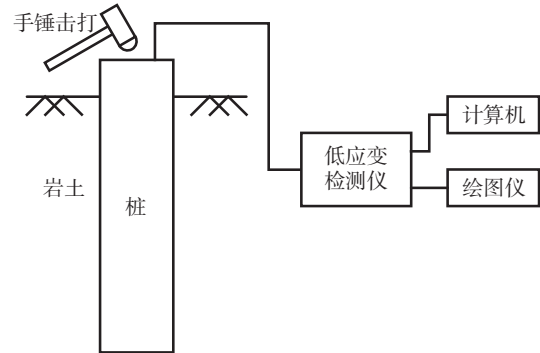


图 8 桩基低应变反射波法检测示意图

Fig. 8 Schematic diagram of low strain reflected wave method for pile detection

(4) 声波透射法

声波透射法是一种利用声波在基桩与周围介质中的传播特性进行无损检测的技术。该方法通过向桩体施加声波脉冲,接收并分析通过桩体传播后的声波信号,以评估桩基的完整性、检测内部缺陷(如裂缝、孔洞)以及评估基桩与围岩的黏结状态^[60]。检测设备包括声波发射器、声波接收器、数据采集系统等,如图 9 所示。

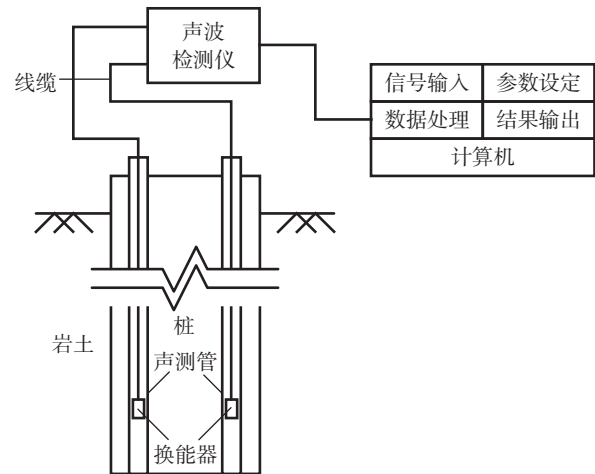


图 9 桩基声波透射法检测示意图

Fig. 9 Schematic diagram of acoustic wave transmission method for pile detection

声波透射法因其高效、准确、便捷等特点,在岩溶地区复杂地质条件下的基桩检测中具有重要应用价值,然而应考虑地质复杂性、地下水、环境噪声等因素影响。岩溶地层中溶洞和裂隙分布不均,可能导致声波信号的复杂性增加,需要采用多角度、多频率的声波检测方法,提高检测的准确性。地下水流动可

能影响声波的传播路径和信号强度,需在检测过程中控制地下水流动或采取防水措施。施工现场可能存在着各种噪声源,需采取隔音措施或选择安静时段进行检测,以减少环境噪声对声波信号的干扰。

5 岩溶地区灌注桩未来发展趋势

5.1 智能化施工与监测

借助信息化与自动化技术,岩溶地区灌注桩施工正逐步向智能化方向发展。通过集成高精度传感器、自动数据采集和远程监控系统,可以实现施工过程的实时数据反馈和动态调整。例如,钻机参数(扭矩、钻压、钻进速度)及泥浆特性(比重、黏度、流速)等关键指标的自动采集与分析,有助于及时识别异常工况,降低溶洞突发风险。

此外,基于大数据分析和机器学习的施工优化模型正在逐渐应用于桩基工程,通过历史工程数据挖掘和现场监测数据分析,为施工工艺调整和风险预警提供科学依据。这种智能化管理模式有助于提高施工效率,降低人为操作误差,提高工程整体安全性和质量可控性。

5.2 新型注浆与密实材料

针对岩溶地层溶洞发育和裂隙丰富的特点,传统水泥浆在渗透性和加固效果上存在一定局限性。为提升地层加固效果和桩基承载力,未来可开展超细水泥浆和纳米改性浆液、高分子注浆材料(如聚氨酯、环氧树脂类材料)、微膨胀密实材料的应用。

这些新型材料的应用不仅能提升加固效果,还能在一定程度上降低材料流失和环境污染风险,符合绿色施工和可持续发展的要求。

5.3 高端桩型与特殊工法

为适应复杂岩溶地层和特殊荷载要求,未来灌注桩工程将更多采用大直径、超长桩和复合桩型设计,以满足深层承载需求和不均匀地基的适应性。同时,特殊施工工法的创新应用也将成为岩溶地区桩基施工的重要发展方向,如复合桩基技术、多序注浆和分区加固工法、机械化与自动化施工设备等。

5.4 多场耦合与安全可靠分析

岩溶地区桩基的长期安全性受多种物理场(应力场、渗流场、化学场、温度场)共同影响。未来研究将更加重视多场耦合条件下桩基性能的演化规律,重点关注化学侵蚀与材料耐久性、冲刷与侵蚀耦合作用、冻融循环与干湿交替影响等。

通过构建完善的多场耦合数值模型和开展长期监测分析,可有效提高岩溶地区灌注桩工程的安全性预测和服役性能评估水平。

6 结论

岩溶地区由于地质条件复杂、溶洞发育显著,其灌注桩施工和承载性能评估面临诸多挑战。通过系统梳理相关研究成果和工程实践经验,可以得出以下主要结论:

(1)地质勘察是保障工程安全的基础前提。岩溶地区地层结构复杂且变化剧烈,溶洞和裂隙分布存在高度不确定性。在桩基工程设计与施工前,应开展系统、细致的地质勘察工作,通过多种探测技术的综合应用,如钻探取芯、地球物理探测和水文地质测试等,准确掌握岩面起伏、溶洞规模及地下水活动特征,以优化桩基设计方案,降低施工风险。

(2)施工工艺需因地制宜,灵活调整。在岩溶复杂地层中,常规成孔和灌注工艺难以完全适应现场实际情况。应根据地层特性合理选择旋挖钻、冲击钻和潜孔锤等成孔设备,并结合护筒跟进、注浆加固和特殊支护措施,提高成孔质量和桩基稳定性。施工过程中,应加强对泥浆性能、孔底清理、钢筋笼安装和混凝土灌注等关键环节的质量控制,确保桩基结构完整性和承载性能。

(3)承载性能评估应结合多方法综合分析。岩溶地层桩基承载性能受多因素共同影响,应采用经验公式、岩土力学模型和数值模拟等方法进行综合分析。现场静载试验和动力测试等多种检测手段的结合使用,可以有效提高桩基承载力预测的准确性和施工质量的评估效果,为桩基设计优化提供可靠依据。

(4)加固与补强技术是提升桩基性能的重要保障。针对复杂地层和溶洞发育区域,应合理采用高压注浆、套管跟进、桩-岩联合支护等加固与补强措施,以提高地层整体稳定性和桩基承载能力。新型注浆材料和密实材料的应用,可有效提升加固效果,满足复杂工程需求。

(5)智能化施工和多场耦合分析将引领未来发展方向。随着信息技术和智能装备的广泛应用,岩溶地区灌注桩施工将向智能化监测、数据化管理和精细化控制方向发展。多场耦合数值分析和长期服役性能研究,将为岩溶地层桩基工程的安全性评价和耐久性设计提供更加科学和系统的技术支撑。

参考文献

- [1] 彭都,刘伟,赵福玉,等.昆明轨道交通岩溶专项勘察手段及方法[J].隧道建设(中英文),2019,39(S2):269-282. (PENG D, LIU W, ZHAO F Y, et al. Special investigation means and methods of karst of Kunming

- rail transit[J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(S2): 269-282. (in Chinese))
- [2] 王家全, 朱存金, 李 磊. 岩溶地区冲孔灌注桩质量检测 and 缺陷处理 [J]. 工业建筑, 2012, 42(12): 146-150. (WANG J Q, ZHU C J, LI L. Quality test and defect treatment of percussion drilling bored pile in karst areas[J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(12): 146-150. (in Chinese))
- [3] 朱佩宁, 宋亚亚, 齐昌广, 等. 岩溶地区嵌岩灌注桩承载性状试验研究 [J]. 人民长江, 2020, 51(7): 200-205. (ZHU P N, SONG Y Y, QI C G, et al. Experimental research on bearing characteristics of rock-socket pile in Karst area[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(7): 200-205. (in Chinese))
- [4] 王家全, 朱庆盛, 刘垒雷, 等. 岩溶地质旋挖灌注桩成孔工艺及其基桩质量控制研究 [J]. 施工技术, 2014, 43(19): 17-19, 38. (WANG J Q, ZHU Q S, LIU L L, et al. Research on the pore-forming technology of rotary digging cast-in-place pile and quality control in karst area[J]. *Construction Technology*, 2014, 43(19): 17-19, 38. (in Chinese))
- [5] 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. (HOU Z K, LIU Y P, LING Z, et al. Review of research progress on bearing characteristics and key disposal techniques of pile foundation in karst area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(11): 4369-4379. (in Chinese))
- [6] 汪进超, 王彦明, 徐书名, 等. 定向声波扫描在孔周隐伏溶洞探测中的应用 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2025, 33(6): 1759-1767. (WANG J C, WANG Y M, XU S M, et al. Application of directional acoustic scanning in detecting hidden karst caves around borehole[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2025, 33(6): 1759-1767. (in Chinese))
- [7] 何世茂, 鹿 磊, 胡艳玲. 岩溶地区基础选型分析和工程应用 [J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2368-2372. (HE S M, LU L, HU Y L. Analysis and engineering application of foundation selection in karst area[J]. *Building Structure*, 2022, 52(S1): 2368-2372. (in Chinese))
- [8] 曹 强, 周 金. 综合超前地质预报技术在复杂岩溶隧道的应用 [J]. 铁道建筑技术, 2020(11): 146-150, 172. (CAO Q, ZHOU J. Application of comprehensive advanced geology forecast technology in complex karst tunnel[J]. *Railway Construction Technology*, 2020(11): 146-150, 172. (in Chinese))
- [9] 张龙起, 陈 景, 曲朝雷. 唐山岩溶区桩基施工中几个问题的分析与探讨 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 325-330. (ZHANG L Q, CHEN J, QU C L. Analysis and discussion of several issues of pile foundation construction in karst region of Tangshan[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(S1): 325-330. (in Chinese))
- [10] 李春景, 刘爱娟. 岩溶地区大直径钻孔桩施工技术 [J]. 世界桥梁, 2006(2): 35-37. (LI C J, LIU A J. Construction techniques for large diameter bored piles in karst district[J]. *World Bridges*, 2006(2): 35-37. (in Chinese))
- [11] 彭柏兴, 贾永生, 王会云, 等. 深厚填土下复杂岩溶场地大直径桩基勘察与施工措施 [J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 2315-2319. (PENG B X, JIA Y S, WANG H Y, et al. Counter measures and survey for large-diameter pile foundation in complex karst site under deep and thick filling[J]. *Building Structure*, 2021, 51(S1): 2315-2319. (in Chinese))
- [12] HILTUNEN D R, CRAMER B J. Application of seismic refraction tomography in karst terrane[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(7): 938-948.
- [13] LIU L, SHI Z M, PENG M, et al. Numerical modeling for karst cavity sonar detection beneath bored cast in situ pile using 3D staggered grid finite difference method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 82: 50-65.
- [14] PAN C W, ZHANG G C, CHEN S, et al. Study on detection of the bearing stratum integrity of bored pile based on transient electromagnetic method[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 2583113.
- [15] LIU X, PAN C W, ZHENG F K, et al. Transient electromagnetic 1 - dimensional inversion based on the quantum particle swarms optimization - smooth constrained least squares joint algorithm and its application in karst exploration[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022: 1555877.
- [16] LIU L, SHI Z M, LI S J, et al. A system for inspecting karst voids during construction of cast-in-place pile foundations[J]. *Engineering Geology*, 2023, 320: 107124.
- [17] LIU L, SHI Z M, TSOFILIAS G P, et al. Detection of karst cavity beneath cast-in-place pile using the instantaneous phase difference of two receiver recordings[J]. *Geophysics*, 2021, 86(1): EN27-EN38.
- [18] 覃美安, 王小锋. BIM 技术在隐伏溶洞复杂空间形态三维可视化中的应用 [J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 412-416. (QIN X A, WANG X F. Application of BIM technology to 3-D visualization complex spatial morphology of concealed karst caverns[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2017, 37(3): 412-416.

- (in Chinese))
- [19] TRAN K T, MIRZANEJAD M, HORHOTA D, et al. Imaging of voids beyond boring depth with 3D SPT-seismic full-waveform tomography[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2024, 220: 105256.
- [20] WANG Z N, ZHU T Y. Characterizing fractured zones in urban karst geology using leaky surface waves from distributed acoustic sensing[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2025, 130(7): e2025JB031477.
- [21] GONDWE B R N, OTTOWITZ D, SUPPER R, et al. Regional-scale airborne electromagnetic surveying of the Yucatan karst aquifer (Mexico): geological and hydrogeological interpretation[J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(7): 1407-1425.
- [22] SUN H F, ZHANG N Y, LI D R, et al. The first semi-airborne transient electromagnetic survey for tunnel investigation in very complex terrain areas[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 132: 104893.
- [23] BENI T, BORSELLI D, BONECHI L, et al. Use of muon imaging for enhanced reconstruction of underground cavities and associated stability conditions at a historical mining site[J]. *Engineering Geology*, 2025, 353: 108141.
- [24] BALÁZS L, HAMAR G, CSICSEK Á, et al. Detection of fractured zones, faults, and cavities by high resolution muon tomography in the Buda Hills[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 17514.
- [25] 鲍庆伟, 高杰, 张书良, 等. 复杂岩溶地区超大径超长桩旋挖钻入岩施工技术[J]. *世界桥梁*, 2017, 45(4): 41-45. (BAO Q W, GAO J, ZHANG S L, et al. Construction technique of driving very-long and large-diameter piles by rotary drilling in complex karst region[J]. *World Bridges*, 2017, 45(4): 41-45. (in Chinese))
- [26] 苏斌. 岩溶地区钻(挖)孔施工技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(S2): 5240-5243. (SU B. Construction technology of drilled (dug) holes in karst terrain[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(S2): 5240-5243. (in Chinese))
- [27] 郭恒, 袁啸岩, 李金强, 等. 岩溶地区散土-硬岩复杂地层降水井施工技术研究及应用[J]. *施工技术*, 2017, 46(19): 109-113. (GUO H, YUAN X Y, LI J Q, et al. Research and application on construction technology of dewatering well in complex stratum and hard rock of karst area[J]. *Construction Technology*, 2017, 46(19): 109-113. (in Chinese))
- [28] 许汉华, 刘文连, 槐以高, 等. 智能钻孔井下电视在岩溶勘察工程中的应用[J]. *工程勘察*, 2020, 48(9): 30-34. (XU H H, LIU W L, HUAI Y G, et al. Application of intelligent borehole television technique in karst investigation[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2020, 48(9): 30-34. (in Chinese))
- [29] 谢忠球, 张玉池, 肖宏彬, 等. 岩溶地基灌浆质量评价的声波全波列测井技术[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(7): 2757-2761. (XIE Z Q, ZHANG Y C, XIAO H B, et al. Acoustic full wave logging of karst foundation grouting effect evaluation[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(7): 2757-2761. (in Chinese))
- [30] 张广丰. 环境敏感区铁路路基岩溶地基处理新结构研究[J]. *铁道工程学报*, 2018, 35(6): 21-25. (ZHANG G F. Research on the new structure of railway subgrade in karst ground treatment in environmental sensitive area[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2018, 35(6): 21-25. (in Chinese))
- [31] 陈文尹. 高铁隧道底部大型溶洞先通过后处治技术研究[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(4): 248-255. (CHEN W Y. Study on treatment-after-passing technology for large karst cave below high-speed railway tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(4): 248-255. (in Chinese))
- [32] 昌钰, 刘耀峰. 岩溶地区钻孔灌注桩施工质量分析与对策[J]. *工业建筑*, 2013, 43(S1): 670-674. (CHANG Y, LIU Y F. The analysis and countermeasure of construction quality of cast-in-place bored pile in karst area[J]. *Industrial Construction*, 2013, 43(S1): 670-674. (in Chinese))
- [33] XU M J, ZHANG F Y, NI P P, et al. Load-settlement behaviour of membrane-confined grouted pile: experimental and analytical study[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(5): 2777-2793.
- [34] 常晓义. 武广高速铁路岩溶地区钻孔灌注桩施工技术[J]. *铁道科学与工程学报*, 2010, 7(2): 70-73. (CHANG X Y. Construction technology bored pile in karst region of Wuhan-Guangzhou high-speed railway[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2010, 7(2): 70-73. (in Chinese))
- [35] 杨松. 复杂地层环境下的全套管钻孔桩成桩技术[J]. *工业建筑*, 2017, 47(5): 116-121. (YANG S. Unitized technique for complete diving casing cast-in-place pile in complex stratigraphic conditions[J]. *Industrial Construction*, 2017, 47(5): 116-121. (in Chinese))
- [36] 周峰, 屈伟, 陈杰. 岩溶地区端承桩复合桩基的工程实践[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(2): 489-495. (ZHOU F, QU W, CHEN J. Engineering practice on end-bearing composite pile foundation in karst area[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(2): 489-495. (in Chinese))
- [37] 李春生. 深水岩溶地基桥梁灌注桩施工技术与检测分

- 析 [J]. 桥梁建设, 2005(4): 59-61,68. (LI C S. Construction techniques and detection analysis of bridge bored piles in karst ground in deep water[J]. Bridge Construction, 2005(4): 59-61,68. (in Chinese))
- [38] 钟杰, 周楚荣, 何龙, 等. 岩溶地区超高层项目钻孔灌注桩施工技术及其质量控制研究 [J]. 建筑技术, 2023, 54(22): 2739-2741. (ZHONG J, ZHOU C R, HE L, et al. Research on construction technology and quality control of bored pile for super high-rise project in karst area[J]. Architecture Technology, 2023, 54(22): 2739-2741. (in Chinese))
- [39] 杜海龙, 贺茉莉, 罗小斌, 等. 岩溶地区某广场钻孔灌注桩基础补强加固设计与新技术 [J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 600-606. (DU H L, HE M L, LUO X B, et al. A new technology of reinforcement by cast-in-place pile foundation in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 600-606. (in Chinese))
- [40] 储珺, 李国胜. 岩溶地区某33层住宅楼桩端基岩厚度不足问题分析及处理 [J]. 建筑结构, 2019, 49(17): 136-141. (CHU J, LI G S. Analysis and treatment of insufficient pile-end bedrock thickness of a 33-storey residential building in karst area[J]. Building Structure, 2019, 49(17): 136-141. (in Chinese))
- [41] 陈东波. 岩溶地区厚覆砂层桩基施工方案比选及实例分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52(17): 139-144. (CHEN D B. Comparison selection and case analysis on construction schemes of thick sand layer covered pile foundation in karst district[J]. Building Structure, 2022, 52(17): 139-144. (in Chinese))
- [42] 郑杰元, 汪勇, 卿伟宸. 成贵高铁玉京山隧道巨型溶洞顶板防护技术研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41(S2): 413-420. (ZHENG J Y, WANG Y, QING W C. Roof protection technology for giant karst cave in Yujingshan tunnel of Chengdu-Guiyang high-speed railway[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 413-420. (in Chinese))
- [43] 梅国雄, 陆志宇, 陈家勋, 等. 岩溶地区新型灌注桩承载机理试验及模拟研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49(7): 32-44. (MEI G X, LU Z Y, CHEN J X, et al. Experiment and simulation research on bearing mechanism of a new type grouted pile in karst area[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 32-44. (in Chinese))
- [44] 肖鸿斌, 金耀岷. 深埋串珠状溶洞的超高层基础设计案例分析 [J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 382-390. (XIAO H B, JIN Y M. Case study on super high-rise foundation design of the deep-buried beaded karst cave[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(2): 382-390. (in Chinese))
- [45] 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.
- [46] GOTMAN N Z, EVDOKIMOV A G. Calculation of bridge-support pile foundations taking karst deformations into account in the base[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2023, 60(5): 401-409.
- [47] HAN G, ZHANG H, WANG Z R, et al. Bearing behavior of rock socketed pile in limestone stratum embedded with a karst cavity beneath pile tip[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e02203.
- [48] 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(1): 17342.
- [49] SHENG M H, LU F Q, JIANG N, et al. Bearing behavior of pile foundation in karst region: physical model test and finite element analysis[J]. Applied Rheology, 2024, 34(1): 20230115.
- [50] HUANG L J, GAO R, CHI J G, et al. Study on load-bearing behaviors of prestressed post-grouting tubular piles in the karst region of northern Fujian Province, China[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12: 1387028.
- [51] ZHOU D Q, ZHU Q, PENG W Z, et al. Effect of newly built embankments on existing bridge piles passing through beaded karst caves[J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(6): 04024111.
- [52] PENG W Z, JIANG X J, ZHU Q, et al. Responses of karst-penetrating piles under active and passive loading: experimental and numerical investigation[J]. Transportation Geotechnics, 2025, 54: 101649.
- [53] 张慧乐, 张智浩, 王述红, 等. 岩溶区嵌岩桩的试验研究与分析 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 92-103. (ZHANG H L, ZHANG Z H, WANG S H, et al. Experimental study and analysis on rock-socketed pile in karst area[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(1): 92-103. (in Chinese))
- [54] 汪婧. 基于上限分析原理的岩溶桩基破坏模式与极限承载力计算 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(9): 2207-2214. (WANG J. Failure mode and ultimate bearing capacity of karst pile foundation based on upper-bound theorem[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2207-2214. (in Chinese))
- [55] 艾凯, 王静. 岩溶地区桩基的有限元分析 [J]. 岩土力学, 2003, 24(S1): 124-126. (AI K, WANG J. Study of piles foundation in karst area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S1): 124-126. (in Chinese))
- [56] 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 Y X, FENG Z J, HAO Y M, 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. (in Chinese))
- [57] OU X D, SANG R H, BAI L, et al. Investigation on the post-grouting bearing capacity of bored piles in a highly weathered mudstone layer based on the O-cell test method[J]. *Acta Geotechnica*, 2025, 20(7): 3703-3723.
- [58] Wan Z H, Dai G L, Gong W M. Field and theoretical analysis of response of axially loaded grouted drilled shafts in extra-thick fine sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, 57(3): 391-407.
- [59] 马永峰, 冉万云, 周丁恒, 等. 岩溶地区大型炼厂地基钻孔灌注桩处理的现场试验 [J]. 土工基础, 2015, 29(5): 70-75. (MA Y F, RAN W Y, ZHOU D H, et al. In-situ tests of cast-in-place reinforced concrete piles for large oil refinery foundations in karst[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2015, 29(5): 70-75. (in Chinese))
- [60] 王家全, 王宇帆, 苏小舟, 等. 岩溶区灌浆处理桩端缺陷及其质量判定方法研究 [J]. 混凝土, 2013(4): 133-136. (WANG J Q, WANG Y F, SU X Z, et al. Based on the karst grouting treatment pile-end defects and quality decision method study[J]. *Concrete*, 2013(4): 133-136. (in Chinese))

收稿日期: 2025-06-21