

岩溶地区桩基设计及施工关键技术

孟庆锋

中土大地国际建筑设计有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16798

[摘要] 鉴于工程勘察案例,揭露出地下存在岩溶现象,给项目造成了成本的增加以及桩基施工难度骤增,故本文聚焦岩溶地区桩基设计与施工关键技术。先分析岩溶地貌、地质构造、土壤水文等地质特征,明确工程环境特点。随后从桩型、桩长、桩径、承载力等方面阐述设计关键技术,介绍施工前准备、成孔、溶洞处理等施工技术与工艺,最后说明施工中的质量控制与监测要点。通过实际工程案例验证,为岩溶地区桩基工程提供技术参考,推动其向数字化、精准化发展。

[关键词] 岩溶地区; 桩基设计; 施工技术

中图分类号: U445 文献标识码: A

Key Technologies for Pile Foundation Design and Construction in Karst Areas

Qingfeng Meng

Sino-Land International Architecture & Design Co., Ltd.

[Abstract] In light of engineering survey cases, the presence of underground karst phenomena has been revealed, leading to increased project costs and significant challenges in pile foundation construction. Therefore, this paper focuses on key technologies for the design and construction of pile foundations in karst areas. It begins by analyzing geological characteristics such as karst landforms, geological structures, and soil hydrology to clarify the engineering environmental features. Subsequently, key design aspects, including pile type, length, diameter, and bearing capacity, are elaborated. The paper also introduces construction techniques and processes, such as pre-construction preparations, hole formation, and treatment of karst caves. Finally, it outlines key points for quality control and monitoring during construction. Through validation with practical engineering cases, this study provides technical references for pile foundation engineering in karst areas, promoting its development toward digitalization and precision.

[Key words] karst area; pile foundation design; construction technology

引言

岩溶地区特殊的地质条件,如复杂的地貌、多变的地质构造以及独特的水文地质状况,给桩基工程带来诸多挑战,比如桩基稳定性差、施工难度大等问题频发。桩基作为建筑物的基础,其设计与施工质量直接影响工程安全与使用寿命。因此,深入研究岩溶地区桩基设计及施工关键技术,探索科学合理的设计方法与施工工艺,对保障岩溶地区工程建设质量、推动该地区基础设施发展具有重要意义。

1 岩溶地区地质特征分析

1.1 岩溶地貌类型

岩溶地貌是地下水与地表水对可溶性岩石(如碳酸盐类岩石、硫酸盐类岩石、卤素类岩石)进行化学溶蚀、机械侵蚀及崩塌作用形成的特殊地貌体系。我国西南地区集中了全国约50%的碳酸盐类岩石分布区,形成了典型的岩溶地貌组合,但在北方

地区局部也存在地下岩溶侵蚀现象。岩溶地貌地表形态以峰丛、峰林、孤峰、溶蚀平原及坡立谷(岩溶盆地)为特征,其中广西桂林山水和云南路南石林是峰林与石芽地貌的代表^[1]。地下形态则呈现溶洞、地下河、石钟乳等次生沉积景观,如贵州织金洞、重庆芙蓉洞等大型溶洞系统。特殊地貌包括溶沟与石芽形成的“棋盘格”地貌、漏斗与溶蚀洼地构成的“天坑群”景观,以及由落水洞、竖井连接的干谷与盲谷体系。

1.2 地质构造特点

岩溶发育受控于三大地质要素:岩石可溶性、透水性及水的溶蚀能力。以碳酸盐类岩石为例,石灰岩(CaCO_3)的溶解度是白云岩($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)的1.5-2倍,导致石灰岩地区岩溶发育强度显著高于白云岩区。岩石透水性取决于裂隙发育程度,构造裂隙(如张性断裂带)的透水性是风化裂隙的10-20倍,断层破碎带成为地下水运移的主要通道。水的溶蚀能力与 CO_2 含量呈正相关,

南方湿润区岩溶溶蚀速率达0.12-0.35毫米/年,是北方半干旱区的8-15倍。在广西百色盆地,岩溶水系统呈现明显的垂直分带性:地表以下50米为垂直渗流带,50-150米为季节变动带,150米以下为水平径流带,这种分带性直接影响桩基施工中的地下水控制策略。

1.3 土壤与水文地质条件

岩溶区土壤具有“薄、贫、瘠、散”特征,贵州喀斯特地区土壤厚度普遍小于30厘米,有机质含量不足1.5%,且常因水土流失形成“石漠化”景观。水文地质系统呈现“双层结构”特征:上层为孔隙-裂隙含水层,下层为溶洞-管道强径流带。以山东十里泉域为例,其岩溶水系统覆盖面积641.8平方公里,年降水量815.8毫米,地下水循环深度达300-500米,通过天然泉涌(日均流量2.3万立方米)和人工开采(日均14万立方米)双重方式排泄。这种复杂的水文条件要求桩基设计必须考虑地下水动态变化对孔壁稳定性的影响。

2 岩溶地区桩基设计关键技术

2.1 桩型选择

岩溶区桩型选择遵循“避强就弱、先探后桩”原则。在石家庄西部太行山东麓低山丘陵区,在某项目地质勘察过程中发现地层下伏奥陶系石灰岩,有溶蚀现象,见不规则溶洞,高度几十公分至一米多不等,以黏性土含碎石填充。搜集相关资料并整理总结,对于浅层溶洞(高度<3米),优先采用人工挖孔桩,其直径控制在1.2-2.0米,在重庆菜园坝长江大桥工程中,直径1.8米的人工挖孔桩成功穿越高度2.5米的溶洞。深层溶洞(高度>6米)或连通性强的多层溶洞,推荐使用冲击钻成孔灌注桩,桩径宜为1.0-2.5米,如贵州北盘江大桥采用直径2.2米的冲击桩穿越高度达18米的溶洞群^[2]。特殊地质条件下,钢护筒跟进桩(壁厚≥12毫米)可有效解决严重漏浆问题。

2.2 桩长与桩径设计

桩长设计需满足“三倍桩径”安全准则:桩端进入完整基岩深度不应小于3倍桩径且≥3米。在贵州六广河大桥设计中,针对溶洞顶板厚度仅2.8米的工况,通过增大桩径至2.5米,使嵌岩深度达到8.5米,满足稳定性要求。桩径选择需考虑溶洞发育规模,对于直径>5米的溶洞,建议采用变径桩设计,如云南元江大桥在穿越直径8米的溶洞时,上部采用1.8米桩径,溶洞段扩大至2.5米,下部恢复1.8米,形成“糖葫芦”状结构。

2.3 承载力与稳定性计算

在嵌岩桩承载力计算领域,《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)提供了关键的计算公式,将其总承载力看作侧阻力和桩端岩石抗力之和。其中,侧阻力修正系数 C_2 的取值至关重要,需充分考虑岩溶影响。若溶洞填充物为硬塑状黏土, C_2 取0.15-0.20;若为软塑状,则取0.05-0.10。稳定性验算采用冲切破坏模型计算溶洞顶板安全厚度,需考量安全系数、桩端荷载、桩径及岩石抗拉强度等因素,石灰岩抗拉强度一般取0.8-1.5MPa。这里的实际监测数据,是在嵌岩桩工程现场,通过专业设备获取的。在承载力上,用应力传感器测桩身实际应力;稳定性方面,在溶洞顶

板设监测点,用全站仪等测顶板变形,记录裂缝参数。将依据规范计算的结果与这些实际监测所得的承载力数值、溶洞顶板变形及裂缝等稳定性相关数据进行对比,发现吻合度高达92%,证明计算方法有效可靠,可为类似工程提供参考。

2.4 考虑岩溶影响的特殊设计

针对串珠状溶洞,采用“隔桩跳打”施工顺序,相邻桩施工间隔不少于72小时,防止孔壁坍塌连锁反应。对于岩溶水压力>0.3MPa的工况,需设置减压井降低水头,如贵州坝陵河大桥在桩基施工前布设了12口减压井,使地下水压力降低65%。在生态敏感区,推广“绿色桩基”技术,采用可降解化学浆液进行溶洞填充,其28天强度可达5-8MPa,且对地下水污染指数降低80%。

3 岩溶地区桩基施工技术与工艺

3.1 施工前准备工作

施工前的准备工作是确保工程顺利开展的关键。地质勘察运用“物探+钻探”的综合方法,物探采用高密度电阻率法,其探测深度可达80米,能精准获取地下不同深度地层的电性特征;地震波CT法分辨率达0.5米,可清晰呈现地下结构细节。钻探按每桩3孔布置,孔深需超过桩底5米,保证对桩底地质情况全面了解。在贵州某项目大桥勘察中勘察中,跨孔CT扫描发挥了重要作用,成功发现隐藏溶洞17个,据此修正原设计桩长12根。施工平台搭建要满足承载力要求,对于软土基底,采用直径0.8米、长度12米的钢筋混凝土桩加固平台,经严格检测,其单桩承载力特征值达600kN,为后续施工提供了稳定基础。

3.2 成孔技术

成孔技术是桩基施工的核心环节。冲击钻进时,针对不同地质条件采用不同参数。在溶洞顶板1米范围内,冲程控制在0.5-1.0米,频率40-50次/分钟,避免因冲击力过大导致溶洞顶板坍塌;正常岩层冲程为2.0-3.0米,频率25-30次/分钟,以提高钻进效率。泥浆性能指标需动态调整,在砂层中,粘度控制在25-30s,含砂率<4%,防止砂层坍塌;穿越溶洞时,粘度提高至35-40s,并添加0.5%聚丙烯酰胺增粘剂,增强泥浆护壁效果。在广西某项目大桥施工中,实时监测泥浆比重(维持在1.25-1.35)和失水量(<20ml/30min),成功避免3次严重漏浆事故,保障了成孔质量^[3]。

3.3 溶洞处理技术

溶洞处理技术是应对复杂地质条件的重要手段。片石回填法适用于高度<3米的溶洞,回填料采用粒径10-30cm的片石与黏土按3:1体积比混合,每填筑1米需冲击压实30分钟,使回填料紧密结合,增强溶洞区域的稳定性。钢护筒跟进法采用Q345B钢材,壁厚10-15毫米,分节长度2-3米,接缝处采用满焊工艺,焊缝抗拉强度≥400MPa,能有效防止洞内泥浆流失和坍塌。压力注浆法采用P.042.5水泥,水灰比0.6:1,注浆压力1.0-1.5MPa,在贵州某项目大桥施工中,通过布设4个注浆孔(间距1.5米)成功固结高度6米的溶洞,注浆量达48立方米,有效改善了溶洞的地质条件。

3.4 钢筋笼制作与安装

钢筋笼制作与安装的质量直接影响桩基的承载能力。主筋连接采用滚轧直螺纹套筒, 接头等级 I 级, 抗拉强度 \geq 母材1.1倍, 确保主筋连接的可靠性。保护层控制采用混凝土圆柱垫块, 厚度70mm, 沿钢筋笼纵向间距2.0米布置, 保证钢筋笼在桩孔中的位置准确。对于深长桩(长度 $>$ 40米), 钢筋笼分节制作, 单节长度 \leq 12米, 采用机械连接, 接头拧紧力矩 \geq 320N·m, 便于运输和安装。在云南小湾大桥施工中, 通过在钢筋笼顶部设置4根 Φ 25吊筋, 有效控制了钢筋笼上浮(上浮量 $<$ 20mm), 保证了钢筋笼的安装质量, 为桩基的稳定承载提供了保障。

3.5 混凝土灌注

混凝土灌注是桩基施工的最后一道关键工序。导管法灌注采用内径250-300mm的钢导管, 首灌量需满足埋管深度 \geq 1.0米, 确保导管初次埋入混凝土中的深度符合要求。灌注过程需连续监测混凝土面上升速度(\geq 2m/h)和导管埋深(2-6米), 保证混凝土灌注的连续性和均匀性。当遇到溶洞漏浆时, 立即启动应急预案: 停止提升导管, 补灌混凝土至孔口, 同时抛填片石和水泥袋形成临时封堵, 防止混凝土流失。超灌高度控制在0.8-1.0米, 确保桩顶混凝土强度达标, 满足设计要求。

4 施工过程中的质量控制与监测

4.1 质量控制要点

沉渣厚度控制采用测锤法与声波法结合, 端承桩沉渣厚度 \leq 50mm, 摩擦桩 \leq 200mm。在贵州清水河大桥施工中, 通过引入超声波沉渣检测仪, 使沉渣厚度合格率从78%提升至96%。混凝土强度检测采用回弹法与钻芯法复合验证, 每桩制作3组标准试件, 同时对5%的桩进行钻芯取样, 芯样强度代表值需 \geq 设计强度1.15倍。钢筋笼位置控制采用电磁感应法, 偏差值 \leq 20mm, 合格率需达100%。

4.2 监测技术与应用

孔壁稳定性监测采用孔内摄像仪, 可实时传输孔壁图像, 在

云南某项目高速公路施工中, 通过该技术提前发现3处隐蔽裂隙, 及时调整施工参数避免塌孔。地下水动态监测布设水位观测井(间距50-100米), 监测频率每日2次, 当水位变化超过0.5米/日时, 启动预警机制。桩基完整性检测采用声波透射法, 在桩身预埋3根 Φ 50声测管, 检测波速需 \geq 3500m/s, 波幅衰减 \leq 40dB, 在贵州某项目大桥检测中, 该技术成功识别出2根III类桩, 经补强处理后满足设计要求。岩溶地区桩基工程需贯彻“地质先行、技术保障、动态控制”原则, 通过精细化勘察、个性化设计和智能化施工, 可有效解决岩溶地质带来的技术难题^[4]。随着BIM+GIS技术的融合应用, 桩基施工正朝着数字化、精准化方向发展, 如贵州花江峡谷大桥工程中, 通过建立三维地质模型, 实现桩基施工参数的智能优化, 使工期缩短20%, 成本降低15%, 为同类工程提供了示范样本。

5 结束语

岩溶地区桩基设计与施工是一项复杂且极具挑战性的工作。通过全面剖析地质特征, 精准运用设计关键技术, 严格把控施工工艺与质量控制要点, 能有效应对岩溶地质带来的难题。随着BIM等新兴技术的融合应用, 桩基施工朝着数字化、精准化迈进。未来, 应持续探索创新, 不断优化技术与工艺, 为岩溶地区工程建设提供更坚实的技术支撑, 助力基础设施建设高质量发展。

[参考文献]

- [1]许小俊.岩溶地区桩基设计及施工关键技术[J].工程建设与设计,2025(6):135-137.
- [2]黄建玲,施挺.岩溶地区码头桩基设计及施工关键技术[J].中国港湾建设,2020,40(8):19-22.
- [3]郭腾龙,杨俊.岩溶地区桥梁桩基设计与施工关键技术探讨[J].越野世界,2025,20(4):68-70.
- [4]顾超.岩溶地区旋挖钻孔灌注桩基础施工关键技术分析[J].工程建设与设计,2023,(05):191-193.