

复杂岩溶场地桥梁桩基选型探究与实践

罗庆锋

(广东省水文环境地质调查中心, 广东 广州 510080)

摘要: 石灰岩地区受岩性特征、地质构造、地下水作用等多因素影响, 导致地下岩溶隐蔽性强、不规则、复杂多变, 复杂岩溶不良地质条件对桥梁桩基产生不利影响。为解决复杂岩溶场地桥梁桩基选型的问题, 结合场地详实地质条件和岩溶发育特征, 通过对桩基承载性状、桩基成桩施工方式、桩基埋置深度等方面的探究和分析, 提出了复杂岩溶区桩基埋置深度并非越深越好; 另外部分复杂岩溶区地段完整持力层埋藏深度极大或者无连续完整的持力层, 对于该特殊地质条件, 可考虑进行人造持力层, 即通过人为改造构筑连续持力层以满足桩基承载力。相关实践案例可作为复杂岩溶区桩基选型的参考。

关键词: 石灰岩; 岩溶; 嵌岩桩; 摩擦桩; 灌注桩; 预应力管桩; 人造持力层

中图分类号: U443.15; TU997

文献标志码:

文章编号: 1009-7716(2026)04-0228-04

Exploration and Practice on Selection of Bridge Pile Foundations in Complex Karst Sites

LUO Qingfeng

(Guangdong Hydrogeological Environmental Geological Survey Center, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Limestone regions are influenced by multiple factors such as lithological characteristics, geological structures and groundwater activity, resulting in strong concealment, irregularity and complex variability of underground karst. The adverse geological conditions of complex karst significantly impact the bridge pile foundations. To address the challenges of pile foundation selection in complex karst sites, combined with the detailed site geological conditions and the karst development characteristics, and through exploration and analysis on the bearing characters, piling construction methods and burial depth of pile foundation, it is proposed that the burial depth of pile foundations in complex karst areas is not necessarily the deeper the better. Additionally, in certain areas with extremely deep or discontinuous intact bearing strata, the artificial bearing layers can be considered by artificially constructing the continuous bearing strata to meet the bearing capacity of pile foundations. The relevant practical cases can serve as references for the selection of pile foundations in complex karst regions.

Keywords: limestone; karst; socketed pile; friction pile; cast-in-place pile; prestressed pipe pile; artificial bearing stratum

0 引言

石灰岩在我国分布广, 石灰岩地区往往基岩表面起伏大, 溶沟、溶槽、溶洞发育, 无风化岩层覆盖等特点^[1]。地下水在岩石中流动和侵蚀形成岩溶, 受岩性特征、岩体结构、地质构造、地下水作用等多因素影响, 导致地下岩溶隐蔽性强、不规则、复杂多变、稳定性差。近年来随着我国基础设施建设的不断推进和发展, 更多的工程需要建造在岩溶发育区域上^[2]。目前国内众多学者对岩溶地区进行研究, 如: 龚道平等^[3], 详细分析了赤水特大桥岩溶地质条件,

合理确定了桥梁跨径和桥梁主塔的安全位置, 指出了岩溶复杂发育区内地基的工程地质适宜性分析评价是基础, 更是决定桥梁结构类型的关键条件; 彭银辉^[4]分析溶洞顶板厚度、洞跨、洞高等因素对岩溶区桩基承载力的影响; 武进广等^[5], 分析了桩基基底存在溶洞时, 嵌岩深度的增加对桩基承载特性的影响, 指出合理增加桩基嵌岩深度, 能有效减小溶洞周边岩体所受应力, 同时能避免溶洞周边出现受拉区; 付梦求^[6]以2座危桥改造项目为背景, 分别总结岩溶施工处治原则以及桩基设计措施, 即采用避让措施, 将单排端承桩优化设计为双排摩擦桩, 解决复杂岩溶施工问题。李强、秦余顺^[7]依托中老铁路朋松楠松河特大桥岩溶桩基施工, 综合工程安全、质量、工期、成本、环境等多方面因素, 研究适用于不同发育

收稿日期: 2025-08-07

作者简介: 罗庆锋(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程技术和管理工作。

形态岩溶的处理技术。郑伟国等^[12],探讨岩溶区房建项目桩基选型,根据基岩埋藏深和浅分别选择预应力管桩作为摩擦桩和采用预应力管桩作为端承群桩形成桩筏。上述的岩溶研究多聚焦于岩溶区勘察技术、岩溶桩基承载特性、桩基施工措施等方面,本次研究从桥梁桩基选型角度出发,对桩基受力承载性状、桩基成桩施工方式、桩基埋置深度以及持力层人为改造方面进行研究,确定适合岩溶场地的桩型。

1 桩基承载性状选型

(1)桩基按承载性状分为摩擦型桩和端承型桩,岩溶地区端承型桩多采用嵌岩桩。

(2)岩溶地区,桥梁单桩荷载较大,岩层埋藏较浅时,宜采用嵌岩桩。采用嵌岩桩时,除了应控制嵌岩桩全断面进入稳定持力层一定深度外,桩端以下 $3d(d$ 为桩径)且不小于5 m范围应无洞穴分布,且在桩底应力扩散范围内无岩体临空面^[8],确保桩基稳定性。

(3)当基岩面起伏很大且埋深较大时,桥梁桩基宜采用摩擦桩。实际工程中,为避免扰动下部岩溶,摩擦桩以岩溶上覆的岩土层为持力层,由于缩短了桩长,为了满足桩基荷载要求,往往又需要采用双桩或多桩型式。如,广州城区某立交桥项目,其中一桥墩地质勘察揭露该处自上而下分布填土层、粉质黏土、坚硬土状全风化砂砾岩、石灰岩,两钻孔相距3.0 m,一个钻孔揭露石灰岩,另一个钻孔孔深范围未揭露石灰岩,但揭露串珠状岩溶,地质钻孔揭示该位置为白垩系与石炭系交界不整合接触带,地质变化大,石灰岩岩面起伏差异极大,灰岩岩面地下水活跃,伴生岩溶,与石灰岩岩面相接触的坚硬土状全风化砂砾岩存在土质松软现象,钻孔揭露的地质条件见图1。

该桥墩下部结构原设计采用单桩(直径1.80 m)及承台,需利用下伏石灰岩作为桩端持力层,按嵌岩桩考虑。但地质资料显示,下部岩溶发育而且完整石灰岩埋深较大,施工难度也较大,故考虑桩基浅埋,将桩端布置于全风化砂砾岩。由于全风化砂砾岩已风化呈土状,桩基单桩轴向受压承载力按支承在土层中的桩进行计算,经计算,需增加桩数,为双桩,即两根直径为1.50 m桩,两桩均为摩擦桩,以全风化砂砾岩作为桩端持力层,桩长一致,并相应增大承台尺寸。该桥已通车十余年,运营安全。

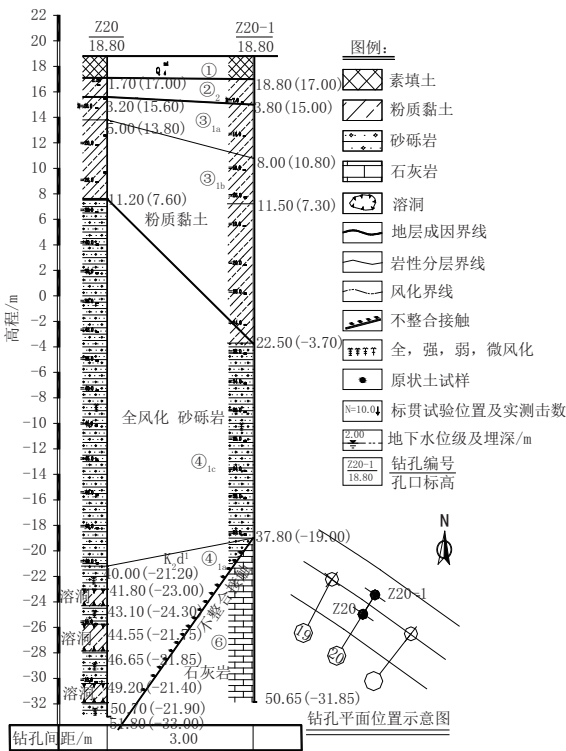


图1 摩擦桩桩位钻孔资料(单位:m)

2 桩基成桩方法选型

(1)石灰岩地区桥梁桩基以灌注桩(钻孔灌注桩、冲孔灌注桩、旋挖灌注桩)为主,灌注桩施工技术成熟,场地适应性强,应用范围广,对于复杂岩溶场地,桩基施工时可采用混凝土回填、钢护筒或提前预处理等辅助措施^[9-11],辅助措施不仅能够提高灌注桩施工安全性,而且也能保障桩基施工质量。

(2)在石灰岩地区的房屋建筑工程上,有较多的预应力管桩应用案例及研究^[12-14],预应力管桩桩身质量有保证,桩基施工快速、无泥浆污染、承载力可控。对于桥跨度不大的中小桥、天桥等桩基,结合地质条件,也可采用预应力管桩(静压预应力管桩、锤击法预应力管桩、随钻跟管预应力管桩^[15])。如广州白云区某天桥,勘察揭露岩土条件自上而下主要为,填土层、冲积粉质黏土层、细砂层、残积粉质黏土层、石灰岩,石灰岩顶面埋深13.00~22.00 m,场地揭露岩溶发育率为50%,强发育,岩溶呈串珠状,岩溶洞高0.50~4.00 m。该天桥典型地质剖面见图2。该天桥下部桩基础通过方案比选后,选择静压预应力管桩群桩基础,天桥主桥墩采用4桩及承台,梯道墩采用2桩及承台,以石灰岩顶面为桩端持力层,平均桩长约16.0 m。该天桥已竣工运营,运行良好。

(3)岩溶区采用预应力管桩,若以石灰岩顶面为持力层时,单桩承载力不宜高估。由于石灰岩顶面

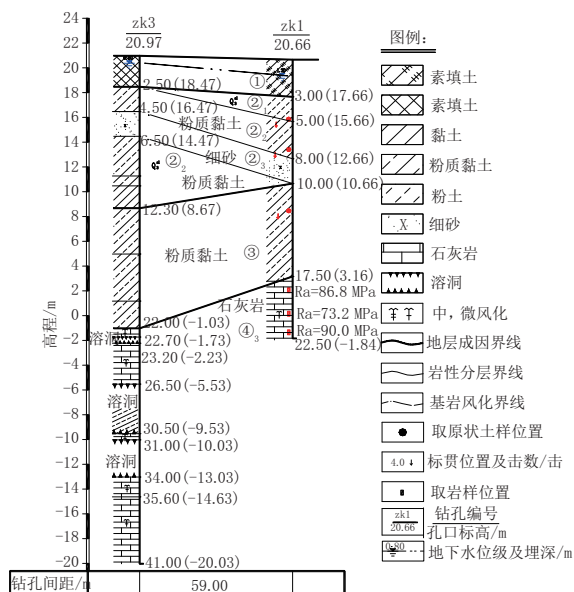


图2 人行天桥典型地质剖面图(单位:m)

起伏,岩面陡斜地段,按过高单桩承载力确定的终压标准进行施工,预应力管桩容易发生断桩现象。石灰岩埋藏浅并以石灰岩顶面为持力层时,预应力管桩选型思路是“多桩低承载力”,根据以往工程经验,直径400~500 mm、桩长小于20.0 m的预应力管桩,单桩轴向受压承载力特征值较为合适的取值是600~800 kN。

3 桩基埋置深度

(1)复杂岩溶区桩基埋置深度需结合桥梁荷载要求、地质条件进行确定,并兼顾施工技术,复杂岩溶区桩基埋置深度并非越深越好。

(2)石灰岩岩层埋藏较浅时,若采用嵌岩桩,嵌岩桩全断面嵌入稳定持力层深度除了满足竖向荷载要求外,还应结合上覆土层性质进行确定,尤其上覆软土层时,软土对桩基侧向约束力较小^[16],在水平荷载、振动、不平衡推力作用下,桩基扰度过大,易引发风险及事故。遇该类情况时,桥梁嵌岩桩埋置深度及嵌岩深度应适当增加。

(3)复杂岩溶区,以岩溶上覆的岩土层为持力层而采用摩擦桩时,摩擦桩埋置深度宜远离岩溶,必要时可对下部土体(或岩溶)进行注浆处理。另外,复杂岩溶场地,若采用摩擦桩时,应避免抽排地下水,以免对桥梁桩基安全产生不利影响。

4 桩基持力层改造

由于桥梁荷载大,复杂岩溶区桥梁桩基一般将桩基置于连续完整持力层之上,但部分复杂岩溶区

连续完整持力层厚度不足,难以满足 $3d$ (d 为桩径)的桩端持力层;或者连续完整持力层埋藏深度大,桩基埋置深,在实际施工中,相应施工难度大、造价高,深度越大,桩基穿越溶洞施工风险也越高。对于这类特殊情况,可采用适当厚度的石灰岩作为持力层,对下卧的溶洞进行处理,人为营造持力层,构筑连续持力层以满足桩基承载力要求,这样不仅能减小桩底深度,加快施工进度,确保溶洞处理安全可靠的同时也能降低工程造价。

如某跨江大桥主塔桥墩桩基,采用16根桩径2.20 m灌注桩,单桩竖向承载力特征值为24 000 kN。详勘、超前钻均揭示该塔基下部基岩起伏较大,串珠状岩溶发育,溶洞为全充填或无充填,溶洞最大高度20.0 m。综合分析详勘、超前钻及跨孔CT资料后发现,桥墩承台西北侧岩溶复杂多变、串珠状岩溶发育、深度大,至高程-100.0 m都还分布岩溶,而桥墩承台东南侧岩溶相对稳定(高程-60.0 m以下无溶洞或发育个别溶洞)。针对该特殊的复杂岩溶地质,桩基采用一桩一设计,确保桩底持力层为微风化石灰岩,而且桩底完整持力层厚度不小于 $3d$ (d 为桩径)。根据上述原则进行设计时,有一根桩桩长大于96 m,桩底标高将大于-91 m,而且超前钻钻孔深度不足。该桩位处3个超前钻钻孔揭露地质情况见图3。

仔细分析研究该桩位地质资料,并对该桩位溶洞顶板进行冲切破坏分析、溶洞顶板弯曲破坏分析,考虑溶洞顶板与人造持力层两者共同受力,经分析计算,确定以标高-83.58~-87.68 m的石灰岩作为桩基持力层,该桩桩底标高-84.60 m,并且在桩基施工前将下部标高-87.68~-90.58 m范围的溶洞进行高压注浆处理,采用双液高压注浆使桩底形成密实、连续、并有一定强度的人造持力层(见图4),注浆后在桩孔中心位置钻取芯样,检验持力层溶洞处理效果,若固结体接缝完整且强度达到要求,视为合格,反之须再次进行注浆处理,直至形成有效的人造持力层。

该桩基成桩后,经过抽芯检测确认为I类桩。该桥已通车运营。经此改造处理后,最终该桩桩长减少约10%,减小施工难度,缩短工期,节约造价。有别于正常桩基以连续完整原岩为持力层,该桥桩基持力层改造实践为桩基选型提供了另一种思路。

5 结语

(1)岩溶地区,桥梁单桩荷载较大,岩层埋藏较

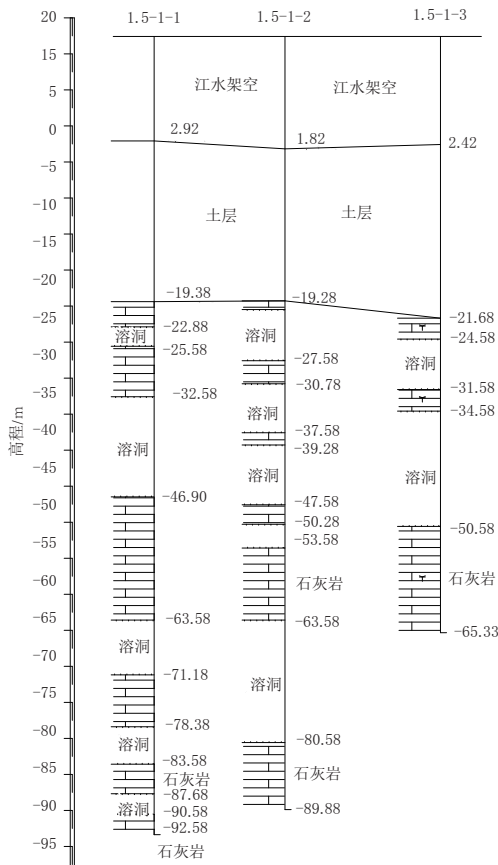


图3 15-1 桩超前钻资料(单位:m)



图4 15-1 桩注浆接缝完整

浅时,宜采用嵌岩桩。当基岩面起伏很大且埋深较大时,桥梁桩基宜采用摩擦桩。实际工程中,为避免扰动下部岩溶,摩擦桩以上部岩土层为持力层时,为满足桩基荷载要求往往需采用双桩或多桩型式。

(2)石灰岩地区桥梁桩基以灌注桩为主。对于桥跨度不大的中小桥、天桥等桩基,也可采用预应力

管桩。岩溶区采用预应力管桩,若以石灰岩顶面为持力层时,单桩承载力不宜高估,否则预应力管桩容易发生断桩现象。

(3)复杂岩溶区桩基埋置深度需结合桥梁荷载要求、地质条件进行确定,并兼顾施工技术,复杂岩溶区桩基埋置深度并非越深越好。

(4)随着新材料、新技术应用,对于部分复杂岩溶区可考虑进行桩端人为改造,构筑连续持力层以满足桩基承载力要求。

参考文献:

[1] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
[2] 陈慧芸,冯忠居,白少奋.桥梁桩基穿越溶洞的荷载传递机制试验研究[J].岩土力学,2023,44(5):1405-1415.
[3] 龚道平,胡惠华,王泗,等.复杂发育区公路桥梁地基适宜性分析研究——以赤石特大桥为例[J].工程勘察,2024(8):26-32.
[4] 彭银辉.岩溶地区桥梁桩基设计探讨[J].北方交通,2016(5):9-11.
[5] 武进广,吴南,周宏伟.嵌岩深度对下伏溶洞桥梁桩基承载特性影响分析[J].铁道勘察,2024(2):104-109.
[6] 付梦求.复杂岩溶地质桥梁桩基础的设计和施工探究[J].广东土木与建筑,2023,30(12):120-123.
[7] 李强,秦余顺.中老铁路桥梁桩基岩溶处理施工技术研究[J].中国岩溶,2019,38(4):607-611.
[8] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
[9] 柳学伟.地质灾害与环境保护复杂地质条件下岩溶区特大桥桩基施工关键技术[J].地质灾害与环境保护,2022,33(2):98-101.
[10] 曾帅.岩溶地区桩基施工及泥浆护壁机理研究[D].淮南:安徽理工大学,2018.
[11] 刘丽丽.岩溶地质条件下的高速公路桥梁桩基处治要点[J].交通世界,2023,34(12):145-147.
[12] 郑伟国,谢毓才,薛绪标.岩溶地区桩基选型浅谈[J].岩土工程学报,2011,33(增刊2):404-407.
[13] 邓伟.水泥土复合管桩在深圳市龙岗区中心城岩溶地区应用研究[J].广东土木与建筑,2024,31(3):53-55.
[14] 韩国壮.复杂岩溶地区建筑桩基础优化和溶洞处理技术研究[J].广东土木与建筑,2024,31(11):16-19.
[15] 胡贺松,唐孟雄,刘春林,等.大直径随钻跟管桩竖向抗压承载性能试验研究[J].土木工程学报,2022,55(2):92-98.
[16] 叶灏衍.海相软土中桩基受竖向和水平荷载共同作用下力学性能研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.