

岩溶地区水处理构筑物基础设计施工探讨

毛江才¹, 张文宏¹, 徐正荣²

(1. 杭州市建设工程质量安全监督总站, 浙江 杭州 310000; 2. 杭州市水务集团有限公司, 浙江 杭州 310009)

摘要: 基于周边环境极其复杂且岩溶发育场地内的水处理工程, 对基础选型进行探讨, 得出适用性最高的为灌注桩基础。采用一桩一孔补充勘察判断岩溶分布的情况, 以桩端嵌岩深度为原则确定桩长。根据试桩过程中出现的混凝土超灌、流失、串孔等问题, 分析并探讨不同处理方法的效果, 提出“由外向内、有溶洞到无溶洞、由大到小、由多到少、由深到浅”跳打桩方案和全套筒不拔出处理中大型溶洞、超灌混凝土处理小型溶洞、预注浆处理无法明确的溶洞等处理方案, 为大规模成桩提供良好的技术支持。最后, 对溶洞的勘察、设计和施工经验进行总结, 得出岩溶分布具有较强的不确定性, 超前勘察是制定溶洞处理方案的必要前提, 设计和施工过程中尚需根据溶洞的实际情况进行动态调整, 以确保处理的效果、桩端入岩的深度和成桩的完整性。

关键词: 岩溶; 溶洞; 灌注桩; 勘察; 设计; 施工

中图分类号: TU473

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0387-05

Discussion on Foundation Design and Construction of Water Treatment Structure in Karst Areas

MAO Jiangcai¹, ZHANG Wenhong¹, XU Zhengrong²

(1. Hangzhou Construction Engineering Quality Safety Supervision Station, Hangzhou 310000, China; 2. Hangzhou Water Group Co., Ltd., China)

Abstract: Based on the extremely complex surrounding environments and karst development sites, the selection of foundation type of water treatment project is discussed. The highest applicability of cast-in-place pile foundation is given. The distribution of karst is judged by supplementary investigation of one pile and one hole, and the pile length is determined according to the principle of the embedded rock depth at the pile tip. Based on the problems such as over-pouring, loss and cross-hole of concrete that occurred during the pile test process, the effects of different treatment methods are analyzed and discussed. The jumping pile driving scheme from outside to inside, from having karst caves to having no karst caves, from large to small, from many to few, and from deep to shallow is proposed, and the treatment schemes such as the full sleeve without pull-out treatment for medium and large karst caves, the over-poured concrete treatment for small karst caves, and the pre-grouting treatment for karst caves that cannot be clearly identified are put forward in order to give the good technical support for pile forming in the large scale. Finally, the experience in the investigation, design and construction of karst caves is summarized. It is concluded that the karst distribution has strong uncertainty, and the advanced exploration is a necessary prerequisite for formulating a treatment scheme for karst caves. During the design and construction process, the dynamic adjustments still need to be made according to the actual situation of the cave to ensure the treatment effect, the depth of the pile tip entering the rock and the integrity of the pile forming.

Keywords: karst; cave; cast-in-place pile; survey; design; construction

0 引言

岩溶是可溶性岩石(碳酸盐岩、硫酸盐岩、卤素盐等)受到水的化学溶蚀作用以及冲蚀、潜蚀和崩塌

等机械作用, 产生的复杂地质现象。溶洞是地下水沿着可溶性岩石的层面、节理或断层进行溶蚀和侵蚀而形成的地下孔道^[1]。

岩溶是地基基础设计和施工的一大难题, 具有不可预见性大、随机性强、处理难度大的特点, 为场地内的工程勘察、设计和施工带来了较大的挑战。

卢永成等^[2]对灰岩地质岩溶发育中的多个桥梁工程的勘察、设计和施工注意事项进行了总结, 认为

收稿日期: 2025-01-03

基金项目: 杭州市建设科研项目(杭建科[2023]85号)

作者简介: 毛江才(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 从事建设工程质量监督管理工作。

一桩一孔勘察结合管波物探的勘察方法准确性较好,并提出了过程控制和动态设计的对策。黑晓丹等^[3]通过对某岩溶强发育场地部分框支剪力墙设计施工过程的总结,提出岩溶地区需要选择合适的勘探方法减少溶洞的误判,并根据桩基水平、竖向荷载、岩体破坏模式等调整计算方法和桩基设计。李国胜^[4]对当前岩溶处理的常规方法和设计计算理论进行了总结,认为溶洞覆盖层较厚且面积不大时可不进行处理,灌注桩是岩溶发育地区的可靠基础形式,并提出了桩基嵌岩要求和桩端临空面的危险判别方法。王荣华^[5]根据某岩溶场地内桥桩设计实践,提出桩底位于溶洞顶板时须按摩擦桩和端承桩包络设计,并留有更高的安全系数。王欣欣^[6]对深圳某交通工程桥桩遇到的溶洞,采用了充填、注浆、钢护筒跟进等处理方法,取得了较好效果。吴盈等^[7]提出了在溶洞地区桩基使用受限时,可采用箱型基础结合部分或全注浆的地基设计方案。顾垒^[8]对岩溶地基成桩施工工艺进行了对比,并提出桩长80~100 m的全套筒回转结合旋挖钻组合工艺在岩溶地区的施工要点。尹华等^[9]对某桥梁岩溶桩基工程采用预注浆结合后注浆处理方案进行了介绍。姚裕春等^[10]认为岩溶地区高速铁路路基应通过地质测绘、遥感判释、无人机勘察等手段划分岩溶的详细情况,对不同情况的溶洞分别采取注浆、复合地基、桩网、桩筏等处理措施。赵旭光等^[11]对比了某工程钻孔揭露的溶洞范围和管波探测分析的溶洞范围的差异,提出管波探测能更精准地判断岩溶的发育情况。张宏颖^[12]提出了对已施工完成的桥桩桩底存在的溶洞采用钻孔高压切割压浆处理的补强措施。李裴君等^[13]对杭州某岩溶场地桩基施工进行了总结,并提出一桩多勘和综合手段探测溶洞的必要性。

现有的岩溶研究案例多针对桥梁桩基和房屋建筑类桩基,而对于水处理构筑物的研究较少。水处理构筑物的特点是单体荷载差异大,抗裂要求高,各功能通过渠道或管道相连接,对沉降差异很敏感。因此岩溶发育场地内的水处理构筑物的地基基础选型和溶洞处理直接决定了水厂类工程的建设使用安全、建设成本和水处理功能的实现。本文以某水厂工程为案例,介绍勘察、设计和施工中遇到的问题,提出的针对性技术对策和动态调整的过程,最终就该工程的处理方法进行归纳总结。

1 工程与地质概况

1.1 工程概况

杭州市某水厂提升改造工程位于西湖核心景观区内,其一期工程建设于20世纪70年代,因水处理工艺目前已较为落后而需要提升改造,建设内容包括15万 m³/d 饮用净水工艺改造和新增25万 m³/d 排泥水处理系统。

本文探讨的对象是该工程中最核心的水处理构筑物—综合滤池,其平面尺寸为70.24 m×45.4 m,底板底标高7.400 m,埋深约4.7 m,根据工艺处理功能划分为砂滤池、提升泵房、反冲洗泵房、后臭氧接触池、炭滤池、管廊等,下部均叠有清水池。各构筑物单体的荷载差异很大且结构本身超长,因此设置了变形缝分为9个单体,各单体间通过管廊连接(见图1)。

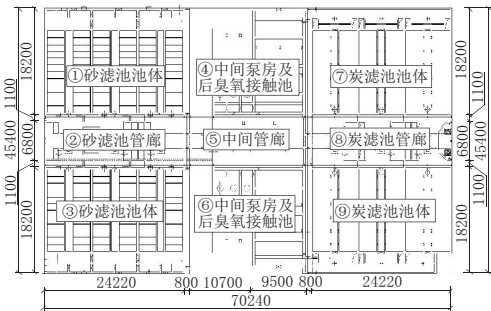


图1 综合滤池平面布置图(单位:mm)

1.2 地质概况

根据该工程地质详细勘察报告,场地地貌单元为山前平原,地势总体较平坦,局部略有起伏。场地土层分布自上而下依次为:①层杂填土;②层粉质黏土;③层红黏土;④层中风化灰岩。各土层主要物理力学参数见表1,典型剖面图见图2。

表1 土层主要物理力学参数表

土层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	f_{ak}/kPa	E_s/MPa	q_{sa}/kPa	q_{pa}/kPa
①	—	—	—	—	—
②	19.37	140	5.2	20	—
③	18.88	150	5.9	24	—
④	22.00	4 000	*	130	4 500

注:④层中风化灰岩可视为不可压缩层。

表1中 γ 为重度, f_{ak} 为地基承载力特征值, E_s 为压缩模量, q_{sa} 为灌注桩桩周土摩擦力特征值, q_{pa} 为灌注桩桩端土承载力特征值。

场地地下水主要为上部土层孔隙潜水和下部基岩裂隙水(岩溶水)。孔隙潜水受大气降水竖向渗入补给及河塘侧向补给为主,水位随季节气候动态变

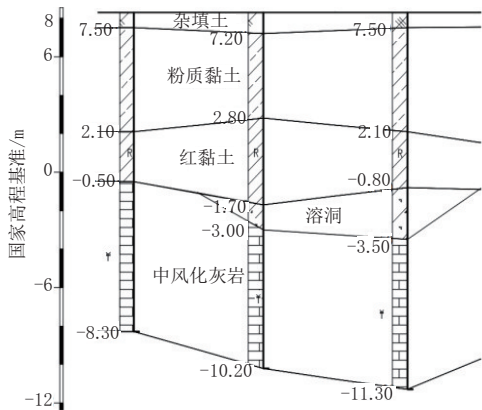


图2 典型土层剖面图(单位:m)

化明显,年水位变幅1.0~2.0 m左右,基岩裂隙水主要受风化裂隙发育及裂隙充填情况影响,与其上部第四系孔隙水可能有直接的水力联系,形成统一的水动过程。勘察建议抗浮水位取室外地坪下0.5 m。

场地的主要不良地质作用为岩溶现象,详细勘察报告中见洞隙率28.6%,评价为岩溶强中等发育,评价的标准为《岩溶地区建筑地基基础技术标准》(GB/T 51238—2018)^[6]。

通过对比该水厂不同时期的勘察报告,发现该水厂一期岩土勘察报告(1975.11)仅有3个勘察孔揭露了小溶洞,见洞隙率7%,结论为场地岩溶弱发育且可不考虑对工程建设的影响,该提升改造工程初步勘察(2021.05)见洞隙率为25%,结论为场地岩溶中等发育,2022年该工程进行了详细勘察,结论为场地岩溶中等发育。

鉴于上述勘察报告存在的差异,要求该综合滤池进行一桩一孔超前勘察,以进入完整中风化灰岩5 m作为终孔条件。最终的钻孔见洞率达38.1%且存在高度20 m以上串珠状竖向溶洞,表明场地岩溶强发育。

由上述勘察报告和一桩一孔的结论变化可以得出,场地内岩溶在近47 a有显著发育的迹象。近两年勘察结论变化的主要原因是场地所处的地理位置非常特殊且现状水处理构筑物仍需要运行,在勘察阶段能实施的钻孔非常有限,导致岩溶发育的结论会随着钻孔数量的增加而变化。

总结一桩一孔的勘察成果,可以发现该工程场地内岩溶的以下特点。

- (1)溶洞在邻近西侧山体处较密集,可能的原因是该位置是水流侵蚀灰岩的入口。
- (2)溶洞在空间分布上没有规律,竖向高度范围

为0.5~20 m,多被流塑状黏土充填。

(3)溶洞串珠状现象较多,局部溶洞有连通。

(4)溶洞上部岩体覆盖层大多很薄,施工过程中容易发生孔壁坍塌和地面塌陷。

(5)基岩面分布不连续,起伏很大,难以确定统一的桩端标高。

2 地基基础设计

2.1 基础设计背景

该工程在现状正在运行的水厂内实施,需要分三期实施以保证水处理功能的正常运行。其中综合滤池属于二期实施的构筑物,需要待一期新建构筑物完成,拆除场地内部分老旧构筑物后,再进行一桩一孔勘察,调整基础设计。

该建设场地东侧临近西湖,西侧靠山,北侧为水厂办公区,南侧为大规模民宿,周边环境非常复杂且敏感,建设原材料运输尚受交通管制。因此,地基基础设计需要考虑减少泥浆排放、选用低噪音无振动施工工艺,尽量减少单次浇筑的混凝土方量。

场地地势走向为西高东低,地下水与西湖连通,溶洞处理需要格外谨慎,以避免混凝土、浆液等流入西湖。

2.2 基础选型

该综合滤池埋深4.7 m,底板底位于①层杂填土或②层粉质黏土,下部为③层红黏土、溶洞和④层中风化灰岩。经计算:炭滤池基底反力184 kPa,砂滤池基底反力117 kPa,中间泵房基底反力142 kPa,管廊上部为敞口空腔,基底反力仅69 kPa;管廊抗浮缺口较大,需要采用抗拔桩或增加配重,其余部分自重抗浮满足要求;天然地基承载时,炭滤池最大沉降204 mm,管廊无附加应力,理论上无沉降。

从上述分析可以得出,该综合滤池基底换填局部杂填土后,地基土承载力可满足设计要求。但各单体间的沉降差过大,无法满足使用功能要求,因此选用了桩基础承载兼抗拔。桩端持力层为中风化灰岩,以进入完整的中风化灰岩1 m作为确定桩长的原则。

基于周边环境的复杂性和桩端嵌岩要求,桩型采用全套管护壁旋挖灌注桩,桩径0.6 m,布置在水池侧墙下。桩基参数见表2。

表2中 R_a 为单桩竖向抗压承载力特征值, N_k 为单桩竖向抗拔承载力特征值。

表2 桩基参数表

单体	桩顶标高/m	R_a /kN	N_k /kN	根数
炭滤池	7.300	2 100	—	98
砂滤池	7.300	1 800	—	84
中间泵房	7.300	1 200	—	112
管廊	7.300	1 000	300	57

3 溶洞处理方案

3.1 溶洞处理原则

桩基础稳定持力层和嵌岩深度选择对确定溶洞处理范围至关重要,按现行标准^[14]要求:桩端下5 m范围深度,范围内为完整的中风化灰岩时,利用该层作为桩端持力层并对溶洞覆盖层进行强度和稳定性计算,不再另行处理;当桩端完整岩不满足5 m厚度要求时,加大桩长穿越溶洞直至更深层符合要求的岩层或对溶洞进行处理。

3.2 试桩成果

该综合滤池第一次无溶洞的勘察孔位置试成桩时,灌注桩充盈系数达到了5.0以后仍然出现混凝土流失的情况,只得重新填土夹石封孔处理。该试桩表明场地内溶洞的规模较大,存在一定的串通现象,即使一桩一孔也不能完全判断溶洞的分布,需要采取应对措施满足桩基成孔和混凝土灌注的要求。

3.3 桩基施工工序和溶洞处理方案

在成桩顺序上,根据溶洞的大小、多少、岩面的高低等条件按由外向内、有溶洞到无溶洞、由大到小、由多到少、由深到浅的原则进行跳打桩,逐步封闭溶洞,填充裂隙、隔断通道。

根据一桩一孔的勘察成果,该工程将溶洞高度<2 m的定义为小型溶洞,高度≥2 m的定义为中大型溶洞,相应制定了以下几种溶洞处理方案。

(1)对于小型溶洞,采用回填黏土、碎石或预注浆进行提前处理。预注浆可与地质超前钻孔结合完成,浆液中添加速凝剂以加速封堵溶洞通道。

(2)对于中大型溶洞或串珠式溶洞,设置双层分离式套管跟进施工,穿越溶洞的钢套筒不再拔出(见图3),以保证灌注桩的完整性。

(3)对于有溶洞勘察孔附近的无溶洞勘察孔或超前钻孔取出的芯样不完整时,采用注浆加固桩端6倍桩径范围^[4,15],以处理桩端扩散角内可能存在的临空面(见图4)。

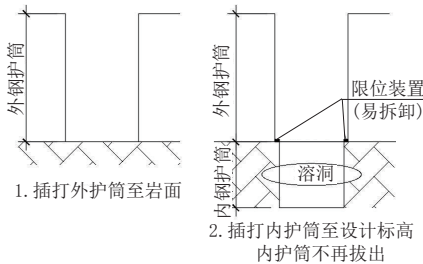


图3 双层套管跟进施工示意图

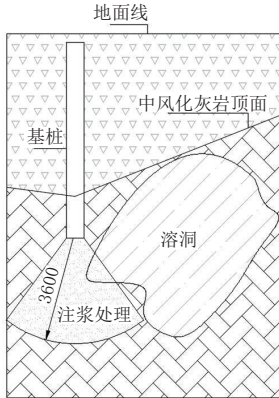


图4 注浆加固桩端临空面示意图(单位:mm)

4 施工经验总结

该综合滤池灌注桩基础施工和溶洞处理过程中,总结了以下经验。

(1)超前钻孔揭示有溶洞的,桩基施工时肯定会有溶洞,部分未揭示溶洞的孔也可能发现溶洞。这是因为溶洞的发育具有较强的随机性,而超前钻的孔径较小,难以全面反映溶洞的分布情况。

(2)超前钻孔发现串珠状的溶洞孔有概率在桩基施工时发现是一个大型溶洞,因为串珠状溶洞可能本身是多层溶洞,也有可能是钻孔时孔正好位于溶洞边缘,而洞壁一般不会是直立或平滑的,会有凹凸。该现象是掉钻和卡钻的高危点,常使得施工陷入被动局面,需要特别注意。

(3)超前钻取出的芯样不完整或有明显的被侵蚀性状时(见图5,图中A为侵蚀状岩芯,B为不完整岩芯),在成桩时大概率会发现溶洞,因此需要按照有溶洞的钻孔对待。

(4)成桩按照本文2.2节的原则实施,灌注桩充盈系数从起初的1.7~5.0逐步减小,直至1.0~1.3。在整个溶洞处理过程中进行水流观测和追踪,也未出现混凝土或浆液污染西湖的情况。可见该方法可有效地封闭溶洞的通道,是敏感环境下溶洞处理的关键施工工序。

(5)对于高度小于2 m的小型溶洞,采用预填充



图5 可能存在溶洞的芯样图

和注浆处理时,仅部分达到了预期的效果,主要原因是即使采用了速凝的双液浆,在灌入到洞内时也难以很快形成完整的胶结物。而该工程的桩径较小,周边环境对振动又极其敏感,充填物无法采用反复冲击进行压实,因此在二次成孔时仅能达到部分挤密原溶洞填充物的效果,该部分的桩基在后期大多通过超灌混凝土处理溶洞问题。

(6)该工程混凝土供应常受交通管制等的影响,在灌注桩成桩过程中出现过多次混凝土流失而无法补灌的问题,只能进行封孔,将断桩彻底清理后原位复桩。此现象在该工程中难以完全规避,但可优先施工已进行溶洞处理范围围合内的桩基,充分利用先行桩超灌混凝土的封堵作用来减少施工风险。

(7)穿越溶洞部分的钢套筒不拔出可有效地保证混凝土的灌注桩质量,在该工程中取得了良好的工期和经济效益。

5 结 论

该综合滤池在极其复杂的环境下,历经半年之久完成了桩基础的全部施工。经 100% 低应变检测,桩基完整性为 I 类和 II 类,无不合格桩;经单桩竖向抗压和抗拔承载力检测,承载力特征值均达到了设计要求;根据沉降监测结果,目前最大沉降量仅 2 mm,桩端入岩效果较理想。

根据上述勘察、设计和施工成功,可以得出以下结论,为同类工程参考。

(1)岩溶发育场地内,进行一桩一孔超前勘察是确定设计方案和溶洞处理方案的必要前提,也是现场工程师的眼睛。

(2)设计与勘察需充分配合,动态和及时提出综

合勘察与补充勘察技术要求,特别钻孔深度,应保证探明足够的持力层厚度(无溶洞)方可终孔。

(3)在桩端完整岩能够满足设计要求时,嵌岩深度确定应遵循“宜浅不宜深,优先保证顶板安全厚度”的原则。

(4)超前钻孔未揭露溶洞的,也不能排除是溶洞,需要结合周边钻孔和取出岩芯性状进行分析,并做好施工过程中遇溶洞的应对措施。

(5)合理的施工工序安排可有效阻断溶洞通道,逐步减少成桩的难度和施工成本。

(6)处理溶洞问题时,需要建设单位、勘察、设计和施工单位通力协作,根据现场实际情况动态调整设计和施工方案,发生异常情况及时解决,必要时调整桩长或补充勘察。

参考文献:

- [1]《工程地质手册》编写组.工程地质手册(第五版)[M].中国建筑工业出版社,2018.
- [2]卢永成,朱蔚,顾赛辉.岩溶地区桥梁桩基勘察,设计和施工体会[J].城市道桥与防洪,2017(4):100-103.
- [3]黑晓丹,张满彪,孙海峰,等.岩溶地区桩基础设计研究及工程问题分析[J].建筑科学,2023,39(3):165-173.
- [4]李国胜.岩溶地区地基处理及基础设计方法探讨[J].建筑结构,2020,50(3):119-128.
- [5]王荣华.岩溶区桥梁桩基勘察与设计要点分析[J].铁道工程学报,2012,29(9):53-58.
- [6]王欣欣.岩溶强烈发育地区桥梁桩基溶洞处理方法[J].广东土木与建筑,2024(11).
- [7]吴盈,罗俊,熊森,等.岩溶地区地基处理及基础设计[J].建筑结构,2024(17):20-24.
- [8]顾垒.超长岩溶桩采用全套管全回转施工关键技术[J].公路,2023,68(12):148-152.
- [9]尹华,李炼.某岩溶地区隧道溶洞处理关键技术研究[J].城市道桥与防洪,2023(12):236-240.
- [10]姚裕春,李安洪,周波,等.岩溶地基高速铁路路基关键技术分析[J].铁道工程学报,2023,40(8):35-39.
- [11]赵旭光,王博.钻孔与管波相结合分析岩溶发育的方法研究[J].城市道桥与防洪,2023(6):284-286.
- [12]张宏颖.溶洞地区桥梁桩基持力层补强技术[J].城市道桥与防洪,2012(7):234-236.
- [13]李裴君,秦俊林,唐国强.杭州某岩溶地区溶洞发育规律及桩基施工遇到的问题分析[J].工程建设与设计,2023(11):48-51.
- [14]GB/T 51238—2018,岩溶地区建筑地基基础技术标准[S].
- [15]住房和城乡建设部工程质量安全监管司,中国建筑标准设计研究院.全国民用建筑工程设计技术措施(2009)结构(地基与基础)[M].北京:中国计划出版社,2010.