

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.03.004

岩溶地区高层建筑的桩基设计与施工

俞弘¹, 林绍良²

(1. 福建师范大学后勤管理处, 福建 福州 350117;
2. 时代建筑设计院(福建)有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 以湖北省某岩溶场地的高层建筑工程为例, 对岩溶地区高层建筑桩基础的设计与施工进行了探讨, 分析了复杂岩溶地区高层建筑桩基础的设计过程、溶洞的处理方法及桩基施工要点。经过对比分析表明, 冲孔灌注桩适应性强、承载力高, 能钻穿溶洞达到稳定持力层, 建议作为岩溶地区高层建筑的首选桩基础形式。

关键词: 岩溶地区; 高层建筑; 桩基设计; 冲孔灌注桩; 施工

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2020)03-0223-05

Pile foundation design and construction of high-rise buildings in karst areas

YU Hong¹, LIN Shaoliang²

(1. Logistic Affairs Department, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China;
2. Time Architectural Design Institute (Fujian) Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: With the high-rise building project of a karst site in Hubei Province as an example, the design and construction of pile foundations of high-rise buildings in karst areas were discussed. The design process of pile foundations for high-rise buildings in complex karst areas, the treatment method of karst caves, and the key points of pile foundation construction were analyzed. Comparative analysis shows that the bored pile has strong adaptability and high bearing capacity, and can drill through the karst cave to reach the stable bearing layer. Therefore, the bored pile is the preferred pile foundation form for high-rise buildings in karst areas.

Keywords: karst areas; high-rise buildings; pile foundation design; bored piles; construction

岩溶地貌又称喀斯特地貌,是指碳酸盐类岩石(主要是石灰岩)为主的可溶性岩石,在以水的溶蚀为主的内外力作用下形成的地貌。它在中国分布广泛,据不完全统计,中国约一半以上省区都有岩溶地貌分布,总面积达 200 万 km²。这种地貌的特点是岩面埋深起伏大,且无规律性,溶洞、溶沟、裂隙十分发育,甚至出现多层溶洞,同时场地的承压水水位高,水量较丰富,工程地质条件复杂。在岩溶地区建设高层建筑,如果桩型设计不合理、持力层的位置及厚度判断不准确、场区水文地质条件掌握不充分,往往易在施工时危及相邻建筑物的安全,或者建筑物建成后不久就产生局部下沉,导致梁、柱或墙体等开裂^[1],后果不堪

设想。因此,探讨岩溶地区高层建筑的桩基设计与施工具有重要的现实意义。

1 工程概况及地质情况

1.1 工程概况

本项目位于湖北省黄石市下陆区苏州路以北、市公安局大楼以西、青鱼路以东,新建多栋 25 层高层住宅,下设 1 层地下室,场地地震基本烈度为 6 度,设计基本地震加速度值为 0.05 g,设计地震分组为第 1 组,建筑场地类别为 II 类,基本风压为 $w_0 = 0.35 \text{ kN/m}^2$,地面粗糙度 B 类,结构形式为剪力墙结构。

1.2 地质条件

建筑场地内的埋藏地层岩性,从上到下依次如表 1 所示。

该场地⑦石灰岩有岩溶发育现象,钻探结果表明,施工 115 个钻孔中有 62 个钻孔基岩为石灰

岩,其中 8 个钻孔有土洞或溶洞、裂隙等岩溶发育现象,钻孔见洞隙率达 12.9%,属岩溶中等发育地段。场地内各岩土层分布及岩溶发育特征详见表 2。

表 1 岩土工程地质分层表
Tab.1 Geotechnical stratification of geotechnical engineering

地层 编号	地层 名称	顶板 标高/m	顶板 埋深/m	地层 厚度/m	空间 分布	岩土特征
①	素填土	25.35~ 42.11	0.00	0.00~ 6.10	场地大部	杂色,土质松散,均匀性差,主要由粘性土混夹少许碎石组成,局部混夹少许建筑垃圾,回填年限 5 年左右。
②	粉质 粘土	23.85~ 34.99	2.60~ 6.10	0.00~ 5.60	场地局部	灰黄色,可塑,土质均匀,含少许结核、碎石。
③	粘土	21.37~ 41.40	0.00~ 8.20	0.00~ 16.30	场地大部	黑灰色,流塑,土质均匀,含腐殖物,有腥臭味,高压缩性。
④	粉质 粘土	14.26~ 40.71	0.00~ 15.80	0.00~ 28.00	场地大部	褐灰、黄灰色,可塑,略见闪长岩残余结构,系闪长岩风化残积物,含较多粉细砂,岩芯手捏易散,砂感较强,遇水易软化。
⑤-1	强风化 闪长岩	11.54~ 41.75	0.00~ 18.00	0.00~ 21.50	场地大部	灰、灰黄色,中粒结构,块状构造,岩石风化强烈,风化裂隙发育,岩体破碎,岩芯手捏易散,多呈中粗砂状,局部碎块状,碎块手可折断。
⑤-1a	粘土	22.01~ 28.12	6.00~ 11.50	0.00~ 9.00	场地局部	灰黄色,稍密,湿,土质较均匀,成分主要为硅质岩岩屑、灰岩岩屑、石英及粘土矿物等,中压缩性。
⑤-2	中风化 闪长岩	3.60~ 38.10	0.00~ 27.80	0.00~ 18.60	场地大部	青灰、灰白色,中粒结构,块状构造,岩石风化中等,裂隙发育,岩体破碎,岩芯多呈碎块、短柱状,岩质较坚硬,锤击声脆,岩芯采取率约 85%,RQD 值约 15%。属较软岩,岩体基本质量等级为 V 级。
⑥-1	粉质 粘土	10.51~ 29.47	10.00~ 26.00	0.00~ 25.10	场地局部	褐红、褐黄色,可塑,略见闪长岩残余结构,系闪长岩风化残积物,岩芯手捏易散,砂感较强,遇水易软化。
⑥-2	粘土	-6.08~ 12.96	23.20~ 35.60	0.00~ 9.60	场地局部	褐红、褐黄色,软塑,土质均匀。
⑦	石灰岩	-7.38~ 19.84	15.00~ 37.50	钻探未 揭穿	场地大部	灰白色,隐晶质结构,块状构造,中厚层状,裂隙发育,岩体破碎,岩芯多呈短柱状、碎块状,岩芯采取率约 85%,RQD 值约 50%,岩质较坚硬,局部见溶蚀孔穴。局部地段有岩溶发育,溶洞内多为软流塑状粘土充填,局部溶洞内无充填物。属较硬岩,岩体基本质量等级为Ⅳ级。

表 2 拟建场地岩溶发育情况统计表
Tab.2 Statistics of karst development of the proposed site

钻孔	溶洞埋深/m	溶洞标高/m	溶洞高度/m	溶洞顶板岩石厚度/m	溶洞充填情况
ZK80	32.00~37.50	9.33~3.83	5.50	0.00	土洞,无充填物
ZK104	21.00~29.30	8.96~0.96	8.00	0.40	软流塑状粘土充填

续表

钻孔	溶洞埋深/m	溶洞标高/m	溶洞高度/m	溶洞顶板岩石厚度/m	溶洞充填情况
ZK105	30.00~35.40	-0.13~-5.53	5.40	0.00	土洞,无充填物
ZK106	23.00~25.80	6.94~4.14	2.80	1.70	软流塑状粘土充填
ZK107	33.70~35.00	-3.83~-5.13	1.30	0.20	软流塑状粘土充填
ZK112	15.80~16.40	14.15~13.55	0.60	0.80	软流塑状粘土充填
ZK118	27.20~38.00	3.94~-6.86	10.80	0.80	软流塑状粘土充填
ZK126	22.80~25.00	16.15~13.95	2.20	12.60	无充填物

2 基础选型及桩基设计

2.1 基础选型

(1) 高强预应力管桩。该桩型单桩承载力较高,造价低,施工速度快,目前在湖北地区施工设备较多,是较为成熟的桩型。但对于本场地而言,基岩起伏较大,且有溶洞存在,施工上无法钻穿溶洞达到稳定持力层,本场地不适宜采用。

(2) 人工挖孔灌注桩。选择此种基础的优点是单桩有着较高的承载力,施工质量容易控制,施工速度快,沉降及不均匀沉降小等。本工程地下水较丰富,勘察反映稳定水位埋深为 0.60~2.70 m。如果采用人工挖孔桩,需要降水处理。但若大面积降水,会引起周围地面下陷、地下土洞发育等不良后果^[2];若采用止水帷幕的方法,深度不易控制。而地下水及溶洞的存在,使施工危险性大,施工也有一定困难,此桩型不应采用。

(3) 钻孔灌注桩。此种基础形式的适应性强、承载力高、安全可靠、经济合理、对相邻楼宇影响小、噪音低、施工安全性好等。但是,其也存在着缺点:质量控制直观性差,水下混凝土施工要求严格,施工工艺较为复杂,易出现孔底沉泥、夹渣、缩颈、露筋、离析、浮浆夹层等缺陷,但若施工控制得好依然可行。但本工程基岩起伏较大,且有溶洞存在,施工上很难钻穿溶洞达到稳定持力层,不适宜采用。

(4) 冲孔灌注桩。此种基础形式的优缺点类似于钻孔灌注桩,但冲孔灌注桩可以在各种复杂地质条件下使用,对本工程而言能钻穿溶洞达到稳定持力层,适宜在本工程中使用。

本建筑物对地基承载力及沉降要求较高。通过上述比较获知,冲孔灌注桩可有效地穿透各类土层,成孔适应性强,达到稳定持力层。经过建设

单位、地勘单位、施工单位、设计单位共同协商,得到普遍认可。同时近年来冲孔灌注桩在本地区得到广泛使用,积累了许多施工经验。经综合考虑,本工程适宜采用冲孔灌注桩。

2.2 桩基设计

依据《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011^[3],冲孔灌注桩承载力主要由 3 部分组成,即桩周覆盖土层的总侧阻力、嵌岩桩段的嵌固侧阻力和桩端承载力,其单桩竖向承载力特征值可按公式(1)进行估算

$$R_a = q_{pa}A_p + u_p \sum_i q_{sia}l_i,$$
 (1)

其中 R_a 为单桩竖向承载力特征值, q_{pa} 为桩端端阻力特征值, A_p 为桩底端横截面面积, u_p 为桩身周边长度, q_{sia} 为桩侧阻力特征值, l_i 为第 i 层岩石的厚度。

依据地质勘察报告提供的数据(详见表 3),

表 3 桩基设计参数建议取值表

Tab.3 Recommended values of pile foundation design parameters

地层编号	地层名称	钻(挖、冲)孔桩	
		q_{sia} /kPa	q_{pa} /kPa
②	粉质粘土	9	
③	粘土	27	400
④	粉质粘土	30	500
⑤-1	强风化闪长岩	80	900
⑤-1a	粘土	27	450
⑤-2	中风化闪长岩	120	2 000
⑥-1	粉质粘土	27	450
⑥-2	粘土	20	
⑦	石灰岩	300	5 000

桩端持力层选用石灰岩,入岩深度取 2 m,通过计算可知(仅考虑嵌岩段 2 m 的侧阻力),桩直径 900 mm、桩长为 15 m 的单桩承载力特征值为

$$R_a = 5\,000 \times 3.14 \times 0.45^2 +$$
$$3.14 \times 0.9 \times 300 \times 2 = 4\,874.85\text{ kN}, \quad (2)$$

设计取值 4 800 kN,基本满足工程的要求。

由于该地区岩溶和流塑分布的不确定性,依据湖北省地方规范《建筑地基基础技术规范》DB42/242-2014^[4],需要采用逐桩预钻孔的工程方法。根据超前钻反馈的资料,分析岩层的节理发育,溶洞、流塑的深度和高度,以及内填充

物^[5],逐桩核算桩长及相应的承载力,在满足工程要求的情况下,尽可能缩短桩长,回避溶洞和土洞,减少施工难度。超前钻的数量和深度,应满足地方规范《建筑地基基础技术规范》DB42/242-2014 第 9.3.11~9.3.13 的要求^[4],钻孔进入桩端以下完整岩石的深度不应小于 5 m;桩端全截面嵌入完整岩层表面的深度不应小于桩身直径的两倍,且不得小于 2 m;当岩层表层存在溶洞或串珠状溶洞时,桩端嵌入溶洞底部完整岩石的深度不应小于 0.5 m,且桩身嵌入岩层深度总和不应小于 2 m 或 2 倍桩直径。本项目典型超前钻柱状图如图 1 所示

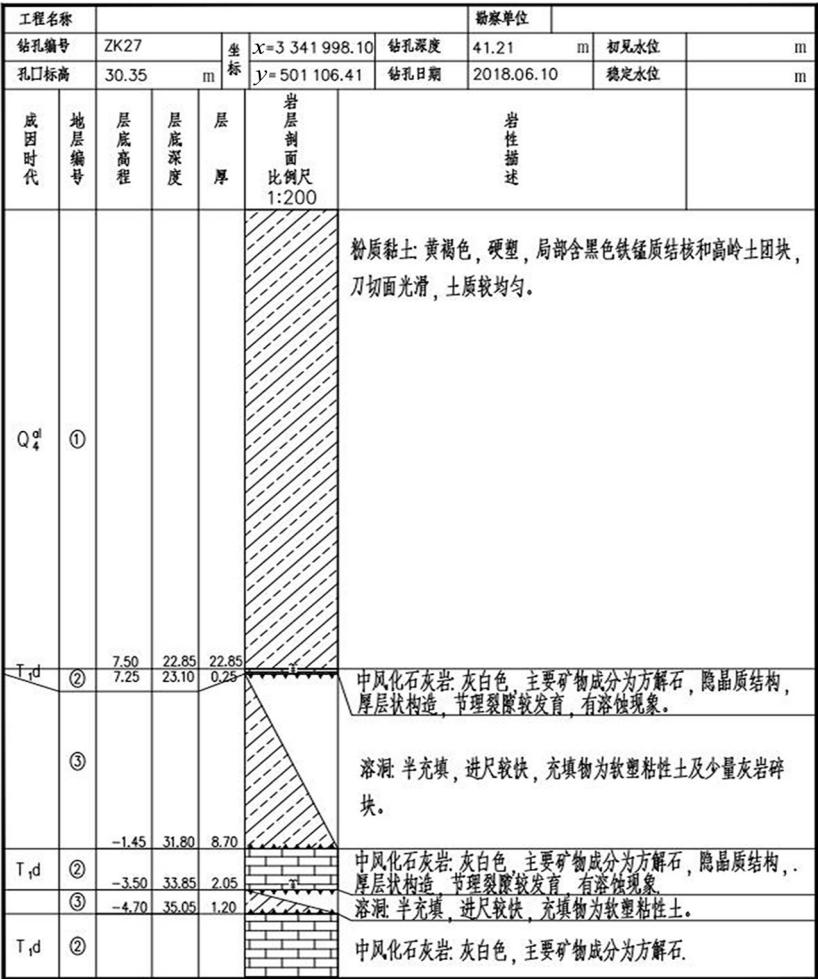


图 1 钻孔柱状图

Fig.1 Borehole histogram

(存在串珠状溶洞),这里对溶洞的埋深、尺寸大小及填充状况作了更详细的描述。

根据《建筑基桩检测技术规范》JGJ106-2014 的要求^[6],设计选取了 3 根试桩,用于验证施工工艺及承载力。试桩完成后,经超声波及静载试验,

结果表明均满足规范及设计的要求。

3 复杂地段的桩基施工要点

灌注桩施工前应先平整场地,埋设孔口护筒,配制泥浆体积宜为正常条件下泥浆体积的 3 倍以

上。岩溶地质条件下的灌注桩应根据覆盖层和基岩情况分别采用不同的成孔工艺,施工要点^[4]如下:

(1)当覆盖土层中不含土洞时,可采用回旋钻进成孔或冲击成孔,当覆盖土层中含有体积较大的土洞且埋深超过3 m时,应对土洞进行预注浆充填或低标号混凝土回填后再成孔^[7]。

(2)成孔至溶洞顶板以上1 m时,改用低频率、小冲程冲击钻进成孔工艺。

(3)当岩面为斜面时,应预先在岩面上部桩孔内回填小片石或者混凝土等,用钻头反复冲击,直至全断面进入岩层为止。

(4)当溶洞顶板被击穿时,及时利用泥浆泵对孔内进行补浆,防止泥浆面下降导致孔壁坍塌,同时在顶板厚度范围内反复轻提慢放冲锤,直至冲锤不受明显阻碍。

(5)当溶洞内有黏土或沙砾等填充物时,成孔施工前宜对溶洞内填充物进行注浆预处理。

(6)对于地下水水量比较大的溶洞,可采用单层或多层长护筒跟进的方法,护筒直径级差不小于15 mm。

(7)成孔过程中如遇漏浆,应及时补浆并向孔内回填片石、黏土或混凝土反复冲击造壁。灌注桩身混凝土时应密切观察混凝土顶面的标高变化,如遇混凝土下沉,应继续补灌混凝土,直至稳定后方可拔出导管。

综上所述,溶洞的处理方法常用的有3种:挤石造壁法、预注浆法、套内护筒法。施工现场应根据地质的实际情况,采用合理的施工工艺和处理措施,防止塌孔、弯孔缩孔、卡钻、掉钻、扩孔过大等质量问题的出现,确保施工质量。本工程在桩基施工过程中,遇到了泥浆面快速下降的异常状况,现场及时补浆并向孔内回填片石、黏土,反复冲击造壁,顺利成孔,解决了施工难点,桩基经检测验收合格。

4 结论

1)岩溶场地工程地质条件复杂,溶洞分布极不均匀,应尽量穿越溶洞,找到稳定的持力层。冲孔灌注桩适应性强、承载力高,能钻穿溶洞达到稳定持力层,适合在各种复杂地质条件下使用,为设计首选桩基础形式。

2)岩溶地区的工程勘察工作,要遵循由疏到密的原则,依次进行场地的试钻孔、初勘、详勘,施工阶段要根据确定的桩位逐桩进行超前钻,探明每桩基础下的地质条件,为设计和施工提供准确的地质资料,确保基础安全。

3)桩基施工前,应根据超前钻提供的地勘资料,逐桩做好施工技术交底,选择合适的溶洞处理方法,对常见的施工质量问题提前做好预防措施,确保工程质量。

参考文献:

- [1] 徐月松. 岩溶地区高层建筑桩基的桩型选择与施工[J]. 探矿工程, 2000(6): 17-19.
- [2] 郑伟国. 岩溶地区基础选型的思路和建议[J]. 建筑结构, 2012, 42(7): 115-118.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范:GB50007-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4] 湖北省质量技术监督局, 湖北省住房和城乡建设厅. 建筑地基基础技术规范:DB42/242-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [5] 汤荣广. 岩溶地区基础设计及工程应用[J]. 建筑结构, 2013, 43(10): 89-93.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范:JGJ106-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [7] 黄宏大. 岩溶地区桩基设计研究[J]. 福建建筑, 2019(10): 151-155.

(责任编辑:方素华)