

温雅歌, 刘金栓, 尹泽鹏, 等. 岩溶发育区某住宅项目基础及岩溶处理设计[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1187-1195.

DOI: 10.11932/karst20240514

岩溶发育区某住宅项目基础及岩溶处理设计

温雅歌, 刘金栓, 尹泽鹏, 盛靖昱

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要: 岩溶区特殊的地质结构可能导致一系列严重的工程问题, 如地基沉降不均、地基塌陷、地下室渗漏水等, 极端情况下甚至会引发地基稳定性丧失和结构损坏。为有效应对这一挑战, 研究聚焦于浙江省某岩溶发育区域内的住宅工程项目, 对基础设计和岩溶处理技术进行深入探讨。该项目包含8栋14至18层的高层住宅楼、2至3层的幼儿园及单层配套用房, 并设置了整体一层的地下室。主体楼座部分采用桩基础设计, 单层地下室区域采用筏板基础。鉴于非楼座区域地下室存在的抗浮问题, 设计采用了抗浮锚杆, 整个工程的地基基础设计等为甲级。勘察报告揭露基岩为可溶性岩石, 见洞率为16.6%, 以点状溶洞形态居多。针对各种类型的溶洞类型, 最终制定全面的基础设计和岩溶处理实施方案。研究成果可为同类岩溶地区住宅建设提供借鉴、参考。

关键词: 岩溶; 岩溶处理; 基础设计; 抗浮锚杆; 桩基础

创新点: 针对住宅项目普遍采用的大底盘地下室平筏+抗浮锚杆及住宅楼座平筏+钻孔桩的基础遇岩溶时的研究较缺乏, 通过对此类型项目地基、基础设计方案进行的研究, 力求为类似工程提供借鉴。

中图分类号: TU753 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)05-1187-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

为满足我国岩溶发育分布区工程建设需求^[1-3], 针对岩溶区建筑物地基易发生沉降、塌陷等问题, 众多学者及工程师对岩溶区地基工程应用进行了研究及探讨, 其中以针对基建项目如地铁、桥梁项目的讨论居多。例如, 李治国^[4]针对隧道项目提出了岩溶处理的原则, 探讨了隧道中不同类型的岩溶处理方法。龙艳魁^[5]和李广涛^[6]分别对长沙地铁1号线和广州地铁3号线项目的岩溶处理设计进行了研究, 主要针对地下结构遇岩溶的情形。李陆平等^[7]对蔡家湾汉江特大桥的桩基岩溶处理进行了探讨, 研究针对桥梁承压桩基。还有很多类似项目研究^[8-11], 是对民用住宅项目的地基基础及岩溶处理, 均具有一定的参考价值。匡乐红等^[12]讨论了工业民用建筑中

不同形式溶洞的处理方法, 其研究聚焦溶洞, 缺少不同基础形式下的针对性讨论。姜燕等^[13]研究了高层住宅建筑的岩溶处理方案, 但其讨论的方案仅包含高层楼座范围, 并不包含普通地下室和上有多层建筑的地下室。目前的文献缺乏近些年来住宅项目愈发普遍采用的大底盘地下室平筏+抗浮锚杆及住宅楼座平筏+钻孔桩形式的基础遇岩溶时的研究、讨论。本文通过对此类型项目地基、基础设计方案进行研究、讨论, 力求为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

本项目主要由8幢14~18F高层建筑物及配套幼儿园(主体2~3F)、配套用房(1F)组成, 建筑物下设1层地下室。地库及住宅楼±0.00=32.50 m, 幼儿

第一作者简介: 温雅歌(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 国家一级注册结构师, Email: wyg@bmedi.cn。

收稿日期: 2023-11-05

园±0.00=32.55 m, 现状自然地坪按照整平后标高 32.000 m 考虑。基坑方面, 槽底绝对标高 25.03~26.15 m, 基坑深度 5.85~6.97 m。

住宅均为剪力墙结构(1#、2#楼为地上 14 层, 3#、4#、5#楼为地上 15 层, 6#楼为地上 16 层, 其余为地上 18 层), 1 幢幼儿园为框架结构; 地下室不设缝与楼座连为一体, 地下室的结构形式也为框架结构。

本工程楼座下方(住宅及幼儿园)采用桩筏基础, 非楼座位置(地下车库)为筏板基础。非楼座地下室存在抗浮问题, 抗浮措施采用抗浮锚杆, 地基基础设计等级为甲级。

2 工程地质条件

2.1 工程地质条件

根据详勘报告, 场地浅表部为填土(mlQ4), 其下为含砾粉质黏土(Q32)、含黏性土卵石(Q31), 底部基岩为震旦系西峰寺组(Zbx)白云质灰岩; 按地层结构、岩性特征、埋藏条件及物理力学性质, 将勘探深度内地层分为①、②、⑤等三个地质单元层, 细分为 7 个单元亚层, 现自上而下分述如表 1。

表 1 地层分布一览表

Table 1 Stratigraphic Distribution Table

土层编号	土层名称	土层厚度/m	土层性质
①	杂填土	6.70~0.40	结构松散, 工程性能及均一性差
②-1	含砾粉质黏土	10.40~0.90	中等压缩性, 切面粗糙, 干强度高
②-2	含黏性土碎石	6.60~0.60	粗颗粒的矿物成分主要为长石、石英等, 岩质坚硬
⑤-1	全风化灰岩	14.40~0.60	可塑为主, 局部硬可塑, 风化成泥土状, 夹砂砾, 原岩结构清晰可辨, 手掰易碎
⑤-0	溶洞	14.60~0.50	岩芯不成形、烂泥状, 夹少量中风化岩块, 岩石表面可见明显溶蚀凹槽
⑤-夹层	石煤	4.40~1.40	夹大量0.5~2 cm煤屑, 手掰易碎
⑤-3	中风化灰岩	最大揭露厚度16.10 m	岩芯多呈柱状、短柱状, 少量碎块状, 锤击声脆, 较难击碎, 岩石质量指标RQD值为10%~70%

经勘察揭露, 本工程特殊性岩土为①层杂填土、⑤-0 层 溶洞及⑤-1 层全风化灰岩、⑤-夹层石煤。

①层杂填土: 根据勘察揭示, 场地西部上部杂填土分布相对较厚, 局部层厚可达 6 m 以上(Z34 钻孔), 成分主要由黏性土夹碎块石、少量碎砖块组成, 结构松散, 均一性较差。该层将给桩基施工、基坑开挖造成不利影响。需注意该层局部块径相对较大, 桩基施工前需作好护筒埋深工作以防填土掉块, 基坑开挖时需作好降水工作。

⑤-1 层全风化灰岩: 该层在场地大部揭示, 可塑为主, 局部硬可塑, 风化成泥土状, 夹砂砾, 原岩结构清晰可辨, 手掰易碎, 局部孔段受下部岩溶发育影响呈软可塑状、干钻可钻进, 部分孔段层厚可达 10 m 以上, 需注意该层风化不均对基坑开挖的影响, 局部软可塑段需加强支护措施, 对本工程桩基施工影响不大。

⑤-夹层石煤: 石煤多呈带状、透镜体状, 受构造挤压影响, 多破碎, 强度低。该层多分布于中风化基岩顶板之上, 分布不连续、厚薄不均, 均一性差, 局部

夹有中风化碳质灰岩岩块, 钻进较困难, 局部则呈泥包砾状, 含泥量高, 干钻可钻、进尺较快, 工程性能差。该层在本场地局部分布, 为确保基础安全, 桩基施工时建议穿透该层。

⑤-0 层 溶洞: 多数为无充填或半充填, 有明显掉钻现象, 局部充填灰黄色软塑~流塑含砾粉质黏土, 岩芯不成形、烂泥状, 夹少量中风化岩块, 岩石表面可见明显溶蚀凹槽。该层局部分布, 层顶埋深 21.30~7.80 m, 层顶高程 25.30~12.62 m, 层厚 14.60~0.50 m。需要对岩溶进行处理, 并结基础形式进行专项设计。此内容为本文讨论重点。

2.2 水文地质条件

场地内无河道水塘分布, 地表水可通过地表径流迅速向周边低洼地带排泄, 总体而言地表水对本工程影响较小。

根据地下水的赋存条件与水理、水力特征, 场区地下水类型有浅层孔隙潜水、基岩裂隙水和岩溶水。

2.2.1 孔隙潜水

场区浅层地下水属孔隙性潜水,主要分布于①层杂填土及②-1层含砾粉质黏土中,与下部②-2层含黏性土碎石具有一定的水力联系,地下水主要接受大气降水补给,排泄途径以向邻近低洼场地排泄为主、其次是蒸发,动态特征表现为气候调节型,地下水位随季节性变化,雨季较高,旱季较低。

本工程钻孔地下水位受地形影响较大,东侧地下水位埋深较深普遍在 5.0 m 以上。勘察期间,场地中部非岩溶区,其东侧钻孔内地下水最大埋深 10.9 m,其余地段地下水埋深在 1.0~3.0 m,对应地下水位高程在 26.00~29.00 m 之间。南北部岩溶区,东侧孔内地下水最大埋深 10.6 m,其余地段地下水埋深在 1.5~3.0 m 之间,对应地下水位高程在 26.50~29.00 m 之间。根据区域资料,场地地下水水位年变化幅度在 0.5~2.0 m 之间。

2.2.2 基岩裂隙水

基岩裂隙水主要赋存于中风化基岩中,含水量主要与构造节理发育程度有关,含水不均一,裂隙水

埋藏较深,透水性一般随深度增加而减弱,基岩裂隙水对本工程基础施工影响较小。

2.2.3 岩溶水

本场地基岩为灰岩,局部存在岩溶发育现象,岩溶水与上部孔隙性潜水、裂隙水连通性较好,对桩基施工有一定影响。

2.3 溶洞发育情况

场地中钻孔揭露基岩为灰岩,属于可溶性岩石,主要化学成分为碳酸盐岩,遇稀盐酸起泡溶蚀现象明显,溶洞内多充填含砾石流塑—软塑状黏性土,局部未充填,钻进过程中进尺快。钻孔揭示遇溶洞钻孔 12 个(图 1),溶洞见洞率 16.6%,溶洞洞径 0.3~14.6 m,以点式溶洞为主,局部呈上下两层串珠状,场地溶洞分布情况见表 2。

从岩溶分布看,整个场地均为灰岩区,岩溶呈不规则分布,总体上以中部岩溶发育较弱,南北侧岩溶发育较强烈,现结合钻孔揭示对整个场区岩溶发育叙述如下:

南部 1#~2#楼及幼儿园部位有 6 个孔揭示有溶

表 2 岩溶分布统计表
Table 2 Statistical Table of Karst Distribution

序号	钻孔编号	岩溶发育孔段/m	洞高/m	充填物性状
1	Z9	13.40~14.60	1.2	灰色,含黏性土碎石充填
2	Z10	19.20~20.40	1.2	无充填
		21.30~22.30	1.0	
3	Z12	12.40~13.80	1.4	灰黄色软塑含砾粉质黏土充填,砾石粒径2~4 cm,干钻进尺较快
		14.90~15.70	0.8	灰黄色流塑粉质黏土充填,夹少量砾石
4	Z13	9.40~9.70	0.3	灰黑色软塑含砾粉质黏土充填,砾石粒径2~4 cm
5	Z26	7.80~8.30	0.5	无充填
		8.70~9.20	0.5	灰黄色流塑粉质黏土充填,夹少量砾石
6	Z36	5.90~6.90	1.0	灰黑色含黏性土砾砂充填,干钻易进尺
		7.50~8.50	1.0	
7	Z56	10.80~11.40	0.6	灰黄色软塑粉质黏土充填,夹少量砾石
		12.40~12.70	0.3	
8	Z57	11.50~12.10	0.6	无充填
		12.70~13.20	0.5	
9	Z58	12.50~13.10	0.6	灰黄色含黏性土碎石充填
10	Z69	14.80~15.90	1.1	灰黄色流塑状黏性土充填,含少量砾砂
		18.50~19.60	1.1	灰色软塑含砂粉质黏土充填
11	Z70	16.90~31.50	14.6	上部基本无充填,掉钻,底部31.4~31.5 m为含黏性土碎石充填
12	Z71	14.40~15.40	1.0	无充填

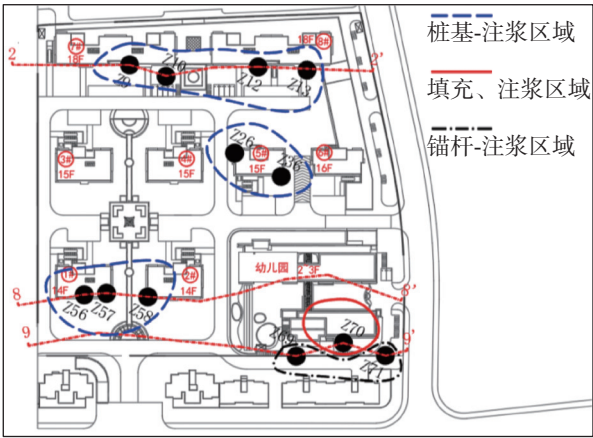


图 1 岩溶发育平面图

Fig. 1 Karst distribution plan

洞,埋深 10.0~18.5 m,单个溶洞竖向洞径多在 0.5~1.1 m 之间,最大可达 14.6 m(Z70 钻孔);

中部 3#~6#楼部位共有 2 孔揭示有溶洞,埋深 6~8 m,单个溶洞竖向洞径在 0.5~1.0 m 之间;

北部 7#~8#楼部位共有 4 孔揭示有溶洞,埋深主要在 12~21 m 之间,单个溶洞竖向洞径 0.3~1.0 m;

根据国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011)^[14]表 6.6.2 岩溶发育程度划分为岩溶强发育、岩溶中等发育和岩溶微发育三个等级,钻孔见岩溶洞隙率大于 30% 属于岩溶强发育等级,根据现阶段钻孔见岩溶洞隙率(16.6%),属于岩溶中等发育区。

考虑岩溶发育存在不规则性,本次勘探孔间距多在 20 m 左右,需结合拟采用的基础形式进一步勘探查明岩溶分布及其不利影响。

本工程的不良地质作用主要为溶洞,岩溶发育是桩基础的严重隐患,设计施工时应应对岩溶发育现象引起足够重视。

3 建筑基础方案

3.1 楼座下基础方案

根据地质勘察报告,基底处于 2-1 含砾粉质黏土、2-2 层含黏性土碎石、5-1 层全风化灰岩、局部处于 5-3 层中风化灰岩。典型区块基底的反力分布如图 2、图 3,各楼座基底反力统计见表 3,楼座下典型地质

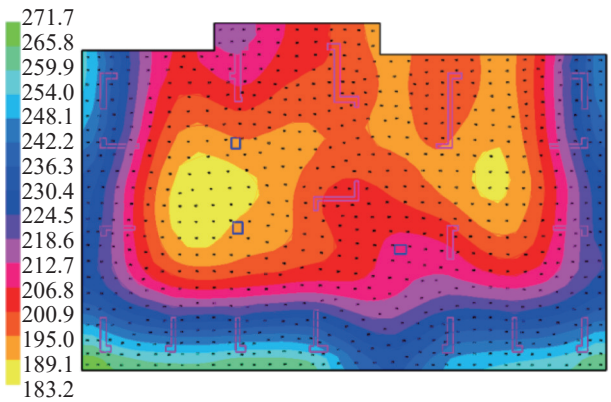


图 2 标准组合下 1#楼基底反力分布

Fig. 2 Distribution of base reaction forces for Building 1 under standard combination conditions

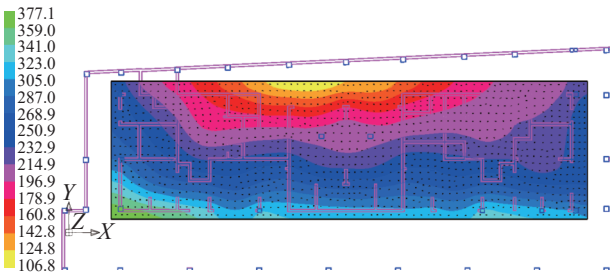


图 3 标准组合下 7#楼基底反力分布

Fig. 3 Distribution of base reaction forces for Building 7 under standard combination conditions

表 3 基底反力统计表

Table 3 Statistics of foundation reaction

楼号	地上层数	典型勘点	基地土层	承载力/kPa	基底反力/kPa	距离中风化灰岩距离/m
1#	14	Z56	含砾粉质黏土	140	190~270	平均约6.8
2#	14	Z58	含砾粉质黏土	140	190~270	平均约7.4
3#	15	Z31	含黏性土碎石	220	210~300	平均约2.0
4#	15	Z34	杂填土	0~100	210~300	平均约1.8
5#	15	Z35	全风化灰岩	180	210~300	平均约1.5
6#	15	Z37	含黏性土碎石	220	210~300	平均约0.5
7#	18	Z9	全风化灰岩	180	130~380	平均约7.4
8#	18	Z12	全风化灰岩	180	130~380	平均约3.5
幼儿园	3	Z61	全风化灰岩	180	30~90	平均约5.5

剖面见图 4、图 5、图 6。

桩基础应按下列两类极限状态设计:

(1) 承载力极限状态: 桩基达到最大承载能力、整体失稳或发生不适于继续承载的变形;

(2) 正常使用极限状态: 桩基达到建筑物正常使用所规定的变形限值或达到耐久性要求的某项限值。

根据项目勘察报告天然地基无法满足楼座的承载/变形要求,结合地质情况,楼座下根据荷载情况采用 800 mm/1 000 mm 钻孔灌注桩,此形式也是岩溶区

较为常用且适用的建筑基础形式^[15-16]。其中 800 mm 直径桩基单桩承载力特征值约为 2600 kN, 600 mm 直径单桩承载力约为 1500 kN。施工时应以进入持力层深度和桩长双控。800 mm 桩基需满足桩长 ≥ 6 m 且桩底进入 5~3 中风化灰岩 ≥ 2.5 m。600 mm 桩基需同时满足桩长 ≥ 6 m 且桩底进入 5~3 中风化灰岩 ≥ 3 m。两种桩型均取同时满足两条件的最小桩长为施工桩长。

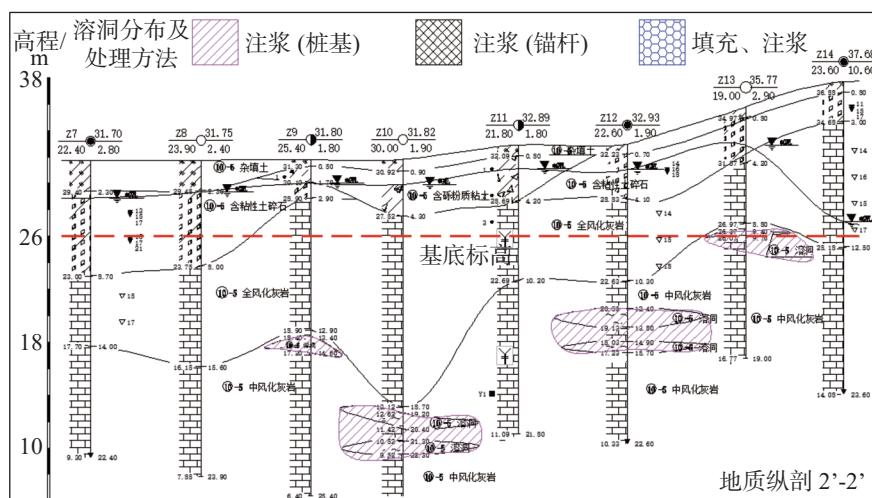


图 4 地质纵剖 2'-2'

Fig. 4 Geological cross-section 2'-2'

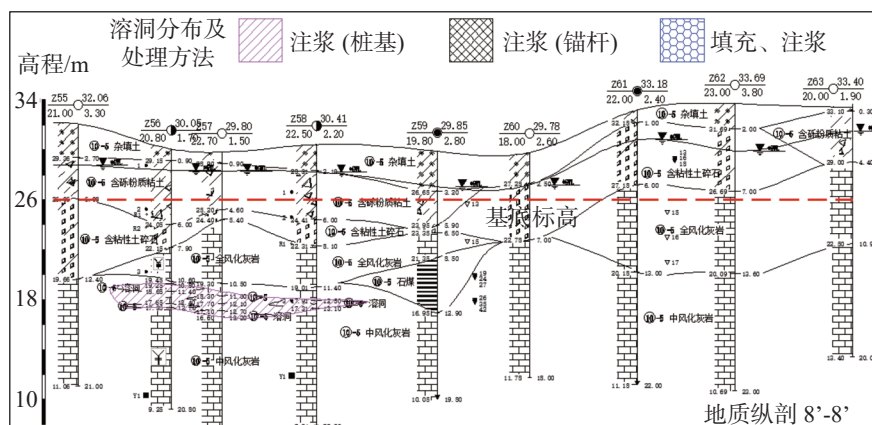


图 5 地质纵剖 8'-8''

Fig. 5 Geological cross-section 8'-8'

3.2 地下室抗浮基础方案

本工程抗浮设计只考虑正常使用状态,施工期间必须采取降水措施。根据地质报告,本工程地下室抗浮设计水位按设计室外道路地坪标高下 1 m 计取,相当于设计相对标高-1.300 m。根据此抗浮水位普通地下室和幼儿园存在抗浮问题。

根据工程所在区域应用较广并适合于本工程的抗浮方案有两种:

- A. 抗拔桩抗浮方案;
B. 岩石锚杆抗浮方案。

两种抗浮方案的对比如表 4:

普通地下室基底天然地基即可满足其承载力要

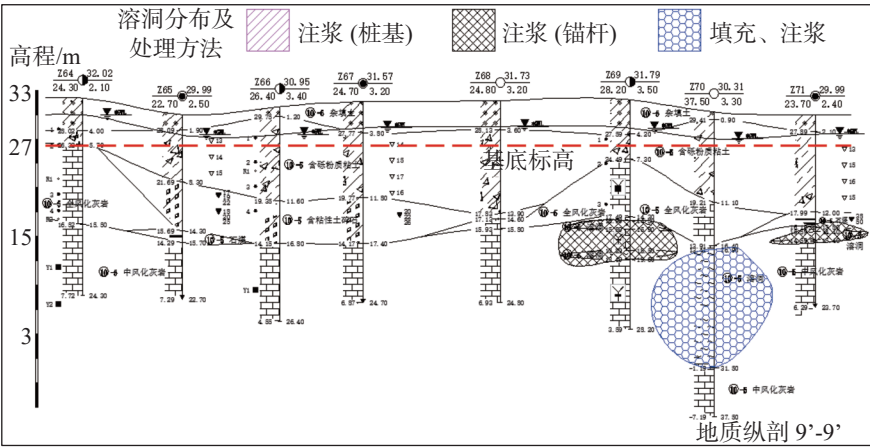


图 6 地质纵剖 9'-9'

Fig. 6 Geological cross-section 9'-9'

表 4 抗浮措施比选表

Table 4 Comparison of anti-floating measures

	受力特性 (地下室仅 需抗拔)	每延米 造价 元/m	岩石层每延 米抗拔力 特征值/kN
A. 抗拔桩 (600 mm)	受拉/受压	500	130
B. 岩石锚杆 (3xHRB400 22)	仅受拉	130	120

求。锚杆因具有易施工、造价低、受力特性与需求匹配的特点,被最终选为普通地下室的抗浮措施。幼儿园基础因兼具承载及穿越溶洞的功能,因此选用 600 mm 桩基作为其抗浮措施。具体参数如(表 5):

表 5 抗浮措施参数表

Table 5 Parameters of anti-floating measures

	持力层	进入持力 层深度/m	抗拔承载力 特征值kN
A. 抗拔桩 (600 mm)	中风化灰岩	≥3	350
B. 岩石锚杆 (3xHRB400 22)	中风化灰岩	≥1.5	180

桩基承载力计算时不考虑溶洞填充物侧阻。为保证桩基及岩石锚杆的承载力,施工时观察岩样,保证其进入持力层的深度为完整岩。若遇溶洞,则需从溶洞底起重新计算入岩深度。

4 溶洞处理方案 (表 6)

4.1 桩基础洞高≤4 m 溶洞处理

(1)对钻孔穿过的溶洞进行填充和注浆加固。

充填材料可采用砂砾、碎石、混凝土等。采用碎石及混凝土材料充填时,应根据岩溶发育程度、地下水特征、充填材料等因素选择施工机械。材料粒径宜由大到小的顺序,分层充填密实,逐步过渡至良好级配面层。充填材料中的碎石抗压强度不宜低于 15 MPa。泡沫轻质土的抗压强度应通过试验确定,且不应低于 1.5 MPa。

(2)注浆可采用水泥浆液,要求水泥浆的水泥为 42.5 级,水灰比可取 0.6~1.0,注浆压力 0.5~1.0 MPa,速度 20~30 L·min⁻¹。注浆顺序应按跳孔间隔注浆方式进行,并宜采用先外围后内部的注浆施工方法。浆液渗透最小直径为 3.0 m,以保证成孔时有足够的固结体。注浆时注浆管必须插入填充物的底部,然后边注浆边缓慢上提,根据注浆速度确定,应使渗透半径控制在允许范围内。当注浆压力逐步升高,达到设计终压,并继续注浆 10 min 以上,且有一定的注浆量,吸浆量在 20~30 L·min⁻¹ 以下时,可停止注浆。浆液流失过快可采用双液体或间隔注浆。

(3)钻孔灌注桩穿过溶洞时,应根据溶洞大小备足泥浆及片石。当冲孔至溶洞位置发现孔内泥浆液面迅速下降时,应立即抛填片石封堵溶洞,并从储浆油向孔内补注浆浆至孔内泥浆面稳定后再继续成孔,防止漏浆及混凝土流失。当溶洞规模较大时,可采用强度等级不低于 C20 的速凝混凝土或水泥砂浆封堵,混凝土或水泥砂浆中应添加速凝剂。

(4)适当增大桩基的超灌系数,防止跑浆后造成桩基空虚。

(5)施工勘察:结合施工勘察确保桩基下 5 m 范围内无溶洞。

4.2 锚杆穿越洞高≤4 m 溶洞的处理

(1)锚杆施工遇无填充物的溶洞,先采用 1 : 2 水泥砂浆进行回填灌浆处理,再采用水泥净浆进行固结注浆处理,待浆体达到一定强度进行二次成孔施工。

(2)锚杆施工遇有填充物、承压水且水系连通的溶洞,先采用注水泥和水玻璃的双液浆使钻孔穿过裂隙、夹层等区域的孔壁形成止浆帷幕以防止浆液大量流失。注双液浆采用小压力、小流量、反复多次的注浆。再采用 1 : 2 水泥砂浆进行回填灌浆处理,最后采用水泥净浆进行固结注浆处理,待浆体达到一定强度进行二次成孔施工,注浆压力从低到高,可间歇、反复压浆。

(3)岩溶地质条件复杂地段也可采用跟管钻进的工艺,钢套管的孔径和壁厚应满足锚索施工和永久防腐要求。

4.3 洞高>4 m 溶洞处理

此规模溶洞有一处位于 Z70 钻孔附近,洞高为 14.6 m。幼儿园位置为 2~3 层框架+单层地下室+平筏存在抗浮问题。由于此位置存在多处岩溶发育且 Z70 位置洞高较高。因此岩溶问题与抗浮问题结合考虑,此位置抗浮措施采用小直径抗拔桩 (600 mm),兼顾跨越溶洞。以缓解溶洞位置地基岩土扰动及部分位置地基塌陷对于基础的不利影响。

此位置桩基溶洞洞高较大,采用如下处理方法:

(1)充填材料采用砂砾、碎石、混凝土。采用碎石及混凝土材料充填时,应根据岩溶发育程度、地下水特征、充填材料等因素选择施工机械。材料粒径宜由大到小的顺序,分层充填密实,逐步过渡至良好级配面层。充填材料中的碎石抗压强度不宜低于 15 MPa。泡沫轻质土的抗压强度应通过试验确定,且不应低于 1.5 MPa。

(2)注浆采用水泥浆液,要求水泥浆的水泥为 42.5 级,水灰比可取 0.6~1.0,注浆压力 0.5~1.0 MPa,速度 20~30 L·min⁻¹。注浆顺序应按跳孔间隔注浆方式进行,并宜采用先外围后内部的注浆施工方法。浆液渗透最小直径为 3.0 m,以保证成孔时有足够的固结体。注浆时注浆管必须插入填充物的底部,然后边注浆边缓慢上提,提管速度不宜太快,根据注浆速度确定,应使渗透半径控制在允许范围内,当注浆压力逐步升高,达到设计终压,并继续注浆 10 min

以上,且有一定的注浆量,吸浆量 20~30 L·min⁻¹ 以下时,可停止注浆。

表 6 处理方式统计表
Table 6 Statistics of treatment method

序号	钻孔编号	处理方法
1	Z9、Z10、Z12、Z13、Z26、Z36、Z56、Z57、Z58	桩基-注浆
2	Z70	先填片石、级配,注浆
3	Z69、Z71	锚杆-注浆

4.4 溶洞处理施工注意事项

(1)在桩基施工过程中,应充分考虑溶洞对桩基施工的不利影响。溶洞土洞多为无充填或半充填型,充填物为黏性土或含砾粉质黏土。对于溶洞较大、顶板较薄的情况,需注意溶洞顶板塌陷导致钻机陷落。

(2)在进行桩基施工时,需依据勘探孔资料和临近孔施工情况进行成孔护壁和混凝土浇筑量的预估,以保证工程的顺利进行。对于地质条件复杂的地段,需要结合钻孔柱状图、实际钻进情况和岩石渣样进行综合判断,以确保工程桩持力层的准确判断。

(3)桩基施工前进行试成桩,选择较典型的孔段,通过试桩选择合适的施工方法及经济可行的遇溶洞处理方法,防止漏浆、塌孔、卡钻、斜钻等事故发生,确保成桩质量和施工进度。

4.5 结果检验

由于本项目溶洞处理在桩基位置主要作用是填充,在普通地下室位置地基附加应力较小,因此对注浆及填充物的质量采用随机原位标贯试验。按 1% 孔数抽查,且不小于 3 点,要求每个溶洞均要检测一次,28d 标贯击数应不小于 10 击。检验结果均满足要求,最小贯击数为 15 击。

对桩基采用声波透射法进行桩身完整性检验,并进行桩基承载力检验,抽检数量不少于 1% 且不少于 3 根。桩身完整性检验结果均为 I 类桩。600 mm 桩基承载力检验拔力加载量为 700 kN,抗压承载力检验压力加载量为 3000 kN。其数值为 2 倍设计承载力特征值,检验结果均满足要求。800 mm 桩基抗压检验承载力检验压力加载量为 5200 kN。其数值为 2 倍设计承载力特征值,检验结果均满足要求。

对抗浮锚杆进行抗拔试验,检验数量不得少于锚杆总数的 5%,且不得少于 5 根。检验拔力加载量

为 360 kN, 其数值为 2 倍设计承载力特征值, 检验结果均满足要求。

5 结 语

(1) 依托浙江省某岩溶发育区的住宅项目, 本文首先对项目地质情况和岩溶发育情况进行了介绍, 进而结合项目结构特点对其基础方案和岩溶处理方案进行了研究、讨论。

(2) 通过对桩基、抗浮锚杆及岩溶处理结果的检验, 验证了本项目基础及岩溶设计方案的可靠性及有效性。

(3) 目前针对岩溶发育区大底盘地下室平筏+抗浮锚杆及住宅楼座平筏+钻孔桩形式的基础及岩溶设计的讨论较为匮乏。本文的研究和讨论可为相关项目的设计提供一定的借鉴。

参考文献

- [1] 刘之葵. 岩溶区溶洞及土洞对建筑地基影响的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
LIU Zhikui. Study on effect of cave and cave soil on building foundation in karst region[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [2] 吴春寅, 曹锋, 朱嗣昭, 孙晋阳, 周庆富, 许公瞻, 华涛, 陈波. 山东省枣庄市十里泉、丁王庄一带地面塌陷的成因及防治对策[J]. 水文地质工程地质, 1998(5): 27-29.
- [3] 康彦仁. 岩溶地面塌陷的形成条件[J]. 中国岩溶, 1988, 7(1): 9-17.
KANG Yanren. Forming condition of land collapse in karst regions[J]. Carsologica Sinica, 1988, 7(1): 9-17.
- [4] 李治国. 隧道岩溶处理技术[J]. 铁道工程学报, 2002, 19(4): 61-67.
LI Zhiguo. Technology of treatment for karst encountered in tunnel construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002, 19(4): 61-67.
- [5] 龙艳魁. 长沙地铁 1 号线工程岩溶洞穴稳定性及其病害处理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
LONG Yankui. The study of stability and processing technology of karst caves in Changsha Metro Line 1[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [6] 李广涛. 广州地铁三号线北延段岩溶处理设计[J]. 隧道建设, 2009, 29(1): 61-64.
LI Guangtao. Design of karst treatment: Case study on north extension section of No. 3 line of Guangzhou metro[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(1): 61-64.
- [7] 李陆平, 尤继勤, 王吉连. 蔡家湾汉江特大桥钻孔桩施工及岩溶处理技术[J]. 桥梁建设, 2009(5): 60-63.
LI Luping, YOU Jiqin, WANG Jilian. Techniques of construction and karst ground handling for bored piles of Caijiawan Hanjiang river bridge[J]. Bridge Construction, 2009(5): 60-63.
- [8] 刘瑞琪. 城市岩溶区地铁隧道的溶洞超前探测及处治技术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2012, 25(2): 42-46.
LIU Ruiqi. Construction treatment technology for city metro in karst area[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2012, 25(2): 42-46.
- [9] 蒋忠信, 秦小林, 袁茂林, 唐晓春. 南昆铁路典型隧道区溶洞研究[J]. 铁道工程学报, 1995, 12(1): 53-62.
JIANG Zhongxin, QIN Xiaolin, YUAN Maolin, TANG Xiaochun. Research of typical solution cave in tunnel region on Nanning-Kunming railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1995, 12(1): 53-62.
- [10] 王青. 桥梁桩基岩溶处理方法分析[J]. 现代交通技术, 2013, 10(1): 24-26.
WANG Qing. Analysis of treatment for bridge pile foundation in karst area[J]. Modern Transportation Technology, 2013, 10(1): 24-26.
- [11] 蒋继昭. 南(宁)柳(州)高速公路洛维大桥桩基岩溶问题[J]. 广西交通科技, 1998, 23(3): 22-23.
- [12] 匡乐红, 彭振斌. 在工业与民用建筑中岩溶地基处理方法探讨[J]. 岩土工程界, 2001, 4(11): 43-44.
- [13] 姜燕, 杨光华, 黄忠铭, 乔有梁, 张玉成. 复杂岩溶场地下的高层建筑地基处理[J]. 岩土力学, 2015, 36(Suppl.1): 430-438.
JIANG Yan, YANG Guanghua, HUANG Zhongming, QIAO Youliang, ZHANG Yucheng. Ground treatment of high-rise buildings in complex karst region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Suppl.1): 430-438.
- [14] 建筑地基基础设计规范: GB50007-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2011.
Code for design of building foundation: GB50007-2011[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [15] 张俊萌, 方从启, 朱杰, 朱俊峰. 超深层岩溶地基上高层建筑桩筏基础性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 343-349.
ZHANG Junmeng, FANG Congqi, ZHU Jie, ZHU Junfeng. Research on performance of pile-raft foundation of high-rise building on ultra deep karst ground[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(2): 343-349.
- [16] 李想, 尹骥, 卫佳琦, 韦马季. 深覆盖岩溶地区高层建筑桩基优化实践[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 591-599.
LI Xiang, YIN Ji, WEI Jiaqi, WEI Maji. Optimization of pile foundation for high-rise buildings in deep-covered karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 591-599.

Design of foundation and karst treatment for a residential project in a karst development area

WEN Yage, LIU Jinshuan, YIN Zepeng, SHENG Jingyu

(Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract With the rapid advancement of construction in China, the development of various buildings and structures in karst regions has been increasing. However, the challenges posed by karst geology cannot be overlooked, as it can lead to a series of serious engineering issues such as uneven foundation settlement, foundation collapse, and water leakage in basements. In extreme cases, karst may even result in the loss of foundation stability and structural damage. To effectively address these challenges, this study focused on a residential project in a karst development area within Zhejiang Province and conducted an in-depth discussion on the foundation design and karst treatment techniques of this project. The project comprises 8 high-rise residential buildings with 14 to 18 floors, a 2–3 story kindergarten, and single-story ancillary buildings, along with a one-level basement. Pile foundations were adopted for the main building sections, while a raft foundation was used for the single-level basement area. Considering the buoyancy issues in non-building areas of the basement, anti-floating anchors were employed, and the overall foundation design was rated as Class A. The geological investigation report revealed that the bedrock is soluble, with a cave occurrence rate of 16.6%, mostly in the form of point-like caves.

Based on the relevant information above, this study elaborately discussed the foundation design schemes for different parts of the buildings and the basement. Based on the analysis of the base reaction forces under the buildings and the combination of engineering experience with geological conditions, bored piles with diameters of 800 mm and 1,000 mm were selected for the foundations beneath the buildings. After the solution of anti-floating pile was compared with the solution of rock anchor, anti-floating anchors for the conventional basement were planned to be used. For the construction of kindergarten, which required both load-bearing capacity and the ability to span caves, piles with the diameter of 600 mm were chosen as the anti-floating measure. Targeted research on treatment technologies for various types of caves was also conducted. Different karst treatment plans were formulated according to the height of the cave, whether it is ≤ 4 m for pile foundations or anchor traversals, or >4 m. This study provided construction considerations for cave treatment, including the adverse effects of caves on pile construction, the determination of the bearing stratum for engineering piles, and key matters such as pile testing. To ensure reliable karst treatment, quality inspections were equally important. These inspections confirmed that the cave treatment, integrity, and bearing capacity of the pile positions treated according to the principles outlined in this paper meet the code requirements, which can also validate the rationality of the results presented herein.

Ultimately, this study has developed a comprehensive foundation design and karst treatment implementation plan for the project. Currently, there is a lack of discussion on the design of large-scale basements with flat rafts plus anti-floating anchors, and residential buildings with flat rafts plus bored piles in karst-developed areas. This study can provide certain reference for the design of related projects.

Key words karst, karst treatment, foundation design, anti-floating anchor rod, pile foundation

(编辑 张玲)