

岩溶地区桩基检测与缺陷处理研究

刘 动^{1,2}

(1. 深圳市岩土综合勘察设计有限公司, 广东 深圳 518172; 2. 深圳市龙岗地质勘察局, 广东 深圳 518172)

摘要: 桩基是岩溶地区建筑基础最常用的形式之一, 由于地质条件的复杂性、特殊性和无规律性, 岩溶地区的桩基施工质量问题频发。岩溶地区桩基质量问题主要是桩身缺陷、桩身局部倾斜、桩底沉渣过厚以及桩底持力层不符合要求, 常用的桩基检测方法包括高低应变法、超声法以及钻芯法, 常用的处理方法采用高压注浆加固桩端持力层。结合深圳市龙岗区一岩溶强发育地区的工程实例, 对岩溶地区桩基检测和缺陷处理的技术进行了探讨。岩溶地区桩基最常见的质量问题就是桩基持力层的缺陷, 钻芯法不仅可以探明桩身范围内的缺陷程度和相对位置, 更有利于查明桩底持力层范围内是否存在溶洞、破碎带以及软弱夹层。岩溶地区检测出桩基缺陷后, 采用高压旋喷注浆的方式对缺陷桩进行加固处理, 可使得原本破碎的持力层变得稳固, 经再次检测合格后, 能够继续满足原有荷载条件下的安全使用要求, 可为类似岩溶桩基问题提供借鉴。

关键词: 岩溶地区; 桩基检测; 钻芯法; 缺陷处理; 注浆加固

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)02-0110-07

Pile testing and defect treatment in the karst area

LIU Dong^{1,2}

(1. *Shenzhen Comprehensive Geotechnical Engineering Investigation & Design Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518172, China;*

2. Shenzhen Longgang Geology Bureau, Shenzhen Guangdong 518172, China)

Abstract: The pile foundation is the most commonly used foundation for buildings in the karst area. The pile foundation construction quality problem is common due to the complexity, particularity, and irregularity of the geological conditions. The main quality problems with the pile foundation in the karst area are pile defects, local pile shaft inclination, thick settlements, and unqualified pile foundation supporting layer. The common test methods for pile foundation include the high and low strain method, ultrasonic method, and coring method. With conventional treatment, high pressure grouting is used to reinforce the pile supporting layer. In regard to a project completed in the karst area in the Longgang District of Shenzhen, an in-depth exploration of pile testing and defect treatment is conducted. The common quality problem is the defect with the pile supporting layer in the karst area. With the coring method, not only the severity and the relative location of the defect can be detected in the pile, but also presence of the karst cave, broken zone, and the weak inter-layers. High pressure jet grouting was used to strengthen the piles with defects and cement the supporting broken zone. Inspection showed that the piles can meet the original load requirement. It can provide reference for similar projects.

Key words: karst area; pile testing; coring method; defect treatment; grouting reinforcement

0 引言

岩溶地区在我国分布广泛, 在岩溶地区进行工

程建设, 由于地质条件的复杂性、特殊性和无规律性, 引发的岩溶工程地质问题越来越多, 造成了很

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-12-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.02.016

作者简介: 刘动, 男, 蒙古族, 1986年生, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程的勘察设计工作, 广东省深圳市龙岗区龙岗大道2172号, liudong04@126.com。

引用格式: 刘动. 岩溶地区桩基检测与缺陷处理研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 110-116.

LIU Dong. Pile testing and defect treatment in the karst area[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 110-116.

多困扰工程安全的技术难题。目前岩溶地区建筑基础施工多采用桩基,尽管事先进行了地质勘察以及超前钻探,施工时也采用了较多技术措施来保证桩基施工的质量,岩溶地区的桩基施工仍会较高概率的出现质量问题。对于岩溶地区的桩基施工,除采取详尽的勘察手段、严格控制施工质量外,利用科学合理的检测手段,形成及时有效的反馈机制,采取经济合理的处理措施,也是保证建筑物基础安全的重要手段。国内外学者针对岩溶地区的桩基施工质量,深入分析桩基检测手段,总结提出了多种桩基缺陷处理的方法,既保证了工程的安全又得到了很多有益的成果^[1-11]。吴辉琴等^[12]针对岩溶地区不同的地质情况,提出了多种检测手段相结合的检测方法,既提高了检测精度又加快了检测进度。李俊^[13]介绍了岩溶地区不同地层中溶洞的处理方法,并对桩基在岩溶地区施工中出现的各种问题进行了原因分析。刘奇等^[14-15]开展了岩溶充填粘土注浆加固试验研究,并根据试验结果对岩溶充填介质注浆加固的效果进行了系统评价。由此可见,岩溶地区地质条件复杂,桩基施工受到岩溶发育程度、地质构造、覆盖层厚度、水文地质条件等多种因素影响,这些因素具有隐秘性、特殊性和不确定性,极易导致桩基施工的质量问题,因此,岩溶地区的桩基检测以及检测出缺陷后的处理方法是岩溶地区桩基施工所面临的重要难题。

本文结合岩溶地区桩基检测和缺陷处理的具体工程,通过归纳岩溶地区不同地质条件下桩基施工的主要质量问题,总结了岩溶地区建筑桩基检测的主要方法,并针对岩溶地区桩基容易出现的质量问题,提出了多种桩基缺陷的处理方法,揭示了岩溶地区桩基检测和缺陷处理的发展方向,可为类似岩溶地区的桩基施工提供参考。

1 岩溶地区桩基的主要质量问题

岩溶地区的桩基出现质量问题一般来说集中在以下4个方面:

一是桩身缺陷。由于岩溶地区富含地下水,易导致混凝土离析,致使混凝土浇筑时易出现胶结困难,导致桩身的中下部区域易形成缺陷;另外岩溶地区丰富的地下水也容易对泥浆护壁造成干扰,护壁的泥浆在地下水作用下易出现泥浆浓度不足,从而出现护壁体系不稳,导致桩身出现缩径、断桩等

桩身缺陷问题。

二是桩身局部倾斜。岩溶地区地质构造复杂,地下岩面起伏较大,土洞、溶洞成串发育,而灰岩本身硬度较大,桩基施工时钻头遇到倾斜岩面极易导致钻头偏位,进而致使桩身偏离垂直方向,造成桩身局部倾斜的缺陷。

三是桩底沉渣过厚。桩底沉渣过厚是桩基施工的质量通病,往往是由于桩基施工时清孔方式选用不当或清孔不彻底导致。而岩溶地区的特殊地质条件,更容易出现桩底沉渣过厚的现象。岩溶地区的富水环境对桩基施工的泥浆护壁体系造成极大的影响,桩基成孔后易出现孔壁剥落、坍塌,致使孔底沉淀物超标,有些复杂地质条件下甚至会经常出现塌孔的现象,需采用长护筒以保持桩孔稳定。另外,在岩溶地区进行桩基施工由于地质条件复杂往往会历时较长,施工工序衔接不及时,清孔与浇筑桩身混凝土之间的时间间隔较长,这些都大大增加了孔内泥浆砂粒沉淀的概率,导致桩底沉渣超标。

四是桩底持力层不符合要求,出现破碎带、软弱夹层或溶洞。在岩溶地区出现持力层缺陷是最容易理解也是最常见的。在岩溶发育地区,桩底部出现溶洞、溶槽是极常见却又极难发现的,即使桩基施工前进行了超前钻探,也极有可能因为桩底出现未发现的溶洞而导致桩基出现质量问题。岩溶区域的下覆基岩往往起伏较大,岩面倾斜现象比比皆是,桩底出现软弱夹层及破碎带也往往不易发现,对下卧层的持力性状判断不准,往往导致桩基持力层出现缺陷,进而导致桩基的承载能力出现问题。

2 岩溶地区桩基的主要检测方法

建筑桩基的检测主要包括桩基完整性的检测以及桩基承载力的检测两方面,其中桩基完整性的检测可以采用高、低应变法,超声法以及钻芯法,而承载力的检测则主要采取静载法。建筑桩基的抽检方法跟桩基的直径有直接关系,当桩径 <800 mm时,一般采用低应变法检测桩身完整性并结合静载法判断桩基的承载力;当桩径在 $800\sim 1600$ mm时,桩基的桩身完整性可采用低应变法、超声法或者钻芯法,桩基的承载力一般采用静载法,但当单桩的竖向抗压承载力特征值 >10000 kN或单桩的竖向

抗拔承载力 >5000 kN时,由于承载力过大,静载法一般无法实施。当桩径 >1600 mm时,应全部安装声测管,并采取超声法进行桩身完整性的检测。

在岩溶强烈发育的地区,桩基出现质量问题的概率大大增加,因此对于此种条件下的桩基检测是非常重要的。对于岩溶发育区域的桩基检测,低应变法和超声法是较为常用的检测桩身完整性的方法,其中超声法需预埋声测管,增加一定的检测成本,但相对来说准确性和实用性较高。上述两种方法仅可以对桩身范围内的缺陷程度和位置进行判断,但对于桩底沉渣厚度以及桩端的持力层情况却无法提供相应信息,而岩溶地区的桩基承载力主要取决于嵌岩段的岩性特征以及下卧层的持力性状,因此对于岩溶发育地区的桩基还必须辅助其他检测手段。钻芯法作为桩基检测的另一项重要方法,不仅可以探明桩身范围内的缺陷程度和相对位置,更有利于查明桩底持力层范围内是否存在溶洞、破碎带以及软弱夹层,在岩溶区域的桩基检测中得到了广泛的应用。在岩溶中等和强发育地区,检测单位常用超声法和钻芯法结合对桩基进行完整性和持力层的判断。采取钻芯法检测时,钻芯的数量也与桩径的大小有着直接关系,桩径 <1200 mm时,需钻芯1孔;桩基为 $1200\sim 1600$ mm时,需钻芯2孔;桩径为 $1600\sim 2000$ mm时,需钻芯3孔;桩径 >2000 mm时,需钻芯4孔。

在岩溶强发育地区,若采取常规检测手段发现桩基持力层范围内存在溶洞或软弱夹层,可结合物探手段进一步对桩基的持力层情况进行检测。物探手段在检测桩基持力层溶洞发育程度、伴生塌陷的分布以及岩面起伏情况有着其他手段无可比拟的优势。岩溶地区桩基常用的物探检测方法一般结合钻芯法进行,利用钻芯孔开展管波探测法、孔中雷达、跨孔CT法等,进一步探明桩基持力层的完整性、桩底部溶洞或破碎带的发育及分布情况,还可以在钻芯孔内开展桩孔壁岩体完整性探测,对桩身范围内孔壁的洞隙位置、形状、发育情况及分布范围予以探明。

3 桩基缺陷的处理方法

岩溶地区桩基的质量问题最常见的就是持力层的缺陷,主要包括持力层出现软弱夹层、构造破碎带或出现溶洞。通过低应变法检测可对桩身完

整性有初步判断,进一步通过钻芯法可确定桩身缺陷的位置和严重程度。当检测出桩基出现质量问题后,需进行详细的分析和计算,以确认其是否可满足安全使用要求,并对缺陷桩提出进一步的处理措施。目前岩溶地区桩基缺陷的处理方法主要包括两种,一种就是通过调整上部建筑结构或基础形式,使得缺陷桩的受力变小以满足桩基安全使用的要求;另一种就是选择合适的方法,对缺陷桩进行加固处理,使得加固后的桩基能够继续满足原有荷载条件下的安全使用要求。

3.1 通过结构措施解决

当检测出某根桩出现质量问题后,例如通过钻芯法发现持力层存在软弱夹层,这时可在此桩的周边进行补充勘察,进一步探明此桩附近持力层的岩性和破碎程度,并可通过取样、试验得到此软弱夹层的物理力学性质,为下一部对此缺陷桩的承载力判断提供依据。在对缺陷桩的嵌岩深度、持力层特性以及缺陷程度进行综合评判,并通过分析和验算后,对缺陷桩的承载能力进行降低或折算,以确定其是否可满足上部结构的受力要求。

缺陷桩的承载能力降低后,可通过调整上部主体的建筑布局或结构形式,改变缺陷桩的受力路径,降低缺陷桩的受力要求以满足其安全使用的要求。还可以加大缺陷桩所在的基础承台或加深基础承台的埋深,以使得缺陷桩承受的荷载降低,或将其承受的荷载分散到其他完整桩基,以达到缺陷桩可以安全使用的目的。在实际工程中,调整建筑布局或上部结构形式往往由于多种因素的制约,不易实现,而加大、加深承台可以起到较好的处理效果,但对缺陷桩的数量、位置以及缺陷程度都有一定的要求。

3.2 桩端持力层的加固

岩溶地区桩基持力层出现软弱夹层、破碎带或溶洞后,可采取高压注浆加固的方法进行处理。高压注浆加固桩端持力层可起到以下3个作用,首先是对桩端的空洞、空隙进行填充,使得原本较空或者部分填充的区域填充密实,使得填充物和周边稳定地层形成一个整体,起到加固持力层的作用。其二是注浆后,可以起到隔绝地下水的作用,使得桩端的持力层不再受到地下水的侵蚀,进一步保证持力层的稳定和建筑物的安全。其三是注浆加固可以使得原本破碎的持力层变得稳固,在注浆体达到

强度后,满足规范和设计要求的承载力。

注浆加固缺陷桩需要先在缺陷桩中施工补强钻孔,也可利用原抽芯检测的钻孔进行加固,补强钻孔的数量根据桩径大小的不同有所不同。补强钻孔施工完毕后,需先用高压水流注入补强孔中,对孔内充填物进行清洗,使其尽量排空。然后利用高压注浆泵进行旋喷注浆,将补强孔尽量填充密实,此步骤可反复多次进行。然后再进行孔内注浆和孔口注浆,直至所有孔口浆液满浆,一次注浆后还需进行二次注浆,以保证注浆的效果可以达到预期的强度要求。

经过补强后的缺陷桩是否可以满足设计使用要求,应在进行桩基的完整性检测后由设计单位进行复核判定。一般情况下,补强后的桩基仍需进行抽芯检测,桩底部分的抽芯试样还需进行抗压试验,试验结果不小于桩身承载力的设计值方可判定为合格。

4 工程实例

4.1 桩基检测方案

深圳市龙岗区某高层住宅及综合体,占地面积约2.6万m²,由3栋塔楼及裙房组成,塔楼高30~33层,塔楼及裙房基础形式均采用冲孔桩,桩端持力层为微风化大理岩。根据项目勘察报告,该地块微风化大理岩顶面起伏较大,浅部溶洞较发育,场地部分钻孔揭露大理岩溶蚀现象,包括蜂窝状、蚕豆状溶孔,钻孔见洞隙率为43.9%,线岩溶率约为11.8%,为岩溶强发育地区。该项目总桩数为237根,桩径为1.0~2.0 m,桩身砼设计强度等级为C35,单桩竖向承载力特征值为9000~34500 kN,设计桩长为6.00~38.00 m。针对本项目复杂的地质情况,结合规范和设计要求,本项目检测方案如下:(1)超声法检测:塔楼桩部分抽检30%,裙房桩抽检10%,且每承台下不少于1根。(2)低应变法检测:不少于总桩数的30%,且每承台下不少于1根,如与超声法重复,则以超声法优先。(3)钻芯法:不少于总桩数的15%,且不少于10根,无超前钻的桩钻进3倍桩径且不小于3 m,有超前钻的桩钻进1 m。(4)界面钻芯法:塔楼桩100%预埋,检测85%,即除了钻芯法检测的桩外,均做界面钻芯。桩基检测的具体数量统计详见表1。

表1 桩基检测数量统计

Table 1 Summary of the tested piles

桩型	桩的设计参数		总桩数	检测数量/根		
	桩径/ m	竖向承载力特征值 (抗压/抗拔)/kN		低应变法	超声法	钻芯法
抗压桩	1000	9000	1	1	-	
	1600	22500	29	21	-	11
	1800	28000	18	-	14	
	2000	34500	17	-	14	
抗压兼抗拔桩	1000	5500/1200	111	63	-	
	1200	13000/1000	27	23	-	25
	1400	17500/2000	25	25	-	
	1600	22500/1000	5	3	-	
合计			233	136	28	36

注:共233根桩,Ø2000 mm 17根,Ø1800 mm 18根,Ø1600 mm 34根,Ø1400 mm 25根,Ø1200 mm 27根,Ø1000 mm 112根。

4.2 检测结果

根据检测结果,桩基承载力满足设计要求,但有5根桩在6个钻芯孔检测出持力层存在溶洞,不满足设计要求,溶洞缺陷从几十厘米到几米发育不等,具体详见表2。以C176号桩为例,抽芯结果显示在24.8~25.26 m范围内存在破碎岩体,初步判断为溶洞缺陷,具体详见图1。

表2 溶洞一览

Table 2 List of karst caves

序号	桩号	桩径/ mm	桩长/ m	检测孔 深/m	缺陷特征	
					类型	位置/m
1	C131	1000	19.96	24.79	溶洞	4.34~8.11
2	C145	1600	17.45	22.50	溶洞	24.59~29.10
3	C171-1	1800	30.70	36.20	溶洞	0.15~4.65
4	C175-1	2000	16.47	22.65	溶洞	20.49~20.92
5	C175-2	2000	16.47	22.75	溶洞	20.38~21.08
6	C176-2	2000	24.65	26.60	溶洞	24.80~25.26

4.3 物探辅助检测结果

由于抽芯结果显示多根桩的桩端持力层存在不同程度的缺陷,为进一步探明溶洞的分布和发育程度,采用跨孔CT物探方法对出现溶洞的桩基钻孔进行进一步的检测。跨孔CT检测选取了4个钻孔形成了4个探测剖面,以查明场地内重点区域溶洞的空间分布、连通性等特征。溶洞内固态充填物



图1 钻芯法检测结果(典型溶洞)

Fig.1 Test results with the coring method

一般为饱和水土。溶洞内介质的纵波波速 V_p 在 1500~2000 m/s 之间。溶洞外介质为灰岩, 根据同类工程经验, 灰岩的纵波波速 V_p 在 4000~6000 m/s 之间。溶洞内外介质存在极为明显的波速差异。

从跨孔CT探测结构(图2)可以看出, 场地内基岩面起伏明显, 埋深约为4~28 m。基岩中波速为3000~4000 m/s 区域推断解释为裂隙发育区, 宏观上表现为基岩, 存在溶蚀现象及小的溶洞、裂隙发育, 部分包含层厚较小的完整基岩或局部夹有强风化岩。岩溶发育区在CT波速映像图中表现为低波速异常(“蓝色”至“青色”区域), 岩溶发育区的纵波波速约为1500~2500 m/s。岩溶发育区宏观上表现为岩溶、溶蚀裂隙发育, 部分包含较小的孤立的微风化岩块。场地揭露最大溶洞洞高9.5 m, 见于R18岩溶发育区, 揭露最小溶洞洞高1.4 m, 见于R11岩溶发育区, 场地揭露溶洞平均洞高4.5 m。

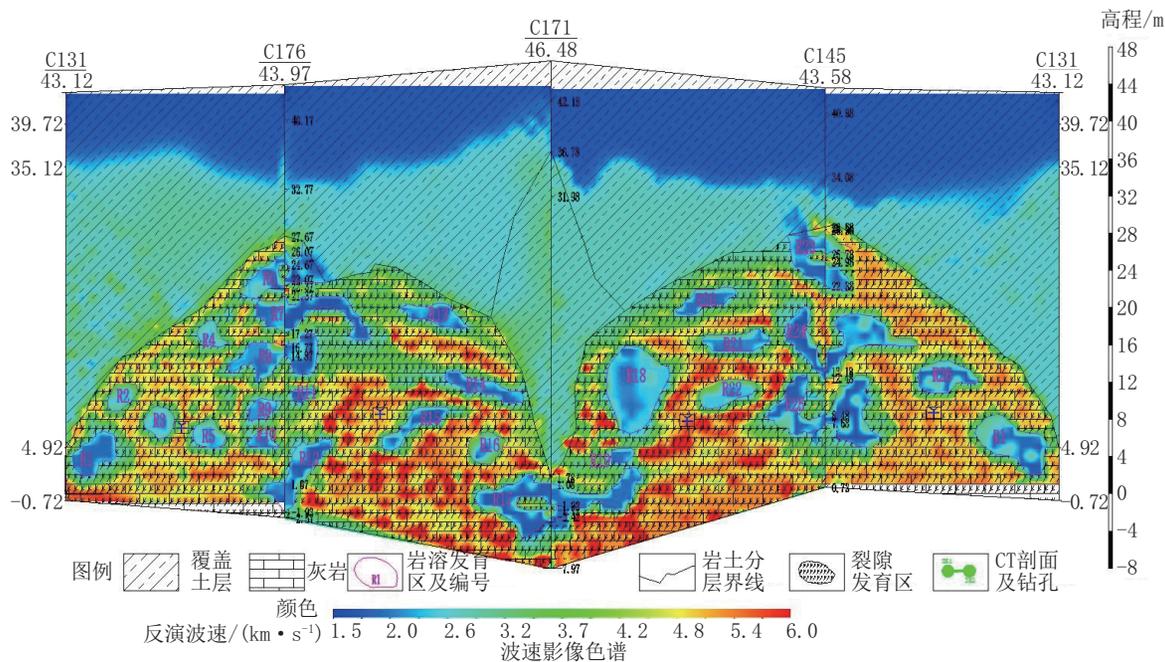


图2 跨孔CT物探成果

Fig.2 Geophysical exploration results with the cross-hole elastic wave CT

4.4 缺陷桩加固

该项目桩基工程经过多种手段检测, 发现主要问题为桩底持力层不满足设计要求。主要原因为该场地地质情况复杂, 岩溶极其发育, 桩基施工未能克服不良地质条件。根据现场情况及施工条件, 建议对持力层不满足要求的桩利用高压旋喷方式进行注浆补强, 注浆加固的流程见图3所示。

主要施工技术参数包括:

(1) 补强钻孔数量: 桩径 < 1600 mm 注浆孔 2 个, 1600~2000 mm 注浆孔 3 个, 桩径 > 2000 mm 注

浆孔 4 个。

(2) 处理深度: 参照检测结果, 处理深度内包含桩底 3 倍桩径范围内所有缺陷, 且穿过缺陷位置入完整基岩 0.5 m。

(3) 钻孔位置: 根据建设单位(或监理单位)提供的桩位图及现场位置, 钻孔在钢筋笼的内侧 150~200 mm 均匀分布。钻孔垂直度偏差 $\geq 0.5\%$ 。

(4) 洗孔水压 10~20 MPa, 高压旋喷注浆浆压 10~20 MPa, 静压注浆浆压 2~4 MPa, 水灰比 0.6~1.0(高压旋喷注浆时为 1.0, 静压注浆时为 0.6)。

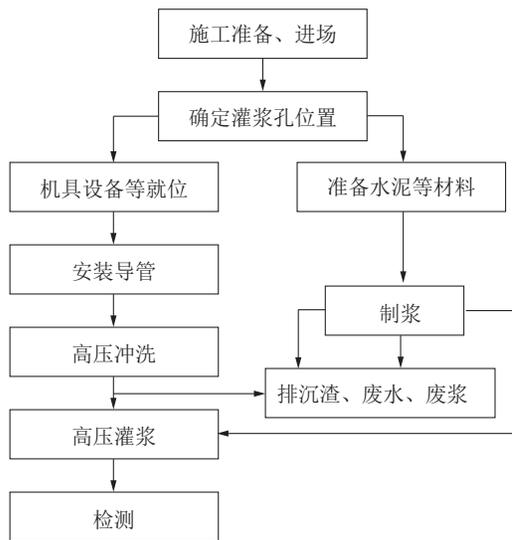


图 3 高压旋喷注浆工艺流程

Fig.3 Process chart of high pressure jet grouting

4.5 处理效果检验

对于高压注浆补强的桩基一般可采用超声法或者钻芯法,采用超声法时需注浆施工时在灌浆孔预埋声测管,本项目采用钻芯法进行处理效果的检测。

在进行桩基补强施工后 1 个月,对补强桩进行钻芯法检测,根据设计要求,补强后的桩基完整性需满足规范要求,且桩底处理后的抽芯试件进行抗压检测后,其承载力设计值不应小于桩身承载力设计值。

缺陷桩经补强后的抽芯结果如图 4 所示(以 C176 号桩为例),检测结果显示,经过高压注浆处理后溶洞内的水泥心样胶结良好、密实、连续,与下部岩石结合为整体,经抗压检测,其饱和抗压强度达到 40 MPa,满足设计和规范的要求,处理效果良好。



图 4 缺陷桩补强后的抽芯结果

Fig.4 Coring results after reinforcement of the pile foundation

5 结论

(1)岩溶地区的桩基出现质量问题主要集中在:桩身缺陷、桩身局部倾斜、桩底沉渣过厚以及桩底持力层不符合要求。其中最常见缺陷为桩底持力层不符合要求,即桩底出现破碎带、软弱夹层或溶洞,此种情况是极难发现的,很有可能因为桩底出现未发现的溶洞而导致桩基出现质量问题。

(2)建筑桩基完整性的检测可以采用高、低应变法,超声法以及钻芯法,其中钻芯法不仅可以探明桩身范围内的缺陷程度和相对位置,更有利于查明桩底持力层范围内是否存在溶洞、破碎带以及软弱夹层。若采取常规检测手段发现桩基持力层范围内存在溶洞或软弱夹层,可结合物探手段进一步对桩基的持力层情况进行检测。

(3)岩溶地区桩基缺陷的处理方法主要包括两种,一种是通过调整上部建筑结构或基础形式,使得缺陷桩的受力变小以满足桩基安全使用的要求;另一种是对缺陷桩进行加固处理,使得加固后的桩基能够继续满足原有荷载条件下的安全使用要求。

(4)高压注浆加固桩端持力层的缺陷,可使得填充物和周边稳定地层形成一个整体,并起到隔绝地下水的作用,使得原本破碎的持力层变得稳固。加固后的桩基经过再次检测达标后,可继续满足原有荷载条件下的安全使用要求。

参考文献(References):

- [1] 范峥,钟久安,何非凡,等.高聚物复合堵水浆材在岩溶地区深孔帷幕灌浆中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):86-90.
FAN Zheng, ZHONG Juan, HE Feifan, et al. Application of high polymer composite water blocking slurry in deep hole curtain grouting in the karst area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(1):86-90.
- [2] 刘运思,牟天光,肖洪波,等.岩溶地区桥墩桩基钢护筒变形加固处治技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(3):57-62.
LIU Yunsi, MOU Tianguang, XIAO Hongbo, et al. Reinforcement treatment of deformation of steel casing of bridge pile foundation in karst area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(3):57-62.
- [3] 吕文龙,刘恋.新型帷幕复合注浆法在桩端持力层加固中的应用[J].岩土工程技术,2015,29(2):95-99.
LV Wenlong, LIU Lian. Application of bearing layer reinforcement around pile tip by new composite curtain grouting technique [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2015,29(2):95-99.
- [4] 林益欢.岩溶地质条件下桩基抽芯孔涌水堵漏及桩底加固技术

- 研究[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(1): 78-80.
- LIN Yihuan. Research on Pile Foundation core pulling hole leakage and pile bottom reinforcement technology under karst geological condition [J]. Building Technique Development, 2019, 46(1): 78-80.
- [5] 胡新发, 柳建新. 山地和岩溶地区端承桩质量检测与加固技术研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 686-692.
- HU Xinfu, LIU Jianxin. Study of testing of end-bearing piles and reinforcement technology in mountain and karst area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 686-692.
- [6] 杜海龙, 贺茉莉, 罗小斌, 等. 岩溶地区某广场钻孔灌注桩基础补强加固设计与新技术[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 600-606.
- DU Hailong, HE Moli, LUO Xiaobin, et al. A new technology of reinforcement by cast-in-place pile foundation in karst areas [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 600-606.
- [7] 张建同, 陈顺军, 刘素梅, 等. 隐伏岩溶条件下的上部结构-基础-地基共同作用数值模拟分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 792-798.
- ZHANG Jiantong, CHEN Shunjun, LIU Sumei, et al. Numerical simulation analysis of interaction of superstructure-foundation-pile foundation under hidden karst condition [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(5): 792-798.
- [8] 黄宏. 综合勘察方法在某岩溶塌陷勘察中的应用[J]. 路基工程, 2018(S1): 137-140.
- HUANG Hong. Application of the comprehensive survey method in the investigation of a karst collapse [J]. Subgrade Engineering, 2018(S1): 137-140.
- [9] 张帅军, 汪进超, 韩增强. 综合钻孔探测技术在水下隧道围岩结构勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2020, 48(4): 72-78.
- ZHANG Shuaijun, WANG Jinchao, HAN Zengqiang. Application of comprehensive borehole detection technique in structure survey of underwater tunnel surrounding rock [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48(4): 72-78.
- [10] 林剑锋, 袁海龙, 张明, 等. 综合物探探测在中马友谊大桥勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2020, 48(6): 73-78.
- LIN Jianfeng, YUAN Hailong, ZHANG Ming, et al. Application of combined utilization of multi engineering geophysical prospecting technology in Sinamale Bridge [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48(6): 73-78.
- [11] 石振明, 沈丹祎, 彭铭, 等. 岩溶地区桩基施工溶洞处理技术——以吉安永和大桥桩基施工为例[J]. 工程地质学报, 2015, 23(6): 1160-1167.
- SHI Zhenming, SHEN Danwei, PENG Ming, et al. Karst cave disposing technology for pile foundation construction, illustrated with—Yonghe Bridge in Ji'an [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(6): 1160-1167.
- [12] 吴辉琴, 王鹏, 王家全. 岩溶地区桩基检测方法对比分析和综合应用[J]. 建筑科学, 2012, 28(3): 79-82.
- WU Huiqin, WANG Peng, WANG Jiaquan. Comparative analysis and comprehensive application of detection method of pile foundation in karst area [J]. Building Science, 2012, 28(3): 79-82.
- [13] 李俊. 岩溶地层后注浆冲孔灌注桩施工分析[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(2): 141-144.
- LI Jun. Construction analysis of post grouting punching cast-in-place pile in karst stratum [J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(2): 141-144.
- [14] 刘奇, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 岩溶充填黏土注浆加固试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3179-3188.
- LIU Qi, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Laboratory experiment study of grouted materials filled in karst caverns [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3179-3188.
- [15] 刘奇, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 基于渗流-侵蚀理论的岩溶充填介质注浆加固效果评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 572-580.
- LIU Qi, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Evaluation of grouting reinforcement effect for karst filling medium based on seepage-erosion theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 572-580.

(编辑 周红军)