

龙泉市鼎丰壹城大直径钻孔桩施工难点与对策

邵吉成, 骆嘉成, 卢立海, 强小兵

(温州浙南地质工程有限公司, 浙江 温州 325006)

摘要: 龙泉市鼎丰壹城桩基项目主要有桩径大、单桩极限承载力大等特点, 最大桩径达 2400 mm, 单桩竖向极限承载力达 89600 kN, 建筑领域参考经验较少。本桩基工程主要面临砂层和卵石层易塌孔、入岩难和沉渣清理困难等三大挑战。结合国内桥梁、铁路桩基施工经验, 通过增加砂层和卵石层稳定性、采用分级扩孔和孔底除渣等关键技术, 针对性解决现场施工难题。灌注桩达到龄期后, 经现场检测, 施工完成的桩大多为 I 类桩。通过对本工程施工经验的总结, 为大直径旋挖钻孔灌注桩在建筑领域的应用提供借鉴。

关键词: 钻孔灌注桩; 大直径桩; 旋挖钻进; 塌孔; 沉渣; 清孔

中图分类号: TU473.1⁺4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2020)10-0077-07

Construction difficulties in large diameter bored piles at Dingfeng Yicheng in Longquan City and the solutions to them

SHAO Jicheng, LUO Jiacheng, LU Lihai, QIANG Xiaobing

(Wenzhou Zhenan Geological Engineering Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang 325006, China)

Abstract: The Longquan Dingfeng Yicheng pile foundation project was featured of large pile diameter and high ultimate bearing capacity of the single pile where the maximum pile diameter was 2400mm, and the vertical ultimate bearing capacity of the single pile was 89600kN. There is little reference experience in the construction field. The pile foundation project mainly faced three challenges: easy caving in the sand layer and pebble layer, difficulty in bedrock penetration, and difficulty in clearing sediment. In reference to the pile foundation construction experience of bridges and railways in China, the key technologies such as stabilization of the sand layer and pebble layer, step reaming, bailing out hole bottom sediments, were purposely targeted to solve the construction problems. Testing after the waiting period showed that most of the bored piles were Class I piles. The summary of the construction experience of this project can provide reference for the application of large diameter rotary bored piles in the construction field.

Key words: bored pile; large diameter pile; rotary drilling; hole collapse; sediment; hole cleaning

0 引言

钻孔灌注桩具有承载力高、施工简单、对周围土体扰动小、适用地层广泛等优点^[1-3], 在桥梁、港口以及建筑基础领域得到广泛应用^[4]。根据桩径大小, 将直径 > 800 mm 的桩定义为大直径桩^[5-6]。随着桩基的不断发展, 大直径桩的定义也有了不同, 目前也有将直径 > 2.5 m 的桩叫作常规意义上的“大直径桩”^[7-8]。大直径钻孔灌注桩承载能力大, 施工设备相对简单, 抗震性、抗风稳定性良好, 造价相对低廉^[9-10], 因而被广泛应用于深水桥梁、港口、

路桥工程等领域的基础施工中^[11]。建筑领域桩径通常在 600~1500 mm 之间, 本工程灌注桩的桩径大多在 1800~2200 mm 之间, 最大桩径达 2400 mm, 在建筑领域应用较少, 在施工过程中出现了大直径桩施工时常见的工程事故和难点, 对于现场解决方案和施工工艺的选择, 不能一概而论, 下面结合龙泉市鼎丰壹城桩基工程的施工, 介绍一些施工经验, 为大直径旋挖钻孔灌注桩在建筑领域的应用提供借鉴。

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-06-28 DOI: 10.12143/j.tkge.2020.10.014

作者简介: 邵吉成, 男, 汉族, 1992 年生, 岩土工程专业, 硕士, 主要从事桩基工程、基坑工程和软土地基处理工作, 浙江省温州市瓯海区新桥街道站前路 199 号, 1040350863@qq.com。

引用格式: 邵吉成, 骆嘉成, 卢立海, 等. 龙泉市鼎丰壹城大直径钻孔桩施工难点与对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10): 77-83.

SHAO Jicheng, LUO Jiacheng, LU Lihai, et al. Construction difficulties in large diameter bored piles at Dingfeng Yicheng in Longquan City and the solutions to them[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 77-83.

1 工程概况

1.1 工程简介

项目位于龙泉市城东片区鼎丰壹城,北邻东茶路,西邻环城东路,本工程涵盖范围为2-2号地块桩基工程,2-2号地块为地下室2层和超高层建筑,层高3.7~6 m。该地块建筑面积约15.19万m²,分为2-2A和2-2B两个地块,其中2-2A号楼为公寓,共30层,高159.8 m;2-2B号楼为酒

店,共35层,高156 m,建成后为龙泉市最高建筑,因此本工程意义重大。

1.2 地质情况

表1为现场土层分布情况,从表1中可以看出,埋深在5.8~0 m和6.4~0.8 m范围内分别为粉砂层和卵石层,在粉砂层和卵石层较厚的区域,旋挖钻机成孔过程中有塌方、失稳的隐患。本工程所有桩皆为端承桩,以⑩₃中风化花岗岩层为持力层。

表1 土层分布情况
Table 1 Soil distribution

地层编号	地层名称	层顶埋深/m (最大~最小)	层顶高程/m (最大~最小)	层底埋深/m (最大~最小)	层底高程/m (最大~最小)	层厚/m (最大~最小)
① ₁	杂填土	0.00~0.00	196.40~191.40	16.70~0.20	194.90~178.70	16.70~0.20
① ₂	杂填土	11.10~2.60	192.10~182.40	14.50~5.80	190.30~180.10	6.00~0.50
① ₃	耕土	2.20~0.00	192.70~191.40	2.70~0.30	192.40~190.90	0.50~0.30
②	粉质粘土	3.70~0.00	193.40~189.30	5.90~1.30	192.10~187.30	3.70~0.50
③	粉砂	5.80~0.00	194.90~187.60	13.10~0.80	194.20~181.10	9.20~0.20
④	卵石	6.40~0.80	194.20~185.90	12.80~6.50	188.70~179.30	12.00~2.10
⑩ ₁	全风化花岗岩	16.70~5.80	190.30~178.70	26.10~13.80	179.80~167.80	17.20~3.60
⑩ ₂	强风化花岗岩	26.10~13.80	179.80~167.80	43.30~21.90	171.20~149.80	23.40~2.30
⑩ ₃	中风化花岗岩	43.30~21.90	171.20~149.80			12.50~1.00

1.3 水文情况

场区地下水有孔隙水和风化裂隙水。孔隙水主要贮存在④层卵石中,水量较大,大口降水井单井出水量>100 t/d;风化裂隙水主要贮存在⑩层花岗岩风化裂隙中,因裂隙面多呈闭合状,故风化裂隙水含量较小。地下水主要接受大气降水垂向渗入补给和上游含水层的侧向补给,由南向北、由西向东径流与排泄。勘察期间测得钻孔孔内稳定水位埋深介于0.10~5.00 m(2018年12月至2019年4月测定)。相应稳定水位标高介于189.00~193.50 m。因地下水动态与季节变化关系较密切,且与龙泉溪水力联系密切,地下水位年变化最大幅度约2.00 m。桩成孔过程中,地下水位高程对孔壁的稳定性有较大影响。

1.4 桩型和数量

本工程钻孔灌注桩共91根,有6种桩型,如表2所示。桩长在17~34 m之间,桩径在1200~2400 mm之间,最大桩径2400 mm,其单桩极限承载力为89600 kN,在建筑领域比较少见。

表2 工程桩型及其数量

Table 2 Pile types and quantities for the project

桩径/mm	数量/根	单桩竖向极限承载力/kN
1200	11	22000
1800	16	48000
2000	17	62000
2100	22	68000
2200	20	74000
2400	5	89600
总计	91	

本工程采用XR550D型和BG38型旋挖钻机进行桩成孔,成孔过程中采用人工造浆的方式进行护壁。对于桩径较大的桩,由于桩孔壁的拱环作用急剧减弱,砂土粘聚力差,在桩成孔过程中孔壁不稳定性增加,极易造成孔壁坍塌事故^[7-8]。且本工程现场土层中局部分布较厚的粉砂层和卵石层,土体被挖走后,在孔内水的浸泡及桩周土侧压力作用下,容易出现成孔坍塌现象。2-2A场地共出现Z19和Z34号桩2处严重塌方事故,Z19号桩塌方处位于粉砂层和卵石层;Z34号桩坍塌事故非常严重(图1),卵石层部位至地表范围土层全部塌陷,护筒随着底部卵石层同时垮塌,掉进孔内数米。

2 施工难点与工程事故

2.1 砂层、卵石层易塌方



图 1 Z34 号桩孔坍塌情况

Fig.1 Collapse of Z34# pile hole

孔壁坍塌后,项目管理人员积极收集现场各项数据,总结出塌方事故发生的原因,将导致本工程出现坍塌事故的原因分为主要原因和次要原因。主要原因有 3 个:(1)场地局部砂层、卵石层较厚,通过对地勘报告土层分布情况的了解可知,Z19 号桩地下粉砂层和卵石层厚度分别在 5 m 和 12 m 左右,Z34 号桩粉砂层和卵石层厚度分别在 5 m 和 8 m 左右,与场地其它桩位土层相比,厚度较大;(2)桩径较大,孔壁拱环作用急剧减弱,Z19 号桩孔径为 2400 mm,Z34 号桩孔径为 2200 mm,比较小直径的桩孔,大直径桩孔更易出现塌孔现象;(3)降雨影响,塌方前一天晚上的降雨使地下水位上升,经现场测量,地下水位高度接近地表,此外,由于降雨的影响,泥浆池内泥浆密度降低,仅为 1.05 g/cm^3 左右,泥浆粘度为 16.59 s,护壁效果不理想。

次要原因主要为成桩过程、入岩过程时间过长,且成孔后未及时清孔、灌浆。本桩基工程要求桩入岩深度为 $0.5D$ (D 为桩径)。根据要求,Z34 号桩(Z19 号桩类似)需入岩 1.2 m,成孔过程共计 21 h,而该桩在入岩过程中耗时达 9 h(见图 2),且成桩完

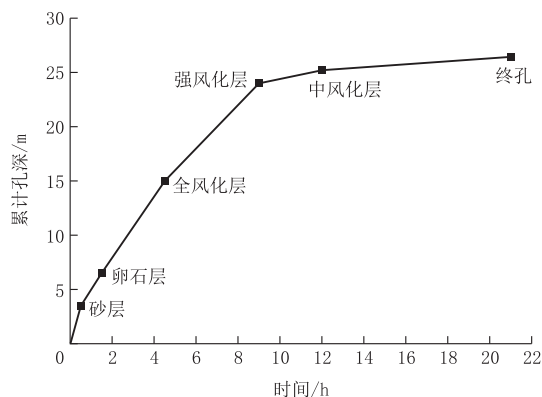


图 2 Z34 号桩成孔进度

Fig.2 Drilling rate of Z34# pile hole

成后未及时清孔、灌浆(终孔时为凌晨 1 点),导致桩孔暴露时间过长,进而出现塌方事故。

2.2 中风化花岗岩入岩难

本工程以中风化花岗岩为持力层,该层岩石岩性为:灰肉红色,饱和,密实,花岗结构,块状构造,节理发育,节理间见铁锰质渲染,岩体破碎;承载力特征值为 103.5 MPa。由于本工程大多数桩的桩径较大,持力层强度较高,导致桩入岩难,成孔速度缓慢,且经常出现钻头牙齿损坏情况,因此选择合适的入岩方式对工程意义重大。

2.3 孔底沉渣较厚

孔底沉渣呈现强度低、压缩性高等特点^[12],影响桩基质量。单桩竖向抗压静载试验表明,当钻孔灌注桩孔底存在一定厚度的沉渣时,其端部一般呈刺入性剪切破坏,导致桩在竖向荷载作用下其受受力性能接近纯摩擦型桩,严重影响桩的承载力^[13-15],进而导致承台承受较大的荷载^[16],对建筑物的安全极为不利。在砂层、卵石层较厚的地层中,成孔过程中,土中砂子易分散到孔内泥浆中,对于大直径旋挖钻孔灌注桩,钻渣易沉淀,且排渣困难^[9]。

本工程之前已有一家桩基施工单位完成了 7 根桩,通过钻心取样得知,桩端存在较厚的沉渣,最厚达 60 cm 以上,导致桩端出现严重的质量问题,桩的承载力得不到充分发挥。经鉴定,7 根桩均为 III 类或 IV 类桩。该施工单位采取常见的气举反循环的清孔方式,但仍不能满足质量要求。

本单位在施工时,尤其注重对桩孔底的沉渣厚度的监控和清理。桩成孔后,采用 JL-DST(B)型钻孔孔底沉渣厚度检测仪对桩成孔后沉渣进行检测发现,多数桩在 1 h 内孔底沉渣淤积厚度在 80~150 cm 之间,部分桩孔底沉渣厚度甚至可超过 200 cm。图 3 为 Y16 号桩成孔后 4 h 内孔底沉渣淤积厚度随时间的变化关系,桩成孔后,钢筋笼的运输、下放通常控制在 2 h 以内,特殊原因会导致施工现场时间出现延缓,但对孔底沉渣厚度的累计影响较小,该桩在成孔 1 h 后其孔内固相物完成主要沉积,沉渣厚度达 134 cm。

本工程所有桩均为端承桩,桩顶设有承台,建筑物绝大部分荷载通过桩底传给中风化花岗岩持力层,因此在浇筑混凝土之前,将孔底淤积的大量沉渣清除干净对桩基质量至关重要。

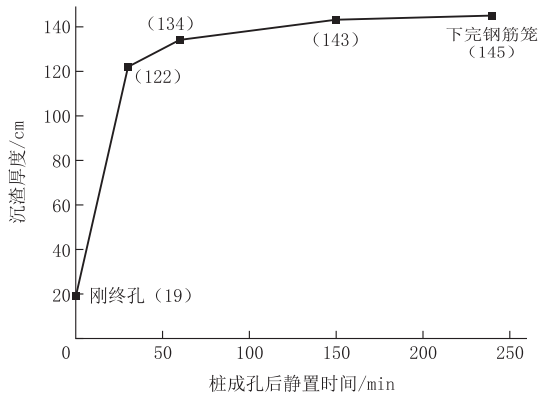


图3 Y16号桩成孔后孔底沉渣淤积速度

Fig.3 Sediment settlement rate on the hole bottom of Y16# pile after finishing drilling

3 施工对策

3.1 增加砂层、卵石层稳定性

本工程施工现场钢护筒长度为3~4 m,为防止桩成孔过程、成孔后桩孔内出现严重塌方事故的发生,项目管理人员决定加长钢护筒埋深长度。通过焊接拼接的方式,将护筒长度延长至6~7 m。打拔机协同旋挖钻机共同将护筒埋设并穿越砂层,对于砂层、卵石层较薄的地层,护筒可穿越一定厚度的卵石层甚至穿越整个卵石层,降低桩孔垮塌风险。

对于砂层、卵石层较厚的地层,通过加长护筒埋深的方式可能不会使护筒达到卵石层,对桩孔坍塌的预防不是万全之策,还需采用其它手段预防。先将预打桩的位置放样出来,沿桩周围15~20 cm的区域进行注浆加固,桩周围设置6个注浆口,用注浆机将桩周围均匀注浆,本工程桩大多较短,注浆深度以达到全风化层为准。表3为预打桩注浆参数。

表3 注浆参数

Table 3 Grouting parameters

注浆孔数	水胶比	注浆深度/m	单孔注浆量/m ³	注浆口径/mm	注浆压力/MPa	注浆机型号
6	1:1	6.5~20	0.4~1.5	57	0.5~1	BW-160

此外,场地四周分布有4个降水井点,通过井点降水的方式使场地地下水位尽量下降,避免地下水位过高造成桩孔内泥浆静水压力不足导致孔壁失稳,同时从一定程度上降低地下水向孔内渗漏速度^[17],避免造成孔内泥浆被稀释或孔壁坍塌。

3.2 提高人工造浆质量

较好的泥浆可在桩孔壁形成一定厚度的泥皮,泥皮兼有止水性好以及渗透能力差等特点;此外,桩

孔内泥浆的有效静液压力可用于平衡桩周围土中水的渗透压力和土压力^[18],对防止桩孔塌方有良好的效果。Z19号桩和Z34号桩塌方前,降雨的影响使泥浆池内泥浆性能大大降低,泥浆的密度仅为1.05 g/cm³左右,未达到建筑地基基础工程施工质量验收标准要求^[19],是导致桩孔塌方的主要因素之一。

为预防桩孔再次出现塌方事故,需提高护壁泥浆的性能,保证泥浆池内泥浆的密度 <1.1 g/cm³,泥浆粘度 <18 s。在造浆桶内完成人工造浆后排入泥浆池陈化24 h后方可用于钻孔护壁,本工程采用优质的膨润土进行人工造浆。表4为调整后的人工造浆各材料投加量。

表4 膨润土造浆配合比

Table 4 Mixture ratio of bentonite drilling mud t

原料名称	淡水	膨润土	CMC	纯碱	PHP	加重剂
配合比	100	8~12	0.004~0.008	0.2~0.5	0.003	试验确定

3.3 采用分级扩孔的方式入岩

桩径增大时,钻机的成孔阻力也有较大幅度的增大,钻机的工作扭矩加大,导致钻机工作状态恶化,不仅使成孔速度变缓,同时易导致钻机钻杆不稳定、钻机压力不足以及钻头出现较多的损坏等情况。分级扩孔方式在桥梁大口径桩施工中应用较广^[7],在钻头入岩过程中,根据孔径大小,先用直径较小(0.8 m)的牙轮筒钻对中风化花岗岩层进行取心,再逐渐增大扩孔直径,达到入岩目的,每次扩孔钻头的直径根据现场桩径大小的实际情况而定,通常分级扩孔不超过3次。

3.4 气举反循环协同除砂机进行清孔

在钢筋笼、导管依次下放完毕之后,现场通过气举反循环的方式将孔底沉渣随泥浆一同吸出,排入振动除砂机的进浆口,并流至出浆口筛网,在振动器及振动弹簧的振动作用下,筛网上下振动,并分离出泥浆中的砂子,分离砂子的泥浆流进前箱室、后箱室,并再次流进桩孔,完成除砂工作,如此循环达到除砂、净化孔内泥浆的作用,孔底泥浆经过除砂机的除砂排渣后再排进孔内^[20]。由于现场大部分桩的桩径都比较大,孔底局部易残留沉渣,用汽车吊将导管吊起,沿桩周反复移动导管位置(图4),使桩底各部位的沉渣都得到清理,保证孔底各部位除砂到位。除砂时间一般不低于2 h,具体情况以除砂机几乎不排砂为主。桩清孔完毕后立即浇筑混凝土,避免

孔内砂子再次淤积到孔底形成较厚的沉渣。在气举反循环协同除砂机清孔过程中,通过计算可知,整个孔内泥浆循环 3 次左右。

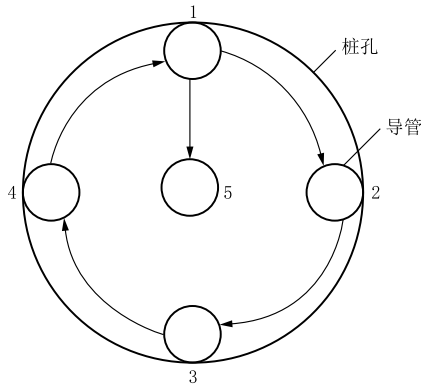


图 4 清孔时导管移动示意

Fig.4 Schematic diagram of the movement of the conductor during hole cleaning

在气举反循环协同除砂机清孔的过程中,施工人员时刻对孔底沉渣淤积厚度进行检测。图 5 为 Y16 号桩在清孔时孔底沉渣厚度变化规律,该桩在清孔 15 min 后,孔底沉渣厚度由 145 cm 变为 47 cm,分析其原因,可能在清孔过程中,导管内高压气体的搅动以及导管的移动作用使部分孔底沉渣再次分散到孔中,因此检测发现刚清孔时,孔底沉渣厚度下降非常明显。在清孔 2 h 后,孔底沉渣厚度仅存 2 cm 左右,但此时停止清孔后,孔底在 20 min 左右再次淤积 24 cm 的沉渣,此时孔底淤积的不一定是较大颗粒的固相物,但为了安全起见,应该继续清孔,直到沉渣厚度 < 5 cm 为止,并立即浇筑混凝土。

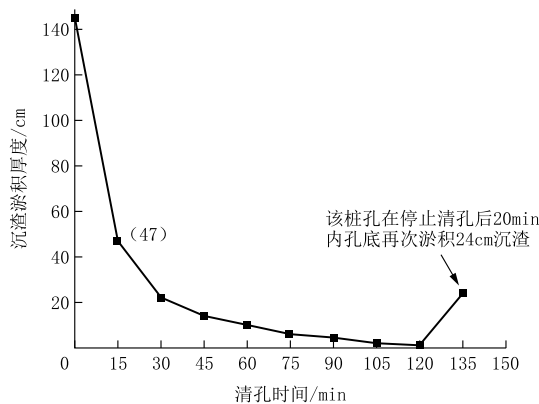


图 5 清孔过程中孔底沉渣淤积厚度变化规律

Fig.5 Variation law of sediment settlement thickness on the hole bottom during hole cleaning

4 施工质量控制效果

通过采用增加砂层和卵石层稳定性、提高人工

造浆质量以及场地周围井点降水等措施,后期施工过程中未出现严重的塌孔事故,桩基施工顺利完成。在每根桩成孔后,采用 JL-IUDS(B)型智能超声成孔质量检测仪对成孔桩进行桩径检测。图 6 为现场随机抽取的一根桩检测结果,从检测结果可知,成孔的完整性较好,未出现严重的塌方现象。在 Z16 号桩孔的护筒底部发现桩孔内有局部小范围垮塌现象,由于范围较小,不会对桩身质量造成实质性的影响。

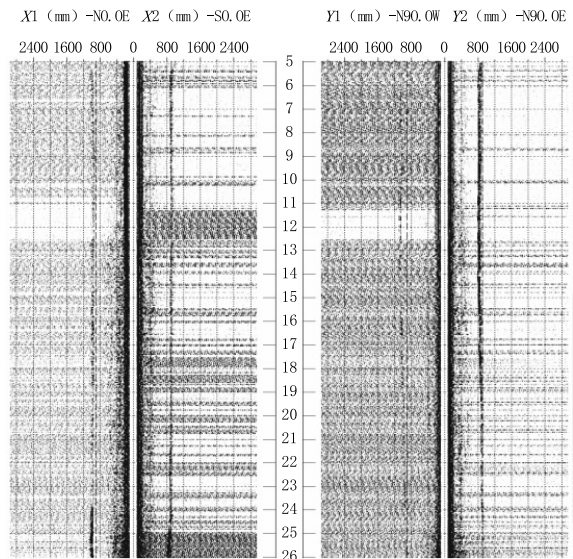


图 6 Z10 号桩成孔完整性检测

Fig.6 Hole integrity detection of Z10# pile

分级扩孔的应用加快了现场的施工速度,提高了工程的整体施工效率。一台桩机平均每天可完成一根桩的成孔,确保了在合同工期内完成所有桩基施工。

以 Y16 号桩为例,气举反循环协同除砂机对孔底沉渣进行清孔后,沉渣仪检测结果显示,桩孔底沉渣得到有效清除(图 7)。通过对现场所有桩孔底沉渣厚度检测发现,大多数桩孔底沉渣厚度在 1~2 cm(图 8),满足规范要求^[5,19]。在桩孔浇筑混凝土达到龄期后,甲方人员对场地 91 根桩均进行质量检测。结果表明,桩底未出现较厚的沉渣,91 根桩均未出现较大的质量问题,其中 I 类桩有 78 根,II 类桩有 13 根,整体桩基施工质量得到甲方的较高的认可。

5 结论

本工程为龙海市重点项目,建筑落成后为龙泉

市最高建筑,因此参与建设的各单位对该工程的质

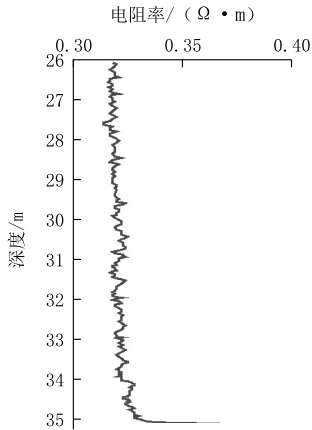


图7 Y16号桩二次清孔后沉渣检测效果

Fig.7 Inspection results of sediment of Y16# pile after secondary hole cleaning

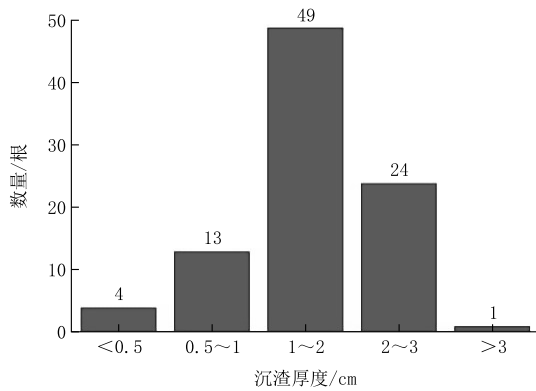


图8 桩孔底沉渣厚度统计

Fig.8 Statistics of sediment thickness on pile hole bottom

量把控尤为严格。该工程同时将大直径桩应用到建筑领域,建筑领域少有经验可参考。施工人员通过对施工难点和现场事故的分析,并参考桥梁、铁路大直径桩施工经验,制定出针对性的有效措施,最终顺利完成该工程,并总结出以下几点结论。

(1)本工程桩孔塌方的主要原因有3点:①场地局部砂层、卵石层较厚,土层稳定性差;②与小孔桩相比,大直径桩由于拱环作用的削减,出现塌孔的概率较大;③降雨在一定程度上可稀释护壁泥浆并提高地下水位,使孔壁稳定性降低。

(2)通过加长护筒埋深、预打桩周围注浆的方式,可从一定程度上增加桩孔内孔壁稳定性;在一定程度上,提高泥浆密度和粘度并降低场地地下水位,可有效缓解孔壁塌方情况。

(3)入强度较高的中风化花岗岩时,采用分级扩孔方式对大直径桩的施工尤为合适,可提高施工效

率。

(4)当场地含有较厚的砂层、卵石层时,大直径桩成孔后孔底易淤积大量沉渣,是影响桩基质量的关键因素。通过气举反循环和除砂机协同工作,可有效清除孔底沉渣。

参考文献(References):

- [1] 王云岗,章光,胡琦.钻孔灌注桩孔壁稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3281-3287.
WANG Yungang, ZHANG Guang, HU Qi. Analysis of stability of bored pile hole-wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(S1):3281-3287.
- [2] 焦文秀.泥浆护壁成孔灌注桩后注浆技术正确应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(7):87-89.
JIAO Wenxiu. Study on proper application of post-grouting technology for holing cast-in-place pile with slurry retaining [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(7):87-89.
- [3] 孙凤玲,刘焕存,刘涛.武汉某摩擦型灌注桩后注浆单桩竖向承载力试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):63-66,70.
SUN Fengling, LIU Huancun, LIU Tao. Experimental study on vertical compressive bearing capacity of single pile with post grouting technology in Wuhan [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(5):63-66, 70.
- [4] 杨联锋,刘成博.跨江特大桥旋挖钻孔灌注桩入海口水上施工实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(9):89-92.
YANG Lianfeng, LIU Chengbo. Over-water construction practice of rotary bored grouting pile at the estuary of Oujiang River[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(9):89-92.
- [5] JGJ 94-2008,建筑桩基技术规范[S].
JGJ 94-2008, Technical code for building foundation[S].
- [6] 徐云博,孙彦飞,宋立峰,等.土力学与地基基础[M].北京:北京理工大学出版社,2016.
XU Yunbo, SUN Yanfei, SONG Lifeng, et al. Soil mechanics and foundation[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016.
- [7] 杨联锋,彭志平,孙智杰.汾河特大桥大直径超深旋挖钻孔灌注桩施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):89-63.
YANG Lianfeng, PENG Zhiping, SUN Zhijie. Construction technology of large diameter ultra-deep rotary bored piles at Fenhe Bridge[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):89-63.
- [8] 丁红波,王自强.旋挖钻机在深厚卵石层超深大直径桩的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):68-72.
DING Hongbo, WANG Ziqiang. Application of rotary drilling rig in super deep and large diameter pile drilling in deep bouldery formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(12):68-72.
- [9] 胡东范.铁路桥梁大直径桩施工难点及对策[J].工程建设与设

- 计,2009(2):103-105.
- HU Dongfan. Railroad bridge large diameter pile construction difficulties and countermeasure[J]. Construction & Design for Project, 2009(2):103-105.
- [10] 左明福.深水大直径钻孔灌注桩若干问题刍议[J].中国港湾建设,2006(5):33-35.
- ZUO Mingfu. Discussion on large diameter bored piles in deep waters[J]. China Harbour Engineering, 2006(5):33-35.
- [11] 陆大伟.大直径钻孔灌注桩泥浆护壁工艺与质量[J].中国港湾建设,2002(6):35-39.
- LU Dawei. Technique and quality control of slurry to protect drilled bores for large diameter bored cast-in-place piles[J]. China Harbour Engineering, 2002(6):35-39.
- [12] 张志华,丁杰.钻孔灌注桩孔底沉渣厚度的检测与控制[J].工程质量 A 版,2008(6):33-35.
- ZHANG Zhihua, DING Jie. Determination and control of the precipitation thickness at the bottom of bored cast-in-place pile[J]. Quality of Civil Engineering and Construction, 2008(6):33-35.
- [13] 王川婴,韩增强,王玉山.钻孔灌注桩沉渣厚度检测方法研究[J].岩土工程学报,2013,35(S2):1212-1215.
- WANG Chuanying, HAN Zengqiang, WANG Yushan. Detection method for bottom sediment thickness of bored piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2):1212-1215.
- [14] 蒋建平,汪明武,高广运.桩端岩土差异对超长桩影响的对比研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(18):3190-3195.
- JIANG Jianping, WANG Mingwu, GAO Guangyun. Contrastive study on influence of difference of pile end rock-soil layer on super-long pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18):3190-3195.
- [15] 刘金波,张中南,孙明,等.某桩基承载力不满足要求处理实例及分析[J].岩土工程学报,2011,33(S2):58-63.
- LIU Jinbo, ZHANG Zhongnan, SUN Ming, et al. Treatment and analysis of pile foundation without satisfying requirements of bearing capacity[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 33(S2):58-63.
- [16] 梅国雄,胡铨波,梅岭.利用桩底沉渣的桩基室内模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3252-3259.
- MEI Guoxiong, HU Chengbo, MEI Ling. Indoor model test of pile foundation using sediment at pile bottom[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1):3252-3259.
- [17] 张毅,甘璐,李红军.深基坑地下连续墙护壁泥浆技术研究[J].施工技术,2015,44(19):48-50,55.
- ZHANG Yi, GAN Lu, LI Hongjun. Research on slurry of diaphragm wall of deep foundation excavation[J]. Construction Technology, 2015, 44(19):48-50, 55.
- [18] 郑万栋,申翊,靳利安,等.泥浆的有效静液压力及在泥浆护壁中的作用[J].土工基础,2019,33(6):704-708.
- ZHENG Wandong, SHEN Hong, JIN Li'an. Effective hydrostatic pressure of slurry and its role in stabilizing the slurry wall excavation[J]. Soil Engineering and Foundation, 2019, 33(6):704-708.
- [19] GB 50202-2018, 建筑地基基础工程施工质量验收规范[S]. GB 50202-2018, Code for acceptance of construction quality of building foundation[S].
- [20] 苗越宾,刘永强.JSN-2B型泥浆净化机振筛系统的优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(9):56-59.
- MIAO Yuebin, LIU Yongqiang. Optimization design of vibration screen system of JSN-2B mud purifier[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(9):56-59.

(编辑 周红军)