

DOI: 10.7672/sgjs2023130049

高速铁路跨黄河大桥超百米级钻孔灌注桩成孔技术*

丛炳刚¹,姜金凤^{2,3},王兆刚¹,陈 钰¹,马 龙¹,吴法尧¹,李 俊⁴,张博伦⁴

(1. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;
3. 山东铁路投资控股集团有限公司, 山东 济南 250102; 4. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

[摘要]为实现黄河深厚覆盖层上的高速铁路桥梁水中超百米级桩基高质量成孔,结合工程经验,设计钢管桩、贝雷梁形成钢栈桥钻孔作业平台,采用履带反循环和气举反循环钻机联合钻进。钢护筒长度适当加深,入土深度14~21 m。钢护筒底部壁厚加大至22 mm或者底部包边处理。钢护筒采用导向架埋设。钻孔深度在30 m以内,护壁泥浆密度、黏度、含砂率随着钻孔深度增加而逐渐增加;钻孔深度超过50 m,护壁泥浆密度、黏度、含砂率基本不变。塌孔轻微时,填水泥、膨润土、锯末,增大泥浆相对密度,增强泥浆护壁,控制钻进速度。通过上下抖动钻头,必要时提钻至地表,人工处理糊钻。采用超声波法检测仪对超百米级钻孔成孔质量进行检测,成孔质量优良。

[关键词] 铁路;桥梁;桩基础;成孔;试验;钢护筒;超声波检测

[中图分类号] U443.32

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2023)13-0049-05

Hole Forming Technology of Cast-in-situ Bored Piles for Extra-100-meter Drilling in the Yellow River of High-speed Railway Bridge

CONG Binggang¹, JIANG Jinfeng^{2,3}, WANG Zhanggang¹, CHEN Yu¹, MA Long¹,
WU Fayao¹, LI Jun⁴, ZHANG Bolun⁴

(1. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Shandong Railway Investment Holding Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250102, China; 4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: To realize the high-quality drilling of a high-speed railway bridge pile foundation with more than 100 meters in water on the deep overburden layer of the Yellow River, combined with engineering experience, the steel pipe pile and Bailey beam are designed to form a steel trestle drilling operation platform, and the combined drilling of crawler reverse circulation and air lift reverse circulation drilling rigs is adopted. The length of the steel casing is appropriately deepened, and the embedded depth is 14 ~ 21 m. The bottom wall thickness of the steel casing is increased to 22 mm, or the bottom is hemmed. The steel casing is buried by the guide frame. When the drilling depth is within 30 m, the density, viscosity, and sand content of the wall-protecting slurry gradually increase with the increase in the drilling depth. When the drilling depth is more than 50 m, the density, viscosity, and sand content of the wall-protecting slurry are basically unchanged. When the hole collapse is slight, cement, bentonite, and sawdust are filled to increase the relative density of slurry, enhance the slurry wall protection, and control the drilling speed. Paste drillings can be manually treated by shaking the drill bit up and down and lifting the drill to the surface, if necessary. The ultrasonic detector is used to detect the quality of the ultra-hundred-meter drilling hole, and the quality of the hole is found to be excellent.

Keywords: railway; bridge; piles; hole forming; tests; steel casings; ultrasonic detection

0 引言

交通线路跨越大江大河时,需要采用大跨径桥梁。高速铁路无砟轨道桥梁对结构刚度要求高,需

* 国家自然科学基金(52078424)

[作者简介] 丛炳刚,高级工程师,硕士,E-mail:33741402@qq.com

[收稿日期] 2022-12-02

要严格控制地基沉降和水平变形。对于跨越黄河、长江等深厚覆盖土层地区的高速铁路桥梁,设计往往采用桩长超过 100 m、桩径>1.5 m 的长大摩擦桩群桩基础,以保证地基工后沉降满足高速铁路运营要求。

钻孔灌注桩施工流程一般为:施工准备→测量放样→埋设钻孔护筒→搭设作业平台→桩机就位→钻孔→成孔检测→清孔→安放钢筋笼→安放导管→浇筑水下混凝土→拔出导管和护筒→基桩检测。成孔质量是钻孔灌注桩的关键环节。已有专业人员对跨越黄河、长江大桥长大桩基气举反循环钻孔技术进行了研究^[1-4],王驰等^[5]分析了履带反循环钻孔技术,梁刚^[6]论述了成孔质量检测技术。

本文介绍郑州至济南高速铁路长清黄河特大桥 249 号墩钻孔桩成孔技术问题及处理措施,探讨并解决钻进速度、塌孔、成孔质量检测问题。

1 工程概况

郑州至济南高速铁路长清黄河大桥,主桥为五塔六跨矮塔预应力混凝土斜拉桥,跨度组成为(108+4×216+108)m。塔墩编号为 247~253 号,其中 249 号塔墩位于主河槽中。主桥为直线桥,设计采用 ZK 活荷载,设计速度目标值 350 km/h,正线双线,线间距 5 m,CRTS III 型板式无砟轨道。采用钻孔灌注摩擦桩,设计桩径 2 m,桩长 119 m,桩尖均置于同一粉质黏土层,该土层地基基本承载力 $\sigma_0 = 260$ kPa。桩的排列采用行列式,顺桥方向布置 5 列,横桥方向布置 7 行,共 35 根桩,如图 1 所示。桩在顺桥向、横桥向的中心距均为 5 m,承台外缘至边桩的净距为 0.8 m。

2 水文地质条件

桥轴线法线与主流线夹角为 4° ,主桥上距韩刘水文站 5.42 km,下距泺口水文站河道 49.13 km。长清区段黄河整体呈北东向,弯道较多,多年平均径流量 437.09 亿 m^3 ,每年的最大洪峰多出现在 7—9 月,10 月较少。枯水流量多在 12 月—次年 2 月。勘察期间实测水位为 29.190 m。

根据现场勘察分析,地下水主要分布在第四系地层中,地下水类型为孔隙潜水,含水层主要为粉土、粉砂层。地下水补给来源主要为大气降水及河水补给,孔隙潜水排泄以蒸发及开采、侧向径流为主。勘察期间地下孔隙潜水稳定水位埋深 2.65~6.04 m,相应高程为 23.950~29.270 m。

地基土层主要为第四系冲积层形成的黏土、粉质黏土、粉土、粗砂、胶结层。

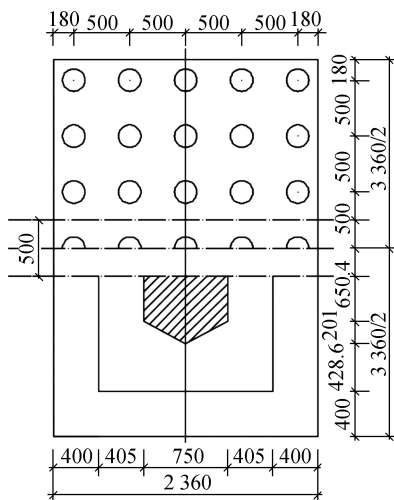


图 1 桩基平面布置

Fig. 1 Plan of pile foundation

3 钻孔作业平台与钻孔设计

3.1 钻孔作业平台

249 号墩钻孔作业平台采用钢管桩+贝雷梁形成钢栈桥平台,钢管桩作为基桩和临时墩,钢管顶布置贝雷梁,贝雷梁上再布置型钢纵横梁,桥面板采用花纹钢板。钻孔作业平台没有利用钢护筒参与平台受力。该钻孔作业平台兼顾钻孔 35 个、灌注 35 根桩基混凝土以及承台施工。

平台满足支撑钻机、护筒加压、钻孔操作及浇筑水下混凝土等施工过程中的所有设备质量、移动荷载要求,坚固稳定,满足钻机、汽车式起重机、履带式起重机、洒水车、混凝土泵车等施工设备进出场要求,提供运输通道和吊装平台,完成长大桩基钻孔作业、钢筋笼下放和桩基混凝土浇筑、承台施工。钻孔作业平台设计还考虑了泥浆的循环、过滤和排放要求。

3.2 钻孔设计

1) 249 号墩桩基设计桩长 119 m,该桩长对应承台底面到桩底的长度。实际钻孔在黄河深水区,水深约 10 m,考虑钻孔平台高度,钻孔深度超过 140 m。

2) 249 号墩由于在黄河深水区,钻孔浅层布置钢护筒,要求钢护筒底刃脚伸入承台以下至少 1 m。采用 RTK 定位埋设钢护筒,安装完成后,采用“十字法”连接护桩,对钢护筒中心进行校正,顶面允许偏差为 50 mm,倾斜度允许偏差为 1%。护桩要保留至该桩下完钢筋笼。

3) 布置泥浆循环净化系统,通过滤网砂箱、泥砂分离器净化分离排渣,泥浆沉淀后循环使用。泥浆循环池尺寸为 5 m×3 m×2.3 m,沉淀池尺寸为

4.5 m×2.5 m×2 m。每台钻机配备泥浆箱,箱外悬挂警示标志。分离后的钻渣由渣土车运输,泥浆由全封闭抽浆车外运,运输后集中处理,严禁排向黄河,及时清运。

4) 钻孔前制造泥浆,造浆材料选用膨润土,必要时再掺入适量外加剂,设置泥浆箱并及时抽运,避免泥浆外露流至黄河造成污染。新制泥浆性能指标应符合下列规定:相对密度 1.05~1.15;入孔泥浆黏度,一般地层为 16~22 s,松散易坍地层为 19~28 s;含砂率≤4%;胶体率≥95%;pH 值>6.5。

5) 钻进过程中每 2 m 及地层变化处捞取渣样,查明土类,保存于渣样盒中,并做好记录。捞取的渣样采用透明的塑料袋保存,塑料袋贴上标签,写明日期、桩的位置和编号、取样时钻孔深度。

6) 成孔孔径不得小于设计孔径,成孔深度不得小于设计孔深,倾斜率不超过 1%。

4 钻孔施工

4.1 桩位测量放样

施工桩位编号按里程增大方向各排从左向右连续进行编号,249 号墩桩位编号如图 2 所示。

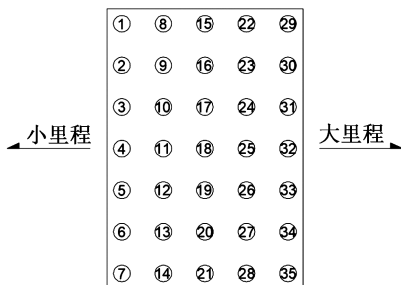


图 2 249 号墩桩位编号

Fig. 2 Numbering of each pile of pier 249

埋设钢护筒前,由测量组用 RTK 准确地测放各桩中心位置。放样时考虑到桩位复核,一次放样多个桩位。安装钢护筒前,用十字交叉法将桩中心引至钻机施工范围外,作 4 个标记点,并做好保护。

4.2 钢护筒制作与埋设

早期 249 号墩桩基钻孔的钢护筒设计长度为 18 m,泥浆渗漏严重。将钢护筒加长至 24~31 m,解决了漏泥浆问题。钢护筒入土深度 14~21 m,直径 2.3 m,采用钢板卷制。为增大钢护筒底部钢板承载力,避免卷边,钢护筒底端 1 m 长壁厚增大为 22 mm,其余壁厚均为 18 mm。多节护筒连接时,接缝牢固、不漏水,筒内连接处无突出物,并在钢护筒上部设溢浆孔。钢护筒在钢结构加工场统一加工制作,运输到施工现场分两节焊接下沉。钢护筒定位后用履带式起重机+400 振动锤打入,振动锤中心

线与护筒中心位置一致。护筒全部下沉到位后,覆盖型钢井盖。对施工完成的钢护筒中心复测,顶面偏差在 50 mm 以内,倾斜度偏差在 1% 以内。

钢护筒长度大,为保证垂直度,建议采用导向架固定位置。除增大壁厚外,钢护筒底部可做包边处理,提高钢护筒底部承载力。

4.3 钻机选择

地层主要特征为巨厚黏性土层、含砂层、胶结层。采用回转钻机钻进,在黏土层中很容易糊钻,影响成孔速度。反循环钻进比正循环钻进快 5 倍以上,造浆原材料用量少、孔壁泥皮薄,对桩基侧摩阻力发挥更有利。反循环钻进还有边钻边清孔的效果。反循环钻进速度快,来不及调整泥浆密度,泥浆护壁薄,对土层变化敏感,遇土质较差的砂土、粉土容易塌孔,需要注意。但反循环钻孔裸露时间短,降低了塌孔风险。反循环比正循环钻孔单价约高 2 倍,但钻孔数量多,工期节约,也会降低总造价。综合考虑决定采用反循环钻机。

现场实际钻进显示,气举反循环钻机钻进在黏土层中多次糊钻,钻进速度缓慢。调整采用履带反循环钻机,避免了糊钻,但在孔深 120~140 m 时,遭遇硬度大的胶结层,钻进困难。因此,在钻进深度 120 m 以内,采用履带反循环钻机;钻进深度超过 120 m,更换为气举反循环钻机。

249 号墩使用的履带反循环钻机型号 HF-250,施工设备主要包括动力泵、钻杆、钻头等。履带反循环钻机的排渣能力为 3 m³/h,钻速 8~9 r/min,每天可钻进约 20 m。使用的气举反循环钻机型号为 KTY3000,施工设备主要包括:空气压缩机、高压空气胶管、风包、气水龙头、液气分离装置、液气输出胶管、双壁钻杆、气水混合器、单壁钻杆、扶正器、钻头等,采用螺杆式 40 m³/min 空压机系统。气举风包 70 m 一换,形成两级风包,通过泵吸、抽吸、充气将压缩空气送入钻孔,气体、泥浆、钻渣形成混合液,使混合液快速向上流动,通过钻杆流向泥浆池。排渣能力大约为 0.5 m³/h。气举反循环钻机钻速 6 r/min,每天可钻进 4~7 m。

249 号墩少量钻孔使用过 5 t 配重,大部分钻孔没有配重,钻压为总钻压的 50%~70%。结合以往的跨黄河大桥工程经验,钻头采用直径 2 m 的三翼刮刀钻头。

4.4 泥浆性能

泥浆性能对钻孔护壁至关重要,泥浆密度太大,孔壁泥皮太厚,螺纹钢筋笼碰挂泥皮,钢筋凹槽积满泥皮,钢筋与混凝土的粘结力受到削弱;泥浆

密度太小,局部塌孔,孔壁形状也影响钢筋保护层厚度。以18号孔为例,研究泥浆密度、黏度及含砂率对钻孔成孔的影响。18号孔钢护筒标高38.982 m,护筒直径2.3 m,护筒实际长度24 m。由于钻进时混入钻屑,泥浆相对密度由造浆时的1.07开始,随着钻孔深度的增加逐渐增加,通过调试改进始终保持在1.05~1.15的限值内(见图3)。泥浆黏度由开始的17.5 s随开挖深度增加到20 s时基本稳定,保持在16~22 s的限值内(见图4)。含砂率由开始的0.9%随钻孔深度增加到2.2%时基本稳定,保持在 $\leq 4\%$ 的限值内(见图5)。

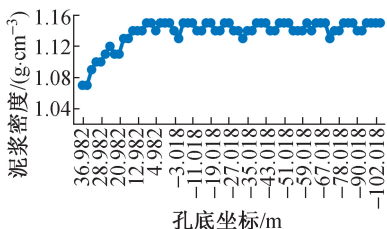


图3 18号钻孔泥浆密度随钻孔深度的变化
Fig. 3 The following change of drilling mud ratio with various borehole depth

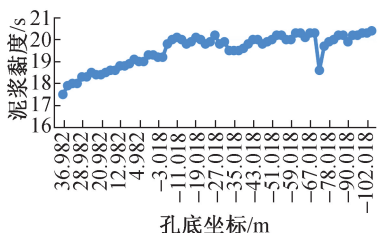


图4 18号钻孔泥浆黏度随钻孔深度的变化
Fig. 4 The following change of drilling mud viscosity with various borehole depth

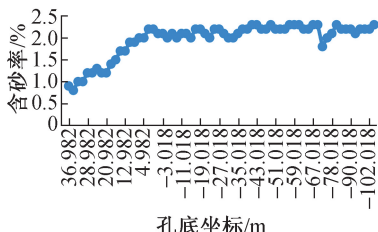


图5 18号钻孔泥浆含砂率随钻孔深度的变化
Fig. 5 The following change of sand content of drilling mud with various borehole depth

经过不断调试改进,249号墩钻孔泥浆性能指标如表1所示,护壁效果良好。泥浆约半小时循环1遍。

4.5 钻孔

1) 钻孔桩施工过程中严格遵循“跳桩施工”原

表1 钻孔不同阶段的实际泥浆性能指标

Table 1 Actual mud performance indexes at different stages of drilling

指标	① 基浆	② 鲜浆	③ 钻进	④ 回流	⑤ 清孔	⑥ 弃用
实际组成成分	膨土+纤维素+工业用碱	①+php	②与钻屑混合	③净化+②	④+②	④沉淀后
相对密度	1.05~1.15	<1.12	1.13~1.15	<1.08	1.06~1.08	1.06
黏度/s	16~22	<18	19~21	18~20	17~20	>16
含砂率/%	<0.5	<0.5	2~4	2	<2	<0.5
胶体率/%	>95	96~98	96	98	98	80~90
失水率/(mL·30min ⁻¹)	10	<10	<15	<10	<10	<10
泥皮厚/(mm·30min ⁻¹)	1.5	1	2	1.5	1	>2
pH	8~9	9~11	9~10	9~10	8~9	<7
静切力/Pa	2~4	4~6	3~5	3~5	3~5	<1

则。前期钢护筒下放过程中,采用2台钻机施工。护筒下放完成后,采用4台钻机施工,共10组施工循环。履带式起重机沿钢栈桥平台行走。在承台区域内行走履带式起重机时,严禁碾压型钢井盖,行车方向与贝雷梁垂直。

2) 钻机安装就位时,检查钻机各部位。对有损伤的各零件、紧固件进行维修、更换。钻机底座支垫坚实平稳,防止位移。钻机平稳地就位于埋设好的护筒上方。钻机安装周正、水平、稳固。机座梁全部承压,机座梁与平台贝雷梁保持垂直方向放置。

3) 检查钻架顶部滑轮槽、转盘卡孔、护筒中心,三者在同一竖直线。钻杆保持竖直,钻头中心与孔位中心的偏差<2cm。检查机械水平度和钻杆垂直度。钻孔开始前采用尺量的方法检查钻头尺寸不小于桩基孔径。

4) 钻机就位后进行试运转,运转正常后钻进。钻孔时,孔内水位高于护筒底脚0.5 m以上或地下水以上1.5~2 m。开钻时低档慢速钻进,钻至地面下1 m后再以正常速度钻进。钻头提离孔底约20 cm,泥浆循环畅通后,开始正式钻进。

5) 钻进过程中,钻头起落速度均匀。经常检查土层变化,对不同土层采用不同的钻速、钻压、泥浆密度和泥浆量。通过增加钻机重力、控制泥浆密度

等方式提高钻进速度。

6) 保持钻孔垂直度的措施为:用钻机的水平尺控制钻机水平度,增加配重,根据地层的变化控制钻进速度。若钻孔倾斜,调整钻机水平度,根据实际孔位倾斜方向,调整钻机倾斜位置。

7) 接换钻杆过程中,钻头均匀起落,不得碰撞孔壁,接换钻杆动作快速。接好后的钻杆逐个检查接头。每次接换完钻杆后,重新钻进前,将钻头提离孔底 20~30 cm,待泥浆循环正常后下落钻进。钻杆连接采用 10.9 级高强螺栓,每钻进完成 2 根桩后,检修钻杆,更换高强螺栓。

8) 钻孔至设计高程时,将钻头提离孔底 5~10 cm,转盘匀速旋转,泥浆继续保持循环,至泥浆分离器基本无钻渣时停机检孔。

9) 钻孔作业保持连续进行,不要中断。钻机撤离后,使用型钢井盖盖住孔口,孔口井盖打开后,用封闭围挡防护,并做好安全警示。

4.6 塌孔处理措施

1) 在粉土或软土等容易塌孔的土层中钻孔时,采用慢速轻压钻进,同时提高孔内水位和加大泥浆密度。

2) 轻微塌孔时,填水泥、膨润土、锯末等增大泥浆密度,增强泥浆护壁,控制钻进速度。塌孔严重时提钻,用导管清孔并造浆。成孔质量不理想时,重新下钻扫孔。通过采取以上措施,基本解决了塌孔问题。

4.7 糊钻处理措施

发生糊钻时,先上下抖动钻头。若仍无法解决,提钻清理钻头,将钻头上的泥清理干净后,再正常钻进。

5 清孔

钻孔清底质量影响钻孔灌注摩擦桩桩端阻力,进而影响桩的轴向受压容许承载力。钻孔达到设计深度后,采用换浆法进行清孔,向孔内注入清水或新鲜泥浆保持孔内水位。清孔完成的标准为:孔内排出或抽出的泥浆手摸无 2~3 mm 颗粒;泥浆相对密度 ≤ 1.1 ;含砂率 $< 2\%$;黏度为 17~20 s;孔底沉渣厚度 ≤ 2 cm。清孔标准符合 Q/CR 9603—2015《高速铁路桥涵工程施工技术规程》要求。

6 成孔质量检测

6.1 检测方法

考虑到传统的钢筋笼法检测长大钻孔成孔质量的效率低,超声波法检测成孔质量快速有效,采用 JL-IUDS(C)智能超声成孔质量检测仪,检测钻孔的孔径、孔深、扩径、缩径、倾斜方向、垂直度。探头

产生一定频率的电脉冲并同时打开计时器,电脉冲经放大后由发射换能器转换为超声波,射入钻孔内的泥浆中,向孔壁方向传播。超声波穿过泥浆到达孔壁后,由于泥浆的声阻抗远小于土层的声阻抗,超声波基本上从孔壁产生全反射。反射波经泥浆传播后,由接收换能器接收,产生一道信号波形,从信号波形上读取反射点的时间即为声时。

探头在下放过程中按设置的测点距离均匀测试。探头上的 4 组发射、接收换能器自动发射超声信号,并接收经孔壁发射的信号。反射信号到达时间反映孔径大小,信号强度反映孔壁特性,同时测试剖面方位。通过声时以及预先测试的泥浆波速,可计算出孔径、垂直度和倾斜方向。深度计数器记录探头升降位置,方位记录器记录换能器水平旋转方位,每一测试点同时自动测试正交方向的两个剖面图,实现钻孔形状的三维立体扫描测试。

该检测仪探头 4 组垂直布置,内置电子罗盘,防水性能好;探头自动实现“+”字两个剖面测试,同时生成两个剖面图;深度计数器采用双滑轮设计,有效防止电缆打滑,确保深度计数准确;实时测试系统全智能化,只须升降探头,自动完成按测点密度要求的测试;自动生成测试结果报告,实测过程能够回放,自动判读孔壁位置,并自动计算各测点孔径值、偏移值和垂直度。

6.2 检测结果

249 号墩 35 号钻孔在大里程下游侧角部,采用 JL-IUDS(C)智能超声成孔质量检测仪进行成孔质量检测,测点间距 100 mm,逐点下降采集数据。实测 35 号钻孔最大孔径 2 272.67 mm,最小孔径 2 003.25 mm,平均孔径 2 108.67 mm,均大于设计孔径(2 000 mm),满足设计要求。垂直度 0.066%,远远低于 1%的要求。设计孔深 141.746 m,实测孔深 142.3 m,钻孔估算体积 453.05 m³。钻孔超过 100 m 深度后,个别位置有塌孔,孔径局部有扩大。平均孔径比设计孔径增大 5.4%,混凝土用量估计增大 1.3%。

检测结果表明,成孔质量优良,满足规范要求,可以下放钢筋笼,进行桩基混凝土浇筑。孔底沉渣厚度使用测绳测量,满足规范要求。

7 结语

1) 郑济高铁长清黄河特大桥 249 号墩 35 个 140 m 深钻孔全部完成,成孔质量优良,钻机选择和钻进工艺正确,钻进问题处理得当。

2) 对于黄河大桥水中超百米钻孔,设置钢管
(下转第 59 页)

组合方式施工,其余桩基采用大型旋挖钻或冲击钻施工,不同大小溶洞制定对应的处理方案,不同孔深或不同设备成孔的桩基采用不同的清孔工艺,上述工装和技术既保证了安全又节省了工期和成本,提前1个月完成了主墩102根深水岩溶超长桩基的施工,经第三方单位检测,所有桩基均为I类桩。相关技术可以为类似工程施工提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 胡尧,刘注.旋挖钻与回旋钻组合施工工艺在大直径超长桩中的应用[J].施工技术,2021,50(8):73-75.
HU Y, LIU Z. Application of combined construction technology of rotary drill and convolute drill in large diameter and super long piles[J]. Construction technology, 2021, 50(8): 73-75.
- [2] 高治,傅志强,宗雷,等.岩溶空洞软弱地基稳定性分析与加固处理[J].施工技术(中英文),2021,50(22):78-83,101.
SHANG Z, FU Z Q, ZONG L, et al. Stability analysis and reinforcement treatment of karst cavity soft foundation [J]. Construction technology, 2021, 50(8): 73-75.
- [3] 彭媛,陈国奇,韦谋.基于BIM的岩溶复杂地质条件下桩基工程施工关键技术[J].施工技术(中英文),2021,50(17):141-143,147.
PENG Y, CHEN G Q, WEI M. Key construction technology of pile foundation in karst complex geological conditions based on

BIM[J]. Construction technology, 2021, 50(17): 141-143, 147.

- [4] 刘军安,乐俊,杨慧齐,等.岩溶地区桩底持力层检测平台设计与应用[J].施工技术,2021,50(7):54-55,59.
LIU J A, LE J, YANG H Q, et al. Design and application of detection platform for bearing stratum of pile bottom in karst area [J]. Construction technology, 2021, 50(7): 54-55, 59.
- [5] 杨燕中,商治,宗雷,等.高压旋喷桩加固岩溶空洞软弱地基施工技术[J].施工技术(中英文),2021,50(22):72-77,110.
YANG Y Z, SHANG Z, ZONG L, et al. Construction technology of high-pressure jet-grouting pile for reinforcement of karst cavity soft foundation [J]. Construction technology, 2021, 50(22): 72-77, 110.
- [6] 朱红明,朱文,魏耀华,等.泵吸反循环超长桩大直径钻孔灌注桩施工技术研究[J].低温建筑技术,2020(3):125-128.
ZHU H M, ZHU W, WEI Y H, et al. Construction technology of super long and large diameter bored pile with pump suction and reverse circulation [J]. Low temperature architecture technology, 2020(3): 125-128.
- [7] 吴波.气举反循环清孔工艺在超长钻孔灌注桩施工中的应用[J].城市道桥与防洪,2016(12):124-125.
WU B. Application of gas lifting reverse circulation hole cleaning technology in construction of over-long cast-in-situ pile [J]. Urban roads bridges & flood control, 2016(12): 124-125.

(上接第53页)

桩+贝雷梁作业平台,采用履带反循环钻机和气举反循环钻机联合钻进。140m深钻孔11~20d成孔,清孔约5~6h。

3) 钢护筒长度适当加深,入土深度14~21m。钢护筒壁厚一般18mm,底部壁厚适当加大至22mm或者钢护筒底部包边处理,防止钢护筒底部变形。钢护筒埋设建议采用导向架,以防止钢护筒倾斜。

4) 轻微塌孔时,填水泥、膨润土、锯末,增大泥浆密度,增强泥浆护壁,控制钻进速度。塌孔严重时提钻,用导管清孔并造浆。

5) 可采用超声波法成孔质量检测仪对长大钻孔成孔质量进行检测。

参考文献:

- [1] 毛亮坤.气举反循环法在百米超长钻孔桩施工中的应用[J].铁道标准设计,2009(S1):89-91.
MAO L K. Application of air-lift reverse circulation method in construction of 100m super-long bored pile [J]. Railway standard design, 2009(S1): 89-91.
- [2] 侯小军,赵金鹏.德大铁路济南黄河桥超长钻孔桩成孔质量控制技术[J].铁道标准设计,2013(7):60-63.
HOU X J, ZHAO J P. Quality control technology of hole forming

of extra-long bored piles of Ji'nan Yellow River Bridge on Dezhou-Dajiwai railway [J]. Railway standard design, 2013(7): 60-63.

- [3] 唐德贤,景兆德,何勇.京沪高速铁路黄河特大桥长大钻孔桩钻头的选用与改进[J].铁道标准设计,2009(S1):62-64.
TANG D X, JING Z D, HE Y. Selection and improvement of drill bits for long and large bored piles of Yellow River Bridge on Beijing-Shanghai high-speed railway [J]. Railway standard design, 2009(S1): 62-64.
- [4] 李少栋.水中长大钻孔桩施工技术[J].铁道建筑技术,2009(10):51-55.
LI S D. Construction technology for underwater long and large bored piles [J]. Railway construction technology, 2009(10): 51-55.
- [5] 王驰,陈根华,杜国顺.浅谈常州大唐线路工程采用GF-250反循环钻机施工的改进方案[J].电工技术,2018(22):132-134.
WANG C, CHEN G H, DU G S. Brief Discussion on improvement scheme for construction of Changzhou Maowu line project using GF-250 reverse circulation drill rig [J]. Electric engineering, 2018(22): 132-134.
- [6] 梁刚.智能超声成孔质量检测仪在灌注桩基础施工中的应用[J].企业科技与发展,2014(7):77-79.
LIANG G. Application of intelligent ultrasonic hole quality detector in pile foundation construction [J]. Sci-tech & development of enterprise, 2014(7): 77-79.