

海洋环境大直径桩基“超重锤+低液面”施工技术

周世康^{1,2}, 谢生华^{1,2}

(1.中交一公局厦门工程有限公司,福建 厦门 361000; 2.中交一公局集团有限公司,北京市 100020)

摘要:针对复杂海况中大直径钻孔灌注桩施工常见问题,以某工程项目为例,基于项目地质情况,对大直径变径钻孔桩施工在设备选型、工艺优化、成品质量控制等多方面进行详细研究,对比分析了不同施工工艺下的成桩质量与施工工效等,实践表明:“低液面(较原来水头标高降低4~5 m)+超重锤(直径 $d=2.5$ m,重14 t)”组合施工工艺冲击成孔工艺在高压强硬岩工况下施工,相较于传统工艺,可有效解决了复杂海洋环境坚硬地层中桩基成孔过程中漏浆、串孔等诸多工程难题, I类桩成桩率达到99%以上,同时本文对桩基成孔过程中的施工重难点及质量控制要点进行详细说明,为类工况桩基施工提供可借鉴解决方案。

关键词:海洋环境;超重锤;低液面;变截面;桩基

中图分类号: U443.15

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0208-05

0 引言

随着海洋工程及近海项目的不断发展,在海洋工程领域,桩基作为其中重要的基础工程,其稳定性、安全性和可靠性是保障整个工程质量的关键因素^[1-3]。由于海洋环境因素复杂且桩基承受不断变化的荷载,海洋环境下的桩基施工必须克服水头压力变化频率高、海底地形多变等因素影响^[2],因此,对于海洋环境高强度硬岩大直径桩基施工技术的研究具有重要的现实意义。在过去的几十年里,随着桩基施工技术的不断创新和改进,已经涌现出许多成熟的施工方法^[4]。然而,针对海洋环境大直径桩基的特点,依然存在许多需要攻克的难题^[5-6]。“超重锤+低液面”施工技术作为一种海上桩基复合施工技术,在低成本、高效率方面表现出较强的优势。这种技术逐渐受到业界的关注,成为了近年来研究热点。

本文将重点讨论“超重锤+低液面”施工技术,这是一种在海洋环境下对变截面大直径桩基施工具有优越性的技术方法。该技术通过采用超重锤来提高桩基的承载能力并以低液面的施工方式降低对海洋环境的影响,进一步探索“超重锤+低液面”的设计原理、施工方法,不断完善技术体系,推进海洋环境大直径桩基施工技术的更快发展。

1 工程概况

1.1 项目概况

如图1(a)、(b)所示,某跨海特大桥采用“矩形承台+群桩基础”基础形式,桩基为钻孔灌注桩,设计桩长18~65 m,承台左右幅分离,每8根直径2.5~2.2 m变截面桩基支撑1个承台,全桥左幅21个墩,右幅24个墩,全桥桩基共180根,均为嵌岩桩,且每根桩嵌入中风化层深度不少于5 m。桥位海域地质岩性分布均匀,经现场勘探,桩位处岩石抗压强度约为102~126 MPa,经走访调查同海域相邻桥梁施工情况,桩基施工过程中经常发生卡锤、漏浆等现象发生。

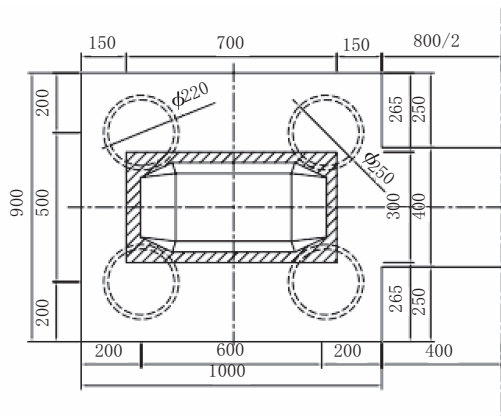
1.2 工程地质水文条件

桥址位置地层自上而下分别为粉质黏土、残积砂质黏性土、细砂、粗砂、全风化晶洞碱长花岗岩、砂土状强风化花岗岩、碎块状强风化花岗岩、中风化花岗岩,均匀层状分布。桥址区域1#~3#墩为裸漏岩石地层区,4#~17#为有少量覆盖层区,18#~24#墩为坚硬裸岩区。裸岩区海床无任何覆盖层,基岩直接裸露于海床底部,且海床起伏较大,垂直落差大,桩位处护筒难以定位,无法采用冲击钻直接成孔。覆盖层区自上往下依次为10 m细砂层、15~25 m粉质黏土层、2.5~10 m粗砂层、3~8 m强风化花岗岩层、基岩埋藏深。其中6#~13#墩海床以下30 m层厚为粗砂层,局部为粉质黏土层。

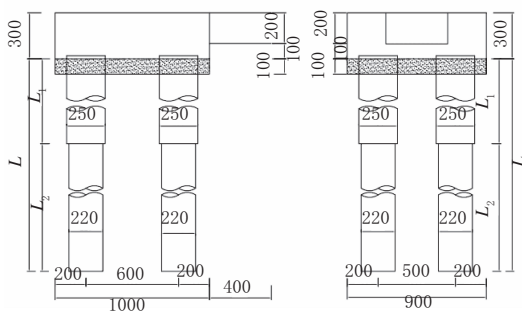
桥址位于亚热带季风气候区,气候温暖潮湿,平

收稿日期: 2023-09-27

作者简介: 周世康(1990—),男,硕士,工程师,从事路桥施工技术研究和科研管理工作。



(a)平面图



(b)立面图

图1 桩基平、立面图(单位:cm)

均年气温为 19.3℃。实际日照时间达到 1 837.6 h,无霜期长达 333 d,年降雨量约 1382.3 mm。此桥梁所处位置为全球三大风区之一,一年中有 301 d 大风达到或超过 6 级,平均风速为 8.42 m/s,其中有 107 d 大风达到或超过 8 级。台风多发生在 7 月~9 月之间,季风期则为 10 月至次年 2 月。在这样的气候条件下,每年的有效施工工作日约为 120 d。

所在海域的潮汐类型为规律性半日潮,潮位表现为高潮时中间位置较高,两侧较低,而低潮时情况相反。在桥梁周边海域,平均高潮位的海拔为 +2.39 m^①,平均低潮位为 -1.89 m,平均潮差为 4.28 m。在 20 a 一遇的高潮位情况下,海拔达到 +4.33 m,最大潮差为 7.1 m。桥梁所在位置的水深介于 10~12 m 之间,一年中有 254 d 出现 2.5 m 及以上的波浪。

2 工艺比选及工艺原理

2.1 传统工艺施工

特大桥 1#~3# 墩采用普通工艺“10 t 锤+高液面”进行钻孔灌注桩施工,根据地层情况控制护筒埋深长度,且不低于 12 m,施工过程中 50% 桩基发生不同程度的漏浆、串孔等情况,桩基施工过程中发现漏浆情况后,首先采用灌注砂浆、混凝土等堵漏措施,在巨大的水头压力及波浪力的作用下,该措施难

以发挥其堵漏效果,继而采取停钻,反复跟进护筒的施工工艺,直至施工至桩底标高,各桩基施工过程中漏浆次数及互通跟进情况见表 1。部分桩基岩石强度达 120 MPa,进尺缓慢,钻进 0.3 m/d,钻进过程中 10 t 钻锤大面积的缺边掉瓣、受损严重,锤边损坏情况如图 2 所示。

表 1 高液面施工护筒跟进及漏浆情况统计表

桩位	漏浆次数	护筒跟进次数	护筒最终埋深/m
1-1	2	1	13.16
1-6	4	3	18.04
1-7	2	1	14.87
2-2	2	1	16.75
2-5	1	1	13.27
2-7	2	1	15.72
3-2	6	5	22.60
3-5	4	3	21.80
3-6	4	3	18.97



图2 10 t 钻锤缺边掉瓣受损

2.2 组合工艺比选

依据地质调查结果,3# 和 4# 墩的覆盖层从海床顶部到基岩依次包括细砂、粉状黏土、强风化花岗岩,而护筒底端岩层为中风化晶洞性碱长花岗岩。在采用高液面法钻进过程中,孔内泥浆液面高度大约在 +9.5 m,泄漏发生时的潮位约为 +2.5 m,导致护筒内外水头差达到约 7 m。为应对这一情况,工艺调整为“低液面+超重锤”冲击成孔方法,并将护筒内泥浆液面标高从 +9.5 m 降至 +5 m,以减少护筒内外液面压力差,如图 3 所示。同时采用“重锤+低液面”、“重锤+高液面”、“轻锤+低液面”、“轻锤+高液面”四种不同工况对 8#、9# 桩基施工进行对比分析,钻锤参数见表 2,施工效能统计见表 3。

由表 2、表 3 分析可知:工况一样本数量最多且均无漏浆现象,施工工效最高,平均钻进速度约为

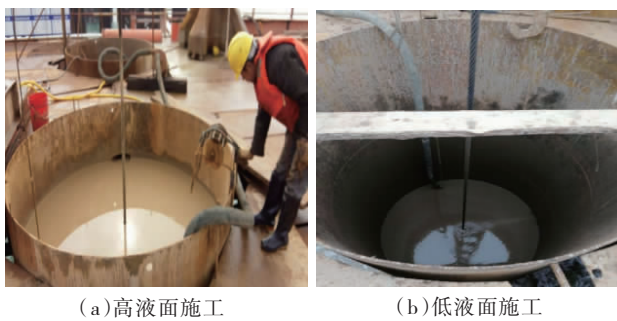


图3 不同液面施工工况

表2 钻锤参数

锤重/t	锤高	锤宽	锤牙个数
10	2	2.5	37
14	2	2.5	37

表3 8#、9#墩桩基施工对比分析

工况	桩号	平均钻进速度 / (m·d ⁻¹)	锤规格/t	高/ 低液面	漏浆/ 次
工况一 (重锤 + 低液面)	8-1	1.45	14	低	0
	8-2	1.09	14	低	0
	8-3	1.09	14	低	0
	8-4	1.24	14	低	0
	9-1	1.24	14	低	0
	9-2	1.09	14	低	0
	9-3	1.09	14	低	0
	9-4	1.09	14	低	0
	9-8	1.24	14	低	0
工况二 (重锤 + 高液面)	8-8	0.67	14	高	3
	9-5	0.73	14	高	2
工况三 (轻锤 + 低液面)	8-5	0.62	10	低	1
	9-6	0.70	10	低	0
工况四 (轻锤 + 高液面)	8-6	0.36	10	高	4
	8-7	0.30	10	高	5
	9-7	0.40	10	高	3

1.18 m/d, 为工况四钻进速度 0.35 m/d 的 3.4 倍; 工况二钻进速度约为与工况三施工效率相差不多约为 0.7 m/d, 工况三钻进速度约为 0.66 m/d, 两种工况钻进速度相差不大, 主要是因为工况二单次进尺大, 但由于高水头差并未改善, 堵漏时间长, 工况三是由于降低水头差降低了渗漏风险, 节约了停钻堵漏时间; 无论增加锤重还是降低液面都可较大幅度提升施工效率, 增加锤重可大幅提升单次循环进尺, 降低液面可明显改善漏浆次数。

综上所述, “14 t 超重锤 + 低液面” 施工技术一方面加大了冲击钻锤头作用于工作面的动能, 使岩石更容易被震碎, 另一方面降低护筒内液面, 降低了

内外水头压力, 减小了护筒底封堵难度, 保证了桩基的顺利成空, 因此该跨海桥其它桩基也选用“14 t 超重锤 + 低液面”技术施工^[5]。为了更好地改进桩基效果, 在面对较厚的砂层和易于塌陷的地层时, 我们采用膨润土和 CMC (羧甲基纤维素) 来制作高质量泥浆, 进而提升塑性黏度。这么做的关键原因在于提高系统的塑性粘度、静态剪切力和动态剪切力, 从而增强钻井液对钻屑的悬停和输送能力。同时, 减少泥浆的滤失量, 形成紧凑的泥饼, 以提高墙体的稳定性。

3 施工过程关键工艺流程

3.1 整体施工工艺

工程整体施工工艺流程: 施工平台搭设→护筒安装→泥浆净化与循环系统安装→钻孔机具就位→钻孔→检孔→钢筋笼下放→导管下放→沉渣检测→混凝土浇筑→桩基检测。

3.2 护筒下放安装

采用 Q235 钢板卷制, 直径 2 610 mm, 厚度 14 mm。根据放样点, 利用双拼 I25b 加工导向架尺寸为 4.2 m × 4.5 m × 6 m。为保证钢护筒的纵向精度, 安装过程中应用履带起重机与 DZ200 型液压振动锤共同进行下沉作业, 预计埋深将达到 15 m ± 2 m, 足以穿越砂层并在粉质黏土内下探大约 3 m。为防止护筒底端形变卷边或锤头卡顿, 护筒底部 1 m 范围内需进行双层加强处理。在护筒安置完毕后, 进一步实施复检。单根桩基钢护筒平均长度在 34 m, 重 30 t, 防止发生桩基串孔漏浆。实景照片如图 4 所示。



图4 钢护筒对接下放^[6]

3.3 泥浆制备及泥浆循环系统设置

3.3.1 泥浆制备

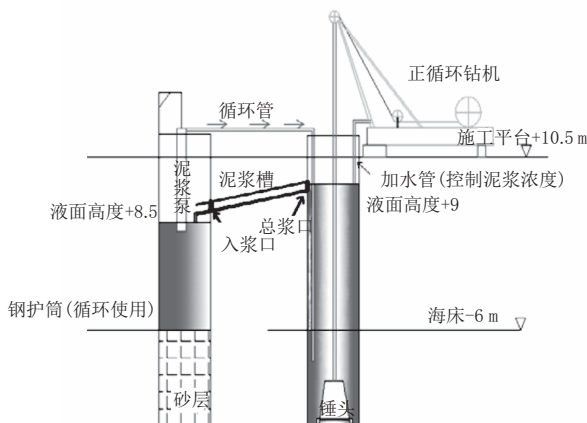
泥浆采用淡水造浆, 并采用优质黏质土或膨胀土调制合适的钻孔泥浆。针对砂层较厚和易于坍塌的情况, 采用添加膨润土和 CMC (羧甲基纤维素) 制

图5 200 kW 振动锤安装及跟进钢护筒施工^[7]

成高质量泥浆以提高塑性黏度,从而增强壁面稳定性以及钻屑的悬浮和传输能力。泥浆中黏土胶体含量应不低于95%,含砂率不应高于4%;泥浆的制备能力应不低于2.5 L/kg。

3.3.2 泥浆循环系统

在海上桩基施工过程中,通过在护筒上(标高+5.5~6.0 m,平台标高+10.5 m)设立溢泥口,以减少护筒内泥浆液面的高度(见图6)。通过在相邻护筒之间设置泥浆槽,利用泥浆泵将泥浆直接从邻近的钢护筒内进行循环。在泥浆槽上安装过滤筛以去除较大颗粒的沉降物,经人工清理并移到捞渣槽,最后集中运至指定地点进行处理。

图6 清孔过程泥浆循环^[8]

3.4 钻机就位造浆、开孔

测量员在钻机到位之前必须准确提前完成桩位测量。CZ-16型钻机协同2.5/2.2 m直径,利用14t超重锤完成施工。在开始钻孔时,用浆液直接替换护筒内的水,直至泥浆浓度与泥浆池相同。同时,实行低液位施工(标高+5~+6 m),最高潮位为+3 m。在钻进过程中,调整泥浆浓度为1.35~1.4,并采用正循环施工方法,与附近的护筒一起充当泥浆池。

3.5 正循环钻进

在钻进阶段,务必保持钻锤稳定性,并定时复查桩位,掌握各地质层的标高。根据地质层状况选择冲程,并确保取样工作顺利进行。降低锤子频率,以减少斜孔、卡钻、坍孔和漏浆等问题的出现。完成直径2.5 m桩长钻进后,把 $\phi 2.5$ m、14 t钻锤换成 $\phi 2.2$ m、14 t钻锤,继续钻至设计标高。进入中度风化岩层后,钻进速度应缓慢且平稳。在钻进过程中,密切关注海况变化并保持适当液面高度,以避免塌孔或流砂的发生。钻孔作业应保证24 h持续进行,如若因故需暂停钻进,应将钻头提至钢护筒内或距离孔底2 m以上,避免塌孔或沉渣回落导致钻具被埋。

3.6 验孔及清孔

如图7和图8所示,在完成预定高程的钻孔后,立即实施孔洞检验,通过检查后立即进行孔内清理。验孔需检查孔深、孔径和垂直度。孔深应符合设计要求,并以实际孔深作为清洗和灌注的基准。采用气升反循环和泥浆分离器技术进行孔内清洗。



图7 泥浆分离器清孔



图8 探笼验孔

3.7 钢筋笼制作及安装

此桩基为2.5~2.2 m变径^[9]类型,其2.5 m桩径长度为16 m,顶部笼子采用双层钢筋笼结构。钢筋笼在钢筋加工厂采用长线法制作,确保钢筋笼尺寸精

确且轴线笔直。因为桩基钢筋笼最大重量可达 45 t,起重安装必须由 130 t 吊车配合 80 t 吊车进行。钢筋笼的吊点应独立设置,在大风区域中,钢筋笼连接较为困难,应选择合适天气安置,并对钢筋笼进行良好的固定。

3.8 桩基混凝土灌注

灌注混凝土时,采用直径 300 mm 的快速卡口垂直升降导管。在使用导管前,确保完成拼接、防水、承压和接头抗拉试验,并在试拼接通过后进行顺序编号。

在钢筋笼安装完毕且即将进行混凝土灌注之前,检查桩基沉渣厚度。满足设计要求后立刻开展灌注工作。控制导管下口与孔底距离在 25~40 cm 范围内,首次灌注混凝土量不低于 8 m³。在灌注过程中保持连续性,避免中断,同时控制混凝土上升速度,防止钢筋笼漂浮。整个混凝土灌注过程中,确保导管埋深保持在 2~6 m。在灌注过程中采取措施,确保变截面区域水下混凝土灌注紧密。在桩基灌注过程中,应随时检查并记录混凝土数量、导管埋设深度以及混凝土表面高度。

3.9 质量控制措施

加强超前地质勘察,提前判明结构层变化,合理选择机具施工保证正常钻进;钻进过程中由于钻锤尺寸及自重较大,现场应合理规划好现场机具摆放,钻进过程中定时检查各部件的运转,保证钢丝绳完好,要及时检查钻锤的完整性,如若钻锤有损坏及时更换;钻进过程中定时检查护桩,保证护桩完整性,整个施工过程中准确控制桩位;由于大直径变径桩基的钢筋笼吊装较重,应根据钢筋笼特点合理选择履带吊械型号等设备。履带吊应在安全位置停放,确保钢筋笼吊装和安置顺利进行;在复杂海况下,桩基施工过程中应定期检查栈桥和钻孔平台的稳定性,检查栈桥平台各部件是否松动或脱落,同时开展栈桥和钻孔平台沉降观测及维护工作;当灌注混凝土至桩基变径部位时,应增加混凝土面测量频率,以避免导管埋设过浅或意外拔出混凝土面。

4 成桩质量分析

4.1 基桩参数及检测方法

本项目桩基施工共计 140 根,基桩设计参数见表 4。根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)及设计文件有关规定,桩身完整性检测采用超声波检测和钻芯法相结合的方式进行,根据《建筑基

桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)及设计文件有关规定对桩径 2 500 mm 的桩抽测 3 根进行钻芯检测^[7,10]。

表 4 基桩设计参数

桩型	桩径 /m	桩长 /m	设计单桩承载力 /kN	设计持力层
灌注桩	2.2~2.5	15~24	2 360/4 250	强风化花岗岩层

4.2 桩基质量分析

经过对 140 根桩基的检测,结果显示:I 类桩有 138 根,占测量桩数的 99.3%;II 类桩 1 根,占所测桩数的 0.7%。没有检测到 III 类桩和 IV 类桩。根据相关规范要求,共对 3 根桩进行取芯检测,检测结果见表 5。桩基取芯结果表明,芯样连续、完整、良好黏结,芯样侧表面光洁,骨料分布基本均匀。芯样呈柱状,断口接近吻合,都属于 I 类桩。

表 5 桩基取芯检测结果

桩号	桩径 /m	桩长 /m	桩身质量	桩底沉渣厚度	完整性
6-1	2.2	18	芯样连续、完整、胶结好,芯样侧表面光滑、骨料分布基本均匀,芯样呈柱状、断口基本吻合	未见沉渣	I
12-4	2.5	22		未见沉渣	I
15-6	2.5	19		未见沉渣	I

综上所述,在高强裸岩地质工况下,采用“14 t 超重锤+低液面”技术施工,成桩后各项检测指标均满足设计和规范要求,现场应用效果良好。

5 结 语

本文以实际项目为例,将“超重锤+低液面”施工技术成功应用与海洋环境硬质裸岩施工,有效解决了桩基施工过程中漏浆、串孔等问题的发生,该技术综合施工工效是传统工艺的 3.4 倍,经济社会效益显著。通过对基桩桩身完整性检测,各项检测指标均满足设计及规范相关要求,超声波检测中 I 类桩占所测桩数的 99.3%,II 类桩仅占所测桩数的 0.7%,没有 III 类桩和 IV 类桩,这足以说明该技术的应用能显著提高恶劣海况条件下大直径变径桩基施工的速度和可靠性,并为将来类似的桩基工程积累了宝贵的经验。

参考文献:

- [1] 黄凯.复杂条件下大直径深长嵌岩灌注桩全套管全回转钻机与 RCD 钻机组合钻进施工技术[J].施工技术(中英文),2022,51(24):50-55.
- [2] 张新宇.港澳地区大直径钻孔灌注桩施工技术及方案优化[J].施工技术(中英文),2023,52(7):57-62.
- [3] 田岱松.爆破作业禁区桩基水磨钻施工技术研究[J].施工技术,2017,

(下转第 232 页)

人拼装),人力投入减少40%。

(3)新型设备工效高,缩减了工期。相同的施工条件下,新型设备中导管施工190 m用时20 d,常规设备施工约180 m用时35 d,工效提升约75%。

(4)新型设备制作简单,周转率高。新型设备制作简单,材料也是工程上的常用材料。常规小推车在运输中极易损坏轮子,新型设备由于浮力作用,重量大大减轻,设备可周转次数更高。

(5)新型设备更利于管道修复成品保护。在中导管拆除阶段,新型设备的采用大大减轻了拆除管节在管道上的压重,避免了运输中损坏已修复的管道内壁。

3.2 经济效益

新型设备运输浮箱和固定式杠杆吊架在经济效益上主要体现为缩减工期和减少人力投入。通过与同工程其他标段的对比,在人力投入方面可减少40%,在工效方面可提升75%。同时,新型设备制作简单,材料均为施工中常见的可回收材料,成本投入低。

除为项目带来直接经济效益外,新型设备还可为项目带来间接的增益效果,如可为后续管道修复施工预留更多的工期,对于项目后续工作中的人工费、措施费等产生较好的增益效应。

3.3 社会效益

新型设备的使用,为本标段节省了大量的工期。本标段工期紧、任务重,阶段性中导管施工及管道修复需在汛期前完成。

本工程第一阶段需于2023年5月底汛期前完

成第一阶段190 m的管道修复。借助新型设备,本标段第一阶段中导管施工仅耗时20个工作日,为后续的管道修复争取了大量的时间,并成功在汛期前如期完成了第一阶段的管道修复施工。

同时,围绕中导管的施工,还形成了多项创新专利,为未来的类似工程提供参考和借鉴。针对不同工况中导管的运输开发研究了低水位工况中导管运输浮箱和中高水位工况中导管运输双向泵气囊两项装置,针对中导管的提升研究开发了固定式杠杆吊架和管内移动式吊机两项不同装置,相关装置及其施工方法已申报创新专利。

4 结论

在工程实践中,常常会遇到各式各样的不利因素,通过对这些不利因素进行分析,往往会发现这些不利因素对立着其有利的另一面。如何通过这些不利因素分析出其有利的一面并加以利用,是工程创新的关键所在。本工程中,新型设备运输浮箱和固定式杠杆吊架正是将工程的涉水作业和吊装空间小的不利因素转化为了有利因素,既解决了施工难题,又节省了工期和成本,取得了良好的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 冯峻.不锈钢全断面内衬技术对重大排水管道保护的应用[J].山西建筑,2023,49(10):193-195.
- [2] 张大华.城市超大直径污水管道非开挖修复施工技术的应用[J].建筑施工,2022,44(10):2420-2424.
- [3] 李瑞典.不锈钢内衬修复技术及其应用研究[J].河南城建学院学报,2022,31(6):59-64.

(上接第212页)

- 46(增刊1):978-979.
- [4] 范远林,李本鑫.易渗漏地质条件下大直径超深钻孔桩施工技术[J].市政技术,2014,32(4):66-68.
 - [5] 毛奎,王昌喜.嘉鱼长江公路大桥超长桩旋挖钻配合冲击钻复合成孔技术[J].中外公路,2018,38(3):199-204.
 - [6] 邹明,胡培强.温州港状元岙港区二期工程斜桩冲击钻钻孔嵌岩施工技术[J].施工技术,2015,44(24):80-82,113.
 - [7] 冯忠居,刘闯,戴良军,等.中国海洋环境桥梁大直径深长桩基的应

- 用研究[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(11),46-50.
- [8] 李嘉明.强潮流河段大直径桩基钢护筒沉放关键技术[J].公路,2013(9):109-113.
 - [9] 江和明,荣劲松.海上超长直径嵌岩钻孔灌注桩施工技术[J].水运工程,2015(2):156-162.
 - [10] 刘谭升.舟洲大桥深水大直径桩基成孔施工技术[J].铁道标准设计,2008(11):58-62.