

复杂环境下超深超大体积承台施工关键技术

周锡海, 杨雁君, 张 勇, 韦宇宁, 殷泽武, 朱书敏

(保利长大工程有限公司, 广东 广州 511431)

摘 要: 广东省中山市横门西特大桥上跨鸡鸦水道(Ⅲ级航道)和小榄水道(I级航道), 其中主墩位于三面环水的岛上, 桥位处为二级水资源保护区范围。主墩承台大里程侧靠近小榄水道, 距离原堤坝最近处约 5 m。承台深基坑边缘距离堤坝距离过近, 基坑钢板桩围堰存在受河道水体影响的风险, 外部土墙过薄会损害基坑稳定性。针对深基坑支护安全需求, 通过系统分析钢板桩围堰变形机理, 基于现场实际条件, 针对性实施钢管桩围堰置换、内支撑结构优化、河堤防渗补强等综合加固方案。施工期间配合全过程动态监测技术, 有效控制工程风险, 最终顺利保障了基坑施工安全。

关键词: 桥梁工程; 深基坑; 钢板桩围堰; 承台施工

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0185-06

Key Construction Technologies for Ultra-deep Ultra-large Volume Base Slab in Complex Environments

ZHOU Xihai, YANG Yanjun, ZHANG Yong, WEI Yuning, YIN Zewu, ZHU Shuming

(Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511431, China)

Abstract: The Hengmen West Extra-large Bridge in Zhongshan City of Guangdong Province spans the Jiya Waterway (Class III waterway) and Xiaolan Waterway (Class I waterway), in which the main pier is located on an island surrounded by water on three sides. The bridge site is within the scope of a Class II water resources protection zone. The main pier base slab is located near the Xiaolan Waterway on the large mileage side, about 5 meters away from the nearest point of the original dam. The distance between the edge of the deep foundation pit of base slab and the embankment is too close, and there is a risk that the steel sheet pile cofferdam of the foundation pit will be affected by river water. In addition, a too thin external earth wall can damage the stability of the foundation pit. In response to the safety requirements of deep foundation pit support, through systematic analysis of the deformation mechanism of steel sheet pile cofferdams, based on the practical site conditions, the targeted comprehensive reinforcement schemes such as replacement of steel pipe pile cofferdam, optimization of internal support structures, and anti-seepage reinforcement of river embankments are implemented. During the construction period, in coordination with the full-process dynamic monitoring technology, the engineering risks are effectively controlled, and ultimately the safety of the foundation pit construction is smoothly guaranteed.

Keywords: bridge engineering; deep foundation pit; steel sheet pile cofferdam; construction of base slab

0 引 言

随着我国交通基础设施建设的不断推进,大跨径斜拉桥作为跨越江河、海湾等障碍的重要桥梁形式,在交通网络中发挥着日益重要的作用。深基坑工程逐渐向大跨度、深埋化方向发展,钢板桩围堰是深基坑施工的关键临时支护结构,承台分层浇筑施工过程复杂,涉及众多环节与技术要点。近年来桥梁承台深基坑钢板桩围堰施工研究聚焦复杂地质适

应性与结构优化,通过钢板桩插打技术、冷却系统应用及有限元模拟验算,显著提升了施工安全性与效率。如杨圣峰,刘鸽等对深水条件钢板桩围堰施工进行研究^[3-5],李光均,蒋晖等对复杂环境条件钢板桩围堰施工技术进行研究^[6-8]。谭海雄,蒋平等对钢板桩施工顺序等进行研究^[9-11]。

对此,结合工程实例,介绍其复杂环境下超深超大体积承台施工关键技术方案。

1 工程概况

1.1 总体概述

横门西特大桥全长 2518 m,为主跨 390 m+324 m

收稿日期: 2025-04-07

作者简介: 周锡海(1971—),男,学士,高级工程师,从事路桥施工技术管理工作。

的独塔钢箱梁斜拉桥^[2],该桥梁工程其设计为独塔整体式钢箱梁斜拉桥,跨径之大在国内同类在建桥梁中首屈一指。主墩承台采用整体式设计,矩形布置,为33.8 m×47.8 m×9 m的实心结构,承台埋置于陆地地面以下,底标高-6 m,顶标高+3 m,混凝土采用C45海工混凝土,封底混凝土设计为C25。横门西特大桥主墩承台及塔柱结构示意见图1。承台分三层浇筑,每层厚度为3.0 m,下塔柱底部2 m高度与第三层承台一同施工,承台混凝土采用天泵进行浇筑。

1.2 地质情况

根据区域地质资料及陆地钻孔揭露的岩土层,项目区覆盖层主要由第四系杂填土构成,夹杂海陆交互相互沉积的软塑淤泥质土、淤泥质土、圆砾,桥址处覆盖层厚度较为均匀,覆盖层厚度在51~58 m之间,基底由下古生界混合岩及其分化层组成,其中承台基本位于淤泥土层与淤泥质土层之间的交界处,

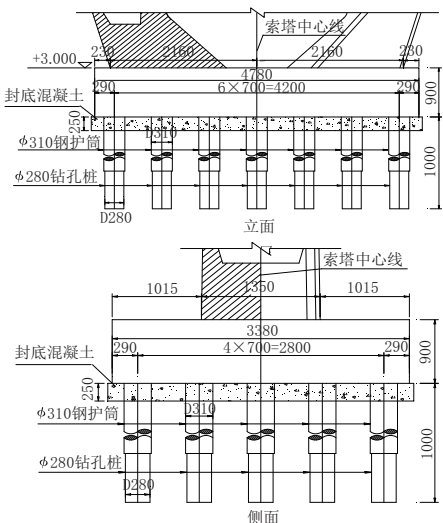


图1 横门西特大桥主墩承台及塔柱结构示意图(单位:cm)

钢板桩底部在淤泥质土层中。
横门西特大桥主墩桥位钻探取土送检报告见表1。

表1 横门西特大桥主墩桥位钻探取土送检报告

样品名称	原状土	样品描述	密封良好,无扰动			
试验依据	GB/T 50123—2019	主要仪器设备	电子天平、应变式直剪仪			
盲样编号 No.	土样孔号	土样编号	取土深度 m	土的物理性质		
				湿密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	粘聚力 C/kPa	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
GWMY2021024784	JK-01	y-1	4.30~4.50	1.92	41.5	13.6
GWMY2021024785	JK-01	y-2	7.20~7.40	1.80	10.6	6.3
GWMY2021024786	JK-01	y-3	14.80~15.00	1.74	16.8	7.2
GWMY2021024787	JK-01	y-4	25.60~25.80	1.69	12.1	10.2
GWMY2021024788	JK-01	y-5	21.00~21.80	1.61	5.5	6.3
GWMY2021024789	JK-02	y-1	0.20~0.40	2.00	52.6	15.6
GWMY2021024790	JK-02	y-2	5.10~5.30	1.77	10.9	8.7
GWMY2021024791	JK-02	y-3	15.80~16.00	1.60	8.6	4.7
GWMY2021024792	JK-02	y-4	24.00~24.20	1.67	12.1	8.9
GWMY2021024793	JK-03	y-1	1.10~1.30	1.86	41.8	17.1
GWMY2021024794	JK-03	y-2	6.60~6.80	1.77	21.6	14.6
GWMY2021024795	JK-03	y-3	13.30~13.50	1.66	13.5	7.6
GWMY2021024796	JK-03	y-4	21.10~21.30	1.59	10.4	5.2
GWMY2021024797	JK-03	y-5	15.20~16.00	1.60	8.3	3.9
GWMY2021024798	JK-04	y-1	11.60~11.80	1.72	16.3	11.2
GWMY2021024799	JK-04	y-2	13.40~13.60	1.57	17.0	5.8
GWMY2021024800	JK-04	y-3	23.50~23.70	1.66	13.9	7.5
GWMY2021024801	JK-04	y-4	24.30~24.50	1.60	15.4	5.4

1.3 水文情况

桥址区地表水发育,桥梁跨越横门水道。
桥位区地处三角洲冲积平原地貌,横门水道源自小榄、鸡鸦及石岐水道,流经张家边区域,穿越中山港区,最终自横门汇入珠江口,其总长度为12 km,构成区域水系的关键一环。局部可能富集。测得稳定地下水位埋深0.50~2.00 m,水位高程-0.40~

0.60 m。
1.4 承台施工工艺
横门西特大桥3#主墩位于岛尖陆地,施工场地在桩基施工阶段已做土石填筑压实及面层硬化处理。主墩承台采用先插打钢板桩围堰,然后进行基坑开挖、浇筑垫层混凝土,再施工承台的总体方案。主墩承台采用先插打钢板桩,向下干挖约3 m,围堰

围檩及内撑先加工完成并按照上下顺序平放,第一道内撑直接在设计高度处进行安装及固定,然后继续进行干挖作业,过程中逐步安装围檩及内撑,直至第三道围檩及内撑安装完成,再开挖至基坑底部,浇筑封底混凝土。

钢板桩围堰内轮廓平面尺寸为51.25 m×37.25 m,围堰体系设3道内撑体系。桩基施工收尾阶段提前进行钢板桩插打施工,钢板桩采用24 m长拉森Ⅳ钢板桩,钢板桩采用履带吊配合振动锤(也可用长臂钢板桩插打机)进行插打。

基坑开挖采用干挖工艺。采用长臂挖机在四周进行,必要时在钢护筒顶部搭设长臂挖机作业平台。

封底混凝土采用 C25, 厚度为 1.0 m, 封底混凝土灌注前对灌料口下的基坑底进行整平并设竹排网 (或钢筋网片) 作为托底。封底混凝土达到预定强度后, 方可进行第一层承台混凝土浇筑。

承台分三层浇筑,每层厚度为3.0 m,下塔柱底部2 m高度与第三层承台一同施工,承台混凝土采用天泵进行浇筑。钢板桩围堰抽水完成后,割除多余钢护筒、凿桩头及封底混凝土找平后进行承台实体施工。承台钢筋在钢筋加工车间制作成型,钢筋根据浇筑分层采取分区配料、下料的方式,以减少二次倒运;钢筋采用平板运输车运至墩位,利用龙门吊机或履带吊机吊入围堰内进行安装绑扎,并在承台内布置冷却循环水管。承台模板均采用定制钢模板,在加工场分块制作,运至现场组拼;承台外模外侧直接用钢管支架支撑于围堰内壁、内部则采用承台钢筋对拉固定。混凝土由位于民众南互通的陆上混凝土搅拌站及位于主墩处的长大18水上搅拌站联合供应,混凝土经由泵车泵送浇筑入模,振捣工序则主要采用高频插入式振捣器实施,主墩承台每层混凝土施工完成后对其表面进行凿毛,并采用表面覆盖洒水进行养护,确保承台混凝土质量。

其中横门西特大桥主墩钢板桩围堰见图2、图3。

1.5 动态监测技术

(1)深基坑施工监测技术:采用智能化传感器及监测仪器设备,加强对深基坑围堰结构的变形及应力监控并及时预警,增强深基坑施工的安全性。

(2)大体积混凝土智能温控技术:通过埋置于大体积混凝土浇筑区内及循环冷却水管进、出水口等处的温度传感器,结合环境温度监测、混凝土入模温度监测,以智能温控系统为平台,对大体积混凝土各项参数进行智能化、自动化监测、传输及分析,并智

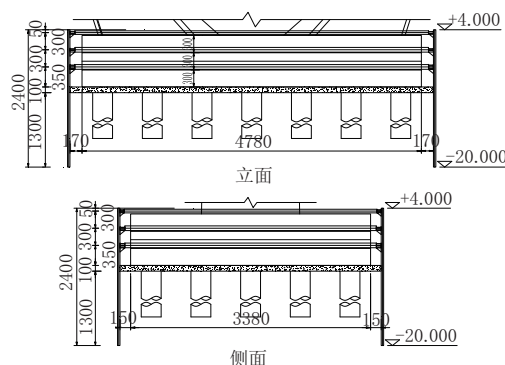


图2 横门西特大桥主墩钢板桩围堰图1(单位:cm)

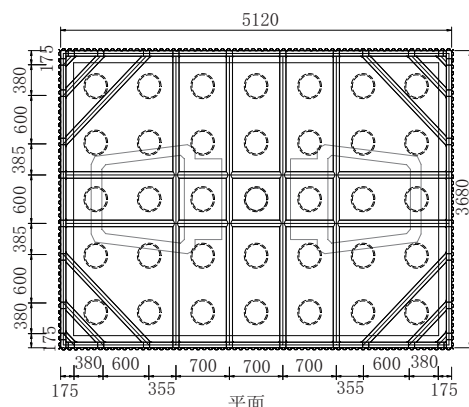


图 3 横门西特大桥主墩钢板桩围堰图 2 (单位: cm)

能控制冷却循环水的流速,控制大体积混凝土内部绝对温度、里表温差等指标满足要求,有效防止大体积混凝土裂缝产生。

2 施工期承台钢围堰分析

2.1 模型建立

结构通过有限元软件迈达斯 civil 进行建模,结构单元离散及仿真分析结构模型见图 4,全模型共划分 48 108 个节点,37 192 个单元,结构单元离散原则:截面变化处、支座节点处、荷载加载位置处均需进行结构单元离散,入土部分采用土弹簧模拟。

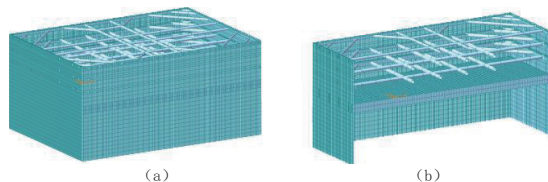


图4 仿真分析结构模型图

2.2 荷载计算

(1)结构自重:有限元软件自动将结构恒载,即自重,纳入分析体系,MIDAS 程序运行时: $g=9.8 \text{ m/s}^2$,重力荷载比例系数设定为-1。

(2)混凝土:封底混凝土采用 C25 混凝土,容重取 25 kN/m^3 。

(3) 钢材: 围檩采用 Q355 材质, σ_s 不小于 310 MPa,

内支撑管采用Q235型钢,屈服强度 σ_s 不小于215 MPa,容重取78.5 kN/m³。

一级。参照《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[1]第3.4.2条规定。

(4)恒载

- a. 土压力:基坑支护(钢围堰)设计安全等级为
- b. 水压力:按静水压力计算。
- 按钢板桩0.4 m宽计算得水和土压力见表2。

表2 土压力计算

序号	土层名称	层底标高	厚度	上层土折算厚	饱和比重	黏聚力	摩擦角	主动土压力系数	各层主动土压力	每根钢板桩上的土压力
1	素填土	1.6	1.9	0	17.5	16.7	8.7	0.74	-4.17	-1.67
		1.6	0	2.00	16.6	12	7	0.78	9.51	3.81
2	淤泥质土	0	1.6	2.00	16.6	12	7	0.78	31.50	12.60
		-3	4.6	2.00	16.6	12	7	0.78	72.74	29.09
		-8	9.6	2.00	16.6	12	7	0.78	141.46	56.58

注:素填土高小于临界高度,不会产生主动土压力。

2.3 各个工况及计算结果

各个工况计算结果见表3。

表3 各个工况计算结果表

工况	位置	最大应力/MPa	允许应力/MPa	是否满足要求
基坑向下开挖0.5 m(排水干挖),安装第一道围檩。继续向下干挖2.5 m	钢板桩	152.0	310	是
	围囹	47.9	215	是
基坑继续向下开挖(排水干挖),完成第2道内撑的安装	钢板桩	174.9	310	是
	围囹	52.2	215	是
基坑继续向下干挖至-3 m标高,安装固定第3道内撑,完成第3道内撑的安装	钢板桩	86.6	310	是
	围囹	36.5	215	是
基坑继续干挖直至基坑挖至-7 m标高处	钢板桩	196.0	310	是
	围囹	92.2	215	是
封底等强达到承载要求	钢板桩	247.8	310	是
	围囹	127.1	215	是
拆模,第1层承台外围回填石粉,顶面浇筑50 cm厚圈梁	钢板桩	202.0	310	是
	围囹	104.4	215	是
拆除第3道内撑,支模,浇筑承台第2层(3.0 m高)	钢板桩	154.4	310	是
	围囹	86.6	215	是
拆模,第2层承台外围回填石粉,顶面浇筑50 cm厚圈梁	钢板桩	151.2	310	是
	围囹	63.5	215	是
拆除第2道内撑,拆除第1道内撑长度方向的螺旋钢管对撑(因其与下塔柱预埋钢筋冲突),支模,浇筑承台第3层(3.0 m高)	钢板桩	151.9	310	是
	围囹	53.6	215	是
拆除第2道内撑,拆除第1道内撑长度方向的螺旋钢管对撑(因其与下塔柱预埋钢筋冲突),支模,浇筑承台第3层(3.0 m高)	钢板桩	152.0	310	是
	围囹	47.9	215	是

整个施工过程中各工况下,钢板桩最大应力为工况五,应力值247.8 MPa<310 MPa,满足规范要求。围囹最大应力发生在工况五,应力值127.1 MPa<215 MPa,满足规范要求。撑杆稳定性计算,满足规

范要求。封底混凝土做最后阶段的内支撑,承受应力为1.34 MPa<13.4 MPa满足规范要求。见图5~图8。

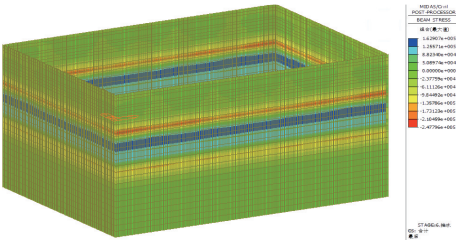


图5 钢板桩应力图

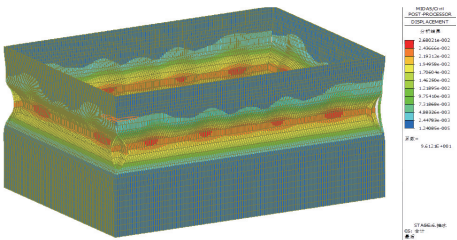


图6 钢板桩位移图

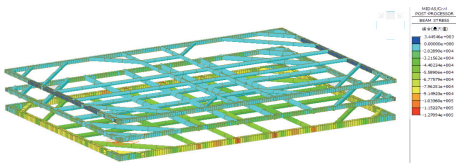


图7 围囹应力图

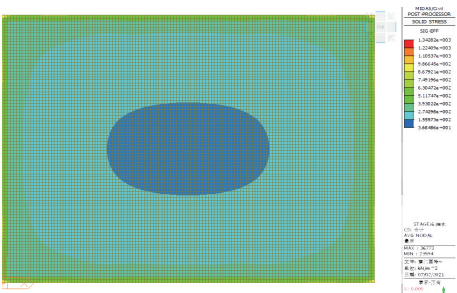


图8 封底混凝土应力图

3 施工期河堤防护分析

横门西特大桥主墩承台位于小榄水道与鸡鸭水

道之间的岛尖位置,三面环水。主墩承台采用钢板桩围堰施工工艺,因承台在小榄水道侧距离现有河堤距离较小,为防止因施工荷载扰动导致河堤结构垮塌,同时亦防止航道水流冲击及水位较大变化对承台深基坑造成不利影响,特别在横门西特大桥主墩承台与小榄水道间的河堤处加以防护。防护结构采用排式锁扣钢管桩,规格为“ $\phi 820 \times 12$ mm 主体钢管+I25b 工字钢+ $\phi 200 \times 6$ mm 锁扣钢管”,锁扣钢管桩长 24 m。

根据区域地质资料及陆地钻孔揭露的岩土层,项目区地层从上而下由第四系填土(部分区域)、海陆交互沉积形成的淤泥、淤泥质土夹圆砾,伴随全至中风化泥质粉砂岩层分布。等组成,桥址处软土覆盖层厚度较为均匀。

3.1 荷载计算

淤泥主要参数指标如下:天然重度 $\gamma_1=16.9$ kN/m³,浮重度 $\gamma_2=6.9$ kN/m³, $\theta=6^\circ$, $c=9.9$ kPa;淤泥质土主要参数指标如下:天然重度 $\gamma_1=17.4$ kN/m³,浮重度 $\gamma_2=7.4$ kN/m³, $\theta=8.2^\circ$, $c=13$ kPa。

锁扣钢管桩侧的主动水土压力和被动水土压力计算采用朗肯土压力计算方法,采用水土合算法进行土压力计算,取 1 m 板宽为单位计算;

主动土压力: $P_a = K_a \gamma h - 2c \sqrt{K_a}$ (1)

被动土压力: $P_p = K_p \gamma h + 2c \sqrt{K_p}$ (2)

根据计算假定,将淤泥土层底部设定为滑动面,根据地质情况,确定淤泥土层主动及被动土压力系数:

$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) = \tan^2(45^\circ - 6^\circ/2) = 0.81$

$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) = \tan^2(45^\circ + 6^\circ/2) = 1.23$

淤泥天然重度 $\gamma_1=16.9$ kN/m³,浮重度 $\gamma_2=6.9$ kN/m³, $\theta=6^\circ$, $c=9.9$ kPa,考虑地面荷载 10 kPa,计算主动土压力为:

$$\sigma_{\text{上}} = 10 \text{ kPa}$$
$$\sigma_{\text{下}} = 10 + 89.7 = 99.7 \text{ kPa}$$

3.2 计算结果

本计算选取 1 m 宽度单元进行计算,根据构件截面特性取等效刚度、等效质量、等效截面特性。该选取方式具有代表性,可保证计算结果科学合理。有限元计算模型见图 9。

由图 10 结果可知,锁扣钢管桩结构计算最大组合应力 147.8 MPa<170 MPa,满足规范要求及受力需求。

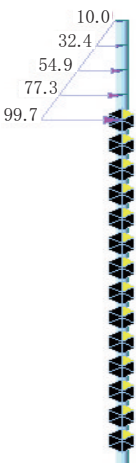


图 9 有限元计算模型图

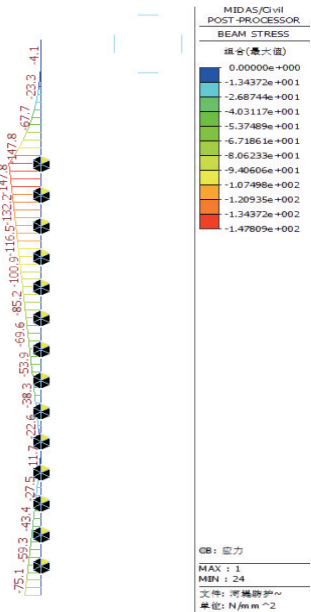


图 10 组合应力图

4 二级水资源保护区的绿色施工

主墩承台施工处在二级水资源保护区范围内,采用节能设备并优化工艺,提升能源效率,减少化石能源依赖。降低施工对周边生态环境的破坏,控制噪声、粉尘、废水排放,保护土壤、水体及空气。

4.1 节能减排技术

新型节能设备应用:在混凝土搅拌、运输和浇筑环节,采用新型节能型搅拌设备和电动混凝土搅拌车。这些设备具备高效的能源转换系统,相比传统设备可降低 20%~30% 的能源消耗。在起重作业中,选用智能变频起重机,根据实际作业负荷自动调整电机功率,减少能源浪费。

4.2 可再生能源利用

在施工现场设置太阳能光伏发电系统,利用光伏板集能转电供应用,为施工现场的照明、小型设备

等供电。在有条件的地区,还可考虑利用地热能,通过地源热泵系统为施工营地提供冷暖空调服务,减少对传统电能的依赖。

4.3 减少环境污染措施

粉尘控制:施工现场设置围挡,减少粉尘外扬。对易产生扬尘的作业,如土方开挖、砂石料装卸等,配备洒水车,定时进行洒水降尘。在物料堆放场地,采用覆盖防尘网等措施,防止粉尘扩散。

废水处理:构建污水预处理构筑物沉淀及化粪池设施,对施工废水和生活污水进行处理。施工废水经沉淀、过滤后,可用于施工现场的降尘、绿化灌溉等;生活污水经化粪池达标处理,排入市政管网。

噪声防控:采用低噪声施工机具与技术。合理安排施工时间,避免在居民休息时间进行高噪声作业。对噪声较大的设备,如搅拌机、电锯等,采用消声装置及隔音设施降噪。

4.4 碳排放控制策略

优化施工组织设计,合理安排施工顺序和设备使用时间,提高设备利用率,减少设备空转和不必要的能耗;推广使用清洁能源,逐步替换传统燃油设备为电动设备,增加可再生能源在施工用电中的占比;选用低碳排放的建筑材料,鼓励使用再生材料和本地生产的材料,减少材料运输过程中的碳排放。通过这些策略的实施,有效降低大跨径斜拉桥施工过程中的碳排放强度,助力“双碳”目标的实现。

5 结 语

围绕横门西特大桥大体积承台施工展开研究,

取得了一系列成果。采用钢板桩围堰分层浇筑施工工艺方面,明确了分层浇筑的必要性与原理,阐述了施工流程与要点,并提出有效的质量控制措施,确保了大体积承台的施工质量;采用锁扣钢板桩施工防护措施,确保了大体积承台安全的施工环境。

绿色施工与“双碳”目标实现方面,阐述了绿色施工理念与目标,介绍了节能减排技术和减少环境污染的措施,分析了碳排放强度并提出控制策略,为大跨径斜拉桥施工的可持续发展提供了方向。

参考文献:

- [1] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] 中交公路规划设计院有限公司,广州市市政工程设计研究总院有限公司.南沙至中山高速公路工程SJ01标段TJ05合同段施工图设计[Z].北京:中交公路规划设计院有限公司,2021.
- [3] 杨圣峰,刘晓星,冯燕平,等.深水致密砂岩地层中钢板桩围堰技术研究[J].公路,2021,66(1):184-188.
- [4] 刘鸽,黄修平,庾焱秋,等.近堤深水承台施工支护体系的设计与受力研究[J].中国港湾建设,2022,42(6):47-51.
- [5] 李光均.复杂地质大型承台深基坑钢板桩围堰施工技术[J].工程建设与设计,2022(10):152-154.
- [6] 梁宏顺,岳雪姣,何超.高潮差环境下承受正逆水平压力的钢板桩围堰施工技术[J].公路,2020,65(7):167-169.
- [7] 蒋晖,李志劲,李沛洪.软弱地质条件下钢板桩围堰安全性分析[J].特种结构,2021,38(6):95-99.
- [8] 谭海雄.长引桥深水承台钢板桩围堰的设计与施工[J].公路,2024,69(3):153-157.
- [9] 雷震,欧记锋,肖前波.先支后插钢板桩围堰施工技术在水中基坑施工中的应用[J].中国港湾建设,2021,41(6):64-67.
- [10] 吴玲正.深中通道东泄洪区非通航孔桥围堰设计与施工[J].世界桥梁,2020,48(5):21-25.
- [11] 蒋平.新型锁口钢管桩围堰在绵苍高速嘉陵江大桥施工中的运用[J].价值工程,2021,40(27):101-103.

(上接第184页)

- [9] 水电部、长江口及太湖流域综合治理领导小组.太湖流域综合治理总体规划方案[Z].1987.
- [10] 易文林,俞汇,韦浩,等.台风“烟花”期间黄浦江上游洪水过程及高水位分析[J].水利水电快报,2023,44(5):18-22.
- [11] 徐家贵,戴晶晶,李琛,等.太湖流域防洪新形势及治理对策[J].中国水利,2024(12):63-68.
- [12] 尹凯丽.上海地区防汛墙的安全检测与评价[J].水利技术监督,

2024(11):43-46;92.

- [13] 骆正清,杨善林.层次分析法中几种标度的比较[J].系统工程理论与实践,2004(9):51-60.
- [14] 杜栋,庞庆华,吴炎.现代综合评价方法与案例精选[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [15] 苑希民,桑林浩,沈福新,等.基于模糊层次分析法的京津冀洪灾风险评价[J].水利水电技术,2018,49(10):37-45.