

外海无掩护斜坡堤挡浪墙的设计与施工

王浩

(中交一航局第五工程有限公司)

摘要: 外海防波堤施工中因海况条件导致施工进度受阻,从而常出现设计工期与实际不符的情况。为解决这一问题,通过设计变更优化施工工艺,以缩短工期、提升经济效益、保障成品质量并维护结构安全性。通过综合分析现场海况数据、施工条件及工艺可行性,对原设计方案进行针对性调整,具体包括优化结构形式、改进施工流程、选用适宜工法等措施。结果表明,经调整后的设计方案有效克服了海况制约,在保证质量与安全的前提下显著缩短了施工周期,降低了工程成本,可为类似工程提供借鉴。

关键词: 斜坡堤;起重船;吊装架;预制挡浪墙;外海无掩护环境

0 引言

随着沿海港口建设的持续发展,外海防波堤工程日益增多。然而,在外海无掩护环境下施工常面临海况复杂、作业窗口期短、传统工艺适应性差等挑战,严重影响了工程进度、成本与质量。尤其是在葫芦岛等开放性海域,受风浪与潮汐影响显著,采用常规现浇施工工艺时,有效作业时间严重不足,难以保证混凝土施工质量与工期目标,已经成为当前外海防波堤施工中的突出难题。

近年来,针对外海施工条件恶劣的问题,国内外学者与工程单位围绕防波堤结构形式、施工工艺等方面开展了诸多研究。其中,预制装配化施工因其作业速度快、受环境影响小、质量易控制等优点,逐渐成为海洋工程领域的研究热点。然而,现有研究多集中于预制构件设计及一般吊装工艺,针对外海无掩护条件下大型预制挡浪墙高效、安全吊装技术的研究仍较为缺乏,尤其是在吊装系统设计、现场适应性及成本控制等方面,尚未形成系统化的解决方案。

基于上述问题,本研究以辽宁省葫芦岛某外海斜坡式防波堤工程为背景,针对原现浇挡浪墙施工中存在的作业效率低、受海况制约严重等问题,结合护岸结构优化与装配化施工方面的经验,开展适用于无掩护海域的预制挡浪墙施工工艺设计与实践。本文重点研究吊装架与钢销组合式吊装系统的结构设计、力学验算与施工组织实施,旨在通过工艺创新克服恶劣海况对施工的不利影响,提升作业效率、保证工程质量,并为类似环

境下的防波堤工程建设提供技术参考与实践依据。

1 工程概况

辽宁省葫芦岛市某水工项目主要由新-1、新-2、新-3 码头及西护岸、南护岸、东南防波堤和北口门消浪堤组成。其中新-1 码头为高桩结构,长度 330 m;新-2 码头和新-3 码头为沉箱重力式结构,长度分别为 500 m 和 510 m;西护岸 527 m,南护岸 575 m,其中东南防波堤 651 m;均为抛石斜坡堤结构,采用 2 t、5 t、8 t 四脚空心块护面,堤顶为现浇灌砌块石基础及挡浪墙,堤顶挡浪墙顶高程+5.8 m,抛石高程+1.7 m,堤顶宽度 5.5 m,葫芦岛施工海域设计高水位+3.64 m,设计低水位-0.07 m,极端高水位+4.65 m,极端低水位-1.67 m,施工水位+1.68 m。故受现场海况及设计原图纸因素影响,调整东南防波堤上部结构挡浪墙结构及施工方式。

2 方案比选

2.1 方案调整

东南防波堤原设计剖面图见图 1。防波堤堤顶高程为+1.7 m,依据葫芦岛当地潮汐计算,日施工时间约为 6 h,且该防波堤为外海无掩护施工,受当地风浪影响较大。若外海侧风向大于 4 级,产生的海浪将导致无法在堤顶道路上通行,依据以往施工葫芦岛外海施工有效作业率约为 0.4,每月有效作业时间约为 72 h,作业时间过少,且均为混凝土施工,施工完成后受海水浸泡,质量难以保证。

防波堤堤顶宽度为 5.5 m,施工需使用的 360

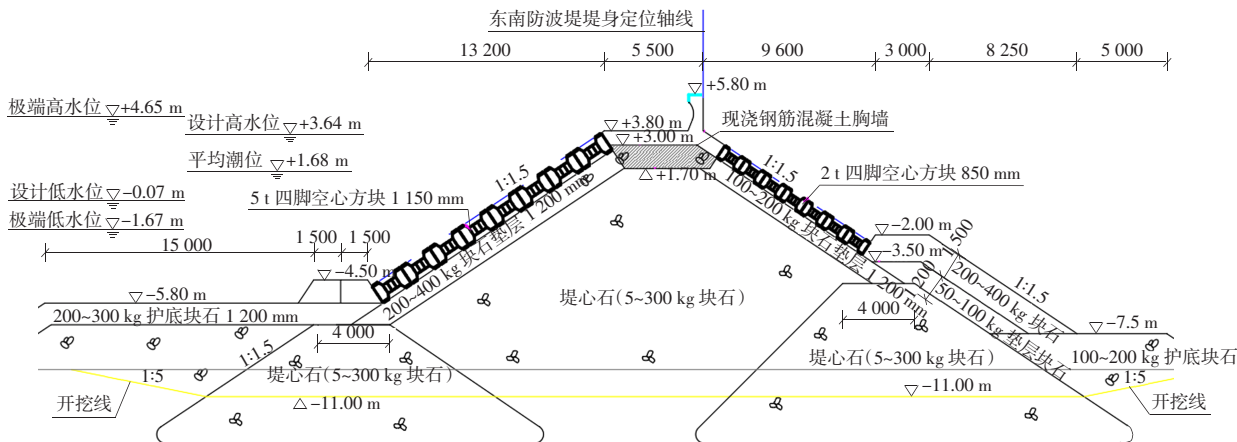


图 1 东南防波堤原设计剖面图(mm)

型反铲挖掘机、混凝土搅拌车、自卸汽车等均无法在防波堤上实现双向通行，故现浇施工作业仅能从远端向近端依次施工，共计划分 70 段进行施工，按照有效作业天计算施工时间至少需要 6 个月完成该工程施工，实际现场可作业时间约 100 d，该工艺无法满足工期要求。

2.2 方案确立

经过与设计单位、监理单位积极沟通，考虑

到公司实际在港船舶船期情况，并结合参考文献及现场实际施工环境因素影响，最终对东南防波堤上部结构中的挡浪墙结构形式进行调整，原现浇结构变更为预制安装结构，见图 2。为保证工期及质量、最终将现浇混凝土施工调整为浮吊预制安装挡浪墙墩身^[1]，现浇立墙结构。计划工期 90 d 完成。设备选用 1 艘 1 600 t 起重船配 1 艘 1 492 kN(2 000 Hp)起锚艇。

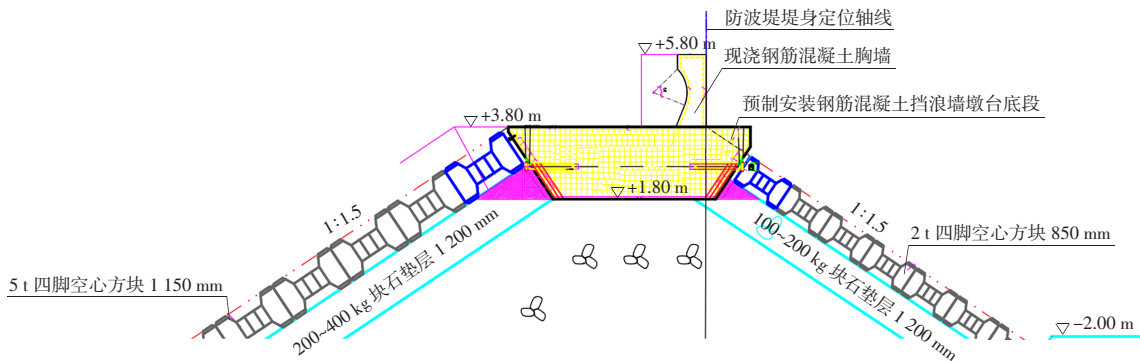


图 2 东南防波堤结构堤顶剖面图

3 新工艺设计

防波堤堤顶结构挡浪墙由原设计现浇结构更改为预制安装挡浪墙底端墩台形式，共计 62 段，混凝土型号为 C40F350，尺寸 9.12 m×6.729 m×2 m，单块自重 260 t。在选取吊装形式时，放弃传统吊环吊装和马腿盒吊点吊装施工工艺，从而选择了吊装架配合钢销吊装的方式，在保证施工质量、安全和进度的前提下，节约了施工成本。

预制挡浪墙自重 2 600 kN，设置吊点数量 4 个，按 3 个吊点计算，荷载分项系数为 1.5，每个吊点受到荷载 F_0 为 1 300 kN。

1) 吊装钢销计算

钢销选材选用 Q390 材料(抗剪强度 $f_s=170$ N/mm²，弯曲应力 $f_b<295$ N/mm²)，钢销直径 140 mm，抗剪强度 101.39 N/mm²，抗剪强度满足要求。钢销悬臂长度 60 mm，钢销弯曲应力为 289.68 N/mm²，满足抗弯强度要求。

2) 混凝土抗冲切计算

冲切破裂面长度 1 700 mm，宽度 1 200 mm，计算高度 850 mm，截面高度影响系数取 1，混凝土轴心抗拉强度设计值按 C30 考虑取 1.43 N/mm²，算得首冲切承载力为 1 459.67 kN，大于 1 300 kN，

满足抗冲切强度。

3) 吊架下方副钢丝绳计算

吊点受竖向荷载标准值 650 kN, 钢丝绳起吊安全系数取 6, 换算系数取 0.82, 钢丝绳拉力设计值为 1 950 kN, 最终选取 56 mm(6×37 芯)钢丝绳(破断拉力总和 2 175 kN)为副钢丝绳。

4) 吊架上方主钢丝绳计算

起吊水平投影长度 3.838 m, 钢丝绳起吊角度为 60°, 则钢丝绳受到轴力的标准值为 749.71 kN, 安全系数取 6, 则钢丝绳拉力设计值为 4 498.27 kN, 故选用 83 mm(6×61 芯)钢丝绳(破断拉力总和 4 780 kN)为主钢丝绳。

5) 吊装架计算

选材为冷弯矩形方管 200 mm×200 mm×6 mm(Q235 材质), 长度 6.12 m, 宽度 4.56 m, 吊装架受到对角线方向轴力为 750.1 kN, 构件压应力为 184.75 N/mm²; 吊装架受到平面长度方向轴力为 598.58 kN, 构件压应力为 178.56 N/mm²; 吊装架受到平面宽度方向轴力为 450.06 kN, 构件压应力为 117.88 N/mm², 计算各轴力方向杆件压应力均满足要求, 见图 3。

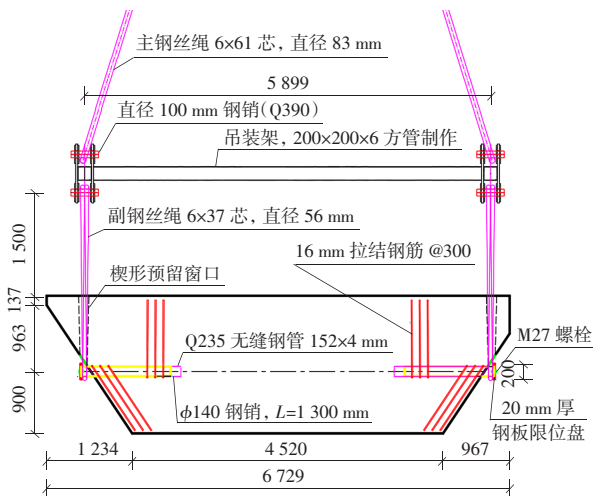


图 3 预制挡浪墙吊装剖面图(mm)

4 施工工艺

施工工艺流程主要包括: 施工准备→基础整平与找平层施工→预制构件运输与验收→吊装系统(吊装架、钢销、钢丝绳)组装→起重船定位与构件起吊→构件精准就位与调整→质量检查与验收→钢销拆除及吊装系统转移。各环节紧密衔接, 尤其注重潮汐窗口利用与海上作业协调, 确保在无掩护环境下安全、高效完成挡浪墙安装。

4.1 船机设备及施工准备

本工程选用船机为 1 600 t 起重船, 1 492 kW 起锚艇, 根据现场实际情况, 在东南防波堤上布设地锚(铅封 40 mm×12 m), 每间距 50 m 布设 1 个, 用于起重船施工过程中驻位带缆。

4.2 挡浪墙安装前基础施工

预制构件起吊前, 对构件强度进行检测^[2], 达到设计要求后, 方可进行起吊。因本工程预制挡浪墙墩台安装搁置面为大块石基础, 基础整平较为困难, 使用反铲将块石粗平, 其大块石间缝隙使用二片石填充, 其上浇筑一层混凝土找平层, 厚度 5 cm, 混凝土强度等级为 C20。施工前, 在找平层两侧按照设计要求的顶面高程放置轨道, 使用 10 号槽钢作为刮杠, 对混凝土找平层进行刮平, 待一个潮水过后, 进行预制挡浪墙的安装。本工程二片石材料、混凝土材料等均通过自航方驳运至施工地点, 使用长臂反铲上料。

4.3 吊装架、钢丝绳、钢销组装

本工程共定制 1 套吊装架、2 组钢销、1 组钢丝绳(4 根主钢丝绳、4 根副钢丝绳)。安装时先将副钢丝绳穿过顶面楔形预留口, 侧面使用人工将钢销安装至侧面预留孔洞, 穿过钢丝绳, 安装限位钢板。起吊时, 先将 4 根副钢丝绳穿过吊装孔, 下放到插销位置, 并富裕一定的长度, 便于钢插销安装, 然后使用人工将插销插入钢丝绳, 起重船缓慢起勾起吊预制构件。构件安装完成后, 需要拆除钢插销, 考虑现场潮水情况, 高潮期间, 人员站立在防波堤两侧的四脚块顶面, 将钢插销拔出(现场配有交通船, 可配合拉拔钢插销)。因钢插销重量较大, 为方便施工, 在钢插销外端焊接一个拉环, 使用 $\phi 16$ mm 钢丝绳将拉环与吊装架栓在一起, 待插销拉出后, 随吊装架一起转移。

4.4 预制挡浪墙吊装

预制构件安装前, 提前将构件的中心线使墨斗放样^[3], 分别在预制构件的顶面及侧面画出中心线, 并在找平基础上画出构件安装位置的外轮廓线, 安装时对准中线及外轮廓线进行安装。

起重船达到安装位置后, 缓慢下放构件, 待构件距安装面高差为 0.5 m 时, 停止下放, 扶住构件的四角, 按照提前画好的标记线, 调整构件的位置, 待无误后, 下放吊钩, 将构件缓慢放置在找平基础上, 起重船吊装预制构件示意图如图 4 所示。

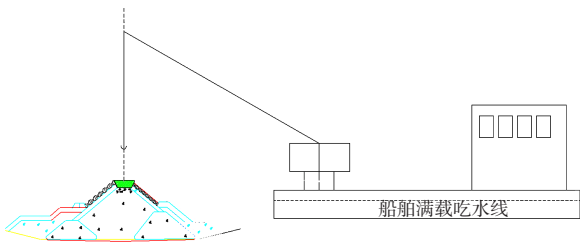


图4 起重船吊装预制构件示意图

因本工程防波堤顶面高程低于设计高水位，受潮水影响较大，为保证施工效率，高潮期间，提前在所需要安装的构件位置前一个位置粗安装一块挡浪墙，人员站立在已经安装的构件顶面，对需要安装的构件进行轴线位置调整。

预制构件安装前由测量员对预制挡浪墙安装位置放样轴线及安装边线^[4]，同时标出预制构件的中心线。预制构件安装完成后，测量预制构件四角位置是否符合规范允许误差，不合格继续起吊，调整位置。直至位置合格后，拔出钢销，进行下一块预制构件起吊。

5 经济效益

为综合评价工艺优化与设计调整的经济效益，对原现浇方案与优化后的预制安装方案进行了详细的成本对比分析。原设计成本如表1所示，优化后成本如表2所示。

表1 原设计成本表

项目名称	工程量	单价/元	合价/元
挡浪墙钢筋	360.94 t	6 549.99	2 364 153.39
挡浪(汛)墙-C40F350	5 011.71 m ³	1 097.04	5 498 046.34
灌砌块石-C30F250 细石	4 235.23 m ³	589.20	2 495 397.52

表2 设计优化后成本表

项目名称	工程量	单价/元	合价/元
挡浪墙钢筋	324.15 t	6 549.99	2 123 146.51
挡浪(汛)墙-C40F350	9 391.54 m ³	746.93	7 014 819.98
灌浆-C30F250	314.20 m ³	406.93	127 857.41
吊环-Q235 圆钢	4.29 t	6 549.99	28 099.46
挡浪墙安装	74 块		618 000.00

原设计成本 1 035.76 万元，设计优化后成本 991.19 万元，通过技术变更，有效节约成本 44.57 万元。

吊装架配钢销与吊环和马腿盒比较优点如下：

1) 相较于吊环，每段挡浪墙需设直径 100

mm，长度 10 m 的吊环，62 块挡浪墙共需 61 t，加工成品吊点市场价约 5 200 元/t^[5]，节约成本 31.72 万元。

2) 在预制期间减少传统吊点埋设施工设备的投入，减轻后期安装后需进行吊点割除、防腐及表面恢复等工序。

3) 此工艺钢销为反复利用，钢销插拔相较马腿及吊环卡环等工艺更为便捷，提高了现场施工效率，吊装架起到了吊装稳定，并且该项目为外海无掩护作业，海上施工条件较差，用吊装架进行起重吊装，提高了安装精度，且吊装孔位置与钢丝绳及吊装架 3 点为同一直线，减小了钢丝绳的受力，提高了现场施工的安全性。

通过吊装方式选择上，在保证现场安装质量及施工安全的前提下，有效节约成本 31.72 万元。合计节约成本 76.29 万元。

6 结语

本研究针对外海无掩护环境下斜坡式防波堤挡浪墙施工面临的工期紧张、海况制约等难题，通过工艺优化与设计调整，将原现浇结构改为预制安装结构，并创新采用吊装架配合钢销的吊装工艺。实践证明，该方案显著提升了施工效率，将计划工期压缩至 90 d，并在保证质量与安全的前提下，成功克服了外海作业时间短、通行条件差等不利影响。通过优化吊装方式与调整结构形式，提升了经济效益，共计节约成本 76.29 万元，实现了技术可行性与经济合理性的统一。

该成果为类似外海无掩护、低潮位出水的斜坡堤上部结构施工提供了可靠的技术路径与工艺参照，尤其为预制构件在复杂海况下的高效、安全安装积累了实践经验。未来，将进一步推广该工艺在相关工程中的应用，持续推动外海防波堤施工技术向装配化、高效化方向发展。

参考文献：

- [1] 李三星. 某“一带一路”港口护岸结构设计优化与实施[J]. 铁道建筑技术, 2022(11): 104-109.
- [2] 宋建东, 王刚, 赵凯. 中外斜坡式防波堤结构设计方法对比[J]. 港工技术, 2022, 59(2): 32-36.
- [3] JTS 208—2020, 防波堤与护岸施工规范[S].
- [4] 方波, 薛丁源, 杨小龙, 等. 大越浪下堤后建筑单体波浪冲击力计算方法[J]. 水运工程, 2024(2): 60-65.
- [5] 张雷. 新旧版《沿海港口水工建筑工程定额》对比分析研究[J]. 财会学习, 2021(29): 154-155.