



## 装配式沉箱墩码头结构研究与优化

张 飞, 孟 超, 唐军军, 张 弛

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 在目前用海政策下, 码头采用透水结构更为可行。结合工程实例, 综合考虑自然条件及使用要求, 针对常规透空沉箱墩在低高程、大荷载、浅基岩情况下存在的问题, 通过理论计算及物理模型试验, 对结构进行受力分析对比, 并从方便施工角度进行优化, 提出装配式沉箱墩码头结构。新结构能够满足码头面低的使用要求, 承受较大使用荷载和波浪力, 提高了对基础不均匀沉降的适应性, 为在地质条件不适宜采用桩基结构的地区建设透空码头结构, 提供了经济性更好、施工便利性更强的结构选型。装配式沉箱墩码头结构已在日照岚山港区得到应用, 可为类似条件下建设透水码头结构提供借鉴。

**关键词:** 透水码头; 装配式; 预制构件

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0027-05

### Research and optimization of prefabricated caisson pier wharf structure

ZHANG Fei, MENG Chao, TANG Junjun, ZHANG Chi

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Under the current policy of sea area use, application of permeable wharf is more viable. This paper combines engineering example, comprehensively considers natural conditions and usage requirements, and addresses problems of conventional pier wharf under low elevation, heavy load and shallow batholith conditions. Through theoretical calculation and physical model tests, the structure is analyzed and compared for stress, and optimized from the perspective of convenient construction. A prefabricated caisson pier wharf structure is proposed. The new structure can meet the requirements of low elevation of wharf surface, resist considerable service loads and wave force, improve the adaptability to uneven settlement of the foundation, and provide a more economical and convenient structural selection for the construction of permeable wharf structures in areas where geological conditions are not suitable for using pile foundation structures. The prefabricated caisson pier wharf has been applied in the Lanshan Port area of Rizhao, which provides reference for the construction of permeable wharf under similar conditions.

**Keywords:** permeable wharf; prefabricated; prefabricated unit

近年来, 我国港口建设更加注重低碳、环保绿色发展, 新的用海政策对港口建设的生态化提出更高的要求。越来越多的码头采用透水结构, 以减少对周边海洋环境的影响。常见的透水码头结构主要为桩基或重力墩式。当表层土厚度较大, 可持力土层与基岩顶面偏低, 从结构形式对地基

的适应性而言, 多采用桩基码头结构<sup>[1]</sup>; 在岩面较浅、覆土厚度不足或桩基施工难度较大区域, 多采用重力墩码头结构。对于岩面浅且起伏较大、波浪条件复杂、码头面低以及使用荷载大的情况, 采用桩基结构施工难度较大、造价高, 而采用常规重力墩式码头结构则难以满足码头上部结构承

收稿日期: 2023-07-17

作者简介: 张飞 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口水工结构设计工作。

受较大波浪浮托力和使用荷载的要求,且重力墩式码头结构还要求对基础不均匀沉降有较强的适应性。

针对波浪和地质条件较为复杂情况下的透空结构,目前已有众多学者进行了多方向、多维度的研究和优化。郭来娣<sup>[2]</sup>对重力墩式码头上部墩台底部波浪浮托力进行计算分析,讨论不同规范中计算方法的适用性;李成强<sup>[3]</sup>对椭圆沉箱墩式码头的波浪力进行计算,分析波浪环境下沉箱的运动响应;苟文杰等<sup>[4]</sup>对采用承插式预制装配式桥墩与现浇施工桥墩的受力性能进行分析,结果表明装配式构件受力性能与现浇式受力性能相近;高鹏等<sup>[5]</sup>研究高桩梁板码头通过上部结构受力及桩长的综合比选确定码头面高程的问题。

本文从结构受力及施工便利性角度进行优化,提出符合用海政策的装配式沉箱墩结构,针对性解决常规透空沉箱墩结构对于同时适应岩面变化明显、波浪复杂、使用荷载大、码头面高程低等复杂情况,在设计、实施及使用中存在的问题。目前该透水沉箱码头结构在日照岚山港区得到应用,已完成主体结构的施工,部分交工并投入使用,效果良好。

## 1 工程概况

### 1.1 结构方案

工程位于日照港岚山港区南作业区<sup>[6]</sup>,建设2个10万吨级通用泊位及1个2万吨级通用泊位(水工结构按20万吨级预留),码头断面见图1。

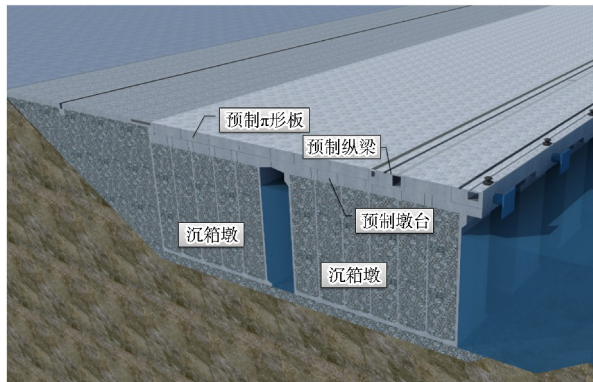


图1 日照岚山港区透水沉箱结构

码头结构以粗砂层作为持力层,码头主体采用沉箱墩结构,沿码头长度方向沉箱墩中心距21.24 m,码头宽度方向由海、陆侧两个沉箱墩组成,沉箱顶高程3.0 m,底高程均为-20.0 m。沉箱上部安放预制墩台,通过预留孔洞与沉箱顶部伸出钢筋现浇连接。墩台上安放预制纵梁,并通过预留钢筋与墩台连接。在两个沉箱墩之间,预制纵梁简支安放于两侧沉箱墩台。墩台上安装预制 $\pi$ 形板,形成码头面。

### 1.2 设计波浪

码头前沿设计波要素波高 $H_{1\%}$ 为3.95 m,周期 $T$ 为8.9 s。

### 1.3 工程地质

工程区域内岩土层自上而下依次为淤泥、填土、黏土、粗砾砂、中粗砂、全风化岩、强风化岩、中风化岩等。其中粗砾砂层和强风化岩-中风化片岩层承载力较高,可作为重力式结构的持力层。

### 1.4 建设难点

1) 泥面高程约-7.0 m,岩面高程为-25~-20 m,基岩较浅且高程变化明显。结构设计时一方面考虑地基基础的衔接,另一方面考虑因基岩高程变化导致不均匀沉降对结构的影响。

2) 码头要求按照120 kPa临时堆载控制,码头面荷载较大。

3) 为便于统筹使用,码头面高程较低并与周边一致,上部结构受波浪影响较大,采用常规的现浇方式,需赶潮施工,导致窗口期极短影响效率,施工质量难以保证。

## 2 常规重力墩码头结构

### 2.1 结构方案

常规重力墩式码头(图2)多采用简支搭接或整体现浇的上部结构。在沉箱上部现浇墩台、胸墙、支座梁、纵梁,相邻沉箱间通过预制梁系连接,梁系上部安放预制面板。若结构采用整体现浇的方式,则面板上部再现浇形成整体。

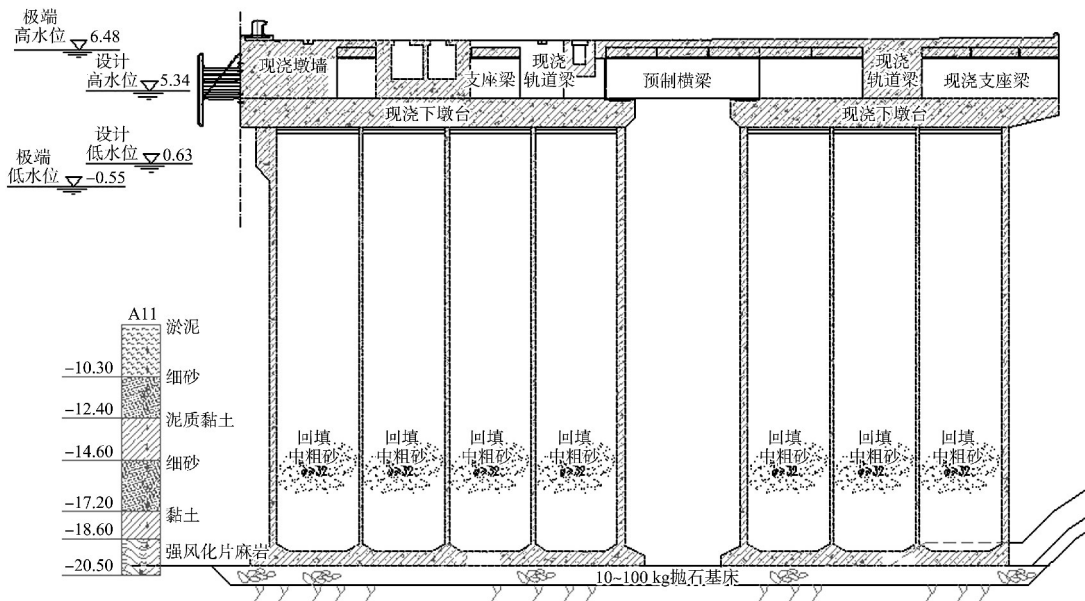


图 2 常规重力墩式码头上部连续板重力式结构 (单位: m)

## 2.2 存在问题

1) 常规重力墩式码头上部结构复杂, 现浇量大, 受波浪影响, 施工速度慢。当重力墩码头面顶高程较低, 上部结构由预制及现浇构件组成, 现场浇筑受制于施工水位, 往往需要赶潮作业, 施工窗口期短, 影响工程进度。

2) 上部结构若采用简支搭接, 则对波浪作用适应性较差。当波浪较大时, 浮托力可能超过梁板自身重力, 将梁板掀起, 带来安全隐患。若全部依靠简支梁板自身重力抵抗浮托力, 工程量增加较多, 并导致自重过大, 超出基础承载力; 若采用抗拉支座, 一方面增大投资, 另一方面因支座位置处于水位变动区或浪溅区, 梁板下长期聚集高浓度海盐气体, 且高温、高湿<sup>[7]</sup>, 抗拉支座的耐久性难以保证, 一旦损坏难以更换。

3) 上部结构若采用整体连接, 则对基础不均匀沉降适应性较差。上部结构整体连接的方式可抵抗波浪及使用荷载的双向作用, 但重力墩结构由于持力层土层性质存在差异且基床厚度不均, 不可避免会产生不均匀沉降<sup>[8]</sup>, 而上部结构整体连接方式的受力对不均匀沉降特别敏感, 使用一段时间后, 容易在现浇部分形成破损, 尤其是沉箱边缘位置的码头面极易产生裂缝。常见不均匀沉降破损情况见图 3。



图 3 常见不均匀沉降破损情况

## 3 结构优化

### 3.1 优化思路

1) 上部结构采用预制装配式, 构件全部预制, 仅在连接处进行少量现浇, 最大限度减少施工, 缩短工期。

2) 上部结构与下部沉箱通过伸出钢筋局部现浇连接成整体, 波浪浮托力可利用码头结构整体自身重力抵抗, 同时通过在翼板根部进行加强的方式, 抵抗向上的波浪冲击力以及向下工艺荷载。

3) 上部结构整体安装在单个沉箱墩上, 彼此间相互独立并设置结构缝, 增加对不均匀沉降的适应性。

### 3.2 装配式上部结构

#### 3.2.1 墩台结构

沉箱上部安放预制墩台 (图 4), 墩台通过预



留孔洞与沉箱顶部伸出钢筋现浇连接。墩台上部为预制  $\pi$  形板, 两者间也通过顶预留孔洞位置伸出钢筋现浇连接。上部结构与下部沉箱通过墩台连接为整体, 依靠自身重力抵抗波浪浮托力。

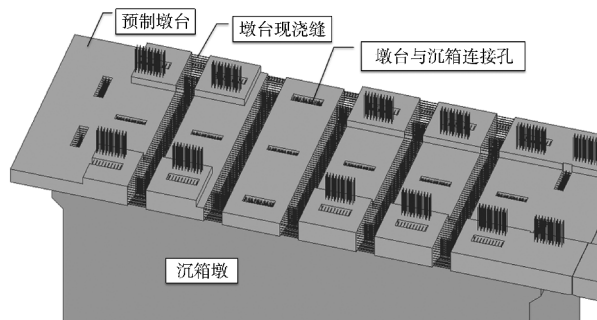


图4 预制墩台结构

### 3.2.2 $\pi$ 形板结构

$\pi$  形板结构主要由面板部分及两个支腿组成, 断面形似符号  $\pi$ , 见图 5。支腿位置预留现浇孔洞, 与墩台相连形成整体, 面板上部浇筑磨耗层形成码头面。 $\pi$  形板结构尺寸可根据构造需求、施工起吊能力进行调整, 针对不同的荷载条件, 可通过调节  $\pi$  形板悬臂部分厚度和配筋率的方式确保安全性和经济性, 增强结构对不同条件的适应性。

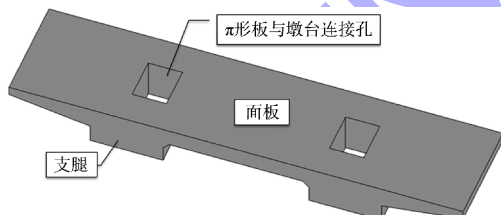


图5  $\pi$  形板结构

### 3.3 独立单元结构

以单个沉箱墩结构作为独立单元, 上部墩台结构、 $\pi$  形板结构均与沉箱墩对应, 相邻沉箱墩的上部结构设有结构缝, 可实现沉箱墩及对应的上部结构独立受力, 减小整体式上部结构对不均匀沉降的高度敏感性, 有效提升不同地质条件地基的适应性。装配式沉箱墩结构立面见图 6。

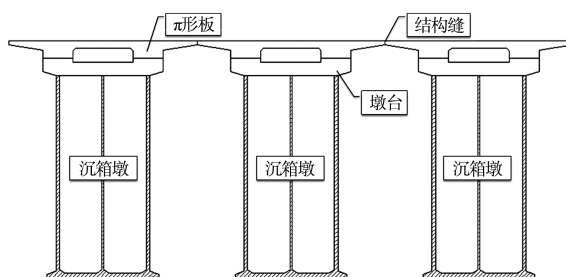


图6 装配式沉箱墩结构立面

### 3.4 上部结构安装

装配式上部结构有效减少现场作业量, 提高施工速度。沉箱墩安放之后, 在预制墩台预留孔处, 墩台与沉箱均留有外伸钢筋, 现浇预留孔即可连接为整体。墩台安装完毕后, 吊装预制  $\pi$  形板, 在  $\pi$  形板支腿预留孔洞处也留有外伸钢筋, 现浇即可连接为整体。 $\pi$  形板上部现浇磨耗层形成码头面, 通过控制磨耗层厚度形成码头面的排水坡。根据使用需求, 可在部分位置将  $\pi$  形板替换为纵梁, 相邻沉箱中间的纵梁简支安放, 通过控制纵梁自身重力抵抗浮托力, 并保证单个沉箱墩的独立性。码头结构三维示意图见图 7。

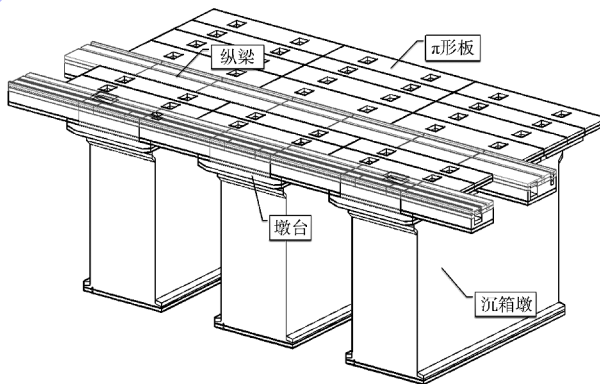


图7 码头结构

## 4 波浪力计算

沉箱间  $\pi$  形板悬臂部分的波浪受力情况十分复杂, 波浪能量聚积, 板底的局部最大冲击压强没有可靠的计算方法。因此, 在进行理论计算的同时, 还开展了波浪整体物理模型试验, 并对比两者的计算结果。

### 4.1 模型布置

工程波浪整体采用 1:45 的正态物理模型 (图 8) 进行试验<sup>[9]</sup>, 根据重力相似设计模型、准确模拟, 并与原型实现几何相似。



图 8 模型试验

### 4.2 模型试验结果

工程上部结构所受波浪力情况较复杂, 受到沉箱间反射、后方岸壁间反射等因素影响, 目前尚无成熟的计算方法, 暂采用规范中离岸式高桩码头面板底部波浪浮托力公式进行试算。与物模试验结果对比显示, 冲击压强理论计算值比物模试验极值偏大约 1.6~1.7 倍。50 a 一遇波浪作用下  $\pi$  形板波浪力试验结果见表 1、图 9。

表 1 50 a 一遇波浪作用下  $\pi$  形板波浪力试验结果

水位/m	冲击压强/kPa	
	物模试验	理论计算
极端高水位 6.48	23.62~64.57	113.53
设计高水位 5.34	11.91~69.53	117.37
不利水位 5.79	22.34~84.41	130.08

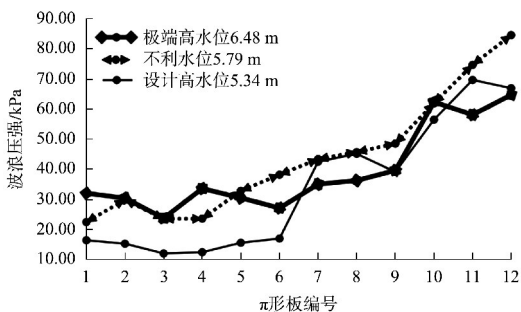


图 9 不同位置的  $\pi$  形板受波浪力计算结果

$\pi$  形板内力计算采用有限元计算方法, 考虑最不利工况下的荷载组合进行控制。计算结果 (图 10) 表明,  $\pi$  形板内力最大的位置在悬臂根部, 受到向上的波浪浮托力和向下的使用荷载作用。因此, 设计  $\pi$  形板悬臂端部厚度较小, 悬臂根部加厚并提高配筋率, 以满足安全和使用要求。

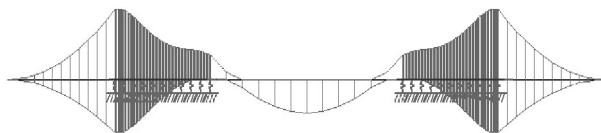


图 10  $\pi$  形板弯矩计算结果

### 5 结论

- 1) 装配式沉箱墩码头结构主要构件均为预制, 实现工厂流水化制作, 现场装配式施工, 仅在预留孔洞进行现浇连接, 有效减少水上现浇工作量, 缩短工期。
- 2) 装配式沉箱墩码头结构受力巧妙, 不仅借助下部结构自身重力承受波浪浮托力作用, 而且各单元相互独立, 对地基沉降适应性良好。
- 3) 预制构件形式灵活、制作方便, 可通过调整预制构件尺度或结构形式适应不同码头使用要求, 适用性较强。
- 4) 波浪情况的复杂性决定了波浪力分析计算必须开展物理模型试验, 并与理论计算进行对比, 为确保结构安全, 建议结构内力计算时取大值控制。

### 参考文献:

- [1] 李元青, 赵丽娟. 蛇口集装箱码头二期工程码头结构选型[J]. 水运工程, 2003(5): 28-32, 53.
- [2] 郭来娣. 重力墩式码头上部墩台波浪浮托力计算方法的探讨[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(11): 244-245, 248.

(下转第 96 页)