



浅基岩大荷载透水沉箱码头结构应用及优化

张 飞，张 弛，王争明

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：用海政策调整后，传统满堂式沉箱结构+后方回（吹）填方案在获得用海许可存在困难。结合工程实例，通过理论计算和物理模型试验对比，在结构受力、构造及施工方面进行优化，提出沉箱墩+叠合板结构方案，具有岩面浅、波浪高且使用荷载大的特点。该方案在日照港岚山港区得到成功应用，码头运营状况良好，取得良好经济效益，可为类似条件下码头的设计和建设提供借鉴。

关键词：用海政策；透水码头；波浪力

中图分类号：U656.1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)11-0076-06

Application and optimization of permeable caisson wharf structure under large load in shallow bedrock

ZHANG Fei, ZHANG Chi, WANG Zhengming

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

Abstract: After adjustment of the sea use policy, the traditional contiguous scheme with caisson structure + rear backfilling/dredger filling makes it difficult to obtain approval for sea use. Combined with engineering examples, through the comparison of theoretical calculation and physical model test, this paper optimizes the structure force, structure, and construction and proposes the caisson pier + composite slab structure scheme, which has the characteristics of shallow bedrock surface, high wave, and large load. The scheme has been successfully applied in Lanshan Port Area of Rizhao Port. The operation of the wharf is in good condition, and good economic benefits have been achieved, which provides a reference for the design and construction of the wharf under similar conditions.

Keywords: sea use policy; permeable wharf; wave force

传统满堂式沉箱码头结构主要由抛石基础、沉箱、上部胸墙、后方抛石棱体及填料组成，适用于基岩较浅或其他具有良好持力层的地质情况，具有造价适宜、荷载适应强、耐久性好等优点，在工程中得到广泛应用。

针对使用过程中遇到的新情况，众多研究人员从波浪受力计算、结构设计、施工等方面进行研究和优化。周枝荣等^[1]提出斜向波作用在矩形重力墩结构上最大总水平波浪力简化计算公式；张亚敬等^[2]对矩形沉箱墩群受力作用进行了研究；张嵩云等^[3]对重力墩式码头上部结构连续布置方式进行了

研究；郭来娣^[4]对重力墩式码头上部墩台波浪浮托力计算方法进行研究；翁同和^[5]针对重力式墩码头在施工中出现的问题提出了解决措施。

2018 年 7 月《国务院关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知(国发[2018]24 号)》(以下简称“通知”)提出“除国家重大战略项目外，全面停止新增围填海项目审批”，因而对于非国家重大战略项目，传统满堂式沉箱结构+后方回(吹)填方案在用海方面存在困难。

本文提出的透水沉箱码头结构符合通知要求，并结合浅基岩、大荷载的情况，从结构受力、施

收稿日期：2023-01-13

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。

工及使用角度进行优化, 针对波浪力取值的难点问题, 采用物理模型试验及理论计算进行比较选用。目前该透水沉箱码头结构在日照岚山港区得到成功应用, 项目已竣工并投入使用, 效果良好。

1 项目概况

1.1 结构方案

项目位于日照岚山港区, 新建 2 个 15 万吨级通用泊位(水工结构按 20 万吨级设计)^[6]。码头结构以强风化岩作为持力层, 主体采用沉箱墩结构, 沉箱墩底高程 -20.0 m, 顶高程 2.5 m, 沿码头长度方向宽 8.22 m, 中心距 16.5 m。码头宽度方向由海、陆侧 2 个沉箱墩组成, 沉箱上部现浇墩台, 沉箱间通过预制梁系连接, 上部设叠合板形成整体, 码头顶高程 7.0 m, 码头结构见图 1。

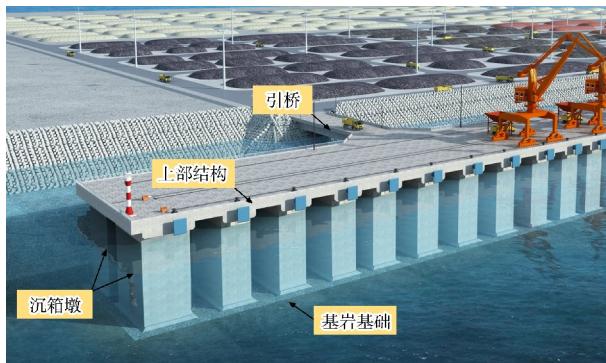


图 1 日照港岚山港区透水沉箱结构

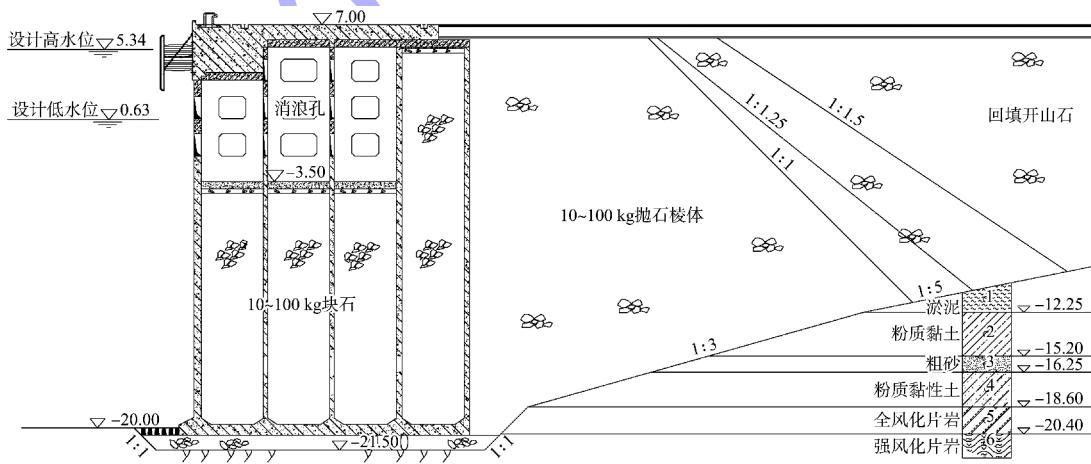


图 2 传统满堂式沉箱结构+后方回(吹)填方案断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2.2 方案优化

2.2.1 主体结构

主体结构优化分 2 个步骤开展, 首先对适用

1.2 结构特点

本项目结构有以下 4 个特点: 1) 泥面高程约 -8.0 m, 强风化岩面高程约 -20 m, 基岩较浅; 2) 码头可临时堆载, 按照 120 kPa 控制, 码头面荷载较大; 3) 为使用海易获批, 码头结构须为透空式; 4) 码头面高程与周边一致, 高程较低, 受波浪影响较大。

1.3 设计波浪要素

码头前沿设计波浪要素波高 $H_{1\%} = 3.84 \text{ m}$, 周期 $T = 8.9 \text{ s}$ 。

1.4 工程地质

在勘察深度范围内, 自上而下分为淤泥、吹填土、细砂、粉砂夹层、粉质黏土、中粗砂、全风化片麻岩、强风化片麻岩、中风化片麻岩。其中, 强-中风化片麻岩在场地分布均匀, 承载力高, 变形低, 稳定性好, 是理想的地基持力层。

2 结构优化

2.1 传统满堂式沉箱结构+后方回(吹)填方案

码头主体结构由钢筋混凝土沉箱及现浇混凝土胸墙构成(图 2), 后方回(吹)填形成陆域。在 2018 年通知出台后项目建设存在围填海问题, 且相关海域主管部门提出码头主体结构应保证一定的透空率, 故原方案不满足通知要求。

于当地自然条件的、常用的沉箱墩及桩基透空结构进行初步比选, 确定沉箱墩结构更为适宜, 再对不同沉箱墩间距进行比选。

综合考虑自然条件、使用及通知要求,初步选定沉箱墩结构及嵌岩桩基结构。地勘资料显示,强风化岩以下 15 m 范围内分布碎屑状、碎块状强风化岩,未见中风化岩。若采用嵌岩桩基结构,桩基入岩深度需达到 20~30 m, 嵌岩工作量巨大,另嵌岩桩结构对荷载变化适应性较差,且每延米造价比沉箱墩式结构高 12% 左右。经过初选,码头主体采用透空沉箱墩结构方案。

在初选的基础上,考虑沉箱墩间距不同直接影响受力方式及造价,结合透空率要求及当地施工能力,选用 2 种沉箱墩中心距进行比选,即沉箱墩+叠合板方案(中心距 16.5 m)和沉箱墩+箱梁方案(间距 24.0 m)。经过对比,沉箱墩+叠合板方案在造价上稍占优势,每延米造价节省约 6%。从施工难易考虑,沉箱墩+箱梁方案需制作并安放预应力箱梁数量较多;需安放抗拉支座,且其耐久性较差,出现损坏难以修复。故推荐采用沉箱墩+叠合板方案。

2.2.2 上部结构

码头面高程取与周边项目一致,为 7.0 m,而极端高水位为 6.48 m,码头面仅在极端高水位以上 0.5 m 左右,码头上部结构受波浪力及工艺荷载双向作用。从受力角度考虑,上部预制梁板预留水平向外伸钢筋,与现浇部分现浇成一个整体,并与下部结构的外伸钢筋也现浇在一起,以抵抗波浪力作用;从施工角度考虑,墩台采用下层预

制、上层现浇方式,下层预制墩台兼做模板,有效加快施工进度。

2.2.3 其他

1) 透空率。通知对结构透空率无明确要求,根据工程需要,按照不低于 50% 透空率考虑。码头结构采用前后双排沉箱墩式结构,码头纵横向均为透空式,可增加水体流动性,码头范围平面投影透空率达到 62%。

2) 码头面宽度。后方已建斜坡护岸距码头前沿 100 m,为保证足够的码头面宽度,项目采用开挖临时边坡+后期防护、码头结构后沿悬挑等方式,形成码头面宽 42 m。

3) 不均匀沉降。上部结构与沉箱墩连接为一个整体,结构受力对不均匀沉降尤为敏感。码头结构以基岩作为持力层,不均匀沉降主要来自抛石基床。通过调整沉箱底高程,将基床厚度控制在 1~2 m。

2.3 沉箱墩+叠合板结构方案

通过上述优化,最终形成沉箱墩+叠合板方案码头结构方案。码头主体采用沉箱墩结构。码头长度方向沉箱墩中心距 16.5 m;码头宽度方向由海、陆侧 2 个沉箱墩组成,净距 5.9 m,沉箱顶高程 2.5 m,沉箱上部设墩台,其上部现浇胸墙、支座梁、横梁及轨道梁,梁系上部安放预制面板,再整体浇注,结构断面见图 3。

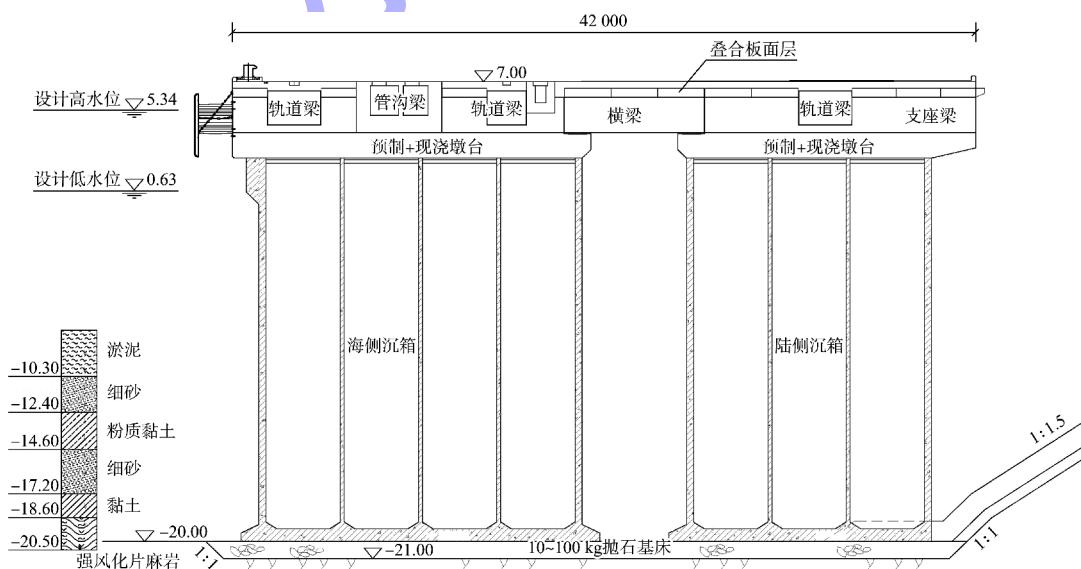


图 3 沉箱墩+叠合板结构方案断面 (高程: m; 尺寸: mm)

3 波浪力计算

针对优化方案的海、陆侧沉箱按独立结构分别进行稳定性计算。相对传统满堂式沉箱结构, 透空式双排沉箱墩结构波浪力尚无成熟的计算办法, 鉴于此, 在进行理论计算的同时, 开展波浪整体物理模型试验, 并对两者计算结果进行对比。

3.1 模型布置

波浪整体物理模型采用正太模型, 按重力相似模型设计, 模型比尺 1:45, 波向为 ESE 和 SE 两个波向, 模型范围包括拟建码头及后方护岸, 波浪整体物理模型见图 4。

3.2 沉箱结构理论计算与模型试验结果对比

沉箱结构所受压强及波浪力作用的理论计算值与模型试验值对比见表 1 和图 5。由表 1 和图 5 可知: 1) 波浪水平压强的物模试验结果基本为梯形分布。最大压强理论计算值在极端高水位时介于海侧与陆侧沉箱物模试验值之间, 设计高水位

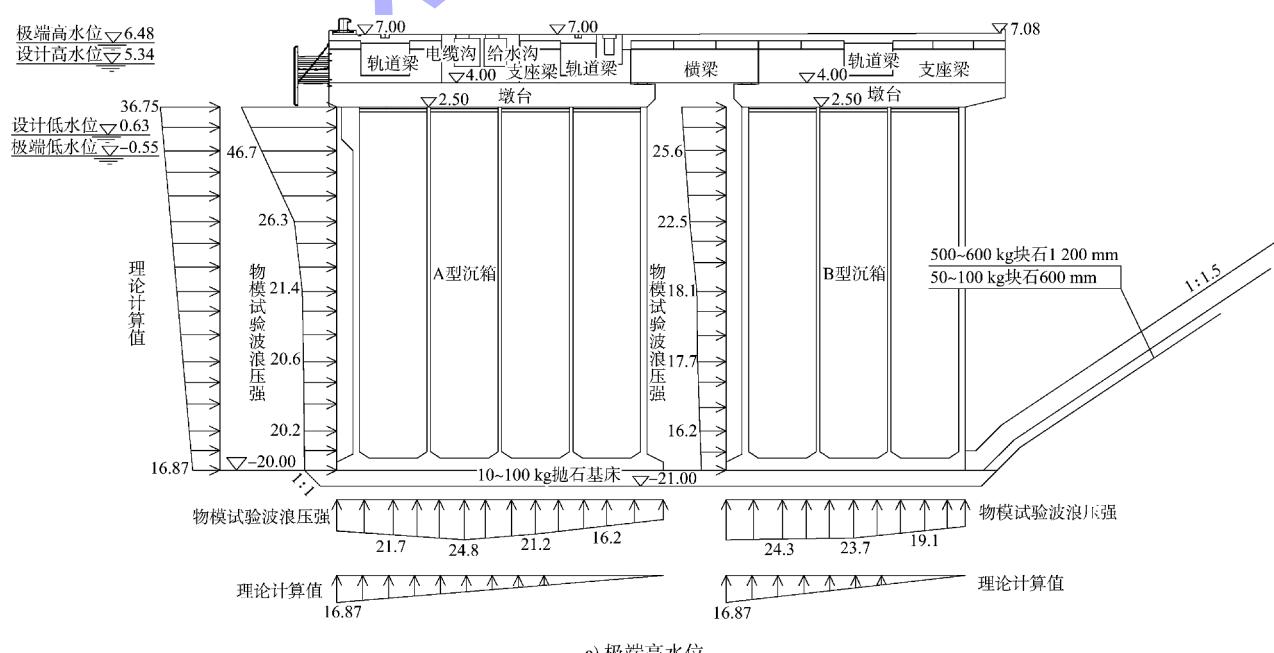


图 4 波浪整体物理模型

时小于海侧与陆侧沉箱物模试验值, 设计低水位时大于海侧与陆侧沉箱物模试验值。试验显示, 海侧沉箱对陆侧沉箱的掩护作用并不明显, 尤其在设计低水位时, 陆侧沉箱的波浪压强大于海侧沉箱。2) 海侧沉箱水平波浪力理论计算值比物模试验大 5%~24%。

表 1 最大压强和波浪力理论计算值与物模试验值结果对比

水位	方法	最大水平压强/kPa		波浪力/(kN·m ⁻¹)		最大竖向压强/kPa		波浪托浮力/(kN·m ⁻¹)	
		海侧沉箱	陆侧沉箱	海侧沉箱	陆侧沉箱	海侧沉箱	陆侧沉箱	海侧沉箱	陆侧沉箱
极端高水位	理论计算值	36.75	36.75	603.26	603.26	16.87	16.87	170.93	125.21
水位	物模试验值	46.70	25.60	486.50	473.97	24.80	24.30	—	—
设计高水位	理论计算值	33.37	33.37	550.31	550.31	15.61	15.61	158.18	115.86
	物模试验值	44.50	40.60	522.87	494.77	26.60	28.40	—	—
设计低水位	理论计算值	30.09	30.09	503.88	503.88	15.65	15.65	158.49	116.09
水位	物模试验值	16.40	20.70	411.19	343.07	12.00	13.10	—	—



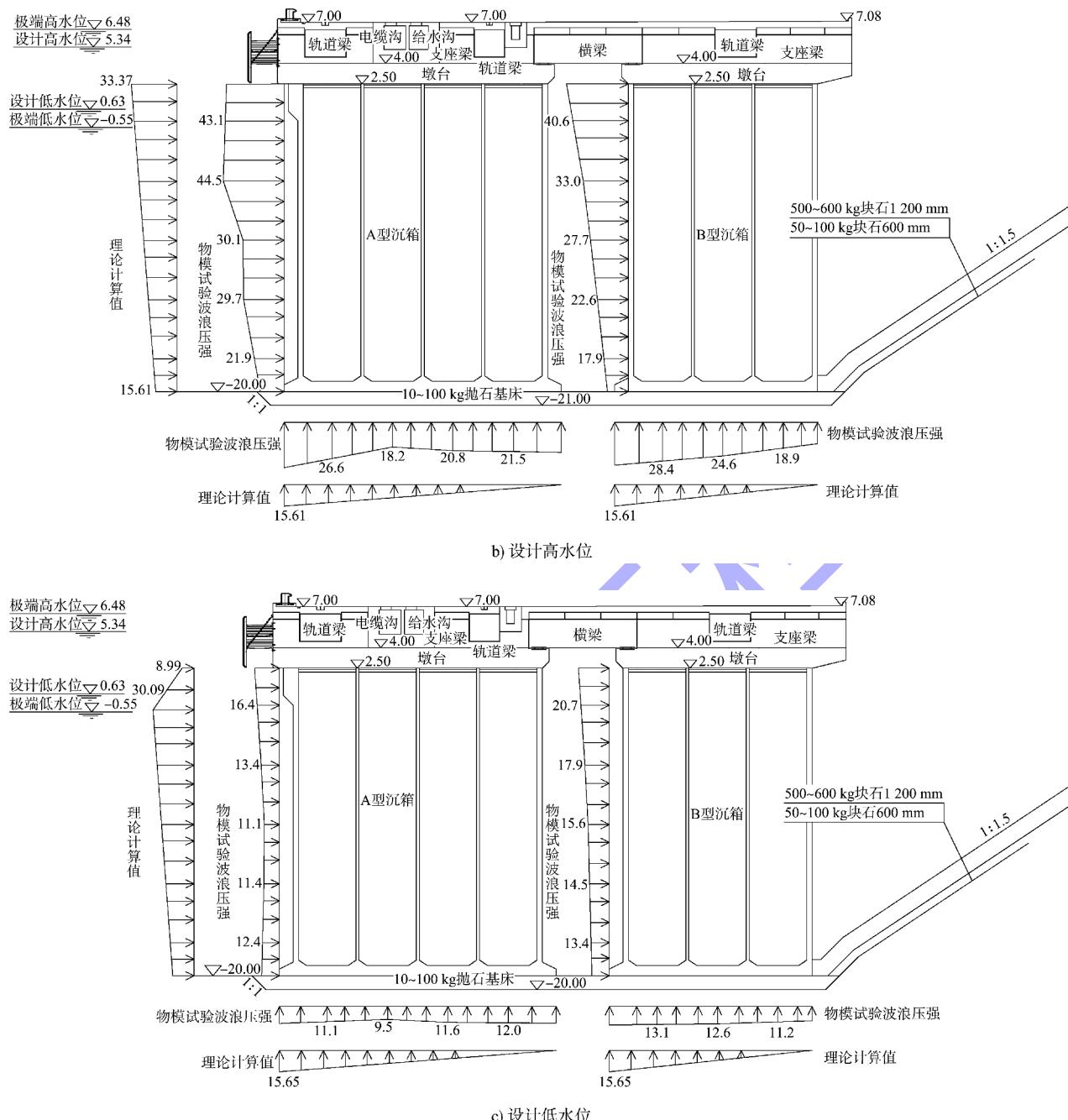


图 5 波浪压强理论计算值与物模试验值对比 (压强: kPa, 高程: m)

3.3 上部结构理论计算与模型试验结果对比

对于透空式双排沉箱墩结构上部梁板所受的波浪浮托力, 目前尚无成熟计算方法, 暂采用 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[7]中离岸

式高桩码头面板底部波浪浮托力的公式进行试算, 与物模试验结果对比显示, 二者均布压强接近, 而冲击压强理论计算值偏大 1 倍以上, 见表 2。

表 2 50 a 一遇波浪作用下沉箱波浪正向压强试验结果

方法	均布压强/kPa			冲击压强/kPa		
	极端高水位 6.48 m	设计高水位 5.34 m	不利水位 5.070 m	极端高水位 6.48 m	设计高水位 5.34 m	不利水位 5.166 m
物模试验值	16.12~22.13	17.01~21.15	-	38.10~41.60	44.70~48.60	-
理论计算值	14	19	22	85	120	136

4 结论

1) 优化后的沉箱墩+叠合板结构方案对浅基岩地质有良好的适应性, 可承受双向荷载作用, 且为透空式, 满足现行用海政策要求, 具有一定的推广价值。

2) 波浪力的分析计算是本结构方案的难点, 需开展物理模型试验, 并与理论计算进行对比, 选择合适的波浪力或压强作为设计参数, 确保结构安全的同时, 可取得较好的经济性。

3) 在不同设计水位条件下, 水平波浪压强的物模试验值和理论计算值相比, 大小关系可能有变化, 建议结构内力计算时取二者中的较大值。

4) 结构物模试验结果显示, 海侧沉箱水平波浪力理论计算值比物模试验值大 5%~24%。

5) 上部结构是控制工程进度的重要节点, 构件尺度模块化可有效缩短工期。依据设备的起重能力, 应尽可能陆上预制、现场安装。

6) 沉箱墩+叠合板结构方案在日照港岚山港区得到成功应用, 码头于 2021 年 11 月投产至今,

运营状况良好, 取得良好经济效益。

参考文献:

- [1] 周枝荣, 邹颋. 斜向波作用下矩形重力墩式码头波浪力研究[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(9): 32-36.
- [2] 张亚敬, 刘海源, 刘鸣洋, 等. 波浪作用下矩形沉箱墩群受力规律试验研究[J]. 水运工程, 2022(7): 55-62.
- [3] 张嵩云, 毛卉. 组合截面沉箱墩式码头结构的分析及设计[C]//上海市水利学会. 上海市水利学会 2013 年年会. 上海: 上海市水利学会, 2013: 81-83.
- [4] 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.
- [5] 翁同和. 港口工程施工中重力式墩码头的应用[J]. 珠江水运, 2019(5): 71-72.
- [6] 中交水运规划设计院有限公司. 日照港岚山港区岚南 12#、16#泊位工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2019.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 75 页)

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 水运工程环境保护设计规范: JTS 149—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [3] 陈昂, 惠二青, 王乃泰, 等. 初期雨水的概念及特征研究[J]. 环境影响评价, 2022, 44(2): 58-62.
- [4] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 华锦建设集团股份有限公司. 城镇雨水调蓄工程技术规范: GB 51174—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [5] 郑瑞东. 港口初期雨水收集量探讨[J]. 市政技术, 2012, 30(3): 81-83.
- [6] 陆敏博, 朱伟峰, 刘畅, 等. 初期雨水径流管控现状与展望[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 102-109.

- [7] 陆荣海. 工业企业初期雨水收集和处理探讨[J]. 给水排水, 2008, 44(S1): 262-264.
- [8] 刘洪波, 高赛赛, 朱梦羚, 等. 初期雨水调蓄池的运行问题及解决方案[J]. 中国给水排水, 2014, 30 (17): 142-144.
- [9] 崔海云. 论初期污染雨水、后期清净雨水自然分流切换设计[J]. 给水排水, 1997, 23(8): 30-31.
- [10] 翁窈瑶, 唐颖, 宋利祥. 中、后期雨水收集分流优化[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(2): 53-60.
- [11] 云南省环境科学研究院, 上海交通大学, 北京大学. 高原湖泊城市河道初期雨水拦截技术规范: DB53/T 950—2019[S]. 昆明: 云南省人民出版社, 2019.
- [12] 北京市环境保护科学研究院, 中国环境科学研究院. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918—2002[S]. 北京: 中国环境出版社, 2002.

(本文编辑 王璁)