



开孔沉箱在改善码头波浪反射及上水中的应用

于志安, 刘 强, 杨晓彤

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对茂名博贺新港区通用码头工程特点, 结合开孔沉箱结构的应用原理, 分析其对本工程的适用性, 提出开孔沉箱方案以及实现开孔和提高消浪效果的结构措施。结合模型试验结果, 分析开孔沉箱对码头上水和波浪反射的改善效果, 并结合规范上水标准对码头前沿顶高程取值进行验证。

关键词: 开孔沉箱; 码头上水; 波浪反射

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)10-0075-05

Application of perforated caisson for improving wave overtopping and reflecting

YU Zhi-an, LIU Qiang, YANG Xiao-tong

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

Abstract: According to the engineering characteristics of Maoming Bohe new port general-purpose wharf and based on the application mechanism of the perforated caisson structure, we analyze its adaptability to this engineering, and put forward the scheme for the perforated caisson and the structural measures for realizing perforation and improving the wave-breaking effect. According to the model experiment result, we analyze the effect of the perforated caisson on wave overtopping and reflecting. The rationality of elevation of wharf apron is verified.

Keywords: perforated caisson; wave overtopping; wave reflecting

茂名港博贺新港区通用码头工程码头前波浪掩护条件一般, 存在波能集中、泊稳条件差等不利于船舶停靠作业的问题; 另外, JTS-165—2013《海港总体设计规范》^[1]针对码头前沿顶面高程确定的方法, 提出上水标准。茂名港博贺新港区通用码头工程在结构方案设计中考虑采用开孔沉箱方案以降低码头前沿波浪反射和上水, 并结合断面物理模型试验对开孔方案进行验证, 较好地解决了工程设计中的困难。

1 工程特点

1.1 工程概况

茂名港博贺新港区通用码头工程位于规划的博贺新港区港池的西北侧岸线, 拟建设 2 个 10 万

吨级、1 个 7 万吨级和 1 个 3.5 万吨级通用泊位(水工结构均按靠泊 10 万吨级船舶设计)以及 1 个工作船舶位。博贺新港区规划建设东、西防波堤形成环抱式港池, 口门位于港池东南方向, 本工程岸线正对港区防波堤口门(图 1)。

1.2 工程特点

1) 波浪掩护条件差。本工程强浪向和常浪向均为东南向, 防波堤的建设对工程区域形成掩护, 港池波浪条件有所改善, 但本工程岸线正对港池口门, 掩护条件较差, 防波堤实施后码头前沿极端高水位重现期 50 a 的 $H_{1\%}$ 设计波高达 5.67 m, 重现期 10 a 的 $H_{4\%}$ 设计波高达 3.64 m。码头前沿泊稳条件相对较差, 码头面高程需抬高较大。

收稿日期: 2016-06-16

作者简介: 于志安(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 注册土木工程师(港口与航道工程), 从事港口航道及海岸工程咨询与设计。

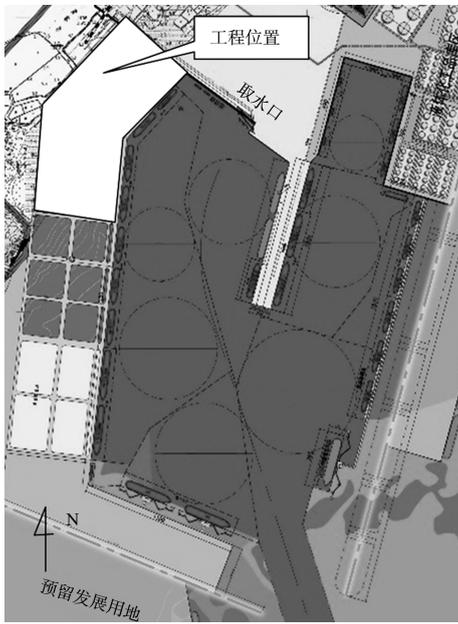


图1 港区规划

2) 工程位置特殊, 恶化泊稳条件。本工程位于港池最底部, 岸线与已建的粤电护岸工程轴线趋于垂直, 南北两段岸线形成夹角 140° , 使得本工程北端和岸线中部均处于波能集中区域, 自身泊稳条件差; 同时, 工程对面为粤电已建的直立式沉箱码头工程, 入射波浪经本工程与粤电码头直立岸壁的多次反射, 将更加恶化本工程泊稳条件, 甚至恶化整个港池的泊稳条件。

3) 工作船舶位对泊稳条件要求较高。本工程北段由于已建工程护岸影响, 水深较小, 为充分利用岸线, 同时解决运营初期博贺新港区配套辅助岸线尚未建设的问题, 在岸线 a 北段与已建工程衔接段建设 1 个工作船舶位。由于工作船舶位停靠船型较小, 作业对波浪条件比较敏感, 如果不采取措施, 拖轮、交通艇等小型船舶在此处停靠十分困难。

4) 预留集装箱作业功能, 沉箱前趾应力大。本工程现阶段实施为通用泊位, 随腹地经济发展及产业结构调整, 远期存在货种调整、改造成集装箱泊位的可能性, 为避免后期改造的难度大, 方案设计需考虑预留 65 t-65 m 集装箱岸桥作业的功能要求, 致使沉箱结构前趾应力大。

5) 工程区域强风化岩层埋藏较浅, 岩层顶面一般高于码头前沿底高程, 可以选作持力层, 其

容许承载力 $550\sim 650\text{ kPa}$, 须尽量采取措施降低前趾应力以满足地基承载力要求。

2 开孔沉箱方案

2.1 开孔沉箱适用性分析

开孔沉箱工作的原理是在沉箱迎浪面的上部设置空腔, 沉箱前壁与消浪室后壁之间存在一定的距离, 部分波浪传播进入沉箱空腔内经消浪室后壁反射再从沉箱开孔传出, 反射波与原行进波在沉箱前的水体振荡存在相位差, 相互抵消一部分能量; 部分波浪传播进入空腔内经多次反射, 能量在空腔内消耗殆尽, 从而降低码头前反射波高。开孔沉箱用于改善港区泊稳条件、降低结构承受波浪荷载在国内秦皇岛港^[2]、大连港、日照港^[3]等多个防波堤、码头工程中应用。

结合本工程特点, 开孔沉箱码头结构方案应用于茂名港博贺新港区通用码头工程具有以下优势:

1) 沉箱开孔可改善码头前的波浪反射, 降低码头前水域波高, 进而改善码头面上水情况, 降低码头面高程。

2) 可有效改善码头泊稳条件, 尤其是降低港池底部的波能集中效应, 改善工作船舶位作业条件, 提高泊位作业天数, 提升码头通过能力。

3) 外海波浪从口门传入后, 遇本工程开孔沉箱, 波能消耗, 反射波高降低, 可有效改善对岸一侧粤电大型散货泊位泊稳条件, 同时可以降低波浪的二次反射, 整个港池的泊稳条件都可以得到改善。

4) 本工程为满足结构抗滑、抗倾稳定性以及地基应力的计算要求, 需采用 4 排仓格沉箱, 具备形成一定宽度的消浪空腔的条件, 同时开孔沉箱在码头结构前面部分形成消浪空腔, 减小码头结构自重对前趾应力的贡献, 有效减小前趾应力, 以满足地基承载力要求。

经上述分析可知, 开孔沉箱方案在解决本工程码头上水、波浪反射等问题上具有较大的优势, 同时结构具备开孔消浪的条件, 因此开孔沉箱方

案对于本工程是适用的。

2.2 结构方案

结合结构稳定性及地基应力计算, 确定本工程开孔沉箱尺寸为 17.45 m×19.8 m×19.0 m, 码头前沿顶高程为 7.0 m, 底高程-16.0 m(图 2)。在方案设计时考虑以下结构措施:

1) 沉箱前壁及海侧纵隔墙设置矩形消浪孔, 海侧 2 排仓格的横隔墙设置开孔, 形成消浪室。依据重力式码头设计规范建议^[4], 使消浪孔宜设置在设计高、低水位上下一倍波高范围内, 开孔率依据防波堤设计规范建议^[5], 可取 20%~40%, 同时依据相关研究成果^[6], 开孔沉箱前壁开孔率 n 为 0.22~0.3 时, 消浪效果呈现最佳状态, 结构方案设计时, 考虑尽量降低沉箱前壁及纵隔墙结构内力, 方便钢筋布置, 消浪室底高程确定为 -5.0 m, 开孔率为 26%。为避免消浪室水流紊乱, 裹挟沉箱内填料, 消浪室底部回填块石, 并以大块石护面。

2) 为了提高极端高水位、设计高水位时码头消浪效果, 在沉箱海侧 2 排仓格顶部的现浇胸墙内也设置消浪孔。考虑尽量提高开孔率同时满足上部埋件及结构受力需要, 胸墙内消浪孔顶高程确定为 4.0 m。为胸墙浇筑分层方便以及后轨道梁的布置, 沉箱后两排仓格设置现浇混凝土盖板, 顶高程为 4.0 m。

3) 为避免波浪淘刷基床, 码头前沿采用栅栏板护底。

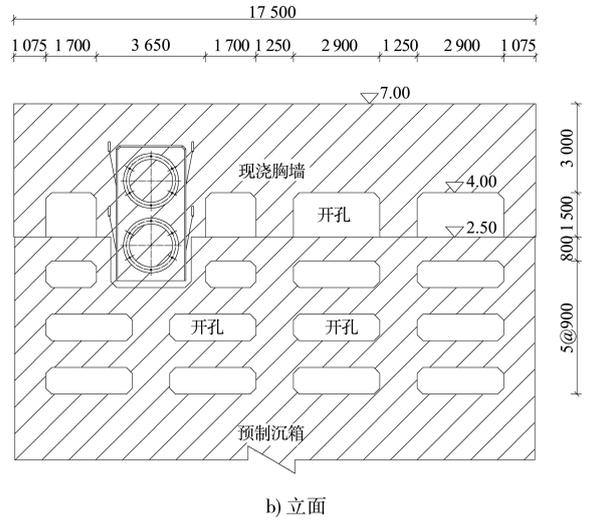


图 2 开孔沉箱方案结构(高程:m;尺寸:mm)

4) 为充分利用工程区域的中粗砂, 沉箱内以及后方以中粗砂回填, 同时为码头结构稳定需要以及施工便利, 在回填料底部设置半棱体。

3 模型试验

3.1 试验结果

为了验证开孔沉箱方案在改善码头波浪反射和上水的效果, 针对码头前沿顶高程确定的基本标准和复核标准工况以及船舶作业、离泊的工况开展了结构断面物理模型试验。模型试验分别针对沉箱开孔和不开孔, 测量了规则波和不规则波作用时码头上水及波浪反射情况。

在试验工况下, 沉箱开孔时码头面上水的主要表现形式为波浪冲击胸墙上的消浪孔, 产生向上冲击的掺气水体跌落在码头面上形成, 无连续水体越堤, 总体越浪量较小; 沉箱不开孔时, 码头面上水主要为波浪经直立式沉箱反射后, 沿码头立面壅高跌落在码头面上形成。码头上水及波浪反射情况如表 1、2 所示^[7]。

表 1 码头上水情况

水位	波浪重现期/a	波类型	越浪量/(m ³ ·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	
			沉箱开孔	沉箱不开孔
设计高水位	10	规则波($H_{4\%}$ 控制)	0.031	0.038
		不规则波($H_{13\%}$ 控制)	0.003	0.005
	5	规则波($H_{4\%}$ 控制)	0.005	0.009
		不规则波($H_{13\%}$ 控制)	0.001	0.003
极端高水位	2	规则波($H_{4\%}$ 控制)	0.009	0.019
		不规则波($H_{13\%}$ 控制)	0.002	0.004

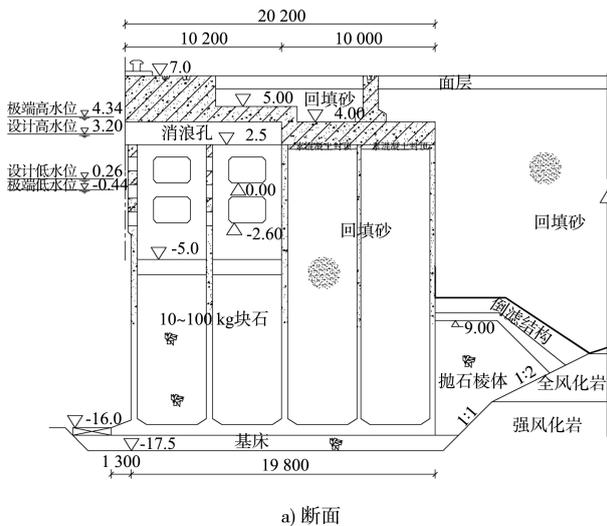


表2 码头前沿波浪反射率

水位	波浪重现期/a	波类型	反射系数	
			沉箱开孔	沉箱不开孔
设计高水位	10	规则波($H_{4\%}$ 控制)	0.69	0.93
		不规则波($H_{13\%}$ 控制)	0.72	0.93
	5	规则波($H_{4\%}$ 控制)	0.73	0.96
		不规则波($H_{13\%}$ 控制)	0.71	0.93
极端高水位	2	规则波($H_{4\%}$ 控制)	0.76	0.90
		不规则波($H_{13\%}$ 控制)	0.79	0.93
设计高水位	作业波浪 (平均周期 8 s)	规则波($H_{4\%}$ 控制)	0.63	0.90
设计低水位			0.39	0.94
设计高水位	离泊波浪 (平均周期 8 s)	规则波($H_{4\%}$ 控制)	0.64	0.91
设计低水位			0.40	0.93

3.2 结果分析

由表1可知,在不规则波和规则波作用时,沉箱开孔与不开孔时时越浪量比分别为30%~60%和47%~82%,虽然在规则波作用时设计高水位重现期10 a波浪工况下码头开孔与不开孔上水情况改善并不明显,但是工程实际中作用波浪均为不规则,试验中不规则波对于码头上水改善情况在实际中更具有参考意义。

由表2可知,直立式沉箱不开孔时,沉箱前反射明显,反射系数均超过0.90,而沉箱开孔后,

反射系数明显减小,尤其是在作业水位与波浪的组合工况下,消浪孔对波能的消减作用明显,反射系数在0.39~0.63。试验结果也显示,在规则波和不规则波作用下,码头前沿反射系数差异并不大。可见,沉箱开孔消浪效果明显,降低了码头前沿波浪反射系数,有利于改善工程泊稳条件。

3.3 码头前沿顶高程验证

结合模型试验结果,依据规范,分别对沉箱开孔和不开孔的情况下进行码头前沿顶高程的计算,结果表3所示。

表3 码头前沿顶高程计算

项目	波浪重现期/a	设计标准	水位(DWL)/m	$H_{4\%}$ /m	反射系数	H_s /m	Δw /m	码头高程计算值/m
沉箱 不开孔	10	基本标准	3.20(设计高)	3.82	1.00	0.50	4.32	7.52
	2	复核标准	4.34(极端高)	2.87	1.00	0.31	3.18	7.52
沉箱开孔 (不规则波)	10	基本标准	3.20(设计高)	3.82	0.72	0.37	3.66	6.86
	2	复核标准	4.34(极端低)	2.87	0.79	0.25	2.82	7.16
沉箱开孔 (规则波)	10	基本标准	3.20(设计高)	3.82	0.69	0.36	3.59	6.79
	2	复核标准	4.34(极端低)	2.87	0.76	0.24	2.77	7.11

从计算结果知:如果不考虑沉箱开孔,在基本标准和复核标准下,码头前沿顶高程计算数值为7.52 m,码头面高程提高,增加建设和运营成本,而且与后方道路高程不宜衔接;沉箱开孔后,码头面计算高程明显下降,节约了建设和运营成本,方便了本工程与后方道路及其他工程的高程衔接。

4 结论

1) 针对工程需改善码头前波浪反射及泊稳条

件的技术需求,通过适用性分析,提出开孔沉箱结构方案,相应采取仓格阶梯回填、胸墙开孔等措施提高消浪效果。

2) 试验结果显示不规则波和规则波作用时,沉箱开孔与不开孔时时越浪量比分别为30%~60%和47%~82%;作业水位与波浪组合工况,反射系数为0.39~0.63。开孔沉箱明显减少码头越浪量,降低了码头前沿波浪反射系数,改善工程区域的泊稳条件,码头面计算高程明显下降,节约了成本,方便了与道路及其他工程的高程衔接。

3) 依据相关研究成果, 开孔沉箱消浪室宽度 B 与作业波浪的波长 L 之比 $B/L=0.25$ 左右时, 消浪效果呈现最佳状态。本工程结构受断面尺度、构件受力等条件限制 $B/L=0.12$, 与推荐参数具有一定差距, 可能并未达到最佳消浪状态。建议类似工程设计中, 对消浪室宽度进行模型试验的确定, 以取得最佳消浪效果。

4) 模型试验测得设计高水位、极端高水位组合相应重现期的波浪时码头越浪数量级为 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$, 但国内外关于允许越浪量标准研究主要是针对防波堤、护岸和堤防等建筑物^[8-9], 现行港口规范也并未对码头工程的允许越浪标准进行规定, 故有关码头工程的允许越浪量标准以及由此来确定码头面顶高程的方法有待进一步的研究。

参考文献:

[1] JTS-165—2013 海港总体设计规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 74 页)

5) 在进行海外港口工程高程设计时, 应充分掌握当地海域水位、波浪及其他气象影响组成因素, 采取适合的标准确定码头面高程。有条件时, 可采用国内外标准进行双重验证。

参考文献:

[1] 暴景阳, 张明亮, 唐岩, 等. 理论最低潮面定义和算法的应用问题分析[J]. 海洋测绘, 2009(4): 1-4.

[2] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.

[3] 王骥, 刘克修. 关于海图深度基准面计算方法的若干问题[J]. 海洋测绘, 2002(4): 10-13.

[4] JTS 165—2013 海港总体设计规范[S].

[5] BS 6349-2: 2010 Maritime works-Part 2: Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins[S]. BSI Standards Publication, 2010.

[2] 谢世楞. 防波堤工程的发展与海浪研究问题[J]. 港工技术, 1987(1): 1-8.

[3] 姜云鹏, 陈汉宝, 戈龙仔. 开孔沉箱在日照港四期码头工程中的消浪效果研究[J]. 水道港口, 2010, 31(1): 20-24.

[4] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].

[5] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].

[6] 习和忠. 开孔沉箱防波堤消浪作用的理论研究及应用[J]. 港口工程, 1994(6): 11-16.

[7] 刘海源, 戈龙仔, 彭程, 等. 茂名港博贺新港区通用码头工程开孔沉箱断面物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2016.

[8] 俞聿修. 海岸工程的允许越浪量[J]. 港工技术, 2009, 46(1): 1-3.

[9] 夏运强, 李贺青, 沈如军. 港口工程允许越浪量标准分析研究[J]. 海洋工程, 2013, 31(6): 104-109.

[6] Dixon M J, Tawn J A. Estimates of extreme sea conditions-Final report-Spatial analyses for the UK Coast POL internal document[R]. Birkenhead: Proudman Oceanographic Laboratory, 1997.

[7] UFC 4152-01. Design: pier and wharves[S]. USA: UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC), 2005.

[8] EM 1110-2-1110. Coastal Hydrodynamics Chapter II-5: Water levels and Long waves[S]. The Coastal Engineering Manual, 2008.

[9] 林显钰, 沈家祺. 海岸工程设计中最高潮位计算方法的探讨[J]. 风暴潮, 1982(1): 71-82.

[10] Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan[S]. The overseas coastal area development institute of Japan, 2009.

[11] JTS 145—2015 港口与航道水文规范[S].

(本文编辑 武亚庆)