



带翼板沉箱在直立式码头结构中的应用

李世强, 周俊青

(大连中交理工交通技术研究院有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 带翼板沉箱作为新型沉箱结构, 与常规沉箱码头结构相比, 可有效改善码头前波浪反射情况、减小墙后土压力、降低工程投资, 采用类似结构的梳式防波堤已有实际工程案例, 但是, 目前带翼板沉箱在后方有回填土的直立式码头中使用较少。介绍了带翼板沉箱结构在大连松木岛件杂货码头中的应用, 分析波浪以及墙后填土对梳式码头结构的作用, 对沉箱翼板尺度的选取进行研究, 为此类新型结构的应用提供参考。

关键词: 带翼板沉箱; 梳式结构; 开孔沉箱; 直立式码头

中图分类号: U 656.1⁺24

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)10-0128-05

Applications of caisson with flange slab in vertical pier structure

LI Shi-qiang, ZHOU Jun-qing

(Dalian CCCC & DUT Institute of Communications Technology Co., Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: Compared with the conventional caisson pier structure, a new type caisson with flange slab can effectively improve the wave reflection, decrease earth pressure behind the wall, and reduce the engineering investment. There are some practical engineering cases in comb-type breakwater while the caisson with flange slab is rarely used in vertical pier structure which has backfill in the rear. This paper introduces the application of caisson with flange slab in Dalian Songmu island general cargo pier, analyzes the effect of wave and wall backfill on comb-type pier structure, and studies the selection of flange slab caisson scale.

Keywords: caisson with flange slab; comb-type structure; perforated caisson; vertical pier structure

随着国内港口建设事业的发展, 大量的新技术、新结构不断涌现出来。带翼板沉箱作为一种新型沉箱结构, 经过近几年的研究与发展, 其理论日臻完善, 特别是经过了若干实际工程的检验。如大连港大窑湾港区梳式防波堤工程, 可消减波浪力 20% 以上, 节省工程投资 20% 以上, 证明带翼板沉箱结构在消浪、节省工程投资等方面优点显著, 结构可靠性亦得到验证。

基于工程习惯、施工工艺等原因, 目前我国沿海港口万吨级以上重力式码头中采用带翼板沉箱这种新型结构形式较少。针对大连松木岛港区工程地质条件较差、黏性土覆盖层较厚的现状, 将带翼板沉箱结构应用到后方有回填土的重力式码头当中, 可有效地降低墙后土压力、改善基床

底地基土的受力状态, 并达到节省工程投资的目的。

1 工程概况

大连松木岛港区位于辽东半岛、大连市渤海侧海岸线中段的普兰店湾东北侧, 是一个三面环山的内湾, 湾口朝向西南, 外部与渤海相连, 湾内为天然海沟深槽, 受风浪影响较小, 常年不淤, 港区天然条件良好。

松木岛港区潮位属于不规则半日潮, 设计高水位为 1.39 m, 设计低水位为 -1.52 m, 50 a 一遇极端高水位为 2.49 m (高程基准采用 85 高程)。

港区天然掩护条件良好, 仅 W 向、SW 向无掩护, 由于港区位于普兰店湾内, 波浪传输至港

区已有较大衰减, 同时港区西南由簸箕岛和里坨子形成天然掩护屏障, 总体来看港区受波浪影响较小。码头前重现期 50 a 设计波浪要素为: 设计高水位, 周期 $T=5$ s, 波高 $H_{1\%}=1.64$ m, 波高 $H_{13\%}=1.11$ m, 波长 $L=37.8$ m; 极端高水位, 周期 $T=5$ s, 波高 $H_{1\%}=1.67$ m, 波高 $H_{13\%}=1.14$ m, 波长 $L=38.1$ m。

工程区域揭露的岩土层自上而下主要为淤泥质粉质黏土、粉质黏土、碎石、黏土和基岩。其中淤泥质粉质黏土层力学强度较低, 不宜作为基础持力层; 下层粉质黏土层和黏土层承载力只有 160 kPa, 可压缩性亦较高, 需要采用适宜的基础形式作为结构持力层。

2 结构特点

码头总长 487 m, 顶高程 3.0 m, 码头底高程 -11.3 m, 主体由带翼板沉箱结构组成, 带翼板沉箱尺寸为 9.0 m×11.0 m×11.3 m (长×底宽×高), 质量约 742 t, 设有前、后趾, 趾长 1 m, 沉箱侧壁陆侧上部和海侧下部各伸出 3 m 长翼板, 沉箱仓格内回填 10~100 kg 块石, 翼板所围空间内下部回填 10~100 kg 块石, 上设 200~300 kg 块石护面。陆侧翼板上部设置混凝土盖板以防止后方回填料流失, 沉箱下部为 10~100 kg 抛石基床, 基床厚度约为 3.8~6.7 m, 坐落于碎石层上, 后方抛石棱体、倒滤层以及附属设施和上部结构等与普通沉箱方案基本相同。码头结构断面见图 1。

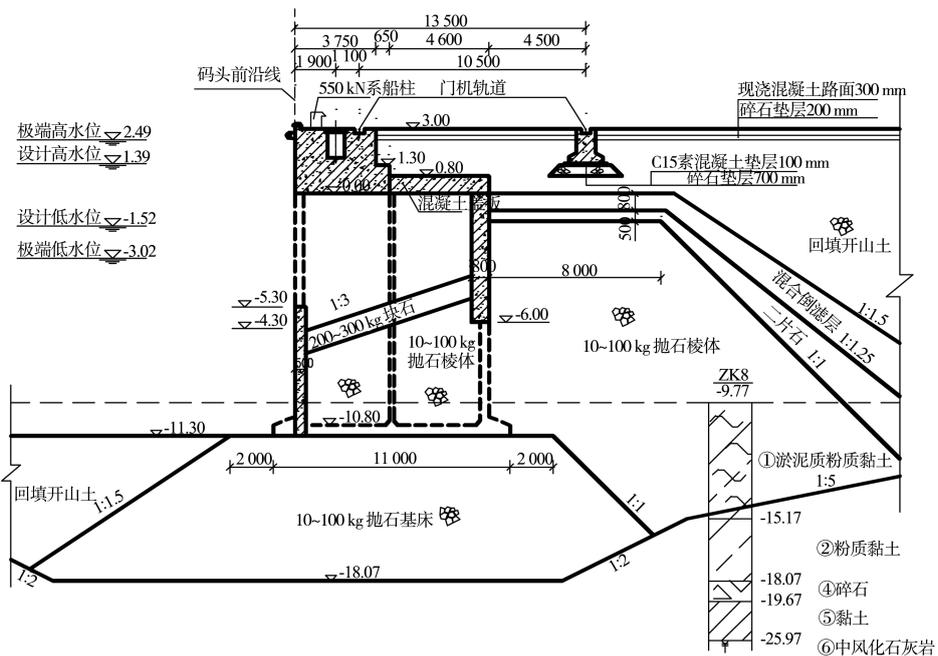


图 1 码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

3 结构计算

带翼板沉箱码头结构计算思路与普通沉箱码头相似, 取一整个带翼板沉箱为一个计算单元, 需分别计算出码头单宽自重力、波浪力、土压力、系缆力等, 其中码头自重力包括沉箱主体、箱内填石、上部结构和两侧外伸翼板 (不考虑翼板间填石) 自重力^[1]。

3.1 波浪力分析

波浪对带翼板沉箱结构的作用较为复杂, 由于沉箱两侧翼板沿码头轴线方向各向外伸出约 3 m

长, 沉箱安装后, 两个带翼板沉箱间将形成一个宽 6 m、进深约 9 m 的消浪室结构。根据其结构特点, 波浪作用可以参考波浪对梳式防波堤作用的公式, 以及波浪对开孔沉箱结构作用的公式计算。

根据牛恩宗等^[2]对大连港大窑湾岛堤设计过程中波浪对结构作用的研究, 梳式防波堤单宽水平波浪力可以按照普通直立式防波堤单宽水平波浪力乘以波浪力折减系数考虑。根据试验资料分析, 折减系数与波浪周期、波长、波高、水深、梳齿宽度 (沉箱主体长度)、梳齿间距 (两块翼板长

度之和)、翼板至沉箱前沿的距离、翼板底距海底高度等具有以下关系:

$$K=0.898+0.011\sqrt{\frac{gT^2}{A}}-0.098\cdot\frac{a}{A}-0.061\cdot\frac{b}{L}-0.261\cdot\frac{c}{d}-0.031\cdot\frac{H}{d} \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; T 为波浪周期(s); L 为波长(m); H 为波高(m); d 为堤前水深(m); A 为梳齿宽度(m); a 为梳齿间距(m); b 为翼板位置(m); c 为翼板底距海底高度(m)。

本工程中: 极端高水位工况下, $T=5 \text{ s}$, $L=38.1 \text{ m}$, $H=1.67 \text{ m}$, $d=13.8 \text{ m}$, $A=9 \text{ m}$, $a=6 \text{ m}$, $b=8.2 \text{ m}$, $c=0 \text{ m}$, 波浪力折减系数 K 计算结果为 0.87。

将沉箱翼板所围空间近似按照开孔沉箱考虑, 根据《防波堤设计与施工规范》中附录 H 矩形开孔沉箱波浪力相关公式计算波浪力^[3]。

$$\frac{P_1}{P_0}=1.147+1.24\left(\frac{H_{1/3}}{L_{1/3}}\right)-2.147\left(\frac{d}{L_{1/3}}\right)-0.844\left(\frac{b_c}{L_{1/3}}\right)-0.41\mu \quad (2)$$

式中: P_1 为开孔沉箱上最大总水平波浪力(kN/m); P_0 为不开孔沉箱上最大总水平波浪力(kN/m); $H_{1/3}$ 为有效波高(m); $L_{1/3}$ 为有效波长(m); d 为基床上水深(m); b_c 为消浪室净宽(m); μ 为沉箱开孔率。

本工程中: 极端高水位工况下, $H_{1/3}=1.14 \text{ m}$, $L_{1/3}=38.1 \text{ m}$, $d=13.8 \text{ m}$, $b_c=8.20 \text{ m}$, $\mu=0.15$, 开孔沉箱与普通沉箱水平波浪力比值的计算结果为 0.16。

通常开孔沉箱在沉箱前壁上设置一系列的小孔, 而带翼板沉箱翼板与沉箱主体形成一个较大的消浪室结构, 与常规开孔沉箱有所不同, 因此消浪效果理论上是稍差一些的。此外, 本工程中相对水深已超过规范中推荐的计算范围, 消浪室宽度也较普通开孔沉箱宽, 按规范中的公式计算存在一定的局限性, 因此计算结果偏小。考虑到工程区域的波高不大、波浪力对计算结果的影响

也较为有限, 波浪力按照波浪对梳式防波堤作用的公式计算, 波浪力折减系数取 0.87。

3.2 土压力分析

与传统沉箱结构码头相比, 带翼板沉箱码头由于结构上的特殊性, 墙后土压力的计算与常规结构稍有不同。墙后土压力的计算主要分为两个部分, 分别为沉箱主体段墙后土压力和沉箱翼板段土压力。其中沉箱主体段墙后土压力的计算与传统沉箱码头计算方法完全相同。

沉箱翼板段土压力由胸墙后方土压力、后翼板后方土压力和前翼板后方土压力 3 部分组成。其中, 胸墙后方土压力的计算与传统结构相同; 后翼板后方土压力的计算高度为从后翼板顶高程(0.0 m)至底高程(-6.0 m), 计算方法与传统结构一致; 前翼板后方土压力的计算高度为从前翼板顶高程(-5.3 m)至底高程(-11.3 m), 由于后翼板可以起到卸荷板的作用, 计算时不计后翼板底高程以上土石自重的影响。

沉箱主体段和翼板段土压力计算完毕后, 可分别按照沉箱主体结构长度与两侧翼板外伸长度加权平均得出墙后单宽土压力值。通过比较发现, 由于后翼板的作用, 带翼板沉箱结构的墙后土压力较传统沉箱结构可削减约 16%。

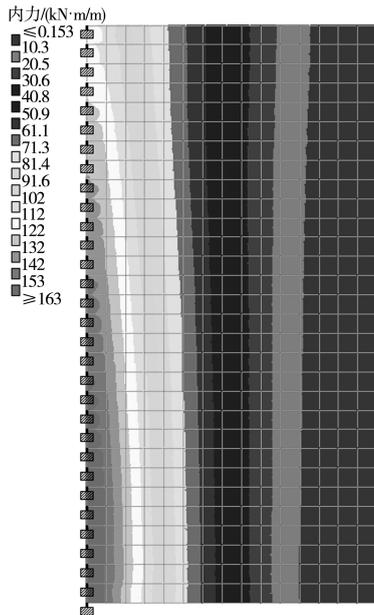
3.3 翼板结构受力分析

翼板结构是带翼板沉箱的关键组成部分, 翼板的安全性对于结构整体安全至关重要。分析沉箱前、后翼板所受外力情况, 采用有限元程序计算翼板的内力分布, 并按照规范要求对翼板进行配筋计算, 分析翼板尺度选择的合理性, 为类似结构的应用提供参考。

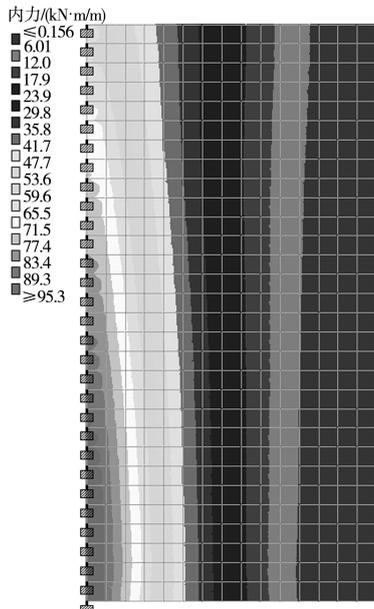
翼板的具体尺度为: 前、后翼板尺寸基本相同, 长 6.0 m、宽 3.0 m, 前翼板厚 0.5 m, 后翼板厚 0.8 m。翼板材质与沉箱主体一致, 混凝土强度为 C35, 抗冻等级为 F300, 轴心抗压强度设计值 f_c 为 16.7 MPa, 轴心抗拉强度设计值 f_t 为 1.57 MPa, 弹性模量为 31.5 GPa, 泊松比为 0.17, 密度为 2.45 t/m³; 钢筋型号为 HRB400, 抗拉强度设计值

f_y 和抗压强度设计值 f'_y 均为 360 MPa, 弹性模量为 200 GPa。

前、后翼板侧面一侧与沉箱前、后壁形成一体, 按照固定支座考虑, 前翼板其余 3 边按照无约束处理; 后翼板顶部与上部结构相连接, 按照铰接支座考虑, 其余两边按照无约束处理^[4]。荷载分别按照波压力、波吸力与墙后土压力进行组合计算, 采用 STAAD 软件建立板单元模型计算前后翼板的内力(图 2~3)并进行配筋计算(表 1)。

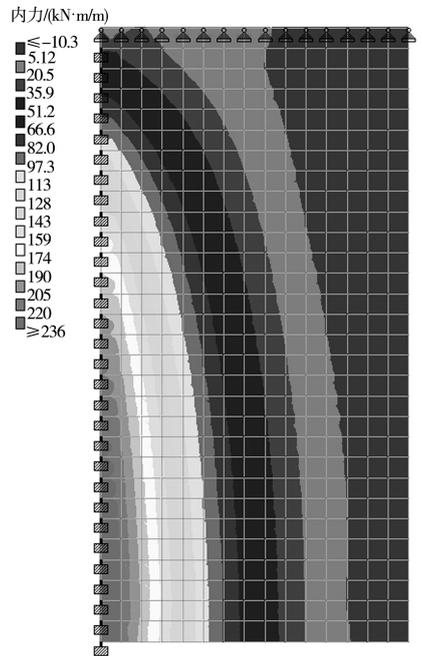


a) 承载力极限状态

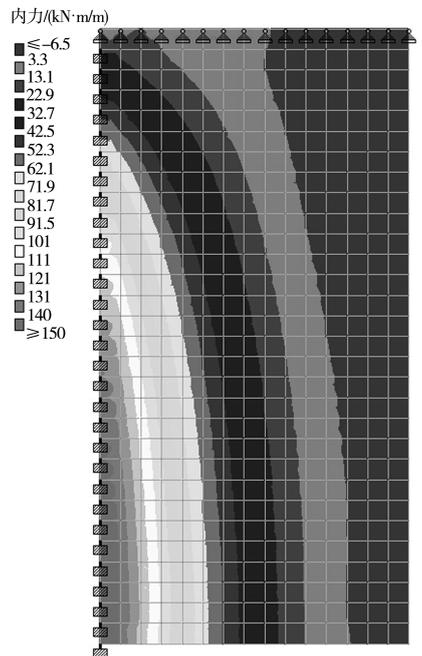


b) 正常使用极限状态

图 2 前翼板内力分布



a) 承载力极限状态



b) 正常使用极限状态

图 3 后翼板内力分布

表 1 翼板延米长度配筋计算

位置	方向	A_s		配筋数 量/根	直径/ mm	裂缝 宽度/mm
		计算/ mm^2	实配/ mm^2			
前翼板	水平	1 261	2 011	10	16	0.188
后翼板	水平	1 074	2 011	10	16	0.176

注: 竖直方向内力较小, 仅需按照构造配筋即可。

根据计算结果可知, 由于前翼板后方土压力较小, 其最大弯矩值也较后翼板小, 本工程前翼板厚

度较后翼板薄 0.3 m，前、后翼板配筋与沉箱常规配筋相差不大，翼板主要尺度的选择是合理的。

4 方案比选

带翼板沉箱结构方案中，沉箱尺寸为 9.0 m×11.0 m×11.3 m(长×底宽×高，两侧翼板各长 3 m，总长度 15 m)，质量约 742 t，普通沉箱结构方案中，沉箱尺寸为 12.0 m×11.0 m×11.3 m(长×底宽×高)，质量约 753 t，两方案延米钢筋混凝土用

量分别为 19.8 m³和 25.1 m³，相差约 21%，两方案延米工程造价分别为 18.6 万元和 22.3 万元，相差约 17%。

两结构方案的外部荷载条件基本相同，经计算，其抗倾、抗滑稳定计算结果比较接近，但带翼板沉箱方案基床顶面最大应力较普通沉箱方案减小约 30~40 kPa，带翼板沉箱方案中地基土的受力状态较好，地基承载力富裕量较普通沉箱方案高。主要结构计算对比结果见表 2。

表 2 不同方案沉箱整体稳定计算结果

水位	带翼板沉箱					普通沉箱				
	N_1	N_2	N_3	σ_1/kPa	σ_2/kPa	N_1	N_2	N_3	σ_1/kPa	σ_2/kPa
设计高水位	1.68	1.28	2.05	267.68	56.34	1.65	1.27	2.17	300.13	112.64
设计低水位	1.80	1.32	2.18	285.30	61.56	1.69	1.29	2.31	314.77	127.30
极端高水位	1.61	1.27	1.95	253.38	42.72	1.60	1.26	2.11	290.41	105.52
极端低水位	1.97	1.43	2.27	296.53	76.70	1.83	1.36	2.42	328.52	131.07

注： N_1 为沿基床顶面抗滑稳定性的抗力分项系数， N_2 为沿基床底面抗滑稳定性的抗力分项系数， N_3 为沿基床顶面抗倾稳定性的抗力分项系数， σ_1 为基床顶面最大应力(kPa)， σ_2 为基床顶面最小应力(kPa)。

5 结语

1) 带翼板沉箱码头结构可有效削减墙前波浪力和墙后土压力，本工程案例中可分别削减 13%和 16%。

2) 与同等宽度普通沉箱结构相比，带翼板沉箱结构可减小基床顶最大应力，改善地基土的受力状态。

3) 相对于普通沉箱结构，本工程案例中该新型结构可节省工程造价约 17%。

4) 随着带翼板沉箱结构在工程实践中的应

用，其计算理论、施工工艺也将更加完善，结构形式有望得到进一步推广。

参考文献：

[1] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].

[2] 牛恩宗, 马德堂, 孙昭晨. 新型梳式防波堤[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 51-55.

[3] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].

[4] 穆森, 朱浩, 刘国宝. 梳式防波堤兼码头结构翼板研究[J]. 水运工程, 2011 (8): 41-45.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

中交集团中标香港机场填海拓地项目

9月27日，中交集团中标香港国际机场第三跑道系统填海拓地工程项目。该项目是香港国际机场第三跑道系统工程的重要组成部分。项目总金额约 131.3 亿元，工期 58 个月。

项目主要工程量包括：填海拓地面积约 650 万 m²，建造海堤长度约 15 km，施工碎石桩 580 万延米，施工排水板 3 500 万延米，深层水泥搅拌桩 170 万 m³。

项目中标进一步巩固了公司在香港海工市场的优势地位，为香港国际机场第三跑道系统工程的后续工作开展奠定了坚实基础。