



船舶撞击码头动力响应有限元分析

邓雷飞, 李越松, 郭 畅

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 以3万吨级船舶以较快速度平行靠泊高桩码头为例, 对不同方法计算出的最大船舶撞击力进行比较分析。应用有限元方法对船舶撞击码头的过程进行了数值模拟, 根据码头结构产生的最大拉、压应力和混凝土强度破坏准则判断码头的损伤情况, 由此确定码头升级改造的可行性。

关键词: 船舶; 高桩码头; 最大撞击力; 有限元分析

中图分类号: U 661.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0092-05

Finite element analysis for dynamic response of vessel impact on wharf

DENG Lei-fei, LI Yue-song, GUO Chang

(Lab of Coastal Structure, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Taking the high-pile wharf subjected to the action of 30 000 DWT ship impact at a fast speed for example, we analyze the ship impact force calculated by different methods, simulate the process between a ship and a high-pile wharf by the finite element, according to the first principal stress, the third principal stress and failure criterion for concrete to judge the damages of the wharf, and determine the feasibility of the wharf's upgrading.

Key words: ship; high-piled wharf; ship impact force; FEM

随着海上运输的迅猛增长, 大型及超大型船舶进出港口日益频繁, 从而出现了现阶段码头靠泊条件不能满足大型船舶靠泊的现象。主要表现为船舶靠岸时的撞击力超出了码头结构的极限承载力, 码头出现局部或大面积损坏, 严重时甚至发生坍塌事故。因此如何准确计算船舶靠岸时的最大撞击力, 为码头设计和维修提供依据, 是设计人员的重要工作内容。目前码头设计过程中, 主要使用的理论计算方法是由交通运输部颁发的JTS 144-1-2010《港口工程荷载规范》和英国标准《海工建筑物》中关于船舶靠岸撞击力的计算^[1]。随着试验研究的逐步深入和有限元理论的发展, 试验法和有限元数值模拟技术也得到了快速发展。利用有限元模拟船舶靠岸过程不仅可以大大降低试验成本, 而且能够直观准确地反映撞

击力和码头变形情况。本文采用有限元LS-DYNA软件对船舶以较快速度靠泊码头的过程进行模拟分析, 通过计算船舶最大撞击力及码头结构损伤情况, 为码头设计、升级改造和维修提供依据。

1 有限元模型的建立

本文模拟了一艘3万t的散货船平行靠泊某高桩码头时的情况。速度取规范规定的该级别船舶最大靠岸速度 $v=0.15 \text{ m/s}$ ^[2]。该码头为无梁板式结构, 尺寸见图1码头断面。原设计靠泊能力为万吨级, 现预升级为3万吨级船舶停靠使用。鉴于码头升级后的船舶撞击力与原设计不同, 在升级前必须经过科学的计算论证。

1.1 码头计算模型

建立的码头有限元模型(图2)包括上部结

收稿日期: 2012-12-06

作者简介: 邓雷飞(1981—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事码头结构与土的相互作用研究工作。

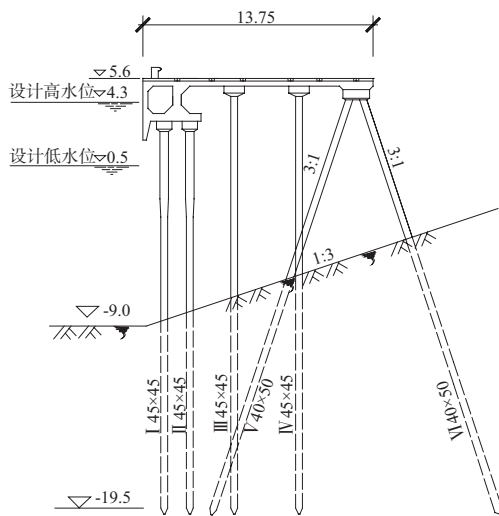


图1 码头断面

构和桩。其中上部结构主要包括面板、桩帽和防撞结构。而桩则分别建立了双直桩、直桩和叉桩 3 种。由于船舶靠岸时的撞击力主要作用在码头的前承台, 对后方承台及接岸结构等影响较小, 且假设船舶靠岸时只与码头的一个结构段相互作用, 所以模型只建立了高桩码头前承台的一个标准结构段, 每个结构段包括 18 个排架, 结构排架间的宽度为 3.5 m。

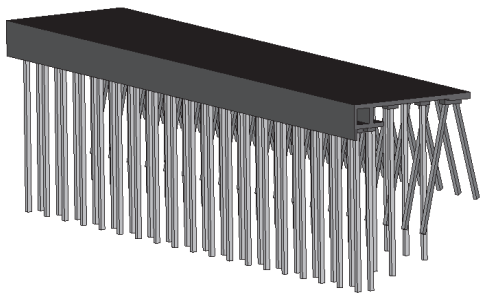


图2 码头有限元模型

由于撞击力作用于码头的上部结构, 且为短暂的受力过程, 受岸坡土体边界条件的影响相对较小, 所以模型中忽略周围土体对桩的相互作用, 而是采用 m 法计算出桩在岸坡土体中的嵌固点, 按照规范方法得到桩的计算长度, 然后将桩底进行全约束, 以简化计算模型。

码头模型的主体结构根据强度为 C35 的混凝土选定参数, 其中弹性模量取值为 3.14×10^4 MPa, 密度为 $2\,450\text{ kg/m}^3$ 。由于码头前承台都为预制空心桩, 考虑到模型简化, 将所有空心桩都建成了实

心桩, 为了消除其影响必须把桩的截面、弹性模量和密度进行等效代换, 代换公式为:

$$\begin{cases} E_p I_p = E_c I_c \\ E_p A_p = E_c A_c \\ \rho_p A_p = \rho_c A_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_p 为桩身实际弹性模量; E_c 为模型中弹性模量; I_p 为桩基实际惯性矩; I_c 为模型中的惯性矩; A_p 为桩基实际截面面积; A_c 为模型中的截面面积; ρ_p 为桩基实际密度; ρ_c 为模型中的密度。

模型桩长、截面面积和材料特性见表 1。

表1 混凝土模型材料特性及桩尺寸

材料名	计算桩长/m	截面面积/m ²	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
码面板、桩帽			2 450	3.15×10^4	0.167
直桩	I, II 16.34				
	III 17.00	0.197	2 517	2.77×10^4	0.167
	IV 15.75				
叉桩	V 13.50	0.194	1 905	2.45×10^4	0.167
	VI 10.90				

橡胶是常见的超弹性材料, 它受到荷载作用时, 具有良好的变形能力, 卸载后能迅速恢复到以前的状况。将这种橡胶材料做成护舷安装在码头前沿, 当船舶撞击力通过橡胶护舷传递到码头结构时, 可利用护舷的变形吸收部分动能, 从而达到降低船舶撞击力的目的, 因此能大大降低船舶和码头的损伤。橡胶护舷按结构可分为圆筒型、半圆型、超级拱型和超级鼓型等。该码头护舷为圆筒型橡胶护舷, 按排架间隔布置, 间距为 7 m。橡胶护舷材料计算模型采用 2 参数的 Mooney-Rivlin 模拟, 其应变能密度函数为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2)$$

式中: C_{10} , C_{01} 为 Mooney-Rivlin 系数; I_1 , I_2 为第一、第二应变张量不变量^[3]。

1.2 船舶计算模型

船舶模型的尺寸根据设计船型参考了该级别的一艘散货船的实际情况, 各项参数为: 船长 $L=162.0\text{ m}$, 船宽 $B=26.0\text{ m}$, 型深 $H=13.0\text{ m}$, 吃水 $D=9.0\text{ m}$, 排水量 $W=3.0 \times 10^4\text{ t}$, 由于本文需计算的是码头结构在船舶撞击力作用下的应力应变, 不需要考虑船体变形, 因此将船体视为刚体, 并约束刚体竖直方向的平动。该码头前沿水域位于

港池内，具有较好的停靠条件，忽略风浪对撞击力的影响。但船舶在靠岸过程中周围的水会随船体移动，并参与碰撞。现阶段模拟这一现象应用较多的是流固耦合模型，但这种模型在计算结构与流体之间的耦合时需要占用大量的时间。因此改用附加质量模型避免耦合计算，以节约计算时间，提高效率。根据V. U. Minorsky假定，船舶横移的附加水质量约等于靠岸船舶排水量的0.4倍，然后通过增大船体的密度来实现^[4]。船舶与护舷之间的接触选用自动面接触算法。

2 计算结果分析

2.1 能量转化及撞击力分析

图3曲线为一艘3万吨级散货船以 $v=0.15\text{ m/s}$ 的速度撞击码头过程中能量的转化。根据图中能量变化曲线可以发现，船舶撞击护舷是一个过程，并非瞬间完成，尽管整个撞击过程非常短，大约为0.7~0.8 s。从船舶接触码头护舷的一刻开始，船舶动能逐渐转化为橡胶护舷和船舶的变形能，到大约0.7 s时船舶总动能99%都已转化，可视为船舶的第一次碰撞过程结束。然后部分变形能又逐渐转化为船舶的动能，船舶被护舷反弹，整个转化的过程中遵守能量守恒定律。

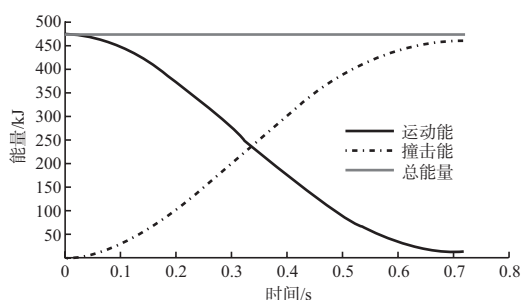


图3 船舶撞击能量-时间曲线

图4为船舶靠岸过程中，撞击力经过护舷缓冲后，间接作用到码头靠船构件上的荷载与撞击时间的曲线。由图4可见，船舶与护舷接触后，靠船构件受到的撞击力随时间的增加而增加。碰撞过程中由于动能逐渐转化为变形能，撞击力的增加速率也随之减小，当接触时间为0.72 s时，撞击力达到最大值2 223 kN。由于护舷的缓冲作用，靠船构件未出现由于强度失效或破坏导致的卸载现象，从

另一个侧面反映了护舷对码头结构的保护作用。

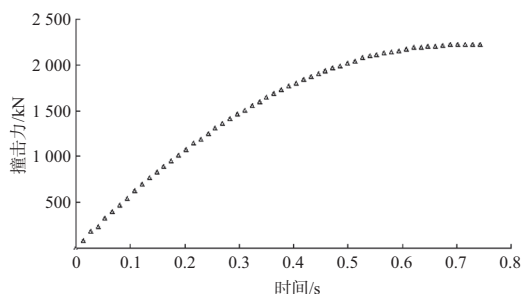


图4 撞击力-时间曲线

2.2 与理论公式计算结果比较

船舶撞击力的主要计算方法有动量公式、振动公式和能量公式。但迄今为止，国内外普遍采用的仍为能量公式^[5]。能量公式的基本原理是：船舶碰撞码头时所产生的有效撞击能量，通过护舷和船舶的变形全部转化为外力所做的功。

2010年修订的《港口工程荷载规范》给出的船舶靠泊码头的有效撞击能 E_0 的计算公式为：

$$E_0 = \frac{\rho}{2} M v_n^2 \tag{3}$$

式中： E_0 为船舶靠岸时的有效撞击能量(kN·m)； M 为船舶质量(t)； v_n 为船舶靠岸时的法向速度(m/s)； ρ 为靠船系统吸收的动能系数，它与诸多参数有关，港口工程荷载规范中 ρ 值采用0.7~0.8。

英国标准《海工建筑物》中规定船舶靠泊时的有效撞击能量 E_0 可根据下式计算：

$$E_0 = \frac{1}{2} C_m M_d v_b^2 C_e C_s C_c \tag{4}$$

式中： C_m 为水动力质量系数，水动力质量是一件极为复杂的实体，它受船壳形状及其状态、龙骨下富裕深度、码头结构形式和靠船速度的影响，水动力质量系数可按下式计算：

$$C_m = 1 + \frac{2D}{B} \tag{5}$$

式中： D 为船舶吃水深度(m)； B 为船宽(m)，根据此式一般其系数取在1.3~1.8； M_d 为船舶排水量(t)； v_b 为撞击时垂直于码头正面的船舶速度(m/s)； C_e 为偏心系数，通常可取0.7~0.8； C_s 为柔性系数，取1.0； C_c 为泊位的形状系数，对于透空式的高桩码头可取1.0。

若已知船舶有效撞击能量，船舶靠岸时的撞

击力标准值就可根据船舶有效撞击能量和橡胶护舷性能曲线以及靠船结构的刚度确定。

各方法计算的有效撞击能量和最大撞击力见表2。

表2 各方法计算的有效撞击能量和最大撞击力

计算方法	有效撞击能量/kJ	最大撞击力/kN
港口工程荷载规范	270	1 453
英国标准	456	2 070
有限元法	473	2 223

根据计算结果可知, 两种理论计算中若按英国标准计算出的最大撞击力进行设计是偏于安全的, 而按港口工程荷载规范的计算最大撞击力则偏小。将有限元法与以上两种理论计算法计算出的值进行比较可知, 有限元法计算结果略微偏高, 但是在接近的范围之内, 因此结果是合理的。

2.3 码头结构变形及应力分析

在靠泊过程中, 船舶撞击力通过护舷间接作用在码头上, 码头由此产生了应力及变形。若已经知道混凝土的破坏准则, 则可根据计算的码头最大拉、压应力及其分布, 就能判断出码头构件的破坏情况。但是在多向受力状况下, 混凝土强度破坏准则是一个比较复杂的问题, 到目前为止还未建立起一个比较完善的、能解释不同破坏现象的混凝土强度理论。因此本文选用了相对比较简单基于最大拉伸应力理论的破坏准则。按照混凝土结构设计规范的规定, 强度等级为 C 35 的混凝土抗拉强度标准值取 2.25 MPa, 抗压强度标准值取 23.5 MPa。

图5和6分别为高桩码头在船舶撞击力和重力共同作用下的第一、三主应力图。计算表明: 在船舶撞击力作用下, 最大拉、压应力同时出现在撞击力最大的时刻 $T=0.72\text{ s}$, 且拉、压应力较高的区域主要集中在叉桩上。这主要是由于叉桩的横向刚度相对较大, 作用在码头上的水平作用力主要由叉桩承担, 因此在叉桩上产生了较高的应力。其中在正斜桩(叉桩中向岸倾斜的桩)顶部内侧区域出现了码头最大拉应力 $\sigma_1=1.164\text{ MPa}$; 而在反斜桩(叉桩中向海倾斜的桩)顶部内侧区域出现了最大压应力 $\sigma_3=1.259\text{ MPa}$ 。另外在防撞构件上也产生

了相对较高的压应力, 这是由于船舶撞击产生了局部应力集中造成的。

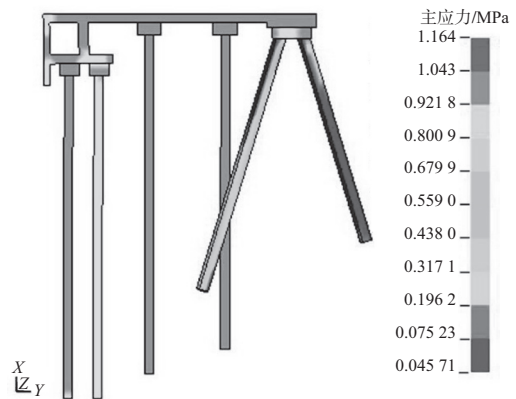


图5 码头结构第一主应力

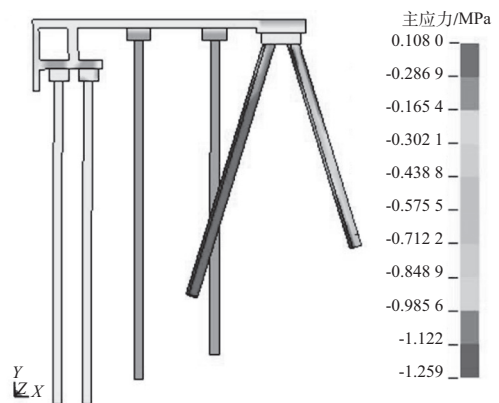


图6 码头结构第三主应力

图7为码头横向水平位移图, 由图可知, 在第一根直桩和桩帽联接的区域产生了最大正向水平位移, 这是因直桩对水平荷载的抵抗力垂直于桩轴方向, 轴阻力不起作用, 导致水平位移较大; 在撞击力和重力作用下直桩中部产生了比较大的

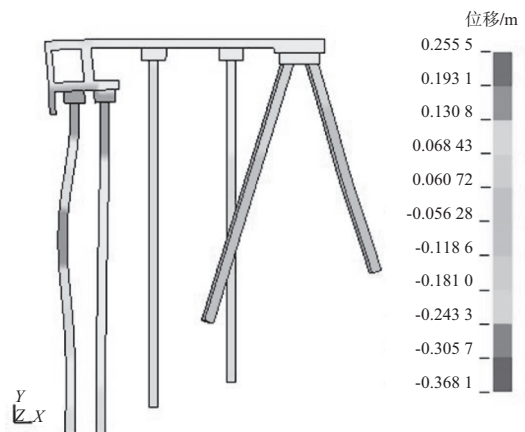


图7 码头结构水平位移

挠曲现象，导致在第一根直桩中部产生了负向最大位移；叉桩因横向约束力大，故水平位移最小。

3 结论

1) 利用有限元LS-DYNA软件计算的有效撞击能量和撞击力与理论计算结果相近，是合理有效的。但是有限元法能够表达出船舶在整个碰撞过程中能量的转化和撞击力变化规律，这是以上两种理论方法都无法达到的。

2) 在船舶撞击力作用下，码头产生的最大拉、压应力和位移均未超出混凝土破坏准则的要求，因此码头可以满足3万t船舶靠泊力的需要。在叉桩和防撞结构部分区域产生了高应力，因此

在码头运行过程中要针对这两个区域加强监测，发现后立刻进行维修加固。

参考文献:

- [1] 茅宝章. 大型船舶靠泊能量计算[J]. 水运工程, 2009(8): 1-4.
- [2] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [3] 王伟, 邓涛, 赵树高. 橡胶Mooney-Rivlin模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品, 2004, 25(4):8-10.
- [4] 王自力, 蒋志勇, 顾永宁. 船舶碰撞数值仿真的附加质量模型[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4):321-326.
- [5] 吴宋仁, 任佐幕, 杨影云. 船舶靠岸速度的现场测试与研究[J]. 重庆交通学院学报, 1990, 9(3): 80-85.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第91页)

波的变化趋势相符。由于桩基透空式防波堤的透浪系数与防波堤结构形式、波要素、相对宽度 B/L 及 t/d 和 d/L (B 为堤宽, L 为波长, t 为挡板入水深度, d 为堤前水深)等有关, 不同的挡板布置形式及桩柱的组合物体等因素都直接影响防波堤的透浪系数, 因此, 对于这种形式的防波堤结构, 理论公式不可能完全适用并精确计算出其透浪系数, 只能是近似解, 而且不同的公式基于不尽相同的理论, 计算结果亦相差较大, 而物模试验是较好的解决问题的方法, 只要严格模拟, 试验结果具有较高的可信度。

6 结语

某港扩建工程桩基透空式防波堤的特殊结构形式, 使港内泊稳状况较为复杂。本文通过一系列的物模试验, 并对采集到的数据进行了较为完善的统计分析, 总结了防波堤掩护区内的波况随挡板的入水深度、潮汐、波浪入射方向等因素不同的变化规律, 对港内泊稳条件有了较为清晰的掌握。通过现行规范等理论计算的方法, 与物模试验结果进行比较, 验证了模型试验的正确性, 同时也看到, 《海港水文规范》给出的绕射系数

计算图解是可靠的, 而《防波堤设计与施工规范》中提供的桩基透空式防波堤透射率计算公式在工程设计中用于估算透射系数是可行的。对于结构比较特殊的工程, 为更好地明确各种因素对港内泊稳的联合作用效果, 物模试验则是最便捷有效的方式和途径。

参考文献:

- [1] 陈万佳. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [2] 藤斌, 韩凌, 李玉成. 波浪对透空外壁双筒柱的绕射[J]. 海洋工程, 2001(1):33-38.
- [3] 赫尔别克. 海岸及海洋工程手册[M]. 李玉成, 陈士荫, 俞聿修, 等译. 大连: 大连理工大学出版社, 1992.
- [4] Herbich J B, Douglas B. Wave transmission through a double-row pile breakwater [C]. Proc 20th International Conference on Coastal Engineering: ASCE, 1987.
- [5] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2002.
- [6] JTJ 213—1998海港水文规范[S].
- [7] JTJ 298—1998防波堤设计与施工规范[S].
- [8] JTJ/T 234—2001波浪模型试验规程[S].

(本文编辑 武亚庆)



龙口港万吨级多用途泊位升级改造工程施工控制要点

于祖杰

(龙口港集团有限公司, 山东 龙口 265700)

摘要: 结合烟台港龙口港区2×2万吨级多用途泊位(14[#], 15[#]泊位)工程码头结构加固改造方案, 通过对码头结构、码头前沿水深、回旋水域等改造, 满足5万吨级船舶靠泊要求, 提升了现有泊位的靠泊等级, 确保了码头主体结构的安全。为沿海港口码头结构加固改造工作提供借鉴。

关键词: 码头结构; 加固改造; 前沿水深; 回旋水域

中图分类号: U 656.1⁷³

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0097-04

Key controlling points of Longkou port multi-purpose berths upgrading project

YU Zu-jie

(Group Company Limited of Longkou Port, Longkou 265700, China)

Abstract: For Yantai port Longkou port area 2×20 000-ton multi-purpose berth (berth Nos.14 &15) project pier structure retrofitting program, based on the renovation of the pier structure, pier apron and turning area, the pier can meet the berthing need of 50 000 DWT vessels, and guarantee the safety of the main structure. It may serve as reference for structure renovation of coastal port's wharf.

Key words: port structure; reinforcement and reconstruction; apron; turning area

1 项目建设背景^[1]

烟台港龙口港区2×2万吨级多用途泊位(14[#], 15[#]泊位)原工程规模为2万吨级多用途泊位2个, 码头岸线长410.0 m, 其中14[#]泊位长246 m, 码头前沿底高程-14.0 m; 15[#]泊位长164 m, 码头前沿底高程-13.2 m, 港池回旋水域直径370 m。结构形式为重力式沉箱结构。近年来, 随着龙口港区经济腹地的逐步扩大、港口货物吞吐量的快速增长、船舶大型化的发展趋势, 原泊位靠泊等级不能满足生产需要, 通过对14[#]和15[#]泊位进行加固改造, 提高泊位等级至5万吨级泊位, 可以充分利用龙口港现有岸线资源, 满足大型船舶靠泊要求, 缓解龙口港大型深水泊位不足的矛盾, 保障港口安全运行。

2 控制要点

2.1 总平面布置^[2]

2.1.1 泊位长度

本工程两个泊位连续布置, 泊位长度为410 m。改造后码头前沿水深相同, 可灵活进行船舶靠泊组合。

1) 1个5万吨级集装箱船靠泊。自14[#]泊位南侧岸线开始布置船舶, 见图1。

$$L_b = L + 2d \quad (1)$$

式中: L_b 为码头泊位长度(m); L 为设计船长(m); d 为富裕长度(m), 按规范取30 m。计算得 $L_b = 353$ m。

2) 1个5万吨级散货船与1个3 000吨级杂货船同时靠泊(图2)。

收稿日期: 2012-12-30

作者简介: 于祖杰(1969—), 男, 高级工程师, 注册咨询工程师, 一级建造师, 从事港口及航道工程。

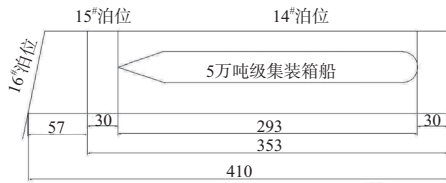


图1 单个泊位长度 (单位: m)

$$L_b = 1.25L_1 + d + L_2 + d \quad (2)$$

计算得 $L_b = 408.0 \text{ m}$ 。

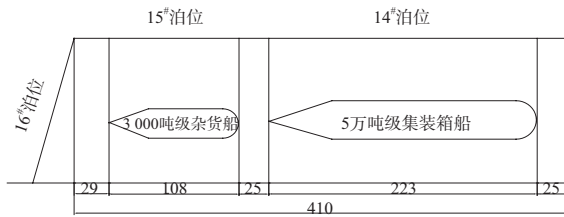


图2 连续布置多泊位长度 (单位: m)

2.1.2 码头前沿停泊水域宽度

根据《海港总平面设计规范》规定, 码头前

沿停泊水域宽度

$$B_b = 2B \quad (3)$$

式中: B_b 为码头前沿停泊水域宽度; B 为设计船舶型宽。5万吨泊位 $B_b=64.5 \text{ m}$ 。本工程原码头前沿停泊水域宽度为65 m, 满足规范要求。

2.1.3 码头前沿设计水深

$$\text{码头前沿水深: } D = T + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \quad (4)$$

$$\text{码头前沿底高程} = \text{设计低水位} - D \quad (5)$$

计算结果见表1。

考虑到本工程掩护条件好、泥沙淤积小, 改造后码头前沿底高程定为-14.0 m, 14#泊位前沿底高程为-14.0 m, 能够满足5万吨级集装箱船及5万吨级散货船靠泊要求; 15#泊位前沿底高程-13.2 m, 需对码头前沿水深进行疏浚至-14.0 m。

2.1.4 港池设计水深

$$D = T + Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \quad (6)$$

计算结果见表2。

表1 码头前沿设计水深

船型	设计船型满载吃水 T	龙骨下最小富裕水深 Z_1	波浪富裕深度 Z_2	配载不均匀增加值 Z_3	备淤深度 Z_4	码头前沿水深计算值 D	设计低水位	码头前沿底高程计算值
2万吨级杂货船	10.1	0.6	0	0	0.4	11.10	-0.14	-11.24
5万吨级集装箱船	13.0	0.6	0	0	0.4	14.00	-0.14	-14.14
5万吨级散货船	12.8	0.6	0	0.15	0.4	13.95	-0.14	-14.09

表2 港池设计水深计算

船型	设计船型满载吃水 T	船舶航行时船体下沉值 Z_0	航行时龙骨下最小富裕深度 Z_1	波浪富裕深度 Z_2	装载纵倾富裕深度 Z_3	备淤富裕深度 Z_4	设计水深 D	乘潮水位(全天候进出港)	港池底高程计算值
2万吨级杂货船	10.1	0.2	0.4	0	0	0.4	11.10	-0.14	-11.24
5万吨级集装箱船	13.0	0.2	0.5	0	0	0.4	14.10	-0.14	-14.24
5万吨级散货船	12.8	0.2	0.5	0	0.15	0.4	14.05	-0.14	-14.19

5万吨级集装箱船及5万吨级散货船港池设计水深-14.2 m, 原14#和15#泊位港池水深-13.0 m, 不能满足5万吨级船舶靠泊要求, 需对港池水深疏浚。

2.1.5 港池回旋水域尺度

船舶回旋水域直径按2.0倍设计船长考虑, 5万吨级散货船回旋圆直径取为450 m, 5万吨级集装箱船回旋圆直径为600 m。原水域回旋圆直径为370 m, 无法满足要求。考虑到22#~26#泊位港池较宽阔, 可将船长200 m以上船舶在拖轮拖带下在此处调头出港。水域设计主尺度核算

结果见表3。

2.1.6 港作拖船

港作拖船所需总功率按下式计算:

$$BHP = kQ \quad (7)$$

式中: BHP 为所需港作拖船总功率(kW); k 为系数, $WT \leq 20\,000 \text{ t}$, 取0.075, $20\,000 \text{ t} < DWT \leq 50\,000 \text{ t}$, 取0.060, $DWT > 50\,000 \text{ t}$, 取0.050; Q 为进出港设计船型载质量(t)。5万吨级港作拖船总功率为3 000 kW。

根据规范要求和龙口港引航员船舶靠泊的操作经验, 船舶作业时应配备2艘拖轮助操, 每艘拖

表3 水域设计主尺度核算结果

项目	计算尺度/m	现状尺度/m	现状尺度是否满足5万吨船舶靠泊要求	说明
码头主体底高程	-14.0	-14.0 (14#泊位)	是	进行码头加固改造
	-14.0	-13.2 (15#泊位)	否	
泊位长度		410	是	靠泊一艘5万吨级集装箱船或同时靠泊一艘5万吨级散货船和一艘3 000吨级杂货船
停泊水域宽度	65	65	是	
港池水深	-14.2	-13.0	否	对港池进行浚深
船舶回旋圆直径	450 (散货船)	370	否	调整船舶回旋水域至相邻泊位港池内
	600 (集装箱船)		否	

轮应在1 864 kW以上，考虑需调整船舶回旋水域至相邻泊位港池内，因此适当加大助操拖轮的马

力，每艘拖轮应在2 237 kW以上，以保证靠离泊作业安全。船舶调头见图3。

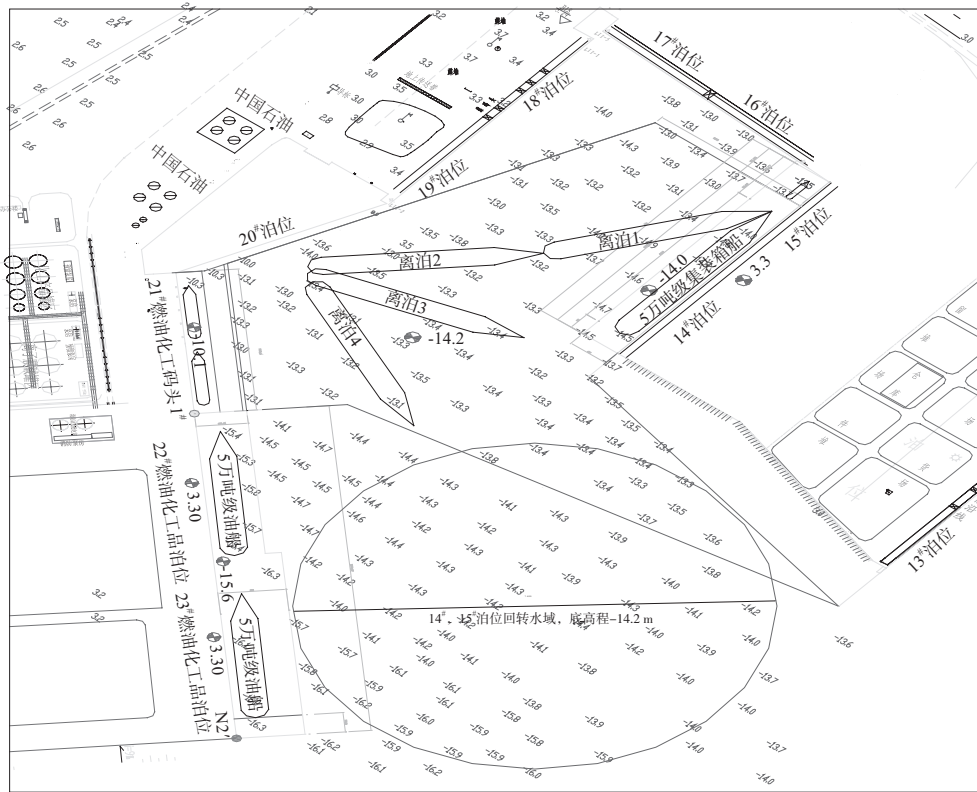


图3 船舶调头示意图

2.2 码头结构加固改造

2.2.1 码头稳定性复核^[3]

重力式码头承受的作用分为永久、可变及地震作用，分别对不同作用组合下进行结构计算，重新对码头基床承载力、地基承载力、抗滑稳定性及抗倾稳定性进行复核，满足规范要求，码头结构主要计算结果见表4。

2.2.2 系缆力标准值复核^[4]

根据《港口工程荷载规范》中规定系缆力及选用系船柱计算结果见表5。原工程配置750 kN

系船柱，能够满足系缆要求。

2.2.3 船舶靠岸时的有效撞击能量复核^[4]

船舶靠岸时的撞击能 E_0 为

$$E_0 = \frac{\rho}{2} M v_n^2 \quad (8)$$

式中： ρ 为有效动能系数，取0.7~0.8； M 为船舶质量(t)，按满载排水量计算； v_n 为船舶靠岸法向速度，取0.1 m/s。

经计算，5万吨级散货船船舶靠岸时的撞击能量为244.4 kJ；5万吨级集装箱船船舶靠岸时的撞

表4 各种组合主要计算结果

组合	验算项目	沿基床顶面的水平滑动	沿基床底面的水平滑动	沿沉箱前趾的倾覆稳定	基床顶面应力	地基承载力抗力分项系数	圆弧滑动分项系数
永久作用+均载+系缆力+门机后重荷载	抗力	1 615 kN	1 740 kN	14 021 kN·m		9 872.5 kN	
	作用效应	1 015 kN	1 330 kN	7 533 kN·m	432.5kPa	3 347.5 kN	1.45
	抗力/作用效应	1.59	1.31	1.86		2.95	
	对应水位	设计低水位	设计低水位	设计高水位	极端低水位	极端低水位	
永久作用+均载+系缆力+地震力	抗力	1 834.1 kN	1 874.6 kN	16 338.0 kN·m		9 164.2 kN	
	作用效应	1 063.4 kN	1 339.7 kN	7 373.8 kN·m	389kpa	3 193.1 kN	
	抗力/作用效应	1.72	1.40	2.22		2.87	
	对应水位	设计高水位	设计高水位	设计高水位	设计低水位	设计低水位	

表5 计算系缆力及选用系船柱

船舶吨级	受力系船柱个数n	系缆力/kN	选用系船柱
5万吨级散货船	5	597	750 kN
5万吨级集装箱船	7	735	

击能量为279.6 kJ。

原工程选用RH1250标准反力鼓型橡胶护舷，吸收能量389 kJ/个，能够满足5万吨级船舶靠泊要求。

2.2.4 改造方案

本工程确定采用“安装漂浮护舷+挖除部分原基床+加固基床+浚深停泊水域”的方法进行改造。

原15#泊位码头前沿水深-13.2 m，不满足5万吨级船舶靠泊要求，需对其码头前沿水域改造至-14.0 m。对距沉箱前趾1 m范围外基床按1:1进行清理至底高程-14.0 m，同时对裸露基床块石空

隙采用水下不扩散混凝土填缝及麻袋混凝土护坡（图4）。为保证船舶作业时舳龙骨的安全，其码头“岸线”需向外移。

具体外移距离计算过程考虑以下因素：

1) 泊位水深疏深导致泊位后边线（此处泊位后边线是指水深在-13.2 m或-14.0 m靠近沉箱前趾的位置线）的前移，相对于原沉箱前趾，浚深0.8 m，前移了2.2 m。

2) 护舷的阻隔有利作用。在5万吨级集装箱船舶停泊或作业时，在码头前沿均布安装φ3 000×6 000漂浮型橡胶护舷4个，护舷通过锚链固定在相应位置系船柱上，经计算护舷最大变形为23%，变形后护航本体直径为2.3 m，使码头“岸线”外移（码头“岸线”外移，是由于水深的加深，-14.0 m泊位水深线距离沉箱前趾为

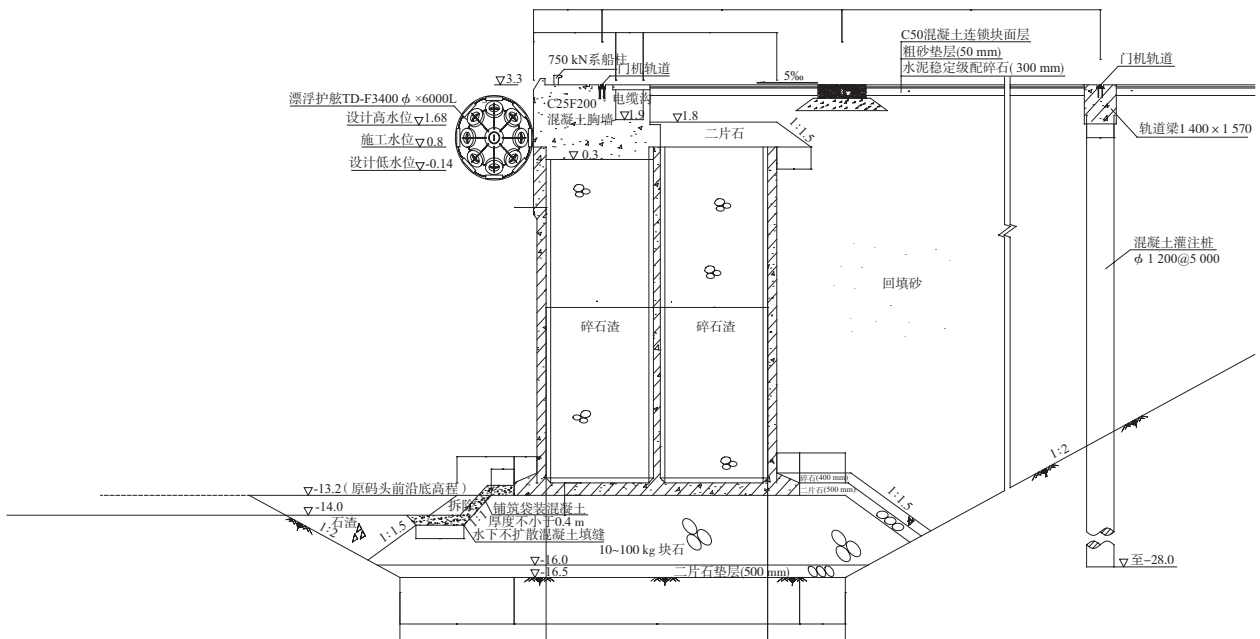


图4 15#泊位改造结构

(下转第104页)