



意大利威尼斯离岸深水港 自动化集装箱码头结构选型

黄 胜, 兰千钰

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要: 意大利威尼斯离岸深水港项目拟在海外建设现代化全自动集装箱港区, 其关键技术之一是在深厚高压缩性土体且广泛存在极软弱泥炭夹层的极不均匀和复杂地质条件下, 采用何种码头结构形式才能满足全自动化集装箱码头较高的使用要求。为此, 对高桩码头+组合式桩基承台驳岸结构、重力式沉箱结构和全高桩(高桩码头+高桩堆场)结构3种方案进行综合比选, 并利用有限元数值模拟分析, 提出采用全高桩码头结构形式。该结构形式适合工程的地质条件和使用要求, 技术成熟, 风险小, 且投资较低。

关键词: 全自动集装箱港区; 码头结构; 结构选型; 高压缩性土体; 泥炭层

中图分类号: U 656.1⁺35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2018)08-0045-05

Structural type selection for fully automated container jetty of Venice offshore port in Italy

HUANG Sheng, LAN Qian-yu

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: A fully automated container port is to be built in Venice offshore, Italy. One of the key technologies of the project is to select a proper structural type for the wharves to resist the action of deep and highly compressible soil and peat layers. The paper compares the differences of 3 structures, i.e. the high-piled wharf + combined pile platform connecting shore structure, gravity caisson structure, full pile-supported beam and slab (high-piled jetty + high-piled yard) structure, analyzes them by the finite element analysis software, and proposes the structural type of full pile-supported beam, which is suitable for the geologic condition and can meet the application requirement due to its mature technology, little risks and low cost.

Keywords: fully automated container port; wharf structure; selection of structure; highly compressible soil; peat layer

意大利威尼斯离岸深水港自动化集装箱码头项目位于威尼斯泻湖以外东南方向约 15 km 的深水区域, 在海外形成人工岛及防波堤, 建设现代化全自动集装箱港区, 其自然条件较差、工程技术复杂、施工依托条件差, 在我国仅上海洋山深水集装箱港区是依托外海岛屿建设的现代化集装箱港区, 在世

界上类似全自动化集装箱港区也罕见。

本工程在海外无依托条件下建设自动化集装箱港区, 主要包括: 防波堤(长约 4 km)、突堤式集装箱码头(长 1 000 m×宽 200 m)、辅建区和辅助建筑物等(图 1)。受工程自然条件、施工技术、使用要求等条件约束, 特别是在软弱复杂地

收稿日期: 2018-02-26

作者简介: 黄胜(1981—), 男, 高级工程师, 从事港口工程设计、咨询等。

质和自动化集装箱较高使用要求条件下, 码头结构形式选择是该项目的关键技术之一。本文结合意大利威尼斯离岸深水港区的环境特点, 围绕码头结构选型这一关键技术, 介绍选型中考虑的因素、原则、选型论证和结构方案等。

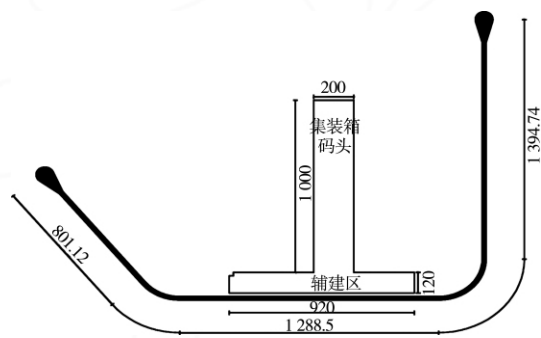


图1 总平面布置(单位: m)

1 码头结构选型主要考虑因素

1.1 复杂的外海自然条件

1) 工程区波浪主要为风成浪, 100 a 一遇波浪在极端高水位(2.09 m)时, 波高 $H_{1\%} = 6.69$ m, 波长 $L = 82$ m, 周期 $T = 7.5$ s。

2) 施工海域风大浪高, 受寒流影响, 施工作业天数根据气象水文资料初步分析在 280 d 左右。

3) 工程区地质条件极其复杂, 土体工程力学强度高低和软硬程度呈交替变化趋势, 规律性较弱, 土层极不均匀和复杂, 其土体的典型强度指标($C = 5, \varphi \approx 30^\circ$) 较高, 但压缩性($M = 3.7 \sim 8.4$ MPa) 较大, 同时各层土体中广泛分布有极软弱泥炭层(压缩指数 $C_c = 1.46$), 更增加了地质的复杂性和不均匀性。典型土层参数见表 1。

表1 典型土层参数

单元土体	层厚/m	有效黏聚力 c'/kPa	有效内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	压缩模量 M/MPa	垂直渗透系数/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	垂直固结系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	压缩指数 C_c	回弹指数 C_s
粉土 1	4.5	5	30	3.7	1.00×10^{-7}	3.66×10^{-5}		
细中砂 1	1.9	0	33	11.2	2.00×10^{-5}	2.22×10^{-2}		
泥炭层	0.9	10	12		1.00×10^{-9}	4.50×10^{-7}	1.46	0.33
粉土 2	8.2	5	30	7.9	2.00×10^{-7}	1.56×10^{-4}		
细中砂 2	12.7	0	33	39.0	2.00×10^{-6}	7.72×10^{-3}		
粉质黏土	4.0	10	24	8.4	2.00×10^{-8}	1.66×10^{-5}		
泥炭层	3.1	10	12		1.00×10^{-9}	4.50×10^{-7}	1.46	0.33
粉质黏土	12.7	10	24	8.4	2.00×10^{-8}	1.66×10^{-5}		
细中砂 3	5.5	0	33	43.3	2.00×10^{-6}	8.57×10^{-3}		
粉土 3	18.5	5	30	13.7	2.00×10^{-7}	2.71×10^{-4}		
泥炭层	0.7	10	12		1.00×10^{-9}	4.50×10^{-7}	1.46	0.33
粉土 3	8.3	5	30	13.7	2.00×10^{-7}	2.71×10^{-4}		

1.2 较高的集装箱码头使用要求

1) 防波堤和码头水工结构的使用年限要求为 100 a。

2) 码头最大设计船型为载箱 1.8 万 TEU、载重 20 万 t 集装箱船。

3) 桥机外伸距 65 m, 吊具下起重能力 65 t, 轨距 30 m, 非工作状态下最大轮压达 2 170 kN。

4) 码头为全自动化集装箱码头, 对工后沉降和不均匀沉降要求非常高: 平面度要求 8 ft(2.4 m) 范围内高差不超过 10 mm(4‰); AGV 装卸区和

行驶区的坡度要求 $\leq 6\%$, 局部最大不超过 1%。

1.3 极差的施工依托条件

工程离陆地较远, 属于全海上施工, 各种施工材料、施工设备、预制构件等均需海运至现场, 海上施工难度非常大。

1.4 技术复杂、难度大, 设计与施工要求较高

本工程特殊地质条件下的水工结构技术难度较大, 一些技术问题无现成规范指导, 需依靠数值模拟、经验传统公式等进行综合分析, 采用新思路、新结构才能够满足项目要求。

2 码头结构选型原则

确定码头结构的选型设计应充分体现“科学合理、安全可靠、技术先进、施工方便、经济适应”的总体原则,并符合有利于规避风险、有利于施工、有利于环保的技术思路^[1]。

1) 码头结构形式应满足营运使用要求,后期维护工程量尽可能小,能够满足大型船舶靠离以及装卸使用要求,能够适应深厚高压缩性土的沉降变形要求。

2) 作为中国企业在欧盟的第一个现汇工程咨询项目,码头结构的设计施工技术应成熟,有利于规避风险。

3) 码头结构形式应适应现场的自然条件和施工条件,应有利于人工岛的施工,使施工作业安全、快捷、方便,并可多作业面施工,确保工期。

4) 积极采用新思路、新技术和新结构,但应充分考虑新结构新技术可能带来的风险。

5) 本工程为外岛水上施工,同时考虑防腐要求,水工结构尽量采用预制预应力构件,现场拼装。

3 码头结构选型

3.1 高桩码头+组合式桩基承台驳岸结构

码头结构采用高桩码头+组合式桩基承台驳岸结构(图2),码头结构与驳岸结构分离以适应结构的不同功能要求。码头结构满足靠船和装卸设备的使用功能要求,驳岸结构主要完成挡土功能^[2]。本结构的关键点和难点在于组合式桩基承台驳岸结构在本工程深厚高压缩性软土、软硬交替互层和广泛存在极软弱泥炭夹层的地质条件下,对后方陆域高回填土和较大集装箱荷载的适应性问题^[3]。

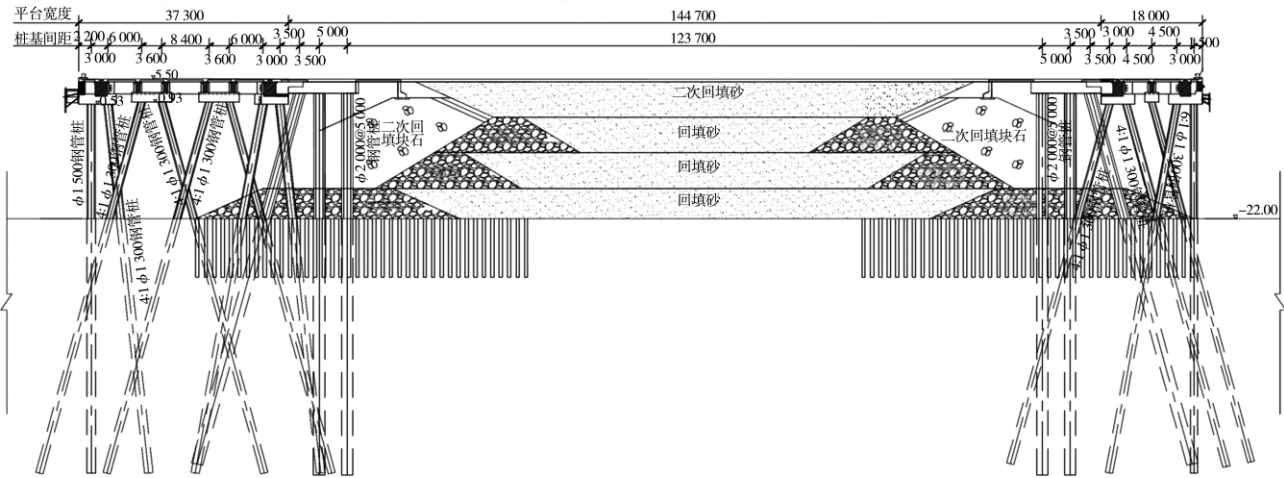


图 2 高桩码头+组合式桩基承台驳岸结构断面(高程: m; 尺寸: mm。下同)

本工程组合式桩基承台驳岸结构桩基结构考虑采用 $\phi 2\,000\text{ mm}\delta 32$ 的钢管桩,结构段为 35 m,桩横向间距为 3.5 m 和 5 m,其中排桩纵向间距为 2.1 m,其余桩纵向间距为 5 m,墩台厚 2.8 m,

墙后回填块石,地基处理采用挤密碎石桩。为了减小驳岸结构的内力,考虑先进行后方陆域局部分级回填施工,再进行桩基承台施工。对此结构采用有限元数值模拟分析,计算结果见表 2。

表 2 组合式桩基承台计算结果

施工步骤	桩轴力/ kN	桩拔力/ kN	桩弯矩/ (kN·m)	桩水平位移 U_x/cm	桩竖向位移 U_z/cm	土体水平位移 U_x/cm	土体竖向位移 U_z/cm
陆域三级回填						9.00	-49.00
打桩	919		508	0.70	-0.80		位移释放为 0
排桩后方回填	7 554		1 931	2.80	-5.05	1.56	-8.52
挡土墙施工及挡墙后方块石回填	9 105		2 119	3.02	-6.06	-2.12	-11.40
回填至码头面	12 090	-504	5 490	6.87	-8.25	-6.32	-24.96
加陆域荷载	13 990	-969	8 927	8.97	-11.92	-10.24	-42.01

分析数值模拟计算结果可知:

1) 桩力偏大, 桩长较长 (97 m 左右), 应力不满足要求, 结构位移较大。

2) 通过有限元软件模拟各种不同桩数可知, 最大桩轴力依然为 12 660 kN 左右, 但桩弯矩随着桩数的增加逐渐减小, 结构整体趋势依然向陆侧倾倒。由于土体竖向变形仍较大, 桩基负摩擦力仍能充分激发, 故增加桩数对轴力影响不大。另外, 由于增加桩基数量, 土体水平变位由 100 mm 减小到 50 mm, 对单桩的水平推力减小, 桩基弯矩变小。

3) 随着土的固结速率不断减小和桩侧极限摩擦力的存在, 桩侧负摩擦力随时间非线性发展, 逐渐趋于稳定, 但只需很小的桩土相对位移 (2 mm) 即可以充分激发和发挥桩侧摩擦力, 或

者使桩侧摩擦力方向发生改变。对场地先堆载固结, 可以减小桩侧负摩擦力, 减小最终的桩身轴力和桩身沉降, 但场地需要达到较大固结度 (固结度达到 90% 以上), 才能达到比较明显的效果^[4]。

因此可以得出结论: 组合式桩基承台驳岸结构不适用于本工程特殊的地质条件。

3.2 重力式沉箱结构

由于业主前期研究推荐采用重力式沉箱结构方案, 同时考虑到工程区域已建有大型预制场, 故提出重力式沉箱结构方案进行比选。考虑到特殊地质条件, 将集装箱岸桥前、后轨放在同一沉箱结构上以减小其不均匀沉降, 大码头单个沉箱高 23.5 m, 宽 33.5 m, 长 18.0 m, 质量约 7 200 t, 沉箱内回填中粗砂, 下部为 4 m 厚 10~100 kg 抛石基床 (图 3)。

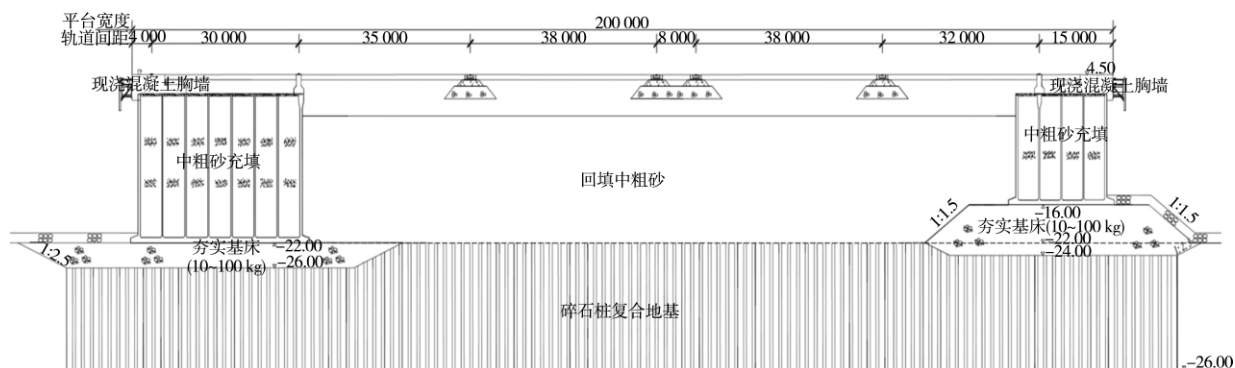


图3 重力式沉箱结构断面

根据计算可知, 重力式沉箱结构若不进行地基处理则其整体稳定不满足要求。另外, 在深厚压缩性土体和极软弱泥炭夹层存在的地质条件下, 不进行地基处理会导致码头结构沉降量过大。

对于深水软弱地基的处理, 目前主要有水下深层水泥搅拌桩、排水固结法、碎石桩等方法^[5]。水下深层水泥搅拌桩地基处理方案的整体稳定性满足要求, 码头总沉降量大大减小, 满足工后沉降要求, 但水泥与含有机质的土体搅拌会阻碍水泥水化反应。由于拟建工程所在区域有机质泥炭层广泛存在, 可能存在断桩的风险, 该方案施工难度大、技术可靠性较低, 且存在巨大的环境风险。所以水下深层水泥搅拌桩的地基处理方案对本工程不适用。在本工程特殊地质情况

下, 打设塑料排水板不能减小最终沉降量, 仅起到加快土体排水固结速度的作用, 而本工程的土体排水性能较好, 经计算得知, 打设塑料排水板对提高土体固结排水的效果并不明显, 故排水固结法也不适用。水下挤密碎石桩处理方案的工后沉降量较小, 基本满足码头的使用要求, 而且施工简便, 对环境污染小, 施工质量也比水下深层水泥搅拌桩容易得到保证, 能增大重力式沉箱结构对复杂地质的适应性。故抛石基床下采用水下挤密碎石桩复合地基进行处理, 碎石桩直径 1.2 m, 间距 1.8 m, 三角形布置, 置换率 40%, 处理深度取 20 m。

对重力式沉箱+水下挤密碎石桩复合地基结构的沉降进行有限元数值模拟计算, 结果见表 3。

表3 重力式沉箱结构沉降计算结果 m

沉降点	施工期总沉降	工后沉降
堆场中心	-1.927	-0.139
沉箱前沿	-0.875	-0.173
沉箱后沿	-1.132	-0.148

结合计算结果,对重力式沉箱结构进行分析可知:

1) 堆场和码头沉箱施工期沉降较大,需通过预制结构预留高度和上部后期回填及现浇结构进行调平,设计和施工技术风险较大,施工控制难度较大。

2) 工后沉降差产生的最大坡度为1.1‰,理论上满足全自动化集装箱码头平面度和坡度的要求,

但实际使用期工艺荷载加载具有不确定性,不均匀沉降仍有可能出现较大坡度,将导致使用期需要调平维护,影响码头生产。

3.3 全高桩(高桩码头+高桩堆场)结构

全高桩梁板码头结构,在软土地基上有成熟的设计施工经验,结构安全可靠,风险小,具备尽快开工的条件。本工程大码头平台宽度约为37 m,码头排架间距为10.0 m,每榀排架设置10根钢管桩,前、后轨道梁下的桩帽各设置3根 $\phi 1\,500$ mm钢管桩,前轨道梁下设半叉桩,后轨道梁下设叉桩,其余桩帽下各设置1组2根 $\phi 1\,300$ mm叉桩。集装箱码头其余部分全部采用全直桩结构(图4)。

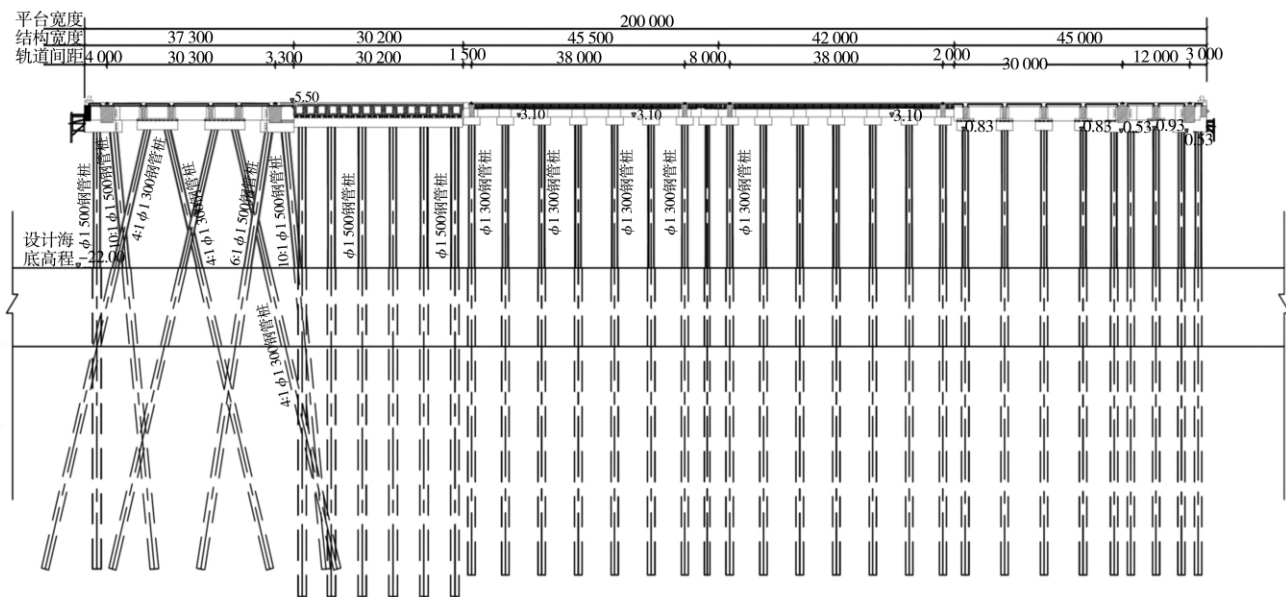


图4 全高桩(高桩码头+高桩堆场)结构断面

采用全高桩结构具有以下特点:

1) 全高桩结构方案受力模式清晰,设计和施工技术成熟,桩基结构深入持力层,沉降量小,能较好地满足全自动化集装箱码头的使用功能要求,能有效规避本工程极复杂和不均匀地质带来的诸多不确定风险。

2) 钢管桩虽然耐久性较差,但对桩基采取合适的专项防腐措施也能达到100 a的使用年限要求,和尽量减小后期维护工作量的目的。

3) 采用全直桩结构可以避免因为桩基数量过多带来的碰撞及施工问题,预制预应力结构拼装简单,施工方便,能加快外海施工速度。

3.4 结构比较

通过比较分析可知:重力式沉箱结构方案具有耐久性好的优点,但在本工程极其复杂和不均匀的地质条件下建设大型重力式沉箱结构的全自动化集装箱码头,其设计和施工技术风险较大,施工控制难度较大,不可预见风险也较大,且重力式沉箱结构方案投资成本较全高桩(高桩码头+高桩堆场)结构高10%左右。经综合分析认为:全自动化集装箱码头水工结构方案应优先选用设计、施工技术成熟,施工和使用风险小,有利于规避风险,且投资较低的结构形式,因此集装箱码头结构推荐采用全高桩结构(高桩码头+高桩堆场)方案。

(下转第54页)

(波浪 $H_{1\%} = 5.25$ m, 水流流速 $v = 1.2$ m/s) 作用下的撞击能量^[3], 同时考虑其撞击能量大于 5 000 吨级船舶满载正常靠泊速度的撞击能量, 建成后工程效果见图 6。



图 6 浮筒式防撞设施

3 结论

1) 对于单一的大型原油进口码头, 采用离岸的“T”型布置是合理的; 但对于既有原油进口又有化工产品出口的综合性液化危险品码头, 采用离岸的“L”型双侧靠泊布置形式, 利用内挡和驳岸布置小型化工泊位, 可减少占用深水岸线资源, 更能体现岸线资源的优化利用。

2) 大型油品码头引桥采用大跨度钢管吊杆拱桥, 更美观, 施工和维修均较方便, 与传统惯用的钢桁架空腹拱桥和钢管混凝土吊杆拱桥相比, 投

资更少, 值得推广应用。

3) 大型油品码头管道补偿采用 π 形补偿器, 具有不受工作压力和温度的限制、安装方便、补偿距离大、长臂和短臂的尺寸可根据现场安装空间灵活调整等特点, 不仅可为管道间留出更多的通道空间, 而且还节省管架结构投资, 值得推广应用。

4) 深水区引桥防撞设施采用浮筒防撞设施美观、有效, 而且投资可控, 类似工程可参考性选用。

参考文献:

- [1] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 厦门港古雷港区古雷作业区南 2 号液体化工码头工程初步设计[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2010.
- [2] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 厦门港古雷港区古雷作业区南 2 号液体化工码头工程施工图设计[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2010.
- [3] 海军北海工程设计院. 厦门港古雷港区古雷作业区南 2 号液体化工码头工程浮式防撞设施施工图设计[R]. 青岛: 海军北海工程设计院, 2010.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 49 页)

4 结语

1) 对于本工程特殊的高压缩性土体和泥炭夹层地质, 土体固结对桩产生的负摩擦作用不能忽视, 只要有很小的相对位移, 即可充分激发桩侧摩擦力, 对场地先堆载固结, 达到较大的固结度时, 才能达到明显减小负摩擦的效果, 本工程不适合采用组合式桩基驳岸结构。

2) 在极其复杂和不均匀的地质条件下建设大型重力式沉箱结构的全自动化集装箱码头, 其设计和施工技术风险较大, 施工控制难度较大, 不可预见风险也较大, 本工程重力式沉箱结构需谨慎。3) 全高桩结构是软土复杂地质条件下首选的结构形式, 其设计、施工技术成熟, 施工和使用风险小, 有利于规避不可预见的地质风险, 是本

工程全自动化集装箱码头推荐采用的结构形式。

参考文献:

- [1] 程泽坤. 洋山深水港区工程码头及接岸结构选型[J]. 中国港湾建设, 2008(2): 17-22.
- [2] 王崇宇. 深水高桩码头斜顶桩驳岸结构桩土相互作用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
- [3] 方君华. 在洋山港应用斜顶桩板桩承台结构的体会[J]. 水运工程, 2008(10): 104-108.
- [4] 周万欢. 堆载固结过程中单桩负摩擦力性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [5] 王世坚. 近海岛屿上的集装箱码头深水防波堤结构设计及地基处理技术的研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2006.

(本文编辑 郭雪珍)