



地中海南岸开敞式码头设计要点

宋伟华, 叶晓文, 沈迪州, 卢永昌

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 分析地中海南岸开敞式码头的轴线方向和结构形式的设计要点。针对轴线方向, 综合考虑风、波浪和水流条件, 分析得出主要控制因素, 并兼顾航道、接岸结构以及与周边环境的协调, 从而确定最优的轴线方向。针对结构形式, 给出重力式和桩基式的常规优劣对比。结合实际项目, 阐述结构选取是如何考虑地质条件、运营维护和新技术因素的。更重要的是, 介绍了非常规的双圆筒断面方案及其优点, 为类似项目提供参考。

关键词: 开敞式码头; 轴线方向; 结构形式; 双圆筒

中图分类号: U 652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0092-05

Key design issues of open terminal at south coast of the Mediterranean Sea

SONG Wei-hua, YE Xiao-wen, SHEN Di-zhou, LU Yong-chang

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The key design issues of the axis direction and structural form of the open terminal at south coast of Mediterranean sea are analyzed. For the axis direction, the main controlling factor is found comprehensively after considering the wind, wave and current, and the channel, connecting structure and the impact with surrounding are also been considered, then the axis orientation is confirmed. In view of the structural form, the conventional advantages and disadvantages of the gravity type and the pile foundation type are given. Combined with the actual project, how to consider the geological conditions, operation and maintenance and new technical factors in the structure selection is explained. More importantly, the unconventional double cylinders section plan and its advantages are introduced to provide reference for similar projects.

Keywords: open terminal; axis orientation; structure type; double cylinders

伴随着船舶大型化的趋势和优良近海岸线的日益减少, 港口的深水化和大型化必将成为未来发展的趋势。同时, 港口的深水化也将加大工程项目的投资和施工难度, 在一定程度上制约了项目的推进落实。在这种趋势下, 开敞式码头为此类项目提供了较好的解决方案。通常情况下, 无防波堤或无天然屏障掩护的码头被称为开敞式码头。

开敞式码头常采用高桩墩台和圆筒沉箱结构, 而双圆筒断面方案具有一定创新性。目前, 常规的水工结构为单圆筒类型, 包括钢圆筒和混凝土圆筒, 国内相关研究较多。例如: 彭志豪^[1]研究了插入式钢圆筒内侧土压力的分布规律; 王玉

红^[2]针对混凝土的圆筒形沉箱在深水油码头中应用进行研究; 但针对双圆筒结构形式的研究相对较少, 郭隆治^[3]从结构受力角度研究了波浪作用情况下的双排圆筒特性。

本文将以地中海南岸某矿石码头项目为例, 结合已经开展的数值模拟和物理模拟试验, 针对开敞式码头轴线方向和双圆筒结构形式两个设计要点进行详细述评, 为设计人员提供参考。

1 项目概况

项目位于地中海南岸, 建设1个15万DWT矿石码头卸船泊位, 是后方钢厂的配套码头工程。该

项目包括 760 m 接岸引堤、360 m 码头和 16 m 加强段, 停泊水域底高程-20.0 m, 港池底高程-21.0 m。其中, 接岸引堤为斜坡式结构, 码头为双圆筒结构, 两部分均为实体结构。在本项目的北侧, 现有两处单点系泊。码头结构距离单点系泊作业水域距离为 1 041 m, 船舶回旋水域距离单点系泊作业水域 296 m, 考虑船舶进出港方向, 具体见图 1。

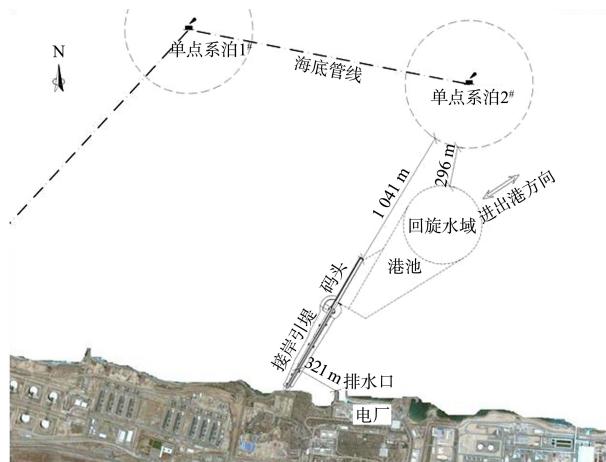


图 1 码头平面布置

1.1 特征水位

具体特征水位为: 极端高水位 0.7 m, 设计高水位 0.34 m, 设计低水位-0.26 m, 极端低水位-0.6 m。

1.2 风、波浪、流

1.2.1 风

项目所在区域的主风向为冬季西南向和夏季东北向。

1.2.2 波浪

根据对区域范围 1963—1970 年的波浪数据分析, 并结合当地工程经验, 项目选址受东西两侧半岛的掩护, 北侧深水区的主要波浪方向为 30°N (NNE)、330°N(NNW) 和 360°N(N)。其中, 330°N 是强浪向, 30°N 是主浪向。项目北侧深水区的设计波要素见表 1。

表 1 项目北侧深水区的设计波要素 H_s

波浪方向	H_s / m						
	重现期 2 a	重现期 5 a	重现期 10 a	重现期 20 a	重现期 50 a	重现期 100 a	重现期 200 a
N	4.2	5.3	5.9	6.7	7.7	8.4	9.15
NNW	4.7	6.1	7.1	8.1	9.5	10.4	11.47
NNE	5.4	6.3	7.0	7.6	8.5	9.2	9.85

1.2.3 流

因受西南和东北两个主风向的控制, 本项目的流向主要为西南和东北两个方向。在西南风作用下, 流速从岸边到外海越来越大; 项目选址位于近岸, 此种情况下的流速可以忽略。在东北风的作用下, 最大流速为 0.26 m/s。

2 轴线方向

根据常规经验, 在选择码头的轴线方向时, 要充分考虑实地的风、波浪和水流的具体资料, 保持码头轴线与风向、浪向和水流的主导方向保持一致(即顺风、顺浪和顺流), 从而最小化风、浪和流对船舶的作用力, 保证船舶的停泊安全并提高工艺装卸效率。然而, 码头轴线通常很难与各个因素达到一致。在这种情况下, 就要根据船舶

性质、作业要求、系统条件等, 综合判断其中的控制性因素。此外, 还要兼顾航道和与项目周边环境的协调。

针对本项目, 通过对风、波浪和流的分析可知, 决定码头轴线方向的主导因素是风向和波浪方向, 0.26 m/s 的最大流速则是次要的因素。基于波浪条件, 如果想同时掩护 3 个主浪向, 则码头轴线与岸线夹角过小, 疏浚量较大, 且船舶停靠和离泊较为不便。因此, 码头轴线方向拟定两个方案, 在掩护两个主浪向的前提下, 与另一浪向保持一致, 最小化波浪的作用力。

方案 1: 码头轴线方向 30°N, 掩护 330°N 和 360°N 方向波浪; 方案 2: 码头轴线方向 330°N, 掩护 30°N 和 360°N 方向波浪。两个方案的优缺点见表 2。

表 2 方案优缺点对比

方案	优点	缺点
1	码头结构掩护强浪向，码头走向与主浪向、风向和流向一致，船舶系泊条件好；船舶靠泊离泊都是顺风顺流，便于船舶操控	码头轴线延长线与现有单点系泊水域冲突，在单点系泊水域有船舶系泊作业时，船舶进出港航较为不便
2	码头轴线延长线避开现有单点系泊水域，船舶进出港航便利，不受单点系泊使用的影响	码头轴线与风向夹角较大，为 75°。东北风时，横向作用力使船舶吹离泊位，对顺岸式码头的系缆不利；西南风时，横向作用力使船舶挤靠码头，对护舷的冲击较大。此外，船舶靠泊离泊都是横风横流，不便于船舶操控

根据现场考察，项目北侧的两个单点系泊利用率并不高。同时，作为专业化的矿石卸船码头，主力船型为 6 万~15 万 DWT，来船频率也不高。因此，方案 1 来船与单点系泊的冲突几率较小，项目运营期间是可以接受的。综合考虑，轴线方向选定方案 1。

针对方案 1 开展数值模拟，根据文献[4]，在双圆筒码头结构的掩护下，从 330°N 和 360°N 两个方向传递过来的波浪，绕射到泊位处时，方向转变成平行于码头轴线，并且波高分别减小为入射波浪

的 1.6% 和 34.8%，降低了对船舶系泊的影响。

根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》^[5] 表 5.4.27，15 万 DWT 散货船对应的装卸作业允许波高 $H_{4\%}$ 限制为：顺浪情况下，装船作业为 2.0 m，卸船作业为 1.5 m；横浪情况下，装船作业为 1.5 m，卸船作业为 1.2 m。同时，根据波浪数模报告结果，码头前沿的设计波要素见表 3。根据码头前沿的波浪序列进行统计分析，得到有效作业天数为 280 d，满足业主实际需求。因此，本项目码头轴线方向的选取是合理的。

表 3 码头前沿的设计波要素 H_s

波浪方向	H_s/m						
	重现期 2 a	重现期 5 a	重现期 10 a	重现期 20 a	重现期 50 a	重现期 100 a	重现期 200 a
N	1.30	1.51	1.63	1.78	1.98	2.12	2.27
NNW	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.17
NNE	2.98	3.34	3.62	3.87	4.24	4.53	4.80

3 结构形式

3.1 结构特点

3.1.1 重力式结构

1) 工程造价高。重力式结构通过自身重力保持稳定，随着水深增加，其所受到的波浪力和水流力也将急剧增大，从而导致断面结构增大，工程造价提升。

2) 施工难度大。开敞深水区，波浪和水流一般较大，施工可作业天数较少，对施工影响极大，例如：基床的开挖回填整平、沉箱的预制拖运、沉箱的定位安装等。

3.1.2 桩基结构

1) 工程造价低。桩基结构自身受波浪和水流力较小，随着水深增加，结构加强所引起的工程造价没有重力式结构剧烈，在大水深情况下的整体工程造价通常较低。

2) 施工相对容易。桩基施工工序较重力式简单，且桩体结构受风、浪和流的影响较小，施工条件较为宽松。

根据上述对比，桩基结构依靠其工程造价低、施工相对容易成为开敞式码头最为常见的选择。然而，在实际工程中，结构形式的选取还要考虑到地质条件、运营维护和新方案的采用等因素^[6]。本项目就是采用重力式结构的开敞式码头，码头兼做防波堤。

3.2 地质条件

根据地质勘查资料，码头区域全部为坚硬的泥灰岩。其中，表层 1~2 m 泥灰岩的标贯击数超过 40 击，深层泥灰岩的标贯击数全部大于 50 击。其中，以典型的钻孔 SG-01 和 SG-03 为例，给出泥面下每隔 1.5 m 的标贯击数，见表 4。由表 4 可以看出，随着深度的增加，泥灰岩越来越坚

硬。尤其是 SG-01, 泥面下 6 m 处, 50 击才打入 60 mm。因此, 基于如此良好的地质基础, 码头结构形式采用桩基将面临较大的施工难度, 而采用重力式更为合理。

表 4 典型钻孔标贯值

钻孔	标贯编号	高程/m	标贯击数 N/击	贯入度/mm
SG-01 (泥面高程 -20.26 m)	SPT-1	-21.76	41	300
	SPT-2	-23.26	50	210
	SPT-3	-24.76	50	100
	SPT-4	-26.26	50	60
SG-03 (泥面高程 -16.91 m)	SPT-1	-18.41	43	300
	SPT-2	-19.91	50	220
	SPT-3	-21.41	50	200
	SPT-4	-22.91	50	190

3.3 运营维护

本项目东侧存在天然气发电厂的排水口, 排水口距离引堤结构距离 321 m, 排出的温水会对结构造成一定影响。重力式结构比桩基结构具有更好的耐久性, 可以降低业主后期运营维护的成本。通过平面分析可知, 本项目建成后, 排水口区域西侧(即引堤处水域)水流强度低, 温水较难向西侧运动; 且东部水域开阔, 在潮流、波浪作用下, 温水容易扩散出去, 对码头结构水域的水温影响有限。

3.4 新型结构方案

通常, 重力式结构主要有方块结构、扶壁结

构和沉箱结构。对于深水开敞式码头, 波浪和水流环境复杂, 受力较大, 方块结构整体稳定性较差, 不宜选取。同时, 扶壁结构通常需要有后方陆域作为依托, 在开敞式海域的适用性不强。因此, 沉箱结构是较好的解决方案, 其具有整体稳定性好、独立性强等特点^[7]。

针对沉箱结构, 通常有方形和圆形两种形式, 其中, 方形沉箱因计算模式成熟、施工简便等特点在工程领域的应用最为广泛。然而, 在波浪条件恶劣的深水区, 圆形沉箱受力均匀、节省工程量的优势就凸显出来了^[8]。本项目立足圆形沉箱, 经过多方案的研究分析, 最终提出了双圆筒断面方案, 见图 2。

码头断面的基床顶高程-20.5 m, 安放 2 个直径为 15.0 m 的圆沉箱, 沉箱上部由 3.0 m 厚的现浇混凝土连接。其中, 左侧挡浪墙顶高程 10.5 m, 用来掩护 330° N 方向的波浪; 码头面顶高程 4.0 m, 满足运营需求且允许大浪情况下上水。

此双圆筒断面形式, 前后沉箱不能作为整体受力来考虑, 在设计过程中采用岩土有限元软件(MID-AS GTS NX)进行分析, 需要研究双圆筒结构稳定的计算模式、圆筒间土压力、筒内土压力、基床应力、上部连接板内力等, 计算原理复杂, 尚未有施工先例。这种断面形式具备如下优点:

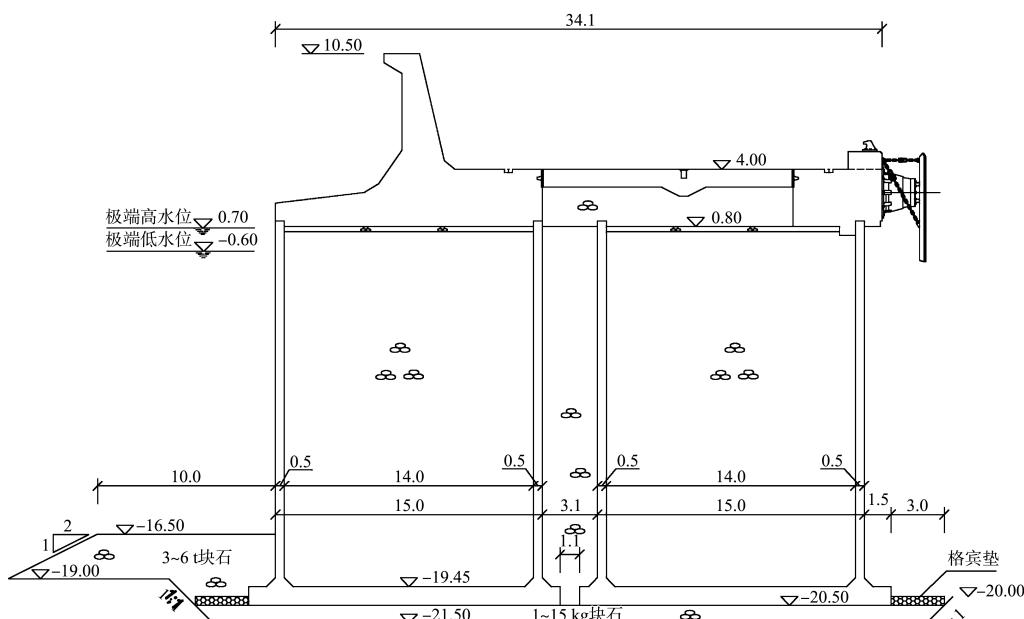


图 2 码头断面 (单位: m)

1) 单个沉箱质量小, 便于施工。按照常规单个沉箱断面方案, 单个沉箱的直径为 33.1 m, 壁厚 650 mm, 质量将超过 5 000 t。而双圆筒方案中, 单个沉箱的直径为 15.0 m, 壁厚 500 mm, 质量为 1 878 t, 更便于沉箱的安全出运和精确安装。

2) 结构受力均匀。单个沉箱断面方案中, 因单体尺度过大, 壁厚相应增加。同时, 沉箱直径达到 33.1 m, 在进行抗倾计算时, 沉箱底板受力不均明显, 局部弯矩巨大, 对结构安全不利, 底板配筋过程中也会遇到空间不足的问题。而双圆筒方案中, 减小单体尺度和壁厚, 受力更为均匀合理。

3) 降低结构损坏风险。单沉箱断面方案中, 沉箱沿码头轴线方向的连接较为薄弱。一旦损坏, 对码头整体稳定影响较大。而双圆筒结构方案中, 两排沉箱间填充块石, 较好地规避单沉箱方案连接处损坏的风险。

同样, 针对码头结构开展 2D 物理模型试验, 根据文献[4], 在设计波浪(100 a 一遇, $H_s = 8.81 \text{ m}$)情况下, 码头结构是安全稳定的。随后, 针对码头结构开展破坏性试验, 将波浪增大到 $H_s = 10.0 \text{ m}$ (几乎不可能出现)时, 码头结构开始出现整体位移, 但是沉箱依然没有倾覆和损坏。因此, 本项目双圆筒结构方案不仅经济合理, 而且安全可靠。

4 结语

1) 码头轴线方向不仅要根据船舶性质、作业要求、系统条件等来判断风、浪和流的控制性因

素, 还要兼顾航道和与项目周边环境的协调。

2) 结构形式的选取需要考虑到地质条件、运营维护和新方案的采用等因素。

3) 首次采用双圆筒结构形式, 尚未有施工先例。此方案的圆沉箱受力均匀, 且能降低结构损坏风险, 可供其他项目参考, 具有较好的推广性。

参考文献:

- [1] 彭志豪, 卢永昌. 插入式钢圆筒筒内侧土压力分布规律及计算方法[J]. 水运工程, 2019(9): 249-252.
- [2] 王玉红, 王丽芳. 一种新型圆筒型沉箱在深水油码头中的应用及内力分析[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(9): 43-46.
- [3] 郭隆治, 王军, 沈迪州, 等. 波浪作用下双排圆筒结构受力特性[J]. 水运工程, 2017(10): 106-112.
- [4] 阿尔及利亚 LEM 实验室. BETHIOUA 矿石码头设计与施工项目: 波浪数模研究报告[R]. 阿尔及尔: 阿尔及利亚 LEM 实验室, 2017.
- [5] 中交水运规划设计有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [6] 范寅初. 对开敞式码头总平面设计若干问题的探讨[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(8): 281-282.
- [7] 张志明, 胡家顺. 我国大型开敞式码头结构设计与施工技术现状及发展趋势探讨[C]//港口工程分会技术交流文集. 中国土木工程学会港口工程分会. 北京: 人民交通出版社, 2005: 98-107.
- [8] 张志明, 朱小松, 周丰. 波浪作用下大型开敞式圆沉箱墩式码头前波峰面高度研究[J]. 中国港湾建设, 2011, 32(3): 20-26.

(本文编辑 武亚庆)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.syge.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。