

复杂地质条件下船坞坞墙结构设计与应用

张森臣¹, 阮心²

(中国电建集团山东电力建设有限公司, 山东 济南 250010)

摘要: 公司承建的港务综合设施项目地处沙特阿拉伯北部的阿曼湾沿岸, 地质条件复杂。坞墙结构作为船坞设施的主要水工结构段, 深入剖析大型干船坞坞墙结构专业的设计原理及优化方向, 结合国内外工程实践经验, 总结提炼在复杂地质条件下的大型船坞结构设计及优化的思路及方法则至关重要。通过本研究的相关成果以期填补公司在相关工程领域的空白, 拓展公司业务范围, 同时也为后续类似项目提供相关工程设计的参考。

关键词: 坞墙结构; 船坞; 复杂地质; 选型

中图分类号: TV92 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2023) 03—0094—03

公司承建的沙特萨拉曼国王国际港务综合设施项目包含建设三座大型干船坞, 其中两座用于新造船只的建设, 一座用于船只的检修维护。因项目所在地所处的地质水文环境复杂, 坞墙结构作为船坞正常使用以及抵抗极端事件的保障作用则更加突出。因此, 坞墙结构的合理选型及设计是如何在安全可靠的前提下最大限度地提高经济性、缩短施工周期的保证, 也是坞墙结构设计需要完成的一项重要指标。

本研究从解决工程实际问题出发, 通过对项目复杂地质进行分析, 对坞墙结构的设计、选型研究过程及方法进行总结, 尤其针对船坞坞墙结构优化过程中的计算

分析过程进行说明, 包括优化方向的确定、有限元分析及计算结果。

1 项目地质条件

项目所处地区原始地貌为砂质土层, 其岩层埋深较深, 且风化程度较高, 船坞区域的地下土层依次为级配不良的粉砂、轻度至良好胶结的砂 / 软弱砂岩、较软弱的砂岩、粘土岩 / 泥岩 / 粉砂岩 / 粉砂屑石灰岩 / 石膏, 偶有薄的粉砂 / 粘土透镜体。地质的承载力低, 天然地基往往不能满足大型工程对土体变形和稳定的要求, 因此, 在工程建设前通常需要对地基进行处理、加固, 增

4.1 实例验证

为了验证本文算法的可行性和适用性, 以 40HQ 外贸集装箱进行装箱为例。从宁波某进出口有限公司获取某个订单进行验证, 该订单产品箱数为 893 箱, 产品种类为 67 种。

通过该订单的实例验证可以看出, 在满足实际装载约束的同时, 40HQ 的集装箱的体积利用率达到了 91.66%, 降低了运输成本。如图 7 所示 40HQ 外贸集装箱的装载效果, 不同颜色表示不同的货物。

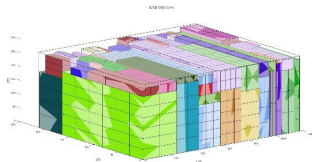


图 7 40HQ 集装箱

5 结论

通过对宁波某进出口有限公司实例验证, 表明所提

算法能够较好地解决大规模货物的装载问题, 进行了上百个订单测试, 集装箱平均体积利用率均高于 89%, 取得了理想的装箱效果, 证明了算法的有效性和可行性。

当然, 本文算法仍然存在一定的缺陷, 例如, 箱子种类越多, 产生的可行块就会越多, 搜索树就会越复杂, 计算时间也会越长。

参考文献:

- [1] 李丽. 我国港口集装箱运输发展现状与趋势 [J]. 现代商贸工业, 2018, 39(19): 17-18. DOI: 10.19311/j.cnki.1672-3198.2018.19.007.
- [2] 叶秋实. 三维装箱算法的研究与系统开发 [D]. 广东工业大学, 2020. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2020.000105.
- [3] 张德富, 彭煜, 朱文兴, 陈火旺. 求解三维装箱问题的混合模拟退火算法 [J]. 计算机学报, 2009, 32(11): 2147-2156.
- [4] 张钧, 贺可太. 求解三维装箱问题的混合遗传模拟退火算法 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(14): 32-39+47.

加土体的抗剪强度，提高软基的承载力和稳定性。

表 1 当地土层概览

土层详情	描述
土层组成	基本为砂质土层 (SP/SP-SM/SW-SM/SM)，深度自地面起到最深处 30m 处，其下为岩层 (珊瑚灰岩/砂岩/粉砂岩)，探测深度为 55m。
土壤密实度	根据现场原位试验 (SPT，标准贯入) 数据显示，从地面到地下最深 55m 处的土壤密实度基本在松散至中度密实间变化。

*S- 砂石及砂质土壤；M- 无机质沉泥极细沙；P- 不良级配；W- 优良级配；

2 坞墙结构设计及选型

2.1 结构选型

船坞的结构形式按干船坞克服地下水扬压力的方式可分为四大类，即重力式、锚杆式、锚桩式和排水减压式。其中：

- (1) 重力适宜用于采用排水减压式和锚拉式结构均有困难和地基较好的情况；
- (2) 锚杆式宜用于地基具有良好锚碇条件的情况；
- (3) 排水减压式宜用于原地级或经防渗处理后地基的渗水量较小的情况。

而根据坞墙与底板的连接方式，又可以分为整体式和分离式两大类。坞墙与底板刚性连接的称为整体式，两者用缝分开而相互独立的称为分离式。

分离式坞墙常用的结构形式有重力式（包括实体式、悬臂式和扶壁式）、桩基承台式和板桩式，以及衬砌式和混合式。其中：

- (1) 重力式适用于承载力较高的地基；
- (2) 桩基承台式和板桩式适用于承载力较低的地基；
- (3) 衬砌式和混合式适用于坞墙后全部或部分为岩体的情况。

考虑项目所处地区的复杂地质，锚碇能力有限；同时，沙特当地商混价格较高，钢筋等建材大部分依赖进口；鉴于以上两点，锚拉式与重力式无论是在技术层面还是经济性上都不适合作为本工程项目的船坞选型。考虑到沙特当地丰富的油气资源造就的低价电力，使用排水设施保证船坞稳定的排水减压式结构相较于其它结构形式有着适应当地特色的较大优势。

在综合造价及技术难度等方面的考虑后，确定排水减压式结构作为本工程项目中干船坞的结构形式。同时，考虑到船坞所在地区地基承载力较好，地质分布较均匀，而且船坞埋深较大，墙体自重及上方覆土能够提供足够的稳定性。在保证安全稳定的前提下，为尽量节省成本，综合考虑后，决定使用分离式的扶壁式坞墙作为船坞坞墙结构形式。

2.2 方案优化

项目坞墙结构原设计方案由荷兰某公司进行设计，其坞墙主体由 400mm 厚钢筋混凝土墙面板、扶肋（3m 间距）、800—2100mm 变截面墙踵及 1400—2100mm 墙趾组成。

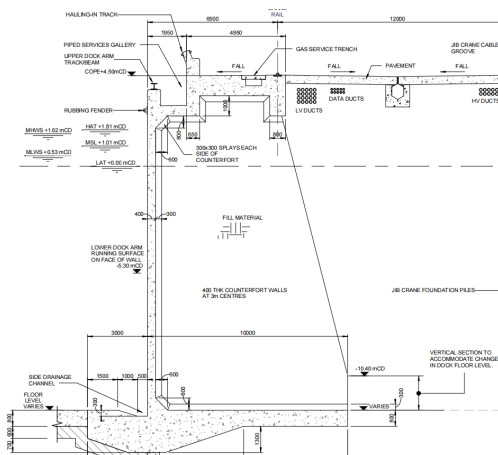


图 1 扶墙原设计方案（截面图）

原坞墙设计方案在设计之初未完全考虑上部设备等因素施加在坞墙主体上的外荷载及底板提供的约束，设计相对保守，通过精细化设计考虑，坞墙墙趾及墙踵设计、坞墙间距存在优化的空间，具体为：

- (1) 通过对上部设备荷载取值及布置的精确化确定，将墙踵及墙趾最大厚度进一步优化；
- (2) 通过对坞墙稳定性分析，探索墙趾及墙踵长度上的优化空间；
- (3) 优化扶肋的间距。

在确定优化方向后，根据类似工程的设计经验及设计参数分析，拟定了新的设计方案：考虑现场模板的尺寸，将底板划分由原方案的 25m x 25m 改为 24m x 24m；底板厚度保持不变；坞墙扶肋改为 4.5m 间隔，墙踵最小厚度由 1400mm 优化为 800mm，长度由 3m 优化为 2.5m；墙趾最大厚度优化为 1500mm，长度不变。

表 3 计算分析结果

工况	分析项 (抗力值/效应值)	结果	结论
静力平衡	最小抗滑移安全系数	0.69	满足
	最小抗倾覆安全系数	1.28	满足
	最小抗浮安全系数	2.26	满足
	最大墙趾压力 (kPa)	571.8	-
	最大墙踵压力 (kPa)	200.0	-
极限承载力	最小抗滑移安全系数	0.89	满足
	最小抗倾覆安全系数	1.41	满足
	最小抗浮安全系数	2.34	满足
	最大墙趾压力 (kPa)	645.0	-
	最大墙踵压力 (kPa)	354.0	-
正常使用 (无施工荷载)	最小抗滑移安全系数	0.9	满足
	最小抗倾覆安全系数	1.42	满足
	最小抗浮安全系数	2.34	满足
	最大墙趾压力 (kPa)	483.6	-
	最大墙踵压力 (kPa)	263.9	--
正常使用 (有施工荷载)	最小抗滑移安全系数	1.86	满足
	最小抗倾覆安全系数	4.01	满足
	最小抗浮安全系数	N/A	满足
	最大墙趾压力 (kPa)	325.2	-
	最大墙踵压力 (kPa)	251.8	-

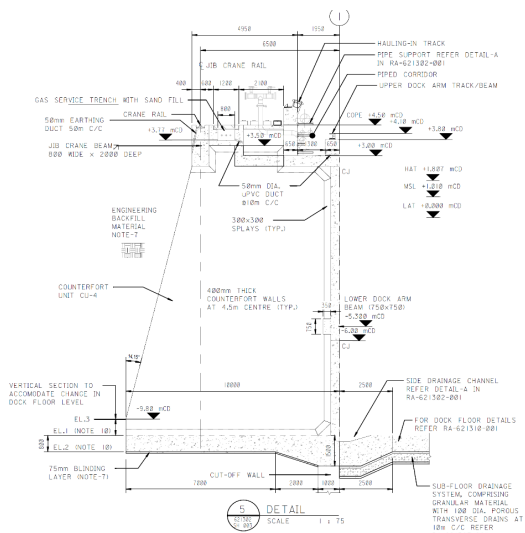


图 2 优化后的扶墙设计方案

2.3 整体稳定计算分析

坞墙结构的稳定性分析主要包括四个部分：抗滑移 (Sliding)、抗倾覆 (Overturning)、抗浮 (Uplift) 以及承载力分析 (Bearing Capacity)。

其中，每个部分的安全系数标准值为：

表 2 稳定性分析安全系数标准值

分析类型	安全系数标准取值
抗滑移	1.00
抗倾覆	1.00
抗浮	1.00

坞墙的抗倾覆分析原理是对比坞墙的倾覆力矩与坞墙本身抗倾覆的能力，即坞墙本身抗倾覆能力需大于坞墙受到的倾覆力矩一定倍数 (本工程为 1 倍)；坞墙的抗浮分析原理为对比坞墙自身重力及其它使坞墙有向下移动趋势的合力与坞墙受到的浮力，其分析结果同样为两者的比值。

2.3.1 坞墙计算模型

坞墙的稳定性计算使用 Staad Pro 有限元结构计算软件进行验算分析，其电算模型如下图所示：

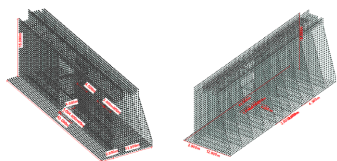


图 3 坞墙电算模型及尺寸

2.3.2 计算分析结果

经过计算分析，新方案下的坞墙设计满足稳定性需求。

3 结论

本项目坞墙结构设计的亮点之一，在坞墙设计过程中充分考虑了底板抗水平力的约束效应，有效减小了坞墙的设计尺寸，在保证安全稳定的同时进一步增强了结构设计经济性。此外，在坞墙设计过程中，在原方案的基础上，进一步优化了结构荷载的配置，将原方案中较不明确的荷载分布进行了细致的划分，将底板及坞墙按照其使用目的配置荷载，在简化了结构分析的同时，使得结构布置更加趋于合理，进而实现了结构总量的优化。

总体来看，坞墙结构的设计要点着重体现在荷载配置的合理性方面。对于船坞这类使用目的明确，设备配置固定的结构，设计初期的方案选型对设计过程影响较大。因此船型配置、工艺设备、设计容量这三项必须在整体方案敲定前尽可能完善，并作为结构设计的设计目标时刻校核设计成果，才能保证最终的设计安全、经济。

参考文献：

- [1] 周晓萍. 岩石地基上的船坞坞室设计与施工 [J]. 建筑施工, 2016, 38(05).
- [2] 宣庐峻, 周杰鑫. 格型地连墙在超深船坞坞墙结构中的应用 [J]. 水运工程, 2022(03).
- [3] 费永成, 顾倩燕, 张亚雄. 船坞接长工程中锚拉式板桩坞壁结构设计 [J]. 水运工程, 2010(12).