



LNG码头后方库区防浪墙 与陆域形成高程优化设计

黄泰坤¹, 庞然¹, 孙建军¹, 梁建国², 陈占峰¹

(1. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222;
2. 广东阳江海陵湾液化天然气有限责任公司, 广东 阳江 529500)

摘要: 护岸防浪墙与陆域形成高程合理的确定是 LNG 项目顺利实施的关键技术问题, 直接影响 LNG 码头后方库区防护效果及工程量, 进而影响项目投资和决策。以阳江 LNG 码头项目为例, 采用直接掩护罐区和非直接掩护罐区功能的护岸分区设计标准, 有效减少了防护工程量。在满足 LNG 库区防潮、防浪安全要求的前提下, 提出了基于总费用最优并兼顾景观通廊的防浪墙与陆域形成高程联动优化设计方法。开展了 4 组规则波作用下不同高程水槽断面物模试验, 验证了高程优化设计的合理性。不同结构形式挡浪墙越浪量对照试验表明: 反曲面防浪墙较直立防浪墙越浪量相对较小, 可作为优选结构形式。

关键词: LNG 码头; 库区; 防浪墙; 陆域形成; 高程优化设计

中图分类号: U 656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0058-06

Elevation optimization design of wave wall and land formation in rear gas storage tank area of LNG terminal

HUANG Tai-kun¹, PANG Ran¹, SUN Jian-jun¹, LIANG Jian-guo², CHEN Zhan-feng¹

(1. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

2. Guangdong Yangjiang Hailing Bay LNG Co., Ltd., Yangjiang 529500, China)

Abstract: The reasonable elevation of wave walls and land formation is a key technical issue for successfully implementing LNG project, and its determination directly affects the protection effect and engineering quantity of the rear gas storage tank areas of LNG terminal and then the project investment and decision. With the Yangjiang LNG terminal project as an example, the project adopts a revetment zoning design with direct and indirect cover tank areas, which effectively reduces the engineering quantity in protection. Under the premise of moisture-proof and wave-proof requirements for LNG gas storage tank areas, this paper proposes an elevation linkage optimization design method for wave walls and the land formation, and the method is the most cost-effective and considers the landscape corridor. This paper carries out four groups of physical model tests of flume sections with different elevations under regular waves to verify the rationality of the elevation optimization design. The control tests of wave overtopping rates of wave walls with different structures show that the wave overtopping rate of a curved wall is smaller than that of a vertical wave wall, and thus the curved wall can be regarded as the optimal structure.

Keywords: LNG terminal; storage tank area; wave wall; land formation; elevation optimization design

天然气作为较清洁的能源, 在众多国家的能源结构中占据着重要地位^[1]。世界天然气资源丰富, 储采比远高于原油^[2], 液化天然气(LNG)贸

易市场日趋成熟。随着经济的发展及煤改气工程的实施, 我国东部沿海地区对海运 LNG 的需求缺口问题逐步凸显。已建及规划建设的 LNG 码头为

天然气产供销体系建设打下重要基础, 但受 LNG 特点限制, LNG 码头多布局于港区外侧, 风浪条件较差, 须通过围填形成陆域, 其陆域形成及防浪墙高程的合理确定是影响项目整体顺利实施并投产的关键技术问题。目前关于 LNG 项目高程研究主要集中于防浪墙^[3]、码头自身结构^[4-5]防护设计, 尚未考虑防浪墙结构和陆域形成之间的联动关系及其对整体投资和通廊的影响, 不利于项目经济和景观效果。本文在满足 LNG 库区防护安全要求的前提下, 采用直接掩护罐区和非直接掩护罐区的设计标准, 提出了基于总费用最优兼顾景观通廊的防浪墙和陆域形成高程优化设计方法, 有效减少整体投资。通过开展水槽断面物模试验, 验证了高程优化设计的合理性。

1 工程概述

工程位于阳江市境内海陵湾东岸、海陵岛西北侧海域。拟建 1 座可停靠 17.5 万 m³ LNG 主力船型的接卸码头(水工结构靠泊 21.7 万 m³ LNG 船)、工作船码头 1 座。后方储气库区距离码头约 400 m, 储气库区陆域形成面积约 28.5 万 m², 库区南侧拟建 16 万~20 万 m³ LNG 储罐 5 座。场地工程前为开敞式水域, 原泥面高程约 0 m(当地理论最低潮面)。库区陆域需通过建设南护岸、西护

岸、东护岸、北护岸围合并由港池疏浚土吹填形成。由于吹填土含水量高, 采用真空预压方式进行软基处理再回填硬壳层材料方案, 满足库区承载力及工艺要求。LNG 码头及工作船码头的港池、停泊水域通过开挖形成, 疏浚量约 830 万 m³。平面布置见图 1。

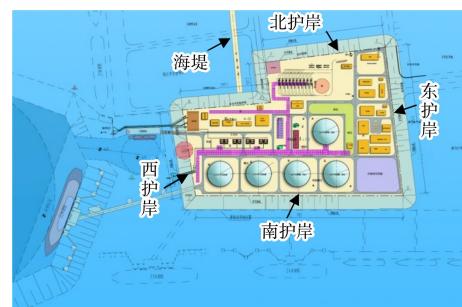


图 1 工程平面布置

2 防浪墙顶高程设计

不同于以往的单一防护标准, 考虑掩护对象重要程度, 对直接掩护罐区和非直接掩护罐区及不同护岸位置所受波浪条件差异性进行分析, 采用不同设计标准进行计算。设计水位采用当地验潮站多年统计资料确定。

2.1 南护岸和西护岸

LNG 储罐位于陆域形成范围南部区域。南护岸、西护岸须起到直接掩护罐区的作用。推算防浪墙不同位置的波浪要素, 其中南护岸波浪要素见表 1。

表 1 南护岸设计波要素

波向	重现期/a	水位/m	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	T/s
SSW	100	100 a 一遇高	2.8	2.4	2.3	2.0	12.5
		极端高	2.6	2.3	2.2	1.9	
		设计高	2.3	2.0	2.0	1.7	
	50	设计低	1.4	1.3	1.2	1.1	
		极端高	2.5	2.2	2.1	1.8	
		设计高	2.2	1.9	1.9	1.6	12.0
		设计低	1.3	1.2	1.1	1.0	

JTS 165-5—2021《液化天然气码头设计规范》^[6]要求直接掩护罐区的斜坡式护岸防浪墙顶高程按照 100 a 一遇极端高水位与 100 a 一遇波浪组合标准计算, 可按下式估算:

$$Z_c = \text{EHWL} + R_{1\%} + \Delta \quad (1)$$

式中: Z_c 为防浪墙的顶高程(m); EHWL 为重现

期为 100 a 的年极值高水位(m), 本工程高程计算基面为当地理论最低潮面; $R_{1\%}$ 为重现期为 100 a 的 $H_{1\%}$ 波浪爬高(m); Δ 为富余值(m), 可根据使用要求和护岸的重要性确定, 取 0~1 m。EHWL=4.9 m, $R_{1\%}=2.914$ m, $\Delta=0~1$ m, 计算得 $Z_c=7.814\sim8.814$ m。据此计算, 南护岸、西护岸防浪

墙顶高程可取 8.0~8.8 m。

2.2 北护岸和东护岸

根据工艺布置, 北护岸和东护岸为非直接掩护罐区, 按照 50 a 一遇极端高水位与 50 a 一遇波浪组合标准计算。其中北护岸被现状海堤分成东西两侧, 由于海堤的存在, 北护岸(海堤东侧)掩护条件更好, 防浪墙高程可进一步降低。

表 2 北护岸、东护岸防浪墙顶高程

护岸	EHWL	$R_{1\%}$	Δ	Z_c	m 取值
北护岸(海堤东)	4.59	1.525	0~1	6.115~7.115	7.0
北护岸(海堤西)	4.59	2.236	0~1	6.826~7.826	7.5
东护岸	4.59	2.054	0~1	6.644~7.644	7.5

据表 2 计算, 北护岸(海堤东侧)防浪墙顶高程取 7.0 m, 东护岸防浪墙顶高程取 7.5 m。

3 陆域形成设计高程

JTS165—2013《海港总体设计规范》^[7]要求: 港区陆域高程应满足在设定的防护标准水位时港区陆域不被淹没, 港区陆域高程通常不宜低于极端高水位以上 0.3~0.5 m。本区域 100 a 一遇高水位为 4.9 m, 因此陆域高程不宜低于 5.2~5.4 m。

陆域高程的确定涉及陆域使用要求、泥土来源、抛泥成本、地基处理费用、护岸结构造价、工期及与周边设施衔接等多因素, 应综合权衡、合理确定。

本工程造陆需要土方大约 180 万 m³, 而码头及港池开挖疏浚量大约 830 万 m³。阳江港将于近期实施 10 万吨级航道, 疏浚量约 1 627 万 m³, 因此疏浚土富余较大。距离最近的外海抛泥区运距约 50 km。适度多就近利用疏浚土方, 对于整体项目具有明显的经济性, 并减少外海抛泥对海洋环境的影响。适当提高陆域设计高程, 可充分利用疏浚土方、缩小防浪墙与陆域的高差, 但陆域高程加高, 势必将带来堤身结构成本增加。因此, 需综合研究陆域使用高程、吹填高程等多因素及其对整体投资的影响。

按照 JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规

范》^[8]规定, 吹填工程设计高程 $H_R = H_s + \Delta H$; 其中 ΔH 为考虑吹填工程完工后由于地基加固和沉降所需的预留高度(m)。地基处理沉降量的测算对于场地吹填高程影响很大。如预测沉降量小于实际沉降量, 则地基处理后场地偏高, 场地建设时需要大面积开挖; 如预测沉降量大于实际沉降量, 则地基处理后场地还需回填, 以此地基处理沉降量的测算对于吹填工程的造价、工期影响均很大, 也是吹填造陆项目的关键性技术指标之一。

3.1 不同吹填高程地基处理沉降量

地基处理采用真空预压方案, 吹填土及原状土在负压作用下产生固结沉降。沉降主要由插板期间的沉降和真空预压期间沉降组成, 即:

$$S = S_f + S_e \quad (2)$$

式中: S 为地基在真空预压结束时沉降量; S_f 为插板期间沉降量; S_e 为预压期间沉降量。预压期间沉降量由附加应力及抽真空引起的负压渗流引起, 按照分层总合法进行计算:

$$S_e = S_{d\infty} K U_{rz} \quad (3)$$

$$S_{d\infty} = m_s \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} h_i \quad (4)$$

式中: U_{rz} 为地基的平均总应力固结度; $S_{d\infty}$ 为地基的最终竖向沉降量设计值; K 为瞬时加荷条件下某时刻平均应变固结度与平均应力固结度的比值; m_s 为经验系数, 荷载较大、地基较软时取高值; n 为计算压缩土层的分层数量; e_{0i} 为第 i 土层在平均自重压力设计值作用下压缩稳定时的孔隙比设计值, 可取均值; e_{1i} 为第 i 土层在平均最终压力设计值作用下压缩稳定时的孔隙比设计值, 可取均值; h_i 为第 i 土层厚度(cm), 当土层厚度较大时宜划分若干小层地质勘察资料分析。

本工程高压缩性软土层主要为吹填土层及原海底面以下的淤泥-淤泥质土层, 其中吹填土层平均厚度约 7 m, 原泥面以下淤泥-淤泥质土层平均厚度约 11 m, 原海底面以下各土层物理力学指标见表 3。地基处理后场地高层见表 4。

表3 原泥土层主要物理力学性质指标

地层名称	含水率 ω /%	孔隙比 e	液限 ω_L /%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	凝聚力 C_q /kPa	摩擦角 φ_q /(°)	压缩模量 E_s /MPa	压缩系数 a_v /MPa ⁻¹
淤泥混砂	42.82	1.22	32.7	14.7	1.69	9.6	4.6	2.57	0.93
淤泥	66.00	1.92	45.2	22.2	1.93	9.7	0.7	1.58	1.96
淤泥	71.25	2.03	50.7	25.0	1.83	12.4	1.5	1.39	2.20
淤泥	73.35	2.06	55.0	27.3	1.68	10.4	2.0	1.30	2.39

表4 地基处理后场地高程 m

吹填高程	硬壳层厚度	预压沉降量	回填、压实期间沉降量	地基处理后场地高程
5.0	2.0	2.08	0.4	4.52
5.5	2.0	2.10	0.4	5.00
6.0	2.0	2.32	0.4	5.28
6.5	2.0	2.44	0.4	5.66
7.0	2.0	2.56	0.4	6.04
7.5	2.0	2.68	0.4	6.42
8.0	2.0	2.80	0.4	6.80

3.2 陆域使用高程优化

图2为设定的不同陆域高程工况条件下造陆工程费增长情况。造陆工程费包括护岸、吹填成陆、地基处理费用；综合工程费包括护岸、吹填成陆、地基处理费用及减少的港池疏浚外抛费用。可以看出，随着陆域高程增加，工程费呈现先缓慢增长、至6.5 m后较快增长的趋势，这主要是由于6.5 m以上围堤结构自身成本大幅增长所致，而外抛费用减少基本呈线性趋势（图3）。从项目整体考虑，在6.5 m处出现总投资的拐点（图4）。陆域设计高程确定为6.5 m最为经济。

项目位于港区外端，考虑防浪墙及陆域形成后便于观景因素，在满足防浪的同时，东、北护岸防浪墙均不高于1.0 m，南护岸、西护岸内侧沿堤道路控制高程7.0~7.2 m，建筑室内外高差约0.5 m，因而防浪墙设计除具备防浪功能外，维持较好的景观通廊效果。

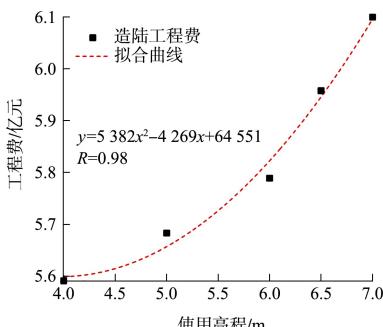


图2 陆域形成工程费与使用高程关系

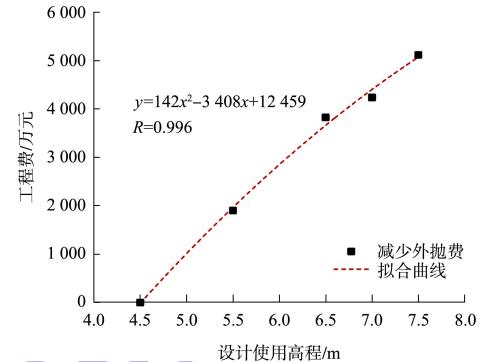


图3 使用高程与港池疏浚减少外抛费关系

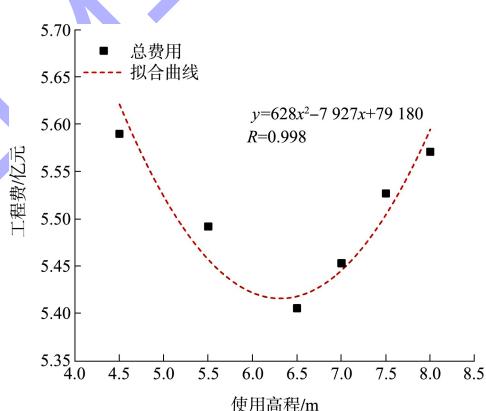


图4 使用高程与总费用关系

3.3 吹填高程优化

场地设计高程约6.5 m总投资最优，场地最终设计高程确定为6.5 m。去除上部结构层地基处理后的交工高程为6.0 m。为满足施工需要，上部需铺设一层1 m厚的砂层，当吹填高程为7.0 m时，顶高程达到8.0 m，地基处理完成后，地面高程下降至5.0 m，再回填1 m厚山皮土可达到交工高程6.0 m（图5）。

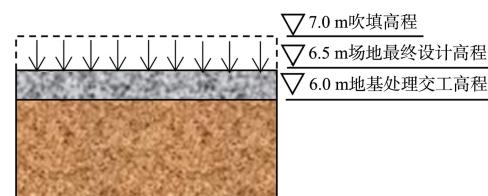


图5 陆域高程关系

适当增加吹填高程会在一定程度上提高护岸的高度, 增加护岸投资, 但可大幅降低港池疏浚费用。图 6 显示了不同吹填高程与工程费用的变化关系, 其中工程费用包括护岸、造陆、地基处理及减少港池疏浚土方外抛节省的抛泥费。可见当吹填高程确定为 7 m 时, 出现拐点, 总费用最低。经对比, 吹填高程确定为 7 m 较吹填高程 6 m 总费用可节省千万元。从项目整体效益出发, 将吹填高程确定为 7 m。

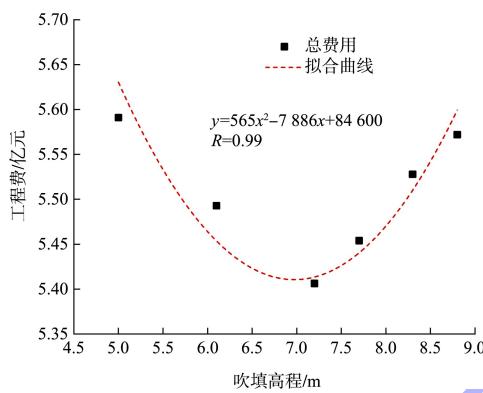


图 6 总费用与吹填高程关系

4 断面物理模型试验

为验证高程设计的合理性, 对于典型断面开展了水槽物理模型试验研究^[9]。试验在交通运输部天津水运工程科学研究院的大型波浪水流槽中进行, 该水槽长 90 m、宽 3.0 m、高 1.8 m。按正态重力相似准则设计模型, 结合试验断面及设备性能等因素确定模型长度比尺, 长度比尺为 $\lambda = 20$ 、时间比尺 $\lambda_t = \lambda^{1/2}$ 、越浪量比尺 $\lambda_q = \lambda^{3/2}$ 。

4.1 防浪墙结构形式对越浪量影响试验

防浪墙结构形式可影响防浪效果, 目前应用较多的有直立式防浪墙和反曲面防浪墙(图 7)。选择合理的防浪墙结构断面形式, 有助于降低越浪量。以南护岸为例, 进行了不同防浪墙结构形式的试验, 试验工况见表 5。

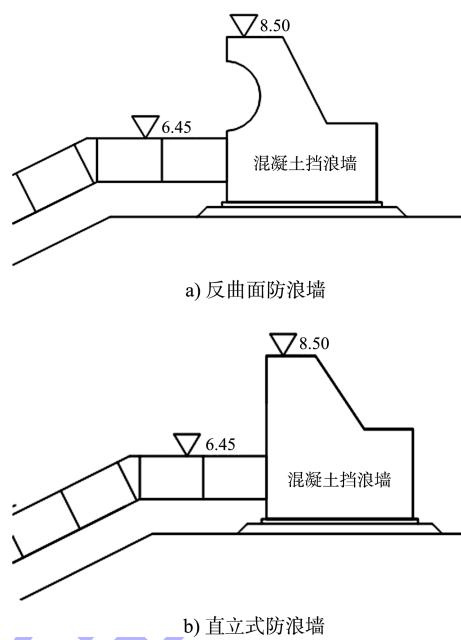


图 7 不同防浪墙结构形式 (单位: m)

表 5 堤顶单宽平均越浪量

试验工况	水位/m	H_s/m	T/s	堤顶高程/m	反曲墙	直立墙
1				8.5	0.000 2	0.000 4
2	4.9	2.08	12.5	8.0	0.001 1	0.001 4
3				7.5	0.002 5	0.003 0
4				7.0	0.004 4	0.012 3

从表 5 不同结构形式越浪量对比可以看出, 直立式防浪墙在 100 a 一遇水位与 100 a 一遇 SSW 向规则波组合作用下, 当胸墙顶高程分别为 8.5 m 时, 单宽平均越浪量为 $0.000 4 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$, 反曲面防浪墙越浪量为 $0.000 2 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。反曲面防浪墙的堤顶单宽平均越浪量明显小于直立式防浪墙, 对于防护本工程 SSW 向入射波效果更佳, 且随着防浪墙高程的降低, 反曲面对于波浪越浪防护效果越好, 可作为结构推荐方案。

4.2 防浪墙不同高程防浪效果试验

以南护岸为例, 在相同结构形式下, 进行了 4 组不同防浪墙高程试验, 试验工况见表 5。不规则波连续作用 3 h, 胸墙、护面四脚空心块、100~200 kg 护底块石均稳定。图 8 为断面试验越浪效

果, 可以看出, 8.5 m 高程工况, 100 a 一遇极端高水位与 100 a 一遇 SSW 向波浪组合条件下, 不规则波浪连续作用过程中, 较大波浪沿斜坡爬上肩台, 直接冲击胸墙, 在胸墙阻挡作用下, 大部分水体落回外海侧, 胸墙顶有少量越浪, 未形成漫顶过流。在规则波作用下, 波浪沿斜坡爬上肩台, 直接作用胸墙, 形成少量胸墙顶越浪。

防浪墙顶高程为 8.5、8.0、7.5、7.0 m 条件下, 单宽平均越浪量结果见表 5。随着挡墙高程的增加, 越浪量减小。顶高程为 8.0 m 以下, 越浪量为 $O(10^{-3})$ 量级; 而顶高程 8.5 m 时, 仅为 $O(10^{-4})$ 量级。表明此时防浪墙可起到良好的掩护效果, 可作为优化设计取值。



a)工况1



b)工况2



c)工况3



d)工况4

图 8 反曲面防浪墙水槽断面试验越浪效果

目前我国规范并未对 LNG 罐区越浪量提出明确要求, 国内已建 LNG 接受站工程越浪量取值不一。如天津中海油 LNG 接收站为不允许越浪, 广西北海 LNG 接收站越浪量为 $100 \text{ cm}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$, 天津中石化 LNG 接收站越浪量为 $900 \text{ cm}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。本工程直接掩护罐区的南护岸防浪墙顶高程取 8.5 m, 在 100 a 一遇极端高水位与 100 a 一遇 SSW 波浪组合条件下, 越浪量仅 $200 \text{ cm}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$, 可满足防护标准要求。

5 结论

1) 对直接掩护罐区和非直接掩护罐区及不同位置所受波浪条件差异性进行分析, 分别采取不同的防护设计标准, 可有效降低防护工程量。

2) 在疏浚土较富余条件下, 提高陆域使用高程可降低疏浚投资、减少弃土对海洋环境的影响, 但随之结构投资也将较大幅增长。综合考虑多因素影响, 总费用拐点对应使用高程可视为最优陆域使用高程。将防浪墙沿线最大高差控制在 1.5 m 以内, 可与周边场景保持较为完好的视觉通廊。在此基础上, 分别对 7 组不同吹填高程工况进行地基处理沉降及投资测算, 总费用拐点对应吹填高程可作为最优吹填高程。

3) 典型位置南护岸防浪墙不同高程工况条件下, 单宽平均越浪量随着防浪墙高程增加越浪量减小, 顶高程为 8.0 m 以下越浪量 $O(10^{-3})$ 量级, 而顶高程 8.5 m 时仅为 $O(10^{-4})$ 量级, 表明此时防浪墙可起到良好的掩护效果。

(下转第 128 页)