

基于掩护功能需要的斜坡式护岸顶高程分析

姜宁林, 邓振洲

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要: 斜坡式护岸顶高程的确定, 往往会对护岸工程总体造价产生较大影响。依据工程实例, 根据理论公式进行护岸顶高程分析, 重点分析了越浪量控制标准。根据越浪量控制标准确定护岸顶高程后, 进一步分析越浪水舌作用距离。最后通过物理模型试验对越浪量以及越浪水舌作用距离理论计算结果进行验证。分析结果表明: 1) 斜坡式护岸顶高程, 应根据护岸实际掩护功能的需要确定合理的越浪量控制标准; 2) 同时应分析越浪水舌作用距离, 以便为护岸后方的场地布置提供依据。

关键词: 掩护功能; 护岸顶高程; 越浪量; 越浪水舌

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0077-05

Slope revetment top elevation based on shielding function

JIANG Ning-lin, DENG Zhen-zhou

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

Abstract: The determination of the slope revetment top elevation often has a great impact on the overall cost of revetment project. In this paper, based on the engineering example, revetment top elevation is analyzed according to the theoretical formula, in which the control standard of overtopping is mainly analyzed. After determining the revetment top elevation according to the control standard of overtopping, the action distance of overtopping tongue is further analyzed. Finally, the theoretical calculation results of overtopping and action distance of overtopping tongue are verified according to the physical model test. The analysis results show that: 1) For the slope revetment top elevation, the reasonable overtopping control standard should be determined according to the actual protection function. 2) At the same time, the action distance of overtopping tongue should be analyzed to provide the basis for the site layout behind the revetment.

Keywords: shielding function; revetment top elevation; overtopping volume; overtopping tongue

在填海造地实施过程中, 护岸结构作为防御外海波浪、水流等自然作用的屏障, 对后方陆域的安全及使用便利起到重要的支撑作用。在实际的填海造地工程中护岸部分的投资占工程项目总投资的比重较大, 护岸顶高程的确定往往对项目建设方案、工程投资、后方设施安全、景观视觉等均会产生重要影响。

现有规范对于护岸顶高程的确定, 主要从设计水位、波浪高度、波浪爬高、越浪量等方面做

了规定说明, 实际工程项目中根据设计水位、波浪高度、波浪爬高等确定的护岸顶高程往往较低, 护岸顶高程需要进一步根据越浪量进行确定。但规范中对于越浪量控制标准的说明较为笼统, 未能具体考虑实际项目的掩护需要、实际项目的后方场地布置等条件。同时, 越浪量计算仅提供了越浪水量的大小, 未提供越浪水舌的作用距离, 这对后方厂区设施的布置也带来了一些不确定因素^[1-4]。

1 工程概况

广东某填海造地项目,已完成一期陆域形成及护岸建设,一期护岸结构安全等级为Ⅱ级,设计波浪重现期和极端高水位重现期均为50 a。护岸采用实体斜坡式结构,0~250 kg块石形成堤心,堤心外侧分别设有垫层块石以及护面块体,护岸坡脚位置设有护底块石。

护岸后方布置重要的大型炼化企业,根据炼化企业要求对已建护岸进行加固,加固标准为:护岸结构安全等级为Ⅰ级,设计波浪重现期和极端高水位重现期均为200 a。护岸典型断面见图1。不同重现期对应的极端高水位及相应的设计波要素见表1。

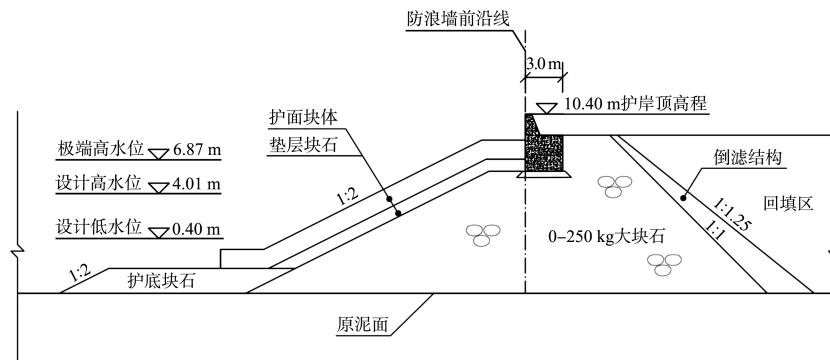


图 1 护岸典型断面

表 1 不同重现期对应的极端高水位及设计波要素

重现期/a	极端高水位/m	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	有效波高 $H_{13\%}/m$	平均波高 H_m/m	平均周期 T_m/s	谱峰周期 T_p/s	平均波长 L_m/m
50	6.33	3.60	3.12	2.59	1.71	7.5	8.9	62.8
200	6.87	3.94	3.41	2.84	1.88	8.1	9.8	71.0

2 护岸顶高程理论公式计算

2.1 根据设计波高确定护岸顶高程

根据JTS 154-1—2011《防波堤与护岸设计规范》^[5],对于允许越浪的沿海护岸,护岸顶高程不宜低于设计高水位以上0.8倍设计波高,并应高于极端高水位。

本项目设计高水位为4.01 m,对应的设计波高为2.16 m,则护岸顶高程须大于5.738 m,极端高水位为6.87 m。综上,根据设计波高确定的护岸顶高程为6.87 m。

2.2 根据波浪爬高确定护岸顶高程

GB/T 51015—2014《海堤工程设计规范》^[6]中,堤顶高程根据设计高水位、波浪爬高及安全加高值进行确定,对于允许部分越浪的护岸:

$$Z_p = h_p + R_F + A \quad (1)$$

式中: h_p 为设计高水位,4.01 m; R_F 为波浪爬高,波浪爬高根据《海堤工程设计规范》第6章规定确定,经计算本项目波浪爬高为3.71 m; A 为安全加高,对于允许越浪的Ⅰ级海堤工程,取为0.5 m。根据式(1)得 Z_p 为8.22 m。

2.3 根据越浪量控制要求确定护岸顶高程

根据越浪量控制要求确定护岸顶高程,首先需要明确越浪量控制标准。越浪量的控制标准需要考虑被掩护对象的重要性、被掩护对象的总体布置、被掩护对象是否设有排水结构等多种因素。中外不同规范对于护岸越浪量的控制标准有不同规定。

1)《防波堤与护岸设计规范》中,根据护岸后方掩护对象的不同以及护岸结构的不同,越浪量控制标准有所不同,具体要求见表2。

表2 《防波堤与护岸设计规范》越浪量控制标准

防护对象	防护设施	越浪量控制标准/(m ³ ·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	设计条件
掩护后方危化品罐区、岸顶铺设管线等重要设施	岸顶有防护	0.005	
掩护后方罐区和较重要的基础性设施	岸顶有防护	0.010	计算高水位及对应的设计波浪
后方人员和公用设施密集的区域	岸顶及内坡有防护	0.020	
后方人员不密集或有堆场、仓库等一般性设施	岸顶及内坡有防护	0.050	

2)《海堤工程设计规范》中, 根据海堤表面防护条件的不同, 允许越浪量的数值有所不同, 具体要求见表3。

表3 《海堤工程设计规范》越浪量控制标准

海堤表面防护	允许越浪量/(m ³ ·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
堤顶及背海侧为30 cm厚干砌块石	≤0.01
堤顶为混凝土护面, 背海侧为生长良好的草地	≤0.01
堤顶为混凝土护面, 背海侧为30 cm厚干砌块石	≤0.02
海堤三面(堤顶、临海侧和背海侧)均有保护, 堤顶及背海侧均为混凝土保护	≤0.05

3)根据欧洲规范 *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*, 结构自身及后方植被安全情况下允许越浪量见表4^[7]。

表4 *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures* 越浪量控制标准

风险类型及原因	平均越浪量/(m ³ ·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
斜坡式防波堤, $H_{13\%} > 5$ m, 后坡无破坏	<0.001
斜坡式防波堤, $H_{13\%} > 5$ m, 设计需考虑越浪量对后坡的破坏	0.005~<0.010
堤顶及后坡植草保护, 维持密实的植草, $H_{13\%} = 1\sim 3$ m	≤0.005
堤顶及后坡植草保护, 没有保持草覆盖, 开阔的苔藓, $H_{13\%} = 0.5\sim 3$ m	≤0.000 1
堤顶及后坡植草保护, 维持密实的植草, $H_{13\%} < 1$ m	0.005~<0.010
堤顶及后坡植草保护, 维持密实的植草, $H_{13\%} < 0.3$ m	不限制

4)根据美国陆军工程师兵团设计手册 *Coastal Engineering Manual* (EM 1110-2-1-1100), 保证护岸结构自身安全情况下允许越浪量见表5^[8]。

表5 *Coastal Engineering Manual* 越浪量控制标准

护岸结构及后方交通安全	平均越浪量/(m ³ ·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
顶部通道设有铺砌, 不危险	≤0.20
顶部通道未设铺砌, 不危险	≤0.05

中外规范中有关越浪量控制的要求, 主要考虑的因素有堤顶及后方结构物的安全、堤顶及后坡的防护情况等。欧洲规范 *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures* 越浪量控制标准最高, 根据其确定的护岸顶高程最高; 美国陆军工程师兵团设计手册 *Coastal Engineering Manual* 越浪量控制标准相对较低, 根据其确定的护岸顶高程较低; 中国规范越浪量控制标准适中, 根据其确定的护岸顶高程较适中。

本项目护岸后方厂区主要布置为: 护岸后有50 m宽道路, 道路后方是100 m绿化带, 绿化带范围内设有雨水明渠和太阳能板。这表明虽然本项目后方布置有重要的炼化企业, 但主要厂房、罐区等装置的布置距离护岸前沿距离最小为150 m, 越浪量控制标准不能直接套用规范中“掩护后方危化品罐区”的要求。

本项目护岸结构为: 堤顶设有防浪墙为混凝土护面, 背海侧设有干砌块石。

综合考虑中外规范要求以及护岸自身结构, 设计中确定的越浪量控制标准为: 在200 a一遇极端高水位叠加200 a一遇设计波浪工况下, 按照0.020 m³/(m·s)越浪量控制标准进行护岸顶高程的设计。

护岸后方越浪量根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》公式进行计算^[9]:

$$Q = 0.07^{H'_c/H_{1/3}} \exp \left(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}} \right) B K_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th} \left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8 \right)^2 \right] \ln \sqrt{\frac{g T_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (2)$$

式中: Q 为单位时间单位堤宽的越浪量(m³·m⁻¹·s⁻¹); H'_c 为防浪墙在静水面以上的高度(m); $H_{1/3}$ 为计算波高(m), 采用有效波高 $H_{13\%}$; B 为经验系数; b_1 为胸墙前肩宽(m); K_A 为护面结构影响系数;

T_p 为谱峰周期 (s); m 为斜坡坡比; d 为计算水深 (m); g 为重力加速度。不同护岸顶高程下越浪量理论公式计算结果见表 7。

表 7 不同护岸顶高程下越浪量理论公式计算结果

防浪墙顶高程/m	8.7	9.1	9.7	10.4	10.8
越浪量/($m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	0.060	0.044	0.025	0.013	0.009

综上, 根据越浪量控制确定护岸顶高程为 10.4 m, 该高程大于根据设计波高以及波浪爬高计算所得的数值。

基于掩护功能的需要, 防浪墙顶高程应进一步通过越浪水舌作用距离进行复核。根据越浪水舌作用距离的分析, 可判断越堤水体是否会直接作用在后方建筑上, 进而为后方场地的平面布置、排水设施布置等提供依据。

2.4 根据越浪水舌作用距离复核护岸顶高程

丹麦研究学者 Andersen 通过物理模型试验, 针对越浪水体的空间分布进行了研究分析, 根据越浪水体的空间分布可以反映越过堤顶的水体对护岸后方陆域的影响范围, 进而间接反映越浪水舌作用距离^[10]。

$$\frac{x}{L_{op} \cos \beta} = -\frac{\ln [F(x^*)] s_{op}^{1.05}}{1.1} + 2.7 \frac{y}{L_{op}} s_{op}^{0.15} \quad (3)$$

式中: x 为越浪水舌在护岸后方的作用距离 (m); $\cos \beta$ 为波浪斜向入射时波向角的余弦值 (m); $L_{op} = \frac{g T_p^2}{2\pi}$ 为根据谱峰周期计算得到的深水波长 (m), 其中, g 为重力加速度 (m/s^2), T_p 为谱峰周期 (s);

$F(x^*) = \frac{Q_{passing}}{Q_{total}}$ 为越浪量通过率, 表示越浪水舌在护岸后方的作用距离 x 的位置剩余越浪量占总越浪量的比例, $Q_{passing}$ 为护岸后方 x 位置的剩余越浪量, Q_{total} 为总越浪量; $s_{op} = \frac{H_{m0}}{L_{op}}$ 为深水波陡, 其中 H_{m0} 为平均波高 (m); y 为护岸胸墙顶与后方路面的高程差 (m)。

根据上述公式, 对于本项目, 假定越浪量通过率为 1% 时, 越浪水舌作用距离为 8.7 m, 该情况下, 仅有 1% 的水体作用在 8.7 m 范围以外。本项目后方设有 50 m 宽道路, 道路后方为 100 m 宽

绿化用地, 绿化用地范围内设有排水渠, 后方道路设计时, 建议设置向岸侧倾斜的横向坡, 越浪水体可汇入排水渠中。

3 物理模型试验验证

为验证理论公式计算结果的合理, 保证护岸防护满足后方厂区使用要求, 本项目采用物理模型试验对护岸顶高程的设计进行验证。物理模型试验在南京水利科学研究院风、浪、流长波浪水槽中进行, 进行越浪量试验时, 每种工况试验次数不少于 3 次, 试验结果取平均值^[11]。

3.1 越浪量试验结果

不同护岸顶高程下越浪量物理模型试验分析结果见表 8。

表 8 不同护岸顶高程下越浪量物理模型试验分析结果

防浪墙顶高程/m	8.7	9.1	9.7	10.4	10.8
越浪量/($m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	0.071	0.039	0.02	0.005	0.003

理论公式计算所得越浪与物模试验结果对比见图 2, 当防浪墙顶高程较低时, 理论计算结果小于物模试验实测值, 当防浪墙顶高程较高时, 理论计算结果大于物模试验实测值。当防浪墙顶高程为 10.4 m 时, 理论计算所得越浪量为 $0.013 m^3/(m \cdot s)$, 物模试验实测值为 $0.005 m^3/(m \cdot s)$, 理论计算值为物模试验实测值的 2.6 倍。理论公式计算所得越浪与物模试验结果对比见图 2。

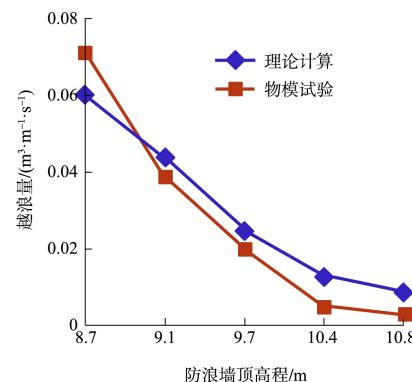


图 2 理论公式计算所得越浪与物模试验结果对比

3.2 越浪水舌作用距离试验结果

越浪水舌作用距离的物模试验测量采用图像分析法, 在防浪墙后方粘贴刻度尺, 采用高速摄影设备拍摄水体越过防浪墙的后越浪过程。根据

物理模型试验结果, 当防浪墙顶高程为 10.4 m 时, 越浪水舌作用距离为 2.3 m。

理论计算中, 防浪墙顶高程为 10.4 m 情况下, 当假定越浪量通过率为 1% 时, 越浪水舌作用距离为 8.7 m。与理论计算结果相比, 物模试验实测所得到的越浪水舌作用距离明显小于理论结算结果。有学者研究表明, 带防浪墙斜坡式护岸上的越浪水体在空中飞过的距离具有随机性, 越浪水舌作用距离是一个十分复杂的随机过程, 这可能是造成物模试验与理论公式差异的主要原因。

4 结论

1) 对于斜坡式护岸顶高程的确定, 国内规范要求根据设计水位、设计波高、波浪爬高等进行确定, 然后针对确定的护岸顶高程复核越浪量大小, 并通过越浪量的控制标准进一步调整护岸顶高程。

2) 根据越浪量调整护岸顶高程, 其重点是确定越浪量控制标准。建议在实际工程设计中, 应基于护岸工程实际掩护功能的需要, 结合护岸掩护后方厂区设备、排水设施的布置等综合分析, 确定合理的越浪量控制标准。

3) 越浪量的分析仅提供了越堤水体体积的大小, 未能说明越堤水体的作用范围, 通过越浪水舌作用距离的计算, 可明确得知越浪水体的影响范围, 进而可为护岸掩护后方设施布置提供一定的参考。Adersen 公式提供了越浪水舌作用距离的理论计算公式, 可用于初步分析护岸后方越浪水舌的作用距离, 但越浪水舌作用距离是一个十分复杂的随机过程, 在施工图设计阶段, 建议进一步通过物理模型试验对越浪

(上接第 52 页)

- [3] British Standard Institution. Maritime works-part 4: code of practice for design of fendering and mooring systems: BS 6349-4: 2014[S]. London: BSI, 2014.
- [4] PIANC. Guidelines for the design of fenders systems [S]. Brussels: PIANC, 2002.
- [5] DEMENET P. The kinetic energy method revisited[J]. Journal of applied water engineering and research, 2018, 6(1): 1-16.

水舌作用距离进行复核。

参考文献:

- [1] 丛润泽. 斜坡式人工岛护岸越浪距离的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [2] 刘宪博. 外海人工岛护岸堤顶高程及越浪量研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [3] 王鹏, 孙大鹏, 吴浩. 海堤上波浪爬高与越浪量计算分析[J]. 海洋工程, 2011, 29(4): 97-102.
- [4] 陈国平, 周益人, 严士常. 不规则波作用下海堤越浪量试验研究[J]. 水运工程, 2010(3): 1-6.
- [5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤设计与施工规范: JTS 154-1—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [6] 水利水电规划设计总院. 海堤工程设计规范: GB/T 51015—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [7] The EurOtop team. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures [M]. London: European Research Council Press, 2018.
- [8] US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual (EM 1110-2-1100) [M]. Washington: Army Corps of Engineers Press, 2006.
- [9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [10] ANDERSEN T L, BURCHARTH H F, GIRONELLA F X. Single wave overtopping volumes and their travel distance for rubble mound breakwaters [M]. London: Coastal Structures International Conference Press, 2007.
- [11] 南京水利科学研究院. 护岸波浪断面物理模型试验[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2020.

(本文编辑 武亚庆)

- [6] 陈际丰, 魏林, 李雪野, 等. 系泊船舶在横浪作用下撞击能量计算参数 C_m 取值研究[J]. 水运工程, 2015(2): 163-167.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

(本文编辑 王璁)