



低顶岛式斜坡堤的堤顶高程设计方法

阳磊, 祝健康, 李江文

(中交水运规划设计院有限公司深圳分公司, 广东深圳 518054)

摘要: 针对低顶岛式斜坡堤的堤顶高程确定方法, 基于国内外现有研究成果和所依托的工程实践, 探讨影响低顶岛式斜坡堤的堤顶高程设计关键因素, 对强浪向分散、常浪向集中的情况提出堤顶高程宜使堤后次生波与非掩护浪向设计波浪基本相当的设计理念, 并结合工程案例的物理模型试验结果进行对比分析。结果表明, 所提出的设计理念合理、可行, 对未来类似工程的设计具有借鉴和参考意义。

关键词: 低顶岛式斜坡堤; 顶高程; 设计波浪要素; 次生波; 物理模型试验

中图分类号: U656.2+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0056-05

Design method for crest elevation of low-crested sloping island breakwater

YANG Lei, ZHU Jiankang, LI Jiangwen

(Shenzhen Branch of CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Shenzhen 518054, China)

Abstract: Aiming at the determining method for the crest elevation of low-crested sloping island breakwater, we discuss key factors affecting the design of the crest elevation of low-crested sloping island breakwater on the basis of existing research findings and the engineering practice under study. For situations where strong waves are scattered and common waves are concentrated, we propose a design concept that the crest elevation should make the secondary waves behind the breakwater and design waves of the non-protected wave direction substantially equivalent, and compare and analyze results of physical model tests in engineering cases. The results show that the proposed design concept is rational and feasible, which has reference significance for the design of similar future projects.

Keywords: low-crested sloping island breakwater; crest elevation; design wave parameter; secondary wave; physical model test

防波堤主要防御波浪对港口的侵袭, 以保证港内水域平稳和基础设施的安全, 有单突堤、双突堤、岛式等布置形式。在建设开敞式深水泊位时, 为了获得最佳的经济效益, 通常采用岛式防波堤。从防波堤的功能需求角度来说, 由于防波堤的造价往往与防波堤高度及长度成正比, 因此并不总是要求极端天气条件下港内水域绝对的平稳, 尤其是深水岛式防波堤。

针对离岸式深水泊位, 如果防波堤的功能仅考虑提供泊稳条件和可作业时间, 实际上只需要考虑阻挡高频率方向上 $2a$ 一遇的波浪, 而让 $50a$ 一遇的极端波浪(含台风浪)越过堤顶, 堤体结构仍保持稳定即可, 并通过适当拉开防波堤与码头水工结构之间的距离, 确保越过堤顶的波浪不直接冲击码头水工建筑物。基于这一思路, 在离岸式深水开敞式泊位的防护设计中, 低顶岛式防波

收稿日期: 2024-04-07

作者简介: 阳磊(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程设计。

堤的应用日趋广泛。

杨云兰等^[1]、王君辉等^[2]、查恩尧等^[3]对低顶防波堤的堤顶高程及越浪特征做出有益探索,然而由于低顶岛式防波堤的复杂特征,其堤顶高程如何确定至今仍缺少系统性标准和方法。因此本文依托工程实际,旨在探讨影响低顶岛式斜坡堤的堤顶高程设计关键因素,并针对强浪向分散、常浪向集中的情况提出一种综合考虑泊稳要求、护面稳定性、安全性和经济性的设计方法,供后续工程参考。

1 低顶岛式斜坡堤的堤顶高程确定标准与方法

低顶岛式斜坡堤兼具低顶防波堤和岛式防波堤特征:堤顶高程较低,介于出水堤和潜堤之间,允许大浪越顶;岛式防波堤端部存在波浪绕射,越堤后的波浪和绕射浪共同形成堤后次生波;岛式防波堤掩护浪向有限,主要考虑掩护常浪向和强浪向波浪。

针对强浪向分散、常浪向集中的情况,基于低顶岛式斜坡堤的特点,建议从港内泊稳标准、护面块体稳定标准、结构安全性和经济性标准等方面进行堤顶高程的确定。

1.1 港内泊稳标准

港内泊稳条件通常取决于防波堤与码头的相对布置及堤顶高程等因素。对于低顶岛式斜坡堤,其堤顶高程的下限以不减少港内作业时间为宜,建议以港内泊稳标准作为基本标准。要求达到港内泊稳条件时港外对应的人射波基本不越浪,此时堤后的波浪主要为绕射波。基于港内泊稳标准初定堤顶高程的具体设计方法如下。

1) 根据设计船型、货种及吞吐量要求,确定港内泊稳条件及泊位年可作业时间需求。

2) 根据波浪、潮流特征,初定防波堤轴线及其与码头的相对布置。

3) 根据 JTS 145-2—2013《海港水文规范》^[4]或波浪模型试验结果,进行堤后绕射波分析,以泊稳波高作为控制条件,得到满足泊稳条件下港

外对应的人射波高。

4) 按达到港内泊稳要求时对应的港外相对不利入射角度的人射波基本不越浪,初步确定堤顶高程。

1.2 护面块体稳定标准

斜坡堤外坡护面单个块体的稳定质量可按 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[5]第 4.3.7 条有关公式计算。针对可越浪的低顶斜坡堤,内坡护面块体质量可按该规范第 4.3.16.1 条有关规定确定。

根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》第 4.3.17 条,堤顶块体的质量宜与外坡块体相同。同时,根据第 4.3.17 条的条文说明:国内外试验表明,当堤顶高程在设计高水位以上 5%~20%设计波高时,堤顶块体的稳定性最差。规范要求该情况时,堤顶护面块体的质量需要加大,取外坡块体质量的 1.5 倍以上为宜。

鉴于低顶岛式斜坡堤的堤顶高程一般位于设计高水位水面附近,为避免堤顶高程设置不合理对防波堤护面结构稳定性带来影响,建议堤顶高程应避免设计高水位以上 5%~20%设计波高附近,并通过物理模型试验对护面稳定性进行验证。

1.3 安全性和经济性标准

堤顶高程在满足泊稳标准和护面块体稳定标准的基础上,还应确保极端情况下码头结构的安全性,同时兼顾经济性。

低顶岛式防波堤的典型特征是允许越浪且防波堤掩护的波浪方向有限,主要掩护主浪向和强浪向波浪。因此,受防波堤掩护的码头结构需要承受大浪越顶后与绕射波叠加产生的次生波荷载以及非掩护浪向的波浪荷载。针对强浪向分散、常浪向集中的情况,基于低顶岛式防波堤的掩护特点,提出兼顾安全性和经济性的堤顶高程确定标准:堤顶高程宜使堤后次生波与非掩护浪向设计波浪基本相当。堤顶高程具体设计方法如下。

1) 根据 JTS 145-2—2013《海港水文规范》或波浪模型试验结果,分析非掩护浪向极端天气

下设计波要素，以此作为堤后次生波控制的基准。

2) 基于港内泊稳标准初定防波堤的堤顶高程，并按照护面块体稳定标准复核堤顶高程。

3) 基于初定的堤顶高程，对堤后次生波高进行计算或预测。如次生波高显著大于非掩护浪向设计波高，则进一步调整堤顶高程，并重复此步骤。

4) 通过整体物理模型试验验证，得到使堤后次生波与非掩护浪向设计波浪基本相当的堤顶高程。

5) 结合物理模型试验，进一步复核港内泊稳条件及作业时间。

2 岛式防波堤后次生波的确定方法

低顶堤的顶高程一般在设计高水位水面附近，允许大浪越顶，波浪在前坡或坡肩破碎，越浪水体冲入堤后，与堤后绕射波浪叠加形成次生波，波周期有所减小。参考 JTS 145—2015 (2022 版)《港口与航道水文规范》^[6]第 9.3.2、9.3.3 条的相关公式，在考虑港内绕射和堤后传递波高影响时，港内次生波高可按下式进行计算：

$$H_{次} = \sqrt{H_t^2 + H_d^2} \quad (1)$$

式中： H_t 为堤后传递波高，m； H_d 为堤后某点的绕射波高，m。

表 1 传递波高系数典型计算公式

Tab. 1 Typical calculation formulas for wave transmission coefficient

学者	公式	限制条件	标准引用情况
杨正己等 ^[7]	$K_t = \tanh [0.8 (h_c/H + 0.038K_B L/H)] K_d$	$h_c/H \leq 0$	-
	$K_t = (K_t)_{h_c/H=0} - \tanh [0.5 (h_c/H)]$	$h_c/H > 0$	
Van der Meer et al. ^[8]	$K_t = 0.8$	$-2.0 < h_c/H \leq -1.13$	JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》采纳
	$K_t = 0.46 - 0.3 (h_c/H)$	$-1.13 < h_c/H \leq 1.2$	
	$K_t = 0.1$	$1.2 < h_c/H < 2.0$	
D'Angremond et al. ^[9]	$K_t = -0.4 (h_c/H) + 0.64 (B/H)^{-0.31} \{ 1 - \exp [-0.5 \tan \alpha \cdot (H/L)^{-0.5}] \}$	$-2.5 < h_c/H < 2.5$ 、 $0.075 < K_t < 0.8$	EurOtop ^[10] 采纳

注： L 为堤前波长，m； K_B 为堤宽影响系数； K_d 为水深影响系数； α 为堤前坡面与水平面夹角，(°)。

结合依托工程的物理模型试验结果，对传递波高系数的试验结果与典型公式计算结果进行对比分析，见图 2。可以看出，D'Angremond 公式计

2.1 堤后传递波高

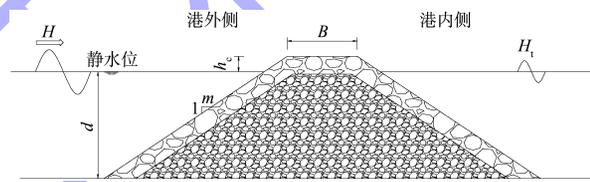
对港口工程而言，为使港内达到泊稳条件和作业时间的要求，堤顶高程一般位于水面以上，本文研究的低顶堤主要指堤顶在静水面以上的高度 h_c 与堤前入射波高 H 的比值在 0~0.6 范围的防波堤。

根据防波堤与护岸设计规范，堤后传递波高 H_t 可按下式计算：

$$H_t = K_t H \quad (2)$$

式中： K_t 为传递波高系数； H 为堤前入射波高，m。

影响 H_t 大小的因素主要包括来浪特征(波高、波长、周期、入射角度)、地形特征(前沿水深、海底坡度)、防波堤结构特征(堤顶在静水位以上高度、堤顶宽度、前坡坡度、肩台、堤面糙率及透水性)，相关参数见图 1。



注： d 为水深，m； B 为堤宽，m； m 为边坡系数。

图 1 低顶防波堤主要参数

Fig. 1 Main parameters of low-crested breakwater

国内外学者对防波堤传递波高系数进行研究，比较典型的计算公式见表 1。

算结果总体和物模试验结果拟合较好，可以用其初步分析低顶斜坡堤后越浪情况。

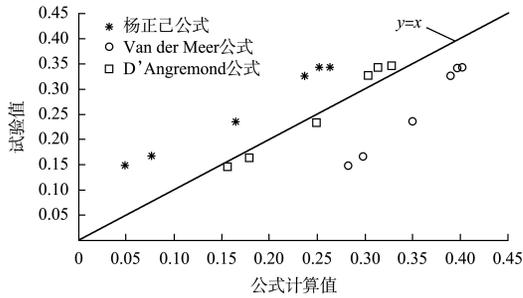


图 2 传递波高系数试验结果与公式计算结果对比

Fig. 2 Comparison between test results and calculation results of wave transmission coefficient

2.2 堤后绕射波高

对岛式防波堤而言, 波浪绕过堤头, 在掩蔽区内发生扩散, 进而对港内波浪产生影响, 根据 JTS 145—2015(2022 版)《港口与航道水文规范》, 堤后某点的绕射波高可按下式进行计算:

$$H_d = K'_d H_i \quad (3)$$

式中: K'_d 为堤后某点的绕射系数; H_i 为入射波高, m。

3 工程实例

3.1 工程概况

工程建设 1 个 30 万吨级原油泊位, 设计年通过能力 2 000 万 t, 码头离岸约 2 km, 与防波堤分离, 呈蝶形布置形式, 防波堤垂直于主浪向, 主要掩护 S—E 向范围的大浪, 工程平面布置见图 3。

工程位置水深、浪大, 防波堤为深水岛式斜坡堤。传统防波堤顶高程较高、断面高大, 鉴于防波堤掩护对象为单一码头, 考虑经济性, 本工程防波堤采用低顶岛式斜坡堤。50 a 一遇极端高水位 3.12 m(当地理论最低潮面, 下同), 设计高水位 1.87 m, 设计低水位 0.30 m, 极端低水位 -0.16 m。

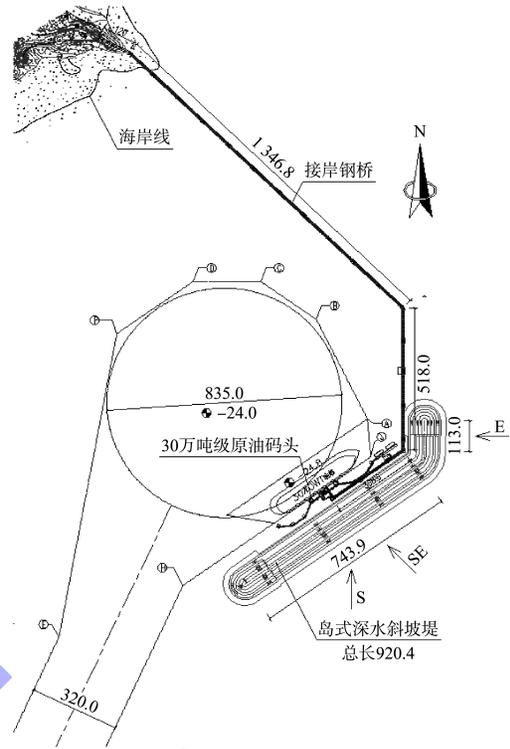


图 3 工程平面布置 (单位: m)

Fig. 3 General layout of engineering (unit: m)

3.2 基于泊稳标准初定堤顶高程

工程港内泊稳要求为顺浪波高 $H_{4\%} \leq 2.0$ m, 横浪波高 $H_{4\%} \leq 1.5$ m, 周期 $T \leq 8$ s。考虑到波浪绕射后基本以顺浪为主, 因此以顺浪 $H_{4\%} \leq 2.0$ m 作为泊稳控制标准。

根据防波堤与码头的平面布置关系进行堤头波浪绕射分析, 南侧系缆墩处不规则波绕射系数在 0.3~0.5, 随入射波角度不同有所区别。考虑相对不利的入射角度, 满足港内泊稳要求时对应的堤外入射波高 $H_{4\%} \approx 4$ m、 $H_{13\%} \approx 3.2$ m。

要求满足港内泊稳标准时, 对应的入射波基本不越浪, 初定堤顶高程取设计高水位以上 1 倍设计波高, 即 5.07 m(=1.87 m+3.20 m), 取 5.1 m。

初定的堤顶高程位于设计高水位以上 20% 设计波高, 满足护面块体稳定标准的要求。

3.3 基于安全性和经济性标准确定堤顶高程

码头结构需要承受大浪越顶后与绕射波叠加产生的次生波荷载以及非掩护浪向的波浪荷载。非掩护浪向设计波浪一般以附近波浪观测站资料、波浪模型结果等为主。根据本工程波浪数学模型报告,对于非掩护的浪向,极端高水位时50 a一遇波高 $H_{13\%}$ 为4.79 m。

基于初定的堤顶高程5.1 m,按D'Angremond公式、式(1)、(3)对堤后南侧系缆墩处次生波高进行初步计算,得出 $H_l = 2.94$ m、 $H_d \approx 3.28$ m、 $H_{次} \approx 4.4$ m。初步计算的防波堤掩护方向堤后次生波小于非掩护浪向设计波高。

3.4 通过物理模型试验验证堤顶高程

结合本工程整体物理模型试验,在初定的堤顶高程基础上,对堤顶高程进一步验证和调整。该工程整体物理模型试验首先对堤顶高程取5.1 m进行验证,在设计高水位2 a一遇设计波浪要素作用下,结果显示港内可作业时间不足,于是试验将堤顶高程调整至5.3 m。当堤顶高程取5.3 m时,试验主要考虑2种工况。

1) 第1种工况是验证设计高水位各方向2 a一遇设计波浪要素作用下港内的泊稳条件。主要进行ENE、E、SSE、SSW等4个方向波浪试验,SSE向波浪绕射较强,越浪引起的波高较小,而SE向波浪防波堤掩护效果较好,但越浪较大,为了比较SSE和SE向波浪港内泊稳波高,又增加了SE向波浪试验。试验测得ENE、E、SE、SSE、SSW向码头各测点波高 $H_{4\%}$ 平均值分别为1.27、1.45、1.04、1.87、2.05 m,对于本工程码头,SSW向波浪接近于顺浪。SE和SSE向入射波浪要素一样,虽然SE向波浪正向入射、越浪较大,但绕射较小,因此港内波浪要素比SSE向小。

2) 第2种工况是验证极端高水位和设计高水位各方向50 a一遇设计波浪要素作用下防波堤的掩护效果,获得码头泊位处的设计波浪要素。试验结果测得码头泊位处50 a一遇波高 $H_{13\%}$ 最大为4.86 m,与非掩护浪向设计波浪基本相当。此时,

堤后越浪及绕射产生的次生波对码头结构安全影响较小,码头结构满足安全和经济的要求。最终,码头堤顶高程取值为5.3 m。

对比堤后次生波初步预测计算结果与物理模型试验结果后得出:当堤顶高程取5.1 m时,堤后次生波高初步预测为4.4 m;物理模型试验将堤顶高程抬高至5.3 m时,堤后次生波高最大为4.86 m。对于本工程而言,物理模型试验的堤后次生波稍大于初步预测计算结果,分析主要原因在于物理模型试验考虑的因素更全面、测点覆盖范围更广,此外是方法不同带来的偏差。

虽然本文堤后次生波初步预测方法得到的结果与物理模型试验存在一定偏差,但仍在合理范围内,可以用其初步分析堤后次生波大小和堤顶高程的合理性。

3.5 工程实际效果

依托工程于2022年5月竣工验收,运营至今实际效果良好,2023年经历4次台风天气的情况下,码头年可作业时间约280 d,吞吐量1 800万t,已接近码头年设计通过能力。

4 结论

1) 采用D'Angremond公式计算的低顶堤后的波浪传递波高总体与物理模型试验结果拟合较好。

2) 针对强浪向分散、常浪向集中的情况,对于低顶岛式斜坡堤的堤顶高程,建议从港内泊稳标准、护面块体稳定标准、结构安全性和经济性标准等3个方面考量:基于港内泊稳标准初定堤顶高程,建议达到港内泊稳要求时对应的港外入射波基本不越浪;根据护面块体稳定标准复核堤顶高程;兼顾结构安全性和经济性,对比防波堤掩护浪向堤后次生波与非掩护浪向设计波浪,堤顶高程宜使堤后次生波与非掩护浪向设计波浪基本相当,并结合物理模型试验合理确定堤顶高程。

3) 经工程实例验证,本文提出的针对强浪向分散、常浪向集中的情况下低顶岛式斜坡堤顶高程的确定标准和方法合理、可行,可供类似工程参考。