



外海长周期波浪作用下的斜坡堤结构设计

刘丽娜, 顾祥奎

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 长周期涌浪和风浪的混合浪具有周期长、波能大的特点, 该种环境下的斜坡堤结构设计不能简单地参照现行规范执行。依托某已建工程, 采用计算及理论分析对其设计过程和物理模型试验验证过程进行对比分析, 得出适用于外海长周期混合浪作用下的斜坡堤结构设计要点。结果表明, 外坡护面块体的选用和防浪墙顶高程确定等设计需要额外考虑经验系数; 墙后堤顶和堤后斜坡需要格外加强, 堤顶尽量选用合适的防浪墙结构形式; 现行规范的护底块石计算公式在浅水条件下并不适用。

关键词: 长周期混合浪; 斜坡堤设计; 物理模型试验验证

中图分类号: U 656.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0065-07

Structural design of slope breakwater under long-period mixed wave in offshore water

LIU Lin-na, GU Xiang-kui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The mixed wave of long-period surge and wind wave has the characteristics of long-period and large wave energy, and the design of slope breakwater structure in such environment cannot be carried out by simply referring to current codes. Based on a built project, we carry out the calculation and theoretical analysis to compare and analyze the design process and physical model test verification process of the project, and obtain the key points of structural design for sloping breakwater under long-period mixed wave in the open sea. The results show that the experience coefficient in the design should be considered such as the selection of block for outer slope protection and determination of the height of the top of the wave wall. The top of the breakwater behind the wall and the slope behind the breakwater need to be strengthened especially, and the appropriate structure type of the wave break wall should be selected as far as possible on the top of the breakwater. The calculation formula of rock protection bottom in the current code is inappropriate under the condition of shallow water.

Keywords: long-period mixed wave; design of slope breakwater; physical model test verification

长周期混合浪不同于一般的风浪和涌浪, 周期与波长均较长、波速较大, 在水平方向上流动性很大, 具有相当大的能量, 对含防波堤在内的港口建筑物破坏力极大^[1]。

在长周期涌浪与风成浪混合作用的海域建设防波堤, 护面结构的选用以及堤顶越浪量的控制是两个关键的指标。其中关于斜坡堤护面块体计

算, 第21届国际航运会议上推荐使用西班牙、挪威、瑞典、苏联和美国共5种计算公式^[2]。在相同情况下, 各种公式的计算结果差异还比较大; 关于越浪量方面, 已有的研究成果也并未对波浪周期的影响进行深入分析, 对于外海长周期混合浪作用下的斜坡堤结构设计研究, 目前仅有少量相关文章发表^[3-5], 在理论、规范和相关技术资料

层面, 其内容和深度尚不能提供成熟可靠的技术支撑, 且无针对专项的技术标准发布。目前国内现行的《防波堤与护岸设计规范》^[6]中说明, 对于设计波浪平均周期大于 10 s 或设计波高与设计波长之比小于 1/30 的坦波, 护面块体质量应适当加强并应进行模型试验验证, 但是到底在设计中应加强多少, 在理论、规范和相关技术资料层面, 并无定性和定量的资料可供参照。

本文结合在承受混合浪影响作用范围海域的某已建防波堤, 对其设计过程进行总结, 为类似建设条件的斜坡堤设计提供参考, 在对初步形成断面进行物理模型试验验证过程中不会出现较大改动, 最大限度做到工程设计过程的优化, 尽量避免不必要的反复过程。

1 工程位置

本文依托的防波堤工程^[7]地处浙江省嵊泗县境内, 位于沈家湾岛和薄刀嘴之间的海域, 防波堤堤顶高程和堤身稳定按 50 a 一遇设计, 护面结构按 100 a 一遇校核。

2 自然条件

2.1 气象

防波堤工程所在海域位于北亚热带南缘的东亚季风盛行区, 因受季风影响冬冷夏热, 四季分明, 降水充沛。

因受冬、夏季风影响, 本海域风向季节变化明显, 全年多 N 和 SE 向风, 4—8 月多 SE 向风, 9—翌年 2 月多偏 N 向风, 3 月份冷暖空气交替频繁, 以 SE 和 N 风为主。常风向为 N 向, 发生频率为 16.4% (NNW~NNE 向合计频率为 36.8%); 次常风向为 SE 向, 发生频率为 13.4% (ESE~SSE 向合计频率为 29.8%)。强风向为 NNW 向 (最大风速 29.1 m/s), 其次分别为 NNE 向 (最大风速 24.8 m/s) 和 N 向 (最大风速 24.4 m/s)。

本海域每年 5—11 月均可能受到热带气旋、台风影响, 其中 7—9 月为热带气旋活动最频繁的季节, 占全年影响总数的 78%。根据 1960—1995 年资料统计, 平均每年 3.6 次, 最多年份达 7 次, 其中 8 级以上热带气旋过程 89 次, 平均每年 2.4 次; 风力 >12 级以上的台风过程共出现 6 次, 平均每 6 年出现 1 次。近年来, 受全球极端气候影响, 影响本海区台风数量较多, 并且呈现“双台风”“三台风”连续影响的特殊现象。冬春寒潮影响时, 当地常会出现剧烈的降温、大风、雨雪和冰冻等天气现象, 年内以 12 和 1 月出现最多。

2.2 水文

本地潮汐主要受东海前进波控制, 属非正规浅海半日潮型。本海区潮汐强度中等。

结合工程所在地邻近测波站 2004 年 7 月—2005 年 9 月的测波资料进行分析, 周边区域波浪具有两个主要特征: 1) 工程海域附近以风浪为主, 大风大浪相伴而生; 夏季本海域以偏东向浪为主。2) 长周期混合浪对本海域有明显影响。本工程波浪计算点见图 1。防波堤附近各水位条件下 50 a 和 100 a 一遇波要素见表 1。本工程设计流速取 1.0 m/s。

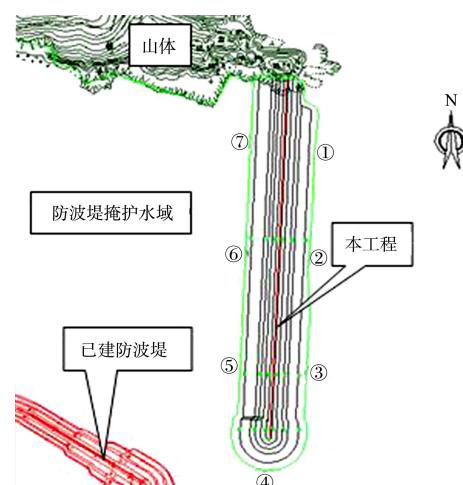


图 1 本工程波浪计算点

表1 防波堤附近各水位条件下50、100 a一遇的波要素

波条件	位置	波向	水位	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	周期 T/s	波长 L/m
50 a一遇	②	NE	50 a一遇极端高水位	4.93	4.32	8.2	72.2
			设计高水位	4.53	3.95	8.2	68.5
			设计低水位	3.11 [*]	3.11 [*]	8.2	52.2
	③	E	50 a一遇极端高水位	5.03	4.42	16.9	159.5
			设计高水位	4.73	4.13	16.9	151.3
			设计低水位	3.11 [*]	3.11 [*]	16.9	111.1
	②	NE	50 a一遇极端高水位	5.29	4.61	8.2	75.0
			设计高水位	4.83	4.23	8.2	71.7
			设计低水位	3.80 [*]	3.80 [*]	8.2	57.1
	③	E	50 a一遇极端高水位	5.10	4.44	16.9	171.0
			设计高水位	4.73	4.13	16.9	159.6
			设计低水位	3.80 [*]	3.80 [*]	16.9	122.5
100 a一遇	②	NE	100 a一遇极端高水位	5.16	4.54	8.7	77.6
			设计高水位	4.77	4.17	8.7	73.5
			设计低水位	3.11 [*]	3.11 [*]	8.7	55.7
	③	E	100 a一遇极端高水位	5.19	4.57	18.5	175.3
			设计高水位	4.87	4.27	18.5	166.2
			设计低水位	3.11 [*]	3.11 [*]	18.5	121.9
	②	NE	100 a一遇极端高水位	5.54	4.85	8.7	80.7
			设计高水位	5.09	4.47	8.7	76.9
			设计低水位	3.80 [*]	3.80 [*]	8.7	60.9
	③	E	100 a一遇极端高水位	5.35	4.67	18.5	188.0
			设计高水位	4.95	4.34	18.5	175.4
			设计低水位	3.80 [*]	3.80 [*]	18.5	134.4

注: 带*数据为波浪已破碎, 取破碎波高。

2.3 地质条件

工程区域勘察揭露, 拟建场区主要地基土层分布较为稳定, 但局部仍有较明显的厚度和埋深变化, 另薄刀嘴嘴头处基岩埋深较浅导致地基的均匀性差, 属不均匀地基。场地浅表部的地基土层的承载力较低, 不能满足拟建建筑物对地基承载力的要求, 宜对一定深度范围内的软弱黏性土层(①₁、③层)进行有针对性的加固处理。

3 初始断面形成

本工程防波堤推荐采用斜坡堤结构。堤心材料选择10~500 kg块石, 含泥、贝壳类碎屑的含量小于10%。地基处理拟采用塑料排水板方案, 水平排水层采用冲灌砂被+碎石垫层。塑料排水板打设范围对堤身结构总体考虑, 一次施工完毕。

3.1 顶高程计算

1)按JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》中对堤顶设胸墙的斜坡堤, 胸墙顶高程宜定在设计高水位以上不小于1.0倍设计波高值处, 则有:

$$Z_p = h_p + H \quad (1)$$

式中: Z_p 为堤顶高程(m); h_p 为设计高水位, 取4.51 m; H 为设计波高, 取50 a一遇的 $H_{1\%}$ 。通过式(1)计算出 $Z_p = 10.38$ m。

2)按SL 435—2008《海堤工程设计规范》的公式计算:

$$Z_p = h_p + R_f + A \quad (2)$$

式中: Z_p 为设计频率的堤顶高程(m); h_p 为设计频率的高潮位(m); R_f 为按50 a一遇设计波浪计算的累积频率为 f 的波浪爬高值(海堤按不允许越浪设计时 $f=2\%$, 按允许部分越浪设计时 $f=13\%$) (m); A 为安全加高值(m)。

拟建工程为防波堤，远期规划形成未来成陆的永久边界。按允许少量越浪计算，得出 $Z_p = 10.36 \text{ m}$ 。

3) 根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》，斜坡堤堤顶有胸墙时的越浪量计算公式为：

$$Q = 0.07^{H_c/H_{1/3}} \exp\left(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}}\right) BK_A \cdot$$

$$\frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th} \left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8 \right)^2 \right] \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (3)$$

式中: Q 为单位时间单位堤宽上的越浪量 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); B 为经验系数; H_c 为堤顶在静水位时, 水位以上至胸墙顶距离 (m); T_p 为波谱的谱峰周期 (s); m 为斜坡坡度系数; 取 1.5; d 为建筑物前水深; $H_{1/3}$ 为有效波波高 (m); b_1 为胸墙前肩宽 (m); K_A 为护面结构影响系数, 取 0.4。

表 2 历代规范编制和修订中 K_D 取值

规范类型	英国 BS 6349. 7-1991	JTJ 298—1998(98 规范)	JTS 154-1—2011(2011 规范)	JTS 154—2018(2018 规范, 现行)
扭王字块 K_d 取值	10~12	18~24	18	15~18

由表2可看出,按照1998规范的 K_D 计算的结果,并考虑放大修正系数2.0后,其计算数值与英国规范相当;按照现行规范的 K_D 计算的结果,并考虑放大修正系数1.5后,其计算数值与英国规范相当。本次防波堤设计中,护面块体稳定质量采用50a一遇波浪计算,100a一遇波浪进行校核。根据现行规范公式计算,扭王字块体质量为

拟建防波堤工程内侧有远期成陆的规划,且胸墙后并未做特殊防护,综合考虑,控制越浪量 $0.02 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$,经计算比较分析后最终顶高程确定为10.4 m。

3.2 主要护面结构计算

根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》，护面块体的稳定质量按下式计算：

$$W = 0.1 \cdot \frac{\rho_b g H^3}{K_b (S_b - 1)^3 \cot \alpha} \quad (4)$$

$$S_b = \rho_b / \rho \quad (5)$$

式中: W 为单个块体的稳定质量(t); ρ_b 为块体材料的密度(t/m^3); H 为设计波高(m); ρ 为水的密度(t/m^3); α 为斜坡与水平面的夹角($^\circ$); K_D 为块体稳定系数, 在历代规范编制和修订中, 取值均有调整, 见表 2。

3.38 t, 综合考虑当地其他工程经验, 并考虑长周期波的影响, 确定承受主浪方向的外侧边坡单个护面块体稳定质量为 6 t。

根据《防波堤设计与施工规范》中相关规定，确定外坡护面块体的垫层石质量和厚度。综合考虑拟建工程使用要求，根据计算结果和结构各部分构造要求，初步形成的断面见图 2。

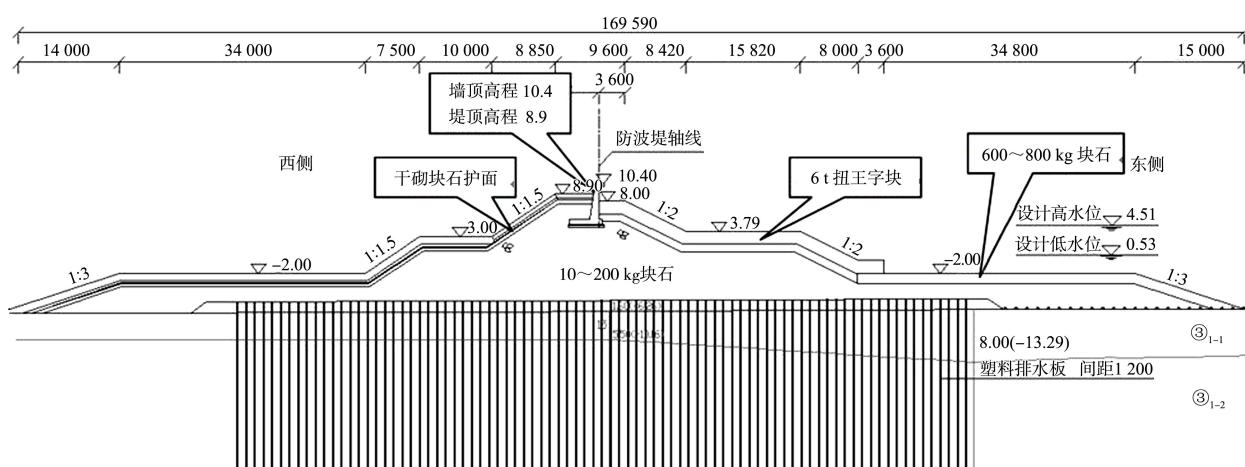


图2 初步形成断面 (高程: m; 尺寸: mm)

防浪墙顶高程 10.4 m。防浪墙内侧堤顶高程 8.9 m, 顶宽 6.0 m。护面结构选用 6 t 扭王字块体, 坡度 1:2, 扭王字块随机安放一层, 每 100 m² 护面层的块体个数为 35.3 块。垫层块石质量选用 300~500 kg。防波堤外坡设置两级压载, 高程分别为 3.79 和 -2.0 m。为防止堤身结构建成后沿堤流对堤脚处冲刷、危害堤身稳定, 在外侧堤脚处采用 200~400 kg 块石护底。防波堤内坡采用干砌块石护面, 设置两级压载平台, 高程分别为 3.0 和 0 m, 护面材料采用 200~400 kg 块石。堤脚处采用 100~200 kg 块石护底。

4 物理模型验证

拟建工程区域波浪较大、周期较长, 并且波浪正向入射, 为确保工程的安全可靠、经济合理, 需要对计算形成的初步断面进行物理模型试验研究^[8], 分析挡浪墙、护面块体及坡脚、坡肩等的稳定性情况及确定堤顶高程。

4.1 试验内容

1) 观测防波堤断面各部位的稳定性, 包括: ①设计断面扭王字护面块体的稳定性; ②设计断面垫层块石的稳定性。按 100 a 一遇设计波浪要素, 观测护面块体已施工情况下垫层块石的稳定性; ③护底块石的稳定性及护底范围; ④胸墙的稳定性。

2) 测定 50、100 a 一遇波浪作用下防波堤的越浪量。

3) 测定 50、100 a 一遇波浪作用下防波堤胸墙的波压力。

4) 通过试验验证防波堤堤顶高程, 并提出越浪量 $Q \leq 0.02 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 时的胸墙内、外侧堤顶高程, 量测挡浪墙上波压力分布及总力。

4.2 试验方法

试验按照《波浪模型试验规程》^[9] 进行, 试验采用不规则波, 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 $\lambda = 32$ 。试验中块石及护面严格依据重力相似准则按照模型比尺进行换算, 模型的时间比尺 $\lambda_t =$

$\lambda^{1/2}$ 、压强比尺 $\lambda_p = \lambda$ 、越浪量比尺 $\lambda_Q = \lambda^{3/2}$ 。

不规则波波谱取 JONSWAP 谱, 频谱的计算公式为:

$$s(f) = \alpha H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \gamma^{\exp[-(T_p f)^{-2/2\sigma^2}]} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (7)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & (f \leq f_p) \\ 0.09 & (f > f_p) \end{cases} \quad (8)$$

式中: H_s 为有效波高 (m); f 为频率 (s^{-1}); f_p 为谱峰频率 (s^{-1}); T_p 为谱峰值周期 (s); γ 为谱峰值参数, 取 3.3。

将特征波要素输入计算机, 按模型比尺计算产生造波讯号, 控制定造波机产生相应的不规则波序列。不规则波波数大于 120 个, 每组试验重复 3 次, 取其均值作为试验值, 结构稳定试验时, 波浪连续作用相当于原型一个风暴潮过程 (时间约 3 h)。试验在河海大学风浪水槽中进行。

4.3 试验后断面优化措施

根据试验结果, 对初步计算断面的结构方案进行优化设计, 提出断面优化方案, 主要优化的方面为:

1) 将原设计初步断面中防浪墙底板前置, 利用墙前底板上的水压力增加防浪墙抗倾、抗滑稳定性。

2) 防浪墙改为大反弧形式, 并将防浪墙前平台宽度即肩台宽度增加到 12 m, 在增加堤身稳定的同时又能有效减少堤顶越浪量。在保证越浪量相当的条件下, 可有效降低防浪墙顶高程约 80 cm^[10]。断面设计中可适当增加防浪墙前平台宽度 (肩台宽度), 本工程最终优化断面将防浪墙前平台宽度增加到 12 m, 在长周期混合浪影响更大的区域, 可以进一步增加该平台宽度, 该项措施可以有效减少墙顶越浪量, 从而降低墙顶高程, 降低工程投资。

3) 原初步计算断面在物模试验过程中, 高水位条件下, 6 t 扭王字块体不稳定, 所以现在改为设置上、下两级护面块体, 上级斜坡护面扭王字

块体由 6 t 改为 8 t, 下级斜坡护面块体选用 6 t 扭王字块体, 并向下延伸到-2.0 m 镇压平台护脚。

4) 在长周期混合浪作用的浅水段断面试验中发现, 由于镇压层顶高程相对较高, 块石上方水深相对较小, 波高较大且周期很长, 波浪底部流速相对较大, 对块石作用较大, 块石更易发生滚动, 需要格外加强。

5) 墙后堤顶选用混凝土路面, 堤后斜坡采用灌砌块石护面而非干砌块石护面, 坡脚设置格梁顶托灌砌块石, 防止护面下滑。堤身外侧护面在选用时需要充分考虑经验调整系数, 在其基础上, 可考虑设置上下两级平台, 下级平台可选用低一级的护面块体, 以优化设计, 节省投资。

优化后的堤身断面经试验验证, 结构各部位均能满足稳定要求。

5 对比分析

5.1 堤顶越浪量的理论计算值和试验值对比

防波堤所处区域的波浪主要为涌浪和风浪的混合浪, 具有周期长、波能大的特点, 这种混合浪在斜坡堤的波浪爬高以及堤顶越浪量的数值并不能完全依照现有规范的公式计算结果, 本工程在初步断面形成的时候, 即按照规范公式的理论计算值, 确定堤顶高程和墙顶高程, 在物理模型试验验证过程中, 对其进行了几次优化和反复。

为了将该地区混合浪对堤顶越浪量的影响进行量化, 首先对防波堤堤身断面在不同波浪要素条件下的堤顶越浪量进行理论计算, 将其与同等条件下的物理模型试验结果进行对比, 结果见表 3。

表 3 堤顶越浪量的理论计算值和试验结果对比

水位/m	波高/m	周期/s	越浪量/($m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)	
			理论计算值	试验值
5.71	4.44	16.9	0.004 0	0.050
4.51	4.13	16.9	0.003 5	0.023
5.83	4.67	18.5	0.007 0	0.062
4.51	4.34	18.5	0.003 8	0.024

注: 泥面高程为-7.04 m。

本工程设计确定允许越浪量标准为 $0.02 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,

通过计算确定的初始断面的堤顶高程为 8.90 m, 墙顶高程为 10.40 m, 根据规范相关公式, 对初始断面的斜坡堤堤顶越浪量计算, 得到的理论计算值满足设计的使用要求。但是经物理模型试验发现, 越浪量的试验值远大于理论计算值, 因此对于外海混合浪作用下的斜坡堤堤顶越浪量计算, 规范公式基本处于失效状态, 应按照物理模型试验确定。根据本工程物理模型试验结果, 优化设计断面的堤顶高程为 10.20 m, 墙顶高程 11.70 m, 在该断面下, 堤顶越浪量试验值可满足设计要求。综合对比理论计算和试验结果, 建议在外海混合浪作用下的斜坡堤断面顶高程确定时, 应在规范公式计算的基础上适当增加 1~2 m 的富余高度, 并尽量选用合适的防浪墙结构形式, 例如大圆弧反浪结构, 以避免物理模型试验过程中由于堤顶越浪量超出允许标准导致的较大变动。

5.2 迎浪面护面块体的理论计算值和试验结果对比

在混合浪作用下的斜坡堤断面迎浪面护面块体的设计和选取过程中, 已考虑长周期混合浪的影响, 按照规范的理论计算值并按照临近工程的经验考虑了调整系数, 但在物理模型试验验证过程中依然出现护面块体失稳或者剧烈晃动的情况。

初始计算断面的迎浪面护面块体在设计极端情况下理论计算值约 3.38 t 扭王字块, 综合考虑经验系数后, 选取了 6 t 扭王字块作为护面块体。但经物理模型试验后建议上层护面选用 8t 扭王字块, 下层护面选用 6 t 扭王字块。在外海混合浪作用下的斜坡堤迎浪面护面块体选用时, 综合对比理论计算和试验结果, 建议在计算过程中, 极端高水位时稳定系数 K_D 可取 18, 设计水位时 K_D 可取 15; 当长周期混合浪作用时, 计算结果再放大 25%; 波周期大于 10 s 必须通过模型试验验证。也可在现行规范公式的基础上直接乘以 2.0~2.5 的经验系数。

此外, 第 21 届国际航运会议上推荐采用的 5 种计算公式, 在相同情况下的计算结果差异比较大。我国的防波堤规范推荐采用美国的 Hudson 公式, 但如果遇到设计波浪波长较长的情况 ($H/L \leq 1/30$),

建议采用苏联规范的公式进行复核:

$$W = \frac{0.1 \mu \rho_b g H^2 L}{\sqrt{1 + \cot^2 \alpha} (S_r - 1)^3} \quad (9)$$

式中: W 为单个块体稳定质量 (t); ρ_b 为块体材料的密度 (t/m^3); L 为浅水波长 (m); S_r 为块体材料密度与水密度之比; H 为设计波高 (m); α 为斜坡与水平面的夹角 ($^\circ$); μ 为系数, 见表 4。

表 4 系数 μ 取值

护面构件名称	系数 $\mu/10^{-4}$	
	抛填	安放
块石	250	-
混凝土方块	210	-
四角锥体	80	58
三柱体	57	34
六角块体	43	34

经苏联规范公式复核后, 护面块体计算质量 $W = 7.45$ t, 基本与物理模型试验稳定块体的质量相符。

6 结论

1) 建议在初定外坡护面块体的规格时, 可在现行的规范公式计算的基础上直接乘以经验系数 2.0~2.5; 建议在外海混合浪作用下的斜坡堤断面顶高程确定时, 应在规范公式计算的基础上适当增加 1~2 m 的富余高度。

2) 在涌浪和风浪的混合浪作用下的海况恶劣海域, 更容易遇到极端气候, 在使用过程中, 可能出现越浪量超出允许值的情况, 墙后堤顶和堤后斜坡很容易被浪打到, 引起结构破坏, 因此需要对墙后堤顶和斜坡护面进行优化。

3) 堤顶尽量选用合适的防浪墙结构形式, 如

(上接第 64 页)

- [5] 谢蓉, 韩旭东. Aermod 模型在港口大气颗粒物污染预测中的应用 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2019, 42(4): 78-83.
- [6] 季雪元. 干散货码头堆场风蚀起尘量计算公式研究进展探讨 [J]. 工程建设与设计, 2017(4): 133-135.
- [7] 李绍武, 李文善, 雷鹏, 等. 港口散货堆场铁矿粉起尘风

大圆弧反浪结构, 并可适当增加防浪墙前平台宽度以有效减少墙顶越浪量。

4) 现行规范中护底块石计算公式在浅水条件下并不适用, 在长周期波浪作用下更为明显。在长周期混合浪作用海域, 堤身外侧镇压层平台或护底结构需要格外加强, 最终根据物理模型试验确定。

参考文献:

- [1] 许万胜, 谭斌. 长周期波影响的河口防波堤施工技术 [J]. 水运工程, 2019(S1): 16-20, 25.
- [2] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [3] 柳玉良, 王海峰, 卢燕. 波浪周期对防波堤护面块体稳定性影响的试验分析 [J]. 海岸工程, 2012, 31(3): 9-14.
- [4] 张先武, 张华平. 长周期涌浪作用下斜坡式防波堤结构优化设计 [J]. 水运工程, 2015(1): 58-62.
- [5] 周加杰, 高峰, 张华平. 长周期涌浪作用下防波堤设计关键技术 [J]. 中国港湾建设, 2014(12): 25-29.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [7] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 嵊泗县沈家湾薄刀嘴防波堤工程初步设计文件 [R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2016.
- [8] 河海大学. 嵊泗县沈家湾薄刀嘴防波堤工程波浪断面物理模型试验报告 [R]. 南京: 河海大学, 2016.
- [9] 南京水利科学研究院. 波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [10] 刘丽娜, 黄明毅. 大圆弧防浪墙在防波堤工程中的应用 [J]. 水运工程, 2013(10): 149-151, 154.

(本文编辑 王璁)

洞试验研究 [J]. 水道港口, 2016, 37(5): 558-562.

- [8] 环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行) [R]. 北京: 环境保护部, 2014.
- [9] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口建设项目环境影响评价规范: JTS 105-1—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

(本文编辑 武亚庆)