



斜坡式防波堤中英设计方法对比研究

王亥索^{1,2}, 刘铭祎^{1,2}

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456; 2. 天津水运工程勘察设计院有限公司, 天津 300456)

摘要: 国内设计单位在海外斜坡式防波堤建设中, 常用的设计方法主要参照中国的 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》和英标 BS 6349-7。由于设计方法的差异, 使国内规范的国际化应用存在一定的局限性。结合这两本设计规范, 采用对比分析法对斜坡堤的波浪、断面、胸墙、边坡、护面块体、垫层块石、抛石棱体、护底及潜堤等设计方法进行论述。结果表明, 两者差异主要体现在设计理念、计算公式与参数、构造要求等方面, 这些差异反映了两国在防波堤设计领域的不同发展水平和工程实践特点。通过对比研究的结果, 可以更好地理解和应用这些差异, 为国内外的防波堤设计工作提供更科学的合理化建议。

关键词: 斜坡式防波堤; 中国规范和英国标准; 设计方法; 标准对比

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0071-08

Comparison of design methods of rubble mound breakwater between Chinese and British codes

WANG Haisuo^{1,2}, LIU Mingyi^{1,2}

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T., Tianjin 300456, China;

2. Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: In the construction of overseas rubble mound breakwaters by domestic design firms, the commonly used design codes mainly include the Chinese JTS 154—2018 *Code for Design of Breakwater and Revetment* and the British code BS 6349-7. Due to the differences between the two design methods, there are certain limitations in the international application of domestic codes. Combining with the two design codes, we use the comparative analysis method to discuss the design methods of wave, section structures, breast wall, slope, protective surface block, cushion block stone, riprap prism, bottom protection and submerged dike of rubble mound breakwater. The results show that the differences between the two codes are mainly reflected in the design concept, calculation formula and parameters, and structural requirements. These differences reflect the different development levels and engineering practice characteristics of the two countries in the field of breakwater design. Through the results of comparative study, we can better understand and apply these differences, and provide more scientific and reasonable suggestions for the design of breakwaters at home and abroad.

Keywords: rubble mound breakwater; Chinese and British codes; design method; code comparison

我国标准体系的建设由政府部门主导, 主要由各行业主管部门牵头, 选择经验丰富的大型企事业单位、科研院所或行业协会进行制定, 是一个自上而下的过程。英国国家标准由英国标准协会(BSI)制定, 英国标准规范主要由标准、推荐性

指南和一些技术文件构成, 其中后两者占比很大, 总体上是以建议性、推荐性指导为主, 注重经验运用和分析实际情况, 以此决定标准的适用性。中国标准的条文按照标准规定编写, 规范条文的格式、用词、量值单位等均应符合标准编写规定,

收稿日期: 2024-02-24

作者简介: 王亥索(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程设计与研究。

通讯作者: 刘铭祎(1991—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事港口航道工程设计与研究。E-mail: 464720021@qq.com

相关条款较为刚性，在条文中只提要求，不进行解释，但条款一般附有条文说明，条文说明不做引申。而英国标准的编写相对自由，标准内容多采用讲解叙述形式，阐述详细，有助于使用者理解。

目前国内学者已对国内外水运工程建设技术标准体系特点进行研究，但在中英防波堤工程设计标准的研究方面还没有对各个环节的详细比对。本文以斜坡式防波堤的设计方法作为研究对象，以中国的 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[1]、JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[2]、NB/T 25002—2011《核电厂海工构筑物设计规范》^[3](简称“中国规范”)为基础，与 BS 6349-7^[4]、BS 6349-1^[5](简称“英国标准”)有关内容进行对比研究，重点分析斜坡堤的设计方法，包括设计波浪选择、结构断面设计、边坡坡度、胸墙稳定性、护面块体稳定性、垫层块石稳定性计算、抛石棱体及护底计算、潜堤设计等^[6]。

1 设计波浪

JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》明确规定斜坡堤的设计波浪重现期应设定为 50a，在水深较大或涉及关键性建筑物等特定情况下，设计波浪重现期可采用 100 a 或更长。JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》、JTS 145—2015《港口与航道水文规范》、NB/T 25002—2011《核电厂海工构筑物设计规范》关于斜坡堤设计波高的累积频率标准见表 1。

表 1 斜坡堤设计波高的累积频率标准

规范	部位	设计内容	波高累积频率/%
JTS 154—2018 《防波堤与护岸 设计规范》	断面	主尺度	13
	护面块石、块体	稳定性	13 或 5
	护底结构	稳定性	13
	胸墙、挡浪墙	稳定性和结构	1
JTS 145—2015 《港口与航道 水文规范》	胸墙、堤顶方块	强度和稳定性	1
	护面块石、护面块体	稳定性	13 或 5
	护底块石	稳定性	13
NB/T 25002—2011 《核电厂海工构筑 物设计规范》	胸墙、堤顶方块	强度和稳定性	1
	护面块石、护面块体	稳定性	4
	护底块石	稳定性	4

英国标准中设计波高是指水工模型试验中所取的规则波波高。目前还没有简单的方法可用以比较规则波与随机波试验结果之间的相关关系。一些试验结果表明，与规则波波高相当的随机波波高介于有效波高 $H_{1/3}$ 与大波波高 $H_{1/10}$ 之间。在波浪未发生破碎的情况下，设计波高应选用 $H_{1/10}$ 的值。然而若堤前处 $H_{1/10}$ 波浪出现破碎现象，则在初步设计阶段应选取破碎波高 H_b 与 $H_{1/3}$ 中作用更显著的值作为设计依据。

2 结构断面设计

2.1 结构断面选型

按照中国规范，斜坡堤宜用于水深相对较浅、地基较差、砂石料来源丰富的情况。而英国标准中决定防波堤断面的主要因素是临海侧护面层块体的特性、边坡、堤顶高程及宽度，另外在选择断面时应适应当地的地基条件和施工的实际可能性。影响整个断面的其他主要因素为是否采用胸墙结构以及允许的越浪量，设置胸墙结构可以限制爬高及越浪。

2.2 结构断面尺寸设计

中国规范根据斜坡堤是否允许越浪、是否有胸墙和防护要求等级高低的不同，采用不同的标准设计堤顶的高程；顶宽的确定，在满足施工要求的基础上还要满足堤顶宽度的基本要求。在英国标准中，斜坡堤的相关堤顶高程、宽度、护面块体的大小均与越浪量有关，而越浪量大小的确定则是通过水工模型试验完成。

3 斜坡堤结构计算

3.1 胸墙稳定性计算

3.1.1 中国规范

1) 关于胸墙顶高程设计有以下规定。

①对于允许越浪且顶部无胸墙的斜坡堤，其堤顶高程应至少位于设计高水位以上，且不小于 0.6 倍的设计波高值。对于采用块石、四脚空心方块、栅栏板护面的斜坡堤，堤顶高程应至少位于设计高水位以上，且不小于 0.7 倍的设计波高值。

②对于基本不越浪的斜坡堤和宽肩台抛石斜坡堤, 堤顶高程应至少位于设计高水位以上, 且不小于 1 倍的设计波高值。

③对于基本不越浪且在堤顶设有胸墙的斜坡堤, 胸墙的顶部高程应至少位于设计高水位以上, 且大于 1 倍的设计波高值。

④对于防护要求较高的斜坡堤, 其堤顶高程应根据波浪爬高的计算结果确定, 并对越浪量进行严格控制。

2) 根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》, 斜坡式建筑物顶部胸墙上的波浪力, 无因次参数 $\xi \leq \xi_b$ 时, 其中 $\xi = \left(\frac{d_1}{d}\right) \left(\frac{d}{H}\right)^{2\pi H/L}$ 、 $\xi_b = 3.29 \cdot \left(\frac{H}{L} + 0.043\right)$, 可按下列规定确定, 但不适用于胸墙前有掩护棱体的情况。

①单位长度胸墙上的总波浪力 p 按下式计算:

$$p = \bar{p}(d_1 + z) \quad (1)$$

$$\bar{p} = 0.24\gamma HK_p \quad (2)$$

$$d_1 + z = H \operatorname{th} \left(\frac{2\pi d}{L} \right) K_z \quad (3)$$

式中: p 为平均压力强度, kPa; d_1 为胸墙前水深, m; z 为胸墙上波浪压强分布图形的顶部距静水面的高度, m; γ 为水的重度, kN/m^3 ; H 为建筑物所在处行进波的波高, m; L 为波长, m; d 为建筑物前水深, m; K_p 、 K_z 分别为与无因次参数 ξ 和波坦 L/H 有关的平均压强系数、波压力作用高度系数。

②单位长度胸墙底面上的波浪浮托力 p_u 按下式计算:

$$p_u = \mu \left(\frac{B}{2} p \right) \quad (4)$$

式中: μ 为波浪浮托力的折减系数, 取 0.7; B 为胸墙底宽, m。

③堤顶胸墙抗滑和抗倾稳定性按下式计算:

$$\gamma_0 \gamma_p p \leq (\gamma_G G - \gamma_u p_u) f + \gamma_E E_b \quad (5)$$

$$\gamma_0 (\gamma_p M_p + \gamma_u M_u) \leq (\gamma_G M_G + \gamma_E M_E) / \gamma_d \quad (6)$$

式中: γ_p 、 γ_u 分别为水平波浪力、波浪浮托力分项系数; γ_G 、 γ_E 分别为自重力、土压力分项系数, 均取 1.0; γ_0 为结构重要性系数; γ_d 为结构

系数, 取 1.25; G 为胸墙自重力标准值, kN/m ; f 为胸墙底面摩擦系数设计值; M_p 、 M_u 分别为水平波浪力的标准值、波浪浮托力的标准值对胸墙后趾的倾覆力矩, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$; M_G 、 M_E 分别为胸墙自重力的标准值、土压力的标准值对胸墙后趾的稳定力矩, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$; E_b 为内侧面地基土或填石的被动土压力, kN 。

3) 关于堤顶胸墙稳定性验算有以下规定。

①当胸墙前有且至少两排掩护宽度的块体, 高度形成全掩护时, 水平波浪力和浮托力可乘以 0.6~0.7 的折减系数。

②若胸墙底面埋深大于或等于 1 m, 内侧面地基土或填石的被动土压力可按相关公式计算后乘以 0.3 的折减系数。

③当胸墙埋入堤顶深度大于 1 m 时, 计入填石的有利作用。

3.1.2 英国标准

1) 关于胸墙上的波浪力有以下规定。

如未进行水工模型试验且波浪未在胸墙上破碎时, 可认为波压力正比于有效波高与静水位以上胸墙顶高之差。波压力 p_w 沿墙高均匀分布, 其近似值可由下式进行计算:

$$p_w = KW_w L \left(\frac{H_s}{H_c} - 0.5 \right) \quad (7)$$

式中: H_s 为堤位处有效波高值, m; H_c 为防波堤的顶高, m; L 为堤位处对应于有效周期的波长, m, 此值应为堤顶高程与静水位高程之差; W_w 为水的重度, 淡水取 9.81 kN/m^3 , 海水取 10.05 kN/m^3 ; K 为无因次系数, 按有限的试验该值对应于从圆石到四脚锥体护面在 0.025~0.190 变化, 在初步计算时可取 0.25。

2) 关于胸墙底面上的波浪浮托力有以下规定。

当胸墙底不带齿樁, 以及堤心为不透水时, 浮托力沿墙底可假定是均匀分布的, 其强度等于作用于侧面上的水平波压力。实际上浮托力相当均匀地向内侧减弱, 而内侧最小的压强取决于胸墙下垫层的渗透性。

3) 关于稳定性验算有以下规定。

安全系数等于总的稳定力除以总的倾覆荷载。对于波浪力按上述计算时,胸墙的抗滑安全系数应大于 1.5,考虑由于护面块体跌落可能引起的外力增加,此时校核计算所得安全系数应大于 1.0。当胸墙顶高程高于护面块顶高程时,抗滑及抗倾安全系数应大于 2.0。鉴于胸墙上所受波浪力的不确定性,对于重要工程进行专门的水工模型试验更为可取。其试验内容包括:在大于设计波的条件下进行试验以表明具有稳定性的富余度;在小于实际结构重度的条件下进行试验以表明具有稳定性的富余度;在设计工况条件下测试模型结构的受力情况以了解设计方案可达到的安全系数。

3.2 护面块体稳定质量和重力的计算

3.2.1 中国规范

1) 当波向线与斜坡堤纵轴线法线的夹角 $\beta > 22.5^\circ$ 时,护面块体采用块石和四脚空心方块的稳定质量可适当折减;当 $\beta < 22.5^\circ$ 时,斜坡堤护面块体稳定质量按下式计算:

$$W = \frac{0.1\gamma_b H^3}{K_D(S_b - 1)^3 \cot\alpha} \quad (8)$$

$$S_b = \frac{\gamma_b}{\gamma} \quad (9)$$

式中: W 为单个块体的稳定质量, t ; K_D 为块体稳定系数; α 为斜坡与水平面的夹角, $(^\circ)$; H 为设计波高, m ; γ_b 为块体的重度, kN/m^3 ; γ 为水的重度, kN/m^3 。

2) 堤头段的长度可采用 15~30 m,深水斜坡堤堤头段长度不宜小于堤身高度值的 2 倍。堤头护面的块体质量应大于堤身外坡护面块体,也可适当放缓堤头的内外坡度,堤头段的护底结构应较堤身适当加强。

3.2.2 英国标准

1) 关于混凝土护面块体所受荷载作用有以下规定。

①施工荷载。它发生在制造、运输和安放过程中,制造过程中的应力增加会导致裂缝(大块体中收缩或温度应力所产生的裂缝),此类裂缝和其

他情况可能会使块体抵御外荷载的能力明显下降。

②静荷载。它由自重力和块体相互的咬合作用引起,以及由堤心及垫层沉降引起块体相迭和挤压而出现。

③水力荷载。由波浪破碎、上冲及下落而引起,也可能是由相邻块体相挤所传递。

④动力荷载。由块体摆动和位移所引起,造成块体间的碰撞,它或许很大,但未必是最高的荷载。摆动引起的反复荷载可能引起疲劳而出现断裂。应进行更多的基础研究以便能对荷载进行更准确的定量分析。

2) Hudson 公式用于天然块石时有以下规定。

在堤高足够并基本不越浪的条件下,可用式(10)计算临海侧护面层的块体重力,但不适用于堤顶高程不足的防波堤。

$$W' = \frac{W_r H_D^3}{K_D X^3 \cot\alpha} \quad (10)$$

式中: W' 为主护面层单个块石在空气中的重力, N ; W_r 为块石的饱和重度, N/m^3 ; H_D 为建堤处的设计波高, m ; X 为块体的相对密度; K_D 为无因次的稳定系数。

在初步设计阶段,对于块石, K_D 将因波浪是否破碎,位于堤头或堤身,或因边坡及护面的层数而改变。使用 Hudson 公式计算块体重力时, K_D 的建议取值见表 2(损坏率为 0%~5%以及很少越浪时适用)。

表 2 Hudson 公式计算块体重力时 K_D 建议取值

块石形状	层数 n	摆放方法	堤身		堤头		$\cot\alpha$
			破波 K_D	未破波 K_D	破波 K_D	未破波 K_D	
光滑 圆石	2	任意	1.2*	2.4	1.1*	1.9*	1.5~3.0
	>3	任意	1.6*	3.2*	1.4*	2.3*	-
		任意	2.0	4.0	1.9*	3.2	1.5
粗糙有 棱角	2	任意	-	-	1.6*	2.8	2.0
		任意	-	-	1.3	2.3	3.0
	>3	任意	2.2*	4.5*	2.1*	4.2*	-

注:带*的 K_D 值未经试验验证,仅供初步设计时参考;位于堤身的 K_D 值适用边坡范围为 1:1.5~1:5; $n > 3$ 时的 $\cot\alpha$ 在没有更多资料验证前,适用边坡范围为 1:1.5~1:3。

3) Hudson 公式用于混凝土块体时有以下规定。

①模型试验的结果指出,对于某些块体(例如

四脚锥和工字块)而言,它抵抗斜浪打击的能力比抵抗正浪作用差。因此当考虑到这一因素时,采用的混凝土块体的 K_D 值还应适当减小。如果块体的良好咬合作用难以得到保证,例如边坡较缓或其摆放难以控制时, K_D 值应适当降低。

②堤身混凝土块体的 K_D 初步建设值及最大质量建议值见表 3。迄今已有若干此类试验表明,经过 6~10 次撞击后其弯曲强度可降低 60%。

表 3 Hudson 公式计算块体重力时 K_D 及最大质量建议值

块体形式	K_D	最大块体质量/t
工字块	10~12	15
稳定块	10~12	20
四脚锥体	6~8	30
方块	6~8	60
钩连块体	10~12	-

4) 关于堤头设计有以下规定。

可采用更大的护面块体或放缓边坡,或者综合采用这两种方法;堤头增大护面层厚度(即增大渗透性)或在混凝土块体中放置重集料,从而可避免由于堤头采用更大护面块而需增加模板,堤顶宽也可增大;重要工程的堤头应进行三维模型试验,采用来自不同方向的波浪。

3.3 边坡坡度

中国规范按照 154—2018《防波堤与护岸设计规范》中的表 4.2.9,依据护面形式选择坡度取值。英国标准对于块石护面而言,护面层边坡大于 1:1.5(接近块石的自然休止角)时 Hudson 公式不再适用。边坡坡度根据表 5 应用 Hudson 公式计算块体重力时的 K_D 建议值。

3.4 垫层块石稳定性计算

3.4.1 中国规范

1) 护面垫层块石的质量应依据护面块体质量的 1/20~1/10 范围内取值;2) 对于规则摆放的护面块体,垫层块石质量可适当减小,可在护面块体质量的 1/40~1/20 范围内取值;3) 采用四脚空心方块和栅栏板作为护面时,垫层块石的尺寸必须不小于护面结构的空隙尺寸;4) 斜坡堤的人工块体数量、护面层的厚度以及混凝土量,可通过下式进行计算:

$$N = An'c(1-P') \left(\frac{0.1\gamma_b}{W} \right)^{2/3} \quad (11)$$

$$h = n'c \left(\frac{W}{0.1\gamma_b} \right)^{1/3} \quad (12)$$

$$Q = N \cdot \frac{W}{0.1\gamma_b} \quad (13)$$

式中: N 为人工块体数量; h 为护面层厚度, m; Q 为人工块体混凝土量, m^3 ; n' 为护面块体层数; γ_b 为护面块体的重度, kN/m^3 ; c 为块体形状系数; A 为垂直于厚度的护面层平均面积; P' 为护面层的空隙率; W 为单个块体的稳定质量, t。

3.4.2 英国标准

1) 关于护面块体的垫层块石质量有如下规定。

①采用天然块石通常垫层块石的中值粒径不应小于护面块石中值粒径的 1/10。垫层块石的单块尺寸与设计尺寸之差应在 $\pm 30\%$ 以内,即各单块质量的变化幅度应在 2:1 范围之内,同时至少应有 50% 的块石超过设计单块质量。垫层块石质量取值见表 4。

表 4 垫层块石质量取值

块体形式	垫层块石质量
工字块	$\left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5} \right) W$
稳定体	$\left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5} \right) W$
四角锥体	$\left(\frac{1}{20} \sim \frac{1}{10} \right) W$
钩连块体	$\left(\frac{1}{15} \sim \frac{1}{7.5} \right) W$

②当无资料可循时,垫层采用下式进行选择:

$$D_{85}/D_v > 2 \quad (14)$$

式中: D_{85} 为垫层块石通过率 85% 的公称粒径, mm, 等效立方体; D_v 为护面层块石孔隙的最大尺度, mm。

当在实际工程中采用卵石时,其最大尺度约为护面块孔洞直径的 2/3。

③泰沙基反滤层准则用以设计垫层与堤心石之间的相对关系,公式为:

$$D_{15u}/D_{85c} \leq 4 \sim 5 \quad (15)$$

$$4 \leq D_{15u}/D_{15c} \leq 20 \sim 25 \quad (16)$$

式中: D_{15u} 、 D_{15c} 为垫层块石、堤心块石通过率

15%的公称粒径,mm,等效立方体; D_{85c} 为堤心块石通过率 85%的公称粒径,mm,等效立方体。反滤层应沿防波堤的整个高度设置。

2) 垫层厚度的计算公式为:

$$r = nk_{\Delta} (W' - W_r)^{1/3} \quad (17)$$

式中: r 为平均层厚,m; n 为石块的层数; W' 为块石的公称重力,N; W_r 为块石的重度, N/m^3 ; k_{Δ} 为层厚系数,取值见表 5。

表 5 厚度系数 k_{Δ} 取值

块体形式	n	摆放方式	厚度系数 k_{Δ}	空隙率/%
光滑块石	2	任意	1.02	38
带棱角块石	2	任意	1.15	37
	>3	任意	1.10	40
加工立方体	2	任意	1.10	47

3.5 抛石棱体及护底计算

3.5.1 中国规范

当斜坡堤的外侧坡脚布设水下抛石棱体时,棱体的顶面宽度和厚度可根据堤前水深和断面尺度确定,其宽度 ≥ 2 m、厚度 ≥ 1 m,其中深水堤取值应适当加大,其宽度 ≥ 5 m、厚度 ≥ 3 m;棱体的顶面高程不宜高于设计低水位以下 1 倍设计波高值;坡脚棱体采用人工块体时,块体至少布设 2 排且块体外侧采用块石护底作为顶撑,高度取块体厚度的 1/2。护底块石稳定质量取值见表 6。

表 6 护底块石稳定质量取值

堤前波浪底流速/ $(m \cdot s^{-1})$	护底块石稳定质量 W/kg
2.0	60
3.0	150
4.0	400
5.0	800

注:破碎波区的堤前护底块石的质量宜适当加大。

3.5.2 英国标准

1) 关于抛石棱体设计有以下规定。

①当堤脚处的水深小于 $2H_s$, 护面层边坡陡于 1:3 时,一般应设堤脚棱体;当水深大于 $2H_s$ 时,作为一种初步方案也可将垫层外延,形成堤脚棱体。

②根据少量非破波的不规则波试验,在初步

计算防护块石重力时可采用下式计算:

$$W' = W_r H^3 / (N_s^3 X^3) \quad (18)$$

式中: H 为建堤的设计波高,m,建议取不小于 $H_{1/10}$; N_s 为抛石基础及护脚的设计稳定系数; W_r 为块石的重度, N/m^3 ,状态为饱和含水、表面干燥; X 为块石的相对重度。

③为了计算防护波浪作用所需的块石重力,英国标准也引用了美国的 *Shore Protection Manual*^[7] 的公式,它类似于 Hudson 公式。该式是基于规则波的模型试验,为:

$$W' = 0.0219 \cdot \frac{v^6 W_r}{g^3 X^3} \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi} \right)^{-3/2} \quad (19)$$

式中: W' 为空气中单个石块的重力,N; v 为最大流速,m/s; θ 为坡角, $(^\circ)$; φ 为护面块石的休止角, $(^\circ)$ 。

④当同时有波浪和水流作用时,所需块石质量应比抗波浪冲刷所需的质量增加 50%。

2) 关于堤脚棱体有以下规定。

①棱体顶宽应至少能放置 4 个块石,块石尺寸最好通过水工模型试验确定。当海床为易于冲刷的细颗粒土质时,应取较宽的堤脚棱体,其体积应足够大以形成允许塌陷的护脚棱体。

②迄今还没有确定护坦所需宽度的明确标准,通常认为在建筑物前 1/4 波长范围内的冲击最严重。

③护坦石的尺寸取决于设计波浪作用下海床上所需稳定块的质量,如考虑破波及波浪下落的作用可适当加大块体质量。

④当海床是很松散的砂质和较细颗粒的土质时,为防止砂土透过块石层有时需用柴排保护,这种砂土运动是由波浪作用引起孔隙水压振荡而造成的。传统的防护是采用柳条柴排压以石块,但现在也可用土工布压以块石或混凝土块。

3.6 潜堤设计

3.6.1 中国规范

抛石潜堤按照 $H_t = K_t H$ (K_t 为传递波高系数, H_t 为堤后的传递波高) 计算传递波高,通过模型

试验确定护面块石稳定质量。当外坡坡度系数为 1.5~2.0 时, 护面块石的稳定质量 W 按照以下公式计算:

$$W = 0.1\gamma_b \left(\frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma} \right)^3 \frac{H^2 L_p}{N_D^3} \quad (20)$$

$$T_p = 1.21\bar{T} \quad (21)$$

$$L_p = \frac{gT_p^2}{2\pi} \text{th} \frac{2\pi d}{L_p} \quad (22)$$

$$N_D = 5.95 - \frac{1}{0.14} \ln \left(\frac{d+h_c}{d} \right) \quad (23)$$

式中: γ_b 为块石的重度, kN/m^3 ; γ 为水的重度, kN/m^3 ; H 为堤前设计波高, m ; L_p 为与谱峰周期相应的波长, m ; N_D 为潜堤护面块石的稳定系数; T_p 为谱峰周期, s ; T 为波浪平均周期, s ; d 为堤前水深, m ; h_c 为堤顶在计算水位以上的高度, m 。

当潜堤顶部位于计算水位下 0.5 倍波高以内时, 护面块石稳定质量不宜小于相同条件下出水堤的护面块石稳定质量。

3.6.2 英国标准

潜堤的堤心石顶高程不高于高水位。一般不设置胸墙结构。潜堤临海侧的波浪下冲力小于高堤顶堤, 但对内侧则波浪下冲力增大。堤顶部位的护面块体会受到很大的波浪力而其咬合作用由于所受重力的差异则不如坡面上的块体。因此和常规的斜坡堤相比, 潜堤的堤顶和内坡的护面块更大些。在初步设计时可取单一质量的护面块体, 块体质量选取常规防波堤海侧护面所采用的块体质量。护面块体应包括从堤顶到内坡静水位以下 1 倍波高处。

4 结论

1) 关于设计波浪的选择, 中国规范针对确定斜坡堤断面尺寸、不同部位结构稳定及强度计算所用的设计波高累计频率标准, 在设计过程中可根据不同要求采取不同数值进行计算。英国标准给出了常用规则波高的选取方法, 并给出随机波

波高的初步估计取值范围, 后续设计工作中需要对波高的选取进行试验验证。

2) 关于结构断面设计, 中国规范对不同的工程特性进行了简单的分类, 在设计初期起到了一定的指导性作用。而英国标准在这一部分仅列出断面形式选取时的主要参考因素, 在设计过程中应结合工程经验适当选取结构形式, 并在后续的设计工作中根据具体情况, 判断结构形式选取的合理性。

3) 胸墙稳定计算。中国规范和英国标准中均已详细地描述了胸墙上波浪力及浮托力的计算。中国规范的计算公式适用于 $\xi \leq \xi_b$ 的情况, 并且不适用于胸墙前有掩护棱体的情况。英国标准的计算公式仅适用于波浪未在胸墙前破碎的情况。在计算胸墙的抗滑抗倾稳定性时, 胸墙前的特殊棱体掩护应对波浪力及浮托力进行折减。英国标准中虽然未体现计算公式, 但对计算的稳定安全系数进行了明确的规定。

4) 关于护面块体稳定计算的分析评价, 中国规范和英国标准均对护面块体的稳定性计算进行了明确的描述, 并明确了稳定性系数的取值。中国规范对斜向入射的稳定性系数进行了修正。英国标准对斜向入射的波浪定性的要求适当减小稳定性系数。中国规范和英国标准均对堤头段护面块体的质量计算进行了修正, 普遍采用加大块体和放缓坡度的处理方式, 英国标准规定重要工程应根据三维模型试验进行堤头段设计修正。

5) 边坡坡度。中国规范和英国标准对斜坡式防波堤的边坡坡度进行了明确的规定, 设计时满足对应坡度要求即可。

6) 垫层块石稳定性计算。中国规范和英国标准均对垫层块石的稳定质量计算进行了规定, 其计算公式稍有差异。中国规范和英国标准对垫层块石厚度的计算也明确了计算公式, 但它们的计算公式稍有差异。英国标准垫层块石的计算, 除了对稳定质量的计算外, 还按照泰沙基反滤层准

则进行了反滤层设计,从而确定了块石的粒径大小。

7) 抛石棱体及护底计算。中国规范对抛石棱体的高程及棱体块石的稳定质量进行了明确描述。但英国标准仅明确了需要增加抛石棱体的条件和稳定质量的计算, *Shore Protection Manuel* 给出了另一个计算抛石棱体稳定质量计算的公式,此公式与英国标准中的计算公式类似。对于护底块石的设计,中国规范一般先进行底流速的计算,根据计算出来的底流速选取护底块石的规格,而英国标准则是根据水深和波高选取护底块石的中值粒径。

8) 潜堤设计。中国规范主要对抛石潜堤护面块体的稳定质量进行描述,当护面坡度不满足计算前提条件时,应由模型试验确定块体稳定质量,中国标准还对抛石潜堤次生波高的计算进行了简要的描述。英国标准中明确潜堤的堤顶及后坡护面块体应较海侧更大。中国规范和英国标准对护面块体内外坡稳定质量的分界标准稍有差异。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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(2022版)[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.

[3] 中广核工程有限公司, 天津市海岸带工程有限公司. 核电厂海工构筑物设计规范: NB/T 25002—2011[S]. 北京: 原子能出版社, 2011.

[4] BSI. Code of practice for maritime structures part 7: guide to the design and construction of breakwaters: BS 6349-7[S]. London: BSI, 1991.

[5] BSI. Code of practice for maritime structures part 1: code of practice for general criteria: BS 6349-1[S]. London: BSI, 2000.

[6] 宋建东, 王刚, 赵凯. 中外斜坡式防波堤结构设计方法对比[J]. 港工技术, 2022, 59(2): 32-36.

[7] USACE. Shore protection manuel [M]. Washington: USACE, 1977.

(本文编辑 王隽)

(上接第 40 页)

参考文献:

[1] 贺志明, 谢汝君. 传统能源与新能源协调发展的路径探讨[J]. 天然气技术与经济, 2023, 17(5): 39-46, 88.

[2] 林冬. 浅谈我国可再生能源发展现状及对策研究[J]. 中国工程咨询, 2022(3): 16-20.

[3] 谢岸辉, 武强, 李鹏飞. 湖南省 2021 年规模工业及部分高耗能行业能耗现状及对策[J]. 大众用电, 2022, 37(5): 35-37.

[4] 孟姣燕, 郑旋, 田拥军, 等. 能源保供, 2022 年湖南怎么干[N]. 湖南日报, 2022-03-17(004).

[5] 张智, 江陵. 重塑华中能源格局浩吉铁路打响水铁联运第一枪[J]. 企业观察家, 2019(10): 68-69.

[6] 王进, 何敬英. 湖北荆州煤炭铁水联运储配基地运营期

的细分市场定位[J]. 中国水运, 2017(2): 19-20.

[7] 湘发改能源规[2022]458号. 湖南省“十四五”煤炭清洁开发与利用规划[S]. 长沙: 湖南省发展和改革委员会, 2022.

[8] 周娟娟. 发挥浩吉铁路作用保障缺煤省份用煤[N]. 中国煤炭报, 2022-03-10(002).

[9] 莫馥榕, 张健. 安全保供新形势下华中地区燃煤电厂公共库存策略研究[J]. 煤炭经济研究, 2023, 43(6): 35-42.

[10] 李丹丹. 长江经济带铁水联运物流经营模式研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2022.

[11] 林天宇. 长江江苏段水上过驳专项整治经验[J]. 中国港口, 2022(8): 48-50.

(本文编辑 赵娟)