

· 港 口 ·



中英规范斜坡式防波堤护面块体 设计对比研究

王 帅, 方爱东, 蔡 伟, 苏永生
(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 以斜坡式防波堤护面块体设计为例, 将英国规范 BS 6349.7—1991《防波堤设计和施工指南》与中国规范 JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》内容进行对比, 分析两者在计算及构造要求中存在的异同, 并通过典型工程实例加以说明, 得到一些有益结论供涉外工程参考。

关键词: 斜坡式防波堤; 护面块体; 规范; 对比

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0061-05

Comparative study on design method of armor block for rubble mound breakwater between Chinese and British standards

WANG Shuai, FANG Ai-dong, CAI Wei, SU Yong-sheng

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Taking the design of armor block for rubble mound breakwater as an example, the codes of Britain (BS 6349.7—1991) and China (JTS 154-1—2011) are compared in this paper. The similarities and differences between the two standards in calculation methods and structural requirements are analyzed. Based on the discussion of a typical example, some beneficial conclusions are summarized, which may serve as reference for overseas project design.

Key words: rubble mound breakwater; armor block; standard; comparison

斜坡式防波堤是海港工程中常见的一种结构形式, 具有消浪性能好、对地基沉降适应性强以及施工简便等优点^[1]。护面是斜坡式防波堤中最重要的部分, 它覆盖在堤心材料外层, 用于直接承受波浪和水流的冲击作用, 以保护堤身其它部位不受侵蚀和破坏。常用的护面块材料有块石、混凝土人工块体和混凝土板等。目前中国工程普遍采用 JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》(简称“中标”)^[2]作为斜坡堤护面块体计算的技术标准。随着经济的飞速发展, 海外市场业务不断增多, 如何将国际普遍认可的通用规范与中国现行的行业规范相结合, 找出且掌握两者的

差异, 并在实践中融会贯通, 是摆在设计工作者面前的重要课题。因此, 本文以斜坡式防波堤护面块体设计为例, 试将英国规范 BS 6349.7—1991《防波堤设计和施工指南》(简称“英标”)^[3]与中国规范此部分内容进行对比, 分析两者在计算方法及构造要求中存在的异同, 并通过典型实例加以说明, 从而为涉外工程提供参考。

1 斜坡式防波堤护面块体设计方法概述

斜坡式防波堤护面块体设计主要包括护面块体稳定重力和护面层厚度两个方面。由于人们对于堤前水动力特性仍然认识不足, 在斜坡堤设计

收稿日期: 2013-12-25

作者简介: 王帅 (1983—), 女, 博士, 工程师, 从事港口、航道规划设计与研究工作。

中,一直将护面块体稳定重力作为抵抗海浪破坏作用的主要依据。其确定方法一般是从块石周围水流流态的分析入手,找出块石失稳的模式,通过块体的力学平衡方程,从而得出稳定重力的计算公式^[4]。目前国内外规定护面块体重力的公式很多,中标^[2]采用最为常用的 Hudson 公式,而英标^[3]则提供了 Hudson 公式和 Van der Meer 公式两种方法。这两种计算公式,前者基于射流理论,可以计算不同结构、不同铺置形式的护面块体稳定重力,因其形式较为简单至今被广泛应用,一般情况下可获得较好的结果^[5];后者基于不规则波试验,考虑了若干 Hudson 公式所未加以考虑的因素,如:波浪形态、周期、波陡、风暴延时、堤身结构渗透性,以及波浪作用后堤面破坏水平的影响等,是目前计算护面块体重力上考虑因素较多、较全面的一种方法,近年来西方国家已采用^[6]。本文主要围绕上述两种公式确定护面块体重力的设计方法进行介绍。

2 护面块体稳定重力计算

2.1 Hudson 公式

Hudson 公式是通过大量的规则波对天然块石护面堤作用的水工模型试验而提出的,但后来被推广应用于混凝土人工块体。具体公式如下:

$$W = \frac{\rho_b g H_D^3}{K_D X^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

式中: W 为护面单个块体稳定重力 (N); ρ_b 为块

体材料的密度 (kg/m^3); H_D 为堤位处的设计波高 (m); X 为块体的相对密度, $X = S_b - 1$, 其中 $S_b = \rho_b / \rho_w$; ρ_w 为水的密度 (kg/m^3); α 为斜坡与水平面的夹角 ($^\circ$); K_D 为块体稳定系数; g 为重力加速度 (9.81 m/s^2)。

中标与英标此公式基本形式一致,但两种标准下设计参数的取值有所区别。首先是设计波高 H_D 不同:中国规范 JTS 145-2—2013《海港水文规范》中规定当平均波高与水深的比值 $\bar{H}/d \geq 0.3$ 时,设计波高取 $H_{13\%}$, $\bar{H}/d < 0.3$ 时取 $H_{5\%}$;而英标则建议在波浪未破碎时,设计波高应取 $H_{1/10}$ (约等于 $H_{4\%}$),当堤前处 $H_{1/10}$ 波浪发生破碎时,应取破碎波高或有效波高 H_S (即 $H_{1/3}$, 约等于 $H_{13\%}$) 两者之中作用更强烈者。通过对比可以看出,对于深水波且波浪未破碎情况下,英标采用的设计波高较大。其次是块体稳定系数 K_D 的取值差异较大,中标与英标对该系数的相关规定见表 1 和表 2。中标规定该系数取值的适用范围是:波向线与斜坡堤纵轴线法线的夹角小于 22.50° ,且堤前波浪不破碎,斜坡堤堤身在计算水位上、下 1.0 倍设计波高之间的护面块体稳定重力的计算。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,规范指出块体稳定性应进行模型试验验证。当波浪斜向作用于斜坡式防波堤时,除扭工字块体护面外,式中 K_D 值应进行修正^[2]。

表 1 中标稳定系数 K_D 相关规定

| 护面形式 | | 容许失稳率/% | K_D | $\cot \alpha$ | 其他要求 |
|--------|--------|---------|-------|---------------|-------------------|
| 护面块体 | 构造形式 | | | | |
| 块石 | 抛填 2 层 | 1~2 | 4.0 | 1.5~3.0 | |
| | 安放 1 层 | 0~1 | 5.5 | 1.5~3.0 | |
| 方块 | 抛填 2 层 | 1~2 | 5.0 | 1.0~1.25 | |
| 四脚锥体 | 安放 2 层 | 0~1 | 8.5 | 1.25~2.0 | |
| 四脚空心方块 | 安放 1 层 | 0 | 14 | 1.25~2.0 | 设计波高大于 4 m 时,不宜选用 |
| 扭工字块体 | 安放 2 层 | 0 | 18 | 1.25~2.0 | 最小块体质量不宜小于 2 t |
| 扭王字块体 | 安放 1 层 | 0 | 18 | 1.25~2.0 | 最小块体质量不宜小于 2 t |

表 2 英标稳定系数 K_D 相关规定

| 护面形式 | | 层数 n | 摆放方法 | 堤身 | | 堤头 | | $\cot\alpha$ | 建议最大块体质量/t |
|------------|--------|--------|------|------|----------|-----------|----------|--------------|------------|
| 护面块体 | 形状 | | | 任意 | 破波 K_D | 未破波 K_D | 破波 K_D | | |
| 块石 | 光滑圆石 | 2 | 任意 | 1.2° | 2.4 | 1.1° | 1.9 | 1.5 ~ 3.0 | 10 ~ 15 |
| | 光滑圆石 | >3 | 任意 | 1.6° | 3.2 | 1.4° | 2.3* | -* | |
| | 粗糙,有棱角 | 2 | 任意 | 2.0 | 4.0 | 1.9° | 3.2 | 1.5 | |
| | | | | | | 1.6° | 2.8 | 2.0 | |
| | 粗糙,有棱角 | >3 | 任意 | 2.2° | 4.5* | 2.1° | 4.2* | 3.0 | |
| 2.1° | | | | | | 4.2* | -* | | |
| 工字块 | | | 任意 | | 10 ~ 12 | | | | 15 |
| 稳定体 | | | 任意 | | 10 ~ 12 | | | | 20 |
| 四脚锥体 | | | 任意 | | 6 ~ 8 | | | | 30 |
| Antifer 方块 | | | 任意 | | 6 ~ 8 | | | | 60 |
| 钩连块体 | | | 任意 | | 10 ~ 12 | | | | |

注: 1) 带*的 K_D 值未经过试验验证, 仅供初步设计时参考。2) 对于块石护面, 容许失稳率为 0% ~ 5% 以及很少越浪时适用。3) 块石护面适用边坡范围为 1:1.5 到 1:5, 带*的边坡范围在没有更多资料验证时, 适用于 1:1.5 ~ 1:3。4) 人工块体护面当边坡小于 1:3 时, 设计应特别慎重, 须结合水工模型试验。

英标中稳定系数 K_D 的取值随波浪是否破碎、位于堤头或堤身、边坡及护面的层数而改变 (表 2), 而这些影响因素未体现在中标 K_D 取值中, 但对堤头等部位的块体质量中标有关于“增大 20% ~ 30%, 破碎区再增大 10% ~ 25%, 且必要时可通过模型试验确定”等相应规定。通过对比分析可知, 英标 K_D 值相比中标普遍偏小, 如工字块体中标取值为 18, 而英标为 10 ~ 12, 因此计算出的稳定块体质量会相比中标计算结果偏大。

Hudson 公式具有使用简单方便的优点, 目前使用经验也最多, 但仍存在一些不足: 1) 该公式基于规则波试验, 而实际波浪为不规则波; 2) 不适用于坡度很陡和平缓的情况, 前者波浪不会发生破碎, 后者波浪破碎形态与相对较陡时不同, 因而均与假设情况不符; 3) 稳定系数 K_D 的取值还有待深入研究, 其影响因素未考虑水深和波陡等影响。有研究表明, 当斜坡堤前水深较大时, Hudson 公式计算的块体稳定重力值可能偏小^[7]。

2.2 Van der Meer 公式

Vander Meer 公式为经验性的, 试验在不规则波条件下进行, 计算参数中考虑的影响因素包括: 1) 波周期; 2) 破碎相似参数; 3) 波浪破碎条件; 4) 风暴延时; 5) 堤心渗透性。英标中具体公式如下:

对于破碎波 ($\xi_m < 2.5 \sim 3.5$)

$$(H_D/XD_{n50})/\sqrt{\xi_m} = 6.2P^{0.18}(S/\sqrt{N})^{0.2} \quad (2)$$

对于不破碎波 ($\xi_m > 2.5 \sim 3.5$)

$$H_D/(XD_{n50}) = 1.0P^{-0.13}(S/\sqrt{N})^{0.2}(\cot\alpha)^{0.5}\xi_m^P \quad (3)$$

式中: D_{n50} 为公称中值粒径 (m); S 为损坏水平值, $S = A/D_{n50}^2$, 其中 A 为受冲蚀部位的断面面积; S 值一般取 1 ~ 3 (大体相当于 5% 的容许失稳率); N 为波浪个数, 取值范围为 3 000 ~ 5 000; 波浪破碎相似参数 $\xi_m = \tan\alpha / (2\pi H_S/gT_Z^2)^{0.5}$; T_Z 为波浪的上跨零点平均周期 (s); P 为堤芯渗透性参数, 建议值为: 相对不透水堤芯取 0.1, 均质块石堤芯取为 0.6, 设计中以低估渗透性为宜。

值得注意的是, Van der Meer 公式中设计波高 H_D 采用的是有效波高 H_S (即 $H_{1/3}$, 约等于 $H_{13\%}$), 这与英标 Hudson 公式取值有所不同。

Van de Meer 方法考虑了较多的因素, 目前在西方国家已得到应用。但该公式基于实验室试验, 考虑的断面形式和波浪要素较少, 因此各国对其仍存在很多讨论。Allsop 等^[8]对欧洲资料进行分析后认为 Van de Meer 公式对于块石应用优于 Hudson 公式, 但对堤头损坏的估计不足, 对于方块护面的符合性不好, 对四脚锥护面也不比 Hudson 公式有改进。由于该公式为经验性的, 因而英标中特

别指出对于公式的应用不能超过试验条件,目前普遍认为该公式对于天然块石稳定重力计算的适用性更好。

3 护面层厚度

对于斜坡堤护面层厚度的计算,中标与英标计算公式基本一致,但形状系数的取值存在一些差别,如英标规定当护面块体为块石 $n=2$ 时,带棱角块石的形状系数取为 1.15,中标则取 1.0,具体数值见相关规范^[2-3]。护面层厚度计算公式如下:

$$r = n'c \left(\frac{W}{\rho_b g} \right)^{1/3} \quad (4)$$

式中: r 为护面层厚度 (m); n' 为护面块体层数; c 为块体形状系数。

对于护面垫层块石,至少应有 2 层石块的厚度,中标规定其质量可取按公式确定的护面块体质量的 1/10 ~ 1/20,最小质量不得小于 1/40;英标规定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,对于混凝土护面块体第 1 层垫层的块石质量应参考有关经验和模型试验的资料,不同护面形式垫层质量推荐值在 1/5 ~ 1/20。

我国对砌石护面研究较多,根据波浪作用下的破坏特点,其稳定性一般按护面层厚度进行控制,因此中标还针对该种护面层厚度计算作出了规定^[2],英标未涉及此部分内容。

4 工程实例分析

沙特东部波斯湾内某港区一期工程项目,护岸及防波堤建设总长度约为 16 km,堤顶高程为 5.0 m,结构设计使用期为 50 a。根据工程技术要求,护面设计须遵从英标要求^[3]。断面形式采用斜坡式结构,护面块体外港池主要采用四脚空心块结构,内港池主要采用块石结构,堤芯为全石芯方案。在进行防波堤断面设计时,初步考虑了四脚空心块和块石两种护面结构方案进行比选,其中四脚空心块方案采用 Hudson 公式进行计算,而块石方案则选用 Hudson 公式和 Van der Meer 公

式两种方法进行核算。

由于英标没有四脚空心块结构的稳定系数 K_D 值,而中国规范中此值为 14,经和英标中其他块体类比,咨工认为取值偏大,经各方讨论研究,并参考英标中形式较为相近几种规则摆放块体的稳定系数取值 (K_D 值多在 6 ~ 8),最终商议确定本项目四脚空心块结构按照 $K_D = 7.5$ 进行设计,同时结合物理模型试验对稳定性结果进行验证。本文选取工程最北侧外海波浪较大处防波堤为例进行分析,两种方案下海侧护面块体主要设计参数为: $H_S = 2.3$ m, 预制块 $\rho_b = 2.4 \times 10^3$ kg/m³, 块石 $\rho_b = 2.5 \times 10^3$ kg/m³, $T_p = 9.0$ s, $\rho_w = 1.025 \times 10^3$ kg/m³, $\cot\alpha = 2.0$ 。

计算结果对比见表 3, 4。由于该位置处防波堤经分析波浪为未破碎状态,因此英标计算中采用的设计波高取 $H_{1/10}$ (约等于 $1.27H_S$), 而中标计算经判断 $\bar{H}/d < 0.3$, 因此设计波高取 $H_{5\%}$ (约等于 $1.22H_S$)。由表 3 可知,四脚空心块方案中由于英标和中标在 Hudson 公式的设计波高 H_D 和稳定系数 K_D 选取上存在较大差异,因此该位置护面块体质量使用英标方法比中标的计算结果大了 1 倍左右,设计块体质量约在 2.0 t 左右。同时由表 4 可以看出,块石护面方案中 Hudson 公式和 Van der Meer 公式两者计算结果相近,后者比前者计算结果略大,块体质量均在 3.0 t 左右。对比两种护面方案,考虑到沙特当地块石材料稀缺,造价较高,而四脚空心块可在现场预制,且不存在专利费用问题,即便使用英标比中标计算出的块体质量大一些,但整体的技术经济性相比块石方案还是更好,因此最终确定外港池防波堤选用四脚空心块方案。本实例中典型位置处防波堤最终选定的护面结构为 2.0 t 四脚空心方块,垫层块石平均质量取 270 kg,约为护面块体质量的 13.5%,选取的垫层块石规格经复核均大于护面的空隙尺度 (0.24 倍四脚空心块边长 ≈ 0.34 m),可以满足构造要求,防波堤结构断面如图 1 所示。该断面后经二维物理模型试验验证,护面块体稳定性较好。

表 3 四脚空心块护面方案计算结果

| 公式和标准 | H_D | | K_D | $X = S_b - 1$ | W | | 块体质量 选用值/t |
|---------------|------------------|------|-------|---------------|--|-------|---------------|
| | 公式 | 取值/m | | | 公式 | 取值/kN | |
| Hudson 公式(英标) | $H_D = 1.27 H_s$ | 2.92 | 7.5 | 1.341 | $W = \rho_b g H_D^3 / (K_D X^3 \cot \alpha)$ | 16.2 | 2.0 |
| Hudson 公式(中标) | $H_D = 1.22 H_s$ | 2.81 | 14.0 | 1.341 | $W = \rho_b g H_D^3 / [K_D (S_b - 1)^3 \cot \alpha]$ | 7.7 | 1.0 |

表 4 块石护面方案计算结果

| 公式 | H_D | | K_D | T_z/s | $X = S_b - 1$ | S | P | N | ξ_m | D_{n50}/m | W | | 块体质量 选用值/t |
|-------------|------------------|------|-------|---------|---------------|-----|-----|-------|---------|-------------|--|-------|---------------|
| | 公式 | 取值/m | | | | | | | | | 公式 | 取值/kN | |
| Hudson | $H_D = 1.27 H_s$ | 2.92 | 4.0 | | 1.439 | | | | | | $W = \rho_b g H_D^3 / (K_D X^3 \cot \alpha)$ | 25.6 | 3.0 |
| Vander Meer | $H_D = H_s$ | 2.30 | | 6.4 | 1.439 | 2 | 0.3 | 4 000 | 2.68 | 1.02 | $W = (D_{n50})^3 \rho_b g$ | 27.4 | 3.0 |

注: $\xi_m = \tan \alpha / [2\pi H_s / (g T_z^2)]^{0.5}$, $D_{n50} = H_D / [X 6.2 P^{0.18} (S/\bar{N})^{0.2} \xi_m^{-0.5}]$ 。

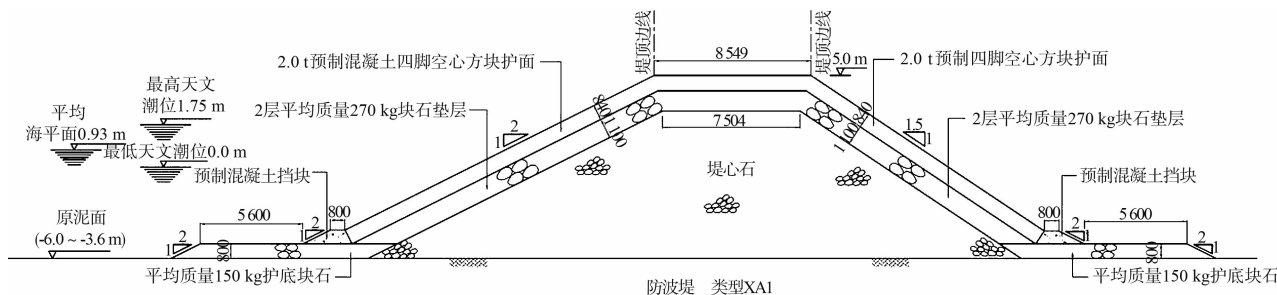


图 1 典型位置防波堤四脚空心块护面结构断面

5 结语

1) 斜坡堤护面块体计算 Hudson 公式中标与英标基本形式一致, 但两种标准下设计波高 H_D 和块体稳定系数 K_D 取值存在差异。对于深水波且波浪未破碎情况下, 英标采用的设计波高较大。英标中稳定系数 K_D 的取值随波浪是否破碎、位于堤头或堤身、边坡及护面的层数而改变, 而这些影响因素未体现在中标 K_D 取值中, 但对堤头等部位的块体质量中标有关于增大 20% ~ 30%, 及破碎区再增大 10% ~ 25% 的相应规定。

2) Van der Meer 公式中设计波高 H_D 采用的是有效波高 H_s , 这与 Hudson 公式波浪未破碎时设计波高取 $H_{1/10}$ 有所不同。

3) 对于斜坡堤护面层厚度的计算, 中标和英标计算公式基本一致, 但形状系数的取值存在一些差别。

4) 结合工程实例分析可知, 由于英标人工块体护面的 K_D 取值相比中标普遍偏小, 因此计算出的稳定块体质量相比中标计算结果偏大。

5) Van der Meer 公式被认为更适用于天然块

石稳定重力的计算, 与 Hudson 公式相比较, 对于块石护面计算结果相近, Van der Meer 公式稍大。

参考文献:

- [1] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 2 版. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [2] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [3] BS6349-7:1991 Maritime Structure-Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters[S].
- [4] 朴正, 马小舟, 董国海. 斜坡式防波堤人工护面块体稳定重量计算公式研究[J]. 中国港湾建设, 2013 (3): 6-10.
- [5] Hudson R Y. Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters [J]. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering: ASCE, 1959, 85 (3): 93-121.
- [6] Van Der Meer J W. Stability of breakwater armor layers design formula [J]. Coastal Engineering, 1987 (1): 219-239.
- [7] 柳玉良, 杨洪旗, 沈如军. 大水深斜坡堤护面块体稳定重量的确定[J]. 海岸工程, 2007, 26(1): 48-51.
- [8] Allsop N W H. Breakwaters, coastal structures and coastlines [M]. Great Britain: Institution of Civil Engineers, 2002.

(本文编辑 武亚庆)