



国内外标准在斜坡堤设计中的应用

吴志良

(中交第三航务勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 在国内行业标准《防波堤设计与施工规范》中斜坡堤设计的基础上, 参考国外标准 The Rock Manual、SPM、BS 6349-7中相关内容, 对其中的公式适用的边界条件进行了明确说明, 并与《防波堤设计与施工规范》中相关内容进行比较, 且有算例加以说明。

关键词: 国内外标准; 斜坡堤设计; 应用; 护面块体; 稳定系数; 堤脚; 护底

中图分类号: U 656.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0080-06

Rubble mound breakwater design with Chinese codes and international codes

WU Zhi-liang

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

Abstract: Based on the *Chinese Code for Design and Construction of Breakwater*, and referring to the international codes, The Rock Manual, SPM and BS 6349-7 concerning the design of rubble mound breakwater, we give a definite explanation for the adaptable boundary condition of some formulae, which is compared with corresponding contents in the *Chinese Code for Design and Construction of Breakwater*. Examples are attached for the designers.

Keywords: Chinese codes and international codes; rubble mound breakwater design; application; armor block; stability coefficient; toe; protection apron

斜坡堤结构是港口构筑物中常见的结构形式, 例如防波堤、码头引堤、护岸, 一般在水深小于 15 m 时采用^[1], 在水深大于 15.0 m 时采用直立堤或直立堤、斜坡堤相结合的混合堤, 具体的结构形式根据当地的材料价格、施工条件决定。斜坡堤结构由堤心、护面、护面下垫层、堤脚和护底组成, 结构看似简单, 然而由于边界条件及环境较复杂, 如水深、地形坡度、波浪、水流方向等因素, 决定每一部分结构尺度时需要慎重考虑。对于斜坡堤, 国内工程设计按《防波堤设计与施工规范》^[2] (简称《规范》) 进行, 而在进行国外工程设计时, 由于我国的规范标准在国际上认可度不高, 很多标书上明确了要采用欧美标准。本文在《规范》的基础上, 参考几种国外的规范标准, 对于护面块石、堤脚、护底块石质量计

算, 发现有较大的差别。充分了解这些差别有利于在投标时控制造价, 容易通过国外咨询公司审查, 从而达到控制造价和加快设计进度的目的。

1 护面块体

1.1 设计波高 H

计算护面块石最重要的参数是设计采用的波高, 对于未破碎波按《海港水文规范》^[3] 分别为 $H_{13\%}$ 和 $H_{5\%}$, 根据平均波高与水深的比值而定, $\bar{H}/d > 0.3$ 时取 $H_{13\%}$, $\bar{H}/d \leq 0.3$ 时取 $H_{5\%}$ 。根据 SPM (Shore Protection Manual) ^[4], 设计波高采用有效波高 $H_s \sim H_{5/100}$, 通常采用 $H_{1/10}$ 。The Rock Manual 直接采用 $1.27H_s$ 作为计算波高。BS 6349-7 ^[5] 要求, 对于未破碎波, 采用 $H_{1/10}$, 对于破碎波, 采用 H_b 和

收稿日期: 2014-05-10

作者简介: 吴志良 (1965—), 男, 教授级高级工程师, 从事港口、海岸工程结构设计工作。

H_s 中的影响效果大者。对于深水波，几种波高的换算关系为 $H_{1/10} = 2.03\bar{H}$, $H_{5\%} = 1.95\bar{H}$, $H_s = 1.60\bar{H}$, 从中可推出 $H_{1/10} = 1.27H_s$, $H_{1/10} = 1.04H_{5\%}$, $H_{5\%}/H_s = 1.22$, 对于近岸波高没有统计数值时可以参考。

由于护面块石的质量与波高的立方正相关，如计算波高采用 $1.27H_s$ 时，其计算的块石质量是以 H_s 作为计算波高的 2 倍、是以 $H_{5\%}$ 作为计算波高的 1.1 倍。单个护面块石质量的差异影响护面块石的计算厚度和单价，造成护面块石的工程量和造价的差异。

1.2 护面块体的 K_D 值

1.2.1 Hudson 公式适用条件

护面块体质量计算常用 Hudson 公式，形式简单，计算所需要的参数少，应用在大量的斜坡堤工程设计中，每种规范可能采用的符号有区别，但本质一样，若所有单位以 t 和 m 为基础，则：

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

用稳定系数的方式来表达：

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad (2)$$

式中： H 为设计波高； S_b 为护面材料与水的相对密度 ρ_r/ρ_w ； α 为坡面夹角； Δ 为护面材料与水的相对密度 $S_b - 1$ ； D_{n50} 为护面块体的中值粒径，按立方体的形式计算其质量，相对于方筛中值粒径 $D_{n50} = 0.84D_{50}$ 。

Hudson 公式的适用条件是在没有越浪情况和透水结构条件下得出的，护面块体的损坏率在 0 ~ 5%：1) 深水规则波；2) 没有考虑到波周期与大波的持续时间；3) 没有考虑到其他损坏程度；4) 没有考到波浪越浪情况和堤心的透水性。对块石而言，坡度适合在 1:1.5 ~ 1:5，对人工块体而言，适用的边坡范围为 1:1.5 ~ 1:3。所以在采用此公式时一定要注意此条件。

1.2.2 国外标准的 K_D 值

国内规范关于护面块体的稳定系数不再列出。SPM 和 BS 6349-7 的参数见表 1。

表 1 SPM 和 BS 6349-7 护面块体的稳定系数

护面块体	层数	安放方式	堤身		堤头		坡度 $\cot \alpha$	说明
			破碎	非破碎	破碎	非破碎		
光滑圆石	2	随机	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5~3	
有棱角粗糙块石	1			2.9		2.3	1.5~3	SPM 和 BS 6349-7 采用的数值
有棱角粗糙块石	2	随机	2	4	1.9 1.6 1.3	3.2 2.8 2.3	1.5 2 3	
四脚锥	2	随机	7	8 (6~8)	5 4.5 3.5	6 5.5 4	1.5 2 3	括号内为 BS 6349-7 采用的数值
扭工字块	2	随机	15.8	31.8 (10~12)	8 7	16 14	2 3	
扭王字块	1	随机		(10~12)				

注：BS 6349-7 未列出混凝土块体破碎波和堤头的情况。

1.2.3 国内外规范的区别

1) 《规范》列出了 1 层护面块石情况，为 $K_D = 5.5$ ，SPM 仅列出了非破碎波情况，1 层块石护面 $K_D = 2.9$ ，而且说明 1 层护面块石一般不推荐使用，采用时护面块石要小心安放。

2) 《规范》中扭工字块、扭王字块的稳定系数 K_D 为 18，与表 1 中 BS 6349-7 取值 10 ~ 12 相比，明显大 50% ~ 80%，若在设计波高取值相同的情况下，意味着按 BS 6349-7 计算的质量要比按《规范》计算大 50% ~ 80%。

3) 在《规范》中，对于堤头部分护面比堤身增加 20% ~ 30%，对于破碎波相应再增加 10% ~ 25%。而 BS 6349-7、SPM 对于护面块石，堤身未破碎波取 4.0，破碎波护面块石 K_D 直接取 2，为非破碎波的 2 倍；堤头部分护面块石与堤身部分的比值也比国内规范大，以 2 层护面块石在非破碎波作用下为例，BS 6349-7、SPM 根据斜坡堤的边坡 1:1.5、1:2、1:3 分别为堤身的 K_D 值的 0.8、0.7、0.575 倍，意味着堤头护面块石的质量为堤身的 1.25、1.42、1.74 倍，除边坡 1:1.5 情况与《规范》接近，边坡 1:2、1:3 情况堤头护面块石质量与堤身部分的比值大于国内规范。

算例 1：某斜坡堤，坡度 1:1.5，设计水深 14.07 m， $H_{5\%} = 3.44$ m， $H_{13\%} = 2.91$ m， $\bar{H} = 1.84$ m，护面块石采用扭王字块；若按《规范》，

属于 $\bar{H}/d < 0.3$ 情况, 设计波高取 $H_{5\%} = 3.44 \text{ m}$, $K_D = 18$, $W = 1.80 \text{ t}$; 若按 BS 6349-7 计算, 计算波高取 $H_{1/10}$, 按 $1.27H_s = 3.70 \text{ m}$, $K_D = 10$, $W = 4.03 \text{ t}$ 。可见采用不同标准计算结果相差之大。

1.3 波浪入射的方向

《海港水文规范》对于波向与斜坡堤纵轴线不垂直, 即与纵轴线法线成夹角时, 护面块体的稳定系数进行修正, 即用 $K_{D\beta}$ 代替 Hudson 公式中的 K_D 。

$$K_{D\beta} = \frac{K_D}{\cos^k(\beta - 22.5^\circ)} \quad (3)$$

《海港水文规范》列出了四脚空心方块、块石(2层)、扭王字块体这3种情况的试验系数 k 值, 对于扭工字块体, K_D 不进行修正。BS 6349-7 规范中指出, 对于扭工字块和四脚锥, 抵抗斜向浪能力比正向浪差, K_D 值建议降低。

1.3.1 对于堤心不透浪情况

《规范》对堤心透浪情况没有说明, The Rock Manual 建议不透浪时采用 Hudson 公式计算护面块石 K_D 取 1.0, 如堤心石与护面块石之间有土工布作为反滤层时, 堤心采用砂被等情况即认为是不透浪情况, 主要考虑了透浪时可以消散部分波能, 若不透浪, 则护面块石应该加大。

1.3.2 对于浅水情况

除 Hudson 公式外, 有很多学者也进行了试验研究并推导了计算公式, Van der Meer 推导的公式就考虑了波周期、风暴作用的时间、护面结构损坏率、堤心透水情况, 分别推导了深水和浅水情况, 《规范》明确指出: 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 30 的波坦, 应进行模型试验验证块体质量, 适用水较深情况; 对于浅水情况, 水深与堤脚处有效波高比值 h/H_{s-10e} 在 1.5 ~ 2.0 或堤脚处有效波高深水波高之比 $H_{s-10e}/H_{s-0} < 70\%$, 可以参考 Van der Meer 浅水公式, 对于 $\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$ 按式(4)计算, $\xi_{s-1,0} \geq \xi_{cr}$ 时按式(5)计算:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{N} \right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}} \right) \sqrt{\cot\alpha} (\xi_{s-1,0})^{-0.5} \quad (4)$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{N} \right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}} \right) \sqrt{\cot\alpha} (\xi_{s-1,0})^P \quad (5)$$

上式考虑了波浪作用时间, 反映在波浪作用个数 N 。堤心的渗透性 P 在 0.1 ~ 0.6, 当采用土工布作为反滤层时, 取 $P = 0.1$, 护面下带块石垫层情况 $P = 0.4$, 堤心石取 0.5, 护面块石与堤心石一样取 0.5。波浪相似参数为 $\xi_{s-1,0}$; S_d 为损坏程度参数, 即“开始损坏”, 相当于护面结构发生移位数量 0 ~ 5%, 对应于不受损程度, 即“中间程度损坏”表示相当于护面结构发生移位数量 5% ~ 10%, “损坏”表示相当于护面结构发生移位数量 20%。

表 2 S_d 损坏程度对应值

堤坡度	开始损坏	中间程度损坏	损坏
1:1.5	2	3~5	8
1:2	2	4~6	8
1:3	2	6~9	12
1:4 ~ 1:6	3	8~12	17

按上面公式计算护面块石, 实际应用于工程设计只有有限的实例, 需要和 Hudson 公式计算对比, 建议取其中之大值。

算例 2: 对于某斜坡堤, 坡度 1:1.5, 50 a 一遇波浪 $H_s = 1.5 \text{ m}$, $T_m = 8 \text{ s}$, 根据风暴作用时间, 波浪作用数量取 3 000, 采用 2 层护面块石, 堤身的护面块石质量采用 Hudson 公式计算, 波浪采用有效波高 H_s 计算时块石质量 $W_{50} = 0.36 \text{ t}$; 当按 SPM、BS 6349-7、The Rock Manual 计算时, 波高取 $H_{1/10}$, 按 $H_{1/10} = 1.27H_s$, 计算的护面块石 $W_{50} = 0.73 \text{ t}$; 当采用 Van der Meer 浅水公式计算时, 若 $S_d = 2$, $W_{50} = 0.90 \text{ t}$, 护面块石 $W_{50} = 0.90 \text{ t}$ 。

1.4 护面块石的级配要求

由于块石是从矿山开采而来, 大小、形状不一, 不可能像混凝土块体那样质量一样, 计算所得的护面块石的质量按 SPM 和 The Rock Manual 分别是护面块石的中值质量 W_{50} , SPM 规定上限为 125% W_{50} 、下限为 75% W_{50} , 参考 BS 6349-7, 要求块石质量落在允许误差范围内, 至少 75% 的块石质量在规定的质量以上。试验证明 $D_{85}/D_{15} = 2.25$ 的护面块石稳定性比 $D_{85}/D_{15} = 4.0$ 好。

《规范》只有对宽肩台斜坡堤的护面块石级配

有要求， D_{85}/D_{15} 取 1.25 ~ 2.25。

The Rock Manual 用中值质量 W_{50} 以及 D_{85} 和 D_{15} (筛分曲线中 85% 和 15% 的对应粒径) 规定了 3 种级配, 见表 3, W_{85}/W_{15} 与 (D_{85}/D_{15}) 为立方关系。

表 3 块石级配

窄级配		宽级配		非常宽级配	
$D_{85}/D_{15} < 1.5$		$1.5 < D_{85}/D_{15} < 2.5$		$D_{85}/D_{15} > 2.5$	
等级/t	D_{85}/D_{15}	等级/t	D_{85}/D_{15}	等级/kg	D_{85}/D_{15}
15 ~ 20	1.1	1 ~ 10	2.0	10 ~ 1 000	4.5
10 ~ 15*	1.1	1 ~ 6	1.8	10 ~ 500	3.5
6 ~ 10*	1.2	0.1 ~ 1	2.0	10 ~ 300	3.0
3 ~ 6*	1.3	0.010 ~ 0.060*	1.8		
1 ~ 3*	1.4				
0.3 ~ 1*	1.5				

注：带 * 的为 EN13383 中的标准级配。

护面块石的级配可参考表 3 中的标准级配, 多名学者通过统计多种矿山石料筛分曲线, 提出理论级配公式, 式 (6) 为 Van der Meer 的适合窄

级配的对数线性曲线^[5]：

$$W_y = W_{50} \left(\frac{W_{85}}{W_{15}} \right)^{[(y-0.5)/0.7]} \quad (6)$$

式中： y 为计算的累积质量。利用此式可方便求出最小、最大的护面块石质量，例如 $W_{50} = 200$ kg, $W_{85}/W_{15} = 2.5$, 则 $W_0 = 122$ kg, $W_{100} = 328$ kg。也能计算出 W_{15} 和 W_{85} 的质量，然后求出 D_{85} 和 D_{15} 。Rosin-Rammler 和 Schmann 分别提出非常宽级配和宽级配公式^[5], 适合于堤心石情况。

对于标准级配块石可以采用样品的算术平均值 W_{em} , 快速判定块石是否符合级配要求, 在计算平均质量时要剔除累计频率在 2% 以下的块石质量。

采用标准级配对于质量小于 300 kg 的块石控制较方便。对于大块石, 即使按单个控制也比较方便, 可以采用非标准级配, 即块石范围不落在表 4 的等级中, 文献[5]列出了 W_{50} 在 0.5 ~ 3 t、3 ~ 15 t 的 W_{85}/W_{15} 范围和 W_{em} 与 W_{50} 的关系。

表 4 W_{50} 与 W_{em} 的关系^[5]

等级	10 ~ <60 kg	60 ~ <300 kg	300 ~ <1 000 kg	1 ~ <3 t	3 ~ <6 t	6 ~ <10 t
W_{50}/W_{em}	1.3	1.15	1.10	1.05	1.0	1.0

此外 SPM 还规定了护面块石与垫层的粒径要求, 除了垫层的质量有规定外, 对粒径也有要求, 以免护面块石过大, 垫层块石被波浪水流带走, D_{15} (护面) $\leq 5D_{85}$ (垫层)。

实际在工程施工过程中, 对于护面块石质量下限容易控制, 而对于大于规定质量的护面块石, 应控制 D_{15} (护面) $\leq 5D_{85}$ (垫层), 如混入个别大块石, 或最小边长大于护面块体计算厚度时, 应注意施工允许误差。

1.5 护面块石的范围

SPM 认为护面块体范围应在最低水位下 $1.5H$ 位置, 在水下 $(1.5 \sim 2.0)H$ 区间, 可以采用 $W/2$, 此位置以下为 $(W/10 \sim W/15)$; 《规范》对深水防波堤外坡有肩台情况, 肩台在水下 $1.0H$ 时护面块体的质量为 $W/2$ 。《规范》中水下 $2H$ 以下护面块石的质量比 SPM 高, 水下 $H \sim 1.5H$ 质量比 SPM 低。

1.6 潜堤

潜堤指堤顶在水面附近的堤, 堤顶能越浪

(图 1)。因为作用于前坡能量的减小, 护面块石质量可以比不越浪的堤小, 但堤顶和堤后坡的护面块石要比不越浪的堤质量大。需要注意静态稳定和动态稳定的情况, 静态稳定指在设计波高下, 护面块石只有少量的损坏, $H/(\Delta D_{n50})$ 在 1 ~ 4; 动态稳定, 设计波高作用下, 堤身坡度变缓以达到稳定的目的, $H/(\Delta D_{n50})$ 在 3 ~ 6, 适用造价限定的情况。堤护面块石质量可以取值不一样。

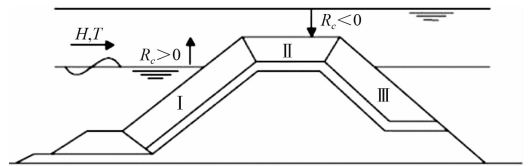


图 1 潜堤^[1]

对于静态稳定潜堤出水时, Powell 和 Allsop 得出了经验公式:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \frac{s_{op}^{1/3}}{b} \ln \left(\frac{1}{a} \cdot \frac{N_{od}}{N_a} \right) \quad (7)$$

其中

$$s_{op} = 2\pi H_s / (gT_p^2) \quad (8)$$

式中： N_{od} 是在 D_{n50} 宽度范围内损坏护面的块体数量，根据护面块体类型，可在 0 ~ 0.5 取值； N_a 是在 D_{n50} 宽度范围内护面的总数量； a 和 b 为系数，可在 The Rock Manual 表格内查到。

无论出水还是淹没堤，对于静态稳定堤也可采 Vidal 公式：

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = A + B \cdot \frac{R_c}{D_{n50}} + C \left(\frac{R_c}{D_{n50}} \right)^2 \quad (9)$$

式中： A 、 B 、 C 这 3 个系数可以根据堤前坡、堤顶、堤后坡不同位置查得，也可按整个堤身考虑。此公式是经过大量试验，以 1:1.5 前后坡的堤取得，如果堤身坡度比此缓，结果偏安全。 $R_c > 0$ 为出水堤，反之为淹没堤。

算例 3：某海岸防护堤（图 2），堤身为斜坡堤，坡度 1:2；极端高水位 2.50 m，相应的水深 $H_s = 3.33$ m，堤顶高程 1.50 m，泥面 -2.70 m；计算结果见表 5。

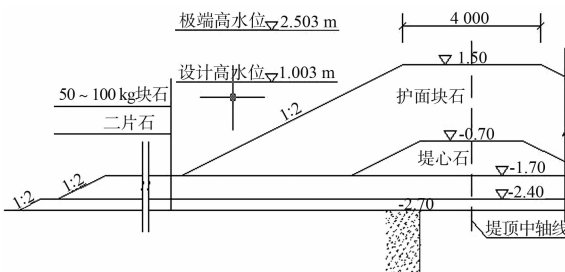


图 2 算例 3 断面

表 5 算例 3 极端高水位时护面块石计算质量 t

Hudson 公式	《规范》	The Rock Manual
3.07	1.33	2.70

注：在按潜堤计算时，The Rock Manual 计算波高按 H_s 。本例中 R_c/h 值不在 Powell 和 Allsop 公式范围内，故采用 Vidal 公式。

1.7 近海底结构

在《规范》中没有计算近海底堤护面块石的内容，可采用 The Rock Manual 的计算公式：

$$\frac{u^2}{g\Delta D_{n50}} = \left(5 \cdot \frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{1/3} \quad (10)$$

$$u = u_0 = \frac{\pi H_s}{T_m} \cdot \frac{1}{\sinh(kh_c)} \quad (11)$$

式中： u 为波浪底流速； k 为波数； h_c 为海底堤顶到静水面的距离。当 $u/u_0 < 2.2$ 且 $0.15 < u_0^2/(g\Delta D_{n50}) < 3.5$ 时可以不考虑水流的影响，否

则应当考虑水流影响。如按《规范》，斜坡堤底流速计算及潜堤计算结果相差较大。

1.8 允许越浪堤内坡护面

对于堤顶在水面的允许越浪堤，内外护坡及堤顶的护面块石应一致，可以按潜堤设计，比照《规范》的内容，堤顶高程在水面设计高水位上方 $0.6H \sim 1.0H$ 位置，内坡护面块石的质量应与外坡护面的块体质量相同，从堤顶到设计低水位以下 $0.5H \sim 1.0H$ 位置，但不应小于 150 kg，且应按堤内侧波浪进行复核。此规定简单明了，可操作性强，但对于前后面坡度不一样的堤，无法参考此条计算。

可以参考 The Rock Manual 公式：

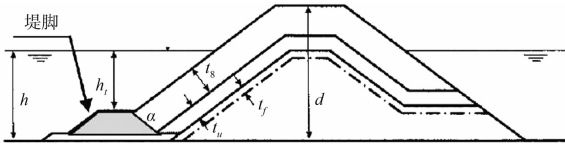
$$D_{n50} = \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{-1/6} \left(\frac{u_{1\%} T_{m-1,0}}{\Delta} \right) (\cot \alpha_{rear})^{-2.5/6} \cdot \left[1 + 10 \exp \left(\frac{-R_{c, rear}}{H_s} \right) \right]^{-1/6} \quad (12)$$

式中： S_d 为损坏参数，当 $S_d = 2$ 时，相当于护面结构损坏率 0 ~ 5%； N 为一个风暴期大波作用数； $T_{m-1,0}$ 为能量波周期； α_{rear} 为后坡的角度； $R_{c, rear}$ 为后坡水位到堤顶的距离； $u_{1\%}$ 为 $H_{1\%}$ 波浪作用越浪时最大水流速度。

此外对于允许越浪的斜坡堤越浪量，国外通行采用 EurOtop Manual^[6] 的计算公式，与《海港水文规范》计算公式不同，如设计国外项目时，要按此计算。

2 堤脚

堤脚的作用是支撑护面块体（图 3）。根据 BS 6349-7，在水深小于 $2H_s$ 以及护面面层边坡陡为 1:3 时一般应设堤脚棱体。设计防波堤以及引堤时，如果地基承载能力足够，一般情况下不调用挖泥设备，堤脚可以直接落在海堤上。具体可以参考 BS 6349-7 对堤脚的要求，当堤脚上方深水 $d \geq 2H_s$ 时，堤脚块体可以采用主护面块体的垫层块石，堤脚块体的垫层可采用堤心石；当水深 $d < 2H_s$ 时，堤脚块体需要与护面块体一样，顶宽至少 4 块堤脚块石；当基底为岩石时，且水深 $d < 1.5H_s$ 时，需要在岩石上挖基槽，深度为 1/2 护面块体的 D_{n50} ，宽度由垫层底面与沟槽底面的交线和护面与底面的交线决定。

图3 堤脚^[1]

对于堤脚尺寸和块石的大小,《规范》规定,水下抛石棱体顶面高程在设计高水位下1.0倍波高时,棱体的块石质量不小于护面块石的0.3~0.4倍,棱体的宽度不宜小于2m,厚度不宜小于1m,对于深水堤其宽度不宜小于5m,厚度不宜小于3.0m。可以看出,对于 $d < 2H_s$ 时,棱体块石的质量明显比BS规范小。

The Rock Manual 对于堤脚块石的大小,堤脚顶水深 $0.4 < h_t/h < 0.9$ 且堤水深 $3 < h_t/D_{n50} < 50$ 时,可以采用下面两式进行计算:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left[1.6 + 0.24 \left(\frac{h_t}{D_{n50}} \right) \right] N_{od}^{0.15} \quad (13)$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left[2.0 + 6.2 \left(\frac{h_t}{h} \right) \right] N_{od}^{0.15} \quad (14)$$

式中: N_{od} 为损坏数,当 $N_{od} = 0.5$ 表示开始破坏, $N_{od} = 2$ 表示堤脚开始出现被波浪打倒, $N_{od} = 4$ 表示完全被击倒。

The Rock Manual 对于水深非常浅情况,护底顶部的水深与护底前水深之比 $h_t/h = 0 \sim 0.2$ 的平缓坡,可以根据波高查表,获得需要的块石质量。

算例4:某斜坡堤堤脚抛石棱体,水位1.91m,泥面-10.2m, $h = 12.11$ m, $h_t = 10.11$ m, $h_t/h = 0.83$, $H_{5\%} = 3.59$ m, $H_{13\%} = 2.95$ m,按The Rock Manual 公式进行计算,取 $N_{od} = 0.5$,则 $W_{50} = 215$ kg。若按《规范》计算,平均波高与水深之比大于0.3时,波高应取 $H_{5\%}$ 。按Hudson公式计算,斜坡堤外侧边坡1:1.5,护面块石质量5.13 t,如果按0.3~0.4倍护面块体质量计算,为1 539~2 052 kg。因此,水深 $> 2H_s$ 时,按《规范》计算的值比按The Rock Manual 计算的值大。

3 防冲刷护底块石

对于地基容易冲刷地段修建斜坡堤,护底块石与斜坡堤的镇脚一样,投资不多但对保护结构

免受地基冲刷引起的坍塌作用非常重要。

1)《规范》列出了斜坡堤前方波浪作用底流速计算公式,然后根据计算的底流速查表确定护底块石的质量。

2) BS 6349-7 则采用查曲线的方法,根据波周期、波高,查出护底块石的 D_{n50} ,确定块石质量。

3) 以上皆没有考虑流速的因素,所以需要放大此因素。

4) 对于近岸泥面在水位附近的斜坡堤,可以采用镇脚与护底合共用的方法。

5) 对于护底块石垫层的要求,护底的宽度没有具体的计算公式可查,一般可取波长的1/4。

4 结语

1) 防波堤护面块体的稳定,取决于波高、波长、波周期、水深等因素,还和堤顶与水面距离、所处位置的地形坡度有关,对比中外规范,采用国外标准计算的护面块体质量,普遍比按国内标准计算的要大,而且明确指出了适用条件。

2) 堤脚块石在水深较大时,按国内标准计算数值较大。

3) 由于斜坡堤计算采用的计算公式只是经验公式,在设计时应充分考虑设计边界条件,对比多种公式,根据施工现场条件,选定合适的护面类型,最好通过物理模型进行验证。

致谢:本文中算例3由刘亚男博士提供,算例4由靳付臣工程师提供,特此感谢。

参考文献:

- [1] TheRock Manual: The use of rock in hydraulic engineering[S]. 2nd ed. CIRIA C683. London, 2007.
- [2] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [3] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [4] Coastal Engineering Research Center. Shore Protection Manual 1984[R]. Mississippi: Coastal Engineering Research Center, 1984.
- [5] Simm J D. Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering[R]. London: CIRJA, 1991.
- [6] Eurotop. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures Assessment Manual[R]. Brussels: Eurotop, 2007.