



斜坡式护岸越浪量分析

解东升, 卢海斌, 张磊

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 根据掩护功能不同对护岸允许越浪量进行分类规定是越浪量研究的方向之一, 探索最大单波越浪量的量化计算对护岸后方排水设计具有重要参考意义。对国内外常用越浪量控制标准和计算公式进行总结对比, 并以沙特海尔港南护岸越浪量计算为例量化探讨肩台宽度和参数相关性对越浪量计算的影响。结果表明, 欧洲和美国规范规定的越浪量标准比中国和日本规范规定的越浪量标准严格; 设置肩台可以有效降低越浪量计算值, 考虑波高和水位的相关性也可以有效降低越浪量计算值; 越浪量计算对波高和水位比较敏感, 允许越浪量可以采用数量级梯度进行分级; 对于允许越浪量要求比较严苛的海外现汇项目, 适当考虑肩台和参数相关性对越浪量计算值的降低作用, 可以提高承包商设计方案的竞争力。

关键词: 护岸; 平均越浪量; 最大单次越浪量; 肩台; 参数相关

中图分类号: U 652.7+1; U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0068-06

Analysis on overtopping of slope revetment

XIE Dong-sheng, LU Hai-bin, ZHANG Lei

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

Abstract: Setting tolerable wave overtopping criteria based on the revetment function is one orientation in wave overtopping study. It makes sense to study the calculation of individual overtopping wave volumes, since it will facilitate the drainage design behind the revetment. We summarize the popular used tolerable wave overtopping criteria and calculation formulas, and discuss the impacts of the berm and the correlation of parameters in the calculation formulas based on the south revetment of the Ras Al Khair Port expansion project. The results show that the tolerable wave overtopping criteria listed in European standards and the United States standards are stricter than in Chinese standards and Japanese standards. Setting a reasonable berm and considering the correlation of wave height and water level can decrease the value of the calculated overtopping volume. The calculated overtopping volume is highly sensitive to wave height and water level, the tolerable overtopping volume can be classified in reasonable magnitudes. Considering the impact of the berm and the correlation of parameters in wave overtopping calculation can benefit the contractor, especially in projects that require extremely low overtopping discharge.

Keywords: revetment; mean overtopping discharge; maximum individual overtopping volume; berm; parameter correlated

斜坡式护岸是常用的护岸结构形式, 用于保护海岸或河岸, 避免波浪或者水流侵蚀。波浪行近护岸时会沿坡上爬, 当波浪爬高超越建筑物顶部时, 即产生越浪。越浪量的衡量标准有: 单位时间内越过单位堤长的平均水量, 以 $q(Q)$ 表示, 单位为 $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$;

最大单波越浪量, 以 V_{\max} 表示, 单位为 m^3/m 。越浪对护岸后方的行人、车辆、建筑物都会产生影响, 国内外诸多规范都对护岸或海堤允许越浪量进行了规定。影响护岸越浪量的因素很多, 主要有波浪要素、水位、护岸断面尺度、护岸前水深及地形等。

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 解东升(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计、咨询及管理。

在护岸顶高程和护岸底高程都确定的情况下，设置肩台对越浪量的计算有较大影响。海外现汇项目中，根据护岸后方场地功能需求，业主对护岸允许越浪量一般有明确限值。有工作人员活动的临水区域，业主对越浪量限值的要求比较高，适当考虑越浪量计算公式中参数的相关性，对护岸设计报批及

提高承包商设计方案竞争力有积极的意义。

1 越浪量控制标准

1.1 《海堤工程设计规范》

《海堤工程设计规范》^[1] 对海堤允许越浪量的规定见表 1。

表 1 《海堤工程设计规范》对海堤的允许越浪量

海堤表面防护	允许平均越浪量/($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
堤顶及背海侧为 30 cm 厚干砌块石	≤ 0.01
堤顶为混凝土护面，背海侧为生长良好的草地	≤ 0.01
堤顶为混凝土护面，背海侧为 30 cm 厚干砌块石	≤ 0.02
海堤三面(堤顶、临海侧和背海侧)均有保护，堤顶及背海侧均为混凝土保护	≤ 0.05

1.2 日本 OCDI 规范

日本 OCDI 的 *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan* ^[2] 规定：建筑物允许越浪量应根据海堤结构形式、后方重要程度、排水设施能力等因素综合确定，见表 2、3。

表 2 日本 OCDI 规范极限允许越浪量

结构物类型	护面结构形式	允许平均越浪量/ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
护岸	堤顶铺砌	0.20
	堤顶未铺砌	0.05
海堤	堤顶、前坡、后坡均为混凝土护面	0.05
	堤顶、前坡为混凝土护面，后坡无护面	0.02
	仅前坡有混凝土护面	≤ 0.005

表 3 日本 OCDI 规范考虑后方陆域重要性的允许越浪量

区域	允许平均越浪量/ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
越浪会造成严重损失的区域，如居民区、公共区域等	约 0.01
其他重要区域	约 0.02
其他区域	0.02~0.06

1.3 美国海岸工程手册(CEM)

美国的 *Coastal Engineering Manual*^[3] 分别对考虑后方交通安全和结构物安全给出了建议的平均越浪量控制范围，为 $10^{-7} \sim 10 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ ；同时指出，台风期间单波越浪量峰值可达平均越浪量的 100 倍。

1.4 英国规范 BS 6349

英国的 *Maritime Structures: Part 7 Guide to the Design and Construction of Breakwaters* ^[4] 给出了对距挡浪墙 3 m 处人员及车辆造成不同程度影响的允许越浪量，见表 4。

表 4 英国规范 BS 6349 规定的允许越浪量

安全条件	允许平均越浪量/($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
对人员造成不便	4×10^{-6}
对车辆造成不便	1×10^{-6}
对人员造成危险	3×10^{-5}
车辆无法通行	2×10^{-5}

1.5 荷兰规范

荷兰的 *Dikes and Revetments-Design Maintenance and Safety Assessment*^[5] 规定的越浪量允许值见表 5。

表 5 荷兰规范规定的允许越浪量

考虑因素	允许平均越浪量/($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
砂性土无植被覆盖	1×10^{-4}
黏性土有较好的植被覆盖	1×10^{-3}
黏土层外坡植被覆盖、内坡罩面	1×10^{-2}
行人可安全行走	4×10^{-6}
行人有危险	3×10^{-5}

1.6 欧洲 EurOtop Manual

欧洲的 *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*^[6] 对越浪量控制标准进行系统描述，从结构设计、被掩护对象和行人车辆安全 3 个维度对允许越浪量提出建议值，见表 6~8。

表 6 防波堤、挡浪墙、海堤和大坝结构设计允许越浪量

危险类型及原因	允许平均越浪量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大单波越浪量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)
斜坡式防波堤；谱有效波高>5 m；无破坏	1×10^{-3}	2~3
斜坡式防波堤；谱有效波高>5 m；内坡设计已考虑越浪	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$	10~20
堤顶和内坡有草被覆盖；定期维护封闭草被覆盖；谱有效波高 1~3 m	5×10^{-3}	2~3
堤顶和内坡有草被覆盖；无定期维护草被覆盖，草被有开口、苔藓或裸露；谱有效波高 0.5~3 m	1×10^{-4}	0.5
堤顶和内坡有草被覆盖；谱有效波高<1 m	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$	0.5
堤顶和内坡有草被覆盖；谱有效波高<0.3 m	无限制	无限制

表 7 考虑防护范围内不同防护对象的允许越浪量

危险类型及原因	允许平均越浪量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大单波越浪量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)
大型游艇严重破坏或沉没；谱有效波高>5 m	$>1 \times 10^{-2}$	5<~30
大型游艇严重破坏或沉没；谱有效波高 3~5 m	$>2 \times 10^{-2}$	5<~30
墙后 5~10 m 小船沉没；谱有效波高 3~5 m；大型游艇受破坏	$>5 \times 10^{-3}$	3<~5
大型游艇安全；谱有效波高>5 m	$<5 \times 10^{-3}$	<5
墙后 5~10 m 小船安全；谱有效波高 3~5 m	$<1 \times 10^{-3}$	<2
后方有建筑物；谱有效波高 1~3 m	$\leq 1 \times 10^{-3}$	<1
墙后 5~10 m 设备受损	$\leq 1 \times 10^{-3}$	<1

表 8 考虑行人和车辆安全的允许越浪量

危险类型及原因	允许平均越浪量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大单波越浪量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)
人在有可能发生猛烈越浪的结构物旁，尤其是直立式结构物	有任意越浪时不允许进入	有任意越浪时不允许进入
谱有效波高 3 m	3×10^{-4}	0.6
谱有效波高 2 m	1×10^{-3}	0.6
谱有效波高 1 m	$1 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$	0.6
谱有效波高<0.5 m	无限制	无限制
人在海堤顶部，清楚看到海况		
谱有效波高 3 m	$<5 \times 10^{-3}$	2
谱有效波高 2 m	$1 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$	2
谱有效波高 1 m	$<7.5 \times 10^{-2}$	2
车辆在堤顶，或者铁路在堤顶紧后侧		
谱有效波高 3 m	$<5 \times 10^{-3}$	2
谱有效波高 2 m	$1 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$	2
谱有效波高 1 m	$<7.5 \times 10^{-2}$	2
高速公路和普通公路、快速路	靠近飞溅的浪花即非常危险	靠近飞溅的浪花即非常危险

2 常用越浪量计算公式

2.1 《港口与航道水文规范》

《港口与航道水文规范》^[7]给出了波浪正向作用时，斜坡堤堤顶无胸墙、有胸墙时平均越浪量的计算公式，分别为：

$$Q = AK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left(\frac{H_c}{H_{1/3}} \right)^{-1.7} \left[\frac{1.5}{\sqrt{m}} + \tanh \left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8 \right)^2 \right] \cdot \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \tag{1}$$

$$Q = 0.07^{H'_c/H_{1/3}} \exp(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}}) BK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \cdot \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \tanh \left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8 \right)^2 \right] \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \tag{2}$$

式中：A、B 为经验系数，二者与海堤坡度有关； K_A 为护面结构影响系数； $H_{1/3}$ 为有效波高； T_p 为谱峰周期； H_c 为堤顶无胸墙时，堤顶在静水面上的高度； m 为海堤临海侧的坡度； H'_c 为堤顶有胸墙时，胸墙顶在静水面上的高度； b_1 为堤顶有胸墙时，临海侧堤肩宽度； d 为堤前水深。

2.2 美国海岸工程手册

美国的 *Coastal Engineering Manual* 对常用平均越浪量计算公式进行总结，给出了影响越浪量计算的变量为有效波高 H_s 、深水谱峰周期 T_{0P} 、短波传播参数 σ 、入射波角度 β 、堤顶与静水面的距离 R_c 、结构物前水深 h_s 以及结构物尺度参数。

Coastal Engineering Manual 同时指出对于服从 Weibull 分布的波浪序列，单个大波越浪量可采

用以下公式进行计算:

$$V_{\max} = B (\ln N_{ow})^{4/3} \tag{3}$$

$$B = 0.84 \cdot \frac{T_m q}{P_{ow}} \tag{4}$$

式中: N_{ow} 为产生越浪波浪个数; T_m 为平均周期; q 为平均越浪量; P_{ow} 为单个波产生越浪的概率。

2.3 日本 OCDI 规范

日本 OCDI 的 *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities* 对大量模型试验和现场观测结果进行总结, 绘制相关越浪量的计算图表, 设计者考虑越浪量时, 直接查阅图表确定越浪量。

2.4 荷兰规范

荷兰的 *Technical Report: Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes* [8] 主要采用 van de Meer 关于斜坡海堤越浪量的研究成果, 其平均越浪量最大值计算公式为:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.2 \exp \left(-2.3 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta} \right) \tag{5}$$

式中: q 为单位时间单宽海堤越浪量; R_c 为堤顶与静水面的距离; H_{m0} 为谱有效波高; γ_f 为糙渗影响系数; γ_β 为波浪入射角度影响系数。

2.5 欧洲 EurOtop Manual

欧洲的 *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures* 对波浪爬高和越浪量计算进行系统研究, 提出了平均值法、设计评估法(半概率法)和概率法。对于斜坡式护岸, 坡度为 1:2~1:4/3 时, 采用设计评估法计算越浪量的公式为:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.1035 \exp \left[- \left(1.35 \cdot \frac{R_c}{H_{m0} \gamma_f \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right] \tag{6}$$

式中: q 为单位时间单宽海堤越浪量; H_{m0} 为谱波高; R_c 为堤顶与静水面的距离; γ_f 为糙渗影响系数; γ_β 为波浪入射角度影响系数。

对于服从两参数 Weibull 分布的波浪序列, 在计算得到波浪爬高和平均越浪量后, 最大单波越浪量可采用以下公式计算:

$$P_{ov} = \exp \left[- \left(\sqrt{-\ln 0.02} \cdot \frac{R_c}{R_{u2\%}} \right)^2 \right] \tag{7}$$

$$b = 0.85 + 1500 \left(\frac{q}{gH_{m0} T_{m-1,0}} \right)^{1.3} \tag{8}$$

$$a = \frac{1}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right)} \cdot \frac{q T_m}{P_{ov}} \tag{9}$$

$$N_{ow} = P_{ov} N_w \tag{10}$$

$$V_{\max} = a (\ln N_{ow})^{1/b} \tag{11}$$

式中: P_{ov} 为单个波浪越浪概率; R_c 为堤顶与静水面的距离; $R_{u2\%}$ 为超越概率为 2% 的波浪爬高; a 、 b 分别为 Weibull 分布尺度、形状参数; H_{m0} 为谱有效波高; $T_{m-1,0}$ 为谱周期; T_m 为平均周期; Γ 为伽马函数; N_{ow} 为产生越浪的波浪个数; N_w 为一定时间内入射波个数; V_{\max} 为最大单波越浪量。

3 肩台对越浪量计算的影响

肩台是斜坡式护岸和防波堤常见结构, 其可以增加结构稳定性、减小越浪量。根据国内外学者研究, 肩台设置在静水位处减小越浪量的效果最为明显, 定量研究肩台对越浪量计算的影响具有重要意义。合理利用肩台对越浪量计算值的降低效果, 可以提高承包商海外现汇项目竞争力。《港口与航道水文规范》的公式并未考虑肩台对越浪量计算的影响, 而荷兰规范和 EurOtop Manual 的公式中都考虑了肩台影响。对于设有肩台的斜坡式护岸, 可以采用平均坡度法分步计算越浪量, 也可以采用式(12)计算平均越浪量。计算得出平均越浪量后, 运用式(7)~(11)可以计算出最大单波越浪量。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.026}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \xi_{m-1,0} \exp \left(-2.5 \cdot \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} H_{m0} \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_\nu} \right) \tag{12}$$

式中: H_{m0} 为谱波高; α 为护岸坡度; γ_b 为肩台影响系数; $\xi_{m-1,0}$ 为破碎参数; R_c 为堤顶与静水面的距离; γ_f 为糙渗影响系数; γ_β 为波浪入射角度影响系数; γ_ν 为胸墙影响系数。

对于肩台的宽度, 《防波堤与护岸设计规范》[9] 规定宜为设计波高的 0.5~2.0 倍, EurOtop Manual 建议不超过 0.25 倍设计波长。肩台宽度与减小越浪量的比例存在较强的相关性, 肩台宽度越大越

浪量计算值越小，但是当肩台宽度大于一定值时，肩台将相当于新的护岸前原泥面，越浪量将不随肩台宽度的增加而减小。

对设有合适宽度肩台的斜坡式护岸，其最大越浪量可用下式估算：

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}=0.1035\exp\left[-\left(1.35\cdot\frac{R_c}{H_{m0}\gamma_{BB}\gamma_\beta}\right)^{1.3}\right] \quad (13)$$

式中： γ_{BB} 为肩台综合影响系数，与护岸受波浪力作用后是否发生变形有较大关系，对于肩台不易变形的护岸 $\gamma_{BB}=0.68-4.1s_{m-1,0}-0.05B/H_{m0}$ ，对于肩台充分变形的护岸 $\gamma_{BB}=0.70-8.2s_{m-1,0}$ ，其中 $s_{m-1,0}$ 为波陡， B 为肩台宽度。

4 参数相关性对越浪量计算的影响

上述越浪量计算公式中，影响越浪量计算结果的因素主要有波高、周期、波高入射角度、水位、水深、断面尺度、护面形式等。对于波高、周期、水位等水文要素，《港口与航道水文规范》规定以浅水实际统计值为基础，经过重现期或累计频率推算后计算越浪量，EurOtop Manual 推荐先采集推算深水水文要素，然后根据选定波谱推算浅水水文要素，用于计算越浪量。无论是采用实际统计水文参数，还是采用波谱参数，波高、周期、水位都存在一定的相关性。EurOtop Manual 指出，不考虑水文参数相关性会造成越浪量计算结果偏高。通常波高和水位采用极值分布理论获取重现值，二者相关性对越浪量计算的影响是本文

研究的重点之一。Weibull 分布是水文统计中常用极值分布，其对波高和风暴增水(水位)的极值分布拟合效果较好。

对于服从 Weibull 分布的变量 X 和 Y ，其概率密度函数为 $f_X(x)$ 、 $f_Y(y)$ ，概率分布函数为 $F_X(x)$ 、 $F_Y(y)$ ，其联合分布密度函数可以采用如下形式^[10]：

$$f(x,y)=\frac{1}{1-k^2}f_X(x)f_Y(y)\{[1-F_X(x)][1-F_Y(y)]\}^{\frac{k^2}{1-k^2}}\cdot I_0\cdot\frac{2k\sqrt{\ln[1-F_X(x)]}\sqrt{\ln[1-F_Y(y)]}}{1-k^2} \quad (14)$$

式中： k 为秩相关系数； I_0 为零阶 Bessel 函数。

5 案例分析

沙特海尔港四期工程位于沙特北部，建设内容包含 4 个散货泊位、1 580 m 防波堤及 650 m 南侧护岸。南侧护岸设计顶高程 5.0 m，底高程-15.0 m，设计边坡 1:2，采用 1.5 t 四角空心方块作为护面块体，堤顶无胸墙。设计高水位 2.45 m，50 a 一遇设计波高 $H_s=1.3$ m，谱峰周期 $T_p=3.4$ s^[11]。结合边坡整体性和越浪量要求，设计考虑 2 个方案：方案 1 为不设置肩台，可以节约港口空间，整体稳定性较差；方案 2 为设置两级肩台，增加护岸整体稳定性，第 1 级肩台设置于设计高水位和设计低水位之间，宽度 5 m，底部坡度 1:3，上部坡度 1:2。采用《港口与航道水文规范》和 EurOtop Manual 公式计算两种方案的越浪量，同时考虑波高和水位相关性，结果见表 9。

表 9 考虑肩台影响和参数相关性影响时越浪量计算结果

计算公式	是否有肩台	是否考虑波高水位相关性 (相关系数 0.5)	平均越浪量/ ($m^3\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)	最大单波越浪量 (6h 风暴过程)/($m^3\cdot m^{-1}$)
《港口与航道水文规范》	-	不考虑波高水位相关性	1.62×10^{-2}	-
		考虑波高水位相关性	1.06×10^{-2}	-
EurOtop Manual	无肩台	不考虑波高水位相关性	2.14×10^{-4}	3.71
	无肩台	考虑波高水位相关性	3.35×10^{-5}	2.00
	有肩台	不考虑波高水位相关性	2.64×10^{-8}	-
	有肩台	考虑波高水位相关性	6.38×10^{-9}	-

通过对表 9 中考虑不同因素的越浪量计算结果进行对比可以发现：采用《港口与航道水文规范》公式计算的越浪量比采用 EurOtop Manual 公式

计算的越浪量大；设置肩台时计算的越浪量比不设置肩台时计算的越浪量小；考虑波高和水位的相关性时，计算的越浪量比不考虑两者的相关性

时计算的越浪量小。设置肩台、考虑波高和水位的相关性能显著降低越浪量的计算值, 对优化护岸设计断面、降低 EPC (设计、采购、施工) 承包商的成本有积极的意义。

6 结语

1) 欧洲和美国规范对越浪量限值的要求比中国和日本规范严格, 这与设计理念有较大关系。EurOtop Manual 对越浪量的允许值进行系统研究, 其应用范围较广, 海外现汇项目中业主多参考其制定允许越浪量标准。

2) 目前大多数规范仅对平均越浪量做了要求, 对于最大单波越浪量尚处于探索阶段。研究最大单波越浪量对设计护岸后方排水系统有重要统计意义, 尤其是强降水与越浪叠加的工况。

3) 在设计高水位和设计低水位之间设置肩台可有效降低越浪量的计算值。在一定范围内肩台宽度与越浪量减小比例相关性比较强, 量化研究肩台宽度、设计波高及越浪量的关系具有积极的实践意义。

4) 考虑波高和水位的相关性可以降低越浪量的计算值, 在海外项目中适当考虑波高和水位的相关性可以有效降低护岸工程量(优化上部结构), 提高 EPC 承包商的方案竞争力。

5) 相较于 EurOtop Manual 公式计算的越浪量, 采用我国的《港口与航道水文规范》公式计算的越浪量偏大。越浪量计算对波高和水位比较敏感, 波高减小 20% 时, 越浪量计算值可能会出现数量级的差异, 允许越浪量可以采用数量级梯度进行分级。

(上接第 67 页)

参考文献:

[1] 环境保护部. 湖泊河流环保疏浚工程技术指南(试行)[S]. 北京: 环境保护部, 2014.

[2] 金相灿, 李进军, 张晴波. 湖泊河流环保疏浚工程技术指南[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[3] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 疏浚与吹填

参考文献:

[1] 水利部水利水电规划设计总院, 广东省水利水电科学研究院, 浙江省水利水电勘测设计院. 海堤工程设计规范: GB/T 51015—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014

[2] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002.

[3] US Army Corps of Engineers .Coastal engineering manual [R]. Washington: US Army Corps of Engineers, 2003.

[4] British Standard Institution. Maritime structures: part 7,guide to the design and construction of breakwaters: BS 6349-7: 1991[S]. London: British Standard Institution, 1991.

[5] PILARCZYK K. Dikes and revetments design: maintenance and safety assessment [M]. Boca Raton : CRC Press, 1998.

[6] VAN DE MEER J W, ALLSOP N W H, BRUCE T, et al. EurOtop: manual on wave overtopping of sea defences and related structures[R]. 2nd edition. Delft: EurOtop , 2018.

[7] 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[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[8] TAW. Technical report: wave run-up and wave overtopping at dikes [M]. Delft: Technical Advisory Committee on Flood Defence, 2002.

[9] 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.

[10] 董胜, 孔令双. 海洋工程环境概论[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.

[11] China Harbor Engineering Arabia Co., Ltd. Ras Al Khair port expansion project, design calculation of breakwater and revetment[R]. Al Khair: China Harbor Engineering Arabia Co., Ltd., 2016. (本文编辑 王璁)

工程设计规范: JTS 181-5—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

[4] 中交水运规划设计院有限公司. 白洋淀内源污染治理试点项目实施效果评估报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2020.

(本文编辑 郭雪珍)