



允许越浪条件下海堤越浪量可靠度分析*

张向东^{1,2}, 张磊³, 董胜¹

(1.中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100; 2.中国人民解放军92304部队, 海南三亚 572011;
3.中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 基于可靠度理论, 进行了允许越浪条件下海堤越浪量的可靠度分析, 建立了允许越浪条件下海堤越浪量的极限状态方程。以青岛某斜坡式海堤为例, 将有效波高和谱峰周期作为基本随机变量进行越浪量可靠度分析。首先对有效波高和谱峰周期进行Log-normal、Gumbel分布拟合, 根据拟合结果, 二者均采用Log-normal分布, 然后采用Monte Carlo模拟计算了该海堤越浪量的可靠性指标。计算结果表明: 进行允许越浪条件下海堤越浪量的可靠度分析是可行的, 并且海堤越浪量的可靠性指标概率意义明确, 比允许越浪量标准更合理。

关键词: 海堤; 越浪量; 可靠度; Monte Carlo模拟

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0015-04

Sea wall overtopping reliability analysis under allowable overtopping

ZHANG Xiang-dong^{1,2}, ZHANG Lei³, DONG Sheng¹

(1.Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Unit 92304 of the PLA, Sanya 572011, China;
3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Based on the reliability theory, this paper analyzes sea wall overtopping reliability under the condition of overtopping allowed and establishes the limit state function for sea wall overtopping. The overtopping failure probability and reliability index of a sloping sea wall in Qingdao are calculated using Monte Carlo simulation method and taking the significant wave height and the spectrum peak period as variables. The significant wave height and the spectrum peak period are fitted using Log-normal fitting and Gumbel fitting. The Log-normal fitting is adopted according to the fitting results. It is concluded that sea wall overtopping reliability analysis is feasible, the probabilistic meaning of the sea wall overtopping reliability index is definite, and the sea wall overtopping reliability index is more reasonable than the standard of the tolerable overtopping limits.

Key words: sea wall; overtopping; reliability; Monte Carlo simulation

波浪行近建筑物时会沿坡上爬, 当波浪爬高超越建筑物顶部时, 即产生越浪。越浪量的衡量标准通常采用单位时间内越过单位堤长的平均水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 以 q 表示^[1]。影响海堤越浪量的因素很多, 主要有波浪要素、海堤断面形式、堤顶高程、堤前水深、风场要素及堤前地形等。对于海堤、护岸, 通常不要求其在高潮大浪时

不发生越浪, 而是要求越浪量能够控制在允许范围内, 即允许越浪量。本文在允许越浪的条件下, 基于可靠度理论, 进行海堤越浪量可靠度分析, 能够为工程设计提供参考。

1 允许越浪量标准

海堤堤顶越浪不仅可能危及堤体和堤后结构

收稿日期: 2012-01-07

*基金项目: 国家自然科学基金(50879085); “新世纪优秀人才资助计划”项目(NCET-07-0778)

作者简介: 张向东(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口海岸工程及其与海洋环境相互作用。

的安全，而且还会危及海堤的功能性安全，其中尤为重要的是堤顶通道的交通安全^[2]。海堤的允许越浪量应根据海堤工程的级别、重要程度和护面防护结构形式的抗冲性等因素综合确定。目前我国尚未推出海堤允许越浪量的国家标准，但一些地方规范给出了允许越浪量的标准。《广东省海堤工程设计

导则》（试行）^[3]给出了几种常见护面结构形式海堤的允许越浪量，见表1。《浙江海塘工程技术规定》^[4]规定当堤顶为混凝土和浆砌块石护面、内坡为干砌块石护面且堤防允许越浪时，设计频率波浪的最大允许越浪量为 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，这与《广东省海堤工程设计导则》（试行）^[3]的标准一致。

表1 常见护面结构形式海堤的允许越浪量

海堤形式	构造	允许越浪量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
有后坡（海堤）	堤顶为混凝土或浆砌块石护面，内坡为生长良好的草地	≤ 0.02
	堤顶为混凝土或浆砌块石护面，内坡为垫层完好的干砌块石护面	≤ 0.05
无后坡（护岸）	堤顶有铺砌	≤ 0.09
滨海城市堤路结合海堤	堤顶为钢筋混凝土路面，内坡为垫层完好的浆砌块石护面	≤ 0.09

2 常用越浪量计算公式

国内外的学者针对斜坡堤越浪量问题进行了大量研究，并提出了很多计算公式和方法，例如国外的Vander Meer方法、英国水利研究站（HR）方法、Hebsgaard方法等，国内的《海

港水文规范》^[6]公式、《浙江省海塘工程技术规定》公式^[4]等。

《海港水文规范》^[6]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：

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

$$q = 0.07^{H_c/H_{1/3}} \exp(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}}) BK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \tanh \left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8 \right)^2 \right] \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (2)$$

式中： A 、 B 为经验系数，二者与海堤坡度有关，例如当坡度为1:1.5时， A 取0.035， B 取0.6，当坡度为1:2时， A 取0.06， B 取0.45； m 为海堤临海侧的坡度； d 为堤前水深； K_A 为护面结构影响系数，例如当护面为混凝土板时其取1.0，为扭工字块时其取0.4； H_c 为堤顶无胸墙时，堤顶在静水面上的高度； 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； T_p 为谱峰周期。

板时取0.49。

《浙江省海塘工程技术规定》^[4]给出了无风条件下，带防浪墙且坡度为1:2或1:0.4的斜坡式海堤的越浪计算公式，并且给出了有风条件下的修正越浪量的风校正因子。其越浪计算公式为：

$$\frac{q}{THg} = A \exp \left(- \frac{B}{K_\Delta} \frac{H_c}{T\sqrt{gH}} \right) \quad (3)$$

式中： A 、 B 为经验系数； H_c 为防浪墙顶在静水面上的高度； \bar{H} 、 T 为堤前平均波高、波周期； K_Δ 为糙渗系数，当护面类型为混凝土时取0.9，为栅栏

3 可靠度理论及Monte Carlo模拟

设基本随机变量 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的联合密度函数为 $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)=f_X(X)$ ，由此变量表示的结构的功能函数为 $Z=g(X)$ ，则该结构的失效概率为^[7]：

$$P_f = P(Z < 0) = \int_F f_X(X) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (4)$$

式中： $F=\{x|g(x)<0\}$ 表示结构的失效域。

由于结构的失效概率与其可靠性指标是一一对应关系，则可靠性指标可表示为：

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (5)$$

Monte Carlo方法^[8]是一种采用统计抽样理论近似地求解数学问题或物理问题的方法，因此又称其为统计试验方法或随机模拟方法。利用Monte Carlo方法解决问题，其基本思想是：首先建立与描述拟解决问题有相似性的概率模型，并利用这种相似性把这个概率模型的某些特征（如基本随机变量的均值、标准差等）与数学计算问题的解

答联系起来, 然后对模型进行随机模拟或统计抽样, 最终利用所得结果求出这些特征的统计估计值作为原来的数学计算问题的近似解。

采用Monte Carlo方法求解失效概率的主要步骤如下:

- 1) 利用随机抽样以获得每一个变量的样本值 $\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_n$;
- 2) 根据上述的抽样值, 计算功能函数式的值 $Z = g(\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_n)$;
- 3) 若进行了 N 次试验 (抽样), 那么失效的概率可由下式近似给出:

$$P_f = \frac{n(Z \leq 0)}{N} \quad (6)$$

式中: $n(Z \leq 0)$ 是 $Z \leq 0$ 的试验次数。不难看出, 失效概率就是试验失效次数占总试验次数的频率, 这也是Monte Carlo方法的基本出发点。

4 允许越浪条件下海堤越浪量可靠度分析

根据可靠度理论, 进行允许越浪条件下的海堤越浪可靠度分析, 首先应建立海堤越浪的极限状态方程。单位时间内单位堤宽越浪的极限状态方程如下:

$$g(C, q) = C - q = 0 \quad (7)$$

式中: q 为越浪量 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 即单位时间单位堤宽的越浪水体体积; C 为定值, 可根据海堤的工程级别、重要程度和护面防护结构形式等综合考虑。

青岛某斜坡堤, 其典型断面见图1, 根据当地水文站1984—2001年的实测资料, 得出有效波高 (m) 的均值和标准差分别为: 2.69, 0.95; 与有效波高对应的谱峰周期 (s) 的均值和标准差分别为: 10.61, 2.13。

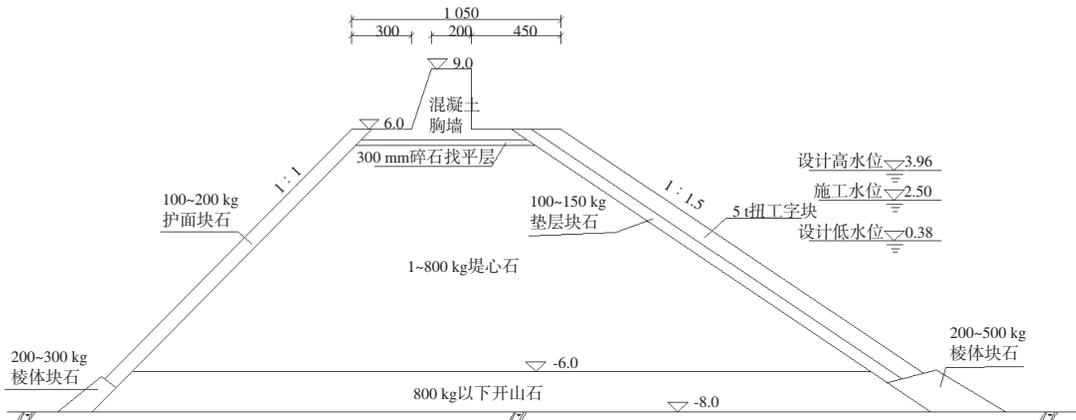


图1 斜坡堤典型断面

海洋工程中常用的单因素极值分布模型有: Log-normal、P-III、Weibull及Gumbel分布^[9]。本文首先对有效波高和谱峰周期进行Log-normal、Gumbel分布拟合, 拟合结果见图2~5。根据拟合结果可以看出, 有效波高、谱峰周期均符合Log-normal、Gumbel分布。本文有效波高和谱峰周期均采用Log-normal分布, 由图2波高Log-normal分布的结果, 可得到50 a一遇的有效波高为5.2 m, 25 a一遇的有效波高为4.8 m。

由于该斜坡堤有后坡, 且堤顶是混凝土胸墙, 内坡是垫层完好的块石护面, 根据表1可知其允许越浪量为 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据《海港水文规范》^[6]斜坡堤有胸墙时的越浪量计算公式 (2), 计

算该斜坡堤50 a和25 a一遇的越浪量。可得50 a和25 a一遇的越浪量分别为: $0.048, 0.022 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 均

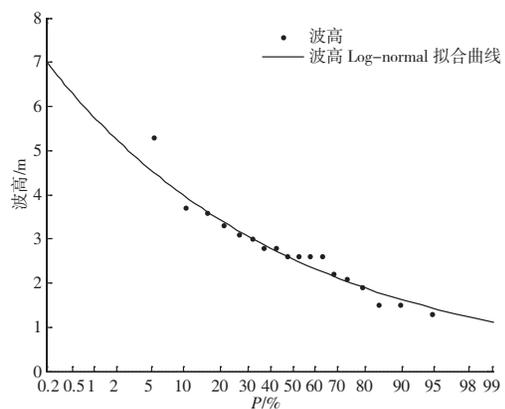


图2 波高Log-normal分布拟合

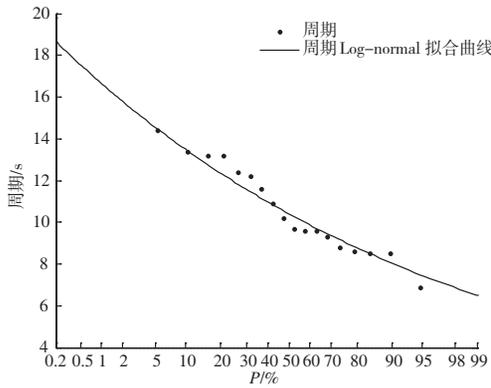


图3 谱峰周期Log-normal分布拟合

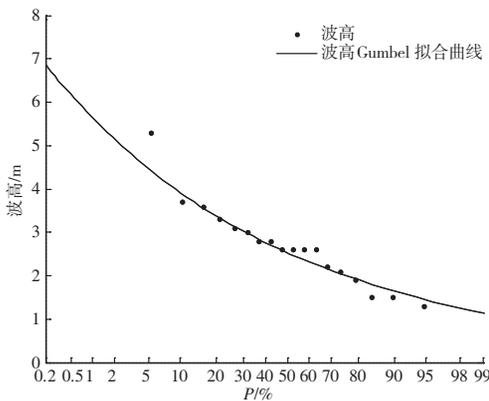


图4 波高Gumbel分布拟合

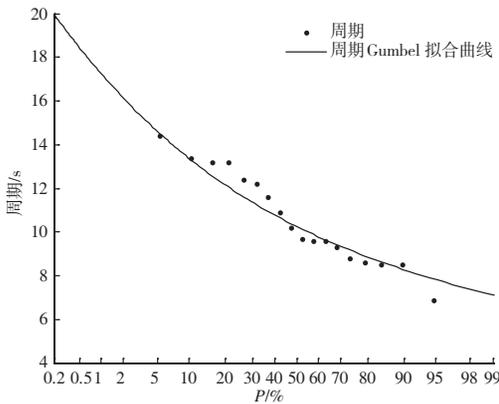


图5 谱峰周期Gumbel分布拟合

小于 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，符合《广东省海堤工程设计导则》(试行)^[3]的要求。

根据式(2)和式(4)，建立该斜坡堤越浪量的极限状态方程：

$$g[C, q(H_{1/3}, T_p)] = C - q(H_{1/3}, T_p) = 0 \quad (8)$$

式中： C 为定值，取0.05； $q(H_{1/3}, T_p)$ 的表达式为式(2)，为有效波高、谱峰周期作为基本随机变量的函数，且有效波高、谱峰周期均服从Log-normal分布。

根据该斜坡堤越浪量的极限状态方程，采用 Monte Carlo模拟的可靠度，可得该斜坡堤越浪量的可靠性指标为2.104 4，失效概率为0.017 67。

5 结语

采用 Monte Carlo模拟得到的该斜坡式海堤越浪量的可靠性指标约为2.10，越浪量大于 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的概率约为0.018，重现期约为56 a，与前面计算的50 a一遇的越浪量 $0.048 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 基本一致，说明采用可靠度理论分析海堤越浪量是可行的。

对于各种形式的海堤、护岸均可按式(7)建立越浪量的极限状态方程。式中的 C 可按《广东省海堤工程设计导则》(试行)^[3]给出了几种海堤允许越浪量取值，也可综合考虑海堤的工程等级、重要程度及结构形式等因素确定，在本文中暂按《广东省海堤工程设计导则》(试行)^[3]给出了几种海堤允许的平均越浪量取值。海堤越浪量与很多参数有关，例如波高、波向、周期、堤前水深、堤顶高程、堤坡、护面结构影响系数等，本文只将波高与周期两个参数作为变量，其它参数取定值处理，今后的研究可根据实际情况增加变量个数。

海堤越浪量的可靠性指标概率意义明确，比允许越浪量标准更符合实际情况。对海堤越浪量进行可靠性分析时，若极限状态方程中的 C 按《广东省海堤工程设计导则》(试行)^[3]给出了几种海堤允许越浪量取值，建议1级海堤越浪量的目标可靠性指标 β 为3.10，即失效概率小于0.01；2级海堤越浪量目标可靠性指标 β 为2.05，即失效概率小于0.02。

目前对于结构形式简单的斜坡式海堤采用越浪量可靠度分析较为方便，但对于结构形式复杂的海堤进行越浪量可靠性分析困难较大，尚需要更深入的研究。本文主要论述了海堤平均越浪量可靠度分析，对于单波越浪量可靠度分析，即单个波浪在单位长堤上产生越顶水体积的可靠度分析在原理上是可行的，如何应用尚需进一步的研究。

(下转第35页)