



斜坡式防波堤的可靠性分析

张磊¹, 傅宇², 郭红霞³

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 中交疏浚(集团)股份有限公司, 北京 100088; 3. 农业部工程建设服务中心, 北京 100081)

摘要: 对港口工程中常用的可靠度计算方法进行阐述, 给出了斜坡堤护面块体稳定性可靠性分析的功能函数, 介绍了港口工程中常用的单变量极值分布。以秦皇岛水文观测数据为基础, 统计换算斜坡堤护面块体的质量, 采用极值分布理论对护面块体的计算质量进行分布拟合, 对比得出对数正态分布可以对护面块体质量分布进行较好的适线。从算例计算结果对比中可以发现, Monte Carlo 模拟的可靠度指标计算结果比验算点法的计算结果低。两种方法计算的可靠度指标均比规范要求的低。利用 Monte Carlo 模拟计算结构可靠度, 选择合理的模拟次数即可。

关键词: 斜坡堤; 护面块体; 可靠性; JC 法; 映射变换法; Monte Carlo 模拟

中图分类号: U 656.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0058-05

Reliability analysis of rubble-mound breakwater

ZHANG Lei¹, FU Yu², GUO Hong-xia³

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

2.CCCC Dredging(Group) Co., Ltd., Beijing 100088, China;

3.China Agricultural Engineering Consulting Center, Beijing 100081, China)

Abstract: The typical reliability analysis methods are introduced. The performance function is defined and extreme value distribution theory is discussed. The conversion massed of the armour blocks are derived from the Qinhuangdao hydrologic database. The extreme value distribution theory is adopted to fit the conversional armour block mass. It is found that lognormal distribution fits well of the conversional armour block mass distribution. From the case study, the reliability index computed by Monte Carlo simulation method is less than the index computed by JC method, but both less than the value specified in the standard. In Monte Carlo simulation method, reasonable simulation time is recommended.

Keywords: rubble-mound breakwater; armour block; reliability; JC method; mapping transformation method; Monte Carlo simulation

防波堤是港口工程的重要组成部分, 在港口工程建设成本中占有很高的比例。防波堤的结构形式主要有斜坡式、直立式和浮式。斜坡式防波堤施工取材方便, 应用十分广泛。根据我国行业标准 JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》^[1] 的规定, 斜坡式防波堤的计算内容主要有: 护面块体稳定质量和护面层厚度、栅栏板的强度、堤

前护底块石的稳定质量、胸墙的强度、胸墙抗滑和抗倾稳定性、整体稳定性和地基沉降。本文主要是针对斜坡堤护面块体质量的可靠性进行分析。

结构可靠度计算最初是建立在全概率法(水准 III 法)理论基础上的, 由于受到数理理论本身的局限性, 全概率法在结构可靠性研究中发展缓慢。近似概率法(水准 II 法)由于其计算方法简单, 能

收稿日期: 2016-05-04

作者简介: 张磊(1986—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口、航道工程设计。

够满足工程精度要求, 发展比较迅速, 其中一次二阶矩法应用最广泛, 包括中心点法、验算点法、映射变换法、实用分析法。随着计算机技术的发展, Monte Carlo 模拟的应用也越来越受到重视。

1 可靠性理论

假设随机向量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的密度函数为 $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_X(X)$, 由此随机向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^[2]:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_F f_X(X) dx_1 \cdots dx_n \quad (1)$$

其中 $F = \{x | g(x) < 0\}$ 表示结构的失效域。

如果结构功能函数 Z 服从正态分布, 其均值为 μ_Z 、标准差为 σ_Z , 则结构的可靠性指标可以表示为:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (2)$$

根据正态分布理论, 对应的结构失效概率为:

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

如果功能函数 Z 服从其他形式分布, 则需将 Z 等效或当量为正态分布的随机变量, 然后进行可靠指标计算。

1.1 验算点法

假设结构功能函数为 $Z = g(X)$, 则结构的极限状态方程为 $Z = g(X) = 0$, 设 x^* 是极限状态面上的一点, 则 $Z = g(x^*) = 0$, 在点 x^* 处展开成 Taylor 级数, 保留至一次项, 可得:

$$Z_L = g(x^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(x^*)}{\partial X_i} (X_i - x_i^*) \quad (4)$$

Z_L 的均值为:

$$\mu_{Z_L} = g(x^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(x^*)}{\partial X_i} (\mu_{X_i} - x_i^*) \quad (5)$$

Z_L 的标准差为:

$$\sigma_{Z_L} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g(x^*)}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2} \quad (6)$$

则结构的可靠性指标为:

$$\beta = \frac{\mu_{Z_L}}{\sigma_{Z_L}} = \frac{g(x^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(x^*)}{\partial X_i} (\mu_{X_i} - x_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g(x^*)}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (7)$$

定义灵敏度系数 $\cos\theta_{X_i}$:

$$\cos\theta_{X_i} = -\frac{\frac{\partial g(x^*)}{\partial X_i} \sigma_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g(x^*)}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (8)$$

采用改进一次二阶矩法求解结构可靠性指标的过程中需要进行迭代计算。一般初始验算点取 $x^* = \mu_X$ 。

对于非正态随机变量, 在进行可靠度计算时, 先要把其当量化, 使其可以用正态分布来代表。当量正态化的基本原理是: 对于代替的正态分布函数要求在设计验算点 x_i^* 处的累积概率分布函数值和概率密度函数值都要和原分布函数的累积概率分布函数值和概率密度函数值分别对应相等。根据这两个条件可以求得等效正态分布的均值 μ_{X_i} 和标准差 σ_{X_i} 。最后采用上述方法求解结构的可靠性指标。这种方法是国际结构安全度联合委员会 (JCSS) 推荐使用的方法, 习惯上称之为 JC 法。

1.2 映射变换法

映射变换法又称为全分布变换法, 是一种等概率变换。其原理是利用累积分布函数相等的映射, 将非正态分布随机变量变换为正态分布随机变量。

1.3 实用分析法

实用分析法中的当量正态化与 JC 法不同。实用分析法当量正态化的方法是把非正态随机变量 X_i 按照对应于失效概率 P_f 或 $1 - P_f$ 有相同分位值 (x_i^f) 的原则, 用正态变量 X_i' 来代替, 当量正态随机变量需要满足的条件是其均值 μ_{X_i} 等于原来的非正态变量 X_i 的均值 μ_{X_i} 。

1.4 Monte Carlo 模拟

Monte Carlo 模拟也是结构可靠度分析的一种基本的方法, 在模拟次数有保证的情况下, 也是

相对比较准确的方法。Monte Carlo 模拟中的抽样方法可以分为直接抽样法、重要抽样法及方向抽样法等。其中，直接抽样法是按照基本随机变量 X 的联合概率密度函数 $f(X)$ 对 X 进行随机抽样，采用所得样本值 x 计算功能函数的值 $Z=g(x)$ ，如果功能函数小于零 ($Z<0$)，则表示模拟中结构失效 1 次。假设总共进行了 N 次模拟，失效次数为 n_f 次，则结构失效概率的无偏估计值为：

$$P_f = \hat{P}_f = \frac{n_f}{N} \tag{9}$$

2 功能函数

在 Iribarren 等工作的基础上，Hudson 在 WES (Army Engineer Waterway Experiment Station) 经过大量试验提出计算护面块体质量的 Hudson 公式。我国行业标准 JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》中规定采用 Hudson 公式计算护面块体的质量。

$$W = 0.1 \times \frac{\rho_b H^3}{K_D (S_b - 1)^3 \cot \alpha} \tag{10}$$

$$S_b = \frac{\rho_b}{\rho} \tag{11}$$

式中： W 为单个块体的稳定质量(t)； ρ_b 为块体材料的密度(t/m^3)； H 为设计波高(m)； K_D 为块体稳定系数； α 为斜坡与水平面的夹角($^\circ$)； ρ 为水的密度(t/m^3)。

从上式可以看出，影响护面块体质量的因素有材料密度、设计波高、块体稳定系数、坡度。其中两个不确定的参数是波高 H 和稳定系数 K_D 。本文重点研究波高对护面块体稳定性可靠度的影响，稳定系数 K_D 的影响将在后续研究中进行。

我国行业标准 JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》中规定设计波高采用 $H_{13\%}$ 或者 $H_{5\%}$ (浅水)。美国海岸工程研究中心编著的 Shore Protection Manual(1977) 中推荐使用 H_s (有效波高) 作为设计波高计算块体质量，经过进一步研究，Shore Protection Manual (1984)^[3] 推荐使用 $H_{1/10}$ (1/10 大波) 作为设计波高计算块体质量。可见，美国海岸工程研究中心认为 H_s 作为设计波高计算

的块体质量安全系数是不足的。此后英美规范中推荐使用 $H_{1/10}$ 作为设计波高计算块体稳定质量^[4-6]。

根据我国行业标准 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[7]，设计波高推算可采用皮尔逊 III 型分布、冈贝尔分布、对数正态分布和威布尔分布对比取优选择。本文主要研究波高对护面块体可靠度的影响，所以本文推荐根据波高计算的护面块体质量分布从上述 4 种分布中进行假设检验。

皮尔逊 III 型分布的概率分布函数为：

$$F(x) = \int_{a_0}^x \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (t - \mu)^{\alpha-1} e^{-\beta(t-\mu)} dt \tag{11}$$

$$x \geq \mu, \alpha > 0$$

式中： μ 为位置参数，并且满足 $0 < \mu < x_{\min}$ (x_{\min} 是样本的最小值)； α 为形状参数； β 为尺度参数。

Gumbel 分布的概率分布函数为^[8]：

$$F(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x-\beta)]\} \tag{12}$$

式中： α 、 β 分别为尺度参数和位置参数。根据矩法估计^[9]，其均值为 $\mu = \frac{0.57722}{\alpha} + \beta$ ，方差为

$$\sigma = \frac{\pi}{\alpha \sqrt{6}}$$

对数正态(Lognormal)分布的概率分布函数为：

$$F(x) = \int_a^x \frac{1}{(t-a)\sigma_y \sqrt{2\pi}} \tag{13}$$

$$\exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_y^2} [\ln(t-a) - \mu_y]^2\right\} dt \quad x \geq a$$

式中： μ_y 、 σ_y 分别为形状参数和尺度参数，数理含义是对应于变量 $\ln(X-a)$ 的均值和标准差， a 为位置参数。

威布尔(Weibull)分布的概率分布函数为：

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\frac{(x-\mu)^\gamma}{\sigma}\right] & x \geq \mu \\ 0 & x < \mu \end{cases} \tag{14}$$

式中： μ 为位置参数； σ 为形状参数； γ 为尺度参数。如果 $\mu=0$ ，则是两参数威布尔分布。

由于预制加工误差，实际生产的护面块体的质量存在一定的不确定性。因此，防波堤护面块体稳定性的功能函数可以定义为：

$$Z = W_1 - W_2 \quad (15)$$

式中: W_1 为实际安装的护面块体质量; W_2 为根据统计波浪特征值计算的护面块体质量。由于护面块体制作误差来自人为因素及设备因素, W_1 的统计分布可以采用正态分布, 变异系数可以取 0.05。由于暂时不考虑稳定系数的影响, 本文研究重点是 50 a 重现期波高对护面块体稳定性的可靠度的影响。

3 案例分析

采用秦皇岛水文观测站 1960—1993 年的原始数据进行推算, 波浪统计数据皮尔逊 III 型拟合见图 1。50 a 一遇 $H_{13\%} = 2.53$ m。护面块体拟采用混凝土方块。根据 Hudson 公式, 设计块体质量采用 2 t。

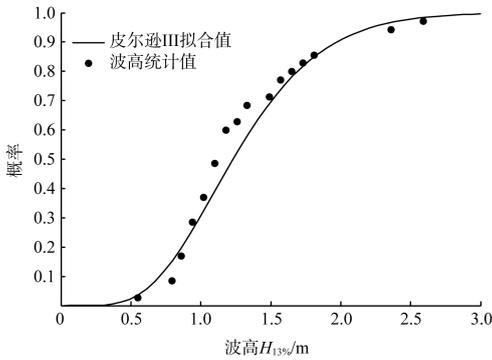


图 1 皮尔逊 III 型分布拟合波高 $H_{13\%}$

根据历年波高统计数据, 利用 Hudson 公式计算护面块体质量后, 分别采用皮尔逊 III 型分布、Gumbel 分布、对数正态分布、威布尔分布对护面块体计算质量分布进行适线, 结果见图 2~5。

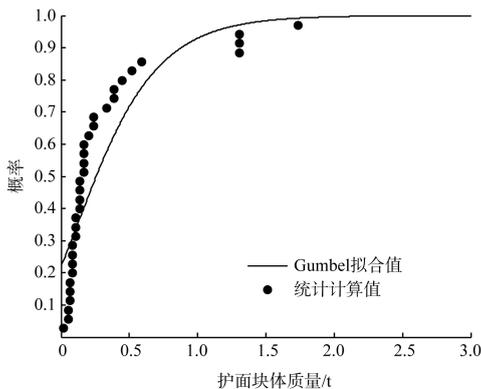


图 2 Gumbel 分布拟合护面块体计算质量

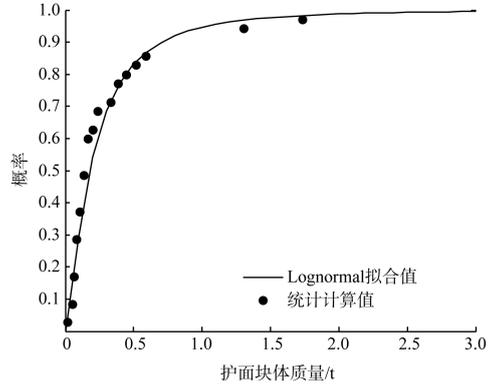


图 3 对数正态分布拟合护面块体计算质量

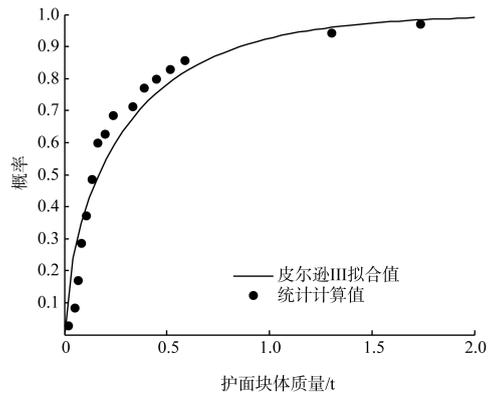


图 4 皮尔逊 III 分布拟合护面块体计算质量

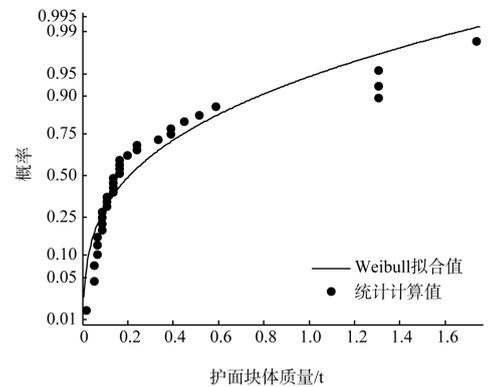


图 5 Weibull 分布拟合护面块体计算质量

从图 2~5 可以看出, 4 种极值分布拟合中, 对数正态(Lognormal)分布拟合护面块体计算质量随机分布最好。实际安装护面块体质量采用正态分布。变量统计参数为: 实际安装护面块体质量, $\mu_{W_1} = 2$ t, $\sigma_{W_1} = 0.1$ t; 护面块体计算质量 $\mu_{W_2} = 0.3267$ t, $\sigma_{W_2} = 0.43$ t。

采用验算点法(JC法)和 Monte Carlo 模拟计算护面块体的可靠度指标结果见表 1。

表1 计算结果

方法	β	P_f
验算点法(JC法)	2.306 0	0.010 565 700
Monte Carlo 模拟($N=10^8$)	2.305 3	0.010 573 300
Monte Carlo 模拟($N=10^9$ 次)	2.303 8	0.010 616 380
Monte Carlo 模拟($N=10^{10}$ 次)	2.304 5	0.010 596 373

从计算结果看, Monte Carlo 模拟计算得出的可靠度指标比验算点法(JC法)的计算结果低,随着模拟次数的增加, Monte Carlo 模拟的计算结果逐渐趋近定值。两种方法计算的可靠度指标均小于 GB 50158—2010《港口工程结构可靠性设计统一标准》中的标准,失效概率偏大。

从表1可以看出模拟次数增加100倍,可靠度指标计算结果差异为3/100 00左右,这种差异在工程应用领域实际意义并不大,所以在采用 Monte Carlo 模拟计算结构可靠度时,选择相对合理的模拟次数即可,以计算机模拟小于5 s为宜。

4 结论

1) 本文的案例中,采用对数正态分布对护面块体计算质量随机分布拟合良好。但是,护面块体实际质量分布受多种因素的影响,具体变异系数需要根据当地工程经验调研取值验证。

2) 除了波高 H , 影响护面块体质量计算结果的不确定性参数还有稳定系数 K_D 。为提高保证率,在确定不同块体 K_D 时, Hudson 公式有一定的安全储备。本文在进行可靠度计算时没有考虑 K_D 的影响,所以造成可靠指标偏低,失效概率偏大。Melby 等认为 K_D 的变异系数在 20%~25%, 这需要进一步的研究。

3) 为提高护面块体稳定性可靠度指标,可以提高波浪设计标准。提高波浪设计标准的途径有两个: ①提高重现期标准,例如将波浪重现期标

准从 50 a 提高到 100 a; ②提高波列累计频率标准,例如美国海军工程研究中心的做法,将设计波高累计频率从 H_5 (约等于 $H_{13\%}$) 提高到 $H_{1/10}$ 。

4) 对于斜坡堤整体稳定可靠性及系统可靠性尚需作进一步研究。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
- [3] Coastal Engineering Research Center. Shore protection manual [M]. Washington DC: US Government Printing Office, 1984.
- [4] US Army Corps of Engineers. Coastal engineering manual[M]. Washington, DC: Coastal Hydraulics Laboratory Publication, 2002.
- [5] CRIA, CUR, CETMEF. The rock manual: The use of rock in hydraulic engineering [M]. London: CRIA, 2007.
- [6] Civil Engineering and Building Structures Standards Committee. BS 6349 Part 7-1991 Guide to the Design and Construction of Breakwaters[S]. London: BSI, 1991.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. JTS 145—2015 港口与航道水文规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [8] 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.
- [9] 张磊, 董胜, 张向东. 直接积分法在防波堤可靠性分析中的应用[J]. 海洋工程, 2011(4): 103-107.
- [10] 中国交通建设股份有限公司. GB 50158—2010 港口工程结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.

(本文编辑 武亚庆)