



直立墙上不规则波波浪力试验和统计分析*

杨萍, 高树飞, 孙昭晨, 贡金鑫

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 为确定波谷作用下波浪荷载的概率分布和统计参数, 进行了不规则波浪对直立墙作用的室内试验, 并对测得的波浪力进行统计分析; 通过长期波浪最大荷载与短期波浪荷载的统计关系, 得到 50 a 设计基准期内波浪荷载的概率分布和统计参数。研究表明, 波谷作用下短期波浪荷载服从 Weibull 分布, 50 a 设计基准期内最大波浪荷载服从极值 I 型分布。

关键词: 港口工程; 直立墙; 不规则波; 波浪力; 统计分析

中图分类号: TV 131.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0026-06

Experiment and statistical analysis of irregular wave forces on vertical walls

YANG Ping, GAO Shu-fei, SUN Zhao-chen, GONG Jin-xin

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To determine the probability distribution and corresponding statistical parameters of irregular wave loads on vertical walls, indoor irregular wave loads experiments are conducted and statistical analysis on the acquired data is made. The statistical parameters of wave loads in design reference period of 50 years are derived based on the relationship between the statistical parameters of long-term load and that of short-term load. It is indicated that the short-term wave load follows a Weibull distribution and the long-term wave load follows an extreme I distribution.

Key words: harbour engineering; vertical wall; irregular wave; wave load; statistical analysis

近年来, 重力式码头的可靠度设计方法受到重视。JTJ 290—1998《重力式码头设计与施工规范》^[1]采用了以分项系数表达的可靠度设计方法, 日本《港口技术设施技术标准 and 解说》^[2]也全部采用了可靠度设计方法, 现行的 JTS 167—2009《重力式码头设计与施工规范》^[3]在继续采用分项系数设计表达式的同时, 在附录 D 还给出了码头抗滑、抗倾稳定性的可靠指标设计方法及材料、岩土性能和堆载的概率分布和统计参数, 提高了重力式码头设计的合理性。但现行的规范 JTS 167-2—2009 没有给出波浪荷载的概率分布和统计参数, 只可用于有掩护情况的抗滑、抗倾稳定性的可靠指标设计, 不能用于无掩护的情况。

近年来, 国内外学者对波浪力的统计特性做了大量研究^[4-11], 但是这些研究大多针对不规则波波峰作用下的波浪荷载的概率分布。由于直墙在波浪波谷作用下有向海侧滑动和倾覆的危险, 波浪波谷作用时的波浪力和倾覆力矩是重力式码头抗滑和抗倾稳定的控制情况, 而目前对于波谷作用下的波浪荷载的统计分析鲜有涉及。故本文主要研究波谷作用下波浪荷载的统计特性, 为无掩护重力式码头抗滑、抗倾稳定性的可靠指标设计提供支持。

1 不规则波浪对直立墙作用的模型试验

1.1 试验内容和方法

试验在大连理工大学海岸及近海工程国家重点

收稿日期: 2013-08-25

*基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目(20113288231510)

作者简介: 杨萍(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事港口工程结构研究。

实验室的海洋环境水槽 (长 50 m, 宽 3 m, 高 1 m) 中完成。水槽的一端设有推板式造波机, 另一端装有消能装置, 以减小和消除波浪反射的影响。试验水槽沿纵向分隔成 0.8 m 和 2.2 m 两部分, 以减少反射影响。模型置于 0.8 m 宽槽内, 断面安放在水槽中距造波板约 30 m 处。

试验中采用有机玻璃制作的沉箱式直立墙模型, 箱体长 80 cm, 宽 40 cm, 高 55 cm。波浪水槽布置见图 1, 其中 d 为直立墙前水深, d_1 为基床上水深, b 为基床前肩宽。墙前底坡 i 为 1:50, 基床前肩坡度 $m = 1:3$, 后肩坡度为 1:2。墙前水深 d 分别为 30, 35, 40 cm, 基床上水深 d_1 为 12, 15, 21, 27, 30 cm 共 5 种, 使 d_1/d 分别属高、中、低和暗基床

范围。基床肩宽 b 分别为 20, 30, 40 cm, 基床由碎石按要 求尺度堆砌而成。如此设计的直立墙、基床以及其组合基本上涵盖了重力式码头所采用的结构。为了测得直立墙上的波浪力, 在直立墙迎浪面的正中间由下而上布置 16 个测点, 直立墙底面布置 7 个测点。试验中不规则波波谱采用改进的 JONSWAP 波谱, 谱峰升高因子 $\gamma = 3.3$ 。

试验中取有效波高 H_s 为 6, 7, 8, 10, 12, 14 cm, 有效周期 T_s 为 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 s。试验范围为 $H_{1\%}/d_1 = 0.28 \sim 2.3$, $d_1/d = 0.25 \sim 1.0$, $b/L = 0.07 \sim 0.26$ 。试验中不规则波浪要素和试验工况列于表 1。波浪要素基本上涵盖了重力式码头所遇到的波浪范围。

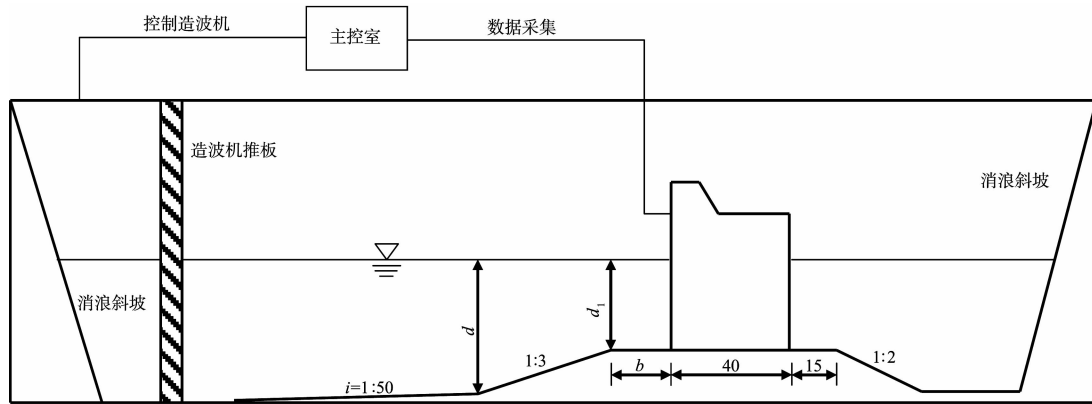


图 1 波浪水槽 (单位: cm)

表 1 不规则波试验组次

基床条件	d/m	d_1/m	b/m	H_s/m	T_s/s
暗基床	0.30	0.30	0.00	0.06, 0.07, 0.08, 0.09	1.0, 1.2, 1.4, 1.6
				0.10	1.2, 1.4, 1.6
				0.12	1.2, 1.4
低基床	0.30	0.21	0.20, 0.30, 0.40	0.06, 0.07, 0.08, 0.09	1.0, 1.2, 1.4, 1.6
				0.10	1.2, 1.4, 1.6
				0.12	1.2, 1.4
低基床	0.35	0.27	0.20, 0.30, 0.40	0.06, 0.07, 0.08	1.0, 1.2, 1.4, 1.6
				0.10, 0.12	1.2, 1.4, 1.6
				0.14	1.4
中基床	0.35	0.15	0.20, 0.30, 0.40	0.06, 0.07, 0.08	1.0, 1.2, 1.4, 1.6
				0.10, 0.12	1.2, 1.4, 1.6
				0.14	1.4, 1.6
中基床	0.40	0.21	0.20, 0.30, 0.40	0.06, 0.07, 0.08	1.0, 1.2, 1.4, 1.6
				0.10, 0.12, 0.14	1.2, 1.4, 1.6
				0.10, 0.12, 0.14	1.2, 1.4, 1.6
高基床	0.40	0.12	0.20, 0.30, 0.40	0.06, 0.07, 0.08	1.0, 1.2, 1.4, 1.6
				0.10, 0.12, 0.14	1.2, 1.4, 1.6

波浪的产生过程为：将特征波要素输入计算机，经计算产生造波信号，控制造波机产生相应的不规则波序列。特征波要素有效波高 H_s 和有效周期 T_s 的偏差均控制在 $\pm 1\%$ 以内。不规则波采样时间间隔为 0.02 s ，数据采集长度 $8\ 192$ ，不规则波波数大于 120 个。每组试验至少重复 3 次。

1.2 试验数据处理

1.2.1 波浪要素计算和波态判断

根据 JTS 145-2—2013 《海港水文规范》^[13]，在不同 H/d 情况下， $H_{1/3} \approx H_{13\%}$ 。 $H_{1/3}$ 为 $1/3$ 大波的平均波高，即有效波高； $H_{13\%}$ 为累积频率为 13% 的波高。在已知 $H_{13\%}$ 和 d 时，根据规范中的图表可查得 $H_{1\%}/H_{13\%}$ ，即可求得累积频率为 1% 的波高 $H_{1\%}$ 。波长 L 亦按规范计算。

根据《海港水文规范》^[13] 中有关直墙式建筑物前的波浪形态判别的规定对表 1 中的各工况进行判别，其中有 166 种工况属于立波， 11 种工况属于远破波， 150 种工况属于近破波。

1.2.2 试验数据统计

在分析试验数据之前，先对采集的数据进行可靠性检查，并剔除异常值。对噪音引起的高频影响，采用高斯滤波法进行滤波。本文中采用的数据，均是以滤波处理后的数据作为基础的。

波浪力和力矩计算方法如下：先对 23 个测点的同步波压进行梯形积分，求得直立墙迎浪面上总水平力、底面总浮托力的过程线以及它们对直立墙前趾的弯矩过程线，再由过程线分别求得波峰及波谷时的极值。关于波浪力方向的规定，水平力以波浪的入射方向为正，垂直力向上为正；对前趾的力矩以使沉箱向后倾覆为正。波谷作用时，水平波浪力方向与波浪入射方向相反，浮托力方向向下，根据前述力和力矩方向的规定，采用上跨零点法计算总水平波浪力及其产生的倾覆力矩（简称“水平波浪力矩”）谷值和浮托力的谷值及其稳定力矩（简称“波浪浮托力矩”）的峰值。将每个工况的 3 组试验结果（全部谷值或峰值）集中在一起考虑，然后计算每种工况的波浪力和力矩的谷值或峰值的均值和标准差。

2 波浪荷载的统计参数

2.1 波浪荷载和荷载效应的标准值

波浪荷载和荷载效应的标准值均按 JTS 145-2—2013 《海港水文规范》^[13] 进行计算，由于规范只给出立波和远破波在波谷作用下波浪力的计算公式，故本文未对近破波的波浪荷载的标准值进行计算，亦未对近破波的统计特性进行分析，本文的相关分析和计算只是针对立波和远破波。

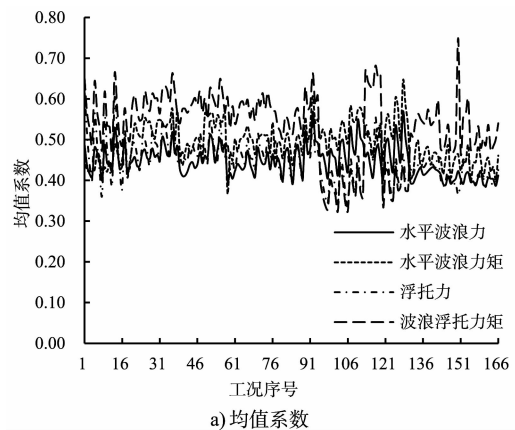
2.2 波浪荷载和荷载效应的均值系数和变异系数

均值系数为变量平均值与标准值的比值，变异系数为标准差与平均值的比值。对于变量 X ，其标准值用 X_k 表示，则 X 的平均值 μ_x 和标准差 σ_x 与其均值系数 k_x 和变异系数 δ_x 间具有如下关系：

$$\begin{cases} k_x = \mu_x / X_k \\ \delta_x = \sigma_x / \mu_x \end{cases} \quad (1)$$

对于每种工况，将试验所得波浪力和力矩的谷值或峰值的均值和标准差作为该工况下波浪力和力矩的均值和标准差，并将按规范计算得到的波谷作用下的波浪力和力矩作为该工况下波浪力和力矩的标准值，则按式(1)计算可得每种工况下波浪力和力矩均值系数 k_i 和变异系数 δ_i 。图 2 和 3 分别为立波和远破波波浪荷载和荷载效应的均值系数和变异系数的变化。

由图 2 和 3 可以看出，波浪力和力矩在不同工况下的均值系数和变异系数的离散性较小，而且随工况的变化幅度小。通过对试验数据的统计，每组工况下波浪力和力矩的谷值或峰值的平均值和标准差已知。在可靠度分析中，可将 m 种工况的



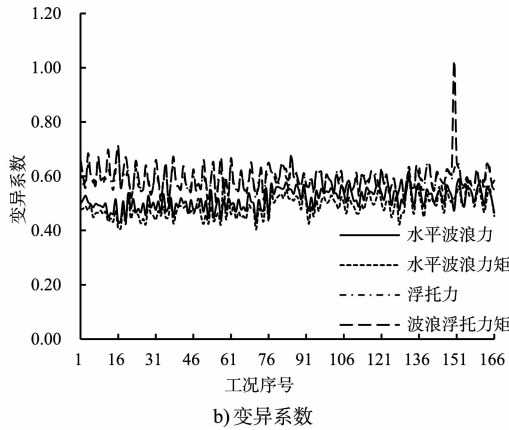


图 2 立波波浪荷载和荷载效应的均值系数与变异系数

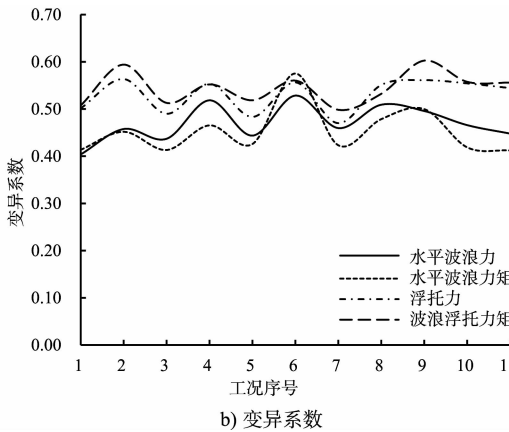
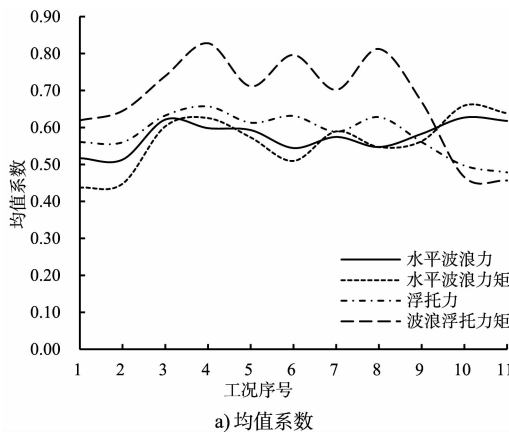


图 3 远破波波浪荷载和荷载效应的均值系数与变异系数

数据组成一个总体, 得到总体的统计参数。此处把每种工况下波浪力或力矩视为一个样本, 第 i 种工况下波浪力或力矩的第 j 个样本值为 X_{ij} , 样本容量为 n_i , 平均值为 \bar{X}_i , 标准差为 S_i , 标准值为 X_{ki} , 均值系数为 k_i , 则波浪力和力矩的均值系数 k 和变异系数 δ 可按下列各式计算。

$$k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m k_i \quad (2)$$

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m n_i \bar{X}_i \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \mu)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} [(X_{ij} - \bar{X}_i) + (\bar{X}_i - \mu)]^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} [(X_{ij} - \bar{X}_i) + n_i (\bar{X}_i - \mu)^2]}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [(n_i - 1) S_i^2 + n_i (\bar{X}_i - \mu)^2]}{n-1}} \quad (4)$$

式中: μ 和 σ 分别为波浪力或力矩的平均值和标准差。对于式(3)和(4), 考虑每种工况的样本容量足够大且相等, 则其可简化为:

$$\mu_x \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i \quad (5)$$

$$\sigma_x \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [S_i^2 + (\bar{X}_i - \mu)^2]}{m}} \quad (6)$$

将计算得到的每种工况下的平均值、均值系数和标准差代入以上各式, 可得波浪力和力矩的统计参数。表 2 为波谷作用下立波和远破波波浪力和力矩的统计参数。

假设变量

$$Z = \frac{X}{X_k} \quad (7)$$

表 2 波浪力和力矩的统计参数

波浪	力或力矩	均值系数	变异系数
立波	水平波浪力	0.447 34	0.605 33
	水平波浪力矩	0.492 74	0.651 18
	浮托力	0.449 25	0.651 63
	浮托力矩	0.533 26	0.686 31
远破波	水平波浪力	0.576 09	0.524 47
	水平波浪力矩	0.563 10	0.587 48
	浮托力	0.582 45	0.535 86
	浮托力矩	0.676 86	0.569 73

式中: X 为试验值; X_k 为变量 X 的标准值。不难看出变量 Z 的平均值为均值系数 k , 变异系数与变量 X 的变异系数相等, 则变量 Z 的标准差 $\sigma_z = k\delta_x$ 。为统一波浪荷载和荷载效应的统计参数, 将表 2 中的波浪力和力矩视为变量 Z 的一组样本, 每组样本的均值 $\mu_{z,i}$ 和变异系数 $\delta_{z,i}$ 为表中均值系数和

变异系数。采用式(5)和(6),并用 $\mu_{z,i}$ 和 $\sigma_{z,i}$ 将其中的平均值和标准差替换,则可得到统一的波浪荷载和荷载效应的统计参数,计算结果列于表3。

表3 波浪荷载的统计参数

波浪	均值系数	变异系数
立波	0.480 65	0.658 68
远破波	0.599 62	0.562 46

3 波浪荷载的概率分布

3.1 非参数假设检验

文献[4-11]多数认为波浪力服从 Weibull 分布,少数认为服从极值 I 型分布(Gumbel 分布)和对数正态分布。本文考虑 Weibull 分布和极值 I 型分布两种分布,并通过 K-S 检验哪种分布符合更好。其中极值 I 型概率密度函数和概率分布函数为:

$$f_X(x) = \alpha \exp[-\alpha(x-u)] \exp\{-\exp[-\alpha(x-u)]\} \quad (8)$$

$$F_X(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x-u)]\} \quad (9)$$

式中: α 尺度参数; u 为位置参数,与平均值和标准差具有如下关系:

$$\begin{cases} \mu_X = u + \frac{0.5772}{\alpha} \\ \sigma_X = \frac{\pi}{\sqrt{6}\alpha} \end{cases} \quad (10)$$

双参数 Weibull 分布的概率密度函数和概率分布函数为:

$$f_X(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right] (x \geq 0) \quad (11)$$

$$F_X(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right] (x \geq 0) \quad (12)$$

式中: λ 为尺度参数; k 为形状参数,与平均值和标准差具有如下关系:

$$\begin{cases} \mu_X = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \\ \sigma_X = \lambda \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为 Γ 函数。

K-S 检验是非参数假设检验比较常用的一种方法。本文对波浪力和力矩的谷值或峰值的样本进行 K-S 检验,每一种工况视为一个样本,对于立波,数据样本为 166 组;对于远破波,数据样本为 11 组。由表 4 可以看出,立波的水平波浪力、浮托力和浮托力矩大部分能通过接受服从极值 I 型分布的检验,但立波水平波浪力矩通过接受服从极值 I 型分布检验的比例较低;立波的水平波浪力、水平波浪力矩、浮托力和浮托力矩大部分都能通过接受服从 Weibull 分布的检验,且通过率要比接受服从极值 I 型分布高。远破波的水平波浪力、水平波浪力矩、浮托力和浮托力矩大部分都不能通过接受服从极值 I 型分布的检验;远破波的水平波浪力和水平波浪力矩大部分都不能通过接受服从 Weibull 分布的检验,但浮托力和浮托力矩大部分都能通过接受服从 Weibull 分布的检验。因此,本文将立波和远破波的水平波浪力和水平波浪力矩、浮托力和浮托力矩均按服从 Weibull 分布考虑。

表4 波浪力和力矩假设检验结果(显著性水平 $\alpha=0.01$)

波浪	分布	基床条件	水平波浪力		水平波浪力矩		波浪浮托力		波浪浮托力矩	
			接受	拒绝	接受	拒绝	接受	拒绝	接受	拒绝
立波	极值 I 型分布	暗基床	6	13	3	16	19	0	19	0
		低基床	82	29	44	67	105	6	105	6
		中基床	21	15	12	24	33	3	34	2
		合计	109(66%)	57(34%)	59(36%)	107(64%)	157(95%)	9(5%)	158(95%)	8(5%)
	Weibull 分布	暗基床	15	4	10	9	19	0	18	1
	低基床	103	8	89	22	110	1	111	0	
	中基床	30	6	23	13	34	2	33	3	
	合计	148(89%)	18(11%)	122(73%)	44(27%)	163(98%)	3(2%)	162(98%)	4(2%)	
远破波	极值 I 型分布	暗基床	0	2	0	2	1	1	1	1
		低基床	3	6	1	8	6	3	6	3
		合计	3(27%)	8(73%)	1(9%)	10(91%)	7(64%)	4(36%)	7(64%)	4(36%)
	Weibull 分布	暗基床	0	2	0	2	1	1	2	0
		低基床	5	4	3	6	6	3	6	3
	合计	5(45%)	6(55%)	3(27%)	8(73%)	7(64%)	4(36%)	8(73%)	3(27%)	

3.2 50 a 设计基准期的波浪荷载统计特性

根据前述假设检验结果,认为波浪荷载服从 Weibull 分布。根据表 3 中的统计参数,将均值系数作为分布的均值,利用变异系数求得分布的标准差,再由式(13)求得分布参数,并将试验结果作为设计基准期 1 a 的参数,得到设计基准期为 1 a 的波浪荷载/标准值分布函数,进而求得 50 a 波浪荷载最大值的概率分布函数,最后再利用概率密度函数求平均值和标准差,进而得到 50 a 设计基准期的波浪荷载统计参数。

将表 3 中立波的数据代入式(13),可得 $\mu_x = 0.480\ 65$, $\sigma_x = 0.480\ 65 \times 0.658\ 68$, 联立方程,解得 $\lambda = 0.534\ 427$, $k = 1.550\ 299$ 。将 λ 和 k 的值代入式(11)和(12),可得 1 a 波浪荷载/标准值的概率密度函数和分布函数,如式(14)和(15)所示。

$$f_x(x) = 2.901 \left(\frac{x}{0.534\ 427} \right)^{0.550\ 299} \exp \left[- \left(\frac{x}{0.534\ 427} \right)^{1.550\ 299} \right] \quad (x \geq 0) \quad (14)$$

$$F_x(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{0.534\ 427} \right)^{1.550\ 299} \right] \quad (x \geq 0) \quad (15)$$

N 年极大值概率分布函数和概率密度函数为:

$$F_{X_{\max}}(x) = [F(x)]^N = \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{0.534\ 427} \right)^{1.550\ 299} \right] \right\}^N \quad (x \geq 0) \quad (16)$$

$$f_{X_{\max}}(x) = N f_x(x) [F_x(x)]^{N-1} \quad (17)$$

N 年极大值的平均值和标准差为:

$$\mu_{X_{\max}} = \int_0^{+\infty} x f_{X_{\max}}(x) dx \quad (18)$$

$$\sigma_{X_{\max}} = \sqrt{\int_0^{+\infty} x^2 f_{X_{\max}}(x) dx - \mu_{X_{\max}}^2} \quad (19)$$

采用 Gauss 积分求解式(18)和(19),可得当 N 取 50 时, $\mu_{X_{\max}} = 1.397\ 847$, $\sigma_{X_{\max}} = 0.249\ 569$ 。将平均值 $\mu_{X_{\max}}$ 作为均值系数,并计算变异系数。远破波的计算方法相同。计算结果列于表 5。

根据概率理论,如果随机变量短期的概率分布为指数型的,则其长期最大值的概率分布趋近于极值 I 型分布。所以本文认为波浪荷载 50 a 设计基准期的最大值分布为极值 I 型分布。

表 5 波浪荷载的统计参数

波态	基准期/a	k	δ
立波	1	0.480 65	0.658 68
	50	1.397 85	0.178 54
远破波	1	0.599 62	0.562 46
	50	1.511 74	0.149 24

4 结论

短期内直立墙上的波浪荷载和荷载效应服从 Weibull 分布,50 a 设计基准期内波浪荷载的最大值服从极值 I 型分布。

参考文献:

- [1] JTJ 290—1998 重力式码头设计与施工规范[S].
- [2] 港湾の施設の技術上の基準・同解説[S]. 日本港湾協会:平成 19 年 7 月.
- [3] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].
- [4] Vicinanza D. Probabilistic analysis of horizontal wave forces on composite and vertical breakwaters [C]//Las Palmas: Proceedings 1st Overall Project Workshop PROVERBS. 2nd PROVERBS MAST III technical workshop, 1997.
- [5] Mckenna J, Allsop W. Statistical distribution of horizontal wave force on vertical breakwaters[J]. Coastal Engineering, 1998, 26(1): 2 083-2 095.
- [6] 黄培基,赵炳来. 直立堤前波浪和波压力概率统计特征[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(4): 367-378.
- [7] 谢世楞,孙毓华,刘颖,等. 关于波浪力的概率分布形式问题[J]. 水运工程, 1989(10): 1-8.
- [8] 李玉成,刘大中. 作用于直立堤上不规则波浪力的统计分布特性[J]. 水动力学研究与进展, 1995, 10(1): 48-60.
- [9] 陈伟. 直立式防波堤水平波浪力的概率分布[J]. 河海大学学报, 2001, 29(3): 37-41.
- [10] 俞聿修,张振平. 斜向和多向不规则波作用于直立堤上波浪力的统计分布[C]//中国力学学会. 第十七届全国水动力学研讨会暨第六届全国水动力学学术会议文集, 2003: 775-783.
- [11] 骆俊彬. 越浪条件下波浪对直墙建筑物作用的试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [12] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [13] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [14] 贡金鑫,魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.