

# 奥帆基地水工结构物模试验的概率特性研究

刘德辅<sup>1</sup>, 李奉利<sup>1,2</sup>, 荆 昆<sup>3</sup>, 姜云鹏<sup>4</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋防灾研究所, 山东 青岛 266003; 2. 第 29 届奥林匹克运动会组织委员会帆船委员会 (青岛), 山东 青岛 266071; 3. 中交第一航务工程局第二工程公司, 山东 青岛 266071; 4. 交通部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

**摘要:** 为确保第 29 届北京奥运会青岛帆船比赛顺利进行, 针对奥帆基地波浪断面模型试验结果, 引入多维联合概率分析理论, 并应用随机模拟技术, 进行结构浮托力和越浪量计算, 进而给出可靠度及风险分析结果, 新方法考虑到多种极端海洋环境条件对结构物的综合作用, 给模型试验赋予了联合概率特征, 结果更加科学合理。

**关键词:** 模型试验; 随机模拟技术; 浮托力; 越浪量; 联合概率

**中图分类号:** U 656      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3096(2007)06-0020-05

断面物理模型试验对于验证工程断面结构的稳定性及越浪量有着重要的意义。为保证第 29 届北京奥运会青岛帆船比赛基地水工建筑物的安全可靠, 作者与海军工程综合试验研究中心合作于 2004 年进行了波浪断面模型试验。模型试验主要考虑各种海况的组合, 如不同重现期的水位、波高的组合以得到不同的结果。但各种海况的组合是有限的, 不能反映各种环境条件组合的全部真实情况及其相应联合出现的概率特性。针对海区的常、强浪向以及拟建工程海域的位置及地形条件, 按照特定的方向选取波高的年极值与水位的年极值一一对应, 并在此条件下进行试验, 得到不同的浮托力及越浪量。作者考虑到海况的随机性和各种不确定性, 对极端海况及相应的荷载特征进行联合概率分析, 是将确定性试验研究与概率特性相结合的一种新尝试。作者从概率分析的角度出发分别对环境条件序列及其结果进行边缘分布分析及相关分析, 并应用随机模拟技术计算得到不同重现期组合值以及不同组合下的联合概率值, 首次将不确定性分析及联合概率理论引入到模型试验成果分析中, 对模型试验赋予了概率及风险特征。

## 1 断面模型及试验条件

主防波堤断面一的试验在长 50.0 m、宽 1.2 m 的不规则水槽中进行。水槽一端为低惯量直流式不规则造波机, 另一端为消能设施。水槽共分 3 格, 宽度分别为 0.3, 0.6, 0.3 m, 中间一格放置模型, 其他两格用于消能。测试仪器采用 SG2000 型多功能数

据采集及处理系统、波高仪、压力传感器。模型比尺根据试验波浪等动力因素、防波堤断面的几何尺寸、试验仪器精度及现有波浪水槽条件和必须要满足的相似准则, 确定模型试验中长度比尺  $\lambda_L = 36$ , 时间比尺  $\lambda_t = \sqrt{36}$ , 波压强比尺  $\lambda_p = 36$ 。

## 2 环境条件和试验结果的统计分析 & 概率预测

### 2.1 基本思路

任何物理试验都是针对不同的海况组合(如不同重现期的波高、水位组合)进行试验, 从而获得相应的响应(本文以结构浮托力及越浪量为例)。但是几组极端海况的组合及其响应无法表达复杂多变的连续海况特别是极端海况及其诱发响应的联合概率特征。因为 50 a 一遇波高与 50 a 一遇水位组合的试验值究竟代表何种联合重现期的响应值, 是无法证明的。它既不代表 2 500 a 一遇的响应, 也不代表 50 a 一遇的响应。因此, 作者试图将几种离散的海况和响应值, 通过概率分析及统计验证确定各种环境因素及其相应响应的边缘分布, 进而使用作者在国家九五攻关项目中开发的“非高斯过程具有不同相关性的多维联合

收稿日期: 2004-12-06; 修回日期: 2005-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379051)

作者简介: 刘德辅(1937), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋工程研究, 电话: 0532-82032559, E-mail: liu@ouc.edu.cn

概率随机模拟技术”求解海况和响应的联合概率特征,以达到对模型试验赋予概率特性的尝试。

## 2.2 环境条件及资料

第29届北京奥运会青岛帆船比赛基地位于青岛市浮山湾及其附近水域,离小麦岛验潮站不足5 km,距具有长期验潮资料的大港验潮站10 km左右。但由于大港验潮站处于胶州湾内,潮汐性质与胶州湾外的浮山湾略有不同,小麦岛的潮汐资料又不足,因此结合这两站资料进行水位和波高的概率特性分析。

根据潮汐性质判别法则,当潮形系数 $A$ 大于0且小于0.5时,则该地潮汐为正规半日潮。通过分析计算,大港和小麦岛的 $A$ 均为0.39。说明此两地都是正规半日潮,每天两涨两落。通过潮汐差比计算,两地的潮差比为0.9,改正值为5 cm。

## 2.3 拟合优度检验与区间估计

为了获得波高、水位等单一变量的边缘分布,首先必须进行统计检验。对假设的分布函数进行统计检验——拟合优度检验,本文采用 $K-S$ 检验法。

设原假设(基本假设) $H_0$ 和对立假设 $H_1$ 分别为:

$$H_0: F(x) = F_0(x)$$

$$H_1: F(x) \neq F_0(x)$$

构造统计量:

$$D_n = \max_{-\infty < x < \infty} |F_n(x) - F_0(x)|$$

其中 $F_n(x)$ 为经验频率分布, $F_0(x)$ 为待检验的分布形式。

取某一显著水平 $\alpha$ (如 $\alpha = 0.05$ ),对不同的样本容量 $n$ ,根据表可查到相应的 $K-S$ 检验的临界值 $D_n(\alpha)$ ,如果 $D_n < D_n(\alpha)$ ,则接受原假设,否则拒绝原假设。

未知参数 $\alpha$ 和 $u$ 的置信区间通常采用主量法求得:冈贝尔分布参数的极大似然估计量置信区间为 $[z_{\alpha/2}, z_{1-\alpha/2}]$ ,其中 $z_{\alpha/2}$ 和 $z_{1-\alpha/2}$ 分别为正态分布 $N(\hat{\theta}, \sigma)$ 的 $\alpha/2$ 和 $1-\alpha/2$ 分位数<sup>[1]</sup>, $\hat{\theta}$ 为未知参数的点估计, $\sigma$ 为正态分布的均方差。

## 2.4 概率统计分布模式

作者采用年极值法对工程区水位、波高进行边缘分布模式分析。年极值法是对统计资料每年的最大值组成的序列选配一条理论曲线,在一定适线原则下确定线型,并推算各种设计参数。

假设检验年极值序列符合Gumbel分布

则分布函数 $G(x) = 1 - \exp[-\exp(-\alpha(x_p - u))]$  (1)

其中,分布参数分别为 $\alpha = \frac{\sigma_n}{s_n}$ ,  $u = \bar{x} - \frac{\bar{y}_n}{\alpha}$ ,

$x_p$ 为与出现概率 $P$ 对应的重现值( $P = 1/T$ ,  $T$ 为重现期)。根据概率 $P$ ,则可求出 $x_p$ :

$$x_p = u - \frac{1}{\alpha} \ln[-\ln(1-P)] \quad (2)$$

## 2.5 环境条件及试验结果的概率分析结果

水位的概率计算:由于工程区没有长期的资料,所以利用大港验潮站1970~1999年共30 a的水位资料进行计算,然后再用差比计算,换算到工程区。

波高的概率计算:根据小麦岛资料统计,其风浪、涌浪的出现频率分别为37%和63%,表明该区域以涌浪为主。累年涌浪向为东南向,频率41%,出现在夏季。考虑到本海区的浪向及工程海域的位置和地形条件,选定SE、S和SW向为对本工程海域影响的主要浪向。本文以SE向为例,取1982~1999年共18 a的年极值序列进行概率计算。

对水位和波高的年极值序列进行Gumbel分布的边缘分析,由于这两个序列的 $D_n < D_n(0.05)$ 因此假设获得通过,可以计算相应的参数及其置信区间,结果见表1。拟合图见图1、图2。由拟合图可以看到拟合效果比较理想。

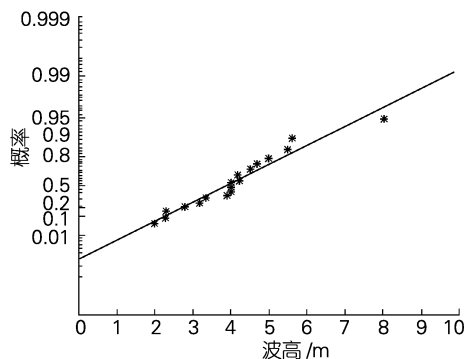


图1 波高的Gumbel拟合图

Fig. 1 Gumbel distribution of wave height

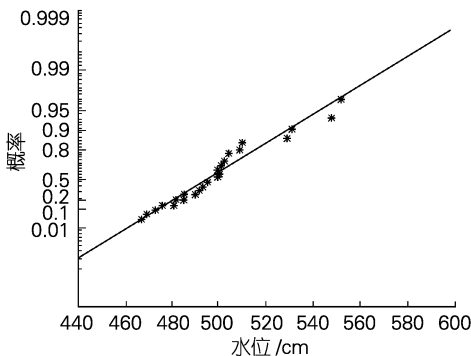


图2 水位的Gumbel拟合图

Fig. 2 Gumbel distribution of water level

由于试验次数太少不足以组成一个可靠的序列进行概率分析,因此作者对试验数据进行多元线性回

归得到浮托力与波高和水位的回归方程式, 由此可以推算浮托力:

$$Y = 3.6614X_1 + 6.687X_2 \tag{3}$$

式中,  $Y$  为浮托力,  $X_1$  为波高,  $X_2$  为水位。

由公式(3)及多年波高和水位年极值序列可得到一个由浮托力组成的序列, 对其进行边缘分析, 经检验亦很好地符合 Gumbel 分布, 计算得到波高、水位及浮托力 3 个序列的参数, 见表 1。拟合图见图 3。

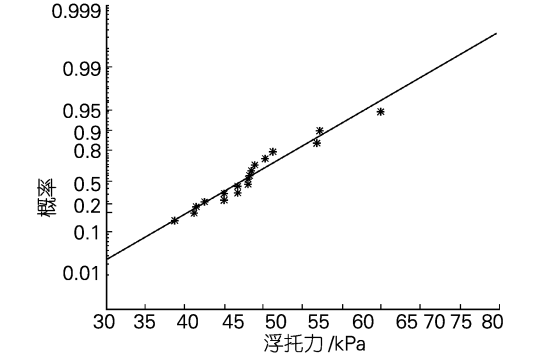


图 3 浮托力的 Gumbel 拟合图

Fig. 3 Gumbel distribution of buoyancy

表 1 序列参数估计

Tab. 1 Parameter estimate

| 序列  | $\alpha$ |              | $u$   |                | $D_n$ |
|-----|----------|--------------|-------|----------------|-------|
|     | 估计值      | 置信区间         | 估计值   | 置信区间           |       |
| 波高  | 0.73     | [0.68, 0.79] | 3.37  | [2.87, 3.76]   | 0.138 |
| 水位  | 0.055    | [0.05, 0.06] | 4.89  | [4.27, 5.27]   | 0.124 |
| 浮托力 | 0.16     | [0.15, 0.18] | 46.04 | [42.32, 48.81] | 0.103 |

注: 置信区间的置信度为 0.05

模型型式的选择存在着不确定性, 假如序列同时服从别的分布, 建议采用优化的方法选取最佳分布型式。

3 多维联合概率法及其应用

3.1 多维联合概率法介绍

多维联合概率的推求实际上是求解下列公式:

$$P_j = \iiint \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \tag{4}$$

这里  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  为联合概率密度函数,  $G(x) < 0$  表示失效域。

随机模拟法就是根据  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的边缘概率特征及相关性, 对  $x_1, x_2, \dots, x_n$  进行随机抽样, 并将抽取的随机样本代入失效边界函数, 判断样本点是否落入失效域, 记录样本点落入区域  $G(x) < 0$  的次数  $k$ , 若总模拟次数为  $N$ , 则上式中  $P$  的估计值为:

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} k/N \tag{5}$$

根据大数定理, 当模拟次数  $N$  趋于无穷大时, 估计值以概率 1 趋于  $P$ 。

蒙特卡洛法<sup>[2,3]</sup>是随机模拟法的一种。但在失效概率较小时蒙特卡洛法的计算量将过大, 耗时多且精度不高。重点抽样法(Important Sampling Procedures)是降低方差, 减少机时的一种较好的方法<sup>[4,5]</sup>。

重点抽样法的基本原理是集中对分布的最重要的区域抽样, 即对失效概率作出主要贡献的部分抽样, 而不是扩展到整个定义域内均匀抽样。

图 4 以二维变量  $X_1, X_2$  为例, 给出了重点抽样法的简单示意图。其中,  $\bar{x}$  为整个定义域内均匀抽样的代表点,  $x^*$  为设计点, 使  $f(x)$  值最大。  $f(x), h(x)$  分别为  $\bar{x}$  和  $x^*$  联合概率密度函数。

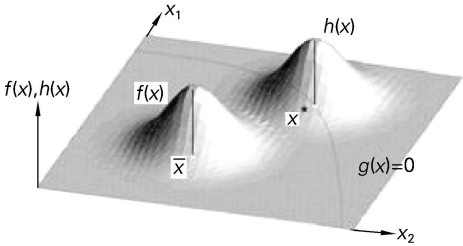


图 4 重点抽样法示意图

Fig. 4 Sketch map of important sampling procedures

3.2 多维联合概率求解浮托力

在使用本方法求解多维联合概率时, 需计算波高、水位和相应浮托力系列的均值、方差(表 2)。3 个序列均符合 Gumbel 分布模式。三者之间的相关系数矩阵如下:

$$P_{ij} = \begin{vmatrix} 1 & & & \\ 0.452 & 4 & 1 & \\ 0.764 & 0 & 0.977 & 1 & 1 \end{vmatrix} \tag{6}$$

表 2 序列的均值和方差

Tab. 2 Mean value and variance

| 波高    |       | 水位    |       | 浮托力   |      |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 均值(m) | 方差    | 均值(m) | 方差    | 均值(m) | 方差   |
| 4.162 | 1.752 | 4.992 | 0.235 | 49.55 | 7.80 |

建立随机模拟状态方程:

$$\left. \begin{aligned} G &= \max(G_1, G_2, G_3) \\ G_1 &= U - X(1) \\ G_2 &= T - X(2) \\ G_3 &= S - X(3) \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

按上述步骤进行随机模拟, 即可获得波高  $X(1)$ 、水位  $X(2)$  和浮托力  $X(3)$  不同组合下的重现值。

由于边缘分布密度和协方差对非高斯随机变量

的联合概率密度并非单一定义,所以相应于某一联合概率,可得到无数多个随机变量的组合。因此,必须通过某些协调多种随机变量的关系,才能由非单一解中求得单一解。在本研究中分别采用以波高、水位为控制条件的三维联合概率的单一解。模拟结果如表 3 所示。

表 3 联合概率模拟结果

Tab. 3 The result of joint probability simulation

| 控制条件 | 波高(m) |       | 水位(m) |       | 浮托力(kPa) |       |
|------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|
|      | 50 a  | 100 a | 50 a  | 100 a | 50 a     | 100 a |
| 波高   | 7.43  | 7.79  | 5.30  | 5.39  | 57.7     | 66.7  |
| 水位   | 7.15  | 7.26  | 5.44  | 5.49  | 56.7     | 62.5  |

表 3 中列出了分别以波高、水位为控制条件的 3 个变量的联合概率值,联合重现期分别为 50 a 和 100 a。对比它们的单变量统计结果(表 4)发现,用随机模拟方法求解的联合概率值比变量单一重现值有明显的减小的趋势。

表 4 单变量统计结果

Tab. 4 Statistics results of single variable

| 波高(m) |      |       | 水位(m) |      |       | 浮托力(kPa) |       |       |
|-------|------|-------|-------|------|-------|----------|-------|-------|
| 10 a  | 50 a | 100 a | 10 a  | 50 a | 100 a | 10 a     | 50 a  | 100 a |
| 6.45  | 8.70 | 9.66  | 5.30  | 5.60 | 5.73  | 59.72    | 69.77 | 74.01 |

3.3 越浪量的计算

确定建筑物的堤顶高程时需进行越浪的计算,通常取单位时间内越过单位堤长的平均水量作为衡量越浪水量的标准,叫做单宽越浪量,以  $q(\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s}))$  表示。 $q$  与波高、水位等因素有关。

进行了在小麦岛极端高水位(5.02 m)和设计高水位(3.96 m)下波高分别为 50 a、25 a 及 10 a 一遇值的越浪试验,对上述试验结果作多元线性回归近似得到越浪量与水位及有效波高的关系:

$$Y=0.0045X_1+0.0282X_2 \tag{8}$$

式中, $Y$  为越浪量,  $X_1$  为水位,  $X_2$  为有效波高。

为了对试验数据进行更准确的延伸和补充,作者采用经验公式<sup>[6]</sup>进行了计算以作对比:

$$q=Q\sqrt{2gH_0^3} \tag{9}$$

$$Q=0.19\exp\left[\frac{-4.2R}{Y_\beta Y_g}\right] \tag{10}$$

其中,  $R$  为相对胸墙高度,  $H_0$  为等效深水有效波高,  $Y_\beta$  为越浪量折减系数,  $Y_g$  为校正系数,与结构形状有关,  $Q$  为无因次越浪量。

在试验条件下用线性回归方法和经验公式(9), (10)计算得到的结果分别与试验结果相比较表明,公式(9), (10)得到的结果与试验结果更接近。详见图 5 和图 6。

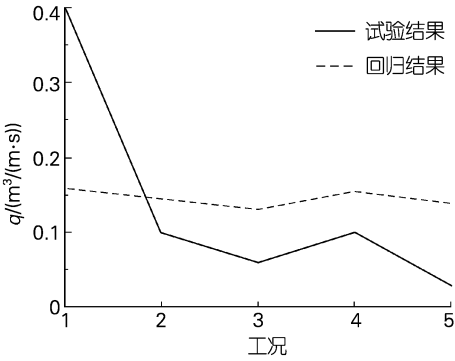


图 5 回归结果与试验结果的比较

Fig. 5 Comparision between regress and test results

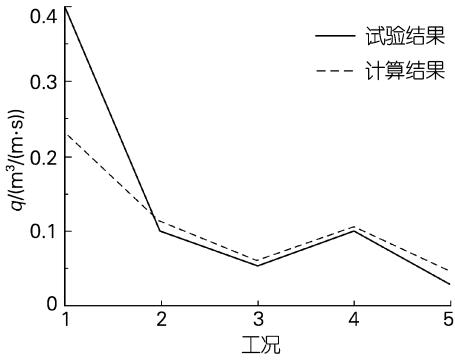


图 6 经验公式计算结果与试验结果的比较

Fig. 6 Comparision between formula and test results

因此,采用经验公式法计算越浪量。把多年水位和对应的有效波高的年极值代入公式(9), (10)得到了越浪量的年极值序列并对其进行了 Weibull 边缘分布检验(表 5)。

表 5 越浪量统计分析结果

Tab. 5 Statistical analysis results of wave overtopping volume

| 越浪量重现值 ( $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ ) |      |       |
|---------------------------------------------------|------|-------|
| 10 a                                              | 50 a | 100 a |
| 0.03                                              | 0.10 | 0.15  |

作者对越浪试验值及试验中的波高和水位值求

解了联合概率值及其重现期, 结果见表 6。

表 6 越浪试验值的联合概率分析结果

Tab. 6 Joint probability of experimental wave overtopping volume

| 试验波高<br>(m) | 试验水深<br>(m) | 越浪值<br>( $m^3/(m \cdot s)$ ) | 联合概率    | 联合概率<br>/ 重现期 |
|-------------|-------------|------------------------------|---------|---------------|
| 8.7         | 5.02        | 0.4                          | 0.005 1 | 186           |
| 7.43        | 5.02        | 0.1                          | 0.009 3 | 107           |
| 6.45        | 5.02        | 0.06                         | 0.013   | 74            |
| 8.7         | 3.96        | 0.1                          | 0.021   | 47            |
| 7.43        | 3.96        | 0.03                         | 0.054   | 19            |

试验中越浪量从 0.03 到 0.4, 它们出现的联合重现期分别从 19 a 到 186 a 不等, 由上述结果可知, 在对于越浪量的计算上, 对越浪量序列进行单变量分析和联合概率的分析会得到不同的结果。虽然无法通过现实的检验说明哪种结果更可靠, 但是很显然, 对试验结果及其环境条件进行随机模拟及联合概率的分析更具有说服力。

4 结论

作者使用随机模拟技术, 求解多维联合概率分布, 改进了传统设计中波浪浮托力及越浪量的计算。以试验结果为依据, 结合环境条件的概率结果, 推算了各环境条件及其导致的结果(浮托力、越浪量)

同时出现的概率及其对应的重现值, 结果表明新方法比单因素分析法更合理, 更能真实地反映海况, 虽然由于资料年限短和试验次数不足的困难会导致分析结果的偏差, 但通过本文对模型试验赋予概率特性的尝试, 对今后各种环境条件联合作用问题的求解提供了新思路。

参考文献:

[1] 盛骤. 概率论与数理统计(2 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989. 8.

[2] Fang G, Hiye T I. On the vertical structure of tidal current in a homogeneous sea [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1983, 73: 65-82.

[3] 张建中. 蒙特卡洛法(I) [J]. 数学的实践与认识, 1974, 1: 12-23.

[4] 张建中. 蒙特卡洛法(II) [J]. 数学的实践与认识, 1974, 2: 22-31.

[5] Liu D F, Song Y. Combined environmental loads design criteria for marine structures [A]. Society of Petroleum Engineering. Proceedings of Offshore Technology Conference [C]. Houston, USA: Society of Petroleum Engineering, 2002. 1749-1755.

[6] 谢世楞. 三维不规则波作用下海堤和防波堤的越浪量计算 [J]. 港工技术, 1995, 4: 1-4.

Probability characteristic study of physical model test of the Olympiad Sailing Games

LIU De-fu<sup>1</sup>, LI Feng li<sup>1, 2</sup>, JING Kun<sup>3</sup>, JIANG Yuir peng<sup>4</sup>  
(1. Disaster Prevention Research Institute, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Sailing Committee (Qingdao) of the Beijing Organizing Committee for the Games of the XXIX Olympiad, Qingdao 266071, China; 3. No. 2 Engineering Company of CCCG Tianjin Port Construction Corporation, Qingdao 266071, China; 4. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Received: Dec. , 6, 2004  
Key words: model test; stochastic simulation technique; buoyancy; wave overtopping volume; joint probability

**Abstract:** According to hydraulic structure model test results of the XXIX Olympiad sailing games, considering the probability characteristic of physical modeling and joint probability of different extreme sea combinations, the stochastic simulation technique is applied to the analysis of sea environmental conditions and their corresponding output. Different return levels of sea environmental combinations are calculated to realize the joint probability characteristic of the model test results.

( 本文编辑: 刘珊珊)