

围海工程堵口水力计算中设计潮型的风险分析方法*

杨 星¹, 李朝方², 吴苏舒¹, 李志清¹, 刘志龙²

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017;

2. 深圳市水务规划设计院, 广东 深圳 518001)

摘 要: 围海工程堵口施工所遇到的水力条件复杂, 是围海工程面临的主要技术问题。为了保证堵口合龙的成功, 必须掌握堵口过程中龙口水力要素的变化规律。但是堵口工程水力计算存在设计潮型计算方法单一、设计潮型标准不统一的问题, 为此, 本文提出堵口期设计潮型的风险分析方法, 并以深圳市赤湾站为例, 计算分析了赤湾站不同重现期下的堵口期设计潮型。研究表明: ① 赤湾站现行典型潮型同倍比放大方法计算的堵口期设计潮型存在风险设计不足的问题; ② 赤湾站不同重现期下堵口期设计潮位一般差异不大, 可统一取 20 年一遇的设计标准; ③ 风险分析方法具有科学合理性, 对围海工程堵口期设计潮型的确定具有指导意义。

关键词: 围海工程; 堵口; 水力计算; 设计潮型; 风险分析

中图分类号: P333.2 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2012) 06-0121-05

Method of Design Tidal Type in the Process of Cofferdam Blocking-off Based on Risk Analysis

YANG Xing¹, LI Chaofang², WU Sushu¹, LI Zhiqing¹, LIU Zhilong²

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;

2. Shenzhen Water Resources Planning & Design Institute, Shenzhen 518001, China)

Abstract: Severe hydraulic conditions which are the key technique problems in reclamation engineering often occur in the process of cofferdam blocking-off. In order to ensure successful implementation of blocking-off, it is necessary to know the hydraulic characteristics. The current methods of design tidal type have many problems which are single and lack of uniform standard. So, a method based on risk analysis was proposed. As an example in Chiwan sea area, the design tidal type with different recurrence periods for the blocking-off period were performed. The main achievements are summarized as follows: ① The results show that there is risk problem for the current method of amplifying the measured tidal level process curve by the same multiple to the design tidal level in Chiwan sea area; ② Differences in the design tidal type with different recurrence periods for the blocking-off period are small in Chiwan sea area, so, the uniform design standards (5% frequency) can be conformed; ③ The new method is reasonable and will provide reference for the computation of design tidal type in the process of cofferdam blocking-off.

Key words: reclamation engineering; cofferdam blocking-off; hydraulic calculation; design tidal type; risk analysis

堵口是海堤修筑的最后阶段, 此阶段所遇到的水力条件十分恶劣, 水流流态复杂, 是堵口施工所

面临的主要技术问题, 也是整个围海工程中最复杂和最困难的问题^[1~3]。一般在工程上, 为了降低风

* 收稿日期: 2012-04-24

基金项目: 水利部公益性基金资助项目 (201001070); 深圳市水务发展中长期战略研究基金资助项目 (SZCG2010021725)

作者简介: 杨星 (1978 年生), 男, 博士; E-mail: ydaxue@163.com

险, 主要选择潮位低、潮差小、风浪小的非汛期时段组织施工, 施工前还要对龙口水力条件进行详细计算, 其中设计潮型是主要计算参数。按照我国的《围海工程技术规范》、《滩涂治理和海堤工程技术规范》等, 堵口水力计算设计潮型选择非汛期一定重现期下的设计值, 但未对潮型设计方法进行明确规定。

典型潮位过程同倍比放大方法是目前主要的潮型设计方法, 通过选取非汛期实测典型潮位过程(潮位高、潮差大), 按照不同重现期下的设计高潮位与实测高潮位的比值, 同倍比放大典型潮位过程, 作为不同重现期对应下的堵口期设计潮型。但高潮位主要控制潮位过程中设计高潮位的大小, 对潮差的控制还需要低潮位的作用。典型潮位过程同倍比放大方法仅用设计高潮位控制潮位过程, 所以存在一定的随意性^[4], 且缺乏足够的论证, 其计算成果可能对选择合适的龙口口门尺度、合理安排堵口程序造成影响, 从而导致堵口施工设计风险的增加。

综上, 本文针对典型潮位过程同倍比放大方法的不足, 提出围海工程堵口水力计算设计潮型的风险分析方法, 按该方法计算了不同重现期下的深圳市赤湾站堵口期设计潮型, 并建议将风险分析方法作为堵口期设计潮型的一种新的计算方法。

1 堵口期典型潮型的选择

堵口期典型潮型应选择非汛期潮位高、潮差大的实测潮型。以深圳市为例, 每年的 5-10 月, 是深圳台风登陆的高峰期, 常造成大范围的洪涝和大风灾害, 所以堵口期主要集中在当年的 1-4 月和 11-12 月。统计深圳市赤湾站 1964-2002 年实测潮位资料(珠江基面系统, 下同), 按照与堵口期设计高潮位接近的原则, 选取赤湾站 1996 年 11 月 13 日 17:00-11 月 14 日 13:20 作为典型潮型(图 1 上的 Y1-Y3 区间): 其中高高潮 $X=1.58$ m, 为非汛期历年最大; 低高潮 $Y3=0.67$ m; 低潮 $Y1=-0.25$ m, $Y2=-1.02$ m。

2 堵口期设计潮型的风险定义及计算模型

潮差、历时、潮位是堵口期设计潮型主要考虑的 3 个特性。不同大、中、小潮涨落潮历时一般差距不大, 所以历时可以按典型潮型选取。设计高潮位则是按工程设计标准确定, 难点在于确定其他特征潮位。分析设计潮位过程中的高低潮位遭遇规

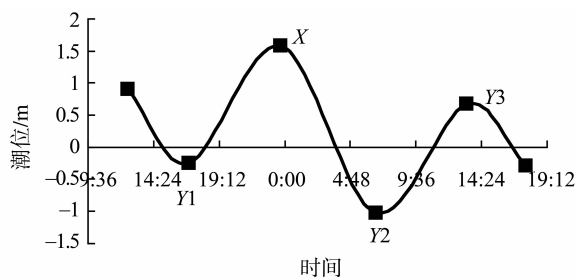


图 1 非汛期实测典型潮型
(19961113 T17:00-1114 T13:20)

Fig. 1 The measured typical tidal type of non-flood season

律, 成为解决问题的关键。这方面可以借鉴已有的一些研究成果^[5-6], 其中刘曾美等^[5]用 Copula 函数构建了广东漠阳江年最大洪水流量和相应潮位的联合分布函数以及年最高潮位和相应洪水流量的联合分布函数, 再基于联合分布函数提出洪潮遭遇组合的风险分析模型, 对于本文堵口期设计潮型风险分析方法的建立具有十分重要的指导意义。

设 X 为堵口期设计高潮位, 重现期为 T , 则工程可能遭遇的超越设计高潮位的概率为 $1/T$ 。一般情况下, 当实际发生的潮位不大于设计高潮位时, 可保障防潮系统的安全运行, 所以可以把超越设计高潮位的概率 ($1/T$) 称为设计高潮位风险率。

对设计潮型而言, 还需要定义潮型风险率。参照图 1, 设 X 、 $Y1$ 、 $Y2$ 、 $Y3$ 分别为半日潮的设计高高潮位、2 个设计低潮位以及设计低高潮位, 定义 2 种潮型风险率:

1) 第 I 型潮型风险率考虑潮位降低, 潮差增大带来的设计风险。对于任意设计高高潮位和设计低潮位数值 $(x, y1)$ 或 $(x, y2)$, 第 I 型风险率可定义为满足设计高高潮位 X 条件下, 潮型结构中的低潮位 $Y1$ 或 $Y2$ 低于设计值 y 发生的条件概率

$$P_{iL}(x, y) = P(Y < y | X \leq x) = \frac{P(X \leq x, Y < y)}{P(X \leq x)} = \frac{F(x, y)}{F(x)} \quad (1)$$

2) 第 II 型潮型风险率考虑潮位升高, 潮差或潮位增大带来的设计风险。对于任意设计高高潮位和设计低高潮位数值 $(x, y3)$, 第 II 型风险率可定义为满足设计高高潮位 X 条件下, 潮型结构中的高潮位 $Y3$ 大于设计值 y 发生的条件概率

$$P_{iiH}(x, y) = P(Y > y | X \leq x) = \frac{P(X \leq x, Y > y)}{P(X \leq x)} = \frac{F(x) - F(x, y)}{F(x)} \quad (2)$$

其中, $F(x, y)$ 为 (X, Y) 的联合分布数, 其在公式 (1) 和公式 (2) 中的组合变量不同, 计算形式一

样, 都可通过 Copula 连接函数求解^[7~11]; $F(x)$ 为 X 的分布函数, 当按极值设计时, 常采用第 I 型极值分布律或皮尔逊 III 型曲线求解; $P_{rL}(x,y)$ 和 $P_{rH}(x,y)$ 分别代表第 I 型和第 II 型潮型风险率。

若设计潮型同时满足设计高潮位风险率和设计潮型风险率, 则从理论上讲, 该设计潮型是科学合理的。具体潮型中的特征潮位组合可按“设计高潮位风险率 = 设计潮型风险率”确定, 如下式

$$\begin{cases} P_{rL}(x,y1) = 1/T \\ P_{rL}(x,y2) = 1/T \\ P_{rH}(x,y3) = 1/T \end{cases} \quad (3)$$

3 堵口期设计潮型的风险计算及潮型设计

按公式 (1) - (3) 展开风险分析, 确定不同重现期下堵口期设计潮型, 并以深圳市赤湾站为例展开应用分析。

3.1 堵口期设计高潮位分布函数的计算

堵口期设计高潮位分布函数 $F(x)$ 根据历年非汛期最大实测高潮位数据, 采用频率分析获得。以深圳市为例, 逐年统计 1 - 4 月和 11 - 12 月年最大潮位, 采用皮尔逊 III 型计算获得堵口期设计高潮位分布函数, 如表 1 所示。

表 1 赤湾站非汛期设计高潮位

Table 1 The design high tide level in Chiwan sea area (non flood season)

重现期 T/a	设计潮位 风险/%	分布函数 $F(x)/\%$	非汛期时段 /潮位	全年时段/ 潮位
200	0.5	99.5	1.67	2.44
100	1	99	1.63	2.31
50	2	98	1.60	2.18
20	5	95	1.54	2.00
10	10	90	1.49	1.86
5	20	80	1.44	1.71
2	50	50	1.35	1.48

3.2 堵口期潮位联合分布函数的计算

参考图 1, 按照低 ($Y1$) - 高 (高高潮, X) - 低 ($Y2$) - 高 (低高潮, $Y3$) 的潮型构造顺序, 采用 Gumbel-Hougaard Copula 连接函数, 分别计算 $F(x,y1)$ 、 $F(x,y2)$ 和 $F(x,y3)$, 其公式如下

$$F(x,y) = \exp\{-[(-\ln F(x))^\theta + (-\ln F(y))^\theta]^{1/\theta}\} \quad (4)$$

式中, 参数 θ 越大, 相关性越强。以深圳市为例:

1) 计算 $F(y1)$ 、 $F(y2)$ 和 $F(y3)$

统计非汛期实测最大潮位过程的低潮 ($Y1$)、低潮 ($Y2$) 以及低高潮 ($Y3$), 分别对 $Y1$ 、 $Y2$ 以及 $Y3$ 采用皮尔逊 III 型曲线计算 $F(y1)$ 、 $F(y2)$ 和 $F(y3)$, 计算结果如表 2 所示。需要说明的是, 由于低潮位全为负数, 计算方法是在原系列上各加一个常数 2 m, 使整个系列为正序列, 然后进行频率计算。最后正序列分析的不同重现数据减去 2 m, 从而获得原序列不同分布函数下对应的设计低潮位。

表 2 非汛期分布函数 $F(y1)$ 、 $F(y2)$ 、 $F(y3)$

Table 2 The distribution function (non flood season) $F(y1)$ 、 $F(y2)$ 、 $F(y3)$

$F(y1)/\%$ 、 $F(y2)/\%$ 、 $F(y3)/\%$	$Y1/m$	$Y2/m$	$Y3/m$
99.9	0.10	-0.32	0.92
99.8	0.06	-0.42	0.87
99.5	0.00	-0.55	0.80
99	-0.04	-0.66	0.74
98	-0.09	-0.77	0.67
95	-0.16	-0.92	0.58
90	-0.23	-1.05	0.50
80	-0.30	-1.19	0.41
50	-0.44	-1.42	0.23
25	-0.55	-1.58	0.10
10	-0.65	-1.69	-0.01
5	-0.70	-1.75	-0.08
1	-0.80	-1.84	-0.20
0.5	-0.84	-1.87	-0.24

2) 计算 $F(x,y1)$ 、 $F(x,y2)$ 和 $F(x,y3)$

以 $F(x,y3)$ 计算为例, 共 39 组实测非汛期最大高潮位 X 和其对应的低高潮位 $Y3$, 绘制散点得到图 2。

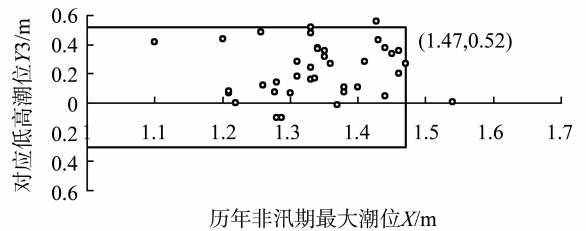


图 2 历年非汛期最大高潮位和
低高潮位散点图 (X , $Y3$)

Fig. 2 The Scatter of non flood season (X , $Y3$)

改变 Copula 函数参数 θ , 使得其计算所得到的理论联合分布函数与经验分布函数具有一致性。根据文献 [12], 推求数据组 $(x,y3)$ 经验分布函

数的方法如下：首先构造一个 $x \times y_3$ 的二维表， x 和 y_3 的观测值分别按升序排列，表中第 i 行和第 i 列所对应的元素 (x_i, y_{3i}) 联合分布函数参考图 2，图中 $F(1.47, 0.52) =$ 图上线框包围的点数/总的点数。理论分布函数的计算点也选取排序后的数据组，计算结果显示：当 $\theta = 1.7$ 时，计算点经验联合分布值与理论联合分布值数据对称的落在 45° 对角线附近（图 3），满足工程应用精度要求。按同样方法： $F(x, y_1)$ 时， $\theta = 1.6$ ； $F(x, y_2)$ 时， $\theta = 1.4$ 。

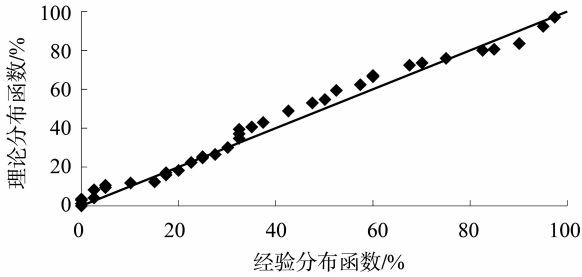


图 3 经验联合分布函数与理论联合分布函数 ($\theta = 1.7$)

Fig. 3 The empirical joint distribution function and theoretical joint distribution function ($\theta = 1.7$)

3.3 按风险方法计算堵口期设计潮型

以赤湾站堵口期 20 年一遇设计潮型为例（设计高潮位 1.54 m，设计高潮位风险率 $1/T = 5\%$ ）， $F(1.54)$ 查表 1 为 0.95：

1) 计算 y_1 和 y_2 。①当 $y_1 = -0.706$ m 时， $F(-0.706)$ 根据表 2 数据插值计算为 0.047 62；②带入公式 (4)， $F(1.54, -0.706) = \exp\{- [(-\ln 0.95)^{1.6} + (-\ln 0.047 6)^{1.6}]^{1/1.6}\} = 0.047 5$ ；③将 $F(1.54)$ 、 $F(1.54, -0.706)$ 带入公式 (1) 计算第 I 型潮型风险率， $P_{rL}(1.54, -0.706) = 5\%$ ，等于 5% 的设计高潮位风险率；④ y_2 计算过程同 y_1 ，当 $y_2 = -1.754$ m 时， $P_{rL}(1.54, -1.754) = 5\%$ ，等于 5% 的设计高潮位风险率。

2) 计算 y_3 。① 当 $y_3 = 0.533$ m 时， $F(0.533)$ 查表 2 为 0.9207；② 带入公式 (4)， $F(1.54, 0.533) = \exp\{- [(-\ln 0.95)^{1.7} + (-\ln 0.920 7)^{1.7}]^{1/1.7}\} = 0.9025$ ；③ 将 $F(1.54)$ 、 $F(1.54, 0.533)$ 带入公式 (2) 计算第 II 型潮型风险率， $P_{rH}(1.54, 0.533) = 5\%$ ，等于 5% 的设计高潮位风险率。

由此，分别按风险方法和典型潮位过程同倍比放大方法计算赤湾站堵口期 20 年、50 年、100 年、200 年一遇的设计潮型，其中典型潮位过程同倍比放大方法的放大系数为

$$K = \frac{X_{\text{设计}}}{X_{\text{典型}}} \quad (5)$$

计算成果如表 3 和图 4（仅绘制 20 年一遇）所示：①同倍比放大法潮差小于风险分析方法，按照本文的风险分析方法对其进行判断，存在风险设计不足的问题；②不同重现期下的赤湾站堵口期设计潮型，其特征表现为随着设计标准的提高，设计高潮位增大，设计低潮位减小，潮差增大，但总体差异小，取非汛期 20 年一遇（5% 频率）的潮型，在赤湾海域是合适的，也可考虑同海堤工程设计标准；③非汛期赤湾站设计高潮位较全年时段设计高潮位小，其 20 年、50 年、100 年、200 年一遇的设计高潮位分别为 1.54、1.60、1.63 和 1.67 m，仅相当于全年时段 2.8 年、3.6 年、4.0 年、4.5 年一遇的标准。

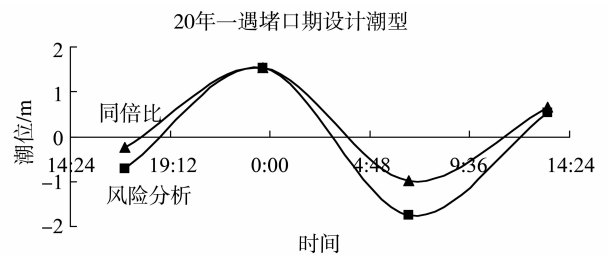


图 4 20 年一遇堵口期设计潮型

Fig. 4 The design tidal type of cofferdam blocking-off period with a recurrence period of 20 years

表 3 堵口期设计潮型

Table 3 The design tidal type of cofferdam blocking-off period

时刻	20 年一遇		50 年一遇		100 年一遇		200 年一遇	
	风险法	放大法	风险法	放大法	风险法	放大法	风险法	放大法
19961113 T17:00	-0.71	-0.24	-0.78	-0.25	-0.80	-0.26	-0.84	-0.26
19961113 T23:40	1.54	1.54	1.60	1.60	1.63	1.63	1.67	1.67
19961114 T6:40	-1.75	-0.99	-1.82	-1.03	-1.84	-1.05	-1.87	-1.08
19961114 T13:20	0.53	0.65	0.64	0.68	0.70	0.69	0.76	0.71

4 结 论

围海工程中,对堵口合龙水力条件的充分论证是保障堵口成功的关键。考虑到设计潮型在水力计算中的重要地位,同时考虑到目前设计潮型方法的单一性,本文提出了堵口期设计潮型的一种风险分析方法,主要结论如下:

1) 与典型潮位过程同倍比放大方法相比,本文提出的风险分析方法,在理论推导上清晰合理,同时也论证了典型潮位过程同倍比放大方法存在风险设计不足的问题,建议将风险分析方法作为堵口设计潮型的一种新的计算方法。

2) 按照风险分析方法对深圳赤湾站 1964 - 2002 年实测潮位资料进行了分析,结果显示不同重现期下赤湾站堵口期设计潮型差异小,因此堵口期设计潮型可统一取 20 年一遇标准或者同工程设计标准。若按照风险分析方法分析得到的不同重现期设计潮型差异较大,建议同海堤工程设计标准。

3) 深圳赤湾站非汛期设计高潮位较全年时段小,其 20 年、50 年、100 年、200 年一遇的设计高潮位分别为 1.54、1.60、1.63 和 1.67 m,仅相当于全年时段的 2.8 年、3.6 年、4.0 年、4.5 年一遇的标准,当邻近地区海域缺乏堵口期设计潮型分析资料时,即可参照赤湾站堵口期设计潮型,也可取较低标准的全年时段设计潮型作为堵口期设计潮型。

4) 围海堵口工程是一项复杂困难的工程,与围海规模、围区地形及现场水动力条件密切相关,堵口水力计算中还有一系列的问题需深入的研究。

参考文献:

- [1] 王振奥. 围海堵口工程水力条件研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- [2] 孙传余. 围海工程堵口的水力计算与研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.
- [3] 刘维东. 一、二维围海堵口水力计算的应用研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [4] 李国芳,陈阿平,华家鹏. 设计潮位计算中若干问题探讨[J]. 水电能源科学,2006,24(3):35-38.
- [5] 刘曾美,陈子燊,李粤安. 感潮河段洪潮遭遇组合风险研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2010,49(2):113-118.
- [6] 康玲,何小聪. 南水北调中线降水丰枯遭遇风险分析[J]. 水科学进展,2011,22(1):44-50.
- [7] 谢华,罗强,黄介生. 基于三维 copula 函数的不同水文区丰枯遭遇分析[J]. 水科学进展,2012,23(2):186-193.
- [8] FAVRE A C, ADLOUNI S EL, PERREAULT L, et al. Multivariate hydrological frequency analysis using copulas[J]. Water Resources Research,2004,40(11):1-12.
- [9] SALVATORE G, FRANCESCO S. Asymmetric copula in multivariate flood frequency analysis[J]. Advances in Water Resources,2006,29:1155-1167.
- [10] KAO S G, GOVINDARAJU R S. A copula-based joint deficit index for droughts[J]. Journal of Hydrology, 2010,380:121-134.
- [11] WONG G, LAMBERT M F, LEONARD M, et al. Drought analysis using trivariate copulas conditional on climatic states[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010,15(2):129-141.
- [12] 熊立华,郭生练,肖义. Copula 联结函数在多变量水文频率分析中的应用[J]. 武汉大学学报:工学版, 2005, 38(6): 16-19.