

黄浦江上海市区段防汛墙漫溢风险分析

赵庚润,李羽文,崔冬,杜小弢

(上海市水利工程设计研究院有限公司,上海 200061)

摘要:为明确黄浦江上海市区段防汛墙防御能力,采用 2012 年防汛墙高程监测数据以及黄浦江防汛墙设计参数,利用蒙特卡罗法计算不同潮位下防汛墙漫溢概率以及远期海平面上升情况下的漫溢概率,提出防汛墙漫溢风险评价准则,并统计相应的漫溢风险。结果表明:现状防汛墙防御能力明显不足,如果再考虑到近年来黄浦江水位趋势性抬高及未来海平面上升,黄浦江防汛形势不容乐观;漫溢高风险区主要集中在市区段上游;黄浦江防汛墙漫溢风险不仅与防汛墙高程欠缺有关,也与不同岸段采用的设计潮位有关。

关键词:防汛墙;漫溢风险;蒙特卡罗法;风险分析;黄浦江;上海市

中图分类号:TV877 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)03-0057-05

Overtopping risk analysis of downtown section of flood wall in Shanghai along Huangpu River//ZHAO Gengrun, LI Yuwen, CUI Dong, DU Xiaotao(*ShangHai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200061, China*)

Abstract: In order to determine the defensive capability of the downtown section of flood wall in Shanghai along the Huangpu River, using monitoring data of flood wall elevation from 2012 and design parameters of the flood wall along the Huangpu River, the Monte Carlo method was applied to calculate the overtopping probability of the flood wall with different tide levels under the current conditions and future conditions of sea level rise, propose evaluation criteria for overtopping risk analysis of the flood wall, and quantify the corresponding overtopping risk. The results show that the current defensive capability of the flood wall is clearly insufficient and Huangpu River flood prevention is inadequate considering the rising water level of the Huangpu River in recent years and the continuing sea level rise that will occur in the future. The high-risk area of overtopping is concentrated upstream of the downtown section of the flood wall. The overtopping risk of the flood wall is related not only to the lack of elevation but also to different designed tide levels adopted in different sections.

Key words: flood wall; overtopping risk; Monte Carlo method; risk analysis; Huangpu River; Shanghai

风险分析理论在 20 世纪 30 年代由军工生产发展而来,20 世纪 50 年代引入到水利工程中,至今在防波堤、海岸工程、工程结构抗震标准、岩土工程、土石坝、水利经济、水环境评价、水资源管理、防洪调度等方面得到了应用^[1]。Tung 等^[2]分静态和时变情况,考虑了水文、水力的不确定性,建立了漫堤风险模型。Duckstein 等^[3]利用蒙特卡罗法计算了交汇河段处防洪堤的漫溢风险。Lee 等^[4]提出了基于防洪堤的荷载和抗力条件概率分布的防洪堤性能动态模型。Davis^[5]基于风险和不确定性的概念提出了一种改进的量化堤防工程中流量、水位和损失的不确定性方法。Wolff^[6]将防洪堤不同失效模式的失效功能函数表示为洪水位的函数。van der Meer 等^[7]在前人研究的基础上综合考虑水力边界条件、堤顶高程的不确定性、堤防的维修成本、洪水造成的损失及其发生概率等因素对堤防工程进行了风险分析。Vrijling^[8]对荷兰防洪系统的概率设计方法进行总结,研究防洪系统的概率设计方法,并通过引入成本效益描述防洪系统的容许风险水平和决策问题。在国内,朱元铎^[9]采用频率组合法对长江防汛墙南京段设计洪水位的风险进行了分析。赵永军等^[10]计算了河道堤坝由于水流参数出现偏差而失事的概率。王卓甫等^[11]提出了防洪堤的边坡失稳和渗透变形风险计算模型。王光远等^[12]建立了“安全-中介-失效”三级工作模式,并建立了依赖于常规“安全-失效”两级模式的计算方法。李青云^[13]以长江中下游堤防工程为背景,系统分析堤防工程安全评价方法,提出了堤防工程安全评价的方法和模型。

朱勇华等^[14]将防洪堤的漫顶破坏风险、渗透破坏风险和滑动失效破坏风险综合起来,研究了防洪堤综合防洪风险率。吴兴征等^[15-16]基于可靠性理论,提出了防洪堤的概率设计方法;对国内外土石坝工程可靠性设计与结构风险评估的研究现状和发展趋势作了评述,探讨了堤坝不同失稳模式的可靠度计算模型和计算方法。卢永金^[1]分析研究了围海工程设计中各种水力风险,并计算了堤身滑动失效风险。邢万波等^[17-18]将堤防水文失事风险分为洪水漫溢风险和洪水漫顶风险,建立了两种风险概率计算模型以及适合于单元堤段分项失事模式的条件失事概率的计算方法。

总体来说,国内外很多学者在堤防工程风险分析领域进行了一些积极的探索,但是仍有许多亟需解决的难点问题。国内的相关研究工作主要集中在洪水水文水力风险分析上,对防洪系统的结构风险研究则相对较少。在黄浦江防汛墙风险研究方面,目前国内相关工作多集中在传统方法上,如设防高程、稳定性研究^[19]等,以及风险因子识别与风险管理方面^[20],尚未见对防汛墙具体各段漫溢风险的研究。

风险分析中常用的失效概率计算方法有重现期法、直接积分法、随机抽样法、一次二阶矩法及其扩展方法、点估计法、响应面法、优化方法、随机有限元法等。蒙特卡罗法又称统计试验法或随机抽样技巧法,作为随机抽样法一种,通过随机变量的数字模拟和统计分析来求取物理、工程技术问题近似解,目前广泛应用于各领域的概率和风险计算,是预测和估算失效概率常用的方法之一^[17]。笔者结合最新的黄浦江防汛墙高程实测资料,分别采用 1984 年、2004 年及预测的远期潮位成果,利用蒙特卡罗法对现状和远期黄浦江上海市区段防汛墙漫溢风险进行了计算,并划分了不同的风险区间范围,对各岸段漫溢风险进行了统计分析。

1 黄浦江上海市区段防汛墙概况

黄浦江上接太湖,下通长江,是太湖流域主要水系——黄浦江水系的主干,是流域重要的排水通道,具有流域行洪、区域排涝(水)、供水、航运、旅游等综合功能。黄浦江上海市区段范围自下游吴淞口至松江区东侧行政边界,市区段河道总长约 71 km。

黄浦江防汛墙是指黄浦江河道以及支流各河口至第一座水闸或者已确定的支流河口延伸段之间的两岸堤防。上海市区段防汛墙始建于 1956 年,左岸自吴淞口至西荷泾,右岸自吴淞口至千步泾^[1],总长约 283.07 km,1988 年后按千年一遇(1984 年批准的水位)标准设防,其设计高水位和墙顶高程见表 1。

表 1 防汛墙原设计高水位和设计墙顶高程 m

堤段		设计 高水位	墙顶 超高	设计墙 顶高程
浦西	浦东			
吴淞口—钱家浜	吴淞口—草镇渡口	6.27	1.0(0.5)	7.3(6.8)
钱家浜—虬江	草镇渡口—高桥化工厂	6.20	1.0(0.5)	7.2(6.7)
虬江—定海桥	高桥化工厂—庆宁寺	6.10	1.0	7.1
定海桥—外白渡桥	庆宁寺—浦东公园	6.0	1.0(0.5)	7(6.5)
外白渡桥—复兴东路	浦东公园—杨家渡路	5.86	1.0	6.9
复兴东路—日晖港	杨家渡路—上钢三厂	5.70	1.0(0.5)	6.7(6.2)
日晖港—龙华港	上钢三厂—严家浜	5.50	1.0	6.5
龙华港—张家塘	严家浜—川杨河	5.40	1.0	6.4
张家塘—淀浦河	川杨河—三林塘	5.30	0.9	6.2
淀浦河—春申塘	三林塘—临江水厂	5.20	0.8	6
春申塘—六磊塘	临江水厂—周浦塘	5.10	0.7	5.8
六磊塘—俞塘	周浦塘—沈庄塘	4.90	0.7	5.6
俞塘—闸港	沈庄塘—金汇港	4.78	0.7	5.5
闸港—樱桃河	金汇港—白庙港	4.67	0.7(0.2)	5.4(4.9)
樱桃河—沪闵路	白庙港—南横泾	4.62	0.7	5.4
沪闵路—北沙港	南横泾—南沙港	4.56	0.7	5.3
北沙港—西荷泾	南沙港—千步泾	4.50	0.7	5.2

注:高程基面为吴淞基面,括号内为码头岸段数据;下同。

由于建设周期较长,自建成以来黄浦江上海市区段防汛墙已出现不同程度的沉降,2012 年防汛墙高程监测结果如图 1 所示,黄浦江上海市区段防汛墙达到设计高程的岸线长度仅占总长的 24%。防汛墙高程欠缺比较严重的区段位于下游的杨浦区、虹口区、黄浦区和上游的奉贤区,平均欠缺高度分别为 0.25 m、0.26 m、0.3 m 和 0.23 m^[21]。同时由于全球气候变化、海平面上升、地面沉降和风暴潮加剧等自然环境因素的变化,以及人类活动影响,黄浦江水水位出现了趋势性抬高,现行千年一遇设防水位(1984 年的潮位分析成果)已不足 200 年一遇的标准^[22]。基于上述因素考虑,准确计算黄浦江上海市区段防汛墙漫溢风险,明确其防御能力是非常必要的。

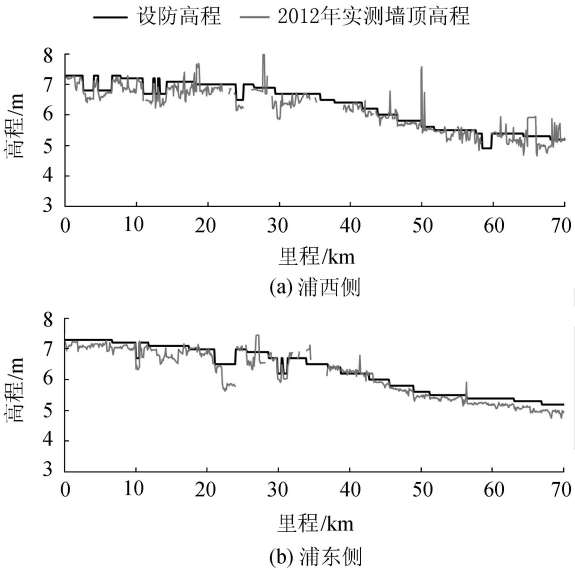


图 1 黄浦江市区段防汛墙现状墙顶高程与原设计设防高程比较

2 计算模型

根据相关规范,黄浦江防汛墙高程可按下式确定:

Z = Z_p + h_s + Δ = Z_p + ΔH (1)

式中:Z 为防洪墙顶标高;Z_p 为设计洪(潮)水位;h_s 为波浪爬高;Δ 为安全加高;ΔH 为墙顶超高,即设计洪(潮)水位以上超高。

防汛墙漫溢风险计算的功能函数为

g(x) = Z - Z_p - h_s - Δ = Z - Z_p - ΔH (2)

利用任意随机数 u_n、u_{n+1},采用坐标变换法得到标准正态分布 N(0,1) 的两个随机数 x_n^* 和 x_{n+1}^*:

{ x_n^* = (-2lnu_n)^{1/2}cos(2πu_{n+1}) x_{n+1}^* = (-2lnu_n)^{1/2}sin(2πu_{n+1}) (3)

再利用下式变成一般正态分布 N(μ,σ^2) 的随机数:

{ x_n = x_n^* σ + μ x_{n+1} = x_{n+1}^* σ + μ (4)

式中 μ,σ^2 分别为正态分布函数 N(x) 的均值和方差。当变差系数 C_s 较小时(一般认为 C_s<2)时,可用下式模拟标准化 P-Ⅲ分布:

φ_i = 2/C_s (1 + C_s t_n^*/6 - C_s^2/36)^3 - 2/C_s (5)

式中:φ_i 为标准化 P-Ⅲ型变量;t_n^* 为标准化正态随机数。根据下式可得满足 P-Ⅲ型随机变量 x_i 的样本值:

x_i = E(X)(1 + C_v φ_i) (6)

式中 E(X)、C_v 分别为 P-Ⅲ曲线的均值和变差系数。利用得到的随机数用蒙特卡罗法计算失效概率时,取样数 N 与计算成果的精度有关。一般工程上采

用 95% 的置信度能够满足精度要求,允许误差为 ε = [2(1 - P_f)/(NP_f)]^{1/2} (7) 式中 P_f 为预先估计的失效概率。经过试算,模拟 10^6 组系列与模拟 10^7 组系列得出的概率值误差都在 0.3% 以内。为保证模型精度,模拟了 10^7 组。

3 漫溢风险分析

1984 年、2004 年黄浦江潮位统计成果如表 2 所示[23]。从表 2 可以看出,2004 年潮位统计成果中高潮位均值普遍比 1984 年潮位统计成果高 0.05 ~ 0.2 m。将得出的潮位随机抽样数组与最新的黄浦江防汛墙高程实测数据代入功能函数,确定防汛墙漫溢失效与否,即可从中求得防汛墙漫溢的风险概率。

3.1 现状防汛墙漫溢风险分析

分别采用 1984 年和 2004 年潮位统计成果计算得出的黄浦江上海市区段防汛墙漫溢风险分布如图 2 和图 3 所示。根据 GB 50201—94《防洪标准》,特别重要城市的防洪工程设计重现期应大于或等于 200 a;重要城市的防洪工程设计重现期应为 200 ~ 100 a;中等城市的防洪工程设计重现期应为 100 ~ 50 a。黄浦江上海市区段防汛墙的设计标准为千年一遇,考虑到上海的重要性及黄浦江防汛墙破坏后导致损失的严重性,初步将黄浦江防汛墙防御能力满足特别重要城市防洪标准的岸段定义为低风险区段,将不满足中等城市防洪标准的岸段定义为高风险区段,则黄浦江防汛墙漫溢风险评价准则见表 3。根据拟定的标准,分别采用 1984 年和 2004 年潮位统计成果计算得出的黄浦江上海市区段防汛墙漫溢风险如表 4 所示。

表 2 各堤段多年平均最高潮位统计

堤段		1984 年成果			2004 年成果		
浦西侧	浦东侧	均值/m	C_v	C_s	均值/m	C_v	C_s
吴淞口—钱家浜	吴淞口—草镇渡口	4.79	0.062	1.30	4.95	0.062	1.45
钱家浜—虬江	草镇渡口—高桥化工厂	4.72	0.062	1.30	4.89	0.062	1.45
虬江—定海桥	高桥化工厂—庆宁寺	4.67	0.062	1.30	4.88	0.067	1.30
定海桥—黄浦公园	庆宁寺—浦东公园	4.62	0.059	1.23	4.77	0.067	1.30
黄浦公园—复兴东路	浦东公园—杨家湾	4.55	0.059	1.23	4.75	0.067	1.30
复兴东路—日辉港	杨家湾—上钢三厂	4.48	0.059	1.23	4.55	0.067	1.30
日辉港—龙华港	上钢三厂—川杨河	4.38	0.059	1.23	4.50	0.067	1.30
龙华港—张家塘港	川杨河—鳊鱼嘴	4.32	0.059	1.23	4.40	0.067	1.30
张家塘港—淀浦河	鳊鱼嘴—三林港	4.26	0.059	1.23	4.34	0.067	1.30
淀浦河—春申塘	三林港—临江水厂	4.22	0.059	1.23	4.27	0.064	1.00
春申塘—六磊塘	临江水厂—周浦塘	4.17	0.059	1.23	4.23	0.064	1.00
六磊塘—俞塘	周浦塘—沈庄塘	4.10	0.059	1.23	4.18	0.064	1.00
俞塘—闸港	沈庄塘—金汇港	4.06	0.059	1.23	4.08	0.064	1.00
闸港—樱桃河	金汇港—白庙港	3.94	0.059	1.23	4.04	0.064	1.00
樱桃河—沪闵路	白庙港—南横泾	3.89	0.048	0.46	4.00	0.064	1.00
沪闵路—北沙港	南横泾—南沙港	3.82	0.048	0.46	3.96	0.058	0.50
北沙港—西荷泾	南沙港—千步泾	3.74	0.048	0.46	3.91	0.058	0.50

表 3 黄浦江防汛墙漫溢风险评价准则

风险等级	发生概率	设计重现期/a
低风险	<0.005	>200
中风险	0.005 ~ 0.02	50 ~ 200
高风险	>0.02	<50

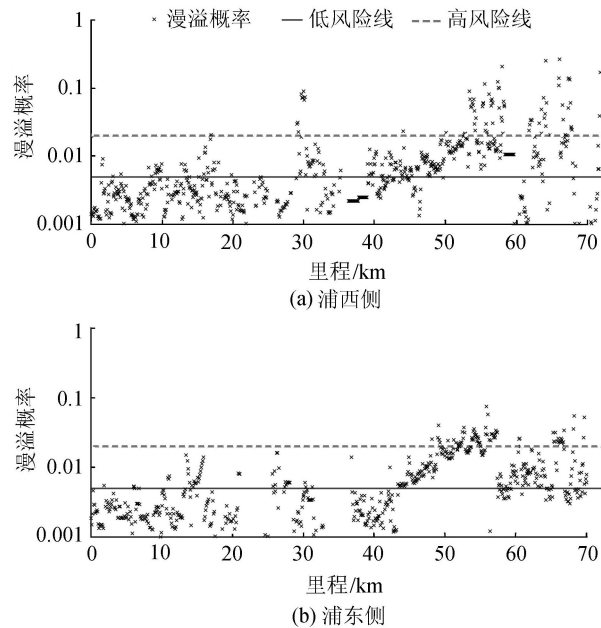


图 2 现状防汛墙漫溢风险分布 (1984 年潮位成果)

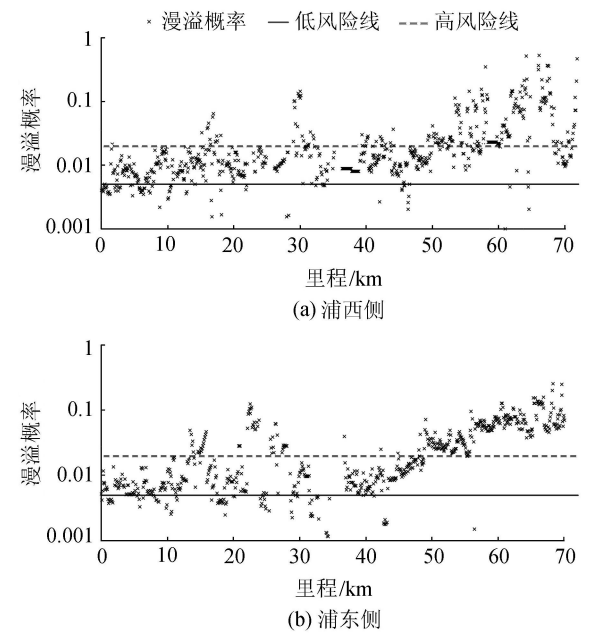


图 3 现状防汛墙漫溢风险分布 (2004 年潮位成果)

表 4 现状防汛墙漫溢风险		%	
风险等级	1984 年潮位		2004 年潮位
	浦西侧	浦东侧	浦西侧 浦东侧
低风险	56.7	52.7	14.0 12.4
中风险	32.8	36.3	54.1 42.9
高风险	10.5	11.0	31.9 44.7

将模拟结果与图 1 结合来看,在采用相同潮位成果下同一设计潮位的区段内,防汛墙漫溢概率与

防汛墙高程欠缺正相关,即现状防汛墙高程欠缺越大,漫溢概率也越大;在相同潮位成果不同设计潮位区段,漫溢概率不仅与防汛墙高程有关,还与不同区段采用的设计潮位有关。同样的潮位统计成果及高程欠缺下,黄浦江上游防汛墙的漫溢概率明显大于下游防汛墙的漫溢概率。例如采用 1984 年潮位统计成果时,在防汛墙高程欠缺 0.2 m 时,下游吴淞口处防汛墙的漫溢概率为 0.002,而上游南(北)沙港处的漫溢概率则为 0.004。从图 2 与图 3 可以看出,虽然奉贤区防汛墙高程欠缺小于上游的杨浦区、虹口区、黄浦区,但奉贤区的漫溢风险明显超过上游这 3 个区。因此,在评价黄浦江防汛墙的防御能力时,不能只从防汛墙高程方面考虑,也应考虑到不同岸段采用的设计潮位对漫溢风险的影响。

如采用 1984 年潮位统计成果,现况工况下黄浦江上海市区段防汛墙约 55% 的岸段位于漫溢的低风险区,主要位于里程桩号 0 ~ 40 岸段;约 34% 的岸段位于中风险区;约 11% 的岸段位于高风险区,中高风险区域主要位于桩号 40 以上岸段。这表明受沉降等因素的影响,现状黄浦江防汛墙防御能力远未达到设计标准。

如采用 2004 潮位成果,即考虑到近年来黄浦江水位趋势性抬高的影响,现状工况下黄浦江上海市区段防汛墙仅约 13% 岸段位于漫溢的低风险区,49% 以上的岸段位于漫溢的中风险区,约 38% 的岸段位于漫溢的高风险区,黄浦江防汛墙防御能力明显不足。

从整体来看,黄浦江上海市区段防汛墙漫溢高风险区主要集中在上游段,即桩号 50 以上段,对此部分防汛墙防汛安全需特别注意。

3.2 远期防汛墙漫溢风险分析

为预测黄浦江上海市区段防汛墙远期(2020 年)漫溢风险,在 2004 潮位统计成果的基础上,考虑海平面上升因素。根据《2013 年中国海平面公报》^[24],预计未来 30 年,上海沿海海平面将上升 85 ~ 145 mm。鉴于海平面上升对上海市远期防洪防潮的影响巨大,按最大预测上升速率 4.8 mm/a 计算,则至 2020 年相应的多年平均最高潮位较 2004 年统计值上升 80 mm。

根据预测潮位,至 2020 年黄浦江防汛墙漫溢风险分布如图 4 和表 5 所示,此时仅约 3% 岸段位于漫溢的低风险区,约 24% 岸段位于漫溢的中风险区,约 73% 的岸段位于漫溢的高风险区,黄浦江防汛形势不容乐观。

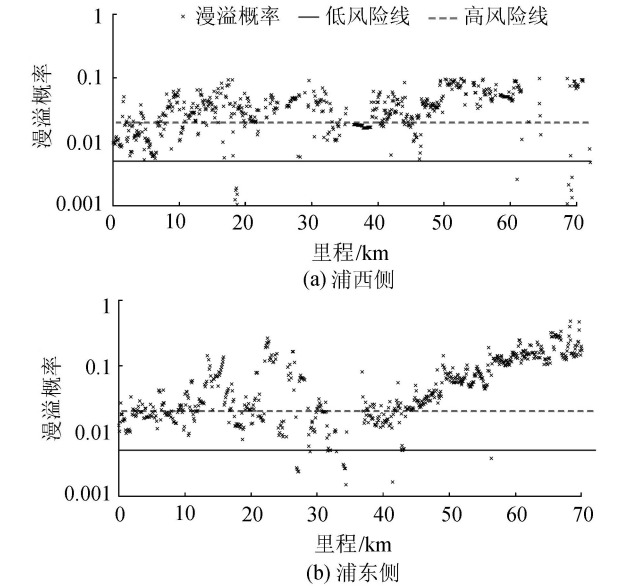


图 4 远期防汛墙漫溢风险分布

表 5 远期防汛墙漫溢风险 %

风险等级	浦西侧	浦东侧
低风险	4.5	2.0
中风险	21.2	26.2
高风险	74.3	71.8

4 结 论

a. 受沉降及黄浦江水位抬升等因素影响,现状黄浦江上海市区段防汛墙防御能力远未达到设计标准。采用 1984 年潮位统计成果计算,约 11% 的岸段位于高风险区;采用 2004 年潮位统计成果计算,约 38% 的岸段位于高风险区,高风险区段主要集中在上游。如考虑远期海平面上升的影响,则至 2020 年,将有 73% 的岸段位于高风险区,黄浦江上海市区段防汛墙防御能力明显不足。

b. 黄浦江防汛墙漫溢风险不仅与防汛墙高程有关,也与采用的设计潮位有关。同样的潮位成果和防汛墙高程欠缺下,黄浦江上游防汛墙的漫溢概率明显大于下游防汛墙的漫溢概率。在评价黄浦江防汛墙的防御能力时,不能只从高程方面考虑,也应考虑到不同岸段采用的设计潮位对漫溢风险的影响。

c. 本文的风险评价准则是在 GB50201—94《防洪标准》中不同城市等级防洪标准的基础上提出的,评价准则的代表性和可靠性尚需更深入的研究。另外,漫溢风险仅是防汛墙防汛风险的一个方面,防汛墙墙身稳定、墙前泥面冲刷趋势、地面沉降趋势,尤其是防汛墙失效后的影响评价,都是防汛墙风险研究的重要组成部分。综合评定黄浦江防汛墙防汛风险尚需更全面的研究。

参考文献:

[1] 卢永金. 围海工程设计中水力风险分析应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.

[2] TUNG Y, MAYS L W. Risk models for flood levee design [J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 833-841.

[3] DUCKSTEIN L, BOGARDI I. Application of reliability theory to hydraulic engineering design[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1998, 107(7): 799-815.

[4] LEE H L, MAYS L W. Improved risk and reliability model of hydraulic structures [J]. Water Resources Research, 1983, 10(6): 1415-1422.

[5] DAVIS D W. A risk and uncertainty based concept for sizing levee projects [C]//DAVIS C A. Hydrology and hydraulics workshop on riverine levee freeboard. Monticello: U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 1991: 231-249.

[6] WOLFF T F. Geotechnical reliability of levees [C]//DAVIS C A. Hydrology and hydraulics workshop on risk-based analysis for flood damage reduction studies. Monticello: U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 1997: 20-22.

[7] van der MEER J W, de LOOFF A P, GLAS P. Integrated approach on the safety of dikes along the Great Dutch lakes [C]//BILLY L E. Proceedings of the coastal engineering conference. New York: ASCE, 1998: 3439-3452.

[8] VRIJLING J K. Probabilistic design of water defence systems in the Netherlands [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74(5): 337-344.

[9] 朱元牲. 长江南京段设计洪水位的风险分析[J]. 水文, 1989, 9(5): 8-15. (ZHU Yuanshen. Risk analysis of design flood water level in Nanjing section of Yangtze River[J]. Journal of China Hydrology, 1989, 9(5): 8-15. (in Chinese))

[10] 赵永军, 冯平, 曲兴辉. 河道防洪堤坝水流风险的估算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1998, 26(3): 71-75. (ZHAO Yongjun, FENG Ping, QU Xinghui. Investigation on hydraulic risk of flood control dams[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences). 1998, 26(3): 71-75. (in Chinese))

[11] 王卓普, 章志强, 杨高升. 防洪堤结构风险计算模型探讨[J]. 水利学报, 1998, 29(7): 64-67. (WANG Zhuofu, ZHANG Zhiqiang, YANG Gaosheng. Risk calculation model for flood levee structure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(7): 64-67. (in Chinese))

[12] 王光远, 张鹏. 具有中介状态的工程系统的可靠性分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 13-17. (WANG Guangyuan, ZHANG Peng. Reliability analysis for engineering systems with intermediate state [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 13-17. (in Chinese))

(下转第 67 页)

出口的总面积,但为了降低管路损失,应慎重选择出口管路的形式和管径。

d. 采用基于多工况流场数值模拟的性能预测技术来进行镜板泵设计方案分析和性能优化与控制是可行的。

参考文献:

[1] 武中德,张宏,张仁江,等. 水轮发电机镜板泵外循环技术[J]. 华中电力,2004,17(6):32-34. (WU Zhongde, ZHANG Hong, ZHANG Renjiang, et al. Technology of outer circulation with runner-pump for hydrogenerators[J]. Central China Electric Power, 2004, 17(6):32-34. (in Chinese))

[2] 雷霆,胡鑫凡,秦留生. 银盘水电站推力轴承支撑性能及镜板泵外循环技术研究[J]. 机电工程,2012,29(9):1042-1045. (LEI Ting, HU Xinfan, QIN Liusheng. Research on thrust supports performance and runner-pump extrinsic technology of Silver Plate Hydropower Station[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(9):1042-1045. (in Chinese))

[3] 赖喜德,张翔,卢珍,等. 水力发电机组的镜板泵流体动力优化研究报告[R]. 成都:西华大学,2013.

[4] 张翔,王洋,徐小敏,等. 低比转速离心泵能量转换特性[J]. 农业机械学报,2011,42(7):75-81. (ZHANG Xiang, WANG Yang, XU Xiaomin, et al. Energy conversion characteristic within impeller of low specific

speed centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7):75-81. (in Chinese))

[5] LU Zhen, LAI Xide, ZHANG Xiang, et al. Numerical simulation of influence of oil tank with different throat areas on mirror-plate-pump performance[J]. Advanced Materials Research, 2013, 774/775/776:347-350.

[6] 刘厚林,杜辉,董亮,等. 离心泵蜗壳内压力脉动特性数值分析[J]. 水利水电科技进展,2013,33(1):18-21. (LIU Houlin, DU Hui, DONG Liang, et al. Numerical analysis of pressure fluctuation in the volute of centrifugal pump[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1):18-21. (in Chinese))

[7] 典平鸽. 低比转速离心泵空化性能的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(6):31-34. (DIAN Pingge. Numerical simulation of cavitation characteristics of low specific speed centrifugal pump[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(6):31-34. (in Chinese))

[8] 王飞,王庆方,王勇军,等. 水轮机蜗壳的优化设计与CFD分析[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):86-88. (WANG Fei, WANG Qingfang, WANG Yongjun, et al. Optimization design and CFD analysis of spiral cases of water turbines[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5):86-88. (in Chinese))

(收稿日期:2015-04-30 编辑:郑孝宇)



(上接第 61 页)

[13] 李青云. 长江堤防工程安全评价的理论和方法研究[D]. 北京:清华大学,2002.

[14] 朱勇华,郭海晋,徐高洪,等. 防洪堤防洪综合风险研究[J]. 中国农村水利水电,2003(7):11-14. (ZHU Yonghua, GUO Haijin, XU Gaohong. Flood-control comprehensive risk study for dikes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(7):11-14. (in Chinese))

[15] 吴兴征,丁留谦,张金接. 防洪堤防的可靠性设计方法探讨[J]. 水利学报,2003,34(4):94-100. (WU Xingzheng, DING Liuqian, ZHANG Jinjie. Study on reliability design method of flood defenses[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(4):94-100. (in Chinese))

[16] 吴兴征,丁留谦. 土石坝工程的病险评价和加固决策[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2004.

[17] 邢万波. 堤防工程风险分析与实践研究[D]. 南京:河海大学,2006.

[18] 邢万波,徐卫亚,王凯,等. 外秦淮河堤防水文失事风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(3):262-266. (XING Wanbo, XU Weiya, WANG Kai, et al. Risk analysis of hydrological failures of levees in External Qinhuai River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(3):262-266. (in Chinese))

[19] 陈锋. 上海地区防汛墙加固工程关键问题[J]. 水利水电科技进展,2014,34(6):49-55. (CHEN Feng. A study of the key problems of reinforcement of flood control wall in Shanghai[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6):49-55. (in Chinese))

[20] 朱元牲. 上海防洪(潮)安全风险分析和管理的[J]. 水利学报,2002,33(8):21-28. (ZHU Yuansheng. Risk analysis and management of flood control for Shanghai[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(8):21-28. (in Chinese))

[21] 卢永金,刘新成,崔冬,等. 上海市海塘防汛墙防汛能力调查评估[R]. 上海:上海市水利工程设计研究院有限公司,2013.

[22] 陈为民. 黄浦江河口建闸工程经济效益分析[J]. 水利经济,2002,20(4):53-58. (CHEN Weiming. Economic analysis of gate project in Huangpujiang River Estuary[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2002, 20(4):53-58. (in Chinese))

[23] 黄浦江潮位分析课题组. 黄浦江潮位分析(修编)[R]. 上海:上海市水文总站,2004.

[24] 中国国家海洋局,2013年中国海平面公报[EB/OL]. [2014-03-17]. http://www.coi.gov.cn/gongbao/nrhaipingmian/nr2013/201403/t20140317_30621.html.

(收稿日期:2015-04-20 编辑:郑孝宇)