

文章编号:1005-9865(2022)03-0093-12

海堤安全风险评估技术研究

琚烈红,刘清君,黄哲,沙海明

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要:我国现行规范体系中,关于堤防工程安全标准的确定,主要根据工程级别确定设计重现期,从而选定工程设计参数。文中提出了依据安全风险评估的结果确定海堤安全风险等级方法。首先,通过对海堤灾害进行风险识别和分析,将洪水灾害和海堤结构自身安全失效作为海堤灾害两种主要形式,建立了海堤灾害故障树。然后,将水文动力条件作为随机变量,从频率分布角度定量计算海堤洪水灾害风险程度和结构安全失效风险,提出了海堤安全风险评价方法。最后,依据规范中关于海堤等级和重现期标准的规定,结合海堤洪灾安全风险和结构自身安全风险的评价结果,确定海堤安全风险等级。文中提出的海堤安全评价技术依据海堤风险定量计算结果,从海堤现状条件满足其设计功能目标有效程度,判定海堤安全等级的级别,是一种相对较新且更科学的方法。该海堤安全风险评估技术为海堤管理和建设提供科学支撑。

关键词:海堤;洪水灾害;结构安全;风险评价;安全等级

中图分类号:U656.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2022.03.011

Research on seawall safety risk level assessment technology

JU Liehong, LIU Qingjun, HUANG Zhe, SHA Haiming

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In China's current standard system, the determination of safety standards for seawall projects is mainly based on the engineering level to determine the design return period, so as to select the engineering design parameters. This paper proposes a method to determine the safety failure risk level of seawalls based on the results of safety risk assessment. First of all, through the risk identification and analysis of seawall disasters, the flood disaster and the safety of the seawall structure are regarded as the two main forms of seawall disasters, and the seawall disaster fault tree is established. Then, using dynamic conditions as random variables, the degree of seawall flood disaster risk and structural safety failure risk are quantitatively calculated from the perspective of frequency distribution, and a seawall safety risk assessment method is proposed. Finally, according to the regulations on seawall level and return period standards in the specification, and based on the evaluation results of seawall flood safety risk and the structure's own safety risk, the seawall safety risk level is determined. The seawall safety evaluation technique proposed in this paper is a relatively new and scientific method to determine the safety level of seawall from the effective degree that the current conditions of seawall meet the design function objective according to the quantitative calculation results of seawall risk. The seawall safety risk assessment technology provides scientific support for seawall management and construction.

Keywords: seawall; flood disaster; structural safety; risk evaluation; security level

收稿日期:2021-08-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407503-4);南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y221017)

作者简介:琚烈红(1975-),男,博士,正高级工程师,从事波浪与建筑物相互作用研究。E-mail:lhju@nhri.cn

通信作者:沙海明。E-mail:hmsa@nhri.cn

我国海岸线总长约 3.2 万 km,其中,大陆海岸线长约 1.8 万 km,岛屿岸线总长约 1.4 万 km。漫长的海岸线上,绵延着保护陆地的“海岸长城”,这便是数万公里的海堤工程。海堤是抗御风暴潮灾害的重要屏障,是保障沿海地区经济社会发展和人民群众生命财产安全的重要基础设施。经过多年建设,我国海堤工程达标率不断提高,但各海堤工程安全状况及防洪能力仍参差不齐,如何评价其安全风险是海堤安全管理中亟需解决的技术问题。

我国的堤防设计主要依据《防洪标准》(GB 50201—2014)^[1]、《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)^[2]、《海堤工程设计规范》(GB/T 51015—2014)^[3]等规范确定其设防标准。《防洪标准》(GB 50201—2014)^[1]中依据防洪保护区和防护对象确定防护等级,其中防洪保护区则分别依据城、乡给出了等级划分标准;防护对象包含工矿企业、交通运输设施、电力设施、环境保护设施、通信设施、文物古迹和旅游设施、水利水电工程等,分别对其防洪等级进行了具体规定。《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)^[2]和《海堤工程设计规范》(GB/T 51015—2014)^[3]均提出堤防等级的五级标准。《海堤工程设计规范》(GB/T 51015—2014)^[3]还对海堤一些常见保护对象的防潮(洪)标准进行了规定。这些规范中都将重现期标准作为堤防安全的设计依据,由于海堤所在地区海域动力条件特点不同,按这种规定设计的海堤安全风险并不一致。

风险管理是一门新兴学科,主要包含风险识别、风险分析、风险评估和风险应对几个方面^[4]。其中,风险估计是风险管理中的难点与核心。风险评估是对辨识出来的风险进行测量,主要是对风险事故导致损失的可能性及大小进行估计。风险评估主要有两种途径,一种是根据经验或专家的评估得出,称为经验或主观评估;另一种是根据大量损失数据用统计推断的方法进行估计,称为客观评估。客观评估方法多种多样,常见的有层次分析法、事故树法、可靠度理论、模糊理论等。而蒙特卡洛(Monte Carlo)法是在可靠度方法基础上发展出来的一种数字模拟方法,可用于复杂模式的概率统计,应用广泛。

海堤灾害是一种自然灾害,其安全风险评估可借鉴自然灾害风险评价理论和成果^[5]。魏一鸣等^[6]从系统论的观点出发,阐述了以洪水危险性分析、承灾体易损性分析和洪水灾害灾情评估为核心的洪水灾害风险分析系统理论。刘德辅等^[7]运用灰色理论、随机模拟等方法进行了洪水、风暴潮、巨浪等环境因素的计算,并进行了灾害经济损失的风险分析。刘希林^[8]提出了风险度与危险度、易损度两者的关系,对评价模式进行了较详细的研究。谢世楞等^[9]对直立堤进行可靠度计算,把可靠度方法应用到直立堤结构安全设计中。邢万波^[10]提出了堤防工程风险率的计算方法。李炎保等^[11]对防波堤进行了风险分析研究,提出了防波堤的失效模式,建立了故障树,并对防波堤的可靠度计算和成本效益进行了探索。刘清君^[12]针对海堤结构,利用可靠度方法,对稳定性进行了分析。王卫标^[13]对钱塘江进行了海堤风险分析和安全评估研究。这些研究工作都把风险的概念应用到堤防安全中来,促进了堤防安全设计的技术发展。

文中从安全风险的角度,提出海堤安全等级的确定方法。将海洋动力条件(波浪和潮位)作为随机变量,在海洋动力条件参数年极值分布的基础上,根据海堤结构承载力条件,对海堤的洪水灾害和自身结构安全灾害进行评价;依据现行规范标准中关于海堤等级和重现期标准的规定,结合海堤洪灾安全风险和结构自身安全风险的评价结果,确定海堤安全风险等级,最终提出了一种海堤安全评价技术。

1 海堤安全风险识别

海堤(或防潮堤、海塘)指为防御风暴潮(洪)水和波浪对防护区的危害而修筑的堤防工程。海堤作为防洪御潮最重要屏障,其失效后引起洪水灾害,往往会导致巨大损失。2005年,卡特里娜飓风引发的风暴潮漫过美国密西西比河沿岸和庞恰特雷恩湖岸的防洪堤,给大部分地面高程低于海平面的新奥尔良地区造成严重后果,造成 1 330 人死亡和 960 亿美元的经济损失^[14]。1959年9月26日,日本发生了严重风暴潮灾害,最大增水达 3.45 m,死亡 4 600 多人,经济损失近 10 亿美元^[15]。2019年,台风海贝斯袭击了日本,也造成了较大损失^[16]。1997年,9711号台风伴随风暴潮正面袭击我国浙江三门,高水位及溃堤引起海水倒灌,造成巨大损失^[17]。

海堤作为一种堤防结构,是防洪系统的组成部分。防洪系统一般针对某个特定区域或范围,称之为防洪保护区。保护区是一个封闭的系统(也称为“封闭圈”),通常由多个海堤单元和其它防洪建筑物组成。《防洪标准》(GB 50201—2014)^[1]中规定,保护区应根据地形条件,以及河流、堤防、道路和其他地物的分割作用进行划分。沿海防洪保护区的完整防洪御潮体系中,通常包含有多个海堤单元、防潮闸等建筑物,任何一个

海堤单元、防潮闸等建筑物的失效都会引起洪灾风险,因此,对于沿海防洪保护区洪灾风险,应对不同的海堤单元分别进行风险评价,并根据“木桶效应”选取风险最大的单元作为保护区的风险评价结果,也就是保护区的安全等级由最薄弱的海堤单元确定。

除了洪水灾害,海堤自身结构失稳导致海堤防洪御潮能力降低甚至失效,是海堤另外一种主要灾害形式。海堤结构失效的情形有很多,包括堤顶防浪墙失稳、护面块体失稳、护底块石失稳和整体圆弧滑动等。任何一种具体结构失稳都会导致海堤防洪御潮能力降低甚至失效。海堤结构的承载力不是永恒不变的,海堤建成后,其结构随时间推移会逐渐老化和局部破损,这使得其对波浪和风暴潮的承载能力降低。

根据以上分析,建立了沿海防洪保护区洪水灾害风险故障树,具体见图 1。

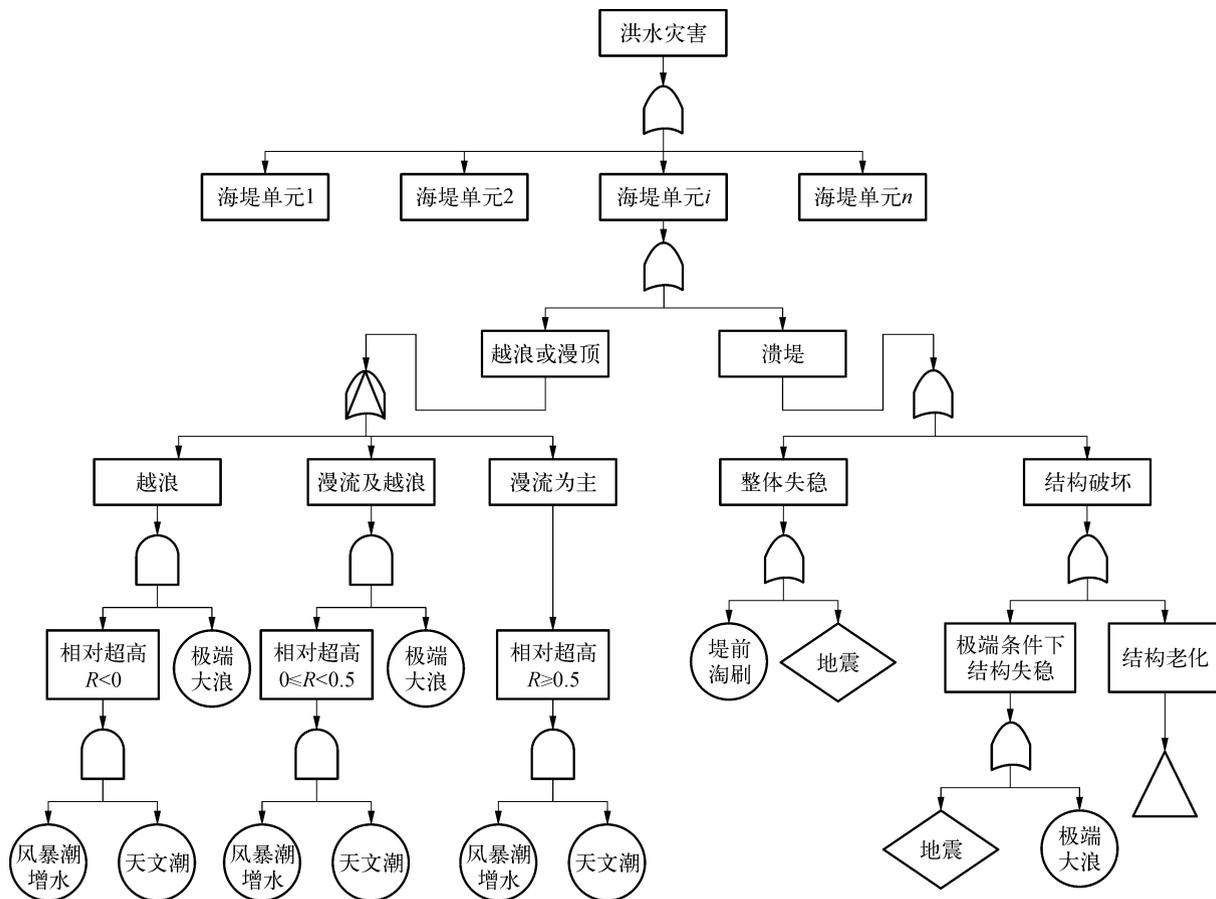


图 1 海堤洪水灾害风险故障树

Fig. 1 Seawall risk fault tree of flood disaster

2 海堤洪水灾害风险计算

依据沿海防洪区洪灾风险分析,海堤的洪水灾害外部致灾因子主要是海洋动力条件,即波浪和潮位。在自然界,波浪和潮位的大小具有随机性,其统计分布已有很多研究成果,工程应用上通常采用这两个参数年极值分布。在海堤洪水灾害风险计算时,也将这 2 个物理参数作为风险计算的基本随机变量,利用洪水流量一些研究成果,来进行洪水灾害风险计算。

假设海堤水(潮)位年极值符合 P-III 分布规律,其概率密度函数为:

$$f(h) = \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{h-\mu}{\beta}\right) \cdot \exp\left[-\exp\left(-\frac{h-\mu}{\beta}\right)\right] \quad (1)$$

假设海堤单元前波高年极值符合极值 I 型分布(Gumbel 分布)规律,其概率密度函数为:

$$\varphi(H) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (H-a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(H-a_0)} \quad (2)$$

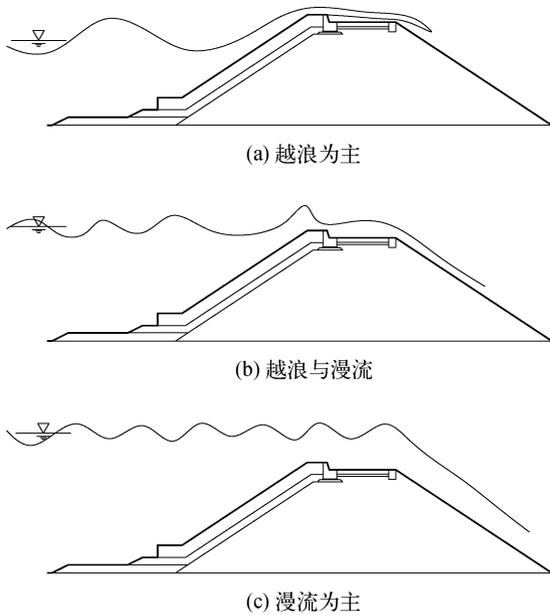


图 2 海堤堤顶越浪及漫流的 3 种模式

Fig. 2 Three modes of wave overtopping and overflowing of seawall

在海堤洪水风险计算时,以式(1)和式(2)作为水位和波高的基础频率分布,在此基础上进行洪水流量频率分布,从而定量反映海堤洪水风险程度。

由于波浪作用,海堤洪水灾害依据水(潮)位与堤顶间的高差,主要分为 3 种不同类型。当水位比堤顶高程低的情况下,受波浪爬高作用,海堤洪水以越浪为主;当水位超过堤顶后,海堤洪水除了波浪引起的越浪,还包括堤顶漫流的成分;当水位超过堤顶一定高度后,波浪引起的越浪对堤顶洪水流量已无明显影响,此时堤顶洪水流量以溢流为主。3 种不同海堤洪水类型示意图 2。

2.1 海堤堤顶洪水流量计算

当海堤外海侧水(潮)位与堤顶的高差不同时,水体越过堤顶有 3 种不同运动方式,这 3 种类型水流运动的动力条件不同,其流量计算方法也不相同。

1) 水(潮)位低于堤顶 $R < 0$ ($R = -R_c/H_{m0}$, R_c

为堤顶与水位的高差,水位低于堤顶时为正,单位为 m, H_{m0} 为有效波高,单位为 m)。

当水(潮)位低于堤顶,此时水体越过堤顶的主要动力是波浪,以越浪的形态形成洪水流量,也称越浪量。海堤越浪量影响因素较多^[18-19],计算复杂。有很多学者和机构进行了长期的研究,文中选用 EurOtop2016 的计算公式^[20]。

$$\frac{q_w}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.023}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \xi_{m-1,0} \cdot \exp \left[- \left(2.7 \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right)^{1.3} \right] \quad (3)$$

其中, γ_b 、 γ_f 、 γ_β 、 γ_v 分别表示斜坡平台折减系数、斜坡粗糙度折减系数、波浪入射方向折减系数、防浪墙影响折减系数, $\xi_{m-1,0}$ 为破波参数。最大值为:

$$\frac{q_w}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.09 \exp \left[- \left(1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right)^{1.3} \right] \quad (4)$$

2) 水(潮)位略高于堤顶, $0 \leq R < 0.5$

当水(潮)位略高于堤顶,堤顶水流形成既有堰流的动力作用,同时波浪的影响仍不可忽略。这种过渡状态的堤顶流量研究成果不多, Hughes 等根据试验提出了计算方法^[21]:

$$\frac{q_{ws}}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.034 + 0.53 \left(\frac{-R_c}{H_{m0}} \right)^{1.58} \quad (5)$$

由于堰流计算方法出现较早,经过大量试验数据和实践检验,有些学者建议过渡区流量计算采用两种流量叠加的方法^[22]:

$$q_{ws} = c \cdot q_w + q_s \quad (6)$$

其中, q_w 为越浪量水流成分, q_s 为漫流水流成分,根据文献[22]建议取 $c = \cos \left(5.236 \frac{-R_c}{H_{m0}} \right)$, $R < 0.3$ 。

如果采用式(4)计算,在过渡区上边界,会出现堤顶流量不单调的情况(图 3 中过渡区 1),这显然是由于计算方法引起的,既不符合实际情况,也不方便应用。大多数研究表明,波浪对一倍波高以下水深处影响相对较小,因此,以 0.5 作为该情况下 R 的计算界值,并对式(5)进行调整,将过渡区堤顶流量计算调

整为:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.09 + 0.35 \left(\frac{-R_c}{H_{m0}} \right)^{1.778}, R < 0.5 \quad (7)$$

图3表明,采用式(7)计算,能使流量在过渡区上、下边界平滑过渡,且在接近漫流区时 Hughes 试验数据符合较好。

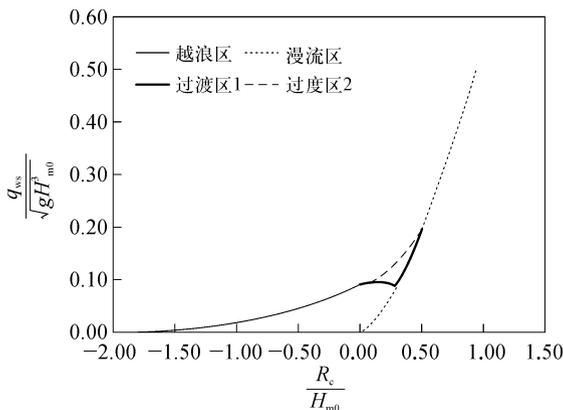


图3 堤顶流量从越浪到漫流的过渡

Fig. 3 Transition of discharge at the top of the seawall from overtopping to overflowing

3) 水(潮)位高于堤顶 $0.5H_{m0}$, $R \geq 0.5$

当水(潮)位远高于堤顶,此时认为波浪影响可忽略,采用常见的堰流公式计算堤顶流量:

$$q_s = 0.544 \sqrt{g} (-R_c)^{1.5} \quad (8)$$

当然堰流流量还受其他因素影响,这里不再详述。

2.2 海堤洪水灾害风险直接积分法计算

假设水位与波高两个随机变量是相互独立的,则堤顶越浪水流流量分布函数为:

$$F_Q(q) = \iint_{Q < q} f(h) \varphi(H) dh dH \quad (9)$$

式(9)是海堤堤顶流量分布函数,这个积分的求解是复杂的。将式(1)和式(2)代入式(9),利用换元法,根据 R_c ($R_c = h_D - h$, h_D 为堤顶高程, h 为水位)的取值大小分区域计算式(9),得到堤顶流量分布密度。

1) $R < 0$

$$f_{Q1}(q) = \int_{\sqrt[3]{12.6q^2}}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\beta} \exp \left[-\frac{1}{\beta} \left(h_D - 0.667H \left(-\ln \frac{11.11q}{\sqrt{gH^3}} \right)^{0.77} - \mu \right) \right] \cdot \exp \left[-\exp \left(-\frac{1}{\beta} \left(h_D - 0.667H \left(-\ln \frac{11.11q}{\sqrt{gH^3}} \right)^{0.77} - \mu \right) \right) \right] \cdot \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (H - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(H-a_0)} \cdot \left[\frac{0.513H}{q} \left(-\ln \frac{11.11q}{\sqrt{gH^3}} \right)^{-0.23} \right] \right\} dH \quad (10)$$

2) $0 \leq R < 0.5$

$$f_{Q2}(q) = \int_{\sqrt[3]{2.77q^2}}^{\sqrt[3]{12.6q^2}} \left\{ \frac{1}{\beta} \exp \left[-\frac{1}{\beta} \left(h_D + H \left(\frac{2.86q}{\sqrt{gH^3}} - 0.257 \right)^{0.562} - \mu \right) \right] \cdot \exp \left[-\exp \left(-\frac{1}{\beta} \left(h_D + H \left(\frac{2.86q}{\sqrt{gH^3}} - 0.257 \right)^{0.562} - \mu \right) \right) \right] \cdot \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (H - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(H-a_0)} \cdot 1.607 \left(\frac{2.86q}{\sqrt{gH^3}} - 0.257 \right)^{0.438} \right\} dH \quad (11)$$

式(10)和式(11)为 $q < 0.602$ 时的分布,计算时将 $f_{Q1}(q)$ 和 $f_{Q2}(q)$ 相加得到不同 q 值最终密度分布。

3) $R \geq 0.5$

$$f_{Q3}(q) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{h-\mu}{\beta}\right) \cdot \exp\left[-\exp\left(-\frac{h-\mu}{\beta}\right)\right] dh \quad (12)$$

式(12)为 $q \geq 0.602$ 时的分布。

2.3 海堤洪水灾害风险蒙特卡洛法模拟

依据波高和潮位的概率分布,采用 Monte-Carlo 直接抽样法模拟,即可计算堤顶流量的概率分布。Monte-Carlo 直接抽样法首先根据随机变量分布进行随机变量抽样,产生大量(假设 N 个)简单子样,然后将每组简单子样值代入堤顶流量计算方法,根据抽样计算结果统计堤顶流量。由大数定律可知,越流量分布统计频率收敛于其实际频率。

3 海堤结构失效风险计算

海堤作为一种防洪御潮的功能性构筑物,其失效风险主要表现为外部荷载超过了其现状结构的极限承载能力。将海堤所处海域海洋动力条件(主要包含波浪和潮位)作为随机变量,采用年极值分布概率密度函数,计算海堤结构所受荷载,与结构现状条件的极限承载力联合建立功能函数,通过计算功能函数的失效概率,计算海堤结构的失效风险。通过对损毁海堤的调查,海堤主要失效类型可分为防浪墙失效、护面块体失效、护底块石失效和整体滑动失稳失效 4 种形式。

3.1 防浪墙失效

当防浪墙前无人工块体掩护且墙底不埋入时,防浪墙所受波浪力示意如图 4 所示,此时作用在防浪墙上的平均波浪压强如式(13)所示:

$$\bar{p} = (\bar{p}_1 + \bar{p}_2) K_d K_b K_m \quad (13)$$

$$\bar{p}_1 = 1.017\gamma H \left(\frac{1}{2} \frac{L}{H}\right)^{-4.10 \frac{\pi H}{L}} \tanh\left(\pi \frac{S}{S_0}\right) \quad (14)$$

$$\bar{p}_2 = \begin{cases} 1.402\gamma H \left(\frac{H}{L}\right)^{0.792} \left(\frac{S}{S_m}\right)^{-b_1} \left[\frac{S}{S_m} \exp\left(1 - \frac{S}{S_m}\right)\right]^{b_2} & S \geq 1 \\ 1.402\gamma H \left(\frac{H}{L}\right)^{0.792} \frac{0.939^{b_2}}{0.687^{b_1}} S & S < 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$b_1 = 2.36 - 9.31 \left(\frac{H}{L}\right) \quad (16)$$

$$b_2 = 7.17 \exp\left(0.0555 \frac{L}{H}\right) \quad (17)$$

式中: \bar{p}_1 、 \bar{p}_2 分别为平均波浪压强的反射分量和基床影响分量; γ 为水的容重; H 为波高; L 为波长; S 为复合因子; S_m 为墙上总水平力最大时的复合因子 S 取值, $S_m = 1.456$; K_d 、 K_b 、 K_m 分别为堤前水位影响系数、肩宽影响系数、坡比影响系数。

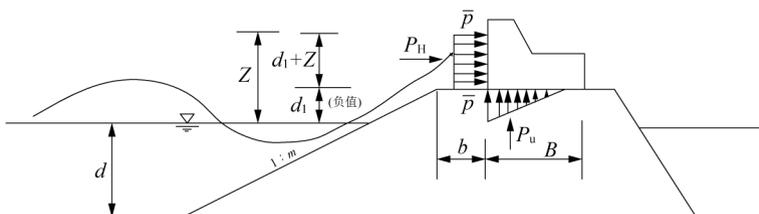


图 4 防浪墙波浪压力分布

Fig. 4 Wave pressure distribution of a wave wall

防浪墙上波浪压强分布高度按式(18)计算:

$$d_1 + Z = \left(1.235 \frac{L}{H} - 1.595\right) \left(\frac{S}{1.456}\right)^{b_1} H \quad (18)$$

为简化计算,波压力在防浪墙上近似按均匀分布,单位长度防浪墙上的总水平波浪力 F_H 及水平波浪力矩 M_H 为:

$$F_H = \bar{p}(d_1 + Z) \quad (19)$$

$$M_H = \frac{\bar{p}}{2} (d_1 + Z)^2 \quad (20)$$

单位长度防浪墙上的总波浪浮托力 F_V 为:

$$F_V = \frac{\mu \bar{p} B}{2} \quad (21)$$

式中: μ 为系数取 0.9, B 为防浪墙底宽。

根据防浪墙所受波浪水平作用力与抗滑力之间的关系以及倾覆力矩与抗倾力矩之间的关系,建立表征防浪墙工作状态的结构功能函数:

$$Z_1 = F_R - F_S \quad (22)$$

$$Z_2 = M_R - M_S \quad (23)$$

式中: F_S 和 M_S 为海堤防浪墙结构所受滑动力和倾覆力矩,可通过式(13)~(19)计算, F_R 和 M_R 为海堤防浪墙结构极限抗滑力和极限抗倾力矩,可以根据海堤现状条件的自重和结构尺寸进行计算。护面块体失效和护底块石失效的功能函数也采用类似的方法构建。

3.2 护面块体失效

海堤常见的护面块体结构形式包括随机抛放块体、栅栏板、干砌块石和混凝土板等。

1) 随机抛放块体

随机抛放的护面块体,包括扭王字块体、扭工字块体、四角锥体和块石等。随机抛放护面块体稳定重力与波高和斜坡坡度的关系为:

$$W = \frac{\gamma_b H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_b}{\gamma} - 1\right)^3 \cot \alpha} \quad (24)$$

式中: K_D 为与块体的类型、抛置方式、层数以及块体失稳率 D 有关的系数。 γ_b 、 γ 分别为块体容重和水的容重, α 为斜坡角度。

2) 栅栏板结构

当斜坡坡率 $m = 1.5 \sim 2.5$ 时,栅栏板稳定厚度 t 与波高水深的关系为:

$$t = 0.235 \frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma} \frac{0.61 + 0.13 \frac{d}{H}}{m^{0.27}} H \quad (25)$$

3) 干砌块石结构

在波浪作用下,当斜坡坡率 $m = 1.5 \sim 5.0$ 时,斜坡堤干砌块石或设置排水孔的浆砌石的稳定护面厚度 t 与波高和斜坡坡度的关系为:

$$t = K \frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma} \frac{H}{\sqrt{m}} \sqrt[3]{\frac{L}{H}} \quad (26)$$

式中: K 为系数。

4) 混凝土结构

对具有明缝的混凝土或钢筋混凝土板护坡,当斜坡坡率 $m = 2.0 \sim 5.0$ 时,其稳定面板厚度与波高和斜坡坡度关系为:

$$t = 0.07 \eta H \sqrt[3]{\frac{L}{B}} \frac{\rho_w}{\rho_c - \rho_w} \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m} \quad (27)$$

式中: ρ_w 为水的密度, ρ_c 为混凝土板的密度。

3.3 护底块石失效

海堤堤脚护底大多采用抛石,在冲刷较严重地区,也有采用混凝土连锁块(排)的情况。块石的质量与斜坡堤最大波浪底流速有关,《海堤工程设计规范》(GB/T 51015—2014)^[3]推荐堤前最大底流速计算公式为:

$$V_{\max} = \frac{\pi H}{\sqrt{\frac{\pi L}{g} \sinh \frac{4\pi d}{L}}} \quad (28)$$

护底块石的稳定质量可根据堤前最大波浪底流速按表 1 进行确定。

表 1 堤前护底块石的稳定质量
Tab. 1 Steady weight of bottom block in front of seawall slope

底流速 $V_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.0	3.0	4.0	5.0
块石质量/kg	60	150	400	800

3.4 整体滑动失效

海堤整体滑动失效是海堤重要的失效形式,其危害较大。对于黏性土坡,主要考虑圆弧滑动,文中主要考虑单一圆弧。单一圆弧滑动多采用条分法,其基本假定为:1) 滑动面为圆弧滑动;2) 各土条两侧作用力均为水平方向,即忽略土条间的剪力,只考虑土条的垂向平衡和对滑动圆心的力矩平衡;3) 土条底部滑动面上的抗滑安全系数均相同,为整个滑动面的平均安全系数。采用简化 Bishop 法的各土条受力示意如图 5 所示。

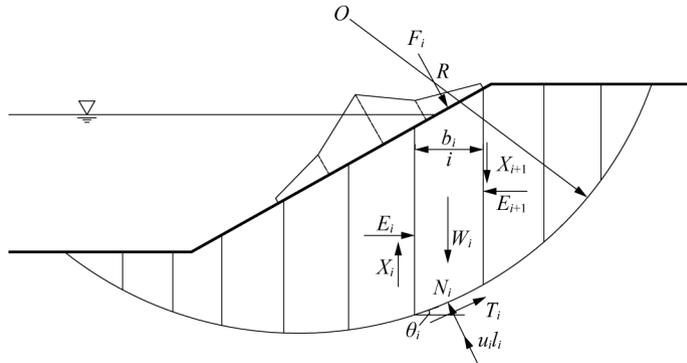


图 5 条分法土条受力示意

Fig. 5 Schematic diagram of soil strip force by section method

任取第 i 土条,土条宽度 b_i ;底面倾角 θ_i ;土条自身重力 G_i ;土条底部法向作用力 N_i ;剪力 T_i ;孔隙水压力 $u_i l_i$;内摩擦角 φ_i ;黏聚力 c_i 和滑面平均安全系数为 F_s 。土条间水平作用力 E_i 和 E_{i+1} ,垂向作用力 X_i 和 X_{i+1} ,这两组力依据假定相互平衡。则整个滑动面平均安全系数 K 为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i \cos \theta_i \tan \varphi_i + c_i l_i)}{\sum_{i=1}^n G_i \sin \theta_i} \quad (29)$$

当斜坡结构有波浪作用时,需考虑波浪压强作用下的整体稳定性,毛昶熙等^[23]提出了有波浪荷载的整体稳定有限元计算方法,这里仍采用相对简单的条分法。波浪压强在斜坡上分布一般认为折线型^[24]。文中参考 Oumeraci 等^[25]2010 年的研究成果。

斜坡堤坡面最大压强为:

$$\frac{P_{\max}}{\rho g H_{m0}} = 0.68 \xi_{m-1,0} \quad (30)$$

对应的位置高度为:

$$\frac{z_{p_{\max}}}{H_{m0}} = 0.7 \xi_{m-1,0} - 0.6, \xi_{m-1,0} < 3.2 \quad (31)$$

其它几个转折点压强位置为:斜坡面上压强最大位置上方转折点, $P=0.4P_{\max}$, $z=-0.6z_{p_{\max}}$;斜坡面上压强最大位置下方转折点, $P=0.5P_{\max}$ 时, $z=-1.5z_{p_{\max}}$;斜坡面上压强最大位置下方转折点, $P=0.4P_{\max}$ 时, $z=-3.0z_{p_{\max}}$;通过该压强分布即可计算土条所受波浪压力 F_i 。

设土条所受波浪压力为 F_i , 则土条位于滑动圆弧段的压力和抗滑力分别为:

$$N_i = G_i \cos \theta_i + F_i \cos(\alpha - \theta_i) \quad (32)$$

$$T_i = G_i \sin \theta_i - F_i \sin(\alpha - \theta_i) \quad (33)$$

则整个滑动面平均安全系数 K 为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \{ [G_i \cos \theta_i + F_i \cos(\alpha - \theta_i)] \tan \varphi_i + c_i L_i \}}{\sum_{i=1}^n [G_i \sin \theta_i - F_i \sin(\alpha - \theta_i)]} \quad (34)$$

安全系数需通过改变圆弧滑动圆心位置求得其最小值。其中 F_i 与随机变量 H 和水位 h 有关。

传统的海堤结构设计中,主要采用安全系数法。若安全系数 $F_s \geq 1$, 结构在理论上便处于安全范围之内;否则,则处于失效范围内。基于此点出发,建立海堤整体稳定可靠度分析的功能函数:

$$Z = \ln(K) \quad (35)$$

3.5 海堤结构安全蒙特卡洛法计算

Monte-Carlo 直接抽样法的指导思想是首先根据随机变量分布类型进行随机变量抽样产生大量(假设 N 个)的简单子样,然后将每组简单子样值代入结构功能函数,判断结构失效与否,并统计出失效次数(n_f 次),根据大数定律可知,结构失效频率是失效概率的无偏估计,即:

$$\hat{P}_f = \frac{n_f}{N} \quad (36)$$

设结构功能函数为:

$$Z = g(X) \quad (37)$$

则结构的失效概率可表示为:

$$P_f = P[g(X) < 0] = \int_{\Omega_f} f_X(x) dx \quad (38)$$

式中: Ω_f 为失效区域, $f_X(x)$ 为随机变量的联合概率密度函数。对式(38)引入示性函数 $I(x)$, 得:

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} I[g(x)] f_X(x) dx = E\{I[g(x)]\} \quad (39)$$

采用 Monte-Carlo 直接抽样法,式(39)可写为:

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(\hat{X})_i] \quad (40)$$

则抽样方差为:

$$\sigma_{\hat{P}_f}^2 = \frac{1}{N} \sigma_{I[g(\hat{x}_i)]}^2 = \frac{1}{N} \sigma_{I[g(x)]}^2 = \frac{1}{N} \hat{P}_f (1 - \hat{P}_f) \quad (41)$$

为保证抽样误差,取置信度为 $1-\alpha$, 相对误差表示为:

$$\varepsilon = \frac{|\hat{P}_f - P_f|}{P_f} \approx \frac{|\hat{P}_f - P_f|}{\hat{P}_f} \leq z_{\alpha/2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \hat{P}_f (1 - \hat{P}_f)} \quad (42)$$

由式(42)可知, Monte-Carlo 直接抽样法的模拟精度与抽样次数和方差 $\sigma_{\hat{P}_f}^2$ 有关,而与随机变量的维数无关。为减小模拟误差,可增加模拟次数 N 或减小失效概率估计值的方差(或变异系数)。

作为式(42)的特种情况,当置信度取 95%, 相对误差取 20% 时,式(42)可近似表示为:

$$N \approx \frac{100}{\hat{P}_f} \quad (43)$$

由式(43)可近似计算 Monte-Carlo 直接抽样法所需要的模拟抽样次数,例如当结构的失效概率小于 10^{-3} 时所需抽样次数至少达到 10^5 才能获得对 P_f 可靠的估计。

4 海堤安全风险等级确定

以上介绍了海堤安全风险的计算方法。即将海堤所在海域波高和水位作为随机变量,利用其年极值分布密度函数与堤顶超高条件,计算得到堤顶越浪与溢流流量的概率分布,据此,可以定量分析该海堤相应的洪水风险;另外,利用波高和水位年极值分布密度函数与结构自身结构参数条件,计算得到海堤安全稳定可靠度,据此,也可以分析反映该海堤相应的破坏及溃堤风险。

然而,实际管理和应用中,习惯于将海堤安全风险划分为不同的等级。但海堤安全风险等级的划分仍无明确标准,文中提出了一种等级划分方法。由于海堤本身根据防护要求有不同的等级,其目标防护能力是不同的:有些海堤本身要求比较低,只需要抵御低级别的风险就满足要求,因此,海堤安全风险等级的划分,应结合海堤本身的设防标准及其满足设防标准的能力两方面综合确定。文中根据海堤灾害分类及其可能后果,将海堤安全风险划分为五个等级,具体见表 2。

表 2 海堤安全等级划分及确定条件
Tab. 2 Classification and determination of seawall safety level

安全等级	安全等级确定标准
I 级	规划设计标准条件下,不发生超标准越浪,海堤不会失稳。
II 级	规划设计标准条件下,不发生超标准越浪;海堤护面与护底局部失稳,海堤整体稳定。
III 级	规划设计标准条件下,发生超标准越浪,越浪引起洪水灾害损失较小,无人员伤亡可能;海堤护面与护底局部失稳,海堤整体稳定。
IV 级	规划设计标准条件下,发生超标准越浪,越浪引起洪水灾害损失较小,无人员伤亡可能;海堤护面与护底局部失稳,在海堤等级降低一级条件下,海堤整体稳定。
V 级	规划设计标准条件下,发生超标准越浪,越浪引起洪水会造成人员伤亡,或者海堤会发生垮塌,导致溃堤。

根据海堤洪水灾害不同后果,对洪水灾害的可能情况进行划分,从而设定致灾因子条件,具体见图 6。同样,对海堤结构安全的可能后果也进行分类,按不同灾害后果确定条件,具体见图 7。最后,按表 2 的条件,具体给出海堤安全风险等级确定的洪水风险和结构安全风险条件组合,具体见表 3。至此,可以通过以上方法确定海堤安全风险等级。

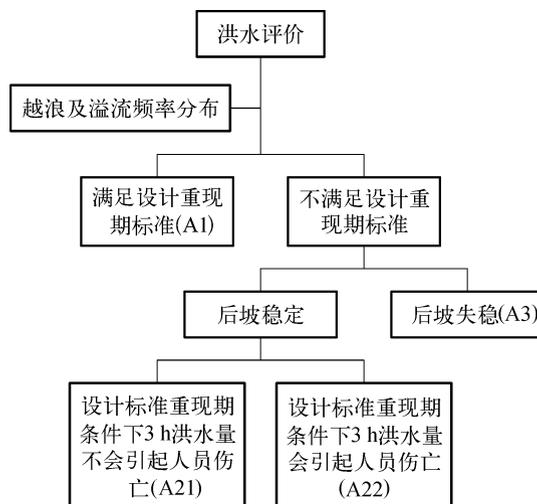


图 6 洪水风险影响海堤安全风险等级划分条件

Fig. 6 Classification conditions of seawall safety risk levels under the influence of flood risk

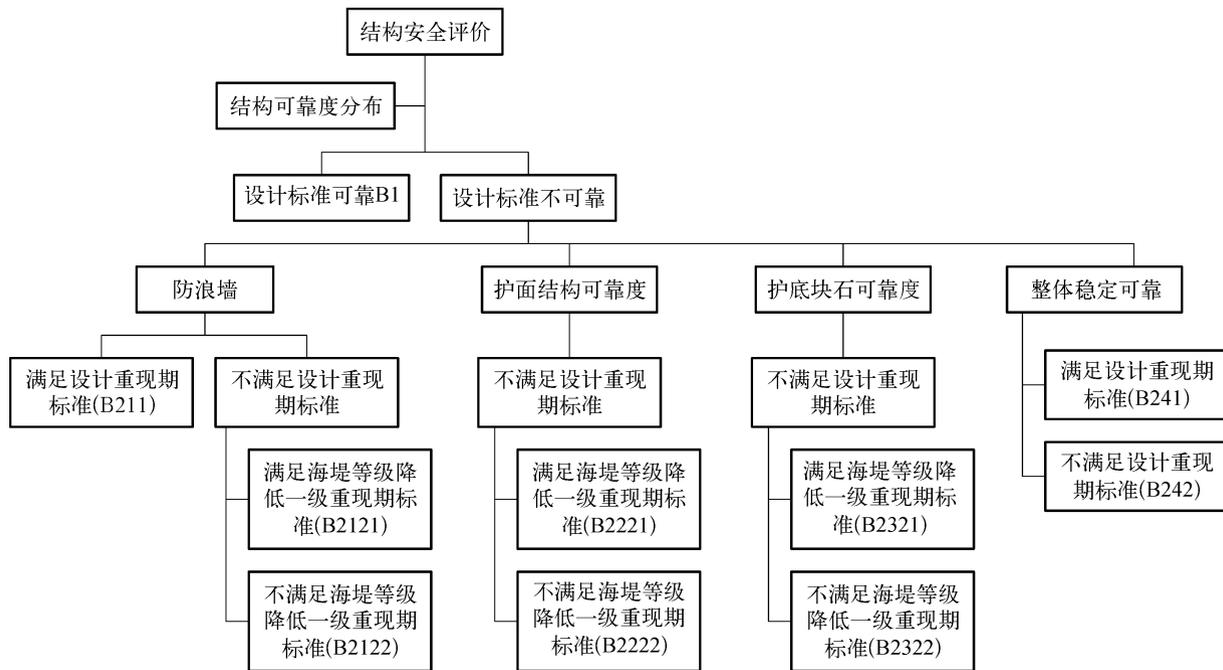


图 7 结构安全影响海堤安全风险等级划分条件

Fig. 7 Classification conditions of seawall safety risk levels under the influence of structural safety

表 3 依据海堤洪水风险及结构安全评估结果判定海堤安全风险等级

Tab. 3 The safety risk level of the seawall based on the flood risk and structural safety

安全等级	安全等级确定标准
I 级	条件 A1 和 B1
II 级	条件 A1 和 B211 和 B2221 和 B2321 和 B241
III 级	条件 A21 和 B211 和 B2221 和 B2321 和 B241
IV 级	条件 A21 和 B2121 和 B2221 和 B2321 和 B241
V 级	条件 A3 或 B2122 或 B2222 或 B2322 或 B242

5 结 语

提出了一种海堤安全风险评估技术,通过应用该技术,可以计算海堤的安全风险,并确定其安全风险等级。主要成果如下:

1) 提出了海堤洪水风险频率分布的计算方法。在以波浪和水位作为随机变量的条件下,通过波浪概率分布密度和水位分布概率密度,利用越浪量计算公式得到越浪量的概率分布密度。通过越浪量的概率分布密度,可定量分析海堤的洪水灾害风险。

2) 提出了海堤结构安全可靠度评估方法。针对海堤防浪墙、护面块体、护底块石和整体稳定等方面,收集分析稳定承载力计算公式,利用波高和水位的概率分布密度,可定量计算结构的失效概率。

3) 提出了海堤安全风险等级划分及确定的方法。该方法在海堤洪水风险及结构安全风险计算的基础上,结合海堤的设计标准,确定海堤的安全风险等级。

4) 文中提出的海堤安全风险评估技术涉及多学科交叉,其关键因子具体判定方法建立在已有研究成果基础之上,有一些采用了试验成果总结的经验公式,但仍有些参数其确定方法尚未成熟,海堤安全等级判定条件相对简单,还需进行大量的研究工作。在以后的研究中,仍需及时吸收相关成果,以进一步完善和提高海堤安全风险评估技术。

参考文献:

[1] 防洪标准: GB 50201—2014[S]. 2014. (Standard for flood control: GB 50201—2014[S]. 2014. (in Chinese))
 [2] 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S]. 2013. (Code for design of levee project: GB 50286—2013[S]. 2013. (in Chinese))

- [3] 海堤工程设计规范: GB/T 51015—2014[S]. 2014. (Code for design of sea dike project: GB/T 51015—2014[S]. 2014. (in Chinese))
- [4] 卓志. 风险管理理论研究[M]. 北京: 中国金融出版社, 2006. (ZHUO Zhi. Research on risk management theory[M]. Beijing: China Finance Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 黄崇福. 自然灾害风险评估[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (HUANG Chongfu. Natural disaster risk assessment[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 魏一鸣, 范英, 金菊良. 洪水灾害风险分析的系统理论[J]. 管理科学学报, 2001, 4(2): 7-11. (WEI Yiming, FAN Ying, JIN Juliang. System theory of flood disaster risk analysis[J]. Journal of Management Science, 2001, 4(2): 7-11. (in Chinese))
- [7] 刘德辅, 褚晓明, 王树青. 沿海和河口城市防灾设防标准系统分析[J]. 灾害学, 2001(4): 1-7. (LIU Defu, CHU Xiaoming, WANG Shuqing. Analysis of the system of disaster prevention and fortification standards in coastal and estuary cities [J]. Catastrophe Science, 2001(4): 1-7. (in Chinese))
- [8] 刘希林. 区域泥石流流风险评价研究[J]. 自然灾害学报, 2000(1): 54-61. (LIU Xilin. Research on regional debris flow risk assessment[J]. Journal of Natural Disasters, 2000(1): 54-61. (in Chinese))
- [9] 谢世楞, 刘颖. 直立式防波堤的可靠度分析[J]. 港工技术, 1989(3): 1-8. (XIE Shileng, LIU Ying. Reliability analysis of vertical breakwater[J]. Port Engineering Technology, 1989(3): 1-8. (in Chinese))
- [10] 邢万波. 堤防工程风险分析理论和实践研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (XING Wanbo. Theoretical and practical research on risk analysis of dike engineering[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [11] 李炎保, 马青山, 蒋学炼. 防波堤风险分析研究框架[J]. 海洋通报, 2006(1): 16-23. (LI Yanbao, MA Qingshan, JIANG Xuelian. Research framework for risk analysis of breakwaters[J]. Ocean Bulletin, 2006(1): 16-23. (in Chinese))
- [12] 刘清君. 海堤结构可靠度分析[D]. 南京: 河海大学, 2012. (LIU Qingjun. Research on the reliability of sea dike structure safety[D]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese))
- [13] 王卫标. 钱塘江海堤风险分析和安全评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (WANG Weibiao. Research on risk analysis and safety assessment of Qiantang River Seawall[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [14] TINH N X, TANAKA H, ABE G, et al. Mechanisms of flood-induced levee breaching in marumori town during the 2019 Hagibis Typhoon[J]. Water, 2021, 13(2): 244.
- [15] KHALIL G M. Cyclones and storm surges in Bangladesh: Some mitigative measures[J]. Natural Hazards, 1992, 6(1): 11-24.
- [16] 王江波, 王俊, 苟爱萍. 超强台风背景下日本东京湾海岸线安全防护体系建设[J]. 水土保持通报, 2020(4): 329-334. (WANG Jiangbo, WANG Jun, GOU Aiping. Construction of safety protection system for Tokyo Bay coastline in Japan under the background of super typhoon[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020(4): 329-334. (in Chinese))
- [17] 郑有文, 罗加友. 9711号台风三门海塘水毁原因分析和修建技术探讨[J]. 浙江水利科技, 1998(1): 53-55. (ZHENG Youwen, LUO Jiayou. Analysis of the cause of flood damage of Sanmen Seawall by typhoon No. 9711 and discussion on construction technology[J]. Zhejiang Water Conservancy Science and Technology, 1998(1): 53-55. (in Chinese))
- [18] 琚烈红. 斜坡堤防浪墙型式合理性试验研究[J]. 水运工程, 2006(5): 1-3. (JU Liehong. Experimental study on the rationality of the slope dike wave wall type[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(5): 1-3. (in Chinese))
- [19] 陈国平, 周益人, 琚烈红. 海堤护面型式对波浪爬高和越浪的影响[J]. 水运工程, 2005(10): 28-30. (CHEN Guoping, ZHOU Yiren, JU Liehong. The influence of seawall protection type on wave climbing and wave crossing[J]. Port & Waterway Engineering, 2005(10): 28-30. (in Chinese))
- [20] MEER J, ALLSOP N, BRUCE T, et al. EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application[R]. Environment Agency, 2016.
- [21] HUGHES S A, NADAL N C. Laboratory study of combined wave overtopping and storm surge overflow of a levee[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(3): 244-259.
- [22] MASE H, KIM S, HASEGAWA M, et al. Development of wave overtopping-overflow transition model based on full-scale experiments[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2020, 34(2): 128-135.
- [23] 毛昶熙, 段祥宝, 毛佩郁, 等. 海堤结构型式及抗滑稳定性计算分析[J]. 水利学报, 1999(11): 30-37. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, MAO Peiyu, et al. Structural type of seawall and calculation analysis of anti-sliding stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(11): 30-37. (in Chinese))
- [24] 余广明. 堤坝防浪护坡设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. (YU Guangming. Design of dykes and dams for wave protection and slope protection[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987. (in Chinese))
- [25] OUMERACI H, STAAL T, PFRTNER S, et al. Hydraulic performance, wave loading and response of Elastocast revetments and their foundation-a large scale model study[J]. European Journal of Environmental & Civil Engineering, 2010, 16(8): 953-980.