

海堤安全评价指标体系的构建及应用

谢 婕¹, 龚 政², 陈永平³, 陆 倩⁴, 李江夏¹

- (1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
4. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061)

摘要:针对海堤破坏的特点,从漫堤、溃堤两方面入手,归纳各破坏形式下海堤安全的主要影响因素,运用层次分析法建立海堤安全风险评估指标体系。结合我国海堤工程的设计特点,依据SL435—2008《海堤工程设计规范》,采用模糊数学中求解隶属度的方法对指标进行量化,并将海堤安全风险评估指标体系应用于浙江台州某海堤堤段,对该堤段的漫堤、溃堤风险分别作出评价。结果表明:研究堤段满足50年一遇的设计标准;所构建海堤安全评价指标体系可用于海堤的漫堤及溃堤风险评估。

关键词:海堤;溃堤;漫堤;安全评价;层次分析法;模糊数学;隶属度

中图分类号:TV871 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)02-0059-05

Establishment and application of index system for seawall safety assessment//XIE Jie¹, GONG Zheng², CHEN Yongping³, LU Qian⁴, LI Jiangxia¹ (1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Nanjing 210098, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Shanghai Water Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200061, China)

Abstract: Based on the characteristics of seawall failure, main factors threatening seawall safety are summarized in terms of the two forms of failure, overtopping and breaches. An index system for seawall safety assessment was established based on the analytic hierarchy process (AHP). Based on features of seawall design in China, the membership degree method from fuzzy mathematics was used to quantify every index according to the Code for Design of Sea Dike Project (SL 435—2008). The index system for seawall safety assessment was applied to a seawall in Taizhou, in Zhejiang Province, in order to assess the risks of overtopping and breaches. The results show that this seawall meets the design requirements for a return period of 50 years. The established index system for seawall safety assessment can be used to investigate the risks of overtopping and breaches of other seawalls.

Key words: seawall; seawall breach; seawall overtopping; safety assessment; analytic hierarchy process; fuzzy mathematics; membership degree

海堤是沿海地区重要的防潮防浪屏障,可有效地抵御风暴潮等海洋自然灾害,保障沿海地区人民的生命财产安全,是沿海地区经济和社会发展的生命线^[1]。然而,在特大台风浪、风暴潮作用下,海堤的破坏往往难以幸免,由于风暴潮和台风浪对海堤的破坏机理比较复杂,除了与海岸动力有关外,还与海堤设计标准、结构形式以及所处的地理位置有直接的关系。因此,开展台风浪、风暴潮作用下的海堤

安全风险评估研究有着重要的现实意义。

现阶段,国内外针对堤防工程安全风险评估开展了不少研究工作,各国的研究结果主要与其堤防特点有关,例如,日本的堤防工程特点是防洪标准不高,但质量较高,能基本保证不出险情,或者即使洪水漫顶也不会溃堤,因而失事风险考虑得不多,主要依据《河川堤防总检点手册》指导堤防工程安全性调查和评价工作^[2];荷兰的海堤系统由封闭的堤防

圈构成,同一堤防圈内设防标准均较高,近年来堤防设计和加固采用可靠性设计方法,设有相应的风险标准^[3-4]。国内,海堤安全评价借鉴大坝安全评价方法^[5-6],主要将定性指标与定量指标相结合,建立海堤安全综合安全评价指标体系^[1,7-8]。应用这种方法时存在两个问题:一是在对指标进行量化时,其评价价值往往依赖于评价者的经验,主观性较大;二是直接将堤身、堤基材料等作为评价指标,评价指标偏多,且与堤防破坏形式关联度不高。另外,现有的研究大多针对内河堤防,海堤工程虽然是堤防工程的一个分支,但其主要以防御台风浪和风暴潮为主,其所受荷载、堤身结构与内河的堤防工程均有区别。本文从海堤的漫堤、溃堤两种破坏形式入手,建立海堤安全评价指标体系,对台风浪、风暴潮作用下的海堤安全风险作出评价。

1 海堤安全评价指标体系

1.1 评价指标

海堤是一个复杂的系统,影响其安全的因素众多,在对其进行安全评价时,应尽量考虑主要因素。海堤主要有漫堤和溃堤两种破坏形式,由于引起这两种破坏的因素不同,应分别予以考虑。近年来,我国已渐渐开始采用允许部分越浪的海堤设计标准,因此,将漫堤的影响因素归结为潮位和越浪量。在溃堤方面,以海堤结构的局部或整体破坏为出发点,将影响因素归结为海堤整体稳定性、胸墙抗滑和抗倾稳定性、渗透稳定性、护坡及护脚稳定性。具体评价指标包括胸墙抗倾稳定安全系数、胸墙抗滑稳定安全系数、整体稳定安全系数、渗透坡降、护坡块体质量以及护脚块体质量。通过对海堤安全影响因素的分析,运用层次分析法^[9],针对漫堤和溃堤两种破坏形式,分别建立海堤安全评价指标体系,如图1所示。

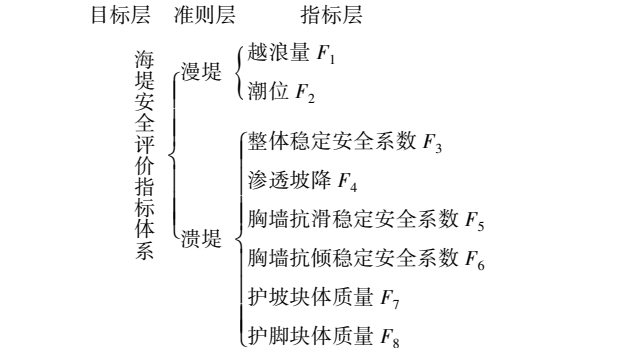


图1 海堤安全评价指标体系

1.2 指标评价标准

由于目前对海堤工程安全评价的研究处于探索阶段,尚缺乏海堤工程的安全等级和评价标准,因此,海堤工程安全评价等级的确定主要参照大坝安

全评价方法,并结合海堤工程的实际情况而确定。参照相关文献,将海堤安全等级分为4级,分别为安全、较安全、不安全、很不安全^[10-11],如表1所示。

表1 指标评价标准

安全等级	评价值	含 义
安全	[0.9,1]	可正常运行,不会出险
较安全	[0.7,0.9)	局部出现险情,需局部加固
不安全	[0.5,0.7)	出险较大险情,需加固
很不安全	[0,0.5)	出现重大险情,无法运行

1.3 指标的度量

由于所建立海堤安全评价指标体系(图1)中各指标的量纲不相同,因此采用无量纲化方法将各指标的实际值转化为可相互比较的相对值。无量纲化是通过数学变换来消除指标量纲影响的方法^[12-13],是多指标综合评价中一个必不可少的步骤。指标的无量纲化过程就是求解隶属度的过程,为简单起见,选择直线型无量纲化方法解决指标的可综合性问题^[14]。根据指标的特性,可以分为正指标、逆指标。正指标,即指标值越大越安全的指标;负指标为指标值越小越安全的指标。根据海堤安全评价指标体系中各指标的特点可知,胸墙抗滑稳定安全系数、胸墙抗倾稳定安全系数、整体稳定安全系数、护坡块体质量、护脚块体质量为正指标,潮位、越浪量以及渗透坡降为逆指标。正指标、逆指标的计算公式分别为

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \begin{cases} 1 & x \geq x_{\max} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0 & x \leq x_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

$$y = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} = \begin{cases} 1 & x \leq x_{\min} \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0 & x \geq x_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: y 为指标的评价值; x 为指标的实际值; $x_{\max}$ 为指标的最大值; $x_{\min}$ 为指标的最小值。

由公式(1)(2)可知,要计算指标的评价值,除了需要确定指标的实际值外,还必须确定有量纲指标的优劣上下限,亦即各指标的最大值 $x_{\max}$ 和最小值 $x_{\min}$ 。下面分别对各评价指标的具体度量方法进行讨论。

a. 越浪量。参照 JTS 145—2—2013《海港水文规范》中 8.2.4 的公式,计算一定的潮位、波浪组合下的平均越浪量。根据 SL 435—2008《海堤工程设计规范》中 6.6 的规定,按允许部分越浪标准设计的海堤,其堤顶面、内坡及坡脚均应进行防护并按防

冲结构要求进行护面设计。允许越浪量应根据海堤工程的级别、重要程度和护面防护结构形式的抗冲性综合确定,同时给出了几种护面结构形式海堤的允许越浪量。因此,可取实际海堤设计允许越浪量为最小值,以规范规定的最大允许越浪量为最大值。

b. 潮位。以海堤的设计高潮位为最小值,以历史最高潮位为最大值。

c. 胸墙抗滑稳定安全系数。根据 SL 435—2008《海堤工程设计规范》附录 M 规定,按照正常运用条件对胸墙的抗滑稳定安全系数进行核算,以海堤设计抗滑稳定安全系数为胸墙抗滑稳定安全系数的最大值,以安全系数设计值的 90% 为最小值。

d. 胸墙抗倾稳定安全系数。与胸墙抗滑类似,按照正常运用条件对胸墙的抗倾稳定安全系数进行核算,以海堤设计安全系数为最大值,以安全系数设计值的 90% 为最小值。

e. 整体稳定安全系数。根据 SL435—2008《海堤工程设计规范》中 10.2.3 规定,海堤整体抗滑稳定可采用瑞典圆弧滑动法计算,抗滑稳定计算应符合附录 M 的规定,其整体抗滑稳定安全系数不应小于规范规定的数值。类似地,按照正常运用条件对胸墙的整体稳定安全系数进行核算,以海堤设计的安全系数为最大值,以安全系数设计值的 90% 为最小值。

f. 渗透坡降。根据 SL435—2008《海堤工程设计规范》中 10.1 规定,渗流计算方法可按照 GB 50286—1998《堤防工程设计规范》附录 E,并根据 SL435—2008《海堤工程设计规范》中 10.1.9 和 10.1.10 中允许坡降规定量化渗透稳定的指标。无论是黏性土还是非黏性土,均可以取临界坡降为最大值,以允许坡降为最小值。

g. 护坡块体质量。护坡稳定性以护坡块体质量来表征。根据 SL435—2008《海堤工程设计规范》附录 J 规定,对于波浪作用下的单个预制混凝土异形块体、块石的稳定质量 Q 可按公式(3)计算,并以此为最大值,以 $0.9Q$ 为最小值。

$$Q = 0.1 \frac{\rho_b H^3}{K_D(\rho_b/\rho - 1)^3 m} \quad (3)$$

式中: Q 为主要护面层的护面体块、块石个体质量; ρ_b 为预制混凝土异型块体或块石的密度; ρ 为水的密度; H 为设计波高; K_D 为系数; m 为坡度。

h. 护脚块体质量。护脚稳定性以护脚块体质量来表征。根据 SL435—2008《海堤工程设计规范》附录 J 规定,护底块石的稳定质量需根据堤前最大波浪底流速确定,同时规定了不同的底流速所需的块石稳定质量。

根据 SL435—2008《海堤工程设计规范》附录 J 中公式计算堤前最大波浪底流速,以同一级别对应的块石质量为最大值,以低一流速级别对应的块石质量为最小值。

1.4 权重的计算

在多指标综合评价中,权重确定得是否合理,直接影响到评价结果的准确性。因此,科学地确定各指标的权重在多指标综合评价中起着举足轻重的作用。早期的堤防工程安全评价研究主要采用构建模糊评判矩阵的方法计算权重系数,然而,该方法在运用中需要通过矩阵的一致性检验,由于堤防工程安全问题的复杂性和人们认识上可能产生的片面性,使得构造出的判断矩阵往往不具有 consistency,为此应对矩阵进行调整,使模糊评判矩阵具有一致性^[15]。近年来,针对判断矩阵较难达到一致性的问题,有学者开始采用 G1 法^[14,16],以避免检验矩阵的一致性,计算量大幅度减小。本文采用 G1 法计算权重系数。

G1 法计算权重分 3 个步骤,首先对各指标按照重要性大小排序,进而采用一定的标度方法量化相邻指标间的相对重要性,最后通过归一化条件得到各指标的权重。本文采用乘积标度法^[17]量化指标间的相对重要性,即在对指标重要性两两比较时,不先划分过多的等级,而只设置 2 个等级,即指标 A 与指标 B 的重要性“相同”或“稍微大”,然后以此作为基础递进乘积分析,这样的权重确定方法具有较大的灵活性。将 9/9 ~ 9/1 标度法、10/10 ~ 18/2 标度法、指数标度法中“稍微大”的标度值的平均值 (1.354) 作为乘积标度法“稍微大”的标度值。当指标 A 与指标 B 之间的重要性用“稍微大”还不足以反映时,可以用 n 个“稍微大”来反映,则指标 A 与指标 B 的相对重要性为 1.354^n 。对漫堤形式和溃堤形式,各指标的权重值如下:

在漫堤破坏形式中,主要考虑潮位 (F_1) 和越浪量 (F_2) 的作用,两者共同控制漫堤破坏的风险,可以认为两者的重要性相同。因此,潮位和越浪量的权重为 $W = (0.5, 0.5)$ 。

在溃堤破坏形式中,评价指标包括整体稳定安全系数 (F_3)、渗透坡降 (F_4)、胸墙抗滑稳定安全系数 (F_5)、胸墙抗倾稳定安全系数 (F_6)、护坡块体质量 (F_7) 以及护脚块体质量 (F_8)。一般认为,渗透失稳在海堤破坏中较为常见,且往往会引起管涌、垮堤等较为严重的破坏;另外,整体滑动失稳也是海堤破坏的主要形式之一。胸墙以及护坡、护脚的破坏是海堤局部结构的破坏,有可能进一步引起海堤整体的功能性破坏,但其本身并不会对海堤主体结构产生严重的破坏;相对于护坡、护脚而言,胸墙对于海

堤结构的影响更为显著,胸墙破坏直接导致越浪量增加,会进一步加剧波浪对于海堤的破坏作用。因此,各指标按重要性排序为 $F_3 = F_4 > F_5 = F_6 > F_7 = F_8$, 指标间的相对重要性为: $\frac{\omega_3}{\omega_4} = 1.0, \frac{\omega_4}{\omega_5} = 1.354^2, \frac{\omega_5}{\omega_6} = 1.0, \frac{\omega_6}{\omega_7} = 1.354, \frac{\omega_7}{\omega_8} = 1.0$, 由归一化条件 $\sum \omega_i = 1$, 最终得到各指标的权重为 $W = (0.257, 0.257, 0.140, 0.140, 0.103, 0.103)$ 。

1.5 综合评价

根据海堤工程风险因子组合的分析层次结构, 由加法合成法得出评价指标体系的安全评价价值:

$$R = \sum \omega_i y_i \tag{4}$$

式中: R 为海堤安全评价价值; ω_i 为第 i 个指标的权重; y_i 为第 i 个指标的评价价值。据此, 对照表 1, 得到海堤评价堤段的综合安全评价等级。

2 实例分析

某海堤位于浙江省台州市东部新区围垦工程区域的东侧, 面临东海。该堤段总长 7 614.56 m, 西北东南走向, 堤线走向为正东方向偏北 $7^{\circ}6'47''$, 北段沿 $-1.6 \sim -1.8$ m (采用 1985 国家高程基准, 下同) 等高线布置。该堤段建筑物级别为 3 级, 设计标准为 50 年一遇高潮位遭遇 50 年一遇风浪, 按允许部分越浪设计。50 年一遇设计潮位为 5.19 m, 100 年一遇设计潮位为 5.58 m, 堤前设计波要素见表 2。

海堤断面结构 (图 2) 采用上陡下斜设消浪平台的复合断面方案, 堤顶高程为 7.80 m, 防浪墙顶高程为 8.60 m, 迎海坡的平台高程为 4.50 m, 迎海面采用四脚空心块体护面, 堤脚处采用大块石护底。堤身由抛石体以及闭气土组成, 地基土主要为淤泥质粉

质黏土和粉质黏土, 计算采用 2011 年 8 月的最新地质勘测资料。

以该堤段为例, 计算不同潮位、波高组合下的海堤安全评价价值。计算中, 只考虑波浪正向入射的情况, 取波浪的周期为 14.0 s, 波长根据频散关系试算得到。分别建立各指标的隶属函数。将各指标的实际值归一化为各指标的评价价值, 结合指标权重, 可得到不同潮位、平均波高组合下海堤漫堤、溃堤的安全评价价值, 计算结果分别列于表 3 和表 4, 当安全评价价值小于 0.5, 表示海堤处于很不安全的状态。

将表 3 和表 4 中的评价价值与表 1 中指标评价标准进行比较, 即得到海堤的安全评价等级。总体而言, 该堤段的漫堤风险较溃堤风险大。漫堤风险方面, 当潮位、波高小于 50 年一遇的标准时, 评价价值为 1 或 0.99, 此时堤段处于安全状态; 当潮位、波高达到 100 年一遇的标准时, 评价价值在 0.5 ~ 0.7 之间, 堤段处于不安全状态, 堤防将发生漫堤破坏; 当潮位、波高大于 100 年一遇的标准时, 评价价值小于 0.5, 堤段处于很不安全状态, 堤防的后方保护区将被严重淹没。溃堤风险方面, 当潮位、波高小于 100 年一遇的标准时, 其评价价值均大于 0.7, 表明堤段结构稳定性较高, 可保证不出现较大的险情, 但需要进行局部加固; 但当潮位、波高大于 100 年一遇的标准时, 评价价值小于 0.7, 说明在较大的台风暴潮来临时, 该堤段仍有溃堤的风险, 应在台风到来之前重点加固。因此, 该堤段的现有状态可满足 50 年一遇的防潮标准; 在 100 年一遇的潮位、波浪组合下, 将会出现漫堤破坏, 局部出现结构破坏, 漫堤风险大于溃堤风险。可见, 应用本方法得到的海堤安全评价价值, 在防潮防台中可为水利部门的防汛决策提供依据。

表 2 研究堤段堤前波要素

设计标准	方向	$\bar{H}/\text{m}$	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{2\%}/\text{m}$	$H_{4\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	周期/s	波长/m	破碎波高/m	堤前水深/m	与海堤法线夹角/($^{\circ}$)
50 年一遇	东北—东北东	2.14	4.11	3.88	3.63	3.10	14.7	119.2	4.18	6.96	0
	东—东南东	2.44	4.18	4.18	4.03	3.47	14.0	113.2	4.18	6.96	18
100 年一遇	东北—东北东	2.46	4.39	4.37	4.10	3.52	16.3	135.4	4.39	7.31	0
	东—东南东	2.67	4.39	4.39	4.36	3.77	15.6	129.4	4.39	7.31	17

注: $\bar{H}$ 为平均波高; $H_{1\%}$ 、 $H_{2\%}$ 、 $H_{4\%}$ 、 $H_{13\%}$ 分别为频率为 1%、2%、4%、13% 时的波高。

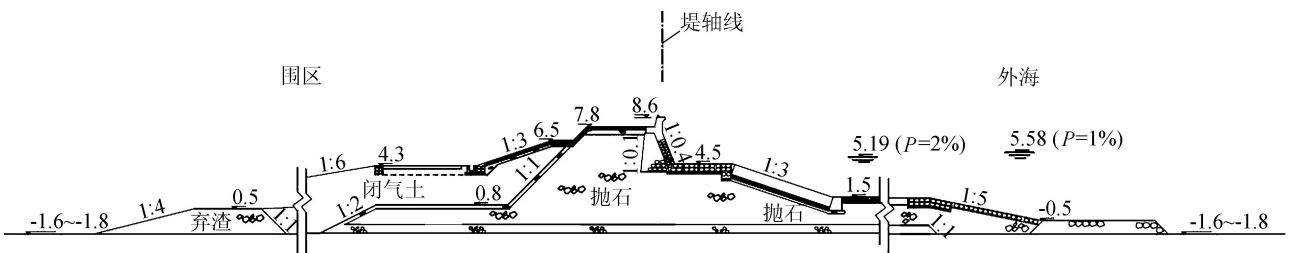


图 2 研究堤段断面示意图 (高程单位: m)

表 3 海堤漫堤安全评价计算结果

平均 波高/ m	不同潮位下的评价值						
	5. 10 m	5. 20 m	5. 30 m	5. 40 m	5. 50 m	5. 60 m	5. 70 m
2. 00	1. 00	0. 99	0. 87	0. 76	0. 64	0. 52	0. 50
2. 10	1. 00	0. 99	0. 87	0. 76	0. 64	0. 52	0. 50
2. 20	1. 00	0. 99	0. 87	0. 76	0. 64	0. 52	0. 50
2. 30	1. 00	0. 99	0. 87	0. 76	0. 64	0. 52	0. 50
2. 40	1. 00	0. 99	0. 87	0. 76	0. 64	0. 52	0. 50
2. 50	1. 00	0. 99	0. 87	0. 76	0. 64	0. 52	0. 50
2. 60	1. 00	0. 99	0. 87	0. 76	0. 64	0. 52	0. 50
2. 70	1. 00	0. 99	0. 87	0. 76	0. 62	0. 47	0. 41
2. 80	1. 00	0. 97	0. 82	0. 66	0. 50	0. 34	0. 27
2. 90	0. 92	0. 86	0. 70	0. 53	0. 36	0. 19	0. 11
3. 00	0. 80	0. 74	0. 57	0. 39	0. 22	0. 04	0. 00
3. 10	0. 68	0. 61	0. 43	0. 26	0. 14	0. 02	0. 00
3. 20	0. 56	0. 49	0. 37	0. 26	0. 14	0. 02	0. 00
3. 30	0. 50	0. 49	0. 37	0. 26	0. 14	0. 02	0. 00
3. 40			0. 37	0. 26	0. 14	0. 02	0. 00
3. 50					0. 14	0. 02	0. 00
3. 60							0. 00

表 4 海堤溃堤安全评价计算结果

平均 波高/ m	不同潮位下的评价值						
	5. 10 m	5. 20 m	5. 30 m	5. 40 m	5. 50 m	5. 60 m	5. 70 m
2. 00	0. 98	0. 98	0. 98	0. 98	0. 98	0. 71	0. 69
2. 10	0. 98	0. 98	0. 98	0. 98	0. 98	0. 70	0. 69
2. 20	0. 98	0. 98	0. 98	0. 98	0. 97	0. 70	0. 69
2. 30	0. 98	0. 98	0. 98	0. 98	0. 93	0. 70	0. 69
2. 40	0. 98	0. 98	0. 98	0. 98	0. 89	0. 70	0. 69
2. 50	0. 98	0. 98	0. 98	0. 98	0. 70	0. 70	0. 69
2. 60	0. 98	0. 98	0. 98	0. 98	0. 70	0. 70	0. 69
2. 70	0. 98	0. 98	0. 98	0. 87	0. 70	0. 70	0. 69
2. 80	0. 98	0. 98	0. 98	0. 77	0. 70	0. 70	0. 69
2. 90	0. 98	0. 98	0. 98	0. 72	0. 70	0. 70	0. 69
3. 00	0. 98	0. 98	0. 98	0. 70	0. 70	0. 70	0. 69
3. 10	0. 98	0. 98	0. 98	0. 70	0. 70	0. 70	0. 69
3. 20	0. 98	0. 98	0. 98	0. 70	0. 70	0. 70	0. 69
3. 30	0. 98	0. 98	0. 98	0. 70	0. 70	0. 70	0. 69
3. 40			0. 98	0. 70	0. 70	0. 70	0. 69
3. 50					0. 70	0. 70	0. 69
3. 60							0. 69

3 结 语

本文针对海堤的漫堤、溃堤两种破坏形式,分别建立海堤安全评价指标体系,并讨论了各指标的量化方法和权重计算方法。将已建立的海堤安全风险评估指标体系应用于浙江台州某海堤,对该堤段的漫堤风险、溃堤风险分别作出评价。

本文所建立的评价体系不再以具体的土质参数为指标,将漫堤破坏的评价指标选为潮位以及越浪量,将溃堤破坏的评价指标选为胸墙抗倾稳定安全系数、胸墙抗滑稳定安全系数、整体稳定安全系数、渗透坡降、护坡稳定安全系数以及护脚稳定安全系数。该评价指标体系主观性大幅度减小,可操作性

更强,也更符合我国海堤工程的设计特点。但海堤安全影响因素众多而且复杂,本文所建立的海堤安全评价指标体系尚有不完善之处,例如,指标度量中上下限的确定等。因此,未来将收集更多的现场观测资料,通过评价指标体系和赋值权重的优化,进一步完善海堤安全评价方法。

参考文献:

[1] 王灶平,刘桂平,龚政,等. 考虑风、潮联合概率分布的海堤超越频率分析[J]. 水利水电科技进展,2014,34(6): 18-22. (WANG Zaoping, LIU Guiping, GONG Zheng,et al. Exceeding cumulative probability analysis of seawall considering the joint probability distribution of tide level and wind speed [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(6): 18-22. (in Chinese))

[2] 陈红. 堤防工程安全评价方法研究[D]. 南京:河海大学,2004.

[3] PILARCZYK K W. Dikes and revetments design, maintenance and safety assessment[M]. Netherlands: A A Balkema Publishers,1998.

[4] WOJCIECHOWSKA K, KOK M. Practical derivation of operational dike failure probabilities [J]. Reliability Engineering & System Safety,2013,113(5): 122-130.

[5] 马福恒,吴中如,顾冲时,等. 模糊综合评判法在大坝安全监控中的应用[J]. 水电能源科学,2001,19(1): 59-62. (MA Fuheng, WU Zhongru, GU Chongshi, et al. Application of the fuzzy comprehensive appraisal methods in the dam safety monitoring [J]. Water Resources and Power,2001,19(1): 59-62. (in Chinese))

[6] 张小飞,苏国韶,吴彰敦. 基于层次模糊综合评价的水库大坝安全评价法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2009,34(3): 321-325. (ZHANG Xiaofei, SU Guoshao, WU Zhangdun. A new safety evaluation method on dams based on analytic hierarchy process and fuzzing mathematics theory [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2009, 34 (3): 321-325. (in Chinese))

[7] 蔡新,严伟,李益,等. 灰色理论在堤防安全评价中的应用[J]. 水力发电学报,2012,31(1): 62-66. (CAI Xin, YAN Wei, LI Yi, et al. Grey theory in comprehensive evaluation of dyke safety risk[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(1): 62-66. (in Chinese))

[8] 田林钢,靳聪聪,巴超. 改进的模糊层次分析法在海堤工程安全评价中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013,46(3): 317-320. (TIAN Lingang, JIN Congcong, BA Chao. Application of improved fuzzy AHP to safety evaluation of seawall engineering [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46 (3): 317-320. (in Chinese))

(下转第 68 页)

- 层参数的实例讨论[J]. 勘察科学技术,2012(6):5-9. (LIU Yan, XIN Lujun, GUO Jianqing, et al. Discussion of determining anisotropic aquifer parameters by pumping tests data[J]. Site Investigation Science and Technology, 2012(6):5-9. (in Chinese))
- [4] 《供水水文地质手册》编写组. 供水水文地质手册[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [5] 陈崇希,林敏. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1999.
- [6] 蒋名亮,韦佳,郭建青,等. 改进直线解析法确定各向异性含水层参数的计算[J]. 中国农村水利水电,2014(10):56-60. (JIANG Mingliang, WEI Jia, GUO Jianqing, et al. The calculation of anisotropy aquifer parameters by improved linear analytical method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(10):56-60. (in Chinese))
- [7] 高瑞忠,朝伦巴根,贾德彬,等. 基于非稳定流抽水试验的BP神经网络确定含水层参数研究[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(6):510-512. (GAO Ruizhong, CHAO Lunbagen, JIA Debin, et al. Determining aquifer parameters with BP neural network based on unsteady flow pumping test [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(6):510-512. (in Chinese))
- [8] 魏连伟,邵景力,张建立,等. 模拟退火算法反演水文地质参数算例研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4):612-614. (WEI Lianwei, SHAO Jingli, ZHANG Jianli, et al. Application of simulated annealing algorithm to hydrogeological parameter inversion [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2004, 34(4):612-614. (in Chinese))
- [9] 周秀秀,常安定,郭建青,等. 混沌粒子群优化算法在确定含水层参数中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1):96-99. (ZHOU Xiuxiu, CHANG Anding, GUO Jianqing, et al. Application of chaos particle swarm optimization algorithms to estimation of aquifer parameters [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(1):96-99. (in Chinese))
- [10] 王媛英,刘元会,郭建青,等. 差分-单纯形算法计算各向异性含水层参数[J]. 云南农业大学学报,2014,29(4):553-557. (WANG Yuanyin, LIU Yuanhui, GUO Jianqing, et al. The estimation of anisotropic aquifer parameters by differential-simplex algorithm[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2014, 29(4):553-557. (in Chinese))
- [11] 李伟,赵燕容,朱旭芬,等. 自动配线法求水文地质参数的优化路径法研究[J]. 勘察科学技术,2013(2):6-10. (LI Wei, ZHAO Yanrong, ZHU Xufen, et al. Study on optimization path method of solving hydrogeologic parameters by automatic curve-fitting method [J]. Site Investigation Science and Technology, 2013(2):6-10. (in Chinese))
- [12] BATU V. Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis[M]. New York:John Wiley & Sons,1998:206-223.
- [13] 王慧文. 偏最小二乘回归法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [14] 阎凤文. 测量数据处理方法[M]. 北京:原子能出版社,1988.

(收稿日期:2015-01-04 编辑:骆超)

(上接第63页)

- [9] SAATY T L. Concepts, theory and techniques: rank generation, preservation and reversal in AHP[J]. Decision Sciences, 1987, 18(1):157-177.
- [10] 汪自力,顾冲时,陈红. 堤防工程安全评估中几个问题的探讨[J]. 地球物理学进展,2003,18(3):391-394. (WANG Zili, GU Chongshi, CHEN Hong. Discussion on several related problems of the levee's safety assessment [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3):391-394. (in Chinese))
- [11] 介玉新,胡韬,李青云,等. 层次分析法在长江堤防安全评价系统中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12):1634-1637. (JIE Yuxin, HU Tao, LI Qingyun, et al. Application of analytical hierarchy process in the comprehensive safety assessment system of Yangtze River Levee [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(12):1634-1637. (in Chinese))
- [12] 胡永宏,贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [13] 刘亚莲,周翠英. 堤坝失事风险的突变评价方法及其应
- 用[J]. 水利水电科技进展,2010,30(5):5-8. (LIU Yalian, ZHOU Cuiying. Catastrophe method of levee failure risk assessment and its application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(5):5-8. (in Chinese))
- [14] 丁丽. 堤防工程风险评价方法研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [15] 顾冲时,汪自力,刘成栋. 堤防工程安全评估专家赋权模型[J]. 岩土力学,2006,27(12):2099-2104. (GU Chongshi, WANG Zili, LIU Chengdong. Experts' weight model assessing embankment safety [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12):2099-2104. (in Chinese))
- [16] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [17] 何金平,李珍照,施玉群. 大坝结构实测性态综合评价中的权重问题[J]. 武汉大学学报(工学版),2001,34(3):13-17. (HE Jinping, LI Zhenzhao, SHI Yuqun. Weight question about comprehensive evaluating dam safety monitoring behavior [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(3):13-17. (in Chinese))

(收稿日期:2015-02-03 编辑:骆超)