

堤坝失事风险的突变评价方法及其应用

刘亚莲¹, 周翠英²

(1. 广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510635; 2. 中山大学工学院岩土工程与信息技术研究中心, 广东 广州 510275)

摘要 通过对堤坝失事模式和影响因素分析, 确定了堤坝失事风险评价指标体系。依据堤防工程的等级、防洪标准、失事可能性及失事后果将堤坝失事风险等级划分为高风险、较高风险、一般风险、较低风险和低风险 5 个等级。利用突变级数法中归一公式的内在作用机制确定各评价指标的权重, 避免了对各因素进行主观赋权, 使评价结果更加科学合理。将该方法应用于广东省北江大堤石角墟—蚬壳岗堤段的风险评价中, 结果表明该堤段属于一般风险堤段。

关键词 突变级数 堤防 堤坝失事风险评价 评价指标体系 北江大堤石角墟—蚬壳岗堤段

中图分类号 TV39

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2010)05-0005-04

Catastrophe method of levee failure risk assessment and its application / LIU Ya-lian¹, ZHOU Cui-ying² (1. Guangdong Technical College of Waster Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China; 2. School of Engineering Research Center for Geotechnical Engineering and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract : An index system for levee failure risk assessment was established based on the analysis of factors and modes of levee failure. The levee failure risk levels were divided into 5 categories of high, relatively high, general, relatively low and low levels according to the levee class, flood-control standards, failure possibility and failure consequences. The internal mechanism of normalized formula in the catastrophe progression method was employed to determine weight of every index and to avoid subjective weight of any factor so as to obtain more rational and scientific assessment results. The proposed method was applied to the risk assessment of Shijiaoxu-Xianqiaogang levee section of Beijiang Dike in Guangdong Province, resulting in the risk to be general level.

Key words : catastrophe progression; levee; levee failure risk assessment; assessment index system; Shijiaoxu-Xianqiaogang section of Beijiang Dike

风险是非期望事件发生的概率及由此而产生的经济和非经济损失。风险普遍存在, 具有客观性、突发性、不确定性和相对性等特征。由于堤坝在设计、施工、运行和管理过程中存在不确定性, 因此堤防存在失事的风险, 对堤防工程进行风险分析和评价是确保堤防工程安全的依据。

堤坝风险分析的任务是对工程中存在的各种风险进行识别、估计和评价, 并在此基础上采用各种风险管理技术进行处理与决策, 对风险实施有效控制和管理。已有文献对水利工程风险分析主要集中在利用常规概率分析方法估计因某一种或某几种随机因素引起工程失事或灾变的可能性^[1-7], 对风险评价研究较少, 对堤防工程综合风险评价未见报道。基于此, 笔者在堤坝失事模式及其影响因素分析的基础上, 选取防洪标准、堤顶高程、泄洪能力、防洪调

度、堤坡坡度、填土质量浸润线高度、地震烈度、洪水位、堤身结构、堤基结构、施工质量、穿堤建筑物老化程度、迎流顶冲情况等为评价指标。根据突变级数评价法的基本原理, 首先利用专家打分法获得各底层评价指标的评价值, 并根据各指标的性质分别按“越大越优”或“越小越优”的原则采用隶属度函数法将各指标的原始数值转换为 0~1 的突变级数, 然后利用突变评价的各归一公式由底层逐层向上进行归一化计算, 最后得到堤防失事风险的总评价值, 为堤防工程风险评价提供一种新途径。

1 堤坝失事模式及风险评价指标体系

1.1 堤坝失事模式及其影响因素分析

堤坝失事根据其发生原因可以分为洪水漫顶、失稳破坏、渗流破坏、结构破坏等。

基金项目 广东省自然科学基金(07006119)

作者简介 刘亚莲(1966—), 女, 湖南桃江人, 副教授, 博士, 从事水工结构、岩土工程研究。E-mail: liuyula306@163.com

a. 洪水漫顶冲刷破坏。洪水漫顶是当堤防遭遇超标准洪水时,由于江河水位猛涨超过堤顶高程,水流漫过堤顶而冲刷坝体的现象,漫顶是导致堤防溃决的主要原因之一,其影响因素主要有堤坝的防洪标准、堤顶超高、泄水建筑物的泄洪能力和防洪调度方式等。

b. 堤坝边坡失稳破坏。边坡失稳破坏是在孔隙水压力、自重等荷载作用下土体抗剪强度不足而引起堤坝边坡滑动的现象,其主要表现形式有滑坡和崩岸,影响因素主要是边坡坡度、填土质量、浸润线高度和地震烈度等。堤坝边坡失稳破坏情况发生前一般可以观察到有纵向裂缝出现。

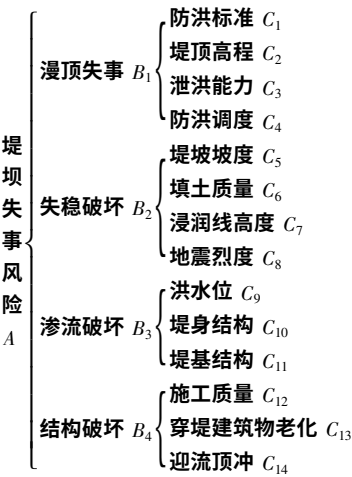
c. 渗流破坏。堤坝渗流破坏的常见形式主要有堤坡散浸冲刷、管涌、流土、接触冲刷和接触流土。渗透变形破坏的发生和演变过程与堤坝的外界水力条件、堤身结构、堤基结构和防渗排水措施等因素有关。

d. 结构变形破坏。结构变形破坏主要表现为由于不均匀沉降和温度变化而引起裂缝发生或塌陷等现象,其影响因素主要有施工质量、穿堤建筑物老化和迎流顶冲等。

1.2 堤坝失事风险评价指标体系

根据堤坝主要失事模式和影响因素分析,将堤防失事综合风险分为:漫顶失事、失稳破坏、渗流破坏和结构破坏 4 种基本类型、14 个基础指标,如表 1 所示。

表 1 堤坝失事风险指标体系



2 突变级数评价法基本原理

突变级数评价法又称突变模糊隶属函数,它把受多个控制变量影响的复杂系统看成一个矛盾体系,把系统的各控制变量看成内部矛盾的诸方面,系统的状态是它们斗争统一的结果,根据它们对状态变量作用的不同,可把它们分为矛盾的主、次方

面^[8-9]。其步骤是首先对系统的总目标进行多层次矛盾分解,然后利用归一公式对系统各层矛盾进行逐层综合量化运算,最后得出一个总的参数,即为系统状态的总的隶属函数,从而对系统进行评价或判别。该方法与常用的层次分析法相比,主要优点是不需人为确定各指标的权重,而是根据各目标在归一公式中的内在矛盾地位和机制决定各指标的重要性,减少了评价中的主观性,且计算简单方便,因而在安全领域中的应用越来越广泛。文献[10]将突变评价法评价结果与改进层次分析法的评价结果进行比较,得出突变评价法评价结果可靠的结论;文献[11]将突变评价法用于环境影响评价中;文献[12]将突变评价法用于长江流域洪灾综合风险社会评价中;文献[13]利用突变评价法对边坡稳定性进行综合评判。

利用突变理论对系统或目标进行评价或判断,首先必须对评价目标逐层次进行主次矛盾分解,将每层各因素按先主后次排列成树状目标层次结构。因为上层指标一般比较综合和抽象,难以量化,对其进行层次分解是为了根据底层可以量化的指标逐层向上归纳,最后得到最上层指标的量化值。

常用的突变模型及其归一公式见表 2。

表 2 常用的 3 种突变模型及归一公式

突变模型	势函数	归一公式
尖点突变模型	$V_{ab}(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx$	$x_a = a^{\frac{1}{2}}, x_b = b^{\frac{1}{3}}$
燕尾突变模型	$V_{abc}(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx$	$x_a = a^{\frac{1}{2}}, x_b = b^{\frac{1}{3}}, x_c = c^{\frac{1}{4}}$
蝴蝶突变模型	$V_{abcd}(x) = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}ax^4 + \frac{1}{3}bx^3 + \frac{1}{2}cx^2 + dx$	$x_a = a^{\frac{1}{2}}, x_b = b^{\frac{1}{3}}, x_c = c^{\frac{1}{4}}, x_d = d^{\frac{1}{5}}$

表 2 中 $f(x)$ 表示系统的势函数, x 为系统的状态变量, a, b, c, d 为系统的控制变量。归一化公式是由系统势函数求一阶导数 $f'(x) = 0$ 得系统的平衡曲面方程,由二阶导数 $f''(x) = 0$ 求得平衡曲面的奇点集,联立求解一阶导数方程 $f'(x) = 0$ 和二阶导数方程 $f''(x) = 0$ 所得分解形式的分歧方程,对分歧集方程进行归一化处理得到的。

利用突变理论进行综合评价时,常用的评价准则有 3 种:①非互补准则。当各控制变量对状态变量的作用不可替代,即不可相互弥补时,按‘大中取小’原则选取状态变量 x 值。②互补准则。当各控制变量对状态变量的作用可以相互替代,即可以相互弥补其不足时,取各控制变量计算所得的状态变

量的平均值作为 x 的计算结果。③过阈互补准则。当各控制变量要求过一定阈值后才能相互弥补其不足时,按过阈值后取平均值的原则选取 x 值。

3 工程应用

选用北江大堤石角墟—蚬壳岗堤段为研究对象,该段堤防属险工堤段,曾多次出现险情,经多次除险达标加固,现大堤抗洪能力得到了较大提高。

3.1 工程概况

北江大堤是全国七大必须确保的堤防之一,更是南粤首屈一指的防洪屏障,大堤保障范围内的生产总值约占全省的 1/3、全国的 1/27,其安危直接威胁广州和珠江三角洲 1 000 多万人民、5 000 多亿元工农业产值、6.67 万多公顷农田以及众多重要基础设施。石角墟—蚬壳岗段堤身原填土为素填土,但土质不均匀,上部 0~3 m 多为紫红色砾质粉质黏土,含少量强风化岩碎块,以下灰~灰黄色粉质黏土、粉土,局部夹有细中砂,成分较复杂,堤身属中等透水至弱透水,堤外坡(迎水坡)坡比为 1:2.5~1:3,堤内坡(背水坡)坡比为 1:2~1:3,堤顶宽度为 6~7 m,堤基为强透水地基,地基从下至上由卵砾石粗砂、粗砂(或中砂)、砾质粗砂、细砂等砂层组成,表面覆盖黏土厚度为 2~5 m 不等,透水层总厚度约为 30 m,地基透水性强。该堤段每遇较大洪水,外坡因高水位受风浪或流态改变而受冲刷塌坡,内坡脚部分堤段有堤身渗水、牛皮胀等现象,基础渗漏,堤内出现管涌、冒水、冒砂等险情。为达安全标准,2005 年对该堤段进行了堤身加高培厚、抛石护脚、填砂压渗、建造减压井等除险加固处理,目前该堤段已达标验收。笔者在此基础上对该堤段进行综合风险评价。

3.2 底层指标赋值及无量纲化

首先根据实测和分析,采用专家评分法对底层基础指标进行赋值,然后将各指标的原始数值采用隶属度函数法转换为 0~1 的突变级数。对于初始值越大导致风险评价价值越大的指标采用式(1)转换:

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

对于初始值越小导致风险评价价值越大型的指标按式(2)转换:

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

3.3 风险等级划分

依据堤防的等级、防洪标准、失事可能性及失事后果将堤防风险等级划分为风险高、风险较高、风险一般、风险较低和风险低 5 个等级,各等级对应的综合评价价值如表 3 所示。

表 3 堤防工程风险等级划分及涵义

风险等级	评价价值	涵义
高	[0.95~1.00]	堤防防洪标准高,失事后果严重,堤顶超高不满足规范要求,堤坡陡,堤脚水流冲刷,穿堤建筑物老化,堤身填土质量差,浸润线高,汛期运行中出现重大险情的数量众多,失事可能性大
较高	[0.85~0.95]	堤防防洪标准较高,失事后果较严重,堤顶超高达到规范要求,但堤坡较陡,堤脚水流冲刷,堤身质量差,在汛期险情数量众多,部分工程不能正常运行,失事可能性较大
一般	[0.60~0.85]	堤防防洪标准较高,失事后果较严重,堤防各项指标基本达到规范要求,汛期有险情出现,但按照常规的运行方式和抢险条件可以保证堤防工程安全运行,失事可能性不大
较低	[0.30~0.60]	失事后果较小或堤防工程各项指标达到现行规范要求,汛期没有出现险情,失事可能性较小
低	[0~0.30]	防洪标准低,堤防工程各项指标达到或超过现行规范要求,汛期能确保堤防正常运行,失事可能性小

3.4 归一化计算

利用突变评价的各归一公式由底层逐层向上进行归一化计算,可得到最高层评价指标。下面阐述其归一化计算过程。

由表 1 可知,控制变量 C_1, C_2, C_3, C_4 构成蝴蝶突变模型,由归一公式得 $x_{C_1} = C_1^{\frac{1}{2}} = (0.55)^{0.5} = 0.74, x_{C_2} = C_2^{\frac{1}{3}} = (0.05)^{\frac{1}{3}} = 0.37, x_{C_3} = C_3^{\frac{1}{4}} = (0.03)^{\frac{1}{4}} = 0.42, x_{C_4} = C_4^{\frac{1}{5}} = (0.01)^{\frac{1}{4}} = 0.40$ 。因为 C_1, C_2, C_3, C_4 为互补型,依据互补原则,取平均得 $B_1 = 0.48$ 。

同理,对于 C_5, C_6, C_7, C_8 有 $x_{C_5} = 0.32, x_{C_6} = 0.58, x_{C_7} = 0.38, x_{C_8} = 0.49$ 。依据互补原则,取平均得 $B_2 = 0.44$ 。

控制变量 C_9, C_{10}, C_{11} 构成燕尾突变模型,由归一公式得 $x_{C_9} = C_9^{\frac{1}{2}} = 0.77, x_{C_{10}} = C_{10}^{\frac{1}{3}} = 0.36, x_{C_{11}} = C_{11}^{\frac{1}{4}} = 0.43$ 。依据互补原则,取平均得 $B_3 = 0.52$ 。

同理,控制变量 C_{12}, C_{13}, C_{14} 构成燕尾突变模型,由归一公式得 $x_{C_{12}} = 0.35, x_{C_{13}} = 0.48, x_{C_{14}} = 0.52$ 。依据互补原则,取平均得 $B_4 = 0.45$ 。

再对 B_1, B_2, B_3, B_4 采用蝴蝶突变模型进行归一计算,得 $x_{B_1} = 0.69, x_{B_2} = 0.76, x_{B_3} = 0.85, x_{B_4} = 0.85$ 。依据互补原则,取平均得堤防失事风险综合

3.5 结果分析

- a. 根据表 3 中堤防工程风险等级划分标准,从以上计算结果可知,加固后该段堤防风险属一般等级。
- b. 因北江大堤防洪标准高,失事后果严重,尽管经过 2003 年以来的达标加固,堤防安全性得到了较大提高,但由于水文、水流等影响因素存在不确定性和随机性,堤防还存在失事风险,堤防管理部门应加强运行观测,建立健全堤防工程安全评价及预警系统,根据实测资料及工程变化情况对堤防安全进行实时动态评价,为堤防安全管理提供决策依据。
- c. 为对比分析,本文采用模糊综合评价法对该段堤防失事风险进行了评价,结果与突变评价法基本一致,所以认为该方法是可靠的。但突变评价法的评价结果与各指标的重要性排序有关^[9],与评价准则的选取有关,因此,在利用该方法进行评价时应认真研究系统的内在作用机理,准确分析各指标之间的逻辑关系,使计算结果具有科学合理性。

4 结 语

- a. 堤防工程是一个复杂的系统工程,包括堤身、地基及穿堤建筑物,影响堤防失事的因素很多,各因素之间关系复杂,将突变评价法应用于堤防失事风险分析中,利用归一公式的内在作用机制确定各指标的权重,避免了对各因素进行主观赋权,使评价结果更具科学合理性。
- b. 建立了堤防失事风险评价指标体系,并利用突变评价法对北江大堤石角墟—蚬壳岗堤段进行了风险评价,采用专家打分法对各底层评价指标进行评分,然后采用隶属度函数法将各指标的原始数值转换为 0~1 的突变级数,进而利用突变评价的各归一公式由底层逐层向上进行归一化计算,最后得到最高层评价指标,依据堤防的等级、防洪标准和失事可能性及失事后果将堤防风险等级划分为风险高、风险较高、风险一般、风险较低和风险低 5 个等级,从结果得知该堤段风险一般,属于中险。
- c. 北江大堤属于我国七大重大堤防之一,是南粤地区首屈一指的防洪屏障,为确保其安全,国家相关部门投入了大量资金进行达标加固,但因设计、施工、运行和管理中存在诸多的不确定性,堤防失事风险依然存在,管理部门应注重堤防的运行管理,建立健全风险评价及预警系统,确保人民生命财产安全。

参考文献：

[1] 麻荣水. 土石坝风险分析方法及应用[M]. 北京：科学

[2] 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.

[3] 姜树海. 基于随机微分方程的河道行洪风险分析[J]. 水利水运科学研究, 1995(2) : 127-137.

[4] 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.

[5] 王卓甫, 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.

[6] 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.

[7] 姜树海, 范子武. 堤防渗流风险的定量评估方法[J]. 水利学报, 2005, 36(8) : 994-999.

[8] 都兴富. 多目标评价决策的突变数学模型——突变级数法[J]. 科学管理咨询, 1989(12) : 23-28.

[9] 都兴富. 突变理论在经济领域的应用(下)[M]. 成都：成都电子科技大学出版社, 1994.

[10] 施玉群, 刘亚莲, 何金平. 关于突变评价法几个问题的进一步研究[J]. 武汉大学学报 : 工学版, 2003, 36(4) : 132-136.

[11] 周绍江. 突变理论在环境影响评价中的应用[J]. 人民长江, 2003, 34(2) : 52-54.

[12] 李继清, 张玉山, 纪昌明, 等. 突变理论在长江流域洪灾综合风险社会评价中的应用[J]. 武汉大学学报 : 工学版, 2007, 40(4) : 26-30.

[13] 梁桂兰, 徐卫亚, 何育智, 等. 突变级数法在边坡稳定综合评判中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(7) : 1895-1899.

(收稿日期 2010-03-05 编辑 高建群)

· 简讯 ·

“2010 年统计与管理科学国际会议”
将在南京举行

由河海大学和中国现场统计研究会资源与环境统计分会主办的“2010 年统计与管理科学国际学术会议”将于 2010 年 10 月 29—31 日在南京举行。本次会议得到国家自然科学基金委、中科院数学与系统科学研究院应用数学所、中科院复杂随机结构与数据科学重点实验室、上海财经大学、江苏科技大学、河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室等单位的联合支持。会议旨在资源与环境、经济与金融、统计应用方法,以及在资源、环境、生态、经济、金融等领域中统计理论、方法的应用及其相互交叉领域上开展广泛的国际学术交流与合作。大力推广统计方法与管理科学在经济和社会发展各个领域的结合与应用,推动统计、资源、环境、经济与金融等有关方面的前沿研究,开创互补多赢的局面。会议主题包括 ①环境与经济;②资源与环境及水资源管理;③资源与环境、生态等数据的统计分析;④经济计量;⑤金融统计;⑥风险管理;⑦应用统计;⑧生存分析;⑨数据挖掘与机器学习。

(本刊编辑部供稿)