

荆江大堤安全度模糊综合评判方法研究

吴 威 郭兴文 王德信 张子明

(河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 通过对荆江大堤工程管理现状和国内外堤防工程安全评价成果的研究 ,并综合考虑大堤的工程地质条件、河势稳定性、渗流稳定性、滑动稳定性、应力分布及应力水平、附加位移变形、地震液化可能状态等影响堤防安全度的主要因素 ,应用模糊数学理论 ,建立了堤防工程安全评判的理论框架 ,构建了堤防工程综合评判的体系和综合评判模型 ,得出了荆江大堤安全性综合评判结果 .结果表明 ,52 个堤段的综合评判结论与大堤现状比较吻合 .

关键词 荆江大堤 安全度 模糊综合评判

中图分类号 :TV698.1 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2008)02-0224-05

荆江大堤位于长江中游荆江河段北岸 ,全长 182.3 km. 大堤由历代零星民垸、堤垸和分散堤段逐步连接发展而成 ,大部分堤身建筑在冲积土层上 ,其中有 60 多 km 建筑在砂层、古河道、旧城区、穴口及溃口遗址上 . 中华人民共和国成立以后 ,党和国家极为重视荆江大堤的安全 ,逐年对大堤进行除险加固 ,但总体而言 ,防洪的标准仍然较低 ,防洪形势依然严峻 ,因此需要对一些典型堤段进行安全度综合分析及评判 ,为大堤进一步加固提供设计依据 .

目前 ,我国堤防的除险加固主要是依据现有堤防工程技术规范规程的要求 ,分别对堤防工程的堤顶高度、抗滑动稳定性、渗透稳定性等进行计算复核^[1-4] . 由于复核计算工作中模型概化等因素的影响 ,因此最后给出的结论常与堤防现状有一定的差别 ,使工程安全度评判缺乏合理的理论支持 . 基于上述问题 ,本文综合考虑多个素之间的相互影响 ,应用模糊数学理论 ,建立堤防工程安全度评判的理论框架 ,构建堤防工程安全度综合评判的体系和综合评判模型 ,提出便于操作的评判方法 ,最终获得荆江大堤安全度综合评判结果 ,为荆江大堤加固提供设计依据 .

1 模糊综合评判数学模型

模糊综合评判方法是一种运用模糊数学原理分析和评价“模糊性”事物、以模糊推理为主、定性 with 定量相结合、精确与非精确相统一的系统分析评价方法 . 该方法在处理各种难以用精确数学方法描述的复杂系统问题方面表现出独特的优越性^[5-7] . 堤防工程轴线方向比垂直轴线方向长得多 ,长江流域干堤每段工程短则几公里 ,长则数十公里 ,堤线多数位于第四系冲、洪或湖积岩层上 ,沿程地基岩相、岩性和底层构造都不一致 ,堤外滩宽窄不一 ,河泓深度不同 ,堤内地面高程起伏 ,近堤渊塘分布 ,这些因素都对堤防工程的安全性有直接影响 . 本文综合考虑这些影响因素(可量化与不可量化因素) ,根据模糊数学原理建立了堤防工程二级综合评判数学模型 .

1.1 二级模糊综合评判数学模型的建立

设评判因素论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和评判等级论域 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$. 定义 n 个评判因素对 m 个评判结论的评判决策矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

(1)

式中： $\tilde{R}$ ——评判因素对评判结论的评判决策矩阵； r_{ij} ——评判因素 u_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 对评判级别 v_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 的评判结果. 对各评判因素的权重分配为

$$\tilde{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \tag{2}$$

式中 $\tilde{A}$ 是论域 U 上的 1 个模糊子集, 且 $0 \leq a_i \leq 1, \sum_{i=1}^n a_i = 1$.

应用模糊变换的合成运算, 可以得到论域 V 上的一个模糊子集, 即综合评判结果

$$\tilde{B} = \tilde{A} \cdot \tilde{R} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \tag{3}$$

式中 b_j 是评判因素加权后对评判级别 v_j 的综合满意度.

1.2 模糊综合评判算子

模糊综合评判中, 采用不同的算子进行模糊运算, 得到的综合评判结果会有差异^[8-9]. 考虑到堤防综合评判中各因素的相互影响及互补特性, 本文给出“ $\sum-0$ ”算子的定义及特点.

设评判结果为 $\tilde{B} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$, 权函数 $\tilde{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\tilde{R}$ 为相应的模糊关系矩阵. 则进行综合评判时, “ $\sum-0$ ”算子定义如下:

$$b_j = \tilde{A} \cdot \tilde{R} = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \tag{4}$$

式中 $a_i r_{ij}$ 为单因素 u_i 对评判级别 v_j 的综合满意度.

“ $\sum-0$ ”算子中, 权的作用是将单因素满意度 r_{ij} 依比例调整, 而 b_j 是评判因素满意度 r_{ij} 加权平均的结果, 其评价意义是评判因素集诸因素 u_i 的综合满意度的和.“ $\sum-0$ ”算子函数具有补偿功能.

2 荆江大堤安全度综合评判

2.1 综合评判因素集 U 的确定

在堤防工程中, 影响堤防安全性的主要因素有工程地质条件、河势稳定性、渗流稳定性、滑动稳定性、应力分布及应力水平、附加位移变形特点及地震液化范围. 将工程地质条件记为 u_1 , 河势稳定性记为 u_2 , 渗流稳定性记为 u_3 , 滑动稳定性记为 u_4 , 应力分布及应力水平状态记为 u_5 , 附加位移变形状态记为 u_6 , 地震液化可能范围记为 u_7 , 则将影响大堤安全性的主要因素归结为因素集

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\} \tag{5}$$

2.2 综合评判结论集 V 的确定

为衡量堤防工程的安全程度, 必须确定评价标准. 评价应该以现行国家规范为评价标准. 将大堤的评判结果分为 4 个级别: 大堤处于安全状态记为 v_1 , 大堤处于较安全状态记为 v_2 , 大堤处于较不安全状态记为 v_3 , 大堤处于不安全状态记为 v_4 , 将其归结为评判结论集

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} \tag{6}$$

2.3 综合评判方法

考虑到大堤安全度综合评判的复杂性与不够成熟等特点, 本文采用二级模糊综合评判数学模型.

2.3.1 单因素评判

所谓单因素评判, 就是建立因素集 U 中各个因素对应于评判结论集 V 中各元素的隶属函数. 大堤评判中涉及描述性因素(工程地质条件、河势稳定性条件)及确定性数值计算评价因素(渗透稳定性、滑动稳定性等)的分类原则与量化原则. 本文在确定相关分类原则与量化原则时, 主要依据大堤资料以及专家咨询意见并进行适当调整.

2.3.1.1 因素集 U 中各个因素的分类原则

a. 堤基工程地质条件评判分类. 根据堤基地质结构及存在的主要工程地质问题, 结合堤内、外的渗流边界条件, 如外滩宽度、堤内渊塘沟渠、溃口冲刷坑等, 此外还要考虑堤防以往历史险情等因素, 将荆江大堤堤基工程地质条件划分为好(A)、较好(B)、较差(C)和差(D)4类. 各类特征如下:

A类堤主要为Ⅱ₂类堤基, 上覆黏性土层为Q₂或Q₃老黏土, 厚度大于10m, 堤内渊塘较少, 堤外有民垸, 为宽外滩, 基本无渗透稳定和岸坡稳定问题.

B类堤主要为Ⅱ₂类堤基,部分为Ⅲ类堤基,外滩一般较宽,堤内发育有少量渊塘,无严重散浸、管涌险情发生。

C类堤主要为Ⅱ₁或Ⅲ类堤基,外滩宽度一般较窄,部分外滩宽,堤内渊塘较发育且深度较大,险情较多,深泓贴岸,崩岸现象较严重。

D类堤主要为Ⅲ类堤基,砂性土层直接出露地表,一般为窄外滩或无外滩,堤内渊塘发育,有较严重的散浸、管涌险情发生,多属历史险工险段,岸坡迎流顶冲,崩岸现象较严重,危及堤身安全。

b. 河势稳定性评判分类.河势稳定性同样划分为好(A)、较好(B)、较差(C)和差(D)4类.各类特征如下: A类堤段经过加固处理,堤岸牢固. B类堤段附近有深泓,但无崩岸现象出现. C类堤段深泓贴岸,出现局部崩岸现象. D类堤段位于顶冲点附近,深泓贴岸,出现较大的崩岸现象。

c. 大堤渗流稳定性评判分类.以渗透安全系数 k (临界坡降与计算坡降的比值)的数值为依据,大堤的渗透稳定状态根据对大堤典型堤段渗流计算结果可分为4种: A类堤 $k > 2.0$; B类堤 $1.5 \leq k \leq 2.0$; C类堤 $1.0 \leq k \leq 1.5$; D类堤 $k < 1.0$ 。

d. 大堤滑动稳定性评判分类.大堤滑动稳定性分类依据规范规定的安全系数 F_s 进行,荆江大堤级别为Ⅰ级.依据正常运用条件及非常运用条件将大堤滑动状态稳定性分为4种.(a)正常运用条件: A类堤 $F_s > 1.30$; B类堤 $1.1 \leq F_s \leq 1.3$; C类堤 $1.0 \leq F_s < 1.1$; D类堤 $F_s < 1.0$.(b)非常运用条件: A类堤 $F_s > 1.20$; B类堤 $1.1 \leq F_s \leq 1.2$; C类堤 $1.0 \leq F_s < 1.1$; D类堤 $F_s < 1.0$ 。

e. 大堤变形评判分类.以稳定渗流期的附加沉降值 V 为参考依据. A类堤 $V < 0.10\text{ m}$,大堤处于安全状态; B类堤 $0.10\text{ m} < V \leq 0.30\text{ m}$,大堤处于较安全状态; C类堤 $0.30\text{ m} < V \leq 0.50\text{ m}$,大堤处于较不安全状态; D类堤 $V > 0.50\text{ m}$,大堤处于不安全状态。

f. 大堤应力评判分类.考虑拉应力、应力水平以及分布区域大小,提出以下分类原则.(a)应力评判分类: A类堤内无拉应力,其他应力状态好; B类堤内未出现拉应力区,但有个别点出现拉应力; C类堤内出现较小主拉应力区; D类堤内出现较大主拉应力区.(b)应力水平评判分类: A类堤内区域应力水平 $S_L < 0.7$; B类堤 $0.7 < S_L < 0.95$; C类堤 $0.95 < S_L < 1.0$; D类堤 $S_L \geq 1.0$ 。

g. 大堤地震液化范围评判分类.评判主要指标为液化度. A类堤全区域无液化区; B类堤距堤脚200 m外出现液化区; C类堤距堤脚100 m外出现液化区; D类堤距堤脚100 m范围内出现液化区。

2.3.1.2 单因素集隶属函数的确定

单因素隶属函数主要依据专家咨询意见进行适当调整确定.例如对某堤段,取因素集中的渗透稳定性进行考察,若在单因素评判结果中该堤段的渗透稳定性结论为处于较安全状态B类,那么该因素对应于评判结论集的隶属度可拟定为

$$u_3 = \left\{ \frac{0.5}{\text{安全}} \quad \frac{0.7}{\text{较安全}} \quad \frac{0.5}{\text{较不安全}} \quad \frac{0.3}{\text{不安全}} \right\}$$

(7)

即以单项评判结论为基点,相应隶属度为0.7,结论元素每移动一位,其相应的隶属度递减0.2,最小隶属度取0.1.根据上述基本原则,可得到因素集 U 中其他因素对应于评判结论集 V 中评判结论的隶属函数(隶属度).将因素集 U 中各因素相对于评判结论集 V 中元素的隶属度汇总,可得两者之间的关系矩阵。

如某堤段单因素评判结果:地质分类为B类,河势稳定性为B类,渗透稳定性为B类,滑动稳定性为A类,应力状态为B类,位移状态为C类,地震液化状态为A类,则因素集 U 与评判结论集 V 之间的关系矩阵见表1。

2.3.2 二级综合评判

虽然在因素集 U 中选出了影响大堤安全性的主要因素,但每个因素对大堤安全性的控制作用是不同的.因此,在综合评判过程中还需进一步给出因素集 U 中每个因素 u_i 相应的权函数 A ,该权函数经咨询有关专家后确定,经归一化处理后为

表1 因素集、评判结论集关系矩阵

Table 1 Relation matrix between factor matrix and evaluation matrix

因素集	评判结论集隶属度 r_{ij}			
	安全 v_1	较安全 v_2	较不安全 v_3	不安全 v_4
u_1	0.5	0.7	0.5	0.3
u_2	0.5	0.7	0.5	0.3
u_3	0.5	0.7	0.5	0.3
u_4	0.7	0.5	0.3	0.1
u_5	0.5	0.7	0.5	0.3
u_6	0.3	0.5	0.7	0.5
u_7	0.7	0.5	0.3	0.1

$$A = \left\{ \frac{0.15}{\text{工程地质}} \quad \frac{0.16}{\text{河势稳定性}} \quad \frac{0.20}{\text{滑动稳定}} \quad \frac{0.17}{\text{渗透稳定性}} \quad \frac{0.12}{\text{应力}} \quad \frac{0.12}{\text{位移}} \quad \frac{0.09}{\text{地震}} \right\}$$

(8)

根据每段给出的因素集与评判结论集之间的模糊关系矩阵,以及相应的权函数,即可进行大堤综合安全度评判,最终结论根据隶属的相对大小决定.考虑到综合评判中各因素的相互影响因素,综合评判算子选“ $\sum \cdot 0$ ”算子.

2.4 荆江大堤安全度综合评判结果

选取荆江大堤 52 个典型堤段进行地质分类、渗流分类、稳定分类等单因素评判^[10].在此基础上对 52 个典型堤段进行了模糊综合评判.荆江大堤 3 个典型堤段的综合评判运算结果见表 2.

根据 52 个典型堤段的综合评判运算结果^[10],可以得出以下结论:荆江大堤处于安全状态的长度为 25.30 km,占总长度的 13.56%;处于较安全状态的长度为 101.62 km,占总长度的 54.48%;处于较不安全的长度为 59.59 km,占总长度的 31.95%.

表 2 荆江大堤 3 个典型堤段安全度模糊综合评判结果

Table 2 Fuzzy comprehensive evaluation results for three typical sections of Jingjiang Dyke								
堤段 编号	名称桩号	因素集	评价集隶属度				权数	评判 结论
			安全 v_1	较安全 v_2	较不安全 v_3	不安全 v_4		
15	关庙至马王庙 769+000~761+000	u_1	0.5	0.7	0.5	0.3	0.15	较安全 状态
		u_2	0.7	0.5	0.3	0.1	0.16	
		u_3	0.3	0.5	0.7	0.5	0.17	
		u_4	0.3	0.5	0.7	0.5	0.20	
		u_5	0.3	0.5	0.7	0.5	0.12	
		u_6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.12	
		u_7					0.09	
		模糊运算结果	0.248	0.292	0.270	0.190		
21	中陈家湾至文渊村 738+000~731+350	u_1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.15	较不安全 状态
		u_2	0.3	0.5	0.7	0.5	0.16	
		u_3	0.1	0.3	0.5	0.7	0.17	
		u_4	0.5	0.7	0.5	0.3	0.20	
		u_5	0.3	0.5	0.7	0.5	0.12	
		u_6	0.5	0.7	0.5	0.3	0.12	
		u_7					0.09	
		模糊运算结果	0.166	0.276	0.281	0.276		
31	柳口至付家台 699+400~683+800	u_1	0.3	0.5	0.7	0.5	0.15	较安全 状态
		u_2	0.5	0.7	0.5	0.3	0.16	
		u_3	0.3	0.5	0.7	0.5	0.17	
		u_4	0.7	0.5	0.3	0.1	0.20	
		u_5					0.12	
		u_6					0.12	
		u_7	0.5	0.7	0.5	0.3	0.09	
		模糊运算结果	0.247	0.298	0.280	0.175		

3 结 束 语

本文结合荆江大堤堤防工程安全性综合评判项目开展研究,综合考虑了大堤的工程地质条件、河势稳定性、渗流稳定性、滑动稳定性、应力分布及应力水平、附加位移变形、地震液化可能范围等影响堤防安全度的主要因素.综合专家意见,提出了描述性因素与确定性数值计算评价因素的分类原则与量化原则,给出了相应单因素隶属度函数以及综合权函数的确定方法.构建了堤防工程综合评判体系和综合评判模型,为荆江大堤加固工程提供了设计依据.

参考文献:

[1] 董哲仁.堤防除险加固实用技术[M].北京:水利水电出版社,1998:1-40.
[2] 陈德坤,孙继昌.1999 水情年报[M].北京:水利水电出版社,2000:27-45.
[3] 吴兴征,丁留谦,张金接.堤防安全评估系统的设计与实现[J].人民长江,2003(6):55-56.

- [4] 荆江大堤姚圪脑至杨家湾堤段整险加固初步设计报告[R]. 武汉 : 湖北省水利水电勘测设计院, 2001 : 9-50.
- [5] 徐念榕, 许长新. 综合评价方法及其在海涂工程项目选择中的应用[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(2): 45-48.
- [6] 高健, 黄海燕, 周登峰. 拱坝安全度模糊综合评价模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3): 164-167.
- [7] 秦效启, 阮本清, 解建仓. 多层次目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学, 2003(7): 37-42.
- [8] 田钦漠. 模糊综合评价中的权向量与合成算子[J]. 大连水产学院学报, 2000, 15(1): 55-59.
- [9] 徐泽水, 岳振军. 模糊综合评价的两种新算法[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2001, 1(4): 5-8.
- [10] 张子明, 郭兴文. 荆江大堤堤防工程三维有限元分析及安全度综合评判[R]. 南京: 河海大学, 2006 : 10-120.

Fuzzy comprehensive method for evaluation of safety of Jingjiang Dyke

WU Wei, GUO Xing-wen, WANG De-xin, ZHANG Zi-ming

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Based on analysis of the management of Jingjiang Dyke and worldwide safety evaluation results of other dykes around the world, a theoretical framework and comprehensive evaluation system were established using fuzzy mathematics theory and taking into account influencing factors, such as geological conditions, stability of river regime, seepage and sliding stability, stress distribution and level, additional displacement deformation and seismic liquefaction regions. Comprehensive evaluation results of the safety of Jingjiang Dyke indicate that the results of 52 dyke sections accord with the present status.

Key words : Jingjiang Dyke ; safety ; fuzzy comprehensive evaluation

《水资源保护》征订启事

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊

《水资源保护》是河海大学和环境水利研究会主办的科学技术期刊,创刊于1985年,双月刊,96页,国内外公开发行,国内统一连续出版物号:CN32-1356/TV.现为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊和江苏省一级期刊.

《水资源保护》主要刊登与水资源保护有关的基础研究,应用技术,工程措施,综合述评,专题讲座,国外动态,书刊评介,科技简讯,水资源管理、评价、监测、优化配置,节水技术,水环境污染控制等方面的文章.近年来,重点关注与水有关的生态环境领域中的研究方向,新增设相关的基础研究、防治技术、城市水环境治理等内容.

主要读者对象:全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理干部以及大专院校的师生.

《水资源保护》邮发代号 28-298,双月刊,8元/期,全年48元,每逢单月30日出版.可全国各地邮局订阅,也可直接与编辑部联系.

编辑部地址 210098 南京市西康路1号 河海大学《水资源保护》编辑部

电话 (025) 83786642

传真 (025) 83786642

E-mail bh@hhu.edu.cn