

堤防工程风险评价体系研究

王亚军¹ 吴昌瑜² 任大春²

(1. 浙江大学建工学院, 浙江杭州 310027; 2. 长江科学院, 湖北武汉 430010)

【摘要】 分析了堤防系统的层次性及模糊性, 在此基础上建立了堤防工程风险评价系统指标体系和评价结构模型。结合 FCT(Fuzzy Consistency Theorem)及 AHP(Analytic Hierarchy Process)定义了模糊一致空间, 实现了基于模糊一致矩阵的权重反演。针对各典型护岸段, 通过加固前江堤系统风险评价的结论, 实现了护岸工程的风险等级划分, 进而按照局部与整体加固两种情况完成了加固后江堤系统的风险评价。

【关键词】 堤防工程风险评价; 层次分析法; 模糊一致理论

【中图分类号】 TU 457

Research for Dike Section Risk Evaluation System Based on Fuzzy Consistency Theorem as Well as Analytic Hierarchy Process

Wang Yajun¹ Wu Changyu² Ren Dachun²

(1. College of Civil Engineering and Architecture of Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027 China;

2. Changjiang Scientific Institute, Wuhan Hubei 430010 China)

【Abstract】 Dike construction risk evaluation system and risk evaluation definition model are settled down with the analysis of dike construction hierarchy as well as fuzzy character. Inclusive of Fuzzy Consistency Theorem and Analytic Hierarchy Process with the definition of fuzzy consistency space, weight reverse analysis math model is realized. By the conclusion of dike construction system risk evaluation for pre-fortification situation, dike bank safety construction risk grade is ranked for representative bank safety construction, by which, dike system risk evaluation for post-fortification situation is covered according to local fortification and integral fortification.

【Key Words】 dike construction risk evaluation; analytic hierarchy process; fuzzy consistency theorem

0 引言

堤防是人类抵御洪灾、引蓄水源的利器, 堤防所在处又多为人口繁庶、经济发达之地区。江河堤防安全与否已成为沿线人民生命财产安全与否的晴雨表^[1]。战线长是堤防工程的最大特点, 全国各大河流绵延数万公里, 仅长江干堤堤防就达3 600 km。这还不包括各支民堤的堤防。长江堤防工程按照堤防功能、地理位置等特点进行段划分后, 各干堤或大堤也长达数十以至数百公里, 给堤防管理工作造成了很大的难度, 国家为此投入了大量的人力和物力。堤防工程的不同断面或不同堤段的实际条件和危险程度千差万别, 分清这些差别, 对已有堤防工程的风险程度和安全状况进行分级划分和管理, 将有限的人力物投入到最危险的堤段——重点堤段, 保证堤防工程的整体安全很有必要。

由于堤防工程的基本条件错综复杂, 建立有效

的堤防工程安全评价体系, 定量评价各堤段的安全状况, 为堤防管理决策服务已经是刻不容缓。

考虑到模型要涉及到模糊性较强的水、土两相材料而且指标体系多为定量指标^[2-4], 笔者基于此选用模糊综合评判方法进行分析。选取堤防工程中某一段条件比较清楚、而且安全性状较好的标准堤段作为参考堤段, 通过分析实际堤段与标准堤段之间的存在的多方面的差距, 利用模糊综合评判和识别方法进行分析, 选出各堤段中与标准堤段安全最一致和最不一致堤段, 以利于堤防管理中确定标准堤段、基本达标堤段、部分达标堤段、基本未达标堤段和完全未达标堤段。

1 堤防工程风险评价系统指标体系的构建

堤防工程风险评价系统指标体系^[5]是反映堤防系统实际情况的主要特征, 由它可以形成高于实际工程、且能表现同类工程问题共性的模型。因此, 它应该具有以下特点:

1)它是我国现实堤防工程基本特点的抽象或模仿;

2)它是由反映堤防工程本质或特征的主要因素构成的;

3)它能集中体现这些主要因素之间的相互关系。

同时系统建模还应当遵循适度原则、合理原则、逼近原则、时效原则。

按照上述原则,考虑与堤防工程安全有关的护岸工程和堤身工程两方面的因素,分别建立相应的指标体系。护岸工程和堤身工程指标体系分别见表1和表2。

表1 护岸工程风险评价指标体系

指标序号	指标名称
1	坡形概化水平
2	可能淘蚀度
3	护岸可靠性
4	平均坡度
5	坡高
6	渗流条件
7	抗渗依托
8	外滩宽度
9	深泓水平
10	水流条件
11	历史险级
12	人为、生物影响

表2 堤身工程风险评价指标体系

指标序号	指标名称
1	出逸点绝对高差
2	堤脚水平比降
3	堤脚垂直比降
4	抗浮安全系数
5	渗透系数变异
6	粘聚力
7	内摩擦角
8	压缩系数
9	干密度

2 风险性决策技术研究^[6]

风险评价又可以称为风险性决策或者决策方案的风险性遴选。本文要对岸坡对象作出分析、决策,以考察堤防系统的安全性能,以此确定堤防工程的重点守护堤段、重要守护堤段、一般守护堤段等。人们在实际当中对客观事物所做的决策多为模糊决策,就岩土类工程对象而言更是如此。究其原因,可以归结为工程对象所处环境具有很大模糊性^[7],而且决策对象多为复杂大系统,牵扯到诸多相关因素,而各因素又颇具模糊性。

针对模糊决策分析,有较多理论可供采用,但考

虑到决策对象具有一定的层次性、动态性,故笔者运用综合性较强的模糊一致理论与层次分析法相嵌套的方法。

2.1 模糊一致理论

模糊一致理论的英文全称为 Fuzzy Consistency Theorem, 缩写为 FCT。

2.1.1 模糊一致矩阵的特性

模糊一致理论 FCT 处理复杂的大系统、涉及因素较多,而且各个因素还可能隶属于不同的层次及类别的问题,可谓得天独厚。有关模糊一致理论笔者只就模糊一致矩阵的广义合成提出相应的定义及推论。

定义1 设有模糊一致矩阵

$$R_{m \times m}^{(l)} = (r_{ij}^{(l)})_{m \times m} \quad (l = 1, 2, \dots, n) \text{ 另有系数}$$

列如下:

$$\sum_{l=1}^n \omega_l = 1 \quad (1)$$

则称下列为模糊一致矩阵的广义合成:

$$R_{m \times m} = \sup_{l=1}^n \inf(\omega_l \oplus R_{m \times m}^{(l)}) \quad (2)$$

其中又有:

$$R_{m \times m} = (r_{ij})_{m \times m} = (\sup_{l=1}^n (\inf[\omega_l \oplus r_{ij}^{(l)}]))_{m \times m} \quad (3)$$

基于以上笔者给出如下推论:

推论1 模糊一致矩阵 $R_{m \times m}^{(l)} (l = 1, 2, \dots, n)$ 的广义合成 $R_{m \times m}$ 仍是模糊一致矩阵

证明:

$$\begin{aligned} r_{ij} &= \sup_{l=1}^n (\inf[\omega_l \oplus r_{ij}^{(l)}]) = \\ &= \sup_{l=1}^n (\inf[\omega_l \oplus (r_{ik}^{(l)} - f_{jk}^{(l)} + 0.5)]) = \\ &= \sup_{l=1}^n (\inf[\omega_l \oplus r_{ik}^{(l)}]) - \\ &= \sup_{l=1}^n (\inf[\omega_l \oplus r_{jk}^{(l)}]) + \\ &= 0.5 \sup_{l=1}^n (\inf[\omega_l \oplus 1]) = \\ &= r_{ik} - r_{jk} + 0.5 \end{aligned}$$

由上述讨论结合文献[8-9]可知,满足一致性要求的模糊矩阵可以将决策对象中各评价方案相互间的地位、优劣就所涉及到的各个评价指标客观地反映出来。

2.1.2 模糊一致空间落于模糊拓朴空间的讨论

2.1.2.1 模糊拓朴空间的定义

首先可以给出如下定义^[10]:

定义2 设 T 是非空集 X 上的一族模糊子集,则可称 T 是 X 上的模糊拓朴,若 T 满足如下条件:

1)对任何

$$r^* \in [0, 1], r^* \in T \quad (4)$$

2)对任何

$$U, V \in T, \text{有 } U \cap V \in T \quad (5)$$

3)对任何 $U_a \in T (a \in \mathcal{P})$, 有 $\bigcup_{a \in \mathcal{P}} U_a \in T$, 其中, \mathcal{P} 代表指标集, 具体定义如前所述。 U_a 为以 a 为指标集的模糊子集, 其的并集 $\bigcup_{a \in \mathcal{P}} U_a$ 以及交集 $\bigcap_{a \in \mathcal{P}} U_a$ 由下式定义

$$(\bigcup_{a \in \mathcal{P}} U_a)(x) = \sup_{a \in \mathcal{P}} U_a \quad x \in U \quad (6)$$

$$(\bigcap_{a \in \mathcal{P}} U_a)(x) = \inf_{a \in \mathcal{P}} U_a \quad x \in U \quad (7)$$

此时可以称 (X, T) 为模糊拓扑空间, 也可以简称 X 为模糊拓扑空间。

定义 3 设 X 是数域 K 上的线性空间, (X, T) 是模糊拓扑空间, 若映射

$$\begin{aligned} f: X \times X &\rightarrow X & (x, y) &\mapsto x + y \\ g: K \times X &\rightarrow X & (k, x) &\mapsto kx \end{aligned} \quad (8)$$

均为模糊连续的则称 (X, T) 是模糊拓扑线性空间 $X \times X$ 和 $K \times X$ 带有乘积模糊拓扑。

2.1.2.2 模糊一致空间的建立

定义 4 设 Θ 为非空子集 Y 上的一族模糊子集, 则可称 Θ 是 Y 上的模糊一致空间, 若 Θ 满足如下条件:

1) $\forall \mathbf{R}_{m \times m} \in \Theta$, 其中, 对于任一元

$r_{ij} \in \mathbf{R} (i, j = 1, 2, \dots, m)$, 有关系为

$$r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5 \cap r_{ij} \in [0, 1] \quad (9)$$

2) 设子集 \mathbf{R}_{SUB} 是由原子集 $\mathbf{R}_{m \times m}$ 划去某一行以及某一系列元后生成的, 而且满足条件:

$$\mathbf{R}_{SUB} \in \Theta \quad (10)$$

3) 对于前述所定义的指标集 \mathcal{P} , 有 $\mathbf{R}_a^{(l)} \in \Theta (a^{(l)} \in \mathcal{P})$, 而且 $\bigcup_{a^{(l)} \in \mathcal{P}} \mathbf{R}_a^{(l)} \in \Theta$ 是基于定义 1 的广义合成所建立的。

由于述讨论可以得出: 模糊一致空间皆为模糊拓扑空间, 前者落于后者当中, 而且符合线性条件。这点可以保证模糊一致空间满足完备性, 而在具体工程问题当中, 就不同层次、不同因素而建立各个模糊一致矩阵经过相应地合成后仍与各模糊矩阵保持等价关系, 从而可以有效地解决多群体决策的问题, 有关模糊等价关系的内容在文献[4]中有较为详细的论述。

2.2 模糊一致理论与层次分析法的嵌套

堤防系统是众多工程系统中最为复杂的系统之一, 原因除了这类系统的结构复杂之外, 主要还是由于构筑堤防的材料几乎均为天然的两相系——水、土两相材料。当这类材料处于同样复杂的自然环境

条件下时, 其工作机理按照通常的确定性分析来考虑往往是人力所不可预知的。本文就是借助于模糊数学的手段来处理这一问题的, 这样做也是符合由 L. A. Zadeh 教授提出的互克性原理的^[11]。经过前述讨论, 可以发现采用模糊手段, 尤其是 FCT 理论的必要性也是显而易见的。当然, 如果工程系统的这种复杂性能够得以合理地概化, 那么 FCT 的理论优势亦将得到彰显。如何概化, 总结这方面的内容, 我们发现 AHP 理论是较为合适且最为有力的。此两者相嵌套就等于在对复杂大系统进行决策分析时按照两步走来做: 首先将复杂大系统分解、条理化、清析化——AHP 理论; 之后将所得信息再综合、归纳——FCT 理论。

2.2.1 层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 的论述^[12]

层次分析法的全称为层次权重决策分析法, 翻译自英文名 Analytic Hierarchy Process, AHP 是其缩写。首创者为美国人 A. L. Satty。A. L. Satty 指出: “研究大系统的第一步就是研究其的层次性”。AHP 可以归纳为如下几个步骤: 明确问题; 建立层次结构; 造判断矩阵; 次单排序和一致性检验; 次总排序和一致性检验

可以想像, 能够将 AHP 的这些信息尽可能全面地包括进去并得出合理的工程解释的有效手段之一就是我们多次提到的 FCT 理论。这里假设各个评价指标的相对权重、控制层的各个层族的相对权重以及中间层的各个层族的相对权重已经获得, 则可以就每一个评价指标对 m 个决策方案建立模糊优先关系矩阵并将他们进一步改造为模糊一致矩阵。设第 i 个控制层族下有 j 个评价指标, 则可相应地就 i 层族构造出 j 个模糊一致矩阵, 决策方案 $\delta_I (I = 1, 2, \dots, m)$ 在指标 $J (J = 1, 2, \dots, j)$ 下的优越性用单因素优度值 $sp_I^{(J)}$ 来表示, 其中, $sp_I^{(J)}$ 由下式确定:

$$sp_I^{(J)} = \frac{\bar{sp}_I}{\sum_{h=1}^m sp_h}, \bar{sp}_I = \left(\prod_{h=1}^m r_{Ih}^J \right)^{\frac{1}{m}} \quad (11)$$

式中, r_{Ih}^J 为指标 J 下的模糊一致矩阵的元。当第 i 个控制层族下 j 个评价指标的单因素优度值 $sp_I^{(J)}$ 均获得时, 便可以得到决策方案 $\delta_I (I = 1, 2, \dots, m)$ 在层族 i 下的综合优度值 $SP_{I,i}$:

$$SP_{I,i} = \sum_{j=1}^j \omega_j \cdot sp_I^{(J)}, \omega_j (J = 1, 2, \dots, j) \quad (12)$$

ω_j 为 i 层族下各个指标的“权”。假设控制层

有 H 个层族, 则可以如法炮制地得到其他层族的综合优度值 $SP_{L,i} (i=1, 2 \dots H)$ 。这些优度值体现了各个评价指标在决策分析中所拥有的数字信息。由于模糊一致矩阵所特有的模糊一致性及中分传递性, 我们可以进一步将这些信息传递到上一层次中。这也就是 AHP 与 FCT 理论嵌套的优势所在。在上一层次即某一中间层中, 各个控制层族对上一层次的影响可通过其他的优度值以及各个层族的“权”来体现, 即用上一层次的综合优度值来衡量, 具体见下式:

$$T_i^L = \sum_{i=1}^{t_L} \omega_i^L SP_{L,i} \quad (13)$$

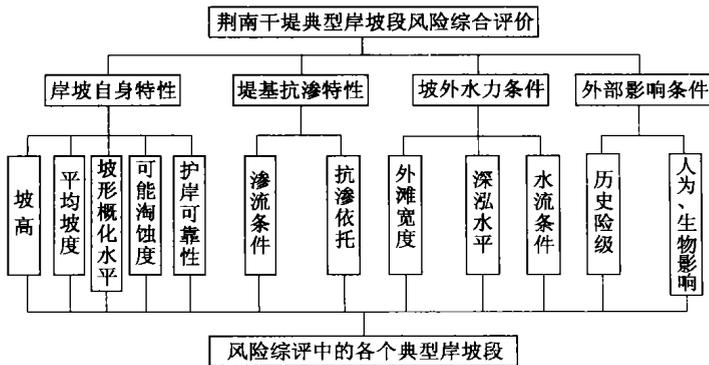


图 1 典型岸坡段 AHP 结构模型

2.2.3 FCT 与 AHP 的搭接——模型指标体系权重的探讨^[13-20]

在模糊数学的应用领域当中, 对于大系统的分析、评价占据着很大的比例, 这主要是由于大系统的复杂性与模糊性所造成的。而在具体解决这类问题的过程当中, 必须要处理好两个关键问题, 一是系统评价因素指标集, 二是评价因素的得分函数^[13], 前者的确定自然是建立在对评价对象特性的明确化的基础上的, 而后者则是对这种明确化的一种量化。以此体现出评价系统所涉及到的评价因素对系统的影响大小。也正是由于这个原因, 得分函数在某些具体问题中又被称为是影响系数。但在绝大部分情况下, 这类得分函数都满足一个特定条件, 即符合“归一性”。可以将这类得分函数用一个名词来统一地定义而称之为“权”(Weight)。本文涉及到的“权”值计算理论是判断矩阵特征向量法, 并且在此基础上, 笔者结合 FCT 理论提出了一种新的计算方法, 基于模糊一致矩阵的权重反演。

2.2.3.1 判断矩阵特征向量法

在系统模型确定后, 如果下一层次中的某些元素与上一层次中的某个元素有关联, 则在客观上下一层次中的这些元素在上一层次那个元素中均占有

式中, T_i^L 为上一层次中第 L 个层族的综合优度值, 在这个层族中, 包含有 t_L 个控制层的层族。各个控制层层族在此层下的综合优度值及“权”分别为 $SP_{L,i}, \omega_i^L$ 。依照这各传递方式, 对于包含有多个决策层次的评价课题, 很容易推广开来。

2.2.2 荆南长江干堤典型岸坡段风险综合评价结构模型

综合上述理论, 结合长江荆南干堤的实际工程情况, 在已经选定的指标体系模型的基础上, 明确体系模型内在关系及规律, 给出最终的评价结构模型(见图 1)。

一定的权重。假设已知 A 层次中的 A_K 元素与下一层次 B 中的 B_1, B_2, \dots, B_n 元素有关联, 于是每一 B_i 在 A_K 中均占有一个权重 $\omega_i = \omega(B_i)$ 。

将 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 称为权重向量^[14], 两元素 B_i, B_j 的权重之比为: ω_i / ω_j , 从而可以构造权重矩阵 M 。权重向量 ω 右边乘权重比矩阵 M , 有:

$$M \circ \omega = n \circ \omega \quad (14)$$

由矩阵理论可知, n 是 M 的唯一非零的也是最大的特征根, 记为 λ_{\max} , 而 ω 是 n 所对应的特征向量^[15]。由此可知, 虽然权重向量事先并不知道一是我们所要求的, 权重比矩阵 M 也不知道, 但我们可以通过两两元素之间的重要程度的比较作出他们的权值的估计值 b_{ij} , 从而获得权重比矩阵 M 的一个估计矩阵 B 称为判断矩阵, 判断值确定方法最常用的是 9 级标度法^[16]。

2.2.3.2 基于模糊一致矩阵的权重反演^[6, 11, 21]

本文在前述理论的基础上提出了基于模糊一致矩阵的权重反演——其理论基础仍是模糊一致理论。不同的只是将初始计算所得的方案优度值作为模型的修改信息, 在此基础上进一步修改权重向量, 从而获得更为合理的评价结果, 具体算法如下:

1) 首先调用 AEGIS.FOR 程序模块计算初始的

权重向量 $\mathbf{PWR} = (\text{PWR}(1), \text{PWR}(2), \dots, \text{PWR}(m))^T$, 并得到相应的模型单因素评价优度值 e_{ij}

2) 迭代矩阵构造

迭代矩阵是控制层每一层族的各个方案在各个单因素下的优度值矩阵, 为

$$E_{I \cdot J}(e_{ij}) \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m。$$

n 为方案数, m 为因素数, e_{ij} 为方案单因素优度值。

3) 评价方案复合优度值期望 $AV_i(\text{ave}_i)$

$$AV_i(\text{ave}_i) = (e_{i1} + e_{i2} + \dots + e_{im}) / m \quad (15)$$

4) 评价方案优度核

$$\mathbf{F} = (\mathbf{F}(1), \mathbf{F}(2), \dots, \mathbf{F}(n))^T \quad (16)$$

$$\mathbf{F} = E_{I \cdot J} * \mathbf{PWR} \quad (17)$$

5) 评价方案优度变异

$$\mathbf{DEV} = (\text{DEV}(1), \text{DEV}(2), \dots, \text{DEV}(n))$$

$$\text{DEV}(i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (F(i) - E_{I \cdot J}(i, j))^2} \cdot AV_i(\text{ave}_i) \quad (18)$$

6) 权重向量诱出值

$$\mathbf{XID} = (\text{XID}(1), \text{XID}(2), \dots, \text{XID}(m))$$

$$\text{XID}(j) = E_{I \cdot J}(i, j) * \text{DEV}(i) + \text{PWR}(j) * \text{SCL}(j) \quad (19)$$

这里, $\text{SCL}(j)$ 称为初始权重等级指标, 是各个因素权的相互之间的比较关系。其中, 权值大的取值较大, 相反则取小值, 级差步长可以取为 0.3。

7) 权重向量迭代矩阵 \mathbf{D}

$$\mathbf{D}(i, j) = \mathbf{XID}(i) / \mathbf{XID}(j) \quad (20)$$

8) 以 \mathbf{D} 矩阵作为修正后的判断矩阵重新调用 AEGIS.FOR 程序模块做权重反算。具体反演时, 首先由最下一层, 即控制层开始, 分别就该层各个子系统的初始权重做反演。遍求该层后, 就所得到的新权重对该层各个子系统求综合优度值, 依次作为对上一层反演的输入数据, 方法同前。

3 荆南长江干堤典型护岸段的系统风险评价

作为护岸段系统风险评价的典型算例, 笔者选取了荆南长江干堤加固工程中的部分护岸进行分析, 各段的具体情况如下^[1]:

1) 朱家湾: 上起公安县一砖瓦场, 下起杨厂安全区, 桩号 646+820~649+700, 全长 2 880 m。完成石方 18.60 万 m^3 , 柴枕 6 378 个。重点守护段在 648+510~649+128。本段是主流经公安弯向郝穴河弯过渡的一个卡口节点, 出现过许多重大险情。如 1907 年、1945 年, 先后二次溃口; 1957 年、1958

年在 646+990~647+340 二度退堤还滩。1962、1969、1978 和 1981 年曾多次出现不同程度外崩。特别是 1962 年高水期间, 杨家厂码头崩挫 50 m。现最窄处滩宽仅 25 m, 最宽 467 m。

2) 斗湖堤: 桩号 652+000~654+880, 长 2 880 m。完成石方 5.5 万 m^3 。该段位于公安河弯弯顶段, 迎流顶冲, 堤外无滩, 特别是中高水位时, 流态紊乱, 冲刷严重。

3) 祁家湾: 上起西湖庙, 下至双石碑, 桩号 659+275~662+240, 长 2 965 m。完成石方 12.42 万 m^3 。该段常年贴流、顶冲, 崩岸险情较严重。现滩宽为 25~150 m。1967、1968、1982 和 1983 年守护段出现过崩坍, 特别是 1982 年、1983 年, 崩宽 5~15 m, 吊坎高 3~5 m。

4) 新四弓: 护岸段桩号 675+050~676+430, 长 1 090 m。完成石方 1.0 万 m^3 。该段河道顺直, 水流顶冲较弱, 但仍有崩岸发生。1965 年曾在该处退堤还滩。目前滩宽 30~50 m, 岸线基本稳定, 但由于原守护工程最小, 又没有进行维修, 护面残缺不全, 基本上不存在。

3.1 加固前江堤系统风险评价

在前述理论上可以得到各典型岸坡段评价的初步结论, 鉴于篇幅, 这里略去了岸坡自身特性等层族综合优度值。通过 AHP 系统目标层的总体优度值, 评价结果给出了各个岸坡段风险性决策等级(见表 3)。进一步运用基于模糊一致矩阵的权重反演方法得出修正后的模型指标体系权重向量(略去)。重新对各个岸坡段进行综合评价并得出结论(见表 4)。依据综合优度值的结果适当选取域值为 0.14、0.16, 按照风险性的高低将荆南长江干堤护岸工程的上述 7 个堤段划分三级: 一级堤段为重点守护堤段(风险性综合优度值大于 0.16); 二级堤段为重要守护堤段(风险性综合优度值介于 0.14、0.16 之间); 三级堤段为一般守护堤段(风险性综合优度值小于 0.14)。这样, 重点守护堤段包括 650+380~647+620、647+800~646+520、652+650~650+380, 重要守护堤段为 661+200~659+080, 一般守护堤段为 654+950~652+650、676+400~675+050、646+520~646+200。基于两种“权”值理论的岸坡段风险决策成果进行对照(见图 2)。特别需要强调的是, 从图 2 可以看出, 这两种手段得到的结果显示, 模糊一致理论的强大的综合性使得决策对象的众多数字信息可以在成果中较为全面的反映出来, 尤其是在运用了基于 FCT 理论的“权重”反演后。通过本文的工程实例可以看出, 后者的结果进一步地将系统的本质刻划出来, 这

一点主要体现在岸坡段“650+380~647+620”与“647+800~646+520”两者前后决策结论的差异上。“650+380~647+620”岸坡段根据相关文献中的论述可知,这段岸坡地处公安河弯段,乃是出名的险段,地

质条件极差,已存在崩口,岸坡整体稳定性极差,相邻地段受其影响,也已经出现了不同程度的坡面塌陷,属于高危险段,而且是荆南公安段冲刷最为严重的坡段之一。

表3 岸坡段 AHP 系统目标层风险决策成果

岸坡段	676+400~ 675+050	661+200~ 659+080	654+950~ 652+650	652+650~ 650+380	650+380~ 647+620	647+800~ 646+520	646+520~ 646+200
总体优度值	0.124 25	0.146 52	0.130 32	0.158 97	0.161 83	0.165 04	0.113 06
决策等级	6	4	5	3	2	1	7

表4 由基于 FCT 的“权重”反演获得的岸坡段 AHP 系统目标层风险决策成果

岸坡段	676+400~ 675+050	661+200~ 659+080	654+950~ 652+650	652+650~ 650+380	650+380~ 647+620	647+800~ 646+520	646+520~ 646+200
总体优度值	0.124 31	0.145 11	0.130 04	0.160 27	0.164 75	0.163 73	0.111 36
决策等级	6	4	5	3	1	2	7

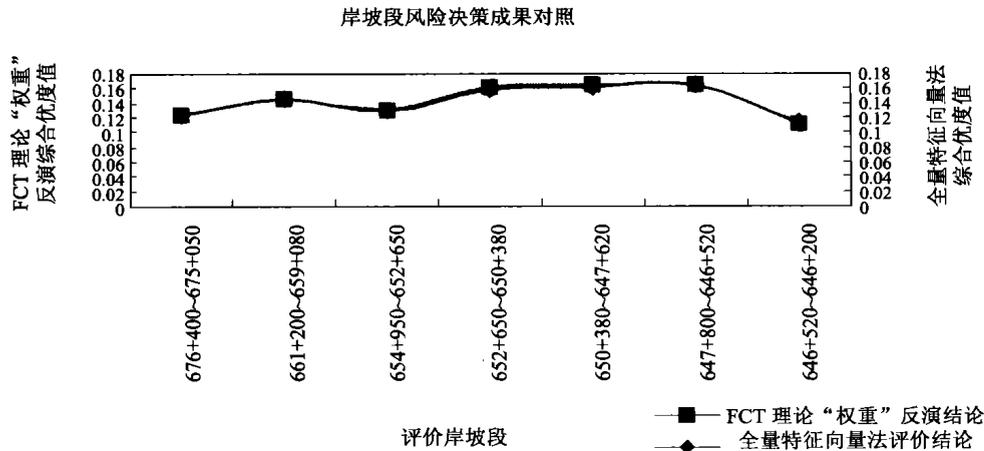


图2 基于两种“权”值理论的岸坡段风险决策成果对照

通过上述风险性分析遴选出最危险的断面位于650+380~647+620。此段堤防应作为防护的重点区域。另外647+800~646+520和652+650~650+380堤段的危险度也较高,应作为防护的重要区域。可见模型的构建及综合评价较全面地反映了工程的客观实际情况。

3.2 加固后江堤系统风险评价

本文考虑的工程加固措施有两种:局部工程加固和整体工程加固。

3.2.1 局部工程加固

局部工程加固又称局部整修,是针对工程运行中出现的的具体情况而进行的局部处理,加固的目的是在总体标准不变的情况下维持工程现状与功能。局部工程加固一般在堤防工程岁修计划或年度防汛计划中安排,特殊情况下在专项资金中安排。

基于前述分析首先对650+380~647+620堤段进行重点加固处理,加固后按照前述模型解释中的取值标准将该段的护岸可靠性指标取为1级,其他指标设定为不变,经过权值反演得到分析结论如下:

首先,就单因素指标而言,加固以后,堤段650+380~647+620的风险性优度值急剧下降见图3。其次,从图3加固前后风险性决策结论的对照可以看出,加固效果比较明显,堤段650+380~647+620的风险性有了明显的下降,守护堤段风险性等级降为二级。当然,岸坡的风险性评价是一个系统工程,仅仅从一项指标无法得出有价值的结论。而综合各项以后可以看出,仍然不能排除堤段650+380~647+620的风险性,主要是由于该段的其他项指标就风险性而言仍然偏高,如其的可能淘蚀度、以及平均坡度均有着较大的数量级,而且深泓水平与水流条件都比较恶劣。这也给

我们的防洪、加固提出了更高的要求。同时可以明显看出,在设定只有堤段 650+380~647+620 进行了加固措施的前提下,该堤段的风险性呈现明显的下降趋

势,但相邻堤段的风险性显著加大,这也进一步印证了岸坡失效具有“迁移”的特性,这种情况在实际的工程当中可谓屡见不鲜。

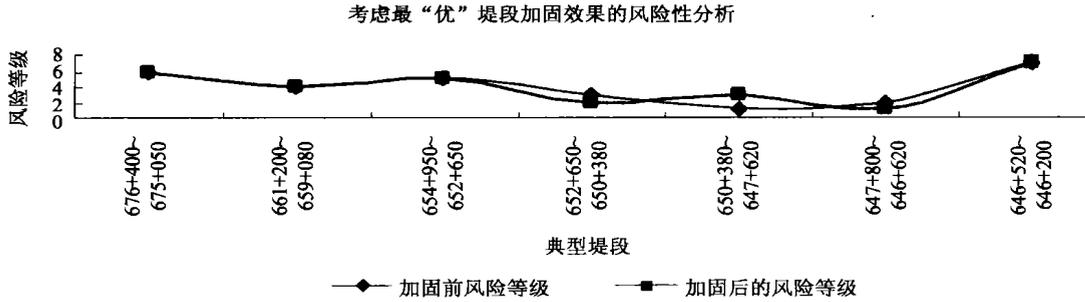


图3 局部加固前后风险性决策结论的对照

3.2.2 整体工程加固

整体工程加固又称全面整修,是国民经济的发展需要,对整个工程标准和使用条件进行的全面提升和加固。整体工程加固一般在国民经济与社会发展计划中安排,规模较小的或工程效益属于局部的在各地地方经济计划中安排。

针对上述的情况,1999—2003年荆南长江干堤加固工程对上述堤段进行整体工程加固处理,具体加固措施见表5。

可见,经过加固之后,总体优度值有明显下降的堤段均为加固效果有明显提高的部分。而对于那些总体优度值没有明显下降甚至是有所提高的堤段,它们的加固效果均不是十分的明显。结合上述关于

岸坡失效的“迁移”特性,进一步印证了本文所用方法的实用性。在上述基础上经过权值的反演可以得到的结论见表6和图4。

对于大多数的工程对象而言,要想较为全面而又比较合理地刻画出对象的内在特性,就必须面对影响工程本身的诸多内、外在因素。本文首先分析了影响堤防风险分析的相关方面,明确了堤防风险分析具有的系统模型特性,指出了堤防系统模型构建的基本思路。在此基础上,提出了与系统模型关联的影响因素以及体系指标,进而引入FCT与AHP嵌套的理念,从而为风险评价的结构模型的最终确立奠定了基础。并结合堤防工程的特点以荆南长江干堤为例进行了具体的推广及应用研究。

表5 全线加固条件下的护岸可靠性指标

岸坡段	加固措施	新护岸可靠性指标	原护岸可靠性指标
676+400~675+050	局部改造、设抛石	3	4
661+200~659+080	抛石	2	2
654+950~652+650	浆砌石护坡、抛石镇脚	2	2
652+650~650+380	浆砌石护坡、抛石镇脚	2	3
650+380~647+620	重点防护混凝土 预制块护坡、抛石镇脚	1	4
647+800~646+520	抛石	2	3
646+520~646+200	干砌护坡、抛石镇脚	2	2

表6 全线加固条件下的风险决策成果

岸坡段	加固前总体优度值	加固前决策等级	加固后总体优度值	加固后决策等级
676+400~675+050	0.124 31	6	0.124 832	6
661+200~659+080	0.145 11	4	0.149 324	4
654+950~652+650	0.130 04	5	0.133 625	5
652+650~650+380	0.160 27	3	0.158 724	2
650+380~647+620	0.164 75	1	0.154 273	3
647+800~646+520	0.163 73	2	0.163 427	1
646+520~646+200	0.111 36	7	0.115 334	7

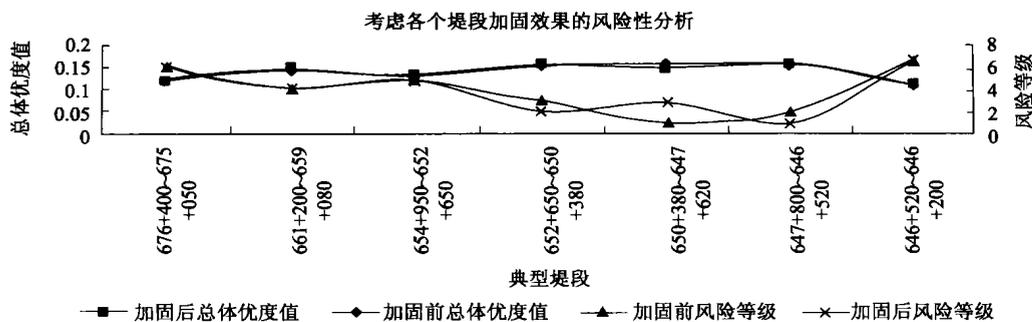


图4 整体工程加固结论

1)堤防工程风险评价系统指标体系包括护岸和堤身段。护岸指标体系包括坡形概化水平、可能淘蚀度、护岸可靠性、平均坡度、坡高、渗流条件、抗渗依托、外滩宽度、深泓水平、水流条件、历史险级和人为、生物影响等。堤身指标体系包括出逸高度、堤脚水平比降、堤脚垂直比降、抗浮安全系数、渗透系数变异、粘聚力、内摩擦角、压缩系数和干密度等。

2)根据本文提出的与系统模型关联的影响因素以及体系指标,引入FCT与AHP嵌套的理念,建立AHP与FCT嵌套的风险性决策结构模型,提出了堤防防汛守护等级划分标准(重点守护堤段、重要守护堤段和一般守护堤段)。通过具体的工程比较计算,运用两种权值理论所得最终结论贴近工程实际情况,防汛守护堤段划分方法简单易行,可以在堤防工程防汛管理中推广应用。

3)通过对护岸加固前后以及局部加固和全线加固的风险决策结论的对照可以发现,对于那些加固效果明显的岸坡段,AHP与FCT嵌套的风险性决策结论可以将岸坡段加固前后风险等级的变化较为圆满的反映出来。

参 考 文 献

- [1] 包承纲,吴昌瑜,丁金华. 中国堤防建设技术综述[J]. 人民长江, 1999(10): 15-16.
- [2] 韩宇平,解建仓. 模糊综合评判法在水库洪不调度方案评价中的应用[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2002(6): 198-201.
- [3] 杨伦标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社, 1993: 213-229.
- [4] 黄健元. 模糊集及其应用[M]. 银川:宁夏人民教育出版社, 1999: 127-190.
- [5] 汪应洛. 系统工程理论与应用[M]. 北京:高等教育出版社, 1998: 54-149.
- [6] 王亚军. 模糊一致理论FCT及层次分析法AHP在荆

南干堤典型坡段风险综合评价中的嵌套应用[J]. 浙江水利科技, 2004(3): 1-3.

- [7] 张吉广,蒙培奇. 港口安全评价的AHP模糊综合评判法[J]. 港口装卸, 2002(5): 24-27.
- [8] 金菊良,魏一鸣,付强,等. 层次分析法在水环境系统工程中的应用[J]. 水科学进展, 2002(2): 187-192.
- [9] 孙才志,林学钰. 基于层次分析的模糊一致性判断矩阵及其应用[J]. 模糊系统与数学, 2002(3): 59-63.
- [10] 吴从析,马明. 模糊分析学基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1991: 11-159.
- [11] 黄健元. 模糊一致矩阵在多层次、多因素决策方案优选中的应用[J]. 河海大学学报, 1999(5): 84-89.
- [12] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation[M]. New York: McGraw Hill, 1980: 222-309.
- [13] 王琦. 实用模糊数学[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1992: 72-120.
- [14] 陈凌高,冯坤,郭茂,等. 运用层次分析法判定连接结构的优劣[J]. 机床与液压, 2002(6): 166-168.
- [15] 方包熔,李医民. 矩阵论基础[M]. 南京:河海大学出版社, 1999: 135-240.
- [16] 武卫东,伍贻文,景国勋,等. 应用AHP法确定通风系统方案优化指标的权重[J]. 上海理工大学学报, 2002(2): 127-130.
- [17] 冷冻冰,韩世泽. 用层次分析法(AHP)确定煤和瓦斯突出中的有关参数[J]. 煤炭技术, 2002(6): 34-35.
- [18] 王淑云,方保熔,王如云. 数值分析防方法[M]. 南京:河海大学出版社, 2000: 10-193.
- [19] 刘德贵,费景高,于泳江,等. FORTRAN算法汇编(第一分册)[M]. 北京:国防工业出版社, 1980: 57-182.
- [20] 李晓峰. 基于AHP的人工神经网络模型的建立[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2003(1): 101-103.
- [21] 姚敏,张森. 模糊一致矩阵及其在决策分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1998(5): 78-81.

收稿日期: 2005-11-28