

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0012

JIANG Qi, LI Shuangyang, ZHAO Jianyuan, et al. Frost damage risk analysis of reservoir dam in cold regions based on T-S fuzzy fault tree[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1):165-177. [姜琪, 李双洋, 赵建沅, 等. 基于 T-S 模糊故障树的寒区水库大坝冻害风险分析[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1):165-177.]

## 基于 T-S 模糊故障树的寒区水库大坝冻害风险分析

姜 琪<sup>1,2</sup>, 李双洋<sup>1</sup>, 赵建沅<sup>1,2</sup>, 朱怀太<sup>3,1</sup>, 赵永春<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 由于运营环境恶劣, 寒区水库大坝会面临冰冻灾害频发且致灾因素众多等问题, 严重影响大坝稳定运营, 增大了安全风险隐患, 并增加了整治维修成本。为有效预防大坝冻害发生, 提升大坝风险管理水平, 提出了一种基于 T-S 模糊故障树理论的寒区水库大坝冻害风险分析方法。以坝体不均匀变形、坝体渗漏加剧、面板冻害破坏为下级事件建立了 T-S 模糊故障树; 同时通过底事件重要度计算对主要致险因素进行了分析; 并将冻胀力学分析与 T-S 模糊故障树相结合, 对红旗泡水库大坝面临的冻害风险进行了计算分析。研究发现诱发大坝冻害的主要风险因素包括反复冻融作用, 库区水位波动、冰层堆积与风浪侵蚀, 面板与坝体填筑质量缺陷和坝体防渗及保温措施不足等; 同时, 发现红旗泡水库大坝发生冻害风险的可能性较高, 应进行风险排查与处理。应用结果表明, 所提出的方法能科学合理地分析大坝冻害风险并确定关键致险因子, 可为寒区水库大坝的冻害风险的识别、管理与决策提供技术支持, 进而为大坝设计、施工、运营维护及冻害防治提供参考依据。

**关键词:** 寒区水库大坝; 冻害风险; T-S 模糊故障树; 重要度; 力学分析

**中图分类号:** TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)01-0165-13

### 0 引言

大坝是水库中具有特定功能的重要基础设施, 广泛用于防洪、灌溉、供水、泥沙控制、改善生态环境和解决水资源分布不均等问题<sup>[1]</sup>。近十年我国已修建了超过 87 000 座大坝, 其中 60% 以上位于寒冷地区<sup>[2-3]</sup>。由于特殊的气候环境, 寒区水库大坝会面临周期性的冻融作用, 导致库坝面板破坏、坝体冻胀破坏、渗漏、冰坝甚至溃坝等冻害现象频发<sup>[2-4]</sup>, 如图 1 所示。这些病害严重影响大坝的结构安全, 给大坝带来不同程度的安全隐患与失事风险, 威胁水库的稳定运营和经济效益的最大化<sup>[5-6]</sup>。因此, 进行寒区水库大坝冻害风险分析与评估, 对预防大坝冻害事件发生, 提升大坝风险管理与决策水平具有十分重要的意义。

目前对大坝进行风险分析与评估的方法可归纳为四类: (1) 基于系统科学的方法, 主要包括模糊综合评判法、层次分析法、灰色系统评估法等。此类方法虽然理论成熟, 可利用专家经验确定指标权重并进行系统综合评价, 但主观性较强且难以对复杂系统进行逻辑分析<sup>[7-8]</sup>。(2) 基于概率论与数理统计的方法, 主要包括事件树分析法、故障树分析法、贝叶斯网络、影响图法等。此类方法可通过计算风险发生概率快速辨识关键致险因子, 明确复杂工程过程控制要点, 但风险事件的客观概率较难获得<sup>[8-10]</sup>。(3) 基于机器学习的方法, 包括神经网络、支持向量机、粒子群算法、遗传算法等。此类方法可用来模拟多个因素和相应风险之间的复杂关系, 但无法解释变量之间的相互作用关系, 且需要大量的数据进行学习<sup>[11-12]</sup>。(4) 基于结构可靠度的方法, 包

收稿日期: 2022-09-09; 修订日期: 2022-10-28

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2020-1); 国家自然科学基金项目(42071092); 中国科学院青年创新促进会项目(Y201975)资助

作者简介: 姜琪, 硕士研究生, 主要从事寒区工程风险评估研究. E-mail: jq18215205524@163.com

通信作者: 李双洋, 研究员, 主要从事冻土力学与寒区岩土工程研究. E-mail: Lisy@lzb.ac.cn



图1 寒区水库大坝冻害现象

Fig. 1 Frost damage of reservoir dams in cold regions

括蒙特卡洛模拟、JC法、一次二阶矩法、响应面法等。此类方法可考虑各种不确定因素对工程结构安全的影响,但分析结果对分布参数极为敏感,且获得可靠的不确定因素数据十分困难<sup>[6,13-14]</sup>。以上方法虽然可以评价大坝冻害风险发生的可能性,但并不能很好地考虑大坝运营过程中的不确定性与模糊性,同时很难在缺少精确数据的情况下通过演绎推理确定大坝冻害关键致险因素<sup>[14-15]</sup>。

T-S模糊故障树理论是在传统故障树的基础上引入T-S模糊理论而形成的一种逻辑框图方法,可以很好地解决以上问题<sup>[15-17]</sup>。T-S模糊故障树用模糊数描述故障程度和故障概率,用T-S模糊门替代传统故障树中的逻辑门,不仅可以通过逻辑演绎的方式系统梳理大坝冻害故障事件并进行可靠性和安全性计算,而且考虑了故障发生概率的不确定性和模糊性,解决了传统故障树基于二态假设且依赖大量故障概率数据的问题<sup>[15-19]</sup>。因此,本文选择T-S模糊故障树理论建立寒区水库大坝冻害风险分析体系。首先,通过系统分析与逻辑演绎,以坝体不均匀变形、坝体渗漏加剧、面板冻害破坏为下级事件建立大坝冻害T-S模糊故障树。再通过底事件重要度分析,挖掘大坝冻害的主要致险因素;最后引入冻土和冰盖双重作用下的冻胀力学模型与T-S模糊故障树相结合对实际工程面临的冻害风险进行分析计算。研究成果可为寒区水库大坝冻害风险的识别、管理与决策提供技术支持,不仅能保障寒区水库大坝的稳定运营,也能为大坝设计、施工、维护及冻害防治提供参考依据。

### 1 T-S模糊故障树理论

T-S模糊故障树如图2所示,其中 $X_1, X_2, \dots, X_6$ 为基本事件,门1、门2和门3为T-S模糊门,事件之间关系的不确定性由T-S模糊门表示,并用模糊数

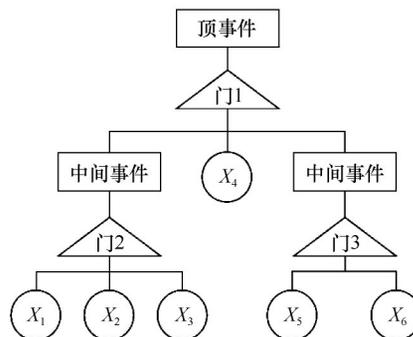


图2 T-S模糊故障树

Fig. 2 The T-S fuzzy fault tree

描述事件的故障概率及故障程度,具体的计算规则如下。

#### 1.1 模糊数及事件描述

在描述故障事件的严重程度时,可通过区间 $[0, 1]$ 上的模糊数来描述,例如描述冻害发生的程度为小、中、大时,可分别用模糊数0、0.5、1来描述<sup>[18]</sup>。

为了方便且不失一般性,本文采用模糊数的梯形隶属度函数来描述冻害事件的故障程度,如图3所示,梯形隶属函数 $F$ 表达式为,

$$F = (F_0, s_l, m_l, s_r, m_r) \tag{1}$$

式中: $F_0$ 是模糊数支撑集的中心, $s_l$ 和 $s_r$ 分别是左支撑集和右支撑集, $m_l$ 和 $m_r$ 是左模糊区域和右模糊区域。

由图3可知:

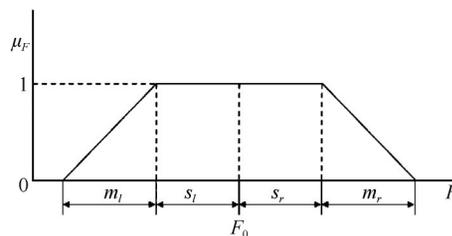


图3 模糊数的梯形隶属函数

Fig. 3 Trapezoid membership function of fuzzy numbers

$$\mu_F = \begin{cases} 0, & F \leq F_0 - s_l - m_l \\ \frac{F - F_0 + s_l + m_l}{m_l}, & F_0 - s_l - m_l \leq F \leq F_0 - s_l \\ 1, & F_0 - s_l \leq F \leq F_0 + s_r \\ \frac{F_0 + s_r + m_r - F}{m_r}, & F_0 + s_r \leq F \leq F_0 + s_r + m_r \\ 0, & F_0 + s_r + m_r \leq F \end{cases} \quad (2)$$

一般可以认为模糊数的隶属函数左右对称,即  $s_l = s_r, m_l = m_r$ 。当  $s_l = s_r = 0$ , 此时梯形隶属函数变为三角形隶属函数; 当  $s_l = s_r = 0$ , 且  $m_l = m_r = 0$  也成立, 此时模糊数变为确定数。

### 1.2 T-S 模糊故障树

T-S 模糊故障树采用模糊门代替传统故障树中的逻辑门来描述事件间的联系, T-S 模糊门是由一组 IF-THEN 模糊规则组成的万能逼近器<sup>[19]</sup>, 其运算规则如下:

已知规则  $l (l = 1, 2, \dots, m)$ : 如果  $z_1$  为  $S_{l1}, z_2$  为  $S_{l2}, \dots$ , 则  $Y$  为  $Y_l$ 。其中  $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_p]^T$  为事件变量,  $\{S_{ij}\}$  为模糊集。模糊集的隶属函数用  $\{\mu_{S_{ij}}(z_j)\}$  表示, 则 T-S 模型的输出由下式给出,

$$Y = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(z_l) Y_l \quad (3)$$

式中:  $\beta_l^*(z_l)$  为标准化后模糊规则  $l$  的执行度。

设基本事件  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的上级事件为  $Y$ , 其关系如图 4 所示。

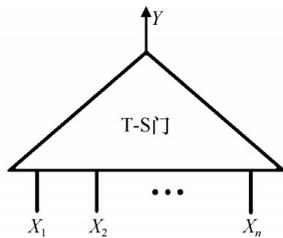


图 4 模糊门

Fig. 4 T-S fuzzy gate

基本事件与上级事件的故障程度分别描述为模糊数  $(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{k_1}), (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{k_2}), (x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^{k_n})$  和  $(y^1, y^2, \dots, y^{k_y})$ , 满足以下关系,

$$\begin{cases} 0 \leq x_1^1 < x_1^2 < \dots < x_1^{k_1} \leq 1 \\ 0 \leq x_2^1 < x_2^2 < \dots < x_2^{k_2} \leq 1 \\ \vdots \\ 0 \leq x_n^1 < x_n^2 < \dots < x_n^{k_n} \leq 1 \\ 0 \leq y^1 < y^2 < \dots < y^{k_y} \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

此时 T-S 模糊门算法可以描述为:

规则  $l (l = 1, 2, \dots, m)$ : 如果  $X_1$  为  $x_1^i, X_2$  为  $x_2^i, \dots, X_n$  为  $x_n^i$ , 则  $y^1, y^2, \dots, y^{k_y}$  的概率为  $P^l(y^1), P^l(y^2), \dots,$

$P^l(y^{k_y})$ , 其中  $i_1=1, 2, \dots, k_1; i_2=1, 2, \dots, k_2; i_n=1, 2, \dots, k_n$ 。  $m$  是规则总数, 满足  $m = \prod_{i=1}^n k_{i_0}$ 。

假设基本事件故障程度的模糊概率为  $P(x_1^i)$ , 则  $P(x_1^i), \dots, P(x_n^i)$  规则  $l$  的执行概率为:

$$P_0^l = P(x_1^i) P(x_2^i) \dots P(x_n^i) \quad (5)$$

上级事件的模糊概率为:

$$\begin{cases} P(y^1) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y^2) \\ \vdots \\ P(y^n) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y^n) \end{cases} \quad (6)$$

若已知下级事件的故障程度为  $x' = (x_1', x_2', \dots, x_n')$ , 则由 T-S 模糊模型可求出上级事件不同故障程度的模糊失效可能性为:

$$\begin{cases} Q(y^1) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^1) \\ Q(y^2) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^2) \\ \vdots \\ Q(y^n) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^n) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\beta_l^*(x') = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{x_j'}^{ij}(x_j')}{\sum_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \mu_{x_j'}^{ij}(x_j')}$ ;  $\mu_{x_j'}^{ij}(x_j')$  为第  $l$  条规则中第

$j$  个事件故障程度  $x_j'$  对应模糊集的隶属度。

因此, 根据下级事件  $X$  的模糊概率, 用式 (6) 并结合 T-S 模糊门规则可得到上级事件  $Y$  的模糊概率。根据下级事件  $X$  的当前故障程度  $x'$ , 用式 (7) 并结合 T-S 模糊门规则可得到上级事件故障程度的模糊可能性。

### 1.3 底事件重要度分析

为了分析各个冻害底事件对水库大坝发生冻害这一顶事件的影响程度, 一般采用底事件重要度的概念进行描述<sup>[16]</sup>。针对故障概率具体数据缺乏的问题, 且为了尽可能地避免专家打分带来的主观性, 可采用假设演绎的方法进行重要度计算。通过假定各底事件的故障程度为一确定值 0.2, 并改变其中一个底事件的故障状态, 讨论其对顶事件的影响程度<sup>[18]</sup>, 以此来判断该底事件对大坝冻害顶事件的重要度。

### 1.4 寒区水库大坝冻害风险分析流程

基于T-S模糊故障树的寒区水库大坝冻害风险分析不仅能够利用底事件重要度分析确定关键致险因素,同时对实际工程进行冻害风险评价,为后续的风险决策工作提供依据。具体分析流程如图5所示。



图5 基于T-S模糊故障树的水库大坝冻害风险分析流程  
Fig. 5 Frost damage risk analysis process of reservoir dam based on T-S fuzzy fault tree

## 2 大坝冻害 T-S 模糊故障树建立

通过广泛收集文献资料<sup>[2-5,9,14,20-22]</sup>,系统梳理寒冷地区水库内混凝土面板-土石坝体-库水系统的冻害现象,以坝体不均匀变形、坝体渗漏加剧、面板冻害破坏为水库大坝发生冻害的下级事件建立T-S模糊故障树,具体内容如下。

### 2.1 寒区水库大坝冻害 T-S 模糊故障树

建立的T-S模糊故障树中顶事件由 $T$ 表示,中间

事件由 $Y_i$ 表示,底部事件由 $X_i$ 表示。由于篇幅所限,将总故障树分为三个子系统进行叙述,如图6所示,其中 $T$ 表示顶事件“寒区水库大坝发生冻害”, $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 表示中间事件“坝体不均匀变形”、“坝体渗漏加剧”和“面板冻害破坏”,1、2、3分别表示坝体不均匀变形子系统、坝体渗漏加剧子系统和面板冻害破坏子系统,具体罗列如下。

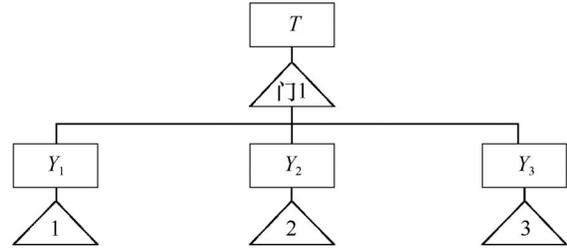


图6 寒区水库大坝冻害T-S模糊故障树  
Fig. 6 Frost damage T-S fuzzy fault tree of reservoir dams in cold regions

#### 2.1.1 坝体不均匀变形子系统 T-S 模糊故障树

以坝体不均匀变形为子系统的顶事件,各故障事件名称如表1所示,建立的坝体不均匀变形T-S模糊故障树如图7所示。

#### 2.1.2 坝体渗漏加剧子系统 T-S 模糊故障树

以坝体渗漏加剧为子系统的顶事件,各故障事件名称如表2所示,建立的坝体渗漏加剧T-S模糊故障树如图8所示。

#### 2.1.4 面板冻害破坏子系统 T-S 模糊故障树

以面板冻害破坏为子系统顶事件,各故障事件名称如表3所示,建立的面板冻害破坏T-S模糊故障树如图9所示。

表1 坝体不均匀变形故障事件名称

Table 1 The failure event name of dam uneven deformation

代号	事件名称	代号	事件名称	代号	事件名称
$Y_1$	坝体不均匀变形	$Y_{39}$	孔隙水压力增大	$X_{22}$	坝高过大
$Y_4$	坝坡稳定性不足	$Y_{40}$	冰凌动荷载作用	$X_{23}$	喷射混凝土表面不平整
$Y_5$	基土冻胀作用加剧	$Y_{44}$	坝体渗水加剧	$X_{24}$	面板受力破坏
$Y_{10}$	坝坡抗滑稳定性不足	$X_1$	气温降低	$X_{25}$	垫层级配不良
$Y_{11}$	外部荷载作用	$X_2$	初始含水量较高	$X_{26}$	坝基防渗质量不合格
$Y_{12}$	水分补给充分	$X_3$	坝坡坡比过大	$X_{27}$	清基不彻底
$Y_{23}$	内部结构面扩展	$X_4$	地震作用	$X_{36}$	冰面裂纹扩展
$Y_{24}$	土体抗剪强度降低	$X_5$	库水位过高	$X_{39}$	天然容重过小
$Y_{25}$	冰荷载作用	$X_6$	细粒土含量较多	$X_{40}$	填料压实度不足
$Y_{26}$	风浪冲刷	$X_9$	反复冻融作用	$X_{41}$	未设置保温层
$Y_{27}$	面板抗渗性能不足	$X_{16}$	风浪作用加剧	$X_{42}$	保温层质量不合格
$Y_{28}$	基土防渗性能不足	$X_{17}$	挡冰结构失效	$X_{43}$	碎冰产生
$Y_{37}$	填筑材料存在质量缺陷	$X_{20}$	坝前产生静冰压力	$X_{50}$	反滤层失效
$Y_{38}$	坝体内部出现裂缝	$X_{21}$	风速过大	$X_{51}$	防渗设施不合格

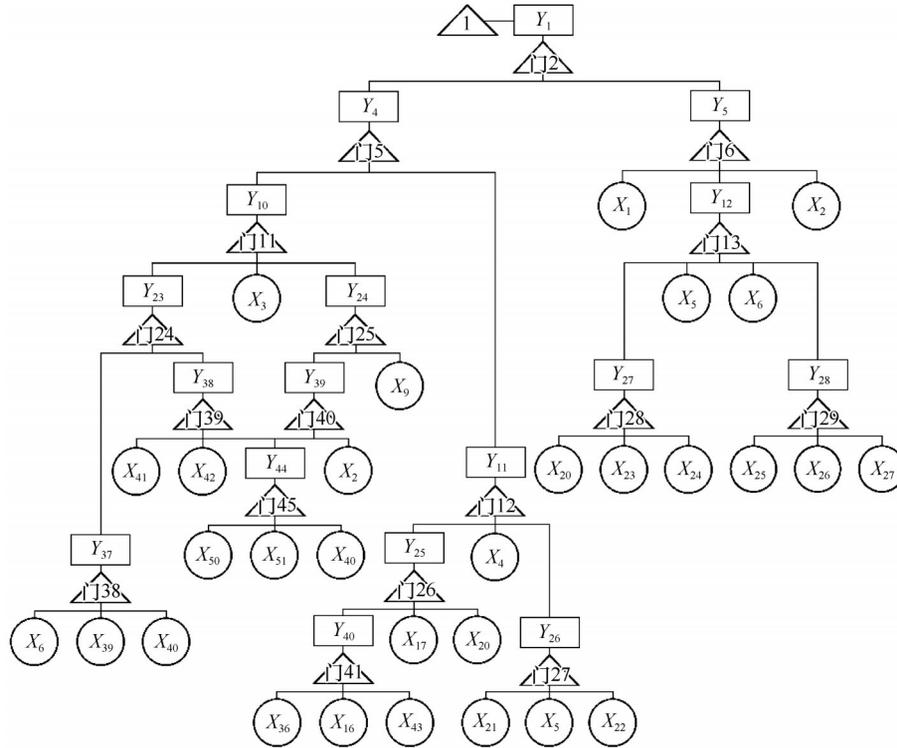


图 7 坝体不均匀变形 T-S 模糊故障树

Fig. 7 T-S fuzzy fault tree of dam uneven deformation

表 2 坝体渗漏加剧故障事件名称

Table 2 The fault event name of dam leakage intensifies

代号	事件名称	代号	事件名称	代号	事件名称
$Y_2$	坝体渗漏加剧	$Y_{32}$	冰推作用加剧	$X_{20}$	坝前产生静冰压力
$Y_6$	面板产生贯通裂缝	$Y_{41}$	防渗材料存在缺陷	$X_{25}$	垫层级配不良
$Y_7$	内部渗水	$Y_{42}$	垫层防渗性能不足	$X_{28}$	积雪融化
$Y_{13}$	受到剪胀力作用	$X_7$	面板后填土冻胀作用加剧	$X_{29}$	冰层与护坡冻结加剧
$Y_{14}$	面板功能不满足要求	$X_8$	冰压与水压作用加剧	$X_{30}$	库水位上升
$Y_{15}$	流冰冲击作用	$X_9$	反复冻融作用	$X_{44}$	防渗材料铺设施工不当
$Y_{16}$	防渗层失效	$X_{10}$	面板抗冻胀性不足	$X_{45}$	防渗材料质量不合格
$Y_{17}$	护坡变形破坏现象	$X_{11}$	面板厚度不足	$X_{46}$	垫层填筑质量不合格
$Y_{29}$	凌汛加剧	$X_{12}$	风浪波动	$X_{47}$	基土冻胀力过大
$Y_{30}$	防渗层有质量缺陷	$X_{13}$	防渗层施工接缝不严密	$X_{52}$	持续降雨
$Y_{31}$	冰拔作用加剧	$X_{16}$	风浪作用加剧		

### 2.2 T-S 模糊门规则获取

将顶事件  $T, Y_1, Y_2, Y_3$  故障发生的程度用模糊数  $(0, 1)$  描述, 其中 0 表示故障事件不发生, 1 表示故障事件发生, 隶属函数参数选为  $s_f=s_r=0.25, m_f=m_r=0.5$ 。其他事件的故障程度用模糊数  $(0, 0.5, 1)$  来描述, 隶属函数参数选为  $s_f=s_r=0.1, m_f=m_r=0.3$ 。建立的 T-S 模糊门规则如表 4~5 所示, 此处由于篇幅的原因仅列出门 32 与门 44 规则表, 其他模糊门的建立以此类推。

## 3 基于 T-S 模糊故障树的寒区水库大坝冻害风险分析

### 3.1 冻害故障树底事件重要度分析

为了确定寒区水库大坝发生冻害的关键致险因素, 为大坝运营过程中的风险控制与决策工作提供依据, 可利用 1.3 节提出的重要度分析方法对水库大坝发生冻害的三个下级事件即坝体不均匀变形、坝体渗漏加剧与面板冻害破坏分别进行风险分析。

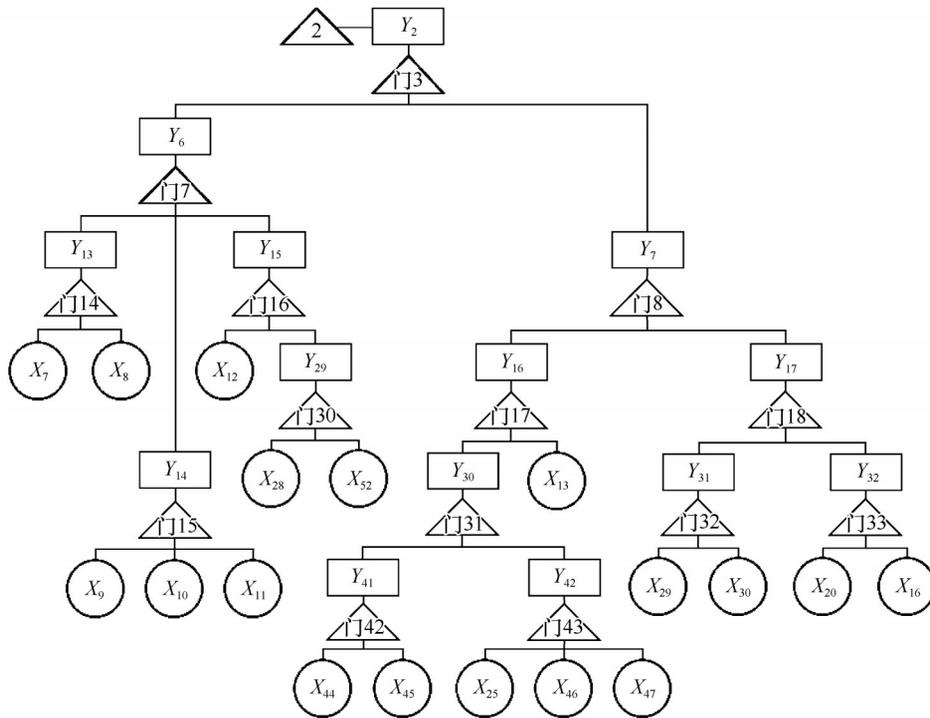


图8 坝体渗漏加剧T-S模糊故障树

Fig. 8 T-S fuzzy fault tree of dam leakage intensifies

表3 面板冻害破坏故障事件名称

Table 3 The fault event name of panel freeze damage

代号	事件名称	代号	事件名称	代号	事件名称
Y <sub>3</sub>	面板冻害破坏	Y <sub>36</sub>	冰块产生	X <sub>31</sub>	浇筑时产生微裂纹
Y <sub>8</sub>	面板开裂及酥松剥落	Y <sub>43</sub>	冰层解冻	X <sub>32</sub>	施工缝或变形缝防水不当
Y <sub>9</sub>	面板松动隆起及破坏	X <sub>1</sub>	气温降低	X <sub>33</sub>	混凝土干缩
Y <sub>18</sub>	环境因素影响	X <sub>8</sub>	冰压与水压作用加剧	X <sub>34</sub>	钢筋锈蚀
Y <sub>19</sub>	面板存在质量缺陷	X <sub>9</sub>	反复冻融作用	X <sub>35</sub>	混凝土强度不足
Y <sub>20</sub>	局部压力作用	X <sub>14</sub>	可溶性盐腐蚀	X <sub>36</sub>	冰面裂纹扩展
Y <sub>21</sub>	动冰撞击	X <sub>15</sub>	风浪产生并冲击护坡	X <sub>37</sub>	冰盖破坏
Y <sub>22</sub>	冰坝产生并堆积	X <sub>16</sub>	风浪作用加剧	X <sub>38</sub>	蒸发量低
Y <sub>33</sub>	面板施工质量有缺陷	X <sub>17</sub>	挡冰结构失效	X <sub>48</sub>	温度升高
Y <sub>34</sub>	面板材料质量有缺陷	X <sub>18</sub>	库水位波动	X <sub>49</sub>	冰层厚度不足
Y <sub>35</sub>	冰层破裂成块	X <sub>19</sub>	面板后填土冻胀变形		

3.1.1 坝体不均匀变形风险分析

顶事件坝体不均匀变形的故障程度用模糊数(0, 1)描述,表示故障事件不发生或者发生。通过对坝体不均匀变形 T-S 模糊故障树进行计算,分析顶事件不发生时的模糊可能性随底事件故障状态的变化情况,结果如图 10 所示。可以发现顶事件不发生的模糊可能性随着底事件故障程度的增大而减小,但部分底事件对顶事件的影响程度较大,具体的重要度排序为:

$$\begin{aligned}
 X_{20} > X_9 > X_2 > X_{51} > X_3 > X_5 > X_{16} > X_{42} > X_{40} > X_{22} > X_1 > \\
 X_4 > X_{17} > X_{39} > X_{41} > X_{21} > X_{26} > X_{23} > X_{25} > X_{30} > X_{27} > \\
 X_{24} > X_{43} > X_{36} > X_6
 \end{aligned} \tag{8}$$

由此可见,引起坝体不均匀变形风险发生的重要因素包括坝前静冰压力、反复冻融作用、初始含水量较高与防渗设施不合格等,另外坝坡比过大、库水位过高、风浪作用与未设置保温层或保温层质量不合格等事件对坝体不均匀变形风险的影响也不容忽视。

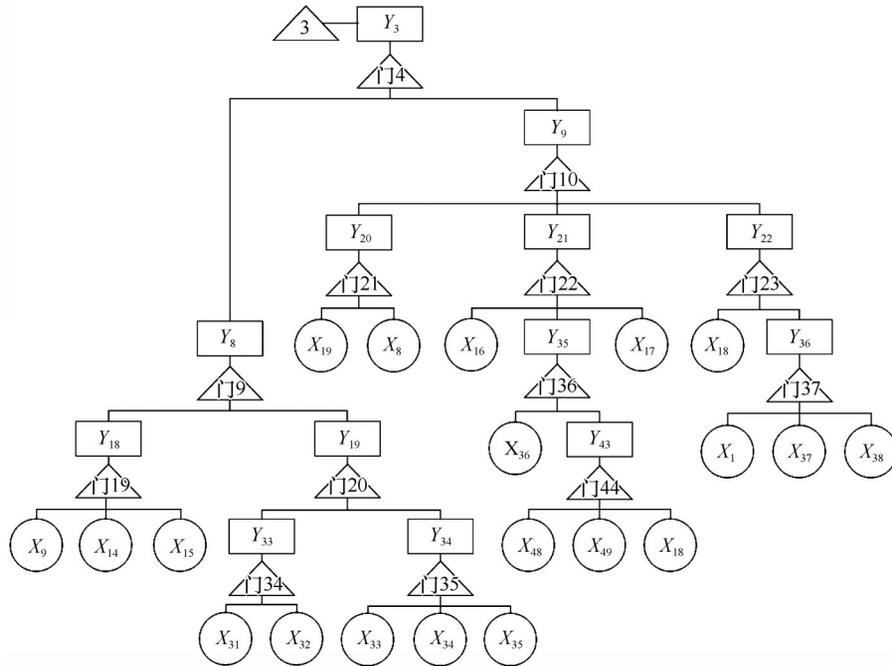


图9 面板冻害破坏 T-S 模糊故障树

Fig. 9 T-S fuzzy fault tree of panel freeze damage

表4 T-S 模糊门32规则

Table 4 Rules of T-S fuzzy gate 32

规则	$X_{29}$	$X_{30}$	$Y_{31}$		
			0	0.5	1
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	1	0	0
3	0	1	0.8	0.2	0
4	0.5	0	0.8	0.2	0
5	0.5	0.5	0.2	0.6	0.2
6	0.5	1	0	0.3	0.7
7	1	0	0.4	0.5	0.1
8	1	0.5	0	0	1
9	1	1	0	0	1

表5 T-S 模糊门44规则

Table 5 Rules of T-S fuzzy gate 44

规则	$X_{48}$	$X_{49}$	$X_{18}$	$Y_{43}$		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	1	0	0
3	0	0	1	0.9	0.1	0
4	0	0.5	0	0.9	0.1	0
5	0	0.5	0.5	0.8	0.2	0
6	0	0.5	1	0.7	0.3	0
7	0	1	0	0.8	0.2	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	1	1	1	0	0	1

3.1.2 坝体渗漏加剧风险分析

同理,可以得到顶事件坝体渗漏加剧不发生时的模糊可能性随底事件故障状态的变化情况,结果如图 11 所示,具体的重要度排序为:

$$X_9 > X_7 > X_{29} > X_{32} > X_8 > X_{13} > X_{20} > X_{11} > X_{28} > X_{30} > X_{10} > X_{16} > X_{12} > X_{44} = X_{45} > X_{46} > X_{47} > X_{52} \quad (9)$$

可见,引起坝体渗漏加剧风险发生的重要影响因素包括反复冻融作用、面板后填土冻胀作用、冰层和护坡冻结作用、持续降雨等,另外冰压与水压作用、防渗层施工接缝不严密、坝前静冰压力、面板厚度不足较多等事件也会影响坝体渗漏加剧风险事件的发生。

3.1.3 面板冻害破坏风险分析

同理,顶事件面板冻害破坏不发生时的模糊可能性随底事件故障状态的变化情况如图 12 所示,具体的重要度排序为:

$$X_{19} > X_9 > X_{14} > X_{18} > X_{15} > X_8 > X_{16} > X_{17} > X_{31} = X_{32} > X_{36} > X_1 > X_{37} > X_{34} > X_{48} > X_{35} > X_{49} > X_{33} > X_{38} \quad (10)$$

可见,引起面板冻害风险破坏发生的重要影响因素包括面板后填土冻胀变形、反复冻融作用、可溶性盐腐蚀与库水位波动等,另外风浪冲击作用、冰压与水压作用、挡冰结构失效、浇筑时产生微裂纹等因素也会导致面板发生冻害破坏。

综上,在进行寒冷地区水库大坝冻害风险控制与决策过程中,应重点考虑反复冻融作用、库区水

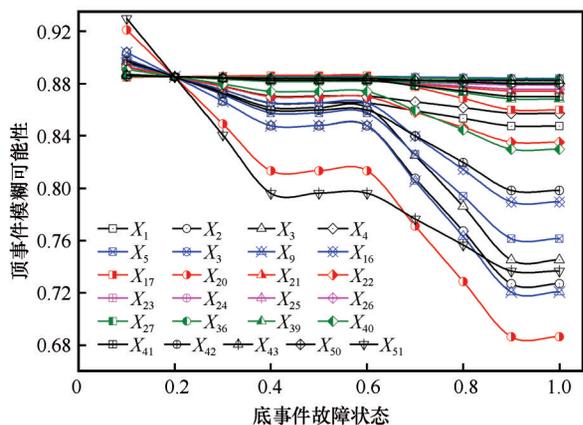


图 10 坝体不均匀变形各底事件对顶事件模糊可能性的影响  
Fig. 10 Influence of each bottom event on the fuzzy probability of top event for dam uneven deformation

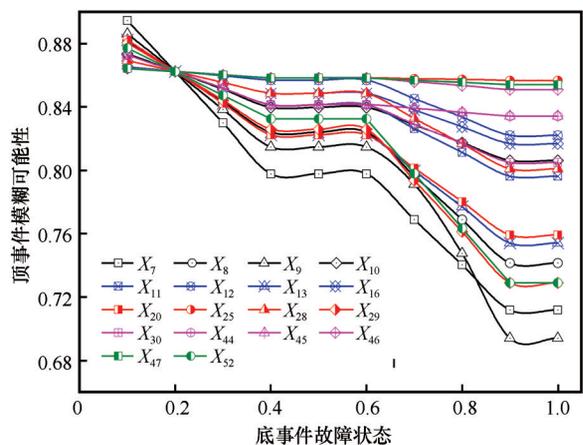


图 11 坝体渗漏加剧各底事件对顶事件模糊可能性的影响  
Fig. 11 Influence of each bottom event on the fuzzy probability of top event for dam leakage intensifies

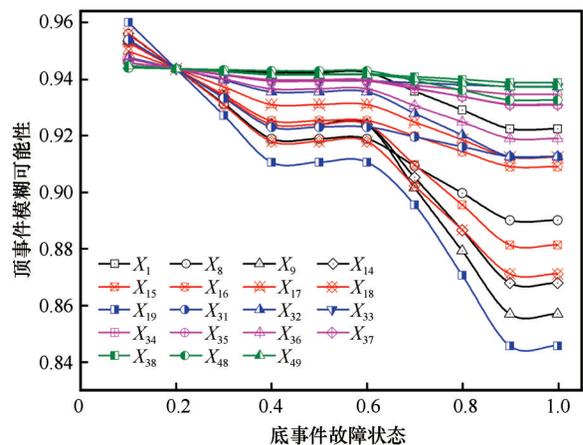


图 12 面板冻害破坏各底事件对顶事件模糊可能性的影响  
Fig. 12 Influence of each bottom event on the fuzzy probability of top event for panel freeze damage

位波动与风浪侵蚀、库区冰层的产生与防治、坝体填筑质量的检测、面板材料质量与施工质量缺陷的

检查以及坝体防渗及保温措施的设置与维护等。在运营维护过程中的风险故障排查可参照式(8)、(9)、(10)的次序进行。对实际工程进行风险评价时应依据重要度分析的结果,从最重要的底事件出发按照顺序进行故障程度赋值。

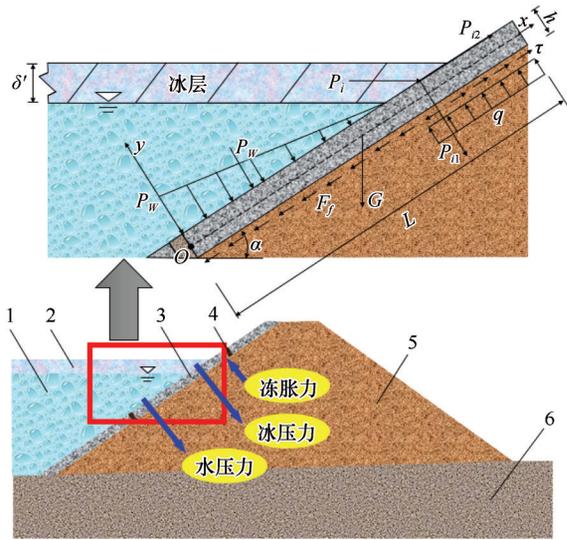
### 3.2 寒区水库大坝冻害风险评价实例

为了验证本文提出的寒区水库大坝冻害风险分析方法的可行性与合理性,选择黑龙江红旗泡水库大坝进行计算分析。红旗泡水库大坝系均质亚黏土坝,水库设计库容  $1.1 \times 10^5 \text{ km}^3$ ,库区面积达  $35 \text{ km}^2$ ,大坝全长  $34.5 \text{ km}$ ,主坝长  $3478 \text{ m}$ ,最大坝高  $5.36 \text{ m}$ ,坝顶宽  $5 \text{ m}$ ,迎水坡为  $1:2.5$ ,背水坡为  $1:2$ 。迎水坡采用渣油沥青混凝土面板<sup>[20]</sup>。大坝在冬季运行时其迎水护坡面板主要面临静冰压力和土体冻胀力的共同作用<sup>[21]</sup>,故首先运用工程力学与冻土力学的相关理论和方法,对水库大坝面临的冻胀破坏问题进行分析,然后将计算结果转化为底事件故障程度代入T-S模糊故障树中,最后通过第2章所述的计算流程对冻害风险顶事件的模糊可能性进行计算分析。

#### 3.2.1 冻胀破坏问题的力学分析

采用冻土和冰盖双重作用下的冻胀力学模型对红旗泡水库大坝面板护坡抗冻胀性能进行校核,进而分析大坝面临的冻害情况。单位宽度板的受力分析如图13所示, $P_i$ 为静冰压力, $P_{i1}$ 和 $P_{i2}$ 分别是 $P_i$ 沿面板法线、切线方向的分力; $G$ 为板的自重; $P_w$ 为静水压力的合力; $F_f$ 为面板与水面以下未冻土之间的摩擦力; $\tau$ 和 $q$ 分别是由垫层土体沿面板方向的切向冻胀力和法向冻胀力; $\sigma'$ 为冰的厚度; $h$ 是面板的厚度; $L$ 是面板长度; $\alpha$ 是坝坡与水平面夹角。具体计算流程如下:

(1)静冰压力计算。水库在冰冻期形成厚厚的冰层,当冰盖膨胀时会受到岸坡和水工建筑物约束,进而产生静冰压力。在《水工建筑物抗冰冻作用设计规范》(GB/T 50662—2011)中,单位宽度的静冰压力可根据表5中的冰厚进行插值计算得到,规范中规定库面狭小的水库和库面开阔的大型平原水库计算得的静冰压力应分别乘以0.87和1.25的系数。红旗泡水库属于大型平原水库,冰层厚度常年介于1.0~1.2 m之间,此处取2008年最大监测厚度1.03 m,通过插值计算得到静冰压力为  $250.25 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,并乘以系数1.25,得到水平方向上单位宽度的静冰压力为  $P_i = 312.81 \text{ kN}$ ,沿面板法



1-冰层; 2-库水; 3-混凝土面板; 4-沥青砂浆;  
5-均质亚黏土; 6-黏土层

图 13 水库大坝混凝土面板受力分析

Fig. 13 Force analysis of concrete panel of reservoir dam

表 5 不同冰厚对应的静冰压力<sup>[22]</sup>

Table 5 Static ice pressure corresponding to different ice thickness<sup>[22]</sup>

冰厚 $\sigma/m$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
静冰压力 $P_i/(kN \cdot m^{-1})$	85	180	215	245	280

线方向上的分力为  $P_{n1} = 117.18 \text{ kN}$ 、切线方向的分力  $P_{t2} = 290.03 \text{ kN}$ 。

(2)冻胀力计算。混凝土板沿坝面向上的冻胀力由冻土的切向冻胀力  $\tau$  和静冰压力沿切线方向的分力  $P_{t2}$  共同引起。冻土的切向冻胀力  $\tau$  的最大值等于基土与接触面之间的冻结力或冻结强度,当土体温度  $T_s$  大于或等于  $-15^\circ\text{C}$  且低于  $0^\circ\text{C}$  时,切向冻胀力  $\tau$  和负温  $T_s$  之间的关系近似为线性<sup>[23]</sup>:

$$\tau = c + b|T_s| \quad (11)$$

式中:  $\tau$  为冻土的切向冻胀力,  $\text{kPa}$ ;  $T_s$  为冻土温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $c$  和  $b$  是与土体类型有关的两个系数,黏土中  $c = 5$ ,  $b = 1.2$ , 粉质黏土中  $c = 4$ ,  $b = 1$ , 含砂粉质黏土中  $c = 4$ ,  $b = 6$ 。

则混凝土板的沿坝面向上的冻胀力由下式计算:

$$F_t = nL \cdot \tau + P_{t2} \quad (12)$$

式中:  $F_t$  为混凝土板沿坝面向上的冻胀力;  $\tau$  为冻土的切向冻胀力,  $\text{kPa}$ ;  $n$  为水位以上的面板长度与板总长的比值,取  $0.466$ ;  $L$  为面板的倾斜长度,长  $2 \text{ m}$ ;  $P_{t2}$  为静冰压力沿切线方向的分力,大小为  $290.03 \text{ kN}$ 。

垫层土体的平均法向冻胀力  $q$  可通过求解板  $O$

点的力矩平衡方程获得,表达式如下:

$$q = \frac{1}{nL^2(2-n)} \left[ 2L(1-n) \left( \frac{P_w}{3} + P_{n1} \right) + \frac{4\sigma'}{3 \sin \alpha} P_{n1} + h(P_{t2} + F_f - nL\tau) + GL \cos \alpha \right] \quad (13)$$

式中:  $q$  是冻土的平均法向冻胀力,  $\text{kPa}$ ;  $F_f$  是面板与水面以下未冻土之间的摩擦力;  $P_w$  是静水压力的合力,为  $2.09 \text{ kN}$ ;  $G$  是单位宽度混凝土板的自重,为  $14.40 \text{ kN}$ ;  $\alpha$  是坝坡与水平面夹角,为  $22^\circ$ ;  $h$  是面板的厚度,为  $0.3 \text{ m}$ ;  $\sigma'$  是冰的厚度,取  $1.03 \text{ m}$ 。

由于冻胀力与冻胀率成正比,则可以通过法向冻胀力与冻胀率的关系式反算板后冻土的冻胀量<sup>[24]</sup>。具体计算公式如下:

$$q = E\eta = E \frac{\Delta h}{H - \Delta h} \quad (14)$$

式中:  $\Delta h$  为冻胀量,  $\text{m}$ ;  $E$  为冻土的弹性模量,  $\text{kPa}$ ;  $\eta$  为冻胀率,  $\%$ ;  $H$  为土层的冻结深度,  $\text{m}$ 。

红旗泡水库主坝坝料为均质黏土,冷季平均土温为  $-12^\circ\text{C}$ ,则由式(11)可得切向冻胀力  $\tau = 19.4 \text{ kPa}$ ,代入式(12)可得混凝土板沿坝面向上的冻胀力  $F_t = 308.11 \text{ kN}$ 。未冻土与混凝土板之间的摩擦系数为  $0.22$ ,由式(13)可得冻土的平均法向冻胀力  $q = 278.92 \text{ kPa}$ 。冻土的弹性模量  $E$  为  $2000 \text{ kPa}$ ,土层的冻结深度  $H$  为  $2.3 \text{ m}$ ,则由式(14)可得板后冻土的冻胀量为  $0.28 \text{ m}$ ,实际观测时发现坝坡隆起高度为  $0.26 \sim 0.4 \text{ m}$ ,混凝土面板隆起现象严重,可见与计算结果基本一致。

(3)混凝土面板抗冻胀性校核。面板发生冻胀破坏主要从两方面判断,一是判断上块面板在挤压作用下的安全情况,二是判断在弯矩和轴力的作用下面板是否发生强度破坏<sup>[25]</sup>。

当沿面板向上的推力  $F'_t$  大于上一块面板沿切向的重力、垫层土体与面板之间的切向冻结力和摩擦力之和时,会使上块面板沿着推力  $F'_t$  的方向移动,另外水库大坝坝顶通常会设置挡土墙来防止面板错位,此时会使冰面以上面板受到挤压作用,需要对其进行抗压强度校核。当压应力  $\sigma_c$  大于或等于混凝土面板的抗压强度  $f_c$ ,即  $\sigma_c \geq f_c$  时,上一块面板将受到挤压损坏,反之则是安全的。上块面板的压应力由下式计算:

$$\sigma_c = \frac{F'_t}{A_c} \quad (15)$$

$$F'_t = F_t - F_f - G \sin \alpha \quad (16)$$

式中:  $\sigma_c$  为上块面板受到的压应力,  $\text{kPa}$ ;  $F'_t$  为沿面板向上的冻胀力大于或等于板的抗冻胀力,即  $F_t \geq$

$F_f + G\sin\alpha$ 时,作用在上块面板上的压力,kN; $A_c$ 为每单位宽度混凝土面板的截面面积, $m^2$ 。

通过计算最大拉应力 $\sigma_{max}$ 与混凝土面板的抗拉强度 $f_t$ 进行比较,可以判断在弯矩和轴力的作用下面板是否发生强度破坏。当最大拉应力 $\sigma_{max}$ 大于或等于混凝土面板的抗拉强度 $f_t$ ,即 $\sigma_{max} \geq f_t$ 时,混凝土板将产生冻胀破坏,反之则是安全的,最大拉应力计算公式如下:

$$\sigma_{max} = \frac{F_t}{A_c} + \frac{M'_t}{W} \quad (17)$$

$$M'_t = \frac{h}{2}(P_{i2} - nL\tau) + \frac{2\sigma'}{3\sin\alpha}P_{i1} - \frac{1}{2}qn^2L^2 \quad (18)$$

式中:式 $\sigma_{max}$ 为由冻土和冰盖共同作用引起的混凝土面板的最大应力,kPa; $M'_t$ 为混凝土面板危险截面上的最大弯矩,kN·m; $W$ 为单位宽度混凝土面板的抗弯截面系数, $m^3$ 。

红旗泡水库大坝混凝土面板强度等级为C25,轴向抗压强度 $f_c$ 为16 700 kPa,轴向抗拉强度 $f_t$ 为1 780 kPa,截面面积 $A_c$ 为0.3  $m^2$ ,抗弯截面系数 $W$ 为0.015  $m^3$ 。由式(15)~(16)求得的上块面板受到的压应力 $\sigma_c$ 为917.43 kPa,因为 $\sigma_c=917.43 \text{ kPa} \leq f_c=16 700 \text{ kPa}$ ,说明上一块面板在挤压作用下的强度满足要求。由式(17)~(18)求得面板上的最大拉应力 $\sigma_{max}$ 为8 951.01 kPa,因为 $\sigma_{max}=8 951.01 \text{ kPa} \geq f_t=1 780 \text{ kPa}$ ,说明面板将在拉应力的作用下破坏,导致面板在库水面附近出现裂缝。

### 3.2.2 冻害风险计算分析

根据计算结果可以发现水库在冰冻期会形成较厚的冰层,导致坝前静冰压力较大,达到了312.81 kN,另外板后土体冻结会产生较大的法向冻胀力,可达278.92 kPa,导致冻土的冻胀量达到了0.28 m。故在冰压、水压与冻土冻胀力的共同作用下,面板抗拉强度得不到满足,最终会导致裂缝产生。结合表6所示的冻胀级别划分表与表7所

示的冻胀力与冻胀级别对照表,可以发现坝体冻胀级别为V级,说明坝体冻胀程度严重。将上述分析结果通过0~1标度法转化为底事件故障程度<sup>[26]</sup>,得到相关底事件“面板后填土冻胀加剧”“基土冻胀力过大”与“面板后填土冻胀变形”的取值为 $X_7=X_{47}=X_{19}=1$ ，“坝前产生静冰压力”与“冰压与水压作用加剧”的取值为 $X_{20}=X_8=0.8$ ，“面板受力破坏”与“面板抗冻胀性不足”的取值为 $X_{24}=X_{10}=0.7$ ，“挡冰结构失效”与“防渗设施不合格”的取值为 $X_{17}=X_{51}=0.6$ 。

表6 土的冻胀分级划分表<sup>[22]</sup>

Table 6 Frost heave classification table of soil<sup>[22]</sup>

冻胀级别	I	II	III	IV	V
冻胀量 $h/cm$	$(-\infty, 2]$	$(2, 5]$	$(5, 12]$	$(12, 22]$	$(22, +\infty)$

表7 冻胀力与冻胀级别对照表<sup>[22]</sup>

Table 7 Comparison table of frost heave force and frost heave level<sup>[22]</sup>

冻胀级别	I	II	III	IV	V
单位法向冻胀力/kPa	0~30	30~60	60~100	100~150	150~210

参照以上分析思路,根据工程实际运行情况,并结合相关文献报告与评价准则<sup>[20,22,27-30]</sup>,可以给出红旗泡水库大坝冻害风险T-S模糊故障树的底事件故障程度取值,如表8所示。

根据1.2节的计算方法可得到各中间事件的模糊可能性。以中间事件 $Y_{17}$ 为例,根据式(2)求出各底事件的隶属度,其中左右支撑半径 $s_l = s_r = 0.1$ ,左右模糊区 $m_l = m_r = 0.3$ ,结果如表9所示。再求出各规则的执行度 $\beta_i^*$ ,如门32中 $\beta_4^* = 1/3, \beta_7^* = 2/3$ ,其余均为0,则根据式(7)求得上级事件 $Y_{31}$ 发生各种故障的模糊可能性分别为: $P\{Y_{31} = 0\} = 0.8\beta_4^* + 0.4\beta_7^* = 0.5333, P\{Y_{31} = 0.5\} = 0.2\beta_4^* + 0.5\beta_7^* = 0.4000, P\{Y_{31} = 1\} = 0.1\beta_7^* = 0.0667$ 。

表8 底事件故障程度取值

Table 8 The numerical value of the fault degree of the bottom event

代号	故障程度	事件名称	代号	故障程度	事件名称	代号	故障程度	事件名称
$X_7$	1	面板后填土冻胀加剧	$X_{19}$	1	面板后填土冻胀变形	$X_{36}$	0.6	冰面裂纹产生
$X_8$	0.8	冰压与水压作用加剧	$X_{20}$	0.8	坝前产生静冰压力	$X_{37}$	0.5	冰盖破坏
$X_9$	0.8	反复冻融作用	$X_{24}$	0.7	面板受力破坏	$X_{42}$	0.5	保温层质量不合格
$X_{10}$	0.7	面板抗冻胀性不足	$X_{29}$	0.8	冰层和护坡冻结加剧	$X_{43}$	0.5	碎冰产生
$X_{15}$	0.6	风浪产生并冲击护坡	$X_{31}$	0.5	浇筑时产生微裂纹	$X_{47}$	1	基土冻胀力过大
$X_{16}$	0.5	风浪作用加剧	$X_{32}$	0.5	施工缝或变形缝防水不当	$X_{51}$	0.6	防渗设施不合格
$X_{17}$	0.7	挡冰结构失效	$X_{35}$	0.5	混凝土强度不足	其他	0	

表9  $Y_{17}$ 各底事件故障程度隶属度

代号	故障程度	隶属度			代号	故障程度	隶属度		
		0	0.5	1			0	0.5	1
$X_{16}$	0.5	0	1	0	$X_{29}$	0.8	0	1/3	2/3
$X_{20}$	0.8	0	1/3	2/3	$X_{30}$	0	1	0	0

其他上级事件的计算过程以此类推,用上级事件的模糊可能性代替其隶属度进行逐层计算,可得到中间事件  $Y_{17}$  出现各种故障的模糊可能性为  $P\{Y_{17} = 0\} = 0.1102$ ,  $P\{Y_{17} = 0.5\} = 0.0987$ ,  $P\{Y_{17} = 1\} = 0.7911$ 。据计算结果可知红旗泡水库大坝护坡发生严重变形破坏的模糊可能性约为 0.79,说明当冰层和护坡冻结加剧,坝前静冰压力和风浪作用较大且挡冰结构有较大程度失效时,护坡出现严重变形破坏的可能性很大。据实际观察在主坝 3+300~3+369、3+500、4+040 处均存在较严重的护坡变形破坏现象<sup>[20,29-30]</sup>,如图 14 所示。其中在 3+369 处护坡混凝土板因受冰爬坡作用出现了隆起、架空、开裂现象;在 3+500 处护坡由于冰推与风浪作用多次出现变形松动,整体上移最大可达 0.15 m;在 4+040 处因冰爬坡引起了坝面严重变形与护坡混凝土板脱缝、隆起,最高处隆起了 0.4 m。可见计算结果与实际运行情况相符。

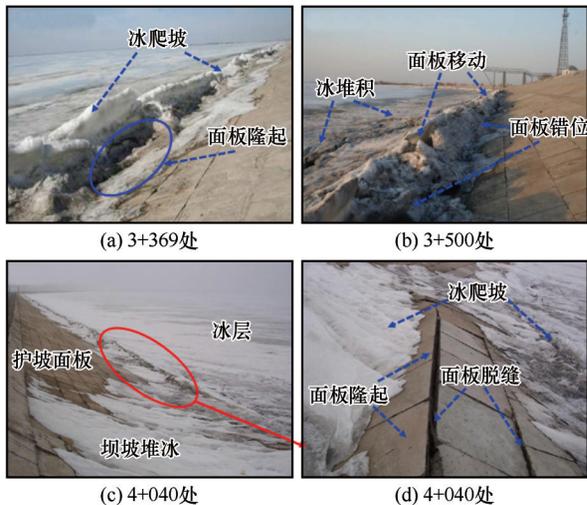


图 14 红旗泡水库大坝护坡变形破坏现象

Fig. 14 Deformation and failure phenomenon of bank slopes in the Hongqipao Reservoir dam

利用上述方法由下向上逐层计算,最终求得顶事件  $T$  出现各种故障的模糊可能性为  $P\{T = 0\} = 0.2293$ ,  $P\{T = 1\} = 0.7707$ 。由结果可知红旗泡水库大坝发生冻害的模糊可能性约为 0.77,说明冻害风险发生的可能性较高。故该水库大坝在运行维护

过程中应格外注意冻害风险的控制与处理,并结合 3.1 节所得到的各底事件重要度分析结果进行冻害风险排查与维护。上述结果既体现了力学计算与风险分析相结合的合理性,也验证了基于 T-S 模糊故障树的寒区水库大坝冻害风险分析方法的可行性与准确性,可为相关领域的研究提供思路与参考。

## 4 结论

本文采用 T-S 模糊故障树理论建立了一种寒区水库大坝冻害风险分析方法,采用底事件重要度指标计算分析了主要致灾因素,并通过案例分析验证了该方法的有效性,得出以下主要结论:

(1)从坝体不均匀变形、坝体渗漏加剧、面板冻害破坏三个下级事件入手建立的大坝冻害 T-S 模糊故障树,不仅可以通过逻辑演绎的方式系统梳理大坝冻害事件,又能解决传统故障树基于二态假设且依赖大量故障概率数据的问题。

(2)通过底事件重要度计算,发现在进行寒冷地区水库大坝冻害风险分析与决策过程中应重点考虑反复冻融作用、库区水位波动与风浪侵蚀、库区冰层的产生与防治、坝体填筑质量的检测、面板材料质量与施工质量缺陷的检查以及坝体防渗及保温措施的设置与维护等。

(3)将冻胀力学模型与 T-S 模糊故障树分析方法相结合对红旗泡水库大坝进行分析,发现冻害风险发生的可能性较高,应进行风险排查与处理。分析结果与实际情况相符,验证了该方法的可行性与合理性。

(4)本文分析了大坝冻害的关键致险因素,并尝试将力学计算与风险分析进行结合对实际工程进行评价,虽然可以一定程度上排除主观因素的干扰,但由于寒区水库大坝风险管理具有综合性与复杂性,故后续的研究中还需进一步讨论。

## 参考文献 (References):

- [1] Rahman Mohamed A, Lee K T. Energy for sustainable development in Malaysia: energy policy and alternative energy [J]. *Energy Policy*, 2006, 34(15): 2388-2397.
- [2] Zhang Mingyi, Lu Jianguo, Pei Wansheng, et al. Laboratory study on the frost-proof performance of a novel embankment dam in seasonally frozen regions [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126769.
- [3] Mu Yanhu, Zhu Xinyi, Yue Pan, et al. Monitoring investigation on winter freezing-thawing of dam core wall soils in cold regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(4): 756-763. [穆彦虎, 朱忻怡, 岳攀, 等. 寒区大坝心墙土料冬季冻融与防控监测[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(4): 756-763.]
- [4] Sayles F H. Embankment Dams on Permafrost. Design and per-

- formance summary, bibliography and an annotated bibliography [R]. Special Rept 87-11, CWIS 31711, 1987.
- [5] Zhang Sherong, Tan Yaosheng. Risk assessment of earth dam overtopping and its application research [J]. *Natural Hazards*, 2014, 74(2): 717-736.
- [6] Gu Chongshi, Su Huaizhi, Liu Hezhi. Review on service risk analysis of dam engineering [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(1): 26-35. [顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. *水利学报*, 2018, 49(1): 26-35.]
- [7] Yu Wenbing, Zhang Tianqi, Lu Yan, et al. Engineering risk analysis in cold regions: state of the art and perspectives [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 171: 102963.
- [8] Zhao Dongan. Safety risk analysis of subway construction based on Fault Tree Method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. [赵冬安. 基于故障树法的地铁施工安全风险[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.]
- [9] Liu Mengkai, Dong Xiaoxia, Guo Hui. Risk assessment of ice dams for water diversion projects based on fuzzy fault trees [J]. *Applied Water Science*, 2021, 11(2): 1-13.
- [10] Fu Xiao, Gu Chongshi, Su Huaizhi, et al. Risk analysis of earth-rock dam failures based on fuzzy event tree method [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(5): 886.
- [11] Hegde J, Rokseth B. Applications of machine learning methods for engineering risk assessment: a review [J]. *Safety Science*, 2020, 122: 104492.
- [12] Xie Xuecai, Guo Deyong. Human factors risk assessment and management: process safety in engineering [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 113: 467-482.
- [13] Escuder-Bueno I, Mazzà G, Morales-Torres A, et al. Computational aspects of dam risk analysis: findings and challenges [J]. *Engineering*, 2016, 2(3): 319-324.
- [14] Sheng Jinbao, Li Dandan, Long Zhifei. Risk assessment and management of reservoir dam [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2019. [盛金保, 厉丹丹, 龙智飞. 水库大坝风险及其评估与管理[M]. 南京: 河海大学出版社, 2019.]
- [15] Chen Wu, Zhang Guohua, Wang Hao, et al. Evaluation of possibility of tunnel collapse by drilling and blasting method based on T-S fuzzy fault tree [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(Suppl 1): 319-328. [陈舞, 张国华, 王浩, 等. 基于T-S模糊故障树的钻爆法施工隧道坍塌可能性评价[J]. *岩土力学*, 2019, 40(增刊1): 319-328.]
- [16] Song Hua, Zhang Hongyue, Wang Xingren. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(8): 854-859. [宋华, 张洪钺, 王行仁. T-S模糊故障树分析方法[J]. *控制与决策*, 2005, 20(8): 854-859.]
- [17] Song Hua, Zhang Hongyue, Chan C W. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model with application to INS/GPS navigation system [J]. *Soft Computing*, 2009, 13(1): 31-40.
- [18] Luo Yanbin. Study on frost damage grades and its prevention and control technologies in cold region tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. [罗彦斌. 寒区隧道冻害等级划分及防治技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.]
- [19] Zhang Lulu, Zhang Ruijun, Si Xinxin. Importance analysis method of fuzzy fault tree based on T-S model and application in hydraulic system [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 470: 707-711.
- [20] Wang Chuan. Observation of ice layer deformation and calculation of static ice pressure in Hongqipao reservoir [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. [王川. 红旗泡水库冰层变形观测及静冰压力计算[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.]
- [21] Stander E. Ice stresses in reservoirs: effect of water level fluctuations [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2006, 20(2): 52-67.
- [22] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for design of hydraulic structures against ice and freezing action: GB/T 50662—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011. [中华人民共和国水利部. 水工建筑物抗冰冻设计规范: GB/T 50662—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.]
- [23] Song Ling, Ouyang Hui, Yu Shuchao. Frozen heaving and capacity of frozen heaving resistance of trapezoidal concrete lining canal with water in winter [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(18): 114-120. [宋玲, 欧阳辉, 余书超. 混凝土防渗渠道冬季输水运行中冻胀与抗冻胀力验算[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 114-120.]
- [24] Chen Xiaobai, Liu Jiankun, Liu Hongxu. Frost action of soil and foundation engineering [M]. Beijing: Science Press, 2006. [陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [25] Qin Zipeng, Lai Yuanming, Tian Yan, et al. Frost-heaving mechanical model for concrete face slabs of earthen dams in cold regions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 161: 91-98.
- [26] Beynon M. An analysis of distributions of priority values from alternative comparison scales within AHP [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 140(1): 104-117.
- [27] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Guidelines on dam safety evaluation: SL 258-2017 [S]. Beijing: China Water Resources and Electric Power Press, 2017. [中华人民共和国水利部. 水库大坝安全评价导则: SL 258-2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.]
- [28] National Energy Bureau of the People's Republic of China. Design specification for concrete face rockfill dams: DL/T 5016—2011 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011. [国家能源局. 混凝土面板堆石坝设计规范: DL/T 5016—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.]
- [29] Jiang Lianjie, Lu Yongchao, Han Hongwei, et al. Causal analysis on ice layer deformation and slope protection damage of Hongqipao Reservoir [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(7): 85-88. [姜连杰, 卢永超, 韩红卫, 等. 红旗泡水库冰层变形及护坡破坏现象成因分析[J]. *水利水电技术*, 2011, 42(7): 85-88.]
- [30] Jia Qing. Study on design ice parameters of slope protection on plain reservoir in cold regions [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. [贾青. 寒区平原水库护坡工程设计冰参数研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.]

## Frost damage risk analysis of reservoir dam in cold regions based on T-S fuzzy fault tree

JIANG Qi<sup>1,2</sup>, LI Shuangyang<sup>1</sup>, ZHAO Jianyuan<sup>1,2</sup>, ZHU Huaitai<sup>3,1</sup>, ZHAO Yongchun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Dams are important infrastructure with specific functions in reservoirs, widely used for flood control, irrigation, water supply, sediment control, improving ecological environment and solving uneven distribution of water resources, etc. More than 87 000 dams have been built in China in the last decade, of which more than 60% are located in cold regions. Due to the complex operating environment, reservoir dams in cold regions face the problems of frequent freezing disasters and many disaster-causing factors. Those problems seriously affect the normal operation of dams, increase the security risk and add the cost of renovation and maintenance. In order to effectively prevent the occurrence of dam frost damage and improve the level of dam risk management, a frost damage risk analysis method of reservoir dam in cold regions based on T-S fuzzy fault tree theory was proposed. The T-S fuzzy fault tree uses fuzzy numbers to describe the degree of failure and the probability of failure and replace the logic gates in the traditional fault tree with T-S fuzzy gates. The method not only can systematically sort out the dam frost damage failure events and perform reliability and safety calculations by logical deduction, but also takes into account the uncertainty and fuzziness of the probability of failure and solving the problem of the traditional fault tree based on the two-state assumption and relying on a large amount of failure probability data. In this paper, a T-S fuzzy fault tree was established with dam uneven deformation, dam leakage intensification, and panel frost damage as subordinate events. Then the main risk factors were analyzed by calculating the importance of the bottom event. At the same time, in order to exclude to the interference of subjective factors on the evaluation results of specific engineering risks, this paper tries to combine mechanical calculation and risk analysis to evaluate the actual engineering. The method combines frost swelling mechanics analysis and T-S fuzzy fault tree to calculate and analyze the risk of frost damage faced by the dam in Hongqipao Reservoir. Firstly, the relevant theories and methods of engineering mechanics and permafrost mechanics were used to analyze the frost damage problem faced by the dam in Hongqipao Reservoir. Then the calculation results were transformed into the bottom event fault degree substituted into the T-S fuzzy fault tree. Finally, the fuzzy possibility of the top event of frost risk was calculated and analyzed by the frost risk analysis process established in this paper. The study found that in the process of freezing risk control and decision making of reservoir dams in cold regions, the focus should be on repeated freezing-thawing action, wind and wave erosion, water level fluctuation and ice accumulation in the reservoir area, quality defects of the panel and dam filling, and insufficient anti-seepage and thermal insulation measures. It was also found that the frost damage risk of the dam in Hongqipao Reservoir is relatively high, and extra attention should be paid to the control and treatment of frost damage risk during operation and maintenance, and frost damage risk identification and maintenance based on the results of the importance of each bottom event analysis. The results of application show that the proposed method can scientifically analyze the risk of dam freezing damage and determine the key risk factors. This work can provide technical support for the risk identification, management and decision-making of freezing damage to reservoir dams in cold regions, and further it is useful for the design, construction, operation, maintenance and frost damage prevention of reservoir dam.

**Key words:** reservoir dam in cold region; frost damage risk; T-S fuzzy fault tree; importance; mechanical analysis

(责任编辑: 罗栋梁)