

土石坝风险实时评估与综合预警模型

蔡 蓁^{1,2},王昭升^{1,2},朱思宇^{1,2},丁嘉林³

(1. 南京水利科学研究院,江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全中心,江苏 南京 210029;
3. 台州市国土资源局,浙江 台州 318000)

摘要:为探讨土石坝风险实时评估方法,采用点估计法进行土石坝溃坝概率的实时分析。基于 BREACH 模型与 HEC-RAS 程序计算溃坝损失,综合前人研究成果提出改进的土石坝风险评价标准及与之相衔接的土石坝风险预警标准,并结合现有突发事件预警标准,构建一种新的土石坝综合预警模型。算例计算结果表明,基于点估计法的土石坝溃坝概率实时分析方法能同时满足风险实时评估对计算精度与计算效率的要求,此综合预警模型可有效提高早期预警能力,并在一定程度上降低过度预警造成的损失,可为土石坝风险管理提供理论依据与技术支持。

关键词:土石坝;风险评估;可靠度理论;点估计法;预警模型;溃坝概率

中图分类号:TV641 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)04-0057-07

A real-time risk assessment and synthetical early warning model of earth and rockfill dams//CAI Qian^{1,2}, WANG Zhaosheng^{1,2}, ZHU Siyu^{1,2}, DING Jialin³ (1. Department of Dam Safety and Management, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Taizhou Land and Resources Bureau, Taizhou 318000, China)

Abstract: To discuss the real-time risk assessment methods for earth and rockfill dams, the point estimation method is adopted for the real-time dam-break probability analysis. The dam-break losses were analyzed based on BREACH and HEC-RAS. According to previous research, new risk evaluation criteria and corresponding risk early warning standards are proposed. A new synthetical early warning model is established combined with the current risk early warning standards for emergency events. The verification example shows that the real-time analysis method of earth and rockfill dam break probability based on point estimation method can meet the requirements of both computational accuracy and efficiency. The synthetical early warning model can effectively improve the early warning capability while reduce the loss caused by excessive early warning to a certain extent. It can provide theoretical basis and technical support for the risk management of earth and rockfill dams.

Key words: earth and rockfill dam; risk assessment; reliability theory; point estimation method; early warning model; dam break probability

随着近年全球气候变化加剧,水库大坝突发灾害不时出现,水库大坝安全面临新的挑战^[1]。大量溃坝案例及研究显示,水库大坝灾害具有突发性^[2],无论是暴雨、洪水、地震、泥石流等自然灾害,还是人为管理不善或工程缺陷导致的水库溃坝过程,常常发生极为迅速,并且结果难以预料^[3]。传统的大坝安全评估及突发事件预警决策手段正经受新的考验,促使人们寻求更加高效的水库大坝安全管理方法^[4]。伴随风险理念的日益深入,水库大坝风险研究成为近年的热点问题^[5]。但现有的风险评估方法、技术与突发事件预警机制并非实时控制,有时难以满足时间效率的需求^[6]。大坝风险实时评估能够反映实时的工情、水情、灾情,为工程以及下游公共安全提供实时的风险预警情报,为下游抗灾准备争取宝贵的时间,是水库大坝与下游生命财产安全的关键性技术保障^[7]。

本文在前人研究基础上,对土石坝风险实时评估进行深入研究,探索全新的风险实时分析方法,结合已有的风险评价标准与实际案例,给出改进的风险评价标准,并基于风险理念对传统预警方法进行补充,提出土石坝综合预警模型,可为土石坝预警及风险决策提供理论依据与技术支持。

1 土石坝风险实时评估与预警

土石坝风险实时评估是指土石坝风险实时分析与风险评价。一般认为,土石坝风险为土石坝溃坝概率与溃坝后果的乘积,溃坝后果包括生命损失、经济损失以及社会与环境影响等^[8]。土石坝风险实时分析包括土石坝溃坝概率实时分析与溃坝损失分析。土石坝风险实时评估的重点是解决或平衡计算精度与计算效率之间的矛盾,并制定合理可行的风险评价与预警标准。

1.1 基于点估计法的土石坝溃坝概率实时分析

1.1.1 点估计法

溃坝概率分析采用基于可靠度理论的定量分析方法,但并非所有方法都能满足实时分析的要求。比如蒙特卡洛法(MC法)为保证计算精度,必须采取数目很大的随机采样,而FOSM法则需多次迭代求解^[9],这两种方法或其改进方法在实时风险评价应用中很可能难以满足计算效率与计算精度的需求。Rosenblueth^[10]于1975年提出一种采用随机向量估计的方法(点估计法)。点估计法是根据随机向量的均值和标准差,以一定规律生成所有可能的随机向量,并计算相应功能函数的值,由所计算的功能函数估算可靠度指标。点估计法已被较多的学者讨论和研究^[11],并被广泛使用于岩土工程可靠度计算,具有方法简便、精度较高、运算效率高的特点^[12]。点估计法计算需要给出或确定如下参数或条件:①影响某一事件可靠度的随机向量 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$;②每一个随机变量 x_i 对应的均值 μ_{x_i} 和均方差 σ_{x_i} ;③功能函数 $g(\mathbf{X})$ 。

采用点估计法计算时,若随机变量个数为 n ,则需计算 2^n 次。对于土石坝结构破坏概率计算而言,其随机变量个数一般在12个以内,即所需最大计算次数为4096次,完全可以满足实时风险分析的时间需求,因此完全可将点估计法应用于土石坝的溃坝概率分析。

1.1.2 土石坝溃坝概率分析

根据我国已溃坝资料统计分析^[13],可总结出土石坝主要溃坝模式为漫顶溃坝、滑坡失稳溃坝及渗透破坏溃坝3种溃坝方式,其破坏原因及溃坝路径分别为:①汛期由于超标洪水或泄洪设施闸门无法开启,导致洪水漫坝,相应的溃坝路径为洪水—库水位上升—防洪(能力)标准不足或闸门无法开启—漫顶—冲刷坝体—大坝溃决;②因坝体内浸润线变化较大引起坝坡失稳滑塌,相应溃坝路径为水库运用—库水位变动—坝体浸润线异动—坝坡滑塌—大坝溃决;③汛期坝体内渗流量较大、渗透水力坡降较

高引起坝体管涌冲刷破坏,相应溃坝路径为洪水—库水位上升—渗流量加大—坝体颗粒料带出—大坝溃决。由于任意一种破坏模式都会导致溃坝概率陡增,出于安全考虑,认为任意一种土石坝破坏模式最终均会导致溃坝发生。下面依次计算这3种溃坝模式的溃坝概率。

a. 导致漫顶溃坝的不确定性因素为坝顶高程 Z 和年最大风速 W ,漫顶溃坝概率分析的功能函数定义为

$$g(Z, W) = Z - h - e(W) - R(W) \tag{1}$$

式中: Z 为坝顶高程(防浪墙顶高程); W 为库区年最大风速; h 为坝前最高静水位; e 为风荷载引起的风壅高度; R 为风荷载引起的波浪爬高。

则漫顶溃坝概率 P_{to} :

$$P_{to} = P(g(Z, W) < 0) \tag{2}$$

b. 导致滑坡失稳不确定性的随机变量为土条抗剪强度指标 c, φ 。定义边坡稳定安全系数为目标函数 $K(c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2, \dots, c_n, \varphi_n)$,其中 c_i, φ_i 为土条的抗剪强度指标($i=1, 2, \dots, n$)。边坡稳定分析依据SL272—2001《碾压土石坝设计规范》,圆弧滑动面可采用简化毕肖普法计算安全系数,计算公式如下:

$$K = \frac{\sum_{m=1}^N \frac{[(\Delta W_m \pm V) - u\Delta x] \tan \varphi' + c' \Delta x}{\cos(1 + \tan \alpha \tan \varphi' / K)}}{\sum_{m=1}^N [(\Delta W_m \pm V) \sin \alpha + M_c / R]} \tag{3}$$

式中: N 为土条数量; ΔW_m 为土条重力; V 为垂直地震惯性力; u 为作用于土条底面的孔隙压力; α 为条块重力作用线与通过此条块底面中点的半径之间的夹角; Δx 为土条宽度; c', φ' 为土条底面的有效应力抗剪强度指标; M_c 为水平地震惯性力对圆心的力矩; R 为圆弧半径。

非圆弧滑动面可采用滑楔法计算安全系数,计算公式如下:

$$P_i = \sec(\varphi'_{ei} - \alpha_i + \beta_i) [P_{i-1} \cos(\varphi'_{ei} - \alpha_i + \beta_{i-1}) - (W_i \pm V_i) \sin(\varphi'_{ei} - \alpha_i) + u_i \sec \alpha_i \sin \varphi'_{ei} \Delta x - c'_{ei} \sec \alpha_i \cos \varphi'_{ei} \Delta x + Q_i \cos(\varphi'_{ei} - \alpha_i)] \tag{4}$$

其中

$$c'_{ei} = c' / K \tag{5}$$

$$\tan \varphi'_{ei} = \tan \varphi' / K \tag{6}$$

式中: P_i 为土条一侧抗滑力; P_{i-1} 为土条另一侧抗滑力; W_i 为土条重力; u_i 为作用于土条底部的孔隙压力; Q_i, V_i 分别为水平和垂直地震惯性力; α_i 为土条底面与水平面夹角; β_i 为土条一侧的 P_i 与水平面的夹角; β_{i-1} 为土条另一侧的 P_{i-1} 与水平面的夹角。

根据滑动面形式选取抗滑稳定安全系数计算公式,定义滑坡失稳概率的功能函数:

$$g(c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2, \dots, c_n, \varphi_n) = F(c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2, \dots, c_n, \varphi_n) - 1 \tag{7}$$

则滑坡失稳溃坝概率 P_{Π} 为

$$P_{\Pi} = P[g(c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2, \dots, c_n, \varphi_n) < 0] \quad (8)$$

c. 土石坝渗透破坏概率主要考虑土体材料渗透系数的随机性,当土石坝内部渗流产生的渗透坡降 J 超过坝体(坝基)材料的临界坡降 J_c 时,土石坝发生渗透破坏。建立土石坝有限元模型,根据土石坝测压管网或渗压计网反演各层土体材料水平、竖直渗透系数 K_{ix} 、 K_{iy} ,并根据注水渗透试验由矩法获得其均方差 $\sigma_{K_{ix}}$ 、 $\sigma_{K_{iy}}$ 。将各土层渗透系数 K_{ix} 、 K_{iy} 作为随机变量,获得渗透系数随机向量:

$$\mathbf{K} = (K_{1x}, K_{1y}, K_{2x}, K_{2y}, \dots, K_{nx}, K_{ny}) \quad (9)$$

采用有限元模型计算土石坝关键部位渗透坡降 J_i :

$$J_i = f_i(\mathbf{K}) \quad (10)$$

式中 $f_i(\mathbf{K})$ 为有限元计算渗透坡降的函数表达式形式。

关键部位应包括坝体下游逸出段、坝体下游坝基上表面、心墙出逸段、心墙内部段等。因此,第 i 个部位渗透破坏功能函数为

$$g_i(\mathbf{K}) = J_{ci} - J_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

则第 i 个部位渗透破坏概率为

$$P_{fsi} = P_i(g_i(\mathbf{K}) < 0) \quad (12)$$

利用点估计法对每个部位进行分析求解。由于任意部位发生渗透破坏都认为总体不满足渗流稳定,则渗透破坏的总概率为

$$P_{fs} = 1 - \prod (1 - P_{fsi}) \quad (13)$$

对于漫顶溃坝、滑坡失稳溃坝和渗透破坏溃坝 3 种模式,认为其中只要有 1 个事件发生,则土石坝发生溃坝,并且 3 种溃坝模式在发生之前均相互独立,因此土石坝总体溃坝概率为

$$P_f = 1 - (1 - P_{fo})(1 - P_{\Pi})(1 - P_{fs}) \quad (14)$$

综上所述,由监测资料实时获取各随机变量的测值,基于点估计法用式(2)(5)(12)(13)依次计算 P_{fo} 、 P_{Π} 、 P_{fs} ,再根据式(14)计算得土石坝总体溃坝概率 P_f 。

1.2 基于土石坝溃决模型与 HEC-RAS 的溃坝损失分析

分析溃坝损失,必须首先模拟计算溃坝洪水演进,分析并确定下游洪水淹没范围、淹没水深、洪水到达时间、洪水流速等要素^[14],在此基础上可依据 SL/Z 720—2015《水库大坝安全管理应急预案编制导则》计算溃坝工程损失与下游淹没损失。

1.2.1 溃坝洪水演进模拟

模拟溃坝洪水演进包括两个过程:溃坝过程模拟与洪水演进模拟。溃坝过程模拟主要确定溃口发

展过程及相应的溃口洪水计算,对于土石坝溃口模拟,根据 SL/Z 720—2015《水库大坝安全管理应急预案编制导则》,均质土坝或心墙坝可采用 BREACH 模型,面板堆石坝可采用李雷模型^[15]或陈生水模型^[16]。以溃坝过程模拟得出的溃口发展过程、洪水下泄过程以及下游地形地貌等参数为基础,采用一维、二维或一二维耦合的非稳定水流模型,进行洪水演进模拟。洪水演进的非恒定渐变流模拟采用 HEC-RAS 有限元程序。

1.2.2 溃坝损失计算

获得洪水演进计算结果后,根据洪水演进影响区域,将溃坝损失按溃坝生命损失、溃坝经济损失与溃坝社会与环境影响三方面分别考虑,均采用 SL/Z 720—2015《水库大坝安全管理应急预案编制导则》中规定的方法结合 GIS 技术进行统计计算,下游影响风险人口 P_{AR} 按静态风险人口统计法计算,生命损失 L_{OL} 用 D&M 法计算,经济损失 D_T 采用分类损失率法计算,社会与环境影响采用社会与环境影响指数 I_{SE} 度量,此处不再赘述。

1.3 土石坝溃坝风险评价标准与综合预警模型

1.3.1 土石坝风险评价标准

国内外现有的风险评价或分级均是依据水库失事后果考量的评价标准^[17]。将风险用容许线、目标线分割为不可接受风险区、可容忍风险区和可接受风险区^[18]。风险标准采用 F-N 线法划分^[19]。根据溃坝后果的分类,将土石坝溃坝风险评价标准相应分为 P_{AR} 风险标准、 L_{OL} 风险标准、 D_T 风险标准及 I_{SE} 风险标准。

令各项风险指标的数学期望 $E(*)$ 表示为溃坝概率 P_f 与其对应风险指标的乘积,如 $E(P_{AR}) = P_f P_{AR}$ 。根据我国《生产安全事故报告和调查处理条例》(2007 年国务院令第 493 号),认为生命损失在 3 人以内或经济损失在 1 000 万元以内是一般事故;根据近年来水库突发事件转移人口调查,认为风险人口在 300 人以内为一般事故;社会与环境影响方面认为小于 10 人为一般事故。根据 GB 50199—2013《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》,认为土石坝溃决概率在 1×10^{-4} 以下是安全的,为获得一定的安全阈值,将其降低至 1/10 作为土石坝安全的目标线,即 $P_f = 1 \times 10^{-5}$;扩大 10 倍为基本安全与不安全分界线,即 $P_f = 1 \times 10^{-3}$ 。则定义可接受的 $E(L_{OL}) = 3 \times 10^{-5}$ 人、 $E(P_{AR}) = 3 \times 10^{-3}$ 人、 $E(D_T) = 1 \times 10^{-2}$ 万元、 $E(I_{SE}) = 1 \times 10^{-4}$;可容忍的 $E(L_{OL}) = 3 \times 10^{-3}$ 人、 $E(P_{AR}) = 3 \times 10^{-1}$ 人、 $E(D_T) = 1 \times 10^0$ 万元、 $E(I_{SE}) = 1 \times 10^{-2}$ 。根据 $E(*)$ 划分风险等级标准,将风险等级区域划分为 I 级极高风险区、II 级不可接受风险区、

Ⅲ级可容忍风险区及Ⅳ级可接受风险区。其中,可接受的 $E(※)$ 以下为Ⅳ级可接受风险区;可容忍的 $E(※)$ 以下至可接受的 $E(※)$ 以上为Ⅲ级可容忍风险区;可容忍的 $E(※)$ 以上 10 倍区域内为Ⅱ级不可接受风险区;可容忍的 $E(※)$ 10 倍区域以外为Ⅰ级极高风险区。风险评价标准见表 1。

1.3.2 土石坝风险预警标准与综合预警模型

根据 SL/Z 720—2015《水库大坝安全管理应急预案编制导则》,我国现行水库预警分级标准为突发事件预警标准。此标准划分非常明确,根据后果的分级依据也较为充分,遵照此预警标准执行的应急响应易于操作。但依旧存在以下应当引起重视的问题:

a. 预警对变化的风险适应性不强^[20]。在突发事件指标未超标时,现行突发事件预警标准认为无安全问题,不采取预警,但水库大坝风险也许已开始抬升;当突发事件某项指标已经超标时,水库已遭遇险情,此时风险早已大大增加。因此,突发事件预警标准因为根据已发生的险情指标采取预警,造成未能及早发现风险变化的情况。

b. 可靠性分析缺乏与过度预警^[21]。虽然现行预警分级考虑了工程安全指标,但缺少量化的分析,因此遭遇险情时,大坝安全可靠如何,有多大把握抵抗风险,都是现行预警分析中存在的问题。正因如此,有时会产生过度预警的情况。比如虽然某些预警指标已经超标,依据突发事件预警标准必须进行预警并采取应急响应措施,但大坝事实上仍然十分安全,未发生险情,此时发出过度预警,反而造成了不必要的损失。

基于两点考虑,本文提出与风险评价标准相衔接的风险预警分级标准。风险预警标准分类与风险评价标准相同,即按照 P_{AR} 风险标准、 L_{OL} 风险标准、 D_T 风险标准及 I_{SE} 风险标准分类,对应不同风险区域进行不同等级预警。对于Ⅰ级极高风险区启动红色Ⅰ级预警;对于Ⅱ级不可接受风险区启动橙色Ⅱ级预警;对于Ⅲ级可容忍风险区启动黄色Ⅲ级预警;对于Ⅳ级可接受风险区启动蓝色Ⅳ级预警;在Ⅲ级可容忍风险区中间插入一个数量级的风险分级,得到Ⅲ级黄色预警与Ⅳ级蓝色预警;对于Ⅳ级可接受风险区不采取预警。当风险指标指向不同预警等级时,取最高风险等级进行预警。风险预警标准见表 1。当溃坝概率小于 1×10^{-5} 时,认为工程非常安全,再大的损失也没有意义,此种情况下都属于Ⅳ级可接受风险区,不予预警。

结合突发事件预警标准与风险预警标准,构建综合预警模型。当水库遭遇突发事件或洪水等险情时,突发事件预警体系与预警标准和风险预警体系与预警标准应被分开考虑,而水库大坝综合预警模型,也应分别考虑突发事件预警标准与风险预警标准。当风险预警级别与突发事件预警级别不同时,应对水情工情进行综合评判,分析险情发展趋势,并判断险情发展的可控性,若险情在可控范围内不会向不利方向继续发展,则按较低级别预警;若险情向不利方向发展或不可控,则按较高级别预警。水库大坝综合预警模型见图 1。

结合突发事件预警标准与风险预警标准,构建综合预警模型。当水库遭遇突发事件或洪水等险情时,突发事件预警体系与预警标准和风险预警体系与预警标准应被分开考虑,而水库大坝综合预警模型,也应分别考虑突发事件预警标准与风险预警标准。当风险预警级别与突发事件预警级别不同时,应对水情工情进行综合评判,分析险情发展趋势,并判断险情发展的可控性,若险情在可控范围内不会向不利方向继续发展,则按较低级别预警;若险情向不利方向发展或不可控,则按较高级别预警。水库大坝综合预警模型见图 1。

2 算例分析

2.1 工程概况

某水库主坝为黏土心墙坝,2 级水工建筑物,最大坝高 20.00 m,坝顶高程 20.00 m。上游坡度为 1:2.5,下游坡度为 1:2.3。主坝典型断面见图 2。水库死水位为 3.00 m,正常蓄水位为 15.00 m(汛期限制水位)。设计洪水 200 年一遇,设计洪水位为 18.15 m;校核洪水 500 年一遇,校核洪水位为 19.30 m。水库下游为普通乡镇,存在国家三级动物保护区及中小型化工企业。

根据实测资料及监测数据,土石坝计算坝高为 20 m,考虑施工与不均匀沉降,坝高均方差为 0.01 m。库面吹程为 2 000 m,库区年最大风速均值为 13.25 m/s,均方差为 2.119 m/s。土石坝边坡稳定与渗透稳定计算参数见表 2。

表 1 风险评价标准与风险预警标准

风险评价标准	风险预警标准	$E(P_{AR})/\text{人}$	$E(L_{OL})/\text{人}$	$E(D_T)/\text{万元}$	$E(I_{SE})$
Ⅰ级极高风险	Ⅰ级红色	$[30, +\infty)$	$[0.03, +\infty)$	$[10, +\infty)$	$[0.1, +\infty)$
Ⅱ级不可接受	Ⅱ级橙色	$[0.3, 3)$	$[0.003, 0.03)$	$[1, 10)$	$[0.01, 0.1)$
Ⅲ级可容忍	Ⅲ级黄色	$[0.03, 0.3)$	$[0.0003, 0.003)$	$[0.1, 1)$	$[0.001, 0.01)$
	Ⅳ级蓝色	$[0.003, 0.03)$	$[0.00003, 0.0003)$	$[0.01, 0.1)$	$[0.0001, 0.001)$
Ⅳ级可接受	不预警	$[0, 0.003)$	$[0, 0.00003)$	$[0, 0.01)$	$[0, 0.0001)$

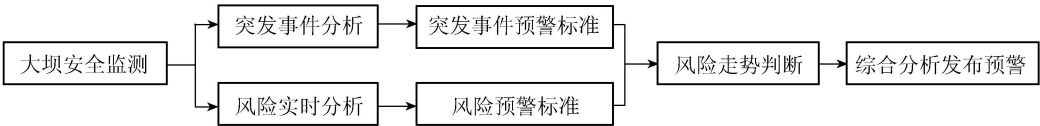


图 1 水库大坝综合预警模型

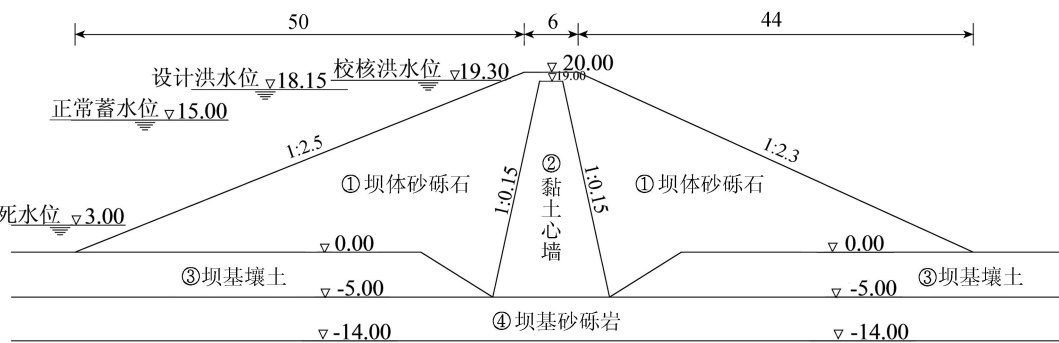


图2 主坝典型断面(单位:m)

表2 边坡稳定与渗透稳定主要计算参数

土层	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	湿密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	有效应力指标				临界渗透坡降		渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)			
			c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	σ_c'/kPa	$\sigma_{\varphi}'/(^{\circ})$	正常工况	校核工况	K_x	K_y	$\sigma_{K_{ix}}$	$\sigma_{K_{iy}}$
①坝体砂砾石	1.92	2.08	0.05	32.0	0.050	2.075	0.25	0.33	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}	2.2×10^{-4}	2.6×10^{-4}
②黏土心墙	1.95	2.00	20.0	24.0	0.358	1.944	4.00	5.33	1.4×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.1×10^{-6}	1.4×10^{-6}
③坝基壤土		2.03	26.0	25.0	0.382	1.987	0.50	0.67	1.6×10^{-5}	1.8×10^{-5}	1.3×10^{-6}	1.4×10^{-6}
④坝基砂砾岩		2.20	73.0	20.0	0.495	1.774			5.2×10^{-4}	5.0×10^{-4}	3.3×10^{-5}	2.9×10^{-5}

2.2 计算结果与分析

土石坝溃坝概率计算及溃坝损失分析采用 FORTRAN 语言在 Visual Studio 与 IVF 开发环境下编写程序实现。

首先进行调洪试算,依次获得从 11.00 ~ 20.00 m 每隔 1 m 和 19.00 ~ 20.00 m 每隔 0.1 m 坝前最高水位对应的洪水过程,其中 15.00 m (汛限制水位) 以下采用不超过泄流能力的少量入库洪水调洪。然后对各入库洪水过程采用相对应的水位条件计算溃坝概率;采用 BREACH 模型计算溃坝泄洪过程;由 HECRAS 程序分析相应溃坝淹没损失。为校核点估计法的计算精度,同时采用 MC 法并行计算,MC 法取样次数为 10^6 次。计算结果见图3、4及表3,

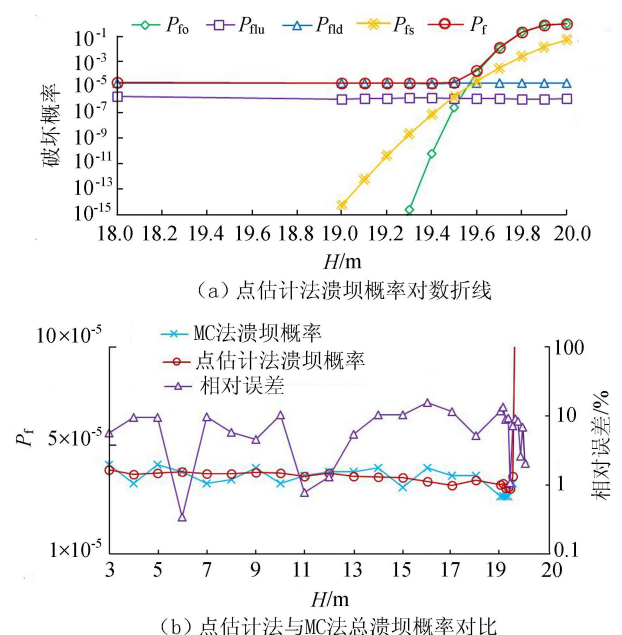


图3 溃坝概率计算对数折线

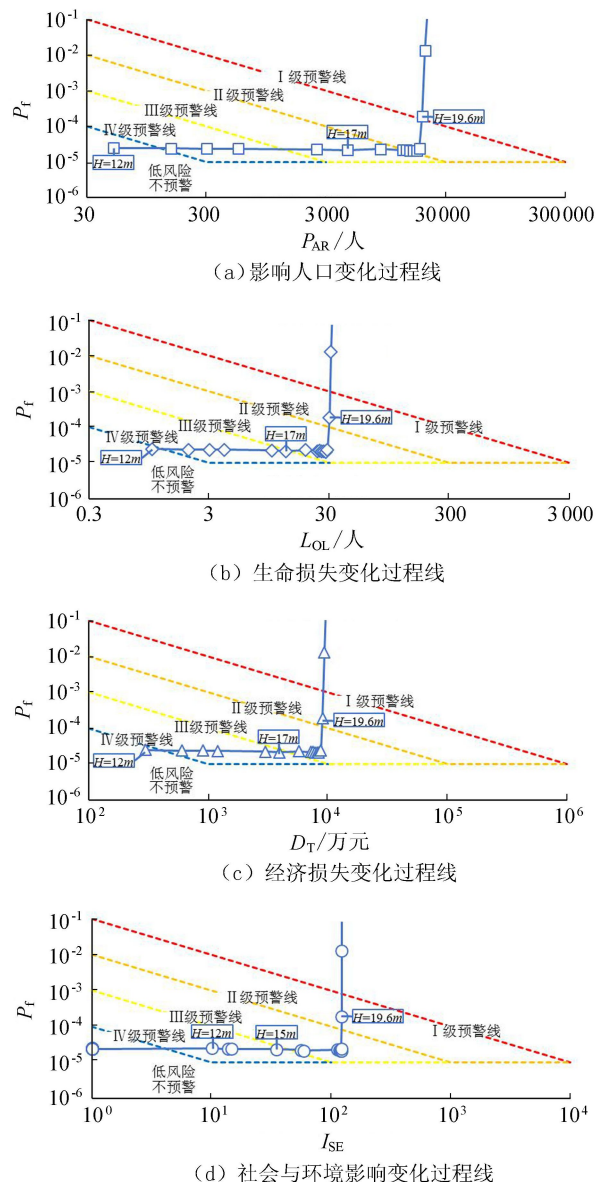


图4 各风险评估指标变化过程线

表 3 综合预警

H/m	P_{AR} 预警 级别	L_{OL} 预警 级别	D_T 预警 级别	I_{SE} 预警 级别	风险 预警 级别	突发 事件 预警 级别	综合 预警 级别
12.00	不预警	不预警	不预警	不预警	不预警	不预警	不预警
13.00	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	不预警	不预警
14.00	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	不预警	不预警
15.00	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级
16.00	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级
17.00	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级
18.00	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级
19.00	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅲ级
19.10	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
19.20	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
19.30	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
19.40	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅰ级	Ⅱ级
19.50	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅰ级	Ⅰ级
19.60	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级
19.70	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级
19.80	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级
19.90	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级
20.00	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级

图中 P_{fo} 、 P_{flu} 、 P_{fld} 、 P_{fs} 及 P_f 分别为漫顶溃坝概率、上游滑坡失稳溃坝概率、下游滑坡失稳溃坝概率、渗透破坏溃坝概率及土石坝总溃坝概率。由于滑坡失稳破坏概率在水位缓慢变化情况下全程基本保持不变,且水位在 3.00 ~ 18.00 m 时,漫顶破坏与渗透破坏概率极小,超出了 FORTRAN 程序的双精度范围,因此图 3(a)中略去了 3.00 ~ 17.00 m 水位部分;而土石坝风险在 3.00 ~ 11.00 m 时较小,不予预警,故表 3 中略去 3.00 ~ 11.00 m 部分。

计算结果分析如下:

a. 比较点估计法和 MC 法计算结果可知,点估计法溃坝概率折线走势与 MC 法一致,在大多数计算点的溃坝概率上,计算结果基本一致,总体相对误差均保持在 15% 以内,因此认为点估计法计算结果科学可信,精度满足计算要求。点估计法在每个水位下计算仅需 12 ~ 16 s,而常规的洪水预报与大坝安全监测系统返回预报与监测数据一般需要 1 min,因此采用点估计法计算溃坝概率可以满足风险实时分析对计算效率与计算精度的双重要求。

b. 由各风险指标变化过程线可知,土石坝风险各个指标随着水位的上涨,都呈现两段式的上升过程。第 1 段处于正常运行期,由于溃坝概率保持平稳,而溃坝损失随着水位的上涨不断增大,因而在风险变化折线图中表现为一近似水平段。第 2 段超出正常运行范围后,溃坝概率陡增,而溃坝损失相对变化较缓,因而表现为一大倾角的陡增段。

c. 根据综合预警表,大部分情况下风险预警标准与突发事件预警标准相吻合。根据综合预警模型

规定,当风险可控或未向不利方向发展时,取相对较低标准预警,故水位在 13.00 ~ 15.00 m 区间时,风险预警进入Ⅳ级预警而突发事件预警标准未预警,证明风险预警相对突发事件预警确实能够较早期地发现险情。此时视风险变化情况可不预警,但需采取措施控制风险。当水位超过 15.00 m 时,风险正向不利方向发展,应采取Ⅳ级预警,当水位上涨到 19.40 m 时,此时已超过校核洪水位,按突发事件预警标准应采取Ⅰ级预警,而风险预警标准为Ⅱ级预警,根据风险分析结果,此时溃坝概率仍然较小,工程仍安全,若险情已得到控制,水位已经开始回落,仍可采用Ⅱ级预警;若险情未得到控制,则必须升级为Ⅰ级预警。当水位继续上涨到 19.50 m 时,虽然风险预警标准仍然为Ⅱ级预警,但此时由于风险有上升趋势,应采用更高级别的突发事件预警标准,发布Ⅰ级预警。因此,采用综合预警模型可以及早对水库大坝险情进行干预,及时控制风险,且在一定程度上减少过度预警的情况。

3 结 论

a. 为满足风险实时评估的要求,采用点估计法计算土石坝溃坝概率,采用 BREACH 与 HEC-RAS 进行洪水演进分析,获得水位与溃坝损失关系曲线,由土石坝溃坝概率与溃坝损失综合分析土石坝风险。算例结果证明,以上方法可同时满足土石坝风险实时评估对计算效率与计算精度的双重要求。

b. 综合考虑了已有土石坝风险评价标准,在此基础上对其进行补充,提出了新的土石坝风险评价标准。对风险评价标准进行细分,得到风险预警标准。将风险预警标准与突发事件预警标准相结合的综合预警模型可以提升早期预警的能力,并量化分析水库大坝安全可靠度,可规避一些过度预警的情况,降低因过度预警造成的损失。

c. 应将土石坝风险实时评估与预警向其他各类坝型拓展,并以风险评估与综合预警模型为基础,进一步研究风险调控方法,讨论实用、可行、动态的风险调度决策方案。

参考文献:

[1] DERDOUS O, DJEMILI L, BOUCHEHED H, et al. A GIS based approach for the prediction of the dam break flood hazard: a case study of Zardezas Reservoir “Skikda, Algeria” [J]. Journal of Water & Land Development, 2015,27(1):15-20.

[2] JAVED I, TU Xinbin, XU Ling. Landslide hazards in reservoir areas: case study of Xiangjiaba Reservoir, Southwest China[J]. Natural Hazards Review, 2017,18

- (4). DOI:04017009.
- [3] PHAN T T, HOANG Q V, NGUYEN V, et al. Active fault segmentation and seismic hazard in Hoa-Binh Reservoir, Vietnam [J]. Central European Journal of Geosciences, 2013, 5(2): 223-235.
 - [4] LIU Pan. A two-stage method of quantitative flood risk analysis for reservoir real-time operation using ensemble-based hydrologic forecasts [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2015, 29(3): 803-813.
 - [5] YE Yan, MA Guangwen, ZHANG Yuanbo. The advances in risk analysis of reservoir operation research [J]. Advanced Materials Research, 2012, 594: 1993-1997.
 - [6] 叶建春, 章杭惠. 太湖流域洪水风险管理实践与思考 [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 136-141. (YE Jianchun, ZHANG Hanghui. Practices and thinking of flood risk management in Taihu Lake Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 136-141. (in Chinese))
 - [7] 李宗坤, 葛巍, 王娟, 等. 中国水库大坝风险标准与应用研究 [J]. 水利学报, 2015, 46(5): 567-573, 583. (LI Zongkun, GE Wei, WANG Juan, et al. Risk criteria and application on reservoir dams in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 567-573, 583. (in Chinese))
 - [8] 董前进, 曹广晶, 王先甲, 等. 水库汛限水位动态控制风险分析研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3): 85-89. (DONG Qianjin, CAO Guangjing, WANG Xianjia, et al. Research progress on the risk analysis of dynamic control of reservoir water limit level [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(3): 85-89. (in Chinese))
 - [9] 吴震宇, 陈建康. 土坡体系可靠度分析方法及在高土石坝工程中的应用 [J]. 岩土力学, 2018(2): 1-7. (WU Zhenyu, CHEN Jiankang. Methodlogy of system reliability analysis of earth slope stability and its application for high earth and rockfill dams [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018(2): 1-7. (in Chinese))
 - [10] ROSENBLUETH E. Point estimate for probability moments [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1975, 72(10): 3812-3814.
 - [11] MORTEZA A, RAINER P. Assessment of the application of point estimate methods in the probabilistic stability analysis of slopes [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 540-550.
 - [12] NAPA-GARCIA G F, BECK A T, CELESTINO T B. Reliability analyses of underground openings with the point estimate method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2017, 64: 154-163.
 - [13] 盛金保, 冯靖宇, 彭雪辉. 小型水库风险分析方法研究 [J]. 水利水运工程学报, 2008(1): 28-35. (SHENG Jinbao, FENG Jinyu, PENG Xuehui. Research on risk analysis of small reservoir dams [J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(1): 28-35. (in Chinese))
 - [14] MA Zhenkun, FAN Ziwu, ZHANG Ming, et al. Flood risk control of dams and dykes in middle reach of Huaihe River [J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(1): 17-31.
 - [15] 李雷, 王仁钟, 盛金保, 等. 大坝风险评价与风险管理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
 - [16] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
 - [17] 王仁钟, 李雷, 盛金保. 病险水库风险判别标准体系研究 [J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(5): 5-9. (WANG Renzhong, LI Lei, SHENG Jinbao. Study on risk judgment standard system for dangerous reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(5): 5-9. (in Chinese))
 - [18] 彭雪辉, 盛金保, 李雷, 等. 我国水库大坝风险评价与决策研究 [J]. 水利水运工程学报, 2014(3): 49-54. (PENG Xuehui, SHENG Jinbao, LI Lei, et al. Dam risk evaluation and decision-making research of China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(3): 49-54. (in Chinese))
 - [19] 彭雪辉, 盛金保, 李雷, 等. 我国水库大坝风险标准制定研究 [J]. 水利水运工程学报, 2014(4): 7-13. (PENG Xuehui, SHENG Jinbao, LI Lei, et al. Research on dam risk criteria of China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 7-13. (in Chinese))
 - [20] 沈振中, 陈允平, 王成, 等. 大坝安全实时监控和预警系统的研制和开发 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 68-72. (SHEN Zhenzhong, CHEN Yunping, WANG Cheng, et al. Development of real-time monitoring and early warning system of dam safety [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 68-72. (in Chinese))
 - [21] 谷艳昌, 王士军. 水库大坝结构失稳突发事件预警阈值研究 [J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1467-1472. (GU Yanchang, WANG Shijun. Study on the early-warning threshold of structural instability unexpected accidents of reservoir dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1467-1472. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-01-24 编辑: 骆超)