

文章编号:0559-9350(2017)04-0480-08

基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定研究

谷艳昌^{1,2}, 王士军^{1,2}, 庞 琼^{1,2}, 王 宇¹, 吴云星¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 在混凝土坝风险理论和结构计算拟定变形指标方法基础上, 研究建立基于风险管理的变形预警指标拟定方法, 使得拟定的预警指标不仅满足工程安全需要, 同时体现大坝风险的要求。首先根据混凝土坝工程安全运行与下游经济社会发展要求, 确立大坝的风险等级标准; 其次分析研究相应风险等级标准条件下, 混凝土坝的破坏路径与模式; 以混凝土坝溃决模式与坝体结构特性转异为纽带, 借助专家经验, 设置结构计算的荷载条件与约束标准, 再采用有限元计算获得相应的变形预警指标值, 进而建立了基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定方法。以某水电站工程为案例, 拟定了该水电站低风险运行的变形预警指标值, 验证了该方法是切实可行的。

关键词: 混凝土坝; 风险管理; 溃决; 变形特性; 预警指标; 交集

中图分类号: TV691.1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160374

1 研究背景

大坝风险是指大坝失事可能性和对生命、财产及环境产生的负面影响严重性的度量, 是不利事件可能性与危害后果的乘积, 也即大坝溃决可能性与溃坝后果的乘积^[1-3]。大坝风险是客观存在的, 人们无法完全消除风险, 只能通过工程或非工程措施降低风险, 使其控制在某一合理的限度之内。风险管理是一种基于风险度量为理念的事前管理机制, 它将工程安全和公共安全联系起来, 为大坝安全管理部门提出更为明确的目标, 是大坝安全管理理念的重大转变^[4-5]。

混凝土坝溃决模式一般为瞬间溃坝, 一旦失事, 溃坝风险必定很大, 后果不堪设想。20世纪曾经发生过3次震惊坝工界的混凝土坝失事事件, 分别为美国圣弗朗西斯(St. Francis)重力坝溃决(1928年)、法国马尔帕塞(Malpasset)拱坝溃决(1959年)和意大利瓦依昂(Vajont)拱坝失事(1963年)^[6-7]。拟定混凝土坝变形预警指标, 能综合反映各种因素对大坝工作性态的影响, 为大坝失事提供事先预警支持。

混凝土坝传统变形预警指标属于工程安全管理范畴, 并未体现下游各种因素(包括生命、财产、环境等)对大坝安全的要求, 也即没有体现大坝风险的度量。随着经济社会的发展、公众对安全意识的增强以及风险分析技术研究的不断深入, 水库大坝的管理模式从传统的工程管理模式逐渐过渡到风险管理模式是必然的趋势。在此背景下, 开展基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定研究, 便是使得建立的预警指标不仅满足工程安全的需要, 同时还体现出大坝风险的要求, 也即体现大坝风险度量, 并随风险的动态变化而变化, 可把宏观层面的风险管理模式渗透到大坝的日常安全管理当中, 为混凝土坝风险管理日常化提供基础理论支撑与有效技术手段。

收稿日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209143); 江苏省自然科学基金项目(BK2010125); 江苏省水利科技项目(2015010);

广西水利厅科技项目(201614); 水利部公益性行业科研专项(201501033); 南京水利科学研究院基金项目(Y715017)

作者简介: 谷艳昌(1980-), 男, 河南开封人, 博士, 高级工程师, 主要从事大坝安全监控研究。E-mail: g_ruby@126.com

2 混凝土坝风险管理理论

大坝风险(R)定义为大坝溃决可能性(f)与溃坝后果(L)的乘积,可表示为:

$$R=f\times L \tag{1}$$

式中: R 为大坝风险; f 为大坝溃决可能性; L 为溃坝后果。

式(1)的核心为“溃决可能性”和“溃决后果”。溃决可能性,一般根据大坝的实际运行环境、结构性态等因素,由专家凭借知识与经验采用事件树或可靠度方法赋值确定。溃决后果,则是溃坝与溃坝洪水造成的直接损失与间接损失综合,一般分为生命损失、经济损失、社会与环境影响损失^[8]。在一定时期内(比如 n 年内, $n\leq 5$)、一定溃坝洪水条件下,溃坝后果可以认为是不变量。

2.1 混凝土坝可能破坏模式 混凝土坝的破坏主要表现为结构失稳、坝体开裂渗水等模式,主要破坏原因包括超标准洪水、地震等外荷载以及坝体内部应力、扬压力异常等。如法国马尔帕塞(Malpas-set)拱坝溃决是坝基扬压力增加和岩基开裂、转动、压碎导致岩体剪切破坏;美国圣弗朗西斯(St. Francis)重力坝是由坝基地质条件缺陷导致溃决。表1、表2分别给出了重力坝和拱坝的可能破坏模式及原因分析汇总。

表1 重力坝破坏模式分析

机理	原因	模式
防洪能力不足	1、超标准洪水	1、漫坝 2、坝体开裂 3、溢洪道冲毁
	2、溢洪道设计泄流能力不足	
	3、溢洪道淤堵或被堵塞,过流能力下降	
	4、闸门槽卡死水闸无法正常启闭	
	5、启闭系统故障	
地震	1、地基层或软弱夹层开裂	1、坝基滑动失稳 2、分缝开裂漏水 3、坝顶、廊道等薄弱部位开裂
	2、坝段分缝裂缝错位,止水破坏	
	3、坝顶或廊道部位应力超限	
基岩破坏	1、基岩软弱面材料压碎或拉裂	1、坝体滑动失稳 2、坝体倾覆破坏
	2、基岩软弱夹层受高压渗流冲刷、溶蚀破坏	
	3、地基深部断层或软弱夹层未能及时发现和处理	
坝体应力超限	1、坝体(坝踵、坝趾)应力超限	1、坝体靠近基础部位出现裂缝 2、坝体出现温度裂缝
	2、坝体浇筑时温控措施不当,温度应力超限	
扬压力异常	1、防渗帷幕设计不当	1、沿坝基面向下游滑动失稳 2、岸坡坝段滑动失稳 3、坝体倾覆
	2、防渗帷幕施工质量问题的	
	3、防渗帷幕冲刷破坏	
	4、排水孔淤堵	

2.2 混凝土坝溃坝概率 就某座具体的混凝土坝,根据其结构性态、运行环境等,由专家凭借其知识与经验采用事件树或可靠度方法赋值确定,分析其可能破坏模式,评价其安全等级,估计混凝土坝的溃决概率。根据国内经验^[5, 8-10],可把溃决概率分为4个等级,见表3。

2.3 溃坝后果 水库大坝溃决后果(L)主要分为生命损失、经济损失、社会与环境影响,具体分级标准国内外学者研究成果较多,相对较为成熟。溃决后果分为4级:Ⅰ级特别重大;Ⅱ级重大;Ⅲ级较大;Ⅳ级一般。

2.4 混凝土坝溃坝风险等级标准 混凝土坝风险定性分级,可根据混凝土坝工程安全等级和混凝土坝溃决后果等级分为4级,即极高风险、高风险、中风险和低风险,分别用Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级表示,如图1所示^[10]。

风险定量等级可以分为群体生命风险定量分级、经济风险定量分级、社会与环境定量分级以及综合分

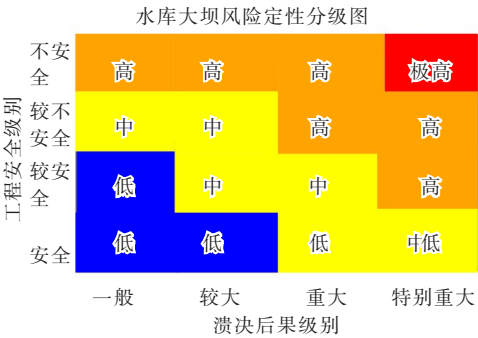


图1 混凝土坝风险定性分级

表2 拱坝破坏模式分析

机理	原因	模式
防洪能力不足	1、超标准洪水 2、溢洪道设计泄流能力不足 3、溢洪道被杂物堵塞,泄流能力下降 4、闸门槽卡死 5、起闭系统故障,闸门操作失灵	1、漫顶 2、溢洪道冲毁
地震	1、坝体及附属结构物拉压应力超限 2、岸坡失稳 3、基础软弱夹层和断层开裂	1、坝体开裂 2、进水塔、引水洞、溢洪道等结构破坏 3、拱座坍塌
坝体应力超限	1、封拱温度偏高 2、环境高温或低温叠加低水位运行	1、坝体开裂
坝体混凝土质量问题	1、碱骨料反应 2、混凝土冻融剥蚀 3、分缝灌浆质量差 4、新老混凝土结合面质量问题	1、坝体材料质量劣化,诱发溃坝 2、坝体开裂渗漏
扬压力增大	1、坝基或坝肩岩体抗剪强度下降 2、岩体冲蚀、溶蚀破坏	1、坝基失稳滑动 2、坝肩失稳滑动 3、坝体开裂渗漏
基岩破坏	1、基岩塑性变形过大,应力破坏 2、岩体软弱夹层或断层未及时发现或处理不当	1、坝体开裂 2、坝基或坝肩岩体开裂 3、坝体滑动失稳
岸坡坍塌	1、上游库岸坍塌滑入水库 2、坝肩或下游侧岸坡坍塌	1、漫坝 2、拱座失稳

表3 混凝土坝溃坝概率与安全等级划分

安全级别	溃坝概率/年	渗流安全	结构安全
I级 安全	$f < 1.0 \times 10^{-5}$	无明显渗流异常	无明显结构隐患,坝体按设计正常运行
II级 较安全	$1.0 \times 10^{-5} \leq f < 1.0 \times 10^{-4}$	坝体现轻微渗漏,但无发展趋势	坝体材料出现小范围塑性区域或出现细小裂缝,但无发展趋势
III级 较不安全	$1.0 \times 10^{-4} \leq f < 1.0 \times 10^{-3}$	坝体出现集中渗漏,出现析钙	坝体材料出现较大范围塑性区;坝体出现较深裂缝
IV级 不安全	$1.0 \times 10^{-3} \leq f$	坝体大面积集中渗漏,或大面积渗水,析钙严重	大坝出现较大贯穿性裂缝,且具有发展趋势;有明显失稳征兆

注:分级指标中选择最高级作为混凝土坝工程安全等级。

级等。英国健康和安全委员会HSE^[11]和澳大利亚大坝委员会ANCOLD^[12]采用可容忍线、可接受线分级;美国垦务局USBR^[13]则采用直接分级法,如根据年生命损失将风险标准定为: 1.0×10^{-5} 、 1.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 和 1.0×10^{-2} 等若干级别。

3 混凝土坝变形预警指标拟定方法

国外对变形预警指标的研究报道较少^[14-15],而国内的研究成果较为丰富^[16-23]。目前,混凝土坝变形预警指标拟定方法主要有置信区间法、典型效应量小概率法和结构计算分析法等。其中,结构计算分析法将力学模型引入到大坝安全监控领域,利用有限元方法进行力学数值模拟计算,根据大坝所处的黏弹性、弹塑性和极限荷载等不同状态,确定不利或者最不利荷载组合,进而拟定混凝土坝不同等级的变形预警指标。

3.1 混凝土坝结构转异特性 混凝土坝渐进变形与转异过程较为复杂,大致可以分为4个阶段(见图2):线弹性工作阶段、准线弹性工作阶段、局部屈服变形阶段以及变

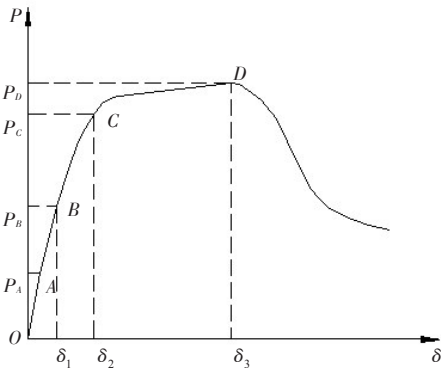


图2 混凝土坝结构转异特征

形破坏阶段，分别对应示意图的OA段、AB段、BC段及CD段。

3.2 混凝土坝4级变形预警指标拟定 根据混凝土坝结构性态转异特性，不妨把其变形预警指标分为4级，即Ⅰ级安全变形预警指标、Ⅱ级较安全变形预警指标、Ⅲ级较不安全变形预警指标、Ⅳ级不安全变形预警指标。

(1) Ⅰ级安全变形预警指标拟定准则。当大坝处于Ⅰ级安全控制状态时，坝体任一点的应力均未超过材料的设计强度，坝踵区拉应力小于设计允许值，应力与应变基本维持在线弹性范围内，坝体处于黏弹性工作阶段。在拟定该级变形预警指标时，应满足下式所示的强度和稳定条件，即混凝土坝Ⅰ级安全变形预警指标的拟定准则为：

$$\delta_1 = f \left(\sigma_t \leq \sigma_{dt}, \sigma_c \leq \sigma_{dc}, K = \frac{R}{S} \geq [K] \right) \quad (2)$$

式中： δ_1 为Ⅰ级安全变形预警指标，mm； σ_t 、 σ_c 分别为坝体实际承受的拉应力、压应力，MPa； σ_{dt} 、 σ_{dc} 分别为坝体材料的抗拉、抗压弹性设计强度，MPa； R 为大坝工作的抗力； S 为不同荷载条件下的效应量； K 为实际的稳定安全系数； $[K]$ 为设计容许的安全系数。

(2) Ⅱ级较安全变形预警指标拟定准则。当大坝处于Ⅱ级较安全控制状态时，坝体局部的应力达到材料的弹性比例极限，坝踵区拉应力接近极限拉应力，坝体局部处于塑性工作状态，坝体处于“准”黏弹性工作阶段。在拟定该级预报控制值时，大坝应满足下式所示的强度和稳定条件，即混凝土坝Ⅱ级较安全的变形预警指标的拟定准则为：

$$\delta_2 = f \left(\sigma_t \leq \sigma_{et}, \sigma_c \leq \sigma_{ec}, K = \frac{R}{S} \geq K_e \right) \quad (3)$$

式中： δ_2 为Ⅱ级较安全变形预警指标，mm； σ_{et} 、 σ_{ec} 为坝体材料的抗拉、抗压弹性极限强度，MPa； K_e 为坝体弹性极限状态的容许安全系数。

(3) Ⅲ级较不安全变形预警指标拟定准则。当大坝处于Ⅲ级较不安全控制状态时，坝体出现较大塑性区域，可能裂缝区较为扩展，下游区压应力增加，坝体部分区域出现压剪屈服或压碎屈服，结构进入屈服状态，变形有显著的增加，应力与应变开始呈非线性，坝体处于黏弹塑性工作阶段。取坝体实际压应力不大于抗压屈服强度，即 $\sigma_c \leq \sigma_{sc}$ 作为Ⅲ级较不安全控制状态的应力控制标准。混凝土拱坝还应采用开裂深度(b_c)与防渗帷幕距离上游坝面距离(b)比值的最大值作为控制参量，定义 $k_c = b_c/b$ ，且以 $\max(k_c)$ 值不大于1，即 $\max(k_c) \leq 1$ 作为控制标准^[24]。除此之外，大坝还需要满足相应的稳定准则，即临界稳定条件的要求。Ⅲ级较不安全变形预警指标的拟定准则可以定义为：

$$\delta_3 = f \left(\sigma_c \leq \sigma_{sc}, \max(k_c) \leq 1, R \geq S \right) \quad (4)$$

式中： δ_3 为Ⅲ级较不安全变形预警指标，mm； σ_{sc} 为坝体材料的抗压屈服强度，MPa； $k_c = b_c/b$ ， b_c 为坝踵开裂深度，m， b 为防渗帷幕距离上游坝面的距离，m。

在计算抗滑力 R 时， c 、 f 应选用野外试验的屈服值，并经专家讨论确定；计算 S 时，荷载工况宜选用大坝运行的最不利荷载工况组合。

(4) 混凝土坝Ⅳ级不安全变形预警指标拟定准则。大坝处于Ⅳ级不安全控制状态，大坝的变形急剧增加，裂缝的大范围扩展，屈服区及压碎区也急剧增大，大坝呈现大变形状态，当荷载再增加达到结构破坏极限时，结构完全失效破坏，从而大坝丧失了继续承载的能力，即认为大坝即将发生破坏。

根据上述拟定准则，采用相应的有限元力学计算模型^[24]，便可拟定各级变形预警指标。

4 基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定

4.1 风险理论与结构计算拟定变形预警指标的交集分析 从表面直观角度看，风险理论与结构法计算拟定变形预警指标，两者似乎各成体系、不存在交集或联系，见图3、图4。

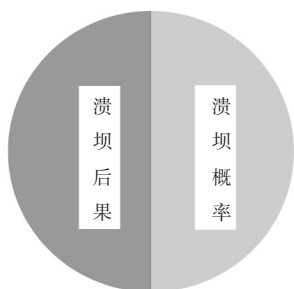


图3 大坝风险理论体系

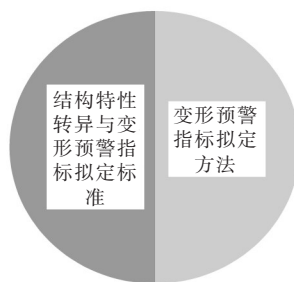


图4 结构计算拟定变形

混凝土坝工作性态主要体现在变形、应力应变以及渗流等方面，其中变形状况尤为直观可靠。目前，国内外坝工专家公认变形是能够体现混凝土坝实际状况的最为可靠指标^[25-26]。当混凝土坝的稳定、渗流或应力等状态发生异常时，均能通过变形体现出来。例如，当坝体应力超越弹性极限时，坝体将产生屈服，变形量明显增大；当坝体出现裂缝时，坝体变形会异常变化；当扬压力变化，尤其骤增或骤降，也会对坝体变形产生影响。

因此，不论混凝土坝的溃决路径如何、溃决模式如何，归根结底，皆可以通过坝体结构变形特性来体现。所以，两者实质上是存在交集的，这个交集就是坝体结构变形特性，见图5。图5深黑色区域即表示两个体系的交集示意。另外，从图中可以看出还存在少量非交集区域，这主要是因为非混凝土坝本身溃决模式，如溢洪道破坏溃决模式等。

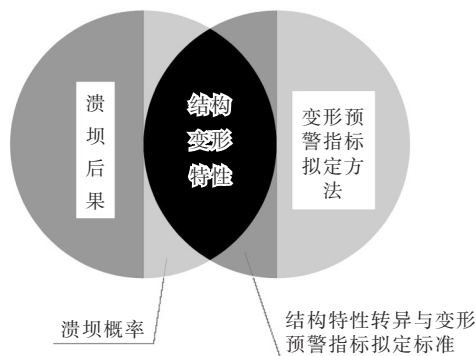


图5 两个体系交集

4.2 基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定方法 基于上述两个体系交集的发现与认识，建立基于风险管理的变形预警指标拟定方法，见图6。具体拟定方法流程为：(1)确定混凝土坝的风险等

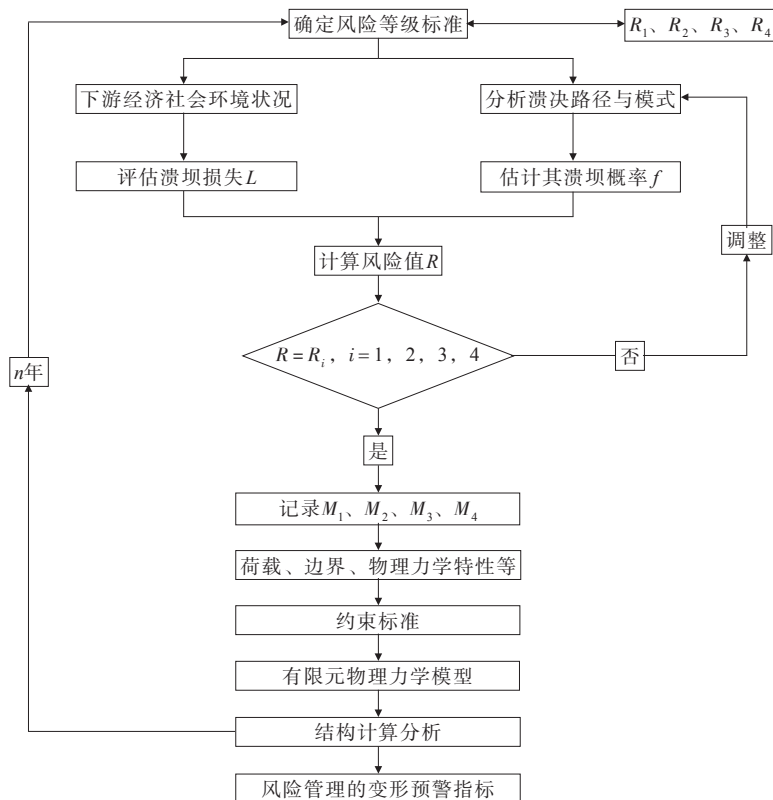


图6 基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定方法流程

级标准，一般分为4级，即低、中、高、极高，并根据实际情况给出量化值($R_i, i=1, 2, 3, 4$)；(2)根据下游经济社会以及环境状况，评估溃坝可能造成的损失 L ，特定时期内，如 n 年内($n \leq 5$)，可认为 L 是不变量；(3)分析混凝土坝各种可能的破坏路径与模式，估计其溃坝概率 f ，计算风险值 R ；(4)调整混凝土坝的破坏路径与破坏模式，使得大坝风险值分别达到 R_1, R_2, R_3, R_4 ，并记录相应溃决路径与模式为 M_1, M_2, M_3, M_4 (因大坝的溃决模式与路径有多种，这里的 $M_i, i=1, \dots, 4$ 为对应溃决路径与模式的集合)；(5)对应4种溃决模式 M_1, M_2, M_3, M_4 与路径集合，分析设置相应的荷载条件、边界条件、材料物理力学特性以及约束标准等，并建立相应的有限元计算模型，采用结构计算分析法，分别计算出不同溃决模式与路径下的大坝变形结果，取其对大坝安全最不利的计算变形量，即为该溃决集合模式条件下的变形预警指标，也即对应其相应风险标准下的变形预警指标；(6)每隔一定时期，即每隔 n 年，重新分析(1)—(5)，实现变形预警指标的动态变化与调整。

4.3 案例简析 某电站枢纽由拦河大坝、坝后厂房、输水系统、泄水底孔及过木筏等组成，工程以发电为主，兼顾防洪、航运和养鱼等效益。水库正常水位275.0 m，设计洪水位($P=1\%$)为275.6 m，校核洪水位($P=0.1\%$)为278.3 m，死水位245.0 m。水库最大库容8.54亿 m^3 ，为不完全年调节水库。拦河大坝为混凝土重力坝，为2级永久建筑物，坝顶高程280.0 m，最大坝高78 m，坝顶全长253.0 m。

坝址区两岸山体完整，岸坡陡峻，右岸平均坡度 45° 以上，左岸 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。基岩为白垩纪流纹斑岩，岩性均一，地质构造简单，在右岸坝轴线上游60 m处(高程300.00 m)，有一节理断层产状为北 75° 西，倾北东、倾角 48° ，破碎带宽度10~15 m。岩石中节理颇为发育，一般间距为30~50 m。最发育的节理有3组，一组为河向近于直交，另一组接近水平。节理面都较平整，展布面较大，互为交切或截切。基岩风化岩层薄，岩体力学指标较高。

下游防洪保护县城1座、乡镇2座、村庄10座，涉及人口10万人。

(1)风险标准。假设该大坝溃决风险等级标准分别为：Ⅰ级极高风险为 1×10^{-1} 、Ⅱ级高风险为 1×10^{-2} 、Ⅲ级中风险为 1×10^{-3} 、Ⅳ级低风险为 1×10^{-4} 。

(2)溃坝路径、模式与概率。根据该水电站大坝工程安全分析，其6[#]坝段扬压力存在异常，即扬压力系数较大，在高库水位作用下出现了大于设计允许值的情况。为此，分析其溃坝路径与模式见图7所示。溃决路径与各环节的概率均由专家经验而定，即遭遇百年一遇洪水概率为0.01、该条件下坝基帷幕失效概率为0.02、坝基扬压力增大概率为0.1、扬压力进一步发展概率为0.05、人工干预失败的概率为0.5，将各环节的概率乘积后得到该模式下溃坝概率为 5×10^{-7} 。

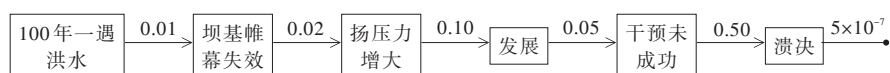


图7 某水电站大坝溃决模式与路径

(3)溃坝损失。溃坝损失分较生命损失、经济损失等，这里以生命损失为例，并假设溃坝生命损失2万人。

(4)溃坝风险。由溃坝概率、生命损失，经乘积后可得到溃坝风险为 1×10^{-2} ，也即该水电站大坝的风险等级为Ⅱ级高风险。

(5)溃坝路径调整。鉴于该电站的重要性，应控制该电站处于低风险水平运行，重新调整其溃决路径，即坝基扬压力增大的概率由0.1调整为0.01、人工干预(干预措施包括设置排水孔、帷幕补强灌浆等)失败的概率由0.5调整为0.05、其他环节保持不变，见图8所示(调整溃决路径首先选择有人为干预的环节进行调整；调整概率的大小，根据调整预期目标由专家经验而定)。调整后该模式下的溃坝概率为 5×10^{-9} 、溃坝风险为 1×10^{-4} ，即Ⅳ级低风险。

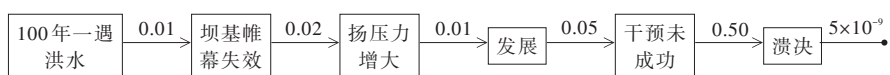


图8 调整后的溃决路径

(6)结构计算的条件。从调整前后的溃决路径来看，为达到低运行风险目的，必须对溃决路径实施人工干预，如实施临时人工排水降低扬压力、帷幕灌浆等措施。为此，影响坝体运行荷载的变化，即坝体所受扬压力有限增加，增加量为正常情况下的10%。

(7)有限元模型。荷载选取最不利荷载组合即历史最高水位(276.75 m)、扬压力、温降荷载组合。本构模型采用黏弹性模型，物理力学参数见表4。约束标准采用Ⅰ级安全变形预警指标拟定准则。根据坝体坝基实际物理力学、结构特性建立6#坝段有限元模型，见图9。

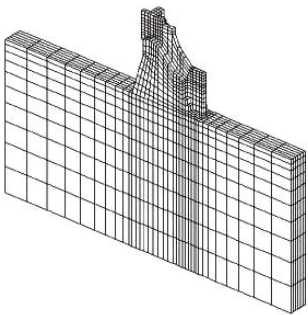


图9 某水电站大坝6#坝段有限元模型

表4 物理力学参数

材料	密度/(kg/m ³)	弹性常数		黏性常数			
		弹性模量/GPa	泊松比	E_1 /GPa	η_1 /(GPa·s)	E_2 /GPa	η_2 /(GPa·s)
坝体混凝土	2400	24.00	0.167	80.00	5.0×10^8	65.00	5.0×10^{10}
基岩	2700	20.00	0.270	52	1×10^{10}	500	5×10^5

(8)计算结果。经有限元计算，得该坝段坝顶变形预警指标为4.57 mm。也即，为使得大坝处于低风险条件运行，务必控制该坝段坝段变形量不超过4.57 mm。当大坝变形量达到预警指标值时，应分析产生的原因，判断可能的破坏路径，及时采取措施，控制风险。同时，随着下游社会经济的发展，要适时评估大坝风险的变化，调整大坝的溃决模式和路径，重新拟定新的预警指标。

5 结论

在水库大坝管理模式从传统工程安全管理模式向风险管理模式转变背景下，为实现混凝土坝风险管理日常化，使得宏观层面的风险管理理论渗透到大坝安全监控管理中，开展基于风险管理的变形预警指标拟定方法研究具有重要的科学价值与实际意义。本文在已有风险理论和结构计算拟定变形指标方法基础上，挖掘发现了两种体系的内在联系与交集，以混凝土坝溃决概率与坝体结构特性转异为纽带，建立了风险管理与结构计算拟定变形预警指标两者之间的关系，提出了基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定方法。将所提出的拟定方法应用于某水电站大坝工程，结合该工程实际情况，确立了该大坝的风险标准与溃决路径，构建了拟定该水电站大坝低风险运行结构计算荷载条件与约束标准，拟定了该水电站低风险运行变形预警指标，证明文中所提出方法是可行的。基于风险管理的混凝土坝变形预警指标拟定方法中，如何确立荷载或环境条件变化量与溃坝路径概率变化调整之间的关系，是关键环节之一，尚待进一步研究。

参 考 文 献：

- [1] 刘宁. 现代大坝安全管理的理念和内涵[J]. 中国水利, 2008(20): 6-9.
- [2] LAVE L B, BALVANYOS T. Risk analysis and management of dam safety[J]. Risk Analysis, 1998, 18(4): 455-462.
- [3] Canadian Standards Association, Risk Management: Guidelines for Decision-makers[S]. National Standard of Canada, CAN/CSA-Q850-97, 1997.
- [4] 蔡跃波, 盛金保. 中国大坝风险管理对策思考[J]. 中国水利, 2008(20): 20-23.
- [5] 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.
- [6] 张有天. 从岩石水力学观点看几个重大工程事故[J]. 水利学报, 2003(5): 1-10.
- [7] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全·拱坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [8] 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.

- [9] 何鲜峰. 大坝运行风险及辅助分析系统研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [10] 彭雪辉, 蔡跃波, 盛金保, 等. 中国水库大坝风险标准研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [11] HSE (Health and Safety Executive, United Kingdom). Reducing Risks, Protecting People[R]. Her Majesty's Stationery Office, London, 2001.
- [12] ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams). Guidelines on Risk Assessment[R]. 2003.
- [13] USBR (United States Bureau of Reclamation), Guidelines for Achieving Public Protection in Dam Safety Decision Making[R]. Denver, Colorado, 2003.
- [14] HyyeBa B H, 等. 监测混凝土坝运行状况的诊断参数的选择[J]. 竺惠玲译, 大坝与安全, 1990(4): 122-125.
- [15] 彼德罗 J O. 混凝土坝安全性的鉴定标准和试验模型[J]. 石膏玉译, 华水科技情报, 1984(3): 224-230.
- [16] 吴中如, 卢有青. 利用原型观测资料反馈大坝的安全监控指标[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1989, 17(6): 29-36.
- [17] 吴中如, 阳武, 顾冲时. 用粘弹性理论拟定混凝土变形一级监控指标[M]//三峡水利枢纽过程应用基础研究(第二卷). 北京: 地质出版社, 1997.
- [18] 李珍照. 运行中混凝土坝安全监控指标研究[J]. 大坝与安全, 1992, 6(2): 14-31.
- [19] 王德厚, 赵全麟. 葛洲坝水利枢纽安全监测与预报模型的检验[J]. 人民长江, 1985(3): 10-17.
- [20] 吴中如, 朱伯芳. 三峡水工建筑物安全监测与反馈设计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1999.
- [21] 王德厚. 浅论大坝安全判据研究[J]. 大坝与安全, 1992, 6(2): 49-54.
- [22] 魏德荣. 大坝安全监控指标问题[J]. 大坝与安全, 1992, 6(3): 23-26.
- [23] 赵志仁, 等. 大坝安全监测的原理与应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1992.
- [24] 谷艳昌. 高地应力区特高拱坝多级变形预报控制值建立的方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [25] 耿克勤, 吴永平, 包煜君. 复杂岩基上拱坝和坝肩岩体变形过程及转异特征研究[J]. 水利学报, 1995(4): 41-48.
- [26] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

Study on early warning index of concrete dam's deformation based on the risk management

GU Yanchang^{1, 2}, WANG Shijun^{1, 2}, PANG Qiong^{1, 2}, WANG Yu¹, WU Yunxing¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: This paper aims to establish a method for determining early warning index of concrete dam deformation on the basis of risk management, based on the prepared deformation index of concrete dam by risk theory and the structure calculation method, which satisfies the requirement of engineering safety management and shows dam risk measurement. According to the requirement of the concrete dam engineering safety operation and the downstream economic and social development, the risk grade standard of the dam is established at first. Then, the failure path and model of concrete dam are analyzed and studied under the condition of the corresponding risk grade standard. By expert experience, with concrete dam failure mode and dam structure characteristics abnormality as a link, the load conditions and the constraint criterion of structure calculation are set. Finally, the corresponding deformation early warning index value is obtained by finite element calculation. Thus, the early warning index determining method of concrete dam deformation based on the risk management is put forward. Taking a hydropower station as an example, the early warning index value of the low risk operation is proposed, which proves that the method is feasible and effective.

Keywords: concrete dam; risk management; dam failure; deformation characteristic; early warning index; intersection

(责任编辑: 王冰伟)