

文章编号:0559-9350(2017)10-1157-10

梯级水库群控制梯级极端工况泄洪安全分析

郭新蕾¹, 周兴波², 夏庆福¹, 付 辉¹, 李邵军³

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120;

3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 河流梯级开发中, 极端条件下流域安全主要取决于干流控制梯级的安全。已有研究将控制梯级特等坝分为特1级和特2级, 究竟哪种等级的大坝应设置非常泄洪设施或临时措施, 在较高水位时启动来降低控制梯级的泄洪风险, 此项研究尚属空白。本文基于DB-IWHR模型理论框架, 研制开发了水库群连锁数值模拟平台, 并针对控制梯级特等坝的空间分布类型, 考虑梯级水库群风险源可能出现的超标准洪水+地震引发某一泄水闸门失效的极端运用工况, 从控制梯级的泄洪安全和设置非常泄洪设施的必要性角度, 研究了流域梯级安全问题。结果表明: 对于“上下相当”的布局, 梯级水库群特1级坝须增设非常溢洪设施以应对超标准洪水、或某一闸门无法开启及其组合运用工况。对于“上小下大”的布局, 由于风险触发梯级溃决预警时间常以小时计, 特1级坝通过设置非常泄洪设施增大泄洪裕度可进一步降低库水位, 从而使得特1级坝腾出更大的库容应对上游溃坝洪水, 明显提高特1级坝的安全裕度。本文提出的理论计算方法和增大泄流能力途径可供梯级水库群设计运行参考。

关键词: 水库群; 控制梯级; 泄水建筑物; 连锁; 超标准洪水

中图分类号: TV135

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170124

1 研究背景

随着全球极端气候出现频率的加快, 水库大坝洪水的设计标准正在不断提高, 可能最大洪水PMF或可能最大降水PMP的概念已经不能满足新标准的要求, 最典型的梯级开发形成的水库群, 设计时要考虑极端致灾风险因子如溃坝、极端气候引起的超标洪水, 还应考虑诸如地震、滑坡涌浪、降雨与融雪之间的相互作用引发泄水不畅等问题^[1-2]。流域梯级的失事毕竟具有一定的概率性, 对于不同大坝防洪标准和不同等级梯级土石坝水库群的复杂格局, 一旦上游较低标准水库在上述风险源下发生损坏、泄流不畅以至溃决时, 要求下游控制梯级具有足够的调洪能力, 在一定程度上可截断、削弱流域上游梯级传递的风险, 但其自身溃决将会导致流域局部或全局产生灾难性的后果, 这表明流域梯级水库群的风险主要取决于干流控制梯级的安全程度, 而它能否截断风险, 与该水库的有效库容、特征水位、来流量和上游溃决之后的预警时间密切相关, 这些敏感参数又直接受挡水和泄水建筑物的设计参数制约。因此, 有必要重新评估梯级水库群控制梯级的泄洪安全能否满足极端条件下的新要求。

随着流域控制性工程设计标准的提高, 泄洪设施规模和标准也随之提高, 以确保大坝安全。如果不考虑使用频率, 把所有的泄洪设施都按同一标准设计是不经济的。在确保大坝安全的前提下, 根据使用频率的高低把泄洪设施分为正常泄洪和非常泄洪设施, 以不同的设计标准修建十分必要^[3]。

收稿日期: 2017-02-17; 网络出版日期: 2017-10-31

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20171031.1332.005.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目(2013CB036405); 国家自然科学基金项目(51679262); 国家重点研发计

划课题(2016YFC0401706)

作者简介: 郭新蕾(1980-), 男, 湖北竹溪人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水力学研究。E-mail: guoxinlei@163.com

通常设置非常溢洪设施应满足下述条件之一：(1)土石坝坝高库大，风险势能高，失事后严重威胁下游1级挡水建筑物或重要城市；(2)按PMF设计时，溢洪道规模大，若区分正常溢洪和非常溢洪，经济合理，运行方便；(3)水文系列资料不全无法正确选定设计洪水或校核洪水；(4)存在极端致灾因子如溃坝、极端气候引发超标洪水和地震闸门破坏引发泄水不畅等发生的可能。周建平、王浩等^[4]考虑梯级效应水库群的安全标准，从溃坝定量分析的角度将特级坝的标准进行了重新定义和划分，根据坝高、库容和是否会导致下游梯级连锁，将特级坝分为特1级坝和特2级坝，但是，究竟哪种等级的大坝应增设非常泄洪设施，在较高水位时启动来降低控制梯级的泄洪风险，此项研究尚属空白，设置非常泄洪设施的目的是以最小的经济代价换取极端情况下大坝的安全。

河流梯级开发规划中，通常在上、中、下游河段适当位置设置控制梯级水库，一方面是为了径流调节，有利于水资源综合利用，另一方面则是为了截断风险传导，规避系统风险。按照控制梯级特级坝的空间分布可以将流域梯级划分为上下相当(特1级坝-土石坝群-特1级坝)、上小下大(特2级坝-土石坝群-特1级坝)和上大下小(特1级坝-土石坝群)三类，其中上大下小可归结到上下相当的类型中。本文以某一流域实际梯级水库规划方案为背景，根据上述类型基于梯级水库群风险源可能出现的极限状态(超标准洪水+极端致灾因子地震引发某一泄水闸门失效)，从关键控制梯级的泄洪安全和增设非常泄洪设施的必要性角度来研究整个梯级的安全问题。

2 水库群连锁数值模型与平台

2.1 数值模型 梯级水库群的安全评价涉及水库群的连锁水力计算问题^[5]，而单坝溃决模型又是梯级连锁水力计算的核心，其溃决过程模拟主要包括溃决洪峰流量、溃决时刻以及持续时间等。在这方面，Cristofano^[6]基于通过峡谷的水流之力等于垂直于坝平面的剪切面上的阻力方程，建立了第一个模拟土石坝漫顶溃决的数学模型，此后，Brown^[7]、Fread^[8-9]、Singh^[10]等相继提出了BRDAM、BREACH、FLDWAVE、BEED模型，分别采用Schoklitsch公式、Meyer Peter & Muller公式和Einstein-Brown等公式计算泥沙冲刷率。此外，还提出了均质土堤管涌溃决模型^[11]、三维非黏性土坝溃决模型^[12]、逐渐溃口数学模型^[13]、心墙坝漫顶溃决数学模型^[14]、面板堆石坝漫顶溃决数学模型^[15]、概念性溃口数学模型^[16]以及Peng^[17]、石振明^[18]等学者建立并提出的一些基于统计的评估模型和土石坝溃决案例库，近年来HEC-RAS、MIKE11等著名软件也耦合了上述相应的溃坝计算模式。由于溃坝机理涉及岩土力学、结构力学、水力学、泥沙动力学等多学科，漫顶水流冲刷溃口底面和边坡引起的下切以及水流侵蚀过程引起的溃口横向坍塌都会造成溃口形成的不确定性，这也导致溃坝水力模型参数的高度敏感性，为此，陈祖煜等提出了一个包含溃口水流计算、溃口侵蚀、溃口横向扩展三部分的溃坝模型DB-IWHR^[19]，并改进了数值算法。本文基于该模型理论框架，利用VC++研发了水库群连锁数值模拟平台，并对溃坝模型进行对比分析。

2.1.1 上游河道洪水演进 洪水进入水库以及水库出流进入下游河道形成的洪水演进可用非恒定流的连续性方程和运动方程来描述

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\left(1 - \frac{BQ^2}{gA^3}\right) \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + s - s_0 = 0 \quad (2)$$

式中： B 为河道水面宽，m； y 为水深，m； t 为时间，s； Q 为流量， m^3/s ； x 为距离，m； g 为重力加速度， m/s^2 ， A 为河道断面面积， m^2 ； n 为河道曼宁糙率； s 为能量坡度。

上述非恒定流模型的求解已经非常成熟，这里采用Newton-Raphson方法将上述非线性方程线性化后用Pressman隐式法迭代求解。

2.1.2 水库涨落调洪过程 对于图1所示上游水库1来说，河道来流末端 y_n 和水库交汇处底高程相等，边界条件满足以下关系

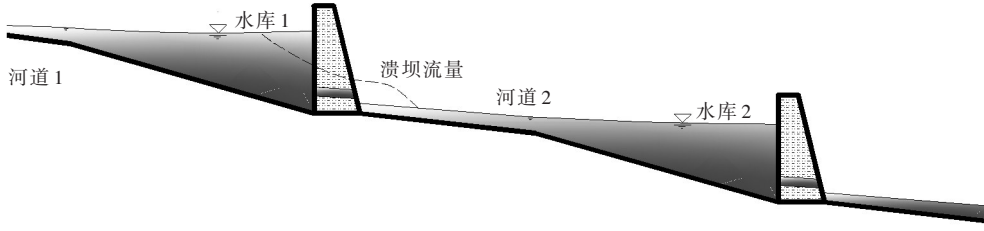


图1 梯级土石坝水库群概化示意图(河道型水库)

$$y_n = y_s \quad (3)$$

$$\frac{dW}{dy_s} \frac{dy_s}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{1, out}(z, m) \quad (4)$$

式中: $Q_{1, out}(z, m)$ 为 t 时刻水库 1 的出流量, 未溃坝前出流量即为泄水建筑物泄量; m 为泄水建筑物流量系数, 如果溃坝, 则出流量为泄水建筑物泄量与溃坝流量的和, 于是有

$$Q_{1, out}(z, m) = C_s L_s (z - z_s)^{1.5} + C_g A_g (z - z_g)^{0.5} + Q_y + Q_b \quad (5)$$

$$Q_b = CB [\max(z - z_d, 0)]^{1.5} \quad (6)$$

式中: Q_y 为引水或抽水流量项, 与水头无关; Q_b 为溃口流量, C_s 、 C_g 、 C 分别为无压溢洪道、闸控泄洪洞和溃口的流量系数; L_s 为溢洪道宽度; A_g 为闸门过流面积; 考虑溃口性质和收缩后, C 值的范围为 $1.43 \sim 1.69 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$; z_s 、 z_g 、 z_d 分别为无控制、闸控泄洪洞和大坝堰顶溃口高程。

上游洪水进入下级水库后, 水库水位将出现壅高、漫顶、溃决三个阶段。壅高过程可应用调洪演算原理利用成熟的定步长龙格-库塔方法求得上述常微分方程(4)的解。

2.1.3 漫顶溃决过程 随着库水位进一步壅高, 当水位涨至坝顶或者进入非常泄洪槽(或人工引流槽)时, 启动坝顶漫流过程, 当通过溃口流速进一步增大达到一个临界值 V_c 后, 槽底开始冲刷, 启动溃坝过程。

溃口流量通过单位时间内水库库容的损失来确定, 有

$$Q_b = -\frac{\Delta W}{\Delta t} + Q_{in} - q \quad (7)$$

式中 q 为不包括溃口流量的水库出流量。

根据质量守恒, 可得水量平衡方程

$$Q_b = CB (z - z_d)^{1.5} = \frac{dW}{dz} \frac{dz}{dt} + Q_{in} - q \quad (8)$$

当溃口流速小于 V_c 时, 由上述平衡方程差分后可得到直接求解水库增量的计算式^[5]

$$\Delta z = \left[Q_{in} - q - CB (z - z_d)^{1.5} \right] \Delta t / \left[\frac{dW}{dz} + 0.75 CB (z - z_d)^{0.5} \Delta t \right] \quad (9)$$

当溃口流速大于 V_c 时, 考虑溃口侵蚀和横向扩展, 其中溃口侵蚀采用陈祖煜提出的双曲线模型^[19-20]

$$\dot{z} = \Phi(\tau) = \frac{v}{a + bv} \quad (10)$$

$$v = k(\tau - \tau_c) \quad (11)$$

式中: $\dot{z}$ 为侵蚀率; v 为扣除临界剪应力后的剪应力; a 、 b 均为侵蚀参数; k 为单位变换因子; τ 为剪应力; τ_c 为临界剪应力。

溃口横向扩展计算采用总应力法加圆弧形面的滑裂面分析方法。常规离散方法是通过给定初始时间 t_0 和时间步长 Δt , 计算相应的水位增量 ΔH , 冲刷深度 Δz 和流速变化量 ΔV 。Chen^[20]的新方法是首先给定初始流速 V_0 和流速增量 ΔV , 然后求出相应的 ΔH 、 Δz 和 Δt 。

需要指出的是, 水位壅高在漫顶之后如果达到溃口冲刷启动流速将进入溃坝模式, 计算时应将

水位到达坝顶之后时刻的上游来水叠加至本库来水流量中进行溃坝过程计算。下阶段水库1的溃坝流量过程将叠加至河道2，其演进和水库2涨落及连溃过程重复上述三步。

2.2 溃坝模型对比分析 利用HEC-RAS、MIKE11、DAMBRK、BREACH和上述基于DB-IWHR的数值平台对唐家山堰塞坝开挖人工引流槽后的溃决过程^[20]进行模拟，并与实测数据进行对比分析。

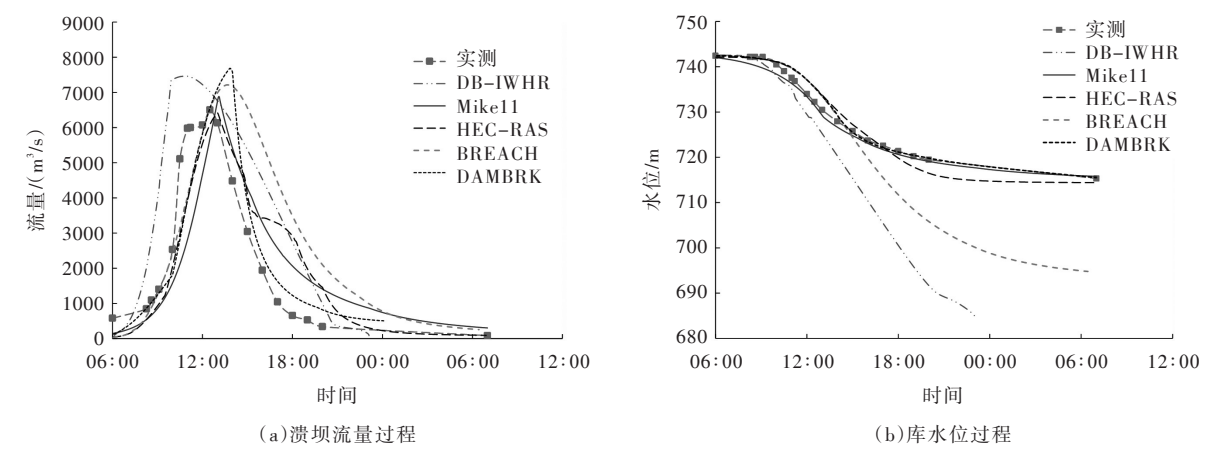


图2 溃坝模型对比

图2给出的是上述模型计算的溃坝流量和库水位过程。由图和调试计算过程可知，Mike11 DB模型和HEC-RAS模型计算的洪峰流量和到达时刻比较接近实测值，但前提是溃口初始和最终尺寸以及发展过程都需要预先设定，否则与实测值差距较大。DAMBRK模型计算的流量、水位变化趋势与实际较符合，类似的，溃口扩展计算也需要输入溃坝历时以及溃口初始和最终尺寸，而这些参数实际上未知的。BREACH模型考虑了泥沙输移、溃口边坡稳定等，能计算出完整的溃坝过程，并且流量符合较好，但模型不确定参数多，且参数敏感性较强，模型假定的溃口断面宽深比缺乏理论依据，溃口尺寸计算值与实测值差距较大。DB-IWHR模型充分考虑了坝体几何参数、材料性质、溃口初始条件等参数的影响，计算的洪峰流量略高于实测流量值，不足之处是洪峰过后的水位和泄流槽高程模拟的偏差较大，相比其他模型，它无需把溃口尺寸等参数作为已知条件输入，对于大坝溃决的预测计算更有实际意义。考虑到一般主要关注水库在极端条件下的溃坝流量及洪峰发生时刻，因此该模型适用性较强，具有较大的应用价值。

以下利用上述模型和平台进行流域梯级泄洪安全计算分析。

3 规划方案试设计

本案例参照某流域上游河段规划方案确定。该河段上布置有“下庄-巴沟-达里-卜实-双电子”几个梯级，均为土石坝，其中巴沟、达里、卜实为调节库容小于0.2亿m³的径流式水库，下庄、双电子库容较大，具有一定调节性能，为控制梯级。各库参数见表1及文献[5]。便于研究对比，上游下庄控制水库试设计分别考虑特1级和特2级两种情况(下庄一、下庄二，坝高不同但对应同一条库容水位曲线)，土石坝群由于调节库容较小暂按库容之和等效为1个水库，即达里水库。

表1 案例土石坝群典型参数

水库	最大坝高/m	坝顶高程/m	调节库容/亿 m³	校核洪水重现期/年	工程等别
下庄	231.0	3 126.0	19.24	PMF	特1级
	175.0	3 070.0	10.24	PMF	特2级
巴沟	142.0	2 920.0	0.07	5000	2等
达里	113.5	2 690.0	0.16	5000	2等
卜实	133.0	2 609.2	0.19	5000	2等
双电子	314.0	2 510.0	19.00	PMF	特1级

3.1 “上下相当”(特1级坝-土石坝群-特1级坝) 当下庄水库为特1级坝时,该梯级型式属于典型的上下相当。从表1可知,下庄调节库容为19.24亿 m^3 ,如果发生溃决,控制梯级之间的径流式水库库容有限,显然无法截断溃坝洪水。按照之前研究成果^[4-5],特1级坝溃决后导致下游1级大坝在预警无效、有效情况下都会发生溃决,因此,从泄洪安全的角度,这种布置必须保证上下都不溃决,也就是说上游下庄水库在任何情况下都不能发生溃决。下庄泄水建筑物试设计中布置有1条溢洪道、1条深孔泄洪洞和1条放空洞。放空洞由于底高程低,泄洪工作水头高、条件差,暂不考虑它参与泄洪。下面分析在极端运用工况:超标准洪水+地震引发某一泄水闸门失效的情况下,下庄特1级坝的泄洪安全和增设非常溢洪设施的必要性。

受资料条件限制,假设超标准洪水为PMF即万年一遇加20%。仅发生超标准洪水时,泄水建筑物按全闸过水,当风险源中叠加地震引发其中某一泄水闸门失效时,泄水建筑物总泄量降低,降低幅值暂按10%~20%考虑,水库从正常蓄水位3120 m(不利水位)起调。利用万年一遇和PMF典型洪水特征值,采用同频率放大法拟定的洪水过程线如图3所示,该洪水典型特征为两次洪峰过程,其中达到洪峰4990 m^3/s 的时间为10 h左右,从万年一遇洪峰4160 m^3/s 到4990 m^3/s 历时1 h左右。

下庄一水库不同调洪方案下的水位涨落或泄量过程如图4、5所示。该工况下,水库从0时刻开始全闸以相应水位的最大泄量开始调洪,对应的泄量在3000 m^3/s 以上。前4 h左右,来流量小于泄量,水库水位先回落0.3 m,紧接着洪水流量增大,库水位随之快速壅高。到第二洪峰前后,库水位小幅回落然后继续上升,随后全闸泄量大于洪水流量,库水位降低。整个过程在第54 h左右,来流总洪量为7.53亿 m^3 ,库水位达到峰值3122.92 m,离水库坝顶还有3.08 m。该水位峰值跟原设计的校核洪水位(3122.87 m)接近,这表明原设计已经充分考虑了超标准洪水情况,并且留有较大的富裕度。

当再叠加地震引发其中某一泄水闸门开启失效时,泄水建筑物泄量降低,其中80%、90%泄量调洪的库水位过程如图4所示。如当闸门失效损失泄量10%时,在洪水过程的第71 h左右,库水位壅高的峰值达到3124.31 m,随后泄量大于来流量,水位回落,该过程峰值水位离坝顶仍有1.69 m,仅损失部分安全加高,并不至于溃坝。当闸门失效损失泄量达到总泄量的20%时,在该超标准洪水过程的第69 h,库水位壅高的峰值达到3126.02 m,已超过坝顶高程,水库将发生漫坝,这为设置非常泄洪设施在较高水位时启动来降低泄洪风险提供了机会。第一次洪峰流量时间内,上述三种工况水库水

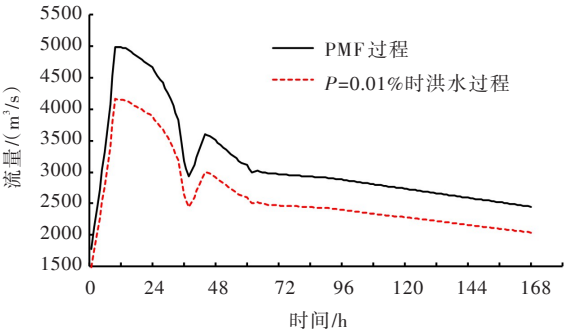


图3 下庄一水库万年一遇和PMF洪水过程线

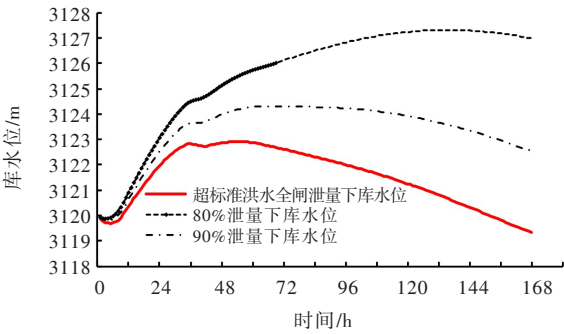


图4 不同调洪方案下的水位涨落过程

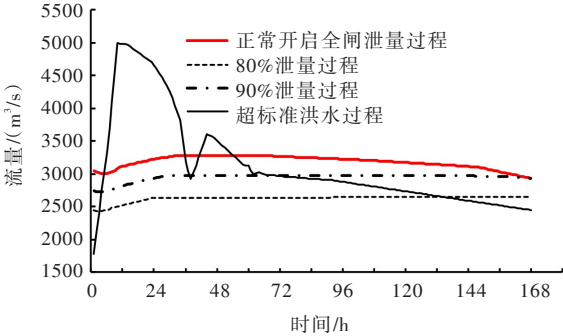


图5 不同调洪方案下的泄量过程

位的增长率 dz/dt (以 h 计) 分别约为 0.12 m/h、0.15 m/h、0.17 m/h，即相比 80% 泄量工况的水位增长率，敞泄工况下水位增长率低 0.05 m/h，这意味着泄水闸门部分失效时，增设较低标准的非常溢洪设施能够有效延缓水位上升速度，降低泄洪风险。

上述计算结果表明，如果考虑超标准洪水+地震引发某一泄水闸门失效这种极端运用工况，水库将发生漫坝溃决，“上下相当”的特 1 级坝须增设非常溢洪设施以应对某一闸门无法开启的情况。增设目的是更好的应对上述极端工况，在上游超标洪水和正常泄洪设施部分故障的情况下减缓本坝库容最终及时泄水、保坝不溃。具体设置量值，可通过本文方法计算后确定，如本例，设置的非常溢洪设施泄流能力为原设计溢流堰和深孔泄洪洞泄量总和的 20% 左右为宜，其启用条件可根据闸门失效情况及预测或监测的洪峰流量标准和时刻来确定。

3.2 “上小下大”(特 2 级坝-土石坝群-特 1 级坝) 将上例中下庄水库正常蓄水位降低，总库容减少到 10.24 亿 m^3 ，降至特 2 级坝标准。该河段梯级布置格局属于典型的上小下大。按照之前特 2 级坝定义条件，本坝溃决后导致下游特 1 级坝在预警无效时连溃、有效情况下不发生溃决定义为特 2 级。以下假定该梯级遭遇极端运用工况，即当下庄二特 2 级坝溃决，计算分析下游双电子特 1 级水库的泄洪安全问题。

3.2.1 下庄二水库溃决及演进 设下庄二遭遇极端工况从 0 时刻开始溃决，溃口冲刷启动流速 3 m/s，利用第 2.1.3 节方法计算的洪水在第 10.7 h 达到洪峰流量 15 000 m^3/s ，紧接着水位降低流量减小，整个溃决过程持续约 40 h。之后的计算时间轴均以 0 时刻开始。达里距下庄二水库 85.6 km，高差 318.5 m，山区河谷按倒梯形处理，底宽 30 m，平均坡度 0.002，糙率取值 0.025，利用第 2.1.1 节的计算方法，洪水一维演进模型 θ 取值 0.6，时间步长 60 s。该库的溃决过程及洪水演进过程如图 6 所示。由图可知，溃坝洪水经过 3.25 h 演进至达里水库，第 12.3 h 洪峰流量 14 797 m^3/s ，基本无衰减。

3.2.2 达里梯级连溃及演进 根据第 2.1.2 节、第 2.1.3 节计算方法，第 5.32 h 达里库水位上升到坝顶位置，如图 7 所示。达里水库漫顶，但由于来流洪峰流量较大，漫顶溢流流量小于来流，库水位仍然升高。当漫顶后流量达到溃口冲刷启动流速后，水位的壅高将结合达里连溃进行计算。计算显示，达里水库于第 14.6 h 达到连溃洪峰流量 23 513 m^3/s ，溃坝历时 21.5 h。达里水库溃决之后，溃坝洪水

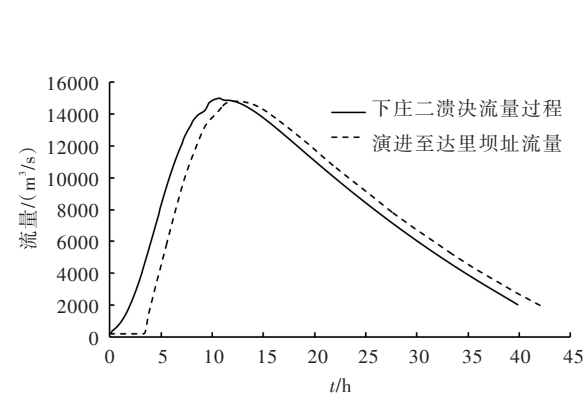


图6 下庄二溃坝及洪水演进过程

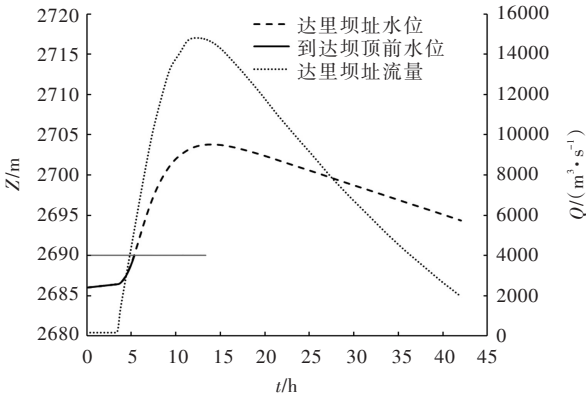


图7 下庄二溃决下达里坝址流量及库水位过程

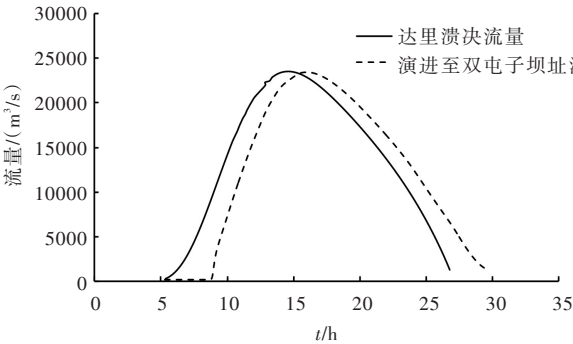


图8 达里连溃流量及洪水演进

继续朝下游双电子演进，（两水库距离 89.3 km，高差 380.5 m，河道宽度暂按 30 m 考虑，糙率取值 0.025）。溃决洪水在第 8.7 h 演进至双电子坝址处，该溃坝洪水的洪峰于第 15.95 h 到达，其连溃过程及洪水演进如图 8 所示。

3.2.3 梯级连溃下双电子无预警全闸泄水 双电子泄水建筑物包括洞式溢洪道、竖井泄洪洞和深孔泄洪洞，在正常蓄水位 2 500 m 对应的总泄量 6 819.6 m³/s。第 8.7 h 达里连溃洪水进入双江口水库，由于无提前预警，即在达里溃坝洪水进入水库之时，双电子全闸开始泄水，由于溃坝洪水流量增长较快，该库水位于第 19.5 h 涨至坝顶高程 2 510 m，第 20.9 h 涨至 2 511.2 m（防浪墙顶高程），大坝漫顶，第 25.7 h 后水位涨至最高水位 2 513.29 m，整个入流、泄水出流及水位变化过程如图 9 所示。

3.2.4 梯级连溃下双电子有预警全闸泄水 在上游下庄二溃决的同时（即 0 时刻），双电子便从水位 2 500 m 开始全闸泄水，水位过程如图 10 所示。达里连溃洪水演进至双江口水库耗时 8.7 h，此时双江口水位已降至 2 494.75 m，降幅 5.25 m，即提前腾空了部分库容，之后溃坝洪水流量仍小于泄水建筑物泄量，库水位进一步下降，至第 9.7 h 水位将至最低点 2 494.50 m，此时入流、出流相等，随后溃坝洪水流量大于全闸泄水流量，水库水位开始上升，至第 25.6 h 入流、出流第二次相等时，水位升至最高点 2 509.79 m，低于坝顶高程 0.21 m，低于大坝防浪墙顶高程 1.41 m。计算表明，该极端工况下上游特 2 级水库溃决，中游梯级连溃情况下，双电子由于提前预警全闸泄水增大了调洪库容，本特 1 级坝不至于溃坝。

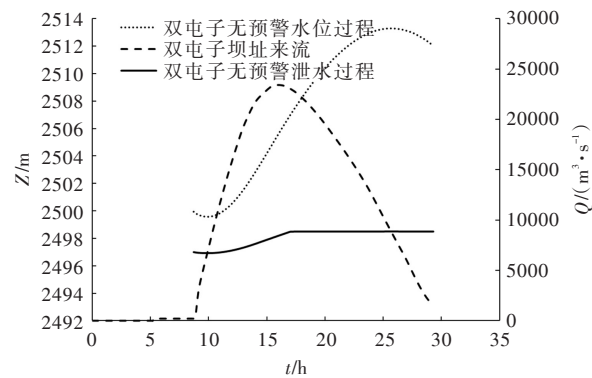


图9 上游连溃双电子无预警入流、泄水及调洪过程

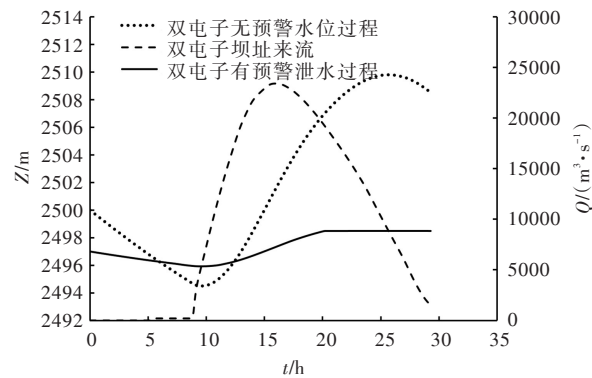


图10 上游连溃双电子有预警入流、泄水及调洪过程

3.2.5 梯级连溃下双电子增大泄流能力+无预警 该工况双电子在原有基础上增大泄流能力，途径是：增设一条非常泄洪洞，泄洪规模同原竖井泄洪洞相当，同时可采取降低现有深孔泄洪洞进口高程（暂考虑降低 10 m）。降低深孔底板高程后，单一深孔泄洪洞在 2 500 m 以上水位下的泄量增量在 8.42 %~9.45 % 之间，增大后总泄量跟原泄量相比增加 16.8% ~ 19.1%，其泄洪曲线如图 11 所示。

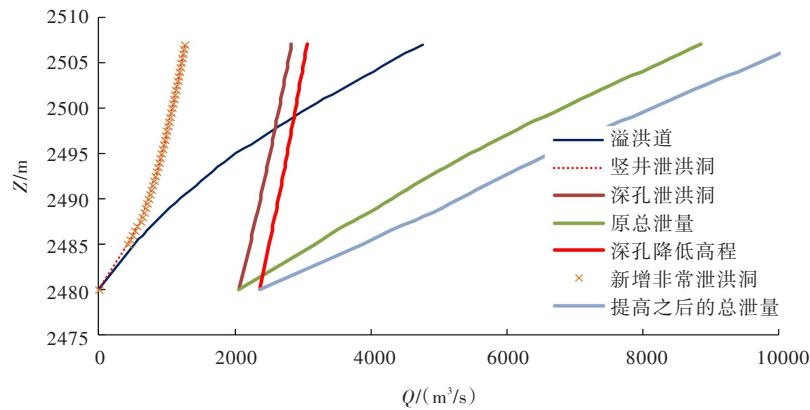


图11 双电子泄水建筑物泄流曲线

经 8.7 h, 达里连溃洪水进入双电子水库, 因无预警, 该水库随即全闸泄水, 由于溃坝洪水流量增长较快, 该库水位于第 21.2 h 涨至坝顶高程 2 510 m, 第 24 h 涨至 2 511.2 m, 大坝开始漫顶, 第 25 h 后水位涨至最高 2 511.31 m, 整个入流、泄水出流及水位变化过程如图 12 所示。同无预警双电子原始泄流能力相比, 由于增大了泄流能力, 在相同上游连溃洪水情况下, 双电子水位上升慢一些, 但最终仍然漫顶, 由此可见溃决预警时间对梯级水库群控制梯级泄洪安全性的重要性。

3.2.6 梯级连溃下双电子增大泄流能力+有预警 在上游下庄二溃决的同时, 双电子便从水位 2 500 m 开始全闸泄水, 水位过程如图 13 所示。达里连溃洪水演进至双江口水库需 8.7 h, 此时双江口水位已降至 2 493.76 m, 降幅 6.24 m, 之后溃坝洪水流量仍小于泄水建筑物泄量, 至第 9.7 h 水位将至最低点 2 494.43 m, 此时入流、出流相等, 随后溃坝洪水流量大于全闸泄水流量, 水库水位开始上升, 至入流、出流第二次相等时, 水位升至最高点 2 507.39 m, 低于坝顶高程 2.61 m (原工况为 0.21 m)。这表明, 该极端工况上游特 2 级水库溃决, 中游梯级连溃情况下, 双电子在原有基础上增设非常泄洪设施并提前预警全闸过水增大了调洪库容, 通过调洪容错, 使得最终水位富裕量从 0.21 m 上升到 2.61 m, 进一步增加了安全裕度, 保证了本坝不溃, 有效阻隔了梯级连溃的风险。

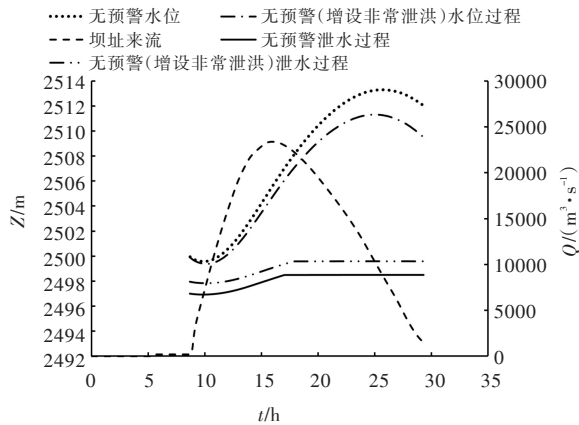


图 12 增大泄流能力+无预警入流、泄水及调洪过程

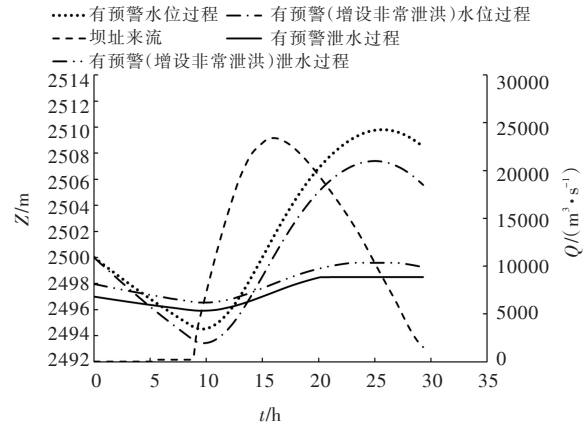


图 13 增大泄流能力+有预警入流、泄水及调洪过程

4 结论

以某流域上游河段梯级水库规划方案为背景, 基于 DB-IWHR 模型理论框架研制开发了水库群连溃数值模拟平台, 针对流域梯级上下相当(特 1 级坝-土石坝群-特 1 级坝)、上小下大(特 2 级坝-土石坝群-特 1 级坝)和上大下小(特 1 级坝-土石坝群)三类布局, 考虑梯级水库群风险源可能出现的超标准洪水+地震引发某一泄水闸门失效的极端运用工况, 从关键控制梯级的泄洪安全和增设非常泄洪设施的必要性角度对流域梯级水库群的安全问题进行了多工况数值计算分析, 结果表明:

(1) 对于上下相当的布局, 特 1 级坝枢纽工程增设非常溢洪设施可以应对超标准洪水、或某一闸门无法开启、或超标准洪水+某一闸门无法开启等极端情况, 具体设置量值可通过本文方法计算后确定, 启用条件可根据闸门失效情况及预测或监测的洪峰流量标准和时刻来确定。

(2) 对于上小下大的布局, 如果上游特 2 级坝发生溃决, 通过预警, 下游控制梯级特 1 级坝可以预先腾空库容, 避免漫顶, 防止溃坝, 而通过设置非常泄洪设施或增大泄洪裕度可以进一步降低上游溃坝洪水到达前的库水位, 明显提高了特 1 级坝的安全度。具体设置量值可通过本文方法计算后确定, 可行的增大泄流能力的设计途径包括: 增设一条非常泄洪洞(非坝身)、降低深孔泄洪洞底板高程及采用泄水建筑物升级改造新技术等。

(3) 梯级水库群风险触发梯级与控制梯级之间的洪水流达时间取决于上游来流量、梯级间隔和河道形态。一旦上游梯级溃决, 留给控制梯级风险预警和应急处置的时间仅以小时计, 因此, 预警时间对于梯级水库群控制梯级的泄洪安全至关重要, 需要在流域梯级安全管理的应急预案中加以深入

研究。

(4)本文研究的三种梯级布置格局中,极端条件泄洪安全及大坝风险防控目标是,上大下小,要保大;上小下大,要保大;上下相当,都不能溃决。

需要指出,土石坝溃决机理复杂,计算模型对参数选择仍有一定的敏感性,因此,连溃流量峰值及过程对防范措施选择有一定影响,建立国内外溃坝案例资料库并对库群溃坝过程进行有针对性的试验及观测验证将是今后研究的一个方向。

参 考 文 献:

- [1] 郭军. 应对变化条件下的洪水设计标准与评价方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, 11(2): 151-156.
- [2] 郭新蕾, 杨开林, 夏庆福, 等. 琴键堰泄流能力特性分析[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 867-874.
- [3] 吴时强, 姜树海. 非常泄洪设施对大坝防洪安全影响的研究[J]. 中国工程科学, 2000, 2(12): 66-72.
- [4] 周建平, 王浩, 陈祖煜, 等. 特高坝和梯级水库群设计安全标准研究 I: 理论基础和等级标准[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 505-514.
- [5] 周兴波, 陈祖煜, 黄跃飞, 等. 特高坝及梯级水库群设计安全标准研究 III: 梯级土石坝连溃风险分析[J]. 水利学报, 2015, 46(7): 765-772.
- [6] CRISTOFANO E A. Method of Computing Erosion Rate of Failure of Earth Dams[Z]. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, 1965.
- [7] BROWN R J, ROGERS D C. BRDAM Users Manual[Z]. U.S. Department of the Interior, Water and Power Resources Service, Denver, 1981.
- [8] FREAD D L. DAMBRK: The NWS dam break flood forecasting model[Z]. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Silver Spring, MD, 1984.
- [9] FREAD D L, LEWIS J M. FLDWAV: A generalized flood routing model[C]//Proc., National Conf. on Hydraulic Eng., ASCE, New York, 1988.
- [10] SINGP V P, SCARLATOS P D, COLLINS J G, et al. Breach erosion of earth-fill dams (BEED) model[J]. Natural Hazards, 1988, 1(2): 161-180.
- [11] WU W. Simplified physically based model of earthen embankment breaching[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(8): 837-851.
- [12] WANG Z, BOWLES D S. Three-dimensional non-cohesive earthen dam breach model. Part 1: Theory and methodology[J]. Adv. Water Resour., 2006, 29(10): 1528-1545.
- [13] 张保蔚, 黄金池. 土坝漫顶逐渐溃口模式研究[J]. 中国防汛抗旱, 2007, 17(3): 28-31.
- [14] 陈生水, 钟启明, 曹伟. 黏土心墙坝漫顶溃坝过程离心模型试验与竖直模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 674-679.
- [15] 陈生水, 曹伟, 霍家平, 等. 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1169-1175.
- [16] 张大伟, 权锦, 何晓燕, 等. 堰塞坝漫顶溃决试验及相关数学模型研究[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 979-986.
- [17] PENG M, ZHANG L M. Breaching parameters of landslide dams [J]. Landslides, 2012, 9(1): 13-31.
- [18] 石振明, 熊永峰, 彭铭, 等. 堰塞湖溃坝快速定量风险评估方法—以2014年鲁甸地震形成的红石岩堰塞湖为例[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 742-751.
- [19] CHEN Z Y, MA L Q, YU S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan barrier lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 142(5): 682-688.
- [20] 周兴波, 陈祖煜, 李守义, 等. 不同推移质输沙模型在溃坝洪水模拟中的对比分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1097-1108.

Safety analysis of flood discharge structures of the control cascade reservoir under extreme operating condition

GUO Xinlei¹, ZHOU Xingbo², XIA Qingfu¹, FU hui¹, LI Shaojin³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The risk of the whole cascade reservoirs of the earth rockfill dams under extreme operating condition is rely on the security of the control cascade reservoir. Such earth rockfill dam with extra height is classified into Class I and Class II dam based on the existing Chinese dam classification systems recently, but which one should design the unusual discharge facilities to reduce the risk level of the dams during the extreme operating condition is blank. Based on the theoretical framework of single DB-IWHR model, a cascade dam break flood simulation software was firstly established. Considering the extreme operating condition (super standard flood combine with discharge gate failure caused by earthquake) and the discharge capacity, the paper simulated the dam break discharge, flood routing and water level of the control cascade reservoir to evaluate the safety of the whole cascade dams. The simulated results show that, for the layout 'Class I dam-earth rockfill dams-Class I', the unusual discharge facility should be considered in the design of the up Class I dam. For the layout 'Class II dam-earth rockfill dams-Class I dam', by adding unusual discharge facility or improve the discharge capacity for the Class I dam, it can lower the water level of the reservoir obviously after the break of the up Class II dam which vacate larger storage capacity to deal with this break discharge. This analysis and discharge capacity improvement method not only can be used as an important tool to evaluate cascade dams risk under extreme operating condition, but also provide supports for the design criteria of the unusual discharge structures for extra height dam.

Keywords: cascade reservoirs; control cascade reservoir; discharge structure; cascade dam break; super standard flood

(责任编辑: 李福田)

《水利学报》征订启事

《水利学报》创刊于1956年,是中国水利学会主办的综合性学术刊物,是水利行业创刊最早、国内外最具影响的学术期刊,在水利工程类核心期刊中排第一位,被国内外多家检索系统收录。《水利学报》刊登反映水利、水电、水运领域较高水平的学术论文、专题综述和工程技术总结,开展学术论文的讨论和评论,介绍国内科技动态和消息。主要专业范围包括:水文及水资源、防洪、灌溉及排水、水力学、泥沙、河港及水运、岩土工程、水工结构及材料、水利水电施工及监理、水力机电、水利经济、水环境、水利史研究等。本刊邮局发行,邮发代号2—183。每册30元,全年订价360元。

主编:程晓陶 国内统一刊号:CN11-1882/TV 国外代号:M216

地址:北京市海淀区玉渊潭南路3号 中国水利水电科学研究院D座303室 邮政编码:100038

投稿网址: <http://jhe.ches.org.cn>

联系电话:010-68785877; 010-68786262; 010-68786919; 010-68786221; 010-68786238

传真:010-68786649; E-mail: slxb@iwhr.com

《水利学报》编辑部