

文章编号:0559-9350(2017)12-1499-07

考虑地震与溃坝洪水共同作用的土石坝坝坡稳定分析方法

陈 玺¹, 孙 平², 李守义¹, 冯上鑫¹, 黎康平¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048)

摘要: 地震与洪水作用是影响土石坝坝坡稳定的主要因素, 在梯级水库中, 上游溃坝洪水的影响尤为显著。以上一梯级溃坝洪水引起的坝前水位变化模拟洪水作用, 提出在毕肖普法基础上, 考虑坝体材料变异系数, 大坝遭遇上游溃坝洪水与地震共同作用时的坝坡稳定分析方法。以“卜寺沟-双江口”两梯级为例, 假定卜寺沟发生溃坝, 进行下游梯级“双江口”下游坝坡稳定的可靠度风险分析。计算结果表明, 双江口在遭遇上游溃坝洪水和地震的极端情况下, 下游坝坡失效概率为 1.571×10^{-6} , 对应的可靠度指标为 4.667, 满足规范对 I 级建筑物发生二类破坏的要求。

关键词: 梯级水库; 溃坝洪水; 地震; 坝坡稳定分析; 可靠度指标

中图分类号: TV122

文献标志码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170789

1 研究背景

流域梯级开发是我国水电开发的一种重要的形式。由于梯级水库群受到极端气候、区域暴雨、地震、流域不良地质灾害等自然风险, 干支流设计洪水和设计安全标准不匹配引起的工程风险, 以及设计、施工缺陷和运行管理疏忽等技术风险的综合影响, 其风险因素更为复杂, 灾害链更长, 影响范围更广。因而相对于单库单坝的设计, 梯级水库中坝体设计需要考虑更多因素影响。

地震是土石坝边坡稳定性分析中须考虑的重要因素^[1], 众多学者在此方面做了研究。邵龙潭等^[2]在土石坝随机地震反应分析和有限元边坡稳定分析方法的基础上, 建立了随机地震作用下土石坝边坡的稳定性分析方法; 张锐等^[3]采用有限元法研究了高于 150 m 土石坝的加速度分布, 提出其地震加速度动态分布系数, 并在此基础上, 对高度超过 150 m 土石坝坝坡抗震稳定性作了进一步的分析; 徐斌等^[4]采用有限元动力时程稳定和变形分析方法, 对不同高度大坝坝坡稳定进行分析; 陈生水等^[5]针对高土石坝的坝坡稳定、坝体地震永久变形和混凝土面板接缝位移 3 个影响高土石坝安全的主要因素, 初步提出了相应的地震安全建议控制标准, 并认为有必要在高土石坝地震安全控制标准中引入风险概率的理念。

除地震外, 梯级水库中上游溃坝洪水对下游梯级坝体稳定产生的影响同样不可忽视。由于洪水的不确定性和溃坝机理的复杂性, 下游梯级遭遇上游溃坝洪水时坝坡稳定性分析方面鲜有研究, 肖詹^[6]通过红阳水库坝坡稳定分析, 对此问题进行了初探。

针对坝体同时遭遇多源头风险时坝坡风险评价问题, Manuel 等^[7]、Moralesnápoles 等^[8]、Kim 等^[9]、Wang 等^[10]、姜树海等^[11]、王刚等^[12]、张锐等^[13]国内外学者利用贝叶斯理论^[14-15], 通过事件树、故障树或决策树等方法对梯级水库中各种风险源进行考虑, 从而对流域梯级风险进行评价。

收稿日期: 2017-08-11; 网络出版日期: 2017-12-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20171225.1400.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0401804); 国家自然科学基金项目(51709282); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB036403)

作者简介: 陈玺(1993-), 男, 陕西西安人, 硕士生, 主要从事水工结构及边坡稳定研究。E-mail: 2275599390@qq.com

通讯作者: 孙平(1976-), 男, 湖北荆州人, 高级工程师, 主要从事岩土工程及边坡稳定研究。E-mail: sunping@iwhr.com

在梯级水库中,一旦上游梯级发生溃决,溃坝洪水快速下泄,下游梯级将面临很大危险。但是坝体溃决原因极为复杂且溃坝概率难以准确计算,因此本文在假定上游梯级一定发生溃决条件下,提出上游溃坝洪水和地震这两种梯级水库中最重要风险源同时作用的极端工况下的坝坡稳定计算方法,通过离散坝前水位变化来考虑洪水作用,利用 Monte Carlo 法随机抽样考虑材料的变异特性,并采用规范^[1]建议的拟静力法模拟地震荷载进行坝坡稳定计算,最终可根据求得的坝坡可靠度指标对坝坡抗滑稳定进行风险分析与评价。

2 分析方法及其实现过程

首先对由溃坝洪水形成的下游梯级坝前水位变化过程进行离散,在不同的水位情况下同时考虑地震荷载和坝体材料变异性,计算坝坡安全系数;然后对不同水位下计算所得安全系数进行概率统计与分布拟合;根据可靠度指标及失效概率与安全系数之间的关系,求得地震和上游溃坝洪水同时发生时坝体可靠度指标与失效概率;进而利用条件概率公式,计算考虑溃坝洪水和地震发生概率下的坝坡失效概率。具体实现过程如下。

(1)上一梯级溃坝洪水引起的当前梯级坝前水位变化模拟。采用陈祖煜团队提出的 DB-IWHR 土石坝溃决及水流演进模拟模型^[16-17]进行溃坝计算。该模型针对坝体溃决水力学模拟过程中的难题,在前人方法基础上从水量平衡计算、冲刷条件、水流速度计算方式和溃口侧向扩展模拟 4 个方面做了改进,提出双曲线侵蚀率模型,基本克服了参数敏感性和数值分析稳定性方面的问题;并通过 VBA 语言在 Excel 表格中编制,具有使用简单,计算过程透明、结果准确度高、参数敏感性低的特点。

在假定上游梯级已经溃决情况下,应用该模型进行上游梯级溃坝模拟,计算获得溃坝洪水过程线;并根据下游水库的库容水位曲线,得到洪水演进至下游梯级时坝前水位变化曲线。

(2)坝前水位离散及基于 Monte Carlo 法的坝体材料强度参数随机抽样。对上一步中得到的下游梯级坝前水位根据固定时段长度进行离散,得到大量不同时间段的坝前水位;并根据已知的坝体材料抗剪强度参数及其分布概型,利用 Monte Carlo 法进行随机抽样,得到多组“坝体材料抗剪强度参数-坝前水位”组合的样本。

(3)土石坝坝坡抗滑稳定安全系数计算。采用规范^[1]建议的拟静力法模拟地震荷载对坝坡稳定性的影响。针对每一坝前水位与坝体材料抗剪强度参数组合,基于简化 Bishop 法并采用最优化方法搜索最小安全系数对应的临界滑裂面,从而得到不同“坝前水位+材料参数”组合的地震工况下土石坝坝坡抗滑稳定安全系数。为研究安全系数的随机分布特征,将所求安全系数样本最小值及最大值所在的区间等分为若干子区间,并统计每个子区间内安全系数的频率,从而得到安全系数分布直方图。在此基础上,通过概率分布拟合及优化检验,获得安全系数 F 的随机分布类型及特征表达式。

(4)坝坡抗滑稳定可靠度指标 β 和失效概率 P_F 计算。一般认为土石坝坝坡抗滑稳定安全系数 F 服从正态分布。安全系数 F 的均值 μ_F 与标准差 σ_F 的计算公式为:

$$\mu_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (1)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_i - \mu_F)^2} \quad (2)$$

式中: n 为安全系数的样本数; F_i 为某一坝前水位对应的地震工况下的坝坡抗滑稳定安全系数。

相应的可靠度指标 β 与失效概率 P_F 的计算公式为:

$$\beta = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \quad (3)$$

$$P_F = P(F - 1 < 0) = 1 - \Phi(\beta) \quad (4)$$

(5)考虑地震发生概率情况下坝坡抗滑稳定可靠度指标与失效概率计算。我国水利水电工程结构

可靠度设计统一标准^[18]规定，对于Ⅰ级结构持久状态发生Ⅱ类破坏时的允许可靠指标 β_T 为4.2，这一规定对正常工况与非正常工况是没有区别的。因此，在梯级水库群中，对于单一梯级在极端工况条件下的坝坡稳定进行复核时，其允许可靠指标并不会降低。令 A 表示上一梯级发生溃坝； B 表示发生地震； C 表示大坝坝坡失稳；则根据条件概率定理有：

$$P(C|AB)=P(ABC)/P(AB) \tag{5}$$

若假定 A 、 B 、 C 相互独立，则上一梯级发生溃坝、当前梯级遭遇地震且坝坡失稳同时发生的概率为：

$$P(ABC)=P(C|AB) \times P(AB)=P(C|AB) \times P(A) \times P(B) \tag{6}$$

式中： $P(A)$ 为上一梯级发生溃坝的概率，由于假定上游梯级已经溃坝，所以 $P(A)=1$ ； $P(B)$ 为发生地震的概率，可根据地震超越概率确定； $P(C|AB)$ 为遭遇上游溃坝洪水和地震条件下坝坡失效概率，即式(4)中所求的失效概率； $P(ABC)$ 为最终求得的考虑溃坝洪水、地震发生条件下坝坡的失效概率。

该方法的计算流程如图1所示。

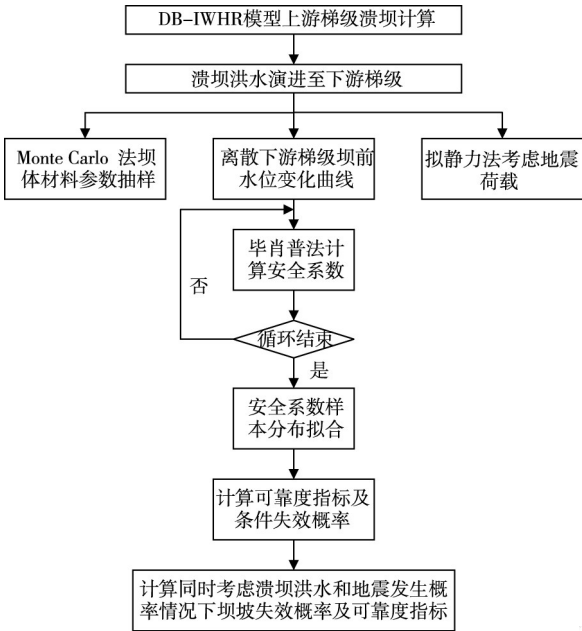


图1 计算流程

3 工况案例应用

3.1 工程概况 大渡河是岷江的最大支流，干流河道全长1 062 km，天然落差4 177 m，河口处多年平均年径流量488亿 m³，可开发容量约2 340万 kW。作为国家规划的十三大水电基地之一，其干流水电梯级开发规划共22个梯级电站。自上而下分别为下尔呷、巴拉、达维、卜寺沟、双江口、金川、巴底、丹巴、猴子岩、长河坝、黄金坪、泸定、硬梁包、大岗山、龙头石、老鹰岩、瀑布沟、深溪沟、枕头坝、沙坪、龚嘴、铜街子，是我国梯级开发的重点流域之一。

其中双江口面板堆石坝坝高314 m，库容28.97亿 m³。坝址区的地震基本烈度为Ⅶ度，设计基准期100年超越概率2%的基岩峰值加速度为 $a=0.2g$ ，按8度设防。作为大渡河流域开发的关键梯级，一旦发生险情，大流量溃坝洪水下泄极有可能引起下游一系列梯级的连累，后果不堪设想，因此其安全性至关重要。

本文以双江口为例，计算双江口大坝在遭遇地震和来自上游梯级卜寺沟的溃坝洪水共同作用的极端工况下的可靠度指标与失效概率。卜寺沟-双江口梯级的大坝工程特性见表1所示。

表1 卜寺沟-双江口梯级工程特性

	卜寺沟	双江口
大坝类型	混凝土面板堆石坝	混凝土面板堆石坝
坝顶高程/m	2 608	2 510
最大坝高/m	133	314
校核洪水位/m	2 603.32	2 504.42
正常蓄水位/m	2 603	2 500
死水位/m	2 600	2 420
总库容/亿 m ³	2.48	28.97

表2 卜寺沟溃决计算基本参数

库容水位曲线	a_1	0.06	基准水位	H_r/m	2 608
	b_1	6.28	入库流量	$Q_{in}/(\text{m}^3/\text{s})$	217
	c_1	226	溃口展宽	B_0/m	20
宽顶堰系数	m_q	0.36		B_{end}/m	180
	m_s	0.9		$\alpha/(\circ)$	160
	m	0.8		$\beta/(\circ)$	170
侵蚀率	$V_c/(\text{m}/\text{s})$	3.0		Z_0/m	1120
	a	1.1		Z_{end}/m	207
	b	0.0007			

3.2 卜寺沟溃决分析 土石坝溃决过程主要受库容水位、侵蚀参数和溃口展宽的影响，利用DB-IWHR土石坝溃决数值分析模型计算卜寺沟溃坝，计算主要参数如表2所示。

假定卜寺沟从0:00开始溃决，入库流量为正常径流量217 m³/s、溃口冲刷起动流速3.0 m/s，则7:54达溃决洪峰7 485.97 m³/s，当日14:48时卜寺沟流速小于起动值3.0 m/s时溃坝过程结束，历时14 h48 min，流量过程线如图2所示。

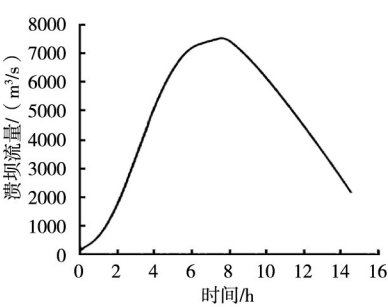


图2 卜寺沟洪水流量过程线

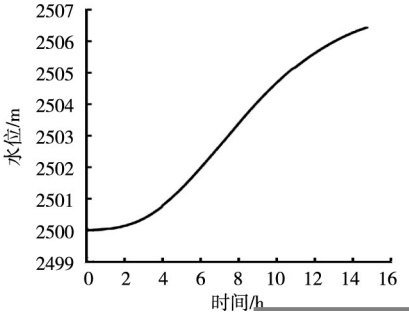


图3 双江口坝前水位变化曲线

3.3 双江口坝前水位壅高计算 由表1知双江口总库容为28.97亿 m³，而卜寺沟总库容仅为2.48亿 m³。所以卜寺沟溃坝洪水进入双江口水库后引起的水位变化并不大，若双江口开闸放水，上游来水将快速下泄，无法体现溃坝洪水对双江口的作用。因此考虑在无任何预警，即起调水位为正常蓄水位2 500 m且不泄水的极端情况下坝前水位的变化过程，坝前水位变化曲线如图3所示。由图3可知，双江口坝前起始水位为正常蓄水位2 500 m，由于没有开闸泄水，水位一直处于壅高状态，在14 h48 min后溃坝洪水结束后水位最终达到2 506.43 m。

3.4 可靠度指标*b*与失效概率*P_F*计算 利用简化Bishop法进行坝坡稳定分析，坝料抗剪强度指标如表3所示，其中心墙料采用Mohr-Coulumb线性强度指标；堆石料、过渡料、坝基砂砾石料与反滤料采用Duncan对数的非线性强度指标，并假定其抗剪强度指标服从正态分布。坝体典型剖面分区图见图4。

表3 双江口坝料计算参数

抗剪强度指标		$c(\Delta\varphi)$			$f(\varphi_0)$			容重	
		均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数	天然容重	饱和容重
①心墙料	线性	4.70	1.18	0.25	0.89	0.036	0.04	21.0	23.3
②上游堆石	非线性	4.54	1.18	0.26	41.9	2.17	0.05	21.5	23.6
③下游堆石 I	非线性	7.73	1.88	0.24	51.24	3.22	0.06	21.5	23.5
④下游堆石 II	非线性	7.90	1.30	0.16	49.4	1.50	0.03	20.0	22.5
⑤反滤 I	非线性	7.56	1.94	0.26	43.82	2.08	0.05	20.5	22.9
⑥反滤 II	非线性	6.90	1.60	0.23	47.17	2.48	0.05	21.5	23.5
⑦过渡料	非线性	5.80	1.60	0.28	46.68	2.48	0.05	21.5	23.5

注：若强度采用 Mohr-Coulumb 线性强度，取 c 和 f ；若采用 Duncan 对数模式的非线性强度，取 φ_0 与 $\Delta\varphi$ 。其中 c 单位为 kPa、 f 无单位、 φ_0 与 $\Delta\varphi$ 单位为 $(^\circ)$ 、容重单位为 kN/m^3 。

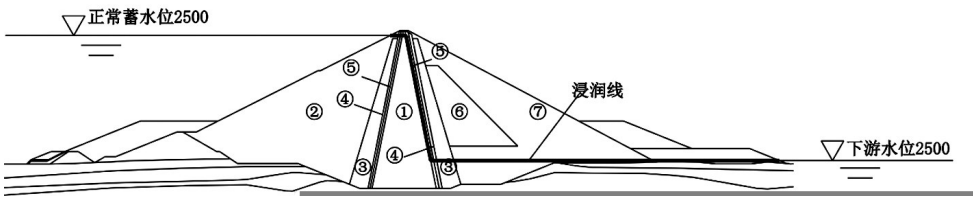


图4 双江口典型剖面材料分区（单位：m）

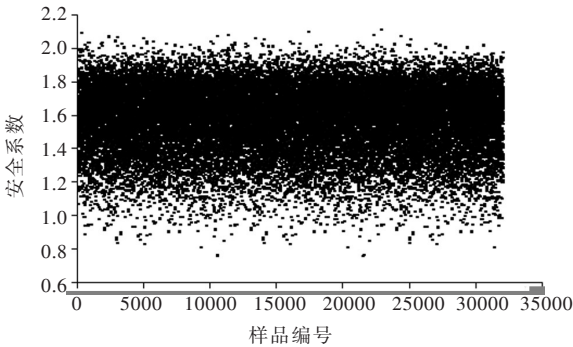


图5 安全系数计算结果

根据图3中双江口坝前水位曲线，以2 min为时间间隔进行离散，获得444个独立的坝前水位样本。在每个水位下根据表3中坝体材料参数利用 Monte Carlo 法进行100次抽样，一共得到44 400组材料抗剪强度参数，在此基础上采用简化 Bishop 法计算大坝坝坡抗滑稳定安全系数，得到44 400个安全系数样本。安全系数计算结果如图5所示。

对图5中所得安全系数样本进行分组统计，绘制安全系数直方图(见图6)，并在给定置信水平 $\alpha=0.05$ 时，采用 K-S 法进行安全系数分布的拟合性检验，认为安全系数样本服从均值 $\mu_F=1.654$ ，标准差 $\sigma_F=0.173$ 的正态分布(图6)。通过式(3)求得坝坡抗滑稳定的可靠度指标 $\beta=3.78$ ，相应的条件失效概率 $P_F=7.854\times10^{-5}$ 。

上述计算成果实质上是上游梯级溃坝与地震同时发生条件下，坝坡发生失稳的条件概率及其所对应的可靠度指标，并未考虑溃

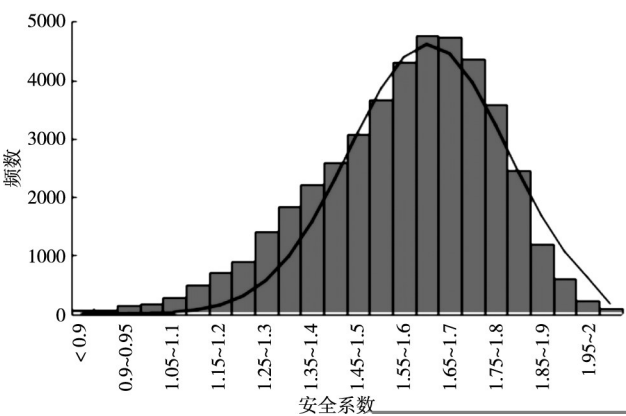


图6 安全系数统计及正态分布拟合

坝洪水和地震发生的概率。因此需通过条件概率公式计算其坝坡稳定的失效概率和可靠度指标。令事件 A 为上一梯级发生溃坝,则 $P(A)=1.0$;事件 B 为发生地震,计算中地震加速度系数采用基岩动峰值加速度的超越概率水平为2%,则 $P(B)=0.02$;事件 C 表示大坝坝坡失稳;则上游梯级发生溃坝、考虑100年超越概率2%的地震动峰值加速度 $a=0.2g$ 且大坝坝坡发生失稳的概率为: $P(ABC)=P(C|AB)P(A)P(B)=7.854\times 10^{-5}\times 0.02\times 1.0=1.571\times 10^{-6}$,通过可靠度指标与失效概率的关系式(4),可得 $\beta[P=4.085\times 10^{-6}]=4.667$ 。

3.5 进一步探讨 利用ROSENBLUETH法对双江口下游坝坡在“正常蓄水”和“正常蓄水位+地震”两种工况下进行可靠度计算。计算结果为:“正常蓄水位+地震”工况下,发生地震时下游坝坡发生失稳的条件失效概率为 1.177×10^{-5} ,考虑地震发生概率后的失效概率为 2.355×10^{-7} ,相应的可靠度指标为5.047;“正常蓄水位”工况时,下游坝坡失稳的可靠度指标为5.312。对比以上计算结果,当考虑上游溃坝洪水影响时双江口梯级下游坝坡失效概率有一定程度的降低,但仍满足规范规定的允许可靠指标4.2的标准。

由于本文所计算梯级的特殊性,若双江口开闸放水,上游卜寺沟溃坝洪水将快速下泄而无法考虑到洪水对坝坡稳定性的影响,因此未考虑双江口闸门打开等预警措施。在其他工程应用中,可在下游梯级坝前水位离散前加以调洪演算过程,考虑预警情况及开闸泄洪作用;同时在上游梯级溃坝计算时可根据需要,输入当前径流量或某一洪水等级流量为入库流量,从而得到所需的计算结果。

4 结论

以一系列坝前水位的变化模拟洪水对坝体的作用,并根据条件概率考虑上游梯级溃坝洪水和地震的发生概率,提出了同时考虑上游溃坝洪水和地震情况下坝坡稳定计算方法。通过“卜寺沟-双江口”梯级工程实例对该方法进行了考核。计算结果显示,在同时遭遇地震和上游溃坝洪水的极端工况下,双江口梯级下游坝坡可靠度指标为4.667,大于规范对I级建筑物发生二类破坏的要求可靠指标4.2,满足稳定性要求。

梯级水库群中,关键梯级的一旦失事后果不堪设想,人们对其安全性也提出来更高要求。本文提出的方法对洪水及地震综合作用的极端工况下坝坡风险分析提供思路,并为梯级水库设计中土石坝坝坡稳定分析提供参考。

参 考 文 献:

- [1] SL1274-2001,碾压式土石坝设计规范[S]. 2001.
- [2] 邵龙潭,唐洪祥,孔宪京,等.随机地震作用下土石坝边坡的稳定性分析[J].水利学报,1999(11): 66-71.
- [3] 张锐,迟世春,林皋,等.地震加速度动态分布及对高土石坝坝坡抗震稳定的影响[J].岩土力学,2008, 29(4): 1072-1076.
- [4] 徐斌,邹德高,孔宪京,等.高土石坝坝坡地震稳定分析研究[J].岩土工程学报,2012, 34(1): 139-144.
- [5] 陈生水,李国英,傅中志.高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J].岩土工程学报,2013, 35(1): 59-65.
- [6] 肖瞻.红阳水库坝坡稳定风险分析[D].南京:河海大学,2007.
- [7] João CASACA, Pedro MATEUS, João COELHO. Bayesian estimation in dam monitoring networks[J]. Journal of Civil Engineering and Architecture, 2011, 5(2): 185-190.
- [8] MORALESNÁPOLES O, DELGADOHERNÁNDEZ D J, DELEÓNESCOBEDO D, et al. A continuous bayesian network for earth dams' risk assessment: methodology and quantification [J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2014, 10(5): 589-603.

- [9] KIM J Y, KIM J G, CHOI B H, et al . A development of hydrologic dam risk analysis model using bayesian network (BN) [J] . Journal of Korea Water Resources Association, 2015, 48(10): 781-791 .
- [10] WANG F, ZHANG Q L . Systemic estimation of dam overtopping probability: bayesian networks approach[J] . Journal of Infrastructure Systems, 2016, 23(2): 1-12 .
- [11] 姜树海, 范子武 . 应用 Bayes 方法对土石坝安全等级的动态概率评定[J] . 水利学报, 2008, 39(8): 922-926 .
- [12] 王刚, 马震岳, 秦净净, 等 . 基于多态和模糊事件的土石坝溃决风险评估[J] . 水力发电学报, 2016, 35(8): 95-104 .
- [13] 张锐, 张双虎, 王本德, 等 . 考虑上游溃坝洪水的水库漫坝失事模糊风险分析[J] . 水利学报, 2016, 47(4): 509-517 .
- [14] PERAL J . Graphical models for probabilistic in belief networks [J]. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 241-248 .
- [15] KARAA F, KRZYSZTOFOWICZ R . Bayesian decision analysis of dam safety[J] . Applied Mathematics & Computation, 1984, 14(4): 357-380 .
- [16] CHEN Zuyu, MA Liqiu, YU Shu, et al . Back Analysis of the Draining Process of Tangjiashan Barrier Lake[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(4): 05014011 .
- [17] 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 .
- [18] GB50199-2013, 水利水电工程结构可靠性设计统一标准[S] . 2013 .

Analysis method for the slope stability of earth-rock fill dam considering the effect of concurrent earthquake and dam-break flood

CHEN Xi¹, SUN Ping², LI Shouyi¹, FENG Shangxin¹, LI Kangping¹

(1. College of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Earthquake and flood are the major factors which affect the slope stability of earth-rock fill dam in cascade reservoirs, and the effect of dam-break flood from upstream is especially remarkable. Analysis method was put forward for the earth-rock fill dam slope stability considering the effect of concurrent earthquake and dam-break flood. The method is based on the Bishop method, considering the variation coefficient of dam material, and the effect of dam-break flood is modeled by the fluctuation of dam front water level. Taking “Busigou-Shuangjiangkou” two ascades as an example, the dam slope stability and the risk of the downstream cascade dam slope of “Shuangjiangkou” were analyzed. The results show that, under the extreme condition of dam-break flood from upstream and earthquake, the downstream dam slope failure probability is 1.571×10^{-6} , and the corresponding reliability index is 4.667. The stability meets the standard requirements for the second class destruction of the first-grade structure.

Keywords: cascade reservoirs; dam-break flood; earthquake; dam slope stability analysis; reliability index

(责任编辑: 李 琳)