

# 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 I : 理论基础和等级标准

周建平<sup>1</sup>, 王浩<sup>2</sup>, 陈祖煜<sup>2</sup>, 周兴波<sup>2,3</sup>, 李斌<sup>2,3</sup>

(1. 中国电力建设股份有限公司, 北京 100048; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048;

3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**水电工程中高度200 m及以上的特高坝的设计已经超出现行规范的适用范围;考虑流域梯级效应的水库群的安全标准,迄今尚属空白。本文从公共安全风险防范和梯级连溃系统风险分析的角度,在现行水利水电枢纽工程等级划分及其设计安全标准的基础上,针对特高坝及其对下游梯级具有溃坝影响的大坝,提出了设立特等工程、特级建筑物及其相应安全标准的建议。经初步论证,建议特2级土石坝年计失效概率为 $5 \times 10^{-8}$ ,目标可靠指标为4.45,坝坡抗滑稳定安全系数为1.6;特1级土石坝年计失效概率为 $1 \times 10^{-8}$ ,目标可靠指标为4.7,坝坡抗滑稳定安全系数为1.7。基于我国某流域实际情况的一个虚拟大坝连溃案例,验证了确定上述工程等级和安全标准的可行性,对我国现有水电工程设计规范的修正和完善具有一定的参考意义。

**关键词:**特高坝;梯级水库;安全标准;高坝分级;梯级连溃

中图分类号:TV641

文献标识码:A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20150249

## 1 研究背景

我国水利水电工程建设正经历一个前所未有的快速发展时期,一大批水工建筑物,尤其是枢纽工程中最重要挡水建筑物(大坝),超越了以往的规模。现有设计规范已不完全适应于这些工程,对其安全标准和风险控制的要求,需要开展专题研究。以下两种情况集中体现了水电工程在风险控制和安全保障方面面临的新问题。

(1)高度超过200 m的大坝。近期,我国已经建成一批坝高200 m级及以上的土石坝、重力坝和拱坝,如瀑布沟(坝高,186 m,下同)、水布垭(233 m)、糯扎渡(261 m);龙滩(216.5 m)、光照(200.5 m)、三峡(181 m);二滩(240 m)、小湾(294.5 m)、溪洛渡(287 m)、锦屏一级(305 m)等,随后在河流开发中还有更多的200 m级及以上的特高坝需要建设,如双江口(314 m)、两河口(295 m)、马吉(270 m)、如美(315 m)、茨哈峡(253 m)、白鹤滩(289 m)、乌东德(265 m)等。但是,现行碾压式土石坝设计规范(DL/T5395-2007)<sup>[1]</sup>、混凝土重力坝设计规范(DL5108-1999)<sup>[2]</sup>、混凝土重力坝设计规范(SL319-2005)<sup>[3]</sup>、混凝土面板堆石坝设计规范(DL/T5016-1999)<sup>[4]</sup>、混凝土面板堆石坝设计规范(SL 228-98)<sup>[5]</sup>均明文规定仅适用于坝高200 m以下大坝,碾压式土石坝设计规范(SL274-2001)<sup>[6]</sup>虽未对具体的坝体高度做出规定,但也要求对特高坝做专题研究。因此,这些工程的设计亟待研究提出新的安全标准和风险防控要求。

(2)梯级水库群的风险防控。梯级开发是河流开发的主要形式。今后20年里,我国大江大河干流,如金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江、黄河等,均将继续开展流域梯级开

收稿日期:2015-03-05

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2013CB036400)

作者简介:周建平(1962-),男,湖南常德人,教授级高级工程师,主要从事水电工程设计研究。E-mail: zjp@powerchina.cn

发建设，形成百余座(包括支流)基本连续、首尾衔接的梯级水库群。这些水库群总落差达1 000~2 000 m，总库容超过数百亿至1 000亿 m<sup>3</sup>。大渡河干流水电基地从双江口至铜街子河段，规划有24座大坝，其中大部分为覆盖层地基上的高土石坝。土石坝抵御超标准洪水的能力较差，一旦某座大坝溃决，可能导致下游1级建筑物大坝连溃的后果。对这样的工程，应从系统风险防控的角度，提高设计安全标准。

我国大坝设计安全标准，诸如防洪标准、抗震设防标准、抗滑稳定安全系数、结构强度安全系数、坝顶超高等，都是根据长期实践经验总结给出的适当规定，体现了一定时期的技术发展水平，也与社会经济水平相适应。在当今社会经济条件下，无法承受以往相同规模工程的失事，更不说超规范、超经验工程规模的失事。从公共安全角度，重新论证工程设计安全标准的适应性，是对现行设计标准体系的补充和完善。确定基于公共安全的设计标准，不仅需要开展技术、经济综合分析和调查总结，还需要建立一套以失效概率和社会可接受程度为基础的风险防控理论体系。本系列论文拟对上述特高坝的设计安全标准开展初步研究，提出这些建筑物略高于常规水工建筑物的年计失效概率、目标可靠指标和安全系数的建议值，以供进一步深入论证参考。

## 2 建立在失效概率基础上的风险控制标准

2.1 社会风险标准 从公共安全角度，国际上通常采用FN曲线表示社会风险标准，其表达式为<sup>[7]</sup>：

$$1 - F_N(x) = P(N > x) < \frac{C}{x^n} \quad (1)$$

式中： $F_N(x)$ 为年死亡人数 $N$ 的概率分布函数，表示年死亡人数不高于 $x$ 的概率； $C$ 决定风险控制线的位置； $n$ 为风险类型( $n=1$ ，中立风险； $n=2$ ，非意愿风险)。

一些国家和地区的社会风险标准如表1所示。

表1 一些国家和地区风险标准FN曲线<sup>[8-9]</sup>

国家/地区	$n$	$C$	说明
香港	1	$10^{-3}$	以1000人为上限控制线。
英国	1	$10^{-2}$	
圣保罗(巴西)、BC Hydro(加拿大)	1	$10^{-3}$	与香港相同，但没有上限控制线。
新南威尔士(澳大利亚)	1.5	$3 \times 10^{-3}$	
里约热内卢、南里奥格兰德(巴西)	1.5	$10^{-2}$	
荷兰、圣巴巴拉(美国)	2	$10^{-3}$	圣巴巴拉在1000人处终止。
丹麦、维多利亚(澳大利亚)	2	$10^{-2}$	丹麦风险控制线从10人开始；维多利亚风险控制线从1人开始。

Mee L D<sup>[10]</sup>给出了船舶航行时可接受社会风险准则，认为社会风险的目标值是每公里航线上年死亡10人的概率为 $10^{-4}$ ，或者每公里航线上年死亡100人的概率为 $10^{-6}$ 。Fell<sup>[11]</sup>主张对于边坡被动风险接受者，以年计的可接受风险值应为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 。我国一些行业的国家标准已采用建立在概率指标基础上的风险控制标准。国家核安全局规定核电站每堆年发生严重堆芯损坏事件的频率应低于 $10^{-5}$ ；每堆年需要场外早期响应的大量放射性释放事件的频率应低于 $10^{-6}$ <sup>[12]</sup>。国家安全生产监督总局规定我国危险化学品生产、储存装置的社会风险标准如图1所示<sup>[13]</sup>。

2.2 大坝风险标准 20世纪后期，一些国家大坝安全管理部门分别制订了建立在年计失效概率基础上的大坝风险标准<sup>[14]</sup>，如图2所示。由此可知，大坝以年计的失效概率大致在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。大坝年计失效概率可近似取为大坝失效概率除以其设计基准期<sup>[15]</sup>。我国水利水电工程结构可靠度设计统一标准(GB50199-2013)规定1级水工建筑物的目标可靠指标为4.2<sup>[16]</sup>，在正态分布条件下，相应失效概率 $P_f(F < 1) = 1 - \Phi(\beta)$ 为 $10^{-5}$ 。按使用年限100年计，相应的年计失效概率为 $10^{-7}$ 。

2.3 特级大坝风险标准的建议值 特等工程的特征：一是工程规模特别大，坝高库大，风险势能

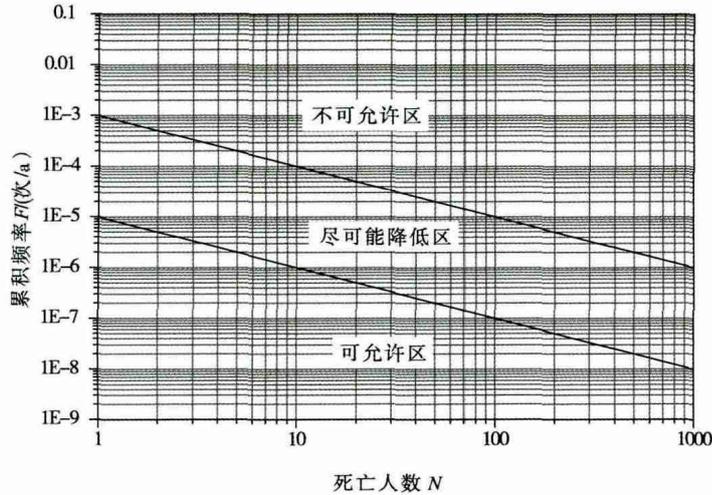


图1 我国危险化学品生产、储存装置社会可接受风险标准图

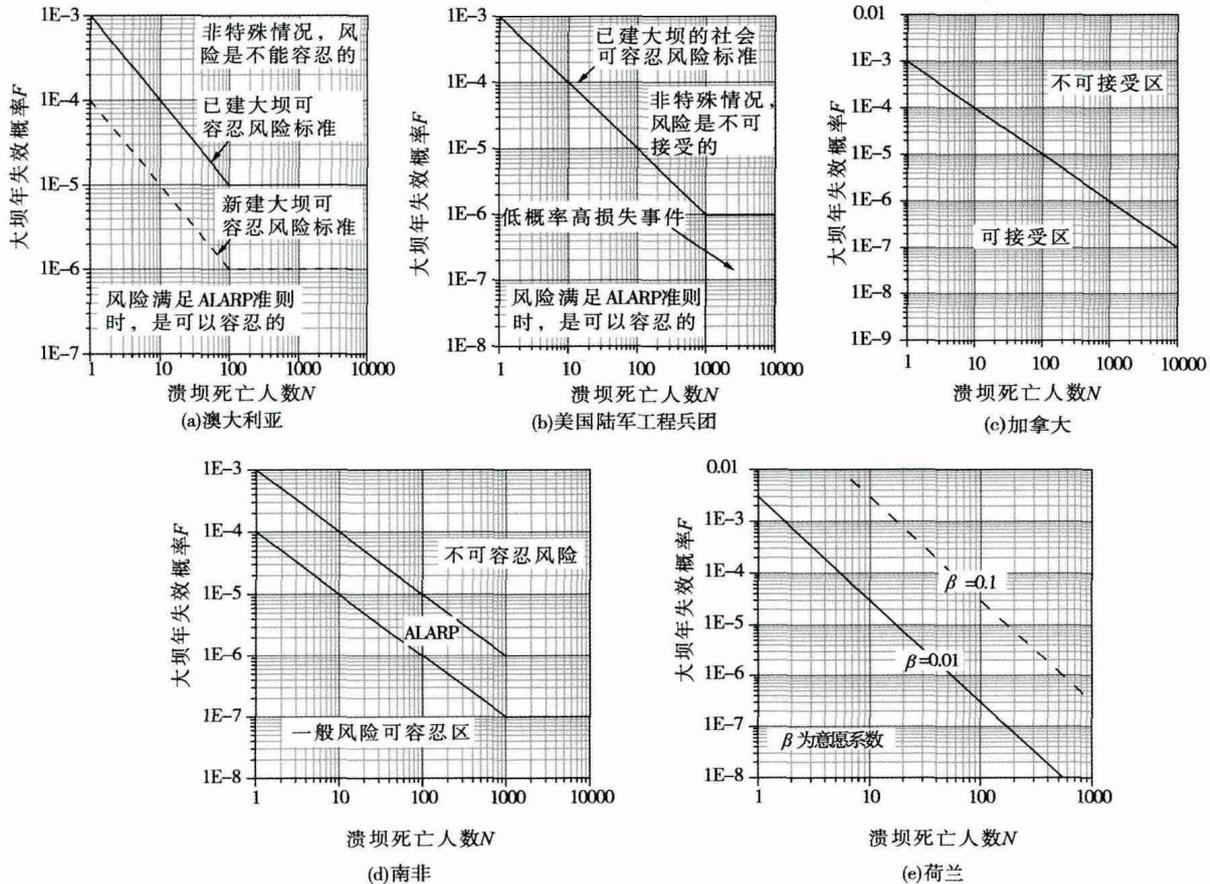


图2 一些国家对大坝允许风险的规定

高；二是一旦失事，后果特别严重，并极有可能造成下游1级挡水建筑物发生连锁。假定大库高坝工程或高风险大坝枢纽工程被列为特等工程，作为主要建筑物的大坝则应按照特级建筑物进行设计。特级建筑物应有比1级建筑物更高的安全可靠性。对大坝的失效概率标准一旦确定，即可在可靠性分析理论框架下确定其可靠指标、分项系数和安全系数。因此，失效概率标准是本研究中的一项基础性工作。对于特高坝和梯级水库群中的高风险大坝，其安全标准应在现有规范规定的安全储备的基础上略有提高，即高于上述对1级水工建筑物的年计失效概率 $10^{-7}$ 。

2.4 特级大坝的划分 根据坝高、库容和是否会导致下游梯级连锁，特级大坝拟分为特1级坝和特2级坝。下面以土石坝为例。

特1级大坝满足以下两个条件中的任一条件：(1)高度在250 m以上，库容大于10亿 m<sup>3</sup>；(2)大坝溃决后将导致下游1级大坝在预警有效情况下仍发生溃决。

特2级大坝满足以下两个条件中的任一条件：(1)高度在200~250 m，库容大于10亿 m<sup>3</sup>；(2)大坝溃决后将导致下游1级大坝在预警有效情况下不发生连溃灾害，但预警失效时会发生连溃。

基于现行水工建筑物可靠性设计标准和风险防控设计理论，本文建议上述特1级和特2级土石坝的控制年计失效概率分别为10<sup>-8</sup>和5×10<sup>-8</sup>。考虑100年设计基准年，则相应其在全生命周期的失效概率分别为10<sup>-6</sup>和5×10<sup>-6</sup>。

建筑物的失效概率 $P_f(F < 1)$ 可通过其可靠指标 $\beta$ 确定，即

$$P_f(F < 1) = 1 - \Phi(\beta) \quad (2)$$

其中： $F$ 为安全系数， $\Phi(\beta)$ 为与可靠指标 $\beta$ 对应的 $F > 1$ 的概率。当安全系数符合正态分布规律时，相应上述10<sup>-6</sup>和5×10<sup>-6</sup>的失效概率，可靠指标分别为4.7和4.45。

以下两节分别针对高度超过200 m的大坝和梯级水库群可能导致连溃的大坝，就风险标准的建议值进行总体论证。本系列论文的第II、III部分再就相关基础理论和技术经济问题作深入探讨。

### 3 高度超过200 m土石坝风险标准建议值的论证

**3.1 对土石坝安全系数标准的研究** 在过去的十余年中，本研究团队致力于采用可靠度方法，通过年计失效概率确定土石坝坝坡稳定安全系数标准<sup>[15,17-19]</sup>。本节在此基础上，开展坝高超过200 m土石坝风险标准建议值的论证。

(1)第一阶段：堆石体坝坡采用非线性强度指标稳定安全系数标准的研究。

土石坝堆石材料的抗剪强度指标具有明显的非线性特点<sup>[20-21]</sup>，实践中多采用以下邓肯指数模式进行坝坡非线性稳定分析

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \lg(\sigma_3/p_a) \quad (3)$$

式中： $\sigma_3$ 为小主应力； $\phi_0$ 和 $\Delta\phi$ 为材料参数。

但是，在以往的计算中发现，采用非线性强度指标，坝坡抗滑稳定安全系数往往较大。对1级大坝，在很多情况下，坝坡安全系数的计算值在1.70~1.90之间，而规范规定的最小安全系数是1.50。在进行非线性稳定分析时，规范关于各安全级别的大坝的最小安全系数标准是否也要作相应的调整，这个问题曾是规范修订中的重点研究内容<sup>[15,17,22]</sup>。陈祖煜等使用可靠度分析原理对这一问题开展了相关的研究<sup>[23]</sup>。

在论证面板坝使用非线性强度指标的安全系数标准时，作者分析了一个具有典型意义的面板坝坝坡的稳定安全系数，其坝高为150 m，坝坡为1:1.3。对以硬岩筑坝的资料进行分析后，采用表2所示的材料强度参数，获得表3的计算成果，相应的计算简图如图3示。

在上述的计算工作中，作者使用了规范建议的计算可靠指标的公式：

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \quad (4)$$

这一计算成果表明，如果对硬岩堆石料非线性强度指标采用具有代表意义的小值平均值，目前普遍采用的面板坝可接受的最陡坡度(1:1.3)所相应的安全系数为1.513，此值并不比规范对1级坝的要求1.5大很多。这一研究结果深化了对这一问题的认识。因此，原有的土石坝规范关于各等级的大坝坝坡抗滑稳定最小安全系数的规定不需对非线性分析做额外的规定。2008年水电行业土石坝设计

表2 对典型面板坝剖面使用的非线性参数

$\phi/(^\circ)$			$\Delta\phi/(^\circ)$		
均值	标准差	小值平均	均值	标准差	小值平均
53.0	2.0	51.0	10.0	1.0	11.0

表3 对典型面板坝剖面稳定分析成果

坝坡	确定性模型	可靠度和风险分析	
	安全系数 $F$	可靠度指标 $\beta$	失效概率
1:1.3	1.513	4.72	1.2×10 <sup>-6</sup>

规范全面解除了土石坝非线性指标分析的限制，并在编制说明中，整段引用了文献[23]相关段落作为依据。

(2)第二阶段：可靠指标与安全系数之间普适性关系的研究。

第一阶段的研究工作是针对一个高150 m的堆石坝，其可靠指标和安全系数分别恰好接近其最小值4.2和1.5的特例进行的。对于实际工程，无论其可靠指标还是安全系数均较其最小值有一定的裕富，为在更大的范围来研究可靠指标和安全系数的关系，本研究团队提出了相对安全率的概念<sup>[24-26]</sup>。

对于某一安全系数为  $F$  的边坡，定义单一安全系数相对安全率  $\eta_F$ ，

$$\eta_F = \frac{F}{F_a} \quad (5)$$

式中： $F_a$ 为规范规定的最小安全系数； $\eta_F$ 为一个衡量既定建筑物的安全系数相对于设计要求标准裕富的指标。与这一指标相对应的可靠度相对安全率为：

$$\eta_R = (\beta - \beta_a)\sigma_F + 1 \quad (6)$$

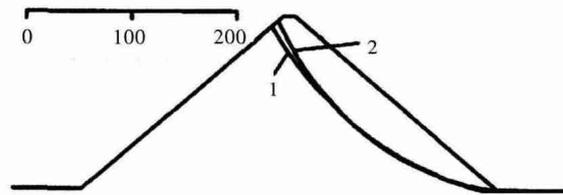
式中： $\beta$ 为可靠指标； $\beta_a$ 为规范规定的可靠指标，即目标可靠指标； $\sigma_F$ 为安全系数的标准差。

相对安全率是建立安全系数与可靠指标之间相互换算关系的重要纽带。在文献[24-25]中，作者提供了严格的理论依据，并通过重力坝和土石坝的4个案例说明以式(5)定义的单一安全系数相对安全率 $\eta_F$ 和以式(6)定义的可靠度相对安全率 $\eta_R$ 具有很好的相关性。这样，对一个工程，可以将采用传统单一安全系数方法和可靠度分析方法的计算成果放在同一平台上进行分析比较。

采用上述算例，开展坝高从75 m至200 m安全系数与可靠指标和失效概率之间具有普适意义的研究，其计算结果如表4所示。

表4 典型土石坝坝坡稳定计算成果

坝高/m	确定性模型		可靠度分析	
	$F$	$\eta_F$	$\beta$	$\eta_R$
75	1.765	1.177	6.165	1.279
125	1.612	1.075	5.109	1.132
150	1.557	1.038	4.763	1.091
175	1.519	1.013	4.538	1.048
200	1.509	1.006	4.315	1.017



(滑裂面1, 确定性模型,  $F=1.513$ ; 滑裂面2, 可靠度分析,  $\beta=4.72$ )

图3 对坝坡为1:1.3面板坝剖面稳定分析的临界滑裂面<sup>[23]</sup>

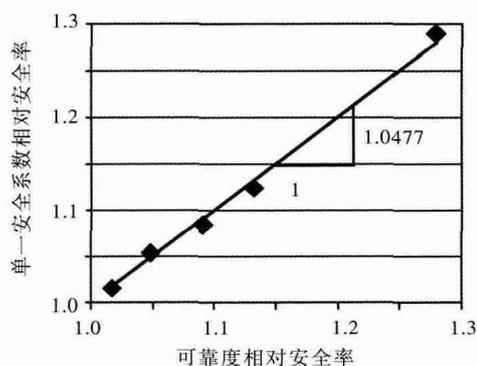


图4 典型土石坝 $\eta_F \sim \eta_R$ 相关关系(1 1.3)

考察表4可见，单一安全系数相对安全率 $\eta_F$ 和可靠度相对安全率 $\eta_R$ 随着坝高的变化二者的值非常接近，相对误差在10%以内。采用过原点的线性函数 $y=ax$ 对 $\eta_F$ 和 $\eta_R$ 进行线性拟合，回归系数为1.0477，如图4所示。这说明了规范中规定的200 m以下1级土石坝确定性模型抗滑稳定安全系数 $F_a=1.5$ 和可靠度分析目标可靠指标 $\beta_a=4.2$ 所反映的是相同的抗滑稳定性要求，处于同一风险控制水平。第一阶段关于土石坝非线性指标分析相应最小安全系数的论证工作在坝高75 m至175 m范围获得验证。

3.2 特级高土石坝坝坡稳定安全系数标准研究 从表4中可以发现，当坝高从75 m增加到175 m，安全系数从1.765降低为1.519，可靠指标也从6.165降低为4.538。当坝高超过200 m后，无论安全系数还是可靠指标都会低于土石坝设计规范规定的1.5和4.2的标准值。考虑到特级坝的风险和社会关注度，在2.3节，我们建议对特1级和特2级土石坝的控制年计失效概率分别降低为 $10^{-8}$ 和 $5 \times 10^{-8}$ 。相

应可靠指标分别为4.7和4.45。对应这样的风险控制标准，特级土石坝的最小抗滑稳定安全系数应取何值，将是本节要研究的问题。

对于坝高在250 m以上的情况，图5绘出了特级坝高250、260、275、285和300 m的 $\eta_F$ 和 $\eta_R$ 的相关关系。在目标可靠指标 $\beta_a$ 为4.7条件下分别考察最小安全系数 $F_a$ 为1.5、1.6、1.7的情况。可以发现，对特1级高土石坝，相应最小安全系数 $F_a$ 设为1.7，回归曲线的斜率为1.0131，与1最为接近。与目标可靠指标 $\beta_a$ 为4.7基本处于同一风险控制水平。

对于坝高在200~250 m的情况，基于目标可靠度指标4.45，类似的计算成果示于图6。可见，最小安全系数取 $F_a$ 为1.5和1.6的斜率分别为0.974和1.037，如取 $F_a$ 为1.55可能最接近1。从工程实际应用综合因素考虑，将 $F_a$ 定为1.6是可行的。

根据以上的研究成果，本文建议对坝高250 m以上的特1级和200~250 m的特2级高土石坝，坝坡稳定最小安全系数分别取1.7和1.6。

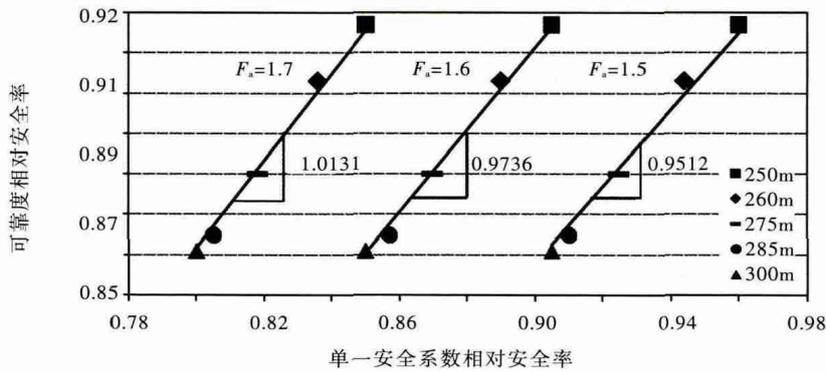


图5 250 m以上高土石坝 $\eta_F \sim \eta_R$ 相关关系(1.3)

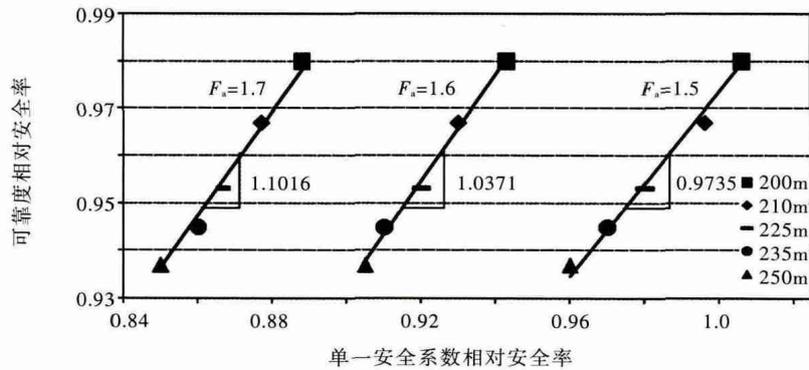


图6 200~250 m高土石坝 $\eta_F \sim \eta_R$ 相关关系(1.3)

## 4 基于土石坝连溃分析的风险标准建议值的论证

**4.1 概述** 划分特级坝的另一条件是建立在溃坝对下游1级建筑物可能发生连续溃决分析的基础上的。目前，现有梯级水库连溃方面的研究成果并不多，其理由可能是单个水库溃决的分析方法尚欠成熟。本研究团队近期对溃坝洪水分析开展了较深入的研究，基本克服了现有分析方法参数敏感性和数值分析稳定性方面的问题，为水库连溃分析创造了条件<sup>[27]</sup>。本节将围绕由3个土石坝组成的梯级水库群开展连溃分析和试设计研究工作。根据分析成果，将其中一个大坝界定为特1级，另一个大坝则无需提高安全级别。在本系列论文第Ⅲ部分，将详细介绍相关原理和分析计算使用的输入参数。

虽然是虚拟的案例，但这一案例是参照了某一流域实际的规划开发方案确定的，具有处理实际工程的代表意义。

### 4.2 连溃模型分析算例研究

**4.2.1 梯级布置概况** 流域的上游河段布置有下庄(1) 达里 双屯子 3个梯级，其平面布置如图7

所示。下庄(1)坝址距离达里坝址约85.6 km,高差约318.9 m,达里坝址距离双屯子坝址约89.3 km,高差约380.5 m。下庄(1)水电站工程采用混凝土面板堆石坝,最大坝高231 m,正常蓄水位3 120 m,校核洪水位31 22.87 m,总库容29.05亿 m<sup>3</sup>。达里水电站工程为二等大(2)型工程,拦河大坝为面板堆石坝,最大坝高113.5 m,正常蓄水位为2 686 m,总库容1.85亿 m<sup>3</sup>。双屯子水电站为一等大(1)型工程,枢纽工程为心墙堆石坝,最大坝高314 m,水库正常蓄水位2 500 m,水库总库容约28.97亿 m<sup>3</sup>。

#### 4.2.2 梯级连溃模型及计算结果

(1)下庄(1)单溃并演进至达里水库。假定下庄(1)在0 00开始溃决,则14 19达溃决洪峰流量31 914 m<sup>3</sup>/s,其溃决过程持续约53 h。溃决洪水演进至距离下游85.6 km处的达里水库约在3 19,洪峰流量于15 25到达达里水库,由于属于峡谷型水库,坦化作用不明显,洪峰衰减很小,达里坝址的洪峰流量为31 624 m<sup>3</sup>/s,其溃决及演进至达里的流量过程如图8所示。



图7 下庄(1) 双屯子示意图

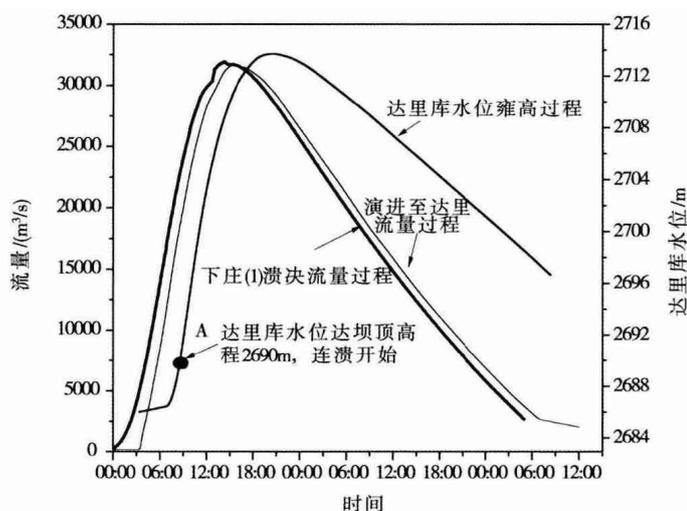


图8 下庄(1)溃决并演进至达里流量过程及达里库水位变化过程

(2)达里大坝漫坝连溃并演进至双屯子水库。3 19溃坝洪水进入达里水库,其库水位从正常蓄水位2 686 m开始雍高,8 33库水位上升至坝顶高程2 690 m(图8中A点),达里大坝开始漫顶溃决。由于漫顶流量小于入库流量,库水位仍然升高,20 31达里溃决流量等于入库流量,库水位升至最高水位2 713.7 m,达里大坝19 39达最大洪峰流量41 314 m<sup>3</sup>/s。11 38达里连溃洪水演进至下游约89.3 km双屯子,21 20洪峰流量演进至双屯子水库,由于峡谷型河道,洪峰流量基本没有损失,为40 832 m<sup>3</sup>/s,其溃决及演进至双屯子的流量过程如图9所示。

(3)双屯子水库调洪漫坝分析。由于下庄(1)水库库容较大,在其溃决的同时(0 00)即告知双屯子全闸泄洪,泄洪流量为8 000 m<sup>3</sup>/s。至11 38达里连溃洪水进入双屯子时,双屯子水位已从2 500 m降至2 492.96 m,下泄水量2.48亿 m<sup>3</sup>。其泄流过程如图10所示。由于入库流量小于下泄流量,双屯子库水位继续下降,15 02入库流量等于下泄流量,水位降至最低2 491.37 m,之后由于入库流量大于下泄流量,库水位开始升高,23 30水位升至坝顶高程2 510 m(图11中B点),双屯子水库漫顶,具体如图11所示。

上述成果表明,下庄(1)大坝溃决,双屯子水库在有预警的情况下,仍然漫顶。因此下庄(1)大坝应确定为特1级坝。达里水库总库容为1.85亿 m<sup>3</sup>,而双屯子从正常蓄水位到坝顶有3.84亿 m<sup>3</sup>的库容,故达里水库单一溃决将不会引起双屯子漫顶溃坝,故不需提高其安全等级。

## 5 典型工程案例对设计安全标准的验证

以上主要是从基础理论角度论证特级坝可靠性标准建议值。事实上,在以往的实践中,设计人员已经根据实际情况对于属于本文建议的特级坝,适当提高了设计标准。下面,以二滩拱坝、三峡

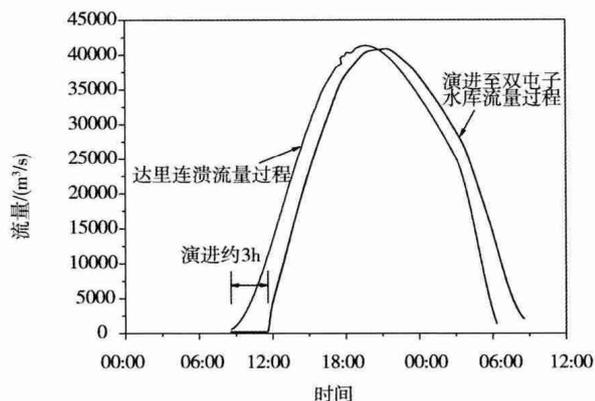


图9 达里大坝溃决及演进至双屯子流量过程

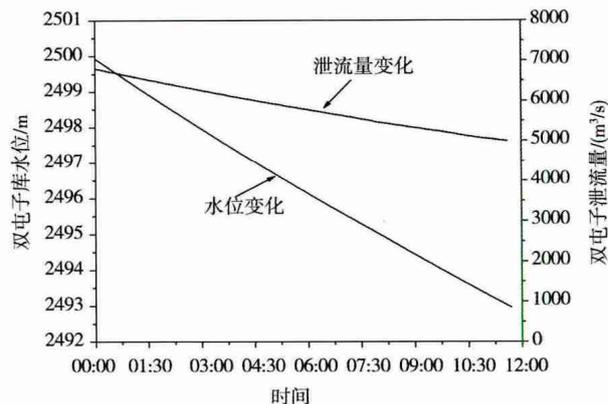


图10 双屯子水库预泄洪过程(0 00—11 38)

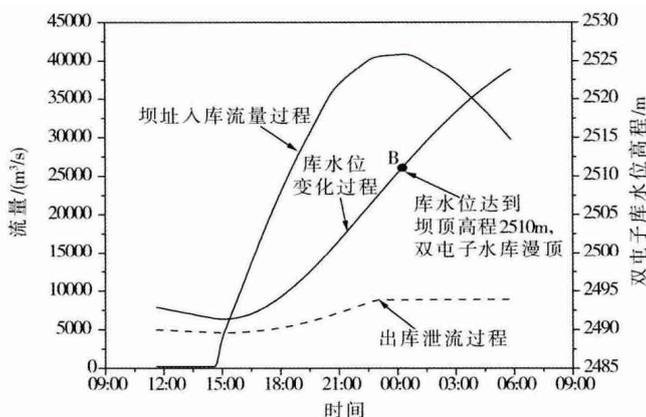


图11 双屯子水库调洪过程过程(11 38 次日6 00)

重力坝和糯扎渡堆石坝3个典型工程为例，说明本文建议的特高坝的设计安全标准实际上也具备了实践依据。

二滩水电站以发电为主，水库正常蓄水位1 200 m，总库容58亿 $m^3$ ，有效库容33.7亿 $m^3$ ，属季调节水库，电站装机容量3 300 MW，混凝土双曲拱坝，最大坝高240 m。枢纽工程为一等工程，主要水工建筑物为1级建筑物。防洪标准采用千年一遇洪水设计，5千年一遇洪水校核。因为坝高超过200 m，泄洪能力、坝顶超高、坝肩抗滑稳定以及坝体混凝土强度等方面，设计上均留有比规范规定更多的安全富裕，也均高于规范规定的安全标准要求。二滩拱坝坝肩抗滑稳定安全系数基本组合大于等于4.0，特殊组合(地震)大于等于3.5，而规范相应的规定分别是大于等于3.5和3.0。

三峡水利枢纽工程，按照原有或现行规范被定义为一等大(1)型工程。三峡重力坝坝高181m，大坝按千年一遇洪水设计，万年一遇洪水加10%校核；电站厂房按千年一遇洪水设计，五千年一遇洪水校核。大坝及厂房防洪标准均高于1级建筑物相应的上限标准。枢纽工程中除大坝外的其他一些建筑物，如电站进水口及其引水系统、泄洪坝段下游左导墙及右导墙、茅坪溪防护大坝等，也都按照1级建筑物进行设计，相应提高了其防洪标准和结构安全标准。正是因为三峡工程的特殊性，设计安全标准和风险防控要求突破了原有的或现行规范的有关规定。

糯扎渡水电站正常蓄水位812 m，总库容237亿 $m^3$ ，电站装机容量5 850 MW，心墙堆石坝，最大坝高261.5 m，为一等大(1)型工程，大坝为1级建筑物，按照千年一遇洪水设计，PMF进行校核。工程场地地震基本烈度为8度，采用基准期100年超越概率2%的基岩水平峰值加速度0.380 g进行大坝抗震设防，并采用100年超越概率1%的基岩水平峰值加速度0.436 g进行抗震复核。采取坝顶宽度加大、预留足够的坝顶超高、坝体上部边坡埋设扁钢网和钢筋网、浆砌块石护坡等措施，以提高坝坡静动力条件下抗滑稳定安全系数，大坝坝坡稳定安全系数高于规范规定值。

以上案例表明，对于200 m以上的已建、在建的大库高坝工程，在大坝设计安全标准的选择上，

除遵循现行规范的要求外，还需要考虑诸多风险因素及其影响，开展大量科学研究和分析论证工作，在增加投资不多或可接受的投资范围内，或提高大坝设防标准，或采取有效措施等，以提高大坝安全储备，增强大坝抵御不可预见风险的能力。

## 6 结论

我国200 m以上的特高坝及其梯级水库群大坝的建设，对工程设计安全标准和风险防控提出了新要求。本文从公共安全和梯级连溃风险的角度，分析提出了特高坝和梯级水库群高风险土石坝的风险控制标准，如表5所示，并建立了年失效概率、可靠指标、安全系数为一体的设计安全标准指标体系，对特级大坝的安全标准进行了初步论证；在建立梯级连溃工程模型和实例分析的基础上，通过辨识高风险大坝，提出了安全等级划分的建议。本系列论文对现行规范的修正和完善提供理论依据。对特级坝的洪水标准、坝顶超高，抗震设防，泄洪设施等方面的风险防控设计要求以及对特级重力坝和拱坝的相应安全标准也宜依据类似的技术方案加以研究确定。

表5 特级土石坝风险控制标准建议值

建筑物级别	分类	描述	年计失效概率	目标可靠指标	最小安全系数
特1级	坝高超200m	高度在250m以上，库容大于10亿m <sup>3</sup> 。	1×10 <sup>-8</sup>	4.7	1.7
	梯级水库群土石坝	大坝溃决后将导致下游1级大坝在预警有效情况下仍发生溃决。			
特2级	坝高超200m	高度在200~250m之间，库容大于10亿m <sup>3</sup> 。	5×10 <sup>-8</sup>	4.45	1.6
	梯级水库群土石坝	大坝溃决后将导致下游1级大坝在预警有效情况下不发生连溃灾害，但预警失效时会发生连溃。			

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] DL/T5395-2007, 碾压式土石坝设计规范[S]. 2007.
- [ 2 ] DL 5106-1999, 混凝土重力坝设计规范[S]. 1999.
- [ 3 ] SL 319-2005, 混凝土重力坝设计规范[S]. 2005.
- [ 4 ] DL/T5016-1999, 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 1999.
- [ 5 ] SL 228-98, 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 1999.
- [ 6 ] SL274-2001, 碾压式土石坝设计规范[S]. 2001.
- [ 7 ] Vrijling J K, Van Gelder P. Societal risk and the concept of risk aversion[J]. Advances in Safety and Reliability, 1997, 1:45-52.
- [ 8 ] Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria by Center for Chemical Process Safety[Z]. American Institute of Chemical Engineers, Inc, 2009.
- [ 9 ] Trbojevic V M. Risk criteria in EU[C]//Proceedings European safety and reliability conference, Tri City, Pland, 2005.
- [ 10 ] Mee L D. The Black Sea in crisis :a need for concerted international action[J]. Ambio, 1992, 21(4):278-86.
- [ 11 ] Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(2):261-272.
- [ 12 ] 中国国家核安全局. 新建核电厂设计中几个重要安全问题的声明[OL]. 2002, 8(26). [http://nnsa.mep.gov.cn/zcfg/200911/t20091103\\_181014.htm](http://nnsa.mep.gov.cn/zcfg/200911/t20091103_181014.htm).
- [ 13 ] 国家安全生产监督管理总局公告:危险化学品生产, 储存装置个人可接受风险标准和社会可接受风险标准(试行)[OL]. 2014, (5)9. [http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel\\_5330/2014/0509/234375/content\\_234375.htm](http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_5330/2014/0509/234375/content_234375.htm).
- [ 14 ] 周兴波, 周建平, 杜效鹤. 我国大坝可接受风险标准研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(1):63-72.
- [ 15 ] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析-原理、方法, 程序[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.

- [ 16 ] GB 50199-2013 ,水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S] . 2013 .
- [ 17 ] 陈祖煜 ,汪小刚 ,杨健 ,等 . 岩质边坡稳定分析 - 原理、方法、程序[M] . 北京 :中国水利水电出版社 , 2005 .
- [ 18 ] 吴世伟 . 结构可靠度分析[M] . 北京 :人民交通出版社 . 1986 .
- [ 19 ] 陈祖煜 . 水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展[M] . 北京 :中国水利水电出版社 , 2010 .
- [ 20 ] 陈祖煜 ,陈立宏 ,孙平 . 采用非线性强度指标的边坡稳定分析[J] . 水力发电 , 1990 , 9 : 9-13 .
- [ 21 ] 陈祖煜 ,陈立宏 ,孙平 . 非线性强度指标边坡稳定安全系数取值标准的研究[J] . 水力发电 , 2004 , 30(2) : 17-20 .
- [ 22 ] 周建平 . 重力坝设计 20 年[M] . 北京 :中国水利水电出版社 , 2008 .
- [ 23 ] 陈祖煜 . 堆石非线性强度特性对高土石坝稳定性的影响[J] . 岩土力学 , 2007 , 28(9) : 1807-1810 .
- [ 24 ] 陈祖煜 ,徐佳成 ,孙平 ,等 . 重力坝抗滑稳定可靠度分析 : (一) 相对安全率方法[J] . 水力发电学报 , 2012 , 31(3) : 167-178 .
- [ 25 ] 陈祖煜 ,徐佳成 ,孙平 ,等 . 重力坝抗滑稳定可靠度分析 : (二) 强度指标和分项系数的合理取值研究[J] . 水力发电学报 , 2012 , 31(3) : 160-167 .
- [ 26 ] Chen Z Y , Chen L H , Xu J C , et al . Quantitative deterministic versus probability analyses based on a safety margin criterion[J] . Science China Technological Sciences , 2014 , 57(10) : 1988-2000 .
- [ 27 ] Chen Z , Ma L , Yu S , et al . Back Analysis of the Draining Process of the Tangjiashan Barrier Lake[J] . Journal of Hydraulic Engineering , 2015 , 141(4) . [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HY.1943\\_7900.0000965](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HY.1943_7900.0000965) .

## Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part I : fundamentals and criteria

ZHOU Jianping<sup>1</sup> , WANG Hao<sup>2</sup> , CHEN Zuyu<sup>2</sup> , ZHOU Xingbo<sup>2,3</sup> , LI Bin<sup>2,3</sup>

(1. Power Construction Corporation of China , Beijing 100048 , China ;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100048 , China ;

3. College of Water Resources and Hydro-electric Engineering , Xi'an University of Technology , Xi'an 710048 , China)

**Abstract :** The rapid development of China's hydropower projects has resulted in a number of large dams whose heights exceed 200 m , an applicability limit of various design codes. Another concern comes from the cascade hydropower development on a river , in which break of one dam may cause serious downstream secondary disasters. Based on a comprehensive review on the social and professional safety control standards the authors propose in these paper two extra classes as well as their related design criteria to the existing Chinese dam classification systems. Class E2 refers to a dam with a height ranged between 200-250 m , or a dam whose breaching would cause a secondary break of a downstream Class 1 dam if early warning is not available. The allowable annual probability of failure , reliability index and slope safety factor are specified as  $5 \times 10^{-8}$  , 4.45 , and 1.6 respectively. Class E2 refers to a dam with a height ranged between 250-300 m , or a dam whose breaching would cause a secondary break of a downstream Class 1 dam even with early warning. The allowable annual probability of failure , reliability index and slope safety factor are specified as  $10^{-8}$  , 4.7 , and 1.7 respectively. An in-depth study on risks and standards associated with these dams has been provided to assess the applicability of the proposed criteria which can be useful for the work of code revision.

**Key words :** extra height dam ; cascade reservoir ; safety criteria ; high dam classification ; cascade dam break

(责任编辑 : 韩 昆)