



Research
Hydro Projects—Review

大坝和洪水

F. Lempérière

HydroCoop, Paris 92190, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 August 2016

Revised 8 October 2016

Accepted

Available online

关键词

洪水

防洪

泄洪道

迷宫式泄洪道

溃坝

摘要

大坝对洪水的削弱作用和大坝面对洪水时的风险是本文讨论的两个主题。中国成功和高效地进行了大坝建设，正在引领世界上该领域的发展。本文致力于研究其他国家的相关经验、从数个世纪以来的事故中获得的教训以及新的解决方案。按照坝高、库容、筑坝材料和泄洪数据对洪水灾害进行分析，结果表明，多数重大事故发生于库容超过 10 hm^3 的土石坝。新的解决方案对大坝安全和防洪来说都具有良好的前景。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

对许多国家来说，洪水都是一个严重的问题，特别是在中国，降雨强度和每平方千米流域面积上的洪水总量接近世界最高水平。中国在防洪方面有着丰富的经验，自20世纪50年代起，修建了很多世界级大坝，其中包括一些超大型大坝，在修建这些大坝的过程中，中国的工程师们进行了大量创新。

本文将重点讨论其他国家数个世纪以来从洪水引发的大坝事故中获取的经验教训，并通过最新技术进展寻求可能的改进方案。本文所展开的讨论主要基于国际大坝委员会(ICOLD)的报告和公告。根据国际大坝委员会的定义，大坝是指高度超过15 m或蓄水量超过 3 hm^3 的水坝。

下述分析就土石坝和混凝土坝两部分分别展开。

冰雪导致的洪灾较为特殊，且由其引起的大坝事故仅占很小部分，因此此类灾害在此不做研究。同样，尾

矿坝由于其风险类型的特殊性且与洪水关系不大，在本文中也未提及。

2. 一些特大暴雨和洪水数据

一直以来，很多研究都在使用各种理论和方法对极端洪水进行评估，近几十年来情况尤为如此。因采用的方法和进行操作的人员不同，评估结果可能有较大出入，相当一部分溃坝事故都与这种严重的评估失误有关。绝对有效的方法是不存在的，每种方法都在某些方面存在问题。因此，合理的结论是在评估发生概率极低的洪水方面存在严重的不确定性。尽管这种不确定性对于百年一遇或千年一遇洪水的年发生概率来说似乎并不重要，但气候变化的影响对上述概率值却非常重要。更可能的是，除了年度洪水外，其他的洪水评估都将存在严重不确定性。

因此，更为明智的做法是，使用多种方法而不仅仅

E-mail address: francois.lempriere@gmail.com

是一种方法来避免重大评估失误。就极端洪水而言,若以不同汇水区域的世界极端降水和洪水数据为参照,则可能出现一系列量级,以下来自中国的数据接近世界极限值。

极端洪水的持续时间随汇水面积的增加而增加。通常,1 km²汇水面积内洪水的持续时间为2~3 h,100~1000 km²为5~20 h,100 000 km²为数天时间。与世界洪水极值相应的降水量大致相同,各汇水区域的降水量在500 mm左右浮动(见表1)。每平方千米汇水面积的极限洪水量在0.5 hm³左右浮动,但持续时长变化较大。对于此类洪水,几乎所有降雨都成为径流;1 km²汇水面积的世界极限降雨量为500 000 m³,该数值与100 m³·s⁻¹的峰值和持续数小时的洪水量是一致的。表2为有记录的世界洪水极值。

对于汇水面积在1000 km²以下的情况,可以通过对该气候区域内有记录的极限降水量和汇水面积与世界极限降水数值进行比较,以便对该区域内的极端洪水进行粗略的初步评估。对于同一国家或同一气候区域内的大坝,此方法是适用的,能够避免重大评估失误。该方法可以根据汇水区域的形状进行简单调整。可以用公式 $q = kS^{0.75}$ 给出初步评估,其中 k 表示区域系数, S 表示汇水面积[1,2]。

国际大坝委员会第82号公告(1992年)和第142号公告(2012年)可作为有效参考。

3. 土石坝(中国以外国家或地区)

3.1. 现有土石坝

现有土石坝分类如下:

(1) 根据高度分类:高于30 m的约5000座;15~30 m的15 000座;5~15 m的数十万座。

(2) 根据蓄水量分类:超过500 hm³的数百座;10~500 hm³的5000座;0.1~10 hm³的100 000座,其中15 000座的蓄水量超过3 hm³,被国际大坝委员会归类为“大型水坝”。

(3) 根据筑坝材料分类:约2500座为堆石坝,大都高于30 m。

在土坝中,筑坝材料质量的不同对洪水风险有显著影响。发达国家自20世纪50年代起,其他国家自20世纪80年代起,多数大型土坝均采用压实良好的黏土材料构成宽截面,可以更好地抵御漫溢,减缓溃坝造成的缺口增大速度。20世纪30年代以前,许多土石坝的填土材料质量相当差。凭借更为完善的理论知识和高效的压实设备,美国在大坝建设方面率先获得关键性进展。但是,在一些劳动力成本低廉的亚洲国家,修建了很多中小型土石坝,这些土石坝未经过重型设备处理,填土质量无法保证,该现象一直持续到20世纪80年代。在这种情况下,漫溢的洪水将从决口处迅速大范围蔓延。

(4) 根据溢洪道的泄洪量进行分类:选择何种溢洪道受泄洪量及国家政策、传统筑坝方法和法规的影响。根据这些因素的不同,对溢洪道的选择也不尽相同。

根据国际大坝委员会的大坝注册资料和第83号公告(第33页)[3],大多泄洪量在1000 m³·s⁻¹以下的大坝具有单一的开敞式泄洪道。大多泄洪量超过1000 m³·s⁻¹的大坝具有单闸门溢洪道。

相应地,对于大多蓄水量超过10 hm³的大坝来说,有数百或数千平方千米的集水面积,因此水库需设有闸门以截住大量的洪水;而对于大多蓄水量约1 hm³的水

表1 中国最大降雨量

Duration	Area (km ²)							
	Point	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000	100 000
1 h	401	185	145	107	41			
3 h	550	447	399	297	120			
6 h	840	723	643	503	360	127		
12 h	1 400	1 050	854	675	570	212		
24 h	1 673	1 200	1 150	1 060	830	435	306	155
3 d	2 749	1 554	1 460	1 350	1 080	940	715	420
7 d	2 749	1 805	1 720	1 573	1 350	1 200	960	570

表2 有记录的世界洪水极值

Catchment (km ²)	1	10	100	1 000
Flood peak (m ³ ·s ⁻¹)	100	700	4000	15 000
Flood peak (km ⁻²)	100	70	40	15

库, 则只需要较小的集水区, 因此只有单一的开敞式溢洪道。

根据特定法规的相关规定, 现有大坝的溢洪道中只有极少数采用闸控和非闸控相结合的方式(除意大利外)。

3.2. 洪水导致的溃坝事故及其补救措施

相关数据主要来自国际大坝委员会的公告(特别是第82号、第99号和第109号)和1974年发布的《大坝事故报告》, 其中涉及的均为大型坝, 即高度大于15 m或蓄水量超过3 hm³的大坝。除中国外, 大约有25 000座大型土石坝, 其中10%建于1930年之前。

虽然一些洪水导致的溃坝事故是由溢洪道结构问题造成的, 但是大部分溃坝是由洪峰期的洪水漫溢以及下游坝面和坝趾遭受侵蚀造成的。坝体材料不同, 土石坝溃口产生和扩大的时间也有差异: 压实良好的黏土材料可以承受0.5 m深的溢流水舌数小时, 且决口处缓慢扩大; 欠压实的材料可能在1 h内被0.3 m深的溢流水舌冲破, 且决口处可能迅速扩大; 堆石材料或可承受1 m深的溢流水舌数小时, 但决口处可能迅速扩大, 因此洪水漫溢持续时间是风险的关键因素。

报告显示, 运行的大坝中, 已发生70起漫顶溃坝事故。尽管许多溃坝事故可能尚未报道, 但相关数据很可能包括了大多数大型水库溃坝事故或人员伤亡较多的溃坝事故。

溃坝率为0.3%或0.4%, 对于平均寿命为50年的大坝来说, 年计溃坝概率约为 0.6×10^{-4} , 这一概率与高度大于30 m的大坝溃坝概率近似相同。

对于1930年之前建造的大坝, 其年计发生溃坝的概率约为 10^{-4} 。根据报告, 2000~3000座大坝中, 发生了约30起溃坝事故, 但是还有很多可能尚未报道。对于1930年以后建造的大坝, 报告显示, 20 000多座大坝(平均使用寿命为40年)中发生了约40起溃坝事故, 即年计发生概率为 0.5×10^{-4} 。

根据报告, 蓄水量为10~500 hm³的水库的溃坝概率更高。美国数百座建于1930年之前的大坝, 有15座发生过溃坝事故, 年计发生概率接近 10^{-3} 。之后建成的约5000座大坝中, 发生了40起溃坝事故, 年计发生概率约为 2×10^{-4} 。

对于小型水库, 已报道的溃坝概率则低得多, 1930年之后兴建的15 000多座小型土石坝中, 只发生了12起溃坝事故, 即年计溃坝概率低于 0.2×10^{-4} , 所报道的人员伤亡数量也更少。

蓄水量超过10 hm³大坝的总泄水量为2500 hm³, 比

小型水库高出100倍。在这些大型水库发生的15起溃坝事故中, 死亡总人数超过10 000人。而较小水库发生的溃坝事故中, 仅数百人死亡。

小型水库的溃坝概率低得多, 部分原因是存在一些尚未报道的溃坝事故, 另外还与洪水和漫溢的持续时间较短、总泄量较低以及土石坝顶部漫溢的溢流水舌深度较小等相关。

溃决率差异的另一个原因可能是: 大多数闸控大坝用于大泄洪量区域, 即大型集水区和蓄水区。而安全系数与水位超高密切相关, 因此开敞式溢泄洪道的安全系数比闸控泄洪道要高得多。由此可见, 这其中的一大部分溃坝事故是由于闸门部分或全部堵塞造成的。

对于大型水库, 其危险率更高的其他原因可能是: 对大型集水区(数百或数千平方千米)的洪水评估存在较大的不确定性; 而对只有几平方千米的小型集水区, 对于一定的积雨面积却有较多极端洪水的区域性资料, 这可能避免了对洪水总量较大的估计。

对于数百个蓄水量超过500 hm³的水库, 尚无溃坝事故报道, 也许因为对于相对较大的集水区来说, 特大洪水洪峰并没有明显高出我们所熟知的1/10或1/100概率。

下文分析1000多起溃坝事故中的几个案例:

日本的Iruhake大坝, 已运行200年, 高为28 m, 长为700 m, 蓄水量为18 hm³。1868年发生的溃坝事故造成1200人死亡。

在美国, 1930年之前所建大坝发生的大部分溃坝事故中, 死亡人数很少, 或几乎没有人员伤亡。但是自建成起有30年历史的南佛克坝, 高为21 m, 长为280 m, 蓄水量为20 hm³, 在1889年的洪水溃坝事故中导致2200人死亡。集水面积为125 km², 泄洪能力约 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。溃坝事故中溃坝洪峰流量达 $10 000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 决口宽100 m。2015年的溃坝事故造成的损失价值接近10亿美元[1]。

在印度, 许多大型土石坝建于1980年之前, 配套设施不足。7座蓄水量为20~400 hm³的大坝发生了溃坝。1979年, 已建成10年的Machu大坝, 高为25 m, 长为4000 m, 蓄水量为100 hm³, 在洪水漫溢数小时后发生溃坝, 若干个决口全长达1800 m, 集水面积为1900 km², 闸控溢洪道的设计泄洪量为 $9000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 实际入库洪量为 $14 000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 而土石坝溃决时的溃坝洪峰流量达 $80 000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (见图1)。当时, 20%的闸门未打开, 报警系统不够完善, 大坝溃决最初造成5人死亡, 至洪水溃决事故结束共导致1万人死亡, 15万人无家可归, 1万处住所被毁。该大坝重新修建时, 溢洪道设计泄洪量增加

至 $26\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

上述溃坝事故可与1975年中国的板桥溃坝事故进行比较。板桥大坝高为25 m，长为2000 m，蓄水量为 500 hm^3 ，集水面积为 800 km^2 ，入库洪量为 $13\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，以上数据接近于世界上最大的同类别集水区。溢洪道泄洪量为每秒数千立方米。溃口长度为400 m，溃口处的洪峰流量为 $80\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。加之其他大坝溃决，数百万人的生活受到影响，数千人直接死于洪水溃决，还有许多人间接死于这次洪水溃决事故。由于通信故障导致没有进行有效报警。大坝在1991年进行了重建。

出人意料的是，5000座高于30 m的大坝在12起洪水造成的溃决事故(中国以外)中仅有数百人死亡，这些大坝的蓄水量为 $10\sim 400\text{ hm}^3$ (平均 100 hm^3)，且平均长度为250 m。死亡率低的原因可能是这些较高的大坝中，有95%的大坝建于1930年后，比低坝的质量更好，因此决口数量也较少。

以巴西的Euclides da Cunha大坝为例，该坝建于1958年，高为40 m，长为300 m，蓄水量为 25 hm^3 ，于1977年发生溃决。其集水面积为 4300 km^2 ，闸控溢洪道泄洪量为 $3000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，入库洪量为 $2000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。事故发生时，由于人为失误，导致在洪水满溢时没有开启闸

门。土石坝承受了深度达1 m的洪水漫溢7 h，溃口宽度仅有100 m。溃口处的洪峰流量约为 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，这导致Euclides da Cunha大坝发生溃决。庆幸的是，事故没有造成人员死亡。大坝在重建时增修了一个开敞式溢洪道。

上游小型水库(人工大坝或天然堰塞坝)突然泄水或溃决，导致的大型水库发生溃决经常被人忽略。

还有许多人员死亡是因下游没有接到任何上游开闸泄水信息而导致的。

3.3. 设计改进

通过在众多溃坝事故中得到的教训，1980年之后，水坝的设计在各个方面得到了改进，尤其是在开敞式溢洪道和应急自溃坝段的设计上。

传统的开敞式溢洪道，如古典形态的开敞式溢洪道，其泄洪量相对有限：对1 m深的溢流水舌，单宽泄洪量为 $2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ；对3 m深的溢流水舌，单宽泄洪量为 $10\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。近10年来，新型迷宫堰的泄洪量不断增加，如P.K.堰(见图2至图4)的单宽泄洪量已增加至上述泄洪量的3倍，并已应用于每秒数百或数千立方米的洪水泄洪中。同时，还可应用于超大型的水库，例如在刚果，



图1. Machu溃坝事故。



图3. 越南的Van Phong P.K.堰。



图2. P.K. Weirs模型测试。



图4. 法国的Malarce P.K.堰。

设计泄洪量高达 $70\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的Inga水库就采用了这一新型的迷宫堰。将迷宫堰技术应用于现有的开敞式溢洪道，增加了蓄水量和安全性[6]。

另外一种完全不同的开敞式泄洪方案已应用于低坝和小于 $100\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的泄洪中，该方案为：在长坝以上，以更小深度的溢流水舌进行泄洪。溢流面衬砌材料也是各种各样，从英国应用于 0.5 m 溢流水舌的草质材料，到美国应用于更深溢流水舌的碾压混凝土材料。事实上，压实良好的土坝已能够承受 0.3 m 深的溢流水舌持续 $1\sim 2\text{ h}$ 的冲刷。该解决方案的明显优势是，对于主要用于蓄水的低坝来说，可以大大增加其蓄水量；而且每立方米蓄水的成本也将大大减少，还能够以较低成本对下游坝趾进行更有效的保护。

近几十年来，出现了第3种解决方案——在闸控或开敞式溢洪道的传统解决方案基础上增加应急自溃坝段设施。应急自溃坝段是专为特大洪水设置的，其在特大洪水中自动溃决，并需在数周或数月内进行重建。其比闸控溢洪道成本低得多，在特大洪水中成为最常用的设施之一。

目前，全世界有约100座“土石”应急自溃坝段，大部分建于20世纪80年代，主要在中国和美国。这种应急自溃坝段的泄洪容量高达数千立方米，高度通常在 $5\sim 10\text{ m}$ 。此类设施具有较高的成本效益，但需要特殊地形；这一点也是其成功率有限的一个原因。由于所采用的材料不同，此类设施的持久性效力也参差不齐。

近20年来，混凝土应急自溃坝段已应用于约100座形状各异的大坝，泄洪量在每秒数百立方米(见图5)到数万立方米(见图6)。此类设施可应用于大多数水坝，包括现今的新型大坝。普通洪水可以溢过此类设施，当遭受百年一遇或千年一遇的洪水时，自溃堤可以自动溃决。混凝土应急自溃坝的成本较低，每秒每立方米所耗费的成本通常只占闸控坝成本的一小部分。自溃坝还可以建成各种形状，如迷宫形状(应急自溃坝段闸门)(见图7)。

随着开敞式溢洪道的不断改良，加之应急自溃坝段设施的低成本、高效益，可在应对特大洪水时将两种溢洪道相结合，并进行一定程度的评估。

若将迷宫式固定溢洪道(如P.K.堰)和应急自溃坝相结合，在应对同样深度的溢流水舌时，其泄洪能力将比传统的开敞式溢洪道增加5倍。

闸控溢洪道可设计用于年度泄洪，或与迷宫形开敞式溢洪道相结合，用于十年一遇洪水的泄洪。该设施平



图5. 小型水坝的混凝土应急自溃坝段：Burkina Faso的Webila水坝。



图6. 洪水溢出Wanak Bori大坝的自溃闸门。



图7. 总站自溃闸门(美国)。

时无需操作人员，只有在预见到可能发生大暴雨时，才在一年当中的这几天或几周安排人员对设施进行相应的管理和操作。

当遇到超大泄洪量时，如超过 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，可将闸控溢洪道设计为可抵御千年一遇的洪水，并结合应急

自溃坝段来抵御极端洪水或全部闸门阻塞的情况。这种解决方案成本较低并且比传统的全闸控式溢洪道更加安全。

通常情况下，与单个闸控溢洪道或单个开敞式溢洪道的传统方式相比，双溢洪道设计是更好的选择。但是现有的地方传统、通用标准或者政策法规(如传统的“设计洪水量”)可能会对这种选择造成阻碍。这时，安全校核洪水量的参考值则更为合理。

3.3. 因施工期间洪水导致的溃坝

一直以来，溃坝都是一种非常严重的风险，但其发生的原因通常会被忽视。低坝的水面以下部分通常在旱季修建，但根据以往报道，已发生过10起50 m以上的大库容土石坝在施工期间由于漫顶而溃决的事故，另外还有很多事故尚未报道。

溃决也一直与工期延误有关，并在水库蓄水过满时发生。

由于溃坝时水库水位不同，产生的影响也不同，因此漫顶的概率可能高于1%。

1961年，印度50 m高的Panshet土坝在溃坝时已经接近完工并且蓄水 200 hm^3 ，溃决造成超过1000人死亡以及下游 140 hm^3 库容的堆石坝溃决。

1961年，巴西54 m高、最大容量为 700 hm^3 的Oros堆石坝在水位为35 m时溃塌，下泄洪水总量为 100 hm^3 ，事故疏散10万人，超过100人溺亡。

在1964年，美国125 m高、最大库存容量为 2600 hm^3 的Hell Hole堆石坝在水位为40 m时溃塌，下泄洪水总量为 50 hm^3 。

1967年，印度尼西亚60 m高、最大库容为 56 hm^3 的Sempor堆石坝在建造过程中溃决并造成2000人死亡。

自1930年以来，半数以上的溃坝和大多人员死亡都是由于超过30 m高的土石坝在施工过程中发生漫顶。

2014年，津巴布韦Tokwe Mukosi心墙堆石坝在将要完工时发生漫顶，几近溃决，造成6万人流离失所。该坝高为90 m、库容为 1700 hm^3 ，如果发生溃决，将产生世界上最大的溃坝泄洪量(见图8)。

高土石围堰也存在巨大的风险。其风险是由于修建速度快，对地基维护不善，以致受到内部渗透破坏而导致溃坝。混凝土坝的土围堰通常会发生这种情况，且容易被忽视。

在工业化国家，传统的泄洪方式是在施工过程中对百年一遇的洪水进行导流。对于亚洲的大坝来说，由于泄洪量大且导流隧洞和围堰的造价较高，这可能不是最



图8. Tokwe Mukosi坝。

好的解决方案。在亚洲，每年大概有8个月是旱季，而高水位洪水仅可能在一两个月内发生。对于堆石坝来说，最好的解决办法可能是导流较小的洪水，并在枯水期完成大坝施工，在雨季水位接近坝顶的时候相应调整并允许洪水漫顶。该方法曾在越南Cua Dat坝的建造过程中成功使用，并能应用于许多堆石坝，此种方法可以大大减小大坝底部造价较高的导流洞。为避免即将完工的大坝溃塌，可在大坝的中间高度位置增设低成本的无衬砌水平向隧洞。

这些针对堆石坝的解决方案，包含了大部分高坝泄洪方案，在大多数国家，可能比传统方法成本更低且更加安全。对传统做法进行全面审查具有合理性。

3.4. 警报系统

除了在大坝设计方面的进步，报警系统的有效性也是保证人身安全的一个关键要素。当前，由于可以提前数日预测到暴雨、提前数小时预知可能发生的漫顶，加之全球高效的现代化通信体系，因此，报警系统可以很好地应用于洪水导致的溃坝预警中。这种警报系统对于百年一遇或者千年一遇的洪水也同样非常有效。气候变化可能会增加大洪水的发生概率。

如果有高效的警报系统，以往大多数由泄洪溃坝事故所造成的人员死亡都是可以避免的。

3.5. 其他土石坝溃坝事故

在中国以外的地区，除洪水外，造成溃坝的主要原因是内部的渗透破坏。由渗透破坏所造成的溃坝事故数量约为洪水溃坝事故的一半。虽然由这类溃坝造成的总死亡人数只占洪水溃坝死亡人数的10%，但内部渗透破坏产生的风险也不容忽视。1976年，美国90 m高的Teton大坝发生溃塌(见图9)。当日，30 000人在2 h内失去家园，10人溺亡。如果溃坝事故在夜晚发生，或将导



图9. Teton 大坝溃塌。

致成千上万人溺亡。1993年，中国的沟后大坝在晚上发生溃决，导致大量人员死亡。

另一个风险是地震导致沙质材料或大坝的地基液化。1961年，美国San Fernando大坝的溃决几乎形成灾难，造成数万人流离失所。

4. 混凝土坝溃决

目前，全世界(除中国外)大约有6000座“大型混凝土坝”，即高度超过15 m或库容超过3 hm³的大坝。在大约15起混凝土坝溃坝事故中，只有3座高于30 m。这些工程的溃坝均发生在1960年前，且地基状况恶劣，溃坝都发生在初次蓄水时。意大利的一起洪水导致的溃坝事故被媒体进行了报道：1985年，在被洪水漫顶2 m之后，15 m高、库容为10 hm³的Zerbino超薄重力坝发生溃决，造成100人死亡。而在同一座水库上的另一座40 m高的混凝土重力坝没有发生溃决。

由此可见，洪水导致的混凝土坝溃决概率似乎是非常低的，尤其是对于高度超过30 m的大坝，这一概率低于每年十万分之一。但溃决是突发性的，并且事先难以预测。

洪水对混凝土坝造成的风险主要是由高土石围堰所造成的。如果在施工期间允许混凝土坝发生漫顶，可能更为安全；很多大坝在施工中都经受过可预测或无法预测到的漫顶。

5. 砌石坝 (中国以外国家或地区)

目前，砌石坝的数量无法明确，可能有上千座，

主要以工业化国家在1930年前建成的重力坝为主，而在亚洲则是1980年前建成的重力坝。据以往报道，在发生的20起溃坝事故中，其中有7起是由洪水造成的，而事故大坝全部修建于1930年以前。与混凝土大坝通常在坝基溃决不同，砌石坝的溃决大多发生在坝体，这是二者的关键区别。对于高坝或低坝，特别是在安装了溢洪道闸门的情况下，洪水引发的风险一直居高不下。

6. 通过大坝泄洪

除中国外，约10%的大坝在一定程度上用于调蓄洪水，另外10%则专门用于泄洪(主要在美国)。由于气候变化可能会使年度降水概率增加10%或20%，从而洪量增加20%，因此许多国家对调蓄型大坝的需求可能会更高。现在百年一遇的洪水将来可能会十年一遇。将现有或新建的、主要用于水力发电或者灌溉的大坝，更好地用于调蓄洪水，可能更为有用。

合理的目标通常是将百年一遇的洪水峰值流量降低30%。一种最经济的解决方案是将一个闸控溢洪道(闸控泄水道可以排放一年洪水量或额外20%)与迷宫开敞式溢洪道结合。对于重要集水区，特大洪水的可能峰值流量可以提前数小时进行大致评估，并且提前1~2 h排水，以腾出洪水高峰的存蓄空间。

事实上，必要的库容通常较低。百年一遇的洪水总量不超过集水区上升0.1 m的蓄水总量，需要存储的约为洪水总量的20%，即集水区每平方千米吸收20 000 m³洪水量，这只是许多大坝的年度排放和库容量的一小部分(世界平均年度排放量为3×10⁵ m³·km⁻²)。

这种解决方案可能适用于许多现存的开敞式溢洪道：有可能将上半部分洪水每隔几米进行分割，并放置1或2道闸门和迷宫结构。这有利于调蓄洪水和保证大坝安全，并可能增加蓄水容量。

对于新大坝，将排放一年洪水量的闸控溢洪道和迷宫溢洪道组合使用，可能是最好的解决方案。可以通过增加自溃坝设施获得额外的安全性。

7. 现行设计标准和规定

所在国家不同，相关标准和规定常常不同，且往往基于以前的数据和传统。对于相同的地点，如果采用不同国家的规定，大坝设计可能发生变化。应该深入研究

以往经验和最新的解决方案。尽管目前的使用率不高，但将多个溢洪道相结合的方法不应被制止，因为这种方法前景广阔。

8. 结语

一直以来，一半的大坝溃决和大多数的人员伤亡都是洪水造成的，而且会随着气候变化对洪灾的影响而增大。对于混凝土大坝来说，洪水导致的溃坝风险较低，风险主要来自数千个库容超过 10 hm^3 的土石坝，特别是只有一个闸控溢洪道的大坝。近年来，在开敞式溢洪道、自溃坝和警报系统上的研究显得尤为重要。过去，将两个溢洪道相关联的做法常常遭到忽视，但这会提高大坝的安全性，并有利于调蓄洪水。因此，需要对现有的相

关规定做出深入审查，并在相关方面优化大坝设计。

在建设高土石坝期间，由洪水导致的风险常遭到忽视。传统的解决方案可能不适用于亚洲的情况。

References

- [1] ICOLD. Bulletin 82: selection of design flood. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 1992.
- [2] ICOLD. Bulletin 142: safe passage of extreme floods. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 2012.
- [3] ICOLD. Bulletin 83: cost impact on future dam design—analysis and proposals. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 1992.
- [4] ICOLD. Bulletin 99: dams failures. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 1995.
- [5] ICOLD. Bulletin 109: dams less than 30 m high. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 1997.
- [6] ICOLD. Bulletin 144: cost savings on dams. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 2010.