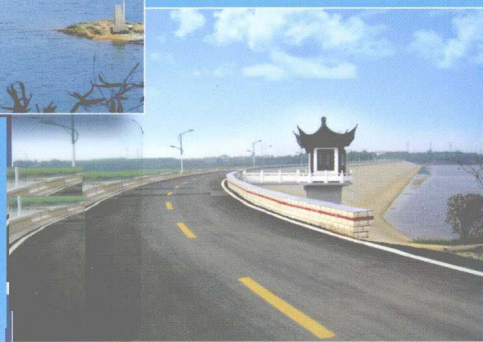


国家“十一五”科技支撑计划项目

——水库大坝病险与溃坝规律研究（2006BAC14B01）课题支持

# 水库大坝加固技术

谭界雄 高大水 周和清 位敏 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



国家“十一五”科技支撑计划项目  
——水库大坝病险与溃坝规律研究（2006BAC14B01）课题支持

# 水库大坝加固技术

谭界雄 高大水 周和清 位敏 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书是一部系统介绍水库大坝除险加固技术的专业书籍,从病险水库防洪安全加固、渗流安全加固、结构安全加固、抗震安全加固、金属结构安全加固等方面系统介绍了各种病害加固技术的设计要点、施工方法及应用实例,以及有关新技术、新方法、新材料的最新成果。本书介绍的各种加固技术,也可应用于其他水利工程的加固。

本书集理论与实践于一体,实用性强,可供从事水利水电工程设计、施工、科研、管理的专业人士及高等院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水库大坝加固技术 / 谭界雄等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.3  
ISBN 978-7-5084-8491-4

I. ①水… II. ①谭… III. ①水库—大坝—加固  
IV. ①TV698.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第052959号

书 名	水库大坝加固技术
作 者	谭界雄 高大水 周和清 位敏 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 23.25印张 552千字
版 次	2011年3月第1版 2011年3月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	65.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



## 前 言

我国已建水库 8.7 万多座，为全世界水库最多的国家。这些水库在防洪、灌溉、发电、城乡供水，以及生态环境改善等方面发挥了巨大作用，为我国国民经济建设和社会发展作出了重要贡献。但由于我国的水库大坝大多兴建于 20 世纪 50~70 年代，受当时条件的限制，普遍存在施工质量差、设计不合理、运行管理不善及工程自身老化等原因，致使约 40% 水库为病险水库。

大量病险水库的存在，不但影响水库效益的发挥，而且还严重威胁水库下游人民生命财产安全，病险水库已日益成为防洪体系中最为薄弱的环节和防洪安全的最大隐患，除险加固已十分必要和迫切。

我国政府历来十分重视水库大坝安全与病险水库除险加固工作。早在“75·8”大洪水后，1976~1985 年就实施了以提高防洪标准为主的水库大坝除险加固工程。1986 年和 1992 年又分别确定了第一批、第二批全国重点病险水库除险加固工程。1998 年大洪水后，我国政府加快了病险水库除险加固工作的实施步伐，组织有关部门于 2010 年 7 月编制完成了《全国病险水库加固专项规划报告》，按轻重缓急的原则分期分批实施病险水库除险加固，2007 年 7 月对该报告进行了修编。全国病险水库除险加固作为中央补助项目，一期安排了 1346 座，二期安排 6240 座大中型及重点小（1）病险水库进行加固，计划于 2010 年全部完成，目前大部分已完工并发挥效益。今后一段时间内还将对余下病险水库进行除险加固工作。

病险水库的除险加固所采用工程技术、设计方法，与新建水库工程存在较大差异，甚至比新建水库工程更为复杂、技术难度更大，许多技术为专门技术，目前还没有相应技术规范，有的水库经过多次加固仍然难以达到设计要求的运用条件。为此，长江水利委员会长江勘测规划设计研究院于 2003 年成立了水利水电病险工程治理咨询研究中心，专门从事水利水电病险工程的勘测设计、咨询和加固技术研发等工作。本书编著者多年来从事水库大坝安全评价、加固设计咨询，现探索性地将水库大坝除险加固技术作一系统性的总结，以期对我国水库大坝安全与加固有所裨益。

本书根据我国病险水库的主要病害特点，从病险水库防洪安全加固、渗流安全加固、结构安全加固、抗震安全加固、金属结构安全加固等方面，系统阐述了各种病害常用加固技术的设计要点、施工方法及应用实例，并介绍了有关新技术、新方法、新材料等，力求能系统指导病险水库除险加固工程的设计与施工。

在本书编写过程中，得到了编著者所在单位——长江水利委员会长江勘测规划设计研究院领导的大力支持，水利水电病险工程治理咨询研究中心的同志提供了不少帮助；书中引用的众多病险水库加固的工程案例，有的是国内同仁的大坝加固技术智慧结晶，而大多案例是编著者与同事共同的劳动成果，陈彦生同志参加了本书的校审，在此一并表示感谢！

由于时间仓促，本书会有疏漏和谬误之处，诚挚欢迎广大读者予以批评指正。

**编著者**

2010年11月





# 目 录

## 前言

<b>1 概述</b> .....	1
1.1 我国水库大坝发挥的重要作用 .....	1
1.1.1 防洪减灾 .....	1
1.1.2 灌溉、供水 .....	2
1.1.3 水力发电 .....	2
1.1.4 航运、水产养殖业及旅游 .....	2
1.2 水库大坝安全的重要性 .....	2
1.3 我国水库大坝安全现状 .....	3
1.4 水库大坝主要病害特点 .....	4
1.5 水库大坝加固技术概况 .....	6
1.5.1 土石坝加固技术 .....	6
1.5.2 重力坝加固技术 .....	9
1.5.3 拱坝加固技术 .....	10
1.5.4 金属结构加固改造 .....	11
1.6 我国病险水库加固技术规律的统计 .....	11
参考文献 .....	12
<b>2 防洪安全加固</b> .....	13
2.1 常见防洪安全问题 .....	13
2.1.1 挡水安全问题 .....	13
2.1.2 泄水安全问题 .....	14
2.1.3 典型案例 .....	15
2.2 工程等级及防洪标准 .....	15
2.2.1 工程等级划分 .....	15
2.2.2 建筑物防洪标准 .....	16
2.3 防洪安全加固技术 .....	18
2.3.1 土石坝加高 .....	18
2.3.2 重力坝加高 .....	21
2.3.3 拱坝加高 .....	28
2.3.4 增加泄洪能力 .....	29
2.3.5 防洪安全复核 .....	32

参考文献	54
<b>3 渗流安全加固</b>	<b>55</b>
3.1 常见渗流安全问题	55
3.1.1 土石坝渗流病害特点	56
3.1.2 混凝土坝渗流病害特点	56
3.1.3 溢洪道渗流病害特点	57
3.2 渗流控制设计标准	58
3.2.1 土石坝渗流控制设计标准	58
3.2.2 混凝土及砌石坝渗流控制设计标准	61
3.2.3 溢洪道渗流控制设计标准	66
3.3 土石坝防渗加固	67
3.3.1 概述	67
3.3.2 混凝土防渗墙	69
3.3.3 高压喷射灌浆	87
3.3.4 劈裂灌浆防渗	98
3.3.5 土工膜防渗	105
3.3.6 膏状稳定浆液灌浆	115
3.4 浆砌石坝防渗加固	120
3.4.1 概述	120
3.4.2 渗漏原因、危害及分类	121
3.4.3 加固处理措施	122
3.5 混凝土坝防渗加固	131
3.5.1 概述	131
3.5.2 渗漏调查	132
3.5.3 渗漏成因分析和处理的判断	133
3.5.4 渗漏处理设计与施工要点	134
3.6 溢洪道基础防渗加固	138
3.7 基础防渗帷幕灌浆	139
3.7.1 概述	139
3.7.2 帷幕灌浆分类	139
3.7.3 设计要点	140
3.7.4 施工方法	144
3.7.5 工程实例	147
参考文献	153
<b>4 结构安全加固</b>	<b>156</b>
4.1 常见结构安全问题	156
4.1.1 土石坝结构病害特点	156
4.1.2 混凝土坝及砌石坝结构病害特点	157
4.1.3 溢洪道结构病害特点	158

4.1.4	水工隧洞结构病害特点	158
4.2	大坝结构安全加固标准	159
4.2.1	土石坝结构安全标准	159
4.2.2	重力坝结构安全标准	159
4.2.3	拱坝结构安全标准	160
4.2.4	溢洪道结构安全标准	161
4.2.5	水工隧洞结构安全标准	163
4.3	土石坝结构安全加固	164
4.3.1	概述	164
4.3.2	坝坡稳定加固	164
4.3.3	坝体填土性能提高	169
4.3.4	坝体裂缝处理	171
4.3.5	土石坝护坡加固与改造	178
4.3.6	土石坝白蚁防治	180
4.3.7	混凝土面板堆石坝加固	181
4.4	重力坝结构安全加固	192
4.4.1	重力坝结构安全加固措施	192
4.4.2	重力坝结构安全加固实例	194
4.5	拱坝结构安全加固	196
4.5.1	拱坝结构安全加固措施	196
4.5.2	拱坝结构安全加固实例	197
4.6	溢洪道结构安全加固	218
4.6.1	广西扶绥县客兰水库溢洪道加固	218
4.6.2	山东马河水库溢洪道喷射混凝土加固	219
4.6.3	河南赵湾水库溢洪道底板加固	220
4.7	水工隧洞结构安全加固	221
4.7.1	安徽卢村水库泄洪隧洞加固	222
4.7.2	湖北石门水库低输水管加固	224
4.7.3	黑龙江九佛沟水库放水洞加固	225
4.8	混凝土缺陷处理技术	226
4.8.1	裂缝处理与修补技术	226
4.8.2	混凝土碳化防治技术	247
4.9	钢筋混凝土结构安全加固技术	250
4.9.1	结构加固技术的发展	250
4.9.2	结构加固的基本原则及主要内容	251
4.9.3	结构加固方法	253
4.9.4	粘钢加固技术	256
4.9.5	粘贴纤维复合材料 (FRP) 加固技术	261
4.9.6	预应力加固技术	265
	参考文献	266



<b>5 抗震安全加固</b>	268
5.1 震害及特点	268
5.1.1 土石坝震害及特点	268
5.1.2 重力坝震害及特点	278
5.1.3 拱坝震害及特点	281
5.2 抗震安全复核	284
5.2.1 抗震安全复核标准	285
5.2.2 土石坝抗震安全复核	289
5.2.3 重力坝和拱坝抗震安全复核	292
5.2.4 其他建筑物抗震安全复核	293
5.3 抗震安全加固技术	294
5.3.1 土石坝抗震安全加固技术	294
5.3.2 重力坝和拱坝抗震安全加固技术	302
参考文献	303
<b>6 金属结构安全加固</b>	305
6.1 闸门和启闭机的类型及工作条件	305
6.1.1 常用闸门的类型和工作条件	305
6.1.2 启闭机的类型和工作条件	306
6.2 常见金属结构安全问题	309
6.3 金属结构检测	310
6.3.1 抽样检测的数量	310
6.3.2 检测的内容	311
6.4 闸门及启闭机的更换与报废	312
6.4.1 闸门	312
6.4.2 启闭机	313
6.5 金属结构加固	314
6.5.1 门叶加固	314
6.5.2 埋件加固	320
6.5.3 启闭设备加固	327
6.5.4 金属结构防腐蚀处理	327
6.5.5 金属结构复核计算	342
参考文献	360

# 1 概 述

## 1.1 我国水库大坝发挥的重要作用

我国幅员辽阔，河流众多，地形气候变化复杂，水文气象条件各异，降水与河川径流时空分布不均，水旱灾害频繁。1949年新中国成立以来，党和政府高度重视水利工作，领导人民开展了大规模的水利工程建设，兴建了大量的水库大坝，取得了举世瞩目的成就。这些水库大坝在历年的防洪抗旱、农田灌溉、城乡供水、发电以及改善生态环境等方面发挥了巨大作用，为我国国民经济建设和社会发展作出了重要贡献。

目前，我国的水库大坝数量居世界之首，据统计，已建成各类水库约 8.7 万座，其中大型水库 510 座，中型水库 3260 座，小型水库 83315 座；坝高 15m 以上的水库约 2.63 万座，坝高 30m 以上的水库 5191 座。现有水库总库容约 6000 亿  $\text{m}^3$ ，相当于全国河流年径流总量的 1/5，水库防洪保护范围内有人口 3.1 亿人、大中城市 132 座、农田 4.8 亿亩，水库年供水能力 2400 亿  $\text{m}^3$ ，为 2.4 亿亩耕地、100 多座大中城市提供了可靠水源。水库大坝工程遍及全国，在防洪、灌溉、发电、城乡供水、航运、水产养殖和旅游等方面发挥了巨大的经济效益。中国以占世界 7% 的耕地养育了占世界 22% 的人口，水库大坝工程功不可没。

### 1.1.1 防洪减灾

我国是世界上洪水危害严重的国家之一。据历史记载，从公元前 206 年到 1911 年的 2117 年间，长江共发生大范围的洪灾 214 次，平均 10 年一次。1931 年和 1935 年洪水，中下游平原分别淹地 5090 万亩和 2264 万亩，人口死亡分别达到 14.55 万人和 14.2 万人，1931 年汉口被淹 3 个月。1954 年大洪水，在堤防有所加强，广大军民大力防守、抢救和采取分洪措施的情况下，分洪和堤防漫溃的洪量达 1000 余亿  $\text{m}^3$ ，有 4755 万亩农田被淹，受灾人口达到 1888 万人，因灾直接死亡 3.3 万人，京广铁路有 100 天不能正常运行。

新中国成立后，党中央和国务院非常重视江河防洪工程建设，修建了大量的拦截江河的水库大坝工程，发挥显著的防洪作用。

据初步统计，分布在我国七大江河上的 245 座大型水库控制总流域面积的 34%，基本实现对常遇洪水的有效控制。以 2003 年为例，全国各类水库大坝拦蓄洪水 447 亿  $\text{m}^3$ ，减免受灾人口 1.1 亿人，减免受灾面积 355 万  $\text{hm}^2$ ，减免县级以上城市进水 445 个，直接减灾效益达 1130 亿元。

### 1.1.2 灌溉、供水

据初步统计,全国农田有效灌溉面积达到 8.67 亿亩,为我国的粮食生产和粮食安全保障作出了重要贡献。

在供水方面,全国水库每年为工业、农业提供水量约 5000 亿  $\text{m}^3$ ,为城乡人民生活 and 工业提供水量约 1300 亿  $\text{m}^3$ ,其中农业供水量占主要部分。水库已成为我国很多城镇和农村饮用水的主要水源。水库大坝有效解决了我国一些地方的饮用水困难问题,保障了人民群众的用水安全。

### 1.1.3 水力发电

目前,水电是仅次于煤炭的第二大常规能源,也是第一大清洁可再生能源。新中国成立后特别是 1978 年改革开放以来,党中央国务院高度重视水能资源的开发利用,推动水电事业快速发展。到 2010 年,中国已建水电装机容量达到 2.0 亿 kW,位居世界第一,发电量将近 6000 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,占全国总发电装机容量的 20%、总发电量的 15% 左右。水库大坝产生的电能为我国工农业生产和人民生活作出了重大贡献。

### 1.1.4 航运、水产养殖业及旅游

水库大坝在航运、水产养殖业及旅游等方面产生了较大的效益。如重庆至宜昌 660km 的川江航道共有碍航滩险 139 处,严重制约了航运发展。三峡水库蓄水后,这些滩险被淹没,航道条件大为改善,万吨级船队有半年时间可直达重庆,使川江航道的年运量由蓄水前的 1000 万 t 增加到 5000 万 t,且运输成本降低 35%~37%。

水库在水产养殖业及旅游也发挥了较大效益。如新安江水库 2008 年渔业销售收入 4000 多万元。水库千岛湖旅游接待游客 261.5 万人,旅游收入 30.7 亿元。

## 1.2 水库大坝安全的重要性

目前我国正处于全面建设小康社会的战略机遇期,随着我国社会与经济的进步与发展,对水库大坝的安全性要求也越来越高。由于水库受地质、水文、设计、施工及运行管理等诸多因素影响,以及工程自身的老化等问题,水库大坝存在的缺陷和溃坝风险一直是无法回避的事实。在世界筑坝史上,曾发生过一些惨痛的溃坝事件。例如 1975 年 8 月我国淮河流域因历史罕见暴雨发生的板桥、石漫滩两座大型水库溃坝,1976 年美国的 Teton 土石坝溃决,1959 年法国马尔帕塞 (Malpasset) 薄拱坝溃决等都造成了惨重的人员伤亡和重大的经济损失。因此,水库大坝安全成为世界各国必须共同面对的问题。

水库大坝一方面可储蓄水资源,为人类所利用;另一方面,水库大坝安全一旦出问题,发生垮坝失事,将给其下游人民生命财产带来巨大损失,给社会稳定和国民经济发展带来很大的负面影响,甚至影响社会稳定。

据统计,我国兴建的 8.7 万座水库中有 43.7% 为病险水库,虽经过多年除险加固处理,截至 2007 年底仍有 3 万余座病险水库。自 1954 年以来共垮坝 3496 座,给人民生命

财产和国民经济建设造成了巨大损失。如：1963年河北省海河流域发生大暴雨洪水，5座中型水库发生垮坝，93座小型水库跨坝，死亡1464人，造成约60亿元的经济损失。1975年河南省淮河和长江流域发生了大暴雨洪水，2座大型水库发生垮坝，2座中型水库跨坝，60座小型水库跨坝（图1.1~图1.3）。其中板桥水库（大型水库）垮坝损失最为惨重，死亡达2.6万人，受伤达9万多人，造成国民经济损失约达100亿元，堪称近代水利史上的一次重大灾难。青海省沟后水库大坝高71m，库容330万 $m^3$ ，下游地广人稀。1993年8月沟后水库大坝失事后（图1.4），仍然死亡320多人（全县共约3万多人），给当地人民群众的生命财产造成巨大损失。



图 1.1 河南板桥水库溃口（1975）

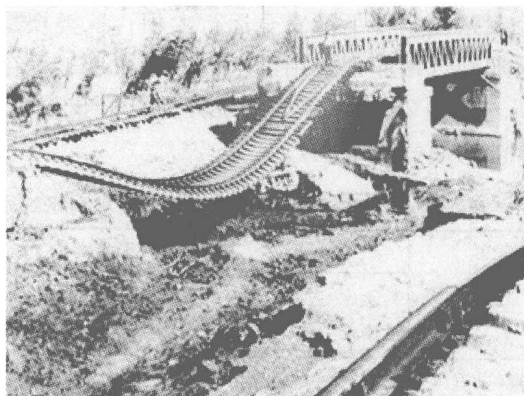


图 1.2 京广铁路路基被损坏 100 多公里（1975）



图 1.3 河南汝南县城被淹（1975）



图 1.4 青海沟后水库溃口（1993）

大量病险水库的存在，已成为影响经济社会发展的制约因素，水库大坝安全属于国家重大公共安全问题。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》指出：“加强对突发公共事件快速反应和应急处置的技术支持”，将“公共安全”列为重点领域及优先主题。

### 1.3 我国水库大坝安全现状

我国水库大坝绝大多数建于 20 世纪 50~70 年代，受当时经济技术条件限制，工程建

设标准低、质量总体偏差，以防洪和灌溉为主要功能发挥社会效益。长期以来，管理、维护和更新投入不足，老化失修严重，存在不少病险情和不安全因素。这不但影响水库的正常安全运行和效益的充分发挥，还会给下游人民群众生命财产带来严重威胁。很多病险水库位于城镇上游，是城镇人民头上的一“盆”水，一旦垮坝，将对下游城镇造成灭顶之灾。为此，水利部于1995年3月20日制定了《水库大坝安全鉴定办法》（水管〔1995〕86号），并于2003年6月进行了修订，按水库大坝安全状况分为一类、二类、三类坝。一类坝指实际抗御洪水标准达到防洪标准规定，大坝工作状态正常，工程无重大质量问题，能按设计正常运行的大坝；二类坝是指实际抗御洪水标准不低于部颁水利枢纽工程除险加固近期非常运用洪水标准，但达不到防洪标准规定，大坝工作状态基本正常，在一定控制运用条件下能安全运行大坝；三类坝是指实际抗御洪水标准低于部颁水利枢纽工程除险加固近期非常运用洪水标准，或者工程存在较严重安全隐患，不能按设计正常运行的大坝。截至2006年年底的统计情况，我国水利系统管理的水库大坝安全状态见表1.1（不含港、澳、台地区）。

表 1.1

我国水利系统水库大坝安全状况表

所属机构	大型水库		中型水库		小型水库				合 计	
	水库座数	病险水库	水库座数	病险水库	水库座数		病险水库		水库总座数	病险水库总座数
					小(1)型	小(2)型	小(1)型	小(2)型		
省(自治区、直辖市)	384	285	2920	2122	15162	66239	9058	26310	84705	37775
流域机构	10	2							10	2
合计	394	287	2920	2122	15162	66239	9058	26310	84715	37777

## 1.4 水库大坝主要病害特点

我国水库尽管数量众多，但占水库总数绝对多数的是中小型水库，其主要建筑物通常由挡水、泄水及输水建筑物等组成，少部分水库有发电建筑物。众多的水库大坝中，由于土石坝可以就地取材，施工方便，对坝址地形地质条件要求相对不高，大量中、小水库大坝采用土石坝，其次为砌石坝和混凝土坝；泄水建筑物多为独立的溢洪道，部分大型水库也有采用输水与泄洪相结合的涵管，中小型水库的输水建筑物多为坝下涵管或输水隧洞。由于种种历史原因，大量水库土石坝采用“土法上马”施工，坝体填筑质量较差，碾压密实度及渗透系数达不到标准，或大坝清基及坝基防渗处理不彻底，致使大坝运行后，下游坝坡或坝后基础出现渗漏、沼泽化，甚至出现管涌、流土、接触冲刷等渗透破坏，坝体出现裂缝或滑坡等问题。对于砌石坝、混凝土坝以及溢洪道和输水隧洞等，由于施工质量差或基础处理不完善，且随着使用年限的增长，大量出现碳化、裂缝、露筋、剥蚀、渗漏等问题，影响建筑物的结构安全和防渗安全。

笔者依托“十一五”国家科技支撑计划项目课题《病险水库除险加固信息管理与技术规律研究》，通过对全国水库安全状况调研及收集整理2300多座病险水库除险加固实例，

对水库大坝病害问题进行统计分析，归纳总结我国病险水库常见病害、多发病害主要为以下几个方面。

### (1) 水库防洪标准不满足规范要求。

这主要表现为：大坝坝顶高程不够或泄水建筑物泄洪能力不足。主要问题为：①随着水文资料系列的延长，设计洪水洪量、洪峰和洪水过程发生较大改变；②原设计洪水标准本身偏低，不满足现行规范要求；③泄水建筑物因过流断面偏小或淤塞等原因，其泄洪能力不足；④泄水建筑物存在安全隐患，不能正常泄洪；⑤因社会经济变化，泄水建筑物下游无行洪通道，无法泄洪等。

### (2) 水库大坝稳定和强度不满足规范要求。

这主要表现为：土坝坝坡滑坡，重力坝、拱坝结构变形、裂缝等。主要问题为：①土石坝坝坡偏陡；②土石坝坝体填筑质量差，坝体填料抗剪强度偏低，影响坝体抗滑稳定；③重力坝由于材料老化和地基条件恶化，沿建基面或基础深层结构面抗滑稳定安全性不够；④浆砌石坝砌筑质量差，影响大坝整体性；⑤混凝土或浆砌石重力坝坝基帷幕和排水失效或部分失效，造成扬压力升高，大坝的抗滑稳定性及结构安全裕度下降；⑥拱坝坝肩单薄或存在软弱结构面以及坝肩稳定性不足。

### (3) 水库大坝渗漏严重，渗流或渗漏影响大坝安全。

这主要表现为：土石坝坝体长期存在渗漏、管涌、散浸、流土；甚至有的坝脚存在沼泽化；浆砌石坝下游坝面及坝内廊道漏水；重力坝、拱坝坝体坝基渗漏，甚至发生大量析钙。主要问题为：①土石坝土质防渗体渗透性不满足规范要求；②土石坝下游无排水棱体或失效；③坝下涵管管壁与坝体接触部位由于设计或施工等原因发生接触冲刷；④土石坝坝基、坝肩清基不彻底，坝基基岩未采取渗控措施或防渗措施设计不合理；⑤浆砌石坝砌体不密实，上游防渗面板混凝土裂缝，止水破坏；⑥重力坝混凝土施工质量差，混凝土存在蜂窝、空洞、裂缝等问题，导致大坝混凝土渗漏；坝体结构接缝灌浆质量不好，造成大坝结构的整体性差，或由于设计时未考虑库水水质对混凝土的浸蚀性，经过几十年运行，混凝土及帷幕灌浆的钙质大量流失，防渗性能下降；⑦由于施工方案不合理或拱坝坝肩基础处理不完善，导致坝体两端拱座附近出现竖向贯穿坝体上下游的裂缝，或因坝体坝基防渗处理不完善等造成拱坝坝体坝基渗漏和坝肩绕坝渗漏。

### (4) 泄水、输水建筑物结构稳定与强度不满足规范要求。

这主要表现为：溢流坝闸墩结构裂缝、变形；泄槽出现冲蚀破坏；下游冲刷破坏严重；输水隧洞衬砌出现裂缝、冲蚀、漏水，涵管出现漏水、裂缝甚至断裂。主要问题为：①溢流坝闸墩结构单薄，混凝土强度低；泄槽未衬砌或衬砌质量差；泄槽底板基础变形，混凝土裂缝甚至坍塌；消能工未完建或无行洪通道；②输水隧洞衬砌结构施工质量差、强度低或设计不完善；③涵管基础差，不均匀变形严重，涵管结构强度低等。

### (5) 抗震标准不够。

这主要表现为：大坝等建筑物抗震安全性低；安全系数不满足规范要求；遭遇地震时，坝体出现裂缝、沉陷、变形和滑塌；土石坝中细砂或少黏性土存在液化可能，降低坝坡抗滑稳定性。主要问题为：①在水库大坝建设时期，对地震设防认识不足，或根本就没有考虑地震设防安全措施；②地震设防标准低，不满足现行规范要求，遇地震易产生纵、

横向裂缝或震陷。

(6) 闸门、启闭机设备老化、锈蚀严重。

这主要表现为：部分闸门高度不满足挡水要求；闸门变形、锈蚀、结构强度不足；启闭机不能正常启闭。主要问题为：①部分水库在建坝时，因水文资料的缺乏与变化，现复核时闸门高度不满足要求，或水库调度的改变，造成闸门高度不够；②闸门因长期运行老化，锈损严重，导致结构构件截面积减少，结构强度、刚度、稳定性降低、承载力下降，使构件产生变形；③启闭设备老化、启闭力不足，闸门的行车轮、导向轮锈死或不灵活，影响闸门正常启闭。

(7) 管理与监测设施陈旧落后或不完善。

这主要表现为：①水库无或未经审批的防洪和兴利调度运用规程，或未按审批的防洪和兴利调度运用规程进行水库调度；②管理制度不完善，运行机制不健全，事企不分；③水库的水文测报、大坝观测系统不完善，或监测设施陈旧、失效、损坏严重，甚至没有水文测报及观测设施；④运行管理人员技术素质差，责任心不强，管理监测手段落后；⑤管理经费缺乏，工程缺乏维护更新。

(8) 工程老化。

随着工程运行时间增长，受材料老化、地基条件恶化以及极端气候条件等自然因素的影响，引起结构破损，强度降低，水库大坝产生老化病害。随着时间推移，我国多数水库运用已达 40~50 年，有的结构属于老化程度严重和使用寿命后期，水库大坝的加固维修和更新改造是保证水库大坝安全运行和减缓工程老化、延长工程寿命的基本措施。

## 1.5 水库大坝加固技术概况

我国水库大坝数量大、分布广，坝型多，病害成因、险情各异，这必然导致水库大坝加固技术复杂、难度大，涉及面广、针对性强。近年来，国家安排大量资金、人力、物力对病险水库进行除险加固，取得了良好的效果和社会效益。笔者依托“十一五”国家科技支撑计划项目课题《病险水库除险加固信息管理与技术规律研究》，通过对 2300 多座病险水库除险加固实例及其加固效果的统计分析，总结了我国水库大坝加固技术与方法。

### 1.5.1 土石坝加固技术

#### 1.5.1.1 提高防洪标准的加固技术

根据水文资料进行水库大坝的设计洪水复核和调洪计算成果，并按现行规范复核大坝坝顶高程。土石坝坝顶高程不够时，则须对大坝进行加高处理。提高土石坝防洪标准的加固措施主要有以下两种方法。

(1) 通过无防浪墙的大坝坝顶上游加设防浪墙。

(2) 加高大坝坝体，加高分为以下 3 种方式。

1) 在原大坝下游培厚并加高坝顶。这种方式不影响水库蓄水，也不受水库蓄水限制。丹江口水利枢纽工程左岸土石坝加高就是采用下游培厚加高的方式。

2) 在原大坝上游面培厚大坝并加高坝顶。这种方式适用大坝上游坝坡抗滑稳定不满



足规范要求或下游坝坡地形、地物不容许培厚加高的条件。在水库大坝上游坡培厚加高须降低库水位或放空水库，限于降水设施的限制或库区取水的需要，在设计中应研究合适的施工控制库水位。

3) 戴帽加高。在土石坝坝体加高高度相对不大，且原坝体的填筑质量较好、坝坡抗滑稳定有一定安全裕度时，可采用在坝顶戴帽加固的方式。

### 1.5.1.2 防渗加固技术

土石坝防渗加固措施可分为水平防渗和垂直防渗两大类，其原则是上堵下排，使其渗透坡降不超过允许坡降，保持土体的渗透稳定。目前，我国水库土石坝常用的防渗加固处理措施主要有混凝土防渗墙、高压喷射灌浆、劈裂灌浆、土工膜及其他防渗加固方式。

#### 1. 混凝土防渗墙

混凝土防渗墙加固土石坝，主要是采用钻凿、抓斗等方法，在坝体或地基中建造槽型孔后，浇筑成连续的混凝土墙，达到防渗的目的。防渗墙加固可以适应各种不同材料的坝体和各种复杂的地质条件，两端能与岸坡防渗设施或基岩相连接；墙体穿过坝体及基础覆盖层嵌入基岩一定深度，彻底截断坝体及坝基的渗透水流。混凝土防渗墙适用性广，实用性强，施工条件要求较宽，耐久性好，防渗可靠性高，现广泛应用于我国病险水库土石坝防渗加固，如江西油罗口水库，湖北陆水水库、青山水库，安徽卢村水库、钓鱼台水库等均采用混凝土防渗墙防渗加固，取得很好的防渗效果。安徽卢村水库大坝为黏土心墙砂壳坝，最大坝高 32m，由于心墙填筑质量差，大坝清基不彻底及左坝肩断层带未做防渗处理等原因，大坝下游坝脚多处出现渗漏。坝体采用混凝土防渗墙、坝基帷幕灌浆防渗加固后，经过近 3 年的运行观测，坝体下游及坝肩渗水全无，渗流监测资料显示，防渗墙截渗效果良好。

#### 2. 高压喷射灌浆

利用钻机钻孔，喷射管下至土层的预定位置喷射出的高压射流冲切破坏土体，喷射流导入水泥浆液与被冲切土体掺搅凝固，在地基中按设计的方向、深度、厚度及结构形式与地基结合成紧密的凝结体，起到加固地基和防渗的目的。高压喷射灌浆适用于淤泥质土、粉质黏土、粉土、砂土、砾石、卵（碎）石等松散透水地基或填筑体内的防渗工程，因具有可灌性好、可控性好、适应性广、设备简单及对施工场地要求不高等特点，目前国内病险土石坝防渗加固采用此法的工程较多，如广西客兰水库、布见水库、三利水库等大坝均采用高喷灌浆防渗加固。广西布见水库大坝为黏土心墙坝，最大坝高 28.97m，由于坝体填筑质量较差，坝体坝基及坝下输水涵管存在渗漏问题，渗流不满足安全要求，水库一直低水位运行。大坝采用“高压喷射灌浆+基岩帷幕灌浆”防渗加固后，经过近 2 年的运行观测，坝脚渗漏消失。但应注意的是，高压喷射灌浆防渗效果受地层条件、施工工艺及技术参数等影响较大，需要通过现场高喷试验确定其施工技术参数，对施工队伍的素质要求较高，对含有较多漂石或块石的地层，慎重使用。

#### 3. 劈裂灌浆

坝体劈裂灌浆是在土坝沿坝轴线布置竖向钻孔，采取一定压力灌浆将坝体沿坝轴线方向（小主应力面）劈开，灌注适宜的压力泥浆形成竖直连续的浆体防渗泥墙，从而达到防渗加固的目的。该加固方法技术机理明确，施工简便、工效高、费用省，目前部分地区已

应用于病险水库土坝和险堤工程。但一般只适用于坝高 50m 以下的均质坝和宽心墙坝，要求在低水位下进行施工；灌浆压力不易控制，灌浆过程中坝体易出现失稳、滑坡；灌入坝体中的泥浆固结时间较长，耐久性较差；对施工队伍的经验要求较高。

#### 4. 土工膜

土工膜是一种由高聚合物制成的透水性极小的土工合成材料，具有很好的防渗性、弹性和适应变形的能力，能承受不同的施工条件和工作应力，广泛应用于水库大坝和堤防的防渗工程中，在混凝土坝或碾压式混凝土坝的修补中，作为防渗护面也逐渐增多，且已从低坝向高坝发展。我国先后在云南省李家营水库和福建省犁壁桥水库土坝采用土工膜进行防添加固后，取得了良好的防渗效果。西班牙的波扎捷洛斯拉莫斯堆石坝，坝高 97m，采用了土工膜防渗，并获得成功。

#### 1.5.1.3 坝坡稳定加固

土石坝坝坡稳定加固处理前，应根据坝坡不稳定的原因，针对具体情况采取相应的措施，其原则是设法减少滑动力与增加抗滑力，加固处理措施可概括为“上部减载、下部压重”。土石坝坝坡加固主要采取消坡或培坡放缓，增设防渗、排水设施，置换筑坝材料以及加密坝体等措施来提高坝坡稳定性。

#### 1.5.1.4 抗震加固

土石坝抗震加固主要分为坝体震害裂缝处理、渗漏处理、滑坡处理和液化处理等内容。目前较为普遍和行之有效的坝体滑坡抗震加固技术措施主要有放缓坝坡、压重固脚、导渗排水、置换筑坝材料和加密坝体等措施。根据坝体具体震害情况，采取经济合理的抗震加固措施，其原则是设法减小滑动力与增加抗滑力，提高坝体材料的抗剪强度，增大抗震稳定安全性。

地震时，对于可能发生液化破坏的土层和坝基，查明其分布范围和危害程度，根据工程的类型和具体实际情况，采用加固技术进行处理。目前，液化抗震加固处理技术主要有置换法、振冲加密法、强夯法、抛石压重、砾石或碎石排水井法以及其他方法。1977 年密云水库白河土坝抗震加固时，清除坝上游面可液化砂砾层，采用石渣料回填。1998 年密云水库潮河土坝抗震安全加固时水下部分采用抛石压坡，水上部分用石渣料替换斜墙上游保护层砂砾料。安徽花凉亭水库大坝砂壳填筑相对密度较低，经动力分析表明，上游坝坡砂土在 VII 度地震作用下存在地震液化区，最大液化深度达 10m。经分析研究，在上游坝坡采用块石压重、石渣料帮坡以及放缓坝坡，提高坝坡水下砂土的抗液化能力及坝坡的稳定性。

#### 1.5.1.5 护坡加固

护坡是土石坝坝体结构重要的组成部分，由于长期受风浪、水浸、冻融、坝体变形等影响，容易发生破坏。护坡加固时可根据现场实际及损坏情况采取局部翻砌维修、细石混凝土或砂浆灌注加固、拆除新建等工程措施。上游护坡可采用块石护坡、现浇混凝土护坡及预制混凝土块护坡；下游护坡可采用草皮护坡、格构草皮护坡、块石护坡、现浇混凝土护坡及预制混凝土块护坡等。对于具有旅游、生态功能的水库，加固时上下游坝坡应选用具有美化、生态功能的护坡形式。