

# 混凝土面板堆石坝 安全监测技术实践与进展

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 混凝土面板堆石坝 安全监测技术实践与进展

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本论文集收入混凝土面板堆石坝安全监测技术研讨会上的 31 篇文章。主要涉及混凝土面板堆石坝建设 25 年的回顾与展望,高新技术在安全监测方面的应用,基于实际工程原型监测资料的混凝土面板堆石坝性状判断及预测,监测资料的分析,以及一些重要高坝的设计实践和对坝料本构关系及流变模型等的研究成果。论文资料翔实,分析论证有据,对混凝土面板堆石坝建设和管理中有疑义的问题提供了一些破解的途径和线索。

本论文集对从事混凝土面板堆石坝的设计、施工、科研人员及大专院校师生都是有价值的参考文献。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土面板堆石坝安全监测技术实践与进展/中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会编著. —北京:中国水利水电出版社,2010.7

ISBN 978-7-5084-7712-1

I. ①混… II. ①中… III. ①混凝土面板堆石坝-安全监察-文集  
IV. ①TV641.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 137957 号

|      |                                                                                                                                                                                                                           |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 混凝土面板堆石坝安全监测技术实践与进展                                                                                                                                                                                                       |
| 作 者  | 中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会 编著                                                                                                                                                                                                |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www. waterpub. com. cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub. com. cn</a><br>电话: (010)68367658(营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010)88383994、63202643<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                                        |
| 排 版  | 中国人民大学出版社印刷厂                                                                                                                                                                                                              |
| 印 刷  | 北京海洋印刷厂                                                                                                                                                                                                                   |
| 规 格  | 184mm×260mm 16 开本 19.25 印张 456 千字                                                                                                                                                                                         |
| 版 次  | 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷                                                                                                                                                                                         |
| 印 数  | 0001—1000 册                                                                                                                                                                                                               |
| 定 价  | 50.00 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

# 混凝土面板堆石坝安全监测技术实践与进展

## 编纂委员会

主 编 蒋国澄 周建平

副 主 编 杨泽艳 孙永娟 黄晓辉 翁新雄

编 委 (按姓氏笔画排列)

王亚文 卢立生 孙永娟 孙 役 余 挺

吴晓铭 陈振文 李洪泉 芮淮丰 张宗亮

沈益源 周建平 杨启贵 杨和明 杨泽艳

赵增凯 徐泽平 翁新雄 黄晓辉 梅锦煜

蒋国澄 蒋 涛

责任编辑 芮淮丰

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会  
2010 年学术年会暨混凝土面板堆石坝安全监测技术研讨会

**主办单位：**

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会  
水电水利规划设计总院

**协办单位：**

大连理工大学  
中国水利水电第十一工程局有限公司  
中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院  
湖北华清电力有限公司  
中国水利水电科学研究院岩土所

中国 大连  
2010. 8. 15~19

# 前 言

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会(以下简称专委会)2010年学术年会在大连召开,并以已建高混凝土面板堆石坝的安全监测技术及运行实态为主题进行学术研讨。同时适逢中国开始采用现代技术修建混凝土面板堆石坝25年的日子。为了回顾已经走过的历程,展望更为美好的前景,专委会组织了这次活动,得到了业内同仁的热烈响应。

混凝土面板堆石坝以其安全性、经济性和适应性优良而得到坝工界同仁的普遍认同。据不完全统计,到2009年底,中国已建坝高30m以上的混凝土面板堆石坝约170座,其中坝高100m以上的近40座;在建、拟建的坝高30m以上的各约40座。高233m的水布垭坝,是世界已建最高混凝土面板堆石坝。中国的混凝土面板堆石坝建设,在数量、高度、规模和技术难度等方面,均居世界前列。由于大坝的原型安全监测及运行实态是评价大坝安全及指导大坝运行的基本手段,也是累积筑坝经验、验证和完善设计理论和施工技术的重要信息源,备受参建各方的重视,在建设过程中有丰富的积淀,这是开好这次会议的坚实基础。

这次会议收到论文32篇,其中专委会委托杨泽艳编写,并经有关专家审改的《中国混凝土面板堆石坝25年》,是对中国建设混凝土面板堆石坝过程中取得的成就、经验、科技成果和存在问题的全面回顾,以及对未来的展望。

其他31篇论文中,有6篇讨论监测设施、信息管理和工程实态;有15篇结合具体工程讨论安全监测技术、监测成果分析、运行实态;有10篇讨论工程设计、分析计算及堆石料的本构模型,都是会议主旨的表述,对中国现代混凝土面板堆石坝的发展趋势提供了有价值的信息。

邴能惠的“中国高混凝土面板堆石坝安全监测”一文,对中国混凝土面板堆石坝安全监测和运行实态进行了综述。文中基于中国高混凝土面板堆石坝的原型监测资料,提出以一系列特征值表征大坝的实测性状,可进行不同工程之间的相互比较,判断其工作性状,并给出了大致的数值范围,这是一个好的建议。文中还根据监测性状,指出堆石坝变形仍是主要因素,变形协调原则极为重要,而堆石体性状预测仍需提高。

吴毅瑾等的论文《汶川地震中水电工程安全监测设施的震损与分析》报道了地震区22座装机大于30MW水电站的调研成果。这些水电站地区的地震烈度在6~11度之间,包括心墙土石坝、混凝土面板堆石坝、碾压混凝土拱坝、

混凝土重力坝和闸坝等多种型式的水利工程。结果表明在 9 度以下的 17 座工程中,仅 1 座监测设施受到严重损害,有些工程情况不详外,多数损害轻微。在 10~11 度区的紫坪铺工程损害也属轻微。在 10 度及 11 度区的 4 座工程中,有 3 座属严重或较重损害。并有工程及监测设施震损实例,可供今后地震区的工程借鉴。

混凝土面板堆石坝的安全监测已受到普遍的重视,较高的坝都有较为完整的监测系统。除改进传统的监测设施以适应高混凝土面板堆石坝的需要外,能提高监测精度和便于自动化监测的新型监测技术已有不少研发和应用,如分布式光纤监测渗流、光纤陀螺仪测面板挠度等。张宗亮、钟登华的论文《超高面板堆石坝监测信息管理与安全评价的理论与实践》报道了所研发的天生桥一级坝的信息管理与安全评价系统,将数据库与三维模型联系起来进行三维可视化分析,用三种预测模型分析的结果与实测值接近,该系统已投入运行,达到实用程度。高新技术在安全监测技术及其自动化、海量监测数据与复杂信息管理、预测预报、反馈分析等方面的应用已成趋势。

会议论文中提供了近 10 座高混凝土面板堆石坝的安全监测成果及其初步分析。这些坝运行都比较正常。紫坪铺工程还经受了 9~10 度强地震的考验,从实践上论证了混凝土面板堆石坝从本质上是安全的论断。但也有些坝发生过后期有害变形较大,混凝土面板裂缝及挤压破坏、渗流量偏大等问题。从监测数据所显示的信息可以对一些有疑义的问题提供破解的线索。

1) 变形控制是高混凝土面板堆石坝安全的关键,而主要措施是提高坝料的压实密度和变形模量,设置预沉降期对减少后期有害沉降有一定作用。对高坝,下游堆石区的变形对面板有较大影响。天生桥一级坝总体压实度较低,平均孔隙率在 22%~25%,下游堆石区使用了较多软岩,且其填筑又较上游区滞后太多,因而发生垫层料表面裂缝、面板脱空和结构性裂缝、面板挤压破坏等问题。而其后修建的高坝,如水布垭、洪家渡、滩坑、吉林台一级等,采用了质量较好的坝料,压实孔隙率多在 19%~21%左右,也注意了下游堆石区的质量和填筑过程,问题相对较少。流变、劣化等长期变形现象也与压实密度有直接关系。

2) 面板脱空问题。在天生桥一级发现面板有与垫层料脱空的问题以后,引起了普遍的关注,都设置了监测脱空值的仪器。发现这是面板与坝体变形不协调所致,是不可避免的,但其程度与坝体填筑的密实度有关。有施工期和运行期两种情况。施工期是与面板分期施工有关的现象,在先期浇筑面板的顶部与垫层脱空,这是与填筑体下部向外鼓胀而上部向内收缩的变形形态有关,可采取浇筑面板时上部填筑体顶部超填、设置预沉降期及续浇前将脱空部位充填处理等措施解决。运行期的脱空则与水位变化有关,水位降落时大而

水位上升时小,只要坝体有正常的压实,就不会有危害性的后果,如水布垭、三板溪、洪家渡、董箐等的监测资料都说明没有明显的脱空。

3) 面板挤压破坏问题。监测数据表明混凝土面板基本上是一个双向受压的构件,仅顶部及周边有不大的拉应力区。在坝轴线方向,由两岸向河床方向变形,一般在最大断面附近有一个轴向变形为零的中和点,也是坝轴线方向严重受挤压的区域。顺坡向压应力较大的区域一般在  $1/2 \sim 1/3$  坝高处。在变形过程中积累的应变能,加上曝晒时的温度应力、地震时的动应力等,就有可能在接缝等薄弱处发生挤压破坏。天生桥一级、三板溪、紫坪铺等工程运行实态都是相同机制的表现。近期修建的坝已采取了提高压实密度以减少变形量、设置收缩缝、改进接缝的细部构造等措施,找到了破解的途径。

4) 根据实际监测资料进行反分析,以反演计算参数、验证计算分析方法、预测预报坝的运行性状等,可以在监测和论证坝的安全性和优化运行调度方案、验证和改进分析计算和设计理论和方法、对施工过程较长的工程实行信息化设计和施工、对建设和运行进行科学化管理等方面发挥积极作用。对资料管理、反分析方法和模型、预测预报等都有不少探讨和创新。论文集中水布垭、三板溪、洪家渡、紫坪铺、巴贡、董箐、察汗乌苏等坝都有所报道。

5) 理论与实践的结合,经验判断与科学实验和分析计算相结合的发展趋势在这次的论文集中表现比较明显。传统上认为混凝土面板堆石坝是一种经验坝型,以经验判断为主,有当时坝的规模和技术难度不大,且科技进步尚不足以说明复杂的大坝性状的历史背景。当代岩土工程理论、计算技术、科学实验手段都以高新技术进行改造,揭示事物本质的能力大为提高。目前虽达不到用计算确定设计的程度,但可以在定性上说明一些规律性的东西,以补充经验的局限与不足,是有益的。

这次会议的论文集虽篇幅不大,但都以实际工程丰富的监测资料为依据,讨论业内同仁关注的问题,进行深入分析和探讨,提出了很多破解问题的线索和措施。深入阅读和研究,定然得益非浅。未来任重而道远,需各界同仁共同努力,使混凝土面板堆石坝的建设和管理更上层楼。

编者

二〇一〇年六月

# 目 录

## 前言

中国混凝土面板堆石坝 25 年…… 中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会 1

|                                     |                |     |
|-------------------------------------|----------------|-----|
| 中国高混凝土面板堆石坝安全监测 .....               | 邴能惠            | 21  |
| 汶川地震中水电工程安全监测设施的震损与分析 .....         | 吴毅瑾 杨泽艳 李福云    | 43  |
| 超高面板堆石坝监测信息管理与安全评价的理论及实践 .....      | 张宗亮 钟登华        | 55  |
| 高混凝土面板堆石坝安全监测若干问题的讨论 .....          | 谭恺炎            | 62  |
| 高面板坝安全监测问题的探讨 .....                 | 颜义忠            | 68  |
| 面板堆石坝内部沉降监测方法简述 .....               | 陈树联 魏鹏 黄燕妮 顾永明 | 76  |
| 水布垭高面板堆石坝安全监测技术与运行状态分析 .....        | 叶查贵 杨启贵 赵卫     | 80  |
| 水布垭高面板堆石坝监测新技术应用 .....              | 闫生存 李芳 于祥明     | 88  |
| 200m 级高面板堆石坝变形与应力反演研究 .....         | 朱晟             | 92  |
| 水布垭大坝垂直位移计自动供水系统 .....              | 尤迎春 邓邦龙        | 102 |
| 马来西亚巴贡大坝安全监测设计及成果综述 .....           | 陈树联 顾永明 张雷     | 106 |
| 巴贡水电站面板堆石坝原型观测资料反演分析 .....          | 米占宽 李国英 邴能惠    | 115 |
| 三板溪混凝土面板堆石坝安全性态分析 .....             | 徐泽平 邓刚 赵春      | 127 |
| 洪家渡水电站面板堆石坝运行状态分析与研究 .....          | 蔡大咏 何平 湛正刚     | 136 |
| 天生桥一级面板堆石坝情况及工程启示 .....             | 罗井伦 叶全文 胡松 包亚军 | 142 |
| 5.12 汶川地震紫坪铺面板堆石坝静动力初步反演分析 .....    | 朱晟 杨鸽 周建平 宋彦刚  | 148 |
| 电位器式位移计在滩坑水电站工程坝基监测中的应用 .....       | 葛晓春 范庆来        | 159 |
| 董箐水电站面板堆石坝运行状态初步分析 .....            | 湛正刚 夏遵全 蔡大咏    | 163 |
| 察汗乌苏水电站面板堆石坝坝体及坝基施工期沉降监测及分析初探 ..... | 王雪樵            | 169 |
| 察汗乌苏坝面板变形及钢筋应力监测初步分析 .....          | 段爱萍            | 178 |
| 渗漏探测电缆在麦洛维大坝中的应用 .....              | 帅永健            | 203 |
| 我国混凝土面板堆石坝 25 年进展的几点回顾 .....        | 赵增凯            | 209 |
| 马来西亚巴贡水电站面板堆石坝设计综述 .....            | 王君利 范建朋等       | 221 |
| 天生桥一级混凝土面板堆石坝设计与实践 .....            | 张宗亮 冯业林 王远亮    | 229 |
| 察汗乌苏水电站深覆盖层上面板堆石坝三维有限元分析 .....      | 孙大伟 刘君健 邴能惠 田斌 | 238 |
| 甘肃洮河九甸峡混凝土面板堆石坝设计特点和运行情况 .....      | 吕生玺            | 252 |
| 那兰混凝土面板砂砾石坝设计、实践与创新 .....           | 冯业林 李云 李娟      | 258 |

|                              |                 |     |
|------------------------------|-----------------|-----|
| 高面板堆石坝面板脱空计算分析·····          | 张丙印 钱晓翔 张宗亮 冯业林 | 265 |
| 土石坝粗粒料静力本构模型验证分析 ·····       | 朱晟 王永明          | 272 |
| 变应力条件下堆石料的流变模型研究 ·····       | 朱晟 王永明 徐骞       | 280 |
| 滩坑水电站混凝土面板堆石坝施工期坝体变形特征 ····· | 陈振文 彭育          | 290 |

# 中国混凝土面板堆石坝 25 年

(中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会)

**摘 要:** 2010 年是中国引进现代筑坝技术建设混凝土面板堆石坝的第 25 年。25 年来中国混凝土面板堆石坝技术稳步、快速发展,走过了一条“引进消化、自主创新、突破发展”之路。中国面板堆石坝数量最多,几乎遍布全国,最大坝高、工程规模和技术难度都处于世界前列。在设计、施工、科研、监测和恶劣自然条件建坝等方面积累了丰富的经验,坝体变形控制、渗流控制、面板防裂等方面也取得了瞩目的成就,筑坝技术逐渐成熟,并正在向更高面板堆石坝方向发展。本文从建设概况、技术进展、经验教训、发展方向等方面进行简要总结。

## 1 建设概况

### 1.1 数量和分布

中国从 1985 年引进现代技术建设混凝土面板堆石坝(以下简称面板堆石坝)以来,筑坝技术稳步、快速发展,走过了一条“引进消化、自主创新、突破发展”之路。据不完全统计,截至 2009 年底,中国坝高 30m 以上面板堆石坝已建约 170 座,在建、拟建各约 40 座。100m 以上高坝统计情况分别见表 1、表 2 和表 3。

**表 1** 中国已建混凝土面板堆石坝统计表(坝高 $\geq 100\text{m}$ ,截至 2009 年底)

| 序号 | 坝 名           | 地 点           | 河 流 | 坝 高<br>(m) | 坝体积<br>(万 $\text{m}^3$ ) | 面板面<br>积( $\text{m}^2$ ) | 库 容<br>(亿 $\text{m}^3$ ) | 装机容<br>量(MW) | 开工<br>年 份 | 建成<br>年 份 |
|----|---------------|---------------|-----|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-----------|-----------|
| 1  | 水布垭           | 湖北巴东          | 清江  | 233        | 1526                     | 138400                   | 45.8                     | 1600         | 2002      | 2008      |
| 2  | 三板溪           | 贵州锦屏          | 清水江 | 185.5      | 962                      | 84032                    | 40.94                    | 1000         | 2001      | 2007      |
| 3  | 洪家渡           | 贵州黔西、织金       | 六冲河 | 179.5      | 920                      | 72100                    | 49.47                    | 600          | 2000      | 2005      |
| 4  | 天生桥一级         | 贵州兴义、<br>广西隆林 | 南盘江 | 178        | 1800                     | 172700                   | 102.57                   | 1200         | 1991      | 2000      |
| 5  | 滩坑            | 浙江青田          | 小溪  | 162        | 960                      | 95000                    | 41.9                     | 600          | 2003      | 2008      |
| 6  | 吉林台一级         | 新疆尼勒克         | 喀什河 | 157        | 836.2                    | 75300                    | 25.3                     | 460          | 2001      | 2006      |
| 7  | 紫坪铺           | 四川都江堰         | 岷江  | 156        | 1117                     | 108800                   | 11.12                    | 760          | 2000      | 2006      |
| 8  | 龙首二级<br>(西流水) | 甘肃张掖          | 黑河  | 146.5      | 270                      | 26884                    | 0.862                    | 157          | 2001      | 2005      |
| 9  | 瓦屋山           | 四川洪雅          | 周公河 | 138.76     | 316.73                   | 20000                    | 5.843                    | 240          | 2003      | 2007      |

续表

| 序号 | 坝名    | 地点             | 河流    | 坝高<br>(m) | 坝体积<br>(万 m <sup>3</sup> ) | 面板面<br>积(m <sup>2</sup> ) | 库容<br>(亿 m <sup>3</sup> ) | 装机容<br>量(MW) | 开工<br>年份 | 建成<br>年份 |
|----|-------|----------------|-------|-----------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|----------|----------|
| 10 | 九甸峡   | 甘肃卓尼、渭河、<br>临潭 | 洮河    | 136.5     | 303                        |                           | 9.43                      | 300          | 2005     | 2008     |
| 11 | 龙马    | 云南墨江、江城        | 李仙江   | 135       | 386                        |                           | 5.904                     | 285          | 2004     | 2007     |
| 12 | 乌鲁瓦提  | 新疆和田           | 喀拉喀什河 | 133       | 649.53                     | 75800                     | 3.47                      | 60           | 1995     | 2001     |
| 13 | 珊溪    | 浙江文成           | 飞云江   | 132.5     | 580                        | 70000                     | 18.24                     | 200          | 1997     | 2001     |
| 14 | 公伯峡   | 青海循化、化隆        | 黄河    | 132.2     | 450                        | 57528                     | 6.2                       | 1500         | 2001     | 2006     |
| 15 | 引子渡   | 贵州平坝           | 三岔河   | 129.5     | 310                        | 37500                     | 5.31                      | 360          | 2000     | 2005     |
| 16 | 街面    | 福建尤溪           | 尤溪    | 126       | 340                        |                           | 18.2                      | 300          | 2003     | 2006     |
| 17 | 鄂坪    | 湖北竹溪           | 泗河    | 125.6     | 286.1                      | 43912                     | 3.027                     | 114          | 2003     | 2006     |
| 18 | 白溪    | 浙江宁海           | 白溪    | 124.4     | 403                        | 48370                     | 1.684                     | 18           | 1996     | 2001     |
| 19 | 黑泉    | 青海大通           | 宝库河   | 123.5     | 586                        | 79000                     | 1.82                      | 12           | 1996     | 2001     |
| 20 | 芹山    | 福建周宁           | 穆阳溪   | 122       | 248                        | 42000                     | 2.65                      | 70           | 1997     | 2001     |
| 21 | 白云    | 湖南城步           | 巫水    | 120       | 170                        | 22120                     | 3.6                       | 54           | 1992     | 2001     |
| 22 | 古洞口   | 湖北兴山           | 古夫河   | 117.6     | 188                        |                           | 1.4                       | 45           | 1993     | 1998     |
| 23 | 芭蕉河一级 | 湖北鹤峰           | 芭蕉河   | 115       | 192                        |                           | 0.99                      | 34           | 2002     | 2006     |
| 24 | 泗南江   | 云南墨江           | 泗南江   | 115       | 258                        | 75000                     | 2.63                      | 200          | 2003     | 2007     |
| 25 | 金造桥   | 福建屏南           | 金造溪   | 111.3     | 175                        | 35000                     | 0.945                     | 60           | 2005     | 2006     |
| 26 | 高塘    | 广东怀集           | 白水河   | 110.7     | 192                        | 26400                     | 0.96                      | 36           | 1994     | 2000     |
| 27 | 双沟    | 吉林抚松           | 松江河   | 110.5     | 258                        |                           | 3.88                      | 280          | 2002     | 2006     |
| 28 | 察汗乌苏  | 新疆和静           | 开都河   | 110       | 396.24                     | 45500                     | 1.25                      | 309          | 2005     | 2009     |
| 29 | 那兰    | 云南金平           | 藤条江   | 108.7     | 259                        | 40800                     | 2.86                      | 150          | 2002     | 2006     |
| 30 | 茄子山   | 云南龙陵           | 苏帕河   | 106.1     | 140                        | 22000                     | 1.26                      | 16           | 1995     | 1999     |
| 31 | 鱼跳    | 重庆南川           | 大溪河   | 106       | 195                        | 30000                     | 0.952                     | 48           | 1998     | 2002     |
| 32 | 洞巴    | 广西田林           | 西洋江   | 105       | 316                        |                           | 3.15                      | 72           | 2003     | 2007     |
| 33 | 鲤鱼塘   | 重庆开县           | 桃溪河   | 105       | 197                        | 25300                     | 1.0433                    | 15           | 2002     | 2005     |
| 34 | 思安江   | 广西桂林           | 思安江   | 103.4     | 220                        | 41236                     | 0.8869                    | 12           | 2000     | 2004     |
| 35 | 洮水    | 湖南茶陵           | 沔水河   | 102.5     | 172                        | 26900                     | 0.525                     | 69           | 2008     | 2009     |
| 36 | 盘石头   | 河南鹤壁           | 淇河    | 102.2     | 548                        | 75000                     | 6.08                      | 10           | 2000     | 2005     |
| 37 | 柴石滩   | 云南宜良           | 南盘江   | 101.8     | 242                        | 38200                     | 4.37                      | 60           | 1994     | 2001     |
| 38 | 白水坑   | 浙江江山           | 江山港   | 101.3     | 150.8                      | 24000                     | 2.462                     | 40           | 2001     | 2004     |

表 2 中国在建混凝土面板堆石坝统计表(坝高 $\geq 100\text{m}$ ,截至 2009 年底)

| 序号 | 坝 名   | 地 点       | 河 流  | 坝 高<br>(m) | 坝体积<br>(万 $\text{m}^3$ ) | 面板面<br>积( $\text{m}^2$ ) | 库 容<br>(亿 $\text{m}^3$ ) | 装机容<br>量(MW) | 开 工<br>年 份 |
|----|-------|-----------|------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|------------|
| 1  | 江坪河   | 湖北鹤峰      | 溇水   | 219        | 704                      |                          | 13.66                    | 450          | 2006       |
| 2  | 卡基娃   | 四川木里      | 木里河  | 171        | 586                      | 61036                    | 3.859                    | 440          | 2009       |
| 3  | 巴山    | 重庆城口      | 任河   | 155        |                          | 58000                    | 3.17                     | 140          | 2005       |
| 4  | 梨园    | 云南香格里拉、玉龙 | 金沙江  | 155        | 778                      |                          | 8.05                     | 2400         | 2009       |
| 5  | 马鹿塘二期 | 云南麻栗坡     | 盘龙江  | 154        | 689.31                   |                          | 5.46                     | 400          | 2004       |
| 6  | 董箐    | 贵州贞丰、关岭   | 北盘江  | 150        | 959                      |                          | 9.55                     | 880          | 2005       |
| 7  | 溪古    | 四川九龙      | 九龙河  | 144        |                          |                          | 0.9986                   | 249          | 2009       |
| 8  | 吉音    | 新疆于田      | 克里雅河 | 134.7      |                          |                          | 0.8                      | 240          | 2008       |
| 9  | 苏家河口  | 云南腾冲      | 槟榔江  | 133.75     | 640                      | 60592                    | 2.25                     | 315          | 2005       |
| 10 | 肯斯瓦特  | 新疆玛纳斯     | 玛纳斯河 | 129.4      | 755                      |                          | 1.91                     | 100          | 2009       |
| 11 | 纳子峡   | 青海大通      | 大通河  | 121.5      |                          |                          |                          | 87           | 2009       |
| 12 | 中梁一级  | 重庆巫溪      | 大宁河  | 118.5      |                          |                          | 0.9859                   | 72           | 2005       |
| 13 | 石头峡   | 青海门源      | 大通河  | 114.5      |                          |                          | 9.85                     | 90           | 2008       |
| 14 | 潘口    | 湖北竹山      | 堵河   | 114        | 311                      | 46000                    | 23.38                    | 513          | 2007       |
| 15 | 苗家坝   | 甘肃文县      | 白龙江  | 111        |                          |                          | 2.68                     | 240          | 2007       |
| 16 | 多诺    | 四川九寨沟     | 白水江  | 108.5      |                          |                          | 0.5622                   | 100          | 2007       |
| 17 | 斜卡    | 四川九龙      | 踏卡河  | 108.2      |                          |                          | 0.8485                   |              | 2009       |
| 18 | 金家坝   | 重庆酉阳      | 甘龙河  | 102.5      | 243.4                    |                          | 1.58                     | 66           | 2008       |
| 19 | 积石峡   | 青海循化      | 黄河   | 100        | 288                      |                          | 2.635                    | 1020         | 2005       |

表 3 中国拟建混凝土面板堆石坝统计表(坝高 $\geq 100\text{m}$ ,截至 2009 年底)

| 序号 | 坝 名    | 地 点       | 河 流  | 坝 高<br>(m) | 坝体积<br>(万 $\text{m}^3$ ) | 面板面<br>积( $\text{m}^2$ ) | 库 容<br>(亿 $\text{m}^3$ ) | 装机容<br>量(MW) |
|----|--------|-----------|------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| 1  | 茨哈峡    | 青海兴海、同德   | 黄河   | 253        | 3150                     |                          | 41.04                    | 2000         |
| 2  | 猴子岩    | 四川康定      | 大渡河  | 223        |                          | 62130                    | 7.042                    | 1700         |
| 3  | 古贤     | 山西古县、陕西宜川 | 黄河   | 199        |                          |                          |                          | 2100         |
| 4  | 姚家坪    | 湖北恩施      | 清江   | 179.5      | 639.6                    | 67000                    | 4.3                      | 240          |
| 5  | 泸水     | 云南泸水      | 怒江   | 176        |                          |                          | 14.11                    | 2750         |
| 6  | 阿尔塔什   | 新疆阿克苏     | 叶尔羌河 | 163        |                          |                          | 28.07                    | 750          |
| 7  | 溧阳蓄能上库 | 江苏溧阳      | 芝麻沟  | 165        | 1575.73                  |                          | 0.1423                   | 1500         |
| 8  | 龙背湾    | 湖北竹山      | 官渡河  | 158.3      | 695                      | 81752                    | 8.3                      | 180          |
| 9  | 大柳树    | 宁夏中卫      | 黄河   | 156        | 1450                     | 164000                   | 98.6                     | 1740         |
| 10 | 牛牛坝    | 四川美姑      | 美姑河  | 155        | 456                      | 49800                    | 2.218                    | 80           |

续表

| 序号 | 坝名      | 地点            | 河流   | 坝高<br>(m) | 坝体积<br>(万 m <sup>3</sup> ) | 面板面<br>积(m <sup>2</sup> ) | 库容<br>(亿 m <sup>3</sup> ) | 装机容量(MW) |
|----|---------|---------------|------|-----------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------|
| 11 | 羊曲      | 青海兴海、贵南       | 黄河   | 147.5     |                            |                           | 15.68                     | 1100     |
| 12 | 碛口      | 山西临县、<br>陕西吴堡 | 黄河   | 140       | 920                        |                           | 125                       |          |
| 13 | 卜寺沟     | 四川马尔康         | 足木足河 | 130       |                            |                           | 2.48                      | 360      |
| 14 | 金佛山     | 重庆南川          | 柏子溪  | 118.5     | 329                        |                           | 1.03                      | 7.06     |
| 15 | 金川      | 四川金川          | 大渡河  | 112       | 401                        |                           | 4.88                      | 860      |
| 16 | 涪天河(加高) | 湖南江华          | 潇水   | 110       | 250                        |                           | 16                        | 150      |
| 17 | 柳树沟     | 新疆和<br>静、焉耆   | 开都河  | 106       |                            |                           | 0.77                      | 195      |
| 18 | 白沙      | 湖北竹溪          | 泉河   | 105.6     | 248.73                     |                           | 2.78                      | 45       |
| 19 | 坪上      | 山西定襄          | 滹沱河  | 105       |                            |                           | 3.221                     |          |
| 20 | 文登蓄能上库  | 山东文登          | 宫院子沟 | 101       | 473                        | 36500                     | 0.0924                    | 1800     |

中国已建、在建和拟建的面板堆石坝(坝高 $\geq 30\text{m}$ )分布在 29 个省(区、市)。建坝 10 座以上的有浙江、湖北、云南、新疆、重庆、四川、贵州和甘肃等,约占全国总数的 70%,其中浙江省最多,达 43 座。

已建面板堆石坝最高的是水布垭坝(湖北清江,坝高 233m),亦为目前世界最高的面板堆石坝,规模最大的是天生桥一级坝(南盘江,坝高 178m),坝顶长 1104m,填筑量约 1800 万  $\text{m}^3$ ,面板面积约 17.7 万  $\text{m}^2$ ,总库容 102.57 亿  $\text{m}^3$ ,最大泄洪流量 21750  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

已建趾板置于深厚覆盖层(近 50m)上最高的是九甸峡坝(甘肃洮河,坝高 136m),覆盖层防渗处理深度超过 70m 的是铜街子左副坝(四川大渡河,坝高 48m)。已建河谷最狭窄的 100m 以上高坝是龙首二级坝(也称西流水,甘肃黑河,坝高 146.5m),大坝长高比仅 1.3,河谷极不对称且边坡高陡的是洪家渡坝(贵州六冲河,坝高 179.5m,趾板边坡最高约 310m)。已建抗震设计烈度最高的是吉林台一级坝(新疆喀什河,坝高 157m),抗震设计烈度达 9 度。已经受高地震烈度考验的是紫坪铺坝(四川岷江,坝高 156m),地震烈度达 9~10 度。已建位于气温最低及温差最大地区的是莲花坝(黑龙江牡丹江,坝高 71.8m),极端最低气温为  $-45.2^{\circ}\text{C}$ ,年温差达  $82.7^{\circ}\text{C}$ ,日温差为  $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ;海拔最高的是查龙坝(西藏那曲河,坝高 39m),坝顶高程为 4388m;纬度最高的是山口坝(新疆哈巴河,坝高 40.5m),高于北纬  $48^{\circ}$ 。

中国面板堆石坝几乎遍布全国,涉及各种不利的地形、地质条件和气候条件,因其安全性、经济性和适应性良好而得到较普遍的推广应用,总体而言,工程设计和建设是成功的。因此,也积累了应对各种困难情况的经验和教训。中国面板堆石坝,无论在数量上、高度上和规模上,还是在技术难度上都处于世界前列。

## 1.2 发展阶段

1982 年,第十四届国际大坝会议在巴西召开,会上有国际专家介绍了部分面板堆石坝设计建设经验,从此现代面板堆石坝概念引入我国。1985 年,美国土木工程师协会年会在底特律召开,会上举行了一场面板堆石坝设计、施工和运行的专题学术讨论会,系统介绍了面板堆石坝设计和施工技术。会后出版了面板堆石坝论文专辑,发表文章 37 篇。这次会议对各国面板堆石坝的发展有重大影响。1985 年我国启动西北口面板堆石坝(湖北黄柏河,坝高 95m)试点工程。以此为标志,一般认为我国现代面板堆石坝技术起步于 1985 年。

中国的现代面板堆石坝,按技术发展,大致可分为引进消化、自主创新和突破发展等 3 个阶段。

1985~1990 年为引进消化阶段。这一阶段开工建设的面板堆石坝有西北口、关门山(辽宁小汤河,坝高 58.5m)、沟后(青海恰卜恰河,坝高 71m,重建坝高 55m)、株树桥(湖南浏阳河,坝高 78m)、成屏一级(浙江松阴溪,坝高 74.6m)、龙溪(浙江始丰溪,坝高 58.9m)、横山加高(浙江县江,坝高 70.2m)、铜街子左副坝、小干沟(青海格尔木河,坝高 55m)和广州蓄能上库(广东从化,坝高 68m)等,约有 14 座。此前已开工建设的柯柯亚(新疆柯柯亚河,坝高 41.5m)和罗村(浙江胥溪,坝高 58m)等坝,坝体断面、填筑参数和施工工艺等还有传统技术的痕迹。

西北口坝作为现代面板堆石坝筑坝技术的试验项目,列入国家“七五”科技攻关课题,开展了大量试验研究和计算分析,取得了 100m 级面板堆石坝研究成果,在筑坝技术方面积累了经验与教训。建成后的西北口面板堆石坝运行情况总体良好,为这一阶段的里程碑工程。这一阶段的特点有:筑坝技术虽起步较晚,但起点较高;已有无轨滑模、碾压砂浆固坡等少量技术开发和创新;最大坝高不超过 100m;开始起草设计导则,向规范化建设迈出了第一步;对面板堆石坝特性的认识不足,面板混凝土裂缝较多,发生溃坝的沟后坝和面板严重坡损的株树桥坝都是在这一阶段建成,说明设计和施工还存在一定的缺陷。

1991~2000 年为自主创新阶段。这一阶段开工建设的面板堆石坝约有 70 余座,如万安溪(福建万安溪,坝高 93.8m)、天生桥一级、白云、东津(江西东津水,坝高 85.5m)、古洞口、白溪(浙江白溪,坝高 124.4m)和珊溪等坝,建成 40 多座。其中古洞口是第一座坝高大于 100m 的面板堆石坝。

天生桥一级坝为中国第一座 200m 级高面板堆石坝,列入“六五”国家科技攻关开展了大量设计和施工技术研究,经 5 年多的努力,取得大量研究成果,为这一阶段的里程碑工程。这一阶段的特点有,从西北口坝面板混凝土裂缝问题到沟后溃坝事件中总结了大量宝贵的经验和教训;建成了多座坝高 100m 及以上高坝,100m 级高坝的筑坝技术日益成熟;自主创新了设计、施工成套技术,并开始向 200m 级高坝发展;面板混凝土温度和干缩性裂缝得到较好控制;编制和发布了面板堆石坝及接缝止水等设计和施工规范;坝体变形控制尚缺乏经验,面板产生结构性裂缝的工程还比较多,相关技术问题引起了普遍重视和研究。

2000~2010 年为突破发展阶段。这一阶段开工建设的坝超过 120 座,建成的坝超过 110 座,已建 150m 以上高坝达 6 座,如洪家渡、紫坪铺、三板溪(贵州清水江,坝高

185.5m)、吉林台一级、水布垭和滩坑(浙江欧江,坝高162m)等坝。这一阶段,株树桥坝面板破损,出现严重渗漏;和天生桥一级坝面板垂直缝多次发生挤压破坏,这些工程缺陷对安全运行构成威胁,但在分析原因和进行修补过程中,也取得了大量的十分难得的经验与教训。

修建于非对称狭窄河谷上的洪家渡高坝,采用合理断面分区和较高密实度设计指标,引入先进的冲碾压实技术,严格变形控制和施工质量管理,取得了坝体变形小、面板无结构性裂缝、总渗漏量较小的良好效果。“八五”国家科技攻关“200m级高混凝土面板堆石坝研究”依托水布垭坝开展了全方位的科学研究,取得突破性研究成果,建后的大坝运行性态总体较好,为这一阶段的里程碑工程。这一阶段的主要特点有:最大坝高突坡200m,深厚覆盖层上建坝高度突破100m;150m级高坝技术日益成熟,取得200m级高坝筑坝的全套技术;坝体变形控制和面板防裂取得良好效果;紫坪铺大坝经受了汶川特大地震的考验;面板堆石坝设计和施工等规范开始新一轮修订;中国面板堆石坝技术水平跃居世界前列,筑坝技术走出国门,承建了巴贡(马来西亚)、麦洛维(苏丹)等国外大型面板堆石坝工程;组织开展了300m级高面板堆石坝适应性和对策研究。

### 1.3 技术成就

中国面板堆石坝工程建设和技术进步过程中,一方面紧跟世界先进潮流,另一方面十分重视自主创新的科学研究和技术开发。自国家“六五计划”开始,高面板堆石坝筑坝关键技术就被列入国家重点科技攻关项目、国家自然科学基金重点课题以及水利水电行业重点科研课题,一大批勘测设计单位、施工企业、科研院所和高等院校联合起来,共同组织全国科技力量,对面板堆石坝建设中的关键技术问题,进行了大量和系统的科学研究,探索了中国特色的面板堆石坝筑坝新技术。依托在建或拟建的高坝工程,解决了一系列重大技术难题,极大地促进了面板堆石坝在中国的发展。为及时总结工程经验,有关部门在已有碾压式土石坝设计与施工规范的基础上,针对面板堆石坝筑坝技术的特点组织编制了相应的设计和施工规范,建立了面板堆石坝筑坝技术标准体系。目前,尚有部分规范在进一步制订或修订中。

混凝土面板堆石坝专业委员会在中国大坝协会、中国水力发电工程学会、中国水利学会、水电水利规划设计总院、水利水电土石坝工程信息网及其他学术团体、科研机构和企业单位的大力支持和共同努力下,几乎每年都要举办形式多样、内容丰富的学术交流活动。1995年和2005年召开了“中国面板堆石坝10年和20周年纪念会议”。1993年、2000年和2009年先后在北京、成都等地成功举办国际大坝委员会支持下的国际面板堆石坝学术研讨会。这些活动对推动中国面板堆石坝发展发挥了巨大作用。

25年来,近万篇科技论文公开发表,多部学术专著出版发行,多项面板堆石坝技术成果获得发明专利、实用新型专利和国家科技进步奖,一些代表性工程和典型工程还获得了全国优秀工程勘察设计奖、鲁班奖及詹天佑奖。所有这些说明,中国面板堆石坝筑坝技术创出了一条更加安全可靠、更加经济高效的自己的道路。中国面板堆石坝的建设成就为世界面板堆石坝的发展做出了贡献,得到了国际坝工界的广泛认同。面板堆石坝筑坝技术已走出国门,推向世界。

## 2 主要技术进展

### 2.1 坝址选择和坝体布置

中国面板堆石坝的坝址选择充分考虑了地形地质条件、水文气象条件、天然建材来源等多种因素。实践证明,面板堆石坝往往以其安全性好、适应性强、经济性优而成为主要比较坝型,甚至是首选坝型。

#### 2.1.1 河谷形态

面板堆石坝对坝址地形条件的适应性很强,已建工程河谷形态差异较大。坝址一般选择在顺直河段,也有在河湾地段,分别如小干沟、龙首二级等坝。位于宽缓河谷上的有梅溪(浙江梅溪河,长高比约 16.3)、山口(长高比约 13.6)、莲花(长高比约 12.6)等坝。位于狭窄河谷上的坝有龙首二级(长高比约 1.3)、古洞口(长高比约 1.6)等坝。位于狭窄非对称及高陡边坡河谷上的有洪家渡等坝。局部不利地形条件可以采取技术措施进行改造。

#### 2.1.2 大坝及趾板轴线

坝轴线一般采用直线,有时根据地形地质条件也可布置成折线,或采用直线与曲线的组合,在抽水蓄能电站水库挡水坝上后者尤为多见,如十三陵(北京昌平)、泰安(山东泰安)、琅琊山(安徽滁州)、沙河(江苏溧阳)和溪口(浙江奉化)、大塙(江西石溪水)和铜街子左副坝等坝,这些工程目前运行情况良好。巴山坝(重庆任河,坝高 155m),其坝轴线布置成折线。

面板堆石坝对地质条件的要求主要是选择合适的趾板轴线。一般情况下,趾板应建于地基稳定、坚硬完整、不冲蚀和可灌浆的弱风化至新鲜基岩上。前期工作中,通过沿趾板线进行地质钻探,查明其基本地质条件,尽量避开不良地质岩体和存在严重地质缺陷的地段。施工过程中,结合开挖揭露的地质条件,进一步研究评价趾板地基地质缺陷的处理方案。地基处理难度大时,还可对趾板轴线进行微调。

#### 2.1.3 泄水建筑物布置

泄水建筑物位置及型式的选择是面板堆石坝枢纽工程设计中的关键之一。首选超泄能力较大的岸边开敞式溢洪道,如天生桥一级、引子渡(贵州三岔河)等工程。受地形地质条件限制,也有采用开敞式进口洞式溢洪道,如洪家渡工程;或有压进水口泄洪洞,如白云工程。面板堆石坝枢纽是否一定要布置开敞式进口溢洪建筑物,虽然尚存争议,但对高坝大库工程一般要求有多条泄水通道,并要求设置具有超泄能力和降低库水位的泄水设施。

如果岸边布置溢洪道或泄洪洞困难,在河床基岩坚硬、泄洪功率及单宽流量不大的情况下,中、低坝枢纽经论证也可设置坝身溢洪道的,这类代表性的工程有榆树沟(新疆榆树沟)、桐柏蓄能下库(浙江天台)和大城(云南坝塘山河)等。

面板堆石坝枢纽中,是否设放空设施,各工程做法不完全一致,尚无规范作统一规定,但重要的或大江大河上的或砂砾石坝工程均设有与后期导流、蓄水初期向下游供水、排沙和泄洪等相结合的多功能放空设施。

### 2.2 坝体断面分区及筑坝材料

#### 2.2.1 断面设计

坝顶宽度一般为 5~8m,100m 以上高坝或高地震烈度区建坝,坝顶可适当加宽。防