

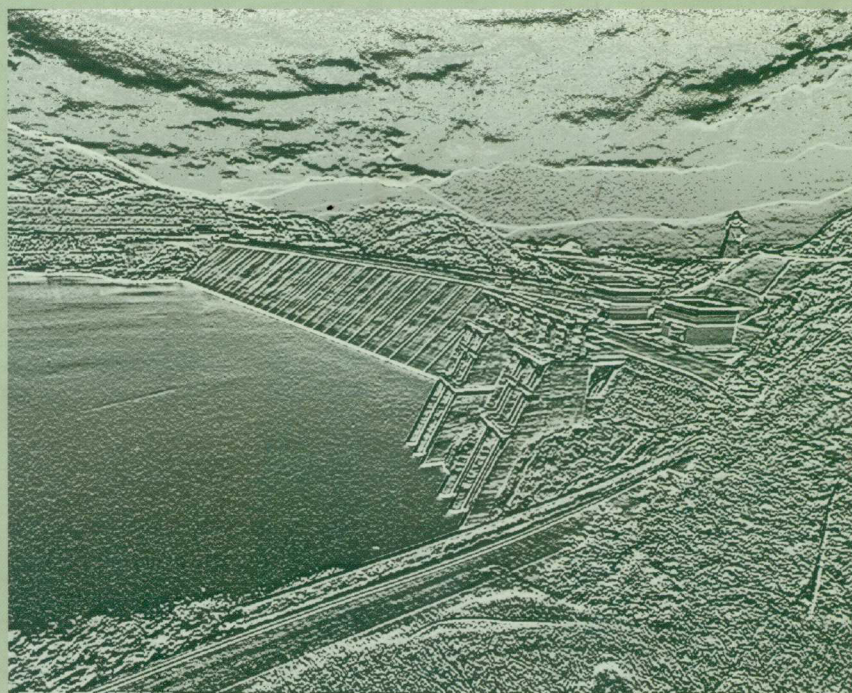
土石坝技术

Technology for Earth-Rockfill Dam

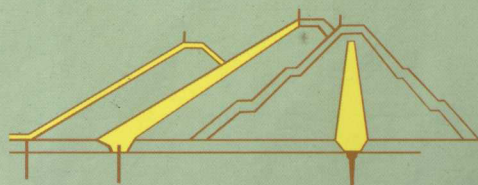
2011年论文集

水电水利规划设计总院
中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会
中国水电顾问集团华东勘测设计研究院
水利水电土石坝工程信息网

组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



www.sstsbw.com

土石坝技术

Technology for Earth-Rockfill Dam

2011年论文集

水电水利规划设计总院
中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会
中国水电顾问集团华东勘测设计研究院
水利水电土石坝工程信息网

组编



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

土石坝技术. 2011 年论文集/水电水利规划设计总院
等组编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-5123-2314-8

I. ①土… II. ①水… III. ①土石坝—文集 IV. ①
TV641-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 229752 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 1 月第一版 2012 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 33.5 印张 761 千字

定价 130.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本书编委会

顾 问	潘家铮	马洪琪	曹克明	林 昭
	王柏乐	周建平	彭 程	刘志明
	关志诚	张春生	陈祖煜	蒋国澄
	梅锦煜			
委 员	陈振文	陈绍松	陈松滨	蔡昌光
	程展林	党林才	樊路琦	费京伟
	何定恩	黄晓辉	孔宪京	李秋生
	李国英	李庆云	吕明治	刘斯宏
	毛文然	孙永娟	孙来成	孙 役
	汤 旻	王金锋	王君利	王亚文
	翁新雄	吴关叶	吴晓铭	吴高见
	吴毅瑾	谢力明	熊泽斌	徐泽平
	杨泽艳	杨和明	杨西林	余 挺
	张宗亮	张顺高	张沁成	湛正刚
	周才全			

水利水电土石坝工程信息网主办的《土石坝工程》和中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会主办的《面板堆石坝工程》曾是非常有参考价值的两份土石坝专业技术出版物,并得到业界同仁的一致赞誉。特别是混凝土面板堆石坝专业委员会出版的《面板堆石坝工程》20多年如一日,为中国混凝土面板堆石坝技术的启蒙、普及和提高立下了不可磨灭的功绩,得到了广大科技人员的欢迎和认同。

进入21世纪,土石坝建设和科技水平有了质的飞跃,一方面是数量、坝高和建设规模得到前所未有的发展;另一方面是除了土质心墙堆石坝和混凝土面板堆石坝这两种主流坝型外,沥青混凝土、土工膜等防渗体的堆石坝也有了很大的发展。土质心墙堆石坝的坝高已达300m;面板堆石坝的坝高已突破200m,并向300m量级发展;沥青混凝土防渗堆石坝的坝高已突破100m,并向150m量级发展;土工膜防渗技术也已在永久性工程中大量应用。随着高坝大库建设向西部地区发展,土石坝的安全性、经济性、适应性优势愈加明显,但高土石坝的建设也面临强地震、深覆盖、大流量、窄河谷、高寒冷等恶劣自然条件的挑战。土石坝技术的发展对总结交流建设经验和科技成果的载体也提出了更高的要求。

为适应新形势下根治洪涝旱灾、实现水资源优化配置、大力开发清洁和可再生的水能资源而开展的大规模水利水电建设的需要,2005年,水利水电土石坝工程信息网出版物《土石坝工程》率先改版为《土石坝技术》论文集,并由中国电力出版社正式出版;2011年,由混凝土面板堆石坝专业委员会出版的《面板堆石坝工程》在发行80期后,也从本卷开始合并到《土石坝技术》论文集中。混凝土面板堆石坝专业委员会与土石坝工程信息网联合出版《土石坝技术》是科技信息资源整合、优化配置的一种尝试,有助于学会与信息网在学术上的优势互补,形成一个交流和研讨土石坝专业的技术平台,为业界同仁提供参考和借鉴。

全新的《土石坝技术》论文集将在继承原有理论与实际结合、工程信息量大、技术实用性强、专题内容集中等特色的基础上,结合水利水电建设前沿科学研究进展,陆续介绍国内外先进技术和科技成果,开设学术讨论栏目,有目标地定向约稿,扩大覆盖面,缩短出版周期,使《土石坝技术》越办越好,为提高土石坝的科技水平和促进我国水利水电建设作出更大的贡献。

《土石坝技术》编委会

2011年9月

前言

一、高面板堆石坝技术

中国混凝土面板堆石坝的发展	杨泽艳 周建平 蒋国澄 孙永娟 王富强 (1)
300m 级高面板堆石坝适应性及对策研究综述	杨泽艳 周建平 苏丽群 杜效鹤 孙永娟 (12)
300m 级高面板堆石坝坝料特性、坝体分区及变形规律分析研究	张宗亮 冯业林 (20)
300m 级特高混凝土面板堆石坝经济优势和适应性研究	邓毅国 徐增辉 杨 健 (26)
超高面板堆石坝设计原则探讨	曹克明 徐建军 (35)
300m 级高混凝土面板堆石坝稳定性评价与变形控制标准研究	徐泽平 邓 刚 邵 宇 谢定松 (42)
300m 级超高面板堆石坝变形规律分析研究	邴能惠 孙大伟 傅 华 邓毅国 杨 健 (64)
300m 级高面板堆石坝防渗和止水系统适应性研究	郝巨涛 鲁一晖 窦铁生 何旭生 关遇时 (74)
300m 级高混凝土面板堆石坝面板混凝土裂缝预防措施研究	马锋玲 鲁一晖 李 蓉 王少江 何旭生 (84)
200m 级高面板堆石坝变形反演分析	钱晓翔 单宏伟 彭 翀 张丙印 于玉贞 (91)
200m 级高混凝土面板堆石坝坝体施工技术	李仕奇 晋国辉 张发瑜 (101)
300m 级心墙堆石坝典型工程及突出问题	张建华 姚福海 马芳平 肖培伟 (111)
狭窄河谷中高面板堆石坝设计应注意的几个问题	刘万新 (125)
马吉水电站超高混凝土面板堆石坝方案初步研究	邓毅国 杨 健 王 勇 (130)
茨哈峡水电站特高面板坝技术设计	翟迎春 王康柱 (135)
天生桥一级混凝土面板堆石坝技术	冯业林 张宗亮 (140)
洪家渡面板堆石坝设计技术总结	张合作 湛正刚 程瑞林 蔡大咏 (150)
马来西亚巴贡水电站面板堆石坝设计	王君利 范建朋 (159)

古水面板堆石坝坝料特性、坝体分区及应力应变分析研究

- 冯业林 孙怀昆 覃建付 (167)
- 三板溪面板堆石坝施工与运行性态反演研究 ... 朱 晟 卢继旺 冯树荣 蔡昌光 (174)
- 水布垭面板堆石坝施工与运行性状反演研究 朱 晟 熊泽斌 蔡金燕 (184)
- 洪家渡、巴贡、天生桥一级面板堆石坝应力变形性状反馈分析
..... 邴能惠 孙大伟 米占宽 赵魁芝 (194)
- 国际高混凝土面板堆石坝技术发展综述及其相关思考与讨论 徐泽平 (210)
- 中国 150m 以上高混凝土面板坝的技术发展 苏丽群 杨泽艳 杜效鹤 (228)
- 国内外已建 200m 级面板堆石坝技术总结 湛正刚 蔡大咏 张合作 程瑞林 (234)

二、工 程 设 计

- 巴山水电站高折线面板堆石坝运行性状研究 ... 王登银 陈振文 汤 旻 齐立景 (241)
- 通化抽水蓄能电站上水库面板堆石坝设计 张殿双 胡顺志 王 超 鞠 晔 (251)
- 呼和浩特抽水蓄能电站上水库防渗面板型式研究
..... 赵 轶 任少辉 陈建华 鲁红凯 (257)
- 积石峡水电站混凝土面板堆石坝坝体分区优化设计及坝料调整
..... 雷 艳 王康柱 蔡新合 (264)
- 刚果英布鲁水电站土石坝断面设计优化 时铁城 王永生 席燕林 (271)
- 仙游抽水蓄能电站上水库主坝面板堆石坝基础处理设计 赵 琳 王樱峻 (278)
- 双河口水电站面板堆石坝设计与实践 曹 骏 (283)
- 重庆市玉滩水库工程主坝选型 王永生 陆永学 高文军 (289)
- 巴山水电站溢洪道分条复式扭曲挑流鼻坎设计 齐立景 陈振文 (293)
- 敦化抽水蓄能电站防渗结构形式选择 王兆辉 刘宝昕 (297)
- 云南龙马水电站大坝渗漏成因分析及处理
..... 李 毅 李 颖 白海林 张玉龙 黄仕俊 (301)
- 深厚覆盖层上土石坝基础廊道的结构形式探讨 姚福海 (308)
- 赵湾水库土石坝基础防渗加固设计 徐铁成 胡顺志 (313)
- 郑家湾面板堆石坝设计要点 李 勇 (318)
- 福建省土石坝防渗加固技术探讨 黄院生 (324)
- 松树水库副坝除险加固设计 徐铁成 赵鹏强 连晓光 张小涛 唐振华 (329)
- 白河沟水库面板堆石坝坝顶溢洪道设计 曹 骏 (334)
- 西龙池抽水蓄能电站上水库全风化层基础处理研究
..... 刘海宇 孟凡珍 张沁成 刘玉哲 (341)
- 混凝土面板堆石坝坝基深厚覆盖层处理设计与试验研究分析 张 云 蔡智云 (349)
- 土石坝几个问题思考 陈世全 张文伟 (355)

三、施 工 技 术

巴山水电站筑坝材料选择	陈永红	(365)
关于土石坝设计孔隙率、设计干密度和岩石密度换算的讨论	赵贱清 于新华	(369)
土石坝体与施工围堰结合浅议	张文倬 梁礼绘 张云生	(385)
HK 系列封边剂在面板坝接缝止水中的应用	王志宏 杜志龙	(391)
素土挤密桩在北干线尚西庄水库坝基处理中的应用	池建军 张立民 辛凤茂	(398)
GPS 实时监控系统在瀑布沟水电站大坝心墙填筑施工质量控制中的应用	马芳平 吴 浩	(401)
利用 EXCEL 软件自动绘制颗粒级配曲线的方法	潘福营	(406)
混凝土面板堆石坝防渗体裂缝处理方法	李平平	(409)
响水涧抽水蓄能电站上水库主坝面板混凝土施工技术 ...	潘福营 陶启忠 任向丽	(413)
溪洛渡水电站下游围堰防渗墙预灌浓浆施工	代 福	(418)
功果桥水电站围堰防渗墙施工	王虎山	(421)
新型贫胶硬填料筑坝技术在围堰工程中的应用	李 茂 张 娅	(428)
岩石地基的黏土水泥灌浆	杨功成 董建忠 夏可风	(434)

四、实验研究及监测

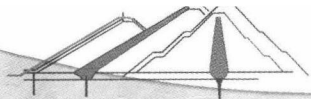
糯扎渡水电站原型观测资料三维反馈分析	张宗亮 赵 迪	(443)
考虑流变效应的响水涧抽水蓄能电站上水库主坝长期变形预测 ...	刘斯宏 吕高峰	(450)
混凝土面板堆石坝的温度应力	吴一匡	(459)
面板堆石坝耐寒性接缝止水结构试验研究	陈 乔 谭建平 王志宏 吕小龙	(463)
片岩作为坝壳料的工程力学特性试验研究	龚维群 张永全 胡春风	(469)
堆石体的压缩模量	赵贱清	(478)
混凝土面板堆石坝结构与监测设计中的几个问题	孙 全 吴鹏举	(493)
合溪水库工程大坝渗流量监测优化设计	余学彦 郎小燕 沈贵华	(499)
面板堆石坝坝体沉降监测方法技术	顾永明 陈树联	(503)
巴山面板堆石坝变形监测控制网的建立	张玉龙 丁学智 张 亮	(510)
湖北清江水布垭大坝量水堰监测资料分析	周玉红	(516)

附录一 中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会第四届第一次

工作会议纪要	(524)
--------------	-------

附录二 第四届中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会组成

人员名单	(526)
------------	-------



一、高面板堆石坝技术

中国混凝土面板堆石坝的发展

杨泽艳¹ 周建平¹ 蒋国澄² 孙永娟¹ 王富强¹

(1 中国水电工程顾问集团公司 2 中国水利水电科学研究院)

[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设计建设走过了一条“引进消化、自主创新、突破发展”的道路。中国面板堆石坝数量最多,最大坝高、工程规模和技术难度都位于世界前列。在设计、施工、科研、监测和恶劣自然条件下建坝等方面,我国积累了丰富的经验,取得了令人瞩目的成就,筑坝技术逐渐成熟,并正在向更高、更难的方向发展。本文从建设概况、技术进展、经验教训和发展方向等方面进行简要总结。

[关键词] 混凝土面板堆石坝 25周年 建设概况 技术进展 经验教训 发展方向

1 建设概况

1.1 数量 and 分布

据不完全统计,截至2009年底,中国坝高在30m以上的混凝土面板堆石坝已建成约170座,在建、拟建各约40座,总数约260座。中国面板堆石坝相应坝高、库容及装机容量等工程规模统计分析见图1,高度在100m以下的中坝最多,以大中型水库为主,中小型电站居多。中国已建、在建及拟建面板堆石坝分布在全国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、甘肃等,约占全国总数的70%以上,其中浙江最多,有43座。

目前我国已建的最高的面板堆石坝是水布垭坝,坝高233m,亦为目前世界上最高的面板堆石坝。坝体填筑规模最大的是天生桥一级坝,坝高178m,坝顶长1104m,填筑量约1800万 m^3 ,面板面积约17.7万 m^2 ,水库总库容102.57亿 m^3 ,枢纽最大泄洪流量21750 m^3/s 。深厚覆盖层上已建的最高的坝为九甸峡坝,坝高136.5m,趾板下覆盖层厚28m。覆盖层处理深度最深的是铜街子左副坝,防渗墙深度超过70m。已建的河谷最狭窄的100m以上的高坝是龙首二级坝(也称西流水坝),坝高146.5m,大坝长高比仅为1.3。河谷极不对称且边坡高陡的是洪家渡坝,坝高179.5m,趾板边坡高度约310m。强地震区已建的最高的坝是吉林台一级坝,坝高157m,抗震设计烈度为Ⅷ度。经受过高地震烈度考验的是紫坪铺坝,坝高156m,汶川地震中影响烈度达Ⅷ~Ⅸ度。已建的位于气温最低及温差最大地区的是莲花坝,坝高71.8m,极端最低气温为-45.2℃;海拔最高的是查龙

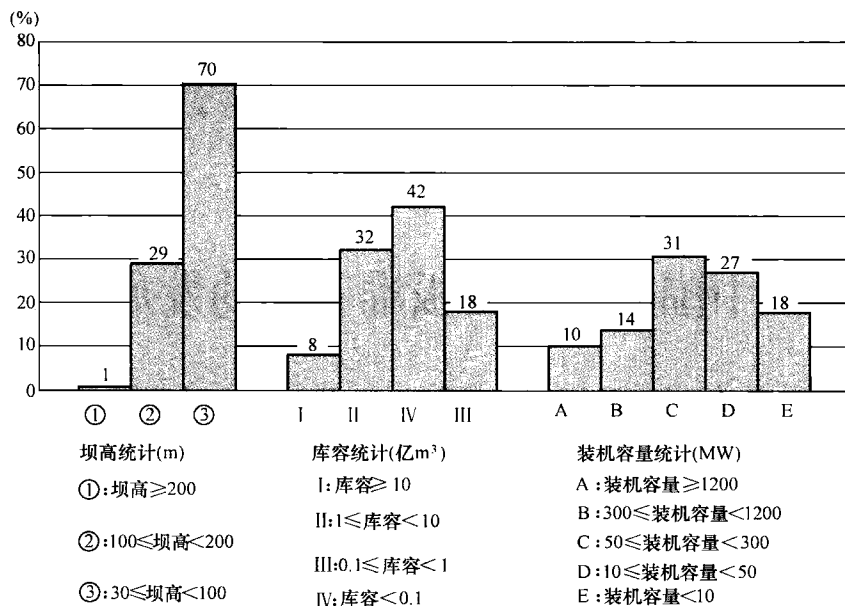


图1 中国混凝土面板堆石坝工程规模统计分析

坝, 坝高 39m, 坝顶高程为 4388m; 纬度最高的是哈巴河山口坝, 坝高 40.5m, 高于北纬 48°。已建坝身溢流量最大、同类坝体最高的是桐柏蓄能下库坝, 坝高 70.6m, 坝身泄洪流量为 496m³/s, 已经过泄洪初步检验。运行期发生溃坝的工程是沟后坝, 坝高 71m, 后来重建。面板严重损坏并放空水库进行修补的工程是株树桥坝, 坝高 78m。

在中国, 面板堆石坝工程几乎遍布全国, 涉及各种不利的地形、地质条件和气候条件, 面板堆石坝因其安全性、经济性和适应性良好而得到广泛应用。总体而言, 25 年来, 中国面板堆石坝工程的设计建设是成功的, 因此也积累了应对各种困难的经验和教训, 其技术进步为世界坝工界所关注。

1.2 发展阶段

1985 年, 中国启动了西北口面板堆石坝试点工程。从此, 中国现代面板堆石坝建设方兴未艾, 迄今已经形成具有中国特色的面板堆石坝筑坝技术。这一技术发展过程大体分为三个阶段, 即引进消化阶段、自主创新阶段和突破发展阶段, 如图 2 所示。

1985~1990 年为中国面板堆石坝技术的引进消化阶段。这一阶段开工建设的面板堆石坝约 14 座。西北口坝作为项目列入国家“七五”重点科技攻关课题, 开展了大量试验研究和计算分析, 取得了高 100m 级面板堆石坝研究设计成果, 建成后运行情况总体良好, 属这一阶段的里程碑工程。这一阶段的技术特点是: 筑坝技术虽起步较晚, 但起点较高; 已无轨滑模、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破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共 70 余座, 建成 40

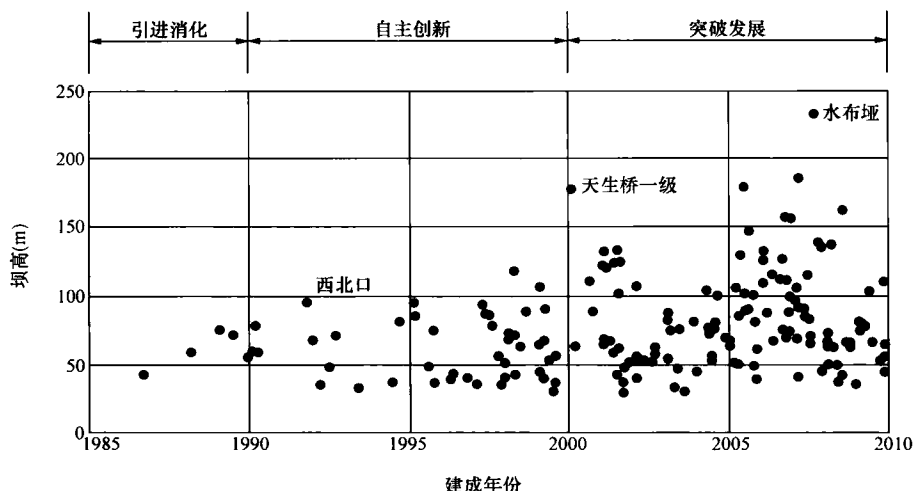


图2 中国混凝土面板堆石坝发展进程

多座。天生桥一级坝为中国第一座 200m 级高面板堆石坝，作为国家“六五”、“七五”重点科技攻关的依托工程，开展了大量设计施工技术研究，取得了大量丰富的研究成果，成为这一阶段的里程碑工程。这一阶段的技术特点是：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；自主创新了面板堆石坝设计与施工成套技术，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；编制和发布了多本设计和施工规范；坝体变形控制尚缺乏经验，面板产生结构性裂缝的工程还较多。

2000~2010 年为突破发展阶段。这一阶段开工建设的面板堆石坝超过 120 座，已建成的超过 110 座，其中 150m 以上的高坝有 6 座。这一阶段，株树桥混凝土面板破损，出现严重渗漏；天生桥一级面板垂直缝多次发生挤压破坏。在对这些工程缺陷进行分析原因和修补的过程中，取得了宝贵的经验与教训。修建于非对称狭窄河谷上的洪家渡高坝，通过坝体合理分区和采用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、大坝渗漏量较小的良好效果。国家“九五”重点科技攻关课题“200m 级高混凝土面板堆石坝研究”依托水布垭坝开展全方位的科学研究，取得了突破性研究成果。迄今，水布垭大坝运行性态总体良好，为这一阶段的里程碑工程。这一阶段的技术特点是：最大坝高突破 200m，深厚覆盖层上建坝高度突破 100m；150m 级高坝技术日益成熟，取得了 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规范开始新一轮修订；筑坝技术水平跃居世界前列，并走出国门；开展了“300m 级高面板堆石坝适应性和对策研究”。

2 主要技术进展

2.1 坝址选择和坝体布置

(1) 河谷形态。面板堆石坝对坝址地形条件的适应性很强，各类河谷形态均可以修建

面板堆石坝。坝址可选择在顺直河段，也可选择在河湾地段。中国已建位于宽缓河谷上的坝最大长高比约 16.3，位于狭窄河谷上的坝最小长高比约 1.3，此外还有位于狭窄非对称及高陡边坡河谷上的坝。局部不利地形条件可通过开挖回填或其他结构措施进行改造。

(2) 坝轴线布置。面板堆石坝对地质条件的适应性也较强，坝轴线通常采用直线，有时也布置成折线或采用直线与曲线的组合。面板趾板通常需要修建在稳定和坚固的基岩上，并应尽量避免不良地质岩体和存在严重地质缺陷的地段；堆石体地基可以是基岩，也可以是覆盖层。在深入研究论证并采取适当工程措施的情况下，深厚覆盖层地基上，也可以修建高面板堆石坝。

(3) 泄水建筑物布置。面板堆石坝工程的泄水建筑物首选超泄能力强的岸边开敞式溢洪道。受地形地质条件限制，也有采用开敞式进口洞式溢洪道和有压进水口泄洪洞的。如果布置岸边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、低坝工程经论证也有设置坝身溢洪道的，目前坝身溢洪道单宽流量一般不超过 $20\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。在任何情况下，面板堆石坝都不允许漫坝，因此，堆石坝工程通常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。

2.2 坝体分区及筑坝材料

坝料选择和坝体分区上，在满足抗滑稳定的前提下，中国特别重视和解决大坝的渗流控制和变形控制问题。垫层料和特殊垫层料要对上游防渗铺盖或自愈型防渗材料起反滤作用，过渡料对垫层料也要起到反滤作用。

(1) 断面设计。坝顶宽度一般为 $5\sim 8\text{m}$ ， 100m 以上的高坝或建在高地震烈度区的大坝，坝顶还应适当加宽。防浪墙高度一般为 $3\sim 5\text{m}$ ，墙底高于正常蓄水位，墙顶高出坝顶 $1.0\sim 1.2\text{m}$ 。当筑坝材料为质量良好的硬岩或中硬岩堆石料时，上、下游坝坡坡比采用 $1.3\sim 1.4$ ；当筑坝材料采用质量良好的天然砂砾石料时，上、下游坝坡坡比采用 $1.5\sim 1.6$ 。软岩堆石坝料所筑的大坝或者建在软基上的大坝，则根据大坝抗滑稳定分析并考虑安全储备研究确定坝坡。

(2) 坝体分区。按照上堵下排和渗透稳定的原则，坝体自上游到下游，按渗透性由低到高、变形模量由高到低，依次设置垫层区、过渡区、上游堆石区和下游堆石区。对透水性较差的筑坝材料，一般研究设置竖向及水平排水层来保持下游坝体的排水通畅。高坝设计和施工则重点研究上游堆石区与下游堆石区压缩模量差和填筑时间差对面板变形应力的影响。适当扩大上游堆石区的范围，与下游堆石区的分界线一般倾向下游，以利于降低下游堆石体对面板变形应力的影响。

面板堆石坝利用软岩料的部位大多是在坝轴线下游的干燥区，少数工程也用到了大坝的主体部位，但坝高都不超过 100m 。利用砂砾石料工程的坝体分区主要有两种，一种是坝体大部或坝轴线上游一定范围使用砂砾石，根据砂砾石的透水性，设置专门的烟囱式排水区；另一种是将砂砾石坝包裹在干燥堆石之中。当垫层料与砂砾石间满足反滤要求时，可以不设专门的过渡层。

(3) 垫层料及过渡料。垫层料多采用半透水料，以起到第二道防渗线的作用。垫层料的加工系统常与混凝土人工砂石料系统结合，以生产满足设计要求的垫层料。通常，垫层

料的最大粒径为 100mm, 粒径小于 5mm 的颗粒含量宜为 30%~55%, 粒径小于 0.075mm 的颗粒含量宜小于 8%。压实后渗透系数宜为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s。

过渡料可以由砂石加工系统生产, 也可以在爆破试验的基础上直接爆破开采或采用洞挖渣料。过渡料的级配应满足设计要求, 压实后渗透系数宜为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/s。通常, 过渡料的最大粒径宜不超过 300mm, 粒径小于 5mm 的颗粒含量一般要求达到 20%~30%, 粒径小于 0.075mm 的颗粒含量宜小于 5%。对爆破开采料, 粒径小于 5mm 的颗粒含量可适当降低。

(4) 堆石料。堆石料的来源非常广泛, 采用较多的是灰岩、砂岩、板岩、花岗岩、玄武岩、大理岩和熔凝灰岩等。前期工作中, 应特别重视堆石料源的选择和地质勘察工作, 少数工程因料场勘察深度不够, 造成了开工后重新找料的被动局面, 严重影响工程质量或工程进度, 教训十分深刻。

堆石料原岩饱和抗压强度大于 40MPa 的中硬岩或硬岩是高坝最合适的筑坝材料。主堆石料的最大粒径应不超过压实层厚度, 宜为 500~800mm; 粒径小于 0.075mm 的颗粒含量也宜控制在 5% 以下。下游堆石料可适当放宽对最大粒径的要求。填筑料压实后均应具有低压缩性、高抗剪强度和良好的透水性能。

为发挥面板堆石坝就地取材、因材设计的优势, 软岩也是可选的筑坝材料之一。中国应用软岩料修筑的面板堆石坝共 10 多座, 多数是成功的, 但也有因软岩料应用不当, 造成坝体变形过大、面板裂缝过多的。筑坝软岩料的饱和抗压强度可小于 30MPa, 但需大于 15MPa; 当坝高超过 150m 时, 软岩料尽可能用于坝体变形和应力较小的部位; 当坝高超过 200m 时, 应慎用软岩料。筑坝材料含有软岩料时, 更应重视坝体变形控制, 做好坝体排水。

采用坚硬岩或超硬岩筑坝的工程实例不多, 仅有已建的三板溪和在建的江坪河工程。三板溪工程围绕超硬岩筑坝开展了大量的试验研究和计算分析, 通过采取强风化岩与弱微风化岩爆破掺混并增加碾压遍数等工程措施, 基本达到了预期效果。

(5) 砂砾石料。砂砾石料是良好的筑坝材料, 中国约有 30 座面板堆石坝的大部或局部采用了砂砾石料。砂砾石料压实后的变形模量一般大于堆石料的变形模量, 因此多用于坝体的高应力区。由于天然沉积形成的砂砾石料大多具有级配不连续、离散和施工易分离的特点, 因此砂砾石料的抗冲蚀能力较差, 低应力条件下的抗剪强度较小, 重车上坝填筑和振动碾工作性能较差, 应用中应多采取针对性工程措施, 特别是采取渗流控制措施。

2.3 坝体防渗结构

(1) 面板。面板分块宽度一般为 12~16m, 两岸约为中部的 1/2, 顶厚 30cm 或 40cm, 底厚按水头的 0.002~0.0035 倍加厚, 中低坝可采用 30~40cm 等厚面板。混凝土面板一般配置单层双向配筋, 单向含筋率为 0.3%~0.4%。根据面板抗挤压的要求, 也有采取双层双向配筋并设置箍筋, 或在高应力区采取双层双向配筋的。适当的配筋方式有利于提高面板混凝土浇筑中的流动稳定性。基于限裂抗裂要求, 结合当地混凝土原材料的来源特性, 大多数工程对面板混凝土进行了改性处理。特别是近 10 年, 面板混凝土改性采用的掺合料和外加剂较为广泛, 取得了一定成效。

(2) 趾板。混凝土趾板与地基的连接方式、趾板结构布置和配筋方式、施工质量要求等均有较成熟的技术。在趾板的布置上,有的工程通过采用等宽趾板或减小趾板宽度,并在其下游沿岸坡设喷混凝土或浇筑内趾板来延长渗径,减少边坡开挖量,并以反滤保护来保证渗透稳定。近期建设的几个工程通过采用等宽连续窄趾板,达到了减少趾板边坡开挖、减少趾板分缝、简化周边缝止水结构和方便施工的目的。

(3) 接缝止水。接缝止水的结构形式由单一止水或自愈型止水向止水与自愈相结合的方向发展。大多数工程都取消了中部止水,加强表层止水。通过改性,止水材料的耐久性大幅提高,止水铜片多采用软紫铜,柔性止水材料形成了 GB 和 SR 两大品牌系列,研发并广泛应用了抗老化性好的三复合橡胶板盖层。基于预防中部面板产生挤压破坏的考虑,面板中部受压垂直缝多设计成具有一定缝宽、缝内嵌填富有弹性和具有吸收变形能力材料、表面予以覆盖的结构形式。

2.4 坝基处理

(1) 趾板地基。一般情况下,趾板建于地基稳定、岩体完整、不冲蚀和可灌浆的弱风化至微新基岩上。岩质地基上的趾板通过锚筋与基岩连接,并进行固结灌浆处理。对置于强风化或断层、溶蚀带、深槽等不良地质体或不利地形条件上的趾板,均采取了专门的处理措施,如贴坡连接板、高趾墙和回填置换地基等。当采用等宽窄趾板时,一般都要求做好趾板下游地基地质缺陷带的反滤保护,防止渗透破坏。

(2) 堆石地基。如果覆盖层厚度不大,一般将堆石体地基挖至岩石界面。砂砾石冲积层一般具有较高的承载力和较低的压缩性,如果不存在影响坝体稳定性的粉细砂、黏土等软弱夹层,经过详细勘察和分析论证,可保留作为堆石体的基础。对于高面板堆石坝,一般都将趾板及其下游一定范围内的覆盖层挖除,保留大部分堆石体下部的覆盖层,并进行必要的处理。

2.5 导流与度汛

大部分工程初期采用枯期围堰挡水度汛,中、后期采用坝体临时断面或已浇混凝土面板的低高程坝体挡水度汛的导流方式,部分工程初期采用枯期过水围堰挡水、汛期坝面和导流泄水建筑物联合过水的导流方式,还有一些工程采用围堰全年挡水、导流洞泄流的导流方式。导流方式一经确定,就要全力保证完成相应的施工度汛形象面貌,确保安全度汛。西北口大坝填筑就因未抢到度汛高程而被迫改变了度汛方式。

2.6 主体工程施工

(1) 填筑分期。早期建设的面板堆石坝按国外经验,分期规划无严格要求,有深刻的教训。2000 年之后建设的高面板堆石坝,除因低高程部位“一枯度汛抢拦洪”的需要,采取在上游超填临时断面外,坝体填筑分期力求做到上下游和左右岸平衡上升;条件许可时,下游坝体填筑还可高于上游坝体,上、下游高差宜小于 40m;面板施工前,填筑面超高至少在 15m 以上或设置预沉指标,使面板浇筑前面板下部坝体的沉降速率小于 5mm/月;具备条件的情况下,还可以采取充水预压措施。上述措施均能够显著减小面板顶部脱空和结构性裂缝的几率。

(2) 填筑碾压。在坝料开采、上坝运输、加水方法、摊铺方式、填筑碾压等筑坝技术

方面也有一些创新和经验。上坝运输一般以汽车运输为主。采取坝外加水和坝面洒水相结合的措施。近期建设的高坝,因设计要求的相对密实度较高,压实功能也要相应提高。振动碾自重普遍从 100kN 级提高到 200kN 级,甚至 300kN 级。洪家渡坝和董管坝还引进了冲碾压实机,击振力达到 2000~2500kN。由于采用大型机械,施工强度大大提高,坝体填筑强度可达 100 万 $\text{m}^3/\text{月}$,一般也可达 50 万~70 万 $\text{m}^3/\text{月}$ 。

(3) 压实检测。堆石坝施工规范规定,压实质量要采用相对实密度与施工工艺参数双控。干密度检测目前仍然离不开挖坑灌水法,这种方法工序复杂、占用时间长,且精度不高。经过研究、试验,并与挖坑灌水法测试结果对比,现有多种方法可以部分替代挖坑灌水法,检测结果可以作为评价质量的指标,如附加质量法、微变形量测法以及 GPS 施工监控法。新的检测方法工序简化,周期缩短,检测数量增加,可靠性和效率得到较大提高。

(4) 垫层料坡面保护。施工期垫层料坡面保护的传统方法是超填、削坡、斜坡碾压,然后再喷混凝土、砂浆或乳化沥青。目前已有多个工程采用挤压墙固坡技术,有的工程探索了混凝土预制梁块移动固坡技术,有的工程探索形成了翻模固坡技术。以上几项固坡技术都是可行的,均有成功应用的实例,但也存在进一步改进的空间。

(5) 混凝土浇筑。中国面板、趾板混凝土施工技术日益成熟。一般根据工程质量控制要求和总体进度安排,选择低温季节施工混凝土面板。在面板钢筋绑扎固定和立模后,通过滑模和浇筑台车进行混凝土浇筑振捣。部分工程对无轨滑模技术进行了优化改进,部分工程趾板则采用了滑模浇筑以及跳块浇筑工艺。混凝土浇筑后,还要重视混凝土的养护,有条件时,尽量一直养护到水库蓄水。

2.7 试验研究及计算分析

(1) 试验研究。前期研究设计中,大多数工程都开展了静动力三轴、压缩、渗透和流变或长期变形等试验研究,粗颗粒材料试验中的尺寸效应问题一直没有得到有效解决。重要的或大型面板堆石坝工程,还开展了坝体应力变形土工离心或动力模型试验研究。有的工程开展了接缝止水结构和材料的大型仿真模型试验研究、基于最优配合比的混凝土改性试验研究,以及施工导流水力学模型试验研究等。工程施工准备阶段,一般都按规范要求,针对代表性的填筑料开展现场爆破、填筑和碾压试验,以确定合理的施工工艺参数。个别工程还结合应力变形反演计算的需要,开展基于原级配堆石料的现场大型载荷试验和压缩试验。

(2) 计算分析。面板堆石坝工程的计算分析内容主要是坝坡抗滑稳定、坝体渗透稳定和应力变形计算分析。坝坡抗滑稳定计算通常采用刚体极限平衡法,有的还结合坝体应力应变分析,按照堆石的非线性强度参数进行坝坡抗滑稳定计算。坝体渗透稳定计算通常按照太沙基准则,确保面板防渗失效时,只要垫层料和过渡料满足渗透稳定要求,大坝就能保持稳定和安全。

面板堆石坝应力变形分析非线性弹性模型中,最常用的是邓肯一张 E-B (或 E- ν) 模型, K-G 模型也有部分应用;在弹塑性模型中,双屈服面模型也是使用较多的一种。这些模型的计算参数可以用常规三轴试验确定,并且已经积累了各类堆石材料的大量数据。

三维有限元法数值计算的结果总体上能够反映坝体施工、蓄水和运行期的应力变形规律,应力变形值大都在合理范围之内。由于土石材料本身性质和施工、运行过程的复杂多变,数值计算不可能完全模拟全过程的各种影响因素,因此,目前数值计算成果仍只是设计的重要参考,而不能作为唯一的依据。

2.8 安全监测

按现行设计规范要求,中国面板堆石坝一般都设有较为完备的坝内和坝外变形及面板挠度和脱空,坝身、坝基及绕坝渗流,堆石体应力及面板应力应变和温度,环境量和强震等监测项目。坝体内部变形监测以垂直向及顺河向变形为主,也有工程进行横河向变形监测和渗漏量分区监测。有的工程尝试采用光纤陀螺仪监测面板挠曲变形。近期工程的安全监测自动化工作也有较快发展。安全监测工作基本能贯穿于工程始终,监测设施与主体工程同步实施及监测资料及时整理和分析,基本达到了反馈设计、指导施工的目的。深厚覆盖层上面板堆石坝的渗漏量监测仍是一大技术难题,汶川地震经验表明,强震监测仪器的可靠性还需进一步提高。

3 特殊条件下筑坝

3.1 窄河谷及高陡边坡

中国有多座面板堆石坝建于狭窄河谷、高陡边坡地区,其中河谷最窄且坝高超过100m的坝为龙首二级,河谷极不对称且趾板边坡高陡的坝为洪家渡,建成后运行效果均良好。这些坝采取了提高堆石坝填筑密实度,适当延长面板浇筑前的预沉降期,在陡岸坡设置具有较大变形模量的特别碾压区,以及提高陡边坡附近周边缝止水结构的适应变形能力等措施。一些面板堆石坝遇到不利的地形条件,常用高混凝土趾墙来改造地形,或作为与混凝土面板相连接的连接部件,如公伯峡趾墙的最大高度达50m。

3.2 深厚覆盖层地基

中国面板堆石坝趾板修建在覆盖层上的约有16座,在建的约5座,待建的则更多。已建坝高超过100m的有那兰、察汗乌苏和九甸峡坝。深厚覆盖层上的面板坝都以全封闭混凝土防渗墙为主。这种筑坝技术的关键是查清覆盖层的组成和结构,合理确定趾板建基面高程、防渗墙深度、连接板形式及可靠的接缝止水结构。对此一般都进行了专门、系统的试验研究和分析论证。

3.3 高地震烈度区

中国高地震烈度区建设的面板堆石坝有吉林台一级,设计地震动水平峰值加速度为 $0.462g$ 。有多座坝的抗震设计烈度为Ⅷ度或高于Ⅷ度。重要的或位于高地震烈度区的面板堆石坝,一般都进行筑坝材料动力特性试验,开展大坝防震抗震计算分析及坝体抗震特性研究,找出大坝抗震的薄弱部位,并有针对性地采取抗震措施。经抗震分析并采取多项抗震措施的紫坪铺坝在“5·12”汶川特大地震中经受了远超设计抗震烈度的强震的考验。实践证明,只要选址合适、工程质量合格,按照现代设计理论和方法设计、建设的高面板堆石坝能够抵御设计地震的作用,并具有超乎预期的抗震潜力。

3.4 高寒地区

中国在严寒和寒冷地区建成的面板坝已超过 20 座, 约有 5 座坝所在地区的极端最低气温低于 -40°C , 多座坝的极端气温低于 -30°C 。严寒和寒冷地区的坝基本上都采取了增大面板下游部位垫层区的渗透系数, 提高面板混凝土抗冻标号及适当增加配筋, 改进表面止水与面板混凝土的联结方式等应对措施。

4 主要经验教训

面板堆石坝的任何设计和施工缺陷都会在施工期或运行期显露出来。25 年来, 中国有 10 多座面板堆石坝出现事故, 最为严重的是沟后溃坝, 后来重建; 其次是株树桥坝产生严重漏水, 还有一些工程出现面板混凝土结构性裂缝和挤压破坏等。多座坝因事故而放空水库或降低库水位检修, 检修后的大坝均恢复正常运行。

(1) 混凝土温度和干缩裂缝。从 20 世纪 90 年代开始, 经建设各方联合攻关, 采取防裂抗裂措施, 面板混凝土干缩及温度裂缝问题得到基本解决。现行面板堆石坝设计和施工规范有较为全面的面板混凝土防裂抗裂技术要求。

(2) 面板结构性裂缝及挤压破坏。2000 年后建设的面板堆石坝工程注意了坝体变形控制, 以及面板结构性裂缝与挤压破坏的预防措施, 因此出现的类似事例较少。董箐坝的砂泥岩料软岩含量为 30% 左右, 但严格控制坝体预沉降指标, 面板适当增加厚度且垂直缝采取了抗挤压措施, 面板浇筑后没有产生结构性裂缝。

(3) 渗透破坏及水力冲蚀。从早期建成的沟后水库溃坝及株树桥坝大量漏水事故中吸取教训, 相关规范中提出了砂砾石坝应采取有效的渗流控制措施, 坝体分区时底部要有硬岩堆石料排水层, 过渡层与垫层料之间应满足反滤原则等要求。

(4) 坝基渗漏。从西北口坝基岩溶充填泥土被高压水冲开及少数工程趾板基础出现集中漏水通道, 而不得不放空水库检修或限制库水位运行等工程中得出经验, 应加强前期勘测, 揭露可能的地质缺陷, 为处理设计提供依据, 并对此采取专门的处理措施。

(5) 反向渗透破坏。现行规范中列入了防止反渗破坏的有关措施。2000 年以后, 仍有多个工程在采取反渗措施后发生反向渗透破坏的情况。分析认为, 选择反渗排水管封堵时机和方法, 以及对上游已浇面板及时进行压重保护也很重要。

(6) 接缝止水失效。中国面板坝接缝止水失效引发事故的工程有沟后坝和株树桥坝。在总结经验教训的基础上, 后期建设的面板堆石坝注重接缝止水材料和结构的研发和改进, 运行效果均良好。

5 未来的发展及挑战

中国拟建的 40 多座面板堆石坝中, 最大坝高超过 100m 的有 20 多座, 最大坝高超过 150m 的有 10 多座。可行性研究中的最大坝高约 250m, 适应性研究中的最大坝高达 300m 级。这些坝多位于西部地区, 坝址多具有河谷狭窄、岸坡陡峻、覆盖层深厚、地震设计烈度高、气候条件恶劣等特点。未来面板堆石坝的主要发展方向及技术挑战如下:

(1) 更高的面板堆石坝。“300m 级高面板堆石坝适应性及对策研究”课题的成果表