

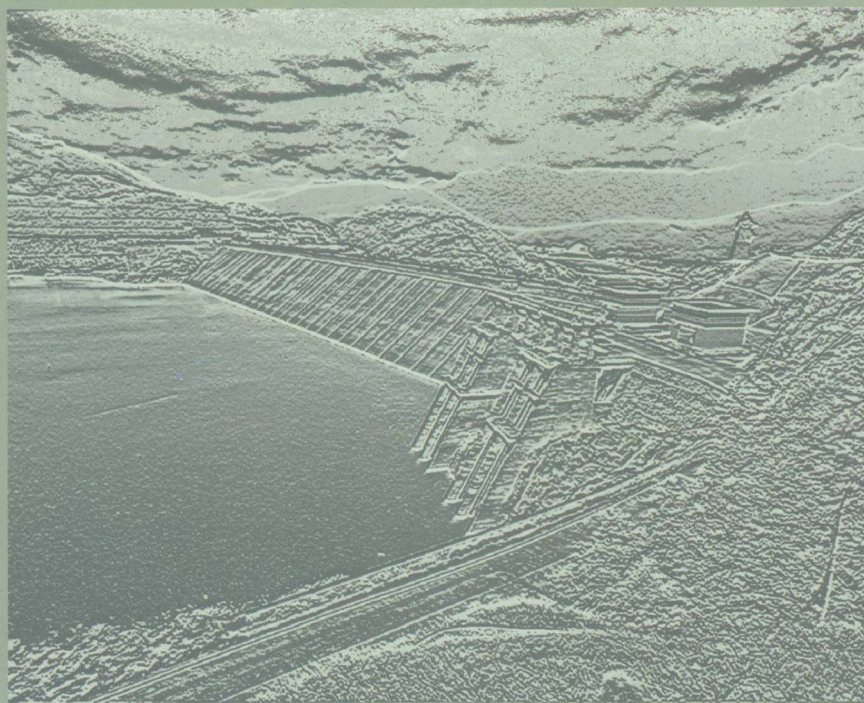
土石坝技术

Technology for Earth-Rockfill Dam

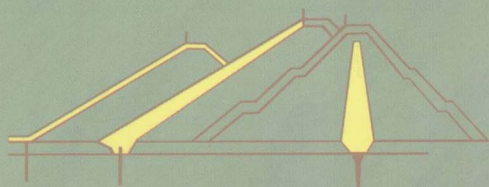
2012年论文集

中国水电工程顾问集团公司
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

2012年论文集

中国水电工程顾问集团公司
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

图书在版编目 (CIP) 数据

土石坝技术. 2012 年论文集/中国水电工程顾问集团公司等组编. —北京: 中国电力出版社, 2012. 6

ISBN 978-7-5123-3237-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 142140 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 34.75 印张 787 千字

定价 139.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

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			

目 录

一、进 展 综 述

国际混凝土面板堆石坝的发展

..... 中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会 (1)

我国水工技术发展与展望..... 杨泽艳 赵全胜 方光达 (17)

高混凝土面板堆石坝建设的核心理念——变形控制与综合变形协调

..... 徐泽平 贾金生 (25)

深厚覆盖层建坝成就及主要技术问题..... 方光达 党林才 (35)

土石坝震害与抗震安全..... 朱 晟 (47)

土石坝及地基抗震设计规范修编的若干进展..... 刘小生 赵剑明 王钟宁 杨玉生 (66)

二、防 震 抗 震

糯扎渡高心墙堆石坝工程抗震设计实践与抗震规范探讨

..... 雷红军 刘兴宁 冯业林 (76)

堆石坝土工格栅抗震加固效果研究分析..... 王登银 陈振文 汤 旻 郎玲芳 (84)

长河坝高土心墙堆石坝坝顶抗震措施研究..... 张 丹 伍小玉 (91)

猴子岩面板堆石坝抗震特性分析与抗震设计 王钰隼 朱永国 黄发根 (101)

汶川地震灾区三座高土石坝地震变形特性分析

..... 杨泽艳 张建民 王富强 李福云 翟迎春 (108)

基于 ABAQUS 的高面板堆石坝地震反应分析 潘家军 饶锡保 徐 晗 (120)

深厚覆盖层上高土石坝不同坝型的地震动力反应分析

..... 龙 文 沈 婷 陈 晴 李国英 李向阳 (128)

深覆盖层上土石坝地震反应非线性有限元分析 岑威钧 王 帅 杨志祥 (142)

董管水电站面板堆石坝抗震设计研究 蔡大咏 湛正刚 慕洪友 (149)

董管水电站地震应急措施和预案设计研究 李晓彬 湛正刚 (155)

金川水电站坝基砂土液化与破坏评价研究

..... 段 斌 吴晓铭 陈 刚 付恩怀 张晓将 (160)

仙游抽水蓄能电站上水库主坝面板堆石坝抗震设计 王樱峻 (168)

崖羊山水电站面板堆石坝坝体动力分析及坝坡稳定分析 张 承 冀承猛 (174)

黄角树水电站覆盖层上面板堆石坝防震抗震研究 孙怀昆 程 凯 任 强 (180)

回龙山水电站心墙堆石坝三维有限元抗震分析	贾宇峰	顾亚敏	孔令学	(188)
柯赛依混凝土面板堆石坝抗震设计	张泽辉	沈贵华	曾 钰	(195)
乌拉泊水库土石坝抗震设计			李慧芳	(201)
土石坝工程震损后的除险及加固	李 宁		郝淑荣	(206)

三、变 形 控 制

基于灰色理论的糯扎渡水电站心墙堆石坝沉降预测模型应用研究	戴益华	王娟娟	邹 青	(209)
双江口水电站 300m 级高堆石坝长期变形初步研究	周 伟	李善平	蒋常春	刘颖雄
				(219)
面板堆石坝流变分析与预沉降时间措施	王富强	张建民	杨泽艳	(226)
高土心墙堆石坝裂缝控制	王党在		金 伟	(234)
水布垭大坝变形控制技术及其变形监测			袁 泉	(239)
小浪底水利枢纽大坝变形监测分析及规律研究	王 琳	赵 春	蒋金虎	(243)
堆石料蠕变与弹塑性变形区分方法探讨	张茵琪	李海芳	王志强	(252)

四、设 计 技 术

糯扎渡水电站高心墙堆石坝监测设计创新与实践	谭志伟		邹 青	(257)
两河口水电站砾石土心墙堆石坝设计	朱先文	冯 军	金 伟	(265)
抽水蓄能电站库盆黏土铺盖防渗设计			王樱峻	(272)
深厚覆盖层上高土石坝的防渗结构设计			刘荣丽	(278)
堆石坝安全监测关键技术问题讨论	吴毅瑾	杨泽艳	孙永娟	谭志伟
				(283)
超百米级深厚覆盖层上心墙堆石坝新型廊道结构研究	徐 晗	饶锡保	潘家军	黄 斌
				陈 云
				(288)
老渡口水电站面板堆石坝设计特点	吴学斌	庄家耿	郑先姣	梁 谦
				(293)
寺坪面板堆石坝坝体分区优化三维有限元分析			陈 云	张传健
				饶锡保
				(298)
Hyttejuvet 坝突然渗漏事故的回顾和心墙堆石坝水力劈裂的反思	邓 刚	韩巍巍	温彦锋	于 沐
				姜 菲
				吴 浩
				(307)
土石心墙坝的水力劈裂防治			饶建勇	张文倬
				(319)

五、施 工 技 术

糯扎渡心墙堆石坝填筑施工技术	黄宗营	张耀威	唐先奇	宁占金
				(325)
糯扎渡超高心墙堆石坝填筑施工质量控制	张耀威	黄宗营	朱自先	宁占金
				周正全
				(335)
糯扎渡心墙堆石坝掺砾土料击实特性及压实质量检测方法研究	宁占金	黄宗营	唐先奇	方德扬
				朱自先
				(344)

高含水率防渗土料筑坝施工技术述评与研究 ... 任金明 陈永红 梅龙喜 黄泰仁 (353)

湿陷性黄土坝基粉质壤土心墙砂砾料混合坝施工技术
..... 支超红 社会龙 曹希泽 丁新强 徐更晓 (361)

博茨瓦纳骆察尼大坝黏土心墙施工 张 睿 周庆国 张喜林 杨和明 (370)

隘口水库大坝沥青混凝土心墙施工技术
..... 孙洪涛 邵国兵 杜浩亮 杨和明 徐更晓 (377)

双江口水电站防渗土料掺合工艺试验研究
..... 李善平 蒋常春 刘颖雄 王 力 彭旭初 (383)

毛尔盖水电站砾石土心墙防渗土料特性研究 刚永才 (389)

大仓水电站混凝土防渗墙施工 曹增强 孙 超 (397)

苗家坝水电站趾板基岩灌浆施工 周卫锋 李新社 (402)

青海南门峡水库左坝肩岩溶帷幕灌浆 潘文国 (409)

三河口水库主坝混凝土防渗墙施工 艾立伟 (413)

窄口水库高黏土心墙坝坝体混凝土防渗墙施工 房小波 金 昊 (417)

六、科 研 试 验

糯扎渡高心墙堆石坝模型参数反演分析
..... 袁会娜 徐文杰 董威信 于玉贞 张丙印 (425)

土石坝静、动力流固耦合可视化分析软件的研发
..... 刘斯宏 陈振文 汤 旻 傅中志 张 凯 (430)

粗粒土非线性剪胀模型 程展林 (439)

苗尾水电站砾质土心墙料碾压试验研究
..... 黄泰仁 陈振文 汤 旻 王登银 郎玲芳 李 健 鄢 镜 (449)

粗粒料残余变形本构模型的探讨 黄 斌 汪明元 周 若 何晓民 (457)

等应力比加载路径下堆石体力学特性的细观数值研究 ... 马 刚 常晓林 周 伟 (465)

水工沥青混凝土力学特性试验研究 黄 斌 伍小玉 谭 凡 (476)

基于小波变换分析小浪底大坝渗流监测数据 宋书克 魏立巍 姜渊知 (482)

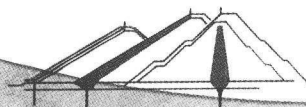
不同设计阶段物理力学参数的取值方法 王新奇 孙胜利 (487)

混凝土面板堆石坝的干缩应力 吴一匡 (494)

附录一 中国 30m 以上已建混凝土面板堆石坝统计表 (截至 2011 年底) (498)

附录二 中国 30m 以上在建混凝土面板堆石坝统计表 (截至 2011 年底) (530)

附录三 中国 30m 以上拟建混凝土面板堆石坝统计表 (截至 2011 年底) (538)



一、进展综述

国际混凝土面板堆石坝的发展

(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] 国际混凝土面板堆石坝已有 100 多年的历史,分布在近百个国家和地区,其发展大致可分为“早期、过渡、现代和突破发展”四个阶段。国际面板堆石坝在设计、施工、科研、监测和特殊自然条件建坝等方面积累了丰富的经验,筑坝技术逐渐成熟,取得了瞩目的成就。最大坝高已突破 230m,正在向更高、更可靠、更安全的方向发展,同时也面临巨大的机遇与挑战。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 建设概况 技术进展 经验教训 发展方向 国际

1 概述

1.1 建设情况

面板堆石坝最早源于美国西部淘金热中的拦河筑坝取水,已有 100 多年的历史。据不完全统计,截至 2011 年,国内外已建、在建和拟建的混凝土面板堆石坝约 600 座,分布在除南极洲外的六大洲近百个国家(见图 1)。其中,中国最多,约占 50%;澳大利亚、西班牙、美国、巴西各占 3%~5%;其他国家约占 1/3。可以说,面板堆石坝发源于美国,成长或推广于西班牙、澳大利亚和巴西,兴盛或发展于中国。中国已成为名副其实的面板堆石坝大国。

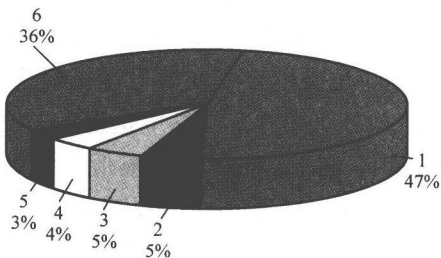


图 1 国际面板堆石坝分布图

1—中国; 2—澳大利亚; 3—西班牙;
4—美国; 5—巴西; 6—其他国家

国际面板堆石坝的坝高、库容及装机容量等工程规模统计分析见图 2。目前,200m 以上的面板堆石坝并不多,约 10 座,占 2%左右;最多的还是 30~100m 的中低坝,约占 70%。面板堆石坝

形成的 10 亿 m^3 以上的大水库不到 10%,大多数还是 1 亿 m^3 以下的中小型水库。面板堆石坝挡水的大型水电站约占 5%,大多数还是中小型水电站。由统计可见,面板堆石坝工程在国际水资源利用中发挥着巨大作用。

* 本文由中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会组织策划,杨泽艳执笔编写,蒋国澄修改完善,周建平、徐泽平、孙永娟和王富强审阅定稿。

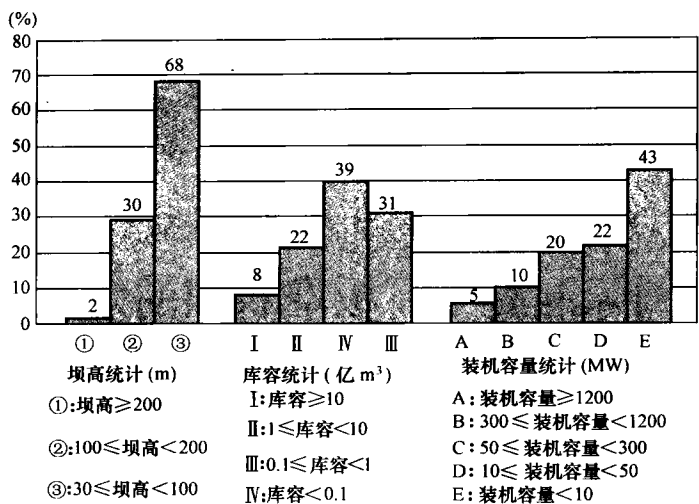


图2 国际面板堆石坝工程规模统计图

目前，国际上已建面板堆石坝工程中，最高的是中国的水布垭坝，高 233m；水库总库容最大的是马来西亚的 Bakun 坝，约 438 亿 m^3 ；装机容量最大的是巴西的 Xingo 坝，约 3000MW；枢纽泄洪流量最大的也是巴西的 Xingo 坝，约 33 000 m^3/s ；坝体填筑规模最大的是中国的天生桥一级坝，坝顶长 1104m，填筑量约 1800 万 m^3 ，面板面积约 17.7 万 m^2 。

国际已建面板堆石坝中，趾板置于深厚覆盖层上最高的是中国的九甸峡坝，高 136.5m，覆盖层厚 38m。覆盖层厚度最大的是智利的帕克拉罗坝，达 113m。河谷最狭窄的 100m 以上高坝是哥伦比亚的 Golillas 坝，长高比仅为 0.87。河谷极不对称且边坡高陡的是中国的洪家渡坝，趾板边坡高度约 310m。强地震区最高的是中国的吉林台一级坝，高 157m，抗震设计烈度为Ⅸ度。经受过高地震烈度考验最高的是中国的紫坪铺坝，高 156m，汶川地震中影响烈度达Ⅸ～Ⅹ度或更高。位于气温最低及温差最大地区的是中国的莲花坝，高 71.8m，极端最低气温为 -45.2°C ，极端温差达 82.7°C 。海拔最高的是中国的查龙坝，高 39m，坝顶高程为 4388m。纬度最高的是冰岛的 Karahnjukar 坝，高 198m，地处北纬 65° 附近。老坝加高最高的是美国的 New Exchequer 坝，高 150m，是在 88m 高的拱坝上加高而成的。坝身溢流量最大、同类坝体最高的是中国的桐柏蓄能下库坝，高 70.6m，坝身泄量为 496 m^3/s ，已经过泄洪初步检验。运行期发生溃坝事故最高的是中国的沟后坝，高 71m。面板严重损坏、放空水库进行修补的是巴西的 Campos Novos 坝，高 202m，满库的库水在 1 天内全部泄空。曾多次降低库水位进行修补的是委内瑞拉的 Never Turimiquire 坝，高 115m，最大渗漏量曾达 9800L/s。

据不完全统计，目前国际上已建、在建和拟建 200m 以上高面板堆石坝情况见表 1。

表 1 国际上已建、在建和拟建 200m 以上高面板堆石坝统计表（按坝高排序）

序号	工程名称	国家	建设情况	坝高(m)	坝长(m)	坝体方量(万 m^3)
1	茨哈峡	中国	拟建	253	669	3150

续表

序号	工程名称	国家	建设情况	坝高(m)	坝长(m)	坝体方量(万 m ³)
2	大石峡	中国	拟建	251	598	2052
3	古水	中国	拟建	242	430	1430
4	Agbulu	菲律宾	拟建	234		2100
5	水布垭	中国	2008 年完建	233	660	1526
6	猴子岩	中国	在建	223.5	283	980
7	Morro de Arica	秘鲁	拟建	221		510
8	Nam Ngum III	老挝	拟建	220		
9	江坪河	中国	在建	219	414	704
10	La Yesca	墨西哥	在建	205	629	1180
11	Bakun	马来西亚	2009 年完建	203.5	750	1650
12	Campos Novos	巴西	2006 年完建	202	590	1211

1.2 发展阶段

按 J. B. Cooke 的意见, 国际面板堆石坝的发展可分为以厚层抛填为主的早期 (20 世纪 30 年代以前)、相对停滞的过渡期 (20 世纪 30 年代至 60 年代后期) 和以薄层碾压为主的现代期 (1970 年以后)。2000 年以后, 面板堆石坝开始向 200m 级超高坝发展, 这一时期突破较多。结合 J. B. Cooke 的论述, 本文将国际面板堆石坝的发展大致划分为“早期、过渡、现代和突破发展”四个阶段 (见图 3)。

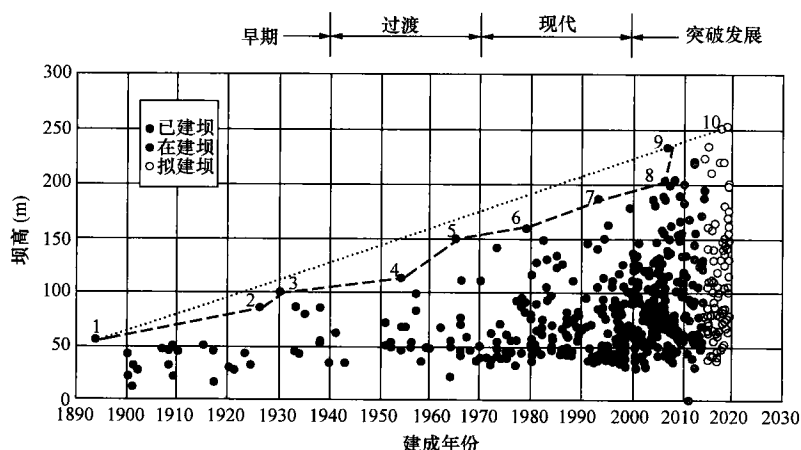


图 3 国际面板堆石坝发展示意图

1—Morena 坝; 2—Dix River 坝; 3—Salt Springs 坝; 4—Paradela 坝;
5—New Exchequer 坝; 6—Foz do Areia 坝; 7—Aguamilpa 坝; 8—Campos Novos 坝;
9—水布垭坝; 10—茨哈峡和大石峡坝

(1) 早期阶段。20 世纪 30 年代以前为早期阶段。该阶段施工方法主要以厚层抛填为主, 有的工程辅以高压水冲实, 也有的采用干砌法; 堆石体用料较严格, 抗剪强度较高, 坝坡较陡, 为 $1:0.6 \sim 1:1.2$ 。抛填式堆石体的孔隙率较大, 为 $27\% \sim 35\%$, 压缩性高;

据统计,坝高超过 75m 的坝大多产生表面裂缝和渗漏,其安全性成为问题。1930 年建成的美国 Salt Spring 坝,高 100m,建成后发生严重渗漏,是这一时期的代表性工程。

早期阶段的技术特点主要表现为:抛填堆石,孔隙率较大,因而坝体变形大,对高坝易产生面板破坏、接缝张开、严重渗漏等问题;方块形混凝土面板;与地基的连接采用嵌入基岩的混凝土齿槽;均匀垫层或硬垫层,堆石料从上游到下游由细到粗,渗透系数由小到大;即便在没有面板的情况下,坝坡稳定和渗透稳定都是安全的。

(2) 过渡阶段。过渡阶段主要指 20 世纪 30 年代至 60 年代后期。因 Salt Spring 坝面板破损和大量渗漏,人们对混凝土面板堆石坝的安全运行有所疑虑,使面板堆石坝建设处于相对停滞的状态。相对而言,土心墙堆石坝较能适应抛填堆石的大量变形,在这一时期得以较快发展。该阶段修建的少数高面板堆石坝,如葡萄牙的 Paradela 坝(高 112m, 1955 年)仍采用抛填式填筑,美国的 New Exchequerfmy 坝(高 150m, 1966 年)部分引入薄层碾压技术,都因坝体变形较大,渗漏较严重而需大量修补。

过渡阶段的技术特点主要表现为:面板堆石坝修建相对停滞,施工技术仍停留在早期的抛填形式,少量坝高超过 100~150m 级的高坝坝体变形仍无法控制,仍有严重渗漏。在 20 世纪 60 年代后期,引入振动碾进行薄层碾压堆石的施工方法,为现代阶段的发展奠定了基础。

(3) 现代阶段。现代阶段主要指 1970~2000 年。由于引入薄层碾压技术,得到密实而较少变形的坝体,从而解决了影响面板堆石坝发展的主要问题,使面板堆石坝得以重新发展,其坝高也向 200m 级高坝发展。现代阶段面板堆石坝的设计理念和施工技术在澳大利亚的 Cethana 坝(高 110m, 1971 年)初步形成,到巴西的 Foz do Areia 坝(高 160m, 1980 年)、Salvajina 坝(高 148m, 1983 年)趋于成熟。20 世纪 80 年代,现代面板堆石坝技术被引入中国,并得到迅速发展。这一时期的代表性工程有墨西哥的 Aguamilpa 坝(高 186m, 1993 年)和中国的天生桥一级坝(高 178m, 2000 年),这两座坝的建设经验和教训为 21 世纪的突破发展准备了条件。

现代阶段的技术特点主要表现为:除保留早期和过渡期面板堆石坝的基本特征外,全面引入振动碾压技术,采用级配堆石料进行薄层振动碾压,得到密实而较少变形的坝体;采用半透水级配垫层;薄型趾板;滑模浇筑竖向分缝的长条形混凝土面板;形成多道和多功能的接缝止水结构和材料,可以适应较大的接缝变形。坝体分区,筑坝材料的填筑标准,面板、趾板的设计及施工技术,接缝止水结构和材料等都已基本定型。开始建设趾板建于覆盖层上的混凝土面板堆石坝。碾压堆石体的密实度较高,以中硬岩为例,堆石孔隙率为 22%~24%,坝高 150m 以下的面板堆石坝运行良好,坝高超过 150m 后,坝体变形较大。虽尚不能脱离经验坝型的范畴,但由于高坝的增多,技术要求较高,而开展系统的科学试验和研究工作,逐步趋向于经验判断与科学试验、理论分析相结合的阶段。

(4) 突破发展阶段。2000 年以后高面板堆石坝日益增多,开始向 200m 级超高坝发展,研究建设 300m 量级的坝,并取得突破。建成了中国的洪家渡坝(高 179.5m, 2005 年)、三板溪坝(高 185.5m, 2007 年)和水布垭坝(高 233m, 2008 年),巴西的 Barra Grande 坝(高 185m, 2005 年)和 Campos Novos 坝(高 202m, 2006 年),冰岛的

Karahnjukar 坝 (高 198m, 2008 年), 马来西亚的 Bakun 坝 (高 203.5m, 2009 年) 等坝。趾板建在深厚覆盖层上的面板堆石坝技术也已基本成熟, 坝高突破 100m。

突破发展阶段的技术特点主要表现为: 除保留现代面板堆石坝的特点外, 根据超高坝的特点, 重视坝体变形控制技术, 采用更大激振力的碾压设备, 增加堆石料的压实度; 坝体分区和筑坝材料要考虑各分区间的变形协调, 坝体填筑尽量平衡上升, 必要时设增模区等措施, 减小不均匀变形; 面板浇筑时坝体有一定的填筑超高, 并有一定的预沉降措施, 以减小后期变形对面板及接缝的有害影响。重视大坝竣工后的长期变形研究和处置, 以及面板混凝土裂缝机理的研究及防治, 研制了坝料全套试验设备及方法, 静动力数值模拟和物理模拟技术取得长足进展等, 增强了理论分析和设计计算的分量。而以重型机械和配套设备装备起来的施工队伍, 可以在合理工期内完成很大的工程量, 并保证质量。数字化技术和信息化管理已在大型工程中试验推广。

2 主要技术进展

2.1 坝体布置

(1) 河谷地形。面板堆石坝对河谷地形条件的适应性很强, 各类河谷形态均可以修建。坝址可选择在顺直河段, 也可选择在河湾地段。国际上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 0.87, 还有位于狭窄非对称及高陡边坡河谷上的坝。局部不利地形条件通过开挖回填、混凝土挡墙或其他结构措施进行改造。

(2) 坝轴线及趾板布置。面板堆石坝对坝址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直线与曲线的组合来适应地质条件的变化。趾板通常修建在稳定和坚固、不冲蚀、可灌浆的基岩上, 并应尽量避免不良地质岩体和存在严重地质缺陷的地段。经适当的工程处理, 也可将趾板建基于较差的岩基上。在具有深覆盖层的坝址, 在深入研究论证并采取适当工程措施的情况下, 可将趾板区挖出覆盖层而建基于岩基上、堆石体建基于覆盖层上, 或将趾板建基于深厚覆盖层地基上, 而对覆盖层作垂直防渗处理。采用后一种方式也修建了多座高面板堆石坝。

(3) 泄水建筑物布置。面板堆石坝枢纽工程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在 $20\text{m}^3/\text{s}$ 左右。任何情况下, 都不允许漫坝, 因此, 堆石坝工程通常要求有多条泄水通道, 并设置具有超泄能力和能降低库水位的泄水设施。对高坝大库, 宜设置不同高程的泄水建筑物, 以便于调度运用。以前都将泄水建筑物置于坝头, 以求工程量较小, 但现在不少工程的岸边溢洪道采取大开挖布置, 并利用开挖料直接上坝, 不设专门料场, 或以料场作为补充, 取得了很好的技术经济效果。还有一些地质条件较好的工程, 采用溢洪道与电站进水口共用一个引渠的布置, 可以节省很大工程量。

2.2 筑坝材料及断面分区

(1) 材料选择。基于就地取材的原则, 面板堆石坝筑坝材料的来源非常广泛。爆破堆

石料采用较多的是灰岩、砂岩、板岩、花岗岩、玄武岩、大理岩和熔凝灰岩等。原岩饱和抗压强度为 40~80MPa 的中硬岩或硬岩是最为适用和应用经验最为丰富的筑坝材料。软岩也是可选的筑坝材料之一,其饱和抗压强度可小于 30MPa,但宜大于 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,应不用或慎用软岩料。采用坚硬岩或超硬岩筑坝的施工可操作性较差,工程实例较少。天然砂砾石料是良好的筑坝材料,国际上有大量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或直接支撑面板的区域。由于砂砾石料在低应力条件下的抗剪强度较小,因此不宜用于坡面附近,并需采取渗流控制措施。近年来,依据土石方平衡的原则,大力提倡将建筑物开挖料按其质量用于坝体的不同部位,将可以利用的开挖料当做料场一样开发,技术经济和环境效益明显。

(2) 坝体轮廓。坝顶宽度一般为 5~8m,100m 以上高坝或高地震烈度区建坝,坝顶还适当加宽。防浪墙高度一般为 3~5m,墙底高于正常蓄水位,墙顶高出坝顶 1.0~1.2m。当筑坝材料为质量良好的硬岩或中硬岩堆石料时,上、下游坝坡采用 1:1.3~1:1.4,由于天然砂砾石料在低应力条件下的强度较低,坝坡一般放缓至 1:1.5~1:1.6,其下游坡宜设置堆石层,以提高坝坡稳定性。软岩堆石坝料筑坝或者软基上建坝,则根据大坝抗滑稳定分析并考虑安全储备研究确定坝坡,必要时适当放缓坝坡。

(3) 断面分区。按照上堵下排和渗透稳定的原则,坝体自上游到下游依次设置垫层区、过渡区、上游(主)堆石区和下游堆石区。对砂砾石、软岩等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排水通畅。现代断面分区设计的理念已能做到即使没有面板,也能保证坝体的渗透稳定。高坝设计和施工则重点研究主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范围,上、下游堆石区的分界线一般倾向下游,以利于减小下游堆石体对面板变形应力的影响。由于坝体变形和不均匀变形影响面板的应力变形条件是面板堆石坝运行安全的控制因素,因此断面分区时需考虑各部分间的变形协调。

(4) 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 80~100mm,小于 5mm 的粒料含量宜为 30%~55%,小于 0.075mm 的粒料含量要求小于 8%。压实后渗透系数宜为 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ 。过渡料可以在爆破试验的基础上直接由料场爆破开采,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 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{cm/s}$ 。通常最大粒径宜不超过 300mm,小于 5mm 的粒料含量一般要求达到 20%~30%,小于 0.075mm 的粒料含量宜小于 5%。对爆破开采料,小于 5mm 的粒料含量可适当降低。过渡料应对垫层料起反滤作用,防止面板漏水时因垫层料流失而扩大事故。

(5) 堆石料。上游(主)堆石料的最大粒径不应超过压实层厚度,宜为 500~800mm,小于 0.075mm 的粒料含量也宜控制在 5% 以下。下游(次)堆石料的最大粒径可适当放宽要求。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。实践



表明,提高上游堆石区的压实密度,可以明显改善堆石体的力学特性,控制竣工后的有害变形,传统的 10t 振动碾碾压 4 遍的施工工艺对高坝已不合适。现代超高坝采用重型振动碾已能将堆石孔隙率控制在 20%或更小。

2.3 防渗结构

(1) 面板。面板分块宽度一般为 12~18m, 15m 最为普遍;两岸面板宽度约为中部的 1/2,有的也采用全线等宽面板。面板厚度一般按水力梯度不超过 200 控制,顶厚 30cm 或 40cm,底厚按水头的 0.002~0.003 5 加厚,中低坝可采用 30~40cm 等厚面板。混凝土面板一般为单层双向配筋,单向含筋率为 0.3%~0.4%;也可采取双层双向配筋,并设置箍筋。根据面板抗挤压的要求,在边缘可加设抗挤压钢筋。面板分期的水平缝通常设置施工缝,钢筋穿缝。结合当地原材料的来源特性,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,面板防裂取得了一定成效。近期,有些工程还采用在面板上喷涂一层防渗防裂涂料的方法,以增强面板的防渗、防裂能力和耐久性。

(2) 趾板。现代混凝土面板堆石坝将薄型趾板视为混凝土面板与地基防渗结构的连接部件,而不是受力结构。目前,混凝土趾板与地基的连接、趾板结构布置和配筋、施工技术等均较为成熟。在趾板的布置上,有的工程通过采用等宽趾板或减少趾板宽度,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,但最小宽度一般不小于 3m,并满足灌浆布置的需要,以内趾板补足允许水力梯度要求的宽度。趾板厚度一般不小于 0.3m,并与相邻面板厚度相匹配。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。对由于地形地质条件的需要而采用高趾墙的工程,则需要对其进行专门设计,校核其稳定及强度安全。

(3) 接缝止水。周边缝是最重要的接缝形式,其止水结构形式由单一止水型或自愈型止水,向止水与自愈相结合的方向发展。相对于传统的三道止水的方式,大多数工程都保留底部金属止水,取消了中部止水,加强表层止水。止水铜片多采用软紫铜。表层采用波纹状止水带、塑性止水材料、表面覆盖盖片等多道既独立又相互支持的止水防线。塑性止水材料的流动性和耐久性大幅提高。配合接缝表面的粉煤灰、粉细砂覆盖及周边缝下垫层料的反滤作用,又增加一道自愈型的防渗线。这样的防渗结构和材料,已成功地应用于 200m 级的特高坝,以适应周边缝的大变形和高作用水头。面板的垂直缝一般不分张性缝或压性缝,都采用表面和底部两道止水的形式。基于预防中部面板垂直缝两侧混凝土产生挤压破坏的考虑,近期的高面板堆石坝选取一定数量的受压垂直缝,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,趾板建于稳定、坚硬、不冲蚀和可灌浆的弱风化以下的基岩上,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;对置于强卸荷、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,如固结灌浆、贴坡连接板、高趾墙和回填置换等。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。趾板下岩基的帷幕灌浆是以趾板作灌浆盖板,在趾板上进行钻灌的,需采取措施防止灌浆时趾板的抬动。

对深覆盖层上的混凝土面板堆石坝,现代越来越多的工程将趾板建基于覆盖层上,而用混凝土防渗墙作覆盖层的防渗处理,覆盖层深度和坝高都已超过 100m。防水墙下基岩是否进行帷幕灌浆处理,视基岩的地质情况和工程要求而定。

(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,如强夯、振冲碎石桩等。

2.5 导流与度汛

大部分工程采用导流洞一次导流的方式。最常见的是导流洞过水、枯期围堰、次年坝体临时断面挡水度汛,中、后期采用中、低高程的导流、泄水建筑物泄水及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。

实践表明,有保护的垫层料挡水度汛是安全和可行的,最大挡水高度已达 70m,挡水时的渗流量最大达到 $70\text{cm}^3/\text{s}$ 以上,这为施工期度汛提供了极大的方便。导流方式的确定对每个工程都有极强的个性,需因地制宜地经多方案比较确定。但一经确定,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。有一些工程汛期出现超标准洪水,造成了一定的损失,因此,现代大型工程一般都采取有效的预防超标准洪水的措施和预案,如上游基坑预冲水措施、下游坝趾采用碾压混凝土挡墙防止冲蚀等。

2.6 主体工程施工

(1) 填筑分期。早期建设的面板堆石坝填筑分期规划无严格要求。近年建设的高面板堆石坝,除低高程抢拦洪度汛的需要外,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,下游坝体填筑还高于上游坝体,上下游高差宜尽可能小。面板施工前,填筑面超高至少在 10~15m 或以上,并设置预沉指标;具备条件的情况下,还结合分期蓄水、提前受益等考虑,对坝体采取充水预压措施,使完工前发生更多变形,并使堆石体强化,以减少完工后的有害变形。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。上坝运输一般以汽车运输为主,加水方式采取坝外加水和坝面洒水相结合的方式。近期建设的高坝,因相对密实度要求较高,故压实功能也相应地提高,振动碾自重普遍从 100kN 级提高到 200kN 级,甚至 300kN 级。部分工程还引进了冲碾压实机,激振力达到 2000~2500kN。根据工程需要,堆石料压实后的孔隙率可控制在 20% 以下。由于采用大型机械,施工强度大大提高,坝体填筑强度可达 $100\text{万 m}^3/\text{月}$,一般也可达 $50\text{万} \sim 70\text{万 m}^3/\text{月}$ 。

(3) 压实检测。堆石坝施工压实质量要采用压实密度与施工工艺参数双控。干密度检

测目前仍以挖坑灌水法为主。经过研究和试验,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 施工监控法等。新检测方法工序简化、周期短、检测数量增加,可与挖坑灌水法相互补充和校核,工作效率得到较大提高。

(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了混凝土挤压墙固坡技术,有的工程还探索了混凝土预制梁块移动固坡技术和翻模固坡技术,并成功应用。为减少上游坡面对面板的约束作用,一些工程采取了在挤压墙表面喷乳化沥青,或在面板施工前凿断挤压墙等措施。

(5) 混凝土浇筑。面板、趾板混凝土施工技术日益成熟,大多数面板采取无轨滑模进行分条跳块浇筑,特殊条件下,也有采用分部分块浇的。一般根据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。有的工程采用了网片钢筋,在面板钢筋绑扎固定和立模后,一般通过滑模和浇筑台车进行混凝土浇筑振捣,近年来普遍采用无轨滑模技术。有的工程趾板采用滑模浇筑及跳块浇筑工艺。而有的工程防浪墙则采用预制构件施工,以利于加快施工进度。

2.7 试验研究及计算分析

(1) 试验研究。前期研究设计中,大多数工程都开展静动力三轴、压缩、渗透、湿化和流变或长期变形等试验研究。现已建立了适用于粗颗粒材料的全套静动力或静动力两用的大型力学性试验设备,但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。有些工程还结合应力变形反演计算需要,开展基于原级配堆石料的现场大型载荷试验和压缩试验。

重要的或大型面板堆石坝工程,还开展静力和动力的土工离心模型试验。在大型振动台上进行的面板堆石坝动力模型试验也取得了可喜的进展。与数学模拟相结合,将面板堆石坝应力变形分析提高到一个新的水平。对接缝止水结构和材料的大型仿真模型试验研究,以及施工导流水力学模型试验研究等,都对推进面板堆石坝建设发挥了积极作用。

基于最优配合比的混凝土改性、面板表面涂料、接缝止水材料、自愈型止水等新材料的研究和开发,其成果已在工程上得到实际应用。

(2) 计算分析。计算分析的主要内容是坝坡抗滑稳定、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。除了坝体高度较大、使用软岩、建基于覆盖层上、强地震区等情况外,一般可不作抗滑稳定分析。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,大坝就能保持稳定安全。坝体垂直向上和上游斜坡向的变形模量、坝体沉降有简化计算公式或图表供预估用。坝体的应力变形分析以非线性弹性模型和弹塑性模型为主,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。动力分析有等效线性和真非线性分析方法,还有静动力耦合的试验和计算方法,并有较成熟的计算程序。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,数值计算虽可对大

坝建设的全过程进行仿真分析,但尚不可能完全模拟全过程的各种影响因素,计算参数的取值也有一定的不确定性,因此,目前数值计算成果仍只是设计的重要参考,而不能作为唯一依据。

2.8 安全监测

各国面板堆石坝一般都设有较为完备的坝内和坝外变形监测项目,有的工程还设有面板挠度和脱空、坝身和坝基及绕坝渗流、堆石体应力,以及面板应力应变和温度、环境量、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渗漏量监测仍是一大技术难题。各国都重视强地震地区的地震动过程和参数的监测,但可资实用的资料不多。

2.9 特殊条件下筑坝

(1) 窄河谷及高陡边坡。国际上已有多座面板堆石坝建于狭窄河谷、高陡边坡地区,这些坝采取了能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适应变形能力等措施,建成后运行效果均良好。还有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部件,有的工程趾墙最大高度达 50m。

(2) 深厚覆盖层地基。国际上趾板修建在覆盖层上的面板堆石坝已有 30 多座,在建多座。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) 强震地区。国际上有多座面板堆石坝的抗震设计烈度为Ⅷ度或高于Ⅷ度。这些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,找出大坝抗震薄弱部位,有针对性地采取抗震措施。实践表明,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。

(4) 高寒地区。国际上在严寒和寒冷地区建成的面板堆石坝已超过 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。

3 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。100 多年来,国际上有多座面板堆石坝出现严重事故,其中 4 座溃坝。还有一些工程出现面板混凝土结构破损和大量裂缝等问题。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。