

土石坝技术

Technology for Earth-Rockfill Dam

2017年论文集

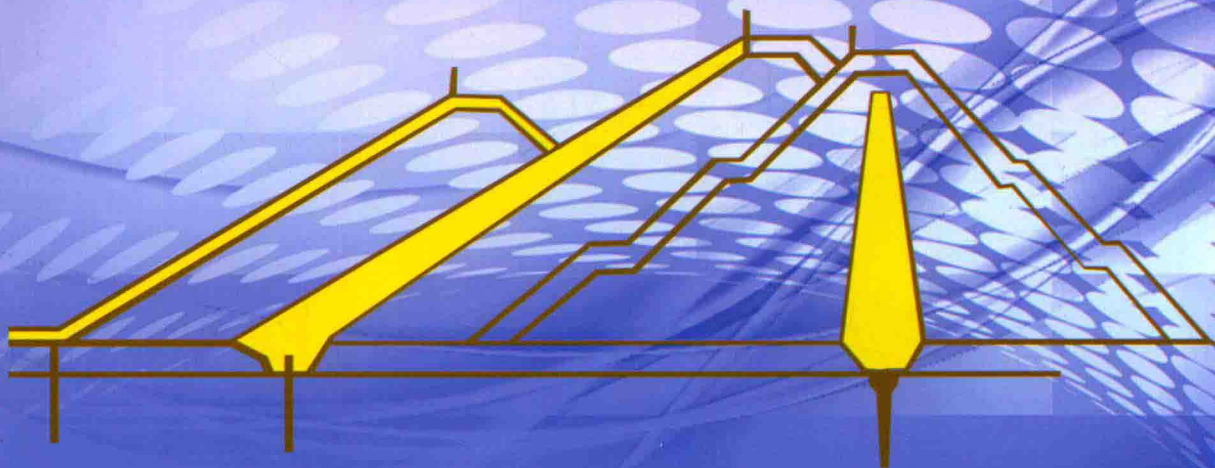
水电水利规划设计总院

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司 组编

水利水电土石坝工程信息网

国家能源水电工程技术研发中心高土石坝分中心



www.sstsbw.com



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

土石坝技术

Technology for Earth-Rockfill Dam

2017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
中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司 组编
水 利 水 电 土 石 坝 工 程 信 息 网
国家能源水电工程技术研发中心高土石坝分中心



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. 2017 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, 2018. 5
ISBN 978-7-5198-1666-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 030446 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 安小丹(010-63412367) 曹 慧 柳 璐

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 张俊霞 赵姗姗

责任印制: 蔺义舟

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2018 年 5 月第一版

印 次: 2018 年 5 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 24.5

字 数: 563 千字

定 价: 130.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

编 委 会

顾 问	马洪琪	陈祖煜	曹克明	林 昭	王柏乐
	周建平	宗敦峰	刘志明	彭 程	冯峻林
	关志诚	蒋国澄	梅锦煜		
主 任	张宗亮				
副主任	杨泽艳	党林才			
委 员	蔡昌光	陈 江	陈振文	程展林	迟世春
	邓毅国	冯业林	何定恩	黄晓辉	李 勇
	李国英	李庆云	李 伟	练继建	刘斯宏
	刘战生	吕明治	毛文然	沈益源	苏 萍
	孙 役	孙永娟	汪小刚	王君利	王仁超
	王亚文	温彦锋	吴高见	吴关叶	熊泽斌
	徐卫亚	徐泽平	严 磊	杨和明	杨建敏
	杨西林	姚栓喜	叶发明	殷宗泽	于玉贞
	余 挺	余 英	袁友仁	湛正刚	张丙印
	张社荣	张跃民	朱 晟	朱俊高	朱永国
编 辑	孙琼芳	雷红军	吴学明	姚翠霞	程伟峰
	马淑君	梁礼绘	李函逾		

近年来,随着设计研究和建设技术的进步,土石坝工程的建设得到了长足的发展。在糯扎渡(坝高261.5m)、双江口(坝高314m)、两河口(坝高295m)、如美(坝高315m)等代表性高心墙堆石坝的工程设计及研究中,在心墙掺砾料的物理力学特性试验及混掺施工工艺、材料的流变与湿化试验及模型、软岩料的利用、堆石料的数值试验、坝料本构模型、土石坝的变形计算分析理论与方法、土石坝抗震设计、大坝施工质量实时控制、大坝安全监测与评价和预警系统等方面取得了大量创新性成果。结合天生桥一级(坝高178m)、水布垭(坝高233m)、古水(坝高240m)等代表性高面板堆石坝的工程建设与研究,近年来工程界又开展了300m级高面板堆石坝适应性及对策研究和安全建设的关键技术研究,在堆石料的颗粒破碎、缩尺效应、面板应力变形的精细化数值模拟、面板挤压破损机理、抗震措施、安全监测廊道及管道机器人等方面又取得了大量可喜的新成就。以上成果的取得使我国土石坝的筑坝技术水平迈上了一个新台阶。

目前,位于我国西部的雅砻江、大渡河、澜沧江、怒江、金沙江、黄河等水电基地以及藏东南四江的开发利用程度还很低,这些流域是未来中国水电开发的重点地区。这些地区大多为高山峡谷,交通及地形地质条件复杂,建设水利水电工程的技术难度将会越来越大,土石坝以其对地基基础条件具有良好的适应性、能就地取材及充分利用建筑物开挖渣料、造价较低、水泥用量较少等优点,将发挥更加重要的作用。但同时,高土石坝工程的建设也将面临强震、深覆盖层、狭窄河谷、高寒等恶劣自然条件的挑战,新一批的关键技术问题亟待解决。另外,近年来在工程界快速发展和应用的新型涂覆材料、止水结构、坝体水下探测及修复材料和技术,以及CAD/CAE一体化三维设计、BIM协同设计与管理等,值得开展研究和应用探索。

水利水电土石坝工程信息网成立三十多年来,每年出版一本《土石坝技术》论文集,致力于适应新形势下土石坝建设的技术需求,广泛收集和积累专业信息和资料,总结土石坝工程建设经验,促进信息网内外专业技术交流,共享土石坝建设发展的新技术、新经验、新理念,研究土石坝建设中的新问题,为土石坝工程技术的发展起到了积极的促进作用。2017年,编委会开展了论文征集工作,共收到学术论文80余篇,经有关专家评审,最终甄选了51篇论文出版成本论文集。

相信本论文集的出版发行能为广大从事土石坝工程设计、施工、管理技术的同仁们提供有益的借鉴。

《土石坝技术》编委会
2017年12月

前言

一、工 程 设 计

关于混凝土面板堆石坝几个问题的探讨	杨启贵 谭界雄 周晓明 高大水 (1)
西北院混凝土面板堆石坝设计技术进步	王君利 (8)
三维设计在斜卡面板坝防渗系统中的应用	周 涛 柴 瑞 (19)
基于 Excel-VBA 和 CATIA 的土石坝三维参数化建模方法	隋国栋 张幸幸 董福品 邓 刚 (26)
响水涧抽水蓄能电站下水库围堤填筑土料设计	巩绪威 (33)
超高心墙堆石坝及地下厂房渗流分析与控制	段 斌 李善平 肖培伟 唐茂颖 李永红 (40)
狭窄河谷中高面板堆石坝变形控制关键技术	张晓梅 王君利 (52)

二、工 程 建 设

混凝土面板堆石坝病害特点及其除险加固	钮新强 谭界雄 田金章 (62)
高压旋喷灌浆应用于地下连续墙接头止水处理	刘松富 (69)
天然不均匀土掺合防渗料填筑质量控制方法与工程实践应用	江万红 (73)
金沙江龙开口水电站深槽上游防渗墙嵌岩成槽方法	胡 斌 黄晓勇 (79)
300m 级土石坝工程建设项目前期研究与论证	钱洪建 段 斌 陈 刚 李善平 严锦江 (84)
长河坝水电站智能施工信息管理系统的应用	周广稳 韩 兴 侯成林 (90)
我国混凝土面板堆石坝建设与思考	谭界雄 王秘学 田金章 周晓明 (97)
金沙江鲁地拉水电站大型弃渣体稳定性评价	季法强 马福祥 万克勇 (106)
振动碾无人驾驶技术的研发与工程应用	韩 兴 朱 剑 (114)
深基础地下连续墙墙下帷幕综合灌浆技术	刘松富 (124)
响水涧抽水蓄能电站引水竖井导井施工技术	郭新海 (129)
水工混凝土细骨料细度模数调整工艺设计与实现	刘 宏 (137)
影响混凝土施工过程中的质量控制因素分析	顿 江 陈怀均 陈怀明 (142)
云洞水库下层平洞强溶蚀带灌浆处理方法	陈占江 曹佳林 董 楠 (147)
300m 级高心墙堆石坝施工关键技术研究与应用	吴高见 樊 鹏 韩 兴 (152)

斜卡水电站大坝混凝土面板裂缝处理 柴 瑞 周 涛 张秋红 (159)

光面爆破装药结构在乌干达卡鲁玛水电站项目的改进和应用 姚 忠 (165)

反轨液压滑模在长河坝水电站的应用 陈 曦 韩 兴 黄 哲 董 武 (172)

罗塞雷斯低位泄水孔修复技术 张光辉 (179)

浅议预留保护层柔性垫层爆破工艺在夹岩水库趾板建基面开挖中的应用
..... 陈亚坤 王宏伟 (184)

面板堆石坝面板开裂研究与预防新措施 黄 静 张敬伟 蔡 寒 郭世海 (189)

沥青混凝土心墙坝渗漏检测及防渗体系修复综述
..... 位 敏 周和清 崔冬冬 胡 林 (200)

基于智慧工程理念的双江口水电站智能地下工程系统建设探索
..... 李善平 肖培伟 唐茂颖 段 斌 陶春华 (206)

三、安 全 监 测

溪洛渡水电站超大型地下厂房围岩监测资料分析和稳定性评价 伍文锋 (214)

浅谈苏丹上阿特巴拉大坝变形监测 赵彦明 (223)

溪洛渡水电站左岸谷肩堆积体边坡治理和监测 伍文锋 税思梅 (232)

物探方法技术在机场岩土工程勘察中的综合应用
..... 刘 成 刘 杰 戴国强 吴宗宇 余灿林 (240)

基于原型沉降监测资料的面板坝正反分析研究 周鹤翔 (246)

四、试 验 研 究

固结应力状态对超深厚覆盖层深埋砂土动强度参数的影响
..... 杨玉生 刘小生 李小泉 刘启旺 (254)

超高堆石坝坝料流变特性及三维有限元分析
..... 张蜀豫 段 斌 唐茂颖 李 鹏 王观琪 (266)

砾石土心墙料不同工况击实特性研究 谢正明 (276)

安徽绩溪抽水蓄能电站下水库面板坝趾板强风化基岩固结灌浆试验研究与探讨
..... 周鹏涛 (287)

水布垭电站土石坝坝料填筑碾压试验研究 李松林 (295)

巧用 Excel 自动选取级配曲线特征值求 C_u 和 C_c 李志龙 贾高峰 陈书军 (306)

掺砾料心墙砾石土压实性能研究 谢正明 (310)

抽水蓄能电站土石坝填筑料碾压工艺性试验研究
..... 贾高峰 王保欣 李志龙 陈书军 (322)

五、其 他

EH4 电磁成像系统在西部隧洞岩溶勘察中的应用
..... 刘 杰 刘 成 段 炜 戴国强 (331)

理正软件在涂面整理工程隔堤稳定分析中的应用 张志伟 杜 斌 陆益挺 (338)

GOCAD 三维地质建模成果的二次开发及应用研究
..... 段建肖 廖立兵 肖 鹏 孙青兰 (343)

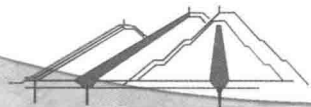
金沙江虎跳峡河段水电开发重大工程地质问题研究 王启国 (350)

南欧江三级水电站中隔墙基础地质评价及处理 梁培金 张根全 (359)

基于熵权的 TOPSIS 方法在土石坝安全评价中的应用 贾晓丽 (366)

岩石锚杆风机基础疲劳研究 明小燕 奚 泉 张 杰 (371)

土石坝防渗体细粒土料地质勘察中若干问题的讨论 黄振伟 马力刚 杨宏伟 (377)



一、工程设计

关于混凝土面板堆石坝几个问题的探讨

杨启贵^{1,2} 谭界雄^{1,2} 周晓明^{1,2} 高大水^{1,2}

(1 长江勘测规划设计研究院 2 国家大坝安全工程技术研究中心)

[摘要] 现代面板堆石坝以其独特的优越性在我国得到了迅速的发展,并取得了显著的成就。但面板堆石坝病害率偏高,且病害检查及加固处理均存在一定困难,从而对面板堆石坝的发展带来了不利影响。本文结合面板堆石坝设计及病害处理需求,对几个问题进行了一些探讨,提出了面板堆石坝坝前辅助防渗铺盖可以取消,需要设置放空设施,周边缝宜取消中间止水加强顶部止水的防渗作用。

[关键词] 面板堆石坝 防渗铺盖 放空设施 止水结构

1 引言

面板堆石坝在我国起步较晚,但发展势头十分迅猛。我国自20世纪80年代开始引进现代筑坝技术建设面板堆石坝,至今已30年有余。期间,经过引进消化、自主创新和不断突破发展,积累了大量的工程经验。我国混凝土面板堆石坝筑坝技术在取得巨大成就的同时,也存在坝体病害率偏高等问题,且病害检查及加固处理均存在一定困难,给面板堆石坝的发展带来了不利影响。

1.1 我国面板堆石坝的发展

混凝土面板堆石坝是以堆石体为支撑结构,并在其上游表面浇筑混凝土面板作为防渗体的大坝。该坝型具有坝体断面小、施工方便、工期短、导流简单、造价低等优点,近年来得到了迅猛发展。

我国现代意义的面板堆石坝始于1985年开工建设的西北口坝(坝高95m)及1988年率先建成的关门山坝(坝高58.5m),之后的建设快速发展。据不完全统计,我国建成及在建的面板堆石坝约300座,占世界面板堆石坝数量的一半;其中,坝高超过70m的混凝土面板堆石坝达140余座,占比40%以上。如今,混凝土面板堆石坝工程几乎遍布全国各地,涉及各种地形、地质条件和气候条件,特别是在高海拔、高寒、高地震烈度地区均有面板堆石坝建设。我国已建成的最高的面板堆石坝是水布垭坝,坝高233m,也是世界上建成的坝高最高的面板堆石坝;坝体填筑规模最大的是坝高178m的天生桥一级面板堆石坝,填筑量约1800万 m^3 ;深度覆盖层上已建的最高坝是九甸峡坝,坝高136.5m,趾板下覆盖层厚度为28m;强地震区最高坝是吉林台一级坝,坝高157m,抗震设计烈度

为9度；经受过高地震烈度考验的坝是紫坪铺坝，坝高156m，汶川地震中影响烈度达9~10度；位于气温最低地区的坝是高71.8m的莲花坝，其极端最低气温为-45.2℃。

1.2 面板堆石坝渗漏病害率较高

从已建成的混凝土面板堆石坝观测资料来看，该坝型大多表现出良好的运行状态，但也有部分水库存在一些问题。例如，沟后水库溃坝是国际坝工史上第一次同类型坝的溃决；天生桥一级面板坝施工期出现面板顶部弯曲裂缝、垫层料拉伸裂缝，运行期面板沿垂直缝挤压破坏；普西桥面板坝面板垂直缝挤压破坏；布西面板坝面板水平施工缝挤压破坏；三板溪面板坝面板脱空，蓄水后产生大量裂缝；株树桥坝、白云坝由于不均匀沉降变形引起面板破坏等。究其原因，面板堆石坝的坝体为散粒料填筑，具有变形大且持续变形时间长的特点，面板应力、接缝位移、面板垫层脱空、裂缝等与之密切相关。面板堆石坝的病害主要为面板变形破坏、止水结构破坏、面板脱空、面板裂缝等，而最终的表现形式均为大坝渗漏，即渗漏量突然增大，明显超过坝体正常运行的渗漏量。据不完全统计，在我国建设的坝高超过100m的63座面板坝中，有布西、白云等11座面板坝出现面板破坏等问题导致渗漏病害发生，出现渗漏病害率相对较高。

2 几个问题的探讨

目前，我国混凝土面板堆石坝的发展非常快，其数量也在迅速增加，但也有些坝在刚建成或运行多年后出现了各种各样的问题，需进行检测并加固处理。下面结合面板堆石坝新建、出现病害的面板坝渗漏检测和加固处理过程中几个问题的思考，进行一些探讨。

2.1 取消坝前辅助防渗铺盖

从安奇卡亚坝（坝高140m，1974年建成）开始，在面板底部设置了碾压防渗土质铺盖的措施，防渗效果较好。在后来的面板坝设计中，坝体分区专门在面板低部位设置了坝前辅助防渗铺盖，由上游铺盖区及盖重区组成。设置坝前辅助防渗铺盖可对面板裂缝及周边缝损坏起到堵漏的作用，铺盖料采用无黏性粉砂土或粉煤灰，当下部面板或接缝破坏发生渗漏时，利用盖重区填料随水流带入缝内，在反滤料的保护下对开裂处进行自动淤堵，起到辅助防渗的功能。

在实际运行中，许多未设置上游铺盖区的面板坝也运行良好，说明坝前辅助防渗铺盖并不是必需的，只有在出现裂缝渗漏问题的时候才显得必要。而当发现渗漏通过检查确定部位后，也可以通过水下抛填粉细砂等工程措施进行处理以达到坝前辅助防渗铺盖的效果。

坝前辅助防渗铺盖的设置现在一般从河床至1/3坝高处，由于防渗铺盖将下部面板覆盖，面板的例行检查或当出现问题需要进行面板检查时，通过水下摄像等手段无法直接观察下部面板是否破坏或破坏的情况。当通过技术手段确定了防渗铺盖下部面板的破坏位置时，因有较厚的覆盖层而无法通过水下施工进行处理。目前，我国混凝土面板坝大多不具备完全放空水库的条件，当辅助防渗铺盖下部面板出现破坏时，加固处理非常困难。若能够将水库放空进行处理，也需要先将辅助防渗铺盖料全部清除，工程量较大，占用工期较长，而面板坝设置了坝前辅助防渗铺盖，也不是发生了面板或接缝破坏就一定能够通过盖

重区料自愈而防止病害进一步恶化。湖南株树桥水库面板坝、白云水电站面板坝的破坏均发生在辅助防渗铺盖下部，盖重区料并未能通过自愈阻止坝体面板的破坏，通过进一步抛投级配料也未能堵住坝体的渗漏，最后不得不通过放空水库，清除坝前辅助防渗铺盖料进行面板及止水结构的修复加固处理。图 1、图 2 所示为株树桥、白云水库辅助铺盖下部面板塌陷情况。



图 1 株树桥水库辅助铺盖下部面板塌陷情况



图 2 白云水库辅助铺盖下部面板塌陷情况

对于坝前辅助防渗铺盖，在实际工程中居于防渗铺盖是辅助性质，施工质量特别是希望发挥自愈作用的防渗自愈材料往往控制不严，难于发挥真正的淤堵自愈功能，但据国内对混凝土面板坝运行的不完全统计，面板坝的上游防渗面板及止水结构在运行过程中出现各种各样的问题与缺陷比例较高，而随着水下工程技术与装备的发展，目前我国已经可以实现大水深的水下检查、检测以及水下加固处理，因此，混凝土面板坝一般不宜设置坝前辅助防渗铺盖，对于需要设置的也必须论证面板坝下部出现问题与缺陷的处理措施。

2.2 设置放空设施

面板堆石坝放空设施是为方便大坝检修而设置的低高程泄水建筑物，一般是通过设置专门的放空洞、利用深孔泄洪洞或引水发电设施来实现。目前，规范也只是规定高坝、重要工程，以及地震设计烈度为 8 度、9 度的混凝土面板堆石坝应设置放空设施，而对于其他一些面板堆石坝，并没有规定需要设置防空设施。天生桥一级、水布垭、董管、东津等面板堆石坝工程均设置了放空洞放空水库，白云、九甸峡、双沟等水库则利用泄洪洞、引水发电洞等建筑物放空水库。随着筑坝理论的发展，很多学者认为面板堆石坝一般不会有放空水库进行处理的可能性，可以不设放空设施，因为漏水不引起安全问题，面板破坏产生的漏水可以由半透水性垫层料限漏，并且可以通过投放粉细砂得到显著减小。如有意外需要进行处理，可由潜水员或采取其他措施进行水下检修，故在很多面板堆石坝工程未设置专门的放空设施，或设置了放空设施而根本不具备完全放空水库的功能。例如，1995 年建成的福建万安溪面板堆石坝（坝高 94m）、2008 年建成的三板溪面板堆石坝（坝高 185.5m）在施工过程中取消了原设计的放空洞，芹山面板堆石坝（坝高 122m）及街面面板堆石坝（坝高 126m）也未设置放空洞。

通过对我国坝高 100~150m 及坝高 150m 以上的面板堆石坝泄水建筑物放空能力的统计得到, 设有放空洞的面板坝水库放空系数 (即最低泄水建筑物进口底板至坝顶的垂直距离 H_1 与最大坝高 H 的比值) 平均值分别为 0.68 和 0.64, 最大值分别为芭蕉河一级坝 (坝高 113.3m) 的 0.93 和天生桥一级 (坝高 178m) 的 0.74, 最小值分别为董管坝 (坝高 150m) 的 0.43 和猴子岩 (坝高 223.5m) 的 0.41。也就是说, 坝高 100~150m 的面板坝通过放空设施放空水库, 下部也平均还有三十余米的水头; 坝高 150m 以上的面板下部也平均还有五十余米的水头, 水库由于水库泥沙淤积及泄洪建筑物闸门性能等限制, 是难以完全放空的。

随着面板堆石坝建设数量的增加, 越来越多的坝出现了不同程度的破坏问题, 如面板变形破坏、止水结构破坏、面板裂缝等直接影响了工程的运行安全, 必须进行处理。湖南白云水库最大渗漏量达 1240L/s, 采用水上抛投级配料铺盖后, 渗漏量减小到约 700L/s 后便不再减小, 且面板破坏区域位于坝前防冲铺盖下部, 采用潜水员进行检修难以完成, 必须通过放空水库进行处理。而白云水库设计是引水发电洞兼作放空洞, 放空洞底板高程距原河床还有 43m 水头, 水库通过放空洞无法完全放空, 最后通过提起导流洞封堵闸门, 爆破永久堵头和临时堵头, 通过导流洞放空水库干地施工完成破损面板修复, 目前水库渗漏量保持在 30L/s 左右, 处理效果良好。株树桥坝面板破坏最大渗漏量达 2500L/s, 通过放空洞将水库放空后进行干地施工处理, 处理后渗漏量一直维持在 10L/s 左右, 加固处理效果良好。茄子山坝趾板基础渗漏最大渗漏量达 1170L/s, 利用放空洞放空水库进行加固处理, 至今运行情况正常。布西面板坝水平施工缝破坏, 最大渗漏量达 3000L/s, 通过放空洞降低库水位, 露出破坏施工缝进行干地加固处理, 效果良好。紫坪铺面板坝经历了汶川大地震, 震后各类建筑物和设施均受到不同程度的损害, 但水库基本蓄水功能未受到明显影响。为保证抢险工作的进行, 开启了放空洞放水, 满足了下游的供水, 缓解了上游来水造成库水位上升带来的压力和风险, 成功应对了抢险救灾的紧急处理; 同时, 通过放空洞大幅降低库水位, 为大坝面板及止水系统的修复创造了施工条件, 保证了修复加固工作的顺利实施。表 1 为我国部分出现较严重渗漏的面板坝及处理情况统计。利用放空设施降低库水位或放空水库进行干地施工均较好地完成了渗漏加固处理, 处理后渗漏量均较小。

表 1 我国部分出现较严重渗漏的面板坝及处理情况统计

工程名称	地域	建成年份	坝高 (m)	破坏形式	总渗漏量 (L/s)		处理方式
					最大渗漏量	处理后渗漏量	
株树桥	湖南	1990	78	面板破坏, 止水损坏	2500	10	放空处理
白云	湖南	1998	120	面板破坏	1240	30	放空处理
布西	四川	2011	135.8	施工缝破坏	3000	100	降水处理
三板溪	贵州	2008	185.5	面板挤压破坏	303	138	水下修补
茄子山	云南	1999	106	趾板基础破坏	1170	1	放空处理

面板堆石坝出现险情后, 很多工程通过水下施工进行加固处理, 如国外的贝雷坝、希

罗罗坝、辛戈坝等均处理得非常成功,但也有很多工程是难以通过水下加固处理完成的,如白云坝面板破坏部位位于坝前铺盖区以下,破坏部位上部覆盖有厚厚的铺盖料及盖重料,加固处理通过水下施工难以完成。三板溪坝面板一、二期施工缝位置出现破损,破损位置在死水位以下 40m,水库不具备放空条件,无法进行干地施工,只能进行水下施工处理。在进行了三次破损面板水下修复处理后,仍未得到彻底有效的处理,目前仍在研究论证。

上述工程表明,面板堆石坝、特别是高坝设置专门的放空设施对工程安全是十分必要的。当水库出现病害问题,水下加固处理难以实施或处理失败后,可以通过降低水位或放空水库干地加固施工,取得良好的加固效果。但由于高水头闸门设计制造水平的限制,目前闸门最高设计水头 160~180m,工作水头 120~140m;同时由于水库泥沙淤积的影响,放空设施的进口高程也不可能过低。而现今面板坝正朝着坝高 300m 级发展,也就是坝体底部有百余米高度是不具备放空的条件,一旦出现问题,加固处理将非常困难。因此,在解决好超高面板堆石坝放空问题前,不宜推进更大坝高面板坝的建设。

2.3 加强周边缝止水结构

止水对于面板堆石坝来说,是其防渗的生命线,也是维持大坝安全的生命线。由于趾板坐落在基岩上,面板则随堆石一起发生变形,因此周边缝位移量一般较大。混凝土面板堆石坝产生较大漏水的原因,大部分是两岸岸坡与坝体接触带的大坝填筑体相对变形较大导致周边缝止水破坏,高压水流通过破坏了止水进入坝体,又破坏了不密实、级配不良的垫层料,最终导致大坝严重渗漏。

20 世纪 70 年代以前的面板堆石坝,其周边缝止水比较简单,仅设一道塑料或铜止水,如哥伦比亚的安奇卡亚和格里拉斯等坝。塞沙那坝周边缝设两道止水,底部为铜片止水,中部设橡胶止水。巴西阿里亚坝周边缝采用三道止水,顶部为塑性填料,中部 PVC 止水带,底部采用铜片止水。这种结构形式奠定了周边缝止水最基本的模式。

面板接缝止水结构的选取主要取决于需要承受的水压力和接缝位移,周边缝按坝高应设置一道或多道止水。底部铜片止水一般为最基本的防渗线;中部为 PVC 或橡胶止水,视情况选用;顶部止水系统一般由柔性填料、粉细砂、粉煤灰等材料构成,可以为其中的一种材料,也可以为柔性填料和无黏性材料两种止水材料。坝高 50m 以下的可以只采用一道止水,50~100m 的宜采用底、顶部两道止水,100m 以上的宜采用底、顶部两道止水,也可采用底、中、顶部三道止水。

小干沟面板堆石坝原设计在周边缝内布置了底、中、顶三道止水。开始浇筑趾板混凝土时发现,由于趾板端部设置钢筋较多,不仅增加了架设橡胶止水的困难,而且在混凝土振捣时,因大量气泡不易排除,停滞在止水带底部,使得止水带下混凝土局部质量不良。由于泌水与气泡的存在,使止水带与混凝土粘接不好,失去止水效果。因此,在施工中取消了中部止水。中部橡胶止水另一弱点是混凝土收缩而产生绕渗,天生桥水库为此将中部止水改为铜片止水。株树桥、白云水库在检查时也发现中部止水带下的混凝土质量较差,主要表现在混凝土顺面板向呈层状脱落,可能是由于中部止水影响了其下部的浇筑质量。

根据国内外混凝土面板堆石坝技术发展经验,近期修建的混凝土面板堆石坝,除超高坝外,大多倾向于取消中部止水。对于底部止水,由于其位于面板下部无法完全揭露出来,也缺乏有效手段进行无损检测。当面板出现渗漏时,底部止水也只能结合面板的修复进行局部更换或修复处理,而无法进行全面的检查和修复,这就要求强化顶部止水的防渗能力。顶部止水是否发生破坏能够及时检查,发现破坏后能全面加固修复处理,因此应将顶部止水作为周边缝的关键防渗止水结构。

面板坝顶部止水多选用柔性止水材料。为加强顶部止水的防渗能力,在顶部止水中增加能适应大变形的封闭金属止水带,将顶部止水作为周边缝的关键防渗结构,包括周边缝缝口的组合橡胶棒,组合橡胶棒上部设置封闭的多弧形金属止水带,金属止水带顶部设置塑性填料和表面防渗保护盖片,两侧用角钢锚固。该止水结构具有两道封闭的止水层,能适应周边缝大变形,有效防止周边缝渗漏,增强止水结构的可靠性。止水结构中表面防渗保护盖片与混凝土密封连接形成第一道封闭止水;顶部止水的塑性填料下部设多弧形金属止水带,并与缝槽两侧混凝土密封黏结,其功能是在顶部止水中形成第二道封闭止水,并可兜住塑性填料,防止塑性填料流失;金属止水带下为组合橡胶棒,可为金属止水带提供支撑,同时若周边缝张开较大,橡胶棒可下落嵌入周边缝,起到一定的止水作用。

3 结束语

(1) 面板堆石坝坝前辅助防渗铺盖并不是必需的,坝前辅助防渗铺盖不利于面板的水下检查及水下加固维修处理,建议面板坝一般不设坝前辅助防渗铺盖。

(2) 放空设施有利于在面板坝出现问题后不宜或难于采用水下施工进行面板修复处理时,可以及时放空水库进行干地施工加固处理,面板堆石坝宜设置专门的放空设施。由于高水头闸门设计制造水平的限制等,在解决好超高面板堆石坝放空问题前,不宜推进更大坝高面板坝的建设。

(3) 止水,特别是周边缝止水是面板堆石坝的防渗生命线。目前周边缝通常采用三道止水,顶部为柔性填料,中部 PVC 或塑料止水带,底部采用铜片止水。由于施工困难,中部止水与混凝土粘接易形成薄弱面,失去止水效果,建议取消中部止水,但加强顶部止水作用,将顶部止水作为周边缝的关键防渗止水结构。

参考文献

- [1] 杨泽艳,周建平,蒋国澄,等. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电,2011,37(2): 18-23.
- [2] 曹克明,汪易森,徐建军,等. 混凝土面板堆石坝[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [3] 钮新强,徐麟祥,廖仁强,等. 株树桥混凝土面板堆石坝渗漏处理设计[J]. 人民长江,2002,33(1): 1-3.
- [4] 谭界雄,高大水,王秘学,等. 白云水电站混凝土面板堆石坝渗漏处理技术[J]. 人民长江,2016,47(2): 62-66.
- [5] SL 228—2013 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [6] 高季章,郭军. 关于面板坝设置放空洞的若干问题[J]. 水力发电学报,2013,32(5): 179-183.

作者简介

杨启贵，男，长江勘测规划设计研究院副院长兼总工程师，国家大坝安全工程技术研究中心副主任，教授级高级工程师，全国工程勘察设计大师，主要从事水工结构与岩土工程设计与科研工作。

西北院混凝土面板堆石坝设计技术进步

王君利

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司)

[摘要] 我国自 1985 年设计建设混凝土面板堆石坝以来,西北院参与了马来西亚的巴贡(Bakun, 坝高 202m)、察汗乌苏(深厚覆盖层)、公伯峡(国内首次采用混凝土挤压墙技术,超长面板施工)、积石峡(软岩筑坝)、羊曲(镶嵌式组合坝),以及在建和拟建的玛尔挡、茨哈峡、新疆大石峡、金川及西藏俄米等面板堆石坝工程的设计施工。在设计过程中,总结和析国外多座面板堆石坝严重渗漏以及坝溃决的原因,重点从坝体变形安全新理念出发设计研究,逐步形成了坝体各区变形协调设计理念、渗流安全理念,进行坝体结构设计及渗流控制。对软岩堆石料筑坝、不利自然条件(狭窄河谷与高陡岸坡、深覆盖层、高寒地区等)建坝等逐步形成了完整技术,展示了西北院在混凝土面板堆石坝方面设计技术的进步。

[关键词] 西北院 面板堆石坝 技术进步

1 发展历程和主要特征

我国自 1985 年开始学习和引进国外混凝土面板堆石坝设计施工技术和经验,重视自主创新的研究和技术开发,对混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题进行科学研究和开发,设计科技成果不断应用于工程实践,取得了重大的技术进步。

混凝土面板堆石坝在实践中体现出来的安全性、经济性和适应性具有良好的优势,使其经常成为首选坝型。据不完全统计,到 2014 年底我国已建成、在建和拟建的混凝土面板堆石坝已达 305 余座,其中坝高 100m 或超过 100m 的高坝有 94 余座,包括已建 48 座、在建 20 座、拟建 26 余座。西北院承接了马来西亚的巴贡(Bakun, 坝高 202m)、新疆察汗乌苏(坝高 110m,河床覆盖层宽 96m,厚 46.7m)、白龙江苗家坝(坝高 111m,河床覆盖层厚 48m)、青海公伯峡[坝高 132m,国内首次采用混凝土挤压墙技术,超长面板(面板长 218m)施工]、青海积石峡(坝高 110m,软岩筑坝)、青海羊曲(坝高 150m,镶嵌式组合坝),以及在建和拟建的青海玛尔挡(坝高 211m)、茨哈峡(坝高 257.5m)、新疆大石峡(坝高 247m)、四川金川(坝高 111.5m,河床覆盖层宽 56m)及西藏俄米(坝高 227m)等面板堆石坝工程的技术咨询或设计施工,展示了该院在国内及国际领域的领先地位。

据统计,我国混凝土面板堆石坝的总数已占到全世界的 50% 以上,高混凝土面板堆石坝的数量已经占全世界的 60% 左右。我国混凝土面板堆石坝在数量、坝高、工程规模和技术难度等方面都居世界前列。在强地震区、深覆盖层、岩溶等不良地质条件和在高陡边坡、河道拐弯等不良地形条件下建造了多座高混凝土面板堆石坝工程。

我国至今已建成各具特点的混凝土面板堆石坝,主要有国内外最高的混凝土面板堆石

坝——水布垭坝（湖北清江，坝高 233m）；堆石体积最大（ $1800 \times 10^4 \text{ m}^3$ ）、面板面积最大（ $17.27 \times 10^4 \text{ m}^2$ ）的天生桥一级坝（贵州南盘江，坝高 178m）；强震区（设计烈度 9 度）最高的混凝土面板砂砾石坝——吉林台一级坝（新疆喀什河，坝高 157m）；已经受强震（汶川 8 级地震）考验的紫坪铺坝（四川岷江，坝高 156m），坝址地震烈度达 9~10 度；河谷不对称且岸坡高陡（左岸趾板边坡高 310m）的洪家渡坝（贵州乌江，坝高 179.5m）；主体用砂岩和泥岩混合料填筑的董管坝（贵州北盘江，坝高 150m）；河谷最狭窄（河谷宽高比 1.27）的猴子岩坝（四川大渡河，坝高 223.5m）；深厚覆盖层上建的新疆察汗乌苏坝（深覆盖层深 70 余米，坝高 100 余米）；国内首次采用混凝土挤压墙技术，超长面板（面板长 218m）施工的青海公伯峡大坝等。

2 筑坝技术的进步

2.1 设计技术进步

2.1.1 坝体结构设计

在混凝土面板堆石坝设计、建设过程中，不断总结总结工程经验教训，重点从坝体变形安全新理念出发进行设计研究，逐步形成了具有中国特色的坝体结构设计理念。首先，充分利用建筑物开挖料和料场各种料源的同时，重点考虑坝体各区的变形协调；同时，采用较高的压实标准，即较小的孔隙率或较高的相对密度，目前面板堆石坝垫层区、过渡区、主堆石区和下游堆石区的孔隙率分别不同提高到 17%、18%、19% 和 19% 左右。重视不同地形条件下采用不同的坝体分区以达到坝体各区变形协调，在陡峻的山坡段或地形起伏较大区域的下部设置一定的增模区，以改善坝体变形性状、变形协调和抗滑稳定性等。

2.1.2 变形协调理念与变形控制措施

总结和分析国内外已建高面板堆石坝存在垫层区裂缝、面板脱空和裂缝、面板挤压破坏和严重渗漏的原因分析，在设计过程中逐步形成了面板堆石坝设计的变形协调理念，提出和采用了变形控制措施。

(1) 马来西亚巴贡水电站大坝设计中，采用数值分析和土工离心模型试验等方法比较不同分区方案时坝体变形和面板应力变形性状，以达到坝体各区变形协调、面板工作状态良好的目的，确定坝体合理分区；对原设计的坝体分区进行了调整，图 1 为变形协调设计的巴贡（Bakun）面板坝坝体分区图。表 1 为经验设计与变形协调设计的巴贡面板坝坝体对比表。

从表 1 和图 1 可以看出，巴贡坝若采用经验设计方案，填筑区顶部和中部坝体变形很不协调，坝体沉降差达到 4.55×10^{-2} 。面板浇筑后，随着坝体的继续填筑，面板顶部与垫层区的法向位移差达到 113.5cm，很可能造成垫层区裂缝、面板脱空甚至面板挠曲应力裂缝。若采用经验设计方案，河谷中央面板最大压应变达 670×10^{-6} ，很可能也发生面板挤压破坏。采用变形协调设计新理念指导的坝的坝体变形则比较协调，坝体沉降差仅为 3.189×10^{-2} ，减小了 51%。一期面板浇筑后，随着后期坝体填筑面板顶部与垫层区的法向位移差只有 70.98cm，减小了 60%，从而大大减小了面板脱空现象，避免了面板产生