

高混凝土面板坝安全 关键技术研究

*Study on Key Technology for the
Safety of High CFRDs*

贾金生 郦能惠 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高混凝土面板坝安全 关键技术研究

*Study on Key Technology for the
Safety of High CFRDs*

贾金生 郦能惠 徐泽平 李国英 等 著
郝巨涛 米占宽 马锋玲 何小雄

南京水利科学研究院 中国水利水电科学研究院 中国水利水电建设股份有限公司

出版基金资助



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是关于高混凝土面板堆石坝安全关键技术的科技专著。全面阐述了作者提出的高混凝土面板堆石坝变形协调设计新理念和动态稳定止水防渗新理念,系统总结了针对高面板坝安全建设关键技术难题的科技成果,主要包括:高混凝土面板堆石坝设计新理念、面板堆石坝性状研究与预测、复杂地形地质条件下高混凝土面板堆石坝结构分析、面板接缝止水、面板混凝土抗裂及耐久性、面板堆石坝安全监测、面板堆石坝优质安全施工技术及典型工程应用等内容,反映了我国高混凝土面板堆石坝安全关键技术的最新研究进展和发展水平。

本书可供水利水电工程设计、施工、监理、运行、科研和建设管理人员使用,也可供水利水电工程专业的大专院校师生参考或作为研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

高混凝土面板坝安全关键技术研究 / 贾金生等著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-5170-2697-6

I. ①高… II. ①贾… III. ①混凝土面板坝—安全技术—研究 IV. ①TV649

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第281539号

书 名	高混凝土面板坝安全关键技术研究
作 者	贾金生 邴能惠 等 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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 34.25印张 812千字
版 次	2014年11月第1版 2014年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	148.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序 一

混凝土面板堆石坝在实践中表现出了良好的经济性和对不利自然条件的适应性，深受坝工界的青睐，已成为世界上发展最快、最具竞争力的坝型之一。但是 20 世纪以来，建设的国内外 200m 级高混凝土面板堆石坝陆续出现面板脱空、面板裂缝和挤压破坏，导致严重渗漏，造成重大经济损失，表明高面板堆石坝关键技术需要深化研究，以确保工程安全。

中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、中国水利水电建设股份有限公司是我国从事混凝土面板堆石坝工程研究与建设的代表单位，是我国成功建设水布垭、洪家渡、紫坪铺、吉林台一级和公伯峡等 200m 级高面板坝的重要技术支撑单位，他们在系统总结分析国内外高混凝土面板堆石坝工程严重问题的原因和产生机理的基础上，提出了高混凝土面板堆石坝变形协调新理念和动态稳定止水新理念，将面板坝工程由简单的经验设计推进到了设计理论指导下，借鉴经验进行设计的新阶段，指导或承担建设了国外最高的巴贡坝（Bakun，高 203.5m）、国内的也是世界上最高的建于高陡狭窄河谷深覆盖层上的九甸峡坝（高 136m），解决了陡峻地形上宜兴上库主坝等众多工程面临的安全性难题，与相关的设计施工单位合作攻关，提出了实践证明有效的措施，在高混凝土面板堆石坝安全建设领域取得了新的重大突破。

本书作者及其团队先后参与了国内外 140 多座混凝土面板堆石坝工程试验研究和设计施工，既是理论研究者，也是积极实践者。本书同时以“八五”、“九五”国家科技攻关项目、国家自然科学基金课题和“十五”、“十一五”水利水电行业重点科技项目的成果为基础，从设计理念、计算方法、坝体分区、筑坝材料、性状预测、接缝止水、面板混凝土、安全监测、施工技术等方面系统阐述了高混凝土面板堆石坝安全建设的关键技术。图文并茂、资料丰富，是一本水利水电工程设计、施工、科研和管理人员的工具书与参考书。

本人有幸多次参加了相关科技项目的验收会和鉴定会，对作者的科技成果有所了解，因此乐于为序，并期望本书对我国高混凝土面板堆石坝安全建设乃至对我国水利水电发展起到重要的推动作用。

中国科学院院士



2013 年 4 月 18 日

序 二

我国自 1985 年开始建设混凝土面板堆石坝，虽与美国、巴西、澳大利亚等国家相比起步较晚，但起点高、进步快，这主要得益于特别重视产、学、研、用的紧密结合，即科研院所、大专院校结合国家科技攻关计划和支撑计划、国家自然科学基金项目、行业重点科研项目和工程咨询项目开展研究，建设、设计、施工单位围绕工程需要不断提出问题并参与课题的合作研究和实施。这样的机制和做法既针对性地解决了工程面临的突出问题，又导致混凝土面板堆石坝应用基础研究、筑坝技术和工程实践不断提升，有力地推动了这一坝型在我国快速发展。

本书的作者及其团队针对上世纪末以来国内外高混凝土面板堆石坝出现的面板裂缝、挤压破坏和严重渗漏等问题，以国家科技攻关计划和国家自然科学基金项目等为依托，致力于高混凝土面板堆石坝安全关键技术的理论研究和工程实践，在水布垭工程之后提出了变形协调和动态稳定止水两个新的设计理念，结合 200m 级高坝和复杂地形地质条件下筑坝面临的关键技术难题，在面板堆石坝性状预测、结构设计、数值分析、模型试验、安全监测与反馈分析、接缝止水、面板混凝土及施工技术等方面取得了原创性研究成果，提高了高混凝土面板堆石坝的安全性和可靠性。这些成果不仅为成功建设世界第二高坝——马来西亚巴贡坝（高 203.5m）提供了技术支撑，应用于国内猴子岩、吉林台一级、九甸峡等 25 座坝高 100m 以上的面板堆石坝工程，而且参与了老挝、苏丹等 20 多座国外面板堆石坝的技术咨询，形成了较为全面系统的 200m 级高混凝土面板堆石坝安全建设关键技术，对于保障未来 200m 级高混凝土面板堆石坝的安全建设具有重要的理论意义和实用价值。

随着我国经济社会的发展，水资源、水能资源的开发将会不断推进，为此今后一个相当长的时期需要建设新的高坝工程，面临的挑战将更为严峻。一是建坝条件更为复杂，有不少大坝需要建在复杂的地形地质条件、强地震区和交通不便的偏远山区；二是坝高达到 300m 级，如论证中的马吉坝高 270m、茨哈峡坝高 253m、大石峡坝高 251m 等；三是对大坝的安全提出了更

高的要求。需要进一步组织创新研究，在成功建设 200m 级高混凝土面板堆石坝基础上，提出适宜于 300m 级特高面板堆石坝的建设技术和保障安全的工程措施，将混凝土面板堆石坝技术提升到一个新的台阶。为此，乐于为本书作序，以促进混凝土面板堆石坝更好更快的发展。

中国工程院院士

马洪琪

2013 年 11 月

前 言

混凝土面板堆石坝是以堆石为主体并在上游面设置混凝土面板作为防渗结构的一种坝型，截至 2013 年年底全世界已建和在建的坝高 30m 以上的混凝土面板堆石坝已达到 500 多座。我国自 1985 年开始建造，至今已建和在建的坝高 30m 以上的混凝土面板堆石坝达到 300 多座，其中坝高 100m 以上的高混凝土面板堆石坝 80 多座，超过同期建设的心墙堆石坝与碾压混凝土坝之和。我国混凝土面板堆石坝的总数和 100m 以上高混凝土面板堆石坝的数量均已占全世界的一半以上，已竣工的水布垭面板堆石坝坝高 233m，居世界第一；坝高 156m 的紫坪铺面板堆石坝抵御了汶川 8 级大地震。由于这种坝型的经济性良好，能适应不良的气候条件和地形地质条件，软岩、特硬岩和砂砾石都可用作面板堆石坝的筑坝材料，可以充分利用枢纽各建筑物的开挖料来填筑坝体，按挖填平衡原则设计施工，既节省投资，又利于环境保护。混凝土面板堆石坝是当前最有竞争力的坝型之一，在强地震区、缺乏防渗土料和运输不便的偏远山区的坝址，混凝土面板堆石坝往往成为首选坝型。

混凝土面板堆石坝虽已建造数百座，但一直都沿用经验设计的方法，正如面板堆石坝专家库克 (J. B. Cooke) 指出：自首批混凝土面板堆石坝以来设计混凝土面板堆石坝的基本做法是以先例——类似工程的样例为基础的经验设计。“经验”一词是“以实际经验作指导而非由理论指导”的意思。

从总的发展看，100m 级面板坝依靠经验设计和小吨位薄层碾压施工是成功的，但对于 200m 级高面板坝而言，20 世纪末以来与水布垭工程同期建设的其他高面板坝，相继出现面板脱空、面板开裂、挤压破坏和严重渗漏等问题，造成重大经济损失。墨西哥的阿瓜密尔帕坝 (Aguamilpa, 高 187m)、巴西的巴拉·格兰特坝 (Barra Grande, 高 185m)、坎普斯·诺沃斯坝 (Campos Novos, 高 202m) 等工程出现了面板结构性裂缝、挤压破坏和严重渗漏，造成了重大损失。我国成功建设了多座 200m 级高混凝土面板堆石坝，但是面板脱空、裂缝、挤压破坏和渗漏等现象时有发生，表明高混凝土面板堆石坝的安全问题未得到根本解决，经验设计和施工已无法满足 200m 级高混凝土面板

堆石坝建设要求。因此,为保障 200m 级高混凝土面板堆石坝的安全,需要建立新的筑坝理论和技术体系。

南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院和中国水利水电建设股份有限公司等单位以国家科技攻关、国家自然科学基金和行业重点科技项目为依托,联合攻关,在技术支撑水布垭、洪家渡、紫坪铺、吉林台一级、公伯峡等工程建设的基础上,近年来结合马来西亚巴贡(Bakun,国外最高面板坝)、我国九甸峡(高陡狭窄河谷深覆盖层上世界最高面板坝)、宜兴上库(陡峻地形上高面板坝)等工程面临的世界难题,提出了变形协调和动态稳定止水两个设计新理念,在筑坝材料工程特性研究、面板堆石坝性状预测、复杂地形地质条件下高混凝土面板堆石坝结构分析、面板接缝止水、面板混凝土抗裂及耐久性、安全监测、优质安全快速施工技术等方面取得了多项具有独立知识产权的科技成果。本书编写目的在于进一步促进混凝土面板堆石坝在国内外的的发展,一是总结了作者及其团队在 200m 级高混凝土面板堆石坝安全建设关键技术的科技成果及其应用实践,保障 200m 级面板堆石坝又好又快建设;二是为保证 300m 级特高面板堆石坝安全建设以及复杂地形地质条件下面板堆石坝的安全建设,提供新的思路。本书以理念创新为先导,以技术创新为主线,集科学性、前瞻性和实用性于一体。

全书共八章,分别介绍了高混凝土面板堆石坝设计新理念、高混凝土面板堆石坝性状研究与预测、复杂地形地质条件下高混凝土面板堆石坝结构分析、面板接缝止水、面板混凝土抗裂及耐久性、安全监测、优质安全施工技术以及典型工程应用。全书由贾金生、郦能惠组织策划,拟定编写大纲,郦能惠负责编写第一、第二、第六章,徐泽平、郦能惠负责编写第三章,贾金生、郝巨涛负责编写第四章,马锋玲负责编写第五章,其中郝巨涛、贾金生、徐耀编写第四节,何小雄负责编写第七章,郦能惠、徐泽平、贾金生负责编写第八章。徐泽平参与编写第二章,李国英参与编写第二、第六章,米占宽参与编写第一、第二章,李登华参与编写第一章。全书由郦能惠、贾金生统稿,郦能惠校核全文。

中国水利水电科学研究院蒋国澄、杨德福、付元茂、鲁一晖、吕小彬等、南京水利科学研究院沈珠江、赵魁芝、李泽崇、孙大伟、王年香、傅华、张志武等在合作研究中做出诸多贡献,众多建设、设计单位在本项目研究中给予大力支持与帮助,在此致以诚挚谢意。

张楚汉院士、马洪琪院士、朱尔明总工等专家在项目立项至验收过程中

给予精辟指导，两位院士并为本书题写序言，在此特致敬意。

潘家铮院士曾多次主持作者承担科技项目的鉴定验收，建议作者凝练研究成果出版专著，以推动国内外面板堆石坝的发展。大师虽逝，仍感叮嘱在耳，故特以此书缅怀并感谢潘家铮院士。

本书编写出版过程中得到中国水利水电出版社林京编审、王启编辑的校审以及两院徐耀、戴丽等诸多帮助，谨致衷心谢意。

限于作者水平有限，时间仓促，难免有错误和不当之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2013年4月20日初稿

2014年5月30日终稿

目 录

序一

序二

前言

第一章 高混凝土面板堆石坝设计新理念	1
第一节 高混凝土面板堆石坝工程实践的启迪	1
第二节 高混凝土面板堆石坝设计新理念	11
第三节 高混凝土面板堆石坝设计新理念的工程应用	32
第四节 结论	49
参考文献	51
第二章 高混凝土面板堆石坝性状研究与预测	53
第一节 概述	53
第二节 高混凝土面板堆石坝筑坝材料流变特性研究	53
第三节 筑坝材料本构模型和计算参数的试验研究	69
第四节 高混凝土面板堆石坝性状的预测和验证	91
第五节 用土工离心模型试验预测高混凝土面板堆石坝性状	164
第六节 结论	177
参考文献	178
第三章 复杂地形地质条件下高混凝土面板堆石坝结构分析	181
第一节 覆盖层上面板堆石坝防渗结构形式研究	182
第二节 覆盖层上面板堆石坝防渗结构优化研究	204
第三节 覆盖层上面板堆石坝防渗墙应力变形性状研究	210
第四节 覆盖层上面板堆石坝的圆弧形防渗墙	216
第五节 陡峻地形条件下高混凝土面板堆石坝	221
参考文献	229
第四章 高混凝土面板堆石坝的面板接缝止水	231
第一节 接缝止水的发展和评价	231
第二节 动态稳定止水设计研究	245
第三节 接缝止水研究	250
第四节 接缝止水设计	316

参考文献	334
第五章 高混凝土面板堆石坝面板混凝土抗裂及耐久性	338
第一节 面板结构受力分析	338
第二节 面板材料改性机理及改性途径研究	354
第三节 面板混凝土抗裂性能试验研究	379
第四节 面板挤压破坏研究	391
参考文献	411
第六章 高混凝土面板堆石坝安全监测	414
第一节 高混凝土面板堆石坝安全监测仪器的研制开发	414
第二节 高混凝土面板堆石坝安全监测设置原则和要点	421
第三节 中国高混凝土面板堆石坝主要工程特性及安全监测	424
第四节 高混凝土面板堆石坝性状的表征	429
第五节 300m 级超高混凝土面板堆石坝性状的预测	438
第六节 高混凝土面板堆石坝安全监测资料分析技术	439
第七节 混凝土面板堆石坝安全监测反馈分析	447
第八节 结论	476
参考文献	478
第七章 高混凝土面板堆石坝优质安全施工技术	480
第一节 概述	480
第二节 施工规划与组织	480
第三节 导截流与坝体填筑新技术	482
第四节 面板与趾板混凝土施工技术	496
第五节 特殊气候条件下面板坝优质安全施工技术	510
第六节 深覆盖层基础处理技术	510
参考文献	512
第八章 典型工程应用	514
第一节 马来西亚巴贡面板坝	514
第二节 甘肃九甸峡面板坝	518
第三节 江苏宜兴抽水蓄能上库面板坝	521
第四节 老挝南俄二级面板坝	523
第五节 新疆吉林台一级面板坝	525
第六节 青海公伯峡面板坝	528
第七节 甘肃龙首二级面板坝	529
第八节 苏丹麦洛维面板坝	531
第九节 北京十三陵抽水蓄能上库面板坝	532
参考文献	533

第一章 高混凝土面板堆石坝设计新理念

第一节 高混凝土面板堆石坝工程实践的启迪

以薄层填筑、用振动碾分层压实的堆石（或砂砾石）作为坝体的现代混凝土面板堆石坝只有 40 多年历史，全世界已建和在建的混凝土面板堆石坝就达到 500 多座，我国自 1985 年开始建造，至今已建和在建有 250 多座 30m 以上的混凝土面板堆石坝，其中坝高 100m 以上的高混凝土面板堆石坝有 72 座，我国混凝土面板堆石坝的总数和高混凝土面板堆石坝的数量均占全世界的 50% 以上，已竣工的水布垭面板堆石坝坝高 233m，居世界第一；我国设计施工建造的巴贡（Bakun）坝坝高 203.5m，居世界第二；坝高 156m 的紫坪铺面板堆石坝成功抵御了汶川 8 级大地震，在高混凝土面板堆石坝抗震史上具有里程碑的意义。由于这种坝型的安全性、经济性和适应性良好，能适应不良的气候条件、地形地质条件，软岩、特硬岩和砂砾石都可用做面板堆石坝的筑坝材料，可以充分利用枢纽各建筑物的开挖料来填筑坝体，按挖填平衡原则设计施工，既节省投资，又利于环境保护。在强地震区、深覆盖层、深厚强风化岩和高陡岸坡的坝址混凝土面板堆石坝往往成为最有竞争力的坝型。^[1,6]

纵观历史数百座混凝土面板堆石坝建造一直都采用经验设计的方法，正如面板堆石坝专家 J. B. Cooke 指出：自首批混凝土面板堆石坝以来，设计混凝土面板堆石坝的基本做法是以先例——类似工程的样例为基础的经验设计。“经验”一词是“以实际经验作指导而非由理论指导”的意思。^[2,3]

一、经验设计概念和原则

面板堆石坝的坝体分区以及各区筑坝材料的选定是面板堆石坝设计的主要内容。SL 228—98《混凝土面板堆石坝设计规范》^[4]和 DL/T 5016—1999《混凝土面板堆石坝设计规范》^[5]在总结国外面板堆石坝 30 多年工程经验、库克（J. B. Cooke）和谢拉德（J. L. Sherard）的建议^[2,3]及我国 10 多年面板堆石坝工程经验的基础上，提出了坝体分区的设计原则。

上述规范提出：应进行坝体分区，并相应确定填筑标准。从上游向下游宜分为垫层区、过渡区、主堆石区和下游堆石区；在周边缝下游侧设置特殊垫层区；100m 以上高坝，宜在面板上游面底部设置上游铺盖区及盖重区。

各区坝料的渗透性宜从上游向下游增大，并应满足水力过渡要求。下游堆石区下游水位以上的坝料不受此限制。

堆石坝体上游部分应具有低压缩性。

由于砂砾石是属于中等渗透水性,难以达到自由排水的要求。为了使大部分坝体处于非饱和状态以保证大坝安全,因此上述规范要求用硬岩堆石料填筑的面板坝的坝体中必须设置L形排水体。于是规范分别对于用硬岩堆石料填筑的坝体和用砂砾石填筑的坝体分别建议了分区设计如图1-1和图1-2所示。

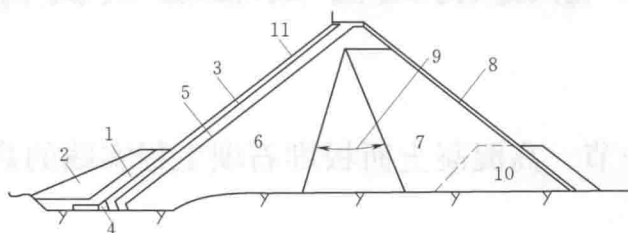


图1-1 硬岩堆石坝体主要分区示意图

- 1—(1A) 上游铺盖区; 2—(1B) 盖重区; 3—(2A) 垫层区; 4—(2B) 特殊垫层区;
5—(3A) 过渡区; 6—(3B) 主堆石区; 7—(3C) 下游堆石区; 8—(3D) 下游护坡;
9—可变动的主堆石区与下游堆石区界面, 角度依坝料特性及坝高而定;
10—(3E) 抛石区 (或滤水坝趾区); 11—(F) 混凝土面板

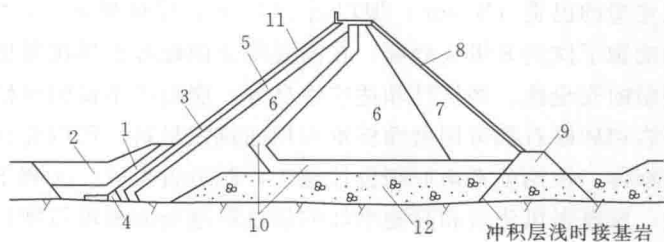


图1-2 砂砾石坝体主要分区示意图

- 1—(1A) 上游铺盖区; 2—(1B) 盖重区; 3—(2A) 垫层区; 4—(2B) 特殊垫层区; 5—(3A) 过渡区;
6—(3B) 主堆石 (砂砾石区); 7—(3C) 下游堆石 (砂砾石) 区; 8—(3D) 下游护坡;
9—(3E) 滤水坝趾区; 10—(3F) 排水区; 11—(F) 混凝土面板; 12—坝基冲积层

用软岩堆石料填筑面板堆石坝时,其渗透性不满足自由排水要求,应在坝体上游区内设置竖向排水区,并与坝底水平排水区连接,将可能的渗水排至坝外,保持下游区坝体的干燥,也就是说用软岩填筑的面板堆石坝分区与如图1-2所示的面板砂砾石坝分区类似。

现代混凝土面板堆石坝的经验设计可以概括为以下要点:^[6]

(1) 经验确定坝体分区,规定了用硬岩堆石和砂砾石填筑的坝体分区、各区筑坝材料和填筑标准。强调堆石坝体上游部分应具有低压缩性,下游部分不要求低压缩性。SL 228—2013《混凝土面板堆石坝设计规范》还建议了各区坝料填筑标准:垫层区、过渡区、主堆石区和下游堆石区的填筑标准分别是孔隙率15%~20%、18%~22%、20%~25%和23%~28%。

(2) 经验确定垫层料的颗粒级配,典型的是谢拉德(J. L. Sherard)在1985年建议的颗粒级配。

(3) 经验确定坝坡,筑坝材料为硬岩堆石料时,上、下游坝坡1:1.3~1:1.4,筑

坝材料为软岩堆石料或砂砾石料时,上、下游坝坡一般为 1:1.5~1:1.6。

(4) 经验确定面板厚度,经验公式

$$t=0.3+\alpha H$$

式中 t ——面板厚度, m;

α ——经验系数为 0.002~0.0035,大多数面板堆石坝选取 0.003;

H ——计算断面至面板顶部的垂直距离或该点水头, m。

(5) 经验确定面板混凝土强度和抗渗等级,分别要求不低于 C25 和 W8。

(6) 经验确定面板分缝,垂直缝间距一般取 12~18m,两岸坝肩附近部位面板垂直缝间距取其一半左右。

(7) 经验确定面板配筋率,垂直向(顺坡向)配筋率通常为 0.35%~0.40%,水平向(轴向)配筋率通常为 0.30%~0.35%,周边缝附近配筋率 0.5%。

(8) 经验确定趾板宽度,1983 年建成的哥伦比亚的萨尔瓦琴娜坝依据趾板岩石地基的容许水力梯度来确定趾板宽度,成为后续建造的混凝土面板堆石坝工程仿效的实例。

(9) 经验确定接缝止水结构和止水材料,自 1980 年巴西的阿里亚坝采用三道止水的周边缝止水结构以后,国内外高混凝土面板堆石坝周边缝都采用这种形式的止水结构,即顶部玛蹄脂嵌缝材料,中部 PVC 止水,底部铜片止水。

正如库克(J. B. Cooke)在《水电和大坝》(Hydropower & Dam)1998 年第 6 期的论文《混凝土面板堆石坝经验设计》中指出:原因在于混凝土面板堆石坝固有的安全性使面板堆石坝的经验设计为人们所接受。能充分说明这种固有安全性的因素有:

(1) 所有分区堆石坝体位于库水的下游。

(2) 面板上的水荷载作用在坝轴线上游的坝基上。

(3) 不存在扬压力和孔隙水压力。

(4) 堆石体抗剪强度高。

(5) 分区堆石体在抵抗内部水流时是稳定的。

(6) 堆石体沉降量小且在几年后沉降基本停止。

在 2000 年北京的面板堆石坝国际学术会议上的特邀讲座中他重申了面板堆石坝的固有安全性(Inherent safety features),并且将堆石体抗震性能好也列入了面板堆石坝固有安全性,他重申了他与谢拉德(J. L. Sherard)在 1985 年美国土木工程师协会面板堆石坝学术会议上的结论:对于未来的超高坝来说,混凝土面板堆石坝是合适的坝型,基于已建坝性状观测进行合理的推断,可以预测出用大多数堆石料建造的 300m 高的混凝土面板堆石坝的性状。

根据以往经验库克(J. B. Cooke)在 1984 年提出了高 244m 的混凝土面板堆石坝的坝体分区如图 1-3 所示。^[2]

二、工程实践的启迪

数十年来面板堆石坝工程的成功建设说明了经验设计在一定范围内的正确性,但是 20 世纪 90 年代以来国内外相继建造的一批高混凝土面板堆石坝出现了问题。

1. 高混凝土面板堆石坝出现的工程问题^[6]

(1) 垫层区裂缝。天生桥一级坝(坝高 178m)、巴西的辛戈(Xingo)坝(坝高

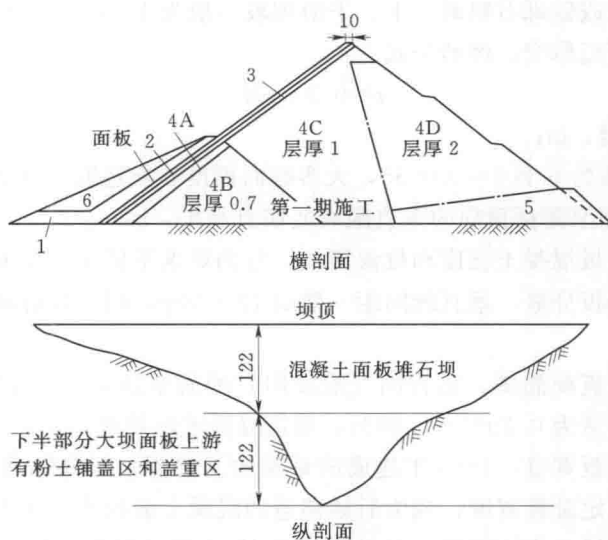


图 1-3 设想的高 244m 的混凝土面板堆石坝分区设计图 (单位: m)

1—粉土铺盖层; 2—垫层区; 3—过渡区; 4—(4A、4B、4C、4D) 碾压堆石区;
5—抛填堆石区; 6—任意料盖重区

140m) 垫层区都产生斜向裂缝, 天生桥一级坝斜向裂缝长 5~40m, 最大缝宽 27mm; 辛戈坝斜向裂缝最大缝宽 56mm, 错位 16mm, 天生桥一级坝垫层区还产生水平裂缝, 最大缝长 60m, 最大缝宽 180mm。

(2) 面板脱空。天生桥一级坝一期、二期和三期面板顶部都存在严重脱空, 一、二期面板有 85% 面板脱空, 三期面板有 52% 面板脱空, 最大脱空深度 (沿面板斜长) 10m, 最大脱空高度 15cm。

(3) 面板裂缝。天生桥一级坝 1997~2000 年 7 次检查面板裂缝, 共发现水平状裂缝 1296 条, 最大缝宽 4mm, 裂缝深度 10~34cm; 2002 年检查三期面板裂缝, 又发现水平状裂缝 4537 条, 缝宽大于 0.3mm 的裂缝有 80 条, 裂缝最大深度 41.7cm, 已贯穿面板厚度。面板裂缝发生部位与面板脱空部位基本一致。墨西哥的阿瓜密尔帕 (Aguamilpa) 坝 (坝高 187m) 1997 年在高程 198.00~202.00m、高程 180.00m、高程 145.00m、高程 120.00m、高程 94.00m、高程 70.00m 的面板上都发现水平状裂缝和斜向裂缝, 其中高程 180.00m 水平裂缝贯穿了 14 块面板, 最大缝宽 15mm, 导致出现严重渗漏。巴西的伊塔 (Ita) 坝 (坝高 125m) 2000 年在周边缝上方 8~15m 的 15 块面板都发现水平状裂缝, 缝宽 7mm, 渗漏量从 160L/s 增加到 1700L/s。

(4) 河床中央面板垂直缝两侧混凝土挤压破坏。2003 年 7 月天生桥一级坝河谷中央垂直缝两侧 L3 面板和 L4 面板混凝土挤压破坏, 挤压破坏区域是从三期面板顶部延伸到底部, 长约 55m, 宽约 3.5m, 最大深度 30cm。修补后 2004 年 5 月该区域面板又挤压破坏, 挤压破坏区向下又延伸了 38m, 宽度达到 6m, 部分可见止水铜片翼片外露。

莱索托的莫海尔 (Mohale) 坝 (坝高 145m) 2006 年 2 月首次蓄水时河谷中央面板垂直缝两侧 L17 和 L18 面板混凝土挤压破坏, 两侧面板超叠 120mm, 错台 75mm, 渗漏量

达 600L/s。

巴西的巴拉·格兰特 (Barra Grande) 坝 (坝高 185m) 2005 年 9 月河谷中央面板垂直缝两侧第 19 块与第 20 块面板混凝土挤压破坏, 挤压破坏区域从二期面板顶部延伸到底部, 使渗漏量增至 428L/s。修复后 2005 年 11 月至 2006 年 1 月再次蓄水, 渗漏量从 830L/s 增至 1284L/s, 两次在破坏区铺洒粉砂处理渗漏, 但渗漏量仍达到 1000L/s。

巴西的坎普斯·诺沃斯 (Campos Novos) 坝 (坝高 202m) 2005 年 10 月首次蓄水时发现河谷中央垂直缝两侧第 16 块和第 17 块面板混凝土挤压破坏, 挤压破坏区域从三期面板顶部延伸到水下, 渗漏量 450L/s, 2006 年 2 月渗漏量增至 1300L/s, 在破坏区铺洒粉砂处理渗漏, 渗漏量减小至 848L/s, 4 月 4 日库水位上升, 渗漏量又达到 1294L/s, 2006 年 6 月放空水库, 对面板混凝土挤压破坏区进行修复。

(5) 严重渗漏。除上述巴拉·格兰特 (Barra Grande) 坝和坎普斯·诺沃斯 (Campos Novos) 坝因垂直缝两侧混凝土挤压破坏造成严重渗漏以外, 还有多座面板堆石坝出现严重渗漏如表 1-1 所示。

表 1-1 面板堆石坝严重渗漏

国家	坝名	坝高 (m)	最大渗漏量 (L/s)	处理措施	处理后渗漏量 (L/s)	大修措施	大修后渗漏量 (L/s)	渗漏原因
委内瑞拉	杜利米奎 (Turimiquire)	115	5400	铺洒粉质细砂	1600~6400	水下施工面板上铺土工膜	600	周边缝渗漏—垫层料冲蚀—面板开裂
巴西	伊塔 (Ita)	125	1700	铺洒黏土、砂土	380			右坝肩周边缝上方 8~15m 面板裂缝张开 7mm
尼日利亚	希罗罗 (Shiroro)	125	1900	铺洒粉质砂土	500	不详	100	周边缝附近面板裂缝
泰国	考兰 (Klao Laem)	130	980	抛填砂砾石	340~2200	充填砾石和砂、然后水泥砂浆灌浆	50	面板支撑差—面板裂缝—垫层料冲蚀—面板坍塌
中国	株树桥	78	2500			回填垫层料、灌浆、修复面板与止水、铺土工膜	10	接缝位移过大—止水损坏—垫层料冲蚀—面板坍塌

(6) 溃坝。500 多座混凝土面板堆石坝只有沟后混凝土面板砂砾石坝一座溃决, 该坝高 70m, 1990 年 10 月建成, 1993 年 8 月 27 日约 22 时 40 分溃决。现场调查发现: 1993 年 7 月下旬库水位从 3261m 逐渐上升至 8 月 27 日 12 时的 3277m, 下游坝坡多处出渗和流水, 13 时 30 分库水位超过防浪墙底面约 20mm, 坝底和坝顶处大面积流水。20 时下游坝坡大面积出渗与流水。下游坝坡出渗和流水位置如图 1-4 所示。

2. 工程问题产生原因的分析^[6]

(1) 阿瓜密尔帕坝工程问题的原因分析。阿瓜密尔帕 (Aguamilpa) 坝是墨西

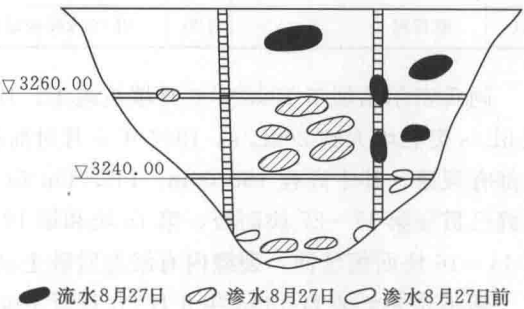


图 1-4 沟后坝下游坝坡出渗和流水位置示意图