

我国峡谷区面板堆石坝建设及研究进展调查

史忠乐, 丁玉堂, 熊国文

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 混凝土面板堆石坝是我国当前水利工程建设常用的坝型之一。由于坝体选址的限制, 一些面板堆石坝需要修建在狭窄的河谷地区。相较于常见的宽阔河谷, 峡谷地区陡峻狭窄的地形增加了坝体变形控制与面板开裂控制的困难, 为大坝的建设及正常安全运行带来了诸多挑战。本文总结了当前国内具有代表性的峡谷区面板堆石坝工程建设与相关理论研究的进展, 探讨了坝体变形与面板开裂的机理及应对措施, 可为相关工程提供参考借鉴。

关键词: 狭窄河谷; 混凝土面板堆石坝; 坝体变形; 面板开裂; 拱效应

中图分类号: TV641.4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2016) 11-0050-04

Investigation on construction and research progress for concrete face rockfill dams in narrow valleys in China

SHI Zhongle, DING Yutang, XIONG Guowen

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu)

Abstract: Concrete face rockfill dam (CFRD) is one of the most popular dam types in dam construction in China. Some CFRDs have to be built in narrow valleys due to the restrictions of geographic features. Compare to those built in wide valleys, CFRDs built in narrow valleys are with difficulties in deformation control and concrete crack control. Overview of the practical and theoretical progress in CFRDs constructions in narrow valley is summarized. The mechanism and remedy strategies for deformation and crack are highlighted. References for related engineering constructions are provided.

Key words: narrow valley; CFRD; dam deformation; concrete face crack; arch effect

0 引言

混凝土面板堆石坝(CFRD)因具有良好的抗滑、抗渗、抗震性能以及施工简便、造价便宜等优点, 现已成为当前土石坝的主要坝型之一。我国自1985年开始修建混凝土面板堆石坝至今, 混凝土面板堆石坝修建总数及高坝数量均居世界首位。许多面板堆石坝修建在宽阔的河谷地区, 坝体的宽高比大于3.0。然而受坝址地形所限, 也有相当一部分堆石坝修建在峡谷地区。峡谷地区两岸高

陡, 河谷多呈狭窄的“V”形或“U”形, 坝体宽高比接近甚至小于2.0。峡谷区地形陡峻, 岸坡的倾角可达70°以上, 某些坝址岸坡坡度通常具有明显的转折, 甚至包含倒坡或台阶状的复式地形。峡谷区地质条件复杂, 以黔中水利枢纽平寨水库大坝(坝高162.7 m, 宽高比2.20)以及甘肃九甸峡水利枢纽大坝(坝高133.0 m, 宽高比1.74)为例, 前者坝址位于溶岩发育的深切河谷, 喀斯特地貌明显, 后者则具有厚达54~56 m的砂卵砾石覆

收稿日期: 2016-09-22

作者简介: 史忠乐(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为大坝安全监测。

盖层。

混凝土面板堆石坝的技术核心是实现对坝体的变形以及面板等防渗系统开裂破坏的控制。与修建在宽阔河谷的堆石坝相比, 峡谷地区面板堆石坝三维效应明显, 坝体的应力分布呈现出明显的拱效应。堆石体的自重应力有相当部分由两岸坝肩承担, 因而坝体在施工期的变形偏小, 随着后期局部区域颗粒的破碎以及应力的调整, 坝体的流变变形显著。另外, 由于峡谷地区两岸陡峻, 坝体与岸坡接触部位的变形梯度较大, 易产生相对滑动, 使得面板等止水设施开裂破坏。峡谷地区面板堆石坝的上述特点为坝体变形以及面板开裂的控制带来诸多不利的影响。国外早期建成的峡谷区面板坝的运行经验表明, 坝体的后期变形与防渗体系破坏不容忽视。澳大利亚 Cethana 坝建成于 1971 年, 坝高 110.0 m, 宽高比 1.94, 大坝完工后 10 年坝顶的沉降以及面板顶部挠度大幅增加, 增幅在 70% 以上 (如图 1 所示)。哥伦比亚的 Anchicaya 坝周边缝发生张开, 止水有较大变形, 坝体的渗漏严重, Golillas 坝则发生了面板与周边缝的多处开裂, 造成严重渗漏。

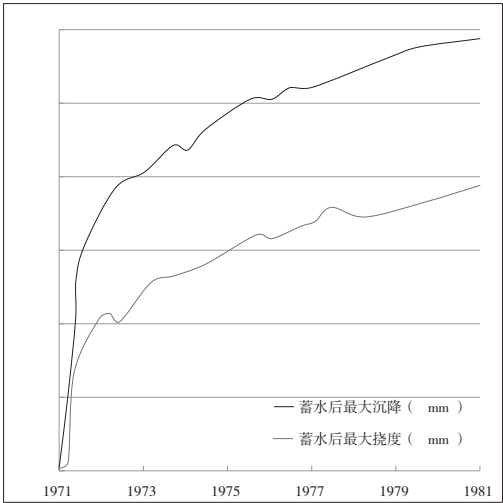


图 1 Cethana 坝顶最大沉降及挠度随时间变化曲线

1 我国峡谷地区面板堆石坝的建设与研究

1.1 我国峡谷地区面板堆石坝的建设现状

我国幅员辽阔, 许多适宜筑坝地址多为地质地形条件复杂的陡峻峡谷地区。面板堆石坝造价便宜, 对坝址地质条件要求低, 因而在峡谷区水利工程建设中被广泛采用。表 1 总结了部分我国

修建在峡谷地区的混凝土面板堆石坝。

表 1 我国修建在狭窄河谷上的面板堆石坝

坝名	建成年份	坝高 (m)	河谷宽高比	筑坝材料
西北口	1989	95.0	2.34	灰岩
万安溪	1995	93.5	2.27	花岗岩
白云	1998	120.0	1.67	灰岩和砂岩
引子渡	2003	129.5	2.13	灰岩
洪家渡	2004	179.5	2.38	砾岩
龙首二级	2004	146.5	1.30	绿灰斑岩
九甸峡	2008	133.0	1.74	灰岩
积石峡	2014	103.0	3.13	砂岩
平寨	2015	162.7	2.20	灰岩
猴子岩	在建	223.5	1.25	灰岩和流纹岩

1.2 我国峡谷地区面板堆石坝的研究现状

狭窄河谷地区面板堆石坝在变形以及面板开裂等方面呈现出的问题引起了国内外研究人员的广泛关注。针对狭窄河谷地形对堆石坝变形与面板开裂的影响, 研究人员结合我国峡谷区面板坝建设的工程实践, 围绕理论分析、数值计算、施工方法等方面进行了一系列的研究。朱晟等^[1-2]分析了国内外建造在狭窄河谷的高面板堆石坝的运行资料, 并结合某工程实例进行了堆石坝的变形与应力计算, 对狭窄河谷上修建高面板堆石坝可能存在的问题进行了探讨。徐泽平等^[3]结合洪家渡面板堆石坝, 采用数值计算分析与大型离心模型试验的方法, 研究了狭窄河谷中高面板堆石坝的应力、变形分布规律, 以及面板周边缝的变形特点。他们的研究表明: 河谷的地形条件对面板应力变形有着显著的影响, 通过改进碾压施工技术、提高填筑密度能够改善坝体和面板的应力变形性状。宋文晶等^[4]针对堆石坝坝体与两岸岸坡的接触问题, 提出了陡坡峡谷地区面板堆石坝坝肩摩擦接触模型。该模型用可以沿接触面滑动的支座来模拟堆石与岸坡的接触, 因而可以描述堆石体沿岸坡切线方向上的滑移。利用该模型, 可以对周边缝破坏的现象做出合理解释。蔡新合等^[5]结合积石峡面板堆石坝的建设, 对堆石坝的布置、坝体分区、趾板布置、周边缝结构、坝顶结构等进行了

优化设计,为在不对称狭窄河谷上建造高面板坝积累了经验。李国英等^[6]通过对羊曲狭窄河谷高面板坝施工、蓄水及运行全过程进行仿真计算,研究了坝体施工期变形及后期变形、河谷拱效应及其转化等因素对混凝土面板应力变形和周边缝位移等的影响,并根据计算分析研究成果提出改善混凝土面板应力变形和面板接缝位移的工程措施。刘建平等^[7]根据九甸峡面板堆石坝工程实例,针对深覆盖层坝基基础的处理方法、防渗墙施工、陡峭坝基边坡坝体的施工、冬季施工及防裂等施工关键点及难点进行了重点研究,提出了相应的施工技术方法。杨泽艳^[8]结合国内外峡谷区面板堆石坝建设经验对洪家渡面板堆石坝的坝肩开挖以及基础处理等方面进行了探讨。

2 坝体变形与面板开裂的控制措施

2.1 坝体变形的控制

混凝土面板堆石坝安全运行的关键是对坝体变形与面板开裂的有效控制。上述峡谷区高面板堆石坝的成功修建与相关研究的开展表明我国在该类坝型建设上的经验与技术的不断成熟。其中,坝体变形控制的措施可以归纳为以下几点:

(1) 坝体堆石合理分区。坝体堆石分为主堆石区、次堆石区、过渡区、垫层区等,各区之间的变形协调是防止垫层裂缝、面板脱控和裂缝的关键。主堆石区是面板坝承受水荷载及其它荷载的主要支撑体,应当采用新鲜坚硬岩料以满足压缩性、抗剪强度以及排水性能的要求。垫层区为面板提供均匀可靠的支承,并承担一定的防渗作用,因此垫层区堆石料应当具有良好的级配并具有反滤功能。过往的设计经验认为库水荷载主要由主堆石区传递到坝基,因此次堆石区模量要求较低。随着坝高的增加,低模量的次堆石区带来许多负面的效果。以坝高 178 m 的天生桥一级坝(宽高比 6.20)为例,由于主堆石区与次堆石区变形不协调,坝体填筑及运行过程中发生较为严重的垫层裂缝以及面板脱空、开裂、垂直缝破坏。狭窄河谷地区的高面板堆石坝具有明显的三维效应,应力分布具有拱效应,变形特征更为复杂。因此为降低坝体的不均匀变形,需要对坝体进行合理的分区,并适当提高次堆石区的模量。另外,狭窄河谷地区

面板堆石坝应当考虑坝体与两岸的变形协调性。以猴子岩坝为例,为减小岸坡岩体与堆石体之间的模量差距、控制周边缝的位移,坝体在两岸附近以及坝体底部设置了主堆石碾压区(增模区)^[9]。

(2) 提高堆石料碾压质量。堆石坝坝体的变形与不均匀沉降是造成面板等止水系统破坏的主要诱因,因此在坝体填筑施工时必须做好坝的碾压实验,严格控制碾压遍数与加水量,提高堆石体的密实度。同时,坝体在填筑时还应当预留一定的沉降高度,每一期面板施工之前要保证坝体有 3 个月左右的自然沉降。平寨水库大坝在坝体碾压填筑施工时引入了基于 GPS 的智能碾压系统,从而实现了铺料厚度、碾压遍数、压实均匀性的控制,提高了坝体的碾压质量。

(3) 加强基础与坝肩的处理。峡谷地区地质地形条件复杂,对坝体变形的控制极为不利。地基开挖时禁止超挖与欠挖,对于开挖揭露的不良地质如软弱夹层、溶洞溶槽、节理裂隙等,设计采取局部扩挖,追踪后以混凝土回填置换处理。对两岸出现倒坡等不良地形处进行削坡处理。

2.2 面板开裂的控制

面板的裂缝可大体分为结构性裂缝与非结构性裂缝。结构性裂缝是面板在自重、库水压力、堆石体对面板的支撑力和摩擦力等荷载作用下到达抗拉压强度极限而产生的裂缝,主要由坝体不均匀变形与垫层亏坡等引起。非结构性裂缝则主要由混凝土干缩及温度应力引起。因此,面板等防渗体系防裂除了上述的坝体变形控制措施之外,还应包括对混凝土面板的合理设计与施工,具体包括:

(1) 合理分缝。在库水压力以及坝体自重荷载作用下,面板在两岸坝肩附近以拉应力为主,在坝体中部则以压应力为主。为防止面板受拉压破坏,在岸坡附近拉应力区设置张性缝,在面板中部设置压性缝,张性缝的间隔要小于压性缝。面板分缝与周边缝处合理设置止水结构,以适应接缝处的开张、压缩、错动。同时,为了进一步控制面板裂缝,可以适当增设水平缝(如水布垭面板堆石坝)。

(2) 提高混凝土面板的整体性与强度。混凝土面板采取双层双向配筋,在周边缝、垂直缝等应力较大区域增强配筋,增加结构的强度。

(3) 合理设置混凝土配合比与外加剂, 提高混凝土早期抗裂能力, 提高混凝土抗渗和抗冻性能。

(4) 加强面板的温控与养护。面板浇筑时及时洒水以降低混凝土水化热, 冬季施工时增加表面保温材料, 防止寒潮冷击。

3 结语

随着我国水利工程建设的逐步深入, 峡谷地区混凝土面板堆石坝的修建日渐增加。陡窄河谷的地形为坝体变形与面板开裂的控制带来诸多不利因素, 引起了工程建设者与研究人员的注意。本文总结了我国狭窄河谷面板研究与工程建设现状, 总结了峡谷地区面板堆石坝在坝体变形与面板开裂控制方面的工程经验, 为相关的工作提供了借鉴。

参考文献:

[1] 朱晟, 王继敏. 建造在狭窄河谷上的高混凝土面板堆石坝 [J]. 红水河, 2004, 23 (4): 81-84.

[2] 朱晟, 欧红光, 殷彦高. 狭窄河谷地形对 200m 级高面板坝变形和应力的影响研究 [J]. 水力发电学报, 2005, 24 (4): 73-77.

[3] 徐泽平, 邵宇, 胡本雄, 等. 狭窄河谷中高面板堆石坝应力变形特性研究 [J]. 水利水电技术, 2005, 36 (5): 30-33.

[4] 宋文晶, 高莲士. 窄陡河谷面板堆石坝坝肩摩擦接触问题研究 [J]. 水利学报, 2005, 36 (7): 793-798.

[5] 蔡新合, 王康柱, 王君利. 积石峡水电站混凝土面板堆石坝设计 [J]. 水力发电, 2011, 37 (11): 29-32.

[6] 李国英等. 黄河羊曲水电站下坝址混凝土面板堆石坝坝体三维非线性有限元动静力分析技术开发研究 [R]. 南京水利科学研究院, 2007.

[7] 刘建平, 葛国平, 周廷江. 九甸峡混凝土面板堆石坝施工关键技术研究 [J]. 水力发电, 2010, 36 (11).

[8] 杨泽艳, 王德军, 陈康. 洪家渡高面板堆石坝设计与施工 [J]. 水力发电, 2004 (A01): 18-25.

[9] 贾金生, 郦能惠等. 高混凝土面板坝安全关键技术研究 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2014.

(责任编辑: 王宏伟)