

•水灾害防治与水环境调控•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500089



考虑“三高一深一窄”特殊工程问题的面板堆石坝安全监测 关键技术研究进展

肖 晟^{1,2}, 杨 杰^{1,2*}, 陆 希³, 周 恒³, 程 琳^{1,2}, 马春辉^{1,2}, 全 飞^{1,2}

(1. 西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;
3. 中国电建集团 西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要:复杂的地形地质条件、严酷的坝址自然环境及从 200~300 m 级坝高的跨越, 对面板堆石坝的安全监测技术发展提出更高要求。本文聚焦于高坝高、高寒、高地震烈度、深厚覆盖层及狭窄河谷等特殊工程问题, 系统梳理“三高一深一窄”下的面板堆石坝结构问题, 阐明面板堆石坝技术的核心在于坝体的变形控制与综合变形协调。现有研究发现: 坝高的增加会使面板堆石坝变形加剧, 进而引发面板开裂, 削弱坝体防渗体系; 高地震烈度区的面板堆石坝永久变形显著, 易产生局部裂隙和内部损伤; 建于极端低温条件下的面板堆石坝耐久性较差, 止水结构损坏风险较高; 深厚覆盖层上的面板堆石坝易产生不均匀沉降、长期变形和面板开裂等问题; 狭窄河谷中的面板堆石坝变形梯度较大, 止水结构和面板易遭破坏。在此基础上, 综述面板堆石坝安全监测技术的发展现状, 归纳特殊工程问题下面板堆石坝安全监测的关键技术, 明确重点监测部位、主要监测项目及常用监测方法。具体而言, 对高坝高的面板堆石坝应重点关注大坝变形和渗流安全, 对高地震烈度区的面板堆石坝应加强大坝强震监测, 对高寒地区的面板堆石坝应主要聚焦冰压力、坝体及面板变形监测, 对深厚覆盖层地基上的面板堆石坝应重点监测地基沉降、防渗墙变形及防渗设施的防渗效果, 对狭窄河谷中的面板堆石坝应加强大坝表面和内部变形、面板变形及堆石体应力的监测。随后, 进一步介绍中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司自主研发的基于全球导航卫星系统(GNSS)监测的双棱镜装置等新型监测设备, 使监测技术发展与特殊工程问题下面板堆石坝的筑坝水平相适配。最后, 基于安全监测工作总结面板堆石坝施工方法和施工控制指标的改进和修正经验, 分析“三高一深一窄”特殊工程问题下改善面板堆石坝服役性态的工程措施, 探讨面板堆石坝综合变形协调的控制手段。本研究有望为面板堆石坝安全监测技术发展提供系统性的理论支持和实践指导, 保障“三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝的长效运行安全。

关键词:面板堆石坝; 安全监测; 高坝高; 高寒; 高地震烈度; 深厚覆盖层; 狭窄河谷

中图分类号:TV641.4; TV698.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2025)06-0047-15

面板堆石坝作为一种以堆石体为支承结构、并在坝体上游表面设置混凝土面板作为防渗结构的特殊坝型, 具有造价低、总体变形小及对地质条件适应性好等显著优势^[1]。中国自 20 世纪 80 年代引进面板堆石坝技术以来, 经历了“引进消化、自主创新、突破发展”3 个阶段^[2], 依托天生桥一级(坝高 178.0 m)、洪家渡(坝高 179.5 m)、水布垭(坝高 233.0 m)等一系列工程实践, 在面板堆石坝的设计、施工和运行管理等方面

取得了长足发展, 为世界面板堆石坝的理论创新与技术进步做出了重要贡献。中国已建、在建和拟建的部 分面板堆石坝发展示意图如图 1 所示。由图 1 可知, 随着筑坝技术的快速发展, 中国面板堆石坝的高度正由 200 m 向 300 m 级不断突破, 也取得了大量在气候环境恶劣、地理位置偏僻、地质条件复杂地区建坝的技术进步和经验积累, 逐步形成了具有中国特色的面板堆石坝筑坝技术体系^[3]。

收稿日期:2025-02-16 修回日期:2025-03-17 网络出版日期:2025-04-21

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52279140); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52409173; 52409174); 西安理工大学优秀博士学位论文创新基金项目(104-252072408)

作者简介:肖 晟(1999—), 男, 博士生。研究方向:大坝安全监测与无损检测。E-mail: 1210412039@stu.xaut.edu.cn

* **通信作者:**杨 杰, 教授, E-mail: yjjxaut@163.com

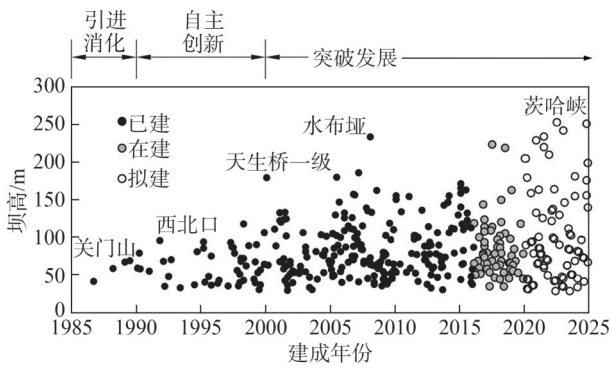


图1 中国面板堆石坝发展示意图^[2]

Fig. 1 Schematic diagram of the development of Chinese concrete face rockfill dams^[2]

当前,中国面板堆石坝的建设既孕育着重大的发展机遇,也面临着巨大的技术挑战。复杂的地形地质条件、严酷的坝址自然环境及从200 m级到300 m级坝高的跨越等特殊工程问题,对面板堆石坝的技术发

展提出了更高的要求^[4]。典型的特殊工程问题包括高坝高、高寒、高地震烈度、深厚覆盖层地基及狭窄河谷,表1为存在特殊工程问题的典型面板堆石坝工程。这些极富挑战性的工程建设,使特殊工程问题下面板堆石坝的筑坝技术得到了快速发展,并在筑坝材料特性、数值分析和模型试验等方面也取得了一系列科研成果^[5]。然而,随着众多面板堆石坝服役期的增长,在坝高的增加及各种复杂地质条件的联合作用下,面板堆石坝仍不可避免地面临大变形、面板和接缝止水结构破损等问题,进而引发坝体渗漏,威胁大坝运行安全^[6]。例如,青海沟后面板砂砾坝的溃坝事故、湖南株树桥面板堆石坝的面板折断、坍塌,以及天生桥一级面板堆石坝的面板挤压破坏等。因此,深入研究面板堆石坝的结构特性,尤其是“三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝可能出现的结构问题,对在在建或拟建的面板堆石坝工程具有重要指导意义。

表1 存在特殊工程问题的典型面板堆石坝工程

Tab. 1 Typical concrete face rockfill dams with special engineering problems

工程名称	位置	总库容/ (10^8 m^3)	总装机 容量/MW	最大 坝高/m	特殊工程问题	典型特性
水布垭	湖北恩施	45.80	1 600	233.0		世界已建最高的面板堆石坝工程
九甸峡	甘肃洮河	9.43	300	136.5	趾板下覆盖层厚度约56.0 m	已建趾板置于深厚覆盖层上最高的面板堆石坝工程
察汗乌苏	新疆和静县	1.25	330	110.0	河床覆盖层宽96.0 m,厚46.7 m	河床覆盖层最宽厚的面板堆石坝工程
铜街子左副坝	四川乐山	2.00	600	48.0	覆盖层厚度73.5 m	坝基覆盖层防渗处理最深的面板堆石坝工程
莲花	黑龙江海林	42.00	550	71.8	坝址多年平均气温3.2℃,极端最低气温-45.2℃	已建位于气温最低及温差最大地区的面板堆石坝
猴子岩	四川康定	7.06	1 700	223.5	河谷宽高比仅1.27:1.00	狭窄河谷上在建最高的面板堆石坝工程
龙首二级	甘肃裕固族自治县	0.86	157	146.5	大坝长高比仅1.30:1.00	已建河谷最狭窄的高面板堆石坝工程
洪家渡	贵州黔西、织金交界	49.47	600	179.5	趾板边坡高度约310.0 m	河谷极不对称且趾板边坡高陡的面板堆石坝工程
吉林台一级	新疆伊犁	25.30	460	157.0	抗震设计烈度为Ⅸ度	高地震烈度区已建最高的面板堆石坝工程
紫坪铺	四川成都	11.12	760	156.0	抗震设计烈度为Ⅷ度	经受汶川地震Ⅸ~Ⅹ烈度考验的面板堆石坝工程

此外,为进一步掌握“三高一深一窄”特殊工程问题下的面板堆石坝运行性态,有效降低或避免因面板堆石坝失事而造成的社会经济损失和人员伤亡,除了精心设计、标准施工和完善管理外,必须依据面板堆石坝的力学特性系统地开展大坝的安全监测工作,全面覆盖特殊工程问题下面板堆石坝的安全监测需求^[7-9]。而现阶段面板堆石坝监测技术的发展明显滞后于筑坝技术的发展,不仅许多监测仪器的适应性、耐久性、抗冲击性等有待提升,而且特殊工程问题下面

板堆石坝安全监测设计的特点、难点也亟待研究总结^[10]。因此,围绕“三高一深一窄”等特殊工程问题开展针对性的仪器设备研发和安全监测设计,及时感知异常先兆并准确提供预警预报信息,对保障面板堆石坝安全运行意义重大。

针对上述问题,本文系统梳理了涉及“三高一深一窄”特殊工程问题的面板堆石坝结构问题与监测重点,总结归纳了特殊工程问题下面板堆石坝安全监测的关键技术,进一步明确了重点监测部位、主要监测

项目及相应监测方法,并介绍了中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司自主研发的基于全球导航卫星系统(GNSS)监测的双棱镜装置等新型监测技术;在此基础上,对“三高一深一窄”特殊工程问题下改善

面板堆石坝服役性态的工程措施进行了探讨,以期为面板堆石坝的长效运行安全提供保障。图2为考虑“三高一深一窄”特殊工程问题的面板堆石坝安全监测关键技术研究思路。

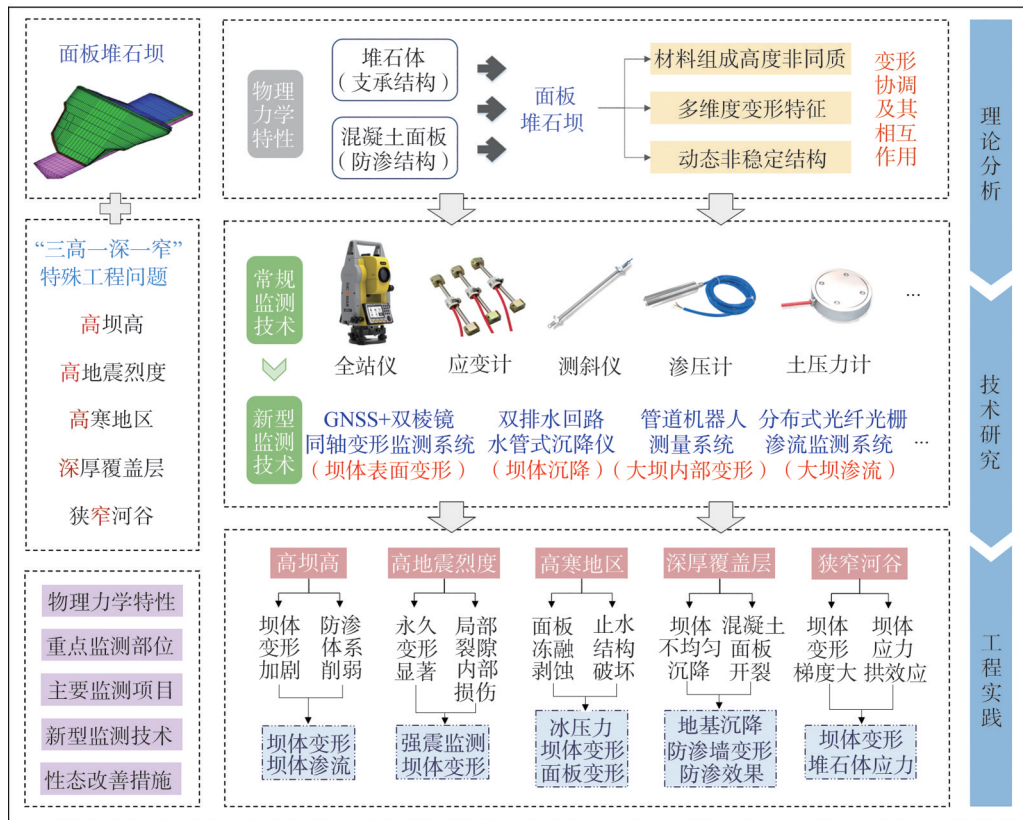


图2 考虑“三高一深一窄”特殊工程问题的面板堆石坝安全监测关键技术研究思路

Fig. 2 Research flowchart of safety monitoring key technologies for concrete face rockfill dams addressing the challenges of “three high, one deep, and one narrow”

1 “三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝结构问题与监测重点

面板堆石坝与混凝土坝、土石坝等传统坝型相比,在物理力学特性方面的表现更为复杂^[11],具体而言:1)从材料组成来看,该类坝型具有高度非同质性,其面板结构可视为近似连续的均质材料,而堆石体则为典型的离散颗粒体系,坝体不同分区在粒径分布、级配特征和压实度上存在明显不同,进而导致其物理性能的多变性;2)就变形特征而言,面板堆石坝表现出多维度、多尺度的变形特征,不仅堆石体在空间中存在三向变形,且坝体还表现出显著的时间效应,即流变特性,这种复杂的力学响应机制使得面板结构在受力过程中承受双向拉压、剪切、挠曲及扭曲等多重变形模式的耦合作用,进一步增加了其力学行为的复杂性^[12];3)此外,混凝土面板是典型的动力非稳定结构,其稳定性依赖于堆石体,在地震作用下,结构的动力响应表现出极大的复杂性^[13]。因此,深入研究“三高

一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝力学特性的基本规律,总结归纳其结构问题与监测重点,是进一步推动面板堆石坝理论创新与技术进步的关键。

1.1 高坝高面板堆石坝的结构问题与监测重点

自振动碾压技术被引入大坝施工以来,面板堆石坝的建设规模与技术水准实现了显著提升,坝高也已突破300 m级。然而,随着坝高的攀升,堆石体应力水平也相应呈现快速上升趋势,致使面板承受的水压力显著增大,极易诱发面板开裂。面板开裂对大坝的不利影响主要表现为^[14]:1)大坝防渗体系可能因此受损,引发堆石体不均匀沉降,削弱其抗剪强度,从而危及坝体整体稳定;2)由于面板与趾板在变形特性上存在显著差异,位于两者结合处的周边缝便为防渗体系中的薄弱部位。随着坝高的增加及坝体变形的加剧,周边缝可能发生显著的剪切、张开和沉降,进而对大坝防渗性能造成潜在威胁。鉴于此,针对高坝高的面板堆石坝,须重点对坝体表面和内部位移、面板接缝及坝体渗流情况进行监测。

1.2 高地震烈度区面板堆石坝的结构问题与监测重点

随着中国对水电资源的大力开发,越来越多的面板堆石坝建在了水能资源丰富的地震易发地带,地震发生后,大坝坝体及其附属建筑物可能产生局部裂隙或内部损伤,如不能得到及时妥善处理,震害损伤将进一步发展导致结构发生更大破坏,故高地震烈度区的大坝抗震安全是面板堆石坝建设及运行期值得关注的重要问题^[15]。通过对相关研究进展的总结归纳,得出高地震烈度区面板堆石坝的结构问题如下^[9,16-17]:1) 在地震荷载作用下,面板堆石坝将产生显著的动力学效应,坝体不可避免地出现永久变形,且当坝料动力模量较低时,这种变形效应更为突出;2) 地震作用会显著扩展面板的拉应力区,并在震动过程中使其承受较大的动拉应力;3) 垂直缝和周边缝在地震作用下的相对位移明显增大,可能导致结构变形加剧;4) 坝体的地震动力响应会随着坝高的增加而增强,其动力放大系数可能超出现行规范的建议范围。因此,对位于高地震烈度区的面板堆石坝,应重点开展强震监测,主要关注面板堆石坝坝体主振型、峰值加速度、自振频率、放大系数等参数,并加强地震加速度和静力监测,这对提高面板堆石坝设计合理性、降低面板堆石坝由地震作用所造成的次生灾害有重要意义。

1.3 高寒地区面板堆石坝的结构问题与监测重点

数据显示,中国在极端低温环境下(低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)建造的面板堆石坝已近 50 座,这些大坝主要分布在东北、华北、西北及西藏等高寒区域^[18]。这些地区具有冬季漫长、气温低的特点,使水库及坝体温度显著下降,结冰现象较为普遍。在冻融循环作用下,混凝土面板的老化进程加速,其耐久性显著降低;此外,表层冰体对面板止水结构的锚固部位产生剪切和拉拔作用,增加了止水系统失效的概率;在施工阶段,由于受低温环境的影响,堆石料的含水量控制难度大,其压实质量难以得到有效保证^[19]。因此,高寒地区面板堆石坝的破坏主要表现为混凝土面板的冻融剥蚀、面板间止水结构的损坏及堆石料冻胀导致的面板开裂等^[18,20]。针对这些可能产生的结构问题,高寒地区的面板堆石坝应重点对冰压力、坝体变形及面板变形开展监测。

1.4 深厚覆盖层上面板堆石坝的结构问题与监测重点

深厚覆盖层地基广泛分布于中国的西南地区,国内外众多学者对覆盖层的工程特性进行了系统研究。Ito 等^[21]认为动力触探试验和旁压试验是获取覆盖层地基参数最为直接和有效的方法;Wang 等^[22]证实了加固碾压处理对大坝变形特性的改善效果显著,为工

程实践提供了可靠的理论依据。关于深厚覆盖层工程特性的研究,目前还主要采用室内试验与原位试验相结合的方法。然而,随着工程规模的不断扩大及覆盖层地质条件的日益复杂,传统试验方法在获取精确力学参数方面面临诸多挑战,发展现场试验手段已成为当前研究的迫切需求,这对于准确评估覆盖层力学特性、优化地基处理方案具有重要工程意义^[23]。此外,深厚覆盖层具有级配不良、结构松散、压缩性和渗透性强等特点,在坝体自重和库水压力的作用下,极易导致堆石坝的不均匀沉降、长期变形和面板开裂等结构问题。特别是蓄水期处在渗流自由面以下的覆盖层地基和部分坝体,存在明显的渗流-应力耦合效应,将进一步影响地基和坝体的应力变形性状,严重威胁面板堆石坝的运行安全^[24]。因此,如何控制坝基变形、确保防渗系统的安全可靠是覆盖层上建坝面临的主要挑战。表 2 为中国建在覆盖层上面板堆石坝的工程特性及其防渗设计。

表 2 中国部分建在覆盖层上的百米级面板堆石坝
Tab. 2 Concrete face rockfill dams with a height of over 100 m built on the deep overburden layer

工程名称	坝高/m	覆盖层厚度/m	覆盖层特性	防渗设计
斜卡	108.2	100.0	砂砾石	1.2 m 厚防渗墙,入强卸荷岩区
多诺	108.5	30.0	砂砾石	0.8 m 厚防渗墙,入岩 0.5 m
那兰	109.0	24.3	砂砾石	0.8 m 厚防渗墙,入岩 0.5 m
察汗乌苏	110.0	46.7	砂砾石	1.2 m 厚防渗墙,入岩 1.0 m
苗家坝	110.0	48.0	砂砾石	1.2 m 厚防渗墙,入岩 0.5 m
金川	112.0	65.0	砂砾石	1.2 m 厚防渗墙,入岩 1.0 m
九甸峡	136.5	54.0	砂砾石	1.2 m 厚防渗墙,入岩 0.8 m
滚哈布奇勒	160.0	50.0	砂砾石	1.2 m 厚防渗墙,入岩 0.5 m

深厚覆盖层多层次、不连续的结构特性导致了其在水平方向和垂直方向上物理力学性质的不均匀性,从而增加了大坝变形控制的难度。因此,对于建在深厚覆盖层地基上的面板堆石坝,还应重点关注地基沉降及防渗墙的变形问题。此外,由于深厚覆盖层透水性较强,水库蓄水后容易产生严重的渗漏问题,故还需对基础防渗帷幕及防渗墙等设施的防渗效果进行监测,主要监测项目包括渗流量、渗透压力等。

1.5 狭窄河谷中面板堆石坝的结构问题与监测重点

在狭窄河谷中修建面板堆石坝时,由于堆石体流

变特性、河谷束窄效应等因素的影响,极有可能出现因坝体变形梯度过大,特别是工程蓄水后坝体水平位移较大,两岸周边缝剪切变形大,从而导致止水结构和面板破坏的情况^[25]。大量学者聚焦工程实际,对不同河谷地形条件下面板堆石坝的应力变形特性展开了研究,表3为部分已建和在建的狭窄河谷中的面板堆石坝工程。

表3 中国部分建在狭窄河谷中的面板堆石坝

Tab. 3 Part of the concrete face rockfill dams built in narrow valleys in China

工程名称	坝高/m	堆石料母岩岩性	坝顶长与坝高比值	建成年份
西北口	95.0	灰岩	2.34:1.00	1989
洪家渡	179.5	砾岩	2.38:1.00	2004
龙首二级	146.5	辉绿岩	1.30:1.00	2004
三板溪	185.5	砂岩	2.30:1.00	2007
九甸峡	136.5	灰岩	1.74:1.00	2008
猴子岩	223.5	灰岩、流纹岩	1.25:1.00	2017
江坪河	219.0	冰碛砾岩	1.89:1.00	2020
玛尔挡	211.0	二长岩、砂岩	1.60:1.00	在建
羊曲	150.0	灰岩	2.36:1.00	在建

徐泽平等^[26]结合洪家渡大坝研究了狭窄河谷中面板堆石坝的应力变形特性;朱永国等^[27]结合猴子岩面板堆石坝工程探究了狭窄河谷中面板堆石坝的变形控制措施;王恩辉等^[28]介绍了新疆地区狭窄河谷中面板堆石坝工程的建设案例和工程经验。上述研究结合具体的工程实践,分别从不同角度分析了狭窄河谷中面板堆石坝的力学特性和可能产生的结

表4 “三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝的主要监测方法

Tab. 4 Main monitoring methods of concrete face rockfill dams considering the special engineering problems of “three highs, one deep, and one narrow”

监测项目	监测仪器设备	监测方法
变形	外部变形	表面变形测点、全站仪
	内部变形	测斜仪、水管式沉降仪、引张线式水平位移计
	接缝变形	单向、三向测缝计
渗流	渗流量	量水堰
	渗透压力	渗压计、测压管
	绕坝渗流	水位监测孔
应力应变及温度	面板应力应变	应变计、无应力计
	坝体应力	土压力计
	温度	温度计

面板堆石坝由防渗体系和堆石体两部分构成,其中防渗体系由面板-趾板-接缝止水结构组成,而面板

构问题,以上研究表明:对于狭窄河谷中的面板堆石坝,岸坡对坝体具有显著的约束作用,从而使得面板堆石坝总体变形量相对较小;但岸坡变形梯度较大,考虑堆石体的流变特性后,坝体后期变形明显增大,变形持续时间也有所增加,且坝体主应力明显小于堆石体自重应力,坝体应力存在明显的应力拱效应。因此,狭窄河谷中的面板堆石坝,应重点对大坝表面和内部变形、面板变形以及堆石体应力开展监测。

2 “三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝安全监测关键技术

2.1 主要监测项目及监测方法

针对“三高一深一窄”特殊工程问题下的面板堆石坝,其监测体系主要包含变形、渗流、应力应变及环境量等多个关键指标。表面变形监测通常采用位移标点法,而坝体内部变形则通过位移计和电磁沉降仪等精密仪器实现;在渗流监测方面,渗压计、量水堰及光纤传感器等设备被广泛应用于坝身和坝基渗流状态的监控;对于面板结构,应重点关注其挠度变化及脱空现象,同时通过应力应变监测评估堆石体与面板的力学响应;环境量及强震监测采用与常规工程相一致的标准化方法^[10]。“三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝最主要的监测项目仍然是变形与渗流,重点聚焦在坝体与接缝变形、面板应力应变及渗透压力和渗流量的监测上。表4、5分别为“三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝的主要监测方法、重点监测部位及相应的监测项目。

表4 “三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝的主要监测方法

Tab. 4 Main monitoring methods of concrete face rockfill dams considering the special engineering problems of “three highs, one deep, and one narrow”

监测项目	监测仪器设备	监测方法
变形	外部变形	表面变形测点、全站仪
	内部变形	测斜仪、水管式沉降仪、引张线式水平位移计
	接缝变形	单向、三向测缝计
渗流	渗流量	量水堰
	渗透压力	渗压计、测压管
	绕坝渗流	水位监测孔
应力应变及温度	面板应力应变	应变计、无应力计
	坝体应力	土压力计
	温度	温度计

与堆石体的刚度、质量等材料特性差异显著,因此,两者的变形协调及其相互作用成为影响大坝整体性

表 5 “三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝的重点监测部位及相应监测项目

Tab. 5 Key monitoring parts and corresponding monitoring items of concrete face rockfill dams considering the special engineering problems of “three highs, one deep, and one narrow”

特殊工程问题	重点监测部位	监测项目	特殊工程问题	重点监测部位	监测项目
高坝高	上下游坝坡 纵、横监测断面交点	坝体表面变形	高寒	上下游坝坡	坝体表面变形
	上下游不同高程	坝体(基)内部变形		坝轴线处	坝体(基)内部变形
	河床和岸坡趾板交界处 面板明显受拉、受压处	界面及接(裂)缝变形		拉、压应力分界处	混凝土面板变形
	上下游坝基	渗流量		面板与趾板交界处	混凝土面板应力应变
	下游坝脚和截水墙底部	坝基渗流压力 坝体渗流压力		面板水温测线至最大结冰 厚度处	冰压力 库水温
深厚覆盖层	覆盖层与基岩交界处	防渗墙变形	高地震烈度	坝顶和左右岸坝坡 堆石体顶部和底部	地震动加速度 动水压力
	下游截水墙	渗流量		顺河向与坝轴线处	坝体表面变形 坝体(基)内部变形
	覆盖层内部	覆盖层基础变形 覆盖层接缝变形		坝体与坝基顺河向	坝基渗流压力 坝体渗流压力
	上游覆盖层	坝基渗流压力 坝体渗流压力			
狭窄河谷	坝顶靠两岸处	坝体表面变形			
	左右岸与河床趾板处	坝体(基)内部变形			
	上游过渡料和坝轴线处	混凝土面板变形			
	面板与垫层料接触处	混凝土面板应力应变			

能的核心因素^[29]。沉降变形作为反映坝体工作性态的重要指标,在施工期对筑坝速度控制、施工质量保障、施工机械调配具有关键指导作用^[30];在运行期,过大的沉降可能直接导致面板开裂,威胁坝体安全。此外,渗流监测对面板堆石坝同样至关重要,应主要关注面板裂缝、面板破碎以及接缝损坏引发的渗漏问题,同时需关注渗流对坝体材料的冲蚀。工程实践表明,在高水头作用下,面板周边缝易产生复杂的三向位移,可能导致止水结构失效,引发严重渗漏,进而使堆石体不均匀沉降加剧,甚至诱发局部或整体失稳以及渗透破坏。因此,在“三高一深一窄”特殊工程问题下,全面监测坝体内部变形及渗流状态,不仅有助于掌握坝体及周边缝等在各阶段的服役性态,也可为大坝安全评估及预警预报提供可靠的数据支撑。

2.2 “三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝的新型监测技术

随着大坝安全监测领域的快速发展,常规监测技术在实践中积累了丰富的工程经验,其应用范围也不断扩大,但其仍然无法克服监测成果“以点代面”、仪器稳定性差、设备安装埋设工艺复杂、系统难以维护等固有缺陷。为此,研发适用性更强、监测范围更广、

性价比更高、仪器布设更加简单的新型监测技术,对提升“三高一深一窄”背景下面板堆石坝的安全监测水平意义重大。

2.2.1 面板堆石坝安全监测技术发展现状

自 20 世纪 80 年代引进面板堆石坝筑坝技术以来,中国对其安全监测工作给予了高度重视。为适应面板堆石坝工程的发展需求,相关科研机构逐步研制了适用于不同坝高的监测仪器。针对 100 m 级面板堆石坝开发了原型观测设备,并在此基础上进一步突破技术瓶颈,成功研制出满足 200 m 级面板堆石坝监测需求的高精度、大量程仪器^[31]。其中:水平垂直位移计整合了水管式沉降仪与引张线式水平位移计的功能,实现了对碾压堆石体内部变形的有效监测;伺服加速度活动式测斜仪和斜面测斜仪分别用于获取坝体内部水平位移与面板挠度数据。此外,小直径压阻式及钢弦式孔隙水压力计能够直接集成于测压管中,为已建工程的原型观测设备升级提供了技术保障。在水布垭、洪家渡、吉林台、公伯峡、紫坪铺等 200 m 级面板堆石坝工程中,遥控遥测水平垂直位移计与高精度双向固定测斜仪在坝体变形及面板挠度监测中发挥了显著作用。经过长达 30 余年的技术积累与创新,中国已构建了覆盖坝体与坝基变形、应力、渗流、面板应力应

变、挠度、周边缝及垂直缝位移等多维度的综合监测技术体系,为200 m级面板堆石坝的安全运行提供了全面的技术支撑^[32]。

但随着筑坝高度的不断增加、地质条件的愈发复杂及坝址自然环境的恶劣影响,许多常规仪器设备已无法满足现阶段面板堆石坝的安全监测需求,相关安全监测技术也已超出中国现有规范和技术标准。例如,在面板堆石坝内部变形监测中,常用的引张线式水平位移计和水管式沉降仪就存在固有的局限性^[33]。引张线式水平位移计的主要问题包括:1)面板堆石坝的沉降特征表现为中部沉降较大,而上下游侧沉降较小,这种不均匀变形会导致引张线的回缩,从而引发测量误差,且这种误差会随着大坝变形量的增加而增大;2)对于高面板堆石坝而言,超长引张线将显著增加沿程阻力,需相应增加钢丝配重,这将增大钢丝断裂的风险。水管式沉降仪的缺陷则主要体现在:1)坝体不均匀沉降导致最大沉降区与观测房之间形成“倒坡”现象,可能引发管路气泡积聚,同时长管线的回水效率较低,直接影响观测精度;2)现行采用的10 mm直径水管在长距离传输中因液体沿程阻力显著增大,增加了观测难度;3)为满足水管式沉降仪坡度为1%的埋设要求,长管线需要提高观测房最低高度,并加大管路埋设基床带开挖深度,这不仅增加了施工干扰,也显著增大了埋设作业的复杂性;4)管内微生物的繁殖可能造成管道内部堵塞,导致测量系统失效,影响长期监测的可靠性。

因此,对于“三高一深一窄”特殊工程问题下的面板堆石坝工程,不仅需要提高传统监测技术的适用性和可行性,还需研制和开发新型监测技术,进一步摸索和发展高坝高、高寒地区、高地震烈度区、深厚覆盖层地基及狭窄河谷上面板堆石坝的监测设施和监测方法,及时感知极端气候和恶劣环境影响下的面板堆石坝异常信息,保障面板堆石坝长效运行安全。

2.2.2 GNSS+双棱镜同轴变形监测系统

随着GNSS定位精度的提升,一批水库大坝工程,如拉西瓦水电站坝肩边坡、小湾拱坝、糯扎渡心墙堆石坝及近坝库岸滑坡体等已采用GNSS技术进行变形监测^[34]。GNSS+双棱镜同轴变形监测系统为GNSS与全站仪协同的3维定位装置,是一个多系统、多层面、多模式的组合系统,可提供高精度的空间定位和时序监测。图3为GNSS+双棱镜同轴变形监测系统示意图。

GNSS+双棱镜同轴变形监测系统通过非变形区设置GNSS基准站及全站仪棱镜,在变形区设置GNSS与全站仪测点,实现变形数据的自动采集^[35]。

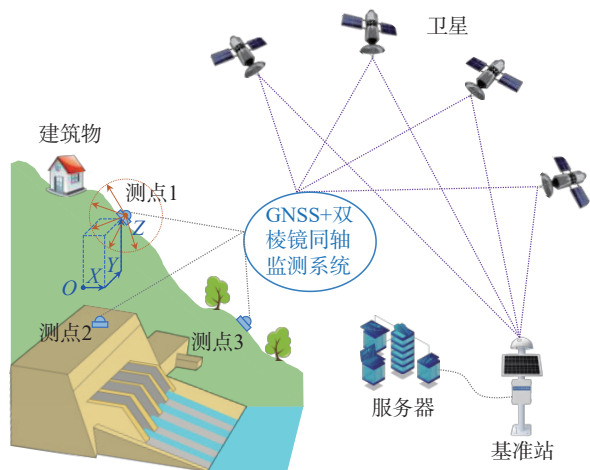


图3 GNSS+双棱镜同轴变形监测系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of GNSS + biprism coaxial deformation monitoring system

GNSS+双棱镜同轴变形监测系统的主要技术优势为:

1)由于使用GNSS定位时无需各测站之间保持通视,故该方法在监测网的布置上较为便捷;2)该方法可同时测定三向位移;3)GNSS测量不受气候条件的限制,可实现全天候观测;4)GNSS+双棱镜同轴变形监测系统可实现长期连续运行,不仅可以大幅降低变形监测成本,在提高监测资料的可靠性方面也有显著效果。因此,对于“三高一深一窄”特殊工程问题下的面板堆石坝,在地形及卫星信号能够得到可靠保障的前提下,GNSS+双棱镜同轴变形监测系统值得大力推广。

2.2.3 双排水回路水管式沉降仪

双排水回路水管式沉降仪以连通管内液面高度恒定的物理特性为基本原理,通过测量连通管一端液面高程,可间接推算另一端(测点)的高程变化,前后两次测量值之差即为测点的沉降量。常规排水管路受沉降变形影响,管路内易形成连续气泡,阻塞管路,导致沉降仪测量精度下降。与常规水管式沉降仪相比,双排水回路水管式沉降仪不仅可以及时发现管路中的排水不畅问题,还能有效避免由于高面板堆石坝不均匀沉降引起的管路中部拱起,在管路内出现积水淹没沉降测头的现象。图4为双排水回路水管式沉降仪结构示意图。

图4中,双排水回路水管式沉降仪的排水调节管通过主排水管与沉降测头连通,观测管通过进水管与沉降测头连通,通气管和副排水管的一端分别与沉降测头固定连通。主排水管具有预警副排水管失效的功能,当主排水管路首次出现排水时,意味着副排水管已经出现故障。因此,主排水管的设置实现了水管式沉降仪的可靠回水、冗余回水,对保证连通管的可靠连通、预警连通管路的工作状态有重要作用。测量时,观测房向进水管补水,平衡后的理想状态下多余水将

从副排水管排出,从而完成一次测量。然而,受坝体变形和埋设质量等因素的影响,副排水管极易堵塞失效,进而导致每次测量后沉降测头内多余的水无法排出。对于双排水回路水管式沉降仪,当积水液面高度超过连接主排水管的排水调节管管口时,主排水管启动排水,水流从排水调节管流出,维持观测管水位与测头进水管水平,从而实现水管式沉降仪的可靠测量。该仪器通常水平布设于监测断面的不同高程位置,并在同一高程测线上间隔设置多个测点,并以测线末端的观测房作为基准点及集中观测场所。为同步获取测点的沉降与水平位移数据,水管式沉降仪常与钢丝水平位移计联合埋设,从而实现测点位移的多维度监测。

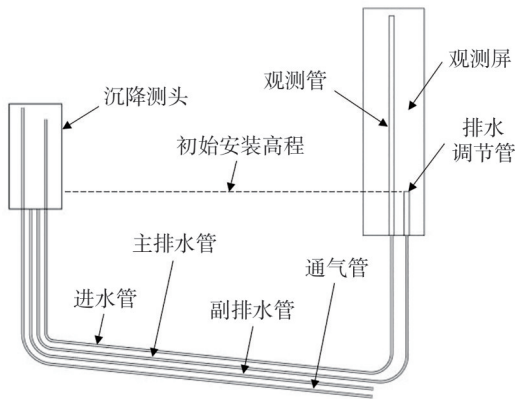


图4 双排水回路水管式沉降仪结构示意图

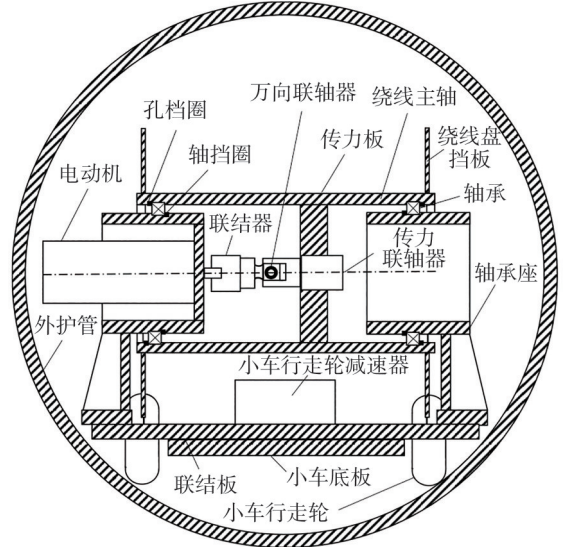
Fig. 4 Structural schematic diagram of double drainage loop water tube settler

2.2.4 管道机器人测量系统

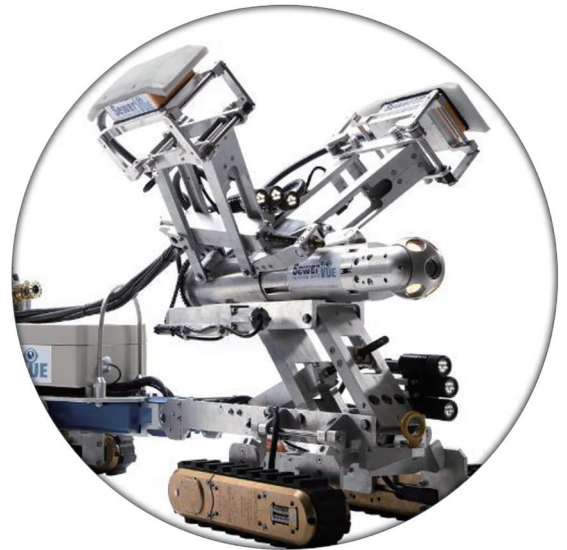
作为一种“直接测量”技术,管道机器人测量系统的工作原理是将专用监测管道埋设于大坝内部,该管道与坝体变形同步;然后,通过专门设计的测量机器人进入管道内部,依据预设程序实现行进。测量机器人配备的监测仪器能够记录和采集管路各测点的垂直位移和水平位移等数据,有效获取大坝内部变形的监测结果。图5为面板堆石坝内部变形管道机器人测量系统,主要由机器人系统、测量系统、轨道系统和保护系统等部分组成。

管道机器人测量系统凭借其独特的设计优势,能够不受“水管”和“引张线”的物理限制,在监测管道内自由移动,实现对任意位置变形状况的精确测量。此外,其测点数量不受约束,使其成为典型的分布式测量系统。与传统“引张线”和“水管式”测量仪器相比,该系统在设备复杂度、操作便捷性及成本效益方面具有显著优势。通常情况下,单台机器人即可满足整座大坝所有管道的监测需求,极大地提高了监测效率并降低了工程成本。南京水利科学研究院利用原型模型

试验的管路,开展了机器人系统沉降测量技术的精度试验研究;结果表明,机器人测量的沉降结果曲线与管道实际调节曲线基本相符^[36]。因此,管道机器人测量系统基本可以满足300 m级面板堆石坝内部沉降监测工作需要,是“三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝变形监测的重要手段。



(a) 结构图



(b) 实物图

图5 面板堆石坝内部变形管道机器人测量系统

Fig. 5 Robot measurement system for internal deformation pipeline of CFRD

2.2.5 分布式光纤光栅渗流监测系统

渗流监测是面板堆石坝的重要监测项目之一。随着筑坝高度的不断增加、地质条件的愈发复杂及坝址自然环境的恶劣影响,面板堆石坝设计了更为复杂的接缝分布,形成了更为广泛的渗流范围,从而导致传统点式监测方法难以实现渗流监测的全覆盖和渗漏点的准确定位。光纤光栅渗流监测系统将高灵敏度温

度传感器埋设在面板堆石坝基础或内部不同深度的位置,特别是在有渗流水流经的区域,使用电热脉冲法进行测量。土石介质中热传递强度的变化会引发测量点周边温度分布的非均匀性。图6为利用分布式光纤光栅监测大坝渗漏的原理示意图。由图6可知,通过对比分析该区域的正常温度与参考水温,可有效识别测点附近温度异常是否源于渗漏水活动,从而实现低温渗漏区的精确定位^[37]。

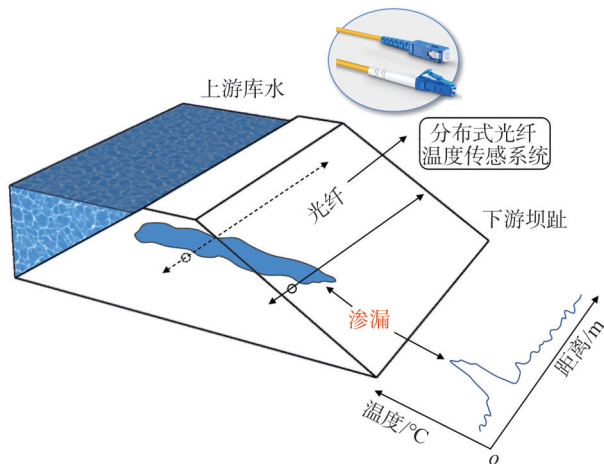


图6 分布式光纤光栅监测大坝渗漏的原理示意图

Fig. 6 Principle diagram of monitoring dam leakage with distributed fiber optic grating

光纤光栅监测技术的成功应用,使渗流监测由以往的单只仪器、单点监测发展为分布式监测,相较于传统方式有了更高的信息密度,除此之外,该技术其他优势为:1) 抗干扰能力强。光纤本身具有阻燃、防腐、耐高电压和强电磁场、耐辐射等先天优势,其抗干扰性强,且不存在击穿、烧毁等潜在隐患;2) 测量范围大。光纤光栅监测技术测点连续,可以全面、实时测定被监测对象的温度,实现不同工况下的在线监测及早期预警;3) 现场只需布设光纤或光缆,简单方便,具有很高的可靠性。因此,分布式光纤光栅渗流监测系统对面板裂缝或因面板破碎、接缝张开或损坏引起的渗漏具有良好的适用性,是“三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝渗流的重要监测手段。

3 “三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝的服役性态改善措施

大坝安全监测是了解大坝运行状态和安全状况的有效方法和重要手段。通过开展大坝安全监测工作不仅能够验证面板堆石坝设计参数的准确性和计算方法的可靠性,还能改进面板堆石坝施工方法和修正施工控制指标,对保障面板堆石坝服役安全具有重要意义。

3.1 高坝高面板堆石坝服役性态改善措施

高坝高面板堆石坝需要重点关注以下问题^[38-39]:

- 1) 应采用3维空间设计方法,淡化传统坝体分区,实现大坝在顺河向、铅直向和坝轴向的整体变形协调;
- 2) 考虑到高坝在蓄水后底部止水的检修难度,建议将止水结构设为独立且多道封闭的型式,并确保其具备自愈能力,以增强其在长期使用过程中的可靠性;
- 3) 在高面板堆石坝的设计中,应重视坝体的可修复性,确保在必要时能够放空库水、加密垫层、修补面板以及更换止水结构,提高维护的便利性;
- 4) 在确保止水结构可靠的前提下,可适当增设永久水平缝,有助于提升面板在静态和动态荷载作用下的变形适应能力,从而增强坝体的整体稳定;
- 5) 在高面板堆石坝的施工过程中,应严格控制硬岩筑坝,选择合适的颗粒级配,减小颗粒破碎程度,提高坝体强度。

3.2 高地震烈度区面板堆石坝服役性态改善措施

高地震烈度区的面板堆石坝工程宜采用下列抗震工程措施^[8,40]:1) 在设计坝顶超高时,必须将地震引发的坝顶沉陷和涌浪高度纳入考量;2) 若坝体使用软岩堆石料或砂砾石料进行填筑,需合理设置排水系统以防止水分积聚;3) 对可能发生液化的覆盖层进行挖除或加固,以提高坝基的稳定性;4) 对垫层料的颗粒级配进行优化,并适当扩展垫层区域,确保在震后垂直缝和周边缝发生局部损坏的情况下,坝体仍能保持安全;5) 优先选用具有良好动力特性,尤其是动力变形特性优越的筑坝材料;6) 鉴于超过2/3坝高的坝体在地震时反应强烈,可通过适当放缓下游坝坡或在其顶部设置锚筋或钢筋混凝土梁的方式进行加固,以增强坝体的抗震稳定性;7) 应用能够适应面板错台和挤压破坏的止水结构和材料,提高坝体的防渗性能;8) 条件允许时增加拉应力区的面板厚度及配筋率;9) 加强强震监测,应特别关注垂直缝与周边缝等变形较大部位,适当增设监测仪器,及时识别潜在问题。

3.3 高寒地区面板堆石坝服役性态改善措施

在高寒地区修建面板堆石坝应特别重视坝址地形及当地气候对坝体设计及施工的影响,具体可采取以下措施^[41]:1) 采用薄层重型振动碾压技术,合理增加碾压次数,保证冬季堆石碾压施工的连续性;2) 通过降低水灰比、掺添高效外加剂,提高混凝土面板的抗冻能力;3) 通过在面板表面涂抹黑色憎水或憎冰涂料的方式增加热交换,保持面板与冰层间的不冻水膜;4) 提高面板的配筋率,并在水位波动较大的区域设置表层抗温度应力钢筋;5) 采用沉头螺栓等固定型式,防止表面止水因冰盖拔出而造成破坏;6) 适当增大面板下游部位垫层区的渗透系数,以改善其排水性能。

3.4 深厚覆盖层上面板堆石坝服役性状改善措施

在覆盖层上修建面板堆石坝,覆盖层与坝体及防渗系统之间的相互作用是核心科学问题之一。温立峰等^[42]采用有限元法系统分析了覆盖层上面板堆石坝的力学特性,阐明了深厚覆盖层地基对大坝及防渗系统的影响机理;Gan^[43]、Lollino^[44]和 Wang^[45]等在考虑地基水力耦合效应及流变特性的基础上,深入研究了覆盖层地基上面板堆石坝的应力变形特性及其对坝体和防渗结构的影响;沈婷^[46]和温续余^[47]等分别对覆盖层上面板堆石坝的防渗结构型式及其力学特性进行了数值模拟分析。赵魁芝^[48]和孙大伟^[49]等分别采用参数反演法和有限元法,对梅溪和大河大坝等覆盖层上结构的变形及安全性态进行了系统研究。为有效控制覆盖层上面板堆石坝的坝基变形并确保防渗系统的可靠性,工程实践中可采取以下措施^[41]:1) 通过钻孔、面波测试、载荷试验和动力触探等方法,全面掌握覆盖层的组成及结构特性;2) 采用全封闭混凝土防渗墙对深厚覆盖层进行防渗处理;3) 通过连接板将防渗墙与趾板连接,以改善趾板的工作条件;4) 重点研究防渗墙的应力变形特性及其影响因素,并提出相应的工程优化措施。

3.5 狭窄河谷中面板堆石坝服役性状改善措施

河谷的宽窄、岸坡的陡缓、两岸的对称性等均可直接影响面板周边缝的位移及坝体和面板的应力变形分布情况,下列工程措施或对改善狭窄河谷中面板堆石坝的应力变形状态具有较好的参考价值^[50]:1) 筑坝堆石料选择母岩强度适中的中硬岩,提高堆石的压实标准,减小坝体的堆石位移;2) 合理规划面板浇筑与坝体填筑之间的预沉降期,确保施工过程的稳定性;3) 明确坝体填筑高程与面板浇筑高程之间的高差;4) 在河床段的面板纵缝中填充具有一定抗压强度的柔性材料,有效吸收面板沿坝轴线方向变形产生的挤压应力;5) 在岸坡附近设置特别碾压区,采用较大变形模量的材料,降低自岸坡至河谷的堆石变形梯度;6) 在不利地形条件下,考虑使用高趾墙或其他便于与建筑物连接的结构;7) 对坝体轴向变形和面板垂直缝变形进行重点监测;8) 采用内趾板设计,以减小陡坡的开挖量。

3.6 面板堆石坝综合变形协调控制措施

面板堆石坝技术的核心在于确保坝体与面板的变形协调。一方面,坝体内部各部位需保持变形协调,避免因下游堆石区变形过大导致上游主堆石区向下游位移,进而引发面板脱空或裂缝;同时,次堆石区变形过大也可能导致上游坝体向下游倾斜,使得垫层区产生水平裂缝,也需加以防范。另一方面,坝体与面板

的变形应同步协调,避免坝体向下游位移过大,而面板的挠度无法匹配,或面板浇筑后坝体变形过大,均可能引发面板脱空和裂缝。为实现面板堆石坝的变形协调,可采取以下措施^[4]:1) 数值分析优化坝体分区。基于坝体填筑材料的变形特性,采用数值分析方法评估不同分区方案下坝体变形及面板应力与变形性状,以坝体各区域变形协调、面板与坝体变形同步协调、坝体无裂缝及面板无脱空为原则,合理确定坝体分区。2) 提高下游堆石区填筑标准。为平衡挖填,下游次堆石区岩性、风化程度及颗粒级配通常较差,因此,其压实标准和碾压施工参数应不低于上游主堆石区,以确保坝体各区域变形均匀协调。3) 全断面均衡填筑。施工时尽量实现全断面碾压和均衡上升,有助于改善坝体变形特性,避免面板脱空与裂缝。4) 此外,还可通过采用新的坝体分区形式、填筑变形特性较好的坝料等方式,进一步提升坝体的变形协调。

4 结论与展望

4.1 结论

本文围绕高坝高、高寒地区、高地震烈度区、深厚覆盖层地基及狭窄河谷下面板堆石坝的关键技术问题,梳理了涉及“三高一深一窄”特殊工程问题的面板堆石坝结构问题与监测重点,归纳了面板堆石坝关键监测技术,研发了基于 GNSS 监测的双棱镜装置等新型监测仪器,探讨了“三高一深一窄”特殊工程问题下改善面板堆石坝服役性能的工程措施。结论如下:

1) 随着筑坝高度的增加及各种复杂地形地质条件、严酷坝址自然环境的联合作用,面板堆石坝的物理力学特性愈发复杂。深入研究“三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝的结构特性,不仅是推动面板堆石坝筑坝施工和设计反馈的关键,而且对指导大坝安全监测设计具有重要作用。

2) 在“三高一深一窄”特殊工程问题背景下,面板堆石坝的监测项目与监测方法应更具针对性,表现为:高坝高的面板堆石坝应重点关注大坝变形安全,高地震烈度区的面板堆石坝应加大大坝强震监测,高寒地区的面板堆石坝应主要聚焦冰压力、坝体及面板变形等项目的监测,深厚覆盖层地基上的面板堆石坝应重点监测地基沉降、防渗墙变形及防渗设施的防渗效果,狭窄河谷中的面板堆石坝应加大大坝表面和内部变形、面板变形及堆石体应力的监测。

3) 针对“三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝常规监测技术暴露出的固有缺陷,有必要开发研制适应超高面板堆石坝应力变形特征的大量程、高耐水压、新型精密监测仪器,及时感知极端气候和恶劣

环境影响下的面板堆石坝异常信息,全面满足特殊工程问题下面板堆石坝的安全监测需求。

4.2 展望

当前,中国面板堆石坝的安全性态预测技术仍存在显著提升空间,未来应着重开展大尺寸、高应力条件下的筑坝材料实验,并在此基础上构建更为合理的本构模型,该模型需综合考虑高应力、复杂应力路径、室内试验缩尺效应、颗粒破碎、流变及湿化变形等因素,更准确地预测“三高一深一窄”特殊工程问题下面板堆石坝的安全性态,确保其在变形、渗流、应力应变等方面的稳定性与安全性。

随着中国水利水电工程建设的持续推进,面板堆石坝在复杂地形地质条件下的应用日益广泛。除高坝高、高地震烈度、高寒、深厚覆盖层、狭窄河谷等典型特殊工程问题外,面板堆石坝建设还面临着高海拔、高陡边坡、喀斯特地貌等复杂地质环境带来的技术挑战,这些特殊工程问题同样对坝体结构设计、施工工艺以及安全监测技术提出了更高要求。针对这些问题,未来研究可关注以下方向:高海拔地区低气压、强辐射、大温差等环境特征对坝体材料性能的影响机理,高陡边坡条件下边坡与坝体的相互作用机制及稳定性评估方法,喀斯特地貌区岩溶发育对坝基稳定及渗流监测的影响效应。

此外,随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的快速发展,面板堆石坝安全监测技术将朝着智能化、精准化方向演进。应进一步加强多源监测数据融合分析技术研究,开发基于机器学习的坝体安全状态智能评估系统,实现对坝体运行状态的实时监测与预警。同时,应重视监测数据的长期积累与分析,为面板堆石坝的设计优化和运行管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] Li Yanlong, Wang Jing, Xu Zengguang. Design optimization of a concrete face rock-fill dam by using genetic algorithm[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016(1):4971048.
- [2] Yang Zeyan, Zhou Jianping, Wang Fuqiang, et al. The 30 years' development of concrete face rockfill dam in China[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2017, 3(1):1-5. [杨泽艳, 周建平, 王富强, 等. 中国混凝土面板堆石坝发展30年[J]. *水电与抽水蓄能*, 2017, 3(1):1-5.]
- [3] Xu Zeping. Research progresses and key technologies of CFRD construction[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1):62-74. [徐泽平. 混凝土面板堆石坝关键技术与研究进展[J]. *水利学报*, 2019, 50(1):62-74.]
- [4] Li Nenghui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(8):1143-1150. [酈能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(8):1143-1150.]
- [5] Yang Jie, Li Guoying, Shen Ting. Stress-deformation properties of super-high CFRDs under complex terrain conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(4):775-781. [杨杰, 李国英, 沈婷. 复杂地形条件下高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(4):775-781.]
- [6] Su Huaizhi, Hu Jiang, Wen Zhiping. Structure analysis for concrete-faced rockfill dams based on information entropy theory and finite element method[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2012, 36(8):1041-1055.
- [7] Kong Xianjing, Zou Degao, Zhou Yang, et al. Earthquake damage analysis of Zipingpu concrete face rock-fill dam during Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2009, 49(5):667-674. [孔宪京, 邹德高, 周扬, 等. 汶川地震中紫坪铺混凝土面板堆石坝震害分析[J]. *大连理工大学学报*, 2009, 49(5):667-674.]
- [8] Cen Weijun, Zhang Ziqi, Zhou Tao, et al. Maximum seismic capacity of a high concrete-face rockfill dam on alluvium deposit[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(2):1-5. [岑威钧, 张自齐, 周涛, 等. 覆盖层上高面板堆石坝的极限抗震能力[J]. *水利水电科技进步*, 2016, 36(2):1-5.]
- [9] Yang Chao, Dang Faning, Ma Zongyuan, et al. Dynamic response properties and maximum anti-seismic capability of CFRD under special terrain condition[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(1):83-90. [杨超, 党发宁, 马宗源, 等. 特殊地形条件下面板堆石坝的动力反应特性及抗震能力研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(1):83-90.]
- [10] Zou Qing. Progress and prospect of key technologies in safety monitoring of high face slab rockfill dams in China[J]. *Dam & Safety*, 2016(1):50-56. [邹青. 中国高面板堆石坝安全监测关键技术进展与展望[J]. *大坝与安全*, 2016(1):50-56.]
- [11] Niu Xinqiang. Security of high concrete face rockfill dam consideration and conclusion[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(1):104-111. [钮新强. 高面板堆石坝安全与思考[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(1):104-111.]
- [12] Hua Junjie, Chang Xiaolin, Zhou Wei. Advances in researches on creep of high rock-fill dams[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(4):194-199. [花俊杰, 常晓林, 周伟. 高堆石坝流变研究进展[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(4):194-199.]
- [13] Wen Lifeng, Yang Ying, Li Yanlong, et al. Comprehensive

- evaluation method for the concrete-face rockfill dams behavior based on the fuzzy recognition model[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(3): 04022021.
- [14] Liu Ying, Li Jiang, Yang Yusheng, et al. Design filling index and deformation control of high concrete faced rockfill dam in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(2): 182–193. [柳莹, 李江, 杨玉生, 等. 新疆高混凝土面板堆石坝筑坝填筑标准及变形控制[J]. *水利学报*, 2021, 52(2): 182–193.]
- [15] Liu Hanlong, Chen Yumin, Yu Tao, et al. Seismic analysis of the zipingpu concrete-faced rockfill dam response to the 2008 Wenchuan, China, earthquake[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, 29(5): 04014129.
- [16] Yang Jie, Li Guoying, Shen Ting. Dynamic response analysis of high CFRD under complex terrain conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3331–3337. [杨杰, 李国英, 沈婷. 复杂地形条件下高面板堆石坝动力反应分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(11): 3331–3337.]
- [17] Li Chuang, Song Zhiqiang, Wang Fei. Response characteristics and panel failure evaluation of asphalt concrete faced rockfill dam under spatial oblique incidence of P wave[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(4): 205–215. [李闯, 宋志强, 王飞. P波空间斜入射下沥青混凝土面板堆石坝响应特性及面板破坏评价[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(4): 205–215.]
- [18] Liu Wanxin, Fu Ping. Deformation control of high concrete face rockfill dam in narrow valley[J]. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(4): 1–2. [刘万新, 付平. 高寒狭窄河谷高面板堆石坝变形控制[J]. *水利水电工程设计*, 2014, 33(4): 1–2.]
- [19] Chang Zhoumei, Liu Donghai, Chen Hui, et al. Structural behavior analysis of asphalt concrete core wall dams based on real compaction quality and modified constitutive model[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(2): 86–98. [常周梅, 刘东海, 陈辉, 等. 考虑压实质量和改进本构的沥青心墙坝性态分析[J]. *水力发电学报*, 2024, 43(2): 86–98.]
- [20] Huang Yaoying, Wan Zhiyong. Deformation monitoring analysis of an RCC gravity dam considering frost heaving in an alpine region: A case study[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(4): 1349–1363.
- [21] Ito M, Azam S. Engineering properties of a vertisolic expansive soil deposit[J]. *Engineering Geology*, 2013, 152(1): 10–16.
- [22] Wang Y S, Liu S H. Treatment for a fully weathered rock dam foundation[J]. *Engineering Geology*, 2005, 77(1/2): 115–126.
- [23] Wen Lifeng. Statistical analysis and numerical simulation of the behaviour of concrete face rockfill dam under complicated geological conditions[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. [温立峰. 复杂地质条件下混凝土面板堆石坝力学特性规律统计及数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.]
- [24] Wang Fan, Mao Haitao, Wang Xiaoju, et al. Numerical analysis of the influence of rheology of layered deep overburden on the structural performance of concrete face rockfill dam based on improved rheological element model[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(4): 216–228. [王璠, 毛海涛, 王晓菊, 等. 基于改进流变元件模型的层状深厚覆盖层流变对面板坝结构性能影响的数值分析[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(4): 216–228.]
- [25] Dang Faning, Yang Chao, Xue Haibin, et al. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(4): 435–442. [党发宁, 杨超, 薛海斌, 等. 河谷形状对面板堆石坝变形特性的影响研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(4): 435–442.]
- [26] Xu Zeping, Shao Yu, Hu Benxiong, et al. Study on stress and deformation properties of high concrete face rock-fill dam in narrow valley[J]. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2005, 36(5): 30–33. [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.]
- [27] Zhu Yongguo, Yan Jun. Design concept and technological innovation of houziyan CFRD[J]. *Water Power*, 2018, 44(11): 56–59. [朱永国, 严军. 猴子岩面板堆石坝的设计理念与技术创新[J]. *水力发电*, 2018, 44(11): 56–59.]
- [28] Wang Enhui. Research on key technologies of local material dam in narrow valley of Xinjiang[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2021(4): 180–181. [王恩辉. 新疆狭窄河谷当地材料坝关键技术研究[J]. *陕西水利*, 2021(4): 180–181.]
- [29] Wu Yijin, Zou Qing, Tan Zhiwei, et al. Progress and prospect of key technologies for safety monitoring of high concrete face rockfill dams in China[C]//Proceedings of Safety Research on High Concrete Face Rockfill Dam and Progress of Soft Rock Dam Construction Technology. Nanjing: Professional Committee of Concrete Face Rockfill Dam of China Society of Hydroelectric Power Engineering, 2014: 148–156. [吴毅瑾, 邹青, 谭志伟, 等. 我国高面板堆石坝安全监测关键技术进展与展望[C]//高面板堆石坝安全性研究及软岩坝坝技术进展论文集. 南京: 中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会, 2014: 148–156.]
- [30] Lu Xiang, Wu Zhenyu, Zhou Zhengjun, et al. Research on the prediction model of deformation of high core rockfill dam during construction period[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(4): 61–69. [卢祥, 吴震宇, 周正军, 等. 高心墙堆石坝施工期变形时空预测模型研究[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(4): 61–69.]

- [31] Wu Yijin, Zou Qing, Tan Zhiwei, et al. China concrete faced rock-fill dam safety monitoring technology progress[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2017, 3(1): 24–31. [吴毅瑾, 邹青, 谭志伟, 等. 中国面板堆石坝安全监测技术进展[J]. *水电与抽水蓄能*, 2017, 3(1): 24–31.]
- [32] Zhao Erfeng, Gu Chongshi. Review on health diagnosis of long-term service behaviors for concrete dams[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(5): 22–34. [赵二峰, 顾冲时. 混凝土坝长效服役性态健康诊断研究述评[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(5): 22–34.]
- [33] He Ning, Wang Guoli, He Bin, et al. New technology for inner horizontal displacement monitoring in high concrete face rockfill dam[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(Supp2): 24–29. [何宁, 王国利, 何斌, 等. 高面板堆石坝内部水平位移新型监测技术研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊2): 24–29.]
- [34] Zhang Libing, Zou Qing. Prospect of new technology for safety monitoring of 300m high face rockfill dam[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2019, 5(6): 41–45. [张礼兵, 邹青. 300 m级高面板堆石坝安全监测新技术展望[J]. *水电与抽水蓄能*, 2019, 5(6): 41–45.]
- [35] Li Nenghui. Performance of high concrete face rockfill dams in China and its inspiration[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(2): 165–173. [酃能惠. 中国高混凝土面板堆石坝性状监测及启示[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(2): 165–173.]
- [36] Qin Peng, Tan Kaiyan, Hu Shengwei, et al. Research of monitoring technology for 300 m high concrete face slab rockfill dam[J]. *Dam & Safety*, 2016(1): 57–60. [秦朋, 谭恺炎, 胡升伟, 等. 300 m级高面板堆石坝安全监测技术探讨[J]. *大坝与安全*, 2016(1): 57–60.]
- [37] Liang Zhipeng, Zhou Huawei, Zhao Chunju, et al. Precise localization of segmental and continuous temperature-measuring optical fiber in a concrete dam[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(3): 52–61. [梁志鹏, 周华维, 赵春菊, 等. 混凝土坝分段连续测温光纤测点精准定位方法研究[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(3): 52–61.]
- [38] Xu Zeping, Deng Gang. Development of high CFRD and key technologies for building super-high CFRD[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(10): 1226–1234. [徐泽平, 邓刚. 高面板堆石坝的技术进展及超高面板堆石坝关键技术问题探讨[J]. *水利学报*, 2008, 39(10): 1226–1234.]
- [39] Xie Dingsong, Liu Jie, Wei Yingqi, et al. Key technology problems of seepage control for building high concrete face rockfill dam[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, 26(10): 118–121. [谢定松, 刘杰, 魏迎奇, 等. 高面板堆石坝渗流控制关键技术问题探讨[J]. *长江科学院院报*, 2009, 26(10): 118–121.]
- [40] Xu Bin, Rong Zhuo, Pang Rui, et al. Study on stochastic dynamic analysis and seismic effect of face slabs of high rockfill dams[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(1): 30–39. [徐斌, 荣卓, 庞锐, 等. 高堆石坝面板随机动力分析和抗震效果研究[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(1): 30–39.]
- [41] Li Nenghui, Yang Zeyan. Technical advances in concrete face rockfill dams in China[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(8): 1361–1368. [酃能惠, 杨泽艳. 中国混凝土面板堆石坝的技术进步[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(8): 1361–1368.]
- [42] Wen Lifeng, Chai Junrui, Wang Xiao. Stress-deformation behavior of a concrete-faced rockfill dam with a deep overburden foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2386–2394. [温立峰, 柴军瑞, 王晓. 深覆盖层上面板堆石坝应力变形特性研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(8): 2386–2394.]
- [43] Gan Lei, Shen Zhenzhong, Xu Liqun. Long-term deformation analysis of the Jiudianxia concrete-faced rockfill dam[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(3): 1589–1598.
- [44] Lollino P, Cotecchia F, Zdravkovic L, et al. Numerical analysis and monitoring of Pappadai dam[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(6): 1631–1643.
- [45] Wang Min, Chen Yifeng, Hu Ran, et al. Coupled hydro-mechanical analysis of a dam foundation with thick fluvial deposits: A case study of the Danba Hydropower Project, Southwestern China[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016, 20(1): 19–44.
- [46] Shen Ting, Li Guoying, Li Yun, et al. Numerical analysis of joint types between toe slab and foundation of CFRD in alluvial deposit layer[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(14): 2588–2592. [沈婷, 李国英, 李云, 等. 覆盖层上面板堆石坝趾板与基础连接方式的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(14): 2588–2592.]
- [47] Wen Xuyu, Xu Zeping, Shao Yu, et al. Study on seepage blocking structure in CFRD built on deep alluvium foundation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(2): 211–216. [温续余, 徐泽平, 邵宇, 等. 深覆盖层上面板堆石坝的防渗结构形式及其应力变形特性[J]. *水利学报*, 2007, 38(2): 211–216.]
- [48] Zhao Kuizhi, Li Guoying. Back analysis of creep deformation and study on safety of Meixi CFRD built on riverbed alluvium[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(8): 1230–1235. [赵魁芝, 李国英. 梅溪覆盖层上混凝土面板堆石坝流变变形反馈分析及安全性研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(8): 1230–1235.]
- [49] Sun Dawei, Deng Haifeng, Tian Bin, et al. Deformation and

stress analysis of Dahe CFRD built on thick alluvium deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008,30(3):434–439.[孙大伟,邓海峰,田斌,等.大河水电站深覆盖层上面板堆石坝变形和应力性状分析[J].岩土工程学报,2008,30(3):434–439.]

[50] Song Wenjing, Gao Lianshi. Frictional contact between abutment and CFRD in deep narrow valley[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(7):793–798.[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.]

A Comprehensive Review of Safety Monitoring Technologies for Concrete Face Rockfill Dams Addressing the Challenges of “Three Highs, One Deep, and One Narrow”

XIAO Sheng^{1,2}, YANG Jie^{1,2*}, LU Xi³, ZHOU Heng³, CHENG Lin^{1,2}, MA Chunhui^{1,2}, TONG Fei^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2.Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3.Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an 710065, China)

Abstract:

Significance The construction of concrete face rockfill dams (CFRDs) in China presents both remarkable development opportunities and considerable technical challenges. The complex topographic and geological conditions, harsh natural environments at dam sites, and the transition from 200 m to 300 m in dam height impose greater demands on the advancement of safety monitoring technologies for CFRDs. Typical engineering challenges include high dam heights, alpine environments, strong seismic activity, deep overburden foundations, and narrow valleys. These demanding conditions inevitably result in issues such as significant deformations, damage to the face slab and joint waterstops, and subsequent dam leakage, all of which threaten the operational safety of the dams. Therefore, beyond precise design, standardized construction, and comprehensive management, systematic safety monitoring of CFRDs is essential based on their physical and mechanical characteristics to fully meet safety monitoring requirements under these specialized engineering conditions. This review aims to provide systematic theoretical support and practical guidance for the advancement of safety monitoring technologies for CFRDs, ensuring the long-term operational safety of these dams under the “three highs, one deep, and one narrow” engineering challenges.

Progress This study focused on specific engineering challenges such as high dam height, alpine regions, high seismic intensity, deep overburden, and narrow valleys. It systematically reviewed the structural issues of CFRDs under the “three highs, one deep, and one narrow” conditions, emphasizing that the core of CFRD technology lies in deformation control and comprehensive deformation coordination. Research indicated that an increased dam height exacerbated CFRD deformation, which led to panel cracking and weakened the dam's anti-seepage system. CFRDs in high seismic intensity zones exhibited significant permanent deformation, making them prone to local cracks and internal damage. CFRDs constructed in extremely low-temperature conditions demonstrated poor durability and a higher risk of waterstop structure failure. CFRDs built on deep overburden layers were susceptible to uneven settlement, long-term deformation, and panel cracking. CFRDs located in narrow valleys experienced large deformation gradients, which caused damage to waterstop structures and panels. The study also reviewed the development of safety monitoring technologies for CFRDs, summarizing key monitoring techniques under special engineering conditions. It identified critical monitoring areas, main monitoring items, and common monitoring methods, highlighting that deformation and seepage remained the primary monitoring focuses for CFRDs under “three highs, one deep, and one narrow” conditions. Specifically, high dams required attention to deformation and seepage safety; CFRDs in high seismic intensity zones needed enhanced strong-motion monitoring; CFRDs in alpine regions needed a focus on ice pressure, dam body, and panel deformation; CFRDs built on deep overburden layers required monitoring of foundation settlement, cutoff wall deformation, and anti-seepage effectiveness; CFRDs in narrow valleys demanded emphasis on surface and internal deformation, panel deformation, and rockfill stress. The study introduced self-developed monitoring equipment, such as a dual-prism device based on GNSS monitoring, to align monitoring technology with CFRD construction standards under special conditions. Based on dam safety monitoring work, it summarized improvements in construction methods and control indicators, analyzing engineering measures to enhance CFRD serviceability under “three highs, one deep, and one narrow” conditions. The control methods for comprehensive deformation coordination in CFRDs were also explored. Specifically, for high CFRDs, attention was paid to the overall three-dimensional spatial deformation coordination, the independent multi-layer sealing and self-healing capabilities of the waterstop structures, the reparability of the dam body, the addition of permanent horizontal joints to enhance deformation adaptability, and the strict control of hard rock dam construction and particle gradation to improve dam strength. For CFRDs in high seismic intensity zones, comprehensive seismic measures were recommended, such as reasonable dam crest elevation, optimized drainage systems, reinforced foundations, expanded cushion zones, high-quality construction materials, gentler slopes or reinforced structures, adaptive waterstop materials, increased panel thickness and reinforcement, and enhanced strong-motion monitoring. In alpine regions, thin-layer heavy vibratory

compaction, improved panel frost resistance, enhanced thermal exchange, increased reinforcement, and better cushion zone drainage were indicated. For CFRDs built on deep overburden layers, full-depth cutoff walls, connecting slabs for improved plinth conditions, and stress-deformation analysis of cutoff walls were essential. In narrow valleys, medium-hard rockfill materials, reasonable pre-settlement periods, flexible fill materials, special compaction zones, high toe walls, or internal plinth designs were recommended to improve stress-deformation states and ensure stability. The core of CFRD technology lies in ensuring deformation coordination between the dam body and panels, which was achieved through numerical analysis, optimized dam zoning, higher downstream rockfill compaction standards, and balanced full-section filling to prevent panel separation and cracking, enhancing overall dam stability.

Conclusions and Prospects Research indicates that as dam height increases, combined with complex topographic and geological conditions and harsh natural environments at dam sites, the physical and mechanical properties of CFRDs become increasingly complex. An in-depth investigation of the structural characteristics of CFRDs under the “three highs, one deep, and one narrow” conditions is essential not only for advancing dam construction and design feedback but also for enhancing dam safety monitoring. In this regard, monitoring projects and methods for CFRDs under high dam height, high seismic intensity, alpine regions, deep overburden, and narrow valleys should emphasize key indicators such as dam deformation, strong-motion monitoring, ice pressure, foundation settlement, and panel deformation. Developing new precision monitoring instruments with large ranges and high water pressure resistance is necessary to overcome the inherent limitations of conventional monitoring technologies. These instruments are vital for accurately detecting abnormal conditions under extreme climatic and harsh environmental circumstances, ensuring that the safety monitoring requirements of CFRDs under special engineering challenges are met. In the future, predictive technology for CFRD safety performance requires significant enhancement. Large-scale and high-stress experiments on dam construction materials should be prioritized to establish constitutive models that comprehensively incorporate multiple influencing factors. In addition, attention should be devoted to special engineering challenges such as high altitude, steep slopes, and karst landforms, which affect dam design and monitoring technologies. The integration of advanced technologies such as the Internet of Things (IoT) and artificial intelligence (AI) is also essential to raise the development of intelligent and precise safety monitoring systems, enabling real-time monitoring and early warning of dam operational conditions.

Key words: concrete face rockfill dam; safety monitoring; high dam height; alpine region; high seismic intensity; deep overburden layer; narrow valley

(编辑 吴芝明)

引用格式: Xiao Sheng, Yang Jie, Lu Xi, et al. A Comprehensive review of safety monitoring technologies for concrete face rockfill dams addressing the challenges of “three highs, one deep, and one narrow”[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(6):47–61. [肖晟, 杨杰, 陆希, 等. 考虑“三高一深一窄”特殊工程问题的面板堆石坝安全监测关键技术研究进展[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(6):47–61.]