

中国混凝土面板堆石坝的技术进步

郦能惠¹, 杨泽艳²

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 中国水电工程顾问集团公司, 北京 100011)

摘 要: 首先阐述了中国 20 余年来混凝土面板堆石坝的发展概况, 简要说明了已建和在建的 94 座坝高 100 m 以上的高混凝土面板堆石坝的主要技术特征和自主创新, 包括上下游坝坡、面板厚度、宽度和配筋率、趾板宽度、坝体分区、筑坝材料、填筑标准、接缝止水 and 工程用途。展示了中国在国际混凝土面板堆石坝工程领域的领先地位。接着阐述中国混凝土面板堆石坝筑坝技术所取得的进展, 分别阐述了设计技术、施工和监测技术、筑坝材料(软岩和砂砾石)和防渗结构(面板和止水)关键技术, 不利自然条件下(狭窄河谷、高陡岸坡、深覆盖层、地震区和高寒区)的筑坝关键技术以及计算和试验研究等方面的技术进步和创新, 最后简述了未来超高面板堆石坝的挑战和展望。

关键词: 混凝土面板堆石坝; 技术进步; 发展进程; 主要特征; 筑坝技术; 创新; 展望

中图分类号: TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)08-1361-08

作者简介: 郦能惠(1940-), 男, 浙江诸暨人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 长期从事水利水电工程和电力建设工程中岩土力学和水工结构研究工作。E-mail: nhli@nhri.cn。

Technical advances in concrete face rockfill dams in China

LI Neng-hui¹, YANG Ze-yan²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Beijing 100011, China)

Abstract: The development of concrete face rockfill dams (CFRD) in China for more than 20 years is introduced. The main features including dam slope, thickness, width and reinforcement ratio of face slab, width of plinth, dam zoning, type of rockfill and function of project and some initiative creations about design concept, placement criteria and water-stop are presented. China's leading position in the worldwide CFRDs is shown. The technical advances and creations in the design, construction, test, research, inspection, safety monitoring of CFRDs are described. The construction technology using soft rock and sand gravel as embankment materials as well as the key technology for building CFRDs at the site with bad natural features including narrow river valley, steep river slope, deep overburden layer, strong earthquake zone and severe cold zone is also presented. The challenge and prospect for supper-high CFRDs in the future are proposed.

Key words: concrete face rockfill dam; technical advance; development; main feature; construction technology; innovation; prospect

0 引 言

中国自 1985 年开始学习和引进国外的技术和经验^[1], 同时重视自主创新的科学研究和技术开发, 以西北口坝为试点工程开始混凝土面板堆石坝的建设, 自国家“六五”计划开始, 高面板堆石坝筑坝关键技术就被列入国家重点科技攻关项目、国家自然科学基金重点课题和水利水电行业重点科技项目, 组织全国科技力量, 勘测设计单位、科研院所、施工企业和高等院校联合起来, 对现代混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题, 进行了大量的系统的科学研究, 取得的科技成果不断应用于工程实践, 解决了一系列重大

技术难题, 编制了设计规范和施工规范, 及时总结工程经验和教训, 推动了水利水电行业科技进步和混凝土面板堆石坝工程的建设。这种坝型在实践中体现出来的安全性、经济性和适应性良好的特点, 深受坝工界的青睐, 经常成为首选的比较坝型。据不完全统计, 到 2011 年底中国已建成、在建和拟建的混凝土面板堆石坝已达 305 座, 其中坝高 100 m 或超过 100 m 的高混凝土面板堆石坝有 94 座, 高坝中已建成 48 座, 在建 20 座, 拟建 26 座, 承接了马来西亚的巴贡(Bakun,

坝高 202 m)、苏丹的麦罗维 (Merowe)、老挝的南俄二级 (Nam Ngum II)、厄瓜多尔的科卡 科多 辛克莱 (Coca Codo Sinclair) 等大型混凝土面板堆石坝工程的技术咨询或设计施工。在面板堆石坝建设的过程中取得了筑坝技术的重大进步, 实现了成功超越。

1 发展历程和主要特征

中国已建高混凝土面板堆石坝和在建、拟建的部分高坝的坝高随建成和预期建成年份的分布见图 1 所示。对照国际大坝委员会不完全的统计, 中国混凝土面板堆石坝的总数已经占全世界的 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, 中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、深厚风化层、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高混凝土面板堆石坝, 其中最具特点的是下列工程^[2-5]: ①至今为国内外最高的混凝土面板堆石坝是水布垭坝 (湖北清江, 坝高 233 m)。②至今为堆石体积最大 ($1800 \times 10^4 \text{ m}^3$)、面板面积最大 ($17.27 \times 10^4 \text{ m}^2$) 的是天生桥一级坝 (贵州南盘江, 坝高 178 m)。③至今为强震区 (设计烈度 9 度) 最高的混凝土面板砂砾石坝是吉林台一级坝 (新疆喀什河, 坝高 157 m)。④已经受强震 (汶川 8 级地震) 考验的是紫坪铺坝 (四川岷江, 坝高 156 m), 坝址地震烈度达 9~10 度。⑤河谷不对称且岸坡高陡 (左岸趾板边坡高 310 m) 的是洪家渡坝 (贵州乌江, 坝高 179.5 m)。⑥主体用砂岩和泥岩混合料填筑的高坝是董菁坝 (贵州北盘江, 坝高 150 m)。⑦河谷最狭窄 (河谷宽高比 1.27) 的高坝是猴子岩坝 (四川大渡河, 坝高 223.5 m)。

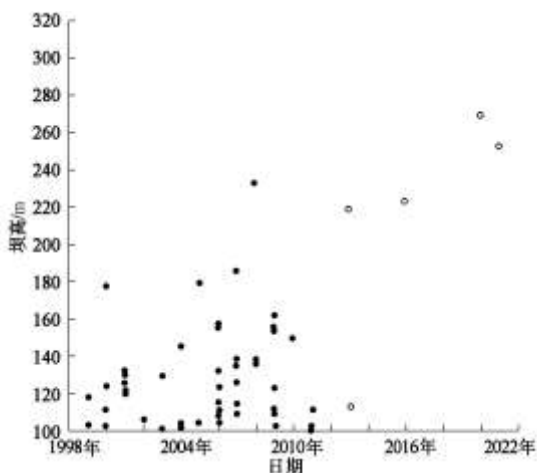


图 1 中国高混凝土面板堆石坝坝高与建成和预期建成年份分布图

Fig. 1 Dam height and completed year or expected completion time for high CFRDs in China

94 座坝高 $\geq 100 \text{ m}$ 的混凝土面板堆石坝的主要特征有下列共同点:

(1) 上游坝坡大多为 1:1.4, 但是筑坝材料为砂砾石的坝坡较缓, 为 1:1.5~1:1.7, 地震区坝坡也较缓, 为 1:1.5~1:1.8。

(2) 下游坝坡大多为马道间 1:1.4, 综合坝坡 1:1.5, 视下游堆石材料抗剪强度的不同下游坝坡随之不同, 滩坑坝料为火山集块岩, 马道间下游坝坡 1:1.25, 茨哈峡坝料为砂岩和板岩, 马道间下游坝坡 1:1.6, 地震区坝坡也较缓, 综合坝坡 1:1.8~1:2.0。

(3) 面板厚度都采用 $0.3 + \alpha H$ 公式, 坝高 $H > 150 \text{ m}$ 的坝 α 值大多为 0.0035, 坝高 $< 130 \text{ m}$ 的坝 α 值大多为 0.003。

(4) 面板垂直缝间距大多为 12 m, 部分高坝为 16 m 或 15 m, 大多数坝面板受拉区的垂直缝间距为受压区的 1/2, 即为 6 m 或 8 m。

(5) 面板钢筋大多采用双层双向配置, 水平向钢筋率 0.3%~0.4%, 垂直向钢筋率 0.35%~0.50%。

(6) 垫层区水平宽度 2~4 m, 大多为 3 m, 个别为 2 m, 坝高 180 m 以上为 4 m。

(7) 过渡区水平宽度大多为 4 m, 坝高 150 m 以上为 5 m 或上窄下宽, Bakun 坝、洪家渡坝与猴子岩坝过渡区顶宽 4 m, 底宽 10 m 或 11 m。

(8) 主堆石区与下游堆石区分界线, 只有天生桥一级坝是坝轴线, 大多为向下游 1:0.2~1:0.6 的坡线, 下游堆石料较差时, 分界线为向下游 1:0.7~1:1 的坡线。

(9) 趾板宽度大都视地形地质条件和水头分别采用 6、8、10、12 m, 一些高坝采用了内趾板。

(10) 筑坝材料大多是中硬岩和硬岩, 包括灰岩、砂岩、玄武岩、花岗片麻岩和凝灰岩, 下游干燥区用软岩填筑的是: 天生桥一级坝为砂泥岩、鱼跳坝为泥质粉砂岩、盘石头坝为砂岩和页岩, 主体用砂岩和泥岩混合料填筑的是董菁坝。

(11) 除溧阳抽水蓄能电站以外, 坝高 150 m 以上的库容都在 $2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 以上, 工程用途大多为综合利用, 包括发电、防洪、灌溉、供水、航运和休闲娱乐, 几乎都有水力发电功能, 装机容量 300 MW 以上占 46%, 坝高 130 m 以上的高坝工程中 75% 的装机容量在 300 MW 以上。

中国混凝土面板堆石坝近 30 a 的发展过程中形成了中国自主创新的特征, 主要是:

(1) 改变了国外坝体分区设计概念^[1], 提出了高坝变形安全的理念, 提出了更为合理的坝体分区^[2-6]。

(2) 改变了国外的坝体堆石填筑标准 (10 t 振动碾碾压 4~8 遍), 21 世纪建成与在建的高混凝土面板

堆石坝(坝高>150 m)的主堆石区和下游堆石区的孔隙率分别提高到 18.8%~21%和 19%~22%。高坝坝体沉降特征值 (S/H^2 , S 为坝体最大沉降值, H 为坝高) 已从 0.95×10^{-4} 降低到 $0.28 \times 10^{-4} \sim 0.54 \times 10^{-4}$, 堆石坝体变形减小一倍, 有利于高坝防渗体系——面板与接缝止水的变形安全和渗流安全^[2, 6]。

(3) 基于动态稳定止水设计理念, 提出了高坝的周边缝止水结构, 开发了 GB 型与 SR 型延伸率高、流动止水性能好的止水材料; 提出了高坝压性垂直缝的可变形止水结构, 有利于减轻或避免垂直缝两侧面板混凝土挤压破坏。

2 筑坝技术的进步

2.1 设计技术进步

(1) 坝体结构设计^[6]

在总结天生桥一级面板堆石坝的工程经验教训基础上, 针对不同的地形地质条件和筑坝材料等技术难题, 在混凝土面板堆石坝坝体结构设计取得了显著的技术进步, 形成了具有中国特色的混凝土面板堆石坝坝体结构设计。主要是: ①在坝体结构设计上充分利用建筑物开挖料和料场各种料源的同时重视坝体各区的变形协调; ②高混凝土面板堆石坝采用较高的压实标准, 即较小的孔隙率或较高的相对密度, 采用重型碾压机械合理分层压实来实现, 如猴子岩面板堆石坝垫层区、过渡区、主堆石区和下游堆石区的孔隙率分别是不大于 17%、18%、19%和 19%; ③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, 如宜兴抽蓄电站上库面板堆石坝建在陡峻的山坡上, 在 427 m 高程以下设置增模区, 提高其变形模量以改善坝体变形性状和抗滑稳定性, 见图 2 所示。

(2) 变形协调理念与变形控制措施^[6]

总结和分析国内外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, 形成了面板堆石坝设计的变形协调理念, 提出了变形控制措施。主要包括: ①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, 以坝体各区变形协调, 面板工作状态良好, 来确定坝体合理分区, 图 3 为变形协调设计的 Bakun 面板坝坝体分区图; ②适当提高下游堆石区的填筑标准, 即使下游堆石料或建筑物开挖料的岩性、风化程度和颗粒级配较差, 提高其填筑标准, 使坝体各区的变形模量相近, 达到坝体变形协调; ③合理确定在纵剖面和横剖面上坝体填筑形象进度, 合理组织筑坝材料开挖、储存和填筑, 尽量做到坝体填筑全断面均衡上升, 达到施工期坝体变形协调; ④合理确定面板分期浇筑时间以及面板浇筑时已填筑坝体顶面与该期面板顶面之间的高差, 即预沉降措施, 使堆石坝体变形与面板变形同步协调; ⑤提高堆石坝体填筑标准, 减小堆石坝体在坝轴线方向的位移, 减小面板与垫层之间的约束, 减小两岸坝肩附近面板的拉应力以及河谷中央面板的压应力, 避免两岸坝肩附近面板产生拉裂缝以及河谷中央面板挤压破坏。

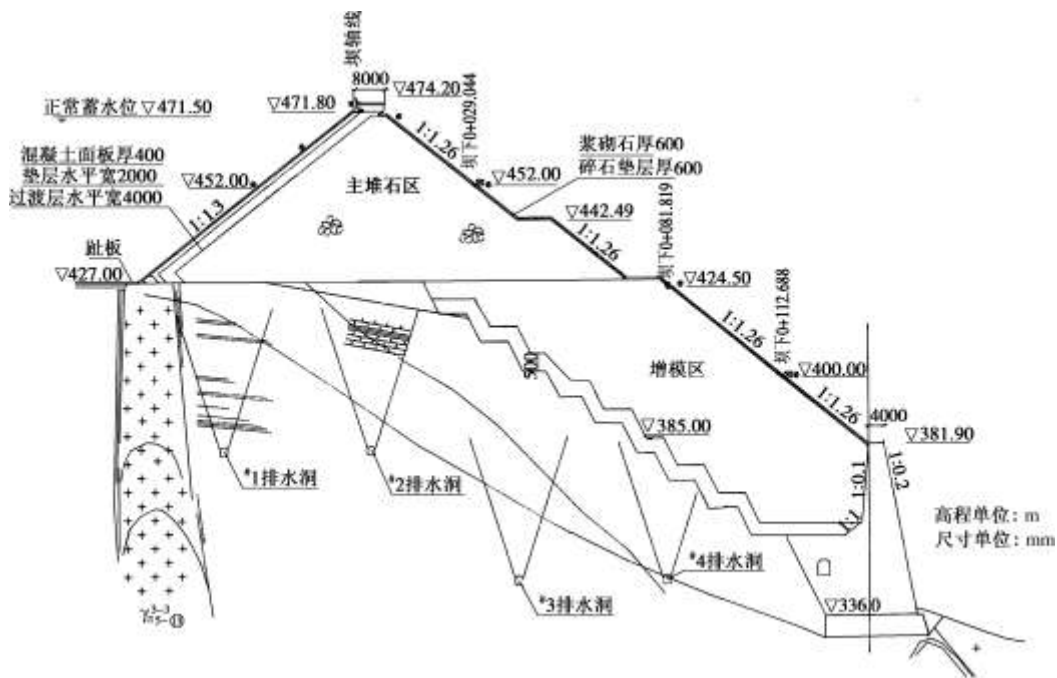


图 2 宜兴抽蓄电站上库面板堆石坝 0+381.02 m 断面图

Fig. 2 Cross section of dam for head reservoir of Yixing Pumped Storage Station (0+381.02 m)

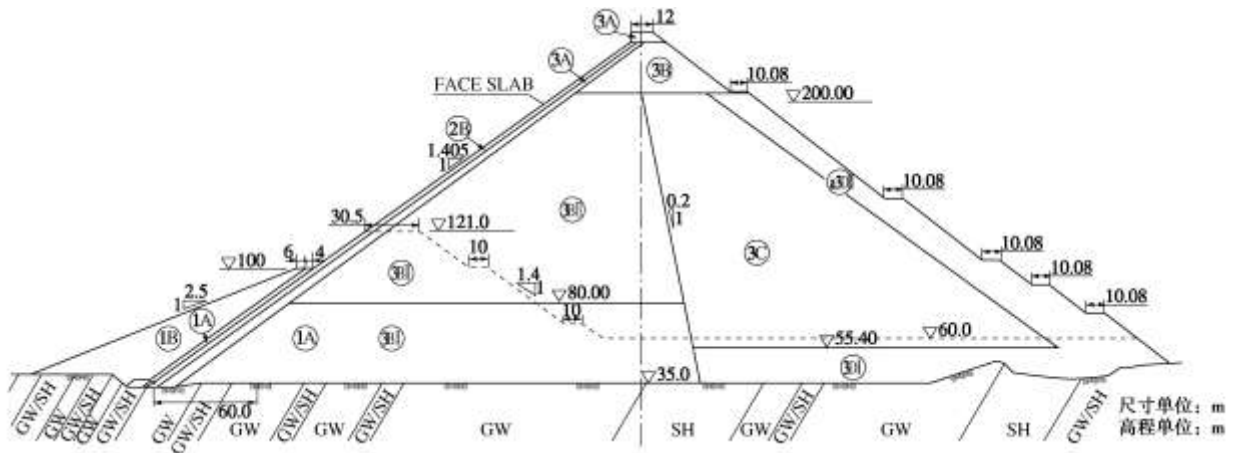


图3 变形协调设计 Bakun 坝的坝体分区图

Fig. 3 Zoning of Bakun Dam designed by new deformation coordination design concept

(3) 渗流安全理念与渗流控制措施

总结和分析株树桥坝和国外多座面板堆石坝严重渗漏以及沟后坝溃决的原因,形成了面板堆石坝渗流安全理念,提出了渗流控制措施,主要包括:①自上游至下游坝体各区渗透系数和层间关系满足水力过渡原则,保证堆石坝主体处于非饱和状态并不产生渗透变形破坏;②减小与控制接缝位移,修正趾板建基面的地形和趾板下游的地形,提高周边缝附近特殊垫层区与垫层区的填筑标准,同时应使得周边缝附近的垫层区、过渡区和堆石区的填筑标准和变形模量彼此相近;③减小甚至避免面板裂缝;④适应大变形的接缝止水结构和止水材料;⑤研究在不同水头、不同渗流速度乃至止水破损条件下的垫层料和过渡料的渗透变形特性,研究和确定垫层料和过渡料的设计;⑥采用内趾板、截水槽、加深固结灌浆和反滤保护等措施处理不良地质条件趾板基础。

2.2 施工和监测技术进步

(1) 施工技术

中国自主建设了270多座混凝土面板堆石坝,形成了一支高水平的施工队伍和高面板堆石坝优质快速施工技术,主要包括:①做好料场规划和料源平衡,使料场开采与大坝填筑在规模和强度上相适应;②分别采用枯期围堰、过水围堰和全年围堰导流渡汛方式和全断面均衡填筑快速施工技术;③开发32t重型振动碾;④采用冲击碾压施工技术;⑤开发垫层区翻模固坡技术和喷乳化沥青技术;⑥开发面板混凝土浇筑布料器、趾板混凝土滑动模板和防浪墙混凝土移动式模板台车等专业机具和配套技术。

(2) 质量检测与质量控制技术

中国混凝土面板堆石坝坝体填筑质量监测采用压实效果与施工参数双控,压实效果是指用试坑法在现场检测坝体堆石料的颗粒级配、干密度或孔隙率和渗

透系数;施工参数是指铺层厚度、加水量、碾压机械、碾压遍数等。为了实时和全面控制施工质量,开发了大坝填筑GPS高精度实时监控技术、附加质量法快速检测堆石体密度的方法、挤压边墙质量检测方法和趾板灌浆抬动变形监测方法等。

(3) 安全监测设备与资料分析技术^[2]

通过“六五”、“七五”、“八五”、“九五”国家科技攻关项目开发了混凝土面板堆石坝安全监测仪器设备,广泛应用于国内外工程,主要包括:①堆石坝体内部变形监测仪器——水管式沉降计、电磁式分层沉降计和引张线式水平位移计、电位器式位移计。②面板变形监测仪器——固定式测斜仪。③周边缝位移监测仪器——三向测缝计。“九五”攻关项目开发了N2000型遥测遥控水平垂直位移计,主要性能达到国际领先水平,已应用于水布垭面板堆石坝工程。④形成了混凝土面板堆石坝安全监测资料分析技术,建立了坝体变形、面板应力和面板挠度等的统计分析模型。

2.3 筑坝材料和防渗结构技术进步

(1) 软岩堆石料筑坝技术

在堆石坝体下游干燥区采用砂泥岩等软岩堆石料最高的是天生桥一级坝,坝高178m,除垫层区、过渡区和排水区以外堆石坝体都用砂岩和泥岩混合料最高的是董菁坝,坝高150m,其典型断面见图4所示。软岩筑坝技术进步主要是:①设置有足够排水能力的排水区,竖向排水尽量靠近上游,使软岩堆石区处于非饱和状态,有足够的抗剪强度和变形模量;②重视坝体分区的变形协调,提高软岩堆石区的压实标准,使软岩堆石区的变形与其他各区的变形比较协调;③研究软岩堆石料的压实特性和变形特性,针对不同岩性的软岩堆石料采取相应的压实施工参数和施工方法;④顶部面板最小厚度增加至40cm、减小底部止水凸起肋条高度、增设抗挤压钢筋等面板抗挤压破坏措施。

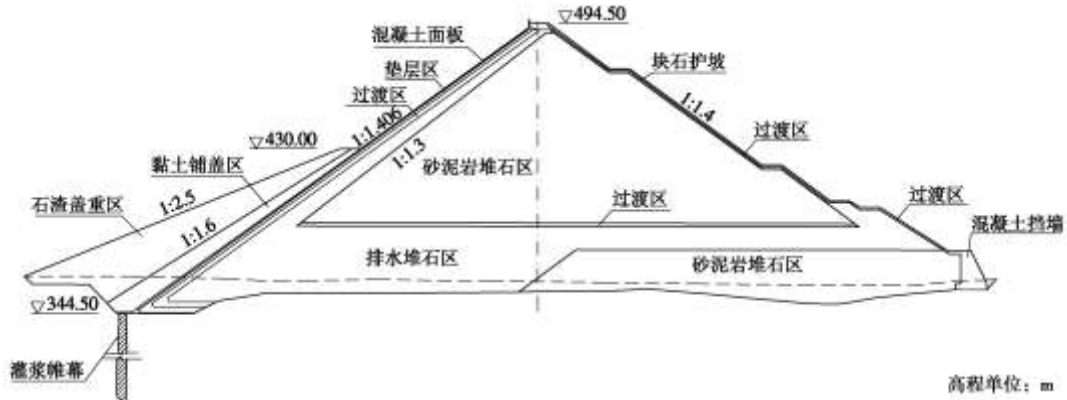


图 4 董菁面板堆石坝断面图

Fig. 4 Cross section of Dongjing CFRD

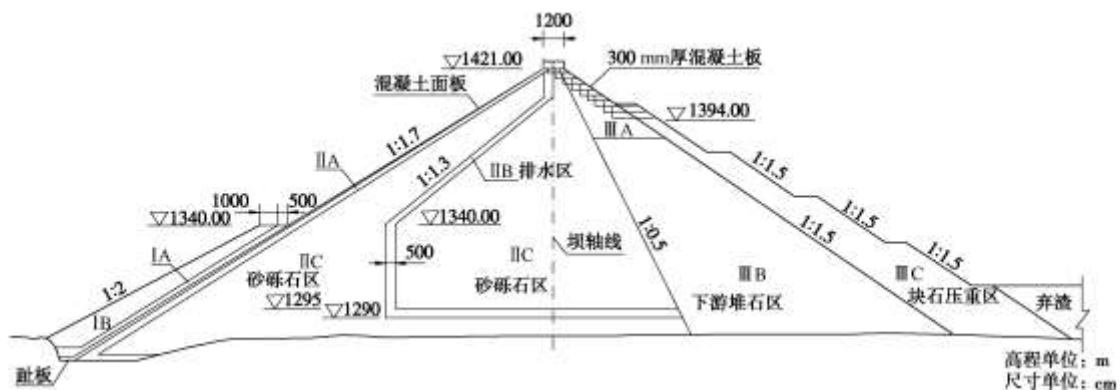


图 5 吉林台一级面板砂砾石坝断面图

Fig. 5 Cross section of Jilintai-I CFRD

(2) 砂砾石料筑坝技术

在分析沟后面板砂砾石坝溃决原因的基础上进行了面板砂砾石坝筑坝技术的系统研究, 相继建成了吉林台一级(坝高 157 m, 见图 5 所示)、乌鲁瓦提(坝高 133 m)和黑泉(坝高 123.5 m)等面板砂砾石坝, 取得的技术进步主要是: ①设置有足够排水能力的排水区, 竖向排水尽量靠近上游, 使砂砾石区处于非饱和状态; ②通过大型足尺渗透变形试验等来研究砂砾石料的颗粒组成、渗透系数和渗透变形特性, 合理设计垫层区、砂砾石区和排水区, 使砂砾石坝体不发生渗透变形破坏; ③吉林台一级、黑泉等多座面板砂砾石坝下游设置堆石区以利抗滑稳定安全。

(3) 面板防裂技术

针对建设初期面板混凝土产生裂缝的技术难题, 从面板混凝土材料、面板混凝土施工技术和面板工作条件全面地进行了混凝土面板防裂技术研究, 取得的技术进步主要是: ①复合外加剂与混凝土配合比优化; ②掺加粉煤灰; ③合成材料纤维混凝土, 主要是掺加聚丙烯腈纤维; ④钢纤维混凝土; ⑤合理配筋; ⑥合理分期浇筑; ⑦喷乳化沥青、切断架立筋等措施, 降

低垫层区对面板的约束; ⑧及时保湿、科学保温养护; ⑨合理选择面板混凝土浇筑时机和环境; ⑩减面板脱空; ⑪改善面板应力状态。

(4) 止水结构与止水材料

国家“七五”、“八五”、“九五”科技攻关项目都将接缝的止水结构与止水材料立项进行了系统的试验研究, 其中具有代表性并广泛应用的是 GB 系列的止水材料与结构和 SR 系列的止水材料与结构, 主要性能都超过国际同类止水材料与结构。中国面板堆石坝除早期建设的株树桥坝和沟后坝以外都没有因止水结构发生破坏而产生严重渗漏。取得的技术进步主要是: ①形成了动态稳定止水设计理念; ②高面板堆石坝普遍重视顶部止水, 水布垭、Bakun、三板溪、洪家渡、吉林台一级等采用有波形止水带的塑性填料顶部止水; ③三板溪、洪家渡、紫坪铺等高面板堆石坝取消了中部止水; ④吉林台一级、天生桥一级等高面板堆石坝的顶部止水采用天然无黏性填料自愈止水; ⑤Bakun 等坝面板受压区垂直缝嵌填可变形的止水材料以避免挤压破坏, 见图 6 所示; ⑥按周边缝要求设置面板顶部与防浪墙之间的水平缝的止水结构与材料;

⑦塑性填料机械挤出嵌填技术。

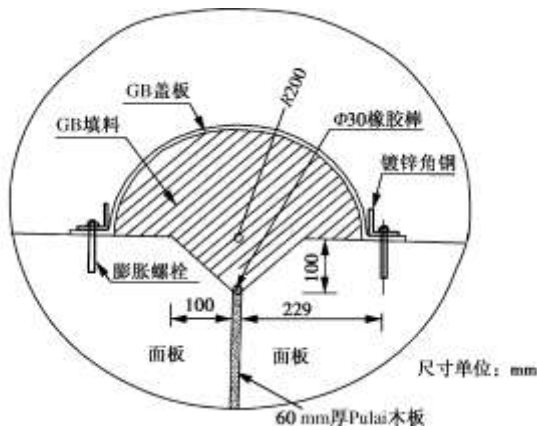


图6 Bakun 坝面板压性垂直缝止水

Fig. 6 Water-stop of vertical joint of Bakun CFRD

2.4 不利自然条件下建坝技术

(1) 狭窄河谷与高陡岸坡坝址建坝技术

中国在狭窄河谷上在建最高的是猴子岩坝（宽高比 1.27，坝高 223.5 m），河谷最狭窄已建的是龙首二级坝（宽高比 1.3，坝高 146.5 m），河谷不对称且趾板边坡高陡的是洪家渡坝（左岸趾板边坡高达 310 m，宽高比 2.38，坝高 179.5 m），取得的主要技术进步是：①提高堆石压实标准，减少堆石坝体变形；②在与岸坡连接处设置变形模量较高的特别碾压区；③合理确定坝体填筑顶面高程与面板浇筑高程的高差，以及合理确定面板浇筑时间与坝体填筑时间的预沉降期；④采用适应较大变形的周边缝止水结构和材料；⑤不利地形条件下采用高趾墙或便于与其它建筑物连接；⑥

采用内趾板减少陡坡开挖量；⑦监测坝轴向坝体变形和面板垂直缝变形；⑧采取合理的边坡加固措施。

(2) 深覆盖层上建坝技术

坝基覆盖层最厚的是铜街子副坝，覆盖层厚达 73.5 m，坝高 48 m；趾板建在覆盖层上最高的是九甸峡坝，覆盖层厚 56 m，坝高 136.5 m，河床覆盖层最宽厚的是察汗乌苏坝，坝高 110 m，河床覆盖层宽 96 m，厚 46.7 m，察汗乌苏面板砂砾石坝典型断面见图 7 所示。取得的技术进步主要是：①采用钻孔、动力触探、面波测试、原位旁压试验和载荷试验等多种手段，查明覆盖层的组成和结构、软弱夹层和可能液化砂层的分布以及覆盖层的工程特性；②覆盖层采用混凝土防渗墙防渗；③采用连接板连接防渗墙与趾板，改善趾板的工作条件，用三维有限元法计算分析优化连接板长度与防渗体系设计；④研究防渗墙应力变形性状及其影响因素，提出改进工程措施。

(3) 地震区建坝技术

中国在 9 度强震区建造的最高面板堆石坝是吉林台一级面板砂砾石坝（坝高 157 m），见图 5 所示。按照场地地震基本烈度 7 度设计的紫坪铺面板堆石坝经受了汶川 8 级地震 10 度地震烈度的考验，这两座坝是中国面板堆石坝抗震设计的代表性工程。地震区面板堆石坝抗震设计与抗震工程措施主要包括：①坝顶超高应包括地震引起坝顶震陷和涌浪高度；②采用不能自由排水的软岩堆石料或砂砾石料填筑的面板堆石坝应设置合理的排水体；③挖除或加固处理坝基可能液化的覆盖层；④下游坝坡或上部坝体的下游坝坡变缓；

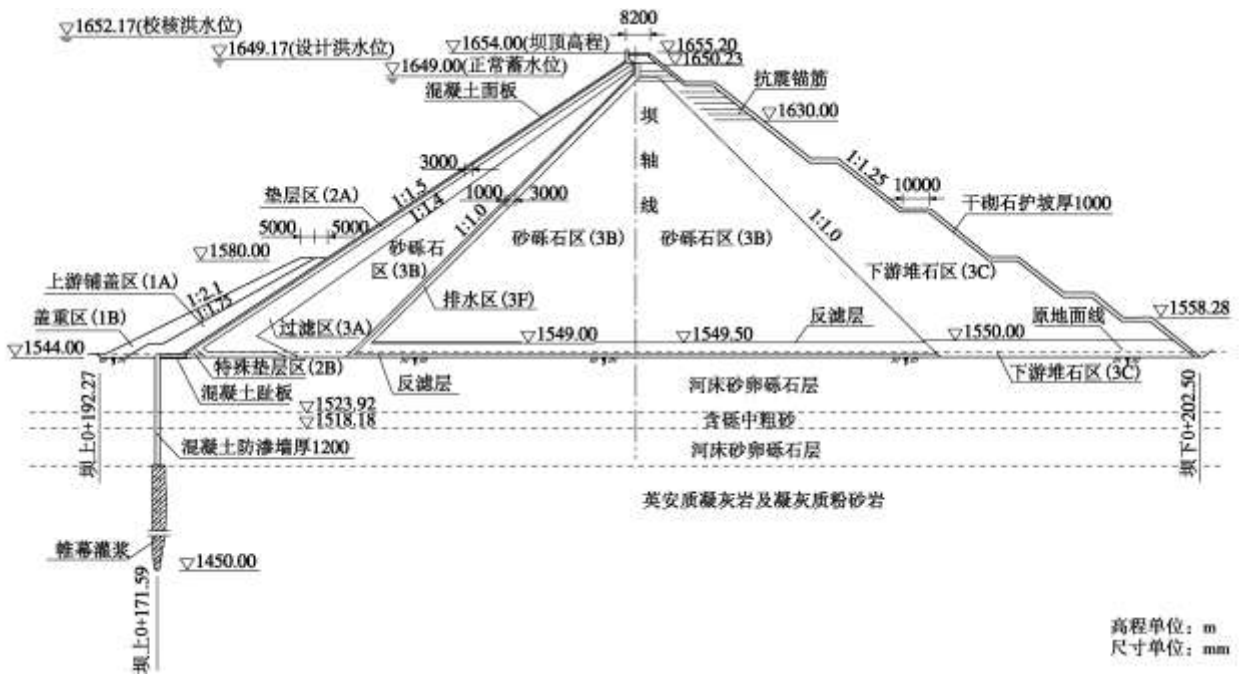


图7 察汗乌苏面板砂砾石坝典型断面图

Fig. 7 Cross section of Chahanwusu CFRD

⑤采用动力特性较好的尤其是动力变形特性较好的筑坝材料; ⑥适当增加垫层区宽度, 岸坡陡时适当延长垫层料与基岩接触区长度; ⑦适当提高压实标准; ⑧上部坝体用锚筋或土工格栅加筋来加固, 提高其整体稳定性; ⑨改善下游坝面护坡型式, 增加坡面抗震稳定性; ⑩适当增加坝顶宽度; ⑪改善坝顶结构整体抗震性能、采用较低的防浪墙和整体式坝顶防浪墙结构; ⑫适当增加某些部位(顶部)面板厚度和面板钢筋率; ⑬采用适应接缝大位移, 特别适应面板错台和挤压破坏的接缝止水结构和止水材料; ⑭改善面板堆石坝与其它混凝土结构的连接型式和结构; ⑮设置紧急泄流和放空建筑物; ⑯加强大坝地震反应安全监测。

(4) 高寒地区建坝技术

在黑龙江、新疆和青海等高寒地区建成 20 余座混凝土面板堆石坝, 其中的代表是莲花坝(坝高 71.8 m), 取得的技术进步主要是: ①采取薄层重型振动碾压实, 合理增加碾压遍数, 实现冬季堆石碾压施工不间断; ②选择采用降低水灰比、掺加外加剂和保温养护等措施, 提高面板混凝土抗冻性能; ③适当增加面板钢筋含量, 在水位变动区设置表层抗温度应力钢筋; ④面板表面涂黑色憎水(憎冰)涂料, 增加热交换, 维持冰面和面板间有一层不冻水膜; ⑤表面止水采用沉头螺栓等固定型式, 避免表面止水被冰盖拔出破坏。

2.5 计算和试验技术进步

科研院所、设计院和高等院校在解决工程设计和施工技术难题的同时, 在试验研究与计算分析方面也取得了技术进步, 主要有: ①研究筑坝材料试验的缩尺效应, 提出用比较试验和反馈分析方法确定缩尺效应修正系数。②研究筑坝材料的流变特性, 建立了流变模型, 为实现面板堆石坝体的变形协调设计计算提供了基础。③采用原位测试(旁压试验、荷载试验)、室内大型试验和反演分析相结合的手段确定覆盖层或筑坝材料的力学特性和计算参数。④建立了合理的筑坝材料本构模型, 南水双屈服面弹塑性模型和 Duncan E-B 非线性弹性模型应用较广, 提出了有限元应力变形计算方法, 100 m 以上高坝大多进行应力变形计算, 计算结果能反映堆石坝体、面板和接缝的应力变形规律, 为设计提供了依据。⑤采用土工离心模拟技术研究混凝土面板堆石坝应力变形性状, 为宜兴上库, 九甸峡等面板坝设计方案比较提供了手段, 为宜兴上库、吉林台一级、察汗乌苏、小干沟、天生桥一级、九甸峡等工程解决复杂地形地质条件下建坝的技术难题提供了基础。⑥研制大型土工离心机振动台, 为研究地震时面板堆石坝的动力性状、采取抗震工程措施提供了手段, 已应用于吉林台一级坝。⑦采用大型足尺模型试验研究并开发了新型止水结构与止水材料, 见

图 8 所示。⑧进行混凝土改性研究和掺合成纤维等研究, 提高混凝土的抗裂性能。

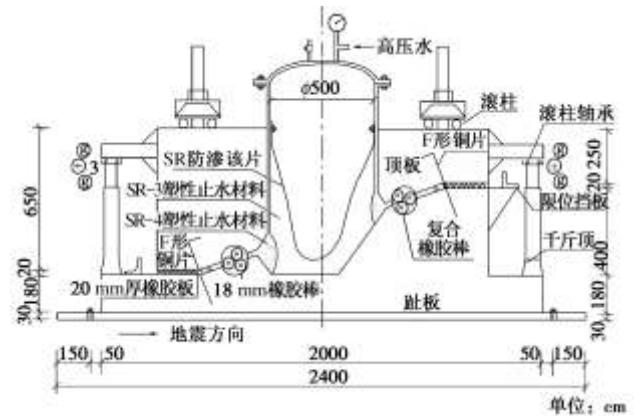


图 8 周边缝止水结构抗震模型试验

Fig. 8 Model tests on seismic behaviors of water-stop structure of peripheral joint

3 挑战和展望

中国西部有着丰富的水能资源, 在金沙江、澜沧江、怒江、雅砻江、大渡河、黄河上游等江河上都要修建 300 m 级的高坝, 形成龙头水库, 以提高梯级电站的补偿调节性能, 提高电能质量。但这些电站都位于经济不发达、交通闭塞的高山区, 受对外交通条件、地形地质条件和筑坝材料等因素的制约, 使得混凝土面板堆石坝成为最具竞争力的坝型。

新建这批坝高超过 250 m 的超高面板堆石坝给坝工建设者提出了巨大的挑战^[7]。200 m 级的 Campos Novos 坝、Barra Grande 坝和天生桥一级坝都发生了面板挤压破坏, 水布垭坝的面板也有局部破损, Campos Novos 坝、Barra Grande 坝等多座高坝产生 600~1300 L/s 的严重渗漏, 这说明高面板堆石坝的变形安全和渗流安全更为重要, 为了更好更省地建设超高面板堆石坝有必要进行下列试验研究和设计施工技术的创新开发: ①高应力与应力路径对筑坝材料特性影响的研究, 建立更符合面板坝实际的可以考虑颗粒破碎、流变变形、湿化变形的本构模型; ②缩尺效应对筑坝材料影响的研究, 建立筑坝材料真实特性与计算参数的确定方法; ③面板与垫层接触面特性试验研究, 建立合理的接触面本构模型; ④建立正确预测堆石坝体变形性状和面板应力变形性状的方法; ⑤静力和地震时高面板堆石坝面板挤压破坏机理分析研究, 提出避免面板挤压破坏的工程措施; ⑥面板堆石坝抗震安全标准和极限抗震能力计算方法研究; ⑦超高坝超长距离坝体内部变形监测设施和深厚覆盖层变形和渗漏量监测设施的开发研制; ⑧超高面板堆石坝的坝体分区、筑坝材料和填筑标准研究; ⑨100 m 以上深

厚覆盖层渗流控制方案和防渗工程措施研究；⑩强震区（甚至地震动水平峰值加速度 $\geq 0.4g$ ）超高面板堆石坝抗震工程设计与抗震工程措施的作用机理研究；⑪深窄河谷、高陡岸坡建造超高面板堆石坝的变形安全设计以及接缝和止水结构设计。

随着对高混凝土面板堆石坝工作机理的真实认识，在不远的将来完成一批超高面板堆石坝建设的同时，将形成中国自己的高混凝土面板堆石坝的设计理论。

致谢：本文撰写时参考了大量国内外文献，特此向诸位作者致谢，包括：Cooke J.B., Sherard J.L., Marulanda A., Materon B., 马洪琪, 曹克明, 蒋国澄, 赵增凯, 周建平, 王柏乐, 党林才, 关志诚, 凤家骥, 张宗亮, 邓毅国, 杨启贵, 王君利, 吴增谋, 蔡昌光, 肖贡元, 孙永娟, 陈振文, 湛正刚, 窦向贤, 彭卫军, 吕生玺, 宗敦峰, 沈珠江, 贾金生, 郝巨涛, 谭建平, 杨德福, 马锋玲, 李国英, 徐泽平, 米占宽, 赵剑明, 鲁一晖, 柏树田, 孙役, 欧红光, 武维新, 杨德勇, 朱自先等, 恕不一一列举。

参考文献：

- [1] COOKE J B. Empirical design of concrete face rockfill dams[J]. *International Water Power & Dam Construction*, 1998(6): 12 - 16.
- [2] 郦能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (LI Neng-hui. Recent technology for high concrete face rockfill dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会. 中国混凝土面板堆石坝 25 年[C]// 混凝土面板堆石坝安全监测技术实践与进展. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 1 - 20. (Committee of CFRD, China Society for Hydropower Engineering. CFRD in China for 25 years[C]// Practice and Progress of Safety Monitoring Technology for CFRD. Beijing: China Water Power Press, 2010: 1 - 20. (in Chinese))
- [4] 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. (YANG Ze-yan, ZHOU Jian-ping, JIANG Guo-cheng, et al. Development of concrete faced rockfill dams in China[J]. *Water Power*, 2011, 37(2): 18 - 23. (in Chinese))
- [5] 蒋国澄. 混凝土面板堆石坝的回顾与展望[C]// 中国大坝技术发展水平与工程实例. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 128 - 135. (JIANG Guo-cheng. Review and prospect of concrete face rockfill dams[C]// Large Dam Construction in China, State of the Art and Case Histories. Beijing: China Water Power Press, 2007: 128 - 135. (in Chinese))
- [6] 郦能惠. 高混凝土面板堆石坝设计新理念[J]. *中国工程科学*, 2011, 13(3): 12 - 18. (LI Neng-hui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. *Engineering Sciences*, 2011, 13(3): 12 - 18. (in Chinese))
- [7] 马洪琪, 曹克明. 超高面板坝的关键技术问题[C]// 中国大坝技术发展水平与工程实例. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 52 - 61. (MA Hong-qi, CAO Ke-ming. Key technology of supper-high CFRD[C]// Large Dam Construction in China, State of the Art and Case Histories. Beijing: China Water Power Press, 2007: 52 - 61. (in Chinese))