

中国水利水电技术 发展与成就

本文集编委会 编



中国电力
出版社

前 言

潘家铮同志是我国杰出的水工结构和水利水电工程专家、中国科学院和中国工程院两院院士。今年是他的 70 华诞，也是他从事水电建设和科技活动的 47 周年纪念。为了庆贺他在水电开发中的贡献和在科技研究中的成就，由中国水力发电工程学会等 6 个学术团体发起，征文出版本论文集。我们的倡议得到长期和潘家铮院士共事的专家们的积极响应，提供了 30 多篇优秀的论文，从各个领域反映了我国水利水电技术的进展和成就，也酌量收集几篇潘家铮院士挚友所写的一些回忆性短文，使本论文集能在很短的时间内编纂完成。当然，各篇论文代表的是作者们的意见，但也是为我国水利水电界留下一本足资参考的史料。

水利水电建设、特别是大型水电的开发牵涉到的科技领域十分广泛，问题非常复杂。潘家铮院士一再强调：任何一座大型水利水电工程，都凝聚着众多同志的心血，是集体智慧的结晶。要记述我国水利水电发展的历史和成就，应歌颂作奠基性工作的最老一輩的专家和领导，应歌颂几十年来战斗在第一线的万千英雄。一个人的作用极为有限，不宜强调。潘家铮院士的意见无疑是正确的，但这并不否定个别专家所起的促进作用，而他就是有代表性的一位专家。

潘家铮院士在水电界勤恳奋斗 47 年，他虚心向老一輩专家学习，继承并发扬他们的优良作风；他将毕生精力投入新中国的水利水电事业，做出了重要贡献；他热爱和培养年轻一代，由他培养出的骨干已不计其数。他是一位承前启后的专家，深受广大同志们的尊重。

几十年来，他参加过几十座大中型工程的查勘、规划、设计、施工、审查和决策等工作，足迹遍布祖国的山山水水。他主持设计的我国第一座拱顶溢流的流溪河双曲拱坝和第一座大型水电站——新安江水电站，对迅速缩小我国水电技术与国际先进水平的差距起到了重要作用。他在我国许多座大型水电工程（如乌江渡、东江、岩滩、龙羊峡、二滩、广州抽水蓄能……）的决策和解决关键性技术问题上做出过特殊的贡献。特别是举世瞩目的三峡工程论证中，他作为技术总负责人，可以说是呕心沥血，最后终于圆了他的“三峡梦”。

在技术领域中，他的研究范围广泛，紧密结合实际，成就也是多方面的。例如，在重力坝设计中，创立和发展了抽排理论以降低扬压力；在拱坝分析中，透彻地研究了试载法的本质，阐明了许多基本问题；在边坡稳定分析上，总结各种计算方法，提出两项基本公式；在水库边坡滑坡分析中，提出简捷的涌浪计算公式；他全面研究了杆件，特别是地基梁的完整常数体系，应用于地下结构和地基梁及框架的分析中。这些都是较突出的例子。

潘家铮院士十分关心和推进新技术的应用与设计现代化，努力推广碾压混凝土、氧化镁混凝土、微膨胀水泥、溢流厂房和坝内厂房、抽排理论等，并主动承担责任。他推动、筹建各设计院的计算机处室，开展有限元分析和开发水利水电设计软件包、CAD 技术和专家智能系统等。他重视业务建设和质量、安全问题，组织开展规程规范的编制与修订，担任质检站站长，在部领导的支持下创建全国大坝安全监测中心，影响都很深远。

潘家铮院士学术渊博，著述浩瀚。五六十年代就出版了《水工结构应力分析丛书》、《重力坝的弹性理论计算》、《重力坝的设计与计算》等专著，七八十年代出版了《建筑物的抗滑

稳定与滑坡分析》、《水工结构分析文集》、《重力坝设计》，主编了《水工建筑物设计丛书》、《水利水电工程软件包》、《水工结构分析及计算机应用》等专著，发表中外文论文近百篇，总字数超过 1000 万，为我国的水利水电技术交流和发 展，起到了重要作用。

潘家铮院士虽年届古稀之龄，仍在孜孜不倦地工作着。他目前仍担任中国工程院副院长、电力部技术顾问、中国长江三峡工程开发总公司技术委员会主任、清华大学教授、国务院学位委员会委员等职和众多的学术团体职务。他除了继续关心指导解决包括三峡工程在内的大中型水电建设中的技术问题外，还承担着一些国家级的重大咨询项目，继续不遗余力地培养新生力量。我们祝愿他健康长寿，继续为我国水利水电事业和科研发展做出更多的贡献。

本文集编委会

1997 年 3 月

目 录

前 言

综 合

我国水工建筑物的设计技术成就	许百立
我国近年土建施工技术的新发展	林伯说
中国水工建设与岩石力学的工程实践	傅冰骏
地震和水利水电工程	陈厚群
工程地质学的主题—地质与工程的结合	王思敬
水利水电工程地质发展概述	朱建业

三 峡 工 程

关于三峡工程论证情况的汇报	潘家铮
三峡工程技术设计审查进展概述	程 山
三峡工程施工技术前期工作研究概况	哈秋龄
三峡工程大坝设计	陈际唐 陆德源 刘 宁
三峡大坝左厂坝段深层抗滑稳定问题	陈际唐 刘 宁
三峡工程泄洪建筑物的水力学研究	丁灼仪 刘彩云

坝 工 技 术

拱坝的多拱梁非线性分析与有限元仿真计算	朱伯芳 许 平 贾金生
拱坝优化研究	孙扬轸 姜常青
拱坝沿地基面滑动的模式及其应力分析方法	陈正作
重力坝断面整体优化及坝体应力和坝基稳定分析	刘世康
土石坝设计的进展	陈明致
混凝土面板堆石坝在我国的发展	郭诚谦
土石坝填筑与岩土开挖工程的计算机模拟及其应用	郭俊竹
我国水电站大坝安全监察工作的回顾	张发华 施济中

地下结构·边坡和坝基稳定

地下工程设计理论与实践	许百立 刘世煌
边坡稳定分析的上限解和下限解	陈祖煜
地下洞室岩爆治理的理论与实践	陆家佑
水工建筑物的抗滑稳定非线性有限元分析	施修玮
坝基渗流计算及对排水孔的模拟	范元勋 姜军凯

计算机应用·CAD 技术

水工结构有限元计算——回顾与展望	崔俊芝
三维造型技术在重力坝 CAD 中的应用	刘白玲 吴素文
拱坝 CAD 技术的进展	周乾父 马 田 夏礼祖
水工枢纽设计智能系统	陈际明 刘润广
CT 技术研究与应用	杨真荣

回 忆·友 谊

潘家铮在新安江水电站	张发华
理论精湛 技术先进 重在实用	李浩钧
风雨同舟 辅佐携进	曹士杰
回忆在 CAD 的普及和应用的日子	诸鸿恩
学而不厌 诲人不倦	李必如
潘家铮院士和能源战略研究	葛能全

附 录

潘家铮院士小传	熊思政
潘家铮院士论著要览	
潘家铮院士简历及主要科技活动年表	
PAN JIAZHENG A Lifetime's Devotion to the Development of Hydroelectric Power in China	Pia Landes

综 合

我国水工建筑物的设计技术成就

许百立^①

近半个世纪以来,我国水利水电工程建设发展迅速,成绩卓著,特别是近10多年来,建设项目之多,规模之大居世界各国之首。大江大河开发治理,百米以上高坝和百万千瓦装机容量水电站的建设,使我国水工建筑物设计技术提高到一个新的水平,并已逐步跨入世界先进行列,但也有一些教训值得吸取。潘家铮院士等一批杰出专家、学者在水工建筑物设计理论和工程建设实践方面作出了重大的贡献。本文就笔者在实际工作中接触到的工程实例,对我国坝工、地下建筑物、泄洪消能建筑物和坝基及高边坡处理等水工建筑物设计技术成就作一综合性概略论述。

一、土 石 坝

1-1 土石坝是最广泛采用的坝型,数量最多

80年代以来,已建成坝高超过100m的有石头河、碧口、鲁布革三座心墙堆石坝。90年代以来,土石坝发展有两个特点:一是混凝土面板堆石坝(以下称面板坝)的广泛采用;二是高土石坝有较大的发展。面板坝由于充分利用当地材料,且与土质防渗墙堆石坝相比受水推力方向有利、浸润线低、坝体断面小、施工不受气候影响、导流度汛简单、工期短、投资省,因而愈来愈被广泛采用。当前我国坝工建设中,土石坝多于混凝土坝,面板坝又多于土质防渗墙坝。至1996年,我国已建成的面板坝有26座,其中超过90m的有西北口、万安溪、天荒坪下库。正在建设的面板坝,据不完全统计有36座,其中坝高超过100m的有9座:天生桥一级(178m)、乌鲁瓦提(138m)、珊溪(130.8m)、白溪(124.4m)、黑泉(123.5m)、白云(120m)、古洞口(120m)、高塘(110.7m)、柴石滩(101.8m)。正在设计坝高超过150m的有8座:三板溪(185.5m)、姚家坪(184.5m)、洪家渡(182.3m)、大柳树(163.5m)、滩坑(161m)、紫坪铺(159m)、响水洞(153m)、吉林台(152m)。此外坝高在100~150m的有11座。这些工程大部分计划在今后十年内安排建设。面板坝在我国发展历史虽不长,但方兴未艾,下一世纪将会突破200m坝高。“七五”、“八五”期间,高土石坝列入国家科技攻关项目,并结合西北口、天生桥一级对面板坝的筑坝材料、坝体分区、接缝止水、坝体应力-应变分析、坝料开采、填筑标准、面板施工机具及施工期坝体挡水、过水等关键技术问题进行了一系列研究;结合小浪底、瀑布沟对土质防渗墙筑坝材料、坝体断面型式、坝体与坝基防渗墙连接型式、坝体渗流分析、土石坝计算分析软件、施工质量控制等方面也作了深入研究,取得了丰硕的成果,使我国土石坝的设计和施工向世界先进水平发展。

1-2 高土质防渗墙堆石坝

(1) 正在建设的小浪底大坝为土质斜心墙堆石坝,坝高154m,坝长1300m,坝体填筑

^① 水利部水利水电规划设计总局副院长兼总工程师。

量 $4900 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该工程坝体设计充分考虑了黄河泥沙多、水库淤积快的特点,坝体防渗体系为一种特殊型式,由坝前天然泥沙淤积铺盖、围堰斜墙、坝体内铺盖和坝体土质斜心墙四部分组成,相互连接,联合构成一道完整的坝体防渗体系。小浪底坝基河床为砂砾石覆盖层,厚约 75 m,坝基防渗处理设两道混凝土防渗墙,一道设在上游围堰斜墙下,厚 1.0 m,另一道为主防渗墙,设在坝体斜心墙下,厚 1.2 m。防渗墙与斜心墙连接采用插入式,插入斜心墙高 12 m。经计算,防渗墙内压应力较大,故采用混凝土标号 C35,弹模 $3 \times 10^4 \text{ MPa}$,防渗墙顶 $5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 范围内填筑高塑性粘土,塑性指标 21.4,以改善与心墙连接处的应力、变形条件,防止心墙产生裂缝。

(2) 已完成初步设计的瀑布沟心墙堆石坝,坝高 186 m,坝长 586 m,心墙土料采用宽级配砾石土,系充分利用当地储量大、运距近的黑马土料场。由于天然料场含砾石多,级配粗,渗透系数偏大,抗渗性能差,土料没有自滤性,不能作高土心墙防渗料,后经多次试验采用剔除大于 80 mm 砾石的措施,使小于 5 mm 和 0.1 mm 的颗粒含量分别达到 50% 和 23% 左右,调整了颗粒级配,改善了土的性质,成为理想的宽级配砾石土。按压实度 0.98 控制,干密度达 2.25 g/cm^3 ,压缩模量 80~100 MPa,压缩系数 $0.01 \sim 0.015 (\text{MPa})^{-1}$,渗透系数 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$,满足高堆石坝防渗体要求。瀑布沟坝基河床覆盖层厚 75 m,坝基曾考虑过灌浆帷幕和混凝土防渗墙等方案,虽然地基具有良好可灌性,但因灌浆帷幕长达 $6.6 \times 10^4 \text{ m}$ 且施工工期长,故放弃,最后确定采用混凝土防渗墙方案。防渗墙与坝体心墙的连接是大坝和地基防渗系统中最薄弱的环节,连接处心墙有可能出现塑流区或拉应力区,从而降低心墙防渗能力,甚至出现裂缝。为此,对瀑布沟混凝土防渗墙与心墙连接,比较了将防渗墙直接与廊道连接和防渗墙直接插入心墙两个方案。经非线性有限元计算和离心模型试验,根据防渗可靠性、防渗墙应力和土体沉降量综合比较,选用防渗墙直接插入心墙的方案。瀑布沟坝基两道防渗墙,各厚 1.2 m,相距 12 m,插入心墙 15 m。在心墙底以上 10 m,两道防渗墙中间设灌浆和观测廊道,廊道净空尺寸 $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。心墙底 3~5 m、防渗墙两侧及顶部 2~4 m 和廊道顶部 4 m 范围内铺填高塑性粘土,其目的也是为了改善防渗墙及其周围心墙土体的受力状态,防止心墙开裂。经计算,防渗墙内最大压应力 $> 30 \text{ MPa}$,发生在防渗墙底部距基岩面 10 m 处,因此,设计采用高强度、中低弹模混凝土,以改善并适应防渗墙应力和变形条件。

1-3 混凝土面板堆石坝

(1) 正在建设的天生桥一级面板坝代表了我国 90 年代的水平。坝高 178 m,坝长 1168 m,坝体填筑量 $1780 \times 10^4 \text{ m}^3$,坝基为泥岩、砂泥岩和灰岩。在坝型比较中,因面板坝比土心墙坝投资省 1.5 亿元,并可提前一年蓄水发电故选用面板坝。天生桥一级面板坝上下游坝坡 1:1.4,垫层料最大粒径 80 mm, $< 5 \text{ mm}$ 的含量为 35%~55%, $< 0.1 \text{ mm}$ 的含量为 5%~8%,渗透系数 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$,允许渗透坡降 50,垫层水平宽 3m。过渡料最大粒径 300mm,主堆石料最大粒径 800mm。坝轴线以上采用溢洪道开采料,为坚硬灰岩,坝轴线以下、下游水位以上容许采用软岩(砂泥岩、泥岩),干密度均要求 2 g/cm^3 以上。基础处理,全部清除覆盖层,将趾板置于弱风化基岩上,但左坝肩因全风化层较深,故在水头小于 30m 范围内置于强风化层,并在趾板下游增设喷混凝土和反滤层保护。趾板宽按满足基岩渗透稳定要求设计,取允许渗透比降为 15,趾板宽 10~6m。趾板下设一道帷幕,深达基岩,单位吸水率 $3L_u$ 或 1/2 水头。固结灌浆深 15 m,面板混凝土标号采用 28 d 龄期抗压强度 25 MPa,水灰比 0.45~0.5,掺 20% 粉煤灰和优质引气剂、减水剂。周边缝止水材料与混凝土面板之间的粘结力要求

大于外水压力；缝宽和止水材料的尺寸能适应预估的周边缝的变形。周边缝设三道止水，垂直缝设两道止水，顶止水不用有机化合物填料，用粉细砂加塑料板覆盖保护。1996年汛期坝体过水，此时坝高约20m，过水缺口宽120m，流量 $2800\text{ m}^3/\text{s}$ ，坝体以混凝土板和钢筋笼、锚筋等保护，满足安全度汛要求。

(2) 多种型式的面板坝。近年来我国面板坝发展迅速，除根据主要筑坝材料为堆石料或砂砾石料可区分为面板堆石坝和面板砂砾石坝外，还有土心墙与混凝土面板相结合的堆石坝、喷混凝土面板堆石坝、溢流面板堆石坝等型式，系根据各工程的具体地形、地质条件、筑坝材料来源，建设多种型式的面板坝。

浙江横山坝原为60年代兴建的粘土心墙堆石坝，坝高48.6m，坝长382m，80年代末将坝加高到70.2m，加高部分采用混凝土面板堆石坝与原心墙堆石坝连成一体。这种坝型之所以取得成功，一是由于原心墙堆石坝已建成20余年，坝体已充分固结；二是设计采用了心墙与面板坝趾板合理的连接。其主要措施是在原心墙中增建了一道厚0.8m的混凝土防渗墙，下达基岩，上至心墙顶，墙深最大72.26m，在防渗墙顶部与加高的面板坝的趾板柔性连接。趾板厚0.8m，长4.42m，设伸缩缝和止水。止水为三道，施工质量较好，底止水为橡胶布加土工反滤布；中间止水为铜片，缝中嵌沥青板；顶止水用嵌缝填料。建成后，自1992年蓄水至今运行正常。

宁波舍网喷混凝土面板堆石坝，是我国首次采用喷混凝土代替常态混凝土做面板。该坝高36.5m，面板分缝宽15m，岸边陡坡处7.5m，喷混凝土具有较好的抗渗性和较高的强度，面板厚15cm，较常态混凝土面板薄。喷混凝土材料采用525号普通硅酸盐水泥、人工碎石骨料（最大粒径15mm），掺减水剂和硅粉，用半湿喷法施工。经试验28d抗压强度达28.5MPa，抗拉强度达2.26MPa。面板内配单层双向 $\phi 14\text{ mm}$ 钢筋，间距20cm。喷混凝土面板应注意垫层面的平稳，使喷混凝土厚度均匀，避免厚薄不均产生裂缝，同时应加强养护，避免干裂。趾板、周边缝、垂直缝同样应做好止水。

十三陵水库面板坝和库盆混凝土面板防渗也具有新的经验。抽水蓄能电站水库水位日变幅大，因此面板坝的材料及分区除考虑通常面板的要求外，还要适应水库水位大幅度骤降时避免可能产生的反向水压力顶托面板。设计采用垫层料的透水性较大，渗透系数 10^{-2} cm/s ，垫层料由人工轧制，最大料径150mm，小于5mm的颗粒占10%~20%，不均匀系数大于10，垫层水平宽度3m。十三陵上库为一开挖库盆，地质较差，透水性较强，本可采用沥青混凝土防渗，但全库采用了钢筋混凝土面板防渗，面积达 $17.48\times 10^4\text{ m}^2$ ，为国内外少见。由于面板有众多的接缝，且难以避免面板完全不开裂，因此在岩坡处面板下设厚30cm的无砂混凝土排水层，渗透系数 10^{-2} cm/s ，在库底面板下设厚50cm的碎石排水垫层，其级配同面板坝垫层。碎石垫层底部设排水管，与排水廊道相接，将渗漏水排出库外。

浙江大奕坑面板坝、瑞祥面板坝和新疆包尔德面板坝均采用溢流面板坝，但都尚未建成。这几座面板坝主要参考了已运行的澳大利亚克罗蒂面板坝设计。这种坝型，适用于泄洪流量较小，坝不很高，两岸无合适布置溢洪道的地形，河床地质条件较好，抗冲刷能力较强的情况。大奕坑面板坝高93m，溢流部位坝高85m，坝址为抗冲能力较强的坚硬熔结凝灰岩。溢洪道设在坝体中部，进口堰和陡槽采用等宽48m，最大泄洪流量 $1925\text{ m}^3/\text{s}$ ，挑流消能，鼻坎处流速约32.4m/s，泄洪陡槽纵坡同下游坝坡1:1.3，底板为钢筋混凝土结构，厚50cm，溢洪道堰体和陡槽下坝体均设置垫层和过渡层，陡槽设掺气槽，纵横分缝设止水，陡槽底板和边墙通

过埋入堆石体内的压板固定在坝体内。

(3) 趾板建在深厚覆盖层上的面板坝。我国高面板坝的趾板大多建在基岩上。对于河床密实的砂砾石冲积覆盖层,无软弱夹泥或细砂层,无架空漂卵石层,且坝不高,也可将趾板建在覆盖层上,以减少坝基开挖,加快施工进度,降低工程造价。国外已有坝高 100 m 以上、覆盖层厚 30 m 以上的面板坝的趾板建在覆盖层上的成功经验。我国铜街子副坝为面板坝,坝高 48 m,河槽覆盖层厚 73.5 m,宽 50 m,坝基防渗采用两排加横撑框格形的混凝土防渗墙,框格尺寸 16 m×15 m,单墙厚 1 m。趾板与搁在防渗墙上的混凝土重力墩连接,接缝处设止水。柯柯亚面板坝高 41.5 m,覆盖层厚 37.5 m,混凝土防渗墙厚 0.8 m,趾板做成拱形连接板与防渗墙连接。正在建设中的乌鲁瓦提面板坝,河床深槽宽 30 m,深 26 m,原设计将覆盖层挖除,趾板建在基岩上。最近经论证,为节省开挖,缩短施工工期,使一个枯水期大坝抢到拦洪高程,确定将趾板建在砂砾石覆盖层上,也采用混凝土防渗墙处理,趾板与防渗墙连接采用适应变形的柔性结构。我国今后面板坝的建设,在查明地质情况的前提下,将可能有更多面板坝的趾板和坝体建在压缩性小、抗剪强度高的覆盖层上。高面板坝在深厚覆盖层上建趾板,除应解决趾板下的基础防渗外,还应分析基础变形对面板、周边缝、垂直缝及其止水的适应能力和防渗墙自身的结构型式和受力条件。

(4) 面板坝的抗震性能。国内外坝工界普遍认为,面板坝的抗震性能较土质防渗墙堆石坝为优。其主要原因是,水压力作用于面板对坝身稳定有利;面板后堆石体大部分干燥,不产生孔隙水压力;堆石体密实,地震产生的变形小;地震可能引起面板裂缝,但垫层及过渡区能起挡水并有反滤自愈作用,不会引起大渗漏。

国外有几座建在强地震区的高面板坝,设计地震加速度超过 $0.5g$,上下游坝坡一般放缓到 $1:1.5 \sim 1:1.6$ 。我国也有几座面板坝,其位置在地震烈度较高地区,如黑泉面板坝按 8 度设防,大柳树面板坝按 9 度设防。近 10 年来,我国对面板坝的抗震问题作了不少研究,进行了振动台的动力试验和二维、三维非线性动力分析,主要结论有:面板对坝体抗震有一定抑制作用,有利于坝身稳定;竖向地震对面板坝影响不大,水平向地震影响大;在地震作用下初始破坏发生在坝顶、下游上部坡面颗粒松动滚落,坝坡面浅层滑动;继而坝顶坍塌,上游坝体垫层料下滑,使面板隆起外凸,并出现裂缝。在强震区修建高面板坝应进行动力分析和模型试验,并应特别重视采取有效的抗震措施。这些措施有:适当放缓坝坡,尤其是下游坝体上部 $1/4$ 坝高范围内坝坡宜放缓;坝坡处应选用粒径大、抗剪强度高的堆石料填筑;适当加宽坝顶,使坝顶下游坡表层滑动时不致危及整个坝顶;加厚垫层料,在面板裂缝时,即使有渗漏,垫层料能自愈而不发生冲蚀破坏;面板和上部坝坡局部加筋,将面板用水平锚筋拉压在堆石体内,以提高上部坝体的整体性;加强坝顶防浪墙结构,防止在地震作用下倾倒。正确的设计可以使高面板坝在地震区满足安全要求。

1-4 沟后面板坝溃决的原因及其教训

沟后面板坝全部用砂砾石填筑,坝高 71 m,坝顶长 265 m,1989 年蓄水,1993 年 8 月溃决,是至今世界上唯一失事的一座面板坝。最大溃坝流量推算约 $2050 \text{ m}^3/\text{s}$,比 500 年一遇坝址校核洪水流量 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 大很多,造成下游 300 余人死亡,重大财产损失。溃决不是由于洪水漫过坝顶引起的。溃坝时,最高水位低于正常蓄水位。溃决是由于水库水位超过防浪墙底,而面板与防浪墙底止水失效,库水从面板顶灌入坝体引起漫溢、冲蚀、塌滑,导致溃坝。沟后坝溃决后三年来经详细调查、现场考察、取样试验,终于基本上找出了原因,分析了机理,

总结出应吸取的教训。沟后坝原设计坝体全部采用砂砾石填筑；坝体分四个区，不同区以最大粒径和干密度控制，未提出不同区颗粒级配要求；坝内未设置排水体；坝顶设高防浪墙，底板低于正常蓄水位；防浪墙底板与面板连接设一道止水。大坝施工存在严重质量问题：从溃坝决口看，坝体无分区，为一均质砂砾石坝；坝体填筑层太厚，达1.0~1.4 m，砂砾石料严重分离，每层下粗上细，部分粗料集中架空；坝体填筑不密实，未达到设计干密度；坝体沉降变形，使上部面板与坝体脱开、架空，成悬臂状；面板与防浪墙连接处止水没有搭接，未全部插入防浪墙底板，致使防渗系统失效，形成漏水通道；防浪墙受坝体不均匀沉降造成部分底板断裂。大坝建成蓄水后管理不善，曾发现下游坝面渗漏，说明大坝存在隐患，虽经处理，但不彻底。在溃决前一个月左右，已出现下游坝坡有多处渗漏和涌水，此时库水尚未漫灌，却无人去打开唯一可泄洪放空的隧洞闸门。经多次调查分析，溃坝的直接原因是由于坝顶面板接缝止水失效，顶部防渗系统不起作用，当水库水位超过面板顶但尚未达到正常蓄水位时，水流就从面板顶接缝中灌入坝体，坝体上部逐步形成饱和区，在渗透水流作用下坝体砂砾石发生渗透破坏，随着坝坡塌滑，面板悬空折断。每一次面板的折断，又突然加高了水头，导致水流更大冲刷，扩大塌滑，直至形成溃决大缺口。从溃坝前下游坝面早已漏水、涌水看，也不能排除坝体其他接缝漏水和由于没有排水设施使坝体浸润线壅高的可能。从沟后面板坝失事分析，应吸取以下几点教训：（1）砂砾石填筑的面板也应有坝体分区，分区不仅需控制粒径，还应提出级配要求和渗透性能要求；（2）由于砂砾石料的不均匀性，施工中有可能产生分离现象，坝体应有排水反滤设施，以降低浸润线，防止渗透破坏细颗粒流失；（3）为避免施工中砂砾石料的分离，应严格控制填筑层厚度，并要求填筑密实，防止不均匀沉降；（4）面板周边缝、垂直缝、顶部与防浪墙接缝止水应确保施工质量，避免形成漏水通道；（5）防浪墙结构，特别是高防浪墙，要满足各种工况荷载作用下的稳定、强度要求和适应一定程度沉降变形不产生裂缝。

砂砾石料具有压缩性低、抗剪强度和变形模量较高、施工易压实、工程单价低等优点，仍然是面板坝填筑的好材料。国外已建和在建坝高100m以上的面板砂砾石坝有5座，世界目前最高的面板坝187m就是以砂砾石为主要筑坝材料的。我国近期建设的古洞口、乌鲁瓦提、黑泉、珊溪4座坝的坝高都超过100m，也是以砂砾石料为填筑料。只要正确设计、施工和科学运行管理，砂砾石填筑的面板坝是能够满足安全要求的。由于砂砾石颗粒的不均匀性及抗水流冲刷能力低，易发生渗透变形破坏，因此必须强调做好排水和反滤层。通常采用的排水型式有两种：一种是竖向与褥垫相结合的排水体；一种是坝下游堆石排水体。无论哪一种型式，都应使面板后渗漏水迅速减少，并设置反滤层，使砂砾石与堆石排水体层间接触符合反滤层颗粒级配要求。大坝的安全，要求设计、施工和运行每个环节都重视质量，无论哪一环节出问题，都将造成危害，严重的导致坝体溃决失事，这是我们从沟后溃坝事故中应吸取的最重要的教训。

二、混凝土重力坝

2-1 在高坝建设中，混凝土重力坝是主要坝型之一

重力坝的枢纽布置较紧凑，便于统筹兼顾泄洪消能、发电、航运、过木、排沙等要求，对基础地质条件要求比拱坝、支墩坝较低。50年代至80年代初，我国重力坝大多采用实体重力

坝、宽缝重力坝和空腹重力坝。80年代中期以来,碾压混凝土重力坝有较快发展,已逐渐替代全部常态混凝土重力坝。为施工方便起见,碾压混凝土重力坝型式力求简单,常采用实体重力坝。

我国最早采用的宽缝重力坝是50年代建设的新安江和古田一级重力坝,其优点是利于坝体散热,减少坝基扬压力,比实体重力坝节省混凝土。新安江大坝高105 m,宽缝占坝段宽的40%,上游坝坡下部1:0.44。上犹江大坝,坝高67.5 m是我国第一座坝内式厂房重力坝。70年代修建的枫树坝和牛路岭坝分别高95.5 m和93.3 m,是我国第一批空腹重力坝。1975年建成的安砂宽缝重力坝,坝高92 m,1993年建成的水口重力坝,坝高101 m,分别成功地采用了斜缝不灌浆和纵缝不灌浆技术。我国目前已建成的最高的实体重力坝是刘家峡大坝,高147 m,1969年建成。举世瞩目的长江三峡工程于1993年正式开工建设,坝高175 m,坝顶长2335 m,为实体重力坝,坝体混凝土量达 $1600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

近10年来,我国相继建成了多座混凝土重力坝,坝高100 m以上的有宝珠寺(132 m)、安康(128 m)、故县(121 m)、岩滩(110 m)、漫湾(132 m)、潘家口(107.5 m)、水口(101 m)等,它们都部分地采用了碾压混凝土。

2-2 我国最早的重力坝专著是50年代由潘家铮所写,在60年代扩充为巨著

潘氏全面论述了重力坝的枢纽布置、坝体结构、设计理论、计算方法和坝基处理,为我国重力坝设计及技术标准的制订奠定了基础。他在新安江大坝及坝后溢流式厂房的设计中,对宽缝重力坝的设计理论,坝体纵缝缝面应力的影响,坝体与溢流式厂房连接的静力、动力分析等作了研究并取得了成果。

80年代以来,随着重力坝建设实践的不断发展和重力坝的设计理论也有新的发展,在有限元分析方法、可靠度理论、坝体断面优化、坝体温度应力仿真计算、断裂力学对裂缝的分析以及泄洪消能工等方面都取得了重大成就。我国混凝土重力坝设计规范颁发已近20年了,亟待重新修订颁发新的标准。根据我国重力坝技术的发展和建设的经验,新的标准将补充以下几方面内容:(1)除采用材料力学法对重力坝进行结构分析外,补充建立用有限元分析法控制的标准,拟采用拉应力区宽度作为控制标准;(2)用概率极限状态设计原则,以分项系数极限状态设计表达式代替过去采用定值法的计算原则和方法;(3)修改坝基岩体分类,补充岩体与混凝土接触面及岩体之间的抗剪力学参数;(4)增加坝基深层滑动稳定分析方法及极限状态表达式;(5)扩充多种型式消能工设计和坝身泄水孔无压和有压段体型设计;(6)放宽基础处理标准,包括建基面和帷幕灌浆控制标准;(7)提出新的抗渗、抗冻和混凝土温控要求,补充防止裂缝的措施及采用MgO延迟性微膨胀混凝土筑坝补偿坝体温度应力的防裂措施;(8)将碾压混凝土重力坝设计纳入新的技术标准。

2-3 三峡工程重力坝为世界最宏伟的重力坝

坝身泄洪流量大,泄洪建筑物结构复杂。大坝下泄洪水流量千年一遇为 $69800 \text{ m}^3/\text{s}$,万年一遇加10%。巨大的洪水全部集中在坝身宣泄,坝身泄洪孔数量多、尺寸大。泄洪坝段23个,总长483 m,单个坝段宽21 m,分表孔、深孔、底孔三层布置。表孔22个,单孔尺寸 $8 \text{ m} \times 17 \text{ m}$,跨缝布置,设计水头17 m,挑流消能,鼻坎处最大流速 37.9 m/s ;23个深孔布置在坝段中间,尺寸 $7 \text{ m} \times 9 \text{ m}$,设计水头85 m,挑流消能,最大流速 39.5 m/s ;底孔22个,供施工导流用,孔口尺寸 $6 \text{ m} \times 8.5 \text{ m}$,设计水头84 m,采用有压长管,跨坝缝布置,挑流消能,最大流速在出口处为 34 m/s 。施工期,底孔、深孔双层泄流;运行期,底孔已封堵,深孔、表

孔双层泄流,水力条件复杂。由于泄洪坝段坝内开孔多、尺寸大,按常规分析,孔口处最大拉应力达4 MPa以上,相应最大拉应力处钢筋配置量达4层,钢筋直径40 mm。拟采用横缝灌浆、止水后移,利用库水平压,提高混凝土标号和钢筋等级及改善孔口体型等措施来减小孔洞周边应力集中。三峡厂房坝段26个,钢管直径12.4 m,钢管以浅埋槽背管方式布置在坝后,采用钢衬钢筋混凝土联合受力结构,坝内钢管的 HD 值达1730 m^2 。经设计计算分析,钢衬厚需28~36 mm,管壁混凝土厚2 m,环向钢筋双排布置,钢筋直径40 mm。三峡工程量浩大,大坝、厂房、船闸等总混凝土量达 $2600 \times 10^4 m^3$,总工期16 a,最高年混凝土浇筑强度 $410 \times 10^4 m^3$,最高月浇筑强度 $46 \times 10^4 m^3$,将采用先进施工方法,在筑坝史上规模空前,居世界领先地位。

2-4 碾压混凝土重力坝

自1986年我国建成第一座碾压混凝土坝以来,据不完全统计,已建、在建和正在设计的碾压混凝土坝近50座,在坝工建设中仅次于混凝土面板堆石坝。在建和近期计划兴建的坝高100m以上的碾压混凝土重力坝有龙滩(192 m)、江垭(131 m)、百色(126 m)、大朝山(120.5 m)、棉花滩(111 m),其碾压混凝土量均占每座坝混凝土总量的60%以上。龙滩坝是我国目前设计的最高的碾压混凝土重力坝,混凝土量 $535 \times 10^4 m^3$,其中碾压混凝土占64%,施工月高峰浇筑强度超过 $25 \times 10^4 m^3$,将达到世界先进水平。

我国碾压混凝土坝的建设,在吸取国外先进经验的基础上,逐步积累了一套具有中国特色的经验。坝体结构尽量简单,碾压混凝土配比上采用低水泥用量、高掺粉煤灰、复合外加剂;坝体以碾压混凝土自身防渗为主,采用富胶凝材料,以提高其抗渗性能;施工上采用大仓面薄层连续浇筑。综合多数工程的实践,主要经验有:(1)坝体体型力求简单,减少孔洞,以利于多用碾压混凝土,方便施工。龙滩、江垭、百色、大朝山、棉花滩等几座高碾压混凝土重力坝,都采用地下厂房,坝身仅布置泄洪建筑物,没有引水钢管和进水口,简化了坝体结构,可缩短施工工期,提前发电。(2)高掺粉煤灰,掺量一般超过50%,不大于70%。富胶凝材料水泥和粉煤灰总量大于 $150 kg/m^3$,以提高混凝土的抗渗性和抗剪强度。(3)采用高效复合外加剂,使碾压混凝土缓凝、减水并有良好和易性,特别有利于高气温地区,可将初凝时间延长至6~8 h,外加剂的取用需经过试验确定。(4)稠度 VC 值的取值与气温有关。为使层面结合良好、施工可碾性好,宜采用较低 VC 值 $10 \pm 5 s$,水胶比 $0.45 \sim 0.5$ 。(5)提高浇筑层的层间结合。80年代搬用国外经验,碾压混凝土坝的防渗常采用外包常态混凝土或坝面做沥青砂浆、预制混凝土板、聚合物涂层、土工薄膜等防渗面层,层面也铺填水泥砂浆。通过“八五”科技攻关,对中等高度的坝可全部依靠碾压混凝土自身防渗,对高坝以碾压混凝土自身防渗为主,辅以防渗面层。碾压混凝土自身防渗主要是在上游坝面采用含富胶凝材料二级配骨料的碾压混凝土,其次要避免浇筑层出现冷缝,必须有足够的混凝土制备能力,使碾压混凝土在初凝前加以覆盖;为加强层间结合,可在坝上游面局部范围内每一填筑层喷洒水泥净浆也同时提高层间防渗性能。只有在出现冷缝的层面上,需打毛并全面铺填砂浆处理。(6)通过现场原位试验确定碾压混凝土的浇筑工艺和选用合适的层间抗剪强度。碾压混凝土抗剪强度与配比、浇筑条件、层面结合情况有关,通常 f 值变异性较小,可取 $1.0 \sim 1.1$, C 值变异性大,与浇筑气温、仓面条件影响较大,实际工程大都取用 $1.1 \sim 1.3 MPa$ 。目前有的工程用富胶凝材料,层面结合条件良好,也有取 $1.5 MPa$ 的。设计应充分预计施工的不均匀性,宜留有适当余地。(7)碾压混凝土重力坝,尤其是高坝,应重视温度控制问题。碾压混凝土

水泥用量少、水化热发热量小是其优点,但由于采用大仓面薄层连续浇筑,横缝间距大,仓面覆盖快,没有间歇时间,并且通常也不采用埋冷却水管降温,因此坝内温升仍可能较高,并且达到准稳定温度场的时间较长,同时在施工期也会受到寒潮的冲击,因此碾压混凝土重力坝也应进行温控设计。目前已编有仿真温控计算程序,通过计算分析和参考已建工程经验采取有效的温控措施,如预冷骨料、加冰拌和、控制入仓温度、仓面雾化遮阳、加强混凝土养护等,寒冷地区还要做好坝面保温。(8)坝体分缝。碾压混凝土重力坝不设纵缝,上下游方向通仓浇筑。横缝间距视温度应力和浇筑能力定,也有采用连片浇筑,切缝机切缝,如观音阁、桃林口等。对高度不大,河床狭窄的碾压混凝土坝,如坑口、龙门滩等不分横缝。天生桥一级、铜街子、岩滩、水口等采用常态混凝土外包的碾压混凝土坝,根据泄洪坝段、钢管坝段布置,横缝间距常采用15~20 m。大广坝坝不高,横缝宽40 m。龙滩坝很高,对横缝间距作了专门研究。经计算,横缝间距应小于60 m。若横缝间距过大或设置不合理,会产生裂缝。龙滩大坝如不采取预冷措施,当横缝间距由15 m增大到80 m时,坝体垂直正应力由1.9 MPa增大到2.31 MPa;如控制混凝土浇筑温度不超过15℃,横缝间距由15 m增大到80 m,坝体应力由1.16 MPa增大到1.34 MPa,说明温度应力是随横缝间距增大而增大的。实践经验表明,横缝间距以取50 m左右为宜,合理确定应根据地形、地质条件、坝体断面形状、布置方式、温度应力、施工能力等因素,通过技术经济比较选择。(9)需研究扩大碾压混凝土应用范围。当前各碾压混凝土重力坝在钢筋布置处、孔洞周围、溢流坝面、闸墩及基础部分一般仍用常态混凝土,其主要原因是这些部位碾压混凝土无法通过振动碾碾压压实,因此目前的碾压混凝土重力坝其碾压混凝土量很少有超过70%的。为扩大碾压混凝土应用范围,除简化坝体结构外,可研究将碾压混凝土改性,在这些部位增加砂浆含量,使之能用振捣器振实。溢流坝面除因有钢筋外,还常因要求混凝土抗气蚀、耐磨损而采用外包常态混凝土。其实,多项试验表明,碾压混凝土具有良好的抗气蚀和耐磨性能。有必要进一步研究直接用碾压混凝土浇筑溢流坝面的施工工艺,或者将溢流坝面做成多级小台阶形,采用宽尾墩消能,有可能解决坝面的掺气减蚀问题。

三、拱 坝

3-1 拱坝是水工建筑物中最大而复杂的壳体结构

对于一座坝高近300 m、坝顶弧长1000 m的拱坝,将在近 $20 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的坝面上承受千万吨级的巨大水推力。拱坝坝体厚度较小,利用拱作用能充分发挥坝体材料强度,节省工程量。拱坝具有较大超载能力,但对地形、地质条件要求较高。我国已建成300多座高度大于30 m的拱坝,成为世界上修建拱坝最多的国家之一。80年代以来,我国陆续建成了一批高度大于100 m的拱坝,如坝高112.5 m的凤滩空腹重力拱坝,坝高分别为102 m、157 m的紧水滩、东江双曲拱坝以及坝高分别为157 m、165 m、178 m的隔河岩、乌江渡、龙羊峡重力拱坝;已建、在建的李家峡、东风和二滩双曲薄拱坝坝高分别为165 m、173 m和240 m,厚高比分别为0.273、0.163和0.232。正在设计的构皮滩、拉西瓦、小湾、溪洛渡双曲拱坝坝高为225 m、250 m、292 m和295 m,预计将在21世纪初建设,后者的高度超过当今世界最高的英吉利拱坝(271.5 m),它标志着我国拱坝建设技术将攀登世界高峰。

3-2 拱坝枢纽布置

拱坝多建于峡谷河床。对于装机规模大,泄洪流量大的高拱坝,在枢纽布置上有一定难度,必须根据地形地质条件、泄洪流量大小、电站装机规模因地制宜合理布置。我国创造了多种以拱坝为坝型的枢纽布置型式,凤滩空腹重力拱坝将厂房布置在坝体腹腔内,坝顶泄洪;乌江渡重力拱坝采取坝顶泄洪、厂前挑流,厂房布置在坝后;紧水滩、东江采用坝后背管厂房,两岸坝身浅孔、中孔滑雪道式泄洪道;李家峡采用坝后双排机组厂房,装机容量2000 MW,五台机组分两列平行布置,两岸坝身中布置中、底孔泄水道;装机容量3300 MW、5000 MW的二滩、小湾高拱坝采用地下厂房,坝身表孔、中孔和岸坡隧洞分散布置泄洪;装机容量达14400 MW的溪洛渡拱坝枢纽布置,采用两岸地下厂房各装机九台,单机容量800 MW,坝身表孔、中孔和两岸隧洞泄洪。各种型式的枢纽布置都通过水工模型试验论证,做到泄洪、发电安全可靠经济合理。

3-3 拱坝体型优化

拱坝是一个复杂的空间超静定结构,应力分析常用拱梁分载法和有限元法。由于拱坝体型参数的选择直接影响着坝体的应力和工程量的大小,因此在拱坝设计中确定合适体型是一项重要任务。拱坝体型优化是利用数学规划方法在给定的约束条件下,寻求拱坝应力条件最好、工程量最小的方法。我国许多单位和专家在这方面都做出了卓越的贡献,例如据朱伯芳院士对30多个实际工程统计,经过优化可减少20%左右的坝体混凝土工程量,节省投资5%~35%。我国拱坝优化已编制有计算机程序,可以考虑静力和地震作用,控制坝踵开裂,也可以引入稳定安全系数为约束条件进行优化。而且还可以用曲率半径方程统一描述拱圈型式进行混合线型体型优化,即对双心圆、三心圆、抛物线、椭圆曲线、双曲线和对数螺旋曲线等六种体型同时进行优化和比选,选出最佳体型及相应参数。我国拱坝优化技术居国际领先水平。

3-4 拱坝拱座稳定

拱座稳定是确保拱坝安全的前提,目前高拱坝趋向采用扁平拱型,限制拱圈中心角,从以前的 $120^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 逐渐减小到 $100^{\circ}\sim 75^{\circ}$,使拱推力与岸坡有较大夹角,以利拱座稳定。核算拱座稳定时,除应控制变形外,主要是研究拱座岩体抗滑稳定,而后者主要受控于岩体结构面的条件。实际工程中,拱座的岩体常由两个或多个结构面切割组成滑块。滑动稳定分析中,首先要进行详细的地质勘查工作,查清拱座岩体的结构面,确定结构面的力学参数以及各种荷载作用。目前通常用刚体极限平衡法、有限元法和地质力学模型进行静、动力和变形分析研究,以判断拱座的稳定性。由于拱座稳定分析中受天然岩体复杂性和地勘手段的局限性的限制,同时抗滑岩体所受外荷载、岩体结构面力学参数及滑移边界都不可能准确确定,所以对于高拱坝应采用多种分析方法复核,并应作敏感性分析,留有一定余地,取较大安全系数。为了确保拱座安全,必要时需对拱座软弱岩体结构面进行处理,以改善其力学性能。如龙羊峡坝肩岩体被多条断层、劈理切割,地质条件异常复杂,除采用两排帷幕和三排排水孔控制其渗流外,对近坝肩断层采用网格式混凝土塞处理,对埋深较大、倾角较陡与拱推力成较大角度的断层用传力墙处理;对埋深较大但与拱推力成较小夹角的断层,采用抗滑键处理并进行全面的高压固结灌浆,使坝肩岩体性能得到改善,这已经受蓄水运行考验。

3-5 坝体应力三维非线性仿真计算

拱坝在水荷载作用下是以压应力为主传力的超静定结构,但在局部地区也出现拉应力,特别在温度荷载作用下常有拉应力。坝体应力在低应力阶段,可按线弹性分析,基本符合材料

与结构的受力状态。但对于高拱坝,由于坝体应力水平的提高,应力与应变关系已成非线性,再加上坝体局部开裂,裂纹扩展,结构已进入非线性状态。我国学者以混凝土本构模型为基础,用断裂损伤力学和弹塑性理论研究出三维非线性多拱梁法和非线性有限元程序。该程序可以考虑裂缝的启裂、扩展和稳定的全过程,可以实现裂缝跟踪,考虑压碎演变,应力重分配,还可以考虑分期施工、分期封拱和分期蓄水对缝面压力的影响,形成一整套三维非线性仿真计算方法,这在一定程度上发展了拱坝设计计算理论,代表了拱坝坝体应力分析新的技术水平。

3-6 拱坝混凝土材料及容许应力

随着拱坝高度的增加,坝体应力也明显提高,早已突破规范规定的容许应力范围。相应容许应力由50年代 $[\sigma]_{\text{压}}=2.0\sim3.0\text{ MPa}$ 、 $[\sigma]_{\text{拉}}>0$ 提高到 $[\sigma]_{\text{压}}=9\sim10\text{ MPa}$, $[\sigma]_{\text{拉}}=1.2\sim1.5\text{ MPa}$ 。从表面看,这似乎只是采用高标号混凝土和提高了容许应力,实际上这是拱坝设计水平与材料科学、施工水平的综合体现。为了较好地解决这一问题,在加强坝体三维应力状态研究的同时,加强了大体积混凝土材料性能的研究。实践证明,因坝内弯矩的存在、基础对坝体变形的约束以及温度等影响,拱坝将不可避免产生拉应力,甚至引起裂缝。为此,在限制拉应力的同时,更重要的是限制拉应力区和裂缝的发展宽度。因此改变过去单一以强度指标和耐久性为目的的传统混凝土配合比设计方法,提出以提高混凝土抗裂性能为目标的抗裂优化混凝土配合比设计。随着混凝土材料科学的发展以及容许应力的提高,拱坝厚高比也明显减小。

“七五”、“八五”期间,我国组织了对高拱坝关键技术问题的研究,在拱坝设计理论、方法、设计准则、岩体稳定性评价及可利用岩体质量标准、高拱坝泄洪消能、坝体库水和坝基相互作用静、动力分析、高拱坝裂缝及其防治、高拱坝安全监测、高强度大体积混凝土材料特性研究、拱坝快速施工技术等方面进行了深入研究,并将其成果直接用于二滩、拉西瓦、李家峡、小湾等高拱坝设计中,取得了丰硕成果。今后我们将面临着更大的挑战,小湾、溪洛渡等300 m级高拱坝的设计,高地震烈度区拱坝的抗震结构设计和措施,还需要进一步通过科技攻关和工程建设的实践去解决难题。

3-7 我国碾压混凝土拱坝的发展史

我国碾压混凝土拱坝的历史只有六年,但发展很快,已建成三座,待建的三座。1993年建成的普定碾压混凝土拱坝坝高75 m,为现今世界最高的碾压混凝土拱坝。1994年、1995年相继建成的温泉堡、溪柄溪碾压混凝土拱坝坝高48.5 m和63 m,厚高比分别为0.29和0.187。拟建的沙牌、白莲崖和玉舍碾压混凝土拱坝坝高分别为132 m、102 m和75.4 m,其中两座已超过100 m。这几座拱坝的设计和施工有共同点,也有差别。这主要是:(1)均采用全断面碾压混凝土,不采用常态混凝土外包,仅在溢流坝面、闸墩及坝内孔洞周边采用部分常态混凝土;(2)均采用高掺粉煤灰、低水泥用量和富胶凝材料,二级配混凝土中胶凝材料约为 180 kg/m^3 ,其中水泥 80 kg/m^3 左右,三级配胶凝材料约为 150 kg/m^3 ,其中水泥 50 kg/m^3 左右;(3)坝体防渗主要依靠碾压混凝土自身,在近上游坝面每一填筑层间铺洒水泥粉煤灰净浆或水泥砂浆,有的坝面另加辅助防渗层;(4)坝体不分柱状块浇筑,采用全断面薄层连续浇筑。有的坝设横缝,有的坝设若干条横向诱导缝,缝内均埋设灌浆管,溪柄溪坝顶弧长仅96 m,不设横缝,也不设诱导缝,在两拱端上游坝面处和拱冠附近下游坝面处设短缝;(5)施工安排均避开夏季高温季节,以防止温度对拱坝的不利影响并可简化温控。普定碾压

混凝土拱坝设计、施工组织了科技攻关,施工质量良好,蓄水后运行正常。

四、泄水建筑物

4-1 泄流量大、泄洪功率大

我国大型水利水电工程泄洪建筑物泄流量大,泄洪功率大。泄洪、导流设施超过 20000 m^3/s 的工程有 20 多座,长江葛洲坝、三峡工程校核洪水流量达 124300 m^3/s ,金沙江溪洛渡工程最大洪峰 52300 m^3/s 。多座水头 200 m 以上的高坝泄洪建筑物,流速达 50 m/s 以上。在峡谷河床中,大流量、高水头、大功率泄洪,能量集中,消能要求很高,二滩、构皮滩、溪洛渡枢纽在河床宽 80~110 m 范围内泄洪功率分别达 26500 MW、31600 MW 和 73096 MW。我国多沙河流含沙量高,三峡坝址平均含沙量 1.2 kg/m^3 ,最大 10.5 kg/m^3 ,小浪底坝址平均含沙量 36 kg/m^3 ,最大 800 kg/m^3 以上。大流量高水头的泄洪消能和高速水流空化,多泥沙的磨损是我国泄洪建筑物设计中十分重要的技术难题。近年来通过科研实验和工程建设的实践,在重力坝联合消能工技术、高拱坝坝身泄洪水垫塘消能技术和隧洞泄洪消能方面取得了重大进展。

4-2 混凝土重力坝宽尾墩联合消能工

混凝土重力坝消能过去常采用单一的挑流、底流、面流或屏流方式。近 20 年来我国摸索出一套独创的宽尾墩联合消能工新形式,解决了大型工程复杂地质条件下高坝大流量泄洪消能问题。潘家口坝高 103 m,洪水流量 43300 m^3/s ,水头约 70 m,采用宽尾墩挑流联合消能工,单宽流量 210 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,比单一挑流消能冲坑深减少 6~9 m。安康坝高 128 m,河床为岩性软弱、抗冲能力差的千枚岩,五个表孔采用宽尾墩消力池联合消能工,单宽流量 200 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,消能率由单一底流消能 30%~40% 提高到 60%~70%;三个中孔采用宽尾墩、折流墩、短消力池联合消能工,较常规消力池长度缩短一半。岩滩坝高 110 m,采用宽尾墩屏式消力池,单宽流量 241 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,与常规平尾墩消力池比较,消力池长度缩短 40%,流速降低 6 m/s 左右,冲刷深减小 50%。五强溪坝高 87.5 m,采用表孔宽尾墩、底孔挑流和消力池联合消能工,使溢流坝段长度缩短 24 m,消力池长度缩短 50 m,大大节省了工程量。

通过大量试验研究,我国水力学专家阐明了宽尾墩联合消能工的工作机理,这就是利用宽尾墩使水流在溢流堰体产生多股收缩射流水体,在反弧段坦化、交汇和混合,极大地加强了水流内部的紊动剪切和掺混,使过堰水流有更多的动能转换为热能和势能,从而改变平尾墩二元水流为完全的三元水流,使其在消力池中获得更大的消能效果。

4-3 拱坝泄洪消能有新的发展

我国 50 年代由潘家铮等设计的流溪河双曲拱坝,坝高 78 m,首次打破了当时苏联专家认为薄拱坝不能坝顶泄洪的论点,采用了坝顶泄洪挑流消能。70 年代建的风滩空腹重力拱坝高 112.5 m,泄洪流量 34800 m^3/s ,采用坝顶高低坎相间布置,射流水舌空中对撞的消能方式。近年来设计的拉西瓦、构皮滩、小湾、溪洛渡和在建的二滩高拱坝,泄洪落差在 200 m 以上,采用坝身表孔、中孔和岸坡隧洞联合泄洪;通过选择合适的表孔、中孔体型、鼻坎高程、挑角和布置,使多股水舌空中碰撞后分散落点;在坝后设二道坝形成水垫塘,控制水流对底板的冲击力;另外利用岸边泄洪洞挑流分散在水垫塘以外。水垫塘冲击值的控制标准大致为 100~160 kPa,塘内单位水体消能率为 10~20 kW/m^3 。水弹性模型试验验证泄洪消能冲击荷载