

我国特高拱坝的建设成就与技术发展综述

王仁坤

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川 成都 610072)

摘要:结合二滩、溪洛渡、锦屏一级、大岗山、小湾等一系列特高拱坝的建设实践,总结了我国特高拱坝的建设成就,阐述了我国特高拱坝建设关键技术的研究进展,包括建基面的研究与确定、体形优化设计、应力分析与强度设计、拱座抗滑稳定、整体稳定、抗震设计、混凝土材料、混凝土温控防裂、基础处理、施工技术 etc 10 个方面的内容。认为我国混凝土拱坝建设技术已处于国际领先水平,指出我国特高拱坝建设需深化研究的 4 个问题,即特高拱坝安全评价体系建设、特高拱坝风险设计、特高拱坝抗震研究以及特高拱坝安全运行健康诊断技术研究。

关键词:特高拱坝;建设成就;建设技术;综述

中图分类号:TV642.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)05-0013-07

Review of construction achievements and technological development of super-high arch dam in China//WANG Renkun (*PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China*)

Abstract: Based on construction and operation of a series of super-high arch dams in China, such as the Ertan Arch Dam, Xiluodu Arch Dam, Jinping-I Arch Dam, Dagangshan Arch Dam, and Xiaowan Arch Dam, construction achievements of super-high arch dams are summarized, and advances in key technologies for super-high arch dam construction are described, including determination of arch dam foundation, shape optimization design, stress analysis and strength design, techniques for stability of dam foundation against sliding, techniques for dam body stability, anti-seismic design, concrete material study, and temperature control and crack prevention of concrete, foundation treatment, and construction technology. It is suggested that construction technology of concrete arch dams in China has reached an internationally leading level. It is pointed out that four issues in construction of super-high arch dams should be further studied: construction of dam safety evaluation systems, dam risk design, anti-seismic measures, and dam health diagnosis technology.

Key words: super-high arch dam; construction achievement; construction technology; review

拱坝是适合于修建在“U”形及“V”形河谷中的经济性与安全性都比较优越的坝型,同时又是挡水坝中结构最复杂的坝型。拱坝越高设计难度越大,坝高超过 200 m 的拱坝为特高拱坝。特高拱坝超出了我国现行拱坝设计规范的适用范围,需要开展专门研究论证。我国的特高拱坝建设起步较晚,直至 20 世纪末才建成第一座特高拱坝,即雅砻江二滩拱坝,坝高 240 m。国外于 20 世纪中叶就开始了特高拱坝的建设,至今已建成的特高拱坝有 20 多座,主要分布在欧洲。由于特高拱坝规模大,对基础条件、结构安全等的控制要求高,设计技术的先进性与工程方案的科学合理性,直接关系到工程安全与投资,专门论证研究就是确保大坝安全可靠、经济合理、运行正常。

近 30 年来,我国相继建成了一大批水利工程,特高拱坝建设也取得了飞速发展,先后建成了二滩、溪洛渡、锦屏一级、小湾、大岗山等多座超过 200 m 甚至达到 300 m 的特高拱坝,其中锦屏一级拱坝高 305 m,成为当今世界第一高拱坝。结合特高拱坝的建设,我国开展了一系列科技攻关,取得了大量科技成果,极大地丰富了特高拱坝建设技术,基本形成了具有世界先进水平的高拱坝建设设计研究技术体系,为特高拱坝的建设奠定了坚实的技术基础。

1 我国特高拱坝建设成就及特点

自 20 世纪中叶以来,我国拱坝建设发展迅速。随着白山、东风、东江、龙羊峡、隔河岩等一批 100 ~ 200 m 高拱坝的建设,拱坝的设计和施工水平得到

作者简介:王仁坤(1962—),男,四川达州人,教授级高级工程师,主要从事高混凝土拱坝设计、超大型地下洞室群布置及围岩稳定研究。
E-mail: wrenkun@chidi.com.cn

了较快发展;1998年,二滩拱坝的建成,标志着我国拱坝建设技术达到了国际先进水平;进入21世纪,随着我国西部大开发战略和西电东送战略的实施,拉西瓦、小湾、构皮滩、溪洛渡、锦屏一级、大岗山等一批200~300 m特高拱坝的成功建成,标志着我国拱坝建设水平已居世界领先地位^[1]。分析近30多年的拱坝设计建设历程,我国在特高拱坝建设方面具有以下特点:

a. 坝高突破300 m,已建成多座世界级特高拱坝。据统计,20世纪国外共建成特高拱坝20多座,其中最高拱坝是前苏联于1980年建成的英古里拱坝(272 m),而目前我国已建成的小湾(294.5 m)、溪洛渡(285.5 m)和锦屏一级(305 m)3座拱坝,坝高均已超过英古里拱坝,后续有白鹤滩(289 m)、龙盘(277 m)、松塔(313 m)、马吉(300 m)、同卡(278 m)、怒江桥(291 m)、罗拉(295 m)等一大批坝高超过英古里拱坝的特高拱坝尚待建设。

b. 承受的水推力巨大。国外拱坝多数坝址河谷狭窄,坝顶弧长相对较短,坝体承受的水推力也相对较小。据统计,20世纪国外建成的20多座特高拱坝的水推力为17952~131552 MN,平均为51601 MN。我国已建成的特高拱坝多建于大江大河之中,虽然岸坡高陡,但坝体多宽大,承受的水推力也相对较大。根据对二滩、小湾、溪洛渡、构皮滩、拉西瓦等特高拱坝的统计分析,拱坝承受的水推力在72878~192178 MN,平均达到了125372 MN。拱坝承受水推力的大幅增大,设计难度必然加大。

c. 坝身泄洪泄量、泄洪功率高居世界前列。国外拱坝(尤其是欧洲拱坝)坝身泄量及泄洪功率大多较小,最大的是前苏联萨扬重力拱坝,坝高245 m,坝身泄量为13600 m³/s,泄洪功率为25000 MW;而我国溪洛渡拱坝坝身最大泄量高达30901 m³/s,坝身泄洪功率达59725 MW,居世界特高拱坝坝身泄量之最。巨大的坝身泄量和泄洪功率,在带来坝身孔口群结构设计、孔口闸门设计、坝后泄洪消能设计等一大批技术难题的同时,也催生了坝身多层孔口泄流、水垫塘消能等重大技术革新。

d. 坝体混凝土方量大。国外双曲拱坝中混凝土方量最大的为英古里拱坝,坝体混凝土384万m³。与国外同体型拱坝相比,我国已建成的特高拱坝大多采用双曲拱坝体型,由于坝顶弧长相对较长,坝更高,我国拱坝的混凝土规模也相对较大,二滩拱坝坝体混凝土400万m³,锦屏一级拱坝476万m³,溪洛渡拱坝558万m³,小湾拱坝高达762万m³。坝体混凝土方量的增加,意味着混凝土生产、运输、浇筑、温控等难度加大,促使我国拱坝混凝土材料研究与施工

温控防裂技术等得到飞速发展。

e. 地基加固处理技术复杂多样。我国特高拱坝大多建于西部高山峡谷之中,多数拱坝坝址地质条件复杂,产生了各种问题,如小湾拱坝坝基岩体开挖卸荷松弛问题、横河向断层影响问题、堆积体问题;锦屏一级拱坝左岸深部拉裂缝及左岸上部IV₂级岩体加固处理、坝基及抗力体断层加固处理、坝趾及抗力体横向锁固、左岸超高边坡设计与开挖支护时序等问题,促使我国高拱坝复杂地基处理水平得以显著提升。

f. 地震设防烈度高,抗震设计要求高。除伊朗的德兹拱坝(设防烈度IX度)、卡比尔拱坝(设防加速度0.47g)外,我国特高拱坝的地震设防烈度比大多数的国外拱坝都高:二滩、拉西瓦、锦屏一级、小湾、溪洛渡拱坝的地震设计加速度分别为0.20g、0.23g、0.269g、0.308g、0.32g,大岗山拱坝的地震设计加速度更是达到了0.5575g。由于我国拱坝地震设计加速度大、坝很高、河谷宽(我国拱坝弧高比普遍比国外拱坝大),因而拱坝抗震设计难度更大^[2-3],由此也催生了坝体梁向钢筋、阻尼器等抗震新技术的发展。值得一提的是,距离“5·12”汶川特大地震震中32 km、坝高132 m的沙牌碾压混凝土拱坝经受了8级地震的考验,坝体完好无损。

2 我国特高拱坝建设技术的研究进展

我国特高拱坝大多具有坝高谷宽、地质条件复杂、水荷载巨大、泄洪规模大、抗震设防要求高等特点。近30年来,结合多座特高拱坝建设关键技术的研究,在拱坝合理建基面的研究以及体形优化设计、应力分析与强度设计、拱座抗滑稳定、拱坝整体稳定、抗震设计、混凝土材料、混凝土温控防裂、基础处理等方面取得了一系列新的进展。

2.1 建基面的研究与确定^[4]

特高拱坝承受的水压荷载巨大(如溪洛渡拱坝的总水推力约为147150 MN,锦屏一级拱坝约为127530 MN),因而对基础承载能力、抗滑稳定、抗渗性能等的要求很高。一般情况下,拱端嵌入深度(嵌深)越大,基岩完整性越好,其承载能力越高,对大坝安全越有利;另一方面,随着拱端嵌深的增大,拱跨加大,承受的库水压力加大,坝体结构和坝肩抗滑稳定的负担加重。同时嵌深过大会涉及高地应力引起的开挖回弹变形、高边坡等岩体工程问题。如果在保证工程安全的前提下建基面能够浅嵌,可大幅度减少坝基开挖和大坝混凝土工程量,缩短工期,节省投资。

在确定溪洛渡拱坝合理建基面的过程中,通过

对基础地质条件和大坝建基岩体的深入研究,提出了“以岩级为基础,安全为准则,合理利用弱风化岩体作为建基岩体,并分坝高区段确定其利用程度”的建基面确定原则^[5];采用规范方法与三维非线性有限元法等手段,全面评价了拱坝建基面嵌深与工程安全的对应关系,最终确定了溪洛渡拱坝上部高程基础部分利用弱风化上段Ⅲ₂级岩体,中部高程拱端主要置于弱风化下段Ⅲ₁级岩体,下部高程基础为Ⅱ级和Ⅲ₁级岩体的建基面实施方案。与可行性研究阶段建基面以微新Ⅱ级岩体为主、仅顶部拱端部分利用Ⅲ₁级岩体的方案比较,建基面平均外移约20 m,基础开挖和大坝混凝土工程量分别减少100多万 m³,获得近6亿元的经济效益。

2.2 体形优化设计

拱坝体形优化设计是以拱梁分载法分析坝体应力为基础,具有抛物线拱、椭圆拱、多心圆弧拱以及统一二次曲线或混合曲线拱等拱坝几何模型,利用数学规划方法求解给定条件下(如应力控制)最优设计体形的设计方法^[6],已成功应用于二滩、溪洛渡、锦屏一级、大岗山等特高拱坝的设计。在优化设计的基础上,进一步建立了拱坝三维协同设计技术以及高效制图 AutoCAD,提高了拱坝体形设计的高效精控化。

2.3 应力分析与强度设计

结构应力分析是拱坝强度设计的基础,常用的方法主要有拱梁法、有限元法。多拱梁法作为一种传统的分析方法,经过长期工程实践的考验,形成了以之配套的强度设计准则。我国多拱梁法程序丰富,不仅能够计算多种几何模型的拱坝静、动应力,而且个别程序实现了有限元-多拱梁法耦合计算,较好地满足了高拱坝设计要求。

河海大学、北京水利科学研究院提出的弹性有限元-等效应力法及其计算程序为拱坝应力有限元分析的实用化创造了条件。该方法首先以弹性有限元法计算拱坝应力,并将坝体厚向的应力转化为截面内力,再用材料力学的方法计算厚度方向截面应力;结合坝基周边薄层单元或加密网格的应用,基本消除了坝基周边的应力集中现象,即可获得应力不随网格划分而变化的稳定数值解。通过二滩、溪洛渡等拱坝的应用,其成果与多拱梁法相近或更合理,表明弹性有限元-等效应力法和多拱梁法既是相互独立的应力分析方法,又可成为相互验证、互为补充的分析手段。

对于特高拱坝,尤其是基础较为复杂的高拱坝,在采用多拱梁法和(或)弹性有限元-等效应力法进行分析的基础上,要同时考虑拱坝整体非线性有限元

静力分析和地震作用下的动力分析成果,以及坝身泄洪孔口等的影响,以全面衡量大坝结构受力属性。

高拱坝结构材料强度设计通常分为高、中、低应力区以及大坝周边近基础区和孔口区等,分别设定其混凝土强度指标。各区范围界定需要在坝体应力多方法分析和各种可能状态如正常运行、施工期应力、地震作用等以及各种参数敏感性分析的基础上进行综合考虑,合理设定高、中、低应力水平区及其混凝土强度等级。特高拱坝的多拱梁法应力水平一般控制在9.0~10.0 MPa较为适宜,相应的混凝土强度以不超过C₁₈₀40为宜。

2.4 拱座抗滑稳定分析

由于拱座抗滑稳定分析的研究对象是天然岩体,受到各种复杂的结构面如断层、软弱带、节理裂隙等的切割,使得一般连续介质假定均不能揭示基础岩体的实际受力属性;加上人们对岩体的物理力学特性的认识是通过有限的勘测、试验和分析所得,拱座基础抗滑稳定分析一直以刚体极限平衡法为主要方法。鉴于基础刚体抗滑假定的局限性,我国学者还提出了刚体弹簧元法。

针对坝基岩体裂隙结构特征,立足刚体极限平衡法的拱座抗滑稳定分析中将刚体滑块模式主要分为大块体、小块体和阶梯块等3种形式,如图1所示。刚体极限平衡法的计算公式为大家熟悉的纯摩公式和剪摩公式。剪摩公式中因 c 、 f 值的变异性差异,由单 k 安全系数发展成对应 c 、 f 值的分部安全系数。对于特高拱坝的基础抗滑分析,我国规范要求采用抗剪断公式进行计算,对于特定结构面(如断层、软弱带等)控制的滑块,建议应用纯摩公式进行计算,纯摩抗滑安全系数应大于1.3。

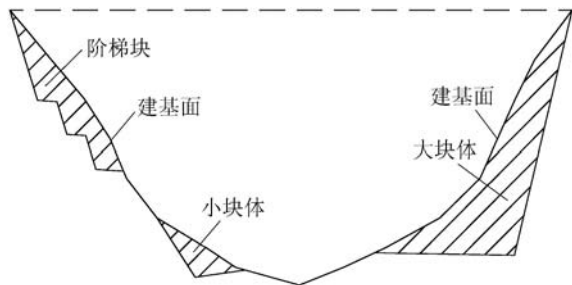


图1 拱坝基础抗滑可能滑块模式

刚体弹簧元法是将拱座抗力体有限单元化,且网格形态反映裂隙和软弱带等结构面的分布,假定各单元为刚体,单元之间为弹簧连接,即单元之间仅传递力,而变位不协调。采用该方法可以连同大坝与基础进行整体计算,得出各种可能滑块的稳定安全系数。通过溪洛渡、锦屏一级、大岗山等拱坝基础抗滑稳定实例分析,刚体弹簧元法可以成为与刚体极限平衡法互为验证的分析方法。

由于稳定分析中各参数的随机性,实际工程设计中都免不了各参数的敏感性分析,并结合三维非线性有限元分析、整体地质力学模型试验综合评价拱座的稳定性,这是当前高拱坝设计的特点。

2.5 整体稳定分析与评价

拱坝整体稳定性是指拱坝与地基系统在极限荷载作用下抵抗变形破坏的能力。拱坝整体稳定分析需要考虑材料进入非线性工作阶段后拱坝与地基内力的非线性调整。三维非线性有限元法和整体地质力学模型试验是研究复杂地基上混凝土拱坝整体稳定与超载安全度的有效手段^[7]。

2.5.1 拱坝整体非线性有限元分析与安全评价

三维非线性有限元法不仅能反映坝与地基的相互作用,而且能合理地反映岩体和混凝土的非线性特性以及基础断层、软弱岩带等地质缺陷的物理力学特性,分析大坝在各种荷载作用下的应力、变形,以及开裂、屈服等破坏现象。常用的分析软件有TFINE、FLAC、MARC等,其中TFINE软件是清华大学立足理想弹塑性模型研制提出的三维非线性有限元法分析程序,屈服条件采用D-P准则。

非线性有限元法分析的计算工况包括正常荷载组合和超载工况。正常荷载组合工况重点分析大坝工作属性,包括坝体应力分布及超限应力区、屈服区、基础各部位点强度安全系数等。超载工况特指正常荷载组合中仅水压超载,并且以超水容重的方式增加水压。将水压荷载的超载系数记为大坝超载安全度。通过逐级超载,不难得出超载系数与坝体变形的关系曲线。如图2所示,当超载系数 K 较小时,大坝变形 u 与荷载 P 的关系呈线弹性关系;当超载系数增大至 K_1 (当荷载 P 为 K_1P_0 , P_0 为正常水压)时,局部拱端出现屈服且屈服区范围约为拱厚的 $1/6$,坝体结构或基础出现开裂,图中 B 点即为坝体开裂起始点, K_1 即为起裂超载系数;继续增大水压荷载,此时结构虽有局部开裂或屈服扩展,但整体仍处于准线弹性工作状态,当荷载超过 K_2P_0 时,结构开始出现非线性屈服变形,图中 C 点为结构非线性

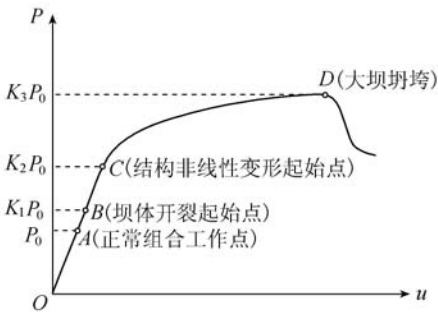


图2 拱坝超载与变形关系曲线

性变形起始点(准线弹性工作极限状态点);当超载系数达 K_3 时,开裂屈服区贯穿坝体和基础,结构系统整体失稳, K_3 称为拱坝极限超载系数。

2.5.2 拱坝整体地质力学模型试验安全评价

地质力学模型试验将结构模型与岩体力学模型融为一体,能够直观地模拟大坝在正常荷载作用下的工作属性和在超载作用下的破坏过程与超载能力。对于特高拱坝,细致的地质力学模型试验研究是一种重要的手段,它可以较好地模拟各种地形地质条件,直观、真实地反映结构的受力和破坏特性,还可用来研究坝与基础裂纹的起始、发展和贯穿过程,探究其破坏机制,以及用于重点研究拱坝的薄弱部位,为设计加固提供参考,为数值计算提供验证。

地质力学模型试验属于破坏试验,研究方法主要有:①超载法;②强度储备法;③综合法。3种试验方法中,超载法最容易在模型中实现,长期以来应用广泛,已积累了大量的宝贵经验,而且超载法能够比较真实地反映拱坝遭遇突发洪水等实际情况的影响。强度储备法需要更改结构面参数,而综合法是一种将超载法和强度储备法相结合的方法。

在不考虑渗压荷载和温度荷载的作用下,清华大学开展了20多座高拱坝和特高拱坝的地质力学模型试验,通过超水容重的超载方式,得出目前已建和在建高拱坝和特高拱坝的起裂超载系数 $K_1=1.5\sim 2.0$;结构出现非线性变形的超载系数 $K_2=3.5\sim 5.0$,可供类似工程设计参考。

2.6 抗震设计

高拱坝抗震设计的基本思路是静载设计,动载复核。若不满足抗震设计要求,重新调整体型或研究抗震措施。动载复核的内容如下:首先按照现行水工抗震设计规范,开展多拱梁法和有限元法动力反应分析以及坝肩三维刚体极限平衡法动力稳定分析,初步判断拱坝的抗震能力。在此基础上,开展考虑各种影响因素的三维有限元动力分析和(或)三维整体动力模型试验,结合高坝抗震设计要求及工程类比分析,综合评价大坝抗震能力。总结二滩、溪洛渡、锦屏一级、大岗山、小湾等特高拱坝的抗震设计,我国在高坝抗震分析理论、分析方法和模型试验等诸方面的研究已处于世界领先地位。北京水利科学研究院、清华大学、大连理工大学等单位在有限元法动力分析方面具备了较高的仿真度,可以分析输入机制(包括相差、幅差的敏感分析)、地基辐射阻尼及横缝张开等对大坝动力反应的影响,以及同时计入地基辐射阻尼、横缝等接触非线性和(或)材料非线性的三维非线性有限元动力分析。北京水利科学研究院的动力模型试验除模拟库水、横缝外,还可

模拟大坝基础的主要地质结构以及边界阻尼影响等,以反映坝基不均匀输入。除研究设计输入地震作用下的拱坝抗震能力外,还可研究拱坝抗震的超载能力。

高坝抗震深受设计者的高度重视。我国现行规范规定的拱坝设防标准与拱坝结构抗震安全要求能够确保大坝长期安全运行。距离汶川地震带较近的沙牌拱坝(高 132 m)遭受了远超设防烈度的考验,验证了现代高坝抗震设计理论与方法的可靠性。随着分析技术的发展和工程抗震实例的校准分析,将不断丰富和完善高坝抗震分析方法及其配套的评价准则。

鉴于 I 级高坝的重要性,工程抗震采用两级设防,即设计地震和校核地震工况,分别采用 100 年基准期 2% 和 1% 的超越概率确定设防水准,并在溪洛渡、锦屏一级、大岗山等特高拱坝设计中遵循“极震不溃”的设计原则,即大坝一旦遭遇校核烈度等极端地震,大坝仍具有挡水能力而不溃决,表现在拱坝动力仿真分析中,要求上下游坝面出现的屈服区范围有限且屈服区不贯穿坝体厚度。

2.7 混凝土材料

特高拱坝混凝土比较理想的性能指标组合是强度高、弹性模量适中、极限拉伸值高、线膨胀系数低、绝热温升低、自生体积微膨胀、抗渗抗冻性能优等。但在实际工程中是较难达到的,不得不考虑拱坝建设周期和受载龄期,合理利用混凝土后期强度以调和各项混凝土性能指标。

应用组合骨料混凝土已建成 2 座特高拱坝。溪洛渡大坝混凝土采用地下工程洞挖玄武岩作粗骨料,开采灰岩作细骨料,既发挥玄武岩强度高、耐磨性能好的骨架作用,又利用灰岩变形性能及热学性能较佳的优势,以提高混凝土的耐久性能和抗裂能力。溪洛渡工程对地下工程洞控料的利用,不仅节约工程投资,而且有利环保。锦屏一级拱坝由于骨料料源选择有限,为了改善全砂岩混凝土的抗裂性能,混凝土选择砂岩作粗骨料,大理岩作细骨料,充分发挥这两种骨料的长处,扬长避短,取得了非常好的效果。

特高拱坝建设周期长,采取高掺粉煤灰并充分利用混凝土后期强度是抑制混凝土施工温控防裂的有效手段。特高拱坝混凝土浇筑工期长达四五年,拱坝承受库水压力时,主要受力区混凝土龄期已在 1 年以上。拱坝混凝土掺入 30% ~ 35% 粉煤灰后,混凝土后期强度有一定幅度的增加,与 90 d 龄期混凝土比较,180 ~ 360 d 龄期混凝土强度还可提高 10% 以上;采用 180 d 设计龄期时,混凝土绝热温升

比 90 d 龄期混凝土降低 3 ~ 4℃,有利于温控防裂,节省施工费用。近年来,高拱坝混凝土大多利用高掺粉煤灰混凝土的后期强度并采用 180 d 龄期强度作为设计强度。

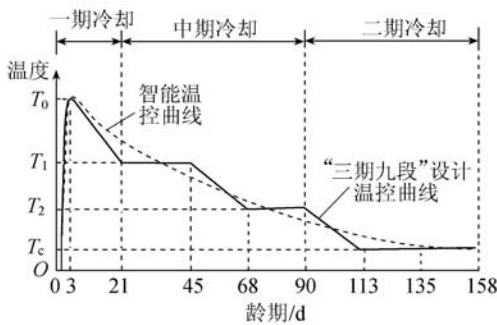
2.8 混凝土温控防裂

特高拱坝规模巨大,应力水平较高,混凝土强度等级高;断面厚度大,一般厚达 50 ~ 80 m,大坝混凝土体积极达数百万立方米;加上大江大河上修建的特高拱坝坝身大多布置多层泄洪孔口和临时导流底孔(如溪洛渡拱坝坝身设有 7 个泄洪表孔和 8 个泄洪中孔,以及 10 个导流底孔),加上孔口闸墩结构等,坝体结构十分复杂。兼顾坝体厚度和坝身孔口布置,混凝土浇筑施工常以横缝将大坝分为数个坝段,单坝段整仓浇筑,最大浇筑仓面多超过 1500 m²,甚至超过 2000 m²。如此大仓面高强度等级混凝土的浇筑施工,温控防裂问题十分突出,尤其是河床大仓面基础坝段、陡坡基础坝段以及孔口结构区等成为特高拱坝温控防裂的关键。

特高拱坝的温控防裂,立足于温度应力的仿真分析以及控温指标的合理确定,通过通水降温的精准化以及保温控温的精细化,建立了一整套温控防裂技术体系^[8-9]。二滩、小湾、溪洛渡、锦屏一级等特高拱坝的建设实践,基本实现了无危害大坝裂缝的混凝土浇筑施工。通过仿真模拟每一仓混凝土的浇筑过程以及混凝土材料特性随龄期的变化(包括水化热、徐变、自生体积变形等),模拟浇筑后的通水冷却、表面保温等温控措施,获得坝段或坝体的温度场、应力场及其变化过程,从而为温控标准及温控措施的确定提供依据。同时分区分部位研究制定可行的温控措施,对河床坝段和陡坡坝段基础区、孔口约束区、其余坝段区的基础温差、内外温差和上下层温差进行控制,各仓混凝土浇筑后,遵循“早冷却、慢冷却、小温差控温”和图 3 所示“三期九段”及坝段竖向“五区协调”温度控制要求。结合溪洛渡等拱坝工程研制的智能通水控温技术,以及 2 种不同温度冷却水系统的应用,较好地实现了特高拱坝混凝土浇筑施工温控防裂的控制目标。

2.9 基础处理

拱坝对基础承载能力、抗变形稳定、抗滑稳定以及抗渗透破坏等的要求极高。对于基础岩体中存在的地质缺陷(包括各种断裂和软弱带),进行基础处理是高拱坝不可或缺的内容。大坝基础处理方法主要包括:①对坝基软弱岩体的混凝土进行置换;②固结灌浆、接触灌浆;③灌浆帷幕、排水帷幕以及岩溶防渗处理等。特高拱坝基础通常较为复杂,一般采用多种方法相结合的综合处理方案。例如锦屏一级



(a) “三期九段”



(b) “五区协调”

图3 拱坝混凝土“三期九段”及“五区协调”控温示意图

拱坝左岸基础处理几乎运用了所有的处理手段。1949 年新中国成立以来,我国在复杂地基上修建了一系列高拱坝,在地基处理方面取得了丰富的经验,解决了诸如龙羊峡、乌江渡、小湾、大岗山、溪洛渡、锦屏一级等水电工程出现的许多复杂的地基处理问题。

近年来结合部分特高拱坝基础处理实例,取得了新的研究成果。河床部位多个坝段基础需深挖或扩挖,其混凝土浇筑不再作为基础回填,而是作为大坝嵌入基岩的基础结构,其混凝土浇筑是与上部结构横缝相衔接的分块浇筑,连续上升浇筑。结构分析和地质力学模型试验表明,如此处理不仅未影响上部结构受力,而且增强了拱坝整体稳定性,显然较通常的基础回填处理效果更优。另外,拱坝坝肩若存在顺坡向陡倾裂隙或属裂隙密集岩体,可在拱端下游坝址附近一定范围内的抗力岩体进行适量锚索加固,不仅可以大幅度提高抵抗拱推力的作用,而且会大大增强基础抗变形稳定。溪洛渡、锦屏一级和大岗山拱坝的坝肩抗力区均实施了锚索加固。

2.10 施工技术

随着二滩、小湾、溪洛渡、锦屏一级、大岗山、拉西瓦等一大批特高拱坝工程的陆续建成,特高拱坝施工建设技术不断发展,尤其在大坝施工仿真技术、混凝土施工质量控制与进度实时监控技术、大体积混凝土智能控温技术、大坝混凝土浇筑 4.5 m 升层

快速施工技术等方面取得了很大的进步和突破。

a. 大坝施工仿真技术。它是计算机技术、VR 技术与现代工程技术的有机融合,能全面、快速考虑各类影响因素对工程施工的影响。1980 年成都勘测设计研究院率先依托二滩工程开发了混凝土拱坝施工仿真系统,该系统具备自动跳仓功能,能自动判断任意仓面是否满足间歇期、备仓时间、机械干扰、入仓强度、坝块间压块关系、相邻块高差等开仓要求,模拟大坝浇筑过程并计算工期,制定浇筑计划,具有计算快捷、准确且直观的特点。通过 30 多年的持续研发与技术创新,形成了中国独有的模拟仿真分析成套技术。

b. 混凝土施工质量与进度实时监控技术。近年来发展了拱坝混凝土施工质量与进度实时监控技术,从施工期混凝土自动化实时监控、施工信息集成与管理、施工与温控反演仿真、施工反馈控制等 4 个环节系统地发展了特高拱坝全坝全过程施工质量和进度实时监控关键技术,实现了特高拱坝施工期工作性态实时可知可控。

c. 大体积混凝土智能控温技术。为确保混凝土施工质量、改善温控作业人员工作环境、提升温控技术水平,发展了大体积混凝土智能控温技术,实现了温度自动采集、冷却通水智能控制。通过系统自动采集、智能控制和实时评价,突破了大体积混凝土智能控温关键技术,实现了大体积混凝土温控施工的精细化和智能化,使得拱坝混凝土温控从粗放到精细,真正达到大体积混凝土温控“早冷却、慢冷却、小温差”的控温目的,提高了大体积混凝土的温控效率。

d. 大坝混凝土浇筑 4.5 m 升层快速施工技术。特高拱坝工程规模大,建设工期长,若能实现高标准、高强度全年连续浇筑快速施工,对于缩短施工工期,工程及早投运效益显著。锦屏一级水电站工程攻克了混凝土浇筑 4.5 m 升层的温控防裂、施工工艺、施工组织等三大技术难题,浇筑混凝土约 230 万 m^3 , 占大坝混凝土总量的 46%,未发现温度裂缝。

3 特高拱坝建设有待深化研究的问题^[10]

a. 特高拱坝安全评价体系建设。大坝安全事关国计民生。坝高低于 200 m 以下的大坝安全评价较为成熟,实践经验丰富;特高拱坝的安全评价,通常要求进行专门论证研究,主要参照 I 级高坝的安全标准来评价。事实上,特高拱坝的基础范围大,地质条件相对复杂,水推力巨大,大坝受力属性及大坝与基础的相互作用以及作用效应等均与一般高坝存在较大差异,需要有配套的评价标准。如基础抗滑

稳定分析的刚体极限平衡法,剪摩公式中的抗力 $\sum CA$ 项与坝高成平方关系,而抗力 $\sum Nf$ 和滑动力 $\sum T$ 是与坝高成 3 次方关系,特高拱坝继续沿用剪摩公式及较高的安全控制指标,其合理性值得商榷^[11]。采用地质力学模型试验和三维非线性有限元法开展拱坝整体稳定分析及超载安全度研究,更需要多个工程实践,逐步形成与方法配套的整体安全度评价体系。

b. 特高拱坝风险设计。特高拱坝具有失事概率低但失事后果严重的特点,因此不仅需要从工程安全角度进行安全设计,更要从社会公共安全角度进行设计与风险评价。特高拱坝的安全风险贯穿于工程的规划、设计、施工和运行各个阶段,因此,识别特高拱坝设计、建设、运行阶段的不同风险因素,开展特高拱坝在各个阶段的风险特征研究与风险评价,提出风险防范和控制措施十分重要。

c. 特高拱坝抗震性能研究。近 20 年来,结合一系列高拱坝工程的动力响应与抗震措施研究,拱坝动力仿真分析理论与方法以及大型振动台动力模型试验等方面取得了巨大进步,基本满足了特高拱坝的建设需要。但与方法配套的评价准则或方法本身的进一步完善,包括区域地震活动性与场地地震安全性评价,工程抗震分级设防与安全设计准则,抗震措施及震害影响,防范地震风险的综合对策等均需持续深入研究。

d. 特高拱坝安全运行健康诊断技术研究。拱坝安全运行健康诊断研究的目的,是建立拱坝安全健康诊断指标体系,实现对大坝的全生命周期进行管理和分析,及时对异常现象作出预警、评判,为大坝管理部门的决策判断提供技术支撑。通过对已建工程监测资料、材料力学特性、结构变形和应力应变等的调查分析,建立合适的计算分析方法,开展系统反馈分析计算,提出特高拱坝安全健康诊断的监测/检测方法和指标体系。同时需要开展建筑物内部损伤探测、识别技术、安全综合健康检测评价信息系统的研究,以及高拱坝在渗透压力、高应力水平、循环荷载作用下的混凝土耐久性研究,并开展锚索、预应力锚杆以及固结灌浆、防渗灌浆等的有效工作周期及其维护措施的研究等,从而对大坝全生命周期的安全运行进行健康诊断。

4 结 语

拱坝建设的新浪潮,使拱坝设计技术得到大发展,分析手段得到大突破,建造技术得到新飞跃,因

而我国特高拱坝建设成就斐然。随着一批特高拱坝的建设及其关键技术的研究,我国的混凝土拱坝建设技术已处于国际领先水平。随着更多高拱坝和特高拱坝工程的建设,拱坝建设技术将更加完善与丰富。

参考文献:

- [1] 王仁坤. 高混凝土拱坝设计[C]//中国水电 100 年. 北京:中国电力出版社,2010:124-127.
- [2] SL282—2003 混凝土拱坝设计规范[S].
- [3] DL/T5436—2006 混凝土拱坝设计规范[S].
- [4] 王仁坤. 特高拱坝建基面嵌深优化设计分析与评价[D]. 北京:清华大学,2007.
- [5] 王仁坤,林鹏. 溪洛渡特高拱坝建基面嵌深优化的分析与评价[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(10):2010-2018. (WANG Renkun, LIN Peng. Analysis and evaluation of optimizing design for foundation excavation of Xiluodu Super-High Arch Dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2010-2018. (in Chinese))
- [6] 王仁坤,赵文光,杨建宏. 溪洛渡拱坝的设计与安全分析[J]. 混凝土坝技术,2007(1):23-29.
- [7] 王仁坤. 拱坝的整体安全度及控制标准初探[J]. 水电站设计,1991,7(3):42-46. (WANG Renkun. Preliminary study on integral safety degree and control standards of arch dams[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1991, 7(3): 42-46. (in Chinese))
- [8] 王仁坤,林鹏,周维垣. 复杂地基上高拱坝开裂与稳定研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(10):1951-1958. (WANG Renkun, LIN Peng, ZHOU Weiyan. Study on cracking and stability problems of high arch dams on complicated foundations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 1951-1958. (in Chinese))
- [9] WANG Renkun, LIN Peng, ZHOU Weiyan, et al. Experimental study on cracking and integrity stability of Xiluodu Arch Dam[J]. Key Engineering Material, 2007, 353/354/355/356/357/358:2565-2568.
- [10] WANG Renkun. Crucial technologies in the design of Xiluodu Super High Arch Dam[J]. Engineering Sciences, 2012,10(2):35-44.
- [11] 周建平,杜效鹄. 中国特高拱坝建设特点与关键技术问题[J]. 水力发电,2012,38(8):29-33. (ZHOU Jianping, DU Xiaohu. Characteristics and key technologies of super-high arch dam construction in China[J]. Water Power, 2012,38(8):29-33. (in Chinese))

(收稿日期:2015-07-23 编辑:骆超)