

重力坝加高工程技术进展

董培基¹, 刘 艳²

(1. 扬子江工程咨询有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 渭南市洛惠渠管理局, 陕西 大荔 715100)

摘要 结合丹江口大坝加高实际, 讨论了混凝土重力坝加高工程的技术难点和主要研究方向, 介绍了大坝加高工程的主要施工方案和坝体混凝土温度控制的目标与方法, 分析丹江口大坝加高过程中遇到的技术难题和解决方法。从技术和管理 2 个层面提出若干建议。

关键词 重力坝; 大坝加高; 丹江口大坝; 综述

中图分类号: TV642.1 文献标识码: B 文章编号: 1006-764X(2008)S1-0172-05

随着水资源的不断开发, 适合建坝的新坝址越来越少。同时, 已建的大坝由于初期建设条件和设计标准的限制、工程老化以及泥沙淤积等影响, 许多坝已不能满足人类发展需求。因此, 已建拦河坝的加高正成为大坝建设的一个重要任务^[1]。

大坝加高在国外已有许多先例, 如委内瑞拉的古里坝, 日本的王泊坝、川上坝、新中野坝, 美国的也尔奇坝, 印度的科伊纳大坝, 瑞士的大狄克桑斯坝等。国内先后在 1995 年、1996 年、1998 年 3 次在丹江口进行了大坝加高试验, 2005 年 9 月开始全面实施丹江口大坝加高工程。

1 重力坝加高需解决的主要问题和工程技术进展

1.1 大坝加高需解决的主要问题

大坝加高改变了坝体结构和受力状况, 一般除加高坝顶外尚须在下游坝坡贴坡加厚。实施中, 主要应解决好加高体型、新老混凝土接合、原有设施的检修改造和重新布置、坝基防渗加固、初期工程缺陷处理以及加高施工与枢纽运行管理综合系统整体优化等问题。其中新老混凝土接合问题常被列为大坝加高工程诸多问题中的重点和难点, 也是目前有关大坝加高研究的热点^[2-4]。

研究新老混凝土接合问题, 实际上是保证坝体整体受力和坝体各部位的应力处于合理范围。具体要求解决以下 3 方面问题: ①处理好新老混凝土联合受力问题; ②妥善解决加高后坝体和坝基应力, 确保大坝安全; ③尽可能减少新浇混凝土温度收缩对老坝体的不利影响, 减少混凝土裂缝, 避免危害性裂缝。

1.2 大坝加高设计研究的主要技术方向

1.2.1 确定加高方式、体型和断面尺寸

大坝加高通常有同基同型加高、同基异型加高、异基同型或异型加高等几种方式。其中重力坝加高又包括后帮整体式、前帮整体式、前帮加后帮式、预应力索钢加高式、直接加高式等几种具体形式。后帮整体式施工最为方便, 在已实施工程中应用最多, 日本的川上坝、新中野坝和委内瑞拉的古里坝等均采用了这种形式。采用后帮整体式加高时, 需适当加大贴坡混凝土厚度和坝底宽度, 使坝踵静力计算结果为压应力, 以抵消坝后新浇贴坡混凝土降温收缩引起坝踵拉应力。

1.2.2 确定混凝土性能指标和配合比

大坝加高工程混凝土一般尽可能采用与初期工程性能相近的材料, 强度与初期工程混凝土相当。考虑到初期工程混凝土龄期较长, 弹性模量较大, 为尽量减小由于不同弹性模量造成的新老混凝土变形差异进而引起的结合面破坏, 一般贴坡部位选择较高标号的混凝土, 以便使其弹性模量接近老混凝土的弹性模量。为减低水化热, 减小块体温度上升, 混凝土配合比设计中常采用低热水泥, 也可考虑掺加一定比例的粉煤灰。

1.2.3 老坝体突出部位拆除

为避免老坝体局部突出部位在新浇混凝土中形成应力集中造成新浇混凝土破坏或结合面开裂, 一般对老坝体突出部位进行局部拆除, 对尖角部位进行结构修整。

1.2.4 新老混凝土接合面凿毛和加设键槽

为保证新老混凝土接合良好并使新老混凝土接

合面的形状对应力传递更为有利,必须对新老混凝土接合面进行凿毛,同时在新老混凝土接合面增设键槽^[5]。老混凝土面凿毛还可起到剔除初期工程混凝土碳化层和消除局部表面缺陷、保证坝体混凝土整体质量的作用。

1.2.5 锚筋和植筋

新老混凝土接合面开裂主要是由于结合面法向应力和切向剪应力超过结合面强度引起的^[2]。在新老混凝土接合面增设锚筋可以显著提高新老混凝土的结合强度,改善应力传递,有效防止新老混凝土接合面开裂。植筋一般用于闸墩等结构的扩大、加高和加固,恰当设置可以改善结构受力状况,保证新老结构形成整体联合受力。目前,小规格的植筋已经有比较成功的经验,但大规格超深植筋胶凝材料、施工工艺、检测方法和相关标准尚处于探索研究阶段。

1.2.6 新老混凝土接合面胶结

为保证新老混凝土接合面附近贴坡混凝土浇筑密实并胶结良好,一般均要求在新老混凝土接合面铺设比同部位混凝土高一等级的水泥砂浆,并要求砂浆在铺设后半小时内被混凝土覆盖。在闸墩和新浇堰体结合部等特殊部位,虽然对新老混凝土接合面质量要求更高,但新浇混凝土和周边结构由于受外部约束和温降收缩等多种不利因素影响,结合面容易开裂。为保证这些部位新老混凝土接合面胶结良好,部分工程拟采用在已作凿毛处理的老混凝土面上涂刷界面胶的方案。受施工条件、凝结时间、耐久性和环保要求等因素限制,目前,水工混凝土界面胶尚处于研究探索阶段。

1.2.7 限制块体最高温度

除满足大体积混凝土自身温控要求外,大坝加高工程混凝土温控工作还要考虑新浇混凝土温度场和温度应力的分布与变化对原坝体应力和变形的影响以及老坝体对新浇混凝土的约束。一般块体最高温度采用材料力学或有限元法计算,根据当地年平均气温和混凝土温度应变相关指标,按不同部位、不同月份确定,尽量减小新浇混凝土温度变化对新老坝体及其联合受力的影响。

1.2.8 控制上下层温差和间歇期

当先浇层混凝土龄期超过 28 d 成为老混凝土时,应控制新老混凝土的温差,对连续上升坝体且层厚大于 0.5 L (浇筑块长边尺寸)时,允许老混凝土面上下各 L/4 范围内上层最高平均温度与新混凝土浇筑前下层实际平均温度之差为 15 ~ 17℃,浇筑块侧面长期暴露时,或上层混凝土厚度小于 0.5 L 或非连续上升时从严控制。

贴坡混凝土浇筑至老坝顶高程后,需间歇 28 d,

方可跨新老混凝土缝面浇筑坝顶加高混凝土。

1.2.9 老坝顶水平面接缝处理

除凿毛、铺砂浆等一般性结合面处理要求外,对位于老坝体顶部的新老混凝土接合面水平缝,一般在距上游坝面一定范围平行坝轴线设置止水片和排水管,分别与横缝止水片和坝体排水系统相连接。为保证止水效果,常使用微膨胀混凝土进行止水片埋设,并加强过程控制。

1.2.10 限制上游水位

高水头下原坝体受库水压力向下游弯曲、位移,水头降低后,原坝体向上游回弹复位,使得在高水位状态下浇筑贴坡混凝土形成的新老混凝土接合面受拉受剪,对新老混凝土接合和联合受力极为不利。所以,贴坡混凝土一般要求在上游水位尽可能低的情况下施工。具体水位控制标准应综合考虑新老坝体不同水位下的应力变形、枢纽工程正常运行和流域调度等因素确定。

1.2.11 接缝灌浆

虽然采取了上述一系列措施,但在实际运用中,仍有诸多不确定因素。为确保特殊情况下新老混凝土接合面出现开裂后不影响新老混凝土联合受力和坝体整体运行,在新老混凝土接合面埋设接缝灌浆系统,以便在需要时采取灌浆方式闭合新老混凝土接合面裂缝。

除上述几点外,一般均要求在相应部位覆盖前对初期工程混凝土裂缝、外露缺陷和运行管理设施进行全面检查并采取相应处理措施。

1.3 大坝加高施工程序和贴坡混凝土施工方案

大坝加高工程施工程序由加高方式决定。对后帮整体式而言,一般都遵循先贴坡后加高的程序,但在贴坡混凝土施工安排上却有诸多不同。具体有以下 3 种:

1.3.1 全断面宽槽回填

在下游坡面新老混凝土间留设一定宽度的预留槽,在新浇混凝土温度基本稳定后再回填预留宽槽,使新老混凝土结为整体。^[6]西澳大利亚蒙达灵坝、韦格林坦坝等采用了这种方式。其优点是新浇混凝土在温度变化过程中能自由伸缩,从而避免了受老坝体约束而产生的温度应力以及新混凝土收缩对坝踵和上游面产生的附加应力,使混凝土温控措施简化;其缺点是宽槽回填实施和质量控制难度比较大。

1.3.2 直接贴坡浇筑

直接在坝体下游贴坡浇筑混凝土,采取严格温控措施,尽可能削减新浇混凝土降温收缩在上游坝面和坝踵产生的拉应力,同时满足新浇混凝土温控防裂要求。其最大优点是:通过综合温控措施,一个

月内将新浇混凝土冷却到不高于年平均气温,没有尾工,施工简便。但新浇混凝土温度及收缩应力仍可能对坝踵及坝体产生不利影响。丹江口大坝、川上坝、新中野坝和古里坝采取了这种方式。

1.3.3 贴坡浇筑结合宽槽回填

在坝体下游斜坡面上直接贴坡浇筑混凝土,在直立面上预留宽槽,待新浇混凝土温度降至准稳定温度后再回填宽槽。

贴坡浇筑结合宽槽回填方案取消了斜坡面上宽槽回填这道非常困难的工序,直立宽槽回填质量也较容易控制。该方案新浇混凝土施工期的温度及收缩应力对原坝体影响较小。

1.4 坝体混凝土温度控制

1.4.1 温度应力的主要危害

混凝土大坝加高施工期和后期运行中,温度场的变化对坝体应力分布有显著影响。温度变化引起的危害主要有3种情况:①混凝土内部温度场分布和变化不均衡,局部温度梯度偏大,胀缩不均,拉应力超过混凝土抗拉强度,导致相应部位混凝土开裂产生裂缝;②贴坡和加高混凝土浇筑前后,老坝体内部温度基本稳定,而新浇混凝土温度变化非常显著,并引起显著的应力、应变和胀缩变化,严重时由于新老混凝土性能指标和胀缩程度的差异导致新浇混凝土在老混凝土面上错动,使新老结合面受剪,当剪应力突破结合面抗剪极限,便对新老混凝土接合面造成破坏;③贴坡混凝土冷却过程中,由于温度应力和新混凝土收缩对坝踵和上游面产生的附加拉应力,对坝体整体稳定造成不利影响。对大坝加高工程而言,后2种危害影响尤其严重^[2]。

1.4.2 施工期混凝土温度控制

施工期混凝土温度控制的具体目标主要包括3个方面:①新浇混凝土内部最高温度不超标;②混凝土温度变化过程均衡平缓;③外部温度陡降时混凝土不受冻害和冷击。

a. 控制新浇混凝土最高温度。施工过程中,一般通过选用低热水泥、减少水泥用量、选择低温时段施工、骨料预冷、加冰(冷水)拌和、保温遮阳运输、及时入仓覆盖、仓面喷雾、通水冷却和流水养护等综合措施降低混凝土水化热、降低原材料温度、减少阳光辐射和外界热量侵入,控制拌和物出机口温度、入仓温度、浇筑温度,保证块体最高温度不超标^[7]。

b. 争取混凝土内部温度变化均衡平缓。尽量保证块体温度变化均衡平缓,特别是在温度下降时尤为重要。主要措施有:相邻浇筑块混凝土标号和配合比尽可能一致;控制冷却水管(特别是进出水段)间距;控制冷却通水水温、流量和通水时间,定期

变换进出水方向,控制混凝土浇筑间歇期。

c. 保证新浇混凝土在外部温度陡降时不受冻害和冷击。混凝土导热性差,外界温度的变化很难在短时间内从混凝土表面传入内部。这样,在外界温度陡降的情况下就会在混凝土表层一定范围形成不利的温度梯度,表层混凝土受冷趋向收缩,内部保持不变。当温度梯度和应力达到一定程度就可能造成面层混凝土受拉开裂。在混凝土强度增长初期、秋冬季“寒潮”或春季“倒春寒”来临时段主要是防止冻害。一般采取以下措施:①每年9月份起对当年浇筑的混凝土和坝体所有外露孔洞采用保温被覆盖;②气温降低时段推迟拆模;③低温时段对已拆模混凝土及时覆盖。近年来,混凝土表面保温有和保湿养护结合并趋于日常化、长期化的趋势,许多工程在设计阶段就考虑把坝体混凝土初期保温和永久保温相结合。另一种情况是夏季泄洪时库底低温水对长期暴晒或由于水化热未完全释放而处于较高温度的过流面及其相邻部位混凝土造成“冷击”。解决这一问题,一般要求过流面周边混凝土在汛期来临前降至稳定温度,具备条件的尽量提前采用库底低温水进行小流量长流水养护和表面预冷。

1.4.3 坝体永久保温

坝体永久保温是近年来在部分大(中)型工程中逐步发展起来的新的工程保护措施,主要在上游坝面水位变动区以上和下游坝面实施,其主要目的是为了削减年气温变化对坝体温度场分布和变化的不利影响。新的设计理念趋向于在设计中结合施工期保温一并考虑,同时考虑坝体防渗、外观和与周围景观协调的要求,考虑防风(浪)、防冲撞及耐久性要求^[8]。

2 丹江口大坝加高工程

2.1 工程概况

丹江口大坝加高工程是目前我国在建的最大的大坝加高工程,丹江口大坝位于湖北省丹江口市。初期工程于1973年建成,坝顶高程162m,总库容为209.7亿 m^3 。加高工程的主体工程于2005年9月开工。加高后,坝顶高程为176.6m,总库容为339.1亿 m^3 ,丹江口水库将成为南水北调中线水源地。近期每年可向北方调水95亿 m^3 ,远期可向北方调水120亿~130亿 m^3 。对缓解京、津、华北地区水资源短缺,促进北方地区国民经济可持续发展具有十分重要的作用。

目前,丹江口大坝加高贴坡混凝土已全部完成,部分坝段已加高至设计高程。

2.2 工程实施中的主要难题

丹江口水利枢纽建成以来,一直承担着防洪、发电、灌溉、航运等功能。加高过程中,除解决水电工程建设一般性问题外,还在加高施工与枢纽运行管理整体优化、重点技术攻关、初期工程缺陷处理以及新增施工项目标准制订等方面进行了探索。

2.2.1 施工布置和交通安排

加高工程施工是在保证枢纽原有功能基本不受影响的前提下进行的。施工布置和交通安排与枢纽运行管理设施的时空协调问题相对突出。加高施工和枢纽运行综合系统整体优化和协同管理、加高工程全年施工可行性等方面的研究是影响加高工程实施效果和枢纽运行效益的重大课题^[9]。

2.2.2 新老混凝土接合部初期工程的混凝土拆除

拆除部位绝大部分与初期工程相邻,少数拆除体还是正在运行的初期坝或发电厂房等安全防护等级较高的建筑物的一部分。直接在预留混凝土面上实施拆除,在确保邻近设施安全及保留结构无损伤的前提下,优化技术方案,加快混凝土施工进度,是项目实施中需重点解决的难题^[4]。在生产性试验的基础上,该项目针对不同部位的质量标准和防护要求分别采取了控制爆破、静爆剂胀裂、机械切割、液压破碎机拆除等多种技术措施,基本满足了工程进度和有关技术要求。

2.2.3 高水头作用下坝基帷幕灌浆

初期工程在坝基上游侧设置了防渗帷幕和排水孔。但坝基防渗帷幕建成后已运行 30 多年,部分坝段坝基排水孔排水量相对较大。大坝加高以后水库正常蓄水位由原来的 157 m 提高至 170 m,少数坝段防渗帷幕可能造成渗透破坏。为改善坝基防渗和排水条件,设计要求对河床混凝土坝基础灌浆帷幕进行全面检查,分析研究其防渗效果及耐久性,据以确定对防渗帷幕进行补强灌浆的标准和技术要求。

上述工作均需在水库正常蓄水、上游水位较高的情况下进行,同时考虑初期施工条件、材料性能和当前技术水平及现行技术标准的衔接问题。目前,高水头作用下坝基帷幕灌浆已全部完成,工程质量达到设计和相关技术规范的要求。

2.2.4 初期工程的裂缝检查处理

经过 30 多年运行,混凝土大坝各永久外露面和廊道内均发现有裂缝。裂缝的存在影响大坝安全运行,其检查处理工作也与相应部位加高施工和枢纽运行管理存在工作面和进度协调问题。作好实施过程中的系统安排和动态控制是保证工程质量和系统综合效益的重点。

2.2.5 金属结构检修

为保证大坝加高后相关设施正常运行,加高过程中要对所有金属结构进行全面检查,并对有缺陷部分进行修复。水上金属结构的检修主要是协调好加高施工和枢纽运行管理的关系。而水下金属结构的检修则存在较大难度,最低水位以下埋件和金属结构检查、修复、拆除和安装在国内尚无大型项目的经验,丹江口大坝加高工程在工作内容、工作方法、缺陷鉴定和分级标准、缺陷处理工艺要求和相关质量标准确定方面均作了一定的探索。

2.2.6 新老安全监测系统的过渡衔接和施工期安全监测

初期工程建设期间,曾设置了大量的监测仪器并取得了丰硕的资料。但受技术条件和使用年限的限制,很多初期安装的仪器已经老化。另一方面,加高工程实施前安全监测工作全部由枢纽运行管理单位负责,加高过程中大部分工作移交施工单位,新增监测仪器也由施工单位安装。新老监测系统的过渡衔接和施工期安全监测问题主要是从技术和管理 2 个层面做好协调工作^[10]。

3 结 语

大坝加高工程在国内还处于探索阶段,今后,类似项目会不断增加并占据更多的投资份额。结合笔者参与建设的南水北调中线水源丹江口大坝加高工程,提出以下建议:

a. 加强相关专门技术的研究与交流。结合丹江口大坝加高,国家和工程建设各方已多次组织相关专题研究和技术交流,参加人员既有政府主管、国内外专家,也有参与一线建设的工程管理、设计、监理和施工单位的代表。与会人员来源广泛,既带来了工程进展中遇到的实际问题,也带来了国内外同类项目的管理和技术信息,促进了各界对大坝加高技术的了解。此项工作应进一步拓展深化,并在适当的情况下提高交流层次,扩大交流范围。

b. 注重过程控制、过程记录和相关资料的分析总结。大坝加高工程约束条件多,已实施项目少,应借助现有项目进一步拓宽现有研究领域,提升研究水平。目前,应以丹江口大坝加高等大型工程为载体,切实做好过程控制、过程记录和相关工作的分析总结。严格按规范程序进行工程组织管理,严格按设计文件和有关技术标准进行施工,细化、完善并切实落实好相关的信息采集、记录、传递、处理以及决策与执行的程序和标准,保证实施过程规范、可追溯。在此基础上,不断对前期工作进行分析总结、持续改进,为今后实施类似项目积累经验。技术层面,

应特别安排好原始记录和安全监测系统的规划、设计、实施、管理、信息采集和资料分析与整理工作,为推进材料、工艺改进和解决有关具体问题提供第一手资料。

c. 加强老水库特别是病险水库和水资源供需矛盾突出区域水库的调研工作。1949 年以来,我国先后建设了数以万计的水库工程,许多工程都有不同程度的老化或现有功能已不能满足发展需要。在现有水利水电工程加固或改(扩)建方案论证和决策过程中,可将大坝加高方案作为若干比较方案中的一项,结合老工程的改(扩)建和病险水库的加固提高工程效益。

参考文献：

[1] 李宁,黄继刚.浅议混凝土坝分期加高技术[J].东北水利水电 2002(4):25-26.
[2] 张国新,朱伯芳,吴志朋.重力坝加高的温度应力问题

[J].水利学报 2002(5):11-15.
[3] 李宁,庞海臻,赵剑.重力坝分期加高技术概述[J].水利水电技术 2004(3):22-23.
[4] 郭武山.南水北调中线及丹江口大坝加高工程施工难点[J].湖北水力发电 2006(4):8-11.
[5] 郭武山.丹江口大坝加高工程新老结合面键槽切割施工[J].人民长江 2006(11):1-2.
[6] 董福品,刘永林,朱伯芳,等.混凝土大坝加高设槽方案的优选及应力仿真分析[J].水利学报 2002(6):100-104.
[7] 邢德勇,徐三峡.三峡三期大坝工程大体积温控技术综述[J].水力发电 2002(10):14-16.
[8] 朱伯芳,买淑芳.混凝土坝的复合式永久保温防渗板[J].水利水电技术 2006(4):13-18.
[9] 朱伯芳,张国新,吴龙碑,等.重力坝加高工程全年施工可行性研究[J].水利水电技术 2006(10):29-32.
[10] 齐伟,陈珊,王丹萍.丹江口大坝加高工程安全监测问题的探讨[J].湖北水力发电 2002(3):26-29.

(收稿日期:2007-01-08 编辑:方宇彤)

.....

(上接第 155 页)

表 1 ADCP 与流速仪精确测量方法比测结果统计							
序号	测量时间	上游水位/m	下游水位/m	流量/(m ³ ·s ⁻¹)		ADCP 相对于流速仪偏差/%	
				流速仪	ADCP	流速仪	ADCP
1	07-22T06:40~T09:10	12.37	12.13	5740	5665	-1.3	
2	07-25T08:40~T10:20	12.17	11.91	5940	5374	9.5	
3	07-27T08:36~T10:40	11.96	11.73	4950	4936	-0.3	
4	08-01T08:36~T10:36	12.26	11.45	4580	4426	-3.4	
5	08-11T09:00~T11:36	12.98	12.66	7620	7538	-1.1	
6	08-23T09:30~T11:40	12.74	10.04	1940	2088	7.6	
7	08-26T09:45~T11:30	12.49	10.86	3560	3546	-0.4	
8	08-29T12:40~T14:20	12.45	10.83	3440	3442	0.06	
9	09-01T08:20~T09:40	12.48	11.48	4820	4871	1.1	
10	09-02T08:40~T09:54	12.48	11.49	4730	4820	1.9	
11	09-05T09:10~T10:40	12.47	11.96	5850	5970	2.1	
12	09-06T07:50~T09:30	12.43	12.10	6290	6259	-0.5	
13	09-16T08:40~T10:20	12.43	11.95	5870	5954	1.4	
14	09-19T08:30~T10:00	12.14	11.74	5180	5455	5.3	
15	09-21T08:30~T09:50	12.66	10.87	3480	3476	-0.1	
16	09-27T14:10~T16:25	12.77	10.65	3190	3153	-1.2	
17	10-14T09:00~T11:00	12.76	11.41	4680	4660	-0.4	

总之,ADCP 在水文测验、水资源调查评价和防汛抗旱工作中应用的效益十分显著,应大力推广。

参考文献：

[1] 田淳,刘少华.声学多普勒测流原理及其应用[M].郑州:黄河水利出版社 2003.
[2] 长江水利委员会水文局.走航式声学多普勒流速剖面仪河流流量测验技术指南[R].武汉:长江水利委员会水文局 2005.
[3] GB50179—93,河流流量测验规范[S].
[4] SL337—2006,声学多普勒流量测验规范[S].
(收稿日期:2007-07-24 编辑:高建群)

(上接第 128 页)

6 结 论

工程实践证明,采取合理有效的工程措施后用粉细砂筑堤是可行的。当前堤防建设的发展趋势是就地取土,少占用耕地,保护生态环境。本工程采用粉细砂放缓边坡筑堤,占用的是河道,未占用耕地,从土堤资源开发利用和全局经济发展的角度考虑,采用粉细砂筑堤在技术、经济上均是可行的。

参考文献：

[1] 杨光照.粉细砂特性及工程措施[J].施工设计研究,1996(6):1-16.
[2] 张越,曲兴辉.改性粉细砂筑坝新技术研究[J].吉林水利 2006(7):8-10.
[3] 李敬库.加筋粉细砂筑坝技术在辽河防洪工程中可行性论证[J].吉林水利 2002(8):20-22.
(收稿日期:2008-05-07 编辑:骆超)

