

混凝土大坝加高施工关键技术研究

周厚贵

(中国葛洲坝集团公司,湖北宜昌 443002)

[摘要] 以国内外混凝土坝加高工程施工实践为基础,系统总结混凝土重力坝后帮整体式加高施工中的4项关键技术,即混凝土原材料及配合比、新老混凝土结合、原有结构体的控制拆除与转移、施工期资源的时间与空间调配。针对其中的每一项关键技术,分析了施工技术难点与特点、施工技术要求,并总结了技术措施和解决策略,以期为同类型工程建设提供参考与借鉴。

[关键词] 施工技术;坝体加高;混凝土坝;水利水电工程

[中图分类号] TV52 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)07-0087-06

1 前言

世界上第一个有相关记载的大坝加高工程大约可以追溯到1600年左右波斯帝国(今伊朗)的Kebars拱坝^[1]。随后的数百年间,诸多的混凝土坝进行了加高施工^[2],如西班牙的Almansa坝,意大利的Pontalto坝,澳大利亚的Parramatta坝,瑞士的Grand Dixence坝,委内瑞拉的Guri坝,美国的Roosevelt坝、Olivenhain坝以及在建的San Vicente坝。国内的混凝土坝加高工程相对较少,此前完成加高的英纳河水库大坝和宝泉抽水蓄能电站下库大坝均为浆砌石重力坝,龙滩大坝加高正在规划设计中,在建的丹江口大坝加高工程开创了国内混凝土坝加高工程加高规模、技术难度的新纪录。

混凝土坝体的加高主要来源于以下几个方面需求:a. 随着坝工建设的发展,可供选择的优质坝址日益减少,对于之前由于技术限制或资金不足等原因导致的水资源未完全开发的枢纽,通过加高坝体可实现增加库容、抬高水位、提高防洪标准,进而实现兴利除害、充分开发水资源的目。大坝加高方式较之新建坝体具有技术、经济和环保等方面的优势。b. 坝体在建设初期出于某种需要而分阶段

建设的工程,如果后期与前期的时间间隔超出一定范围,后期工程建设也属于坝体加高施工。c. 由于各种原因引起的坝体老化、损伤,或者由于坝体在建设过程中存在某种不足,需要对坝体进行加固或维修,同时对坝体进行适当加高。d. 在混凝土坝大范围、大规模的维修与加固的改扩建工程中,虽然不加高坝体,但其施工内容、施工条件、技术难点、技术要点与混凝土坝加高施工基本相似^[3]。

时至今日,混凝土坝加高的工程规模、加高高度、加高难度、加高方式、加高的坝型都已取得了巨大的突破,并且由于混凝土坝加高工程的施工条件与技术要求等与新建工程差别显著,逐步形成了与新建工程相区别的混凝土坝加高技术体系,成为水电工程建设的一个重要分支和组成部分,也得到了坝工界的广泛关注和重视^[4~6]。

目前,混凝土坝加高的坝型主要为重力坝,其次为重力拱坝。在混凝土重力坝的各种加高方式中,后帮整体式(俗称“穿衣戴帽”)技术成熟、施工难度相对较小、对现行工程运行影响不大,成为混凝土坝普遍采用的加高方式,如图1所示。建立与完善混凝土坝后帮整体式加高施工的技术体系对于该方法的进一步推广和应用、提高混凝土坝加高建设水平

[收稿日期] 2010-08-09

[作者简介] 周厚贵(1962—),男,湖北枝江市人,教授级高级工程师,博士生导师,从事水电工程施工技术与管理研究;

E-mail: hougui@cgge.cn

具有重要意义。

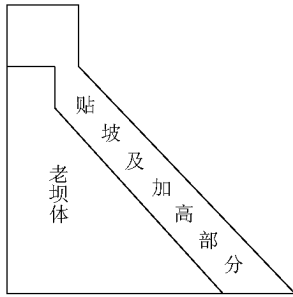


图1 后帮整体式加高方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of integral heightening mode of concrete gravity dam

文章从后帮整体式混凝土重力坝加高工程的施工技术出发,在系统总结国内外相关工程,特别是我国丹江口大坝加高工程施工技术的基础上,提出了混凝土坝加高施工的技术特点与难点,并探讨了关键技术的解决策略,供国内外类似工程建设参考。

2 主要关键技术

混凝土坝加高工程通常是在现有枢纽运行期间施工,在老坝体的下游面及坝顶进行混凝土浇筑。需要重点解决以下4大关键技术:新浇混凝土的原材料及配合比优化问题、新老混凝土结合问题、原有结构体的拆除与转移问题、施工期资源的时间与空间调配问题。各项关键技术的特点与难点、技术要求如下。

2.1 新浇混凝土的原材料及配合比优化

考虑到新老混凝土结合等方面的需要,混凝土坝加高工程中新浇混凝土的性能需要在抗裂强度、温升特性、徐变性能等方面满足特殊要求。为此,需要对混凝土的原材料和配合比做专门的研究。

2.1.1 技术特点与难点

1) 原材料的选择。要求所使用的骨料坚固、自身体积变形小、无碱活性;要求外加剂为混凝土施工提供良好的和易性,促进胶凝材料释放凝固力量;同时要求胶凝材料稳定、均一、牢固。

2) 新材料的应用。包括微膨胀胶凝材料、金属/非金属矿渣掺和料以及第三代聚羧酸类新型外加剂的使用。

3) 配合比优化。需要提高混凝土各类原材料的适配性、材料特性的互补与互增性,并确定最优配合比用于现场施工。

2.1.2 技术要求

通过优选混凝土的原材料、使用新材料、调整外加剂、优化配合比等手段尽量提高新浇混凝土的抗裂强度,尽量减少混凝土水化热温升和延缓水化热散发速率,尽量提高混凝土初期硬化时的徐变能力,最终实现新老混凝土之间的良好结合。

2.2 新老混凝土结合

新老混凝土结合是混凝土坝加高施工中的核心问题之一,新老混凝土之间的良好结合对于确保大坝的整体性和安全性具有直接影响。

2.2.1 技术特点与难点

新老混凝土结合施工技术特点与难点的根本在于新老混凝土的物理力学性质差异引起的一系列问题。主要反映在以下几个方面:

1) 新老混凝土性能差异。通常情况下,老坝体混凝土龄期已经很长,弹性模量较高且已达到稳定状态,甚至表面存在不同程度的碳化和风化层,而新浇混凝土的强度、弹性模量等尚处于变化中,收缩变形较大,易在新老混凝土结合面产生应力。

2) 温度场差异。老坝体混凝土的温度已趋稳定且新浇混凝土将其与外界隔离,而新浇混凝土体因本身水化热和外界气温引起的温度变化相对较大,会在新老混凝土的结合面产生温度应力。

3) 下游坝面新浇混凝土除受侧面老混凝土的约束外,还受底部混凝土或基岩的约束,使得新老混凝土结合面的应力状态更为复杂。

4) 结合面的形态。新老混凝土结合面的形态直接影响其应力分布形式、新老坝体之间的传力方式和传力特性,是调整新老混凝土坝体联合作用状态的重要手段。

2.2.2 技术要求

新老混凝土结合施工技术要求的根本在于实现加高后由老混凝土和新混凝土共同构成的坝体共同工作,使加高后坝体的稳定安全系数、坝基应力、坝体应力满足规范和设计要求。主要反映在以下两方面:

1) 新老坝体之间的结合程度。新老混凝土之间应实现良好结合,控制或避免坝体结合面裂缝。

2) 新老混凝土结合面的应力状态。结合面的应力状态应满足混凝土强度的要求,包括温差应力控制在许可的范围内,避免应力集中的出现等具体的要求。

2.3 原有结构体的拆除与转移

拆除与转移是指混凝土坝加高工程施工过程中

原有结构体的拆除,以及结构体拆除后的对外运输。

2.3.1 技术特点与难点

混凝土坝加高施工中的拆除具有点多、面广、量大的特点。需要拆除的结构体(主要为混凝土结构)既有少量拆除,又有薄层拆除,还有大体积拆除。拆除的结构体通常位于枢纽运行区,对震动、飞石、粉尘等有较多限制,拆除施工不能破坏保留结构体的物理力学性质。混凝土坝加高施工中的拆除是典型的控制拆除。此外,拆除体的外运受空间和调运设备布置的限制,比通常情况下困难。

2.3.2 技术要求

1)对混凝土保留体外形轮廓的精确控制。包括保留混凝土的外型轮廓尺寸、平整度等要求。

2)对混凝土保留体损伤的严格控制。包括对保留体裂缝的严格控制、对拆除体内保留钢筋的操作限制、对保留体的震动限制。

3)对周围建筑物和设施的保护要求。包括对控制爆破拆除点周边一定范围的原有混凝土、新浇混凝土、灌浆区、闸墩、厂房、中控室、发电机组及其他建筑物和设施的振动强度限制,以及对一定范围内建筑物和设施的防止飞石保护和爆破粉尘控制。

4)拆除体外运所使用的调装设备不得与各类空中线缆、各类建筑物和设备发生碰撞。

2.4 施工期资源的时间与空间调配

由于混凝土坝加高施工期间枢纽正常运行,需要承担防洪、安全度汛、发电等任务,各项施工作业与枢纽运行存在一定的冲突,导致施工工作面狭窄、受制约因素较多、矛盾突出、关系复杂。为此,需要处理好各项施工活动的时间与空间调配工作,以确保加高施工不影响枢纽运行。

2.4.1 技术特点与难点

施工期各类资源的时间与空间调配工作的特点在于枢纽的运行对施工场地布置、施工机械配置与调度、施工现场交通、施工进度控制与管理等都提出了特殊的要求。施工中需要考虑施工与防洪、施工与发电的冲突:一是时间冲突,如大坝安全检测及日常维护与加高施工的时间冲突,溢流面泄洪与加高施工的时间冲突;二是空间冲突,如进场公路的使用、坝顶门机与坝顶闸门启闭设备轨道的使用;三是资源冲突,如利于增加发电效益的高水位与施工限制水位引起的库容矛盾。

2.4.2 技术要求

1)施工场地布置。加高施工的施工场地布置

不能影响度汛与汛期泄洪、不能影响发电。

2)施工机械布置。加高施工的机械布置不能影响发电与防洪,如布置于坝顶的混凝土入仓机械不能影响坝顶门机的正常使用。

3)交通道路布置。加高施工的交通道路布置不能影响防洪物资、坝体维修材料与设备的运输,需要确保防洪、发电、坝体维修等充足的道路运输能力。

4)施工进度计划。加高施工进度必须满足枢纽运行、泄洪等要求。如为确保坝体应力满足施工技术要求,当库水位超过一定高程时,不能进行贴坡混凝土浇筑;为使汛期闸门及泄流堰体和深孔满足度汛要求,在汛期到来之前混凝土浇筑必须达到相应的形象进度。

3 技术措施研究

针对以上混凝土坝加高工程施工中的关键技术问题,结合国内外混凝土坝加高工程施工实践,解决以上技术难题的主要措施如下。

3.1 新浇混凝土的原材料及配合比优化

主要通过配合比优化设计、现场试验确定混凝土各种原材料性能、各类外加剂数量,具体的参数根据实际工程情况而定,其基本原则如下。

1)通过减少水泥用量,以及具有减水、缓凝及引气效果的复合型高效外加剂的使用,改善混凝土和易性,提高混凝土耐久性、抗渗性和抗裂能力,延缓水化热发散速率。

2)选择发热量较低的中/低热水泥、较优骨料级配和I级粉煤灰,优选复合外加剂(减水剂和引气剂),降低混凝土的单位水泥用量,以减少混凝土水化热温升和延缓水化热发散速率,提高混凝土抗裂能力。

3)通过配比试验优化混凝土配合比,保证混凝土所必需的抗拉强度、施工匀质性指标及强度保证率,改善混凝土抗裂性能,提高混凝土抗裂能力。

4)在全面满足设计要求的各项技术参数的条件下,掺用粉煤灰,降低水泥用量,提高混凝土初期硬化时的徐变能力,并选用较低的水灰比,以提高其极限拉伸值。

5)综合选择与合理使用各类新材料,包括新型外加剂、新型掺和料等,提高混凝土各项性能,满足施工要求。

3.2 新老混凝土结合

新老混凝土结合的关键技术措施如下:

1) 凿除老坝体表面的碳化层,并通过机械切割设置人工键槽,以改善新老坝体之间的受力状态^[7]。

2) 在新老混凝土结合面设置植筋和锚桩,利于新老坝体的结合。

3) 在新老混凝土结合的特殊部位,如溢流坝段老闸墩与新加高溢流堰结合面,涂刷界面剂,以增加新老混凝土之间的粘结力^[8]。

4) 严格控制新浇混凝土温度,加强混凝土温度控制及防裂措施,减少混凝土温度应力,提高混凝土抗裂能力。

5) 贴坡混凝土浇筑时,适当控制水库水位,以降低老坝体上游面初始应力。

6) 修整老坝体下游面体形,清除突出部位混凝土,减少应力集中。

3.3 原有结构体的拆除与转移

混凝土坝加高工程中的拆除方法几乎涵盖了各种拆除技术,在工程实践中需要根据具体情况选用相应的技术^[9]。各种拆除方法的适用条件和技术特点简述如下。

1) 人工拆除。主要应用于少量拆除作业,或者其他方法难以实施的情况,通过人工辅助简易工具拆除混凝土。该方法机动灵活,工艺简单,成型质量好,适用于各种复杂的施工环境,对混凝土保留部分几乎没有损坏。

2) 机械拆除。适用于拆除量较大,拆除要求高,拆除体周边施工环境较差,紧临发电厂、开关站等重要保护建筑物,现场不宜实施控制爆破,对拆除产生的危害控制要求严格的部位,包括手风钻、风镐凿除、振动锤凿除以及液压盘锯、金刚石链锯等锯割拆除。该方法易形成机械化流水作业,拆除效率较人工拆除高,对混凝土结构保留部分和周围保护对象影响较小。

3) 静爆拆除。适用于不允许有震动、噪声、有毒有害气体、飞石、静电或电磁波辐射的部位;对混凝土结构保留部分不允许有任何损坏的部位。该方法通常作为机械等其他拆除方法的一种辅助手段,通过静爆先在拆除体与保留体间形成裂隙,再使用机械分离。该方法拆除过程无震动、无飞石、无噪声、效率高,对保留部分不造成任何损害,而且施工简便、安全。在实施中需要通过计算和现场试验确定静爆剂药量。

4) 控制爆破拆除。如果可将爆破产生的振动、

飞石、粉尘等控制在规定的范围内,该方法是大规模混凝土控制拆除的首选方法。该方法理论上较成熟、施工经验丰富;效率高,利于缩短工期;通常情况下施工费用较低。实施的关键在于将振动、飞石、粉尘等控制在许可的范围内。

3.4 施工期资源的时间与空间调配

针对混凝土坝加高施工中各项工作的时间与空间调配的特点,除了通过加强现场管理等措施确保工程施工的顺利实施外,通过优化调配与模拟技术实现施工机械的调度、施工进度的制订、混凝土浇筑仓位的编排等目标,可以显著提高调配的效率和优化水平,即开发混凝土坝加高施工模拟与优化系统。系统的主要功能包括系统管理、施工数据管理、施工过程模拟与优化、施工现场管理、施工参数统计与分析、混凝土浇筑虚拟现实等方面^[10]。

4 工程实例应用

上述4项混凝土大坝加高施工关键技术已经在南水北调中线丹江口大坝加高左岸工程中得到了全面的应用,实施效果良好,为工程的顺利建设发挥了重要作用。以下是各项技术应用的基本情况和实施效果的简要总结。

4.1 新浇混凝土的原材料及配合比优化

在工程施工中,为使新浇混凝土更好地与老混凝土结合,通过添加活性材料、表面活性剂、膨胀成分、惰性材料、保水材料等措施优化了混凝土配合比。此外,对新浇混凝土进行分区设计,在新老混凝土结合处设置一个过渡层,通过过渡层混凝土的特殊设计使得新混凝土在浇筑初期性能急剧变化时在结合面形成一个过渡缓冲区,来减弱老混凝土对新浇混凝土的约束,从而实现了良好结合的目的。

4.2 新老混凝土结合

在工程施工中,通过老混凝土表面凿毛、新增人工键槽、增设锚杆、涂刷界面胶、接缝灌浆、混凝土温控等一系列综合措施,有效保证了新老混凝土结合面的处理质量,改善新老坝体之间的传力方式和传力特性,确保了新老混凝土坝体联合作用状态,保障了坝体的安全运行。目前的观测资料表明新老混凝土结合没有开裂。

工程施工中共完成混凝土结合面凿毛 $69\ 053\ \text{m}^2$ 、键槽混凝土切割 $2\ 362\ \text{m}$ 、现浇混凝土 $671\ 398.2\ \text{m}^3$ 、砂浆锚杆 $7\ 924$ 根、锁口锚杆 753 根、接缝灌浆 $44\ 296\ \text{m}^2$ 、涂刷界面密合剂 $12\ 000\ \text{m}^2$ 。

4.3 原有结构体的拆除与转移

工程施工中的老混凝土拆除量高达 26 707.4 m³, 分布于老坝体的多个部位, 拆除施工工期紧、转移难度大、技术要求高。通过以上拆除与转移施工技术的应用, 满足了相关技术要求, 且按计划或提前完工^[9]。特别是在人工键槽施工中, 综合采用液压圆盘锯切割与钻孔静态破碎相结合的方法, 发明了“锯割静裂法”。该方法对保留混凝土体无任何损伤, 显著加快了施工进度(工期仅为传统方法的 50%), 大幅减低了施工成本, 且安全可控、键槽成型精确, 不存在爆炸、冲击、飞石等危险源^[7]。

4.4 施工期资源的时间与空间调配

工程施工作业与枢纽发电、防洪之间存在一定的冲突。为此, 在施工进度计划编制、施工道路安排、大型施工机械布置等方面都进行了有针对性的技术研究, 并制订了有效的实施方案。如汛期不进行贴坡混凝土浇筑、确保汛期防洪道路通畅、给闸门启闭设备预留足够的运行空间等。此外, 通过“丹江口混凝土坝加高施工模拟与优化系统”的开发与应用, 实现了对施工资源、施工进度优化调配和管理, 进一步确保了工程的顺利实施^[10]。

5 结语

混凝土坝加高工程施工相对于新建工程而言, 其施工约束与限制更多、环境更复杂, 对施工技术提出了更高的要求。

文章通过对国内外混凝土坝加高工程施工实践的分析与总结, 讨论了混凝土坝加高施工中的 4 项

关键技术, 即新浇混凝土原材料及配合比优化、新老混凝土结合、原有结构体的拆除与转移、施工期资源的时间与空间调配, 讨论了每一项关键技术的特点与难点、技术要求, 并提出了每一项关键技术的技术措施, 以期今后的混凝土坝加高施工提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] Goblot H. Kébar en iran sans doute le plus ancien des barrages - voûtes: l'An 1300 Environ (Kébar in Iran possibly the oldest arch dam: around 1300 A. D) [J]. Arts et Manufactures (in French), 1965, 154: 43 - 49.
- [2] Toran J. Heightening of existing dams including methods of constructing new dams in successive stages [C]//6th International Commission of Large Dams: v1. Nova York, 1958: 303 - 365.
- [3] 周厚贵. 水电站扩建工程的施工问题与对策 [J]. 湖北水力发电, 2005(2): 1 - 3.
- [4] 朱伯芳, 张国新, 吴龙坤, 等. 重力坝加高中减少结合面开裂措施的研究 [J]. 水利学报, 2007, 38(6): 639 - 645.
- [5] Reed III G E, Steele K A, Stiff M T, et al. RCC for the heightening of San Vicente Dam [J]. International Journal on Hydropower and Dams, 2003, 10(5): 130 - 137.
- [6] 赵志方, 周厚贵, 袁群, 等. 新老混凝土粘结机理研究与工程应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [7] 周厚贵. 丹江口大坝加高新老混凝土结合面人工键槽施工技术 [J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(4): 8 - 10.
- [8] 程润喜, 周厚贵. 新老混凝土结合面新型界面剂的研制 [J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(6): 94 - 96, 101.
- [9] 周厚贵. 混凝土控制拆除施工技术及其在丹江口大坝加高工程中的综合应用 [J]. 中国工程科学, 2009, 11(2): 17 - 21.
- [10] 曹生荣. 复杂条件下混凝土坝施工模拟、优化与工程应用 [R]. 中国葛洲坝集团公司, 2008.

Research on key construction technologies of concrete dam heightening project

Zhou Hougui

(China Gezhouba Group Corporation, Yichang, Hubei 443002, China)

[Abstract] Based on construction practice of worldwide concrete dam heightening project, 4 key construction technologies of concrete gravity dam heightening project by the integral heightening mode on the existing dam by the down stream side and on the dam crest were systematically summarized. The 4 key technologies are concrete

raw materials and mix proportion, jointing between new concrete and existing concrete, controlled demolition and transference of old structures, and resources temporal and spatial allocation during construction period. For each key construction technology, the construction technical difficulties, features and requirements were analyzed, and the technical measures and solving strategies were summarized to provide construction reference for the same type project in the future.

[**Key words**] construction technology; dam heightening; concrete dam; hydraulic and hydropower engineering

(上接 45 页)

Developing and applying of Guangdong Zhongyuan shipbuilding gantry crane with function of turning over ship-section

Huang Yaoyi¹, Wang Jingquan², Zhang Zhihua³, Wang Xu¹

(1. Qinhuangdao Tianye Tolian Heavy Industry Co. Ltd., Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

2. Engineering Institute of Engineer Corporations, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China; 3. Zhengzhou New Dafang Heavy Industry

of Science & Technology Co. Ltd., Zhengzhou 450064, China)

[**Abstract**] The paper briefly introduced the state about the developing and applying successfully of Guangdong Zhongyuan shipbuilding gantry crane with function of turning over ship-section, with the emphasis on the discussion about the technical characteristics and practical value of several new inventions of that new lift equipment and technology. Those include the technique of turning over ship-section in series, the designs for rigid leg in type of double columns tower and sightseeing lift to land up the crane, the design and manufacture technology for the gantry double box-beams designing as divided into two layers, the technology for moving repair crane with the upper lift car, and using double cable sheaves technology for supply low-voltage electric power, etc.

[**Key words**] shipbuilding; crane; development; application