

超高压水道衬砌混凝土施工技术研究

陈艳

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6247

[摘要] 文章系统研究超高压水道衬砌混凝土施工,剖析其独特性能要求,探讨施工面临的制约因素,并详细阐述施工技术应用路径,旨在为超高压水道衬砌工程提供科学、高效的技术方案,保障工程结构安全与长期稳定运行。

[关键词] 超高压水道; 衬砌施工; 混凝土工艺; 技术路径

中图分类号: TV331 **文献标识码:** A

Study on the construction technology of lining concrete for ultra-high pressure channel

Yan Chen

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., LTD

[Abstract] This paper systematically studies the construction process of ultra-high pressure waterway lining concrete, analyzes its unique performance requirements, discusses the constraints facing the construction, and expounds the application path of construction technology, aiming to provide scientific and efficient technical scheme for ultra-high pressure waterway lining engineering, and ensure the safety and long-term stable operation of the engineering structure.

[Key words] ultra-high pressure waterway; lining construction; concrete process; technical path

前言

超高压水道作为水利水电及输水工程的关键设施,承担着高压水流输送任务。其衬砌混凝土质量直接关乎工程整体安全性与耐久性。在超高压环境下,衬砌混凝土需具备特殊性能,施工过程面临诸多挑战,因此深入研究相关施工技术具有重要的现实意义。

1 超高压水道对衬砌混凝土的性能要求

1.1 高抗渗性

在超高压水流作用下,衬砌混凝土必须具备卓越的抗渗性能,以防止水的渗漏引发结构破坏。依据相关标准及工程实践经验,超高压水道衬砌混凝土的抗渗等级需达到W12及以上,即混凝土在1.2MPa水压作用下,6h内不出现渗水现象。通过优化混凝土配合比,如降低水胶比至0.35以下,添加高效减水剂和优质掺合料,能够有效改善混凝土内部孔隙结构,减少连通孔隙,从而显著提升抗渗性能^[1]。同时,在施工过程中,确保混凝土振捣密实,避免出现蜂窝、麻面等缺陷,进一步增强抗渗能力。

1.2 高耐久性

超高压水道长期处于恶劣环境,衬砌混凝土需承受高压水流冲刷、侵蚀以及温度变化等多重作用,故高耐久性至关重要。混凝土的耐久性主要体现在抗冻融、抗化学侵蚀等方面。为提高抗冻性,混凝土抗冻等级应达到F300及以上,可通过掺加引气

剂,引入适量微小气泡,缓解冻胀应力。在抗化学侵蚀方面,针对不同侵蚀介质,选择合适的水泥品种与掺合料。例如,对于硫酸盐侵蚀环境,采用抗硫酸盐水泥,并控制水泥中C₃A含量低于5%,同时掺加粉煤灰、矿渣粉等活性掺合料,提高混凝土的密实度与抗侵蚀能力,延长结构使用寿命。

1.3 高强度性

超高压水道衬砌混凝土需承受巨大水压及其他荷载,因此必须具备高强度。通常设计强度等级在C50及以上。高强度混凝土可通过合理选用原材料实现,采用高强度等级水泥,如P·042.5及以上,同时选择级配良好、质地坚硬的骨料,严格控制骨料的含泥量和泥块含量,分别不超过1%和0.5%。此外,通过优化配合比设计,精确控制水胶比、砂率等参数,确保混凝土在满足工作性能的前提下,达到设计强度要求,保障结构的承载能力与稳定性。

2 超高压水道衬砌混凝土施工制约因素

2.1 施工空间小

超高压水道的结构设计为满足水流高效输送需求,其内部空间往往极为有限。在圆形水道中,直径通常仅为2~5米,这使得施工人员进行模板安装、钢筋绑扎以及混凝土浇筑等核心作业时,活动范围严重受限^[2]。例如,在直径3米的超高压输水隧洞施工环节,施工人员进行模板拼接时,两人之间的操作间距不

足1米,身体的伸展与工具的使用都受到极大阻碍,导致模板拼接过程缓慢,且拼接缝的精度难以把控,偏差时常超出规范允许范围,影响混凝土成型后的外观质量与结构整体性。狭窄的空间极大地制约了施工设备的选择与使用。常规的大型模板吊运设备无法进入,只能采用小型、简易的吊运工具,这不仅吊运效率低下,每次吊运的模板重量与尺寸也大幅受限,增加了模板安装的工作量与时间成本。同时,在混凝土浇筑环节,大型混凝土输送泵车难以靠近作业面,需要通过长距离的管道转接,这不仅增加了堵管风险,还导致混凝土在输送过程中容易出现离析现象,影响浇筑质量。

2.2 安全风险大

超高压水道施工过程中,高压水流带来的安全风险不容忽视。由于水道周边地质条件复杂,在施工过程中,高压水流可能冲破薄弱的围岩,引发涌水、突泥等地质灾害。例如,在超高压水电站引水隧洞施工时,因前方遇到断层破碎带,高压水流瞬间涌入施工区域,在短时间内淹没了部分施工场地,不仅造成施工设备的损坏,还危及施工人员的生命安全。据统计,在类似工程施工中,因涌水、突泥等灾害导致的人员伤亡事故时有发生,严重影响工程进度与施工安全。施工设备在狭窄空间内运行也存在诸多安全隐患。设备之间的安全间距难以保证,稍有不慎就可能发生碰撞事故。例如,在水道内进行模板台车移动时,由于空间狭窄,台车与周边的临时支撑结构发生碰撞,导致支撑结构损坏,模板台车倾斜,对车内施工人员的生命构成严重威胁。同时,在高空作业方面,超高压水道衬砌施工中,部分作业面位于水道顶部,距离底部地面数米甚至数十米,若防护设施不完善,如安全网破损、安全带固定不牢等,施工人员一旦失足,将面临高空坠落的巨大风险^[3]。施工中大量电气设备的使用,在潮湿的作业环境下,容易发生漏电事故,进一步增加了安全风险。

2.3 技术要求高

超高压水道衬砌混凝土施工的每一个环节都对技术有着严苛要求。在混凝土配合比设计阶段,不仅要满足高强度、高抗渗、高耐久性的性能需求,还需考虑施工环境因素。例如,在寒冷地区施工时,混凝土配合比要兼顾抗冻性能与低温施工的工作性能,需要精确调整外加剂的种类与掺量,如添加适量的防冻剂,确保混凝土在低温环境下能够正常凝结硬化,同时保证其强度增长符合设计要求。

在混凝土浇筑过程中,对浇筑温度、分层厚度、振捣时间等参数的控制极为关键。若浇筑温度过高,混凝土内部水化热反应剧烈,容易导致温度裂缝的产生;若分层厚度过大,下层混凝土振捣不密实,影响整体结构强度;振捣时间不足或过长,都会使混凝土出现蜂窝、麻面或过振离析等缺陷。以超高压水道衬砌工程为例,因浇筑过程中未严格控制分层厚度,部分区域分层厚度达到60cm,远超30~50cm的规范要求,在后续检测中发现这些区域混凝土内部存在大量空洞,严重影响结构质量,不得不进行返工处理。

3 超高压水道衬砌混凝土施工技术应用路径

3.1 模板优化技术

针对超高压水道施工空间狭小的难题,除采用高强度、轻质的铝合金模板外,还可进一步探索复合材料模板的应用。例如,碳纤维增强复合材料模板,其具有质量轻、强度高、耐腐蚀等优点,能够有效减轻模板的搬运难度,同时提高模板的使用寿命。在模板设计方面,利用先进的计算机辅助设计(CAD)技术,对模板进行精确建模,模拟不同工况下模板的受力情况,从而优化模板的结构布局,增强模板的稳定性。在模板安装过程中,除运用全站仪进行高精度定位外,还可引入三维激光扫描技术。该技术能够快速获取模板安装位置的三维数据,与设计模型进行实时对比,精准检测模板的安装偏差,及时进行调整,确保模板定位偏差控制在极小范围内^[4]。同时,为提高模板的拼接效率与精度,研发专用的模板拼接夹具,该夹具能够快速固定模板拼接部位,保证拼接缝紧密贴合,减少漏浆风险。

3.2 混凝土制备技术

混凝土制备环节需进一步精细化控制,以满足超高压水道衬砌混凝土的特殊性能要求。在原材料选择上,水泥应优先选用强度等级不低于42.5的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,其初凝时间不早于45min,终凝时间不迟于600min。粗骨料宜采用连续级配,最大粒径不超过25mm,压碎指标不大于10%,针片状颗粒含量不超过5%。细骨料采用中砂,细度模数在2.3~3.0之间,含泥量不超过2%,泥块含量不超过0.5%。外加剂选用高效减水剂,减水率不低于20%,含气量控制在3%~5%^[5]。除严格把控上述原材料质量外,还可引入新型掺合料,如纳米二氧化硅。纳米二氧化硅的平均粒径一般在15~30nm,比表面积高达200~600m²/g,其活性SiO₂含量不低于98%,能够填充混凝土内部的微小孔隙,改善混凝土的微观结构,进一步提高混凝土的强度、抗渗性和耐久性。在配合比设计阶段,运用正交试验设计方法,全面考虑水胶比、砂率、掺合料掺量、外加剂用量等多个因素对混凝土性能的影响。水胶比一般控制在0.28~0.35之间,砂率根据粗骨料的种类和最大粒径在38%~45%范围内调整。纳米二氧化硅的掺量通常为胶凝材料总量的1%~3%,外加剂用量则根据其减水率及混凝土工作性能要求,经试验确定,一般为胶凝材料总量的0.8%~1.5%。通过多组试验确定最优配合比,使混凝土在满足设计强度等级(C50及以上)的同时,具备良好的抗渗性(抗渗等级P12及以上)和耐久性(抗冻等级F300及以上)。在混凝土搅拌过程中,采用智能搅拌控制系统,实时监测搅拌过程中的各项参数。搅拌时间一般不少于120s,当采用二次搅拌工艺时,初次搅拌时间为60~90s,静置时间为15~30min,再次搅拌时间为60~90s,确保原材料充分混合均匀。搅拌速度根据搅拌机类型和混凝土配合比进行调整,强制式搅拌机的搅拌速度一般为20~30r/min,自落式搅拌机为18~22r/min。原材料用量通过高精度电子秤计量,计量误差控制在:水泥±1%、骨料±2%、外加剂±1%、掺合料±1%。在混凝土运输过程中,利用混凝土搅拌运输车的智能温控系统,实时监测并调节混凝土的温度。夏季高温时,通过罐体喷淋降温等措施,确保混凝土在到达施工现场时,温度不超过25℃;冬季低温时,

采用罐体保温材料包裹及内置加热装置等手段,使混凝土温度不低于15℃,确保混凝土在运输过程中保持良好的工作性能,避免因温度变化导致坍落度损失过大或混凝土凝结时间异常。

3.3混凝土浇筑技术

在超高压水道狭窄空间内进行混凝土浇筑,需不断创新浇筑方法与设备。除选用小型、灵活的泵送设备外,还可研发自适应管道输送系统。该系统能够根据水道的形状、尺寸以及施工进度,自动调整管道的布置与输送参数,提高混凝土输送的效率与稳定性。例如,在弯道较多的水道段,系统可自动调整管道的弯曲半径和泵送压力,确保混凝土顺利通过。在浇筑过程中,采用多点振捣技术,即在混凝土浇筑面上均匀布置多个振捣点,通过智能控制系统协调各振捣点的振捣时间与频率,确保混凝土振捣密实。同时,利用超声波检测技术,实时监测混凝土内部的密实情况,一旦发现混凝土内部存在空洞或不密实区域,及时调整振捣参数或采取补振措施。水电站引水隧洞设计压力12MPa,内径4.5m,洞长3.2km,包含12处急弯段(曲率半径<5D)。隧洞衬砌采用C60纤维混凝土,厚度400mm,需在狭窄空间内完成全断面浇筑,混凝土密实度要求 $\geq 98\%$ (超声检测波速 $\geq 4200\text{m/s}$)。在混凝土浇筑过程中,使用超声波检测技术进行质量评估,全隧洞累计检测1280个断面,发现并处理空洞/不密实区域23处,一次检测合格率从89%提升至97%。为确保混凝土浇筑的连续性,避免出现冷缝,建立混凝土浇筑信息化管理平台。该平台实时监控混凝土搅拌站的生产情况、运输车辆的位置与行驶路线、施工现场的浇筑进度等信息,根据实际情况合理安排混凝土的生产与运输,保证下层混凝土初凝前完成上层混凝土的浇筑。此外,在浇筑大体积混凝土时,采用预埋冷却水管的方式,通过循环冷却水带走混凝土内部的水化热,控制混凝土内部温度上升,防止因温度应力导致混凝土开裂。

3.4混凝土养护技术

混凝土养护对于保障超高压水道衬砌混凝土的质量与性能起着关键作用。在保湿养护方面,除传统的覆盖土工布并定期洒水外,可采用新型保湿养护材料,如保水薄膜。保水薄膜具有良好的保水性能,能够在混凝土表面形成一层封闭的保湿层,减少水分蒸发,且操作简便,能够适应复杂的施工环境。在温控养护方面,利用分布式光纤温度传感器,构建混凝土内部温度监测网

络。该网络能够实时、准确地监测混凝土内部不同位置的温度变化情况,通过数据分析处理,及时发现温度异常区域,并采取相应的温控措施。结合智能温控系统,根据混凝土内部温度与环境温度的变化,自动调节养护措施。例如,当混凝土内部温度与表面温度差值接近25℃时,系统自动启动通风设备,加强空气流通,降低混凝土内部温度;当环境温度过低时,系统自动开启加热装置,对养护环境进行升温,确保混凝土在适宜的温度条件下进行养护。此外,在养护过程中,利用无损检测技术,如回弹法、超声回弹综合法等,定期检测混凝土的强度增长情况,根据强度增长趋势调整养护时间与养护措施,确保混凝土强度达到设计要求。

4 结语

超高压水道衬砌混凝土施工技术的研究与应用,对于保障水利水电及输水工程的安全运行具有重要意义。通过深入分析超高压水道对衬砌混凝土的性能要求,充分认识施工制约因素,并采取针对性的施工技术应用路径,能够有效提升施工质量与效率,降低安全风险。然而,随着工程建设的不断发展,超高压水道衬砌混凝土施工技术仍需持续创新与完善,以适应更为复杂的工程环境与更高的质量要求。

【参考文献】

- [1]郑尧.超高压水道衬砌混凝土施工技术研究[J].水电站设计,2023(3):77-82.
- [2]加武将.水下C45混凝土施工工艺与质量管理研究——以洪奇沥特水道大桥桩基施工为例[J].现代装饰,2022(31):115-117.
- [3]于耀飞,王忠岱,马士力.航道整治护滩结构的混凝土单元排施工模具刚度特性研究[J].水道港口,2022(2):186-191.
- [4]农一铭.农田水利工程灌溉防渗渠道衬砌施工技术分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(2):57-60.
- [5]夏仁强.引水工程中隧洞全断面衬砌施工技术分析[J].现代工程科技,2024(19):65-68.

作者简介:

陈艳(1983—),女,汉族,四川绵阳人,新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司,高级工程师,本科,主要从事水利工程设计工作。