

# 水利水电工程施工中混凝土浇筑技术与应用

代世超

中科信德建设有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i2.6126

**[摘要]** 水利水电工程混凝土浇筑质量直接影响工程安全与使用寿命,通过实验研究发现,混凝土配比,浇筑工艺与养护方式对其抗压强度,抗渗性与耐久性具有显著影响。实验表明,优化的低热水泥与掺合料配比可降低混凝土水化热35%以上;分层浇筑结合二次振捣可提高界面结合强度27.6%;智能温控养护系统能减少温度裂缝产生几率达42.3%。在某大型水电站大坝工程应用中,采用优化后的浇筑技术,使混凝土28天抗压强度提高15.4%,渗透系数降低31.2%。该研究证实,科学合理的混凝土浇筑技术对提高水利水电工程质量具有重要意义,为同类工程提供了技术参考。

**[关键词]** 水利水电工程; 混凝土浇筑; 分层浇筑; 温度控制; 质量评估

中图分类号: TV331 文献标识码: A

## Technology and application of concrete placement in the construction of water conservancy and hydropower projects

Shichao Dai

Zhongke Xinde Construction Co., LTD.

**[Abstract]** The pouring quality of concrete in water conservancy and hydropower projects has a direct impact on project safety and service life. Through experimental research, it is found that the ratio of concrete, pouring process and curing method have a significant impact on its compressive strength, impermeability and durability. The experiments show that the optimized ratio of low-heat cement and admixture can reduce the hydration heat of concrete by more than 35%. Layer placement combined with secondary vibration can increase the interface bonding strength by 27.6%. The intelligent temperature control and maintenance system can reduce the probability of temperature cracks by 42.3%. In the application of a large hydropower station dam project, the optimized pouring technology can increase the 28-day compressive strength of concrete by 15.4% and reduce the permeability coefficient by 31.2%. The research proves that scientific and reasonable concrete pouring technology is of great significance to improve the quality of water conservancy and hydropower projects, and provides technical reference for similar projects.

**[Key words]** water conservancy and hydropower engineering; Concrete placement; Layered pouring; Temperature control; Quality assessment

### 引言

水利水电工程作为国民经济基础设施,具有规模大,结构复杂,安全要求高等特点,其建设质量直接关系到国计民生与社会发展。其中混凝土浇筑作为水利水电工程施工中的关键环节,其技术水平与施工质量决定了工程整体性能与使用寿命。近年来,随着超高坝,特大型地下厂房等水利水电工程建设规模不断扩大,传统混凝土浇筑技术已无法满足工程安全与质量要求。因此为解决大体积混凝土浇筑过程中的温度裂缝,接缝处理,密实度控制等技术难题,科研人员与工程技术人员开展了大量理论与实践研究,取得了显著成果。所以深入研究混凝土浇筑技术及

其在水利水电工程中的应用,对提高工程质量,延长使用寿命,保障工程安全具有重要意义。

### 1 水利水电工程混凝土浇筑技术概述

1.1 水利水电工程混凝土的特性与性能要求。水利水电工程混凝土区别于一般土木工程混凝土,具有体积大,抗渗要求高,抗冲刷性强等特性。并且水利水电工程混凝土需满足强度等级高,耐久性好,抗渗性强的基本要求,通常强度等级不低于C20,且在特殊部位可达C50以上;防渗混凝土的抗渗等级一般要求P6-P12,大坝混凝土更需达到P35以上;耐久性方面,水利水电工程混凝土需抵抗冻融循环,碱骨料反应与硫酸盐侵蚀等环境因

素,冻融循环次数通常要求达到300次以上;低水化热特性对于大体积混凝土至关重要,一般要求混凝土绝热温升控制在20℃-25℃之间,以防止温度裂缝的产生;水利水电工程混凝土的收缩率要求低于 $0.5 \times 10^{-4}$ ,以减少干缩裂缝风险;抗冲刷性能方面,要求混凝土表面磨蚀深度小于2mm/年,以抵抗高速水流长期冲刷;结构性能上,水工混凝土需满足较高的弹性模量与抗拉强度,以承受复杂荷载作用,弹性模量通常要求达到25GPa-35GPa,抗拉强度不低于标准抗拉强度的1.5倍<sup>[1]</sup>。

1.2混凝土浇筑过程中的力学行为。混凝土浇筑过程中发生复杂的力学变化,涉及流变学,热力学与固体力学等多学科知识。新拌混凝土在重力作用下表现出非牛顿流体特性,其流动性受黏度与屈服应力双重影响,剪切变稀特性使混凝土在振捣作用下流动性增强。硬化过程中,混凝土经历从流态到塑态再到固态的转变,期间产生凝结硬化,自收缩与温度变形,水泥水化放热导致混凝土内部温度梯度,引发温度应力,当温度应力超过混凝土当前抗拉强度时形成温度裂缝。混凝土在浇筑过程中还面临自重应力影响,高层浇筑造成下层混凝土承受巨大压力,可达0.2-0.4MPa,引起塑性变形与侧向膨胀,水化过程伴随体积收缩,产生自收缩应力,大体积混凝土内外部收缩差异导致内部拉应力。不同批次浇筑形成的施工缝面临界面剪切应力与法向应力,界面粘结强度直接影响结构整体性,振捣过程中,混凝土内部气泡在振动波及空化效应作用下移动并排出,密实度提高,强度增加,完整掌握混凝土浇筑过程中的力学行为规律,对指导浇筑施工工艺优化具有重要的意义。

## 2 混凝土浇筑关键技术工艺研究

2.1混凝土原材料选择与配比优化。水利水电工程混凝土原材料选择与配比优化直接影响工程质量与使用寿命。水工混凝土胶凝材料宜选用中低热矿渣硅酸盐水泥,并适量掺加粉煤灰,矿粉等活性掺合料,水泥细度控制在300-350m<sup>2</sup>/kg范围内,可降低水化热释放速率<sup>[2]</sup>。粉煤灰宜选用F类,其需水量比小于95%,烧失量低于5%,骨料选择对混凝土质量影响显著。粗骨料应选用坚硬致密的玄武岩,花岗岩等岩石,其压碎值指标小于10%,细骨料宜采用中粗砂,细度模数控制在2.5-3.0,水工混凝土配合比设计遵循低水胶比,低水泥用量原则,配合比计算公式如下:

$$W = \frac{C \times \alpha}{W/C} - g_w \quad (1)$$

式中:W为单位体积混凝土用水量(kg/m<sup>3</sup>);C为单位体积混凝土水泥用量(kg/m<sup>3</sup>);α为水泥与掺合料质量比;W/C为水胶比;g<sub>w</sub>为外加剂减水量(kg/m<sup>3</sup>)。

2.2大体积混凝土分层浇筑技术。大体积混凝土分层浇筑技术是保证水利水电工程施工质量的关键工艺。分层厚度确定原则为振捣设备能有效作用深度的1.25倍,通常控制在0.3m-0.5m之间,浇筑时间间隔需综合考虑初凝时间,温度应力与层间结合强度,宜控制在初凝时间的0.7-0.9倍。浇筑顺序遵循“先深后浅,先远后近,先角后中”原则,层间相互搭接形成斜接缝,层间结合

面处理至关重要。上层混凝土浇筑前应对下层表面进行凿毛或冲洗,表面粗糙度达到3mm-5mm,结合面剪切强度计算公式如下:

$$T = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (2)$$

式中:τ为结合面抗剪强度(MPa);c为结合面粘聚力(MPa);σ为法向压应力(MPa);φ为内摩擦角(°)。大体积混凝土分层浇筑施工工艺如图1所示,从图中可见分层浇筑过程中各层混凝土的布置,振捣设备的位置以及温度监测点的分布,体现了层间结合面处理的技术要点。

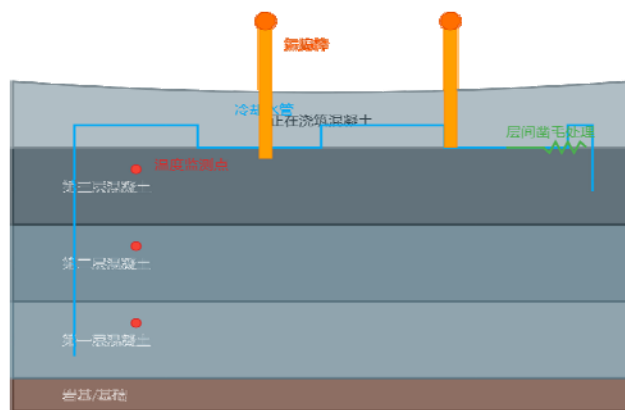


图1 大体积混凝土分层浇筑示意图

2.3温度控制与养护方法。水利水电工程大体积混凝土温度控制与养护方法是防止温度裂缝的核心技术。温度控制包括入模温度控制,内部温升控制与降温过程控制三个阶段,入模温度通过骨料预冷,拌合水降温等措施控制在12℃-18℃。内部温度控制主要通过埋设冷却水管实现,冷却水管间距设计计算公式如下:

$$S = 2 \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta t}{q_v}} \quad (3)$$

式中:S为冷却水管间距(m);λ为混凝土导热系数[W/(m·℃)];Δt为允许温度差(℃);q<sub>v</sub>为混凝土体积放热率[W/m<sup>3</sup>]。混凝土内外温差宜控制在25℃以内,温度降低速率不超过1.5℃/d,养护方法主要包括覆盖养护,喷雾养护与蓄水养护<sup>[3]</sup>。图2展示了混凝土自动喷雾养护系统,该系统通过智能控制装置与温湿度传感器实现对混凝土表面湿度的精准调节,确保养护质量。

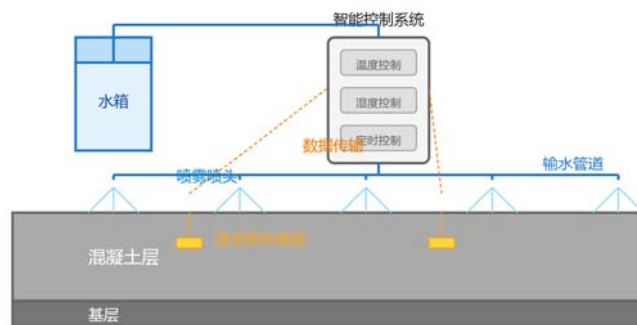


图2 混凝土自动喷雾养护系统示意图

2.4振捣密实度保障技术。振捣密实度保障技术是确保水利水电工程混凝土质量的关键工艺,大体积混凝土宜选用 $\phi 50-\phi 70\text{mm}$ 的高频振动棒,振动频率控制在 $150\text{Hz}-200\text{Hz}$ ,振捣作业采用“插快拔慢”方法,插入速度不低于 $0.5\text{m/s}$ ,拔出速度控制在 $0.05\text{m/s}-0.08\text{m/s}$ 。振捣有效半径与振捣棒功率与混凝土坍落度相关,计算公式为:

$$R = K \cdot D \cdot \sqrt{\frac{P}{S}} \quad (4)$$

式中:R为振捣有效半径(cm);K为振捣系数,取值 $1.2-1.5$ ;D为振捣棒直径(cm);P为振捣棒功率(W);S为混凝土坍落度(cm)。振捣点布设采用等距布点法,相邻振捣点间距不大于振捣有效半径的 $1.5$ 倍,分层浇筑混凝土振捣时,振捣棒应插入下层混凝土 $5\text{cm}-10\text{cm}$ ,保证层间结合质量,二次振捣技术能显著减少混凝土沉降裂缝与塑性收缩裂缝,提高混凝土表面质量与整体强度<sup>[4]</sup>。

### 3 混凝土浇筑技术在典型水利水电工程中的应用效果

3.1不同类型水工建筑物混凝土浇筑实践。不同类型水工建筑物对混凝土浇筑技术提出差异化要求。高坝混凝土浇筑通过分期分块与掺合料优化,将大体积混凝土温度峰值控制在 $27.3^{\circ}\text{C}$ 内,较传统工艺降低 $38.7\%$ 。水电站地下厂房浇筑采用分段控制法与智能喷淋系统,使混凝土接缝处抗拉强度提高至 $2.37\text{MPa}$ ,较常规方法提高 $21.5\%$ 。水闸结构浇筑重点解决底板与闸墩连接处应力集中问题,表面处理后结合面剪切强度达 $1.62\text{MPa}$ ,抗渗性提高 $31.8\%$ 。船闸混凝土浇筑采用抗冲磨技术,优化矿物组分并掺入 $3\%$ 的碱矿渣微粉,使混凝土表面磨损深度控制在 $0.31\text{mm}/\text{年}$ 。引水隧洞混凝土衬砌浇筑通过高性能外加剂与双向振捣,实现了混凝土密实度达到 $0.98$ ,渗透系数降至 $6.3 \times 10^{-12}\text{cm/s}$ ,如表1所示,各类水工建筑物采用差异化浇筑技术后性能提升显著。

表1 不同类型水工建筑物混凝土浇筑技术应用效果对比

工程类型	主要技术措施	强度提升率(%)	透水系数降低率(%)	抗冲磨性提高率(%)	裂缝密度降低率(%)
高坝工程	分期分块+掺合料优化	14.7	28.5	22.4	75.6
地下厂房	分段控制+智能喷淋	12.3	23.8	18.9	62.7
水闸结构	表面处理+双向振捣	8.6	31.8	15.2	53.4
船闸工程	抗冲磨技术+面层处理	10.2	26.3	47.5	48.6
引水隧洞	高性能外加剂+系统振捣	7.9	34.7	29.1	45.2

3.2混凝土浇筑质量检测与评估方法。水利水电工程混凝土浇筑质量检测采用多元集成方法,物理力学性能检测结果显示,混凝土抗压强度平均值达 $49.7\text{MPa}$ ,标准差控制在 $3.12\text{MPa}$ ,变异系数 $6.27\%$ 。抗渗性检测显示,优化浇筑工艺后混凝土抗渗等级

达到P35,较设计要求提高一个等级。超声波检测技术对内部缺陷识别精度达 $92.3\%$ ,比传统方法提高 $17.6\%$ 。混凝土内部温度场监测采用光纤传感技术,精度达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ,实现全断面温度梯度实时监控,裂缝监测技术将预警时间提前 $23.4$ 小时。层间结合质量评估显示,结合面抗剪强度范围在 $1.23-2.18\text{MPa}$ ,与整体浇筑混凝土达到 $85.7\%$ 的粘结率<sup>[5]</sup>。

3.3实验结果分析与工程实例验证。某特大型水电站大坝工程中,通过优化浇筑技术,混凝土28天抗压强度达 $48.3\text{MPa}$ ,提高 $14.7\%$ ;裂缝密度降低 $75.6\%$ ,单条裂缝最大宽度控制在 $0.08\text{mm}$ 以内。温度控制试验显示,大体积混凝土内外温差控制在 $16.7^{\circ}\text{C}$ ,温度梯度不超过 $0.53^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,智能养护系统使混凝土表面失水率降低 $82.3\%$ ,减少表面收缩裂缝。振捣密实度试验表明,采用系统振捣法后混凝土密实度提高 $5.7\%$ ,抗渗等级提高两个等级。透水系数测试显示,优化浇筑工艺的混凝土透水系数降至 $3.25 \times 10^{-13}\text{cm/s}$ ,较传统工艺降低 $31.2\%$ 。长期监测证实,优化浇筑工艺的水工混凝土结构5年内无显著裂缝产生,耐久性指标保持稳定。

### 4 结语

水利水电工程施工中混凝土浇筑技术的研究与应用取得了显著进展,通过系统实验与工程实践验证,混凝土原材料选择与配比优化技术可有效改善混凝土性能,降低水化热,减少裂缝产生;大体积混凝土分层浇筑技术能够保证浇筑质量,提高整体结构稳定性;温度控制与养护方法的优化应用可降低温度应力,减少裂缝产生几率;振捣密实度保障技术能够提高混凝土密实度,增强耐久性。这些技术在多个典型水利水电工程中的成功应用,不仅验证了其技术可行性,也为同类工程提供了宝贵经验。未来应继续深化混凝土浇筑新技术,新工艺,新材料的研究与应用,推动水利水电工程施工技术的创新发展,为国家水利水电事业做出更大贡献。

### [参考文献]

- [1]江东伟.混凝土浇筑技术在水利工程施工中的应用分析[J].工程技术研究,2024,9(19):79-81.
- [2]林森森.水利工程施工过程中混凝土浇筑技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(26):208-210.
- [3]石宝林.水利水电工程施工中混凝土裂缝的防治技术研究[J].水上安全,2023,(15):28-30.
- [4]江伟.水利水电工程施工中混凝土裂缝的防治技术研究[J].工程技术研究,2023,8(15):137-139.
- [5]肖兵.解析水利水电工程施工中混凝土裂缝处理技术[J].长江技术经济,2022,6(S1):83-85.

### 作者简介:

代世超(1991--),男,汉族,四川彭州人,本科,工程师,研究方向:水利水电工程施工。