

经过一系列的调查、识别与考核，最终确定了该工程主要风险为：施工管理风险、施工技术风险、施工作业风险、施工法律风险，并且将这些作为一级指标构建风险识别体系。其中，白鹤滩水电站应用了世界单机容量最大的百万千瓦机组，技术风险最为突出。在风险识别环节，继续识别出了其设备制造风险、安装风险、材料供应稳定性风险、特殊工种作业安全风险、超大型构件吊装风险等二级指标。通过一系列操作，精准识别水利水电工程施工中隐藏的风险因素，为后续评估风险，加强风险的应对提供了有力支持。

#### 4.2 使用合适方法，科学评价风险

在水利水电工程施工项目风险管理中，工作人员要根据风险识别结果进一步科学评估工程施工风险，评估各风险的相对重要性，从而为进一步加强施工风险管理提供支持。风险评估，关键在于根据工程实际情况分析风险事件发生给你的可能性，预期风险事件发生之后可能造成的影响及其程度。风险评估方法较多，如：主观评分法、层次分析法、故障树分析法等。工作人员应根据水利水电工程的实际施工情况选择合适的评价分析方法。本文认为，层次分析法（AHP）通过构建层次结构模型，将复杂的风险问题分解为目标、准则和方案，不仅让风险可能一目了然，更为加强风险控制提供准确支持<sup>[2]</sup>。比如，在“JSJ工程”的四座水电站中，工作人员利用层次分析法确定各风险可能，具体为：

（1）安全风险属于“较大风险”，需重点管控；（2）质量风险、自然风险等被评定为“一般风险”。同时，该工程工作人员使用故障树分析法（FTA）进一步进行复杂的风险隐患分析，深入分析了溪洛渡水电站的高拱坝混凝土温度裂缝产生的原因，聚焦关键控制点。通过科学开展评价，聚焦水利水电工程施工项目风险的主要矛盾，将有限精力投入到更高风险部分，从而确保工程施工的顺利推进。

#### 4.3 针对制定措施，灵活应对风险

在风险评估基础上，工作人员应制定针对各类风险事件的实施方案，从而降低风险事件发生概率，弱化风险事件发生的不良影响。一般，针对不同可能性的风险事件，采取的应对措施有回避、减轻、分担和转移。以JSJ工程为例，其工程施工技术挑战极高，风险应对须具备较强的灵活性和针对性。其中，乌东德水电站工程中，有“最薄300米级特高拱坝”的工序施工，一旦发生大体积混凝土温度裂缝，发生施工质量与技术风险，不仅严重耽误工序，更影响整个项目的施工效果。因此，工作人员针对这种可预见严重后果的风险，优先采用技术手段回避该风险。具体方法为：创新应

用低热水泥混凝土。与此同时，在常规的水利水电工程单项施工中，也聚焦高压线下作业、深基坑开挖等高风险活动，灵活调整“减轻策略”“分担策略”与“转移策略”，制定针对性较强的施工专项方案，加强施工现场监督，从而有效减轻风险。比如，向家坝工程中，在重型机械中安装GPS定位和倾角传感器，控制临近高压线作业，有效减轻这方面的风险<sup>[1]</sup>。

#### 4.4 制定具体风险管理制度，完善风险管理保障机制

健全完善的风险管理制度，是确保水利水电工程施工项目风险管理落实的重要保障性条件。本文认为，应建立覆盖水利水电工程全生命周期的风险管理制度，分别设计契合工程实际情况的风险识别制度、风险评估制度、风险监控制度、风险应对制度等。在各项制度中，要清晰罗列风险识别、评估、监控与应对的操作流程、控制标准等，确保各岗位人员遵循制度协同配合，共同完成高质量的风险控制。比如，设立直属于项目经理部的风险管理组，从制度层面界定专职安全工程师、地质工程师和设备监理师的工作范围、职责、参与环节、配合要求。再比如，在施工现场落实风险交底“三不放行”原则，贯彻执行未交底不放行、交底不清不放行、措施未验不放行的制度。

### 5 结语

综上所述，风险管理是水利水电工程施工顺利推进的重要环节，直接关系到工程建设社会效益与经济效益。通过研究探讨发现，水利水电工程施工的项目风险影响因素较多，单一的风险应对措施并不足以满足风险管理需求，而是要从识别环节入手，加强风险识别与评估，科学开展有效的风险管理应对，同时以完善的保障制度确保有序开展各项风险管理工作，将风险隐患扼杀在源头，切实提升水利水电工程施工项目风险管控水平。未来，将继续深入研究水利水电工程施工项目风险管理的深入开展，制定更全面的风险管理制度体系与应对机制，通过风险管理提升工程综合效益，促进水利水电工程的持续发展。

#### 参考文献

- [1] 张建林. 基于风险管理的水利施工项目管理策略优化分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (30): 190-192.
- [2] 孙鹏, 张玮, 许言超. 水利水电工程施工项目风险管理探讨[J]. 山东水利, 2025, (04): 28-30.
- [3] 郑泽棉. 水工建筑物类水利工程项目施工风险影响因素评价与管理研究[J]. 水利科技与经济, 2024, 30(12): 103-107.

# Application of High Strength Prestressed Concrete in Water Conveying Tunnel

Yan Hao

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

## Abstract

As critical infrastructure for inter-regional water resource allocation and urban water supply, water conveyance tunnels endure prolonged exposure to internal water pressure, surrounding rock loads, and hydrological cycles. Traditional concrete is prone to cracking-induced leakage, compromising both structural safety and water delivery efficiency. High-strength prestressed concrete (PSC), engineered with pre-applied compressive stress, effectively counteracts tensile stresses during service life, thereby enhancing crack resistance, load-bearing capacity, and durability. This study examines the application advantages of PSC in water conveyance tunnels, detailing its implementation in critical components including tunnel linings, branch pipe sections, and maintenance wells. Through case studies, the research validates PSC's effectiveness, providing actionable insights for structural optimization and long-term stability in water conveyance tunnel projects.

## Keywords

high strength prestressed concrete; water conveyance tunnel; lining structure; crack resistance; durability

## 高强度预应力混凝土在输水隧洞内的应用

郝艳

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川·成都 611130

## 摘要

输水隧洞作为跨区域水资源调配、城市供水的核心基础设施,需长期承受内水压力、围岩荷载及干湿循环作用,传统混凝土易出现裂缝导致渗漏,影响工程安全与输水效率。高强度预应力混凝土通过预先施加压应力,可有效抵消服役期拉应力,提升结构抗裂性、承载能力与耐久性。本文结合输水隧洞的工程特性,分析高强度预应力混凝土的应用优势,阐述其在隧洞衬砌、岔管段、检修井等关键部位的具体应用形式与技术要点,并结合工程案例验证其应用效果,为输水隧洞工程的结构优化与长期稳定提供参考。

## 关键词

高强度预应力混凝土; 输水隧洞; 衬砌结构; 抗裂性; 耐久性

## 1 引言

随着水资源供需矛盾加剧,长距离、大口径输水隧洞工程建设规模不断扩大(如我国南水北调中线穿黄隧洞、引汉济渭秦岭输水隧洞)。此类隧洞多穿越复杂地质环境,服役期间需承受内水压力(通常 0.5-2.0MPa)、围岩不均匀变形荷载,且水流长期冲刷易导致混凝土碳化、钢筋锈蚀,传统 C30-C40 普通混凝土衬砌因抗裂性能不足,常出现贯穿性裂缝,引发渗漏问题——某输水隧洞工程统计显示,普通混凝土衬砌投运 5 年内渗漏率高达 15%-20%,需频繁维修,增加工程运维成本。

高强度预应力混凝土(通常采用 C50-C80 混凝土,配合后张法或先张法施加预应力)通过在结构内部建立预压应

力,可使混凝土在承受内水压力等拉应力时,始终处于压应力状态,从根源上抑制裂缝产生。近年来,该技术在输水隧洞关键部位的应用逐步推广,其技术优势与工程适配性已成为行业研究重点。

## 2 高强度预应力混凝土在输水隧洞内的应用优势

相较于普通混凝土,高强度预应力混凝土在输水隧洞场景下的优势集中体现在抗裂性、承载效率与耐久性三方面,具体如下:

### 2.1 显著提升抗裂性能,解决渗漏难题

输水隧洞衬砌的裂缝主要由内水压力产生的环向拉应力诱发。普通混凝土的抗拉强度仅为抗压强度的 1/8-1/10(如 C40 混凝土抗拉强度约 3.5MPa),当内水压力较大时,衬砌易出现环向裂缝;而高强度预应力混凝土通过施加环向预应力(通常控制预压应力值 2-4MPa),可完全抵消内水压

【作者简介】郝艳(1990-),女,中国甘肃白银人,本科,工程师,从事水利水电施工技术及管理研究。

力产生的拉应力，使混凝土始终处于压应力状态，抗裂系数提升 3-5 倍。某试验数据显示，C50 预应力混凝土衬砌在 1.2MPa 内水压力下无可见裂缝，而同等条件下 C40 普通混凝土衬砌已出现宽度 0.2mm 的贯穿裂缝<sup>[1]</sup>。



图 2-1 高强度预应力混凝土钢绞线安装

## 2.2 降低结构厚度，优化隧洞断面

高强度混凝土的抗压强度可达 C50-C80（抗压强度 50-80MPa），配合预应力作用，可大幅提升结构承载效率。在相同内水压力与围岩荷载下，高强度预应力混凝土衬砌厚度可较普通混凝土减少 30%-40%——以直径 8m 的输水隧洞为例，普通混凝土衬砌厚度需 800-1000mm，而 C50 预应力混凝土衬砌厚度仅需 500-600mm，不仅减少混凝土用量（降低工程成本 15% 左右），还可增大隧洞过流断面，提升输水能力。

## 2.3 增强耐久性，延长服役寿命

输水隧洞中的水流可能含氯离子、硫酸盐等腐蚀性介质，普通混凝土裂缝会加速介质渗透，导致钢筋锈蚀、混凝土劣化；高强度预应力混凝土因无裂缝或微裂缝闭合，可阻断介质渗透路径。同时，高强度混凝土本身密实度高（孔隙率较普通混凝土降低 20%-30%），抗碳化能力、抗冻融能力更强。工程监测表明，高强度预应力混凝土衬砌在干湿循环、冻融循环环境下，50 年耐久性指标衰减率仅为普通混凝土的 1/4，预期服役寿命可延长至 100 年以上。



图 2-2 高强度预应力混凝土浇筑成型

## 3 高强度预应力混凝土在输水隧洞的关键应用部位与技术要点

根据输水隧洞的结构功能与受力特点，高强度预应力混凝土主要应用于衬砌结构、岔管段、检修井三大关键部位，不同部位的预应力施加方式与技术要求存在差异。

### 3.1 隧洞衬砌结构：环向预应力为主，分段施工控制

衬砌是输水隧洞的核心受力结构，需承受环向内水压力与径向围岩荷载，采用后张法环向预应力体系，技术要点如下：

1. 混凝土强度与配合比：选用 C50 高强度混凝土，胶凝材料用量控制在 450-550kg/m<sup>3</sup>，掺入硅灰、超细矿粉改善密实度；粗骨料采用 5-25mm 连续级配花岗岩，确保抗压强度与弹性模量匹配（弹性模量 ≥ 3.6 × 10<sup>4</sup>MPa）。

2. 预应力筋布置：采用 Φs15.2 钢绞线（抗拉强度 1860MPa），沿衬砌环向布置，间距 150-200mm；为避免预应力损失，采用“两端张拉+分级张拉”工艺，张拉控制应力取 0.75f<sub>ptk</sub>（f<sub>ptk</sub> 为钢绞线抗拉强度标准值），分级顺序为 20%σ<sub>con</sub> → 50%σ<sub>con</sub> → 100%σ<sub>con</sub>，每级张拉后持荷 5min，确保应力稳定<sup>[2]</sup>。



图 3-1 预应力钢绞线分级张拉

3. 施工缝处理：隧洞衬砌按 11.84m 分段浇筑，施工缝处设置环向止水带与预应力筋衔接装置，避免分段处出现应力集中导致裂缝；浇筑时采用滑膜施工工艺，控制混凝土坍落度 180-200mm，振捣密实度（密实度 ≥ 98%），减少内部孔隙。

### 3.2 岔管段：双向预应力体系，应对复杂应力

输水隧洞岔管段（如分岔、汇流部位）因断面突变，承受双向（环向+径向）复杂应力，易出现应力集中，需采用双向预应力混凝土体系，技术要点如下：

1. 预应力体系设计：环向采用钢绞线束（同衬砌结构），径向采用精轧螺纹钢（直径 32mm，抗拉强度 930MPa），形成“环向+径向”交叉预应力网，预压应力值根据有限元应力分析确定（环向 3-4MPa，径向 2-3MPa）。