

U型薄壳预应力渡槽模架系统应用研究

戴涛辉

(中铁十二局集团第七工程有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要 本文以向家坝灌区北总干渠工程为背景, 针对大跨度U型薄壳预应力混凝土渡槽的施工技术难点, 系统研究了支架现浇体系的设计、施工工艺及质量控制方法, 通过工程实践, 验证了钢支撑/托架+贝雷梁组合支架的稳定性与适用性, 分析了预应力张拉、混凝土浇筑等关键工序的技术要点, 总结了施工中的高空作业安全经验, 旨在为类似工程提供有益参考。

关键词 U型渡槽; 薄壳渡槽; 支架; 托架; 贝雷梁

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.10.010

0 引言

向家坝灌区工程是川南地区重要的水利基础设施, 其北总干渠段渡槽设计流量达 $93 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大架空高度 76 m , 采用大跨度U型薄壳预应力混凝土结构, 具有截面尺寸大、荷载复杂、施工精度要求高等特点。传统现浇支架体系在高空、大跨度条件下易出现变形失控、安全隐患等问题。赵启强通过岷河供水一期工程高石梯渡槽特点以及现场实际条件, 对高渡槽的槽身现浇支架搭设及垂直运输方案进行了优化, 介绍了高渡槽现浇支架的设计、施工及其成套运输系统^[1]。王卫星对高渡槽现浇支架施工技术进行了设计、施工及试验研究^[2]。本文结合工程实践, 探讨钢支撑/托架+贝雷梁组合支架的设计及应用, 以期为类似工程提供重要参考。

1 工程概况

1.1 结构特点

向家坝灌区北总干渠渡槽均为简支结构, 单跨跨度为 $42 \text{ m}/30 \text{ m}$, 槽身直径为 8.3 m , 壁厚仅有 0.35 m , 采用C50预应力混凝土^[3]。槽身纵向设横向拉杆(间距 2.5 m), 并配置双向预应力钢绞线, 纵向采用 $12 \sim 15.2 \text{ mm}$ 钢绞线, 环向采用扁形塑料波纹管(内尺寸 $90 \times 22 \text{ mm}$)。

1.2 施工难点

(1) 高空作业风险: 最大架空高度 76 m , 支架稳定性要求高; (2) 大跨度荷载: 单跨槽身混凝土方量达 613 m^3 , 支架最大承受 1.1 倍施工荷载进行预压; (3) 薄壁结构精度: 槽身直壁高 3.45 m , 模板安装误差需控制在 $\pm 5 \text{ mm}$ 内。

2 支架现浇体系设计与施工

2.1 支架选型与设计

在渡槽槽身支架现浇体系的布置过程中, 本研究遵循安全性、科学性、经济合理性及施工便捷性的基本原则。在材料选择方面, 优先考虑通用性强、可重复利用且易于维护的材料, 以确保资源的有效利用和工程的可持续性。在结构设计方面, 力求受力路径清晰、构造措施完善, 并确保各环节便于施工验收, 从而提升工程的整体质量^[4]。此外, 模板及模板支架的搭设严格遵循国家相关规范与标准, 确保施工过程的安全性和合规性。同时, 本研究结合工程实际条件, 充分借鉴了既有施工经验, 以优化设计方案并提高施工效率^[5]。综合考虑, 本工程采用“钢支撑+三角托架+贝雷梁”组合体系(见图1)。

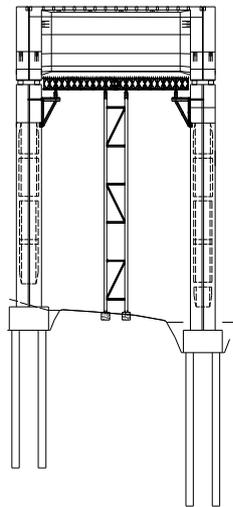


图1 钢支撑+三角托架+贝雷梁示意图

1. “钢支撑+三角托架+贝雷梁”组合体系如下: (1) 钢支撑: 跨中布置 6 根 $\phi 609$ mm 钢管柱, 缀条采用 20 槽钢, 单柱承载力 $\geq 1\ 600$ kN; 20 槽钢, 单柱承载力 $\geq 1\ 600$ kN; (2) 托架: 桥墩侧设置双拼 I40 工字钢三角托架, 锚固采用 $\phi 32$ 精轧螺纹钢; (3) 贝雷梁: 纵向布置 13 榀 26 片贝雷梁, 横向间距 0.5 m, 通过 U 型螺杆与分配梁固定。

2. 设计控制要点包括: (1) 刚度控制: 支架弹性变形 $\leq L/400$ (L 为跨度); (2) 安全冗余: 预压荷载按 1.1 倍施工荷载 (2 392 t) 分级加载, 消除非弹性变形。

2.2 关键施工技术

1. 支架预压与变形监测。预压分三级 (50%、75%、110%), 采用砂袋与钢筋堆载; 观测点沿槽身轴线布设, 监测弹性变形 (均值 15.2 mm) 与非弹性变形 (均值 8.5 mm); 预拱度按二次抛物线分配, 最大预拱值 22 mm。

2. 模板系统安装。内模采用液压可调式整体钢模, 外用分节拼装, 接缝误差 ≤ 1 mm; 附着式振捣器 (1.5 kW) 按 2 m 间距布设, 确保薄壁混凝土密实。

3. 预应力施工控制。钢绞线锚下控制应力 0.75 fpk (1 395 MPa), 采用两端同步张拉; 孔道压浆采用真空辅助工艺, 浆体强度 $\geq M40$, 泌水率 $\leq 1\%$ 。

3 支架现浇体系验算

向家坝灌渠北总干渠渡槽槽身支架现浇体系的设计与验算采用了三维有限元分析 (3D Finite Element Analysis, FEA) 与结构力学计算相结合的方法, 以确保支架现浇体系在施工及运行阶段的稳定性与安全性。首先, 通过三维有限元模型对支架现浇体系进行精细化模拟, 全面考虑其在实际荷载作用下的应力分布、变形特性及稳定性表现, 从而为设计优化提供科学依据。其次, 结合结构力学理论, 对关键设计参数 (如支座反力、弯矩分布及节点连接强度等) 进行定量计算, 确保其满足相关规范要求及工程实际需求。通过两种方法的相互验证与补充, 不仅提高了设计方案的可靠性, 还为施工过程中的质量控制提供了理论支持^[6-8]。

3.1 三维有限元验算

支架现浇体系三维有限元复核计算选取会诗沟渡槽第三根槽墩与第四根槽墩之间的贝雷梁、槽墩、侧托架及钢管桩支架建立整体计算模型。此跨贝雷梁具有最大跨度, 且槽墩及钢管桩支架高度最大, 为渡槽施工过程中的最危险结构。验算侧托架和钢管桩支架

的稳定性, 这里采用大型商业有限元软件 ABAQUS 对其进行三维有限元计算复核。支架现浇体系整体结构三维有限元模型详见图 2。



图 2 钢支架现浇体系整体结构三维有限元模型

整个模型共有实体单元 16 872 个, 梁单元 79 502 个。经计算, 最高支架在仅受到上部贝雷梁传递的重力荷载作用 (工况一) 时, 最大应力约为 55.75 MPa; 在受到上部贝雷梁传递的重力荷载与风荷载组合作用 (工况二) 时, 最大应力约为 57.26 MPa。在钢管桩屈曲失稳薄弱位置分析过程中, 1~4 s 时, 钢管桩和斜撑的应力逐渐增大, 而斜撑先于钢管桩达到设计屈服强度 306 MPa, 同时钢管桩和斜撑塑性等效应变在第 4 s 的时候才开始变化, 表现为斜撑先于钢管桩发生等效塑性应变。通过在靠近钢管桩底部增加斜撑后, 钢管桩和斜撑几乎同步达到设计屈服强度, 支架整体受力性能满足要求。

3.2 结构力学计算

根据渡槽结构形式及三维有限元计算分析成果, 现浇支架跨径布置分为以下 4 种: 3+12+2 m、3+6+2 m、3+9+2.75 m、3+12+2.75 m。(1) 支架标准截面布置 13 榀 26 片贝雷梁, 贝雷梁在中间格构柱上方纵向采用错位搭接方式布置。槽台处现浇支架跨径布置为 0.44+1.19 m; 2 支架标准截面布置 26 根 I40b 工字钢; (2) 贝雷梁下方布置 3I40 工字钢或 2I40 工字钢作为下横梁; 在下横梁下方, 钢管立柱顶或托架上弦杆上方布置 $\phi 60$ cm 高 70 cm 落架砂箱; (3) 支架中间立柱采用 2×6 根或 6 根 $\phi 609$ mm 壁厚 16 mm 钢管结构, 缀条采用 [20 槽钢, 连接耳板采用 15 mm 钢板; (4) 桥墩侧支架采用三角托架支撑, 托架采用 I40 工字钢, 拉杆采用 $\phi 32$ 精轧螺纹钢, 剪力销采用 $\phi 90$ mm 的 45 号特种钢。

结构力学计算主要包括: 验算荷载、贝雷梁验算、贝雷梁受力分析、贝雷梁强度验算、工字钢下横梁验算、钢管柱验算等。根据计算可知, 贝雷梁最大弯矩为 8 209.85 kN·m, 最大剪力为 3 455.56 kN, 弯矩安全系数为 2.11 > 1.20, 剪力安全系数为 1.56 > 1.20, 即贝雷梁强度的满足要求; 工字钢下横梁的最大弯矩为 248.61 kN·m, 最大剪力为 619.57 kN, 弯矩安全

系数为 $4.19 > 1.20$ ，剪力安全系数为 $3.59 > 1.20$ ，即工字钢下横梁的强度满足要求；钢管柱的最大轴力为 $1\,244.95\text{ kN}$ ，最大轴力安全系数为 $7.30 > 1.20$ ，格构柱平面内整体稳定时，最大为 $0.137 < 0.905$ （根据长细比 λ 和钢材类型查《钢结构设计规范》附录D），即钢管柱强度及剪刀撑布置满足要求。

4 施工过程与质量控制

4.1 混凝土施工

（1）分层浇筑：底板→腹板→顶板，单次浇筑高度 $\leq 1.5\text{ m}$ ；（2）温控措施：入模温度 $\leq 30\text{ }^\circ\text{C}$ ，内外温差 $\leq 15\text{ }^\circ\text{C}$ ，采用麻布覆盖养护7天。

4.2 质量验收标准

（1）钢筋安装：间距偏差 $\leq 15\text{ mm}$ ，保护层厚度偏差 $\pm 5\text{ mm}$ ；（2）支架垂直度：钢管柱偏差 $\leq L/1\,000$ （ L 为柱高），最大允许值 15 mm 。

5 高空作业安全措施

高空作业安全措施是水利渡槽施工安全管理的关键环节，需针对关键危险源构建多层次防控体系。本工程通过系统化安全设计实现了风险要素的精准管控：

（1）支架结构失稳防控方面，采用分级预压技术验证承载性能，首阶段实施1.2倍施工荷载静载预压（持续72小时）；（2）建立每日巡检制度，检测钢支撑关键焊缝质量，高强螺栓连接检测；（3）高空坠落防护方面，设置组合式防护系统：作业平台外围安装可拆卸钢制护栏（立杆间距 $\leq 2\text{ m}$ ，横杆三道设置），内侧铺设阻燃型密目安全网（目数 $\geq 2\,000\text{ 目}/100\text{ cm}^2$ ），搭设之字形钢制安全爬梯（踏步步距 $\leq 30\text{ cm}$ ，倾斜角 $\leq 50^\circ$ ），同时实施双保险措施，除强制使用五点式安全带（冲击力 $\leq 6\text{ kN}$ ）外，还增设水平生命线系统（钢丝绳直径 $\geq 8\text{ mm}$ ，锚固间距 $\leq 12\text{ m}$ ）。

6 应用效果与经验总结

本文依据向家坝灌区北总干渠6座渡槽工程作为典型大跨度U型薄壳渡槽集群，总长 1.7 km 的39跨槽身施工中全面采用“钢支撑/托架+贝雷梁现浇体系”，其技术创新与工程管控经验具有重要示范价值。在模架体系实施阶段，项目团队通过三阶段技术验证确保系统可靠性：首先运用ABAQUS软件构建三维有限元模型，模拟渡槽施工全过程荷载传递路径，优化支撑间距和连接节点构造；其次基于结构力学原理建立荷载分配模型，重点计算钢支撑立柱的偏心受压稳定性和贝雷梁组合刚度；最后通过1.2倍设计荷载的实体预压试验，监测弹性变形实测模架弹性变形量（最

大 15.2 mm ）与理论值偏差控制在5%以内，验证了计算模型的准确性。其应用效果及经验总结如下：（1）工期优化：采用3套模板流水作业，单孔槽身施工周期缩短至72天。（2）经济性：支架材料周转利用率达85%，节约成本约12%。（3）技术创新：提出“非对称荷载下贝雷梁错位搭接”方法，减少跨中弯矩15%。

（4）改进建议：探索BIM技术辅助支架受力模拟；优化预应力孔道定位工艺，减少穿束阻力。

7 结论与展望

向家坝灌区工程北总干渠渡槽施工实践表明，“钢支撑/托架+贝雷梁现浇体系”的应用为大跨度U型薄壳渡槽施工提供了有效解决方案。该体系通过模块化钢支撑与贝雷梁的优化组合，形成了具有良好空间刚度的复合支撑结构，既能满足U型薄壳渡槽高精度成型要求，又可适应复杂地形条件下的荷载传递特点。在施工过程中，贝雷梁通过标准化组装形成连续承重平台，显著提升了大跨径施工的稳定性和安全性。针对未来发展方向，建议在支撑体系关键节点布设光纤光栅传感器，构建基于BIM技术的智能监测平台，实时采集支架应力、位移及环境参数，通过云计算进行结构安全评估与预警。同时可结合无人机倾斜摄影技术，建立三维地形模型，优化支架布置方案，推动现代水利工程建造技术向数字化、智慧化方向迈进。

参考文献：

- [1] 赵启强. 槽身模板支架及成套运输系统在高渡槽施工中的应用[J]. 四川水力发电, 2017, 36(06): 75-78, 92.
- [2] 王卫星. 黄家湾水利枢纽拱式渡槽支架设计与计算分析[J]. 铁道建筑技术, 2022(12): 94-97.
- [3] 肖云伟. 向家坝灌区渡槽桩基静载试验检测方案比较研究[J]. 四川水利, 2022, 43(03): 56-58.
- [4] 黄朝伟. 大跨度高排架梁式渡槽槽身施工方案分析[J]. 水利技术监督, 2024(03): 299-302.
- [5] 郭延辉, 袁晶, 练尧杰. 贝雷支架在高排架大跨度渡槽施工中的应用研究[J]. 青海交通科技, 2022, 34(06): 71-82.
- [6] 朱江. 大悬臂现浇盖梁支架体系受力有限元分析[J]. 广州建筑, 2025, 53(01): 50-54.
- [7] 李士强. 贝雷梁支架与普通型钢支架在现浇箱梁施工中的应用对比分析[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(34): 89-92.
- [8] 魏永平, 粟学平, 丁振亚, 等. 支架支撑体系中贝雷梁的研究进展[J]. 科技与创新, 2023(23): 96-98.