

新藏项目输水工程中长隧洞衬砌施工技术的研究和实践

徐伟

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南省郑州市

摘要：本文结合具体工程实例探究了一种新型长隧洞衬砌施工技术，详细分析了长隧洞衬砌施工的要点，包括缝面处理、测量放线、钢筋制安、模板制作与安装、预埋件安装以及混凝土浇筑等关键步骤。通过技术的创新应用有效提高了施工的效率，并且确保了施工的质量和安全。本文的研究结果可为类似工程的施工提供有价值的参考。

关键词：输水工程；长隧道衬砌；施工技术

引言

引水隧洞是输水工程的主要组成项目之一，长期以来由于输水隧洞断面小，长隧方案难以实施，常成为项目方案比选的重点，也是项目施工的控制点。现阶段，水电市场开发逐渐向偏远地区转移，而山区施工往往受地形条件的限制，所以给整体施工布置带来了较大的难度。但小水电站引水隧洞二次衬砌一直是比较难处理的一个问题，空间小、距离长、工期短、投入大且工程变更频繁，无形中增加了施工成本。因此探究一种新型的长隧洞衬砌施工技术具有重要的意义和作用。

1 技术研究背景

本项目依托新藏水电站首部枢纽工程。引水隧洞全长1920.830m。引水隧洞边顶拱衬砌混凝土强度等级C20，钢筋制安约125t，衬砌混凝土约1500m³。根据现场实际，如果采用购买厂家定做衬砌台车，由于隧洞断面尺寸的限制，钢模台车造价高，二次利用率低；如果采用现衬砌现搭设模板的传统老工艺，则每个衬砌段施工都要进行搭拆一次，工作面转化时间长，则功效低；后经技术研究，经过对衬砌模架的设计、计算、校核，并带领现场作业人员对衬砌模架进行制作，改造。将二衬模架从固定式提升到移动式。结合了传统排架法和钢模台车的优点，制作成了符合项目适用的移动式固定模板支架。通过制作改良衬砌模架，引水隧洞二衬衬砌长度的选择更加切合实际，施工班组与人数的配置、辅助工器具的配置得以简化，移动的二衬模架对钢筋混凝土质量控制、混凝土外观缺陷处理也起到了一定的作用。

2 新藏项目输水工程中长隧洞衬砌施工技术要点分析

长隧洞衬砌施工工艺流程为：缝面处理→测量放线→钢筋制安→止水安装→预埋件安装→钢模台车就位→堵头模板支立→混凝土入仓浇筑→拆模→养护。

2.1 缝面处理

布置好施工用电、供水管至工作面，Ⅱ、Ⅲ类围岩洞段每次清理长度90m，Ⅳ、Ⅴ类围岩洞段每次清理长度不超过2个洞段。先清理边顶拱，采用高压风水冲洗支护面，清除浮渣、松散体。

底板清理先用反铲进行粗清，自远端后退扒拢堆渣，集中后装车外运。之后人工用铁锹或耙锄、撬棍等将活动残留碎石、浮渣、淤泥、杂物等人工集中后配合装载机进行整体清理运送到洞内自卸车上，再用洞内自卸车运送到洞外弃渣场。废渣清运后用高压水清扫基岩面，使开挖基面露出干净清晰的基岩面，以便地质工程师查看地质结构分布和验收，并将积水排干。引水隧洞欠挖部位及设计高程以上残留的孤石可采用电镐凿除，若欠挖较多且岩石较为坚固，可采用小孔径微量装药控制爆破处理。如果引水隧洞底板因地质原因超挖，按规定上报监理部。

在底层混凝土强度达到2.5MPa以上时进行，采用混凝土冲毛机冲毛结合人工进行凿毛，缝面处理标准：粗砂微露，表面无乳皮、无松动颗粒。

2.2 测量放线

基面处理合格后，用全站仪测放洞轴线、边墙外边线、桩号线、高程等，所有测量结果均在洞壁上作明显标志，以便钢筋绑扎和立模。

2.3 钢筋制安

全断面混凝土衬砌段钢筋底板及边顶综合考虑，尽量利用钢筋定尺长度，减少损耗。钢筋在加工厂内按照施工图纸和技术规范，对钢筋原材料进行配料、加工，加工后的钢筋分型号堆放、标识。钢筋加工完成后，根据施工需要采用汽车运输至工作面附近。人工抬运至工作面安装。在架力筋上标示钢筋间距，依此间距安装主筋，分布筋依据主筋上标示的间距绑扎，绑扎点呈梅花形布置。钢筋安装应特别注意钢筋保护层的大小、两层钢筋的层间距及止水边第一根钢筋的位置准确。

2.4 模板制作与安装

2.4.1 支架台车组装

1) 脚手架搭设：先安排测量人员对脚手架立杆位置进行测量放线，然后施工人员根据测量人员放线点位搭设支撑架，施工脚手架在浇筑好的隧洞底板上搭设，立杆间距a为0.6m，排距为0.6m，步距b为1.4m，距离底部20cm设置扫地杆，脚手架底部

均设置18#工字钢，工字钢间距0.6米，工字钢之间用工字钢焊接，立杆与工字钢采用电焊焊接，工字钢底部安装行走轮；

2) 承重支架顶部采用凹型可调托撑调整至拱架底部高程，拱架安装从上游向下游进行，座在立柱托撑上，拱架之间用Φ48钢管做剪刀撑连接；

3) 模板的安装

每组模板分侧模、顶模，侧面模板就位：先将侧面模板就位，靠钢筋侧立，侧模分段加工，现场拼装；安装顶拱钢管拱架；拼装钢模：平面模板采用3015钢模拼装；侧模调整加固：侧模最大侧向荷载52.36KN/m²，侧模加固计算：采用Φ48mm钢管对撑

加固，部分利用承重支架横杆，对撑钢管按压杆计算， $\frac{N}{\varphi A} \leq f$

， $\lambda = \frac{\ell_0}{i} = 103$ ， $\varphi = 0.566$ ，对撑水平间距0.6m，环向间距

0.6m，底部圆弧模板有向上浮力，增加拉杆内拉措施，拉杆直径12mm，斜向下拉，最后进行加固；

2.4.2 台车就位

台车按照设计要求调整到位，台车通过装载机作为动力将其推行到预定施工位置，再通过人工推动台车达到准确位置；如图1所示。

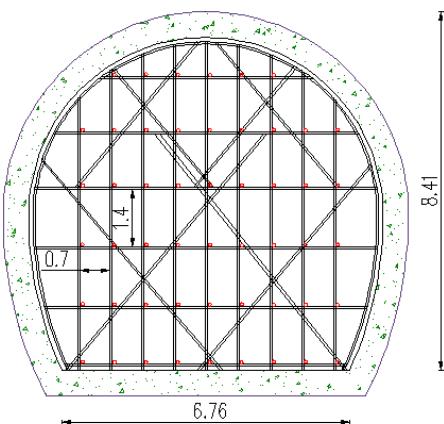


图1是本支架衬砌结构示意图。

支架设计计算：平面模板：3015钢模+钢管背肋+支撑系统。钢管背肋间距0.6m。

荷载计算：支架所承受荷载包括：钢筋混凝土、排架自重荷载，浇筑、倾倒混凝土及振捣时产生的荷载等。

①模板受力计算：

模板受力分三类，拱顶隧洞中心线两侧各4.0m范围内模板可视为承重模板，主要承受混凝土垂直压力；轴线上半部其它模板则兼受垂直压力和侧压力，以侧压力为主；洞轴线以下模板兼受侧压力和混凝土上浮力。

1) 垂直荷载

垂直压力主要为单位面积内钢筋混凝土衬砌重量，按最大厚度，该段隧洞采用型钢拱架支护，超挖较少，拱形顶部距离中线较远部位厚度较大，约为0.8m。

钢筋混凝土自重： $P_1 = 24 \times 0.8 = 19.2 \text{ KN/m}^2$ ，荷载分项系数1.2；

模板自重：单块3015钢模重21.93kg， $P_2 = 0.49 \text{ kN/m}^2$ ，荷载分项系数1.2；

泵送混凝土泵管出口距模板较近，泵送冲击力不计；

振捣混凝土荷载标准值4.0kN/m²，荷载分项系数1.4；

作用在顶模上的垂直荷载 $P = 1.2 \times (24 \times 0.8 + 0.49) + 4.0 \times 1.4 = 29.23 \text{ kN/m}^2$ 。

2) 侧压力

混凝土侧向最大浇筑高度约8.4m。作用于模板最大侧压力取下列两式的最小值：

$$F = 0.2 \gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 V^{1/2} ,$$

$$F = \gamma_c H$$

F：新浇混凝土对模板最大侧压力；

γ_c ：混凝土重力密度，取24KN/m³；

t_0 ：新浇混凝土初凝时间， $t_0 = \frac{200}{T + 5}$ ，T为混凝土温度，浇筑时间约为2019年3月~2019年5月最低气温时段，根据现场温控条件，T可取10℃；

V：混凝土浇筑上升速度，取0.5m/h；

β_1 ：外加剂影响修正系数，不具缓凝作用，取1.0；

β_2 ：混凝土坍落度影响修正系数，坍落度140mm~160mm，取1.15；

H：混凝土浇筑总高度：取8.6m。

代入以上两式，取小值得34.3KN/m²，

考虑混凝土入仓产生的荷载4.0KN/m²、振捣产生的4.0KN/m²荷载及荷载分项系数，则模板最大侧向荷载 = $1.2 \times 34.3 + 1.4 \times 4 + 1.4 \times 4 = 52.36 \text{ KN/m}^2$ ，侧压力有效压头2.18m。

3) 模板浮力

底板至轴线侧向模板有下拱形状，承受混凝土上浮力，上浮力为混凝土对模板面压力在高度方向分力，面压力按(2)公式计算，混凝土浇筑上升速度按0.5m/h控制，为34.3KN/m²，模板加固采用拉杆，拉杆方向与模板面板垂直，或水平与垂直方向同时加固。

4) 侧模受力验算：

模板最大侧向荷载52.36KN/m²，模板采用3015钢模板，模板面板按三跨连续梁计算，计算跨度0.5m，宽度0.3m计算， $q = 15.71 \text{ KN/m}$ 。抗拉强度=205N/mm²， $I = 26.97 \text{ cm}^4$ ， $W = 5.94 \text{ cm}^3$ 。

$$M = 0.1 q^2 = 0.1 \times 15.71 \times 0.5 \times 0.5 \text{ kN.m} = 0.39 \times 106 \text{ N.mm}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = 66 \text{N/mm}^2 < 205 \text{N/mm}^2, \text{满足要求。}$$

$f = \text{系数} * ql^4/100EI = 0.677 * 15.71 \times 5004/100 \times 2.1 \times 105 \times 26.97$
 $\times 104 = 0.1 \text{mm} < \frac{\ell}{400} = 1.25 \text{mm, 满足要求。}$

5) 顶部模板受力

根据《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范 (JGJ130-2011)》及支架设计参数, 荷载如下:

作用在顶模上以上垂直荷载 $P = 1.2 \times (24 * 0.8 + 0.49) + 4.0 \times 1.4 = 29.23 \text{kN/m}^2$

模板面板按三跨连续梁计算, 计算跨度 0.5m, 宽度 0.3m 计算, $q = 29.23 \times 0.3 = 8.77 \text{KN/m}$ 。

抗拉强度 = 205N/mm², $I = 26.97 \text{cm}^4$, $W = 5.94 \text{cm}^3$ 。

$$M = 0.1q^2 = 0.1 * 8.77 * 0.5 * 0.5 \text{kN.m} = 0.22 \times 106 \text{N.mm}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = 37 \text{N/mm}^2 < 205 \text{N/mm}^2, \text{满足要求。}$$

$f = \text{系数} * ql^4/100EI = 0.677 * 8.77 \times 5004/100 \times 2.1 \times 105 \times 26.97$
 $\times 104 = 0.07 \text{mm} < \frac{\ell}{400} = 1.25 \text{mm, 满足要求。}$

②支撑钢管立杆计算

荷载根据《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范 (JGJ130-2011)》及支架设计参数, 荷载如下:

1) 作用在顶模上以上垂直荷载 $P = 1.2 \times (24 \times 0.8 + 0.49) + 4.0 \times 1.4 = 29.23 \text{kN/m}^2$

2) 支架自重荷载标准值 2.5kN/m², 脚手板自重荷载标准值 0.35kN/m², 其他配件自重荷载标准值 0.5kN/m², 荷载分项系数 1.2。

3) 施工人员荷载标准值: 3.0kN/m², 施工设备为集中荷载, 折算为 2.0kN/m², 荷载分项系数 1.4。

洞内无风荷载等水平荷载, 垂直荷载合计值:
 $① + ② + ③ = 39.71 \text{kN/m}^2$

2.5 预埋件安装

橡胶止水带按设计图纸要求位置安装, 将止水带牢靠地夹在模板中。止水带的中间空腔体安装在接缝处, 其空腔体中心线与接缝线偏差要满足规范要求。不允许在止水带上任意钉钉子或穿孔, 尤其是在空腔体附近, 更应严格禁止。为防止混凝土振捣时止水带受振时发生定位、翘曲等问题, 每隔 1m 左右用铅丝将止水带固定 (只允许在边缘穿孔) 在钢筋上, 同时采用 $\Phi 6 \text{mm}$ 钢筋加工的止水带卡子固定止水带。橡胶止水带接头采用粘合剂粘

接, 粘接前先将止水带表面上的污垢清洗干净, 粘接前将粘接面打毛。连接前用高标号汽油将止水带粘接面清洗干净。用专用粘剂刷 2 ~ 3 遍, 每次干燥时间约 10 分钟, 将两块橡胶止水带接头粘接面对粘, 然后用木块击打, 使其粘牢。搭接长度不小于 20cm。

采用 $\Phi 50 \text{mm}$ PVC 管, 按设计位置采用扎丝绑扎固定在内外钢筋网上。管道安装要求外口紧贴岩面; 内口位置与混凝土表面吻合, 以便紧贴模板, 管口绑扎彩条布封堵, 防止浇筑时混凝土进入管内堵塞灌浆管。

2.6 混凝土浇筑

从低向高依次浇筑, 先铺 2 ~ 3cm 厚水泥砂浆, 混凝土铺料厚度控制在 50cm, 边墙两侧对称铺料浇筑, 以免台车发生偏移。每铺筑一层先通过工作窗采用插入式振捣器 ($\phi 50$ 棒) 振捣工作窗附近, 主要振捣方式为附着式振捣, 开动附着式振捣器, 振捣时间 30 ~ 60s, 通过工作窗观察, 以砼不再显著下沉并开始泛浆、无明显气泡溢出为准。底板混凝土初凝后, 铺土工布对混凝土表面进行洒水养护; 顶拱脱模后喷水养护。养护时间 28d。隧洞二次衬砌工作量大、工期较短、质量要求高, 且有增加衬砌工程量可能性。选择合适二衬施工工艺及合理的施工资源配置, 对本工程的完好履约会有可靠保障。

新老砼层间结合部, 在砼浇筑前必须先铺 2~3cm 厚水泥砂浆, 水泥砂浆要求铺满、铺匀, 且在新老砼层间结合面要加强振捣, 砼分层厚度为 30~40cm, 混凝土采用 $\Phi 50$ 软轴振捣器振捣, 在砼每一位置的振捣时间, 每一位置的振捣时间以 60s 为宜。钢模台车在混凝土强度达到 50% 方可脱模 (冬季拆模时间为混凝土浇筑完 3d 天, 夏天拆模时间为 40h 以上)。

结语

通过新藏水电站引水隧洞的混凝土衬砌施工完成, 自制式钢模支架在二衬混凝土施工中的应用, 自制式钢模支架使每仓引水隧洞二衬衬砌长度的选择更加符合实际生产需求, 施工作业班组与人数的配置、辅助工器具的配置得以简化、二衬模板与堵头模板的选择与使用更加规格化, 为钢筋混凝土质量控制提供了有效帮助。

参考文献

- [1] 刘晓波. 南水北调配套引水隧洞衬砌关键施工技术 [J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2021, 21(01):33~37.
- [2] 张彦. 小断面引水隧洞衬砌裂缝成因及施工处理措施 [J]. 四川建材, 2021, 47(01):127~128.
- [3] 阿里木江, 李明, 张鹏等. 特小断面长隧洞快速衬砌施工技术研究 [J]. 四川水力发电, 2020, 39(04):38~41.