

# 水利工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工解析

龙伟

广东省基础工程集团有限公司

**摘要：**众所周知，在水利工程中最为复杂的施工就是隧洞施工，相比于其他隧洞的施工而言，水利工程隧洞整体运行更加繁杂，一般需要涉及多种手段来进行加固处理。因此，为了更好的探究水利工程中隧洞的高质量施工，本文与具体案例相结合，围绕衬砌加固、喷锚支护加固以及隧洞衬砌的具体结构复核计算等层面展开，针对隧洞衬砌、喷锚支护的加固情况展开详细分析和探究，希望能为有关人员提供参考。

**关键词：**水利工程；隧洞衬砌；喷锚；支护加固

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.21.066

## 前言

现阶段，我国存在着水利资源不均衡分布的情况，该问题直接导致区域之间的经济发展存在巨大失调。因此，要想进一步促进缺水地区和干旱地区之间的经济得到稳定发展，就需要充分重视区域间的输水工程。水利工程隧洞的衬砌加固工艺以及施工开挖，已经不单单成为水利建设的重点，也成了当下各行各业密切关注的焦点所在。本文围绕某水利工程项目展开，深入分析和探讨了隧洞加固施工以及衬砌修补的技术研究。

## 一、工程概况

本文以某输水工程项目中的水库灌区工程改造项目为例，该工程主要由输水隧洞、输水暗渠以及输水明渠共同构成输水线，输水隧洞8.12km长；隧洞围岩中部分属于风化灰岩，岩石相对破碎，节理裂隙发育，岩体的完整性较差，透水性中等，有明显的渗漏情况。按照GB 50487—2008《水利水电工程地质勘察规范》（2022年版）相关规定，将围岩分为IV类和III类，且局部稳定性不高，不进行支护干预可能会出现塌方和掉块等情况，因此要想使得这项输水工程可靠性以及施工质量提升，就需要对隧洞衬砌展开修补和加固。

## 二、隧洞衬砌技术在水利隧洞加固的应用

针对上述工程隧洞中所暴露出来的问题，在保证投资成本稳定和施工技术可行的前提之下，借助修补加固方案来对混凝土衬砌展开处理，在既有的设施基础上合理增设钢衬里，使得原衬砌强度进一步提升，见图1。此种措施会使得隧洞内孔的直径进一步降低，可以保证隧洞中不同位置的受力均匀。同时，将钢管置于需要进行加固和强化的区域，在上述措施的干预下，首次衬砌基础之上形成了一层钢衬层；钢衬层以及首次衬砌间还要保证一定的间隙，旨在用于垫毡和防水操作，保证两次衬砌有较强的粘接强度，还需要确保钢衬层以及首次衬砌受力的均匀性以及连续性。此外，要想提高隧洞围

岩的实际承载力，让工程隧洞应用寿命进一步延长，保证隧洞工程安全性，具体的施工方案如下。

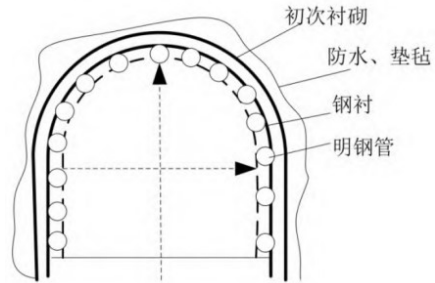


图1 隧洞衬砌修补加固的结构示意

## （一）输水工程隧洞衬砌结构复核计算

考虑到隧洞工程整体运行期较为持久，因此在对其展开衬砌加固修补之前，首先要对衬砌结构不同力学参数进行明确，并对其展开复核计算。本项目中的隧洞在运行过程中以荷载组合的形式为主，衬砌重量、围岩压力、外水和内水压力等因素使其实现了平衡，综合考虑上述因素展开详细复核计算<sup>[1]</sup>。在测算内水压力的时候，可以和压力管道最末端、调压井间涉及的水力包络联系相结合，测量面设为剖面。在选取外部水压系数的时候，需要和隧洞设计状况相结合，选择隧洞中最高处的地下水位折减作为基础系数；围岩压力则需要和普通法相结合展开计算，计算过程中不用涉及折减问题。基于上述基础上，按照相关荷载计算相关原理，对隧洞钢筋混凝土衬砌面原理展开详细负荷，最后再进行二次校核，根据隧洞混凝土衬砌没有产生的裂缝展开考量，本工程隧洞主要以双层钢筋混凝土衬砌组成，在此前提之下对混凝土应力展开复核即可。

## （二）安设模板

以本项目工程为例，隧洞断面相对较小，且原材料在施工运输中的条件较差，所以隧洞不同位置所选择的模板不一样，比如隧洞的边墙部位主要以木质模板为主，拱顶主要以铝合金模板为主，而封头模板则以木质可定型加固的模板为主。但是不管是哪种类型的模板，实际安设过程中均要保证严密接缝、表面光滑，且有较高的刚度以及稳定性。在使用拱架之前需要在样台上提前进行拼装演示，且使用过程中要反复进行检查，若是存在位移或者变形等情况的，需要及时调整。拱架外缘还需要借助围岩和支撑结构来进行辅助，避免混凝土衬砌在实际浇筑过程中出现拱架变形情况；模板的接头部位还要确保整齐和平顺，特别是岩壁和挡头板间的间隙需要堵实。

### （三）制作安装钢筋

在本项目中，隧洞主要以分层、分段衬砌的手段来进行加固衬砌，先将隧洞断面的钢筋进行分段，分为两段后展开底板施工操作，再针对顶拱和边墙展开施工，其中涉及的钢筋必须统一完成加工，可以借助自卸汽车来将材料运输到现场完成安装工作，底板钢筋先完成安装，浇筑完底板混凝土之后，再展开顶拱和边墙的安装，人工来对钢筋的焊接与绑扎进行操作。

### （四）混凝土衬砌

在进行混凝土衬砌的过程中，同样需要分段处理，顺序为底拱、边墙、顶拱，最开始从隧洞的进口逐步浇筑，一直到出口截至。在此过程中，需要确保混凝土衬砌中的净空大小、断面尺寸、标高以及中线等满足设计相关要求；在隧洞口周围布设一台搅拌机来提供混凝土，混凝土拌制好之后可以借助移动小车来完成运输，人工借助铲锹完成混凝土入仓操作，最后通过插入式振捣器来将其充分振捣<sup>[2]</sup>。

### （五）养护及拆模

浇筑完成衬砌混凝土之后，等待12小时左右，可以实施洒水养护操作，确保混凝土表层在养护过程中可以保持湿润的状态，这样能够更好的促进混凝土完成固化；一般情况下，隧洞加固区域的混凝土实际养护一周即可，而一些重要、特殊的部位养护时间需要在半个月以上。根据施工方案中相关的规定来对模板进行拆除，在拆除过程中，侧面模板保留，需要确保混凝土实际强度满足相关标准之后才能够将其拆除，避免提前拆除而对混凝土强度造成影响，从而引起缺角掉楞等一系列不必要的问题，特别是针对隧洞的边墙区域，若是混凝土的强度在3.5MPa以下，则会使得拆除难度增大。

### （六）衬砌施工质量技术要求

本项目中围岩等级以及混凝土衬砌的厚度等存在一定差异，针对Ⅲ级围岩而言，为了进一步提高施工质量以及加固的效果，衬砌混凝土实际厚度、隧洞边墙以及底板厚度均需要超过20厘米以上，拱顶借助混凝土喷锚支护专业技术展开。针对Ⅳ级围岩而言，需要对全断面展开加固操作，且衬砌混凝土实际厚度需要在25厘米以上；确保混凝土强度在C20，且钢筋保护层的实际厚度在4厘米以上，选择HRB335这种强度较高的钢筋最佳，在全断面衬砌过程中，每间隔12米需要分设一道分缝来完成止水操作，伸缩缝内还需要有橡胶止水带的设置，这样可以使止水效果得到进一步提高<sup>[3]</sup>。混凝土在浇筑期间，还要确保整个模板被混凝土填满，然后充分振捣，运输过程中还要加强保护，避免混凝土中混入杂质或者出现离析等问题，从而对衬砌效果造成影响。

## 三、锚喷支护技术在水利隧洞加固中的应用

### （一）锚筋、钢筋网的施工

要想促使加固效果得到提升，本项目中的钢筋网以及锚筋施工可以借助试验施工模式来确定施工最佳方

案。一般钢筋网环向、纵向钢筋的直径在6毫米左右，网格之间约300毫米间隙，喷射混凝土保护层需要超过50毫米，锚杆和钢筋网之间需要牢固焊接，连接交叉点的时候可以选择隔点相绑或者隔点相焊方式进行。锚杆施工以先注浆再插锚杆的方式为主，一般锚杆单根的长度不超过1.5米，纵向的间距也是在1.5米左右，围绕梅花型进行交错均匀布置；其钻孔的孔径在40毫米左右，孔深在1.5米左右，钻孔过程中将M25类别的水泥砂浆灌注其中。

### （二）混凝土喷射方法

隧洞加固的效果和质量离不开混凝土的施工质量，混凝土在实际拌合过程中，速凝剂以及水泥的称量偏差在±3%，且砂石称量偏差在±2%。在本项目工程中，混凝土拌合主要以超过400L容量的搅拌机完成拌合工作，具体的搅拌控制时间在1分钟以上。尽可能不采用人工来对混凝土进行拌和，也不干喷混凝土，如果混合料内加上了一定的外加剂，也要适当延长搅拌的时间。在存放、运输混凝土的过程中，也要强化保护，混凝土在运输至现场之后，需要进行过筛操作，之后才可以将其装进喷射机内。在正式喷射混凝土前，需要清理锚杆支护周边坡脚石渣、浮石以及浮土等，如果岩面较为光滑的，还要对其展开凿毛干预，在施工平台上借助高压风枪来清洗受喷面，以便于后续给混凝土正式喷射提供条件。

本项目中，借助湿喷法来对混凝土进行喷射，根据施工作业的实际分段分区情况来看，喷射顺序是从上至下，喷射的整体厚度要符合施工相关技术参数标准。分层喷射过程中，第一层混凝土在没有终凝之前，不能进行下一层的喷射工作。喷射支护时要确保混凝土料可以连续供应，喷射机的风压也要保证稳定，完成喷射，或者由于喷射异常、故障等情况出现中断的，要立即清理干净输料管和喷射机中的部分积料。隧洞受喷面要和喷头垂直，严格控制好受喷面和喷头之间的距离，一般在50至100毫米范围内最佳，这样可以最大限度降低喷料流淌和回弹的发生率。在混凝土正式喷射之前，需要将钢筋锚杆置入隧洞岩石的表层，并对钢筋锚杆间距进行控制，一般在5米范围内。最终钢筋锚杆多余的长度部分，就是混凝土喷射的实际厚度，喷射完成混凝土之后，还要确保钢筋锚杆被混凝土全面覆盖，并在每一百平的地方布设3孔，钻孔主要以手风钻进行操作，对混凝土实际喷射厚度进行检查，一般情况下，厚度均值需要大于等于设计的尺寸，不合格检测点厚度需要大于等于设计厚度的一半，绝对值需要在5厘米以上。

### （三）混凝土浇筑

浇筑隧洞混凝土的时候，需要按照隧洞中部逐步向进出口进行推进，即先对底板进行浇筑，然后再针对顶拱和边墙展开浇筑。根据设计分缝来实施连续浇筑，混凝土需要由人工进行摊铺，最后以插入式振捣器来完

成振捣操作，以人工来完成收面压光等操作。其次，顶拱和边墙的混凝土浇筑。按照隧洞的断面面积情况分析，本项目中隧洞断面并不大，因此混凝土浇筑需要少量多次，与现场情况相结合，选择满足该隧洞混凝土衬砌相关要求的混凝土泵车（HBT-40ZID 型）来辅助施工。根据设计分缝相关规定<sup>[4]</sup>，需要准备12 m 台车至少2套，用来进行跳仓工作。隧洞洞口和工作面间距在300米以内的时候，需要通过混凝土罐车来进行运送，送到隧洞之后再直接向工作面进行输送。而隧洞洞口和工作面间距超过300米的时候，需要在洞口以及工作面分设泵车，便于混凝土的运输。边墙混凝土浇筑也需要借助泵车中的输送软管来进行灌注，每段边墙的两侧混凝土注入量需要保证均匀上升，避免台车出现偏移，顶拱区域混凝土可以通过台车直接灌注到仓内。顶拱以及边墙混凝土在实际浇筑期间，需要选择附着式和插入式的振捣器进行振捣，同时对振捣时间进行严格控制，做到不漏振、不超振。

**四、混凝土质量保证措施**

第一，台车在就位过程中，需要做好严格的间距测量与控制，确保就位的精准性。第二，原材料在入场之前，需要做好全面的检验工作，若是检验不达标的原材料不得入场，在施工过程中需要严格根据配合比实施配料，针对养护、浇筑、运输、搅拌等环节进行严格监督，对相关操作进行严格规范，保证混凝土的质量。第三，按照《水工混凝土施工规范》相关规定<sup>[5]</sup>，针对拌和质量进行控制和检验，保证混凝土各项指标满足相关要求。第四，混凝土运输过程中，要保证车速平稳，尽可能将运输时间缩短，降低由于道路不平而导致的漏浆发生率。在罐车将混凝土卸入到泵车内后，为了防止运输期间出现的泌水情况，可以基于泵车料斗内实施二次搅拌，最后再泵送。

**五、加固效果分析**

在对本项目工程隧洞衬砌加固修补之后，需要对施工质量和施工技术进行检验，进一步分析加固的效果。按照施工相关标准，进一步测定隧洞衬砌不同分段区域的混凝土强度，详情见图2。（图2为五个混凝土强度布设测试点）

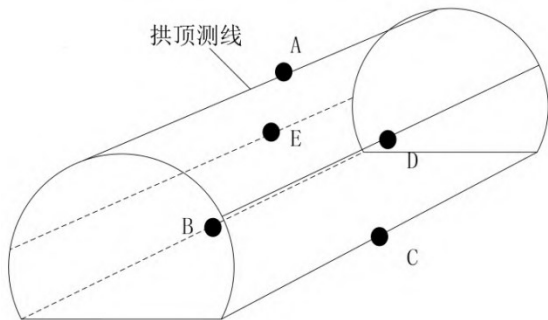


图2 五个混凝土强度布设测试点

根据上图所示，测点A设置于隧洞拱顶测线之上，剩下的四个测点均匀设置于拱顶测线左右两端，借助混凝土强度检测仪（型号：贯入式SJY100B）来测定不同测点混凝土强度，记录下最终的测定结果。详情见表1。

表1 混凝土强度测定结果 (MPa)

测点	混凝土强度	标准要求
A	5.25	> 2.5
B	5.55	
C	5.42	
D	5.82	
E	5.24	

按照表1检测数据来看，不同测点混凝土强度已经超过了常规的标准，且强度基在6 MPa左右，实际承载力较高。基于此，对本次加固施工情况分析来看，上述加固施工的技术能够促使隧洞混凝土结构的整体强度进一步提升，从而增强抗压能力，给水利工程隧洞施工提供便利条件。

**结束语**

综上所述，本文与相关案例相结合，进一步探究了隧洞衬砌、喷锚和加固施工的施工措施，结果显示针对隧洞进行加固的过程中会受到工程本身特点和地理位置的影响，导致施工难度进一步提升，单靠混凝土衬砌技术难以实现高质量的加固。借助隧洞衬砌+喷锚支护方案来进行施工，能够有效提高隧洞加固的质量，解决施工难度较大的问题，同时还可以进一步封闭和加固隧洞围岩，促使水利隧洞稳定性得以提升。

**参考文献**

[1] 孙露, 丁继辉, 王宇宁. 小断面引水隧洞混凝土衬砌施工关键技术研究——以辽宁桓仁供水工程为例[J]. 水利水电快报, 2023, 44 (09): 57-61.

[2] 吴雄波. 单向超小洞径隧洞多面衬砌施工技术改进研究与应用. 广东省, 广东省水利水电第三工程局有限公司, 2020-08-26.

[3] 任卫军. 甘肃中部移民扶贫开发供水工程隧洞施工方案浅析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (21): 165-167.

[4] 陈攻明. 韩江鹿湖隧洞引水工程二衬回填灌浆质量检测分析[J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53 (02): 57-58.

[5] 李文海. 长大深埋型水工隧洞不良地质条件TBM施工技术研究——以榕江关埠引水工程为例[J]. 水上安全, 2024, (02): 166-168.

作者简介: 龙伟, 1987年, 男, 汉, 本科, 项目经理(副高级工程师), 研究方向: 水利水电工程施工技术。