

大断面地下洞室混凝土衬砌施工技术研究

王靖玮, 郝卫超, 汪翔, 刘东

中国水利水电第一工程局有限公司, 吉林 长春 130000

摘 要 : 随着我国地下工程建设规模的不断扩大, 大断面地下洞室的需求日益增加。作为地下洞室的关键构造, 混凝土衬砌在确保结构安全和使用功能方面发挥着至关重要的作用。然而, 大断面地下洞室的复杂环境和特殊要求给混凝土衬砌施工带来了诸多挑战。为应对这些难题, 本文深入研究大断面地下洞室混凝土衬砌施工技术, 从施工准备、浇筑技术到后期处理等方面提出了一系列优化策略和创新方法。通过系统性地探讨和改进施工技术, 期望能够提高大断面地下洞室混凝土衬砌的施工质量和效率, 为相关工程实践提供有力的技术支持和参考。

关 键 词 : 大断面地下洞室; 混凝土衬砌; 施工技术

Study On The Construction Technology Of Concrete Lining Of Large Section Underground Cave

Wang Jingwei, Hao Weichao, Wang Xiang, Liu Dong

China Water Resources and Hydropower First Engineering Bureau Co., LTD., Changchun, Jilin 130000

Abstract : With the continuous expansion of the scale of underground engineering construction in our country, the demand for large section underground caverns is increasing day by day. As the key structure of underground cavern, concrete lining plays a vital role in ensuring the safety and function of the structure. However, the complex environment and special requirements of large section underground caverns bring many challenges to the construction of concrete lining. In order to solve these problems, this paper deeply studies the construction technology of large-section underground cavern concrete lining, and puts forward a series of optimization strategies and innovative methods from the aspects of construction preparation, pouring technology and post-treatment. Through the systematic discussion and improvement of construction technology, it is expected to improve the construction quality and efficiency of concrete lining of large section underground caverns, and provide strong technical support and reference for related engineering practice.

Keywords : large section underground cavern; concrete lining; construction technique

大断面地下洞室是现代地下工程中的重要组成部分, 其混凝土衬砌施工是确保结构安全 and 功能实现的关键环节。这类工程通常具有空间尺寸大、地质条件复杂、施工难度高等特点。混凝土衬砌作为永久支护结构, 需要承担巨大的岩土压力和地下水压力。施工过程中涉及开挖支护、模板安装、混凝土浇筑、养护等多个环节, 每个环节都需要精细化管理和技术创新。面对这些挑战, 深入研究和优化施工技术对于提高工程质量、缩短工期和降低成本具有重要意义。

一、大断面地下洞室混凝土衬砌施工准备

(一) 洞室开挖及支护技术

大断面地下洞室的开挖及支护是混凝土衬砌施工的前期关键工序。在开挖过程中, 通常采用台阶法或分步开挖法, 以确保洞室的稳定性^[1]。台阶法开挖时, 一般将洞室分为3~5个台阶, 每个台阶高度控制在3~5米之间。开挖顺序为自上而下, 上部台阶超出下部台阶5~10米。分部开挖法则根据洞室断面形状, 将其划分为拱顶、边墙和底板等部位, 按照“先拱后墙、先墙后底”的顺序进行。开挖过程中, 需严格控制超挖量, 一般不超过设计

轮廓线30cm。同时, 采用光面爆破技术, 爆破参数如孔距60~80cm, 装药量0.8~1.2kg/m³, 以减少对周围岩体的扰动。开挖完成后, 立即进行初期支护是确保洞室稳定的关键措施。常用的支护方式包括锚杆、钢筋网、喷射混凝土等。锚杆采用全长黏结型, 直径22~25mm, 长度3~6m, 间距0.8~1.2m。钢筋网采用Φ6~8mm钢筋, 网格间距15~20cm。喷射混凝土强度等级不低于C25, 厚度15~30cm, 分2~3层喷射。对于地质条件较差的区段, 可增设工字钢支撑, 间距0.5~1.0m。支护过程中, 应及时进行收敛变形监测, 控制变形速率在2mm/d以内。通过这些精细化的开挖和支护技术, 可为后续混凝土衬砌施工创造良好的基础条

件，确保大断面地下洞室的整体稳定性和安全性^[2]。

（二）衬砌模板系统设计与制作

大断面地下洞室混凝土衬砌施工中，模板系统的设计与制作直接影响衬砌质量和施工效率。鉴于洞室断面尺寸大、荷载复杂，通常采用定制化的钢模板系统。该系统主要由面板、主肋、次肋、背撑及调节机构等组成^[3]。面板采用 Q235 钢材，厚度 8-10mm，表面经过抛光处理，粗糙度控制在 $Ra1.6\mu m$ 以内，以确保混凝土表面的平整度。主肋和次肋采用 H 型钢或工字钢，规格分别为 $H200\times200\times8\times12mm$ 和 $H150\times150\times7\times10mm$ ，间距 600-800mm。背撑系统则使用 $\phi 48\times3.5mm$ 的钢管，纵向间距 1.5-2m，横向间距 1-1.5m，形成稳固的空间支撑结构。模板系统设计时需考虑混凝土侧压力，通常按 $25-30kN/m^2$ 计算。为适应不同断面尺寸，模板采用分段组装方式，每段长度控制在 3-5m。模板拼接处采用高强螺栓连接，螺栓规格 M20，间距 200-300mm。为便于拆卸和周转使用，模板系统配备液压千斤顶和滑移装置，千斤顶承载能力 50-100kN，行程 200-300mm。此外，模板表面涂覆脱模剂，用量 $0.2-0.3L/m^2$ ，以减少混凝土粘结。模板制作完成后，需进行试拼装，确保各部件吻合度误差不超过 5mm。通过精心设计和制作的模板系统，可有效保证大断面地下洞室混凝土衬砌的几何尺寸精度和表面质量，同时提高施工效率，缩短工期。

（三）混凝土材料选择与配比优化

大断面地下洞室混凝土衬砌对材料性能要求较高，因此材料选择和配比优化至关重要。水泥选用 P.O 42.5 或 P.O 52.5 硅酸盐水泥，其 28 天抗压强度不低于 42.5MPa 或 52.5MPa。粗骨料采用连续级配的碎石或卵石，粒径 5-31.5mm，针片状含量控制在 10% 以下。细骨料选用中砂，细度模数 2.3-3.0，含泥量不超过 3%。为改善混凝土的工作性能和耐久性，通常参加粉煤灰和矿渣粉等矿物掺合料，掺量分别为胶凝材料总量的 15%-25% 和 20%-30%。此外，还需添加高效减水剂，用量为胶凝材料质量的 0.8%-1.2%，以降低水胶比并提高混凝土的流动性。

配比优化过程中，需综合考虑强度、抗渗性、耐久性等多项指标。以 C30 混凝土为例，其配合比设计可采用以下参数：水胶比 0.38-0.42，胶凝材料用量 $380-420kg/m^3$ ，砂率 35%-38%。通过试配和性能测试，确定最终配比为：水泥 $320kg/m^3$ ，粉煤灰 $60kg/m^3$ ，矿渣粉 $40kg/m^3$ ，水 $160kg/m^3$ ，粗骨料 $1150kg/m^3$ ，细骨料 $650kg/m^3$ ，减水剂 $4.2kg/m^3$ 。该配比下，混凝土的坍落度控制在 180-220mm，扩展度 500-600mm，初凝时间不少于 8 小时，终凝时间不超过 12 小时。28 天抗压强度可达 38-42MPa，抗渗等级不低于 P8。通过精细的材料选择和配比优化，可确保大断面地下洞室混凝土衬砌具备良好的工作性能和长期使用性能，满足工程的各项技术要求^[4]。

二、大断面地下洞室混凝土衬砌浇筑技术

（一）分层分段浇筑方法

大断面混凝土衬砌浇筑采用分层分段法，这种方法可有效控

制混凝土的温度应力和收缩应力，减少裂缝的产生。通常将衬砌断面划分为拱顶、边墙和仰拱三个主要部位，每个部位再进行分层浇筑^[5]。拱顶和边墙一般分为 2-3 层，每层厚度控制在 1.5-2.0m；仰拱则根据断面尺寸可分为 1-2 层，每层厚度 1.0-1.5m。纵向分段长度通常为 10-15m，以满足混凝土收缩要求。相邻段之间设置施工缝，缝宽 20-30mm，采用止水钢板或橡胶止水带进行防水处理。浇筑顺序遵循“先仰拱、后边墙、再拱顶”的原则，以确保结构的整体性和稳定性。每层混凝土浇筑完成后，需进行表面处理，采用粗糙面或凿毛处理，以增强新拌混凝土的结合强度。层间间隔时间控制在 12-24 小时，确保下层混凝土初凝但未完全硬化。

（二）混凝土泵送与布料技术

大断面混凝土衬砌施工中，泵送与布料技术是确保混凝土均匀性和密实度的关键环节。泵送设备选用大功率柱塞泵，输送能力达 $80-120m^3/h$ ，泵送压力不低于 8MPa。输送管道采用内径 125-150mm 的无缝钢管，管壁厚度 8-10mm，以承受高压输送。管道连接使用快速卡箍式接头，每 50-100m 设置一个减压阀，确保输送压力均衡^[6]。混凝土坍落度控制在 180-220mm，并添加 0.03%-0.05% 的泵送剂以改善可泵性。泵送过程中，管道内混凝土流速保持在 0.8-1.2m/s，以防止离析和堵管。布料系统由固定式布料机和可伸缩布料臂组成。固定式布料机安装在施工平台上，回转半径不小于 15m，变幅范围 $0-40^\circ$ 。可伸缩布料臂长度达 18-25m，末端配备 3-5m 长的软管。布料时，混凝土自由倾落高度严格控制在 1.5m 以内，防止骨料分离。布料点间距为 3-4m，每个布料点浇筑量 $2-3m^3$ 。采用“之”字形布料方式，布料速度控制在 $15-20m^3/h$ 。布料过程中，混凝土温度保持在 $10-30^\circ C$ ，环境温度超过 $25^\circ C$ 时，需采取降温措施^[7]。

（三）振捣密实度控制措施

大断面混凝土衬砌施工中，振捣密实度控制是确保结构质量的关键环节。振捣采用高频插入式振动棒，其频率为 180-200Hz，振幅 1-2mm，振捣棒直径 50-70mm。振捣时，振捣棒应垂直插入混凝土中，插入深度不小于 30cm，并应插入下层混凝土 5-10cm，以确保新旧混凝土的有效结合。振捣点间距控制在 1.5 倍有效振捣半径，通常为 30-50cm。每个振捣点的振捣时间为 20-30 秒，以混凝土表面不再出现大气泡、泛浆和表面平整为准。对于拱顶等难以振捣的部位，可采用附着式振动器辅助振捣，其振动频率为 50-60Hz，振幅 0.5-1mm。为确保混凝土的均匀密实，振捣过程中需采取分层、分块的方式进行。每层厚度控制在 30-50cm，与振捣棒长度相适应。振捣顺序遵循“先深后浅、先角落后中间”的原则，确保混凝土充分密实^[8]。

三、大断面地下洞室混凝土衬砌后期处理技术

（一）混凝土养护技术

大断面地下洞室混凝土衬砌施工完成后，养护工作对于确保混凝土性能至关重要。养护过程主要包括温度控制和湿度维持两个方面。温度控制采用智能测温系统，在混凝土内部埋设温度传

感器,间距3-5m,实时监测混凝土内部温度。养护期间,混凝土内部温度应控制在15-25℃,温度梯度不超过20℃/m,降温速率控制在2-3℃/d。为达到这一目标,可采用循环水管降温系统,水管间距30-50cm,冷却水温度控制在10-15℃,流量0.5-1.0m³/h。对于拱顶等难以布置水管的部位,可采用喷雾降温,喷雾压力0.3-0.5MPa,喷雾量0.5-1.0L/m²·h。湿度维持是养护的另一关键环节。养护期间,混凝土表面相对湿度应保持在95%以上。初期养护采用喷雾养护,喷雾压力0.2-0.3MPa,喷雾量0.3-0.5L/m²·h,持续时间不少于7天。后期可采用覆盖养护,使用塑料薄膜或养护毯覆盖混凝土表面,覆盖材料搭接宽度不小于20cm。养护时间根据混凝土强度等级确定,一般不少于14天。对于采用矿物掺合料的混凝土,养护时间可适当延长至21-28天。通过科学的养护技术,可有效减少混凝土的收缩开裂,提高其抗渗性和耐久性,确保大断面混凝土衬砌结构的长期性能^[9]。

(二) 衬砌表面修饰工艺

大断面混凝土衬砌完成后,表面修饰工艺是提升结构美观性和耐久性的重要环节。修饰工艺主要包括表面处理和涂装两个阶段。表面处理首先采用高压水枪清洗,水压控制在15-20MPa,清洗距离0.3-0.5m,以去除表面浮浆和松散物。随后使用金刚石磨头进行打磨,磨头粒度由粗到细依次为80#、120#、180#,打磨深度控制在0.5-1.0mm。对于局部凹凸不平区域,采用环氧砂浆修补,砂浆强度等级不低于M30,修补厚度3-5mm。修补后进行二次打磨,确保表面平整度偏差不得超过2mm/m。涂装工艺采用多层复合涂装系统,包括底漆、中涂和面漆。底漆选用环氧树脂底漆,涂布量150-200g/m²,固化时间8-12小时。中涂采用环氧铁中涂,涂布量250-300g/m²,固化时间12-24小时。面漆使用聚氨酯面漆,涂布量100-150g/m²,固化时间24-48小时。涂装过程中,环境温度控制在10-30℃,相对湿度不超过

80%。涂装设备选用无气喷涂机,喷涂压力15-20MPa,喷嘴尺寸0.38-0.53mm。涂装完成后,进行附着力测试,拉断强度不低于2.0MPa。通过精细的表面修饰工艺,可显著提升大断面混凝土衬砌的外观质量和防护性能,延长结构使用寿命。

(三) 防水防渗处理方法

大断面混凝土衬砌的防水防渗处理采用多重防护体系,包括外部防水层、内部防渗层和结构自防水。外部防水层选用高分子自粘防水卷材,厚度1.5-2.0mm,拉伸强度≥8MPa,断裂伸长率≥300%。卷材铺设时搭接宽度不小于100mm,采用热熔法粘接。为增强防水效果,在防水卷材外侧设置30mm厚的细石混凝土保护层,其强度等级不低于C20。内部防渗层采用结晶型防水涂料,涂布量1.5-2.0kg/m²,分2-3遍涂刷,每遍间隔时间4-6小时。结构自防水则通过优化混凝土配比实现,水胶比控制在0.38-0.42,掺加5%-8%的硅灰和0.8%-1.2%的高效减水剂,以提高混凝土的密实度和抗渗性。

为确保防水防渗效果,施工过程中需进行严格的质量控制^[10]。防水卷材铺设完成后,采用高压电火花检测仪进行检测,检测电压15-20kV,漏电流不得超过1%。结晶型防水涂料施工后,进行淋水试验,持续24小时,不得有渗漏现象。混凝土浇筑时,采用插入式测温仪监测内部温度,控制温度梯度不超过20℃/m,以防止温度应力导致的裂缝。

结束语

大断面混凝土衬砌施工技术是一项复杂而精细的工程实践。通过科学的设计、精确的材料选择、先进的施工方法以及严格的质量控制,可以有效保证衬砌结构的整体性能和长期耐久性。持续优化和创新这些技术,将为地下工程建设提供更可靠的支撑,推动基础设施建设向更高水平发展。

参考文献:

- [1] 段兆林, 张博, 姜晓博, 等. 地下等截面交叉洞室扩建衬砌拆除及支护方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15291-15303.
- [2] 陈二平. 既有大断面交叉洞室衬砌拆除控制及围岩稳定性研究[J]. 公路, 2022(003): 067.
- [3] 郑阳, 刘海龙. 地下洞室大断面双层衬砌共架可変径模板施工技术[J]. 砖瓦世界, 2021, 000(012): 89-90.
- [4] 马海军. 地下洞室衬砌混凝土裂缝与预防策略探讨[J]. 建筑工程技术与设计, 2018.
- [5] 张金祥. 隧洞混凝土衬砌施工混凝土损耗控制措施[J]. 云南水力发电, 2023, (08): 69-72.
- [6] 肖云. 水库输水隧洞混凝土衬砌施工技术研究[J]. 低碳世界, 2019, 9(1): 2.
- [7] 邓小飞. 圆形有压隧洞钢管混凝土衬砌施工技术[J]. 红水河, 2023, (03): 46-49.
- [8] 李立功, 张立勃. 隧道衬砌中高流动性混凝土施工技术研究及应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(S01): 2319-2326.
- [9] 冯春怀. 渠道现浇混凝土衬砌施工技术研究[J]. 珠江水运, 2019(13): 2.
- [10] 杨紫慧. 大断面地下洞室混凝土衬砌施工技术[J]. 技术与市场, 2021, (10): 84-85+88.