

水利水电工程设计中引水隧洞衬砌厚度确定方法

李 杨

湖北省长阳土家族自治县大堰乡居溪村二组 湖北 宜昌 443500

【摘 要】：引水隧洞衬砌厚度关系到围岩承载、内水压力传递、裂缝控制和检修安全，经验厚度容易掩盖地质分段差异。本文分析衬砌受力条件、设计计算方法、围岩荷载指标和内水压力尺度指标，提出以围岩分级、运行水头、断面半径、抗裂控制和耐久修正为主线的厚度确定方法。厚度选型应先划定地质单元，再按满水、低水位外压、施工期和检修空洞工况联合校核，使厚度档位、配筋、灌浆、排水和监测形成同一设计口径。

【关键词】：水利水电工程；引水隧洞；衬砌厚度；围岩荷载；内水压力

DOI:10.12417/2811-0528.26.19.017

引言

有压和半有压引水隧洞在同一洞线内常穿越完整岩体、裂隙岩体、富水破碎带和洞口浅埋偏压段，衬砌厚度随地质单元变化而变化。偏薄的衬砌会放大环向拉应力、渗漏通道和施工缺陷，偏厚的衬砌又会增加开挖处理、混凝土温控和收缩约束。设计阶段把地质勘察、运行水头、断面尺寸、施工净空和检修条件放入同一计算链条，才能使厚度取值成为可校核、可分段、可随工况调整的设计结果。

1 衬砌厚度设计指标和方法综述

1.1 引水隧洞衬砌受力条件研究现状

引水隧洞衬砌受力取决于围岩承载圈、运行水头和地下水补给条件。完整中硬岩段能够分担较多内水压力，厚度主要控制局部拉应力、表层裂缝和施工偏差；断层破碎带、强卸荷带和富水裂隙区会把松弛荷载、外水压力和接触面渗流同时传给衬砌，厚度取值要从单一内压校核转为内外水压力、围岩压力和灌浆圈质量的组合判断。设计分段应把岩体完整性、节理间距、埋深、洞线转弯和低水位检修工况转化为厚度计算边界^[1]。高水头洞段还存在压力循环问题，调压井波动、机组启停和检修排空会改变衬砌两侧压力差，拱顶、边墙和仰拱的控制位置并不完全一致。洞周剖面关系可用于区分拱顶松弛、边墙外压和仰拱回填接触对厚度控制位置的影响。洞周受力组合关系可见图1。

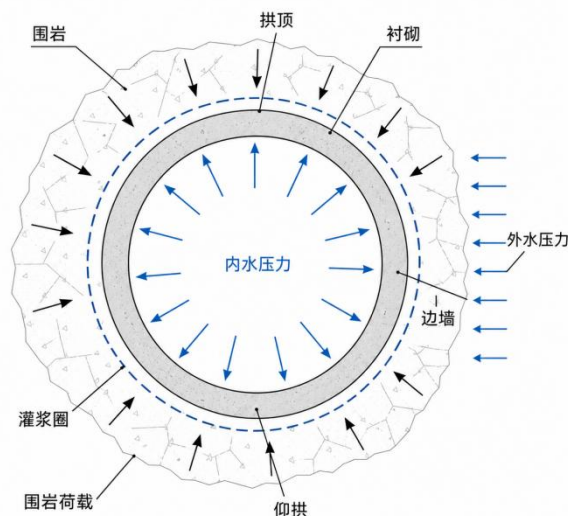


图1 引水隧洞衬砌受力剖面示意

图1中，内水压力由洞内向衬砌外缘扩散，外水压力从富水侧反向作用，围岩荷载沿洞周压向衬砌；灌浆圈位于衬砌外侧，说明厚度设计必须同时考虑围岩接触、渗流通道和洞周部位差异。

1.2 衬砌厚度设计计算方法研究现状

衬砌厚度计算可从规范构造厚度、荷载结构法和围岩衬砌共同作用模型逐级展开。构造厚度适合地质均一、压力较低、施工误差可控的洞段；荷载结构法把围岩压力、内水压力、外水压力和自重转化为等效荷载，适合破碎带和浅埋段保守校核；共同作用模型强调围岩弹性抗力、衬砌刚度和灌浆圈渗透性之间的压力分担。水工隧洞设计、工程地质勘察和安全监测规范共同限定这些方法的适用范围^[2]。理论计算得到的非整数厚度还要按模板台车、钢筋保护层、振捣空间和止水构造取整。当地质揭露与勘察判断不一致时，计算方法不应只提高一个统

一厚度, 而应重新划分洞段并同步复核配筋、接缝止水和回填灌浆。

2 引水隧洞衬砌厚度设计指标体系

2.1 围岩荷载指标的确立

围岩荷载指标应由地质单元直接转换。完整岩体可用岩体质量、结构面组合和弹性抗力系数控制厚度下限; 块裂岩体要增加松弛圈厚度、掉块规模和初期支护残余变形; 断层泥、蚀变岩和岩溶充填段则把围岩压力、外水压力和施工扰动列为同等指标^[3]。永久衬砌承担的是初期支护释放后的残余松弛荷载、运行水压力和长期劣化后的接触压力, 开挖瞬时最大围岩压力不能直接等同于运行期厚度控制值。洞口段还要把地形偏压、浅表卸荷和冻融风化放入围岩荷载指标, 避免按深埋洞段的对称受力假定处理。

2.2 内水压力工况下厚度尺度指标量化

内水压力指标量化应从设计水头、调压波动和检修低水位三个端点展开, 荷载组合指数 1、2、3、4 可表达由低到高的组合工况; 常规岩段相对厚度系数按 1、1.15、1.30、1.45 递增, 富水破碎段按 1.10、1.25、1.45、1.60 递增, 同一指数下富水破碎段曲线始终高于常规岩段。高水头工况控制环向拉应力和抗裂厚度, 快速降水工况控制外水压力反向作用, 长期稳定运行工况控制渗流、碳化和冻融环境下的耐久厚度。厚度尺度不能只取最大水头对应值, 还要核对水头循环次数、裂缝限值和材料抗渗等级, 使压力幅值、循环频率和耐久年限进入同一分档。软弱破碎段和高内水压力段的厚度选型还要同步考虑保护层、灌浆圈和排水减压条件。这种参数响应写法把水力工况、围岩条件和厚度尺度放在同一曲线中比较, 能够直观看出加厚控制点从常规岩段向富水破碎段偏移的过程。厚度系数响应关系见图 2。

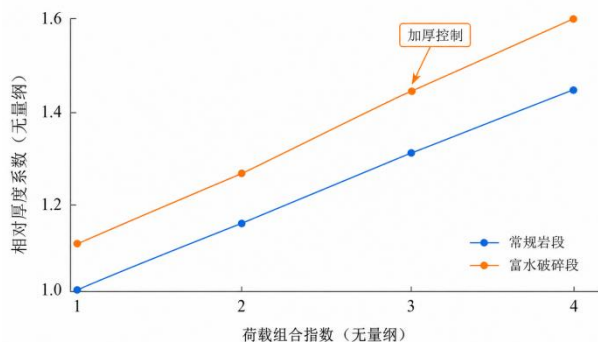


图2 荷载组合指数与相对厚度系数关系

图2中, 荷载组合指数由1增至4时, 常规岩段相对厚度系数由1增至1.45, 富水破碎段由1.10增至1.60; 两条曲线在高荷载区差距扩大, 说明富水破碎段的厚度上调不能按完整岩

段线性套用。

3 引水隧洞衬砌厚度设计方法测度

3.1 安全厚度与耐久厚度设计权重确定

安全厚度和耐久厚度对应不同控制目标。安全厚度控制承载极限、抗裂和局部稳定, 重点响应围岩压力、内水压力、外水压力和断面半径; 耐久厚度控制保护层、抗渗、抗冻、化学侵蚀和检修年限, 重点响应水质、渗漏路径、施工质量和裂缝可修复性。设计权重应随洞段风险改变, 完整岩段可让承载校核和构造厚度占主导, 富水破碎段则提高外水压力、抗渗等级和耐久修正的权重。外水压力无法可靠排泄或断层蠕变具有长期趋势时, 厚度应按控制项上调^[4]。权重调整还应保留否决项, 外水压力无法排泄、断层错动持续发展或接缝止水难以检修时, 厚度选型不能由低风险指标抵消。在同一洞线内, 权重不是一次性固定数, 而是随围岩揭露、渗水状态和运行调度校核结果进行局部调整。这种边界说明能使同一洞段的安全控制和耐久控制保持可追溯。

3.2 多工况校核下衬砌厚度选型方法

多工况选型可采用“初选厚度—控制工况校核—构造取整—配套措施复核”的顺序。初选厚度由断面半径、围岩荷载和内水压力确定, 随后校核满水运行、低水位外压、施工期封闭、检修空洞和地质突变段。任一工况产生超过材料控制值的环向拉应力时, 厚度、钢筋率、灌浆圈和排水措施应联合调整; 只增加混凝土厚度而不处理围岩接触和渗流通道, 难以消除裂缝源^[5]。最终厚度档位还要满足模板台车、钢筋安装、接缝止水和后期检测的空间条件。施工图阶段还应把计算厚度转换为台车可施工的厚度档位, 并核对钢筋排距、保护层、预埋件和止水带位置, 防止构造拥挤削弱浇筑质量。这些校核按先后关系组织后, 设计返调应发生在厚度初选阶段, 而不是在构造措施已经确定后被动修改。多工况厚度校核过程可见图3。

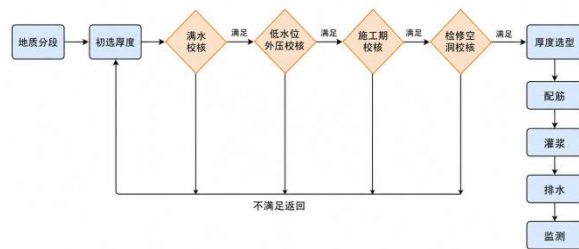


图3 多工况衬砌厚度选型流程

图3中, 初选厚度必须连续通过满水、低水位外压、施工期和检修空洞校核; 任一校核不满足时返回厚度初选, 满足后再配置配筋、灌浆、排水和监测, 避免把厚度数值与配套构造割裂。

4 结语

水利水电工程设计中的引水隧洞衬砌厚度, 应由围岩分段、内外水压力、断面尺度和耐久修正共同确定。完整岩段可以构造厚度和抗裂校核为主, 富水破碎带、高内水压力段和洞

口偏压段要把松弛荷载、外水压力折减、灌浆质量和保护层要求一并纳入厚度选型。较稳妥的流程是先按地质单元形成厚度初值, 再用满水、低水位、检修空洞和施工期四类工况校核, 最后结合配筋、接缝止水、排水减压和监测可达性确定工程厚度档位。

参考文献:

- [1] 范瑞朋.《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》发布[J].水利水电工程设计,2026,45(3):63.
- [2] 高志伟.水利水电工程安全监测新型感知技术的应用场景与选型策略研究[J].水利科学与寒区工程,2026,9(7):129-132.
- [3] 丁志宏.《水利工程水文化建设设计导则》发布[J].水利水电工程设计,2026,45(3):80.
- [4] 刘东海.萍水河水利工程洪水预警系统的构建与应用[J].四川水泥,2026,(8):48-50.DOI:10.20198/j.cnki.scsn.2026.08.020.
- [5] 张瑞梅.水利工程中混凝土施工技术创新与质量控制体系构建[J].城市建设理论研究(电子版),2026,(22):187-189.