

小浪底工程排沙洞无粘结预应力混凝土结构设计

田 耕 胡玉明 张 阳

(黄河勘测规划设计有限公司 河南 郑州 450003)

摘 要:小浪底排沙洞承担了水库的排沙及部分泄洪任务,应用水头122m。为防止衬砌在高压水头作用下开裂,原设计采用了有粘结预应力混凝土衬砌方案。经现场试验研究及计算分析,决定改为无粘结预应力结构衬砌方案,新方案的设计研究内容包括无粘结预应力混凝土衬砌的结构布置、预应力混凝土结构的应力特性分析、预应力构件及设备的参数论证和选型等。

关键词:小浪底 排沙洞 无粘结 预应力 衬砌 设计研究

小浪底工程设有3条排沙洞,坝基灌浆帷幕后的圆形有压洞段原设计为有粘结预应力混凝土衬砌结构,在施工前期又提出了无粘结预应力混凝土衬砌的替代方案。为比较两方案的优缺点和验证设计参数,在小浪底工地现场对有粘结与无粘结两个方案同时进行了1:1模型试验。经国内外专家咨询论证认为,这两个方案在技术上都是可行的,但无粘结方案在其结构合理性、施工方法及经济性上有一定的优势,设计最终确定了无粘结预应力混凝土衬砌方案。

无粘结预应力技术已广泛应用于土木建筑行业,但将其用于水工隧洞的衬砌结构,在我国尚无先例,而双圈布置的环锚结构,用于小浪底排沙洞属世界首创。这项技术的优点是比有粘结的预应力效率高、工程措施简单、结构应力状态均匀、节省工程投资。

本文就无粘结预应力混凝土衬砌方案有关洞身衬砌的结构布置、预应力混凝土结构的应力特性分析、预应力构件及张拉设备的参数论证和选型等进行了研究。

1. 排沙洞的布置

排沙洞按 I 级建筑物设计。3条排沙洞均设在左岸,平面上为直线布置。每条洞全长1100m,由进口段、压力洞段、出口闸室及明流段组成。进口高程175m,压力段出口高程153m,最大运用水头122m。其剖面形式见图1。



图1 1号排沙洞纵剖面图

排沙洞压力洞段在上游段即坝肩防渗帷幕前,由于内、外水位较高而采用普通钢筋混凝土衬砌,下游段即防渗帷幕后由于外压低、内压高,经比选后决定采用后张预应力混凝土衬砌。隧洞内径6.5m,预应力混凝土衬砌厚度为0.65m。混凝土选用C40,锚具槽回填C40无收缩混凝土。

2. 无粘结预应力混凝土衬砌结构布置

2.1 预应力锚索布置

根据现场模型试验结果及三维有限元计算分析,洞身衬砌结构中,每束无粘结预应力锚索由8根钢绞线组成,分双层布置。沿洞轴线方向每米布置2束锚索,间距0.5m。

2.2 预应力锚固系统

锚固系统包括锚索、锚具及张拉设备。



图2 排沙洞横剖面图

锚索采用高强、低松弛的带HDPE套管的无粘结钢绞线,其标准强度为 $1860\text{N}/\text{mm}^2$,公称直径 15.7mm ,公称面积 150mm^2 ,弹性模量 $1.8\times 10^5\text{N}/\text{mm}^2$,单束绞线破断力为 279.0kN 。

锚具及张拉设备选用德国Dywidag公司的DSI-6808型无粘结环锚系统及配套的张拉设备。

2.3 锚具槽布置及尺寸

考虑排沙洞的受力状况及施工条件,洞内锚具槽分两列交错布置在洞断面下半园范围内,与隧洞垂直中心线夹角为 $\pm 45^\circ$ (见图2、图3)。根据锚具及张拉设备的要求,确定了锚具槽尺寸。

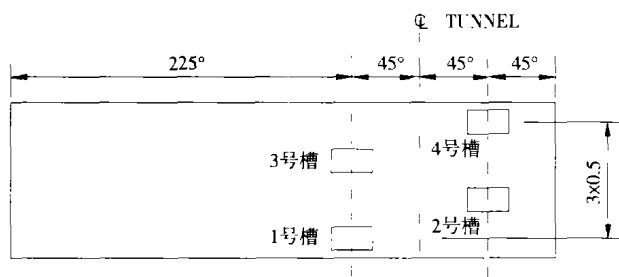


图3 锚具槽展开布置图

3. 结构计算

3.1 结构分析方法及原则

根据工程经验,当隧洞环锚的预应力荷载达到一定程度时,混凝土衬砌与围岩之间会形成一定的缝隙。因此,在预应力结构计算时,将衬砌体作为一个独立的结构考虑,锚索张拉力作为外加荷载作用于混凝土衬砌。隧洞横剖面假定为平面问题,根据内外水压力计算每延米洞长所需的预应力锚索的数量,然后用三维有限元理论分析在各种荷载作用下的衬砌结构应力状况。

3.2 控制工况的确定

根据排沙洞的运行条件,选定两种工况进行计算比较:①当库水位为 275.0m ,工作弧门关闭挡水;②库水位 251.0m 工作弧门局部开启,浑水容重 $1.58\text{t}/\text{m}^3$,控泄流量 $500\text{m}^3/\text{s}$ 。

经比较,工况①时压力段末端的内、外水压力差最大,故定为预应力衬砌的控制设计工况。

3.3 钢绞线张拉应力分布

假定锚索中的每根钢绞线在同一环向位置的应力相等。

预应力沿程分布计算

$$\sigma = \sigma_1 e^{-(kx + \mu x)}$$

式中: k 为钢绞线摆动系数; x 为从张拉端至计算断面的绞线长度(m); μ 为钢绞线与PE套管

的摩擦系数; θ 为从张拉端至计算截面曲线孔道的切线夹角(以弧度计)。

在张拉和锚固过程中,预应力的损失除千斤顶及弧形托座处摩擦损失外,还考虑了钢绞线的松弛及回缩、混凝土的收缩与徐变等因素。

4. 结构应力分析及结论

结构应力分析采用三维有限元分析方法,使用的Sap3D软件模拟了施工及运行过程中可能出现的情况,以及预应力锚索在张拉及内水压力作用下张拉力增加的过程,分析研究的重点在锚具槽的布置形式上。计算模型分别选取一个施工段的中部及端部两个部位。

4.1 荷载组合

根据排沙洞开挖状况,计算模型考虑了 0.65m 和 0.90m (考虑超挖 0.25m)两种衬砌厚度。锚索间距考虑了 0.45m 和 0.50m 两种方案,对应这4种模型,考虑洞内试验段的施工条件,共5种工况进行了荷载组合。组合情况见表1。

表1 不同设计工况的荷载组合

工况	设计工况	预应力	内水压力	外水压力	衬砌自重	山岩压力	备注
1	施工期A	50%张拉力			√		
2	施工期B	100%张拉力		√	√		
3	空洞情况	预应力1			√	√	
4	运行期A	预应力2	√	√	√	√	考虑围岩
5	空洞情况	30%预应力1			√	√	试验段

注:1. 预应力1为张拉完毕全部锁定后的预应力荷载。

2. 预应力2为预应力1经长期运行松弛后的预应力荷载。

4.2 结论及分析

(1)通过以上各种工况的结构应力分析,锚具槽的二列布置和 0.50m 间距的布置可以满足排沙洞的运行条件下环向全预应力度的设计要求。

(2)施工过程中,第一束锚索张拉至100%设计荷载时,衬砌会产生一定的洞轴向拉应力,并在锚具槽口部位产生应力集中,拉应力超过混凝土抗拉强度值,可能会出现小范围裂缝,故设计中在锚具槽两侧 2m 范围内设置了加强箍筋。但若考虑超挖因素,衬砌厚度为 0.90m 的情况下,此轴向拉应力有所降低,不会造成混凝土破坏。预应力锚索必须分步张拉,控制相邻两束锚索的张拉力差值在50%的设计荷载范围内。

(3)在设计控制工况 275m 水位关门挡水情况下,衬砌结构尚有 1.2MPa 的预压应力储备。

(4)对于空洞工况,衬砌中的压应力较大,但并未超过混凝土的容许抗压强度,设计中按构造要求配置普通环向和纵向钢筋即可。