

小浪底水库排沙洞工程预应力混凝土衬砌方案选择

(12)
49-51

丁学斌 袁全义 张东升

(小浪底工程咨询有限公司 河南济源 454681)

TV652
TV673
TV65
TV55

摘要 小浪底工程排沙洞预应力混凝土衬砌原设计为有粘结筋方案,在招投标期间,承包商提出采用无粘结筋作为替代方案,为了对两种方案进行慎重选择,在现场进行了 1:1 室外模型试验,试验结果表明,无粘结筋方案具有张拉时摩擦损失小,可采用双圈布置,预压应力均匀,结构受力性能好,张拉槽数量少,施工简单、方便,节省材料等优点。

关键词 排沙洞;预应力混凝土;衬砌;粘结筋;模型试验;小浪底水利枢纽

小浪底水库位于黄河中下游最后一个峡谷的出口,上距三门峡水库 130 km,其开发目标是:以防洪、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,除害兴利,综合利用。该工程由拦河大坝及泄洪排沙、引水发电、灌溉引水等建筑物组成。大坝为壤土斜心墙堆石坝,坝顶高程 281 m,最大坝高 154 m;泄洪排沙建筑物由 3 条孔板泄洪洞(由 3 条导流洞改建)、3 条排沙洞、3 条明流泄洪洞和 1 座正常溢洪道组成,总泄流能力为 $17000 \text{ m}^3/\text{s}$;引水发电系统由 6 条引水发电洞、1 座地下式厂房组成,装机容量为 6 台 30 万 kW 机组,水库最高蓄水位为 275 m,总库容为 126.5 亿 m^3 。

1 排沙洞工程设计概况

小浪底工程在左岸设置 3 条排沙洞,每条长约 1100 m,主要承担排沙、排污及调节水库下泄流量的任务。排沙洞运用水头为 120 m,根据工程规划要求,库水位 220 m 时,每条洞泄洪量为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$,洞内流速 15 m/s ;库水位高于 220 m 时,为防止高含沙水流磨损衬砌边壁,在出口设有弧形闸门,可局部开启,控制洞内流速不超过 15 m/s 。沿 3 条排沙洞轴线,在帷幕轴线上游洞顶上覆岩层较厚,厚度一般超过 120 m,在帷幕轴线下游洞顶上覆岩层较薄,厚度约为 25~76 m,并且岩层中夹有泥化夹层,影响山体稳定。

考虑到排沙洞围岩相对较差,为满足排沙洞高水头、高含沙、高流速的运行要求,设计者拟定在洞身山体较薄弱地段,即排沙洞衬砌结构在帷幕轴线下游到出口闸前渐变段之间,采用后张法预应力混凝土衬砌,并要求在最大内水压力作用下,混凝土衬砌仍处于压应力状态,确保不产生裂缝。3 条排沙洞

预应力混凝土衬砌长度分别为:1 号洞 727.0 m,2 号洞 734.5 m,3 号洞 756.5 m。

2 预应力混凝土衬砌结构布置

2.1 有粘结筋方案(原设计方案)

排沙洞内径 6.5 m,后张法预应力混凝土衬砌厚度为 0.65 m,选用 400 号混凝土。在断层破碎带处预应力衬砌圈的外层,另设厚度为 0.60 m 的钢筋混凝土衬砌圈。

隧洞衬砌预应力是通过在衬砌内部的环状锚索张拉来实现的,即通过锚索张拉变形挤压孔道壁,衬砌环受到径向的挤压和环向的磨擦力,从而使衬砌截面形成预压应力。排沙洞预应力系统包括:波纹管、锚索、锚具、锚具槽及张拉设备。

波纹管由薄钢带卷成,管径为 90 mm,呈环形预埋在衬砌混凝土中。为了提高预应力效果,锚索布置尽量靠近混凝土衬砌的外缘,锚索穿过波纹管并在衬砌内侧的预留槽内由锚具锁定,形成封闭的预应力结构。锚索采用高强度低松弛钢绞线,每束由 12 根公称直径为 15.24 mm 的钢绞线组成,每根钢绞线由 7 股无涂层、直径为 5 mm 的钢丝组成,符合美国标准 ASTM A416 的规定。

为使预压应力在整个衬砌环中分布均匀,设计曾对整个圆环采用 4 个锚具槽叠加(角度为 90°)及 6 个锚具槽叠加(角度为 60°)两种情况进行了预压应力叠加效果的比较,最终选定 6 个锚具槽的布置方案。锚具槽长 2.00 m,宽 0.34 m,深 0.25 m,相邻锚具槽中心间距为 0.25 m。

锚具选用瑞士 VSL 公司生产的 Z6-12 型锚具

及其配套的张拉设备.为防止锚索锈蚀,要求锚索在放入套管 2 d 内实施张拉,张拉时要求混凝土强度不低于 28 d 的抗拉强度.后张拉完成 7 d 内,在波纹管进行灌浆,以防止锚索松弛和锈蚀,减少预应力损失,从而提高锚索的长期可靠性.

2.2 无粘结筋方案(替代方案)

排沙洞预应力混凝土衬砌原设计为有粘结筋方案.但在招投标期间,承包商提出采用无粘结钢绞线作为替代方案,并在合同中给予了说明.

无粘结筋方案对原设计方案的锚索布置进行了修改,修改的依据是使无粘结筋方案与原设计方案等效,即每米洞段内非粘结钢绞线和有粘结钢绞线具有相同的应力值.

无粘结筋方案每束锚索由 8 根公称直径为 15.7 mm 的钢绞线组成,每根钢绞线由 7 股高强度低松弛钢丝组成,但锚索全长涂 0.5 mm 厚的防腐油脂并由 1.5 mm 厚的聚乙烯套管保护.无粘结钢绞线在混凝土衬砌中采用双圈布置,两层钢绞线的间距为 10 cm,锚索间距为 0.45 m.锚具槽分 4 行排列,布置在隧洞底部 120°范围内,相邻锚具槽中心线在竖直面上的投影为 40°.锚具槽长 1.51 m、宽 0.34 m、深 0.25 m.无粘结筋在外层钢筋安装后模板架立前就位,在混凝土达到规定的 28 d 抗压强度后进行张拉锁定.

3 预应力混凝土衬砌无粘结筋与有粘结筋两种方案 1:1 模型试验

鉴于排沙洞预应力结构衬砌的设计和施工技术具有一定的难度,特别是对于无粘结筋方案,目前在国内外重大水利水电工程水工隧洞中不仅应用较少,而且经验不足.为了对无粘结筋与有粘结筋两种方案进行慎重选择,经工程师批准,由二标承包商于 1997 年 7~8 月在小浪底工地进行了两个方案室外预应力混凝土衬砌模型试验.试验模型断面尺寸与原型相同,洞轴线采用垂直布置,两个模型高度分别为 1.925 m 和 1.950 m.在试验段内,无粘结筋模型共布置了 4 束按照英国标准 BS 5896 要求制造的高强度低松弛钢绞线.根据设计要求和张拉设备性能,锁定前预应力钢绞线在千斤顶处预拉力为 1 674 kN/束,在锚具处为 1 535 kN/束.试验中应用了德国 DSI 公司的张拉设备及锚具系统,其张拉次序依次为 3 号→2 号→1 号→4 号锚具槽.有粘结筋模型共布置了 6 束按照美国标准 ASTM A416 要求制造的高强度低松弛钢绞线,锁定前在千斤顶处预拉力为 2 343.6 kN/束,在锚具处为 2 109 kN/束.试验中应用了 OVM 和 DSI 公司的千斤顶及锚具张拉系统,张拉次序依次为

2 号→5 号→4 号→6 号→3 号→1 号锚具槽.

两种方案沿试验环高度方向分别布置了 6 层和 4 层测试仪器,每层测试仪器均设 5 个测试点.在混凝土内部埋设钢筋计及混凝土应变计,混凝土内外表面贴置应变片、应变花,以测量混凝土及非预应力钢筋应变、应力值.此外还在钢绞线上贴置了应变片以测量张拉过程中钢绞线的应力变化值.预应力筋与孔道壁之间摩擦系数 μ 值测试时,在固定端设置了荷载传感器以量测摩擦损失值.

根据设计要求,排沙洞预应力段混凝土为三级配混凝土,最大骨料粒径为 80 mm.但因模型中设置了大量测试仪器,为施工方便,采用一级配混凝土,其骨料最大粒径为 19 mm,经养护 28 d 后进行张拉.为了避免阳光对混凝土表面应变计读数的影响,张拉作业均在夜间进行.为测读混凝土表面应变片应变值,应用了数据采集仪.张拉过程中对混凝土应力、应变,钢筋应力,钢绞线张力,以及隧洞收敛变形等参数进行了实测,取得了大量可靠的第一手资料.根据各类测试仪器测读结果,两种方案的试验环混凝土平均有效预应力如表 1 所示.

表 1 两种方案的试验环混凝土平均有效预应力 MPa

方 案	混凝土 内部 应变计	混凝土 外表面 应变片	混凝土 内表面 应变片	外圈 钢筋计	内圈 钢筋计	总平均
无粘结筋	10.26	9.73	8.94	10.73	11.65	10.40
有粘结筋	7.72	2.77	5.25	6.34	10.19	7.38

试验结果表明,无粘结钢绞线混凝土试验环建立的平均环向预压应力分布较有粘结筋方案均匀.

这次模型试验虽获得一些重要参数,取得一定的可靠成果并达到了预期目的,但因试验模型设计及技术工作欠细致和周密,致使模型试验还存在一些问题,主要有:①在张拉过程中出现了环向不连续裂缝(最大裂缝宽度为 0.8 mm);②在水压试验中两个方案都因模型裂缝处漏水而中止试验.

为弄清试验中出现的意外情况,对两方案的试验模型作了详细的三维有限元计算和分析.模型中出现环向裂缝的主要原因:一是拟定的张拉程序不太合理;二是模型混凝土强度未达到设计值;三是测试用的油压表不准,造成实际加荷比要求的大 6%.水压试验失败的主要原因:一是安装钢绞线的波纹管未灌浆;二是张拉槽在压水前未进行混凝土回填.

上述问题只要在今后施工中严格保证混凝土强度,按改进的张拉程序进行加荷,环向裂缝是完全可以避免的.

4 预应力混凝土衬砌方案的比较与选择

通过无粘结筋和有粘结筋两个方案的模型试

验,从预应力锚索施工、结构受力情况以及经济性等方面分析,得出两种方案的主要优缺点如下:

a. 受力性能.由于无粘结筋方案采用具有 PE 套管内充油脂的钢绞线,所以张拉时摩擦系数小,无粘结筋在试验管中建立的混凝土平均有效压应力较有粘结筋试验管平均大 29%,从有限元计算结果看,无粘结筋衬砌建立的混凝土平均应力也较有粘结筋大 15%.另外,在张拉和衬砌运行阶段,无粘结筋也较有粘结筋受力均匀.

b. 衬砌结构.排沙洞锚具槽二期回填混凝土因无预压应力,而成为预应力衬砌的薄弱区.从两方案布置情况看,无粘结方案锚具槽间距较大,因此薄弱部位少,结构整体性能好,同时张拉钢绞线时对临近锚具槽影响较小.另外,无粘结筋方案所有锚具槽均布置在起拱线以下,混凝土回填质量易于保证,有利于日后的维护,并且也不干扰伸缩缝与锚具槽的布置.

c. 材料用量.无粘结筋方案由于锚束间距较大,因此钢绞线和锚具相应数量减少,从而大大降低了工程造价.据计算,采用无粘结筋方案较有粘结筋方案可节省投资 1000 多万元.

d. 施工难易.由于无粘结筋方案所有孔口布置在底部,因此张拉钢绞线及回填工作易于进行,而且锚具槽成型及回填工作量小.无粘结方案在浇筑混凝土前可以预埋钢绞线,因此节省穿筋、灌浆等工序.有粘结筋方案上部的 3 个锚具槽张拉及混凝土回填工作十分困难,且有粘结筋方案在整体张拉时,由于钢绞线受力不均匀,易产生断丝现象,需逐束预紧钢绞线.而无粘结筋方案整体张拉时无需逐束预紧钢绞线.

e. 防腐性能.由于无粘结钢绞线采用 PE 套管内充油脂包裹,因此在钢绞线运输、存储时防腐性能好,在现浇混凝土内的防腐也是可靠的.但该方案的关键是如何解决张拉槽部位裸露钢绞线的防腐问题.为此,在小浪底工地又进行了两种型式的防腐试验,即德国 DSI 公司的单根钢绞线防腐和 OVM-SB 联营体的整体防腐工艺性试验.试验结果表明,两种防腐型式都是可行的和可靠的.

对有粘结筋方案,在钢绞线运输、存储及施工中几乎无防腐措施.由于波纹管内灌浆难以完全充填,因此在衬砌运行过程中,防腐性能较差.

综上所述,无粘结筋和有粘结筋方案在技术上都是可行的.但无粘结筋方案明显具有张拉时摩擦损失小,可采用双圈布置,预应力均匀,结构受力性能好,张拉槽数量少,施工简单、方便,节省材料等优点,故排沙洞预应力混凝土衬砌推荐采用无粘结筋方案.

5 无粘结筋方案优化设计

根据模型试验情况,无粘结筋方案采用的 4 个锚具槽的布置型式,在施工过程中,混凝土内侧面将出现大面积的较大的洞轴向拉应力.为消除这一缺点,经三维有限元分析计算,确定采用 2 个锚具槽的结构型式.考虑到排沙洞岩石为层状岩石,其开挖断面大致为方形隧洞,故将锚具槽在隧洞中垂线的 $\pm 45^\circ$ 位置交错布置.这样,衬砌软弱部位得到了弥补.锚具槽长 1.54 m,深 0.25 m,顶宽 0.28 m,底宽 0.30 m.相邻锚具槽中心线间距为 0.50 m.

为便于混凝土浇筑,除将原设计的三级配混凝土改为二级配混凝土外,还将模型试验设计的两层钢绞线间距由原来的 0.10 m 增加到 0.13 m.在两层钢绞线相交的部位,将采用预埋灌浆管进行灌浆,以保证混凝土密实度.对于锚具槽的回填混凝土,将采用与衬砌混凝土具有同样强度和抗磨性能的不收缩混凝土.

6 结 语

对于有压水工隧洞,过去,在国内外许多工程中常采用有粘结筋预应力混凝土衬砌的结构型式.这是由于人们认为无粘结筋预应力技术尚不完善,主要存在着张拉槽裸露、钢绞线耐腐蚀问题,因此对无粘结锚索的耐久性持怀疑态度,致使无粘结锚索在水工隧洞中的应用不能显示其优越性.

无粘结预应力混凝土衬砌在小浪底排沙洞工程中的应用,为预应力混凝土衬砌带来了生机.可以预见,随着无粘结预应力锚索防腐措施和施工技术的不断发展,无粘结锚索在水工隧洞中将会越来越多地被采用,具有广阔的发展前景.

(收稿日期:1998-07-06 编辑:熊水斌)

·简讯·

北美、欧洲和亚洲 7 个国家的 18 个环保和社会活动团体最近成立了一个称为“Living River”的联盟,这个国际性的联盟旨在恢复受到大坝影响的河流功能和社区居民生活.该组织声称将通过改变大坝和水库的运行模式,甚至拆除大坝来达到上述目的.世界各地许多河流由于筑坝而导致其功能大大退化,致使大片富饶的土地和生态资源丰富的地区以及千百万居民的家园被洪水淹没.虽然许多大坝的确为社会提供了许多服务,例如:发电、防洪和蓄水等,但在提供这些服务的同时在较小程度上也存在一些破坏因素.该联盟还声称,现在许多坝已废弃,应从其生态和社会影响、经济学和安全的角度来评价其继续存在和运行的必要性.该联盟声称将尽力说服新成立的世界大坝委员会(1998 年 5 月成立)深入细致地评估大坝拆除这一问题. (熊莉芸摘自“IWP&DC”,Sept. 1998)