

环形无粘结预应力混凝土衬砌的试验与实践

朱 瑛

摘 要 本文主要介绍了在黄河小浪底水利枢纽排沙洞的预应力混凝土衬砌工程中,设计、监理、施工等各方面的工程技术人员科学合理地设计和选择方案、进行1:1的模型对比试验和现场试验,最终确定实施后张法双圈环绕无粘结预应力混凝土施工方案及实施的全过程。详细阐述在施工中合理选择设备、材料,组织和优化施工工艺,严格进行质量控制和管理,对节约预应力材料,提高锚索张拉效率,降低施工强度,加快施工进度,确保工程质量所起的重要作用。

关键词 环形无粘结预应力 试验 施工工艺 质量评定

1 排沙洞工程简介

黄河小浪底水利枢纽工程中的三条排沙洞是该枢纽泄洪建筑群中进水口高程最低的建筑物,担负着调节水库下泄流量、排沙、保护泄洪洞和发电洞的进水口不被泥沙淤堵的任务,是泄水建筑物中运用机会最多的泄水洞。每条排沙洞全长约1.1km,预应力混凝土衬砌厚度0.65m,内径6.5m,衬砌材料选用R₂₈C40混凝土。黄河小浪底工程的水库最高设计水位为275m,在水库水位220m时,泄水量为 $Q=500\text{m}^3/\text{s}$;流速 $v=15\text{m/s}$,水位超过220m时,采用调节出口闸门开度来控制流速不超过15m/s,以减少水流对排沙洞混凝土衬砌的冲蚀。由于水库正常运动时,排沙洞在大坝帷幕线下游段的地下水位仍很低,洞内的内水水头最大值 $H_{\max}=122\text{m}$ 。从长期运行的安全考虑,为防止排沙洞内衬砌混凝土的开裂,内水外渗危及左岸山体的稳定,在大坝帷幕线下游至出口闸室前的洞身段,设计为环形全预应力混凝土衬砌,使洞内衬砌混凝土在充水后仍为受压状态,以确保枢纽运行的安全。

2 排沙洞环形预应力混凝土衬砌方案

2.1 原设计方案

根据黄河小浪底水利枢纽工程招标设计图纸,排沙洞采用环形有粘结预应力混凝土衬砌。为了做好排沙洞的预应力设计,水利部黄委设计院的设计人员进行了细致的分析和比较,选择了有

粘结预应力方案(下称原方案),即在衬砌的混凝土中预埋锚索的环形波纹套管,用12根 $\Phi 15.24\text{mm}$ (7 $\Phi 5$ 钢丝)的有粘结钢绞线组成一束锚索,锚索沿洞轴向的间距为0.25m。为使预应力在混凝土衬砌环中布均匀,锚具槽位置按60°角均匀布置在整个衬砌环的圆周上,锚索穿入波纹套管后,在预留锚具槽口进行张拉锚固,之后在波纹套管内灌浆,最后用无收缩混凝土回填锚具槽。

2.2 承包商建议的替代方案

国际承包商在此工程项目实施前,提出了用环形双圈无粘结预应力混凝土衬砌的方案(下称替代方案)进行排沙洞预应力混凝土衬砌施工。替代方案中,预应力体系选用德国DYWIDAG公司的DSI-6808型环锚及配套的张拉设备和防腐系统。预应力混凝土衬砌采用全断面上置式针梁模板台车进行浇筑,泵送混凝土入仓。混凝土衬砌中每浇筑块长度为12.05m,锚索沿洞轴向的间距为0.5m/束,每束锚索由8根 $\Phi 15.7\text{mm}$ 带防腐PE套管的无粘结钢绞线组成。锚具槽交错布置在隧洞底拱中垂线两侧各45°的位置,锚具槽内的裸露钢绞线和锚具采用单根防腐保护措施进行处理后,再用C40无收缩混凝土回填锚具槽。

3 模型试验及方案的选择与确定

3.1 试验模型概况

国际承包商根据合同的规定和监理工程师的要求,在现场进行了两个方案的1:1模型对比试

验。试验模型的断面尺寸、锚索布置均与原型相同,但洞轴线与地面垂直,模型高分别为1.925m和1.95m。无粘结试验模型共布置4个锚具槽;有粘结试验模型则为6个。模型混凝土的28天强度为C30;由于设置了较多的测试仪器,为保证混凝土密实,采用一级配混凝土,骨料的最大粒径为19mm。模型混凝土浇筑28天后开始进行预应力张拉试验。张拉过程中对混凝土的应力、应变、钢绞线张力、钢筋应力、收敛变形等参数进行了实测,还专门进行了钢绞线摩擦系数的试验。通过两个方案的模型试验,取得了大量的资料。对两种方案在混凝土中建立的平均有效预压应力比较的结果见表1。

有效预压应力比较结果(单位:MPa) 表1

	混凝土内部 应变计	混凝土外表面 应变计	混凝土表面 应变计	外圈钢筋计	内圈钢筋计	总平均值
有粘结	7.72	2.77	5.25	6.34	10.19	7.38
无粘结	10.26	9.73	8.94	10.73	11.65	10.40

根据试验资料进行的三维有限元剖分的计算分析显示:无粘结方案在设计最大内水压力作用下内侧面大部区域的拉应力比有粘结方案要小,而且混凝土的环向压应力储备分布均匀,结构的受力状态优于有粘结方案。

从现场试验的施工工艺上分析,无粘结方案虽然要求严格,难度大,但节省预锚材料、减少了施工程度、提高了工程效率,从而缩短了工期,节省了工程投资。

3.2 无粘结方案的确定

经业主、咨询公司、黄委设计院、承包商、世行特咨团及国内知名专家对试验结果评审论证,达成了共识:无粘结和有粘结方案在技术上都是可行的。但无结方案张拉时摩擦系数小,而采用双圈布置,预压应力均匀,结构受力性能好,锚具槽数量少,减少了施工工序,预应力材料较省,在上述方面均比有粘结方案优越,且承包商在合同文件中也提出了无粘结方案。如果充分做好施工设计工作,在生产性试验中重点解决施工工艺上的难题,可以优先选用无粘结方案,由此排沙洞预应力混凝土衬砌确定实施无粘结预应力混凝土方案。

4 现场试验

在已完成的1:1模型试验中,由于试验模型设计及技术工作中对一些重大问题只能得出定性结论而不能得出定量分析成果,致使试验成果难

以直接用来指导施工,因此,现场工艺试验就成为一项必不可少的工作。试验的内容包括:

(1)选择和优化预应力混凝土衬砌施工中钢绞线和预留锚具槽的定位安装施工工艺。

(2)使施工人员熟悉预应力张拉及锚具防腐的施工程序及操作方法。

(3)演示张拉系统包括测量锚索的张拉力、张拉锁定后的伸长值、建议方法的效果。

(4)测量钢绞线和HDPE护套之间的摩擦系数;测量锚块处的张拉力及离张拉处 2π 远处的锚索张拉力。

(5)决定张拉时和锚固时锚块处及锚索的张拉力的损失。

根据上述试验内容,设计单位和监理工程师要求承包商在现场混凝土衬砌第九、第十两个试验段的21个断面上布置观测仪器。排沙洞的试验段施加预应力后,进行了3个月的仪器监测,并对试验段的大量观测数据进行了分析,对模型试验中一些只能得出定性结论的问题在试验段得出了定量分析成果,现场试验达到了预期目的。

5 无粘结方案的实施

5.1 施工设备的选择

小浪底工程排沙洞预应力混凝土衬砌段的开挖洞径,在断层带中位为9.00m(分两层进行混凝土衬砌),在正常部位为7.9m,混凝土衬砌后内径为6.5m。由于有较大的洞径,虽然便于施工机械进行操作,但也增加了高空作业的难度。同时,由于洞身混凝土衬砌段长达860m,最远工作面距施工进道口约800m,加上施工工序繁多,若不能科学合理地选择设备类型及其操作程序、运行方式,各施工工序之间就可能互相干扰甚至无法进行施工。经认真研究后,确定选择了以下施工设备:

钢筋的安装:不阻碍交通的简易可移式钢筋安装台车。

钢绞线的安装定位:可移式钢绞线安装定位台车。

混凝土衬砌:A.模板:上置式针梁钢模台车全断面衬砌(意大利CIFA公司设计制造);B.混凝土输送:混凝土泵(国产SANY60型)、混凝土罐车(国产 $6m^3$);C.混凝土振捣:气动附着式振

捣器(意大利 CIFA 公司生产)为主,国产软轴插入式振捣器辅助。

环形无粘接预应力锚索张拉:A. 预应力体系: DYWIDAG 公司的 DSI 预应力体系及配套的张拉设备; B. 张拉: 自制可移式张拉操作平台车。

5.2 预应力衬砌混凝土配合比选择

为保证排沙洞运行期洞内水不外渗,混凝土不出现拉应力,排沙洞按抗裂和全预应力设计。衬砌混凝土标号为 C40 级,衬砌厚度为 0.65m,每个浇筑块的长度为 12.05m,锚索沿洞轴线的间距为 0.5m/束,混凝土中钢筋(含钢绞线)的重量为 $142\text{kg}/\text{m}^3$,每个混凝土浇筑块布置 24 束环形双圈锚索和 24 个预留锚具槽。由于这些特殊的设备和要求,使混凝土中钢筋、钢绞线布置很密集,一旦预应力衬砌混凝土产生深层裂缝,将无法修补。所以,在选择混凝土配合比时,就必须考虑预应力混凝土结构整体的受力状况和衬砌混凝土的综合性能,即:抗压、抗渗、抗冲耐磨性、可泵性和温控要求。经过多次选择、试验、优化,最后确定了预应力衬砌混凝土的配合比:28 天标准抗压强度为 40MPa;最大骨料粒径为 40mm;水灰比为 0.4~0.45;坍落度为 140~160mm。

5.3 预应力锚固体体系的选择

(1)锚固系统:小浪底排沙洞这种水工隧洞的特殊运行情况,要求必须保证所使用的锚固系统工程稳定性和一次成功率。所以,选择德国 DYWIDAG 公司的 DSI—6806 型无粘接环锚体系(包括锚板、工作锚夹片、偏转器 HOZ 950/100 型千斤顶)即 DSI 系统,作为锚固和防腐系统,由柳州海威姆建筑机械有限公司(原名柳州欧维姆公司)生产锚板。为确保排沙洞预应力体系不失效,锚板材料使用了 40Cr 钢。夹片为进口产品,其材料为 30Cr。该系统最突出的特点是对钢绞线采用单根防腐技术,而不是采用目前通用的整体防腐技术,锚板的受力也较为均匀。

(2)锚索:用 8 根高强低松弛、带有 HDPE 套筒的无粘结钢绞线组成一束环形双圈锚索。由于国内产品的性能指标完全能满足质量要求,选定天津预应力钢丝一厂的无粘结钢绞线。该厂的生产工艺较为先进,尤其是不用通常的酸洗法除锈,避免了酸洗产生的氢脆现象,所以钢绞线产品的质量完全符合小浪底排沙洞的施工要求。此钢绞

线的标准强度为 1860MPa,公称直径 15.7mm。

(3)防腐保护:采用德国 DYWIDAG 公司的 DSI—6808 型无粘结环锚体系配套的单根防腐保护系统,包括锚块前后的两块防腐密封板、钢绞线头套、钢绞线套管、防腐润滑油脂。

(4)锚具槽回填混凝土:选用 C40 无收缩混凝土。

5.4 施工工艺的优化选择

经现场试验和研究论证,科学合理地设计和制定了从准备工作开始到最后全面测量检查及验收的 20 道工序,并在工序上严格把关、质量上严格要求,保证了工程按进度高质量的完成。环形无粘结预应力混凝土施工工序如下:

- (1)测量、放点及准备工作。
- (2)钢筋台车就位。
- (3)外层钢筋安装定位。
- (4)钢绞线固定架测量定位焊接(同时钢绞线下料编束)。
- (5)钢绞线安装及定位测量。
- (6)预留锚具槽安装及测量定位(同时内层钢筋安装绑扎、两层止水安装定位)。
- (7)其它埋件定位安装。
- (8)此前工序的检查验收。
- (9)针梁模板台车就位,针梁模板台车调整、测量、定位。
- (10)此前所有工序的全面检查验收。
- (11)混凝土浇筑及拆模养护。
- (12)预留锚具槽清理、毛面处理及混凝土缺陷检查。
- (13)回填灌浆。
- (14)预应力锚索的张拉(在混凝土浇筑 28 天后进行)。
- (15)张拉测量数据的整理及质量检查评定。
- (16)预留锚具槽清理及防腐保护的再检查。
- (17)预留锚具槽用无收缩混凝土回填。
- (18)固结灌浆及固结灌浆检查。
- (19)混凝土不平整度及缺陷检查和修补。
- (20)全面测量检查及验收。

6 质量控制

6.1 对《小浪底工程二标技术规范》的修改补充

由于排沙洞环形预应力混凝土衬砌施工采用国际承包商建议的无粘结方案,与原设计方案的预应力体系有较大变化,《小浪底工程二标技术规范》中有关预应力混凝土的部分条款已不适用于排沙洞预应力混凝土衬砌施工和现场的监理工作,所以修改补充了《小浪底工程二标技术规范》中从准备工作、监督、锚索安装、预应力张拉、预应力混凝土衬砌施工检测标准到每个重要工序的验收内容及填报格式等多项技术规范条款,并在补充的技术规范中明确:每个重要工序必须经监理工程师检查合格、验收签认后,才能进行下一工序的工作,使现场监理及施工有据可依、有章可循,保证了排沙洞预应力混凝土衬砌施工的顺利进行。

6.2 预应力张拉参数

设计锚索的最大张拉力: $T_{\max}$ (根据张拉用千斤顶、油泵及同压泵配套率确定后再确定)

锚索实际的最大张拉力: $T_1 = T_{\max}(1 - f_1)$

锚块处的最大张拉力: $T_2 = T_1(1 - f_2)$

式中: f_1 ——张拉千斤顶的摩擦损失百分数;

f_2 ——张拉时锚块、偏转器的摩擦损失百分数;

锚块外的锚索伸长值: $\Delta L_1 = AE_g(T_1 + T_2) / 2L_1$

锚块内的锚索伸长值: $\Delta L_{2(0 \sim 2\pi)} = rT_2[1 - e^{-2\pi(kr + \mu)}] / [AE_g(kr + \mu)]$

锚索理论计算总伸长值: $\Delta L_{\Sigma} = \Delta L_1 + \Delta L_2 \times 2$

式中: L_1 ——锚块外的锚索长度;

L_2 ——锚块内的锚索长度;

E_g ——预应力锚索的弹性模量;

A ——钢绞线的总横截面积;

r ——双圈环形锚索的形心与隧道中心的距离,即半径;

e ——自然对数的底;

k ——摆动系数;

μ ——钢绞线的曲率摩擦系数。

6.3 施工张拉质量的评定:

根据《小浪底工程二标技术规范》14.4.4条的要求,锚索张拉的理论计算总伸长值(ΔL_{Σ})对应的张拉力与锚索张拉实际伸长值(ΔL_s)对应的张拉力(T_s)之间的差值应不超过5%。据此,可用

以下直观、简便可行的方法来进行质量评定:在正常施工条件下,锚索张拉的理论计算总伸长值为 ΔL_{Σ} ,对应的张拉力为 T_1 。则锚索张拉实际伸长值(ΔL_s)对应的张拉力(T_s)应在 $T_1 \pm 0.05T_1$ 范围内。锚索在 T_1 力作用下是完全弹性伸长,符合虎克定理,可设 $T_1 / \Delta L_{\Sigma} = k$;这样我们就可以通过C值($\Delta L_{\Sigma} - \Delta L_s = \pm C$)来判断张拉的结果:若 $+C \leq 0.05T_1/k$ 及 $-C \geq 0.05T_1/k$ 则张拉的结果满足《小浪底工程二标技术规范》14.4.4条的要求;反之则不满足。

7 结 语

(1)无粘结和有粘结方案在技术上都是可行的。但无粘结方案张拉时摩擦系数小,并采用双圈布置,预压应力均匀,结构受力性能好,锚具槽数量少,减少了施工工序,节省了预应力材料,在上述诸方面均比有粘结方案优越,而且承包商在合同文件中也提出了无粘结方案。所以,小浪底工程排沙洞选用无粘结方案是符合合同规定和实际情况的。

(2)由于在模型试验中不可能对一些重大问题得出定量分析成果,试验成果难以直接用于指导施工,因此,现场试验是必不可少的。

(3)无粘结双圈环形锚索用于水工隧洞预应力混凝土衬砌首先必须根据设计要求并结合工程实际,选择最佳的设备和材料以满足质量和进度的要求。

(4)在符合相应的技术规范和国家标准的前提下,根据所选择的设备和材料的性能及其使用条件,结合工程现场的地理位置、环境及施工单位职工素质、技术能力、工艺设备以及其它综合因素,科学合理地优化施工工艺,采用最佳的工艺流程,并按确定的工艺流程、施工张拉参数、质量评定方法进行周密组织、严格管理、认真施工是保质保量、顺利按时完成无粘结预应力混凝土衬砌施工的重要保证。

参考文献

1. 黄委设计院. 排沙洞无粘结预应力混凝土衬砌结构分析, 1997. 12.
2. (德国)F·莱昂哈特著, 预应力混凝土·程积高译. 北京: 水利水电出版社, 1989.