

湍河渡槽槽身预应力施工技术应用及效果评价

孙翔¹, 尹延飞¹, 庞文占², 王军¹, 周学友¹

(1. 南水北调中线干线工程建设管理局 河南直管项目建设管理局, 河南 郑州 450004;

2. 葛洲坝集团第一工程有限公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 根据湍河渡槽原型试验槽试验数据,研究了湍河大跨度薄壁U型渡槽工程双向预应力张拉施工工艺,提出了详细的、可操作性的预应力张拉、灌浆和封锚的施工工艺,并结合湍河渡槽的安全监测数据对张拉效果进行评价。结果表明:采用该施工工艺可以满足渡槽质量控制要求,对同类渡槽工程预应力张拉的设计施工具有一定的借鉴意义。

关键词: 预应力张拉; 施工工艺; 效果评价; 湍河渡槽

中图分类号: TV672+.3 TV523

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0153-06

Application of prestressing construction technology of aqueduct above Tuanhe river and effect evaluation

SUN Xiang¹, YIN Yanfei¹, PANG Wenzhan², WANG Jun¹, ZHOU Xueyou¹

(1. Henan Branch Bureau, Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Zhengzhou 450004, China; 2. First Engineering Co., Ltd., Gezhouba Group, Yichang 443002, China)

Abstract: According to the result of Tuanhe river aqueduct prototype test, the paper studied strain construction technology of two-way prestressed of thin-wall concrete U-type structure across Tuanhe river. It also proposed the detail and operative construction technology of prestressed stretching; grouting and sealing anchor. Combining the data of safety monitoring of aqueduct, it evaluated the strain effect. The results showed that the construction process can meet the quality control requirements of aqueduct and has certain reference significance for the design and construction of similar prestressing aqueduct projects.

Key words: prestressed stretching; construction technology; effect evaluation; Tuanhe river aqueduct

1 工程概况

南水北调中线总干渠湍河渡槽位于河南省邓州市小王营-冀寨之间的湍河上,槽身为相互独立、3槽并列的预应力混凝土U型结构,槽身段总长为720 m,单跨40 m,共18跨,单槽内高与宽分别为7.23、9.0 m,设计流量为350 m³/s,加大流量为420 m³/s。槽身高度8.23 m,两端简支,槽身下部为内半径4.50 m的半圆形,半圆上部接2.73 m高直立边墙,边墙厚0.35 m。在槽身顶部间隔2.5 m设置一拉杆,拉杆截面尺寸0.5×0.5 m,单槽内空尺寸(高×宽)7.23 m×9.0 m,底板厚1.0 m,支座处底板加厚至1.47 m。下部支承采用钢筋混凝土空心

墩、钻孔灌注桩^[1-2]。采用移动造槽机原位现浇,槽身总重量约1 600 t。

U形槽槽身为双向预应力C50F200W8混凝土结构,纵向为有粘结力钢绞线,环向为无粘结力钢绞线,均采用1860级Φ^{15.2}高强低松弛钢绞线。单槽纵向预应力钢绞线共40束,其中在槽底布置一层共8束(12×Φ^{15.2}),在槽身下部104.4°范围内布置一层共22束(12×Φ^{15.2}),在槽顶两侧直墙上各布置五束(6×Φ^{15.2}),采用圆形锚具,圆形波纹管,单端张拉;环向在跨中1/2跨区域内布置(3×Φ^{15.2})间距18 cm的钢绞线,而在两端1/4跨内,对钢绞线进行加密,布置(3×Φ^{15.2})间距15 cm的钢绞线,两端同时张拉^[3]。见图1、图2。

收稿日期:2015-03-15; 修回日期:2015-04-10

基金项目:南水北调中线干线工程建设管理局科技项目(ZXJJ201242)

作者简介:孙翔(1977-),男,河南桐柏人,工程硕士,高级工程师,研究方向为水工结构及大坝安全监测。

2 预应力张拉

2.1 施工工艺流程

随着科技进步和东深供水、南水北调等大批引调水工程的建设需要,国内相继开展了大跨度预应力渡槽预应力施工工艺等方面的研究^[4-9],但湍河

渡槽作为目前世界最大 U 形输水渡槽^[10],施工工艺复杂,没有可直接借鉴的工程经验,为此,在湍河渡槽 1:1 原型试验槽研究成果的基础上,并在工程槽施工中加以改进和完善,总结出了湍河渡槽的预应力张拉施工工艺流程,如图 3。

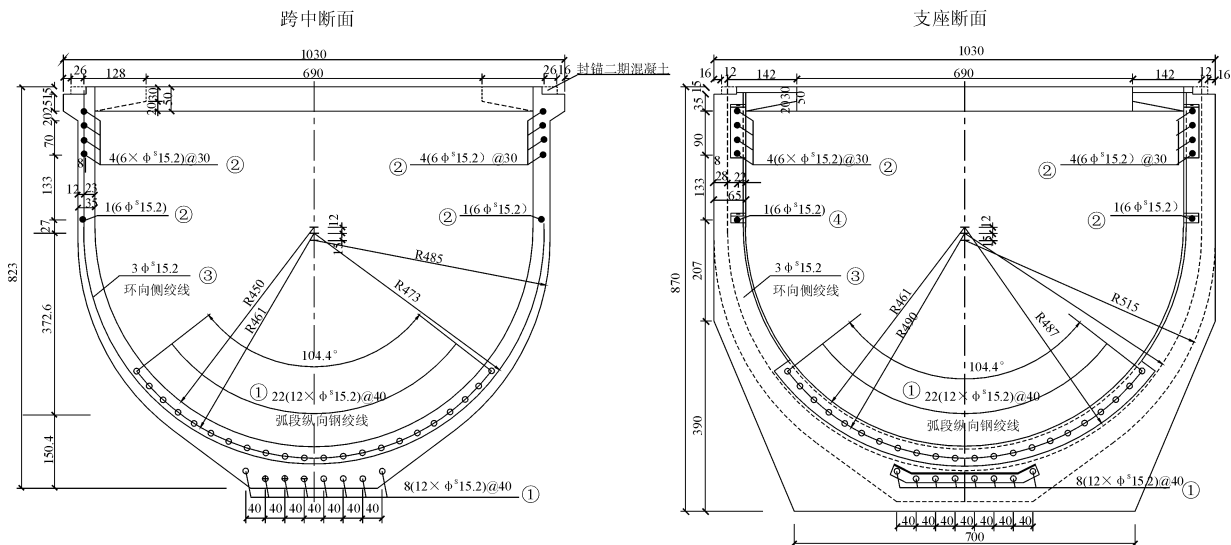


图 1 槽身纵向钢绞线布图(单位:cm)

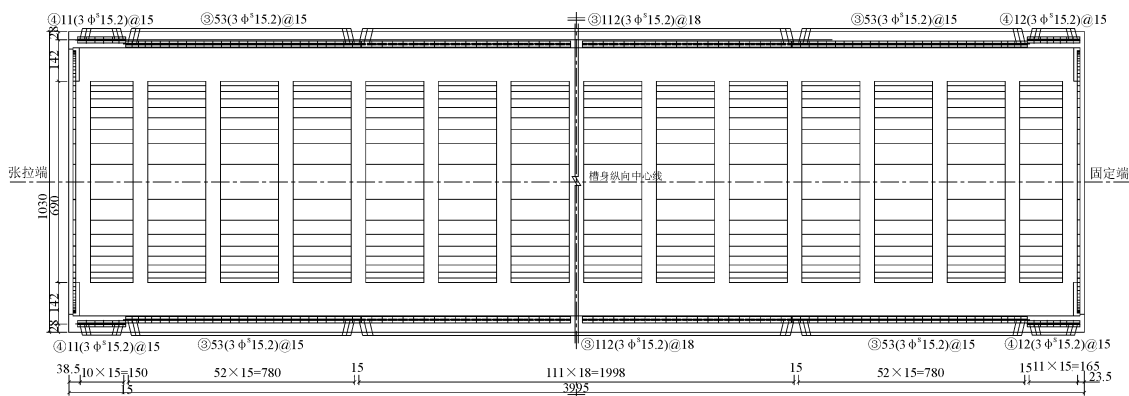


图 2 槽身环向钢绞线布置(单位:cm)

2.2 张拉施工

2.2.1 钢绞线下料、编束 技术人员按照设计图纸要求计算下料长度,并与下料作业人员一起量测、标识出醒目的下料长度控制线。根据下料单(见表 1)的长度,用砂轮逐根进行切割。

钢绞线采用天津冶金集团中兴盛达公司产品,除按规范^[11]进行检查外,还要特别注意钢绞线应顺直无侧弯,切口无松散,如遇死弯必须切掉;不同长度、种类的钢绞线应有标识,分区堆放以方便运输、使用。

对于无粘结钢绞线,使用 GYJ450 型挤压机将一端安装挤压 P 型锚具挤压套进行锚固作业,挤压

力大于 20 MPa。

2.2.2 钢绞线铺设 由于槽身为全预应力结构,根据设计要求,纵向钢绞线定位偏差 ± 8 mm,环向钢绞线定位偏差 ± 5 mm,为保证预应力施工质量和设计要求,在安装波纹管及钢绞线时进行精确定位并采用样架钢筋固定。根据预应力布置,采用 3 种型号的波纹管样架钢筋和 1 种环向钢绞线样架钢筋。为确保纵向波纹管固定牢靠、准确且避免与环向钢绞线位置发生冲突,在两端按间距 45 cm 布置 2×18 道(两端各 18 道)、跨中部分按间距 54 cm 布置 37 道,纵向合计 73 道纵向波纹管样架筋。沿环向钢绞线布置 20 道环向钢绞线样架筋。

表 1 单个槽身钢绞线下料长度表

钢绞线编号	纵向/环向	钢绞线规格	单槽预应力束数量/根	单根理论长度/m	单根下料长度/m	单槽总数/根	总长度/m	钢绞线种类
①	纵向	12Φ ^s 15.2	30	39.54	40.5	360	14580	有粘结
②	纵向	6Φ ^s 15.2	10	39.52	40.4	60	2424	有粘结
③	环向	3Φ ^s 15.2	218	20.3	21.4	654	14061	无粘结
④	环向	3Φ ^s 15.2	23	20.7	21.9	69	1511.1	无粘结

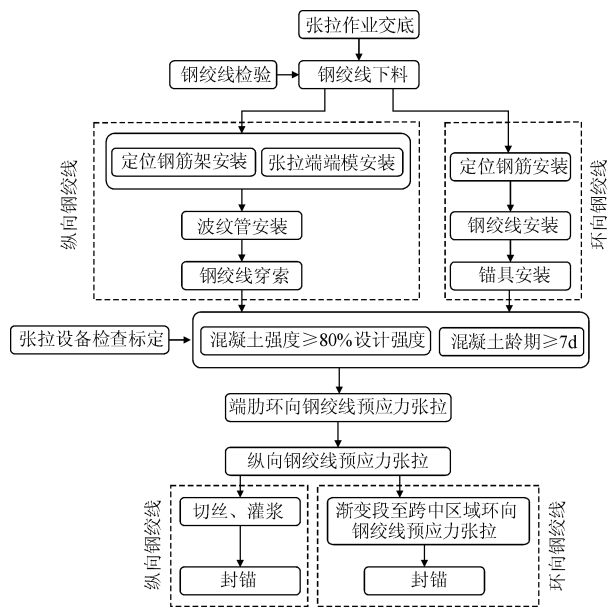


图 3 预应力张拉施工工艺流程图

预应力定位钢筋安装完成后,通过已浇筑跨(锚固端)预留空隙进行纵向波纹管安装,管接头处采用外套大一型号的波纹管,即 Φ90 mm 波纹管外套 3 m 长 Φ105 mm 的波纹管,Φ70 mm 波纹管外套 3 m 长 Φ90 mm 的波纹管,并采用胶带密封。

2.2.3 纵向预应力钢绞线穿索 渡槽槽身预应力筋采用单根穿索单端张拉,长 40 m,超过目前我国现行规范^[12]要求。18#槽身浇筑完成后进行 17# ~ 1#槽身施工时,由于两跨槽身分缝仅 5 cm,待浇跨槽身底板下部 8 束钢绞线无法实现穿索。为解决上述问题,施工中将锚固端 P 锚形式更改带卡箍式圆形 P 锚,见图 4。



图 4 卡箍式圆形 P 锚具



图 5 张拉端构造图

穿索采取人工方式,逐根将带有挤压头的钢绞线从锚固端上层钢筋倾斜穿入波纹管中,再从张拉端(见图 5)反向穿入带卡箍式圆形 P 锚板中。采用 6mm 厚钢板通过螺杆与锚板连接,挤压锚头防止钢绞线脱离 P 型锚板。特别注意纵向锚具与端模间隙、预应力筋锚固端约束环部位均采用泡沫胶对其进行填充充实,要求锚具灌浆孔及锚具与波纹管间空隙密实不漏浆。且保证与预应力筋张拉作用线垂直,锚垫板以外露出的预应力筋采用彩条布包裹保护,防止槽身浇筑过程中粘带水泥浆。钢绞线安装后在张拉端设置孔道灌浆管,在锚固端波纹管安装出浆管。

2.2.4 环向预应力钢绞线铺设 先按照设计图纸,进行测量放样,定位出每束钢绞线位置,并在造槽机外模内壁用粉笔刻画标识线,然后采用人工分束,多次穿入的方法进行钢绞线安装。钢绞线安装到位后,采用细铁丝或扎丝将每束钢绞线固定牢靠,整束钢绞线应整齐平顺,避免钢绞线打绞。最后要调整钢绞线外露长度。安装过程中,要注意对 PE 套管进行保护,防止破损。

2.2.5 预应力钢绞线张拉

(1)张拉时机。预应力张拉应在槽身混凝土抗压强度达到设计强度的 80% 以上、龄期不少于 7 d 时进行。

(2)张拉控制应力及张拉力。

环向预应力钢绞线张拉控制力为:

$$\sigma_{con} = 0.70 f_{ptk} = 0.70 \times 1860 = 1302 \text{ MPa};$$

纵向预应力钢绞线张拉控制力为:

$$\sigma_{con} = 0.75 f_{ptk} = 0.75 \times 1860 = 1395 \text{ MPa};$$

则:12 - Φ^s 15.2 规格纵向钢绞线的张拉力为 1395 × 12 × 140 = 2343.6 kN;

6 - Φ^s 15.2 规格纵向钢绞线的张拉力为 1395 × 6 × 140 = 1171.8 kN;

3 - Φ^s 15.2 规格环向钢绞线的张拉力为 1302 × 3 × 140 = 546.84 kN。

(3)张拉顺序。采用后张法施工。槽身纵向采用有粘结预应力钢绞线,单端张拉;环向采用无粘结钢绞线,两端同步张拉。为保证槽身受力均匀,纵、环向预应力钢绞线采用对称张拉。按先张拉端肋环向钢绞线(共23束),再张拉纵向钢绞线(共40束),最后张拉渐变段至跨中区域环向钢绞线(共218束)的顺序进行。钢绞线张拉前先单根预紧再整束张拉,单根钢绞线的预紧力为张拉控制应力的10%。纵向钢绞线张拉完毕,才能进行造槽机外模拆除,所有预应力钢绞线张拉完毕造槽机才能移位过孔。

端肋环向钢绞线张拉顺序:端肋环向预应力张拉前先对钢绞线编号,见图6。然后按钢绞线编号由小到大的次序张拉奇数号钢绞线 $0 \rightarrow 0.1F \rightarrow F$ (持荷5 min 锚固),再张拉偶数号钢绞线 $0 \rightarrow 0.1F \rightarrow F$ (持荷5 min 锚固)。为保证对称张拉,每次张拉两

束环向钢绞线。

纵向钢绞线张拉顺序:纵向钢绞线的分区张拉次序依次为A区 \rightarrow B区 \rightarrow C区 \rightarrow D区,钢绞线分区及编号,见图7。首先张拉A区钢绞线, $0 \rightarrow 0.1F \rightarrow F$ (持荷5 min 锚固)。然后张拉其他各分区钢绞线,按钢绞线编号由小到大的次序,先张拉奇数号钢绞线 $0 \rightarrow 0.1F \rightarrow 0.5F$ (锚固),再张拉偶数号钢绞线 $0 \rightarrow 0.1F \rightarrow F$ (持荷5 min 锚固),最后补张奇数号钢绞线 $0.5F \rightarrow F$ (持荷5 min 锚固)。为保证对称张拉,每次张拉两束纵向钢绞线。

渐变段至跨中区域环向钢绞线张拉顺序:渐变段至跨中区域环向预应力张拉前先从两端向中间依次对钢绞线编号(见图6),然后从两端向中间同步张拉奇数号钢绞线 $0 \rightarrow 0.1F \rightarrow F$ (持荷5 min 锚固),再张拉偶数号钢绞线 $0 \rightarrow 0.1F \rightarrow F$ (持荷5 min 锚固)。为保证对称张拉,每次张拉两束环向钢绞线。

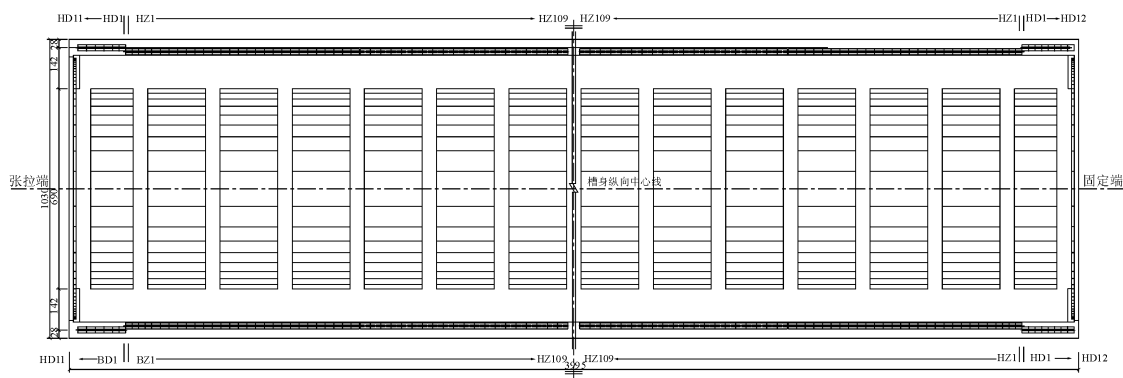


图6 环向钢绞线分区及编号(单位:cm)

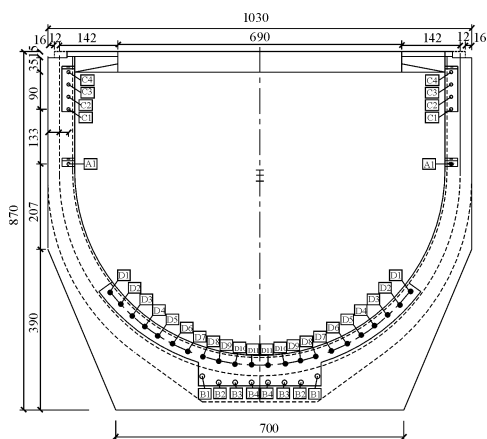


图7 纵向钢绞线分区及编号(单位:cm)

2.3 孔道灌浆及封锚

2.3.1 孔道灌浆 终张拉完毕后,必须在2 d内对纵向有粘结预应力管道进行灌浆作业。设计要求浆材应采用级别不低于P. O 42.5的配制,浆体强度不

低于50 MPa,水灰比小于0.45,浆液搅拌后3 h泌水率2%~3%,为增加孔道灌浆密实性时,水泥浆中可掺入对预应力筋无腐蚀作用的外加剂。经试验验证,湍河渡槽预应力灌浆实际采用水灰比为0.35,材料用量见表2。

表2 预应力灌浆水泥浆材料用量 kg/m^3

水	P. O42.5 水泥	膨胀剂	SP 减水剂	SK-H 引气剂
486	1246	126	116.66	0.0694

湍河渡槽采用真空辅助灌浆工艺,灌浆设备具有压力和灌浆量自动记录功能。灌浆过程中,首先关闭灌浆阀,启动真空泵,抽吸孔道内的空气,真空度达到 $-0.06 \sim -0.1$ MPa并保持稳定。然后启动灌浆泵,排除残存在灌浆泵及管道内的水份和空气,当排出的水泥浆和储浆筒内的水泥浆稠度一致时,关闭灌浆泵,将灌浆泵管道通过快换接头接到锚垫

灌浆孔的控制阀上,打开阀门,启动灌浆泵,开始灌浆,直至排气管的出浆浆液稠度和储浆桶一样,且流速稳定时,暂停灌浆泵1~2 min,保持出浆口的阀门敞开,然后再开启灌浆泵,待出浆口出浆顺畅后,关闭出浆端阀门,使灌浆泵的压力达到0.5~0.7 MPa,持压2 min。然后关闭灌浆端阀门及灌浆泵,完成灌浆。灌浆顺序应先下层孔道后上层孔道,同一孔道的灌浆应连续、一次完成。从浆液搅拌到压入槽体的时间不宜超过40 min。

2.3.2 封锚 经复核纵向预应力钢绞线张拉数据后采用手提式砂轮对钢绞线切除,外露长度不小于30mm。并在锚垫板、工作锚及外露钢绞线上均匀涂刷防水材料,并用高强度砂浆密封锚具,砂浆外包裹一层薄塑料布保湿养护。

环向无粘结预应力钢绞线张拉完毕后,及时对锚固区进行保护。在切除外露无粘结预应力筋多余长度后,在夹片及无粘结预应力筋端头外露部分涂专用防腐油脂,并罩帽盖进行封闭,该防护帽与锚具应可靠连接,然后采用后浇微膨胀混凝土进行封闭。

3 预应力张拉效果评价

湍河渡槽自2011年11月2日开始浇筑第一榀工程槽(18#中),到2013年9月28日后一榀槽(1#右)浇筑顺利完成,历时23月。为检验渡槽槽身在设计及满槽水位下永久缝止水情况,在设计水位、满槽水位下渡槽混凝土质量、槽体结构应力状态、槽体结构挠度及沉降变形情况等,为工程运行前的安全性评估、顺利投入运行提供技术保障,在2013年12月至2014年6月期间先后进行了2次单独充水试验。通过充水试验期间与预应力相关的沉降、应力应变及锚索测力等监测仪器的数据分析,进一步评价张拉效果。

3.1 安全监测布置

(1)槽体垂直位监测。在湍河渡槽左槽、中槽、右槽两侧墙顶对称布置水准测点各2排,共计6排,每槽4测点。

(2)槽体混凝土应力应变监测。在2#中槽、12#中槽分别布置应变计29只、无应力计3只。

(3)槽体锚索荷载监测。湍河渡槽在18#中槽身纵向锚索布置锚索测力计2台,测点编号分别为左B4F、右B4F。

3.2 安全监测分析

2013年12月7日开始第一次试验,槽身充水采用单槽逐个方式进行充水,中槽的充水安排为

2013年12月7日开始充水,12月10日达到设计水位,12月16日达到满槽水位,2014年2月22日开始放水,3月3日放水完成。第二次从湍河河道内取水对三槽进行同时充水,充水时槽内水位上升速度按每天不大于3 m控制。2014年4月15日开始进行充水,于2014年4月23日充水至满槽水位。2014年5月14日开始放水,并于2014年6月2日放水完成。

由于篇幅限制,本文选择18#中锚索测力计B4F进行锚索荷载损失分析、选择有代表性的12#槽体应变计S03THD、S10THD进行混凝土应力应变分析。B4F测点荷载/温度/时间序列过程线见图8。应变计过程线见图9。

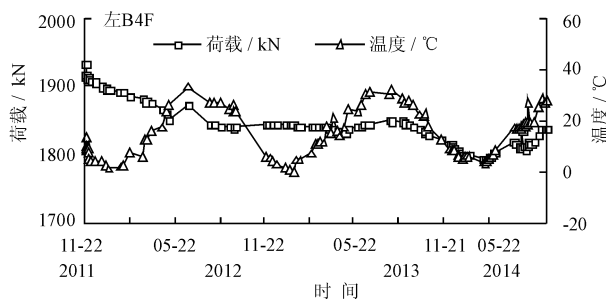


图8 施工期及第1、2次充水试验期槽身锚索测力计左B4F锚索荷载时间过程线图

从图8看,锚索荷载略表现为与温度变化负相关,湍河渡槽槽身两次充水试验期间,锚索荷载变化不明显,在充水前后的变化趋势都表现为变小,且第二次充水试验期间的变化量比首次充水略小。充水试验期间锚索荷载损失值与张拉锁定值相比最大为-7.08%,在允许范围内。

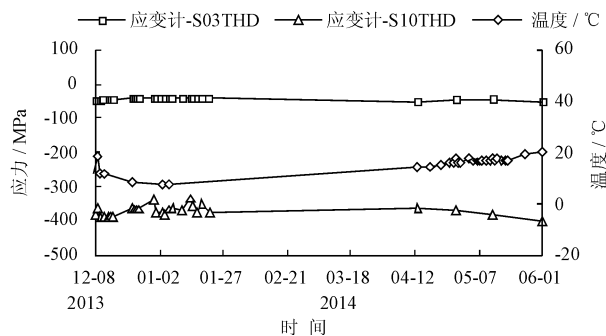


图9 湍河渡槽12#槽体应变计过程线图

从图9看,混凝土浇筑期间以及后续预应力锚索张拉后,槽身混凝土主要表现为压应变,且有相应富余。从监测成果来看:第一次充水试验期间,槽体混凝土应力应变变化主要发生在中线槽充水期间,后续的左右槽充水,槽体混凝土应力应变测值稳定,

左右槽充水对中线槽体混凝土应力应变影响不明显,槽体混凝土在混凝土浇筑期间以及后续预应力锚索张拉后,混凝土主要表现为压应变,且有相应富余。第一次充水试验前后,槽体混凝土应力应变范围在 $-388.23 \sim -41.00\text{MPa}$ 之间。第二次充水试验满槽后对比充水前,槽体混凝土应力应变,变化范围在 $-2.39 \sim -35.15\text{MPa}$ 之间;泄水完成后对比充水前,变化范围在 $-7.68 \sim -29.21\text{MPa}$ 之间。两次充水试验期间,应力应变/温度/时间曲线变化连续,无明显突变、异变现象。

4 结 语

湍河渡槽预应力张拉施工工艺从作业交底开始到封锚都整个施工流程制定严格要求并进行量化,通过严格的施工管理,确保了预应力张拉施工顺利完成。安全监测数据分析表明,湍河渡槽钢绞线预应力损失较小,混凝土应变与温度均表现为负相关,表明槽体混凝土和预应力锚索处于正常工作状态,表明预应力张拉施工工艺满足技术要求和质量控制要求。2014年12月12日,南水北调中线工程正式全线通水,作为目前世界规模最大的U型输水渡槽工程,湍河渡槽的工程经验值得推广和借鉴。

参考文献:

(上接第152页)

工程运行结果表明,由于这种鼻坎基本满足了导流兼深孔泄洪洞的设计要求,任何水流条件下均能形成纵向拉开水舌,避免了现有窄缝挑坎的起挑水位限制,成功解决了该工程的技术问题,因此该体型对解决同类工程问题具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 倪汉根. 高效消能工[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2000.
- [2] 肖兴斌. 窄缝式消能工在高坝消能中的应用与发展综述[J]. 水电站设计, 2004, 20(3): 76-81.
- [3] 余胜. 窄缝式消能工的研究综述[J]. 内蒙古水利, 2011, 31(5): 5.
- [4] 焦爱萍, 孙五继, 周陈超, 等. 高拱坝分层多股射流水垫塘冲击压强研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 114-117.

- [1] 郑光俊, 吕国梁, 张传健, 等. 南水北调中线湍河渡槽设计与施工研究[J]. 人民长江, 2014, 45(6): 27-30+34.
- [2] 简兴昌, 梁仁强, 杨谢芸. 南水北调中线湍河渡槽槽身施工方案研究[J]. 人民长江, 2014, 45(6): 92-94+98.
- [3] 周继红. 南水北调工程湍河渡槽槽身预应力施工[J]. 水利水电施工, 2014, 02: 73-75+86.
- [4] 陆岸典, 丁仕辉. “U”形薄壳预应力渡槽施工在东深引水工程的应用[J]. 水利水电施工, 2007(3): 81-82+80.
- [5] 边秋璞, 雷进生, 孙庆. 漕河渡槽后张预应力结构原位测试方法[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(2): 23-25.
- [6] 牛宏力. 南水北调沙河渡槽预应力施工技术应用[J]. 水利水电施工, 2013(3): 24-27.
- [7] 张利, 王玉华, 王彩玲, 等. 大流量薄壁渡槽槽身张拉工艺仿真研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 13-17.
- [8] 陆晓敏, 赵引, 任青文, 等. U型渡槽环向无粘结预应力钢绞线束优化设置[J]. 水利水运工程学报, 2009(2): 55-60.
- [9] 陈华兵. 大型现浇预应力混凝土U形薄壳渡槽仿真模型试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [10] 世界最大U形渡槽通过技术验收[J]. 中国水能及电气化, 2014(7): 18.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T5224-2003 预应力混凝土用钢绞线[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [12] 国家能源局. DL/T 5083-2010 水电水利工程预应力锚索施工规范[S]. 北京: 中国电力出版社出版, 2010.

- [5] 张挺, 陈虹, 许唯临, 等. 高扩散低收缩差动挑坎I: 水力特性实验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 134-139.
- [6] 潘瑞文, 王海军. 柴石滩高坝挑流消能工体型优化研究[J]. 云南工业大学学报, 1997, 13(1): 15-20.
- [7] 宋昉, 马飞. 大流量表孔窄缝挑坎挑流控制试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2014, 29(6): 670-674.
- [8] 柳杨, 马飞, 吴建华. 窄缝坎的冲击波及水舌入水宽度的计算[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(3): 20-23+29.
- [9] 陈忠儒, 陈义东. 窄缝式消能工的水力特性及其体型研究[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(2): 25-29.
- [10] 中华人民共和国水利部. SL155-95 水工(常规)模型试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [11] 韩守都, 刘韩生, 倪汉根. 直线边墙窄缝挑坎的水力计算[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(2): 54-56.
- [12] 刘韩生. 新疆某水电站工程水工模型试验报告[R]. 水利部西北水利科学研究所, 2010. 8.