

# 世界首次在CFRD面板上施加预应力的试验实践

任尚卿

(葛洲坝集团 宜昌 443002)

**摘要:**自上世纪30年代初美国修建世界第一座CFRD以来,已80多年从未有过在CFRD面板上施加预应力的报道。笔者在2008年香港国际CFRD经验交流会上提出,在钢筋混凝土面板上施加预压应力,藉此达到提高抗裂性能、减少钢筋用量,这一创新提议得到与会专家的赞同。经三年多来在葛洲坝集团伊犁水电投资公司、水利部新疆水利厅勘测设计研究院、天津冶金中兴盛达公司及柳州OVM公司的大力支持下,通过斯木塔斯水电站挡水大坝——CFRD面板试验获得成功。本文简要地介绍大坝及施加预应力情况,并在总结实验的基础上提出改正的意见。

**关键词:**混凝土面板堆石坝(CFRD) 施加预压应力 缓粘结筋 超长索

## 1 试验经过

2008年12月,在香港国际CFRD技术经验交流会上笔者提出,在钢筋混凝土面板上施加预应力,使其成为预应力钢筋混凝土面板,它不仅减少或防止面板裂缝发生,而且可以节省钢筋的用量。此后历时3年半,在葛洲坝集团伊犁水电公司、水利部新疆水利厅勘测设计研究院、天津冶金集团中兴盛达公司、柳州OVM公司、国际面板坝协会以及攀科预应力公司的通力协作下,于2012年5月9日至6月6日完成了此项试验。试验时,先在斯木塔斯水电站挡水副坝8#块作为练兵为主坝9#坝块做好实战准备,通过试验获得圆满成功。

## 2 工程概况

斯木塔斯水电站位于我国西北部高原、严寒、强震的北疆阿拉牙孜河上,枢纽工程由挡水坝、泄洪工程、引水发电隧洞及电站厂房组成。工程以发电为主,兼有灌溉、防洪等综合效益。电站装机容量为11万kW·h(2台4万kW·h及2台1.5万kW·h),年平均发电量为3.2亿度。该工程由葛洲坝集团投资,由水利部新疆维吾尔自治区水利厅勘测设计研究院设计,并由葛洲坝集团新疆工程局及葛洲坝集团第一工程公司承包施工。工程自从2009年春进场筹建,当年秋开始正式施工,2012年秋有望蓄水发电,整个工程动态投资为8.8亿人民币。

## 3 挡水大坝

坝址河谷为不对称“V”河谷,两岸边坡陡峻,坡度为 $50^{\circ}$ ~ $85^{\circ}$ ,河床狭窄,底宽仅为8~12m。岸坡基岩裸露,岩性为黑云母花岗岩。经比选采用混凝土面板砂砾堆石坝。

## 3.1 主坝

最大坝高106m,坝顶宽度为10m,坝顶长为141.23m,上游坝坡为1:1.6,下游坝坡1:1.55(综合坝坡1:1.86),上游采用钢筋混凝土面板,下游采用干砌石护坡。

## 3.2 副坝

最大坝高为11.9m,坝顶宽度为10m,上下游坝坡均为1:1.5,坝顶长为347.4m,加上连接坝段85.2m,全长共计432.6m。上游采用钢筋混凝土面板,下游采用干砌石护坡。

## 4 坝体分区

主坝钢筋混凝土面板共 $1.3\text{万m}^3$ ,分17个坝块,其中河床受压区共6块(每块宽12m),左右两侧受拉区11块(每块均为6m宽),另加连接块3.23m,详见图1。坝体填筑总方量为 $106\text{万m}^3$ ;副坝位于河床左侧,钢筋混凝土面板共 $0.98\text{万m}^2$ ,标准坝块每块宽12m及6m两种,副坝坝体填筑总方量为 $25\text{万m}^3$ 。

### 4.1 主坝分区

坝体填筑分区详见图2。

从上游至下游依次为:

#### 4.1.1 截流堤

堤高为9m,堤顶宽为8m,上下游边坡为1:1.25,堤身填料为石渣料。

#### 4.1.2 上游填料区

该区顶宽为41.82m,上游边坡为1:2.5,为砂砾料填筑,由于位于混凝土趾墙上游故对填筑有一定的要求,压实时铺层厚度0.8m,压实后其压实度 $D_r > 0.85$ ,渗透系数 $k = 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。

#### 4.1.3 混凝土趾墙

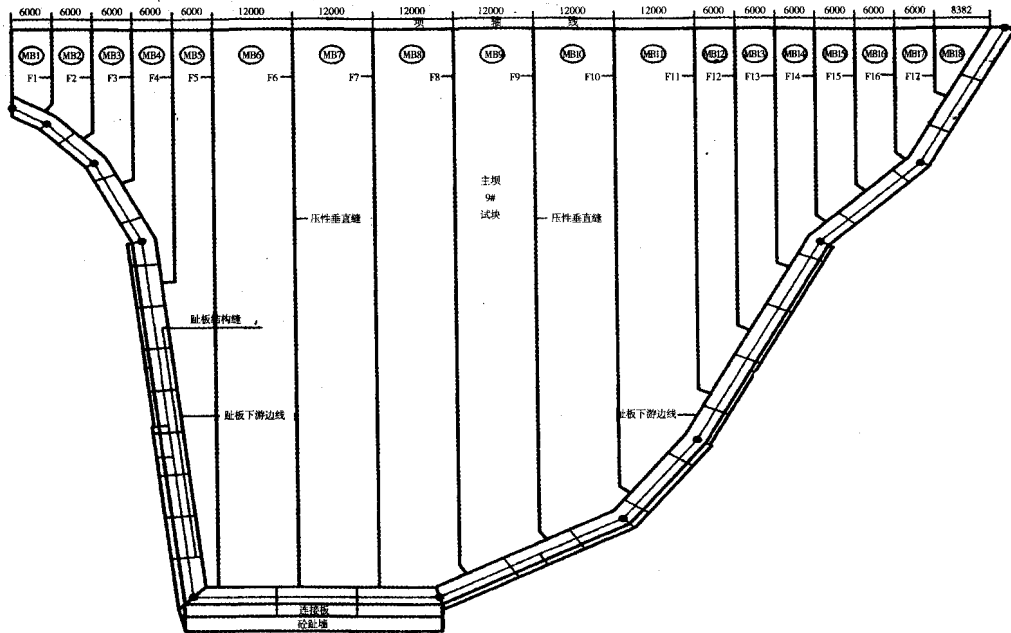
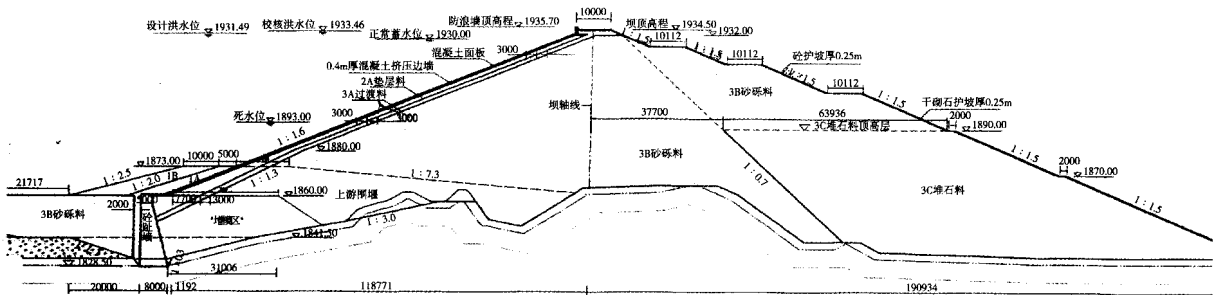


图1 主坝



坝顶填筑大样 1:100

图2 坝体填筑分区

墙高为31.5m，顶宽为2m，底宽为7.88m，上游采用垂直坡，下游坡为1:0.25，采用C25钢筋混凝土。

4.1.4 上游铺盖区

位于钢筋混凝土面板上游，高为13m，顶宽为5m，上游坡度为1:2，采用粘土料，分层压实。

4.1.5 上游盖重区

位于铺盖区上游，高为13m，顶宽为10m，上游坡度为1:2.5，采用砂砾石料填筑。

4.1.6 钢筋混凝土面板

位于挤压边墙上游，厚度为0.3~0.54m ( $d=0.3+0.0035H$ )，C30混凝土，纵横配筋率均为0.4%，采取单层双向钢筋。

4.1.7 挤压边墙

位于钢筋混凝土面板下游，高为0.4m，底宽0.79m，采用C10混凝土，表面涂刷一层乳化沥青。

4.1.8 垫层特别级配小区

位于趾板与面板交接处：采用M10 砂浆垫块，其垂直面板厚为200mm，底宽亦为200mm；特殊垫层料垂直面板厚为400mm，底宽为500mm，边坡为1:0.5，采用 $d_{max} \leq 20mm$ ，铺层厚度为0.2m，压实后其压实度 $Dr > 0.85$ 。

4.1.9 垫层区

位于挤压边墙下游，水平宽为3m，垫层料 $D_{max} \leq 80mm$ ，小于5mm净含量为35~15%，小于0.075mm含量8%，铺层厚度为0.4m，碾压后其压实度 $Dr > 0.85$ ，渗透系数 $k$ 控制在 $10^{-2} \sim 10^{-4} cm/s$ 。

4.1.10 过渡区

位于垫层区下游，水平宽为3m，过渡料 $D_{max} \leq 150mm$ ，铺层厚设0.4m，碾压后其压实度 $Dr > 0.85$ ，渗透系数 $k$ 控制在 $10^{-2} \sim 10^{-3} cm/s$ 。

4.1.11 砂砾区

本区为主堆石区，砂砾料小于5mm含量30%~50%，含泥量 $< 5%$ ，铺层厚为0.8m，碾压后其压实

度 $D_r > 0.85$ , 渗透系数 $k$ 控制在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$  cm/s。

#### 4.1.12 堆石料区

下游坝体的堆石料区, 采用开挖(弃渣料,  $D_{\max}$  600~800mm, 小于5mm的颗粒含量不超过20%, 小于0.1mm颗粒含量不超过5%, 铺层厚0.8m, 碾压后其空隙率 $n \leq 20\%$ 。

#### 4.1.13 增模区

两岸陡坡、趾墙下游“增模区”即过渡区, 其铺层厚度为0.4m, 压实后其压实度 $D_r > 0.85$ , 渗透系数控制在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$  cm/s。

### 4.2 副坝分区

坝体填筑从迎水面至背水面依次为:

#### 4.2.1 钢筋混凝土面板

其厚度为0.3, 纵横配筋率均为0.3%, 采用单层双向钢筋。

#### 4.2.2 挤压边墙

其尺寸为高0.4m, 底宽为0.79m, 采用C10混凝土, 表面刷一层乳化沥青。

#### 4.2.3 垫层及坝体的砂砾料区

其标准与主坝上部一样。

#### 4.2.4 下游护坡

采用0.3m厚干砌石。

### 5 面板施加预应力

原计划将斯木塔斯水电站拦河大坝打造成为世界第一座预应力钢筋混凝土面板堆石坝, 由于技术准备工作拖后, 赶不上整个工程的进度, 只能在副坝8#块和主坝9#块上做试验。

#### 5.1 副坝8#块施加预应力

该块钢筋混凝土面板长为18m, 宽为12m, 厚为0.3m, 纵横配筋率均为0.3%, 单层双向钢筋网。预应力筋采用天津冶金集团中兴盛达公司研发的 $\phi 15.24$ mm高强低松弛 1860MPa, 固化期为6个月的缓粘结筋, 由该公司无偿提供; 锚具使用柳州OVM公司无偿提供的防腐型的单孔锚。

##### 5.1.1 下料长度

该块共布设主筋9束及次筋2束, 其中5束主筋采取一端固定, 一端变角张拉, 其余4束均采用两端变角张拉。坝顶两束横向次筋均采用变角张拉的方式。根据张拉工艺及监测仪器情况, 主筋下料长度均为18m、2束次筋为11.5m, 下料后两端当即采用电工胶布绑扎以防粘结剂渗出。

##### 5.1.2 铺筋

预应力筋设置间距: 次筋为0.5m、主筋为1.2m。运输、铺筋采用人工抬扛, 边铺边调直,

并用编织带牢固地绑扎在钢筋网上。

##### 5.1.3 仪埋

为及时了解在施工过程或将来运行过程中混凝土面板的工况, 共埋设仪器14支, 其中测力计1支、钢索计3支、应变计9支、无应力计1支。

##### 5.1.4 板下检查

面板混凝土浇筑后, 进行板下密实性检查, 发现问题当即处理。

##### 5.1.5 张拉

当混凝土强度达到C30的75%时开始张拉, 张拉机具: 2台YDC 240 QX 千斤顶和2台ZB2-500AZ液压油泵及变角器、压力表等均由柳州OVM公司提供。

###### (1) 张拉程序

先张拉坝顶2束横向次筋, 锁口后再张拉9束纵向主筋。

###### (2) 张拉方式

由于副坝8#块相邻两侧的坝块及趾板均已浇筑混凝土, 2束水平次筋只能采用变角张拉。9束纵向主筋按操作条件及试验要求, 采取一端固定一端变角张拉及两端变角张拉的方式。

###### (3) 张拉控制应力

张拉控制应力 $P$ 为 $0.75 f_{pk}$  即 $0.75 \times 1860 \times 140 \times 10^{-3} = 195.3$  kN

###### (4) 理论伸长值计算

按直线索进行计算, 公式参照DL/T5083-2004【水电水利工程预应力锚索施工规范】。

###### (5) 分级加载

采取分5级加载对称同步张拉:

预紧—— $0.2 \sigma_{con} \xrightarrow{\text{持荷} 2\text{min}} 0.4 \sigma_{con} \xrightarrow{\text{持荷} 2\text{min}} 0.6 \sigma_{con} \xrightarrow{\text{持荷} 2\text{min}} 0.8 \sigma_{con} \xrightarrow{\text{持荷} 2\text{min}} 1.0 \sigma_{con} \xrightarrow{\text{稳压} 15\text{min}} \text{锁定}$ 。

张拉时采取以张拉力控制为主, 伸长值校核为辅的双控操作。张拉过程中2束次筋未出现异常状况, 张拉力和伸长值基本一致, 而且实测伸长值和理论计算差值在 $\pm 6\%$ 以内; 9束纵向主筋除5#束设有测力计外, 其余2组各4束尽管张拉方式有些不同, 但其张拉力和伸长值亦基本一致。唯有5#束测力计读数有些反常, 次日退锚后作了重新张拉, 结果比较正常。

##### 5.1.6 监测

在面板施加预应力前各类仪器均测得初始值, 安有测力计的5#束进行了观测, 锁定后测得175kN, 锚口有些损失。其他仪器只测得初始值。

#### 5.2 主坝9#块施加预应力

主坝9#试块,位于河床中部偏右,在受压区内。该块面板宽为12m,长为120~130m,C30混凝土厚为0.30~0.54m( $d=0.3+0.0035H$ ),纵横配筋率均为0.4%单层双向钢筋。预应力筋及锚具与副坝8#块相同。

#### 5.2.1 下料长度

该块铺设纵向主筋6束,坝顶横向次筋2束,共计8束。主筋下料长度为120m~130m,次筋2束均为11.5m。

#### 5.2.2 铺筋

预应力筋设置间距:次筋为0.5m、主筋为2m。第一束采用人工从坝顶抬扛至坝趾,考虑施工安全,后采用穿套管下束,这样既方便又快捷。人工调直后,采用编织带绑扎于钢筋网上。这里需要强调一下,伸出坝顶的主筋必须牢固的绑扎在封头模板上,以防下滑。

#### 5.2.3 仪埋

与副坝8#块一样,共埋设各种观测仪器17支,其中测力计2支、钢索计6支、应变计6支,无应力计3支。另在坝面上放有变形观测点共三排21个点。

#### 5.2.4 板下检查

当面板混凝土滑模离开锚具槽后或收仓起吊后,即开始检查,发现问题当即处理。

#### 5.2.5 张拉

在9#块坝顶快收仓时,做了三组9个试件进行自然养护,在成型时入仓混凝土温度为16℃,届时气温为15℃,4天后测得第一组试块强度为C30的72%,第5天午后开始张拉。本应按直线索计算其伸长值,由于纵筋属于超长索,加之混凝土浇筑时下料过程中架设在钢筋网上的溜槽下部节段摆移频繁,影响了预应力筋的顺直度,故按曲线索计算伸长值。此外,原计划分10级加载,增加持荷稳压时间,考虑到坝体施工总进度以及为避免施工中相互干扰,故仍按副坝8#块分5级加载。

##### (1) 张拉程序

先张拉坝顶2束水平次筋,随后张拉6束纵向主筋。

##### (2) 张拉方式

由于本块相邻的8#块、10#块面板及趾板混凝土已浇筑,故2束次筋采用一端固定,另一端变角张拉。6束主筋除1#束采取两端均用变角张拉外,其余5束上部采取顶端张拉,下部为变角张拉的方式。

##### (3) 张拉控制力

与副坝8#块相同,均为195.3kN。

##### (4) 分级加载

按5级双向同时加载,由两侧相向对称、同步张拉。持荷稳压时间稍比副坝8#块长些。

在2束次筋张拉过程中第一束很顺利,实测伸长值与理论计算值接近,但在第二束张拉时不起压,经分析这可能在混凝土振捣时不慎振捣器触及锚具,致使夹片松动。主筋1#束采取两端变角张拉方式,张拉情况比较好,当安有测力计的6#束张拉至 $0.6\sigma_{con}$ 时,天下大雨故只好停止作业。次日继续张拉,午前1#~6#全部张拉完毕。6束主筋张拉情况都比较正常,如5#束来看,计算伸长值为784mm,实测伸长值为736mm,差值不大。另从其中3#束测力计显示,锁定后为172.6kN。此次在主坝9#块面板上共施加了预应力为1035.6kN。

#### 5.2.6 监测

本坝块共埋设各类监测仪器17支,其中测力计2支,分别安装在3#、6#束坝顶面板端部;钢索计6支,埋设在3#束、应变计6支,埋设在3#束;无应力计3支,埋设在3#束旁。另在面板上左、中、右三排21个变形观测点。在面板施加预应力前均测得初始值。安有测力计的锚索在张拉过程中进行观测。

## 6 资料的整理分析

两个试验坝块共埋设各类仪器共31支,前后观测了23次:其中水库蓄水前15次、蓄水后8次。同时将施加过预应力面板的仪器测值与未加预应力面板的仪器测值作了对比,因副坝除8#块外其他坝块未埋设仪器故无法比较;主坝9#块与8#块除测力计外,均埋有相同仪器。蓄水前后的测值,前者大部为受压应力,后者拉应力居多,不难看出施加预应力面板与未施加预应力面板大为不同。

## 7 改正建议

为进一步完善CFRD面板施加预应力工程,下面几个问题应值得改正:

##### (1) 缓粘结预应力筋方面

要针对工程规模、运输条件采取定尺生产,小捆包装,必要时亦可将生产线搬入工地,这样既避免运输起吊中PE护层破损,又能方便施工,还能节省固化剂用量。

##### (2) 预应力筋布置

一般间距应控制在1~1.2m,布置在中和轴上



部为宜,如采取双层钢筋网则应铺设在上层网面。若替代更多的钢筋可采用 $\phi 21.6\text{mm}$ 缓粘结筋。

### (3) 施加预应力方面

对于超长索预应力筋张拉,最好采取多级加载、增加稳压时间以及间隙张拉工艺,这样所建立的有效预应力不致于过大的损失。

### (4) 面板混凝土施工工艺

面板混凝土浇筑程序安排上应周密考虑,尽量减少变角张拉方式,这样既能减少锚具槽安装数量,又不影响面板的整体性。尽量做到面板混凝土快速浇筑,为此,应增加入仓强度,最好使用带有真空脱水装置的滑模,以达到抗浮、早强、免抹,同时还可减少水泥用量。

(上接第22页)

## 5 工程应用

试验之后的运梁小车和缆载吊机应用于湖南矮寨大桥实际工程。2011年4月15日,矮寨大桥进行了首段192吨钢桁梁架设的试运行,见图16。对整个运梁系统的结构受力进行了测试,对钢桁梁运行的指挥和操作系统进行了检验,效果良好。该桥于2011年8月20日完成了所有钢桁梁的吊装,全桥合拢。轨索运梁与吊机提升系统架梁,见图17。

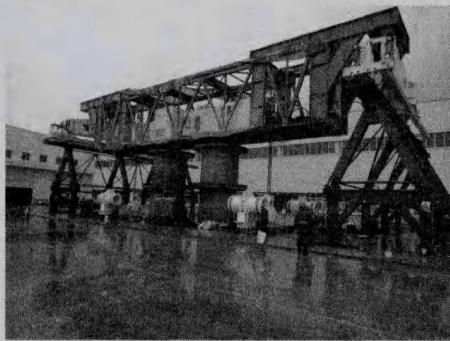


图15 缆载吊机试验



图16 运梁小车运梁

## 8 结语

历时一个月,耗资70万元的现场试验已告结束。通过试验、监测表明,对CFRD面板施加预应力,无论是单向或双向都是便捷可行的,只要工序安排得当,此项工作不会占用直线工期。从监测数据分析来看,施加预应力的面板与未施加预应力的面板完全不一样,它的抗裂性是其它措施难以替代的。至于降低钢筋用量的问题,要根据配筋率大小、布筋结构来定。当然还有施加预应力的面板其宽度亦可增加,这对减少面板分缝亦有好处。总之,在CFRD面板上施加预应力是有利无弊的,此法可以推广应用。



图17 轨索运梁与吊机提升系统架梁

## 6 结论

所有试验和工程结果表明,轨索运梁方法巧妙地把1200米跨度的吊装过渡为14.5米吊装;结构具有较好的安全性,也具有很好的经济性。该方法不仅适用于山区峡谷的悬索桥,也可以使用在大跨度中承式与下承式拱桥的主梁拼装上。具有很广阔的应用前景和推广价值。

### 参考文献

- [1] 郭友根. 矮寨悬索桥主桁架设计方案研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2009
- [2] 李俊龙. 悬索桥加劲梁轨索移梁架设系统力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010
- [3] 马碧波. 悬索桥轨索运梁系统设计参数与误差影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011年
- [4] 冯剑. 矮寨特大悬索桥缩尺模型设计研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. TSG Q7002-2007桥式起重机型式试验细则[s]
- [6] 中华人民共和国国家标准. GB-T5905-1986起重机试验规范和程序[s]