

龙口水利枢纽安全监测设计综述

江晓文¹ 贡保臣² 朱蔚霞² 王浩³ 温旭东¹

(1. 浙江华电乌溪江水力发电厂, 浙江省衢州 32401; 2. 北京木联能工程科技有限公司, 北京 100011; 3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

[摘要]: 本文根据工程区的地址情况, 明确了龙口水利枢纽安全监测的设计原则, 详细介绍了龙口水利枢纽各主要建筑物的变形、渗流、应力、温度等各方面的仪器布置。

[关键词]: 安全监测; 监测设计; 设计原则; 挠度; 坝基变形

1 概述

龙口水利枢纽位于黄河中游北干流上, 主要由拦河坝、河床式电站厂房、泄流底孔、表孔、排沙洞、下游消能设施、副厂房、GIS 开关站等建筑物组成。水库总库容 1.96 亿 m^3 , 电站装有 4 台 100MW 和 1 台 20MW 机组, 总装机容量 420MW。根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252-2000) 的规定, 按库容 1.96 亿 m^3 , 确定工程等别为 II 等工程, 工程规模为大 (2) 型。按照工程等别为 II 等工程, 确定主要建筑物大坝、电站厂房、泄水建筑物按 2 级建筑物设计, 导墙及护坡等按 3 级建筑物设计。坝基持力层 $\text{O}_2\text{m}_2^{2-1}$ 岩层致密坚硬, 但层间存在泥化夹层及钙质充填夹层, 对坝基抗滑稳定起控制作用

左岸布置电站厂房, 右岸布置泄洪建筑物。其中底孔位于河床中部, 表孔位于右岸岸边。拦河坝坝型为混凝土重力坝, 坝顶高程 900m, 坝顶全长 408m, 最大坝高 51m。其坝段从左岸至右岸依次布置为非溢流坝段、主安装间坝段、电站坝段、小机组坝段、副安装间坝段、隔墩坝段、底孔坝段、表孔坝段及非溢流坝段, 副厂房及 GIS 开关站布置在左岸非溢流坝段下游。

2 安全监测系统设计原则

根据龙口大坝坝基内存在多层软弱夹层、坝基深层岩体弹模低于浅层岩体、坝基内存在深层承压水的工程地质条件, 以及坝体水工建筑物的结构特点, 大坝安全监测系统以坝基、坝体变形及与此相关的扬压力、渗漏量为主, 结合进行坝体温度、泥沙冲淤及水力学监测。监测设计以大坝运行期安全监测为主, 同时兼顾施工期的安全监测, 以监测为主, 校核设计和科学研究为辅。

监测仪器的布置遵循以下基本原则:

(1) 设计应能全面反映大坝的工作状况, 仪器布置要目的明确, 重点突出。监测设施应尽量集中, 便于资料分析。

(2) 监测仪器设备应精确可靠, 稳定耐久。在满足观测精度的前提下, 力求观测方便、直观。

(3) 在监测断面选择及测点布置上, 既要考虑分布的均匀性, 又必须重点考虑有特点的结构部位及地质构造。重要部位布设多种监测设施, 以便相互验证, 便于资料分析。

- (4) 施工期与运行期连续监测, 及时了解并掌握大坝在施工期、初期蓄水及运行期的工作状态。
- (5) 以自动监测为主, 人工监测为辅, 自动监测与人工监测相结合。
- (6) 满足《混凝土大坝安全监测技术规范》(DL/T 5178-2003) 中的有关规定。

3 主要监测内容

龙口水利枢纽为大(2)型工程, 大坝、泄水建筑物、电站厂房为2级建筑物。依据《混凝土大坝安全监测技术规范》(DL/T 5178-2003), 选设下列监测项目: 位移、挠度、接缝和裂缝、渗漏量、扬压力、绕坝渗流、混凝土温度、坝基温度、坝前淤积、下游冲淤、水位、库水温、气温等。

根据本工程规模较大、设置的观测项目较多、观测工作劳动强度大等特点, 为迅速及时地取得大坝工作状态的各种信息, 改善观测人员工作条件, 采用智能型分布式数据采集系统对各观测项目进行自动化监测。

3.1 变形监测

(1) 坝体、坝基水平位移

在位于高程895.0m的观测廊道和高程852.0m的基础灌浆及主排水廊道内布置引张线进行监测。

① 高程895.0m观测廊道内布置一条引张线。1#、19#坝段的垂线作为引张线的控制基点。1#~19#坝段每坝段设一个测点, 共19个测点, 监测近坝顶的坝体水平位移。

② 10#~18#、3#~10#坝段基础灌浆及主排水廊道内各布置一条引张线, 以3#、10#、18#坝段垂线作为引张线的控制基点。4#~10#、11#~17#坝段每坝段设一个测点, 共14个测点, 监测坝基的水平位移。

采用单向引张线仪进行自动监测。采用读数显微镜进行人工观测。

(2) 坝体挠度

坝体挠度采用垂线监测。选择位于坝肩的1#、19#非溢流坝段和位于河床的3#主安装间坝段、10#副安装间坝段、18#表孔坝段各布置一条垂线。为减少垂线长度, 保证监测精度, 坝顶至灌浆及主排水廊道设正垂线, 灌浆及主排水廊道高程以下设倒垂线, 两者在位于灌浆及主排水廊道、扬压力观测廊道及横向灌浆排水廊道的垂线测站内相结合。倒垂线的锚固点位于坝基NJ301下, 倒垂孔深入基岩30~35m不等。正垂线锚固点位于坝顶混凝土内。

垂线在高程852.0m灌浆及主排水廊道和高程895.0m观测廊道处设垂线测站。采用三向垂线座标仪自动监测大坝的三向变位。人工采用MZ-1型垂线瞄准器进行观测。

(3) 坝基变形

为监测坝基 $O_2m_2^{-1}$ 层内基岩的层间变形, 利用18#坝段坝轴线部位基岩中的直径2.0m的地勘竖井, 布置一条倒垂线。浮托装置设在与灌浆及主排水廊道同高程的监测站内, 在竖井内各软弱夹层间的岩石上设监测点。监测仪器及监测方法同坝体挠度监测。

另在井壁上各软弱夹层缝面布置大量程的三向测缝计, 其测值与各倒垂线测值互校。

(4) 垂直位移

坝体、坝基和近坝区岩体的垂直位移, 采用一等水准测量。

坝下游布设一等水准环线。由坝体水准点, 沿两岸上坝公路、左岸进厂公路的水准点, 组成闭合高程控制网。

水准点包括水准基点、工作基点、沉陷标点三种。

水准基点的布设: 在坝下游沉陷影响范围(约3km)以外, 左、右岸各埋设一组水准基点, 每组水准基点不少于3个水准标石。

工作基点的布设：为观测坝顶的沉陷，在左、右岸灌浆平洞内各布设一组工作基点，每组不少于 2 个测点。平洞内一年四季温度变化较小，作为观测坝顶沉陷的基准值。

灌浆及主排水廊道底高程 852.0m，水准路线可通过左岸下游进厂公路经 3[#]坝段通向下游坝面的交通廊道引入。工作基点布置在左岸下游 872.90m 高程平台坝体交通廊道出口附近。

沉陷标点的布设：在每个坝段坝顶下游侧埋设一个沉陷标点，计 19 个测点，用以观测坝顶的垂直位移。在灌浆及主排水廊道和下游灌浆排水廊道内，每坝段各埋设一个沉陷标点，计 38 个测点。在监测坝基垂直位移的同时，通过每坝段的两个测值，可推算出坝基的倾斜。为监测大坝下游近坝区岩体的垂直位移，并检测工作基点的稳定性，按逐步趋近的原则，沿两岸上坝、进厂公路每隔 0.3~0.5km 左右埋设固定沉陷标点。标点埋设在新鲜、稳固的岩石上。

水准测量采用精密水准测量，观测仪器采用自动安平水准仪和钢瓦钢尺。

另外，在较平坦的 4[#]~18[#]坝段的灌浆及主排水廊道内布置静力水准测点，每坝段一个，共计 15 个测点，实现主要坝段坝基垂直位移的自动化监测。

(5) 坝区平面监测网

为监测近坝岩体和左、右岸岸坡的稳定，检查 1[#]、3[#]、10[#]、18[#]、19[#]五个坝段的倒垂线在坝基内的锚固点的稳定性，分别在大坝下游 1200m 范围内左、右岸各建造 4~6 座控制点监测墩，在坝顶上 5 条正垂线锚固点处设监测墩，两者共同组成外部变形控制网。

(6) 接缝监测

在 2[#]、3[#]、8[#]、13[#]、17[#]、18[#]共七个坝段的坝体横缝上，埋设三向测缝计，每个坝段 3~4 个测点，监测上述坝段横缝的三维变形。

(7) 坝上、下游淤积和冲刷监测

在坝上、下游可能形成淤积和冲刷的区域内，采用断面测量法或地形测量法观测。

3.2 渗流监测

(1) 坝基扬压力监测

大坝坝基除设有上游帷幕外，还在下游坝趾处设有下游帷幕。为了对坝基扬压力进行全面监测，设 2 个纵向监测断面，6 个横向监测断面。

第一个纵向监测断面布置在上游灌浆及主排水廊道内，第一道排水幕线上。第二个纵向监测断面布置在下游灌浆排水廊道内。每个纵向监测断面在每个坝段设一个测点，埋设测压管，测压管深入基岩 1m。

横向监测断面布置在 1[#]、5[#]、8[#]、13[#]、18[#]、19[#]坝段，共六个断面，并在建基面附近设扬压力监测廊道。每个监测坝段布置 5~6 个测点，测点布置以上游密、下游渐疏为原则。第一个测点布置在基础帷幕的上游，埋设测压管，监测淤沙对渗流的影响；第二个测点布置在第一道排水幕线上，埋设深孔双管式测压管，监测 NJ303、NJ302 软弱夹层的扬压力，测压管进水管段应埋设在软弱夹层以下 0.5~1m 的基岩中；第三、四、五个测点分别布置在第一、二道排水幕下游及第二道排水幕线上，埋设测压管，监测第一、二道排水幕后及第二道排水幕线上的扬压力；第六个测点布置在下游灌浆排水廊道内第三道排水幕线上，埋设深孔双管式测压管，监测坝趾处基岩内 NJ304、NJ303、NJ302 软弱夹层的扬压力。

(13[#]底孔坝段、18[#]表孔坝段下游一级消力池基础内，各埋设一排渗压计，间距 10~20m，监测消力池基础的扬压力。在底孔、表孔一级消力池左、右岸边墙上，布置 4 个监测孔，监测坝基扬压力。

坝基扬压力的自动化监测采用渗压计进行，人工采用压力表进行观测。

(2) 坝体渗透监测

为监测坝体水平施工缝的渗透压力，在 13[#]、18[#]两个坝段上游面至坝体排水孔的水平施工缝上，埋设渗压计。渗压计布置高程 857.0m 处，靠近上游密些，下游渐疏。每个坝段布置四个测点。

(3) 混凝土蜗壳及尾水管渗透压力监测

在 8[#]电站坝段钢筋混凝土蜗壳及尾水管内，沿环向布置渗压计。共布置三个断面，每个断面 4 个测点。

(4) 坝体、坝基渗流量监测

坝基渗流量：在 4[#]、11[#]、13[#]等坝段排水廊道及交通廊道内，分段布置量水堰，量测各段坝基排水孔的涌水量。

坝体渗流量：在 5[#]、15[#]坝段灌浆及主排水廊道内横向排水沟中，分段布置量水堰，监测坝体各段的渗流量。

在右岸 859m 高程廊道和左岸 863m 高程廊道下游排水沟处各设置一个量水堰，监测左右坝肩渗水情况。在各集水井中，通过量水堰或集水井流量计，监测坝体、坝基的总渗流量。

(5) 绕坝渗流监测

根据大坝与两岸连接的轮廓线，在左、右岸坝肩上、下游岸坡方向各布置三列测压管，每列 3~4 个测压管，管底高程分别为 860.0、865.0m。测压管总数为 20 个，用渗压计进行自动化监测。

(6) 库区渗漏监测

根据库区原地勘孔的分布，从中选择库区中水库左、右岸距河床 3000~5000m 范围内的监测孔作为运行期库区渗漏的监测孔，共 15 孔，不足部分重新钻孔，安装渗压计监测库区渗漏情况。

(7) 渗漏水水质分析

选择有代表性的排水孔或绕坝渗流孔，定期取水进行水质分析。如发现有析出物或侵蚀性水流出现时，应取水样进行全项目分析，在渗漏分析的同时，应做库水水质分析。

3.3 应力、应变及温度监测

应力、应变及温度监测包括坝基变形监测、接缝监测、钢筋应力监测、泥沙压力监测和坝体、坝基温度监测等。

(1) 监测坝段的选取

根据坝基情况、坝体结构、日照影响等多方面因素，主要选取 2[#]、8[#]、13[#]、18[#]四个坝段，分别作为非溢流坝段、电站坝段、底孔坝段、表孔坝段的代表坝段来布置监测仪器。

(2) 坝基变形

在 2[#]、8[#]、13[#]、18[#]共四个坝段的基岩中，埋设基岩多点变位计，监测坝基内 O₂m₂⁻¹ 层三维变形情况。测点的布设，沿垂直坝轴线方向每个监测断面布置 3~4 支多点变位计，每支仪器在坝基不同高程处布置 3 个测点。

(3) 钢筋应力监测

在 8[#]电站坝段、13[#]底孔坝段的孔口附近钢筋混凝土内埋设钢筋计，监测钢筋应力，同时监测混凝土温度。

(4) 坝体、坝基温度监测

坝体温度：在 2[#]、13[#]、18[#]三个坝段的中心截面，按网格布置测点。测点间距 8m，埋设温度计进行自动化监测。

坝面温度：下游坝面受日照影响，混凝土温度变幅较大。在 2[#]、13[#]四个坝段下游坝面中部各埋设四个表面温度计，用以监测下游坝面温度和混凝土的热传导性。表面温度计的埋设，沿水平方向间距分别为 10、20、40、60cm。

基岩温度：在 2[#]、8[#]、13[#]、18[#]四个坝段的坝基岩石中，分别在上游、下游、中间部位沿铅直方

向埋设三排温度计。温度计距基岩面分别为 0、1.5、3.0、5.0m。

(5) 接缝监测

坝体纵缝监测：在 2[#]、8[#]、13[#]、18[#]四个坝段纵缝或宽缝上埋设 2~4 支单向测缝计，监测坝体纵缝监测开合变化情况。

坝体横缝监测：在 2[#]、8[#]、13[#]、18[#]四个坝段的相邻的坝体横缝上埋设单向测缝计。测缝计的布置原则，沿高程布置 3~4 个断面，每个断面不少于六个测点（包括三向测缝计在内）。

坝体与基岩面接触监测：在 2[#]、8[#]、13[#]、18[#]共四个坝段的坝踵、坝趾与基岩的结合面埋设单向测缝计。每坝段 3~5 个测点。在左右岸坡坝段与两岸基岩接触面埋设测缝计，沿高程布设三个监测断面，每断面 2 个测点。

在 13[#]底孔坝段和 18[#]表孔坝段的坝趾与消力池底板间的纵缝上，各埋设两只单向测缝计。在 8[#]电站坝段尾水渠底板与基岩接触面上，沿顺水流方向埋设两只单向测缝计。

(6) 淤沙压力监测

在 2[#]、11[#]、13[#]、18[#]坝段坝踵 860.0m 高程处各布设 1 只土压力计，用以监测大坝上游面淤积形成的泥沙压力。

(7) 下游尾岩（深层滑动抗力体）监测

底孔、表孔坝段下游消力池下游尾水基岩，作为深层滑动的抗力体，需打锚锁进行加固处理。为了解锚锁和抗力岩体的受力情况，在 13[#]、17[#]坝段下游的锚锁顶部安装锚锁应力计，每个坝段布置 2 套。

3.4 环境量和水力学监测

(1) 水位监测

在建筑物投入运行前，布设上、下游水位测点。在坝上游 500m 及坝下游 270m 左右各布置水位计井，通过遥测自记水位计进行监测。

(2) 库水温监测

在 2[#]、13[#]、18[#]三个坝段的中心横截面上距上游坝面 5~10cm 的坝体混凝土内，埋设差动电阻式温度计。温度计沿高程相距 4m。

另在 2[#]、11[#]、18[#]三个坝段坝前设三条水温测线，采用深水温度计监测库水温度，温度计间距 4m。

(3) 气温

在 11[#]坝段下游高程 872.90m 平台上设置一个气温监测站，采用自记温度计监测。

(4) 冰凌监测

主要包括冰凌现象和冰层厚度，坝前冰盖层的整体移动和冰压力观测。采用目测法观测。

(5) 水力学监测

主要采用目测法对水流流态、水面线、下游雾化等进行观测。

3.5 自动化监测系统设计

自动化监测系统主要由传感器、监测分站、监测总站、电缆、网络通讯连接和安全监测系统软、硬件组成。传感器通过信号电缆与数据采集单元（监测分站）相连，信号电缆将数据采集单元所采集的信号传输到监控管理中心（监测总站），从而实现自动化监测。

自动化监测分站主要设有数据采集单元（MCU），每一个数据采集单元的布置是根据其监控测点数量的多少、类型和距离确定的。每一个数据采集单元对所辖监测仪器按工控机的命令或设定的时间自动进行监测，并转化为数字量，暂存在数据采集单元中。各个数据采集单元中的数字量通过信号电缆并根据工控机的命令向主机传送所测数据。

4 结语

主体建筑物监测项目满足规范要求，各种安全监测设施齐全，观测系统布置合理。从现有埋设的仪器和观测资料整理和分析成果看出，水库下闸蓄水前大坝各监测量均比较正常，大坝设计、施工质量均在可控范围内，大坝目前运行状态正常，未发现明显的不利因素。