

水坝健康状态监测系统

陈得民

(北京必创科技股份有限公司 北京 100085)

摘要:大坝健康状态监测是确保大坝安全运行的必要手段。本文通过对大坝的健康状态做了分析,针对大坝的特点,研究设计一套基于传感器网络的坝体健康状态监测系统。主要从系统总体结构、变形监测、渗流监测、应力监测的设备与方法以及软件系统进行了阐述,对测点布置、测试设备、测试方法及原理等都做了详细的论述。

关键词:水坝监测 传感器 变形监测 渗流监测 应力监测

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.03.002

1 概述

1.1 系统背景

水库安全度汛一直是我国防汛抗洪的难点和重点,中小型水库的安全度汛已成为当前全国防汛工作的一个薄弱环节,大部分水库缺少必要的安全监测等设施,检查手段落后,隐患很大。一旦发生局部暴雨洪水,极易引发溃坝事件,轻则造成财产损失,重则造成重大人员伤亡或毁灭性灾害。

国内外大坝失事的实例不少。1975年8月暴雨洪水导致板桥水库和石漫滩水库失事,造成大面积水灾和人员伤亡,京广线也被局部冲毁,损失巨大。1993年8月27日沟后水库失事,造成水库下游13km处的恰卜恰镇500人伤亡,直接经济损失1.53亿元。中国大坝年均溃坝率为世界年均溃坝率的4倍多;即使20世纪80年代后,水库发生溃决的概率大幅下降,但1991年到2003年,平均每年依旧有近20座水库溃坝。大坝安全关系到百姓的生命财产安全,任重而道远,故开展现代化的安全监测措施是十分有必要的。本方案设计的智能化、自动化、信息化水利大坝在线安全监测系统,具有数据远程传输、实时在线监测预警、网络化功能,对保障水利大坝的安全运营和日常养护管理、应对重大自然灾害和突发事件具有重大作用[1]。

1.2 系统内容

大坝在线安全监测是通过自动化仪器观测和人工的现场检查监视,对大坝坝体、坝肩、近坝

区岸坡及坝周围环境所作的测量及观察,通过合理的计算和分析对工程的工作状态进行评估,对工程未来性态进行预报,以确保工程的安全。监测项目主要包括:变形监测,渗流监测,应力监测[2]。

1.3 系统目标

安全监测除了及时掌握建筑物的工作状态,确保安全外,其还有诊断、预测、法律、研究等方面的作用[3]。

(1) 诊断:包括验证设计参数、改进设计;对施工技术进行评估和改进;对不安全迹象和险情的诊断并采取措施进行加固等;

(2) 预测:运用长期积累的观测资料掌握变化规律,对建筑物的未来状态做出及时有效的预报;

(3) 法律:对由于工程事故而引起的责任和赔偿问题,观测资料有助于确定原因和责任,以便法庭作出公正判决;

(4) 研究:观测是建筑物工作形态的真实反映,可为未来设计提供定量信息等。

2 总体设计

一个监测系统主要由现场的监测仪器、导线、采集测控单元,通讯装置、计算机及其相应的监测软件等构成。图1为监测系统的基本结构图:

3 变形监测[4]

大坝变形的的主要概念有:表面位移、内部位移和整体位移。表面和内部位移都包含垂直、水平位移两方面,整体位移包含弯曲、倾斜、裂

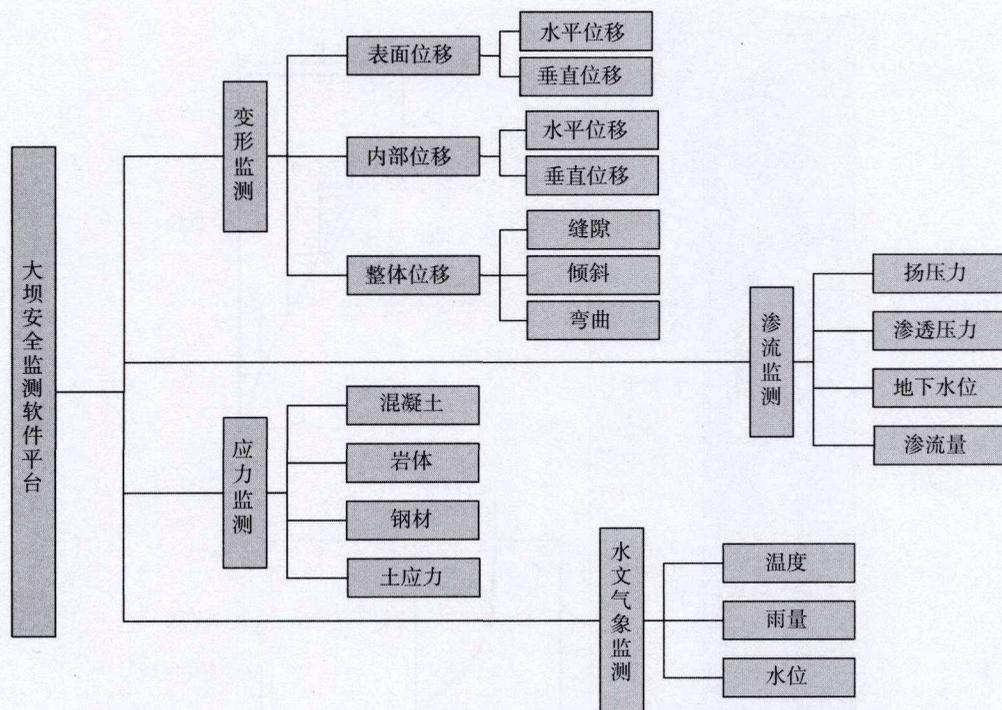


图1 总体框架

缝三方面。这些指标中，通过以下几个观测项目可以反映大坝变形：

- ◆ 表面水平位移观测
- ◆ 垂直位移观测（包括坝体表面、内部）
- ◆ 挠度（与以上联合，表征内部位移）
- ◆ 倾斜度
- ◆ 裂缝情况（变形的极端情况）

传感器布点原则：

- ◆ 一般在表面布设的点多一些，原因是：方便、也是位移变化最大的部位；
- ◆ 内部和各方向上的布点一般应该大于3个；

3.1 观测断面的布设

不同结构和材料筑成的坝体监测断面选择不同，以混凝土坝（重力坝或拱坝等）大坝为例，其各项指标布设点位置如下：

◆ 位移观测

纵断面：在坝顶、怀廊道中各设置一个，坝高时在坝中间部位增设1~2纵继面；

内部断面（横断面）：布置在最大坝高断面上，结构复杂断面处1~2个；

- ◆ 挠度观测（倾斜观测与挠度观测设置一致）同一坝段设置2~3条垂线即可，同一垂线设

置多个测点；

- ◆ 裂缝观测（设在接缝、突变部位和重点部位）

横断面与纵断面应该相互交叉，共用一个测点；

如图2、图3所示为水坝内部位移的典型监测断面，测斜管底部和多点位移计底部锚头应深入稳定岩层或涂层2m；测量精度与传感器间距相关，推荐的距离为3m~8m，特殊条件可放宽；可结合GPS系统进行表面位移的监测。

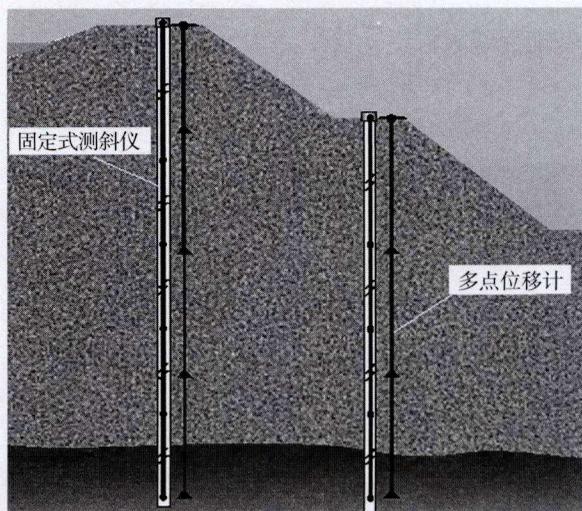


图2 坝体内部位移典型监测断面

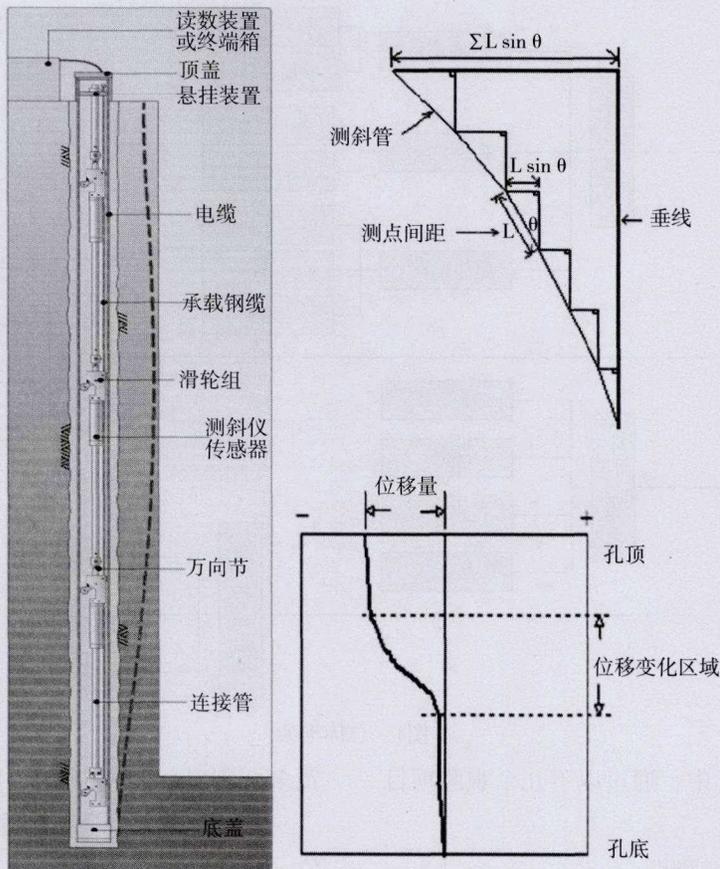


图3 坝体内部水平位移监测方法

3.2 监测仪器选择

本方案主要选择振弦式传感器(如图4)结合智能数据记录仪对坝体的变形进行监测。因大坝的地质构造、性态等不同,各观测项的监测仪器可以按如下进行选择:

- (1) 表面位移监测: 大量程位移传感器, 智能无线数据记录仪。
- (2) 深层位移变形监测: 多点位移计。
- (3) 内部裂缝监测: 型土体位移计。

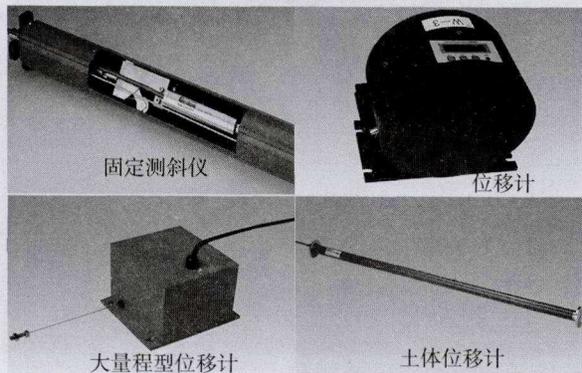


图4 振弦传感器

4 渗流监测[5]

国际大坝委员会在1988~1994年对世界溃坝进行分析认为,各种坝形溃坝比例基本一致,在土石坝中溃坝的主要原因是:

- (1) 洪水漫顶, 占39%;
- (2) 渗透破坏, 占30% (其中坝体渗透破坏18%, 坝基渗透12%);

而其他坝型的渗透压力(如扬压力)对坝体安全的影响也是巨大的。因此,对坝体渗透状况进行监测是非常有必要的。

以混凝土或砌石坝为例,渗流监测的内容如图5所示:

土坝、土石坝或面板堆石坝的渗流监测如图6所示:

4.1 观测断面的布设

传感器布置原则:

- (1) 测压管或传感器安装高程应低于最低浸润线下2m为宜;

(2) 为保证传感器的测量精度，传感器的量程以覆盖浸润线变化范围为准，如图7所示。

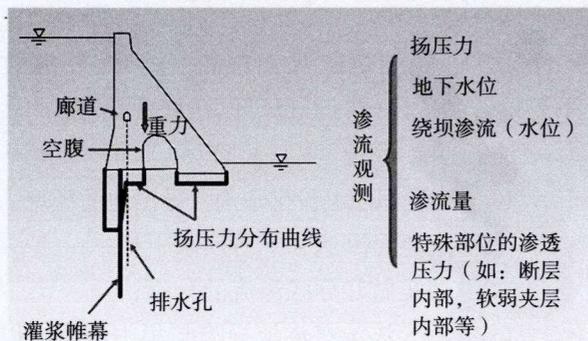


图5 混凝土坝和砌石坝的渗流监测

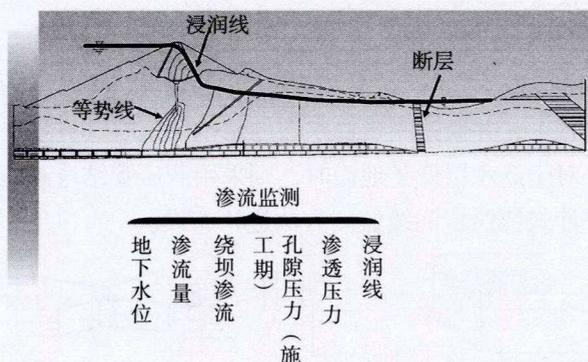


图6 土坝等坝型的渗流监测

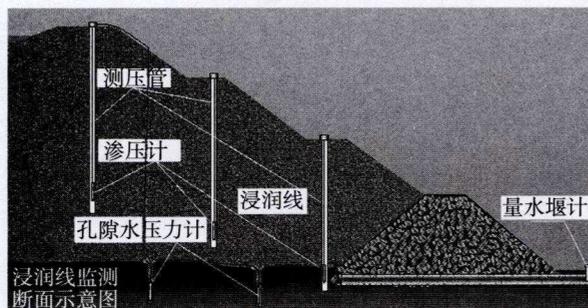


图7 浸润线观测断面

4.2 扬压力监测

扬压力监测适用的坝型有：混凝土坝、砌石坝（薄拱坝不观测），观测断面：

(1) 坝基

纵断面：1个，帷幕、排水孔下游侧或排水帷幕线上；

横断面：2~5个；

观测点：横断面上3~5个点，如图8所示；

(2) 坝体

数量较坝基少，并与坝基结合。在分缝初设，1~3个横断面。

上游密，排水孔上下游各设观测点。

扬压力监测采用渗压计（见图9），渗压计具有便于遥测、无需廊道、精度高、无滞后等优点，适用于坝基和坝体的扬压力监测。

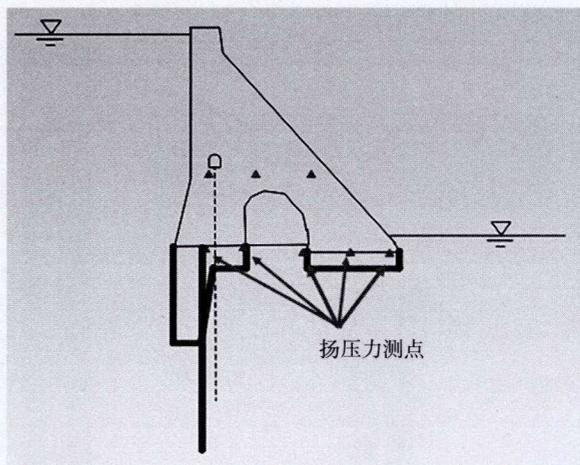


图8 扬压力观测点示意图

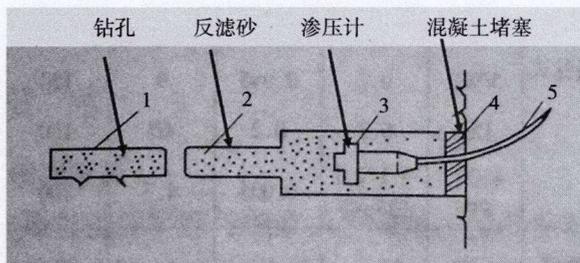


图9 渗压计埋设示意图

4.3 渗透压力监测

渗透压力主要针对土石坝（包括面板堆石坝）的监测，观测断面与观测点的选取：

(1) 坝基：天然岩层、人工防渗设施（如帷幕或防渗墙）、排水系统等；

横向观测断面：3~5个，顺流线布；

观测点：

1) 对于水平铺盖防渗的坝：铺盖末端、与坝体防渗设施结合的部位布设观测点；

2) 对于垂直截渗防渗的坝：在墙的上下游各布设一个测点；

3) 对于多层透水地基：在弱透水层下部，排水井和渗透出口处布设观测点；

4) 对于岩石地基：在断层、软弱层和帷幕等地质结构中布设观测点。

(2) 坝体

包括坝体内部渗透压力分布和浸润面位置横

向观测断面与坝基相配合,一般3个,布置成观测垂线,按坝体流线布置。

与扬压力测定一样,渗透压力使用渗压计法,适用性广,便于自动化并且广泛应用。图10为渗压计的埋设方法:

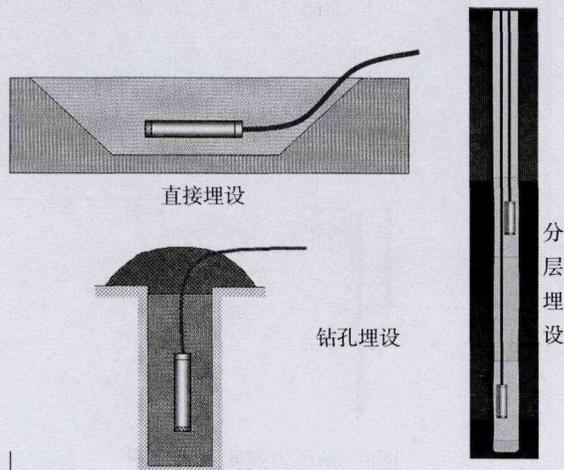


图10 渗压计埋设方法

4.4 地下水位监测

地下水位监测与渗压观测原理相同,只是观测的目的是地下水位而已,观测方法参照渗透压力监测。

4.5 渗流量监测

4.5.1 观测内容:

- (1) 总渗流量;
- (2) 分区渗流量;
- (3) 各坝段渗流量(河床、溢流段等);
- (4) 坝体、坝基、绕渗流量;
- (5) 导渗渗流量,如减压井、排水井等;

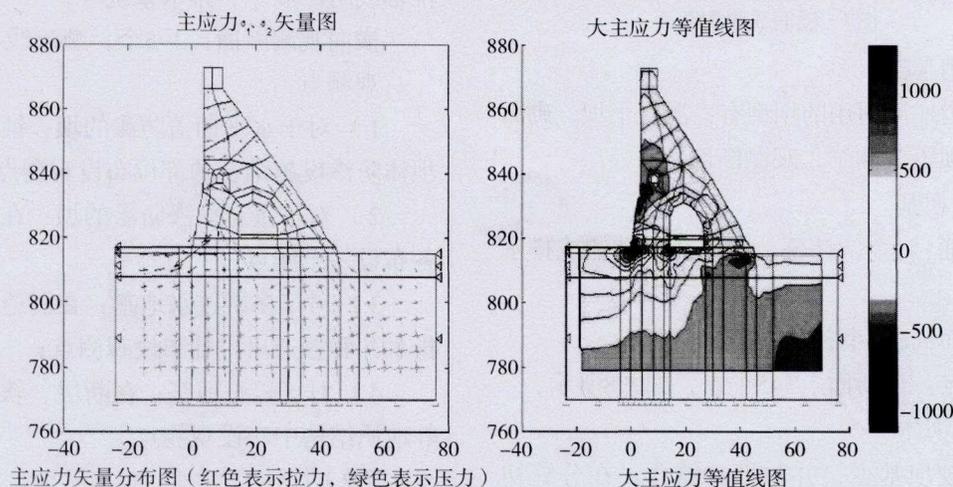


图12 混凝土坝的应力分布

4.5.2 布置:

(1) 土坝或土石坝,在坝后设置,分区用隔水墙分隔;

(2) 混凝土坝、砌石坝和面板坝,一般在下游检查廊道内进行,也可以在坝后设置;

4.5.3 注意:

(1) 坝后坝面上设排水沟,导出地面径流;

(2) 避免泄洪流和下游回水干扰;

(3) 切实做好分区渗流的分隔;

(4) 用导渗沟将渗流导渗与集中部位,以便于观测;

4.5.4 观测方法:

在坝趾下游的导渗沟设置量水堰(见图11),并通过测量量水堰的水位来反映其流量。对于透水层低于地面时,则采用测压管结合渗压计式依照浸润线监测方法进行布置。

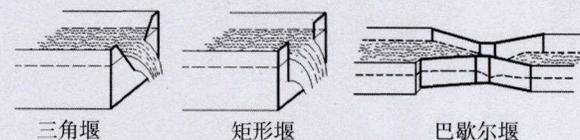


图11 量水堰

5 应力监测[6]

坝体应力是表征大坝安全的重要指标,大坝应力状况是大坝设计者关心的问题,也是大坝管理者关心的问题。坝体应力的观测较为复杂,总体来说,大坝应力监测的主要内容包括:混凝土应力应变观测、岩体应力应变观测、钢材应力应变观测和土应力观测,详见图12、图13、图14。

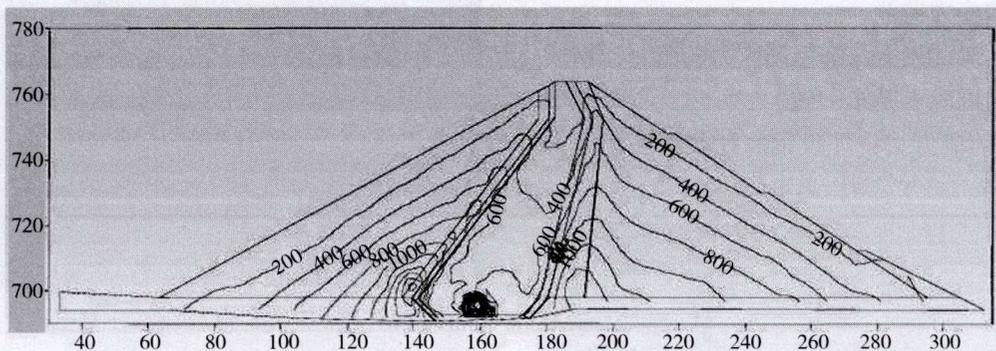


图13 斜心墙土石坝大主应力等值线图

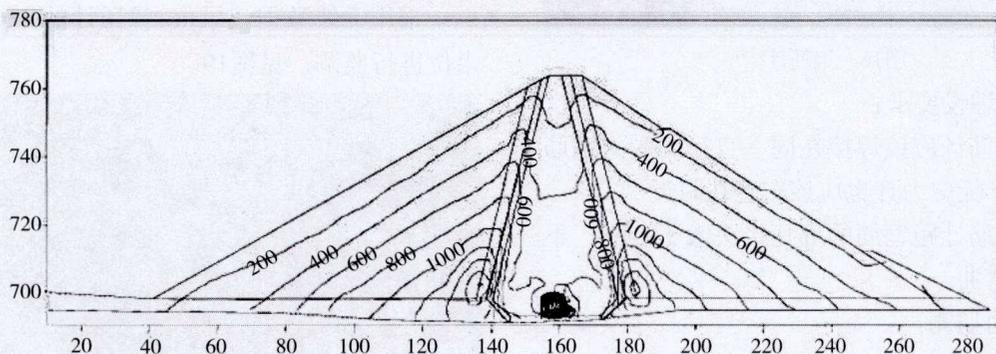


图14 直心墙土石坝大主应力等值线图

5.1 混凝土的应力监测

混凝土应力监测的原理是通过大混凝土中埋设应变计来测定混凝土的应变值，由应变值通过弹性理论计算混凝土的应力值。因为应变便于测量，同时通过测定水平、倾斜和垂直方向的应力值，来计算测点的大小主应力值。

5.1.1 混凝土应力需要观测和试验的内容：

- (1) 总应变；
- (2) 温度与湿度引起的应变；
- (3) 混凝土各龄期下弹性模量试验；
- (4) 混凝土蠕变和松弛试验；

5.1.2 观测方法

- (1) 应力计（单向、多项）：测定总应变；
- (2) 无应力计：测定因为温度、湿度和化学变化引起的应变，见图15；

5.2 岩体的应力监测

5.2.1 监测部位：坝基地下工程、坝肩岩体、洞室 观测方法与仪器：

- (1) 岩基应变计（即：大应变计，标距长度为1m~2m），多点位移计，滑动测微计；
- (2) 岩石弹性模量可用室内试验或钻孔弹

模仪测定；

5.2.2 测点布置：

- (1) 对于重力坝应该重点在坝踵与坝趾区基岩，对于拱坝重点在两岸坝肩；
- (2) 高边坡监测可采用多点位移计观测；
- (3) 洞室应力监测应该用收敛仪、三向位移计、多点位移计等，对于锚杆可以用锚杆测力计。

5.2.3 计算方法：

由应变计算应力；由位移计算应变，再计算应力。

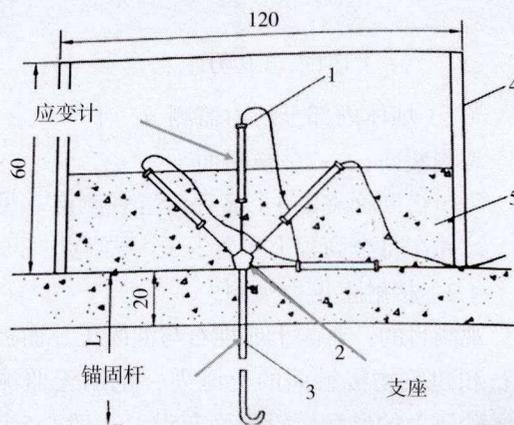


图15 埋设在混凝土内部的应变计

5.3 钢材的应力监测

主要是对混凝土内部钢筋应力的监测，钢板应力监测与混凝土基本一致。

(1) 监测方法：埋设钢筋计和钢筋无应力计，见图16；

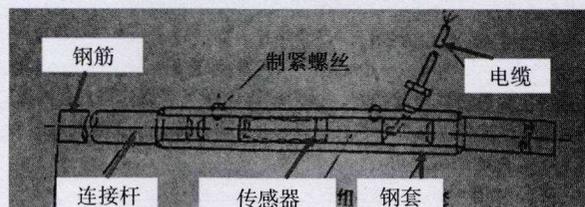


图16 钢筋计

(2) 埋设要求：

1) 钢筋计应该焊接在同一直径的受力钢筋的轴线上，无应力计也应该布置在附近

2) 钢筋计距钢筋的绑扎接头大于1.5m，不使传感器弯曲。

5.4 土压力监测

土体基本上不能承受拉力，主要承受压力，因此土体应力监测以压力监测为主。通过土压力计可以测出总应力值，通过孔隙水压力计可以测出孔隙压力，通过吸力计可以测定土体的吸力，这样可以计算出土体的有效应力。在两个相互垂直的方向上设置一组土压力计（见图17），就可以计算出土体的大小主应力值。

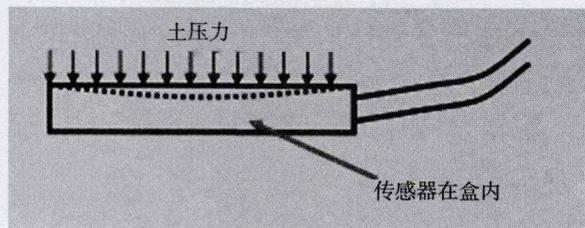


图17 土压力计

(1) 坝体内部土压力监测

观测断面：1~2个横断面

每个横断面在2~3个高程设置观测点（见图18），并在每个高程上布置2~3个观测点。

(2) 接触土压力观测

观测目的：监测土或堆石与混凝土、面板、岩石和建筑物接触面的土压力，也用于监测上游淤砂压力的监测。沿界面布设，一般3~5个观测点。

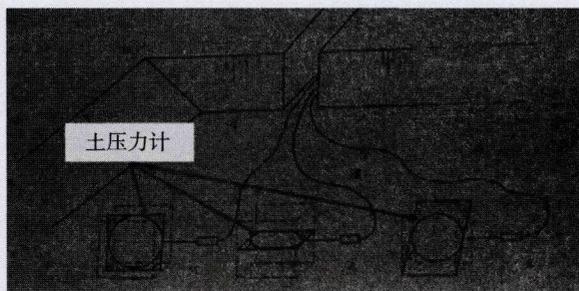


图18 不同方向埋设示意图

5.5 水位监测

采用无线数据记录仪+渗压计的方式对水库水位进行监测，见图19。

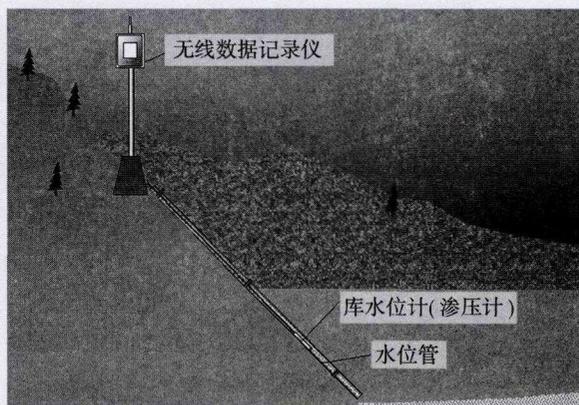


图19 库水位监测布置示意图

6 在线监测系统

水坝安全在线监测系统由监测点、监测站、监测管理站、监测管理中心站及相关的数据传输网络等组成。在线监测系统具有数据自动采集、现场网络通讯及远程通讯、数据存储及处理分析、预警、防雷及抗干扰等功能；具有实时显示测点及监测站的信息，可远程实时采集任意监测点的数据，并通过系统软件显示任意监测点的过程线、当前状态等信息，并具有报警功能。

(1) 监测点即监测仪器或其位置；

(2) 监测站即数据采集装置或电缆集线箱，见图20；

(3) 监测管理站即安装由采集软件的计算机与外设，简称采集计算机；

(4) 监测管理中心站即安装有监测管理软件与外设的的中控场所；

(5) 数据传输网络即连接监测站、监测管理站和监测管理中心站的通讯网络，按照传输方

式可以有线、光纤或无线，还可以是以太网或Internet网。

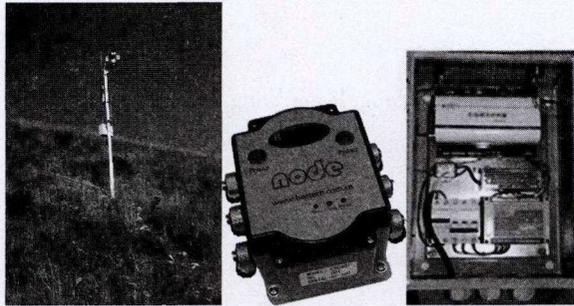


图20 数据采集装置和集线箱

本系统选用的传感器和数据采集装置具有以下特点：

- ◆无线智能组网
- ◆多种传感器接口可选
- ◆灵活多变的配置模式
- ◆低功耗设计
- ◆全天候防水设计
- ◆开放端口通讯规约，便于与GIS等第三方在线监测系统集成。

7 软件平台

运行信息查询系统，可以查询实时、历史数据信息；可以录入水文观测表、打印各种雨量报表和水位报表；可以查询各个要素的图表信息，见图21、图22。

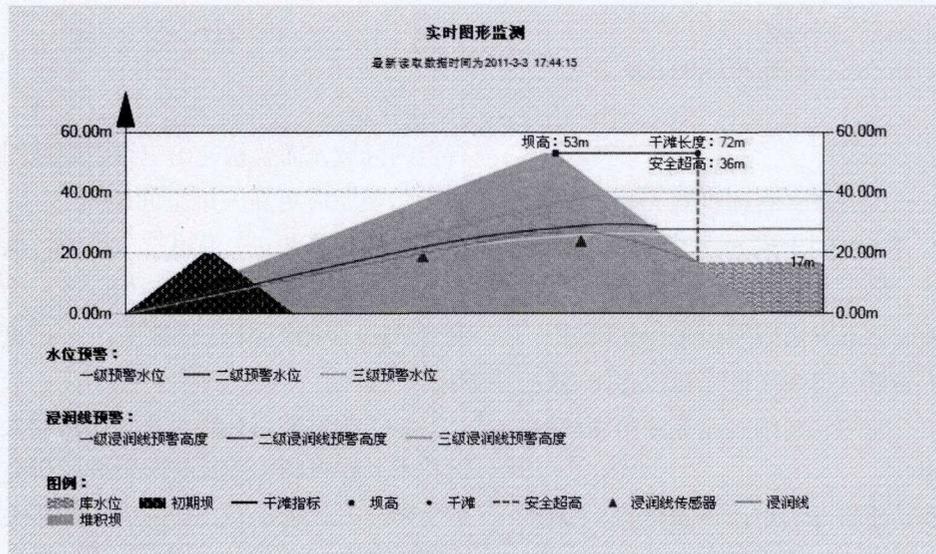


图21 坝体实时图形监测

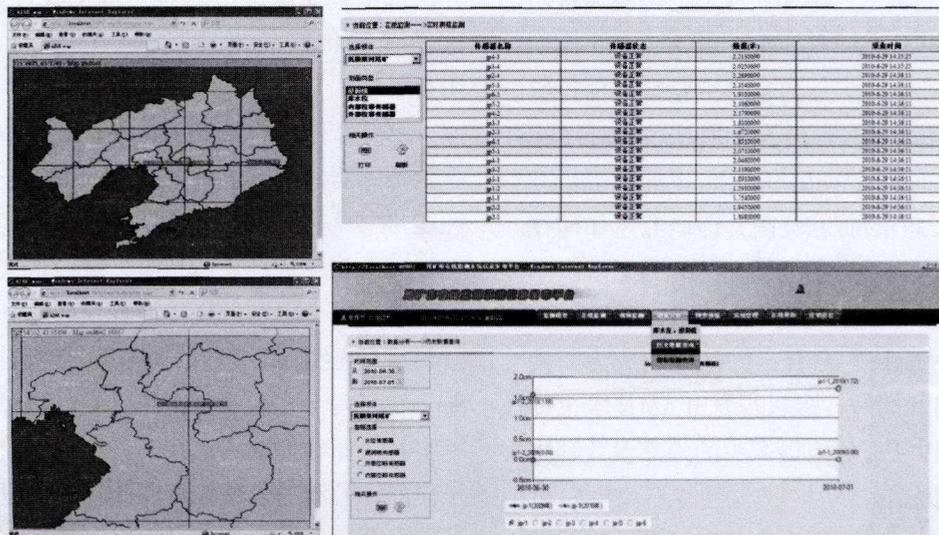


图22 图形化远程在线监测

(下转第34页)

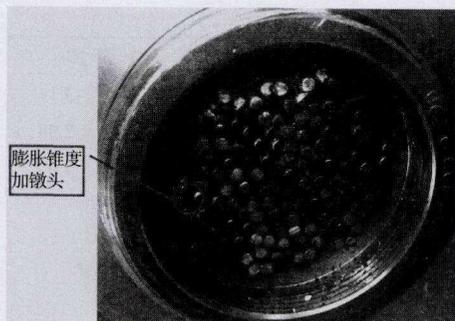


图5 锚固套端部膨胀锥度加镦头方案



图6 19根钢绞线静载试验

表2 19孔拉索静载试验结果对照

序号	改进方案	公称破断力(kN)	母材实际破断力(kN)	拉伸最大力(kN)	锚固效率(%)	延伸率(%)
1		4948	5253.5	5074.9	0.966	2.99
2	膨胀锥度4°	4948	5253.5	5085.4	0.968	3.2
3		4948	5253.5	5095.9	0.973	3.39
4		4948	5253.5	5122.2	0.975	3.65
5	膨胀锥度3°、镦头	4948	5253.5	5143.2	0.979	4.1
6		4948	5253.5	5111.7	0.973	3

锚固性能合格依据^[5]: 锚固效率系数应 $\geq 95\%$, 延伸率应 $\geq 2\%$

从试验结果可以看出, 以上2种方案均能够满足要求, 但就性价比而言, 由于镦头处理过程繁杂, 且容易出错, 因此选择将膨胀锥度增加至4°的方案更加优越。

4 结论

本文通过对增加挤压拉索锚固性能的不同改进方案进行研究, 得到了能够满足较为极端条件下使用的旧式拱桥换索用拉索, 具有很好的实际工程参考性。通过试验研究验证, 得到了以下结论:

(1) 在锚固套中粘结金刚砂、增加铜片、增加挤压簧的方案对提升拉索锚固性能的作用不明显, 在原锚固套长度减少80%长度的条件下, 不能实现锚固性能的优化;

(2) 增加锚固套端部膨胀锥度能够显著提高拉索锚固性能, 但不是锥度越大效果越好, 当锥度为4°时作用最优;

(3) 增加锚固套端部膨胀锥度+镦头处的方式对拉索锚固性能也非常显著, 当锥度为3°+镦头处理时作用最显著;

(4) 单孔得到的优化结果在多孔拉索上依然适用, 19孔拉索在按照单孔拉索优化结论进行试验后依然能够满足要求;

(5) 所有优化方案中, 锥度为3°+镦头处理与锥度为4°两种方式作用最为有效, 但从性价比上进行对比, 端部膨胀锥度为4°时方案最优。

参考文献

- [1] 孙振海, 韦达洁. 拱桥吊杆病害分析及更换设计[J]. 西部交通科技, 2011,7:64-67.
- [2] 张秀才, 谢奎, 任毅勇. 浅析“宜宾市小南门金沙江大桥”桥塌原因与修缮方案[J]. 河南城建高等专科学校学报, 2002,11(2):15-17.
- [3] 孙海霞, 唐继舜, 陈远久. 吊杆拱桥换索工程施工简介[J]. 四川建筑, 2007,27(2):189-190.
- [4] 张挺. 广西邕宁邕江大桥短掉杆更换施工[J]. 山西交通科技, 2004,6:47-49.
- [5] fib Acceptance of stay cable systems using prestressing steels Recommendation prepared by Task Group 9.2. January 2005.

(上接第15页)

本系统可与数据采集服务器分开部署, 提供采集系统的稳定性。信息查询系统可以不用部署到采集服务器上, 可以部署到值班室的计算机终端上。方便值班人员浏览查看图文并茂的水雨情信息。各种表格都提供打印功能, 只要安装了打印机即可随时打印数据表格。

参考文献

- [1] Joo Francisco Alves Silveira. 小型水坝安全管理现状[J]. 岩土工程学报, 2008(11): 26-31.
- [2] 王国营. 大型水坝实时监测系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2006(25):193-196.
- [3] 梅风波. 水利枢纽工程大坝安全监测方式研究[J]. 价值工程, 2004(20):31-33.
- [4] 刘芸华, 付典龙, 刘洋. 峡江水利枢纽工程变形监测设计[J]. 陕西水利, 2014(06): 77-80.
- [5] 行增晖. 大坝安全渗流监测系统的设计与实现[D]. 南京理工大学, 2006.
- [6] 皮海琪. 大坝工程的安全监测控制管理[D]. 华南理工大学, 2011.