

盛金保 张建生◎编著

小浪底土石坝工程 安全监测与分析



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

盛金保 张建生◎编著

小浪底土石坝工程 安全监测与分析



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是《黄河小浪底水利枢纽工程安全监测设计》与《黄河小浪底水利枢纽大坝安全鉴定》等研究成果的汇总。全书以小浪底水利枢纽工程安全监测设计、系统集成、资料评价为主线,共分八章,其中第二章与第三章介绍小浪底水利枢纽工程安全监测设计与安全监测自动化系统;第四章介绍监测仪器的现场检测与可靠性评价技术、原始测值的可靠性检验与监测成果的合理性分析技术和开发的监测系统评价软件;第五章至第八章分别为大坝变形和渗流、左岸山体,以及近坝库岸监测资料的分析技术。

本书可作为水工结构、水利水电工程、工程力学和安全监控等领域的设计、施工管理、运行管理和科研工作科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

小浪底土石坝工程安全监测与分析/盛金保,张建成编著. —南京:河海大学出版社,2013. 12
ISBN 978-7-5630-3583-0

I. ①小… II. ①盛…②张… III. ①黄河—水利枢纽—土石坝—安全监测—洛阳市 IV. ①TV632. 613

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 298653 号

书 名 小浪底土石坝工程安全监测与分析
书 号 ISBN 978-7-5630-3583-0/TV·371
责任编辑 成 微
封面设计 黄 煜
出版发行 河海大学出版社
地 址 南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话 (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)
经 销 江苏省新华发行集团有限公司
排 版 南京新翰博图文制作有限公司
印 刷 南京新洲印刷有限公司
开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 12 印张 297 千字
版 次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
定 价 39.00 元

《小浪底土石坝工程安全监测与分析》

编写人员

主 编：盛金保 张建生

副 主 编：肖 强

执行主编：王 琳 刘成栋

编写人员：张建生 肖 强 盛金保 马福恒 刘成栋

王 琳 向 衍 屈章彬 王昭升 张东升

宋书克 袁 辉 龙智飞 李子阳 陈 琳

苏 畅 魏立巍 张 凯

前 言

小浪底水利枢纽位于黄河中游最后一个峡谷出口,是黄河干流三门峡水利枢纽以下唯一能够取得较大库容的重大控制性工程。枢纽控制 92.3% 的黄河流域面积,控制黄河花园口以上 91.8% 的天然径流量和近 100% 的黄河泥沙,在黄河治理开发中具有承上启下、控制黄河下游水沙的重要战略地位。

小浪底水利枢纽水库总库容 126.5 亿 m^3 ,水电站装机容量 180 万 kW,是一座大(1)型综合利用的水利枢纽。其任务主要是以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,蓄清排浑,除害兴利,综合利用。工程建成后,下游防洪标准由 60 年一遇提高至 1 000 年一遇,基本解除了下游凌汛威胁。枢纽由拦河主坝、副坝、泄洪排沙系统及引水发电系统组成,其中泄水系统和引水发电系统均布置在左岸单薄层状山体之中,集中引水、集中消能,地下厂房及其他洞室在左岸山体内纵横交错,构成复杂地下洞群。

枢纽建基于含软弱泥化夹层、倾向下游倾角约 10° 的二叠系和三叠系的砂岩、黏土岩互层上,断裂构造发育,工程地质条件和水文地质条件复杂。场址地震基本烈度为Ⅶ度,大坝及进水塔等建筑物地震设计烈度为Ⅷ度。

拦河主坝为座落在深厚覆盖层(最大厚度为 70 m)上带内铺盖的壤土斜心墙堆石坝,最大坝高 160 m。副坝为壤土心墙堆石坝,最大坝高为 45 m。泄水建筑物由 9 条泄洪洞和一座 3 孔陡槽式溢洪道组成,9 条泄洪洞中 3 条为由导流洞改建的洞径为 14.5 m 的多级孔板消能泄洪洞、3 条为洞径 6.5 m 的预应力混凝土排沙洞、3 条为城门洞式(10.0~10.5)m×(11.5~13.0)m 明流洞。9 条泄洪洞和溢洪道采用出口集中消能方式,消能水垫塘宽 356 m、长 185~205 m、水深 28 m。引水发电建筑物采用以地下厂房为核心的三洞室布置,地下厂房长 251.50 m、宽 26.20 m、高 61.44 m。泄洪、引水发电、灌溉洞进口集中布置,形成高 113.0 m、宽 276.4 m 的进水塔群。小浪底水利枢纽工程地质条件复杂,工程技术难度高,规模巨大,水库运用要求严格,是我国目前地质条件复杂和技术难度高的大(I)型水利枢纽之一。

由于小浪底水利枢纽工程独特的水文、泥沙条件,复杂的地形和工程地质条件,以及综合开发目标所要求的严格运用方式,形成了小浪底水利枢纽在建筑物总体布局和建筑物设计上的鲜明特点,许多工程技术问题超出了我国的经验水平。为保证枢纽各建筑物在施工期、运行期的安全,并能同时验证设计,提高我国高土石坝的设计、管理水平,在枢纽各建筑

物上布设了较多的监测项目,形成了较为完备的安全监测系统。枢纽监测数据自动采集系统是目前国内正常运用的最大的监测系统之一,也是目前连续在线监测无故障运行最长的监测系统之一。安全监控系统实现了数据的自动采集、自动处理、分析和评价,是目前能够自动在线综合评判的安全监控系统之一,为枢纽实现“无人值班、少人值守”创造了条件。

与此同时,整个安全监测系统已运行多年,积累了海量监测信息。成果的可靠性对准确评价工程运行性态至关重要,这不仅需要评价监测资料自身的完整性、可靠性及合理性,而且还应结合设计、施工资料等方面分析监测资料是否反映了大坝或工程运行的实际情况。

本著作一方面评述了小浪底水利枢纽的安全监测系统实施及根据工程实际增设的监测项目,另外结合《土石坝安全监测技术规范》(SL 551—2012)、《大坝安全监测仪器安装标准》(SL 531—2012)、《大坝安全监测仪器检验测试规程》(SL 530—2012)、《大坝安全自动监测系统设备基本条件》(SL 268—2001)等规程规范介绍了枢纽安全监控系统的评价关键技术。

本著作编写过程中,有关领导和专家给予了热忱的指导和支持,书中文字写作和图表制作得到了有关人员的支持和帮助;本著作的出版得到了南京水利科学研究院出版基金以及国家自然科学基金(编号:51179108、51209145)的资助,特表示感谢。

书中存在的错误和不足之处,敬请批评、指正。

编者

2013年9月

目 录

第一章 概述	1
1.1 工程概况	1
1.2 枢纽建筑物	2
1.3 工程建设概况	5
第二章 安全监测总体设计	6
2.1 工程特点	6
2.2 安全监测设计原则	6
2.3 大坝安全监测总体设计	7
2.4 左岸山体监测总体设计	12
2.5 近坝库岸边坡稳定监测总体设计	12
2.6 安全监测自动化系统	13
第三章 监测仪器现场检测与可靠性评价	16
3.1 监测系统的评价流程	16
3.2 典型监测传感器的检测方法	17
3.3 电缆断线(短路)长度检测	21
3.4 监测仪器可靠性评价	24
第四章 监测资料的可靠性检验与合理性分析	25
4.1 可靠性评价原理	25
4.2 合理性分析方法	26
4.3 安全监测系统评价软件研制	29
4.4 监测资料的可靠性评价与合理性分析	40
4.5 结语	58

第五章 大坝变形监测资料分析与反演	59
5.1 大坝变形观测概况	59
5.2 外部变形监测资料分析与反演	63
5.3 坝顶裂缝监测资料分析与预测	108
5.4 主坝应力应变监测资料分析	115
5.5 结语	124
第六章 大坝渗流监测资料分析与反演	125
6.1 大坝渗流监测概况	125
6.2 大坝渗流监测资料分析	128
6.3 大坝渗流监测资料反演	150
6.4 结语	153
第七章 左岸山体监测资料分析	155
7.1 概述	155
7.2 变形监测资料分析	156
7.3 地下水位监测资料分析	157
7.4 小结	159
第八章 近坝库岸边坡稳定监测资料分析	160
8.1 监测概况	160
8.2 滑坡体监测资料分析	161
8.3 结语	180
参考文献	181

第一章 概 述

1.1 工程概况

黄河小浪底水利枢纽位于黄河中游豫、晋两省交界处的洛阳市孟津县小浪底,在洛阳市以北黄河中游最后一段出口处,南距洛阳市 40 km,上距三门峡水利枢纽坝址 130 km,下距郑州花园口 128 km,具体位置见图 1-1。小浪底水利枢纽控制流域面积 69.4 万 km^2 ,占黄河流域总面积的 92.3%,是黄河干流三门峡以下唯一拥有较大库容的控制性工程。小浪底水利枢纽是治理开发黄河的关键性工程,属国家“八五”期间重点项目,其任务主要是以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,蓄清排浑,除害兴利,综合利用。坝址位置示意图见图 1-2。

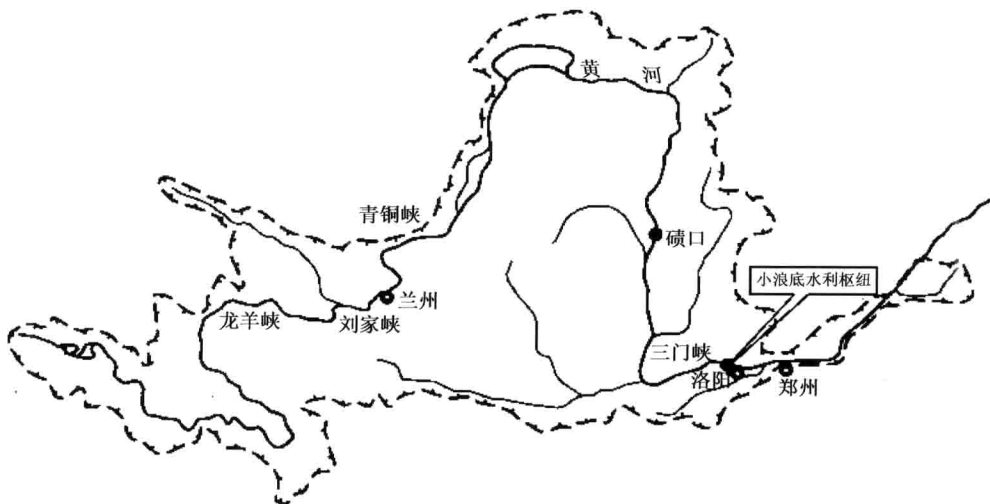


图 1-1 黄河小浪底水利枢纽工程位置

小浪底水利枢纽坝顶高程 281.00 m,正常蓄水位 275.00 m,死水位 230.00 m,汛期防洪限制水位 254.00 m,防凌限制水位 266.00 m。水库总库容 126.5 亿 m^3 ,其中拦沙库容 75.5 亿 m^3 ,防洪库容 40.5 亿 m^3 ,调水调沙库容 10.5 亿 m^3 。水库正常蓄水位和校核洪水位同为 275.00 m,是一座大(1)型综合利用的水利枢纽。枢纽按 1 000 年一遇洪水设计,相应洪峰流量 40 000 m^3/s ,设计洪水位 274.00 m;按 10 000 年一遇洪水校核,相应洪峰流量 52 300 m^3/s 。枢纽建成后下游防洪标准由 60 年一遇提高到 1 000 年一遇,基本解除凌汛灾害,减少下游淤积;灌溉面积增加至 4 000 万亩^①;多年平均增加非汛期调节水量 17 亿 m^3 ;

① 1 亩=1/5 公顷。

水电站装机容量 180 万 kW,多年平均发电量 51 亿 kW·h。

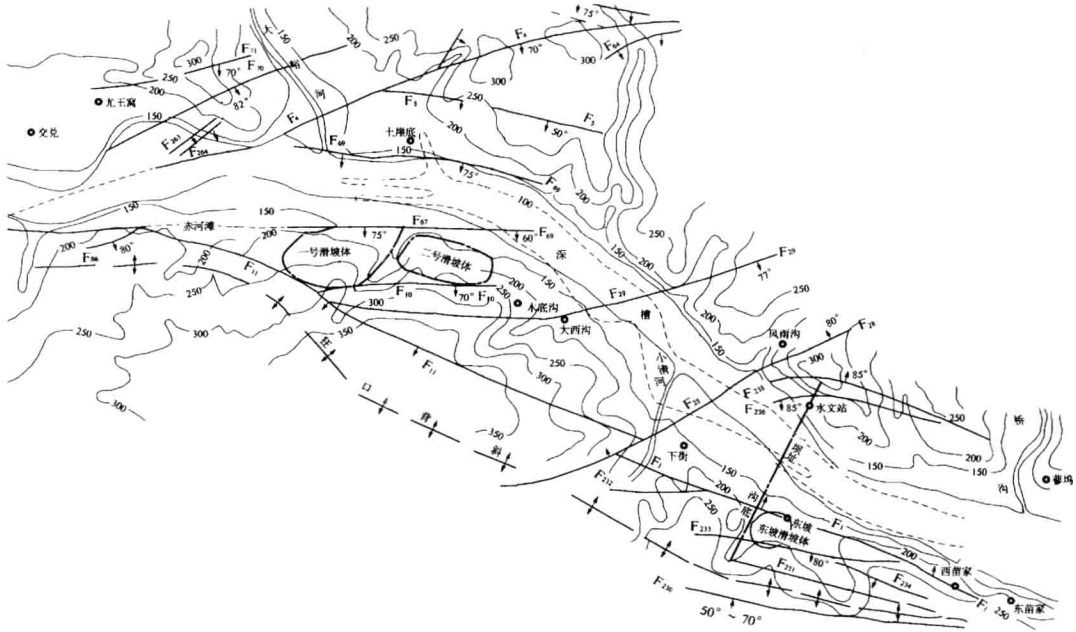


图 1-2 小浪底坝址位置示意图

1.2 枢纽建筑物

小浪底水利枢纽工程等别为 I 等,主要建筑物为 1 级建筑物。枢纽工程由拦河大坝、泄洪排沙系统和引水发电系统三部分组成,详见图 1-3。

拦河大坝包括主坝和副坝;泄洪排沙建筑物由三条直径为 14.5 m 的孔板消能泄洪洞(施工前期为导流洞,大河截流后改建)、三条断面尺寸为(10.0~10.5)m×(11.5~13.0)m 的明流泄洪洞、三条直径为 6.5 m 的排沙洞,一条直径为 3.5 m 的压力灌溉洞,一座正常溢洪道,十座进水塔,一座综合消能水垫塘组成;引水发电系统由六条直径为 7.8 m 的引水发电洞,一座长 251.50 m、跨度为 26.20 m、最大开挖深度为 61.44 m 的地下厂房,一座主变室,一座尾闸室和三条断面为 12.0 m×19.0 m 的尾水洞组成。小浪底水利枢纽受地形地质条件限制和运行要求,泄洪洞、发电洞、灌溉洞和溢洪道进水口集中布置在主坝左岸山体,出水口集中布置在主坝下游左岸,地下厂房位于左岸 T 形山梁交汇处的腹部,呈空间立体交叉,地下洞室之多、程度之复杂为国内外罕见^[1]。

1.2.1 挡水建筑物

小浪底水利枢纽拦河大坝分为主坝和副坝。主坝为座落在深厚覆盖层基础上带内铺盖的壤土斜心墙堆石坝,最大坝高 160 m,坝顶高程 281.00 m,坝顶长 1 667 m,坝顶宽 15 m。主坝 185.00 m 高程以上上游坡坡比为 1:2.6,以下为 1:3.5;高程 155.00 m 以上下游坡坡比为 1:1.75,以下为 1:2.5。采用造孔深 82 m、厚 1.2 m 的混凝土防渗墙及基岩帷幕

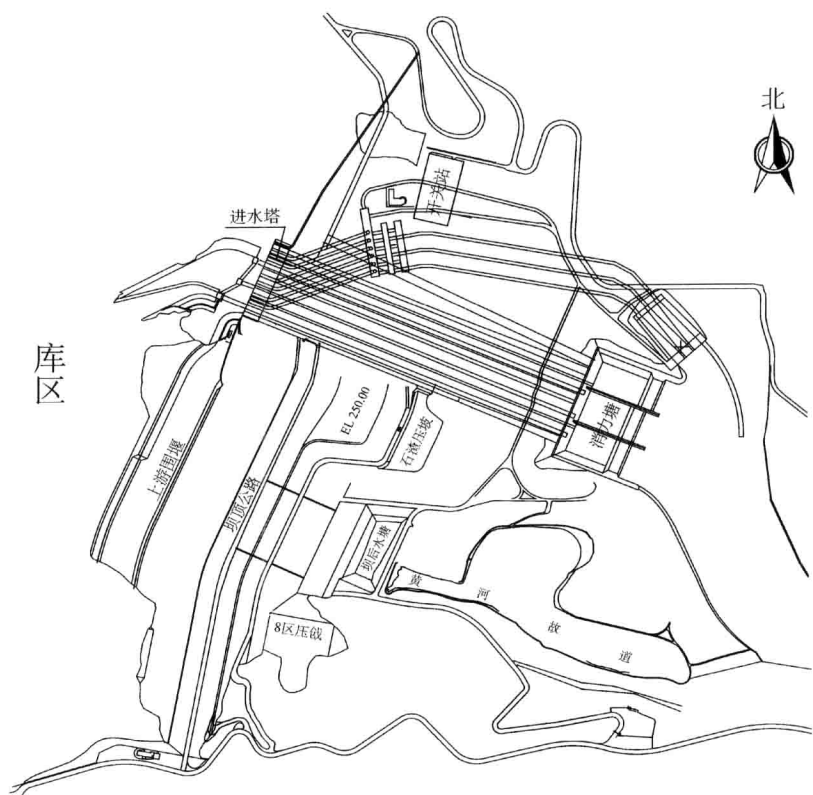


图 1-3 小浪底水利枢纽主要建筑物示意图

灌浆进行坝基防渗,混凝土防渗墙向上插入斜心墙 12 m,向下嵌入基岩 1~2 m,形成主坝的主垂直防渗系统;利用坝前泥沙淤积和拦洪围堰的壤土斜墙、主坝上爬式内铺盖形成水平辅助防渗体系。主坝基础深厚砂砾石覆盖层采用两道垂直防渗处理。上游围堰斜墙下采用塑性混凝土防渗墙和高压旋喷灌浆帷幕相结合的防渗措施。主坝共采用 17 种坝料进行分区填筑,截流戗体、拦洪围堰是其一部分,典型剖面见图 1-4。

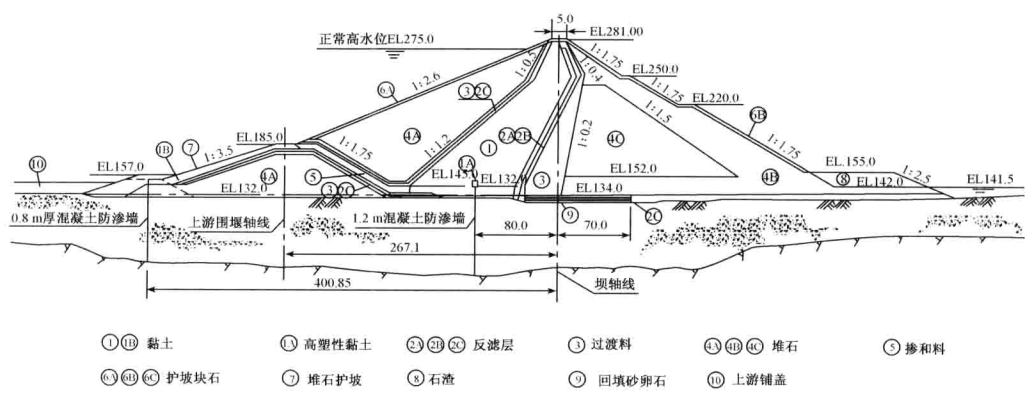


图 1-4 主坝典型剖面图(单位:m)

副坝位于左岸风雨沟东侧垭口处,坝型为土质心墙堆石坝,坝顶高程 281.00 m,最大坝高 47 m,坝顶长 191.2 m,坝顶宽 15.0 m,上、下游坡坡比均为 1:2.5,下游坡在高程 260.00 m 处设一 3.0 m 宽马道,下游坡脚压坡高程 240.00 m。心墙顶宽 7.5 m,上、下游坡比均为 1:0.3,在其上、下游各设两层宽 2.0 m 反滤料。在下游坝壳底部设厚 1 m 的排水层,延伸至坝脚外。副坝 DG0-831.89~DG0-(1+023.89)段因坝基岩石破碎,裂隙发育,为加强整体蓄水防渗效果,根据设计要求,对岩石基础进行坝基固结灌浆和双排孔帷幕灌浆。副坝典型断面见图 1-5。

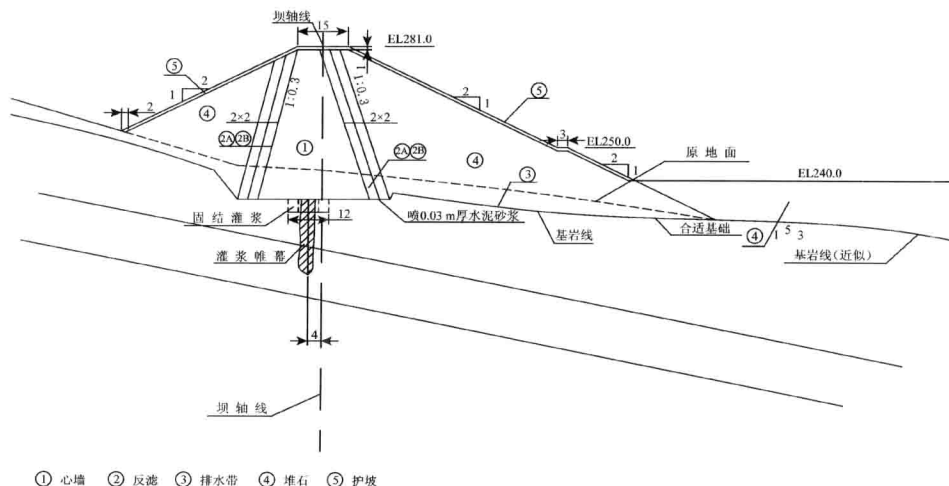


图 1-5 副坝 D0-910.00 m 断面图

1.2.2 泄洪排沙与引水发电系统

泄洪、排沙、引水发电及灌溉隧洞进水口布置在左岸山体风雨沟内,16条隧洞进口组成十座进水塔,呈“一”字型排列,进水塔顶高程283.00 m,总宽276.4 m,高113 m,长52.8~70.0 m,进水塔上游立视图见图1-6。孔板洞进口高程175.00 m,直径14.5 m,洞长分别为1134 m、1121 m、1121 m;明流洞进口高程分别为195.00 m、209.00 m、225.00 m,断面尺寸分别为10.5 m×13.0 m、10.0 m×12.0 m和10.0 m×11.5 m,洞长1093 m、1079 m、1077 m;排沙洞进口高程175.00 m,洞径6.5 m,洞长均为1105 m;溢洪道为岸坡开敞式,堰顶高程258.00 m,堰体高12 m。

引水发电系统由发电进水塔、引水洞、压力钢管、地下厂房、主变室、尾闸室、尾水洞、尾水渠和防淤闸等组成。六条引水洞为压力洞,1[#]~4[#]洞进口高程为195.00 m,5[#]~6[#]洞为190.00 m,洞径均为7.8 m,长423.79~324.27 m不等(含压力钢管)。地下厂房尺寸251.1 m×26.2 m×57.94 m(长×宽×高)。主变室平行厂房布置,与厂房净距32.0 m,尾闸室平行主变室设置,与主变室净距24.3 m。3条尾水洞为明流洞,断面尺寸12.0 m×19.0 m,长分别为805 m、856 m、906 m。3条尾水明渠各宽12 m,长160 m,尾部设置3孔防淤闸,闸孔尺寸14.0 m×22.5 m。

消力塘布置在左岸山体下游桥沟西侧,各泄洪排沙建筑物泄水均集中在消力塘消能,通过桥沟泄水渠往下游与黄河连接。消力塘为钢筋混凝土结构,一级消力塘长 140~160 m,

宽 319 m,深 28 m,池底高程 113.00~110.20 m;二级消力塘长 35 m,宽 354 m,深 15 m,池底高程 125.00 m。

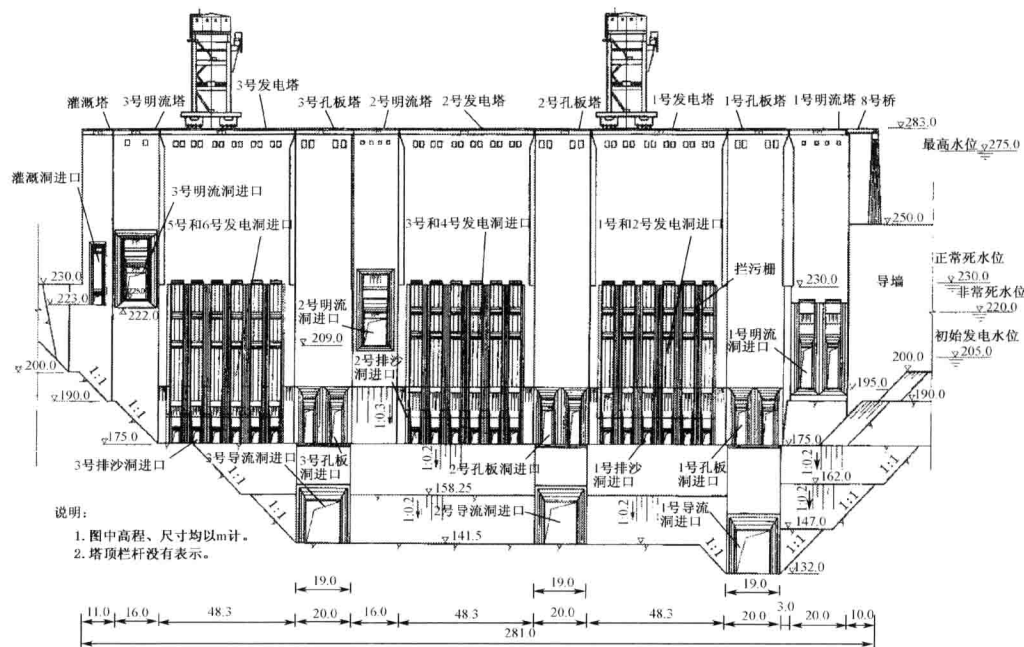


图 1-6 进水塔上游立视图(尺寸、高程:m)

1.3 工程建设概况

小浪底水利枢纽工程于 1991 年 9 月 12 日开始前期准备工程施工,1994 年 9 月 1 日主体工程开工,主坝右岸滩地坝体最先填筑,1997 年 10 月 28 日截流,1998 年 4 月 24 日上游围堰左岸河床部分填筑至 185.00 m 高程,1999 年 4 月 5 日主坝填筑至 200.00 m 高程,8 月 19 日主坝全线填至 230.00 m 高程,1999 年 10 月 8 日填筑至 236.00 高程,2000 年 6 月 26 日填筑至 280.00~282.00 m 高程,主坝于 2000 年 11 月 30 日填筑完毕。主坝主要填筑期为 1998 年 7 月至 2000 年 6 月,共完成填筑量 2 685 万 m^3 ,坝体升高 152 m(河床部位),月平均填筑强度 112 万 m^3 ,月平均填筑高度 6.33 m,最高月填筑强度 158 万 m^3 (1999 年 3 月),相应月上升高度为 8 m,最高日填筑强度 6.7 万 m^3 (1999 年 1 月 22 日)。工程于 1999 年 10 月 25 日下闸蓄水,2000 年 1 月 9 日首台机组并网发电,2001 年底主体工程全面完工,历时 11 年,共完成土石方明挖 3 625 万 m^3 ,石方洞挖 280 万 m^3 ,土石方填筑 5 573 万 m^3 ,混凝土 348 万 m^3 ,金属结构安装 3 万 t,机电设备安装 3.09 万 t,共安置移民 20 万人,取得了工期提前、投资节约、质量优良的好成绩,被世界银行誉为其与发展中国家合作项目的典范,在国际国内赢得了广泛赞誉。2002—2008 年,小浪底水利枢纽先后通过了竣工技术鉴定、工程及移民部分竣工初步验收和水土保持、工程档案、消防设施、环境保护、劳动安全卫生等专项验收。2008 年 12 月,小浪底工程通过竣工技术预验收。2009 年 4 月 7 日,顺利通过竣工验收。

第二章 安全监测总体设计

2.1 工程特点

黄河小浪底水利枢纽位于黄河中游豫、晋两省交界处的洛阳市孟津县小浪底,在洛阳市以北黄河中游最后一段出口处,南距洛阳市 40 km,上距三门峡水利枢纽坝址 130 km,下距郑州花园口 128 km。控制流域面积 69.4 万 km^2 ,占黄河流域总面积的 92.3%,是黄河干流三门峡以下唯一拥有较大库容的控制性工程。小浪底水利枢纽是治理开发黄河的关键性工程,属国家“八五”期间重点项目,其任务主要是以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,蓄清排浑,除害兴利,综合利用。

小浪底水利枢纽坝顶高程 281.00 m,正常蓄水位 275.00 m,死水位 230.00 m,汛期防洪限制水位 254.00 m,防凌限制水位 266.00 m。水库总库容 126.5 亿 m^3 ,其中拦沙库容 75.5 亿 m^3 ,防洪库容 40.5 亿 m^3 ,调水调沙库容 10.5 亿 m^3 。水库正常蓄水位和校核洪水位同为 275.00 m,是一座大(1)型综合利用的水利枢纽。枢纽按 1 000 年一遇洪水设计,相应洪峰流量 40 000 m^3/s ,设计洪水位 274.00 m;按 10 000 年一遇洪水校核,相应洪峰流量 52 300 m^3/s 。枢纽建成后下游防洪标准由 60 年一遇提高到 1 000 年一遇,基本解除凌汛灾害,减少下游淤积;灌溉面积增加至 4 000 万亩;多年平均增加非汛期调节水量 17 亿 m^3 ;水电站装机容量 180 万 kW,多年平均发电量 51 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

2.2 安全监测设计原则

由于小浪底工程所处的特殊地位,并且枢纽各建筑物的布置及结构设计具有挑战性,这些结构和新技术不但在国内坝工史上首次采用,而且在世界坝工史上也是罕见的。为确保枢纽各建筑物的施工质量及施工期和运行期的安全,同时验证设计,以提高我国土石坝的设计水平,所有这些均要求在小浪底水利枢纽各建筑物上布设项目齐全、设备先进、实用、具有国内先进水平的安全监测系统。

由于受技术条件的限制以及人们对监测的重视程度不够,加上之前的水工建筑物规模都比较小,一般的水工建筑物只进行了常规项目的监测,像小浪底工程规模这么大、结构这么复杂,如果仍按照以往的监测规程、规范进行常规设计或按照类似的工程情况进行设计,显然存在一定的问题。为此,根据当时国内外监测技术的发展情况,同时借鉴国内外类似工程的经验,提出了小浪底工程监测设计的原则:

(1) 目的明确,监测项目内容齐全。安全监测系统应覆盖枢纽区各建筑物及其基础,保证监测系统空间的连续性,以便掌握工程整体性状,及时对工程安全作出评价。

(2) 突出重点,兼顾全局。将建筑物及其基础作为整体考虑,渗流、变形作为监测重点,从影响工程安全的程度出发,按照“重点、一般”层次选择监测部位(断面),既突出重点部位又兼顾一般部位,形成监控全部建筑物的监控网络。做到既要突出重点、少而精,又要照顾全局、全面反映建筑物的运行状况。

(3) 以监测建筑物安全为主,监测项目的设置和测点的布设既要满足监测工程安全运行需要,同时又兼顾到验证设计,以达到提高设计水平的目的。

(4) 永久监测设备的布置尽量与施工期的监测布置相结合,有条件时,尽量将永久监测设备提前安装埋设,以便减少施工期监测仪器的布设数量,同时可以得到较为完整的监测数据,对以后评价建筑物的运行安全和指导施工具有重要意义。

(5) 一项为主,互相校核。各种监测项目要互相校核,以便在资料分析和解释时互相印证。

(6) 监测设备的选型要突出可靠性,应保证能在恶劣的环境下正常工作,特别是监测建筑物安全的测点,必要时在特别重要的测点上布置两套不同的监测设备,以便互相校核,同时也可保证某套监测设备失灵时,仍能得到该处的监测数据^[2, 3]。

(7) 尽量采用成熟、先进的技术和监测设备。在监测设备的选型时,还要考虑能否便于实现监测自动化。

(8) 在有条件的情况下,所有测点尽量实现自动化监测,同时在自动数据采集系统可靠、先进的前提下,还要考虑留有人工监测接口。

(9) 由于小浪底工程规模很大,监测仪器设备的布设毕竟有限。为此,在进行监测设备观测的同时还要加强人工巡视检查工作。

2.3 大坝安全监测总体设计

2.3.1 监测项目与断面选择

大坝是枢纽工程的重点监测建筑物,设有内外部变形、渗流、应力应变和强震等监测项目。监测仪器布置在 3 个有代表性的横断面和 2 个纵断面上。3 个横断面分别为:A 断面(D0+693.74)位于 F₁ 断层破碎带处,是监测的重点部位;B 断面(D0+387.50)位于最大坝高处,覆盖层最深;C 断面(D0+217.50)位于左岸基岩陡坎处,此处是不均匀沉陷变形的集中部位^[4]。两个纵断面分别沿坝轴线和防渗体轴线,3 个横断面和 2 个纵断面监测仪器布置见图 2-1。

2.3.2 外部变形监测

大坝的外部变形分为水平变形和竖直变形,其中水平变形又分为两个方向,即沿水流的上下游方向(以下称为 Y 向水平位移,指向下游为正,指向上游为负)和沿坝轴线的左右岸方向(以下称为 X 向水平位移,指向左岸为正,指向右岸为负)。竖直变形则是指坝体的沉降(以下称为 Z 向沉降,下沉为正,上抬为负)。沿水流方向的变形监测采用视准线法或小角度法,沿坝轴线方向的变形监测采用测距线法,竖直变形监测采用几何水准测量^[5]。后期采用 GPS 全球卫星定位技术法、TPS 测量机器人法和 TCA1800 全自动全站仪进行观测,以提高精度。坝体表面上下游不同高程共设 8 条视准线。由于大坝轴线存在转弯点,8 条视准线共分成 15 段,共含有 151 个监测点。外部变形监测点布置示意图如图 2-2 所示。

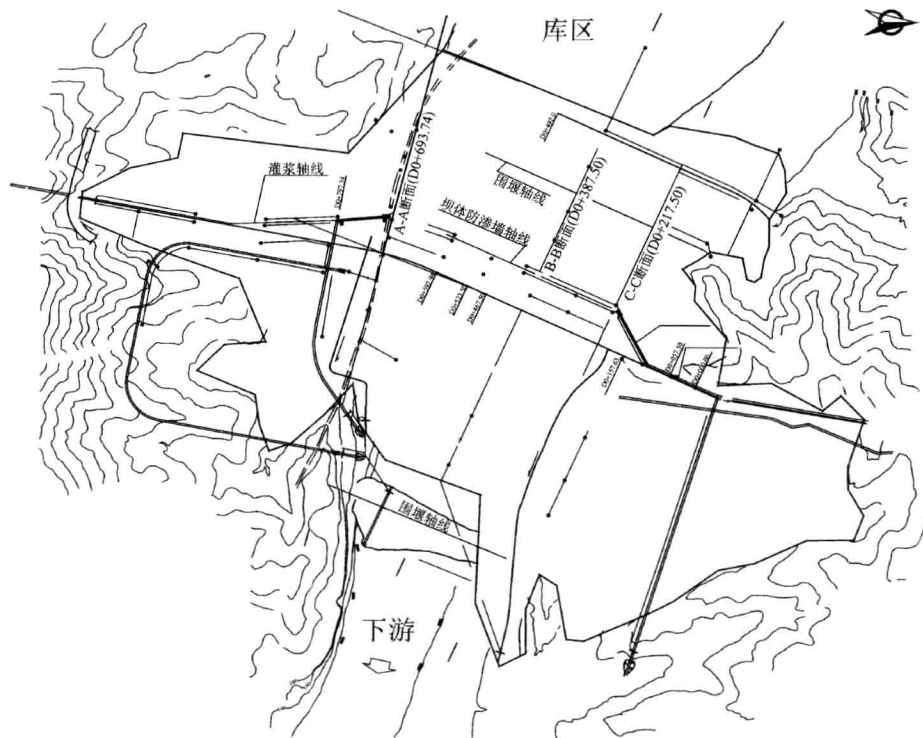


图 2-1 3 个横断面位置示意图

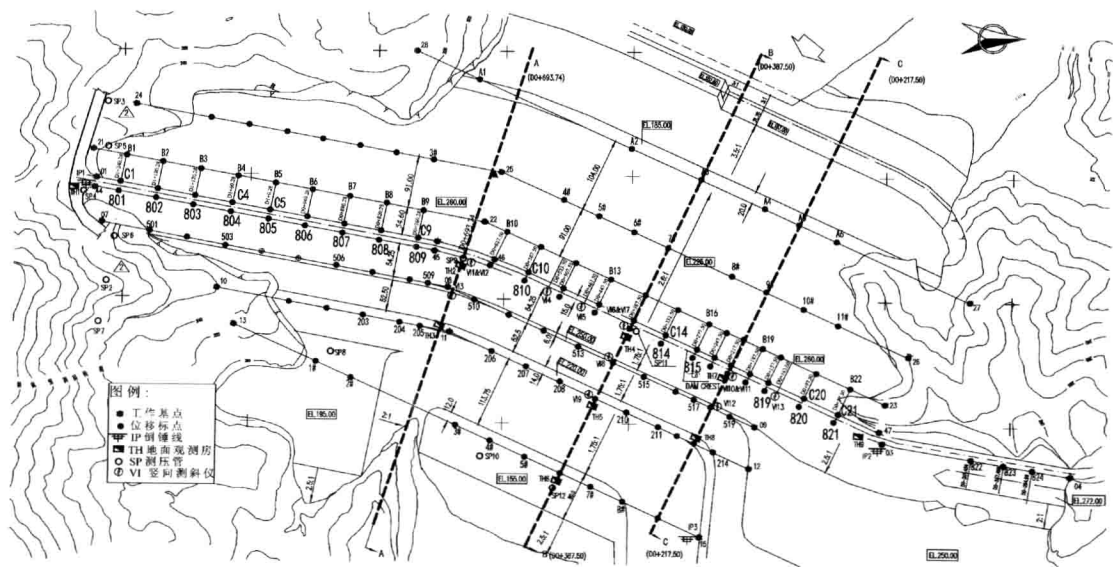


图 2-2 外部变形监测测点布置示意图

水平变形采用视准线法,在坝体上、下游坡面和坝顶共设 14 条视准线。其中位于上游坝坡正常高水位以下的视准线,仅在施工期和水位下降之后才进行监测。每条视准线的位移标点间距一般为 60 m,左岸陡坎处间距加密为 30 m。沿轴线方向的变形采用测距法测

量。垂直变形采用几何水准测量,每个水平位移标点附近设一水准标点。视准线的工作基点,采用变形控制网校测其稳定性。

主坝表面变形观测包括竖向位移、横向水平位移及纵向水平位移观测。在不同高程共设 8 条纵向测线,现状共计坝面测(基)点 135 个,两岸基点 16 个。测点兼测竖向位移、横向水平位移及纵向水平位移。除被水淹没的上游 185 围堰和 225 围堰视准线测线已经停止观测外,其他测线正常观测至今。横向水平位移为沿水流方向(定为 Y 向,指向下游为正,指向上游为负),纵向水平位移为沿坝轴线方向(定为 X 向,指向左岸为正,指向右岸为负),竖直位移为竖直方向(定为 Z 向,下沉为正,上抬为负),见表 2-1。

表 2-1 主坝表面变形观测现状基本情况表

测线位置	高程(m)	测线长度(m)	测点数量	坝面测(基)点编号	两岸基点编号	位移观测
上游	185.00	962	6	A1~A6	27、28	Y 向、Z 向
	225.00	1 225	12	1#~11#、BZ25	24、26	Y 向、Z 向
	260.00	1 335	23	B1~B22、BZ22	21、23	X 向、Y 向、Z 向
坝顶	上游侧	281.00	1 187	C1~C21、BZ02、BZ46	01、47	X 向、Y 向、Z 向
	下游侧	281.00	1 634	801~824、BZ45、03	44、04	X 向、Y 向、Z 向
下游	250.00	873	20	501~519、BZ08	07、09	X 向、Y 向、Z 向
	220.00	823	15	201~214、BZ11	12、10	X 向、Y 向、Z 向
	155.00	743	9	1#~9#	13、15	Y 向、Z 向

测点竖向位移采用全站仪法进行观测,基点采用几何水准方法与水准基准点联合观测,全站仪采用徕卡公司的 TCA1800、TCA2003 全自动全站仪,几何水准采用蔡司公司的 Ni002 和徕卡公司的 NA2002 电子水准仪;水平位移监测采用徕卡公司的 T2002 电子经纬仪,TCA1800、TCA2003 全自动全站仪,DI200S、ME5000 测距仪和徕卡 350 型 GPS 接收机。外部变形监测观测工作由小浪底工程咨询有限公司测量计量部承担。

2.3.3 内部变形监测

内部监测仪器主要布置在有代表性的 3 个横断面和 2 个纵断面上。3 个横断面分别为:A-A 断面(桩号 D0+693.74)位于 F1 断层带处,B-B 断面(桩号 D0+387.5)位于最大坝高、最厚覆盖层处,C-C 断面(桩号 D0+217.5)位于左岸坡脚基岩陡坎处。2 个纵断面中 D-D 断面在沿斜心墙轴线处,E-E 断面在沿坝轴线处。变形监测项目主要有堤应变计、测斜仪、沉降盘、钢弦式沉降仪、界面变位计等。主要观测断面布置图见图 2-3。

从图中可以看出,小浪底大坝共布设有 18 支测斜管。在 A-A、B-B、C-C 3 个横断面上共布置 14 支。A-A 观测断面布置有 1 支斜向测斜管 VI1,基本上通过斜心墙的中心线,与水平向成 59.2° ,用来直接观测斜心墙的三向变形;同时布置有 2 支垂直向测斜管 VI2、VI3 和 1 支水平向测斜管 HI1,其中 VI2 管口位置在坝顶下游侧,VI3 管口位置在下游 250 m 高程马道上,HI1 布置在 220 m 高程。B-B 观测断面布置有 1 支斜向测斜管 VI6,位置与 A-A 断面完全相同;同时布置有 3 支垂直向测斜管 VI7、VI8、VI9 和 2 支水平向测斜管 HI2、HI3,其中 VI7 管口位置在坝顶下游侧,VI8 管口位置在下游 250 m 高程马道上,VI9 管口位置在 220 m 高程马道上,HI2 布置在 142.0 m 高程,HI3 布置在 220 m 高程。C-C 观