

黄河小浪底水利枢纽工程 安全评价关键技术研究

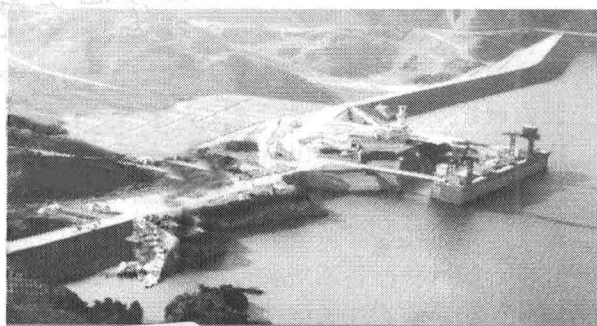
刘六宴 张利新 盛金保 张建生 等◎编著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

黄河小浪底水利枢纽工程 安全评价关键技术研究

刘六宴 张利新 盛金保 张建生 等◎编著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

全书共分十章,主要介绍了小浪底水利枢纽工程概况、现场安全检查、工程质量评价、运行管理评价、渗流安全评价、大坝结构与抗震安全评价、进水塔结构与抗震安全评价、地下结构仿真分析与安全评价、输泄水建筑物安全评价、金属结构与供电安全评价。

该书是对小浪底水利枢纽工程建设以来,首次进行的一次全面安全评价。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的科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

黄河小浪底水利枢纽工程安全评价关键技术研究/
刘六宴等编著. —南京:河海大学出版社,2013. 12
ISBN 978-7-5630-3582-3

I. ①黄… II. ①刘… III. ①黄河—水利枢纽
—水利工程—安全评价—洛阳市 IV. ①TV632.613

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 298656 号

书 名 黄河小浪底水利枢纽工程安全评价关键技术研究
书 号 ISBN 978-7-5630-3582-3/TV·370
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 19.5 印张 484 千字
版 次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
定 价 58.00 元

《黄河小浪底水利枢纽工程安全评价关键技术研究》

编写人员

主 编：刘六宴 张利新

副 主 编：盛金保 张建生

执行主编：肖 强 向 衍

编写人员：张利新 刘六宴 盛金保 张建生 肖 明

肖 强 向 衍 刘定友 石月春 卢建勇

魏 皓 于永军 屈章彬 王 琳 张东升

宋书克 刘成栋 王昭升 龙智飞 厉丹丹

傅 翔 宋人心 李 军 傅中志 陈 琳

苏 畅 蔡勤学 赵子涛 杨继斌 代永信

詹奇峰 焦玉峰 许 滔 唐红海 魏延召

魏立巍 周克发 台树辉 孙晓英 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。枢纽控制黄河流域面积 92.3%,控制黄河花园口以上天然径流量的 91.8%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。

由于黄河小浪底水利枢纽工程所处的特殊地理位置和重要战略地位,加上工程本身规模大,洞室多、地质条件复杂等特性,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仅在国内坝工史上首次采用,而且在世界坝工史上也较为少见。

小浪底水利枢纽自 1999 年 10 月 25 日下闸蓄水以来,工程已经运行十余年,随着时间的推移,枢纽建筑物的强度、稳定和耐久性均有可能发生变化,给安全运行管理工作带来一定影响。为更好地了解这种变化并对可能出现的安全隐患进行分析,以便采取正确的措施或预案,有预见性地对大坝进行全面管理维护,本书主要在现场安全检查、混凝土与金属结构安全检测的基础上,依据有关技术规范,融合计算分析、安全监控、反演分析、三维仿真分析等手段,对小浪底水利枢纽的工程质量、运行管理、枢纽建筑物结构安全、枢纽工程渗流安全、枢纽工程抗震安全、金属结构安全等进行系统分析和评价,并结合工程运行现状提出今后安全运行的主要建议。本书安全分析评价对保障我国目前地质条件复杂和技术难度高的小浪底水利枢纽安全运行,充分发挥工程的社会效益、经济效益和生态效益具有重要意义,其分析方法和计算手段供大坝安全设计、施工、评价、运行管理和科学研究人员参考,也希望能够为加强我国土石坝工程安全管理提供借鉴。

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,书中文字和图表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指出,敬请批评、指正。

编者

2013 年 9 月

目 录

1 小浪底水利枢纽工程概况	1
1.1 工程规模	1
1.2 气象与水文情势	2
1.3 枢纽布置	3
1.4 工程建设概况	6
1.5 安全评价技术路线	6
2 现场安全检查	8
2.1 现场安全检查的组织	8
2.2 挡水建筑物现场安全检查	8
2.3 泄洪排沙与引水发电建筑物现场检查.....	10
2.4 滑坡体现场检查.....	18
2.5 其他建筑物检查.....	20
2.6 大坝安全监测系统现场检查.....	21
2.7 现场检查结论.....	21
3 工程质量评价.....	23
3.1 工程质量评价方法.....	23
3.2 工程施工概况.....	31
3.3 主坝工程质量评价.....	32
3.4 副坝工程质量评价.....	45
3.5 进水塔工程质量评价.....	47
3.6 洞室群工程质量评价.....	51
3.7 溢洪道工程质量评价.....	60
3.8 消力塘.....	63
3.9 混凝土抗冻性检测.....	65

3.10	混凝土骨料碱活性(长龄期)试验研究	67
3.11	渗水水质监测	67
3.12	结论与建议	68
4	运行管理评价	72
4.1	工程管理.....	72
4.2	工程运行.....	73
4.3	工程安全监测.....	76
4.4	工程运行期判别.....	81
4.5	结论与建议.....	85
5	渗流安全评价	86
5.1	渗流安全评价内容及方法.....	86
5.2	主坝渗流监测资料分析.....	88
5.3	主坝坝基裂隙岩体渗流反馈分析.....	97
5.4	主坝三维渗流场反演分析与预测	115
5.5	副坝渗流观测资料分析	126
5.6	副坝渗流有限元计算分析	127
5.7	其他建筑物	131
5.8	结论与建议	133
6	大坝结构与抗震安全评价	135
6.1	安全评价内容与方法	135
6.2	外部变形监测资料分析	141
6.3	大坝原型观测资料的反演分析	150
6.4	三维应力-渗流耦合全过程仿真分析.....	155
6.5	裂缝成因分析与预测	167
6.6	主坝结构稳定分析	172
6.7	主坝抗震安全评价	174
6.8	副坝结构与抗震安全评价	185
7	进水塔结构与抗震安全评价	189
7.1	评价内容与方法	189

7.2	进水塔监测资料分析	190
7.3	典型发电塔结构与抗震安全评价	196
7.4	典型孔板塔结构与抗震安全评价	210
8	地下结构仿真分析与安全评价	220
8.1	地下洞室安全监测资料分析	220
8.2	仿真分析理论与计算程序	224
8.3	三维整体数值模型建立	231
8.4	地下洞室群区域地应力场分析	234
8.5	地下洞室群三维稳定性分析	235
8.6	衬砌典型裂缝分析	251
9	输泄水建筑物安全评价	256
9.1	溢洪道安全评价	256
9.2	孔板消能泄洪洞安全评价	257
9.3	排沙洞安全评价	261
9.4	明流泄洪洞安全评价	261
9.5	消力塘结构安全评价	264
9.6	其他	266
10	金属结构与供电安全评价.....	269
10.1	评价内容及方法.....	269
10.2	检测项目与检测仪器设备.....	271
10.3	明流洞闸门与启闭机械.....	272
10.4	孔板洞闸门与启闭机械.....	279
10.5	排沙洞闸门与启闭机械.....	285
10.6	溢洪道闸门.....	290
10.7	防淤闸闸门检测.....	292
10.8	移动式门机.....	293
10.9	结论和建议.....	295
	参考文献.....	301

1 小浪底水利枢纽工程概况

1.1 工程规模

黄河小浪底水利枢纽位于黄河中游豫、晋两省交界处,位于河南省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,其具体位置见图 1-1。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能取得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,其主要任务是以防洪(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。

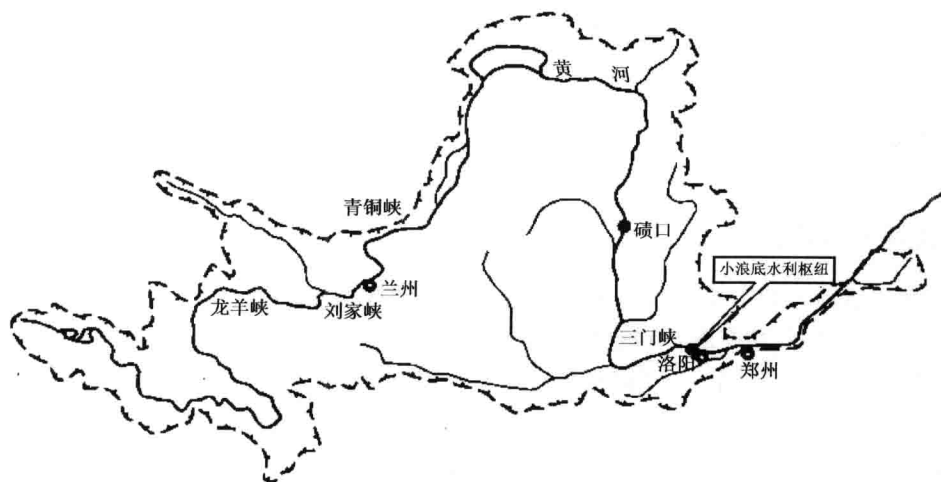


图 1-1 黄河小浪底水利枢纽工程位置

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=1/15 公顷。

水电站装机容量 180 万 kW,多年平均发电量 51 亿 kW · h。

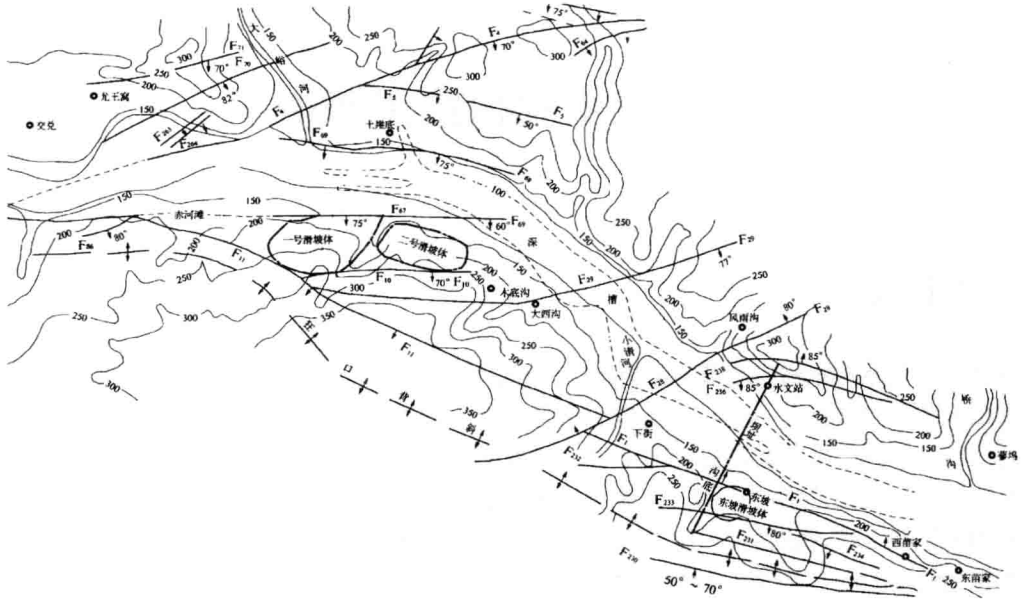


图 1-2 小浪底坝址位置示意图

1.2 气象与水文情势

1.2.1 坝区气候特征

按国家气象局编制的中国气候区域,坝区属南温带亚湿润气候区。坝区附近三门峡、垣曲、孟津和济源等气象站资料,可概略反映坝区气候特征。该区年平均气温约 14℃。1 月平均气温最低,在 0℃ 附近。极端最低气温达 -17.2~-20.0℃。7 月平均气温最高达 26.0~27.5℃,极端最高气温达 41.5~43.7℃。坝区年降水量 600~2 100 mm,其中 7—9 月降水量占年降水量的 50% 以上。年平均蒸发量 1 800~2 100 mm,年均相对湿度 60% 上下。极端最大风速达 20 m/s 以上,冬季盛行风向 WNW,其他季节以 ENE 风向为主。坝区是三花间主要暴雨中心区之一,暴雨发生频繁,强度与总量较大,特别是在经向型环流形势下南北向切变线暴雨过程中,100 mm 以上大暴雨区往往几乎覆盖三门峡至小浪底区间(简称“三小间”)。另坝区附近黄河北岸王屋山南坡山岭陡峻,盛夏热力、动力作用强,易形成局地强对流天气和局地暴雨,产生较大支沟洪水。

1.2.2 水文情势

1. 年径流特性

黄河实测径流受人类活动影响较大,其中影响最大的是农业灌溉耗水和大型水库调蓄。除此外,水土保持、中小型水库蓄水及因修建水库所增加的蒸发渗漏等,对天然径流还原也有一定影响。与其他河流比较,黄河流域河川水资源量较贫乏。

2. 暴雨洪水特性

黄河流域洪水一般由暴雨形成。黄河上游有少量融雪洪水,其洪峰流量、洪量较小,且有明显日变化特征;下游洪水主要来自黄河中游,上游洪水仅形成下游洪水的基流;中游洪水主要来自河口镇至龙门区间(以下简称河龙间)、龙门至三门峡区间(以下简称龙三间)和三花间。

1.3 枢纽布置

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。

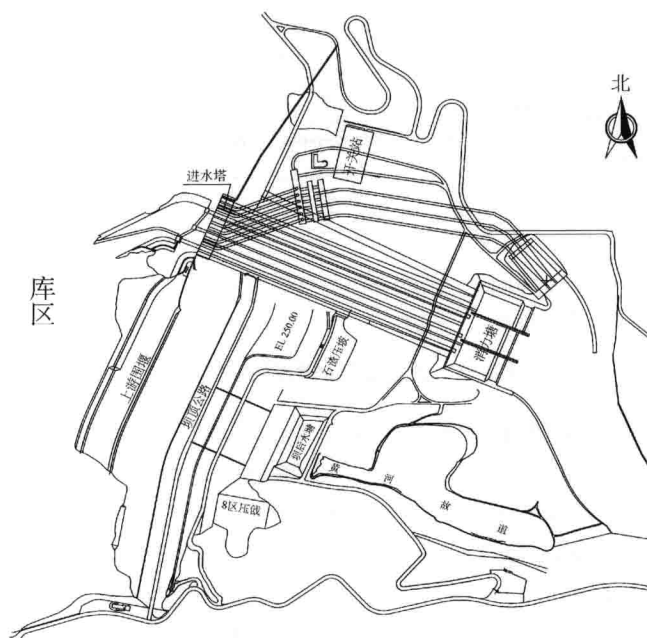


图 1-3 小浪底水利枢纽主要建筑物示意图

拦河大坝包括主坝和副坝;泄洪排沙建筑物由3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)、3条断面尺寸为 $(10.0\sim 10.5)\text{m}\times(11.5\sim 13.0)\text{m}$ 的明流泄洪洞、3条直径为6.5 m的排沙洞、1条直径为3.5 m的压力灌溉洞、1座正常溢洪道、10座进水塔、1座综合消能水垫塘组成;引水发电系统由6条直径为7.8 m的引水发电洞、1座长251.5 m、跨度为26.2 m、最大开挖深度为61.44 m的地下厂房、1座主变室、1座尾闸室和3条断面为 $12.0\text{m}\times 19.0\text{m}$ 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。

1.3.1 挡水建筑物

小浪底水利枢纽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, 截流戽体、拦洪围堰是其中一部分, 典型剖面见图 1-4。

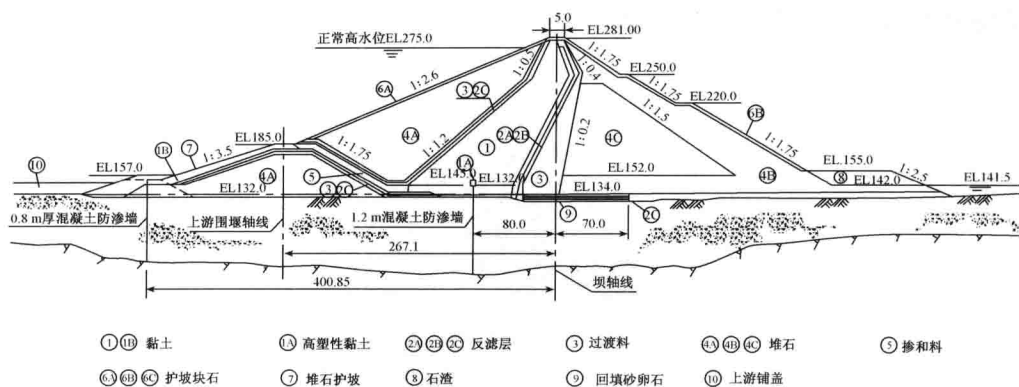


图 1-4 主坝典型剖面图(单位:m)

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 的反滤料。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。

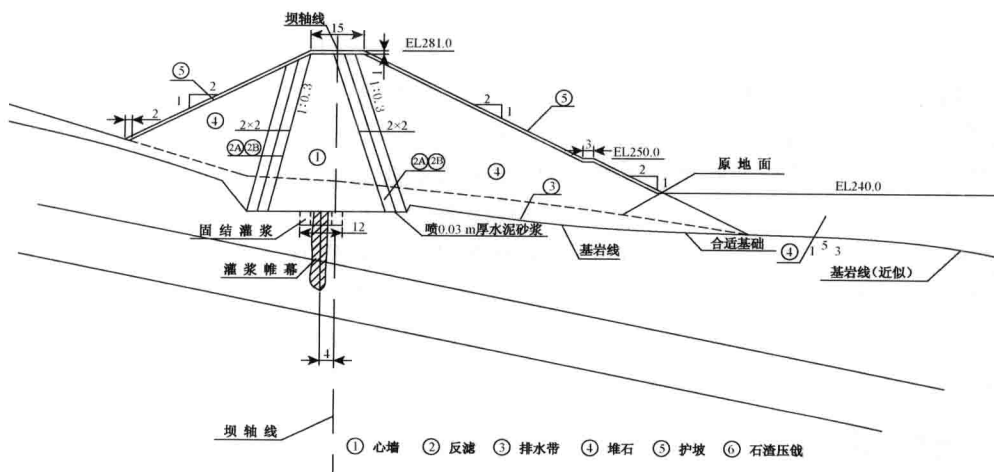


图 1-5 副坝典型剖面图(单位:m)

1.4 工程建设概况

小浪底水利枢纽工程于1991年9月12日开始前期工程施工准备,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 m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5573万 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,被世界银行誉为该行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。

1.5 安全评价技术路线

本次安全评价按照水利部颁布的《水库大坝安全鉴定办法》、《水库大坝安全评价导则》(SL 258—2000)等国家和行业技术规程、规范要求,首先组织小浪底水利枢纽现场安全检查组进行详细的现场安全检查。

由于黄河小浪底水利枢纽工程所处的特殊地理位置和重要战略地位,加上工程本身规模大,洞室多、地质条件复杂等特性,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仅在国内坝工史上首次采用,而且在世界坝工史上也较为少见。为确保枢纽各建筑物的施工质量以及施工期和运行期安全,同时为验证设计,各建筑物布设了较多的监测项目,形成了较为完善的安全监测系统。这些监测项目为掌握工程运行性态起到了重要作用。目前,安全监测系统已运行十余年,测值近1 000万条。海量监测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,而且还需要结合设计、施工资料等分析监测资料是否反映大坝或工程运行的实际情况。因此,需要对监测系统和监测资料进行可靠性与合理性分析评价工作。

在上述工作的基础上,依据有关技术规范,融合计算分析、安全监控、反演分析,必要时辅以地质勘探以及必要的物探手段等,对小浪底水利枢纽的工程质量、运行管理、枢纽建筑物结构安全、枢纽建筑物渗流安全、枢纽建筑物抗震安全、金属结构安全等进行系统分析和评价,然后对枢纽建筑物安全进行综合评价,并结合工程运行现状提出今后安全运行的主要建议。相应流程见图1-7。

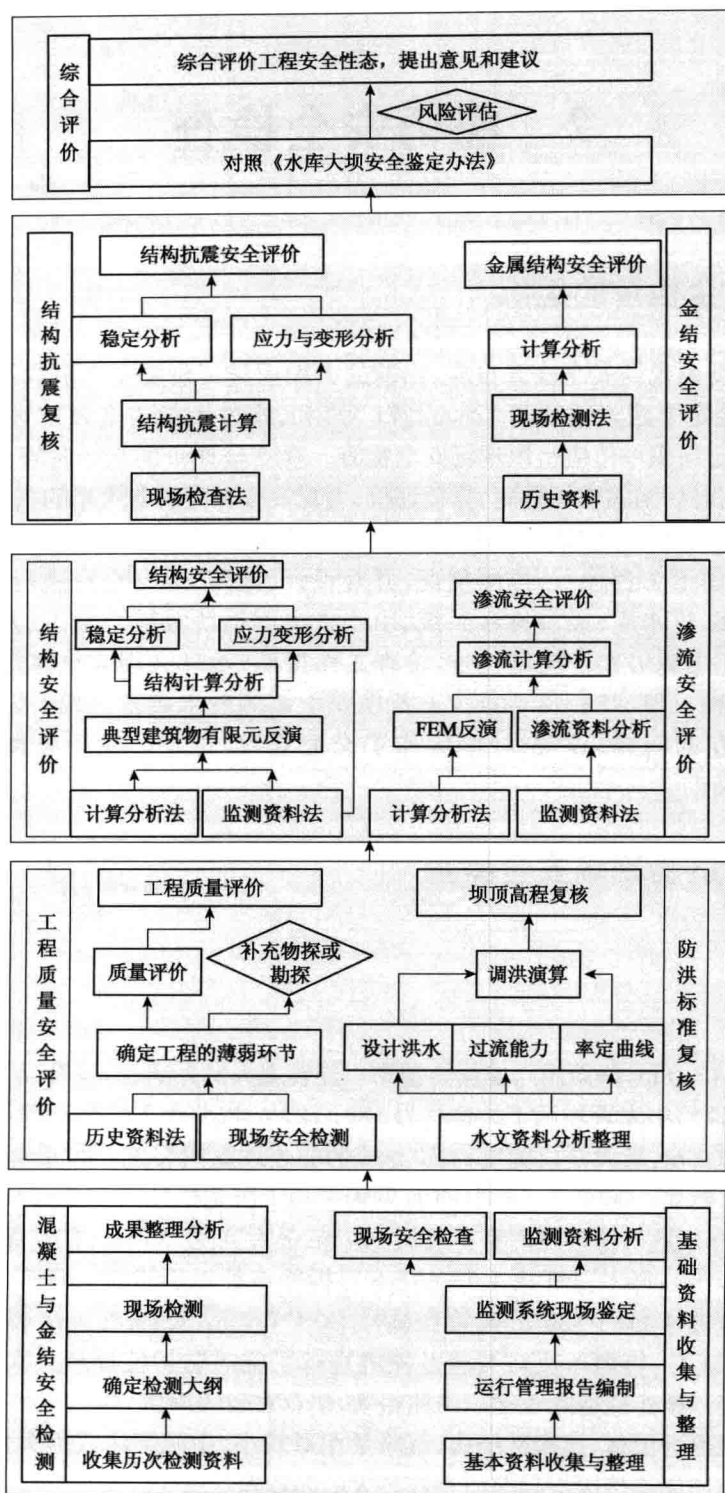


图 1-7 小浪底水利枢纽安全评价流程图

2 现场安全检查

2.1 现场安全检查的组织

工程现状主要由现场安全检查报告、当前的大坝质量评价及安全监测结果体现,根据《水库大坝安全鉴定办法》(水建管〔2003〕271号)和《水库大坝安全评价导则》(SL 258—2000)的要求,鉴定组织单位应组织现场安全检查。在安全评价的起始阶段,现场安全检查显得尤为重要,它对后期的现场检测、分项评价、大坝安全分类有着重要的指导意义。

2012年5月15日,小浪底水利枢纽大坝安全鉴定现场安全检查专家组成立。专家组向管理人员了解了工程运行、监测情况,并对设计、施工、运行资料进行了初步检查分析,然后对主副坝、进水塔、泄洪排沙系统、引水发电洞系统等建筑物,以及金属结构、安全监测系统、备用电源等作了现场检查,检查工作按照《水库大坝安全鉴定办法》、《水库大坝安全评价导则》(SL 258—2000)、《土石坝安全监测技术规范》(SL 551—2012)等进行,对建筑物存在的问题、异常、缺陷等作了全面观察、记录。现场检查时,库水位为259.56 m,天气晴朗。

2.2 挡水建筑物现场安全检查

2.2.1 主坝

1. 坝顶

主坝坝顶宽15.0 m,路面用六棱体砖铺砌。经管理人员介绍,2001年7月24日库水位在192.00 m时,巡检中发现坝顶下游侧桩号D0+727 m以北距下游侧路缘石内侧40~60 cm处有一长约100 m、最大开口宽度约10 mm的非连续纵向裂缝。2002年5月坝顶铺设六棱砖时,裂缝被覆盖。2003年10月18日发现主坝下游侧桩号D0+690 m以北距下游侧路缘石80~120 cm处,六棱砖缝间有1条长160 m、最大宽度约4 mm的连续缝隙。为进一步查明裂缝情况,2004年6月开挖4个探坑,8月拆除该处坝顶路面六棱砖,发现裂缝基本平行于坝轴线,自桩号D0+130 m延续到桩号D0+757 m,长约627 m,裂缝平面图见图2-1。2004年7—11月,管理单位对裂缝及探坑进行了临时防护性处理。本次现场检查发现,该裂缝处坝面六棱砖经拆除重铺后未能密实,仍存在较大缝隙。

左、右坝肩段原为山体,属刚性结构,沉陷量相对较小,中间河床段为柔性结构,沉陷量较大,因此坝肩与河床连接段坝顶路面存在较大的高程差。

桩号D0+435~D0+680 m处坝顶上、下游两侧变形不均匀,上游侧高于下游侧,坝顶路面向下游侧倾斜。桩号D0+630 m高差最大达到约15 cm。

2. 上游坡

上游坝坡为堆石护坡,蓄水运行后发现桩号 D0+250~D0+800 m 坡面呈明显碟状沉降区。2001 年 12 月底曾对主坝 6 个断面上游坡沉降进行测量,结果表明,以设计坝坡线为基准的最大沉降达 2.65 m。据此,设计单位提出了上游坡修整意见,修整范围为高程 260.00 m 马道以上,桩号为 D0+000.00~D0+800.00 m 间的坡面,长度为 800 m。260.00 m 高程马道以下不修整,马道也不再加高到 260.00 m 高程,马道以上坝坡以一个平均坡度直至坝顶,各断面间平顺连接。坝顶设 1 m 宽干摆石平台,以方便观测。回填石料采用原主坝 6A 料,即护坡料。填筑方量为 7.6 万 m³,平均填筑厚度 0.3 m,未碾压。上游坝坡于 2002 年 4 月进行修整,2002 年 7 月 18 日完成。

2009 年发现主坝上游坡 D0+800 以南,260.00 m 高程马道至 283.00 m 高程区间坝坡局部沉陷,块石风化严重,2010 年 9—11 月对该区进行了回填处理。本次现场检查,上游坡原沉陷区经整修后未见明显异常。

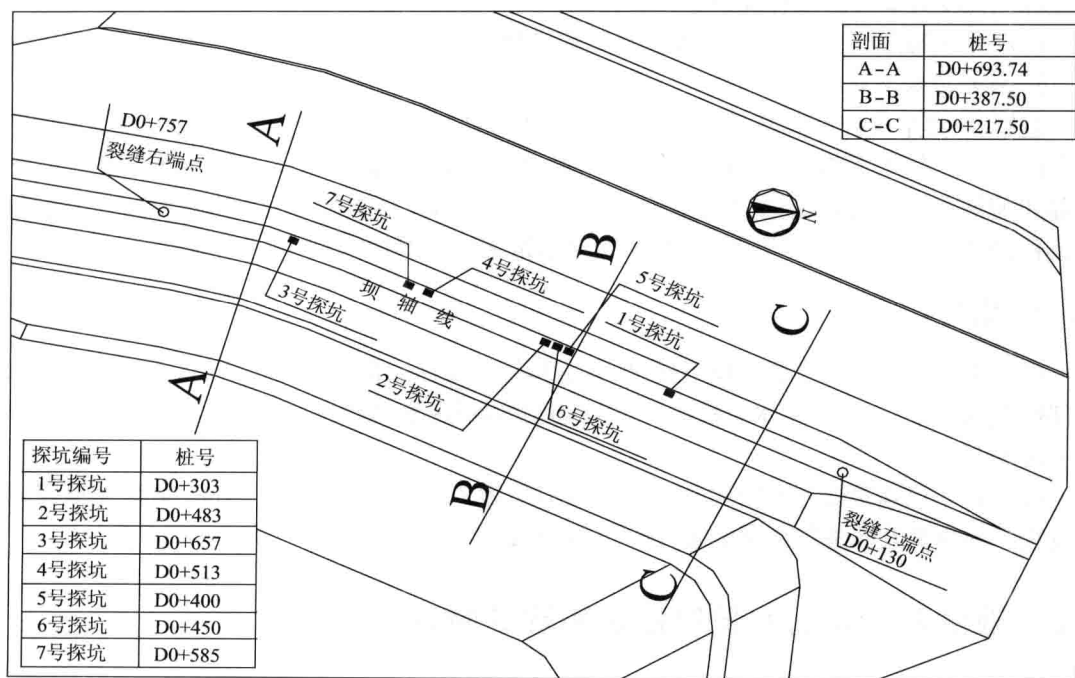


图 2-1 主坝坝顶裂缝平面位置图

3. 下游坡

下游坡采用堆石护坡。水库蓄水后下游坝坡局部沉降,据 2001 年 12 月底的测量结果,下游坡局部沉降区最大沉降量达 1.88 m,设计单位据此确定的修整范围为桩号 D0+100~D0+700 m 间高程 276.00 m 以上坝坡,长 600 m,采用块石贴坡处理,顶部留 0.8 m 宽平台,其下 1 m 斜长也采用摆石。修整用石料要求同坝体下游护坡 6B 料,填筑方量为 2.6 万 m³。同时在下游坝坡上部修建了 4 个观测平台。经现场检查,D0+385 m 平台处有错缝,最大缝宽约 30 cm。高程 275.00 m 以上下游坡面步梯变形,最大水平错动约 20 cm。下游坡其余部位运行正常,未发现明显异常现象。