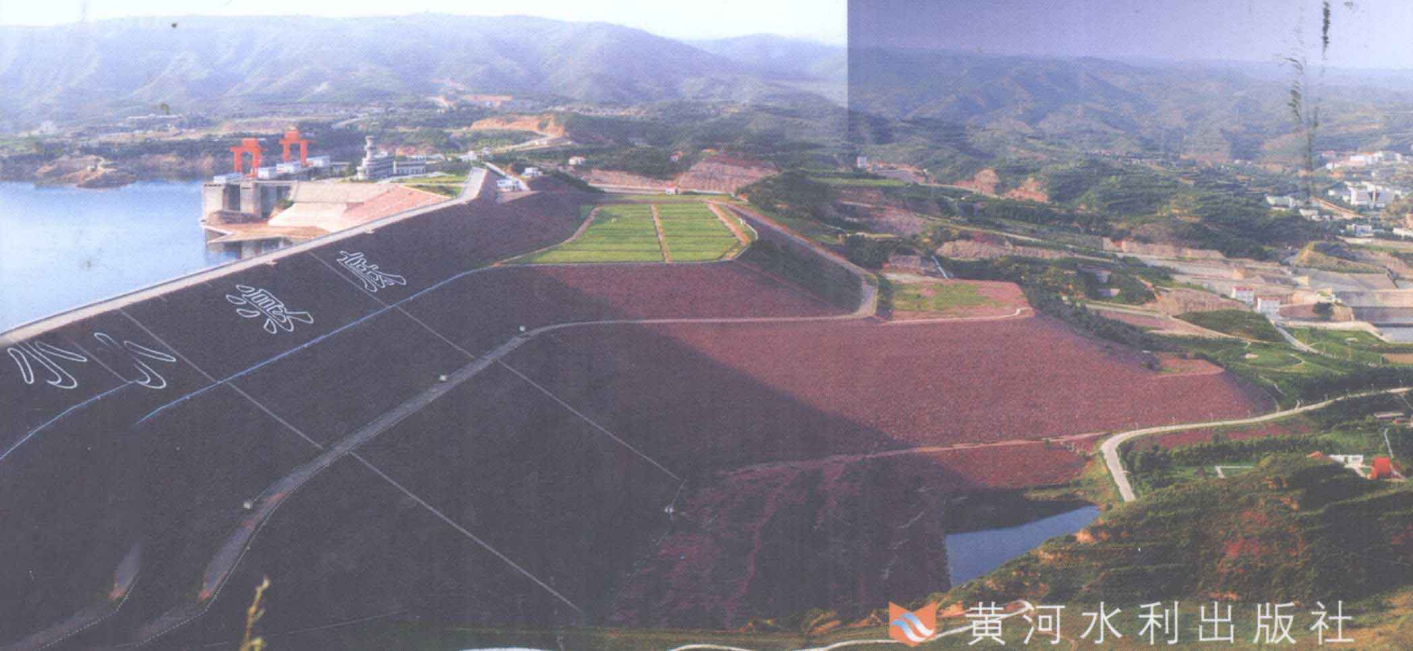


XIAOLANGDI TUSHIBA
ANQUAN GUANLI
SHIJIAN

小浪底土石坝安全管理

实践

殷保合 著



小浪底土石坝安全管理实践

殷保合 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书共分十章,主要介绍了小浪底水利枢纽工程概况和小浪底土石坝安全设计,土石坝施工建设期工程安全控制以及运行期土石坝变形监测、原型监测及自动化、渗漏水水质监测、水库地震监测和土石坝白蚁防控实践,此外,重点介绍了小浪底工程大坝安全会商管理以及小浪底土石坝安全管理实践主要成果。

该书内容丰富,是对小浪底土石坝建设、运行管理 20 年来实践经验的总结,可为类似工程提供借鉴,亦可供从事水利水电工程、大坝安全监测等专业的设计、施工、监理、运行管理技术人员和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

小浪底土石坝安全管理实践/殷保合著. —郑州:黄河水利出版社,2010.12

ISBN 978 - 7 - 80734 - 968 - 6

I. ①小… II. ①殷… III. ①黄河 - 水利枢纽 - 土石坝 - 安全管理 - 洛阳市 IV. ①TV632.613

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 256361 号

组稿编辑:岳德军 电话:13838122133 E-mail:983375628@qq.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:17.75

字数:410 千字

版次:2010 年 12 月第 1 版

印数:1—1 500

印次:2010 年 12 月第 1 次印刷

定价:49.00 元

前 言

影响大坝安全的因素很多,涉及范围也很广,但大致可以分成三类。第一类是由设计、施工和自然因素引起的,它没有一个从量变到质变的过程,是大坝建成后就已确定的,如设计洪水位偏低、混凝土强度等级过低、未考虑地震荷载等;第二类是在运行、管理过程中逐步形成的,有一个从量变到质变的发展过程,如冲刷、侵蚀、渗透破坏、混凝土老化、金属结构的锈蚀等;第三类是上述两种情况的混合,即设计、施工中的不完善在运行中得不到及时改正,或者说随着时间的推移和运行管理的不力使设计、施工中的隐患发展为破坏。

大坝安全管理工作应针对具体的坝址、坝型和结构,有针对性地加强安全监测和巡视检查,如针对破碎地基和深覆盖层上筑坝的基础处理及防渗、多泥沙河流的泥沙淤积、库岸高边坡的稳定等方面进行加强安全监测和巡视检查。同时,大坝监测应与大坝设计、施工和运行管理互相补充,特别是在设计中运用新结构、新方法、新材料,施工时发现新的地质构造和地质条件,运行遇到不利工况时,大坝安全监测更应成为检验设计、控制施工过程及运行管理科学决策的基础和前提。

黄河小浪底水利枢纽土石坝自建成运行以来已近 10 年,随着时间的推移,大坝的稳定性、老化性和耐久性均有可能发生变化,给安全运行管理工作带来较大的困难。为了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者预案,有预见性地对大坝进行全面管理维护,确保管好民生工程,本书主要从设计、施工、运行管理等阶段对涉及的土石坝安全管理各方面的因素进行分析和整理,总结土石坝安全管理实践中的经验教训,供大坝安全监测设计、施工、运行管理和科学研究人员参考,希望能够为加强我国土石坝安全管理和其他土石坝安全设计、施工、运行管理、科研等工作提供借鉴。

参与编写本书的有祁志峰、李德水、宋书克、李珍等,书中参考其他作者的资料文献较多,由于各种原因未能一一注明,在此深表歉意,并谨向他们致以真诚的谢意。本书的出版得到黄河水利出版社的支持,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中内容与文字难免出现疏漏或谬误,恳请读者不吝指正。

作 者

2010 年 10 月于小浪底

目 录

前 言

第 1 章 小浪底水利枢纽工程概况	(1)
1.1 工程规模	(1)
1.2 工程坝址水文地质条件	(2)
1.3 枢纽建筑物	(3)
1.4 工程建设历程	(4)
第 2 章 小浪底土石坝安全设计	(6)
2.1 坝址、坝型选择及大坝设计	(6)
2.2 防洪、抗灾能力设计情况	(19)
2.3 土石坝防渗体系设计	(28)
2.4 水库诱发地震设计分析	(32)
2.5 斜心墙堆石坝动力稳定性分析	(47)
2.6 水库两岸滑坡体塌岸对大坝的影响	(65)
2.7 安全监测系统设计	(69)
2.8 大坝安全及运行管理设计小结	(75)
第 3 章 施工建设期工程安全控制	(76)
3.1 大坝结构特点	(76)
3.2 大坝施工特点	(79)
3.3 施工度汛及防洪能力	(80)
3.4 基岩开挖施工及检验情况	(81)
3.5 基础处理施工	(82)
3.6 大坝填筑施工	(95)
3.7 大坝安全监测施工与检验情况	(105)
3.8 水库渗漏施工处理情况	(107)
3.9 大坝工程施工小结	(118)
第 4 章 土石坝变形监测	(120)
4.1 小浪底水利枢纽工程大坝变形监测内容	(122)
4.2 小浪底土石坝外部变形监测	(126)
4.3 主坝坝体位移变形监测	(131)
4.4 变形监测小结	(134)
第 5 章 原型监测及自动化	(136)
5.1 原型监测自动化	(136)

5.2	渗压监测	(141)
5.3	坝基渗漏监测	(149)
5.4	原型监测小结	(150)
第6章	渗漏水水质监测	(151)
6.1	监测点布设和监测方案	(151)
6.2	库水水化学成分特点及变化规律	(152)
6.3	渗漏水水化学成分特点及变化规律	(153)
6.4	库水渗漏过程中水化学成分的变化	(157)
6.5	库水渗漏过程中的水-岩相互作用	(158)
6.6	渗漏水监测情况小结	(160)
第7章	水库地震监测	(161)
7.1	水库区地震地质条件	(161)
7.2	遥测地震台网建设	(164)
7.3	地震台网数字化改造	(167)
7.4	大坝强震监测系统	(179)
7.5	工程地震灾害应急	(184)
7.6	地震观测过程控制	(186)
7.7	地震台网运行管理	(189)
7.8	震情分析	(190)
第8章	土石坝白蚁防控实践	(204)
8.1	小浪底水利枢纽白蚁防控研究的背景	(204)
8.2	小浪底水利枢纽白蚁危害的普查	(204)
8.3	小浪底水利枢纽白蚁危害防控技术的试验	(206)
8.4	白蚁对小浪底土石坝安全影响初步分析	(209)
8.5	小浪底水利枢纽白蚁防控方案	(210)
8.6	白蚁防控小结	(211)
第9章	小浪底工程大坝安全会商	(212)
9.1	大坝安全管理工作专业化和部门化	(212)
9.2	大坝安全管理部门的命令链和控制跨度	(213)
9.3	大坝安全应急救援预案	(214)
9.4	工程安全巡视检查	(216)
9.5	水工建筑物维护	(216)
9.6	大坝安全会商机制	(217)
9.7	大坝安全会商制度	(219)
9.8	大坝安全会商信息技术平台建设	(220)
9.9	大坝安全会商小结	(229)

第 10 章 小浪底土石坝安全管理实践主要成果 (231)

10.1 观测仪器抢救会商分析 (231)

10.2 两岸坝肩渗漏情况及采取的工程措施 (242)

10.3 坝基渗漏问题研究及防渗补强处理 (254)

10.4 坝顶纵向表层裂缝专题会商分析 (265)

参考文献 (275)

第 1 章 小浪底水利枢纽工程概况

黄河小浪底水利枢纽位于黄河中游豫、晋两省交界处,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峡谷的出口处,南距洛阳市 40 km,上距三门峡坝址 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 ,占黄河总流域面积的 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。黄河小浪底水利枢纽工程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”。

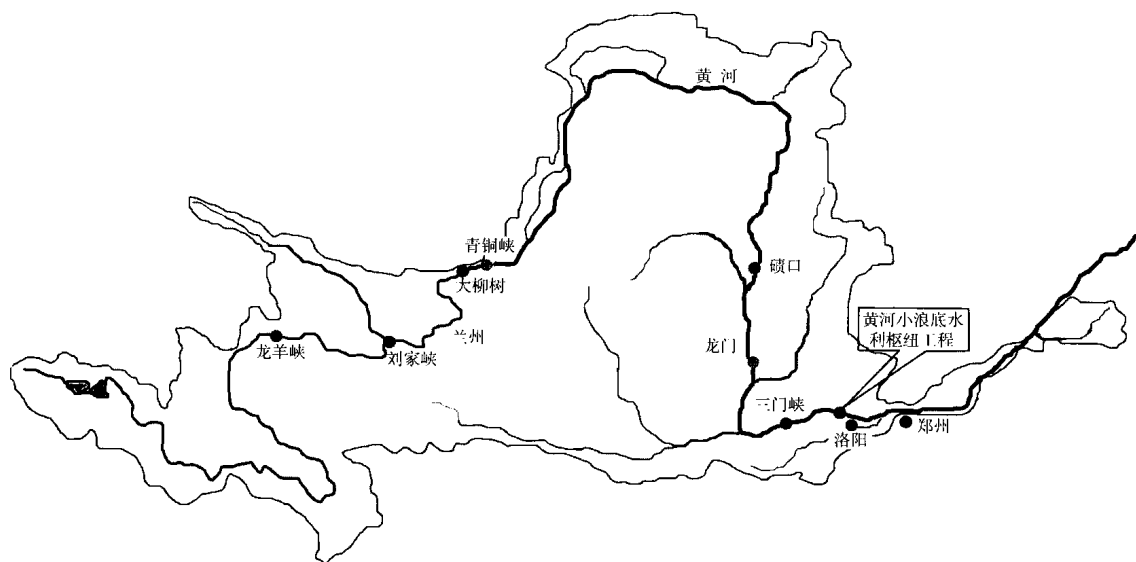


图 1-1 黄河小浪底水利枢纽工程的地理位置

1.1 工程规模

小浪底水利枢纽坝顶高程 281 m,正常高水位 275 m,死水位 230 m,汛期防洪限制水位 254 m,防凌限制水位 266 m。防洪最大泄量 17 000 亿 m^3/s ,正常死水位泄量略大于 8 000 m^3/s 。小浪底水库总库容 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,水电站装机容量 1 800 MW,是一座大(1)型综合利用的水利枢纽。枢纽按千年一遇洪水 40 000 m^3/s 设计,万年一遇洪水(同可能最大洪水)52 300 m^3/s 校核。多年平均径流量 277.2 亿 m^3 ,多年平均入库沙量 13.23 亿 t,实测最大含沙量 941 kg/m^3 。

小浪底工程建成后,与三门峡水库、陆浑水库、故县水库联合运用,遇百年一遇洪水,

花园口站洪峰流量为 $15\,700\text{ m}^3/\text{s}$;遇千年一遇洪水,花园口站洪峰流量为 $22\,600\text{ m}^3/\text{s}$;与三门峡水库联合运用,可基本解除下游凌汛威胁;采用蓄清排浑运用方式,利用水库 75.5 亿 m^3 的拦沙库容和 10.5 亿 m^3 的调水调沙库容,在 50 年运用期相当于约 25 年内下游河床不再抬升;多年平均增加年调节水量 20 亿 m^3 ,可提高 $4\,000$ 万亩($1\text{ 亩}=1/15\text{ hm}^2$)耕地的灌溉保证率,改善下游灌溉、供水条件;安装 6 台 300 MW 水轮发电机组,总装机容量 $1\,800\text{ MW}$,设计多年平均年发电量 51.1 亿 kWh ,前 10 年为 45.99 亿 kWh ,10 年后为 58.51 亿 kWh 。

小浪底水库北依王屋、太行二山,南抵崤山余脉,西起平陆县杜家庄,东至济源市(原济源县)大峪河。南北最宽处约 72 km ,东西长 93.6 km 。正常蓄水位时淹没影响面积 277.8 km^2 ,施工区占地 23.33 km^2 ,共涉及河南、山西两省的济源、孟津、新安、渑池、陕县、平陆、夏县、垣曲 8 县(市)33 个乡镇,动迁年移民 20 万人。

1.2 工程坝址水文地质条件

小浪底工程坝址河床覆盖层最深达 70 m 。坝址区为二叠纪和三叠纪沉积的砂岩、粉砂岩和黏土岩交互地层。岩层以 $8^\circ\sim 12^\circ$ 的缓倾角倾向北东,并含有连通性很好、摩擦系数 $f=0.2\sim 0.25$ 、 $c=0.005\text{ MPa}$ 的泥化夹层。岩体断裂构造及节理裂隙发育,横穿坝下的 F_1 及左岸 F_{28} 、 F_{236} 、 F_{238} 等大断层均与枢纽建筑物有密切关系,断层和节理裂隙均为 80° 左右的高倾角,且大部分断层呈上下游方向展布。左岸山体由于沟道切割形成了单薄分水岭,水库蓄水后存在稳定问题。近坝区右岸(包括右坝肩)有多处大的滑坡和倾倒变形体。坝址区基本地震烈度为 7 度。

水库集水区处于峡谷地段,地势西北高、东南低。南岸为崤山东北余支,地势陡峻;北岸有太行、王屋山脉。两岸地形起伏较大,西部、北部多 $1\,000\text{ m}$ 以上高峰,西阳河上游历山海拔 $2\,321\text{ m}$,为区内最高峰。区域内大面积分布着第四系黄土,以及前震旦系的变质岩、安山岩、寒武系灰岩、砂页岩、红色砂、页岩和黏土岩。该区域深厚的沉积地层中发育了种类繁多的沉积、变质矿产资源,如煤、硫磺、铜、铝矾土、铁、黄铁矿、石英、白云岩、石灰石等。库区范围内的矿产资源主要有煤矿、硫磺矿、铜矿和铝土矿。煤矿在各县(市)的大部分地区均有分布,煤质优良,蕴藏丰富;铜矿主要分布在 275 m 高程以上,垣曲县毫清河、板涧河上游,归属于中条山有色金属公司;硫磺矿主要分布于新安县境内的畛河、青河流域;铝土矿主要分布在新安、渑池、陕县等地,矿质优良,品位居全国之首,储量达 0.62 亿 t ,较大的企业为长城铝业公司洛阳铝矿。

库区属温带大陆性季风气候,年平均气温为 $12.4\sim 14.3\text{ }^\circ\text{C}$,昼夜温差大,1 月平均气温最低,7 月平均气温最高;库区年平均降水量为 616 mm ,降水量年际变化较大,主要集中于夏、秋两季,而冬季雨量稀少;年平均蒸发量为 $2\,072\text{ mm}$,全年夏季蒸发量最大,冬季蒸发量最小;年平均湿度在 62% 左右。

库区属温带半湿润地带,广泛分布着暖湿带的地带性土壤,其土壤类型为棕壤和淋溶褐土,浅山丘陵主要分布着褐土类中的红黏土、立黄土、白面土。在山前的冲积平原下部和局部低洼地区分布着潮土。库区植被覆盖率约为 20% ,地表植被密度不一,部分地表

裸露。植被类型有灌丛和草丛、阔叶林、针叶林,山区有小面积的天然林;植物有刺槐、榆、侧柏、荆条、酸枣等。

库区内农业生产历史悠久,自然环境受到人类活动较大的影响,由于放牧牛羊、烧柴、开垦耕地、常年干旱缺水等原因,库区植被不断遭到破坏,致使区域内水土流失严重。

黄河由西向东穿过库区,水流湍急,流程 130 km,其间有较多的支流、支沟、毛沟汇入,较大支流计有 18 条,多数分布在库中区 and 库前区,如北岸的西洋河、逢石河、毫清河、沅西河和南岸的畛河、青河、北涧河等河流。黄河三门峡至小浪底区间流域面积为 5 756 km²,约占三门峡至花园口区间流域面积的 14%。支流来水流量一般较少,且经常出现断流。汛期常有短时间暴雨洪水,一般每年出现 3~4 次。

黄河径流的泥沙含量居世界首位,多年平均含沙量 37.6 kg/m³,多年平均输沙量 13.51 亿 t。在一年之中,泥沙主要集中在汛期,干流站 7~9 月沙量占全年沙量的 80% 左右,支流站接近 100%;汛期沙量又集中在几次暴雨洪水之中。黄河泥沙约有 1/4 沉积在下游河床,致使下游河床以每年 10 cm 的速度抬高。小浪底水利枢纽能控制近 100% 的沙量。

1.3 枢纽建筑物

小浪底工程为 I 等工程,主要建筑物为 1 级建筑物。枢纽工程由主坝、泄洪排沙系统和引水发电系统组成,见图 1-2。泄洪洞、发电洞、灌溉洞和溢洪道进水口集中布置在大坝左岸山体,出水口集中布置在大坝下游左岸。地下式厂房位于左岸 T 形山梁交会处的腹部。

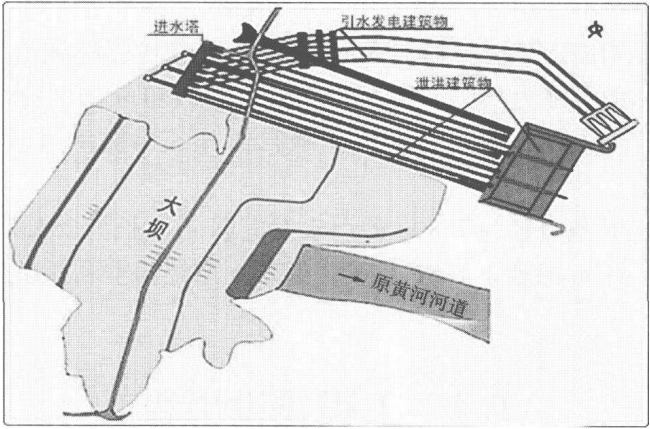


图 1-2 小浪底水利枢纽主要建筑物示意图

小浪底水利枢纽主坝为壤土斜心墙土石坝,上游围堰为坝体的一部分,坝基采用混凝土防渗墙,设计最大坝高 154 m (实际最大坝高 160 m),坝顶长度 1 667 m,坝顶宽度 15 m,最大坝底宽度 864 m,坝体总填筑量 5 185 万 m³。基础混凝土防渗墙厚 1.2 m、深 80 m。工程初步设计为斜墙坝型,后优化为斜心墙坝型,主要是适度地考虑了库区淤积的防渗作用,使坝基防渗效果更为可靠;上爬的内铺盖改善了上游坝坡的抗滑稳定性,既实现了库区淤积的连接,又不会对坝坡产生太大的影响;减少了上游围堰的土方填筑量及基础处理工程量,使截流后比较紧张的工期得以缓解。主坝特性见表 1-1,大坝全景如图 1-3 所示。

表 1-1 主坝特性

坝型	壤土斜心墙堆石坝
坝顶高程、设计最大坝高(m)	281、154
坝体总填筑量(万 m ³)	5 185
坝顶长度、宽度(m)	1 667、15
最大坝底宽度(m)	864
坝基防渗墙	混凝土防渗墙(厚:1.2 m,最大深度:80 m)

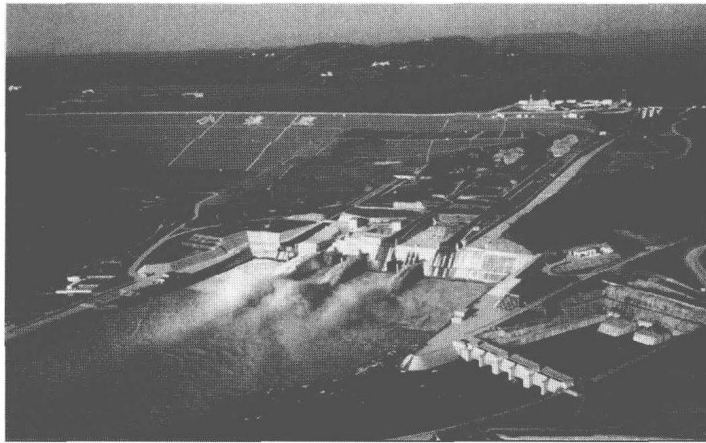


图 1-3 大坝全景图

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(10~10.5)m×(11.5~13)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 个两级消能消力塘组成。

引水发电系统由 6 条直径为 7.8 m 的引水发电洞,1 座长为 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 m×19 m 的尾水洞组成。

1.4 工程建设历程

小浪底水利枢纽工程于 1991 年 9 月 12 日开始进行前期准备工程施工,1994 年 9 月 1 日主体工程开工,1997 年 10 月 28 日截流,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 m³,石方洞挖 280 万 m³,土石方填筑 5 573 万 m³,混凝土 348 万 m³,金属结构安装 3 万 t,机电设备安装 3.09 万 t,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,被世界银行誉为本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。

小浪底水利枢纽自 2002 年以来进行了 5 次调水调沙运行,水库最高运用水位达

265.69 m,在防洪(包括防凌)、减淤、供水、灌溉和发电等方面发挥了巨大的社会效益和经济效益。

小浪底工程被国际水利学界视为世界水利工程史上最具挑战性的项目之一,其技术复杂,施工难度大,现场管理关系复杂,移民安置困难多。主体工程开工不久,即出现泄洪排沙系统标(二标)因塌方、设计变更、施工管理等问题造成进度严重滞后,截流有可能被推迟一年的严峻形势。截流以后,承包商又以地质变化、设计变更、赶工、后继法规影响等理由,向业主提出巨额索赔。面对各种各样的困难,小浪底工程建设者以高度的主人翁责任感,强烈的爱国主义情怀,沉着应对,奋勇拼搏,创造性地应用合同条款,组织由国内几个工程局组成的联营体(OTFF)以劳务分包的方式,承担截流关键项目的施工,用13个月时间,抢回被延误的工期,实现了按期截流;在上级部门的支持下,精心准备,艰苦谈判,通过协商处理了全部索赔,使工程投资控制在概算范围以内,取得了工程建设的重大胜利。

小浪底工程在国家改革开放和经济体制由计划经济向市场经济转轨时期兴建,进行了广泛深入的国际合作和建设管理体制创新,引进、应用、创造了新的设计、施工技术,取得了巨大成就。技术上,较好地解决了垂直防渗与水平防渗相结合问题和进水口防淤堵问题;设计建造了世界上最大的孔板消能泄洪洞;设计建造了单薄山体下的地下洞室群;大量运用了新技术;实现了高强度机械化施工。管理上,成功地引进外资并进行国际竞争性招标;全面实践了“三制”建设管理模式;合同管理成效显著;移民安置做到了移得出、稳得住;工程建设计划全面完成,工期提前,投资节约;精神文明建设取得了丰硕成果;枢纽投运以后走上了良性发展的轨道。

第2章 小浪底土石坝安全设计

黄河小浪底水利枢纽是治理黄河下游水旱灾害、改善河道生态与环境的控制性骨干工程。该工程于1991年9月1日开工,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12月31日主体工程全面完工。水库初期蓄水运用以来,最高蓄水位曾达到265.69 m,较正常蓄水位275.00 m低9.31 m。工程在防洪(包括防凌)、减淤、供水、灌溉、发电和改善下游河道生态与环境方面,发挥了巨大作用。

小浪底水利枢纽正常运用水位275 m,设计坝高154 m,总库容126.5亿 m^3 ,装机1800 MW,属国家大(1)型I等工程,主要建筑物为1级建筑物。枢纽按千年一遇洪水设计,万年一遇洪水校核,百年一遇洪水导流。在水库总库容126.5亿 m^3 中,长期有效库容51亿 m^3 ,淤沙库容75.5亿 m^3 。

大坝的安全和风险管理始于设计阶段,从大坝选址到坝型设计再到防洪设计等,从源头上综合各方面的情况来分析并考虑建设时期及运行过程中可能遇到的涉及大坝安全和运行管理的问题。本书将从设计的角度来阐述小浪底水利枢纽大坝安全和运行管理的设计情况,包括工程选址及枢纽布置、大坝坝型设计、大坝危险有害因素防范的安全设计及其评价、生产运行过程中洪水、淹溺、坍塌等方面的工程安全设计等。

2.1 坝址、坝型选择及大坝设计

2.1.1 大坝的设计特点

根据小浪底工程坝址区的地形地质条件、丰富的土石资源和施工总进度安排,经过多方案比较,最终推荐的大坝设计方案为带内铺盖的壤土斜心墙堆石坝,并将截流戗堤、枯水围堰、拦洪围堰和主坝形成一个有机的整体。坝顶高程281 m,设计坝高154 m,实际坝高160 m,坝顶长1667 m,坝顶宽15 m,总体积5073 m^3 。坐落在河床深覆盖层上的大坝长度达400多m,斜心墙下设厚1.2 m的混凝土防渗墙,防渗墙向下截断深厚覆盖层嵌入基岩1~2 m,向上插入心墙12 m,形成主防渗线。厚6 m的人工掺砾土内铺盖连接壤土斜心墙和拦洪围堰壤土斜墙,随着水库淤积的发展将形成天然铺盖作为大坝的辅助防渗线。

大坝采用分区设计,并尽可能多地利用了枢纽建筑物的开挖料填筑坝体。左岸单薄山体视为大坝的延伸进行防渗、排水和填沟压戗稳定处理。根据世界银行专家的建议,校核了大坝在8度地震及发生震中距10 km、6.25级水库诱发地震工况下的动力稳定性。对于横穿坝下的顺河向 F_1 大断层采用混凝土板封闭、固结灌浆、5排加强帷幕灌浆,在过渡料和堆石体底面设置反滤保护等措施。在大坝的设计中还采用了一系列先进的施工工艺,诸如GIN帷幕灌浆技术、龙口段高压旋喷灌浆防渗技术、混凝土防渗墙槽口段平接技

术、左岸坝脚坡积洪积物地基采用旋喷灌浆桩加固技术等。大坝设置了渗压计、沉降仪、测斜管、土压力计等共 487 支原型观测仪器和大量的位移测点,关键的原型观测仪器用 MCU 和计算机联网,可进行数据的自动传输和处理分析。

2.1.2 坝址比选

2.1.2.1 坝址选择

根据各坝段的地形地质特点和各阶段对工程开发任务的不同认识,不同时期曾对竹峪、青石嘴、一坝址、二坝址及三坝址等五个坝址作了大量的研究、比较,其中竹峪坝址因条件较差而较早被舍弃。

各坝址工程地质问题有一定的共性,主要表现在:

- (1)河谷都是平缓的砂页岩地层,砂页岩中普遍存在摩擦系数很低的泥化夹层;
- (2)各坝址均存在较深厚的砂砾石覆盖层;
- (3)河谷右岸都有倾向河床的顺层岸坡和大小不同的滑坡分布;
- (4)高倾角断层较发育,泄洪排沙建筑物难以完全避开;
- (5)各坝址的地质条件都比较复杂,不宜建混凝土重力坝。

一、二两坝址右岸都有大型古滑坡体,滑坡处理工程量大,滑坡涌浪又严重威胁大坝安全,故一、二两坝址缺点明显。

青石嘴位于一坝址大滑坡的上游,不存在滑坡涌浪威胁,河床覆盖层相对较薄,左岸地形条件易于布置泄水、发电建筑物。但河床断层很多,左岸洞群区断层破碎带宽达 150 m;隧洞出口段基岩面突然降低,使洞群在纵剖面上难以布置,地质上缺点很多且难以回避。此外,青石嘴坝址的库容因不包括大峪河而减少 14.7 亿 m^3 ,大坝工程量则因河床较其他坝址宽阔而增加 1 000 万 m^3 以上。

三坝址位于一坝址下游 3.5 km 处,受滑坡涌浪的威胁比一、二坝址的相对较小,左岸具有布置泄水建筑物的地形地质条件,虽河床覆盖层较厚,深槽达 80 m,但其防渗处理按国内技术条件是可以解决的。最后推荐三坝址为选定方案。

2.1.2.2 坝轴线比选

坝轴线的选择与坝型选择具有密切联系。

坝轴线的选择考虑了对坝体坝基的稳定是否有利、防渗体能否避开深槽右岸的基岩陡坎、混凝土防渗墙能否部分安排在前施工以及对左岸泄水建筑物进口布置的影响等,结合推荐采用的坝型,通过对多达 6 条轴线的研究比较,所选坝轴线的走向,成功解决了下面几个关键问题:

- (1)利用了左岸山梁,使得大坝上游坡对泄水建筑物进口布置的影响最小;
- (2)右岸坝轴线折向下游,使斜墙坐落在东坡上游的沟底,对防渗和稳定都有利;
- (3)使河床坝段防渗体的底部尽量避开了深槽基岩陡坎的不利影响;
- (4)相当一部分混凝土防渗墙位于右岸滩地上,便于提前施工。

2.1.3 坝型比选

2.1.3.1 坝型选择的基本思路

前文已提及,由于厚达 70 ~ 80 m 的深厚覆盖层和坝址区普遍分布抗剪强度极低的泥化夹层的存在,混凝土重力坝方案在此显然是不经济的。

土石坝坝型的确定与坝基砂砾石处理方案密切相关,结合小浪底工程的实际情况,在不同的设计阶段共研究过 20 多种坝型,基本设计思想包括以下 3 种:

(1) 利用坝前天然铺盖和混凝土防渗墙共同防渗。前期以拦洪围堰下混凝土防渗墙防渗,后期主要靠天然铺盖防渗的双重防渗体系。

(2) 以混凝土防渗墙垂直防渗为主,坝前泥沙淤积铺盖为辅的双重防渗体系。

(3) 大开挖的心墙堆石坝和斜心墙堆石坝防渗方案。

以天然淤积防渗为主,或是以天然淤积防渗为辅,或是混凝土防渗墙与淤积铺盖共同防渗,始终是坝型设计中研究的重要课题。其中问题的焦点集中在天然淤积防渗的可靠程度和深近 80 m 的河床砂砾石覆盖层造墙的可行性及墙体质量的可靠性。

2.1.3.2 研究的典型坝型

经过多种坝型方案的比较论证,在初步设计阶段选择了具有代表性的斜墙坝型、斜心墙坝型、心墙坝型等多种坝型方案,各坝型的典型剖面见图 2-1。

最终确定坝型的典型断面如图 2-2 所示。其主要优点为:

(1) 坝基防渗采用以垂直防渗为主、水平防渗为辅的双重防渗体系,提高了大坝防渗的可靠性。

(2) 上游堆石坝坝壳体积大大增加,保证了坝体抗滑稳定性和抗震性能。

(3) 内铺盖采用上爬式,消除了坝体下部软弱带,提高了上游坝坡稳定性,从而改陡了上游坝坡,将上游围堰顶部平台宽度 70.00 m 变为 20.00 m,坝体填筑方量减少约 5.3%。

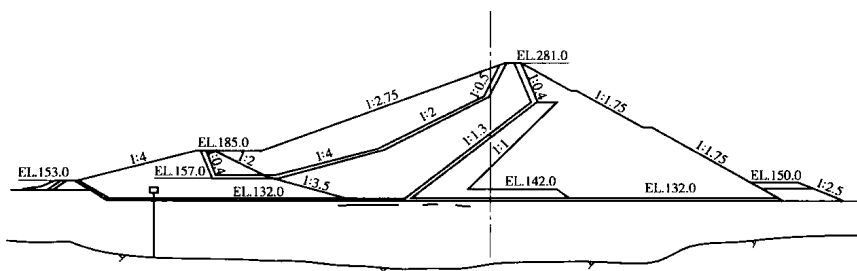
(4) 主坝混凝土防渗墙移至斜心墙下,与斜墙坝型相比,大坝防渗线缩短约 530 m,帷幕灌浆进尺减少约 39%。

(5) 上游围堰采用斜墙,与上爬式薄内铺盖衔接,减少了施工难度,使截流后施工工期紧张问题得到解决。

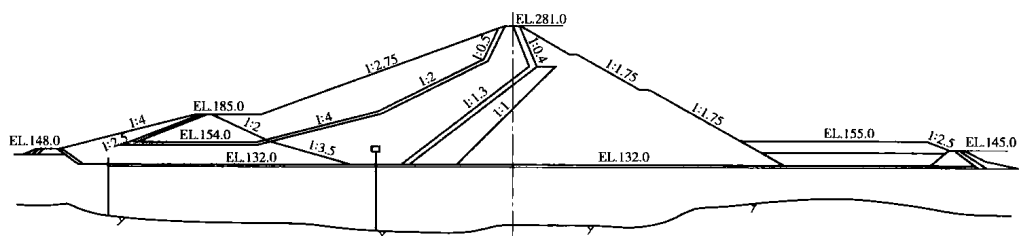
2.1.3.3 坝前泥沙淤积防渗的可行性论证

高含沙量是黄河来水的主要特征之一,也是与其他河流来水最根本的区别,因此坝前泥沙淤积对大坝的影响是大坝设计必须考虑的因素。对小浪底水库而言,考虑三门峡水库和小浪底水库联合运用,经计算分析,50 年年平均入库水量 277.2 亿 m^3 ,年平均入库沙量 13.23 亿 t,99% 的沙量来自汛期,汛期平均含沙量 78.2 kg/m^3 。

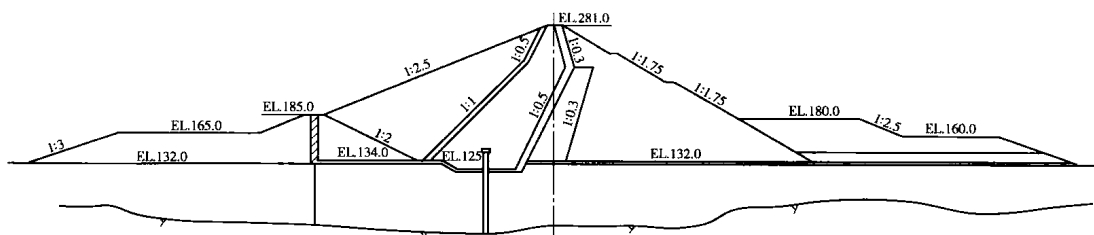
最终坝前形成高滩深槽的淤积形态,靠右岸为滩面,淤积高程 254.00 m,靠左岸为深槽,淤积底面高程 226.00 m。就悬沙而言,小浪底坝前泥沙淤积的最大粒径 $d_{\max} \leq 0.50 \text{ mm}$,其颗粒级配见表 2-1。



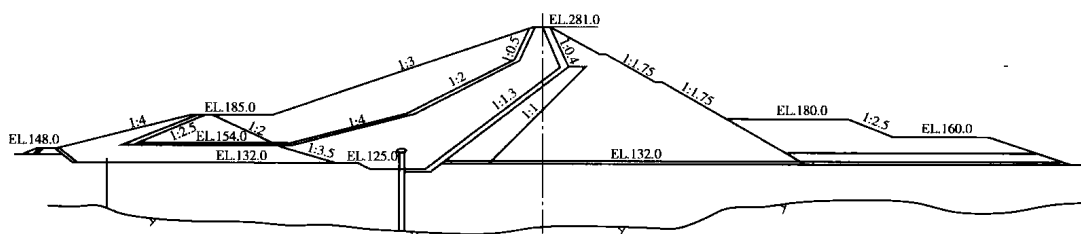
(a)斜墙坝型1



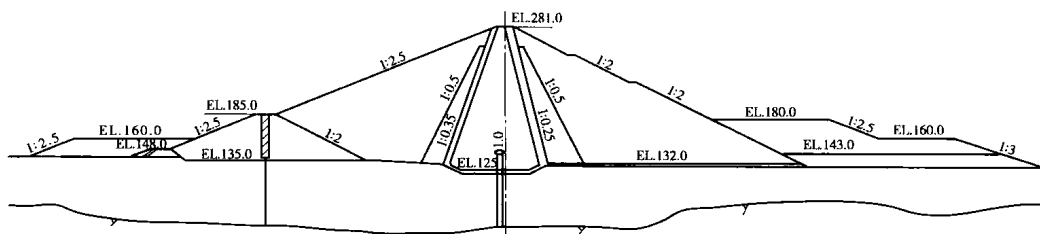
(b)斜墙坝型2



(c)斜心墙坝型



(d)斜墙坝型



(e)心墙坝型

图 2-1 初步设计阶段基本坝型曲型横剖面

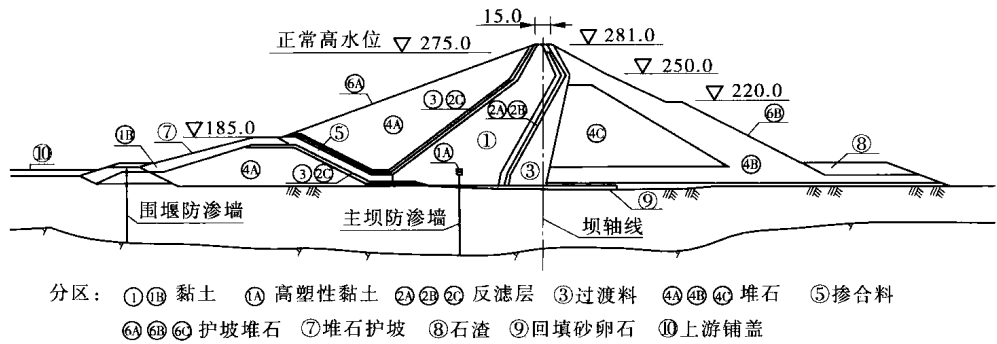


图 2-2 大坝典型剖面

表 2-1 小浪底断面泥沙颗粒组成 (1962 ~ 1983 年平均)

粒径 (mm)	0.005	0.01	0.025	0.05	0.1	0.25	中数粒径 (mm)
小于某粒径之土重百分数 (%)	15.6	30.5	52.4	77.9	93.4	100	0.022 5

注:按吸管法分析的资料。

为了探讨坝前淤积泥沙的防渗性能,进行了大量的调查研究和科学试验工作,其中在三门峡水库坝前淤积层中进行了勘测试验工作。淤积原状土渗透系数统计见表 2-2。

表 2-2 三门峡坝前淤积原状土渗透系数统计 (平均值)

土名	干容重 γ_d (kN/m^3)	含水量 (%)	孔隙比 e	黏粒含量 (%)	渗透系数 (cm/s)
重粉质沙壤土	15.1	26.3	0.802	6.5	2.5×10^{-5}
重粉质壤土	14.6	31.1	0.872	24.5	1.7×10^{-6}
粉质黏土	13.1	38.8	1.092	38.0	2.9×10^{-6}

由此可见,3 种淤积土固结后,渗透系数均在 $10^{-5} \text{ cm}/\text{s}$ 量级以下,形成的铺盖可以作为大坝基础的辅助防渗措施加以利用。

2.1.4 大坝设计

坝址地形地质条件的复杂性、筑坝材料的特殊性以及黄河特有的水沙条件,决定了小浪底土石坝设计的难度。通过大量的科学试验研究,成功地解决了一系列重大技术课题,如:黄土类壤土修筑高坝的可行性、利用黄河泥沙淤积铺盖防渗、人工反滤料设计研究、枢纽建筑物开挖料利用、约 80 m 的深厚覆盖层处理以及大坝抗震性能研究等,为大坝的设计提供了坚实的技术保证。

2.1.4.1 坝体分区

坝体共由 10 种大的材料分区组成,各分区共包括了 17 种材料。其中 1、1A、1B、5 区和 10 区为防渗体,2A、2B、2C 区为反滤层,3 区为过渡层,4A、4B、4C 区为坝壳堆石区,6、7