

SHIMENGONGBA 25NIAN
YUNXINGJISHU ZHUANTI YANJIU

石门拱坝 25年

运行技术专题研究

龙云霄 李保华 韩景泰 黄炳成 李 瓚 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

201170

TV642.4

L767

石门拱坝25年 运行技术专题研究

龙云霄 李保华 韩景泰 黄炳成 李 瓚 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书从大坝设计施工与监测、坝踵开裂与大坝结构性态、右坝肩特殊渗流现象所引起的工程问题、泄洪运行中所发生的问题、大坝位移反映及分析、渗流问题、枢纽运行中的其他问题等七个部分总结了石门拱坝运行实践中发生的突出问题,总结混凝土拱坝运行实践经验,以工程实践丰富拱坝理论,提高拱坝建造水平。

本书是我国现代拱坝设计、施工及运行管理等方面的重要实践总结资料,是有关水电施工、设计科研、管理及教学等部门人员的宝贵参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

石门拱坝 25 年运行技术专题研究/龙云霄等编著.

—北京:中国电力出版社,2001

ISBN 7-5083-0579-5

I. 石… II. 龙… III. 混凝土坝:拱坝—运行经验—陕西省 IV. TV642.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 16722 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

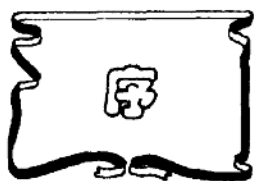
2001 年 8 月第一版 2001 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 14.5 印张 329 千字 1 插页

定价 32.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



混凝土拱坝在我国建国后始建，并得到迅速发展。半个世纪以来，我国混凝土拱坝建设经历了从无到有、从少到多、从低到高的过程，世界拱坝建设的重心，从“二战”后的欧洲转到 20 世纪 70 年代后的中国。石门拱坝，正是 70 年代初建设的当时国内最高的混凝土双曲拱坝。

石门拱坝建成以来，设计、施工、管理以及研究单位，都给予了高度的关注。尤其是管理单位，自拱坝建设起，就有关拱坝的技术专题开展了原型观测和研究工作。26 年来，我国的一些拱坝专家和学者，就石门拱坝运行中的技术专题，在各种有关石门拱坝的技术工作会议上和各类技术期刊杂志上，提出了不少的真知灼见。

石门拱坝的管理和运行，在国内拱坝史上第一次全面真实地记录了拱坝上游坝踵开裂的全过程；第一次在拱坝坝肩岩体内，观测到高压引水发电洞漏水的重大影响，并在岩体内同一钻孔同一位置上连续测试到 22 年岩体力学的定量变化；第一次在拱坝开设中孔的泄洪条件下，连续不断对下游冲刷开展原型观测和各项测试、观察和研究工作等等。设计、施工、管理和研究单位对石门拱坝专题不间断地进行了 28 年的研究工作。从当前来看，石门拱坝的高度已经不是很高，但对该坝很多技术专题进行的长期连续的研究，确实使我们对拱坝某些领域的认识得到了进一步深化。《石门拱坝 25 年运行中技术专题研究》是一部现代拱坝技术在某些重要方面的实践总结，是一部理论联系实际的好书，值得一读，值得推荐给设计、施工、管理和教学单位参阅。

在新世纪到来之际，尤其是拱坝建设的大国，应当有自己的拱坝实践经验，《石门拱坝 25 年运行中技术专题研究》就是其中之一，希望运行管理单位能不断总结实践经验，不断丰富我们水利水电建设管理的技术宝库，为我国水利水电建设作出有益的贡献。



混凝土拱坝在我国建国后始建,并得到迅速发展。半个世纪以来,我国混凝土拱坝建设经历了从无到有、从少到多、从低到高的过程,世界拱坝建设的重心,从“二战”后的欧洲转到 20 世纪 70 年代后的中国。石门拱坝,正是 70 年代初建设的当时国内最高的混凝土双曲拱坝。

石门拱坝建设在汉江的一级支流陕西汉中褒河的峡谷出口上,石门水库距汉中市仅 17km,坝顶高于市区 120m,具有得天独厚的效益条件。石门灌区是汉中盆地水稻的主产区,灌区大面积水稻单产居亚洲第一;坝后电站年发电量约为汉中水电的半数;水库的滞洪削峰作用,控制了汉江洪峰的 49%,成为汉中经济带防洪减灾的屏障。

石门拱坝建成以来,设计、施工、管理以及研究单位,都给予了高度的关注。尤其是管理单位,自拱坝建设起,就有关拱坝的技术专题开展了原型观测和研究工作。26 年来,我国的一些拱坝专家和学者,就石门拱坝运行中的技术专题,在各种有关石门拱坝的技术工作会议上和各类技术期刊杂志上,提出了不少的真知灼见。

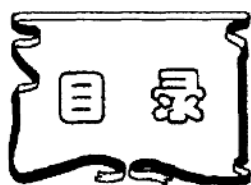
石门拱坝的管理和运行,在国内拱坝史上第一次全面真实地记录了拱坝上游坝踵开裂的全过程;第一次在拱坝坝肩岩体内,观测到高压引水发电洞漏水的重大影响,并在岩体内同一钻孔同一位置上连续测试到 22 年岩体力学的定量变化;第一次在拱坝开设中孔的泄洪条件下,连续不断对下游冲刷开展原型观测和各项测试、观察和研究工作,发现了下游强烈的三元流冲刷坝基岩体问题;发现了随季节周期变化的渗流“谷峰”现象;发现了泄洪过程对枢纽造成的一系列次生问题等等。设计、施工、管理和研究单位对石门拱坝专题不间断地进行了多年的研究工作。从当前来看,石门拱坝的高度已经不算什么,但对该坝很多技术专题进行的长期连续观测、测试和研究,得到的实践成果,是难能可贵的,也是十分罕见的,这些成果确实使我们对拱坝某些领域的认识得到了进一步深化。

编写本书,旨在总结 26 年石门拱坝运行实践中发生的突出问题,总结混凝土拱坝运行实践经验,深化对拱坝的某些领域的认识,以工程实践丰富拱坝理论,提高拱坝建造水平。本书共分七个部分,重点突出四项内容,即坝踵开裂与大坝结构性态、右坝肩特殊渗流现象所引起的工程问题、泄洪运行中发生的问题及渗流问题。《石门拱坝 25 年运行技术专题研究》是一部现代拱坝在某些重要方面的技术实践总结。拱坝建设走过了 20 世纪,我国是拱坝建设的大国,应当有自己的拱坝实践经验,编写本书,旨在为此做出奉献。

参与本书编写的有中国水利水电科学研究院、南京自动化研究院、西北水电勘测设计

研究院、汉中市水电局及石门水库管理局的有关专家。参与本书编写工作的人员还有杨志平、史中华、杨树正、吕锦波、汤建斌、戴锦萍、陈军等同志。在本书的专题技术研究工作中，我国的一些拱坝专家和学者为之做出了不少的努力，谨此一并感谢。

龙云霄 李保华 李 瓚



序
前言

第一部分

大坝设计施工与监测

- 3 石门双曲拱坝的设计与施工 李 瓚
17 石门双曲拱坝安全监测设计与实际监测工作 郑 宁 史中华

第二部分

坝踵开裂与大坝结构性态

- 27 大坝坝踵裂缝的发现与相应渗流机制分析 韩景泰 李 瓚 郑 宁
37 石门拱坝应力、渗流及稳定有限元
综合分析研究 耿克勤 吴永平 龙云霄 李 瓚
44 投运 25 年后石门拱坝的质量检查与数据测试 韩景泰 李 瓚
49 石门拱坝温度场分析 郑 宁 彭 虹 李 瓚
55 石门拱坝混凝土自生体积变形分析 彭 虹 郑 宁 李 瓚
62 石门拱坝实测应力分析 彭 虹 李 瓚 郑 宁

第三部分

右坝肩特殊渗流现象所引起的工程问题

- 77 石门拱坝右坝肩地下水监测与高压引水隧洞
的渗水 龙云霄 李 瓚 郑 宁
84 石门拱坝右坝肩高压引水隧洞漏水
处理及效果 龙云霄 李 瓚 李保华 郑 宁
89 右坝肩岩体综合老化问题 龙云霄 李 瓚 郑 宁
95 石门拱坝右坝肩高部某些渗流性态分析 龙云霄 李 瓚 郑 宁

第四部分

泄洪运行中所发生的问题

- 103 石门拱坝坝后长期过水冲刷实践与试验研究 李保华 李 瓚

118	消能区岩嘴的影响	李保华	李	瓚
124	长期运行中石门拱坝的实际泄洪特点	李保华	李	瓚
132	大洪水强降雨给石门枢纽带来的系列工程问题	李保华	李	瓚 郑 宁

第五部分

大坝位移反映及分析

143	坝肩位移分析研究	黄炳成	郑 宁	李 瓚
150	拱冠梁位移分析与大坝某些工作性态	黄炳成	郑 宁	李 瓚
160	坝顶位移与分析	黄炳成	郑 宁	李 瓚

第六部分

渗流问题

169	石门拱坝左区各坝段渗流分析	李 瓚	卢有清	郑 宁
177	石门拱坝右区各坝段渗流分析	李 瓚	彭 虹	卢有清 郑 宁
184	不同渗控布置和地质情况下左、右区坝基渗流 性态的区别	李 瓚	彭 虹	郑 宁
194	从 4 [#] ~ 7 [#] 坝段坝基涌水流量变化看右区地基渗透性态 的某些特殊问题			李 瓚
201	7 [#] 坝段渗量大的特殊渗流机制			李 瓚

第七部分

枢纽运行中的其他问题

211	常年运行中金属结构出现的问题及其处理	韩景泰	郑 宁	李 瓚
217	中孔检修门的设置问题	韩景泰	郑 宁	李 瓚
222	底孔出口环向裂缝及其处理	韩景泰	李 瓚	郑 宁

第一部分

大坝设计施工与监测

石门双曲拱坝的设计与施工^①

李 璜

(一) 工程要况

石门水电站工程前期工作开始较早,60年代初期,原水利电力部西北勘测设计院即开始了规划勘测和设计工作。当时重点工作的坝址是石门坝址以上6km处的老君崖坝址。规划完成后即在该坝址进行了地质勘探和设计,1964年末“设计革命”后期,西北勘测设计院(以下简称“西北院”)成立陕南指挥部,设计人员即到河东店进行设计工作,并提出了以老君崖为坝址的初步设计报告。文化大革命时期的1970年,设计院被解散,勘测设计人员全部转入原水利电力部第三工程局(以下简称“三局”),由该局统一领导设计工作。70年代西北院恢复,原下放三局的勘测设计人员基本回调西北院。

1968年末到1969年初,坝址由老君崖改到石门。西北院随即调整力量,全面进行石门枢纽的设计工作。该坝址距褒河峡谷出口1.8km,出口不远即是川陕公路和从陕西到湖北公路的交接点河东店。

石门枢纽的施工和后期设计正值文化大革命末期,极左思潮及工作方法控制着后期设计和施工,虽广大干部工人进行了抵制,工程取得了成效,但“四人帮”时代军代表的统一指挥,极左思潮,在技术领域的影响,给工程造成了一些后果。

汉中盆地位于秦岭东西复杂构造带与龙门山华夏系构造复合地区,盆地背缘为褒略大断裂,大坝即位于该断层北部2.5km处的秦岭山中(见图1)。河流大体NS向。坝区由石炭系、三叠系的石英岩、云母石英和石英云母片岩、大理岩、千枚岩等岩石组成,为浅海相沉积岩经区域变质生成。本区大地主要受NS向挤压推错,从早期的区测工作中可以看到,褒河下游多处反复褶皱或断裂,坝址区附近700m范围内大的背向斜轴就有4处,是褒河下游河段中褶皱和断裂比较集中的地区。但由于梯级开发的需要,本枢纽无法避开。

坝址基本地震烈度为7度。

坝址所在处河流大体呈NS向,是一个略呈梯形的横向谷。由于近NS向的挤压作用,坝址区的断裂有3组(图2)可称之为“2陡1缓”,主要构造线为NEE向,褶皱紧密,岩层陡立倾上游。3组构造面分述于后。

1) 近东西向,沿层面发育,产状($NE75^{\circ}NW \angle 80^{\circ} \sim 90^{\circ}$)与岩层产状同。一般宽1~3cm,最大10~30cm,在强风化带内有泥质物分布,面有铁染,但内部均为挤压紧密的片状物,裂面较平直,延伸长,分布最多,为坝区主要构造,是为第1组。

2) 近南北向,垂直层面发育。走向 $NW330^{\circ} \sim 350^{\circ}$,倾向NE少量倾SW,倾角 80° 。

① 石门拱坝前期勘测设计由西北勘测设计研究院完成,后期设计和施工由水电第三工程局完成。本文由李璜执笔。

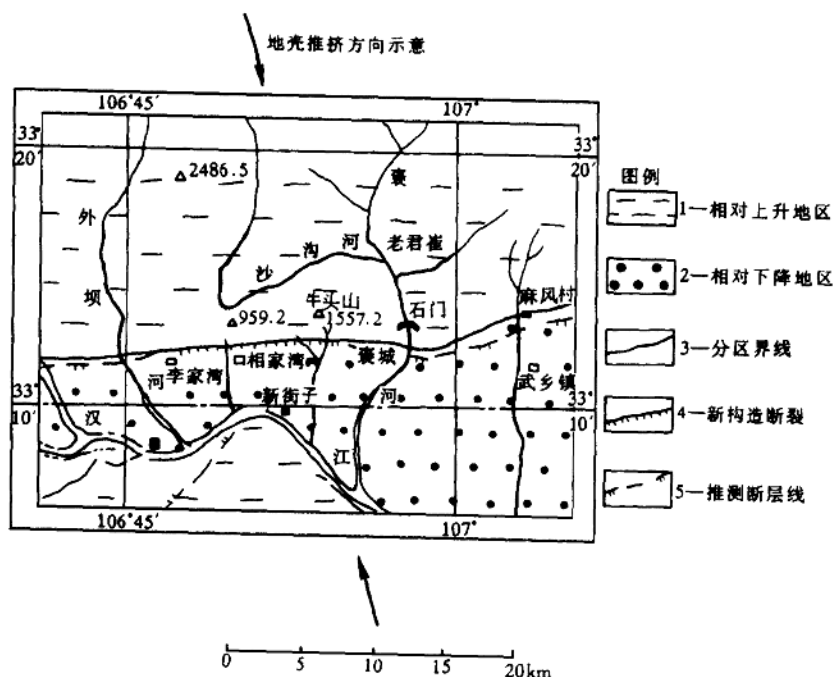


图1 石门区域新构造差异运动分布图

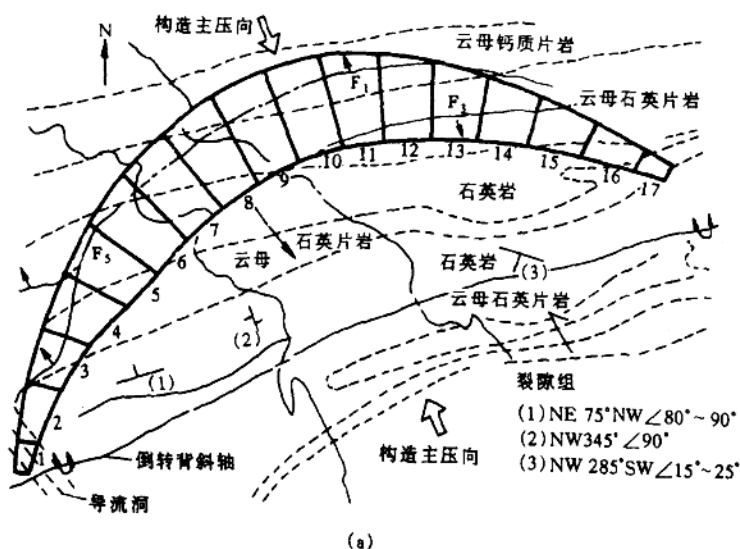


图2 坝址地质图

(a) 坝址地质要况示意图; (b) 坝轴线地质剖面图 (上游) (见书末插图)

呈张性面延伸, 单条裂隙呈闭合状, 面粗糙不平, 有铁染, 多无充填。分布较少, 延伸短, 连续性差, 是为第2组。

3) 缓倾角组产状 $NW280^{\circ} \sim 320^{\circ}$, 倾向 SW, 倾角 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。一般宽 $0.05 \sim 0.5\text{cm}$,

强风化带内裂隙有黏土及岩屑充填,弱风化岩石之裂隙面有铁染及钙膜,新鲜岩石中即无充填。面平整,光滑,一般延伸 5~10m 甚至更长,坝区分布较多,是为第 3 组。

大坝坝址地质要况示于图 2。构造变形主要是褶曲、挤压带、裂隙和小断层。各坝段都在石门倾伏倒转背斜的上游翼,右岸上部紧靠轴部,岩层走向与河流近于垂直。倾向上游,倾角 80°左右。大坝由西向东共分 17 个坝段,西坝头的 1# 坝段正处于石门倾伏倒转背斜轴上。

坝基岩石主要是石英岩,含石榴子石的石英片岩,云母石英片岩等,力学强度高、变形模量较大,其次是钙质片岩,结晶灰岩和大理岩等可溶性岩石,有规模不大的溶蚀裂隙和小溶洞,但岩石坚硬完整,变形模量高。这两类岩石约占坝基的 80%,坝基地质情况良好。此外,还有较易风化呈薄层、夹层出现的石英片岩,含碳质的石英云母片岩,钙质云母片岩,含炭质的云母片岩等软弱的岩石;但因倾角陡,在强风化岩石挖除后,岩石强度一般也可满足大坝要求。

挤压带和挤压破碎带产状与岩层一致,挤压带宽 1~8m,岩层扭曲剧烈,矿物有分异和重结晶现象,岩块呈或大或小的鳞片状排列,有时可见较多的石英脉,方解石脉。挤压带对岩体完整性影响不大,对地基承载力无影响。挤压破碎带的破裂面弯曲,有时见擦痕,一般宽 2~50cm,由岩石碎块,糜棱岩组成,易风化。

坝基只遇到三条断层。 F_1 通过坝基 6#、7#、8#、9#、10# 坝段,延伸虽长,但破碎带较窄,又无明显的影响带,对坝基影响较小, F_2 破碎带宽 0.15~0.3m,充填岩石碎屑,角砾岩,断层泥等,没有胶结,由于它切过 4#~5# 坝段前缘和上游开挖边坡,宽达 2~8m,且开挖时放过大炮,施工中做了相应处理。 F_3 通过 11#、12#、13# 坝段。

河床覆盖层最深 3.5m,右岸无,左岸最深 8.8m。强风化层河床部分较浅,最深约 4m,两岸垂直深度左、右岸最深分别为 9m 和 22m。强卸荷深一般为数米。

根据勘探工作,渗透性大于 1Lu 者主要在近地表、陡倾和平缓裂隙发育部位,例如左岸 7# 勘探孔处这种部位可从地表直至深 40m 处。渗透性小于 1Lu 的部位一般在 25m 以下,例如右岸 1# 坝段可达 25m,河床中仅为 17m,但地下深部透水性有局部加大现象。云母钙质片岩部位渗透性小。

坝基个别孔有承压水,10# 勘探孔承压水顶板高程 507.67m (设计坝基高程 530.00m),水头 75.53m,涌水量 3L/min。

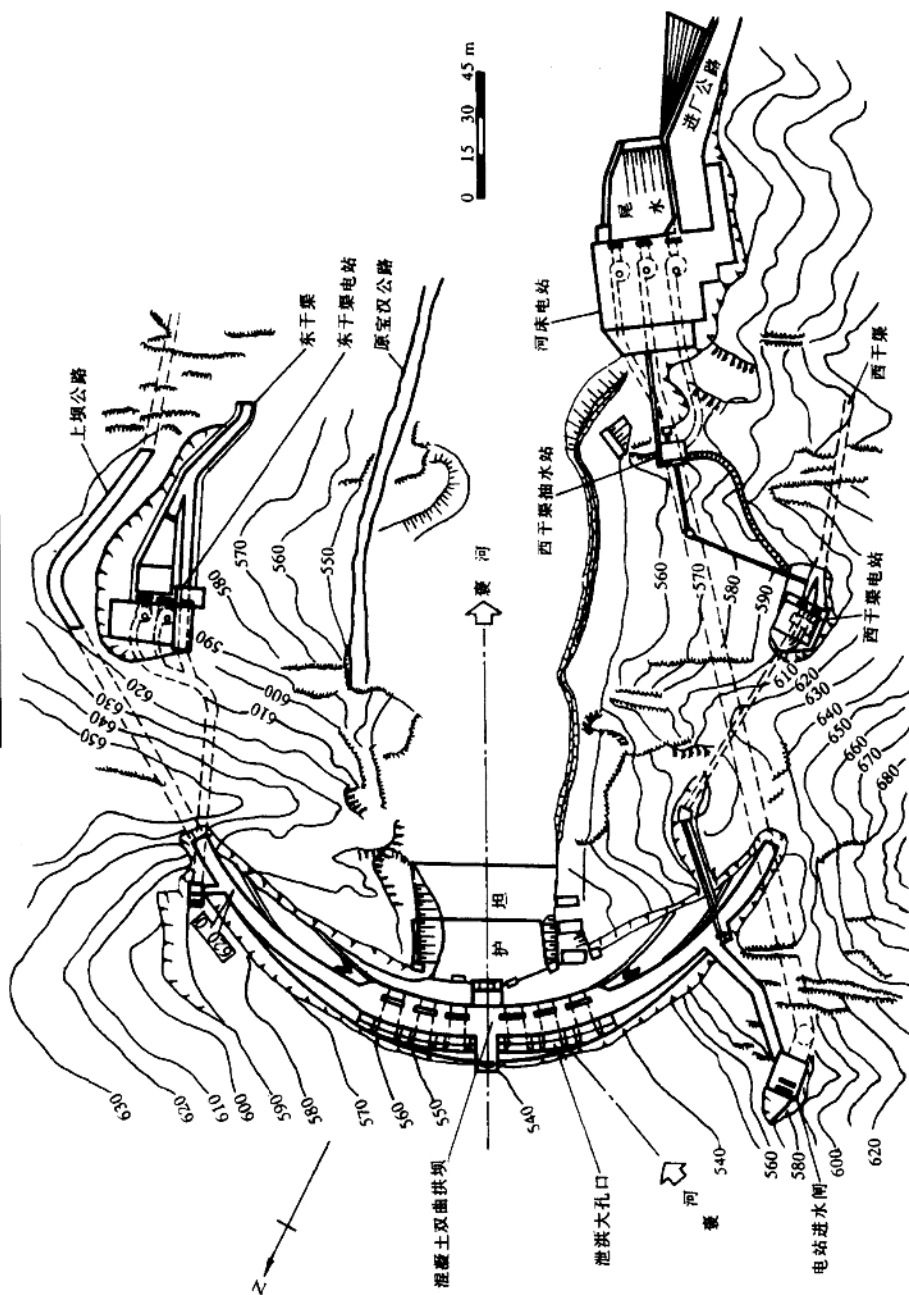
地面、地下水对水泥均无侵蚀性。

右岸坝头正好位于石门倾伏倒转背斜轴上,至高程 590m 以上,特别是 600m 高程以上岩石十分破碎,成为石门拱坝基础中最为突出的工程地质问题。

(二) 拱坝枢纽布置及主要指标

本工程属以灌溉为主,发电为辅的综合利用水利枢纽,总库容 1.05 亿 m^3 ,灌溉 51.5 万亩,装机容量 4.05 万 kW,年电量 1.34 亿 $kW \cdot h$ 。因枢纽性质决定,工程虽规模不大,但布置格局相对复杂,即有混凝土双曲拱坝(最大坝高 88.6m),右岸导流发电引水系统,右岸坝后横河地面厂房(常称河床电站),西干渠灌溉发电系统,东干渠灌溉发电系统(见图 3)。另外,在河床电站尾水下约 1.3km 处有反调节池渠首建筑,是在原褒惠渠滚

石门水库枢纽平面布置图



(a)

图 3 石门拱坝枢纽布置图 (一)
(a) 拱坝枢纽平面布置图

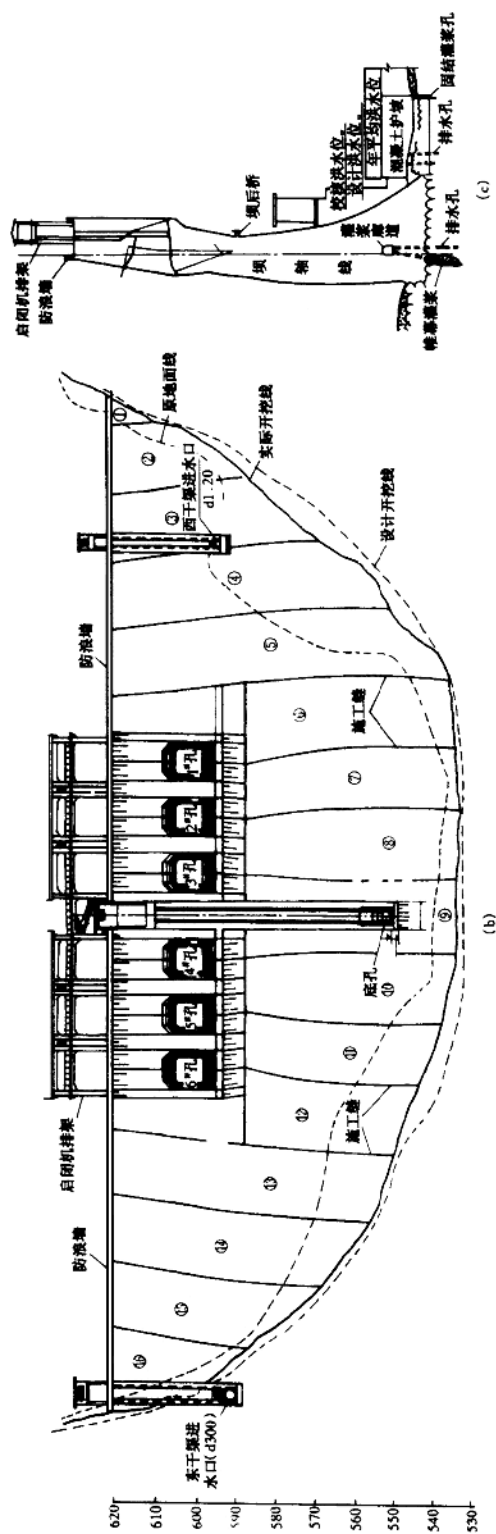


图3 石门拱坝枢纽布置图 (二)
(b) 上游视图; (c) 剖面图

水坝上加设橡胶坝而形成（图 3 中未示）。以上诸多建筑物组成了石门水利枢纽工程。

本工程的水文气象、水库资料见表 1 和表 2。

表 1 水 文 气 象

序 号	名 称	数 量	备 注
1	坝址以上流域面积 (km ²)	3861	
2	水文系列年限 (年)	37	1934~1970
3	多年平均径流量 (亿 m ³)	13.8	
4	多年平均流量 (m ³ /s)	43.6	
5	洪水流量		
	实测最大流量 (m ³ /s)	2900	1962 年
	历史调查 1867 年洪水流量 (m ³ /s)	5160	清 (同治六年)
	1904 年洪水流量 (m ³ /s)	3650	清 (光绪三十年)
	设计洪水 (P=1%) (m ³ /s)	4290	
	校核洪水 (P=0.2%) (m ³ /s)	5590	
	千年一遇洪水流量 (P=0.1%) (m ³ /s)	6120	
	可能最大洪水流量 (m ³ /s)	10000	
6	运行期间 1981 年“81.8”洪水 (m ³ /s)	6200	1984 年复核计算, 重现期为 200~300 年一遇 P=1% 时 Q=4850m ³ /s P=0.2% 时 Q=6490m ³ /s
7	泥沙		
	多年平均输沙量 (万 t)	148	
	多年平均含沙量 (kg/m ³)	0.934	
8	气温 (℃)		
	绝对最高温度 (℃)	44.7	
	绝对最低温度 (℃)	-9	
	年平均气温 (℃)	14.4	
9	水温 (℃)		
	绝对最高温度 (℃)	33.3	
	绝对最低温度 (℃)	0	
	年平均水温 (℃)	13.4	
10	多年平均降雨量 (mm)	905.6	

表 2 水 库 特 性

序 号	名 称	数 量	备 注
1	水库容积 (总库容) (亿 m ³)	1.098	校核洪水水位时
	库容 (亿 m ³)	1.05	正常高水位时
	有效库容 (亿 m ³)	0.607	
	死库容 (亿 m ³)	0.443	
2	水库面积 (km ²)	3.2	正常高水位时
3	水库回水长度 (km)	17	
4	水库水位		
	正常高水位 (m)	618.0	
	设计洪水水位 (m)	618.0	
	校核洪水水位 (m)	619.5	
	可能最大洪水保坝水位 (m)	624.4	
	汛限水位 (m)	615	
	死水位 (m)	595	
5	调节特征		具有年调节性
6	至 1994 年的水库淤积量 (亿 m ³)	0.3416	
	其中有效库容淤积 (亿 m ³)	0.0884	

河床电站进水口底槛高程 567m, 装机容量 $3 \times 1.25 = 3.75$ 万 kW, 最大引用流量 $3 \times 22.5 = 67.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 发电用水由导流隧洞改建后的钢筋混凝土衬砌高压引水洞进入厂房 (后部为钢板衬砌), 静压水头一般 75m, 主洞洞径 6.5m。尾水流入反调节池, 供南干渠引水。南干渠控制灌溉面积 19.5 万亩。设计灌溉引水流量 $20 \text{ m}^3/\text{s}$, 褒惠渠渠首最大引水流量 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

东干渠渠首电站进水口底槛高程 588.5m, 装机容量 $2 \times 0.125 = 0.25$ 万 kW, 最大引用流量 $2 \times 8.05 = 16.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 尾水进入东干渠 (并有引水设施进入)。东干渠控制灌溉面积 27 万亩, 设计灌溉引水流量 $20 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大引用流量 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

西干渠渠首电站进水口底槛高程 592m, 装机容量 $1 \times 0.05 = 0.05$ 万 kW, 最大引用流量 $3.89 \text{ m}^3/\text{s}$, 尾水进入西干渠。西干渠控制灌溉面积 5 万亩, 设计灌溉引水流量 $6 \text{ m}^3/\text{s}$, 加大灌溉引水流量 $7 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

有关灌溉发电系统的布置见图 3。

褒惠渠渠首浆砌石滚水坝最大坝高 9.3m, 溢流顶高程 539.3m, 其上设 $2.5 \text{ m} \times 132.5 \text{ m}$ (高 $\times$ 长) 的橡胶坝, 大坝充水体积 1376 m^3 , 形成库容 58 万 m^3 , 供反调节用。

(三) 大坝设计

石门拱坝的布置情况见图 3, 属 II 级建筑物。

石门拱坝原设计为 95m 的定心定径重力拱坝, 底宽 42.5m, 并按之进行了施工。坝肩开挖到一定高程, 由于当时国家水泥供应十分困难, 经过慎重认真分析研究并计算, 在最短时间内, 我们果断地将坝型改为变心变径的前倾双曲拱坝, 设计坝高 90m, 坝顶长 260m, 底宽 28m (当时拉应力控制在 1 MPa 左右, 实际压应力 4 MPa 左右, 一般部位混凝土标号为 200 号), 从而减小了坝体体积量, 同时也减少了水泥用量, 缓解了施工中水泥供应不足的问题。这在当时的政治形势、施工水平、现场已存条件、时间极其紧迫、计算条件十分原始和那时已是国内最高双曲拱坝等诸多因素制约下, 设计单位和设计人员承担了极大风险。

石门大坝属前倾双曲拱坝, 大坝主要数据和情况见表 3。大坝弧高比 2.9, 弦高比 2.3, 厚高比 0.31。由于施工中种种原因, 大坝除个别点已近 530.00m 外, 河床部分不少地区未能达到设计高程, 实际最大坝高 88.6m。

由于流域规划需要, 选用了目前的石门坝址。石门坝址的一个重要问题是无法避开石门倒转背斜轴, 右岸由于地形限制只能将坝头顶在该轴轴部, 致使右坝肩 590m 高程以上成为设计乃至多年运行所关注的重点。其他制约大坝布置的因素是左岸钙质片岩岩的影响, 横向河谷较复杂的卸荷风化问题, 当时已成的施工格局问题, 及尽量减少开挖以满足当时的工期要求的限制。

鉴于当时尚处于计划经济时代, 施工队伍的经验往往成为决定坝型的重要因素。当然, 更重要的是, 60 年代末 70 年代初, 国内双曲拱坝、高拱坝的建设起步不久, 尚无超过 80m 的双曲拱坝; “文革”时期左倾路线的控制与干扰; 计算技术的落后, 使我们对这样一座时间要求十分紧迫、又无法进行哪怕是稍微认真一些的计算分析, 当时是国内最高