

国外五座特大型水电站介绍

谷兆祺 梁海波 郭建军 编译

清华大学出版社



TV75
1

国外五座特大型水电站介绍

谷兆祺 梁海波 郭建军 编译

清华大学出版社

内 容 提 要

随着我国国民经济的迅速发展,各行各业对电力的需求越来越紧迫。我国水力资源丰富,但开发利用的程度还很低。在坚持“独立自主,自力更生”的同时,我们应该学习和吸收国外的先进技术和经验,加快我国水利水电工程建设步伐。

本书在收集和编译有关资料的基础上,比较详细地介绍了目前世界上五座特大型水电站,并附有 68 张附图。这五座特大型水电站分别是巴西、巴拉圭的伊泰普水电站,美国的大苦力水电站,委内瑞拉的古里水电站,以及俄罗斯的克拉斯诺斯库水电站和萨扬塔-舒申斯克水电站。书中所介绍的内容主要是以电站厂房和引水系统为重点,同时也涉及到规划、枢纽布置、坝工等内容。编者还结合我国长江三峡工程就电站若干方面的问题作了综合评述。

本书可供水利水电工程技术人员、水利水电设计院规划设计人员使用,也可供各类水利水电大专院校的有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

国外五座特大型水电站介绍/谷兆洪等编译. -北京:清华大学出版社,1996.7

ISBN 7-302-02239-9

I. 国... I. 谷... II. 水力发电站,特大型-简介-世界
N. TV741

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 13314 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学大学校内,邮编 100084)

印刷者:北京市海淀区清华园印刷厂

发行者:新华书店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/8 印张:14.25 字数:346 千字

版 次:1996 年 8 月第 1 版 1996 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-02239-9/TV·26

印 数:001—500

定 价:72.00 元

我们衷心希望本册子能对三峡工程和其它水电站的建设有所借鉴。我们衷心希望三峡工程在全体工程技术管理人员的共同努力下早日建成，为我国社会主义建设作出贡献。

编者
1995年12月

前言

近些年来，我国水利水电工程建设发展很快，水电装机容量以每年3000MW左右的速度增长。截止到1995年底，我国水电总装机容量突破了50000MW的大关。到2003年，我国水电装机容量将达到每年50000MW的速度。

随着改革开放的进一步深化，随着经济建设持续快速稳定的发展，我国已具备了修建超大型水电站的实力和条件。目前，举世瞩目的三峡工程已经顺利开工，西南地区的溪落渡、向家坝等大型和超大型水电站也正在规划研究之中。

为了学习吸收世界上其他国家超大型水电站设计施工的经验，三峡工程开发总公司技术委员会委托我们编写了这本册子，介绍目前世界上五座特大型水电站的情况。这五座特大型水电站包括伊泰普水电站、大古力水电站、古里水电站、克拉斯拉雅尔斯克水电站，以及萨扬诺-舒申斯克水电站。介绍的内容及附图以厂房和引水系统为重点，同时也涉及到了规划、枢纽布置及坝工方面的一些内容。

由于时间短促，也由于在国际上收集资料的种种困难，我们对每座电站汇集了8至16张附图，五座水电站共计68张附图。根据由各种途径得到的工程情况介绍、会议文章、学术论文以及现场参观资料，我们编写了这五座特大型水电站的简介，对电站某些方面的问题作了一些综合评价。由于水平有限，谬误之处在所难免，希望国内外各位专家同仁不吝指正，以便修改。

本册子由北京清华大学水利水电工程系谷兆雄、黎海波和覃建奎负责编译。在编译过程中得到许多专家学者的指导与帮助，许多单位及个人慷慨地为我们提供了许多宝贵资料。

俄罗斯圣彼得堡工业大学水电站教研组Vic Tor V. ELISTRATOV教授为我们提供了部分俄罗斯大型水电站的图纸。巴西伊泰普电站管理局特许我们翻译并引用他们的工程总结材料。在此，谨向这些国外同行友人致谢！

参加编译与提供资料的还有：三峡工程开发总公司技术委员会委员魏永晖教授，电力部信息研究所王长海总工程师，水利部水利水电规划设计研究总院邵剑南工程师，武汉水利电力大学马善定教授，天津大学要祖伦教授，清华大学水利水电系王树仁教授、彭守拙教授，电力部西北勘测设计院石瑞芳院长，水利部长江水利委员会蒋为群工程师，在此一并向他们致谢！

参加此项工作的还有贾秀梅、冯金鸣、包燕英、朱禄娟等同志。

目 录

一、巴西、巴拉圭伊泰普水电站简介	1
1、流域概况	1
2、坝址自然状况	1
3、伊泰普水电站的规划与布置	2
4、大坝设计	2
5、发电系统及电站厂房的设计	5
6、施工概况	8
7、运行后一些观测成果	9
8、结语	13
9、附图(一~十六)	14
二、美国大苦力水电站简介	29
1、流域概况	29
2、坝址水文、地质、自然条件简介	30
3、枢纽布置	30
4、大坝设计	30
5、厂房设计	31
6、施工概况	32
7、附图(一~十六)	32
三、委内瑞拉古里水电站简介	49
1、工程概况	49
2、流域概况	49
3、梯级开发规划	49
4、枢纽布置和水工建筑物	50
5、施工	53
6、古里水电站工程特性表	53
7、附图(一~十五)	55
四、俄罗斯克拉斯诺雅尔斯克水电站简介	71
1、流域概况	71
2、坝址的水文、地质、自然条件	71
3、枢纽布置	71
4、大坝设计	72
5、电站厂房设计	72
6、通航建筑物	73
7、施工进度	73
8、附图(一~八)	73
五、俄罗斯萨扬塔-舒申斯克水电站简介	82
1、流域概况	82
2、坝址的水文、地质及其它自然条件	82
3、枢纽布置	82
4、大坝设计	82
5、电站厂房设计	83
6、施工概况	84
7、附图(一~十三)	84
六、五座特大型水电站的综合评述	98
1、关于额定水头与装机容量	98
2、关于水电站的扩机问题	98
3、关于厂房坝段进水口布置的一些问题	98
4、钢管型式	99
5、水轮机蜗壳的设计与安装	100
6、主厂房桥吊位置与厂房上部结构布置	102
7、厂房主要构件尺寸及水下混凝土	103
8、安装间布置与面积	105
9、坝顶布置	106
10、总工期及提前发电问题	107

一、巴西、巴拉圭伊泰普水电站简介

1、流域概况

伊泰普水电站在巴西与巴拉圭两国交界的巴拉那河段上。该电站是目前全世界已投入运行的最大水电站，总装机容量为12600MW。

巴西是南美洲第一大国，全国水能资源丰富，可开发的水电容量为213000MW，年发电量可达12000亿度，可靠的年发电量可达9300亿度，仅次于我国的水电蕴藏量，居世界第二位。目前巴西水电总装机已超过13000MW，年发电量1400亿度，略少于我国水电装机容量。巴西水电装机容量占全国所有装机容量量的84%，而发电量所占比例则高达97%。

巴西的河流分为三大河系：

(1)、北部亚马孙河系。该河为世界第一大河，流域面积705万 km^2 ，发源于南美西北部。在巴西境内长度为3500km，流域面积为500万 km^2 ，为我国长江流域面积的2.8倍。河流流量极大，但巴西境内于落差很小，仅60m。可开发的水能资源主要在支流上。该流域可开发的水能资源约为1亿kW，目前基本尚未开发。

(2)、西南部巴拉那河系。该河发源于巴西西南部的高原地区，流经巴西、巴拉圭，至阿根廷注入大西洋，河流全长约4000km，全部流域面积约300万 km^2 。巴西境内的巴拉那河干流，从格兰德河口至伊瓜苏河口长约800km，落差226m，平均坡降为2.8%，该河段水能资源在20000MW以上。该区域离巴西西南部工业中心较近，干流上已建成百万千瓦级电站10余座，伊泰普水电站即建于该河段上，如图1.1所示。

(3)、东北部的圣弗兰西斯科河系。该河亦发源于巴西西南部的高原地区，流向东北，注入大西洋。该河全长2660km，流域面积64万 km^2 ，比我国黄河流域略小。该流域水能蕴藏量约为15000MW，目前已建及在建的水电站总装机容量约为6500MW。

由以上介绍可见伊泰普电站所在的巴拉那河，是巴西目前主要的水电基地，而伊泰普电站则是巴西最主要的水电站。

2、坝址自然状况

坝址以上流域面积为82万 km^2 ，年平均降水量为1400mm。年平均气温为22℃，年最高气温为40℃，最低气温为-4℃，属亚热带性气候。年平均相对湿度为75%。

坝址区多年平均流量为9070 m^3/s ，实测最大日流量为39790 m^3/s ，实测最小日流量为2900 m^3/s 。

坝址区河谷的宽度约为500m，天然水位高程约为100m，河槽最深处方程约为40.0m。两岸台地高程约为120~130m，逐渐抬高，因此坝顶高程为225.0m时，两岸台地上副坝筑坝高度一般也有80~110m左右。

大坝的右岸为巴拉圭，左岸侧为巴西。巴拉圭的电网周波为50Hz，巴西电网周波为60Hz。伊泰普共装18台机组，每台容量为700MW，其中9台用50Hz周波向巴拉圭供电，另外9台用60Hz周波向巴西供电。



图1.1 巴西已建和在建的100万kW以上水电站示意图

坝址区地震烈度不高,但在设计中,正常工况时考虑垂直及水平向地震加速度为0.05g,而特殊工况时垂直及水平地震加速度考虑为0.08g。

伊泰普坝址区主要为玄武岩,基岩中有水平层状的角砾岩、多孔杏仁状玄武岩以及大面积的水平节理面,这些节理面上摩擦角仅为 30° ,摩擦系数仅0.577,凝聚力 $c=0$,大坝坝底最低高程约为40.0m。这些水平的大面积节理面其高程分别约为130.0m、120.0m、80.0m、40.0m、20.0m、0.0m,完整的玄武岩其抗压强度可达140~150MPa,抗拉强度可达12MPa,弹性模量可达20GPa。但有砾岩及多孔杏仁状玄武岩,强度就较差,抗压强度低到70MPa,抗拉强度低到1~7MPa,弹性模量低到7GPa。因此大坝的抗滑稳定及变形问题是非常重要的问题。采用双支墩重力坝,上游面做成较缓的坡度(为1.0:5.8),利用大量水重来解决稳定问题,是该工程的一大特点。

由于坝基下地质条件不太好,基础处理工程量极大,除了常规的开挖、灌浆及排水等措施外,沿软弱夹层及结构面还设置混凝土塞和抗剪键槽,设置系统的排水廊道和排水系统,以减少坝基扬压力,保证大坝抗滑稳定。这也是该工程布置的又一大特点。

3、伊泰普电站的规划与布置

伊泰普电站位于巴拉那河干流巴西和巴拉圭两国界河的南端。按照规划,其主要任务是为了发电,共装18台单机容量为700MW的水轮发电机组,总容量为12600MW。可靠出力为9360MW,多年平均发电量为700亿度。

伊泰普电站除发电外,还有防洪、航运、渔业、旅游、生态改善等综合效益。

经规划研究,水库正常蓄水位为220m,坝顶高程定为225m,最大坝高为196m,最高洪水位为223m。水库总库容为290亿 m^3 ,有效库容为190亿 m^3 ,库长170km,水库面积1350km 2 。

伊泰普大坝及翼坝挡水前缘总长为7766m。主要建筑物有:混凝土双支墩重力坝,右岸混凝土单支墩翼坝,左、右岸堆石坝及土坝,河岸式溢洪道,坝后式地面发电厂,500kV地面变电站以及船闸等通航建筑物。目前尚未建造船闸及其他通航建筑物,也未见这方面的报道。枢纽总布置见图附一、二。

根据地质地形条件,主河道中布置厂房坝段及电站厂房,右岸台地上建造高约70m的混凝土翼坝,长约980m,然后是河岸溢洪道,再往右侧为土石坝。

施工期采用明渠导流,在左岸台地上开挖宽约200m的明渠。后期明渠截流后,在明渠中建造3个电站坝段,安装3台机组。主河道上下游均用土石围堰,一次拦断河道。

明渠段左侧为混凝土支墩坝段,再往左侧分别为堆石坝及土坝坝段。堆石坝坝段长约2km,土坝坝段长约2.2km,堆石坝最大坝高70m,左岸土坝最大坝高30m。

右岸河岸式溢洪道最大泄量为62200m 3 /s,总宽度390m,总长度483m,共有14孔,每孔安装弧形门,门宽20m,门高21.34m。14孔分成三组,中间有导墙分开,每个弧门上的水平推力约为4600t,单宽泄水量约为220m 3 /s。因此这个溢洪道恐怕也是世界上最大的溢洪道了。溢洪道出口为挑流消能,将水流抛入原河床中,且远离大坝及电站厂房。

4、大坝设计

大坝坝段有挡水坝坝段及电站坝段,主要是主河槽中的电站坝段。曾经比较过混凝土重力坝及双支墩混凝土坝两种坝型,最后采用后者。

双支墩混凝土坝的优点是:

- (1)、节省混凝土量约25%~30%。
 - (2)、由于上游坡较重力坝缓,坝底较宽,因此抗滑、抗倾性能更好些。
 - (3)、混凝土厚度小,易于散热。
 - (4)、底部扬压力较小,排水系统更有效。
- 两种坝型的工程量比较见表1.1。

表1.1 两种坝型工程量比较

	双支墩坝实际用量 (万 m^3)	重力坝估算用量 (万 m^3)	节约量 (万 m^3)
混凝土	512	676	164
钢板	125	104	-21
开挖	196	160	-36

在伊泰普电站节省164万 m^3 混凝土,不仅是节省了1.6亿美元(1974年价格的)直接造价,而是节约了相应的利息、财务支出以及6个月的工期。这部分工期是溢洪道槽下部混凝土所需要的工期,是关键性工期。这是在伊泰普电站采用支墩坝的决定性原因。

在采用支墩坝时,也考虑到存在下列缺点:

- (1)、坝体的某些部位，单位体积内的水泥用量要多些。
- (2)、模板用量较多。
- (3)、上游大头及下游支腿处外形比较复杂，使浇筑进度减慢。
- (4)、在两岸斜坡，坝基要挖成台阶式，施工较复杂。
- (5)、在某些应力集中部位，要多用一些钢筋。
- (6)、由于结构更复杂，需要作更多的模型试验和科学观测。

河床中主坝坝段即厂房坝段，为了便于安装巨型引水钢管，采用双支墩。每个坝段宽为34m，每侧支墩厚为6m，坝段中间空腔宽12.4m，两坝段间半个空腔宽为4.8m，上游坝面坡度为1:0.58，下游为1:0.46，空腔率为0.57，见图1.2。

在翼坝坝段，由于坝高较小，且没有安装巨型钢管的要求，因而采用了单支墩的支墩坝，坝段宽度为17m，上、下游坡度与主坝相同，坝面宽度为11.0m，见图1.3，详细尺寸见附图三。

河床段主坝沿水流方向，下部分成五仓浇筑，到上部再并仓，各仓接缝面上均做键槽并灌浆，如图1.4。在支墩坝头部伸缩缝上设置三道PVC止水，一道排水，在头部大体积混凝土内还设置许多水平的放射状的排水管，见图1.4。

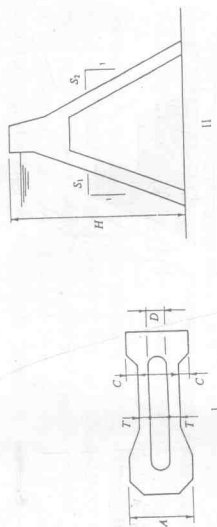
大坝坝基下面存在多层水平的角砾岩、多孔岩仁状玄武岩以及抗剪强度极低的连续面，因此采用了一些特殊的基础处理措施。

(1)、在河床深槽坝段，高程为20.0m的不连续面上，垂直水流方向开挖了八道抗剪切缝洞，用混凝土回填，做成抗剪键。

(2)、在上游坝踵处设3道帷幕灌浆孔，先钻灌上游及下游2道帷幕孔，孔距3m。用逐步加密法先灌靠下的这一道，再灌靠上游的这一道。在吃浆量大于12.5kg/m³的段落，两道帷幕孔中间，再加钻灌第3道帷幕孔，帷幕孔深决定于各坝段地质情况，在河床坝段，灌到高程0.00m附近，即孔深在最高坝段的坝基以下40m深处。

(3)、在坝段下面做排水系统，河床坝段在高程20.0m附近，做排水洞和排水孔幕，坝踵下部及厂房下部各设一道垂直水流方向的排水洞，另有两道顺水流向排水廊道，形成一个145m×185m的封闭式排水区。从这些排水隧洞中向下打排水孔幕，孔径102mm，孔距6m。

河床段双支墩坝段及岸边单支墩坝基处理见附图八。大坝坝基及坝基下部高程20.0m处的扬压力水头均为 H_0 ， H_0 为坝基高程减去廊道高程20.0m。整个河床廊道之间的扬压力水头均为 H_0 。



坝名	开工期 (年)	竣工期 (年)	最大坝高 H (m)	A (m)	S ₁	S ₂	C (m)	D (m)	T (m)	空腔率
Itaipu	1982	1982	196	34.0	0.58	0.46	4.8	12.4	6.0	0.57

图1.2 空腔重力坝

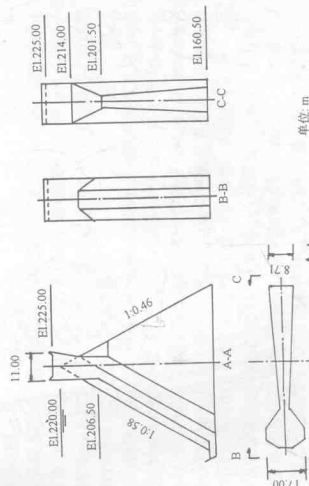
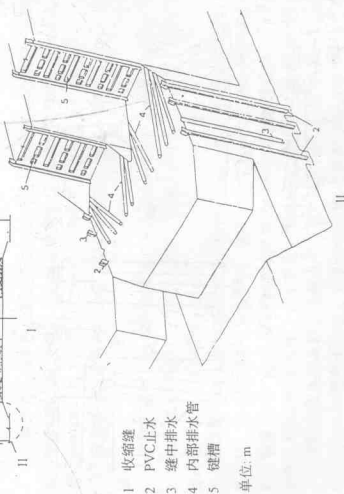
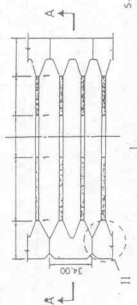
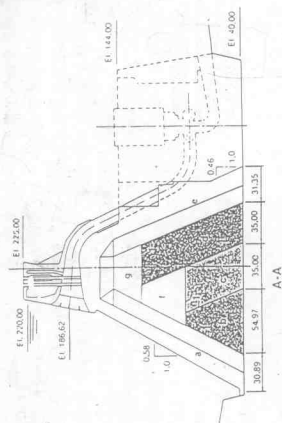
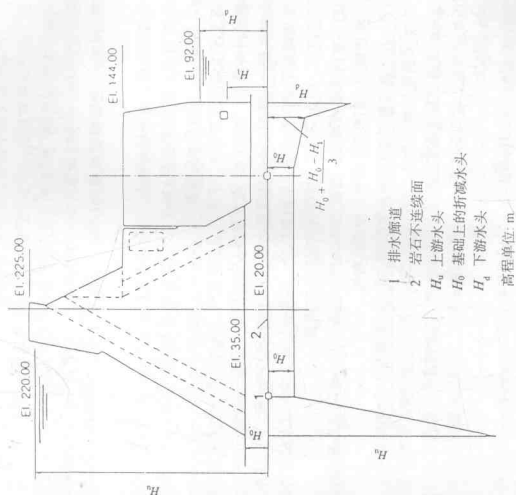


图1.3 右翼典型坝段



- 1 收缩缝
 - 2 PVC止水
 - 3 缝中排水
 - 4 内部排水管
 - 5 键槽
- 单位: m



- 1 排水廊道
 - 2 岩石不连续面
 - H_u 上游水头
 - H_0 基础上的折减水头
 - H_d 下游水头
- 高程单位: m

图1.5 扬压力图形

图1.4 空腹重力坝典型坝段细部

坝段坝基下面为封闭式抽排系统。实际上排水廊道中,若抽排系统正常运行, R_0 应为零, 此处是考虑抽排系统发生故障。
大坝抗滑稳定计算所用的安全系数如表1.2。

表1.2 大坝抗滑安全系数

剪应部分	工 况		极端情况
	正常情况	特殊情况	
纯摩擦部分	4.0	3.0	1.5
	3.0*		
	2.0	1.4	1.1
	1.5*		

*注:当地基条件较好,且有足够的了解时,安全系数可以降低。

不同情况下,大坝混凝土允许的应力如表1.3。

表1.3 大坝混凝土允许的应力

混凝土抗压强度 (365天龄期) (MPa)	允许抗压强度 (MPa)	允许抗拉强度 (MPa)
21	7	0.7
18	6	0.6
14	4.6	0.46

在设计伊泰普支墩坝时,当时全世界最高的支墩坝为Jose Maria de Oriol 坝,该坝完成于1969年,最大坝高为130m,而伊泰普最大坝高为196m,比上述坝高出46%,因此对伊泰普坝不仅作了大量有限元结构分析,还作了大量模型试验,坝体及坝基内埋设了大量观测设备。这些研究资料和观测资料对大坝的设计、运行提供了很宝贵的经验。

5、发电系统及电站厂房的设计

伊泰普电站目前表机18台,总容量12600MW。另外还有2个坝段,做好了进水口,但没有安装钢管和机组,以后必要时可以扩机。一台予留机组在明渠坝段中,另一台予留机组在主河槽坝段中。

电站进水口的布置图见附图五-17。每一个机组一个进水口,最前面为拦污栅,高33.0m,总宽24.0m,毛面积为792m²。进口设有3个立柱、3条横梁,

净过水面积为600m²。每台机组正常引用流量为660m³/s,平均净过栅流速为1.1m/s。

水流过栅后,四面均收缩,宽度变成6.7m,这个宽度与导流孔封闭闸门尺寸一样,以便重复使用该闸门,而节约投资。第一道门为检修叠梁门,宽6.7m,高19.0m;第二道门为事故门,宽6.7m,高16.2m,油压启闭。两门中距4.95m,后者为平板门,事故工作门过水面积为108.5m²,门高为16.2m。孔口面积为钢管面积的115%,过门处正常流速为6.4m/s;而钢管直径为10.5m,管内相应力流速为7.6m/s。

设计时做了详细的水工模型试验,做了一个比尺为1:100,包括所有进口水口、混凝土坝段及溢洪道的大型整体模型,另外又做了一个比尺为1:50的进口水口模型,包括一个进口水口、一条钢管、下弯段以及水轮机蜗壳。

在整体模型中详细研究了漩涡的情况。试验结果表明,水库水位越低时,越容易发生漩涡,水位在205~210m时,漩涡就会进入进口水口。当16~20台机组均投入运行时,进口流速均匀,没有漩涡。相邻的8台机组同时运行时,没有漩涡。但若只间隔运行几台机组,例如1、2、7、8、13、14、18、20,即使库水位在220m,也可能发生漩涡。曾打算在侧墙上开槽或孔,以减弱漩涡,但没有采用,因为认为可用控制机组运行方式,即不采用上述间隔分组运行来减少漩涡的生成。

钢筋混凝土的拦污栅支墩框架,其正常设计水头差为7.5m,特殊情况下水头差为10m。18台机组共设二台潜污机。钢筋混凝土的设计水头同上,栅条净距为150mm,和水轮机出力为10%额定出力时的导叶开度相当。栅前栅后水头差超过4.9m时,特殊装置会发出警告。

电厂坝段坝顶宽度为29.82m,最前面为潜污机,中间是起重量为110t的门机。门机高30m,轨距10m,全电厂共2台。最下游为公路,路面宽约70m。

进口水口闸门段后即为渐变段,然后接钢管。钢管内径10.5m,直至蜗壳前缩小至内径约8.5m。钢管上弯段、下弯段均埋入钢筋混凝土内,中间长度约70m的直段大部分为明管。在下弯段的上部没有伸缩节,见附图7。

钢管所用钢材为巴西SAR-50钢,上部最小允许厚度为25mm,下部伸缩节处最小厚度为42mm。这个厚度中包括直管段防腐蚀裕度2mm,上弯段腐蚀裕度3mm。纵缝、环缝均用手工焊,焊后未作退火、正火处理,所有焊缝均选用超声波探伤,再用x射线探伤,特别注意到控制冲击韧性,要求0℃时的冲击韧性不低于3.5kgm。

上弯段混凝土与钢板间作接触灌浆,在各加劲环处则留有排水管。为了防锈,钢管先喷砂除锈,第一层涂含锌树脂,第二层再涂煤焦油树脂。在暴露的管外壁,先涂含锌树脂,再涂Alkalayde White。在进入厂房144.0m高程平台时,还涂一层防水层。

厂房坝段及河槽坝段下设置了复杂的排水系统,一共有9个排水站,36台扬程、容量各不相同的水泵,总排水量达每分钟114.17m³(约1.9m³/s)。在近8年的运行中,表明只有1/3的水泵容量就够了。水泵及集水井的布置见图1.6。

各泵站参数如表1.4。

表1.4中各水泵站布置成梯级形,高程较高的集水井,若来不及抽排,可以溢流入高程较低的一级泵站。各泵站最终将渗水穿过厂房排至下游尾水。

排水量如此之大是考虑到要排基础中的渗水、坝段间渗水、支墩坝头部位混凝土中的渗水,以及降雨从支墩间或下游坝面上漏入的雨水,所有这些均按最坏的情况考虑。

电站厂房的平面布置如图1.7。

在主河槽中可装机16台,已装15台,预留1台。在导流明渠中可装机4台,已装3台,预留1台。

表1.4 大坝排水泵站

泵站号	位置 (坝段号)	站内水泵数			水泵性能	
		正常	备用	将来预留	总计	扬程(m)
1	F3/4-F5/6	2	1	1	4	51
2	F11/12-F13/14	2	1	1	4	93
3	F15/16-F17/18	6	2	2	10	113
4	F19/20-F21/22	2	1	1	4	95
5	I 20	1	1		2	12
6	F15/16	2	1	1	4	39
7	H14	2	1		3	94
8	D7	1	1		2	19
9	H8	2	1		3	75
合 计					36	
						114.17

每一个双支墩的厂房坝段垂直水流方向宽度为34.0m,每一个机组段长也是34.0m长,但坝块的分缝与机组段的分缝错开了8.3m,不在一条直线上。

厂房间是分缝的,厂房块段顺水流方向总长99m。厂房底部最低开挖高程

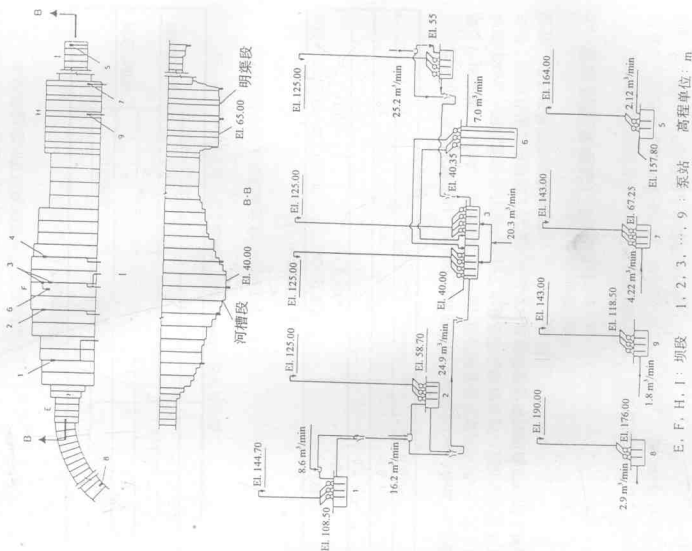


图1.6 大坝泵站

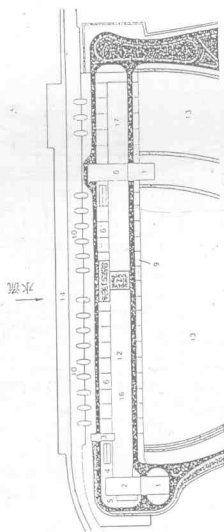


图1.7 厂房总体布置

要求为54.0m,河槽段最低处基岩高程为35.0m左右,因此在某些厂房块下用低标号混凝土回填近20m高。

主厂房全长968m,在右端河岸上有一个安装间,它包括在高程144.0m处有一个卸载场,有2台起重重量各为250t的桥吊,卸货后将部件下运到高程为108.0m的主安装场上去,这个部位的副厂房从92.4m到144.0m高程,内设有50Hz的机械电气设备、备用柴油及接带室等,预装配场在144.0m高程,全长136.5m,宽30.7m,在高程为108.0m的主安装场长141.3m(比4个机组段还长),宽为29m。

主河槽段中现装15台机组,每3台为一组,设一个升压变压器、开关及附属机电设备系统,在9A机组段设有安装机组,在9A段及第10段之间为中控室及管理室,共5层。

厂房中共装18台混流立轴伞式水轮发电机组,每台容量700MW,机组最大毛水头为128m,正常毛水头为120m,水轮机设计水头为118.4m,电站目前总装机容量12600MW,可靠出力9360MW,年平均电能700亿度,18台机组中9台为巴西供电,频率为60Hz,转速为92.3 r/min,发电机额定容量为73.7万kV·A,功率因数为0.95,另外8台机组向巴拉圭供电,频率50Hz,转速90.9 r/min,发电机额定容量为82.36万kV·A,功率因数为0.85,发电机惯性矩为31.36 GJ·m,发电机通风量内径约为22.0m,水轮机转轮直径约8.15m,单机额定过流量为645 m³/s,机组段长为34m,机组的剖面图如图十六。

在主河槽与明渠段之间,有一个中央安装场,在144.0m高程上也设有一个卸载场,室内设有两台起重重量各为250t的桥吊,预安装场长144.0m,宽32.8m,两台起重重量各为250t的桥吊可将部件下运到高程为108.0m中央安装场上去,中央安装场长98.15m,宽29m(接近3个机组段的长度),这个安装场上下也有许多层,内部设有60Hz的机械电气设备。

两个安装大楼的剖面图如图九、十,中间管理大楼的立面剖面图如图十

主厂房全高为82.5m,在深槽坝段,由于基岩较低,厂房全高达109m,厂房顺水流方向,从厂坝分缝处至尾水管出口总长为99m,下游最高尾水位极高,约为136.5m,最低尾水位又较低,使机组安装高程为87.5m,因此整个厂房几乎在最高尾水位以下。

整个厂房块体中,中间部分为主厂房,上、下游均为副厂房,发电机通风道内直径约为22m,桥吊跨度约为29m,发电机层高程为108.0m,水轮机层高程为98.5m,厂房纵剖面见图十二、十三。

主厂房内设有4台双小车的主桥吊,每台起重重量均为1000t,桥吊轨顶高程为125.0m,高出安装间及发电机层地面17m,在主桥吊之上,全厂设有2台大小车起重重量各为100t的小桥吊,其轨顶高程为136.5m,高出主桥吊11.5m,大小桥吊均支承在钢筋混凝土梁柱系统上,厂房下游挡水墙,从上至下厚度均为3.0m。

厂房的最下游有尾水平台,平台上有门式尾门起闭机,起重重量140t,共2台,门机总高达25m,主厂房上游副厂房中主要布置附属电气设备,98.5m高程下层有励磁设备、厂用变压器、下层通风设备等,高程108m层,上游为单相主变器,主变运输道,250t主变桥吊,高程128.2m层以上为SF₆开关设备,及吊运SF₆设备的起重重量为10t的桥吊,再上面,在144.0m高程的屋顶上为出线装置。

主厂房下游侧的副厂房共8层,上部几层为电缆层、通凤层、蓄电池室、配电盘室等;下部几层为机组油、气、水附属设备室。

厂房最下部及尾水管底版中共有4条垂直水流方向的排水廊道,宽2.5m,高3.5m,如图1.8。从这些排水灌浆廊道中向下钻灌浆帷幕,下游3排钻孔,孔径76mm,钻透高程为20.0m左右的角砾岩与多孔杏仁状玄武岩,直至高程为12.0m左右的完好玄武岩中。上游在高程为76.5m处的排水灌浆廊道中,也钻3排76mm的灌浆孔,灌至21.0m高程。3个廊道中共钻5排排水孔幕,并与高程在20.0m高程,位于角砾岩中的排水廊道相连。排水孔孔径均为100mm。灌浆孔及排水孔幕垂直水流方向间距一般为3.0m。在混凝土和岩基接触面上还埋设了半圆形的排水管网,通向排水廊道。在厂房两端,顺水流方向还有侧向封闭的灌浆廊道及排水孔幕,且与大坝下的灌浆、排水系统连成整体。

如此复杂严密的灌浆、排水系统连成整体,是为了增加坝段抗滑、抗浮的安全性,为了减少通过各种软弱透水地基的渗水量。厂房下面的扬压力图假定如图1.9。即假定厂房下部靠近下游的灌浆排水帷幕,可使底板下测压管水头减少1/3。

主河槽各坝段投入运行后,在5年中观测到坝下及厂房下的扬压力均比原假定的要少。因此在1985~1988年建造导流明渠坝段厂房时,认为灌浆排水可使厂房底板下测压管水头减少2/3,如图1.10。因而4个明渠坝段厂房下的开挖量共可减少6.3万m³,回填混凝土减少2.7万m³。

6、施工概况

伊泰普水电站整个工程的主要工程量为:土方开挖量2830万m³,石方开挖量3311.7万m³,土石填筑量3098万m³,混凝土量1291万m³。

工程于1975年10月开工,1982年10月水库开始蓄水。原计划第一台机组将于1983年一季度开始发电,后因投资没有及时到位,第一台机组延至1984年5月正式发电。因此,从开工到第一台机组发电共用了8年零7个月。最后3个机组段,即导流明渠段的几台机组在1991年投入运转,因此,从开工至完建共约16年。

施工的顺序大致是,先在左岸滩地上开挖明渠,并在明渠中形成导流底孔,然后在主河槽中建造截流围堰。截流后开挖右侧主河槽基坑,并浇筑混凝土坝。同时不间断地浇筑右岸台地上支墩坝,建造右岸的溢洪道和左岸的土石坝。当河槽主坝段电站进水口、厂房以及溢洪道均具备蓄水条件后,明渠导流段下闸蓄水,最后完建河槽段厂房及明渠段厂房,以及所有余下的工程。

事先对浇筑混凝土工作做了很多研究工作,并提出了许多要求。

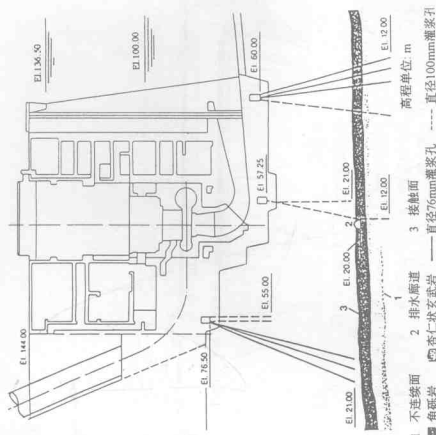


图1.8 灌浆帷幕和排水孔

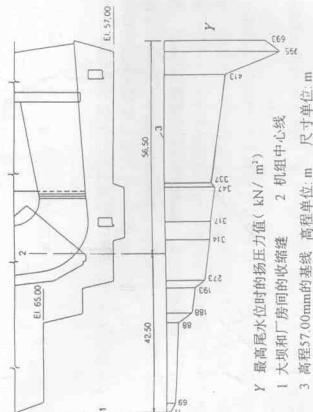


图1.9 扬压力图(第1-15号机组)

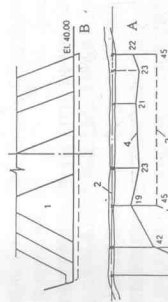
大坝混凝土为A-140级，365天的抗压强度为14MPa，最大骨料一般为152mm。在大坝上游头部处，为了降低透水性及提高抗拉强度，骨料最大直径降为75mm。

7、运行后一些观测成果

大坝电厂各部位埋设了大量观测设备。投入运行之后，这些设备测到许多重要数据，对大坝厂房运行情况提供了重要的信息。

7.1、坝基扬压力

大坝坝基下高程为20.0m处，原估计扬压力较高，如图1.11。在第F19/20坝段下，1988年12月（夏季）测得的扬压力只有估计扬压力的一半左右，因此大坝抗滑稳定有了额外的安全度。



对于主坝而言，先浇筑支墩靠上游的两大块，当这两块高度达到5~10m后，再接着浇筑紧挨着的下游两大块支墩，比前一仓低一个浇筑高度，接着也浇筑大坝头部的混凝土，比第一仓支墩混凝土低5m以上。下游的实体混凝土是最后浇的一块。靠近基础浇筑的混凝土层厚为0.5m，然后为1.5m、2.5m。正规的混凝土层厚为2.5m，直至进水口高程。

河槽段、明渠段主坝，以及相邻的几个翼坝坝段在155.0m高程以下均用混凝土和6m³吊桶浇筑。155.0m高程以上以及厂房部分的混凝土用门机及6m³吊桶浇筑。每次铺料厚0.3m。

设计中做了大量温控研究，最后提出的温控要求为：

- (1)、入仓温度不超过7℃。
- (2)、12%~25%的波特兰水泥用粉煤灰代替（原设计要求替代20%~25%，因粉煤灰不足，后降为12%。）。
- (3)、靠近基础处的混凝土，每仓厚度为0.5~0.7m。

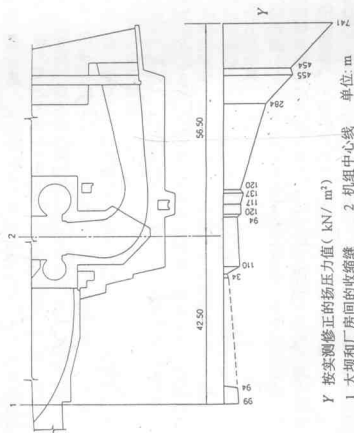


图1.10 扬压力图(第16~18A号机组)

高程单位: m

图1.11 典型坝段坝基接触面扬压力图

7.2、坝体、坝基渗透水量

蓄水之后，坝基、坝块间伸缩缝、坝上游头部、坝的裂缝有的地方开始漏水。接缝漏水一般起初为0~8L/min，只有F36(H)坝块间接缝漏水达25L/min。2年后有5条坝块间的接缝漏水增至38~191L/min，且还有增加的趋势。采用分期钻孔灌浆的办法堵漏，上述5条接缝的漏水逐渐减少，如表1.5。

表1.5 坝块间伸缩缝漏水

接缝排水位置 坝块号	漏水量 (L/min)					
	1985.10	1986.2	1986.11	1987.2	1987.6	
F8/9	106	122	157	107	23	
F10/11	38	26	13	9	7	
F22/23	148					
F24/25	101	61	40	27	32	
F34/35	191	117	80	81	64	

蓄水5年后，渗水量稳定了，达到设计预期的要求，整个坝基、坝块间漏水量约500L/min，约720m³/d。

各个双支墩大坝头部坝体中，有21个排水管。一共有378个排水管，其中5个坝段中一共有6个排水孔，渗水量超过2L/min。如表1.6。

表1.6中坝段F34/35的排水孔在蓄水2个月后漏水猛增，F35/36段的排水孔在蓄水3年后漏水猛增。经调查，漏水原因同上所述伸缩缝漏水原因一样。F35/36坝块还因为明渠段厂房爆破开挖，使坝头漏水增加。

上述漏水部位也经类似的灌浆处理，使之漏水减少，恢复正常。

表1.6 坝块头部漏水情况

坝块号 及孔号	漏水量 (L/min)									
	1982.11	1983.1	1983.6	1985.10	1986.11	1987.9				
F9/10(9)	4.4	3.3	1.4	25.8	6	0.6				
F17/18(7)	2.2	1.8	0.9	0.8	S	S				
F21/22(4)	4.2	4.2	4.1	S	S	S				
F34/35(3.5)	15.0	520.0	S	S	S	S				
F35/36(10)	S	S	S	115	112	110				

注：表中“S”代表小于0.5L/min。

7.3、坝体裂缝情况

大坝各支墩坝块中一般均没有发生裂缝，只有明渠段F33/34、F35/36两坝段的支墩中发生了裂缝。因为这两个坝块靠近坝基处有一个2.5m×2.5m交通道穿过四个坝块。这个通道靠近一条接缝，1981年6月(冬天)发现通道附近12m直及近乎垂直的微小裂缝。一组裂缝开始在通道拐角处，另一组在廊道上游12m处。裂缝宽0.1mm，似乎没贯穿。后来用环氧树脂脂缝，在蓄水前用混凝土堵塞了该廊道。经研究，该裂缝主要是因为温降过快造成的。混凝土是1979年1月(夏天)浇筑的，温升大约到了36℃，然后在6个月内降到了18℃，比规定的降温速度快了50%，加上基础约束及廊道口应力集中，产生了大约2.6MPa的拉应力，因此产生了这些裂缝。

1986年12月(夏天)，即蓄水后4年，在F35/36坝块又发现垂直的裂缝，长10~15m，缝宽0.2~0.6mm，F33/34相邻坝块无裂缝，经分析F35/36的裂缝不是因为温度形成。从基础变形、坝块变形、纵缝变形等情况分析，该裂缝是因为明渠段厂房基础开挖造成的，这个缝用环氧灌浆处理，当下游开挖完成，基础不再蠕变后，坝块不再变形，一切正常。

大坝头部裂缝。在两个头部坝块中产生过两条近乎垂直的裂缝。它们可能是因为基础变形和温度变化形成微裂，后来在排水孔水压试验时被劈裂，这两条缝中一条在上游面，一条在头部下游面，后用环氧灌浆处理。

蓄水3年后，在F8、F9坝块头部下游面，在F8/F9伸缩缝两侧靠基础面处，均发生裂缝，F9块中的缝是干的，用环氧灌浆处理了。F8块中的缝有漏水，并随时间增加，估计裂缝与缝中的排水管相通了。也用环氧灌浆加以堵塞。

从以上情况看，伊泰普大坝温控抗裂工作做得极好，大坝裂缝漏水情况不甚严重。质量相当良好，经验值得借鉴。

7.4、厂坝之间伸缩缝沉降及坝体应力观测结果

在大坝设计时，对坝体应力做了详细的二维、三维有限元分析，以及地质力学模型试验。既考虑坝体自重、水压力、扬压力等等，也考虑了温度变化的情况，计算分析时所用的荷载如图1.12。

三维应力分析求得的河床典型坝段应力分布如图1.13。分析求得厂坝之间各高程因荷载而造成的缝面闭合如图1.3中实线“6”。由温度变化而形成接缝的张开如图1.13中的虚线“7”、“8”。根据上述试验分析，河床坝段厂坝之间在基础至高程111.0m之间，预留一个宽10mm的接触缝。

在厂坝各项段内埋设了许多观测仪器, 在施工过程及蓄水之后进行了系统的观测。由于各块段完成情况与上下游蓄水关系均不一样, 因而反应出来的沉陷、倾斜、变位也各异。

对厂房U3块的观测结果如下:

水库及尾水蓄水后6个月, 厂房发电机组向上游变形0.5mm, 在厂房顶部高程为142.3m处向上游变形5mm。再过8个月, 在夏季, 上部结构向下游变形8mm, 而水下结构只变形1mm。在两年内, 循环地发生上述变位, 分析表明, 上述变形主要是由于气温及尾水位的变化造成的。当时, 上游的坝块只建到100.0m高程, 因此, 厂房上部结构并受到坝块传来的力。

1985年第3号机组投入运行, 厂房结构明显向下游变形。两年内, 发电机层板向下游变位0至1.5mm。在上部结构的顶部, 向下游变形0至6mm。同时垂直水流方向, U3厂房块段有向左岸的变形, 在发电机层约1mm, 在厂房顶约1.5mm, 变形在以后的8年中基本没有变化。上述变形是由埋设在厂房最下游的混凝土块体上的吊垂线测出的, 不能说明安装机组的中间块体也有这样大的变位。在机组的导轴承上并未测出各方向有不同的受力变化, 因而不能认为机组主轴的垂直度受到什么影响。

对厂房U9A块的观测结果:

在未浇筑二期混凝土和安装机组时, U9A块发电机电机层高程处向上游变形1~2mm, 这随温度变化而变化。在高度126.4m处, 向上游变位增至2~5mm。垂直水流方向在高度126.4m处有向右岸的变形, 约0.8mm。

在U9A块段没有测出向下游的变形, 因此可以认为U9A上游的坝块没有传力或只传了较小的力量给了厂房。

各机组段之间均是独立的, 但机组段之间由于温度的变化, 接缝有0.3~0.5mm的张开或闭合。

厂房坝段的沉陷变形与坝体应力的观测结果也是令人很感兴趣的。

最高的一个坝段, 即F17/18, 在初始蓄水至135.0m高程时, 坝基沉陷5.5~7.5mm。1982年12月库水位抬高时, 沉陷变形增加甚快, 20天之内增加1~1.5mm。以后5年, 库水位保持在215.0~220.0m之间, 基础沉降率保持在一个比较稳定的数字, 上游坝踵每年沉降约0.25mm, 下游坝趾沉降量每年小于0.1mm。沉降变形的过程, 如图1.14所示。这些沉降, 主要是因为坝基下不连续面软弱夹层的固结造成的。坝基中抗滑键槽中的垂直应力每年约增加0.10~0.15MPa, 垂直压应力增至2.70MPa。而在坝趾部位基岩上的垂直压应力则为1.30MPa。

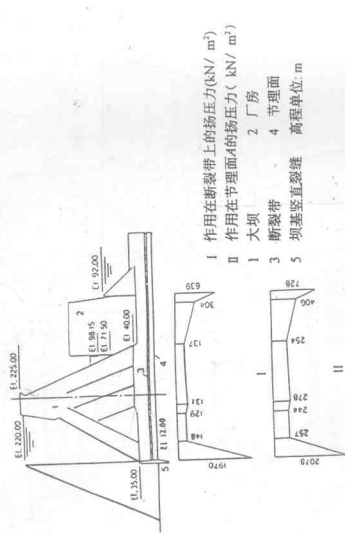


图1.12 厂房进水口坝段荷载图

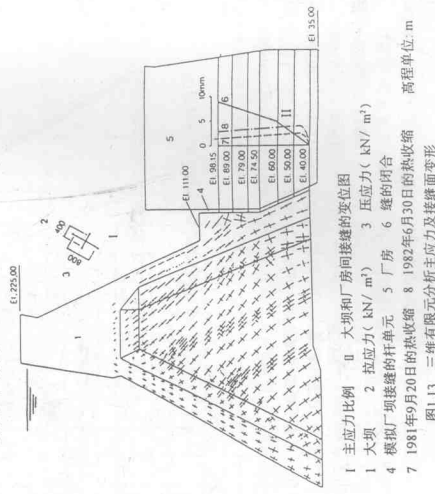


图1.13 三维有限元分析主应力及接缝面变形

由于基础沉降、水压力及其他荷载的共同作用,大坝坝顶均略有向下游游变形,图1.15上部为沿垂直方向的坝顶变形,线条“4”是1985年的冬天实测结果,线条“5”是1988年冬天的实测结果。由图上可见河床坝顶最高,坝顶向下游最大变形约有12.5mm,3年之内约增加5mm。

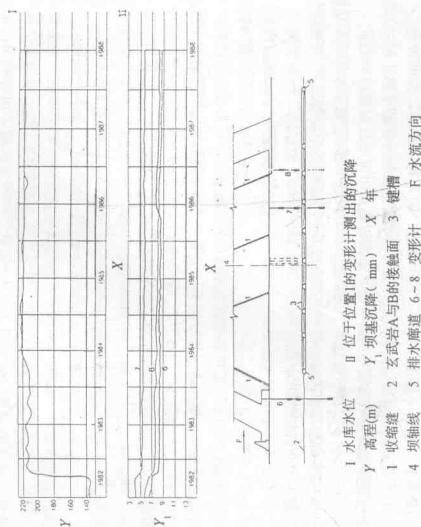


图1.14 空腔重力坝坝基测降

图1.15下部为正垂线测得的F19/20坝段沿坝高的向下游变形。坝体下半部变形随坝高增加而增加,坝体上半部变形大致不随坝高增加而增加。上述实测结果是冬天测的,冬天下游坝面较冷,库水温度稍高,故坝顶变形向下游较大,夏天向下游变形可能略小些。

图1.16为10多年过程中坝体各部应力变化的情况。

图1.17为F19/20坝体中各高程垂直压应力的情况,虚线为实测的,阴影线为有限元计算的结果。

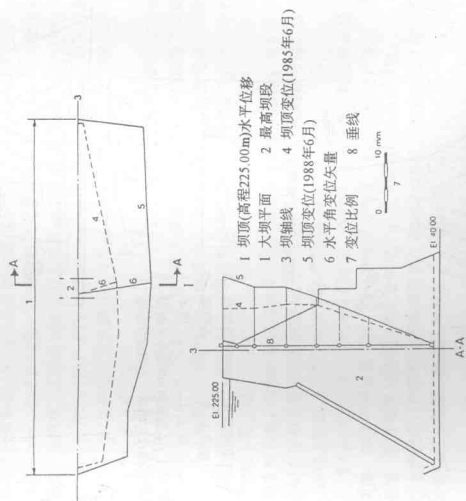


图1.15 由垂线测出的空腔坝变位

坝体内的应力,当各坝段各仓不断升高,直至50m高时,混凝土中主要是自重压应力。至1981年,各坝段均浇到200m高程时,基础上的压应力一般为上游坝头部位1.0MPa,中间支墩部位2.5MPa,下游坝头部位1.0MPa。

中间支墩坝体因温度的变化,垂直压应力有0.70~1.00MPa的变化。冬天压应力增加,夏天则减少。

当充水至水头近100m左右时,高坝坝支墩处基础压应力增加0.70~1.00MPa。上游坝头下的压应力增量约为0.50MPa,下游坝头下压应力增加很小。