

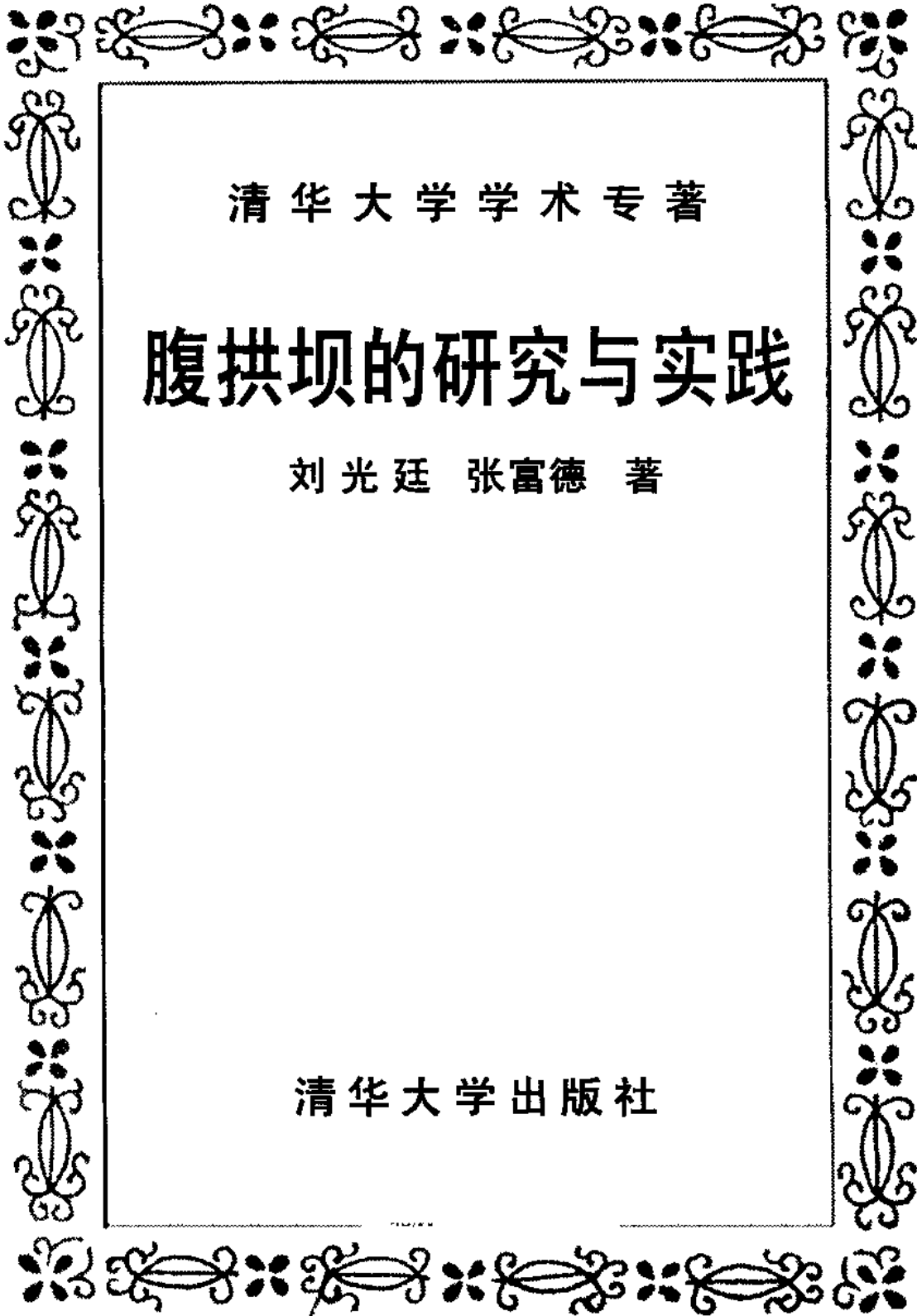
清华大学学术专著

腹拱坝的研究与实践

刘光廷 张富德 著



清华大学出版社



清华大学学术专著

腹拱坝的研究与实践

刘光廷 张富德 著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书总结了我国提出的一种结构改进的混凝土新坝型——腹拱坝的研究成果与设计施工经验。腹拱坝具有坝体应力改善,提高稳定安全系数,节约坝体工程量,能适应河床和两岸复杂地质条件,解决狭窄河谷大流量泄洪和厂房布置的矛盾等优点,已建成的多座大、中、小型腹拱坝取得了很好的效益。

结合腹拱坝发展的仿真计算方法和试验技术也适用于其他混凝土坝工程的定量分析。

全书共八章,论述了腹拱坝的选型、应力特征,仿真应力计算,试验方法,拱形腹拱坝的应力分布,强度及稳定问题,坝及坝内厂房的布置,施工特点及运行实测等,全面、系统、既有理论分析,又有实例说明,适用于水利工程技术人员,研究人员及大学师生。

图书在版编目(CIP)数据

腹拱坝的研究与实践/刘光廷,张富德著. —北京:清华大学出版社,1995
ISBN 7-302-01789-1

I. 腹… I. ①刘… ②张… II. 混凝土坝:腹拱坝-工程施工-研究 N. TV649

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 02294 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:人民文学印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:28 字数:659 千字

版 次:1996 年 7 月第 1 版 1996 年 7 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-01789-1/TV·24

印 数:0001—1000

定 价:38.00 元

SUMMARY

This book summarizes research findings, experiences in design and construction practices of the arched abdomen dam which is a structurally improved type of concrete dam first put to use in China. The arched abdomen dam has the following advantages; improved stress distribution in the dam; increased degree of stability of the dam; reduced engineering work especially in the lower part of the dam or when large amount of underground excavation is involved. The new design is more capable in suiting complicated geological conditions at the dam site and offers a better solution to the difficult problem of arranging the power plant and the large discharge of flood through a narrow canyon. Evident benefits have been obtained in building these arched abdomen dams in large, medium and even small sizes. The new method of stress simulation and experimental techniques developed for the arched abdomen dam may also be used for the quantitative analysis of other kinds of concrete dams.

The book contains eight chapters, namely, discussion on the appropriate form of arched abdomen dam; characteristics of stress distribution; simulated stress calculation and experimental methods; stress distribution of the arched abdomen dam; strength and stability problems of the dam; arrangement of the dam and the imbedded power plant; construction of dam and field monitoring during operation. The book offers comprehensive and systematic information in theoretical analysis and practical examples of the arched abdomen dam, and is suited for use by engineers in hydro-structure, research experts, teaching staff and students in hydraulic engineering.

序 言

多年来水工建筑物的改进往往来自新结构、新材料和新工艺。为了解决狭窄河谷大流量泄洪和厂房布置的矛盾,为了适应河床和两岸复杂地质条件,我国提出了一种结构改进的混凝土新坝型——腹拱坝。它从研究设计到付诸实践在我国经历了较长时间,直到石泉腹拱坝和百米以上凤滩拱形腹拱坝修建并运行后,人们才消除了腹拱坝在结构和安全上的疑虑,确认它能有效地节约工程量;牛路岭腹拱坝提前发电、超载安全运行,并获得优质工程称号,进一步解除了人们对腹拱坝存在“施工干扰影响进度”的顾虑;崖屋潭腹拱坝为小型工程提供了新结构和简易快速施工的范例。至此腹拱坝在我国完成了从研究设计到实践的全过程。

由于腹拱坝(尤其是拱形腹拱坝坝内厂房)的结构形状较复杂,促使结构应力稳定等的分析研究需要建立在以弹性力学、弹塑性、断裂力学为基础的仿真技术上,我们编制了系统的计算软件,研究应用了(整体和分部)仿真试验技术(累计自重、分期蓄水、前期直到运行期的温度场及温度应力、弹塑性及断裂应力重分布等),并进行实测对照,以论证腹拱坝受力状态,这些试验技术和计算方法同样适用于其他混凝土坝,促进了我国坝工新技术的发展。

从1958年清华大学水利工程系开始对腹拱坝进行大量研究以来,我国先后进行腹拱坝研究设计、施工的单位不下20多个,积累了丰富的新设计思想、研究成果、新施工工艺和经验,要全面总结这些内容是作者力未能及的事,这本书仅介绍作者工作中接触到的工程和理解了的工程资料,而主要篇幅放在总结作者1958年以来参与和主持腹拱坝研究的成果和直接指导研究生进行腹拱坝仿真研究的工作内容,希望它能有助于新坝型的进一步发展和完善;有助于混凝土坝的建设。

刘光廷
张富德

• ■ •

目 录

第一章 概述	1
第二章 腹拱坝应力特征和选型	17
2-1 拱轴方向	19
2-2 拱的高度	22
2-3 拱的位置	33
2-4 内拱的宽度	36
2-5 上游坝面	38
2-6 尾水管对坝体应力的影响	47
2-7 不同弹模岩基对坝体应力的影响	60
2-8 腹拱坝的抗震性能	75
2-9 腹拱坝的温度应力	82
2-10 综合应力对腹拱坝的影响	119
第三章 腹拱坝的仿真应力计算及试验	121
3-1 仿真计算和试验的边界条件的确定	121
3-2 腹拱坝累计自重的试验和计算	132
3-3 腹拱坝的分期蓄水应力	151
3-4 腹拱坝的温度场和温度应力仿真计算和试验	167
3-5 光弹应变计和腹拱坝实测应力	210
3-6 动载下的腹拱坝应力计算和试验	226
3-7 混凝土坝局部弹塑性和断裂起裂判别	232
3-8 混凝土结构断裂延伸和稳定性计算	245
第四章 拱形腹拱坝及混凝土多轴强度	284
4-1 光测整体模型试验	284
4-2 拱形腹拱坝的双向应力场	305
4-3 混凝土结构的三维弹塑性及断裂应力重分布	326
4-4 含缺陷坝体的变形和应力重分布	348
4-5 拱形腹拱坝及其混凝土承受能力	355
第五章 腹拱坝的基础应力稳定问题	369
5-1 均质地基的腹拱坝应力稳定破坏试验	370
5-2 拱形腹拱坝整体模型的应力及破坏试验	374
5-3 模拟不均质地基的地质力学模型试验	382
5-4 岩体稳定的数值分析	396
第六章 腹拱坝和拱形腹拱坝及其坝内厂房的布置	403
6-1 坝体结构布置特点	403
6-2 腹拱坝的空腹和坝内厂房布置	409

6-3 坝内厂房对外交通	411
第七章 腹拱坝的施工特征	413
7-1 腹拱坝导流实例及通过坝身泄洪	413
7-2 内拱施工	416
7-3 大坝电厂平行作业及施工速度	419
第八章 腹拱坝运行实测	422
8-1 腹拱坝的变形	422
8-2 腹拱坝控制点应变	423
8-3 基础渗流和腹拱坝渗压	429
8-4 坝内厂房运行的实际工作条件	429
第九章 腹拱坝的工程经济	431
参考文献	434

CATALOGUE

Chapter 1 General aspects	1
Chapter 2 Profile selection and the distinct of stress-distribution of arch	
abdomen dam	17
2-1; direction of arch axis	19
2-2; height of inner arch	22
2-3; location of inner arch	33
2-4; width of inner arch	36
2-5; upstream face of dam	38
2-6; The influence of draft tube structure on the stress of dam	47
2-7; The influence of elastic modules of rock foundation on the stress of dam	60
2-8; The earthquake resistance of arch abdomen dam	75
2-9; The thermal stress of arch abdomen dam	82
2-10; The influence of the combined stress on arch abdomen dam	119
Chapter 3 The actual simulated calculations and experiments for arch	
abdomen dam	121
3-1; Determination of boundary condition for actual-simulated calculation and test	121
3-2; Test and calculation of the accumulated self weight of arch abdomen dam	132
3-3; The stress of arch abdomen dam due to pounding by stage	151
3-4; The actual simulated calculation and test of thermal field and thermal stress of arch abdomen dam	167
3-5; Photo strain meter and stress of arch abdomen dam measured in field	210
3-6; The stress evolution and test of arch abdomen dam due to dynamic load ...	226
3-7; Determination on elasto-plastic deformation and crack formation at local regions of concrete dam	232
3-8; Calculation of crack propagation and stability in concrete structure	245
Chapter 4 Multi-axil strength of concrete and arch abdomen dam	284
4-1; Photolastic study with integral model	284
4-2; The stress field caused by co-system structure of arch shaped arch abdomen dam	305
4-3; The 3-D stress-redistribution caused by local elasto-plastic crush and tensile fracture in concrete structure	326
4-4; The deformation and stress redistribution of dam structure with defects ...	348
4-5; The burden ability of arch shaped arch abdomen dam and its concrete	355
Chapter 5 The stress-stability problem of the foundation of arch	
abdomen dam	369

5-1: Stress-stability crushing test of arch abdomen dam on the homogeneous foundation	370
5-2: The crashing test of integral model of arch shaped arch abdomen dam	374
5-3: The geological mechanics model test for simulating heterogeneous foundation	382
5-4: The numerical stability analysis of rock mass	396
Chapter 6 Arch abdomen dam and arch shaped arch abdomen dam with its arrangement of power house within dam	403
6-1: The characteristics of structural layout of dam	403
6-2: Inner arch abdomen with its arrangement of power station within dam	409
6-3: The communication of power house within the dam	411
Chapter 7 The specific construction of arch abdomen dam	413
7-1: The example of construction diversion of arch abdomen dam and flood release through the temporary dam body	413
7-2: Construction method of inner arch	416
7-3: The parallel construction technology of dam and power house, speed of construction	419
Chapter 8 The observation in field during operation of arch abdomen dam	422
8-1: The deformation of arch abdomen dam	422
8-2: The strains at the control points of arch abdomen dam	423
8-3: Filtration through foundation and seepage pressure in arch abdomen dam	429
8-4: The practical working circumstance and operation of power house within the dam	429
Chapter 9 Engineering economy of arch abdomen dam	431
Bibliography	434

第一章 概 述

长期以来在岩基上修建挡水的混凝土重力坝,其受力方式都是类似于承受水和沙荷载的固端悬臂梁,为此需将坝体自重、重心前移,以便抵消因水和砂压力引起的上游坝踵处的拉应力。即使在重力坝坝内设厂房时,其工作方式仍不变,即按有孔的悬臂梁受力考虑。腹拱坝的设计思想则不同,它不单纯为节约而挖除重力坝内部受力较小部位的混凝土,使之形成拱形孔,而且将其中部分混凝土填在坝踵、坝趾以增强较薄弱的拱壁,通过改变内外轮廓使混凝土坝在水压、自重共同作用下形成压在地面上的拱(剖面拱),从而改善了坝体应力。这种用剖面拱代替传统剖面梁挡水的坝型^{[1][19]}称为腹拱坝。由主应力轨迹线图(图 1-1-1)可以明显地看到剖面拱的受力状态。

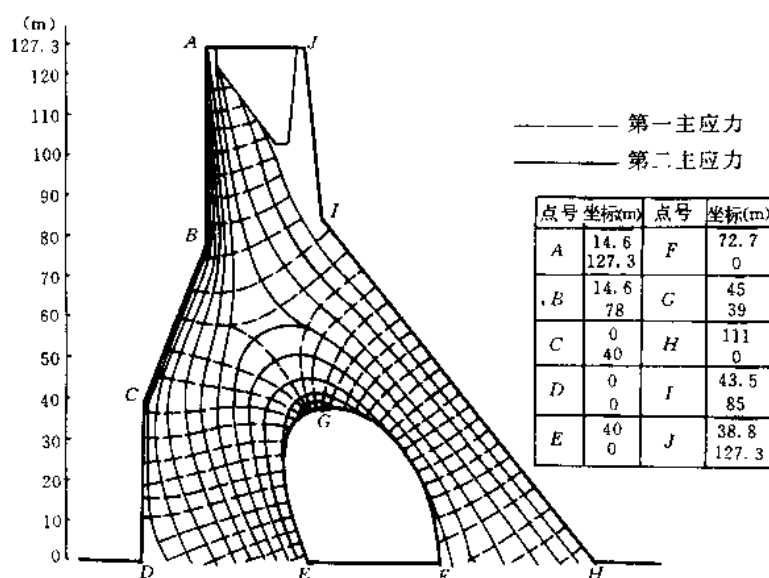


图 1-1-1 腹拱坝主应力轨迹线图(水压+自重)

正确的选型不仅节省了混凝土,而且使拱形孔周边及上下游坝体表面在水压自重作用下处于压力状态,不需应力配筋。显而易见,将原重力坝内部受力较小部位的混凝土部分移到坝踵和坝趾,使悬臂梁的下部抗弯截面距加大,必定会减少由于水、沙压力而引起的坝踵的拉力;而底面积的减小也加大了自重对上游坝面及坝踵的压应力;坝踵成压应力的加大,提高了坝体的应力超载能力;空腹便于排水,减少了上浮力;前后腿往往嵌入半风化或弱风化岩层,从而增大了坝体的抗滑稳定能力,某工程在同样的稳定安全系数时,腹拱坝型比重力坝型节约混凝土量 15.5%。

腹拱坝的空腹内可以设置厂房,也可以不设置厂房,均具有上述的好处,显然是否设置坝内厂房不是识别腹拱坝的标志。对于较狭窄的河谷,腹拱坝在平面上也可以布置成平面拱^[9],形成拱形腹拱坝,试验和实测都表明拱形腹拱坝的整体作用良好,平面拱和剖面拱同时起作

用,将更有利于在河床和两岸坝基间重新分配荷载以适应不同地形地质条件的需要。

早期在重力坝中,空腹的出现是为了改进重力坝,使它能适应不均匀地基沉陷而采取的措施。在坝体近基础的中部应力较小的地区设置较大的纵向廊道,以防止因不均匀沉陷和收缩引起的坝体沿坝轴线方向出现的纵向裂缝^[7]。1954—1957 年奥地利的工程界就研究并在 Grosser Mühldorfersee 坝^[1]实现了类似腹拱坝的“大廊道重力坝”如图 1-1 2。

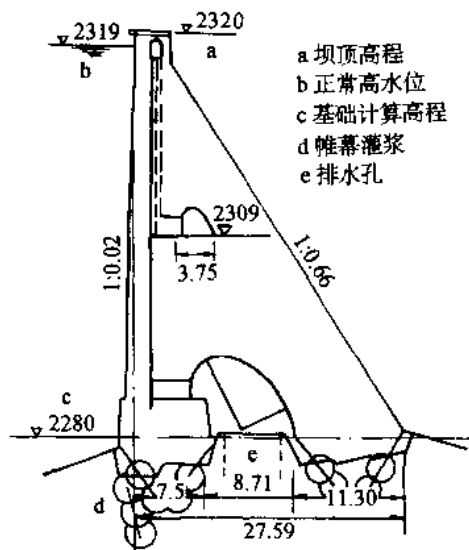


图 1-1-2 Grosser Mühldorfersee 坝剖面图

通过光弹性试验研究和该坝的实践,他们已经认识到把廊道做成倾向上游的椭圆拱可得到较好的前腿应力分布,廊道排水可减少上浮力,廊道通风有利于大体积混凝土散热,前后腿分开有利于前期不均沉陷,以及施工中可以从廊道中补做基础岩石灌浆等好处,他们的工作是富有创造性的。未等待国外提供“成熟经验”就成功地完建了。当然采用开孔的悬臂梁(剖面)作为挡水坝体,最多只能改善部分孔口周边的应力,而廊道加大必然削弱悬臂梁承受水沙荷载的能力,因此 Grosser Mühldorfersee 坝开孔率只占剖面面积 10%,而上游坝踵的水压自重合成应力就已经比重力坝稍差了。

1958 年我国清华大学水利工程系进一步明确地提出以剖面拱代替传统的剖面梁挡水的设计思想^{[1][5]},同时调整内拱圈和外轮廓,使坝体在水压自重作用下如同压在地面上的拱(剖面拱)(图 1-1-3),从根本上改变受力方式,大大改善了坝体应力,使空腹不需做应力配筋,消除了一般人认为的腹拱坝坝体需大量配筋的疑虑,光弹、软胶网格、石膏模型试验都表明腹拱坝应力分布较均匀,上游面压应力较大,因此有较大的超载能力;作为剖面拱空腹可加大尺寸达坝高的 1/3,在减少混凝土工程量情况下,尚能保持上游坝踵应力比重力坝好;大空腹内还可设置厂房,这在窄河谷宣泄大流量时较好地解决了泄洪和厂房布置上的矛盾,可大为节约厂房和引水系统的工程量;这时厂房和坝体用缝分开,作用在厂房底部的上浮力不传给坝体,坝体仍保持独立拱的受力状况;空腹大,排水效果好,尤其对下游尾水位较高的坝址,腹拱坝明显地提高了稳定安全度。

在三峡工程方案比较中,腹拱坝作为方案之一,进行了全面系统的设计研究。除优化剖面轮廓外,对坝内厂房的布置,尾水管穿行腹拱坝后腿对坝体应力的影响及尾水洞改形后水头损失影响等进行了研究。对内拱施工方法^[2],施工期临时挡水剖面应力及泄洪水力的条件^[4],以

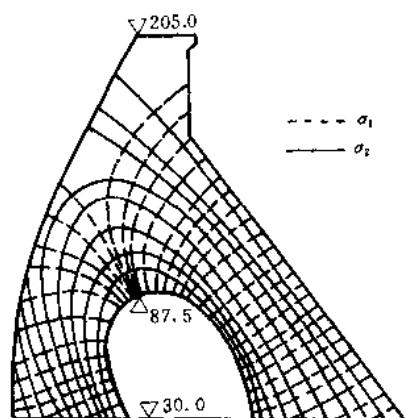


图 1-1-3a 主应力轨迹线(VII号剖面水压自重作用下)

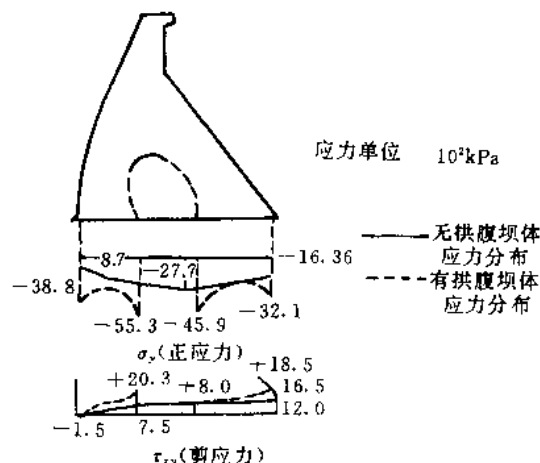


图 1-1-3b 有拱腹与无拱腹的应力分布比较图(VII号剖面)

及腹拱坝和坝内厂房减少施工干扰快速施工的大坝电厂平行作业的研究^[3],使大部分电厂工程在封拱的保护下可以全年施工,以减少泄洪及大坝施工对厂房施工的干扰。还进行了工程防护方面的研究,如爆破冲击荷载试验用以改进坝体体型。并开始了腹拱坝复连域温度应力试验方法的探索。但限于当时认识水平,只比较了基础无约束不正确条件下的稳定场温度应力(它只是温度应力的一个组成部分),而且稳定场的初始均温值取值不正确,结果大大夸大了腹拱坝和重力坝温度应力的差值以及绝对值,对腹拱坝的温度应力问题产生了一些不必要的疑虑。

1959 年国家科委批准选择工程作为腹拱坝的试验坝,为新坝型的研究和实践提供了极有利条件。

1960~1961 年原水电部上海勘测设计院和清华大学水利工程系协作进行了浙江湖南镇和福建建溪腹拱坝坝内厂房研究设计,用腹拱坝较经济地解决了窄河谷大流量泄洪和厂房布置上的矛盾,研究了宽缝腹拱坝型^[5],以进一步节省坝体混凝土工程量(图 1-1-4)。

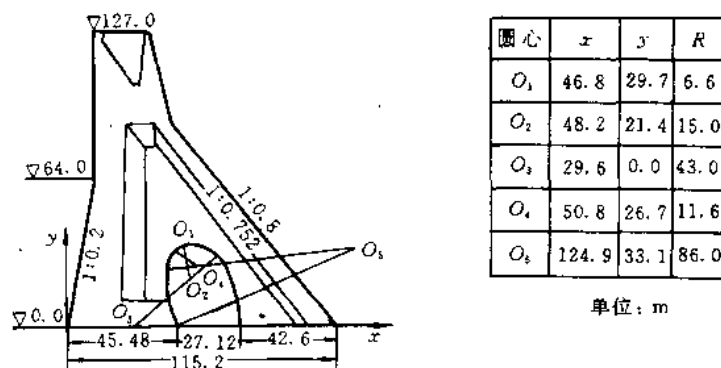


图 1-1-4 湖南镇宽缝腹拱坝剖面

施工单位支持了新坝型试验,确认了腹拱坝前期水下开挖量和混凝土工程量的减少有利于工程快速抢出水面,减少了围堰的负担。重新研究了腹拱坝从施工到最终稳定变场的温度变

化所引起的温度应力,并分段(浇注块、封拱、稳定场)进行试验计算,得出了腹拱坝施工期顶拱分缝局部强制冷却后,再灌浆形成整体拱,将大大改善腹拱坝的温度应力的重要结果,减少了关于腹拱坝温度应力大的疑虑。建溪工程宽缝重力坝和腹拱坝破坏试验比较中,腹拱坝方案混凝土工程量在比宽缝重力坝少 4.3% 条件下,静荷载超载能力比宽缝坝大约 8%~11%,动荷载超载能力比宽缝坝大约 20%。试验表明当上游命中时,宽缝坝将产生更为不利的应力状态。127 m 高的湖南镇腹拱坝坝内厂房工程在争议中开工了,由于经验不足,后腿倒悬混凝土在施工中出现裂缝,被当作是新坝型的缺点,从而填塞空腹改变了坝型。

1961~1964 年葡萄牙发表了关于 Bemposta 空腹拱坝^[8]的文章,对打消“国内外尚无先例”的顾虑和促进我国腹拱坝的修建起了良好的作用。87m 高的 Bemposta 坝(图 1-1-5)是按拱坝考虑能安全经济地宣泄大流量(11000m³/s),把加厚的溢流面延伸到地面和消力池衔接,形成了有空腹的拱坝,在试载法拱梁(7 梁 4 拱)计算中,不考虑后腿拱的作用,剖面上仍按悬臂梁考虑。用石膏整体模型作了水压荷载试验测三维表面应力,用光弹作了拱冠梁剖面试验(水压及自重),廊道顶有 $7 \times 10^2 \text{ kPa}$ 拉应力,光弹自重应力和石膏整体模型水压应力叠加,大廊道仍有 $+2 \times 10^2 \sim 3 \times 10^2 \text{ kPa}$ 拉应力,设计者认为结构上没有问题,确定开工。该坝廊道尺寸小,厂房仍布置在右岸山体内。

修建 Bemposta 坝的经验表明它和通常重力拱坝相比有以下的长处:减少上浮力(较安全),节省了大廊道的 3.33 万 m³ 混凝土,大廊道易散热,节省了人工冷却费用,如发现基础有渗漏时易于从大廊道进行处理。

1964 年我国河北省青石岭工程(坝高 138m)重新提出拱形腹拱坝坝内厂房方案(图 1-1-6),以解决大流量(12000m³/s)泄洪和厂房布置的矛盾^[14]。

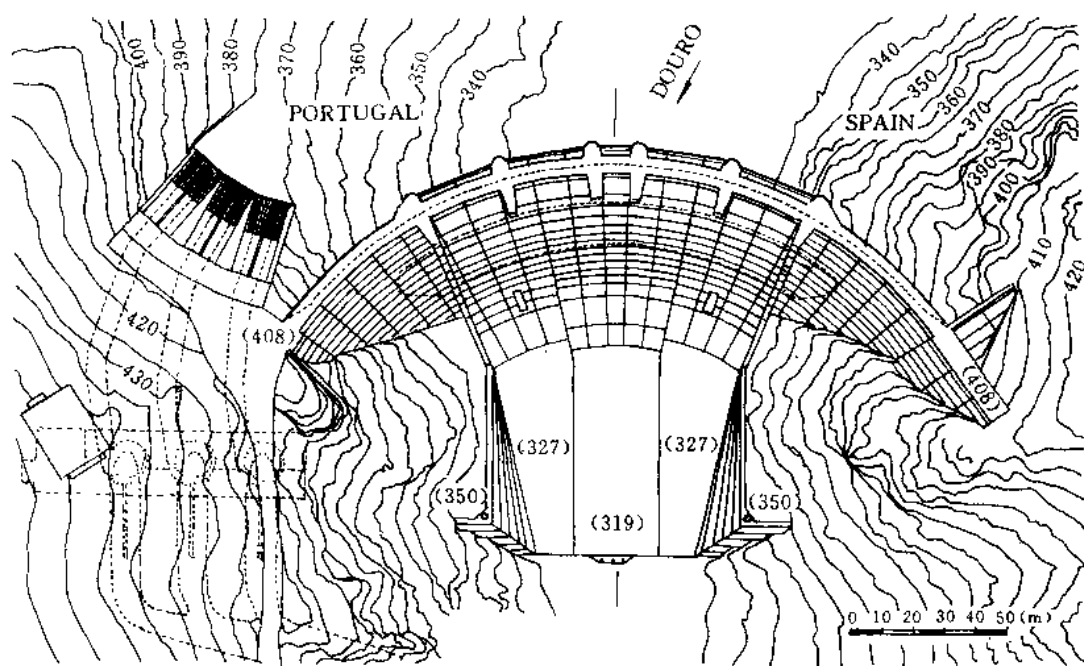


图 1-1-5a Bemposta 坝平面图

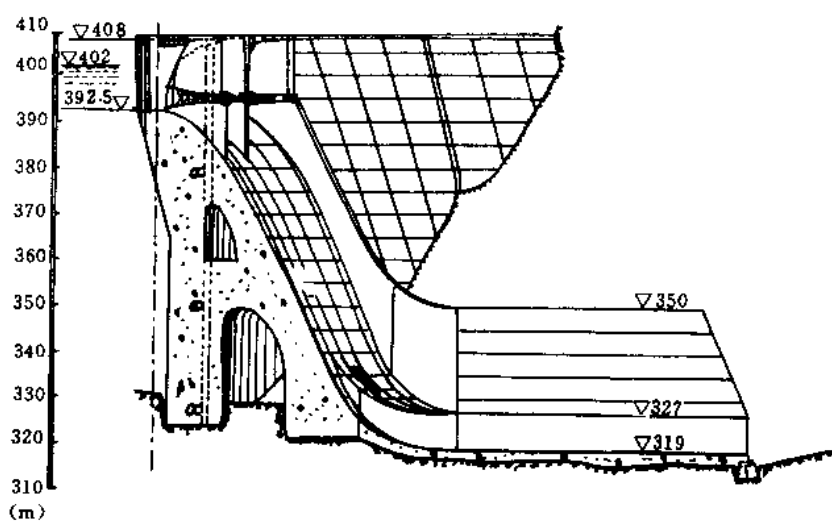


图 1-1-5b Bemposta 坝剖面图

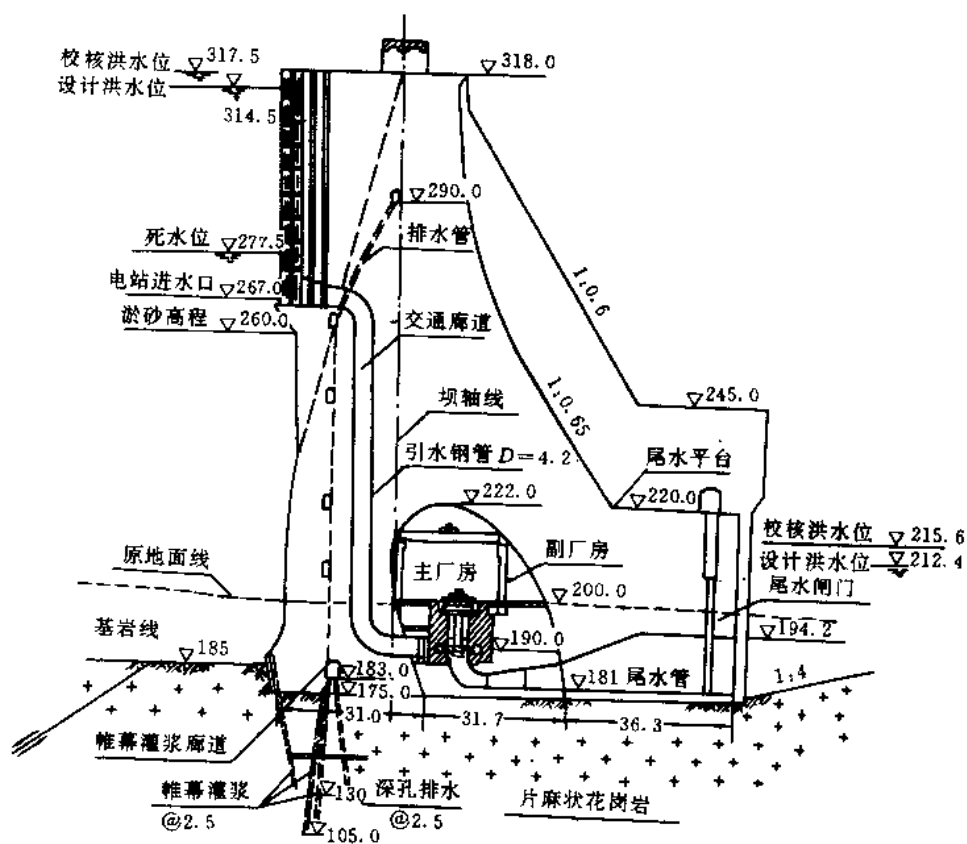


图 1-1-6a 青石岭腹拱坝及坝内厂房剖面

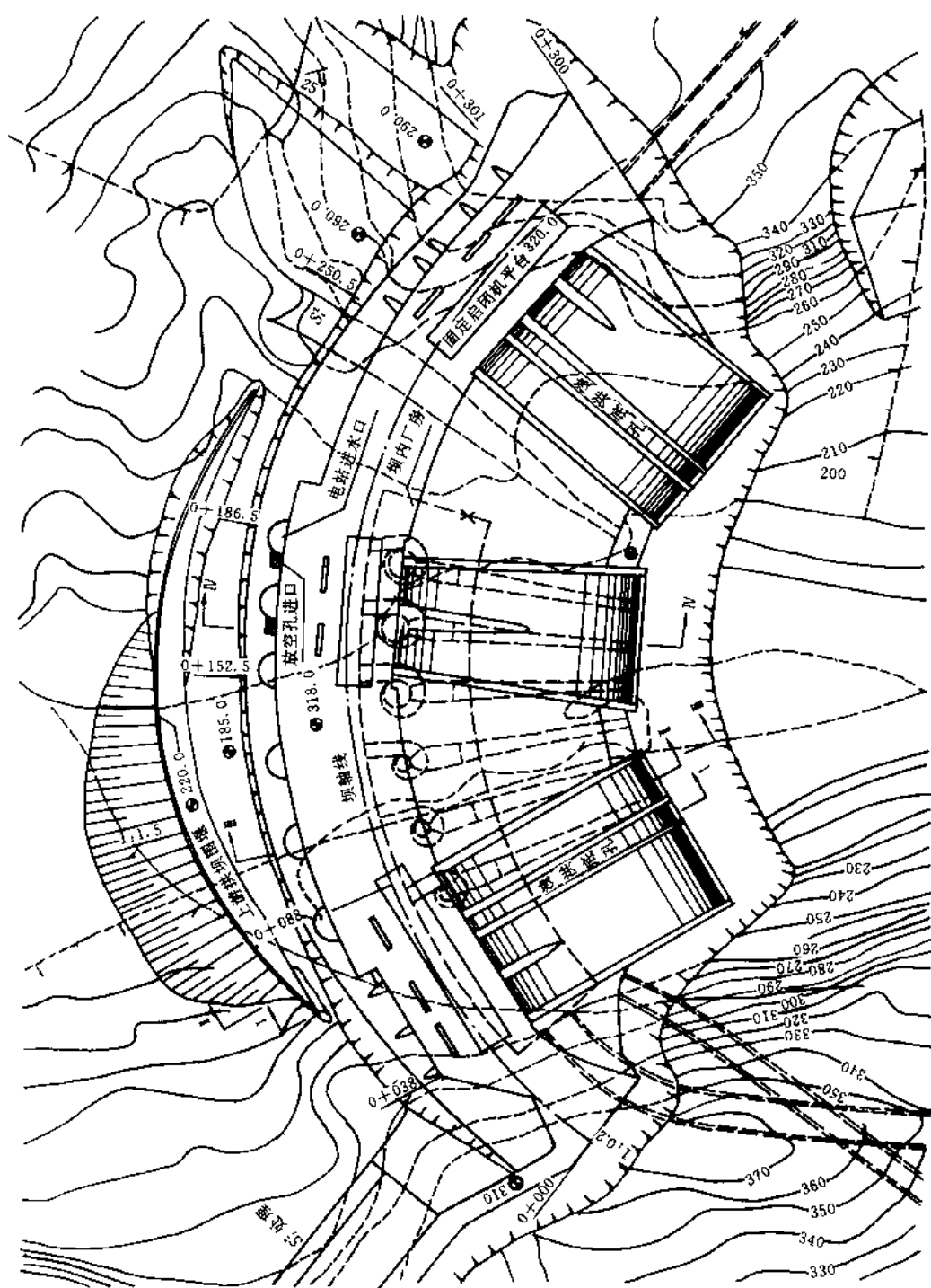


图 1-1-6b 青石岭拱形腹拱坝及坝内厂房平面布置图

由于左岸山体有断层通过,清华大学水利工程系在设计中考虑剖面拱承担 80%荷载,并考虑炸弹命中后坝体安全,坝段光弹实验(自重)中表明电厂进口闸墩明显加大了上游坝踵压应力,整体石膏模型试验表明拱向分担荷载加大,拱形腹拱坝应力分布比预想要好得多。库满时不仅内拱周边不出现拉应力,而且尾水管顶板拉应力也大大减小($<+5 \times 10^2 \text{kPa}$),下游拱座最大压应力(水压) $<-30 \times 10^2 \text{kPa}$,上游拱座最大拉力 $<+6 \times 10^2 \text{kPa}$ 。为弄清复杂结构及其两岸山体的内部应力,1966 年完成了光弹整体模型试验方法研究及全部技术准备,包括整体模型材料研究,初应力及粘接应力控制在 <0.1 级/cm 厚。研究表明拱形腹拱坝的上游坝踵拉力小,下游坝体压力也大大减少,应力条件最好且能适应不同的地质条件,这些研究成果为后来的腹拱坝设计和施工打下了基础。

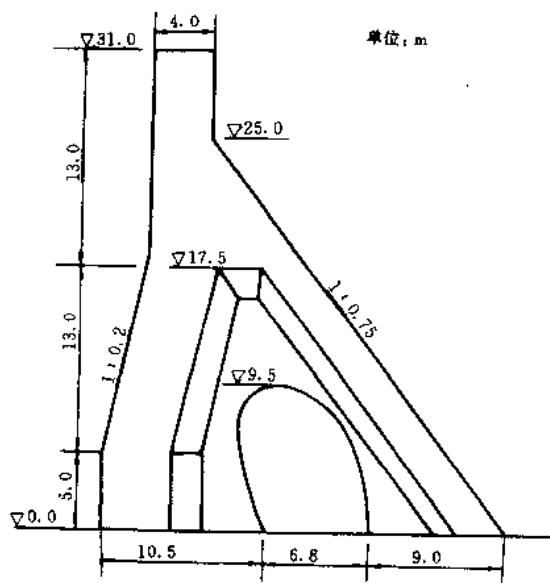


图 1-1-7 古田四级宽缝腹拱坝

腹拱坝的发展,初期就已有明显的优点,但是它是不完善的,有缺陷的,人们对它存在疑虑,随着研究和实践中问题逐步解决,在上海勘测设计院的主持下和清华大学水利工程系的科研协助下,1965~1967 年终于在古田四级^[1]工程中(简称 1[#]工程)首次在我国修建了宽缝腹拱坝的试验坝段(图 1-1-7),由于 1966 年“文化大革命”开始,清华水利工程系未能参加试验坝的工程实践。福建古田四级宽缝腹拱坝高 31m,1967 年建成蓄水。从此结束了腹拱坝在我国的实验研究准备阶段。

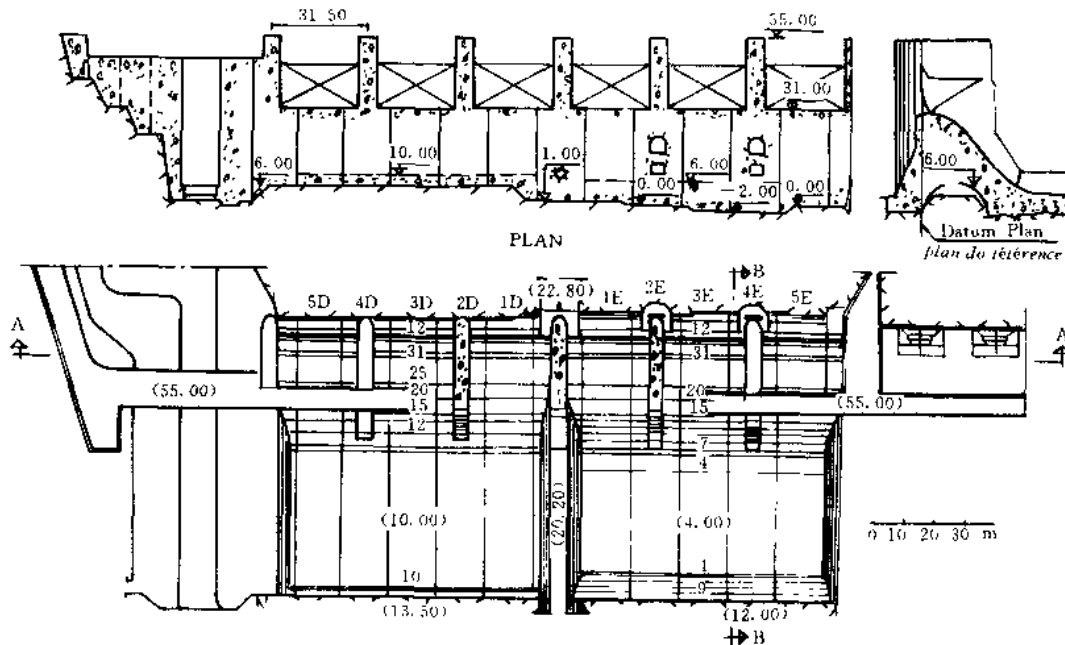


图 1-1-8 Carrapatelo 腹拱坝

1967年英国和葡萄牙联合发表 Carrapatelo 腹拱坝^[11]的应力研究成果和施工照片,该坝高 57m,坝轴长 300m 直线布置,内拱为圆形,直径 20m(图 1-1-8)。

除通常结构计算、平面光弹试验、石膏整体模型试验外,运用平面有限元法(283 个三角形常应变单元)和电子计算机计算该坝应力及位移,有限元计算的位移和三维石膏模型(水压)位移值相近。

此外,60 年代后期我国湖南平江也建成黄金堰砌石空腹坝,坝高 28.2m,为了施工方便内拱为铅垂轴的城门洞形。原水利电力部第三工程局也在陕西老君崖工程研究了腹拱坝坝内厂房方案,除平面光弹试验、石膏整体模型试验外,用矩形网络变分法和计算机进行应力计算。

1970 年我国湖南省凤滩水电站^[13,14]开始修建迄今为止世界上规模最大的拱形腹拱坝(图 1-1-9)。

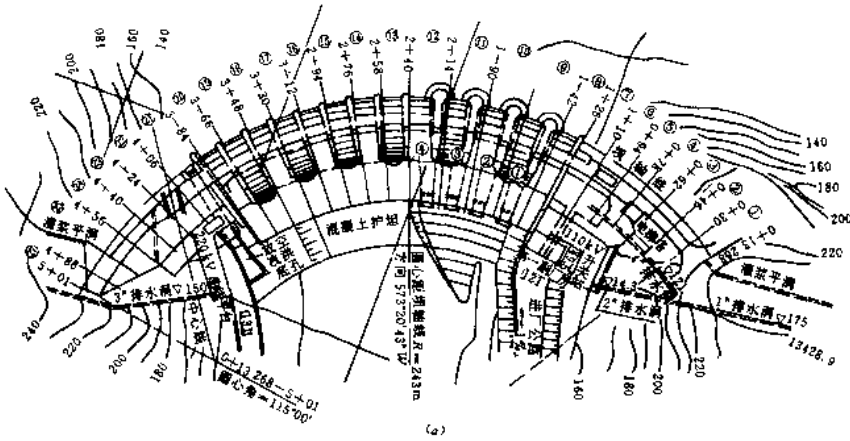


图 1-1-9 a 凤滩拱形腹拱坝坝内厂房平面布置图

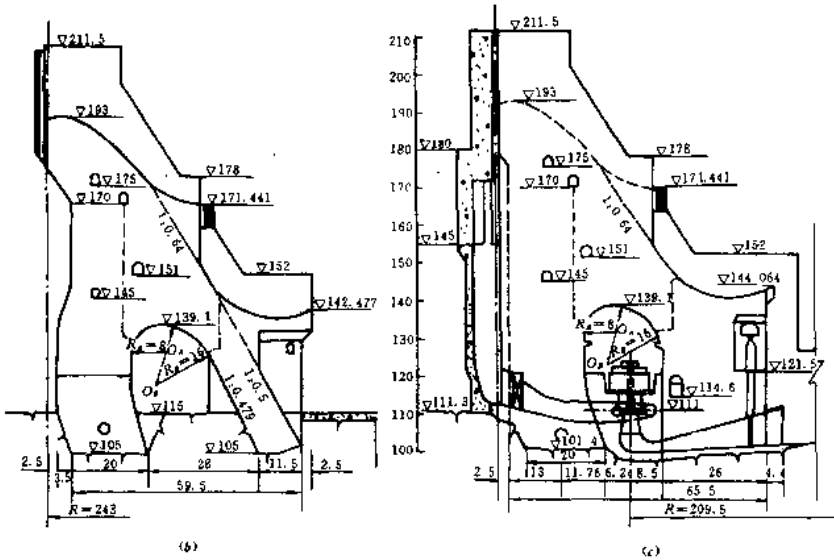


图 1-1-9b 溢流坝段剖面(13)坝段

图 1-1-9c 厂房坝段剖面(9 坝段)