

大河口电站空腹重力坝 平面有限元计算及分析

刘建明

(四川省水利水电勘测设计研究院,成都,610072)

摘要 利用有限元程序对大河口空腹重力坝应力、位移进行计算和分析,并与委托单位所做的计算和试验进行对比,认为该坝体结构设计合理,空腹坝在高山峡谷、泄流量大的情况下,具有很大的发展潜力。

关键词 空腹重力坝 平面有限元 应力 位移

1 概述

大河口水电站位于四川省黔江地区酉阳县境内阿蓬江上。电站以发电为主,兼顾灌溉和用水。装机容量为 3×2.3 万 kW。拦河大坝共分9个坝段,其中1"~3"为左岸非溢流坝,9"坝段为右岸非溢流式重力坝,4"坝段为安装间坝段,5"、6"、7"为机组坝段,8"为冲砂

底孔坝段,坝体型式为溢流式空腹重力坝。坝顶总长149m,坝顶高程 $\nabla 394$ m,最大坝高85m。

该电站厂房设在溢流式空腹重力坝内,空腹宽度22.74m,高度21.09m。前腿宽度为21.75m,后腿宽度为21.96m,见图1。

由于坝体孔洞较多,尺寸较大,水头较高,致使坝体结构复杂。为了安全和结构需要,有必要对坝体结构进行分析和计算。

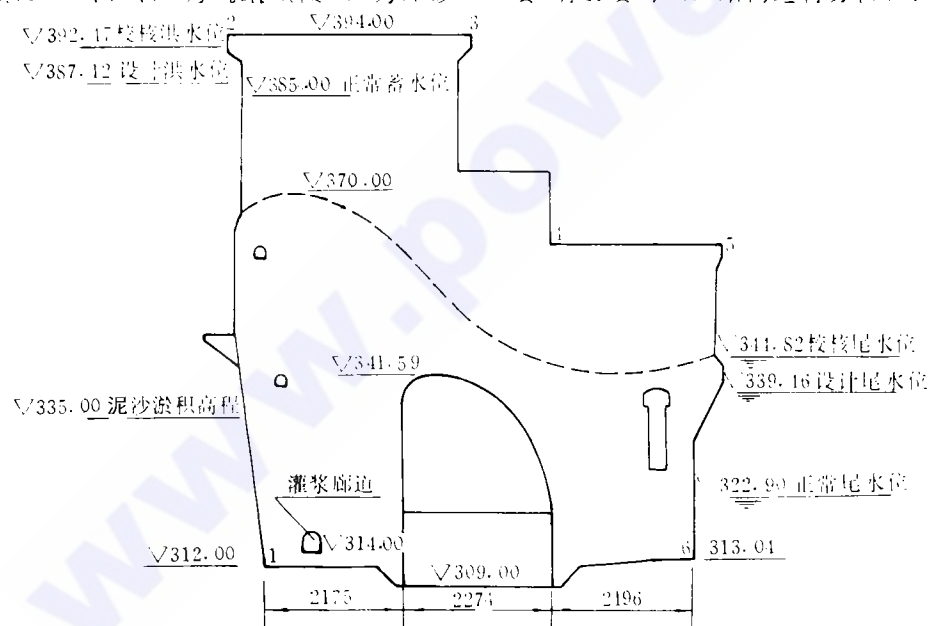


图1 坝体结构简图

水压；(3)自重+校核水压。

2 基本参数和计算方案

2.1 基本参数

坝体结构见图1。大坝桩标号为150[#]~250[#]。砼不是完全弹性材料。大坝在受水压力长期作用下,会产生两种变形;一种是弹性变形,另一种是非弹性变形,即徐变。在坝体计算中采用能够反映徐变影响的持久弹模。坝体弹模平均取值为18GPa,泊松比为0.167,容重为24.5kN/m³。

基岩由奥陶系下统红花园组,分乡组灰岩、分乡组薄层灰岩夹页岩组成,岩层走向与河谷正交,倾向上游,倾角72°左右。红花园组灰岩 $E=18\text{GPa}$,分乡组灰岩 $E=14\text{GPa}$,泊松比为0.25。

2.2 计算方案

选6[#]坝段闸墩和溢流坝两个剖面作为计算剖面,荷载主要有水砂压力、自重、扬压力、泥沙压力等。工况组合对于两个计算剖面分别有三种工况:(1)纯自重;(2)自重+正常

3 计算方法及边界条件

有限元分析采用的程序是 Super sap 程序,在我院 AST-386机上进行计算。基础边界范围,坝踵上游、坝趾下游和坝底均取1倍坝高,由文献[1]可见,基础1、3、5倍坝高,几种边界条件下的应力差别很小。纯自重工况下,最大应力差为0.128MPa,在满库工况下仅相差0.032MPa。因此可以认为基础边界取1倍坝高已满足计算精度要求。

基础底部节点,采用水平及垂直双向支座约束;基础上、下游面节点采用水平向支座约束。计算按平面应变问题考虑。

由于空腹坝坝型复杂,给有限元网格划分带来许多困难。因此网格划分主要以手工为主,辅以计算机自动剖分。溢流坝剖面单元数目为475个,闸墩剖面为524个。以四边形单元为主,部分采用三角形单元。单元划分见图2。

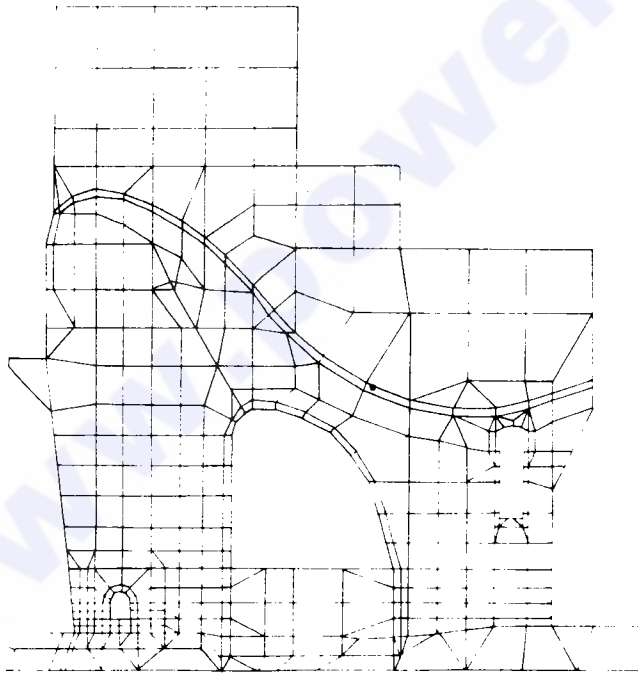


图2 有限元网格图

4 计算成果及分析

有限元计算对于溢流坝剖面 and 闸墩剖面各进行了三种工况的计算。计算剖面中没有压力钢管和尾水管,这两部分的计算属三维空间问题。对于闸墩来说,在平面问题中无法考虑一孔开启、一孔关闭最危险情况下的侧向水推力。(闸墩应作为空间问题单独计算)。本计算的中心任务是知道空腹坝在各种工况下的应力分布和位移情况,弄清楚坝踵应力,空腹拱顶的拉应力及前后腿的应力分布。

4.1 应力分布情况

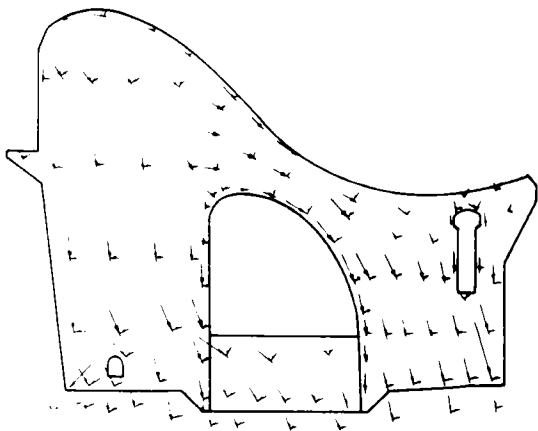


图3 溢流坝断面(自重+正常水压)

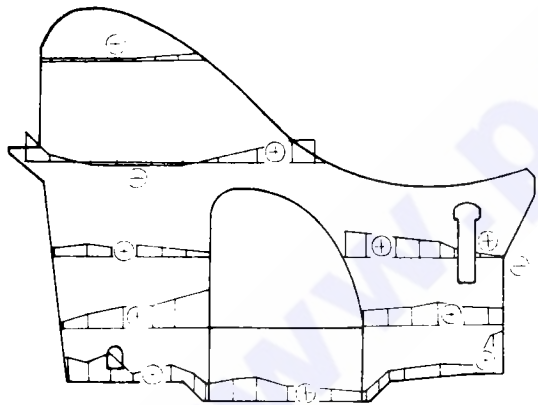


图4 溢流坝断面(自重+正常水压)剪应力 τ_x

溢流坝剖面的计算成果见图3,图4,从自重+正常水压情况下的主应力分布图看,坝踵最大主拉应力为1.3MPa,深度为1m,大致

在坝踵到▽314m 廊道底板这一段范围内。除坝踵172单元外,其它部位 σ_1 呈现拉应力很小, σ_2 为压应力,较拉应力绝对值大,因此,拉应力并不起绝对作用,基岩中的分布情况也类似。坝趾角点处出现压应力集中,最大值为2.84MPa,空腹拱顶均为压应力。拱顶由于拱梁效应,能将空腹以上的水压力传向后腿,因此,斜腿的端部压应力较大。前、后腿应力分布均匀,且均为压应力状态。尾水廊道拱顶上游侧有微小拉应力,但在直墙段却无拉应力,这是因为水压力基本上沿着空腹侧墙的切线方向传向坝趾。尾水廊道所在的位置在水压力影响范围以外。后腿的应力分布并没有因为尾水廊道的出现而恶化。从图4的剪应力分布来看,前腿在空腹以下,剪应力较大,空腹位置剪应力较小;后腿由于承受上游水压力因此剪应力较大。

对于自重+校核水压情况下,由于下游水位较高,水头较正常水位情况下小,应力分布情况无多大变化,基本类似于自重+正常水压工况。

闸墩剖面的应力成果见图5、图6、图7。在自重工况下,空腹拱顶下游侧出现拉应力,最大值为0.86MPa,深度为3.5~4.0m,空腹的其它部位应力状态较好。在坝踵处有角点压应力集中,坝体达到-5.5MPa,基岩中达到-6.3MPa,除开应力集中的因素,前后腿的应力分布较为均匀。在自重+校核水压工况下,坝踵处有拉应力其值为1.05MPa,坝趾处出现压应力集中其值为-4.05MPa。空腹拱梁效应很好,将拱顶以上的水压力传入后腿,前后腿应力分布状态较好,均为压应力。剪应力的分布状况与溢流坝剖面基本类似。

为了弄清楚空腹对坝体应力的影响,笔者作了闸墩断面自重+校核水压实体重力坝情况的应力计算,成果见图7。对比空腹和实体的应力分布,可以得出几点结论:

1. 虽然空腹尺寸较大,但对整个坝体影响是有限的,影响主要在空腹周边。

孤与坝基相接的两个同精度对比计算,计算剖面为溢流坝剖面,工况选用自重+正常水

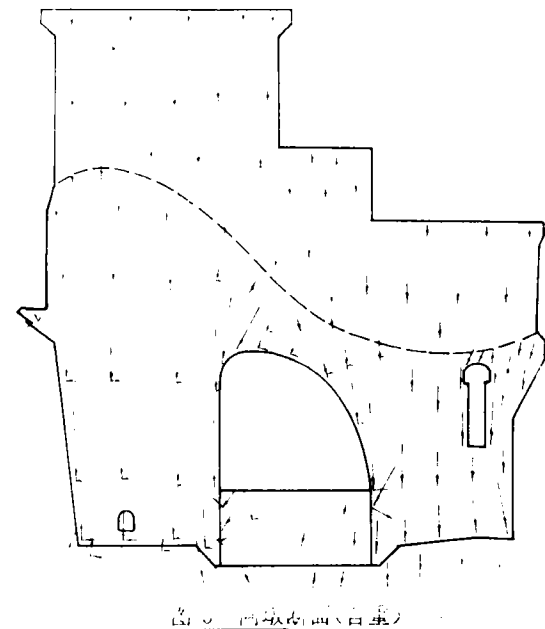


图6 闸墩断面(自重+校核水压)

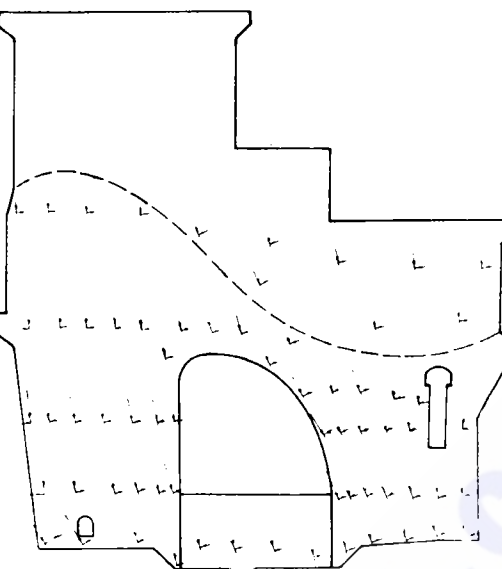
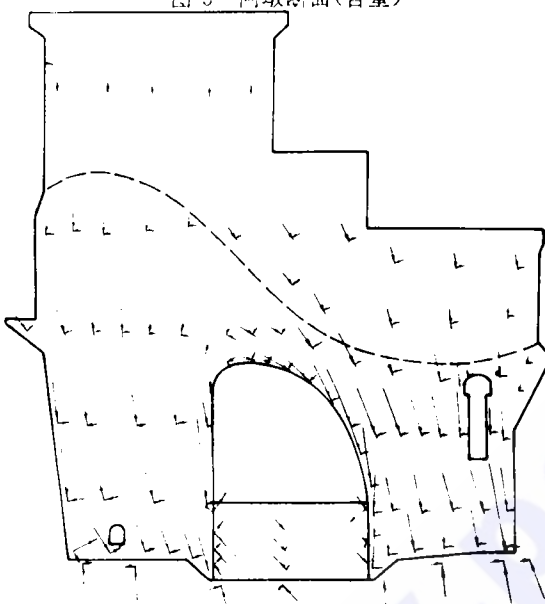


图7 闸墩断面(实体重力坝自重+校核水压)

压。从计算成果看,垂直情况下,坝踵处拉应力最大值为2.94MPa,深度为3m。 $R = 3.5\text{m}$ 圆弧情况下,拉应力为2.64MPa,深度1m左右。对比设计剖面可见,坝踵拉应力与坝踵型式关系密切,设计上采用1:0.125的倒坡对减小坝踵拉应力和范围非常有利。

对于厂房底部前、后腿的联系墙,笔者在计算中将这两条垂直灌浆缝,用 $E = 2\text{GPa}$ 模拟。计算结果表明:两条灌浆缝在各种工况下都存在拉应力,在运行期有可能将灌浆缝拉开。联系墙对于加强后腿的刚度和传递上游侧的剪应力有作用。但是由于其存在,无法使前、后腿自由变形,不利于拱顶的拉应力释放,如取消联系墙,拱顶应力将减小,前腿的剪应力增加不大。笔者认为,可以取消这两条灌浆缝,将节约投资,加快施工工期。但是要深入进行计算,才能决定。

整个坝体的应力分析表明:设计断面合里,局部拉应力可以通过配筋加以解决。坝踵的拉应力实际上是由于弹性力学的局限性而产生的应力假象。由于砼具有塑性,破坏不是一个点,而是一个区域。根据文献[2],“认为

2. 应力增加主要在前、后腿,后腿主要是在斜腿下端部,坝趾范围应力增加不大。

3. 应力增加主要表现在压应力的增加。因此,空腹坝较实体坝更大地发挥了砼的抗压性能。

对于坝踵应力,历来都为工程界所关注。笔者曾作了前腿上游坝面垂直情况下的计算和在1:0.125倒悬下坝踵处用 $R = 3.5\text{m}$ 的圆

坝踵应力是个应力奇点区,从工程实用角度出发,取值时避开这个奇点区域,采用坝高的3%,作为坝踵的控制应力”。计算成果表明,在坝高3%处的单元坝踵应力为压应力,是安全的。

对于温度应力问题,为空腹坝计算比较重要的问题。因为在计算时,委托的温度应力仿真计算成果还未出来,因此没有将此部分计算列入计算内容。后经长科院材料所三维有限元计算,将温降作为控制工况,利用仿真计算砼浇筑后最高温度减去冬季温度场得到的温降计算应力。实际上这样计算方案的选取是偏于保守的。因为大坝浇筑有时间差,不可能同时处在较高温度上。计算成果表明,当与设计荷载叠加后,拉应力区主要出现在溢流面外表和坝体外表。主拉应力最大值为0.44MPa。因此,在运行期的温度应力对坝体的影响是安全的。施工期的温度应力可以通过加强温控措施予以解决。

4.2 坝体位移分布情况

从有限元位移成果见,位移数值不大,最大位移在坝顶,图1显示了位移考查点的具体位置。考查点位移成果见表1。

表 1

工 况		位 移 部 位		
		1	2	3
自 重	x(mm)	-6.76	-7.19	-7.28
	y(mm)	-0.06	-0.75	-0.523
自重+正	x(mm)	-6.29	-8.38	-8.11
常水压力	y(mm)	2.28	3.25	3.09
自重+校	x(mm)	-6.16	-8.65	-8.36
核水压力	y(mm)	2.69	4.20	3.46

工 况		位 移 部 位		
		4	5	6
自 重	x(mm)	-6.66	-7.14	-7.14
	y(mm)	-0.14	-0.307	-0.701
自重+正	x(mm)	-7.27	-6.81	-8.34
常水压力	y(mm)	1.86	1.93	3.21
自重+校	x(mm)	-7.47	-6.72	-8.62
核水压力	y(mm)	2.24	2.35	4.12

注:向上游为“+”,上抬为“+”。

4.3 与委托单位的计算和试验成果对比

本工程委托长科院材料所做了三维有限元计算,三维光弹试验,三维地质力学模型试验,石膏模型试验。将其成果与笔者平面有限元计算对比如表2。

从成果对比看,平面有限元计算成果与其它成果相比,应力有差别但是差别较小,因此可以认为,平面有限元成果较为可靠。

三维有限元成果和光弹试验成果分析表明;引水管和尾水管扩散段拉应力较大,这些问题可以通过配筋加以解决。三维地质力学模型试验成果表明,坝体破坏形态不是深层滑动,也非建基面上破坏,而是强度破坏。破坏的顺序是当荷载加到 $3.6P_0$ (P_0 为设计荷载)左右时,首先在坝踵处被拉开;当荷载达到 $4.5P_0$ 时,空腹上游面的上端部部位被拉开,并沿着上游面发展到离上游坝面只有2~3cm;当荷载达到 $5P_0$ 时,后腿被破坏。由此可见,坝体超载能力较大,坝踵并非结构关键部位,最关键部位应为前腿,前腿的厚度是控制坝体破坏的关键所在。

表 2

工 况	位 置	光 弹	石 膏	三 维	平 面
		试 验	模 型	有 限 元	有 限 元
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
自 重	坝 踵	7.95	-4.4	-5.98	-5.29
	坝 趾	/	-1.03	-1.44	-2.31
	空腹拱顶	+0.94	+0.57	+0.52	+0.86
自重+正 常水压	坝 踵	+0.43	-1.43	+0.22	+0.58
	坝 趾	/	-2.88	-4.31	-4.09
	空腹拱顶	+0.22	-1.0	为压应力	为压应力

注:闸墩断面拉为“+”,压为“-”。

总的来说,坝体设计合理,空腹的存在并没有恶化坝体应力;局部区域的拉应力可以通过配筋加以解决,坝体超载能力较大,坝体的位移较小,属小变形问题,大坝运行是安全可靠的。

(下转第83页)

- e. 人工操作控制软件;
- f. 人机联系软件;
- g. 画面生成及显示软件;
- h. 打印制表软件;
- i. 工况计算及重要设备可靠性统计软件;
- j. 运行监视软件;
- k. 通信软件。
- l. 系统初始化及通道检查软件;
- m. 系统实时时钟管理软件。

5 计算机监控系统与常规设备的关系

本电站计算机监控系统以计算机为主与

常规控制相结合的监控系统。计算机监控系统完成全厂运行状态和数据的采集、安全监测、操作与控制、经济分配负荷、自动开、停机、自动调节有功、无功等功能、取消原有的水力机械自动操作屏,通过 LCU 执行上位机指令完成开、停机,断路器投、切等操作。同时在中控室返回屏上设开、停机、断路器投、切、有功、无功功率调节等常规控制回路作为备用控制手段。

水力机械油、水、气系统的现场操作、继电保护以及闸门控制等功能仍由常规设备实现。计算机监控系统主要完成常规设备不能胜任的工作,如自动安全监测、自动发电控制和经济运行等功能。

(收稿日期:19941231)

~~~~~  
(上接第 42 页)

难题,不失为一种较好的坝型,今后将会被工程界广泛地推广和应用。

## 5 结束语

空腹重力坝是重力坝的一种新形式,由于设计和施工比较复杂,目前应用还不很广泛,但是如深入探讨其结构内在规律,采用先进的施工工艺,形成一整套行之有效的设计构思,对于解决狭窄河谷,泄洪量大这些工程

### 参考文献

- 1 吴媚玲,姚耀代,《重力坝的应力稳定与可靠性》,水利电力出版社
  - 2 汝乃华编著,《重力坝》,水利电力出版社
  - 3 《空腹重力坝总结》,水利电力出版社。
- (收稿日期:19950124)

## Computation and Analysis by Two-dimensional Finite Element on Hollow Gravity Dam at Dahekou Hydropower Station

Liu Jianming

(Sichuan Hydroelectric Investigation and Design Research Institute)

**Abstract** Stress and displacement of hollow gravity dam at Dahekou are computed and analyzed by finite element method. The results are compared to the computations and tests made by commission unit. It is believed that the dam structure is well designed and hollow gravity dam in high valley with large discharges have great potentialities to be exploited.

**Key Words** hollow gravity dam two-dimensional finite element stress displacement