

二滩水电站双曲拱坝应力分析

水电部成都勘测设计院 二滩应力组*

一、工程概况

二滩水电站位于雅砻江下游，距河口33公里。坝址控制流域面积116,360公里²，占全流域面积的90%。多年平均流量1680米³/秒。坝址距渡口市40多公里，距成昆铁路桐子林车站18公里，并有公路通过左岸，对外交通便利。

本工程以发电为主兼顾其它综合利用要求，其中以解决木材过坝为重点。电站建成后供电渡口、西昌地区，并以50或75万伏超高压输电线与川南、川东相联，并入四川大电力系统。

电站正常高水位拟定为1200米，壅高河水位188米，总库容58.0亿米³，有效库容33.7亿米³，装机容量300万千瓦，多年平均发电量165亿度，保证出力100.2万千瓦。

枢纽建筑物由大坝、地下厂房和泄洪隧洞等组成（见图1）。大坝为变园心等厚度双曲拱坝，最大坝高245米，坝顶弧长761.3米，坝顶厚12米，坝底最大厚度75米，顶拱园弧中心半径为440米。泄洪建筑物由四部分组成：坝顶中部表孔溢洪道5孔，孔口尺寸16×11米（宽×高）；两侧滑雪道式溢洪道4孔，孔口尺寸与中部表孔溢洪道相同；泄洪中孔6孔，布置在表孔溢洪道闸墩下方，进口底高程1100米，孔口尺寸5×6米（宽×高）；右岸一条泄洪隧洞，直径13米。枢纽设计洪水流量为20,600米³/秒（ $P=0.1\%$ ）；校核洪水流量为25,200米³/秒（ $P=0.01\%$ ）。地下厂房布置在左岸坝肩上游正长岩体内，安装6台50万千瓦水轮发电机组；采用单独引水方式，引水隧洞内径10米，尾水经尾水调压室和两条内径为15.5米压力隧洞排入下游。

坝址处为近似对称的“V”形河谷，两岸临江坡高达400至500米，左岸谷坡30°~45°，右岸谷坡25°~40°，枯水期水面宽80~100米，正常高水位1200米处谷宽为600~750米。坝区两岸基岩裸露，岩石为二迭系玄武岩和侵入其间的正长岩，以及接触蚀变玄武岩。各类岩组的变形模量差异较大——正长岩20~25×10⁴公斤/厘米²；蚀变玄武岩15~20×10⁴公斤/厘米²；而呈条带状分布于右岸玄武岩中的纤闪石化玄武岩只有0.6~1.0×10⁴公斤/厘米²，仅为正长岩变模值的 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{40}$ ，其展布范围在900~1090高程之间，条带最大宽度一般为15~20米，这是坝基地质的主要薄弱部位。

*本文由洪才根、计家荣同志执笔。

二、双曲拱坝静力分析

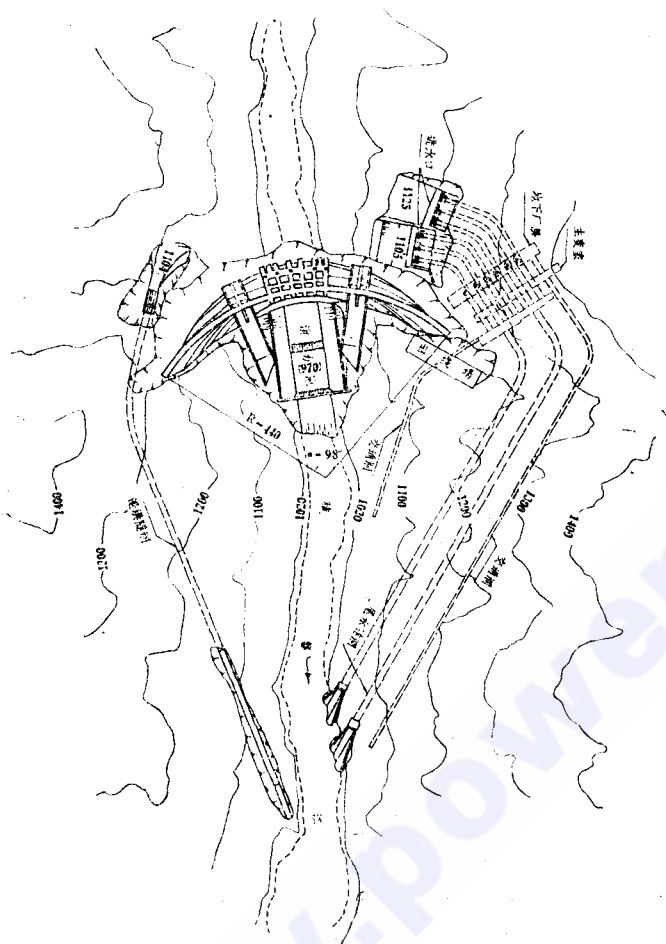


图1 枢纽布置图

本电站可行性研究阶段，双曲拱坝结合体型的初步选择进行了大量应力分析工作，主要采用全调整试荷载法；同时也采用了三维有限元计算及结构模型试验进行了校核。试载法为七拱十三梁的计算体系；三维有限元最多划分了294个等参混合单元；结构模型比尺为 $\frac{1}{500}$ 。所有分析方法的应力变化规律一致，数值相互比较接近。

(一) 体型选择

双曲拱坝体型选择主要满足两个条件——即坝体最大主应力满足应力控制标准；同时坝肩的稳定性能达到要求的安全系数。决定双曲拱坝几何形状有以下三个主要因素。

1. 坝基基岩利用面的确定

坝区岩石风化的主要特征为裂隙风化与夹层风化。风化带划分为强风化带和弱风化带，而弱风化带又分为弱偏强和弱偏微风化两级。

一般情况下，当岩体为弱偏强风

化、裂隙普遍张开或渗水、并充填夹泥时，即确定为卸荷带。坝址区强风化带，水平深度一般为15~20米；弱偏强风化带，划分为清除开挖段和研究处理段两部分。若弱偏强风化带岩体的裂隙较密集、裂面普遍风化、个别裂面局部充填次生夹泥或泥膜，变形模量和抗剪强度较低，单位吸水量一般大于0.1公升/分·米·米，地质方面建议一般均应清除，不能作为坝基。因此，目前设计的拱坝，都以弱偏微风化岩体作为大坝基础。

2. 坝基的综合变形模量

二滩坝址因各岩组的变形模量差异很大，基础变形特性很不均一。尤以右岸微粒隐晶玄武岩中的纤闪石化玄武岩条带变模过低，使得两岸基础变形特性具有较严重的不对称性。为了在体型选择中反映各类岩组不同的变形特性，故采用平面有限元法，对基础各控制高程点上，计算出与复杂地基变形特性有等效作用的综合变形模量，以提供试载法进行地基变位分析。

3. 坝体应力控制标准

坝体允许应力，是从二滩的实际条件出发，按全调整试载法程序的计算结果而确定的。允许应力以主应力作为控制标准，规定坝体在基本荷载组合时主压应力不超过80公斤/厘米²；下游面主拉应力一般控制在15公斤/厘米²以下，上游面主拉应力不超过10公斤/厘米²。

上述任一点的变化，都会使坝体相对较优的体型有较大的变化，并对坝体工程量的增减有直接影响。

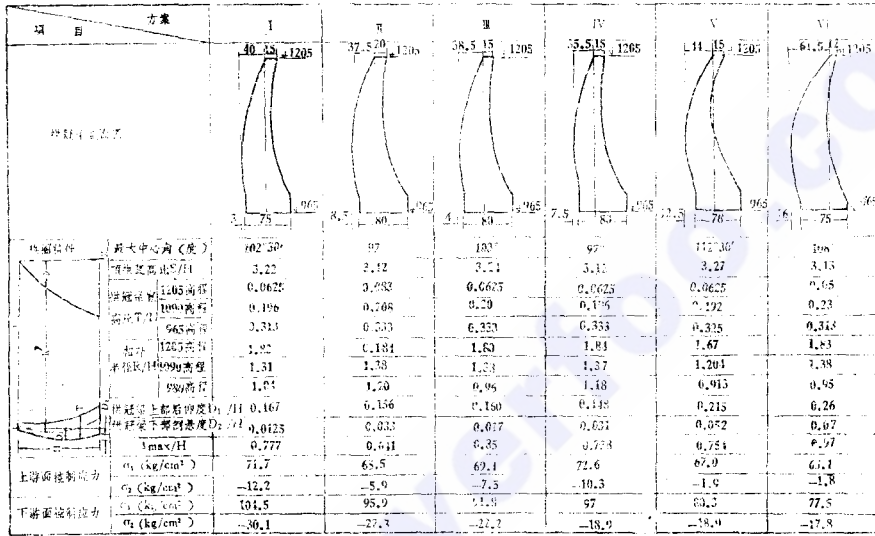


图2 双曲拱坝体型比较图

应力分析的荷载组合均以正常情况——水压力+泥沙压力+自重+均匀温降——作为控制。根据上述基岩利用面岩体综合变模和应力控制标准等因素确定的原则下，双曲拱坝体型的几何要素大致有这样一些特点：即坝体剖面应有较大的垂直曲率，上游面有较大的倒悬度，以及布置上应有较大的中心角和较小的半径等（其体型比较详见图2）。通过计算比较，坝体拱冠剖面垂直曲率的反弯点应在1/2坝高附近；上部的后仰度D₁/H应介于0.2~0.26的范围内；下部倒悬度D₂/H应在0.05~0.09之间选择。拱冠梁底部的厚高比，不应小于

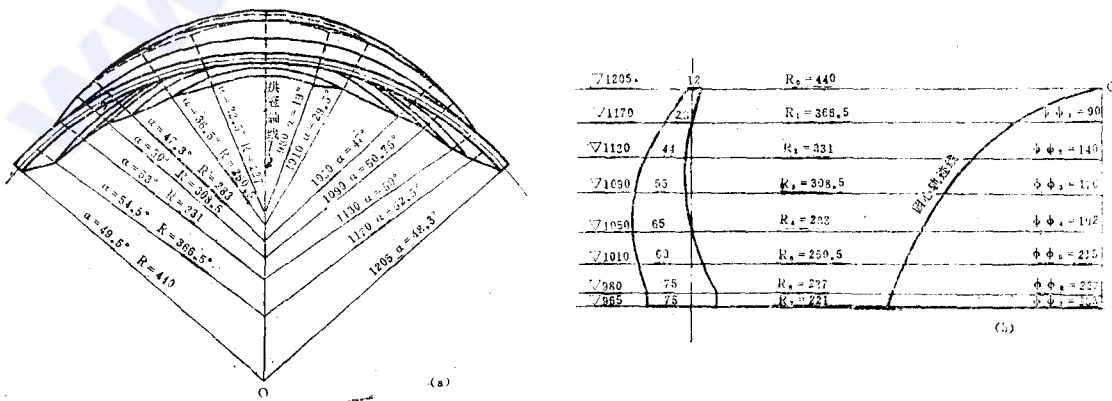


图3 双曲拱坝几何尺寸图

0.3; 中部的厚高比为0.2左右; 顶拱相对半径R/H约为1.67~1.83; 半高拱圈的相对半径约为1.20~1.40。

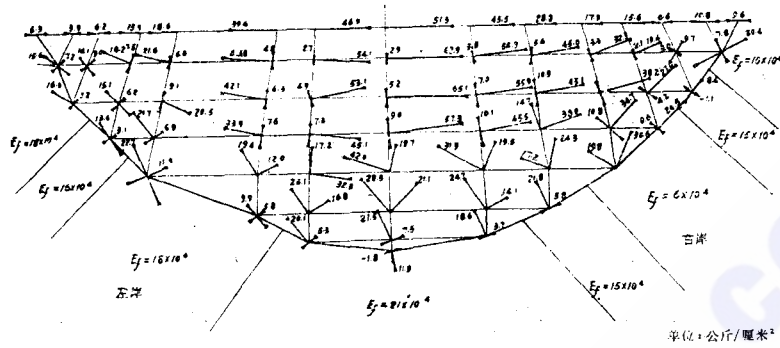


图4 上游坝面主应力图

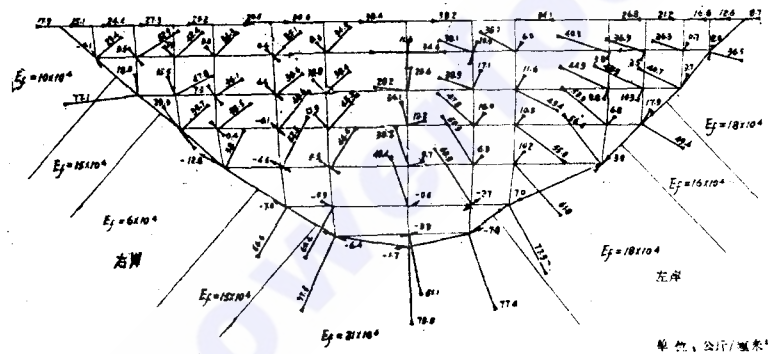


图5 下游坝面主应力图

按上述数据布置的体型, 应力条件基本上能满足应力控制标准。根据图2所列主要体型分析, 其中以V型和Ⅵ型的应力条件较好, 但V型稳定条件稍差, 因此, 可行性研究报告推荐Ⅵ型方案, 其几何尺寸详见图3。

(二) 试载法计算成果

双曲拱坝试载法分析的拱、梁正应力成果列入表1:

拱圈 高程(米)	位置	拱向正应力		梁号	高程 (米)	梁向正应力	
		上游面	下游面			上游面	下游面
1205	左端	6.3	8.7	0	1205	0	0
	拱冠	51.3	38.4		1170	3.0	11.1
	右端	9.6	17.9		1130	5.5	23.8

1170	左端	13.1	36.0	1	1050	9.1	35.6
	拱冠	62.9	34.4		1030	19.8	36.6
	右端	18.9	26.0		1010	26.8	42.7
1130	左端	9.7	37.1	1	980	27.2	48.4
	拱冠	65.1	27.7		965	11.7	73.4
	右端	1.1	75.8		1205	0	0
1050	左端	8.2	35.8	1	1170	3.7	10.2
	拱冠	57.2	19.5		1130	7.0	21.8
	右端	14.4	27.9		1050	10.1	33.7
1030	左端	15.4	24.0	1	1030	19.8	35.4
	拱冠	41.9	10.0		1010	23.0	45.2
	右端	24.5	-6.7		980	17.3	57.2
1010	左端	7.4	18.6	2	1205	0	0
	拱冠	22.2	-0.2		1170	5.8	7.7
	右端	10.2	4.8		1130	11.0	16.8
980	左端	6.0	0.3	2	1050	16.2	25.8
	拱冠	7.7	-3.7		1030	23.1	29.8
	右端	5.5	-1.1		1010	17.6	47.6

注：（1）表中正为压应力，负为拉应力。

（2）拱梁位置见图4。

上、下游面主应力成果详见图4和图5。

通过试载法分析表明，整个坝体的上下游面，除1050米拱圈的上游面基础点局部地区外，应力均未超过控制指标。上游面最大主压应力65.1公斤/厘米²，最大主拉应力-1.8公斤/厘米²。由于右岸局部地区变形模量过低的影响，致使1050米拱圈下游面基础附近的主拉应力稍有超出。

（三）三维有限元计算及结构试验

双曲拱坝的应力分析，曾采用北京大学“YD”程序进行过对比验证。清华大学在进行V型结构模型试验时，同时进行过三维有限元的对比分析。三维有限元计算与试验成果颇为吻合；与试载法成果相比，除基础边界点上有一些差异外，坝体内部的应力与变位，其分布规律和数值量级均较接近。基础边界上的差异主要反映在两个方面：（1）用有限元法计算时，上游面基础边界上一般均有拉应力出现，而采用试载法计算时，一般不出现拉应力

或出现很微小的拉应力；（2）右岸低变模区的下游面基础附近，用试载法计算时，往往会出现较大的主拉应力，而用有限元计算则拉应力值很小，甚至为受压状态，但属于低应力区。上述差异主要是与两种计算方法的理论及基础计算模型不同有关。若用试载法成果作为下游拉应力的控制标准，是偏于安全的。

两种计算手段，在主压应力控制值及控制部位上均很接近，与结构模型试验也较吻合。清华大学曾对双曲拱坝V型方案进行过试载法、三维有限元及模型试验的成果对比，其特征应力见表2：

表2 特征应力比较表 (单位 公斤/厘米²)

应力 \ 方法	试载法	三维有限元法	模型试验
上游面最大主压应力	67	54.7	55.2
上游面最大主拉应力	-1.9	-3.1	-6.7
下游面最大主压应力	80.3	63.7	68.8
上游面最大主压应力集中		89.2	91.8
下游面最大主拉应力	-18	-13.1	-9.5

考虑坝型选择过程中的坝体断面一般是受下游面的主压应力与主拉应力所控制。因此，用试载法选择的体型，能够满足本阶段的设计要求。

三、双曲拱坝动力分析

二滩坝址位于西南高地震区。按目前所制订的规范仅适用于高度在150米以下拱坝的地震荷载计算。因此，对二滩高达245米的双曲拱坝，目前尚缺乏成熟的经验，它在地震作用下的动力反应、强度、整体稳定性，以及抗震薄弱部位的防护设计等，都需慎重考虑。

(一) 基本资料

根据国家地震部门鉴定，坝址区基本烈度为7度，据“水工建筑物抗震设计规范”（SDJ10—78）要求，应按8度设防。依照抗震规范的基本规定，设计中所采用的动力基本参数如下：

- (1) 地面运动最大加速度 $0.2g$ ；
- (2) 加速度在三个方向（顺河向、横河向、竖向）的分量比分别为1:1:2/3；
- (3) 遇合系数在三个方向分别为1, 1, 0.5；
- (4) 综合影响系数0.25；
- (5) 地基动弹模 $E'_{动} = 1.25E'_{静}$ ；
- (6) 坝体动弹模 $E_{动} = 1.5E_{静}$ 。

(二) 动力法分析

二滩工程曾委托天津大学、水利水电科学研究院、中科院工程力学研究所、华东水利学院等单位,同时进行动力分析方面的研究与计算,并研讨了地基和水体对大坝自振特性的影响。尽管各单位所研究的体型不同,且计算程序及计算网格各异,若换算到同一的计算参数进行比较,其最终成果仍大体接近。通过计算分析,拱坝的动力特性反映了以下几个特点:

1. 地震作用下的动力特征,主要取决于坝高及河谷形状,体型的影响是比较次要的。各种不同体型方案的计算中,当地基为刚性时,其一阶自振周期变化在0.554~0.603之间;二阶自振周期变化为0.472~0.574;三阶自振周期变化为0.360~0.438,其下限值为重力拱坝的自振周期,上限值为双曲拱坝的自振周期,相对变化不大。

2. 地基刚度对自振特性及其动力反应的影响不大。刚性地基与弹性地基反映在自振频率上仅相差5~15%左右。最大动应力一般出现在拱冠顶部附近,受基础的影响较小,只是基础附近梁向最大组合动应力,当按弹性地基计算时则偏小5~15%左右。因此可以认为地基对拱坝动应力的影响,相对于静力来说,并不很显著。

3. 根据双曲拱坝的振型曲线分析,高阶振型中,竖向地震作用不能忽视。在横河向地震作用下,六阶振型引起的变位占组合变位的25%。在竖向地震作用下,九阶振型产生的变位占其总变位的14%。因此,对高双曲拱坝来说,计算振型数目不应少于十阶。

按照十阶振型动应力平方和开方进行组合,二滩最大组合动应力:拱向为6.8公斤/厘米²,梁向为5.5公斤/厘米²;拱向最大动应力在顶部拱冠,为静荷载应力的受压区,对大坝不起控制作用;梁向最大动应力发生在拱冠梁底部,与静力组合后,在上游面基础附近将产生不大于13公斤/厘米²的拉应力,未超过大坝强度的校核标准。显然,在8度地震作用下,其抗震性能良好。

(三) 拟静力法分析

采用拟静力法进行地震应力分析的主要目的,在于与试载法的静力成果能进行叠加。用抗震规范规定的一系列计算方法求出惯性力及动水压力,再进行拱梁分配的试载法计算。如此虽有很多缺点,不能反映坝体的动力特性,但有公认的强度控制标准。

按抗震规范规定,坝高大于100米时,地震惯性力系数 $F=1.0$ 。地震惯性力系数 F ,应为动力法计算的坝体地震总惯性力与静力计算总惯性力的比值。显然 F 值应与大坝的自振特性有关,它将随加速度反应谱值 β_i 的减小而减小, F 与 β_i 大致是线性关系,而 β_i 将随坝体的自振周期的增加而降低。高坝或宽河谷,坝体的自振周期也将加大。从几座拱坝的实例看来,坝高大于100米或较宽河谷的拱坝,惯性力系数应取小于1的系数。例如当顺河向地震时,白山拱坝 F 值计算结果为0.65;恒山拱坝(坝高69米、河谷严重不对称) F 值为0.56。二滩坝高245米,一阶振型周期为0.6秒左右,由规范谱曲线查得 β 值为0.75,仅为最大值2.25的1/3。为此,在进行二滩拟静力法分析地震应力时,地震惯性力系数宜取0.4~0.6较为合适。

若取 $F=0.4$,按规范所规定的地震惯性力计算方法,算出坝体惯性力分布强度,再进行拱梁分载计算,并与动力法计算成果予以比较(成果如表3)。

表3 拟静力法与动力成果比较 (库空情况)

应 力	计算方法	动力法 (SAP—5 程序)	拟 静 力 法	
			$F = 1.0$	$F = 0.4$
最大拱向应力 公斤/厘米 ²		6.8	14.2	5.9
最大梁向应力 公斤/厘米 ²		5.5	13.6	4.7

按表3对比分析,在修正惯性力系数 F 之后,拟静力法计算的最大应力与按动力法计算的控制应力量级大小相当,其分布规律亦大致相近。因此用拟静力法分析高拱坝的地震应力,仍然是一种可行的方法。

地震水压力从水体作为“附加质量”的概念出发,应该同惯性力一样进行一定修正,在计算中我们采用同一个 F 值来修正。

对惯性力及地震水压力修正之后,满库时的地震应力和静力叠加后,考虑校核情况允许应力提高30%,也能满足应力控制标准。

四、结 论

二滩双曲拱坝采用上述各种方法的大量应力分析,论证了修建245米高的拱坝在结构上是可行的。本阶段用试载法进行体型选择,并配合有限元计算和结构试验验证,动力分析使用动力法和拟静力法等,获得了可靠的应力分析成果,满足了本阶段的精度要求。

由于坝址基岩变形模量不均一,在应力分析中采用平面有限元法,把实际变形模量换算为综合变形模量以反映复杂地基的综合影响,经过分析认为这种做法是合理的。

关于拱坝的应力控制标准,通过双曲拱坝和重力拱坝几十组体型选择的应力分析,以及相应科研工作的论证,对坝体应力量级和分布规律基本弄清,结合二滩拱坝的具体条件,目前确定的应力控制标准是合适的。

参 考 文 献 (略)

※ ※ ※ ※

《水利运科学研究》

征 订 启 事

《水利水运科学研究》系南京水利科学研究所编辑出版的定期刊物,在国内公开发行。

本刊系学术性刊物,报导本所的主要科研成果,刊载国内有关的学术论著,择要介绍国外有关的科技成就和发展动向。主要报导内容:通航、过鱼和泄水建筑物水力学,水工建筑物和地下水开发利用,潮汐河口及河流河床演变和航道整治,海岸演变、港口淤积及防浪掩护,水电、水运工程岩土力学和工程结构,水工港工混凝土和钢筋混凝土耐久性,现场及试验室内测试新技术等。读者对象为水利、水运及土木建筑工程系统的科技工作者和大专院校师生。

本刊为季刊,每季度末月20日出版。每期100页上下,16开本,定价0.50元,单位和个人均可订阅。1984年度征订工作已经开始。请读者到当地邮局办理订阅手续。刊号? 28—19。

《水利水运科学研究》编辑部