

以应力为目标的拱坝体型优化设计

孙林松¹, 王德信¹, 裴开国²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏南京 210098; 2. 上海铁路局南京分局, 江苏南京 210000)

摘要 针对二次曲线型拱坝, 以最大拉应力最小为目标, 建立了拱坝体型优化设计的数学模型. 对某拟建高拱坝进行的优化设计研究表明, 二次曲线拱坝能够更好地适应河谷形状. 采用本文模型获得的优化体型可以在一定的坝体体积限制下, 使最大拉应力得到降低, 而且拉应力区域也有所减小.

关键词 应力目标 体型优化 拱坝 二次曲线

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2000)01-0057-04

60 年代末, 人们开始进行拱坝体型优化设计的研究, 30 年来, 这方面已经取得了不少成果. 但是, 通常进行的拱坝体型优化设计是以造价为目标, 试图在给定的约束条件下使得拱坝的造价最低 (一般是大坝体积最小).

随着我国水电事业的发展和拱坝技术的提高, 修建的拱坝越来越高. 这时, 人们更关心的是安全, 希望在一定的造价范围内, 寻求一个具有更高安全储备的拱坝体型.

拱坝的安全是一个受勘探、设计、施工等多方面因素影响的综合问题, 在体型设计阶段, 不妨以坝体应力作为衡量拱坝强度安全的数值指标. 本文对以应力为目标的拱坝体型优化设计进行了研究.

1 以应力为目标的拱坝体型优化设计数学模型

1.1 二次曲线拱坝与设计变量^[1]

拱坝体型是由拱圈剖面 (线型与厚度) 和拱冠梁剖面决定的. 二次曲线拱坝是圆、抛物线、椭圆、双曲线等类型拱坝的一般形式, 它设拱轴线为二次方程

$$x^2 = az^2 + bz \quad b > 0, z > 0 \quad (1)$$

这是通过原点并对称于 z 轴的二次曲线 (图 1), 其中 a 为无量纲系数, b 的量纲是长度.

方程 (1) 的曲率半径为

$$R = \frac{[4x^2(1+a) + b^2]^{3/2}}{2b^2} \quad (2)$$

当 $x = 0$ 时有 $R_c = b/2$, 即

$$b = 2R_c$$

式 (3) 表明, 系数 b 是拱冠曲率半径的 2 倍.

考察左岸侧拱 (第一象限内曲线) 有

$$\tan \varphi = \frac{dz}{dx} = \frac{2x}{\sqrt{4ax^2 + b^2}} \quad (4)$$

将左岸侧弦长 x_l 与似半中心角 φ_l 代入, 得

$$a = \frac{1}{\tan^2 \varphi_l} - \frac{b^2}{4x_l^2} \quad (5)$$

将式 (3), (5) 代入式 (1) 即可用体型参数 R_c, φ_l, x_l 等来表示二次曲线拱坝的拱轴线方程.

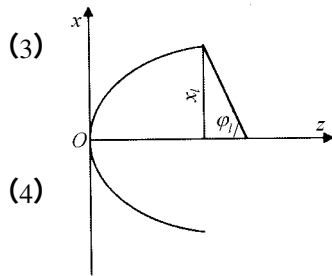


图 1 二次曲线
Fig.1 Conic

考虑到一般坝址选定后,两岸侧弦长也就基本确定了,因此,在进行优化设计时,选取各控制高程左右半拱的拱冠曲率半径 R_{cl}, R_{cr} 与似半中心角 φ_l, φ_r 为设计变量来确定拱轴线方程. 为了确定拱圈厚度,再取两岸拱端厚度 T_{al}, T_{ar} 为设计变量,拱轴线上任意点 i 处的厚度 T_i 按弧长 S_i 插值:

$$T_i = T_c + (T_a - T_c) \left(\frac{S_i}{S_a} \right)^n$$

(6)

式中: T_c ——拱冠厚度; T_a ——拱端厚度; S_a ——拱轴线长度.

确定拱冠梁剖面的设计变量可取控制高程处的拱冠梁上游面坐标 z_c 与拱冠梁厚度 T_c .

1.2 目标函数与约束条件

对高拱坝而言,人们更关心的是降低上游面坝踵拉应力. 因此,本文以上游面最大拉应力为目标函数. 约束条件除常规进行体积最小优化所考虑的约束外,为体现对造价的限制,引入了坝体体积约束条件.

综合起来,以应力为目标的拱坝体型优化设计的数学模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & \sigma_{u \max} \\ \text{s.t.} \quad & \sigma_{u \max} \leq [\sigma_{u \max}] \\ & \sigma_{d \min} \geq [\sigma_{d \min}] \\ & V \leq [V] \\ & g_i \leq 0 \quad i = 1, 2, \cdots, m \end{aligned} \right\}$$

(7)

式中: $\sigma_{u \max}, [\sigma_{u \max}]$ ——上游面最大拉应力及其允许值; $\sigma_{d \min}, [\sigma_{d \min}]$ ——下游面最大压应力及其允许值; $V, [V]$ ——坝体体积及其允许值; g_i ——其它约束.

2 工程实例

2.1 初始体型与设计变量

某拟建拱坝坝顶高程 1 245.0 m,坝高 292.0 m,属 300 m 级的高拱坝. 设拱冠梁断面上游面坐标 z_c 与拱冠梁厚度 T_c 按三次曲线变化,取控制高程 1 245.0,1 170.0,1 050.0,953.0 m 处的 z_c 与 T_c 为设计变量,其中 1 245.0 m 高程的 z_c 规定取 0.0,因此确定拱冠梁断面共需 7 个设计变量. 拱圈以拱冠曲率半径 R_{cl}, R_{cr} ,似半中心角 φ_l, φ_r ,拱端厚度 T_{al}, T_{ar} 为设计变量,控制高程为 1 245.0,1 210.0,1 170.0,1 130.0,1 090.0,1 050.0,1 010.0,975.0,953.0 m,各控制高程之间设计变量按 Lagrange 插值. 确定拱圈所用设计变量共 54 个. 初始体型采用设计单位提供的抛物线双曲拱坝体型,该体型已满足规范规定的拉应力标准.

2.2 优化结果与分析

优化设计采用改进的复形法求解. 表 1、表 2 为优化设计的拱坝体型参数与拱轴线方程,可以看出优化体型的拱圈线型包括椭圆与双曲线. 优化体型拱坝体积为 750.389 万 m^3 ,与初始体型的 752.216 万 m^3 相当.

表 1 二次曲线双曲拱坝优化体型参数

Table 1 Characteristic parameters of optimal conic double-curved arch dam

高程 /m	拱 冠 梁		拱端厚度/m		拱冠曲率半径/m		似半中心角/(°)	
	z_c /m	厚度/m	左岸	右岸	左岸 R_{cl}	右岸 R_{cr}	左岸 φ_l	右岸 φ_r
1 245.0	0.000	12.000	12.868	12.645	466.774	440.080	43.176	44.901
1 210.0	- 14.905	30.067	30.941	27.921	408.875	393.271	46.334	44.516
1 170.0	- 30.646	43.297	40.108	39.088	349.440	333.414	43.939	46.007
1 130.0	- 44.005	50.513	54.041	54.296	296.582	294.094	45.639	46.627
1 090.0	- 53.938	53.853	63.181	67.542	243.934	242.377	48.237	45.283
1 050.0	- 59.403	55.457	72.384	73.131	192.469	208.420	43.471	43.790
1 010.0	- 59.353	57.464	73.942	72.184	168.329	165.321	39.967	41.529
975.0	- 53.966	61.233	76.534	75.049	166.654	154.297	31.215	31.697
953.0	- 47.696	65.241	65.241	65.241	143.642	133.544	0.075	0.078

表 2 优化体型各高程拱轴线方程

Table 2 Axis functions of arch rings of optimal design at different elevations

高程 /m	左岸拱轴线		右岸拱轴线	
	方 程	线 型	方 程	线 型
1245.0	$x^2 = -0.0424z^2 + 933.5479z$	椭 圆	$x^2 = -0.191z^2 + 880.1606z$	椭 圆
1210.0	$x^2 = -0.205z^2 + 817.7491z$	椭 圆	$x^2 = -0.0367z^2 + 786.5423z$	椭 圆
1170.0	$x^2 = 0.00466z^2 + 698.8791z$	双曲线	$x^2 = -0.0296z^2 + 666.8288z$	椭 圆
1130.0	$x^2 = -0.134z^2 + 593.1633z$	椭 圆	$x^2 = -0.0621z^2 + 588.1885z$	椭 圆
1090.0	$x^2 = -0.280z^2 + 487.8675z$	椭 圆	$x^2 = 0.0136z^2 + 484.7549z$	双曲线
1050.0	$x^2 = 0.103z^2 + 384.9373z$	双曲线	$x^2 = 0.0288z^2 + 416.8408z$	双曲线
1010.0	$x^2 = -0.0220z^2 + 336.6580z$	椭 圆	$x^2 = 0.0998z^2 + 330.6430z$	双曲线
975.0	$x^2 = -0.354z^2 + 333.3085z$	椭 圆	$x^2 = 0.241z^2 + 308.5937z$	双曲线
953.0	$x^2 = 71.600z^2 + 287.2846z$	双曲线	$x^2 = 94.600z^2 + 267.0874z$	双曲线

优化过程中结构分析与重分析采用线弹性有限单元法^[2],沿坝厚方向划分 4 层单元,高度方向 10 层单元,有限元网格单元总数 1120,节点总数 1528 考虑到建基面的应力集中问题,应力分析时只考察离建基面 5 m 以上的坝体应力,应力采用经光滑处理后的节点应力.在基本荷载组合下,优化体型上游面最大主拉应力为 7.618 MPa,比初始体型下降了 1.138 MPa,约占 13%,图 2 为上游面主拉应力等值线;下游面最大主压应力为 -11.389 MPa,与初始体型基本一致.对比拱冠梁断面与建基面主拉应力大于 1.0 MPa 的区域(图 3)可以看出,优化体型的较大拉应力区域也较初始体型有所减小.这说明,本文建立的优化模型是合理的.

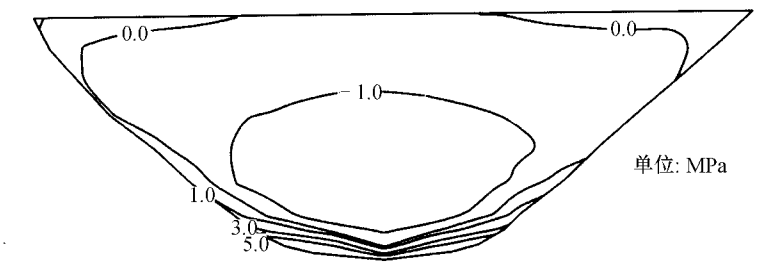


图 2 上游面主拉应力等值线

Fig.2 Contour map of principal tensile stress on upstream surface

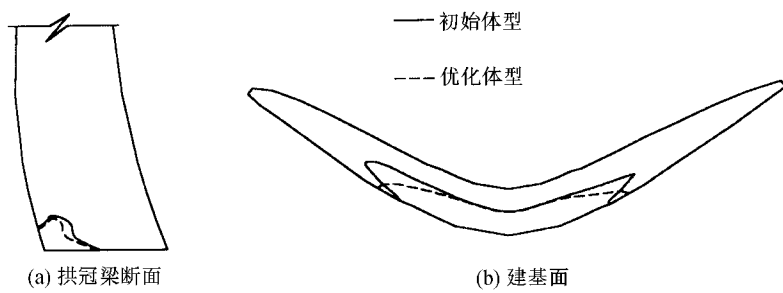


图 3 主拉应力区域对比

Fig.3 Region of principal tensile stress

3 结 语

- a. 二次曲线拱坝是圆、椭圆、抛物线、双曲线等类型拱坝的一般形式,它能更好地适应河谷形状的变化,充分体现拱坝的结构特点.
- b. 以应力为目标的拱坝体型优化设计可以在一定的体积约束下,获得应力分布更加合理、具有更高安全储备的拱坝体型.
- c. 拱坝体型优化设计是一个非常复杂的课题,为了在安全性与经济性之间作出合理取舍,有必要对以

应力和造价为目标的拱坝体型双目标优化作进一步研究.

参考文献：

- [1] 厉易生.二次曲线拱坝及其体型优化模型[J].水利学报,1988(7) 27~31.
[2] 王德信,许庆春.基于有限单元法的拱坝体型优化设计[J].河海大学学报,1993,21(3) 102~105.

Stress-Oriented Shape Optimization of Arch Dams

SUN Lin-song¹, WANG De-xin¹, PEI Kai-guo²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Nanjing Branch Department of Shanghai Railway Bureau, Nanjing 210000, China)

Abstract In this paper, the shape optimization model of conic arch dams is established to minimize the maximal tensile stress. The research on the shape optimization of a planned arch dam indicates that conic arch dam is fit the variation of valley well, and with the present model, both the maximal tensile stress and the region of tensile stress are reduced while the dam volume is controlled.

Key words stress objective shape optimization arch dam conic

《水利水电科技进展》征订启事

《水利水电科技进展》(双月刊,国内统一刊号 CN32 - 1439/TV,国际标准刊号 ISSN1006 - 7647).主要刊登与水利、水电、水运、海洋、土木、环境等学科有关的文章,为水利水电工程建设及运行管理提供有借鉴意义的新颖实用技术和科技信息.主要栏目有方针与政策、专题综述、研究与开发、规划与勘测、设计与施工、工程管理、经济交流、国外动态等,适合广大工程技术人员、科学研究人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读.

本刊由河海大学主办,全国各地邮局均可订阅,邮发代号 28 - 244,2000 年全年订价 30.00 元,也可直接汇款至编辑部订阅(另加包装邮寄费 6.00 元).编辑部地址:南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部,邮政编码 210098.汇款时务请注明“订水利水电科技进展”.联系电话:(025)3713777 转 50335.