

# 基于心形线特性的锚固洞体型优化研究

夏可, 李守义, 张岳, 何冠洁, 郭金君

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对预留锚固洞对拉锚索的锚固方式, 传统梯形锚固洞周围拉应力过大的问题, 以某工程预应力闸墩中墩为研究对象, 建立三维有限元模型, 根据心形曲线的几何特性, 提出了心形锚固洞体型, 在不同的荷载组合下, 对梯形和心形锚固洞进行了对比分析, 并对其设计参数做了深入研究。结果表明: 心形锚固洞与传统梯形锚固洞相比, 周围拉应力明显降低, 受力情况更好; 将心形锚固洞上游曲面改为铅直面, 能有效控制锚固洞体积, 且在满足施工情况下, 可尽量靠近下游面中心; 心形锚固洞顶面与下游面交线到顶层锚索中心距离取 1.5 ~ 2.0m, 底面与下游面交线到底层锚索中心距离取 1.2 ~ 1.5m, 较为合理。

**关键词:** 预应力闸墩; 锚固洞体型; 心形线; 心形锚固洞; 体型优化

中图分类号: TV662.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0161-05

## Study on shape optimization of anchorage holes based on cardioid characteristics

XIA Ke, LI Shouyi, ZHANG Yue, HE Guanjie, GUO Jinjun

(Faculty of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Aiming at the anchoring method of the anchorage hole to the anchor cable and the excessive tensile stress around the traditional trapezoidal anchorage hole, the middle pier of a prestressed pier of a project was taken as the research object to establish a 3-dimensional finite element model. According to the geometric characteristics of the cardioid curve, the shape of the cardioid anchorage hole was proposed. The trapezoidal and cardioid anchorage holes were compared under different load combinations, and the design parameters were studied in depth. The results showed that the cardioid anchorage hole has lower tensile stress and better stress than the traditional trapezoidal anchorage hole. The upstream curved surface of the cardioid anchorage tunnel changed into a straight surface, which can effectively control the volume of the anchorage tunnel and can be as close as possible to the downstream surface center under the construction conditions. The distance between the top surface of cardioid anchorage hole and the downstream surface to the top anchor cable is 1.5 ~ 2.0 m, and the distance between the bottom surface and the downstream surface to the bottom anchor cable is 1.2 ~ 1.5 m, which is reasonable.

**Key words:** pre-stressed pier; anchor hole type; cardioid; cardioid anchor hole; shape optimization

## 1 研究背景

近年来随着泄水建筑物的泄量不断增大, 预应力闸墩以其明显的经济性和安全性等优势, 被广泛应用于大型弧门泄水建筑物的支撑结构中<sup>[1-6]</sup>。关于预应力闸墩的锚固形式<sup>[7-9]</sup>, 国内外学者做了大量研究。2000年, 胥润生<sup>[10]</sup>对安康水电站预应力

闸墩锚固形式做了优化, 提出了“深槽+锚孔”结构, 验证了该结构可节省50%锚索, 且便于施工; 2007年, 杨胜等<sup>[11]</sup>将预留竖井式、胶结式内锚头和U型锚固锚固形式进行了对比分析, 推荐使用U型锚固形式, 但在实际应用中技术难度大, 施工复杂; 2009年, 李振龙等<sup>[12]</sup>对竖井式锚固洞预应力闸墩进行了应力应变分析, 得出该锚固形式效果较好, 且

收稿日期: 2018-10-23; 修回日期: 2018-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479168)

作者简介: 夏可(1993-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构数值模拟。

通讯作者: 李守义(1955-), 男, 甘肃庄浪人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水工结构分析及数值分析。

便于施工;2012年,周伟等<sup>[13]</sup>对胶结式锚固预应力闸墩进行了非线性接触分析,分析了胶结式锚固形式的优势,但在工程应用中成本较高,施工复杂。

实际工程大多采用预留锚固洞对拉锚索的锚固形式,但由于预应力的施加导致锚固洞周围应力较大,同时预留锚固洞对闸墩整体结构有一定的削弱。本文通过对预留锚固洞的形状及尺寸进行优化研究,从而达到降低锚固洞周围拉应力的目的,缓解锚固洞对闸墩整体结构的削弱程度。

## 2 工程概况

某水电站工程溢洪道正常蓄水位 723 m,堰闸段闸顶高程 729.5 m,建基面高程 693 m。正常蓄水位弧门瞬启时作用在单个弧门支铰上的最大净荷载为:水平推力  $N = 18\,500$  kN,切向力  $S = -800$  kN,侧推力  $H = 1\,850$  kN,溢洪道闸墩采用预应力闸墩结构。中墩厚度 4 m,中墩主锚索共 4 排,每侧各两排,外排 8 束,内排 4 束,共 24 束,单束永存吨位为 2 700 kN,超张拉吨位为 3 105 kN;水平次锚索分 3 排在垂直弧门推力方向上,每排均布置 4 束,共 12 束,单束永存吨位为 1 800 kN,超张拉吨位为 2 070 kN,拉锚比为 1.75,锚索布置见图 1。

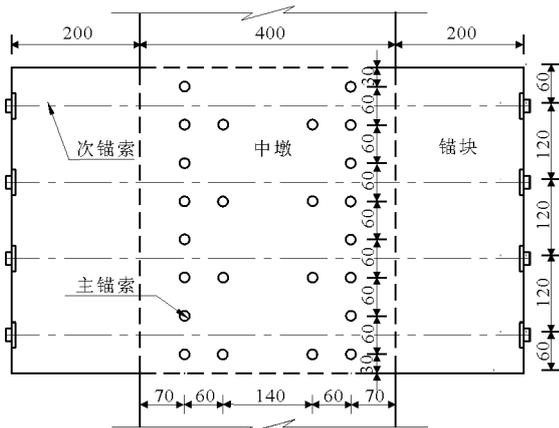


图1 预应力闸墩中墩锚索布置图(单位:cm)

## 3 计算模型及计算工况

### 3.1 计算模型

取预应力闸墩中墩为研究对象,建立三维有限元模型,见图 2。假定混凝土为各向同性、均匀连续的线弹性材料,基础质量不予考虑。计算模型基础向坝基以下、坝上游及坝下游各取两倍的坝高各 80.0 m。闸墩、坝体结构网格尺寸控制在 0.5 m 以内,基础网格尺寸控制在 0.5 ~ 10.0 m,采用八节点六面体实体单元 Solid45 进行模拟。计算模型  $X$  正向为顺水流方向, $Y$  正向为竖直向上, $Z$  正向为右岸方向。

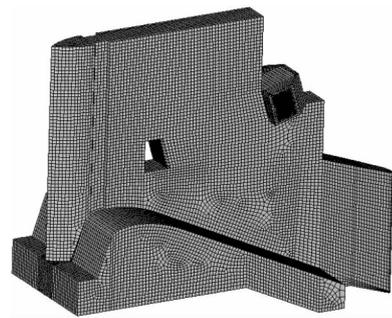


图2 预应力闸墩中墩有限元模型

### 3.2 材料参数

水的重度  $\gamma_w = 10$  kN/m<sup>3</sup>,预应力闸墩各部位混凝土强度等级及材料特性见表 1。

### 3.3 计算工况及荷载组合

计算选取 2 个控制性工况,即工况 1(完建期)和工况 2(运行期:双侧弧门瞬启),荷载组合见表 2。

## 4 计算结果与分析

传统梯形锚固洞周边拉应力往往比较大,远超过混凝土轴心抗拉强度设计值,工程中需要的配筋量较大,本文通过选取合理的锚固洞体型,来缓解其周围应力过大的问题。

表 1 预应力闸墩各部位混凝土材料特性表

部位	混凝土 强度 等级	混凝土强度/MPa				弹性模量 $E_c$ /MPa	重度/ (kN · m <sup>-3</sup> )	泊松比
		标准值		设计值				
		轴心抗压 $f_{ck}$	轴心抗拉 $f_{tk}$	轴心抗压 $f_c$	轴心抗拉 $f_t$			
溢流堰体	C20	13.4	1.54	9.6	1.10	$2.55 \times 10^4$	24	0.167
闸墩	C30	20.1	2.01	14.3	1.43	$3.00 \times 10^4$	25	0.167
闸墩颈部及锚块	C40	26.8	2.39	19.1	1.71	$3.25 \times 10^4$	25	0.167

表 2 各计算工况荷载组合

工况编号	计算情况	荷载类型						
		自重	水重	静水压力	扬压力	弧门推力	超张拉预应力	锁定预应力
1	施工完建	√					√	
2	正常蓄水位弧门双侧瞬启	√	√	√	√	√		√

心形线是由动圆绕着与其相切且半径相同的另外一个定圆滚动时,动圆上固定一点所形成的轨迹(见图 3),本文采用的心形线参数方程<sup>[14]</sup>:

$$x = a(1 + \sin\theta) \cos\theta \quad (1)$$

$$y = a(1 + \sin\theta) \sin\theta \quad (2)$$

心形线曲率半径:

$$\rho = \frac{2\sqrt{2}}{3}a \sqrt{1 + \sin\theta} \quad (3)$$

式中:  $a$  为定圆直径;  $\theta$  为极角( $0 \leq \theta \leq 2\pi$ )。

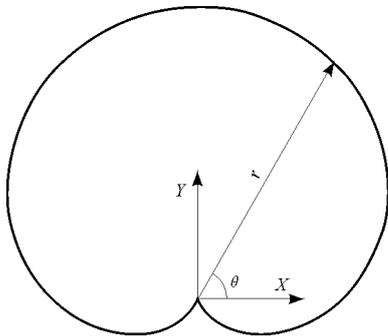


图 3 心形线轨迹方程

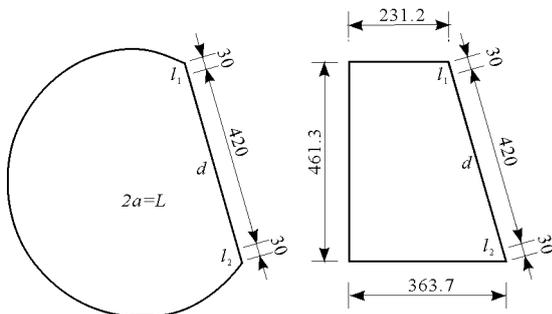


图 4 心形锚固洞和梯形锚固洞体型图(单位:cm)

传统梯形锚固洞的顶、底面与下游面交线处拉

应力往往较大,上游面拉应力很小。利用心形线极角  $\theta(0 \leq \theta \leq \pi/2)$  越小曲率半径越小,形状越陡越凸出,极角越大曲率半径越大,形状越缓越扁平这一几何特性,恰好能使顶、底面在拉应力最大处明显起拱,改善受力状态;而在上游面处很快趋于平缓,有利于控制锚固洞体积大小不会过大。

心形线的几何特性理论上应用于锚固洞体型较为理想,而心形锚固洞体型的设计关键在于参数  $a$  ( $a$  为心形线定圆直径) 的选取。下游斜面长度  $L = d + l_1 + l_2$  (其中  $d$  为顶层锚索中心到底层锚索中心的距离;  $l_1$  为锚固洞顶面与下游面交线距顶层锚索中心的距离;  $l_2$  为锚固洞底面与下游面交线距底层锚索中心的距离)。由于参数  $a$  是参考下游斜面长度选取的,本文取  $d$  为 4.2 m 不变,则参数  $a$  与  $l_1$ 、 $l_2$  的长度密切相关,以下计算假定主锚索位置及吨位不变。

#### 4.1 两种锚固洞体型计算结果对比分析

为进一步验证心形锚固洞体型可行性,将锚固洞下游斜面作为  $x$  轴,斜面法线为  $y$  轴,初拟  $l_1$  为 0.3 m、 $l_2$  为 0.3 m,则  $a$  取斜面长度  $L$  的一半为 2.4 m,坐标原点  $O$  取  $d$  的中点,简化心形线取  $0 \leq \theta \leq \pi$  段建立心形锚固洞模型,心形锚固洞与梯形锚固洞体型图见图 4,两种锚固洞各关键部位的应力计算结果见表 3。

分析工况 1 结果可知:心形锚固洞与梯形锚固洞相比,顶面最大拉应力从 4.8 MPa 降至 4.3 MPa,降幅 10.4%;下游面最大拉应力从 4.5 MPa 降至 4.0 MPa,降幅 11.1%;底面最大拉应力从 4.6 MPa 降至 4.1 MPa,降幅 10.9%;上游面基本无拉应力;各部位最大压应力均满足混凝土设计抗压强度。

表 3 两种锚固洞体型计算结果

锚固洞形状	工况	MPa							
		顶面		下游面		底面		下游面	
		最大主拉应力	最大主压应力	最大主拉应力	最大主压应力	最大主拉应力	最大主压应力	最大主拉应力	最大主压应力
梯形	工况 1	4.8	1.1	4.5	12.2	4.6	0.8	0.2	1.2
	工况 2	3.9	1.4	5.2	11.1	5.5	1.5	0.9	2.0
心形	工况 1	4.3	1.4	4.0	12.2	4.1	0.5	0.0	1.4
	工况 2	3.2	1.6	4.7	11.1	5.1	0.4	0.8	1.4

分析工况2结果可知:心形锚固洞与梯形锚固洞相比,顶面最大拉应力从3.9 MPa降至3.2 MPa,降幅17.9%;下游面最大拉应力从5.2 MPa降至4.7 MPa,降幅9.6%;底面最大拉应力从5.5 MPa降至5.1 MPa,降幅7.3%;上游面拉应力变化不大;各部位最大压应力均满足混凝土设计抗压强度。

结果表明,心形锚固洞相比梯形锚固洞的受力情况更好,具有一定的可行性。但心形锚固洞顶、底面及下游面拉应力仍较大,且体积偏大,对坝体削弱程度较大,故有必要对其做进一步优化。

#### 4.2 心形锚固洞上游面体型优化研究

分析可知,梯形锚固洞上游面拉应力本身就很小,不起控制作用,虽心形锚固洞上游面以曲面代替了梯形锚固洞的铅直面,但对上游面拉应力情况改善并不明显;同等条件下,梯形锚固洞体积为60.70 m<sup>3</sup>,而心形锚固洞体积为100.36 m<sup>3</sup>,增幅较大。综合考虑,将心形锚固洞上游面改为铅直面,通过改变铅直面位置,探究上游铅直面位置和锚固洞周围应力的关系。选择工况2为控制工况,计算取 $l_1$ 为0.3 m、 $l_2$ 为0.3 m,  $a$ 取斜面长度 $L$ 的一半为2.4 m,坐标原点 $O$ 取 $d$ 的中点,初拟上游铅直面距下游面中心2、2.5、3、3.5、4 m等5种情况,计算结果见图5~6。

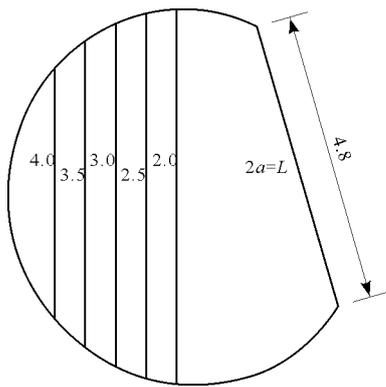


图5 上游铅直面位置示意图(单位:m)

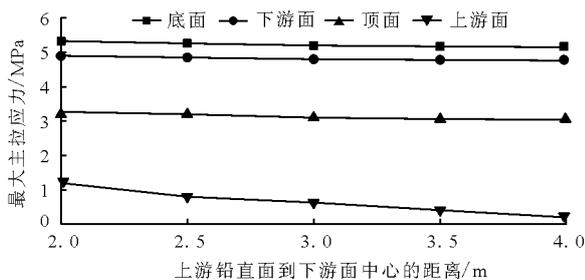


图6 关键部位最大主应力随上游铅面位置的变化

结果表明:随着上游铅直面远离下游面中心,心形锚固洞各关键部位最大拉应力不断减小,但降幅

较小。在距下游面中心2~3 m时,顶面最大拉应力从3.3 MPa降至3.1 MPa,降幅6.1%;下游面最大拉应力从4.9 MPa降至4.8 MPa,降幅较小,为2.0%;底面最大拉应力从5.3 MPa降至5.2 MPa,降幅较小,为1.9%;上游面最大拉应力始终很小,不起主要控制作用;距下游面中心3 m以外,各关键部位最大拉应力基本无变化;距下游面中心2 m时,心形锚固洞体积仅为47.6 m<sup>3</sup>,距下游面中心3 m时,为65.9 m<sup>3</sup>。

综合分析,将心形锚固洞上游曲面改为铅直面,可有效减小锚固洞体积,且在满足施工要求的情况下,可尽量靠近下游面中心。

#### 4.3 心形锚固洞设计参数优化研究

虽优化了心形锚固洞上游面体型,但顶、底以及下游面最大拉应力仍远超混凝土轴心抗拉强度设计值,这是由于顶、底面距顶底、层锚索太近造成的,故有必要对心形锚固洞设计参数做进一步优化。坐标原点 $O$ 取 $d$ 的中点,则顶面心形曲线参数 $a_1 = d/2 + l_1$ ,底面心形曲线参数 $a_2 = d/2 + l_2$ ,通过改变 $l_1$ 、 $l_2$ 探讨心形锚固洞设计参数的合理值。上游铅直面距下游面中心3 m,计算方案为:保持 $l_2$ 为0.3 m不变,初拟 $l_1$ 为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m等5种情况;保持 $l_1$ 为0.3 m不变,初拟 $l_2$ 为0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 m等5种情况,计算结果见图7~8。

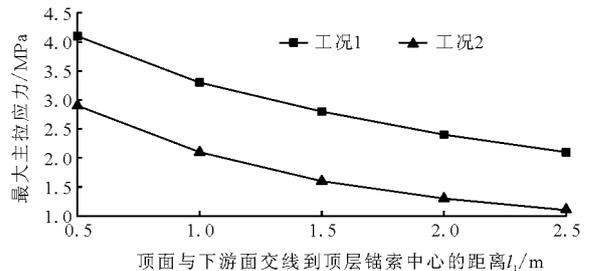


图7 顶面最大主拉应力随  $l_1$  的变化

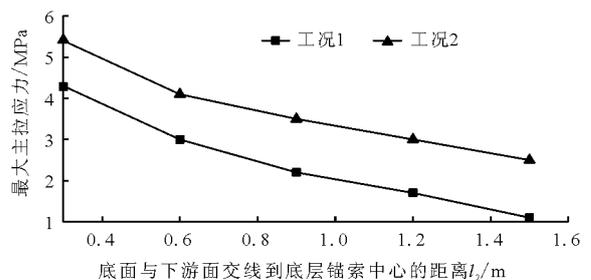


图8 底面最大主拉应力随  $l_2$  的变化

分析工况1和工况2结果:随着心形锚固洞的 $l_1$ 、 $l_2$ 不断增大,顶、底面最大主拉应力不断降低,锚固洞体积不断增大。顶面与下游面交线到顶层锚索中心距离

太近,会导致顶面拉应力过大,太远则应力降幅较小,且锚固洞体积过大;底面与下游面交线到底层锚索中心距离太近,会导致底面拉应力过大,太远则锚固洞体积过大,且增幅较大,对闸墩整体结构受力情况不利。

当顶面与下游面交线到顶层锚索中心距离为1.5~2.0 m时:工况1顶面最大主拉应力从4.4 MPa降至2.4 MPa,降幅为45.5%;工况2顶面最大

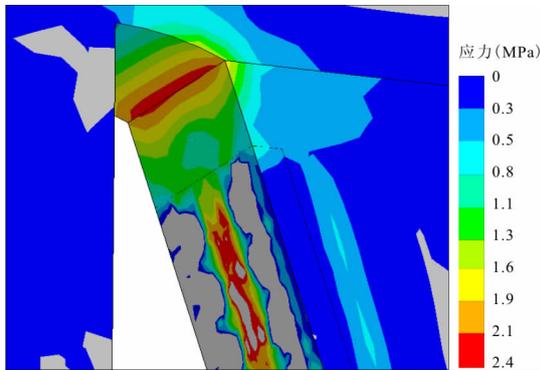


图9 工况1顶面与下游面交线距顶层锚索中心2m处最大主拉应力云图

综合考虑,顶面与下游面交线到顶层锚索中心距离取1.5~2.0 m,底面与下游面交线到底层锚索中心距离取1.2~1.5 m,心形锚固洞各关键部位拉应力大幅降低,且体积不会太大,体型较为合理。

## 5 结论

本文对预应力闸墩心形锚固洞体型进行了较为系统深入地讨论研究,得到以下结论:

(1)心形锚固洞较梯形固洞体型,拉应力降低较为明显,应力分布较为均匀,受力情况更好。

(2)将心形锚固洞上游曲面改为铅直面,既能有效减小心形锚固洞体积,又能降低关键部位拉应力,且上游铅直面在满足施工要求的情况下,可尽量靠近下游面中心。

(3)心形锚固洞顶面与下游面交线到顶层锚索中心距离取1.5~2.0 m,底面与下游面交线到底层锚索中心距离取1.2~1.5 m,较为合理。

### 参考文献:

- [1] 谢德浚,刘致彬. 大型弧门预应力闸墩的设计现状及问题[C]//中国水力发电工程学会全国水工预应力技术学术讨论会,1990.
- [2] 孙翔,尹延飞,庞文占,等. 湍河渡槽槽身预应力施工技术应用及效果评价[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):153-158.
- [3] 温中华,闫飞,解伟. 蒲石河水库预应力闸墩模型受力状

主拉应力从3.3 MPa降至1.3 MPa,降幅为60.6%。当底面与下游面交线到底层锚索中心距离为1.2~1.5 m时:工况1底面最大主拉应力从4.3 MPa降至1.1 MPa,降幅为74.4%;工况2底面最大主拉应力从5.3 MPa降至2.5 MPa,降幅为52.8%。同时下游面拉应力也有所减小,主要出现在下游面中心处,见应力云图图9~10。

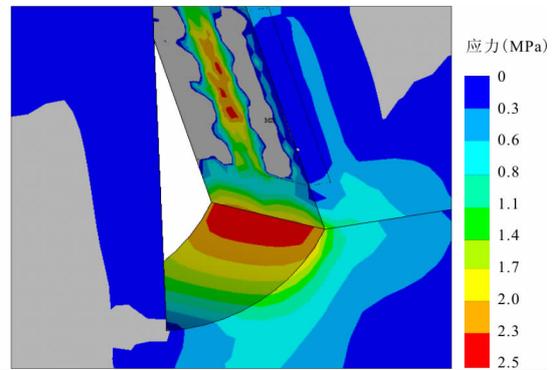


图10 工况2底面与下游面交线距底层锚索中心1.5m处最大主拉应力云图

态研究[J]. 长江科学院院报,2009,26(8):73-75.

- [4] 胡清义. 预应力闸墩优化设计研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [5] 郝晓飞,李守义,李萌,等. 锚索预应力衰减与失效对结构的稳定影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6):169-173.
- [6] 徐远杰,唐碧华. 三板溪大吨位预应力中墩三维有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2004,37(4):1-6.
- [7] 宋兴君,李守义,叶林. 预应力闸墩锚固形式研究[J]. 水力发电学报,2006,25(5):92-96.
- [8] 马吉明,逢阿强,佟志强. 闸墩预应力锚索新形式的探索[J]. 水力发电学报,2004,23(3):79-83.
- [9] 李守义,郭晓晶,董华峰,等. 预应力锚固闸墩有限元分析研究[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(6):35-38.
- [10] 胥润生. 安康水电站表孔预应力闸墩优化设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2000,19(3):106-108.
- [11] 杨胜,李守义,赵丽娟,等. 高拱坝深孔预应力闸墩锚固形式研究[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(6):79-83.
- [12] 李振龙,李守义,范瑞朋. 里底水电站溢洪道竖井式预应力闸墩应力及应变分析[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(5):140-143.
- [13] 周伟,杨胜,成磊,等. 胶结式内锚固预应力闸墩的非线性接触分析[J]. 四川水力发电,2012,31(S1):125-127.
- [14] 赵海峰. 心形线双曲拱坝体型建模与有限元分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.