

坝高与弧高比对高拱坝厚高比的影响

方咏来,黄朝煊,马以超

(浙江省水利水电勘测设计院,浙江 杭州 310002)

摘要 基于第 2 版《水工设计手册》中的国内外已建高拱坝参数,采用数值统计回归分析法,考虑坝高对拱坝厚高比的影响,给出了拱坝厚高比经验计算公式,进而提出了拱坝底厚建议计算公式。与现有拱坝底厚建议计算公式的比较分析表明,该建议计算公式的相关系数、标准方差等回归指标均优于第 2 版《水工设计手册》的建议计算公式,且多数计算值也比第 2 版《水工设计手册》建议计算公式的计算值更接近实际工程设计值,具有一定的参考价值。

关键词 拱坝 厚高比 弧高比 拱坝底厚

中图分类号 :TV642.4

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)04-0051-04

Impact study of dam height and arc-height ratio to thickness-height ratio of high archdam//FANG Yong-lai, HUANG Chao-xuan, MA Yi-chao (Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract :Based on the parameters of built arch dams at home and abroad in the *Hydraulic Design Manual* (Second edition), numerical statistical regression analysis was applied to investigate the effects of the dam height on the thickness-height ratio of arch dam. An empirical formula of the thickness-height ratio and a proposed formula of the arch dam bottom thickness are provided in this paper. Compared with the existing formula of the arch dam bottom thickness, this proposed formula is better than the formulas from *Hydraulic Design Manual* (second edition) based on the correlation coefficient and standard deviation. Most of the calculated values of the built arch dam with the proposed formula were found to be closer to the design values. Thus, the proposed formula has certain reference value for engineering applications.

Key words :arch dam ; thickness-height ratio ; arc-height ratio ; bottom thickness of arch dam

拱坝厚薄的度量参数主要有厚高比和柔度系数,厚高比是拱坝底厚与坝高之比,第 2 版《水工设计手册》^[1] (2011 年出版,以下简称《手册》)对拱坝厚高比与弧高比进行了统计分析,得出了线性关系建议式。柔度系数 C 是国际著名坝工专家龙巴迪^[2]提出的,是反映拱坝厚薄的一个综合参数,龙巴迪认为正常情况下 C 值为 15 左右,若混凝土浇筑技术较高, C 值也能达到 20。但实际工程表明,不少坝高较低的拱坝, C 值较大仍能正常运行,因此用柔度系数评价坝体安全性和经济性时,还要注意坝高要素。对于 Kolnbrein 拱坝坝踵的开裂^[3-4],龙巴迪认为是由于拱坝的柔度系数太大($C = 17.7$,是已建高拱坝中最大的)、坝体设计得太薄造成的。

任青文等^[5]假定拱坝力学模型为圆筒的一部分,从强度观点近似给出了拱坝的强度破损曲线 $C = 3.4\sigma / (H\gamma_w)$,其中 σ 为混凝土容许抗压强度, H 为拱坝坝高, $\gamma_w = \rho_w g$ (ρ_w 为水的密度, g 为重力加

速度);同时从屈曲观点近似给出破损曲线 $C = 348/H^{1/3}$,并认为拱坝坝体的安全性一般是由强度控制的,只有当坝体采用高强度混凝土,使强度破损曲线抬高、接近或超过稳定破损曲线的情况下,才由屈曲失稳控制。

黄朝煊^[6]考虑坝高、河谷宽高比等对柔度系数的影响,通过数值分析得到薄高拱坝底厚建议公式,虽然该公式考虑了拱坝纵断面形状的影响,但计算稍显复杂,并认为拱坝柔度系数与河谷形状、宽高比、坝高等因素密切相关。拱坝的宽高比太大或太小都将导致坝体拱梁受力分配的失调,导致坝体应力过度集中,不利于坝体的安全。

饶宏铃^[7]认为,现行规范(指 SL 282—2003《混凝土拱坝设计规范》、SD145—85《混凝土拱坝设计规范(试行)》)仅考虑厚高比来划分拱坝的厚薄,实际上仅从悬臂梁的刚度出发,没有考虑拱圈作用,不能反映拱坝受力情况。

徐福卫等^[8]考虑河谷的宽高比影响,利用河谷宽高比与拱坝柔度系数的关系得出了拱坝柔度系数的分区图,认为文献[5]的强度破损曲线相对龙巴迪强度破损曲线有了一定的进步,但文献[5]的强度破损曲线只考虑混凝土的抗压强度,而实际工程中拱坝破坏基本上是因为拉应力或剪应力过大而破坏,认为文献[5]的强度破损曲线的合理性也值得商榷。

基于此,本文依据《手册》中的国内外大量已建拱坝的参数,对高拱坝厚高比、底厚建议值等问题进行探讨。

1 高拱坝厚高比的影响因素分析

潘家铮院士在《特高拱坝枢纽分析与重点问题研究》^[9]一书的序言中认为,拱坝的安全性与其存在非线性关系,即同样 200 m 高的拱坝整体安全,若将坝体结构外形尺寸均同步放大 2 倍后,变成 400 m 高的拱坝后就不一定安全,因此拱坝的厚高比与坝高存在非线性增函数关系。

弧高比对拱坝厚高比的影响也较大,拱坝的弧高比越大,其拱的作用效果就越弱,由悬臂梁分担的荷载就越大。因此,拱坝厚高比与拱坝的弧高比存在增函数关系。

此外,拱坝坝址河谷形状越接近 U 形,悬臂梁分担的荷载就越大,拱坝的厚高比也越大。而河谷两岸岩基的地质状况、河谷形状的对称性等也是影响拱坝厚高比的重要因素。

由于拱坝厚高比涉及影响因素多而复杂,本文考虑其中主要因素如坝高的非线性影响、弧高比的影响以及河谷形状的影响,近似给出拱坝厚高比的经验关系式:

$$\frac{T}{H} = k_0 H^a F_{L/H} f_{\mu} \tag{1}$$

式中: T 为拱坝底厚; H 为拱坝坝高; k_0 为河谷两岸岩基的地质状况、河谷形状的对称性等其他因素对拱坝厚高比影响的修正系数,在河谷两岸岩基的地质状况较差、河谷形状不对称等不利因素影响下, $k_0 > 1$,具体可参考工程实例; a 为待定参数,是坝高对厚高比的影响幂次,可通过统计回归分析法择优选取, $a \geq 0$; $F_{L/H}$ 为弧高比对厚高比的影响函数,本文分别采用线性回归和抛物线回归分析,依据相关系数择优选取; f_{μ} 为拱坝坝址处的河谷形状(U形、V形)对厚高比的影响系数。

由于拱坝实际厚高比的选取涉及影响因素多且复杂,如工程地质条件(两岸及坝基的断层与节理等)、河谷断面形状、坝址处地震状况、坝基渗流状况等,因此,本文通过对已建拱坝资料(表 1,取自《手

册》))进行统计回归分析,得出拱坝坝高、弧高比等主要因素对拱坝厚高比的影响关系。

为了分析待定参数 a ,暂取 $k_0 = 1.0$ 和 $f_{\mu} = 1.0$,分析参数 $a = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 时的厚高比与弧高比的最优回归分析公式,并实际工程底厚进行误差比较分析。通过对表 1 中已建拱坝数据分析,得到参数 $a = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 时线性回归分析、抛物线回归分析的相关系数见图 1,可知当 $a = 0.3$ 并采用抛物线回归分析时相关系数最大,因此 $a = 0.3$ 时拟合得到的厚高比最接近实际工程,故可取 $a = 0.3$,此时相应弧高比对拱坝厚高比的影响函数为

$F_{L/H} = 0.0033 \left(\frac{L}{H}\right)^2 - 0.0016 \frac{L}{H} + 0.0254 \pm 0.0115$,弧高比对拱坝厚高比影响(扣除坝高非线性影响后)与实际工程之间的关系见图 2。图 2 中实际工程参数在拟合线上方表明该工程厚高比可能由于地质状况、河谷对称性、设计偏保守等因素影响取值偏大,在拟合线下方表明设计厚高比偏小,如科尔布莱恩拱坝发生开裂破坏^[3-4,6],该点位于拟合曲线的最下方。

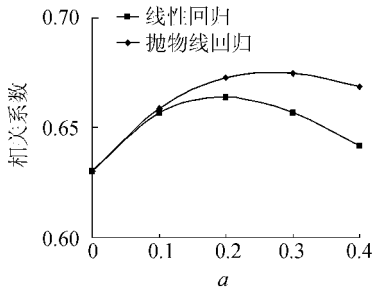


图 1 参数 a 不同取值时厚高比回归分析相关系数

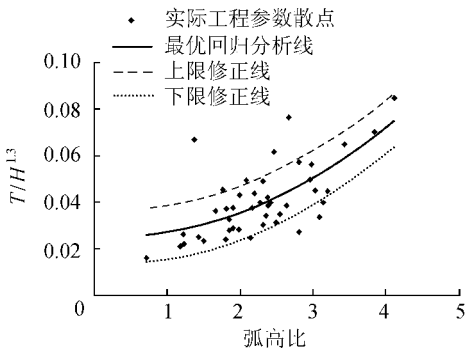


图 2 弧高比对厚高比的影响($a = 0.3$)
参考文献[6]中拱坝坝址河谷形状(U形、V形)对厚高比的影响系数,可取参数 $f_{\mu} = 0.9(1 + \mu)$,结合式(1)可知拱坝厚高比近似为

$$\frac{T}{H} = k_0 H^{0.3} \left[0.0033 \left(\frac{L}{H}\right)^2 - 0.0016 \frac{L}{H} + 0.0254 \pm S \right] [0.9(1 + \mu)] \tag{2}$$

式中: L 为坝顶弧长; μ 为度量河谷形状的参数,即

表 1 世界上已建拱坝参数及底厚计算值比较

名 称	坝 型	坝高 <i>H</i> /m	弧高比 <i>L</i> / <i>H</i>	底厚 <i>T</i> /m	式(3)底厚计算值/m		式(5)底厚计算值/m	
					回归值	修正范围(±)	回归值	修正范围(±)
锦屏一级	抛物双曲拱坝	305.0	1.811	63.0	49.9	18.7	56.5	19.5
小 湾	抛物双曲拱坝	294.5	3.032	72.9	69.4	18.0	82.5	18.6
溪洛渡	抛物双曲拱坝	285.5	2.387	60.0	56.4	17.5	62.9	17.9
拉西瓦	对数双曲拱坝	250.0	1.903	49.0	42.3	15.3	44.9	15.1
二 滩	抛物双曲拱坝	240.0	3.204	55.7	59.0	14.7	67.3	14.3
构皮滩	抛物双曲拱坝	232.5	2.377	50.3	45.8	14.2	48.0	13.7
大岗山	抛物双曲拱坝	210.0	2.964	52.0	48.6	12.9	51.9	12.0
李家峡	三心双曲拱坝	165.0	2.468	47.0	33.4	10.1	31.7	8.8
东 江	双曲拱坝	157.0	2.312	35.0	30.3	9.6	28.2	8.2
东 方	抛物双曲拱坝	153.0	1.663	25.0	23.7	9.4	22.0	8.0
英古里	双曲拱坝	271.5	2.357	50.0	53.2	16.6	58.3	16.8
瓦伊昂	双曲拱坝	265.5	0.718	22.7	26.3	16.2	36.8	16.3
莫瓦桑	双曲拱坝	237.0	2.194	53.5	44.1	14.5	46.2	14.1
契尔盖	双曲拱坝	232.5	1.432	30.0	32.9	14.2	35.6	13.7
康特拉	双曲拱坝	222.0	1.802	27.0	36.2	13.6	37.3	12.9
姆拉丁其	双曲拱坝	220.0	1.223	29.3	28.4	13.5	31.5	12.8
柳 冲	双曲拱坝	208.0	2.548	36.0	43.1	12.7	44.1	11.9
德 兹	双曲拱坝	203.5	1.179	21.0	25.7	12.5	28.2	11.5
阿尔门德拉	双曲拱坝	202.0	2.807	27.0	44.9	12.4	46.6	11.4
卡 隆 1	双曲拱坝	200.0	1.900	28.3	33.8	12.2	33.6	11.3
科尔布莱恩	双曲拱坝	200.0	3.095	33.0	47.9	12.2	51.0	11.3
黑部川第四	双曲拱坝	188.0	2.378	38.0	37.1	11.5	36.4	10.4
莫西罗克	双曲拱坝	184.7	1.995	38.1	32.2	11.3	31.2	10.2
卡拉杰	双曲拱坝	180.0	2.167	32.0	33.2	11.0	32.0	9.8
埃默索恩	双曲拱坝	180.0	2.417	34.0	35.9	11.0	34.9	9.8
伊迪基	双曲拱坝	170.7	2.142	19.8	31.3	10.4	29.6	9.2
维德拉鲁	双曲拱坝	166.0	1.849	25.0	27.5	10.2	25.9	8.8
卡博拉巴萨	双曲拱坝	163.5	1.853	21.0	27.2	10.0	25.5	8.7
斯贝盖里	双曲拱坝	156.5	1.227	15.8	20.2	9.6	20.2	8.2
勒佩尔	双曲拱坝	109.0	3.138	17.7	26.4	6.7	23.5	5.1
拉帕兰	双曲拱坝	106.0	2.642	16.5	22.5	6.5	19.0	4.9
邦达来	双曲拱坝	103.6	1.496	9.8	15.0	6.3	12.7	4.8
板 本	双曲拱坝	103.0	2.495	12.9	21.0	6.3	17.4	4.8
刀 利	双曲拱坝	101.0	2.272	16.0	19.3	6.2	15.6	4.6
汤伊索列芒	双曲拱坝	100.0	1.980	11.3	17.4	6.1	14.0	4.6
紧水滩	双曲拱坝	102.0	3.437	26.5	26.5	6.2	24.1	4.7
龙 首	双曲拱坝	80.0	1.760	13.5	12.9	4.9	9.8	3.4
泉 水	双曲拱坝	80.0	2.313	9.0	15.5	4.9	11.7	3.4
王屋山	双曲拱坝	77.3	1.365	19.0	10.6	4.7	8.4	3.3
里石门	双曲拱坝	74.3	2.806	15.5	16.5	4.5	12.7	3.1
溪流河	双曲拱坝	78.0	2.667	22.0	16.7	4.8	12.9	3.3
天堂山	双曲拱坝	72.0	4.122	22.0	21.6	4.4	19.4	3.0
流清河	双曲拱坝	68.0	2.982	13.6	15.8	4.2	12.1	2.8
丰 乐	双曲拱坝	54.0	3.841	12.5	15.3	3.3	12.1	2.1
上 标	双曲拱坝	50.7	2.083	8.1	9.1	3.1	6.0	1.9

理想拱坝底部弧长与顶部弧长之比,当为典型 U 形河谷时 $\mu = 1$,而为典型 V 形河谷时 $\mu = 0$,实际拱坝纵断面展开图是很不规则的,若已知拱坝纵断面展开面积 A ,则 μ 可近似取为 $\mu = \frac{2A}{HL} - 1$; S 为标准方差,取 0.0115。

通过比较知,《手册》中厚高比公式是式(2) $a = 0$ 时的特例。

2 由厚高比导出的拱坝底厚建议公式

《手册》拱坝底厚建议计算公式为

$$T = \left(0.0591 \frac{L}{H} + 0.0568 \pm 0.0612 \right) H \quad (3)$$

式中 : H 为拱冠梁的高度或坝高(《手册》中公式存在刊误)。

美国垦务局《拱坝设计》^[10] 建议拱坝底厚采用

以下近似公式：

$$T_B = \left[0.012HL_1L_2\left(\frac{H}{122}\right)^{\frac{H}{122}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中： L_1 为坝顶高程处拱端可利用基岩面河谷宽度； L_2 为拱冠梁底以上 $0.15H$ 处拱端可利用基岩面河谷宽度。

根据本文建议厚高比(式(2))，可得拱坝底厚经验公式为

$$T = k_0H^{1.3}\left[0.0033\left(\frac{L}{H}\right)^2 - 0.0016\frac{L}{H} + 0.0254 \pm S\right] [0.9(1 + \mu)] \quad (5)$$

其中标准方差 $S = 0.0115$ 。

对式(3)与式(5)进行计算比较分析(由于资料不全，暂取参数 $\mu = 0.1, k_0 = 1$)，结果列于表 1。由计算结果分析可知，式(5)比式(3)更接近实际设计值，说明式(5)稍优，且由图 1 可知式(5)的相关系数、标准方差等回归指标均优于式(3)，但在特高拱坝中必须考虑河谷两岸岩基的地质状况、河谷形状的对称性等其他因素对拱坝厚高比的修正。

通过计算，认为式(4)对坝高在 150 m 左右的拱坝有参考价值，但对于坝高在 300 m 左右的拱坝计算的建议底厚值太大，没有参考价值。

3 结 论

a. 回归分析表明：拱坝厚高比与 $H^{0.3}$ 成正比(此时相关系数最大)，且厚高比与弧高比呈增函数关系 给出了经验性的拱坝厚高比计算公式，进而给出了拱坝底厚建议公式(式(5))，可为实际工程设计提供方便。式(3)可视作式(2) $a = 0$ 且对弧高比线性回归分析时的特例。

b. 计算分析表明，式(5)比式(3)计算值更接近

实际设计值，并且式(5)的相关系数、标准方差等回归指标均优于式(3)，因此式(5)具有一定的参考价值，但在特高拱坝中需考虑地质条件等不利因素的修正系数 k_0 。而式(4)对于特高拱坝(> 250 m)建议底厚值太大，没有参考价值。

c. 由于拱坝实际厚高比的选取涉及影响因素多且复杂，如工程地质条件(两岸及坝基的断层与节理等)、河谷断面形状、坝址处地震状况、坝基渗流状况等，对大量已建拱坝资料进行统计回归分析，是寻求高拱坝厚高比的一种实用方法。

参考文献：

[1] 水利水电规划设计总院. 水工设计手册：第五卷[M]. 2 版. 北京：中国水利水电出版社，2011：109-170.

[2] LOMBARDI G. Klnbrein Dam：an unusual solution for an unusual problem[J]. Water Power & Dam Construction, 1991, (6) 31-34.

[3] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全 拱坝[M]. 北京：中国水利水电出版社，1995：203-207.

[4] 陈宗梁. 世界超级高坝[M]. 北京：中国电力出版社，1998：40-41.

[5] 任青文, 王柏乐. 关于拱坝柔度系数的讨论[J]. 河海大学学报：自然科学版, 2003, 31(1) 1-4.

[6] 黄朝煌. 薄高拱坝坝体屈曲稳定初探[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2011.

[7] 饶宏铃. 拱坝体形参数统计分析[J]. 水电站设计, 2004, 20(3) 1-5.

[8] 徐福卫, 田斌. 关于拱坝柔度系数的研究[J]. 人民长江, 2007, 38(11) 41-42.

[9] 李瓚, 陈飞, 郑建波, 等. 特高拱坝枢纽分析与重点问题研究[M]. 北京：中国电力出版社，2004.

[10] 美国垦务局. 拱坝设计[M]. 拱坝设计翻译组，译. 北京：水利电力出版社，1984.

(收稿日期：2011-12-09 编辑：熊水斌)

(上接第 40 页)

[3] 张俊云, 周德培. 厚层基材喷射植被护坡基材混合物的收缩恢复性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7) 1203-1208.

[4] 刘德荣, 马永林, 韩烈保, 等. 坡面液压喷播绿化草种及组合的筛选[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(2) 41-45.

[5] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2003(4) 38-41.

[6] 孙超, 许文年, 夏振尧, 等. 岩质边坡植被混凝土肥力时间变异性研究[J]. 中国水土保持, 2009(4) 32-34.

[7] YANG Jing, JIANG Guo-liang. Experimental study on

properties of pervious concrete pavement materials[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3) 381-386.

[8] 许文年, 夏振尧, 周宜红, 等. 植被混凝土无侧限抗压强度试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(4) 51-54.

[9] 项翥行. 建筑工程常用材料试验手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1998.

[10] 郑碧仿, 张俊云, 李绍才, 等. 岩石边坡植被护坡技术(4) 厚层基材基本特性研究[J]. 路基工程, 2001(3) 1-4.

[11] 周德培, 张俊云. 植被防护工程技术[M]. 北京：人民交通出版社，2003：15-26.

[12] 许文年, 叶建军, 周明涛, 等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术, 2004, 35(10) 50-52.

(收稿日期：2011-12-05 编辑：熊水斌)