

文章编号: 1000-4750(2014)05-0145-06

基于拱梁分载法的高薄拱坝 水平拱圈曲折稳定评价

李 慧, 王正中, 王 羿

(西北农林科技大学水利水电工程研究所, 陕西, 杨凌 712100)

摘 要: 该文针对深山峡谷中高拱坝半径较小且截面尺寸较大, 曲率和剪切变形对临界荷载的影响较为明显的特点, 基于大曲率深拱问题在拱坝中应用的理论和经典的拱梁分载理论, 对《拱坝抗曲折稳定分析再探》中的算例重新校核, 重新定义拱坝水平拱圈的抗曲折稳定系数, 并结合柔度系数绘制两者关系曲线, 更直观的判定水平拱圈的稳定性。结果表明: 对于拱坝的中上部, 拱圈起主要承载作用, 拱圈的稳定性较弱, 曲率和剪切变形的影响不明显, 容易发生失稳, 故在校核稳定时应当给予重视; 对于中下部, 拱圈的稳定性较强, 但剪切与曲率的影响较为明显, 并且剪切变形的影响大于曲率的影响; 高拱坝的柔度系数越大则拱圈曲折失稳范围越大, 柔度系数为10时坝高全范围拱圈将不曲折失稳。

关键词: 高薄拱坝; 曲折; 稳定分析; 柔度系数; 深拱

中图分类号: TV642.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.12.0948

BUCKLING STABILITY ANALYSIS OF HORIZONTAL ARCH RINGS OF HIGH-THIN ARCH DAMS BASED ON ARCH-CANTILEVER METHOD

LI Hui, WANG Zheng-zhong, WANG Yi

(Institute of Water Resources and Hydropower Engineering, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China.)

Abstract: High arch dams in canyon areas are normally featured with small radiuses and large cross-sections, and the curvature and shearing deformation of high arch dams impose great influence on the critical load. Based on the experience in analyzing high arch dams of large curvature and using the arch-cantilever method, this study re-examined the examples in "Further discussions on the stability of arch dams regarding elastic buckling". The buckling stability factor was reformulated, and its relationship with the slenderness coefficient of high arch dams was derived. Results show for the middle-upper part of high arch dams, arch rings bear a large portion of loads and are vulnerable to collapse. The influence of curvature and shear deformation is insignificant. On the other hand, for the middle-lower part, the stability condition is relatively better. The influence of curvature and shear deformation is noticeable, and that of shear deformation is greater than that of curvature. It is also noted that a bigger slenderness coefficient is associated with a bigger area of bulking instability of arch rings. A slenderness coefficient of 10 signifies no bulking collapse throughout the dam.

Key words: high-thin arch dam; buckling; stability analysis; slenderness coefficient; deep arch

随着筑坝技术的提高与结构优化设计及高强度混凝土的使用, 国内外相继出现了 300m 级的薄

高拱坝, 其屈曲稳定亟待从理论上研究。黄文熙^[1]提出壁厚过薄的坝体可能发生屈折稳定问题, 由于

收稿日期: 2012-12-13; 修改日期: 2013-03-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD10B02)

通讯作者: 王正中(1963—), 男, 陕西彬县人, 教授, 学士, 博导, 从事水工水力学研究(E-mail: wangzz0910@163.com).

作者简介: 李 慧(1987—), 女, 黑龙江牡丹江人, 硕士生, 从事水工结构安全评价研究(E-mail: lihui2210@yeah.net);

王 羿(1987—), 男, 山西长治人, 硕士生, 从事水工结构安全评价研究(E-mail: wangyimutou@126.com).

屈折引起的大变形所产生的局部裂缝,可能不断发展,导致坝体的全面崩塌,这种失稳方式就是所谓的拱坝屈折失稳,并给出两个校核拱坝抗曲折稳定的准则。目前高拱坝及超高拱坝的曲折稳定也越来越多受到专家学者的重视,王正中等^[2]基于夏桂云等^[3]提出的大曲率深拱平面弹性稳定的理论,将大曲率深拱问题引入到拱坝的抗曲折稳定分析中,考虑曲率和剪切变形对水平拱圈稳定的影响,并给出了水平拱圈临界荷载的计算公式,用水平拱圈的临界荷载极限承载力与水压强的比值作为评价指标,提出拱坝水平拱圈抗曲折系数的概念。但常规将拱坝简化成一种由水平拱段和竖向悬臂梁组成的网格结构,水荷载由水平拱圈和悬臂梁共同承担,故水平拱圈抗曲折系数应为水平拱圈的临界荷载和水平拱圈所分担的水荷载的比值为评价指标。

拱坝屈曲失稳应该与其形体特征联系起来,Lombardi G^[4]针对 Kohlbrein 坝的事故,提出与高拱坝形体有关的经验性的柔度系数概念来分析拱坝的曲折失稳。朱伯芳^[5]、任青文等针对柔度系数提出了不同的见解,分别提出了应力水平系数、安全水平系数等概念来评价拱坝的安全,这些成果从坝体的形状和地基强度等方面对高拱坝安全设计和评价的依据进行了探索。

该文基于拱梁分载法,将拱梁分载法的拱圈分荷与考虑大曲率和剪切变形情况下水平拱圈临界荷载联系起来,重新定义水平拱圈的抗曲折系数,并与 Lombardi G^[4]提出的柔度系数 $C = F^2 / VH$ 联系起来,从整体稳定的方面重新认识柔度系数。在此基础上,分析水平拱圈抗曲折稳定安全性具有实际意义。

1 大曲率圆弧深拱稳定理论在拱坝抗曲折稳定分析中的应用

1.1 基础公式

假定水平拱为一圆拱(如非圆弧,可近似地代以圆弧), R 为圆弧半径, t 为圆弧拱的厚度, α 为圆弧的半中心角,沿拱坝高度取 $b=1\text{m}$,即水平拱圈的截面尺寸为 $b \times t$,弧长 $l=2\alpha R$, k 为临界系数。

当既不考虑曲率影响,又不考虑剪切变形的影响,也就是说认为中性轴与截面的形心轴重合,其截面的抗弯惯性矩等于面积二阶矩,也就是最初 Timoshenko 和 Gere^[6]通过建立曲杆平衡方程推导出圆弧拱在径向均布荷载作用下的反对称失稳的

临界荷载公式(此时 $I=J_z$)。

$$q_{cr} = \frac{EI}{R^3}(k^2 - 1) \quad (1)$$

当不考虑剪切变形、只考虑曲率影响时,其截面抗弯惯性矩不等于面积二阶矩。矩形截面的抗弯惯性矩的计算公式为:

$$J_z = \int \frac{y^2 dA}{1 - y/R} = Rb^3 \ln \frac{2R+t}{2R-t} - R^2 bt \quad (2)$$

式(2)的精度受函数 $\ln(x)$ 的影响,当较大时,易出现精度不足的情况,采用下式的级数^[3]解:

$$J_z = \frac{bt^3}{12} \left[1 + \frac{3t^2}{5 \times 2^2 R^2} + \frac{3t^4}{7 \times 2^4 R^4} + \frac{3t^6}{9 \times 2^6 R^6} + \dots \right] \quad (3)$$

则临界荷载可表示为:

$$q_{cr} = \frac{EJ_z}{R^3}(k^2 - 1) \quad (4)$$

当不考虑曲率影响、考虑剪切变形影响的情况下,截面剪切修正系数 $\mu=5/6$ ^[3], G 为剪切模量, μG 体现了剪切变形对临界荷载的影响,水平拱圈的临界荷载(此时 $I=J_z$)。

$$q_{cr} = \frac{EI}{R^3}(k^2 - 1) \quad (5)$$

$$1 + \frac{EI}{R^2 mGA}(k^2 - 1)$$

当既考虑曲率变化又考虑剪切变化时的临界荷载:

$$q_{cr} = \frac{EJ_z}{R^3}(k^2 - 1) \quad (6)$$

$$1 + \frac{EJ_z}{R^2 mGA}(k^2 - 1)$$

1.2 临界系数 k 的计算

当坝体和坝肩岩体之间的连接方式是铰接情况下,两铰圆弧拱发生曲折失稳时的超越方程为:

$$\sin ka = 0 \quad (7)$$

由式(7)解得 $k=\pi/\alpha$ 。

当坝体和坝肩岩体之间的连接方式是固接情况下,无铰圆弧拱发生曲折失稳的超越方程为:

$$\tan(ka) = k \tan a \quad (8)$$

文献[2]中给出的迭代公式,可有如下结果。见表 1。

表 1 不同角度 α 下临界系数 k 的取值

Table 1 The value of k with different α

$\alpha(^{\circ})$	20	30	40	50	70
k	12.9001	8.6213	6.4905	5.2169	3.7784

将公式 $R=l/\alpha$ 和 J_z 数值代入式(1)、式(4)、式(5)、式(6), 可以对不同高程校核拱坝水平拱圈的曲折稳定性。

2 拱梁分载法^[7]

从坝顶到坝底选取 8 层拱圈, 令各划分点的序号为自坝顶 $i=1$ 至坝底 $i=8$, 各层拱圈之间取相等的距离 Δh , 拱圈高为 1m。

由拱冠梁的各层拱圈交点处径向变位一致条件可以列出方程组:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + d_i^v = (p_i - x_i) d_i + \Delta A_i \quad (9)$$

式中: p_i 为作用在第 i 层拱圈中截面高程的总水平荷载强度, 包括水压力及泥沙压力等; i 为拱圈层数, $i=1, 2, \dots, n$; x_i 为拱冠梁在第 i 层拱圈处分配承担的水平荷载强度, 则 $(p_i - x_i)$ 为第 i 层拱圈分配承担的水平荷载强度; x_j 为拱冠梁 j 点所承受的水平荷载; j 为单位荷载作用点的序次; a_{ij} 为拱冠梁上 j 点的单位荷载在另一点 i 产生的径向变位, 称为梁的单位变位; d_i 为第 i 层水平拱圈在单位强度的均不荷载作用下, 在拱冠处产生的水平径向变位, 称为拱的单位变位; d_i^w 为拱冠梁第 i 层截面在铅直荷载作用下产生的水平径向变位; ΔA_i 为第 i 层拱圈由于均匀温度变化 t_m ($^{\circ}\text{C}$) 在拱冠处产生的径向变位。

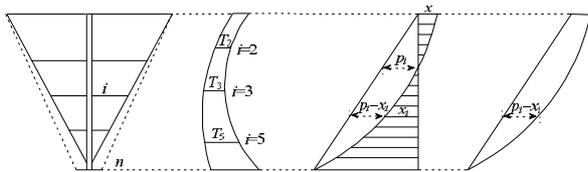


图 1 拱冠梁法荷载分配示意图

Fig.1 Load distribution of crown cantilever

3 算例^[8-16]

对文献[2]中的算例重新校核, 并添加柔度介于四个算例的最大值和最小值之间的奥本坝, 假定水位至坝顶, 选取不同高程处的水平拱圈进行分析。记不考虑曲率和剪切变形影响的临界荷载为 q_{cr1} ; 考虑曲率但不考虑剪切变形影响的临界荷载为 q_{cr2} ; 不考虑曲率但考虑剪切变形影响的临界荷载为 q_{cr3} ; 既考虑曲率又考虑剪切变形影响的临界荷载为 q_{cr4} ; 基于拱梁分载法算出的水平拱圈分荷为 q_a 。由于拱坝坝体和坝肩岩体之间的连接为弹性连接, 且缺少详细数据, 拱坝水平拱圈的两端介于铰支和固

支之间, 并且偏于固支, 只要铰支的计算结果是安全的则可以保证固支计算结果安全, 坝体就可满足水平拱圈抗曲折稳定的要求; 反之, 如果铰支的计算结果不安全, 则需要进一步校核固支情况, 并绘出铰接临界荷载 q_{cr} 和水平拱圈分荷 q_a 的比值表。理论上比值小于 1 说明水平拱圈极发生曲折失稳^[17], 但是对于混凝土脆性材料拱坝其曲折失稳会导致整体溃坝, 稳定安全系数应大于强度安全系数, 应在 5~5.5 以上^[18]。

算例 1. 加日拱坝位于法国中部高原伊尔河上, 最大坝高 41m, 坝顶长(不包括两岸边墩)142.95m, 坝的上游面呈圆筒形, 外半径 65m, 中心角 126° , 顶宽 1.3m, 拱冠底宽 2.57m, 厚高比 0.063, 柔度系数 50。基本参数的假定: 弹性模量 $E=15000\text{MPa}$, 热膨胀系数 $8 \times 10^{-6}/(^{\circ}\text{C})$, 混凝土与基岩弹性模量比为 4。1954 年开始蓄水, 但进入 1960 年坝体出现比较严重的开裂。

水平拱圈如按两铰拱处理, 拱圈曲折稳定安全系数如表 2。

表 2 加日拱坝不同高程处的 q_{cr}/q_a (两铰拱)

Table 2 The value of q_{cr}/q_a at different elevations of Cage arch dam (two-hinged arch)

高程/m	q_{cr1}/q_a	q_{cr2}/q_a	q_{cr3}/q_a	q_{cr4}/q_a
1004	1.6268	1.6271	1.6246	1.6249
998	1.8288	1.8291	1.8229	1.8232
992	2.0995	2.0998	2.0912	2.0915
981	6.0604	6.0613	6.0264	6.0274

水平拱按无铰拱处理, 如表 3。

表 3 加日拱坝不同高程处的 q_{cr}/q_a (无铰拱)

Table 3 The value of q_{cr}/q_a at different elevations of Cage arch dam (fixed arch)

高程/m	q_{cr1}/q_a	q_{cr2}/q_a	q_{cr3}/q_a	q_{cr4}/q_a
1004	3.9364	3.9371	3.9236	3.9242
998	2.3192	2.3196	2.3098	2.3102
992	2.6626	2.6630	2.6493	2.6497
9801	7.6858	7.6870	7.6313	7.6325

稳定安全系数应大于 5~5.5 以上为安全, 由上结果表明, 高程位于 1004m、998m、990m 处水平拱圈容易发生曲折失稳, 而文献[9]表明该坝在 1960 年的确在 980m~998m 张开水平裂缝。

算例 2. 托拉拱坝位于法国西嘉岛的普鲁内利河上, 是由柯恩设计的另一座双曲薄拱坝, 最大坝高是 90m, 坝顶弧长 120m, 坝顶上游面半径 71m, 顶厚 1.5m, 拱冠处最大厚度 2.43m, 厚高比仅为 0.03, 柔度系数为 50, 气温变化 $4.5^{\circ}\text{C} \sim 26.7^{\circ}\text{C}$ 。该坝于 1961 年

初次蓄水,在两岸近岸坡的坝体下游面,在高程525m~555m范围内发生了许多裂缝,大部分裂缝位于540m以上,裂缝形态顺岸坡呈周边缝形式。

水平拱圈按两铰拱处理,拱圈曲折稳定安全系数如表4。

表4 托拉拱坝不同高程处的 q_{cr}/q_a (两铰拱)

Table 4 The value of q_{cr}/q_a at different elevations of Tolla arch dam (two-hinged arch)

高程/m	q_{cr1}/q_a	q_{cr2}/q_a	q_{cr3}/q_a	q_{cr4}/q_a
550	1.9619	1.9620	1.9543	1.9533
537	1.7435	1.7436	1.7348	1.7333
525	1.3262	1.3264	1.3180	1.3166
500	6.0194	6.0225	5.8863	5.7708

水平拱圈按无铰拱处理,如表5。

表5 托拉拱坝不同高程处的 q_{cr}/q_a (无铰拱)

Table 5 The value of q_{cr}/q_a at different elevations of Tolla arch dam (fixed arch)

高程/m	q_{cr1}/q_a	q_{cr2}/q_a	q_{cr3}/q_a	q_{cr4}/q_a
550	4.3342	4.3347	4.2976	4.2917
537	3.8517	3.8520	3.8098	3.8022
525	2.9299	2.9304	2.8902	2.8826
500	13.2981	13.3050	12.6654	12.1358

由表4和表5可知,在525m处到550m处,稳定安全系数都偏小,是相对较为薄弱的部位,易发生曲折破坏,正如文献[13]中说到,托拉拱坝在540m高程处裂缝较为集中,校核结果与事实相符。

该托拉拱坝坝址的地基刚度很大,使悬臂梁的底部收到很大的约束不能产生转动,从而引起很大的拉应力,超出坝体混凝土的允许抗拉强度,上中部拱圈起主要的分荷作用,又由于托拉拱坝过于单薄,其柔度较大,易发生曲折失稳。

算例3. 奥本坝是位于美国西部加利福尼亚州阿美利坚河的支流北福克河上,宽V形河谷中的前倾双曲拱坝,大坝坝高209m,顶宽12.2m,坝底宽36m,该坝拱圈采用三心圆,柔度系数为21.4。

水平拱圈按两铰拱处理,拱圈曲折稳定安全系数如表6。

表6 奥本拱坝不同高程处的 q_{cr}/q_a (两铰拱)

Table 6 The value of q_{cr}/q_a at different elevations of Auburn arch dam (two-hinged arch)

高程/m	q_{cr1}/q_a	q_{cr2}/q_a	q_{cr3}/q_a	q_{cr4}/q_a
346	3.6343	3.6347	3.6080	3.6085
316	4.3696	4.3707	4.3202	4.3213
286	7.4536	7.4573	7.3323	7.3358
256	15.6002	15.6138	15.1803	15.1932

水平拱圈按无铰拱处理,如表7。

表7 奥本拱坝不同高程处的 q_{cr}/q_a (无铰拱)

Table 7 The value of q_{cr}/q_a at different elevations of Auburn arch dam (fixed arch)

高程/m	q_{cr1}/q_a	q_{cr2}/q_a	q_{cr3}/q_a	q_{cr4}/q_a
346	7.7632	7.7642	7.6445	7.6455
316	9.4604	9.4628	9.2320	9.2342
286	16.9959	17.0044	16.3781	16.3859
256	34.2775	34.3073	32.3137	32.3402

奥本坝是一座建在宽V形河谷中的特高拱坝,大坝弧高比为5.82,大坝设计的非常薄,坝体的整体曲折稳定就要给予足够的重视。从表6与表7结果表明,在拱坝的中上部,容易发生曲折失稳。

算例4. 溪洛渡拱坝位于四川省雷波县和云南省永善县境,抛物线型双曲拱,河谷形状U型,最大坝高278m,拱冠厚度14m,拱底厚69m,厚高比0.248,最大中心角96.2°,坝顶弧长710m,柔度系数11.7,目前运行良好。

水平拱圈按两铰拱处理,拱圈曲折稳定安全系数如表8。

表8 溪洛渡拱坝不同高程处的 q_{cr}/q_a

Table 8 The value of q_{cr}/q_a at different elevations of Xiluodu arch dam

高程/m	q_{cr1}/q_a	q_{cr2}/q_a	q_{cr3}/q_a	q_{cr4}/q_a
610	6.7869	6.78934	6.7501	6.7525
570	28.1571	28.2030	27.0383	27.0805
530	66.7866	67.0601	60.4209	60.6445
490	141.9030	142.9766	117.1748	117.9060

算例5. 拉西瓦枢纽坝址位于龙羊峡谷出口上游4.5km的石门处。坝型为对数螺旋线双曲拱坝,坝高250m,河谷形状V型,拱冠顶厚为10m,拱冠底厚49m,最大中心角92.4°,厚高比为0.196,柔度系数为10.0,目前运行良好。

水平拱圈按两铰拱处理,拱圈曲折稳定安全系数如表9。

表9 拉西瓦拱坝不同高程处的 q_{cr}/q_a

Table 9 The value of q_{cr}/q_a at different elevations of Laxiwa arch dam

高程/m	q_{cr1}/q_a	q_{cr2}/q_a	q_{cr3}/q_a	q_{cr4}/q_a
2460	10.7826	10.7861	10.6648	10.6682
2424	43.4412	43.5040	41.1358	41.1921
2388	87.5646	87.8166	77.5421	77.7397
2352	166.1302	167.0292	133.9566	134.5405

由上述校核结果表明,稳定安全系数大于10,两个拱坝均满足水平拱圈曲折稳定的要求。

以上五个拱坝的校核结果表明,坝顶厚度在满足交通要求的情况,坝顶一般不会出现曲折失稳,

但坝体上部拱圈曲折稳定安全系数较低；在拱坝中上部，如失事的两个拱坝中最大中心角也在坝高的中上部，此处的水平拱圈的弧长较大，拱厚较小，拱圈曲折失稳集中在坝高的中上部，导致临界荷载较小，容易发生曲折失稳，加日和托拉属于大柔度薄拱坝，截面尺寸变化不大，曲率和剪切变形的影响不明显；在拱坝中下部，如溪洛渡和拉西瓦超高拱坝，拱厚较大，相对临界荷载较大，不容易发生曲折失稳，截面积较大，符合文献[3]中所述的大曲率深拱问题，曲率和剪切变形影响较为明显，且剪切变形对拱坝稳定影响大于曲率的影响。

4 拱坝柔度系数和拱圈曲折稳定系数的关系

根据文献[5,15]，给出 5 个算例的柔度系数，结合文中算出的屈曲稳定系数，横坐标为屈曲稳定系数，纵坐标为相对坝高，即距离坝踵的位置与坝高的比值，在坝顶为 1.0，如图 2。

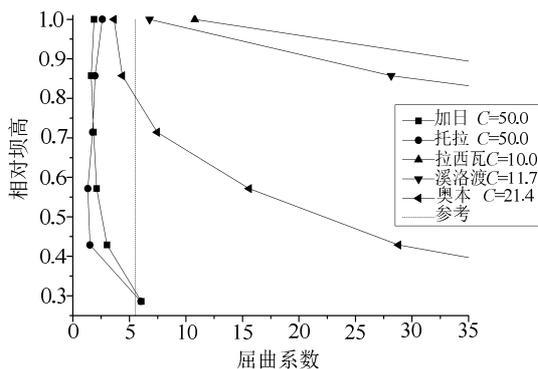


图 2 柔度系数与屈曲系数关系

Fig.2 Relationship of slenderness coefficient and buckling coefficient

由图 2 可以看出以屈曲系数 5.5 为分界，左边为破坏区，右边为安全区。屈曲系数大于 5.5 均为安全，在柔度系数较大，坝体过于单薄，在坝体的中上部易发生曲折失稳，在坝体的下部，由于悬臂梁的作用越来越明显，分担的水荷载要比拱荷载大，拱圈较为稳定。

进一步由图 3 分析拱坝柔度系数和拱圈曲折稳定系数的关系可以看出，高拱坝的柔度系数为 50 时将有 70% 的坝高范围拱圈曲折失稳，柔度系数为 21 时将有 20% 的坝高范围拱圈曲折失稳，柔度系数为 10 时坝高全范围拱圈将不曲折失稳。

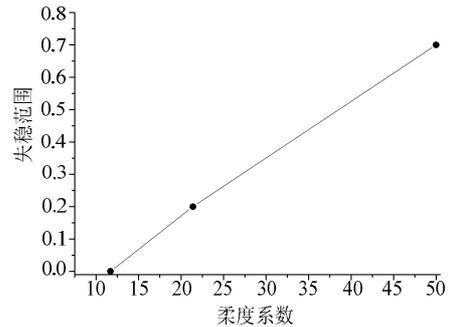


图 3 失稳区范围与柔度关系

Fig.3 Relationship of slenderness coefficient and instability range

5 结论

该文根据大曲率深拱理论引入的拱坝的抗曲折稳定公式，计算出在不考虑曲率和剪切变形影响、考虑曲率但不考虑剪切变形影响、不考虑曲率但考虑剪切变形影响、既考虑曲率又考虑剪切变形影响的四种情况拱圈曲折稳定临界荷载，并与经典的拱梁分载法的拱圈分载进行比较，重新校核文献[2]中的 4 个算例，评价了薄高拱坝曲折稳定性。得出结论如下：

(1) 文中算例 4、算例 5 中 200m 级高拱坝坝顶宽度在 10m 以上，当坝顶满足交通要求的前提下，由于坝顶水压强较小，一般不会发生曲折失稳，但坝体上部拱圈曲折稳定安全系数较低；所以要保证一定的坝顶厚度，拱坝设计规范中给出，国内的拱坝的坝顶厚度一般多在 3m~8m。

(2) 坝体的最大中心角在坝体高程的中上部，此处水平拱圈的弧长较大，水平拱圈的曲率和拱厚较小，临界荷载较小，容易发生曲折失稳。

(3) 高拱坝的建设多在峡谷中，坝体体型多属于深 V 形或 U 形，坝体中下部，半径较小、截面尺寸变化较大，在校核中应当按大曲率深拱考虑。

(4) 理论上水平抗曲折稳定系数比值小于 1 说明水平拱圈发生曲折失稳，但是对于混凝土脆性材料拱坝其曲折失稳会导致整体溃坝，稳定安全系数应大于强度安全系数，参考相关规范取 5.5 较为合适，按此评价算例 1、算例 2 拱坝失事原因应是曲折失稳所致。

(5) 由拱坝柔度系数与拱圈曲折稳定系数的关系可以看出，高拱坝的柔度系数越大则拱圈曲折失稳范围越大，柔度系数为 10 时坝高全范围拱圈将不曲折失稳。

(6) 建议在计算简图为两端铰支的情况下, 安全系数为 5.5 时, 此时破坏范围为 20%, 认为此时拱坝发生曲折失稳, 此时的拱坝的整体柔度系数为 20。

参考文献:

- [1] 黄文熙. 拱坝抗屈折稳定初探[J]. 水利学报, 1995, 9(9): 1—4.
Huang Wenxi. Preliminary studies on the stability of arch dam against elastic buckling [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 9(9): 1—4. (in Chinese)
- [2] 王正中, 刘计良. 拱坝抗曲折稳定再探[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 147—153.
Wang Zhengzhong, Liu Jiliang. Further discussions on the stability of arch dam against elastic buckling [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(6): 147—153. (in Chinese)
- [3] 夏桂云, 李传习, 曾庆元. 大曲率圆弧深拱平面弹性稳定分析[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 145—149.
Xia Guiyun, Li Chuanxi, Zeng Qingyuan. In-plane elastic buckling analysis of circular arch considering influences of curvature and shear deformation [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 145—149. (in Chinese)
- [4] Lombardi G, Kohlbrein Dam. An unusual solution for an unusual problem [J]. Water Power and Dam Construction, 1991, 6(43): 31—34.
- [5] 朱伯芳. 混凝土拱坝的应力水平系数与安全水平系数[J]. 水利水电技术, 2000, 31(8): 1—3.
Zhu Bofang. Stress level coefficient and safety level factor of concrete arch dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000, 31(8): 1—3. (in Chinese)
- [6] Timosheko S P, Gere J M. Theory of elastic stability [M]. New York: McGraw-Hill Book Company Inc, 1961: 278—313.
- [7] 林继镛. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 168—173.
Lin Jiyong. Hydraulic structure [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 2008: 168—173. (in Chinese)
- [8] 刘华丽, 彭辉. 基于多拱梁分载法的高拱坝应力分析[J]. 云南水力发电, 2009, 25(3): 26—29.
Liu Huali, Peng Hui. The multiple arch-cantilever safety-base high arch dam stress analysis [J]. Yunnan Water Power. 2009, 25(3): 26—29. (in Chinese)
- [9] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995: 53—57.
Ru Naihua, Jiang Zhongsheng. Arch dams accident and safety of large dams [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1995: 53—57. (in Chinese)
- [10] 姚栓喜, 李蒲健. 黄河拉西瓦双曲拱坝坝型优化设计[C]. 昆明: 水电 2006 国际研讨会论文集, 2006: 194—205.
Yao Shuanxi, Li Pujian. Optimization design of double-curvature arch dam body in laxiwa yellow river [C]. Kunming: International Symposium on Hydroelectric Power in 2006, 2006: 194—205. (in Chinese)
- [11] 周秋景, 张国新. 拱坝极限承载力影响因素及安全评价体系研究[C]. 上海: 第三届全国水工岩石力学学术会议论文集, 2010: 353—356.
Zhou Qiujing, Zhang Guoxin. Studies on arch dam of factors affecting the ultimate bearing capacity and safety assessment system [C]. Shanghai: The Third National Academic Conference on Hydraulic Engineering Rock Mechanics Symposium, 2010: 353—356. (in Chinese)
- [12] 黄岩松, 周维垣, 杨若琼, 沈大利. 拉西瓦拱坝稳定性分析和评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 901—905.
Huang Yansong, Zhou Weiyuan, Yang Ruoqiong, Shen Dali. Stability analysis and evaluation of laxiwa arch dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 901—905. (in Chinese)
- [13] 黄岩松, 周维垣, 陈新. 拉西瓦双曲拱坝整体稳定分析[J]. 岩石力学和工程学报, 2002, 21(2): 2413—2417.
Huang Yansong, Zhou Weiyuan, Chen Xin. Analysis on stability in the large of laxiwa hyperbolic arch dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 2413—2417. (in Chinese)
- [14] 姚栓喜, 李蒲健, 雷丽萍. 拉西瓦水电站混凝土双曲拱坝设计[J]. 水力发电, 2007, 33(11): 30—33.
Yao Shuanxi, Li Pujian, Lei Liping. Desing of double curvature arch dam of the laxiwa hydroelectric project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 33(11): 30—33. (in Chinese)
- [15] 李瓚, 陈飞, 郑健波. 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: 57—71, 103—147, 612—638.
Li Zan, Chen Fei, Zheng Jianbo. Analysis and studies on project and major technical issues of surper-high arch dams [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 57—71, 103—147, 612—638. (in Chinese)
- [16] 任青文, 王伯乐. 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.
Ren Qingwen, Wang Bole. Discussion on slenderness coefficient of arch dams [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2003, 31(1): 1—4. (in Chinese)
- [17] 范钦珊, 薛克宗, 王波. 工程力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 329—333.
Fan Qinshan, Xue Kezong, Wang Bo. Tutorial of engineering mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998: 329—333. (in Chinese)
- [18] DL/T 5346, 混凝土拱坝设计规范[S]. 2006.9.
DL/T 5346, Specifications of concrete arch dam design [S]. 2006.9. (in Chinese)