

关于拱坝柔度系数的讨论

任青文¹,王柏乐²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098 ;2.国家电力公司水电水利规划设计总院,北京 100011)

摘要 针对以往认为龙巴迪破损曲线是只与坝高有关的直线,没有将它与拱坝的安全性指标直接联系起来这一情况,从混凝土坝体的强度和屈曲稳定出发,得出两类曲线:一类与坝体混凝土的强度有关,是一簇以坝体混凝土强度为参数的双曲线;另一类与坝体的屈曲稳定有关,是一条指数曲线。
关键词 拱坝;柔度系数;龙巴迪破损曲线

中图分类号:TV642.4;TU311.2 文献标识码:A 文章编号:1000-198X(2003)01-0001-04

奥地利科恩布赖双曲拱坝,高 200 m,坝顶长 626 m,厚 7.6 m,坝底厚 36 m,1977 年建成。在 1978 ~ 1983 年首次蓄水过程中,最高坝段的坝踵和下游面底部均出现裂缝、漏水和扬压力增大直到全水头的现象。对于这一事故及事故发生后的处理,从 1978 年开始到 1994 年结束,历时长达 15 年。不少坝工专家参与研究和讨论,其结论虽各有侧重并不一致,但都认为该坝的坝址河谷宽阔和坝体太薄。瑞士坝工专家龙巴迪在研究这一问题的基础上,于 1986 年提出柔度系数的概念^[1]。他通过对一批已建拱坝的数据统计,认为柔度系数在 15 左右可保证拱坝不开裂,其极限值为 20。并绘制了已建拱坝的高度与柔度系数的分布统计图。此后,其他一些坝工专家也对此进行了研究,逐步增加了统计点。所有这类图内,都有一条直线,是用来区分拱坝是否能够安全运行的分界线,可称之为龙巴迪破损曲线^[2]。对于这条破损线的形状和合理性,研究的成果不多,本文将根据坝体的强度和屈曲稳定从理论上进行探讨。

1 存在的问题

Lombardi 柔度系数 C 被定义为

$$C = \frac{F^2}{VH} \tag{1}$$

式中: F ——拱坝中剖面展开后的面积; V ——拱坝的体积; H ——拱坝的最大高度。

图 1 和表 1 给出国内外 38 座已建和拟建拱坝的龙巴迪柔度系数随高度的分布情况。可以看出,大部分

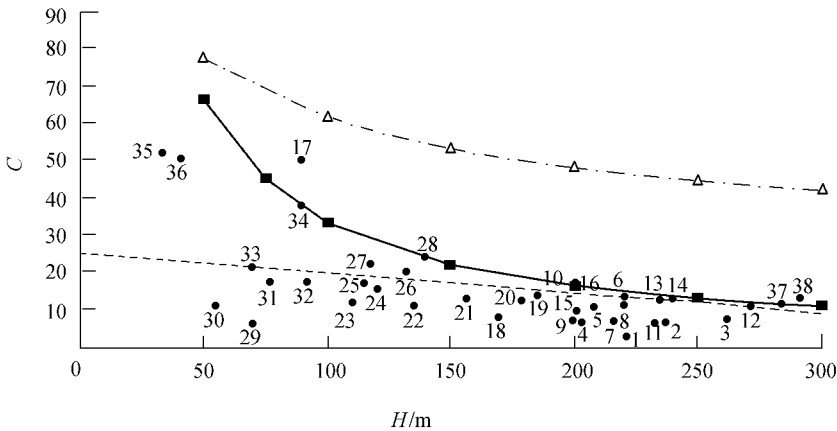


图 1 拱坝坝高与柔度系数的分布

Fig.1 Slenderness coefficient vs. dam height

拱坝的柔度系数在 10~20 之间. 图中的虚线是龙巴迪建议的破损线,用于对拱坝是否发生开裂破坏进行经验性判别,其方程为

$$C = 25 - 0.05H$$

(2)

龙巴迪认为凡是坝高和柔度系数落在这条直线以上,也就是实际柔度系数大于按式(2)计算值的拱坝,发生开裂破坏的可能性都很大. 这样,在该线位置以上那些点所代表的拱坝,如奥地利的科恩布赖,法国的托拉、加日,美国的罗斯等 10 座拱坝将发生开裂破坏. 瑞士的康特拉,前苏联的英古里,洪都拉斯的埃尔卡洪,中国的二滩等 4 座拱坝也处于破坏的边缘. 但实际上,仅科恩布赖、托拉等拱坝因坝体过于单薄引起比较严重的破坏. 此外,拱坝的破坏应与坝体混凝土的强度有关,即使强度没有问题,也存在屈曲失稳的可能性,特别是对于高拱坝. 而这些都没有在式(2)中得到反映,说明这条破损线的合理性值得商榷.

表 1 拱坝的坝高和柔度系数

Table 1 Height and slenderness coefficient of arch dams

序号	拱坝名称	坝高/m	柔度系数	序号	拱坝名称	坝高/m	柔度系数
1	Hoover	221	2.7	20	Emosson	178	13.0
2	Mauvoisin	237	7.0	21	Zeuzier	156	12.7
3	Vajont	262	7.5	22	Lumiei	136	10.8
4	Dez	203	7.05	23	Fort Buso	110	12.0
5	Luzzzone	208	10.8	24	Kops	120	15.3
6	Contra	220	14.0	25	Pieve di Cadore	112	17.0
7	Glen Canyon	216	7.1	26	Schlegeis	131	20.2
8	Mratinje	220	10.6	27	S. Maria	117	22.0
9	Kebir	200	7.2	28	Valle di Lei	140	24.0
10	Kolnbrein	200	17.7	29	Montagna Spaccata	70	6.0
11	Chirkey	232.5	7.1	30	Cecita	55	11.0
12	Inquri	271.5	11.3	31	Osiglietta	77	17.0
13	El Cajon	234	13.0	32	Val Gallina	92	17.4
14	二滩	240	13.3	33	Roggiasca	70	21.0
15	Berke	201	9.8	34	Les Toules	90	38.0
16	Ross	201.4	16.0	35	Stevenson	33	52.0
17	Tolla	90.0	50.0	36	Le Cage	41	50.0
18	Paute	170	7.7	37	溪洛渡	283	11.7
19	Ziller	185	14.3	38	小湾	292	13.4

2 龙巴迪曲线的合理表达式

2.1 强度表达式

以下从强度的观点研究破损线的形状. 根据式(1)有

$$C = \frac{F^2}{VH} = \frac{F}{H} \bigg/ \frac{V}{F} = \frac{B_m}{t_m}$$

(3)

式中: B_m ——拱坝中剖面展开后的平均宽度; t_m ——坝体的平均厚度; H ——拱坝高度(图2).

可以看出, C 相当于坝高一半处水平拱圈的周长与拱截面厚度之比,类似于压杆的柔度. 河床宽阔,岸坡平缓,会使 B_m 变大,单薄坝体的 t_m 小,从式(3)可知,此时 C 变大. 事实上,对于同样高度的坝,这都会增加坝体的应力而导致坝体的破坏. 而且,坝愈高,水压力愈大,愈容易引起拱坝的破坏.

一般来说,拱坝高度一半处水平拱圈的半中心角大约在 $45^\circ \sim 55^\circ$ 之间. 假定为圆拱,则 B_m 与平均拱圈半径 R_m 之间的关系是 $B_m = (1.57 \sim 1.92)R_m$,取平均值 $B_m = 1.7R_m$,由式(3)得

$$C = B_m/t_m \approx 1.7R_m/t_m$$

(4)

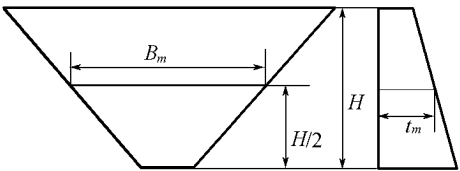


图 2 拱坝中剖面及拱冠梁断面
Fig.2 Mean developed fibre and crown cantilever of arch dam

由圆筒公式,该拱圈内的平均应力为

$$\sigma_m = pR_m/t_m \leq \sigma$$

式中: σ ——坝体混凝土的容许压应力; p ——作用在拱圈上的均匀压力,对于拱坝高度一半处水平拱圈, $p = \gamma_w H/2$,代回上式得

$$\frac{R_m}{t_m} \leq \frac{2\sigma}{\gamma_w H} \tag{5}$$

将式(5)代入式(4),则有

$$C \leq 3.4\sigma/(H\gamma_w)$$

可见,从强度来看, C 应满足上式,破损线的方程应当是

$$C = 3.4\sigma/(H\gamma_w) \tag{6}$$

根据式(6)求出 C 就是柔度系数的容许值.在 H, C 坐标系内,这是一条双曲线, H 越大,容许的 C 值越小.它在坐标系内的位置与混凝土的强度有关.不同拱坝所采用的混凝土标号一般不相同,高坝混凝土的标号较高.因此,龙巴迪强度破损线应当是以坝体混凝土强度为参数的一簇双曲线,图 1 中的实线是与坝体混凝土容许压应力 $\sigma = 10 \text{ MPa}$ 对应的破损线.由图可知,对于坝高大于 150 m 的高坝,这条破损线与式(2)表示的、龙巴迪建议的破损线比较接近.坝愈低,两者的差别愈大.

2.2 屈曲稳定表达式

如果考虑拱的屈曲稳定,还可以得到另一条曲线.对于受匀布压力的无铰圆拱,发生屈曲的临界压力可表示为^[3]

$$q_{cr} = \frac{EI}{R^3}(k^2 - 1) \tag{7}$$

式中: E ——材料的弹性模量; I ——拱圈断面的惯性矩; R ——拱圈的半径; k ——系数,其值与拱圈的半中心角 α 有关,由式(8)确定:

$$k \cdot \tan \alpha \cdot \cot k\alpha = 1 \tag{8}$$

对于坝高一半处的拱圈, $q_{cr} = 0.5\gamma_w H$, $I = t_m^3/12$,代入式(7)得

$$\frac{R_m}{t_m} \leq \sqrt[3]{\frac{E(k^2 - 1)}{6\gamma_w H}}$$

对于半中心角为 $45^\circ \sim 55^\circ$ 之间的圆拱, $k = 5.78 \sim 4.75$,平均可取 5.2,对于坝体混凝土,弹性模量 $E = 20 \text{ GPa}$; $\gamma_w = 1.0 \text{ t/m}^3$.代入上式,并引用式(4),可导出

$$C \leq B_m/t_m \approx 348/\sqrt[3]{H}$$

因而,从屈曲稳定的角度来看,破损线方程应为

$$C = 348/\sqrt[3]{H} \tag{9}$$

图 1 中的点划线表示这条屈曲稳定的破损线.可以看出,它远在强度破损线(图 1 中的实线)之上,这说明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,使强度破损线抬高接近或超过稳定破损线的情况下,才由屈曲稳定控制.

3 结 论

在以往的拱坝坝高与龙巴迪柔度系数分布图中,龙巴迪破损曲线是一条直线,既缺乏理论根据,也不能反映实际情况.本文分析表明,龙巴迪曲线应有以下两类:

从强度观点出发,龙巴迪破损曲线应该是一簇以坝体混凝土强度为参数的双曲线.也就是说,容许的龙巴迪系数不仅与坝高有关,而且与坝体混凝土强度有关.

根据拱坝坝体的屈曲稳定要求,容许的龙巴迪系数与拱圈的中心角、坝体混凝土的弹模和坝高等有关,龙巴迪破损曲线是一条指数曲线.

可见,拱坝坝体的安全性一般由强度控制,只有当坝体采用高强度混凝土,使坝体过于单薄,从而使强度破损线抬高接近或超过稳定破损线的情况下,才由屈曲稳定控制.

此外,从强度破损线可以看出,对于坝高小于 150 m 的拱坝,容许柔度系数随坝高的变化明显,其值也比较大,说明拱坝在体形优化过程中,容许体积有较大的变化,因此应以大坝的混凝土体积为优化的目标函数。而对于坝高大于 150 m 的高坝,容许柔度系数都比较小,企图通过体形优化使体积减小的余地不大,此时应同时以混凝土体积和坝体应力的改善为目标函数。

应当说明的是,本文的两类龙巴迪曲线是在拱圈为圆拱、拱座为刚性的假定下导出的。但实际拱坝是一个复杂的三维结构,不是二维的拱,不能只考虑拱的作用。而且,拱坝的拱曲线也不一定是圆。因此,位于这两类龙巴迪曲线之上的点所代表的拱坝也有可能安全运行,而落在曲线之下的点所代表的拱坝不一定不破坏。这些曲线只能大体上作为拱坝能否安全运行的经验判据。值得注意的是,这里所说的拱坝安全仅仅是指坝身的安全,不包括拱坝沿建基面和坝肩岩体的安全性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈宗梁.世界超级高坝[M].北京:中国电力出版社,1998.40—41.
- [3] 梁炳文,胡世光.弹塑性稳定理论[M].北京:国防工业出版社,1983.88—91.

Discussion on slenderness coefficient of arch dams

REN Qing-wen¹, WANG Bai-le²

- (1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
- 2. General Planning and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, State Power Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: In consideration of the fact that the Lombardi curve does not rely on any safety indexes of arch dams but is only related to the dam height, two types of curves are presented based on the concrete strength of arch dams and the buckling of arch rings: the one is a group of hyperbolas, characterized by the concrete strength of arch dams; the other is an exponential curve related to the buckling of arch rings.

Key words: arch dam; slenderness coefficient; Lombardi curve