

拱坝拱端推力与坝高的关系

周明军, 张建海

(四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要 通过对水压力进行曲面积分, 得到了左右岸体型对称双曲拱坝的水荷载与坝高的关系, 进而推求出拱端推力的求解公式, 并对国内若干工程进行了验证, 结果表明 拱端推力顺河向分量与坝高成 3 次方关系 横河向分量与坝高成 4 次方关系。

关键词 双曲拱坝 水荷载 坝高 拱端推力 坝肩稳定

中图分类号 :TV642.4+6 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2006)S1-0051-03

拱坝承受荷载后, 主要通过拱的结构作用传递到两岸基岩, 推力角对横河向拱端推力的 大小有贡献, 拱坝体型对坝肩岩体及拱座稳定的影响表现在拱坝传递到坝肩岩体的推力上, 因而确定拱端推力的 大小至关重要。

目前国内对拱端推力的研究取得了一系列成果 文献[1]从分析拱坝体型与坝肩稳定的关系出发, 对国内近 13 项工程资料进行计算, 量化拱端推力角 α 与拱坝柔度系数 $C = \frac{A^2}{VH}$ 、扁平度(中心角 2φ)及跨度 $\bar{L} = \frac{L_m}{H}$ (L_m 为最大弧长)的关系, 拟合得到拱端推力的表达式 文献[2]通过在拱形底板两端安装力传感器来实测动水荷载作用下的拱端推力大小, 然后对实验数据进行处理得到拱端推力大小的拟合公式, 并得到拱端推力是拱坝拱座稳定分析的控制性条件。 还有其他一些拱端推力的研究成果, 但对于拱坝设计和坝肩岩体及拱座稳定分析方面而言, 还没有统一的理论上能求解拱端推力的公式。

本文推导拱端推力理论计算公式时, 以左右岸体型对称双曲拱坝为研究对象, 在确定拱坝上游面曲线方程和拱端推力角与拱坝体型参数关系过程中, 以 $\frac{T_B}{H}$ (拱坝的厚高比)、 $\frac{L}{H}$ (拱坝的平均宽高比) 两者作为大坝体型的主要控制因数 假定影响拱端推力角 α 的主要体型参数取决于拱坝的最大弧高比值 $\beta(\beta = \frac{H}{L_m}, L_m$ 为最大弧长)。通过对水压力强度 γ_z (γ 为水的容重) 在上游面上的变化进行曲面积分, 得到水荷载与坝高的关系, 进而由力学分析推

求拱端推力的理论求解公式, 并应用国内一些工程来验证, 初步得到了一些坝肩推力的规律。

1 拱坝拱端推力力学分析

如图 1 所示, 拱坝在承受荷载后(主要是水推力), 坝体对坝肩岩体就会产生拱向推力, 设为 P' , 其在 xy 水平面的投影为 P , P 在垂直河流方向指向岸坡的分力设为 P_x , 顺河流方向指向下游的分力设为 P_y 。 它们有如下关系:

$$\begin{cases} P_x = P \sin \alpha \\ P_y = P \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

$$\quad \quad \quad (2)$$

P_y 为静定力, 它与水压荷载平衡; P_x 为超静定力, 其大小与两个方面的因数有关, 一是拱坝所受的总的水压力在水平面上的分力, 另外一个因数是拱端推力角 α 。 由力的平衡关系有:

$$F = 2P \cos \alpha = 2P_y \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)和式(2)可得

$$P_x = \frac{F}{2 \cos \alpha} \sin \alpha = \frac{F}{2} \tan \alpha \quad (4)$$

$$P_y = \frac{F}{2} \quad (5)$$

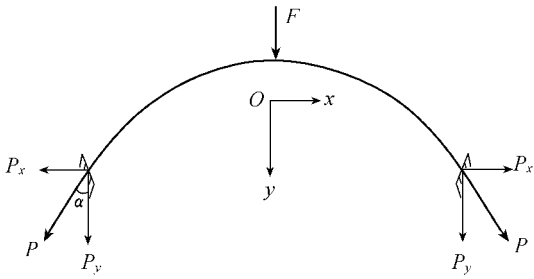


图 1 拱坝拱端推力平面示意图

由式(4)和式(5)可知,要得到 P_x, P_y 理论求解表达式,需求得总水压力 F 值和推力角对拱端推力大小的贡献。

2 总水压力 F 的确定

当河谷与坝肩开挖深度以及坝高、蓄水位确定后,拱坝所受的总水荷载即已确定。由于拱坝的上游面展开为一曲面,求 F 即是在确定上游面曲线方程基础上对水压力强度 γz 在曲面内进行积分。

2.1 拟定拱坝上游面曲线

如图 2 所示,对双曲拱坝,拱冠梁上游面曲线可用凸点与坝底高差 $Z_0 = \beta_1 H$ 、凸度 $\beta_2 = \frac{D_A}{H}$ 和最大倒悬度 $S(A, B$ 两点之间的水平距离与其高差之比)及坝底厚度 T_B 来描述^[3]。拟定这些参数的原则是 控制悬臂梁的自重拉应力不超过 0.5 MPa,对高坝还可以适当加大,并使坝体在正常荷载组合情况下具有良好的应力状态。坝的下部向上游倒悬,由自重 在坝踵产生的竖向压应力可抵消一部分由水压力产生的竖向拉应力,但倒悬度不宜太大,一般不超过 0.3^[3]。

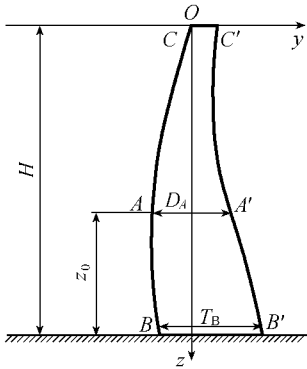


图 2 双曲拱坝纵剖面参数示意图

定出 A, B, C 这 3 点位置后,可由圆弧线或几段不同圆心和半径圆弧组成的曲线、二次抛物线,通过 3 点定出上游面曲线方程^[4]。

假定上游面为二次曲线,表示为

$$y = C_0 + C_1\left(\frac{z}{H}\right) + C_2\left(\frac{z}{H}\right)^2 \tag{6}$$

当 $z = 0, y = 0$; $z = \beta_1 H, \frac{dy}{dz} = 0$; $z = H, y = -\beta_2 T_B$,

代入式(6)有 : $C_1 = -\frac{2\beta_1\beta_2 T_B}{2\beta_1 - 1}, C_2 = \frac{\beta_2 T_B}{2\beta_1 - 1}$ 。得曲线方程为

$$y = -\frac{2\beta_1\beta_2 T_B}{2\beta_1 - 1}\left(\frac{z}{H}\right) + \frac{\beta_2 T_B}{2\beta_1 - 1}\left(\frac{z}{H}\right)^2 \tag{7}$$

2.2 F 与坝高 H 的关系

对于双曲拱坝,如图 3 所示 : x 方向指向河谷左岸(或者拱坝的右拱端), z 方向由坝顶指向坝基。

假设拱坝左、右岸对称,则在同一计算高程上,水压力强度沿拱冠弧线的积分等效于同一高程处沿拱冠弦长的积分 而在 Δh 高度方向上,为一沿上游面曲线的曲线积分,由于水压力强度 γz 随高度变化而变化,则在 Δh 高度上任意一点的积分在 z 方向上都有一力作用的余量 ΔF ,其效果是向上浮托拱坝。本文仅从理论上寻求总水压力与坝高的关系,因此考虑此部分作用力 ΔF 由拱坝自重来维持平衡,故在 Δh 高度上也只考虑垂直作用在上游面曲线上的水压力的作用。

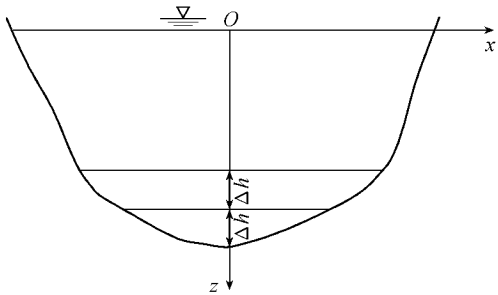


图 3 双曲拱坝横剖面示意图

令 $y = f(z)$, 定义 $0 \leq z \leq z_0$ 。由上游面曲线方程(7)有

$$dy = -\frac{2\beta_1\beta_2 T_B}{1 - 2\beta_1} \frac{dz}{H} + \frac{2\beta_2 T_B z}{1 - 2\beta_1} \frac{dz}{H^2} \tag{8}$$

又 $f'(z)$ 在 $[0, z]$ 上满足连续条件,由曲线积分方程有

$$\int_{C(A,B)} f(z, y) ds = \int_a^b f[z, y] \sqrt{1 + f'^2(z)} dz \tag{9}$$

则 F 可以由以下积分公式求得

$$\begin{aligned} F &= \iint f(z) dx ds = \int \left(\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \gamma z dx \right) ds = \int_0^{z_0} \gamma z L ds = \\ &= \int_0^{z_0} \gamma z L \sqrt{1 + \left[\frac{2\beta_2 T_B}{1 - 2\beta_1} \frac{z}{H^2} - \frac{2\beta_1\beta_2 T_B}{(1 - 2\beta_1)H} \right]^2} dz = \\ &= \int_0^{z_0} \gamma z L \sqrt{\left[\frac{2\beta_2 T_B}{(1 - 2\beta_1)H^2} \right]^2 z^2 - \frac{8\beta_1(\beta_2 T_B)^2}{(1 - 2\beta_1)^2} \frac{z}{H^3} + 1 + \left[\frac{2\beta_1\beta_2 T_B}{(1 - 2\beta_1)H} \right]^2} dz = \\ &= \int_0^{z_0} \gamma z (\bar{K} z) dz = \bar{K} \gamma H^3 \end{aligned} \tag{10}$$

式中 : z_0 为坝底到蓄水位高程之间的高差, m ; L 为两岸可利用基岩面间河谷宽度沿坝高的平均值, m ; T_B 为大坝的底厚, m, 其计算式为 : $T_B = 0.7 HL / [\sigma]$, 其中 $[\sigma]$ 为坝体混凝土的容许压应力, kPa ; $\bar{K}$ 为与大坝体型有关的系数, $\bar{K} = \frac{2\beta_2}{1 - 2\beta_1} \frac{T_B}{H} \frac{L}{H}$ ($\beta_1 = 0.3 \sim 0.4, \beta_2 = 0.15 \sim 0.2$), 其中, $\frac{T_B}{H}$ 为拱坝的厚高比, $\frac{L}{H}$ 为拱坝的平均宽高比, 以两者作为求解 F 与 H 关系

时大坝体型的主要控制因数。

3 拱端推力角 α 与体型参数的关系

根据国内已建工程经验及对弹性支承圆拱的研究分析,得到影响 α 的独立因数共有 3 个 中心角 φ , 拱厚 T 与半径 r 的比即相对厚度 T/r 及 E_r/E_c , 其中 E_r 为坝肩岩体变形模量, E_c 为混凝土弹性模量^[5]。

相关研究在考虑拱坝体型与拱端推力角的关系时,主要考虑了拱坝柔度系数 $C = \frac{A^2}{VH}$ 、扁平度(中心角 2φ)及跨度 $\bar{L} = \frac{L_m}{H}$ (L_m 为最大弧长)对拱端推力的贡献,通过对大量的工程实验数据进行拟合处理,得到拱端推力角与拱坝体型参数之间的关系,从而得到拱端推力的表达式^[1]。对于单位坝高等厚度圆拱圈而言,如图 1 所示:有 $\alpha = \tan^{-1} \frac{H_A}{V_A} - \varphi$, 其中 H_A, V_A 分别为所研究拱圈层拱端轴力和剪力^[5]。

本文在寻求推力角和拱坝体型参数关系时,假定影响 α 的主要体型参数取决于拱坝的最大弧高比值 $\beta \left(\beta = \frac{H}{L_m} \right)$ 。在 H 一定的情况下, L_m 变化引起中心角 2φ 变化,从而引起 α 的变化,伴随 2φ 的逐渐加大, α 逐渐偏向岸里达到一峰值 $\alpha_{\max}$, 超过此点, α 又逐渐转向岸边变小。这种变化是由于拱结构的特性,是合理的^[5]。因此认为在沿坝高方向上, α 本身对拱端推力的贡献表现为 H 的近似一次方关系,即有:

$$\tan \alpha = \frac{H_A}{V_A} - \tan \varphi = f(\varphi, C, L_m) = R \approx \beta \quad (11)$$

式中: R 是一个相关常数,它的求解依赖于拱坝体型参数的确定。对于这一点假定有待对具体工程作计算来验证。

4 拱端推力与坝高 H 的关系

通过以上分析,在已经求得的关系基础上,将式(10)和式(11)代入式(4)和式(5)即可得到拱端推力的理论求解表达式:

$$P_x = \frac{F}{2} \tan \alpha = \frac{1}{2} \bar{K} \gamma \frac{H^4}{L_m} \quad (12)$$

$$P_y = \frac{F}{2} = \frac{1}{2} \bar{K} \gamma H^3 \quad (13)$$

5 算例验证

利用式(12)和式(13)对国内近 9 座中高坝及高坝进行了拱端推力计算,结果如表 1 所示,其中溪洛渡为在建工程,其他为已建成投入使用的工程。表

中 P'_x, P'_y 为工程计算结果, P_x, P_y 为按照本文所推导的公式计算的结果。

表 1 工程计算结果与本文公式结果对比

坝 名	H/m	T_B/m	L_m/m	P'_x/GN	P'_y/GN	P_x/GN	P_y/GN
溪洛渡	278	69	698.3	20.83	68.57	26.59	72.50
二 滩	240	55.75	769.4	10.73	42.47	16.06	51.49
龙羊峡	175	80	371.2	2.93	11.24	9.19	19.47
东 江	157	35	437.6	3.10	8.89	4.32	12.04
李家峡	155	45	431.6	3.18	10.11	5.39	15.00
东 风	153	25	253.9	2.99	6.19	3.90	6.47
井水滩	102	24.61	346.9	0.54	3.88	1.28	4.35
井岗冲	92	24	274.6	0.51	2.02	1.01	3.03
石 门	88	27.26	252.4	0.03	2.07	1.07	3.07

注 表中参数来源于文献^[5]。

从表 1 中可以看出: P_x, P_y 在数值上比 P'_x, P'_y 偏大,其主要原因是本文只考虑了上游水荷载的作用,而未考虑下游水荷载对总水压力的部分抵消作用,其次,本文从纯拱理论出发认为水荷载完全由拱承担,而实际存在拱梁分载效应,因此算得的数值偏大。两者在数量级及规律上呈现一致性,表明对影响 α 的主要体型参数取决于拱坝的 β 的假定是正确的,推导结论可以用来计算拱端推力的大小,从而为拱坝坝肩稳定分析提供理论依据。

6 结 论

本文在仅考虑上游水荷载的情况下,得到拱端推力的理论求解表达式,基于以上分析,拱坝拱端推力对坝肩岩体及拱座稳定分析有以下规律可供参考:

- a. 顺河向静定力 P_y 与坝高 H 成 3 次方。由式(10)可以看出, F 与 H 的 3 次方成正比,而 P_y 与上游面展开面积 A 有关,故与 H 也成 3 次方关系。
- b. 横河向超静定力 P_x 与坝高 H 成 4 次方关系。由前面的分析可知, P_x 与总水压力 F 成正比,而 F 与 H 成 3 次方关系,故 P_x 与 H 有 3 次方关系;同时 P_x 与 α 有关,根据前面的推导, α 对 P_x 的贡献表现为 H 的近似一次方关系,所以, P_x 与 H 近似成 4 次方关系。

参考文献:

[1] 饶宏玲. 拱坝推力分析[J]. 水电站设计, 2001, 17(3): 7-19.
[2] 彭新民, 王继叙, 崔广涛. 拱坝水垫塘拱形底板受力稳定性实验研究[J]. 水力发电学报, 1992(2): 55-62.
[3] 祁庆和. 水工建筑物[M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 141-205.
[4] 高世宝. 拱坝几何参数的设计[J]. 农田水利与小水电, 1995(5): 14-176.
[5] 李瓚, 陈兴华, 王光纶. 混凝土拱坝设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 15-76.

(收稿日期: 2005-09-20 编辑: 熊水斌)