

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.032

等效应力在拱坝应力分析中的应用

杨珂, 钱丽云

(长江勘测规划设计研究院, 重庆 400016)

摘要: 拱坝应力分析方法大致可以分为拱梁分载法及有限元法两类。其中有限元法计算结果在近基础部位存在着明显的应力集中, 这对拱坝的应力评价带来了困难。基于 ANSYS 软件, 通过在模型中设置薄层单元, 并利用单元平衡条件计算基础部位的等效应力, 可以很好解决这一问题。计算结果表明, 工程实例的基础部位等效应力结果合理, 满足各工况条件下拱坝应力控制标准, 为工程设计提供了依据。

关键词: 拱坝; 应力分析; 有限单元法; 等效应力; 薄层单元

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0179-04

Application of Equivalent Stress Method in Analysis of Arch Dam Stress

YANG Ke, QIAN Liyun

(Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Chongqing 400016, China)

Abstract: The stress analysis methods of arch dams can be roughly classified into two categories which are arch-cantilever method and finite element method. When using finite element methods there is obvious stress concentration near the surface of foundation in the calculation results, which brings difficulties to the stress evaluation of arch dam. In this paper, based on ANSYS this problem was solved by setting thin layer elements in the model and calculating the equivalent stress of the foundation part under equilibrium of elements. The results indicate that the equivalent stress of the foundation of engineering examples is reasonable and can meet the stress control criteria of arch dam under different conditions, which provides a basis for engineering design.

Keywords: arch dam; stress analysis; finite element method; equivalent stress; thin layer element

拱坝是一种实体混凝土坝, 在平面上向上游弯曲, 以结构合理和体型优美而著称。而拱坝的应力变形是拱坝设计中十分重要的课题。

拱坝应力分析方法大致可以分为两类: 一类是拱梁分载法; 另一类方法是有限元法。

以结构力学方法为基础的拱梁分载法, 由于其设计理论成熟, 被广泛应用于拱坝设计, 且经过工程实际检验后, 采用该方法设计的拱坝都在保持正常运行。因此到目前为止, 拱坝体型设计仍以拱梁分载法为主要手段。

有限元法较拱梁分载法而言, 优势在于可以适应各种复杂条件下的应力应变分析, 并充分考虑拱坝与地基的共同受力和变形协调。

有限元法的计算结果与模型的单元形式划分有

较大关系, 且会在基础部位产生明显的应力集中。受这些因素的影响, 计算得出的拉应力有可能会超过了混凝土的抗拉强度, 因而很难直接作为确定拱坝体形的依据。在工程实际当中, 由于岩体本身存在裂隙, 并不是理想的连续介质, 所以在采用有限元法进行计算时, 出现在基础部位的应力集中现象并不一定符合实际。

为消除应力集中现象, 《混凝土拱坝设计规范》^[1](DL/T 5346—2006)提出了补充计算“有限元等效应力”, 这一规定为采用有限元法计算拱坝应力提供了基础。

本文基于 ANSYS 平台, 根据有限元法等效应力计算的原理与公式, 实现了拱坝的有限元等效应力计算^[2-3], 并应用于指导工程设计。

1 拱坝应力控制标准

拱坝的体型,尤其是坝体厚度主要受允许应力控制,因而采取的应力控制标准是否合理对拱坝的经济性和安全性十分重要。

采用拱梁分载法计算拱坝应力的标准十分成熟,在《混凝土拱坝设计规范》^[1](DL/T 5346—2006)上有明确的标准。

而有限元法的应力控制标准^[4],通常有以下三种^[2]:

(1) 根据拉应力值控制。在妥善解决模型当中应力集中问题的前提下,将等效处理后的拉应力值作为应力控制标准。

(2) 根据拉应力范围控制。在假定坝体混凝土处于弹性阶段,且不考虑坝体开裂的前提下,将受拉区面积占整个截面面积的比例作为控制指标。

(3) 根据开裂范围控制。计算时假定坝体混凝土只承受压应力,受拉区均视为开裂。通过非线性有限元计算,分析得出坝体的开裂范围,并以此作为控制指标。

目前,采取第(2)、(3)种方法作为控制指标存在一定的局限性,且在实际工程中应用的较少。因此,目前我国拱坝规范应力标准采用第(1)种方法拟定。

2 有限元等效应力计算原理

早在 20 世纪 80 年代,朱伯芳^[5-6]院士就提出了有限元等效应力的计算方法,傅作新等^[7]也提出了一种计算等效应力的方法,即在用弹性有限元法求得拱坝应力之后,假定坐标面上主应力分量沿坝体上下游方向线性分布,便可以通过等效应力法求得拱坝上下游面的各应力分量,然后根据微分体平衡条件求解拱坝上下游的主应力^[8]。

计算时首先用常规的有限单元法^[9] 求出各单元形心点的应力分量,然后用转轴公式求解局部坐标系中的应力分量 $\sigma_t, \sigma_z, \sigma_{zt}$, 其中 σ_z 不变,而

$$\sigma_t = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha \quad (1)$$

$$\tau_{tz} = \tau_{zx} \cos \alpha + \tau_{xy} \sin \alpha \quad (2)$$

式中: α 为拱轴线的切线与拱轴线的法线的交角,以逆时针为正。

以沿坝体上下游方向划分三个单元为例,三个单元形心点的梁应力 σ_z 分别记为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 则水平截面上的正应力可以用如下二次方程表示

$$\sigma(x) = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_2}{2} \right) x^2 + \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \right) x + \sigma_2$$

把上述正应力合成轴力 \bar{N} 和弯矩 \bar{M} , 可得

$$\bar{N} = \frac{9}{8}(\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_2) + 3\sigma_2 \quad (4)$$

$$\bar{M} = \frac{9}{8}(\sigma_3 - \sigma_1) \quad (5)$$

因此坝体上下游的等效应力为

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_d} = \frac{1}{3}(\bar{N} \mp 2\bar{M}) \quad (6)$$

同理可得 σ_z, τ_{zt} 的等效应力^[10]。

然后再根据微分体平衡条件,可以得出其他三个等效应力:

$$\bar{\tau}_{rz} = (p + \bar{\sigma}_z) \text{ctg} \theta \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}_r = -p + \bar{\tau}_{rz} \text{ctg} \theta \quad (8)$$

$$\bar{\tau}_{rt} = \bar{\tau}_{zt} \text{ctg} \theta \quad (9)$$

式中: p 为坝体表面水压力的强度,以压为正; θ 为坝面与拱轴线的法线的交角。

3 薄层单元的应用

拱坝坝基面附近的应力对单元尺寸极为敏感^[11],而该位置的应力又往往是拱坝体型的控制应力。因此,为了求得数值稳定的坝基面应力,傅作新建议在靠近坝基面的坝体中布置一层薄层单元。

由于薄层单元较薄(一般取坝高的 1/100 ~ 1/200),且单元各面间的夹角接近 90°,沿单元厚度的应力接近均匀,因此能够合理地表征坝基面上的应力状况。此外,薄层单元还可以给出更为准确的沿坝基方向的应力,例如如拱冠梁坝踵和坝趾的拱应力,以便在拱坝处于复杂应力状态条件下,更为准确的校核拱坝强度^[12]。

因此,合理应用薄层单元,可以有效的提高坝基面上应力的稳定性,并且得出更为准确的应力结果。

4 等效应力在计算中的应用

4.1 工程实例 1

某工程混凝土双曲拱坝水平拱圈形式为抛物线,坝顶高程 2 948.0 m,河床建基面高程为 2 660.0 m,最大坝高 288.0 m。

混凝土拱坝计算的范围为:基岩深度、基岩上下游长度、两岸山体厚度均取 1.5 倍坝高。坐标系以拱坝参考面与坝顶高程上游坝面的交点在高程为 0 的水平面上的投影点为原点,以坝顶高程所在平面与拱坝参考面交线为 y 轴, y 轴以指向上游为正方向;以过坐标系原点并垂直参考面的直线为 x 轴, x

轴以指向左岸为正方向;以通过原点的铅垂线为 z 轴, z 轴以铅直向上为正方向^[13-14]。

整个有限元计算模型单元划分示意如图 1 所示。

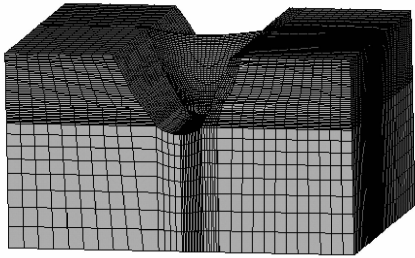


图 1 计算模型单元划分

各工况等效应力计算结果见表 1。

表 1 各工况应力值 单位:MPa

工况	最大主拉应力		最大主压应力	
	等效前	等效后	等效前	等效后
校核洪水位	3.88	1.26	-12.5	-8.07
设计洪水位	4.00	1.27	-12.6	-7.91
正常蓄水位	4.04	1.26	-12.6	-7.91

由计算结果可知,经等效处理后的坝体最大主拉应力均小于 1.5 MPa,最大主压应力均小于 10.0 MPa,满足拱坝应力控制标准。

4.2 工程实例 2

某工程混凝土双曲拱坝水平拱圈形式为抛物线,坝顶高程 3 256.0 m,河床建基面高程为 2 970.0 m,最大坝高 286.0 m。坝顶弧长 727.07 m,顶宽 12.0 m,最大底宽 69.98 m,厚高比 0.25,弧高比 2.5,最大中心角 93.5°。

混凝土拱坝计算的范围确定原则与工程实例 1 相同。

整个有限元计算模型单元划分示意如图 2 所示。

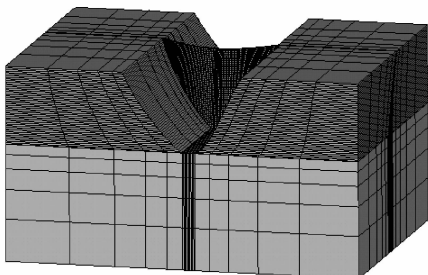


图 2 计算模型单元划分

各工况等效应力计算结果见表 2。

由计算结果可知,经等效处理后的坝体最大主

拉应力均小于 1.5 MPa,最大主压应力均小于 10.0 MPa,满足拱坝应力控制标准。

表 2 各工况应力值 单位:MPa

工况	最大主拉应力		最大主压应力	
	等效前	等效后	等效前	等效后
校核洪水位	3.27	1.24	-13.3	-9.66
设计洪水位	3.18	1.15	-13.1	-9.46
正常蓄水位	3.25	1.09	-13.0	-9.33

5 有限元等效应力与拱梁分载法计算结果对比

由于拱坝的控制应力一般发生在坝基面上,在此处,有限单元——等效应力通常大于试载法应力,增大约 10% ~ 20%^[9]。

下面就工程实例 1 和工程实例 2 的计算结果与一些国内工程的有限元等效应力和拱梁分载法应力结果进行对比^[10]。

工程实例 1 和工程实例 2 双曲拱坝的有限元等效应力与拱梁分载法计算结果见表 3 ~ 表 4。有限元等效应力和拱梁分载法应力的比值见表 5。

表 3 工程实例 1 有限元等效应力和拱梁分载法应力值 单位:MPa

工况	最大主拉应力		最大主压应力	
	有限元等效应力	拱梁分载法	有限元等效应力	拱梁分载法
校核洪水位	1.26	1.14	-8.07	-7.01
设计洪水位	1.27	—	-7.91	—
正常蓄水位	1.26	0.97	-7.91	-6.80

表 4 工程实例 2 有限元等效应力和拱梁分载法应力值 单位:MPa

工况	最大主拉应力		最大主压应力	
	有限元等效应力	拱梁分载法	有限元等效应力	拱梁分载法
校核洪水位	1.24	1.11	-9.66	-8.21
设计洪水位	1.15	0.92	-9.46	-7.98
正常蓄水位	1.09	0.94	-9.33	-8.18

表 5 有限元等效应力和拱梁分载法应力比值

工况	最大主拉应力比值		最大主压应力比值	
	工程实例 1	工程实例 2	工程实例 1	工程实例 2
校核洪水位	1.11	1.12	1.15	1.18
设计洪水位	—	1.25	—	1.19
正常蓄水位	1.30	1.16	1.16	1.14

表 6 中所列的是一些国内工程的有限元等效应力和拱梁分载法应力的比值。由表 5、表 6 的对比可知,工程实例 1、2 的有限元等效应力成果与拱梁分载法应力值的比值在常规范围之内,符合一般规律,等效结果可信^[15]。

表 6 有限元等效应力和拱梁分载法应力比值^[16]

工程名称	最大主压应力比值				最大主拉应力比值		
	温降		温升		温降		温升
	上游面	下游面	上游面	下游面	上游面	下游面	上游面
李家峡	0.82	0.83	0.41	1.31	1.11	0.84	0.99
龙羊峡	0.90	0.87	0.46	1.19	1.26	1.01	1.02
东风	0.78	0.74	0.56	1.23	1.11	0.53	1.04
东江	1.06	1.06	0.77	1.28	2.25	1.20	—
白山	0.99	1.14	0.86	1.28	1.06	0.69	1.18
瑞墙	1.23	0.96	1.17	1.07	1.39	1.98	—
江口	0.19	1.25	1.61	1.26	2.44	1.22	2.58
平均值	0.85	0.98	0.83	1.23	1.52	1.07	1.36

由表 5、表 6 的对比可知,工程实例 1 及工程实例 2 的有限元等效应力成果与拱梁分载法应力值的比值在常规范围之内,符合一般规律,等效结果可信。

6 结 论

(1) 通过计算可知,工程实例 1、工程实例 2 两座 300 m 级的高拱坝,在各工况条件下,坝体等效最大主拉应力值均小于 1.50 MPa,满足拱坝应力控制标准。

(2) 工程实例 1 及工程实例 2 的有限元等效应力成果与拱梁分载法应力值的比值在常规范围之内,因此采用等效应力的方法评价拱坝应力是基本合适的,等效应力与薄层单元相结合的方法能较好的满足现阶段对拱坝应力分析的需要。

参考文献:

- [1] 混凝土拱坝设计规范:DL/T 5346—2006[S].北京:中国电力出版社,2006.
- [2] 张 义.有限元等效应力基于 ANSYS 的计算[J].水利科技与经济,2006(4):266-267.
- [3] 李守义,周 伟,等.基于 ANSYS 的拱坝等效应力研究[J].水力发电学报,2007,26(5):39-41.
- [4] 孙宝成.基于 ABAQUS 的混凝土高拱坝三维有限元静动力分析[D].郑州:郑州大学,2016:3-4.
- [5] 朱伯芳.论混凝土拱坝有限元等效应力[J].水利水电技术,2012,43(4):30-32.
- [6] 朱伯芳.论拱坝应力控制标准[C]//2002 年水工专委会学术交流会议学术论文文集,2002:33-45.
- [7] 傅作新,钱向东.有限单元法在拱坝设计中的应用[J].河海大学学报,1991(2):8-15.
- [8] 许芳星.基于 ANSYS 的双曲拱坝体形优化设计研究[D].郑州:华北电力大学,2015:1-15.
- [9] 郭艳军.砌石拱坝三维有限元分析及设计优化[D].郑州:郑州大学,2011:1-10.
- [10] 赵 玮.布西拱坝有限元等效应力计算研究[J].西北水力发电,2007,23(2):43-45.
- [11] 李同春,陈会芳,等.网格尺寸对拱坝等效应力分析的影响[J].水利学报,2004,35(9):83-86.
- [12] 何奇滨,谭茶生,唐欣薇.龙槽槽砌石拱坝加固方案三维有限元分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(3):101-103.
- [13] 何华志,李 琼,刘 莹.基于生死单元原理的拱坝体形优化[J].水利与建筑工程学报,2012,10(5):155-156.
- [14] 郭晓晶,徐谨谨.子模型法在拱坝泄水底孔应力分析中的应用[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):205-208.
- [15] 胡国平,张文捷,谢卫生.拱坝三维有限元等效应力应用及对比分析[J].南昌工程学院学报,2009,28(6):56-59.
- [16] 柏宝忠,钟源清.混凝土拱坝设计应力控制标准的研究[J].人民长江,2003(11):12-13.