

有限单元法在高拱坝坝肩动力稳定分析中的应用

苏 超¹ 李俊宏¹ 任青文²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 利用有限元法及三维实体任意截面数据处理技术,建立了高拱坝坝肩稳定安全系数计算分析方法,并编制了相应的计算和处理程序.通过对某高拱坝动力稳定性的分析计算,给出了拱坝坝肩在 3 个典型高程分别沿两滑移面交线方向、侧滑面及底滑面滑动的最小安全系数.

关键词 高拱坝 动力计算 坝肩稳定

中图分类号:TV642.4+6

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2003)02-0144-04

近年来,我国水资源开发规划中双曲(薄)高拱坝日渐增多,如已建成的二滩拱坝(高 240 m),在建中的澜沧江小湾拱坝(高 292 m),拟建中的黄河拉西瓦拱坝(高 250 m),金沙江溪洛渡拱坝(高 275 m)及雅砻江锦屏一级拱坝(高 310 m).高拱坝地质条件和地质构造相当复杂,如非均质、不连续、软弱夹层、断层、裂隙及层间错动带、岩体渗流等,多种荷载的作用又集中于坝肩.坝肩在强大的上游水压力、温度荷载,特别是地震荷载作用下能否保持稳定,对高拱坝的安全来说至关重要.我国“九五”期间一些学者在有限元动力计算技术方面所进行的研究,基本上考虑到了以上各种因素的影响.若在此基础上进行坝肩稳定计算,将有助于更好地解决这个复杂的工程技术问题.

高拱坝坝肩稳定分析,首先应寻找出岩体的潜在滑移体,然后根据选用的计算方法来设定阈值,同时将阈值与计算结果进行比较以判断岩体是否稳定并确定其稳定安全度.潜在滑移体一般由底滑面、侧滑面、上游面及下游临空面组成.滑移体主要根据岩体的构造特点人为设定^[1]或利用分形块体理论(矢量投影)^[2]来确定.阈值设定主要采用极限平衡法^[3].由于岩体工程的复杂性,目前很难用一种分析方法或手段就可获得精确定量的岩体稳定特性,因此在工程实践中需要结合几种方法来综合评价坝肩的稳定性.本文利用动力有限元法计算的较精确的应力场分布数据,进一步分析高拱坝的坝肩稳定安全系数,并对某高拱坝的动力稳定性进行了分析计算.

1 计算方法

本文主要研究当岩石和坝体为连续介质时坝肩的稳定问题,因此所采用的方法与以往拱坝坝肩稳定计算的刚体极限平衡方法不同,即变形和应力计算采用有限单元法,计算时考虑了岩体断层材料非线性,计算荷载包括静水压力、泥沙压力以及温降时的坝体温度应力.动力计算采用目前国内普遍使用的直接积分法.在有限单元法计算的基础上通过分析来完成拱坝坝肩稳定安全系数的计算.由于目前工程设计部门关于坝肩稳定的计算是在指定的滑移面上进行的,有时可能需要给出多个滑移面才能进行分析比较,因此给采用有限单元法计算时网格的剖分带来很多不便.为解决这一问题,本文采用空间任意截面数据处理技术确定拱坝坝肩滑移体的受力状态.其具体步骤如下.

a. 在有限元计算网格中根据事先给定的数据将滑移体切

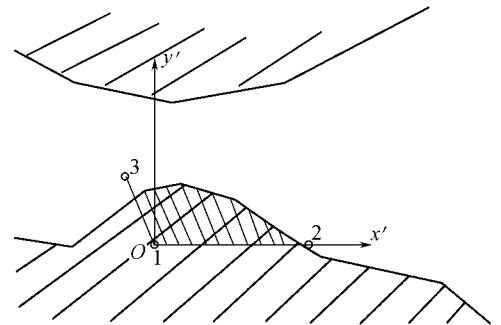


图 1 截面上滑动力和阻滑力计算范围

Fig.1 Scope of calculation for sliding force and anti-sliding force on cross-section

收稿日期:2001-12-28

基金项目:国家“九五”科技攻关基金资助项目(96-221-03-02-05);国家自然科学基金资助项目(59719180)

作者简介:苏超(1960—),男,吉林梅河口人,教授,主要从事复杂水工结构的仿真分析.

出,每一个滑移面的确定均采用 3 点输入方式(图 1)3 点间的连线和临空面形成的多边形即为滑移体的一个滑动面(阴影线部分).在确定滑移面的同时,通过线性插值方法计算出滑移面上各点相对于整体坐标系的应力分量.

b. 根据滑移面方位进行应力转换,以求出滑移面上的法向应力和切向应力.设固结在滑移面上的坐标系为 x',y',z' 相对于原坐标轴 x,y,z 的方向余弦分别为 $l_1,m_1,n_1,l_2,m_2,n_2,l_3,m_3,n_3$,则对应于新坐标系 x',y',z' 的应力为

$$\sigma_{x'} = \sigma_x l_1^2 + \sigma_y m_1^2 + \sigma_z n_1^2 + 2\tau_{xy} l_1 m_1 + 2\tau_{yz} m_1 n_1 + 2\tau_{zx} n_1 l_1$$
$$\sigma_{y'} = \sigma_x l_2^2 + \sigma_y m_2^2 + \sigma_z n_2^2 + 2\tau_{xy} l_2 m_2 + 2\tau_{yz} m_2 n_2 + 2\tau_{zx} n_2 l_2$$
$$\sigma_{z'} = \sigma_x l_3^2 + \sigma_y m_3^2 + \sigma_z n_3^2 + 2\tau_{xy} l_3 m_3 + 2\tau_{yz} m_3 n_3 + 2\tau_{zx} n_3 l_3$$
$$\tau_{x'y'} = \sigma_x l_1 l_2 + \sigma_y m_1 m_2 + \sigma_z n_1 n_2 + \tau_{xy}(l_1 m_2 + l_2 m_1) + \tau_{yz}(m_1 n_2 + m_2 n_1) + \tau_{zx}(n_1 l_2 + n_2 l_1)$$
$$\tau_{y'z'} = \sigma_x l_2 l_3 + \sigma_y m_2 m_3 + \sigma_z n_2 n_3 + \tau_{xy}(l_2 m_3 + l_3 m_2) + \tau_{yz}(m_2 n_3 + m_3 n_2) + \tau_{zx}(n_2 l_3 + n_3 l_2)$$
$$\tau_{z'x'} = \sigma_x l_3 l_1 + \sigma_y m_3 m_1 + \sigma_z n_3 n_1 + \tau_{xy}(l_3 m_1 + l_1 m_3) + \tau_{yz}(m_3 n_1 + m_1 n_3) + \tau_{zx}(n_3 l_1 + n_1 l_3)$$

c. 利用数值积分和岩石的力学参数计算滑移面上的滑动力(矢量和)、截面上的阻滑力:

$$F_h = \sum_{i=1}^n \tau_i \Delta S_i \qquad F_z = \sum_{i=1}^n (C_i - \sigma_{ni} f_i) \Delta S_i$$

式中: C_i ——滑动面(x',y' 面)单元的单位粘聚力; σ_{ni} ——截面法向应力(拉为正,当 $\sigma_{ni} \geq 0$ 时令 $\sigma_{ni} = 0$); f_i ——滑动面摩擦系数; ΔS_i ——滑动面单元面积; τ_i ——滑动面单元剪应力.拱坝坝肩沿滑移面滑动的稳定安全系数用 K 表示,它是坝肩滑移体上阻滑力与滑动力的比值,对于不同的滑动方式, K 具有不同的表达方式.

2 算 例

某高拱坝属地震多发地区,坝肩抗震稳定性研究是该工程重要的研究课题.笔者应用上述方法对该拱坝坝肩稳定进行了分析计算.按水工抗震规范要求,基本荷载组合为:正常蓄水位+自重+泥沙压力+温降+地震作用.计算时静动力荷载分开计算.静力计算考虑正常蓄水位(考虑渗压)+自重+泥沙压力+温降,动力计算采用人工生成地震波,按规范要求最大峰值加速度取 $0.308g$,竖向峰值加速度为水平向峰值加速度的 $2/3$.具体波形见图 2.

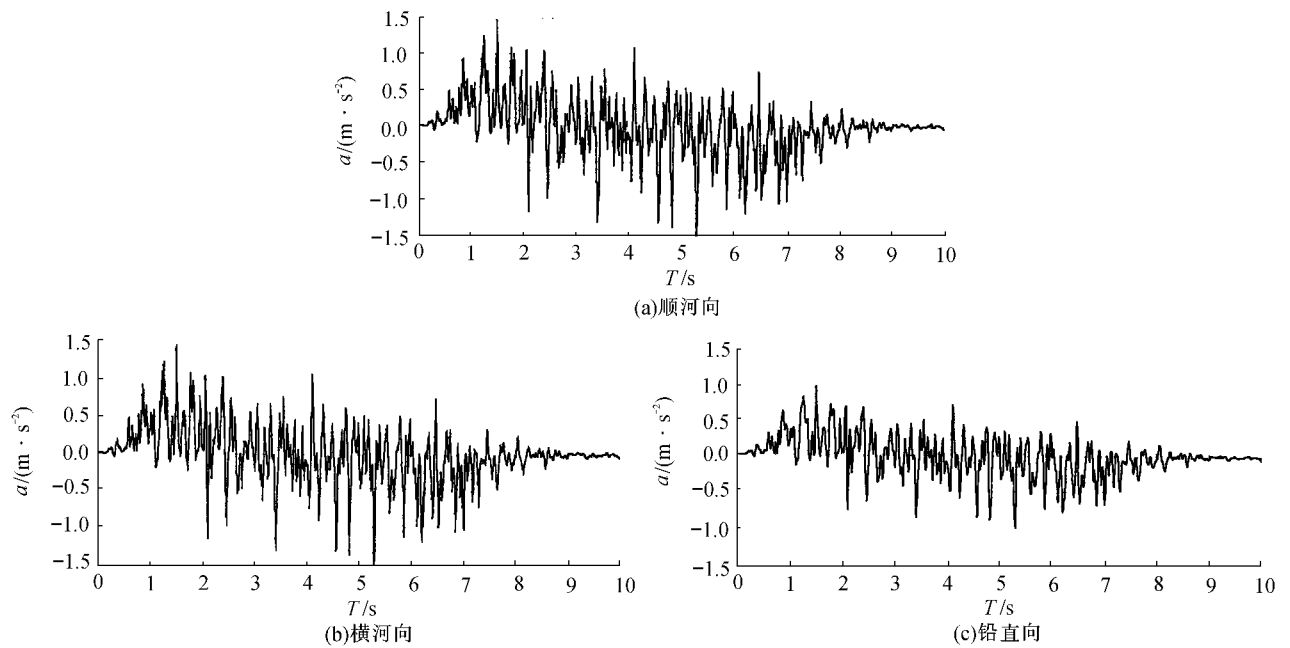


图 2 人工生成地震波($T_g = 0.2s$)

Fig.2 Artificial seismic wave

2.1 计算基本资料

2.1.1 拱坝混凝土力学参数

混凝土弹性模量 $E = 2.1 \times 10^4$ MPa ;混凝土动弹性模量 $E = 2.73 \times 10^4$ MPa ;混凝土泊松比 $\mu = 0.189$;线膨胀系数 $\alpha = 8.85 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;渗透系数 $K_c = 35 \times 10^{-10}$ m/s ;混凝土密度 $\rho = 2400$ kg/m³.

2.1.2 建基面附近岩体力学参数

岩面抗剪强度按岩石分类给出 ,见表 1. 各类岩体的力学强度指标见表 2.

2.2 计算成果

2.2.1 拱坝的自振特性

计算精确模拟了建基面岩体的不同材料分区及主要断层. 计算中 ,对于动水压力的影响则采用流固耦合的有限元数学模型 ,取修正 Westergaard 公式折半计算库水附加质量. 前 8 阶频率分布情况见表 3.

表 1 基岩面抗剪强度

坝基岩体类型	抗剪强度	
	F'	C'/MPa
I ,II 类	1.24 ~ 1.40	1.20 ~ 1.40
III 类	1.10 ~ 1.25	0.90 ~ 1.20
IV 类	0.70 ~ 1.00	0.30 ~ 0.60

表 2 抗力岩体部位岩体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rocks						
岩体质量	泊松比	变形模量 /GPa	f	C'/MPa	岩体单轴抗压强度 /MPa	岩体单轴抗拉强度 /MPa
I	0.22	25.0	1.50	2.20	40.0	1.500
II	0.25	20.0	1.40	1.80	30.0	1.200
III _a	0.26	14.0	1.25	1.30	20.0	1.000
III _b	0.28	10.0	1.10	0.90	5.0	0.500
IV _a	0.30	5.0	1.05	0.60	1.5	0.100
V _a	0.40	1.0	0.50	0.15	0.1	0.005

表 3 拱坝前 8 阶振动频率

Table 3 First 8 order vibration frequencies of the arch dam

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
频率/Hz	0.938	0.990	1.345	1.733	1.984	2.083	2.148	2.415

2.2.2 坝体的位移和应力

坝体顺河向最大位移达 44.6 cm ,发生在拱冠 1245 m 高程处 ,其中静力位移为 20.6 cm ,动力位移为 24.0 cm ,铅直向最大位移达 7.3 cm ,其中静力位移为 2.3 cm ,动力位移为 5.0 cm. 表 4 给出了其拱冠处拱向应力最大、最小值.

表 4 拱冠处拱向应力最大、最小值

Table 4 Maximum and minimum stresses along axis of arch crest

高程 /m	下游面		上游面		高程 /m	下游面		上游面	
	最小值	最大值	最小值	最大值		最小值	最大值	最小值	最大值
1245	-19.04	5.41	-20.45	3.07	1070	-4.61	-1.29	-12.97	-2.88
1230	-16.43	4.26	-18.85	1.21	1050	-3.84	-1.11	-11.95	-3.11
1210	-13.72	2.83	-16.62	-1.01	1030	-3.16	-0.87	-10.62	-3.33
1190	-11.52	1.68	-15.18	-2.17	1010	-2.57	-0.67	-9.00	-3.46
1170	-9.68	0.74	-13.74	-2.89	990	-2.11	-0.53	-7.06	-3.42
1150	-8.46	-0.09	-14.01	-3.08	975	-1.91	-0.61	-5.04	-3.03
1130	-7.38	-0.77	-14.18	-2.95	963	-2.23	-1.35	-3.23	-1.60
1110	-6.39	-1.20	-14.11	-2.70	954	-3.04	-2.09	-1.32	2.68
1090	-5.51	-1.33	-13.69	-2.70					

2.2.3 拱坝坝肩稳定安全系数

拱坝坝肩 3 个典型高程沿两滑移面交线方向滑动最小安全系数见表 5 ,左岸安全系数低于右岸 ,最小值为 2.40 ,发生在左岸 1170 m 高程处. 表 6 给出了拱坝坝肩沿侧滑面滑动最小安全系数 ,最小值为 2.60 ,发生在 1130 m 高程左岸处. 拱坝坝肩沿底滑面滑动最小安全系数见表 7. 由表 7 可知 ,沿底滑面滑动安全系数普遍较低 ,最小值为 1.59.

表 5 拱坝坝肩沿两滑移面交线方向滑动最小安全系数

Table 5 Minimum safety factor for sliding along the intersecting line of two sliding surfaces on the arch dam abutment

高程 /m	1 130		1 170		1 210	
	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸	左岸
安全系数	3.18	2.61	3.54	2.40	3.38	3.26

2.3 拱坝坝肩稳定分析

地震作用过程持续 10s ,沿底滑面滑动安全系数较小 ,这是坝体混凝土自重和坝体偏上部分向下的水压力作用的结果 .沿两滑动面交线滑动 ,其滑动方向基本水平 ,沿侧滑面滑动 ,其滑动方向不能指向两滑动面交线 ,重力不能发挥作用 .底滑面与铅直面的夹角在 30°左右 ,其可能的滑动方向不会指向两滑动面交线 ,这有利于重力发挥作用 .

采用连续模型进行计算 ,计算中当法向力为正时 ,摩擦力为零 ,但对整个滑动面来讲 ,全部被拉开的可能性非常小 ,坝肩能否真正沿底滑面运动值得进一步研究 .

3 结 语

采用有限元法进行动力稳定分析计算 ,可以充分利用较精确的位移和应力分析计算成果 .本文利用三维实体任意截面数据处理技术 ,提出了应用有限元法计算拱坝坝肩稳定安全系数的方法 .由于数据处理是在有限元计算成果的基础上通过三点截面形式完成的 ,因此具有较好的灵活性 ,为在一定范围内进行可能滑移面的搜寻提供了分析工具 .通过对某高拱坝的动力稳定性的分析计算 ,给出了拱坝坝肩在 3 个典型高程分别沿两滑移面交线方向、侧滑面及底滑面滑动最小安全系数 ,其计算结果可直接应用于工程设计 .

参考文献 :

[1] 黄昌乾 ,丁恩保 .边坡稳定性评价结果的表达与边坡稳定判据[J]. 工程地质学报 ,1997 ,5(4) 375—380 .
[2] 张子新 ,孙钧 .分形块体理论及其在三峡高边坡工程中的应用[J]. 同济大学学报 ,1996 ,24(5) 552—557 .
[3] 孙东亚 ,陈祖煜 ,杜伯辉 ,等 .边坡稳定评价方法 RMR-SMR 体系及其修正[J]. 岩土力学与工程学报 ,1997 ,16(4) 297—304 .

FEM-based dynamic stability analysis of abutment for high arch dams

SU Chao¹ , LI Jun-hong¹ , REN Qing-wen²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : A safety factor method for calculation and analysis of the stability of the abutment of arch dams was developed based on the finite element method and 3-D data-processing technology for arbitrary cross sections of solid masses , and corresponding programs were compiled . By dynamic stability analysis and calculation for an arch dam , the minimum safety factor for sliding along the intersecting line of two sliding surfaces , the side sliding surface and the bottom sliding surface of the arch dam abutment was calculated respectively for three characteristic elevations , and the minimum safety factor was obtained .

Key words : high arch dam ; dynamic calculation ; stability of abutment