

考虑流固耦合的反应谱法分析拱坝的动力特性

潘树军 王 新 潘明杰 吴 丹

(河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 根据对乌东德拱坝抗震研究中的动力分析 ,在考虑水体与结构之间耦合作用 的情况下分析乌东德拱坝的动力特性 ,根据规范给出的反应谱计算方法计算乌东德拱坝的反应谱法动力响应 ,并对反应谱法计算的 动力结果进行分析 ,结果表明 ,考虑水体与结构之间的耦合作用能有效降低拱坝的 动应力。

关键词 动力特性 ;反应谱 ;流固耦合 ;乌东德拱坝

中图分类号 :TV642.4 ;TV312 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2006)S1-0054-03

乌东德水电站位于金沙江下游四川省和云南省的界河上 ,坝高 235 m ,根据国家地震安全性评定委员会审查通过的《金沙江乌东德水利枢纽工程工程场地地震安全性评价补充论证报告》,工程场址区地震基本烈度为 7 度 ,主要建筑物按地震烈度 8 度设防 ,100 年基准期超越概率 2% 的基岩峰值加速度为 0.27g。

1997 年新修订的水工建筑物抗震规范^[1]规定 ,地震荷载下 “拱坝强度分析应以静、动力拱梁分载法为基本分析方法。对于工程抗震设防类别为甲类 或结构复杂 ,或地基条件复杂的拱坝 ,宜补充作有限元动力分析 ”。同时规定 “采用动力法计算拱坝的地震作用效应时 ,宜采用振型分解反应谱法。对于特殊重要的拱坝 ,可用时程分析法进行补充计算 ”。

本文应用考虑水体与结构之间耦合作用的结构自振特性分析方法 ,首先求解考虑坝体-库水动力相互作用的坝体自振特性 ,并分析乌东德拱坝的动力特性 ,然后根据规范给出的反应谱计算方法计算乌东德拱坝的反应谱法动力响应。

1 计算模型

1.1 地震参数

有限元动力计算中各项参数按抗震规范取值 :乌东德坝址处设计地震烈度 7 度 ,根据规范^[1]规定 ,阻尼比取 5% ,设计反应谱加速度放大系数为

$$\begin{cases} 1 + \frac{\beta_{\max} - 1}{T_l} T & T \leq T_1 \\ \beta_{\max} & T_1 \leq T \leq T_g \\ \beta_{\max} \left(\frac{T_g}{T} \right)^{0.9} & T_g \leq T \leq T_2 \\ \beta_{\min} & T \leq T_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 : T 为结构的自振周期 ; T_g 为特征周期 ,根据场地类别选取 ; $\beta_{\max} = 2.25$, $T_1 = 0.1\text{ s}$, $T_g = 4.0\text{ s}$, $\beta_{\min} = 0.45$ 。

1.2 材料参数

坝体和基岩均按线弹性考虑。有限元网格划分见图 1 ,整个计算模型共 14 144 个单元、16 871 个节点 ,其中水体离散为 3 312 个单元、5 097 个节点。

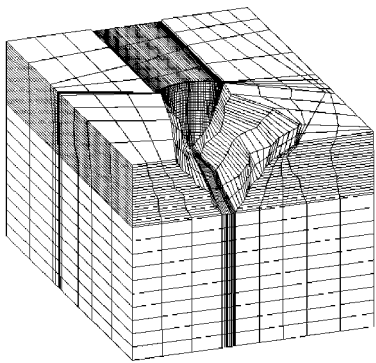


图 1 有限元计算模型

2 考虑水体与结构之间耦合作用的结构自振特性分析方法

结构自振特性(频率与振型)是结构动力分析的主要内容。在实际工程中 ,阻尼对结构自振频率和振型的影响很小 ,可忽略阻尼力。由动力平衡方程

$$K\delta + C\dot{\delta} + (M + M_p)\ddot{\delta} = R_0 \quad (2)$$

可得到无阻尼的自由振动方程 :

$$(K - \omega^2 \bar{M})\delta_0 = 0 \quad (3)$$

其中 $\bar{M} = M + M_p$

当不考虑水体与结构的相互作用时 ,可略去式

(2) 中的 M_p 项。

在水工结构的抗震计算中通常只需求少数几个最低频率,此时以反幂法为基础的直接滤频法是一种简便而有效的方法。直接滤频法求第 $r+1$ 个特征值的滤项方程为

$$\lambda \delta_{0r+1} = \left(K^{-1} \overline{M} - \sum_{i=1}^r \frac{\lambda_i \delta_{0i} \delta_{0i}^T \overline{M}}{\delta_{0i}^T \overline{M} \delta_{0i}} \right) \delta_{0r+1} \quad (4)$$

具体计算步骤归纳如下:

a. 求第 r 个振型的有关常数:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\delta_{0i}^T \overline{M} \delta_{0i}} \quad (5)$$

b. 在第 k 次迭代时,求各个振型的滤频系数:

$$\beta_i^{(k-1)} = \alpha_i \delta_i^T \overline{M} \delta_{0r+1}^{(k-1)} \quad (6)$$

c. 求特征向量的第 k 次近似值,并归一化:

$$\lambda_{r+1}^{(k)} \delta_{0r+1}^{(k)} = K^{-1} \overline{M} \delta_{0r+1}^{(k-1)} - \sum_{i=1}^r \beta_i^{(k-1)} \delta_{0i} \quad (7)$$

c. 检查 $\lambda_{r+1}^{(k)}$ 是否满足精度:

$$\frac{|\lambda_{r+1}^{(k)} - \lambda_{r+1}^{(k-1)}|}{\lambda_{r+1}^{(k)}} \leq \epsilon \quad (8)$$

实际计算中,当考虑水体与结构相互作用时,无须写出 M_p 的显式,这样可大大节省存储空间,且当只计算几个特征值时可减少计算工作量。此时式(7)中的 $\overline{M} \delta_{0r+1}^{(k-1)}$ 求解方法如下:

$$\overline{M} \delta_{0r+1}^{(k-1)} = M \delta_{0r+1}^{(k-1)} + G^T H^{-1} G \delta_{0r+1}^{(k-1)} = M \delta_{0r+1}^{(k-1)} + G^{-1} p_{r+1}^{(k-1)} \quad (9)$$

$$p_{r+1}^{(k-1)} = H^{-1} f_{p,r+1}^{(k-1)} \quad (10)$$

$$f_{p,r+1}^{(k-1)} = G \delta_{0r+1}^{(k-1)} \quad (11)$$

计算时先对所有水体与结构相接触单元求解式(11)中的右端项,叠加得 $f_{p,r+1}^{(k-1)}$,再由式(10)求得 $p_{r+1}^{(k-1)}$,然后将其代入式(9)按接触面单元循环求解式(6)右端项得第二项并组装。在这一求解过程中 H 矩阵只需进行一次分解即可。

3 自振特性计算

应用流固耦合三维有限元计算方法,考虑了水体对结构的影响,求解坝体的自振特性。

坝体在正常水位和空库时考虑流固耦合的前5阶最低频率见表1。对应的各阶振型见图2和图3。从中可以看出,乌东德拱坝的动力特性有以下特点:

表1 乌东德拱坝坝体自振频率			Hz		
振型阶数	空库	正常水位	振型阶数	空库	正常水位
1	2.873 3	2.495 9	4	4.821 3	4.526 0
2	2.960 6	2.716 0	5	5.074 4	4.796 8
3	4.388 9	3.772 0			

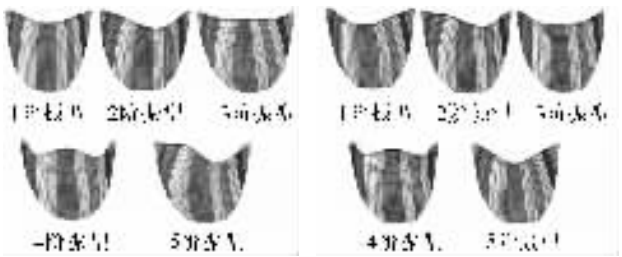


图2 正常水位拱坝振型

图3 空库拱坝振型

a. 在空库时,1阶和2阶阶振型为反对称振动,3阶、4阶、5阶振型为对称振动。

b. 在正常水位时考虑流固耦合情况下,1阶、2阶、5阶振型为反对称振动,3阶和4阶振型为对称振动。

c. 在正常水位时坝体的1阶自振频率比空库时降低了13.13%。

4 坝面动应力计算成果

根据规范给出的反应谱计算方法以及乌东德拱坝的动力特性,计算乌东德拱坝的反应谱法动力响应。对于在 x 方向地震波激励下坝体的应力分布(单独地震作用),图4给出了拱坝上游面第一主应力的分布情况,第一主应力在顶拱拱端和拱冠处的值较大,最大主应力出现在▽920.00右拱端下游面,为5.00 MPa。图5给出了拱坝上游面 x 向位移的分布情况, x 向位移在坝的左右两边呈对称分布,最大位移值出现在顶拱上游面,为15.11 mm。图6给出了拱坝上游面 y 向位移的分布情况, y 向位移在坝的左右两边呈对称分布,最大位移值出现在顶拱,为26.59 mm。图7给出了拱坝上游面 z 向位移的分布情况, z 向位移在坝的左右两边呈对称分布,最大位移值出现在顶拱下游面拱冠处,为5.38 mm。

- 8— $\sigma=5.003\ 7$ MPa
7— $\sigma=4.380\ 8$ MPa
6— $\sigma=3.716\ 9$ MPa
5— $\sigma=3.073\ 5$ MPa
4— $\sigma=2.430\ 2$ MPa
3— $\sigma=1.788\ 8$ MPa
2— $\sigma=1.143\ 4$ MPa
1— $\sigma=5.000\ 0$ MPa
- 10— $x=13.1$ mm 5— $x=5.3$ mm
9— $x=12.9$ mm 4— $x=4.3$ mm
8— $x=10.8$ mm 3— $x=3.2$ mm
7— $x=8.6$ mm 2— $x=2.1$ mm
6— $x=6.4$ mm 1— $x=1.0$ mm

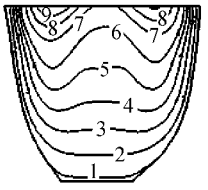
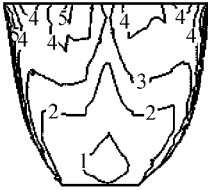


图4 上游坝面第一主应力

图5 上游坝面横河向位移

根据规范给出的反应谱计算方法以及乌东德拱坝的动力特性,计算乌东德拱坝的反应谱法动力响应。对于在 y 方向地震波激励下坝体的应力分布(单独地震作用),图8给出了拱坝上游面第一主应

10— $y=26.6\text{ mm}$	5— $y=12.9\text{ mm}$	10— $z=5.4\text{ mm}$	5— $z=2.7\text{ mm}$
9— $y=23.9\text{ mm}$	4— $y=10.2\text{ mm}$	9— $z=4.8\text{ mm}$	4— $z=2.1\text{ mm}$
8— $y=21.1\text{ mm}$	3— $y=7.5\text{ mm}$	8— $z=4.3\text{ mm}$	3— $z=1.8\text{ mm}$
7— $y=18.4\text{ mm}$	2— $y=4.7\text{ mm}$	7— $z=3.7\text{ mm}$	2— $z=1.0\text{ mm}$
6— $y=15.7\text{ mm}$	1— $y=2.0\text{ mm}$	6— $z=3.2\text{ mm}$	1— $z=0.5\text{ mm}$

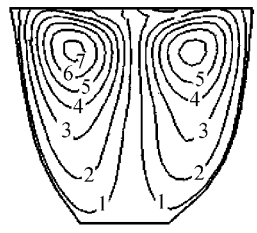
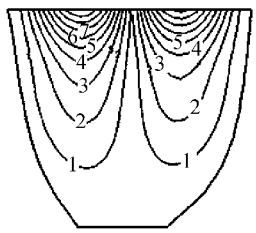


图6 上游坝面顺河向位移 图7 上游坝面竖向位移

力的分布情况,第一主应力在左右拱端的值较大,最大主应力出现在左拱端下游面 920.00 m 高程处,为 6.30 MPa。图 9 给出了拱坝上游面 x 向位移的分布情况, x 向位移在坝的左右两边呈对称分布,最大位移值出现在顶拱,为 7.43 mm。图 10 给出了拱坝上游面 y 向位移的分布情况, y 向位移在坝的左右两边呈对称分布,最大位移值出现在顶拱,为 56.09 mm。图 11 给出了拱坝上游面 z 向位移的分布情况, z 向位移在坝的左右两边呈对称分布,最大位移值出现在下游坝面顶拱拱冠处,为 9.9 mm。

8— $\sigma=6.2948\text{ MPa}$
7— $\sigma=5.4701\text{ MPa}$
6— $\sigma=4.6417\text{ MPa}$
5— $\sigma=3.8134\text{ MPa}$
4— $\sigma=2.9850\text{ MPa}$
3— $\sigma=2.1567\text{ MPa}$
2— $\sigma=1.3283\text{ MPa}$
1— $\sigma=5.0000\text{ MPa}$

10— $x=7.4\text{ mm}$	5— $x=3.6\text{ mm}$
9— $x=6.7\text{ mm}$	4— $x=2.8\text{ mm}$
8— $x=5.9\text{ mm}$	3— $x=2.0\text{ mm}$
7— $x=5.1\text{ mm}$	2— $x=1.3\text{ mm}$
6— $x=4.4\text{ mm}$	1— $x=0.5\text{ mm}$

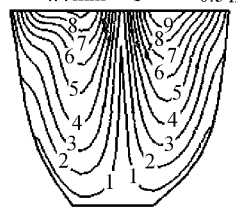
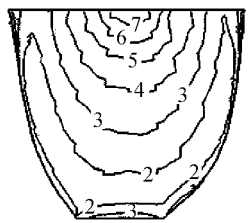


图8 上游坝面第一主应力 图9 上游坝面横河向位移

10— $y=56.1\text{ mm}$	5— $y=27.7\text{ mm}$	10— $z=9.9\text{ mm}$	5— $z=5.0\text{ mm}$
9— $y=50.4\text{ mm}$	4— $y=22.0\text{ mm}$	9— $z=9.0\text{ mm}$	4— $z=4.0\text{ mm}$
8— $y=44.7\text{ mm}$	3— $y=16.4\text{ mm}$	8— $z=8.0\text{ mm}$	3— $z=3.0\text{ mm}$
7— $y=39.1\text{ mm}$	2— $y=10.7\text{ mm}$	7— $z=7.0\text{ mm}$	2— $z=2.0\text{ mm}$
6— $y=33.4\text{ mm}$	1— $y=5.0\text{ mm}$	6— $z=6.0\text{ mm}$	1— $z=1.0\text{ mm}$

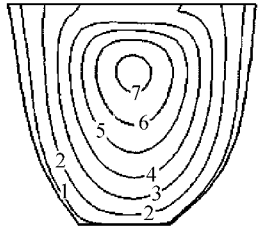
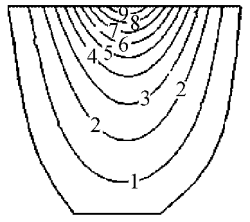


图10 上游坝面顺河向位移 图11 上游坝面竖向位移

5 结 语

a. 反应谱法是计算结构地震响应的有效方法,现有各国规范对地震荷载及结构响应的计算基本上

以反应谱法为基础。

b. 本文运用了考虑水体与结构之间耦合作用的反应谱法,通过与空库时的计算结果比较,结果表明考虑水体与结构之间耦合作用能有效地降低拱坝的动应力。

参考文献:

[1] SL203—97,水工建筑物抗震设计规范[S].
 [2] 郭维东,裴国霞,韩会玲.水力学[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
 [3] 李家星,赵振兴.水力学[M].南京:河海大学出版社,2001.
 [4] 曹广德,李同春.考虑槽身与水相互作用的渡槽自振特性分析[J].水利技术监督,2002(5):43-44.
 [5] 李杰,李国强.地震工程学导论[M].北京:地震出版社,1992.
 [6] 沈可,张仲卿.振型分解反应谱法计算拱坝地震动应力[J].广东水利水电,2002(1):7-8.

(收稿日期 2005-05-30 编辑:高建群)

·简讯·

中国水利学会地下水科学与工程专业委员会在河海大学成立

中国水利学会地下水科学与工程专业委员会于 2006 年 10 月 15 日在河海大学成立。来自全国有关高校和科研单位的 200 余名专家学者及师生代表参加了成立大会。中国工程院院士卢耀如、吴中如,中国水利学会副理事长张瑞凯,河海大学校长张长宽,江苏省水利厅副厅长陆桂华,中国水利学会综合组织部主任吕爱华出席了大会。

在当前对水资源的开发、利用、治理、配置、节约及保护中,地下水与水利建设和经济社会发展的关系日趋紧密,作用日益凸显,已成为水利科学的一个重要方面。中国水利学会地下水科学与工程专业委员会的成立,将进一步促进该领域的科学研究、应用及国内外交流。成立大会后,举行了地下水科学与工程学术研讨会。卢耀如院士、国际原子能机构高级顾问克劳斯教授、美国衣阿华大学张幼宽教授、美国西古拉大学唐纳德教授、中国科学院地质与地球物理研究所庞忠和研究员以及清华大学、中国地质大学、长安大学、河海大学、南京水利科学研究院、长江科学研究院、河南省水文水资源局等单位的专家学者分别作了专题学术报告。

(编辑部供稿)