

灯泡贯流式水电站厂房坝段的抗震分析

苏礼邦,刘云贺,李守义

(西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

[摘要] 灯泡贯流式厂房坝段是由多孔洞组成的复杂三维孔洞结构,其内力分布较其他型式的厂房坝段更加复杂,而贯流式机组相对于其他类型机组而言,其机组型式、受力方式有自身特点。为了全面了解厂房坝段在地震作用下的应力、位移、配筋及防裂情况,使结构设计更加合理、安全、经济,采用大型有限元程序 ANSYS 进行了抗震动力分析。其计算结果表明,厂房坝段结构的变形和强度均能满足要求,为工程设计提供了依据。

[关键字] 灯泡贯流式水电站;电站厂房坝段;三维有限元;谱分析;抗震分析

[中图分类号] TV312

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)06-0202-05

Analysis on the earthquake resistance of the factory monolith of bulb tubular power station

SU Li-bang, LIU Yun-he, LI Shou-yi

(Institute of Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The factory of bulb tubular power station composed by apertures, is a complex and lacunose 3D structure, therefore, it is more complex in stress distribution than other patterns. Compared with other unite it is special in unite and stressing. In order to know stress and displacement distributing, reinforcement and crack control roundly under earthquake and make the design more feasible, economic and safety, it is necessary to carry out aseismic analysis by 3D Finite Element Method ANSYS. The calculated results show that the distortion and intension are reasonable, which can supply reliable data for project designers.

Key words: the bulb tubular power station; power building monolith; 3D finite element; spectrum analysis; aseismic analysis

灯泡贯流式水电站因其具有土建工程量小、施工技术简单、淹没损失小、流道形式好、水力资源利用充分等优点^[1-2],成为开发低水头水力资源的良好形式。灯泡贯流式厂房坝段一般为上游挡水墩墙、流道、下游挡水墩墙、主厂房上部结构等组成的复杂三维孔洞结构,厂房坝段结构十分复杂,加之计算机容量、计算速度等的限制,前人所作的研究^[1,3-4]往往对厂房结构模型做出较多的简化,例如:将形状复杂的流道简化为一个圆筒或方孔洞结构,不考虑蜗壳及尾水管的扩散段;将厚度相差悬殊的墙体结构用板单元等效;各种孔洞均忽略不计;将结构的某一部

分单独进行计算分析等。这些对结构局部的过于粗略的简化,必然会在相当程度上影响计算结果的有效性和精确性。且贯流式机组相对于其他类型机组而言,其机组型式和受力方式有自身特点^[2]。作为挡水建筑物,要承受上、下游水平作用力,使其内力分布较其他型式的厂房坝段更加复杂,厂房坝段结构的自振特性以及在地震作用下的动态响应等问题,需要通过理论与数值研究确定。因此,为了比较切合实际地反映地震效应,全面了解厂房坝段在地震作用下的应力、位移、配筋及防裂情况,使结构设计更加合理、安全、经济,本文采用三维有限元动力

* [收稿日期] 2006-06-08

[作者简介] 苏礼邦(1981-),男,青海湟中人,在读硕士,主要从事水工结构应力仿真分析。E-mail: sulibang56@126.com

反应谱法,对厂房坝段进行了计算分析,以期为厂房坝段结构的优化设计及抗震性能改进提供理论参数。

1 工程概况

以发电为主的某工程为河床式水电站,枢纽布置从左至右依次为土工膜防渗体堆石坝、电站厂房坝段、中间坝段、泄洪冲沙闸、右岸混凝土挡水坝段。电站厂房坝段布置在河床左岸,为三等中型工程,主要建筑物级别为 3 级,从左至右依次为安装间、电站厂房。厂房坝段布置了 4 台贯流式水轮发电机组,分为 4 个坝段,每个厂房坝段设置 1 孔排沙孔。厂房坝段结构如图 1 所示。

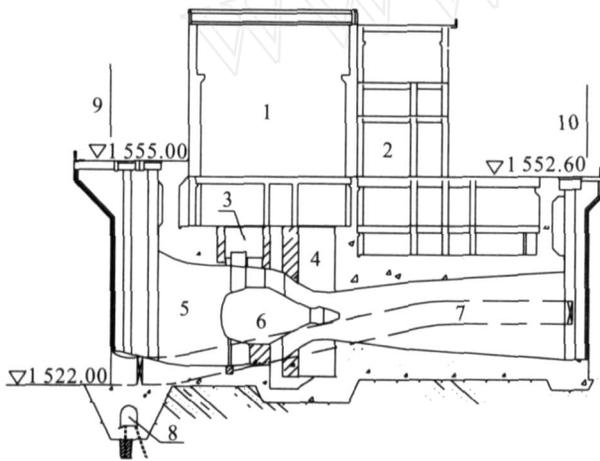


图 1 厂房坝段结构示意图

- 1. 主厂房; 2. 副厂房; 3. 发电机检修进入孔; 4. 水轮机检修进入孔;
- 5. 流道; 6. 灯泡体; 7. 排沙孔; 8. 灌浆廊道;
- 9. 坝下 0+000.00; 10. 坝下 0+072.79

Fig. 1 Structural representation of factory monolith
 1. Main generator room; 2. Auxiliary plant; 3. Inspection inlet of generator; 4. Inspection inlet of turbine; 5. Flow passage; 6. Bulb; 7. Sand sluice; 8. Grouting gallery; 9. Downstream of dam 0+000.00; 10. Downstream of dam 0+072.79

2 分析方法

计算分析采用有限单元法。静力问题有限元基本公式为: $KU = F$ 。式中: K 为总体刚度矩阵, U 为节点位移向量, F 为节点力向量。地震作用下的动力平衡方程为^[5]:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = MA_g \quad (1)$$

式中, M 、 C 、 K 分别为总体质量矩阵、总体阻尼矩阵和总体刚度矩阵; \ddot{U} 、 \dot{U} 、 U 分别为节点加速度向量、节点速度向量和节点位移向量; A_g 为地面运动的加速度。使用振型分解法将这个耦联的联立方程组变

为独立的微分方程组,进而可使用振型叠加法求结构动力响应。

在动力分析时,结构阻尼比的合理选取,对于结构动力响应的影响至关重要。结构阻尼的机理非常复杂,除结构本身外,还包含了相邻介质的相互作用和振动能量在地基及水中的逸散影响,这与水位、地基特性以及结构振动频率和激振强度有关,具有非线性特征。一般认为,结构承受的激励越大,阻尼比就越大,其对结构动力响应的影响也越显著。根据规范^[6],本文取阻尼比为 0.05。

动力分析用反应谱的振型叠加法获得应力,最后进行厂房坝段结构在动静荷载作用下结构响应的叠加,通过静动力反应叠加的位移、应力等综合评价厂房坝段的安全度。反应谱法是利用振型叠加的概念求结构在地震作用下的最大反应值,该法避免了在计算结构系统的位移和应力反应全部过程时,所涉及的庞大计算工作量,而是利用反应谱的概念,估算出每个反应分量的最大值,在工程实际中有较重要的实用意义。

3 计算模型的建立

3.1 基本假定

- (1) 各厂房坝段间设置有结构缝,因此各坝段独立承受荷载,坝段间无相互作用。
- (2) 库水假定为不可压缩的流体,故库水对坝的动力作用即相当于附加质量。
- (3) 假定坝体混凝土是线弹性的,地基为均匀的无质量弹性体。

3.2 计算范围及单元剖分

厂房坝段三维有限元计算模型取 3 # 坝段,该厂房坝段宽 21.82 m,顺水流方向长 72.8 m,由进水口段、机组段、尾水管段 3 部分组成。鉴于该水电站厂房坝段结构的特殊性,本文对发电站厂房坝段,包括进水管、扩散段、尾水管在内的水轮机整个流道、管型座、胸墙、排沙孔等都进行了三维实体模型模拟,对板、梁、柱系统,主、副厂房排架、屋架,上下游起重设备,主变压器等附属设备及机组灯泡体等进行了适当的简化,采用附加质量单元将折算荷载施加到厂房坝段的相应位置。计算模型中,基础范围向上游、下游和底部都取 1 倍的坝高。将地基视为无质量的弹性地基,只考虑其对厂房结构的约束作用。坝体剖分单元多数为六面体八节点单元,以少数四面体四节点单元作为过渡,主要部位的剖分单元沿厚度方向不少于 3 层,坝体部分单元长度不大

于 0.7 m。计算范围内主要结构剖分后得到的模型如下:节点总数 82 979 个,单元总数 55 943 个。其有限元模型如图 2 所示。

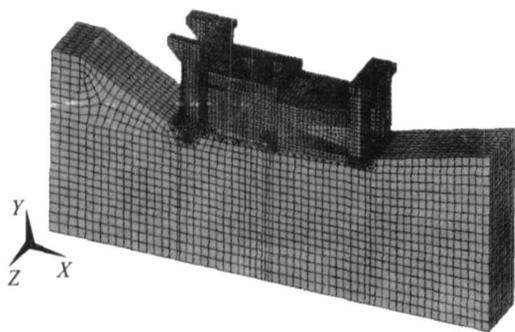


图 2 厂房坝段整体三维有限元网格图

Fig. 2 3-D finite element grid of factory monolith

计算模型应用的坐标系为:水流方向为 X 轴方向,向下游为正;沿高度方向为 Y 轴方向,向上为正;坝轴线方向为 Z 轴方向,向右为正。Y 向坐标值为相对高程,坐标系原点取在机组中心线位置,高程为 1 532.2 m,坝下 0+031.70 m。计算范围内结构剖分后得到离散化有限元模型如图 1 所示。模型基础部分约束情况为:底部为三向约束,上、下游面及左、右侧面各施加相应法向链杆约束。厂房坝段有限元模型采用的材料力学性能指标见表 1。

表 1 材料物理力学性能参数

Table 1 Mechanical behavior parameter of material

材料 Material	弹性模量/ GPa Elastic modulus	泊松比 Poisson's ratio	容重/(kN · m ⁻³) Bulk density
混凝土 Concrete	25.5	0.167	25
基岩 Base rock	0.615	0.320	/
钢材 Steel	200.0	0.300	78

3.3 荷载及荷载组合

抗震计算水位为上游正常蓄水位、下游最低尾水位。静荷载包括自身质量、设备质量、内水压力、外水压力、浪压力、泥沙压力和扬压力。动力计算中

库水对坝体地震反应的影响十分显著。鉴于计算库水可压缩性影响因素的复杂性,已有的研究成果^[7]表明,其结果与不可压缩水体相差并不很大,因此在实际工程的抗震计算中,通常不计库水的可压缩性影响。抗震规范对此也有相应规定,即库水的影响采用目前坝工界普遍采用的维斯特伽特(Westergaard)公式^[8]进行计算,即:

$$p_w = \frac{1}{8} \rho_w h \sqrt{H_0 h} \quad (2)$$

式中: p_w 为作用在坝体单位面积上的动水压力, ρ_w 为水的密度, h 为水平向设计地震加速度代表值, H_0 为库水总深度, h 为计算位置距水面的深度。计算的地震动水压力折算为与单位地震加速度相应坝面附加质量来考虑库水的影响,以往的工程实践^[8]表明,这种处理方法可以有效体现库水的动力影响。

4 反应谱分析

4.1 模态计算

利用模态分析可以确定结构的自振频率、振型及振型参与系数等振动特性。结构的振动特性决定结构对于各种动力载荷的响应情况,所以在进行其他动力分析之前,首先要进行模态分析。在厂房结构振动分析中,共振校核法使用较多,该方法以结构的自振频率是否避开机组的强振频率为评判标准。而水电站厂房振动是一个振源(机组)和振动体(厂房结构)都非常复杂的振动系统,机组和厂房结构的频率分布范围很广,共振校核往往难以奏效。

灯泡贯流式水电站厂房坝段是多构件组成的复杂结构,各结构构件的频率相差很大。为全面分析其自振特性,确定进口流道、尾水管、管型座、流道侧墙等部位的自振频率及振型,本文采用 Block lanczos 法^[5]计算了厂房结构的前 400 阶频率,其结果见表 2。

表 2 厂房结构整体模型的自振频率

Table 2 Self-vibration frequency of entire model

阶数 Number	频率/ Hz Frequency								
1	2.597	11	13.702	110	40.843	210	57.389	310	74.324
2	3.482	20	20.740	120	42.242	220	58.910	320	75.821
3	4.573	30	25.897	130	43.377	230	61.145	330	77.907
4	4.730	40	28.518	140	44.472	240	62.700	340	79.562
5	6.653	50	30.570	150	45.728	250	64.561	350	80.692
6	8.649	60	33.146	160	48.175	260	66.579	360	82.622
7	9.174	70	35.637	170	49.635	270	68.663	370	84.359
8	11.205	80	37.450	180	51.294	280	69.736	380	86.401
9	12.196	90	38.442	190	53.011	290	71.276	390	87.504
10	13.161	100	39.701	200	54.913	300	72.788	400	88.957

再根据各阶频率的振型图逐个观察比较各部位的自振频率及振型,确定了结构各部位的自振频率,结果见表 3。

表 3 厂房坝段各部位的自振频率

Table 3 Self-vibration frequency of each part of factory monolith

结构部位 Structure	阶数 Number	频率/ Hz Frequency
进口右侧墙 Right flank wall of inlet	19	19.304
进口左侧墙 Left flank wall of inlet	21	21.239
尾水管一阶 First order of hydraucone	28	25.124
尾水管二阶 Second order of hydraucone	55	32.430
管型座 Cast seat	74	36.666
流道钢衬一阶 First order of passage steel lining	29	25.690

由模态计算结果可以看出,厂房坝段的第 1 阶频率(基频)为 2.597 Hz,较相应的重力坝高;其前七阶频率介于 2.22 ~ 10 Hz,对应反应谱曲线上幅值比较高的部分,所以厂房坝段的地震响应比较强烈。加速度沿坝高的放大倍数如图 3 所示。从图 3 可以看出,顺河向、横河向加速度沿高程的放大系数比较大,达到了 3.65,竖向的放大系数相对较小,说明水平向的地震加速度响应比较强烈。

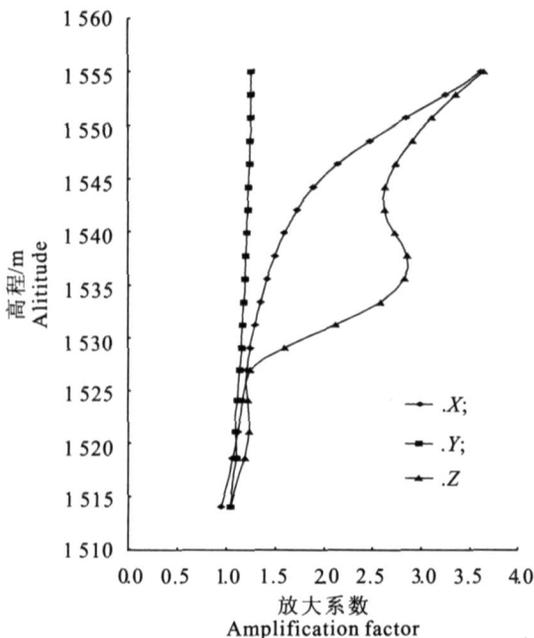


图 3 加速度沿坝高的放大系数

Fig. 3 Acceleration amplification factor along height of dam

4.2 反应谱计算

确定设计地震动参数是进行动力反应谱分析的

前提,其大小直接关系到水工建筑物的抗震安全性和工程的经济合理性。该厂房坝段为三级建筑物,安全级别为 Ⅲ 级。按国家地震局 1990 年 1/400 万《中国地震烈度区划图(1990)》,工程区地震基本烈度为 8 度。依据《水工建筑物抗震设计规范 DL5073-2000》规定,可确定厂房坝段抗震设防烈度为 8 度,水平地震动峰值加速度为 0.20 g,竖向设计地震加速度代表值取水平向的 2/3,即 0.133 g,场地特征周期 0.45 s。由此可以确定厂房坝段抗震计算所采用的设计加速度反应谱。在进行反应谱分析的振型组合时,参与组合的振型数目应足以表征结构的响应特性,对于拱坝动力分析一般参与组合的振型数目要大于 10^[8],本文计算时参与组合的振型数目选为 20,各阶振型的地震作用效应按平方和开方(SRSS)法组合。

5 计算结果

厂房坝段抗震分析结果包括各节点、单元的各类作用效应,可以按等值线图、云图、矢量图显示整体结果,也可以按剖面显示计算结果,以更好地了解坝体内部的位移应力分布情况。也可以动画显示各阶振型图,很方便地确定出厂房坝段各部分的振动频率,以利于确定结构某一部位的自振频率,进行共振校核。

抗震动力分析时水流方向、坝轴线方向和竖向同时受地震荷载作用,其中竖向地震动力为水平向的 2/3 倍,结构的总动力响应为三个方向动力响应的平方和开平方;总的地震作用效应是反应谱计算的地震动应力和静力计算得到的静应力的叠加。在进行静动叠加时,针对钢筋混凝土结构构件的抗震设计,若采用动力法计算地震作用效应,按规定应对地震作用效应进行折减^[7]。因此,动静叠加时对地震作用效应按系数 0.35 进行折减后,再与静力计算结果进行叠加。反应谱分析得到的动应力是交变应力,叠加后的应力需包括所有可能出现的不利应力状态,所以在进行动应力和静应力叠加时,应采用包络叠加法,即采用动力反应谱法给出正应力、剪应力和位移的结果,与对应静力计算结果正叠加(静加动),得到总的正应力、剪应力,再由叠加以后的正应力和剪应力计算最大主应力,即为第一主应力;同理,再进行负叠加(静减动)就得到正应力和剪应力的最小值,再由叠加以后的正应力和剪应力计算最小主应力,即为第三主应力。

由计算结果可以看出,由动力反应谱法给出的

静动叠加的整体位移最大值为 4.26 cm,发生在进水口边墙的顶部,其中,顺河向最大位移为 1.13 cm,横河向最大位移为 2.58 cm,竖向最大位移为 3.35 cm。厂房坝段的正应力响应大部分都在 0~1 MPa 左右,但是在几何尺寸突变处和结构各部分的连接处,以及管型座与混凝土的连接部位都产生了

应力集中,但应力集中的范围不大。图 5 给出了坝下 0+010.30 m、坝下 0+028.30 m 2 个垂直水流向剖面的第一主应力等值线图(拉应力为正,压应力为负)。从图 4 可以看出,在几何尺寸突变处及流道侧墙与顶板和底板交接部位都出现了应力集中。

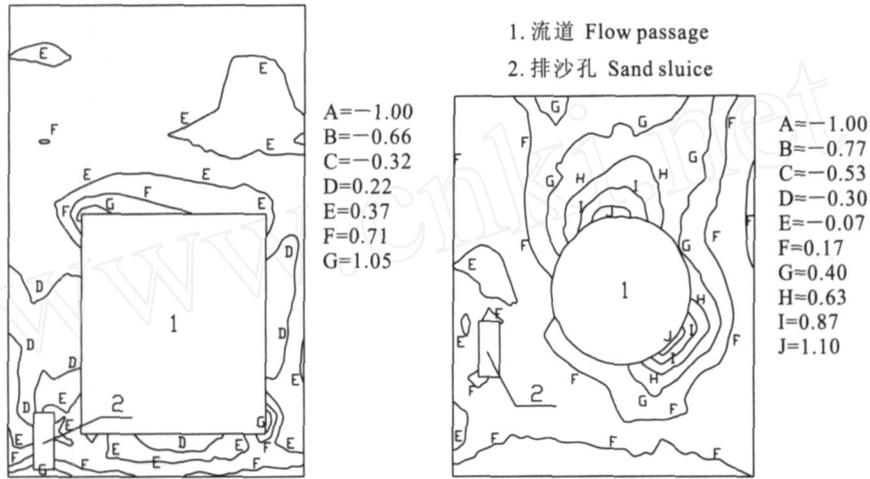


Fig. 4 First principal stress contour of typical section(stress unit:MPa)

6 结论与建议

1) 对该水电站厂房坝段三维有限元动力计算表明,厂房坝段的地震响应比较强烈,水平向的地震加速度响应尤为突出。

2) 从模态分析的前 400 阶振型图可以看出,流道钢衬的自振频率分布较为广泛,应注意钢衬与混凝土的连接。

3) 在地震作用下,上游齿墙与流道底面交接处,流道侧墙与顶板和底板交接处,发电机检修进入筒和水轮机检修进入筒两边侧墙,以及其他几何形状突变处都产生了应力集中,但是范围较小,对整个坝体的安全影响不大,坝体结构的强度基本满足要求,但也要注意这些部位是坝体的关键部位,应加强配筋确保安全。同时应增加厂房坝段各部分的连接性能,以利于坝段的整体抗震性能。

4) 管型座是机组重要的受力部位,在管型座处产生的应力集中尤其要引起注意,应加强配筋,以利

机组灯泡体安全。

[参考文献]

- [1] 沙锡林. 贯流式水电站[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999:1,45-47.
- [2] 马震岳,董毓新,李彦硕. 水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004:70-73.
- [3] 李彦硕. 水电站建筑物的振动[M]. 大连:大连理工大学出版社,1989:13-22.
- [4] 董毓新,李彦硕. 水电站建筑物结构分析[M]. 大连:大连理工大学出版社,1995:157.
- [5] Craig R R Jr. 结构动力学[M]. 常岭,李振邦,译. 北京:人民交通出版社,1981.
- [6] 中华人民共和国电力行业标准. 水工建筑物抗震设计规范(DL 5073-2000)[S]. 北京:中国电力出版社,2000:18.
- [7] 陈厚群,侯顺载,杨大伟. 地震条件下拱坝库水相互作用试验研究[J]. 水利学报,1989(7):26-28.
- [8] 李瓚,陈兴华,郑建波,等. 混凝土拱坝设计[M]. 北京:中国电力出版社,2000:563-569.