

喜河水电站厂房坝段空间整体稳定性分析

付海峰¹,陈 辉²,巢 捷³,彭 贵⁴

(1.天津港岛建设开发有限公司,天津 300450;2.南京市长江河道管理处,江苏 南京 210011;
3.江苏新大都置业有限公司,江苏 南京 210002;4.徐州长城基础工程公司,江苏 徐州 221003)

摘要 采用空间组合有限元法对陕西喜河河床式水电站厂房坝段整体结构进行应力分析.根据所求的坝基应力,采用刚体极限平衡原理计算抗滑稳定和抗浮稳定安全系数.计算模型有效地考虑了上游坝段,主、副厂房,下游挡水结构以及地基的相互作用.结果表明:喜河水电站厂房坝段整体结构的抗滑、抗震稳定和地基应力满足工程稳定要求.

关键词 河床式水电站 刚体极限平衡原理 稳定安全系数 组合有限元法

中图分类号 TV74 3TU311.2 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2004)07-0015-02

河床式水电站^[1]的特点是上游挡水坝,主、副厂房和下游挡水结构连成一体,共同承受上、下游水位及厂房内水压力,受力情况非常复杂.为了确保工程的安全,首先必须校核厂房坝段的整体抗滑稳定性和抗浮稳定性.如何利用空间有限元计算得到的应力,按目前规范的要求进行稳定性分析,是工程设计人员十分关心的问题.本文采用空间组合有限元法^[2]对喜河水电站厂房坝段进行整体结构应力分析,根据所求的坝基应力,采用刚体极限平衡原理计算抗滑稳定和抗浮稳定安全系数.计算模型有效地考虑了上游坝段,主、副厂房,下游挡水结构以及地基的相互作用.

喜河水电站为河床式水电站,位于陕西省安康市石泉县与汉阴县交界处,坝址距上游石泉县城公路里程为 42.3 km,距西安市 302 km.4~6 号坝段为厂房坝段,每个厂房坝段宽度为 22.5 m,总装机容量 180 MW,布置 3 台单机容量为 60 MW 的立轴轴流转浆式水轮发电机组,水轮机型号为 ZZ500—LH—600,最大发电水头 32.5 m,最小发电水头 13 m,额定水头 25.0 m.

1 计算原理和方法

1.1 计算模型

根据喜河水电站厂房坝段结构形状和受力特点,对于地基和上、下游坝段采用一般的空间六面体 8 结点或五面体 6 结点等参协调单元进行离散,对于楼板、梁、风罩、机墩、蜗壳、尾水管等则采用能够较好地反映弯曲变形性能的空间六面体 8 结点或五

面体 6 结点非协调单元进行离散.将各类单元组合在一起,采用空间组合有限元方法进行计算.

1.2 整体稳定计算

求出的坝体和岩基接触面上的单元应力可按照文献[3,4],用刚体极限平衡原理,推求出坝体的有限元形式的整体抗滑稳定安全系数 K .其基本原理是将抗剪断强度公式的相应项置换为接触面上的离散的单元应力,在接触面上经过叠加后即可确定 K 为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^e (\sigma_{ni} f' + c') A_i}{\sum_{i=1}^e \tau_{si} A_i} \tag{1}$$

式中: f' 和 c' 分别为坝体和岩基的摩擦系数和凝聚力; σ_{ni} 和 τ_{si} 分别为 i 接触面单元平行于垂直面的法向正应力和剪应力; A_i 为接触面单元 i 的法平面面积(法向即为接触面外法线方向); e 为坝体与岩基接触面上的单元总数.

1.3 整体抗浮计算

根据坝体和岩基接触面上的垂直单元应力.同样根据极限平衡原理求出坝体的整体抗浮稳定安全系数为

$$K' = \frac{\sum_{i=1}^e \sigma_z' A_i}{\sum_{i=1}^e \sigma_z'' A_i} \tag{2}$$

式中: σ_z' 为除扬压力以外的荷载作用下引起的接触面单元的垂直应力; σ_z'' 为仅有扬压力作用下引起的接触面单元的垂直应力.

作者简介:付海峰(1974—),男,天津人,博士,从事工程结构设计及项目管理工作.

2 计算基本资料

2.1 水库水位

上游正常蓄水位 362.00 m, 对应下游尾水位 330.60 m (1 台机满发时水位); 上游设计洪水位 362.20 m, 对应下游尾水位 353.60 m; 上游校核洪水位 367.00 m, 对应下游尾水位 358.10 m.

2.2 材料参数

坝体基础垫层、坝体胸墙及厂房上游墙采用 C20 大坝常态混凝土, 上游闸墩采用 C30 大坝常态混凝土, 尾水管外围及尾水挡水结构、主机间二期及下游立柱采用 C20 常态混凝土.

由于厂房基坑开挖后, 厂房基础落于微风化的凝灰岩体上, 根据地质资料并作适当概化, 在高程 306 m 以下认为岩体为微风化岩体, 在此之上的岩体为弱风化岩体. 考虑 GP3 断层的影响, 在计算中, GP3 断层的控制点为 0 + 000、右 0 + 158.35 m; 下 0 + 050 m、右 0 + 53.60 m. 断层宽度按 2.5 m 考虑, 贯穿整个厂房坝段. 倾角按垂直考虑. 对于坝底灌浆加固部位, 其弹性模量与相应的岩体相比提高 1.2 倍. 计算所采用的材料参数见表 1.

表 1 材料参数

材料类型	弹性模量 E/GPa	泊松比	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	抗剪断强度	
				f	c/MPa
C20 大坝常态	25.5	0.167	2450		
C30 大坝常态	30.0	0.167	2450		
C20 常态	25.5	0.167	2450		
弱风化岩体	5.0	0.300		1.3	1.5
微风化岩体	7.0	0.250		1.5	1.5
GP3 断层	2.0	0.350		0.4	0.05
弱风化基岩/混凝土				1.1	0.5
微风化基岩/混凝土				1.4	0.6

注 计算中不考虑岩基自重作用对结构的影响, 故取岩基和灌浆体的密度为零.

3 抗滑、抗浮及地基法向应力计算工况

厂房坝段整体抗滑稳定、抗浮稳定及地基面上的法向应力计算, 采用安全系数法, 所有荷载均考虑标准值, 荷载按基本组合和特殊组合两种情况考虑, 荷载组合见表 2. 计算工况 1 为上游正常蓄水位, 下游最低水位; 计算工况 2 为上游设计洪水位, 下游设计尾水位; 计算工况 3 为上游校核洪水位, 下游校核尾水位; 计算工况 4 为上游正常蓄水位, 下游最低水位.

4 计算模型

选取 2 号机组所在的整个厂房坝段作为计算对象, 进行整体三维有限元计算. 将上游坝段、主、副厂房, 下游坝段的主要混凝土结构以及一定范围的地基作为一个整体进行有限元网格剖分. 空洞主要考

虑廊道、吊物孔、楼梯孔和机坑进入通道. 断层仅考虑 GP3 断层, 宽度取 2.5 m, 并近似认为垂直.

表 2 抗滑、抗浮稳定及地基面法向应力计算荷载组合

荷载组合	运行情况	计算工况	荷载名称											
			混凝土自重	永久机电设备重	进口事故闸门重	尾水闸门重	事故闸门推力	尾水闸门推力	水重及静水压力	主副厂房活荷载	扬压力	浪压力	泥沙压力	机组运行荷载
基本组合	正常运行	1	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
	正常运行	2	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	
特殊组合	非常运行	3	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	
	机组未安装	4	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

注 混凝土自重包括厂房屋顶结构自重. 对第 4 种计算工况, 混凝土自重中扣除主机间二期混凝土的重量. 主、副厂房活荷载仅考虑副厂房活荷载. 水重仅考虑相应部分的荷载.

所有混凝土结构和地基都用空间块体单元进行模拟. 对于地基和上、下游坝段采用一般的空间六面体 8 结点或五面体 6 结点等协调单元进行离散, 在坝体和地基之间布置一层接触单元, 其性质和岩基一样. 对于楼板、风罩、机墩、蜗壳、尾水管等则采用能够较好反映弯曲变形性能的空间六面体 8 结点或五面体 6 结点非协调单元进行离散^[5], 在厚度方向至少布置 3 层单元. 对于下游立柱、牛腿、电缆层与水轮机层间的立柱也用空间非协调单元进行模拟.

坝体单元的材料性质按坝体材料分区定义, 地基单元的材料性质按地质资料情况进行概化分层, 在高程 306 m 以下为微风化岩体, 在此之上为弱风化岩体. 固结灌浆后的岩体作为相应的灌浆体单元考虑.

对于机组未安装计算工况, 主机间二期混凝土未浇. 计算时整体网格不变, 但将相应单元当作空气单元, 即假定相应单元的重度和刚度都为零^[6].

空间有限元网格的坐标系取为: 0 点设在机组中心的高程零点上 (右 0 + 101.85 m、下 0 + 030.75 m、▽ 0.0 m), x 轴垂直河流方向水平指向右边, y 轴沿顺河流方向水平指向下游, z 轴垂直指向上方. 图 1 为厂房坝段空间整体有限元网格, 其中单元总数为 36 480, 结点总数为 47 995.

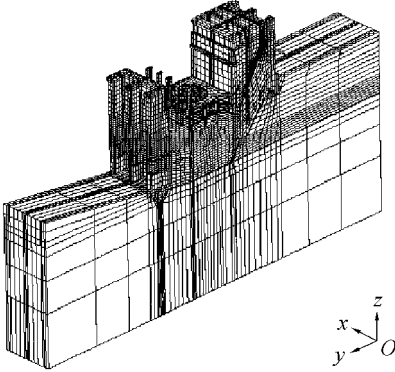


图 1 厂房坝段空间整体有限元网格

(下转第 71 页)

坏.切削磨损是固体颗粒斜向冲击引起的,只有固体颗粒的硬度大于管内壁表面的硬度时才会发生.工程中铁锰结核物中 SiO_2 的含量为 24.87%,其硬度为 800 kg/mm^2 (布式硬度), Fe_2O_3 含量为 43.5%,其硬度 600 kg/mm^2 左右,均大于或等于钢管的硬度 $200\sim 800\text{ kg/mm}^2$,这些具有磨削功能的固体颗粒在管道中高速运动,其能量足以切削磨损管路的表面并造成碎屑.

在输送的浆体中含有的铁锰结核物在浆体运动中呈悬浮状态.经验表明,当固体颗粒的 C/C_A 值(即管顶 $0.08D$ 处与管中心处固体颗粒体积分数之比)小于 0.5 时,铁锰结核物沿管底滑动并引起磨损,所以造成管底磨削成一道沟痕.由于这种磨损的存在,需定期将管道翻转方向.

(上接第 16 页)

5 成果整理和分析

按照以上计算模型和参数,对 4 种典型工况进行计算,求出了整体结构的位移、应力.现根据工程设计要求对计算成果进行整理和分析.

表 3 给出了基本组合下的计算工况 1 和计算工况 2 以及特殊组合下的计算工况 3 和计算工况 4 共 4 种计算工况下的抗滑稳定安全系数、抗浮稳定安全系数和对应的最大地基应力.

表 3 抗滑、抗浮稳定安全系数及最大地基应力

荷载组合	运行情况	计算工况	K	K'	最大地基应力	
					数值/MPa	位置
基本组合	正常运行	1	14.35	2.965	-1.54	下游齿墙
基本组合	正常运行	2	15.94	1.735	-1.42	下游齿墙
特殊组合	非常运行	3	17.74	1.609	-1.20	下游齿墙
特殊组合	机组未安装	4	10.73	2.153	-1.62	上游折角

由表 3 可以看出,最小抗滑稳定安全系数发生在特殊组合下的机组未安装工况 4,最小值为 10.73;最大抗滑稳定安全系数发生在特殊组合下的校核水位工况 3,最大值为 17.74.前者由于自重荷载最小,而后者则由于向上的扬压力增大.最小抗浮稳定安全系数发生在特殊组合下的校核水位工况 3,最小值为 1.609;最大抗浮稳定安全系数发生在基本组合下的正常运行工况 1,最大值为 2.965.

图 2 为工况 1 的 3 个横剖面(右 0+101.85m、右 0+89.35m)地基法向应力分布.

6 结 语

计算结果表明,喜河水电站厂房坝段的最小抗滑稳定安全系数发生在特殊组合下的机组未安装工

3 结 语

太湖东茭嘴疏浚工程中发生泵管堵塞、爆管及管道异常磨损等问题,主要原因是长距离输送含有粉质黏土的疏浚先例较少,加之土块中含有 0.3%~0.5%的铁锰结核物,这在疏浚施工中很少发生.针对这些问题,现场技术人员采取了以下措施:①加强了对挖泥船操作人员的管理,并指派有经验的机长操作;②密切注意输出压力的变化,及时调整输浆浓度,并在每一条管道上增设了 2 台接力泵;③调整了管道的曲率半径,并及时更换耐磨损的管道.通过这些措施,基本解决了施工中的问题,为下阶段太湖大范围地疏浚提供了可借鉴的经验.

(收稿日期 2004-07-28 编辑 马敏峰)

况,最小值为 10.73.最小抗浮稳定安全系数发生在特殊组合下的校核水位工况,最小值为 1.609.地基法向应力均为压应力状态,最大地基法向应力发生在特殊组合下的机组未安装工况,最大值为 -1.62 MPa.整体结构的抗滑、抗浮稳定和地基应力满足工程稳定安全要求^[7,8].

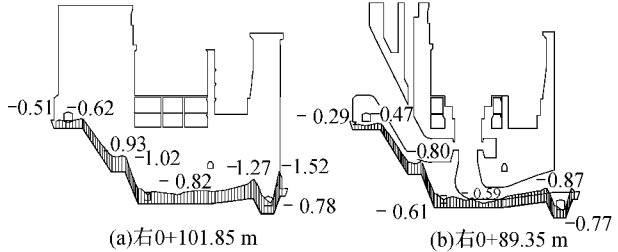


图 2 工况 1 横剖面地基法向应力分布(单位:MPa)

参考文献:

[1] SL266-2001,水电站厂房设计规范[S].
[2] 陈和群,彭宣茂.有限元法微机程序与图形处理[M].南京:河海大学出版社,1992.
[3] DL 5077-1997,水工建筑物荷载设计规范[S].
[4] DL/T 5077-1976,水工混凝土结构设计规范[S].
[5] 林绍忠,苏海东.水电站蜗壳保压浇筑混凝土结构的三维仿真分析[J].水利学报,2002(1): 45~48.
[6] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:水利电力出版社,1979. 120~160.
[7] 顾鹏飞,喻远光.水电站厂房设计[M].北京:水利电力出版社,1992.
[8] 傅作新.水工结构力学问题的分析与计算[M].南京:河海大学出版社,1993.

(收稿日期 2004-10-09 编辑 高建群)