

百色水电站进水塔抗震分析

张柏成¹, 李同春²

(1. 浙江省城乡规划设计研究院, 浙江 杭州 310007; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 由于百色水电站进水口边坡地质条件复杂、有多条断层和裂隙、且地质风化严重, 用协调的六面体单元考虑进水塔与地基相互作用的方法进行抗震分析非常困难。笔者提出对进水口边坡采用四节点四面体单元离散, 进水塔采用八节点六面体单元离散的非一致网格协调位移解法来考虑进水塔和边坡之间的相互作用, 在此基础上采用振型分解反应谱法对进水塔进行动力分析。计算表明, 进水塔的强度和抗滑稳定性满足规范要求。

关键词: 进水塔; 地基抗震; 振型分解反应谱法; 非一致网格协调位移解法

中图分类号: TV312

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2004)01-0029-03

百色水利枢纽位于郁江上游右江上, 坝址在百色市上游 22 km 处, 是一座以防洪为主, 兼有发电、灌溉、航运、供水等综合效益的大型水利枢纽。水电站建筑物环绕左坝头布置, 由岸塔式进水塔、引水发电隧洞、地下主厂房、地下主变洞、交通运输洞、通风疏散洞、尾水隧洞及尾水渠等建筑物组成。进水塔的塔高 60 m, 塔基础长 82 m, 顺水流方向宽 28 m。电站进水口区的抗震设防烈度为 8 度。

百色水电站进水口开挖边坡分为左侧边坡和下游侧边坡两部分, 坝首公路 234 m 高程以下最大坡高约 60 m。边坡体由多种岩层组成, 存在下软上硬的现象, 其岩石强度、水理性质和风化程度相差很大, 边坡结构较为复杂。根据现边坡已开挖揭露的地质情况看, 总体而言地质条件较差。左侧边坡为顺向坡段, 该段处于岩层扰曲部位, 岩层挤压强烈, 产状多变, 短小节理发育, 岩体较破碎, 有一条断层 F_{35} , 为层间挤压带。下游侧边坡为斜交逆向坡, 该处边坡处于岩层扰曲部位。

进水塔地基持力岩层主要为各类软岩类泥岩, 其次为中等坚硬的硅质岩, 各层岩性不均一, 岩质及变形模量差别大, 完整性差。进水塔地基软硬岩相间, 存在不均匀沉陷问题。进水塔地基持力岩层有 D_3L^1-3 薄层泥岩、 D_3L^1-4 薄 ~ 中 ~ 厚硅质泥岩、 $D_3L^{2-1(1)}$ 极薄层硅质岩、 $D_3L^{2-1(2)}$ 薄 ~ 中 ~ 厚硅质泥岩夹泥化夹层、 D_3L^{2-2} 薄层含洞穴白云质泥岩和 D_3L^3 薄 ~ 中 ~ 厚硅质泥岩等。

进水塔区存在 4 组结构面, 结构面以层面泥化

夹层、层间节理为主, 走向、间距、延伸长度多样。此外还有 5 条断层: F_{28-1} , F_{28-2} , F_{35} , F_{34} , F_7 , 层间充填物多为岩体碎块及砂质粘土, 破碎带宽度在 0.2 ~ 1.0 m 之间变化, 且各断层相互交错。各岩层和断层的力学参数见表 1。

1 研究目的

由于进水口边坡一期开挖揭露的地质条件较差, 可能危及边坡的稳定及进水塔正常运行的安全, 因此对二期开挖后的边坡和进水塔进行静、动力稳定与应力计算。本文主要介绍进水塔的抗震分析结果。进水口区的抗震设防烈度为 8 度, 按《水工建筑物抗震设计规范》要求, 该进水塔的工程抗震设防类别为甲类, 抗震计算宜采用动力法; 考虑到塔内外水体及地基的影响, 宜采用振型分解反应谱法^[1]。本文用上述方法分析得出地震作用下进水塔的应力强度和抗滑稳定性。

2 分析方法

百色水电站进水口边坡的地质条件十分复杂, 各岩体存在不同的风化程度, 而且边坡内裂隙、节理、结构面发育, 各断层存在相互交错。由于进水塔的受力变形是研究的主体, 因此其精度相对要求较高。采用八节点六面体单元离散; 地基精度相对要求较低, 本文借助商业软件 GID 采用四节点四面体单元离散可以大大节省前处理工作量。GID 是西班牙学者研究的专门用于前、后处理的商业软件, 对规则

结构用八节点六面体单元离散比较方便,而对复杂的地基输入一些控制信息进行四节点四面体单元离散则比较方便.目前,其它一些商业软件如 ANSYS, MARC, ABAQUS 等亦如此.这就带来了如何保证地基与结构在不同网格下接触面上的位移协调问题.本文提出了非一致网格协调位移解法来解决进水塔与地基网格不一致的问题,并在此基础上运用振型分解反应谱法求解进水塔的地震响应.

2.1 非一致网格协调位移解法

文献[2]中提出的局部非协调网格位移解法使得地基与结构可采用不同的网格剖分密度,但文献[2]中采用的地基与结构单元形式是一致的,均为八节点六面体单元.笔者提出的非一致网格协调位移解法是文献[2]中方法的拓展,其基本思路是地基和进水塔采用不同的单元形式,即地基为四面体单元,进水塔为六面体单元,在两者交界面处建立位移协调关系:以交界面上进水塔或地基相连一侧节点的位移变量作为基本变量,其点集称为协调节点集;而另一侧节点的位移变量作为从变量,其点集称为非协调节点集.通过线性插值建立从变量与基本变量之间的线性关系,从而导出以基本变量作为未知量的总体线性方程组.在建立两者关系的时候需要两者在交界面上的节点全部落在交界面范围内,并用节点数少的一侧节点为协调节点集,节点数多的另一侧节点为非协调节点集.以保证求解结果的稳定性.为了模拟结构与地基之间的接触面特性,在地基和进水塔之间设置厚度为 0.01 m 的薄层单元,薄层单元为常规的六面体单元,其单元的适用性见文献

[3],薄层单元的材料特性和其相邻地基材料特性相同.薄层单元的上层节点和进水塔的节点重叠,下层与地基节点之间按上述原理建立协调位移关系.

2.2 进水塔动力分析的振型分解反应谱法

工程设计单位最关心的是进水塔在考虑其和边坡的相互作用后地震响应最大值和进水塔的稳定问题.本文按规范要求采用振型分解反应谱法对进水塔进行了动力分析,并按照设计规范对进水塔的抗滑稳定性进行了验证^[1].

振型分解反应谱法是在振型分解法的基础上导出的一种近似方法.它首先是由振型分解法对进水塔进行自振特性分析,求出进水塔的自振频率和振型;然后由各振型的正交性将进水塔结构的耦合运动方程进行解耦,分解为 n 个独立的微分方程,在求出各振型的最大响应值后,用均方根法求解结构的最大响应值^[4,5].

3 计算模型与结果分析

3.1 计算模型

进水口边坡的范围为:垂直水流方向(x 向)为 226.5 m,顺水流方向(y 向)为 154 m,塔基深度 60 m,右侧按地形坡面取值.模型及材料分区见图 1 和图 2.进水塔由 4 个独立的塔段组成(从左到右分别为 1 号,2 号,3 号,4 号),底部由厚为 1 m 的混凝土垫层连成一起.单元模式采用空间八节点六面体单元.由于接触面和多种岩石材料接触,采用加权平均的办法求得各接触面单元的材料特性.塔体内外的动水压力简化为附加质量来考虑^[1].

表 1 进水口边坡岩体物理力学计算参数

岩层或 断层	风化程度	密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	泊松比 μ	变形模量 /GPa	饱和抗压强度 /MPa	抗剪参数		
						f	f'	c' /MPa
D_3L^1	强风化	1.7/1.8	0.35	0.10/0.05	6.0/3.0	0.35	0.35	0.04
	弱风化	2.2/2.3	0.33	0.80/0.40	15.0/8.0	0.45	0.49	0.14
	微风化	2.4/2.4	0.30	1.00/0.50	30.0/15.0	0.5	0.53/0.49	0.21/0.18
$D_3L^{2-1(1)}$	破碎带	1.9/2.4	0.38	0.08/0.06	8.0/4.0	0.4	0.42/0.38	0.07/0.05
$D_3L^{2-1(2)}$	强风化	1.4/1.7	0.35	0.30	4.0/3.0	0.35	0.39	0.11
	弱风化	1.9/2.4	0.32	0.60	17.0/12.0	0.55	0.53/0.49	
	微风化	2.0/2.5	0.28	4.00/3.00	38.0/32.0	0.55	0.59/0.56	0.25/0.18
D_3L^{2-2}	强风化	1.3/1.6	0.40	0.25/0.15	6.5/4.5		0.38	0.09
	弱风化	1.52/1.9	0.35/0.32	0.65	17.0/12.0		0.53/0.49	0.13/0.12
D_3L^3	强风化	1.6/2.0	0.35	0.45/0.25	0	0	0.38	0.13
	弱风化	2.0/2.5	0.32/0.30	1.80/1.60	50.0/40.0	0.6	0.63	0.32/0.25
β_{w4}^{-1}	强风化	1.9/2.4	0.32	2.00/1.50	26.0/19.0		0.57	0.32
F_{28-1}, F_{34} F_{28-2}, F_{35}		1.3/1.4	0.4	0.05	1.8/1.6	0.35	0.35	0.01
F_7		2.0/2.4	0.39	1.50	8.0	0.35	0.35	0.01

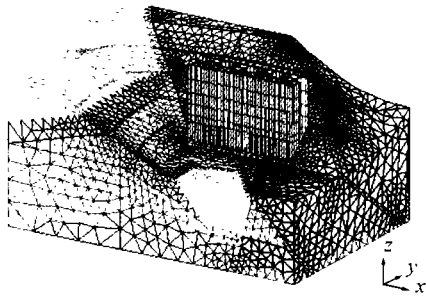


图1 计算模型示意图

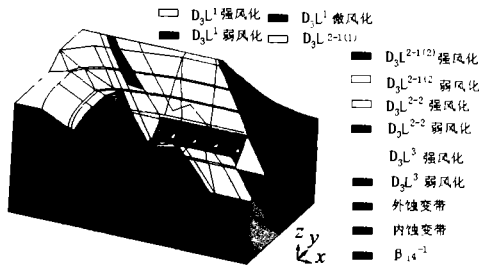


图2 进水口边坡材料分区示意图

3.2 计算结果

3.2.1 进水塔振型、位移、应力分析

对进水塔采用振型分解反应谱法进行分析计算,按常规不考虑边坡地基质量,仅将边坡地基作为弹性垫层考虑.计算时,考虑了 x, y, z 三个方向的地震作用;动力分析时,考虑了进水塔前12阶振型影响,相应的各阶振型频率、参与系数见表2.

表2 考虑与地基相互作用进水塔地震参数

阶数	自振频率 /Hz	自振周期 T/s	振型参与系数	设计反应谱
1	1.476	0.6775	1.6580	1.080
2	1.620	0.6173	1.7240	1.175
3	1.950	0.5128	0.4018	1.389
4	2.490	0.4011	0.4417	1.732
5	2.855	0.3502	0.7772	1.958
6	3.080	0.3247	1.2430	2.095
7	3.538	0.2827	1.0160	2.250
8	3.872	0.2583	0.1857	2.250
9	4.843	0.2065	0.8312	2.250
10	5.132	0.1952	0.8040	2.250
11	6.739	0.1484	0.2594	2.250
12	8.324	0.1201	1.1920	2.250

由计算结果可知,在地震荷载作用下,进水塔的 x 向、 y 向最大变形约为1.9cm,进水塔底部的不均匀沉降约为3cm.由于各塔段之间基本是分开的,所以振动可以看作是各塔段独立的振动.因各塔段的结构形式一致,1号、4号塔的约束条件是近似一致的,2号、3号塔的约束条件是一致的,只是所在的地质材料参数有所不同,所以各方向的振动变形基本呈对称形式.进水塔前2阶振型示意图见图3和图4.

对进水塔用振型分解反应谱法进行动力分析时,进水塔内的应力大部分满足抗拉和抗压强度要求.在

进水塔底部的垫层部位局部产生了较大的拉应力,最大拉应力出现在2号和3号塔段之间,大小为2236kPa.建议在进水塔的底部及垫层部位适当配筋.

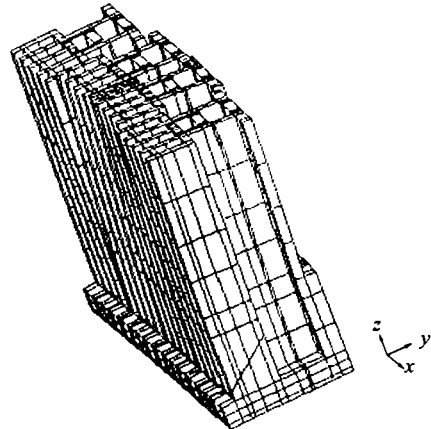


图3 进水塔地震时第1阶振型

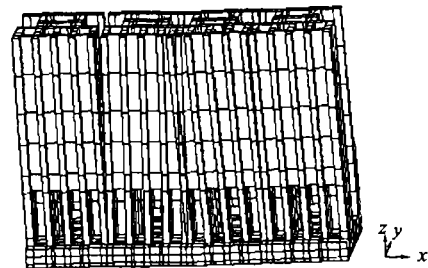


图4 进水塔地震时第2阶振型

3.2.2 进水塔抗滑稳定性分析

按照文献[1]中10.1.13的要求,用抗剪断强度公式验算进水塔的抗滑稳定性.计算中采用的 f' 和 c' 值为塔底的平均值,分别为0.536kPa和196.5kPa.计算工况为:运行工况(考虑地震作用),计算中采用的荷载有动水压力,进水塔垂直向地震惯性力(方向向上)、水平向地震惯性力(方向指向坡外),进水塔自重,边坡对进水塔的作用力.运行工况的抗滑稳定安全系数为4.2,大于规范要求的2.3,说明进水塔的抗滑稳定性是满足要求的.

4 结 语

a. 在复杂的地质条件下,采用本文提出的非一致网格协调位移解法来考虑边坡和结构的相互作用问题可以减少计算的前处理工作量.

b. 对百色水电站进水塔采用建立在非一致网格协调位移解法基础上的振型分解反应谱法进行抗震分析,结果是正确、合理的.

c. 经过计算可知:考虑地震作用,进水塔的结构基本满足要求,建议进水塔底部适当配筋,同时增加各塔段之间连接性能,以利于进水塔的整体抗震性能;进水塔的抗滑稳定性满规范要求. (下转第46页)

可增加药量提高爆破效果,缺点是钻孔工作量大.槽内钻爆则克服了这一缺点,钻孔工作量小,爆破效果好,且安全,缺点是干扰防渗墙施工.槽内聚能爆破方法简便迅速,虽然效果稍差些,但应用较多,显著地提高了块球体和硬岩中的钻进工效,加快了施工进度.

b. 用 5t 或 10t 重锤冲砸.当块球体或硬岩经爆破炸裂后,块度不大时采用重锤冲砸,可明显提高钻进工效.

c. 用耐磨冲击高强合金钻头或重锤的冲击刃冲砸,可增强破岩效果,减小钻头磨损,钻进工效有显著提高.

5.3 陡坡段防渗墙成槽措施

a. 先施工端孔,用冲击反循环钻机钻进,穿过堰体和覆盖层至基岩陡坡最高点后,改换十字钻头,手动操作间断冲击,发现孔歪时回填块石和碎石及时进行修正,在陡坡斜面冲砸出台阶后,下置定位管(排渣管)和定位器(套筒钻头),用全液压工程钻机钻爆破孔,然后下置爆破筒,提升定位管和定位器进行爆破.爆破后用冲击钻进行冲击破碎,直至终孔.

b. 中间部位的堰体和覆盖层可由液压铰和抓斗施工,至基岩陡坡最高点改由冲击钻施工,自左至右(即自陡坡由高至低)平推钻机,移距 0.5 m(半钻),按上述钻爆结合方法施工.

c. 由于坡陡岩硬,钻孔极易顺坡溜钻偏斜,除采用回填块石修孔外,也采取了定向聚能爆破纠偏措施,即将多个聚能爆破筒焊在定位架上,下至偏斜深度位置,爆破筒方向对准斜坡起爆,效果十分显著.

5.4 槽孔施工安全措施

a. 调整槽孔长度.合适的槽孔长度是陡坡段槽孔安全施工的重要因素,原设计的施工方案是短槽孔(槽长 2.8 m 或 3.5 m),小台阶,但在施工时考虑到如二期槽孔太短,将被一期槽孔施工时击穿而互相串通,从而增加施工难度,并危及槽孔安全,也会影响浇筑和成墙工程质量,为此重新调整了陡坡段的槽孔长度,尤其是二期槽孔长度不宜短,均调整为大于 6 m,从而保证了上游防渗墙安全竣工.

b. 浇筑 8 MPa 混凝土.下游防渗墙正处于汛期施工,外江水位高,基坑又抽水,且有子堰的侧压力,因此槽孔坍塌十分严重,为确保其安全施工,向槽内浇筑 8 MPa 混凝土进行加固,效果较好.

c. 两个二期槽孔同时浇筑混凝土,并使之平衡,防止墙体产生滑动破坏.

d. 陡坡段下部浇筑 8 MPa 混凝土,防渗墙下基岩进行灌浆插锚杆,以加强防渗墙体与基岩的结合.

6 结 语

三峡工程二期上游围堰防渗墙施工综合难度为国内外罕见,通过引进先进设备,采用新技术、新材料、新工艺攻克了砂卵石漏失层、陡坡段嵌岩等一系列技术难关,圆满完成了防渗墙施工任务.防渗墙完工后,围堰渗水量、渗透比降均小于设计允许值,防渗效果良好,为二期工程施工提供了可靠保障,并将防渗墙的设计及施工技术提高到了一个新水平.

(收稿日期:2003-04-01 编辑:熊水斌)

(上接第 21 页)

c. 标底的正确设立.建议引入概率论计算复合标底,招标人计算的标底与投标报价的权重由招标人根据工程项目复杂程度、招标人的意图等加以确定,并在招标文件中加以明确规定.

d. 鼓励采用无标底招标.对于市场环境较好、市场机制较为完善、招标投标较为规范的地区(行业),鼓励采用无标底招标,以充分发挥市场竞争机制作用,提高经济效益.这也是今后招标投标发展的趋势.

参考文献:

- [1] 国家计划委员会政策法规司,国务院法制办公室财政金融法制司.中华人民共和国招标投标法释义[M].北京:中国计划出版社,1999.
- [2] 丰景春,高玉华,杨建基.建设项目管理理论与实务[M].南京:河海大学出版社,2002.
- [3] 丰景春,陈立民.水利工程招投标综合评分法报价赋分模型[J].水利经济,2003,21(3):25~27.

(收稿日期:2003-01-15 编辑:张志琴)

(上接第 31 页)

参考文献:

- [1] SL203-97,水工建筑物抗震设计规范[S].
- [2] 李同春,李森,温召旺,等.局部非协调网格在高拱坝应力分析中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(1):42~45.
- [3] 姚纬明,李同春,任旭华.带软弱结构面岩体的弹塑性有限元分析[J].河海大学学报(自然科学版),1999,27(3):34~38.
- [4] 赵光恒.结构动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1996.
- [5] 李杰,李国强.地震工程学导论[M].北京:地震出版社,1992.
- [6] 温召旺.高拱坝设计中的有限元法实用化研究[D].南京:河海大学,2002.

(收稿日期:2003-03-14 编辑:张志琴)