

【工程勘测设计】

大型水电站配水环管充水保压值优化分析

樊小发¹, 张洪星², 梁成彦¹, 吉晓红¹

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 黄河水利委员会 规划计划局, 河南 郑州 450003)

摘 要:厄瓜多尔 Coca Codo Sinclair 电站拥有 8 台大型高水头冲击式机组, 最小水头 604.90 m, 需要配水环管和外侧混凝土共同承担水头压力, 充水保压值至关重要, 因此采用三维有限元方法对拟定的配水环管三种保压方案进行了模拟。对比分析不同保压方案在正常运行水头作用下钢衬、环向钢筋的应力及外围混凝土应力变形分布规律, 同时考虑配水环管与外围混凝土之间的接触状态及混凝土的承载比等因素, 最终选用最小水头压力的 85% 作为保压值。

关键词:高水头; 配水环管; 保压值

中图分类号:TV741; TU991.3 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1000-1379.2019.09.024

Analysis of Water Filling Pressurization Value Optimization for Distribution Pipe of Large-Scale Hydropower Station

FAN Xiaofa¹, ZHANG Hongxing², LIANG Chengyan¹, JI Xiaohong¹

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;
2. Department of Planning and Programming, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: There are eight high water head of great units in Coca Codo Sinclair Power Station of Ecuador. The lowest water head is 604.90 m. Water filling pressurization distribution pipes and external concrete structures are structurally complicated and jointly bear the water pressure of high water head, so the pressurization value is extremely important. This paper carried out simulation of three pressurization alternatives for the distribution pipe using three dimensional finite element method, compared the circumferential stress of steel lining and circumferential reinforcement of each alternative under normal operating head, and analyzed the stress and deformation distribution rules of external concrete while taking into account factors such as the contact between distribution pipe and external concrete and the concrete bearing ratio. In the end, 85% of the lowest water head was adopted as pressurization value.

Key words: high water head; distribution pipe; pressurization value

1 项目概况

Coca Codo Sinclair(简称 CCS)水电站为径流式电站, 位于南美洲厄瓜多尔国北部 Napo 省与 Sucumbios 省交界处, 该水电站厂房为尾部式地下厂房, 安装 8 台冲击式水轮机组, 总装机容量 1 500 MW。最大静水头 620.75 m, 最小静水头 604.90 m, 配水环管进口断面直径 2.2 m, 配水环管材料采用 Q500D, 管壁厚度 30~60 mm。配水环管与外围混凝土结构处理措施采用冲水保压方式, 即金属配水环管之间不设置弹性垫层, 在配水环管充水保压状态浇筑外围混凝土。

笔者以 CCS 电站充水配水环管为研究对象, 采用三维有限元法对配水环管结构 3 种保压方案进行了研究, 对比分析不同保压方案钢衬、环向钢筋的应力及外围混凝土应力变形分布规律, 为保压值的优化提供依据。

2 计算模型和工况

2.1 计算方案及荷载组合

充水保压分别选取最小静水压力的 75%、80% 和 85% 三种方案, 在正常运行工况下分别对配水环管结构进行有限元分析, 计算荷载主要包括内水压力、结构自重、水轮发电机组运行动荷载、各层楼板荷载等, 得出不同保压值方案在正常运行工况下配水环管和外围混凝土的应力变形分布规律。各保压方案及荷载组合见表 1。

2.2 计算模型

为了更好地反映实际情况, 计算时取主厂房 3[#]和 4[#]两个机组段作为分析对象。计算范围: 沿厂房纵轴

收稿日期: 2017-12-25

作者简介: 樊小发(1979—), 女, 湖南郴州人, 高级工程师, 主要从事水利水电工程电站厂房设计工作

E-mail: 179915410@qq.com

线方向总长为 40.68 m,沿厂房上下游方向宽度为 26.0 m)高度为 27.0 m。
m,从建基面(高程 596.50 m)至发电机层(高程 623.50

表 1 计算方案和荷载组合

方案 编号	保压水 头值/m	结构自 重荷载	定子基础板 竖向荷载/kN	下机架基础板 竖向荷载/kN	发电机层均布活 荷载/(kN·m ⁻²)	母线层均布活荷 载/(kN·m ⁻²)	水轮机层均布活荷 载/(kN·m ⁻²)	联合承载内压 (考虑分项系数后)/MPa
LC-1	454	√	867×8	33×6	5	5	5	4.149
LC-2	484	√	867×8	33×6	5	5	5	3.725
LC-3	514	√	867×8	33×6	5	5	5	3.302

在计算范围内,对配水环管及外围混凝土均按实际尺寸模拟。计算模型的底部施加全约束;上下游侧高程 613.5 m(水轮机层)以下采用弹性连杆考虑围岩的约束作用,以上自由;两侧岩石开挖高程以下为法向约束,其余自由。

模型单元分为结构混凝土、配水环管、机井内衬和岩石 4 组。混凝土和岩石采用 8 节点六面体单元,个别区域采用四面体单元过渡;配水环管和机井内衬采用 4 节点平板壳单元^[1-4]。整体模型和配水环管网格见图 1、图 2。

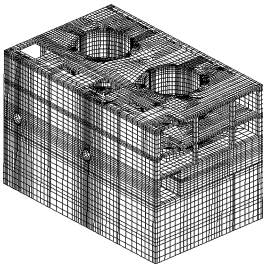


图 1 整体模型网格

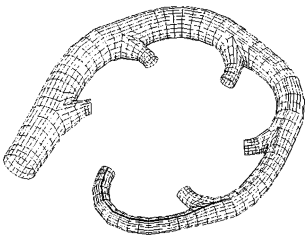


图 2 配水环管网格

3 计算结构分析

3.1 配水环管外围混凝土应力

根据计算结果,整理了 3 种保压方案、3#和 4#机组段配水环管外围混凝土 7 个典型断面的环向应力和水流向应力,断面编号及位置见图 3,特征点位置见图 4。3#和 4#机组应力大小及分布规律基本相似,部分特征点的环向应力见表 2(环向应力均为相应截面上的正应力,拉应力为正,压应力为负)。

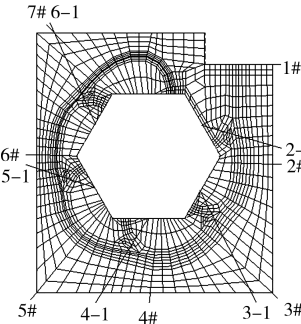


图 3 混凝土典型断面位置

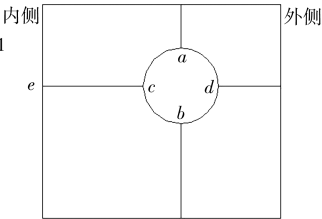


图 4 断面特征点位置

表 2 3#机组典型断面特征点环向应力

断面 编号	特征点	环向应力/MPa		
		LC-1	LC-2	LC-3
1#	顶部内缘 a	2.61	2.35	2.09
	底部内缘 b	2.39	2.15	1.90
	内侧内缘 c	2.77	2.47	2.16
	外侧内缘 d	2.56	2.27	1.99
	内侧外缘 e	0.38	0.32	0.26
2#	顶部内缘 a	2.97	2.67	2.36
	底部内缘 b	3.30	2.97	2.63
	内侧内缘 c	3.87	3.43	2.99
	外侧内缘 d	3.28	2.92	2.56
	内侧外缘 e	2.73	2.41	2.10
3#	顶部内缘 a	3.02	2.71	2.40
	底部内缘 b	2.89	2.60	2.31
	内侧内缘 c	4.08	3.62	3.16
	外侧内缘 d	2.65	2.36	2.07
	内侧外缘 e	1.65	1.45	1.25
4#	顶部内缘 a	2.78	2.49	2.20
	底部内缘 b	2.70	2.42	2.15
	内侧内缘 c	3.92	3.51	3.09
	外侧内缘 d	3.17	2.84	2.52
	内侧外缘 e	0.84	0.74	0.64
5#	顶部内缘 a	2.60	2.33	2.06
	底部内缘 b	2.75	2.47	2.19
	内侧内缘 c	2.97	2.63	2.30
	外侧内缘 d	2.26	2.01	1.77
	内侧外缘 e	0.59	0.49	0.40
6#	顶部内缘 a	2.85	2.55	2.26
	底部内缘 b	2.99	2.68	2.38
	内侧内缘 c	3.11	2.74	2.38
	外侧内缘 d	3.05	2.71	2.37
	内侧外缘 e	1.37	1.19	1.01
7#	顶部内缘 a	2.60	2.34	2.08
	底部内缘 b	2.62	2.35	2.08
	内侧内缘 c	2.44	2.15	1.85
	外侧内缘 d	2.09	1.85	1.60
	内侧外缘 e	0.16	0.11	0.05

图 5~图 7 直观地反映了配水环管外围混凝土在各保压方案下超过混凝土抗拉强度(3.14 MPa)的范围(黑色部分)。

(1) LC-1 方案混凝土应力。该方案保压值为 4.54 MPa,即最小静水压力的 75%,配水环管外围混凝土在内水压力和上部结构传来的荷载共同作用下,各断面环向拉应力较大,最大达 4.08 MPa,出现在 3#机

组 3#断面内侧腰部内缘。从数值上看,2#~4#断面紧贴配水环管的混凝土内缘环向应力超过混凝土抗拉强度(3.14 MPa)。在内水压力作用下,各断面靠外侧水流向基本呈受拉状态,内侧基本呈受压状态(1号断面除外)。

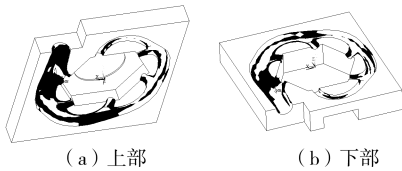


图5 LC-1方案3#机组配水环管外围混凝土第一主应力超过3.14 MPa的范围

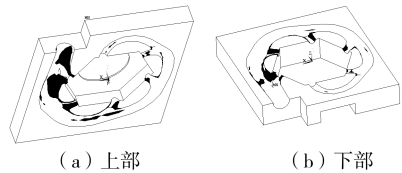


图6 LC-2方案3#机组配水环管外围混凝土第一主应力超过3.14 MPa的范围

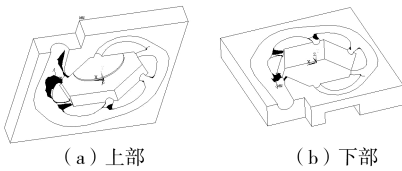


图7 LC-3方案3#机组配水环管外围混凝土第一主应力超过3.14 MPa的范围

虽然该方案下紧贴配水环管的混凝土内缘环向应力较大,但其沿径向衰减较快,超过混凝土抗拉强度的范围并不大,主要集中在紧贴配水环管附近的区域,由此可以判断,混凝土开裂范围不会太大,不会过多削弱配水环管外围混凝土的整体性,对配水环管的稳定运行不会有很大影响。但值得注意的是,配水环管喷嘴周围混凝土可能开裂,对耐久性有一定影响,该处的配筋应当加强。

(2) LC-2方案混凝土应力。该方案保压值为4.84 MPa,即最小静水压力的80%。联合承载值约为LC-1方案的90%。总体看,该方案混凝土的应力水平低于LC-1方案的。各断面环向拉应力依然较大,最大为3.62 MPa,出现在3#机组3#断面内侧腰部内缘,这与LC-1方案是一样的。该方案环向应力分布规律与LC-1方案类似,LC-2方案相同位置的应力值约是LC-1方案的90%,这与LC-2方案的联合承载值约为LC-1方案的90%是对应的。这种对应关系说明,配水环管外围混凝土环向应力主要与联合承载值大小有关。2#~4#断面紧贴配水环管的混凝土内缘环向应力超过了3.14 MPa,该方案不能避免紧贴配水环

管的混凝土出现开裂情况。

LC-2方案混凝土第一主应力超过3.14 MPa的区域位置与LC-1方案基本类似,只是范围有所减小,但配水环管喷嘴周围混凝土应力水平依然较高。总体上看,尽管该方案联合承载值约为LC-1方案的90%,但可以预见其减小混凝土开裂范围效果并不明显。

(3) LC-3方案混凝土应力。该方案保压值为5.14 MPa,即最小静水压力的80%。联合承载值约为LC-1方案的80%。该方案混凝土的应力水平是3个方案中最低的。各断面环向拉应力最大值依然出现在3#机组3#断面内侧腰部内缘,最大值为3.16 MPa,仅该断面紧贴配水环管的混凝土内缘环向应力大于3.14 MPa,比LC-1、LC-2方案大为减小。

LC-3方案混凝土第一主应力超过3.14 MPa的区域远小于LC-1和LC-2方案的,说明选取0.85倍最小水头压力作为保压值对减小混凝土开裂范围有明显效果。

3.2 配水环管外围混凝土承载比

某个断面配水环管环向应力(联合承载部分)的平均值为 σ_0 ,可以初步计算外围混凝土的承载比 η :

$$\eta = 1 - \frac{p_b}{p} - \frac{\delta \sigma_0}{rp}$$

式中: p_b 为配水环管保压值,MPa; p 为配水环管设计内水压力(含水击压力),该工程为7.5 MPa; δ 为典型断面处配水环管厚度,mm; r 为典型断面处配水环管半径,mm。

根据计算结果,整理了3#机组1#、2#、4#、6#等典型断面的配水环管环向应力和外围混凝土承载比,见表3。

从表3可以看出,对于充水保压配水环管方案,外围混凝土承载比最大未超过30%。3种方案下各截面承载比的变化规律不变。充水保压值越高,外围混凝土承载比越小,越能发挥配水环管的承载作用,这对混凝土受力是有利的。

3.3 配水环管保压值的确定

从上述分析可以看出,配水环管保压值对外围混凝土的应力水平有着明显的影响。显然保压值越高,对混凝土结构受力越有利,配筋量越小,越能充分发挥配水环管的承载作用。充水保压措施实质上是使配水环管和外围混凝土之间在充水之前有一个初始缝隙。从保证机组稳定运行的角度讲,需要保证实际保压值与因冷缩缝隙而增加的“保压值”之和小于电站最小水头压力,这样就可以保证在任何运行水头情况下不出现配水环管脱空现象。

综上所述,配水环管保压值的确定,既要考虑外围

混凝土应力的影响,又要考虑机组长期稳定运行的要求。LC-3 方案保压值对外围混凝土的受力状况有较

大改善。结合 CCS 水电站的具体情况,配水环管保压值建议确定为最小水头压力的 85%,即 5.14 MPa。

表 3 3*机组配水环管环向应力和外围混凝土承载比

方案	断面	配水环管环向应力/MPa				环向应力平 均值 σ_0 /MPa	配水环管 半径 r /mm	配水环管 厚度 δ /mm	承载比 η %
		顶部	底部	内侧	外侧				
LC-1	1#	19.75	17.04	20.81	20.13	19.43	1 100.0	60	25.84
	2#	30.57	28.50	34.59	26.93	30.15	1 065.6	55	19.51
	4#	25.08	24.04	34.18	24.73	27.01	966.0	50	21.61
	6#	24.58	25.52	29.71	24.78	26.15	674.4	35	22.45
LC-2	1#	17.74	15.25	18.57	17.93	17.37	1 100.0	60	23.25
	2#	27.44	25.59	30.78	24.02	26.96	1 065.6	55	17.59
	4#	22.49	21.56	30.58	22.16	24.20	966.0	50	19.43
	6#	22.01	22.91	26.40	22.06	23.35	674.4	35	20.24
LC-3	1#	15.74	13.46	16.34	15.74	15.32	1 100.0	60	20.67
	2#	24.31	22.68	26.99	21.13	23.78	1 065.6	55	15.67
	4#	19.90	19.09	27.00	19.60	21.40	966.0	50	17.26
	6#	19.44	20.31	23.10	19.35	20.55	674.4	35	18.03

4 结 语

冲水保压蜗壳(配水环管)结构设计的关键是保压值的选取^[1-4]。经分析比较发现,保压值取最小水头(604.9 m)的 75%、80%和 85%三种方案下,外围混凝土的应力水平和配筋量随保压值的增大逐渐降低。配水环管保压值的确定,既要考虑外围混凝土应力和配筋的影响,又要考虑机组长期稳定运行的要求。综合考虑,CCS 水电站配水环管保压值建议确定为最小水头的 85%,即 5.14 MPa。

目前,CCS 电站已经正常运行发电,表明配水环管充水保压设计方案经济合理,为类似工程积累了宝贵

经验。

参考文献:

[1] 亢景付,孙少杰,张沁成.西龙池抽水蓄能电站蜗壳结构三维有限元计算分析[J].水力发电学报,2007(2):37-41.
[2] 王海军,黄津民,王日宣.充水保压钢蜗壳外围混凝土应力分析方法研究[J].中国农村水利水电,2007(6):131-136.
[3] 聂金育,伍鹤皋,苏凯.抽水蓄能电站蜗壳保压值优化研究[J].水电能源科学,2009(2):151-154.
[4] 郭涛,张立翔,姚激.大型水电站蜗壳保压值的优化分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2011(10):1023-1026.

【责任编辑 张华岩】