

文章编号:1001-5485(2009)07-0043-05

三峡左岸电站蜗壳保压浇筑外围混凝土仿真计算

崔建华^{1,2}, 苏海东², 陈 琴²

(1. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072; 2. 长江科学院 材料与结构研究所, 武汉 430010)

摘要:三峡工程左岸电站采用保压方式浇筑蜗壳外围混凝土。为研究钢蜗壳与外围二期混凝土交界面的传力以及可能存在的间隙,采用三维非线性有限元法,对左岸 10[#] 机组进行模拟施工过程的温度场与温度应力仿真计算,给出了在不同运行情况及不同季节时二者之间传力及间隙的变化。计算值与现场观测值有很好的 consistency。

关键词:蜗壳;保压浇筑;温度应力;仿真计算;有限元法

中图分类号:P642 **文献标识码:**A

1 概 述

国内外中高水头水电站蜗壳大都采用钢制蜗壳外包大体积混凝土,以此来承受结构自重、内水压力和机组荷载。按承受内水压力的方式不同,浇筑方式主要分为 3 种:①垫层式,在钢蜗壳外铺设垫层后浇筑外围混凝土;②保压式,在钢蜗壳充水保压状态下浇筑外围混凝土;③直埋式,在钢蜗壳外直接浇筑混凝土。已建成的三峡水电站左岸厂房蜗壳及右岸大部分蜗壳都采用充水保压浇筑混凝土的埋入方式。

保压浇筑方式的施工是在维持一定内水压力 $H_{保}$ 的情况下浇筑外围混凝土,一段时间后放水卸压。如果仅考虑内水压力的作用,运行期间内水压力 $H_{运} < H_{保}$ 时,钢蜗壳与混凝土之间存在间隙, $H_{运}$ 由钢蜗壳独立承担; $H_{运} > H_{保}$ 时,钢蜗壳与混凝土贴紧,剩余水压 $H_{运} - H_{保}$ 由钢蜗壳和外围混凝土共同承担。在以往,对大型机组保压浇筑外围混凝土的蜗壳应力简化计算中,只考虑了超出保压水头的那部分水压力作用时钢蜗壳与外围混凝土的联合承载,即认为在水压达到保压水头的时刻,蜗壳与外围混凝土之间刚好接触,且交界面处传力为零^[1]。但相关研究结果与工程观测资料都表明,此时二者之间的间隙和传力都呈现出均匀性。文献[2]提出用模拟充水预压蜗壳结构的施工及运行全过程的三维有限元仿真算法替代简化算法,以反映预压水头及预压施工缝隙对整个结构的影响。

实际上,在分析蜗壳与外围混凝土联合受力情

况时,除内水压力外,温度也是不可忽视的影响因素。施工过程、混凝土绝热温升随时间的变化、钢蜗壳与外围混凝土不同的线膨胀系数、运行期相对于施工期的温差引起的混凝土和钢蜗壳的温度变形、气温年变化等都会影响到两者间的间隙与传力。文献[3]则在模拟施工过程的三维有限元仿真计算中,考虑温度荷载对传力的影响,针对不同季节浇筑蜗壳外围混凝土时需采取的保压水头和保压水温进行了研究。

本文在以上研究的基础上,收集现场施工资料,细致模拟三峡左岸电站蜗壳充水、保压浇筑外围混凝土、卸压、正常运行等施工和运行过程,通过考虑接触非线性问题的三维温度应力仿真计算^[4,5],分析在不同季节、不同水位运行期的钢蜗壳与外围混凝土之间的传力和可能存在的间隙,了解其规律,并与现有的左岸机组蜗壳部位的监测成果进行比较。

2 计算模型与计算条件

2.1 模型选取及简化

鉴于三峡左岸 10[#] 机组监测资料相对比较完整,且其断面尺寸具有一定的代表性,本文取该机组段为研究对象,蜗壳进口断面直径为 12.4 m(图 1),蜗壳中心线高程 57.0 m,运行期最大静水头 118 m,设计水头 139.5 m,保压水头 70.0 m。

该机组在厂坝联接段引水压力钢管设置了伸缩节,而且电站厂房与挡水坝段两块间设有永久横缝,大坝的变形对厂房所产生作用较小,因此计算模型

收稿日期:2008-11-11
基金项目:国家自然科学基金(50539010);948 项目(200606);“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAB04A01)
作者简介:崔建华(1972-),男,河南叶县人,高级工程师,主要从事水工结构温度及结构应力计算,(电话)027-82829754(电子信箱)cuijh@mail.crsri.cn。

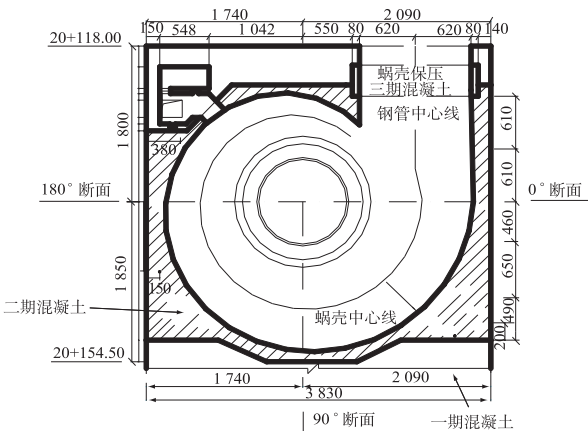


图1 蜗壳结构图(高程 57 m 平面)

Fig.1 Structure drawing of the spiral case at elevation 57 m

中只考虑厂房部分,这样有利于比较精细地模拟蜗壳部分及减少计算工作量。左、右侧面为机组段永久横缝,因此,坝轴线方向上取 1 个坝段进行研究,模型宽 38.3 m。另外,考虑到肘管段以下部分在钢蜗壳埋设前两年已经浇筑,对蜗壳变形影响很小,模型从尾水管锥管底面高程 40 m 开始向上模拟至水

表 1 基本材料参数表

Table 1 Basic material parameters

材料种类	弹模/GPa	泊松比	线膨胀系数/ 10^{-5}°C	导热系数/ $(\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1})$	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	比热/ $(\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1})$
钢材	210	0.3	1.2	1.089 6	78	0.46
一期混凝土	36	0.167	0.85	0.083 3	24.5	0.983 9
二期混凝土	36	0.167	0.85	0.083 3	24.5	0.983 9
三期混凝土	45	0.167	0.85	0.083 3	24.5	0.983 9
垫层	0.002 5	—	—	—	—	—

注:钢材是指钢蜗壳、座环和固定导叶等部位;垫层材料厚度为 30 mm。

2.3 主要边界温度曲线

温度曲线选取基本原则是:有实测点温资料的前提下,取用实测数据;没有实测资料时,采用由库区多年年平均气温或水温值拟合得出的曲线。

与大气接触的外表面,

$$T(t) = 17.3 + 11.9\sin\omega(t - 105)。$$

充水保压施工期间蜗壳内表面,水温取恒温为 20℃,运行期蜗壳内表面水温曲线,

$$T(t) = 17.53 + 8.5\sin\omega(t - 130)。$$

式中: t 为时间(d),以 1999 年 1 月 1 日为计算起点, $\omega = 2\pi/365$ 。

2.4 施工及蓄水过程

施工及蓄水过程见表 2。

2.5 温度场和温度应力计算边界条件

温度场计算边界条件:一期混凝土四周及底部按绝热条件处理;二期混凝土左右两侧,浇筑期按正常气温考虑,浇筑完毕后按绝热条件处理;蜗壳内表面施工期处于保压状态,按水温边界处理。应力计算边界条件:厂房上、下游外侧为自由边界,一期混

轮机层面高程 67 m。为模拟充水保压及卸压过程,模型还考虑了闷头、密封环、座环等结构。根据各构件的特点,采用高精度的 10 结点四面体单元模拟蜗壳外围混凝土,12 结点五面体单元模拟蜗壳钢板、座环等薄壁结构,15 结点的五面体单元模拟固定导叶,座环和固定导叶单元之间采用粘接技术,以保证位移协调。整个计算模型(图 2)结点总数为 206 231,单元总数为 129 767。

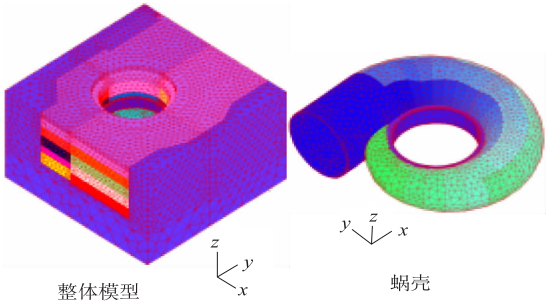


图 2 计算模型图

Fig.2 Computation model

2.2 基本材料参数

模型的基本材料参数见表 1。

凝土底部(高程 40 m)为全约束。

表 2 施工及蓄水过程

Table 2 Procedure of the construction and water impoundment

项目	时间(年-月-日)
安装座环、蜗壳等	2001-12-09 至 2001-12-24
蜗壳充水	2001-12-24 至 2001-12-29
保温保压浇筑二期混凝土	2001-12-29 至 2002-07-31
卸压	2002-07-31 至 2002-08-06
拆除闷头、密封环	2002-08-08
浇筑三期混凝土	2002-09-15 至 2002-10-12
139 m 水位	2004-04
156 m 水位	2007-11
175 m 水位(考虑水击力)	2009-11

3 计算方法

3.1 温度场计算

考虑到一期混凝土施工资料欠缺,且在钢蜗壳埋设前两年已浇筑完成,故先计算在边界气温作用下的一期混凝土准稳定温度场,在此基础上,进行模拟保

压浇筑二期混凝土施工过程的温度场仿真计算,计算中考虑了保温及通水等工程措施。蜗壳外围二期及三期混凝土的浇筑温度作为混凝土的初始温度。

3.2 应力与变形仿真计算

获得厂房结构的温度场后进行应力与变形分析,计算时段从厂房二期混凝土浇筑开始至运行期,模拟混凝土保压浇筑过程和卸压、运行期加压过程以及水库蓄水过程等。对于混凝土徐变的影响,采用初应变法将各时段的徐变转化为等效结点力,并入该时段的温度、自重和水压等增量荷载中。

3.3 接触模拟^[6]

采用厚度趋于零的五面体 12 节点接触单元模拟钢蜗壳与外围混凝土之间的接触问题,认为接触面能传递压应力、剪应力,但不传递拉应力。

设接触面摩擦系数、凝聚力和抗拉强度分别为 f, C 和 σ_p , 初始法向间隙为 w_0 , 在荷载作用下产生的接触面两侧法向(n)、切向(t, s)的相对位移分别为 w_r, u_r, v_r , 则接触应力与相对位移之间的关系为当 $w_r + w_0 \leq 0$ 时,

$$\begin{cases} \sigma_n = k_n(w_r + w_0), \\ \tau_t = k_t(1 - w_0/|w_r|)u_r, \\ \tau_s = k_s(1 - w_0/|w_r|)v_r; \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{且 } \sqrt{\tau_t^2 + \tau_s^2} \leq C - f\sigma_n. \quad (2)$$

式(1)中: k_n, k_t, k_s 为接触面单位面积的法向刚度和切向刚度; σ_n, τ_t, τ_s 为接触面的法向应力和切向应力; $w_r + w_0 \leq 0$ 表示法向闭合, 如果初始间隙 $w_0 = 0$, 且 $w_r > \sigma_p/k_n$, 则表示法向拉裂。当接触面法向张开时, 不传递任何应力; 当接触面法向闭合时, 切向应力可能超过抗剪强度而产生滑移, 因此切向应力还要满足条件(2)。

在考虑施工期温度、徐变影响的接触问题全过程仿真计算中, 以上一时段的接触状态和接触应力作为本时段的初始值, 用变刚度法进行接触问题非线性迭代, 直至前后 2 次的计算结果接近为止, 然后转入下一计算时段。

本次左岸厂房蜗压保压埋入方式仿真计算中, 取摩擦系数 $f = 0.25$, 抗拉强度 σ_p 、粘聚力系数 C 和初始法向间隙 w_0 为 0。

4 计算成果

4.1 应力

图 3、图 4 给出了 0° 断面腰部混凝土内、外点的应力历时过程。由图可知, 在围堰挡水发电期之前, 混凝土内的各向应力相对较小; 围堰挡水发电期及

正常水位运行期, 0° 断面腰部混凝土的竖向应力及顺水流方向应力基本随季节变化, 在年温变化作用下, 内、外点的变化趋势相反, 表现出夏季内压外拉、冬季内拉外压的特点。在内水压及温度共同作用下, 正常运行期, 内、外点的竖向最大应力分别为 1.11, 2.77 MPa, 顺水流向最大应力分别为 2.13, 1.92 MPa。蜗壳外围混凝土应力分布以及随季节呈周期性变化的特点, 显示了温度荷载在其中所起的作用。

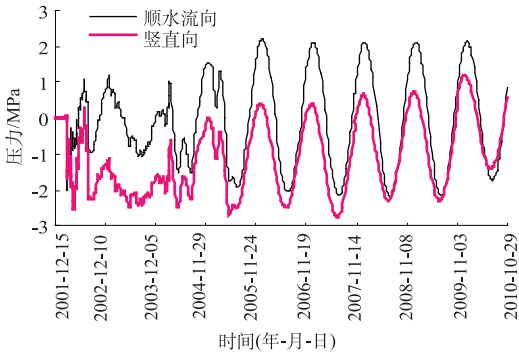


图 3 0°断面腰部内点应力历时过程
Fig. 3 The variation process of stress of the inner surface at 0° section's waist

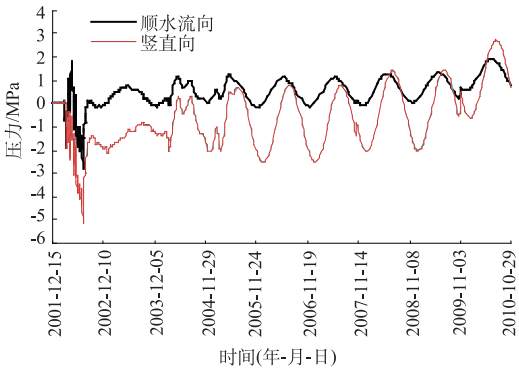


图 4 0°断面腰部外点应力历时过程
Fig. 4 The variation process of stress of the exterior surface at 0° section's waist

4.2 蜗壳变形

充水保压(70 m 水头)时的蜗壳变形, 主要是横断面内沿径向的变形。蜗壳底部在支墩之间的变形要大于支墩处的变形。由卸压前后及不同运行时期时的蜗壳变形比较(见图 5)可知, 卸压后, 蜗壳已经产生了一定的变形。由于模拟了施工过程, 蜗壳变形

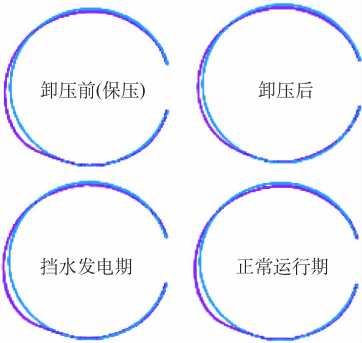


图 5 蜗壳 0°断面变形图
Fig. 5 Deformation at the 0° section of the spiral case

呈现出一定的不均匀性,从而在后期内水压增大及温度变化时也体现出蜗壳和混凝土之间的间隙和传压的不均匀性。

4.3 传压及间隙

表 3 给出了 2 个典型断面(0°,90°)的管顶、管腰、管底处的间隙和传压值。由表可知,间隙或传压的分布是不均匀的。在围堰挡水发电期冬季以前,钢蜗壳与外围混凝土界面间的平均传压一直比较小,围堰挡水发电期冬季时仅为 0.12 MPa,可以认

为此时内水压力主要由蜗壳承担。而同一季节,正常运行期的平均传压比水位 145 m 时大 0.41 ~ 0.48 MPa,约为内水压力增量(0.52 MPa)的 79% ~ 92%。当内水压力相同时,运行期夏季要比冬季的平均传压大 0.26 ~ 0.34 MPa,约占剩余水压的 43%。这与文献[5]的计算结果接近。正常运行期夏季的平均传压为 0.89 MPa,已超过了剩余水压,这说明温度对传压的影响相当明显。

表 3 蜗壳与混凝土界面的间隙和传力(70 m 保压水头,保温)

Table 3 The gaps and interaction forces between the steel spiral case and its surrounding concrete

运行水位 及季节	平均 传压/ MPa	平均 间隙/ mm	0°断面						90°断面					
			间隙/mm			传压/MPa			间隙/mm			传压/MPa		
			管顶	管腰	管底	管顶	管腰	管底	管顶	管腰	管底	管顶	管腰	管底
运行前冬季	—	2.04	0.28	3.15	1.35	—	—	—	0.07	5.62	0.28	—	—	—
运行前夏季	—	1.63	0.24	2.18	0.40	—	—	—	0.06	4.37	0.22	—	—	—
130 m 冬	0.08	0.23	0.08	0.27	0.15	—	—	—	0.72	0.11	—	—	—	0.04
130 m 夏	0.19	—	—	—	—	0.18	0.35	0.25	—	—	—	0.07	0.06	0.19
139 m 冬	0.12	—	—	—	—	0.14	0.17	0.22	—	—	—	0.02	0.04	0.09
139 m 夏	0.27	—	—	—	—	0.26	0.41	0.32	—	—	—	0.13	0.13	0.28
145 m 冬	0.14	—	—	—	—	0.16	0.13	0.27	—	—	—	0.05	0.08	0.12
145 m 夏	0.41	—	—	—	—	0.36	0.49	0.48	—	—	—	0.30	0.24	0.52
175 m 冬	0.55	—	—	—	—	0.59	0.64	0.6	—	—	—	0.51	0.53	0.49
175 m 夏	0.89	—	—	—	—	0.84	1.19	0.96	—	—	—	0.83	0.71	1.00

注:175 m 水位时考虑了水击力。

5 计算值与实测值的比较

图 6 为高程 57 m 处外围混凝土内点温度变化过程计算与实测值的比较。由图可知,二者的变化形态和数值基本一致。

图 7 为腰部蜗壳与混凝土之间间隙的计算值及实测值变化曲线。

由图可知:①在围堰挡水发电期前,两条间隙曲线变化形态一致,数值也比较

接近,间隙最大值均约 3.3 mm,发生在 2003 年元月,间隙变化与温度变化趋势相反,冬夏之间的间隙变化量均在 1.5 mm 左右。②2004 年 4 月,在 139 m 水位水压作用下,间隙计算值降为 0,结合面在后

期一直保持闭合状态,而现场实测值的间隙减小到约 0.8 mm,且在此后近一年时间内基本保持不变。从实测值曲线分析,这段时间该处的温度测值仍在周期性变化,结合①中所述的前期间隙随温度变化的规律认为,实测间隙本应发生相应变化,而基本保持

不变的实测值说明该处已无法进一步闭合,其原因有待进一步分析。③在 2005 年初,观测间隙值有短期的增大,资料显示这可能是机组检修引起的,而计算中未模拟此过程。

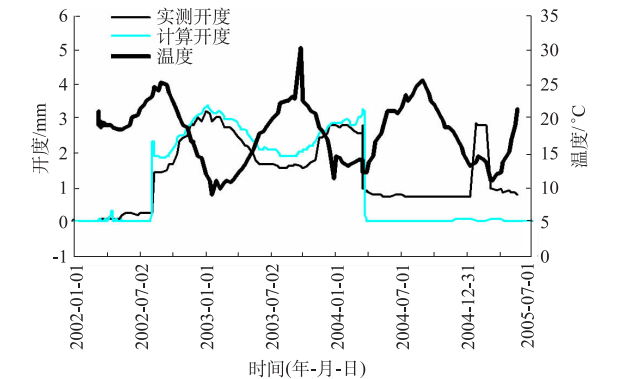


图 6 高程 57 m 处温度计算值与实测值的比较

Fig. 6 Comparison diagram of calculated values and measured data of temperature at elevation 57 m

图 7 结合面间隙变化历时过程

Fig. 7 The variation process of the gap between the steel spiral case and its surrounding concrete

6 结 语

仿真计算结果与现场实测值规律一致,温度计算值以及在围堰挡水发电期前的蜗壳与外围混凝土之间的间隙值都比较接近,说明采用细致模拟施工全过程并考虑温度荷载的三维接触非线性仿真计算可以得到蜗壳与外围混凝土之间传力与间隙的真实状态,所采用的计算程序及计算方法是合适的。本

文较全面地反映了温度荷载对结构应力、蜗壳与外围混凝土之间的间隙及传力的影响,可为类似工程蜗壳的设计和施工提供参考。

参考文献:

[1] 李 丹,陈 坪. 三峡电站厂房蜗壳外围混凝土结构设计综述[J]. 人民长江,2003,34(1):11-13.
[2] 李文富,锦 成,赵小娜,等. 水电站充水预压蜗壳结构的应力仿真计算研究[J]. 水力发电,2004,30(3):52-54.
[3] 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):66-70.
[4] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用(第二版)[M]. 北京:水利电力出版社,2000.
[5] 朱伯芳. 大体积混凝土的温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
[6] 徐跃之,黄作森,林绍忠,等. 三峡永久船闸第三闸首接触问题仿真计算[J]. 长江科学院院报,1998,15(4):23-27.
[7] 林绍忠,苏海东. 大体积混凝土结构仿真应力分析快速算法及应用[J]. 长江科学院院报,2003,20(6):19-22.

(编辑:刘运飞)

3-D FEM Emulation Computation on Surrounding Concrete of Steel Spiral Case Keeping Internal Pressure During Construction for TGP

CUI Jian-hua^{1,2},SU Hai-dong²,CHEN Qin²

(1. School of Water Resources and Hydropower, WuHan University, Wuhan 430072, China;
2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010,China)

Abstract: The surrounding concrete of steel spiral case in the power station of Three Gorges Project(TGP) is constructed by means of keeping a specific level of internal pressure during construction. For analyzing the contact behavior of the interface between the steel spiral case and its surrounding concrete,the numerical simulations of the construction process according to the actual construction procedure are carried out with 3-D FEM. The variation of the gap and the interaction force between the steel spiral case and its surrounding concrete in different operation stages and different seasons are put forward. By comparing the computed results with the prototype safety monitored data during and after the construction of surrounding concrete, it shows that they are in good agreement. The method and the program are proved to be feasible.

Key words:spiral case; surrounding concrete; keeping internal pressure during construction; thermal stress;Emulation computation; finite-element method

(上接第 42 页)

Study on A New Kind of Joint Type of Concrete Cut-off Wall

YAN Qiao^{1,2}, BI Ming-liang¹,WANG Li-bin¹

(1. College of Civil & Hydropower Engineering, Three Gorges University,Yichang 443002, China;
2. Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: The joint section of a cut-off wall is a very important location and its quality is crucial to ensure the anti-seepage effect of the cut-off wall and determines the success or failure of the cut-off wall. The shortcoming of the traditional joint type is analyzed. From joint grouting principle of the dam body, a new reliable joint grouting of joint type is studied. Construction technics and technology key points are introduced. The feasibility, effect and benefit of the new joint are analyzed. This technology helps simplify the traditional joint construction technology, improve the efficiency of construction and shorten the construction period. Significant economic benefits are obtained.

Key words:cut-off wall; wall juncture; joint type