

大型水电站蜗壳结构优化研究

谢小玲^{1,2}, 苏海东^{1,2}

(1. 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010; 2. 长江科学院 材料与结构研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要:针对溪洛渡水电站蜗壳埋设方式研究中的水泵房墙体贯穿性裂缝问题,采用钢筋混凝土非线性有限元方法进行优化研究。研究表明,对于垫层数设至 135°方案,局部增加钢筋或增加墙体厚度均不能阻止贯穿性裂缝的产生,在未采取其他工程措施的情况下,垫层应至少数设至 180°断面。水泵房墙体加厚前后的裂缝分布以及应力状态表明,对于蜗壳这种有限裂要求的大型复杂水工结构,在进行线弹性设计配筋的基础上,还应该进行钢筋混凝土开裂非线性仿真分析,即在考虑混凝土的非线性本构关系、钢筋与混凝土的相互作用关系、混凝土裂缝扩展过程等的基础上,才能设计出既满足机组安全稳定运行要求又经济合理的蜗壳结构。

关键词:蜗壳结构; 钢筋混凝土; 开裂非线性; 有限元分析; 优化研究

中图法分类号: TV741 文献标志码: A

高 HD 值的蜗壳结构混凝土随着内水压力的增加,必将经历弹性、弹塑性及开裂 3 个过程。钢蜗壳与混凝土之间的接触非线性、混凝土非线性本构关系、钢筋混凝土的开裂非线性等,都影响着结构的力学行为,因此,蜗壳结构的受力分析非常复杂^[1-5]。

国内专家、学者通过数值分析和物理模型试验研究,对蜗壳结构的受力特性有了一定的了解。在三峡工程蜗壳直埋方案研究中,试验模型与计算模型在裂缝分布上的一致性^[1],以及起裂荷载的相似性,验证了所采用的钢筋混凝土开裂非线性计算方法对蜗壳结构的数值分析是合适的,其方法和精度能满足实际工程的需要。

本文参考三峡工程的经验,对溪洛渡水电站蜗壳埋设方式进行研究^[5-10],针对数值分析中水泵房墙体贯穿性裂缝问题,从增加配筋量、墙体加厚等方面进行优化研究。

计算采用 MARC 软件,考虑钢筋混凝土非线性力学行为以及钢蜗壳与混凝土之间的非线性接触。研究的控制标准为:甩负荷工况不容许出现贯穿性裂缝,正常运行工况下混凝土表面裂缝宽度小于 0.3 mm,钢蜗

壳、钢筋应力满足强度要求等。

1 计算方法

钢蜗壳和混凝土间的接触采用基于直接约束的接触迭代算法,该算法能自动追踪变形体表面的运动轨迹,一旦探察出变形体之间发生接触,便将接触所需的运动约束(即法向无相对运动,切向可滑动)和节点力(法向压力和切向摩擦力)作为边界条件直接施加在产生接触的节点上,这种接触算法对接触的描述精度高,不需要增加特殊的界面单元。

接触模拟有光滑接触、摩擦接触和完全粘结 3 种方式,因实际浇筑过程中存在初始缝隙,所以考虑完全粘结是不合适的。光滑接触则由于钢蜗壳不传递切向力,导致混凝土分担的荷载比实际要偏小,此种计算结果使混凝土结构偏危险。实际运行情况是混凝土与钢蜗壳间应为摩擦接触,经对比分析,钢蜗壳与混凝土间的摩擦系数取 0.25。

非线性计算可模拟混凝土拉伸开裂、裂纹闭合、拉伸软化、压缩塑性屈服和压碎的材料特性。混凝土拉伸软化曲线如图 1 所示,压缩塑性采用 Drucker - prag-

er 屈服准则。

裂缝采用分布模型,开裂面的剪力传递通过定义残留抗剪系数来确定。钢筋采用一维杆单元,通过埋入方法将其嵌入混凝土单元,程序自动耦合自由度,依据钢筋和混凝土单元位移协调原则,分别求出混凝土和钢筋对单元刚度矩阵的贡献,组合得到综合单元刚度矩阵。

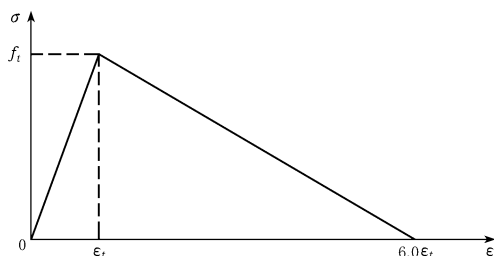


图 1 混凝土拉伸应力应变曲线

裂缝宽度根据非线性计算得到的钢筋应力,采用《水工钢筋混凝土结构设计规范》(SL191-96)中混凝土裂缝计算公式计算。

2 计算模型及计算参数

取标准机组段为研究对象,左右两侧取至机组段永久分缝处,顶部取至发电机定子高程,底部取至尾水管直锥段底高程,计算模型见图 2。

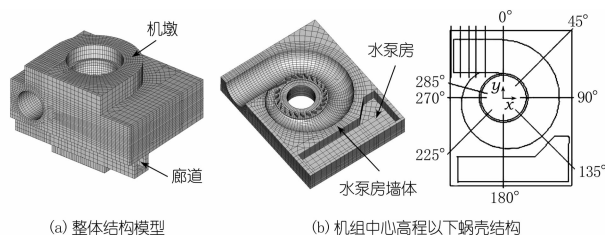


图 2 计算模型及典型断面示意

模型不仅详细模拟了钢蜗壳、座环、固定导叶、大舌板等钢部件以及钢蜗壳外围的混凝土和钢筋,对蜗壳右侧的水泵房以及尾水管直锥段的廊道等混凝土空腔也进行了详细模拟。

混凝土基本配筋按 3 层考虑,直管段内侧为 $2\Phi 36@20$,沿管道轴线布置,外侧 $1\Phi 36@20$,沿混凝土外沿正交布置;蜗壳断面内侧为 $2\Phi 36@20$,沿流道轴线呈辐射状布置,外侧为 $1\Phi 36@20$,沿混凝土外沿正交布置;水流向钢筋每层均为 $\Phi 32@20$ 。

整个模型单元总数 124 500,节点总数为 132 400。蜗壳、尾水管直锥段等钢板采用 4 节点板单元,厚度按实际尺寸模拟;钢筋采用 2 节点杆单元,不考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移;混凝土采用 8 节点非协调元。在敷设垫层的区域,上半圆包垫层,离机坑里衬 1.5 m

范围不敷设垫层。垫层边缘约 1 m 区域作为过渡段,厚度渐变。在未敷设垫层的下半圆,钢蜗壳与混凝土之间按接触考虑。在蜗壳进口段敷设的垫层一直延伸至上游基岩中,以保持蜗壳钢板变形的连续性。

基岩向上、下游各模拟了 50 m 范围,基岩底部全约束,其他边界法向约束。

混凝土为 C25,弹模为 28 GPa,泊松比为 0.167,容重为 25 kN/m^3 ,标准抗拉强度为 1.75 MPa;基岩弹模为 15 GPa,泊松比为 0.25;钢材弹模为 210 GPa,泊松比为 0.3,容重为 78.5 kN/m^3 ,设计强度 310 MPa。钢蜗壳与混凝土间的摩擦系数取 0.25;垫层弹模 2.5 MPa,厚度 2 cm,采用正交各向异性模型,只考虑法向刚度。

计算荷载:① 结构自重(包括混凝土、蜗壳钢板、座环等钢部件重量)。② 水压力荷载,蜗壳内水压力取负荷载工况 2.87 MPa(含水击压力),计及水重的影响,混凝土开裂阶段,每计算步施加水荷载 0.03 MPa;尾水管内水压力按下游设计水位静水压力施加。③ 机组荷载,水轮机转轮、主轴以及发动机转子重。④ 水轮机顶盖传递给座环上环板的力。⑤ 定子基础板(20 个)以及下机架基础板(12 个)上作用的荷载。⑥ 水轮机层楼面荷载、风罩自重及上部楼板结构自重。

3 计算结果

在蜗壳埋设方式研究中,研究了直埋方案、垫层方案(垫层敷设至 280°),以及组合 15° 、组合 30° 、组合 45° 、组合 135° 方案(即垫层分别敷设至 15° 、 30° 、 45° 、 135°),本文仅针对组合 135° 方案进行介绍。

(1) 裂缝分布及钢筋应力。组合 135° 方案的贯穿性裂缝仅限于水泵房墙体腰部(见图 3)。裂缝处的钢筋应力在 70 MPa 以上,3 层钢筋的应力最大值分别为 184 MPa(外侧靠近水泵房)、125 MPa(第 2 层)、70 MPa(内侧靠近蜗壳)。未开裂区域的钢筋应力基本上在 20 MPa 以下,这与试验模型所测的钢筋应力范围(未开裂区)是吻合的^[2],反映了混凝土未开裂区的钢筋受力特性。

(2) 蜗壳钢板应力。垫层区(图 4)的钢板应力基本上都在 80 MPa 以上,腰部偏上约 45° 区域的应力较大(图 5 深色),均在 100 MPa 以上,最大值约 130 MPa,而无垫层区的钢板应力在 30 MPa 以下。贯穿性裂缝区(也在无垫层区)的钢板应力为 40~50 MPa,说明裂缝混凝土承载力下降,钢板发挥了承载的作用。即使产生了贯穿性裂缝,蜗壳钢板及钢筋应力亦满足强度要求。

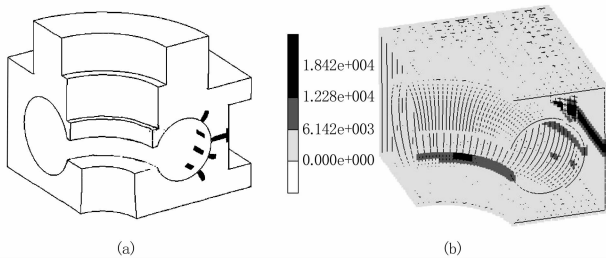


图3 裂缝分布及第1,3层钢筋应力(0.01 MPa)

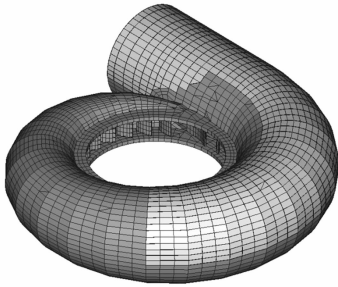


图4 钢蜗壳及垫层(浅色为垫层)

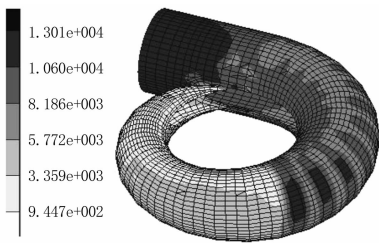


图5 钢蜗壳等效应力(0.01 MPa)

4 优化研究

蜗壳结构混凝土的最薄弱部位一般位于管径最大的直管段腰部、顶部,而溪洛渡工程蜗壳水泵房墙体腰部尺寸仅1.8 m,小于直管段腰部尺寸2 m,成为结构最薄弱部位。考虑到宽约5.8 m的水泵房空腔可压缩,因此优化研究中考虑的优化措施包括局部增加配筋量、增加水泵房墙体厚度、考虑混凝土后期强度增长等。

4.1 增加配筋量

(1) 方案1。墙体外侧(水泵房一侧)钢筋加密,即由 $1\Phi36@20$ 变为 $1\Phi36@15$ 。

(2) 方案2。外侧增加一层钢筋,即外侧钢筋为 $2\Phi36@20$ 。

(3) 方案3。墙体外侧钢筋加密加厚,即外侧钢筋为 $2\Phi36@15$ 。

计算结果显示(表1),局部增加钢筋可以减小表面裂缝宽度,配筋越多,裂缝宽度越小,然而甩负荷工况下的贯穿性裂缝仍不可避免。

4.2 增加墙体厚度

按线弹性计算结果的截面总拉力估算,墙厚增加0.5 m可以使截面拉应力平均值小于C25混凝土的抗拉强度1.75 MPa。因此将墙厚增加0.5 m,进行钢筋混凝土非线性计算。

表1 水泵房墙体局部增加钢筋的计算方案及裂缝情况对比

项目	裂缝宽度/mm		裂缝是否贯穿	
	正常运行工况	甩负荷工况	正常运行工况	甩负荷工况
基本配筋方案	0.23	0.51	是	是
方案1	0.21	0.45	是	是
方案2	0.09	0.39	否	是
方案3	0.07	0.31	否	是

计算结果显示,墙体厚度增加0.5 m,其腰部贯穿性裂缝消失(图6),然而,机墩根部却出现了贯穿性裂缝。显然,增加墙体厚度未能达到消除贯穿性裂缝的目的。

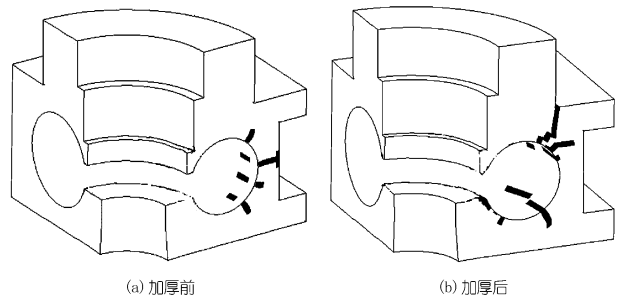


图6 墙体加厚前后裂缝分布

4.3 考虑混凝土后期强度增长

C25混凝土90 d龄期的抗拉强度实际可达到C30混凝土的抗拉强度,因此,采用C30混凝土参数,弹模取30 GPa,标准抗拉强度为2.0 MPa,进行进一步研究。

墙体加厚后,考虑C25后期强度的裂缝分布如图7所示,虽然机墩根部的贯穿性裂缝消失,但腰部上45°附近的裂缝仍然开裂较深。

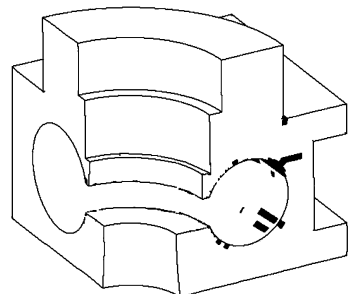


图7 墙体加厚0.5 m时考虑C25后期强度的裂缝分布

4.4 增加垫层敷设范围

上述措施对消除贯穿性裂缝都不理想,因此考虑增加垫层敷设范围继续分析。

表 2 及图 8 显示,垫层敷设至 160°断面时,水泵房墙体腰部仍出现贯穿性裂缝,而敷设至 180°断面时,贯穿性裂缝消失,仅存在表面裂缝,而且裂缝宽度在正常运行工况下小于 0.3 mm,满足设计要求。

表 2 不同垫层敷设范围情况下水泵房墙体腰部裂缝情况

垫层 敷设范围	裂缝宽度/mm		是否贯穿	
	正常运行 工况	甩负荷 工况	正常运行 工况	甩负荷 工况
135°	0.23	0.51	是	是
160°	0.05	0.42	否	是
180°	0.04	0.05	否	否

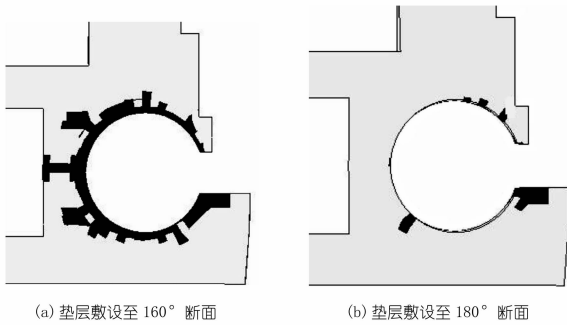


图 8 不同垫层敷设范围的断面裂缝分布

4.5 综合措施研究

进一步研究多重工程措施效果,即考虑墙体加厚又将垫层延伸至 150°断面。结果显示,在考虑 C25 混凝土后期强度增长的前提下,可以满足与静力分析相关的控制标准。

5 问题讨论

从线弹性计算结果看,机墩根部应力最大处(150°断面)的截面拉应力平均值约 1.9 MPa,大于 C25 混凝土的抗拉强度,应该存在贯穿性裂缝,但实际上墙体加厚前并没有出现,为此,对 150°断面的机墩根部截面以及 180°断面的水泵房腰部截面应力进行分析。

水泵房墙体加厚前,腰部截面拉应力平均值为 2.2 MPa,大于机墩根部截面的拉应力平均值(1.9 MPa),因此首先开裂。而腰部截面尺寸仅有 1.8 m,因此裂缝随着水压力荷载的增加迅速扩展至贯穿。

150°断面机墩根部最大主应力历程曲线显示(图 9),线弹性计算中,应力随着水位基本呈线性增长,而开裂计算中,当内水压力荷载超过 2.1 MPa 时,应力反而随着水位增长而略有下降,说明腰部开裂至裂缝贯穿后使得周边应力释放,造成腰部附近及机墩根部的

应力下降,机墩根部仅出现表面裂缝。

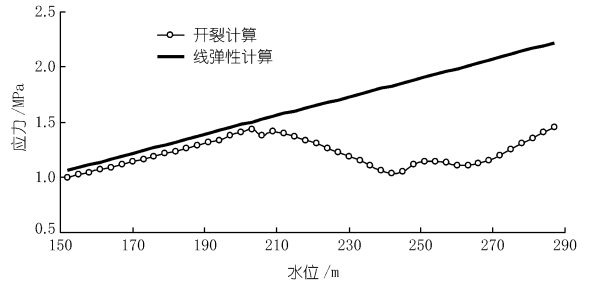


图 9 150°机墩根部最大主应力历程曲线

墙体加厚后,腰部截面拉应力平均值降为 1.7 MPa,小于其混凝土的抗拉强度,不会开裂,而机墩根部则开裂至贯穿。

6 结论与认识

针对垫层敷设至 135°方案的水泵房墙体贯穿性裂缝的优化研究表明,局部增加钢筋或增加墙体厚度都不能阻止贯穿性裂缝的产生,在未采取其他工程措施的情况下,垫层应至少敷设至 180°断面,才能满足所有与静力分析相关的控制标准。

水泵房墙体加厚前后的裂缝分布表明,对于蜗壳这种有限裂要求的大型复杂水工结构,仅靠线弹性计算进行配筋设计是远远不够的,还应进行钢筋混凝土开裂非线性计算分析,得到裂缝状态下的结构受力特性,在此基础上才能设计出既满足机组安全稳定运行条件又经济合理的蜗壳结构形式。

参考文献:

- [1] 陈琴,林绍忠,张杰.三峡电站直立式蜗壳结构试验模型的非线性有限元分析[J].长科学院院报,2007,24(2).
- [2] 张杰,陈琴,何英杰,等.三峡右岸电站 15 #机组蜗壳直埋方案仿真模型试验研究报告[R].武汉:长江科学院,2006.
- [3] 苏海东,陈琴,谢小玲,等.三峡右岸电站蜗壳流道及外围混凝土静力分析报告(垫层方案和保压方案)[R].武汉:长江科学院,2006.
- [4] 陈琴,苏海东,崔建华,等.大型机组蜗壳不同埋设方式的结构开裂分析[J].长科学院院报,2009,26(4).
- [5] 陈琴,林绍忠,苏海东.大型机组直立式蜗壳结构不同限裂措施的三维非线性分析[J].长科学院院报,2008,25(6).
- [6] 陈琴,谢小玲.某大型水电站机组直立式蜗壳结构应力分析[J].水利水电快报,2006,27(21).
- [7] 袁达夫,谢红兵.大型混流式水轮机蜗壳的埋设方式[J].人民长江,2009,40(16).
- [8] 马震岳,张运良,陈婧,等.巨型水轮机蜗壳软垫层埋设方式可行性论证[J].水力发电,2006,(1).
- [9] 付洪霞,马震岳,董毓新.水电站蜗壳垫层结构研究[J].水利学报,2003,(6).
- [10] 申艳,伍鹤皋,蒋逸超.大型水电站垫层蜗壳结构接触分析[J].水力发电学报,2006,(10).

(编辑:郑毅)

Optimization of spiral structure of large – scale hydropower plant

XIE Xiaoling^{1,2}, SU Haidong^{1,2}

(1. *Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention of MWR, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China*; 2. *Department of Material and Structure, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, 430010, China*)

Abstract: Nonlinear FEM for reinforced concrete is used to solve the penetrating crack problem of wall of pump house during the research of embedding way of spiral case in Xiluodu Hydropower Station. The results show that, the penetrating cracks of structure cannot be prevented by increasing steel bars or the wall thickness, if the cushion is laid to 135°. If no other engineering measures are taken, the penetrating cracks could be avoided by laying the cushion to 180°. The crack and stress distribution before and after increasing thickness of pump house wall indicates that for the large scale hydraulic structure such as spiral structure with crack limit, reinforced concrete crack nonlinear simulation is needed based on the linear analysis. In order to design a safe and economical spiral case, nonlinear constitutive relation, interaction between concrete and steel bars and the crack propagation process needs to be considered.

Key words: spiral case structure; reinforced concrete; nonlinear crack; finite element analysis; optimization

(上接第 14 页)

Discussion on regulation of Baguazhou Inlet in Nanjing reach of Yangtze River and coastal economic development

ZHANG Zhiqiang, LI Taozhang, ZHOU Lingxia

(*Yangtze River Course Administrative Office of Nanjing City, Nanjing 210011, China*)

Abstract: The left branch of Baguazhou Inlet in Nanjing reach of Yangtze River declines slowly with the division ratio decreasing and river bed elevating, which has influenced the operation of the group of large enterprises along the bank of left branch. The implemented regulation projects of Baguazhou Inlet and the effects are introduced. The regulation demands such as maintaining the stability of river regime and fully utilizing the coast line are put forward in consideration with the economic development in the coastal region of the inlet. The guiding principle and preliminary scheme for systematic regulation is proposed. According to the main and difficult points, the solutions are given, so the favorable water area conditions for coastline development can be obtained to promote sustainable development of coastal economy.

Key words: inlet; division ratio; regulation project; economic development; coast line utilization; river regime; Baguazhou inlet in Nanjing; Yangtze River

(上接第 21 页)

Study of inversion of phase velocity of Rayleigh wave based on singular value decomposition algorithm

LI Xueliang, YANG Changchun, WANG Zhenli

(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: In the inversion of phase velocity of Rayleigh wave, during the linearization process of its dispersion curve, the coefficient matrix would be singular or approximately, because of the introduction of error. Therefore, the phase velocity of Rayleigh wave was inverted using singular value decomposition, which could improve the inversion precision and reliability of low velocity weak intercalation; the introduction of weight matrix improved the resolution of the data; the iteration effect could be strengthened and the relationship between resolution and solution could be coordinated using self – adaptive modification of damping factor. The results show that the inversion of phase velocity of rayleigh wave using singular value decomposition algorithm has the advantages of stable, precise and strong resolution ability, and it can be layered and inverse the formation parameter automatically.

Key words: Rayleigh wave; phase velocity; singular value decomposition algorithm; low velocity weak intercalation