

横缝深止水布设对蜗壳应力的影响规律研究

程帅¹, 乔洪伟², 汪俊波¹, 南江¹, 郭巍¹, 李志华¹, 张世明¹

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 深能水电投资管理有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 横缝深止水方案的布设对轴流式机组蜗壳部位的应力影响较大, 而深止水方案的布设通常根据工程经验确定, 没有统一的规范。止水方案的布设在满足防渗和安全的同时, 应选择最优布设使其对蜗壳应力的影响较小。依托某轴流式水电站实际工程, 建立厂房的 ANSYS 三维有限元模型, 模拟在机组正常运行和检修工况下, 横缝深止水在上游处闭合和上游处联通两种方案的不同止水布设对蜗壳应力的影响。对比两种深止水方案下蜗壳进口断面、内部典型断面和外包混凝土的应力变化, 结果表明: 随着止水位置的上移, 两种深止水方案下的蜗壳应力变化规律相同, 但相同的止水位置下, 上游联通方案对蜗壳各种应力的减小幅度是上游闭合方案的 2 倍以上, 横缝深止水布设时可优先采用上游联通方案进行止水。

关键词: 水电站厂房; 横缝深止水布设; 轴流式机组; 蜗壳结构; 有限元法; 结构应力

中图分类号: TV731

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)03-0158-07

Influence of deep waterstop layout of transverse joint on volute stress

CHENG Shuai¹, QIAO Hongwei², WANG Junbo¹, NAN Jiang¹, GUO Wei¹, LI Zhihua¹, ZHANG Shiming¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Shenzhen

Energy Hydropower Investment Management Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The layout of the deep waterstop scheme of the transverse joint has a great influence on the stress of the volute part of the axial flow turbine unit, it is usually determined according to the engineering experience, and there is no unified standard. However, it is commonly recognized that an optimal layout of the waterstop scheme should not only meet the anti-seepage and safety requirement, but also have as less effect on the volute stress as possible. Based on an actual axial flow hydropower station project, the ANSYS three-dimensional finite element model of the powerhouse is established to simulate the influence of different waterstop arrangements on the volute stress under the two deep waterstop schemes of upstream closure and upstream connection under normal operation and unit maintenance conditions. Then, the stress changes of the volute inlet section, the internal typical section and the external concrete under the two deep waterstop schemes are compared and analyzed. The results show that with the rise of the waterstop position, the stress changes of the volute under the two schemes are the same; but under the same waterstop position, the upstream connection scheme has more than twice the decreased magnitude on the various stresses of the volute than the upstream closure scheme. Therefore, the upstream connection scheme is preferred when a deep waterstop of transverse joint is laid.

Key words: hydropower house; deep waterstop layout of transverse joint; axial flow turbine unit; volute structure; finite element method; structural stress

1 研究背景

在大流量和中低水头的水电站中, 轴流式机组被广泛应用, 而轴流式机组厂房空间布局繁琐、结构复

杂、内部空间和孔洞结构尺寸偏大, 其各部位结构应力变化较其他型式的厂房更加敏感^[1]。横缝深水平止水方案的布设对蜗壳结构应力的影响较大, 合理的横缝止水布设可以有效缓解蜗壳部位的结构应力, 减

收稿日期: 2022-09-03; 修回日期: 2022-11-16

基金项目: 中国华能集团有限公司科技项目 (HNKJ21-HF300、HNKJ21-H53)

作者简介: 程帅 (1992—), 男, 陕西西安人, 硕士, 工程师, 主要从事水电及新能源工程安全监测研究。

小厂房的不规则变形^[2],因而止水布设关乎水电站工程建设及运行的适用性、经济性和安全性^[3]。

目前对水电站厂房结构的研究主要集中于机组发电过程中水力脉动与机械振动等激振力对厂房结构自振特性的影响和传递路径分析,以及抗震安全影响等方面^[4-7],对止水结构的研究主要为面板堆石坝面板结构周边缝的止水失效原因分析与影响,以及止水材料特性、施工工艺等方面^[8-9]。在水电站厂房横缝止水布设方面,李守义等^[10]分析了不同止水布设方案对贯流式机组水电站厂房结构的影响;程帅^[11]研究了横缝不同位置的止水对厂房进水及尾水区域混凝土结构、尾水管等关键部位应力变形的影响;杜威等^[12]以金沙江某河床式水电站溢流坝段厂房机组段为研究对象,研究了不同的横缝止水结构布设设计对溢流坝段关键部位的变形影响,优化了止水布设型式;李守义等^[13]利用有限元软件对某河床式水电站厂房进行模拟,确定出了较为合理的横缝止水布置形式;邹金波^[14]对大坝横缝止水的施工工艺进行了改进,在节省投资的同时提高了施工效率;徐新田^[15]、陈磊等^[16]针对横缝止水渗漏问题提出了各种新的处理方法;李玉婕等^[17]利用 ANSYS 软件研究了止水结构对厂房受力特征的影响,表明止水位置对蜗壳部位的受力特征影响较为显著;向功兴等^[18]借助 ABAQUS 有限元分析软件,在不同工况下研究了厂房止水位置对混凝土蜗壳座环柔度的影响,并得到了蜗壳座环最大柔度。而针对厂房横缝不同深止水布设方案对蜗壳结构不同位置的受力特性及其应力变形影响的研究较少,仅根据工程经验确定的止水布设方案往往不是最优布设。

为深入了解不同深止水布设方案对轴流式机组厂房蜗壳结构应力特性的影响效果,本文依托某轴流式水电站工程,选取其具有代表性的中间厂房坝段,建立了 ANSYS 三维有限元模型,研究了不同运行工况下,横缝深止水布设的上游闭合和上游联通方案对蜗壳进口矩形断面钢衬等效应力、混凝土结构主应力、蜗壳内部 0° 和 90° 断面应力以及蜗壳外包薄层混凝土应力的影响,通过分析比较两种水平深止水布设方案对蜗壳各部位结构应力的影响,优化了深止水方案布设,研究结果可为类似工程的深止水布设方案提供参考。

2 计算模型与参数假定

2.1 工程概况与 ANSYS 模型建立

本次计算以某实际水电站的轴流式机组厂房坝

段为研究对象,该水电站等别为 II 等大(2)型工程,以发电为主要目标,水库总库容为 $1\ 541 \times 10^4 \text{ m}^3$,坝轴线全长 304.50 m,坝顶高程为 2 764.00 m,最大坝高为 79.72 m。电站厂房配有 3 台轴流式发电机组,发电机类型为轴流转浆式,电站总装机容量为 360 MW。按照《水电站厂房设计规范》^[19],基本荷载组合选取正常运行工况,其正常蓄水位为 2 762.00 m,下游水位为 2 725.00 m;偶然荷载组合选取机组检修工况,其正常蓄水位为 2 762.00 m,下游检修水位采用一台机组检修、其余两台机组运行时的尾水位 2 722.50 m。

建立实际轴流式水电站厂房结构的整体有限元模型如图 1 所示,混凝土蜗壳 ANSYS 模型如图 2 所示。模型整体基本采用 SOLID45 八结点六面体实体单元划分,部分连接区域采用四面体过渡,蜗壳内部钢衬用 SHELL181 壳单元模拟,细部构造沿厚度方向不少于两层单元划分。模型整体坐标系原点设在厂房坝段上游底部最右侧与地基相交处,坐标系方向:垂直于坝轴线方向指向下游为 X 轴正方向(即顺水流方向),沿高度方向竖直向上为 Y 轴正方向,平行于坝轴线方向指向右岸为 Z 轴正方向。在有限元分析过程中,厂房上、下游面和左、右横缝面均为自由面,对基岩上、下游面和左、右侧面周围施加法向约束,底部施加三向约束。

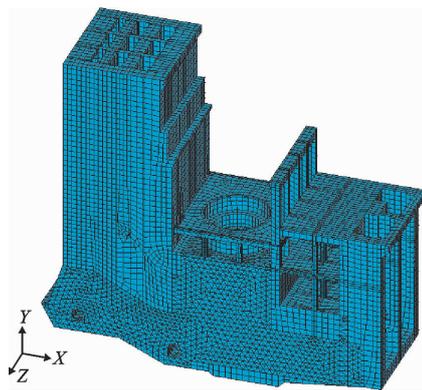


图1 水电站厂房有限元计算模型

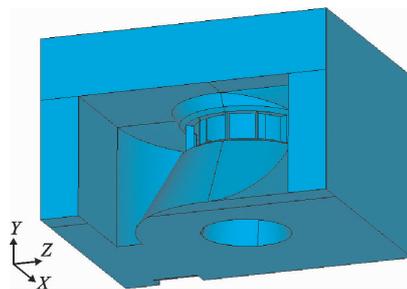


图2 混凝土蜗壳 ANSYS 模型

2.2 材料参数与计算假定

2.2.1 模型材料参数 计算模型中的混凝土材料、坝前淤积泥沙、地基岩体及蜗壳内敷钢衬均采用弹性模型,各材料参数如表1所示。

表1 材料计算参数

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦 角/ $(^\circ)$
混凝土结构(C25)	28000	0.167	24.5	
泥沙			17.2 (饱和容重)	26
钢衬	210000	0.300	78.5	
地基岩体	8000	0.280		

2.2.2 计算假定 根据水电站厂房的结构特点及其相关研究成果^[11,20-21],本文在三维有限元计算分析中做以下假定:

(1)各厂房坝段中间设置横缝,各坝段独立受力,相互间无应力变形影响;

(2)厂房坝段间横缝中的止水设施镶嵌牢固、布置可靠,不存在止水失效或破损渗漏现象;

(3)混凝土与基岩结构材料均为弹性、均质、各向同性的连续体,厂房基础与地基固结可靠,无脱空离析现象,满足线性问题的连续性条件。

3 深止水方案对蜗壳应力影响规律研究

3.1 两种深止水布设方案

深水平止水布设即在实际工程中将水平止水布设在蜗壳部位附近。本文研究水平止水对蜗壳的影响,以控制变量原则,保持上、下游竖向止水位置不变。如图3所示,蜗壳进口断面高度为 H ,通过改变止水位置,将水平止水上游侧分别设置在距蜗壳进口断面底板 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 和 H 处,变化过程中,各水平止水均与上游竖向止水相交呈现闭合状态,此时蜗壳部分承受水压力由下游水位控制,此方案称为上游闭合方案;如图4所示,设置上部与下部两道水平止水,下部水平止水全段均设置在蜗壳进口断面底板处保持高程不变,上部水平止水沿上下游方向在蜗壳下游侧截止,依次布设在距离蜗壳进口断面底板 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 和 H 处,此时上、下部两道水平止水与上游竖向止水相交联通,蜗壳部分承受水压力由上游水位控制,此方案称为上游联通方案。

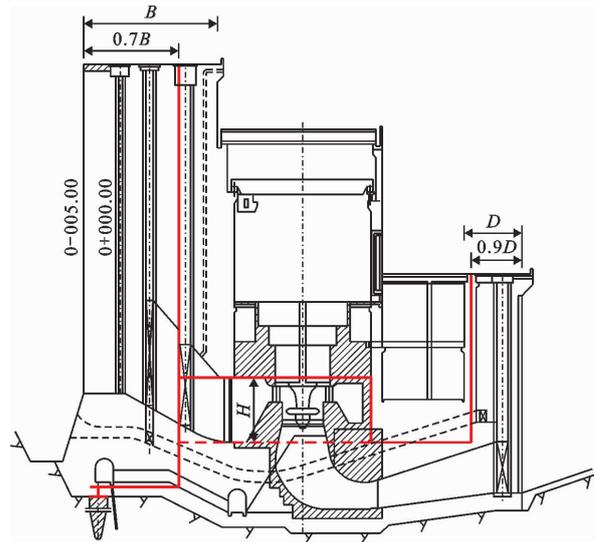


图3 上游闭合方案止水位置变化示意图

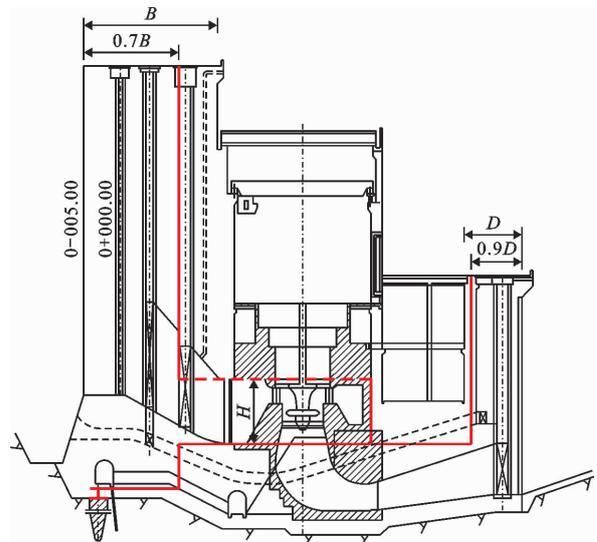


图4 上游联通方案止水位置变化示意图

3.2 蜗壳进口断面应力对比

选取蜗壳进口断面关键点处混凝土的最大主拉应力、最大主压应力和钢衬 Mises 应力,在上游闭合和联通两种止水布设方案下进行比较分析,关键点的位置如图5所示,蜗壳进口断面顶板、右边墙、底板和左边墙的中点位置分别为点B、D、F、H,左、右边墙与蜗壳顶板和底板的四个角点分别为点A、C、E、G。

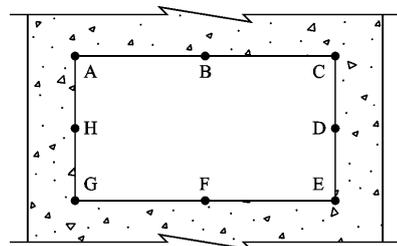


图5 蜗壳进口断面应力分析关键点位置

3.2.1 混凝土主应力对比 模拟正常和检修两种工况下蜗壳进口断面各关键点处的混凝土主应力。根据模拟计算结果可知,两种深水平止水的变化对蜗壳进口左、右边墙中部位置(即 H、D 点)的主拉应力及蜗壳顶板和底板的中部位置(即 B、F)主压应力几乎没有影响。为更直观地说明深水平止水设置在不同位置处时蜗壳进口断面关键点处应力变化趋势及不同布设方案的应力缓解效果,限于篇幅,选择正常运行工况下混凝土进口断面应力变化明显且较为典型的 A、C 点的最大主拉应力,以及 C、H 点的最大主压应力,绘制出两种深水平止水布设方案下蜗壳进口断面关键点混凝土的主应力变化曲线,如图 6 所示。

由模拟计算结果可知,随着止水位置的上抬,两深止水方案下蜗壳进口断面关键点的混凝土主应力变化规律相同,或逐渐减小或逐渐增大。止水位置在距蜗壳进口断面底部 0.2H 处时,两种深止水方案的主应力差值不大;随着止水位置的上移,两种深止水方案的混凝土主应力差值逐渐增大,最大主拉应力差值可达到 1.41 MPa(C 点)。正常运行工况

下,随着止水位置的上移,蜗壳各关键点的主拉应力均逐渐减小,上游闭合方案的减小量为 27.1% ~ 38.2%,上游联通方案的减小量为 62.2% ~ 76.6%;上游闭合方案下 H 点的主压应力减小了 14.7%,上游联通方案下 H 点的主压应力减小了 30.3%。机组检修工况下,上游闭合方案 B 点的主拉应力减小了 33.6%,上游联通方案 B 点的主拉应力减小了 57.9%;上游闭合方案 H 点的主压应力减小了 17.1%,上游联通方案 H 点的主压应力减小了 37.9%。其他各关键点的主压应力变化较小。综上所述,深水平止水上游联通方案对蜗壳进口混凝土主应力的缓解效果明显优于上游闭合方案,其主应力减小幅度是上游闭合方案的 2 倍以上。

3.2.2 钢衬等效应力对比 蜗壳进口断面各关键点处的钢衬 Mises 应力呈现对称分布,点 A、B、D、E 与相应的点 C、F、H、G 的钢衬 Mises 应力变化规律相同。限于篇幅,选择正常运行工况下较为典型的 C、D 两点和检修工况下较为典型的 B、G 两点,绘制两种深水平止水布设方案下进口断面钢衬关键点的 Mises 应力变化曲线,如图 7 所示。

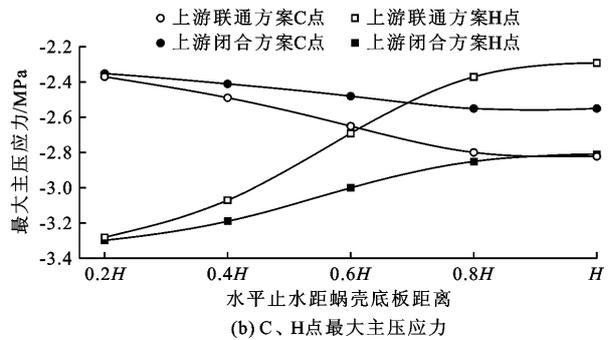
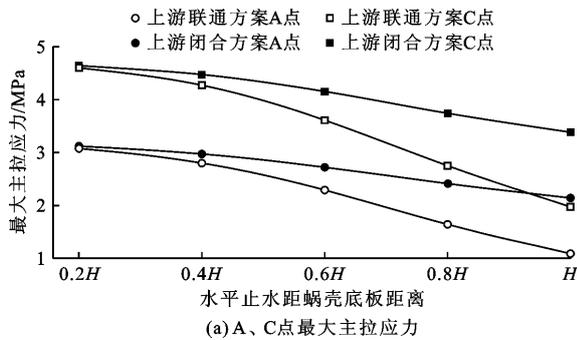


图 6 两种深水平止水布设方案下蜗壳进口断面关键点混凝土的应力变化曲线(正常运行工况)

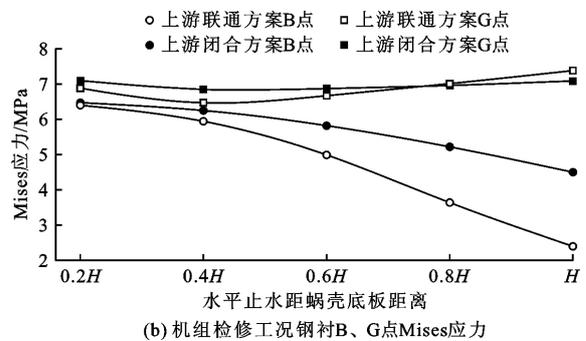
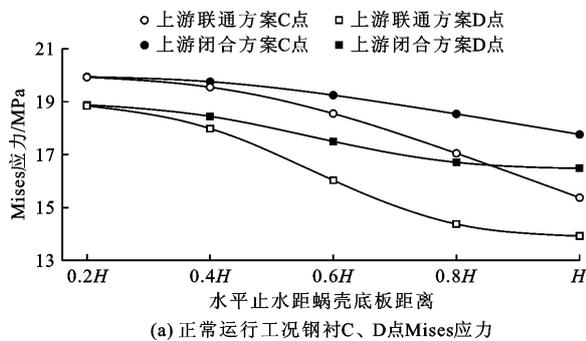


图 7 两种深水平止水布设方案下蜗壳进口断面关键点钢衬的 Mises 应力变化曲线

由模拟计算结果可知,除 E、G 两点外,止水位置的上移对关键点钢衬的 Mises 应力影响均较大,Mises 应力整体呈现出逐渐减小的趋势。正常运行工况下,随着止水位置的上移,C、D 点的钢衬 Mises

应力在上游闭合方案下的减小量分别为 10.9% 和 12.7%,在上游联通方案下的减小量分别为 22.8% 和 26.1%。机组检修工况下,随着止水位置的上移,B 点的钢衬 Mises 应力在上游闭合方案下减小

了30.4%,在上游联通方案下减小了62.6%。其余相应各关键点的变化规律与上述点相似只是变幅大小不同。表明上游联通方案对钢衬 Mises 应力的缓解效果优于上游闭合方案,其 Mises 应力减小幅度是上游闭合方案的2倍以上。

3.3 蜗壳内部典型断面应力对比

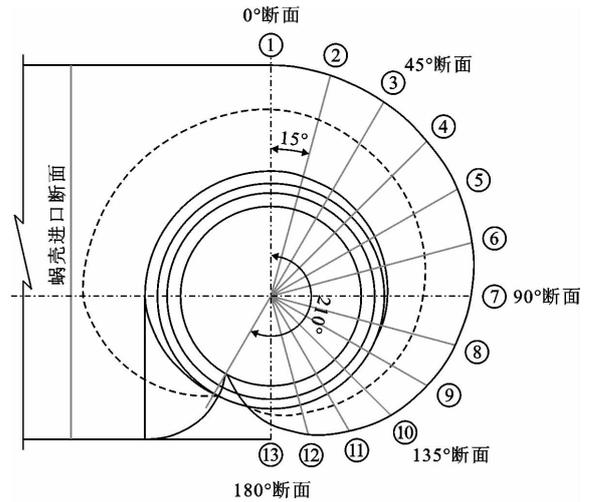
蜗壳内部典型断面和各角点位置如图8所示。模拟计算深止水布设下两方案的蜗壳内部0°断面和90°断面各角点处混凝土及钢衬的应力值,对比随着止水位置的上移两方案蜗壳内部的应力变化。

3.3.1 蜗壳内部0°断面应力对比 随着深止水位置的上移,蜗壳内部点C、D、E的最大主拉应力值变化较大,蜗壳0°断面处混凝土最大主压应力及钢衬 Mises 应力几乎不变,故本节以最大主拉应力为研究对象,选择正常运行工况下C、E点和机组检修工况下B、E点,绘制出蜗壳0°断面混凝土的最大主拉应力变化曲线,如图9所示。

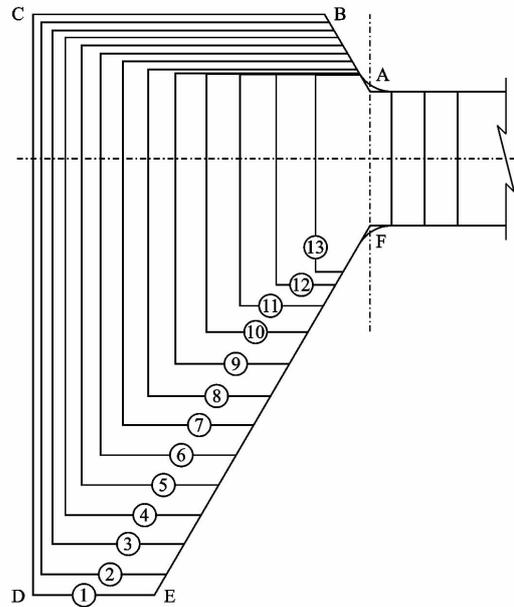
模拟计算结果表明,随着止水位置的上移,两方案下的蜗壳0°断面混凝土最大主拉应力变化规律相同,但应力差值逐渐增大。正常运行工况下,随着止水位置的上移,A点和F点的混凝土主拉应力基本不变,其余点的应力值逐渐减小,上游闭合方案下减小幅度为17.5%~69.3%,上游联通方案下减小幅度为38.6~154.5%。机组检修工况下,蜗壳全断面各点的主拉应力值均较小。由此可知,上游联通方案下蜗壳0°断面混凝土主拉应力的减小量是上游闭合方案的2倍以上。

3.3.2 蜗壳内部90°断面应力对比 对比两工况下计算结果可知,相比于正常运行工况,机组检修工况蜗壳90°断面处的混凝土最大主拉应力及钢衬 Mises 应力整体较小,故本节以正常运行工况下蜗壳90°断面应力较为典型的B、C两点作为研究对象,对比两种深水平止水方案下不同位置的应力变化情

况。绘制出正常运行工况下B、C两点的混凝土最大主拉应力与钢衬 Mises 应力,如图10所示。

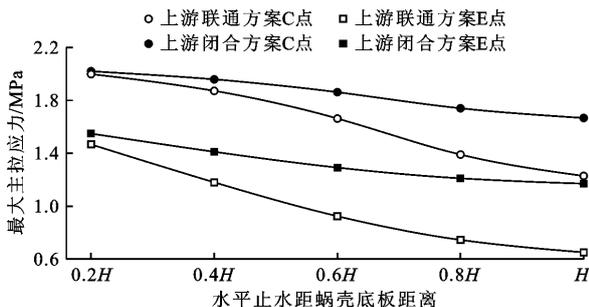


(a) 蜗壳内部典型断面

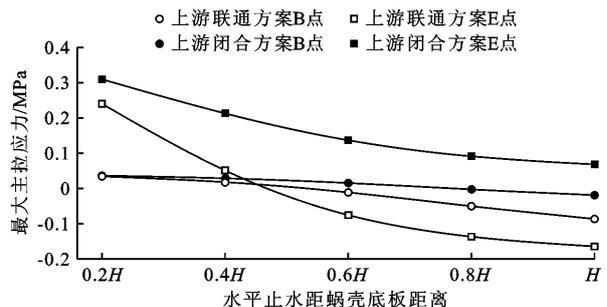


(b) 各角点位置

图8 蜗壳内部典型断面和各角点位置示意图



(a) 正常运行工况断面C、E点最大主拉应力



(b) 机组检修工况断面B、E点最大主拉应力

图9 两种深水平止水布设方案下蜗壳0°断面混凝土的最大主拉应力变化曲线

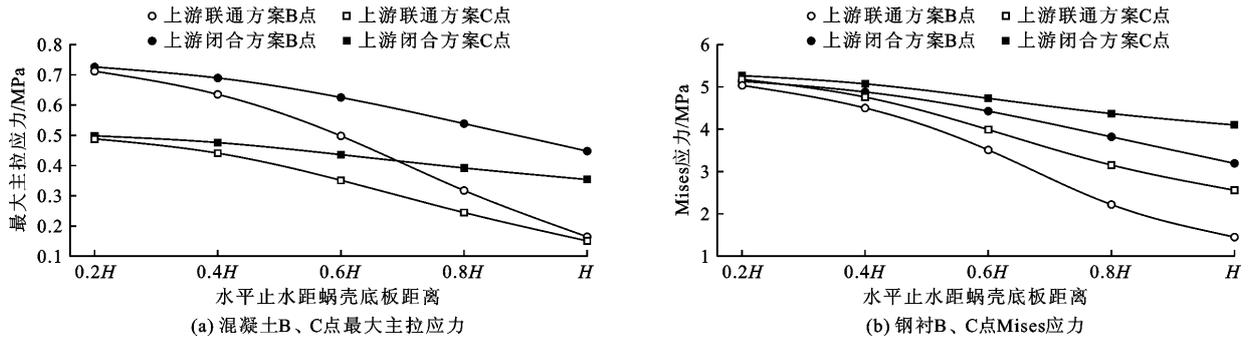


图 10 两种深水平止水布设方案下蜗壳 90°断面关键点应力变化曲线(正常运行工况)

比较模拟计算结果可知,蜗壳 90°断面的混凝土主拉应力值和钢衬 Mises 应力值整体上比蜗壳 0°断面小,但止水位置的上移同样会使应力减小。上游闭合方案下深水平止水位置由 0.2H 抬高至 H 时,B、C 两点的主拉应力减小幅度分别为 38.3% 和 28.8%,钢衬 Mises 应力的减小幅度分别为 37.8% 和 22.2%。上游联通方案下深水平止水位置由 0.2H 抬高至 H 时,B、C 两点的主拉应力减小幅度分别为 76.9% 和 69.1%,钢衬 Mises 应力减小幅度分别为 71.1% 和 50.5%。可见上游联通方案各水平止水布设对缓解蜗壳内部混凝土应力和钢衬 Mises 应力的效果优于上游闭合方案。

3.4 蜗壳外包薄层混凝土应力对比

蜗壳自 0°断面由左岸向右岸逐渐旋转至鼻端处,外包混凝土逐渐加厚,因而蜗壳进口断面与 0°断面之间的靠左岸一侧混凝土厚度较薄,与边墙厚度一致。在蜗壳强大的内水压力下,进口处左侧外包薄层混凝土承受较大拉应力。故本文选择薄层混凝土的最内侧点和最外侧点作为典型的应力点,分析两种深水平止水布设方案下,随着止水位置的上移蜗壳左岸薄层混凝土外侧和内侧的应力变化情况。绘制出的正常运行工况蜗壳左岸薄层混凝土的最大主拉应力见图 11,机组检修工况蜗壳左岸薄层混凝土最大主压应力见图 12。

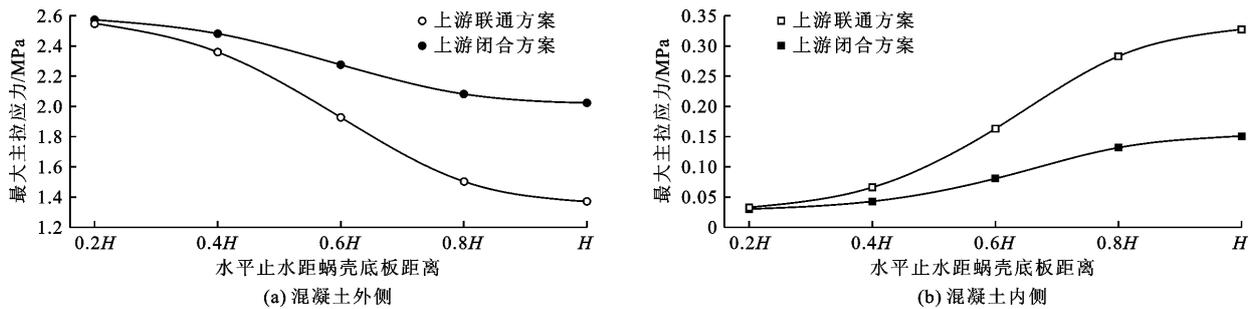


图 11 两种深水平止水布设方案下正常运行工况蜗壳左岸薄层混凝土最大主拉应力变化曲线

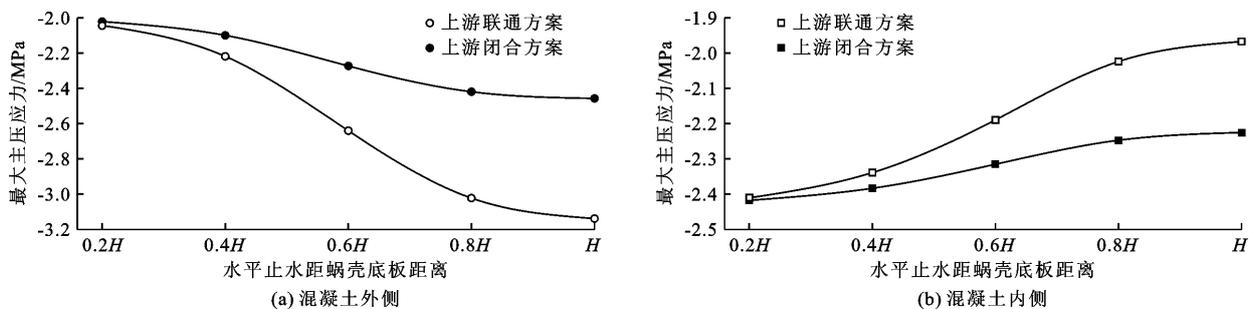


图 12 两种深水平止水布设方案下机组检修工况蜗壳左岸薄层混凝土最大主压应力变化曲线

由图 11、12 可知,随着止水位置的上移,薄层混凝土外侧和内侧主应力变化规律相同,或逐渐增大或逐渐减小,曲线变化趋势为两端缓中间陡。正常

运行工况下深水平止水位置由 0.2H 抬高至 H 时,上游闭合方案对混凝土外侧最大主拉应力的减小幅度为 21.4%,而上游联通方案的减小幅度为 46.3%;

机组检修工况下深水平止水位置由 $0.2H$ 抬高至 H 时,上游闭合方案对混凝土内侧最大主压应力的减小幅度为 8.0% ,而上游联通方案的减小幅度为 18.4% 。正常运行工况下混凝土内侧主压应力和机组检修工况下混凝土外侧主拉应力随止水位置的上移增幅较小。上游联通方案对蜗壳混凝土的主拉应力和主压应力的减小幅度是上游闭合方案的 2 倍以上,水平止水上游联通方案优于上游闭合方案。

4 结 论

横缝深水平止水方案的布设没有统一的规范规定,而深止水方案的布设对轴流式机组蜗壳应力影响显著。为明晰深止水布设对蜗壳应力的影响规律,依托某轴流式水电站实际工程,建立其厂房及蜗壳的 ANSYS 三维有限元模型,通过详细对比两种深止水方案下,随着止水位置的上移蜗壳进口矩形断面应力、蜗壳内部典型断面应力、蜗壳外包混凝土应力的变化情况,得出以下结论:

(1)在相同水平深止水布设位置下,上游联通方案对缓解蜗壳附近大部分区域混凝土主应力的效果比上游闭合方案更为显著。

(2)随着深水平止水位置由距离蜗壳进口断面底板上表面 $0.2H$ 处上移至蜗壳进口断面顶板处时(距离蜗壳进口断面底板上表面 H 处),上游联通方案对蜗壳部位混凝土主应力及钢衬等效应力的减小量和减小幅度百分比均为上游闭合方案的 2 倍以上。

(3)在轴流式机组水电站厂房的横缝深止水布设的设计中,应优先考虑采用上游联通方案布设止水方案。在相同止水布设范围内,上游联通方案能更大程度地降低蜗壳附近部位的结构应力。

参考文献:

- [1] 司政,程帅,李守义,等.轴流式机组厂房横缝水平止水布置研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):132-137.
- [2] 李守义,吕汶蔚.河床式水电站厂房结构流固耦合振动特性研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):205-209.
- [3] 司政,程帅,李守义,等.横缝竖向止水布设对轴流式机组厂房应力的影响[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(8):695-702.
- [4] 霍学平,马震岳,陈婧,等.水电站地面厂房上部结构抗振分析[J].人民黄河,2016,38(8):95-98.
- [5] 孙莹,陈利利,蒋莉,等.基于不同边界的水电站厂房振动特性研究[J].人民黄河,2018,40(4):108-111+116.
- [6] 王海军,白冰,李康.水电站厂房相邻机组段振动传播规律研究[J].水资源与水工程学报,2016,27(1):141-146.
- [7] 刘晶石,吕桂萍,钟苏,等.基于 ANSYS 的轴流式水轮机空心活动导叶结构优化分析[J].水力发电学报,2014,33(6):215-219.
- [8] JIA Jinsheng, ZHENG Cuiying, HAO Jutao, et al. Studies for the transverse joint waterstops at Xiaowan dam [J]. International Journal on Hydropower and Dams, 2006, 13(1): 50-58.
- [9] HAO Jutao, LU Yihui, JIA Jinsheng, et al. Adaptability of slab joint waterstops to very high CFRDs[J]. International Journal on Hydropower and Dams, 2010, 17(1): 78-83.
- [10] 李守义,安学民,杨胜,等.灯泡贯流式水电站厂房水平止水布置研究[J].水资源与水工程学报,2009,20(1):68-71.
- [11] 程帅.横缝止水布设对轴流式机组厂房结构的影响研究[D].西安:西安理工大学,2017.
- [12] 杜威,王志宏,王占军.河床式水电站厂泄连接坝段横缝止水布置研究[J].水利规划与设计,2021(4):101-105.
- [13] 李守义,肖静.河床式水电站厂房横缝止水布置形式研究[J].水力发电学报,2014,33(5):165-168.
- [14] 邹金波.大坝横缝止排水系统施工工艺改进的探讨[J].水力发电,2014,40(9):20-21+57.
- [15] 徐新田.大坝横缝排水槽化学灌浆新工艺[J].大坝与安全,2017(4):57-59.
- [16] 陈磊,吴启民.长距离置换式灌浆法处理大坝横缝止水渗漏[J].大坝与安全,2016(5):67-69.
- [17] 李玉婕,赵世英,罗荣.水电站厂房结构自振特性与止水优化分析[J].长江科学院院报,2017,34(12):122-125.
- [18] 向功兴,杨亚军,伍鹤皋,等.河床式厂房止水布置和混凝土蜗壳座环柔度[J].武汉大学学报(工学版),2010,43(1):46-50.
- [19] 国家能源局.水电站厂房设计规范:NB/T 35011—2016[S].北京:中国电力出版社,2016.
- [20] 彭文明.生长单元在碾压混凝土结构仿真计算中的应用技巧[J].水资源与水工程学报,2022,33(4):164-170+177.
- [21] 陈金泉,王海军,刘娟莉,等.基于 IGA-BPNN 的水电站厂房振动响应预测[J].水资源与水工程学报,2022,33(3):163-168.