

# 锚索索力损失对预应力闸墩动态特性的影响

李火坤<sup>1</sup>, 何小敏<sup>2,3</sup>, 刘 鹏<sup>3</sup>, 杨 敏<sup>2</sup>

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 3. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 某水电站泄洪闸采用大吨位预应力闸墩承受弧形闸门支臂传递的巨大水推力, 通过近2年的闸墩锚索拉力监测发现, 锚索张拉力损失部分超过15%, 并尚未收敛, 且闸墩在宣泄洪水过程中曾出现过强烈振动现象。为进一步明确锚索拉力损失是否对闸墩动态特性(包括模态特性、动位移与动应力特性)产生影响, 建立了闸墩-基础-锚索整体有限元模型, 通过制作闸墩水力学模型并采用力传感器测量作用于闸墩上的整体面荷载, 获取不同运行工况下的闸墩整体水动力荷载时程线, 以此为有限元模型输入荷载进行闸墩动态响应计算, 分析了泄洪闸预应力闸墩主、次锚索不同索力损失对闸墩的动态特性的影响, 研究成果可为工程安全运行提供重要参考。

**关 键 词:** 锚索; 索力损失; 预应力闸墩; 动态特性

**中图分类号:** TV662

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2013)05-0039-07

采用大吨位锚索锚固技术支承水工弧形钢闸门支臂传递的巨大水推力, 已在我国水利水电工程建设中得到广泛的应用与发展, 如国内首先使用该技术的葛洲坝水电站中的二江、三江和大江泄洪冲沙闸, 以及后来推广应用的龙羊峡、五强溪、安康、水口、漫湾等水电站。关于锚索对闸墩静态应力的影响研究, 国内外研究较多, 李振龙<sup>[1]</sup>、张微微<sup>[2-3]</sup>、赵春<sup>[4]</sup>等采用三维有限元法计算了水电站闸墩整体空间应力与变形, 分析了预应力闸墩的静态受力特性; 郭宏磊等<sup>[5]</sup>通过有限元模拟、模型实验及弹性理论分析, 得到了预应力闸墩体内锚固区的应力分布及开裂部位; 张世宝等<sup>[6]</sup>对预应力闸墩进行了结构模型试验, 分析研究了预应力预压效果和闸墩及其锚块等控制部位的受力状态; 陈震等<sup>[7]</sup>采用弹塑性损伤模型模拟了预应力混凝土内部损伤累积导致的变形增加和承载力降低, 并基于规范中的单轴应力-应变曲线推导了简化的弹塑性损伤模型, 模拟预应力闸墩的损伤机理。以上研究多集中于预应力闸墩的静态应力分析方面, 由于闸墩除了承受弧形闸门推力外, 泄流过程中还会承受水动力荷载作用<sup>[8]</sup>并产生振动, 关于预应力闸墩动态特性(包括模态特性、动态响应等)方面的研究较少涉及, 特别是锚索张拉力损失对闸墩动态特性的影响方面研究更少, 彭刚等<sup>[9]</sup>采用振型分解反应谱法对某预应力闸墩的动力特性进行了计算分析, 比较了分离式模型和整体式模型下的频率、位移及应力成果。本文以某水电站预应力泄洪闸闸墩为例, 针对其运行过程中出现的锚索拉力损失和泄洪闸闸墩出现强烈振动的情况, 采用模型试验与数值模拟方法, 测试了闸墩整体水动力荷载, 建立了预应力闸墩三维有限元模型, 计算并分析了锚索索力损失对闸墩动态特性的影响, 研究成果可为类似工程提供参考。

**收稿日期:** 2013-03-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51269019, 50909049); 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室开放研究项目; 江西省教育厅基金资助项目(GJJ12030)。

**作者简介:** 李火坤(1981-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 主要从事泄流结构动力检测与安全评估方面的研究工作。

E-mail: lihuokun@126.com

## 1 工程概况

### 1.1 泄洪闸闸墩及锚索结构布置

某泄洪闸布置于垂直升船机坝段与厂房坝段之间,由 5 孔组成,从左至右排列为 1#~5#。孔口尺寸为 13.0 m×23.8 m(宽×高),堰顶高程 193.50 m,设 13.0 m×23.5 m 的平板检修门和弧型工作门各一道,弧门支铰高程为 217.60 m,弧门半径为 32.00 m,闸墩厚度 4.5 m。堰型为宽顶堰,由上游圆弧、堰顶水平段、抛物线段、斜坡段、反弧段组成,堰面通过反弧段与消力池底板相接,闸室沿水流方向长 54.0 m。闸墩为预应力闸墩,1#孔左闸墩为满足施工期导流需要,闸墩与纵向导墙结合设计,顶部厚 14.0 m(其中 4.5 m 厚为预应力结构),其余闸墩厚均为 4.5 m。右岸泄洪闸闸墩锚索布置采用锚块预应力形式,分闸墩主锚索和锚块次锚索。锚块断面为梯形,顶宽 4.0 m,底宽 5.6 m,沿弧门推力方向长 6.5 m,弧门单支铰推力  $P=25\ 180\ \text{kN}$ ,根据推力值和布置需要,闸墩厚度设置为 4.5 m,泄洪闸布置如图 1~2 所示。

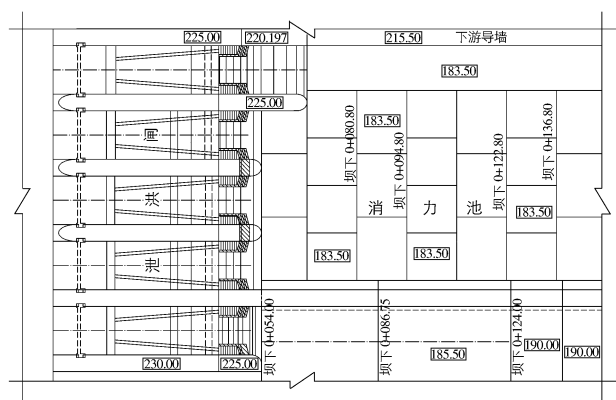


图 1 泄洪闸平面布置

Fig.1 Sluice layout

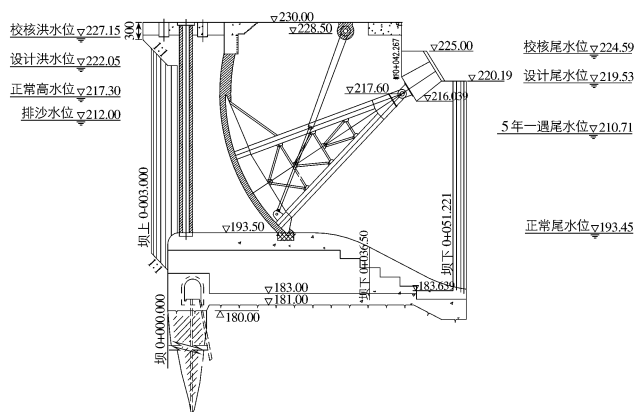


图 2 泄洪闸闸墩剖面

Fig.2 Typical profile of a sluice

主锚索布置:泄洪闸右闸墩,主锚索立面为扇形布置,设 5 层,1,3,5 层每层 4 束,2,4 层每层 3 束。左侧中闸墩主锚索立面同为扇形布置,设 5 层,每层 6 束。主锚索型式采用 OVM15-27 锚固体系,钢绞线直径为 15.24 mm,单束由 27 根钢绞线组成,单束锁定吨位 4 880 kN,超张拉吨位为 5 120 kN,永存吨位 4 100 kN。弧门单支铰推力的拉锚系数(所施加的预压力与弧门总推力之比值)边墩为 2.54,中墩为 2.38。为了使锚块保持较好的应力状态,在锚块内布置垂直水流方向的次锚索,垂直弧门推力方向分别布置 4 列 4 排共 16 束锚索,下游侧一排布置于距锚块下游侧边缘 1.05 m 处,上游侧一排布置于距锚块上游边缘 0.7 m 处,中间排距上游排的距离分别为 0.9 和 1.2 m,每列均布设 4 束。上游侧三排采用 OVM15-25 锚固体系,即钢绞线直径为 15.24 mm,单束由 25 根钢绞线组成,单束锁定吨位为 4 500 kN,超张拉吨位为 4 720 kN,永存吨位 3 850 kN。下游侧一排采用 OVM15-22 锚固体系,即钢绞线直径为 15.24 mm,单束由 25 根钢绞线组成,单束锁定吨位为 3 900 kN、超张拉吨位为 4 100 kN、永存吨位为 3 350 kN。锚索布置如图 3 所示。

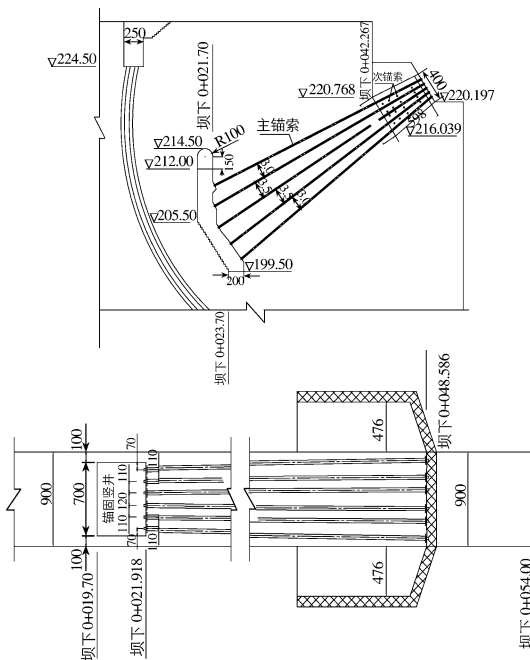


图 3 泄洪闸中墩锚索布置

Fig.3 Anchor layout of middle pier

## 1.2 锚索索力损失

在锚索张拉锁定后的半年内,锚索张拉荷载损失较大,10套主锚索实测值平均损失8.8%,2年后10套锚索实测值平均损失14.47%,其中6套锚索实测值小于设计永存吨位4 100 kN,5号墩部分锚索发生突变式荷载损失.个别锚索测力计实测张拉荷载在1年后一直呈现减小趋势,尚未收敛;根据监测资料结果分析,锚索荷载损失率普遍较高,索力损失率超过15%的有7支,损失率在10%~15%之间的有8支,部分锚索应力损失较大,且当前测值低于设计永存吨位.该电站在运行过程中曾遭遇30年一遇洪水,发现泄洪闸闸墩顶部振动幅度较大,无法判定锚索索力损失与闸墩振动之间的关系.鉴于此,本文基于三维有限元模型,并结合水力学模型试验,研究锚索索力损失对闸墩动态特性的影响.

## 2 预应力闸墩数值计算模型

采用ANSYS大型有限元软件建立泄洪闸闸墩数值模型,取2#泄洪闸右半孔+3#泄洪闸+4#泄洪闸左半孔(简称3#孔闸墩)作为计算单元体进行干模态分析,模拟不同索力损失对泄洪闸闸墩整体动力特性的影响.泄洪闸闸墩、地基、锚索等结构相关计算材料参数如下:钢筋混凝土重度为 $24.50 \text{ kN/m}^3$ ,混凝土重度为 $24.0 \text{ kN/m}^3$ ,锚索重度为 $78.5 \text{ kN/m}^3$ ;C25混凝土弹性模量和泊松比为 $2.80 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 和0.167,C30的为 $3.00 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 和0.167,C40的为 $3.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 和0.167;锚索弹性模量和泊松比为 $1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 和0.27.

采用ANSYS单元库中的SOLID45单元模拟闸墩混凝土结构及地基;附属建筑物(如工作桥等)采用MASS质量元进行简化;采用LINK8杆单元模拟锚索效应(施加初始应变进行模拟),闸墩预应力按损失后吨位计算,边墩、中墩主锚索张拉力每根均按4 000 kN计;次锚索张拉力前3排每根均按3 700 kN计,后1排每根均按3 350 kN计.

计算范围及边界条件:根据地基模拟范围对泄洪闸闸墩动力特性影响的分析结果<sup>[10]</sup>,地基模拟深度取50 m,宽度取26 m,上下游长度取50 m;闸室地板周边结构缝按自由边界处理,地基四周采用全约束,即约束 $X, Y, Z$ 方向位移,工作桥等附属建筑物以附加质量的形式考虑.泄洪闸及锚索有限元模型如图4~5所示.

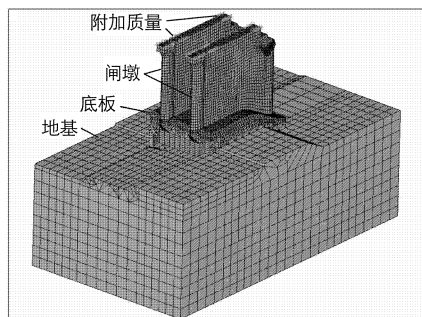


图4 3#孔泄洪闸闸墩整体有限元模型

Fig.4 FEM for 3# sluice pier

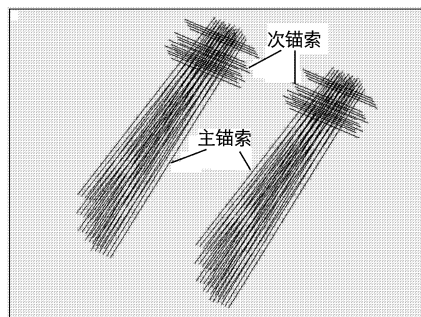


图5 闸墩锚索有限元模型(LINK8单元)

Fig.5 Anchor's FEM (LINK8 element)

## 3 锚索索力损失对闸墩动态特性的影响分析

### 3.1 索力损失对闸墩模态特性的影响

以上述有限元模型为基础,计算5组索力损失程度情况下闸墩模态特性(前10阶),主锚索索力损失模拟每根按4 000,3 000,2 000,1 000和0 kN依次递减;次锚索拉力前3排每根按3 700,3 000,2 000,1 000和0 kN依次递减;次锚索拉力后1排按3 350,3 000,2 000,1 000和0 kN依次递减.计算时,当锚索发生应力损失时,按主锚索与次锚索同时损失进行计算,计算结果如图6所示.从计算结果来看,主、次锚索损失对泄洪

闸闸墩自振频率影响很小(频率变化基本在小数点后2位).

3.2 索力损失对闸墩动态响应(动位移、动应力)的影响

3.2.1 泄洪闸闸墩整体水动力荷载模型试验 为获取作用在闸墩上的整体荷载(面荷载),制作了泄洪闸整体水力学模型,水力学模型左、右闸墩沿顺水流方向都分成3块,用于测量顺水流向闸墩不同区段的水力学荷载,利于后续的数字计算.面压力盒承压面的面积与一个闸墩段的面积相同,承压面由2个力传感器支撑,受测段两侧承压面的动水压力传至2个传感器,进而测出受测段的动水荷载.闸墩的力传感器布置如图7所示,试验模型如图8所示.试验工况为不同频率洪水及不同运行方式组合,如表2所示.

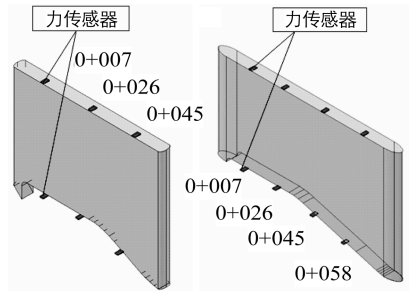


图7 闸墩整体面荷载测试传感器布置  
Fig.7 Sensor layout of pier overall load tests

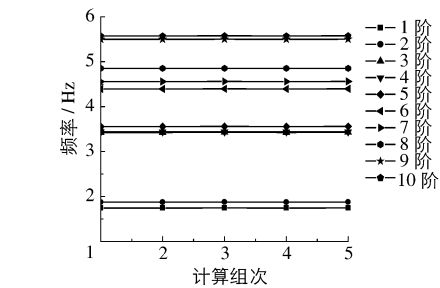


图6 锚索索力损失对闸墩动力特性的影响  
Fig.6 Impact of anchor force loss on pier dynamic characteristics

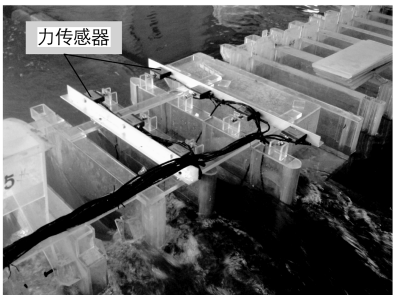


图8 闸墩整体荷载模型试验  
Fig.8 Overall load model tests on piers

表2 整体面荷载测量试验工况  
Tab.2 Model test conditions of overall load tests

| 整体荷载<br>测试工况 | 1                               | 2                               | 3                               | 4                               | 5                               | 6                               |
|--------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|              | 校核洪水                            | 设计洪水                            | 20年一遇洪水                         | 5年一遇洪水                          | 常遇洪水                            | 常遇洪水                            |
|              | $Q=38\,100\text{ m}^3/\text{s}$ | $Q=30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ | $Q=23\,100\text{ m}^3/\text{s}$ | $Q=16\,900\text{ m}^3/\text{s}$ | $Q=17\,760\text{ m}^3/\text{s}$ | $Q=15\,549\text{ m}^3/\text{s}$ |
| 上游水位(m)      | 227.15                          | 222.05                          | 217.57                          | 212.88                          | 216.26                          | 215.60                          |
| 下游水位(m)      | 224.20                          | 219.00                          | 214.60                          | 210.40                          | 210.80                          | 209.30                          |
| 备 注          | 5孔闸全开                           | 5孔闸全开                           | 5孔闸全开                           | 5孔闸全开                           | 2#孔全开                           | 2#孔全开                           |

对各试验工况闸墩整体荷载进行统计分析,整体面荷载最大值、均方根见图9~10(限于篇幅仅给出左闸墩试验结果).

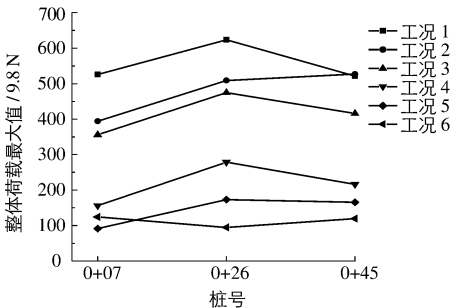


图9 各工况左闸墩整体荷载最大值  
Fig.9 The maximum overall load of left pier

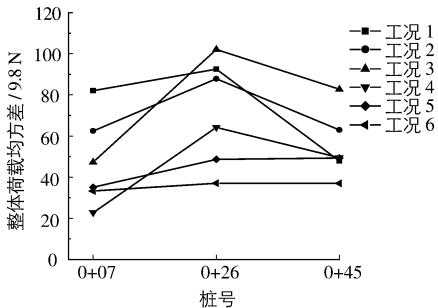


图10 各工况左闸墩整体荷载均方差  
Fig.10 Root mean square deviation of overall load of left pier

试验结果表明,左闸墩最大瞬时水平推力出现在校核工况,位置在桩号 0+26 m 处,约为  $6.11 \times 10^3$  kN,此时脉动推力均方根约为  $9.1 \times 10^2$  kN;其他工况的瞬时水平推力为  $1.96 \times 10^2 \sim 5.88 \times 10^3$  kN 量级,脉动推力均方根为  $2.25 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^3$  kN 量级。通过对闸墩整体荷载功率谱分析,荷载主频较低,约为 0.05 ~ 0.15 Hz,脉动能量基本分布在 0.50 Hz 以内。

**3.2.2 索力损失对闸墩动态响应的计算结果分析** 以校核荷载工况所测整体荷载为典型计算工况,将所测整体面荷载施加至有限元模型进行瞬态计算,分别计算锚索索力不同损失程度对闸墩动位移及动应力的影响,锚索索力损失计算组次同表 1。闸墩动位移及动应力结果提取节点位置如图 11 所示,其中 1 ~ 10 号点提取动位移,11 ~ 31 号点提取动应力,计算结果如图 12 ~ 13 所示。

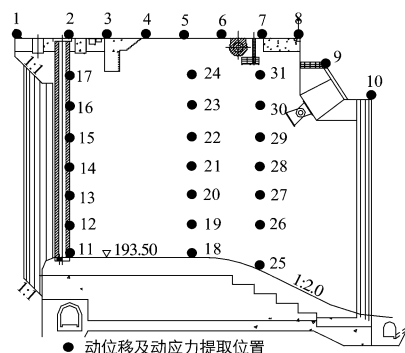


图 11 动位移及动应力提取点位置

Fig. 11 Dynamic displacement and dynamic stress monitoring points

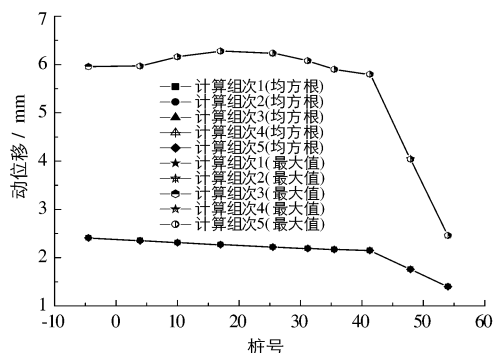


图 12 1 ~ 10 号点动位移均方根及最大值

Fig. 12 Root mean square and the maximum dynamic displacement of points

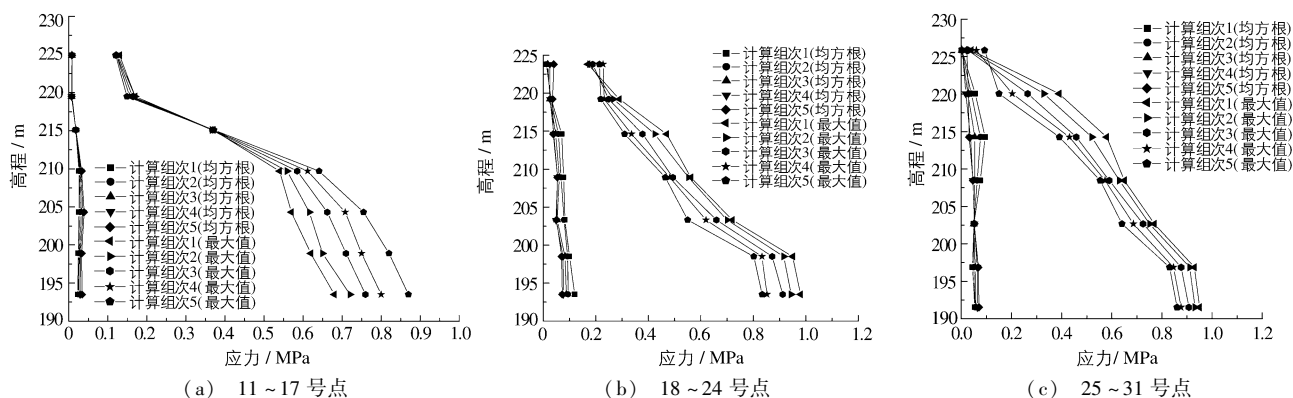


图 13 11 ~ 31 号点动应力均方根及最大值

Fig. 13 Root mean square and the maximum dynamic stress of points 11 ~ 31

从计算结果来看,对动位移而言,锚索索力损失对闸墩动位移影响甚微,各计算组次情况下动位移均方根及最大值变化很小;对动应力而言,对于远离锚固区的 11 ~ 17 号点,动应力均方根无论是沿高程还是不同计算组次,其值变化很小,基本在 0.02 MPa;闸墩动应力最大值沿高程逐渐减小,但不同索力损失计算组次情况下,底部最大动应力随索力损失程度增加而增大,即锚索索力的减小增大了远离锚固区的底部的最大动应力值,增幅约 0.2 MPa。对于锚固区的 18 ~ 24 号点以及 25 ~ 31 号点,动应力均方根无论是沿高程还是不同计算组次,其值变化也较小,约 0.05 MPa;闸墩动应力最大值沿高程逐渐减小,在不同索力损失计算组次情况下,闸墩底部最大动应力随索力损失的变化与远离锚固区的 11 ~ 17 号点变化趋势相反,即底部最大动应力随索力损失程度增加而呈减小的趋势,减幅约 0.1 MPa。

总体而言,锚索索力损失对闸墩动位移影响很小,而对闸墩底部最大动应力的影响与闸墩部位有关(即

锚固区与远离锚固区), 动应力最大值的变幅不大, 主要体现为局部影响。

## 4 结 语

预应力闸墩在水利工程泄水建筑物中已广泛使用, 随着运行时间的增长, 锚索索力会发生不同程度的降低, 本文以某泄洪闸闸墩为例, 针对其运行过程中出现的锚索索力损失以及闸墩强烈振动现象, 采用数值模拟与水力学模型试验相结合的手段, 研究了锚索索力损失对闸墩模态特性、动位移及动应力的影响。研究结果表明, 锚索索力损失对闸墩模态特性及动位移影响很小, 对闸墩动应力而言, 闸墩首部(远离锚固区)最大动应力随锚索拉力减小而增大, 闸墩后部(锚固区)最大动应力有随锚索拉力减小而减小的趋势, 最大动应力变幅在 0.1~0.2 MPa。由于本文仅考虑了 5 组索力损失组合情况, 并且在计算工况的选择上仅考虑了最大整体动荷载(即校核工况, 无弧门推力)的工况, 对于闸门局部开启工况(有弧门推力)以及更多的索力损失组合工况的研究还有待进一步加强。

## 参 考 文 献:

- [1] 李振龙, 李守义, 范瑞朋. 里底水电站溢洪道竖井式预应力闸墩应力及应变分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 140-143. (LI Zhen-long, LI Shou-yi, FAN Rui-peng. Stress and strain analysis of the spillway silo prestressed pier of Lidi hydropower station[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(5): 140-143. (in Chinese))
- [2] 张微微, 彭刚, 陈灯红, 等. 江坪河溢洪道预应力边墩三维有限元分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(12): 113-115. (ZHANG Wei-wei, PENG Gang, CHEN Deng-hong, et al. 3-D FEM analysis of the left side prestressed pier of Jiangpinghe hydropower station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(12): 113-115. (in Chinese))
- [3] 张微微, 彭刚, 陈灯红, 等. 江坪河预应力闸墩静动力有限元分析研究[J]. 世界地震工程, 2008, 24(4): 159-163. (ZHANG Wei-wei, PENG Gang, CHEN Deng-hong, et al. Seismic response analysis of prestressed pier of Jiangpinghe project by 3D-FEM[J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(4): 159-163. (in Chinese))
- [4] 赵春, 张军, 杨国祥, 等. 五强溪大坝表孔预应力闸墩应力复核[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 624-627. (ZHAO Chun, ZHANG Jun, YANG Guo-xiang, et al. Stress recheck of pre-stressed pier for surface outlets in Wuqiangxi Dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(5): 624-627. (in Chinese))
- [5] 郭宏磊, 贺采旭, 何亚伯. 预应力闸墩体内锚束锚固区受力性能研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(1): 59-64. (GUO Hong-lei, HE Cai-xu, HE Ya-bo. Study on behavior of anchorage zone of tendon in internal prestressed sluice pier[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1996, 29(1): 59-64. (in Chinese))
- [6] 张世宝, 张淙蛟, 解伟. 大型泄洪排沙闸预应力闸墩结构模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 92-96. (ZHANG Shi-bao, ZHANG Cong-jiao, XIE Wei. Study on model test for a large scale pre-stressed pier of a flood releasing and scouring sluice[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 92-96. (in Chinese))
- [7] 陈震, 徐远杰. 基于弹塑性损伤模型的预应力闸墩非线性有限元分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2012, 43(4): 481-484. (CHEN Zhen, XU Yuan-jie. Nonlinear finite element analysis of prestressed pier based on elastoplastic damage model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 43(4): 481-484. (in Chinese))
- [8] 练继建, 杨敏, 李火坤, 等. 高坝泄流工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (LIAN Ji-jian, YANG Min, LI Huo-kun, et al. Hydrodynamics for high dam[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 彭刚, 陈灯红, 姚艳华, 等. 江坪河预应力闸墩动力响应分析[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2008, 30(4): 1-4. (PENG Gang, CHEN Deng-hong, YAO Yan-hua, et al. Dynamic response analysis of prestressed pier of Jiangpinghe project[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2008, 30(4): 1-4. (in Chinese))
- [10] 练继建. 泄洪闸闸墩泄洪振动研究[R]. 天津: 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 2013. (LIAN Ji-jian. A study of flow induced vibration of sluice piers[R]. Tianjin: State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, 2013. (in Chinese))

## Influence of anchor cable force loss on prestressed pier dynamic characteristics

LI Huo-kun<sup>1</sup>, HE Xiao-min<sup>2,3</sup>, LIU Peng<sup>3</sup>, YANG Min<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. HydroChina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Large-tonnage prestressed pier of a hydropower station is applied to resist huge hydraulic thrust from the radial gate arms. Pier cable tension monitoring in nearly two years shows that part of the anchor tensile force had lost by more than 15% and not converged, and that the pier had strong vibration during the flood discharge. In order to clarify the influence of the anchor cable force losses on dynamic characteristics of the pier (including modal characteristic, dynamic displacement and dynamic stresses), a finite element overall model of pier-foundation-anchor is established, and the pier hydraulic model measuring the overall surface loads acting on the pier surface is set up to obtain the overall hydrodynamic loads under different operating conditions. Then, the overall surface loads are taken as the input loads for calculation of pier dynamic response, and analysis of the influence of primary and secondary anchor cable force losses on the pier dynamic characteristics is made. Those research results can provide an important reference for the safe operation of the same projects.

**Key words:** anchor cable; cable force loss; prestressed pier; dynamic characteristics

### 水利部“948”项目“SRAP 结构评估修复成套技术推广应用” 顺利通过验收

2013年6月1日,水利部“948”项目管理办公室在南京组织召开了“SRAP 结构评估修复成套技术推广应用”(任务书编号:201127)项目验收会。

项目验收会由水利部科技推广中心曹景华副主任主持,来自河海大学、南京航空航天大学、南京林业大学、黄河水利科学研究院、华北水利水电大学、江苏省水利财务结算中心和水利部科技推广中心等单位的专家组成了验收专家组,听取了项目组胡少伟教授的工作汇报和成果介绍,审阅了有关技术资料。经质疑和讨论,专家组对本项目的成果实施给予高度评价,一致认为该项目全面完成了合同规定的各项指标,并取得突出进展和优异成果。项目管理规范,经费使用符合有关规定。项目成果已在20多个工程中成功应用,经济、社会效益显著,推广应用前景广阔。专家组同意该项目通过验收,并评价为A级。

摘自南京水利科学研究院网站