

潘荟霖, 贾水欣, 彭强. 龙抬头式放空洞及其闸室结构的抗震特性研究[J]. 华南地震, 2016, 36(1): 44-48. [PAN Huilin, JIA Shuixin, PENG Qiang. Study on the Seismic Characteristics of the Dragon Tunnel and Lock Chamber Structure[J]. South china journal of seismology, 2016, 36(1): 44-48.]

## 龙抬头式放空洞及其闸室结构的抗震特性研究

潘荟霖<sup>1, 2</sup>, 贾水欣<sup>1, 2</sup>, 彭强<sup>1, 2</sup>

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 2. 四川大学水利水电学院, 成都 610065)

**摘要:** 鉴于龙抬头式放空洞及其闸室抗震动力特性迄今研究鲜少, 采用振型分解反应谱法对放空洞及其闸室工程实例进行抗震特性研究, 通过有限元软件 ANSYS 进行模态分析得到自振频率和典型振型图, 以及谱分析进行结构应力及位移状况研究, 分析表明整体结构主要受到横河向地震作用, 放空洞进水口、闸室顶部、反弧段始端的洞底等部位存在压应力集中现象, 该研究为相关工程的优化设计提供了重要参数。

**关键词:** 龙抬头式放空洞; 闸室; 有限元; 自振频率; 抗震性能

中图分类号: P315.92 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2016) 01-0044-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.01.007

## Study on the Seismic Characteristics of the Dragon Tunnel and Lock Chamber Structure

PAN Huilin<sup>1, 2</sup>, JIA Shuixin<sup>1, 2</sup>, PENG Qiang<sup>1, 2</sup>

(1. *Hydraulics and the Development and Protection of State Key Laboratory of Mountainous Rivers of Sichuan University, Chengdu 610065, China*; 2. *School of Water Resources and Hydropower of Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

**Abstract:** As so far, given the fact that the seismic dynamic characteristics of the dragon tunnel and lock chamber structure have been rarely studied, this article study the seismic characteristics of engineering example of dragon tunnel and lock chamber structure by using the mode-superposition response spectrum method. Through the finite element method software ANSYS, the paper does the model analysis and the spectrum analysis, and obtains the vibration frequency, typical vibration diagram and its structures' stress and displacement conditions. The results show that the overall structure is mainly controlled by the Henghe earthquake; the chamber of sluice intake, the top of the chamber, flip bucket and other parts occur compressive stress concentration phenomenon. The study provides an important parameter for the optimization design of related projects

**Keywords:** The Dragon tunnel; Chamber of sluice; The finite element method; Natural frequency of vibration; Seismic performance

收稿日期: 2015-03-16

作者简介: 潘荟霖(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水利工程。

E-mail: panhuilin@163.com.

## 0 引言

目前我国大坝约有 80% 是建设在峡谷地区<sup>[1]</sup>, 在狭窄河床上泄洪放空建筑物很难布置, 而专门修建则施工复杂且工程造价高昂, 故工程上多将施工导流任务完成后的导流洞改建为具有排沙泄洪、放空水库等多种用途的永久隧洞<sup>[2]</sup>。这种二次合理利用可以很好解决上述泄洪问题, 将泄洪洞和导流洞合一布置时常做成“龙抬头式”, 这种龙抬头式放空洞是目前比较常见的结构形式<sup>[3]</sup>。

在针对闸室结构的研究中, 目前国内外对于放空洞及其闸室结构研究主要是针对隧洞的体型及泄洪消能、掺气减蚀理论和上下游的出入口形式理论。在闸室结构探究中, 王桂平等分析了瀑布沟水电站闸室结构敏感部分, 对其整体闸室以及关键剖面进行了抗震受力分析<sup>[4]</sup>; 在对龙抬头放空洞的研究中, 朱云兰曾提出, 中间闸室过流面积适当缩小, 有助于避免洞内负压出现并减少泄洪洞空蚀现象发生<sup>[5]</sup>。但是这些仅是针对闸室或龙抬头隧洞的研究, 而对整体结构在地震作用下的研究鲜有涉及。

本文结合具体实例进行数值模拟, 采用振型分解反应谱法研究结构的动力特性, 对龙抬头式放空洞及其闸室结构在地震作用下进行全面受力分析, 本研究成果对工程设计、施工及运行均有工程价值。

## 1 放空洞及闸室地震效应分析

放空洞及水闸地震作用效应主要通过动力法和拟静力法来进行计算, 拟静力法在抗震设计中虽已积累了丰富的经验, 但终归无法真实模拟地震下水工结构动态性能, 对工程抗震设防烈度为 8 度的水闸往往采用动力法来进行分析<sup>[6]</sup>, 而时程分析法和振型分解反应谱法是目前普遍运用的两大动力计算方法。在放空洞及水闸工程的抗震动力分析中, 优先采用振型分解反应谱法对结构进行抗震动力特性分析。

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程概况及计算参数

该水库正常蓄水位为 3 278 m, 死水位为 3 248 m, 放空洞及闸室工程结构见图 1 所示, 放空洞进口型式为竖井式, 进水口底板高程为 3 210 m, 闸室总长为 21 m, 高度为 73 m, 底板厚 2 m, 闸室上游设一扇平板检修闸门, 其孔口尺寸(宽×高)为 7.6 m×7.0 m, 下游设一扇弧形工作闸门, 其孔口尺寸(宽×高)为 7.6 m×6.0 m, 放空隧洞为圆拱直墙形, 隧洞净空尺寸(宽×高)为 7.6 m×8.3 m。

结构选取强度等级为 C25 的混凝土, 弹性模量为 28 GPa, 泊松比为 0.167, 重度为 24 k N/m<sup>3</sup>, 山体岩性为花岗岩, 强风化层、弱风化层和基岩

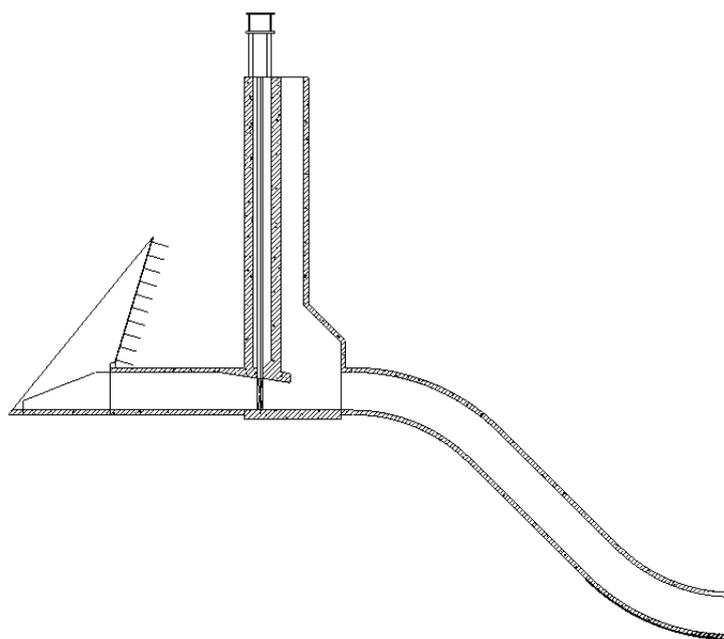


图 1 放空洞及闸室工程结构图

Fig.1 The structure map of the Dragon tunnel and chamber of sluice

的弹性模量依次取为 0.75 GPa、0.25 GPa、5.0 GPa，工程设防烈度为 8 度，水平设计地震加速度代表值为 0.2 g，场地特征周期为 0.4 s。

## 2.2 计算模型

本文利用大型有限元通用软件 ANSYS 进行三维数值模拟，取放空洞、闸室竖井、围岩整体作为对象建立模型，取  $X$  方向为顺水流方向， $Y$  方向为铅直向上方向， $Z$  方向为横水流方向，按照真实尺寸建立有限元模型。计算长度取为自放空洞进口以下 165 m，基岩底部边界取为自闸室底板以下 147 m，约为闸室高度的约 2 倍，横河向两侧基

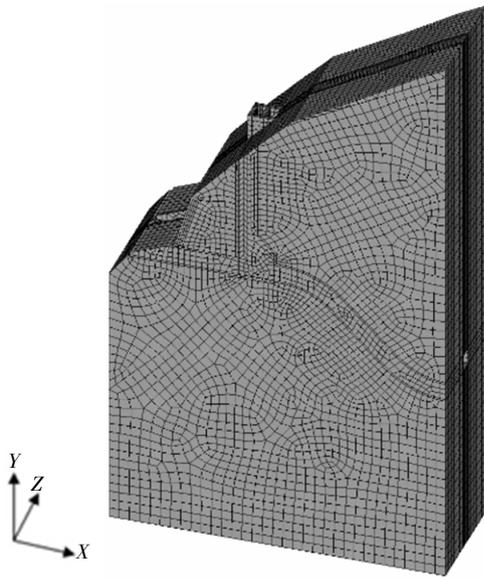


图 2 整体结构三维有限元模型示意图

Fig.2 The three-dimensional finite element model of structure

固有频率与固有振型，在通用后处理器中扩展 10 阶模态数，得到结构的前 10 阶固有频率以及对应的振型，其计算结果分别为 1.77 Hz、3.01 Hz、3.42 Hz、4.29 Hz、4.56 Hz、5.01 Hz、5.70 Hz、5.85 Hz、5.87 Hz、6.16 Hz。发现自振频率之间差值较小且排布紧密，第 10 阶与第 1 阶之间大小差别不超过 5 Hz，这表明放空洞闸室整体结构稳定性良好。1~2 阶模态频率涨幅为 70.33%，其跃变较大，自振频率随模态阶数的增加呈明显的分段集中趋势，其中 2~3 阶模态涨幅 13.69% 与 4~5 阶模态涨幅 6.31% 差别较小，7~10 阶模态频率相对集中并且频率渐变幅度不大，虽然于中间几段激励频率呈现一定倾向跃变上升，这说明结构振

岩的宽度取为 24 m，为闸室底板宽度约 1 倍。根据结构的特点与要求，锚固部位采用 Line8 (锚杆单元)，放空洞结构和围岩采用 solid45 (三维实体单元)。所建整体结构模型如图 2 所示，该模型共 66 803 个节点，64 405 个单元，放空洞及闸室三维有限元网格模型如图 3 所示。

## 2.3 模态分析

动力分析中对其混凝土的动态弹性模量较其静态标准值提高 30%，设计加速度反应谱最大值的代表值取 2.25，结构的阻尼比取 0.05。通过模态分析中子空间法(Subspace)可以得到系统结构的

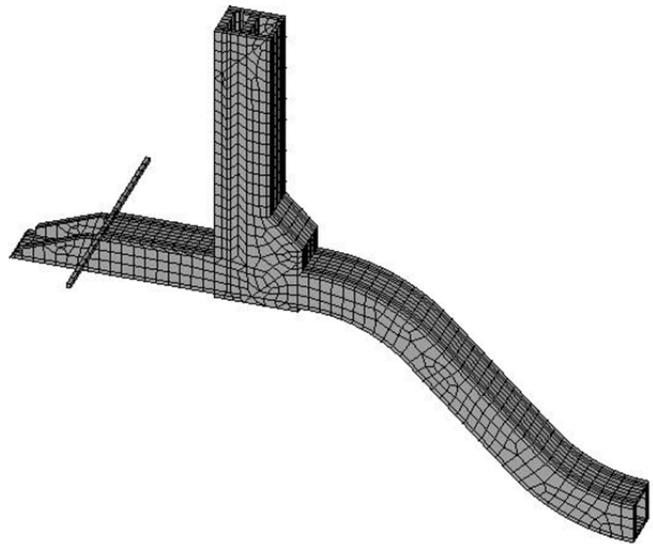


图 3 放空洞及闸室三维有限元网格模型示意图

Fig.3 Three-dimensional finite element mesh model of the Dragon tunnel and chamber of sluice

动略显复杂变化趋势，但是纵观整体频率相对比较稳定紧密。

由图 4 给出的典型振型图可以看出，当地震激励施加时，结构一阶振型呈现沿闸墩垂直方向振动，二阶振型呈现横河向倾斜，随着频率的增大，三阶及其以上振型除呈现朝沿闸墩垂直向、横流向平移振动外，都叠加有横向的扭转耦合振动，此时平移、弯曲、扭转相互叠加使得结构振型稍显复杂，且上部的变形位移要比下部变形位移明显，分析表明上部结构和进水口方向约束较小，导致该突出部分地震反应加剧，破坏也更为严重。

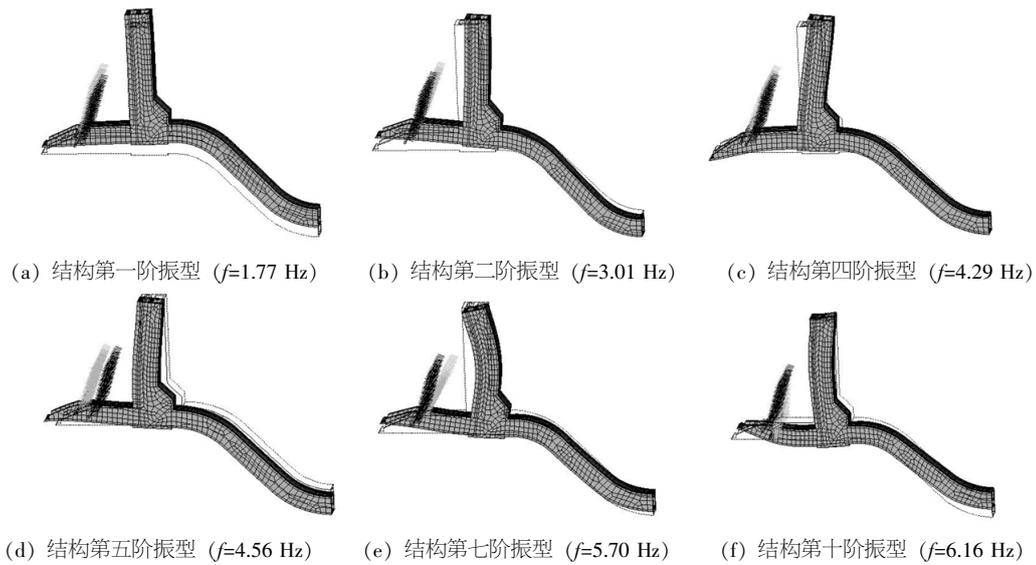


图 4 结构典型振型图

Fig.4 The typical vibration model of structure

### 2.4 谱分析

基于模态分析得到的固有频率和模态振型,在计算模态解的基础上利用反应谱曲线,对有限元模型进行单点响应谱分析,依次施加自重、静水压力以及地震荷载,动力荷载分为多个荷载步施加。

#### 2.4.1 位移分析

为比较来自不同方向的地震动特性,对顺河向( $X$ 向)、竖向( $Y$ 向)和横河向( $Z$ 向)三个方向分别施加激励,得到地震作用下放空洞沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的最大响应汇总于表 1。从表 1 可以看出在顺河流地震作用下,闸室结构速度、加速度明显最大。最大位移响应值发生在闸室结构中上部、顶部,其值为 94.45 mm,且呈现从上到下均匀减小的趋势,表现出“鞭梢效应”。分析表明于整体而言振动变形均不大,三个方向的振型均在结构振动中起到了重要作用,但结构  $Z$  向位移远远大于  $X$  向和  $Y$  向,说明结构垂直水流方向的横向振动危险性最高, $Z$  向地震对该整体安全稳定性起控制作用。

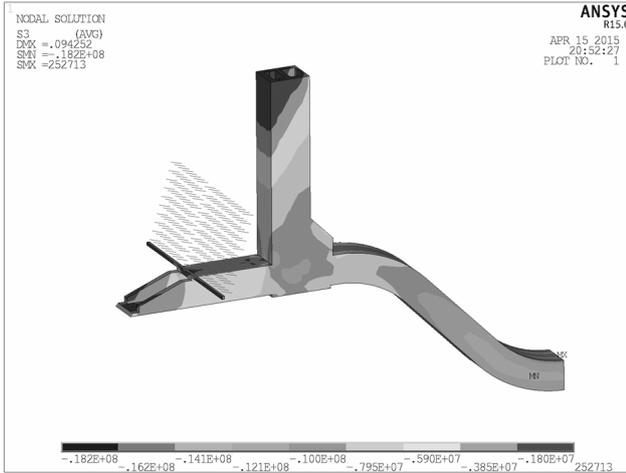
#### 2.4.2 应力分析

在正常水位、自重及地震的作用下,结构应力响应见图 5。结构沿三个方向的最大拉应力相差不大,均在 2.8 MPa 左右,位置均在闸室结构与龙抬头反弧段接触部位,说明该处即为应力集中部位,可适当提高混凝土强度,必要时适当配置钢筋进行加固。在放空洞进水口、闸室顶部、反弧段始端的洞底、洞顶以及锚杆锚固部位均出现了较大压应力分布区,且三个方向的最大压应力也基本相当,在 -18.2 MPa 左右,超出了混凝土轴心极限抗压强度 6.3 MPa,因为这些部位约束较少或结构易发生突变,在强震中其结构易滋生微小裂纹,所以这些部位应该成为抗震设计的重点区域。由于基础部位是由原导流洞封堵改建成龙抬头式放空洞,对地基可采用加强固结灌浆措施。地震是具有瞬时性和持续性,动静力联合作用对整体受力结构有一定影响,建议设计时整体把握结构稳定性,施工中采用提高材料强度的方法加固薄弱部位。

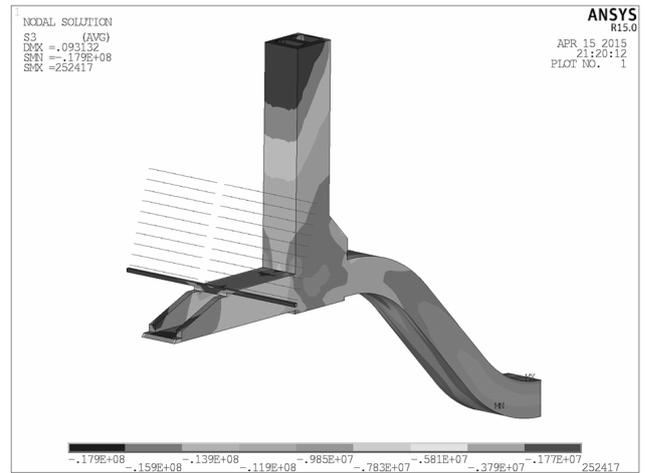
表 1 地震作用下结构三个方向的最大响应

Table 1 The maximum response of structures in three directions under earthquake

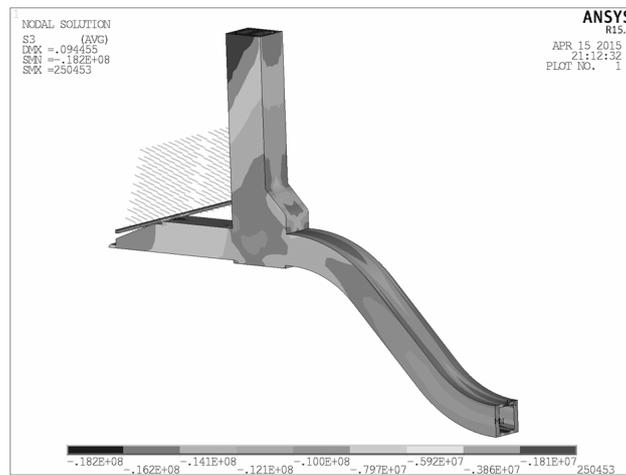
工程部位	响应名称	位移/mm	速度/(mm/s)	加速度/(mm/s <sup>2</sup> )
锚杆锚固部位及闸室上部	顺流 $X$ 向	94.00	10.50	265.10
锚杆锚固部位及闸室中上部	竖向 $Y$ 向	0.09	5.01	10.25
闸室顶部	横流向 $Z$ 向	94.45	0.04	1.52



(a) X方向第三主应力图



(b) Y方向第三主应力图



(c) Z方向第三主应力图

图5 结构第三主应力图

Fig.5 The third main stress of the structure

### 3 结语

(1) 结合工程实例利用 ANSYS 软件对放空洞、闸室及围岩进行三维有限元建模,采用振型分解反应谱法进行模态分析,结果表明:自振频率随模态阶数的增加呈明显的分段集中趋势,由典型振型图可得,结构多以平移、弯曲和扭转相互叠加方式振动,上部结构和进水口方向约束较小易受地震破坏。

(2) 由谱分析得出闸室结构中上部、顶部为最大响应部位,且从上到下均匀减小呈现出“鞭梢效应”。放空洞及闸室主要受横河向地震控制,在闸室结构与龙抬头反弧段接触部位存在应力集中,放空洞进水口、闸室顶部、反弧段始端的洞底、洞顶以及锚杆锚固部位出现了较大压应力分布区,均超出混凝土抗压强度,为抗震设计薄弱部位,可进行局部抗震加固。

### 参考文献:

- [1] 潘家铮,何璟. 中国大坝 50 年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [2] 邓建伟,花立峰,安梦雄. 龙抬头式泄洪洞体型设计与泄洪消能问题研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 169-172.
- [3] 吴小菊. “龙抬头”泄洪隧洞大流量泄洪消能数值模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [4] 王桂平,谢秀栋. 瀑布沟水电站泄洪洞进口闸室结构抗震分析[J]. 中国农村水利水电, 2007 (08): 97-100.
- [5] 朱云兰. 大中河水库导流泄洪洞龙抬头试验研究[J]. 云南水力发电, 2001 (01): 40-41.
- [6] 朱庆华,顾美娟. 水闸闸室抗震动力分析及措施[J]. 水电能源科学, 2012 (01): 114-116.