

# 泄洪闸闸顶启闭机排架动力特性分析

撒文奇, 石太军, 井向阳

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:**采用三维有限元动力分析方法,以草街航电枢纽工程泄洪闸闸顶启闭机排架为例,对排架结构进行了不同地震烈度下的整体空间变形与应力分析,得到了对应的应力与应变分布规律。根据计算成果,总结出了排架结构在地震作用下的抗震薄弱部位,并提出了抗震措施建议,可为同类工程问题提供借鉴。

**关键词:**启闭机排架;有限元分析;动力分析;草街航电枢纽

**中图分类号:**TV664;TV7;TV735;TV652

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2015)04-0101-04

## 1 概述

随着设计和制造水平的不断发展以及实际工程需要,启闭机排架的设计趋势正在向高度高、跨度大的方向不断发展<sup>[1]</sup>。启闭机排架作为一种钢筋混凝土框架结构,在静力工况下的安全稳定性是可以得到充分保证的。然而,地震作用是一种非可预见性自然灾害,若在启闭机排架设计时没有充分考虑其作用,在设计使用期内发生地震,将会对排架结构自身,甚至整个水利工程造成重大损失与破坏,故研究启闭机排架结构在地震作用下的动力特性非常必要,可进一步提高其抗震性能,减小由地震灾害带来的损失及风险。笔者以草街航电枢纽围堰改建闸上部单跨排架为例,深入研究了其抗震特性,找出了结构自身的薄弱部位,进而有针对性地提出了抗震措施建议,可为后续排架设计提供经验。

草街航电枢纽工程系嘉陵江干流合川至河口段自下而上渠化梯级开发的第二级,是以航运为主,兼顾发电并具有拦沙减淤、改善灌溉条件等效益的水资源综合利用工程。枢纽建筑物从左到右由船闸、厂房、5孔冲沙闸、1孔围堰改建闸、15孔泄洪闸和右岸挡水坝等组成,拦河建筑物顶高程为221.5 m,坝顶总长度为677.37 m,最大闸高46 m,工程枢纽布置详见图1。

河床右侧布置有15孔开敞式曲线型实用堰闸,堰顶高程180 m,建基高程159 m,混凝土底板厚13~21 m,其基础置于弱风化砂质粘土岩上,在闸室上、下游设有齿槽。闸顶高程221.5 m,沿



图1 草街航电枢纽工程上游全景图

坝轴线总长度为251 m。泄洪闸单孔闸室净宽13 m,闸室长40 m。左侧边闸墩与围堰改建闸共用(厚度为8 m),中墩厚度为4 m,右侧边墩与右岸挡水坝段共用;采用底板分缝将闸室底板分为7个单元,每个单元宽度均为34 m。每孔闸设一道平板检修门和一道工作闸门,工作门为平板门,采用卷扬式启闭机起闭,启闭机平台高程249.6 m。

## 2 泄洪闸坝顶启闭机排架设计

根据泄洪闸的闸室结构设计,特别是针对中墩厚度只有4 m的特点,泄洪闸坝顶启闭机排架按照多孔联系梁排架和单孔排架2种排架设计,其中单孔排架布置在围堰改建闸坝顶和右岸当时坝段吊物孔部位,1#~15#泄洪闸坝顶启闭机排架采用3孔连系梁排架结构。其中,3孔连系梁排架:排架总高度为28.1 m,总长度为52.9 m和50.9 m。排架沿高程方面在高程229 m、236.2 m和242.9 m处分别设置了截面尺寸为60 cm×120 cm(宽×高)连系梁。排架的主梁截面尺寸为120 cm×250 cm(宽×高),每孔设置了4根截面尺寸为60 cm×120 cm(宽×高)次梁,排架柱的截面尺寸为150 cm×150 cm(宽×高)。

## 3 三维有限元计算模型

收稿日期:2015-03-08

### 3.1 计算部位

笔者以草街航电枢纽围堰改建闸上部单跨排架为例,排架高度为 28.1 m,净跨度达到 15.6 m,是目前水电工程排架设计中结构尺寸较大的,具有较强的代表性。其三维模型见图 2。

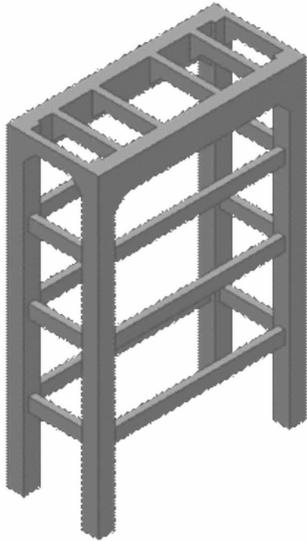


图 2 三维 CAD 模型

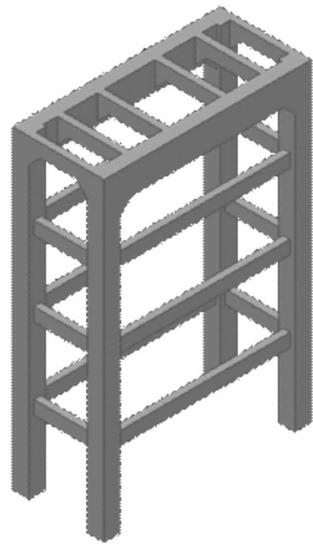


图 3 三维有限元离散模型

### 3.2 计算参数

混凝土结构强度等级为 C25,重度为 25 kN/m<sup>3</sup>,弹性模量为 28 GPa,动弹性模量为 36.4 GPa,泊松比为 0.167。

为了充分研究启闭机排架的动力特性及破坏,笔者拟定了三种不同的地震等级<sup>[2]</sup>,分别为Ⅶ度(0.981 m/s<sup>2</sup>)、Ⅷ度(1.962 m/s<sup>2</sup>)、Ⅸ度(3.924 m/s<sup>2</sup>)地震作用,顺河向输入。

### 3.3 有限元离散模型

三维模型主要采用 8 节点六面体实体单元离散,顶部启闭机荷载采用面压力(pressure)模拟施加。为了保证计算精度,计算单元总数为 99 600 个,节点总数为 124 508 个。三维有限元离散模型见图 3。

三维有限元离散模型边界条件为:排架柱底部全约束。

## 4 不同地震烈度下的排架动力特性分析

### 4.1 静力计算成果

#### 4.1.1 位移成果分析

静力工况下,启闭机排架位移计算成果见表 1。正值表示位移指向上游或向上,负值表示位移指向下游或向下。

表 1 位移成果汇总表(静力) /mm

项目	极值	极值发生部位
顺河向位移	+0.69 -0.21	顶部横河向两横梁跨中下部内侧
横河向位移	±0.62	排架柱上部,指向两侧,对称变形
铅直向位移	-3.5	顶部中间两根顺河向连系梁底部

静力状态下,在排架自重及顶部启闭机荷载的共同作用下,排架结构的顺河向水平位移极值分别为 +0.69 mm、-0.21 mm,分别发生在顶部横河向横梁跨中底内侧。上游侧横梁位移较大,原因是启闭机荷载上游侧数值较下游侧大所致;横河向位移极值为 ±0.62 mm,发生在排架柱上部,分别指向两侧,左右对称变形;铅直向位移极值为 -3.5 mm,发生在排架顶部中间两根顺河向连系梁底部,主要由于启闭机荷载压力所致。

#### 4.1.2 应力分析

静力工况下,启闭机排架应力计算成果见表 2。正值表示拉应力,负值表示压应力。

表 2 应力成果汇总表(静力) /MPa

项目	极值	极值发生部位
第一主应力	4.27	下数第三排长连系梁两端与排架柱结合处
第三主应力	-6.25	排架柱顶部与横梁结合处

从应力计算成果看,在自重及启闭机顶部荷载共同作用下,排架结构大部分拉应力值为 -2.72 ~ 2.24 MPa,绝大部分区域处于受压状态,基本满足 C25 混凝土强度要求。由于横向跨度较大,拉应力值较大部位主要集中在横河向水平连系梁与排架柱的结合处和顶部横梁跨中下部,极值为 4.27 MPa,出现在下数第三排长连系梁两

端与排架柱结合处且向内部发展较浅,属于局部应力集中。建议在相应部位配置受拉钢筋,以改善其受力状况;压应力均小于 C25 混凝土抗压强度,极值为 -6.25 MPa,出现在排架柱与顶部横梁结合内侧,主要是因顶部横梁受启闭机荷载下压,角点处受挤压所致。

#### 4.2 自振特性分析

为了更好地模拟启闭机排架在地震作用下的工作情况以及地震响应规律,通过计算排架的自振特性,分析排架整体的自振频率和各阶振型等自身动力特性。

模态提取方法采用 Block Lanczos 法(分块的兰索斯法),求解前 10 阶特征振型及频率。启闭机排架的前 5 阶振型见图 4。表 4 给出了启闭机排架的前 10 阶自振频率。

表 4 启闭机排架自振频率汇总表 /Hz

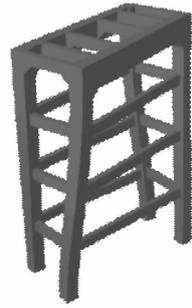
阶数	频率
1	1.665 8
2	2.043 9
3	2.776 5
4	7.272 3
5	7.551 9
6	7.885 7
7	8.566 4
8	8.732 6
9	8.741 5
10	8.960 5



(a) 第一阶振型图



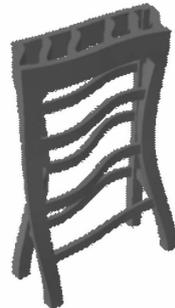
(b) 第二阶振型图



(c) 第三阶振型图



(d) 第四阶振型图



(e) 第五阶振型图

图 4 启闭机排架前 5 阶振型图

启闭机排架自振特性是结构动力分析的基础,通过模态分析可充分认识排架的自振频率分布及振型特点。前 5 阶振型描述见表 5。

表 5 启闭机排架前 5 阶振型描述表

阶数	振型描述
1	垂直河流向摆动,顶部摆动最大
2	顺河流向摆动,顶部摆动最大
3	上下游侧垂直水流向逆向摆动
4	顺水流向摆动,中部连系梁摆动最大
5	左右侧顺水流向逆向扭动

#### 4.3 动力计算成果

##### 4.3.1 位移计算成果

动力工况下,启闭机排架位移计算成果见表

6. 正值表示位移指向上游或向上, 负值表示位移指向下游或向下。

表6 位移计算成果汇总表(静动叠加) /mm

等级	项目	极值	极值发生部位
Ⅶ度地震	顺河向位移/mm	7.95	顶部横河向横梁跨中部内侧
	横河向位移/mm	0.67	排架柱上部外侧, 指向两侧, 对称变形
	铅直向位移/mm	-3.46	顶部中间两根顺河向连系梁底部
Ⅷ度地震	顺河向位移/mm	15.42	顶部横河向横梁跨中部内侧
	横河向位移/mm	0.73	排架柱上部外侧, 指向两侧, 对称变形
	铅直向位移/mm	-3.46	顶部中间两根顺河向连系梁底部
Ⅸ度地震	顺河向位移/mm	30.35	顶部横河向横梁跨中部内侧
	横河向位移/mm	0.83	排架柱上部外侧, 指向两侧, 对称变形
	铅直向位移/mm	-3.46	顶部中间两根顺河向连系梁底部

从位移计算成果看, 在地震作用下, 排架结构位移分布规律与静力工况基本相同, 极值较静力工况明显增大, 且随着地震等级的提高呈倍数增长规律, 极值发生位置也与静力工况下相同。其中顺河向位移发展较为明显, 主要与地震作用是沿着顺河向输入有关。

4.3.2 应力计算成果

动力工况下, 启闭机排架应力计算成果见表7。正值表示拉应力, 负值表示压应力。定义超拉区概念, 即拉应力超过 2 MPa 的范围。

表7 应力计算成果汇总表(静动叠加) /MPa

等级	项目	极值	极值发生部位/超拉区 发展深度/cm
Ⅶ度地震	第一主应力/MPa	7.02	顺河向短连系梁两端与排架柱结合位置/20
	第三主应力/MPa	-6.14	排架柱顶部与横梁结合位置内侧角点处
Ⅷ度地震	第一主应力/MPa	13.75	顺河向短连系梁两端与排架柱结合位置/55
	第三主应力/MPa	-6.19	排架柱顶部与横梁结合位置内侧角点处
Ⅸ度地震	第一主应力/MPa	27.2	顺河向短连系梁两端与排架柱结合位置/贯穿
	第三主应力/MPa	-6.31	排架柱顶部与横梁结合位置内侧角点处

由应力成果分析可知, 在地震作用下, 排架结构拉应力值及超拉区范围较静力工况明显增大, 且随着地震等级的提高, 结构应力与位移一样呈

倍数增长规律。在不同等级地震作用下, 排架结构最薄弱部位仍然在水平连系梁端部与排架柱结合处, 超拉区范围也随着地震作用的增大而急剧加大, 在Ⅸ度地震下顺河向短边连系梁两端甚至出现了超拉区完全贯穿的现象, 主要是由于排架顺河向跨度较小, 结构刚度也较小, 在顺河向强地震作用下无法满足抗震要求; 压应力数值较静力工况增大不明显, 仍在 C25 混凝土抗压强度之内。

根据应力计算结果, 说明连系梁端部的刚度无法满足高等级地震的要求, 是排架结构设计的关键部位, 应在设计过程中重点考虑、优化; 建议在连系梁两端与排架柱结合部位上下均设置贴脚, 以增大连系梁两端的刚度, 具体效果在后续研究成果中论述。

5 结语

笔者以草街航电枢纽围堰改建闸上部单跨排架为例, 建立了三维有限元模型, 利用振型分解反应谱法, 对排架结构进行了三维有限元动力分析, 得出了以下结论:

(1) 在静力工况下, 由于排架结构横河向跨度较大, 导致横河向长连系梁两端与排架柱结合处拉应力值较大, 需配置适当的钢筋以改善其受力状态。

(2) 在地震荷载作用下, 排架柱与连系梁结合部位的应力值较大, 为结构抗震的薄弱区域与控制性部位, 应予以重点考虑、优化。在顺河向地震荷载作用下, 顺河向短边连系梁首先因拉应力贯穿而破坏。

(3) 针对抗震薄弱部位, 建议在连系梁两端设置贴脚以增大端部刚度, 改善端部的应力状态。

参考文献:

[1] 赵桂连, 张清琼, 唐碧华. 大型复杂启闭机排架结构的优化设计[J]. 水电站设计, 2014, 30(2): 82-85.  
 [2] 水工建筑物抗震设计规范, DL 5073-2000[S].

作者简介:

撒文奇(1985-), 男, 内蒙古赤峰人, 工程师, 博士, 从事水工建筑物设计工作;  
 石太军(1980-), 男, 甘肃庄浪人, 高级工程师, 工程硕士, 从事水工建筑物设计工作;  
 井向阳(1987-), 男, 河南信阳人, 工程师, 博士, 从事水工建筑物设计工作.

(责任编辑:李燕辉)