

苏州河河口水闸底轴驱动式翻板闸门设计

卢新杰,石守津,韩晶,陈文伟

(中国水电顾问集团华东勘测设计研究院,浙江杭州 310014)

摘要 苏州河河口水闸工程采用一扇单孔净宽 100 m 的翻板闸门作为挡水结构,防御千年一遇高潮。根据工程的具体条件,通过门型选择、结构研究和试验并采取了相应的技术措施,翻板闸门门叶采用纵向悬臂梁受力结构,以底轴作为悬臂梁的固端,由启闭设备直接驱动底轴旋转来启闭闸门,使闸门孔口的宽度不再受梁高的制约,致使单扇闸门的宽度达百米之巨。该门型的研究成果是对挡水闸门设计的一种突破,已获国家实用新型专利。

关键词 翻板闸门;底轴;苏州河河口水闸

中图分类号:TV663 文献标识码:B 文章编号:1006-764X(2007)S1-0011-03

1 门型比选与结构研究

苏州河河口水闸的建设要求具有“防御黄浦江苏州河口千年一遇的潮位,能双向挡水、灵活启闭;总体布置与周围环境相协调”等功能,同时要求“施工期苏州河不断流、不断航”。根据以上要求,水闸功能要求并不高,能适应的门型有很多,但考虑水闸地处上海外滩风貌保护区这一特殊地理环境的因素,能适应的门型就屈指可数了,其中有两种门型具有成功的工程实例可以借鉴:一是应用法国活动坝技术建成的安徽妹滩活动坝;二是英国伦敦 Woolwich 的泰晤士闸。这两种门型共同特点是:操作方便,启闭灵活,闸门开度无级可调,方便调度,工程较隐蔽,无碍防汛和通航,基本不对原有河道的景观造成影响。不同之处在于:活动坝的翻板闸门支铰置于闸门底部,检修、维护较困难,但工程相对更隐蔽,且闸门自重较轻,土建及施工工程量亦较少,闸门跨度一般以 20~40 m 为宜,不宜太大;旋转扇形闸门的支铰位于水上,且闸门可 180°旋转至闸门全部露出水面,因此,闸门的检修维护较为便利,缺点是闸门的工程量较大,特别是大跨度闸门,如英国伦敦泰晤士闸(跨度 61 m)仅一扇闸门的自重就达 2 250 t,启闭机单缸推力 15 260 kN,相应的开挖工程量亦巨大。由于苏州河河口水闸建设要求闸孔宽度与河道同宽,中间不允许设置闸墩,故孔口单跨净宽达 100 m。显然,上述两类闸门均无法适用。究其原因

因主要是:闸门挡水时按主梁承载结构设计,当设计水头相同时,作用在闸门上的总载荷随跨度呈线性增大。如采用常规的横主梁结构,则对单跨 100 m 的主梁所带来的问题已远远超过其他结构、施工以及工程投资所能接受的范围。因此,要解决如此巨大孔口闸门的结构问题,就首先必须突破常规型式闸门跨度对闸门结构的制约,寻求一种能适用于本工程的新型闸门。经过多方案的分析比较与研究,针对本工程的具体条件,提出了新型底轴驱动式翻板闸门的方案,使闸门受力结构从常规的横主梁变为与孔口跨度无关的纵向悬臂主梁受力结构,门叶的悬臂固端与底轴连接,闸门的启闭由底轴旋转直接驱动。

2 结构设计及安装

翻板闸门在孔口净宽范围内由左、右相对独立的两扇带底轴的门叶组成,相对孔口中心线呈对称布置,孔口中心线处的连接结构采用对各向变位有一定适应能力的 Ω 形橡皮。每扇门叶沿宽度方向由 8 块单宽 5.9 m 的门叶结构和一块宽 2.56 m 的门叶结构用螺栓拼接而成,相邻的门叶结构之间设有纵向止水。门叶与底轴间采用螺栓连接。翻板闸门的上游设一道底水封,采用耐磨损高分子合成硬质材料,为延长使用寿命,补偿磨缩量,压板上设有预压板弹簧。侧水封为插拔式具自动补偿功能的双向止水装置,不仅具有止水功能,在出现温变情况下,

作者简介:卢新杰(1966—),男,浙江缙云人,工程师,从事水利水电金属结构设计工作。E-mail:lu_xj@ecidi.com

还具有自动调节功能。翻板闸门允许门顶溢流,门顶设有破水器,以避免局部开启运行时因门顶溢流及启闭操作时造成门后负压。

底轴作为门叶纵向悬臂梁的固端和闸门启闭驱动轴是本水闸最重要的构件之一。为最大限度地避免土建结构变形和变位对底轴运行的影响,使底轴受力状态明确,设计将底轴主体在孔口中心线处一分为二,再采用波纹管加滑动止水衬套的柔性连接形式将左右两段底轴连接起来。底轴结构按扭转-弯曲受力条件设计,底轴直径 2000 mm,全长 111.21 m,采用板厚 120 ~ 100 mm 钢板分段卷制焊接而成,材料选用 Q345C。底轴在厂内分为 12 段(含拐臂段)制造,段间采用铰制孔螺栓连接成整体,经厂内预组装后,运抵船坞内的拼装现场,再安装在预制好的闸底板上。整根底轴共设 14 个支点,其中,在净宽 100.0 m 范围内设 10 个支点,用以承受水压力和自重荷载,支承部件采用 MGA 材料耐磨自润滑球面轴承。图 1 为底轴结构总图。

为满足水闸施工时苏州河不能断流、不能断航的要求,闸门所有零部件及构件均在制造厂内制造后,将孔口部分的底轴、门叶、轴承总成、底止水等事先进入水闸钢筋混凝土底板的预制场所内进行安装、试验、调试完成后,随底板一起经水上浮运至闸址现场沉放就位,然后采用临时钢围堰,再将其余部分进行现场安装施工。

3 关键技术问题研究

苏州河河口水闸闸门无论门型还是结构,其设计、制造、安装在国内均属首次,设计单位为此进行了大量的研究工作,也取得了一定的成果。考虑到工程的重要性和特殊性,在工程设计过程之中,由建设、设计单位分别委托国内著名大专院校和科研机构进行了多项数学模型分析和物理模型试验,主要包括:苏州河河口水闸水工建筑物整体三维有限元结构分析(同济大学地下建筑与工程系隧道及地下工程研究所承担);苏州河河口水闸金属结构整体数学模型有限元计算(南京水利科学研究院承担);苏州河河口水闸整体三维有限元结构分析(河海大学

承担);上海苏州河水闸翻板门结构模型试验研究(浙江大学承担)。工程建设初期专门召开了苏州河河口水闸工程金属结构关键技术问题研讨会,邀请国内有关专家对几项关键技术问题进行了深入的研讨。主要关键技术问题的有关研究内容如下:

3.1 水下金属结构防腐蚀研究

苏州河河口水闸地处外滩风貌区,地理位置敏感,景观要求极高,加之所选用的水下闸门存在检修维护困难的缺点,设计时特别提出水下部分金属结构设备 30 年免维修的要求,其中,包括了水下金属结构的防腐,但目前国内金属结构防腐领域尚未有如此长效防腐的工程实例和该方面有关研究的记载,因此,对此进行专题技术研究十分必要。

在设计之初,采取的金属结构水下防护方案主要为:门叶面板、紧固件全部采用不锈钢材料,底轴外圆采用喷涂不锈钢,希望通过不锈钢来解决重要结构和部件的防腐蚀问题。但随着研究工作的进一步深入,发现不锈钢并不是解决水下金属结构防腐的最佳手段,相反,如果处理不当,反而会加剧其他碳钢构件的腐蚀,同时,还会加大电化学防腐的难度和成本。在进一步深入对国内专业研究机构和有代表性的用户单位进行广泛技术征询之后,设计单位联合上海迪普材料保护工程有限公司对该问题进行专项研究和试验。最终取消了水下部分的不锈钢材料,改由统一材质,统一防护措施,辅以牺牲阳极电化学防腐的水下综合防护体系方案。具体方案如下:

a. RmAL 复合涂层方案。由 3 层组成,见表 1。

表 1 复合涂层方案

涂层系统	涂料牌号及名称	层数	漆膜总厚度/ μm
防腐层	RmAL 热喷涂	4	150
封闭层	JD901 封闭漆	3	20
	JD902 中间漆		100
面 层	JD903 面漆	2	80

b. 阴极保护方案:镁合金牺牲阳极(Mg-Al-Zn-Mn)保护。设计参数:电流密度 $10\text{ mA}/\text{m}^2$,保护年限 10 年,保护电位 $-0.85 \sim -1.25\text{ V}$ (相对于铜/硫酸铜饱和参比电极),阳极消耗率 $7.2\text{ kg}/(\text{A}\cdot\text{a})$,电流效率 55%,发生电量 $1.22\text{ A}\cdot\text{h}/\text{g}$,开路电位 1.48 V。

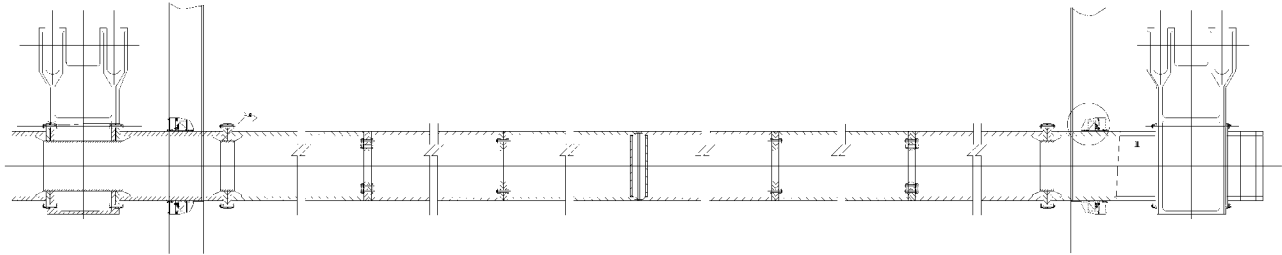


图 1 底轴结构总图

阳极用量计算 :①保护电流为 61.52 A (保护电流密度 $\times$ 保护面积) ,其中 ,迎水面及底轴 13.08 A ,背水面及底轴 48.44 A ;②阳极用量依据保护电流需求及综合考虑备用系数、保护年限、阳极分布等因素 ,共需阳极 12 364 kg ,其中 ,闸门迎水面及底轴 2 464 kg ,闸门背水面及底轴 9 900 kg。

3.2 底轴运行卡阻问题研究

河口水闸底轴总长 111.21 m ,闸门承受的最大水压力达 36 330 kN ,底轴承受最大扭矩达 90 239 kN·m。对承受如此重载的一根多支点超百米长轴 ,在运行过程中是否会出现卡阻问题 ,一直是各方关注的焦点之一 ,也是该门型方案的设计难点之一。为解决该问题 ,在上述的数学模型分析和物理模型试验中有针对性提出了试验要求。

根据模型试验和有限元分析结果 ,在设计中采取了相应的技术措施 ,主要有 :

a. 对土建结构的设计和施工提出了明确的控制指标 ,其中重点是严格控制闸底板的各向变形和各闸墩间的沉降差。在浙江大学的闸门结构模型试验中进行了底板变形对底轴运行影响问题的专项试验和研究。试验结果表明 ,底轴扭矩对单一支座的沉降呈现近似的线性关系 ,闸底板的变形和变位将直接影响底轴的正常运行。

b. 底轴轴承布置位置避开闸底板的最大变形点 ,并根据底轴中点扭矩值为零的条件将其从孔口中心线处断开 ,全长一分为二 ,可有效减少闸底板变形、变位对底轴的影响。

c. 轴承座与轴承间在铅垂向留有 15mm 间隙 ,为适应闸底板的变形留出活动空间 ,使闸底板在计算的变形值范围内不会对底轴的正常运行产生不利影响。

d. 对底轴轴承的结构和材料进行专项研究 ,其功能和特性应能满足如下要求 :①轴承结构具有良好的变位适应性 ;②轴承材料具有高的物理、化学及结构稳定性 ;良好的自润滑能力和低的动静摩擦系数 ;长的使用寿命和强的耐磨损性 ;低的吸水率和耐候性 ;强的抗泥沙特性 ;较好的可加工性和机械性能。

e. 设计规定了底轴总成的制造、安装技术要求为 :①节间同轴度偏差不大于 1.0 mm ,全长同轴度偏差不大于 3.0 mm ;②底轴制造后进行厂内预组装 ,检查全长同轴度、直线度应符合设计图纸要求 ,并与轴承在厂内进行预装配。

3.3 结构振动和门后补排气研究

3.3.1 结构振动研究

闸门振动问题是重要闸门设计的关键点之一 ,也是部分闸门失事的主要原因。鉴于本工程闸门跨

度巨大 ,结构新颖 ,运行状态复杂 ,为了解水动力荷载作用下结构振动的基本状态及一般工况下闸门运行的平稳性和可靠性 ,在“上海苏州河水闸翻板门结构模型试验研究”中进行了相应的科学研究。

当闸门在动水工况下 ,总会出现振动 ,但一般情况下振动是轻微的 ,只有当水动力荷载的激励频率接近或等于闸门结构的自振频率时才会发生共振。尤其是击水动载荷的高能区长期位于闸门结构的低频区时 ,振幅剧增 ,使门叶结构以致启闭系统出现不平常的应力和应变 ,严重时可能导致动力失稳 ,酿成破坏事故。因此 ,对处在动水载荷作用下的闸门系统进行振动模型试验十分必要。模态试验的目的在于通过模态分析得出结构的低阶自振频率、振型、阻尼比 ,以便从闸门结构的动力特性着手为解决闸门振动问题提供可靠的参数。

测试结果表明 ,门叶、底轴、启闭系统的模态以扭转振动为主 ,并且模态频率较低。最低固有频率仅在 1.64 Hz 附近 ,因此 ,整个系统仅对水力脉动载荷有一定的敏感性 ,不存在过流引起扭转共振的可能性。

由于门叶抗扭刚度很低 ,所以它的变形对上下游水头差很敏感 ,在试验过程中发现 ,过流后尾水造成下游水面的波浪对门叶的变形有较大的影响 ,产生超低频摆动现象 ,它与振动不同 ,是一种准静态的力产生的准静态位移。但如果下游出现的风致浪及涌浪具有独特的规律性 ,则也应引起注意。

3.3.2 启闭过程闸门后的补排气研究

翻板闸门允许门顶溢流 ,为避免局部开启运行时因门顶溢流及启闭操作时造成门后负压 ,在闸门门顶设有破水器。尽管目前国内外大多翻板闸门都设有破水器 ,但有关破水器和翻板闸门补排气的文献却很少发表 ,这方面的专题研究在国内尚未有记载。为此 ,结合本工程闸门水力学模型试验 ,对启闭过程闸门后的补排气问题进行了专题研究。

本工程翻板闸门的特点是总宽度为 100 m ,远大于高度 ,门顶过流时 ,沿宽度方向的流速基本是均匀的 ,模型试验可以用较小的宽度来近似 ,模型比例以高度来控制 ,实现变比尺模型模拟。试验按 1:12 模型比例制作模型 ,在宽 1 m、长 30 m 的玻璃水槽内进行。

试验结果如下 :

a. 门顶未安装破水器过流时 ,门后为封闭气腔 ,气腔内的负压和压力脉动的强度有很大关系。模型压力脉动幅值最大达到 415.8 Pa ,相当于原型 5 kPa ,对应的模型压力脉动均方根值为 116.7 Pa ,相当于原型 1.4 kPa ,水流脉动的卓越频率在 1.12 ~ 1.88 Hz 的小范围波动。作用范围恰好 (下转第 28 页)

于 C30 ,局部受力位置采用钢筋网片进行加强 ,原考虑的闸洞取消^[3]。

3.3 集中力作用截面应力分布规律

在闸门挡最大潮时 ,在模型右侧的坡面上作用有两对集中力 p_1 ,其值达到了 11270kN ,将其分解为沿水平方向和竖直方向的分力加到节点上去。分析该集中力作用截面的 x 向和 y 向应力分布规律发现 , y 向应力最大值出现在钢板下的混凝土台阶处 ,为 19.1 MPa(竖直向下 ,即图 7 中的 MN 点处) ,作用在集中力作用点向下与台阶的垂直交点处。

4 结 论

通过合理的简化 ,应用三维有限元数值分析方法对边墩模型进行应力和变形计算 ,得到了典型工况下结构整体位移、变形和结构重要部位的应力分布规律。

a. 墩体在自重及运行荷载作用下的整体位移

(上接第 13 页) 在下游水位线附近 ,由于自由水面与水舌互相作用下的翻滚 ,引起水压力的变化。从测试数据看到脉动压力变化较大 ,就相对于静水头而言 ,最大达到了上下游水头差的 29.7% ,如此之大的压力脉动是不多见的 ,甚至于高速水流引发的压力脉动也没有到达这个程度 ,究其原因因为封闭气腔的压力变化所致。由于封闭气腔内的压力为负压 ,造成气腔内的水柱上升 ,到达一定程度 ,造成掺气水舌。气泡在上升到面板后不断破灭 ,压力传感器显示出很大的压力脉动 ,同时 ,对门叶造成较大的瞬间冲击载荷 ,由此产生较大的振动响应 ,并引起底轴扭矩的较大波动。

b. 在门叶顶部安装破水器后 ,脉动压力的优势频率已不十分明显 ,各频率段的激励强度比较均匀而且很小。从水力学原理分析 ,首先 ,破水器破坏了门后的封闭气腔 ,极大地削弱了压力波动范围 ;其次 ,破水器扰动了门顶水流 ,使得较均匀的流场变得紊乱 ,脉动压力的能量不至于集中在某个频率段 ,从而不易诱发闸门振动。

水流引起的动水压力、封闭气腔会造成底轴扭矩的增加 ,并诱发较大幅度的压力脉动。破水器的试验研究有助于了解安装破水器后的封闭气腔的压力变化 ,为设计破水器提供依据。在试验过程中 ,分别对高度为 50 cm 与 130 cm 的破水器进行比较试验。虽然长度 130 cm 破水器的破水效果较 50 cm 破水器明显 ,同时 ,在实验中还观察到一个现象 ,破水

器能够直接分开水流的现象仅仅在过流水舌厚度很小时才出现 ,但当过流量增加到破水器无法分开水流时 ,仍能够极大地减小门顶水舌的厚度 ,从而减小了水舌的弯曲刚度 ,同样能起到降低负压的效果。据此 ,考虑闸门原型的实际效果 ,设计最终选用了长度 50 cm 破水器。

b. 墩体在两种工况作用下闸墩混凝土、基坑底部平面、垫板坡面处、人行通道、正面及背面墙的应力情况整体上满足设计要求。

c. 集中力作用截面的局部压应力区的应力情况能够满足设计要求。

参考文献 :

[1] 梁清香 . 有限元与 MARC 实现 [M] . 北京 : 机械工业出版社 , 2003
[2] 赵会德 , 钱向东 . MSC Marc 软件在输水隧洞锚固开挖分析中的应用 [J] . 水利与建筑工程学报 , 2004 , 2(1) : 43-45.
[3] 缪圆冰 , 王瑟澜 , 夏才初 , 等 . 苏州河水闸工程大跨度箱型地板优化设计 [J] . 地下空间与工程学报 , 2005(1) : 112-116.

(收稿日期 2007-01-15 编辑 熊水斌)

器能够直接分开水流的现象仅仅在过流水舌厚度很小时才出现 ,但当过流量增加到破水器无法分开水流时 ,仍能够极大地减小门顶水舌的厚度 ,从而减小了水舌的弯曲刚度 ,同样能起到降低负压的效果。据此 ,考虑闸门原型的实际效果 ,设计最终选用了长度 50 cm 破水器。

c. 通气试验及效果分析 : 在各次试验中 ,同时进行了门后封闭气腔的通气定性试验 ,了解通气对负压的影响。试验中采用直径 1 cm 的空心钢管连接大气与封闭气腔。试验表明 ,通气后的负压均消失 ,而气道的气流速度均很小。

4 结 语

苏州河河口水闸闸门与底轴于 2004 年 3 月在上海重型机器厂开始制造 ,同年 10 月完成厂内制造及预组装 ,2005 年 6 月完成现场安装 ; 2005 年 7 月进行单机调试和启闭机带门联合调试 , 2005 年 10 月系统联合调试结束。通过参建各方的不懈努力 ,闸门与底轴的制造和安装均达到了设计要求 ,系统联合调试一次成功。经过了近 1 年的试运行 ,目前 ,闸门及启闭设备系统的各项技术数据均达到了设计要求 ,等待着千年一遇设计潮水位的考验。通过苏州河河口水闸的工程实践 ,为今后类似工程积累了宝贵的经验 ,证明采用底轴驱动式翻板闸门作为超大孔口跨度挡水建筑物的挡水设施是可行的。

(收稿日期 2007-01-15 编辑 熊水斌)