

小湾水电站底孔弧形闸门支铰应力分析

李同春¹, 郑克红², 张向明³, 赵兰浩¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南昌工程学院瑶湖校区水利系, 江西 南昌 330099;
3. 云南华能澜沧江水电有限公司, 云南 昆明 650011)

摘要: 将闸门和支臂及支铰作为整体考虑, 在铰轴与活动铰链和固定铰座连接处采用薄层接触单元模拟其间只传递法向压力的特性, 分析了正常工作荷载作用下支铰各部件的应力分布. 计算成果表明, 正常工作荷载作用下, 小湾水电站底孔弧形闸门支铰各部件的应力分布合理, 满足强度要求.

关键词: 底孔弧门; 支铰; 接触应力; 小湾水电站

中图分类号: TV314; TV663

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2005)S1-0037-02

小湾水电站坝身底孔弧门是目前国内外设计水头最大、承受荷载最大的闸门. 坝身底孔孔口尺寸为 $5\text{ m} \times 7\text{ m}$ (宽 \times 高), 设计承压水头 160 m , 弧门半径 15 m , 支铰离底孔底坎高度 11 m . 弧形闸门的支铰承受全部水压力和启闭过程中的部分启闭力和门重, 并保证闸门能绕水平轴转动. 小湾弧形闸门的支铰结构采用圆柱铰形式, 包括活动铰链、固定铰座和铰轴. 其中活动铰链与支臂相连接, 固定铰座被固定在支承大梁上, 而铰轴的作用则是连接活动铰链和固定铰座, 起到传递荷载的作用, 支铰放大图见图 1. 由于工程的重要性, 必须保证支铰有足构的强度, 因此合理分析支铰的应力是十分必要的.

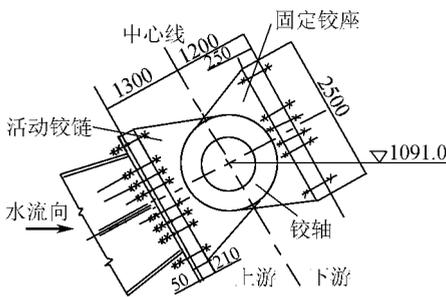


图 1 小湾水电站坝身底孔弧门支铰

本文对闸门和支臂用板和梁单元离散, 对支铰各部件采用八节点空间等参单元离散, 在铰轴与活动铰链和固定铰座连接处采用笔者提出的薄层接触单元离散, 模拟其间只传递法向压力的特性, 分析在水压力、启闭力和闸门自重等荷载作用下支铰各部件的应力分布.

1 薄层接触单元

本文采用的薄层单元为常规的柱状等参单元, 当薄层单元的厚度接近于零时可忽略垂直于薄层单元层面方向的传力, 问题是当薄层单元厚度很小时是否能保证有限元方程非奇异. 当单元劲度矩阵的主对角元占优且大于零就可满足上述要求. 而对柱状等参单元这一条件是自然满足的, 详细证明见文献 [1].

接触问题需模拟接触面的张开与闭合过程, 同时一般情况下当接触面闭合时, 接触面上的应力条件需满足给定的摩擦屈服准则. 而对本文所研究的支铰接触问题, 当铰轴与活动铰链或固定铰链接触时只传递法向压力.

本文对薄层单元加以适当修改来模拟三维非线性接触问题, 其基本思路是当单元中高斯点处于接触状态时, 按一般的求解方法考虑只传递法向压应力建立劲度矩阵. 而当该高斯点处于张开状态时, 相应的劲度矩阵赋为零.

为了记录每个高斯点的张开、闭合过程, 并进行接触状态判别, 对每个高斯点设立 g, g_0 数组, 其中 g 表示本次增量下的接触间隙值, g_0 表示上级荷载增量下的间隙值.

$$g = g_0 + \Delta g \quad (1)$$

$$\Delta g = \mathbf{R}^T \delta_g \quad (2)$$

式中: $\mathbf{R}^T = (l, m, n)$ 为接触面的法向方向余弦; δ_g 为接触面上上下盘增量位移差在高斯点处的插值,

$$\delta_g = \sum N_i \delta_i \quad (3)$$

作者简介: 李同春(1963—), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士, 从事水工结构研究.

δ_i 为结点处接触面上、下盘增量位移差. 对空间八结点单元有:

$$\delta = (U_5 - U_1, U_6 - U_2, U_7 - U_3, U_8 - U_4) \quad (4)$$

这里, $U = (u, v, w)^T$.

每次迭代时首先判别高斯点的接触状态, 对每一高斯点, 若已知本级增量下的法向应力 σ_n , 则当 $g > 0$ 且 $\sigma_n > f_t$ 时该高斯点处于张开状态; 否则, 该高斯点处于闭合状态. 当某高斯点在上级增量下处于张开状态, 而本级增量下处于接触状态时, 由本级位移增量按常规方法求解得的应力增量值需要乘以一系数 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$,

$$\alpha = \frac{|g|}{|g_0| + |g|} \quad (5)$$

实际求解时先根据上级增量结果假定接触面上所有接触面单元高斯点的接触状态, 求解得每个高斯点的 g 和 σ_n , 进而判断其新的接触状态, 若假定状态与新状态一致, 则接触状态迭代收敛. 否则以该接触状态作为重新假定的接触状态, 进行新一轮计算, 直至接触状态收敛为止.

2 计算模型与参数

闸门和支臂采用板、梁单元, 其刚度矩阵形式见文献 [2, 3]. 支铰各部件采用八节点空间等参单元, 由于支铰抗弯刚度较大, 近似认为支臂与支铰联结处的转角为零. 铰轴与活动铰链和固定铰链连接处采用薄层接触单元.

由于整个闸门结构对称、荷载对称, 为简化计算取整个闸门结构的一半来进行, 其中节点数为 7316 个, 单元数为 8835 个, 板单元数 8323 个, 八节点等参单元 512 个 (其中活动铰 204 个, 铰轴 150 个, 固定铰 158 个). 图 2 是整体网格, 图 3 是支铰网格, 图中顺水流方向为 x 向, 垂直水流方向为 y 向, 竖直向上为 z 向.

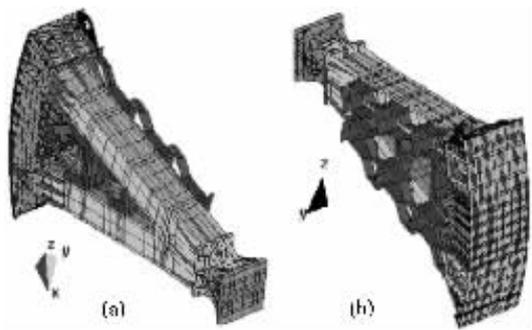


图 2 弧形闸门整体网格

2.1 约束条件

弧形闸门在面板底槛上所有节点由于底槛的约束, 施加竖向约束, 即 $U_z = 0$; 对称面上施加对称约

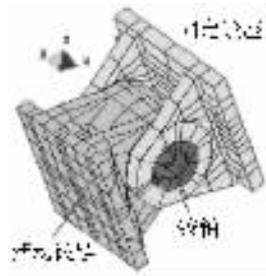


图 3 支铰网格

束, 使其沿 y 向的线位移及绕 x 轴和 z 轴方向的转角位移为零; 支铰头部与支撑大梁连接处按实体单元考虑, 加固定约束; 在转轴两端施加沿垂直水流方向 (即 y 向) 的铰约束, 对重合的节点作耦合处理, 除此之外其余的节点均为自由点.

2.2 计算参数

a. 材料参数. 钢材容重为 78.5 kN/m^3 , 水容重为 10 kN/m^3 , 钢材弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$, 钢材泊松比为 0.2963 .

b. 荷载参数. 底坎高程 1080.0 m , 正常水位 1240.0 m , 最高水位 1243.0 m , 支铰高程 1091.0 m , 泥沙高程 1098.0 m .

3 计算成果分析

计算得出在正常荷载作用下支铰各部件应力分布如图 4 ~ 9 (图中单位均为 MPa) 所示. 在正常荷载作用下, 由于水压力和泥沙压力的径向作用, 活动铰链在上游面将顶推铰轴, 在两者接触面上产生压应力. 由于活动铰链两边刚度大, 因此该压应力分布是两边大, 中间小, 如图 5 和图 7 的第三主应力. 铰轴可近似看作是搁在活动铰链上的梁, 因而在其下游面产生相对较大的轴向拉应力, 图 6 给出了铰轴第一主应力图. 铰轴将活动铰链传来的荷载通过固定铰座传递到闸墩上, 因而两者接触面上产生相对较大的压应力, 见图 9. 图 8 中对应位置的拉应力是由于泊松效应引起的.

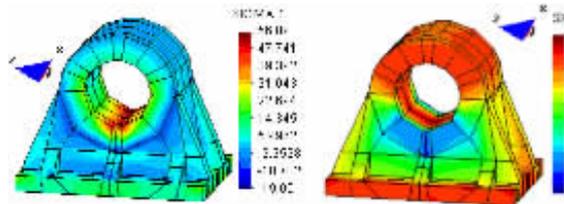


图 4 活动铰链第一主应力 图 5 活动铰链第三主应力

支铰各部件最大第一主应力和最小第三主应力见表 1. 从表中可看出, 应力最大值为 258.7 MPa , 小于 SL74-95《水利水电工程钢闸门设计规范》所规定的容许应力值 290 MPa , 说明在正常工作荷载作用下支铰各部件均能满足强度要求. (下转第 42 页)

有效措施,坝体浸润线将必然会随着坝体的增高而有明显的抬升,因此该尾矿库扩容工程可行性的关键就是要采取有效措施控制坝体浸润线的位置,使坝体在加高的过程中浸润线不会出现明显的抬升。渗透稳定性分析结果表明坝体加高前后的初期坝的渗透稳定性均不满足要求,所以该尾矿库在考虑扩容之前应该对坝体进行综合治理,以确保浸润线的位置在坝体不断加高的过程中能得到有效的控制。针对该尾矿坝的问题提如下建议:①在堆积坝靠近初期坝处开挖一定深度设置排渗系统,降低浸润线以防止其在坝面逸出,同时也可增加初期坝的抗滑稳定性;②为提高初期坝抗滑稳定性和防止初期坝及坝基上渗流出口出现渗透破坏,建议在初期坝原有排水体处增设一道兼起贴坡反滤和镇压坡脚作

用的干砌石挡墙;③建立完善的尾矿库监测系统,包括坝体垂直及水平变形监测、浸润线观测,加强尾矿坝坝坡面植被保护,防止被雨水冲刷。

参考文献:

[1]汪云满,宋月明,徐志宏.上游法尾矿坝加高扩容的加固处理措施[J].矿业快报,2002(9):13-15.
 [2]尾矿设施设计参考资料编写组.尾矿设施设计参考资料[M].北京:冶金工业出版社,1987.
 [3]钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:中国水利水电出版社,1995:239-256.
 [4]张超,杨春和,孔令伟.某铜矿尾砂力学特性研究和稳定性分析[J].岩土力学,2003,24(5):858-862.

(收稿日期:2004-09-22 编辑:熊水斌)

(上接第38页)

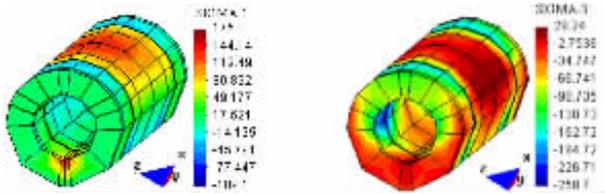


图6 铰轴第一主应力 图7 铰轴第三主应力

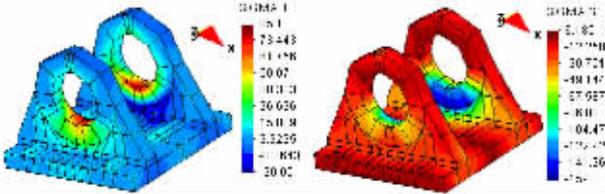


图8 固定铰座第一主应力 图9 固定铰座第三主应力

表1 支铰应力计算成果 MPa

部位	第一主应力	第三主应力
活动铰链	56.1	24.8
铰轴	175.8	258.7
固定铰座	85.1	159.8

4 结论

将闸门和支臂及支铰作为整体考虑,在铰轴与活动铰链和固定铰链连接处采用薄层接触单元模拟其间只传递法向压力的特性,由此计算得到正常工作荷载作用下支铰各部件的应力分布是合理的,支铰各部件应力最大值为258.7 MPa,小于规范所规定的容许应力值,说明在正常工作荷载作用下支铰各部件均能满足强度要求。

参考文献:

[1]李同春,温召旺.拱坝应力分析中的有限元内力法[J].水力

发电工程学报,2002(4):19-24.

[2]卜小明,龙驭球.一种薄板弯曲问题的四边形位移单元[J].力学学报,1991,23(1):53-59.
 [3]朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].第二版.北京:中国水利水电出版社,1998.

(收稿日期:2004-09-20 编辑:熊水斌)

·简讯·

中国工程院院士钱正英在河海大学作学术报告

2005年10月26日下午,全国政协原副主席、中国工程院院士钱正英为河海大学师生作了题为《人与河流和谐发展》的学术报告。报告内容包括河流自身的发展规律、人类活动和河流演变的相互影响、我国河流的状况和问题、必须正确处理人与河流的关系4部分。钱正英院士从河流的形成和发展、河流的自然功能、河流的基本特征阐释了河流自身的发展规律。她指出,河流是一个巨大的系统,具有较强的抵御干扰能力,但如果干扰超过它的自我调节和自我修复能力,其自然功能也将不可逆转地逐渐退化,最终将影响甚至威胁人的生存和发展。我国河流开发的历史久远,新中国成立以来,为适应社会经济的快速发展,以空前未有的速度和规模开发利用和改造河流,对河流的大规模开发利用,也带来不少问题,主要表现为水质严重污染、下游河湖干涸、洪灾威胁依然严重、近海海域的生态系统退化,这些问题已经直接影响人民的生活和生产,并将危及社会经济的可持续发展。正确处理人与河流的关系,需要研究并处理好总体要求和区别对待、合理配置水资源、保证河流的生态和环境需水、在规划设计和水利管理的各个层面上落实河流的生态和环境用水等问题。

(本刊编辑部供稿)