

闸墙变位对三峡人字门安全运行影响研究^{*}

张燎军¹, 傅作新¹, 张贵寿²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 绍兴文理学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要 基于接触面单元, 导出一组能反映两扇闸门斜接柱接触变化的本构方程式. 详细研究了闸室水位升降过程中两扇闸门接触区域的变化情况以及对门体应力的影响, 并提出了通过调整背拉杆预应力克服闸墙变位引起的不良影响的一种简单有效的方法.

关键词 船闸; 人字门; 接触面单元; 接触问题; 应力分析; 背拉杆预应力

中图分类号 TV633⁺.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2000)04-0097-04

三峡永久船闸边坡岩体由于深开挖而形成了高百米以上的高边坡, 该边坡因地应力释放、渗流条件变化和岩石的徐变作用等, 将在一定时期后缓慢产生向闸室方向的位移. 这种位移将直接影响人字门正常合拢时斜接柱的接触条件, 从而对闸门的强度、刚度和船闸的正常运行产生不利的后果. 本文基于接触面单元, 推导出一组能反映两扇闸门对接时接触区域变化的非线性本构方程式, 将两扇门作为一个系统, 严格定出闸墙变位后各扇门的实际位置, 以此建立一个复杂的非线性分析模型. 通过逐渐改变闸室水位, 详细研究关门挡水时, 水位升降所引起的两扇闸门接触区域的变化情况以及门体的扭曲变形和扭曲应力规律, 以此研究闸墙位移对人字门的影响. 文中还提出了通过调整背拉杆预应力以消除闸墙变位引起人字门关闭时的间隙量和扭曲变形的一种行之有效的简便方法. 研究方法和研究成果可直接应用于三峡闸门的设计分析中.

1 计算模型选择

三峡船闸闸室宽 34 m, 典型人字闸门高 37 m, 单扇门宽 20.2 m, 重约 800 t, 设计运行淹没水深 35 m. 由于人字闸门是一个典型的薄壁结构, 当闸墙发生变位后, 左右两扇闸门成为不对称的, 从而影响人字门关闭合拢时支枕垫的正常对接. 随着水位的升降, 支枕垫逐步接触, 而已接触的支枕也有可能再次脱开. 因此, 计算模型的选择, 必须考虑到各构件的几何性质、变形特征和受力方式以及两扇门接触区域的变化情况、相互作用关系, 以正确反映出闸门的整体作用和各构件的工作状态.

由于人字门门扇位置在闸墙变位后产生了变化, 因此, 我们将左右两扇门分别在局部坐标系 ($O'X'Y'Z'$) 中形成有限元网格, 然后通过坐标变换转换至整体坐标系, 如图 1 所示. 整体网格见图 2, 闸门下游面平面图见图 3.

对三峡船闸, 据资料表明, 闸墙变位可能在 4 ~ 5 cm 左右, 本文中计算取闸门顶枢相对底枢的水平位移 $\Delta = 4$ cm.

计算常数选择: 弹性模量 $E = 210$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.3$, 容重 $\gamma = 78.5$ kN/m³.

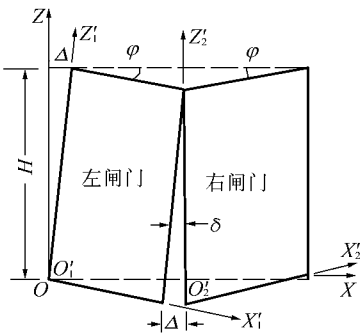


图 1 闸墙变位后人字门位置

Fig.1 Position of miter gate after lock-wall deformation

收稿日期: 1999-04-07

作者简介: 张燎军 (1962—), 男, 江苏昆山人, 教授级高工, 水工结构工程专业, 主要从事水工结构的应力分析、抗震分析和渗流稳控分析.

^{*} 三峡工程八个单项技术设计审查项目.

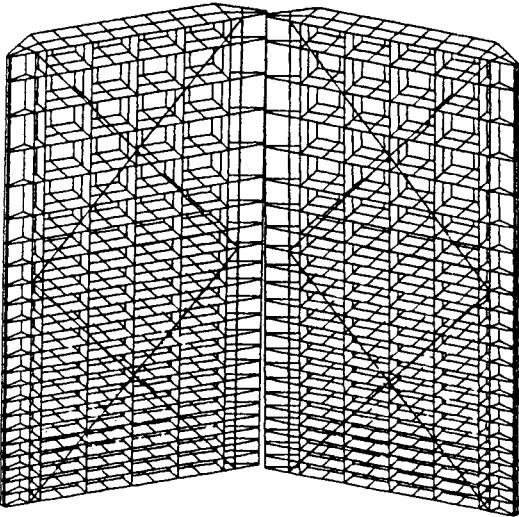


图 2 人字门系统的网格图(下游方向)

Fig.2 Mesh for the miter gate(downstream)

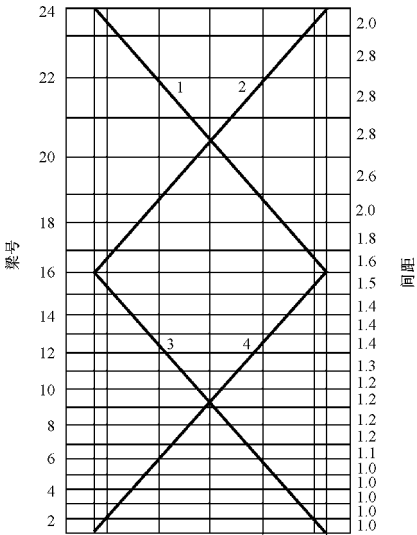


图 3 闸门下游面布置及尺寸

Fig.3 Arrangement and size of the downstream surface of the miter gate

2 接触面单元本构关系

为了准确模拟两扇闸门在斜接柱支枕垫处的接触变化情况,布置了一系列接触面单元.根据接触面传压、传剪、不传拉原则,采用增量形式表示的接触面单元本构方程式为

$$\begin{cases} \Delta\sigma_n = K \cdot \Delta w \\ \Delta\tau_{tu} = \frac{K}{K_n} \cdot K_{tu} \Delta u \\ \Delta\tau_{tv} = \frac{K}{K_n} \cdot K_{tv} \Delta v \\ K = \begin{cases} K_n & \sum \Delta w + \delta \leq 0 \\ 0 & \sum \Delta w + \delta > 0 \end{cases} \end{cases} \tag{4}$$

其中 $\Delta u = \Delta u_{i+1} - \Delta u_i$ $\Delta v = \Delta v_{i+1} - \Delta v_i$ $\Delta w = \Delta w_{i+1} - \Delta w_i$
式中 $\Delta u, \Delta v$ ——单元两个切向增量“应变”; Δw ——单元法向增量“应变”; K_n ——接触面法向刚度系数;
 K_{tu}, K_{tv} ——接触面切向刚度系数; δ ——两扇闸门斜接柱的水平初间隙; $\Delta\sigma_n$ ——某级荷载增量下所对应的
法向接触应力; $\Delta\tau_{tu}, \Delta\tau_{tv}$ ——某级荷载增量下切向增量剪应力; $\sum \Delta w + \delta \leq 0$ 表示斜接柱支枕垫接触; $\sum \Delta w$
 $+ \delta > 0$ 表示支枕垫脱开.

式(4)是一组随荷载增量变化而变化的非线性本构方程式,能够反映接触面的开合接触状态.

3 计算步骤

由于闸室水位是逐渐升高或降低的,因此选择等步长小增量的形式自然能够得到满意的结果,但将耗费大量的机时.我们采取变增量迭代方案,增量 ΔP 为水位差增量 Δh 形成的水压力.每级荷载增量 ΔP 的选取是根据一定规则迭代选择,因篇幅所限,这里从略.

两扇闸门初间隙的选取时,假设沿闸门高度成线性变化.人字门合拢时由于闸墙变位,门顶先接触,此时两斜接柱构成倒 V 形初间隙,其规律为

$$\delta(z) = \frac{H - z}{H} \cdot \Delta \tag{5}$$

式中 Δ ——门底初间隙,相当于闸墙顶枢相对底枢的最大水平位移; H ——闸门高度; z ——任一点竖向坐标.接触面刚度系数应根据具体情况选择,对本文金属闸门, k_n 取 2×10^5 MPa, $k_{tu} = k_{tv} = \frac{1}{2} k_n$.

这里将闸门挡水的整个过程分别为两步来考虑,以水位上升为例介绍.

第一步 设初始状态闸门上下游均无水,首先求出两扇门完全闭合时所需的闭合水荷载,即上游水位升高的高度,从而求得门体变形和应力.

第二步 闸门完全闭合后,人字门形成一整体拱形结构,改变约束条件后,将剩余水荷载一次作用于该整体结构,即上游水位升至 35.0 m,求出闸门总变形和总应力.

4 成果分析

按上面提出的研究方案,取闸室水位升高情况计算. 计算发现,当水位逐渐升高时,两扇闸门的间隙均匀地减小. 当 $h \leq 2.5$ m,两根斜接柱上各对应结点都没有发生接触. 当 $h = 2.6$ m 时,斜接柱上各对应结点大部分接触;而当 $h = 2.7$ m 时,各对应结点已全部接触,即人字门全部闭合. 产生这种现象的原因是,闸门受水荷载产生扭曲变形时,斜接柱各点仍基本保持为一直线,故而斜接柱上各对应结点基本上是接近同时接触的. 表 1 列出了左岸闸门五根主梁的六个控制点的正应力,右岸闸门与左岸闸门的应力分布基本是对称的,这里不再列出. 表 2 列出了闸门背拉杆的内力和应力. 图 4 为主梁剖面图.

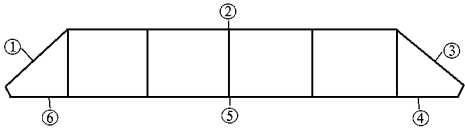


图 4 主梁剖面图

Fig.4 Section of the main beams

表 1 左闸门主梁的正应力

Table 1 Stress of the main beams of the left gate

梁号	工况	①	②	③	④	⑤	⑥
1	扭曲变形	- 3.3	- 4.4	- 13.1	6.9	8.3	5.2
	关闭情况	- 140.6	- 143.1	- 132.5	- 76.5	- 19.1	- 69.7
3	扭曲变形	- 1.3	- 3.6	- 5.7	2.1	4.3	0.8
	关闭情况	- 133.0	- 141.0	- 137.4	- 73.3	- 30.3	- 75.1
16	扭曲变形	- 0.7	0.3	- 0.2	0.2	1.8	1.6
	关闭情况	- 105.6	- 95.3	- 101.5	- 56.8	- 32.9	- 54.6
20	扭曲变形	- 0.2	0.3	0.2	- 0.6	- 0.9	- 0.1
	关闭情况	- 71.8	- 59.3	- 76.4	- 36.1	- 31.8	- 39.7
24	扭曲变形	- 5.7	0.7	14.1	- 14.1	- 8.6	- 8.6
	关闭情况	- 10.5	- 2.4	2.4	- 16.1	- 6.9	- 5.8

注 ①~⑥为各主梁的控制点.

表 2 左闸门背拉杆的内力和应力

Table 2 Internal force and stress of the back drag rods of the left gate

内力和应力	工 况	1 号杆	2 号杆	3 号杆	4 号杆
内力/kN	扭曲变形	- 1 035	518	- 954	610
	关闭情况	- 650	109	- 450	- 210
应力/MPa	扭曲变形	- 30.0	28.8	- 27.6	33.9
	关闭情况	- 18.8	6.0	- 13.1	- 11.7

从计算结果可以看出,只需很小的水压,即水位只要上升 2.7 m,约正常挡水 35.0 m 高度的 1/13,闸门就完全闭合了. 并且门体内各梁向正应力都很小,若与 35 m 水位关闭挡水情况相比,最大正应力比值不足 1/10. 因此,在给定闸墙变位条件下,闸门的扭曲变形对门体的强度不会形成太大影响.

类似地,可考虑当闸室水位下降时,人字门闭合过程中的接触变化情况. 取 $\Delta = 4$ cm,从上下游淹没水深均为 35.0 m 开始,逐渐降低下游水位. 当下游水位降低 0.2 m 时,闸门已完全闭合,此时门体内的应力同样也很小. 通过计算可以看出,闸门闭合所需的闭合水荷载,上下游满水情况与上下游无水情况的合力是不同的,但是它们对闸门顶边的合力矩是基本相同的,说明无水情况集中于闸门底部的较小水荷载就能使闸门闭合,而满水时作用于板面的较大水荷载方能达到相同之目的.

上述研究表明,闸墙变位对人字门的强度没有太大影响,但是其变位引起闸门合拢时的初始间隙有可能影响到闸门关闭时的止水条件等.下面我们提出了调整背拉杆预应力抵消闸墙变位不良影响的一种方法.

5 背拉杆预应力的调整

采用前面的有限元模型,不考虑闸墙变位影响,可以求得,当按水位涌高 0.2 m 计算并设计背拉杆预应力时,主、副背拉杆预拉力或预应力分别为^[1]

$$\begin{cases} N_{1,3}^0 = 2\,613.0\text{ kN} \\ N_{2,4}^0 = 900.0\text{ kN} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \sigma_{1,3}^0 = 75.74\text{ MPa} \\ \sigma_{2,4}^0 = 50.0\text{ MPa} \end{cases}$$

通过对背拉杆作用的分析可知,主背拉杆的预应力将使闸门底端相对顶端产生指向下游的径向位移,副背拉杆预应力结果则相反.而闸墙顶部向闸室方向产生相对底部的水平位移 Δ 时,为使入字门均匀关闭,需使两扇闸门产生一定的扭曲变形,简单计算可知,它相当于斜接柱底端相对顶部发生大小等于 1.306Δ 的径向位移,方向指向下游(图 5(a)).

我们通过调整主杆预应力来达到目的.设背拉杆方向作用两对拉力 $N_{1,3} = 1\,000\text{ kN}$,见图 5(b),可求得闸门斜接柱产生指向下游的相对位移 $\delta_{AB} = 34.447$,因此,为使闸门斜接柱产生大小等于 1.306Δ 的相同性质的位移,需在背拉杆中增加预拉力

$$N_{1,3}^0 = \frac{1.306\Delta}{\delta_{AB}} \cdot N_{1,3} = 151.7(\text{kN})$$

相应的预应力为 4.40 MPa,这些数值远小于原主杆设计的预应力(仅为原主杆设计预应力的 5% ~ 6%),不会改变原预应力设计方案.

由此可见,闸墙由于岩体变位而产生不大的相对位移(例如 4 cm 左右)时,只要适当增大背拉杆预应力,便能消除闸墙变位引起的闸门初间隙.因而在闸门设计时,预留背拉杆预应力重新调节能力,以便必要时进行预应力调整,以克服闸墙变位的不良影响.

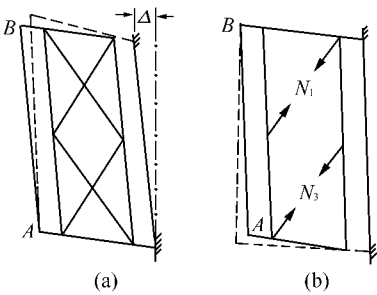


图 5 闸门初始变位
和背拉杆作用力的方向

Fig.5 Initial deformation of the gates
and direction of the acting force of
the back drag rods

参考文献:

[1] 张燎军,傅作新.三峡多级船闸人字门抗扭性能研究[J].水运工程,1997(7):34~40.
[2] 张燎军,傅作新.大型人字门设计计算中的若干问题[J].人民长江,1993(3):12~17.
[3] 傅作新,张燎军.大型人字门的整体分析与原型试验[J].河海大学学报,1992,20(5):98~104.
[4] Sharma H D,Nayak Gc,Maheshwari J B.Generalization of sequential nonlinear analysis—a study of rockfill dam with joint elements[J]. Numerical Method in Geomechanics,ASCE,1976.662~685.

Effect of Lock-wall Deformation on the Performance of
the Miter Gates of the Three Gorges Project

ZHANG Liao-jun¹, FU Zuo-xin¹, ZHANG Gui-shou²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering,Hohai Univ.,Nanjing 210098,China ;
2. Shaoxing College of Arts and Sciences,Shaoxing 312000,China)

Abstract Based on the contact Element Method,nonlinear equations for the analysis of the miter gates of the Three Gorges Project are established.The variations of the contact area and stress and displacement of the miter gates during water level rise and fall are studied.A simple and valid method to overcome the effect of the displacement of the lock wall through adjusting the prestress of the back drag rod is presented.

Key words ship lock ;miter gates ;the contact element ;contact problem ;stress analysis ;prestress of back drag rods