



衬砌船闸闸室接触有限元分析

李学义¹, 杨斌¹, 聂云亮²

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

2. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 基于有限元计算方法, 以某航电枢纽工程为依托, 采用非线性理论建立二维闸室结构仿真模型, 分别在检修和低水运行工况下对高衬砌倒梯形闸室结构与岩基进行接触分析和计算。通过对接触状态及接触部位的应力分布研究, 得到倒梯形衬砌式闸墙结构薄弱面可能在台阶处的主要结论。

关键词: 船闸闸室; 非线性有限元法; 接触分析

中图分类号: O 319.56

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0143-05

Finite element analysis for contacting of lined lock chamber

LI Xue-yi¹, YANG Bin¹, NIE Yun-liang²

(1. River and Ocean Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. CCCC Wuhan Harbor Engineering Design and Research Institute, Wuhan 430040, China)

Abstract: Based on the finite element method, which is based on a navigation-power junction project, we adopt the nonlinear theory to establish the two-dimensional simulation model of lock chamber structure in maintenance and low water operation respectively for the contact analysis and calculation of highly lined inverted trapezoidal lock chamber structure and rock bed. According to the research on the stress distribution of the contact state and contact part, we draw the conclusion that the weak surface of the inverted trapezoidal lock chamber structure may be on the steps.

Key words: lock chamber; nonlinear finite element method; contact analysis

衬砌闸室结构在山区河流的船闸中应用较多, 其主要优点为可以利用基岩与闸墙共同承担闸室结构承受的船舶荷载、水压力等。在计算中, 常采用传统的解析法, 但该法很难反映闸墙与基岩之间的相互作用, 基于不同的基本假设所得到的计算结果也存在一定差异^[1]。鉴于闸室计算可以简化为平面应变问题^[2], 本文针对高衬砌闸室结构, 基于 ANSYS 分析软件, 采用非线性接触有限元法, 建立二维闸室结构计算模型, 研究岩基和闸室结构之间接触部位的应力分布规律。

型, 其基本方程为:

1) 平衡方程。

$$\sigma_{ij} + f_i = 0 \quad (1)$$

2) 几何方程。

$$\begin{cases} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\mu_{i,j} + \mu_{j,i}) \\ \gamma_{i,j} = 2\varepsilon_{ij}, \quad i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

3) 本构方程。

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\mu}{E}\sigma_{ij} - \frac{\mu}{E}\sigma_{kk}\delta_{ij} \quad (3)$$

1 有限元仿真模型的建立

1.1 混凝土模型^[3]

本模型中, 把混凝土模型考虑成理想弹性模

1.2 岩基模型^[4]

本模型中, 把岩基模型考虑成弹塑性模型, 其基本方程为:

收稿日期: 2013-07-04

作者简介: 李学义 (1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事水利工程设计。

1) 平衡模型。

$$(\sigma_{ij})_{i,j} + f_i = 0 \quad (4)$$

2) 几何方程。

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\mu_{i,j} + \mu_{j,i}) \quad (5)$$

3) 本构方程。

在弹性区级卸荷区内:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\mu}{E}\sigma_{ij} - \frac{\mu}{E}\sigma_{kk}\delta_{ij} \quad (6)$$

在塑性区内:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + h \langle \varphi \rangle \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{ij}}, \quad h \geq 0 \quad (7)$$

1.3 接触模型^[5-6]

为了正确合理地分析闸墙与基岩之间的相互作用, 如实反映它们之间的位移变形关系及接触应力的传递关系, 包括切向粘结力可能出现的相互错动以及法向粘结力可能出现的压缩、拉伸甚或脱离状态, 本文采用非线性接触模型进行模拟。

假定船闸为接触体 Ω^1 , 基岩为接触体 Ω^2 , 而 S_q 和 S_u 分别表示船闸和基岩总的外荷载边界和位移边界, S_c 则表示船闸和基岩可能的公共接触边界(面)。同时, 在可能的公共接触边界上定义局部直角坐标系 na , 其中向量 n 表示可能接触面的法向, 由 Ω^2 指向 Ω^1 , 向量 a 则表示可能接触面的切向。另外, 还定义: 变量前面加 d 表示增量, 变量前面加 Δ 表示可能接触点位移相对值, u 表示位移, σ 表示应力。

1) 间隙条件^[7]。

定义局部坐标系中可能接触面的相对间距为:

$$\begin{cases} u_n = u_n^1 - u_n^2 + u_n^0 \\ du_n = du_n^1 - du_n^2 \\ du_a = du_a^1 - du_a^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: u_n^0 表示可能接触面之间的法向初始间隙。

2) 接触条件^[8]。

①作用力与反作用力原理。

$$\begin{cases} \sigma_n^1 = -\sigma_n^2 = \sigma_n \\ \sigma_a^1 = -\sigma_a^2 = \sigma_a \end{cases} \quad (9)$$

②应力及法向非嵌入条件。

脱离状态:

$$\begin{cases} \sigma_n = 0 \\ \sigma_a = 0 \end{cases} \quad (10)$$

粘着和滑动状态:

$$\begin{cases} u_n \geq 0 \\ \sigma_n \geq 0, \quad u_n = 0 \end{cases} \quad (11)$$

③库仑摩擦定律。

粘着状态:

$$\sigma_a \leq \mu \sigma_n, \quad du_a = 0 \quad (12)$$

滑动状态:

$$\sigma_a = \mu \sigma_n, \quad du_a \geq 0 \quad (13)$$

2 衬砌船闸闸室结构仿真分析

本文采用 ANSYS 软件对草街船闸倒梯形衬砌式闸室进行二维接触分析。

草街船闸左闸室墙为高衬砌墙, 墙高 36.8 m, 闸墙断面为顶宽 13.0 m, 底宽 7.5 m, 倒梯形衬砌结构(图 1)。

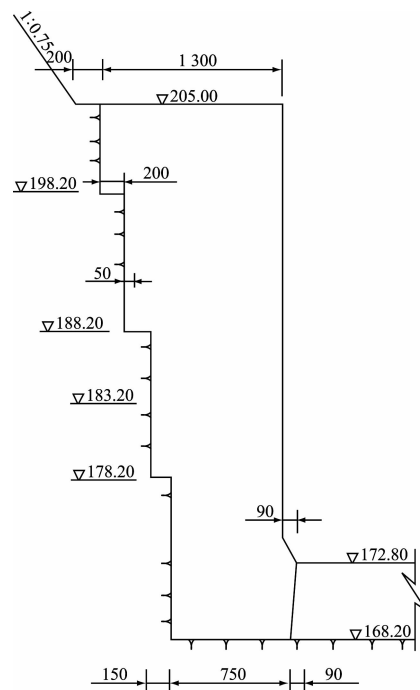


图 1 闸室断面

2.1 模型建立

本算例以草街船闸左闸墙和一定范围基岩为

对象, 建立二维有限元模型, 其中混凝土和基岩采用 plane82 单元进行模拟, 接触面采用 target169 单元和 conta172 单元进行模拟^[9-10]。有限元计算网格见图 2。

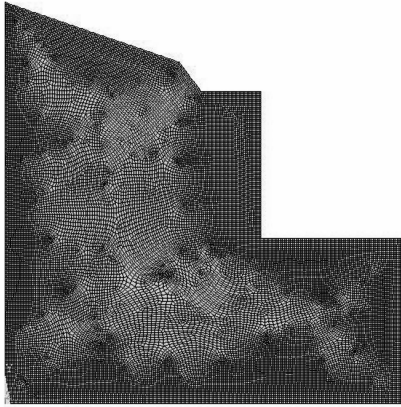


图 2 衬砌船闸二维网格

模型材料参数: 岩基弹性模量 $E = 0.64 \text{ GPa}$; 密度 $\rho = 2.60 \text{ t/m}^3$; 泊松比 $\mu = 0.28$; 混凝土/岩摩擦系数 $f = 0.65$; 混凝土/岩凝聚力 $C = 0.15 \text{ MPa}$ 。

2.2 边界条件

模型计算选取了较为不利的检修和低水运行两种工况。其中检修工况为: 闸墙前无水, 墙后为排水管水位 178.2 m; 低水运行工况为: 墙前为下游最低通航水位 176.30 m, 墙后为排水管水位 178.20 m。所以边界条件为: 在基岩两侧施加水平方向的位移边界条件, 在基岩下部施加竖直和水平方向的位移边界条件, 在闸墙前后施加各工况对应水压力的应力边界条件。

2.3 计算结果及分析

2.3.1 检修工况

1) 主应力成果及分析。

在检修工况下, 模型的第一主应力计算表明: 最大拉应力出现在第 1 台阶处, 约为 1.47 MPa; 第 2, 第 3 和第 4 台阶处都出现了相对较大的拉应力, 表明在各台阶处容易出现应力集中现象 (图 3)。

2) 切应力成果及分析。

由接触面直立衬砌墙 (简称竖墙) 上的切应力分布曲线 (图 4) 可以看出: 竖墙顶部切应力值较大, 中部较小且几乎接近于零, 下端反向有所增长 (图 4 中 *Distance* 表示竖墙上从上到下的距离)。

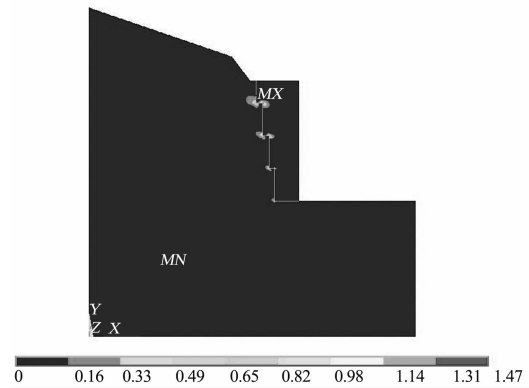


图 3 第一主应力云图 (单位: MPa)

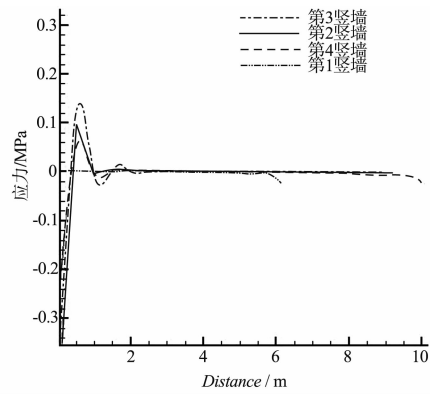
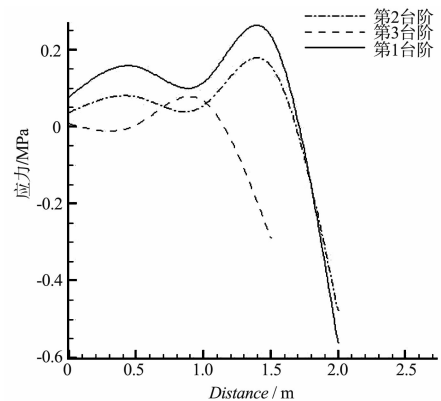


图 4 竖墙上切应力分布

通过对竖墙上切应力和抗切应力的对比, 可以得到竖墙与岩基的接触状态: 在竖墙顶部, 其切应力值大于抗切应力值, 顶部为向下滑移状态; 在竖墙中部和底部, 其切应力值均小于抗切应力值, 表现为粘结状态。

由图 5 可知, 台阶上的切应力分布基本呈逐渐增大后突然反向增大趋势, 造成这种突然反向增大是在台阶转角处应力集中的表现。在各台阶上的切应力均小于抗切应力, 表明台阶上的接触状态为粘结状态。



a) 第1~3台阶

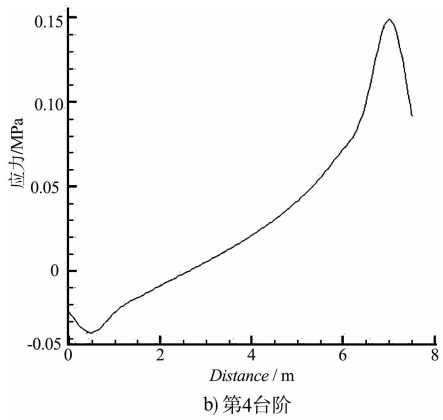


图5 台阶上切应力分布

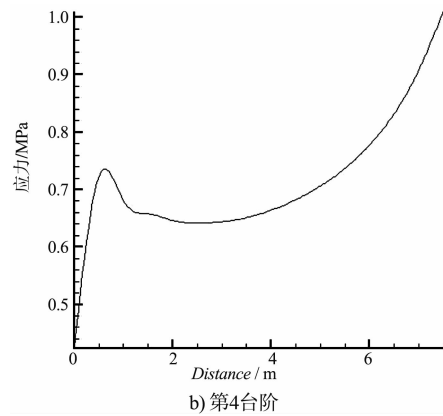


图7 台阶上接触压应力分布

3) 接触压应力成果。

由图6可以看出,竖墙上的接触压应力分布规律为竖墙顶部和底部较大,中部较小且几乎接近于零,与切应力分布相似。台阶上的接触压应力在第1至第3台阶上的分布为近似抛物线型的应力分布,中间大,两端小;在第4台阶上的接触应力沿水平方向基本呈逐渐增大的趋势,最大压应力达到1.01 MPa。与传统解析法采用的线性假设^[11]有很大差异(图7)。

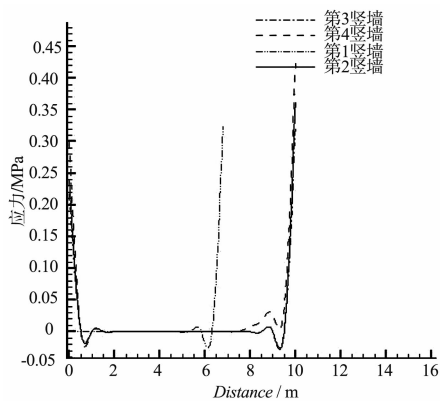
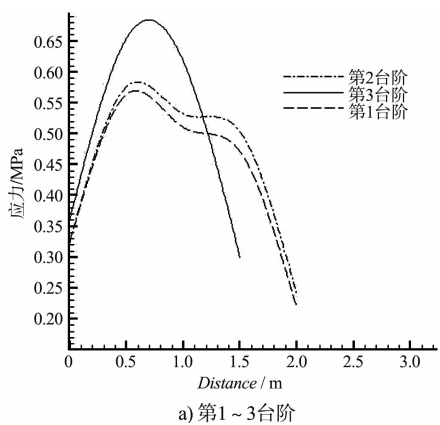


图6 竖墙上接触压应力分布



2.3.2 低水工况

1) 主应力成果及分析。

在低水运行工况下,模型的第1主应力基本情况与检修工况相差不大,但其最大拉应力减小为1.43 MPa,见图8。

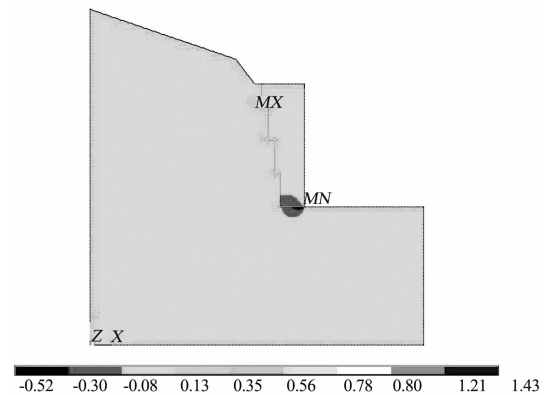


图8 第1主应力云图(单位:MPa)

2) 切应力成果及分析。

低水运行工况下竖墙的切应力分布规律与检修工况下的基本相似,见图9。

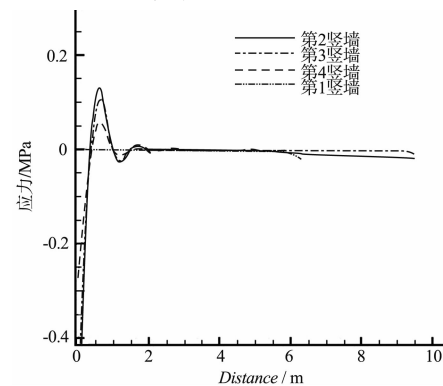
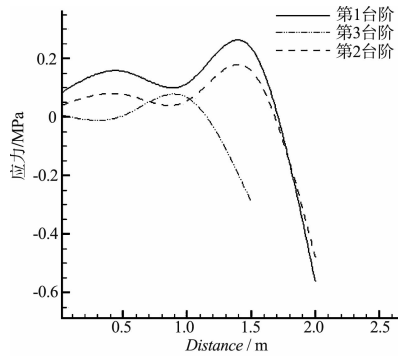
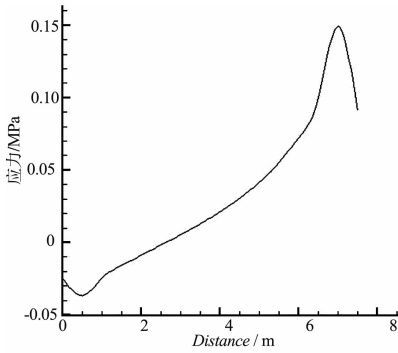


图9 竖墙上切应力分布

由图10可看出,台阶上的切应力分布同样与检修工况相差不大。



a) 第1~3台阶



b) 第4台阶

图 10 台阶上切应力分布

3) 接触压应力成果。

低水运行工况下竖墙与台阶上的接触压应力形状和分布都与检修情况相似, 最大压应力增加至 1.04 MPa。其接触应力分布曲线见图 11 和 12。

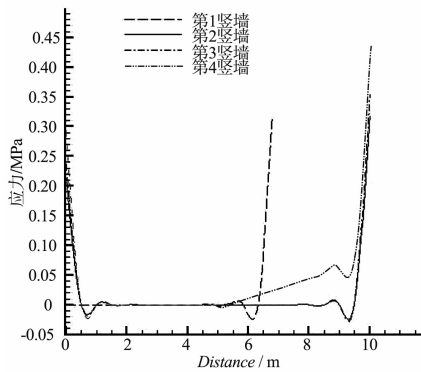
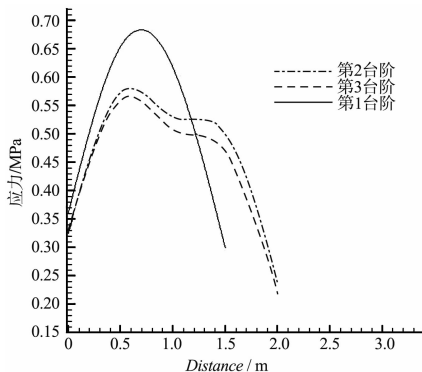
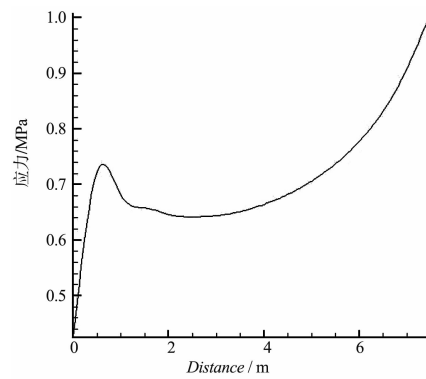


图 11 竖墙上接触压应力分布



a) 第1~3台阶



b) 第4台阶

图 12 台阶上接触压应力分布曲线

检修和低水工况下台阶上接触压应力具体比较见表 1。

表 1 检修和低水工况下台阶上压应力比较

台阶	距台阶左端的距离/m	接触压应力/kPa		差值/kPa
		低水	检修	
第 1 台阶	0	317	325	-8.14
	0.5	549	564	-15.10
	1.0	497	510	-12.60
	1.5	461	471	-10.20
	2.0	213	217	-3.80
第 2 台阶	0	319	325	-6.17
	0.5	564	576	-12.10
	1.0	521	532	-10.30
	1.5	495	503	-8.27
	2.0	237	240	-2.76
第 3 台阶	0	355	362	-6.42
	0.5	641	655	-13.50
	1.0	605	617	-12.50
	1.5	294	299	-5.16
	第 4 台阶	0	400	424
0.5		714	723	-9.49
1.0		673	681	-7.97
1.5		651	658	-6.62
2.0		641	646	-5.27
2.5		638	642	-3.92
3.0		642	644	-2.47
3.5		650	651	-0.92
4.0		665	664	0.79
4.5	685	682	2.73	
5.0	711	706	4.97	
5.5	745	737	7.64	
6.0	789	778	10.90	
6.5	847	832	15.20	
7.0	929	908	21.30	
7.5	1 040	1 010	28.50	