



# U形预应力工艺在整体式闸室中的应用

李辰银, 王大庚, 李恒, 管人地  
(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 应用ANSYS有限元软件, 建立U形预应力整体式闸室结构的三维模型, 对整体式闸室结构在不同工况下的应力、变形情况进行模拟计算, 计算结果表明将U形预应力工艺应用于整体式闸室结构中是可行的, 可以较好地解决采用普通钢筋混凝土设计整体式闸室结构时存在的截面尺寸大、配筋量大及裂缝开展宽度不易满足的问题, 从而为设计整体式闸室结构提供参考。

**关键词:** U形预应力; 整体式闸室; 有限元; 数值模拟

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0169-04

## Application of U-shape reinforcement prestressing technology on monolithic lock chamber structure

LI Chen-yin, WANG Da-geng, LI Heng, GUAN Ren-di

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the finite element software ANSYS, this paper builds up a 3D finite element model of monolithic lock chamber structure to conduct a simulation for the stress and deformation of this chamber structure in different conditions. The result shows that U-shape reinforcement prestressing technology used in depressed chamber structure is feasible, which not only provides solution to the problem of concrete crack, but also cuts down the cost of reinforcing bar. Thus it may serve as reference for the design of monolithic lock chamber.

**Key words:** U-shape reinforcement prestressing; monolithic lock chamber; finite element method; numerical modeling

整体式闸室结构中由于底板和闸墙刚性连接, 闸墙将承受的外荷载及边荷载作用传递给底板, 使底板承受很大的弯矩, 因此闸室底板的截面尺寸和配筋量大, 裂缝宽度不易满足规范要求。为解决整体式闸室结构中存在的这些问题, 本文提出将U形预应力工艺应用于整体式闸室结构中的方法, 应用ANSYS有限元软件进行数值模拟, 并将计算结果与普通钢筋混凝土结构的计算结果进行对比分析。

预应力混凝土工艺虽然在建筑、桥梁等领域有着广泛的应用, 取得了较好的效果, 也积累了一定的经验<sup>[1]</sup>, 但在船闸工程中的应用还属于一个

新课题, 因此该研究具有现实意义。

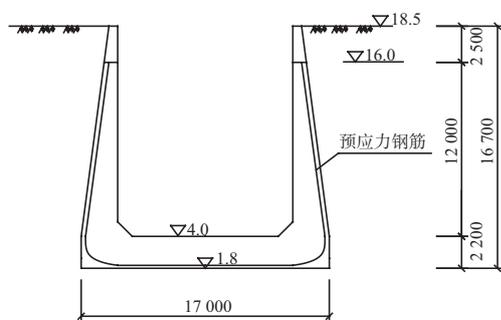
### 1 工程概况

某水利枢纽船闸, 设计等级为IV级, 闸室尺度为130 m × 12 m × 3.0 m, 设计船型为500吨级, 其尺度为45 m × 10.8 m × 1.6 m (总长 × 型宽 × 吃水); 船队为1顶2 × 500吨级, 其尺度为111 m × 10.8 m × 1.6 m (长 × 宽 × 吃水)。闸室混凝土采用C40混凝土, 非预应力钢筋采用II级钢筋, 直径 $\phi=16$  mm, 间距100 mm, 闸室结构以黏土层为基础持力层, 该层为硬质黏土层, 硬塑、坚硬状态, 地基容许承载力 $f=270$  kPa, 内摩擦角

收稿日期: 2012-04-13

作者简介: 李辰银 (1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口航道工程结构。

$\varphi=16.6^\circ$ , 粘聚力  $c=40$  kPa, 压缩模量  $E=8.8$  MPa, 泊松比  $\mu=0.36$ , 变形模量  $E=5.28$  MPa。预应力研究中的整体式预应力闸室基本情况及预应力钢筋布置情况见图1。



注: 1.图中尺寸高程以m计,其余以mm计。  
2.预应力钢筋与闸室底板底部间距200 mm。

图1 闸室结构

闸室结构中的预应力筋采用低松弛高强度预应力钢绞线,呈U形布置。每束预应力筋由9股钢绞线组成,单股钢绞线直径  $\phi=15.24$  mm,截面面积  $A=140$  mm<sup>2</sup>,标准强度  $R=1\ 860$  MPa,弹性模量  $E=1.95 \times 10^5$  MPa。预应力筋的张拉控制应力  $\sigma_{con}=1\ 395$  MPa,每孔道张拉控制荷载  $F=1757.7$  kN,施工工艺采用两端张拉的方式,每束钢绞线预留孔道直径  $\phi=90$  mm,塑料波纹管成孔,真空吸浆<sup>[2-3]</sup>。闸室结构中预应力筋的布置间距为500 mm。

## 2 模型建立

### 2.1 单元类型的选取<sup>[4]</sup>

采用实体筋法建立U形预应力整体式闸室非线性有限元模型,预应力钢筋采用杆单元模拟,混凝土采用实体单元模拟,用降温法来模拟预应力的作用,用体分割法来确定预应力的钢筋的位置。本文中采用三维8节点等参元SOLID65来模拟混凝土单元,选用三维8节点等参元SOLID45来模拟土体,用LINK8模拟预应力筋。

### 2.2 本构关系及破坏准则

本文中采用线性强化模型(MISO)反应混凝土本构关系,用美国E. Hongstad建议的模型来反映单轴受压时的应力-应变曲线,分别用上升段和下降段来描述,其上升段为抛物线型,下降段为直线型<sup>[5]</sup>。即:

上升段

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0) \quad (1)$$

下降段

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right) \right] \quad (\varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_u) \quad (2)$$

式中:  $\sigma_0$ 为混凝土单轴受压时的应力峰值;  $\varepsilon_0$ 为混凝土峰值应力所对应的应变;  $\varepsilon_u$ 为混凝土的极限压应变。

本文采用SOLID65来模拟混凝土单元,在ANSYS中SOLID65单元采用的是Willam-Warnke五参数准则,其混凝土破坏准则为:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (3)$$

式中:  $F$ 为主应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  的函数;  $S$ 为主应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  与  $f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2$  等5个参数定义的破坏面。

土体采用DP模型模拟,DP模型采用Drucker-Prager屈服准则。

预应力钢筋采用线弹性模型,应力-应变成正比关系,满足胡克定律。

### 2.3 建模及网格划分

由于闸室结构具有对称性,故可取其一半进行建模,通过预应力筋拖拉形成的面和工作平面将混凝土结构分为几个实体结构,各实体结构的交线定义为预应力筋线,然后分别对预应力筋和混凝土结构进行网格划分,从而建立U形预应力整体式闸室三维有限元模型。

### 2.4 加载与计算

利用库仑土压力理论计算墙后的静止土压力,采用静力等效原则,将水平土压力和竖向土压力转化为作用在单元节点上的集中力  $F_x$  和  $F_y$ 。利用设置水力梯度的方法来施加水压力。利用降温法计算预应力筋在各段需降温的数值,模拟曲线预应力钢筋在不同段的有效预应力<sup>[6]</sup>。将整个模型施加重力加速度,通过加速度来施加重力。

在有限元建模过程中采用底板下10 m厚的黏土层为地基进行有限元模拟,地基底部边界固接,两侧边界有竖向位移,无水平位移;地基与底板接触处设置接触单元,考虑底板与地基的相互作用。

## 3 计算结果分析

### 3.1 不同工况下的计算结果

通过ANSYS软件的计算和后处理可以得到预

应力闸室结构在不同工况下的计算结果。

1) 工况1: 检修期。

一般情况下闸室结构检修期是一种比较危险的工况, 应作为控制工况。为能够较好地分析整体式闸室中预应力作用的效果, 本文将普通混凝土结构和预应力混凝土结构的计算结果进行对比分析。

图2~4为普通钢筋混凝土结构检修期应力、变形情况。

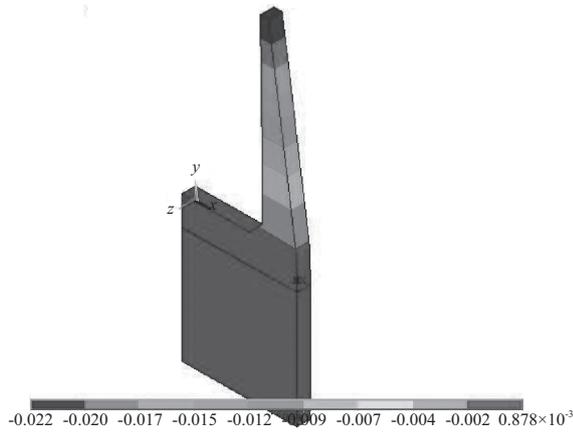


图2 普通钢筋混凝土结构水平方向位移 (单位: m)

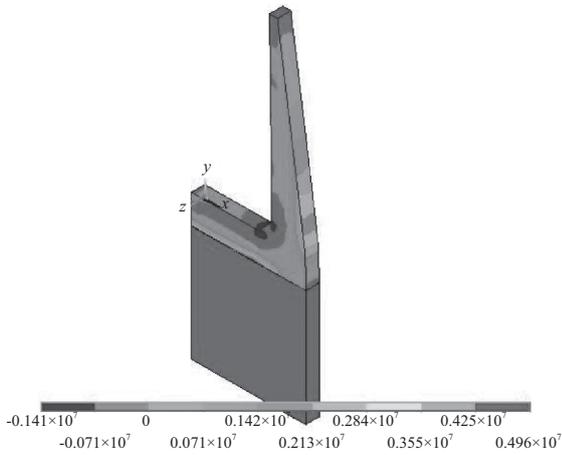


图3 普通钢筋混凝土结构第一主应力 (单位: MPa)

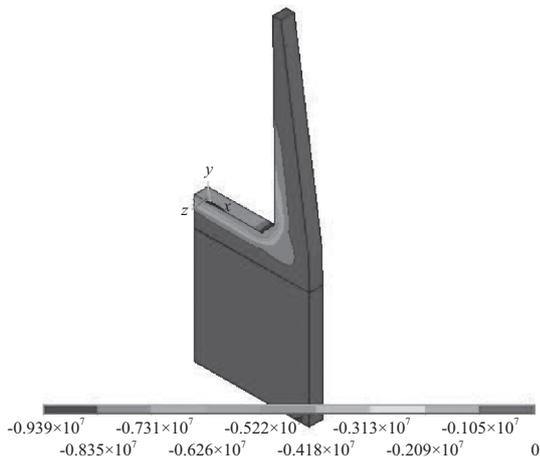


图4 普通钢筋混凝土结构第三主应力 (单位: MPa)

图5~7为预应力混凝土结构检修期应力、变形情况。

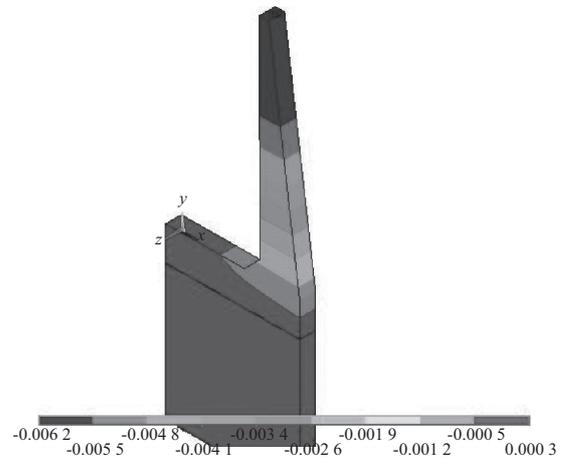


图5 预应力混凝土结构水平方向位移 (单位: m)

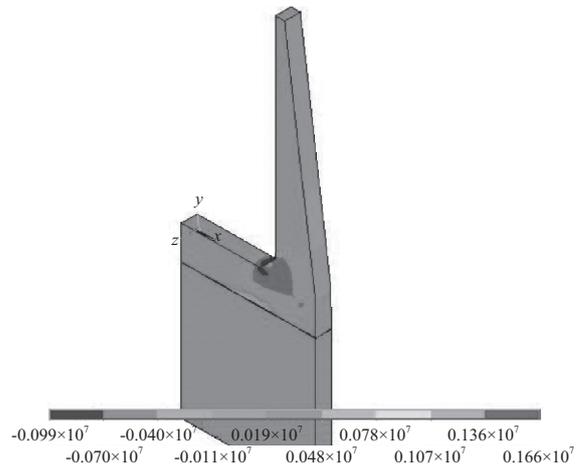


图6 预应力混凝土结构第一主应力 (单位: MPa)

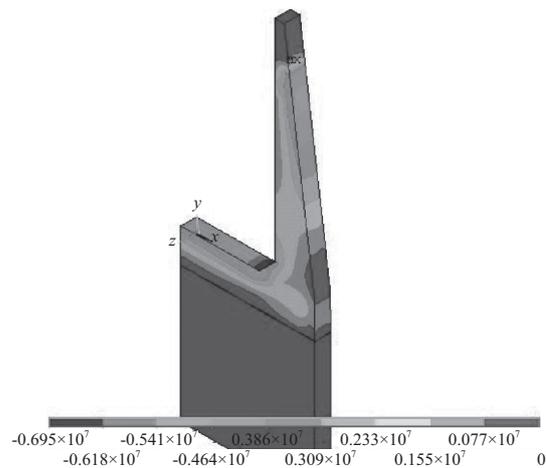


图7 预应力混凝土结构第三主应力 (单位: MPa)

通过图2~7可以发现, 闸室在采用普通钢筋混凝土结构时墙顶端位移为22.4 mm, 而在采用预应力混凝土结构后墙顶位移减小为6.27 mm, 在预应力作用下闸室墙顶端的位移明显减小。同时闸室墙顶

端位移不大，墙后土压力可以近似看成是静止土压力，这与本文的假定是符合的。当闸室采用普通钢筋混凝土结构时闸墙出现的最大拉应力为3.55 MPa，底板上的最大拉应力4.96 MPa，采用预应力混凝土闸室时闸墙不出现拉应力，处于0.1~0.4 MPa的压应力下，底板上的最大拉应力降为1.66 MPa，小于C40混凝土的抗拉强度设计值1.8 MPa，只需配置构造钢筋即可。由上可知闸室结构在预应力作用下收到了明显的效果，闸室结构在检修期是安全的。

- 2) 工况2: 施工期。
- 3) 工况3: 高水位运行期。
- 4) 工况4: 低水位运行期。计算结果见表1。

为方便描述闸室结构的应力情况，将各种工况下闸室结构的代表性区域的应力情况列表如下，代表性区域的示意图见图8。

表1 各种工况下闸墙顶部的位移

工况	闸墙顶端位移/mm
普通钢筋混凝土结构检修期	22.4
预应力混凝土结构检修期	6.2
普通钢筋混凝土结构施工期	20.9
预应力混凝土结构施工期	4.9
普通钢筋混凝土结构高水位运行	14.3
预应力混凝土结构高水位运行	1.8
普通钢筋混凝土结构低水位运行	21.9
预应力混凝土结构低水位运行	5.8

表2 闸室结构应力

时间	混凝土	MPa				
		A区域	B区域	C区域	D区域	E区域
检修期	普通钢筋混凝土	0.71	3.55	0.72	4.96	2.84
	预应力混凝土	-0.1	-0.40	-0.40	1.66	0.19
施工期	普通钢筋混凝土	0.68	3.26	0.70	4.53	2.63
	预应力混凝土	-0.12	-0.55	-0.56	1.28	-0.09
高水位运行	普通钢筋混凝土	0.34	2.41	0.40	2.82	1.58
	预应力混凝土	-1.28	0.20	-1.24	0.26	-0.53
低水位运行	普通钢筋混凝土	0.70	3.48	0.70	4.82	2.80
	预应力混凝土	-0.10	-0.50	-0.52	1.56	0.21

注：表格中应力为正表示受拉，应力为负表示受压。

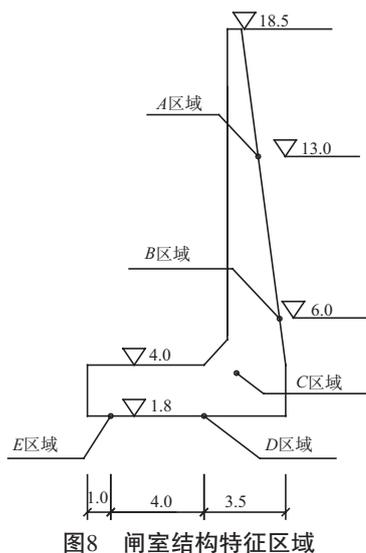


图8 闸室结构特征区域

### 3.2 对比分析

由本文的工程实例计算可知，在预应力作用下闸墙的位移非常小，基本符合墙后土体的土压力是静止土压力的假定，闸室结构处于较低的拉应力水平，有些区域甚至处于压应力状态。同

时，当采用普通钢筋混凝土闸室结构（图9）时为满足裂缝开展宽度的要求，在截面尺寸不变的情况下须增加大量的受力钢筋<sup>[7-8]</sup>，底板 I-I 截面钢筋面积为7 775.4 mm<sup>2</sup>，II-II 截面钢筋面积为8 846.2 mm<sup>2</sup>，III-III 截面钢筋面积为12 214.8 mm<sup>2</sup>，闸墙底部 II-II 截面钢筋面积为11 196.9 mm<sup>2</sup>，而使用预应力钢筋时的受力主筋面积为4 732.1 mm<sup>2</sup>，钢筋的用量有大幅度的减少。

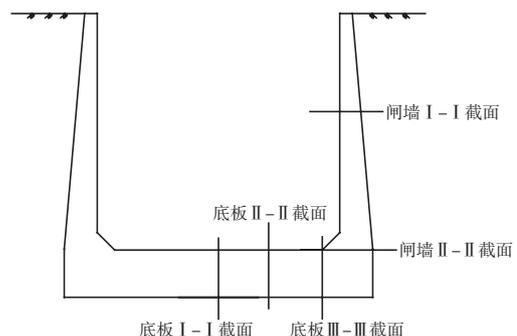


图9 普通钢筋混凝土闸室配筋截面

(下转第190页)