

坞式闸室预应力筋布置形式优化

林珈伊¹, 居尧²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 预应力坞式闸室预应力筋可以采用多种布置形式。为使闸室达到较优的受力状态, 结合一具体工程实例, 依据预应力钢筋的布置原则和等效荷载原理, 提出了两种坞式闸室预应力筋的合理布置形式。通过 ANSYS 有限元软件模拟两种布筋方案可知, 不同的布筋形式下闸室结构的受力是有差异的, 而合理的布置形式能有效减小闸室拉应力和变形。

关键词: 坞式闸室; 预应力钢筋; 线形布置; ANSYS 模型

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0144-04

Optimization of prestressed reinforcement alignment in depressed chamber structure

LIN Jia-yi¹, JU Yao²

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: There are many linear arrangements of prestressed reinforcement in depressed chamber structure. In order to reach a better state of stress, this paper puts forward two reasonable arrangements according to the layout and equivalent principles combining with an engineering project. By ANSYS simulation of two schemes, we know that the stress states are different under different arrangement forms, and reasonable forms can reduce tensile stress and deformation effectively of the lock chamber structure.

Keywords: depressed chamber; prestressed concrete; linear arrangement; ANSYS model

为满足承载能力的要求, 坞式闸室截面尺寸及钢筋用量都较大, 不仅结构不经济, 而且容易开裂。特别是底板结构, 与闸墙刚性连接, 将承受由闸墙传递的荷载作用, 受力很大。而采用预应力混凝土结构可以有效解决普通钢筋混凝土坞式闸室存在的上述问题。

目前, 预应力坞式闸室的设计还不成熟, 特别是对预应力钢筋在闸室中合理布置的研究。预应力筋的线形、位置、用量等将影响结构的受力、变形和裂缝开展, 其对闸室的作用效果随之发生改变。本文将针对闸室预应力筋的线形布置进行研究, 从而为预应力坞式闸室设计提供参考。

1 预应力筋线形布置原理

坞式闸室的受力特性、构造形状和截面尺寸决定了可选择的预应力筋线形和布置范围。预应力筋沿构件长度方向布置, 其对截面中性轴的偏心距和截面积成反比。在满足结构基本设计要求的前提下, 预应力筋在结构中的线形布置可有多种方案。设计时可参考已有资料, 并依据自身知识和经验拟定方案。尽管坞式闸室的构造和受力较一般梁板结构复杂, 预应力筋的线形布置具有一定的限制性和特殊性, 但仍应遵循以下基本原则^[1]: 1) 预应力筋的线形及布置位置应尽量与结构的弯矩图一致; 2) 弯矩较大的控制截面处预应

收稿日期: 2015-03-19

作者简介: 林珈伊 (1987—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事港口水工结构设计研究工作。

力筋的偏心距应尽可能大; 3) 尽可能减小曲线预应力筋的曲率, 尽量使预应力筋在锚固端与截面垂直, 从而降低预应力孔道摩擦损失和锚固损失; 4) 预应力筋应尽量连续布置, 以减少张拉次数和锚具数量, 方便施工; 5) 全面考虑其他因素, 如结构的几何形状、混凝土保护层的厚度、张拉锚固位置对施工的影响及构造要求等。

上述原则中最为重要的是遵循与结构弯矩图一致这一条, 因为根据等效荷载原理^[2], 这能使预加力有效地平衡外荷载。

1) 曲线预应力钢筋的等效荷载。

预应力混凝土构件中曲线布置的预应力钢筋一般为圆弧或二次抛物线, 如图 1 所示简支梁, 配置了单根抛物线形预应力钢筋, 跨中矢高(垂度)为 f , 在图示坐标系下, 预应力钢筋的线形方程为:

$$y_p(x) = \frac{4f}{L^2}x^2 - \frac{4f - e_B + e_A}{L}x + e_A \quad (1)$$

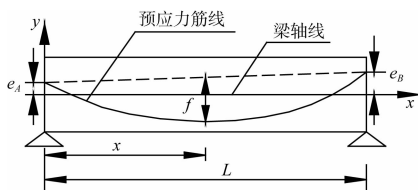


图 1 曲线形布置的预应力钢筋

由材料力学弯矩和分布荷载的关系, 可将预加力引起的弯矩等效为:

$$q_e(x) = -\frac{d^2 m_p}{dx^2} = -\frac{d^2}{dx^2}[N_p(x)y_p(x) + ax + b] = -\frac{d^2}{dx^2}[N_p(x)y_p(x)] \quad (2)$$

式中: M_p 为预加力引起的截面弯矩; N_p 为预加力; a 、 b 为待定常数。

当预加力 N_p 沿预应力筋不变时, 将式(1)代入式(2)即可得:

$$q_e(x) = -N_p \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{4f}{L^2}x^2 - \frac{4f - e_B + e_A}{L}x + e_A \right) = -\frac{8N_p f}{L^2} \quad (3)$$

由上式可见, 当预加力沿力筋长度不变时, 单根抛物线形预应力筋引起的等效荷载为常数, 可平衡均布外荷载。

2) 折线预应力钢筋的等效荷载。

如图 2 所示, 预应力钢筋为折线布置, 且预应力筋在折点 C 左右仍为直线。

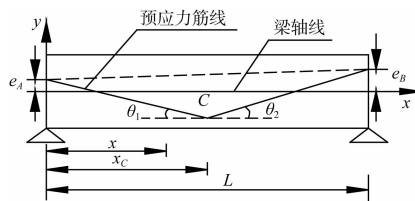


图 2 折线形布置的预应力钢筋

在折点 C 以左和以右段, 预加力引起的弯矩 M_L 和 M_R 分别为:

$$M_L = N_p \cos \theta_1 (e_A - x \tan \theta_1) + ax + b \quad (4)$$

$$M_R = N_p \cos \theta_2 [e_B - (L - x) \tan \theta_2] + ax + b \quad (5)$$

由材料力学理论可知, 折点 C 处的集中等效荷载(向下为正)与剪力的关系为:

$$P = [V_L]_{x=x_c} - [V_R]_{x=x_c} = \frac{dM_L}{dx} - \frac{dM_R}{dx} = -N_p (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad (6)$$

2 预应力坞式闸室布筋形式分析

不同船闸的受力情况不同, 闸室所受弯矩大小和分布也不相同, 从而影响预应力筋的布置。本文以某船闸工程为例, 拟定两种线形布置方案, 比较分析坞式闸室底板预应力筋的合理布置方式。

2.1 工程实例

某船闸的设计等级为 III 级, 设计最大船舶吨级为 1 000 t, 船闸闸室尺度为 230 m × 23 m × 4 m。闸室剖面见图 3。

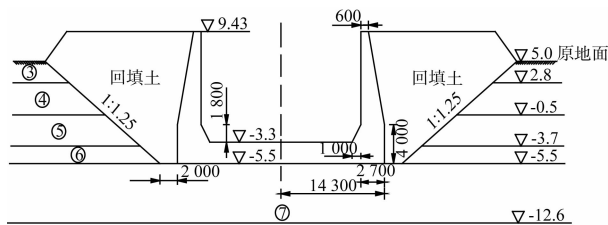


图 3 闸室结构剖面 (高程: m, 尺寸: mm)

闸室混凝土采用 C30 混凝土。预应力钢筋采用我国 GB 5224—1995 标准中抗拉强度标准值为 1 860 MPa 的低松弛 7 股钢绞线, 张拉控制应力 $\sigma_{con} = 1 395$ MPa, 单根钢绞线直径 $\phi = 15.2$ mm,

面积 $A = 140 \text{ mm}^2$ ，预应力筋的弹性模量 $E_p = 1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，密度 $\rho_p = 7.92 \text{ t/m}^3$ 。

回填土水上密度 $\rho_s = 1.91 \text{ t/m}^3$ ，水下密度 $\rho'_s = 1.0 \text{ t/m}^3$ ，内摩擦角 $\varphi = 26^\circ$ ，凝聚力 $C = 30 \text{ kPa}$ 。闸室结构以第⑦层砂质粉土为基础持力层，内摩擦角 $\varphi = 23^\circ$ ，凝聚力 $C = 13.4 \text{ kPa}$ ，地基容许承载力 $f = 230 \text{ kPa}$ 。船闸各工况下设计水位组合见表 1。闸室所受地面活荷载为 3 kPa 。

表 1 船闸设计水位组合				
设计工况	上游 水位/m	下游 水位/m	闸室墙内 水位/m	闸室墙后 水位/m
运行低水期	7.83	0.70	0.70	1.6
运行高水期	8.33	2.92	8.33	1.6
检修期	6.33	1.19	-3.30	2.0
完建期	-3.30	-3.30	-3.30	-3.3

由郭氏法计算得设计船闸各工况下底板各截面弯矩值，将其绘成底板弯矩包络图（图 4）。

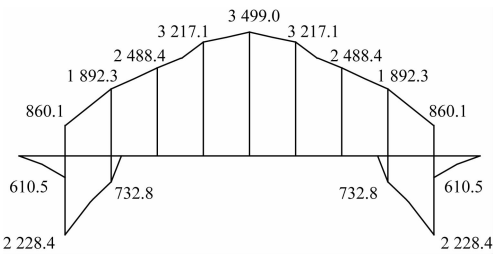
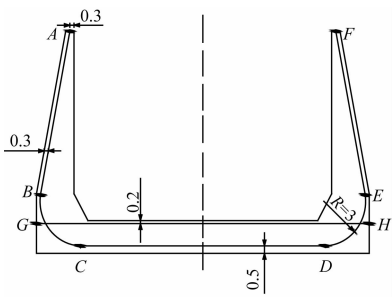


图 4 底板弯矩包络图（单位： $\text{kN} \cdot \text{m}$ ）

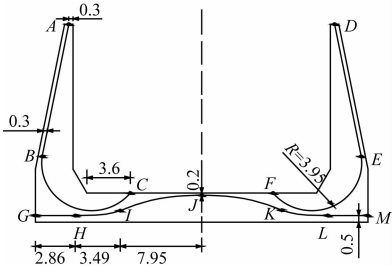
2.2 两种布筋方案的拟定

根据预应力筋线形布置原则、等效荷载原理并结合坞式闸室的具体构造，同时考虑施工的可行性，拟定以下两种预应力坞式闸室布筋方案^[3]，见图 5。

方案 1 底板顶部布置直线形预应力筋 GH ，以抵抗底板顶部的拉应力，底板底部的直线预应力筋通过半径为 3 m 的圆弧 BC 和 DE 向上延伸至闸墙顶， B 、 C 和 D 、 E 为直线和圆弧的切点，整条曲线呈“U”形，以抵抗底板底部和闸墙外侧的拉应力。方案 2 采用了底板预应力筋与闸墙分离的形式，底板预应力筋线形采用多段抛物线组合，能较好地符合底板弯矩图曲线分布，同时抵抗底板的正负弯矩，闸墙预应力筋采用两条对称的“J”形曲线， AB 、 FE 部分为直线，下段用半径为 3.95 m 的圆弧线过度至底板顶面的张拉锚固点 C 和 F ， B 、 E 点为切点。



a) 方案1



b) 方案2

图 5 闸室整体布筋方案（单位： m ）

与方案 1 中的“U”形预应力筋相比，方案 2 采用闸墙与底板力筋分离的形式可以有效减小力筋的长度和弯折度，使张拉力的传递效果更佳，减少应力损失，但张拉锚固点的数量随之增加，施工工序相较于方案 1 复杂，这些张拉锚固点分布的合理与否关系到施工时力筋张拉的可行性，如若 AB 、 DE 向下直线延伸， C 、 F 点位于底板底面与地基土接触区域，张拉和锚固较难实现。此外，方案 2 曲线部分的长度要大于方案 1，由于孔道弯曲引起的应力损失对其影响较大，但方案 2 圆弧段的曲率半径大于方案 1，故该段预应力筋对孔道内壁的挤压力也相对较小。

2.3 两种布筋方案的 ANSYS 有限元分析与比较

坞式闸室具有结构和荷载对称性，可建立一半的闸室整体模型。考虑回填土对闸墙的直接作用，取回填土宽度为闸室宽的一半，地基土取闸底以下 30 m ，闸室纵向取 1 m 。闸室对称面施加对称约束，地基土底面施加全约束，侧边界及沿闸室纵向施加水平约束。

采用实体切分法形成力筋线^[4]，根据名义拉应力法^[5]初估，单位长度分别配置方案 1 直线形预应力筋和方案 2 底板曲线预应力筋截面积 $1\,260 \text{ mm}^2/\text{m}$ ，沿闸室纵向 3 根/ m ；分别配置方案 1

“U”形预应力筋和方案 2 “J”形预应力筋截面积 $280\text{ mm}^2/\text{m}$, 沿闸室纵向 2 根/m。

闸室混凝土采用 SOLID65 单元模拟, 预应力筋采用 link8 杆单元模拟, 两者都使用线弹性本构关系。土体采用 SOLID45 单元模拟, 使用 Drucker-Prager 理想弹塑性模型。地基土与闸室底板间建立接触单元, 选择闸室受力最大的检修工况为例进行计算分析。

经过 ANSYS 求解后, 可得闸室两种布筋方案第一主应力云图 (图 6、7)。

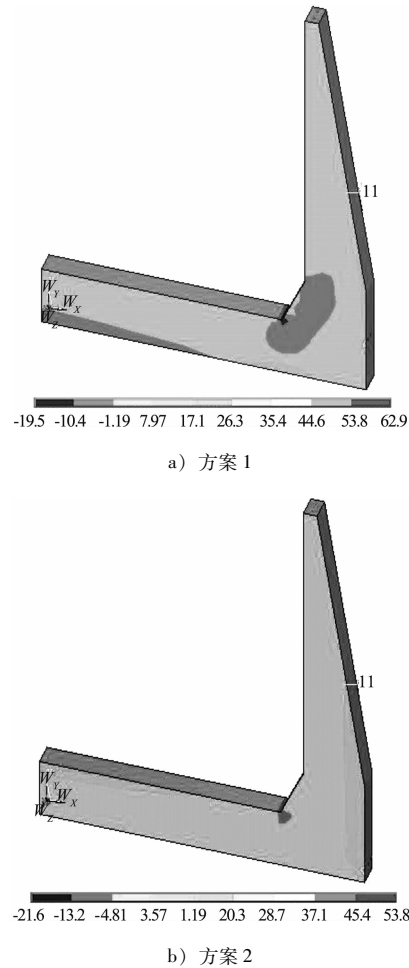


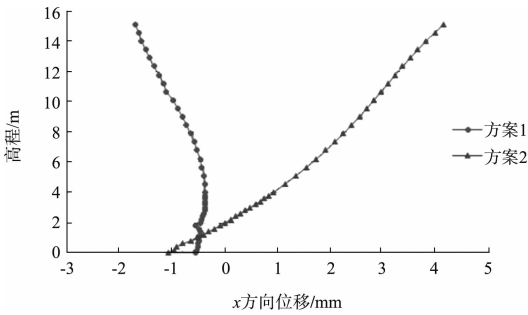
图 6 闸室主应力云图 (单位: MPa)

从两个方案应力云图可见, 在预应力作用下, 闸室的大部分区域都处于受压状态。力筋张拉点附近的较大应力是由于应力集中造成的, 在施工中可避免。除了这部分区域外, 闸室受拉区的拉应力都较小, 方案 1 最大值为 1.87 MPa , 方案 2 最大值为 1.81 MPa , 均小于设计要求, 受力性能良好, 可以满足裂缝宽度要求。

方案 1 拉应力较大区域位于闸室底板中间部分顶面、底板近两端底面部分区域、闸墙底部临土面侧区域。方案 2 除了底板近两端底面区域仍为受压区外, 其余拉应力较大区域分布情况与方案 1 相似, 但受拉区范围大于方案 1。方案 2 底板各截面的顶面应力都略大于方案 1, 因为方案 1 底板顶部预应力筋的偏心距维持不变, 而方案 2 控制底板顶部拉应力的预应力筋的偏心距从底板中心向两边逐渐减小, 在截面积不变的情况下预应力对底板顶部纤维的作用减弱。中心截面顶部预应力筋偏心距和截面面积虽然相同, 但由于预应力损失的不同, 方案 2 该点预应力筋的有效应力小于方案 1。

两方案除了预应力筋张拉点附近由于应力集中造成的最大压应力外, 较大压应力区都主要分布在闸墙与底板连接的角点部分, 这是由于“U”形和“J”形预应力筋的圆弧段对内侧混凝土的挤压以及回填土的共同作用造成的, 并且方案 1 该区域压应力值比方案 2 大, 因为方案 1 “U”形预应力筋圆弧段的曲率半径小于方案 2 “J”形筋的圆弧段, 对内侧混凝土的挤压力也相对较大。

两种布筋方案闸墙 x 方向位移值见图 7。



注: 负值表示向闸室内侧位移, 正值表示反方向位移。

图 7 两种布筋方案闸墙 x 方向位移

从图 7 可见, 两种不同的布筋方案使闸墙顶端发生了相反方向的位移, 方案 1 中对闸墙有作用的“U”形预应力筋使闸墙发生向闸室临水面的位移, 而方案 2 中对闸墙作用的“J”形预应力筋使闸墙发生向回填土方向的位移。从理论上分析, 两种闸墙中的预应力筋都布置在偏闸墙外侧, 预应力形成的反拱变形使闸墙顶端发生向回填土

(下转第 157 页)