



预应力方法在预防横拉门船闸门库裂缝中的应用

苏超¹, 刘百涛¹, 苏阳²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 山东省水利勘测设计院, 山东济南 250013)

摘要: 针对横拉门船闸闸首门库极易在施工期产生裂缝的问题, 尝试对门库的危险部位施加预应力技术。通过 ANSYS 有限元软件并结合 Fortran 语言, 对横拉门船闸整个浇筑过程进行仿真分析得出门库部位应力分布情况, 运用等效荷载法对门库部位施加预应力, 并对施加预应力前后的闸首门库的温度应力进行对比分析。结果表明施加预应力后门库部位最大拉应力从 1.98 MPa 降低到了 1.80 MPa, 低于混凝土应力控制标准, 验证了预应力方法在门库裂缝防治中的可行性。

关键词: 横拉门闸首门库; 施工期裂缝; 预应力; 仿真分析

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0099-05

Prestress method for crack prevention of lock head gate with transverse pull door

SU Chao¹, LIU Bai-tao¹, SU Yang²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Electricity, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Ji'nan 250013, China)

Abstract: To counter the problem of cracks which are easily occurred in the horizontal sliding door lock head during construction, we try to exert prestress to the gate chamber. Combining Fortran language and ANSYS finite element analysis software, we analyze the process of pouring and get the stress distribution at the lock chamber, and carry out comparative analysis of the temperature stress before and after exertion of the stress. The result reveals that after exerting the prestress, the maximum tensile stress at the lock chamber decreases from 1.98 MPa to 1.80 MPa, which is lower than the control standard of concrete stress. It verifies that the method of prestress is feasible for preventing and curing the crack of the gate chamber.

Keywords: gate chamber of horizontal sliding door lock head; construction crack; prestress; simulation analysis

在船闸的众多形式中, 横拉门船闸应用较为广泛, 由于横拉门闸首的门库结构较大、体形较长且门库侧墙厚度较小, 故在分层浇筑时极易产生温度裂缝。研究表明^[1], 预应力混凝土可提高构件的抗裂度和强度, 并延缓混凝土构件的开裂。预应力技术主要应用在高层建筑、多层大跨结构、承受特重荷载结构以及桥梁结构中, 并取得了一定的经济效益^[2-3], 但预应力技术在水工建筑物尤其是在船闸的应用中较少, 深旭鸿等^[4]将预应力技术应用在双绞式闸室的结构加固中, 使底板拉应力减小 24.5%。吴信等^[5]通过预应力锚索和高

桩承台的联合作用, 有效地改善结构的变形。邢述炳^[6]对人字门船闸的背拉杆进行了预应力设计, 减小了人字门的下垂变形, 提高了闸门的刚度。本文对横拉门船闸的门库进行仿真应力计算, 研究预应力的设计方案, 探讨施加预应力对门库裂缝的影响。

1 计算理论

1.1 不稳定混凝土温度场基本理论

既在空间上变化, 又随时间变化的温度场即为不稳定温度场。不稳定温度场的求解主要通过

收稿日期: 2015-06-12

作者简介: 苏超 (1960—), 男, 博士, 教授, 从事水工结构工程、水运工程数值计算方法与试验研究。

热传导方程进行,同时需要初始条件和边界条件^[7]。热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中: T 为温度; a 为导温系数; θ 为混凝土绝热温升; τ 为龄期。

初始条件是物体内部温度在初始瞬时的分布规律,边界条件是混凝土表面与周围介质之间温度相互作用的规律,常用的为第三类边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a) \quad (2)$$

式中: T 为混凝土表面温度; T_a 为气温; β 为散热系数; λ 为常数。

1.2 混凝土应力场基本理论

温度的改变会使混凝土发生线应变,当线应变受到约束不能自由发生时便产生温度应力^[8]。温度应力的有限元法是将结构划分成有限个单元、把时间划分为各个时段,用节点位移表示单元的应变。基本方程为:

$$\Delta \sigma_n = \bar{D}_n \times B \times \Delta \delta_n - \eta_n - \Delta \epsilon_n^T - \Delta \epsilon_n^0 \quad (3)$$

$$K \times \Delta \delta_n = \Delta P_n + \Delta P_n^c + \Delta P_n^T + \Delta P_n^0 \quad (4)$$

式中: B 为几何矩阵; $\Delta \delta_n$ 为节点位移增量; $\Delta \epsilon_n^T$ 为温度应变增量; $\Delta \epsilon_n^0$ 为自生体积变形应变增量; K 为结构的刚度矩阵; ΔP_n 为外荷载增量; ΔP_n^c 为徐变变形产生的当量荷载增量; ΔP_n^T 为温度荷载增量; ΔP_n^0 为自生体积变形荷载增量。由式(4)求得位移增量 $\Delta \delta_n$ 后,代入式(3)可求出应力增量 $\Delta \sigma_n$,各个时段的应力增量之和即为总温度应力^[9]。

1.3 ANSYS 中预应力的模拟方法

在 ANSYS 中预应力混凝土分析根据作用一般

分为两类:分离式和整体式^[10]。分离式就是将预应力钢筋看作混凝土的脱离体,用荷载的形式对预应力钢筋进行模拟,典型的如等效荷载法;整体式是将钢筋和混凝土划分为不同的单元一起进行考虑,用 LINK 单元模拟预应力钢筋在混凝土中的位置,可采用初始应变法和降温法。分离式方法建模简单方便,不用考虑预应力钢筋的位置,但不利于模拟预应力钢筋对混凝土各处的作用,无法对张拉过程进行模拟;整体式方法能很好地模拟出预应力钢筋的具体位置以及对结构的影响,可以对不同预应力钢筋的张拉进行模拟,对应力损失也可以进行较好的模拟,但是建模复杂、工作量大,尤其在钢筋较多并且曲线布置时^[11]。

本次预应力设计采用等效荷载法,等效荷载法通过自平衡原理,把结构中的预应力钢筋和锚具脱离出来,用一组等效荷载作为施加在结构上的外荷载代替预应力的作用^[12-13]。在 ANSYS 计算中,通常要根据不同单元的划分情况,把等效的外荷载转化为相应的节点荷载,然后求出节点位移以及单元应力^[14]。

2 工程应用

2.1 工程概况

某横拉门船闸建设规模为 23 m × 230 m × 4 m (口门宽 × 闸室长 × 槛上水深),门库高度为 17.46 m、长 21.28 m,门库底板厚度为 1.5 m、侧墙厚度为 1.3 ~ 1.5 m。门库采用 2 次浇筑,首次浇筑下半段高度为 9.16 m。门库和地基的主要材料参数见表 1。

表 1 门库和地基的主要材料参数

部位	弹性模量/GPa	泊松比	比热/(kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	导热系数/(kJ·m ⁻¹ ·d ⁻¹ ·°C ⁻¹)	绝热温升/°C
门库	34.25(1 - e ^{-0.28τ^{0.22}})	0.167	0.960	220.00	44.8(1 - e ^{-0.701τ^{1.00}})
地基	41 × 10 ⁻³	0.300	1.005	100.63	

2.2 应力控制标准

门库采用的是 C30 混凝土,其立方体标准抗压强度 $R_c = 30$ MPa,根据中国水利水电科学院的试验成果以及大量试验资料,朱伯芳给出了混凝土

土轴向抗拉强度的推荐公式^[15]:

$$R_t = 0.332R_c^{0.60} \quad (5)$$

由于公式(5)与试验成果符合得更好,故采用公式(5)进行计算,可知轴心抗拉强度 R_t 为 2.56 MPa,为

确保工程的安全性, 本次应力安全系数取 1.4, 即最大主拉应力控制在 1.83 MPa 以下。

2.3 模型的建立

选取整个下闸首作为计算模型, 坐标原点为零高程处, 即底板顶向上 4.17 m 处, X 轴取横河向, Y 轴取顺河向, Z 轴竖直向上; 闸首网格模型单元总数为 58 619、节点总数为 74 375。整体模型单元总数为 164 190、节点总数为 185 411。闸首网格模型见图 1, 整体网格模型见图 2, 现场的浇筑方案见表 2。

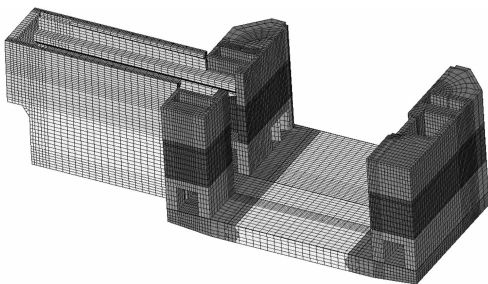


图 1 闸首结构有限元网格模型

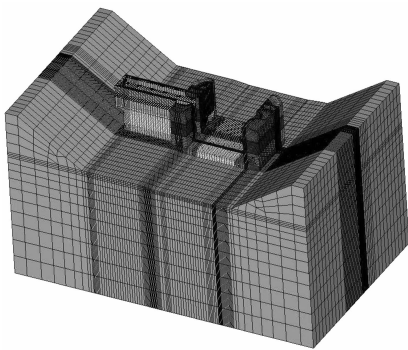


图 2 整体结构有限元网格模型

表 2 闸首结构浇筑时间

浇筑部位	时间
闸首底板	2015 年 11 月 1 日
边墩廊道	2015 年 12 月 1 日
边墩第 1 层空箱	2016 年 1 月 1 日
闸门库下半部分	2016 年 1 月 10 日
边墩第 2 层空箱	2016 年 2 月 1 日
闸门库上半部分	2016 年 2 月 10 日

2.4 门库部位预应力设计

2.4.1 门库预应力钢绞线施加位置设计

结合工程经验以及对门库的应力场计算成果进行分析可知, 横拉门门库的侧墙在施工期容易

产生竖向裂缝。横拉门门库上半段浇筑后第 3 d 在 X = -28.26 m 截面的最大拉主应力云图见图 3。

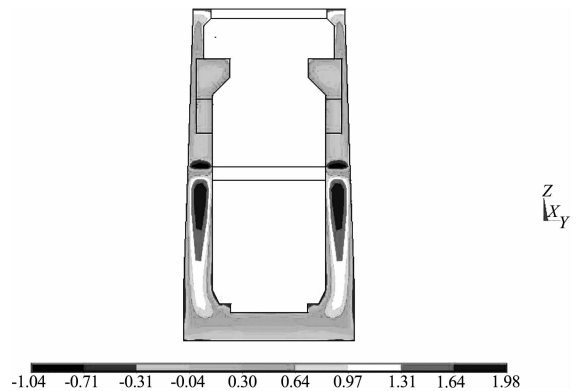


图 3 门库上半部分浇筑后第 3 d 在 X = -28.26 m 切面的最大主应力云图 (单位: MPa)

门库上半段浇筑后的前几天, 由于水化热的作用使新浇筑的混凝土快速膨胀, 对老混凝土会产生较大的拉伸作用, 由图 3 可看出, 在新老混凝土接触面向下 0.7 ~ 2.2 m 处产生了较大的拉应力, 最大值为 1.98 MPa, 在新老混凝土接触面向下 0.8 m 处, 若不采取措施将会产生竖向裂缝。故对门库两个侧墙拉应力较大部位施加 4 组预应力钢绞线, 由于两个侧墙是对称结构, 故布置方式相同。布置方案为: 第 1 组预应力钢绞线布置在新老接触面向下 0.7 m 处, 第 2 组预应力钢绞线布置在新老接触面向下 1.2 m 处, 第 3 组预应力钢绞线布置在新老接触面向下 1.7 m 处, 第 4 组预应力钢绞线布置在新老接触面向下 2.2 m 处, 这 4 组预应力钢绞线均位于侧墙厚度方向的中心位置, 长度方向均为从门库的右端延伸到侧墙的左端。布置方案见图 4。

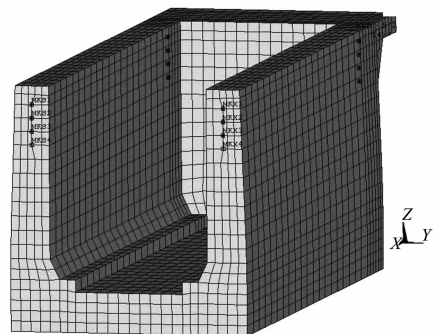


图 4 闸门库预应力绞线钢布置方案

2.4.2 门库预应力钢绞线施加时间及施加量值设计

门库新老混凝土接触面下部会产生较大的拉应力，取此区域侧墙内部一节点（ $X = 16.87\text{ m}$ ， $Y = -4.07\text{ m}$ ， $Z = -3.37\text{ m}$ ）为代表点，作出该点最大主应力随龄期的变化曲线（图5）。

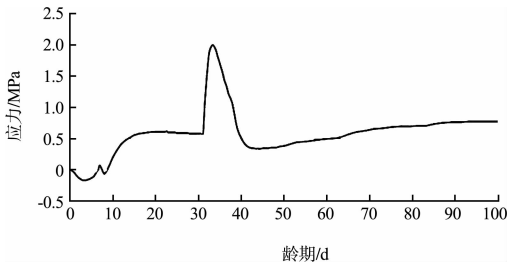


图5 门库侧墙代表点最大主应力随龄期变化曲线

由图5曲线可看出，在门库上半段浇筑之前，最大主拉应力一直较小，上半段浇筑之后，内部拉应力急剧上升，拉应力值从0.6 MPa迅速升高到1.98 MPa，然后开始下降直至达到门库上半段浇筑前的水平。由于新混凝土早期强度较低，不宜过早施加预应力。门库下半段侧墙内部拉应力在浇筑后第10 d左右上升较快，故本次预应力钢绞线在门库下半段浇筑后的第10 d施加，预应力一次施加到设定值。

预应力束采用 $\phi s15.2$ 高强钢绞线，公称面积为 138.7 mm^2 ，其标准强度 $f_{pk} = 1\ 860\text{ MPa}$ ，张拉控制应力 $\sigma_{con} = 0.65 f_{pk}$ ，由公式 $f = \sigma_{con} A$ 可算出每根预应力钢绞线提供的拉力值为 167.7 kN 。

本次设计每组采用4根预应力钢绞线，共提供 $2\ 683\text{ kN}$ 的压力。对模型只施加重力和钢绞线预应力进行应力分析，以判断绞线对结构的影响效果。图6给出了门库侧墙 $X = 28.26\text{ m}$ 截面处施加预应力后的横河向应力云图，图7给出了中间组钢绞线横河向应力随 X 坐标的变化曲线。

由图6和图7可看出，预应力锚具周围产生较大的压应力，距离锚具越远，压应力逐渐减小，在最中间的位置提供的压应力最小为 0.20 MPa 左右，此处自身所产生的拉应力为最大。整体来看，此预应力方案所提供的预压应力可以让最中心处的拉应力降低到安全水平。

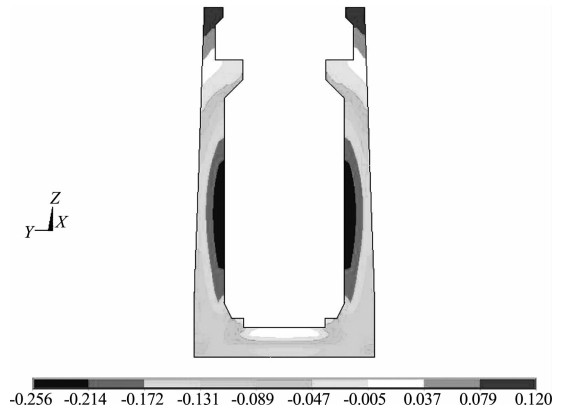


图6 门库侧墙 $X = 28.26\text{ m}$ 切面的横河向应力云图
(单位: MPa)

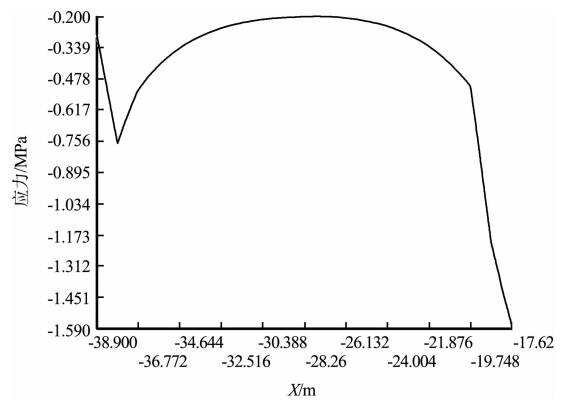


图7 中间组钢绞线横河向应力随 X 坐标的变化曲线

2.5 门库预应力施加效果分析

在门库侧墙部位施加预应力之后，重新对整个闸首进行应力场的计算，提取出门库下半段代表点在施加预应力前后，其横河向应力随龄期的变化曲线进行对比（图8）。

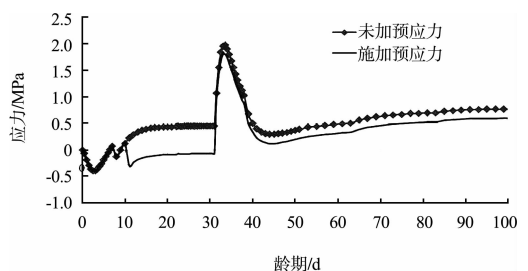


图8 横河向应力随龄期的变化曲线

从图8可以看出，在施加预应力之后，该点的横河向应力当天即变为负值，并且在相当长一段时间都维持在受压状态，在门库上半段浇筑后应力突增到 1.80 MPa ，但仍小于控制应力 1.83 MPa ，

随后下降并维持在较低水平。通过两曲线的对比发现,预应力的施加并不改变应力发展规律,只是在一定程度上降低拉应力值,从而防止裂缝的产生。

选取门库下半段在施加预应力前后的典型云图(图9),较大的横河向应力主要集中在中段区域,两端由于预应力的施加而呈现出压应力,可看出预应力的施加降低了门库侧墙内部最大拉应力值,并且使拉应力区域明显缩小,增强了结构的整体安全性。

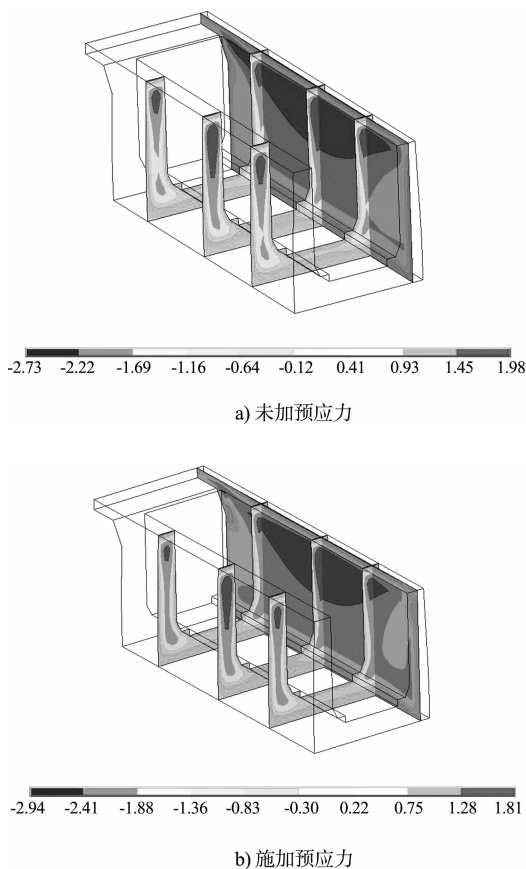


图9 门库下半段浇筑后第33 d横河向应力云图
(单位:MPa)

3 结语

在横拉门船闸门库侧墙部位施加预应力之后,门库的整体拉应力水平得到降低、受拉区域明显缩小,并且没有出现过大的负面影响,从而降低了横

拉门船闸闸首门库在施工期产生裂缝的可能性。预应力技术在类似工程中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 吕志涛. 现代预应力结构体系与设计方法[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2010.
- [2] 郑岩. 高层预应力混凝土结构拆除及加固改造的应用技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [3] 陈峰. 预应力桥梁结构耐久性与剩余寿命研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [4] 沈旭鸿, 王仙美, 苏超. 体外预应力技术在闸室结构加固中的应用研究[J]. 中国水运: 下半月, 2014(3): 128-129.
- [5] 吴信, 王大伟. 高桩承台加预应力锚索结构在长洲三线四线船闸中的应用[J]. 水运工程, 2014(9): 126-130.
- [6] 邢述炳. 浮箱结构船闸人字闸门预应力背拉杆设计[J]. 水运工程, 2013(8): 147-151.
- [7] 苏利勋, 董羽蕙. 混凝土基础底板温度应力和温度裂缝分析[J]. 科学技术与工程, 2008(10): 2 728-2 729.
- [8] 程世鹏. 混凝土结构温度场和温度应力的有限元分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [9] 苏超, 吴坤坤, 任威威. 金属冷却水管对船闸闸首底板冷却效果分析[J]. 水运工程, 2014(6): 112-113.
- [10] 赵通. 预应力锚固系统的有限元分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [11] 付永强, 张小水, 胡成. 预应力混凝土结构施加预应力的 Ansys 模拟[J]. 工程与建设, 2008(6): 784-785.
- [12] 王中强, 余志武. 高温下无黏结预应力混凝土受弯构件的非线性有限元分析[J]. 土木工程学报, 2011(2): 42-49.
- [13] 朱彤, 殷广庆. 基于响应面的预应力混凝土桥动力有限元模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013(6): 644-647.
- [14] 赵勇, 黄鼎业, 李云贵, 等. 预应力混凝土板的等效荷载计算[J]. 建筑科学, 2002(4): 8-11.
- [15] 朱伯芳. 混凝土极限拉伸变形与混凝土龄期及抗拉、抗压强度的关系[J]. 土木工程学报, 1996(5): 72-76

(本文编辑 武亚庆)