



# 预应力土层锚杆加固前倾闸室墙优化设计

沈旭鸿<sup>1</sup>, 王仙美<sup>1</sup>, 苏 超<sup>2</sup>

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**为解决重力式闸室墙前倾问题,以某船闸工程为例,对多个加固方案进行技术经济比较,并采用三维有限元法,对推荐方案的设计参数影响规律进行研究。结果表明:预应力土层锚杆加固方案造价经济,对周边环境影响小,其锚索张拉力对重力式闸室结构影响的敏感性较小,张拉高程在约 2/3 墙高处墙身应力较小,当锚索间距较大时,锚索间土体会出现一定的拉应力。合理设计预应力土层锚杆参数,可有效控制墙身及土体应力,取得良好的加固效果。该方法不仅可应用于船闸大修工程,也可用于水闸、箱涵等其他类似水工结构的加固改造提供参考。

**关键词:** 预应力土层锚杆; 加固; 闸室墙; 优化设计

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0148-05

## Optimal design of forward leaning lock chamber strengthened by pre-stressed soil anchor

SHEN Xu-hong<sup>1</sup>, WANG Xian-mei<sup>1</sup>, SU Chao<sup>2</sup>

(1.China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2.College of Water Conservancy and Hydropower Electricity, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To solve the problem of tilting of gravity lock chamber wall, we carry out the techno-economic comparison among several reinforcement schemes taking a lock project as an example, and adopt the finite element method to study the influence law of design parameters of the recommended schemes. The result shows that the pre-stressed soil anchor reinforcement scheme is economical in cost and has little influence on the surrounding environment, the tensile force of the anchor cable is less sensitive to the influence of the gravity lock chamber structure, and the wall stress is less at about 2/3 height of the wall. When the distance between the anchor cables is large, the soil mass between the anchor cables will appear certain tensile stress. Rational design of pre-stressed soil anchor parameters can effectively control wall and soil stress, and obtain good reinforcement effect. This method can be used not only in ship lock overhaul project but also in the reinforcement and reconstruction of sluice, box culvert and other similar hydraulic structures.

**Keywords:** pre-stressed soil anchor; strengthening; lock chamber; optimal design

船闸重力式闸室墙长期使用后易出现排水管道堵塞问题。连续降雨时,在水、土压力作用下易发生较大的前倾变形。传统的加固方法主要有加大墙身断面及替换墙身材料等,但需施工开挖,对周边影响较大,存在局限性。

采用体外预应力土层锚杆加固墙身可以较好

地解决以上问题,同时具有施工机械及设备作业空间小、噪音和振动较小等优点<sup>[1]</sup>,可通过预应力锚杆控制建筑物变形。目前,预应力土层锚杆技术在深基坑支护<sup>[2]</sup>、边坡稳定<sup>[3]</sup>、结构抗浮<sup>[4]</sup>、护岸工程<sup>[5]</sup>、钢板桩闸室<sup>[6]</sup>等方面应用广泛,但在船闸重力式闸室结构的加固和相应预应力参数

收稿日期: 2021-01-24

作者简介: 沈旭鸿(1983—),男,高级工程师,从事水运工程设计咨询及科研工作。

选取方面的研究较少。

笔者分析某前倾重力式闸室墙预应力土层锚杆加固方案的技术经济性, 并通过三维有限元法, 结合最优设计方案分析过程, 总结出预应力土层锚杆张拉力、高程和间距对重力式闸室结构与土体的影响规律。

### 1 工程概况

某船闸位于江苏省镇江市, 建于 20 世纪 80 年代初, 闸室有效尺度为 20 m×230 m×4 m(净宽×闸室长×门槛水深)。闸室结构为分离式透水地板结构, 闸室墙采用 75#浆砌块石空箱式结构。经过几十年使用后, 发现靠近下闸首西侧闸室墙墙顶出现位移。

为解决墙身前倾问题, 确保船闸安全使用, 进行了 3 个方案比选。方案 1: 加大原上部浆砌块石墙身宽度; 方案 2: 拆除上部墙身, 采用 C20 素混凝土替换; 方案 3: 在浆砌块石墙体前增设预应力土层锚杆, 使土层锚杆与墙体共同承受外部荷载。方案 3 采用体外预应力方案可以有效缩短工期、工程费用低、施工期无需墙后开挖、对船闸管理区影响小等优点。因此, 拟作为项目推荐方案。

### 2 预应力布置方案优化设计

#### 2.1 有限元模型

采用三维有限法进行建模分析, 分别考虑土层锚杆预应力施加、墙前/后水压力作用等荷载<sup>[7]</sup>, 取 25 m 结构段进行计算, 高度方向从地面取至-40 m

高程, 横河向从闸室中心线取 50 m 范围, 有限元计算网格见图 1。

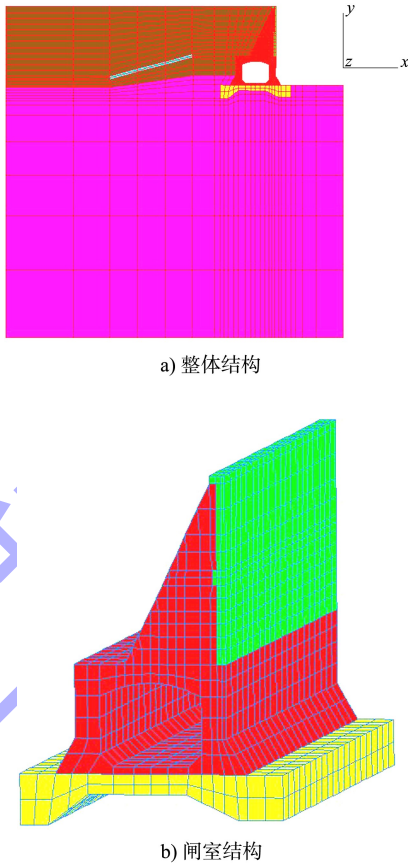


图 1 有限元计算网格

#### 2.2 主要参数

结合地质勘察报告, 墙后第 1 层土层为地面至-3.0 m(吴淞高程), 是船闸建设期墙后填土; 第 2 层为棕黄色粉质黏土, -3.0 m 以下(未揭穿), 土质均匀, 呈硬塑状态。土层物理力学性质指标见表 1。考虑水位变化时内聚力的影响, 计算内聚力按 2/3 折减。

表 1 各土层物理力学性质指标

土层名称	含水率/%	天然密度		空隙比	饱和度/%	塑性指数/%	液性指数	抗剪强度		平均贯入击数/击	地基承载力标准值/kPa
		湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )					黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)		
素填土(粉质黏土)	25.8	1.98	1.58	0.726	95	13.5	0.50	16	16	8	80
粉质黏土	27.1	1.98	1.56	0.750	99	12.5	0.62	16	16	18	160

通过反演分析方法获取土体变形模量<sup>[8]</sup>。根据闸室墙实测最大变形时(10 cm)的实际情况, 计

算得出上层土体的变形模量为 2.3 MPa, 下层土体的变形模量为 6.8 MPa。

加固计算主要考虑的最不利工况(暴雨时)水位组合如下:闸室内水位 3.0 m,闸室墙后水位 9.1 m。

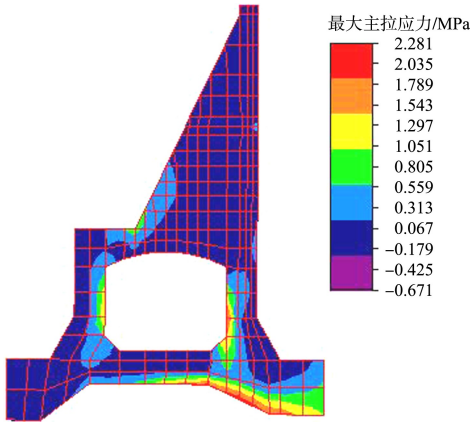
2.3 锚索张拉力的影响

在闸室墙结构 2/3 处,分别施加与水平夹角为 15°的 800、900、1 000、1 100、1 200、1 500 kN 张拉力。根据表 2 给出的最不利工况下的计算结果可知:闸室墙顶部的水平相对位移随着张拉力增加而减小,但变幅不大,在 4 mm 以内;基底的 最大竖向反力随着张拉力增加而减小,变幅在 1.9 kPa 以内;混凝土衬砌最大拉应力随着张拉力增加而减小,变幅在 0.37 MPa 以内;墙体浆砌块石最大拉应力随着张拉力增加而减小,变幅在 0.03 MPa 以内。

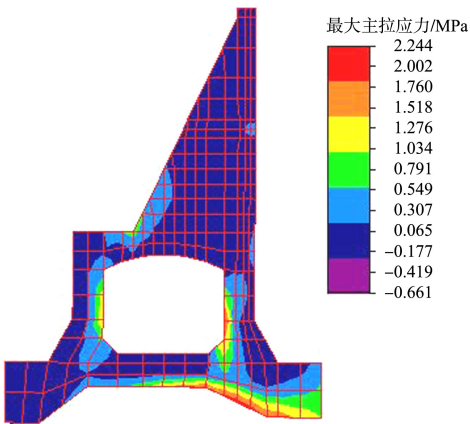
表 2 不同张拉力作用下闸室墙位移和应力值

锚索张 拉力/kN	顶部水平 位移/mm	基底最大 反力/kPa	混凝土衬砌 拉应力/MPa	浆砌块石 拉应力/MPa
800	52.88	221.0	2.281	2.184
900	52.31	221.0	2.275	2.179
1 000	51.74	220.7	2.271	2.175
1 100	51.18	220.4	2.265	2.171
1 200	50.61	220.1	2.260	2.166
1 500	48.91	219.1	2.244	2.154

图 2 分别给出在 800 kN 和 1 500 kN 张拉力作用下主拉应力分布情况。从图 2 可知,闸室墙内主拉应力主要发生在基底的下表面和墙身空腔内表面,随着张拉力增加,主拉应力减小。



a) 800 kN张拉力



b) 1 500 kN张拉力

图 2 不同张拉力作用下闸室主拉应力分布

2.4 锚索张拉高程的影响

分别在 4.3、4.8、5.1、5.4、6.1、6.8 m 高程施加 1 000 kN 张拉力。从表 3 可知:闸室墙顶部的水平相对位移随着张拉作用高程增加而减小,但变幅不大,在 4.2 mm 以内;基底的 最大垂直向反力随着张拉高程增加而减小,变幅在 3.9 kPa 以内;墙体迎水面混凝土最大拉应力随着张拉高程增加而减小,变幅很小;墙体浆砌块石最大拉应力随张拉高程增加而变化,在 5.1 m 高程拉应力最小,为 61 kPa。

表 3 不同张拉高程闸室墙关键位移和应力值

锚索张 拉高 程/m	闸室墙顶 部的水平 位移/mm	基底的 最大反力/ kPa	闸室迎水面 混凝土最大 拉应力/kPa	闸室迎水面 浆砌块石最 大拉应力/kPa
4.3	37.62	180.1	16	76
4.8	35.58	178.3	14	66
5.1	35.24	178.0	13	61
5.4	34.93	177.7	13	67
6.1	34.16	177.0	12	80
6.8	33.39	176.2	11	119

图 3 分别为 4.3 m 和 5.1 m 高程施加 1 000 kN 张拉力时闸室墙主拉应力分布云图。从图 3 可知:闸室墙内大部分区域以受压为主,主拉应力主要发生在闸室墙基底的 下表面和墙身空腔内表面,随着张拉高程增加,主拉应力减小。

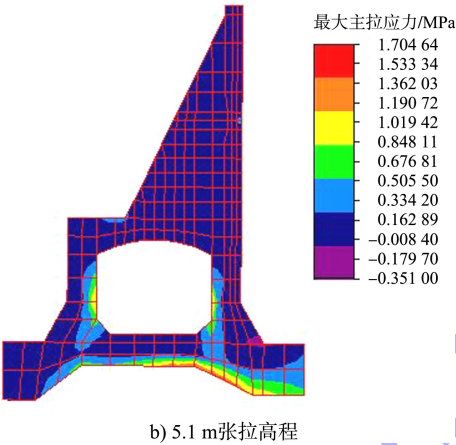
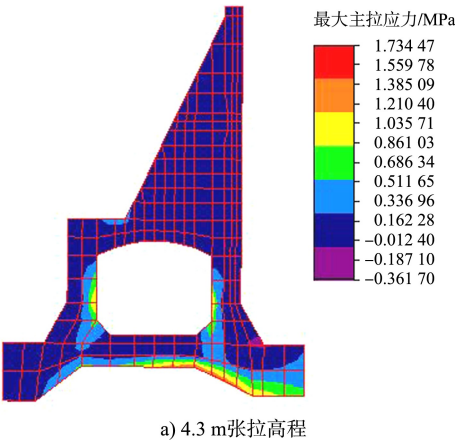


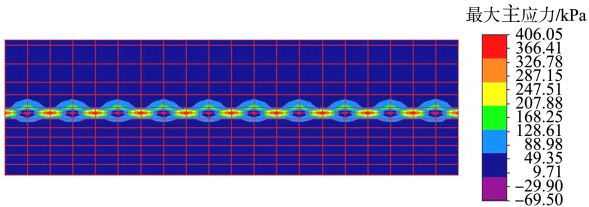
图 3 不同张拉高程时闸室应力分布

2.5 锚索间距的影响

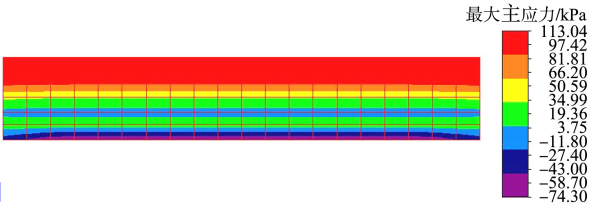
选取 25 m 结构段, 在 5.1 m 高程总共施加 1 000 kN 张拉力, 锚索间距分别为 1.25、2.50、5.00 m。从表 4 可知: 迎水面混凝土拉应力均小于混凝土抗拉强度, 锚索间距越大迎水面混凝土应力越大。图 4 为 2.5 m 锚索间距时迎水面混凝土、迎水面浆砌石、锚固段土体应力分布。从图 4 可知: 锚索间距对浆砌石应力分布基本没有影响; 在锚固体所在平面土体内全部为压应力, 在两锚索之间平面土体有小数值的拉应力, 随着锚固力的集中而增加, 最大为 6.9 kPa。为使土层锚杆中具有足够的强度储备, 建议采用 2.50 m 间距进行设计。

表 4 不同锚索间距墙身及土体应力值

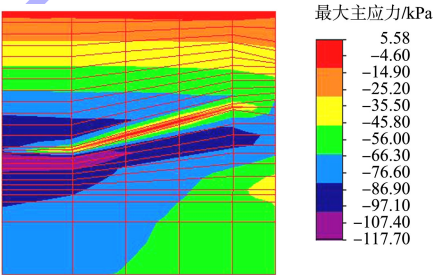
锚索间距/m	迎水面混凝土 拉应力/kPa	迎水面浆砌块石 拉应力/kPa	锚固段土体 应力/kPa
1.5	150	110	5.58
2.5	400	110	5.58
5.0	420	110	6.93



a) 迎水面混凝土



b) 迎水面浆砌石



c) 锚固段土体

图 4 2.5 m 间距时不同结构位置的应力分布

3 预应力布置方案的确定

根据以上分析, 确定在 5.1 m 高程处增设土层锚杆 1 道, 锚杆间距 2.5 m,  $\phi 200$  mm, 总长 25.5 m, 其中自由段长 9.5 m, 锚固段长 16 m, 土层锚杆设计单根极限承载力 600 kN, 施加预应力 100 kN。

加固方案在正常运行工况下, 闸墙水平位移为 0.7 mm(后倾), 竖向位移为 1.5 mm(向下)(图 5); 墙身最大主拉应力出现在锚索安装处, 为 410 kPa。闸墙下部土体主要承受压应力(图 6), 大部分区域压应力值在 80.0 kPa 以内,



在两角点附近区域有压应力集中现象，最大值为 140.2 kPa，满足地基承载力要求。

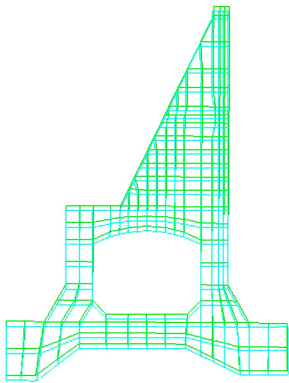


图 5 闸室墙位移

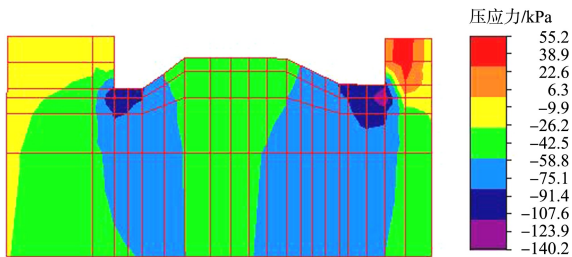


图 6 下部土体竖向应力分布

4 加固方案经济性及效果

在不考虑周边环境恢复费用的情况下，预应力土层锚杆加固方案与传统的墙身加固法相比，工程造价更低(表 5)，且对周围环境影响较小，具有较明显的优势。船闸加固后经过多年运行，墙体未发生进一步的前倾变形，表明加固方案经济、易施工，合理可行。

表 5 加固方案造价比较			元/延米
体外预应力法	墙身加固法		
	加大断面法	素混凝土替换法	
6 389	7 167	7 314	

5 结语

1)与传统的墙身加固法相比，体外预应力加固法的经济性更好。在无需破坏闸室墙的情况下，可以节省工程投资，降低对周边环境的影响，缩短施工周期。

2)根据现场的实测变形量，采用直接反演分析法可以得出土体变形模量，可为类似工程计算

提供可行的思路。

3)闸室墙顶部水平位移、基底最大反力、墙身应力均随着张拉力的增加而减小，但变幅不大，总体上锚索张拉力对重力式闸室结构影响的敏感性较小。

4)闸室墙顶部水平位移、基底的 最大反力、墙身迎水面混凝土应力均随着张拉力的高程的增加而减小，但变幅不大；墙体浆砌块石最大拉应力随着张拉高程的增加而变化，在 5.1 m(约 2/3 墙高)高程拉应力最小。

5)预应力锚索间距越大，迎水面衬砌混凝土应力集中越大；但是锚索间距对墙身主体浆砌块石应力分布基本无影响；在两锚索之间土体有较小的拉应力，它随着锚索间距的增加而增加，最大为 6.9 kPa。

6)最终加固方案计算成果均能满足安全使用需要，且经过多年运行后，墙体未发生前倾，表明加固方案经济、可行。

参考文献：

[1] 陈仲颐,叶书麟.基础工程学[M].北京:中国建筑工程出版社,1990.

[2] 张向霞,黄爱军.土层锚杆在深基坑支护中的应用研究[J].建筑技术,2015,46(6):546-549.

[3] 孔瑞天.土层锚杆在边坡中的设计应用实例[J].福建建筑,2004(5):63-65.

[4] 陈永战,张邦通,胡明亮.土层锚杆在某地下室抗浮中的应用[J].江苏建筑,2009(S1):80-81.

[5] 郑雨晴,刘军,张福海,等.拉锚式钢板桩护岸结构的土压力现场试验研究[J].河南科学,2020,38(9):1419-1424.

[6] 毛伟,徐金环,夏建国.船闸工程土层锚杆的变形及设计承载力分析研究[J].土工基础,2005,19(6):55-57.

[7] 沈旭鸿,王仙美,苏超.体外预应力技术在船闸闸首结构中的应用[J].中国水运(下半月),2014(4):273-274.

[8] 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),2014,14(3):128-129.