

整体式闸室结构内力分析与优化设计

钟华林^{1,2}, 邹永超³, 汤建宏⁴

(1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 江苏省港口绿色技术集成工程中心, 江苏 南京 210019;
3. 武汉理工大学交通与物流工程学院 湖北 武汉 430063; 4. 中交水运规划设计院有限公司 北京 100007)

摘要: 针对整体式闸室结构内力及位移受闸室高度影响较大的问题, 采用有限元分析方法, 研究了大高宽比整体式闸室结构内力及位移。得出以下结论: 1) 当高宽比超过某一数值时, 整体式闸室底板边墩根部正弯矩值大于底板跨中负弯矩值, 底板厚度由正弯矩决定。2) 当高宽比小于某一数值时, 趋势正好相反。3) 对大高宽比闸室结构, 在闸墙后方设置踵板或卸荷板均能减小底板边墩根部正弯矩值、增大跨中负弯矩值、减小闸墙位移。这样底板受力更均衡, 从而减小底板厚度, 以期优化设计、节约造价。

关键词: 整体式闸室; 结构内力; 水平位移; 优化设计

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0135-06

Internal force analysis and optimization of monolithic lock chamber structure

ZHONG Hua-lin^{1,2}, ZOU Yong-chao³, TANG Jian-hong⁴

(1.JSTI Group, Nanjing 210019, China; 2.Jiangsu Port Engineering Center of Green Technology Integration, Nanjing 210019, China;
3.School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4.CCCC Water Transportation Consultants Co.,Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Considering that the internal force and displacement of the monolithic lock chamber structure are greatly affected by the height of the lock chamber, this study investigates the internal force and displacement of the monolithic lock chamber structure with a large height-width ratio by the finite-element analysis method. The conclusions drawn are as follows: 1) When the height-width ratio exceeds a certain value, the positive bending moment at the root of the side pier of the bottom plate of the monolithic lock chamber is larger than the negative bending moment in the middle of the bottom plate span, and the thickness of the bottom plate is determined by the positive bending moment. 2) When the height-width ratio is less than that value, the trend is just the opposite. 3) For a lock chamber structure with a large height-width ratio, setting a heel plate or an unloading plate behind the lock wall can reduce the positive bending moment at the root of the side pier of the bottom plate, increase the negative bending moment in the middle of the span, and ultimately reduce the displacement of the lock wall. In this way, a more uniform force on the bottom plate allows the thickness of the bottom plate to be reduced to optimize the design and save the cost.

Keywords: monolithic lock chamber; internal force of structure; horizontal displacement; optimal design

整体式闸室是船闸工程中常用的一种结构形式, 具有刚度大、不透水的特点, 适用于水头较大、地基不好的情况。研究表明: 当闸室的高宽比较小时, 闸墙水平位移较小, 底板负弯矩大于

正弯矩, 底板厚度由负弯矩决定; 当闸室高宽比较大时, 闸墙水平位移较大, 底板正弯矩大于负弯矩, 底板厚度由正弯矩决定。

席荣等^[1]首次提出了带卸荷板整体式闸室结

收稿日期: 2022-01-05

作者简介: 钟华林(1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程设计研究。

构,研究了卸荷板高程、宽度及厚度对闸墙弯矩及水平位移的影响。为理清大高宽比整体式闸室结构受力特点、改善底板受力状态、减小闸墙弯矩和水平位移,本文进一步研究了带卸荷板闸室的卸荷板宽度对底板弯矩和闸墙位移的影响;同时提出了带踵板的整体式闸室结构,研究了踵板宽度对底板弯矩和闸墙位移的影响;从减小闸墙位移、改善底板受力等角度提出了整体式闸室优化设计思路,以期得到受力更优、投资更省的整体式闸室结构。

1 概述

某船闸有效尺度为 240 m×23 m×5.2 m,设计水位见表 1。闸室采用整体式结构,闸顶高程 28.4 m、底板底高程 8.91 m、闸室高度 19.49 m,见图 1。现场钻探揭示,工程区土层主要为素填土、粉质黏土、粉质黏土及黏土、粉质黏土夹粉土等。底板座落于粉质黏土夹粉土层,土质较好。

表 1 设计水位

水位	上游/m	下游/m
设计最高通航水位	26.90	26.70
设计最低通航水位	19.47	17.14
检修水位	23.00	19.00
正常蓄水位	23.00	18.50

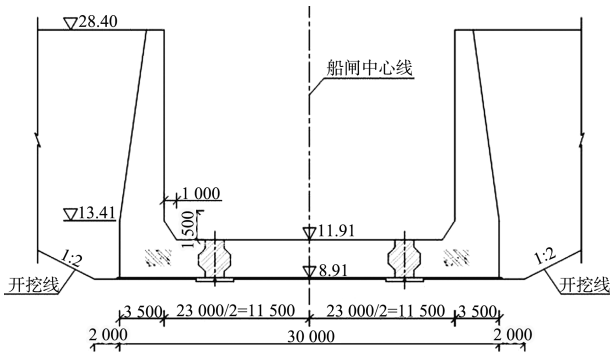


图 1 闸室结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2 有限元数值分析模型

2.1 闸室结构及土体模型

2.1.1 闸室结构模型

采用有限元软件计算闸室结构内力。闸室底

宽 30.0 m,地基宽度按 4 倍结构宽度取 120.0 m,地基深度按 2 倍结构宽度取 60.0 m^[2]。

闸室结构钢筋混凝土采用三维实体单元 C3D8R 模拟,本构模型采用线弹性模型,弹性模量 $E=28.0\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.167$ 。

2.1.2 土体本构模型

土体采用三维实体单元 C3D8R 模拟,本构模型采用弹塑性模型,应力-应变关系采用 Mohr-Coulomb模型。为简化计算,对土层参数进行归并,地基土和回填土参数见表 2。闸室及土体有限元模型见图 2。

表 2 土体本构模型参数

土体	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
回填土	1.97	25.0	0.30	0.05	26
地基土	1.97	25.0	0.30	23.00	23

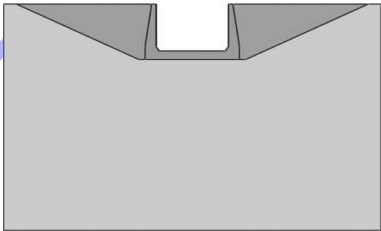


图 2 闸室及土体有限元模型

2.2 地应力平衡

为了得到有初始应力无初始应变的地基模型,需要进行地应力平衡。在静力分析步前添加地应力分析步,对地基施加重力荷载进行地应力平衡。平衡后地基变形小于 $10\text{ }\mu\text{m}$,满足工程精度要求。

2.3 接触设置

底板与地基、闸墙与回填土之间均存在接触。在各接触面之间设置接触对,切向设置摩擦,摩擦系数取 0.35;法向设置硬接触,允许接触后分离。

2.4 回填土模拟

采用单元“生”和“死”模拟回填土^[3]。在进行地应力平衡前,“杀死”回填土单元和闸室单元,完成地应力平衡后,再“激活”被杀死单元,建立接触、施加荷载进行计算。

3 整体式闸室结构内力分析与优化设计

一般情况下, 检修和完建工况为整体式闸室结构内力控制工况^[4], 本文选这两个工况进行结构内力计算分析。

3.1 标准闸室结构内力分析

3.1.1 底板内力分析

取闸室高度 14.49 ~ 19.49 m 进行计算。图 3 为闸室结构变形及应力云图, 图 4 为底板跨中和边墩根部弯矩随闸室高度变化曲线, 图 5 为不同闸室高度底板弯矩分布。底板弯矩以向闸室内部弯出为负、向外弯出为正。

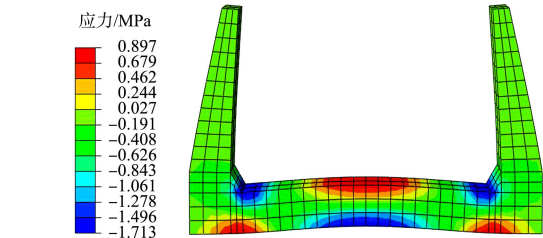


图 3 标准闸室结构的变形及应力云图

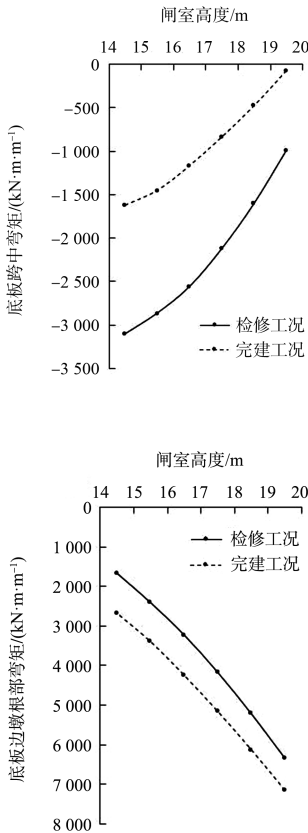


图 4 不同闸室高度底板弯矩

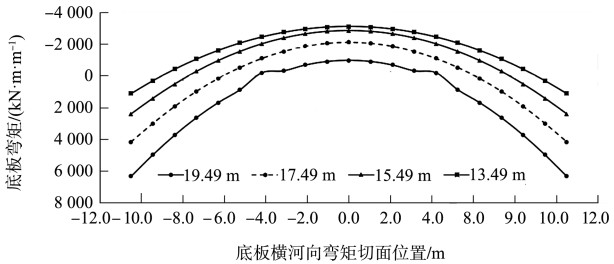


图 5 不同闸室高度底板弯矩分布

由图 4 可知, 底板跨中负弯矩值随闸室高度增加而减小; 底板边墩根部正弯矩值随闸室高度增加而增大。墙后土压力、水压力产生底板正弯矩, 作用力与高度为平方关系; 闸墙自重、墙后填土边载及扬压力产生底板负弯矩, 作用力与高度为线性关系。当闸室高度增加时, 正弯矩作用效应权重增加, 负弯矩作用效应权重减小。因此, 随着闸室高度增加, 底板负弯矩值减小、正弯矩值增大。

由表 3 可知, 闸室高宽比小于 0.516 时, 底板负弯矩值大于正弯矩值; 高宽比大于 0.516 时, 底板正弯矩值大于负弯矩值; 高宽比越大, 底板正、负弯矩均衡性越差, 变化趋势见图 5。当高宽比大于 0.516 时, 底板厚度由正弯矩决定。由于底板顶面需按最小配筋率配筋, 当高宽比大到一定程度, 底板跨中负弯矩将小于按最小配筋率得到的抗弯承载能力, 配筋浪费。当高宽比大于 0.516 时, 有必要对闸室结构进行优化, 使底板正、负弯矩更均衡, 投资更省。

表 3 标准闸室不同闸墙高度的底板弯矩

闸室高度/m	闸室高宽比	变矩/(kN·m·m ⁻¹)			
		检修工况		完建工况	
		跨中	边墩根部	跨中	边墩根部
19.49	0.650	-991	6 335	-71	7 150
18.49	0.616	-1 604	5 210	-476	6 125
17.49	0.583	-2 125	4 163	-837	5 155
16.49	0.550	-2 563	3 218	-1 169	4 240
15.49	0.516	-2 868	2 400	-1 454	3 390
14.49	0.483	-3 108	1 658	-1 625	2 671

3.1.2 闸墙内力及位移分析

表 4 为不同闸室高度闸墙与底板倒角处闸墙弯矩、闸墙顶部水平位移。闸墙弯矩以向闸室内

部弯出为正、向外弯出为负；闸墙水平位移以向闸室内部变形为正、向外变形为负。由表 4 可知，闸墙弯矩值及位移值均随闸室高度增加而增大。

表 4 不同闸室高度闸墙弯矩及位移

闸室高度 /m	闸墙弯矩/(kN·m·m ⁻¹)		闸墙位移/mm	
	检修工况	完建工况	检修工况	完建工况
19.49	6 110	7 510	14.4	19.7
18.49	5 225	6 125	9.6	14.8
17.49	4 402	5 155	5.6	10.6
16.49	3 650	4 240	2.4	7.0
15.49	2 967	3 390	0.1	4.0
14.49	2 293	2 671	0.01	2.2

3.2 带踵板闸室结构内力分析

3.2.1 底板内力

为改善底板受力状态、减小闸墙弯矩和位移，在标准闸室墙后增加踵板。取闸室高度 19.49 m、踵板宽度 0.5~3.0 m。图 6 为带踵板闸室结构变形及应力云图，图 7 为底板跨中和边墩根部弯矩随踵板宽度变化曲线。

由图 7 可知，底板跨中负弯矩值随踵板宽度增加而增大，边墩根部正弯矩值随踵板宽度增加而减小。这是因为踵板宽度越大，相应重力越大、产生负弯矩的作用效应也越大。

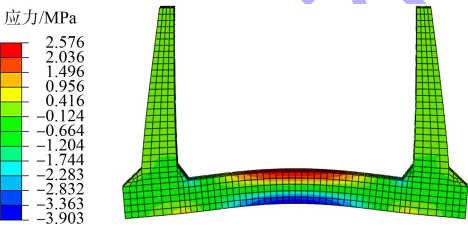
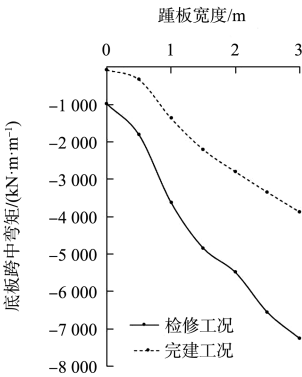
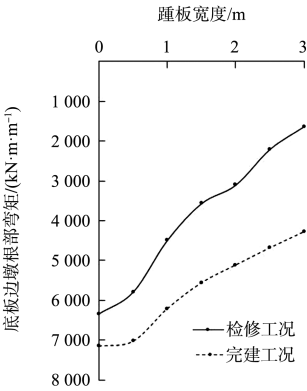


图 6 带踵板闸室结构变形及应力云图



a) 底板跨中弯矩



b) 底板边墩根部弯矩

图 7 不同踵板宽度底板弯矩

3.2.2 闸墙内力及位移

表 5 为不同踵板宽度时闸墙与底板倒角处的闸墙弯矩、闸墙顶部水平位移。由表 5 可知，闸墙弯矩值随踵板宽度增加而减小；检修工况位移值随踵板宽度增加而减小，踵板宽度大于 2 m 后，位移反向，位移值随踵板宽度增加而加大；完建工况位移值随踵板宽度增加而减小。

表 5 不同踵板宽度闸墙弯矩及位移

踵板宽度/ m	闸墙弯矩/(kN·m·m ⁻¹)		闸墙位移/mm	
	检修工况	完建工况	检修工况	完建工况
0.0	6 110	7 510	14.4	19.7
0.5	5 885	7 400	11.2	18.3
1.0	5 615	7 125	4.9	14.5
1.5	5 285	6 795	0.8	11.6
2.0	5 460	6 785	-2.6	9.1
2.5	5 055	6 475	-5.6	7.2
3.0	5 160	6 545	-8.1	5.5

3.3 带卸荷板闸室结构内力分析

3.3.1 底板内力

为改善底板受力状态、减小闸墙弯矩和位移，在标准闸室墙后增加卸荷板。取闸室高度 19.49 m、卸荷板高程 19.41 m、卸荷板宽度 0.5~3.0 m。图 8 为带卸荷板闸室结构变形及应力云图，图 9 为底板跨中和边墩根部弯矩随卸荷板宽度变化曲线。

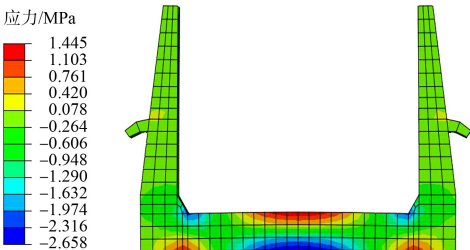


图 8 带卸荷板闸室结构变形及应力云图

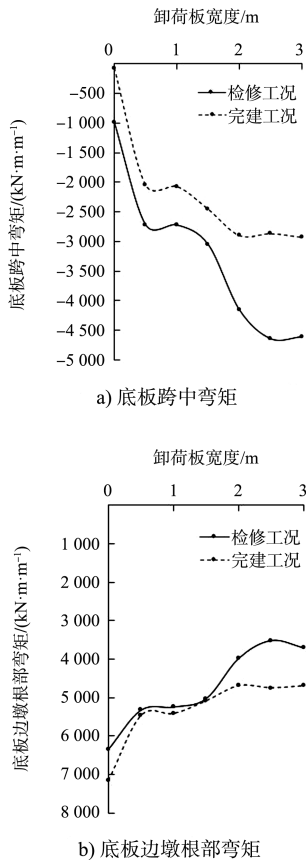


图 9 不同卸荷板宽度底板弯矩

由图 9 可知, 底板跨中负弯矩值随卸荷板宽度增加而增大, 边墩根部正弯矩值随卸荷板宽度增加而减小。这是由于卸荷板宽度越大, 上部填土重力越大、产生负弯矩作用效应也越大。

3.3.2 闸墙内力及位移

表 6 为不同卸荷板宽度时闸墙与底板倒角处闸墙弯矩、闸墙顶部水平位移, 闸墙弯矩值及位移值均随卸荷板宽度增加而减小。

卸荷板宽度 /m	闸墙弯矩/(kN·m·m ⁻¹)		闸墙位移/mm	
	检修工况	完建工况	检修工况	完建工况
0.0	6 110	7 510	14.4	19.7
0.5	5 825	6 215	7.7	10.4
1.0	5 800	6 230	8.2	10.5
1.5	5 700	5 920	6.9	8.7
2.0	4 904	5 515	1.9	6.4
2.5	4 495	5 520	0.5	6.6
3.0	4 659	5 450	-0.4	6.2

3.4 闸室结构优化设计

闸室高度 19.49 m, 标准闸室底板跨中负弯矩

-991 kN·m/m, 边墩根部正弯矩 7 150 kN·m/m, 闸墙弯矩 7 510 kN·m/m, 闸墙位移 19.7 mm。底板跨中负弯矩值远小于底板顶面按最小配筋率的抗弯承载能力, 闸墙弯矩值及位移值均较大。为使底板受力更均衡、减小闸墙弯矩和位移、减小工程量、节约投资, 根据整体式闸室结构受力特点, 提出优化设计方案。

3.4.1 带踵板闸室结构优化设计

表 7 为踵板宽度为 0~3.0 m 时底板弯矩及底板厚度由 3.0 m 减小到 2.4 m 时底板弯矩。踵板宽 1.0 m 时, 每延米节约混凝土 11.7 m³/m、底板增加钢筋 0.45 t/m、踵板增加钢筋 0.22 t/m、土方开挖及回填增加 116 m³/m。经测算, 每延米可减少工程费用 3 600 元, 占闸室每延米工程费用的 1.5%。

底板厚度 度/m	踵板宽度/m	弯矩/(kN·m·m ⁻¹)			
		检修工况		完建工况	
		跨中	边墩根部	跨中	边墩根部
3.0	0.0	-991	6 335	-71	7 150
	1.0	-3 627	4 488	-1 367	6 205
	1.5	-4 843	3 564	-2 203	5 555
	2.0	-5 490	3 099	-2 794	5 110
	3.0	-7 255	1 628	-3 871	4 275
2.4	1.0	-3 560	4 332	-1 996	5 485

底板厚度由 3.0 m 减小到 2.4 m、踵板宽 1.0 m 时, 完建工况的闸墙弯矩由标准闸室的 7 510 kN·m/m 减小为 7 200 kN·m/m、位移由 19.7 mm 减小为 15.7 mm; 检修工况的闸墙弯矩为 5 990 kN·m/m、闸墙位移 3.1 mm。

综上, 墙后增加踵板, 底板负弯矩值增大、正弯矩值减小, 闸墙弯矩和位移均减小, 底板厚度减小, 投资更省。但增设踵板会加大基坑开挖面, 在开挖受限的情况下不具备实施条件。

3.4.2 带卸荷板闸室结构优化设计

表 8 为卸荷板高程取 19.41 m、宽度 0~3.0 m 时底板弯矩及底板厚度由 3.0 m 减小到 2.4 m 时底板弯矩。卸荷板宽 1.5 m 时, 每延米节约混凝土 15.87 m³/m、底板增加钢筋 0.24 t/m、卸荷板钢筋增加 0.47 t/m。经测算, 每延米可减少工程费用 7 700 元, 占闸室每延米工程费用 3.2%。

底板厚度由 3.0 m 减小到 2.4 m、卸荷板宽 1.5 m 时, 闸墙弯矩由标准闸室的 7 510 kN·m/m 减小为 5 880 kN·m/m、位移由 19.7 mm 减小为 7.6 mm; 检修工况的闸墙弯矩为 5 495 kN·m/m、闸墙位移 3.4 mm。

表 8 带卸荷板闸室不同板宽的底板弯矩

底板厚度/m	卸荷板宽度/m	弯矩/(kN·m·m ⁻¹)			
		检修工况		完建工况	
		跨中	边墩根部	跨中	边墩根部
3.0	0.0	-991	6 335	-71	7 150
	1.0	-3 627	4 488	-1 367	6 205
	1.5	-4 843	3 564	-2 203	5 555
	2.0	-5 490	3 099	-2 794	5 110
	3.0	-7 255	1 628	-3 871	4 275
2.4	1.5	-3 391	4 438	-2 758	4 630

综上, 墙后增加卸荷板, 底板负弯矩增大、正弯矩减小, 闸墙弯矩和位移均减小, 底板厚度减小, 投资更省。但增设卸荷板后, 卸荷板以下回填土无法压实, 闸墙需分多次浇筑; 墙后排水管布设不方便。卸荷板的设置须结合内力分析和回填要求确定, 设计及施工均较为繁琐。

4 结语

1) 当闸室高度较大时, 整体式标准闸室结构底板跨中负弯矩值远小于边墩根部正弯矩值, 闸墙弯矩及水平位移均较大, 底板受力不均衡, 底板跨中弯矩远小于按最小配筋率的抗弯承载能力, 配筋浪费。

2) 采用带踵板闸室结构可以增大底板跨中负弯矩值、减小边墩根部正弯矩值, 减小闸墙弯矩

和位移; 通过优化踵板宽度, 可以得到底板受力更均衡、闸墙变形更小、投资更省的结构; 但在开挖受限的情况下不具备实施条件。

3) 采用带卸荷板闸室结构, 可以增大底板跨中负弯矩值、减小边墩根部正弯矩值, 减小闸墙弯矩和位移。通过优化卸荷板宽度, 可以得到底板受力更均衡、闸墙变形更小、投资更省的结构; 但卸荷板以下回填土无法压实, 混凝土需分多次浇注, 设计及施工均较为繁琐。

4) 当闸室高度较大时, 采用带卸荷板闸室结构相较于带踵板闸室结构, 对位移减小的作用更大。

5) 闸室内力是多因素综合作用的结果, 本文所得高宽比临界点、踵板及卸荷板最佳宽度等均是基于本工程闸室尺度、地基及回填土参数、墙后水位等得出的结论, 不具有普适性, 具体问题应具体分析。

参考文献:

[1] 席荣, 关云飞, 李夫仲.带卸荷板的整体式闸室结构受力与变形有限元分析[J]. 水运工程, 2018 (5): 116-121, 126.

[2] 詹世富, 蔡志长.航道工程学(II)[M].北京: 人民交通出版社, 2003: 147-148.

[3] 费康, 张建伟.ABAQUS 在岩土工程中的应用(水电版)[M].北京: 中国水利水电出版社, 2010: 298-299.

[4] 中交水运规划设计院.船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001[S] 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 武亚庆)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.sygccom.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部