



某枢纽船闸输水廊道方案布置与结构分析

韩莹莹，毕雪峰，张丽媛

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：输水系统设计是船闸工程设计的关键工作，其设计的合理性决定了船闸的灌泄水效果和使用的耐久性。输水廊道尺度直接影响输水时间、泊稳条件。为确定合理的廊道尺寸及结构断面，以某枢纽船闸项目为例，从水工结构和经济性角度出发，应用有限元方法计算 2 种不同输水廊道尺寸对应结构断面的结构内力，并从工程造价方面进行对比分析，得出较优廊道尺寸的闸室结构断面。

关键词：输水系统；廊道尺寸；有限元分析；经济性分析

中图分类号：U 641

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)04-0123-06

Scheme layout and structure analysis of ship lock's water conveyance culvert

HAN Yingying, BI Xuefeng, ZHANG Liyuan

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The design of water conveyance system is the key work of ship lock engineering design. The rationality of its design determines the effect of water conveyance and the durability of the ship lock. The size of water conveyance culvert directly affects the time of water conveyance and mooring condition. To determine the reasonable size of water conveyance culvert and structure section, this paper takes a junction lock as an example, from the perspective of the hydraulic structure and economic analysis, uses the finite element method to calculate the structure internal force of structure section corresponding to the sizes of two different water conveyance culverts, and makes a comparative analysis of the different structure section from engineering cost, and gets a better lock structure section with the reasonable size of the water conveyance culvert.

Keywords: water conveyance system; size of water conveyance culvert; finite element analysis; economic analysis

船闸输水系统的设计选型和布置决定闸首、闸室墙、闸室底板的主体构造和结构形式。在工程设计之初，应合理确定输水系统形式，进行输水系统水力分析计算，初步确定输水系统总体设计布置方案，然后通过水力试验进一步核实水力分析计算，准确确定部分参数。输水系统的廊道尺度直接影响输水时间、泊稳条件。廊道尺度太小会增加廊道输水时间，影响船闸通过能力；廊

道尺度提高能够加快输水时间，但结构尺度随之增大，工程造价相应提升；廊道尺度增大到一定程度，泊稳条件不能满足要求，同时产生回流、结构空蚀空化等问题。为确定合理的廊道尺寸及结构断面，本文以某枢纽船闸项目为例，从水工结构分析和经济性角度出发，合理确定输水系统各部位尺寸，通过理论分析为下一步输水系统水力模型试验提供依据。

收稿日期：2022-07-20

作者简介：韩莹莹（1984—），女，硕士，高级工程师，从事港口航道及海岸工程设计。

1 工程概况

本文研究的枢纽船闸所处的航道是北方某省境内的一条重要河流，水资源日益匮乏，规划建设 5 个梯级枢纽对该航道进行渠化开发。该枢纽船闸规划等级为Ⅲ级航道，设计船型为 1 000 吨级货船，考虑远期发展，船闸等级为Ⅱ级通航建筑物，船闸建设规模为 280 m×34 m×5 m(长×宽×最小门槛水深)。上游最高通航水位 11.2 m，正常蓄水位 9.6 m；下游最低通航水位 4.2 m，最大水头差为 5.4 m。上、下游导航调顺长度均为 230 m，上、下游靠船段长度均为 300 m，上、下游引航道底宽均为 70 m，引航道最小水深 4.7 m。建筑物基础坐落在粉质黏土层上，拟采用开挖后的土料作为回填料。

2 输水系统设计

2.1 输水系统形式选择

依据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[1](简称“规范”)规定，输水系统类型可根据判别系数 m 值初步选定。当 $m > 3.5$ 时，采用集中输水系统；当 $m < 2.5$ 时，采用分散输水系统；当 m 为 2.5~3.5 时，应进行技术经济论证或参考类似工程选定。 m 值按下式计算：

$$m = \frac{T}{\sqrt{H}} \quad (1)$$

式中： T 为闸室灌水时间，取 $T=8 \sim 10$ min； H 为设计水头，取 $H=5.4$ m(闸上为正常蓄水位 9.6 m，闸下为最低通航水位 4.2 m)，计算得 $m=3.44 \sim 4.30$ 。

由于该枢纽船闸所处航道沿线水资源匮乏，航道水位难以保证，而该船闸工作一次输水过程耗水量达 5.5 万 m³，为减少航运用水量，船闸需带省水功能^[2]。根据地形、征地投资及运量预测对船闸通过能力的要求，初步选择从闸室侧壁输水的闸墙长廊道分散式输水系统与省水池之间的水体实现交换。

2.2 闸墙输水廊道尺寸的确定

2.2.1 输水阀门处廊道断面面积

输水阀门处廊道断面面积按下式计算：

$$\omega = \frac{2C\sqrt{H}}{\mu T \sqrt{2g} [1 - (1-\alpha)k_v]} \quad (2)$$

式中： ω 为输水阀门处廊道断面面积(m²)； C 为计算闸室水域面积， $C=11220$ m²； H 为设计水头，取 $H=5.4$ m； μ 为阀门全开时输水系统的流量系数，取 $\mu=0.7$ ； T 为闸室灌水时间，取 $T=600$ s； α 为与阀门有关的系数，查表得 $\alpha=0.56$ ； k_v 为输水阀门开启时间与闸室灌水时间的比值，取 $k_v=0.5$ ； g 为重力加速度， $g=9.8$ m/s²。

计算得 $\omega=35.95$ m²。初步确定输水阀门尺寸为(4.0 m×4.5 m)×2，总面积为 36 m²。

2.2.2 输水系统闸墙主廊道的断面面积

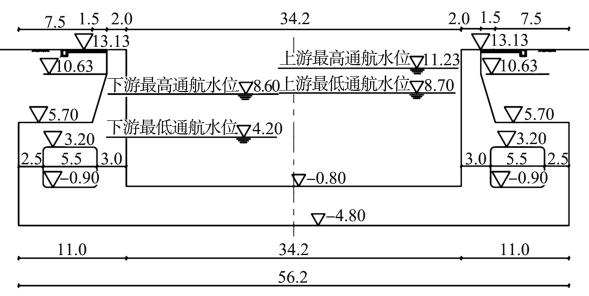
根据我国多数船闸的统计，输水系统闸墙主廊道断面面积与输水阀门处廊道断面面积的比值在 1.25~1.31 之间。根据经验，本工程该比值取 1.25，因此，计算得主廊道断面面积为 45 m²。根据廊道断面面积初步拟定 2 种廊道尺寸进行比选，分别为 5.5 m×4.1 m(宽×高，双侧廊道合计面积为 45.1 m²)、4.5 m×5.0 m(宽×高，双侧廊道合计面积为 45.0 m²)。

根据以往的设计经验^[3]，闸墙廊道淹没水深在 0.3~2.0 m 范围(淹没水深与水头比在 0.02~0.25)。本工程下游最低通航水位时廊道顶淹没水深取 1.0 m，与水头比为 0.19。

3 结构应力分析

3.1 结构断面

根据拟定的 2 种廊道尺寸和淹没水深，初步拟定 2 种闸室结构断面见图 1。



a) A型闸室墙(廊道尺寸 5.5 m×4.1 m)

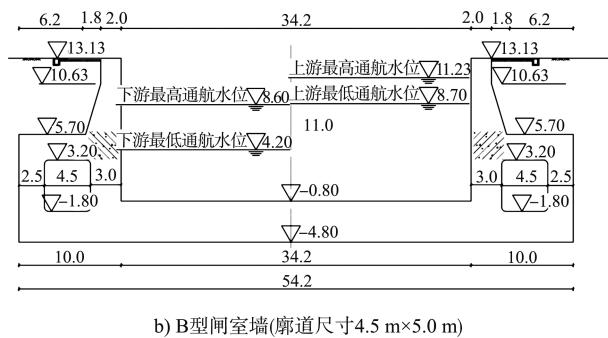


图1 闸室结构断面 (单位: m)

3.2 结构应力分析

用ADINA有限元软件分别建立不同闸室结构断面的有限元模型^[4]。在建模过程中,选取闸室墙长度方向1 m长的结构段,混凝土材料采用各向同性弹性体,单元采用混凝土3D-solid单元进行模拟,墙后回填土采用施加土压力方法进行模拟;地基土作为一个整体,采用各向同性弹性体3D-solid单元进行模拟。各种计算工况下,选取完建工况为闸室结构内力计算控制工况,采用有限元应力积分法计算截面内力和弯矩。

3.2.1 A型闸室墙结构应力分析

A型闸室墙有限元模型见图2。完建工况下,A型闸室墙底板(x 向)、边墙(z 向)及地基反力(z 向)的应力云图见图3。

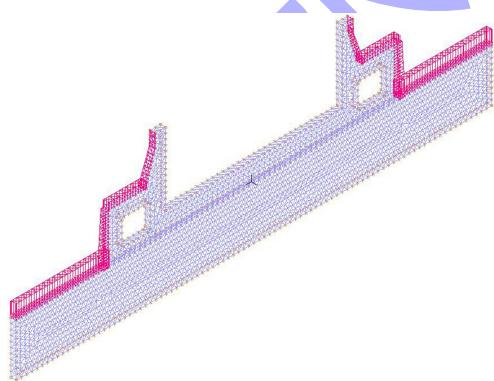
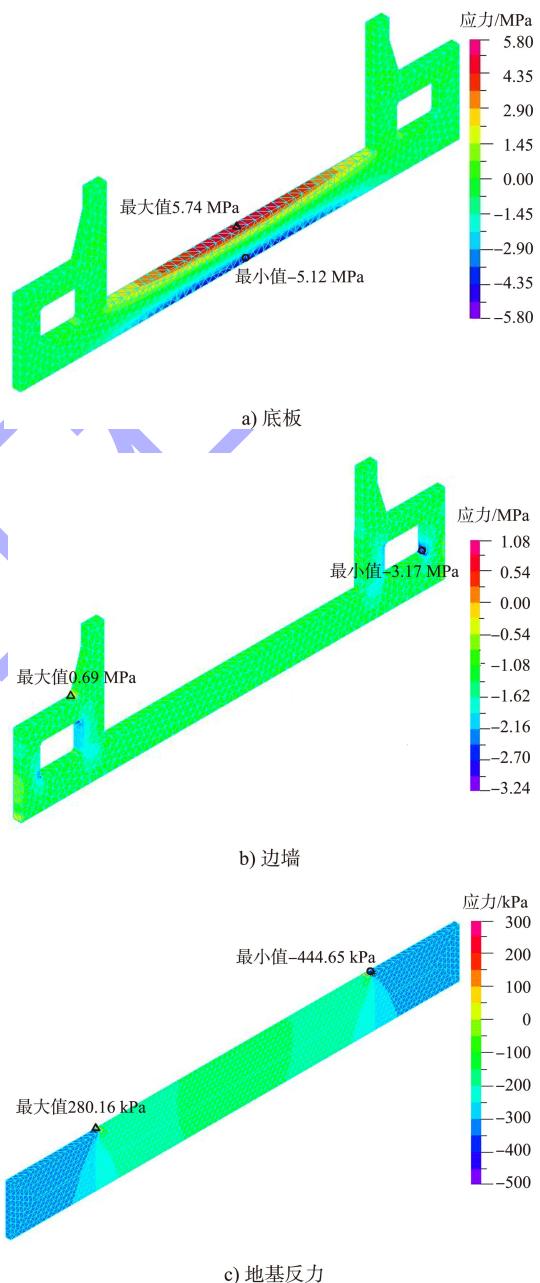


图2 A型闸室墙有限元模型

根据有限元计算,从应力分布云图可见,完建工况下,A型闸室墙结构断面底板顶部中间有较大拉应力,最大拉应力为5.74 MPa,底板底部最大压应力为5.12 MPa,采用ADINA有限元切截面应力积分法,计算底板截面弯矩正常使用极限状态标准值为14.48 MN·m。边墙较大拉应力集中

在墙身变截面拐角处,最大拉应力为0.69 MPa,较大压应力集中在廊道底部角点位置处,最大压应力值为3.17 MPa,根据应力积分法,计算边墙弯矩承载能力极限状态标准值为2.01 MN·m。最大地基压应力为444.65 kPa^[5]。



注:正值表示拉应力,负值表示压应力。

图3 A型闸室墙结构应力云图

3.2.2 B型闸室墙结构应力分析

B型闸室墙有限元模型见图4。完建工况下,B型闸室墙底板(x 向)、边墙(z 向)及地基反力(z 向)的应力云图见图5。

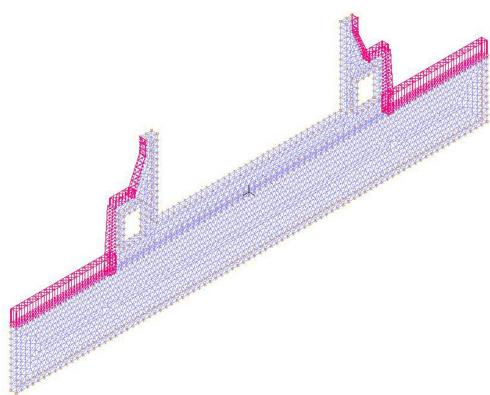


图 4 B 型闸室墙有限元模型

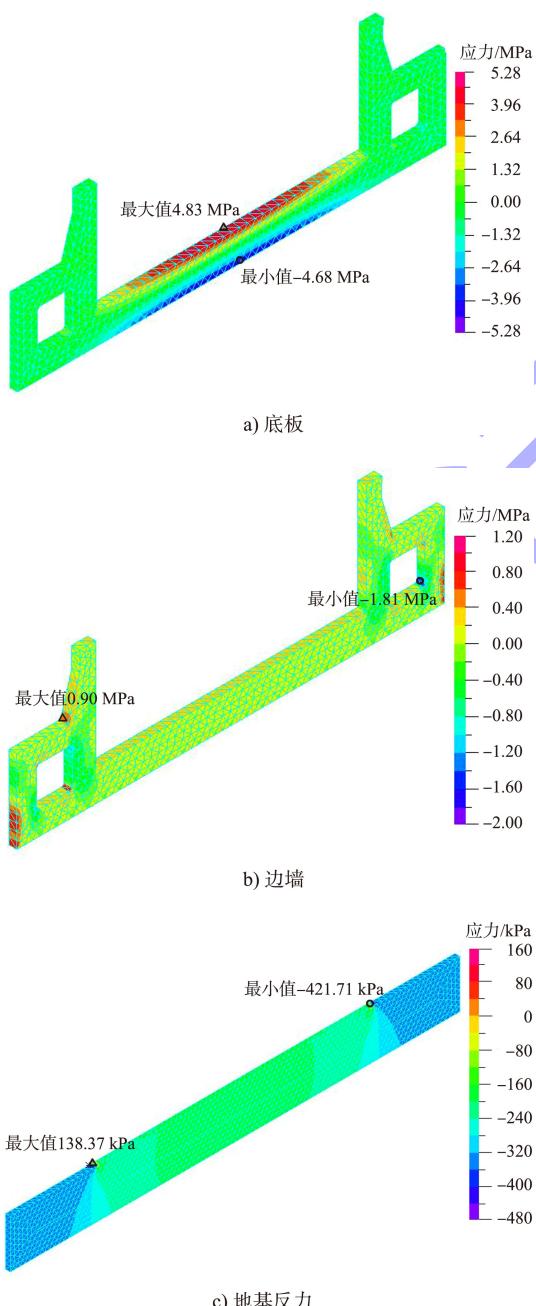


图 5 B 型闸室墙结构应力云图

根据有限元计算,从应力分布云图可见,完建工况下,B型闸室墙结构断面底板顶部中间有较大拉应力,最大拉应力为4.83 MPa,底板底部最大压应力为4.68 MPa,采用ADINA有限元切截面应力积分法,计算底板截面弯矩承载能力极限状态标准值为12.68 MN·m。边墙较大拉应力在墙身外侧变截面拐角处,最大拉应力为0.90 MPa,较大压应力集中在底板顶面与墙身内侧相交处,最大压应力值为1.81 MPa,根据应力积分法,计算边墙弯矩承载能力极限状态标准值为2.03 MN·m。最大地基压应力为421.71 kPa。

通过A、B型2种闸室墙结构的内力分析可以看出,B型闸室墙的结构内力更小,结构更偏于安全,且相较于A型闸室墙,B型闸室墙基坑开挖宽度更小、征地更少,推荐采用B型闸室墙结构。

4 结构断面优化及造价对比

4.1 结构断面尺寸优化

为减少混凝土及钢筋用量,减少结构造价,在B型结构断面的基础上对断面尺寸进一步优化,取廊道顶部淹没水深为2.0 m,廊道底部低于底板顶2.0 m,两侧闸墙墙墩顶部降低1.0 m,两侧闸墙宽度从10.0 m优化为9.0 m,优化后的C型结构断面见图6。对C型闸室结构断面运用有限元(图7)计算结构内力。完建工况下,C型闸室墙底板(x 向)、边墙(z 向)及地基反力(z 向)的应力云图见图8。

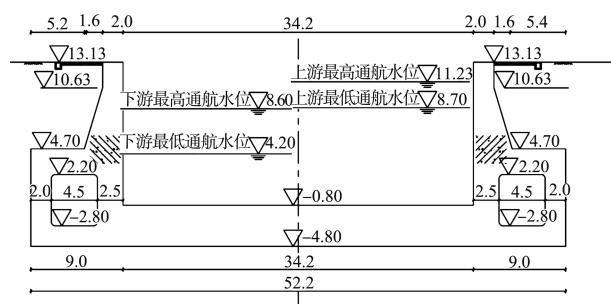


图 6 C 型闸室结构断面 (单位: m)

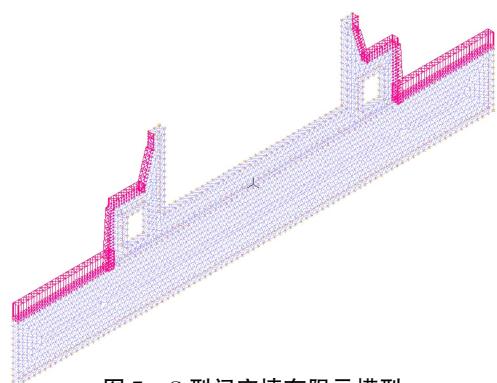
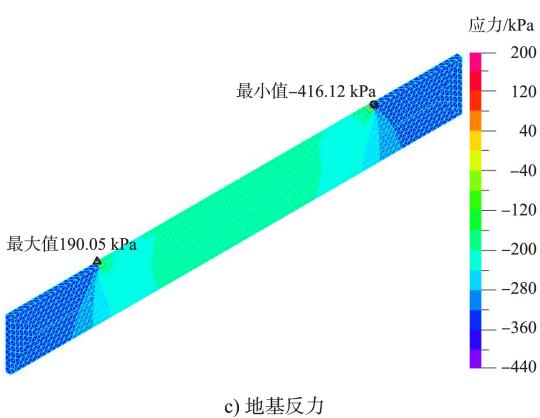
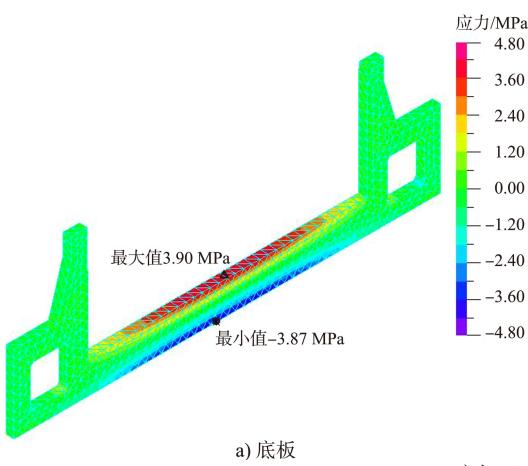


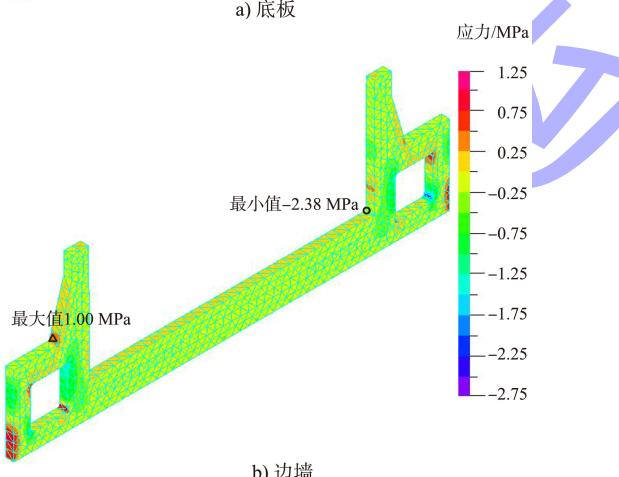
图 7 C型闸室墙有限元模型



c) 地基反力



a) 底板



b) 边墙

图 8 C型闸室墙结构应力云图

根据有限元计算, 从应力分布云图可见, 完建工况下, C型闸室墙结构断面底板顶部中间有较大拉应力, 最大拉应力为 3.90 MPa, 底板底部最大压应力为 3.87 MPa, 采用 ADINA 有限元切截面应力积分法, 计算底板截面弯矩承载能力极限状态标准值为 10.36 MN·m。边墙较大拉应力集中在边墙外侧靠近廊道底部处, 最大拉应力为 1.00 MPa, 较大压应力集中在底板顶面与墙身内侧相交处, 最大压应力值为 2.38 MPa, 根据应力积分法, 计算边墙弯矩承载能力极限状态标准值为 1.76 MN·m。C型闸室墙最大地基压应力为 416.12 kPa。

完建工况下, A、B、C型 3 种廊道尺寸对应的闸室结构内力和弯矩计算结果见表 1。可以看出, 优化后的 C型闸室结构内力相对更小, 对结构安全更加有利。

表 1 3种闸室结构断面内力和弯矩计算结果

断面类型	底板混凝土最大拉应力/MPa	底板最大压应力/MPa	底板截面弯矩/(MN·m)	闸墙最大拉应力/MPa	闸墙最大压应力/MPa	闸墙截面弯矩/(MN·m)	最大地基压应力/kPa
A	5.74	5.12	14.48	0.69	3.17	2.01	444.65
B	4.83	4.68	12.68	0.9	1.81	2.03	421.71
C	3.9	3.87	10.36	1	2.38	1.76	416.12

4.2 经济性分析

为深入研究优化后的 C型闸室墙结构断面相对于 A、B 型 2 种闸室结构断面的投资差异性, 对 3 种

闸室墙结构进行综合投资指标对比, 见表 2。可以看出, C型闸室结构断面的混凝土和钢筋用量更少, 每延米造价和征地拆迁投资额相对于 B型闸室墙更低。

表 2 3 种闸室结构单位长度经济技术指标

断面类型	混凝土用量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$	钢筋用量/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-1})$	投资额/(万元· m^{-1})	征地拆迁投资额/(万元· m^{-1})
A	360	15.51	35.042 3	1.815 5
B	339	14.31	32.500 6	1.766 3
C	307	12.97	29.679 1	1.717 1

综合以上分析, C 型闸室墙结构断面的结构内力相对优化前的 B 型结构更小, 廊道面积满足输水要求, 有一定的淹没水深, 流态更好; 同时比优化前的 B 型闸室墙结构断面基坑开挖宽度小、征地少, 更节省投资, 有经济优势。本项目闸室长廊道结构断面推荐优化后的 C 型闸室墙结构断面, 即廊道尺寸 $4.5 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$, 廊道淹没水深取 2.0 m 、廊道底高程低于闸室底板顶高程 2.0 m 的断面结构。

5 结语

1) 通过输水系统形式的选取和主要尺度的确定, 采取闸室长廊道输水系统为低水头船闸中进行灌泄水的省水措施, 对北方水资源匮乏地区具有示范效应。

(上接第 25 页)

参考文献:

- [1] WANG P F, WANG C, AI X Y, et al. Biofilm characteristics of globular biofilter in the ecological spur-dike and water quality improvement effect on Wangyu River [C]//International Conference on Electronics, Communications and Control. Ningbo: [s. n.], 2011: 3598-3603.
- [2] 刘明洋, 李永, 王锐, 等. 生态丁坝在齐口裂腹鱼产卵场修复中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3): 37-43.
- [3] 曹民雄, 申霞, 应翰海. 长江南京以下深水航道生态型整治建筑物结构研究[J]. 水运工程, 2018(1): 1-11.
- [4] 张静. 新型透空式六面体在南汇东滩促淤二期工程中的应用[J]. 中国水运(上半月), 2017, 38(6): 66-68.
- [5] 蔡喆伟, 夏云峰, 徐华, 等. 深水航道整治中新型结构淹没丁坝水流力特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 16-23.
- [6] 刘滨, 张余, 马瑞, 等. 多层浮管结构浮式防波堤消浪特性研究[J]. 港工技术, 2021, 58(6): 31-35.
- [7] 侯仲荃, 石进, 王宪业, 等. 空心块体水沙动力及泥沙淤积特性研究 [J]. 海洋学报(中文版), 2022, 44(5): 124-133.
- [8] 陈含墨, 渠晓东, 王芳. 河流水动力条件对大型底栖动物分布影响研究进展[J]. 环境科学研究, 2019, 32(5): 758-765.
- [9] 黄远东, 龙催, 邓济通. 三棱柱型人工鱼礁绕流流场的 CFD 分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 1-4.

2) 通过有限元计算分析结构内力, 优化结构断面尺寸, 确定了廊道宽度相对较小(4.5 m)、廊道淹没水深 2.0 m 、廊道底高程低于闸室墙顶 2.0 m 的 C 型结构断面作为推荐方案, 其内力相对较小, 结构更加安全。

3) 通过经济性比较, 确定了优化后的 C 型闸室结构断面在工程造价方面更能节省投资, 在经济性方面更有优势。

参考文献:

- [1] 南京水利科学研究院. 船闸输水系统设计规范: JTS 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 张丽媛, 汤建宏. 高水头省水船闸水工结构及输水系统研究[J]. 水运工程, 2016(10): 146-151.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司. 小清河复航工程(滨州段)初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2017.
- [4] 夏小迪, 汤建宏. 省水船闸的布置方案与结构设计[J]. 水运工程, 2022(S1): 124-129, 154.
- [5] 王勤振, 刘海民, 冯超. 非杆件大体积混凝土结构内力及配筋计算合理性分析[J]. 水运工程, 2021 (10): 295-299.

(本文编辑 王传瑜)

(本文编辑 王传瑜)