



# 岩基上坞式闸室结构受力分析及其优化设计

张志飞

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 对于水头较高的船闸工程, 坞式结构存在抗滑稳定性不足、结构应力较大的缺点。为此, 提出坞式结构的 3 组优化方案: 加大截面尺寸、增加悬臂、泡沫轻质土置换回填土。通过定义抗滑影响因子  $\delta$  分析 3 组优化方案对抗滑稳定性的影响, 利用有限元模型并引入截面尺寸的解析算法分析 3 组优化方案的结构应力变化。结果表明, 增加悬臂方案对抗滑稳定性的优化效果最为明显, 泡沫轻质土置换方案对于改善结构内力更为经济合理。

**关键词:** 坞式结构; 抗滑影响因子; 泡沫轻质土

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0141-05

## Stress analysis and optimization design of dock lock chamber on rock foundation

ZHANG Zhi-fei

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

**Abstract:** For the ship lock project with high water head, the dock structure has the disadvantages of insufficient anti-sliding stability and large structural stress. In this paper, three groups of optimization schemes for dock structure are proposed: increasing the section size, adding the cantilever, and replacing the backfill with foamed mixture lightweight soil. By defining the anti-sliding influence factor  $\delta$ , the influence of three groups of optimization schemes on anti-sliding stability is analyzed. Using the finite element model and introducing the analytical algorithm of section size, the structural stress changes of three groups of optimization schemes are analyzed. The results show that the optimization effect of anti-sliding stability is the most obvious when the cantilever is added, the scheme of foamed mixture lightweight soil replacement is more economical and reasonable for improving the internal force of the structure.

**Keywords:** dock structure; anti-sliding influence factor; foamed mixture lightweight soil

坞式结构指底板与闸墙刚性连接的 U 形结构, 是船闸工程中常见的结构形式。坞式船闸整体性较好, 对地基承载力的要求较低, 适用于土基、软岩基础等复杂地基, 在我国船闸工程建设中被广泛应用<sup>[1-2]</sup>。以往的船闸建设经验表明, 由于坞式结构属于薄壁结构, 墙身及底板的拉应力较大, 容易出现不同程度裂缝, 故常需配置大量的抗裂钢筋来增强结构的耐久性<sup>[3]</sup>。对于水头较高的岩基上工程, 一般优先选择分离式结构, 但对于某些地质不良的地区, 也常采用坞式结构, 优化结

构、减少底板及墙身拉应力是设计工作的关键。

代礼红等<sup>[4]</sup>研究高水头坞式结构的变位与应力分布规律, 并探讨了墙后回填、基岩变形模量等敏感性因素的变化对闸室工作性态的影响; 扈世龙等<sup>[5]</sup>对比了在不同地基模型条件下, 由于地基沉降变形差异以及地基与结构耦合作用造成的结构变形及内力分布的不同。以往坞式结构的研究多集中在边界条件(如地基基础)对结构变形与内力分布的敏感性分析, 关于结构本身的优化及荷载分布的研究相对较少。本文通过建立二维有

收稿日期: 2022-06-02

作者简介: 张志飞(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事船闸水工结构的设计工作。

限元模型，分析坞式结构的受力特点，并引入影响因子等，研究不同结构优化方案及荷载分布的影响，为类似船闸工程提供设计参考。

1 闸室有限元模型

某船闸工程闸室采用坞式混凝土结构，一侧回填土至闸顶，一侧临水。墙顶高程为 35.5 m，墙底高程为 10.0 m，底板顶高程为 13.5 m。底板、边墙厚度均为 3.5 m，底板宽度为 41.0 m。闸室结构建基面为中风化岩体，饱和抗压强度 10 MPa，属于软岩基础。

采用 ADINA 有限元软件建立船闸闸室结构二维有限元模型，混凝土与地基材料采用弹性体单元，墙后回填土采用 Mohr-Coulomb 单元。模型采用接触面单元模拟混凝土与地基、回填土之间的相互摩擦作用，基岩与混凝土结构之间抗滑摩擦系数为 0.4。边界约束施加在地基上，其中底面为三向约束，竖向侧面为横向约束。本模型以完建工况为计算工况，计算荷载包括结构自重力和墙后土压力，各材料物理参数见表 1。混凝土单元整体加密网格，地基网格单元在接触面局部加密网格，使计算结果更加精准<sup>[6]</sup>，模型见图 1。

表 1 材料物理参数

类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹模/MPa	泊松比	摩擦角/(°)
基岩	2 400	1 500	0.38	—
混凝土	2 500	28 000	0.17	—
回填土	1 800	40	0.25	30

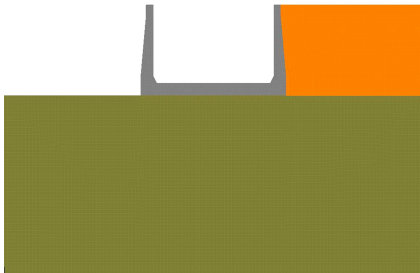
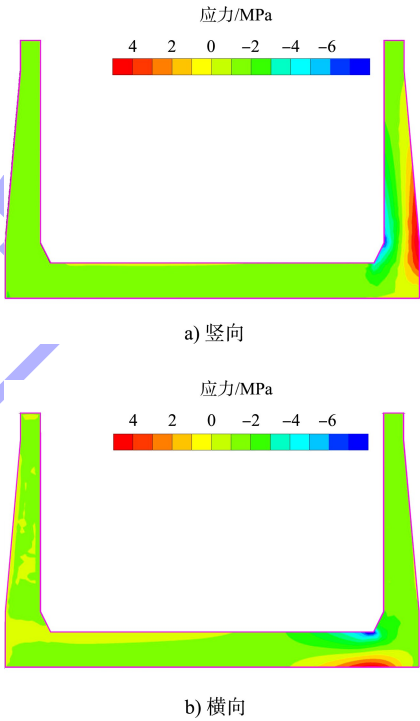


图 1 闸室有限元模型

2 计算结果

以完建期为例，应力云图见图 2，位移云图见图 3。由应力云图可知，临土侧边墙截面出现最大竖向拉、压应力，分别为 4.25、7.26 MPa，截面

位置为倒角与边墙相交处；临土侧底板截面出现最大横向拉、压应力，分别为 4.46、8.27 MPa，截面位置为倒角与底板相交处。由位移云图可知，受单侧土压的坞式闸室以闸墙变形为主，最大位移达 3.17 cm，出现在闸墙顶部。底板变形呈“反拱”形，最大位移不超过 5 mm，出现在临土侧底板底面。从稳定计算来看，坞式结构具有整体性好、质量轻的特点，结构抗倾覆系数 6.30，安全富余较大；抗滑系数 1.04，接近安全系数。



注：拉应力为正值，压应力为负值。

图 2 应力云图

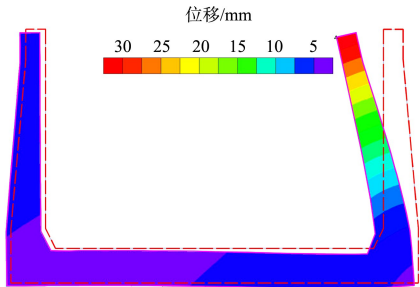


图 3 位移云图

3 优化设计

对于水头较高的船闸工程，坞式结构存在抗滑稳定性不足、竖向及横向应力较大、受力状态较不理想、结构发生破坏的几率较大的问题，因

此需从结构设计、荷载分布两方面进行优化设计。

3.1 结构设计优化

结构设计优化可从加大截面尺寸以及增加底板悬臂两方面进行考虑：1) 加大截面尺寸一方面可提高结构自身质量，提高抗滑稳定性；另一方面可提高截面惯性矩，改善截面内力；2) 增加底板悬臂一方面可利用悬臂及以上填土自身质量，提高抗滑稳定性，另一方面可提供稳定力矩，改善底板截面内力。不同优化方案见表 2。

表 2 优化方案		
方案	方案说明	备注
A	$B=4.5\text{ m}, H=4.5\text{ m}$	将底板、墙身厚度均加厚 1 m
B	$B=5.5\text{ m}, H=5.5\text{ m}$	将底板、墙身厚度均加厚 2 m
C	$L=4\text{ m}$	$L$ 为外伸悬臂的长度
D	$L=6\text{ m}$	$L$ 为外伸悬臂的长度

定义抗滑影响因子  $\delta$  为：

$$\delta = [(K_{cn} - K_{c0}) / (V_n - V_0)] \cdot V_0 / K_{c0} \tag{1}$$

式中： $K_{cn}$  为优化方案  $n$  的抗滑安全系数； $K_{c0}$  为优化前结构抗滑安全系数； $V_n$  为优化方案  $n$  的结构单宽体积； $V_0$  为优化前结构的单宽体积。该参数可用于反映不同优化方案的经济性及优化效率。

从表 3 计算结果可知，采用不用方案的抗滑影响因子分别为  $\delta_A = 0.68$ 、 $\delta_B = 0.61$ 、 $\delta_C = 3.04$ 、 $\delta_D = 2.93$ ，采用悬臂坞式方案的  $\delta$  值远大于采用加宽截面方案的  $\delta$  值，因此增加悬臂长度对于提高抗滑稳定是更优的选择。增加悬臂后结构应力云图见图 4。

表 3 方案优化前后抗滑稳定计算结果			
方案	单宽体积 $V/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$	抗滑稳定系数 $K_c$	$\delta$
A	336	1.23	0.68
B	411	1.39	0.61
C	301	1.47	3.04
D	319	1.66	2.93
优化前	265	1.04	-

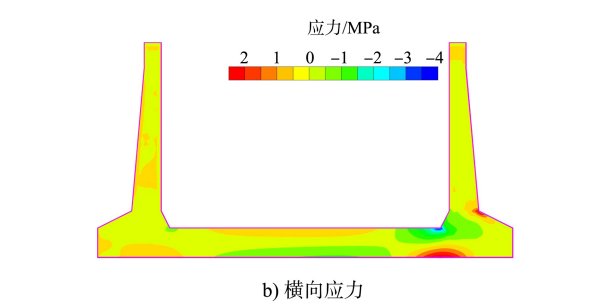
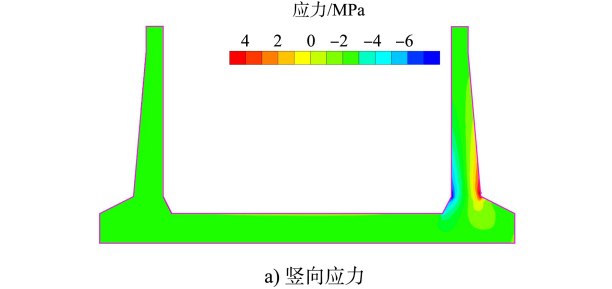


图 4 优化方案 C 结构应力云图

表 4 为方案优化前后最大拉应力结果，由表可见，优化方案 A、B 可同等程度降低竖向与横向的最大拉应力，竖向应力由 4.25 MPa 分别降低至 2.51、1.61 MPa，降低率分别为 41%、62%；横向应力由 4.46 MPa 分别降低至 2.17、1.35 MPa，降低率分别为 51%、70%。优化方案 C、D 可有效降低横向应力，由 4.46 MPa 分别降低至 1.90、1.35 MPa，降低率分别为 57%、65%；两方案对竖向应力难以起到优化作用，而且由于悬臂的竖向变形作用，导致边墙竖向应力分别由 4.25 MPa 增加至 4.81、4.87 MPa，增加率分别为 13%、14%。因此认为，增加截面厚度是改善坞式结构内力的有效措施，增加悬臂只能改善底板横向应力，对边墙竖向内力反而起不利作用。

表 4 方案优化前后最大拉应力		
方案	竖向应力 $\sigma_1/\text{MPa}$	横向应力 $\sigma_2/\text{MPa}$
A	2.51	2.17
B	1.61	1.35
C	4.81	1.90
D	4.87	1.56
优化前	4.25	4.46

3.2 荷载优化

船闸结构需在不同荷载组合下的不同工况下进行结构计算<sup>[7]</sup>。对于墙后存在回填土的坞式闸室结构，墙后土压力的大小将直接影响结构的安全性及内力分布，降低墙后土压力可达到优化坞式闸室结构的目的。

通过降低墙后回填土高程，可有效减少土压力，但墙后回填高程往往受制于船闸的总平面布置及使用功能需求，不可随意改变；也可采用物理特性较好的回填料如块石等进行回填，但回填

料材质往往就地取材，有场地和运输的限制。基于以上两点，需研究在不改变墙后回填高程及回填料主要材质的基础上，降低墙后土压力。

泡沫轻质土是近年来的新型材料，常应用于软土换填、桥台台背回填等工程，其通过发泡系统将发泡剂用机械方式充分发泡，并将泡沫与水泥浆均匀混合，然后经过泵送系统进行浇筑施工或模具成型，经养护形成一种含有大量封闭气孔的新型轻质混凝土材料。泡沫轻质土具有自立性、轻质性、密度和强度可调节性等特点<sup>[8]</sup>。采用泡沫轻质土作为墙后回填土的一部分，可起到卸载土体荷载、降低墙后土压力的作用。基于以上结论，采用泡沫轻质土对墙后回填土进行局部置换，研究坞式结构的稳定性及内力变化情况，材料参数为：密度 500 kg/m<sup>3</sup>；弹模 210 MPa；泊松比 0.2。置换方案见表 5。

表 5 泡沫轻质土置换方案

方案	置换深度 $h/\text{m}$	备注
E	3	回填土顶部 3 m 采用泡沫轻质土
F	5	回填土顶部 5 m 采用泡沫轻质土

采用抗滑影响因子  $\delta$  反映置换方案的敏感性，由于泡沫轻质土与结构混凝土之间存在单价差异（参照以往项目，泡沫轻质土单价约为混凝土单价 1/2），为了与前述方案进行同等对比，需对  $\delta$  进行材料价格的修正，计算结果见表 6。由表可知，2 种置换方案的抗滑影响因子分别为  $\delta_E = 2.32$ 、 $\delta_F = 2.63$ ，采用泡沫轻质土置换部分回填土方案的  $\delta$  值远大于采用加宽结构截面方案后的  $\delta$  值，对于提高结构抗滑安全稳定来说，为较优的方案。

由表 7 可知，优化方案 E、F 可同等程度降低竖向与横向的最大拉应力，竖向应力由 4.25 MPa 分别降低至 2.94、2.21 MPa，降低率分别为 31%、48%；横向应力由 4.46 MPa 分别降低至 2.65、1.90 MPa，降低率分别为 41%、57%，表明采用置换泡沫轻质土的方案可有效改善结构的内力。

表 6 方案优化前后抗滑稳定计算结果

方案	结构体积 $V_1/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$	泡沫轻质土体 积 $V_2/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$	抗滑稳定 系数 $K_e$	$\delta$
E	265	46	1.25	2.32
F	265	74	1.42	2.63
优化前	265	—	1.04	—

表 7 方案优化前后最大拉应力

方案	竖向应力 $\sigma_1/\text{MPa}$	横向应力 $\sigma_2/\text{MPa}$
E	2.94	2.65
F	2.21	1.90
优化前	4.25	4.46

4 方案对比

4.1 抗滑稳定角度

加大截面尺寸、增加悬臂、泡沫混凝土置换部分回填土 3 组方案均可有效提高结构的稳定性，相比之下，增加悬臂的方案优化效果最为明显、最具经济性，泡沫轻质土置换的方案次之，加大截面尺寸的方案在提高抗滑稳定方面性价比最低。

4.2 改善结构内力角度

加大截面尺寸和泡沫混凝土置换部分回填土方案均能起到改善结构内力的效果。控制边墙最大拉应力为 1.5 MPa，进一步分析对比两组方案的优化效果及经济性。

加大截面尺寸方案需确定截面尺寸以达到要求的应力值，单靠有限元模型进行试算较为繁琐，可结合传统解析法推求截面尺寸与拉应力之间的关系，确定截面尺寸。以完建工况为例，根据第 3 节应力云图显示，边墙最大拉应力截面出现在倒角与边墙相接处，假设计算截面宽度为  $B$ ，计算高度为  $H$ ，墙后回填土密度为  $\rho_0$ ，混凝土密度为  $\rho_c$ ，回填土内摩擦角为  $\varphi$ ，黏聚力为  $c$ ，土压力系数为  $K_a$ ，采用朗肯理论计算墙后土压力值  $P$ ：

$$P = \frac{1}{2} K_a \rho_0 g H^2$$

(1)

边墙按悬臂梁计算截面弯矩  $M$ ，见式(2)；边墙可视为偏心受压构件，假定截面内力呈线性分布，内力可分解为由墙后土压力荷载产生的纯弯曲应力及结构自重力产生的附加应力，根据纯弯曲产生的应力计算截面弯矩  $M$ ，见式(3)：



$$M=\frac{1}{6}K_a\gamma_0H^3 \tag{2}$$

$$M=\frac{1}{6}\sigma_1B^2 \tag{3}$$

联立式(2)(3)求得纯弯曲应力值 $\sigma_1$ 为：

$$\sigma_1=\frac{K_a\gamma_0H^3}{B^2} \tag{4}$$

由结构自重力产生的附加应力值 $\sigma_2$ 为：

$$\sigma_2=\rho_cgH \tag{5}$$

联立式(4)(5)求得边墙内力：

$$\begin{cases} \sigma_3=\frac{K_a\rho_0gH^3}{B^2}+\rho_cgH \\ \sigma_4=\frac{K_a\rho_0gH^3}{B^2}-\rho_cgH \end{cases} \tag{6}$$

式中： $\sigma_3$  为截面压应力； $\sigma_4$  为截面拉应力； $[\sigma]$  为设计允许拉应力值，因此需满足 $\sigma_4\leq[\sigma]$ ：

$$\sigma_4=\frac{K_a\rho_0gH^3}{B^2}-\rho_cgH\leq[\sigma] \tag{7}$$

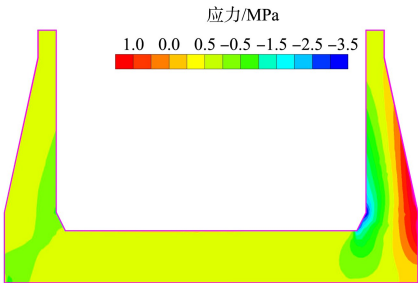
由式(7)求得：

$$B\geq\sqrt{\frac{K_a\rho_0gH^3}{[\sigma]+\rho_cgH}} \tag{8}$$

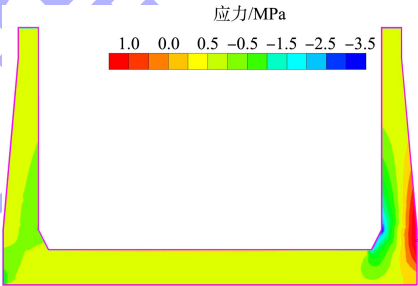
采用优化前方案、优化方案 A、B 对式(7)进行验算，见表 8，传统解析法与有限元模型计算结果较为接近，差异值不超过 8%，公式可行。当 $[\sigma]=1.5\text{ MPa}$ ，计算得到 $B\approx5.7\text{ m}$ ；采用有限元模型进行复核，应力云图见图 5a)。经过解析法分析、有限元试算，得出泡沫轻质土置换方案墙后回填区置换 7.3m 泡沫轻质土后，墙身最大拉应力为 1.499 MPa，应力云图见图 5b)。

表 8 边墙最大拉应力

方案	边墙宽度 B/m	截面拉应力/MPa		差异率/%
		传统解析法	有限元法	
优化前	3.5	4.59	4.25	7.41
A	4.5	2.58	2.51	2.71
B	5.5	1.56	1.61	-3.21



a) 加大截面宽度至 5.7 m



b) 回填区置换 7.3 m 泡沫轻质土

图 5 竖向应力云图

4.3 优化方案投资对比

对 2 组优化方案进行投资对比，见表 9。参考以往项目，钢筋混凝土单价取 1 000 元/m<sup>3</sup>，泡沫轻质土单价取 500 元/m<sup>3</sup>。经对比，泡沫轻质土置换的优化方案的总投资约为加大截面尺寸方案的 75%，对于改善结构内力来说，更为经济合理。

表 9 优化方案投资对比

方案	单宽结构体积/ (m <sup>3</sup> ·m <sup>-1</sup> )	单宽泡沫轻质土 体积/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-1</sup> )	结构钢筋混凝土 单价/(元·m <sup>-3</sup> )	泡沫轻质土单价/ (元·m <sup>-3</sup> )	总投资/万元
加大截面尺寸	426	0	1 000	500	42.6
置换泡沫轻质土	265	102	1 000	500	31.6

5 结论

1)通过有限元模型分析了坞式结构的特性，并针对坞式结构存在抗滑安全不足、竖向及横向拉应力值较大的特点，提出加大截面尺寸、增加底板悬臂及泡沫轻质土置换回填土 3 组优化方案。

2)引入抗滑影响因子  $\delta$  分析各优化方案的经济性及优化效果，得出结论：增加悬臂方案对抗滑安全性的优化效果最为明显，最具经济性；引入边墙截面最大拉应力的解析法公式，并与有限元结果进行对比，差异性较小，公式可行。