

淮安市清隆桥泵站 空箱挡墙拓扑优化设计研究

刘松¹, 徐鹏飞², 郭瑞², 颜柏杨², 郭金³, 徐昕¹

(1. 淮安市水利工程建设管理服务中心, 江苏 淮安 223005; 2. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001;
3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于拓扑优化设计理论和方法, 研究空箱挡土墙结构优化设计问题。以清隆桥泵站进水侧空箱挡土墙为例, 以挡墙应变能最小为目标函数, 以挡墙结构体积、强度、抗滑稳定、抗倾覆稳定等为约束条件构建拓扑优化计算模型, 实现了对空箱挡土墙的结构优化及轻量化设计。利用有限元软件对优化后的结构进行稳定性复核, 结果表明空箱挡土墙结构的强度、抗滑稳定、基地应力等指标均满足要求, 验证了拓扑优化结果的可靠性, 为挡土墙结构优化设计提供参考。

关键词: 拓扑优化; 变密度法; 空箱挡土墙

中图分类号: TV675 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2023)02-0048-0005

Topological optimization design of chamber retaining wall of Qinglongqiao Pump Station in Huai'an City

LIU Song¹, XU Pengfei², GUO Rui², YAN Baiyang², GUO Jin³, XU Xin¹

(1. Huai'an Water Conservancy Project Construction Management Service Center, Huai'an 223005, China;
2. Huai'an Water Resources Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Huai'an 223001, China;
3. School of Water Resources and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on topological optimization design theory and method, the optimization design of chamber retaining wall structure is studied. Taking Qinglongqiao Pump station inlet side chamber retaining wall as an example, taking the minimum strain energy of the retaining wall as the objective function, and taking the volume, strength, anti-sliding stability, anti-overturning stability of the retaining wall as the constraint conditions, the topological optimization calculation model is established to realize the structural optimization and lightweight design of the chamber retaining wall. Finite element software is used to recheck the stability of the optimized structure, and the results show that the strength, anti-sliding stability, base stress and other indicators of the chamber retaining wall structure met the requirements, which verified the reliability of the topological optimization results, and provide a reference for the optimization design of the retaining wall structure.

Key words: topological optimization; variable density method; chamber retaining wall

收稿日期: 2022-09-08

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021015)

作者简介: 刘松(1965—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程建设与管理方面研究。E-mail: 656998809@qq.com

1 概述

水利工程是践行可持续发展观,关乎国计民生的重要工程。兼具挡土与挡水功能的水工挡土墙在溢洪道、船闸、水闸及泵站等水工建筑物中有着极其广泛的应用。水工挡土墙形式多样,其中空箱式挡土墙由前墙、后墙、隔墙、底板和顶板组成,可在空箱内注水或填土维持稳定,有效降低了自重,减少了混凝土等材料的用量^[1]。空箱挡土墙以其刚度大、重量轻、基底压应力小、抗沉降能力强等诸多优点被广泛应用于水利工程中。

近年来,拓扑优化设计理论与方法已被广泛应用于航空航天^[2-3]、机械设计^[4-5]、医学^[6-7]等领域并取得显著成果。与传统的水工建筑物依据相关规范和设计经验进行比选的设计方法相比,拓扑优化设计方法以严密的数学、力学理论为基础,在高性能计算机的辅助下实现结构设计,有效地解决了传统设计方法中主观色彩浓厚,经济性差等问题,安全可靠,经济性效果显著^[8]。

随着计算机技术的进一步发展,部分学者尝试将拓扑优化方法应用到水工建筑物优化设计中,并取得了一定成效。如蔡新等^[9]利用ANSYS有限元软件对泵站结构进行优化,有效减小了构件尺寸,降低了整体造价。崔朕铭等^[10]以水闸闸室和群桩基础结构的几何尺寸为设计变量进行寻优搜索,其优化结果有效降低了工程造价,效果显著。何成龙等^[11]基于变密度法对重力坝进行拓扑优化设计,优化模型的各项应力和稳定性指标满足要求,且曲线形下游面更有效地缓和了应力集中现象。拓扑优化通过寻找结构的最佳材料分布,将结构材料的性能最大化地发挥出来,达到节约材料降低成本等目的,在水利工程领域具有广阔的应用前景。本文将拓扑优化理论和方法应用到挡土墙的优化设计中,对建立的空箱式挡土墙初始模型进行拓扑优化迭代和平滑化处理,最终得到优化结构模型,实现墙体结构的优化及轻量化设计,为挡土墙结构的拓扑优化设计提供新的思路。

2 变密度法空箱挡土墙拓扑优化

2.1 工程概况

清隆桥泵站是清江浦区境内的主要排涝泵站之一,泵站位于里运河东侧,圩北路(越河路)西侧,紧邻清隆桥,位于城区里运河封闭段内,涉及的排水片为原清河片和开发区片。泵站设计流量为6.0 m³/s,

泵站工程等别为Ⅱ等,站身及出水涵洞等主要建筑物级别为2级,并配套实施相关附属设施工程。

2.2 基本荷载及计算工况

泵站进水侧设计运行水位8.6 m,最高运行水位9.5 m,最低运行水位7.5 m,另考虑到挡土墙完工后的无水头工况,共计4种计算工况。挡土墙所受荷载主要有:挡土墙自重,空箱内填土对侧壁和底板的压力以及挡土墙临水侧所受的水压力。其中土体压力计算时,墙后土体中的地下水位取临水侧水位,水位以上采用土体湿密度,水位以下采用有效重度,分别以解析场的方式施加到各受力面。本文选取完建期无水头工况进行拓扑优化迭代计算,再分别在4种工况下进行稳定性复核。

2.3 初始化模型建立

根据相关设计资料,空箱挡土墙采用C25混凝土,混凝土材料采用线弹性本构模型,内部填土以土荷载形式施加到模型上。混凝土密度取2 475 kg/m³,弹性模量取30 GPa,泊松比取0.167。土的重度取19 000 N/m³,饱和土的有效重度为9 600 N/m³。建立空箱挡土墙三维实体模型并进行网格划分,其模型见图1。

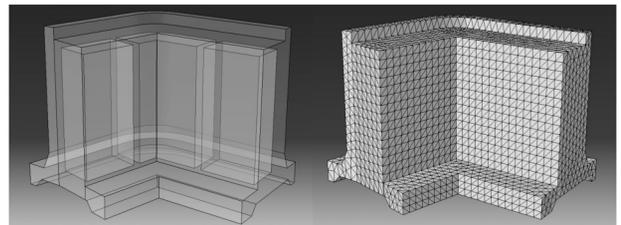


图1 空箱式挡土墙有限元模型

2.4 变密度法拓扑优化

拓扑优化是在满足各种功能条件和约束条件的情况下,将给定空间中不必要的材料去除从而得到最佳的材料分布,使结构在规定的设计范围内达到最优化^[12]。变密度法是力学建模中较为流行的方法,其更能反映拓扑优化的本质特征。

变密度法又称伪密度法,即假定材料的密度是一种可在0~1之间变化的伪密度,并在伪密度和杨氏模量等物理参数之间建立显示函数关系,通过引入含有惩罚因子的插值函数来建立优化数学模型。SIMP法是变密度法中应用广泛的插值模型,其构造的插值函数为:

$$f(x_i) = x_i^p \quad (1)$$

式中: p 为惩罚因子; x_i 表示第 i 个微小单元的相对密

度。则弹性模量可表示为:

$$E_i = f(x_i)E_0 \quad (2)$$

式中: E_0 为材料的弹性模量。由此建立的以最小应变能为目标函数, 以 SIMP 为插值函数的变密度法拓扑优化数学模型为:

$$\begin{aligned} & \text{Find } X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R \\ & \text{Min } C = F^T U = U^T K U = \sum_{i=1}^n (x_i)^p u_i^T k_0 u_i \\ & \text{s.t. } \begin{cases} K U = F \\ \frac{V}{V_0} = \Delta \\ 0 \leq x_{\min} \leq x_i \leq 1 \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

式中: X 为单元的伪密度矢量; C 为结构应变能; F 为荷载矢量; U 为位移矢量; K 为结构的刚度矩阵; k_0 为初始刚度矩阵; V_0 、 V 分别为结构初始体积和优化后体积; Δ 为体积分数; x_{\min} 为材料最小的伪密度。

2.4.1 设计变量

设计变量就是优化中需要改变的参数, 本文中设计变量即为待优化的单元。由于空箱挡墙外边缘需要承担水荷载或土荷载, 外隔板应当保持连续且密闭, 因此将待优化区域选为空箱内部的隔板单元, 设计变量即为隔板的尺寸, 见图2。

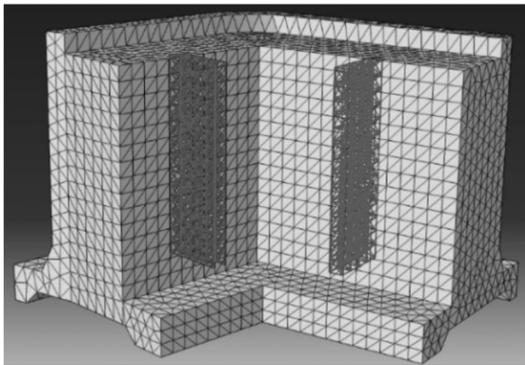


图2 空箱式挡土墙拓扑优化区域

2.4.2 目标函数

目标函数决定拓扑优化所要达到的目的, 是从设计响应中萃取的一定范围的值, 如最大位移或最大应力。目标函数确立了对设计响应的处理方式, 可用多个设计响应变量来表示。本文中选取结构刚度作为设计响应, 并通过应变能进行表征, 应变能越小, 结构刚度越大, 应变能越大, 结构刚度越小。目标函数则确定为整体结构的最小应变能。

2.4.3 约束条件

约束条件是对设计响应的限定, 是从设计变量

中萃取的一定范围的数值。约束条件可以是计算响应, 如位移、应力等; 也可以是几何约束条件, 如直径、体积等。本文中选取体积作为约束, 取体积约束为优化区域体积小于初始体积的40%为约束条件。

2.5 拓扑优化结果

综上, 取隔板区域为优化区域, 以整个结构的最小应变能为目标函数, 以40%原始体积作为约束条件, 令挡土墙底部为固端约束, 基于 ABAQUS 软件进行拓扑优化迭代计算, 设定迭代次数上限为20次。结果显示, 经过5次迭代, 目标函数即收敛, 记录每次迭代所产生的中间结果, 见图3。

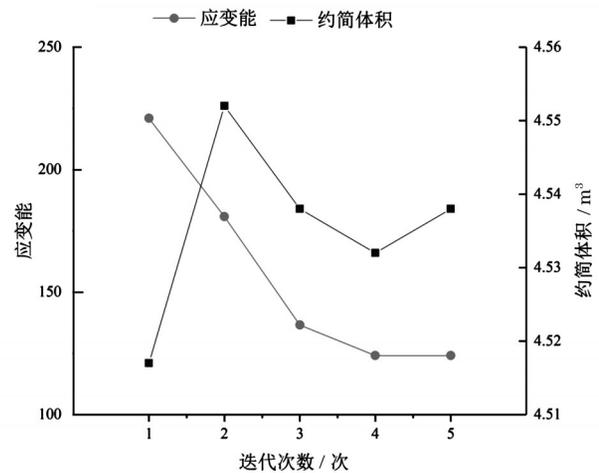


图3 空箱挡墙隔板应变能及约简体积随迭代次数变化情况

从图3可以看出, 随着迭代次数的增加, 目标函数不断减小, 而迭代3次后目标函数基本收敛, 约简的结构体积基本维持不变。经最后一次优化后结构应变能最小, 结果即为最优结果, 提取最后一次的网格, 见图4。

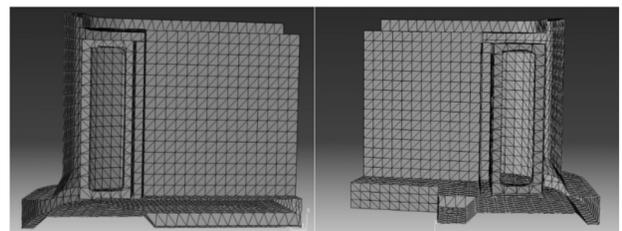


图4 空箱挡墙隔板优化结果

考虑到优化后的隔板结构边缘不规则, 不利于实际生产, 且优化后的网格结构较为破碎, 无法用于后续的稳定分析, 因此需要对优化后的隔板边缘进行规则化处理, 处理结果见图5。

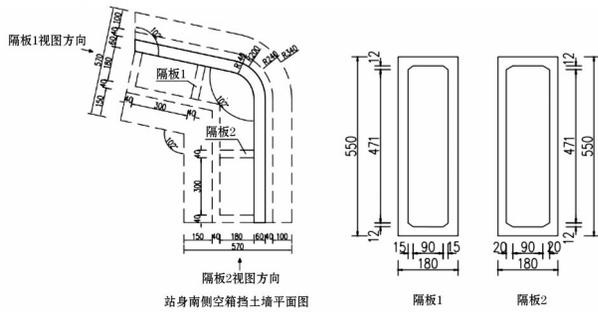


图5 修整后空箱挡墙拓扑优化结果(单位:cm)

3 优化结果稳定性复核

根据优化结果对空箱挡土墙初始模型进行切割,重新划分网格并施加荷载后进行三维有限元分析。根据该挡土墙的实际运行情况,选取4种工况:临水侧无水头工况(工况一)、临水侧水头为最低运行水位7.5 m(工况二)、临水侧水头为设计运行水位8.6 m(工况三)、临水侧水头为设计运行水位9.0 m(工况四),分别对4种荷载工况条件下的空箱挡土

墙优化结果进行稳定性复核。4种计算工况下挡土墙临土侧和两个隔板所处剖面处的最大主拉应力分布以及挡土墙底面处的法向支反力分布情况如图6所示。

根据文献[1]规定,对空箱挡土墙的结构稳定性提出如下要求:

(1)基底应力要求:松软地基土质上的挡土墙在基本荷载组合条件下,挡土墙基底应力的最大值与最小值之比不大于1.50。

(2)抗滑稳定要求:土质地基上挡土墙在基本荷载组合条件下,沿基底面的抗滑稳定安全系数不应小于规范允许值1.35。

(3)抗倾覆稳定约束:土质地基上的挡土墙,若基底不出现拉应力,可认为其满足抗倾覆稳定性要求。

(4)挡土墙结构强度要求:挡土墙结构采用C25混凝土,抗拉强度设计值为1.27 MPa,轴心抗压强度设计值为11.9 MPa。限制挡土墙结构压应力不超过轴心抗压强度设计值10 MPa,鉴于截面配筋

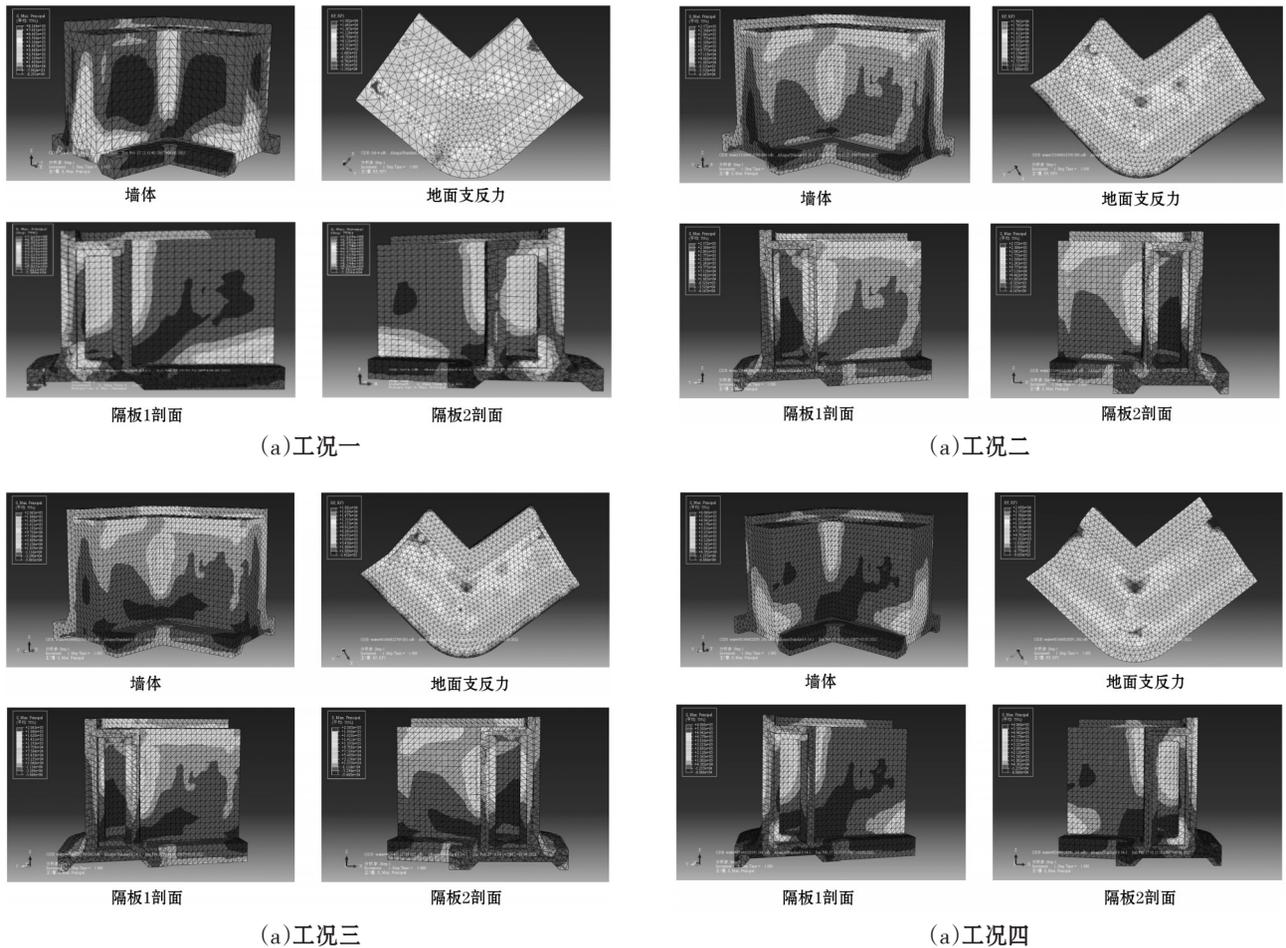


图6 4种工况下优化后挡土墙的有限元计算结果

作用,挡土墙钢筋混凝土结构的抗拉强度应不超过 1.27 MPa。

详细的稳定性复核要求如下:

$$\begin{cases} \sigma_{b\min} \leq 0 \text{ kPa} \\ K_c \geq 1.35 \\ \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \leq 1.50 \\ \sigma_{pt} \leq 1.27 \text{ MPa} \\ \sigma_{pp} \leq 1.00 \text{ MPa} \end{cases} \quad (4)$$

由图6的底面支反力计算结果可以看出,底面

普遍受压应力(云图中数值为正表示受Z+向支反力,即压力),只在边缘处由于模型尺寸效应受局部拉应力,说明各工况下空箱挡墙均满足抗倾覆稳定性。此外可根据最大主应力、基底水平向所受合力、基地支反力等计算结果,对空箱挡土墙结构进行强度、抗滑稳定、基底应力等指标复核。由于各工况下挡土墙主压应力远小于混凝土的抗压强度指标,结果未在表中列出,其余指标计算结果见表1,从表1中可以看出,各项指标均符合式(4)中的稳定性指标要求。

表1 空箱挡墙优化结构安全复核结果

工况	最大主拉应力/MPa	全部竖向荷载/kN	抗滑稳定安全系数	基地支反力/kN	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$
工况一	0.72	6.40	1.82	7.00	1.08
工况二	0.26	7.52	9.06	7.52	
工况三	0.21	7.30	9.80	7.31	
工况四	0.61	6.88	2.38	6.99	

4 结 论

本文以通用有限元软件ABAQUS为平台,对空箱式挡土墙进行了拓扑优化设计和稳定性复核,结论如下:

(1)通过变密度法对空箱挡土墙进行拓扑优化设计,实现了空箱挡土墙的优化和轻量化设计,减少了钢筋混凝土等材料的用量,降低了工程造价。

(2)对优化后的空箱挡土墙进行了有限元分析复核,分析结果表明空箱挡土墙结构的强度、抗滑稳定、基底应力等指标均满足要求,验证了拓扑优化结果的可靠性。

参考文献:

- [1] 水工挡土墙设计规范(SL379—2007)[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2] 王华敏,秦国华,胡政,等. 面向加工变形控制的航空整体结构件拓扑优化设计方法[J]. 机械工程学报,2019,55(21):127-138.
- [3] SHI Guanghui, GUAN Chengqi, QUAN Dongliang, et al. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing

- [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(4).
- [4] 刘小瑞,何培祥,谢光辉. 用于刚性机械手结构拓扑优化的叠加方法[J]. 机械传动,2021,45(11):46-50.
- [5] 万平,康巍,陈晶晶. 城轨车辆司机室承载结构拓扑优化设计[J]. 电力机车与城轨车辆,2022,45(3):50-54.
- [6] PARK Jaejong, ALOK Sutradhar, JAMI J- Shah, et al. Design of complex bone internal structure using topology optimization with perimeter control [J]. Computers in Biology and Medicine, 2018, 94.
- [7] 李楠,唐桥虹,王宏坤,等. PEEK 颈椎融合器的拓扑优化设计[J]. 应用力学学报,2022,39(3):598-606.
- [8] 张鹤志,尹斌,陈怡君,等. 基于拓扑优化的钢筋混凝土构件设计方法研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(5):462-473.
- [9] 蔡新,边赛贤,陈卫东,等. 块基型泵房整体结构优化设计研究[J]. 中国农村水利水电,2018(3):105-109.
- [10] 崔朕铭,蔡新,黄海田,等. 软土地基上水闸整体结构优化设计[J]. 水利水电科技进展,2016,36(1):86-89.
- [11] 何成龙,周丹,涂兴怀. 基于变密度法的实体重力坝拓扑优化[J]. 长江科学院院报,2014,31(9):105-109.
- [12] 张威. 基于变密度法的无人机后机身拓扑优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.