

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230118

基于改进人工鱼群算法的防渗墙结构优化研究

凌小康¹, 詹杰¹, 麻建飞²

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 防渗墙是土石围堰中重要的防渗结构,对改善渗流场分布与提高土石围堰稳定性具有积极作用。为此,提出一种基于改进人工鱼群算法的防渗墙结构优化方法,以某围堰工程为例,基于有限元分析法建立围堰有限元模型,以防渗墙的墙体厚度和入岩深度作为待优化变量,构建以渗流量和经济指标联合表征的目标函数,采用改进人工鱼群算法更新待优化变量,确定最优的防渗墙结构,最后通过渗流—应力耦合分析,得到常水位和水位骤降工况下围堰的安全系数。结果表明,与传统人工鱼群算法相比,基于改进人工鱼群算法的防渗墙结构优化方法具有较快的收敛速度和收敛精度,优化后的防渗墙结构在满足防渗效果的前提下,实现了防渗效果和经济性的平衡;防渗墙后孔隙水压力下降明显,围堰在常水位及水位下降速率 $v=0.5、1.0、2.0$ m/d 工况下安全系数分别为 1.489、1.410、1.376、1.321,均满足安全要求,体现了所提方法的可行性和合理性,研究结果可为土石围堰设计和施工提供参考。

关键词: 防渗墙; 结构优化; 人工鱼群算法; 防渗效果; 经济指标; 稳定性

中图分类号: TV543

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0152-04

1 引言

防渗墙是土石围堰工程中最重要、通过防渗墙结构优化有助于掌握防渗墙结构变化对渗流结果的影响并评价土石围堰的稳定性。目前防渗墙结构优化问题已有大量研究,如防渗墙材料、结构、质量、防渗效果,与地基的关系等,进一步优化确定了防渗墙厚度及深度^[1]、上下游水力坡降^[2]、嵌入基岩深度^[3]等,王常明等^[4]针对某土石围堰,设计了 33 种计算方案,以防渗墙后作用水头、防渗墙底部和坝脚溢出水的水力比降为指标,确定了防渗墙的优化尺寸。但防渗墙结构优化问题还需结合渗流场和应力场的耦合效应、优化方法的有效性、目标函数的有效性三个关键因素开展进一步研究工作。为此,本文针对防渗墙结构优化问题,提出了一种基于改进人工鱼群算法的防渗墙结构优化方法,并以某围堰工程为例,基于有限元分析法建立围堰有限元模型,以防渗墙的厚度和入岩深度作为待优化变量,建立以防渗效果和经济性指标联合表征的目标函数,采用改进人工鱼群优化算法更新待优化变量,确定最优的防渗墙结构;最后通过渗流—应力耦

合分析,得到常水位和水位骤降工况下围堰的安全系数。

2 基于改进人工鱼群算法的防渗墙结构优化方法

2.1 防渗墙结构优化方法

防渗墙的防渗效果是由渗透系数、厚度和入岩深度等多种因素共同作用的结果^[5]。其中,渗透系数主要受防渗墙的材料限制。因此,本文主要考虑防渗墙厚度及入岩深度对防渗效果的影响。具体实现流程如下:建立围堰有限元模型,给定初始防渗墙的厚度和入岩深度,构造以渗流量和工程经济指标联合表征的目标函数,通过改进人工鱼群算法将模型中防渗墙的厚度值和入岩深度值迭代优化,得到目标函数最小值,此时有限元模型中的防渗墙厚度和入岩深度即为防渗墙结构的最优设计。图 1 为防渗墙的结构优化流程。

2.2 目标函数

为评价不同防渗墙结构对防渗效果和经济性的影响,需构造一个目标函数,将求解防渗墙最优结构问题转换为求解目标函数最优值的问题。通过求解目标函数最优值,得到防渗墙的最优结构。

收稿日期: 2023-01-02, **修回日期:** 2023-02-25

作者简介: 凌小康(1998-),男,硕士研究生,研究方向为水工结构设计, E-mail: 18810658077@163.com

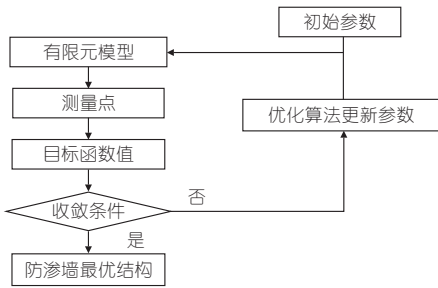


图 1 防渗墙结构优化流程

Fig. 1 Structural optimization process of cutoff walls

本文建立以渗流量和经济指标联合表征的目标函数:

$$P(X) = \frac{Q_i - Q_g}{Q_g} + \frac{M_i - M_g}{M_g} \quad (1)$$

$$M_i = aBL(H^\gamma + H_1) \quad (2)$$

其中, P 为目标函数值; X 为待优化参数组成的向量; Q_i 为每次迭代的渗流量计算值; Q_g 为渗流量优化的目标值; M_i 为每次迭代的工程造价计算值; M_g 为工程造价优化的目标值; a 为防渗墙延米深的工程造价; B 为防渗墙的厚度; L 为防渗墙的宽度; H 为防渗墙入岩深度; γ 为常数; H_1 为防渗墙顶部到相对弱透水层深度。

2.3 改进人工鱼群算法

本文结合反向学习策略和动态调整系数对人工鱼群算法^[6]进行改进,通过改进人工鱼群优化算法对目标函数进行迭代寻优。反向学习策略是在给定的参数优化范围内,基于反向学习策略均匀地生成一个初始种群,分别计算初始种群和反向种群的适应度,选择适应度更高的个体作为初始种群。动态调整系数是针对算法中步长和视野的调整系数,通过调整步长和视野参数,提高算法的精度和收敛速度,视野更新和步长公式分别为:

$$V_{\text{visual}} = \begin{cases} n_1 V_{\text{visual}} & (P_{i+1} - P_i) < \Delta_a \\ V_{\text{visual}} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{\text{step}} = \begin{cases} n_2 S_{\text{step}} & (P_{i+1} - P_i) < \Delta_b \\ S_{\text{step}} & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, n_1 、 n_2 分别为视野、步长动态调整系数; Δ_a 、 Δ_b 分别为视野、步长参数。

3 优化结果与分析

3.1 工程概况

以某围堰工程为例,该工程为某 1 级水工建筑物相应的导流建筑物。根据《水利水电工程施工组织设计规范》^[7]规定,确定其为 4 级建筑物。围堰采用 20 年一遇洪水重现期,相应设计水位为 23.90 m,考虑安全加高及波浪爬高后围堰顶设计高程取 25.21 m。

3.2 计算模型

根据地质勘测和设计资料,建立围堰有限元模型,水平方向为 x 方向,竖直方向为 y 方向,考虑边界效应后,模型尺寸为 480 m(x 方向) \times 125 m(y 方向)。模型采用位移约束,两端边界条件为水平方向约束,下端边界为固定约束,坡面无约束,上游边坡建立节点水头,下游边坡建立渗透面。有限元模型见图 2。

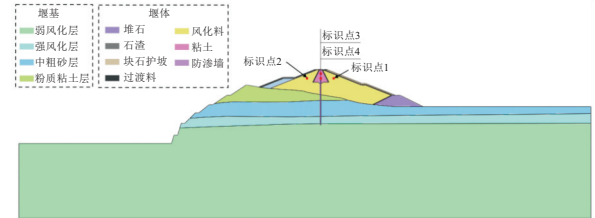


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

3.3 计算参数

因土石围堰施工所需土料、碎石料及块石料一般采用开挖料,所以围堰体计算参数采用经验取值^[8]。围堰地基参数取自地质勘测资料,计算参数见表 1。

表 1 围堰参数

Tab. 1 Cofferdam parameters

围堰分区	材料	渗透系数 / (cm · s ⁻¹)	围堰分区	材料	渗透系数 / (cm · s ⁻¹)
堰体	堆石	1	堰基	防渗墙	1 × 10 ⁻⁵
	石渣	1 × 10 ⁻¹		粉质黏土层	8 × 10 ⁻⁵
	块石护坡	1 × 10 ⁻¹		中粗砂层	1 × 10 ⁻²
	过渡料	1 × 10 ⁻²		强风化层	1 × 10 ⁻⁴
	风化料	1 × 10 ⁻³		弱风化层	1 × 10 ⁻⁴
	粘土	1 × 10 ⁻⁵			

3.4 优化结果与分析

采用改进人工鱼群算法对防渗墙结构进行优化,图 3 为优化过程中全局最优值、目标函数的变化历程,表 2 统计了各参数的优化结果。由图 3、表 2 可知:①随着优化的进行,目标函数值从 2.137 6 减小至 1.313 1,表明随迭代的进行防渗墙结构逐步接近最优值。②随迭代的进行两种优化方法下目标函数均趋于最优值,但基于改进人工鱼群算法拥有更好的初始精度;基于改进人工

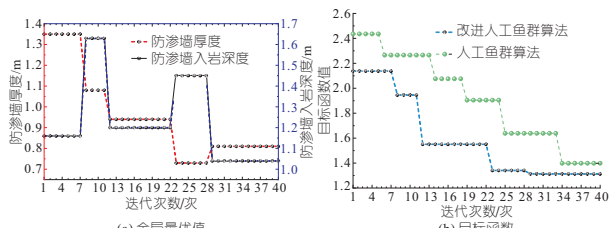


图 3 优化过程中全局最优值、目标函数的变化历程

Fig. 3 Variation of the global optimum and the objective function value

表 2 优化结果
Tab. 2 Optimization results

参数	防渗墙厚度 /m	防渗墙入岩深度/m	目标函数值
搜索下限	0.60	1.00	
搜索上限	2.00	3.00	
最优 1	1.35	1.16	2.137 6
最优 2	1.08	1.63	1.945 6
最优 3	0.94	1.20	1.550 7
最优 4	0.73	1.45	1.340 5
最优 5	0.81	1.04	1.313 1

鱼群算法共经历了 5 代最优值,而传统人工鱼群算法经历了 6 代最优值,这表明基于改进人工鱼群算法的防渗墙结构优化方法在相同的迭代次数下,具有更快的收敛速度和更优的结果。

根据防渗墙优化结果建立有限元模型,分别进行常水位和水位骤降工况下围堰的渗流及稳定性分析,评价防渗墙优化结果可靠性。计算工况如下:①工况 1。上游常水位($P = 5\%$, 23.90 m),下游无水。②工况 2。上游水位骤降由常水位骤降至 14.1 m, $v = 0.50$ m/d。③工况 3。上游水位骤降由常水位骤降至 14.1 m, $v = 1.00$ m/d。④工况 4。上游水位骤降由常水位骤降至 14.1 m, $v = 2.00$ m/d。各工况下围堰孔隙水压力和水力梯度结果见图 4、5。由图 4、5 可看出,在不同工况下,孔隙水压力在防渗墙部位均出现了明显弯折点,表明防渗墙后孔隙水压力明显减

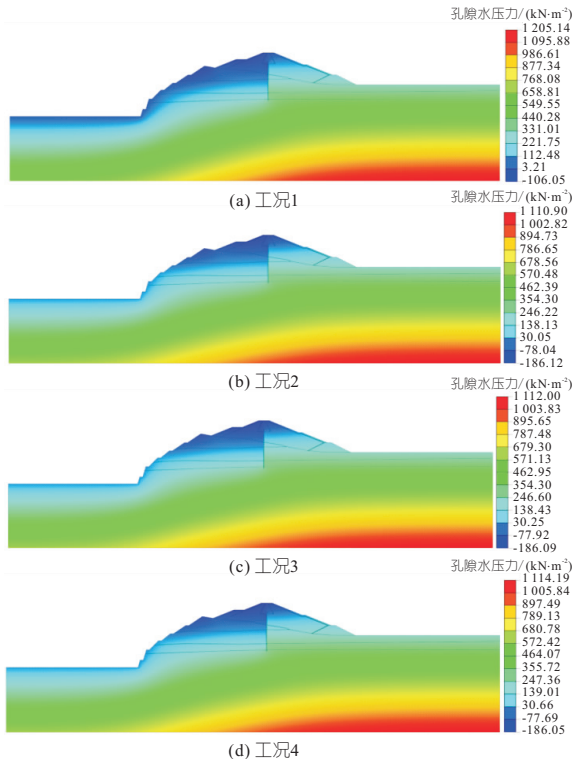


图 4 不同工况下孔隙水压力云图

Fig. 4 Pore pressure cloud diagram under different working conditions

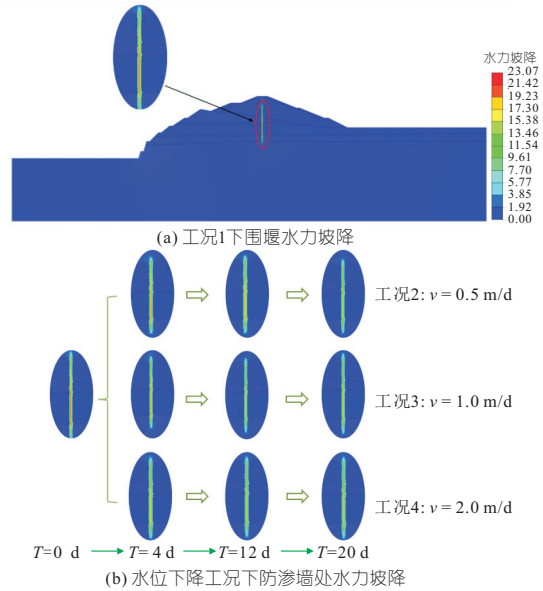


图 5 水力坡降云图

Fig. 5 Hydraulic gradient cloud diagram

小,体现了优化后防渗墙结构良好的防渗效果。

分别提取围堰在不同工况下不同区域 4 个标识点的孔隙水压力值,见图 6。由图 6 可知,各标识点的孔隙水压力随水位的下降不断减小。标识点 1 在 $v = 0.5, 1.0, 2.0$ m/d 工况下孔隙水压力降低至 0 kPa 所需的时间分别为 8.77、4.40、2.23 d;标识点 4 在相同的工况下孔隙水压力降低至 0 kPa 所需的时间分别为 0.94、0.49、0.27 d。表明孔隙水压力降低速率与水位下降速率成正比,但围堰内部孔隙水压力下降存在滞后效应,渗透系数越小,滞后效应越明显。

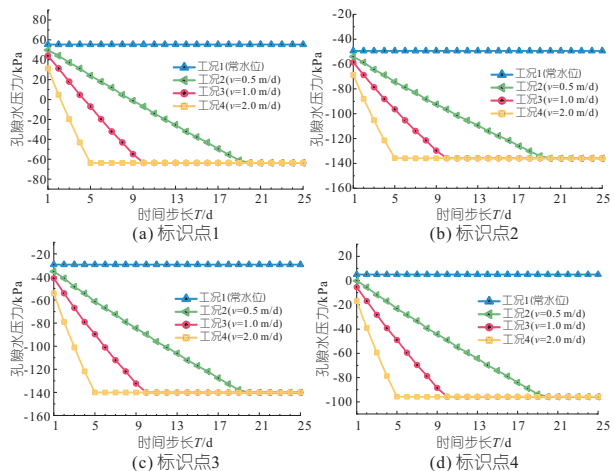


图 6 各工况下孔隙水压力变化曲线

Fig. 6 Pore water pressure variation curve under different working conditions

计算得到各工况下围堰的安全系数(以工况 1 为初始工况),见图 7。由图 7 可知,当水位下降时,安全系数呈下降趋势,工况 2~4 最小安全系数分别为 1.410、1.376、1.321,均满足规范要

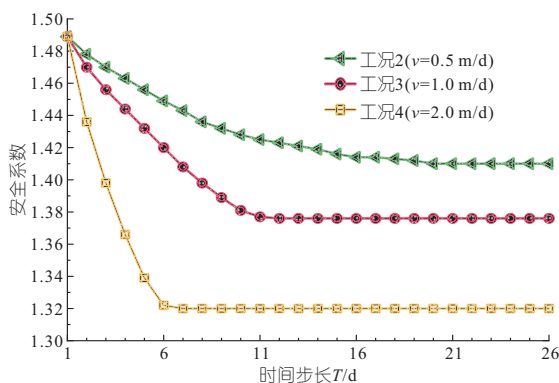


图 7 围堰安全系数

Fig. 7 Cofferdam safety factor

求^[9],体现了优化后防渗墙结构的合理性。

4 结论

a. 与传统经验性的防渗墙结构设计方法相比,本文提出了基于改进人工鱼群算法的防渗墙结构优化方法,该方法具有较快的收敛速度和收敛精度,有效地解决了防渗墙结构设计中存在较大经验性的问题,实现了防渗效果与经济性的平衡。

b. 在防渗墙结构优化后,墙后孔隙水压力下明显;围堰安全系数在常水位及 $v=0.5$ 、 1.0 、 2.0 m/d 工况下分别为 1.489、1.410、1.376、1.321,均满足规范要求,体现了优化后防渗墙结构的合理性。

参考文献:

- [1] SAINOV M P, SOEOKA V B. Ultra-high rockfill dam with combination of the reinforced concrete face and clay-cement diaphragm[J]. Magazine of civil engineering, 2018(5):135-148.
- [2] 谢兴华,王国庆. 深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9):2708-2712.
- [3] 辛欣. 防渗墙深度优化及其防渗效果研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(12):131-134, 147.
- [4] 王常明,鲁黎,马栋和. 土石围堰中混凝土防渗墙设计方案的数值优化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(3):857-865.
- [5] 鲁黎. 土石围堰中防渗墙参数优化及坝体渗流—应力耦合分析[D]. 长春:吉林大学, 2020.
- [6] 缪长健,施斌,郑兴,等. 基于 CM-AFSA-BP 神经网络的土石坝渗流压力预测[J]. 水电能源科学, 2019, 37(2):82-85.
- [7] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程施工组织设计规范:SL 303-2017[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2017.
- [8] 王哲鑫,朱家奇,胡小禹,等. 复杂工况下框格式地下连续墙与围堰相互作用的机理研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(9):150-153, 166.
- [9] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程施工导流设计规范:SL623-2013[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.

Research on Structural Optimization of Cutoff Walls Based on Improved Artificial Fish Swarm Algorithm

LING Xiao-kang¹, ZHAN Jie¹, MA Jian-fei²

(1. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Anti-seepage wall is an important anti-seepage structure in cofferdam, which plays an active role in improving the distribution of seepage field and the stability of cofferdam. This paper presents an optimization method of cutoff wall structure based on artificial fish optimization algorithm. Taking a cofferdam project as an example, the calculation model of cofferdam was established based on finite element analysis, and the wall thickness and rock depth of cutoff wall were taken as the variables to be optimized. Finally, the safety factor of cofferdam under the condition of constant water level and sudden drop of water level was obtained through seepage and stress coupling analysis. Compared with the traditional artificial fish swarm algorithm, the results show that the optimized method based on the improved artificial fish swarm algorithm has faster convergence speed and convergence accuracy, and the optimized anti-seepage wall structure can achieve the balance between the anti-seepage effect and the economy. The pore water pressure behind the cutoff wall decreased significantly, and the safety factors of the cofferdam under the conditions of constant water level and falling water level (falling rates are $v=0.5$ m/d, 1.0 m/d and 2.0 m/d, respectively) were 1.489, 1.410, 1.376 and 1.321, which met the safety requirements, reflecting the feasibility and rationality of the proposed method. The research results can provide reference for the design and construction of cofferdam.

Key words: cutoff walls; structural optimization; artificial fish swarm algorithm; impermeability; economic indicators; stability