

Study on Optimization of Anti-Seepage Curtain Structure for High Dam Foundation

Yue Zhang, Yuan Qin, Jiahuan He

State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi
Email: 1530314974@qq.com

Received: Sep. 5th, 2017; accepted: Sep. 21st, 2017; published: Sep. 30th, 2017

Abstract

The design of grouting curtain in seepage control measures of the dam foundation of the actual project not only meets the safety, but also meets the economic problems. In this paper, based on the combination of particle swarm optimization and finite element method, the average depth and equivalent thickness of impervious curtain under the constraint condition were calculated for concrete face rock fill dam on deep overburden. Firstly, the seepage field of the dam foundation in the 2D model was analyzed, and the permeability of the dam foundation is relatively high when it has no curtain, and it is easy to produce osmotic rupture. It is therefore necessary to perform grouting in the bedrock to reduce dam foundation seepage. The particle swarm optimization (PSO) is feasible and applicable in the optimization of curtain structures. It is concluded that as the number of iterations increases, the particles are close to the optimal solution, and the objective function (engineering cost) is gradually reduced and tends to be gentle as the number of iterations increases. The research results can be used to provide reference for the structural design of curtain grouting in engineering.

Keywords

Anti-Seepage Curtain, Particle Swarm Algorithm, Finite Element Model, Optimization Study

高坝坝基防渗帷幕结构优化研究

张悦, 覃源, 何佳欢

西安理工大学, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安
Email: 1530314974@qq.com

收稿日期: 2017年9月5日; 录用日期: 2017年9月21日; 发布日期: 2017年9月30日

摘要

针对实际工程坝基防渗处理措施中灌浆帷幕的结构设计, 既满足安全性又满足经济性问题, 本文基于粒子群算法。作者简介: 张悦(1993-), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事水利工程渗流研究。

法与有限元方法相结合计算满足约束条件下防渗帷幕的平均深度与等效厚度。以某高坝深厚覆盖层上的混凝土面板堆石坝为案例,首先分析二维模型中无防渗帷幕时坝基渗流场情况,得出无防渗帷幕时坝基透水率相对较高,容易产生渗透破坏,因此必须在基岩中进行灌浆以降低坝基渗流量。研究发现:粒子群算法在帷幕结构优化中的可行性和适用性,得出随着迭代次数的增加,粒子不断向最优解靠近,目标函数(工程造价)随着迭代次数的增大逐渐减小并趋于平缓,该研究成果可用于对工程中帷幕灌浆的结构设计提供参考。

关键词

防渗帷幕, 粒子群算法, 有限元模型, 优化研究

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在坝与水库失事事故的统计中约有 1/4 是由于渗流问题引起的,因此坝基防渗处理措施的研究是十分必要的,几乎所有大坝基础都要进行不同程度的防渗处理。在坝基的处理中,帷幕灌浆是用得最多的一种防渗设施[1]。帷幕灌浆设计一般参考已建好的工程,并结合经验公式。但是这样只能得出一个较好的设计方案,不是最好的设计方案。帷幕的深度与厚度依据钻孔的孔深、孔距、孔径,因此帷幕结构设计对坝基的防渗效果,工程造价,以及施工进度都有影响,为了节省混凝土用量以及评估帷幕的防渗性能,选择最优帷幕结构是十分必要的。

防渗帷幕通过凝结颗粒填充岩土间的孔隙提升坝基防渗能力,不仅能减小坝基渗透量,降低坝基扬压力,还可以保证坝基、坝肩稳定,防止地层产生机械潜蚀,还可以防止坝基内产生机械和化学管涌。帷幕的设计既要满足安全性又要满足经济性,国内外学者从理论、实验以及数值分析等方面做了大量研究。

崔文娟等将改进遗传算法应用于坝基帷幕灌浆的优化中,得到了坝基帷幕参数在不同约束条件下的最优设计方案,对工程设计具有重要参考价值[1];党发宁等将“平衡防渗法”应用于防渗帷幕结构优化中,得出此优化设计既可保证防渗效果达到最佳,又可保证投资达到最小[2];郑伦鑫等采用有限元和复合型优化算法对坝基墙接幕体系中的防渗帷幕灌浆参数组合进行优化研究,为坝基防渗优化设计提供参考[3];何云霄等应用 FLUENT 分析软件分析了帷幕深度对渗流量的影响,得出帷幕的合理深度[4]。

灌浆技术因其施工便捷、安全环保、经济效益高不仅被广泛应用于水利工程,同时被应用于石油,煤矿等领域。Ebrahim 等通过实验及数值模拟对伊朗原油无衬底储藏洞穴水幕系统在各种条件下的性能评估[5];Li 等研究了中关铁矿大型水下超深帷幕的注浆技术,为类似矿山的灌浆技术提供了参考[6]。

近几年粒子群优化算法因其规则简单,收敛速度快,可调参数少等优点广泛应用于水利工程领域,同时为了适应工程的应用,很多学者对粒子群算法进行了改进,并且取得了很好的效果,Wang 将混合粒子群算法应用于二阶可靠度分析,结果表明,该方法在工程应用中的可靠性分析准确,稳定,灵活,高效[7];Zhang 等将小种群混合粒子群优化算法应用于求解小电机最优组合,该方法应用于解决中国多个水热机组组合测试系统和实用的水热系统,最终结果显示了混合粒子群优化算法的可行性和有效性[8];Zhang 等将自适应粒子群算法应用于水库调度,与其他方法相比,改进的自适应粒子群优化提供了更好的运行结果,具有更高的有效性和鲁棒性,在发电效益和收敛性能方面似乎更好。同时,优化结果可以满足每个间隔的输出约束[9];Bai 等将融合可行性搜索空间的粒子群算法(FSS-PSO)应用于多目标梯级水库优化。结果表明,提出的维数降低策略与 FSS-PSO

算法相结合是很有前途的工具,该方法在多目标优化的背景下容易实现。因此粒子群算法广泛应用于工程的案例为本文采用粒子群算法进行优化提供了参考[10]。

以某已建深厚覆盖层上的面板堆石坝为案例,基于改进粒子群算法并结合有限元软件对河床底部悬挂式防渗帷幕的平均深度及等效厚度进行优化计算,以使帷幕不仅达到有效的防渗效果,而且从理论上讲工程造价最低,为工程帷幕设计提供参考。

2. 粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)是一种基于群体协作的随机搜索算法,该算法是通过模拟鸟群的觅食行为而发展起来的,算法的核心是找到这两个最优值时,粒子根据如下公式更新自己的速度和新的位置根据。

$$vid(t+1) = \omega vid(t) + c_1 r_1 (Pid(t) - Xid(t)) + c_2 r_2 (Pgd(t) - Xid(t)) \quad (1)$$

$$Xid(t+1) = Xid(t) + vid(t+1) \quad (2)$$

式中: vid 为粒子速度; Xid 为粒子位置; Pid 为个体最优历史位置; w 为惯性权重; Pgd 为群体最优历史位置; c_1, c_2 为学习因子; t 为迭代次数。

本文基于改进粒子群算法是对惯性权重 w 的随机调整,在目前的研究中,很多学者认为 w 应为一组随机值,如 Eberhart 等[11]提出一种动态惯性权重法以试图解决优化目标变化显著的问题。

在标准 PSO 算法中,当某个粒子在搜索过程中飞出可行域时,通常的处理方法是使粒子的位置处于边界上,但是这样做很容易使粒子陷入局部最优点,从而产生停滞。另外,会使多个粒子在多维上都向边界聚集,经过若干次迭代之后,这些向边界聚集的粒子的行为将不可避免地趋于相同,从而降低整个粒子群的效率[11]。因此为了避免粒子落在边界,对粒子的速度及位置进行一定程度上的变异操作。

2.1. 数学模型

防渗排水设施参数设计应满足安全性和经济性的要求。从优化设计的角度来看,安全性就是要满足一定的约束条件,经济性就是使工程造价(目标函数)最小。在满足坝基允许的渗流量和幕体本身水力坡降的条件下,使幕体工程造价(目标函数)最小。

优化设计的数学模型如下所示

目标函数

$$\min C = c \times H \times T \quad (3)$$

约束条件

$$Q \leq [Q] \quad (4)$$

$$J \leq [J] \quad (5)$$

式中: C 为坝基灌浆帷幕的工程总造价; c 为坝基灌浆帷幕的工程单价(折算为元每立方米); $[Q]$ 为坝基的容许总渗流量; $[J]$ 幕体本身允许的水力坡降; Q 为坝基实际渗流量; J 为幕体的水力坡降。

2.2. 基于 MATLAB 的粒子群算法

基于 matlab 平台编写的粒子群优化算法,可通过调用批处理*.bat 文件的方式来调用 ADINA 进行计算。以 ADINA9.0 为例。

批处理文件的写法如下:

@echo off

```
d:\adina\bin\au.exe -b -m 300m *.in
d:\adina\bin\adinat.exe -b -s -m 300m -M 500m -t 8 *.dat
d:\adina\bin\au.exe -b -m 500m *.plo
```

Step 1: 首先必须成功通过批处理运行 ADINA, 需要注意的是在*.in 文件里需写上生成*.dat 文件的命令流语句;

Step 2: 基于 MATLAB 编写粒子群优化算法, Matlab 中需要有调用批处理文件的语句;

Step 3: 运行程序;

这就实现了用批处理的方式运行 ADINA, 生成求解文件, 进行求解, 将需要的结果输出的整个过程[12]。

现绘出三维稳定渗流场防渗帷幕结构优化程序设计流程如图 1 所示。

3. 算例分析

3.1. 工程概况

苗家坝水电站坝址位于白龙江下中游的甘肃省文县口头坝乡境内, 距下游碧口水电站 31.5 km, 控制流域面积 16,328 km², 占白龙江流域面积的 51.3%, 坝型为混凝土面板堆石坝, 坝顶高程 805 m, 正常蓄水位 800 m, 死水位 795 m, 坝高 111 m 深厚覆盖层 42~48 m。各材料的渗透系数如表 1 所示。

3.2. 二维模型算例分析

基于 ADINA 建立二维模型, 分析有防渗帷幕和无防渗帷幕时的渗流场情况。

坐标系的选取: 采用二维直角坐标系, 原点取在工程坐标(0, 500)处, 以垂直坝轴线的顺河流方向为 y 轴的正方向, 以垂直坝轴线的垂直向上为 z 轴的正方向。计算的上游边界取至坝趾向上游的 170 m 长处, 下游边界至坝趾向下游的 170 m 长处, 底部边界至坝基以下 148 m (至高程 46 m)处, 模型如图 2 所示。计算区域中共有 11 种材料, 在模型中分别呈现不同的颜色, 如图 3 所示。

边界条件: 上游正常蓄水位 306 m, 下游水位假设 215 m。

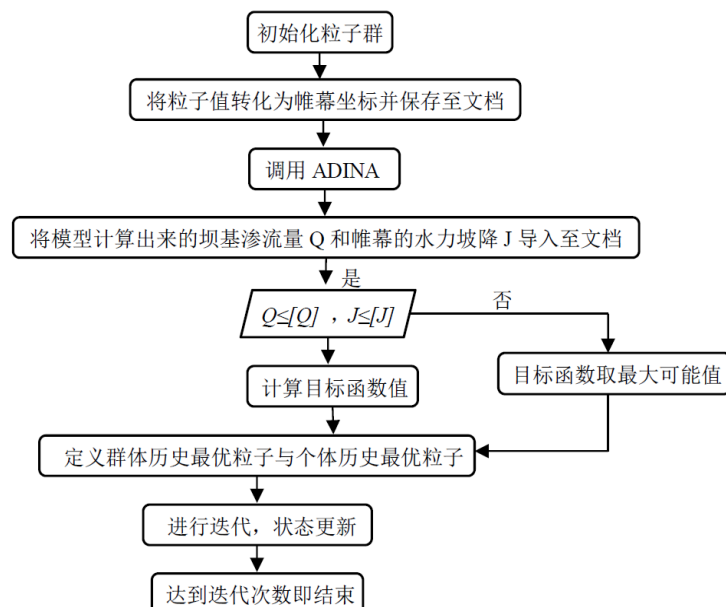


Figure 1. Algorithm flowchart

图 1. 算法流程

Table 1. Seepage calculation parameter table
表 1. 渗流计算参数表

序号	材料名称	渗透系数(m/s)
1	面板	5.0×10^{-6}
2	垫层区	1.5×10^{-4}
3	过渡区	1.0×10^{-5}
4	主堆石区	3.2×10^{-3}
5	下游堆石区	3.2×10^{-3}
6	深厚覆盖层底部	1.7×10^{-4}
7	深厚覆盖层中部	1.7×10^{-4}
8	深厚覆盖层顶部	1.4×10^{-4}
9	防渗墙	1.0×10^{-8}
10	防渗帷幕	1.0×10^{-8}
11	基岩	1.0×10^{-6}

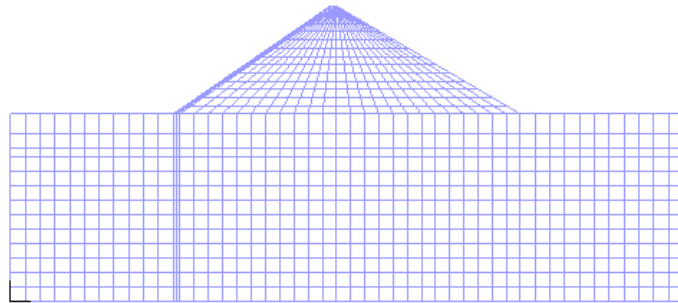


Figure 2. 2D model
图 2. 二维模型

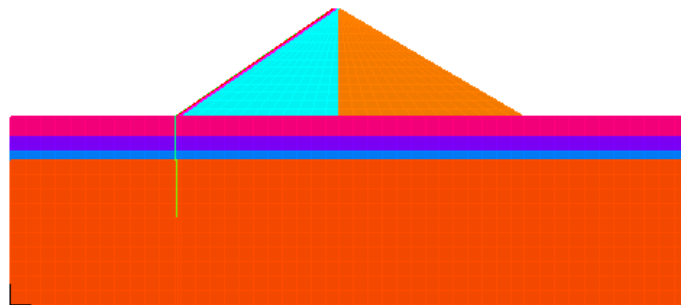


Figure 3. Material partition model
图 3. 材料分区模型

无防渗帷幕的渗流场如图 4~图 5 所示。

由图 4~图 5 可以看出无防渗帷幕时，处于深厚覆盖层中的防渗墙明显起到防渗效果，坝体浸润线较高，可以通过布置排水系统来降低浸润线，或者适当增强面板的防渗效果。图 6 为坝体水流流速分布，可以看出水流在面板层出现骤降，随后逐渐趋于平缓，且流速分布均匀。

由图 7~图 8 可以看出有防渗帷幕时，防渗帷幕明显降低了水头。在工程中，基岩的渗透系数较小，因此基岩中的防渗措施一般采用灌浆帷幕，通过灌浆凝结基岩中的裂隙，起到防渗效果。而深厚覆盖层基础，因其渗

透系数较大，一般采用防渗墙等措施来达到一定的防渗效果。

3.3. 优化计算

基于 ADINA 建三维模型，以命令流的形式保存于 adina\bin 文件夹下，同时后处理命令流文件也保存至 bin

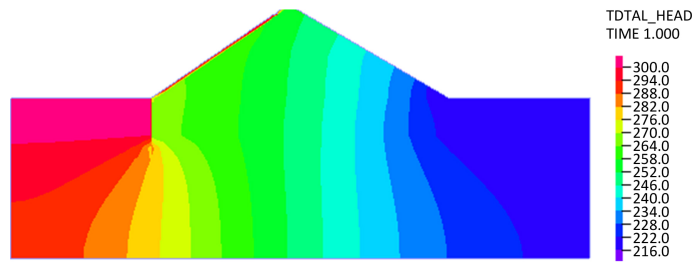


Figure 4. Total head line diagram without curtain

图 4. 无防渗帷幕的总水头线图

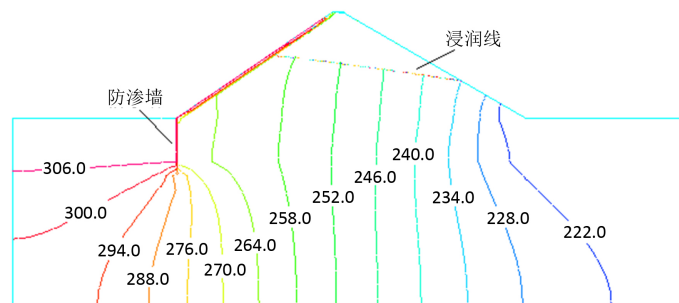


Figure 5. Equal head line diagram without curtain

图 5. 无防渗帷幕的等水头线图

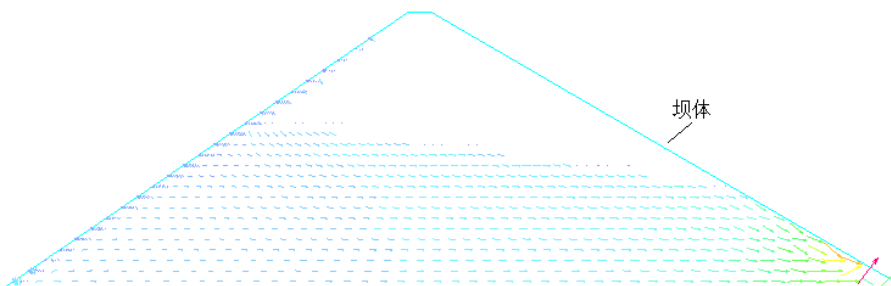


Figure 6. Flow velocity distribution of dam body

图 6. 坝体的流速分布图

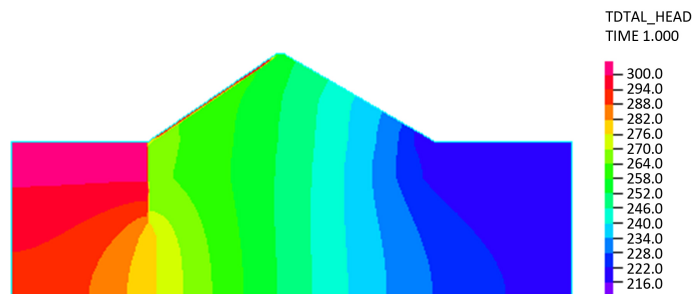


Figure 7. Total head line diagram with curtain

图 7. 有防渗帷幕的总水头线图

文件夹下，方便批处理文件的调用。粒子群算法初始化粒子群并运行计算直到达到最大迭代次数。

分析：图 9，随机生成的 30 个粒子在横坐标 X(172, 176)以及纵坐标 Z(571.8, 614.2)之内分布较为均匀，迭代 5 次以后，由图 10 可以看出粒子逐渐向 X(173.5, 610)附近靠拢，迭代 10 次后，由图 11 可以看出粒子集中在 X(173.5, 610)附近，因此可以得出随着迭代次数的增加，粒子逐渐向最优解靠近。最优粒子坐标为(173.24, 610.65)。

由图 12 可以看出最优适应度随着迭代次数的增加而减小，迭代次数达到某一值时，最优适应度趋于某一确

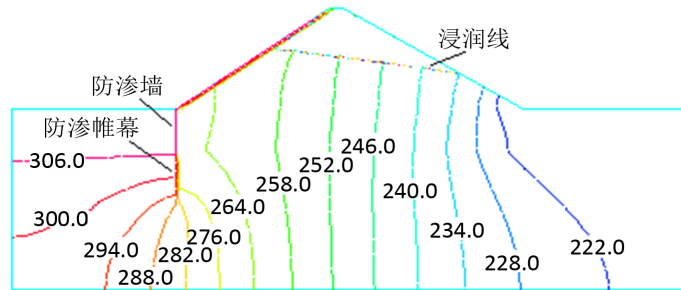


Figure 8. Equal head line diagram with curtain
图 8. 有防渗帷幕的等水头线图

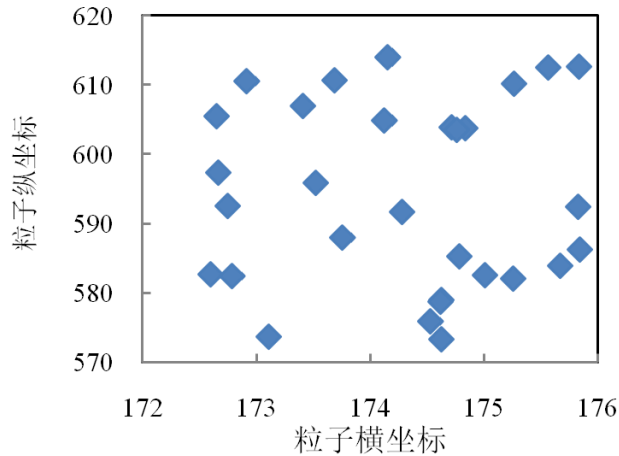


Figure 9. Initialize the particle swatch
图 9. 初始化粒子群

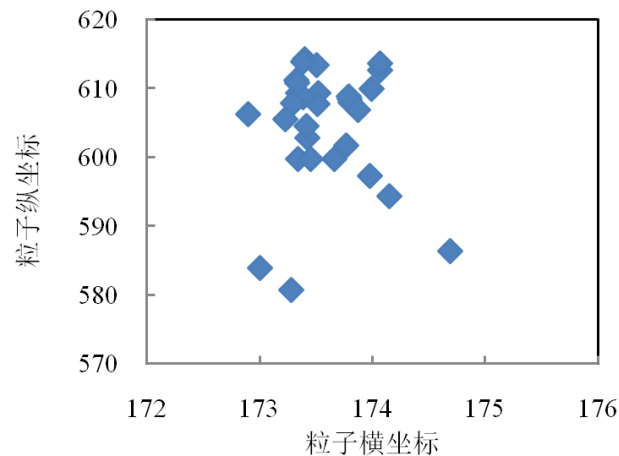


Figure 10. Particle distribution after 5 iterations
图 10. 迭代 5 次后的粒子分布

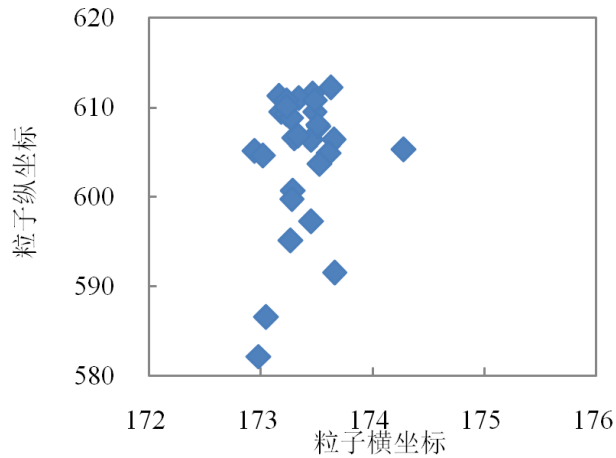


Figure 11. Particle distribution after 10 iterations

图 11. 迭代 10 次后的粒子分布

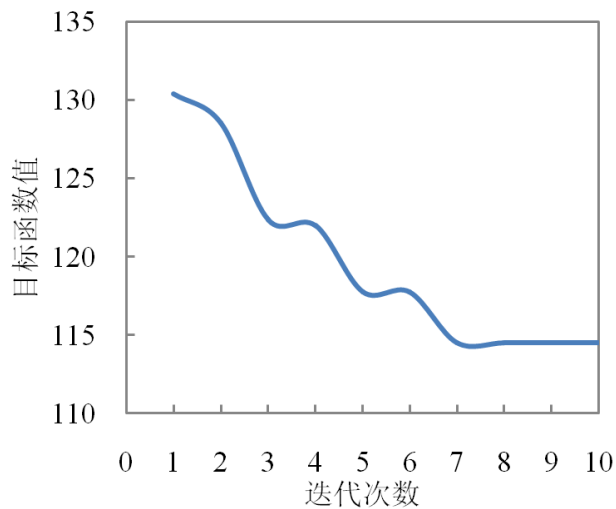


Figure 12. Fitness curve

图 12. 适应度曲线图

Table 2. Optimal curtain parameters

表 2. 最优帷幕参数

帷幕深度 H (m)	帷幕厚度 T (m)	坝基渗流量 Q (m ³ /s)	帷幕的水力坡降 J	坝基允许渗流量[Q] (m ³ /s)	帷幕允许水力坡降[J]
35.35	3.24	1.4818E-2	3.51	1.50E-2	4

定的值不再变化，这表明已经达到了全局最优状态。为了证明用优化算法得到数据的正确性，可将算法找到的最优参数带入到有限元模型中相应的位置进行计算(见表 2)，计算出坝基渗流量以及帷幕的渗透坡降，并与容许值进行比较。

4. 结语

通过二维模型分析有无防渗帷幕时的渗流场情况，得出对基岩进行帷幕灌浆是十分不要的，并采用粒子群优化算法结合有限元软件，对帷幕结构进行优化，计算灌浆帷幕的深度与厚度，使整个计算过程呈自动化，一定程度上减小了工作量，此方法的目的在于寻找出最优帷幕，在满足坝基渗流量和帷幕水力坡降的条件下，以

降低工程造价,提高计算效率。粒子群算法是为了寻找一个最优解,可以运用这个方法对帷幕灌浆的相关参数进行理论分析,为工程实践提供参考。

基金项目

国家自然科学基金青年基金科学基金(51409208)。

参考文献 (References)

- [1] 崔文娟, 伍美华, 邓祥辉. 遗传算法和复合型法确定坝基帷幕灌浆优化方案[J]. 水电能源科学, 2006, 24(4): 60-63.
CUN Wenjuan, WU Meihua and Deng Xianghui. Optimization of curtain grouting for dam foundation by genetic algorithm and compound method. *Hydropower and Energy Science*, 2006, 24(4): 60-63. (in Chinese)
- [2] 党发宁, 田红梅, 王振华. 基于平衡防渗原理的土石坝防渗帷幕优化设计[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 44-48.
DANG Faning, TIAN Hongmei and WANG Zhenhua. Optimum design of anti-seepage curtain for earth-rock dam based on balanced anti-seepage principle. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(4): 44-48. (in Chinese)
- [3] 郑伦鑫, 燕乔, 张胜利. 深厚砂砾石坝基防渗帷幕方案优化[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2015, 37(3): 1-5.
ZHEN Lunxin, YAN Qiao and ZHANG Shengli. Optimization of anti-seepage curtain scheme for deep sand and gravel dam foundation. *Journal of the Three Gorges University: Natural Science Edition*, 2015, 37(3): 1-5. (in Chinese)
- [4] 何云霄, 赵冠. 混凝土坝坝基防渗帷幕深度对渗流量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2013(9): 119-129.
HE Yunxiao, ZHAO Guan. Influence of impervious curtain depth on seepage flow of concrete dam foundation. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(9): 119-129. (in Chinese)
- [5] RAVANDI, E. G., RAHMANNEJAD, R., KARIMI-NASAB, S. and SARRAF, A. Sensitivity analysis of effective parameters on water curtain performance for crude oil storage in Iranian URC using the 2K factorial design and numerical modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016(58): 247-256. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.06.001>
- [6] LI, Z. F., GUO, D. M., WANG, Y. B. and ZHEN, Z. L. Technology research of large underwater ultra-deep curtain grouting in Zhongguan Iron Ore. *Procedia Engineering*, 2011(20): 713-737.
- [7] WANG, G., MA, Z. Y. Hybrid particle swarm optimization for first-order reliability method. *Computers and Geotechnics*, 2017(81): 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.07.013>
- [8] ZHANG, J. R., TANG, Q. H., CHEN, Y. L. and LIN, S. A hybrid particle swarm optimization with small population size to solve the optimal short-term hydro-thermal unit commitment problem. *Energy*, 2016(109): 765-780.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.057>
- [9] ZHANG, Z. B., JIANG, Y. Z., ZHANG, S. H., GENG, S. M. and SANG, G. Q. An adaptive particle swarm optimization algorithm for reservoir operation optimization. *Applied Soft Computing*, 2014(18): 167-177.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.01.034>
- [10] BAI, T., KAN, Y. B., CHANG, J. X., HUANG, Q. and CHANG, F.-J. Fusing feasible search space into PSO for multi-objective cascade reservoir optimization. *Applied Soft Computing*, 2017(51): 328-340. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.12.005>
- [11] SHI, Y., EBERHART, R. Empirical study of partial swarm optimization. *Proceeding of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1999: 1948-1950.
- [12] 赵迪, 张宗亮, 陈建生. 粒子群算法和 ADINA 在土石坝参数反演中的联合应用[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 43-47.
ZHAO Liang, ZHANG Zongliang and CHEN Jiansheng. Application of particle swarm optimization and ADINA in parameter Inversion of earth-rock dam. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(3): 43-47. (in Chinese)