

改进遗传算法在坝基帷幕灌浆方案优化中的应用

崔文娟¹, 柴军瑞^{2,3}, 许增光², 伍美华²

(1. 河南黄河勘测设计研究院, 郑州 450003; 2. 西安理工大学 水电学院, 西安 710048; 3. 三峡大学 土木水电学院, 宜昌 443002)

摘要: 以一般基岩上的混凝土重力坝为例, 采用改进的遗传算法对坝基有排水时的帷幕灌浆参数组合进行优化研究。根据帷幕的厚度进行单元网格剖分, 用有限元数值方法计算渗流场, 以坝基渗流量、坝基渗透压力和幕体本身的最大水力坡降不超过允许值为约束条件, 以帷幕的工程造价最小为目标函数建立优化设计数学模型, 寻找一般情况下的帷幕参数的最优组合, 为工程设计提供参考依据。

关键词: 灌浆帷幕; 有限元法; 帷幕参数; 改进遗传算法; 优化设计

中图分类号: TV 543

文献标识码: A

Application of improved genetic algorithm to optimization of grouting curtain of dam foundation

CUI Wen-juan¹, CHAI Jun-rui^{2,3}, XU Zeng-guang², WU Mei-hua²

(1. Hennan Yellow River Investigation and Design Institute, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. College of Civil and Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Taking a concrete gravity dam on common rock foundation for example, the curtain parameters of dam are studied by the improved genetic algorithm. Based on the depth of the curtain plotted out element and calculated by finite elements. The mathematical model of optimizing design is established according to the allowable seepage discharge, seepage pressure of dam foundation and the maximum hydraulic gradient of the curtain, the minimum cost of the grouting curtain regarded as objective function. Finally, the optimum combination of the curtain parameters is identified, for saving engineering investment.

Key words: grouting curtain; finite element method; curtain parameters; improved genetic algorithm; optimal design

1 引言

帷幕灌浆是大坝基础处理的重要措施之一, 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。防渗帷幕能减小渗透流量, 降低坝基扬压力, 保证坝基、坝肩的稳定, 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^[1]。

帷幕灌浆设计的参数较多, 根据工程地质和人文地质条件, 采用经验公式, 并参照已有的工程实例, 确定帷幕灌浆孔的位置、孔深、孔距和孔径等参数, 假定扬压力折减系数, 求出扬压力, 并据此

进行稳定分析。该扬压力折减系数是一个经验性的比较笼统的数据, 无法具体地反映帷幕灌浆区的渗透系数、厚度和深度等因素对坝基渗透压力的影响。对于工程地质和人文地质条件简单的中、低坝而言, 按此处理一般均能满足工程要求, 但对于坝高较高、地质条件复杂的工程而言, 就需要用其他方法进行分析计算, 对重大的工程还需通过现场灌浆试验才能确定这些参数。

在帷幕灌浆优化方面, 柴军瑞^[2]采用一维渗流理论分析了设置帷幕灌浆时坝地地基面的水头分布, 进而分析了帷幕灌浆各参数对地基面渗透压力的影响, 从降低渗透压力的角度方面提出了最佳帷

收稿日期: 2007-05-30

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目 (No.50579092); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目 (2005); 湖北省青年杰出人才基金项目 (No.2004ABB012); 三峡大学湖北省“楚天学者计划”特聘教授资助项目 (No.603108); 三峡大学科技创新团队资助项目 (No.603402); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目 (No.106-220331); 西安理工大学科技创新研究计划项目 (No.106-210303, 220275)。

作者简介: 崔文娟, 女, 1981年生, 硕士, 主要从事水工结构防排水工程优化方面的研究工作。E-mail: cui_wj@163.com

幕灌浆区厚度的理论;王恩志等^[3]通过三维渗流计算,以渗流量为控制条件,对地层渗透性、帷幕的防渗性能及帷幕深度和长度的敏感性分析,优选出帷幕深度和长度;柴军瑞等^[4]以碾压混凝土坝防渗设施施工造价为目标函数,建立了混凝土防渗面板、坝基帷幕灌浆、坝体及坝基排水设施等防渗设施的优化设计数学模型,求解并得到了该工程防渗设施的优化设计方案;罗平等^[5]借助节点虚流量法、排水子结构和排水孔开关器技术,用三维渗流有限单元法,计算分析大坝渗流场各主要影响因素的作用,研究坝体和坝基的渗流特性,经过对比和综合分析,得出坝基的优选渗控方案。前两篇文献是从理论方面分析研究参数对渗流场的影响;后两篇是给出多种参数组合,经过对比分析得出优选方案。本文用改进遗传算法随机产生帷幕的厚度、深度和渗透系数,根据帷幕厚度的变化进行网格剖分,并进行渗流场有限元数值计算,求出坝基的渗流量、坝基渗透压力和幕体本身的最大水力坡降,以帷幕灌浆总的工程造价最小为目标函数,采用改进遗传算法对帷幕灌浆的设计参数进行优化组合,寻找一般情况下的最优帷幕参数的组合,为工程优化设计提供依据。

2 坝基灌浆帷幕优化的数学模型

2.1 帷幕的各种参数

帷幕灌浆的参数通常包括灌浆孔的位置、孔深、孔距、孔径、排数、排距和帷幕区的平均渗透系数等。帷幕灌浆的位置通常依据大坝型式及其基础应力情况而定。防渗帷幕的深度根据作用水头和基岩的工程地质、水文地质情况确定。帷幕灌浆区的厚度应根据地质条件、帷幕的允许水力坡降、幕体的密实程度和防渗标准及幕体本身的稳定性而定^[6-8]。

本文为了简化渗流计算,采用帷幕灌浆区的平均渗透系数 K_g 、厚度 t_g 、深度 h_g 及帷幕灌浆区前沿距上游坝踵的距离 a_g 这4个定量指标来表示坝基帷幕灌浆(见图1所示)。

2.2 灌浆帷幕的优化数学模型

灌浆帷幕的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。此处以一般岩基上的混凝土重力坝为例,在满足坝基允许的渗流量、坝基渗透压力和幕体本身水力坡降的条件下,使帷幕防渗体工程造价(目标函数)最小。

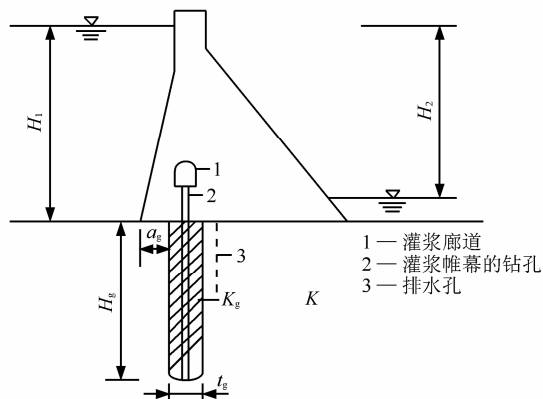


图1 悬挂式帷幕灌浆示意图

Fig.1 Sketch of the open grouting curtain

综上所述,灌浆帷幕优化设计的数学模型如下所示。

目标函数为

$$\min C = C(K_g, h_g, t_g) = c(K_g)h_g t_g \quad (1)$$

约束条件为

$$Q = Q(K, K_g, h_g, t_g, H_1, H_2) \leq [Q] \quad (2)$$

$$P = P(K, K_g, h_g, t_g, H_1, H_2) \leq [P] \quad (3)$$

$$J = J(K, K_g, h_g, t_g, H_1, H_2) \leq [J_a] \quad (4)$$

式中: C 为坝基帷幕灌浆的工程总造价; c 为坝基帷幕灌浆的工程单价(折算为元/ m^3),是帷幕灌浆区渗透系数 K_g 的函数; $[Q]$, $[P]$, $[J_a]$ 分别为坝基的容许单宽总渗流量、坝基面容许总渗透压力及幕体本身允许的水力坡降; Q , P , J 分别为坝基实际的单宽渗流量、坝基面总渗透压力及幕体的水力坡降; K 和 K_g 分别为地基透水岩层和幕体的渗透系数,其余符号如图1所示。灌浆帷幕优化模型的约束条件是无法用显式形式表示的,只能通过渗流场有限元数值方法来表示。

3 改进遗传算法

3.1 基本遗传算法

基于对自然界中生物遗传与进化机制的模仿,Goldberg^[9]总结出了一种统一的最基本的遗传算法——基本遗传算法(Simple Genetic Algorithms,简称SGA)。其遗传进化操作过程简单,容易理解,是各种遗传算法的基本框架,可不依赖于问题的领域和种类,具有一定的应用价值。一般可按下述步骤来构造求解问题的遗传算法:

(1) 确定决策变量、各种约束条件和目标函数。

(2) 确定可行解的染色体编码及解码方法。

(3) 确定个体适应度的量化评价方法; 本目标函数为求最小值问题, 可作如下转换:

$$F(X) = \begin{cases} C_{\max} - f(X), & f(X) < C_{\max} \\ 0, & f(X) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f(X)$ 为目标函数; $C_{\max}$ 为给定的一个很大的数。

(4) 设计遗传算子, 即确定出选择运算、交叉运算、变异运算等遗传算子的具体操作方法; 选择运算使用比例选择算子, 交叉运算使用单点交叉算子, 变异运算使用基本位变算子。

(5) 确定遗传算法的有关运行参数, 包括群体大小 M (一般取为 20~100)、遗传运算的终止代数 T (一般取为 100~500)、交叉概率 P_c (一般取为 0.4~0.99)、变异概率 P_m (一般取为 0.000 1~0.1)。在本算例中取 $M = 80$, $T = 100$, $P_c = 0.60$, $P_m = 0.05$ 。

3.2 改进遗传算法

虽然遗传算法已经取得了广泛的应用, 但存在着收敛速度慢、算法稳定性差、早熟等诸多缺陷, 为此对遗传算法的求解过程做如下改进。

(1) 混合选择。将个体的适应度从大到小排序, 再执行适应度比例选择。这样既有利于进化后期保持群体多样性, 又避免选择概率与适应度偏离的问题。

(2) 自适应遗传算法。Srinivas^[10]等提出一种自适应遗传算法 (Adaptive GA, 简称 AGA)。在该算法中, P_c 和 P_m 能够随适应度自动改变, 但这种调整方法对种群处于进化后期比较合适, 而对于进化初期不利。王小平等^[11]对此进行了改进, 使群体中最大适应度值的个体的交叉率和变异率不为 0, 分别提高到 P_{c2} 和 P_{m2} , 这就相应地提高了群体中表现优良的个体的交叉率和变异率, 使得它们不会处于一种近似停滞不前的状态。为了保证每一代的优良个体不被破坏, 采用精英选择策略, 使它们直接复制到下一代中。经过上述改进 P_c 和 P_m 表达式如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ P_{c1}, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m1}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f_{\max}$ 为群体中适应值最大的; f_{avg} 为每代群体的平均适应值; f' 为交叉的两个个体中适应度值较大的; f 为变异个体的适应度值。一般来说, $P_{c1} = 0.9$, $P_{c2} = 0.6$, $P_{m1} = 0.1$, $P_{m2} = 0.001$ 。

(3) 复合遗传算法。陈昌富^[12]等引入改进的复合形优化方法来改善 SGA 的局部搜索能力。根据适应度值大小来对参数进行排序, 存入 $xcom(M, i)$, 其中 M 为群体大小, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为决策变量个数, 使 $xcom(1, i)$ 优于 $xcom(2, i)$, $xcom(2, i)$ 优于 $xcom(3, i)$, 以此类推, 可知最优个体为 $xcom(1, i)$, 最差点为 $xcom(M, i)$ 。在当代 (如第 t 代) 种群中选取 5 个最优个体进行复合形改造, 将改造过的 5 个最优点重新代入计算, 求出新的最优点和最差点。

本文按上述方法步骤对基本遗传算法进行了改进, 用于坝基帷幕灌浆方案优化。

4 工程算例

基岩上修建的某混凝土重力坝上游水位为 50.0 m, 下游水位为 0, 坝底宽度为 55.0 m, 坝基渗透系数 $K = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, 坝基渗流场计算范围取为 $60 \text{ m} \times (60 \times 2 + 55) \text{ m}$, $ABCD$ 和 $EFGH$ 为第 1 类水头边界条件, 其他的为边界为第 2 类边界条件, 如图 2 所示。

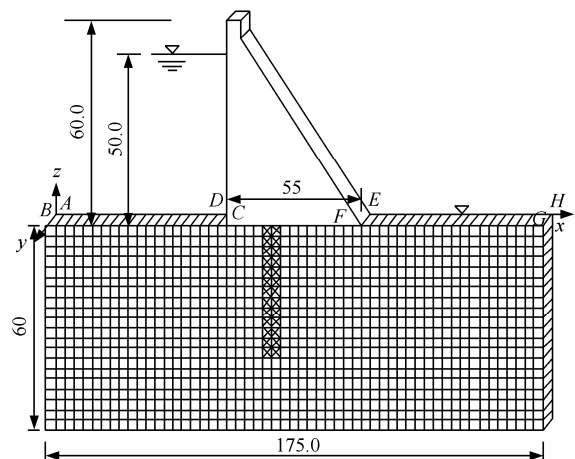


图 2 悬挂式帷幕结构计算示意图 (单位: m)

Fig.2 Computation Model of the open curtain grouting (unit: m)

根据工程经验, 坝基帷幕灌浆深度在 40~60 m 范围内取值, 在灌浆帷幕区厚度大于 5 m 时, 灌浆帷幕区的渗透系数在 $(0.05 \sim 2.0) \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 内取值。假设帷幕体的渗透系数 K_g 与工程造价 c 的关系如表 1 所示。

表 1 帷幕的渗透系数与工程造价的关系
Table 1 The relation of the seepage coefficient and the engineering cost

帷幕的渗透系数 $K_g / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$c / \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$
$K_g \leq 0.4 \times 10^{-8}$	$1.22 c_0$
$0.4 \times 10^{-8} < K_g \leq 0.8 \times 10^{-8}$	$1.14 c_0$
$0.8 \times 10^{-8} < K_g \leq 1.2 \times 10^{-8}$	$1.00 c_0$
$1.2 \times 10^{-8} < K_g \leq 1.6 \times 10^{-8}$	$0.86 c_0$
$1.6 \times 10^{-8} < K_g \leq 2.0 \times 10^{-8}$	$0.70 c_0$

注: c_0 为当渗透系数在 $0.8 \times 10^{-8} \text{ m/s} < K_g \leq 1.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 内时沿坝轴线单位长度帷幕体的工程单价 (元/ m^3)。

采用优化模型中的目标函数和约束条件式 (1) ~ (4), 首先由改进遗传算法随机产生帷幕区的平均渗透系数 K_g 、厚度 t_g 、深度 h_g , 帷幕灌浆区前沿距上游坝踵的距离 a_g 取为 2 倍的帷幕厚度, 即 $a_g = 2t_g$ 。根据帷幕厚度的一半作为剖分单元的长度, 即 $belem = t_g / 2$ 。例如帷幕的网格剖分, 其

深度为 h_g , $nh_g = \text{int}(h_g / belem)$, nh_g 为帷幕竖向的剖分总数, 如果 $h_g - nh_g \times belem$ 大于 $belem / 2$, 则 $h_g = (nh_g + 1) \times belem$, $nh_g = nh_g + 1$; 否则, $h_g = nh_g \times belem$ 。其他的以此类推。假设帷幕厚度取 5 m, 单元长度为 2.5 m, 总共剖分为 $70 \times 24 = 1\,680$ 个单元、3 550 个节点。由于排水孔很小, 为了计算方便, 把排水孔当作给定水头的一条线, 而忽略孔径大小的影响, 排水孔的深度取为帷幕深度的一半。剖分单元选为 8 节点六面体单元, 由于剖分的节点较多, 用直接法存贮时易发生数组溢出, 所以采用压缩存贮及相应的解法来求得渗流场^[13], 解出渗流量、坝基渗透压力和幕体本身最大的水力坡降, 再将这三者作为约束条件返回到改进遗传算法中, 进行优化计算, 求得帷幕在不同约束条件下的最优参数组合, 计算结果如表 2 所示。

表 2 用改进遗传算法计算的结果

Table 2 The calculation cases and the calculation results by the improved genetic algorithm

约束条件			结算结果			
帷幕允许的渗透坡降 $[J]$	帷幕允许的渗透流量 $[Q] / \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	帷幕允许的渗透压力 $[P]$ 系数	帷幕厚度 t / m	帷幕深度 h / m	帷幕渗透系数 $K_g / 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	工程造价 $C / \text{元}$
9	1.0×10^{-5}	0.5	5.161 5	40.000 1	0.053 5	251.880 04 c_0
9	0.5×10^{-5}	0.5	5.161 3	40.000 2	0.059 5	251.874 33 c_0
9	1.0×10^{-6}	0.5	5.161 4	40.000 2	0.063 7	251.875 24 c_0
9	1.0×10^{-5}	0.55	5.161 3	40.000 3	0.059 4	251.874 74 c_0
9	1.0×10^{-5}	0.6	5.161 3	40.000 3	0.059 4	251.874 74 c_0
9.5	1.0×10^{-6}	0.5	5.000 0	40.000 1	0.065 2	244.002 47 c_0
10	1.0×10^{-6}	0.5	5.000 0	40.000 1	0.065 2	244.002 47 c_0

最优方案: 帷幕厚度为 5 m, 深度为 40.000 1 m, 渗透系数为 $0.065 2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 时的渗流场水头等值线如图 3 所示。

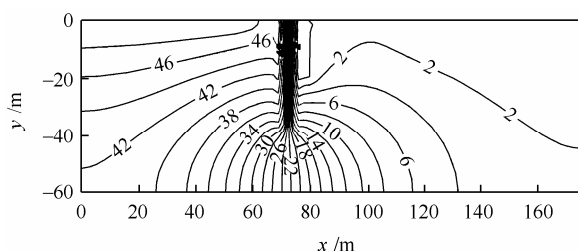


图 3 渗流场水头等值线图 (排水孔断面, 单位: m)
Fig.3 Contour map of hydraulic head (unit: m)

5 结 语

采用改进遗传算法优化设计, 对某混凝土坝坝基防渗帷幕的参数设计进行了分析研究, 得到了坝基帷幕参数在不同约束条件下的最优设计方案。本文的成果对工程设计具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 王世夏. 水工设计的理论和方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [2] 柴军瑞. 坝基最优帷幕灌浆区厚度研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 1999, 7(2): 198—203.
CHAI Jun-rui. On optimum thickness of curtain grouting on dam foundation[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1999, 7(2): 198—203.
- [3] 王恩志, 鲁歧峰, 孙雄. 软基重力坝防渗帷幕优化设计分析[J]. 水利水电技术, 1999, 30(12): 25—27.
WANG En-zhi, LU Qi-feng, SUN Xiong. Impervious wall optimization design of gravity dam on pebble foundation[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1999, 30(12): 25—27.
- [4] 柴军瑞, 李守义, 陈尧隆. 碾压混凝土重力坝防渗设施设计研究[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(3): 292—295.