

基于遗传算法的深层搅拌桩优化设计

冯仲仁¹, 王雄江¹, 姚爱民², 刘兆丰²

(1. 武汉理工大学 土木建筑工程学院 湖北 武汉 430070; 2. 湖北武桥岩土工程有限公司 湖北 武汉 430052)

摘要: 将遗传算法应用于深层搅拌桩优化设计中, 以单位面积内深层搅拌桩的水泥用量为优化目标函数。全部约束条件均按相应规范的要求给出, 并针对传统遗传算法优化设计时遇到的诸如计算量大、早熟收敛等问题, 提出了相应的改进策略, 利用 Visual C++ 编制了计算程序, 通过实例证明了所提优化方法的有效性。

关键词: 深层搅拌桩; 遗传算法; 优化设计

中图分类号: TU 470.3 **文献标识码:** A

Optimal design of deep-mixing piles based on genetic algorithm

FENG Zhong-ren¹, WANG Xiong-jiang¹, YAO Ai-ming², LIU Zhao-feng²

(1. School of Civil Engineering and Architectural, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Wuqiao Geotechnical Engineering Co. Ltd., Wuhan 430052, China)

Abstract: The genetic algorithm was used in optimal design of deep-mixing piles. The cost of deep-mixing piles in one unit area of foundation was taken as the objective function. All the restrains were listed following the corresponding specification. Suggestions were proposed and the modified genetic algorithm was given to deal with the problems of excessive computational cost and premature convergence. Software system of optimal design of deep-mixing piles was developed in Visual C++. The effectiveness of the optimal method was proved by an application example.

Key words: deep-mixing pile; optimal design; genetic algorithm

1 引言

“最优设计”对于工程而言, 就是在优选方案的基础上, 选择合理的参数, 使所设计的工程具有最好的使用性能(如工程的安全、可靠和有效)和最低的材料消耗与制造成本, 以便获得最佳的工程效益^[1]。日前, 在深层搅拌法处理软基方面, 传统的设计方法仍拘泥于根据设计变量的估计量, 应用公式算出安全系数, 或对应力场进行数值分析, 经多次分析计算使稳定系数或参数值符合有关设计规范要求。这种方法既没有考虑各项参数的适时优化问题, 也不能获得保证工程安全可靠、有效且造价最低的设计方案。显然, 在大多数情况下, 存在符合规范要求且更经济合理的设计方案。

遗传算法(Genetic Algorithm 简称 GA)是模拟生物的遗传和长期进化过程发展起来的一种搜索和寻优算法^[2]。它模拟生物遗传进化的步骤, 将

选择、交叉和变异等概念引入到算法中, 用逐次迭代法寻优, 由于 GA 对所要求解问题的无连续性、可微性的要求, 而且, 其寻优过程始终保持整个种群的进化, 因此, GA 为许多困难的全局优化问题开辟了一条新途径^[3, 4]。但传统的 GA 仍存在收敛速度慢, 求解效率不高等缺点, 而且对于高维、多约束的 GA, 还会出现收敛困难的问题。为克服传统 GA 的以上缺点, 本文通过引入交叉、变异率自适应调整方法^[3], 藉此, 提高算法的求解速率, 并将改进的遗传算法用于解决深层搅拌桩的最优设计问题, 以获取符合工程需要、设计规范要求且造价最低的设计方案。

2 优化模型

2.1 设计变量的选取

设计变量的选取原则: 选取那些对目标函数值影响较大, 而且, 为一般设计者不易掌握的、准确

收稿日期: 2002-09-16

基金项目: 湖北省重点科技攻关项目资助(编号: 981P1201)

作者简介: 冯仲仁, 男, 1962年生, 博士, 副教授, 现从事软基处理方面研究和教学工作。

的设计参数, 作为优化过程中的设计变量; 而将另一些根据经验就可以解决, 或根据规范、地质条件和其它要求就能确定的参数作为参量, 预先固定下来, 其基本思想是突出主要矛盾, 简化优化过程^[5]。

根据以上原则, 本文选取搅拌桩面积置换率、桩长、掺灰比为设计变量, 由优化程序给出最优值; 而将土层参数、桩顶垫层厚度、桩径等作为设计参量, 由设计者根据经验、规范要求或地质条件给定。

2.2 目标函数的建立

水泥用量是深层搅拌桩优化设计的目标。在保证加固效果的前提下, 能使造价最低或用料最省。本文取搅拌桩的水泥用量作为优化目标, 其值为

$$F = \frac{2mla}{A_p} \quad (1)$$

式中 m 为搅拌桩面积置换率; l 为搅拌桩长度; a 为掺灰比; A_p 为桩体截面面积。

2.3 约束条件

粉体搅拌桩优化设计的约束条件可分为设计变量约束、设计准则约束。

2.3.1 设计变量约束

设计变量约束即对设计变量的取值范围的约束。根据相应的规范, 并结合工程的地质条件, 上述设计变量的约束条件分别为:

$$30\% \leq m \leq 40\%$$

$$13\% \leq a \leq 20\%$$

$$0.5H \leq l \leq 1.2H \quad (H \text{ 为软弱土层厚度})$$

2.3.2 设计准则约束

(1) 单桩竖向承载力约束

单桩竖向承载力标准值可按下列两式计算, 并取较小值:

$$R_k^d = \eta f_{cu,k} A_p \quad (2)$$

$$R_k^d = \bar{q}_s U_p l + \alpha A_p q_p \quad (3)$$

式中 $f_{cu,k}$ 为与水泥土搅拌桩身加固土配比相同的室内加固土试块的无侧限抗压强度平均值; η 为强度折减系数, 可取 0.35~0.50; $\bar{q}_s$ 为桩周土的平均摩擦力; U_p 为桩周长度; q_p 为桩端天然地基土的承载力标准值; α 为桩端天然地基土的承载力折减系数, 可取 0.4~0.6。

(2) 复合地基承载力约束

$$f_{sp,k} = m \frac{R_k^d}{A_p} + \beta(1-m)f_{s,k} \quad (4)$$

式中 $f_{sp,k}$ 为搅拌桩复合地基承载力标准值; m 为搅拌桩面积置换率; $f_{s,k}$ 为桩间天然地基承载力标准值; R_k^d 为单桩竖向承载力标准值; β 为桩间土承载力折减系数, 当桩端土为软土时, β 可取 0.5~1.0; 当桩端土为硬土时, β 可取 0.1~0.4; 当不能考虑桩间软土的作用时, 可取零;

(3) 下卧层地基强度的验算

$$R_b = \frac{f_{sp,k} A + G - V \bar{q}_s - f_{s,k} (A - F_1)}{F_1} \leq R_s \quad (5)$$

式中 R_b 为假想实体基础地面处的平均压力; G 为假想实体基础的自重; V 为假想实体基础的侧表面积; F_1 为假想实体基础的底面积; R_s 为假想实体基础底面处修正后的地基承载力。

(4) 沉降计算

搅拌桩复合地基的垂直沉降 S 包括桩土复合层本身的压缩变形沉降 S_1 和桩土复合层以下土的沉降量 S_2 , 即 $S = S_1 + S_2$ 。

$$S_1 = \frac{(P + P_0)L}{2E_0} \quad (6)$$

式中 P 为桩土复合层顶面的平均压力,

$$P = \frac{f_{sp,k} A - f_{s,k} (A - F_1)}{F_1}; \quad P_0 \text{ 为桩土复合层底面的}$$

附加压力, $P_0 = R_b - \gamma_p L$ (γ_p 为桩土复合体的平均重度); L 为桩长; E_0 为桩土复合体的变形模量, $E_0 = mE_{s0} + (1-m)E_s$, E_{s0} 和 E_s 分别为桩身水泥和桩间土的变形模量。

S_1 值随上部荷载、桩长、桩身强度等因素变化, 变化范围为 1.0~3.0 cm。 S_2 可按《建筑地基基础设计规范》中规定的分层总和法计算^[6]。

2.4 遗传算法的优化设计步骤

(1) 优化设计模型及种群初始化

由前面的分析, 粉体搅拌桩的优化设计模型为: 在满足所有约束条件下, 求取使 $F(X)$ 趋于最小的向量值 X , 其中 $X = \{l, a, m\}$ 。 F 值越小, 表明可行解的性能越好。在给定浮点向量的搜索范围内随机均匀地产生 n 个初始 $X_i = \{l_i, a_i, m_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 作为初始解种群, 其中 l_i, a_i, m_i 称为基因, X_i 称为一条染色体, 以各设计变量的取值对染色体进行实数编码。

(2) 适应值计算

对种群中的每一条染色体, 按式 (2)~(6) 对单桩竖向承载力、复合地基承载力、下卧层地基强度、复合地基沉降量进行验算, 如果不满足某一要求, 则调整设计变量, 重新进行验算, 直至每一

设计准则约束均满足要求为止。

对满足验算要求的可行解,按式(1)求目标函数值 $F_i (i=1,2,\dots,n)$, 由于 F_i 的值越小,可行解的性能越好,故可设适应值 $f_i = \frac{1}{F_i}$, 于是适应值越大,可行解性能越好^[5]。

(3) 竞争、选择和复制的操作

根据确定的适应值 f_i 的大小,按赌轮法则将当前群体中适应值大的个体选出,并复制到新的群体中。

(4) 交叉与变异操作

遗传算法的参数中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的选择直接影响算法的收敛性。对于不同的优化问题,往往需要反复实验来确定 P_c 和 P_m , 而且很难找到适应于每个问题的最佳值。在此,我们采用 Srinivas 等提出的自适应遗传算法(Adaptive GA), P_c 和 P_m 能够随适应度自动改变^[3]。当种群各个体适应度趋于一致或者趋于局部最优解时,使 P_c 和 P_m 增加;而当适应度比较分散时,使 P_c 和 P_m 减少。同时,对于适应值高于群体平均适应值的个体,相对应于较低的 P_c 和 P_m , 使该解得以保护进入下一代;而低于平均适应值的个体,相对应于较高的 P_c 和 P_m , 使该解被淘汰掉。

在自适应遗传算法中, P_c 和 P_m 按如下公式进行自适应调整:

$$P_c = \begin{cases} k_1 \frac{(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, & f < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

$$P_m = \begin{cases} k_3 \frac{(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, & f < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

式中 $f_{\max}$ 为群体中最大的适应度值; f_{avg} 为每代群体的平均适应度值; f' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值; f 为要变异个体的适应度值。

这里,只要设定 k_1, k_2, k_3, k_4 取 $(0, 1)$ 区间的值,就可以进行自适应调整了。从上式可以看出,自适应的 P_c 和 P_m 能够提供相对某个解的最佳 P_c 和 P_m 。

(5) 最优设计变量的确定

对通过复制、杂交和变异操作而产生的子代群体重复上述步骤,直至迭代收敛,即连续数代得到的最大适应值都没有变化或达到最大进化代数,则计算结束。由此时的最大适应值对应的可行解 $X_0 = \{l_0, a_0, m_0\}$, 即为最优设计变量。

2.5 优化设计的程序编制

依照上述步骤,作者编制了基于 Visual C++ 界

面的深层搅拌桩优化设计程序,该程序界面友好,根据规范要求输入数据变化范围后,就可以进行建筑地基加固处理和高速公路软基优化设计。

3 应用实例

武汉市某环城路部分软基路段拟采用粉喷桩加固,预先选取 K8 + 725~K9 + 000 作为试验段,并对指定的钻孔(K8 + 743.2)内各土层分别进行了室内配合比试验。该路段各土层物理力学指标如表 1 所示,室内配比试验结果见表 2。

表 1 各土层物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical characters of soils

层号	土层	厚度/m	粘聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	重度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
1	人工填土	1.2	—	—	—
2	淤泥质粉粘土	1.3	12.05	3.8	1.49
3	粘土	3.0	10.30	5.9	1.85
4	粘土	2.1	16.7	11.6	1.90

表 2 室内配比试验结果
Table 2 Cement ratio experiment results in laboratory

土层	含水量/%	不同掺灰比(%)下的 90 d 平均抗压强度/kPa				
		13	15	17	18	20
淤泥质粉粘土	44	743.6	780.2	910.3	970.3	1 300.4
粘土	25	1 763.9	1 863.9	2 000.6	2 227.3	2 274.0
粘土	31	1 833.9	2 327.4	2 480.7	2 730.8	2 907.5

该软基加固工程复合地基承载力标准值为 120 kPa,并要求残余沉降量 $S \leq 5.0$ cm。原设计在 K8 + 743.2 段采用直径 0.5 m、长度为 13.0 m 的粉喷桩进行柱状加固,掺灰比为 18%。现按上节所述的计算步骤进行优化设计,优化结果与原设计的比较见表 3。由表 3 可看出,优化设计的水泥用量比原设计的水泥用量大约少 28.3%,优化效果十分明显。

表 3 优化设计与原设计方案的比较
Table 1 Optimal design and original design

设计方案	长度/m	置换率/%	掺灰比/%	排数	列数	总长度/m	水泥用量/kg
原设计	13	36	15	7	72	6 552	327 600
优化设计	11.8	31	13.8	6	72	5 097.6	234 490

4 结 语

遗传算法是基于生物进化原理的一种全局优化算法,其基本原理简单,编程方便。本文利用遗传

体性质的材料, 无论应变能密度因子 S 有多小, 只要时间足够长, 裂隙在蠕变过程中都会失去稳定性。

6 结 语

任何材料的破坏过程都要消耗能量, 因此, 都应受到最小耗能原理的规范。任何耗能过程都将在相应的约束条件下以最小耗能的方式进行, 而这种约束条件便是表示材料能量蓄积程度的强度准则。正是基于材料破坏的这种物理内涵, 本文从最小耗能原理出发, 利用线粘弹性断裂理论推导出了以应变能密度因子表示的粘弹性裂隙蠕变稳定性准则。而另一方面, 将线弹性断裂力学的应变能密度因子断裂判据直接推广到粘弹性状态, 得到了与最小耗能原理相同的稳定性准则表达式, 从而证明了最小耗能原理的正确性。

基于应变能密度理论的混合型裂隙断裂准则已有很多的实验研究, 这些包括各向异性体中的裂隙, 多层组合材料的破坏以及裂隙体的振动等问题。基于应变能密度因子的断裂判据能够考虑所有应力分量对材料破坏的影响, 避免了最大拉应力判据等类似准则只考虑某些应力分量所带来的片面性。应变能密度理论认为, 不管载荷性质如何, 材料只具有

以应变能密度因子的临界值 S_c 表征的一种强度, 而传统断裂理论对同一材料区分为压缩和拉伸强度是这类理论的缺点。

线弹性断裂力学的应变能密度因子断裂判据已经得到很多的实验验证, 而粘弹性状态下的应变能密度因子断裂判据有待于实验的进一步证实。

参 考 文 献

- [1] 周筑宝. 最小耗能原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 张淳源. 粘弹性断裂力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994.
- [3] 李颢, 陈树坚, 郭碧坚. 断裂力学与复合材料力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1989.
- [4] Barry Kean Atkinson. Fracture mechanics of rock [M]. London: Harcourt Brace Jovanovich Publishers, 1987.
- [5] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂-数值实验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 黄克智, 肖纪美. 材料的损伤断裂机理与宏微观力学理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

上接第 422 页

算法对深层搅拌桩进行优化设计作了有意义的尝试, 该方法既继承了传统进化算法全局寻优的搜索方式, 又提高了搜索效率, 并通过实例证明了其优化效果。需要说明的是, 该方法选取的目标函数仅考虑了深层搅拌桩的水泥用量, 因而与实际的工程造价有一定差别。

参 考 文 献

- [1] 徐杨青. 深基坑工程优化设计理论与动态变形控制研究[博士学位论文 D]. 武汉: 武汉理工大学, 2001.
- [2] 潘正君, 康立山, 陈毓屏. 演化算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [3] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [4] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] 肖专文, 龚晓南, 谭昌明. 基坑土钉支护优化设计的遗传算法[J]. 土木工程学报, 1999, 32 (3): 45-49.
- [6] 《地基处理手册》(第二版)编写委员会. 地基处理手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.