

文章编号: 1000-7598-(2007)12-2543-06

复合形模拟退火算法及其在水泥土墙 优化设计中的应用

陈昌富¹, 吴子儒², 龚晓南³

(1. 湖南大学 岩土工程研究所, 长沙 410082; 2. 广州市地下铁道设计研究院, 广州 510100;
3. 浙江大学岩土工程研究所, 杭州 310027)

摘要: 将传统优化方法中的复合形法和智能优化方法中的模拟退火算法有机结合, 得到一种新型的智能计算方法——复合形模拟退火算法。仿真分析表明它比单一的复合形法和模拟退火算法搜索性能更优。按照我国现行规范建立了水泥土墙优化设计数学模型, 探讨了提出的复合形模拟退火算法在水泥土墙支护结构参数优化设计中的应用。给出了工程计算实例, 其计算结果验证了方法的可行性和可靠性。还讨论了基坑内被动土压力区的加固对水泥土墙的嵌固深度和有效宽度的影响。

关键词: 基坑; 水泥土墙; 支护结构; 复合形法; 模拟退火算法

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

Complex simulated annealing and its application to optimization design of cement-soil retaining walls

CHEN Chang-fu¹, WU Zi-ru², Gong Xiao-nan³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Guangzhou Metro Design and Research Institute, Guangzhou 510100, China;
3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Complex method (CM) of traditional optimization methods combined with simulated annealing (SA) of intelligent optimization methods; and a new type of intelligent computation method, complex simulated annealing (CSA), was developed. Simulating analysis results show that the CSA has outstanding advantages in searching performance compared with the complex method or the simulated annealing. In addition, an optimization design model for cement-soil retaining wall (CSRW) was set up according to Chinese design codes; and the CSA was successfully applied to the optimization design of CSRW. Two case studies were given to verify the proposed method. The comparing computation results show that the proposed optimization method is feasible and reliable. Finally, the influence of reinforcement of passive earth pressure area located inside foundation pit on the embedded depth and effective breadth of CSRW was discussed.

Keywords: foundation pit; cement-soil wall; retaining structure; complex method; simulated annealing

1 前言

随着我国城市的飞速发展, 兴建了大量的高层和超高层建筑, 由此深基坑工程日益增多, 并且深度不断增加, 地质与环境条件愈来愈复杂。如何根据工程实际得到既安全可靠又经济合理的最佳设计方案, 已成为工程技术界广泛关注的问题。为此, 莫海鸿和周汉香等^[1]采用改进复合形法对带圈梁的

排桩支护结构进行优化设计, 陈文华和许爱里等^[2]对某基坑降水工程进行了优化设计, 肖专文和龚晓南等^[3]以及贺可强和阳吉宝等^[4]利用遗传算法对土钉支护结构进行优化设计, 而陈昌富^[5]提出了土钉支护结构可靠性分析混合遗传算法和桩墙支护结构位移与安全性动态仿生优化预报法, 此外吴恒和周东等^[6]还将协同演化思想应用于基坑桩锚支护优化设计中。

水泥土墙因具有工期短、成本低、施工简便、能隔水防渗等优点,在软土地区基坑支护中得到广泛应用,但工程中采用的设计计算方法仍是传统的试算校核法,采用优化方法的文献报道很少。陈明中等^[7]曾采用简约梯度法进行优化计算,取得了较理想的结果。然而,简约梯度法是传统的局部最优解搜索算法,不能保证搜索到问题的全局最优解,而且还需要导数信息。对于复杂的目标和约束函数求导会遇到困难,有的甚至不可能。此外,文献^[7]在表述约束条件时是针对单一均质土层,若为多层土,其表达式就复杂得多。另外,张冬梅和王箭明^[8]采用正交试验法对水泥土墙支护结构优化问题进行了探讨,但是对正交试验的变量取值不连续,这样可能会遗漏最优的设计结果。为此,本文通过深入分析现有水泥土墙的设计理论和方法,建立了水泥土墙优化设计数学模型,同时为求解该优化设计数学模型,将传统的复合形优化方法与模拟退火算法结合,得到一种新型的优化计算方法—复合形模拟退火算法,并将其成功地用于深基坑支护水泥土墙优化设计计算中。

2 复合形模拟退火(CSA)算法

众所周知,复合形算法(CM)不需要目标和约束函数的导数信息,且搜索效率较高,但容易陷于局部最优解;模拟退火算法(SA)除了能接受优化解外,还有一个随机接受准则(Metropolis 准则)有限度地接受恶化解,并且接受恶化解的概率慢慢趋于 0,这使得算法能从局部最优解中跳出,趋于全局最优解^[9]。基于此,本文结合两种算法的优点,提出了一种新的不需要导数信息的复合形模拟退火(CSA)算法。该法利用 SA 的突跳性搜索得到 CM 新的初始解,使它能跳出局部极小点,并伴随退温操作通过循环趋近于全局最优解。下面具体介绍 CSA 算法步骤。

2.1 局部最优解搜索复合形法

在 CSA 算法中,复合形法是为了加速局部最优解的搜索,其操作步骤如下:

(1) 在可行域 $D=\{X \mid g_i(X) \geq 0, (i=1,2,\dots,n)\}$ 内随机产生 $2n(n$ 为维数)个初始点,构造一初始复合形。

(2) 复合形算法寻优迭代计算。通过将最差点向复合形的形心反射、次差点向最好点靠拢以及复合形顶点向形心收缩等操作不断构成新的复合形。重复计算,使新的复合形不断地向可行域的最优点靠拢,直至满足给定的最大迭代次数 L_1 ,于是得到

一局部最优解。

2.2 全局最优解搜索模拟退火算法

在局部最优解搜索的基础上,对各个体再采用模拟退火(SA)搜索策略进行搜索,以寻找全局最优解。具体的操作如下:

(1) SA 状态产生函数与接受函数。设计状态产生函数应该是尽可能保证产生的候选解遍布全部解空间,SA 状态产生函数常采用 $X_j = X_i + \eta \xi$, 其中 X_j 、 X_i 分别为新、旧状态; η 为扰动幅度参数; ξ 为随机扰动变量。随机扰动可服从柯西、高斯、均匀分布和混沌机制,本文随机扰动服从均匀分布。状态接受函数是 SA 产生概率突跳能力实现全局最优搜索的关键,SA 通常采用 $\min\{1, \exp(-\Delta/t)\} > \text{random}[0,1]$ 作为接受新状态的条件,其中 Δ 为新旧状态的目标值差; t 为当前退火“温度”。

(2) 初温。在时齐 SA 算法收敛性理论中^[10],根据与物理退火过程的类比关系,初温应选择充分大以使几乎所有产生的候选解都能被接受。试验表明^[9],初温越大,获得高质量解的几率越大,但花费的时间越多。本文采用经验给定初温 $t_0=50^\circ\text{C}$ 。

(3) 退温函数。折衷优化质量和时间性能,本文采用指数退温函数,即 $t_k = \alpha t_{k-1}$, α 为退温速率,取 $\alpha=0.95$ ^[9]。

(4) 抽样稳定和算法终止准则。SA 的 Metropolis 抽样过程采用定步长法,即在各温度下均以 L_2 步进行抽样,通常 $L_2=(10\sim 50)n$ ^[9],本文取 $L_2=150$ 。算法终止准则采用阈值判断法^[9]或者最大迭代代数限制法。

2.3 复合形模拟退火算法流程

复合形模拟退火算法程序流程图如图 1 所示,本文基于 Fortran PowerStation4.0 环境下编制了计算程序。

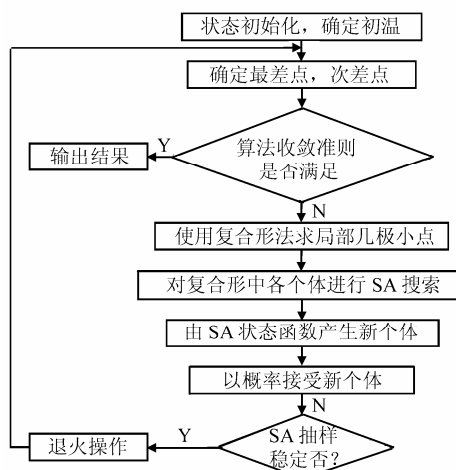


图 1 CSA 混合优化策略

Fig.1 The hybrid optimization strategy of CSA

2.4 CSA 仿真分析

本文对如下试验函数进行了计算:

$$\begin{aligned} \min f_1(X) &= (x_1 - 10)^2 + 5(x_2 - 12)^2 + x_3^4 + 3(x_4 - 11)^2 \\ &\quad + 10x_5^6 + 7x_6^2 + x_7^4 - 4x_6x_7 - 10x_6 - 8x_7 \\ \text{s.t. } &\begin{cases} 127 - 2x_1^2 - 3x_2^4 - x_3 - 4x_4^2 - 5x_5 \geq 0 \\ 282 - 7x_1 - 3x_2 - 10x_3^2 - x_4 + x_5 \geq 0 \\ 196 - 23x_1 - x_2^2 - 6x_6^2 + 8x_7 \geq 0 \\ -4x_1^2 - x_2^2 + 3x_1x_2 - 2x_3^2 - 5x_6 + 11x_7 \geq 0 \\ -10.0 \leq x_i \leq 10.0, i = 1, 2, \dots, 7 \end{cases} \end{aligned}$$

该问题有 4 个非线性约束, 目标函数也是非线的, 在 $X = (2.330\ 499, 1.951\ 372, -0.477\ 541\ 4, 4.365\ 726, -0.624\ 487\ 0, 1.038\ 131, 1.594\ 227)$ 处取得整体极小值 680.630 057 3。分别运用复合形法^[11]、模拟退火算法及本文提出的 CSA 算法分别对之进行求解, 群体大小均为 14, 其中复合形法迭代 200 000 代、模拟退

表 1 不同算法计算结果

算法	$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$	$f(X)$
CM	(2.332 105, 1.954 148, -0.679 456, 4.359 236, -0.593 577, 1.162 395, 1.695 009)	680.989 547
SA	(2.337 143, 1.961 955, -0.412 634, 4.325 317, -0.559 250, 1.104 343, 1.621 875)	680.793 752
CSA	(2.330 422, 1.951 693, -0.478 532, 4.364 952, -0.624 451, 1.038 055, 1.594 184)	680.630 073

火算法迭代 200 000 代、CSA 算法迭代 200 代 (其中每次局部最优解搜索中的复合形法迭代次数为 100 代), 得计算结果见表 1。

表 1 表明, CSA 算法更接近真解, 因此, 它与 CM 法和 SA 相比具有更优良的搜索性能。

3 水泥土墙优化设计模型的建立

3.1 设计变量

水泥土墙支护结构优化设计的决策变量确定为墙体有效宽度 B 、嵌固深度 H_d 和面积置换率 λ (如图 2), 于是有决策向量

$$X = [x_1, x_2, x_3]^T = [B, H_d, \lambda]^T \quad (1)$$

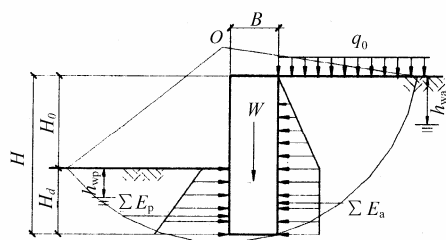


图 2 水泥土墙设计计算模型

Fig.2 Computation model of cement-soil wall

3.2 目标函数

优化设计的目的是在满足安全性条件下, 获得安全、经济的设计方案。对于水泥土墙支护结构, 在给定的开挖深度和地层条件下, 工程上常根据水泥土体积计算成本, 所以可取单位长度水泥土墙的水泥土总方量作为目标函数, 即有:

$$F(X) = \lambda B(H_0 + H_d) = x_3 x_1 (H_0 + x_2) \quad (2)$$

式中: H_0 为基坑开挖深度。

3.3 约束条件

水泥土墙支护结构的设计必须满足正常的使用要求, 即必须满足抗倾覆稳定约束条件 $g_1(X)$ 、抗滑移稳定约束条件 $g_2(X)$ 、整体稳定性约束条件 $g_3(X)$ 、墙顶变形约束条件 $g_4(X)$ 、墙体材料强度约束条件 $g_5(X) \sim g_7(X)$ 、地基土承载力约束条件 $g_8(X) \sim g_{10}(X)$ 以及坑底抗隆起稳定约束条件 $g_{11}(X)$ 、抗流砂稳定约束条件 $g_{12}(X)$ 和抗突涌稳定约束条件 $g_{13}(X)$ 。 $g_1(X) \sim g_{13}(X)$ 表达式的建立详见文献[12]。

3.4 优化设计数学模型

表 2 算例 2 土层性质

层号	厚度 /m	重度 /kN·m ⁻³	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)
1	3.0	18.0	10.0	20.0
2	13.93	17.6	12.0	13.5
3	1.89	19.4	14.2	28.9

综上所述, 可建立水泥土墙支护结构优化设计数学模型如下:

$$\begin{aligned} &\text{求 } X = [x_1, x_2, x_3]^T = [B, H_d, \lambda]^T \\ &\text{使 } \min F(X) \\ &\text{s.t. } \begin{cases} g_1(X) = \frac{M_w + \sum M_p}{\sum M_a} - [K_q] \geq 0 \\ g_2(X) = \frac{\sum M_p + c_0 B + W \tan \varphi_0}{\sum M_a} - [K_h] \geq 0 \\ g_3(X) = K_{sf} - [K_{sf}] \geq 0 \\ g_4(X) = [y] - y \geq 0 \\ g_5(X) = q_u / K_j - (\gamma_c z + q_0 + M_z y_1 / I_B) \geq 0 \\ g_6(X) = \gamma_c z - M_z y_2 / I_B \geq 0 \\ g_7(X) = 0.1 q_u / K_j - E_{az} / (\lambda \times B) \geq 0 \\ g_8(X) = f - (\gamma_c H + q_0) = f - \bar{p} \geq 0 \\ g_9(X) = 1.2 f - (\bar{p} - M_{zz} y_3 / I_B) \geq 0 \\ g_{10}(X) = \bar{p} - M_{zz} y_4 / I_B \geq 0 \\ g_{11}(X) = \frac{\gamma'_2 H_d N_g + c_0 N_c}{\gamma'_1 (H_0 + H_d) + q_0} - [K_1] \geq 0 \\ g_{12}(X) = \frac{(H_0 - h_{wa} + 2H_d) \gamma'}{(H_0 - h_{wa}) \gamma_w} - [K_{ls}] \geq 0 \\ g_{13}(X) = \gamma h_s / \gamma H_s - [K_{TY}] \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

式中: $[K_q]$ 、 $[K_h]$ 、 $[K_{sf}]$ 、 $[K]$ 、 $[K_{ls}]$ 、 $[K_{TY}]$ 和 $[y]$ 分别为抗倾覆稳定性、抗滑移稳定性、整体稳定性、抗隆起稳定性、抗流砂稳定性、抗突涌稳定性安全系数的容许值和墙顶位移容许值; K_j 为水泥土墙的不均匀系数, 取值见文献[13~17]; q_u 为水泥土墙的无侧限抗压强度; f 为墙底土按深度修正后的地基承载力特征值; M_w 、 M_p 、 M_a 分别为墙体自重产生的抗倾覆力矩、被动土压力产生的抗倾覆力矩、主动土压力产生的倾覆力矩; W 、 c_0 、 φ_0 分别为墙体自重、墙底土黏聚力和内摩擦角; K_{sf} 为整体稳定性系数, 可按简化毕肖普法计算求得; y 为墙顶总位移, 由文献[12]中的方法求得; y_1 、 y_2 分别为验算截面形心到最大和最小应力点的距离; M_z 、 E_{az} 分别为墙体计算截面处所受弯矩和土压力; z 为计算截面到墙顶的距离; I_B 、 γ_c 分别为墙体截面惯性矩和墙体重度; y_3 、 y_4 分别为墙底截面形心到最大和最小压力点的距离; M_{zz} 为墙底截面处所受弯矩; γ_1' 、 γ_2' 分别为挡墙后和墙前土层的平均重度; N_g 、 N_c 为地基极限承载力系数; γ 、 γ' 、 γ_w 分别为土层的重度、

有效重度和水的重度; h_s 为不透水层厚度; H_s 为承压水高于含水层顶板水头高度。其他符号见图 2。

4 算例与讨论

4.1 算例 1

文献[18]中工程实例的工程资料如下: 土层性质如表 2 所示, 桩墙后地面堆载为 20 kPa/m^2 , 水泥土重度为 18.5 kN/m^3 , 其无侧限抗压强度为 1 MPa , 墙底土地基承载力特征值为 90 kPa 。要求基坑开挖深度为 5.7 , 6.5 , 7.3 , 9.3 m 不等。原文中选择了开挖深度为 5.7 m 的 I 区进行计算。原设计取桩墙埋入深度为 6.3 m 、墙宽为 4.7 m 进行计算, 置换率约为 0.90 。采用本文的方法计算, 得到的结果为: 有效宽度 $B=3.654 \text{ m}$, 嵌固深度 $H_d=6.753 \text{ m}$, 置换率 $\lambda=0.600$ 。与原设计相比, 虽然嵌固深度增加了 0.453 m , 但有效宽度减小 1.046 m 、置换率减小 0.3 , 所以每延米水泥土体积减少了 46.2% , 节约了用材, 降低了成本。原设计结果与本文优化结果如表 3。

表 3 算例 1 传统方法和优化方法对比

Table 3 The comparison between traditional method and optimization method for Example 1

计算项目	抗倾覆 稳定性	抗滑移 稳定性	整 体 稳定性	墙体变形 /mm	墙体应力/kPa			水泥土墙底压力/kPa			抗隆起 稳定性
					最大	最小	剪切	平均	最大	最小	
原设计结果	1.52	1.38	—	—	—	—	—	—	—	—	1.79
是否满足要求	√	√	—	—	√	—	√	—	—	—	—
优化结果	1.49	2.10	1.88	0.64	230.64	0.26	64.29	250.37	398.57	102.17	1.88
是否满足要求	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

注: “—”表示未计算, “√”表示满足要求, “×”表示不满足要求。

4.2 算例 2

文[19]中工程要求基坑开挖深度为 5.2 m , 桩墙后地面堆载为 10 kPa/m^2 , 水泥土重度为 17.5 kN/m^3 , 无侧限抗压强度为 1.4 MPa 。基坑开挖深度范围内为淤泥质黏土, 重度为 17 kN/m^3 , 黏聚力为 10 kPa , 内摩擦角为 8° , 墙底地基承载力特征值为 80 kPa 。

原设计取水泥土墙埋入深度为 7.4 m , 墙宽为

4.6 m 进行计算, 置换率约为 0.86 , 计算结果如表 4。而采用本文方法计算得到的结果为: 有效宽度 $B=3.538 \text{ m}$, 嵌固深度 $H_d=8.153 \text{ m}$, 置换率 $\lambda=0.700$, 其相应的各约束条件值如表 4。从两者的计算结果可以得知, 在满足正常使用的前提下, 本文方法使每延米水泥土体积减少了 33.7% , 取得了技术可靠、经济合理的设计结果。

表 4 算例 2 传统方法和优化方法对比

Table 4 The comparison between traditional method and optimization method for Example 2

计算项目	抗倾覆 稳定性	抗滑移 稳定性	整 体 稳定性	墙体变形 /mm	墙体应力/kPa			水泥土墙底压力/kPa			抗隆起 稳定性
					最大	最小	剪切	平均	最大	最小	
原计算结果	1.20	1.15	—	—	507.5*	—	5.52	—	—	—	—
是否满足要求	√	√	—	√	√*	×	√	√	×	×	√
优化结果	1.37	1.84	1.52	4.11	190.51	1.49	50.99	243.67	393.99	93.36	1.46
是否满足要求	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

注: “—”表示未计算, “√”表示满足要求, “×”表示不满足要求, “*”处表示原设计采用不同于本文的计算方法和验算标准。

4.3 被动区加固对设计结果的影响

设计计算中发现, 当土质很差时, 水泥土墙的嵌固深度和有效宽度明显要大得多。因此, 当土质

很差的软土地区采用水泥土墙支护结构时, 可对坑底被动土压力区进行加固处理。下面讨论被动区加固对水泥土墙嵌固深度和有效宽度的影响。

为简化计算,假定加固范围在垂直于挡墙的方向有足够的尺寸,即保证加固层被最危险滑动面完全切过(图 3)。取文[20]的工程实例进行讨论。各土层的性质如表 5,基坑开挖深度为 5.8 m,地面堆载为 15 kPa/m^2 ,水泥土无侧限抗压强度大于 1 MPa 。改变被动土压力区的加固层深度,按本文优化设计计算方法得计算结果如图 4 和图 5 所示。由图 4 可知,水泥土墙嵌固深度 H_d 随被动区加固深度 H_{jg} 的增加而减少,并且初始段减小较快, $H_{jg} \geq 4.0 \text{ m}$ 后减小变缓慢;另由图 5 可知,水泥土墙宽度 B 随 H_{jg} 的增加也相应减少,但初始段减小较慢,而当 $H_{jg} \geq 4.0 \text{ m}$ 后减小变快。

表 5 土层性质指标
Table 5 soils' property index

层号	土层名称	厚度 /m	重度 / kN/m^3	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / $(^\circ)$
1	杂填土	0.5~2.5			
2	粉质黏土	0.0~1.6	18.9		
3	淤泥粉黏土	18.7~23.9	17.4	3.4	13.5
4	淤泥粉黏土	18.0~20.8	18.1	14.6	12.7

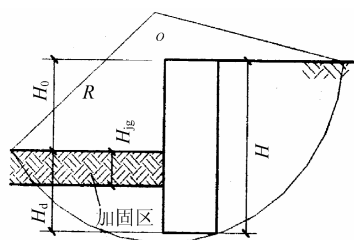


图 3 被动土压力区加固深度示意图

Fig.3 The reinforced depth of passive earth pressure area

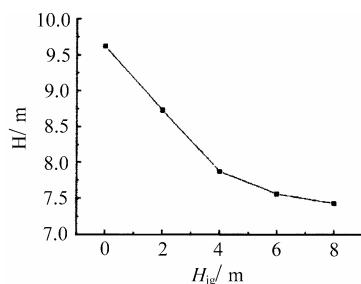


图 4 嵌固深度随加固深度的变化关系

Fig.4 The relation of embedded depth's change with reinforced depth

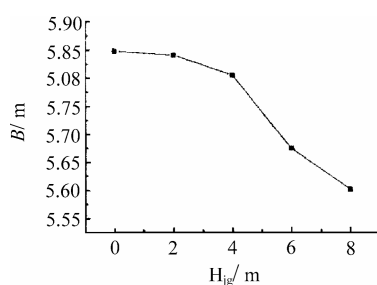


图 5 有效宽度随加固深度的变化关系

Fig.5 The relation of effective width's change With reinforced depth

5 结 论

(1)提出了一种新型的复合形模拟退火混合优化策略,仿真分析表明,其搜索性能优于单一的复合形优化方法和模拟退火算法。

(2)将优化方法用于水泥土墙支护结构的优化设计,可有效地避免传统试算校核法不仅计算繁琐,而且难以保证得到既安全可靠、又经济合理的设计方案的缺点。

(3)水泥土墙支护结构优化设计涉及许多复杂的约束函数,而传统优化方法大都需要目标函数和约束函数的导数信息,并且容易陷于局部最优解,这对优化问题求解带来很大的困难。本文提出的水泥土墙支护结构复合形模拟退火混合优化设计方法只需要目标函数值信息,而且总能有效地搜索到全局最优解。

参 考 文 献

- [1] 莫海鸿,周汉香,赖爱平. 基坑支护桩结构优化设计[J]. 岩土工程学报, 2001,23(2):144—148.
MO Hai-hong, ZHOU han-Xiang, LAI Ai-ping. The optimal design of soldier pile system in deep excavation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001,23(2):144—148.
- [2] 陈文华,许爱里,马丽丽,等. 最优化法在深基坑降水工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3):37—45.
CHEN Wen-hua, XU Ai-guo, MA Li-li .et al. Application of Optimization Method in Groundwater Drawdown Project for Deep Excavation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 15(3): 37—45.
- [3] 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):73—80.
XIAO Zhuan-wen, GONG Xiao-nan, TAN Chang-ming. Genetic algorithms for optimal design of soil nailing for deep excavations [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1999, 32 (3): 73—80.
- [4] 贺可强,阳吉宝,王胜利. 遗传算法在土钉支护结构优化设计中的应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (5): 567—571.
HE Ke-qiang, YANG Ji-bao, WANG Sheng-li. Application of genetic algorithms in the optimization of soil-nail bracing [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(5): 567—571.
- [5] 陈昌富. 仿生算法及其在边坡和基坑工程中的应用 (博士学位论文). 长沙:湖南大学.
- [6] 吴 恒,周 东,李陶深,等. 深基坑桩锚支护协同演化

- 优化设计[J].岩土工程学报, 2002, 24(4):465—470.
- WU Heng, ZHOU Dong, LI Tao-shen .et al. Co-evolution optimization of anchored piles in row for deep foundation pit[J].**Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(4): 465—470.
- [7] 陈明中, 龚晓南, 梁 磊. 深层搅拌桩支护结构优化设计[J].建筑结构, 1999, (5):3—4.
- CHEN Ming-zhong, GONG Xiao-nan, LIAN Lei. Optimum design of retaining structure with deep mixing Pile [J]. **Building Structure**, 1999, (5): 3—4.
- [8] 张冬梅, 王箭明. 正交试验法在水泥土搅拌桩挡墙优化设计中的应用[J]. 建筑结构, 2000, 11, 30(11):34—34.
- ZHANG Dong-mei, WANG Jian-ming. Optimum Design for Cement Soil Pile Retaining Wall by use of Orthogonal Method [J]. **Building Structure**, 2000, 11, 30(11): 34—34.
- [9] 康立山, 谢 云, 尤矢勇, 等. 非数值并行算法—模拟退火算法[M]. 北京科学出版社, 1998.
- [10] E. H. L. Aarts, J. H. M. Korst. Simulated Annealing and Boltzmann machines[M]. John Wiley & Sons, 1989: 457—459.
- [11] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集[M].北京:清华大学出版社, 1991.
- [12] 陈昌富, 吴子儒, 曹 佳, 等. 水泥土墙支护结构遗传进化优化设计方法 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 224—229.
- CHEN Chang-fu, WU Zi-ru, CAO-jia .et al. GAs-based optimization design method of cement-soil retaining wall [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(2): 224—229.
- [13] 陈忠汉, 黄书轶, 程丽萍. 深基坑工程(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社, 2002.
- [14] GB 50007—2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [15] JGJ 120—99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [16] SJG05—96, 深圳地区建筑深基坑支护技术规程[S].
- [17] YB 9258—97, 建筑基坑工程技术规范[S].
- [18] 蔡春明, 宋会莲, 罗召华, 等. 水泥土搅拌桩护墙设计与施工的研究[J].中南工学院科技通讯, 1998, 14(1):10-12.
- [19] 刘国品, 朱耀华. 宁波市金光中心基坑水泥搅拌桩挡墙支护[J]. 浙江水利科技, 1999, (增刊): 14—15.
- LIU Guo-pin, ZHU Yao-hua. Retaining wall support for cement mixing pile of foundation pit of Jinguang center building in Ningbo [J]. **Zhejiang Hydrotechnics**, 1999, (sup.): 14—15.
- [20] 俞跃平. 深层搅拌桩法深基坑围护中的应用[J].岩土工程, 2000, 3(12):31—32.
- YU Yue-ping. Application of deep mixing pile method in deep foundation pit support [J]. **Geotechnical engineering world**, 2000, 3(12): 31—32.

上接第 2542 页

- [2] Wong F S. Slope reliability and response surface method [J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1985, 111:32—53
- [3] Bucher C G, Bourgund U. A fast and efficient response surface approach for reliability structural problems [J]. **Structural Safety**, 1990, 7:57—66.
- [4] 武清玺, 卓家寿. 结构可靠度分析的变 f 序列响应面法及其应用[J]. 河海大学学报, 2001, 29(2):75—78.
- [5] WU Qing-xi, ZHUO Jia-shou. A sequential response surface method with various f and Its application to structural reliability analysis[J]. **Journal of Hohai University**, 2001, 29(2):75—78.
- [6] Liu YW, Moses F. A sequential response surface method and its application to the reliability analysis of aircraft structural system[J]. **Structural Safety**, 1994, 16:39—46.
- [7] Faravelli L. Response-surface approach for reliability analysis[J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 1989, 115 :2736—2781.
- [8] Raja Shekhar M R, Ellingwood B R. A new look at the response surface approach for reliability analysis[J]. **Structural Safety**, 1993 126:205—220.
- [9] 赵国藩. 工程结构可靠性理论及其应用[M]. 大连:大连理工大学出版社, 1996, 248—260.
- [10] 赵明华, 桥梁桩基计算与检测[M]. 北京:人民交通出版社, 2000, 100—103.