

基于混沌粒子群算法的桩基础优化设计方法*

王成华, 曾超峰, 刘伟鹏
(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

[摘要] 为提高桩基础设计工作的效率及质量,将一种混沌粒子群算法引入到桩基础优化设计中。建立了以桩基础造价为目标函数的桩基础优化设计数学模型。编制了此数学模型的优化设计计算程序并对桩基础工程算例进行分析,从而得到了桩基础的若干主要参数对其造价影响的基本规律,证明了本优化方法具有可行性及比普通算法的优越性。

[关键词] 桩基础; 优化设计; 混沌粒子群算法; 基础造价

中图分类号: TU473.1+2 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2016)02-0076-06

Optimal design method for pile foundation based on chaotic particle swarm algorithm

Wang Chenghua, Zeng Chaofeng, Liu Weipeng

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and quality of the design of pile foundations, a chaotic particle swarm algorithm was introduced in the optimal design of pile foundations. The mathematical model of pile foundation optimization design that takes pile foundation cost as objective function was established. A calculation program corresponding to the model was coded and a typical pile foundation engineering case was analyzed, and the basic rules of influences of main design parameters on the cost of pile foundations were then obtained, which demonstrated the feasibility of the optimal method as well as its advantages to those commonly used methods.

Keywords: pile foundation; optimal design; chaotic particle swarm algorithm; foundation cost

0 引言

近十年来,以降低造价为目标的桩基优化设计越来越引起人们的重视,目前的研究主要集中在三个方面:理论机理的研究,目标函数的建立,优化算法的选择与改进。其中优化算法的选择十分重要,好的优化算法能够既迅速又准确地搜索到目标函数的极值点,从而找到最优结果。

目前,国内许多学者对桩基础的优化设计已经开展了一系列研究,许多优化算法已在设计中得到了应用。阳吉宝等^[1,2]采用数学规划法对桩筏基础的优化设计进行了研究,但此法要求目标函数能够用显式表达式表示,此法对于大型的结构优化问题收敛性不太好且迭代次数较多。蒋启平^[3]利用遗传算法做了桩基础优化分析,但该算法技术比较复杂,参数较多,不易程序化,并且收敛速度慢,计算结果精度不高。王成华等^[4,5]通过采用粒子群算法进行基坑挡土结构及边坡的优化设计证明粒子群优化方法对于支护工程具有收敛速度快、收敛效果好、参数少、易实现程序化等众多优点。

本文将混沌粒子群算法引入到桩基础优化设计中,建立优化设计的数学模型;并通过对应桩下群桩基础算例的优化设计,证明此粒子群优化设计方法是可行的。

1 混沌粒子群算法原理

1.1 粒子群算法(PSO)基本原理

PSO初始化为一群随机粒子(随机解),然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己^[6,7]。一个极值是粒子本身所找到的最优解,即个体极值 *pbest*,另一个极值是种群目前找到的最优解,即全局极值 *gbest*。

在找到这两个最优值时,每个粒子根据如下的公式来更新自己的速度和位置:

$$v_{k+1} = c_0 v_k + c_1 (pbest_k - x_k) + c_2 (gbest_k - x_k) \quad (1)$$

$$x_{k+1} = x_k + v_{k+1} \quad (2)$$

式中: v_k, v_{k+1} 分别为 k 时刻及下时刻 $k+1$ 时刻粒子的速度向量; x_k 及 x_{k+1} 分别为 k 时刻及下一时刻 $k+1$ 时刻粒子的位置向量; $pbest_k$ 为 k 时刻粒子本身所找到的最优解的位置; $gbest_k$ 为 k 时刻整个种群目前找到的最优解的位置; c_0, c_1, c_2 为群体认知系数, c_0 一般介于(0,1)之间, c_1, c_2 取(0,2)之间的随机数; v_{k+1} 为 $v_k, pbest_k - x_k, gbest_k - x_k$ 矢量之和。

每一颗粒子的速度都会被限制在一个最大速度向量 v_{max} 内,即若 $v_k > v_{max}$ 时, $v_k = v_{max}$; 或 $v_k <$

* 国家自然科学基金资助项目(51478313, 50978182)。
作者简介:王成华,教授,Email:Chwang@tju.edu.cn。

- v_{max} 时, $v_k = -v_{max}$ 。

1.2 基本粒子群算法的不足

基本粒子群算法对初始解群十分敏感,而它的初始化过程是随机的,随机过程虽然可以保证初始解群分布均匀,但对个体的质量不能保证,解群中会有一些远离最优解,有可能使粒子群算法陷入局部最优解。

1.3 混沌粒子群优化算法(CPSO)

混沌是自然界广泛存在的一种非线性现象。具有随机性、遍历性、规律性等特点,将混沌引入粒子群算法就是对基本粒子群优化算法不足的改进。基本思路是:利用混沌运动的遍历性,产生大量初始群体,从中择出最优初始群体;对当前粒子产生混沌扰动,以使解跳出局部极值区间。

Logistic 映射就是一个典型的混沌系统,迭代公式^[6]如下:

$$z_{i+1} = \mu z_i(1 - z_i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, \mu \in (2, 4]) \quad (3)$$

式中: μ 为控制参数,当 $\mu = 4, 0 \leq z_0 \leq 1$ 时, Logistic 完全处于混沌状态; z_i 及 z_{i+1} 分别为 i 时刻及下一时刻 $i+1$ 时刻的随机变量。

设求解 n 维优化问题:

$$\begin{aligned} \min f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{s. t. } a_i \leq x_i \leq b_i \end{aligned} \quad (4)$$

式中: x_i 为 i 时刻粒子位置; a_i 及 b_i 分别为 x_i 的下边界及上边界值。

该问题的混沌粒子群优化算法步骤如下:

(1)混沌初始化。随机产生一个 n 维且每个分量数值在 $(0, 1)$ 之间的向量 $z_1 = (z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1n})$ 。根据式(3), $z_{i+1j} = \mu z_{ij}(1 - z_{ij})$ ($j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, N-1$), 得到 N 个分量 z_1, z_2, \dots, z_N 。将 z_i 的各个分量截波到优化变量的取值范围,即 $x_{ij} = a_j + (b_j - a_j)z_{ij}$ ($j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, N$)。计算目标函数,从 N 个初始粒子中选择性能较好的 m 个解作为初始解,随机产生 m 个初始速度。

(2)先将 m 个解当做每个粒子的个体极值 $pfbest_{ik}$, 将其相应位置当做个体极值位置 $pxbest_{ik}$ 。

(3)随机产生一个 n 维且每个分量数值均在 $(0, 1)$ 之间的向量 $u_0 = (u_{01}, u_{02}, \dots, u_{0n})$ 。执行规定次数内的循环操作(迭代次数 $k <$ 规定迭代次数 n_{max}),且循环变量 $i = 1, 2, \dots, m$ 。

(4)按式(1)更新自己的速度向量 v_i , 并把它限制在 v_{max} 内。

(5)根据式(3),产生 n 维向量 $u_1 = (u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1n})$, $u_{1j} = 4u_{0j}(1 - u_{0j})$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 将 u_1 的各个分量截波到混沌扰动范围 $[-\beta, \beta]$ 内,扰动

量 $\Delta x = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)$ 的计算式为 $\Delta x_j = -\beta + 2\beta u_{1j}$, $u_0 = u_1$; $x_{ik+1} = x_{ik} + v_{ik+1}$, $x'_{ik+1} = x_{ik} + v_{ik+1} + \Delta x$, 计算 x_{ik+1}, x'_{ik+1} 这两个位置的适应值(即目标函数的解) f 和 f' 。若 $f' < f$, 则 $x_{ik+1} = x'_{ik+1}$ 。完成 m 次循环。

(6) $k = k + 1$, 计算第 i 个粒子的适应值 f_i 。若粒子的适应值优于原来的个体极值,则设置当前适应值为个体极值 $pfbest_{ik}$, 设置当前位置为个体极值位置 $pxbest_{ik}$ 。

(7)根据各个粒子的个体极值 $pfbest_{ik}$, 找出全局极值 $gfbest_k$ 和全局极值位置 $gxbest_k$ 。完成 m 次循环和规定次数内的循环。输出全局极值 $gfbest_k$ 和全局极值位置 $gxbest_k$ 。

2 桩基础混沌粒子群优化模型

2.1 目标函数

桩基础优化设计的目的,是在满足各种约束条件的基础上,追求经济性^[8]。通过调整桩长、桩距、桩径等参数,使桩基础造价 F 最低。目标函数的表达式为:

$$F = \min(F_1 + F_2) \quad (5)$$

式中: F_1 为承台造价; F_2 为基桩造价。

桩基造价与各种因素相关,例如成桩工艺、混凝土价格、钢筋价格等。为了便于研究,假定桩基造价与各种材料的用量成正比,对承台及桩中混凝土和钢筋各取一个价格系数,即总共有 4 个价格系数,当承台与桩中的混凝土或钢筋的标号或种类相同时,视其价格系数相同。

承台造价函数表达式为:

$$F_1 = C_1 A B t_c + C_2 (V_{s1} + V_{s2}) \quad (6)$$

式中: C_1, C_2 分别为承台单位体积混凝土和钢筋的造价系数; A, B 分别为承台的长、宽; t_c 为承台厚度; V_{s1}, V_{s2} 分别为承台内抗拉、抗压钢筋的体积。

当桩为圆桩时基桩总造价函数表达式为:

$$F_2 = \sum [C_3 V_{pi} + C_4 (M_{si} + M_{gi})] \quad (7)$$

式中: C_3, C_4 分别为桩体积混凝土和单位质量钢筋价格系数; V_{pi} 为第 i 根桩的混凝土体积; M_{si}, M_{gi} 分别为第 i 根桩的纵筋质量和箍筋质量。

将单根桩总体积近似作为混凝土体积,则:

$$V_{pi} = d^2 l_i \quad (8)$$

式中: d 为圆桩直径; l_i 为第 i 根桩的桩长。

当桩径为 300 ~ 2 000mm 时,正截面配筋率可取 0.65% ~ 0.2%,其他配筋率按桩径线性内插取值。

考虑到各桩只受竖向力作用,第 i 根桩纵筋质

量 M_{gi} 计算公式为:

$$M_{gi} = k_b \rho \rho_i d^2 l_i \quad (9)$$

式中: ρ 为钢筋的密度, 取 $\rho = 7.8t/m^3$; ρ_i 为第 i 根桩的截面配筋率; k_b 为钢筋笼长度与桩长的比值, 可根据实际需要选取。

在轴压荷载下, 桩所配置的箍筋对混凝土起到约束加强作用, 可大幅提高桩身受压承载力, 而桩顶部分荷载最大, 故在桩顶部分的箍筋适当加密。令桩顶下 $5d$ 范围内的箍筋适当加密 (取箍筋间距 $100mm$), 桩顶下 $5d$ 范围以下部分取箍筋间距 $200mm$ 。因此, 第 i 根桩箍筋的质量 M_{gi} 计算公式为:

$$M_{gi} = 4\rho_i(d - a_s)[5d/0.1 + (l_i - 5d)/0.2] \quad (10)$$

式中: ρ_i 为单根钢筋的公称质量, 采用直径 $8mm$ 的钢筋时, ρ_i 值为 $0.222kg/m$; a_s 为桩的保护层厚度, 取 $a_s = 50mm$ 。

则式(7)可写为:

$$F_2 = \sum \left\{ C_3 d^2 l_i + 2C_4 \rho_i d^2 l_i / 3 + 4C_4 \rho_i (d - a_s) [5d/0.1 + (1.5d)/0.2] \right\} \quad (11)$$

在目标函数中不仅包括了混凝土的造价, 也考虑了钢筋的造价, 比以往方法中笼统地考虑钢筋、混凝土造价的情况更符合实际。

2.2 约束条件

桩基础优化设计的约束条件一般分为三个方面: 一是强度约束, 保证桩基有足够的承载力; 二是变形约束, 保证基础不会产生过大的沉降或者差异沉降; 三是构造约束, 按照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[9] (简称桩基规范) 和工程经验来确定。

(1) 桩基竖向承载力可按式^[9]计算:

$$\begin{cases} N_k \leq R \\ N_{kmax} \leq 1.2R \end{cases} \quad (12)$$

式中: N_k 为基桩平均竖向力标准值; N_{kmax} 为偏心荷载作用下的桩顶最大竖向作用力标准值; R 为基桩承载力特征值。

(2) 变形约束^[9]:

$$s \leq [s] \quad (13)$$

式中: $[s]$ 为桩基变形沉降允许值, 根据上部结构对桩基沉降变形的适应能力和使用上的要求确定其值; s 为计算的桩基最终沉降量。

(3) 桩间距约束:

$$3d \leq D \leq 6d \quad (14)$$

式中 D 为相邻两桩的中心间距。

(4) 桩径约束:

$$d_{min} \leq d \leq d_{max} \quad (15)$$

式中 d_{max} , d_{min} 分别为最小、最大桩径, 其值一般是由施工条件决定。

(5) 桩长约束:

$$l_i \geq l_{min} \quad (16)$$

式中 l_{min} 为桩最小长度。

(6) 承台厚度约束:

根据桩基规范, 承台要满足受冲切和受剪切要求, 其厚度 t 必须不小于某一下限值 t_0 , 即:

$$t \geq t_0 \quad (17)$$

(7) 承台受弯约束:

$$M \leq f_y A_s (h_0' - x/2) \quad (18)$$

式中: M 为承台内最大弯矩; f_y 为受拉钢筋抗拉强度设计值; h_0' 为承台截面的有效高度; x 为混凝土相对受压区高度。

(8) 承台受冲切约束:

$$N_i \leq 2.8(b_p + h_0)\beta_{hp} f_t h_0 \quad (19)$$

式中: N_i 为扣除承台和其上土重后在荷载效应基本组合下基桩的静反力设计值; b_p 为方桩的边长, 当桩截面为圆形时需换算成方桩, 换算截面边长 $b_p = 0.8d$; h_0 为承台冲切破坏锥体的有效高度; β_{hp} 为承台受冲切承载力截面高度影响系数, 当 $h \leq 800mm$ 时, β_{hp} 取 1.0 , 当 $h \geq 2000mm$ 时, β_{hp} 取 0.9 , 其间接线性内插法取值; f_t 为承台混凝土抗拉强度设计值。

3 程序编制

利用 FORTRAN90 软件自编了优化设计程序 CPSOPILES, 共包括 1 个主程序和 3 个子程序。其中主程序为 CPSO, 共有 290 行语句, 其主要功能是读入初始参数, 产生初始粒子, 对粒子进行迭代优化, 并对粒子进行扰动, 输出最终结果。主程序 CPSO 流程图见图 1。子程序 ZAOJIA 共有 610 行语句, 其主要功能是根据主程序提供的参数, 对桩基础进行承载力、变形、受冲切等约束条件的验算, 计算出基础的总造价。子程序 ZAOJIA 流程图见图 2。子程序 ALF 共有语句 32 行, 其功能是计算地基土的附加压力系数。子程序 RAD 共有语句 4 行, 其功能是产生 $(0, 1)$ 区间里的随机数, 用以产生初始粒子, 计算粒子的速度等。

4 算例分析

4.1 算例参数分析

某柱下群桩基础只承受竖向力作用, 上部结构荷载效应的标准组合值为 $45MN$, 荷载效应的准永久组合值近似取标准组合值乘以 0.95 , 荷载效应的基本组合值近似取标准组合值乘以 1.2 。承台最大弯矩为 $3000kN \cdot m/m$, 桩群采用矩形均匀布桩, 使

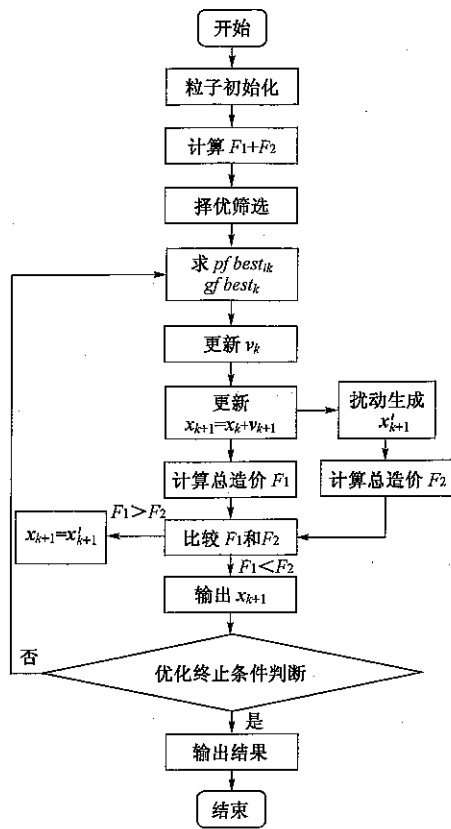


图 1 主程序 CPSO 流程图

上部荷载重心与桩反力合力点重合。

地基土为成层土,土层分布情况和物理参数如表 1 所示。基础埋深 2m,承台下地基承载力特征值为 150kPa。

在本例优化设计与分析中,桩的最小限定长度取 $l_{min} = 10d$ 。钢筋笼长度与桩长的比值 k_b 取 2/3。最小及最大桩径分别取 $d_{min} = 300\text{mm}$, $d_{max} = 1\ 000\text{mm}$ 。对此桩基础进行优化设计,将桩长 l 、桩径 d 、桩间距和承台长度 A 、宽度 B 、厚度 t_c 均作为优化变量,优化结果如表 2 所示。从表 2 的优化结果可以看出,最优结果将第⑤层砂质粉土作为桩端持力层,这是因为这一土层较硬,土层的桩端承载力要大于附近土层。

为了探讨各个参数对桩基础造价的影响,令某一参数取若干固定值,在某一固定值下优化其他参数,得出最优结果,从而得出桩基础最低造价与各个参数取值的关系。

(1) 令桩长 l 取不同值,优化其他参数,桩基础造价 F 与桩长 l 关系曲线如图 3 所示。当 $l < 30.0\text{m}$ 时,随着 l 增大, $F-l$ 曲线随桩长增加呈递减趋势。这是由于桩长较短时桩端持力层较差,基桩承载力导致桩数大量增加,从而使承台尺寸增大,造成造价上升;当 $l > 30.0\text{m}$ 时,随着 l 增大, $F-l$

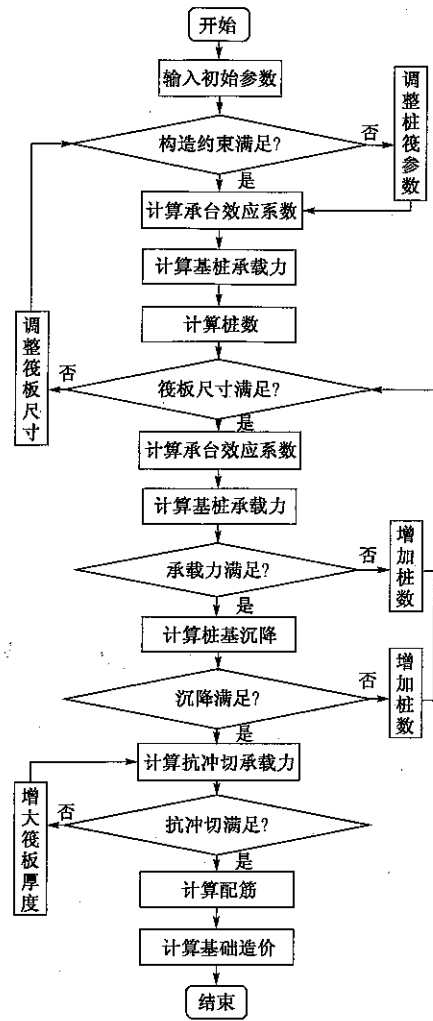


图 2 子程序 ZAOJIA 流程图

曲线又呈现递增趋势。说明随着桩长的增加,基桩承载力增大,使桩数有所减少,由于桩数减少所导致材料用量的减少比由于桩长增加所导致的桩材料用量的增加小,因而 $F-l$ 曲线随桩长的增加而呈递增趋势。因此,对某一成层土条件下的桩基础而言,桩长并非越长或者越短越好,而是有一个最优值。

地基土层分布及物理力学特性 表 1

土层	层厚/m	极限侧阻力/kPa	极限端阻力/kPa	压缩模量/MPa	重度/(kN/m ³)
①粉质黏土	5.2	25			18.1
②淤质黏土	6.3	32	500	11	18.7
③砂质粉土	3.5	35	1 500	18	19.2
④有机黏土	4.7	34	1 800	17	19.3
⑤砂质粉土	14.1	41	2 500	29	19.1
⑥粉质黏土	6.0	47	2 400	22	19.0
⑦粉细砂	2.3	50	5 000	45	19.3
⑧中砂	5.6	63	8 100	50	20.8
⑨粗砂	10.4	82	9 800	60	21.0

算例桩基础优化结果 表 2

桩数/根	l/m	d/m	D/m	A/m	B/m	t_c/m	$F/\text{万元}$
35	29.6	0.5	1.5	10.5	7.5	1.2	35.3

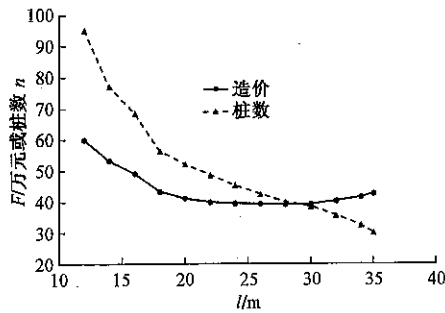


图3 桩基础造价 F 或桩数 n 与桩长 l 的关系曲线

(2) 令桩径 d 取不同值, 优化其他参数。 $F-d$ 关系曲线如图4所示。从图中容易看出, $F-d$ 曲线随桩径 d 增大呈单调递增趋势, 二者近似成线性关系。这是因为桩侧表面积是桩径的一次函数, 桩体积是桩径的二次函数, 桩径变化所引起的桩体积的变化要远大于其所引起的桩侧表面积的变化。因而, 当桩径增大时, 虽然桩侧表面积增大而使基桩承载力增大, 但桩体积增大更显著, 从而引起混凝土用量迅速增加, 使桩基础造价上升。所以, 对于摩擦型桩, 为了降低桩基础的造价, 工程中应尽量使用小直径桩, 即采用长径比大的桩。

(3) 承台长、宽受上部结构的限制, 可调整范围很小。令承台长度 A 与宽度 B 取相同值, 当两者均取不同值时, 优化其他参数, 得到承台固定尺寸下的最低造价。桩基础造价 F 与承台尺寸的关系曲线如图5所示。从图5中可以看出, 曲线随承台尺寸增加而呈单调递增趋势。因此, 设计应尽量减小承台挑出长度, 即减小外桩边缘与基础边缘间距离。在满足最小桩间距要求、桩基承载力和沉降要求的前提下, 可通过减小桩间距适当减小承台尺寸, 以达到降低桩基础造价的目的。

(4) 令承台厚度 t_c 取不同值, 优化其他参数。 $F-t_c$ 的关系曲线如图6所示。

承台厚度 t_c 取决于冲切荷载大小; 而桩长变化又导致冲切力变化, 因而也会影响 t_c 。从式(18)可以推断出, t_c 增大会使受拉钢筋用量减少, 虽然混

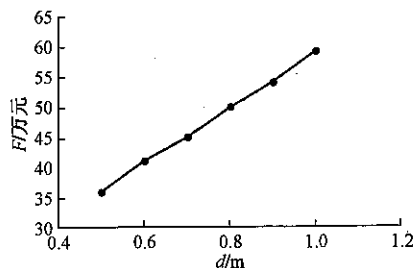


图4 基础造价 F 与桩径 d 关系曲线

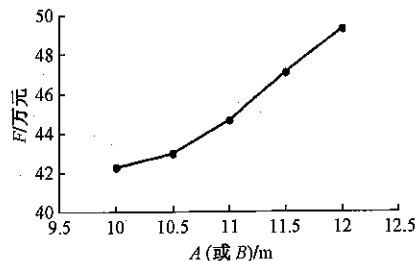


图5 桩基础造价 F 与承台尺寸 A (或 B) 的关系曲线

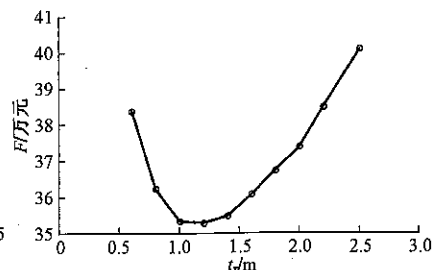


图6 基础造价 F 与承台厚度 t_c 的关系曲线

土用量增加, 但由于钢筋价格较高, 也有可能降低桩基础造价。因此, 桩和承台材料用量均与 t_c 相关, 承台厚度的最优值实际上是反映了桩、承台混凝土和钢筋用量的最佳组合。

从图6可以看出, F 在 $t_c = 1.2$ m 附近有最小值, 当 $t_c < 1.2$ 时, 由于受拉钢筋的用量较大, 桩基础造价反而较高; 但当承台厚度继续增大到一定程度, 即 $t_c > 1.2$ 时, 混凝土用量的增加起到了主导作用, 同时桩基规范规定, 承台中间需设置直径不小于 12mm、间距不大于 300 mm 的双向钢筋网, 故该曲线的斜率逐渐增大。

4.2 工程设计算例

北京国际财源中心位于东长安街沿线上原北京第一机床厂内, 由4座塔楼(两座西塔楼、两座东塔楼)及塔楼外围的裙房和纯地下室组成, 总建筑面积 239 600 m²。本文仅对两座西塔主楼的桩基进行群桩的优化设计^[10]。

两座西塔主楼地上36层, 地下7层, 采用框架-核心筒结构。基础埋深26m, 桩基承台下土层分布及其有关设计参数如表3所示。

主楼采用后注浆灌注桩筏基础, 平板式筏板, 筏板尺寸为 32m × 21.5m, 厚度为 2 200mm, 桩间距为3倍桩径。混凝土强度等级为 C40, 钢筋采用 HRB400 级。核心筒上部结构荷载为 843 892kN, 基底附加压力 $p_0 = 680$ kPa。

为了减小基础的差异变形, 原设计采用了强化核心区、弱化核心区外围的方法。核心筒区域采用常规桩基, 桩径 1 000mm, 桩长 26m, 核心筒区域布桩总数为 90 根。本文仅对其核心筒区域群桩部分进行优化设计。优化变量取桩长、桩数、桩径。

按照原设计需要强化核心区、弱化核心区外围, 考虑减小差异沉降, 依照原设计选择第⑥层土作为桩端持力层。持力层为细中砂, 且其下为卵石, 令桩进入持力层的最小深度为 $1d$ 。优化结果如表4所示。

考虑到实际工程, 取桩长 $l = 24.0$ m。优化后群桩材料用量与原设计比较, 如表5所示。

北京国际财源中心土层分布及其力学参数 表 3

土层	层厚 /m	底层深度 /m	极限侧阻力 /kPa	极限端阻力 /kPa	侧阻力增强系数	端阻力增强系数	压缩模量 /MPa
①细砂	2.8	2.8	70		1.8		
②卵石	4.4	7.2	140		2.8		
③黏土	8.2	15.4	65		1.8		
④卵石	5.0	20.4	150	2 500	2.8	4.0	150
⑤粉质黏土	2.6	23.0	65		1.8		18
⑥细中砂	5.1	28.1	70	1 500	2.8	3.2	75
⑦卵石	1.8	29.9	150	2 500	2.8	4.0	150
⑧细粉砂	1.5	31.4	60				75
⑨粉质黏土	6.0	37.4					22
⑩细粉砂	3.9	41.3					80
⑪粉土	1.9	43.2					30
⑫细砂	2.2	45.5					80
⑬卵石	10.0	55.5					170

北京国际财源中心主楼优化计算结果 表 4

桩数/根	l/m	d/mm	群桩混凝土用量/m ³
102	23.866	800	1 271.6

北京国际财源中心主楼优化前后方案对比 表 5

设计变量	桩长/m	桩径/mm	桩数/根	混凝土用量/m ³
原设计	26	1 000	90	1 836.9
优化设计	24	800	102	1 271.6

从表 5 可以看出,原方案群桩钢筋混凝土用量共 1 836.9m³,优化后群桩钢筋混凝土用量共 1 271.6m³,节约混凝土用量 565.3m³,具有很好的经济效益。优化方案的总桩数比原来增加了 16 根,施工量和施工工期可能会稍有增长。

5 结论

(1)混沌粒子群算法在桩基础优化设计中显示出优异的性能。与以往优化设计算法相比,其搜索能力和搜索效果明显较优。主要体现在:1)需调整的参数少,收敛速度快。利用混沌的“遍历性”、“随机性”可产生大量的随机粒子,择优选出其中较好

的粒子作为初始粒子群进行优化迭代,加快了收敛速度。2)可避免陷入局部最优解,提高计算精度。通过对粒子的混沌扰动,可以使解跳出局部极值区间,从而避免陷入局部最优解。

(2)基于混沌粒子群算法的桩基优化设计方法具有良好的实用价值。本方法不但能以较高效率获得总造价最小的最优设计方案,且可直接分析桩基础各种参数对工程造价的影响规律,对桩基础优化设计有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] 阳吉宝,任臻,周小刚.带裙房的高层建筑基础的优化设计[J].土木工程学报,1998,31(5):39-47.
 [2] 阳吉宝,赵锡宏.高层建筑箱(筏)基础的优化设计[J].计算力学学报,1997,14(2):241-244.
 [3] 蒋启平.遗传算法在箱(筏)基础优化设计中的应用[J].五邑大学学报:自然科学版,2001,15(2):43-46.
 [4] 王成华,王卓雄,陈海明.基坑挡土结构的粒子群优化设计方法[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2005,38(6):547-551.
 [5] 张慧,李立增,王成华.粒子群算法在确定边坡最小安全系数中的应用[J].石家庄铁道学院学报,2004,17(2):1-4.
 [6] 高尚,杨静宇.群智能算法及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2006:63-82.
 [7] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN' 95). Perth, 1995.
 [8] 李海峰,陈晓平.高层建筑桩筏基础优化设计研究[J].岩土力学,1998,19(3):59-64.
 [9] JGJ 94—2008 建筑桩基础技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
 [10] 刘伟鹏.竖向荷载作用下群桩的混沌粒子群优化设计方法研究[D].天津:天津大学,2007.

(上接第 58 页)

[2] LIN WEIWEI, YODA TERUHIKO. Mechanical behavior of composite girders subjected to hogging moment: experimental study[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers: Ser A1, 2011,67(3):583-596.
 [3] 樊健生,聂建国,贾维,等.钢-混凝土连续组合梁的设计方法[J].建筑结构,2003,33(1):41-44.
 [4] 莫时旭,钟新谷,赵人达.刚性基底上弹性约束矩形板的屈曲行为分析[J].工程力学,2005,22(2):174-178.
 [5] 莫时旭,钟新谷,沈明燕,等.钢箱-混凝土梁局部屈曲分析与试验研究[J].铁道科学与工程学报,2007,4(2):48-53.
 [6] 蒋丽忠,曾丽娟,孙林林.钢-混凝土连续组合梁腹板局部屈曲分析[J].建筑科学与工程学报,2009,26(3):

27-31.

[7] 蒋丽忠,刘海峰,李兴.工字型钢-混凝土连续组合梁腹板局部稳定性分析[J].建筑科学与工程学报,2009,26(4):35-39.
 [8] 陈骥.钢结构稳定理论与设计[M].2版.北京:科技出版社,2003.
 [9] 樊健生,聂建国,吴道闻.钢-混凝土组合梁弹性屈曲的力学性能[J].清华大学学报:自然科学版,2004,44(6):786-788.
 [10] BIJLAARD P P. Plastic buckling of simply supported plate subjected to combined shear and bending or eccentric compression in their plane [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1957,24(4): 291-303.