

护坡桩整体优化设计计算机扫描 分析系统简介

秦 四 清

(中航勘察设计院 北京 100086)

0 引言

护坡桩整体优化设计计算机扫描分析系统将非线性科学引入到参数处理和护坡桩稳定性监测中去,使软件理论依据新颖,数据处理能力大大加强。

该系统软件将最优化理论引入到护坡桩设计中去,在确保满足稳定性的前提下,做出造价最小的最优方案设计。

该系统软件采用结构化程序设计,QBASIC、FORTRAN、C和ASM语言混和编程,将菜单技术、鼠标技术、光条技术、图形技术、打印技术、在线帮助技术融为一体,使程序可读性强、界面友好、可操作性强。该系统软件从参数优选做起→进行优化设计→设计验证→稳定性监测,基本上包揽了护坡桩设计的所有工作,使设计质量和设计效率大大提高。

1 护坡桩优化设计的理论

1.1 护坡桩优化设计的意义

城市高层建筑需要深基坑开挖,由于受施工环境限制,难以采用放坡开挖施工,而常用支护开挖。钻孔灌注护坡桩因施工方便且造价低,在实践中已得到较为广泛的应用,但由于其设计基本是经验性的,施工经验也欠成熟,因此在工程实践中事故和失败的实例时有发生。这说明根据经验设计的方案有时是靠不住的,也不一定是最优的,可能造成不必要的浪费。鉴于此,完善其设计理论,开展最优化设计,开发一套系统完整的优化设计软件,是十分必要的,也是今后设计的发展方向 and 必由之路。

现代数学、力学、信息科学、计算机科学的迅速发展,为结构优化提供了数学方法和计算工具。利用优化方法和计算机,可使设计时间大大缩短,设计质量大幅度提高。已有资料表明,与传统设计方法比较,优化设计可节约投资5%~25%左右,带来可观的经济效益。

1.2 结构优化设计的模型

1.2.1 给定参数

结合规范、实验、计算等,确定描述结构特性的参数,如护坡桩设计的 c 、 φ 值、桩长、弯矩等。

1.2.2 确定设计变量

指在优化设计过程中所选择的描述结构特性的量,如护坡桩设计中的桩径、桩间距、配筋面积等。

1.2.3 确定目标函数

指优化设计所要达到的目标,如造价、用料等。

1.2.4 确定约束条件

指设计受到的强度及稳定性等方面的限制。

1.2.5 建立优化设计模型

指在满足各种约束条件下,使目标函数为最小。用数学表达式可写为:

$$\text{目标函数 } f(X) = \min \quad (1)$$

约束条件

$$G_i(X) \leq 0, i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

$$H_j(X) = 0, j = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

1.3 岩土力学参数优选

c 、 φ 取值对护坡桩安全设计和造价影响甚大，因此我们特别建立了参数优选模块，以确定合理的 c 、 φ 值。

1.3.1 随机-模糊最小二乘法

对一元线性函数，取论域

$$U = \{ y_i(x_i) = a_0 + a_1 x_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \}$$

n 为样本数， ε 是误差变量， R 是 U 的一个模糊线性函数关系子集。随机-模糊最小二乘法的实质就是求 R 的清晰估计，即

$$R = \{ \hat{y}(x) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x \mid \mu_R[y(x)] = 1 \} \quad (4)$$

取样本 $y_i(x)$ 对 R 的隶属函数为

$$\mu_R[y(x_i)] = \exp(-D_i) \quad (5)$$

式中 $D_i = [\hat{y}_i(x_i) - \hat{y}_i(x_i)]^2$ ，
 $\hat{y}_i(x_i)$ ——回归方程的计算值（估计值）；

\hat{a}_0 及 \hat{a}_1 —— a_0 和 a_1 的估计值；

显然， $y_i(x_i)$ 距 $\hat{y}_i(x_i)$ 的距离越大，则它对 R 的隶属度越小。因此，可将式（5）表示为

$$\gamma_R(D_i) = \mu_R[y(x_i)] \quad (6)$$

按照使实际样本值整体上隶属于样本模糊子集 R 程度最大的原则，确定参数 \hat{a}_0 、 \hat{a}_1 。为此，组成目标函数

$$J = \sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i) = \max \quad (7)$$

可解得

$$\hat{a}_1 = m_{xy} / \sigma_x^2 \quad (8)$$

$$\hat{a}_0 = \bar{y} - \hat{a}_1 \bar{x} \quad (9)$$

式中 \bar{x} 和 \bar{y} —— x 和 y 的随机模糊均值；

σ_x^2 ——随机模糊方差；

m_{xy} ——模糊协方差。且

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i) x_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i)} \quad (10)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i) y_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i)} \quad (11)$$

$$\sigma^2 x = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i) (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i)} \quad (12)$$

$$m_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i) (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i)} \quad (13)$$

求解 \hat{a}_0 和 \hat{a}_1 是一个逐渐逼近的过程，可采用迭代法求解。当 $\gamma_R(D_i) = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 时，即样本不含模糊性时，式（10）~式（13）即为随机变量的均值、方差、协方差计算公式。可见，随机线性最小乘法仅是随机-模糊最小二乘法的特例。

随机-模糊最小二乘法并不是寻求相关性提高，而是强化有用信息利用率。因此，用相关系数评价回归效果，在这里没有意义。我们采用反映数据离散程度的变异系数评价回归效果。 r 越大，回归效果越差。

$$r = \sigma_y / \sqrt{\bar{y}} \quad (14)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i) (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n \gamma_R(D_i)}} \quad (15)$$

1.3.2 c 和 φ 值优选

用线性规划理论可对 c 和 φ 值进行优选，目标函数为：

$$\sum_{i=1}^n (\tau_i - (c + \sigma_i \cdot \text{tg} \varphi))^2 = F_{\min} \quad (16)$$

约束条件为：

$$c_1 < c < c_2 \quad (17)$$

$$\varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \quad (18)$$

式中 c_1 和 c_2 ——凝聚力经验约束上下限值；

φ_1 和 φ_2 ——摩擦角经验约束上下限

值。

用上述理论编制了参数优选模块，可计算参数的随机均值、模糊均值；随机 c 和 φ 值，模糊 c 和 φ 值； c 和 φ 值的优选值。

1.4 护坡桩优化设计

1.4.1 土压力

因朗金主动土压力不考虑土与桩背摩擦力，主动土压力偏大，被动土压力偏小，为经济和安全起见，主动土压力系数用朗金公式表达：

$$K_a = \left[\text{tg} \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right]^2 \quad (19)$$

被动土压力系数采用库伦公式：

$$K_p = \left[\frac{\cos \varphi}{\sqrt{\cos \delta} - \sqrt{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}} \right]^2 \quad (20)$$

式中 δ ——桩与土的摩擦角，一般可在 $0 \sim 2\varphi/3$ 内取值；

φ ——土的内摩擦角。

1.4.2 优化设计原理

(1) 悬臂式护坡桩设计

坡桩设计

悬臂式护坡桩如图1所示。

根据各土层主动土压力，被动土压力及水压力对O点的力矩，用安全系数公式：

$$K = \frac{M_{\text{被动}}}{M_{\text{主动}} + (M_{\text{主动水}} - M_{\text{被动水}})} \quad (21)$$

计算桩嵌入深度，并计算最大弯矩。

优化设计模型如下：

目标函数：

$$F = (A_g C_g + \pi C_k r^2) \times L \times LT/S \quad (22)$$

约束条件：

$$KSM \leq [9/16 \pi r^3 R_w + 2 A_g R_g (r - t)] \sin \varphi / \pi \quad (23)$$

$$\varphi \leq 0.3\pi \quad (24)$$

$$\varphi = \pi A_g R_g / (A_k R_m + 2 A_g R_g) \quad (25)$$

$$0.1 \leq r \leq 0.5 \quad (26)$$

$$0.5 \leq S \leq 3.5 \quad (27)$$

$$0.003 \leq A_g \leq 0.02 \quad (28)$$

$$0.006 \leq A_g / \pi r^2 \leq 0.025 \quad (29)$$

式中 S ——桩距；

A_g ——配筋面积；

r ——桩半径；

$$A_k = 0.75 \pi r^2；$$

R_m ——混凝土的弯曲抗拉强度；

R_g ——钢筋的弯曲抗拉强度；

C_k ——混凝土的每立方米造价；

C_g ——钢筋的每立方米造价；

L ——桩长；

LT ——需要护坡的基坑长；

t ——混凝土保护层厚。

(2) 单支点锚杆护坡桩设计

单支点护坡桩设计分两种情况，即自由端和固定端。

a. 自由端：自由端支承的插入深度一般小于固定端支承，它适用于挖土线以下有粘性土层或中等强度的地层。

b. 固定端：适用于无粘性土和桩前后水位差小的情况，当超载与基坑以上桩长比十分大时，或锚杆标高特别低时，不宜用此法。

采用固定端式，埋置深度深，但最大弯矩和锚杆拉力小，对桩身设计和锚杆设计有利，且整体稳定性好。因此在有条件的场地，应多选择固定端式。

锚杆设计原理：

锚杆截面积为：

$$A_b = \frac{K_b R_D}{\sigma_p \cos \alpha} \quad (30)$$

式中 K_b ——锚杆面积安全系数；

R_D ——所需锚杆拉力；

σ_p ——锚杆抗拉强度；

α ——锚杆与水平线的夹角。

锚杆自由段长为：

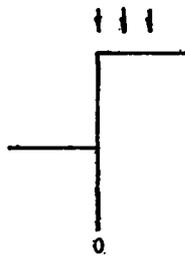


图 1

$$L_f = (H + A - G) \frac{\cos(45^\circ + \varphi/2)}{\sin(135^\circ - \alpha - \varphi/2)} \quad (31)$$

式中 H ——开挖深度；
 $A = 2D/3$ (固定端式)， $A = D$ (自由端式)；
 D ——桩入土深度；
 G ——锚杆深度。
 锚杆锚固段长度：

$$L_m = \frac{K_m R_D}{F_a \cos \alpha} \quad (32)$$

式中 K_m ——锚杆锚固长度安全系数；
 F_a ——极限锚固力， $F_a = \pi D_r q_s$ ；
 D_r ——锚固体直径；
 q_s ——土与锚固体间粘结强度。

优化设计模型如下：

目标函数：

$$F = (A_g C_g + C_t \pi r^2) \times L \times LT/S + \frac{K_1 R_D}{\sigma_g \cos \alpha} \times C_{g1} [(h + a - g) \times \frac{\cos(45^\circ + \varphi/2)}{\sin(135^\circ - \alpha - \varphi/2)} + \frac{K_2 R_D S}{\cos \alpha F_a}] \times LT \quad (33)$$

约束条件：

$$KSM \leq [9/16 \pi r R_w + 2 A_g R_g (r - t)] \sin \varphi / \pi \quad (34)$$

$$\varphi \leq 0.3 \pi \quad (35)$$

$$\varphi = \pi A_g R_g / (A_t R_w + 2 A_g R_g) \quad (36)$$

$$0.1 \leq r \leq 0.5 \quad (37)$$

$$0.5 \leq S \leq 3.5 \quad (38)$$

$$0.003 \leq A_g \leq 0.02 \quad (39)$$

$$0.006 \leq A_g / \pi r^2 \leq 0.025 \quad (40)$$

$$15^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ \quad (41)$$

式中 K_1 ——锚杆面积配筋安全系数；

K_2 ——锚固力安全系数；

R_D ——锚固力；

r, A_g, S, α ——设计变量；

其它符号意义同前。

(3) 两支点护坡桩设计

除目标函数与单支点稍有不同外，约束条件完全一样。

(4) 多支点护坡桩设计

锚杆拉力及最大弯矩计算用连续梁有限元法求解。

1.4.3 桩配筋计算时安全系数的选取

一般取 $K = 1.5$ 。但考虑到梁变形时拱的作用，桩中间部分主动土压力减少，被动土压力合力作用点上移，最大弯矩会减小 10%~20%，因此，安全系数可取：

$$K = 1.2 \sim 1.35 \quad (42)$$

1.5 其它稳定性验算问题

设计方案做好后，还要进行整体稳定性计算、地基承载力稳定验算、管涌验算、基底隆起验算，以确保设计方案万无一失。

1.5.1 整体稳定性验算

整体稳定性验算用 Bishop 法，其安全系数公式为

$$K_s = \frac{\sum [c_i b_i + (W_i - u_i b_i) \operatorname{tg} \varphi_i] / m_i}{\sum W_i \sin \alpha_i + \sum Q_i e_i / R} \quad (43)$$

$$m_i = \cos \alpha_i + \frac{\operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_i}{K_s} \quad (44)$$

式中 W_i ——土条重；

u_i ——土条的孔隙水压力；

α_i ——土条底面与水平线的夹角；

Q_i ——水平地震力荷载；

e_i ——地震力荷载距滑弧圆心垂距；

b_i ——土条宽度。

1.5.2 承载力稳定性验算

1.5.2.1 考虑 c, φ 值的承载力稳定性验算方法

承载力安全系数验算公式

$$K_s = \frac{\gamma D N_a + C N_o}{\gamma (H + D) + q} \quad (45)$$

式中 H ——开挖深度；

D ——桩入土深度；

q ——地表超载;

N_a, N_s ——地基承载力系数。

用Prandtl公式, N_a, N_s 分别为

$$N_a = \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) \times \exp(\pi \text{tg} \varphi) \quad (46)$$

$$N_s = (\dot{N}_a - 1) \text{ctg} \varphi \quad (47)$$

实践证明, 该法基本上适用于各类土质条件。并已列入上海市地基基础设计规范。

1.5.2.2 抗隆起地基稳定验算方法

要求抗隆起的安全系数:

$$K = \frac{2\pi\tau}{q + \gamma h} \quad (48)$$

式中 τ ——土体抗剪强度;

q ——地表超载;

γ ——土密度。

1.5.3 抗管涌验算

管涌(及流砂)主要是由于水头差所引起的。在含有饱和粉砂层的地区, 开挖深井时, 如采用井内明排水等造成井内外水头差的作法是最容易发生管涌的, 下面的验算公式是以基坑底土的浮密度必须大于水头差引起的动水力而推导的抗管涌公式:

$$K_s = \frac{(h' + 2D)\gamma'}{h'\gamma_m} \geq 1.5 \quad (49)$$

式中 K_s ——抗管涌安全系数;

D ——桩入土深度;

γ', γ_m ——土的浮密度和水的密度;

h' ——水头差。

1.5.4 基底隆起验算

经验公式:

$$\delta = -29.17 - 0.0167\gamma H' + 12.5 \times \left(\frac{D}{H}\right)^{-0.6} + 0.637\gamma C^{-0.04} \times (\text{tg} \varphi)^{-0.54} \quad (50)$$

式中 δ ——基底隆起量, cm;

$H' = H + q/\gamma$, m;

H ——基坑开挖深度, m;

q ——地表超载, kN/m²;

D ——墙体入土深度, m;

c ——土体的粘聚力, kPa;

φ ——内摩擦角, 度;

γ ——重度, kN/m³。

说明: 一般要求 $\delta < 0.5H/100$ 。

1.6 护坡桩稳定性监测

护坡桩投入运行后, 桩与土体发生相互作用, 在外部环境(如降雨)作用下, 可能使原来稳定的桩土体向不稳定态演化, 如能及早根据护坡桩监测资料判断其稳定性, 则可及时采取措施, 达到防患于未然的目的。

为此, 我们将现代前沿理论——非线性科学理论: 分形理论、混沌理论、突变理论、非线性动力学理论等引入到护坡桩监测中去, 编制了功能强大的稳定性监测模块。可对护坡桩稳定性、演化趋势、运动轨道特征、可能失稳时间作出及时的预测。

该部分理论较复杂, 在此不作详细阐述。有兴趣的读者可详见秦四清等^[1]著的《非线性工程地质学导引》一书。

2 软件功能与特点

本中文版软件采用QBASIC、FORTRAN77、C和ASM语言混合编程, 结构化程序设计, 菜单式操作, 全鼠标支持, 人机对话式输入, 界面友好, 随机在线帮助, 操作简单, 方便易学, 只要稍具微机知识, 即能运用自如。

2.1 参数部分

数据采用表格式输入, 用户可随时编辑、修改、打印数据, 也可用数据文件进行输入输出操作。

用随机方法和随机-模糊方法, 可求出参数的随机均值和模糊均值。

用随机方法和随机-模糊方法, 可求出随机 c 、 φ 值和随机模糊 c 、 φ 值。

用最优化方法优选出 c 、 φ 值。

由于参数处理部分考虑了信息的不确定性, 使参数取值更加客观合理。

2.2 设计部分

(1) 采用随机优化选点——拉格朗日松弛变量——复形耦合新算法, 具有稳定性好、收敛快的特点。

(2) 可处理地下水、超载及土层为多层的复杂问题。

(3) 可计算任意支点护坡桩的贯入深度、最大弯矩点位置、最大弯矩及所需锚杆拉力; 可解决超深基坑、多支点护坡等特别复杂问题。

(4) 集常规计算与有限元计算为一体。

(5) 可计算任意截面桩的面积与惯性矩。

(6) 可对圆形截面桩径、桩距、配筋率、锚杆深度、锚杆与水平线夹角作出优选。

(7) 可对矩形截面进行单面和双面的不均匀配筋计算, 优选出合适的钢筋根数和钢筋直径。可对圆形截面进行常规配筋计算。

(8) 用户有较高的选择权。

(9) 用户有较高的中断权。

(10) 可用数据文件输出, 亦可用图形输出, 可作出主动土压力、被动土压力、弯矩及安全系数随桩长的变化图, 图形可任意放大、缩小、反转、加或不加网格, 图题可随意放置, 图形可用多种型号打印机输出。

(11) 配有专门打印功能并且屏幕提示, 帮助用户输出桩长、弯距等中间计算结果。

(12) 优化结果可以屏幕显示方式、直接打印方式、数据文件形式输出。

(13) 初始数据以文件形式存盘, 以备用户校核之用。

(14) 具有交互式绘图功能, 可绘出基坑桩位图, 桩配筋图等。

2.3 设计与验证部分

可对护坡桩整体稳定性、地基承载力稳定性、抗管涌能力、基底隆起等进行验算,

以确保设计的可靠性和安全性。

2.4 护坡桩稳定性监测部分

运用多种方法, 对护坡桩运行过程中的稳定性进行判断, 及时预报, 防患于未然。

3 计算实例

现给出如图1所示的悬臂桩的计算结果。

(1) 原始数据

基坑深度[m] = 8

放坡角度[°] = 90

桩后水位[m] = 20

桩前水位[m] = 20

地面超载[kPa] = 10

基坑超载[kPa] = 0

桩长安全系数 = 1.2

桩背与土的摩擦角系数 [0 ~ 0.67] = 0.0

需要护坡的基坑周长[m] = 100

混凝土保护层厚[m] = 0.035

桩配筋安全系数 = 1

混凝土弯曲抗压强度[MPa] = 11

钢筋弯曲抗拉强度[MPa] = 310

混凝土价格[元/m³] = 700

钢筋价格[元/m³] = 23000

第1层土 { 深度[m], γ [kN/m³],
c[kPa], φ [°] } 3, 18, 10, 20

第2层土 { 深度[m], γ [kN/m³],
c[kPa], φ [°] } 5, 19, 5, 25

第3层土 { 深度[m], γ [kN/m³],
c[kPa], φ [°] } 20, 19, 0, 30

(2) 计算结果

桩入土深度 = 9.12(m)

最大弯矩点距桩顶距离 = 12.10
(m)

最大弯矩值 = 1182.82(kN·m)

抗滑安全系数 = 2.06

桩径 = 800[mm]

桩距 = 1.6[m]

压缩区角度之半 = 69.60[°]

高层建筑桩基沉降值的概率统计预测法

阳 吉 宝

(同济大学 上海 200092)

【摘要】 本文通过对上海地区30幢高层建筑桩基础沉降值的统计分析, 提出高层建筑桩基础沉降值的概率统计预测法, 可供工程设计人员参考。

【Abstract】 The probability statistical method for forecasting the settlement of the pile foundation of high building is proposed based on the statistical analysis to the settlements of the pile foundation about 30 high buildings in Shanghai area in this paper.

0 前言

随着浦东开发开放的不断推进, 上海城市建设日新月异, 高层建筑如雨后春笋般拔地而起。上海地处长江三角洲, 第四纪土层厚度约150~400m, 高层建筑一般采用桩基。目前, 群桩基础沉降计算理论较多, 但限于岩土参数的离散性和随机性, 施工因素的影响以及理论模型的不完善等, 计算所得到的桩基沉降值与建筑物沉降实测值往往相差较大。鉴于目前上海市已建成几百幢高层、超高层建筑, 且相当一部分建筑物都有最终沉降值的实测资料, 本文运用贝叶斯(Bayes)概率公式, 通过对上海30幢12~25层高层建筑实测沉降值的统计分析, 提出高层建筑桩基沉降值的概率统计预测法。

1 基本原理

设影响桩基沉降的因素共有 n 个, 每个因素又可分为若干特征, n 个因素共有总数为 N 个特征。用 $T_i (i=1, 2, \dots, N)$ 来表示每个特征。自然, 桩基沉降特征可用 T_i 的总体来描述。

桩基沉降值的变化有一定范围, 这个范围可划成若干区间 $S_j (j=1, 2, \dots, m)$ 。对于沉降值的每个区间 S_j 可以算出特征 T_i 落入该区间的概率。用 P_{ij} 来表示该区间 S_j 内的这个概率。若已知各因素在整个沉降值范围内每一个区间 S_j 的分布规律, 则可求出这种因素值下沉降区间的概率, 即 $P_{i.}$ 。

表1列出了用于预测的原始资料, 它包括特征值 T_i 和移动区间 S_j 。该表是综合考虑

按圆形截面配筋面积 = 228.22
[cm²]

按等效矩形截面配筋结果:

受拉面配筋面积 = 92.24[cm²]

受压面配筋面积 = 24.71[cm²]

配筋面积 = 116.95[cm²]

总桩数 = 62

桩材料造价 = 848012.99元

底部隆起值 = 2.17[cm]

地基承载力安全系数 = 5.37

桩顶位移 = 73.59(mm)

4 结语

该软件的研制成功, 将给护坡桩工程带来更大的经济效益。

该软件已在北京南银大厦护坡桩工程、北京有色冶研院西区宿舍楼护坡桩工程中得到应用, 经实践检验证明该软件是高效和可靠的、产生的效益是显著的。

参 考 文 献

- 1 秦四清等著. 非线性工程地质学导引. 西南交通大学出版社, 1993