

DOI: 10.11779/CJGE2014S2031

预应力锚杆复合土钉支护稳定可靠度分析

惠趁意^{1, 2}, 朱彦鹏^{1, 2}, 叶帅华^{1, 2}

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对预应力锚杆复合土钉支护结构的稳定可靠性分析问题, 以极限平衡理论为基础, 建立了基坑稳定性分析安全系数求解公式和可靠性分析功能函数。以土体力学参数为作为随机变量, 应用 Monte Carlo 重要抽样法计算了基坑稳定性可靠度指标和失效概率, 通过工程实例进行了分析。分析表明: 该稳定性计算公式计算的安全系数符合工程要求并且通过可靠性分析, 因而使用该方法对复合土钉支护结构稳定性计算是有效的; 基坑可靠性分析中, 可靠度指标 β 和失效概率 P_f 受土体黏聚力、内摩擦角与摩阻力的变异系数的影响较大, 前者随变异系数的增大而减小, 后者随变异系数的增大而增大; 对于土体力学参数分布选型参数 c 采用对数分布, φ 、 q_{sik} 采用正态分布对可靠度计算分析比较合理。

关键词: 预应力锚杆; 复合土钉; 基坑; 稳定性; 可靠性

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0186-05

作者简介: 惠趁意(1985-), 男, 河南兰考人, 博士研究生, 主要从事支挡结构方面的研究。E-mail: huichenyi@163.com。

Stability reliability analysis of composite soil nailing structures with prestressed anchors

HUI Chen-yi^{1, 2}, ZHU Yan-peng^{1, 2}, YE Shuai-hua^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: For the problem of reliability analysis of stability of composite soil-nailing supporting structures with prestressed anchors, based on the limit equilibrium theory, the safety coefficient formulas and reliability analysis functions for foundation pits are established. Then taking the mechanical parameters of soils as random variables, the stability reliability index and failure probability of foundation pits are calculated using the Monte Carlo importance sampling method. A project example is used for analysis. The results show that the formula for the stability calculation accords with the demands of engineering and the reliability analysis, so its use for calculating the stability of composite soil-nailing structures is effective. In the reliability analysis of the foundation pit, the reliability index and the failure probability are greatly influenced by the cohesive force, internal friction angle of soils and friction resistance of coefficient of variation. The former decreases with the increasing coefficient of variation, while the latter increases with the increasing coefficient of variation. For the selection of distribution of mechanical parameters of soils, the cohesive force of parameters takes logarithmic distribution, and the angle of internal friction and the friction resistance adopt normal distribution. The reliability of the calculation and analysis is quite reasonable.

Key words: prestressed anchor; composite soil-nailing; foundation pit; stability

0 引言

复合土钉支护结构作为一种新的支护方法, 已经在城市基坑支护中得到了广泛的应用^[1-2]。目前复合土钉支护结构的稳定性分析大多采用极限平衡定值计算方法^[3-4], 但土体力学参数的随机性使得定值计算方法的结果具有一定的不确定性。为了保证实际工程的安全性, 在安全系数满足要求的情况下, 应考虑岩土力

学参数的随机性, 对其进行可靠性分析和计算。

近年来, 许多专家把可靠性理论引入到基坑稳定性计算中, 进行了基坑与边坡稳定的可靠性研究, 比如: 黄广龙等^[5]分析了参数变异性对基坑支护结构稳

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAK12B07); 兰州理工大学建工七七基金项目 (TM-QK-1304); 兰州理工大学博士基金项目
收稿日期: 2014-07-28

定性的影响,考虑岩土参数的不确定性和空间变异性,通过土性参数空间折减进行可靠度分析;唐仁华等^[6]提出了锚杆挡土墙支护的串-并联模型,并进行可靠度研究,对锚杆挡墙体系单根锚杆几种破坏模式串联与多根锚杆并联系统体系的可靠度进行了分析;罗晓辉等^[7]分析了不同土层力学参数的变异性对土钉支护稳定可靠性的影响。但是针对黄土地区基坑预应力锚杆复合土钉支护结构稳定可靠性分析的研究很少。杨育文等^[8]在计算土钉墙内部稳定性安全系数时使用假定滑移面为抛物线型的计算方法,并通过工程实际应用说明了该方法的合理性。因此,本文根据极限平衡理论,假定滑动面为抛物线型,建立预应力锚杆复合土钉支护结构稳定性分析的公式和搜索模型,然后根据稳定性分析公式建立可靠性分析极限状态方程,通过 Monte Carlo 重要抽样法对极限状态功能函数进行可靠性分析。

1 基坑稳定性分析

1.1 基本假定

对预应力锚杆复合土钉支护结构进行稳定性分析时(见图 1 计算简图),作如下基本假定:

- (1) 设滑移面为抛物线型;
- (2) C 点处滑移面切线方向与水平线的夹角 $\theta_c < 90^\circ$, 且大于 $\arctan(H/X_c)$;
- (3) 锚杆和土钉在滑移面破坏时达到极限抗拉力;
- (4) 土条之间条间力相互作用平衡合力为零。

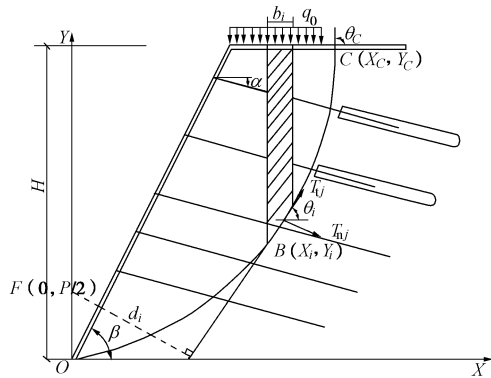


图 1 复合土钉稳定性分析计算简图

Fig. 1 Simplified diagram for stability of composite soil-nailing structure

1.2 基坑内部整体稳定性分析

复合土钉支护稳定性分析计算简图如图 1 所示,图中坡脚 O 为坐标系原点, C 点为滑移面与坡顶的交点, B 为土条底部弧长的中点, F 为抛物线焦点, H 为基坑深度, β 为基坑坡角。根据假定条件,整体稳定性验算采用极限平衡理论的条分法,若条体的稳定

性安全系数为 K_s , 计算公式为

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i L_i + (w_i + q_0 b_i) \cos \theta_i \tan \varphi_i] s d_i}{[s r_0 \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i)] X_i} + \frac{\sum_{j=1}^m T_j^t [\cos(\theta_i + \alpha) + \sin(\theta_i + \alpha) \tan \varphi_i] d_i}{[s r_0 \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i)] X_i} + \frac{\sum_{j=1}^m T_j^m [\cos(\theta_i + \alpha) + \sin(\theta_i + \alpha) \tan \varphi_i] d_i}{[s r_0 \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i)] X_i} \quad (1a)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} d &= \frac{p/2 + X_i^2 / p - y_i}{\sqrt{1 + (X_i^2 / p)^2}}, p = \frac{X_c}{\tan \theta_c}; \\ X_i &= (i - 0.5) b_i, Y_i = X_i^2 / 2p; \\ \cos \theta_i &= p / \sqrt{p^2 + X_i^2}, \sin \theta_i = X_i / \sqrt{p^2 + X_i^2}; \\ T_j^t &= \pi d_t q_{sik} l_{nj}^t, \\ T_j^m &= \pi d_m q_{sik} l_{nj}^m, \\ w_i &= \gamma_0 (h_i - Y_i) b_i; \\ h_i &= \begin{cases} X_i \tan \beta, (H - X_i / \tan \beta) > 0 \\ H, (H - X_i / \tan \beta) < 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (1b)$$

式中 d_i 为焦点 F 到第 i 分条滑裂面处切线的距离; n 为滑动体分条数; γ_0 为土体重度; h_i 为第 i 条土条顶部中点的高度; w_i 为第 i 分条土条重量; b_i 为第 i 分条宽度; c_i 为第 i 分条滑裂面处黏聚力标准值; φ_i 为第 i 分条滑裂面处内摩擦角标准值; θ_i 为第 i 分条滑裂面处切线与水平面夹角; α 为锚杆或土钉与水平面之间的夹角; q_0 为基坑顶部荷载; $\arctan(H/X_c)$ 为坡顶与 OC 的夹角; θ_c 为过 C 点的滑移面的切线与水平方向的夹角; X_c 为 C 点到 Y 轴的距离; l_i 为第 i 分条滑裂面处弧长; d_t 、 d_m 分别为土钉和锚杆的锚固直径; q_{sik} 为土体与土钉锚杆极限摩阻力标准值; l_{nj}^t 为土钉在滑移面外稳定土体中锚固段长度; l_{nj}^m 为锚杆在滑移面外稳定土体中锚固段长度; s 为计算滑动体单元厚度。

1.3 危险滑动面搜索

通常方法搜索出的最危险滑移面可以满足工程要求的精度,但达不到最优化的状态,可能会存在比较大的误差,遗传算法^[9](GA)具有精度高和全局优化的优点,因此,滑动面采用遗传算法进行搜索。滑移面通过坡脚,这样决策变量的组成便成为 X_c 和 θ_c ,安全系数 K_s 可以看作是 X_c 和 θ_c 的函数,则

$$K_{\min} = f(X_c, \theta_c) \quad (H / \tan \beta < X_c < H, \arctan(h_i / l) < \theta_c \leq 90^\circ) \quad (2)$$

采用 MATLAB 遗传算法工具箱编制程序进行搜索, 通过确定决策变量 X_c 和 θ_c 的大小来找出抛物线滑移面的焦点位置, 从而确定最危险滑动面, 但是确定的最危险滑移面是不是可靠需要进行可靠性验算和分析。

2 可靠性分析

2.1 功能函数的导数

根据试验统计分析, 重度 γ 的均值和变异性对边坡的可靠性影响较小, c , φ 的变异性对边坡可靠性影响比较大, 为简化计算选取土体力学参数 c , φ , q_{sik} 作为复合土钉基坑支护体系可靠性分析的随机变量, 在分析中各随机变量均服从正态分布。预应力锚杆复合土钉支护结构可靠性分析的功能函数为

$$Z = \sum_{i=1}^n [c_i L_i + (w_i + q_0 b_i) \cos \theta_i \tan \varphi_i] s d_i + \sum_{j=1}^m T_j^t [\cos(\theta_i + \alpha) + \sin(\theta_i + \alpha) \tan \varphi_i] d_i + \sum_{j=1}^m T_j^m [\cos(\theta_i + \alpha) + \sin(\theta_i + \alpha) \tan \varphi_i] d_i - [s r_0 \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i)] X_i = 0 \quad (3)$$

功能函数对各随机变量的导数为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial c_i} &= \sum_{i=1}^n L_i s d_i \\ \frac{\partial Z}{\partial \tan \varphi_i} &= \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i) \cos \theta_i \tan \varphi_i s d_i + \sum_{j=1}^m \pi d_t q_{sik} l_{nj}^t \sin(\theta_i + \alpha) d_i + \sum_{j=1}^m \pi d_m q_{sik} l_{nj}^m \sin(\theta_i + \alpha) d_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial q_{sik}} = \sum_{j=1}^m \pi d_t l_{nj}^t [\cos(\theta_i + \alpha) + \sin(\theta_i + \alpha) \tan \varphi_i] d_i + \sum_{j=1}^m \pi d_m l_{nj}^m [\cos(\theta_i + \alpha) + \sin(\theta_i + \alpha) \tan \varphi_i] d_i \quad (5)$$

2.2 可靠性计算方法

蒙特卡罗重要抽样法的基本思想是通过改变随机抽样的中心, 使样本点有较大的机会落入失效域, 增加使功能函数小于零的机会, 从而提高可靠性模拟的精度和效率。应用蒙特卡罗重要抽样法计算结构的可靠度, 将随机变量 $(c_1, \varphi_1, q_{1k}, \dots, c_k, \varphi_k, q_{k})$ 记作 $X^* = (X_1^*, X_2^*, X_3^*, \dots, X_{3k}^*)$ 为设计验算点, k 为土层数, 首先用一次二阶矩 JC 法^[10]计算出验算点 X^* , 计算公式为

$$\mu_{X_i} = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)] \sigma_{X_i} \quad (6)$$

$$\sigma_{X_i} = \frac{\varphi \{ \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)] \}}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad (7)$$

$$\alpha_{X_i} = \cos \theta_{X_i} = - \frac{\frac{\partial Z_X(x^*)}{\partial X_i} \sigma_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{3k} \left[\frac{\partial Z_X(x^*)}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\sum_{i=1}^{3k} \frac{\partial Z_X(x^*)}{\partial X_i} (\mu_{X_i} - x_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{3k} \left[\frac{\partial Z_X(x^*)}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (9)$$

$$x_i^* = \mu_{X_i} + \beta \sigma_{X_i} \cos \theta_{X_i} \quad (10)$$

根据公式 (6) ~ (10) 计算结构的设计验算点和可靠度指标 β ; 当 X 的各变量 X_i 之间相互独立时, 求出样本 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik})^T$ 的无偏估计值, 计算公式为

$$\hat{p}_f = \frac{1}{3k} \sum_{i=1}^{3k} I[Z X(v_i)] \prod_{j=1}^n \frac{f X_j(v_{ij})}{p V_j(v_{ij})} \quad (11)$$

$$P V_j(v) = \frac{1}{\sigma_{V_j}} \varphi \left(\frac{v - \mu_{V_j}}{\sigma_{V_j}} \right) \quad (12)$$

在体系的计算中, $P V_j(v)$ 取正态分布的概率密度函数, V 的均值和标准差分别取成 x^* , σ_X , 根据公式 (6) ~ (12) 编制计算程序求得可靠度失效概率。

3 实例分析

甘肃省总工会办公楼及住宅楼位于兰州市城关区广场东口, 地貌单元划属黄河南岸 II 级阶地。基坑开挖深度约 9.5 m, 由于基坑四周支护方式的不同, 选取基坑南侧的预应力锚杆复合土钉支护结构作为分析对象, 锚杆孔径 150 mm, 花钢管土钉孔径 100 mm, 土钉墙钢筋网采用双向 $\Phi 6.5$ mm, 间距为 250 mm \times 250 mm, 喷射混凝土厚度 80 mm, 喷射混凝土强度等级 C20。结构剖面图见图 2, 土层力学参数的数学统计特征值见表 1, μ_c , μ_φ , $\mu_{q_{sik}}$ 分别为 c , φ , q_{sik} 的均值, δ_c , δ_φ , $\delta_{q_{sik}}$ 分别为 c , φ , q_{sik} 的变异系数。

表 1 土层力学参数的数学统计特征值

Table 1 Statistical characteristics of mechanical parameters of soil

layers							
土层	厚度 /m	μ_c /kPa	δ_c	μ_φ /($^\circ$)	δ_φ	$\mu_{q_{sik}}$ /kPa	$\delta_{q_{sik}}$
杂填土	2.6	12	0.3	18	0.2	30	0.15
卵石	6.9	0	0.3	32	0.2	200	0.15

经过 MATLAB 软件编程计算得到复合土钉支护结构的安全系数, 如图 3 所示, 经过遗传变异优化, 最后搜索到最危险滑移面的安全系数为 1.3376, 实际工程中, 使用的是理正深基坑设计软件进行计算, 该软件假定滑移面为圆弧滑移面, 计算的稳定性安全系数为 1.3613, 与本文的计算结果比较接近, 本文的稳

大, P_f 变大而 β 变小的规律, 但第 1 层土的 φ 的变异系数与第 2 层土的 φ 的变异系数对 P_f 影响, 在变异系数小于 0.3 时, 第 2 层土的影响较大, 变异系数大于 0.3 时, 第 1 层土的影响较大。

4 结 论

根据边坡的极限平衡理论和条分法, 提出了一种基于可靠性理论的预应力锚杆复合土钉支护结构基坑稳定性的分析方法, 并通过工程实例进行分析, 结果表明:

(1) 基坑稳定性分析过程中, 除了稳定安全系数的计算外应对工程进行可靠性分析; 在可靠性分析计算时, 应考虑土体变异参数的影响, 以提高工程安全性分析精度。

(2) 土体力学参数 c , φ , q_{sik} 的分布类型对可靠性分析中失效概率 P_f 和可靠度指标 β 的影响较大, 通过分析比较, 参数 c 采用对数分布, φ , q_{sik} 采用正态分布对可靠度的计算结果有利。

(3) 土体力学参数 c , φ , q_{sik} 的变异系数对基坑稳定可靠性分析中失效概率 P_f 的影响较大, 随变异系数的增大而变大, 其中, 黏聚力 c 影响最大。相对应的, 对可靠度指标 β 的影响是随 c , φ , q_{sik} 变异系数的增大而减小。在分析中发现, 根据土层情况的不同, 失效概率随力学参数的变异系数出现一些不规律性, 还有待于以后进一步研究。

参考文献:

- [1] 董 诚, 郑颖人, 陈新颖, 等. 深基坑土钉和预应力锚杆复合支护方式的探讨[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3793 - 3796, 3802. (DONG Cheng, ZHENG Ying-ren, CHEN Xin-ying, et al. Research on composite support pattern of soil nails and prestressed anchors in deep foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3793 - 3796, 3802. (in Chinese))
- [2] 周 勇, 朱彦鹏. 土钉-预应力锚杆复合支护在深基坑的应用[J]. 路基工程, 2008, **41**(6): 32 - 34. (ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. The application of composite support of soil nails-prestressed anchors in deep foundation pits[J]. Subgrade Engineering, 2008, **41**(6): 32 - 34. (in Chinese))
- [3] 赵德刚, 蒋 宏. 复合土钉墙的变形与稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1687 - 1690. (ZHAO De-gang, JIANG Hong. Deformation and stability analysis of composite soil-nailed walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1687 - 1690. (in Chinese))
- [4] 杨志银, 张 俊, 王凯旭. 复合土钉墙技术的研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(2): 153 - 156. (YANG Zhi-yin, ZHANG Jun, WANG Kai-xu. Development of composite soil nailing walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(2): 153 - 156. (in Chinese))
- [5] 黄广龙, 卫 敏, 李 娟. 参数变异性对围护结构稳定性影响分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2484 - 2488. (HUANG Guang-long, WEI Min, LI Juan. Analysis of influence of parameters variability on retaining structure stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2484 - 2488. (in Chinese))
- [6] 唐仁华, 陈昌富. 锚杆挡土墙可靠度分析与计算方法[J]. 岩土力学, 2012, **33**(5): 1389 - 1395. (TANG Ren-hua, CHEN Chang-fu. Analysis and calculation method of reliability of anchored retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(5): 1389 - 1395. (in Chinese))
- [7] 罗晓辉, 朝泽东, 肖 坚. 基于蒙特卡罗法的基坑土钉支护稳定可靠度分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学), 2006, **23**(增刊 1): 30 - 33. (LUO Xiao-hui, CHAO Ze-dong, XIAO Jian. Stability analysis of reinforced soil nail based upon Monte-Carlo method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2006, **23**(S1): 30 - 33. (in Chinese))
- [8] 杨育文, 袁建新. 深基坑开挖中土钉支护极限平衡分析[J]. 工程勘察, 1998(6): 9 - 15. (YANG Yu-wen, YUAN Jian-xin. Limit equilibrium analysis of excavation of soil nailing in deep foundation pit[J]. Engineering Survey, 1998(6): 9 - 15. (in Chinese))
- [9] 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. (WANG Xiao-ping, CAO Liming. Genetic algorithm—theory, application and software realization[M]. Xi'an Jiao Tong University Press, 2002. (in Chinese))
- [10] 张 明. 结构可靠度分析——方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (ZHANG Ming. Structural reliability analysis - methods and procedures[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 赵延林, 安伟光. 基于可靠性的复合土钉支护基坑稳定性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, **32**(10): 1300 - 1304. (ZHAO Yan-lin, AN Wei-guang. Reliability-based stability analysis of foundation pit supported by composite soil nailing [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, **32**(10): 1300 - 1304. (in Chinese))