

复合土钉支护的基坑稳定可靠度分析

刘 涛

(江苏省电力建设第三工程公司,江苏 镇江 212003)

摘要 :目前对复合土钉支护的基坑进行稳定性评价主要采用安全系数法,并以土体平均力学参数进行计算,而未考虑其取值不确定性对复合土钉支护结构稳定性的影响。为使其稳定评价指标更具合理性,提出采用一次二阶矩法计算复合土钉支护的基坑稳定可靠度,在探讨其具体计算方法的基础上得出基坑稳定可靠度指标及失效概率,进而建立复合土钉支护的基坑稳定可靠度分析方法。对某工程实例进行了分析,验证了该方法的合理性与可行性。

关键词 基坑支护 ;复合土钉 ;基础稳定性 ;安全系数法

中图分类号 :TU473.1+2 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2007)S2-0076-03

基坑工程是近年来土木工程领域发展起来的一门新学科,它包括基坑支护结构的设计和施工、地下水控制、基坑土方开挖、工程监测和周围环境保护等<sup>[1]</sup>。复合土钉围护结构由于具有经济性好、施工方便、施工工期短、安全可靠等优点,最近几年大量应用于基坑工程支护<sup>[2-3]</sup>。但关于基坑支护结构稳定性分析,目前大都采用常规的定值设计法,即用抗力效应与荷载效应的比值作为安全系数来评价基坑支护结构的稳定性。由于计算所用参数的随机性、计算模式的不确定性等原因,导致其计算所得安全系数本身也具有随机性和不确定性,而现有的安全系数法并不能反映该特点,不能真正反映支护结构的稳定与安全程度。与定值设计法不同,结构可靠度分析方法是建立在概率统计基础之上的,充分考虑了工程参数的随机性与变异性,并用结构抗力大于荷载效应的概率来定量地确定结构的安全与否,因而该方法比常规的定值设计法更符合工程实际,也更具合理性。本文将采用一次二阶矩法对复合土钉支护的基坑稳定可靠度进行计算,以期使稳定性评价方法更具合理性。

1 复合土钉安全系数确定方法

现在常用复合土钉支护结构稳定分析方法是安全系数法。为推导稳定性安全系数的计算公式,土条受力按照 Bishop 方法进行分析,并做如下假定 :  
①复合土钉支护边坡的可能滑动面为圆弧面,破坏

形式为主动土体绕圆心产生微小转动 ;②在滑动面上土的极限平衡条件符合 Mohr-Coulomb 破坏准则,同时假定在土体破坏时,全部土钉达到抗拉或拔出的极限状态,水泥土搅拌桩的抗剪强度或坡趾附近土体的局部抗挤压能力达到极限状态 ;③土钉采用等间距、等倾角设置方式 ;④只考虑土钉的拉力,不考虑土条间的法向力和切向力 ;⑤不考虑土钉支护的三维空间效应,按平面状态进行分析。内部稳定分析采用条分法,并定义稳定性安全系数为边坡可以达到的强度与维持边坡稳定平衡时所需的强度之比,则安全系数为

$$F_s = \frac{R}{S} \tag{1}$$

$$R = \sum [(W_i + Q_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + V_i \cos \alpha_i \tan \delta_i + (R_k / S_{hk}) (\sin \beta_k \tan \varphi_i + \cos \beta_k) + (c_i + d_i) (b_i / \cos \alpha_i)] \tag{2}$$

$$S = \sum (W_i + Q_i) \sin \alpha_i \tag{3}$$

式中 : $W_i, Q_i$  为作用于土条  $i$  的土体自重和地面、地下荷载,  $\text{kN/m}$  ; $\alpha_i$  为土条  $i$  圆弧滑裂面切线与水平面之间的夹角,  $(^\circ)$  ; $b_i$  为土条  $i$  的宽度,  $\text{m}$  ; $\phi_i$  为土条  $i$  圆弧破坏面所处第  $j$  层土的内摩擦角,  $(^\circ)$  ; $c_i$  为土条  $i$  圆弧破坏面所处第  $j$  层土的黏聚力,  $\text{kPa}$  ; $R_k$  为破坏面上第  $k$  排土钉的最大抗力,  $\text{kPa}$  ; $\beta_k$  为第  $k$  排土钉轴线与该处破坏面切线之间的夹角,  $(^\circ)$  ; $S_{hk}$  为第  $k$  排土钉的水平间距,  $\text{m}$  ; $F_s$  为内部稳定安全系数,取  $1.25 \sim 1.3$  ; $V_i$  为有搅拌桩处作用于第  $i$  土条

的土体自重和地表荷载之和, kPa ; $\delta_i$  为第  $i$  水泥土搅拌桩土条的内摩擦角, (°) ; $d_i$  为第  $i$  水泥土搅拌桩土条的内聚力, kPa。

采用该方法对复合土钉支护结构进行稳定性评价时, 所采用的计算参数均为其平均值, 未考虑由于参数空间位置不同所导致的取值随机性与不确定性, 并导致某些结构安全系数很大但是仍然失稳, 此时, 采用定值安全系数进行评价必然不够合理, 为此, 本文将引进一次二阶矩法计算其可靠度指标及失效概率, 进而对复合土钉支护结构进行稳定性评价。

## 2 复合土钉稳定可靠度分析方法

影响基坑工程稳定性的因素多而复杂, 某些随机影响因素难以用统计方法定量地描述, 更难以确定其准确的概率分布, 即使确定了亦难解出, 因此在进行基坑稳定性、可靠性分析时, 采用一次二阶矩模型<sup>[7-8]</sup>, 该模型是针对随机变量的分布尚不确定的情况而采用的简化数学模型。它将抗力系数、荷载效应等随机变量按假定的概率分布估算失稳概率或可靠指标, 并仅以均值和标准差作为统计参数对计算表达式进行线性化处理, 目前应用较多的是验算点法, 其基本原理如下:

在基坑工程中, 用  $R, S$  表示抗力与下滑力, 则破坏概率  $P_f$  可表示为

$$P_f = P[(R - S) < 0] \quad (4)$$

对于复合土钉的支护形式, 用安全储备的计算方法较为简便, 定义安全储备为

$$Z = R - S \quad (5)$$

将式(2)与式(3)代入式(5)可得

$$Z = g(c, \varphi, \delta, d, \tau) = \sum [(W_i + Q_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + V_i \cos \alpha_i \tan \delta_i + (R_k / S_{hk}) (\sin \beta_k \tan \varphi_i + \cos \beta_k) + (c_i + d_i) (b_i / \cos \alpha_i)] - \sum (W_i + Q_i \sin \alpha_i) \quad (6)$$

当  $Z > 0$  时, 则基坑稳定,  $Z < 0$  时, 则基坑失稳。此状态函数的均值  $\mu_Z$  可以用标准差  $\sigma_Z$  来度量, 即

$$\mu_Z = \beta \sigma_Z \quad (7)$$

$\beta$  和  $P_f$  一样, 可以作为衡量边坡可靠性的一个指标, 一般称为可靠指标。可靠指标  $\beta$  为安全储备与标准差之比, 或安全储备的变异系数的倒数, 可以推导为

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{Z(\mu_c, \mu_\varphi, \mu_\delta, \mu_d, \mu_\tau)}{\sqrt{W}} \quad (8)$$

其中

$$W = \left( \frac{\partial Z}{\partial c} \bigg|_{c'} \sigma_c \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial \varphi} \bigg|_{\varphi'} \sigma_\varphi \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial \delta} \bigg|_{\delta'} \sigma_\delta \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial d} \bigg|_{d'} \sigma_d \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial \tau} \bigg|_{\tau'} \sigma_\tau \right)^2 \quad (9)$$

式中安全储备均值  $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ ; 安全储备标准差

$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2}$ ;  $Z(\mu_c, \mu_\varphi, \mu_\delta, \mu_d, \mu_\tau)$  为  $c, \varphi, \delta, d, \tau$  取平均值的  $Z$  值,  $c', \varphi', \delta', d', \tau'$  为验算点的  $c, \varphi, \delta, d, \tau$  值,  $W$  为功能函数在最可能破坏概率点的一级泰勒展开式。采用式(6)、(8)与(9)进行迭代计算可得可靠指标  $\beta$ 。其具体求解过程如下: ①选定复合土钉支护结构滑出点位置, 然后假定圆心位置, 由此确定滑裂面位置; ②对滑动体进行分条, 并确定每一条块的计算参数; ③由式(6)计算复合土钉支护结构可靠度分析功能函数  $Z$ ; ④计算  $Z$  在  $c, \varphi, \delta, d, \tau$  的均值点处偏导数值, 进而得式(9); ⑤通过式(8)得均值点处可靠指标  $\beta_1$ ; ⑥重新选定复合土钉支护结构滑出位置, 重复①~⑤可得均值点处可靠指标  $\beta_k$ , 对于给定的精度要求  $\epsilon$ , 若  $\beta_n$  与  $\beta_{n-1}$  满足  $|\beta_n - \beta_{n-1}| \leq \epsilon$ , 则停止计算, 否则, 继续确定滑出位置并进行计算。

对于得到的可靠指标  $\beta$ , 其对应的破坏概率为

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (10)$$

由  $R, S$  的函数式建立  $Z$  的表达式, 按上述步骤求得复合土钉支护结构可靠指标  $\beta$  和破坏概率  $P_f$ , 进而对稳定性进行评价, 若可靠指标  $\beta \geq 3.2$  则认为该支护结构是稳定可靠的。

## 3 工程实例

### 3.1 工程地质资料

该工程为某新开发小区的综合楼, 基坑设计开挖深度为 6.9 m。基坑四周环境比较复杂, 北侧 20 m 左右为围墙, 围墙外为另一小区的新村路, 宽约 40 m, 距坑边 80 ~ 100 m 为已投入使用的高层公寓, 桩箱基础, 西北角紧靠一栋 8 层的办公楼, 桩基, 西侧是场区内的施工临时用房, 东侧紧贴基坑边为一正在使用的变电站, 距坑边 6 m 为围墙, 围墙外为新民路, 下埋有直径 300 mm 的给水管, 南侧与本小区的 3 号楼相邻, 该楼正在进行内部装修, 平面布置如图 1 所示。

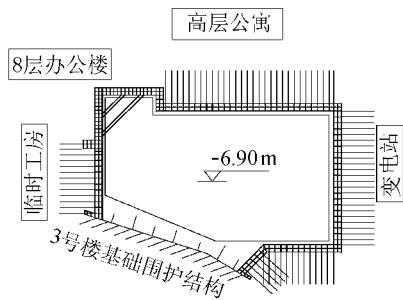


图 1 基坑平面及支护方式分布

根据现场地质勘察结果,在基坑开挖深度及影响范围内,主要地基土的组成自上而下为:杂填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土和淤泥质黏土,主要物理力学性能指标见表 1。

表 1 土层物理力学性能指标

| 层号 | 层厚/m    | 含水量<br>$w/\%$ | 密度<br>$\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(\text{^\circ})$ |
|----|---------|---------------|-------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1  | 0~2.1   | 14            | 1.85                                      | 10                    | 15                                |
| 2  | 0.6~1.7 | 19            | 2.05                                      | 15                    | 18                                |
| 3  | 3.1~6.6 | 27            | 1.90                                      | 11                    | 20                                |
| 4  | 9.0~12  | 41            | 1.70                                      | 14                    | 11                                |

3.2 支护设计

本基坑开挖深度为 6.9 m,根据场地工程水文地质条件以及现有基坑支护方法初步拟定东、西、北三侧采用复合土钉支护(图 2),即在距顶部 1.5 m 深的范围内采用 1:1.5 的坡度放坡,采用 2 排水泥土搅拌桩支护,其中桩径为 600 mm,桩长 11.0 m,间距 500 mm,另外在基坑中随深度加 5 排土钉,第一排距离坑顶 1.3 m,其余竖向间距 1.2 m,横向间距 1.2 m,其中,第一、二、三排土钉长 12.0 m,四、五排均为 9.0 m,土钉采用直径为 25 mm 的螺纹钢,孔径 110 mm,倾角为 10°;南侧主要利用 3 号楼施工时的围护结构,如果施工中发现局部不稳定则进行土钉补强;此外,西北角靠近建筑物太近,采用局部钻孔灌注桩与水泥土搅拌桩联合支护,其中钻孔灌注桩直径为 800 mm,主筋为 9 $\varnothing$ 25+3 $\varnothing$ 16,加强箍筋为 $\varnothing$ 16@2000,箍筋为 $\varnothing$ 8@20,混凝土为 C25;另外在图 1 所示的北侧 1/3 与 2/3 处分别用直径为 800 mm 钢管作为内支护,其距离坑顶的距离为 2 m。通过复合土钉与钻孔灌注桩的各种稳定性验算,均符合要求。

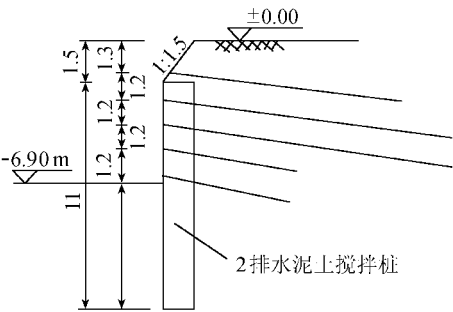


图 2 复合土钉支护参数(单位:m)

3.3 复合土钉可靠度分析

在复合基坑可靠度分析过程中,对于土体黏聚力均值分别取为 10 kPa, 15 kPa, 11 kPa, 均方差为 2.8 kPa,内摩擦角均值分别为 15°,18°,20°,均方差为 3°,土钉界面黏结强度均值为 8 kPa,均方差为 2 kPa,水泥土搅拌桩土条的黏聚力均值为 460 kPa,均方差为 16 kPa,内摩擦角均值为 25°,均方差为 2°,根据上文提出的复合土钉支护结构可靠度计算方法,编制

了相应的的计算程序,计算得  $\beta = 2.01, P_f = 0.8\%$ ,根据现有统计资料该可靠度指标下复合基坑支护结构是稳定的,实际工程中也是稳定的。

4 结 语

a. 考虑土体参数空间分布的特点,将可靠性理论引入复合土钉支护的稳定性研究,用验算点法进行计算,克服了安全系数计算的缺点,得出了评判稳定性的可靠指标及失稳概率,它们能反映参数取值不确定性对复合土钉支护结构稳定性的影响。

b. 根据工程实际情况提出采用复合土钉与钻孔灌注桩联合支护的设计方法,可满足工程安全需要又节省工程造价,同时提高了施工速度,此外,在施工过程中的降水、土方开挖、成孔与注浆压力等方面也都加强了管理,并注重监测对施工的影响,这也保证了复合土钉支护结构的稳定性。

参考文献:

[1] 黄强.建筑基坑支护技术规程应用手册[M].北京:中国工业出版社,1999.  
[2] 张明聚,宋二祥,陈肇元.基坑土钉支护稳定性分析方法及其应用[J].工程力学,1998,15(3):36-43.  
[3] 陈肇元,崔京浩.土钉支护在基坑工程中的应用[M].北京:中国工业出版社,2000.  
[4] 胡展飞,周健,杨林德.深基坑基底软土稳定性研究[J].土木工程学报,2001(2):84-88.  
[5] 隆威,刘飞禹.土钉和锚杆联合在深基坑事故处理中的应用[J].探矿工程,2002(4):16-18.  
[6] 孙铁成,张明聚,杨茜.深基坑复合土钉支护稳定性分析方法及其应用[J].工程力学,2005,22(3):126-133.  
[7] 祝玉学.边坡可靠性分析[M].北京:冶金工业出版社,1993.  
[8] 吴世伟.结构可靠度分析[M].北京:人民交通出版社,1990.

(收稿日期:2006-12-25 编辑:熊水斌)

