

土钉支护设计计算程序开发及应用

狄圣杰^{1,2}, 汪明元¹, 魏 涌³

(1. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江, 杭州 3100143 ;

2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

3. 中国南方电网有限责任公司云南电力建设监理咨询有限公司, 云南 昆明 650231)

摘要 :综合考虑土钉侧压力、土钉设计内力、土钉抗拔力及土钉墙稳定性等多方面因素, 基于 VB2005 开发了土钉支护设计计算程序。对于土钉墙稳定性计算, 分别评判原始边坡稳定性及支护后边坡稳定性, 土钉抗拔力分布与所分土条数无关, 考虑钉土相互作用后, 最危险圆弧滑动面将有所变化, 程序实现了支护后最危险圆弧滑动面的动态搜索。工程应用表明 程序涵盖了全面的土钉支护设计计算内容, 计算完成的同时即可绘制图形, 形象直观, 操作简便, 可应用于基坑和边坡工程。

关键词 :土钉支护 圆弧滑动面 基坑工程 稳定性 程序设计

中图分类号 :TV222

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)04-0074-04

Calculation program development for soil nail bracing and its application // DI Sheng-jie^{1,2}, WANG Ming-yuan¹, WEI Yong³
(1. East China Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Group Co., Hangzhou 310014, China ; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 3. Yunnan Power Construction Supervision & Consulting Co., Ltd, China Southern Power Grid, Kunming 650231, China)

Abstract : A calculation program was developed with Visual Basic 2005 based on a comprehensive consideration of many factors, such as lateral pressure, designed internal forces, anti-pulling force, and overall stability of soil nailing. In this study, the stabilities of unsupported and supported slopes were evaluated separately for the calculation of the overall internal stability. As the distribution of the anti-pulling force of soil nailing is independent of the soil slices, the most dangerous circular sliding surface changes at each stage if interaction between soil and nailing is considered. The program enables a dynamic search of the most dangerous circular sliding surface of a supported slope. The engineering applications indicate that the program contains all the design and calculation contents for the soil nail bracing, and can also present visual graphics simultaneously during the calculation. The program is visual and can be easily implemented. It is efficient when it comes to foundation pit engineering and can provide useful references for civil engineers.

Key words : soil nailing bracing ; circular sliding surface ; foundation pit engineering ; stability ; programming

土钉支护技术是用于基坑和边坡稳定的一种挡土技术, 它不需要单独的施工工期, 可以与挖土同步操作, 具有施工快、设备简单、成本低、无噪音等优点, 一般其单位工程造价仅为传统支护方法的 $1/3 \sim 1/2$, 在我国应用广泛^[1]。付文光等^[2]对土钉支护、土钉墙等概念进行了详尽的阐述, 并评述了与锚喷技术的工作机理及力学性能的区别, 建议对多种技术联合应用时, 采用分段、分级、组合、混合等命名方法。在深基坑土钉支护设计计算中, 可使用极限平衡方法和有限元方法进行分析, 但单一的有限元计算不一定能输出定量数据, 在实际工程应用中有一定局限性, 极限平衡分析法简单明了, 基本能够满足工程设计要求, 目前被普遍采用, 亦有依据圆弧滑动面边

坡安全稳定性工程类比的经验判定方法, 为土钉支护边坡安全稳定性分析提供参考^[3-7]。一般情况下土钉支护设计计算量大, 设计人员往往将土层简化, 凭借经验进行设计, 对其稳定性分析不够深入^[8]。祝方才等^[9]对土钉支护稳定分析规范的极限平衡公式进行了探讨, 研究了土层参数平均化对计算的影响, 得出了使用土层参数平均化可能造成较大误差的结论。郭院成等^[10]提出了均质土体中土钉受力的极限分析上限法, 对 JGJ 120—99《建筑基坑支护技术规程》^[11]和 CECS96—97《基坑土钉支护技术规程》^[12]采用土压力方法进行了比较, 得出后者土压力模式较合理的结论。

工程软件的编制涉及土质参数、土压力模型及

修正等多个方面因素,随着施工经验的积累、设计规范的更新以及新技术、新成果的出现,在基坑和边坡工程的应用中,须对原有工程支护程序源代码进行修改,但商品软件都涉及版权并进行了封装,难以取得源代码,且基坑及边坡支护区域性强,支护体系设计与施工亦要因地制宜,可见编制一套适用性强且方便可用的程序很有意义。

本文采用 VB(Visual Basic) 2005 软件为开发平台,以基坑土钉支护技术规程^[12]为基础,开发了一套具有可视化交互操作及图像输出界面的土钉支护设计计算程序,可计算土钉侧压力、土钉设计内力、土钉抗拔力及土钉墙稳定性等内容,对于稳定性计算可动态搜索考虑土钉抗拔力作用时边坡最危险圆弧滑动面及相应安全系数。

1 土钉支护设计计算

1.1 土钉侧压力及内力计算

在土体自重及地表均布荷载作用下,土体自重相应侧压力按基坑土钉支护技术规程取梯形分布,地面超载部分取矩形分布,则土钉长度中点处侧压力为

$$P = P_1 + P_q \quad (1)$$

$$P_m = K_a \left(1 - \frac{2c}{\rho g H} \frac{1}{\sqrt{K_a}} \right) \rho g H \leq 0.55 K_a \rho g H \quad (2)$$

$$P_q = K_a q \quad (3)$$

式中: P_1 、 P_m 为由支护土体自重引起的侧向土压力,kPa; P_q 为地面超载引起的侧压力,kPa; K_a 为主动土压力系数; c 为对应的土体黏聚力,kPa; ρ 为土体密度,kg/m³; H 为基坑深度,m; q 为地面超载,kPa。

当计算深度 $y \leq 0.25H$ 时, $P_1 = yP_m/0.25H$,当计算深度 $y > 0.25H$ 时, $P_1 = P_m$ 。对于 $2c/\rho g H \leq 0.05$ 的砂土及粉土, $P_m = 0.55 K_a \rho g H$;对于 $2c/\rho g H > 0.05$ 的一般性黏性土,则 $P_m \geq 0.2 \rho g H$ 。

土钉所受最大设计内力 N 由土钉侧压力求出:

$$N = \frac{1}{\cos \alpha} P S_v S_h \quad (4)$$

式中: α 为土钉与水平面夹角; S_v 、 S_h 分别为土钉布置平面竖向间距及水平间距,m。

当有地下水及其他地下荷载作用时,应考虑由此产生的侧向压力并在计算设计内力时计入其影响。土钉设计内力应较土钉钢筋抗拉力小,考虑基坑稳定安全系数应满足:

$$FN \leq 1.1 \frac{\pi d^2}{4} f \quad (5)$$

式中: F 为基坑稳定安全系数,一般取值 1.2~1.4; f 为钢筋抗拉强度标准值,kPa; d 为土钉钢筋直径,m。

式(5)给出了钢筋直径选用的下限值。土钉注浆后形成锚固体,薄弱环节即为土钉与浆体接触面、

砂浆锚固体与土体接触面,根据已有试验结果及实际工程经验,后者接触面的黏结强度一般较小,土钉破坏基本在锚固体与土体界面处,进行土钉抗拔力及稳定性计算时以此作为控制标准。

1.2 土钉墙稳定性计算

土钉支护的稳定性分析是一项重要内容,可以校核初步设计方案的安全性和适用性。土钉墙稳定性计算分为内部整体稳定性及外部整体稳定性计算,前者失稳破裂面穿过土钉支护复合体的内部,后者失稳破裂面则是在土钉加固体外部,主要表现为倾覆及滑动。按照瑞典条分法的稳定安全系数定义,原始边坡稳定安全系数 F_{s1} 为

$$F_{s1} = \frac{\sum \frac{c_k b_i}{\cos \theta_i} + \sum (W_i + Q_i) \cos \theta_i \tan \varphi_k}{\sum (W_i + Q_i) \sin \theta_i} \quad (6)$$

式中: W_i 、 Q_i 分别为作用于土条 i 的自重和附加荷载,kN/m; θ_i 为土条 i 破裂面切线与水平面夹角; b_i 为土条 i 宽度,m; c_k 为土条 i 破裂面处 k 土层的黏聚力,kPa; φ_k 为土条 i 破裂面处 k 土层的摩擦角。

在此基础上应考虑土钉支护后土钉提供的抗力,同时忽略土钉自重,则支护后边坡稳定安全系数 F_{s2} 为

$$F_{s2} = \frac{\sum [\sin(\alpha_j + \theta_i) \tan \varphi_k + \cos(\alpha_j + \theta_i)] \frac{R_j}{s_{hj}}}{\sum (W_i + Q_i) \sin \theta_i} \quad (7)$$

其中

$$R_j = \pi d_{0j} l_{wj} \sum \tau_j \quad (8)$$

式中: R_j 为破裂面第 j 排土钉的极限抗拔力,kN; s_{hj} 为第 j 排土钉水平方向的间距,m; α_j 为第 j 排土钉与水平面的夹角; l_{wj} 为土钉在圆弧面外的长度,m; τ_j 为土钉穿过稳定土层的土体与锚固体间的黏结强度,kPa; d_{0j} 为锚固体直径,m。

设置圆心搜索范围,一般设定为 $2H \times H$ ^[4], H 为坡高,如图 1 所示。亦可扩大范围来提高精度,本文以每个圆心至坡面的圆弧切线距离为初始值,对应于半径步长 Δr ,则下一个循环值即为 $r_i(x_0, y_0) + \Delta r$,逐步扩大至边坡内部,从中搜索最危险圆弧滑动面及最小安全系数。经过测试发现,如果基坑底部土体抗剪强度参数较上部相差较多时,如底部为软弱土体,圆弧滑动面会出现在坡底,如果整体土质良好,圆弧滑动面一般经过坡脚。由于土钉位置及几何参数固定,对于每一个圆弧滑动面,土钉在圆弧滑动面内外的长度均可确定。

内部整体稳定性计算时,先分析未加土钉时原始边坡最小稳定安全系数及对应圆弧滑动面,对原始边坡进行评价。添加土钉后根据土钉在圆弧滑动面外长度,计算土钉抗拔力大小,求出支护后边坡的稳定

系数为 0.560, 不满足稳定性要求, 添加土钉后原始圆弧滑动面稳定安全系数为 2.150, 考虑内力重分布搜索圆弧滑动面最小稳定安全系数为 2.03, 满足稳定性要求且有裕量。重新搜索得到的最小稳定安全系数较小, 表明在实际工程中使用原始圆弧滑动面判定土钉支护稳定性不合理。

由于土钉较密, 重新搜索的圆弧滑动面有避开土钉向后偏移的现象, 而且通过其他实例计算发现, 土钉密度越大, 圆弧滑动面偏移越多, 越有试图避开土钉加固区的趋势, 可以假设当土钉密度达到一定程度时, 大大提高了土体复合抗剪强度参数, 形成一等效复合式挡土墙, 从而起到挡土作用。土钉内力及抗拔安全系数输出界面如图 6 所示。



图 6 土钉内力输出界面

考虑土钉施工步骤, 开挖一层土体设置一排土钉, 各开挖工况最小稳定安全系数变化曲线如图 7 所示, 开挖第一层且未植入土钉时稳定安全系数最小为 1.454, 最后开挖完毕且未植入土钉时稳定安全系数亦较小, 为 1.776, 开挖完毕植入土钉后稳定安全系数变为 2.030。故在分层开挖时, 禁止超挖, 超挖可能导致边坡失稳, 应引起注意。

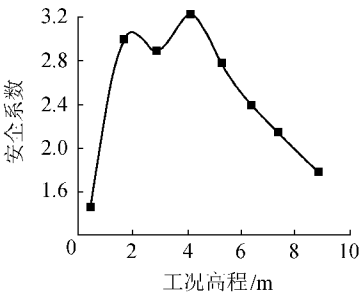


图 7 各开挖工况最小稳定安全系数

计算得到土钉总体抗拔安全系数为 3.650, 满足抗拔稳定要求, 同时验算整体抗滑稳定安全系数为 3.160, 整体抗倾覆稳定安全系数为 7.030, 均满足要求。

此外, 分析了土体参数的敏感性, 原始边坡整体稳定安全系数受土体黏聚力 c 影响较大; 土钉抗拔安全系数和支护后边坡稳定安全系数受摩擦角 φ 影响较大。同时发现随土钉锚固体直径及锚固力的增大, 稳定安全系数提高幅度较大, 说明通过压力灌

浆措施对土钉支护安全稳定性提高有较大作用。随着坡顶荷载的增大, 稳定安全系数有所降低, 坡顶荷载对土钉抗拔力影响较大。

4 结 语

基于 VB2005 软件平台开发了土钉支护设计计算程序, 涵盖了全面的土钉支护设计计算内容, 弥补了在土钉支护工程应用中只验算某单一指标, 而未协调统一的缺陷。程序设计条理清楚、可视化输出, 搜索圆弧滑动面模块亦可用于土坡稳定分析、滑坡治理等方面, 可为工程设计人员提供有益的参考。在考虑土钉作用时, 最危险圆弧滑动面随土钉设计参数动态变化, 实现了土钉支护中边坡最危险圆弧滑动面的动态搜索, 这对于保证开挖过程中其安全稳定性具有一定意义, 通过土钉支护边坡各开挖工况稳定性计算发现, 安全系数呈现出先增大再降低的规律性。

本文研究内容仍属于土钉支护校核验算范畴, 在此基础上如何扩充一套方便可用的优化设计程序 and 支护体位移计算程序, 因地制宜, 优化出土钉最佳布置方案, 如土钉横竖间距、土钉倾角及钉长分布等, 同时对支护结构的变形进行控制, 提高工程的安全性和经济性, 是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] 王志勇, 李培锋. 土钉墙作用机理及其与传统支护的比较[J]. 西部探矿工程, 2003(11): 49-50.
[2] 付文光, 卓志飞. 对‘土钉墙’等术语命名的探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 46-51.
[3] 邓建刚, 傅旭东. 土钉支护结构的优化设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(10): 321-324.
[4] 朱彦鹏, 李忠. 深基坑土钉支护稳定性分析方法的改进及软件开发[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 939-943.
[5] 刘志凯, 郑毅, 左广州. 基坑开挖与土钉支护的数值模拟[J]. 吉林大学学报 地球科学版, 2004, 34(增刊 1): 103-106.
[6] 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.
[7] 狄圣杰, 李晓敏, 魏樯. GRNN 在边坡稳定预测分析中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 80-83.
[8] 张百红, 李国富, 韩立军. 基坑土钉支护设计的简单算法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3041-3046.
[9] 祝方才, 何杰, 戴益民. 土钉支护稳定分析的规范公式研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 29(7): 1037-1040.
[10] 郭院成, 秦会来. 均质土体中土钉受力的极限分析上限法[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3241-3245.
[11] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S].
[12] CECS96—97 基坑土钉支护技术规程[S].
[13] 狄圣杰, 徐卫亚. 黏性土求主动土压力的库尔曼法及应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 970-974.

(收稿日期 2011-10-18 编辑 周红梅)