

# 刚性桩网路基边坡稳定性分析的编程实现

解治敏<sup>1</sup>, 许超<sup>1</sup>, 韩中阳<sup>2</sup>

(1.中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2.福建省建筑科学研究院, 福建 福州 350025)

**摘要:** 圆弧滑动法是对复合地基稳定性进行计算分析的常用方法, 福建地方标准也采用该方法, 且认为破坏模式为弯断破坏。考虑到该方法的计算量大, 为简化求解, 文中利用 Visual C++ 语言编程, 通过输入土体参数、边坡几何参数和布桩参数得到边坡安全系数, 再采用黄金分割法搜索出最小安全系数, 实际工程应用结果显示该程序的误差较小。

**关键词:** 公路; 路基; 边坡; 圆弧滑动法; 刚性桩; 稳定性分析

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2018)04-0075-03

福建省位于中国东南部沿海地带, 其土体以晚更新统~全新统冲淤积软土层为主, 主要为中软~软弱场地, 公路设计中多采用刚性桩网路基。虽然刚性桩竖向承载力很高, 但路基失稳现象时有发生。采用刚性桩复合地基处理的路基即使处于稳定状态, 复合地基和刚性桩仍会产生一定侧向位移, 刚性桩会承受一定弯矩并可能受弯开裂, 影响工程的耐久性, 甚至导致路基滑塌。传统的柔性桩复合路基设计基于桩土等应变假定, 按刚度比推算荷载分布, 按桩体抗剪强度计算抗滑力。对于刚性桩复合路基, 因桩土刚度差异巨大, 桩头桩端存在刺入变形, 等应变假定不合理。另外, 因桩体刚度及强度远大于软土, 滑面两侧土体对桩体的约束很小, 弯断可能性远大于剪断。路堤下刚性桩弯矩可利用有限单元法计算得到, 但有限单元法所需参数确定困难。鉴于此, 福建省 DBJ/T 13-221-2015《刚性桩网路基设计与施工规程》中路堤破坏模式主要为弯断破坏, 以弯断为主要破坏形式的圆弧条分法计算出的稳定性较符合工程实际, 且具有简便的计算模型, 便于应用推广。

在土坡稳定安全系数计算中, 由于滑动圆弧的圆心和半径都是任意假定的, 计算出的安全系数不一定是最小安全系数, 需多次试算, 假定多个滑裂面才能找到土坡最小安全系数, 计算量大, 需花费大量时间。为缩短计算时间, 该文采用 Visual C++ 语言编程计算土坡稳定安全系数。

## 1 计算原理

### 1.1 滑动面圆心位置的确定

滑动面圆心位置采用黄金分割法确定。黄金分

割是指将整体一分为二, 较大部分与整体部分的比值等于较小部分与较大部分的比值, 约 0.618。编程中通常采用黄金分割法求解函数最值。如图 1 所示, 假定滑动面为一圆心为  $O$ 、半径为  $R$  的圆弧, 先计算网格的 25 个点的稳定性系数, 通过比较得出最小值, 然后以最小值为中点、长和宽缩短为上一次的 0.618, 再次寻找最小值, 即以 0.618 的速率缩减区间, 直到达到设定精度。为保证区域中的点存在最小稳定性系数, 对初始区域适当放大。计算时使  $x$  方向边界为  $(-AC, AC)$ ,  $y$  方向边界为  $(0, 3AB)$ 。最后一次计算的长和宽小于 0.05 m, 即认为找到了最小稳定性系数。

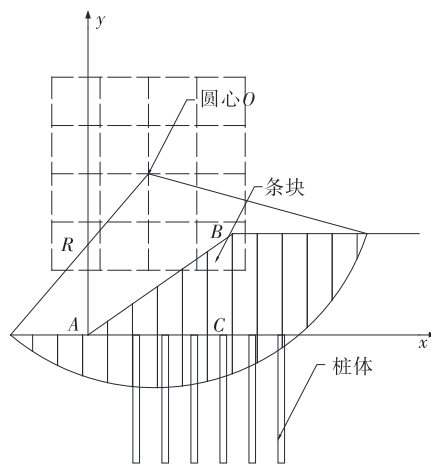


图 1 最危险圆弧的确定

### 1.2 路基稳定安全系数的确定

确定圆心位置后, 根据任一土条  $i$  上竖向力平衡条件, 含桩单元总重量扣除滑面处桩身轴力  $N_p$  求桩间土总重量, 同时增加桩体水平抗力  $F_p$  (见图 2), 式(1)不再与桩截面相关。刚性桩路基稳定验算

包含土体不滑移、桩体不弯断两部分。

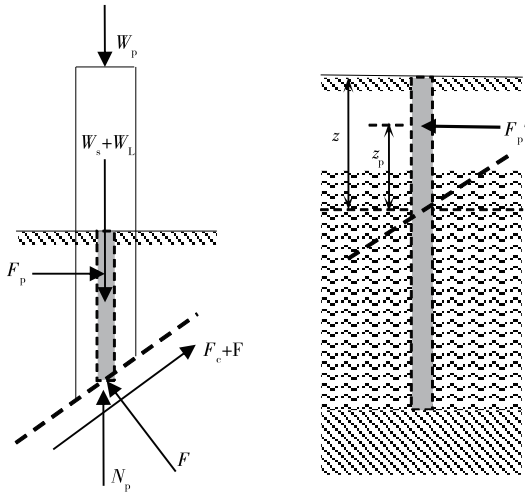


图2 滑动体土柱单元与桩体水平抗力示意图

$$k_f = \frac{\sum M_f + \sum M_c + \sum M_p + M_t}{\sum M_v} \quad (1)$$

式中:  $M_f$ 、 $M_c$  分别为土体摩擦力矩和粘结力矩;  $M_p$  为桩体水平抗力矩;  $M_t$  为土工织物抗剪力矩(依据受力与滑动趋势关系改为受剪);  $M_v$  为单元土体下滑力矩。

单元总重量  $W$  等于土层重量  $W_s$ 、填土重量  $W_l$  与路面活载  $W_p$  之和, 桩体轴力  $N_p(z)$  等于桩顶荷载减去滑面之上桩侧摩阻总和, 总重量  $W$  扣减滑面处桩体轴力  $N_p(z)$  后得到单元重量  $W_v$ , 非挤土桩还应扣减桩孔体积土重:

$$\begin{cases} W = XYq + (XY - A_p) \int_0^z \gamma_s(z) dz \\ N_p(z) = \sigma_p(0) A_p - \pi D \int_0^z f(z) dz \\ W_v = W - N_p(z) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $X$  为单元横向宽度;  $Y$  为单元纵向宽度;  $q$  为填土重量及路面活载之和;  $A_p$  为桩截面面积;  $z$  为滑面深度;  $\gamma_s(z)$  为土层容重;  $f(z)$  为侧摩阻。

使单元底面积等于单桩分担面积即  $XY = A$ , 得到含桩单元桩间土总重量  $W_v$  计算式:

$$W_v = \sigma_s(0) A_s + \pi D \int_0^z f(z) dz + A_s \int_0^z \gamma_s(z) dz \quad (3)$$

$$W_{si} = A \sum_{j=1}^{n_i} \gamma_j h_j \quad (4)$$

$$W_{vi} =$$

$$\begin{cases} Aq_i + W_{si}, \text{无桩土条} \\ \sigma_{si}(0) A_s + \pi D \sum_{j=1}^{n_i} f_j h_j + A_s \sum_{j=1}^{n_i} \gamma_j h_j, \text{有桩土条} \end{cases} \quad (5)$$

其他抗滑力矩和滑动力矩按下式计算:

$$M_{si} = \begin{cases} (A - A_p) / \cos \alpha_i \tau_{si} R, \text{原位十字剪} \\ M_{ci} + M_{fi}, \text{快剪指标} \end{cases} \quad (6)$$

$$M_{ci} = (A - A_p) / \cos \alpha_i c_i R \quad (7)$$

$$M_{fi} = \begin{cases} W_{si} \cos \alpha_i \tan \varphi_i R, \text{土条滑面为饱和黏性土} \\ W_{vi} \cos \alpha_i \tan \varphi_i R, \text{土条滑面为非饱和黏性土} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} M_{pi} = F_{pi} (R \cos \alpha_i - z_i / 3) \\ M_t = Q_t Y Z_t \\ M_{wi} = W_{vi} R \sin \alpha_i \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $A$  为土条截面积 ( $m^2$ ), 等于单桩分担面积;  $A_p$  为桩截面面积 ( $m^2$ ), 滑面未切过桩体时取零;  $\alpha_i$  为土条滑面倾角 ( $^\circ$ ), 土条位于滑动圆心左侧时取负值、右侧时取正值;  $\tau_{si}$  为土条滑面土层原位十字剪强度或静力触探换算十字剪强度 (kPa);  $R$  为滑动圆半径 (m);  $c_i$  为土条滑面土层粘结力快剪指标标准值 (kPa);  $W_{si}$  为土条有效地层重量 ( $kN/m^3$ );  $\varphi_i$  为土条滑面土层内摩擦角快剪指标标准值 ( $^\circ$ );  $W_{vi}$  为土条总净重 ( $kN/m^3$ );  $F_{pi}$  为桩体水平抗力 (kPa);  $z_i$  为土条滑面深度 (m), 桩体水平抗力作用点取  $z_i/3$ , 即呈倒三角形分布;  $Q_t$  为加筋体或水平拉筋每延米拉力设计值 (kN);  $Y$  为土条纵向计算宽度 (m),  $Y = A/X$ ;  $X$  为土条横向计算宽度;  $Z_t$  为滑动圆心  $O$  与加筋体或水平拉筋的高差 (m)。

## 2 程序编制及流程

编程环境为微软公司 Visual Studio 2010 (程序中未计入渗流作用)。

计算程序分为三部分: 1) 确定滑动圆心所在位置。在  $x \in (-AC, AC)$ 、 $y \in (0, 3AB)$  的区域根据图 1 所示方格依次取为圆心。2) 确定滑动半径。确定滑动圆心使半径的初始值  $R_{min}$  为  $OB$ , 其中  $B$  为路基路面左侧端点, 设置半径最大值  $R_{max}$  为路面宽度的 0.75, 中间递增变量  $\Delta R = (R_{max} - R_{min}) \times 0.05$ , 即等分为 20 份。求得 20 个不同半径的  $k_f$  后, 以最小值为中点缩小半径增量直至求到满足精度要求的  $k_f$ 。3) 按照二分法求得最小稳定性系数  $k_f$ 。计算流程见图 3。

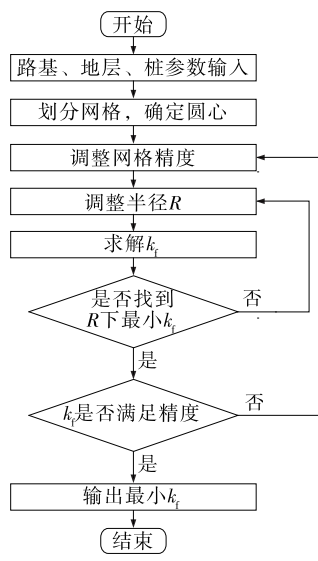


图3 计算流程

3 工程案例

3.1 工程概况

某双向六车道高速公路,路基宽度为 30 m,坡率为 1 : 1.5,路堤中心填高分别为 9.0 和 11.5 m。沉管灌注桩桩径为 500 mm,桩间距为 1.5 m,呈梅花形布置,桩长为 30~35 m。桩帽顶部直径为 1.5 m,高度为 0.6 m。桩体和桩帽采用素砼,强度等级均为 C20。桩帽横向用 1 根水平拉筋  $\phi 12$  连接,拉筋进行防锈处理。垫层采用级配碎石,厚度为 0.5 m。计算时桩径取 0.5 m,桩长取 31.2 m,桩身变形模量取 255 GPa。

3.2 地层参数

工点位于丘陵与滨海沉积接触带,其地层参数见表 1。

表 1 地层参数

地层编号	地层岩性	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	压缩模量/kPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	剪应力/kPa	厚度/m
1	中砂	17.5	4 580	1.0	30.0	30	8.8
2	淤泥	16.8	2 980	7.9	1.0	15	21.4
3	强风化花岗岩	26.0	10 000	30.0	30.0	1 000	0.4~5.0

3.3 计算结果

运行程序进行计算,得到该路基稳定性系数为 1.13,滑动圆心为(6.8,14.5),半径为 17.36 m,路基处于稳定状态,图 4 为其滑动面。

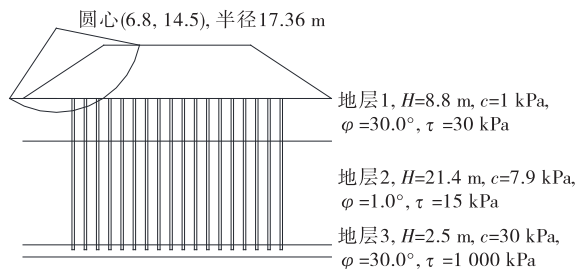


图4 地层结构示意图

考虑到滑动面圆心使用黄金分割法可能在第一次能搜索到全局最优值,而第二次得到的只是局部最优值,搜索范围影响搜索结果,为验证该稳定性计算方法使用黄金分割法计算是否会出现只能找到局部最优值的错误,进行以 0.1 m 为间距、 $x$  为(-15,15)、 $y$  为(0,40)共 120 000 个点的穷举计算。使无法计算的点为-1,得到稳定性系数最小值为 1.11,圆心为(7,18.3)(见图 5)。通过黄金分割法计算得到的稳定性系数最小值为 1.13,圆心为(6.8,14.5),

与穷举法所得最小值的误差在容许范围内。

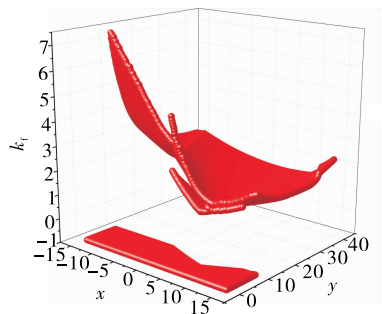


图5 穷举法计算结果

从图 5 可看出: $k_f$  呈现从四周向中间递减的趋势,在中间变化较小,会出现圆心移动一小段距离但  $k_f$  基本不变的情况。

4 结语

对《刚性桩网路基设计与施工规程》中路基稳定性分析采用编程求解,圆心搜索采用黄金分割法,通过与穷举法对比,该方法能迅速收敛并得到相对准确的解。进行界面编制后,使用程序时需输入的参数有土体容重  $\gamma$ 、粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、压缩模量

(下转第 164 页)

在分析豹子沟隧道山体开凿情况的基础上,巧妙利用周边地形,让隧道洞门以一种模拟丝绸腾舞的视觉形象自然地渗透进绿色山峦之中,通过洞顶土方回填和路基两侧地形整理,利用生态防护技术修复土壤生态环境系统来重建隧道口仰坡植被,并结合自然式的种植设计,营造与周围环境相协调的隧道洞口景观。

洞口背面山体较大,侧面采用山体切面的开挖方式,坡度大且陡峭,但稳定性较好,植被覆盖良好。洞口前分离式路基地形平缓,洞口左右岩石裸露少且易于绿化。洞口左右的挡土护坡与洞口结构相连,洞门结构浑然一体,最大程度地尊重现场地形。对隧道洞口结构的创新,边坡圬工防护与隧道景观造型巧妙地结合在一起,创造出“飘带”造型的洞口景观形态,设计出既满足功能需求又体现东西作为古代丝绸之路起点的文化寓意。为避免大范围砌墙面对司机心理造成影响,减轻对司机的视觉压迫,采用贴面、文化石等材质对墙面进行处理(见图2)。



图2 豹子沟隧道洞门景观设计方案

#### 4 结语

隧道洞门不仅具有行车安全、道路通行等基本功能,而且是整个隧道的形象展示窗口,其景观设计在隧道设计中的比重越来越大。隧道洞口景观设计在中国还处于初级发展阶段,高水平的景观作品较缺乏。设计中,在实现绿色环保最基本要求的基础上,应充分发挥各学科的优势,实现高速公路隧道洞门景观向更高层面发展。

#### 参考文献:

- [1] 关向群.隧道洞口景观设计实用方法的研究[D].成都:西南交通大学,2004.
- [2] 张军.隧道洞口景观设计:以杭州西湖风景区五老峰隧道为例[J].河北农业科学,2009,13(3).
- [3] 柏松平,李德宏.山区公路隧道洞门美学效果设计[J].公路隧道,2005(2).
- [4] 陈柳晓,刘唐志,段萌萌.基于视错觉的隧道入口减速景观设计[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2018,37(1).
- [5] 陈芳,周智海.高速公路隧道洞口绿化设计[J].公路与汽运,2015(3).
- [6] 费雯.隧道端墙式洞门景观设计浅析[J].公路交通科技:应用技术版,2014(6).
- [7] 张晓艳.高速公路隧道洞口景观设计研究:以甘肃省临合高速公路为例[J].丝绸之路,2016(24).

收稿日期:2018-04-23

(上接第77页)

$E_s$ 、边坡角 $\alpha$ 和边坡高度 $H$ ,桩长 $l$ 、桩身压缩模量 $E_{s1}$ 等参数均按照经验取值内置;输出结果有最小安全系数 $k_t$ ,圆心坐标 $x$ 、 $y$ 及滑动半径 $R$ 。该程序使用方便,除可用于边坡稳定性分析外,还能得出圆弧滑动边坡最危险圆弧的位置及滑动半径,对刚性桩网路基设计能起到较大辅助作用。

#### 参考文献:

- [1] 刘吉福,郑刚,安关峰.刚性桩复合地基路基绕流滑动稳定分析[J].工程勘察,2013(6).
- [2] 顾晓鲁,钱鸿缙,刘惠珊.地基与基础[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [3] 郑刚,李帅,刁钰.刚性桩复合地基支路堤稳定破坏机理的离心模型试验[J].岩土工程学报,2012,34(11).

- [4] 郑刚,刘力,韩杰.刚性桩加固软弱地基上路堤的稳定性问题(I):存在问题及单桩条件下的分析[J].岩土工程学报,2010,32(11).
- [5] DBJ/T 13-221-2015,刚性桩桩网路基设计与施工规程[S].
- [6] 李明,丁德馨.边坡最危险滑动圆弧圆心位置的程序搜索及其应用[J].南华大学学报:自然科学版,2004,8(4).
- [7] 蔡文,曹洪,罗彦,等.边坡稳定分析的一个全面搜索危险圆弧滑动面的方法[J].广东水利水电,2007(1).
- [8] 吕军.考虑坡顶裂隙特性的土质路堑边坡稳定性研究[J].公路与汽运,2017(3).
- [9] 凡子义,贺炜.高速公路改扩建边坡支护方案及稳定性分析[J].公路与汽运,2017(5).

收稿日期:2017-12-28