

圆弧滑面滑坡推力的数值解研究

戴自航^{1,2}, 沈蒲生²

(1. 福州大学环境与资源学院, 福州 350002; 2. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

[摘要]基于国内折线滑面滑坡推力计算传统的分块传递系数法原理,提出了适用于圆弧滑面滑坡推力计算的数值积分法,推导了有关的计算公式,编制了实用的计算程序。由程序实例计算图形处理结果,探讨了滑坡推力随位置变化的某些规律,这对于滑坡治理设计是有益的;同时根据对滑体内部力函数的变化规律的分析,指出了传递系数法尚存在的问题。

[关键词]滑坡推力 传递系数法 圆弧滑面 数值积分法 内部力函数

[中图分类号]TU431;U448.14 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2004)03-0093-04

1 分块传递系数法

在对滑坡进行稳定分析和治理设计中,我国铁路部门最先提出了分块传递系数法^[1](不平衡推力传递法),该方法具有简单适用的优点,几乎成为国内各部门在计算滑坡推力时唯一选用的方法。

该方法的分析原理是:假定滑动面由一系列折线滑面构成,各分块下滑力平行于底滑面,如图1所

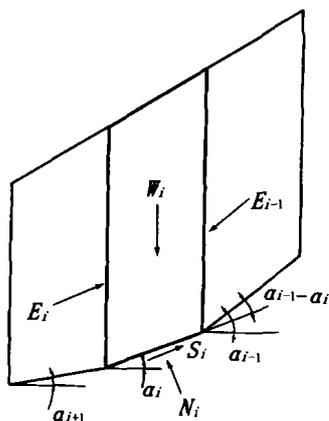


图1 折线滑面滑体块段受力分析

示。取单位厚度滑体进行分析,将各力(在不考虑其它外力荷载时)投影在相应分块底滑面上,根据滑面及其法线方向(N_i 作用方向)上满足力的平衡条件推导出众所周知的滑坡推力计算公式

$$E_i = E_{i-1}\psi_{i-1} + W_i \sin\alpha_i - \frac{1}{F} (c_i l_i + W_i \cos\alpha_i \tan\phi_i) \quad (1)$$

式中 ψ_{i-1} 称为下滑力传递系数,按下式表达

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\tan\phi_i}{F} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (2)$$

严格地说,分块传递系数法仅适用于折线滑面滑坡推力的计算。然而,实际工程滑坡,尤其是较为均质的土体滑坡,其滑动面并非由多段折线滑面构成,而往往更接近于圆弧滑面。迄今为止,对于圆弧滑面,人们似乎理所当然地按有关文献^[1,2]建议将之以若干折线滑面近似代替,仍采用传统的分块传递系数法计算滑坡推力。笔者认为,如此处理是欠妥的,计算的滑坡推力可靠性值得怀疑。我国现行规范^[3],也仅建议了上述折线滑面推力算法。因此,根据传统的分块传递系数法分析原理,提出更适于圆弧滑面滑坡推力计算方法是很有必要的。

2 圆弧滑面滑坡推力数值算法

设有典型饱和均质土坡,如图2所示,土的容重为 γ ,直接快剪强度指标为 c, ϕ (对于已滑边坡则应取其残余抗剪强度指标 c_r, ϕ_r),坡面OD为单一斜坡,坡度 $i = 1:m$,坡高为 h ,滑动面ABC为圆弧面,半径为 R 。在图示坐标系中,圆心坐标为 $O(x_0, y_0)$,一般地,设滑弧与坡顶平面和坡底平面分别交于 $C(x_c, h)$ 和 $A(x_A, 0)$,则土坡边界方程为

$$y_i = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ \frac{x}{m} & (0 \leq x \leq mh) \\ h & (x \geq mh) \end{cases} \quad (3)$$

[收稿日期]2003-03-31; [修订日期]2003-06-20; [责任编辑]陈仁俊。

[基金项目]湖南省自然科学基金(编号:02JJY2010)和福州大学人才基金资助。

[第一作者简介]戴自航(1966年-),男,2001年毕业于中南大学,获博士学位,副教授,在站博士后,从事边坡稳定分析、滑坡治理等岩土工程方面的教学和研究工作。

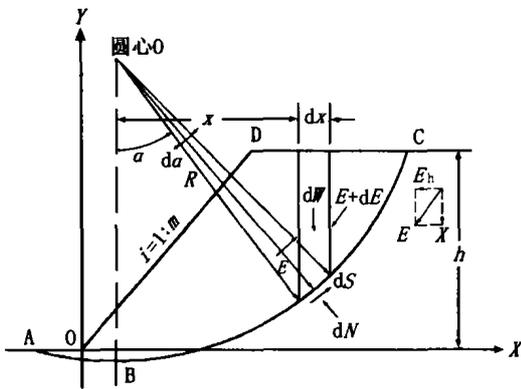


图2 圆弧滑面滑体内微分土条受力分析

滑动面圆弧方程为

$$y_2 = y_0 - \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2} \quad (4)$$

$$x_A = x_0 - \sqrt{R^2 - y^2} \leq x \leq x_0 + \sqrt{R^2 - (h - y_0)^2} = x_c$$

从滑动体内取出任一单位厚度微分土条,宽度为 dx ,作用在该微分土条上诸力如图2所示,图中:
 dW 表示微分土条重量,易见 $dW \approx \gamma(y_1 - y_2)dx$;
 dN 表示作用在微分土条底面的法向力;
 dS 表示微分土条底面引发的抗剪力;
 E 表示作用在微分土条上的滑坡推力;
 dE 表示作用在微分土条上滑坡推力增量;
 α 为径向线与过圆心的铅垂线 OB 间的夹角;
 $d\alpha$ 为 α 角的增量;
 dl 为滑弧微分段弧长,显然 $dl = R d\alpha$;
 E_h 为滑坡推力的水平分量,称为水平推力;
 X 为滑坡推力的垂直分量,称为内部剪力。
 从图中还不难看出:

$$\sin\alpha = \frac{x - x_0}{R}$$

$$\cos\alpha = \frac{\sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}}{R}$$

$$d\alpha = \frac{dx}{\sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}}$$

根据分块传递系数法原理,可假定滑坡推力平行于圆弧滑动面。将作用在微分土条上的各力投影至过微分土条滑弧中点的切线上,根据切向力和径向力的平衡有:

$$dS - (E + dE) \cos\left(\frac{d\alpha}{2}\right) - dW \sin\alpha + E \cos\left(\frac{d\alpha}{2}\right) = 0$$

$$dN - dW \cos\alpha + E \sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) - (E + dE) \sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) = 0$$

由以上两式易得,

$$dS = dW \sin\alpha + dE \cos\left(\frac{d\alpha}{2}\right) \quad (5)$$

$$dN = dW \cos\alpha + dE \sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) \quad (6)$$

根据 Taylor 级数形式展开式,有

$$\cos \frac{d\alpha}{2} = 1 - \frac{(d\alpha)^2}{2} + \frac{(d\alpha)^4}{24} + \dots$$

$$\sin \frac{d\alpha}{2} = \frac{d\alpha}{2} - \frac{(d\alpha)^3}{6} + \frac{(d\alpha)^5}{120} + \dots$$

因微分时 $d\alpha$ 很小, $d\alpha/2$ 则更小,故以上两式均可取至一次式,将其代入式(5)和式(6),并注意 $dE d\alpha/2$ 为二次微分小量,故可近似表达为:

$$dS = dW \sin\alpha + dE \quad (7)$$

$$dN = dW \cos\alpha \quad (8)$$

按 Mohr - Coulomb 破坏理论,微分滑面引发的抗剪力:

$$dS = \frac{1}{F_s} (cdl + dN \tan\phi) \quad (9)$$

由式(7)、(8)、(9)整理可得,

$$dE = \frac{c}{F_s \cos\alpha} dx + \left(\frac{\tan\phi \cos\alpha}{F_s} - \sin\alpha \right) dW \quad (10)$$

从图2边坡顶部自右向左采用数值积分法^[4,5],可求得各微分段的下滑力增量,依次迭加可得到滑面不同位置处滑坡推力。进而,按以下二式可分别

$$E_h = E \cos\alpha = \frac{\sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}}{R} E \quad (11)$$

$$X = E \sin\alpha = \frac{(x - x_0)}{R} E \quad (12)$$

得到滑体内部各处的水平推力和剪力。根据边坡稳定分析的 Morgenstern - Price 法^[6]中提出的土体内部条间力函数的概念,按下式还可求得该方法对应土体内部力函数。

$$f(x) = X/E_h \quad (13)$$

在传递系数法的分析原理中,隐含滑体内部不发生竖直剪切破坏的条件^[7],即

$$X \leq \frac{c'(y_1 - y_2)}{F_s} + \frac{E_h \tan\phi'}{F_s} \quad (14)$$

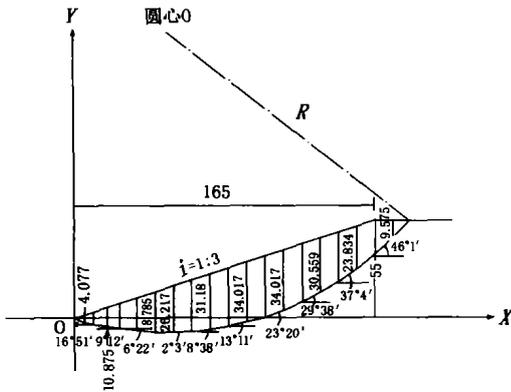
式中 c' 、 ϕ' 为土体竖直面上的抗剪强度指标,对于未曾滑动的均质边坡,其值与 c 、 ϕ 是一致的。

为便于采用上述方法计算滑坡推力,笔者编制了实用的计算程序,该程序能完成全部计算,并将计算结果图形化。

3 算例

如图3所示,某饱和简单均质粘性土坡,坡高 h

=55 m, 坡率 $m = 3$, 土体的容重 $\gamma = 19.1 \text{ kN/m}^3$, 快剪强度指标为 $c = 32.0 \text{ kPa}$, $\phi = 11.3^\circ$ 。按张天宝提出的图表法^[7], 可求得该土坡最危险滑弧中心坐标 $x_0 = 51.48 \text{ m}$, $y_0 = 160.512 \text{ m}$, 半径 $R = 169.395 \text{ m}$ 。



4 结论

1) 文中滑坡推力数值算法的提出, 完善了传递系数法的理论, 使该法不仅可用来计算折线滑面滑坡推力, 而且可很好地适用于圆弧滑面滑坡推力的计算。

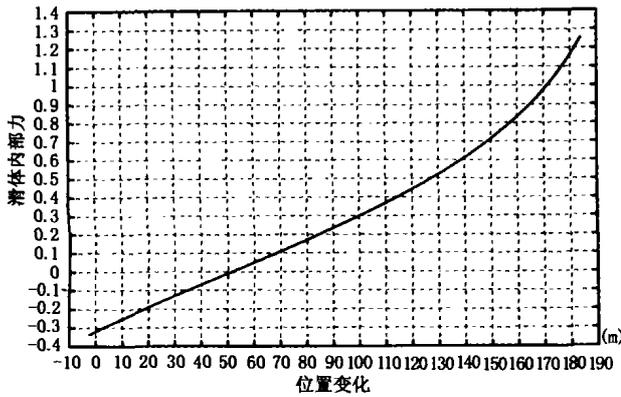


图6 滑体内部力函数曲线

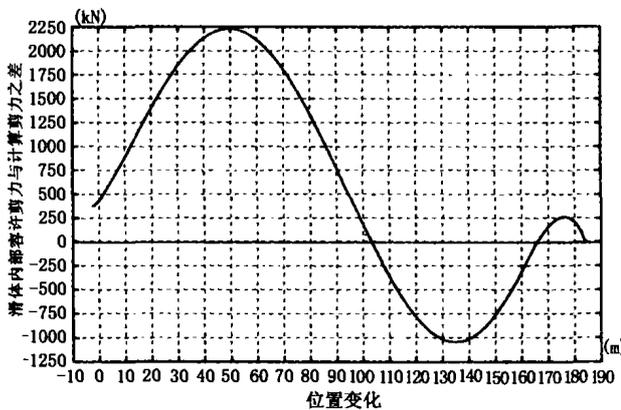


图7 滑体内部容许剪力与计算剪力之差随位置变化曲线

2) 尽管国内早已有分块传递系数法的计算程序, 但数据输入之前, 仍离不开分块量算等繁琐的准备工作, 而基于文中所述数值算法程序的编制, 则

避免了这样的工作, 数值积分区间可划得任意小, 可有效地提高计算精度和计算速度。

3) 程序对计算结果的图形处理, 揭示了滑体可按滑坡推力随位置变化定量划分为牵引段、主滑段和抗滑段的规律。不难得知, 为充分发挥滑体的剩余抗滑力, 抗滑结构物(如抗滑桩)应设置于抗滑段, 且其合理位置应是滑面出口至下反弯点之间。

4) 计算实例表明, 传递系数法得出的内部力函数与有限单元法所得通用条间力函数相差甚远, 在滑面坡角较大处, 会得出滑体发生竖直剪切破坏的结论, 与式(13)相矛盾, 表明传递系数法尚存在问题。不过, 通常式(13)条件不能满足的区段较小, 对抗滑段、尤其是坡脚附近滑坡推力计算结果影响不大, 因而该法仍不失为方便适用的方法。

[参考文献]

- [1] 铁道部科学研究院西北研究所. 滑坡防治[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1977.
- [2] 中国有色金属总公司《岩土工程施工方法》编写组. 岩土工程施工方法[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社.
- [3] GB5007-2002. 建筑地基基础设计规范[S]. 2002.
- [4] 张善杰, 唐汉, 高瑞章. 实用计算方法[M]. 南京: 南京大学出版社, 1998.
- [5] 龚剑, 朱亮. MATLAB5.X入门与提高[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] Morgenstern N R, Price V E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. Geotechnique[J]. 1965, 15(1).
- [7] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物的边坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [8] A W Bishop. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Geotechnique[J]. 1955, 5, 7-17.
- [9] 金问鲁, 顾尧章. 地基基础实用设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [10] K Fan, D G Fredlund, G W Wilson. An Interslice Functions for Limit Equilibrium Slope Stability Analysis[J]. Can Geotech J 1986, 23(3): 287-296.

STUDY ON NUMERICAL SOLUTION OF LANDSLIDE THRUST FOR CIRCULAR SLIP SURFACE

DAI Zi-hang^{1,2}, SHEN Pu-sheng²

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350002;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract: The numerical integral method is presented to calculate the landslide thrust of circular slip surface based on the principle of the conventional passing coefficient method by division blocks to calculate the landslide thrust of slip surface combined by several lines in China. The correlative formulae are deduced. The useful computer program is completed. Some variational laws of landslide thrusts at different places are discussed based on the figure treatment of the practical example by the program. They are helpful to the design of landslide control. Meanwhile, problems that passing coefficient method occurs are pointed out according to the analysis on the variational laws of the function of internal force in sliding mass.

Key words: landslide thrust, passing coefficient method, circular slip surface, numerical integral method, function of internal force