

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.016

用于边坡稳定分析的改进通用条分法

陶丽娜^{1,2}, 周小平¹, 柴贺军²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要:在极限平衡理论的基础上,考虑外部因素(水、拉裂缝、外荷载)与加固措施(锚杆、锚索、土工织物、土钉)对边坡的作用,推导出能模拟各种极限平衡方法的改进通用条分法(IGLE)理论体系,并编写了相应的计算程序-Rslope。运用改进通用条分法(IGLE)模拟了不平衡推力法,并对不平衡推力法(强度储备法)与不平衡推力法(超载法)的安全系数与剩余下滑力进行了精度分析,给出了使用建议。针对工程人员容易混淆剩余下滑力与条间力的情况,对条间法向力与剩余下滑力的水平分力进行对比分析,结果表面二者没有必然联系或者规律。运用 Rslope 程序与商品化软件 slide、SLOPE/W 进行了算例分析,对比了自动搜索圆弧滑面、折线型滑面、加固后的边坡安全系数,结果具有很好的一致性。

关键词:改进通用条分法(IGLE);不平衡推力法;边坡加固

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)01-0106-08

Improved General Limit Equilibrium Method for Slope Stability Analysis

Tao Lina^{1,2}, Zhou Xiaoping¹, Cai Hejun²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd., China Merchants, Chongqing 400067, P. R. China)

Abstract:Based on the theory of ultimate equilibrium, an improved General Limit Equilibrium method (IGLE) is studied, and it is implemented in Rslope software. IGLE can simulate various limit equilibrium methods and takes into account external factors (water, tensile crack, external load) and reinforcing measures (anchor, anchor-cable, geotextile, soil nail). Imbalance thrust force method is simulated in this study, and analysis on precisions of safety coefficient and residual pushing force under two conditions of imbalance thrust force which are strength reserve method and overload method respectively by using IGLE is conducted. The study also promotes an effective usage recommendation. Aiming at the problem that engineer is easy to confuse residual pushing force with inter-slice force, comparative analysis on horizontal components of inter-slice force and residual pushing force is conducted. The results show that there is no direct correlation between them. Then the results of calculation examples of Rslope are compared with other commercial soft wares, such as slide, SLOPE/W. Specifically, the comparison includes automatically searched safety factor of circular slip surface, safety factor of sliding surface and safety factor of reinforcement. The results have a good consistency. IGLE is of practical significance for real applications.

Key words:improved general limit equilibrium method(IGLE); imbalance thrust force method; slope reinforcement

收稿日期:2013-07-10

基金项目:国家自然科学基金(51279218,51078371)

作者简介:陶丽娜(1975-),女,博士生,副研究员,主要从事道路工程研究,(E-mail)taolina@cmmhk.com。

在边坡稳定性分析方法中,极限平衡法作为一种非常有效的分析方法被广泛研究和应用^[1-8]。近二十多年来,随着计算机和数值分析技术的发展,人们开始研究各种极限平衡方法的数值算法^[9-11],并在此基础上研究边坡稳定性分析的通用极限平衡法,试图将所有的条分法纳入到统一体系中。代表性的成果有 Fredlund 的普遍极限平衡法^[12]和陈祖煜的通用条分法^[13]。普遍极限平衡法与通用条分法的理论基础是一致的,都是建立在极限平衡法基础上的边坡稳定分析通用理论。

通用条分法用于推导安全系数的静力学原理有:垂直和水平方向的合力均为零,以及所有的力围绕转动轴心的合力矩为零^[12,14]。这两条加上破坏准则,还不足以使边坡稳定问题成为静定问题^[15-16]。要使它成为静定问题,必须再补充一些原则。通用条分法(GLE)对条间力的方向做了假设,采用这种做法的各种极限平衡方法均可视作通用条分法的特例^[14]。通用条分法属于严格条分法,条块满足所有的静力平衡条件,即 2 个力平衡条件及 1 个力矩平衡条件。通用条分法可以模拟圆弧或折线型滑动面边坡的各种稳定性计算方法。目前,对边坡稳定性计算的极限平衡方法,包括通用条分法所考虑的边坡外部作用(水、拉裂缝、外荷载)并不完善,特别是边坡加固(锚杆、锚索、土工织物、土钉)后的安全系数计算还比较欠缺,因此,对通用条分法进行了改进以适应实际工程的需要。改进通用条分法(Improved General Limit Equilibrium method,简称 IGLE)可根据所满足的静力平衡条件和对条间力的假设,模拟各种条分法(瑞典法、简化毕肖普法、简化江布法、修正江布法、陆军工程师团法、斯宾塞法、罗厄法、摩根斯坦普莱斯法等)计算边坡在水、拉裂缝、外荷载等作用下,采取锚杆、锚索、土工织物、土钉等加固后的安全系数。本文运用改进通用条分法(IGLE)模拟了中国岩土界特有的不平衡推力法,并与文献^[17-18]推荐的不平衡推力法进行了精度的对比分析,从而将不平衡推力法的应用进行了深入与扩展。

以改进通用条分法(IGLE)为理论基础,编写了相应的程序 Rslope,并与著名商业化软件—slide^[19]、SLOPE/W^[20]、理正边坡稳定进行了算例对比分析。

2 改进通用条分法(IGLE)理论

2.1 安全系数的定义

关于安全系数的定义,潘家铮^[21]对安全系数的

定义提出了 2 种解法:

1)强度储备法:如果材料的强度降低 F 倍,边坡即将处于失稳状态。

2)超载法:如果将荷载增大 F 倍,边坡即将失稳;如果体系在设计荷载下已经不能稳定,则求出的 F 将小于 1。

对于同一边坡,2 种不同概念的安全系数值是不相同的,甚至相差很大。研究多趋向于采用“材料强度储备系数”作为安全系数,因为:1)由于强度储备法中外荷载较为明确,而材料的强度变化不易精确测定,材料强度中考虑安全系数较为合理;2)许多问题中,自重往往是最主要的荷载。但是自重既产生下滑力,也产生抗滑力,采用超载系数的概念便不够明确。

因此,改进通用条分法(IGLE)采用强度储备法来定义安全系数。

2.2 强度准则

采用有效应力分析,在极限平衡条件下,条块底面的抗剪力大小可表示为^[14]式(1)。

$$S_m = \frac{s\beta}{F} = \frac{c' + (N - u\beta)\tan\varphi'}{F} \quad (1)$$

式中: S_m 为条块底面剪力; s 为剪应力强度; c' 为有效凝聚力; φ' 为有效内摩擦角; u 为孔隙水压力; F 为安全系数; N 为条块底面上的总法向力; β 为条块底面的长度。

2.3 力矩平衡安全系数

考虑边坡加固后的计算模型如图 1 所示。从力矩平衡的角度考虑,所有条块对转动轴心的合力矩为零,则有式(2)。

$$\begin{aligned} & \sum Wx + \sum k_y Wx + \sum k_x We \\ & - \sum S_m R - \sum Nf - \sum T_s R + \sum T_N f \\ & + \sum Dd - D_w d_w + A_T a_T - A_B a_B = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),得到力矩平衡安全系数表达式,见式(3)。

$$F_m = \frac{\sum (c'\beta R + (N - u\beta)R \tan\varphi')}{M_1 + M_2 + M_3} \quad (3)$$

$$M_1 = \sum Wx + \sum k_y Wx + \sum k_x We - \sum Nf$$

$$M_2 = \sum T_N f - \sum T_s R + \sum Dd - \sum D_w d_w$$

$$M_3 = A_T a_T - A_B a_B$$

式中: W 为条块重力; x 为条块中线至力矩中心的水平距离; K_x 、 K_y 分别为条块质心的水平、竖向地震荷载系数; R 为圆弧滑动面的半径或任意形状滑动

面上的抗剪力 S_m 的力臂; f 为法向力 N 的作用线至力矩中心的垂直距离; e 为 $K_x W$ 对应的力臂; D 为外荷载; d 为外荷载 D 对应的力臂; A_T 为坡顶拉裂缝水的合力; a_T 为 A_T 对应的力臂; A_B 为坡脚水的合力; a_B 为 A_B 对应的力臂; T_N 、 T_S 分别为加固力 T 垂直、平行条块底面的分力 D_w 为由坡脚水体作用在条块上的水压力, 方向垂直于坡面; d_w 为 D_w 对应的力臂。

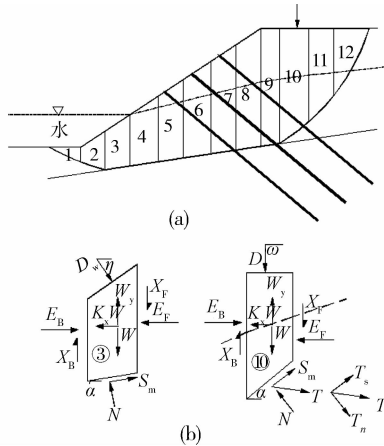


图1 (a) 边坡模型; (b) 条块3、条块10的受力分析

2.4 力平衡安全系数

从力平衡的角度考虑, 所有条块水平力的合力为零, 则有:

$$\sum (E_B - E_F) - \sum (N \sin \alpha) + \sum (S_m \cos \alpha) - \sum (k_x W) + \sum T_N \sin \alpha + \sum T_S \cos \alpha + \sum D \cos \omega + D_w \cos \eta + A_B - A_T = 0 \quad (4)$$

式中: ω 为外荷载 D 的水平夹角; η 为水压力 D_w 的水平夹角; E_F 、 E_B 为条块前、后条间法向力。

沿整个滑动土体求和时, 条间法向力 E_B 和 E_F 相互抵消, 将式(1)代入式(4), 得到力平衡安全系数表达式, 见式(5)。

$$F_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \varphi' \cos \alpha)}{F_1 + F_2 + F_3} \quad (5)$$

式中: $F_1 = \sum k_x W + \sum N \sin \alpha$; $F_2 = - \sum T_N \sin \alpha - \sum T_S \cos \alpha$; $F_3 = - \sum D \cos \omega - D_w \cos \eta + A_T - A_B$ 。

2.5 条块底面的法向力

如果要同时求解力和力矩平衡安全系数, 首先需要计算出条块底面法向力。对于条块底面法向力, 可以根据所有竖向力的和求解得式(6)。

$$-W - k_y W + (X_B - X_F) + N \cos \alpha + S_m \sin \alpha - T_N \cos \alpha + T_S \sin \alpha +$$

$$D \sin \omega + D_w \sin \eta = 0 \quad (6)$$

考虑条块水平方向力的平衡,

$$(E_B - E_F) = N \sin \alpha - S_m \cos \alpha + K_x W - T_N \sin \alpha - T_S \cos \alpha - D \cos \omega - D_w \cos \eta - A_B + A_T \quad (7)$$

由式(6)计算条块底面法向力的时候, 需要求解条间剪力。假设条间剪力 X 和条间法向力 E 之间存在一定的数学函数关系^[15]:

$$X = E \lambda f(x) \quad (8)$$

式中: $f(x)$ 为描述 X/E 值沿滑动面变化情况的函数关系; λ 为比例常数, 代表求解安全系数公式时使用函数 $f(x)$ 的百分比。

由条间力函数式(8)可以得到:

$$(X_B - X_F) = \lambda f(x) (E_B - E_F) \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)得:

$$(X_B - X_F) = \lambda f(x) (N \sin \alpha - S_m \cos \alpha + K_x W - T_N \sin \alpha - T_S \cos \alpha - D \cos \omega - D_w \cos \eta - A_B + A_T) \quad (10)$$

将式(10)和式(1)代入式(6), 并整理得

$$N = - \left(\frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{B} + \frac{A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9}{B} \right) \quad (11)$$

式中:

$$A_1 = W(\lambda f(x) K_x - 1 - K_y); A_2 = \frac{\beta}{F} (\sin \alpha - \lambda f(x) \cos \alpha); A_3 = \frac{u \beta \tan \varphi'}{F} (-\sin \alpha + \lambda f(x) \cos \alpha); A_4 = D(\sin \omega - \lambda f(x) \cos \omega); A_5 = A_B(-\lambda f(x)); A_6 = A_T(\lambda f(x)); A_7 = T_S(\sin \alpha - \lambda f(x) \cos \alpha); A_8 = T_N(-\cos \alpha - \lambda f(x) \sin \alpha); A_9 = D_w(\sin \eta - \lambda f(x) \cos \eta); B = (\cos \alpha + \frac{\tan \varphi'}{F} \sin \alpha - \frac{\tan \varphi'}{F} \lambda f(x) \cos \alpha + \lambda f(x) \sin \alpha)。$$

式(11)为求条块底面法向力 N 的一般表达式, 当 λ 与 $f(x)$ 取不同值时, 联立式(3)和式(5), 便可以模拟各种以极限平衡理论为基础的边坡加固后安全系数计算方法。联立式(2)与式(3), 便可以求解力矩平衡安全系数; 联立式(2)与式(5), 可以求解力平衡安全系数。

2.6 各种极限平衡方法的模拟

改进通用条分法(IGLE)可模拟各种极限平衡法(瑞典法、简化毕肖普法、简化江布法、陆军工程师团法、罗厄法、摩根斯坦普莱斯法等)。从理论的观

点来看,各种条分法可根据所满足的静力平衡条件(表 1)和对条间作用力的假设(表 2)加以分类。

表 1 不同极限平衡方法满足的静力平衡条件

方法	力平衡		力矩平衡
	第一方向(垂直)	第二方向(水平)	
瑞典法	是	否	是
简化毕肖普法	是	否	是
简化江布法	是	是	否
修正江布法	是	是	否
斯宾塞法	是	是	是
摩根斯坦普莱斯法	是	是	是
陆军工程师团法	是	是	否
罗厄法	是	是	否
不平衡推力法	是	是	否

表 2 不同极限平衡方法满足的条间力函数

方法	条间力假设
瑞典法	$X=0, E=0$
简化毕肖普法	$X=0, E \geq 0$
简化江布法	$X=0, E \geq 0$
修正江布法	$X_F = E_F \tan \alpha_f - (E_F - E_B) t_R / b$
斯宾塞法	$X/E = \tan \theta$
摩根斯坦普莱斯法	$X/E = \lambda f(x)$
陆军工程师团法	X/E —坡面的平均坡度
罗厄法	X/E —坡面和滑面的平均坡度
不平衡推力法	X/E —一条块底面坡度

注: α_f 条间推力线与水平面的夹角; t_R 从条块底面至条块右侧推力线的垂直距离; b 条块宽度; θ 条间力的合力与水平面的夹角。

2.7 不平衡推力法的模拟

不平衡推力法亦称传递系数法或剩余推力法,是我国工程技术人员创造的一种实用滑坡稳定分析方法。由于该法计算简单,并能够为滑坡治理提供设计推力,因此在道路、水利、铁路等部门得到了广泛应用,在国家规范和行业规范中都将其列为推荐方法使用。中国《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2002)^[17]、《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[18]均推荐使用超载法进行安全系数计算,其安全系数计算公式见式(12)、(13)。

$$K_s = \frac{\sum R_i \psi_i \psi_{i+1} \cdots \psi_{n-1} + R_n}{\sum T_i \psi_i \psi_{i+1} \cdots \psi_{n-1} + T_n} \quad (12)$$

$$\psi_i = \cos(\theta_i - \theta_{i-1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i-1}) \tan \varphi_i \quad (13)$$

($i = 1, 2, 3, \dots, n-1$)

式中: ψ_i 第 i 计算条块剩余下滑推力向第 $i+1$ 计算条块的传递系数。

不平衡推力法满足力平衡,其基本假定是条间力方向与条块底面平行。应用改进通用条分法(IGLE)模拟不平衡推力法非常方便,只需根据条块划分情况定义条间力函数为条块底面倾角,求解力平衡安全系数即可。但是改进通用条分法(IGLE)的安全系数是采用强度储备法来定义,本文将这种模拟方法简记为不平衡推力法(强度储备法),与文献[17-18]规定的不平衡推力法(超载法)求解的安全系数略有区别。

3 算例分析

算例选用 slide 软件实例 tutorial1.sli,模型如图 2 所示。边坡坡度 1:1.5,边坡凝聚力 5 kPa,内摩擦角 30° ,容重 19 kN/m^3 。

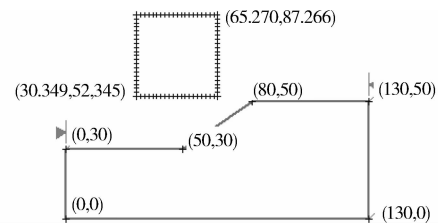


图 2 圆弧滑面计算简图

3.1 圆弧滑面

采用网格搜索最危险滑动面,网格搜索左下角点坐标(30.349, 52.345),右上角点坐标(65.270, 87.266),条块条分数目 25。使用瑞典法、简化毕肖普法、简化江布法、不平衡推力法(强度储备法)与不平衡推力法(超载法)对模型进行计算,计算结果见表 3。

从表 3 中可以看出:对于瑞典法、简化毕肖普法与简化江布法,Rslope 与 slide 计算的安全系数基本一致,如果取小数点后二位有效数字,则安全系数计算结果完全一致。

使用不平衡推力法(强度储备法)计算得到的安全系数为 1.148,不平衡推力法(超载法)计算得到的安全系数为 1.149,二者基本一致,而且这两种方法搜索到的危险滑动面完全一致。这说明对于圆弧滑动面,不平衡推力法(强度储备法)与不平衡推力法(超载法)具有同等的精度。且不平衡推力法计算的安全系数(1.149、1.148)与简化毕肖普法计算的安全系数(1.141、1.144)精度相当,这与郑颖人等^[22]、张鲁渝等^[23]的研究结论对于圆弧滑面,不平衡推力法的精度与简化毕肖普法相当是一致的。

表 3 圆弧滑面安全系数比较

方法	软件	安全系数	搜索危险圆心	搜索危险半径
瑞典法	Slide	1.103	(40.825,80.282)	51.030
	Rslope	1.100	(44.317,75.044)	45.143
简化毕肖普法	Slide	1.141	(40.825,80.282)	51.030
	Rslope	1.144	(42.571,76.790)	47.093
简化江布法	Slide	1.099	(40.825,80.282)	51.030
	Rslope	1.096	(44.317,75.044)	45.143
不平衡推力法(强度储备法)	slide			
	Rslope	1.148	(42.571,76.79)	47.093
不平衡推力法(超载法)	slide			
	Rslope	1.149	(42.571,76.79)	47.093

3.2 折线型滑面

为了便于条块信息的对比,根据搜索危险滑动面的结果拟定折线滑动面及转动轴心。

滑动面的坐标点为:(50,30),(54.029,30.95),(58.449,32.811),(63.8,35.777),(70.081,39.965),(78.805,45.723),(80,46.9966),(82.818,50)。

转动的轴心为:(46.409,72.818)。

边坡条分数目为 7 块,如图 3 所示。

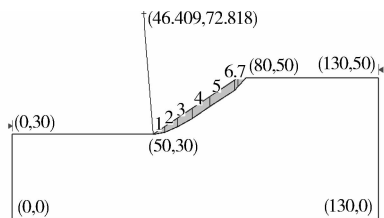


图 3 折线型滑面计算简图

1) 条间力函数

工程师法条间力函数假定为边坡表面的平均坡度。对于条间力函数这有两种理解:一种是等于坡面的平均坡度 0.609 4(图 4 的工程师法 1);另一种是包括地面部分在内的坡面表面的平均坡度 0.667(图 4 的工程师法 2),边坡条间力会随着地面的几何形状而改变。

罗厄法(Lowe-Karafiath)条间力的方向被假定为坡面和滑面坡度的平均值,条间力函数如图 5 所示。

斯宾塞法条间力的夹角同时满足力平衡和力矩平衡安全系数,条间力函数如图 6 所示。

摩根斯坦普莱斯法法假定条间力函数为常数、半正弦、缺端正弦、梯形,条间力函数如图 7 所示。

不平衡推力法假定条间力的方向与条块底面平行,条间力函数如图 8 所示。

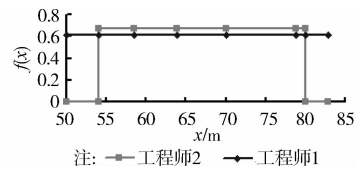


图 4 工程师法条间力函数

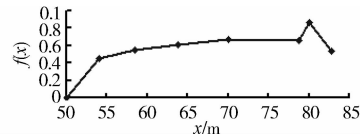


图 5 罗厄法条间力函数

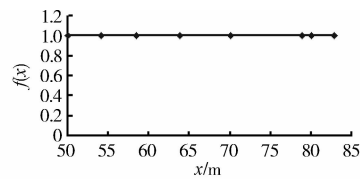


图 6 斯宾塞法条间力函数

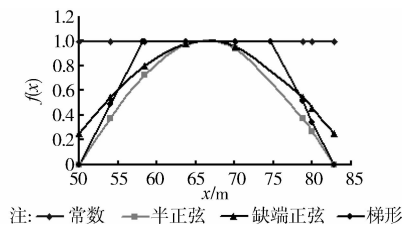


图 7 摩根斯坦-普赖斯法条间力函数

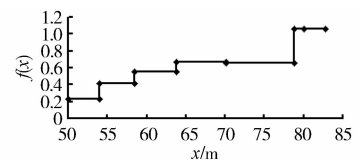


图 8 不平衡和推力法条间力函数

2) 安全系数

在 slide, SLOPE/W, Rslope 中,使用瑞典法、简化毕肖普法、简化江布法、修正江布法、工程师法 1、工程师法 2、罗厄法、斯宾塞法、摩根斯坦-普赖斯法(常数、半正弦、梯形、缺端正弦)对模型进行计算,安全系数计算结果见表 4。从表 4 中可以看出, Rslope 与 slide 或 SLOPE/W 计算的安全系数具有很好的 consistency。

使用不平衡推力法(强度储备法)计算得到的安全系数为 1.154,不平衡推力法(超载法)计算得到的安全系数为 1.170,引起二者差异的原因是折线滑面段的长度及倾角对安全系数的影响相对较大。因此对于折线型滑面不宜单独使用不平衡推力法,特别是不平衡推力法(超载法),而应采取多种方法进行综合分析。

表 4 折线型滑面安全系数比较

方法	slide	SLOPE/W	Rslope
瑞典法	1.146	1.146	1.144
简化毕肖普法	1.179	1.182	1.176
简化江布法	1.142	1.142	1.142
修正江布法	1.173	1.162	1.189
工程师法 1	1.164	1.165	1.165
工程师法 2	1.166	1.167	1.161
罗厄法	1.164	1.162	1.162
斯宾塞法	1.164	1.165	1.163
摩根斯坦普莱斯法(常数)	1.164	1.164	1.163
摩根斯坦普莱斯法(半正弦)	1.158	1.158/1.161	1.156
摩根斯坦普莱斯法(梯形)	1.159	1.162/1.159	1.158
摩根斯坦普莱斯法(缺端正弦)	1.158	1.162/1.160	1.163
不平衡推力法(强度储备法)			1.154
不平衡推力法(超载法)			1.170

3) 剩余下滑力

使用理正边坡软件、手算、Rslope 分别计算安全系数为 1.17 和 1.154 时条块对应的剩余下滑力,结果如表 5 及图 9 所示。

表 5 剩余下滑力比较 kN

条块编号	F=1.170			F=1.154		
	手算	理正边坡	Rslope	手算	理正边坡	Rslope
1	0.27	0.26	0.00	-11.10	-11.11	0.00
2	45.46	45.45	45.16	32.95	36.85	32.95
3	90.52	90.51	90.23	78.38	79.32	78.37
4	106.75	106.74	106.51	96.56	96.55	96.55
5	75.38	75.38	75.23	68.83	68.83	68.83
6	41.24	41.24	41.20	39.44	39.45	39.45
7	16.25	16.24	16.23	15.31	15.30	15.30

从表 5 中可以看出, Rslope 计算的剩余下滑力与手算及理正边坡计算结果基本一致。

从图 9 中可以看出,不平衡推力法(超载法)安全系数为 1.170 对应的剩余下滑力比不平衡推力法(强度储备法)安全系数为 1.154 对应的剩余下滑力值最大的值要高 10.5%左右,

目前中国边坡规范^[17],岩土工程勘察规范^[18]等

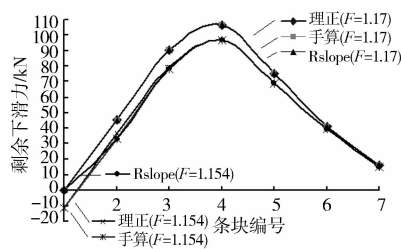


图 9 条块剩余下滑力曲线

国家标准均推荐不平衡推力法(超载法)作为计算方法,在具体应用时建议要同其他的极限平衡方法联合应用。在折线型滑动面情况下,由于不平衡推力法(超载法)安全系数偏高,直接应用工程将会偏于不安全。

4) 剩余下滑力与条间法向力

由于 slide 与 SLOPE/W 具有界面友好、建模方便等优势,但缺少中国特有的不平衡推力法。因此在 slide 与 SLOPE/W 的使用中,工程技术人员误认为条间法向力与剩余下滑力的水平分力差不多,在实际工程应用时,特别是使用简化毕肖普法与简化江布法计算时,把条间法向力当剩余下滑力水平分力使用,来进行边坡的加固设计。

对简化毕肖普法与简化江布法计算得到的条间法向力与剩余下滑力的水平分力做对比分析,结果如表 6 及图 10 所示,并得到以下结论:

1) Rslope 与理正边坡计算的剩余下滑力水平分力基本一致,说明 Rslope 与理正边坡具有同等的精度。

2) Rslope 与 slide 和 SLOPW/E,简化江布法的条间法向力基本一致,而简化毕肖普法的条间法向力这差异较大,这是因为三者在对条间法向力的传递方向的不同:在 slide 和 SLOPW/E 中,条件法向力的计算是从第最左边的条块(条块 1)向右(条块 7)的传递计算的。Rslope 是按照边坡从坡顶(条块 7)往坡脚(条块 1)传递的。

3) 对于边坡下部条块 1、2、3,条间法向力的值要远远高于剩余下滑力的水平分力。以条块 2 为例, Rslope 计算的剩余下滑力水平分力为 21.73 kN, 而条件法向力为 64.73 kN(简化江布法)与 84.79 kN(简化毕肖普法)。因此,剩余下滑力的水平分力与简化毕肖普法或简化江布法的条间法向力没有必然联系或者规律,把条间法向力当做剩余下滑力的水平力来进行边坡加固设计会造成极大的浪费与不合理。

表 6 剩余下滑力与条间力的比较

kN

条块编号	剩余下滑力水平分力 (不平衡推力法)		条间法向力 (简化江布法)		条间法向力 (简化毕肖普法)			
	理正边坡 $F=1.142$	Rslope $F=1.142$	slide $(F=1.142)$	SLOPW/E $(F=1.142)$	Rslope $(F=1.142)$	slide $(F=1.179)$	SLOPW/E $(F=1.182)$	Rslope $(F=1.176)$
	1	-19.12	-19.11	32.67	32.58	32.64	31.37	32.58
2	21.72	21.73	64.83	64.57	64.73	60.73	64.57	84.79
3	60.58	60.59	76.73	76.29	76.52	68.20	76.29	92.29
4	73.97	73.98	57.27	56.71	56.93	43.02	56.71	67.17
5	53.34	53.35	32.23	31.50	31.71	10.00	31.50	34.22
6	26.07	26.07	12.71	12.05	12.16	-10.68	12.05	13.56
7	9.99	9.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

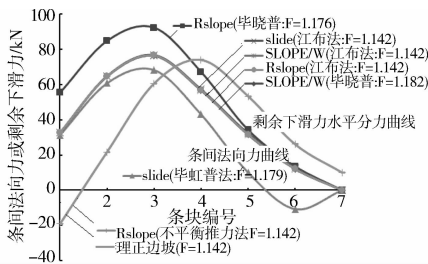


图 10 条块剩余下滑力与条间力曲线

3.3 边坡加固后安全系数计算

算例中的边坡安全系数不满足边坡规范^[17]的要求,对边坡进行锚杆加固,如图 11 所示。

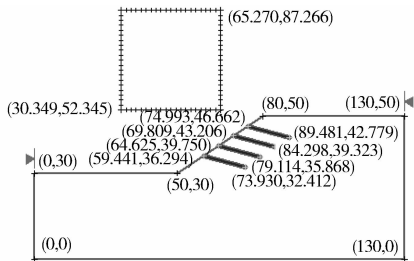


图 11 边坡加固计算简图

运用自动搜索圆弧滑动面,得到安全系数的计算结果,见表 7。

表 7 边坡加固后的安全系数比较

kN

方法	软件	安全系数	搜索危险圆心	搜索危险半径
瑞典法	slide	1.386	(53.084,62.821)	34.074
	Rslope	1.367	(53.048,62.821)	32.971
简化毕肖普法	slide	1.432	(47.809,75.044)	44.902
	Rslope	1.418	(49.566,68.059)	38.028
简化江布法	slide	1.341	(53.048,62.821)	34.074
	Rslope	1.356	(53.048,61.075)	31.628
不平衡推力法 (强度储备法)	slide			
	Rslope	1.448	(49.566,68.059)	38.028

从表 7 可以看出,Rslope 与 slide 的安全系数、危险滑动面的计算具有很好的一致性。不平衡推力法(IGLE)的安全系数 1.448 与简化毕肖普法计算的安全系数 1.418 法接近。

4 结论

1)对通用条分法(GLE)进行了改进,并推导了改进通用条分法(IGLE)理论与安全系数求解过程。

2)改进通用条分法(IGLE)可根据所满足的静力平衡条件和对条间力的假设,模拟各种条分法(瑞典法、简化毕肖普法、简化江布法、陆军工程师团法、罗厄法、摩根斯坦普莱斯法等)计算边坡在水、拉裂缝、外荷载等作用下,采取锚杆、锚索、土工织物、土钉等加固措施后的安全系数。

3)运用改进通用条分法(IGLE)模拟了我国特有的不平衡推力法,完善了通用条分法(GLE)的理论体系。

4)基于 IGLE 理论编制了相应的程序 Rslope,与 slide、SLOPE/W 及理正边坡及手算进行了算例分析。对比分析了圆弧滑面的安全系数、折线型滑面安全系数、不平衡推力法(强度储备法解)与不平衡推力法(超载法)的安全系数及剩余下滑力、剩余下滑力与条间法向力,边坡加固后的安全系数等内容,结果表明改进通用条分法(强度储备法)具有较高的数值精度和实用价值。

参考文献:

[1] 曹雄. 二维边坡稳定性分析的通用极限平衡法[J]. 铁道工程学报,2012(6):28-36.
Cao X. A new general limit equilibrium method for analysis of 2-dimension slope stability[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(6):28-36.
[2] 邵龙潭. 土体的极限平衡条件和稳定安全系数定义[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2011(8):225-230.

- Shao L T. Limit equilibrium condition for soil mass and definition of stability safety factor [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2011 (8): 225-230.
- [3] 苏爱军,王建,周涛. 条块间作用力倾角的假定及其对条分法计算结果的影响[J]. 中国地质大学学报:地球科学,2013,38(1):188-195.
Su A J, Wang J, Zhou T. Assumption of the slices' force dips and its effect on results calculated by slice method [J]. Journal of China University of Geosciences: Earth Science, 2013,38(1):188-195.
- [4] 曾根,张泽辉,杨宏丽. 基于边坡渐进破坏特征对传统极限平衡法几点假设的合理分析[J]. 岩土力学,2012,33(1):146-151.
Zeng Z, Zhang Z H, Yang H L. Analysis of reasonability of several assumptions used in typical limit equilibrium methods based on progressive failure feature of slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(1):146-151.
- [5] 黄锦林,钟志辉,张明飞. 基于垂直条分法改进计算式的库岸滑坡滑速分析[J]. 山地学报,2012,30(5):555-560.
Huang J L, Zhong Z H, Zhang M F. Sliding velocity analysis of reservoir bank landslides based on the improved vertical slice method [J]. Journal of Mountain Science, 2012,30(5):555-560.
- [6] 刘勋,徐顺畅. 极限平衡条分法中条块个数的影响分析[J]. 山西建筑,2011,37(17):66-67.
Liu X, Xu S C. On influential analysis of limit equilibrium slice method on slice' amount [J]. Shanxi Architecture, 2011,37(17):66-67.
- [7] 邓东平,李亮. 水平条分法下边坡稳定性分析与计算方法研究[J]. 岩土力学,2012,33(10):3179-3188.
Deng D P, Li L. Analysis of slope stability and research of calculation method under horizontal slice method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(10):3179-3188.
- [8] Espinoza R D, Repetto P L, Muhunthan B. Unified formulation for stability of slopes[J]. Geotech Engrg, ASCE, 1994 (7) :1185-1204.
- [9] 戴自航,沈蒲生. 土坡稳定分析简化 Bishop 法的数值解[J]. 岩土力学,2002 (6) :760-764.
Dai Z, Shen P S. Numerical solution of simplified bishop method for stability analysis of soil slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002 (6) :760-764.
- [10] 林峰,黄润秋. 滑坡推力计算的改进 Janbu 法[J]. 工程地质学报,2000 (4) :493-496.
Lin F, Huang R Q. The modified janbu method for calculation of thrusting Force of landslide [J]. Journal of Engineering Geology, 2000 (4) :493-496.
- [11] 朱大勇,李焯芬,黄茂松,等. 对3种著名边坡稳定性计算方法的改进[J]. 岩石力学与工程学报,2005 (2) :183-194
Zhu D Y, Li Z F, Huang M S, et al. Modifications to three well-known methods of slope stability analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005 (2):183-194.
- [12] Frelund D G, Krahn J. Comparison of slope stability methods of analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14: 429-439.
- [13] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003
- [14] Frelund D G, Krahn J, Pufahl D E. The relationship between limit equilibrium slope stability methods [C]// Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981. Stockholm, Sweden.
- [15] Morgenstern N R, Price V E. 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces [J]. Geotechnique, 15(1): 79-93.
- [16] Spencer E. 1967. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces [J]. Geotechnique, 17(1): 11-26.
- [17] GB 50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:23-24.
- [18] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2009 版. 北京:中国建筑工业出版社,2009:210-214.
- [19] Slide, Slope stability analysis software, Rocscience Inc. Canada.
- [20] Slope/W, Slope stability analysis software, GEO-SLOPE International Ltd. Canada.
- [21] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京:水利出版社,1980:6-6.
- [22] 郑颖人,时为民,杨明成. 不平衡推力法与 Sarma 法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17):3030-3036.
Zheng Y R, Shi W M, Yang M C. Discussion on imbalance thrust force method and sarma' s method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2004, 23(17):3030- 3036.
- [23] 张鲁渝,郑颖人,时卫民. 边坡稳定分析中关于不平衡推力法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):177-182.
Zhang L Y, Zheng Y R, Shi W M, On slope stability analysis by imbalance thrust force method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24 (1):177-182.