

文章编号: 1003-8035 (2001) 03-0070-09

边坡稳定性分析中的剩余推力法

王建锋¹, Wilson H. Tnag², 崔政权³

(1. 中国科学院力学研究所工程科学研究部, 北京 100080;

2. Department of Civil Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong;

3. 长江水利委员会综合勘测局, 湖北 武汉 430010)

摘要: 基于传统的剩余推力法思路, 推导了包括地表水、地下水、地震力、锚固力等外荷载综合作用下的边坡稳定性和剩余推力计算公式, 以实例给出了剩余推力法在 Microsoft Excel 中的实现方法, 从中可以清晰看出剩余推力法的实质。比较了用同一安全系数但采用不同的折减方法所获得的剩余推力变化趋势。通过上述 4 类荷载的敏感性分析, 指出了剩余推力法应用中应注意的基本问题。运用 Excel 中加载宏“规划求解”工具, 可以方便实现确定性框架下临界滑动面的随机搜索。

关键词: 边坡稳定性; 剩余推力法; 滑坡推力; 临界滑动面; 电子报表软件

中图分类号: P642.2 **文献标识码:** A

1 前言

剩余推力法也称不平衡推力传递法。我国水利、交通和铁道部门在核算滑坡稳定时普遍使用该方法。加拿大矿物和能源技术中心 (1972 ~ 1977) 所提出的多块体平面剪切滑动模式计算方法^[1], Gaziev E G (1978) 所称的“不平衡方法”^[2]以及 Stephen D Priest (1995) 的二维多平面滑动模式^[3]实质上都属于不平衡推力传递法的范畴。其优点是借助于滑坡构造特征分析及剩余推力计算, 可以获得任意形状滑动面在复杂荷载作用下的滑坡推力, 并且计算简洁。但是, 此法的推力计算及某些假定条件存在不合理之处, 主要表现在: 给定条块推力作用方向平行于其底滑面是硬性规定, 力学原理上不够严谨, 当滑动面倾角较大时, 可导致条块侧面抗剪稳定系数小于 1; 条块划分均为竖直方向, 计算中忽略了两相邻条块间共同分界面上的摩擦力, 因而只考虑了力的平衡, 对力矩平衡没有考虑; 实际计算中采用安全系数乘以下滑力或除以抗滑力来弥补计算中带入的不确定性因素的作用, 带有经验性, 物理意义不明确, 其结果是计算所得的滑坡推力常较实际者大, 以此作为抗滑工程设计多偏于保守, 因而造成一定的经济浪费。为弥补这些问题的不足, 本文试图以该法为基础, 从若干侧面或途径改善模型本身的不足, 并以工程师易于接受的 Excel 软件实现其计算, 以

使现场工程师快速方便地运用该法获得接近实际的稳定性评价结果。

2 基本计算公式

图 1 为具有任意形状滑动面且受地表水、地下水压力作用的边坡。图 2 是任意滑动土条受力情况, 条块编号自坡后缘至坡脚递增。假定条块为刚塑性体, 侧面之间无摩擦, 且各条块剩余下滑力平行于自身条块底滑面。如图 1 所示, 当仅仅考虑重力及摩擦、粘聚阻力作用时, 对于潜在滑坡体最后缘条块 AIB 来说, 滑面上的重力法向分量为 $N_1 = W_1 \cos \alpha_1$, 重力对滑面的切向分量为: $T_1 = W_1 \sin \alpha_1$, 抗滑阻力为: $F_1 = W_1 \cos \alpha_1 \tan \phi_1 + c l_1$, 因此剩余下滑力为:

$$P_1 = T_1 - F_1 \quad (1)$$

对于 IHCB 条块: $N_2 = W_2 \cos \alpha_2$ 。第 1 条块余力 P_1 作用于条块 IHCB 所引起的正应力和下滑力分量分别为:

$$N_2 = P_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (2)$$

收稿日期: 2001-04-14; 修回日期: 2001-04-29

作者简介: 王建锋 (1964—), 男, 1997 年毕业于中国地质大学 (武汉) 工程地质专业获工学博士学位。曾从事岩石力学、工程地质科研、教学工作, 现主要从事地学与力学结合方面的研究工作。1989 年以来在国内外共计发表 30 余篇学术论文。

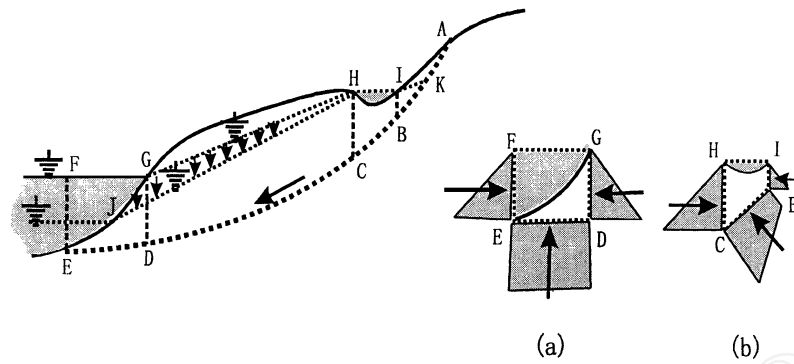


图1 滑面为任意形状的边坡

Fig. 1 Slope geometry and treating method of hydrostatic pressure acting on a typical slice (block)

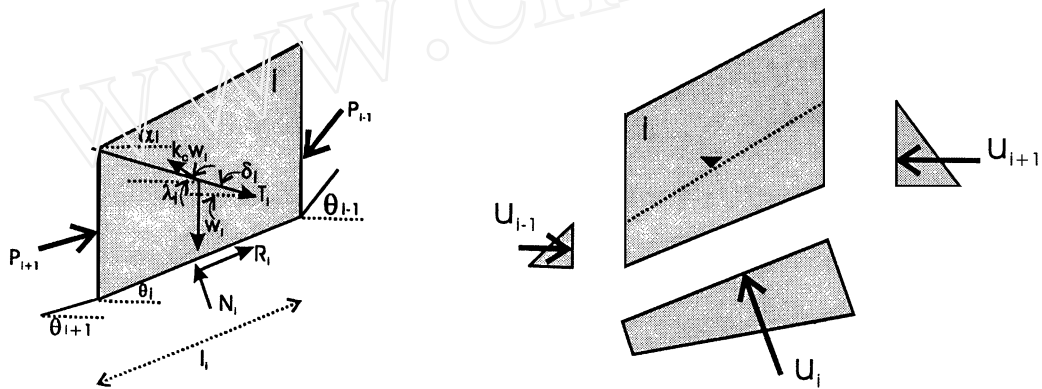


图2 滑动破坏模式条块受力分析

Fig. 2 Forces acting on a typical slice (block) for multiple sliding failure mechanism

$$T_2 = P_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (3)$$

由 P_1 引起的对 $IHCB$ 条块的附加下滑力为:

$$P_2 = T_2 - N_2 \tan \alpha_2 = P_1 [\cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \tan \alpha_2] = P_1 \cdot \lambda_2 \quad (4)$$

式中: $\lambda_2 = [\cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \tan \alpha_2]$, 称为传递系数。

故 $IHCB$ 条块的总下滑力为:

$$P_2 = T_2 - F_2 + P_2 = W_2 \sin \alpha_2 - [W_2 \cos \alpha_2 \tan \alpha_2 + c_2 l_2] + P_1 \cdot \lambda_2 \quad (5)$$

一般地, 其递推公式为

$$P_i = W_i \sin \alpha_i - \frac{1}{[F_s]} [W_i \cos \alpha_i \tan \alpha_i + c_i l_i] + P_{i-1} \cdot \lambda_i \quad (6)$$

此时, 传递系数为

$$\lambda_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{1}{[F_s]} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \alpha_i \quad (7)$$

式中: 对于计算剩余推力而言, $[F_s]$ 为安全系数, 可以理解为因边界条件、荷载条件、强度参数等的不确定性, 为安全起见而引入的大于1的折减系数, 一般应根据滑坡现状及其对工程的影响而确定, 通常可取 1.05 ~ 1.25; 对于计算边坡稳定性而言, 此时 $[F_s]$ 即为底滑面上的抗滑力与下滑力之比, 有稳定系数 F_s 之含义, 或者说是在建立力的平衡方程 (6) 式时, 所引入的一个无量纲系数。只有当力的边界条件满足时 ($E_n = 0$), 此时的 $[F_s]$ 才可称为整个边坡的稳定系数 F_s 。因此在求解 F_s 时, 先要假定 F_s , 然后从第1条开始逐条向下推求, 直至求出最后一条的推力 P_n , 如果 P_n 不为零则要重新假定 F_s 进行迭代运算, 直至最终条块的剩余推力为零, 此时对应的 F_s 即为所求的整个边坡的稳定系数 F_s 。此外, 在迭代过程中, 考虑到条块之间不能承受张力, 所以当任一条块的推力 P_i 为负值时, 取

$P_i = 0$ 以使 P_i 不向下传递。

需加注意, 无论是求解滑坡推力还是要求解稳定系数, 公式 (6) 中的 $[F_s]$, 均可改除抗滑力为乘以下滑力, 此时对应的传递系数中也不存在 $[F_s]$, 但两者求算的效果是相同的。

在满足力的边界条件下, 基于所求得各条块剩余推力 P_i , 容易求得条块底滑面上和分界面上的抗滑稳定性系数。其中各个条块底滑面稳定系数 F_{si} 为:

$$F_{si} = \frac{[W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)] \tan \alpha_i + c_i l_i}{W_i \sin \alpha_i + E_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i)} \quad (8)$$

$$P_i = [W_i \sin \alpha_i + K_c W_i \cos(\alpha_i + \alpha_i) + (u_{i-1} - u_{i+1}) \cos \alpha_i - T_i \cos(\alpha_i - \alpha_i)] - \frac{1}{[F_s]} \left[\left[\frac{W_i \cos \alpha_i - K_c W_i \sin(\alpha_i + \alpha_i) - u_i}{(u_{i-1} - u_{i+1}) \sin \alpha_i + T_i \sin(\alpha_i + \alpha_i)} \right] \tan \alpha_i + c_i l_i \right] + P_{i-1} \cdot i \quad (10)$$

式中:

$$i = \left[\cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{1}{[F_s]} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \alpha_i \right] \quad (11)$$

而各条块底滑面上和分界面上的抗滑稳定性系数则分别为:

$$F_{si} = \frac{\left[\frac{W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - K_c W_i \sin(\alpha_i + \alpha_i)}{(u_{i-1} - u_{i+1}) \sin \alpha_i - u_i + T_i \sin(\alpha_i + \alpha_i)} \right] \tan \alpha_i + c_i l_i}{\left[\frac{W_i \sin \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - K_c W_i \cos(\alpha_i + \alpha_i)}{(u_{i-1} - u_{i+1}) \cos \alpha_i - T_i \cos(\alpha_i + \alpha_i)} \right]} \quad (12)$$

$$F_{vi} = \frac{(P_i \cos \alpha_i - u_i) \tan \alpha_i + c_i h_{i+1}}{P_i \sin \alpha_i} \quad (13)$$

如图 1 中的 (a) 所示, 当对水库充水的滑体前缘条块进行受力计算时, 可将 ABCDEFGHIA 视为一个前缘受静水压力阻力作用的整体滑坡, 该条块所受重力应为 DEFG 内所有水、岩重量总和, 所受孔隙水压力如图中所标示。仿此考虑滑坡壑中受湖水作用的条块受力。当水库水位消落时, 孔隙水压力线分布变为 KIHGJ, 按此水压线计算滑坡稳定性。即无论何种地表水、地下水活动情况, 坡体内部地下水渗流的作用均可视为作用于各个条块边界上的静水压力 (详见图 1、图 2 中右图涉及表水作用时的条块划分及水压力处理方法)。

3 用 Microsoft Excel 实现具有确定性滑动面边坡稳定性计算

用 Microsoft Excel 来计算某些岩土力学问题, 对

各个条块分界面上的抗滑稳定系数 F_{vi} 为:

$$F_{vi} = \frac{P_i \cos \alpha_i \tan \alpha_i + c_i h_{i+1}}{P_i \sin \alpha_i} \quad (9)$$

式中, h_{i+1} 为第 i 条块朝向滑移方向侧面的垂直高度。

公式 (6) 的推导也可应用取垂直、平行于任一条块底滑面方向的力的平衡, 并应用以安全系数定义的摩尔-库伦准则 3 个方程, 通过消去底滑面上法向、切向力而得到。这种求解方法为多数条分法所采用。

当考虑地震力 $K_c W$ 、水压力 u 、锚固力 T 作用时 (图 2), 各条块的剩余下滑力为:

现场工程师来说非常方便, 目前已经有了一些好的应用结果^[4~8], 其优点是计算过程直观、简洁、便于掌握。以本文介绍的剩余推力法为例, 要实现其计算通常需要编制特别的程序, 虽然程序不大, 但却影响了这一方法在工程中的方便使用。这里借助于 Microsoft Excel 实现其计算, 从中可看出剩余推力法中所包含的清晰概念。实际上, 借助于 Excel 实现其它边坡稳定性分析方法的计算同样并不困难。

以文献 [9] 第 254 页例题 7~3 为例, 下面用 Excel 求解这一包含 6 个条块的边坡稳定性。解题过程见图 3, 其中直接输入的地形和滑动面座标数据, 系据其原图量测并按比例求得的; 而需要公式输入的数据, 系据几何关系和前述相关公式求得的, 其中要用到 Excel 中的 SLOPE () 和 IF () 函数。

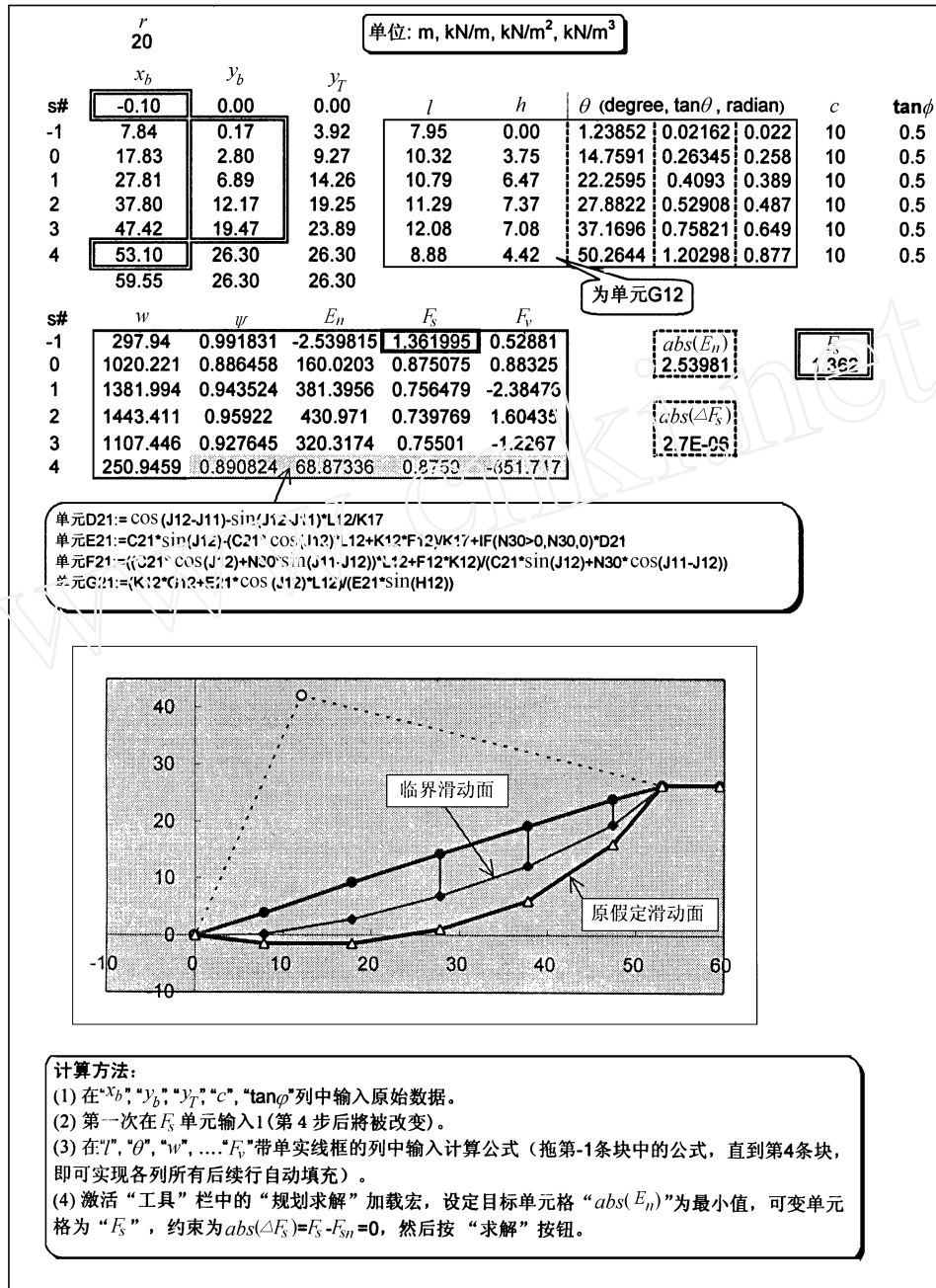


图 3 用 Excel 求解文献 [9] 中表 7-1, 2, 3 和图 7-23 所示例题

Fig. 3 Spreadsheet automated iterations and search for the critical slip surface for the example in Fig. 7-23 and Table 7-1, 2, 3 of Chen Zhongyi et al. (1987) by Residual Thrust Method

此处计算结果是 $F_s = 1.55$ 。如果用原文提供的所有数据, 而不是由原图量得数据, 用剩余推力法由 Excel 仍求得 $F_s = 1.55$ 。原例题用瑞典条分法算得 $F_s = 1.36$, 用简化 Bishop 法算得 $F_s = 1.51$ 。本文方法与例题中的两算法的相对误差分别为 14%、

2.6%。因此, 本文方法所得结果与用简化 Bishop 法算得结果之间的误差不应属于测量误差, 而应当是方法之间的模型误差。由于剩余推力法与简化 Bishop 法之间的误差几乎可以忽略不计, 因此凡可应用简化 Bishop 法的显然也可以使用剩余推力法。

在运用 Excel 应用程序计算边坡稳定性时，需要注意的是，当需要进行迭代运算时，必须激活“工具”栏中的“选项”中的“重复运算”。当未激活“重复运算”，遇到循环引用以及单元被零除时，计算将会暂时终止或瘫痪。但是，这种终止或瘫痪并不可怕，只要了解公式的引用路径，它们很容易再次恢复计算。

4 考虑滑坡稳定系数计算滑坡推力

滑坡推力是滑坡整治设计的重要依据。在推力计算中，取不同的安全系数以及同一安全系数在不同条块中折减方式不同，都会得出差别极大的最终滑坡剩余推力。通常的计算方法中，或以 $[F_s] = 1$

来折减各个条块剩余推力（即不进行任何折减），或以 $[F_s]$ 乘以各个条块下滑力以增大之，或以 $[F_s]$ 除以各个条块抗滑力以折减之，或同时以 $[F_s]$ 乘以各个条块下滑力和除以各个条块抗滑力以增加安全储备，也可以考虑各个条块的稳定系数以 $[F_s] / F_{si}$ 乘以各个条块的抗滑力来计算剩余推力。如果将这 5 类折减方法得到的滑坡推力分别记为 E_n^- 、 E_n^- 、 E_n^+ 、 E_n^{++} 、 E_n^{+++} ，一般地应有：

$$E_n^- < E_n^- = E_n^+ < E_n^{++} < E_n^{+++} \quad (14)$$

有时上述关系容易被错误理解^[10,11]。

图 4、表 1 是对同一算例以不同折减方法得到的不同滑坡推力计算结果。

表 1 不同折减方法得到的不同滑坡推力计算结果

Tab. 1 Calculated results of residual thrusts using the different depreciation method

条块号	各条块稳定系数	取不同安全系数时的剩余推力 P_i					
		$F_s = 1$	$F_s = 1.05$	$F_s = 1.15$	$F_s = 1.25$	$F_s = 1.25 / F_{si}$	$F_{s,l} = 1.25^*$
- 1	1. 552	- 354	- 341	- 317	- 298	- 66	- 298
0	1. 093	- 900	- 857	- 644	- 370	406	- 900
1	0. 764	- 277	- 120	159	397	1368	- 278
2	0. 628	515	626	820	985	1778	515
3	0. 549	718	772	867	947	1365	718
4	0. 556	186	198	217	233	316	187

*仅对最后一条块进行折减

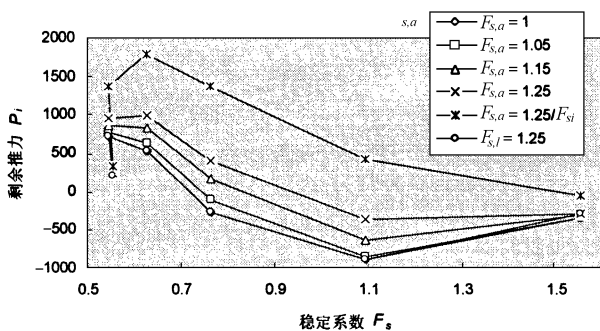


图 4 不同折减方法得到的不同滑坡推力

(横坐标表示各个条块的稳定系数，从左到右各个数据点对应于 4、3、2、1、0、- 1 条块)

Fig. 4 The relationship between residual thrusts and safety factors obtained by the different depreciation method

从图 4 中可以看出，考虑各个条块自身的稳定系数以 $[F_s] / F_{si}$ 乘以各个条块的抗滑力来计算剩余推力，对所有条块来说均将获得最大的滑坡推力，并且由于推力传递效应以及稳定性高的条块所获得的安全储备相应减小，因此虽然最终条块剩余推力与其它方法差别不大，但其它稳定性低的条块则获

得了较高的安全储备。从对每一条块都进行折减的曲线 $F_{s,a} = 1.25$ 和仅仅对最后条块折减的曲线 $F_{s,l} = 1.25$ 也可以看出这种趋势。对于实际情况而言，究竟采用何种折减方法，应视所获得的滑坡资料和工程重要性而定。但是，无论何种情况，当计算抗滑桩处的滑坡推力时，桩处条块必须计及安全系数。

5 地震效应分析

通常，地震力对边坡稳定性的影响是十分复杂的。不但与地震级有关，还与其持续时间包括前震、主震和余震效应等有关。由于地震力为一连续作用的惯性力，大小方向不断变化，尤其是在地震前震、余震震级大且序列丰富时。当边坡内部存在易于滑动的地质结构组合时，将地震力考虑为一次性的瞬时水平指向坡外作用的惯性力与将其考虑为重复性惯性力是很不大同的。同时，在极震区地震惯性力的垂直分量尚不能忽略。1995 年 1 月 17 日发生的日本阪神大地震所表现出的一系列地震效应就是这方

面的典型例子。

也许解决动力问题的最好方法是从计算加速度谱和考虑岩土体的非线性着手进行动力学分析。然而这需要不断地确定滑坡岩土体内每一点的加速度和剪应力的实际分布以及土体本构关系的精确描述。同时考虑多种复杂情况, 边坡稳定性的动力学解将是十分复杂的、困难的。为了简化和方便, 工程上多采用“等效静力法”取代加速度谱。即假定一组随时间保持常量, 坡体内每点等值水平指向坡外的水平惯性力模拟随时空变化的地震力。然而, 实际地震加速度是具方向性的变量, 地震力是作用于滑体上 3 个正交方向分量的合力, 在任何特定时间最大合力将大于 3 个分量中的最大值, 即水平方向的惯性力不一定是危险的。因此, 在等效静力法分析中地震力偏角的影响必须考虑, 必须确定地震力的最危险方向^[12,13]。

图 5、表 2 为同一算例的边坡稳定系数 F_s 随地震力偏角的变化计算结果。其中, 由表 2 数据运用方向数据统计原理^[14], 可以求得稳定系数均值所在的方位及其圆上方差。其算法如下:

设地震力偏角 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ 为 N 组方向数据样本观测值的分组区间中点, f_i 为相应区间内的频数。利用方向数据与圆周上的对应关系:

$$i \sim op_i = [\cos(f_i \alpha_i), \sin(f_i \alpha_i)] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

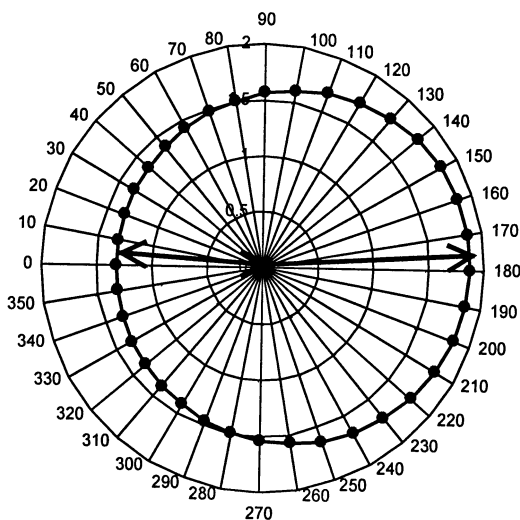


图 5 边坡稳定系数 F_s 随地震力偏角的变化

Fig. 5 Calculated variation in factors of safety with the direction of applied earthquake force in the same example

表 2 边坡稳定系数 F_s 随地震力偏角的变化计算结果

Tab. 2 Sensitivity analysis for the directions of applied earthquake forces in previous example

(degree)	F_{si}	$\cos \alpha_i$	$F_{si}^* \cos \alpha_i$	$\sin \alpha_i$	$F_{si}^* \sin \alpha_i$
0	1.3167	1.0000	1.3167	0.0000	0.0000
10	1.3193	0.9848	1.2992	0.1736	0.2291
20	1.3282	0.9397	1.2481	0.3420	0.4543
30	1.3436	0.8660	1.1636	0.5000	0.6718
40	1.3656	0.7660	1.0461	0.6428	0.8778
50	1.3940	0.6428	0.8961	0.7660	1.0679
60	1.4288	0.5000	0.7144	0.8660	1.2373
70	1.4693	0.3420	0.5025	0.9397	1.3807
80	1.5150	0.1736	0.2631	0.9848	1.4920
90	1.5648	0.0000	0.0000	1.0000	1.5648
100	1.6171	-0.1736	-0.2808	0.9848	1.5926
110	1.6703	-0.3420	-0.5713	0.9397	1.5695
120	1.7220	-0.5000	-0.8610	0.8660	1.4913
130	1.7698	-0.6428	-1.1376	0.7660	1.3558
140	1.8114	-0.7660	-1.3876	0.6428	1.1643
150	1.8443	-0.8660	-1.5972	0.5000	0.9222
160	1.8669	-0.9397	-1.7543	0.3420	0.6385
170	1.8780	-0.9848	-1.8494	0.1736	0.3261
180	1.8771	-1.0000	-1.8771	0.0000	0.0000
190	1.8647	-0.9848	-1.8364	-0.1736	-0.3238
200	1.8419	-0.9397	-1.7308	-0.3420	-0.6300
210	1.8102	-0.8660	-1.5677	-0.5000	-0.9051
220	1.7717	-0.7660	-1.3572	-0.6428	-1.1388
230	1.7282	-0.6428	-1.1109	-0.7660	-1.3239
240	1.6818	-0.5000	-0.8409	-0.8660	-1.4565
250	1.6342	-0.3420	-0.5589	-0.9397	-1.5357
260	1.5869	-0.1736	-0.2756	-0.9848	-1.5628
270	1.5413	0.0000	0.0000	-1.0000	-1.5413
280	1.4982	0.1736	0.2602	-0.9848	-1.4755
290	1.4586	0.3420	0.4989	-0.9397	-1.3706
300	1.4230	0.5000	0.7115	-0.8660	-1.2324
310	1.3920	0.6428	0.8948	-0.7660	-1.0664
320	1.3660	0.7660	1.0464	-0.6428	-0.8780
330	1.3451	0.8660	1.1649	-0.5000	-0.6726
340	1.3298	0.9397	1.2496	-0.3420	-0.4548
350	1.3203	0.9848	1.3002	-0.1736	-0.2293
360	1.3167	1.0000	1.3167	0.0000	0.0000
总计	58.0128		-3.7017		0.2386

则此 N 组方向数据的平均方向 X_0 应由 op_1, op_2, \dots, op_N 的合向量方向来表示, 即

$$\bar{c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \cos \alpha_i \quad (16)$$

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \sin \alpha_i \quad (17)$$

$$\bar{R} = \sqrt{\bar{c}^2 + \bar{s}^2} \quad (18)$$

而 $R = N \bar{r}$ 为此 N 个合向量的长度，平均方向 X_0 应为方程组

$$\begin{cases} \bar{c} = \bar{R} \cos x_0 \\ \bar{s} = \bar{R} \sin x_0 \end{cases} \quad (19)$$

的解。

而圆上样本方差 s_0 为：

$$\begin{aligned} s_0 &= D(X_0) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \cos(x_i - X_0) \\ &= 1 - \bar{R} \end{aligned} \quad (20)$$

由表 2 计算结果可得到：

$$\begin{aligned} \bar{c} &= -0.0638, \bar{s} = -0.00041, \bar{R} = 0.0639, \\ \cos x_0 &= -0.9979, \sin x_0 = 0.0643, \\ x_0 &= 176.3123^\circ, 3.6877^\circ, s_0 = 0.9361 \end{aligned}$$

由此可以看到，最危险的地震力作用方向为指向坡外且与水平面夹角 3.68° 的上仰方向，最安全的地震力方向 176.31° ，且数据分散性非常之大。由表 2 计算结果还可看到，仅仅因地震惯性力的方向变化对边坡稳定性的影响可高达 42.6%。因此，可以说等效静力法的水平向地震力假定往往可导致对边坡稳定性的过高估计。

6 水压力的作用

图 6 为该例各个条块地下水位与自身条块高度之比 $R_{n/h}$ 与边坡整体稳定系数 F_s 之间的关系。可以看出，两者呈完全的线性关系；仅考虑地下水静水压力作用时（而非地表水位骤降），静水压力的最大影响在 10% 以内。显然，仅仅静水压力的作用，对边坡的影响看来并不大。

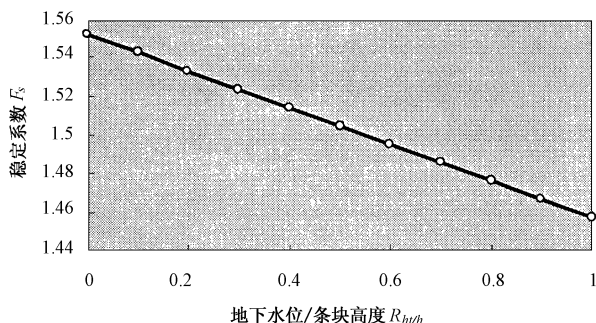


图 6 地下水位高度对边坡稳定性的影响
Fig. 6 Variation of factors of safety with ground water table in the same example

7 锚固力效果分析

仅对剩余推力较大的 2、3 条块进行其自身重量的 10% 的锚固力加固（图 7）。仿照前述方向数据分析，得到如下结果：

$$\begin{aligned} \bar{c} &= -0.06548, \bar{s} = -0.6021, \bar{R} = 0.6056, \\ \cos x_0 &= 0.1080, \sin x_0 = 0.9941, \\ x_0 &= 83.79^\circ, 83.79^\circ, s_0 = 0.3944 \end{aligned}$$

很清楚，从统计角度来看最好的锚固方向是接近于与该边坡面近于垂直，且此处得到的统计样本的分散性不大。

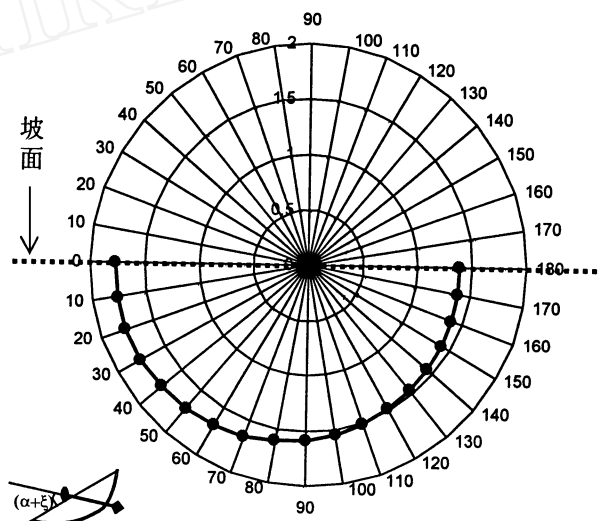


图 7 边坡稳定系数 F_s 随锚杆与坡面夹角 $(\alpha + \delta)$ 的变化

Fig. 7 Two-dimensional locus of factors of safety with anchor angle $(\alpha + \delta)$

8 临界滑动面搜索的实现

如图 3 所示，设定目标单元格为“ $F_s = \text{最小值}$ ”，可变单元格为“ $F_s, x_{b-2}, x_{b4}, y_{b-1}, y_{b0}, y_{b1}, y_{b2}, y_{b3}$ ”，约束为“ $53.1 < x_{b4} < 60, -10 < y_{b-2} < -0.1, -10 < y_{b-1} \dots y_{b3} < x_{b-1} \dots x_{b3} < < < x_{b2}$ ”，“ $abs(E_n) < 30$ ”，进行规划求解即可得到临界滑动面及其相应的稳定性计算结果。不过，从图中可以看出有条间分界面上抗滑稳定系数 F_v 小于 1 甚至小于零的情况出现，这说明剩余推力法的不严格之处。当多数条块出现 $F_v < 0$ 时，往往预示着将会存在较大误差。

对于某些通过若干钻探工作获知局部滑动面位置或滑动面追踪缓倾向坡外断层的控制的滑坡,同样可预先设定约束使待搜索的滑动面强制通过已知点、线,而获得相应条件下的临界滑动面。

9 结语

剩余推力法的求解实现本质上是满足一定条件下循环求解包含有稳定系数或安全系数的平衡方程,其求解过程类似于有限元分析。由于该法的很强假设条件,因此使用过程中必须注意其适用范围,否则将会引起较大误差。当计算要求苛刻时,建议使用Janbu广义条分法^[15]。

功能强大的Microsoft Excel Spreadsheet Software能够自动实现剩余推力法中的迭代运算,本文介绍的该实现技术能使其中包含的概念更能为人们清晰了解,因而也能使现场工程师更快、更方便使用该法评价滑坡稳定性和进行滑坡加固设计。在结合使用Excel中的Circular References和Solver工具时,必须明了公式引用路径,只有这样才能很快恢复瘫痪的计算方案。

本文虽然仅仅涉及剩余推力法,但事实上运用Excel实现其它边坡稳定性方法的分析以及可靠度分析并不困难。

参考文献:

- [1] 加拿大矿物和能源技术中心(CANMET). 边坡工程手册(上册)(PIT SLOPE MANUAL)[Z]. 祝玉学,邢修祥,译. 北京:冶金工业出版社,1984,422-424.
- [2] Gaziev E G. Analysis of storage reservoir slope stability [A], IAEG, IC, Section, Madrid [C], 1978, (1): 127-132.
- [3] Stephen D Priest. Discontinuity Analysis for Rock Engineering [M]. Chapman & Hall, 1995, 227-231.
- [4] Wolff Thomas F. Spreadsheet Applications in Geotechnical Engineering [M]. Boston: PWS Pub. Co., 1995.
- [5] Low B K. Practical probabilistic approach using spreadsheet [A]. In D S Charles, P N Priscilla & J S Mary (eds), Uncertainty in Geologic Environment: From Theory to Practice; Proceedings of Uncertainty 96, Madison, Wis., 31 July-3 August 1996 [C]. ASCE Geotechnical Special Publication 1996, 2 (58): 1284-1302.
- [6] Low B K and Tang W H. Probabilistic slope analysis using Janbu's generalized procedure of slices [J]. Computer and geotechnics, 1997, 21 (2): 21-142.
- [7] Low B K and Tang W H. Efficient reliability evaluation using spreadsheet [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997, 123: 749-752.
- [8] Gedam Subhash G and Beaudet Steven T. Monte carlo simulation using Excel spreadsheet for predicting reliability of a complex system [A]. Proceedings Annual Reliability & Maintainability Symposium [C]. 2000, IEEE. 188-193.
- [9] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994. 254-255.
- [10] 杨宗耀. 考虑滑坡稳定系数计算滑坡推力[A]. 滑坡文集(兰州滑坡会议论文集)[C]. 北京:中国铁道出版社,1988. 394~397.
- [11] 晏同珍. 水文工程地质与环境保护[M]. 北京:中国地质大学出版社,1994. 61-62.
- [12] Hendron A J, Cording E J and Aiyer A K. Analytical and Graphical Methods for the Analysis of Slopes in Rock Masses [R]. US Army Engineer Waterways Experiment Station, NCG Technical Report, 1971. 36.
- [13] Ambraseys N N and Hendron A J. Dynamic behaviour of rock masses [A]. In Rock Mechanics in Engineering Practice, ed. K G Stagg and O C Zienkiewicz [C], Wiley & Sons, London. 203-236.
- [14] Graham J G Upton and Bernard Fingleton. Spatial Data Analysis by Example, Volume 2: Categorical and Directional Data [M]. John Wiley & Sons, 1989. 207-311.
- [15] Janbu N. Slope stability computation [A]. In Embankment Dam Engineering, Casagrand Volume, ed. R C Hirschfeld and S J Poulos [C]. Krieger Pub. Co., 1987. 47-86.

Slope stability analysis using residual thrust method

WANG Jian-feng¹, WILSON H. Tang², CUI Zheng-quan³

(1. Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Department of Civil Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China;

3. Bureau of Geotechnique of Changjiang Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: A 2-D rigid-body limit equilibrium analysis, named as the *Residual Thrust Method* (RTM), of rock blocks with two-dimensional multiple plane sliding mechanism is carried out in the present paper considering the water pressure, the earthquake load, and the reinforcement force applied on the slope. Practical spreadsheet techniques, from which the essential details enclosed in the RTM method can be seen out clearly, are set up for the deterministic slope stability analysis, based on the RTM method. The factor of safety and the residual thrust are solved automatically which never requires special computer programs. Sensitivity analyses for the directions of applied earthquake force, for water pressure, and for anchor bolt angle are presented. Some valuable results from the sensitivity analyses, which can be used as a guide for the reinforcement of such slope as a whole, are found. A search for the deterministic critical slip surface is automatically realized that accompanied by the simply conception, ease of implementation routine using SOLVER optimization tool existed in Microsoft Excel spreadsheet software. The legible formula and the practical flexibility of the presented method in realization are stressed for site or field engineers.

Key words: slope stability; residual thrust method; landslide thrust; critical slip surface; spreadsheet.