

折线滑面滑体的稳定分析方法的改进

马衍泉

(成都科技大学 成都 610065)

提 要 本文根据刚体极限平衡分析原理,考虑各块体的力矩平衡和块间的嵌合作用,假定作用于块体的已知外力所产生的应力呈线性分布,推导出确定其作用力数值、方向和作用点,以及整体抗滑稳定安全系数的方法和公式。并通过实例研究了嵌合作用、分界面倾角等对反力分布和安全系数的影响,与常用方法的计算结果作了比较,说明本方法有较大的适用性,可应用于工程设计。

关键词 稳定 滑动 极限平衡 嵌合

刚体极限平衡法,概念简明,计算快捷,广泛应用于山体边坡和坝基系统的稳定分析;特别在进行工程类比和设计方案选择时,作为宏观概括性的估计,既简便又适用。可是,由于设计及滑体的变形和考虑其应力的复杂分布状态,同时对其工作状态、作用力方向、作用点等又作了若干假定,进行了较多的简化,虽有多种改进的分析方法(文献[1]),但分析结果差异较大,且未得到较多的验证,与实际状况有一定出入。

1 稳定分析方法

由于地貌变化,滑面的起伏曲折,岩性状况的多变,在滑动过程中,滑体虽基本保持着原始的产状结构,可视为准刚体,但其扭曲破裂出现的部位却受上述因素的影响,有其自身的规律,而块间错动变形的大小和裂面抗剪能力的发挥程度,各处亦不相同。因此在稳定分析时,除了对滑动后的滑体进行验算,有破坏形态可供参照外,多数情况下,其分块数、分界面的位置和方向都是拟定的,需通过计算求其最可能的方案。加之对块间下推力方向或作用点位置等,人为的作一些简化和假定,实难符合其复杂多变的特点。本文针对这些问题,在分析方法方面作了些改进,并对分块数,分界面的位置和方向的影响作了若干探讨。

首先,对底部滑裂面和滑体分块已拟定的情况,分析块间力的作用和传递分配。本法假定底部滑裂面已经形成且处于极限抗剪状态;而块体自重、渗压、相邻分块传来的下推力等已知力的合力 $P(i)$ (见图1),其矢量是由底滑面 BHD 和分界面 CD 的分力 R_1 和 R_2 来平衡的。垂直 $P(i)$ 方向的一对力偶 R_3 ,其数值和所承担的弯矩都比 R_1 、 R_2 的相应部分为小,因此合理的确定 R_1 和 R_2 值是很重要的。一种较接近

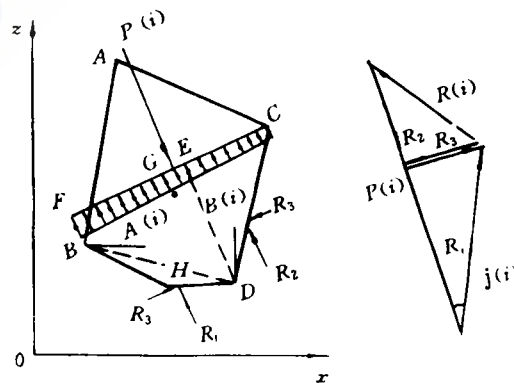


图1

实际情况的简化,可假定在垂直合力 $P(i)$ 的作用面上,分界面 CD 与底滑面 BHD 的投影长度 CEF 区域,其法向应力呈线性分布; R_1 与 R_2 的数值和作用点,即用相应投影长度 EF 和 CE 范围的应力求得(如图 1 所示)。由力多边形求得 R_3 并确定 $R(i)$ 后,再核算分界面上的剪力是否超过其抗剪指标;当超过时,按极限抗剪状态进行力的调整,直至作用于该块体的主矢和主矩同时满足为零的条件为止。从而避免了对分界面的应力状态、下推力 $R(i)$ 的方向或作用点,作出主观和任意的假定。对于垂直条块情况时的稳定分析,作者于文献[4]中,已将其计算假定和原理、基本公式的推导结果、以及迭代计算过程,作了较详细的论述。至于非垂直的任意分界面块体,其原理相同,仅表达式略为复杂而已,限于篇幅,本文不再将其结果一一列出。

关于块体间的嵌合作用,作者参考了文献[2、3]的理论推导及其试验成果。该论文是根据剪胀能理论推导的,考虑了随剪切位移增加所产生的剪胀值,以及外力抵抗剪胀所作之功。同时依照剪切破坏过程,分别推导出沿接着面滑动破坏,通过岩体内部一系列剪断面,即在剪切过程中不断改变滑移面情况下,其峰值和残余抗剪强度表达式(见图 2a、b、c)。为了能适应普遍情况,作者参照文献[2]的原理,分别推导出,接着齿面两侧坡角不等时,相应各种情况的表达式,推导过程详见文献[2],结果列出如下。

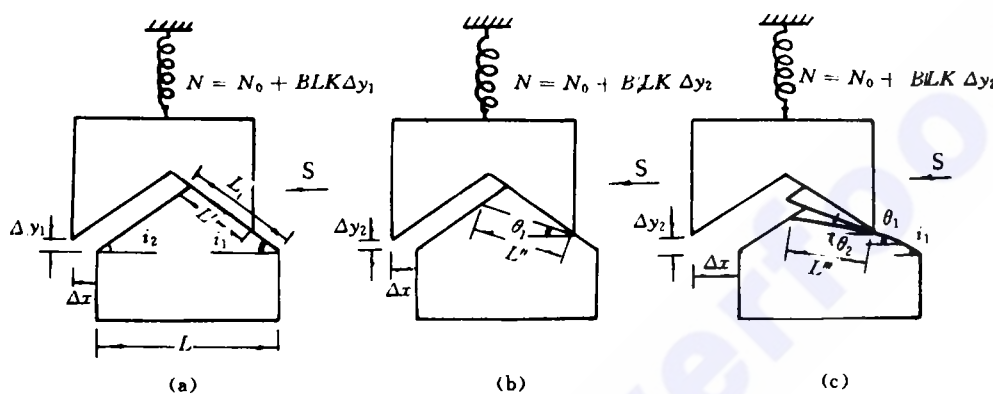


图 2

沿接面滑移情况,见图 2(a)

$$S_u^i = N_0 \tan(i_1 + \varphi_{s1}^p) + \frac{C_u BL \eta}{\pi \cos^2 i_1 (1 - \tan i_1 \tan \varphi_{s1}^p) (1 + \frac{\tan i_1}{\tan i_2})}$$

$$\times \cos^{-1} \left[1 - \frac{2 S_{s1}^p \sin i_1 \cos i_1 (1 + \frac{\tan i_1}{\tan i_2})}{BL \eta q_u} \right]$$

$$S_r^i = (N_0 + \Delta N_0) \tan(i_1 + \bar{\varphi}_{s1}) + \frac{C_u BL \eta}{\pi \cos^2 i_1 (1 - \tan i_1 \tan \bar{\varphi}_{s1}) (1 + \frac{\tan i_1}{\tan i_2})}$$

$$\times \cos^{-1} \left[1 - \frac{2 S_{s1}^r \sin i_1 \cos i_1 (1 + \frac{\tan i_1}{\tan i_2})}{BL \eta q_u} \right]$$

式中 $\bar{\varphi}_{s1} = \varphi_{s1}^r + \left(\frac{\varphi_{s1}^p - \varphi_{s1}^r}{\pi} \right) \cos^{-1} \left[1 - \frac{2 S_{s1}^p \sin i_1 \cos i_1 (1 + \frac{\tan i_1}{\tan i_2})}{BL \eta q_u} \right]$

联锁因子 $\eta = 1 - (\Delta x / L_1 \cos i_1)$; Δy_i 不同剪切阶段的剪胀值;接着长度 $L' = L_1 \eta$; $\Delta N_0 =$

$BLK\Delta y_i$; K 为法向刚度; φ_{ih}^0 、 φ_{ih}^r 及 C_{ih} 为接着面的峰值, 残余摩擦角和粘聚力; q_u 为单轴抗压强度; Δx 为剪切位移; B 为滑移面宽度; 其余符号见图2。

1.2 通过岩体内部破坏角 θ_1 剪断并滑动, 见图2(b)

$$S_{sh}^p = (N_0 + \Delta N_0) \tan(\theta_1 + \varphi_{ih}^0) + \frac{C_{ih} BL \eta \tan i_2}{\cos^2 \theta_1 (1 - \tan \theta_1 \tan \varphi_{ih}^0) (\tan i_2 + \tan \theta_1)}$$

$$S_{sh}^r = (N_0 + \Delta N_0) \tan(\theta_1 + \varphi_{ih}^r)$$

式中 $L_1 = \frac{L}{\cos i_1 (1 + \frac{\tan i_1}{\tan i_2})}$ $L'' = \frac{L \eta \tan i_2}{\cos \theta_1 (\tan i_2 + \tan \theta_1)}$

φ_{ih}^0 、 φ_{ih}^r 及 C_{ih} 为岩体的峰值、残余摩擦角和粘聚力。

1.3 通过岩体内一系列剪断面不断改变滑移面, 见图2(c)

$$S_{sh}^p = (N_0 + \Delta N_0) \tan(\theta_2 + \varphi_{ih}^0) + \frac{C_{ih} BL \tan i_2 (1 - \frac{\Delta X}{L} + \frac{\Delta y_2}{L \tan i_2})}{\cos^2 \theta_2 (1 - \tan \theta_2 \tan \varphi_{ih}^0) (\tan i_2 + \tan \theta_2)}$$

$$S_{sh}^r = (N_0 + \Delta N_0) \tan(\theta_2 + \varphi_{ih}^r)$$

式中 $L''' = \frac{\tan i_2 (L - \Delta x - \frac{\Delta y_2}{\tan i_2})}{\cos \theta_2 (\tan i_2 + \tan \theta_2)}$

使用上述一系列公式, 即可求得滑块随剪切位移 Δx 增加时, 相继出现的各种剪切破坏状态下, 相应的抗剪强度 S 值(见图3)。它能充分反映出渐进破坏过程中, 滑动破坏面的转移和抗剪强度的变化, 理论分析与试验成果相当接近。虽然刚体极限平衡分析方法, 不计其位移及变形, 若根据各分块形状特征和应力分布状况, 采用相应破坏阶段的抗剪强度公式进行强度校核, 即可得到更接近实际情况的稳定分析成果。

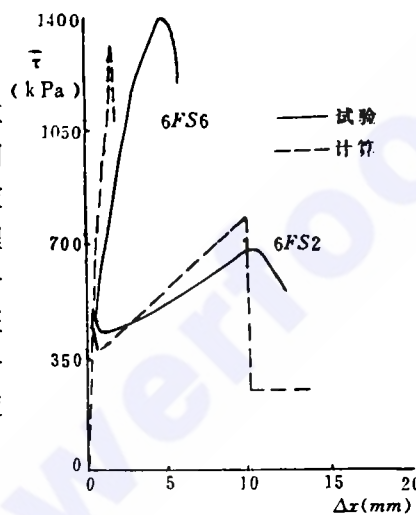


图3

2 实例计算及成果分析

根据前述计算原理及公式, 编制了计算程序, 并在微机上进行了两个算例分析, 所得成果分述如后。

表1 整体稳定安全系数 K 值

分块分析方式	分界面倾角	分界面倾角			说明
		倾向坡里 20°	垂直分界	倾向坡外 20°	
滑面转折	分块极限平衡法		0.95		见图4
	推力传递法		0.90		
	本文方法	0.88	0.83	0.78	
任意点	本文方法	1.15	1.05	0.95	见图5

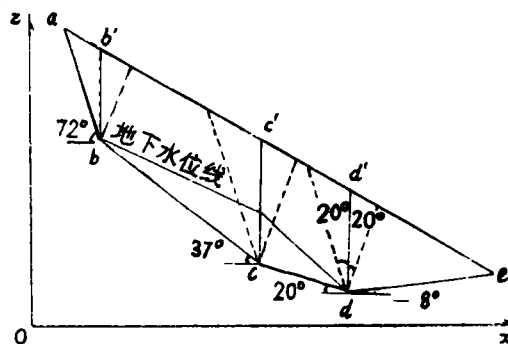


图4

2.1 边坡稳定分析

采用文献[1]中P. 78图4-18的算例,并作了适当简化(如图4),计算成果如表1和表2。从整体稳定安全系数 K 来看,分块极限平衡法是0.95(文献[1]为0.91,差异在于将堆积层简化为基岩处理,地貌及地下水水位线也略加简化),推力传递法为0.90,本文方法是0.83。从表2所列三种方法求得的底滑面及分界面的法向力及剪力看,三者差异较大,其中分块极限平衡法与本文方法相接近,但 $R_x(i)$ 是分块极限平衡法大于本文方法,而 $R_x(i)$ 值则相反,这就是造成两者 K 值差异的原因。

(力的单位:10kN) 表 2

分析方法	序力名称	内			序力名称	外			
		2	3	4		1	2	3	4
分块极限平衡法		449.8	2814.1	2906.3		629.2	6683.4	4178.1	6958.2
推力传递法	$R_x(i)$	215.7	2593.4	2508.3	$J_x(i)$	307.5	7104.1	5162.6	5607.2
本文方法		594.1	3029.3	3007.7		872.6	7994.9	2902.7	6362.2
分块极限平衡法		343.8	2150.4	2221.0		480.6	2673.8	1930.0	1980.3
推力传递法	$R_y(i)$	664.4	1954.5	912.9	$J_y(i)$	247.9	2974.1	2477.0	1771.2
本文方法		0	218.2	1604.1		762.8	3572.9	1587.2	2168.3
分块极限平衡法	方向角	37.39°	37.39°	37.39°	方向角	37.37°	21.8°	24.79°	15.89°
推力传递法	$Q_2(i)$	72°	37°	20°	$Q_1(i)$	38.88°	22.72°	25.63°	17.53°
本文方法		0°	4.12°	28.08°		41.16°	24.08°	28.67°	18.82°

分块极限平衡法是按块间为错动式变形假定导出的,分界面亦处于抗剪极限状态,抗剪强度的潜力得到了充分发挥。本文方法考虑了块体的弯矩平衡和滑体弯扭变化,但没有对分界面状态作任何规定,而是通过核算来确定的。从实例计算结果看(见表2),分界面推力角 $Q_2(i)$ 都较小,块间错动变位不大没有达到临界状态,下滑力主要以 $R_x(i)$ 方式传递。滑坡一般分为牵引段、主滑段和抗滑段,各区段的滑面倾角是上陡下缓,坡脚处抗滑区段往往还出现反坡,因此 $R_y(i)$ 下传的数值大将使 K 值增大。推力传递法假定下滑力平行于底滑面, $Q_2(i)$ 是个确定值,该算例中出现 $Q_2(i) > Q_{2k}$ 的情况,显然不够合理。因此可知,同一算例,分块图式相同, K 值虽差异不大,但推力传递情况却不同,自然存在那种分析方法更符合实际情况的问题。

分界面的部位和方向,以及分块数目往往不能主观拟定,与岩体内各种不连续结构面(如断层、夹层、节理、裂隙等)的位置、走向有关。即使是均质连续的岩体,其应力分布多较复杂,在滑移过程中,滑体底面与滑床表面曲率不吻合,丘状突起相互咬合,使局部阻力增大,从而导致滑体局部的鼓凸和塌陷,以至滑体的破裂分离。而破裂面往往出现在弯曲较大的部位。所以分块数、分界面位置和方向都应在分析滑坡特点之后谨慎确定,避免人为的使之削弱。作为一种探索,本文对该滑坡体的几种不同分块图式进行了稳定分析。

首先改变分块位置,不象通常那样,在滑面转折点分界,而是在已有不连续结构面或在滑移时

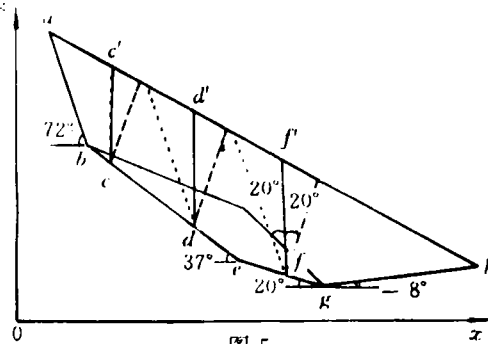


图 5

爬坡抬升而易弯折处分界,其次分界面方向也分为倾向坡里20°、垂直及倾向坡外20°三种情况(见图5),以包含多种可能性。从表1中所列的计算结果看,计入折线滑面滑体与滑床间的嵌合作用,稳定安全系数 K 值,从0.83提高到1.05,增加近26%,该稳定因素不容忽视。至于分界面方向不同对 K 值的影响,不论是图5还是图4分块方式,结果都显示;倾向坡里最大,倾向坡外最小,垂直分界居中(见表1),数值相差约10%~20%。这同样是由于分块形状不同时,滑体总重传递到各滑面区段的力存在差异,如图6所示。在坡脚附近区域,三者之中,倾向坡里时, $J_x(i)$ 最大,而下推力 $R_x(i)$ 却与垂直分界相近,因而 K 值较大。所以,在稳定分析之前,应确定滑体内主要结构面的部位和产状,要分析在滑移时滑体的变形特点,弯折最大的部位,破裂面可能的延伸方向等,力求分块形式符合实际情况,充分体现其抗滑潜力,不宜分块过多,导致整体抗滑作用的削弱。

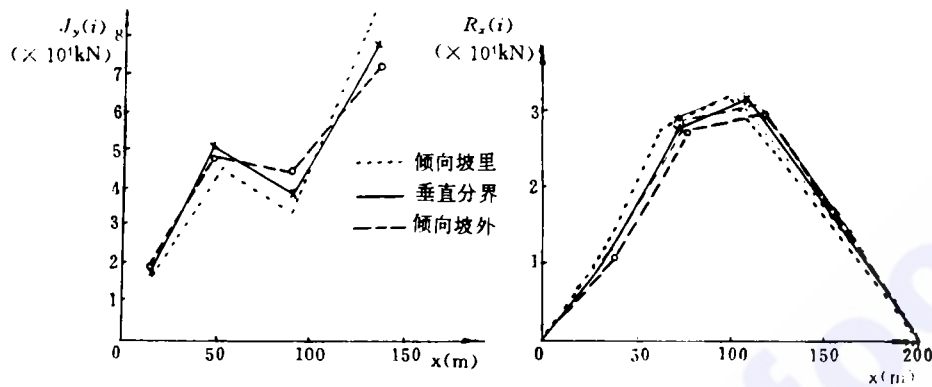


图 6

2.2 坝基深层抗滑稳定分析

采用文献[4、5],作者曾研究过的,双斜复合滑裂面坝基系统稳定分析的几个方案,如图7所示。这些方案曾用模型试验、有限元分析及刚体极限平衡法分别进行了试验和分析研究,图7为各方案的模型试验破坏图式。三种方法所得的整体稳定安全系数 K 值,前两种较为接近,习用极限平衡法,求得的 K 值甚小,最小 K 值的方案也不相同,与试验结果吻合较差。经仔细分析后发现,坝基深层滑动问题,坝体传给地基巨大的斜推力是深层滑动的主要原因。该力在坝基传递扩散,在坝趾区域形成高压应力区;且主压应力方向改变得较急,各分界面的抗力角不可能为同一值;破裂部位不一定在滑面转折处,方向也往往不是垂直的。习用方

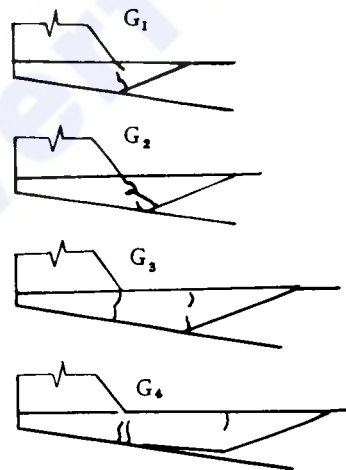


图 7

表 3

方 案	G_1	G_2	G_3	G_4
夹层交点距坝趾距离(m)	0	17.2	40.0	62.5
模型试验破坏极限时 K_2	2.74	1.80	1.46	1.73
基岩内破裂面破坏类型	压裂	剪断	剪切与弯曲	压弯上凸产生爬升而弯折
有限元分析屈服极限时 K_1	1.65	1.34	1.62	
本文方法 K 值	2.2	1.14	1.69	1.85
说 明	夹层交点在坝趾垂直线上	夹层交点在坝坡延长线上		

法从坝趾和转折处垂直分界,又作了一些简化和假定,过份削弱了坝基系统的抗滑能力。为了深入进行研究这一问题,本文主要以模型试验破坏图式为依据进行分块,与习用方法相比,分块数目减少,分界部位和分界面方向也不相同。当采用本文方法,考虑力矩平衡和块间嵌合作用,求得 K 值与试验结果的吻合程度大为提高,见表3。

3 结 语

通过以上分析研究,可获得以下几点认识:

1. 本文方法考虑了滑体的力矩平衡和块间嵌合作用,可适合于任意形状的分块体。依照材料强度储备系数的概念(即通常的等 K 法),除求得整体稳定安全系数 K 值外,并可获得底滑面及分界面的作用力数值、方向和作用点,便于了解滑体内部力的分布及传递特征。

2. 通过一些算例的实际应用后发现,本方法所得的结果与习用极限平衡分析方法相比,当在滑面转折处垂直分界时,求得的 K 值偏小,属于安全方向。若根据可能的破裂图式进行合理地分块,并考虑块间嵌合作用时, K 值有所增大,大于习用的计算值,且能正确地反映出整体的抗滑潜能。

3. 成果显示,分块数目、分界面的部位和方向,对 K 值都有较大的影响。特别象坝基深层滑动问题,坝基内应力分布复杂,不合理的分块,对分界面推力作用方向的简化和假定,都可能偏离实际情况,导致求得的 K 值过份偏低。因此在稳定分析时,应确定滑体内主要结构面的部位和产状、要分析在滑移时滑体的变形特点、弯折最大的部位、破裂面可能的延伸方向等。力求分块形式符合实际情况,充分体现其整体抗滑潜力。

4. 滑体的稳定分析的刚体极限平衡法,虽简便适用,但存在的问题还很多,实例验证尚不足,仅用 K 值来比较和评判亦不够全面,有待深入研究加以改进。

参 考 文 献

- 1 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析. 北京:水利出版社,1980. 6
- 2 Ian W. Johnston and Thomas S. K. Lam. (1989) "Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints-Analysis". J. Geotech. Engrg., ASCE115(5), 711~727.
- 3 Thomas S. K. Lam and Ian W. Johnston. (1989) "Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints-Evaluation". J. Geotech. Engrg., ASCE115(5), 728~740.
- 4 马衍泉. 考虑分条力矩平衡的稳定分析方法,成都科技大学学报. 1989;(6)
- 5 王斌,马衍泉. 双斜复合滑裂面岩基上混凝土重力坝稳定研究. 成都科技大学学报,1990;(1)

Improvement of Stability Analysis for Mansard Sliding Plane of Slide Mass

Ma Yanquan

(Chengdu Science and Technology University)

Abstract Based on Limiting equilibrium analysis of rigid body, considering moment equilibrium and interlocking of blocds for every block, and assuming the resulting stress caused by the known external force on block being linear distribution, the author presents the method and equation which determine the value, direction, point of application of acting force and safety factor of sliding resistance of the monolithic block. The influence of interlocking, dip of separation plane on counter force distribution and safety factor are studied by setting examples. Comparing with conventional calculation method, it is proved that the present method is more applicapable in engineering design.

Key Words stability, sliding, limiting equilibrium, interlocking.