

水文地质工程地质

SHUIWENDIZHI GONGCHENG DIZHI

地质科学研究院水文地质工程地质研究所

只限国内发行

2

1975

地质出版社

水文地质工程地质

一九七五年第二辑

地质科学研究院水文地质工程地质研究所编

地质出版社

水文地质工程地质

第二辑

(只限国内发行)

*

地质总局书刊编辑室编辑

地质出版社出版

地质印刷厂印刷

*

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

1976年2月北京第一版·1976年2月北京第一次印刷

印数1—7,200册·定价0.50元

统一书号: 15038·新135

毛主席语录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

路线是个纲，纲举目张。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

目 录

岩体边坡沿结构面滑动的模拟算法

.....武汉地质学院 庄乐和 (1)

关于岩溶发育规律的意见

.....湖南省地质局四〇八队 李友贵 (20)

《单孔抽水试验确定渗透系数的新方法》在计算影响半径公式 中之应用

.....贵州省地质局一〇七地质队 邓厚基 (28)

珠江三角洲某一煤矿突水的处理

.....广州市加禾煤田地质勘探公司 苏 明 (36)

电法勘探在山区基岩找水的体会

.....吉林省给水排水勘察设计院物探组 (43)

湖南地热试验电站水位预报——以X-2型通用电子计算机计算

.....湖南省地质局水文地质工程地质队
湖南省科技局计算技术研究所 (48)

译文选登

近似表示含水层流量的若干方案 (59)

边坡稳定分析的图解法 (67)

岩体边坡沿结构面滑动的模拟计算法

武汉地质学院 庄乐和

提 要

本文提出一个计算岩体边坡沿结构面滑动的稳定性的计算方法。它适用于露天矿、路堑等岩体边坡的设计及检验岩体边坡有无沿结构面，如断层面等滑动的可能性。亦可作为岩体边坡工程地质定量评价的计算方法。本文提出的模拟计算兼有模型试验和数值计算的优点。

一、绪 言

随着我国社会主义工农业的发展，宏伟的工程建设愈来愈多，规模也愈来愈大，露天采矿深度可达几百米，铁路岩体路堑有高达一百多米的。这种岩体边坡经常产生滑坡（或称坍方），严重地影响着生产。因此岩体边坡稳定性问题引起了普遍重视。

影响岩体边坡稳定性的因素很多，大致可以分成如下二类：

第一类，岩体和边坡所固有的因素：包括岩体的类型（分连续介质和非连续介质两种。一般完整的岩体都可以作连续介质来计算；岩体很破碎，或断层、节理、层理和裂隙都很发育，有碍力作用的连续性，则可以作非连续介质或称块体结构来计算）；岩石的物理力学性质；边坡的尺寸，即边坡开挖成的高度和坡角等。这些因素对岩体边坡稳定性起着决定性的作用。

第二类，自然和人为的因素：包括雨水、风化、地震、机器车辆运行、其它施加的荷载、施工中爆破等。这些因素对岩体边坡的稳定性也有很大的影响，如很多大滑坡都是在连续大雨或暴雨之后发生的。

本文所谓岩体边坡沿结构面滑动的结构面是指岩体内存在的断层面、层片理面、连续节理面等。这些面上的抗剪强度比同种岩石内部的抗剪强度小得多，加上边坡尺寸的配合就形成滑动体沿结构面滑动。这是考虑了第一类的影响因素。

所谓模拟计算法是把同一地点同类岩体已经产生的滑坡作为模型，用力学的方法算出滑动时结构面上的抗剪强度指标。然后再用这些指标去计算沿结构面可能产生滑动的边坡的稳定性。这种方法部分地模拟了第二类的影响因素。

二、边坡和结构面所构成的滑动体的形状

我们在某一露天采矿场调查了已经发生的 42 个中小型滑坡。滑坡体高度从 6.65 米至 19.5 米。这 42 个滑坡都是沿结构面产生滑动的。滑动体的形状都是四面体，共有如图 1 所示的三种类型。

图 1 a 滑动体为 $ABCD$ 四面体，由二个结构面 $\triangle ACD$ 和 $\triangle BCD$ 、水平的坡顶面 $\triangle ABC$ 及坡面 $\triangle ABD$ 四个面构成。滑动体沿 CD 方向向下滑动，在二个结构面上都产生滑动摩擦。图上细虚线是滑动的迹线。

图 1 b 滑动体为 $AECD$ 四面体，由一个结构面 $\triangle ACD$ 、切割面 $\triangle ECD$ 、水平的坡顶面 $\triangle ACE$ 及坡面 $\triangle AED$ 四个面构成，滑动体沿 CD 方向向下滑动，仅在结构面 $\triangle ACD$ 上产生滑动摩擦。图上细虚线是滑动摩擦的迹线。必须指出的是，从简单的原理考虑，切割面 $\triangle ECD$ 是铅垂的平面， $\angle ACD = 90^\circ$ ，所以在 $\triangle ECD$ 面上没有摩擦力。由于岩体内裂隙的影响，从已经发生的这类滑动体的实际观测结果是：切割面 $\triangle ECD$ 上部垂直，即倾角为 90 度，下部略有倾斜，但 $\triangle ECD$ 仍接近平面。在上口接近 EC 边的岩石呈参差不齐的拉断现象，并且一般 $\angle ACE$ 不一定等于 90 度。所以我们在计算时这样来处理：第一把切割面按平面计算；第二当根据已经滑动的滑坡体测算结构面上的抗剪强度指标时，根据实际情况测得数据，和前一类型一样，按二个都是结构面来计算结构面和切割面上的抗剪强度指标；第三计算还没有滑动的边坡的稳定性系数时，按图 1 b 的形状来计算。

图 1 c 滑动体为 $ABCD$ 四面体，由三个结构面和坡面构成。结构面 $\triangle ACD$ 和 $\triangle BCD$ 一般为节理面，结构面 $\triangle ABD$ 一般为顺坡的层理面。滑动体在 $\triangle ABD$ 面上产生滑动摩擦。

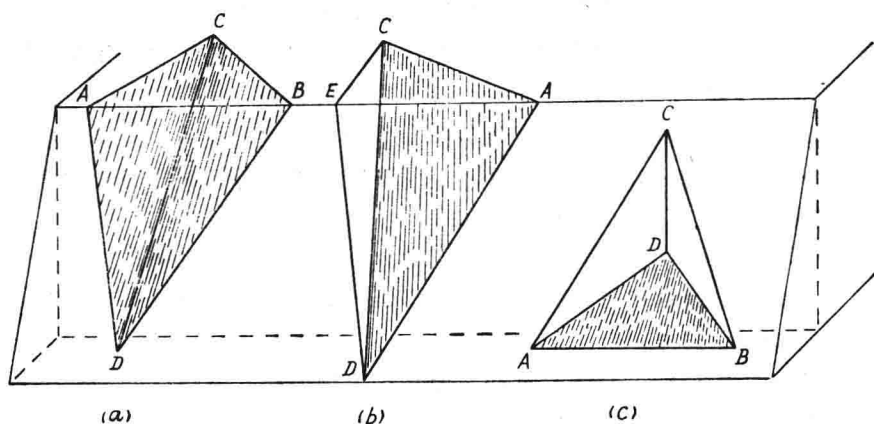


图 1 滑动体的形状

在我们所工作的露天矿采场观察到的滑动体的类型仅有以上三种。从出现的数目来说，前两种共 40 个，第三种类型 2 个。由于前两种滑坡体的类型比较普遍，所以在以下几节仅介绍前两种类型的计算公式。自然界中发生的滑坡体的类型当然不只以上所说的

几种，其他类型的滑坡，根据具体情况再解决。

三、结构面的定位及滑动四面体一些角度的计算

1. 结构面的定位

一般地质面习惯用走向、倾向和倾角三个量来定位，其中倾向和走向相差90度，所以知道了倾向也就可以知道走向。因此可以简单地用二个量来给结构面定位。

如图2所示， P 和 P' 是平行的二个倾斜平面。 P 平面通过半球的中心，它的空间方位可以用二个量来决定。一个是方向北与它的倾向之间的夹角 η ，称为倾向方位角；一个是倾角 α 。有了这二个量，结构面（如 P 平面）的方位就决定了。

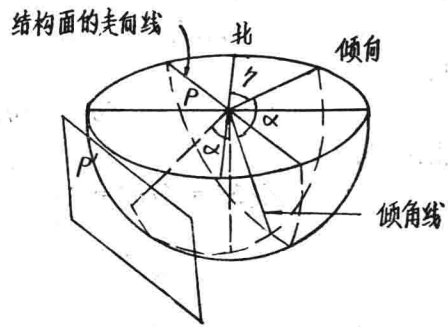


图2 结构面的定位图

2. 已知二个结构面的倾向和倾角，求此二面交线的倾向和倾角

如图3a所示，已知第一结构面 $\triangle acf$ 的倾向方位角为 η_1 ，倾角为 α_1 ；第二结构面 $\triangle bcf$ 的倾向方位角为 η_2 ，倾角为 α_2 。其中 $\triangle abc$ 为水平面，所以 ac 和 bc 为此二结构面的走向线， cf 为此二结构面的交线。过 cf 作一铅垂面 $\triangle cfd$ 交水平面于 cd ，则 $\angle dcf = \beta$ 为交线 cf 的倾角， cd 方向为 cf 的倾向。过 d 点作 $ab \perp cd$ ，过 ab 作一铅垂面交 cf 于 f 点，则 df 为铅垂线。作 $dg \perp ac$ 、 $dh \perp bc$ ，连 gf 、 hf ，则 $\angle dgf = \alpha_1$ 为第一结构面的倾角， $\angle dhf = \alpha_2$ 为第二结构面的倾角。

设 $\angle acd = \theta_1$ 为第一结构面的走向线与过交线的铅垂面走向线的夹角， $\angle bcd = \theta_2$ 为过交线的铅垂面走向线与第二结构面的走向线的夹角。

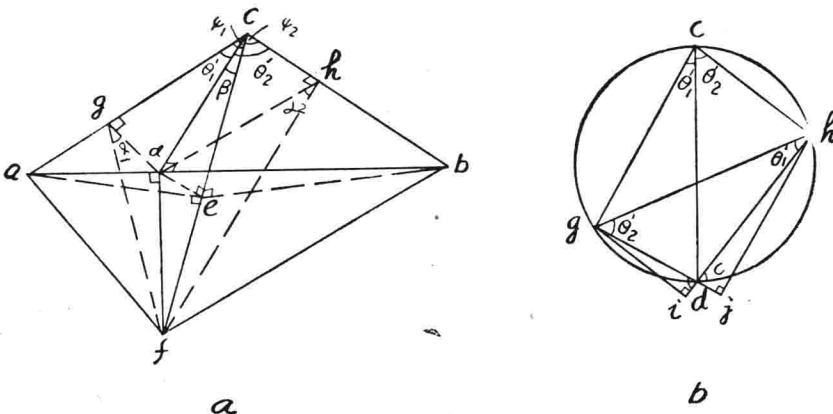


图3 滑动四面体一些角度的计算

设 $acb = \angle c$

由图 3a:

$$dg = df \operatorname{ctg} \alpha_1 \quad (1)$$

$$dh = df \operatorname{ctg} \alpha_2 \quad (2)$$

$$dc = df \operatorname{ctg} \beta \quad (3)$$

由于 $cgdh$ 四边形有一对角是直角, 所以四边形共圆, 另作一平面图如图 3b 所示:

$$\angle idj = \eta_2 - \eta_1, \quad \text{而 } \angle c = \pi - \angle idj$$

所以

$$\angle c = \pi + \eta_1 - \eta_2 \quad (3.1)$$

由图 3b:

$$\angle ghd = \angle gcd = \theta'_1, \quad \angle hgd = \angle hcd = \theta'_2$$

$$\operatorname{tg} \theta'_1 = \frac{gi}{hi} = \frac{dg \sin \angle c}{dh + dg \cos \angle c} \quad (4)$$

将 (1)、(2) 代入 (4) 得:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \theta'_1 &= \frac{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \angle c}{\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \angle c} \\ \theta'_1 &= \arcsin \operatorname{tg} \left[\frac{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin (\pi + \eta_1 - \eta_2)}{\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \cos (\pi + \eta_1 - \eta_2)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

同理得:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \theta'_2 &= \frac{\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \angle c}{\operatorname{tg} \alpha_2 + \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \angle c} \\ \theta'_2 &= \arcsin \operatorname{tg} \left[\frac{\operatorname{tg} \alpha_1 \sin (\pi + \eta_1 - \eta_2)}{\operatorname{tg} \alpha_2 + \operatorname{tg} \alpha_1 \cos (\pi + \eta_1 - \eta_2)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

由图 3:

$$\sin \theta'_1 = \frac{dg}{dc} \quad (5)$$

将 (1)、(3) 代入 (5) 得:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \operatorname{tg} \alpha_1 \sin \theta'_1 \\ \beta &= \arcsin (\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \theta'_1) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

同理得:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \operatorname{tg} \alpha_2 \sin \theta'_2 \\ \beta &= \arcsin (\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \theta'_2) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

3. 已知 θ'_1 、 θ'_2 及 β 求 θ_1 及 θ_2 (分别为第一、第二结构面 $\angle acf$ 、 $\angle bcf$ 与铅垂面 $\triangle dcf$ 之夹角)

在图 3a 上作辅助线, 由于 $ab \perp \triangle dcf$ 平面, 自 d 点作 $de \perp cf$, 则 $\angle abe$ 构成的平面与 $\triangle dcf$ 平面互相垂直。又由于 $cf \perp de$, 所以 cf 垂直于 $\angle abe$ 平面。所以 cf 垂直于 eb 和

ea。所以 $\angle aed$ 是第一结构面与铅垂面 $\angle dcf$ 之夹角, $\angle bed$ 是第二结构面与铅垂面 $\angle dcf$ 之夹角。

设

$$\angle aed = \theta_1, \quad \angle bed = \theta_2$$

由图 3a:

$$ad = cd \operatorname{tg} \theta'_1 \quad (1)$$

$$de = cd \sin \beta \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{ad}{de} \quad (3)$$

将 (1)、(2) 代入 (3) 得:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_1 &= \frac{\operatorname{tg} \theta'_1}{\sin \beta} \\ \theta_1 &= \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{\operatorname{tg} \theta'_1}{\sin \beta} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

同理得:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_2 &= \frac{\operatorname{tg} \theta'_2}{\sin \beta} \\ \theta_2 &= \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{\operatorname{tg} \theta'_2}{\sin \beta} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

4. 已知 θ'_1 、 θ'_2 及 β 求 ψ_1 及 ψ_2 (分别为第一、第二结构面走向线与二结构面交线 of 之夹角, $\psi_1 = \angle acf$ 、 $\psi_2 = \angle bcf$)

由图 3a:

$$ce = cd \cos \beta \quad (1)$$

$$ca = \frac{cd}{\cos \theta'_1} \quad (2)$$

$$\cos \psi_1 = \frac{ce}{ca} \quad (3)$$

将 (1)、(2) 代入 (3) 得:

$$\left. \begin{aligned} \cos \psi_1 &= \cos \theta'_1 \cos \beta \\ \psi_1 &= \operatorname{arc} \cos (\cos \theta'_1 \cos \beta) \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

同理得:

$$\left. \begin{aligned} \cos \psi_2 &= \cos \theta'_2 \cos \beta \\ \psi_2 &= \operatorname{arc} \cos (\cos \theta'_2 \cos \beta) \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

四、边坡沿二个结构面滑动的计算

1. 滑动体一些未知量的计算

已知边坡面的倾向方位角 η 、倾角 α ；第一结构面的倾向方位角 η_1 、倾角 α_1 ；第二结构面的倾向方位角 η_2 、倾角 α_2 ；滑坡体高 H 。

由图 4：

$$\delta_1 = \eta - \eta_1, \quad \delta_2 = \eta_2 - \eta_1$$

$$\angle C = \pi - (\delta_1 + \delta_2) = \pi + \eta_1 - \eta_2$$

设二结构面的交线 CD 的倾角为 β ，过 CD 的铅垂平面走向线 CE 分 $\angle C$ 为 θ'_1 和 θ'_2 。

由 (3.2)、(3.3) 式：

$$\operatorname{tg} \theta'_1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \angle C}{\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \angle C}, \quad \operatorname{tg} \theta'_2 = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \angle C}{\operatorname{tg} \alpha_2 + \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \angle C},$$

由 (3.4)、(3.5) 式：

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \alpha_1 \sin \theta'_1 = \operatorname{tg} \alpha'_2 \sin \theta'_2,$$

由图 4：

$$\operatorname{ctg} \xi_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 \sin \delta_1, \quad \operatorname{ctg} \xi_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 \sin \delta_2,$$

因为 CE 是 CD 在水平面上的部分投影，所以 CE 、 CD 构成的平面 ECD 是一个铅垂的平面。

设第一结构面与铅垂平面 ECD 之间的夹角为 θ_1 ，铅垂平面 ECD 与第二结构面之间的夹角为 θ_2 。

由 (3.6)、(3.7) 式：

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{\operatorname{tg} \theta'_1}{\sin \beta},$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{\operatorname{tg} \theta'_2}{\sin \beta},$$

由图 4：

$$CD = \frac{H}{\sin \beta} \quad (4.1)$$

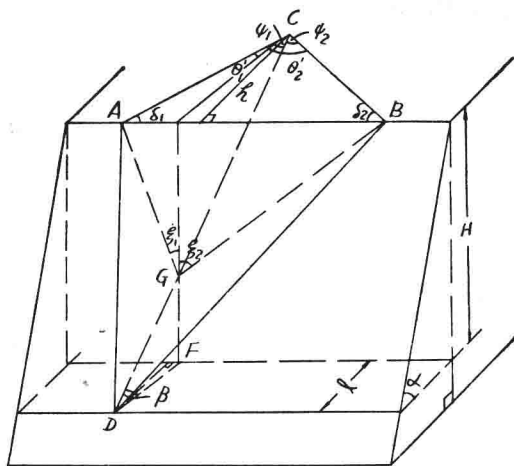


图 4 沿二个结构面滑动的滑坡图

$$l = H \operatorname{ctg} \alpha, \quad DF = \frac{l}{\sin \xi} = \frac{H \operatorname{ctg} \alpha}{\sin(\delta_1 + \theta'_1)},$$

$$GF = DF \operatorname{tg} \beta = \frac{H \operatorname{tg} \beta}{\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha},$$

$$GE = H - GF = H \left[1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha} \right],$$

$$AE = GE \operatorname{tg} \xi_1 = \frac{H}{\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \delta_1} \left[1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha} \right],$$

$$BE = GE \operatorname{tg} \xi_2 = \frac{H}{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \delta_2} \left[1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha} \right],$$

因为

$$AB = AE + BE$$

所以

$$AB = H \left[1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha} \right] \left[\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \delta_1} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \delta_2} \right] \quad (4.2)$$

因为

$$\frac{h}{GE} = \frac{l}{GF}, \quad \text{所以} \quad h = \frac{l \cdot GE}{GF},$$

$$h = \frac{H [\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta]}{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta}$$

因为

$$\Delta ABC = \frac{1}{2} AB \times h$$

所以

$$\begin{aligned} \Delta ABC = \frac{H^2}{2} \left[1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha} \right] & \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \delta_1} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \delta_2} \right) \\ & \left[\frac{\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

设滑动四面体的重量为 G (吨), 则

$$G = \frac{1}{3} \Delta ABC \times H \times \gamma$$

$$G = \frac{\gamma H^3 [\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta]^2}{6 \sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg}^2 \alpha \operatorname{tg} \beta} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \delta_1} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \delta_2} \right) \quad (4.4)$$

式中: γ ——岩体的容重 (吨/米³)

$$AC = \frac{h}{\sin \delta_1} = \frac{H[\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta]}{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \sin \delta_1} \quad (4.5)$$

$$BC = \frac{h}{\sin \delta_2} = \frac{H[\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta]}{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \sin \delta_2} \quad (4.6)$$

设 $\angle ACD = \psi_1$, $\angle BCD = \psi_2$ 。

由 (3.8)、(3.9) 式:

$$\cos \psi_1 = \cos \theta'_1 \cos \beta; \quad \cos \psi_2 = \cos \theta'_2 \cos \beta;$$

因为 $\Delta ACD = \frac{1}{2} AC \times CD \times \sin \psi_1$

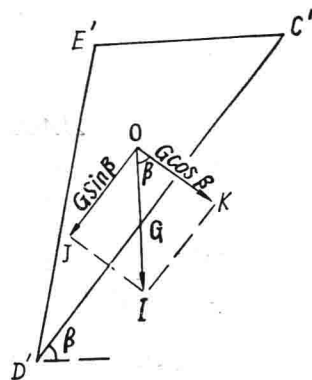
所以 $\Delta ACD = \frac{H^2[\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta] \sin \psi_1}{2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \sin \delta_1 \sin \beta} \quad (4.7)$

因为 $\Delta BCD = \frac{1}{2} BC \times CD \times \sin \psi_2$

所以 $\Delta BCD = \frac{H^2[\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta] \sin \psi_2}{2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \sin \delta_2 \sin \beta} \quad (4.8)$

2. 极限平衡方程的建立

经过四面体 $ABCD$ 的重心 O 作一平行于 ΔECD 的铅垂断面 $\Delta E'C'D'$ 如图 5a 所示, 四面体的重量 G 以线段 OI 的长度表示, 可以分解成二个分力, 一个平行于 $C'D'$ (亦平行于 CD) 的为 $\vec{OJ} = G \sin \beta$, 一个垂直于 $C'D'$ 的为 $\vec{OK} = G \cos \beta$ 。



再经过重心 O 作一垂直于 $C'D'$ 的断面如图 5b 所示, $A'P$ 为 ΔACD 平面的迹线, $B'P$ 为 ΔBCD 平面的迹线。将分力 $\vec{OK}$ 再分解成二个力, 一个垂直于 ΔACD 平面的为 $\vec{OM}$, 一个垂直于 ΔBCD 平面的为 $\vec{ON}$ 。OMKN 为平行四边形。作 $KQ \perp OM$, $KR \perp ON$ 。由于 $\angle MKQ = \angle NKR = \theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}$, 所以

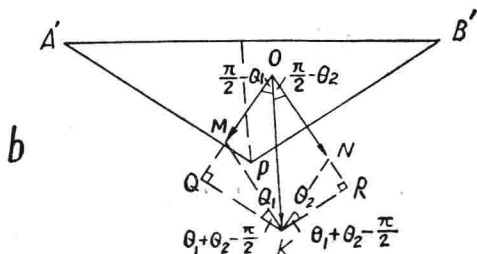


图 5 重力分解图

$$\vec{OM} = \vec{OQ} - \vec{MQ} = \vec{OK} \sin \theta_1 - \vec{OK} \cos \theta_1 \operatorname{tg}\left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\vec{OM} = \vec{OK} \left[\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \operatorname{tg}\left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

$$\vec{OM} = G \cos \beta \left[\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \operatorname{tg}\left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

同理 $\vec{ON} = G \cos \beta \left[\sin \theta_2 - \cos \theta_2 \operatorname{tg}\left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right]$

使滑动四面体 $ABCD$ 向下滑动的力是四面体 $ABCD$ 的重量在 CD 方向的分力，

$$\text{滑动力} = G \sin \beta$$

阻止四面体 $ABCD$ 滑动的力为 $\angle ACD$ 和 $\angle BCD$ 面上的摩擦力和粘聚力。

$\angle ACD$ 面上的摩擦力为垂直压力 $\vec{OM}$ 乘摩擦系数 $\operatorname{tg} \psi_1$ ，其值为：

$$G \cos \beta \left[\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \operatorname{tg}\left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right] \operatorname{tg} \psi_1$$

其中： ψ_1 为第一结构面上的摩擦角。

$\angle ACD$ 面上的粘聚力为： $\angle ACD \times C_1$

其中： C_1 为第一结构面单位面积上的粘聚力。

$\angle BCD$ 面上的摩擦力为垂直压力 $\vec{ON}$ 乘摩擦系数 $\operatorname{tg} \psi_2$ ，其值为：

$$G \cos \beta \left[\sin \theta_2 - \cos \theta_2 \operatorname{tg}\left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right] \operatorname{tg} \psi_2$$

其中： ψ_2 为第二结构面上的摩擦角。

$\angle BCD$ 面上的粘聚力为： $\angle BCD \times C_2$

其中： C_2 为第二结构面单位面积上的粘聚力。

滑动四面体将要滑动的瞬间，作用在四面体上的诸力必定平衡，称为极限平衡状态，我们考虑作用在滑动方向上的力的平衡条件，则有：

$$G \cos \beta \left[\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \operatorname{tg}\left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right] \operatorname{tg} \psi_1 + G \cos \beta \left[\sin \theta_2 - \cos \theta_2 \operatorname{tg}\left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right] \operatorname{tg} \psi_2 + \angle ACD \times C_1 + \angle BCD \times C_2 = G \sin \beta \quad (4.9)$$

上式称为极限平衡方程式，可以根据已经发生滑动的四面体 $ABCD$ 的尺寸和其它数据来计算结构面上的抗剪强度指标（摩擦角 ψ 和粘聚力 C ）。

3. 测算岩体结构面上的抗剪强度指标

在露天矿边坡，一般每10米留一个平台，在每一阶级的边坡上会发生相当数量的四面体形的滑坡。滑坡滑下后尚留下凹进的四面体轮廓，可以用测针或小铁椿定出如图4

所示的 A 、 B 、 C 及 D 四点构成的轮廓。用罗盘、经纬仪和皮尺可以直接测得以下数据：

滑坡体高度 H (米)；

坡面的倾角 (或称边坡的坡角) α (度)；

二结构面交线的倾角 β (度)；

边坡走向线与第一结构面走向线的夹角 δ_1 (度)；

第二结构面走向线与边坡走向线的夹角 δ_2 (度)；

第一结构面走向线 CA 与通过 CD 的铅垂面走向线 CE 的夹角 θ'_1 (度)；

通过 CD 的铅垂面走向线 CE 与第二结构面走向线 CB 的夹角 θ'_2 (度)；

AC 和 BC 的长度 (米)；

再用天平测定岩石的容量 γ (克/厘米³)；

用以下公式算出有关数据：

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{\tan \theta'_1}{\sin \beta} \right), \quad \theta_2 = \arctan \left(\frac{\tan \theta'_2}{\sin \beta} \right);$$

$$\psi_1 = \arccos (\cos \theta'_1 \cos \beta); \quad \psi_2 = \arccos (\cos \theta'_2 \cos \beta);$$

$$\triangle ABC = \frac{1}{2} AC \times BC \sin (\theta'_1 + \theta'_2);$$

$$G = \frac{1}{3} \triangle ABC \times H \times \gamma;$$

$$CD = \frac{H}{\sin \beta};$$

$$\triangle ACD = \frac{1}{2} AC \times CD \sin \psi_1; \quad \triangle BCD = \frac{1}{2} BC \times CD \sin \psi_2$$

将上列数据代入极限平衡方程 (4.9)，就得到以 $\tan \psi_1$ 、 C_1 、 $\tan \psi_2$ 及 C_2 为未知数的线性方程。因为有四个未知数，所以需要测定四个滑坡体的数据代入方程 (4.9) 得到四个线性方程，解方程即得到 ψ_1 、 C_1 、 ψ_2 及 C_2 ，即岩体结构面上的抗剪强度指标。

如果第一结构面与第二结构面是同一种结构面，则 $\tan \psi_1 = \tan \psi_2$ ， $C_1 = C_2$ ，这样极限平衡方程中就只有二个未知数，就只要测定二个滑坡体的数据代入方程 (4.9)，得到二个线性方程解得二个值 (ψ 与 C 值)。

例如我们在某一露天采矿场，测定出滑坡体的数据后，就可计算出岩体结构面上的抗剪强度指标值。如表 1 所示。

必须说明的是，在测算抗剪强度指标的工作中，至少要取得滑坡体的八个数据，它们是 γ 、 H 、 α 、 β 、 δ_1 、 δ_2 、 θ'_1 和 θ'_2 。除 γ 以外的七个数据决定了滑坡体的形状和大小。其中 $\theta'_1 + \theta'_2 = \angle C$ ， δ_1 、 δ_2 和 $\angle C$ 是 $\triangle ABC$ 的三个内角，它们之和等于 180 度。所以可用这个条件来检验这三个角测量得是否精确，有误差时进行平差。有时因为 A 点或 B 点处坍塌了，岩石不能放仪器测量 δ_1 或 δ_2 角的大小，就可以用三角之和等于 180° 的关系来计算其中的一个角度 δ_1 或 δ_2 。

有些数据如 AB 、 AC 、 BC 和 CD 的长度都是比较容易测定的尽量把它们直接测出来。虽然 AC 、 BC 、 CD 和 AB 分别可以用 (4.5)、(4.6)、(4.1) 和 (4.2) 式把它们计算出来,但是一般直接测量出来的较精确,并且可以用以检验测量的角度是否精确。例如应用正弦定律:

$$\frac{AB}{\sin \angle C} = \frac{AC}{\sin \delta_2} = \frac{BC}{\sin \delta_1}$$

检验 $\angle C$ 、 δ_1 和 δ_2 是否精确。

有些数据直接测定有困难就可以应用以前所列的关系式来计算。

这里我们没有用测定结构面的倾角 α_1 、 α_2 的数值来参加计算。因为变质岩的结构面很不平整,精确测量 α_1 和 α_2 较困难。

还需说明的是计算的成果,表 1 最后一栏是测算得的岩体结构面上的 ψ 、 C 值,其中 C 值为每平方米零点几吨。一般说来此值是较小的,因为是选择开挖后经过几年风化、雨淋和环境的影响后产生的滑坡。我们在现场进行了调查研究,这些结构面都是闭合的,铁矿与黑云母斜长片麻岩的接触面和断层面都由粘土矿物质胶结,新鲜的时候胶结得很坚实,估计 C 值每平方米可达到几十吨,后经过风化、雨淋,粘聚力逐渐变小。

必须指出,测算岩体结构面上抗剪强度指标时,须选择开挖后经过几年的风化、雨淋和环境的影响而产生的滑坡。用刚开挖后就产生滑动的滑坡测算岩体结构面上的抗剪强度时,其结果粘聚力 C 值偏大,用以计算岩体边坡的稳定性时,必须降低 C 值,否则算出的稳定性系数偏大。

4. 计算沿二个结构面滑动的边坡的稳定性

在由二个结构面和边坡面构成的四面体可能产生滑坡而尚未滑动的地方,可以用罗盘和皮尺测得边坡面的倾向方位角 η 、倾角 α ; 第一结构面的倾向方位角 η_1 、倾角 α_1 ; 第二结构面的倾向方位角 η_2 、倾角 α_2 ; 以及滑坡体的高度 H 。再用天平测定岩石的容重 γ , 用以下的表达式计算该处边坡的稳定性。

稳定性系数为阻止滑坡体滑动的力与使滑坡体向下滑动的力之比。

设 W 为稳定性系数, 则

$$W = \frac{G \cos \beta \left[\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \operatorname{tg} \left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right] \operatorname{tg} \psi_1 + G \cos \beta \left[\sin \theta_2 - \cos \theta_2 \operatorname{tg} \left(\theta_1 + \theta_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right] \operatorname{tg} \psi_2 + \triangle ACD \times C_1 + \triangle BCD \times C_2}{G \sin \beta} \quad (4.10)$$

式中:

$$G = \frac{\gamma H^3 [\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta]^2}{6 \sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg}^2 \alpha \operatorname{tg} \beta} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \delta_1} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \delta_2} \right),$$

$$\Delta ACD = \frac{H^2 [\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta] \sin \psi_1}{2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \sin \delta_1 \sin \beta},$$

$$\Delta BCD = \frac{H^2 [\sin(\delta_1 + \theta'_1) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta] \sin \psi_2}{2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \sin \delta_2 \sin \beta},$$

$$\psi_1 = \arccos(\cos \theta'_1 \cos \beta);$$

$$\psi_2 = \arccos(\cos \theta'_2 \cos \beta);$$

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} \theta'_1}{\sin \beta}\right);$$

$$\theta_2 = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} \theta'_2}{\sin \beta}\right);$$

$$\beta = \arctg(\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \theta'_1) = \arctg(\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \theta'_2);$$

$$\theta'_1 = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \angle C}{\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \angle C}\right);$$

$$\theta'_2 = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_1 \sin \angle C}{\operatorname{tg} \alpha_2 + \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \angle C}\right);$$

$$\angle C = \pi + \eta_1 - \eta_2;$$

$$\delta_1 = \eta - \eta_1;$$

$$\delta_2 = \eta_2 - \eta_0.$$

5. 算 例

已知一处岩体边坡为黑云母斜长片麻岩，测得坡面的倾向方位角 $\eta = 264^\circ$ ，坡面倾角 $\alpha = 66.5^\circ$ ；第一结构面为断层面，倾向方位角 $\eta_1 = 216^\circ$ ，倾角 $\alpha_1 = 56^\circ$ ；第二结构面为层片理面，倾向方位角 $\eta_2 = 292^\circ$ ，倾角 $\alpha_2 = 41^\circ$ ；滑坡体的高度 $H = 18.6$ 米；岩石容重 $\gamma = 2.50$ 吨/米³；由前节 3 计算得同一地点黑云母斜长片麻岩断层面的摩擦角 $\psi_1 = 33.8^\circ$ ，粘聚力 $C_1 = 0.226$ 吨/米²；黑云母斜长片麻岩层片理面的摩擦角 $\psi_2 = 40.5^\circ$ ，粘聚力 $C_2 = 0.11$ 吨/米²。试计算滑坡体的稳定性系数。

〔解〕 由 (4.10) 式：

$$\delta_1 = \eta - \eta_1 = 264^\circ - 216^\circ = 48^\circ$$

$$\delta_2 = \eta_2 - \eta = 292^\circ - 264^\circ = 28^\circ$$

$$\angle C = 180^\circ + \eta_1 - \eta_2 = 104^\circ$$

$$\theta'_1 = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_2 \sin \angle C}{\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \angle C}\right) = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} 41^\circ \sin 104^\circ}{\operatorname{tg} 56^\circ + \operatorname{tg} 41^\circ \cos 104^\circ}\right) = 33.6^\circ$$