



# 边坡稳定性分析概述

《岩土工程勘察规范》规定边坡的稳定系数按以下方法取值：新设计的边坡，对安全等级为一级的边坡工程， $F_s$ 值宜采用1.30~1.50；安全等级为二级的边坡工程， $F_s$ 值宜采用1.15~1.30，安全等级为三级的边坡工程， $F_s$ 值宜采用1.05~1.15。当边坡采用峰值抗剪强度参数设计时， $F_s$ 取大值，采用残余抗剪强度参数设计时， $F_s$ 取小值。验算已有边坡的稳定性， $F_s$ 值可采用1.10~1.25；当需要边坡加荷，增大坡角或开挖坡角时，应按新设计边坡取值。《建筑地基基础设计规范》规定：滑坡推力安全系数应根据滑坡现状及其对工程的影响等因素确定，对一级建筑物取1.25，二级建筑物取1.15，三级建筑物取1.05。

# 边坡稳定性计算方法分类

边坡稳定性计算目前多采用二维断面进行分析，三维分析使用还较少。

稳定性分析方法可分为三类：

n 刚体极限平衡法

把滑体视为刚体；滑动面因剪切破坏而形成；用块体在斜坡上的平衡原理确定稳定系数。

n 数值分析法

包括有限单元法、边界单元法、离散单元法等。根据边坡体内的应力和位移分布确定边坡的稳定性。

n 概率分析法

用数理统计方法分析边坡的稳定性。

# 平面滑坡的稳定性计算

平面滑坡是指边坡上的岩体沿某一倾斜面的滑动。

发生平面滑坡的条件是：

- n 滑面走向与边坡走向平行或近于平行(相差 $20^{\circ}$ 左右)
- n 滑面倾角小于边坡角，且滑动面在坡面上有出露
- n 滑面倾角大于滑动面的等效摩擦角
- n 滑面两侧有裂面，侧向阻力可以忽略

# 平面滑坡的稳定性计算

平面滑坡稳定性计算有以下几种情况：

n 边坡内有确定的滑面但没有竖直张裂缝

---

n 边坡内有确定的滑面及竖直张裂缝

---

n 边坡内没有确定的滑面，滑面需经分析求得

---

n 边坡内没有确定位置的竖直张裂缝

---

# 圆弧面滑坡的稳定性计算

圆弧面滑坡通常出现在均质岩土边坡中，其稳定

系数的定义是：
$$F_s = \frac{\text{抗滑力矩}}{\text{滑动力矩}}$$

求出 $F_s$ 的关键问题是确定抗滑力矩和滑动力矩。

确定抗滑力矩和滑动力矩的方法很多，这里只介绍两种常用的方法——Fellenius条分法和Bishop法。

Fellenius条分法和Bishop法在求稳定系数时都需要试算滑动面，有没有不需要试算的方法确定滑面？

俄国人费先科提出的作图法可以一次求出滑动面。

# 圆弧面滑坡的稳定性计算

(1) 据  $h_0 = \frac{2c}{\gamma} \cot(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$  计算产生张裂缝的深度，取  $AC=h_0$ ;

(2) 过 C 点作 CD 线，使其倾角为  $(90^\circ + \varphi)/2$ ;

(3) 过坡角 B 点作斜线，倾角为  $(\alpha + \varphi)/2$ ，与 CD 线交于 E 点;

(4) 作 BE 的中垂线，

则滑面必在此线上;

(5) 过坡角作 BF 线，

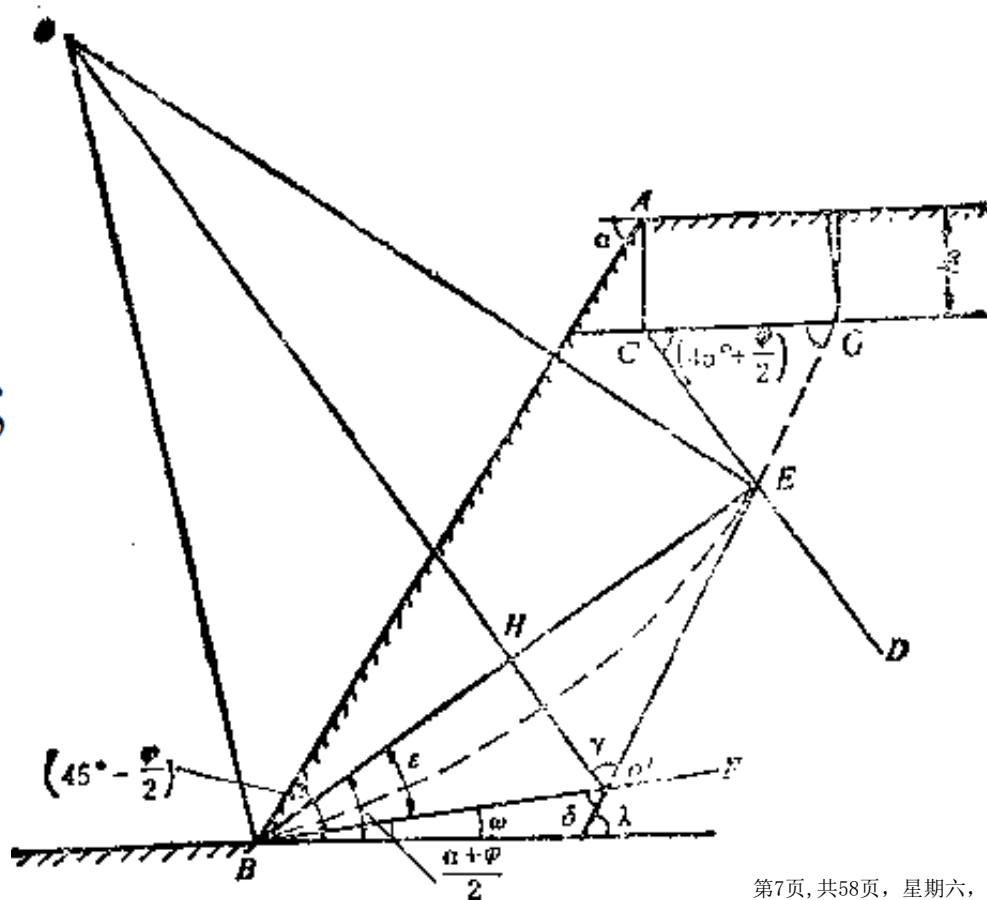
使其与坡面成  $(90^\circ - \varphi)/2$ ;

(6) 过坡脚作垂直于 BF 线，

与中垂线交于 O，O 为所

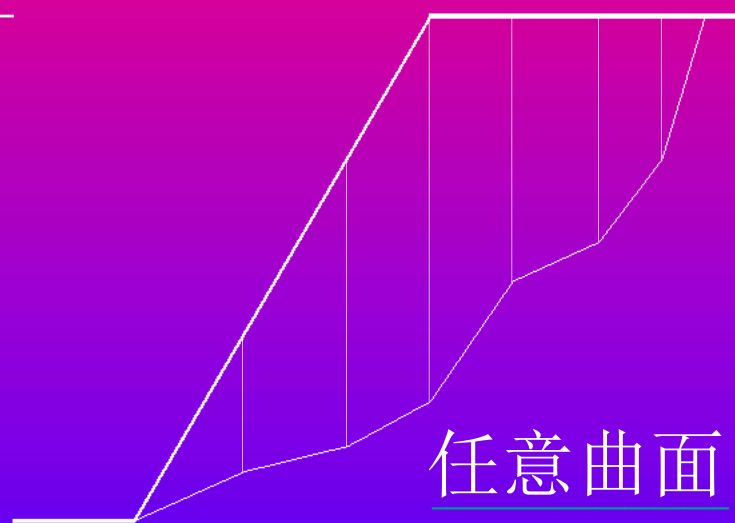
求的滑弧中心。作 BE 弧，

则 BEG 为所求滑面。



# 曲折滑面滑坡的稳定性计算

边坡岩体被纵横交错的地质断裂面切割，由这些断裂面形成的滑面，往往不是平面或圆弧等规则形状的，而是具某一曲折形状。

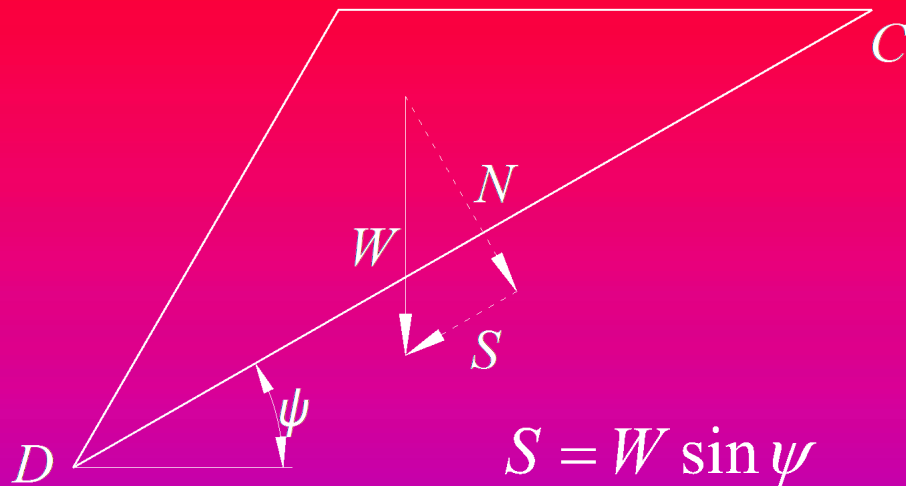


在进行稳定性计算时，通常将滑体分为若干条块（可以用竖直界面划分，也可以用倾斜界面划分）。



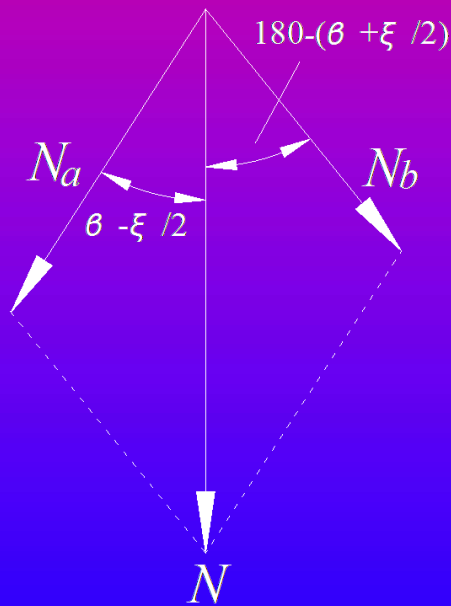
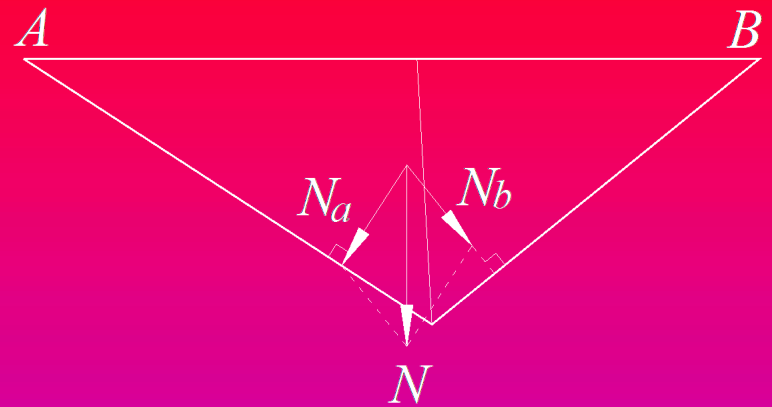


# 楔形体滑坡的稳定性计算2



$$S = W \sin \psi$$

$$N = W \cos \psi$$



根据力的平衡条件:

$$N_a \sin(\beta - \xi / 2) - N_b \sin(\beta + \xi / 2) = 0$$

$$N_a \cos(\beta - \xi / 2) - N_b \cos(\beta + \xi / 2) = W \cos \psi$$

联立求解得:

$$N_a = \frac{W \cos \psi \sin\left(\beta + \frac{\xi}{2}\right)}{\sin \xi}, \quad N_b = \frac{W \cos \psi \sin\left(\beta - \frac{\xi}{2}\right)}{\sin \xi}$$

# 楔形体滑坡的稳定性计算3

如果结构面 $a$ 、 $b$ 的面积分别为 $S_a$ 和 $S_b$ ，内聚力和内摩擦角分别为 $C_a$ 、 $C_b$ 、 $\varphi_a$ 、 $\phi_b$ ，则楔体的抗滑力为

$$\text{抗滑力} = C_a S_a + C_b S_b + N_a \tan \phi_a + N_b \tan \phi_b$$

楔体的稳定系数 $F_s$ ：

$$F_s = \frac{\text{抗滑力}}{\text{下滑力}} = \frac{C_a S_a + C_b S_b + N_a \tan \phi_a + N_b \tan \phi_b}{W \sin \psi}$$

如果 $C_a = C_b = 0$ ， $\varphi_a = \phi_b = \phi$ ，则 
$$F_s = \frac{(N_a + N_b) \tan \phi}{W \sin \psi}$$

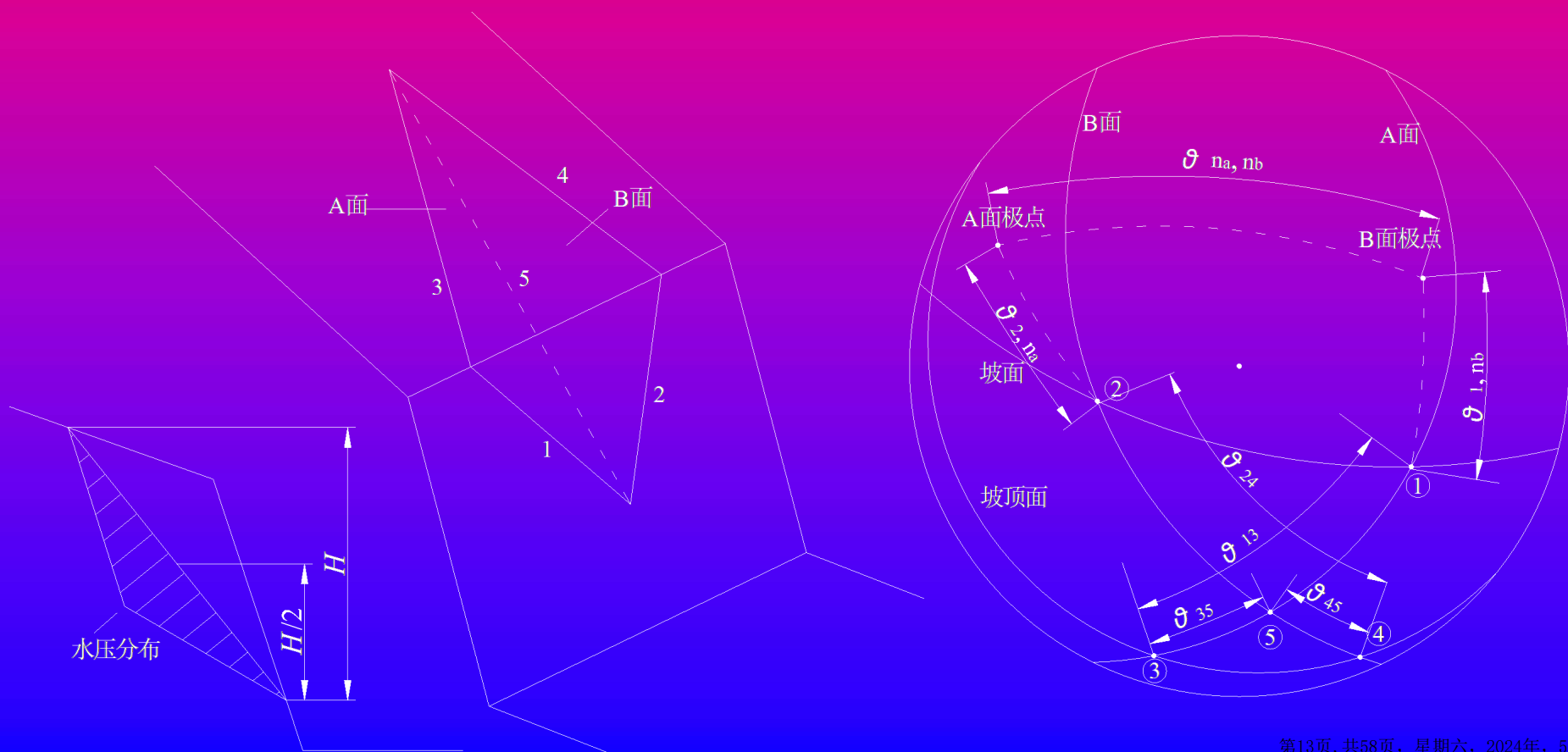
将 $N_a$ 、 $N_b$ 的表达式代入可得

$$F_s = \frac{\sin \beta}{\sin \frac{\xi}{2}} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \psi}$$



# 楔形体滑坡的E. Hoek图解法

E. Hoek法是将边坡面、坡顶面和两个结构面绘制在赤平极射投影图上，4个圆弧有5个交点，分别代表了5条线，各线之间的夹角可在图中测出。



# 楔形体滑坡的E. Hoek图解法

根据测得的角度，求出楔体的几何形状参数：

$$X = \frac{\sin \theta_{24}}{\sin \theta_{45} \cos \theta_{2,na}},$$

$$Y = \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{35} \cos \theta_{1,nb}},$$

$$A = \frac{\cos \phi_a - \cos \phi_b \cos \theta_{na,nb}}{\sin \psi_5 \sin^2 \theta_{na,nb}},$$

$$B = \frac{\cos \phi_b - \cos \phi_a \cos \theta_{na,nb}}{\sin \psi_5 \sin^2 \theta_{na,nb}}.$$

楔体的稳定系数为：

$$F_s = \frac{3}{\gamma H} (C_a \cdot X + C_b \cdot Y) + \left( A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot X \right) \tan \phi_a + \left( B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot Y \right) \tan \phi_b.$$

如果 $C_a=C_b=C$ 、 $\phi_a=\phi_b=\phi$ ，又没有水的情况下：

$$F_s = \frac{3C}{\gamma H} (X + Y) + (A + B) \tan \phi.$$

# 球投影法分析边坡的稳定性

用赤平极射投影定量地分析边坡的稳定性方法

称为球投影法。

## n 基本知识

- ★ 摩擦锥
- ★ 摩擦圆
- ★ 广义摩擦锥
- ★ 裂隙组的摩擦圆

## n 平面滑坡分析

## n 折面滑坡分析

## n 楔体滑坡分析

# 崩落及屈曲滑坡的计算

崩落主要出现在坚硬岩石陡边坡中；

岩体被几

块状体所

条件这种岩体

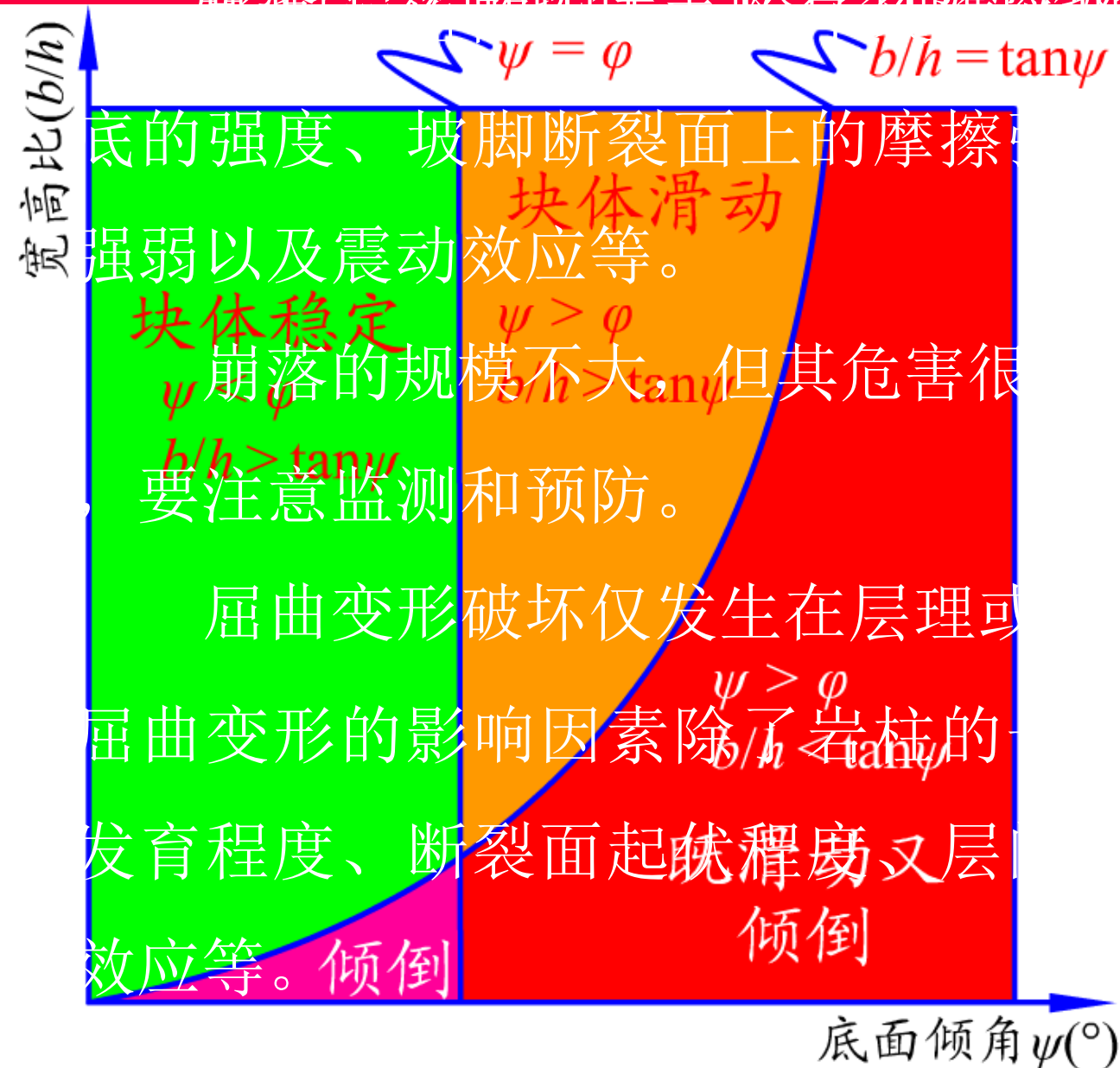
表示岩体的转  
由于突然性的  
同样产状的

两组裂隙，由于  
发育的岩体的高

比不同，一个边  
外，还有裂隙的  
坡有崩落的危险，  
接强弱以及震动

全的。

ψ



岩体的强度、坡脚断裂面上的摩擦  
强弱以及震动效应等。

块体稳定  
崩落的规模不大，但其危害很  
要注意监测和预防。

屈曲变形破坏仅发生在层理或

屈曲变形的影响因素除了岩柱的  
发育程度、断裂面起伏释层  
效应等。倾倒



# 数值分析法简介

有限元法是在连续介质力学的基础上，将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

有限元法的基本原理是将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

有限元法的基本原理是将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

有限元法的基本原理是将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

有限元法的基本原理是将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

有限元法的基本原理是将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

有限元法的基本原理是将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

有限元法的基本原理是将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

有限元法的基本原理是将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

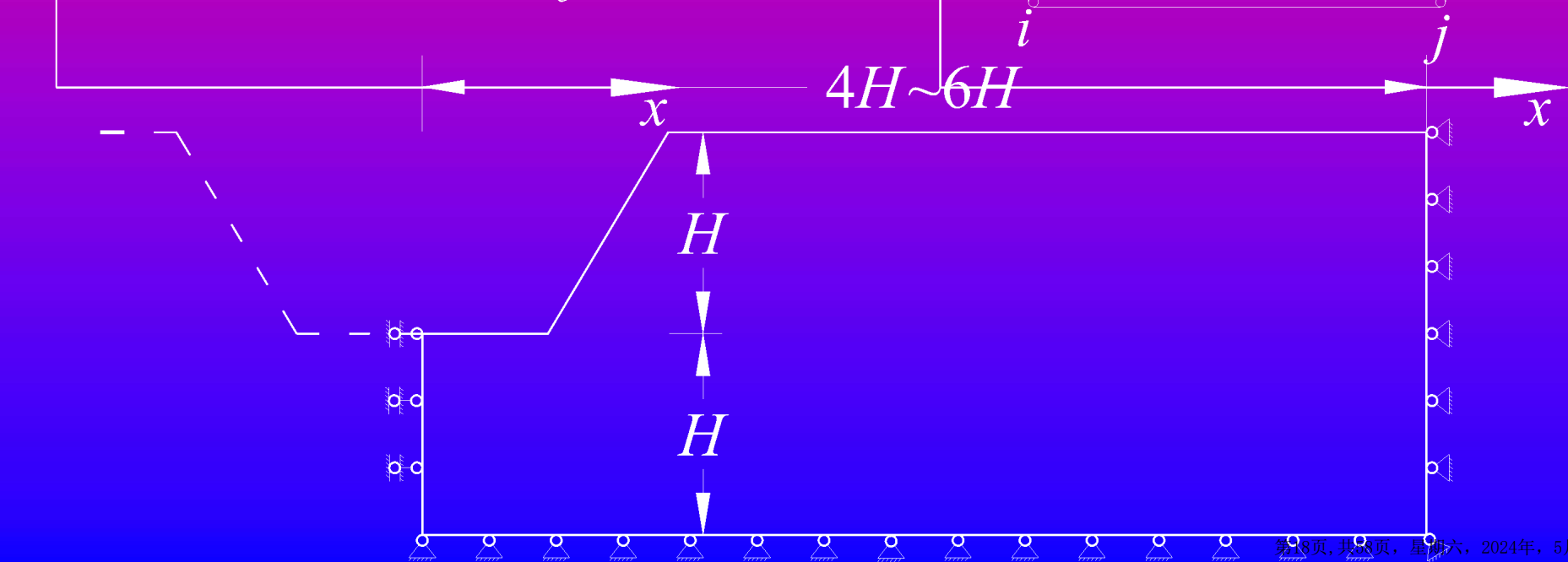
有限元法的基本原理是将连续体离散为有限单元，通过求解有限单元的位移场，来近似求解整个结构的力学问题。

# 有限单元法

FEM通常采用三角形和四边形单元。

FEM已有许多商业软件，我们要作的工作就是确定计算范围、给定边界条件，输入岩土物理力学参数，最后对计算结果进行整理分析。

对于走向长度远大于高度的边坡，通常按平面问题来分析，范围和边界条件可按下图选取。

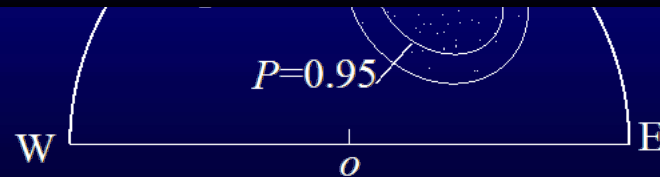
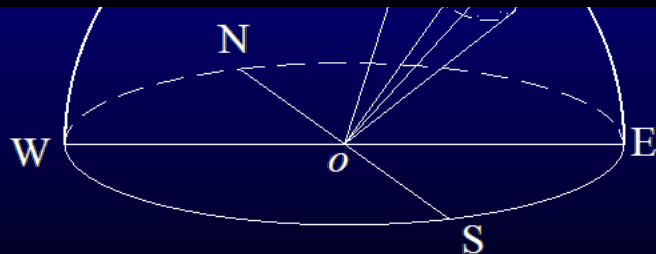
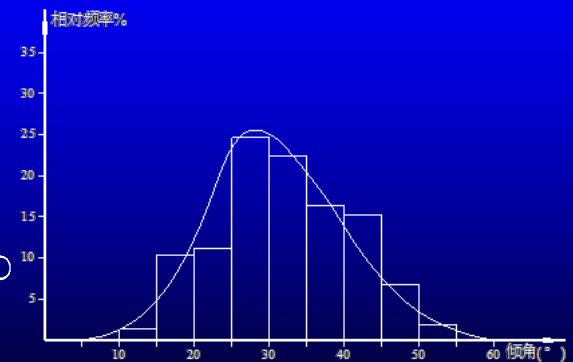


# 概率分析法简介

节理的方位用节理面法线在三维空间的单位矢量来表示，或用节理的极点表示。同一组节理的方位通常服从三维正态分布。

同一组内的节理倾角分布服从正态分布，其概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad -\infty < x < +\infty$$



# 平面滑动概率分析

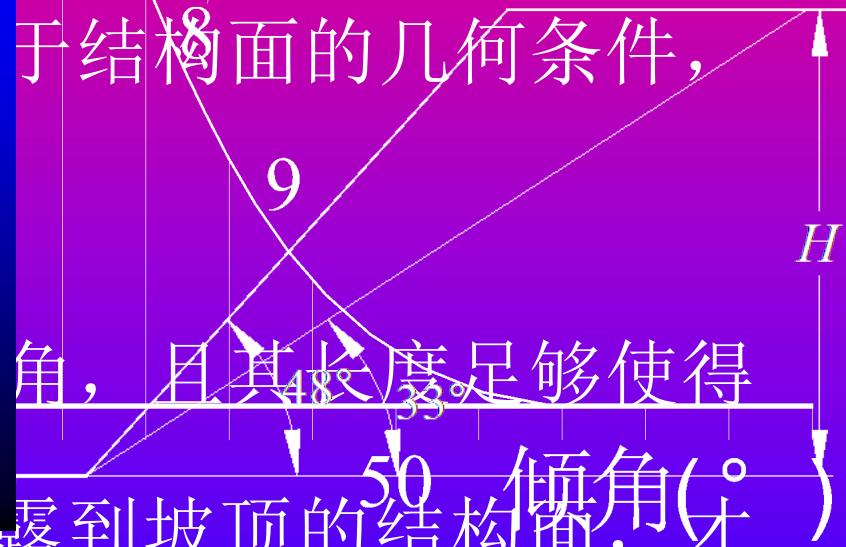
结构面摩擦角  $\phi$  的破坏概率  $P_{Di}$  的以组概率  $P_{Di}$  个独立

平均倾角  $\theta$  事件概率 (倾角概率  $P_{\theta}$  和长度概率  $P_{L_i}$ ) 的

标准差  $\sigma = 4^\circ$  事件概率 (破坏面的存在概率  $P_{Ei}$  和沿这些面产生的滑

根据已知的坡高和坡角计算某一倾角下(如第1组的31°、第2组的33°等等)构成滑面的最小长度(如  $L_1$ 、 $L_2$  等), 再根据长度累积概率曲线计算大于等于最小长度的概率 ( $P_{L1}$ ,  $P_{L2}$  等)。

$$P_{L2} = \exp(-BL_2^C)$$



# 平面滑动概率分析

平面滑面存在概率也就是滑面的几何概率，它也是两个独立事件概率(倾角概率 $P_D$  和长度概率 $P_L$ ) 的复合概率： $P_{Ei} = P_{Di} \cdot P_{Li}$ 。 $P_{Di}$  和 $P_{Li}$  都可以由相应的概率分布曲线下的面积求得。

$P_E$  的计算过程：

$P_S$  的计算过程：

根据 $P_E$ 和 $P_S$ 的分布用Monte Carlo法求得边坡沿某组量(梅雷需要的400~500组)的抽样值，并用公式

$$f_i = \frac{C + N_i \tan \varphi}{T_i}$$

( $i=1,2,L,n$ ) 计算稳定系数， $f_i < 1.0$  的次数所占百分比

就是第  $i$  组的滑动概率。
$$P_{Fi} = \sum P_{Ei} = \sum P_{Di} P_{Li} P_{Si}$$

# 楔体滑动概率分析

楔体滑动的条件有两个：一是构成楔体的两个结构面的交线的倾角应缓于边坡角；二是这些缓倾角的交线还应有足够的长度，使其在边坡上下均有出露。

交线的长度取决于左右结构面的长度，而左右两结构面的长度概率是相互独立的，所以有： $P_{Li} = P_{LLi} P_{LRI}$

滑动概率的计算与平面破坏概率分析法相同。

某一符合滑动条件的楔体的破坏概率 $P_{Fi}$ 为：

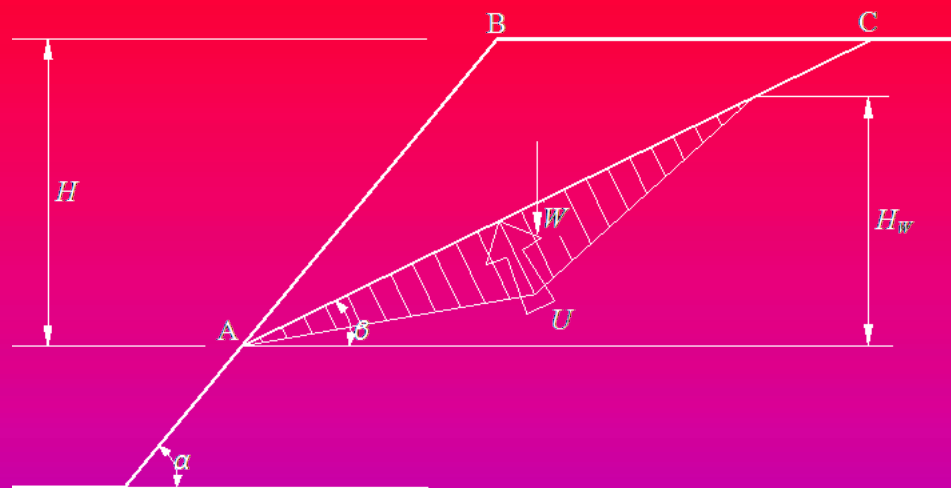
$$P_{Fi} = P_{Li} P_{Si}$$

所有符合滑动条件的楔体的破坏概率 $P_F$ 为：

$$P_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{Li} P_{Si}$$

# 边坡内有确定的滑面但没有竖直张裂缝

假设：①滑体不透水，水自在坡顶的滑面渗入，经滑面从坡面流出，水压呈线性变化；②滑体的重力 $W$ 、水压力 $U$ 通过滑体的重心。



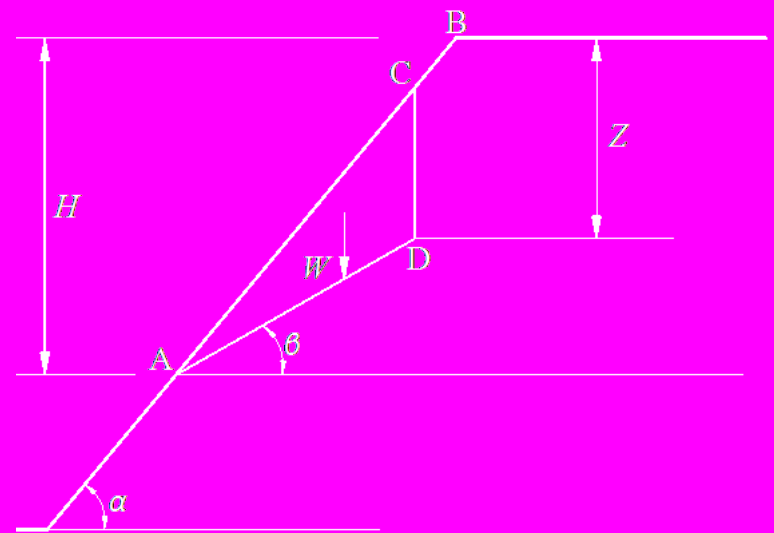
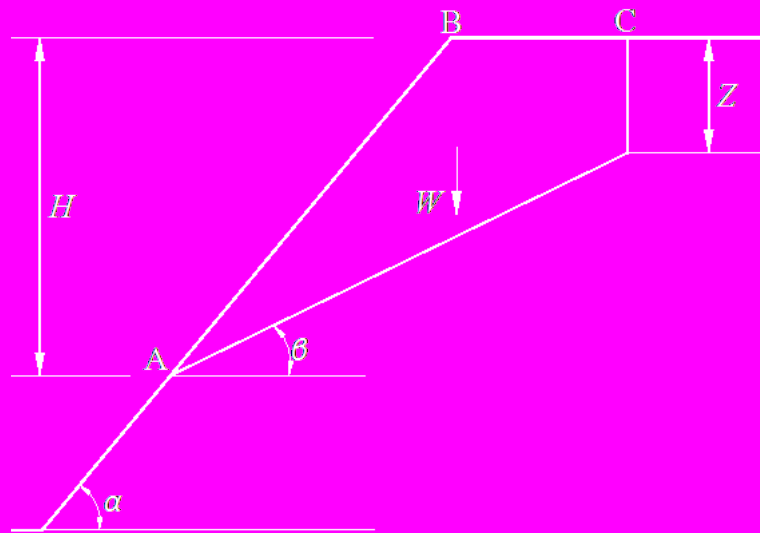
稳定系数为 
$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + \frac{1}{W \sin \beta} \left( \frac{CH}{\sin \beta} - U \tan \phi \right)$$

式中 $W$ 为单位走向长度滑体的重量：
$$W = \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

$U$ 为单位走向长度上水的浮托力：
$$U = \frac{H_w^2}{4 \sin \beta} \cdot \gamma_w$$

当 $C=0$ 、 $H_w=0$ 时：
$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

# 边坡内有确定的滑面及竖直张裂缝



当张裂隙位于坡顶时，

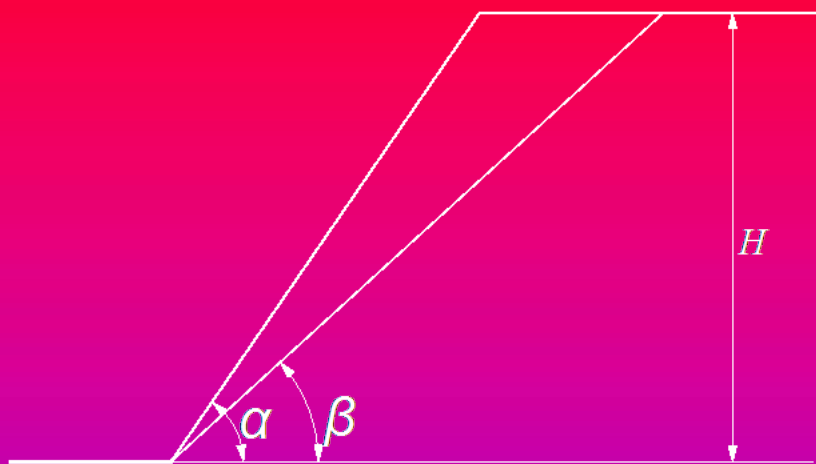
$$W = \frac{\gamma}{2} H^2 \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{Z}{H} \right)^2 \right] \cot \beta - \cot \alpha \right\}$$

当张裂隙位于坡面时，

$$W = \frac{\gamma}{2} H^2 \left[ \left( 1 - \frac{Z}{H} \right)^2 \cot \beta (\cot \beta \tan \alpha - 1) \right]$$



# 边坡内没有确定的滑面，滑面需经分析求得



最危险滑面的倾角  $\beta_{cr}$

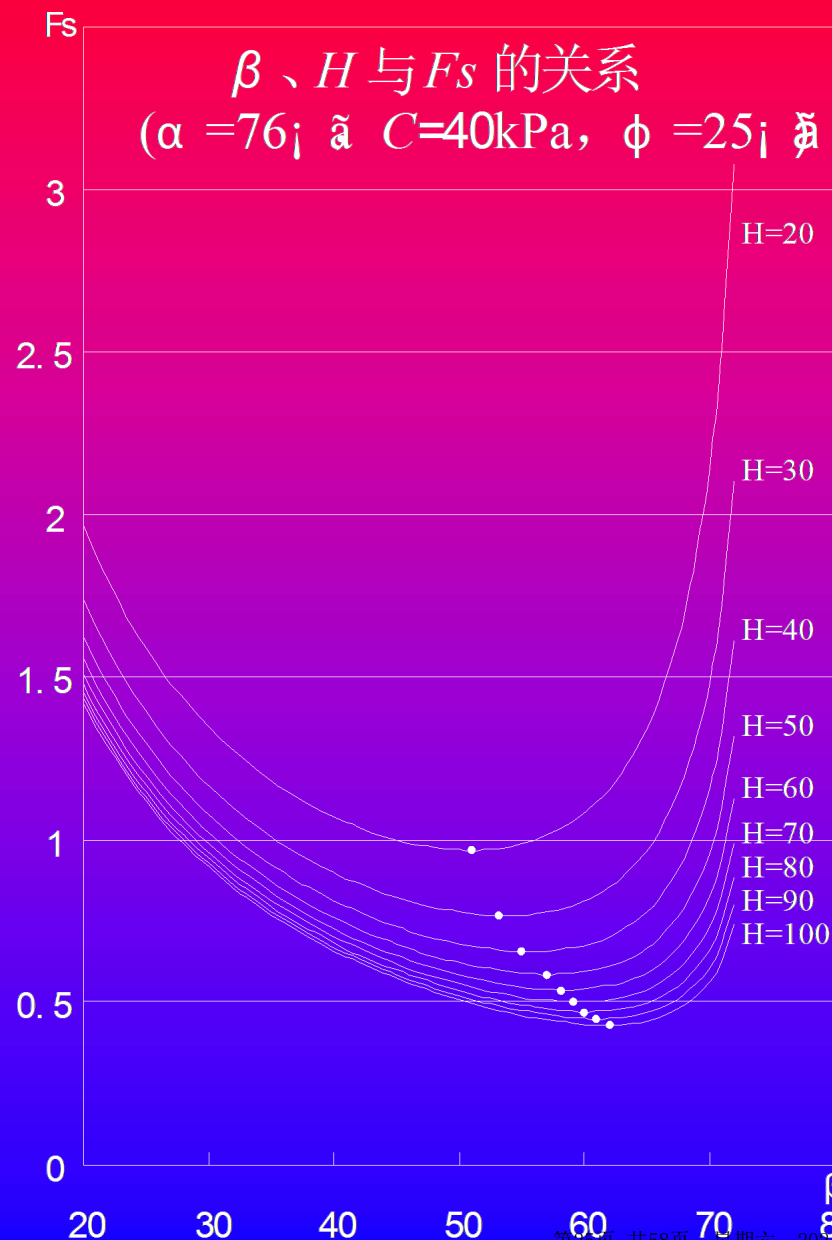
$$\beta_{cr} = \frac{1}{2}(\alpha + \varphi)$$

这个公式的推导有问题。

应用  $\frac{dF_s}{d\beta} = 0$  进行推导，因

为  $\beta_{cr}$  是与  $F_s$  有关。

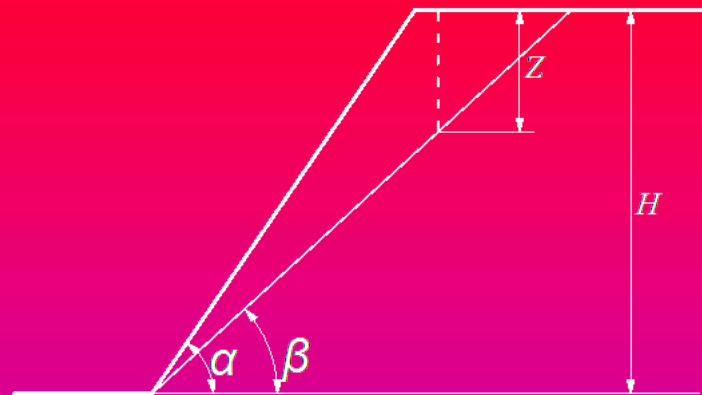
计算  $\beta_{cr}$



# 边坡内没有确定位置的竖直张裂缝

设张裂缝深度为 $Z$ ，滑体

的稳定性系数 $F_s$ 可表示为：



$$F_s = \frac{2C(1-Z/H)}{\gamma H \left\{ 1 - (Z/H)^2 \right\} / \tan \beta - 1 / \tan \alpha} \sin^2 \beta + \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

求 $F_s$ 对 $Z$ 的偏导数，并令  $\frac{dF_s}{dZ} = 0$

可求出最危险的张裂缝高度(临界高度) $Z_{cr}$ ：

$$Z_{cr} = H \cdot \left( 1 - \sqrt{\tan \beta / \tan \alpha} \right)$$

# Fellenius条分法

Fellenius条分法的具体步骤是：①选择将滑面划分

为若干条块，以滑面圆心的距离为半径在边坡内作一圆弧。②将圆弧以滑面圆心为轴，用若干条块代替。

③根据各条块的几何形状确定每条块的重量 $W_i$ 、底面长度 $l_i$ 、底面倾角 $\alpha_i$ ；④求出各条块对O点的力矩；⑤根据 $F_s$ 的定义求出该滑面对应的稳定系数；⑥

变滑面圆心的位置，求出一系列的 $F_s$ 值，其中最小的 $F_s$ 值即为边坡的稳定系数。

就是边坡的稳定系数。

就是边坡的稳定系数。

就是边坡的稳定系数。

就是边坡的稳定系数。

# Bishop法

Bishop法是对Fellenius条分法的一种改良，其求解步骤与Fellenius条分法是相同的。只是考虑作用在每一条块上的力不同，Bishop法多考虑了竖直分界面上的水平反力( $E_i$ 、 $E_{i+1}$ )和剪切反力( $T_i$ 、 $T_{i+1}$ )以及底滑面上的水压力 $U_i$ 。

Bishop法有两种不同的解题方法——精确解法和简化解法，后者与前者相比，误差小于1%

# Bishop精确解法

综合按照滑体极限平衡时沿滑动面力矩平衡条件于虚有  
 在使用精确Bishop法时，先直接选择一组  $(T_i - T_{i+1})$

使其满足  $\sum_{i=1}^n \frac{W_i - T_i \tan \alpha_i}{\sin \alpha_i} = 0$  (这很容易)。但同时满足  $\sum_{i=1}^n (E_i - E_{i+1}) = 0$  就非常困难。

按照Mohr-Coulumb准则，当边坡破坏之前底滑面  
 $(E_i - E_{i+1}) = 0$  就非常困难。因为  $(T_i - T_{i+1}) \cos \alpha_i = (E_i - E_{i+1}) \sin \alpha_{i+1}$  有这  
 上的各力应满足  $S_i = (C_i + N_i \tan \phi) / F_s$ ，其中  $F_s$  为强度储备  
 要通过上式求解  $F_s$  值，需要先假设  $\alpha_i$  和  $(T_i - T_{i+1})$  的值， $\alpha_i$   
 系数(或称为稳定系数)。

显然，要让  $\sum_{i=1}^n (E_i - E_{i+1}) = 0$ ，就必需使  
 另外根据稳定系数的定义有  $F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i + N_i \tan \phi)}{\sum_{i=1}^n [S_i / \cos \alpha_i - (W_i + T_i - T_{i+1}) \tan \alpha_i] \sin \alpha_i}$   
 在极限平衡条件下，当坡顶和坡面没有外载时，对于整个  
 滑体应满足： $\sum_{i=1}^n (T_i - T_{i+1}) = 0$ 、 $\sum_{i=1}^n (E_i - E_{i+1}) = 0$

即满足力矩平衡条件需要进行试算的试算满足力矩平衡

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/538042056122006115>