

第8章 边坡稳定分析

Stability analysis of soil slopes

本章提示：

本章提示：边坡稳定分析是土力学中一个实践性很强的内容。本章主要介绍了土质边坡稳定分析中常用的几种方法，包括原理、计算过程。并给出了相应的算例和详细的计算过程，既可手算，又可电算，在工程中使用电算较多，掌握一门计算机语言和一定的编程技巧可加深对边坡稳定的理解。还简略介绍了地下水作用下边坡稳定的计算及施工因素的考虑等。

主要内容

- 1 概述
- 2 表层滑动的稳定分析
- 3 深层滑动的稳定分析
- 4 边坡稳定分析的工程考虑

§ 1 概述

1.1 土坡：具有倾斜面的土体

1. 天然土坡

- 江、河、湖、海岸坡



边坡稳定分析是岩土工程实践和研究领域的主要课题之一。边坡按其材料组成为岩质边坡、土质边坡和过渡型边坡。岩质边坡的稳定性主要受结构面控制，常采用楔体分析法。土质边坡又简称土坡，又可分为砂性土边坡和黏性土边坡，砂性土边坡分析起来简单，而黏性土边坡相对较为复杂。土坡工程中常采用极限平衡法，所谓过渡型边坡是指岩石和土混杂，可能土层下卧岩层等情况存在，这种情况分析起来也较复杂。

1. 天然土坡

- 山、岭、丘、岗、天然坡



2. 人工土坡

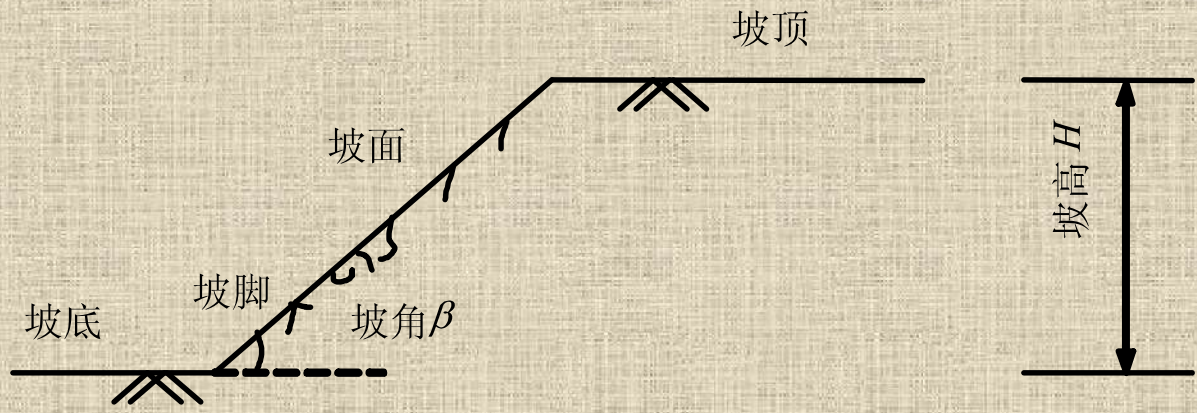
• 挖方：沟、渠、坑、池

露天矿



本章主要讲述土坡，不讨论岩质边坡。土坡按其形成的原因有天然土坡和人工土坡，前者是在自然应力的作用下形成的，若无其他外部扰动基本保持稳定，形成时间相对较长。人工土坡则是通过填方或挖方形成的，时间相对较短，一般来说需要分析其稳定性。

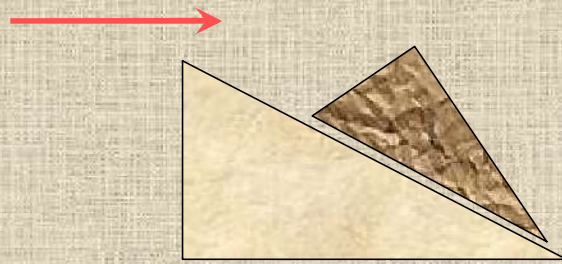
边坡组成要素



1.2. 滑坡

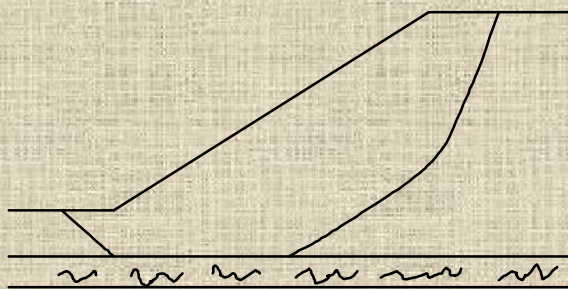
什么是滑坡？
为什么会滑坡？

一部分土体在外因作用下，相对于另一部分土体滑动

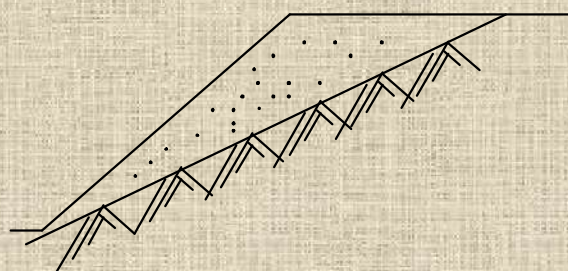


在进行边坡稳定分析之前，需要确定边坡的滑动模式。土坡的滑动模式有多种，根据滑动的诱因，可分为推动式滑坡和牵引式滑坡。推动式滑坡是由于坡顶超载或地震等因素导致下滑力大于抗滑力而失稳。牵引式滑坡主要是因为坡脚受到切割导致抗滑力减小而破坏。按滑动面的类型可分为圆弧型滑动、折线滑动、组合滑动，滑动面类型与土层的强度参数、土层分布和外界条件等因素有关

黏性土边坡的滑动

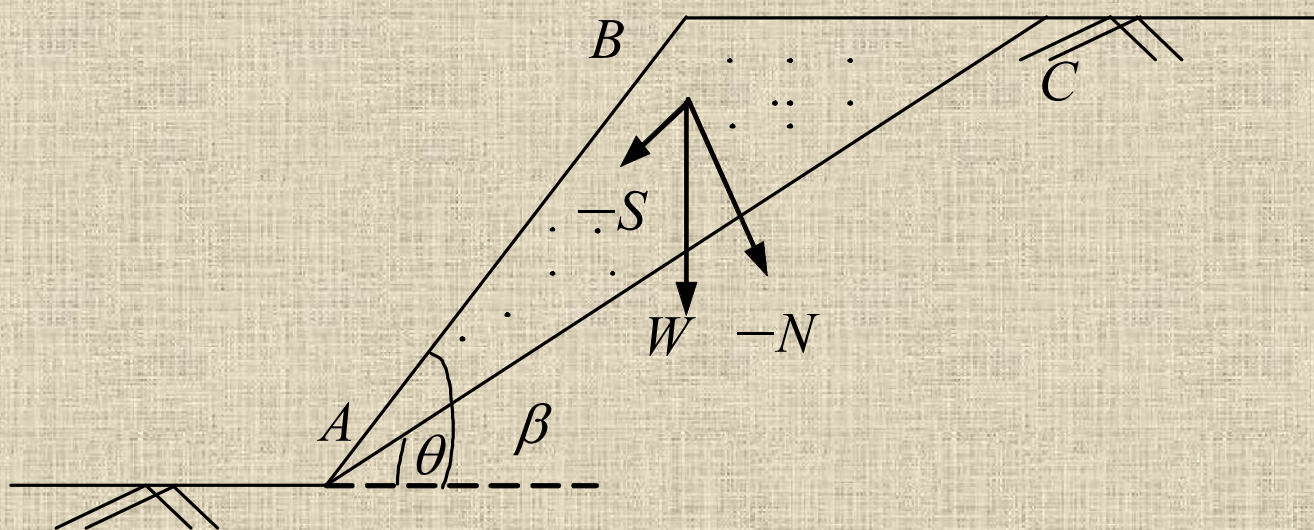


(a) 下伏软弱土层的滑动面形式



(b) 下伏硬层的滑动面形式

砂性土边坡稳定分析



云南徐村水电站溢洪道土坡滑坡



造成边坡失稳的主要原因包括边坡设计参数的失误(坡过陡、坡角过大)、坡顶超载、渗流及坡脚受到切割。目前判别边坡稳定的方法主要有超载法和折减法。超载法实际上是加大推力,但传统的推力是竖向施加,在增加下滑力的同时也增加了抗滑力,造成力学概念不明确。而强度折减法则是通过降低土体的强度参数从而使边坡达到极限平衡,力学概念明确,在实际工程中使用广泛。毕晓普(Bishop)关于边坡稳定安全系数的定义正好反映了这一点。即将强度参数 c 和 φ 进行如下方式的折减: c/K , $\tan\varphi /K$, 其中 K 为安全系数。对于土质边坡稳定分析来说,常见的边坡为黏性土边坡,这也是本章的主要研究对象。在边坡稳定分析中,主要分析方法有基于上限分析的稳定因数图解法和条分法。



江西省江新洲洲 头北侧塌岸

三峡库区滑坡问题—蓄水



2001年，重庆市云阳县就发生了两次大型滑坡，重庆市武隆边坡失稳造成79人死亡。国务院已经决定拨款40亿元，用于三峡库区地质灾害治理。仅重庆就有150多个治理工程。

漫湾滑坡

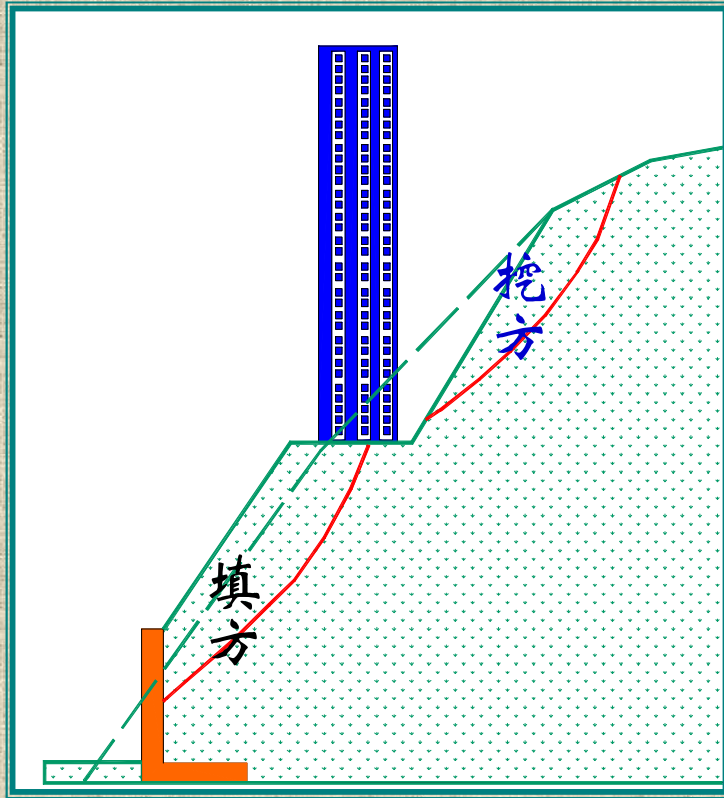


1989年1月8日 坡高103m

地质: 流纹岩中有强风化的密集节理和一个小型不连续面。
电站厂房比计划推迟一年, 修复时安装了大量预应力锚索。

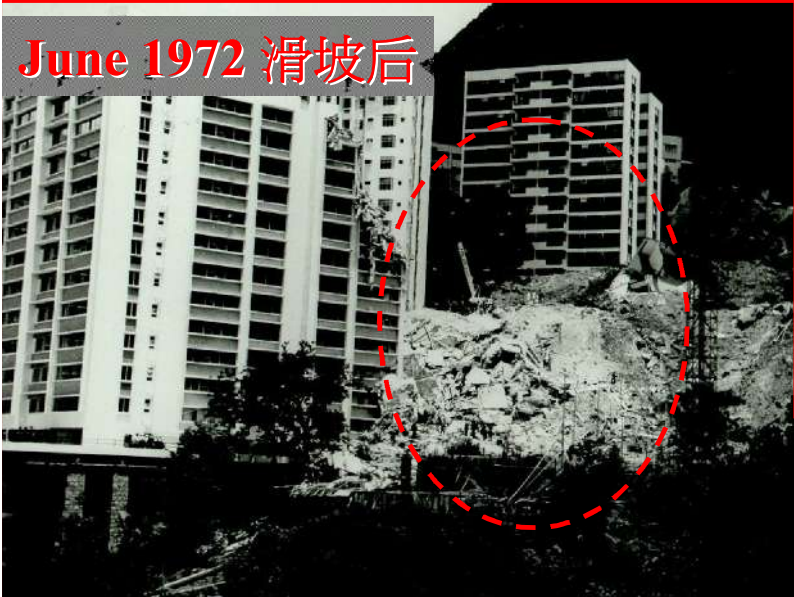
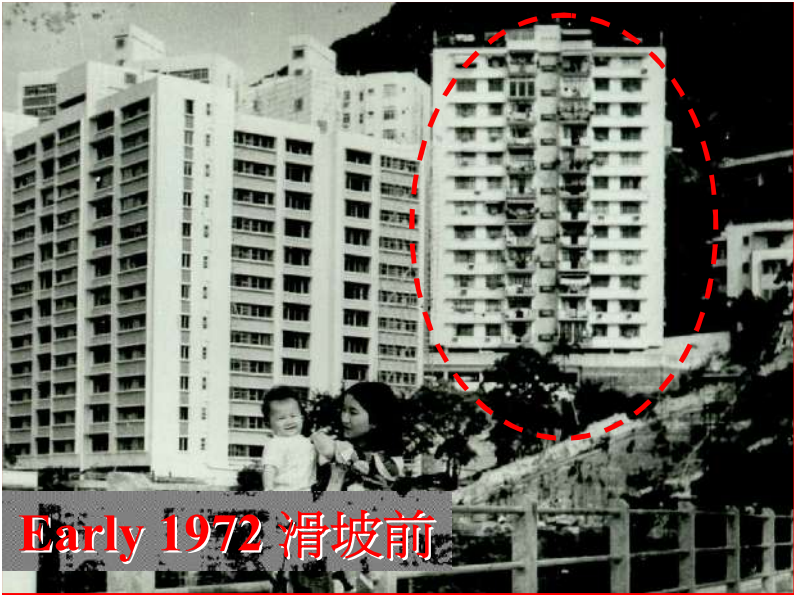
事故:

城市中的滑坡问题 (香港, 重庆)



香港1900年建市，1977年成立土力工程署
港岛1972 Po Shan 滑坡 (~ 20,000 m³)(67 死、20 伤)





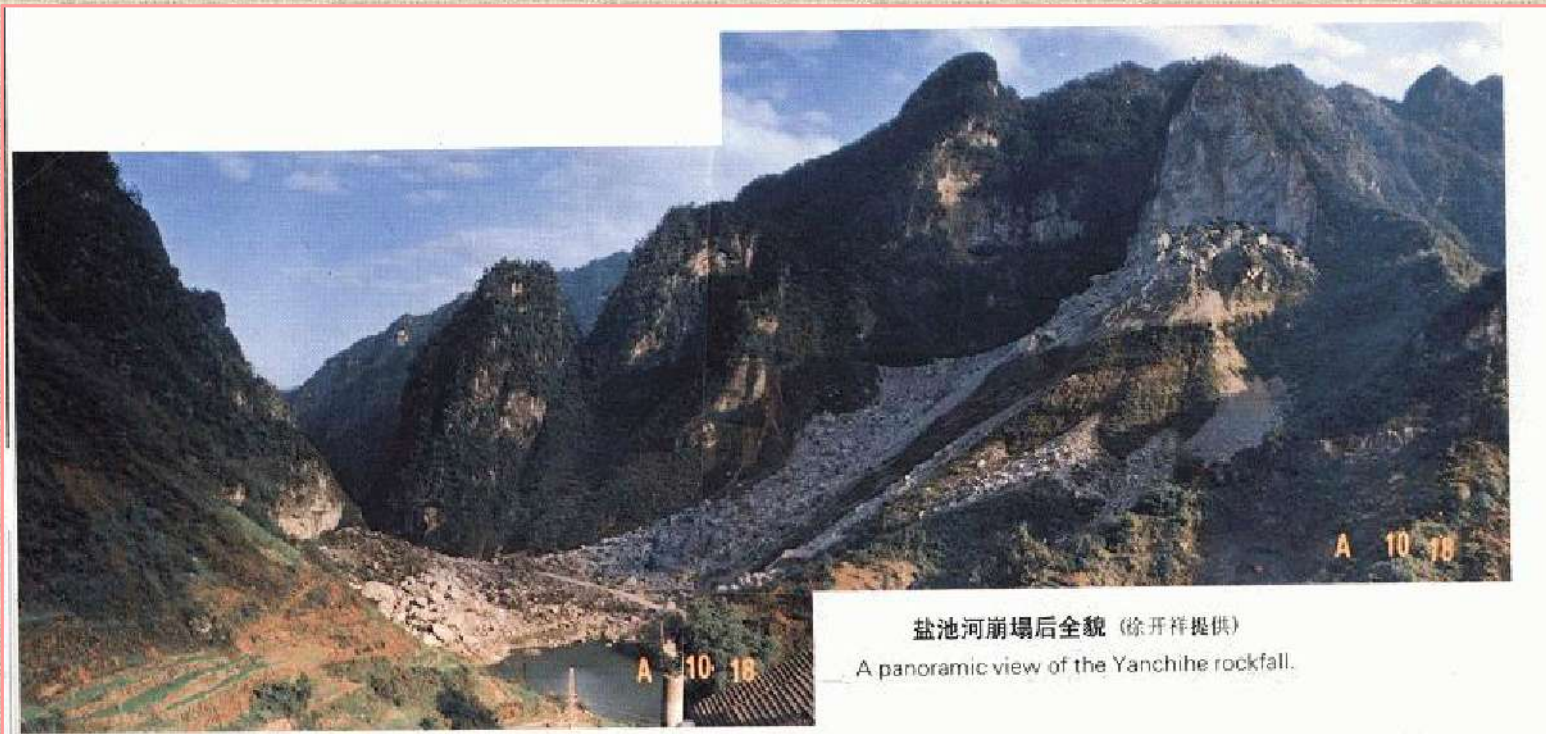
贵阳沙冲路滑坡—平面滑动



龙羊峡库岸滑坡：平面+圆弧滑动



盐池河边坡破坏-崩塌



盐池河崩塌后全貌 (徐开祥提供)

A panoramic view of the Yanchihe rockfall.

2003年7月13日三峡库区沙镇溪发生千将坪滑坡，致使24人失踪。





千将坪滑坡实景

滑坡各因素-实际图

2. 造成滑坡的原因

- 1) 振动：地震、爆破
- 2) 土中含水量和水位变化
- 3) 水流冲刷：使坡脚变陡
- 4) 冻融：冻胀力及融化含水量升高
- 5) 人工开挖：基坑、船闸、坝肩、隧洞出入口

降雨、蓄水、使岩土软化，
坝背水坡浸润线

存在渗透力

原因：

- (1)外界的作用破坏了土体原来的应力平衡状态，增大了滑动面上的滑动动力；
- (2)土体抗剪强度由于受到外界各种因素的影响而降低。

**应如何分析、判断
边坡的稳定性？**

土体滑坡形态格式各样，主要取决于土的性质和工程地质构造。

1. 粗粒土坡的滑坡深度浅、形状接近于平面；
2. 粘性土滑坡面深度到坡体内，均质粘性土坡滑动面的形状按塑性理论分析为对数螺旋曲面，在计算中通常以圆弧面代替。
3. 判断边坡的稳定性，是以计算滑动土体的抗滑力和滑动力的比值为依据。比值大于1为安全，等于1为达到极限状态，小于1不安全。

§ 2 表层滑动的稳定性分析

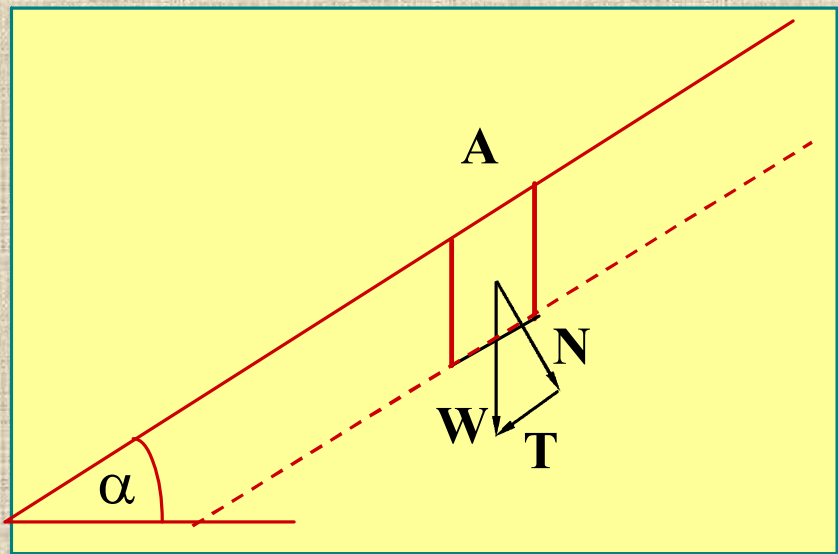
土坡对象：无粘性土

破坏形式：表面浅层滑坡

强度参数：内摩擦角 φ

考察一无限长坡，坡角为 α

分析一微单元A



2.1 无渗流的无限长土坡

1) 微单元A自重: $W = \gamma \Delta V$

2) 沿坡滑动力: $T = W \sin \alpha$

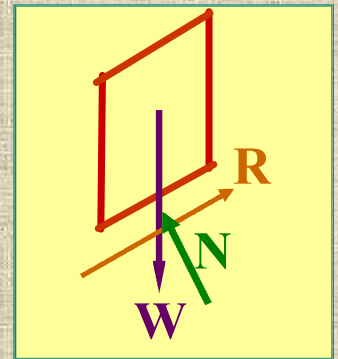
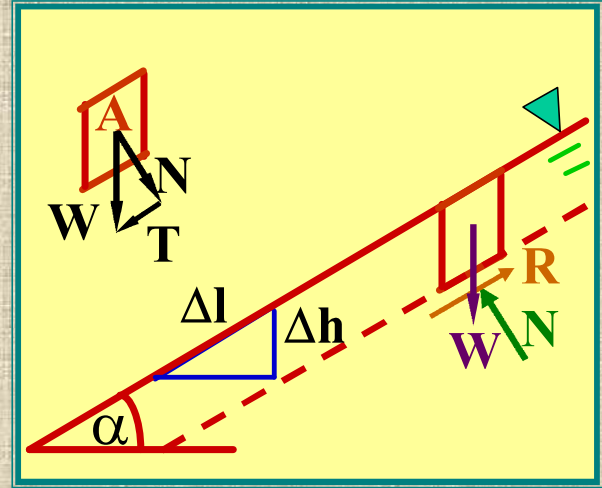
3) 对坡面压力: $N = W \cos \alpha$

(由于无限土坡两侧作用力抵消)

4) 抗滑力: $R = N \tan \varphi = W \cos \alpha \tan \varphi$

5) 抗滑安全系数:

$$F_s = \frac{\text{抗滑力}}{\text{滑动力}} = \frac{R}{T} = \frac{W \cos \alpha}{W \sin \alpha} \tan \varphi = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

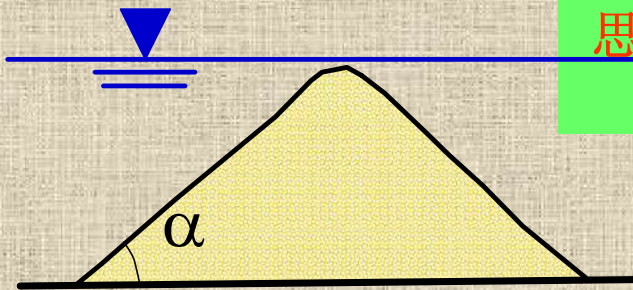
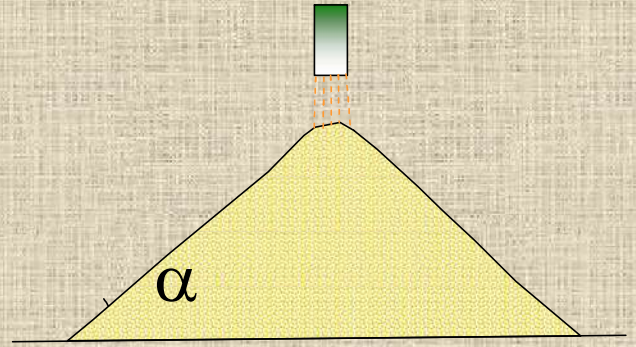


无渗流的无限长土坡讨论

$$F_s = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\alpha}$$

- 当 $\alpha=\varphi$ 时, $F_s=1.0$, 天然休止角
- 可见安全系数与土容重 γ 无关
- 与所选的微单元大小无关。

即坡内任一点或平行于坡的任一滑裂面上安全系数 F_s 都相等



思考题: 干坡与静水下, 若坡中 φ 不变, F_s 有什么变化



2.2有渗流情况

1. 有渗流砂土边坡安全系数

(1) 取微单元A的土骨架为隔离体，作用力自重： $W' = \gamma' \Delta V$

渗透力： $J = j \Delta V = i \gamma_w \Delta V = \sin \alpha \gamma_w \Delta V$

底面支撑力N，底面抗滑力R

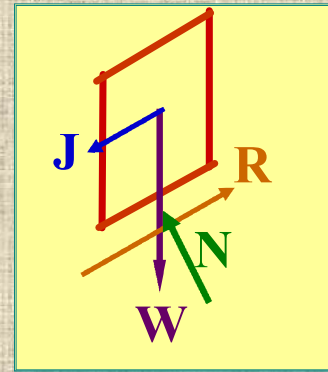
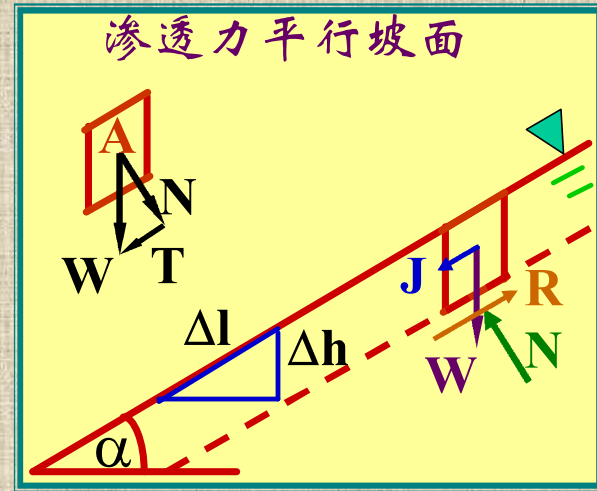
(2) 滑动力：

$$T' + J = (\gamma' \sin \alpha + \gamma_w \sin \alpha) \Delta V = \gamma_{sat} \sin \alpha \Delta V$$

(3) 抗滑力： $R = N \tan \phi = \gamma' \Delta V \cos \alpha \tan \phi$

(4) 抗滑安全系数：

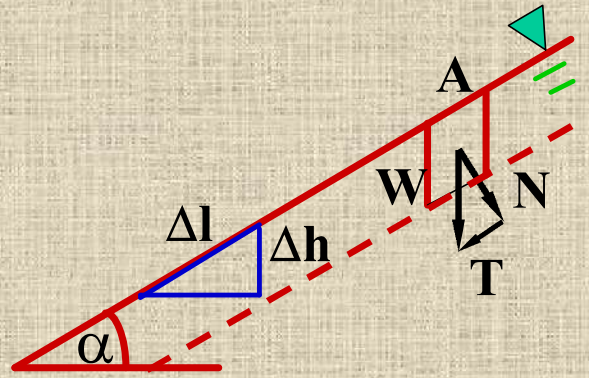
$$F_s = \frac{R}{T' + J} = \frac{\gamma' \cos \alpha}{\gamma_{sat} \sin \alpha} \tan \phi = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$



2.有沿坡渗流情况

3. 讨论

$$F_s = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \frac{\text{tg}\phi}{\text{tg}\alpha}$$

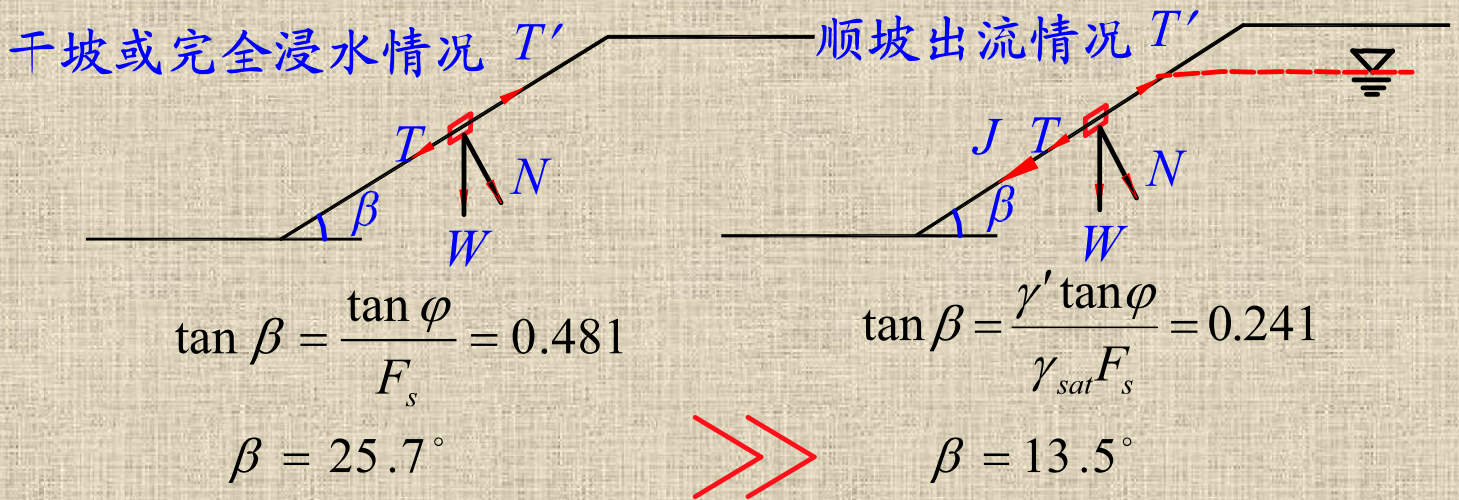


- $\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \approx 0.5$ 与无渗流比较 F_s 减小近一倍

注: 意味着原来稳定的坡, 有沿坡渗流时可能破坏

- 与容重有关
- 与所选 ΔV 大小无关, 亦即在这种坡中各点安全系数相同

【例8.1】均质无粘性土土坡，其饱和重度 $\gamma_{sat} = 20.0 \text{ kN/m}^3$ ，内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$ ，若要求该土坡的稳定安全系数为1.20，在干坡情况下以及坡面有顺坡渗流时其坡角应为多少度？



有渗流作用的土坡比无渗流作用的土坡，其稳定坡角要小得多

2.3 本节小结

边坡对象：无粘性土土坡

破坏形式：表面浅层滑坡

分析方法：考虑为无限长坡

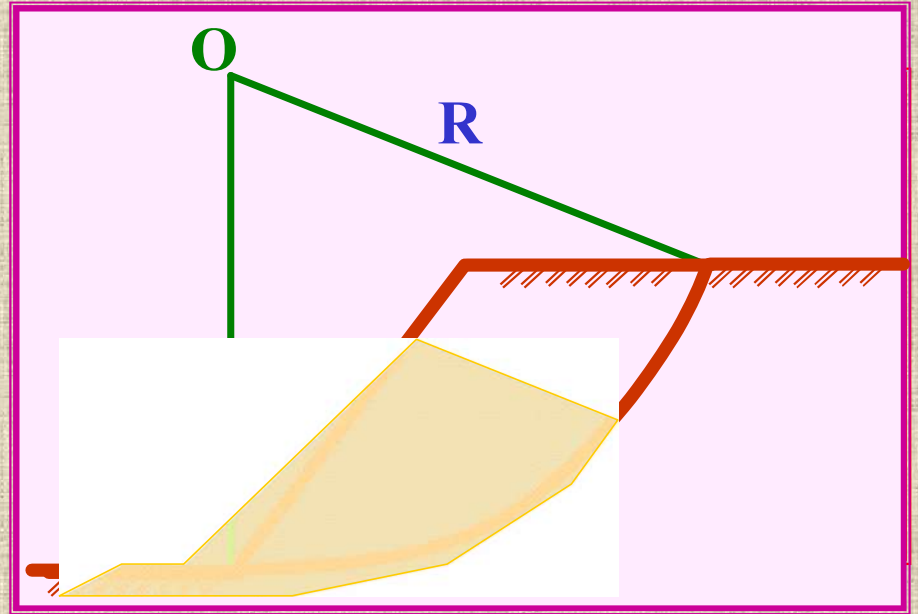
安全系数： $k = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$; k 值一般取 1.25 ~ 1.3

§ 3 深层滑动的稳定性分析

土层性质：粘性土、土质均匀

强度参数：粘聚力 C ，内摩擦角 φ

破坏形式：实际滑坡表明，对于粘性土、均匀土坡，在平面应变条件下，其滑动面与圆弧（圆柱面）近似。



3.1 概述

彼得森 (K.E.Petterson) 于 1916 首先提出，采用圆弧滑动面分析土坡稳定性。此后费伦纽斯 (W.Fellenius, 1927) 和泰勒 (D.W.Taylor, 1948) 又做了一些改进。

总体说有两种分析方法：

(1) 整体圆弧滑动法。主要适用于均质简单土坡。所谓简单土坡是指土坡的坡度不变，顶面和地面水平，且土质均匀，无地下水。

(2) 条分法。条分法对非均质土坡、土坡外形复杂、土坡部分在水下情况均适用。

对于均质黏性土简单土坡(即土坡上下两个面水平,坡面为平面)来说,滑动面接近于圆弧形。圆弧滑动面形式有三种。

(1) 坡脚圆, 圆弧滑动面通过坡脚。

(2) 坡面圆, 圆弧滑动面通过坡面某一点。

(3) 中点圆, 圆弧滑动面通过坡脚以外的某一点, 且圆心位于坡面的竖直中线上。

上述三种圆的形成与坡角 β , 土强度指标, 土中硬层等因素有关。

3.2 圆弧滑动面的整体稳定分析

1. 基本概念

土坡在自重作用下产生如图的滑动，根据抗滑动力矩和滑动力矩的平衡关系，有土坡稳定性安全系数如下：

$$K = \frac{M_f}{M_s} = \frac{\tau_f \widehat{LR}}{Wa}$$

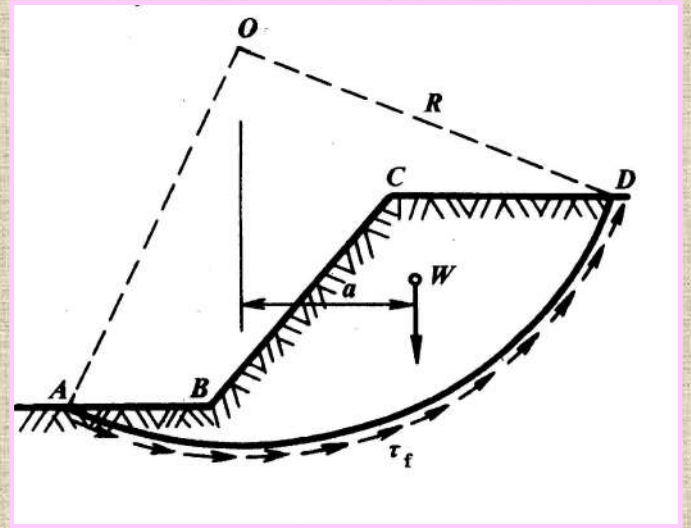


图8.7 土体的整体稳定分析

3.2 圆弧滑动面的整体稳定分析

2. 分析计算方法

1) 假设条件:

- 均质土
- 二维
- 圆弧滑动面
- 滑动土体呈刚性转动
- 在滑动面上处于极限平衡状态

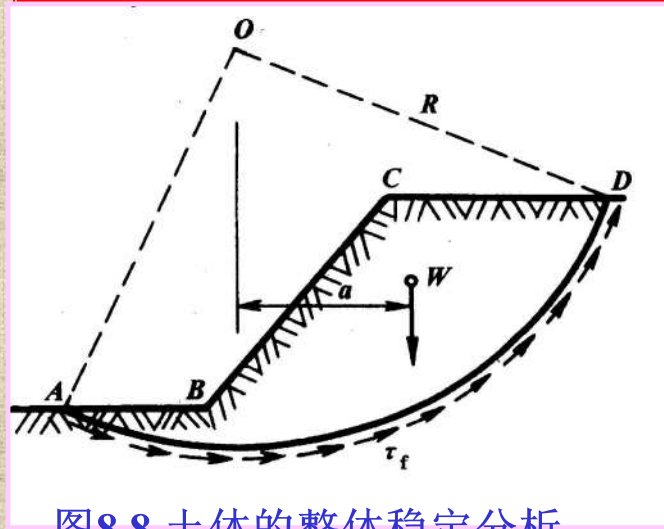
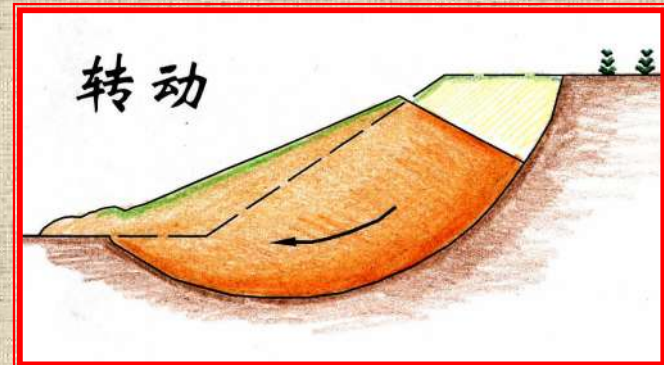


图8.8 土体的整体稳定分析

3.2 圆弧滑动面的整体稳定分析

2) 平衡条件 (各力对O的力矩平衡)

(1) 滑动力矩: $M_s = W \cdot d$

(2) 抗滑力矩:

当 $\varphi=0$ (粘土不排水强度) 时,

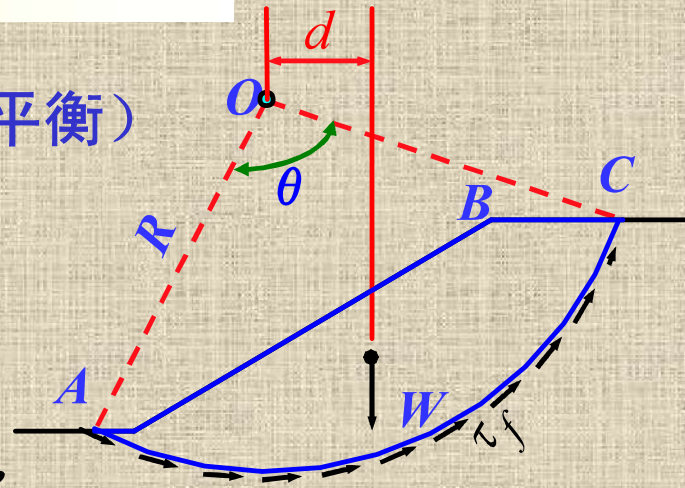
$$C = C_u$$

$$M_R = \tau_f \cdot \hat{L} \cdot R = C_u \cdot \hat{L} \cdot R$$

\hat{L} 为AC弧

(3) 安全系数:

$$F_s = \frac{\text{抗滑力矩}}{\text{滑动力矩}} = \frac{M_R}{M_s} = \frac{\tau_f \hat{L} R}{W \cdot d} = \frac{C_u \hat{L} R}{W \cdot d}$$



讨论:

(1) 当 $\varphi \neq 0$ 时, σ_n 是 $L(x,y)$ 的函数, 无法得到 F_s 的理论解

(2) 其中圆心 O 及半径 R 是任意假设的, 还必须计算若干组 (O, R) 找到最小安全系数

—— **最可能滑动面**

(3) 适用于饱和粘土

3.3条分法的基本原理

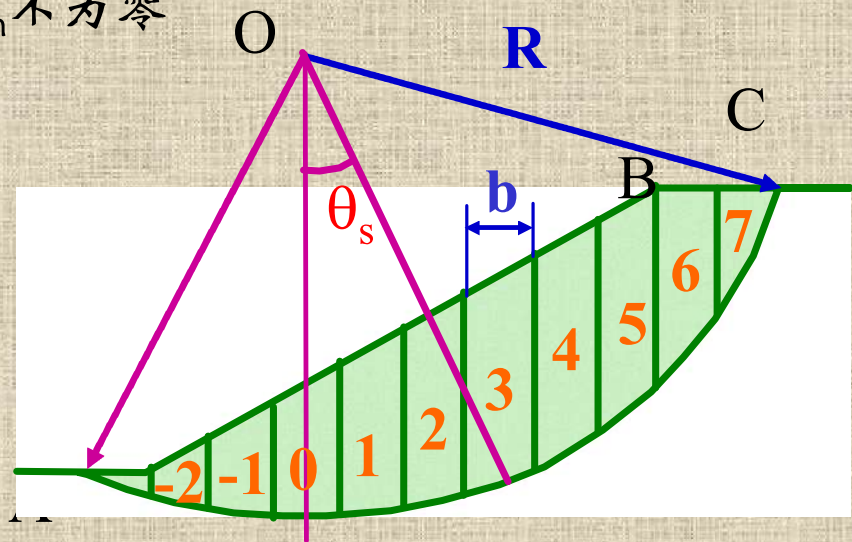
1. 原理

整体圆弧法中的抗滑力矩：

$$\int_0^l \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \, de$$

σ_n 是 $l(x,y)$ 的函数，若 σ_n 不为零

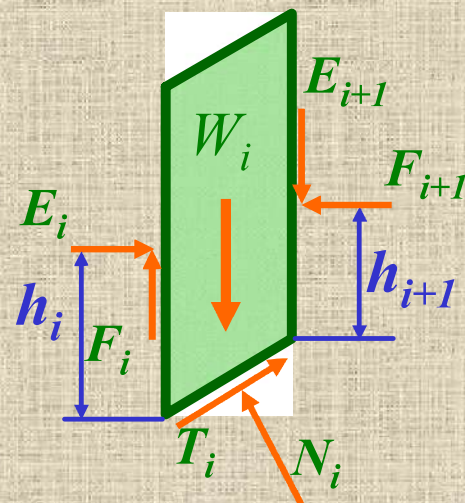
则，无法求理论解，是一个边值问题，应通过数值计算解决。一个简化解决方法是将滑动土体分成条——条分法。实际是一种离散化计算方法



2. 条分法中的力和求解条件

(1) 未知量数目：

- W_i 大小和方向已知；
- 滑动面上的 N_i 、 T_i (含 $c_i l_i$ 和 $N_i \tan \phi_i$)大小未知；
- 土条两侧， E_i 、 F_i 、 h_i 由前一个土条计算得出， E_{i+1} 、 F_{i+1} 、 h_{i+1} 未知；
- 可见，作用在土条上的作用力有5个未知数，可以建立3个平衡方程，故为静不定问题。



(2) 力平衡条件（求解条件）

简化计算方法：

1. 不考虑土条间的作用力，或只考虑其中的一个；
2. 假设条间力的作用方向或规定 E_i 和 F_i 的比值；
3. 假定条块间力的作用位置， h_i 已知。

3.4 简单条分法（瑞典条分法、费伦纽斯(Fellenius)法）

1. 基本假设：

- (1) 假定问题为平面应变问题。
- (2) 假定危险滑动面(即剪切面)为圆弧面。
- (3) 假定抗剪强度全部得到发挥。
- (4) 不考虑各分条之间的作用力。

2. 计算方法：

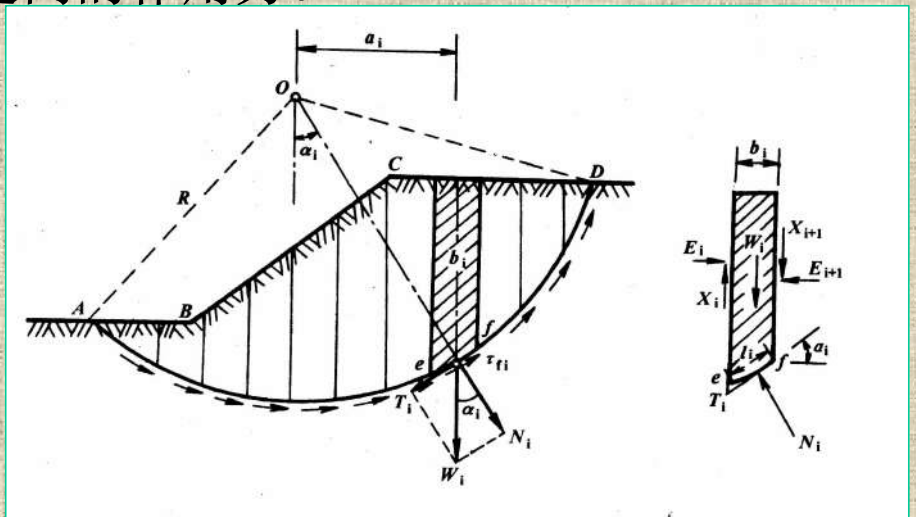
- 计算土条自重

$$W_i = \gamma b h_i$$

- 将土条自重分解

$$N_i = W_i \cos \alpha_i$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i$$



3.4 简单条分法（费伦纽斯(Fellenius)）

- 滑动面上土的抗剪强度为：

$$\tau_{fi} = \sigma_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i = \frac{1}{l_i} (N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i) = \frac{1}{l_i} (W_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i)$$

- 计算滑动力矩和稳定力矩：

$$M_s = T_i R = W_i R \sin \alpha_i$$

$$M_f = \tau_{fi} l_i R = (W_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i) R$$

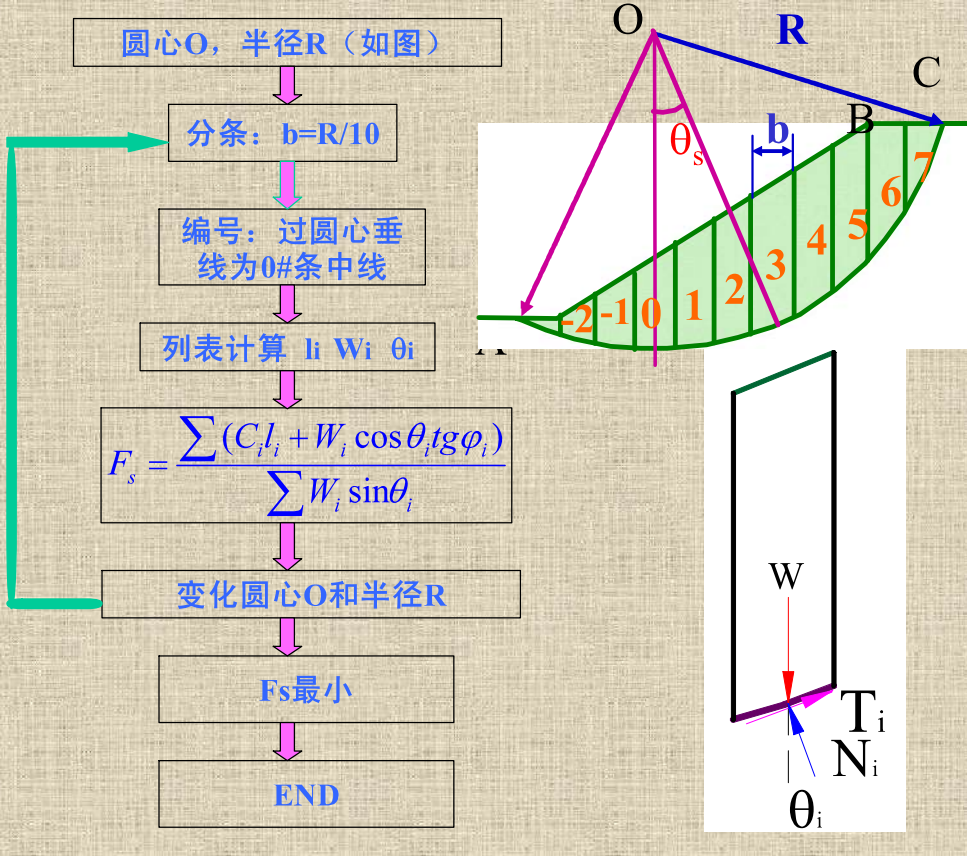
- 计算土坡的稳定安全系数

$$K = \frac{M_f}{M_s} = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} (W_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i)}{R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i}$$

- 对于均质土坡 $c_i = c \quad \varphi_i = \varphi$

$$K = \frac{M_f}{M_s} = \frac{\operatorname{tg} \varphi \sum_{i=1}^{i=n} (W_i \cos \alpha_i + c l_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i}$$

简单条分法计算步骤



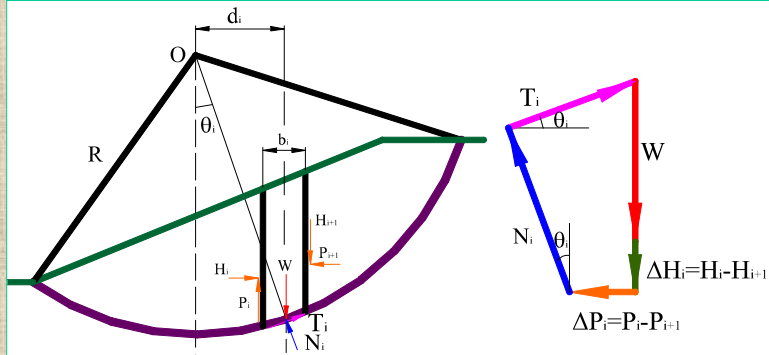
瑞典简单条分法的讨论

- * 由于忽略了条块间的作用力，只满足力矩平衡，不满足静力平衡。
- * 假设圆弧滑裂面，与实际滑裂面有差别。
- * 忽略了条间力，所计算安全系数 K 值偏小；假设圆弧滑裂面，使 K 值偏大；总体结果是 K 值偏小。
- * φ 越大(条间的抗滑作用力越大)， K 值越偏小。

一般情况下， F_s 偏小10%左右工程应用中偏于安全

3.5 毕肖普 (Bishop) 法

毕肖普 (A · W · Bishop) 1955年提出的一种简化计算方法。该方法可以考虑条块间的作用力。但在考虑整个滑动土体力矩平衡条件时，认为各土条的作用力对圆心力矩之和为零。



1. 原理与特点

- (1) 滑动面为圆弧面。
- (2) 滑动面上的剪切力做了具体规定。
- (3) 土条之间的剪切力忽略不计(简化毕晓普法)。
- (4) 土条的滑裂面上满足极限平衡条件
- (5) 土条在y方向上（竖直）达到静力平衡
- (6) 总体对圆心O力矩平衡

3.5 毕肖普 (Bishop) 法

2. 推导过程

- 竖向平衡条件:

$$W_i - H_i + H_{i+1} - T_i \sin \alpha_i - N_i \cos \alpha_i = 0$$

$$N_i \cos \alpha_i = W_i + (H_{i+1} - H_i) - T_i \sin \alpha_i$$

- 若土条的稳定安全系数为 K , τ_{fi} 与滑动面上的切向力 T_i 相平衡的条件有:

$$T_i = \tau_{fi} l_i = \frac{1}{K} (N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i)$$

$$N_i = \frac{W_i + (H_{i+1} - H_i) - \frac{c_i l_i}{K} \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{1}{K} \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_i}$$

$$K = \frac{M_f}{M_s} = \frac{\sum (N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

3.5 毕肖普 (Bishop) 法

2. 推导过程

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{[W_i + (H_{i+1} - H_i)] \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{1}{K} \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i}$$

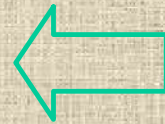
$$m_{\alpha i} = \cos \alpha_i + \frac{1}{K} \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_i$$

参数 $m_{\alpha i}$ 包含有 K ，是一超越方程。采用试算的方法。查曲线的方法。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{m_{\alpha i}} [W_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i \cos \alpha_i]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i}$$

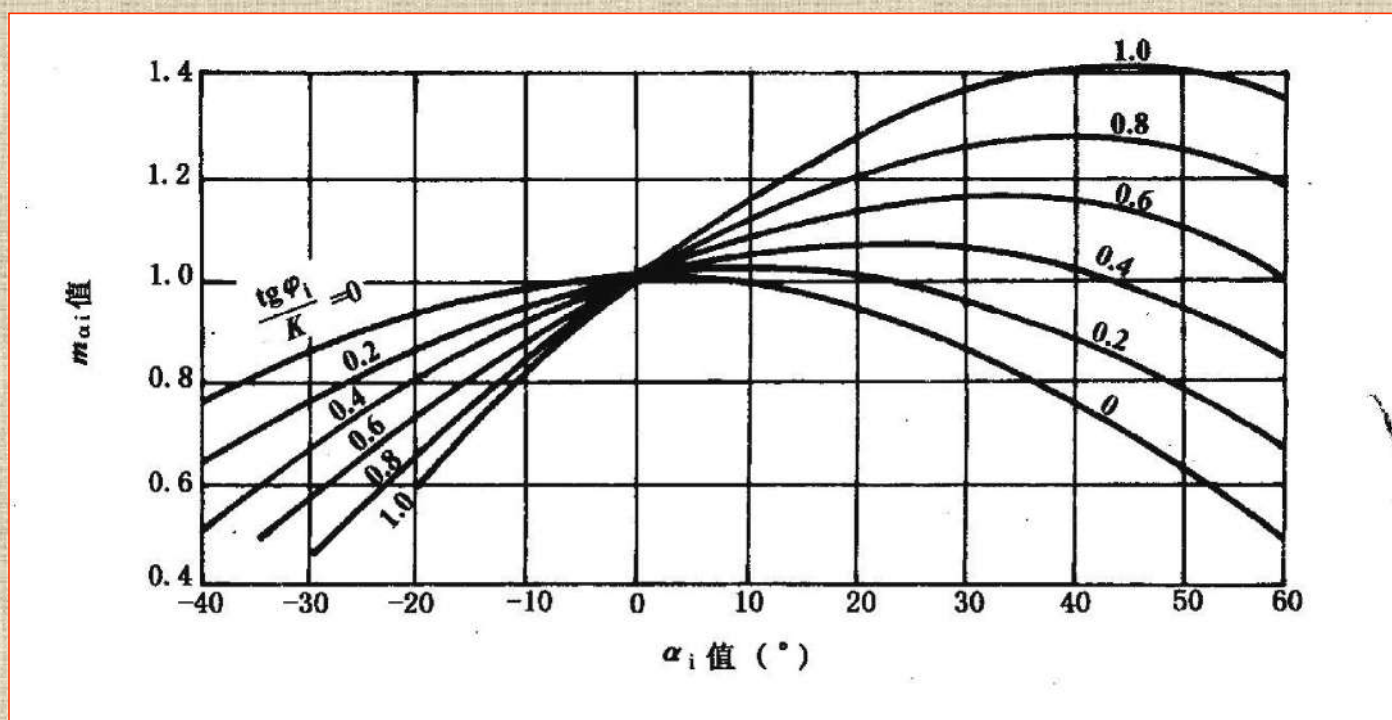
简化

$$H_{i+1} - H_i = 0$$



3.5 毕肖普 (Bishop) 法

毕肖普曲线



m_{α_i} 值曲线

圆心O, 半径R

设 $K=1.0$

计算 m_{θ_i}

计算 K'

$k = k'$

No

$\Delta k = k' - k < \delta$

YES

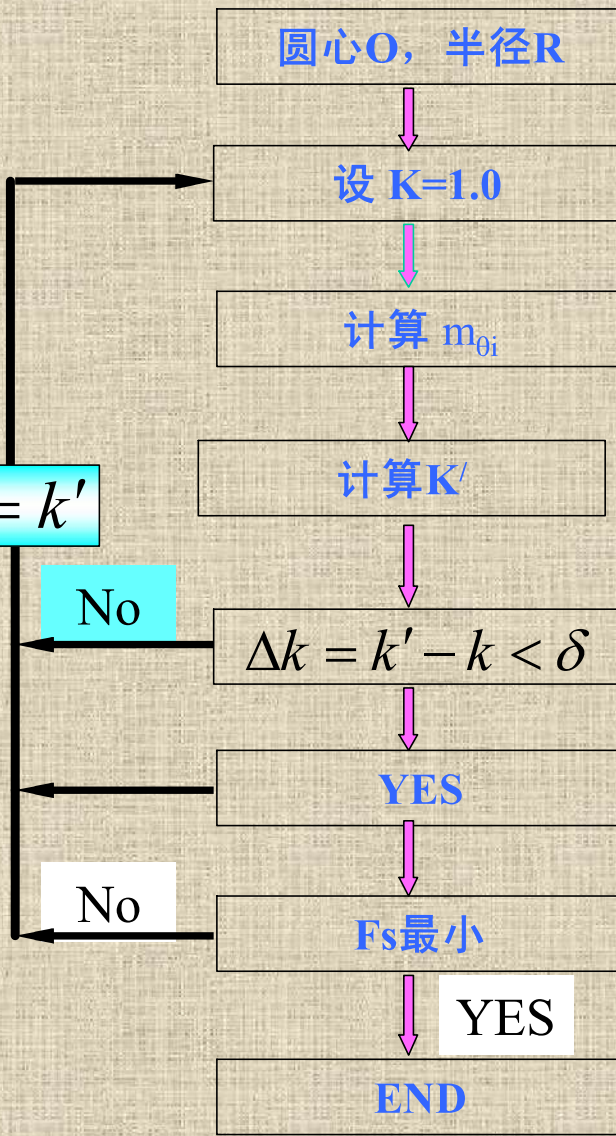
No

F_s 最小

YES

END

3. 毕肖甫法计算步骤



4. 小结

1. 满足整体力矩平衡条件；
2. 满足各条块力的多边形闭合条件，但不满足条块的力矩平衡；
3. 假设条块间作用力只有法向力没有切向力；
4. 满足极限平衡条件。
5. 得到的安全系数较瑞典条分法略高一些。

3.6 圆弧滑动面的整体稳定分析

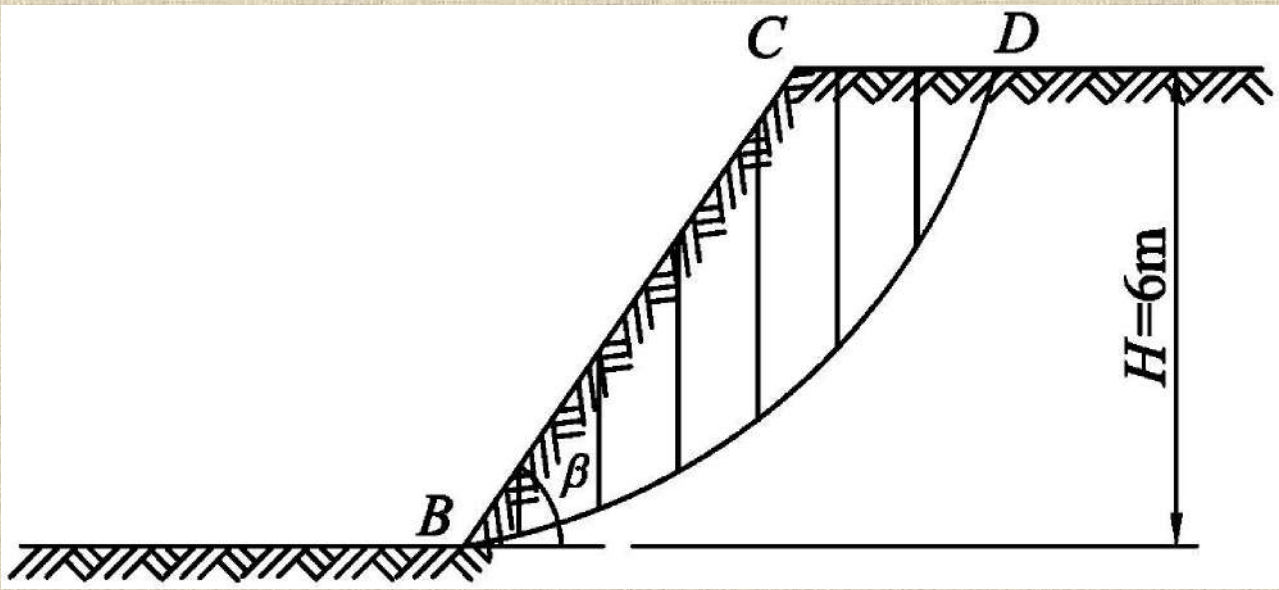
β_1 及 β_2 的取值

土坡坡度 (垂直:水平)	坡角 β	β_1	β_2
1:0.58	60°	29°	40°
1:1	45°	28°	37°
1:1.5	33° 41'	26°	35°
1:2	26° 34'	25°	35°
1:3	18° 26'	25°	35°
1:4	14° 02'	25°	37°
1:5	11° 19'	25°	37°

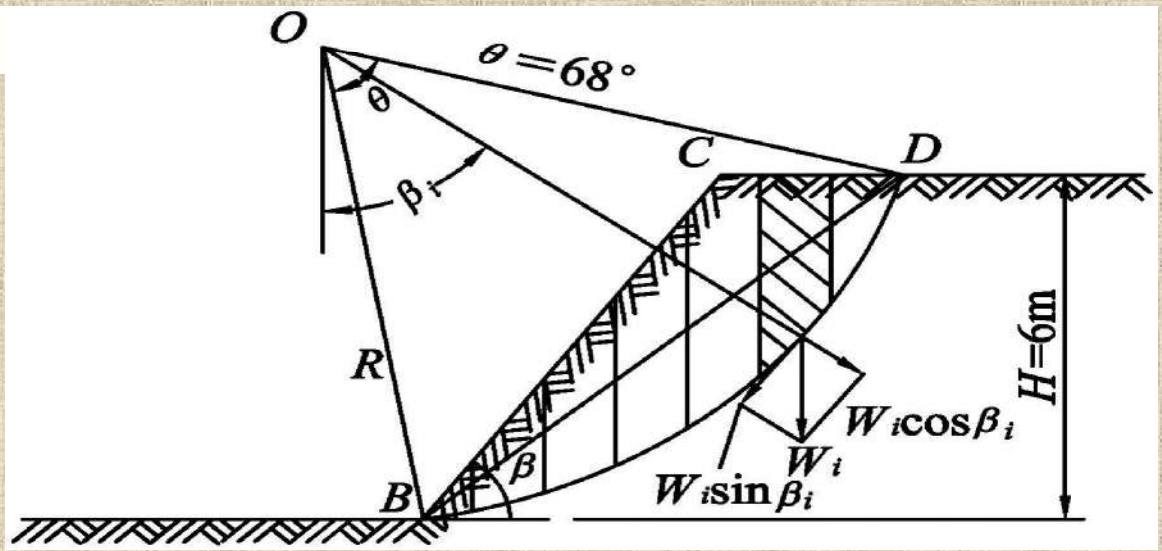
3.7 几种分析计算方法的总结

方法		整体圆弧法	简单条分法	毕肖普法	普遍条分法 (简布)
滑裂面形状		圆弧	圆弧	圆弧	任意
假设		刚性滑动体滑动面上极限平衡	忽略条间力	考虑条间力 $\Delta H_i=0$ (简布)	P_i 直线分布 w_i , N_i 交于条底中点 O_i
条件		软粘土不排水 $P_n=0$	一般均质土	一般一般均质土	任意土 (分层土)
精度			F_s 偏小 10%	$\Delta H_i=0$, 误差 20%-70%	比较难确定
平衡条件	整体力矩	√	√	√	√
	各条力矩	√	×	×	√
	各条垂直力	√		√	√
	各条水平力	√	×	×	√

【例8.2】 某土坡如图所示。已知土坡高度 $H=6\text{m}$ ，坡角 $\beta=55^\circ$ ，土的重度 $\gamma=18.6\text{kN/m}^3$ ，内摩擦角 $\varphi=12^\circ$ ，粘聚力 $c=16.7\text{kPa}$ 。试用条分法验算土坡的稳定安全系数

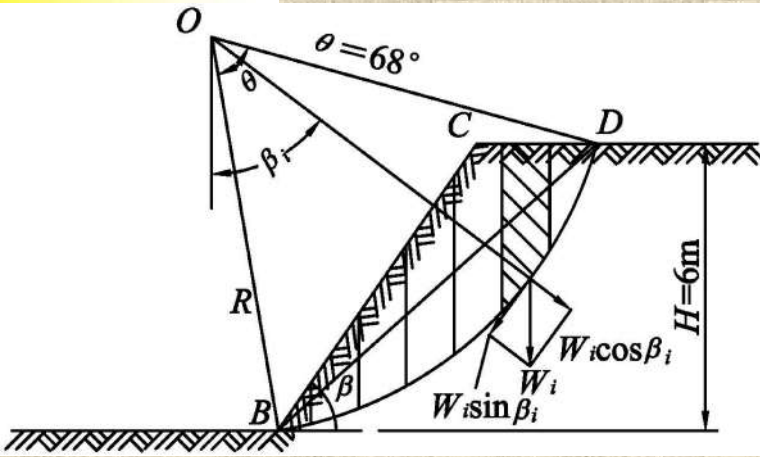


分析:



- ①按比例绘出土坡，选择圆心，作出相应的滑动圆弧
- ②将滑动土体分成若干土条，对土条编号
- ③量出各土条中心高度 h_i 、宽度 b_i ，列表计算 $\sin\beta_i$ 、 $\cos\beta_i$ 以及土条重 W_i ，计算该圆心和半径下的安全系数
- ④对圆心O选不同半径，得到O对应的最小安全系数；
- ⑤在可能滑动范围内，选取其它圆心 O_1, O_2, O_3, \dots ，重复上述计算，求出最小安全系数，即为该土坡的稳定安全系数

计算



①按比例绘出土坡，选择圆心，作出相应的滑动圆弧

取圆心 O ，取半径 $R = 8.35\text{m}$

②将滑动土体分成若干土条，对土条编号

③列表计算该圆心和半径下的安全系数

编号	中心高度(m)	条宽(m)	条重 W_i kN/m	β_i (°)	$W_i \sin \beta_i$	$W_i \cos \beta_i$
1	0.60	1	11.16	9.5	1.84	11.0
2	1.80	1	33.48	16.5	9.51	32.1
3	2.85	1	53.01	23.8	21.39	48.5
4	3.75	1	69.75	31.6	36.55	59.41
5	4.10	1	76.26	40.1	49.12	58.33
6	3.05	1	56.73	49.8	43.33	36.62
7	1.50	1.15	27.90	63.0	24.86	12.67
合计					186.60	258.63

3.8 边坡稳定分析图解法

土坡稳定分析工作量很大，许多学者整理出坡高 H 、坡角 α 、与土的抗剪强度指标 c 、 ϕ 和 γ 之间的关系，并绘制如图关系，直接计算土坡稳定性。即知道其中4个参数就可以计算剩余的数值。

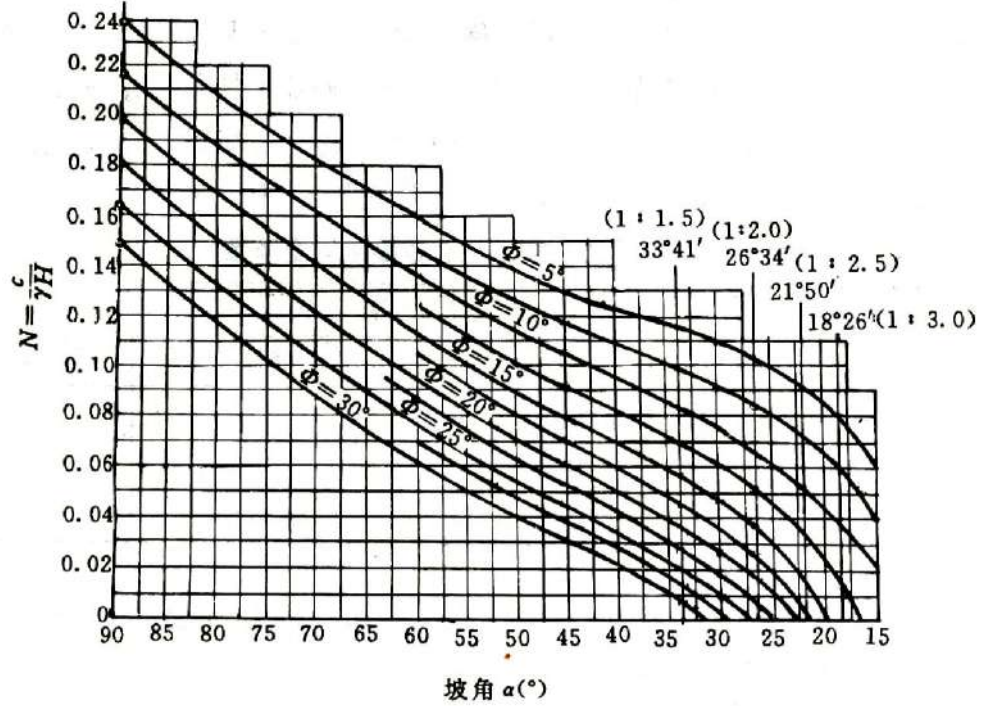


图 7-25 计算简单土坡稳定用图表 (П. Д. Лобасов)

泰勒图表法

土坡的稳定性相关因素

泰勒 (Taylor, D. W, 1937) 用图表表达影响因素的相互关系

抗剪强度指标 c 和 φ 、重度 γ 、土坡的尺寸、坡角 β 和坡高 H

土坡的临界高度或极限高度

$$N_s = \frac{\gamma H_{cr}}{c}$$

根据不同的 φ 绘出 β 与 N_s 的关系曲线

稳定数

$$F_s = \frac{H_{cr}}{H}$$

泰勒图表法适宜解决简单土坡稳定分析的问题:

- ① 已知坡角 β 及土的指标 c 、 φ 、 γ ，求稳定的坡高 H
- ② 已知坡高 H 及土的指标 c 、 φ 、 γ ，求稳定的坡角 β
- ③ 已知坡角 β 、坡高 H 及土的指标 c 、 φ 、 γ ，求稳定安全系数 F_s

例题分析

【例8.3】 一简单土坡 $\varphi=15^\circ$ ， $c=12.0\text{kPa}$ ， $\gamma=17.8\text{kN/m}^3$ ，若坡高为5m，试确定安全系数为1.2时的稳定坡角。若坡角为 60° ，试确定安全系数为1.5时的最大坡高

【解答】

①在稳定坡角时的临界高度： $H_{cr}=KH=1.2\times 5=6\text{m}$

$$N_s = \frac{\gamma H_{cr}}{c} = \frac{17.8 \times 6}{12.0} = 8.9$$

由 $\varphi=15^\circ$ ， $N_s=8.9$ 查图得稳定坡角 $\beta=57^\circ$

②由 $\beta=60^\circ$ ， $\varphi=15^\circ$ 查图得泰勒稳定数 N_s 为8.6

$$N_s = \frac{\gamma H_{cr}}{c} = \frac{17.8 \times H_{cr}}{12.0} = 8.6$$

求得坡高 $H_{cr}=5.80\text{m}$ ，稳定安全系数为1.5时的最大坡高 H_{max} 为

$$H_{max} = \frac{5.80}{1.5} = 3.87\text{m}$$

§ 4 边坡稳定分析的工程考虑

前面在边坡稳定分析时，主要考虑的是除了考虑土条(块)自身的重力。实际工程作用在边坡上的荷载可能较为复杂，如边坡顶面超载，包括集中荷载和分布荷载；边坡中存在地下水作用；为了提高边坡稳定性而采取的各种抗滑措施；地震荷载、爆破作用、交通荷载等动荷载；边坡的施工过程等因素。

4.1地下水对边坡稳定分析的影响

实践表明，水的浸入将使土的抗剪强度指标降低、有效应力减小，土体抗滑动能力减小，导致边坡失稳。

4.1.1土的抗剪强度指标及安全系数的选用

抗剪强度指标	允许安全系数	说明
固结快剪	1.10~1.30	土坡上超载 q 引起的抗滑力矩可全部采用或部分采用，视土体在 q 作用下固结程度而定； q 引起的滑动力矩应全部计入
三轴不排水剪	1.30~1.50	孔隙水压力采用与计算情况相应的数值
十字板剪	1.10~1.30	需考虑因土体固结引起的强度增长
快剪	1.00~1.20	需考虑因土体固结引起的强度增长；考虑土体的固结作用，可将计算得到的安全系数提高10%

4.1.2 有水渗流时的土坡稳定计算

浸润线以下部分应考虑水的浮力作用，采用浮重度，动水 D 可按下式计算：

$$D = G_D A = \gamma A$$

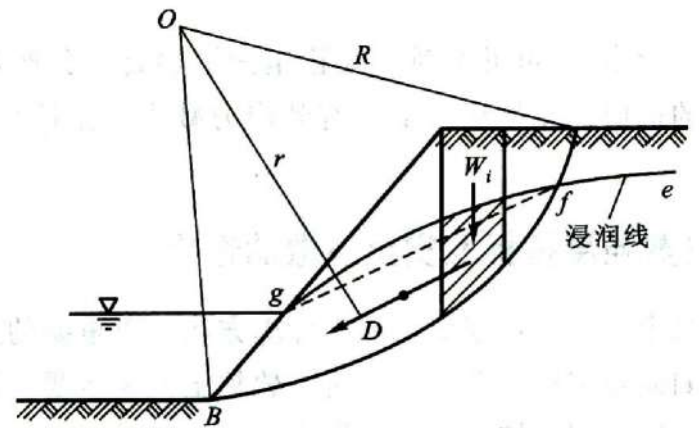


图 8.18 水渗流时土坡稳定计算

$$K = \frac{M_f}{M_s} = \frac{R(\operatorname{tg} \varphi \sum_{i=1}^{i=n} W_i \cos \alpha_i + c \sum_{i=1}^{i=n} l_i)}{R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i + rJ}$$

4.1.3 按有效应力法分析土坡稳定

通过对总应力法的计算公式进行修正，得到有效应力法的计算公式：

$$K = \frac{tg\varphi' \sum_{i=1}^{i=n} (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) + c' \hat{l}}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i}$$

4.2 施工过程对边坡稳定的影响

若土坡用饱和黏性土填筑或由于降雨等因素导致土坡处于饱和状态，若孔隙水来不及及时排出，将产生孔隙水压力而造成土的有效应力减小，造成滑坡的危险性加大，这时可采用有效应力法，所用的强度指标为有效应力强度指标，此时应力采用有效应力。

对于费伦纽斯条分法，其有效应力法的条分公式可写为

$$K = \frac{\sum (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \tan \varphi_i + c'_i l_i}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

而对于毕晓普条分法，其计算公式可改写为

$$K = \frac{\sum (W_i - u_i l_i \cos \alpha_i) \tan \varphi_i + c'_i l_i \cos \alpha_i}{\sum W_i \sin \alpha_i} m_{\alpha_i}$$

4.3 边坡稳定的计算机分析方法

随着计算机的发展，边坡稳定逐渐倾向采用计算机进行分析，这样可以大大减轻计算工作负担，目前在边坡稳定中应用较多的软件国内有北京理正软件公司的理正系列软件、中国水利水电科学研究院的stab分析软件、同济大学的同济曙光软件等，国外比较常见的有加拿大Geoslope公司的slope/w软件，目前边坡稳定程序发展趋势：与AutoCAD兼容，可以考虑加固、渗流、地震荷载，以及可以搜索任意滑动面。值得欣慰的是，国内的边坡分析软件在技术水平方面与国外软件基本保持同等水平。

目前，国内的理正岩土软件更是发展迅速。

【例8.4】某土坡如图所示，已知土坡高度 $H=10\text{m}$ ，坡角，土的物理力学参数：重度 $\gamma=17.8\text{kN/m}^3$ ，黏聚力 $C=21.2\text{kPa}$ ，内摩擦角 10° ，试用费伦纽斯法确定土的安全系数。

土条编号	土条底面长度/m	土条重力/kN	底面倾角 $\alpha_i/(^\circ)$	$W_i \sin \alpha_i$	$W_i \cos \alpha_i$
1	3.812	47.785	66.172	43.712	19.305
2	2.564	123.666	53.088	98.878	74.272
3	2.122	162.096	43.483	111.543	117.614
4	1.886	162.822	35.269	94.017	132.936
5	1.741	153.476	27.838	71.669	135.715
6	1.648	137.261	20.894	48.953	128.235
7	1.589	115.266	14.263	28.399	111.713
8	1.554	88.115	7.825	11.996	87.294
9	1.540	56.146	1.486	1.456	56.128
10	1.545	19.493	-4.835	-1.643	19.424
合计	20.001	合计		508.981	882.634
安全系数	$K = \frac{\tan \varphi \sum W_i \cos \alpha_i + cL}{\sum W_i \sin \alpha_i} = \frac{882.634 \times \tan 10^\circ + 21.2 \times 20.001}{508.981} = 1.139$				

The end!

Thanks!