

第7章 土坡稳定性分析

主讲：刘勇健



本章目录

§ 7.1 概述

§ 7.2 平面滑动分析法

§ 7.3 黏性土坡的稳定分析

§ 7.4 土坡稳定分析的若干问题



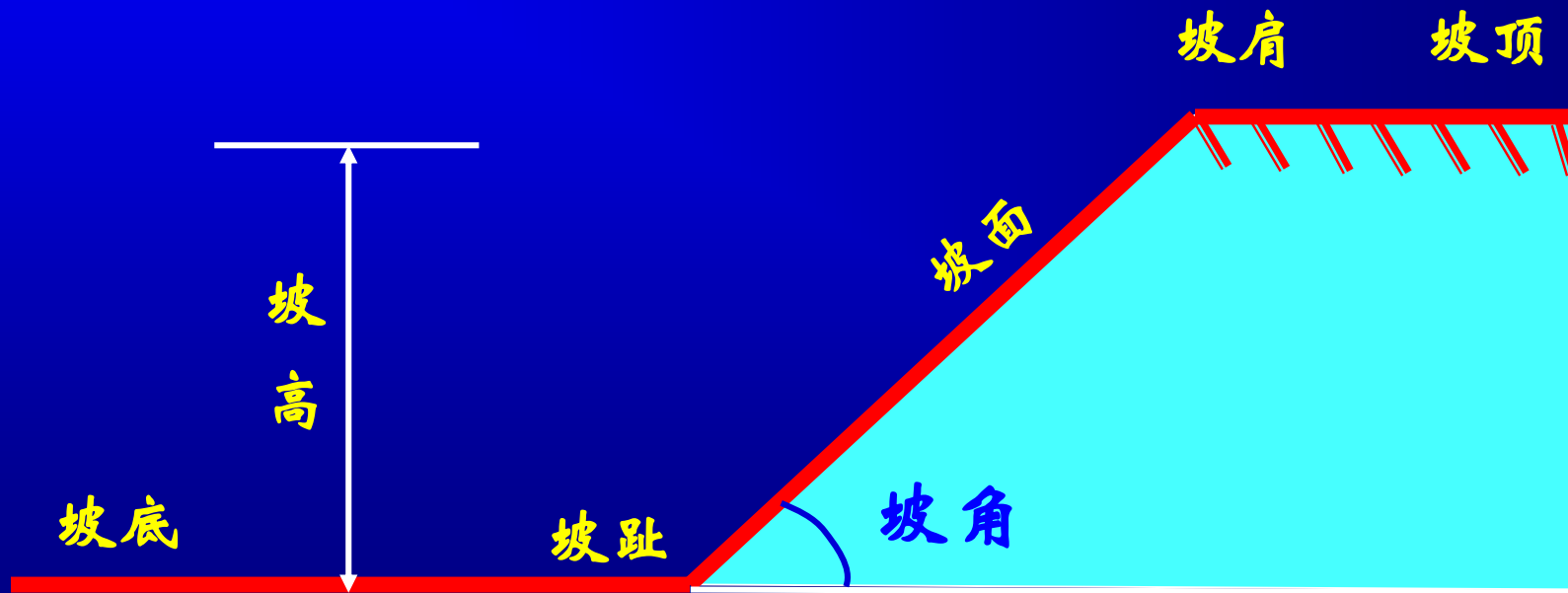
问题：

- ✓ 为什么会发生土坡失稳？
- ✓ 如何评价土坡稳定性？
- ✓ 如何防治土坡失稳？



§ 7.1 概述

土坡：具有倾斜面的土体



天然土坡

- 江、河、湖、海的岸坡
- 山、岭、丘、岗的边坡

人工土坡

- 挖方工程：沟、渠、池、基坑
- 填方工程：河堤、路基、土坝、堆料边坡



7.1 概述

天然边坡



7.1 概述

露天矿场



7.1 概述

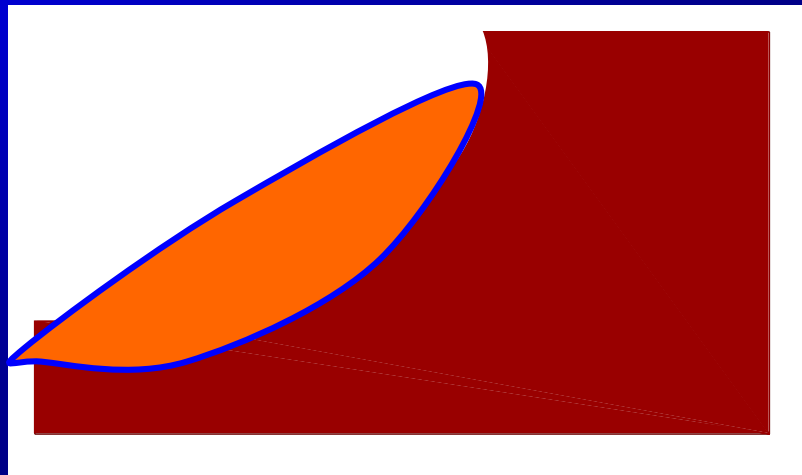
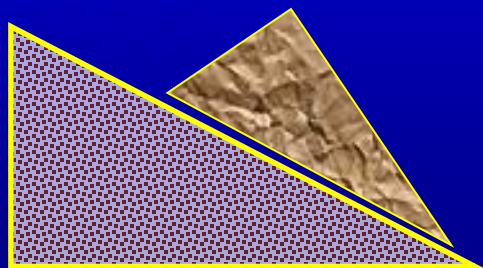
小浪底土石坝



7.1 概述

滑坡：

滑坡——斜坡上的岩土体沿着某一连续剪切破裂面整体向下滑动的现象。土坡破坏实质是土体发生了剪切破坏。



7.1 概述



7.1 概述



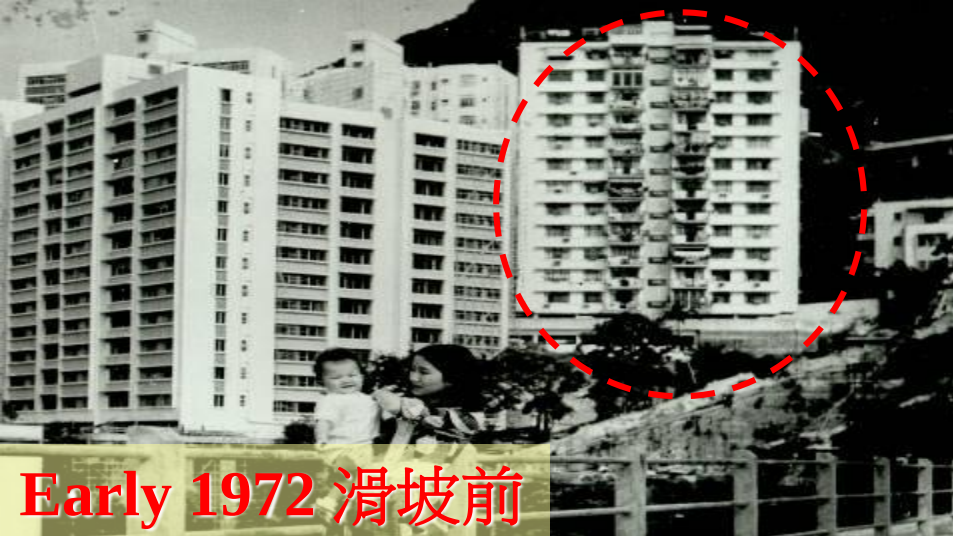
基坑的倒塌



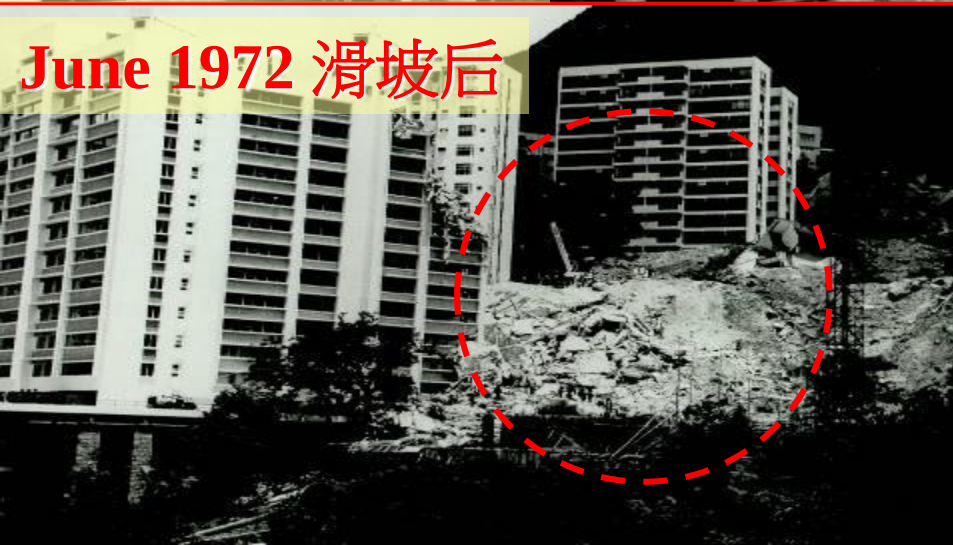
7.1 概述

港岛1972年宝成滑坡





Early 1972 滑坡前



June 1972 滑坡后



7.1 概述

深圳山体滑坡

2015年12月20日
滑坡覆盖面积38
万m², 33栋建筑
物被掩埋, 遇难者
69名。





7.1 概述

地震引发的滑坡



7.1 概述

唐家山堰塞湖

汶川大地震后形成的北川灾区面积最大、危险性最大的一个堰塞湖。

库容为1.45亿立方米，坝体顺河长约803米，最大宽约611米，顶部面积约30万平方米，由石块和山坡风化土组成，湖上游集雨面积3550平方公里。



2011年3月11日日本8.8级地震



土坡失稳的原因：

- (1) 外力作用打破原来坡体的应力平衡状态；
- (2) 由于某种原因，边坡岩土体软化，强度稳定性变差。

地震引起坡体失稳；

土中水位变化引起土中应力的变化；

降雨使岩土软化，土坡的稳定性降低；

冻融作用：冻胀融沉，含水量变化

工程活动：开挖、爆破、打桩、堆放材料等

边坡分析的目的

- (1) 设计合理边坡
- (2) 加固边坡，避免滑坡的发生
- (3) 管理边坡，消除隐患





§ 7.2 平面滑动分析法

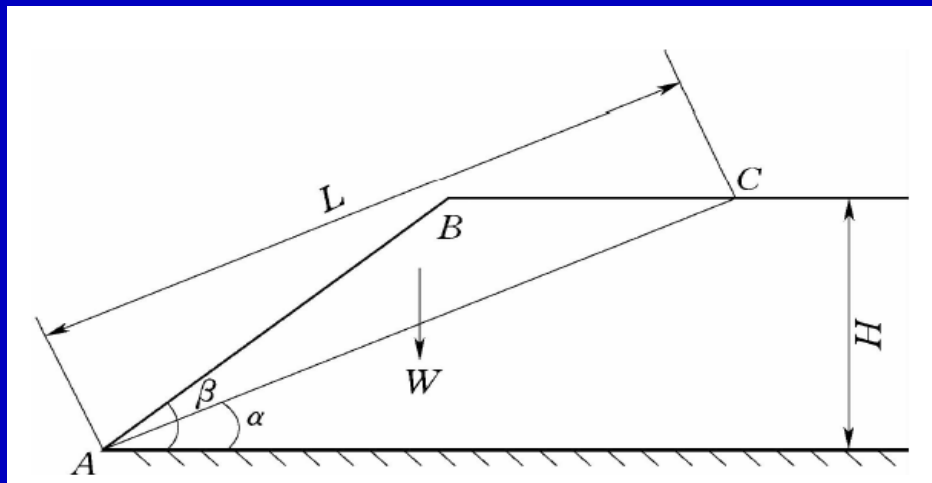


7.2.1 无黏性土坡稳定性

设滑动面是过坡脚A的平面AC，倾角 α ，AC长度为L，
分析土体ABC沿AC面上滑动的稳定安全系数K值。

- 滑动土体ABC的重力W:

$$W = \gamma S_{\triangle ABC}$$



W 在滑动面 AC 上的切向分力 T （ T 即为滑动面上的下滑力）及剪应力为：

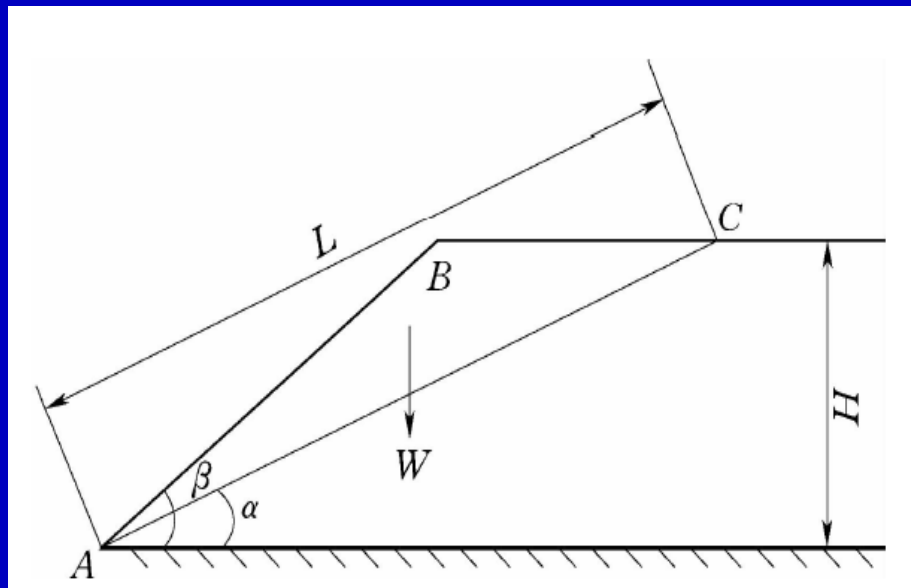
$$T = W \sin \alpha$$

$$\tau = \frac{T}{L} = \frac{W \sin \alpha}{L}$$

- AC 上的法向分力 N 及正应力为

$$N = W \cos \alpha$$

$$\sigma = \frac{N}{L} = \frac{W \cos \alpha}{L}$$



7.2 平面滑动分析法

- 定义土坡的安全系数 K :

$$K = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\sigma \tan \varphi + c}{\tau} = \frac{\frac{W \cos \alpha}{L} \tan \varphi + c}{\frac{W \sin \alpha}{L}} = \frac{W \cos \alpha \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha}$$

$$\tau = \frac{T}{L} = \frac{W \sin \alpha}{L}$$

$$\sigma = \frac{N}{L} = \frac{W \cos \alpha}{L}$$

7.2.1 无黏性土坡稳定性

$$K = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\sigma \tan \varphi + c}{\tau} = \frac{\frac{W \cos \alpha}{L} \tan \varphi + c}{\frac{W \sin \alpha}{L}} = \frac{W \cos \alpha \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha}$$

假设若干个滑动面，计算相应的安全系数，由此求得最小安全系数 $K_{\min}$ 。

当 $K_{\min} \geq 1$ 时，此土坡即是稳定的

为了保证土坡具有足够的安全储备，通常可取

$$K \geq 1.3 \sim 1.5$$

7.2 平面滑动分析法

$$K = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\sigma \tan \varphi + c}{\tau} = \frac{\frac{W \cos \alpha}{L} \tan \varphi + c}{\frac{W \sin \alpha}{L}} = \frac{W \cos \alpha \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha}$$

均质无黏性土坡 ($c=0$) :

$$K = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$$

- 当 $\alpha=\beta$ 时，滑动稳定安全系数最小，土坡坡面的一层土是最容易滑动的。土坡稳定安全系数为：

$$K = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

7.2.1 无黏性土坡稳定性

讨论： $c=0$

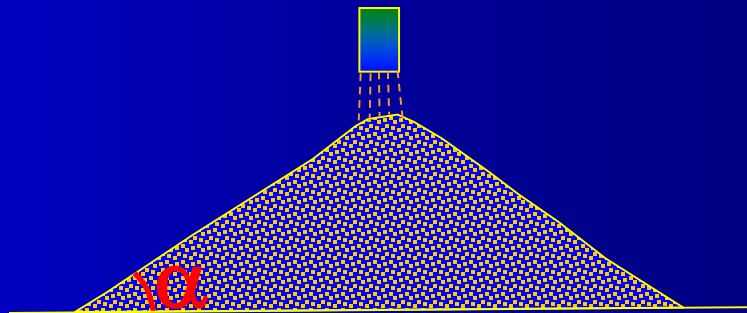
$$K = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

• (1) K 与土重度 γ 无关，与所选 ΔV 大小无关，亦即在这种坡中各点安全系数相同。只要坡角小于土的内摩擦角（ $\beta < \varphi$ ）， $K > 1$ ，则无论土坡多高在理论上都是稳定的。

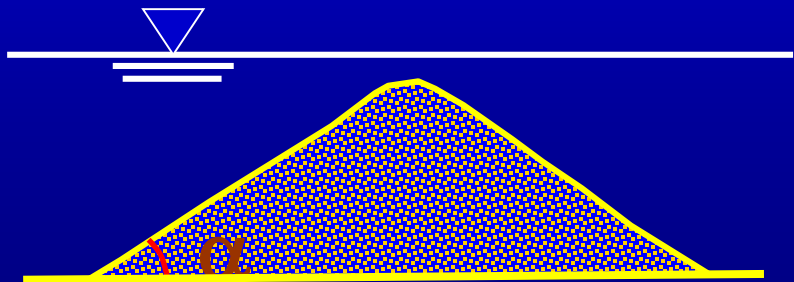
(2) $K=1$ 表明土坡处于极限状态，即土坡坡角等于土的内摩擦角。

(3) 均质无黏性土坡，当 $\alpha=\beta$ 时，滑动稳定安全系数最小，即土坡坡面的一层土是最容易滑动的。

(4) 当 $\alpha=\varphi$ 时, $K=1.0$,
天然休止角

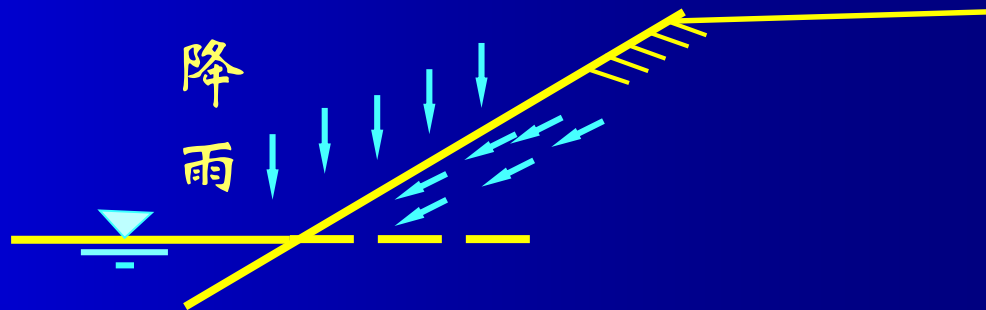


无黏性土所能形成的最大坡角就是无黏性土的内摩擦角, 此坡角也称为自然休止角。

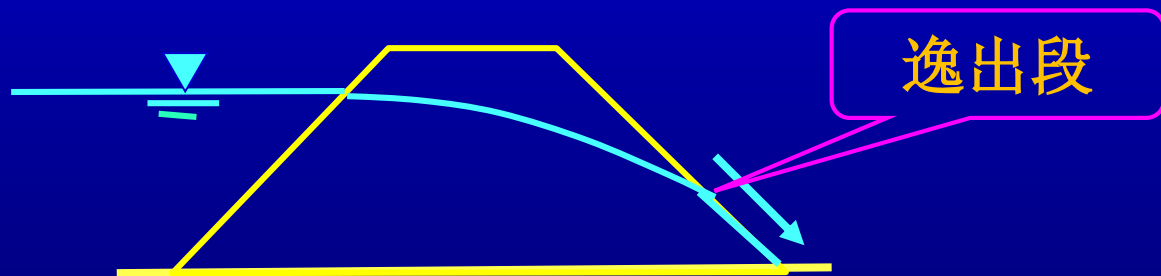


7.2 平面滑动分析法

有沿坡渗流情况



土坝上下游



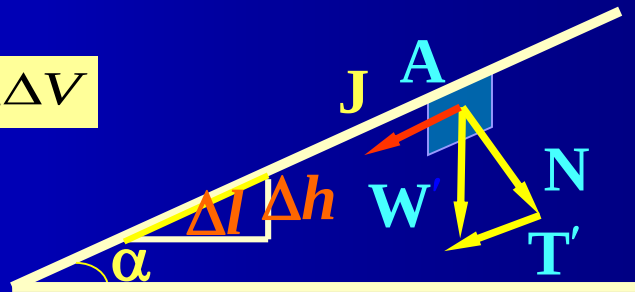
取微单元 A，以土骨架为隔离体：

(1) 自重： $W' = \gamma' \Delta V$

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

水力坡度： $i = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \sin \alpha$

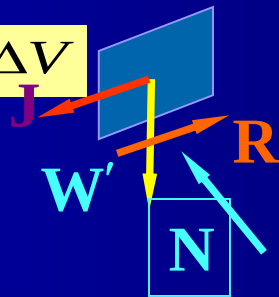
方向：平行于流向（土坡）



(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： $R = N \tan \varphi = \gamma' \Delta V \cos \alpha \tan \varphi$

(4) 抗滑安全系数：



$$K = \frac{\text{抗滑力}}{\text{滑动力}} = \frac{T_f}{T + J} = \frac{\gamma' \cos \alpha \tan \varphi}{(\gamma' + \gamma_w) \sin \alpha} = \frac{\gamma' \tan \varphi}{\gamma_{sat} \tan \alpha}$$

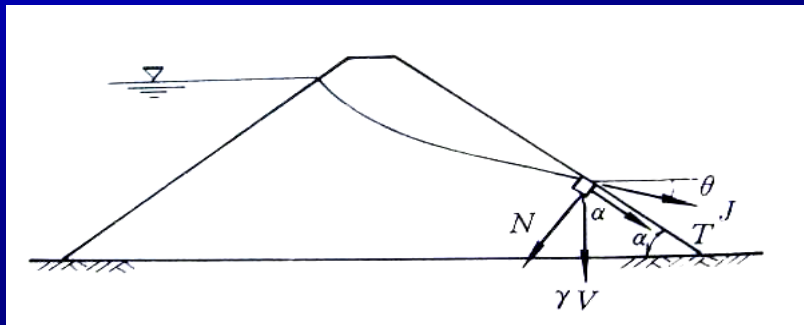
讨论：

(1) 渗流顺坡流出:
$$K = \frac{\text{抗滑力}}{\text{滑动力}} = \frac{T_f}{T + J} = \frac{\gamma' \cos \alpha \tan \varphi}{(\gamma' + \gamma_w) \sin \alpha} = \frac{\gamma' \tan \varphi}{\gamma_{sat} \tan \alpha}$$

(2) 渗流方向为水平逸出坡面时:

$$K = \frac{(\gamma' - \gamma_w \tan^2 \alpha) \tan \varphi}{(\gamma' + \gamma_w) \tan \alpha}$$

- (3) 当渗流作用时，无黏性土坡的稳定安全系数约降低一半。
- (4) 与重度有关；与所选 ΔV 大小无关，亦即在这种坡中各点安全系数相同。





§ 7.3 黏性土坡的稳定分析

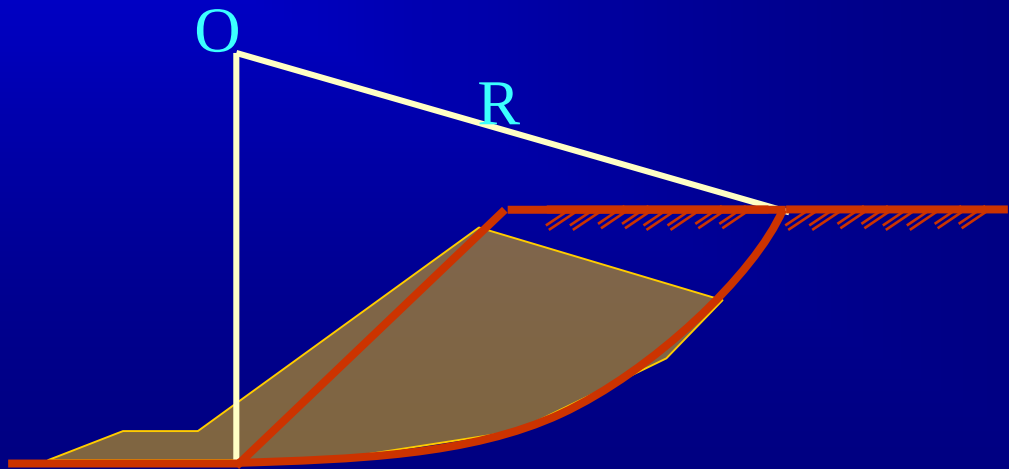


黏性土坡破坏特点

黏性土黏聚力 $C>0$;

其危险滑动面位置在土坡深处;

对于均匀土坡，在平面应变条件下，其滑动面可用一圆弧（圆柱面）近似。



计算方法：

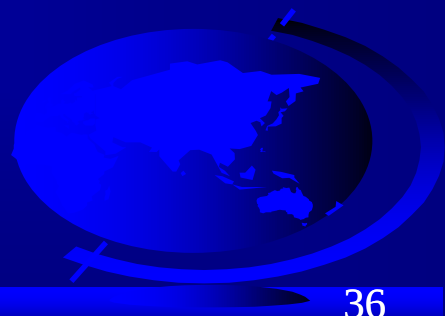
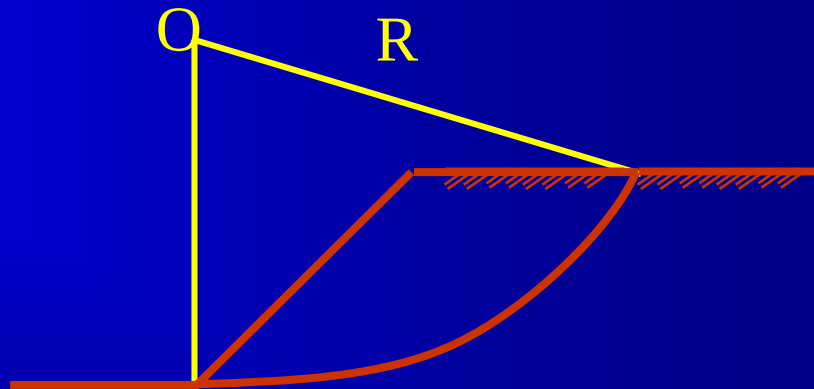
- 1 整体圆弧滑动法（瑞典Pettersen）
- 2 瑞典条分法（瑞典Fellenius）
- 3 毕肖普法（ Bishop）
- 4 简布法（Janbu）
- 5 不平衡推力传递法



一、整体圆弧滑动法（瑞典圆弧法）

假设条件

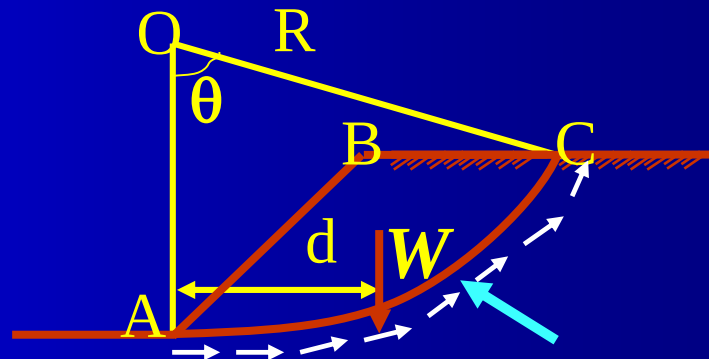
- 均质土坡
- 二维
- 圆弧滑动面
- 滑动土体为刚体
- 滑动土体处于极限平衡状态



平衡条件（各力对圆心O的力矩平衡）

(1) 滑动力矩: $M_s = Wd$

(2) 抗滑力矩:



$$M_R = \int_0^L \tau_f dl \cdot R = \int_0^L (c + \sigma_n tg\phi) dl \cdot R = c\widehat{A}c \cdot R + \int_0^L \sigma_n tg\phi dl \cdot R$$

注：（其中 $\sigma_n = \sigma_n(l)$ 是未知函数）

当 $\phi=0$ （黏土不排水强度）时，

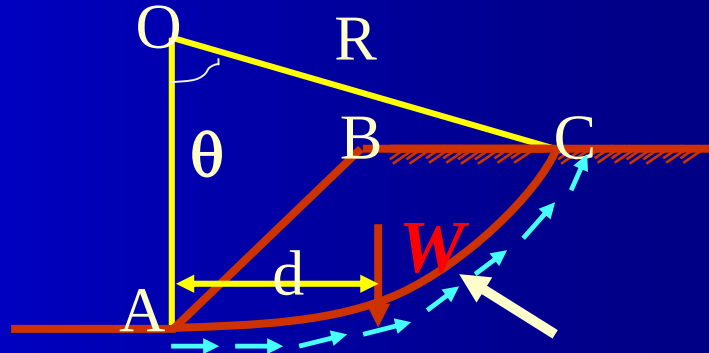
$$C = C_u \quad M_R = CA' \cdot c \cdot R$$

(3) 安全系数:

$$K = \frac{\text{抗滑力矩}}{\text{滑动力矩}} = \frac{M_f}{M} = \frac{\tau_f \cdot L_{CA}) \cdot R}{\tau \cdot L_{CA}) \cdot R}$$

讨论：

1 当 $\phi \neq 0$ 时， σ_n 是 $l(x,y)$ 的函数，
无法得到安全系数的理论解



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 适用于饱和软黏土，即 $\phi=0$ 情况，称 $\phi=0$ 的分析法

二、条分法的基本原理及分析

基础：

整体圆弧法：

$$\int_0^L \sigma_n \operatorname{tg} \phi \cdot dl$$

σ_n 是 $l(x,y)$ 的函数

原理：

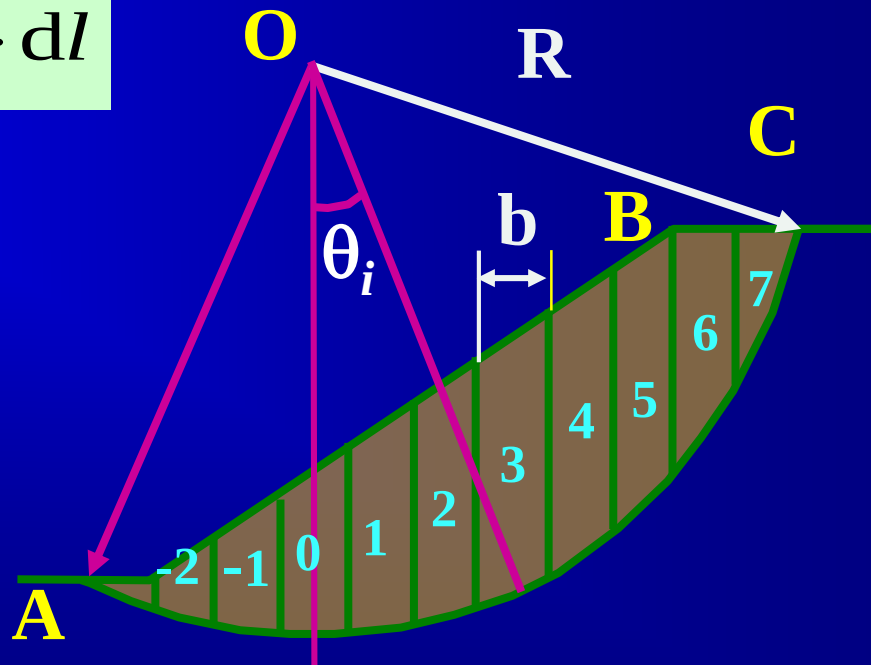
离散化



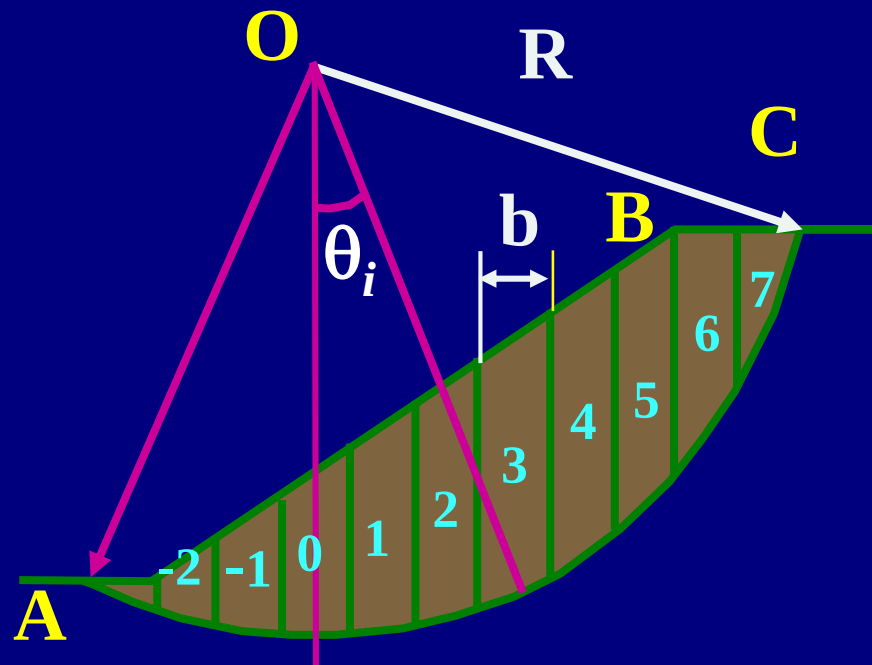
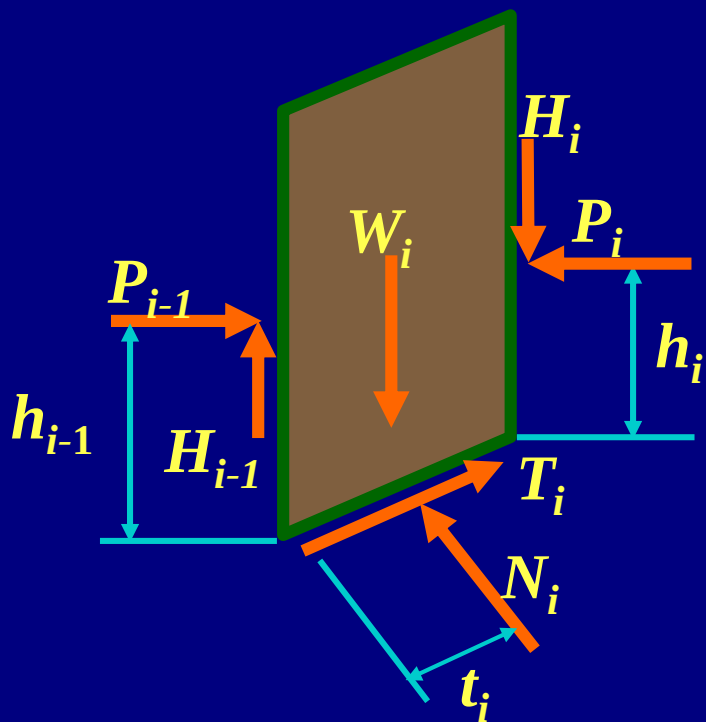
分条



条分法



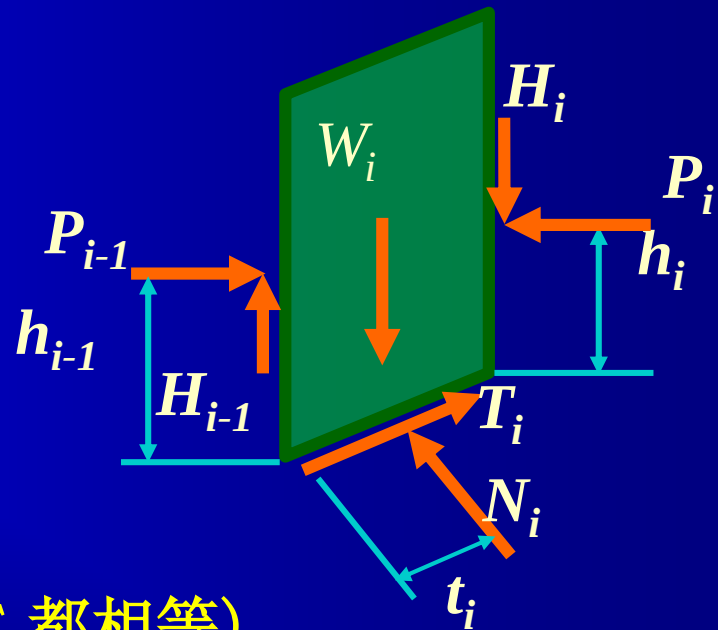
第*i*条土的作用力



2. 条分法中的求解条件

n 条土条 (W_i 已知)

- (1) 土条底部力及作用点:
 (N_i, T_i, t_i) 共 $3n$ 个
- (2) 条间力及作用点:
 (P_i, H_i, h_i) 共 $3(n-1)$ 个
 (两端边界是已知的)
- (3) 假设总体安全系数为 F_s (且每条 F_s 都相等)
 F_s 共 1 个
- 未知数合计 = $3n + 3(n-1) + 1 = 6n - 2$



2. 条分法中的求解条件—平衡方程

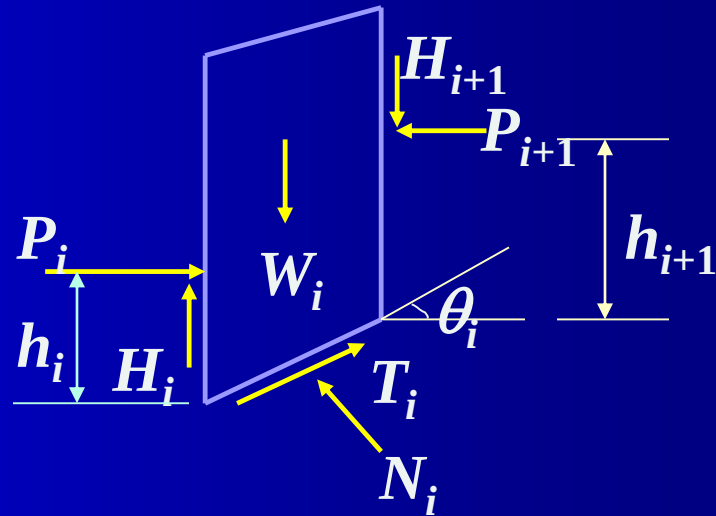
各土条： 求解条件共 $4n$ 个

- 水平向静力平衡条件： $\Sigma x=0$ 共 n 个
- 垂直向静力平衡条件： $\Sigma y=0$ 共 n 个
- 力矩平衡条件： $\Sigma M_0=0$ 共 n 个
- n 个土条底面上满足极限平衡条件： 共 n 个

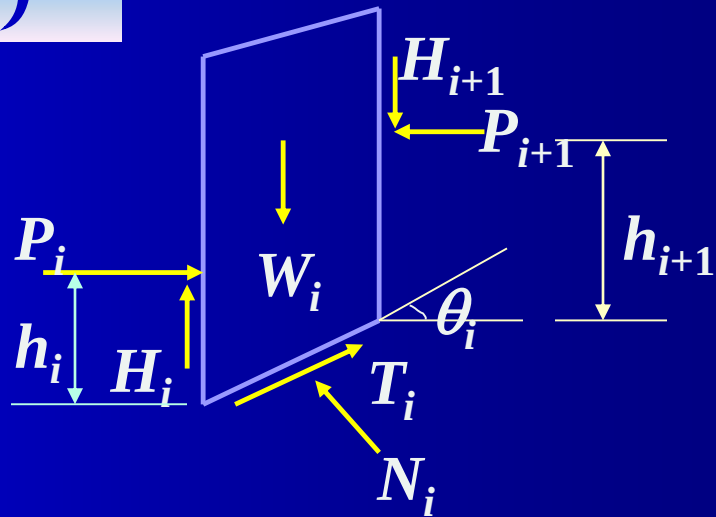
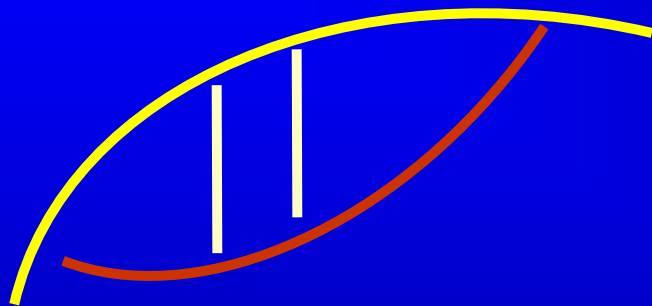
$$\text{未知数} - \text{方程数} = 2n - 2$$

未知数: $6n-2$ 方程数: $4n$

- 1 整体圆弧滑动法 $n=1$
- 2 瑞典条分法 $3(n-1)+n=4n-3$
- 3 毕肖普法 $(n-1)+n=2n-1$
- 4 Janbu法 $(n-1)+n=2n-1$
- 5 不平衡推力传递法 $(n-1)+n=2n-1$



三、瑞典条分法 (简单条分法)



假定： 圆弧滑动面；不考虑条间力

忽略所有条间作用力： $2(n-1)+(n-1) = 3n-3$ }

假定滑动面上作用点位置： n

4n-3

未知数： $2n+1$ 方程数： $4n$

N_i 方向力平衡:

$$N_i = W_i \cos \theta_i$$

极限平衡条件:

$$T_i = \frac{c_i l_i + N_i \tan \phi_i}{F_s} = \frac{c_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi_i}{F_s}$$

整体对圆心的力矩平衡:

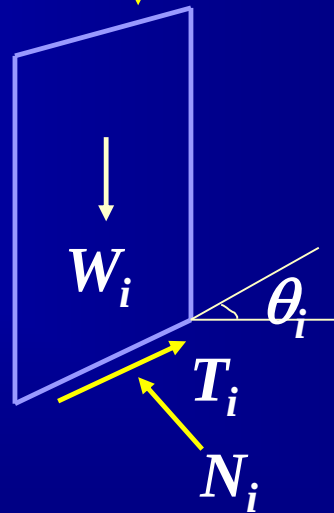
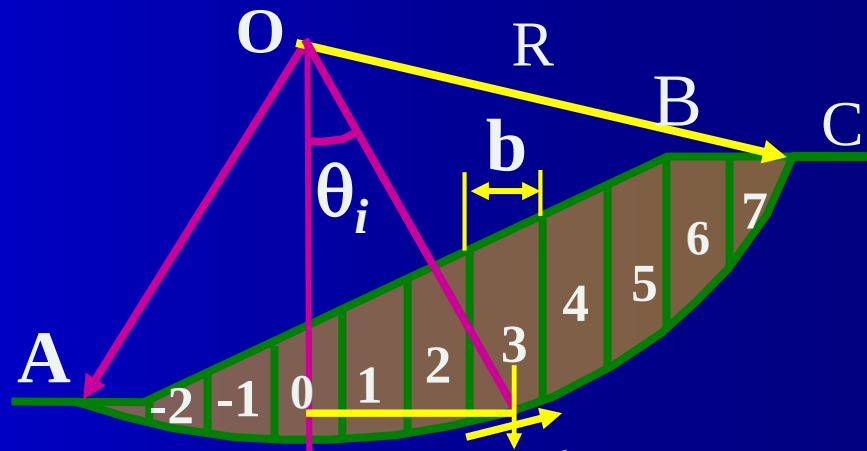
滑动力矩=抗滑力矩

$$M_s = M_R$$

$$\sum W_i \sin \theta_i R = \sum T_i R = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi_i)}{F_s} R$$

$$F_s = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi_i)}{\sum W_i \sin \theta_i}$$

显式
表达





瑞典条分法

(费伦纽斯条分法)

瑞典条分法

1、基本原理

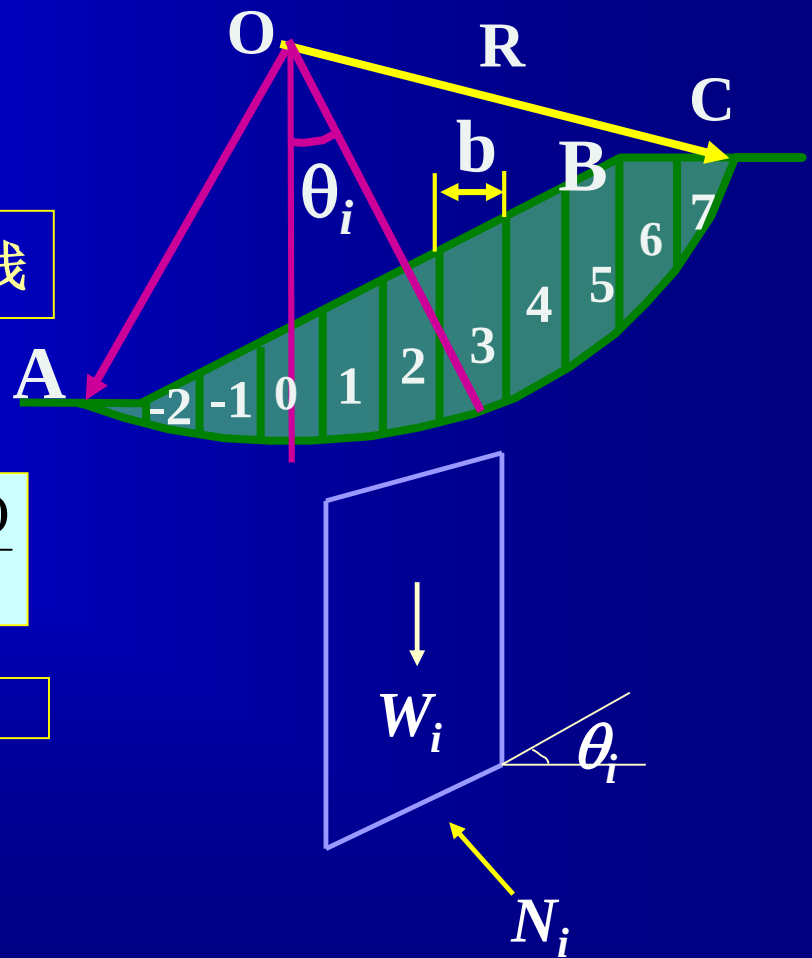
- 将圆弧滑动体分成若干竖直的土条。
- 计算各土条对弧心的抗滑动力矩和滑动力矩。
- 计算土坡总抗滑力矩和总滑动力矩之比 K 。
- 选几个可能的滑动面，分别计算相应的 K ，其中 $K_{\min}$ 所对应的滑动面就是最危险的滑动面，要求 $K_{\min}=1.3\sim 1.5$ 。



```

graph TD
    A[圆心 O，半径 R] --> B[分条： b=R/10]
    B --> C[编号：过圆心垂线为 第0 条中线]
    C --> D[列表计算  $l_i$   $W_i$   $\theta_i$ ]
    D --> E["
$$F_s = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \theta_i \operatorname{tg} \phi_i)}{\sum W_i \sin \theta_i}$$
"]
    E --> F[变化圆心 O 和半径 R]
    F --> G[Fs 最小]
    G --> H[END]
    F --> B

```



瑞典条分法的讨论

未知数: $2n+1$ 方程数: $4n$

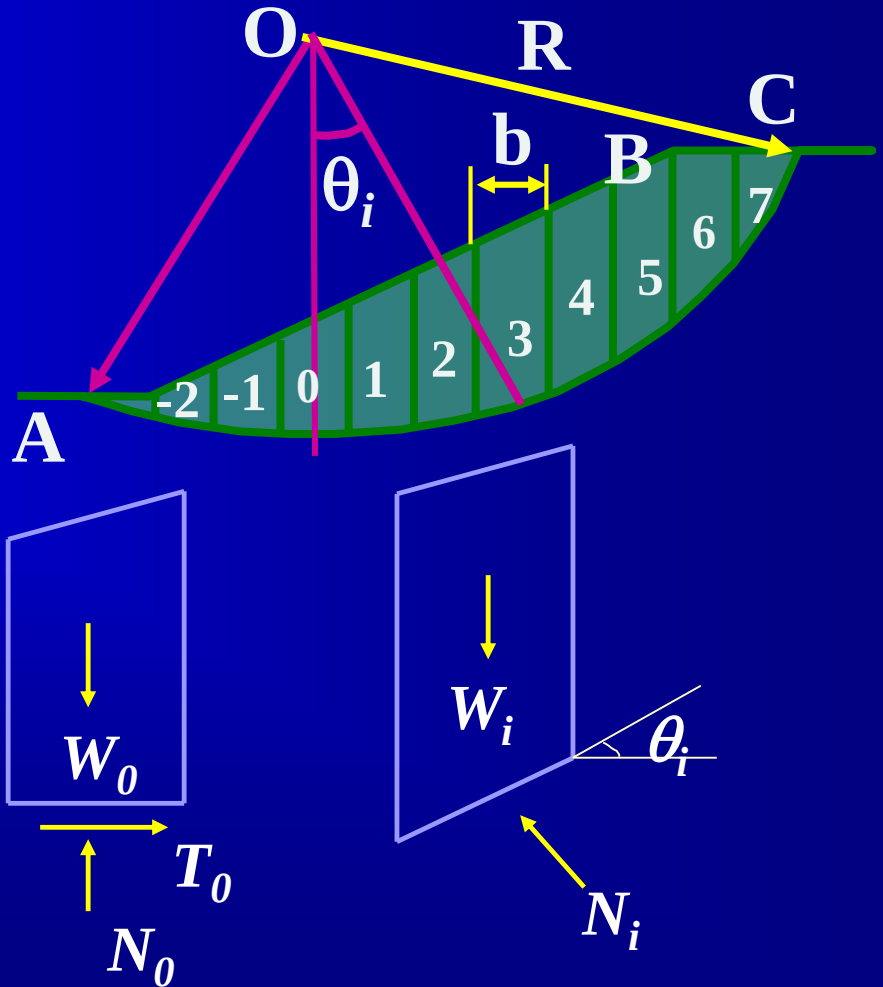
(1) 一些平衡条件不能满足

$$N_i = W_i \cos \theta_i$$

$$T_i = \frac{c_i l_i + N_i \tan \phi_i}{F_s} \neq W_i \sin \theta_i$$

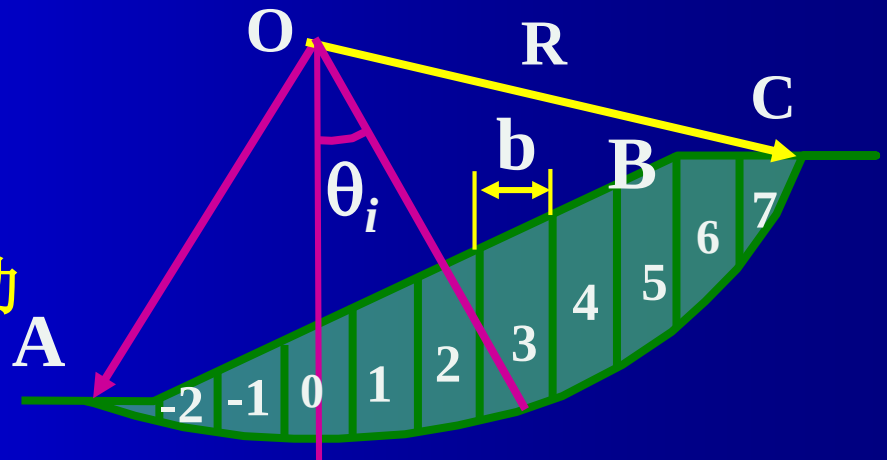
对0#土条

$$T_0 = \frac{c_0 l_0 + N_0 \tan \phi_0}{F_s} > 0$$



瑞典条分法的讨论

(2) 假设圆弧滑动面，与实际滑动面有差别

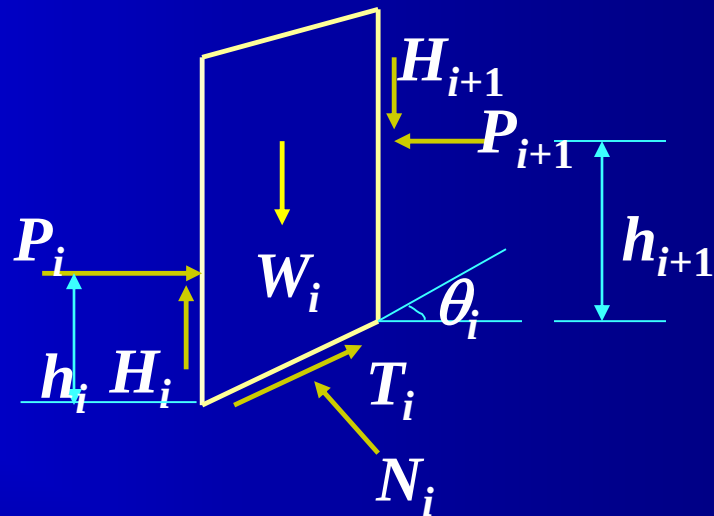
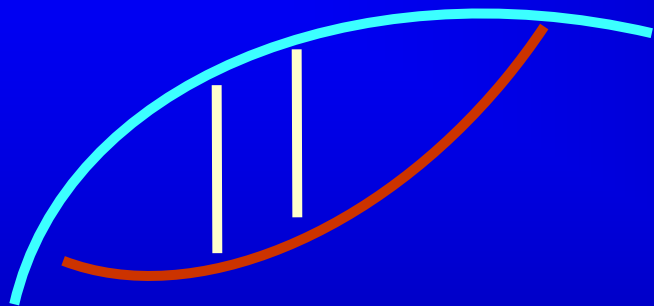


- 假设圆弧滑动面，使 F_s 偏大
- 忽略条间力，使得计算安全系数 F_s 偏小

最终结果是 F_s 偏小， ϕ 越大 F_s 越偏小

一般情况下， F_s 偏小 10% 左右，工程应用中偏于安全

四、毕肖甫 (Bishop) 法



假定：

圆弧滑动面；条间力切向力=0

$$\Delta H_i = (H_{i+1} - H_i) = 0$$

忽略条间切向力：n-1

假定滑动面上作用点位置：n

2n-1

未知数：4n-1 方程数：4n

毕肖甫法

$$\sum F_z=0$$

极限平衡条件

方程组求解，得到：

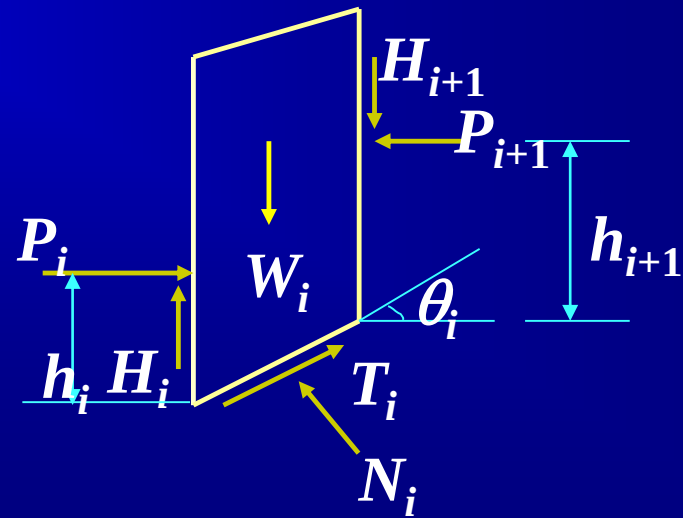
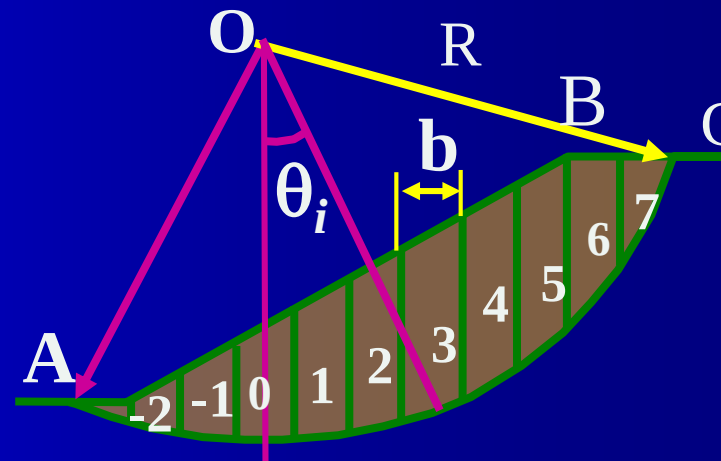
$$W_i = N_i \cos \theta_i + T_i \sin \theta_i$$

$$T_i = \frac{c_i l_i + N_i tg \phi_i}{F_s}$$

$$N_i = \frac{(W_i - \frac{c_i l_i}{F_s} \sin \theta_i)}{m_{\theta i}}$$

$$T_i = \frac{1}{F_s} \cdot \frac{W_i tg \phi_i + c_i l_i \cos \theta_i}{m_{\theta i}}$$

$$m_{\theta i} = \cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i tg \phi_i}{F_s}$$



毕肖甫法

整体力矩平衡：

$$\sum W_i \sin \theta_i R = \sum T_i R$$



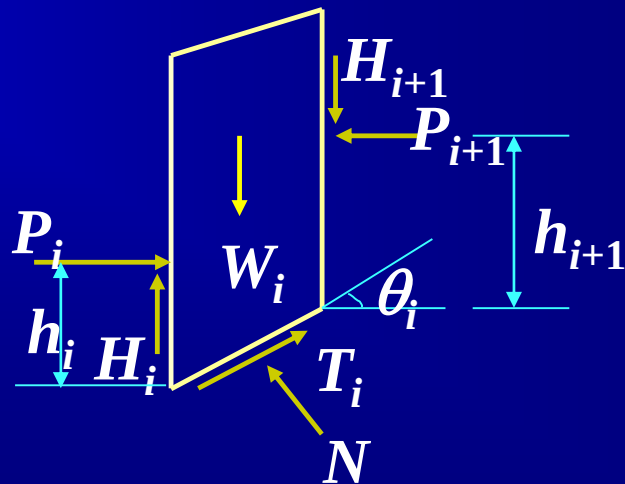
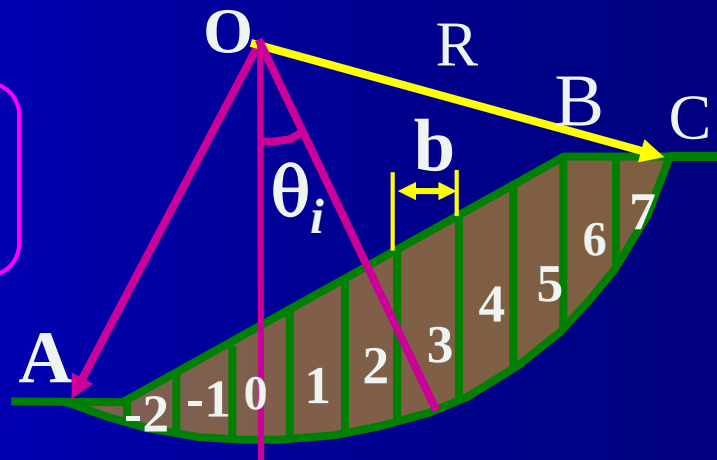
$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{\theta i}} [c_i l_i \cos \theta_i + W_i \tan \phi_i]}{\sum W_i \sin \theta_i}$$

$$m_{\theta i} = \cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i \tan \phi_i}{F_s}$$

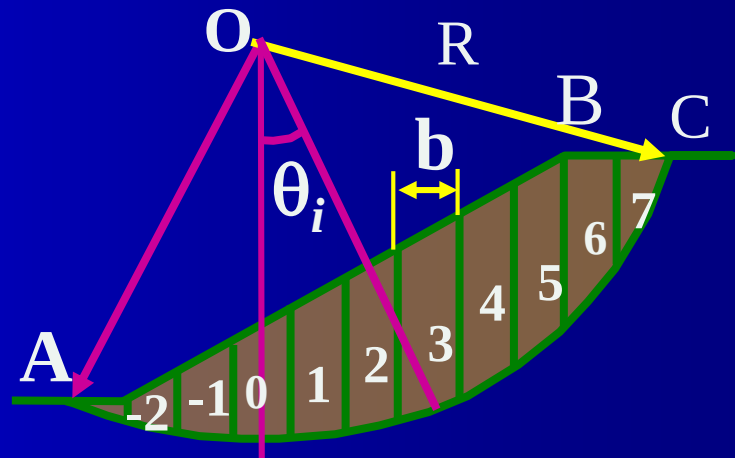
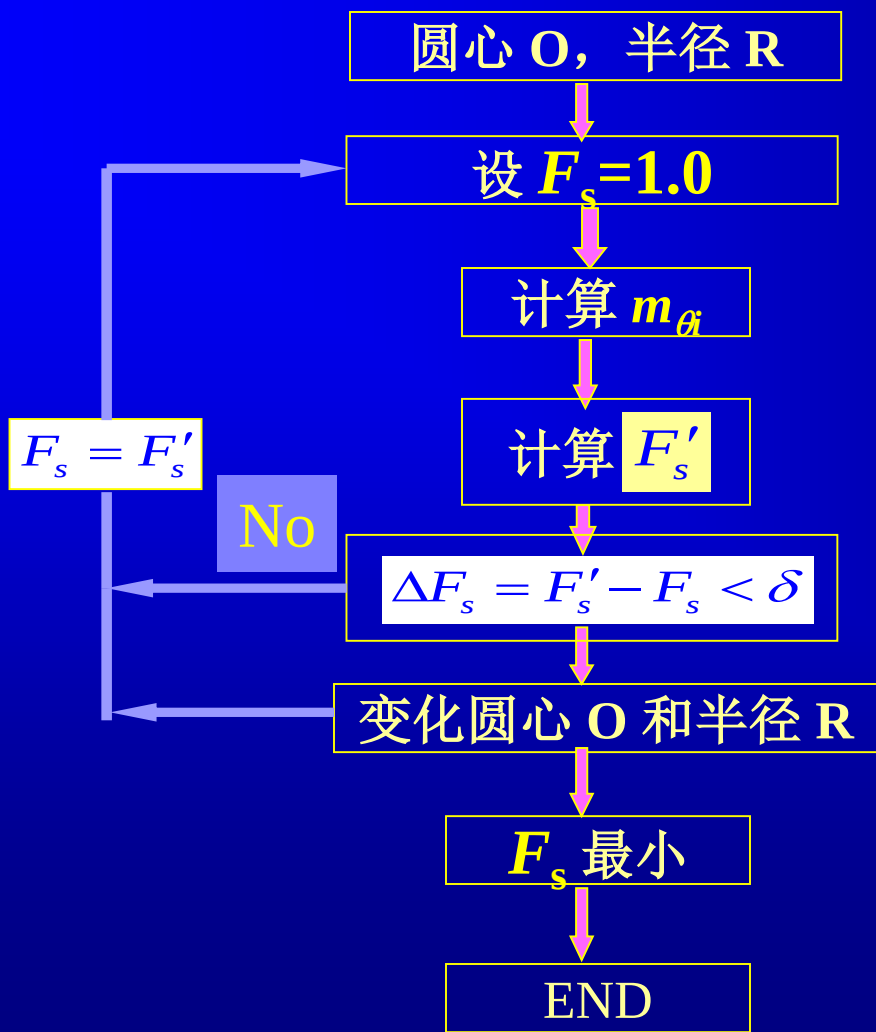
N_i 过圆心;
 P_i 互相抵消

$$l_i \cos \theta_i = b_i$$

隐式
表达



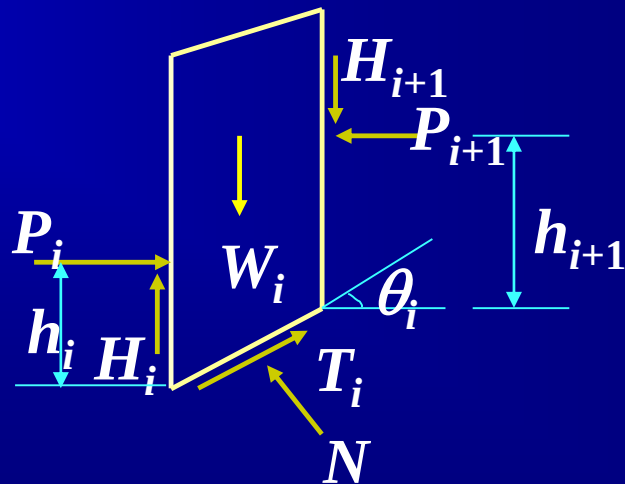
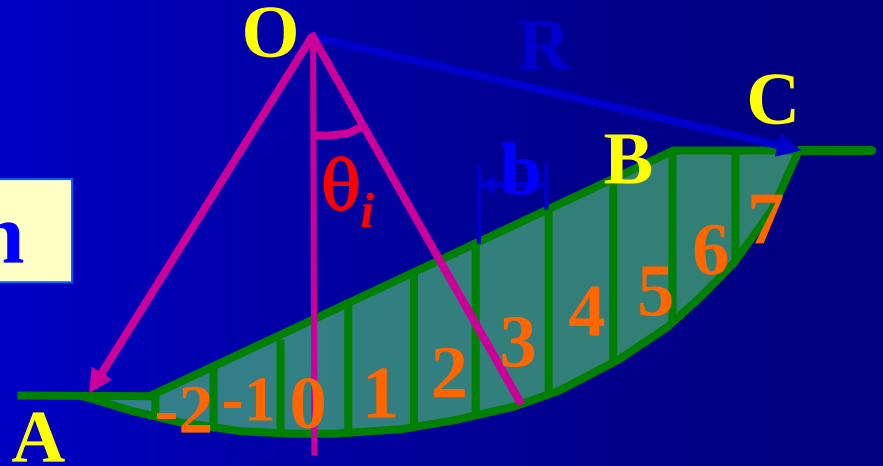
计算步骤



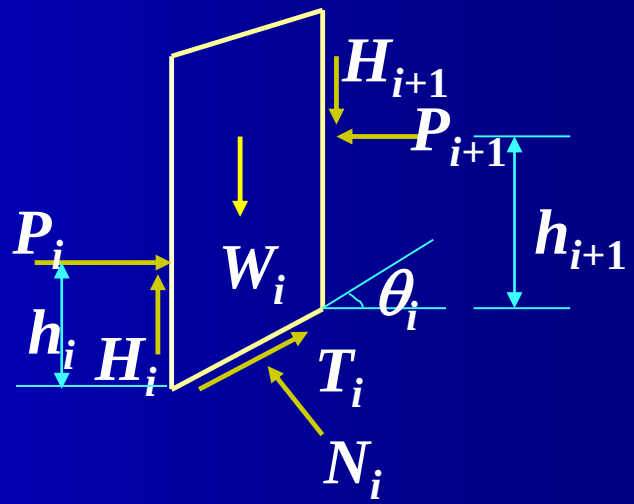
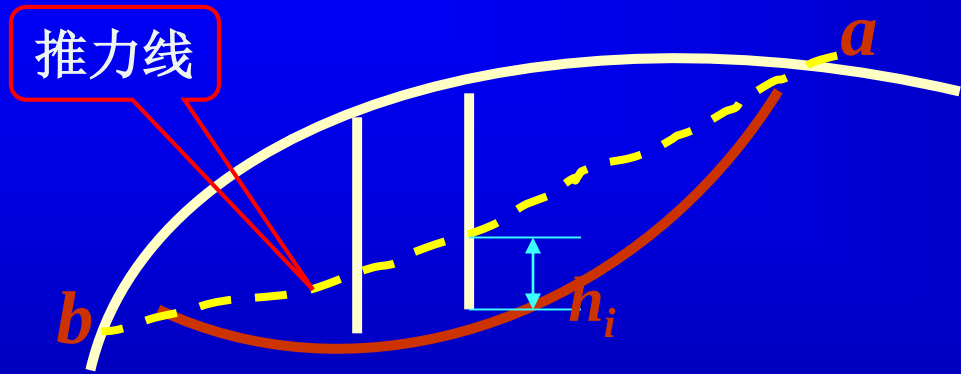
毕肖甫法讨论

未知数: $4n-1$ 方程数: $4n$

- (1) 假设圆弧滑动面
- (2) 大多数情况下是精确的
- (3) 计算所得安全系数比瑞典法大



五、简布 (Janbu) 法



假定：假定各土条间推力作用点连线为光滑连续曲线 ↔ “推力作用线”
即假定了条块间力的作用点位置

条块间力的作用点位置： $n-1$
假定滑动面上作用点位置： n } $2n-1$

未知数： $4n-1$ 方程数： $4n$

简布法

$$\sum F_z = 0$$

$$W_i + \Delta H_i = N_i \cos \theta_i + T_i \sin \theta_i$$

$$\sum F_x = 0$$

$$\Delta P_i = T_i \cos \theta_i - N_i \sin \theta_i$$

极限平衡条件

$$T_i = \frac{c_i l_i + N_i \tan \phi_i}{F_s}$$



方程组求解

N_i T_i ΔP_i

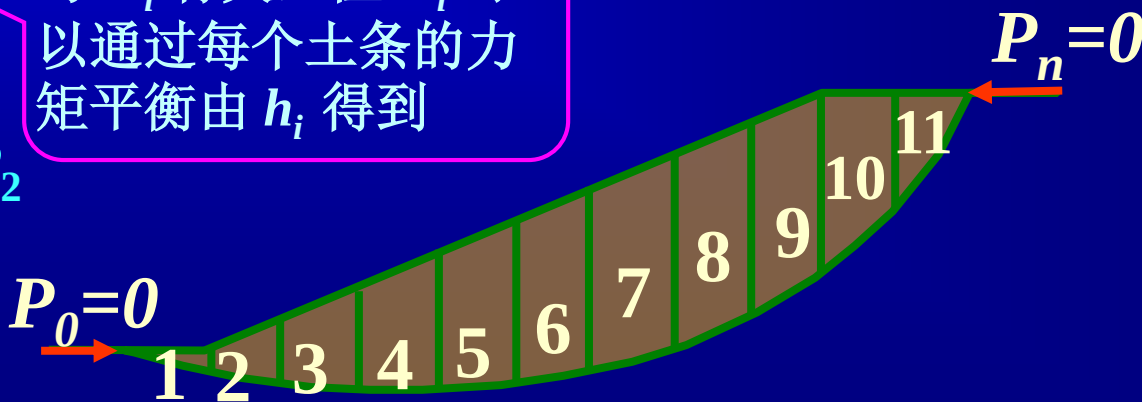
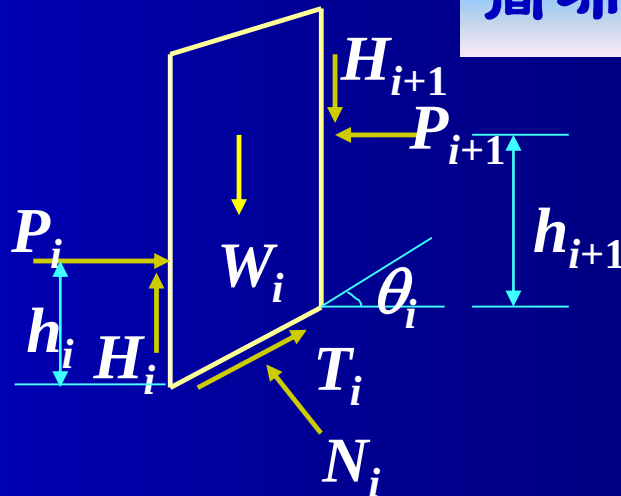
与 H_i 有关, 但 H_i 可以通过每个土条的力矩平衡由 h_i 得到

$$P_1 = \Delta P_1$$

$$P_2 = P_1 + \Delta P_2 = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

$$P_j = \sum \Delta P_i \quad (i=1, j)$$

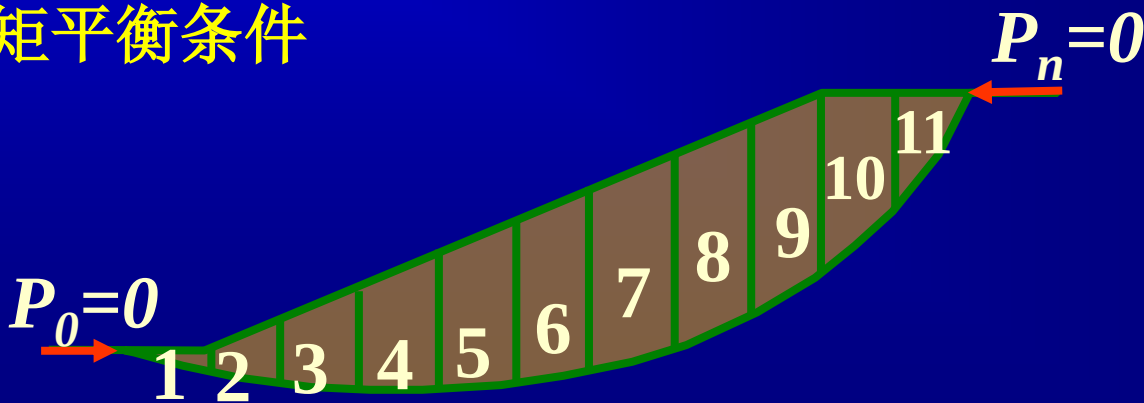
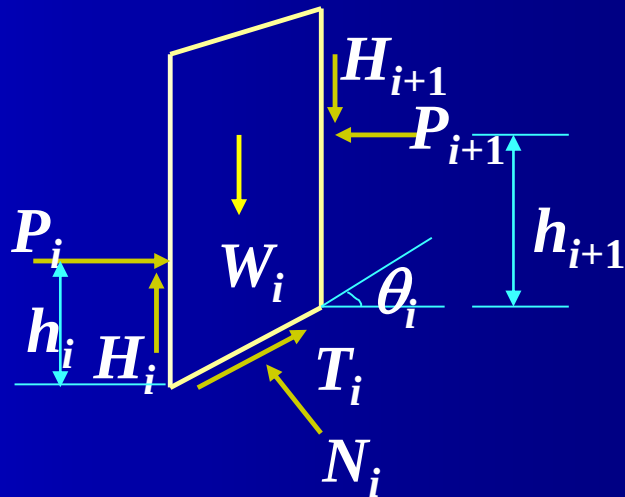
$$P_n = \sum \Delta P_i = 0 \quad (i=1, n)$$



简布法讨论

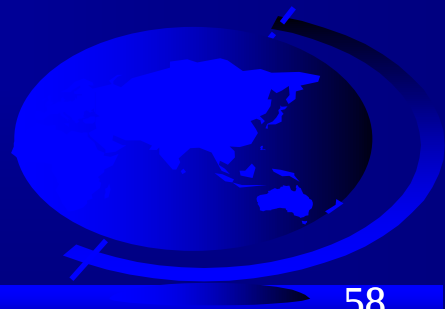
未知数: $4n-1$ 方程数: $4n$

- (1) 任意形状滑动面，不一定是圆弧
- (2) 各土条满足静力平衡和极限平衡条件，滑动土体满足力矩平衡条件
- (3) 计算较复杂





§ 7.4 土坡稳定分析的若干问题



一、坡顶开裂时的土坡稳定性

- (1) 雨水或地表水会渗入裂缝后，将产生一静水压力。
- (2) 裂缝中的静水压力将促使土坡滑动。
- (3) 土坡滑动弧长相应地减短，即抗滑力矩有所减少。

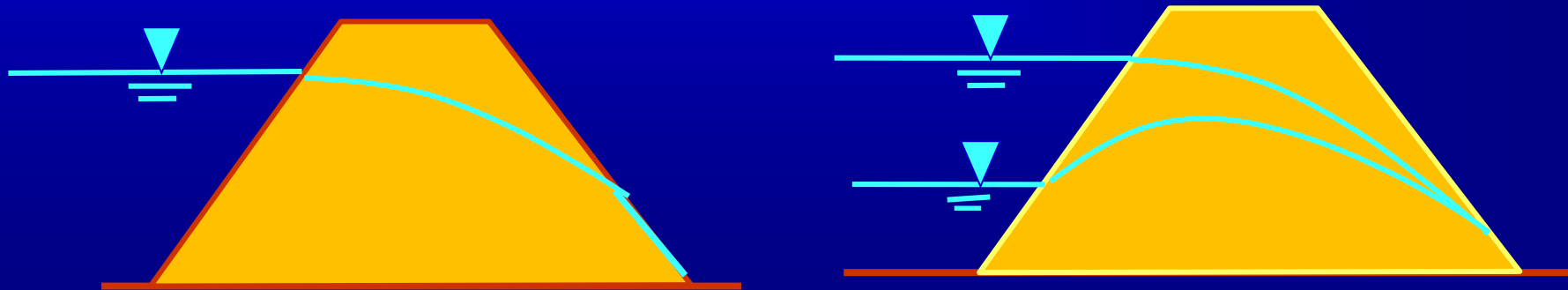
二、边坡稳定分析的总应力法和有效应力法

有效应力法物理概念明确，困难在于孔隙水压力的计算较麻烦。如果孔隙水压力能够比较容易地计算出来，应该用有效应力法，这样概念清晰，结果可靠。

但在许多情况下，孔隙水压力难以准确计算，就只能采用总应力法。

三、土中水渗流时的土坡稳定性

当土坡两侧水位不同形成渗流时，土坡稳定分析需考虑渗透力的作用。无黏性土坡的稳定安全系数约降低一半，甚至更多。



四、土的抗剪强度指标及安全系数的选用

土的抗剪强度指标及土坡稳定安全系数值。表7-4

抗剪强度指标的选用基本原则是，若能准确地知道土中孔隙水压力的分布，则采用有效应力强度指标比较合理。重要工程应采用有效应力强度指标进行核算。

土的抗剪强度指标及安全系数的选用：

对总应力强度指标的选用：验算正常使用情况宜采用固结不排水或固结快剪强度指标；

验算施工期土坡稳定，宜采用不排水或快剪强度指标。但又与土坡的加荷情况、土层渗透性、厚度及施工速度有关。

安全系数的选用

土坡的稳定安全系数的确定，国内现行的国家、行业及地方的标准还不完全一致。

P268 表7-5~~表7-8

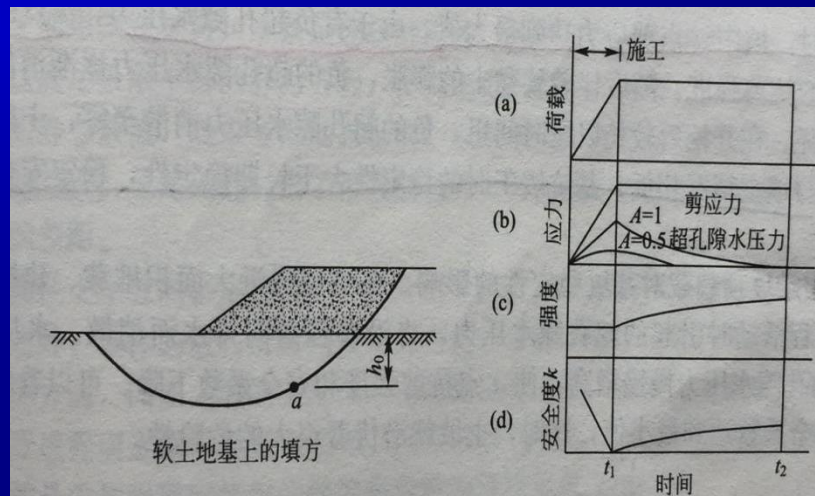
五、挖方、填方边坡

填方工程

填方工程：（1）竣工后，土中的总应力保持不变，而超孔隙水压力逐渐消散。

（2）填土结束时边坡的稳定性应用总应力法和不排水强度指标来分析，而长期稳定性则应用有效应力法和有效应力参数来分析。

（3）填方工程边坡的安全系数在施工结束时最小，并随着时间的增长而增大。

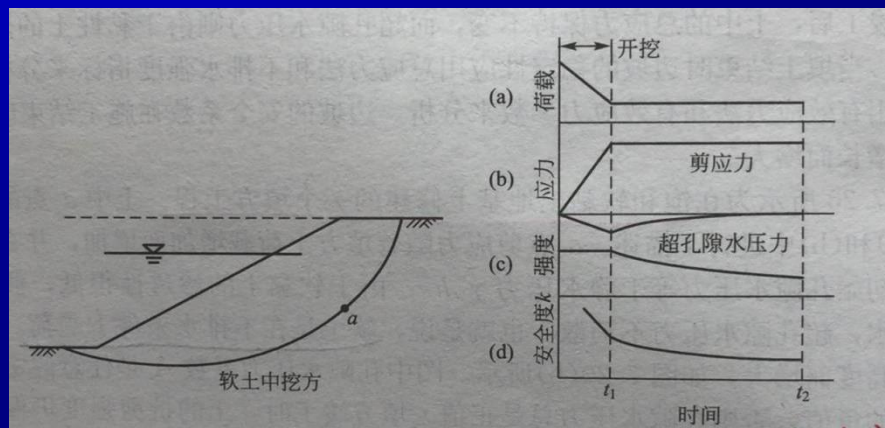


挖方工程：黏性土边坡开挖时，随着总应力的减小，孔隙水压力也不断地下降，直至出现负值。

(1) 竣工以后，负超孔隙水压力随着时间逐渐消散，伴随而来的是黏性土的膨胀和抗剪强度的下降。

(2) 竣工时的稳定性分析和长期稳定性分析应分别采用卸载条件下的不排水和排水强度来表示。

(3) 基坑竣工时的稳定性大于长期稳定性，稳定安全系数随着时间而降低。



六、影响土坡稳定的因素

外界力的作用破坏了土体内原来的应力平衡状态。
土的抗剪强度由于受到外界各种因素的影响而降低，
促使土坡失稳破坏。

主要原因两个方面:

(1) 土中切应力的增加

土坡作用力发生变化: 坡顶上堆载、车辆行驶、开挖爆破、打桩、地震等动力扰动。

静力水的作用: 雨水使土含水量增大, 自重压力增加;

静水压力使土中切应力增加并改变土中原有应力状态。

水渗流时, 产生渗透力。

(2) 土中抗剪强度的降低

气候变化使土干裂、冻胀, 因降雨、蓄水使土的含水量增多或超静水压力的增加; 振动使饱和细砂、粉砂液化等都会使土的强度降低。

边坡分析的目的

- (1) 设计合理边坡
- (2) 加固边坡，避免滑坡的发生
- (3) 管理边坡，消除隐患



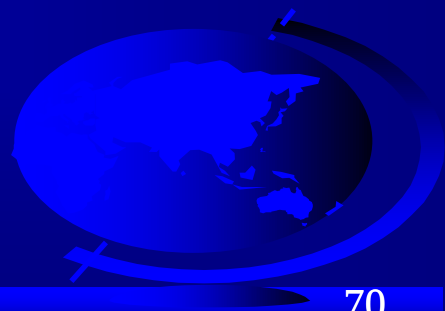
本章目录

§ 7.1 概述

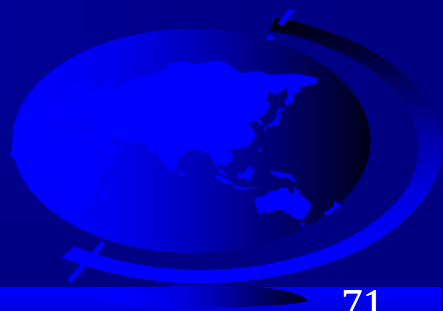
§ 7.2 平面滑动分析法

§ 7.3 黏性土坡的稳定分析

§ 7.4 土坡稳定分析的若干问题

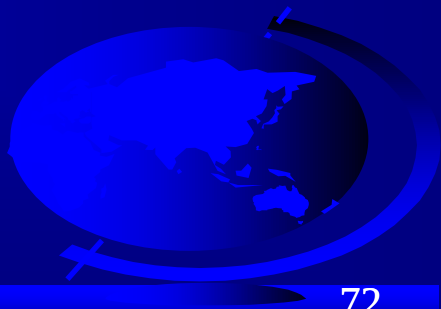


本章结束



课后作业

- 1、影响土坡稳定的因素有哪些？
- 2、土坡稳定分析的条分法原理是什么？



思考题（不用交）

- 1、土中水渗流对土坡稳定性有何影响？
- 2、土的抗剪强度指标及安全系数的选用原则？
- 3、挖方、填方边坡稳定性各有什么特点？
- 4、如何防止土坡滑动？