



西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

土力学 (第2版) 电子课件

廖红军
H. J. Liao

新世纪土木工程系列教材

土力学

(第2版)

赵树德 廖红军 主编

高等教育出版社

H. J. Liao



- 本电子课件为高等教育出版社土木工程系列教材《土力学》第2版(赵树德、廖红建主编)的配套课件。基于作者长期主讲《土力学》的电子教案编制而成。限于编者水平, 难免存在不妥之处, 恳请大家批评指正。
- 《土力学》第2版经修订共有10章内容, 其中1-8章是土力学的核心部分, 9-10章为选学内容。故本课件以1-8章的主要教学内容作为电子教案, 可为使用本教材的教师和学生提供教学和学习上的便利。



第7章 土坡稳定分析

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

7.1 概 述

7.2 土坡稳定及其
影响因素

7.3 平面滑动面的土坡
稳定分析

7.4 圆弧滑动面的土坡
稳定分析

7.5 瑞典条分法

7.6 圆弧滑动面的
毕肖普法

7.7 非圆弧滑动面的
分析方法

7.8 土坡稳定分析中的
孔隙水压力

7.9 基坑工程的土坡
稳定分析

H. J. Li ao



§ 7.1 概述

- 滑坡的产生机理

- Ø 在土体自重及外力作用下，坡体内将产生**切应力**，当切应力大于土的抗剪强度时，即产生**剪切破坏**，如靠坡面处剪切破坏的面积很大，则产生一部分土体相对于另一部分土体滑动的现象，称为**滑坡**或**塌方**。

- 滑坡特征及危害

- Ø 土坡在发生**滑动前**，一般在坡顶产生明显的**下沉**并出现**裂缝**，**坡脚**附近的地面则有较大的侧向位移并微微隆起。**滑坡后**如果处理不当，不仅影响工程进展，甚至危及生命安全和导致工程事故，应引起重视。

- | 基坑的开挖
- | 坡顶堆载
- | 人工填筑的土堤、路堤等

陕西省泾阳县南黄土塬滑坡，作者摄



H. J. Li ao

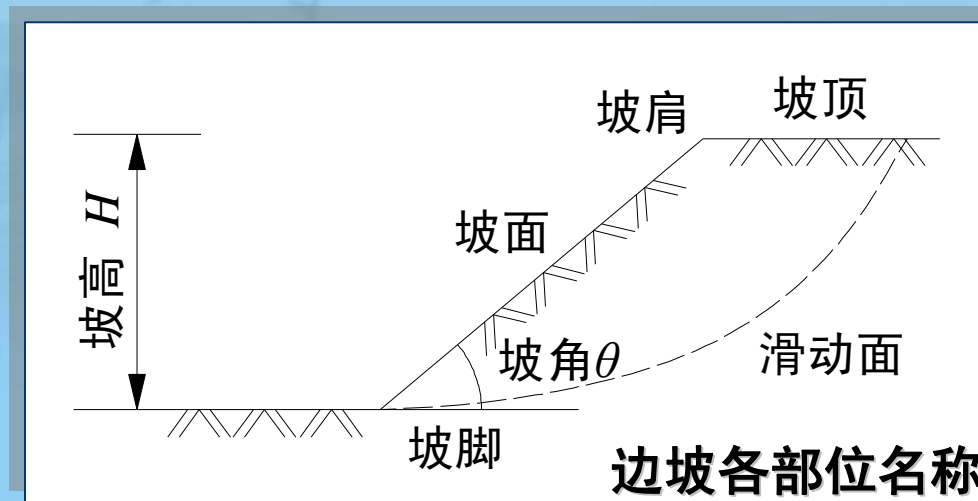


§ 7.2 土坡稳定及其影响因素 (一)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

- 基本概念

- Ø **土坡**: 具有倾斜表面的土体。
- Ø **天然土坡**: 由于地质作用自然形成的土坡, 如山坡、江河的岸坡等。
- Ø **人工边坡**: 填土工程建造物如基坑、渠道、土坡、路堤等的边坡。



H. J. Li ao



§ 7.2 土坡稳定及其影响因素 (二)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

- 影响土坡稳定的因素

- Ø **边坡的坡角 θ** ， θ 越小愈稳定但不经济； θ 太大则经济而不安全。
- Ø **坡高 H** ，其他条件相同， H 越大越不安全。
- Ø **土的性质**，如重度 γ 和强度参数 ϕ 、 c 值。 ϕ 、 c 值大，则土坡安全。有时由于地震等原因，使得 ϕ 值降低或产生孔隙水压力，可使原来稳定的边坡失稳而滑动，地下水位上升，对土坡不利。
- Ø **地下水的渗透力**，当边坡中有地下水渗透时，渗透力与滑动方向相反则安全，两者方向相同则危险。
- Ø **震动作用的影响**，如地震、工程爆破、车辆震动等。
- Ø **人类活动和生态环境的影响**。

H. J. Li ao



§ 7.3 平面滑动面的土坡稳定分析 (一)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

- 土坡稳定分析

无粘性土坡
稳定分析

一般情况下的
无粘性土土坡

有渗流作用的无
粘性土土坡

粘性土坡
稳定分析

瑞典条分法
稳定数法

毕肖普法

简布普遍条分法

不平衡推力传递法

复合滑动面简化算法

H. J. Li ao



§ 7.3 平面滑动面的土坡稳定分析 (二)

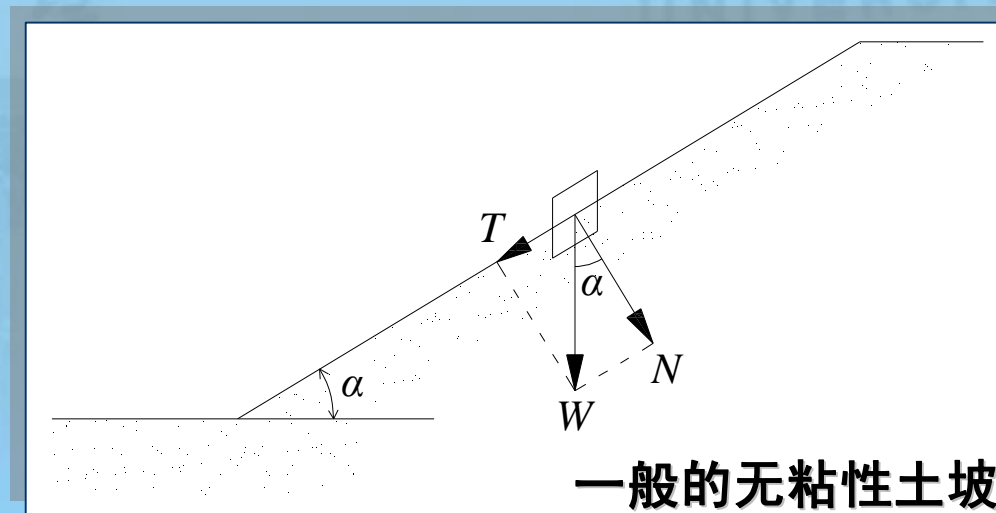
西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

7.3.1 一般情况下的土坡

- ∅ 对于均质的**无粘性土**土坡，无论是干坡还是在完全浸水条件下，由于土粒间无粘结力，故只要位于**坡面**上的土单元体能够保持稳定，则整个土坡就是稳定的。
- ∅ 设单元土体的自重为 **W** ，则使它下滑的剪切力 **T** 和在坡面法线方向的分力 **N** 为

$$T = W \sin \alpha$$

$$N = W \cos \alpha$$



H. J. Li ao



§ 7.3 平面滑动面的土坡稳定分析 (三)

- ∅ 阻止土体下滑的力是此单元体与下面土体之间的抗剪力，其所能发挥的最大值根据库仑定律为

$$T_f = N \tan j = W \cos a \tan j$$

- ∅ 土坡稳定**安全因数** K_s 为最大抗剪力与剪切力之比

$$K_s = \frac{T_f}{T} = \frac{W \cos a \tan j}{W \sin a} = \frac{\tan j}{\tan a}$$

- 当 $K_s = 1$ 时，土体处于**极限平衡状态**，即 $j = a$ 。可见理论上只要坡角**小于**土的内摩擦角土体是**稳定的**，此时的坡角称为**自然休止角**。



§ 7.3 平面滑动面的土坡稳定分析 (四)

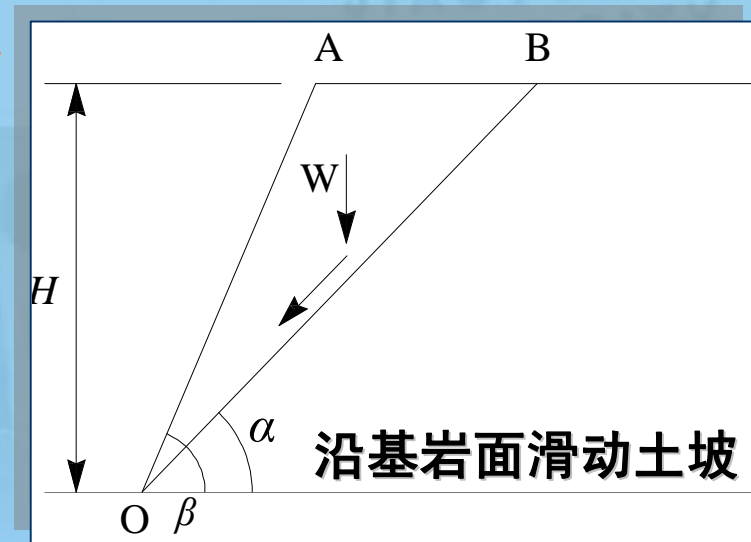
- ∅ 对于在**倾斜基岩面**上堆积有第四纪土层，当雨季或震动作用下沿基岩面滑动时，由**倾斜滑动平面**上的极限平衡条件得土坡稳定**安全因数K**为

$$K = \frac{\tan j}{\tan a} + \frac{2c \cdot \sin b}{g \cdot H \cdot \sin a \cdot \sin(b - a)}$$

- ∅ 当**K=1**时边坡的临界高度 **H_{cr}**

$$H_{cr} = \frac{2c \cdot \sin b \cos j}{g \sin(b - a) \sin(a - j)}$$

- ∅ 通常工程上**K=1.1~1.25**。





§ 7.3 平面滑动面的土坡稳定分析 (五)

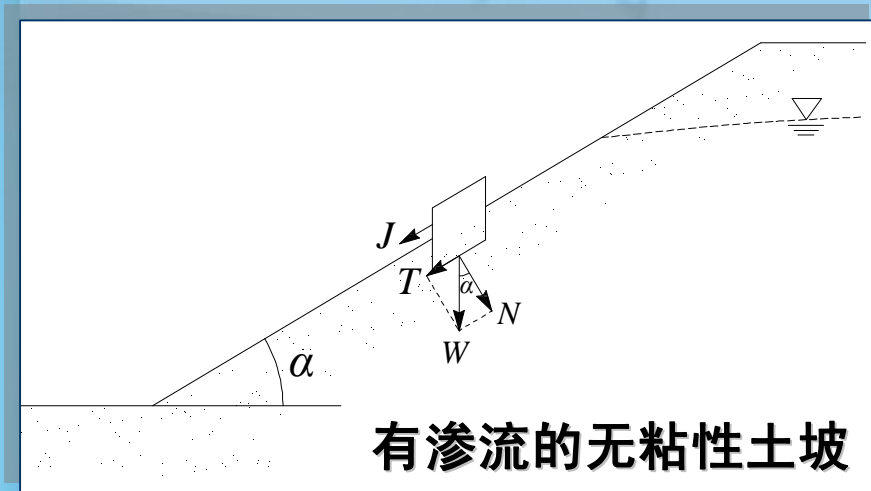
西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

7.3.2 有渗流作用的无粘性土土坡

- 在坡面上渗流逸出处取一单元土体，除自重外还受到**渗流力**作用。若渗流为**顺坡**，则逸出处渗流方向与坡面平行，渗流力的方向也与坡面平行，下滑的剪切力为：

$$T + J = W \sin a + J$$

- 单元土体所能发挥的最大**抗剪力**仍为 T_f ，则**安全因数**为



$$K_s = \frac{T_f}{T + J} = \frac{W \cos a \tan j}{W \sin a + J}$$

H. J. Li ao



§ 7.3 平面滑动面的土坡稳定分析 (六)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

- 对单元土体来说，当直接用渗流力来考虑渗流影响时土体自重就是**浮重度** γ' ，而渗流力 $J = \gamma_w i$ ， i 是渗流逸出处的**水力梯度**。对于顺坡出流：

$$i \approx \sin a$$

于是

$$K_s = \frac{g' \cos a \tan j}{(g' + g_w) \sin a} = \frac{g' \tan j}{g_{sat} \tan a}$$

g_{sat} 为土的饱和重度，**安全因数有所降低**。



例题1

有一砂砾土坡，饱和重度 $\gamma_{\text{sat}} = 19 \text{ kN/m}^3$ ，内摩擦角 $\phi = 32^\circ$ ，坡比为1:3。求：1) 干坡或完全浸水时的稳定系数；2) 当有顺坡渗流时土坡的稳定性；3) 若坡比改成1:4，其稳定性又如何？

解：1) 干坡或完全浸水时土坡的稳定安全因数为

$$K_s = \frac{\tan j}{\tan a} = \frac{\tan 32^\circ}{1/3} = 1.87$$

稳 定

2) 有顺坡向渗流时，土坡的安全因数为

$$K_s = \frac{g' \tan j}{g_{\text{sat}} \tan a} = \frac{(19 - 10) \times \tan 32^\circ}{19 \times 1/3} = 0.89$$

不 稳 定

3) 若将坡比改成1:4，土坡的稳定安全因数为

$$K_s = \frac{g' \tan j}{g_{\text{sat}} \tan a} = \frac{(19 - 10) \times \tan 32^\circ}{19 \times 1/4} = 1.18$$

稳 定



§ 7.4 圆弧滑动面的土坡稳定分析 (一)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

- **粘性土**的抗剪强度包括**摩擦**强度和**粘聚**强度，由于粘聚力的存在，其边坡最危险的滑动面深入土体内部，多呈一曲面，从而在理论上提出了**圆弧滑动面法**。
- 基于圆弧假定，从极限平衡状态来分析边坡稳定：
 - Ø **整体圆弧滑动面法**，主要适用于均质简单土坡；
 - Ø **圆弧滑动条分法**，可适用于非均质土坡、有地下水位、土坡外形复杂等情况。

H. J. Li ao



§ 7.4 圆弧滑动面的土坡稳定分析 (二)

7.4.1 整体圆弧滑动面法

该法认为边坡失稳为滑动土体绕圆心转动。对于粘性土滑动面上的**抗滑力矩**由两部分组成：

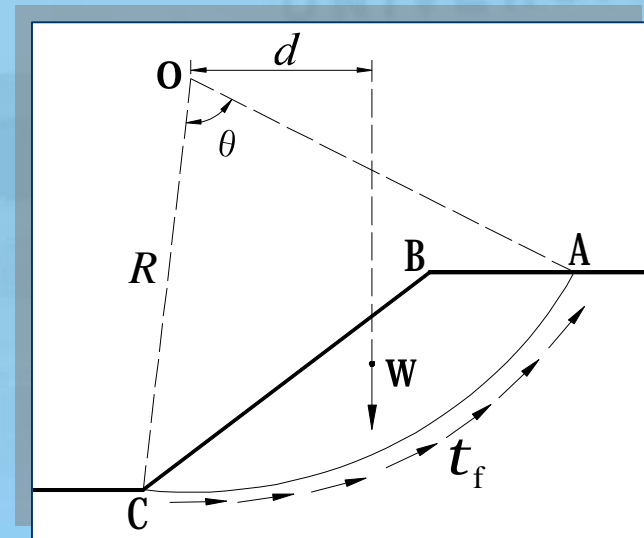
- ∅ **粘聚力**在滑面上产生的抗滑力矩；
- ∅ 滑面上的**反力**产生的抗滑力矩，其大小与**内摩擦角**有关。

当 $\varphi=0$ ，滑动面为一光滑面，反力的方向在滑动面法线上通过圆心O，故抗滑力矩：

$$M_r = c \cdot \widehat{AC} \cdot R$$

土坡稳定**安全系数**为

$$K_s = \frac{M_r}{M_s} = \frac{c \cdot \widehat{AC} \cdot R}{W \cdot d}$$



H. J. Li ao



§ 7.4 圆弧滑动面的土坡稳定分析 (三)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

7.4.2 摩擦圆法

当 $\varphi > 0$ ，圆弧滑动面上的抵抗力由两部分组成：

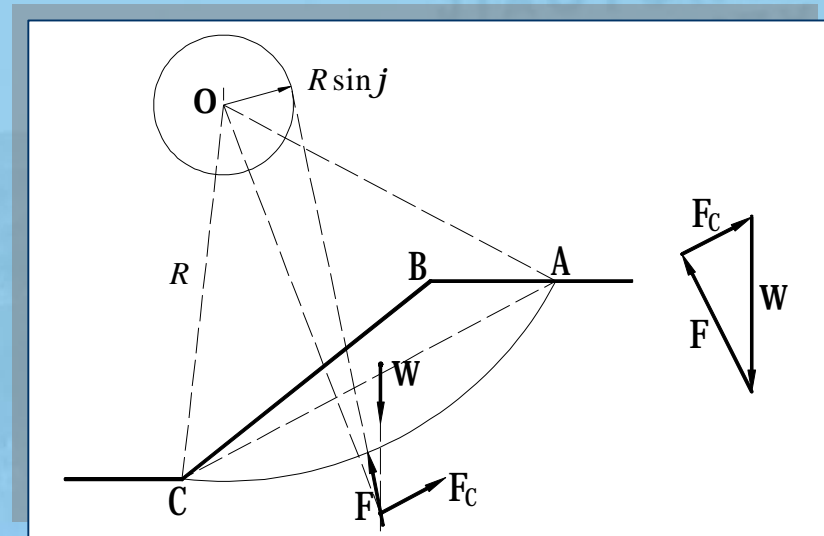
- 粘聚力产生的抵抗力的合力 F_c
- 内摩擦角产生的抵抗力的合力 F

泰勒假定圆弧滑动面上的**摩阻力**全部发挥，而把**粘聚力的发挥程度**定义为**安全因数**，设维持土体平衡时滑动面上需要发挥的粘聚力为 c_r ，则

$$K_s = \frac{c}{c_r}$$

通过 F_c 、 F 、 W 组成的力矢三角形求出 F_c ，再由下式求 c_r

$$F_c = c_r \overline{AC}$$



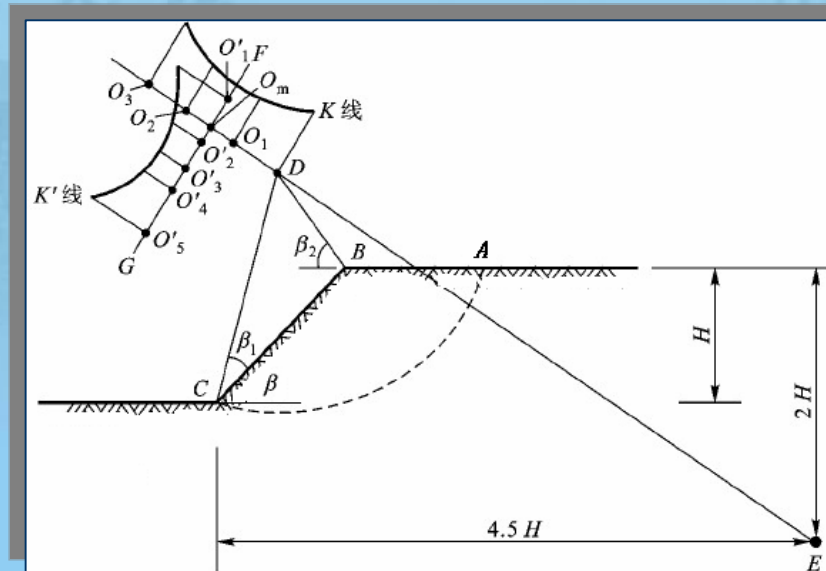
H. J. Li ao



§ 7.4 圆弧滑动面的土坡稳定分析 (四)

7.4.3 费伦纽斯确定最危险滑动面圆心的方法

- ∅ 土的内摩擦角 $\varphi = 0$ ，最危险滑动面通过坡脚且圆心在D点。
- ∅ 当 $\varphi > 0$ ，最危险滑动面也通过坡脚，圆心确定**基本思路**为：
 - 1) 先在ED的延长线上取**若干点** O_i 作为试算圆心，求出相应的安全因数 K_i ，连成 **K线**的最低点即最小安全因数对应的圆心 O_m ；
 - 2) 通过 O_m 点作ED的垂线FG，在FG线上再取若干试算圆心 O'_i ，连成 **K'线**后的最小安全因数对应的圆心即是最危险滑动面圆心。





§ 7.4 圆弧滑动面的土坡稳定分析 (五)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

7.4.4 稳定数法

为减少土坡稳定分析计算的工作量，对高度在**10m以下**的均质土坡，宜采用**洛巴索夫图解法**或**泰勒稳定数法**进行稳定分析。

Ø 洛巴索夫图解法

土坡稳定的临界高度：
$$H_{cr} = \frac{c}{gN_s}$$

N_s —**稳定数**，只与坡角 β 和土的内摩擦角 φ 值有关，查图7.4.4。

稳定安全因数 K 定义为：
$$K = \frac{H_{cr}}{H}$$

Ø 泰勒图解法

稳定数 N_s ：
$$N_s = \frac{gH}{c}$$

查图7.4.5。

H. J. Li ao



例题2

已知某工程基坑开挖深度 $H=5\text{m}$ ，地基土的天然重度 $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ ，内摩擦角 $\phi=15^\circ$ ，内聚力 $c=12\text{kPa}$ 。
求稳定坡角为多少？

解：1) **洛巴索夫图解法**

$$N_s = \frac{c}{gH} = 0.126$$

查图7.4.4得：坡角 $\beta = 64^\circ$

2) **泰勒图解法**

$$N_s = \frac{gH}{c} = 7.92$$

查图7.4.5得：坡角 $\beta = 65^\circ$



§ 7.5 瑞典条分法 (一)

条分法概念:

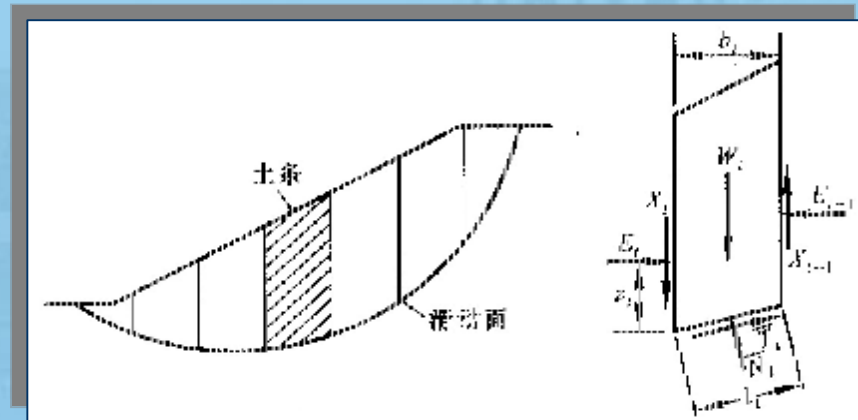
将滑动土体分成若干条块, 分析每一条块上的作用力, 根据每一土条上的力及力矩的静力平衡条件求出安全因数。

分析每一土条上作用的力:

土条的自重 W_i , 作用于土条底面的法向力 \bar{N}_i 和切向力 \bar{T}_i , 土条两侧的作用力 E_i 、 X_i 和 E_{i+1} 、 X_{i+1} 。(超静定问题)

由安全因数定义和莫尔-库仑破坏准则, 可得

$$\bar{T}_i = \frac{t_{fi} l_i}{K_s} = \frac{c_i l_i + \bar{N}_i \tan j_i}{K_s}$$



土条及作用在土条上的力



§ 7.5 瑞典条分法 (二)

- **瑞典条分法**：假定滑动面为圆柱面且为不变形的刚体；假定**不考虑土条两侧面**上的作用力。（静定问题）

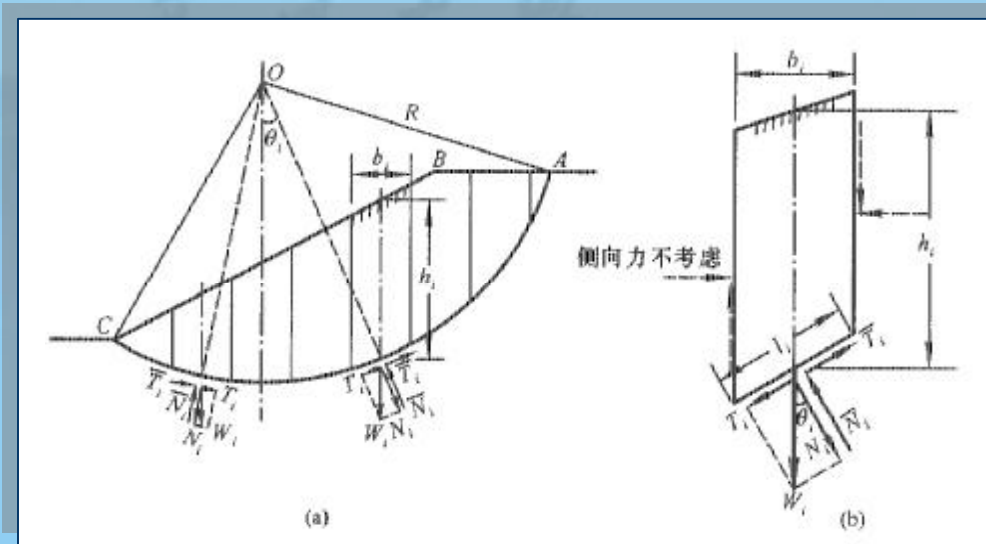
- 土条上作用的力有：

Ø 土条**自重**及其在滑动面的法向和切向的分力 $N_i = W_i \cos q_i$

$$T_i = W_i \sin q_i$$

$$W_i = g b_i h_i$$

Ø 作用在土条**底面**上的**法向反力** \bar{N}_i ，它与 N_i 大小相等，方向相反。



瑞典法计算图式



§ 7.5 瑞典条分法 (三)

作用在土条底面上的**抗剪力** \bar{T}_i ，其可能发挥的最大值等于土条底面上的抗剪强度与滑弧长度 l_i 的乘积，方向则与滑动方向相反。当土坡处于稳定状态并**假定各土条底部滑动面上安全因数均等于整个滑动面上安全因数**时，实际发挥的抗剪力为：

$$\bar{T}_i = \frac{t_{fi} l_i}{K_s} = \frac{(c + s_i \tan j) l_i}{K_s} = \frac{cl_i + \bar{N}_i \tan j}{K_s}$$

将整个滑动土体内各土条对圆弧O点取力矩平衡，可得

$$\sum T_i R = \sum \bar{T}_i R$$

故得

$$K_s = \frac{\sum (cl_i + \bar{N}_i \tan j)}{\sum T_i} = \frac{\sum (cl_i + W_i \cos q_i \tan j)}{\sum W_i \sin q_i} = \frac{\sum (cl_i + gb_i h_i \cos q_i \tan j)}{\sum gb_i h_i \sin q_i}$$

若取各土条宽度均相同，上式可简化为

$$K_s = \frac{c\hat{L} + gb \tan j \sum h_i \cos q_i}{gb \sum h_i \sin q_i}$$



§ 7.5 瑞典条分法（四）

- **试算法**：假定不同的圆弧滑动面即滑弧，就能求出不同的安全因数 K_s 值，可**试算**找出**最小的 K_s** 值即为土坡稳定的安全因数。若安全因数达不到设计要求，应修改原设计，重新进行稳定性分析。
- 瑞典条分法也可用**有效应力法**进行分析，此时土条底部实际发挥的抗剪力为

$$\bar{T}_i = \frac{t_{fi} l_i}{K_s} = \frac{[c' + (s_i - u_i) \tan j'] l_i}{K_s} = \frac{c' l_i + (W_i \cos q_i - u_i l_i) \tan j'}{K_s}$$

故有

$$K_s = \frac{\sum [c' l_i + (W_i \cos q_i - u_i l_i) \tan j']}{\sum W_i \sin q_i}$$



§ 7.6 圆弧滑动面的毕肖普法 (一)

毕肖普法提出能够考虑土条两侧面上的作用力的土坡稳定分析方法。

该法仍假定滑动面为一圆心为 O ，半径为 R 的圆弧，任取一土条 i ，进行受力分析：

作用于土条底面的抗剪力 \bar{T}_i ；有效法向反力 \bar{N}_i 及孔隙水压力；

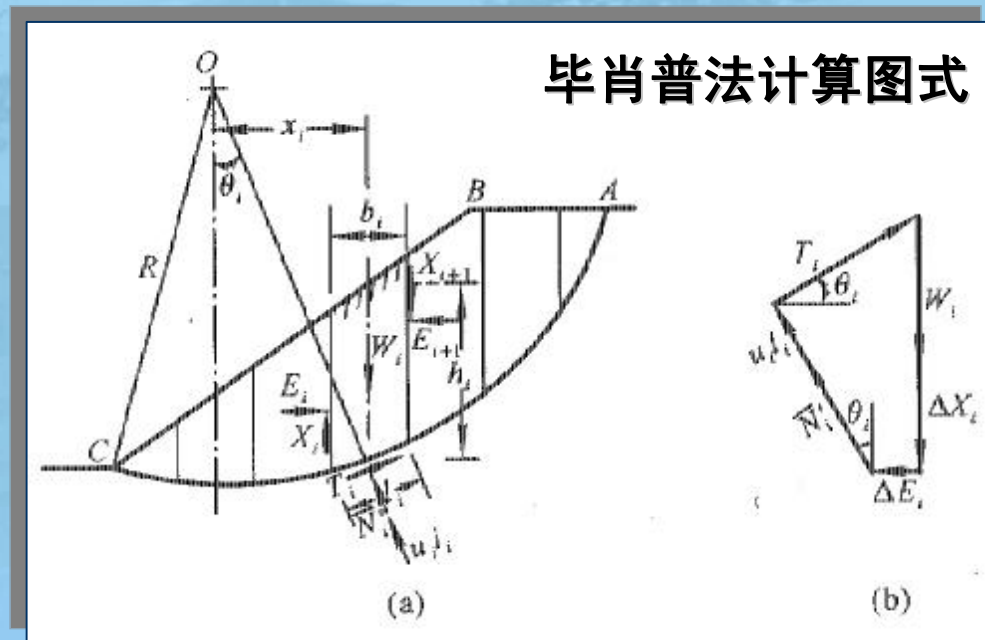
假定这些力的作用点都在土条底面中点；

土条自重 W_i ；

土条两侧作用有法向力

E_i, E_{i+1} 及切向力 X_i, X_{i+1}

$$X_{i+1} - X_i = \Delta X_i$$

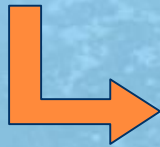




§ 7.6 圆弧滑动面的毕肖普法 (二)

- 取*i*土条**竖直方向合力的平衡**:

$$W_i + \Delta X_i - \bar{T}_i \sin q_i - \bar{N}'_i \cos q_i - u_i l_i \cos q_i = 0$$



$$\bar{N}'_i \cos q_i = W_i + \Delta X_i - \bar{T}_i \sin q_i - u_i b$$

- 土条滑动面上的**抗剪力**运用库仑定律有:

$$\bar{T}_i = \frac{t_{fi} l_i}{K_s} = \frac{c' l_i}{K_s} + \bar{N}'_i \frac{\tan j'}{K_s}$$

$$\bar{N}'_i = \frac{1}{m_{qi}} (W_i + \Delta X_i - u_i b - \frac{c' l_i}{K_s} \sin q_i)$$

$$m_{qi} = \cos q_i + \frac{\tan j'}{K_s} \sin q_i$$



§ 7.6 圆弧滑动面的毕肖普法 (三)

整个滑动土体**对圆心O求力矩平衡**，此时相邻土条间侧壁作用力的力矩相互抵消，各土条的 \bar{N}_i 及 $u_i l_i$ 的作用线均通过圆心，则：

$$\sum W_i x_i - \sum \bar{T}_i R = 0, \quad x_i = R \sin q_i$$

$$K_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{qi}} [c'b + (W_i - u_i b + \Delta X_i) \tan j']}{\sum W_i \sin q_i}$$

上式即为毕肖普求土坡安全因数的**普遍公式**。若令各土条的 $\Delta X_i = 0$ ，则为**简化毕肖普公式**。

试算法：先假定 $K_s = 1$ 代入 $m_{qi} = \cos q_i + \frac{\tan j'}{K_s} \sin q_i$

$$K_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{qi}} [c'b + (W_i - u_i b) \tan j']}{\sum W_i \sin q_i}$$

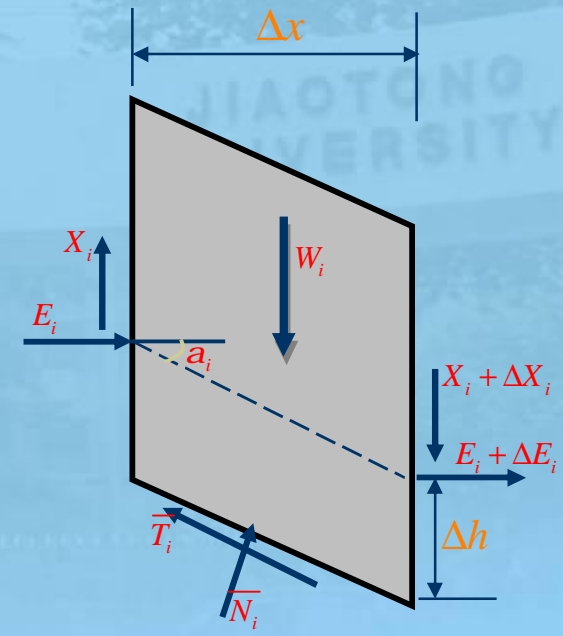
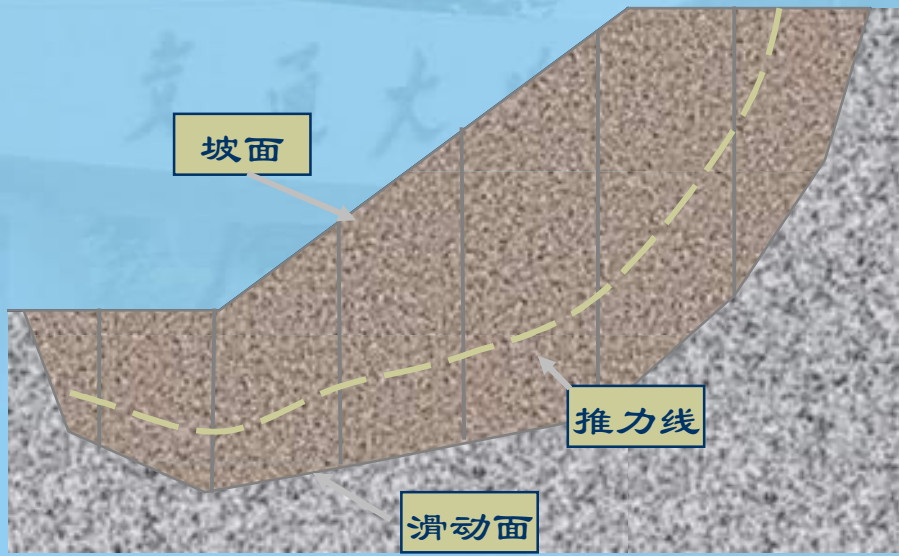
直至前后两次 K_s 非常接近为止



§ 7.7 非圆弧滑动面的分析法 (一)

7.7.1 简布和普通条分法

针对任意的滑动面，划分土条后，假定条间力合力作用点的位置已知。可以假定作用在土条底面以上1/3高度处，这些点的连线就是**推力线**。



H. J. Li ao



§ 7.7 非圆弧滑动面的分析法 (二)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

- 根据土条的**静力平衡条件**，假定土条间不产生拉力和不产生剪切破坏，可导出安全系数表达式为

$$K_s = \frac{\sum [c \cdot \Delta x + (W_i + \Delta X_i) \tan j] / m_{a_i} \cos a_i}{\sum (W_i + \Delta X_i) \tan a_i}$$

- 上式求解需用**迭代法**求解，一般借助电子计算机进行计算。目前国内外有关土坡稳定的电算程序，大多包含有简布的方法，但要注意，在某些情况下其计算结果有可能不收敛。

H. J. Li ao



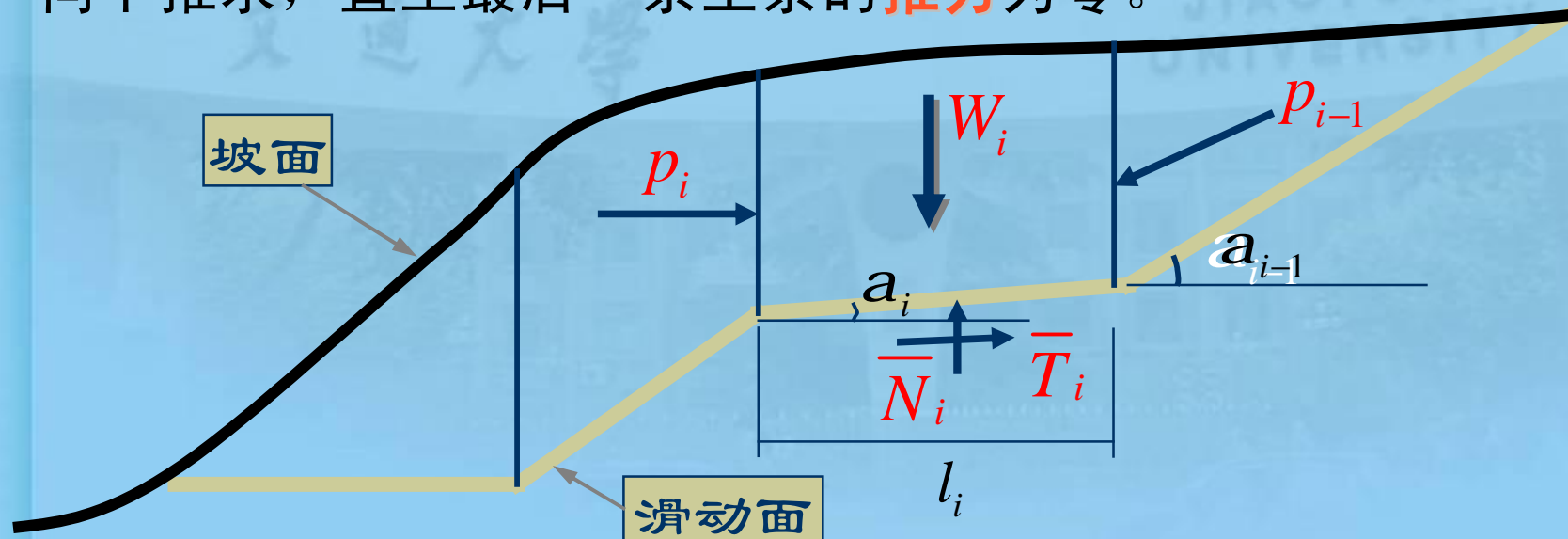
§ 7.7 非圆弧滑动面的分析法 (三)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

7.7.2 不平衡推力传递法

山区一些土坡往往覆盖在起伏变化的**岩基面**上形成**折线滑动面**，这类土坡的稳定分析可采用**不平衡推力传递法**。

基本思路：按折线滑动面将滑动土体分条，假定条间力的合力与上一个土条平衡，然后根据力的平衡条件，逐条向下推求，直至最后一条土条的**推力**为零。



H. J. Li ao



§ 7.7 非圆弧滑动面的分析法 (四)

西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

取任一土条，在垂直和平行土条底面方向取**力的平衡**，根据安全系数定义和莫尔—库仑破坏准则，可得**推力**：

$$p_i = W_i \cdot \sin a_i - \frac{c_i l_i + W_i \tan j_i \cos a_i}{K_s} + p_{i-1} Y_i$$

ψ_i —**传递系数**，其表达式为：

$$Y_i = \cos(a_{i-1} - a_i) - \frac{\tan j_i}{K_s} \sin(a_{i-1} - a_i)$$

- 解题时先假设 K_s ，从坡顶第1条开始逐条向下推求直至最后一条的推力 p_n ，若 p_n 不为零则要重新假定 K_s 试算。
- 详见《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)。



§ 7.7 非圆弧滑动面的分析法 (五)

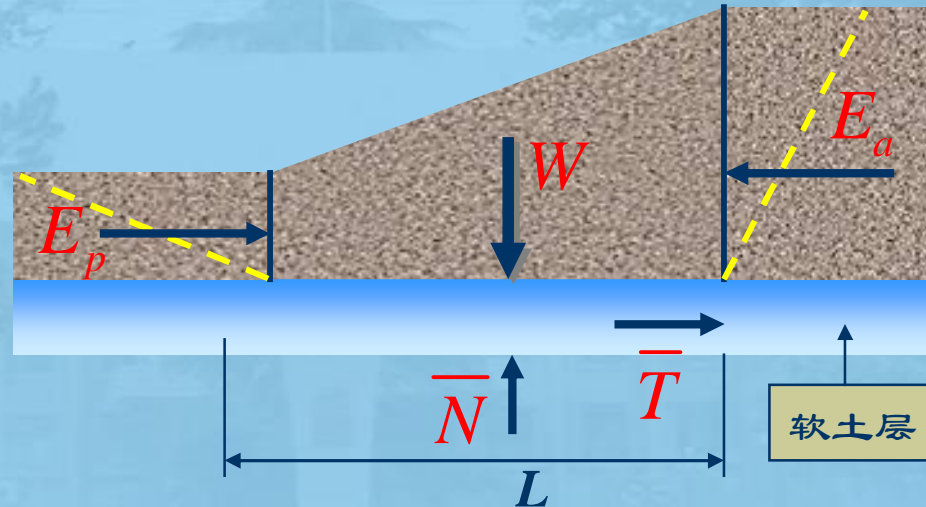
西安交通大学 土木工程系
Department of Civil Engineering
Xi'an Jiao Tong University

7.7.3 复合滑动面的简化算法

当土坡地基中存在**软土层**，滑动面**不是平滑连接**时。
稳定分析中简单的一种算法是过坡肩及坡脚做竖直线，
分析抗滑安全因数为：

$$K_s = \frac{E_p + \bar{T}}{E_a}$$

$$\bar{T} = c \cdot L + W \tan j$$



H. J. Li ao



- 本电子课件中部分未列入的章节可作为选学内容。各个学校可根据学时情况作适当的调整。

交通大学

JIAOTONG
UNIVERSITY