7 土坡稳定分析

7.1 概述

7.2 无粘性土坡的稳定分析

7.3 粘性土坡的稳定分析

7.4 总应力法与有效应力法

7.5 工程实际中的边坡稳定问题

Failure of Slopes and Embankments Under Static and Seismic Loading.pdf - Foxit Reader

are Connect Help Extras Tell me what you want to do..

opes and E... ×

ıd a landslide, such as the landslide of Figure 1 on Taiwan's No3 mo

slopes on motorway No. 3 of Taiwan (2010). For the removal of the

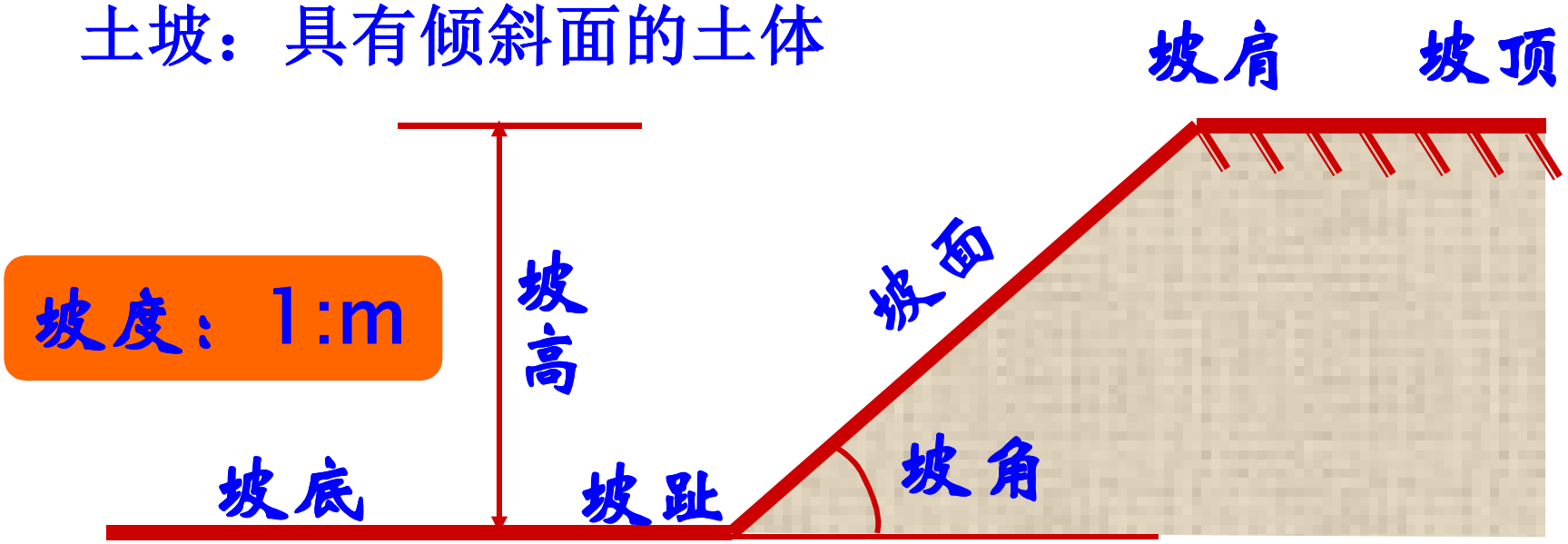
7.1 概述

边坡稳定分析对象：

土石坝、库区边坡、堤坝填筑

土质、岩质边坡

土坡：具有倾斜面的土体



7.1 概述

天然土坡

- 江、河、湖、海岸坡
- 山、岭、丘、岗、天然坡

人工土坡

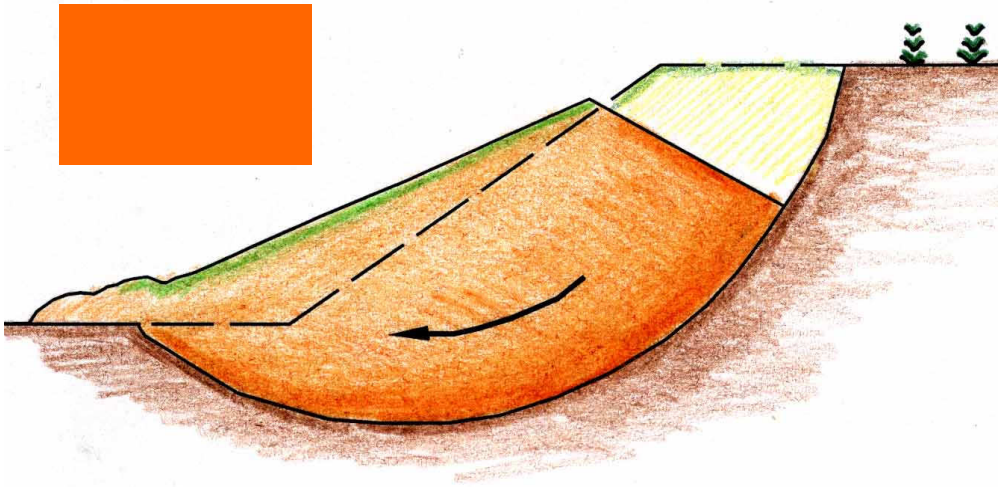
- 挖方：沟、渠、坑、池
- 填方：堤、坝、路基、堆料

7.1 概述

土体重量和渗透力在坡体内引起剪切应力，若剪应力大于剪切强度，就要产生**剪切破坏**

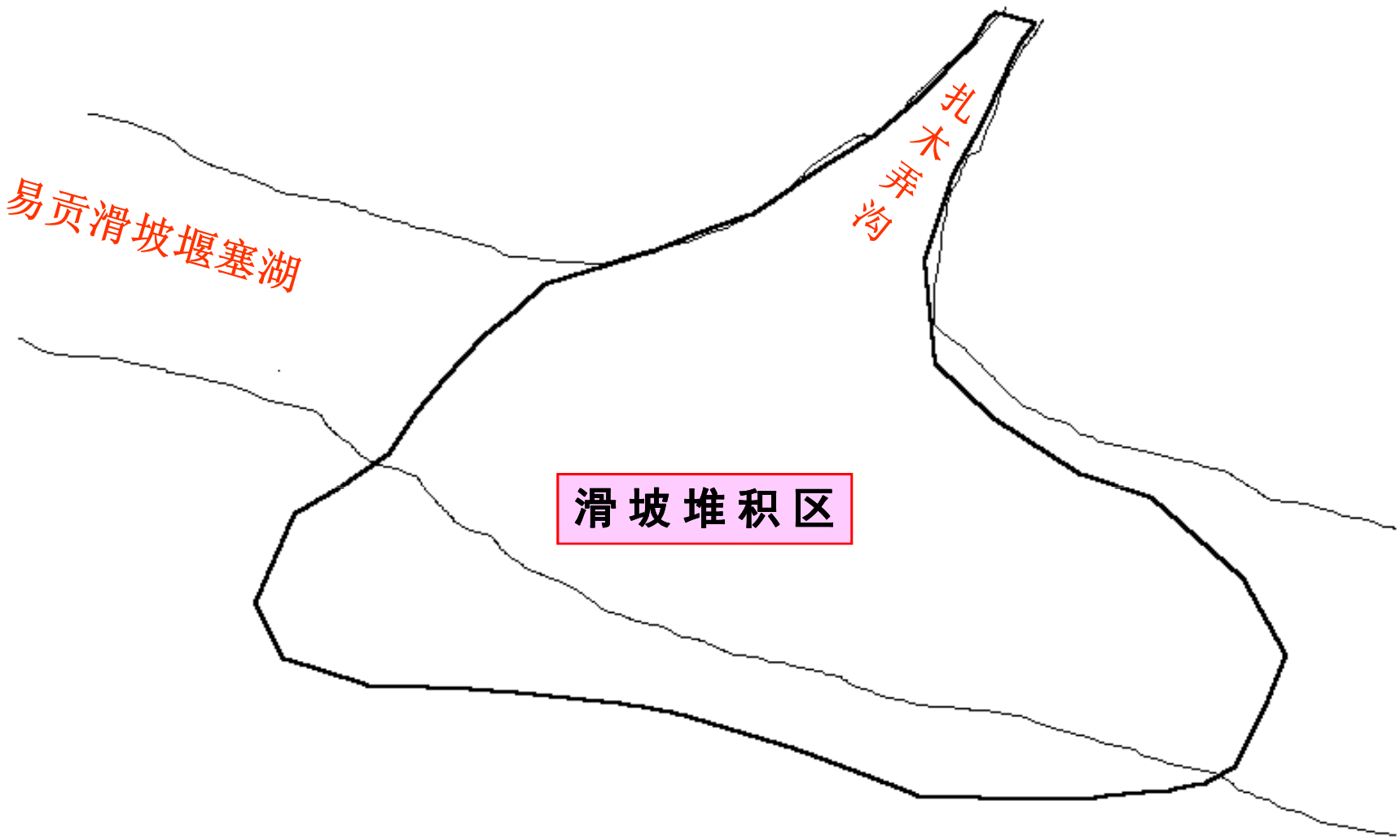
滑坡：

若坡面内的剪切破坏面积较大，一部分土体在外因作用下，相对于另一部分土体滑动，即为滑坡



P267

7.1 概述



易贡巨型高速滑坡及堰塞湖平面示意图

http://news.cctv.com/2018/10/15/VIDESCjk7yG3YQyJj8LZyxi1181015.shtml

2018年10月11日

西藏昌都市江达县波罗乡境内的金沙江堰塞湖

二次滑坡

2018年11月3日

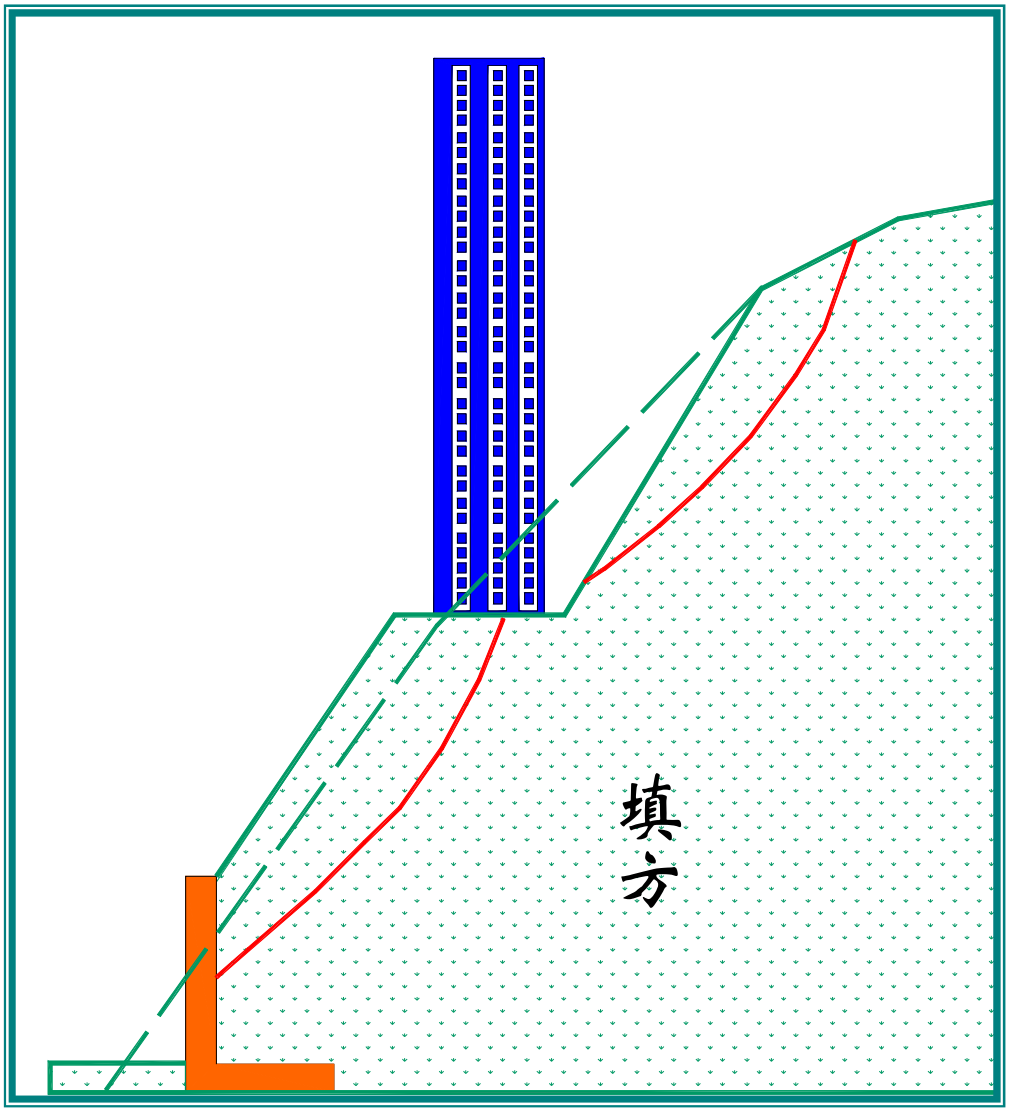
波罗乡白格村原山体滑坡点发生二次滑坡

2008年5月12日

唐家山堰塞湖是汶川大地震后形成的最大堰塞湖，地震后山体滑坡，阻塞河道形成的唐家坝堰塞湖位于涧河上游距北川县城约6公里处，是北川灾区面积最大、危险最大的一个堰塞湖

7.1 概述

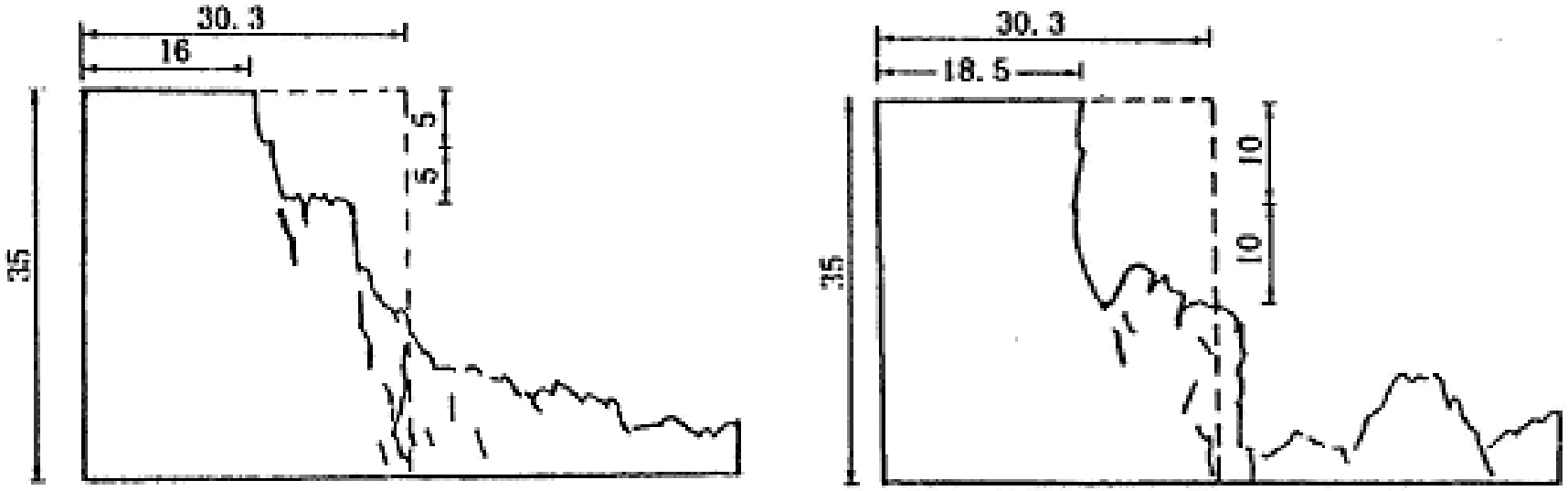
城市中的滑坡问题（香港，重庆）



1950-1960
经济大发展时期，
香港形成了54000
处人造陡降削土和
填土斜坡

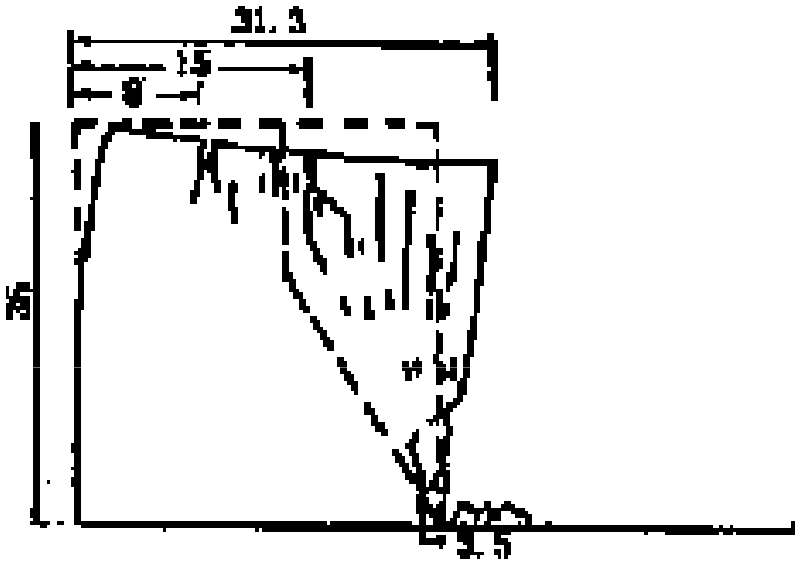
7.1 概述

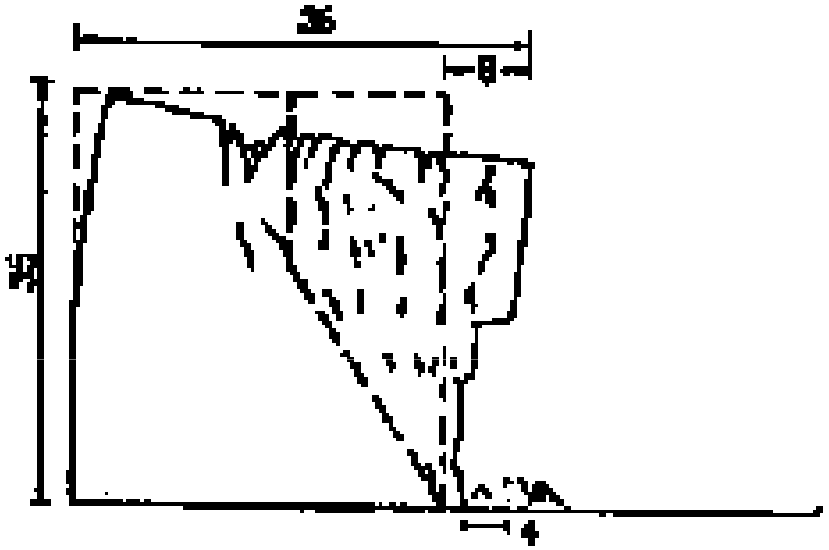
模型试验中直立边坡的破坏



7.1 概述

模型试验中直立边坡的破坏





Dundee university
Centrifuge test by Wu

7.1 概述

滑坡原因

1）振动：地震、爆破

2）土中水位升、降

3）降雨引起渗流、软化

4）水流冲刷：使坡脚变陡

5）冻融：冻胀力及融化含水量升高

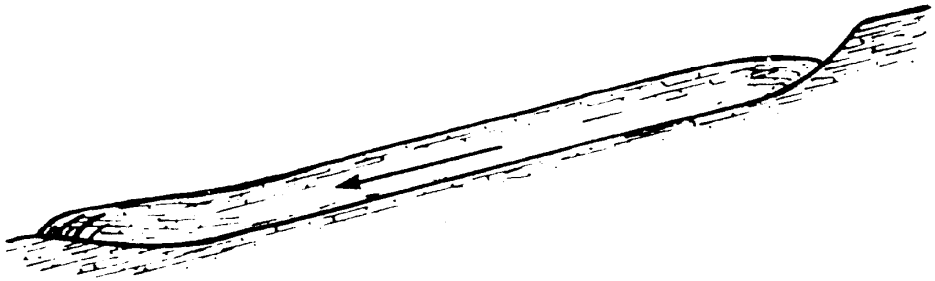
6）人工开挖：基坑、船闸、坝肩、隧洞出入口

7.1 概述

滑坡形式

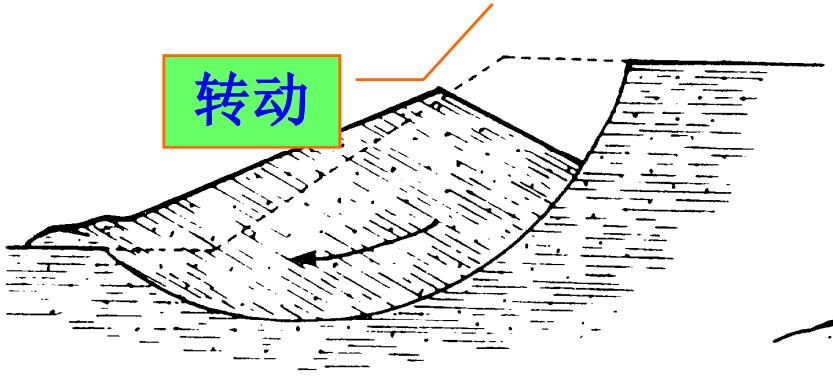
崩塌

(a) falls



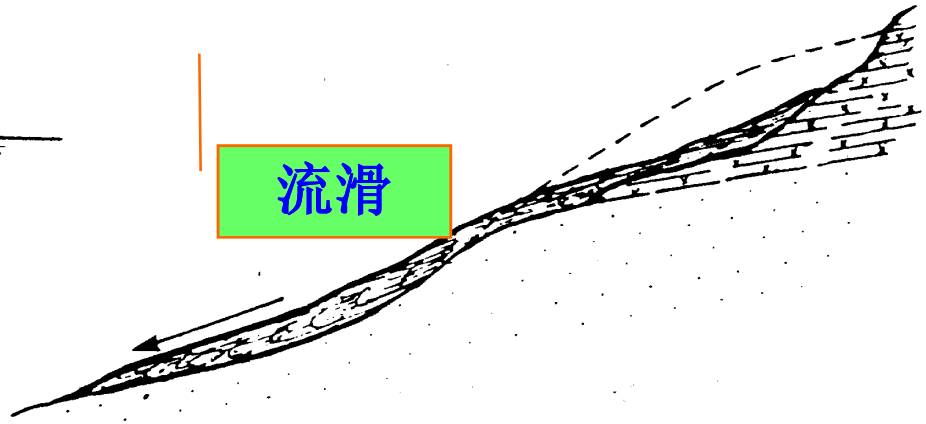
平移

(b) translational slide



转动

(c) rotational slip



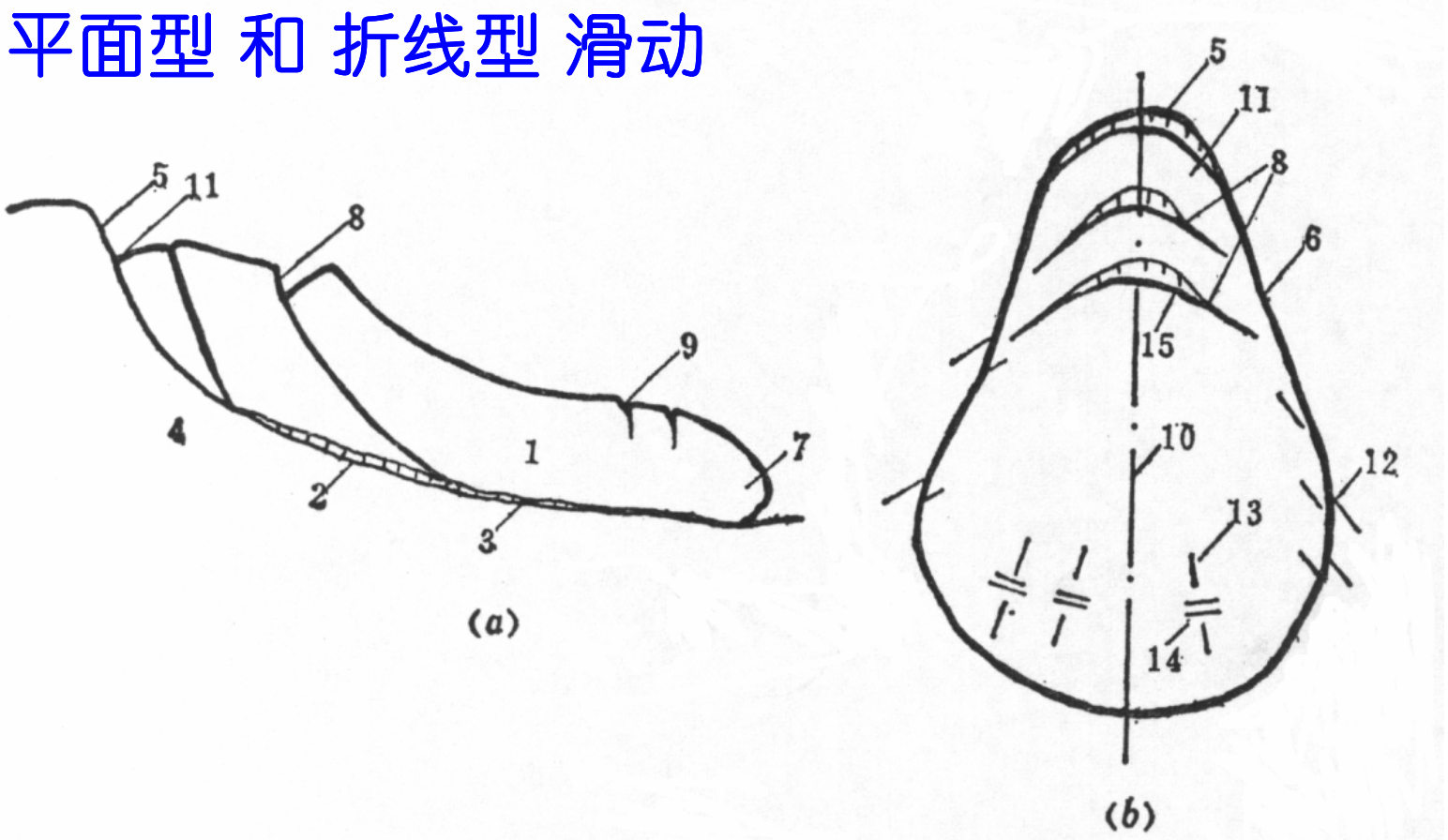
流滑

(d) flow

P268

滑坡形式

平面型 和 折线型 滑动



（a）剖面 （b）平面

1—滑体；2—滑带；3—滑面；4—滑床；5—滑壁；6—滑坡周界；7—滑坡前缘；8—滑坡台阶；9—滑坡裂缝；10—主滑线；11—封闭洼地；12—剪切裂缝；13—扇形裂缝；14—鼓张裂缝；15—拉张裂缝

第二类土工构筑物　本章的主要目的

新建坝（坡）体的坡率

已建坝（坡）体的边坡稳定评估

采用的方法为 极限平衡分析法

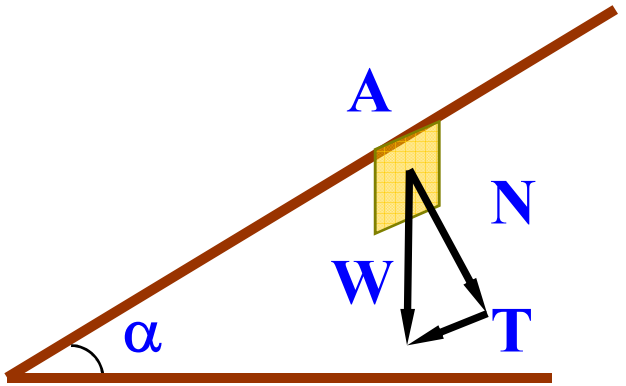
假定斜坡破坏是沿着土体内某一确定的滑裂面滑动，根据滑裂土体的静力平衡条件和莫尔-库伦强度理论，可以计算出沿该滑裂面滑动的可能性，即土坡稳定性　（安全系数的大小）

主要分为无粘性土坡和粘性土坡

P268

7.2 无粘性土坡的稳定分析

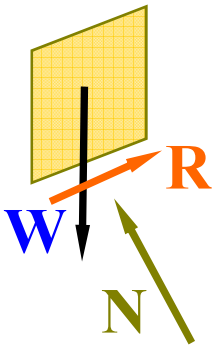
7.2.1 表面浅层滑动



坡与水平夹角为α 砂土内摩擦角为φ

1）微单元A自重: W=γΔV

2）沿坡滑动力：$T = W\sin\alpha$ traveling



3）对坡面压力：$N = W\cos\alpha$

（由于无限土坡两侧作用力抵消 单位宽度）

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

5）抗滑安全系数：

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

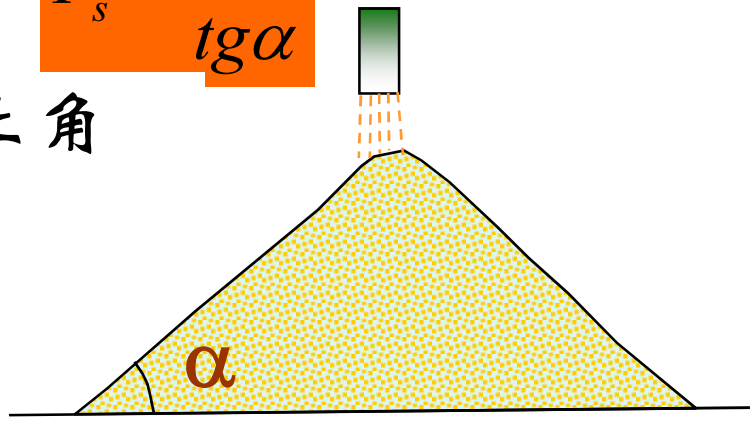
式7-1

269

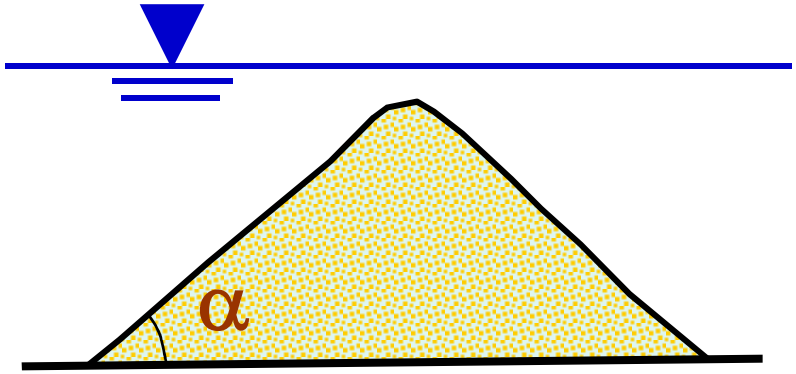
7.2 无粘性土坡的稳定分析

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

⌘ 当α=φ时，F_s=1.0，天然休止角



- 安全系数与土容重γ无关
- 与所选的微单元大小无关
- 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



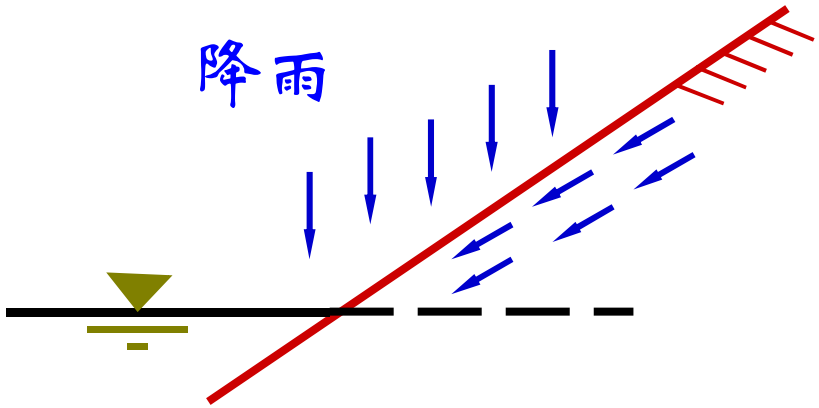
P270

P270

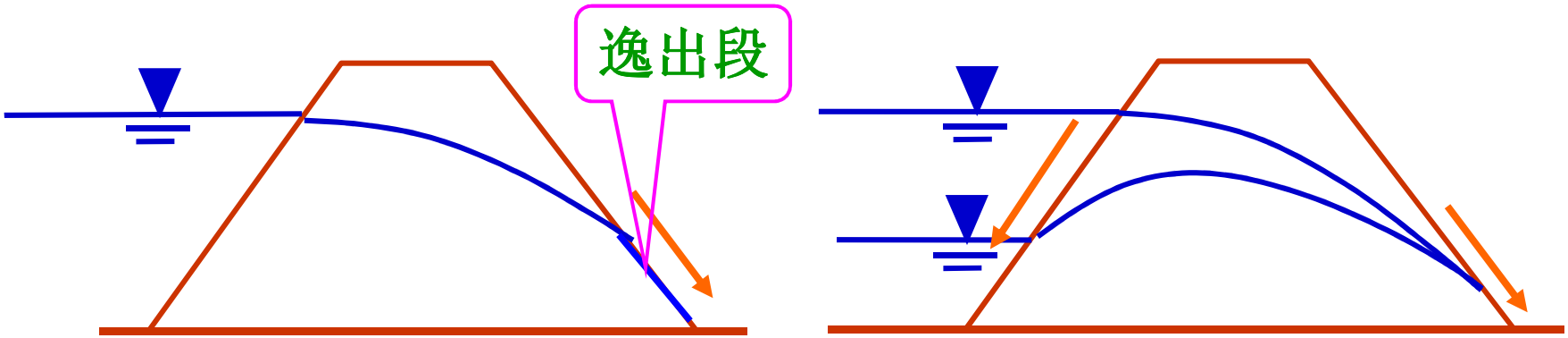
思考：在干坡及静水下坡中，如φ不变，F_s有什么变化

这种坡体的稳定性水上水下无变化

7.2.2 有沿坡渗流情况



正常蓄水土坝下游　　水位骤降的土坝上游

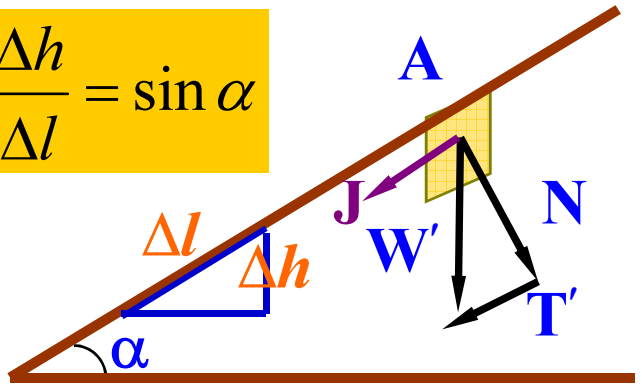


P271

7.2 无粘性土坡的稳定分析

取微单元 A，以土骨架为隔离体：

$$i=\frac{\Delta h}{\Delta l}=\sin\alpha$$



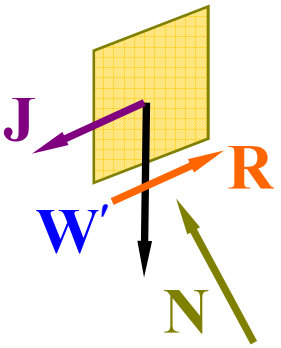
(1) 自重： $W'=\gamma'\Delta V$

渗透力：（方向：平行于土坡）

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

(2) 滑动力：重力项+渗透力项 travel

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



(3) 抗滑力：

$$R=N\,tg\varphi=\gamma'\Delta V\cos\alpha\,tg\varphi$$

(4) 抗滑安全系数：

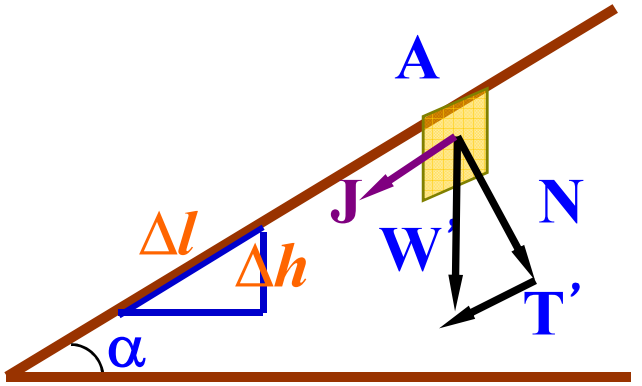
$$F_s=\frac{R}{T'+J}=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\cdot\frac{\cos\alpha}{\sin\alpha}tg\phi=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\cdot\frac{tg\phi}{tg\alpha}\qquad 7\text{-}7$$

P273

7.2 无粘性土坡的稳定分析

讨论：

$$F_s = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \frac{tg\phi}{tg\alpha}$$ 式7-7



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

  意味着原来稳定的坡，有沿坡渗流时可能破坏

- 与容重有关

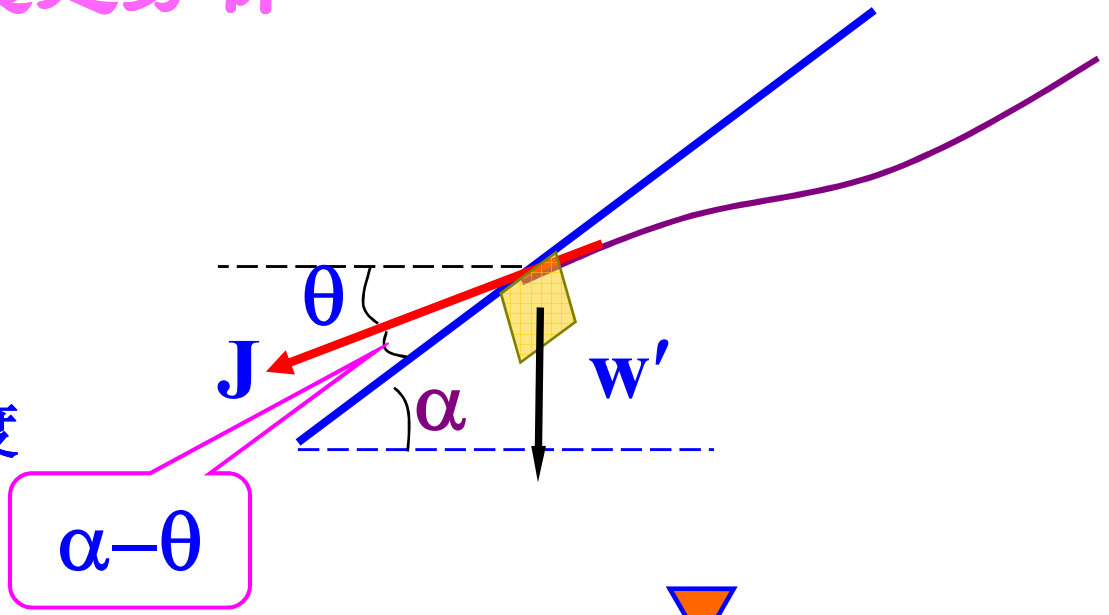
- 与所选ΔV大小无关，亦即在这种坡中各点安全系数相同

P273

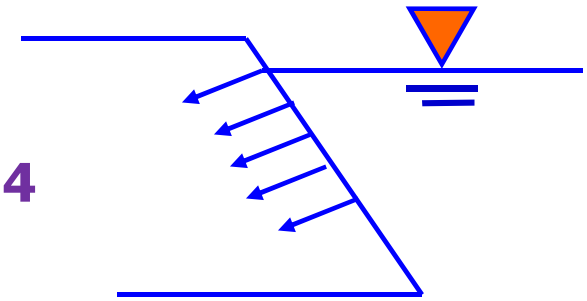
7.2 无粘性土坡的稳定分析

其它：

(1) 与坡面成一定角度

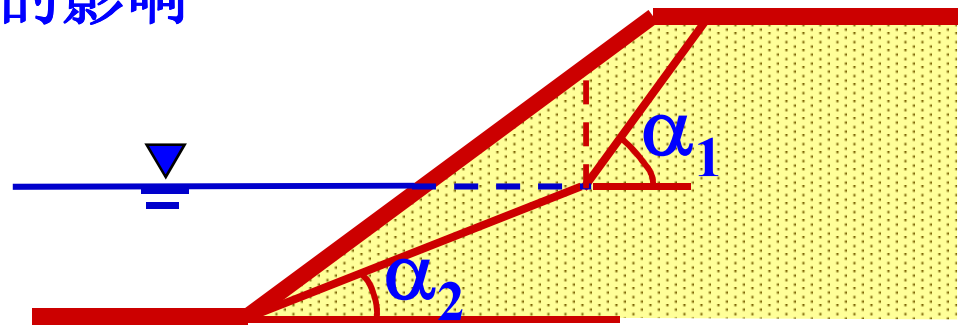


(2) 垂直向内渗流



(3) 部分浸水无粘性土坡 7.2.4

(4) 非线形强度指标的影响 7.2.3



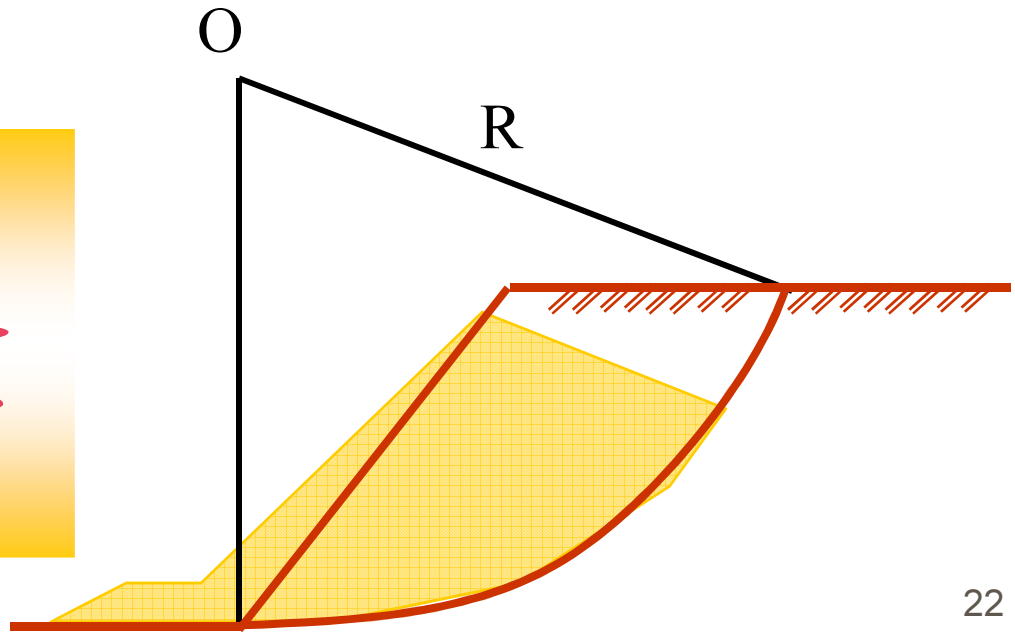
DEL

7.3 粘性土坡的稳定分析

破坏特点

- 由于存在粘聚力c，与无粘性土坡不同；
- 其危险滑裂面位置在土坡深处；
- 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。

思考：
为什么粘性土坡通常不会发生表面滑动？



P274

7.3 粘性土坡的稳定分析

塑性上限 下限

计算方法： 极限平衡法 极限分析法 有限单元法

1 整体圆弧滑动法（瑞典Petterson）1915

2 瑞典条分法（瑞典Fellenius）

3 毕肖普法（Bishop 挪威）1955

4 Janbu法 1973

5 Spencer方法

6 Morgenstern-Price方法

7 陈祖煜的通用条分法

8 不平衡推力传递法

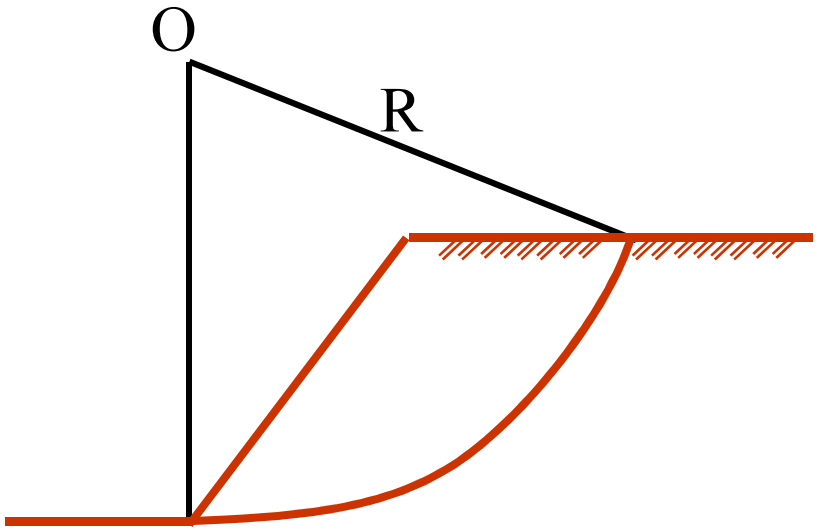
9 Sarma方法

https://en.wikipedia.org/wiki/Slope_stability_analysis

7.3 粘性土坡的稳定分析

瑞典Petterson 1915

7.3.1 整体圆弧滑动法（瑞典圆弧法）

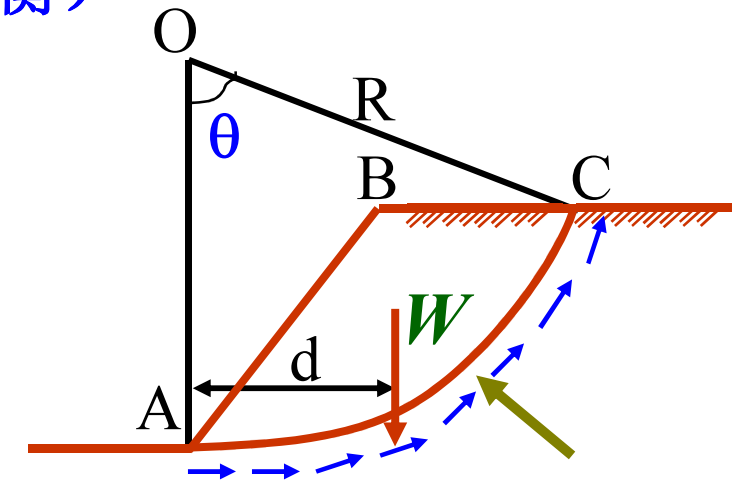


假设条件

- 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条件

7.3 粘性土坡的稳定分析

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：

极限平衡

$$M_R = \int_0^L \tau_f \mathrm{d}l \cdot R = \int_0^L (c + \sigma_n tg\phi)\mathrm{d}l \cdot R = c\hat{A}c \cdot R + \int_0^L \sigma_n tg\phi \mathrm{d}l \cdot R$$

注：（其中 $\sigma_n = \sigma_n(l)$ 是未知函数）

当φ=0（粘土不排水强度）时，　$c = c_u$　　$M_R = c\hat{A}cR$

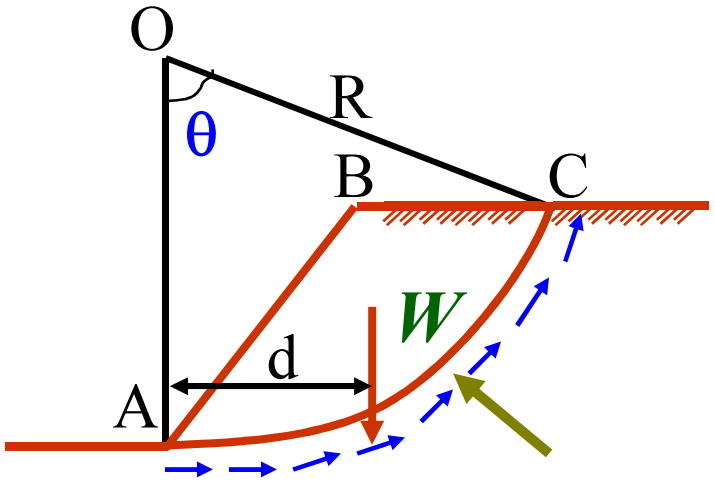
(3) 安全系数：　$F_s = \dfrac{\text{抗滑力矩}}{\text{滑动力矩}} = \dfrac{M_R}{M_s} = \dfrac{c \cdot \hat{A}c \cdot R}{Wd}$　　式7-9

P275

当φ <> 0时，采用其它方法 P176顶行

7.3 粘性土坡的稳定分析

讨论：



1 当 $\phi \neq 0$ 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 适用于饱和软粘土，即 $\phi=0$ 情况

P276

7.3 粘性土坡的稳定分析

φ <> 0

7.3.2 条分法的基本原理及分析

源起

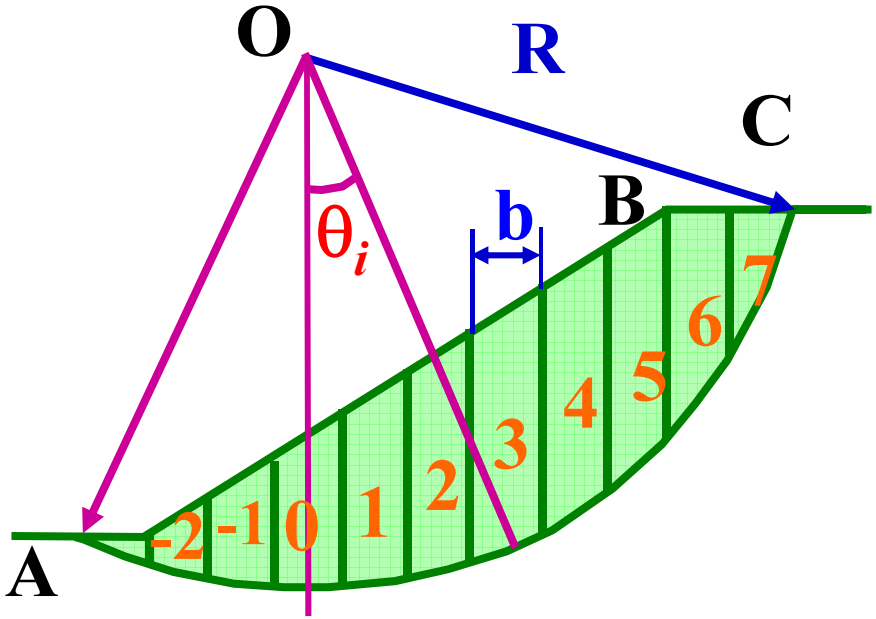
整体圆弧法：$\int_0^L \sigma_n tg\phi \cdot \mathrm{d}l$

σ_n 是 $l(x,y)$ 的函数

思路

离散化 → 分条

→ 条分法



P275

7.3 粘性土坡的稳定分析

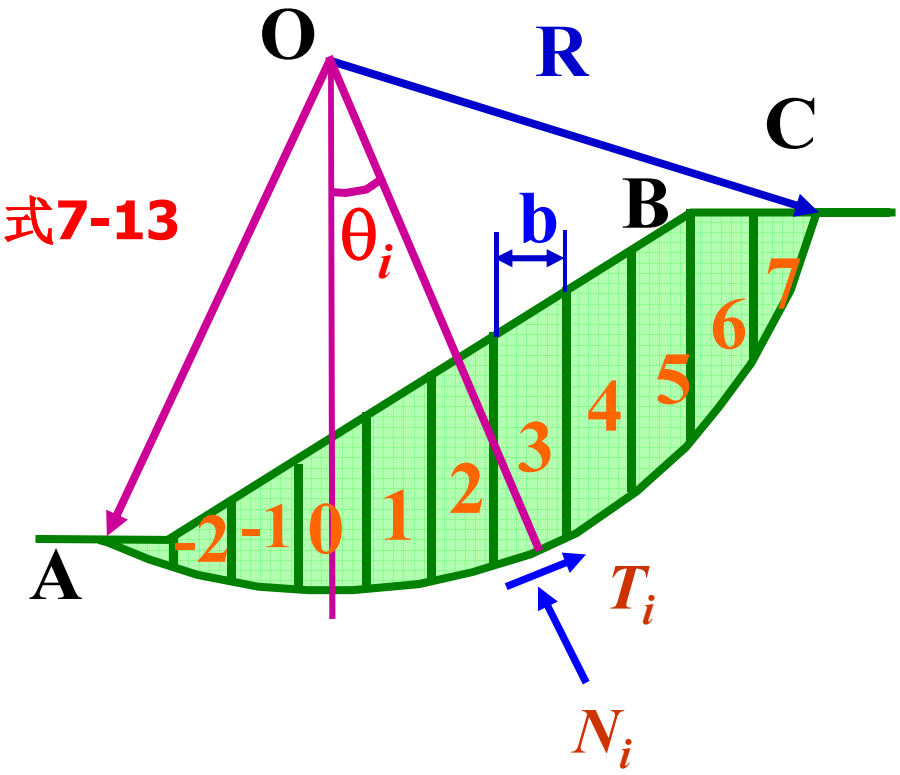
安全系数定义

切向力之比

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

式7-13

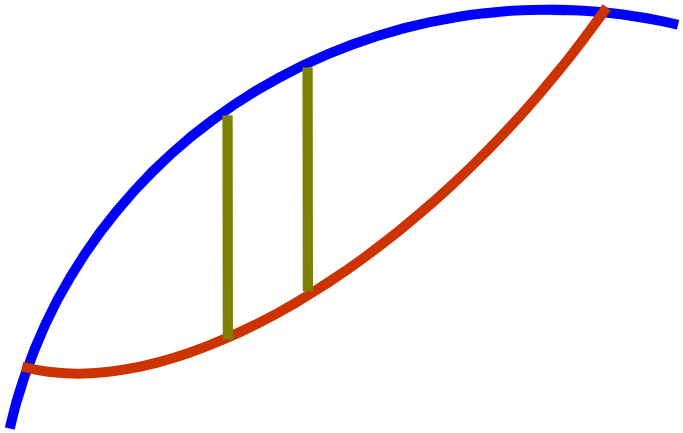
$$T_i = \frac{c_i l_i + N_i tg\phi_i}{F_s}$$

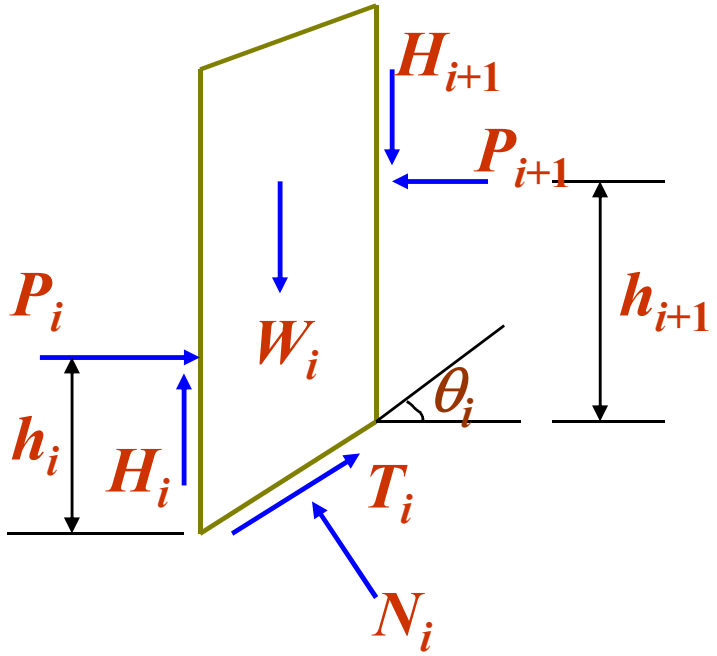


Fs=抗滑力矩/滑动力矩

P276

7.3 粘性土坡的稳定分析





未知数：条块间力＋作用点位置＝2(n−1)+(n−1) ＝ 3n−3

滑动面上的力＋作用点位置＝3n

安全系数 F＝1

} 6n−2

方程数：静力平衡＋力矩平衡＝3n

滑动面上极限平衡条件＝n

} 4n

未知数－方程数＝2n−2

一起看书 要想求解 必须建立新方程

P 277

7.3 粘性土坡的稳定分析

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

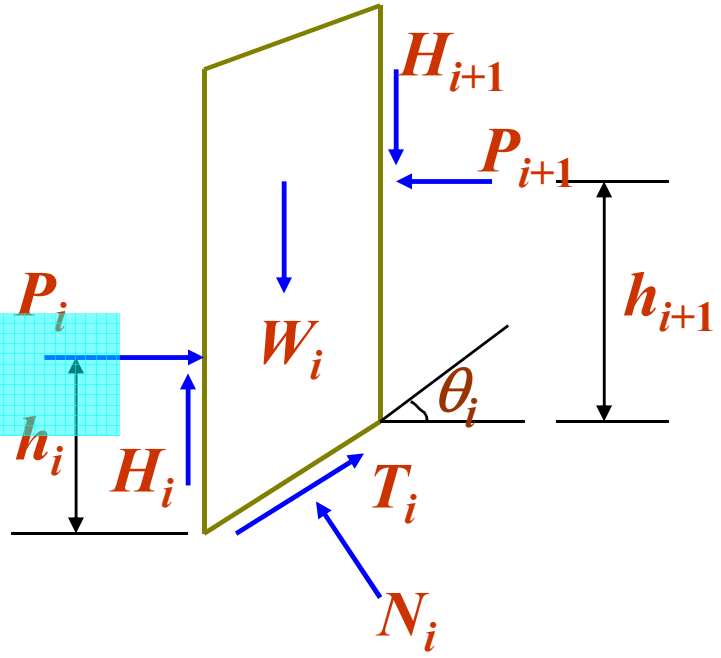
5 Spencer方法　(n−1)+1+n=2n−2

6 Morgenstern-Price方法

7 陈祖煜的通用条分法

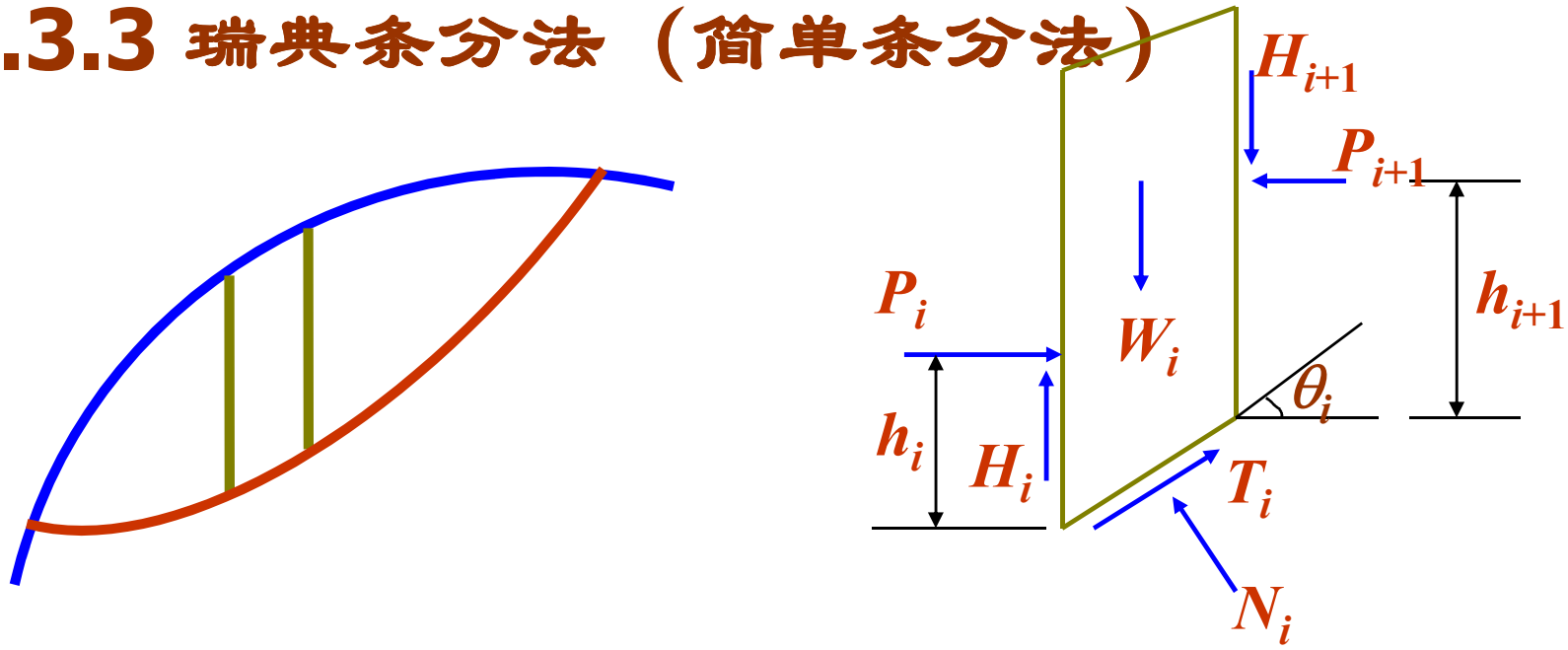
8 不平衡推力传递法　(n−1)+n=2n−1

9 Sarma法　(n−1)+1+n=2n−2



DEL

7.3.3 瑞典条分法（简单条分法）



假定： 圆弧滑裂面；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

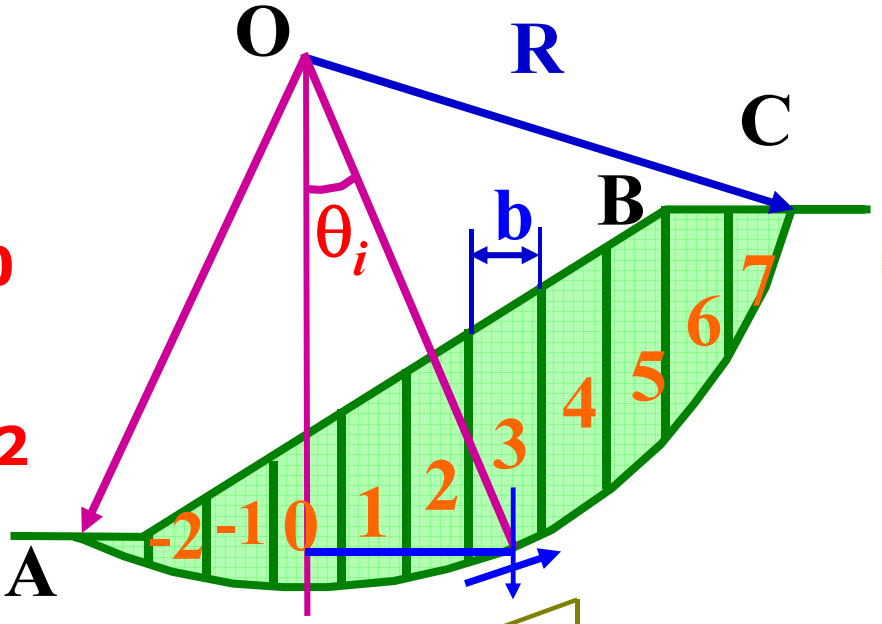
7.3 粘性土坡的稳定分析

径向力平衡：

$$N_i = W_i \cos\theta_i$$ 式7-10

极限平衡条件：

$$T_i = \frac{c_i l_i + N_i tg\phi_i}{F_s} = \frac{c_i l_i + W_i \cos\theta_i tg\phi_i}{F_s}$$ 式7-12



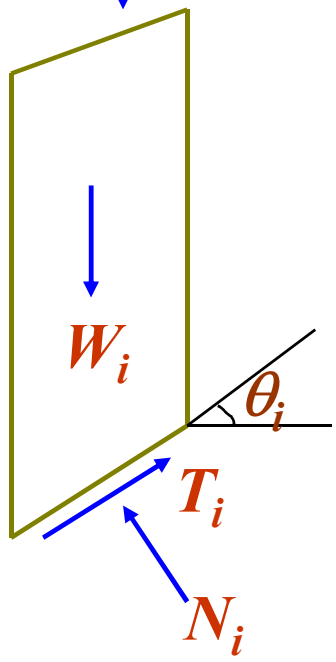
整体对圆心的力矩平衡：

滑动力矩=抗滑力矩 $\Leftrightarrow$ $M_s = M_R$ 式7-13

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

$$F_s = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos\theta_i tg\phi_i)}{\sum W_i \sin\theta_i}$$ 式7-15

显式表达



P277

计算步骤

圆心 O，半径 R（如图）

分条：
b=R/10

编号：过圆心垂线为 0# 条中线

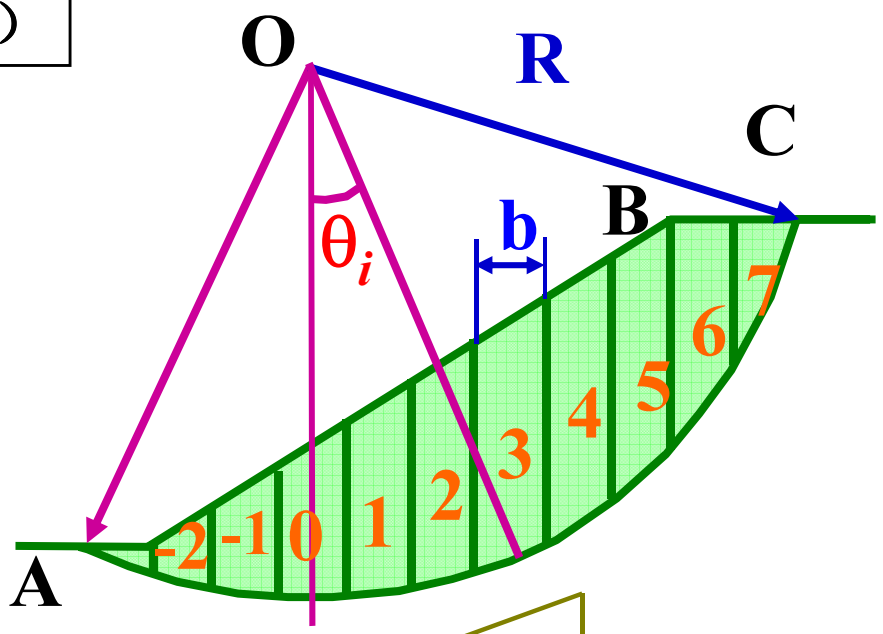
列表计算 l_i W_i θ_i

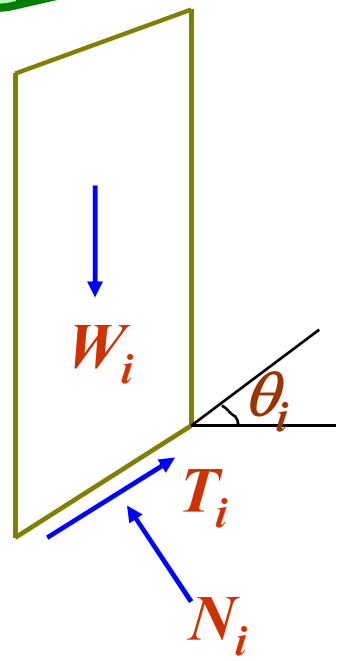
$$F_s = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos\theta_i tg\phi_i)}{\sum W_i \sin\theta_i}$$

变化圆心 O 和半径 R

Fs 最小

END

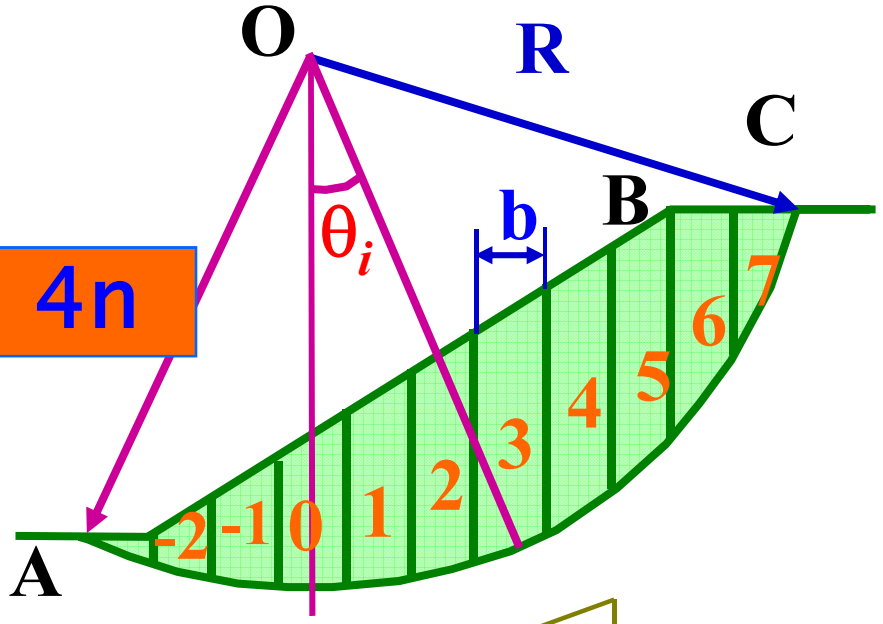




7.3 粘性土坡的稳定分析

瑞典条分法的讨论

未知数：2n+1　方程数：4n



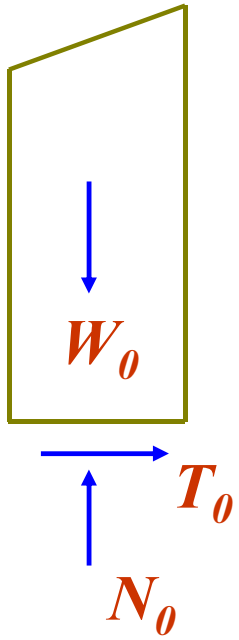
(1) 一些平衡条件不能满足

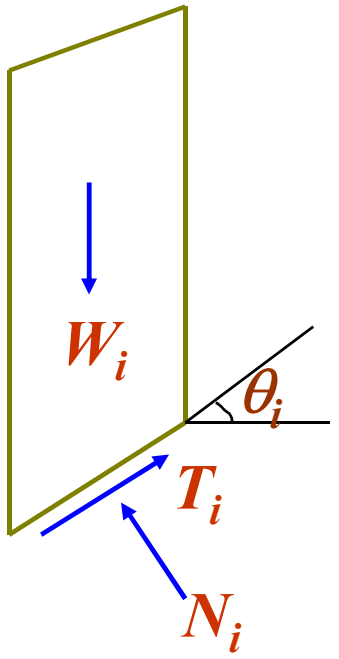
$$N_i = W_i \cos\theta_i$$

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

对0#土条

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



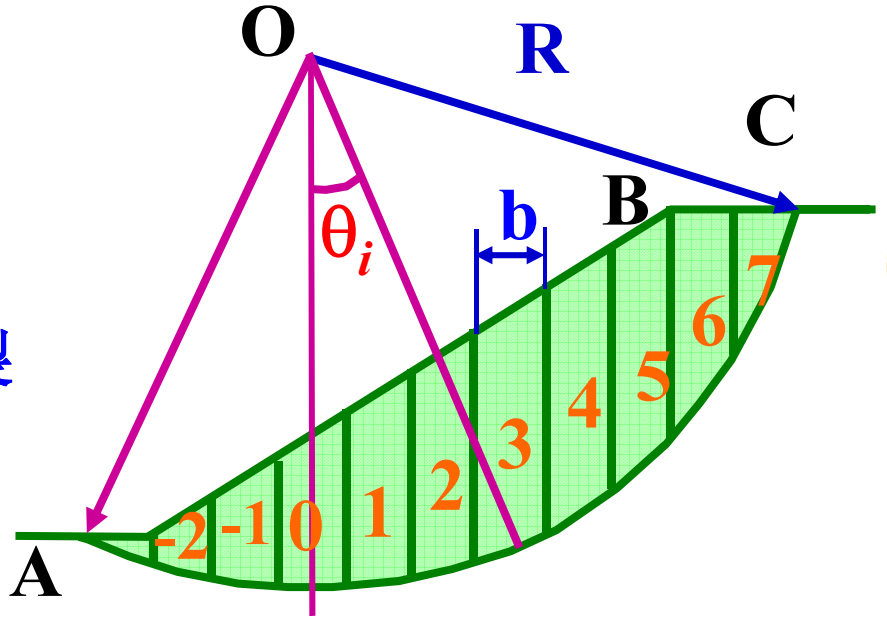


P277 优缺点有时会作为考点

7.3 粘性土坡的稳定分析

瑞典条分法的讨论

(2) 假设圆弧滑裂面，与实际滑裂面有差别



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

→ 最终结果是 F_s 偏小，φ 越大 F_s 越偏小

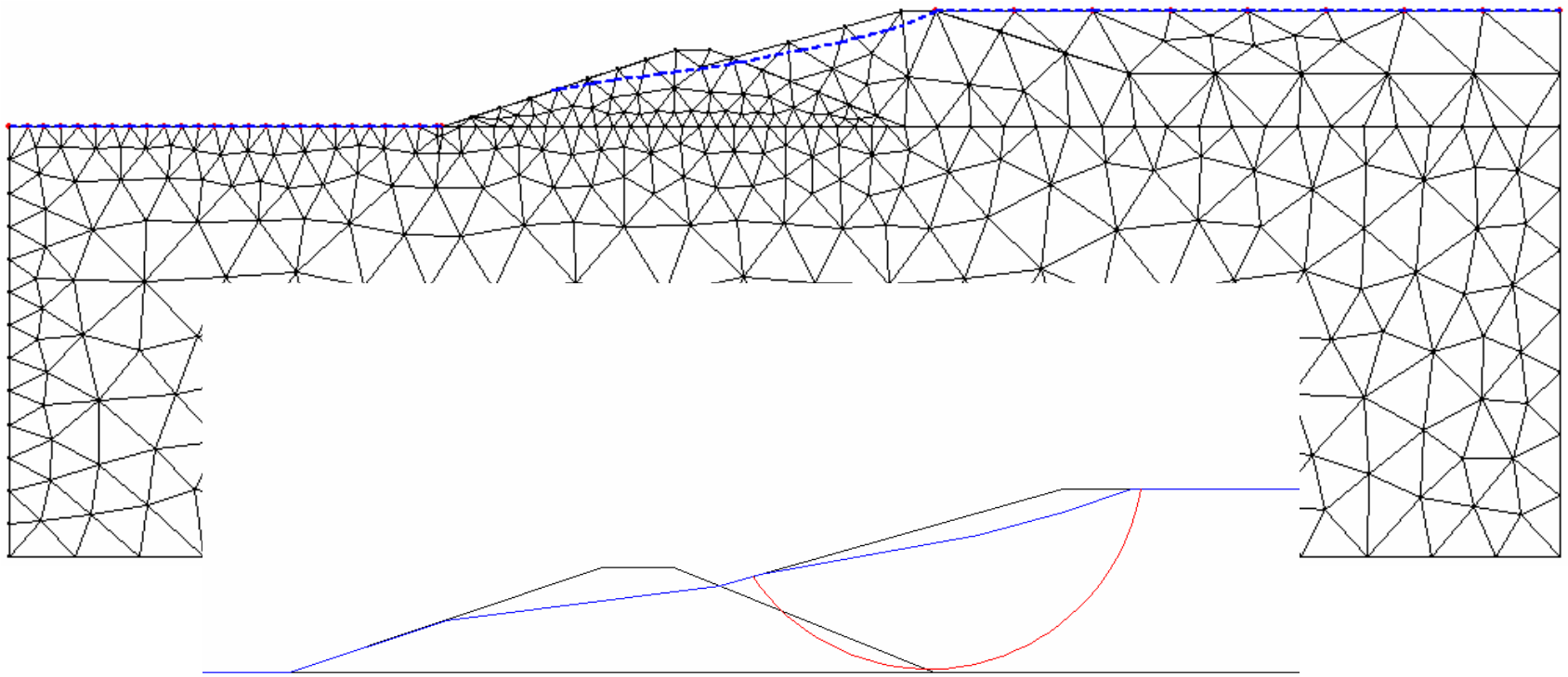
↓

一般情况下，F_s 偏小 10% 左右

← 工程应用中偏于安全

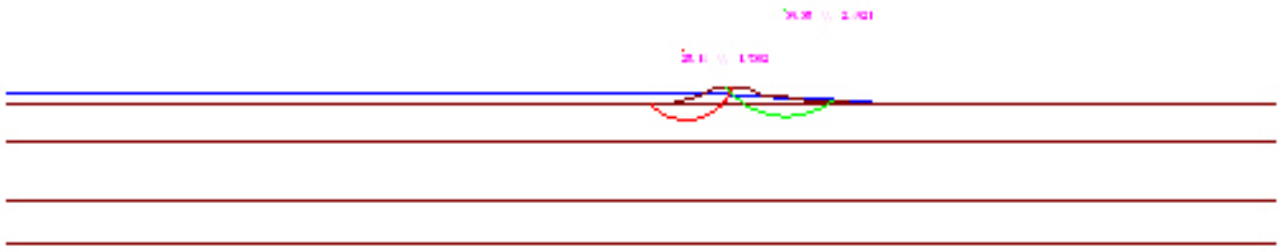
P277 DEL

7.3 粘性土坡的稳定分析

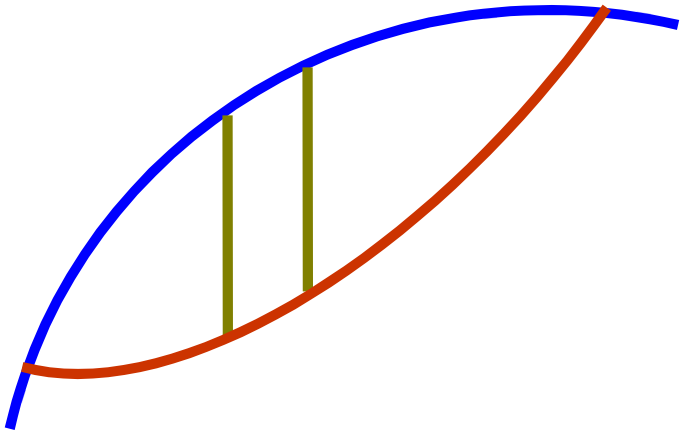


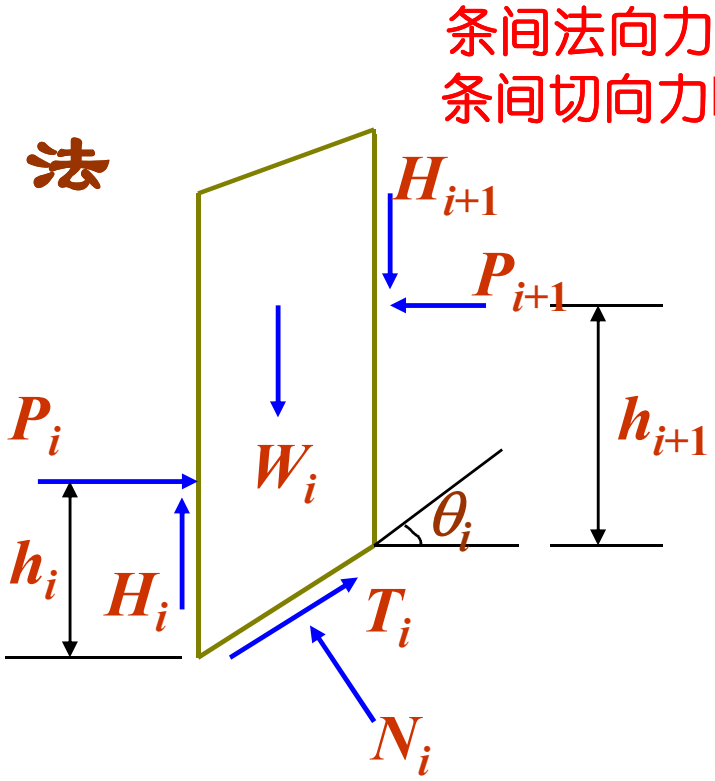
堤段稳定分析

SADSS



7.3.4 毕肖甫（Bishop）法





假定： 圆弧滑裂面；条间力切向力=0

忽略条间切向力：n-1

假定滑动面上作用点位置：n

} 2n-1

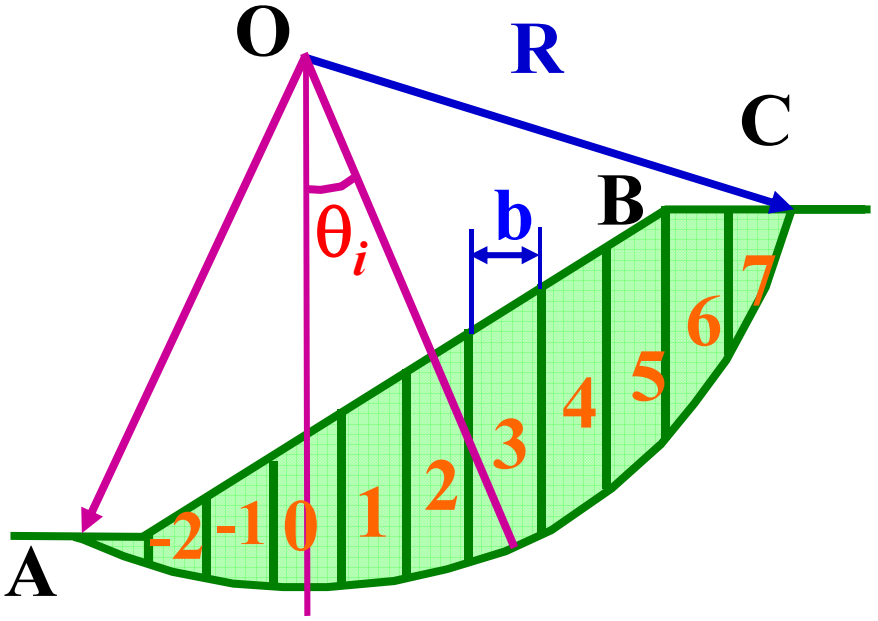
未知数：4n-1　方程数：4n

P277

7.3 粘性土坡的稳定分析

$\Sigma F_z=0$ $\quad W_i = N_i\cos\theta_i + T_i\sin\theta_i$

极限平衡条件 $\quad T_i = \dfrac{c_i l_i + N_i tg\phi_i}{F_s}$



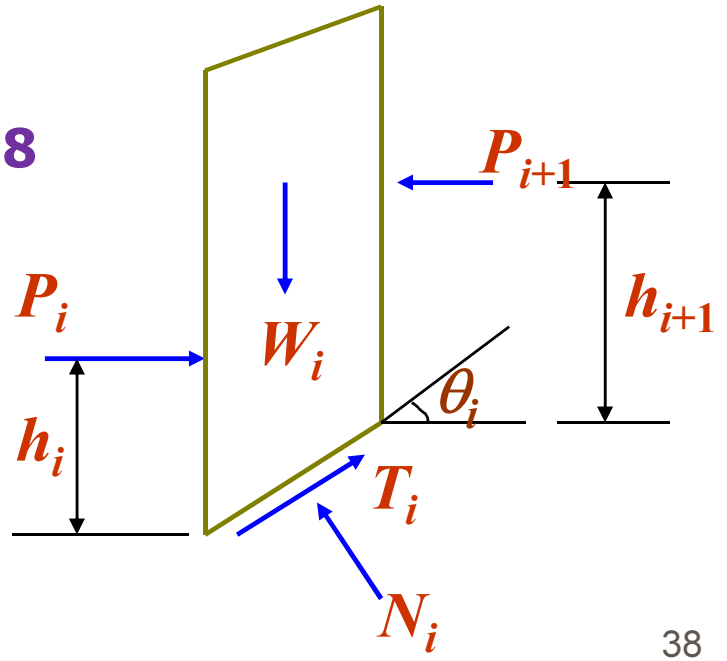
方程组求解，得到：

$$\begin{cases} N_i = \dfrac{(W_i - \dfrac{c_i l_i}{F_s}\sin\theta_i)}{m_{\theta i}} \\ T_i = \dfrac{1}{F_s}\cdot\dfrac{W_i tg\phi_i + c_i l_i\cos\theta_i}{m_{\theta i}} \end{cases}$$

式7-18

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

P278



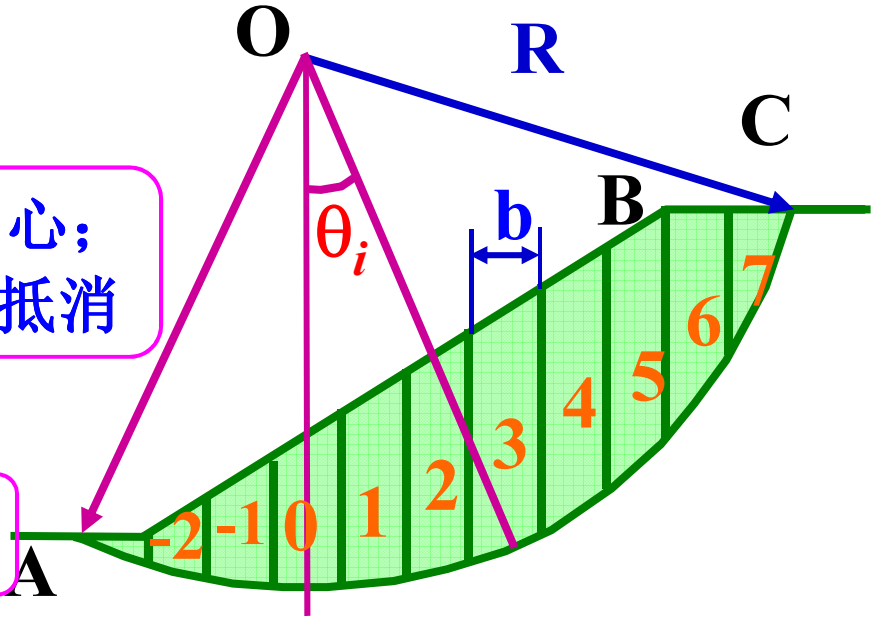
7.3 粘性土坡的稳定分析

整体力矩平衡：

N_i 过圆心；
P_i 互相抵消

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

$$l_i \cos\theta_i = b_i$$

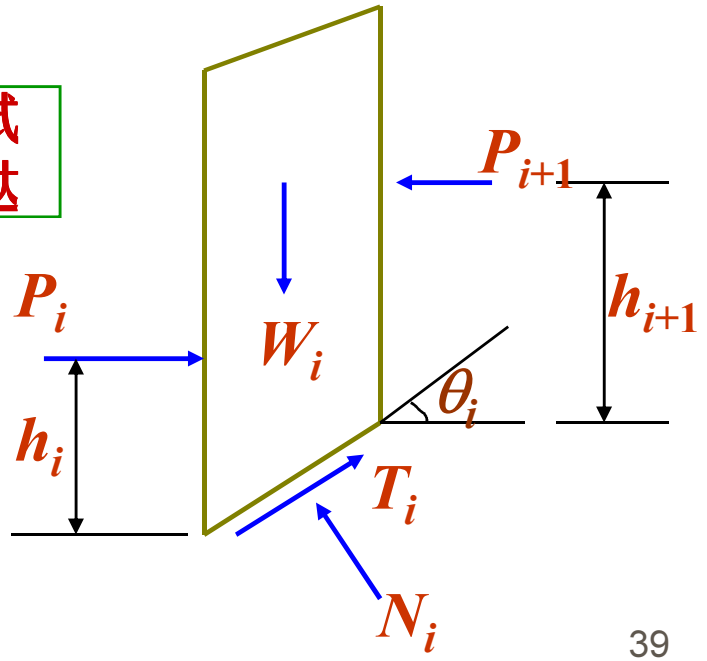


$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{\theta i}} [c_i l_i \cos\theta_i + W_i tg\phi_i]}{\sum W_i \sin\theta_i}$$

隐式表达

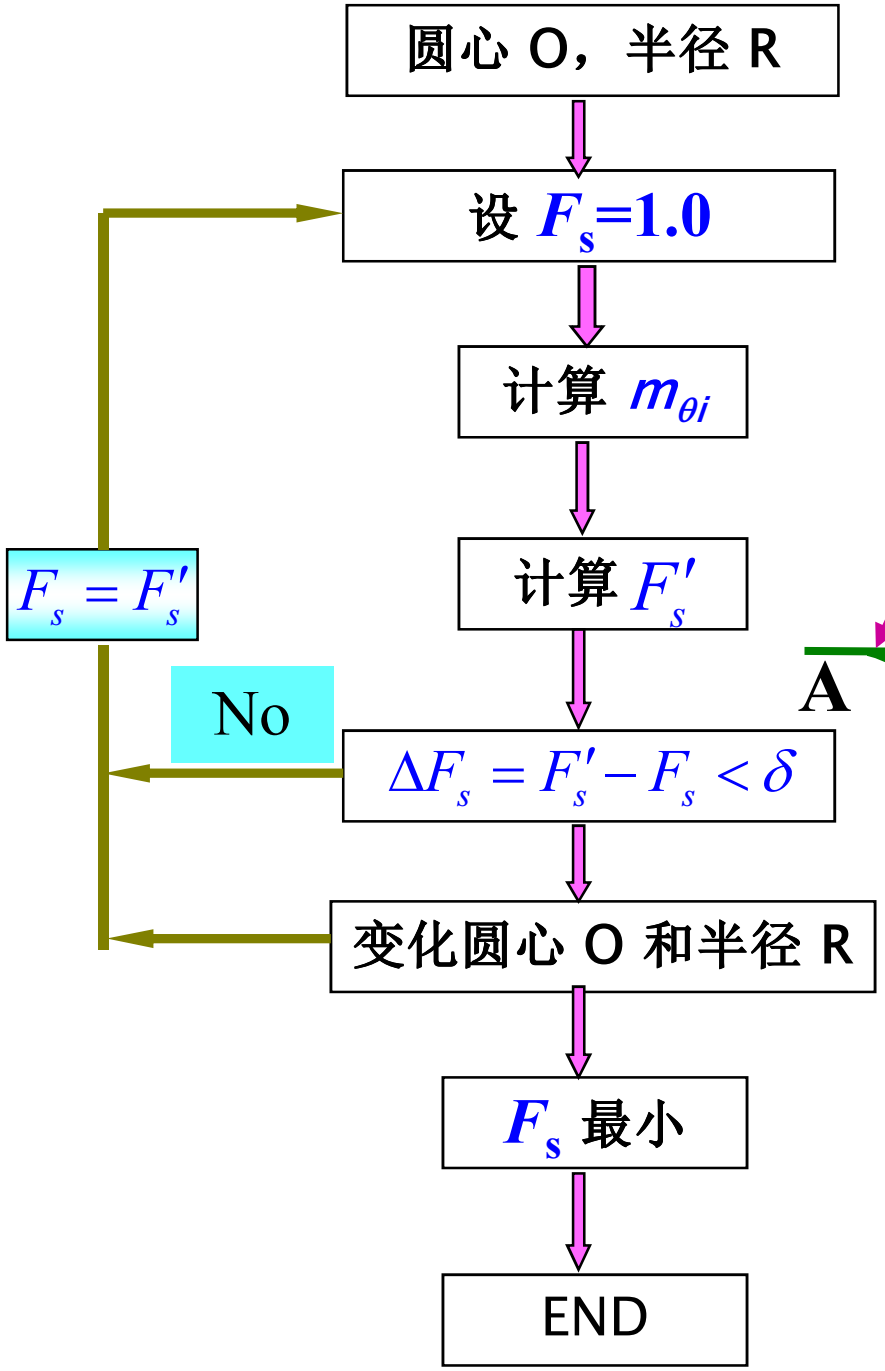
式7-20

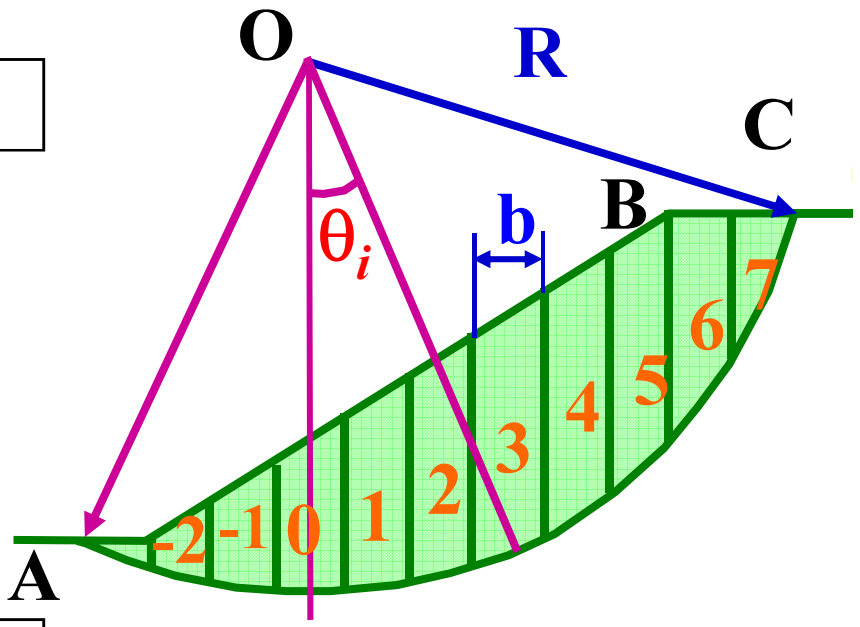
$$m_{\theta i} = \cos\theta_i + \frac{\sin\theta_i tg\phi_i}{F_s}$$



P278

计算步骤


圆心 O，半径 R
设 F_s=1.0
计算 $m_{\theta i}$
计算 F_s'
$\Delta F_s = F_s' - F_s < \delta$
No
$F_s = F_s'$
变化圆心 O 和半径 R
F_s 最小
END


O
R
C
B
A
θ_i
b
-2
-1
0
1
2
3
4
5
6
7

P278

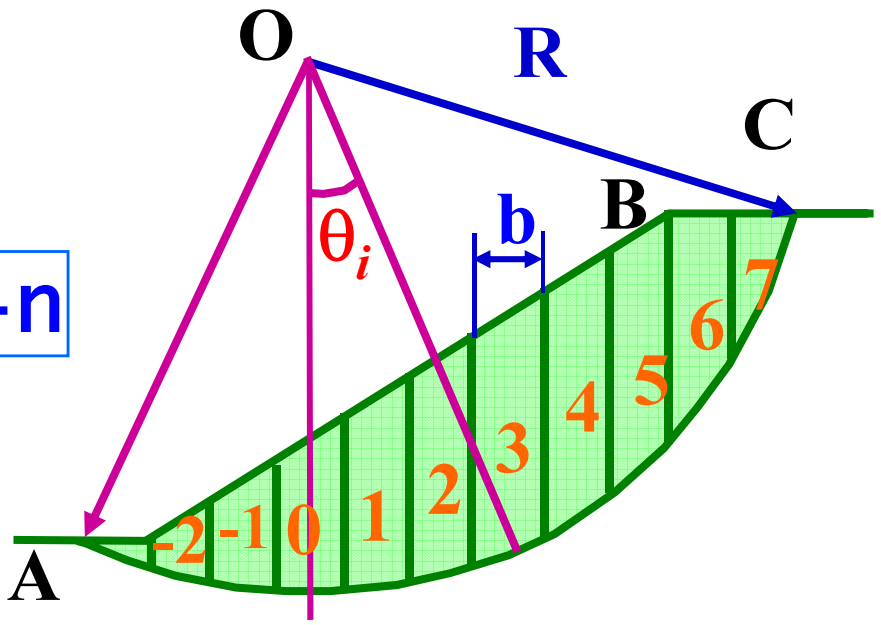
7.3 粘性土坡的稳定分析

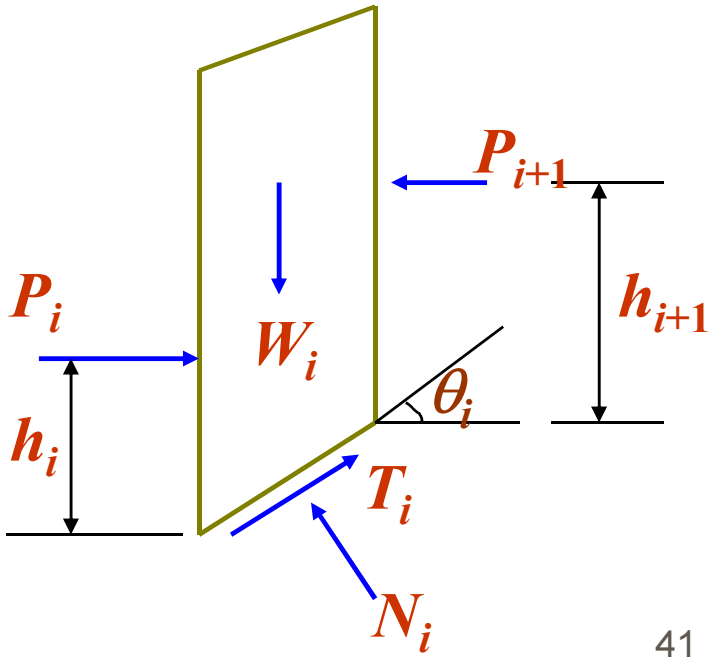
毕肖甫法的讨论

未知数：4n-1　方程数：4n

(1) 假设圆弧滑裂面

(2) 大多数情况下是精确的



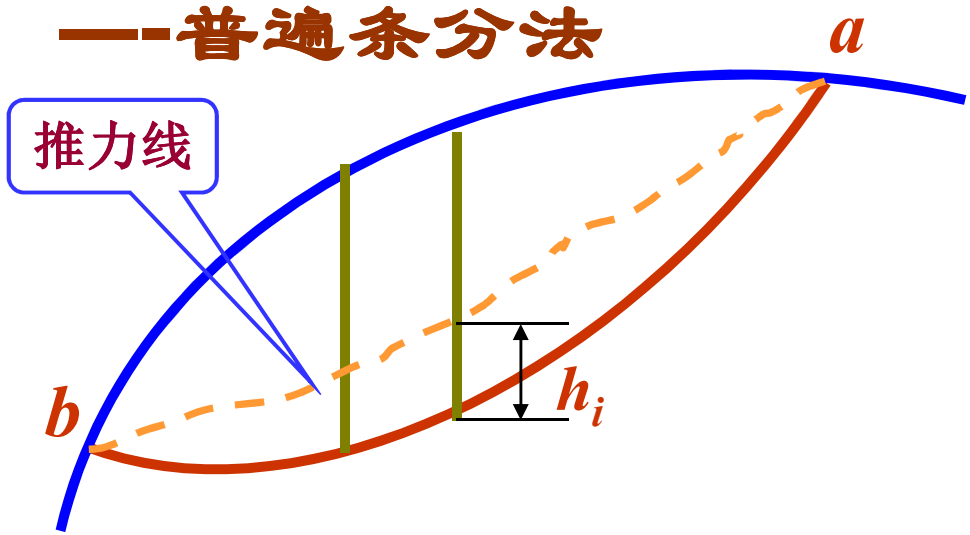


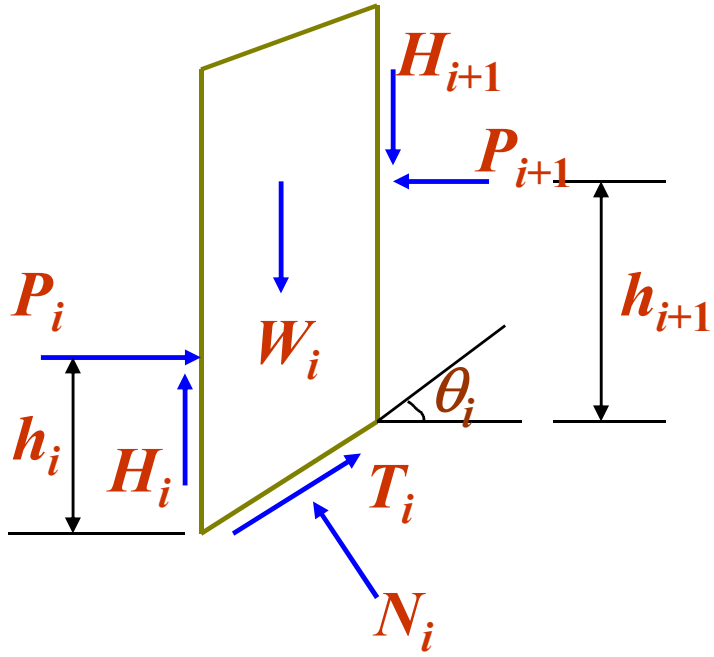
P283 例题7-3一起看一下

DEL

7.3.5 简布（Janbu）法

——普遍条分法





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

P279

7.3 粘性土坡的稳定分析

$\Sigma F_z=0$ $W_i+\Delta H_i=N_i\cos\theta_i+T_i\sin\theta_i$

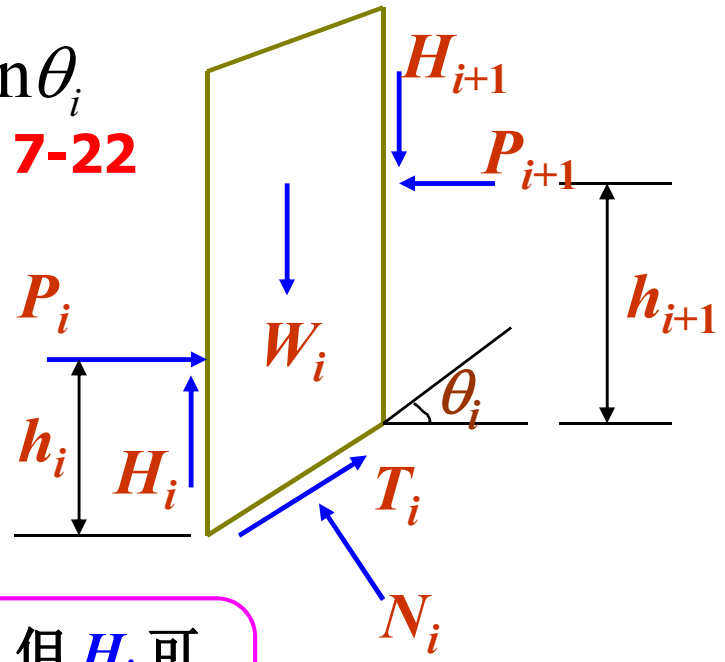
$\Sigma F_x=0$ $\Delta P_i=T_i\cos\theta_i-N_i\sin\theta_i$

极限平衡条件 $T_i=\dfrac{c_i l_i+N_i tg\phi_i}{F_s}$

⇩ 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

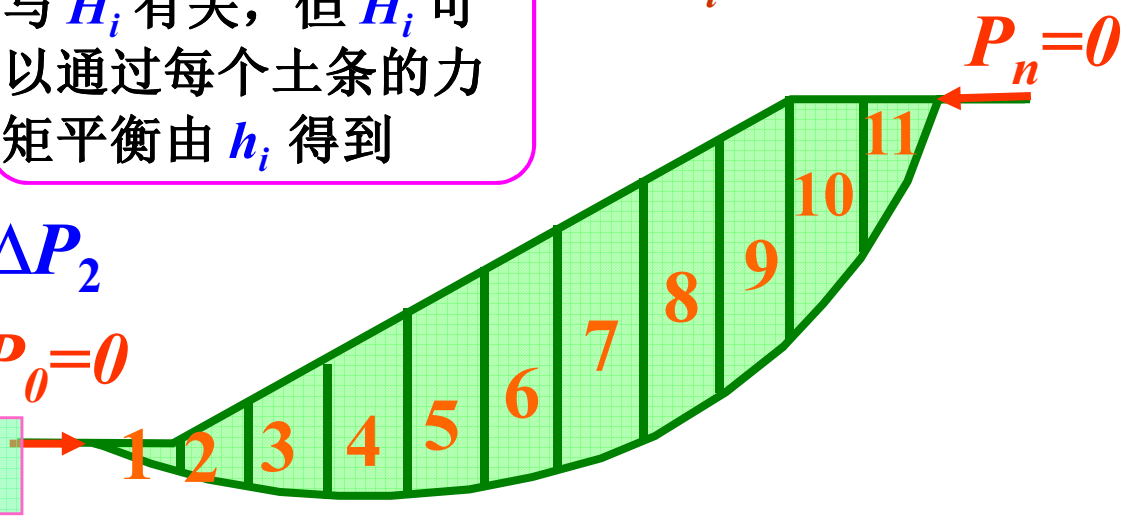


$P_1=\Delta P_1$

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

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

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



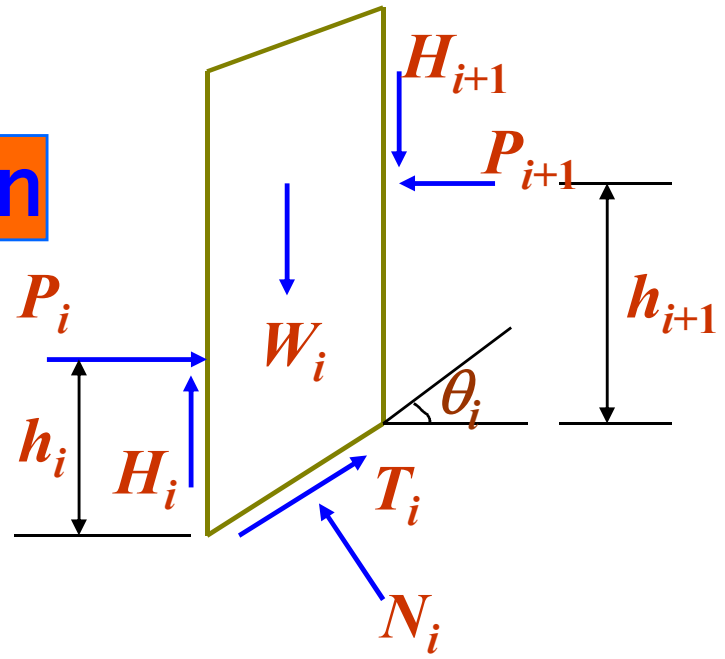
P280

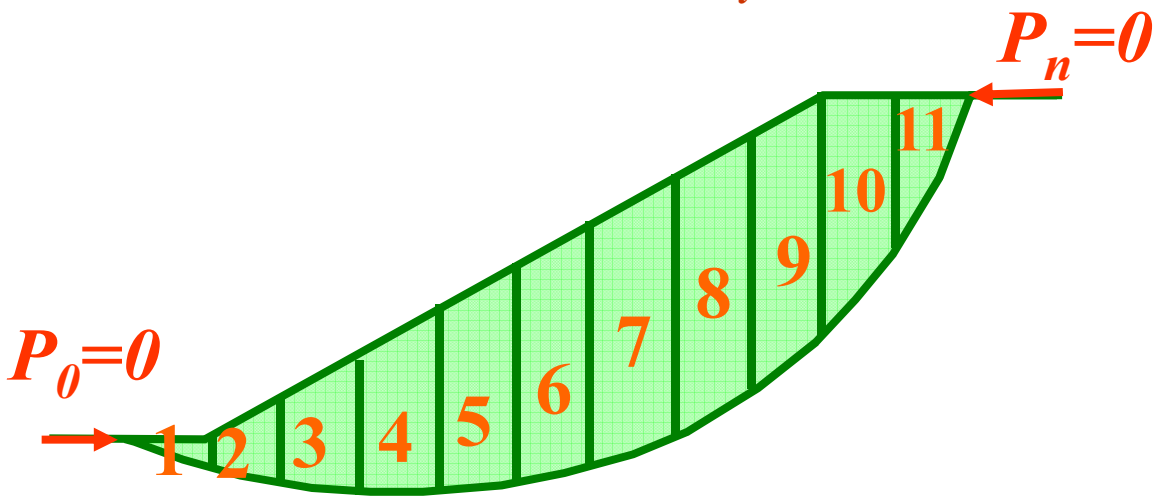
简布法的讨论

未知数：4n-1　方程数：4n

(1) 任意形状滑裂面，不一定是圆弧

(2) 计算较复杂

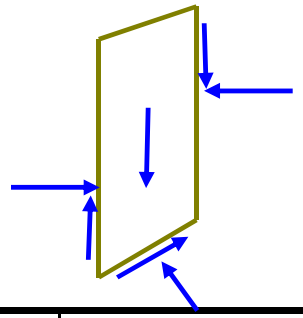




P281

7.3 粘性土坡的稳定分析

危险圆心位置7.3.7 P285看书



几种方法总结

方法		整体圆弧法	简单条分法	毕肖普法	简布法
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	忽略全部条间力	忽略条间切向力	条间力作用点位置
适用性		饱和软粘土，$\phi=0$	一般均质土	一般均质土	任意
精度		/	偏小10%	误差20~70%	难以确定
平衡条件	整体力矩	√	√	√	√
	各条力矩	√	×	×	√
	各条垂向力	√	/	×	√
	各条水平力	√	×	√	√

7.4 总应力法与有效应力法

两种分析方法：

⌘有效应力法：使用有效应力强度指标 c'、ϕ'

⌘总应力法：使用总应力强度指标 c_u、ϕ_u或 c_{cu}、ϕ_{cu}

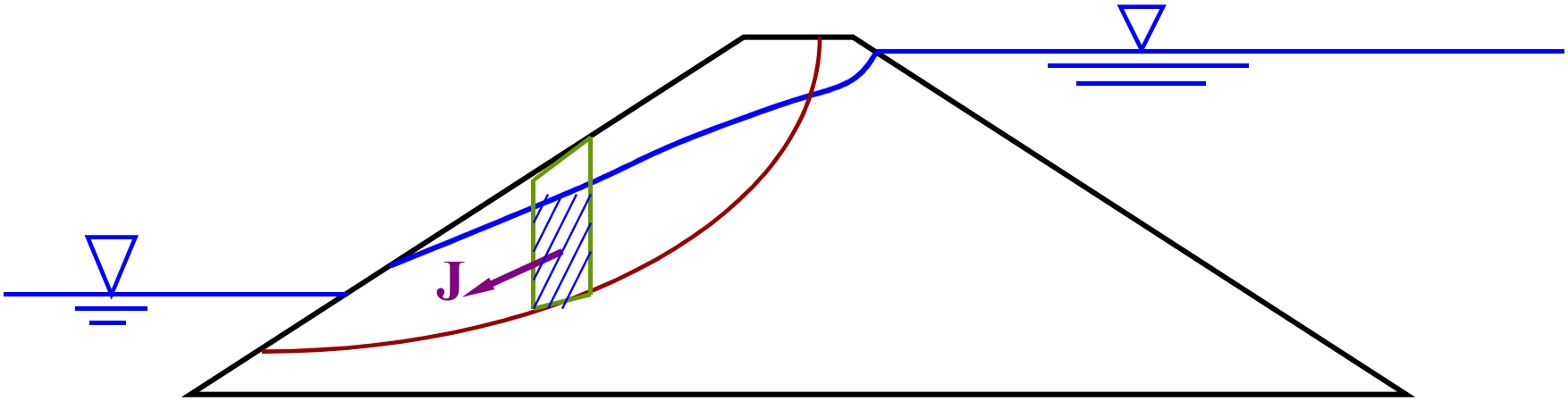
	总应力法	有效应力法
无粘性土		√
土坝施工期	c_u、ϕ_u	√
土坝渗流稳定期		√
土坝地震时	c_{cu}、ϕ_{cu}	

P289 2 土的抗剪强度指标的选用

7.4.2 稳定渗流期土坝的边坡稳定分析

特点： 已形成稳定渗流，流网可唯一确定

方法1： 取土骨架作为隔离体



计算比较繁琐

P291

7.4 总应力法与有效应力法

方法2：将土水整体作为隔离体

浸润线

等势线

h_{1i}

h_{2i}

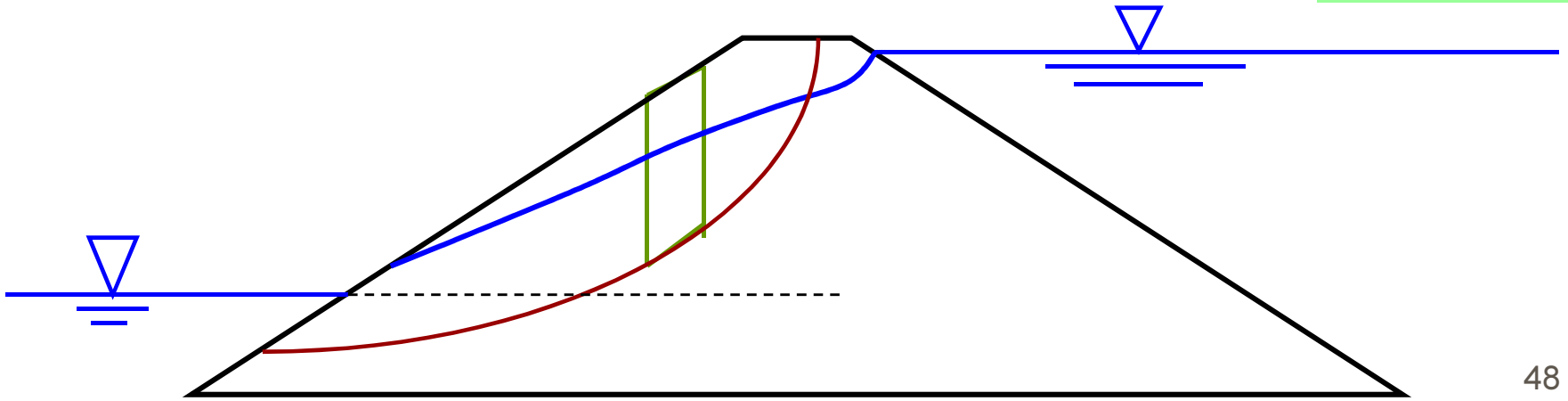
h_{ti}

(1) 土条在下游水位以上时

$$F_s = \frac{\sum [c_i' l_i + (W_i \cos\theta_i - \gamma_w h_{ti} l_i) tg\phi_i']}{\sum W_i \sin\theta_i}$$

$$W_i = (\gamma h_{1i} + \gamma_{sat} h_{2i}) b_i$$

$$u_i = \gamma_w h_{ti}$$

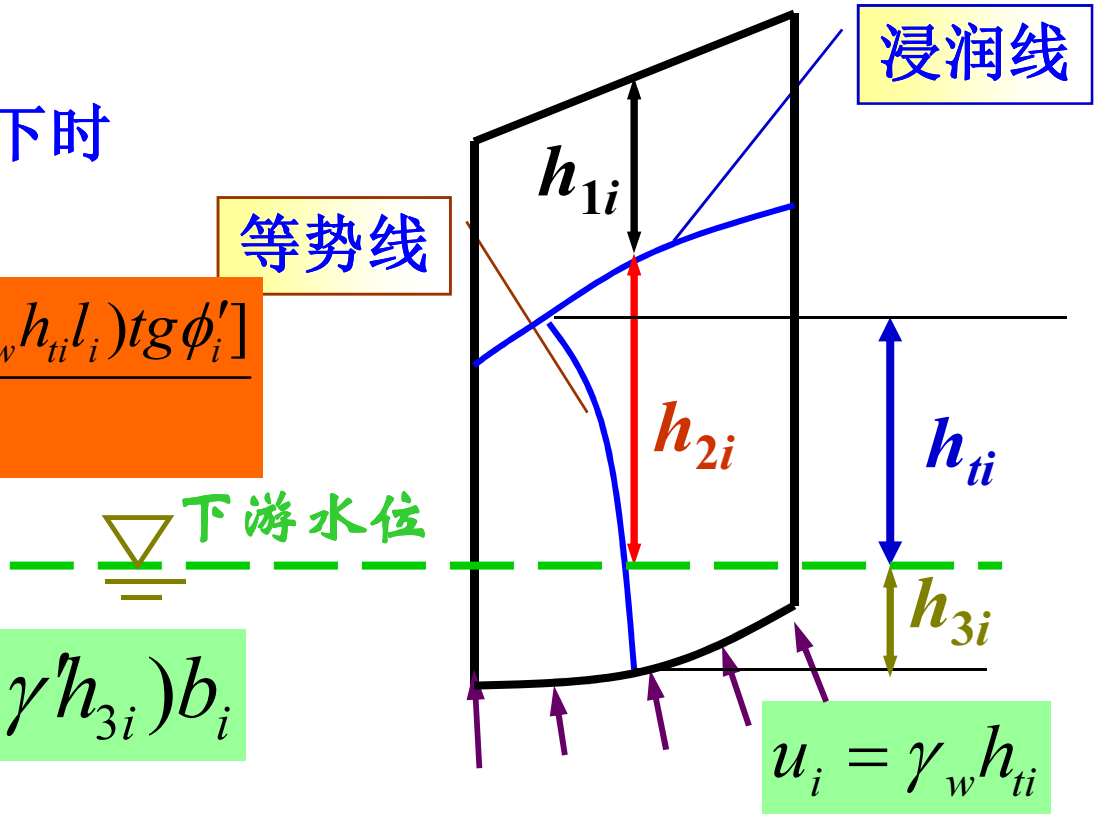


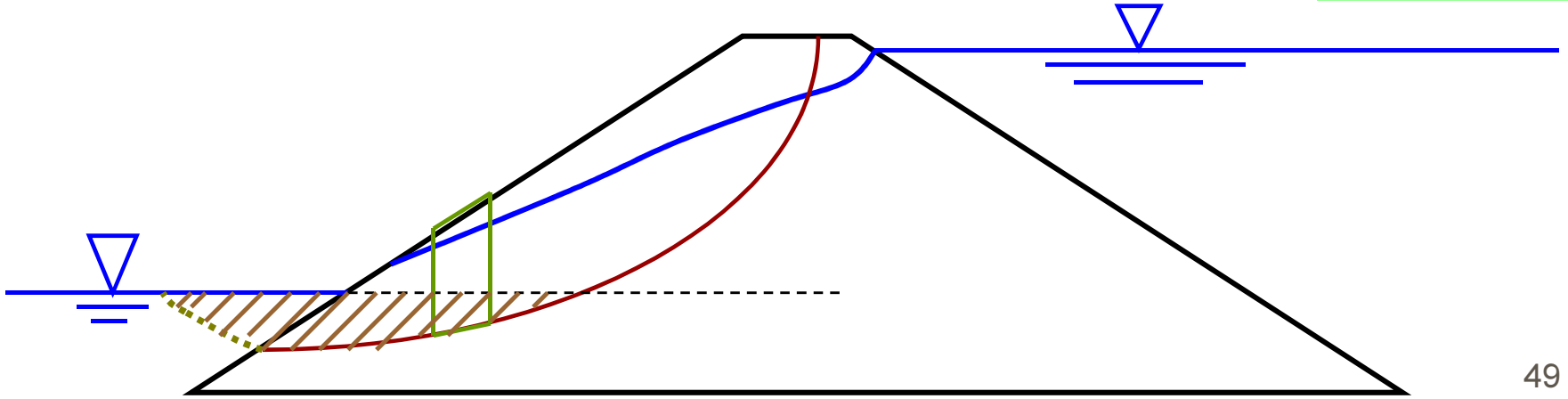
7.4 总应力法与有效应力法

(2) 部分在下游水位以下时

$$F_s = \frac{\sum [c_i' l_i + (W_i \cos\theta_i - \gamma_w h_{ti} l_i) tg\phi_i']}{\sum W_i \sin\theta_i}$$

$$W_i = (\gamma h_{1i} + \gamma_{sat} h_{2i} + \gamma' h_{3i}) b_i$$





7.4.3 施工期土坝的边坡稳定分析

总应力法： 使用总应力强度指标 c_u、ϕ_u

有效应力法：

（1）确定土坝中超静孔隙水压力

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

$$= B\Delta\sigma_1[\frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} + A(1 - \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1})]$$

$$= B\Delta\sigma_1[A + (1-A)\frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1}] = \overline{B}\Delta\sigma_1$$

$$\overline{B} = B[A + (1-A)\frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1}] \quad \Leftrightarrow \quad \text{土坝中} \quad \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} \approx const.$$

P296

7.4 总应力法与有效应力法

(2) 绘制等孔压图

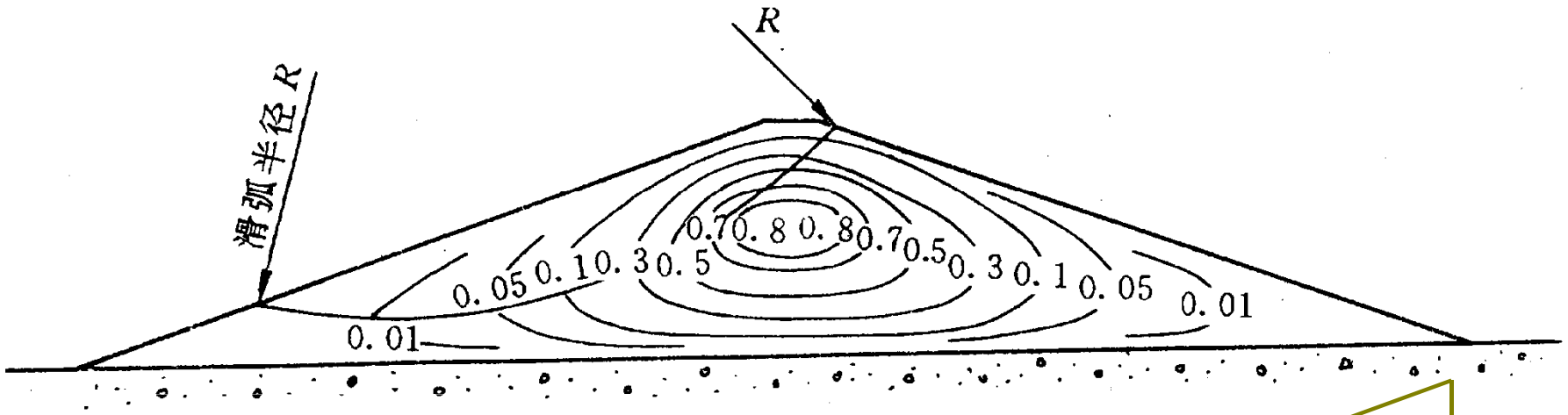


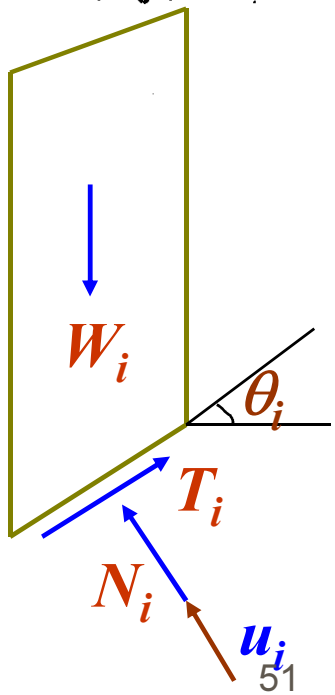
图 7-32　坝体孔隙水压力等值线图

(3) 计算抗滑稳定安全系数

孔压项

$$F_s = \frac{\sum [c_i' l_i + (W_i \cos\theta_i - u_i l_i) tg\phi_i']}{\sum W_i \sin\theta_i}$$

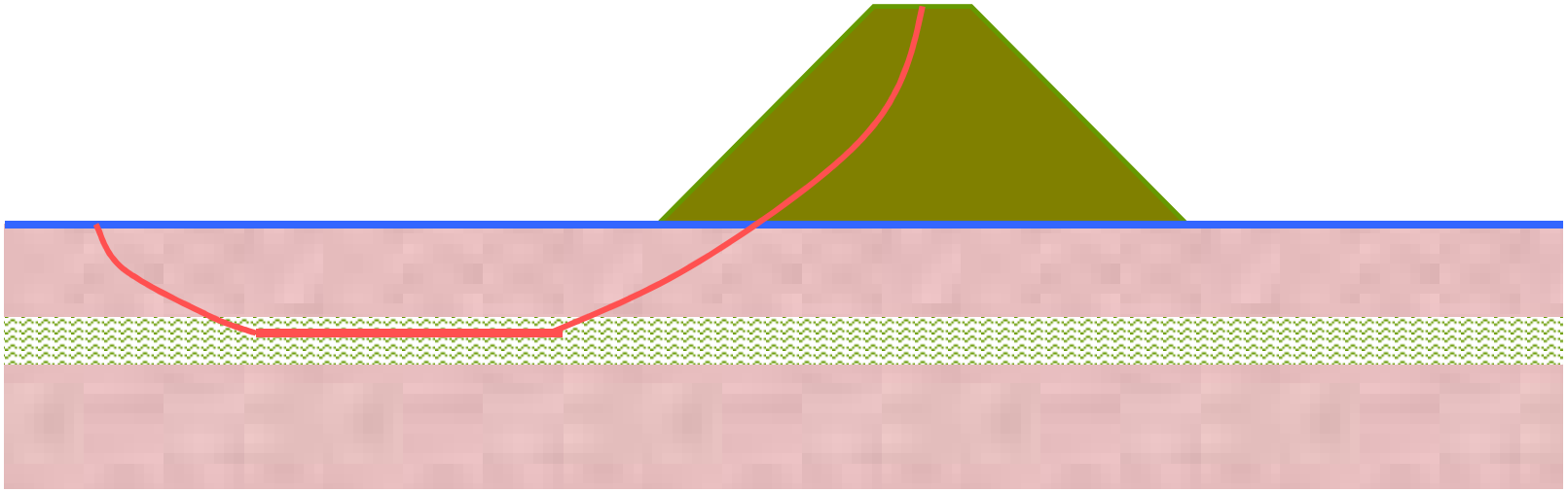
瑞典条分法



7.5 工程实际中的边坡稳定问题

1 超固结粘土边坡

2 软弱夹层



P298 一起看书

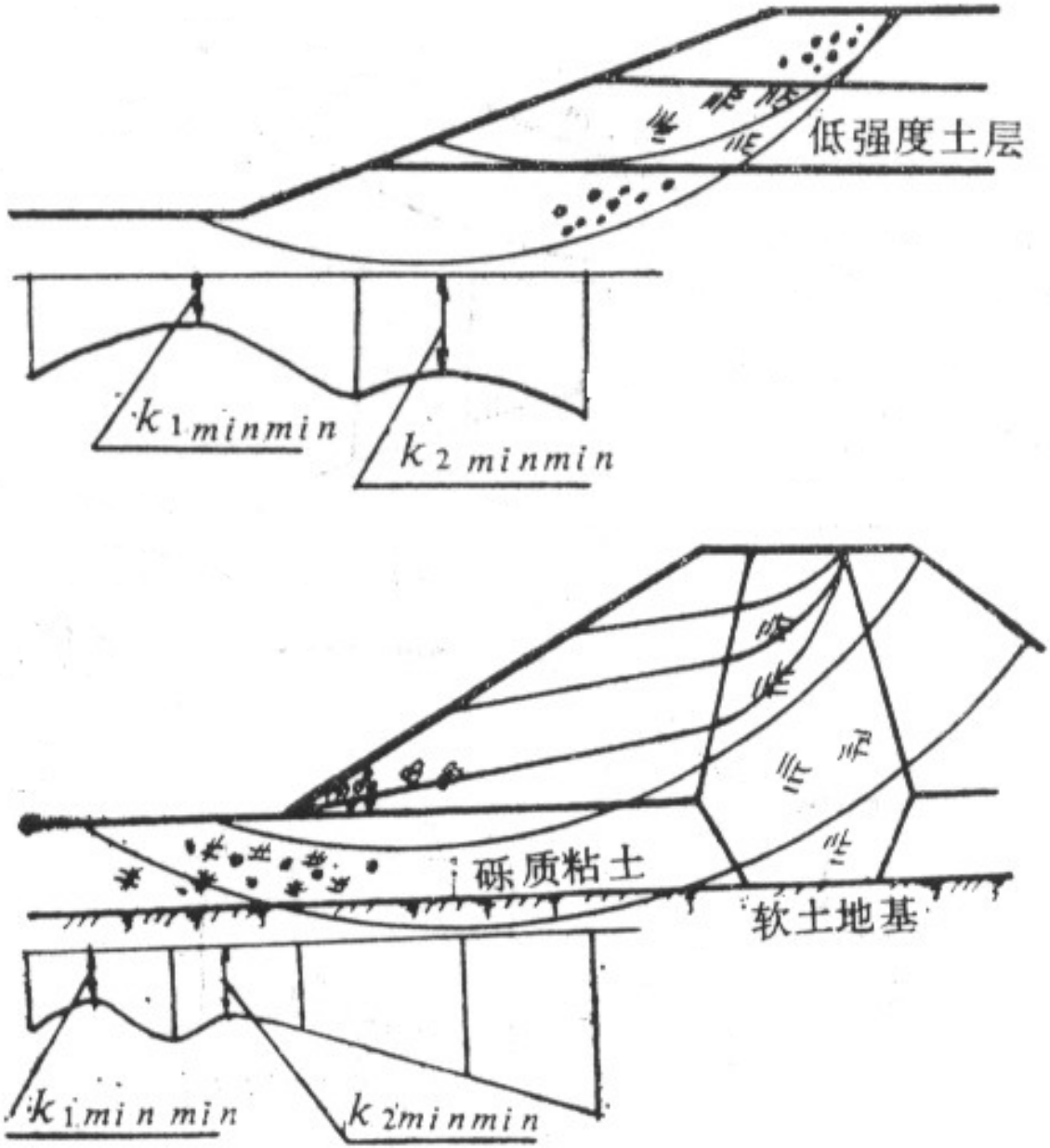
7.5 工程实际中的边坡稳定问题

其它： 最小安全系数的搜索

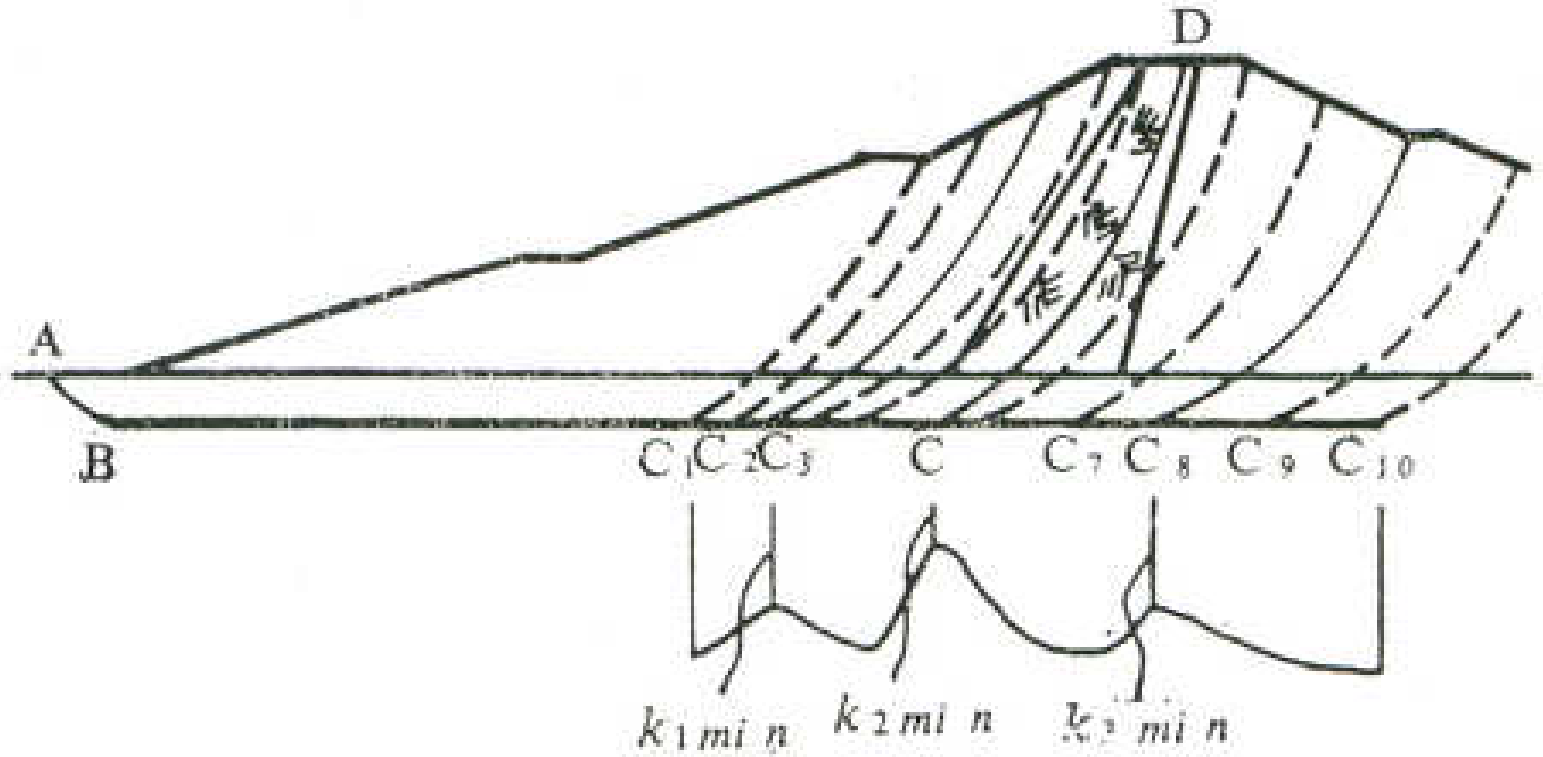
- 1· 初级方法： 枚举法
- 2·解析法：单形法、负梯度法、DFP法
- 3· 随机搜索法
- 4·优化方法：模拟退火法、神经网络法、遗传算法……

主要为了避免局部极小问题

7.5 工程实际中的边坡稳定问题

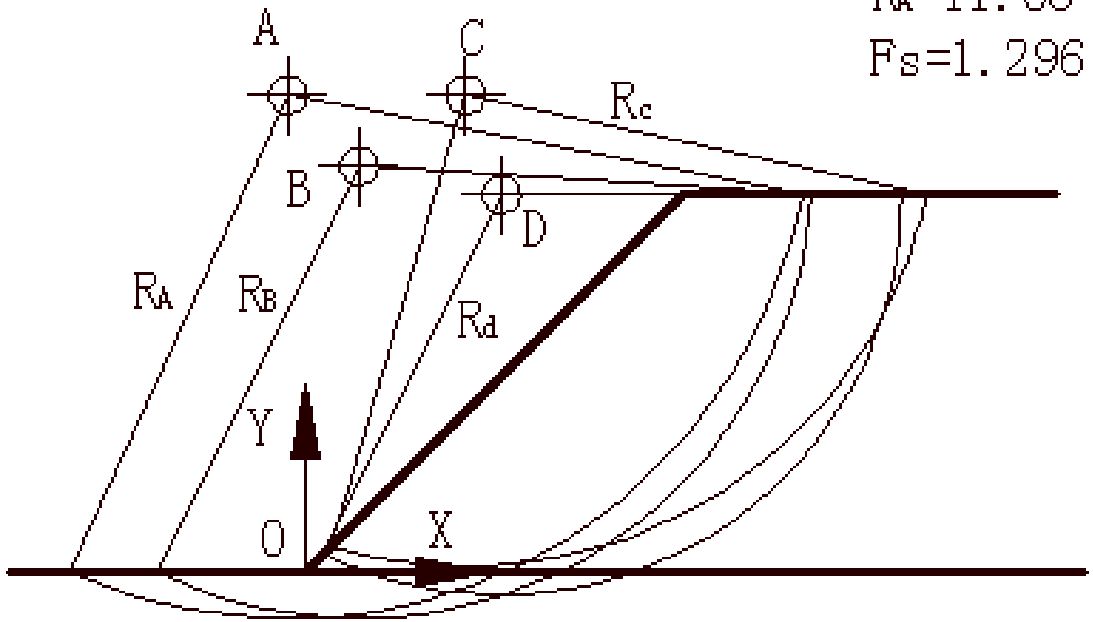


7.5 工程实际中的边坡稳定问题



7.5 工程实际中的边坡稳定问题

Ax=-0.36	Bx=1.14	Cx=3.39	Dx=4.14
Ay=10.06	By=8.56	Cy=10.06	Dy=7.96
R_A=11.06	R_B=9.56	R_c=9.96	R_d=8.46
Fs=1.296	Fs=1.3	Fs=1.296	Fs=1.289



Wu's publications related to the slope stability analysis

Wu X.Z. *Implementing statistical fitting and reliability analysis for geotechnical engineering problems in R*. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2017, 11(2):173-188. 土工多元统计分析和概率计算的 R 实施

Wu X.Z. *Development of fragility functions for slope instability analysis*. Landslides. 2015, 12(1):165-175. Technical note. 强降雨和地震作用下边坡失稳的易损性曲线.

Wu X.Z. *Using copulas to characterise the dependency of GCL shear strengths*. Geosynthetics International. 2013, 20 (5):344-357. 考虑GCL剪切强度相关性的概率稳定分析.

Wu X.Z. *Trivariate analysis of soil ranking-correlated characteristics and its application to probabilistic stability assessments in geotechnical engineering problems*. Soils and Foundations. 2013, 53(4):540-556. [SCIE:0.41]. 土体多变量参数的相关性及其在岩土工程中概率稳定评估中的应用.

Wu X.Z. *Probabilistic slope stability analysis by a copula-based sampling method*. Computational Geosciences. 2013, 17(5):739-755. [SCIE:1.61] 基于关联函数的取样方法及其在概率边坡稳定分析应用.

Wu X.Z. *Modelling dependence structures of soil shear strength data with bivariate copulas and applications to geotechnical reliability analysis*. Soils and Foundations. 2015, 55(5):1243-1258. 采用关联函数模拟土体抗剪强度参数的互相关性及其应用.
吴兴征, 丁留谦, 张金接. 防洪堤的可靠性设计方法探讨. 水利学报. 2003, (4):87-93.
吴兴征, 栾茂田, 徐又建. 土工网加筋土堤坝的稳定分析. 第五届全国土工合成材料学术会议. 现代知识出版社, 2000. 326-329. [pdf]

国外：
Plaxis2d 荷兰
SLIDE RockSci ence
Geo-slope 加拿大

国内 ：
STAB IWHR
北京理正
同济启明星

Ref: 李广信 张丙印 于玉贞 土力学 第三版 清华大学出版社 2022.08

The end

文件名格式：班级 学号 姓名 简略实验名称

邮件标题同文件名

Any questions please 发送至

xingzhengwu@163.com