

2021年青年教师教学竞赛参赛课程

# 《土力学》

沈佳轶

港口海岸与近海工程研究所

浙江大学 海洋学院



浙江大学  
ZHEJIANG UNIVERSITY

# 第十章 第 1 节

## 圆弧滑动面边坡稳定性分析

### 学习目标

1. 掌握边坡和滑坡的概念
2. 理解边坡失稳的本质
3. 掌握边坡稳定性分析的方法



露天矿开采

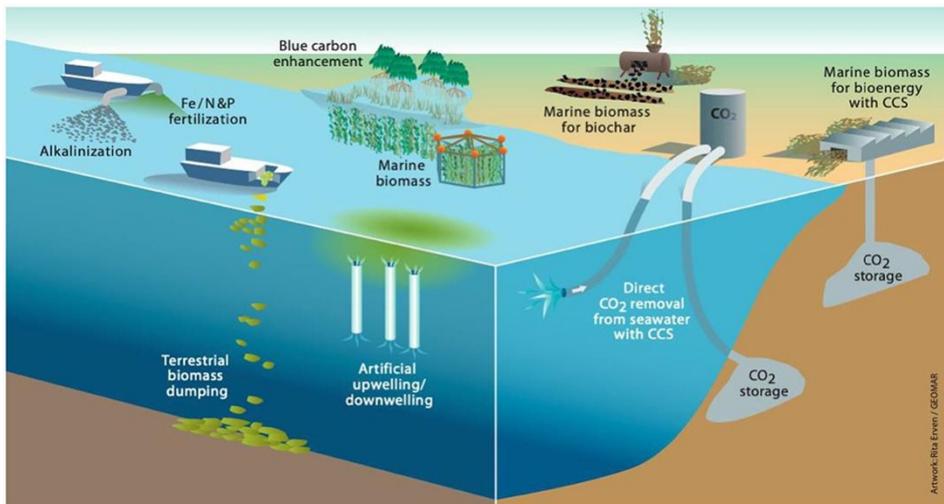


基坑开挖



公路边坡

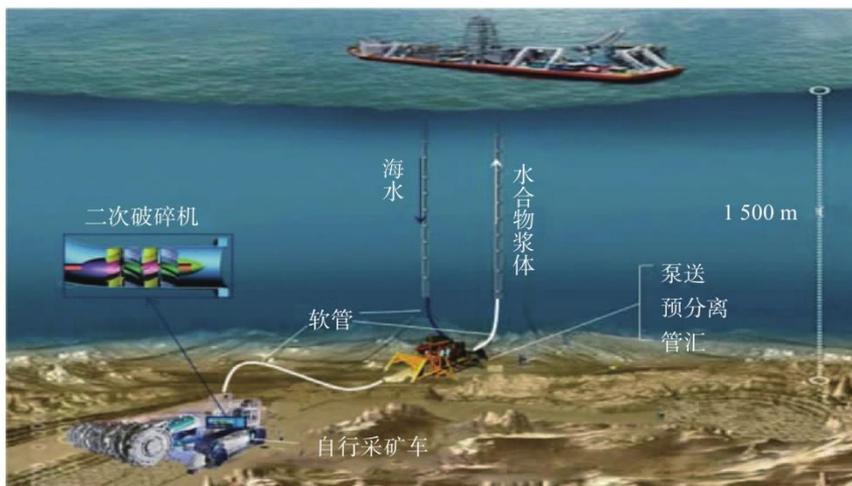
陆地



近海CO<sub>2</sub>海底封存



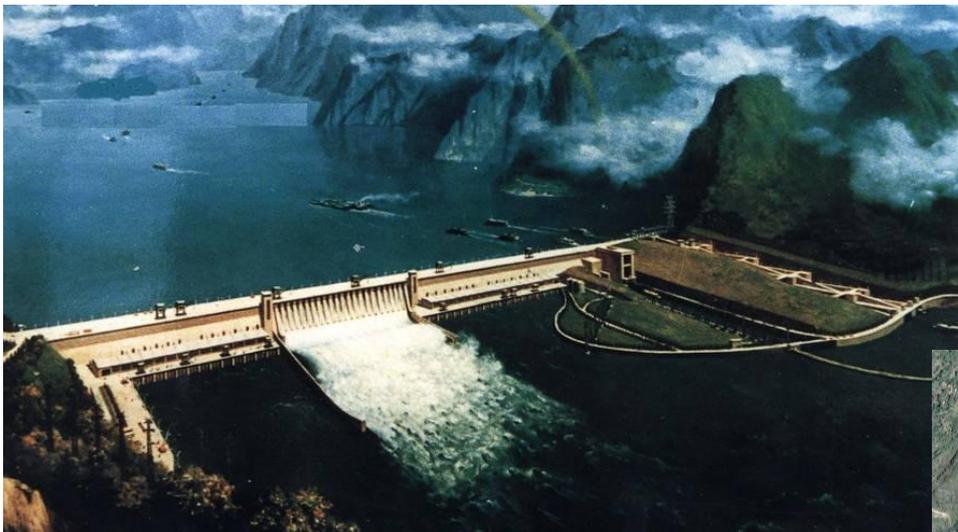
海岸线



深海天然气水合物开采

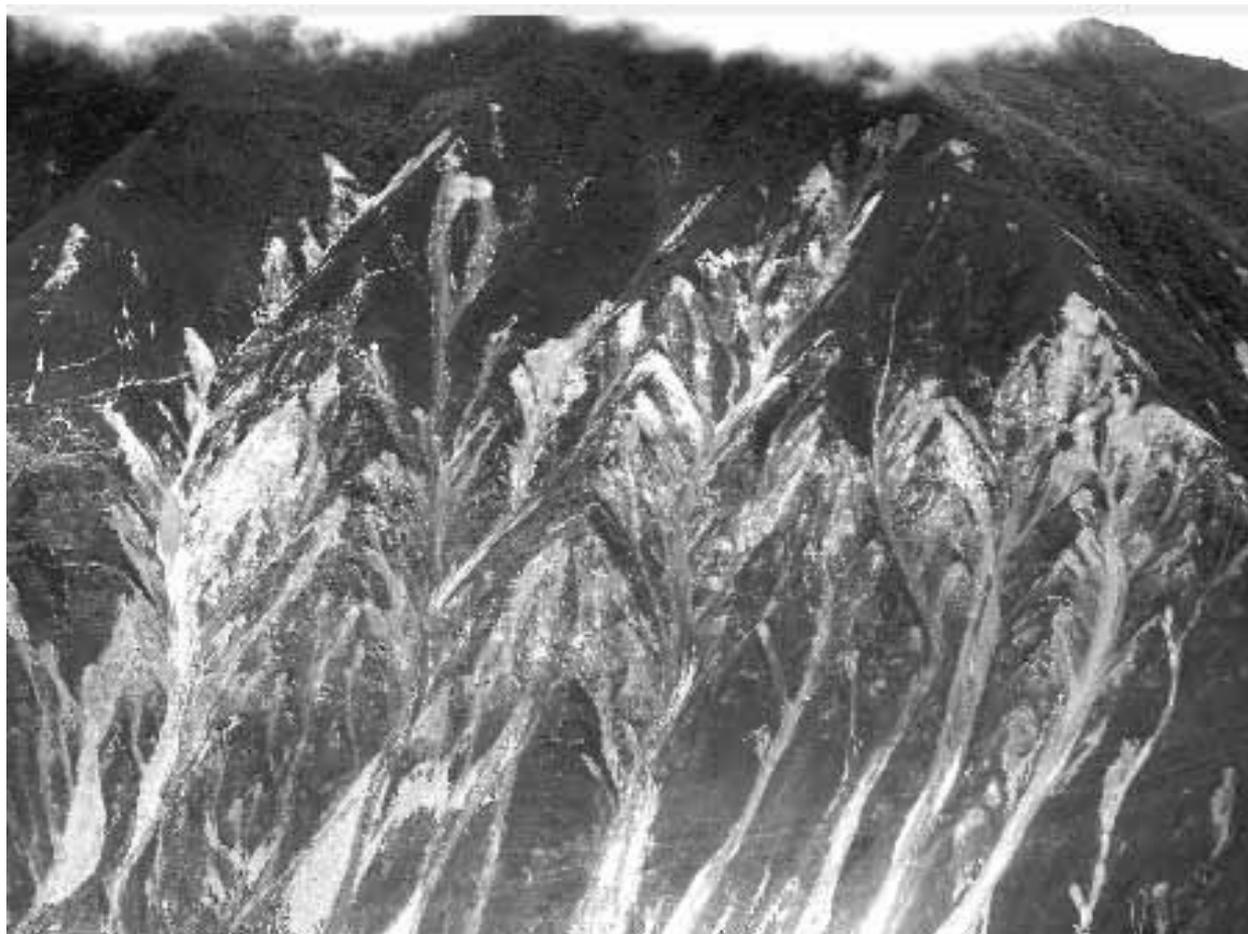
海洋

## 水位变化引发滑坡



2001年，重庆市云阳县发生两次大型滑坡，其中武隆边坡失稳造成79人死亡。  
国务院拨款40亿元用于三峡库区地质灾害治理

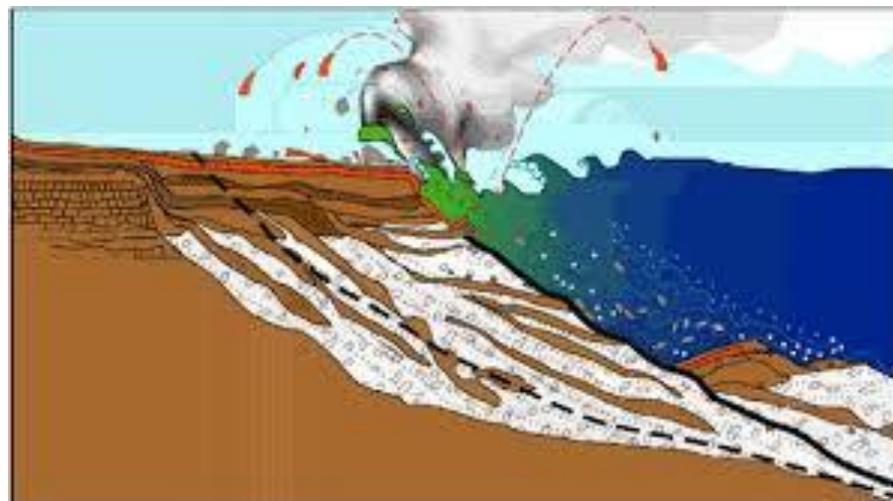
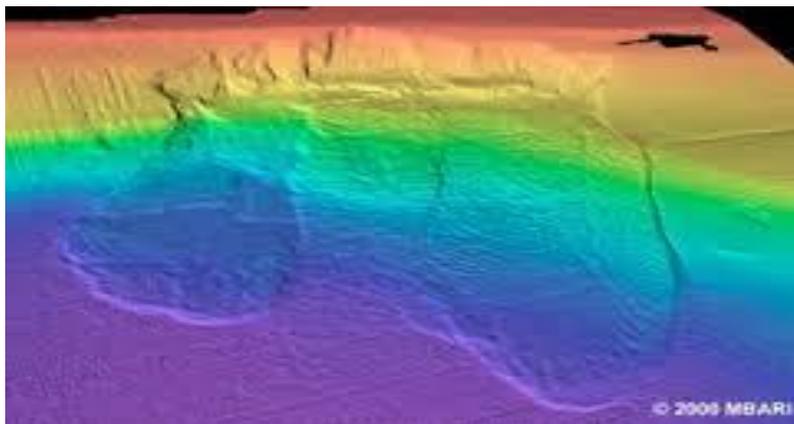
## 地震引发滑坡



2008年“5.12”汶川特大地震诱发了数以万计的地质灾害，其中仅大型、特大型滑坡就达数百处。

汶川地震

## 波浪引起滑坡

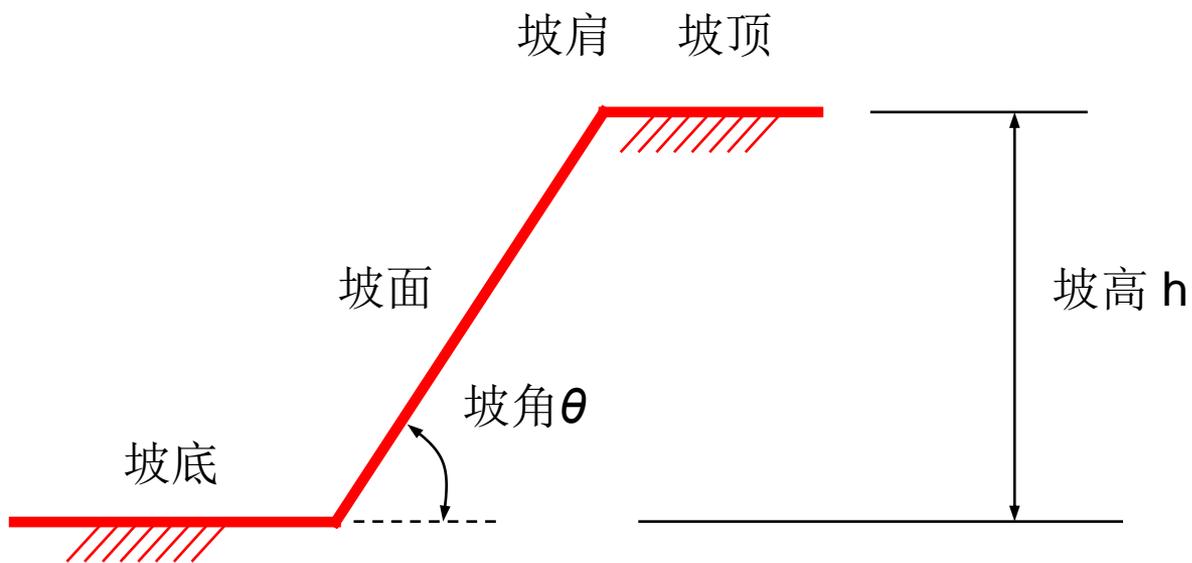


1969年Camille飓风引发密西西比河三角洲发生海底滑坡，造成高达1亿美元的经济损失；

1998年巴布亚新几内亚由于地震和海底滑坡诱发海啸，夺取2000人的生命；

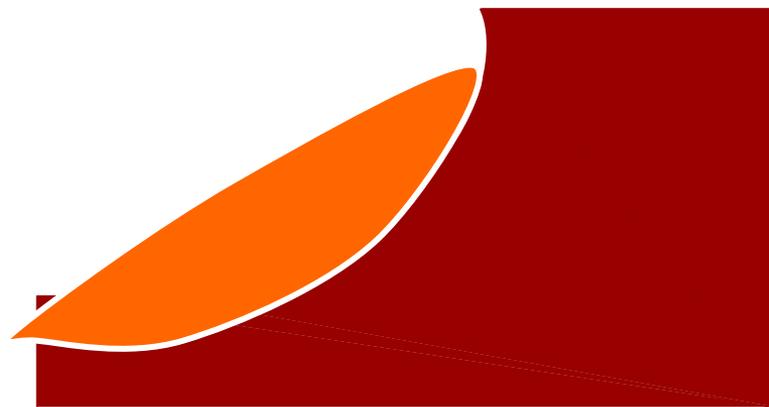
2006年吕宋海峡的海底光缆遭到海底滑坡的破坏，使我国与中南亚地区的通讯中断了12个小时

边坡：具有倾斜坡面的岩土体

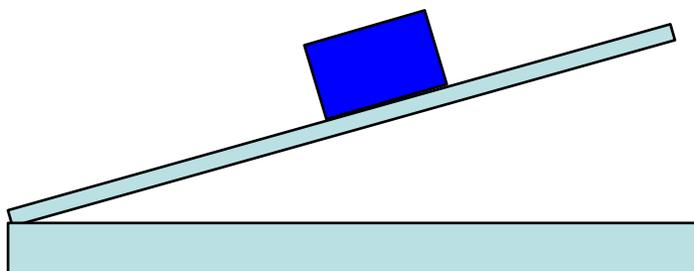
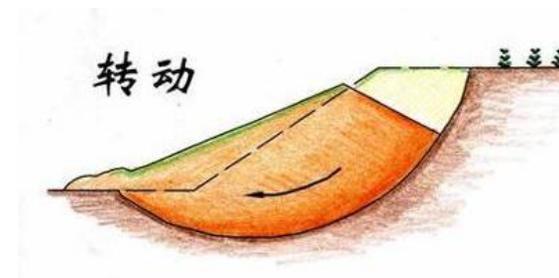
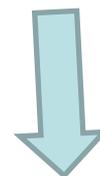
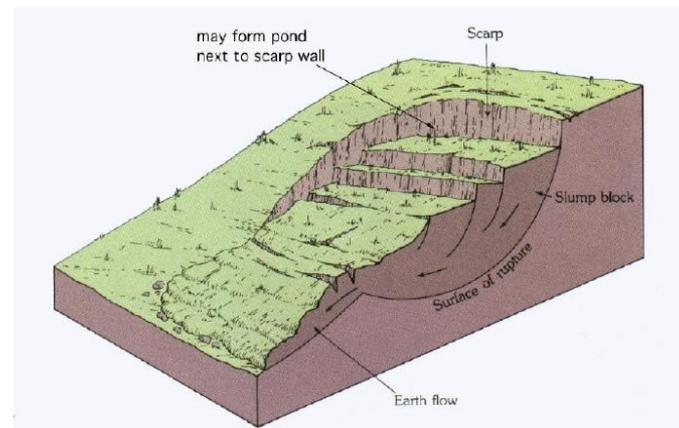


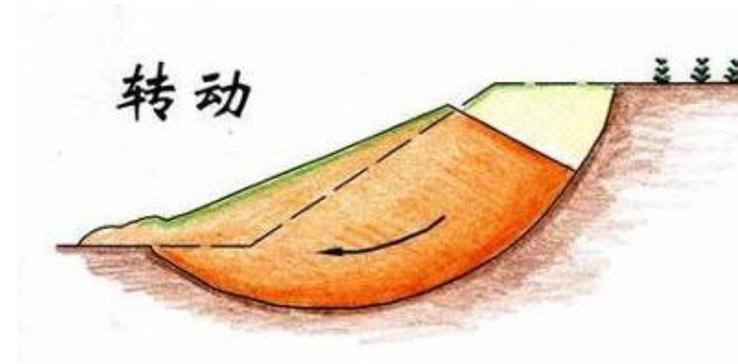
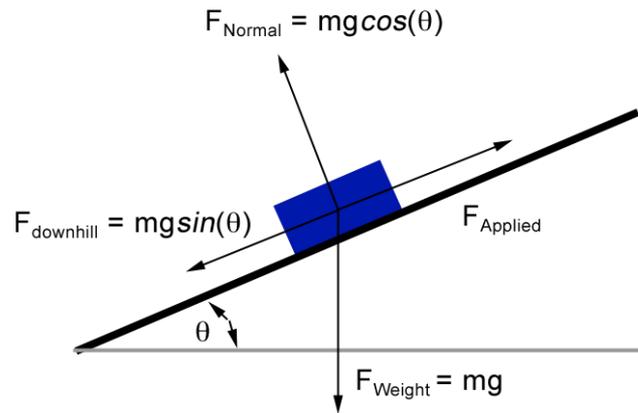
边坡各部位名称

**滑坡：**边坡丧失其稳定性，一部分岩土体相对于另一部分岩土体发生滑动的现象



## 边坡稳定性分析模型





下滑力：重力产生的分量

下滑力：重力产生的分量

抗滑力：摩擦力  $f = \mu^* mg \cos \theta$

抗滑力：土的抗剪强度  $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$

$\tau$ —土的抗剪强度 (shear stress), kPa;

$\sigma$ —作用在剪切面上的法向应力 (normal stress), kPa;

$\phi$ —土的内摩擦角 (angle of friction),  $^{\circ}$  ;

$c$ —土的粘聚力 (cohesion), kPa;

边坡失稳的本质：土体重力（或者外力）产生的下滑力 **大于** 土体的抗剪强度

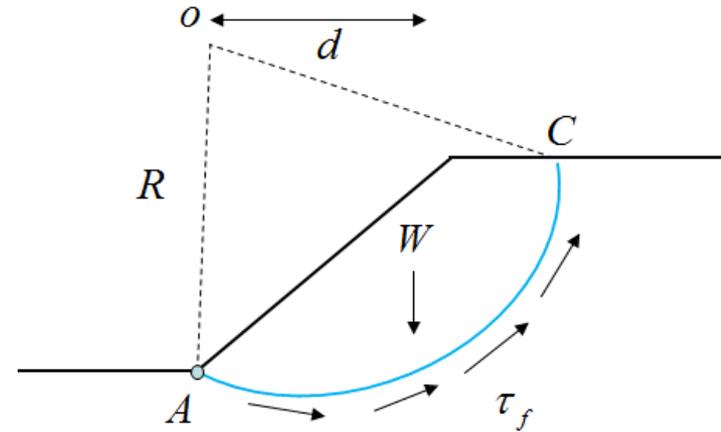
## 安全系数 (Factor of safety, FOS)

定义 1: 抗滑力 ( $T_R$ ) 与下滑力 ( $T_D$ ) 之比

$$FOS = \frac{T_R}{T_D}$$

定义 2: 抗滑力矩 ( $M_R$ ) 与下滑力矩 ( $M_D$ ) 之比

$$FOS_s = \frac{M_R}{M_D} = \frac{T_R R}{Wd} = \frac{\tau_f L_{AC} R}{Wd}$$



整体圆弧滑动

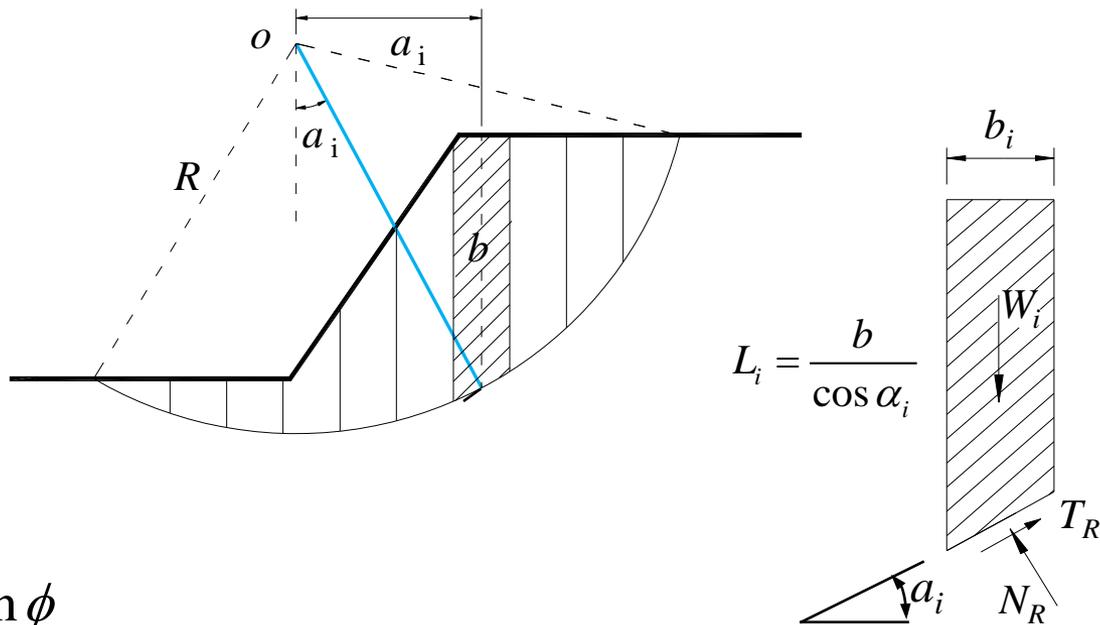
## 极限平衡法-瑞典条分法

下滑力  $T_D = W_i \sin \alpha_i$

$$N_R = W_i \cos \alpha_i$$

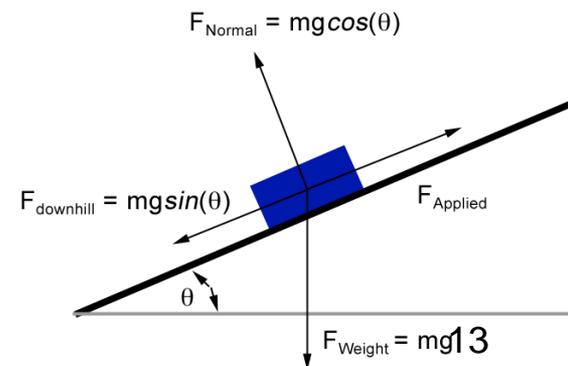
抗滑力  $T_R = cL_i + N_R \tan \phi$

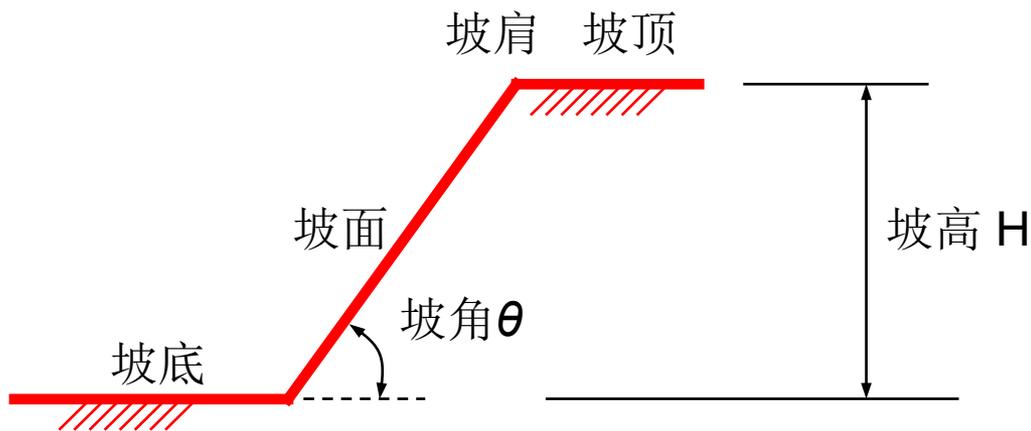
$$T_R = cL_i + W_i \cos \alpha_i \tan \phi$$



土条上的受力分析图

$$FOS = \frac{T_R'}{T_D} = \frac{T_R' R}{T_D R} = \frac{\sum cL_i + W_i \cos \alpha_i \tan \phi}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$





$$FOS = \frac{T'_R}{T_R} = \frac{T'_R R}{T_R R} = \frac{\sum cL_i + (W_i \cos \alpha_i \tan \phi)}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad W_i = f(\theta, H, \gamma) \quad FOS = f(\theta, H, \gamma, c, \phi)$$

坡角越大



坡高越高



重度越大



内摩擦角, 内聚力越大



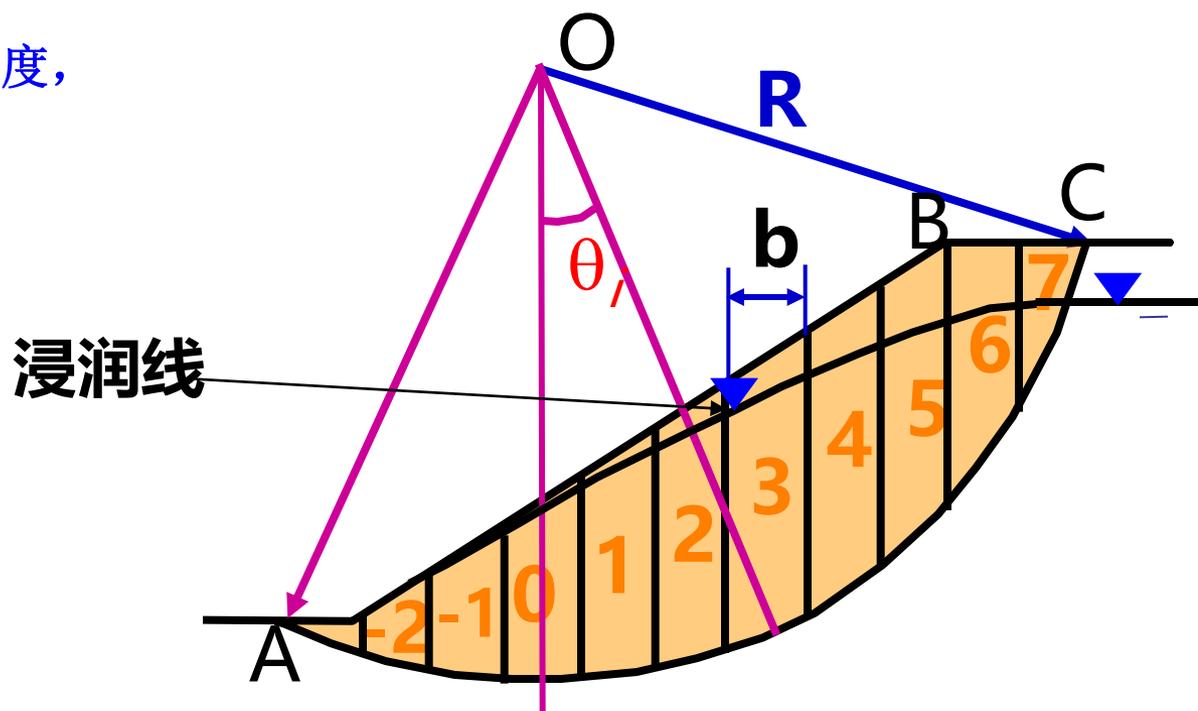
如何提高边坡的稳定性?

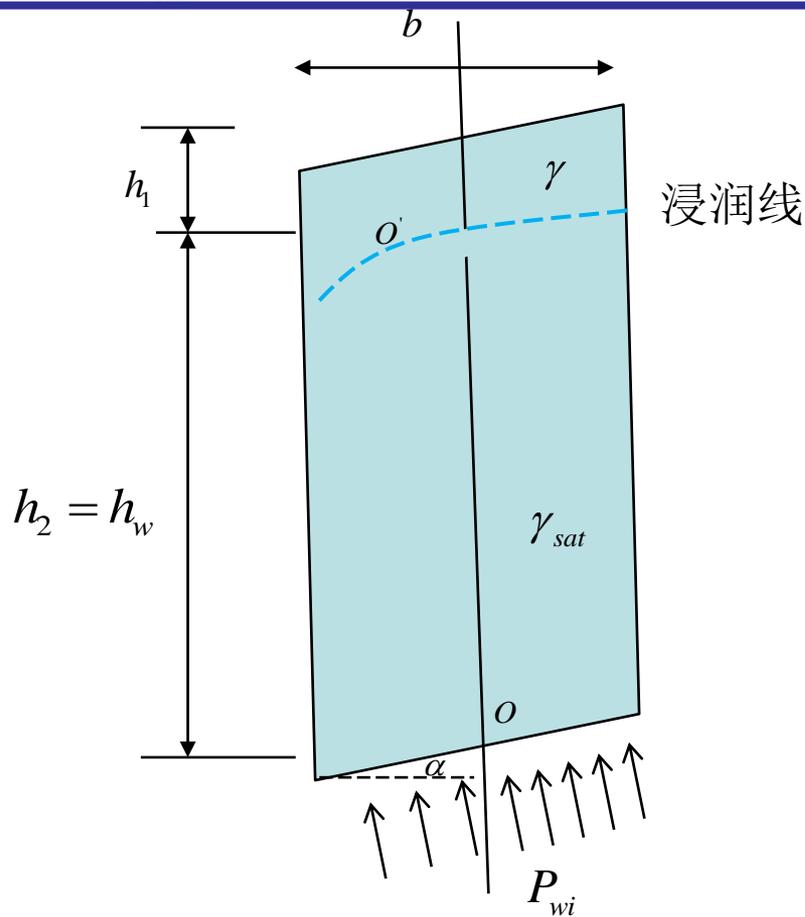
## 水位对边坡稳定性的影响

降雨会引起地下水位上升，

降低土体强度，增大土体的重度，

导致边坡的稳定性下降。





$$FOS = \frac{\sum_{i=1}^n \left( c \frac{b_i}{\cos \alpha_i} + W_i \cos \alpha_i \tan \phi \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$

$$FOS = \frac{\sum_{i=1}^n \left( c' \frac{b_i}{\cos \alpha_i} + \left( W_i \cos \alpha_i - \gamma_w h_{wi} \frac{b}{\cos \alpha_i} \right) \tan \phi' \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$

区别1: 滑体重量的改变

区别2: 滑体底部的支持力的改变

$$N_R = W_i \cos \alpha_i - P_{wi}$$

$$W_i = (h_1 \gamma + h_2 \gamma_{sat}) b$$

$$P_{wi} = uh = \gamma_w h_w \frac{b}{\cos \alpha}$$

## 地震对边坡稳定性的影响

计算时将随时间变化的惯性力等价成一个静力的地震惯性力，作用在滑体上。

$F_{nh}$ : 水平向的地震惯性力

$F_{nv}$ : 垂直向的地震惯性力

$$F_{nh} = \frac{a_h \xi W_i \alpha_i}{g} \quad F_{nv} = \frac{a_h \xi W_i \alpha_i}{3g}$$

$\alpha_h$ : 水平向设计地震加速度代表值。

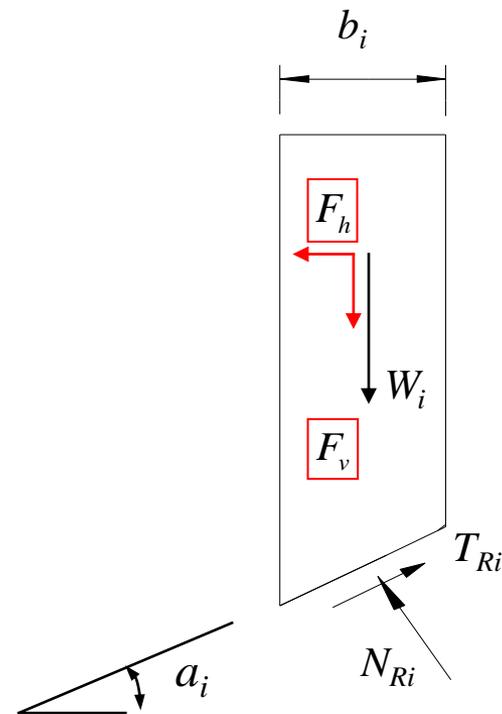
当设计烈度为7级 = 0.1g、8级 = 0.2g、9级 = 0.4g

$g$ : 重力加速度

$\xi$ : 地震加速度折减系数，取0.25

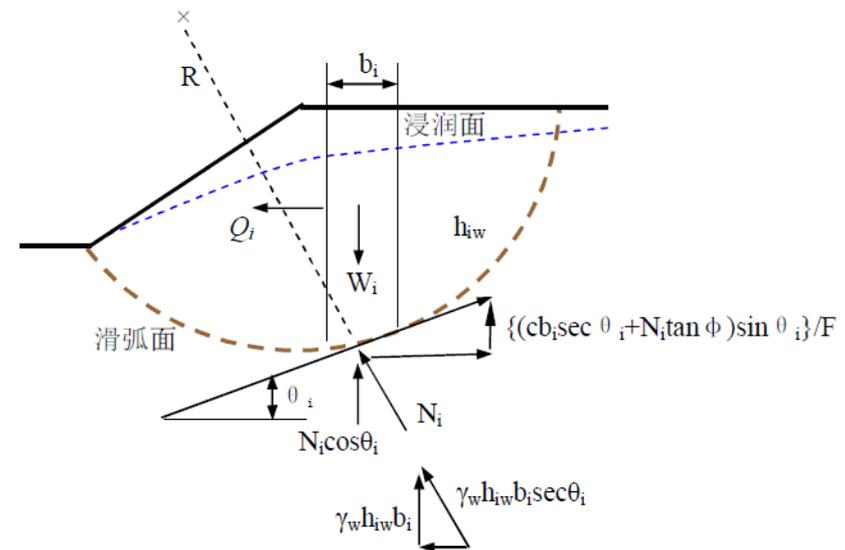
$\alpha_i$ : 质点*i* (土条重心)的动态分布系数，7级 = 3.0、8级 = 2.5、9级 = 2.0

$W_i$ : 土条重量



考虑地震作用力后的计算公式:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{c'b_i + b_i(\gamma h_i - \gamma_w h_{iw}) \tan \varphi'}{\cos \alpha_i + (\sin \alpha_i \tan \varphi') / F_s}}{\sum_{i=1}^n (W_i \sin \alpha_i + C_s W_i a_i / R)}$$



$$f(F_s) = F_s \sum_{i=1}^n (W_i \sin \alpha_i + C_s W_i a_i / F_s) - \sum_i \frac{c'b_i + (1 - r_u) \gamma h_i b_i \tan \varphi'}{\cos \alpha_i + (\sin \alpha_i \tan \varphi') / F_s} = 0$$

## 波浪对边坡稳定性的影响？



刘敏. 复杂环境下海底斜坡稳定性解析[D].大连理工大学,2016.

# 谢谢!

