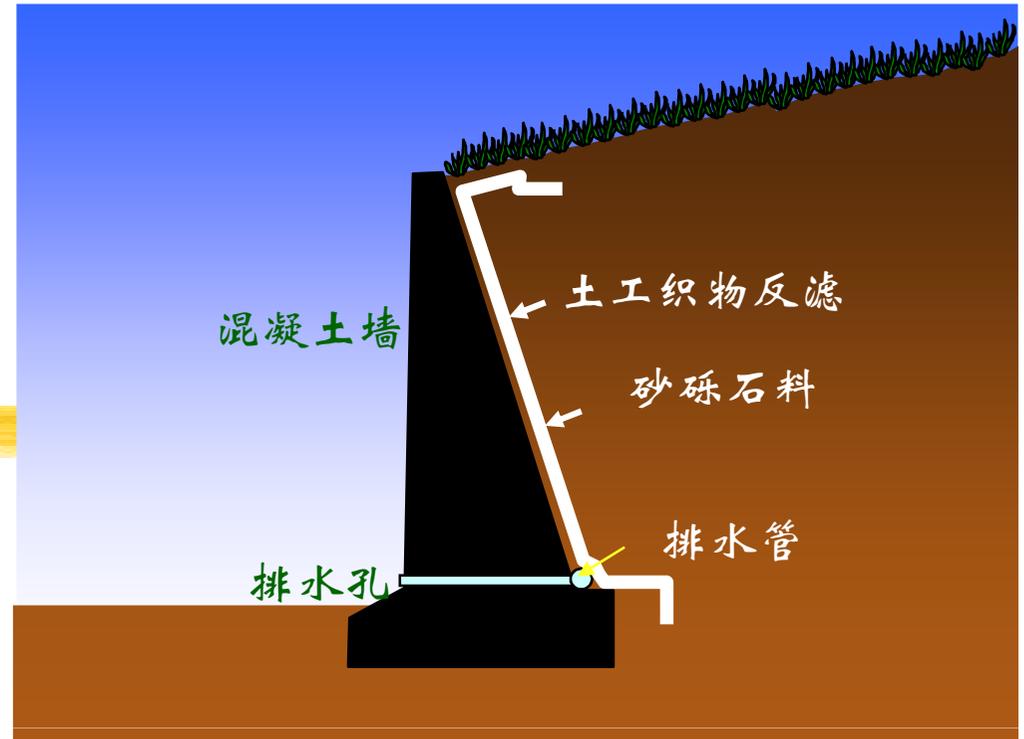
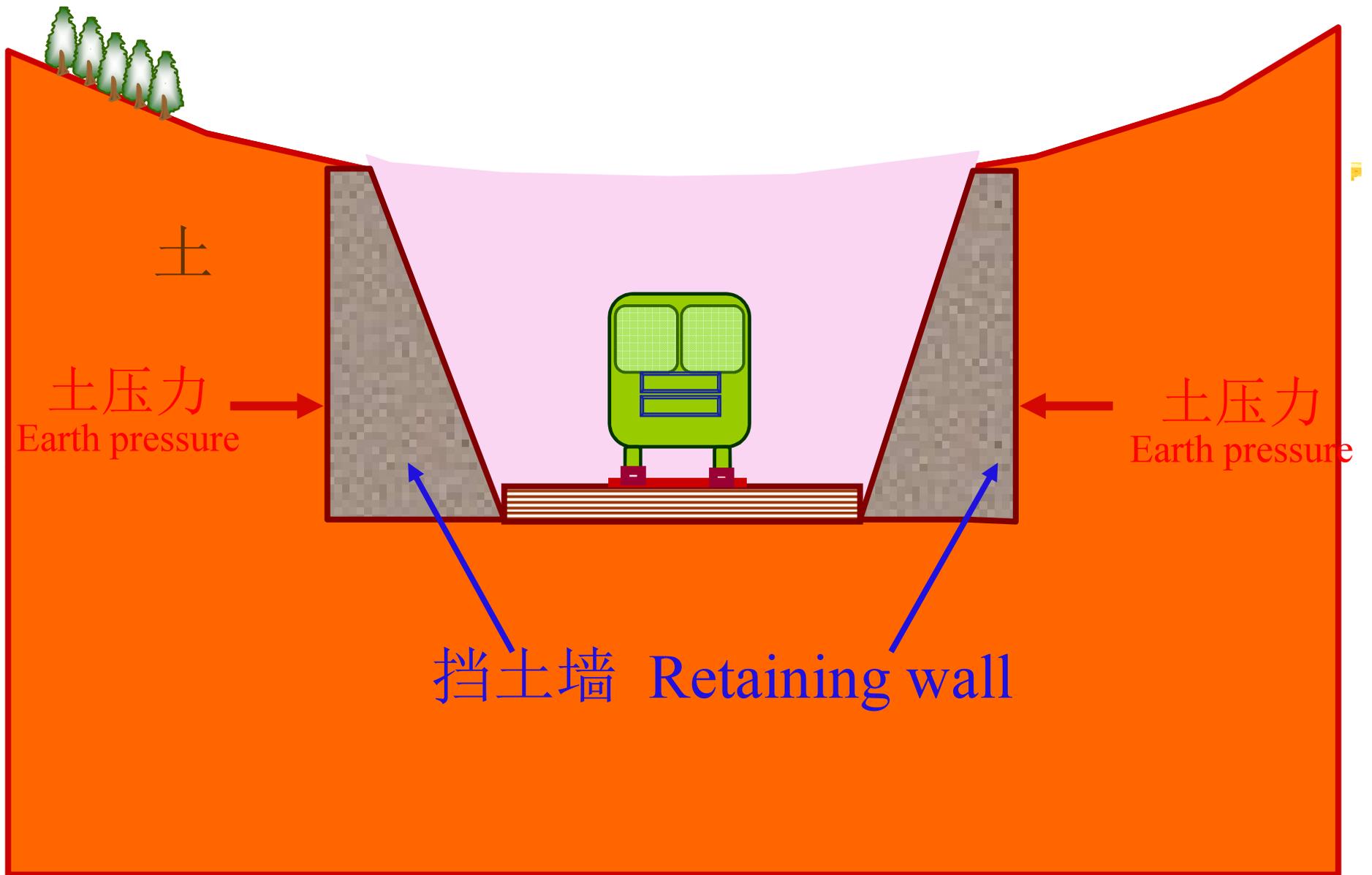


第7章



挡土结构物上的土压力 Earth pressure on retaining wall

侧向



常见于土木、水利、海岸、交通等工程中



目 录

7.1 概述

7.2 静止土压力计算

7.3 朗肯(Rankine)土压力理论

7.4 库仑(Coulomb)土压力理论

7.5 土压力问题的讨论

7.6 工程中挡土墙的土压力计算

§ 7.1 概述

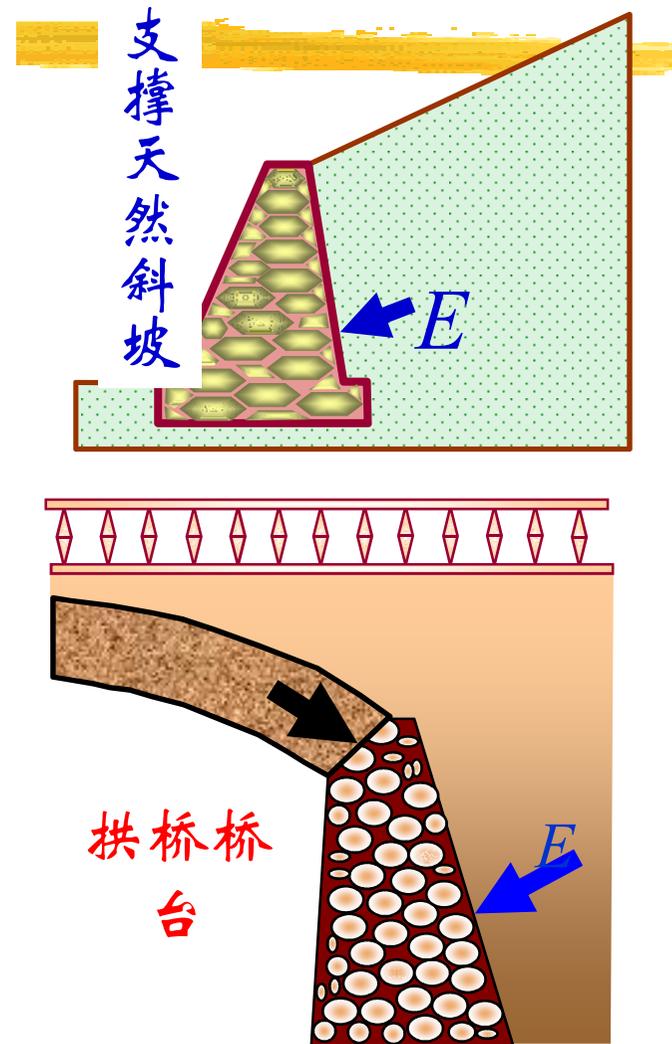
- 什么是挡土结构物
Retaining structure
- 什么是土压力
Earth pressure
- 影响土压力的因素



7.1.1 挡土结构物（挡土墙）及土压力

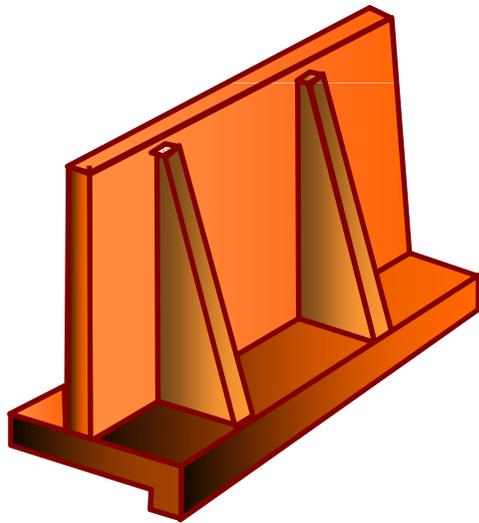
挡土结构物：用来支撑天然或人工斜坡不致坍塌以保持土体稳定性，或使部分侧向荷载传递分散到填土上的一种结构物。

挡土墙上的土压力：由于土体自重、土上荷载或结构物的侧向挤压作用，挡土结构物所承受的来自墙后填土的侧向压力。

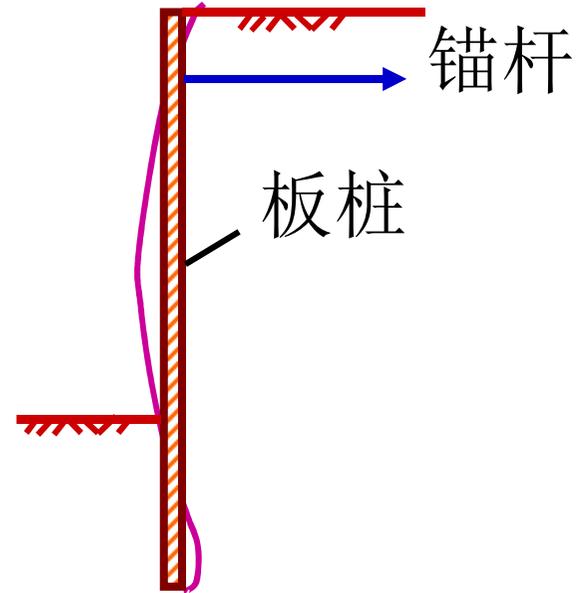


挡土墙类型（按刚度及位移方式）

刚性挡土墙

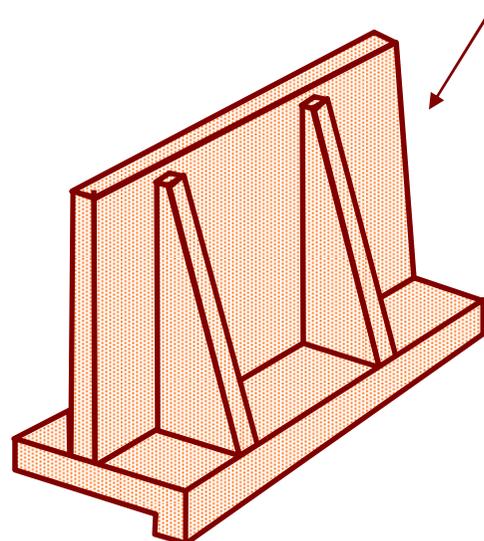
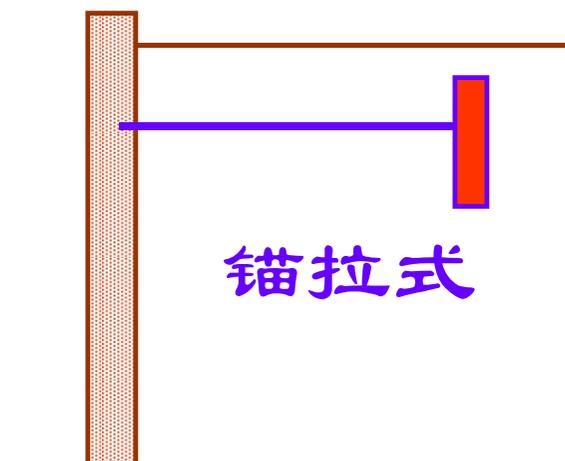
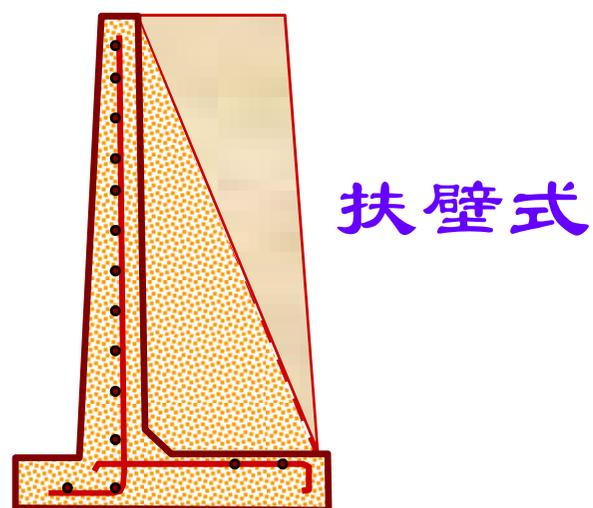
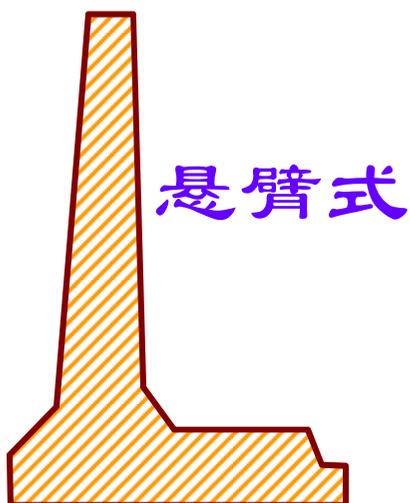
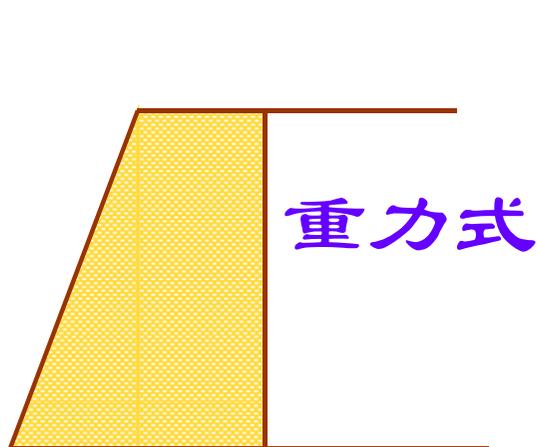


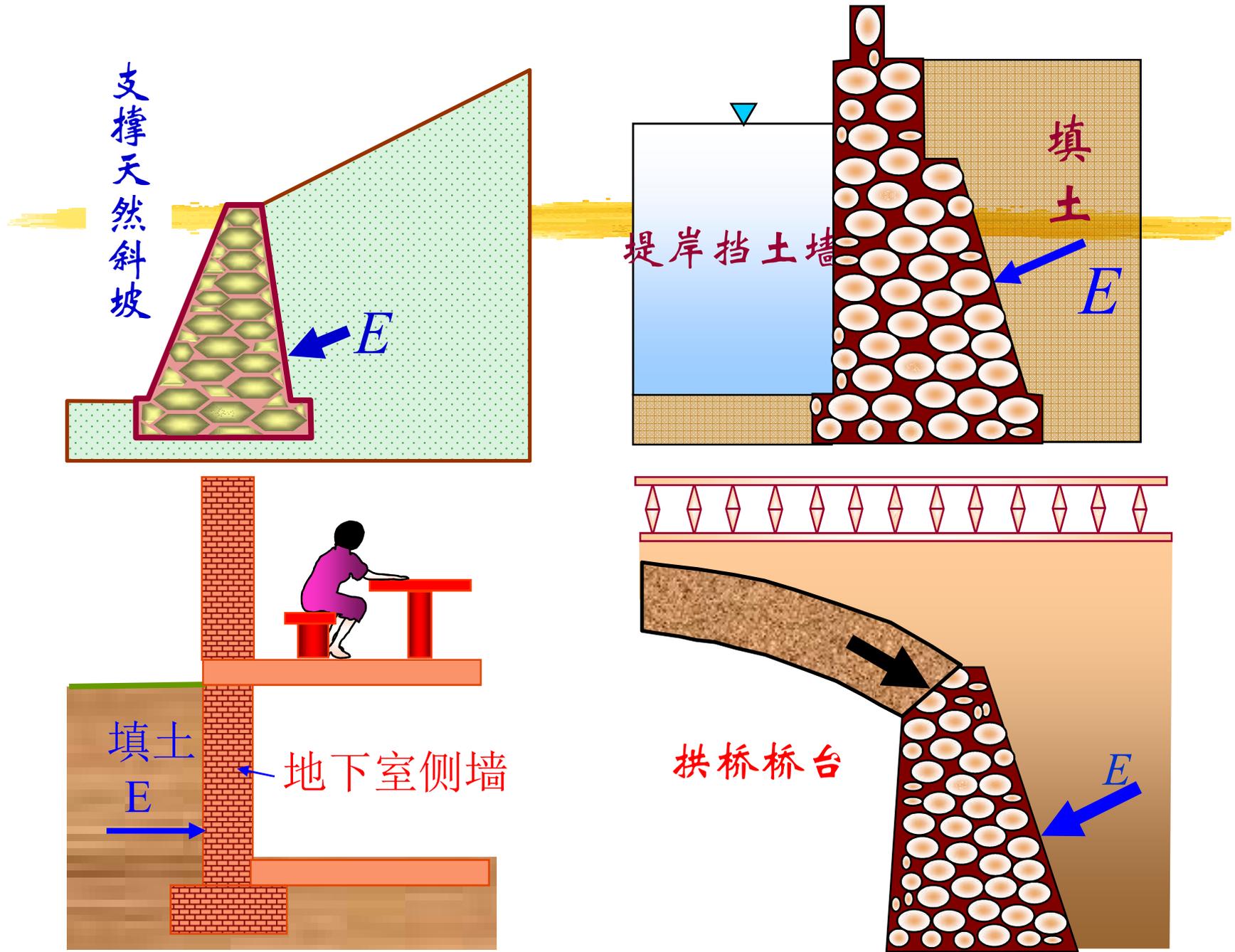
柔性挡土墙



板桩变形

➤ **刚性挡土墙**：本身变形极小，只能发生整体位移





挡土墙—浆砌块石



护坡桩形成的挡土结构



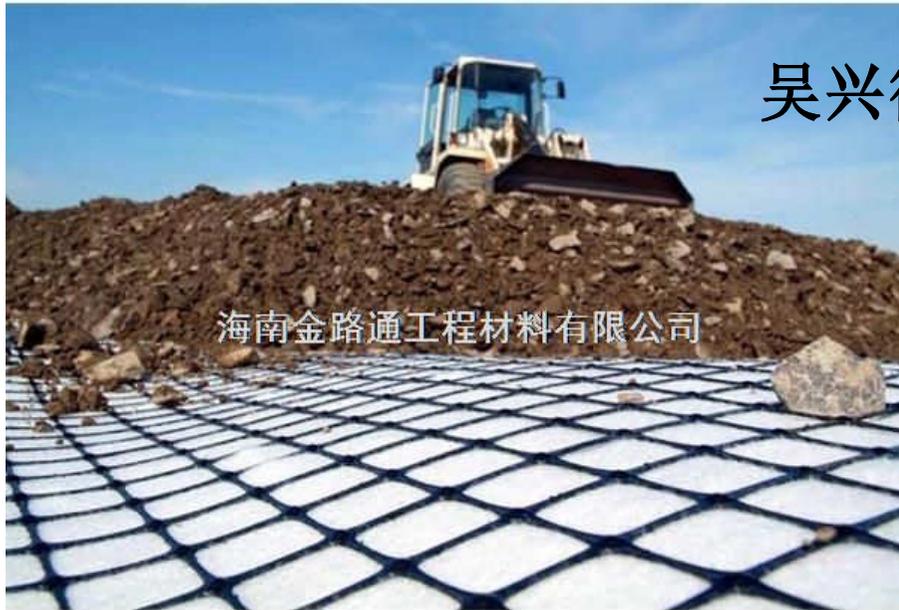
§ 7.1 概述



土工格栅加筋建成5~6.5m高
的加筋挡土墙

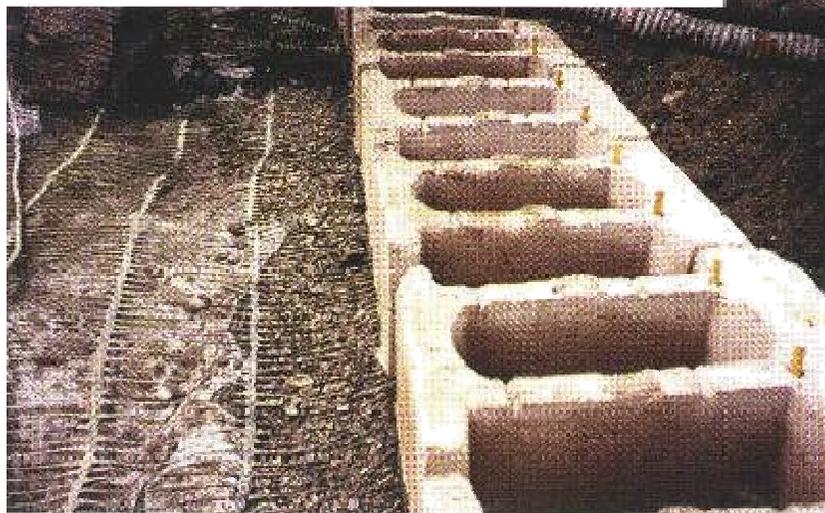


吴兴征, 丁昌杰, 朱文芳. 土工格栅拉拔试验研究进展. 山东交通科技. 1998, (4):6-9.



海南金路通工程材料有限公司

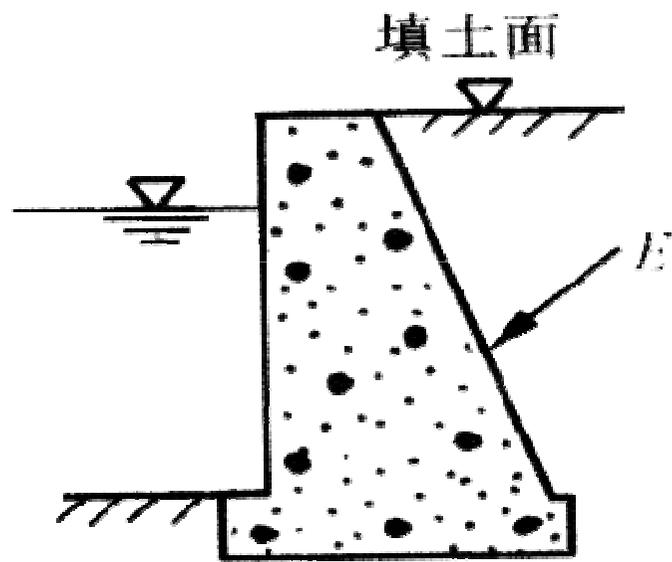
jdol.com.cn



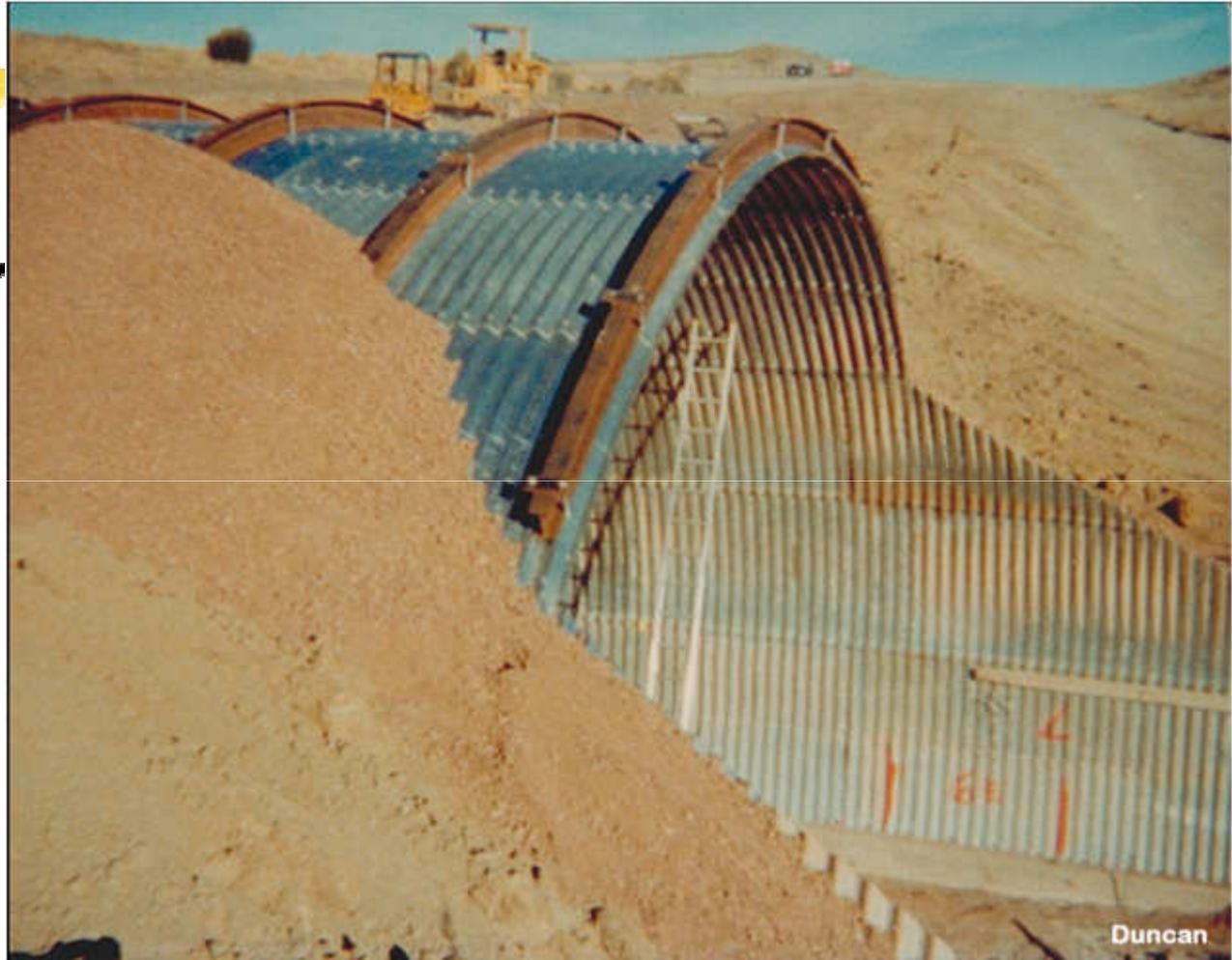
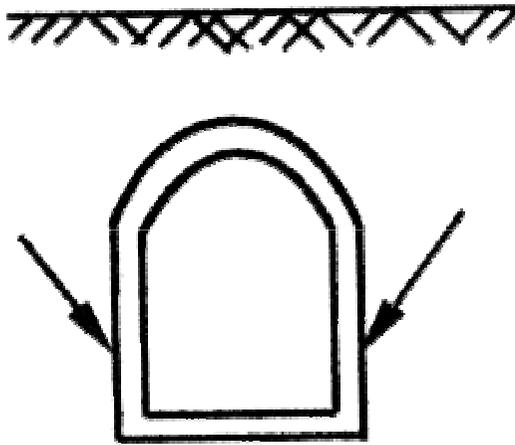
土工格栅加筋修筑河堤挡土墙
(扬州古运河整治)

加筋挡土墙

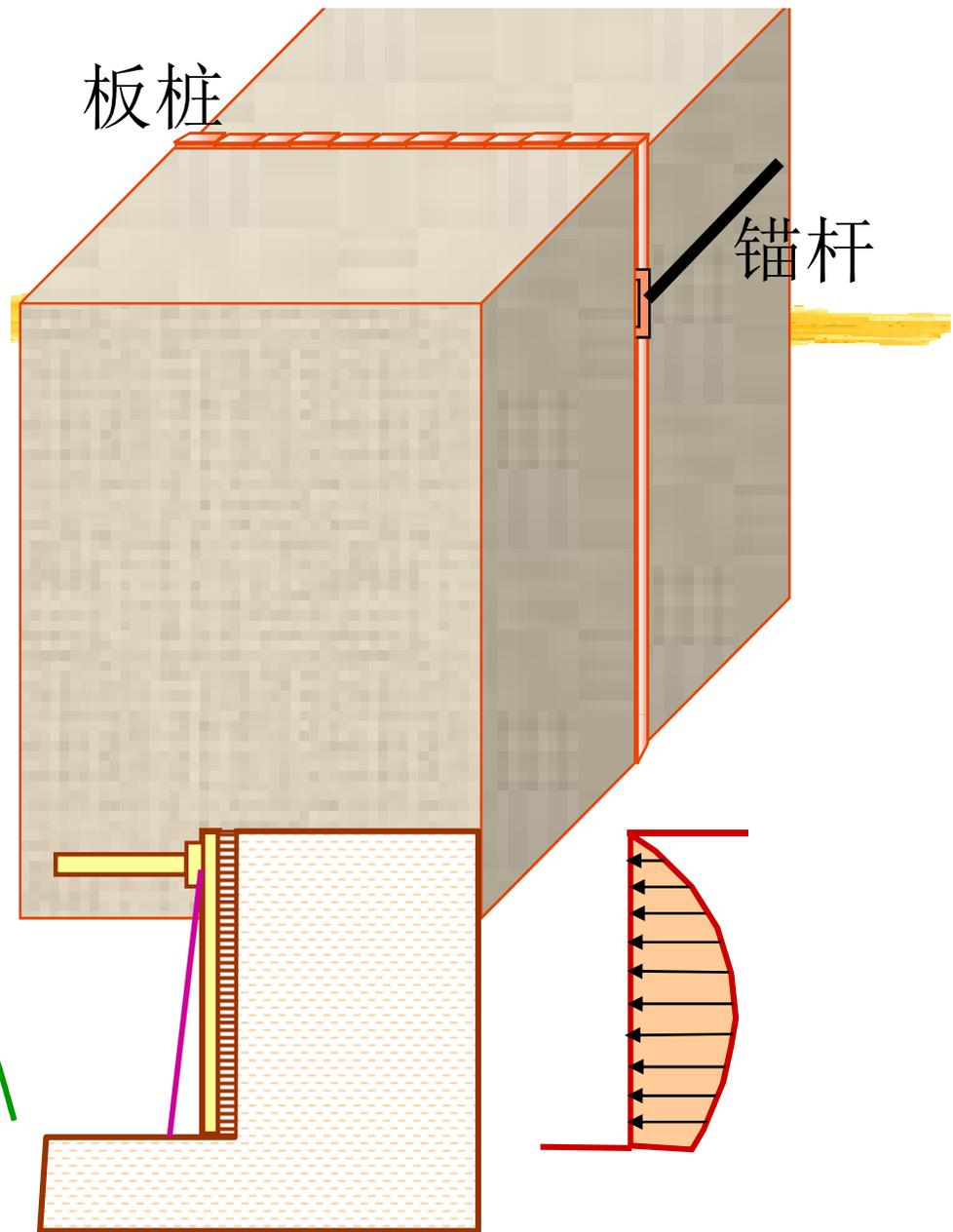
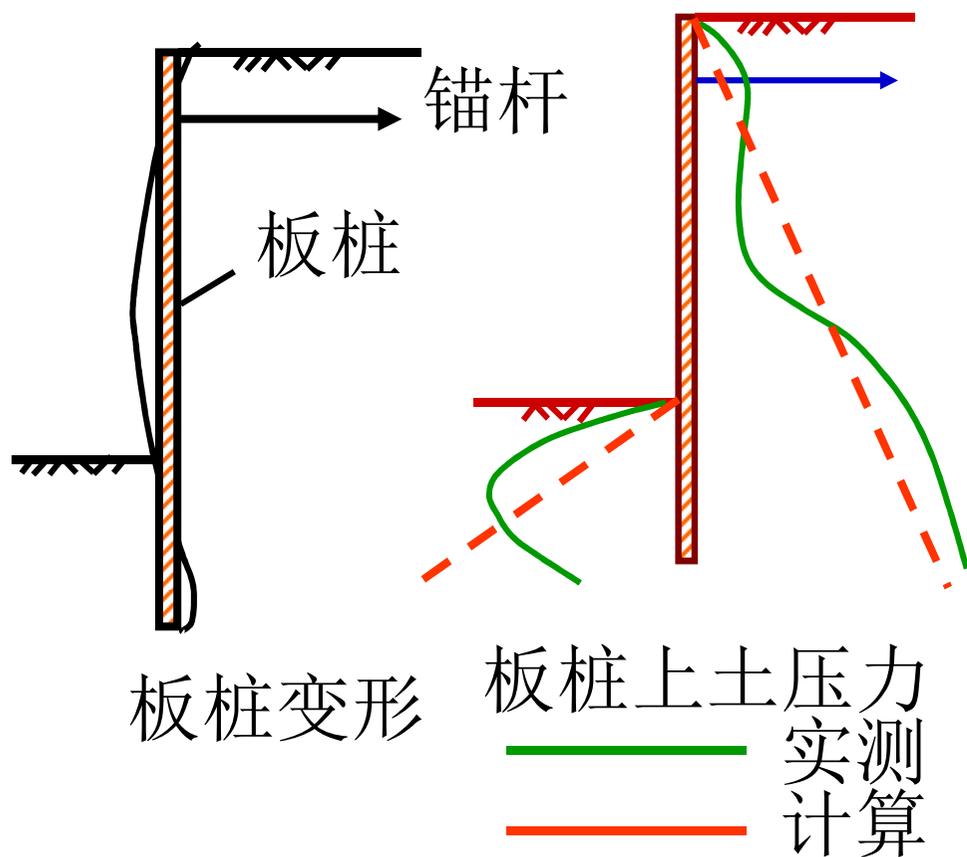




§ 7.1 概述



➤ **柔性挡土墙**：本身会发生变形，墙上土压力分布形式复杂



变形 土压力分布
基坑支撑上的土压力

本部分（书）要讨论的中心问题

刚性挡土墙上的土压力性质及土压力计算，包括土压力的大小、方向、分布及合力作用点。

学完本章，即可完成**第一类**土工构筑物的设计

Wu X.Z. *Assessing the correlated performance functions of an engineering system via probabilistic analysis*. Structural Safety. 2015, 52(PA): 10-19.

[SCI:2.39] 工程体系的功能函数相关性的概率分析.

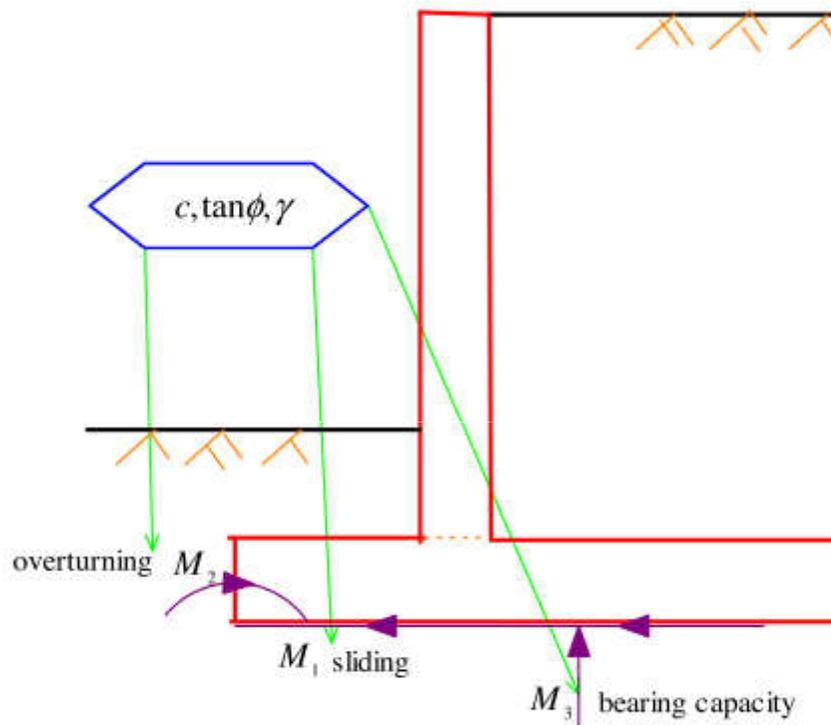


Fig. 8. The possible failure modes for a retaining wall.

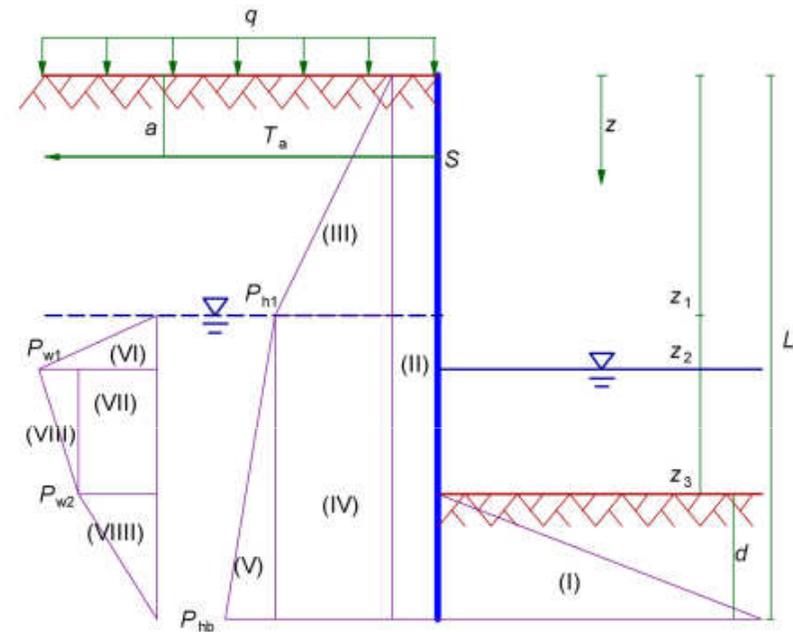
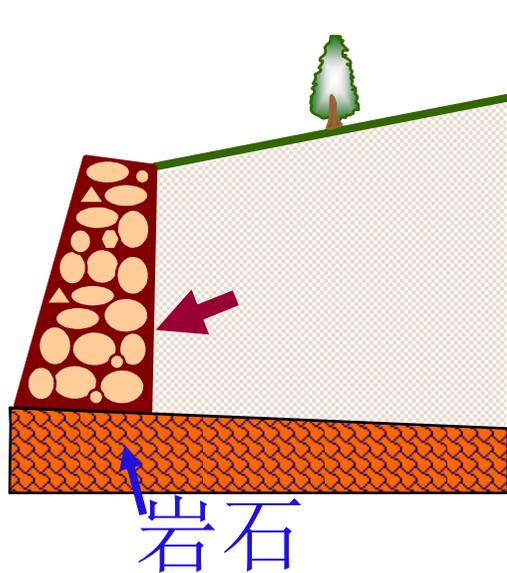


Figure 2. Illustration for an anchored sheet pile wall in sand with steady-state seepage.

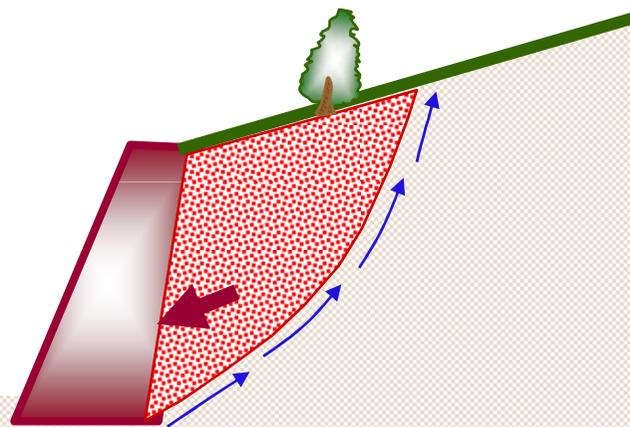
Wu X.Z. *Implementing statistical fitting and reliability analysis for geotechnical engineering problems in R*. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2017, 11(2):173-188. 土工多元统计分析和概率计算的 R 实施

7.1.2 土压力的种类

P141

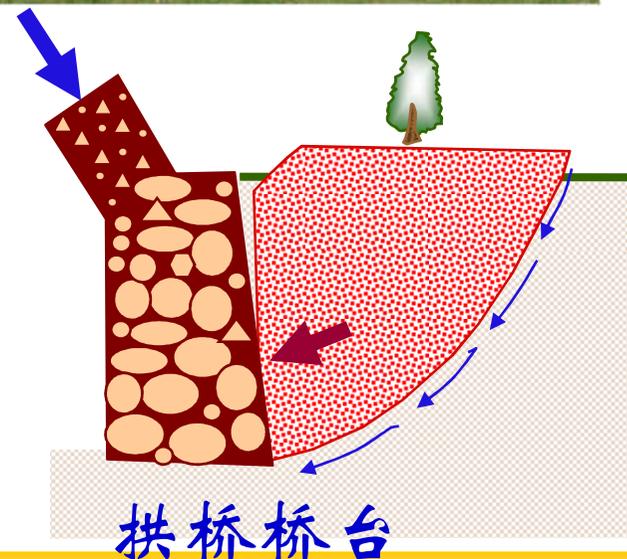


1. 静止土压力
(Earth pressure at rest)



2. 主动土压力
(Active earth pressure)

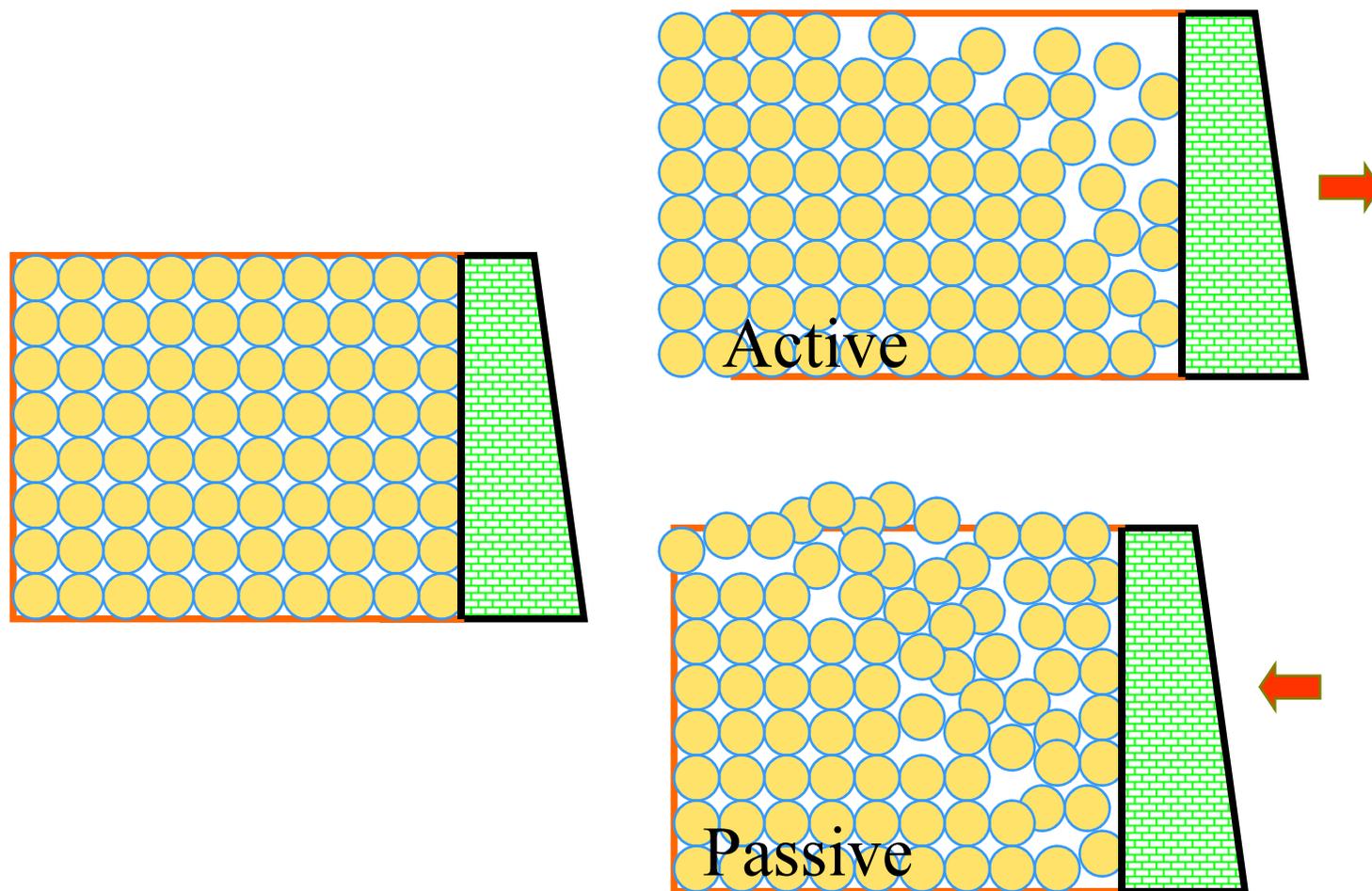
拖住墙
滑梯滑动



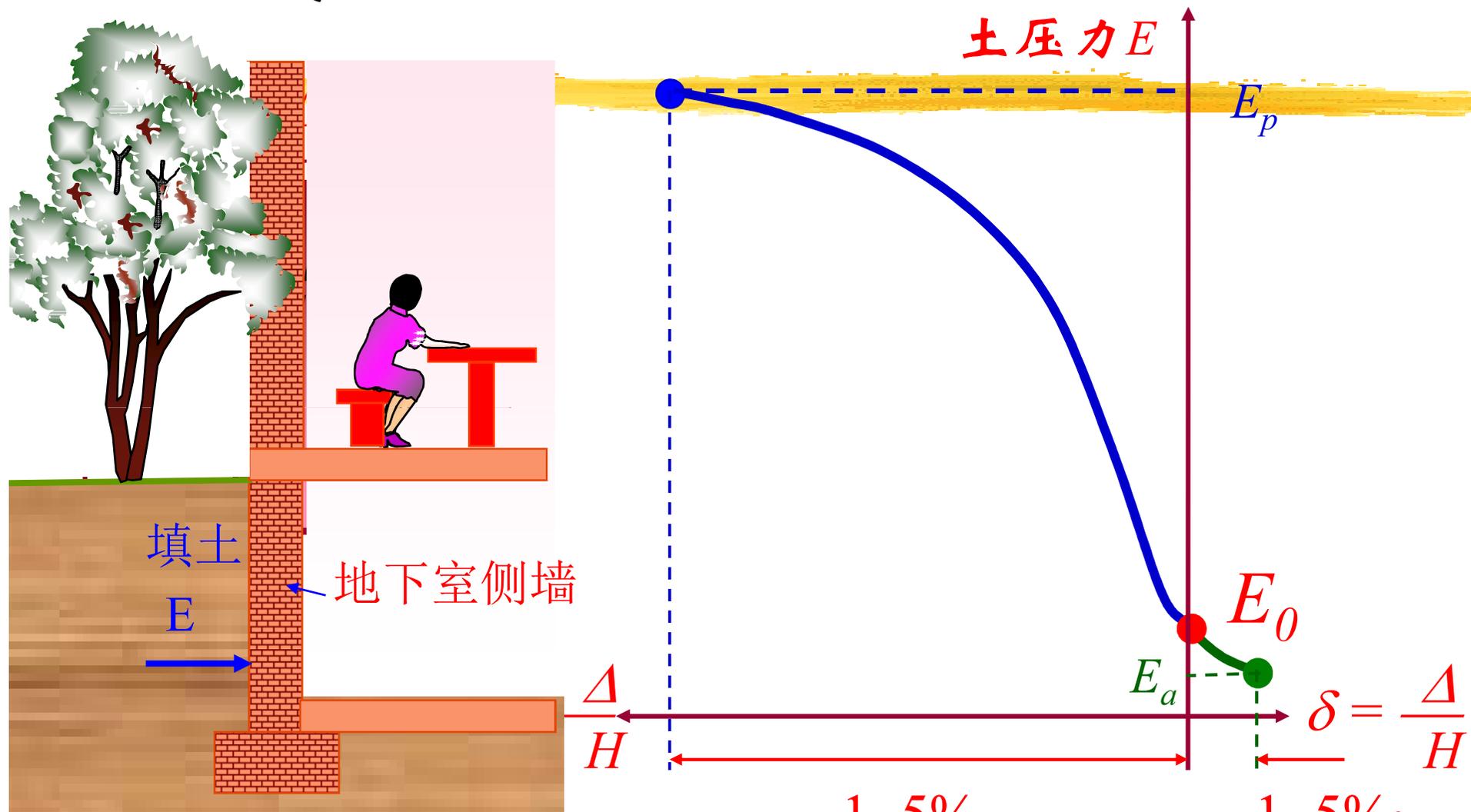
3. 被动土压力
(Passive earth pressure)

推动墙
滑梯反推

墙体位移与土压力类型



静止土压力

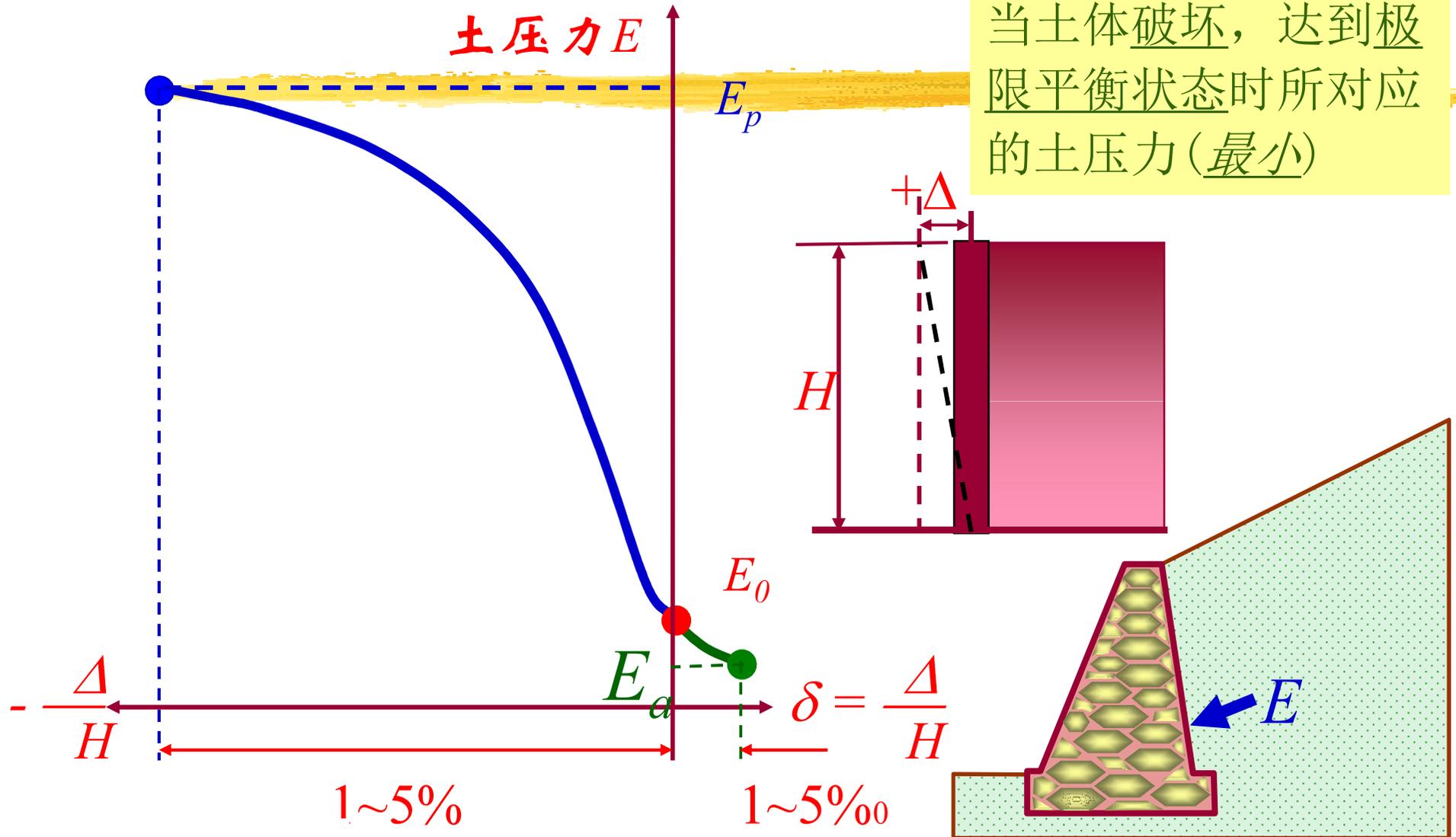


P142

内挤移动

外撤移动

主动土压力

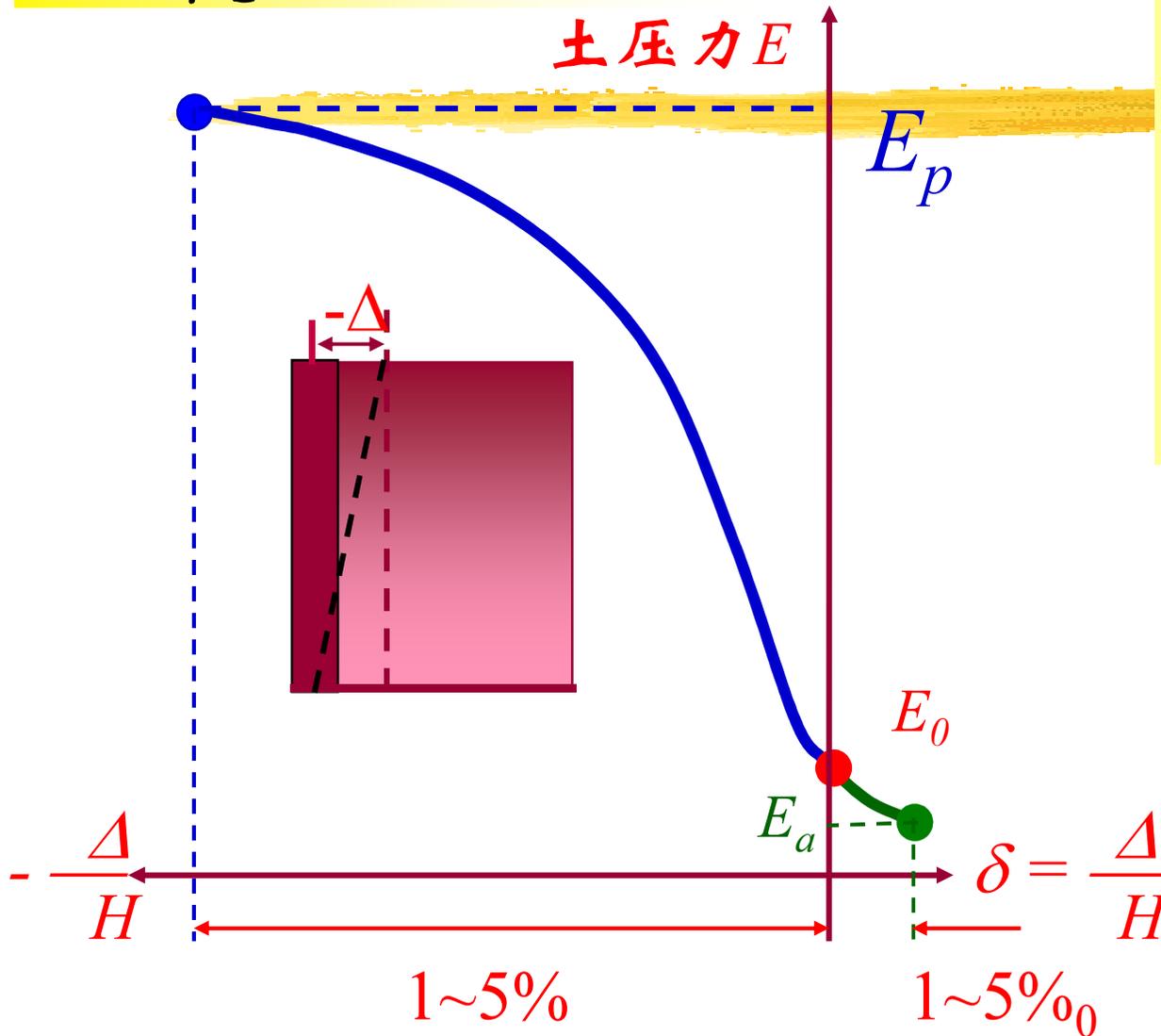


墙体外移，
土压力逐渐减小，
当土体破坏，达到极限平衡状态时所对应的土压力(最小)

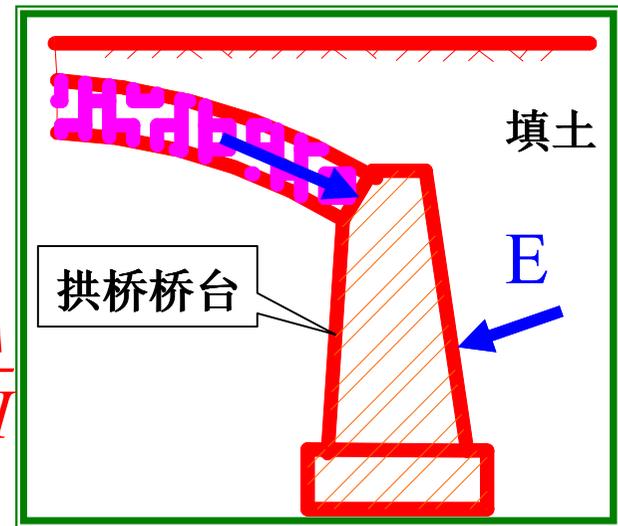
P142

被动土压力

土压力 E



墙体内移，
土压力逐渐增大，
当土体破坏，
达到极限平衡状态
时所对应的土压力
(最大)



P142

§ 7.2 静止土压力计算

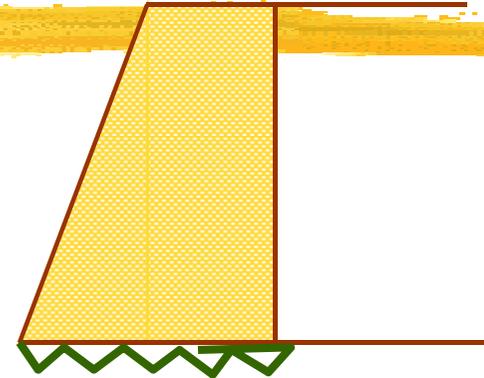
静止土压力

☒ 墙体不发生任何位移,即

$$\delta = 0$$

☒ 相当于天然地基土的
应力状态 (侧限状态)

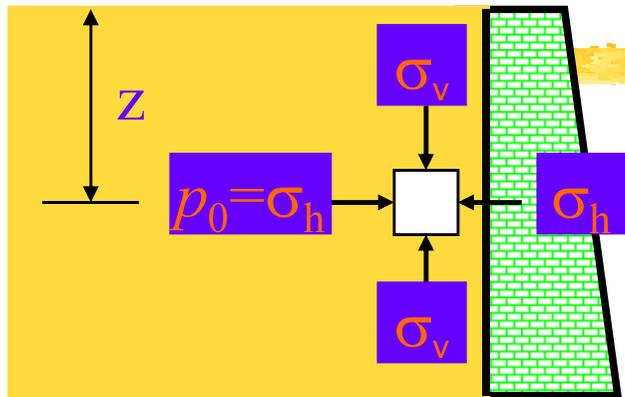
可用半无限地基水平方向应力的
公式计算



嵌岩的挡土墙



§ 7.2 静止土压力计算



$$\sigma_v = \gamma z$$

$$\sigma_h = K_0 \gamma z$$

式7-1

$$p_0 = \sigma_h = K_0 \gamma z$$

土压力强度

7.2.3 静止土压力系数 K_0 :

对于侧限应力状态，理论上： $K_0 = \nu / (1 - \nu)$ 式3-6

由于土的 ν 很难确定， K_0 常用经验公式计算

对于砂土、正常固结粘土

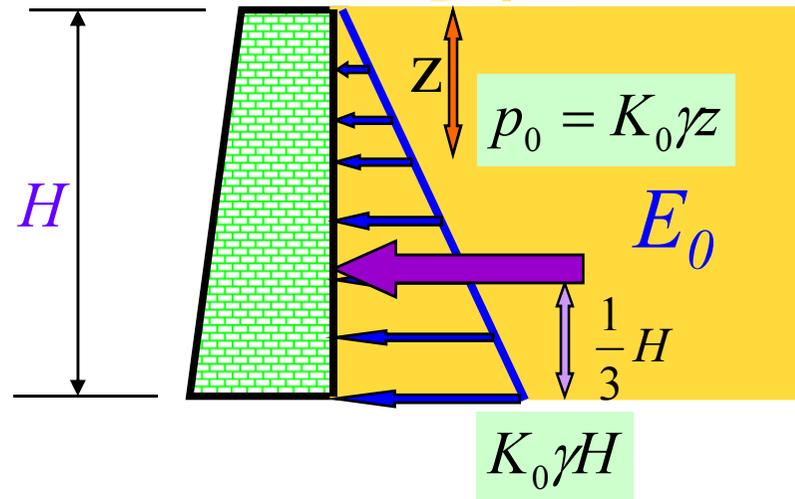
$$K_0 = 1 - \sin \phi'$$

式7-2

一起找规律 P223 参见表6-1 中给出各种土的静止土压力系数值

§ 6.2 静止土压力计算

7.2.2 静止土压力分布



总静止土压力

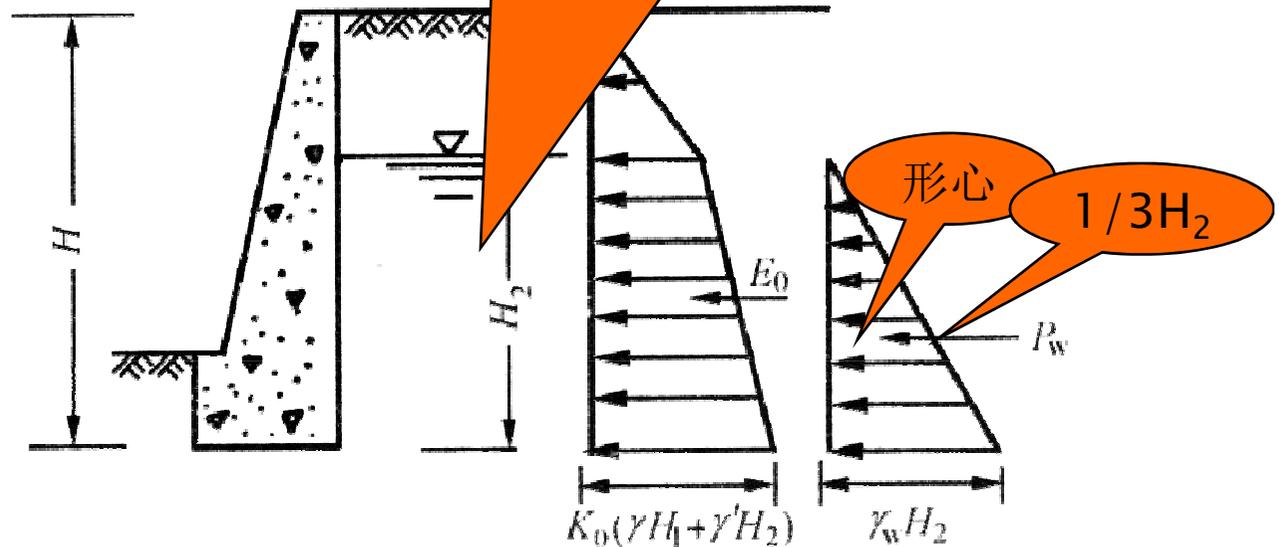
$$E_0 = \frac{1}{2} K_0 \gamma H^2$$

式7-3

§ 7.2 静止土压力计算

若墙后填土中有地下水，
则计算静止土压力时，水
中土的重度应取浮重度

P243 6.6.2



$$E_0 = \frac{1}{2} K_0 \gamma H_1^2 + K_0 \gamma H_1 H_2 + \frac{1}{2} K_0 \gamma' H_2^2$$

式7-4

$$P_w = \frac{1}{2} \gamma_w H_2^2$$

一起看一下例题7-1 P144

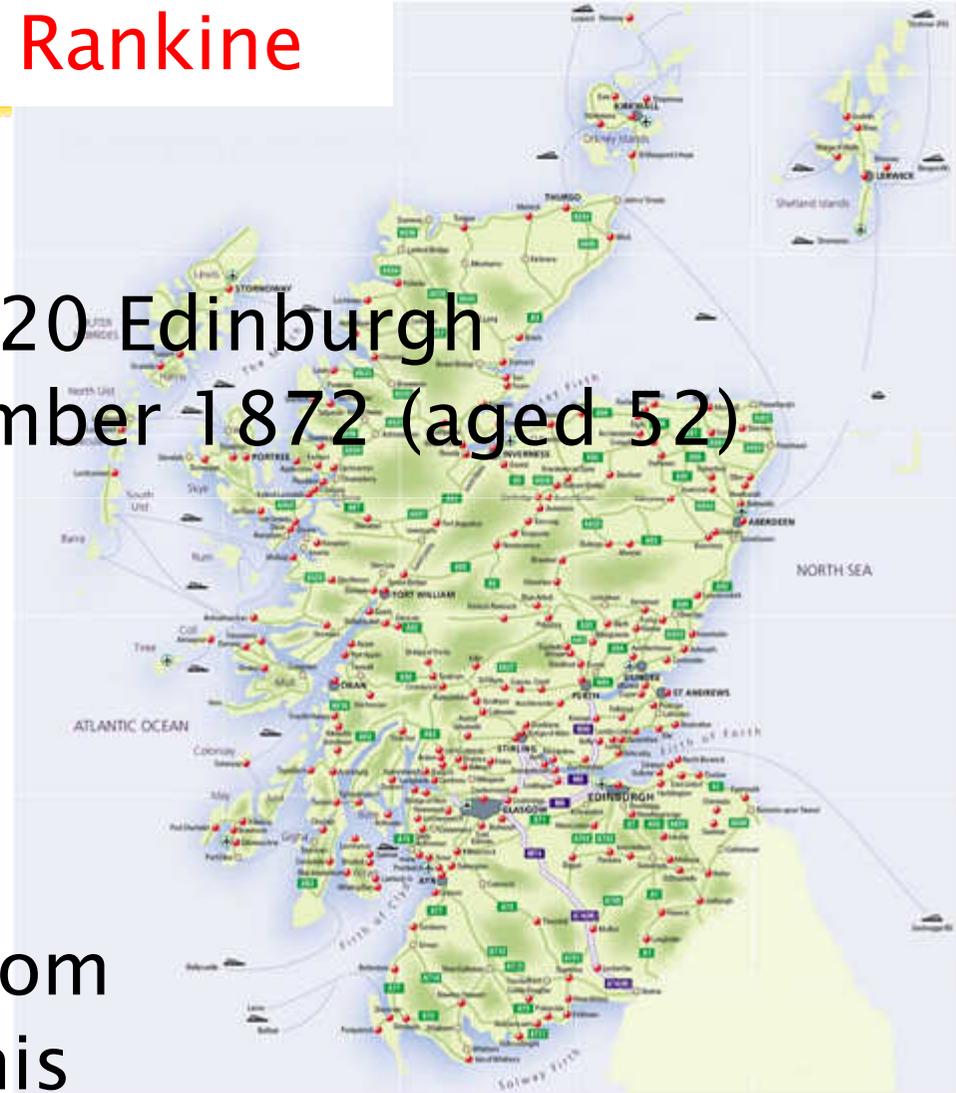
§ 7.3 朗肯 (Rankine) 土压力理论

William John Macquorn Rankine

The Rankine Lectures



5 July 1820 Edinburgh
24 December 1872 (aged 52)
Glasgow
Scottish



W Macquorn Rankine

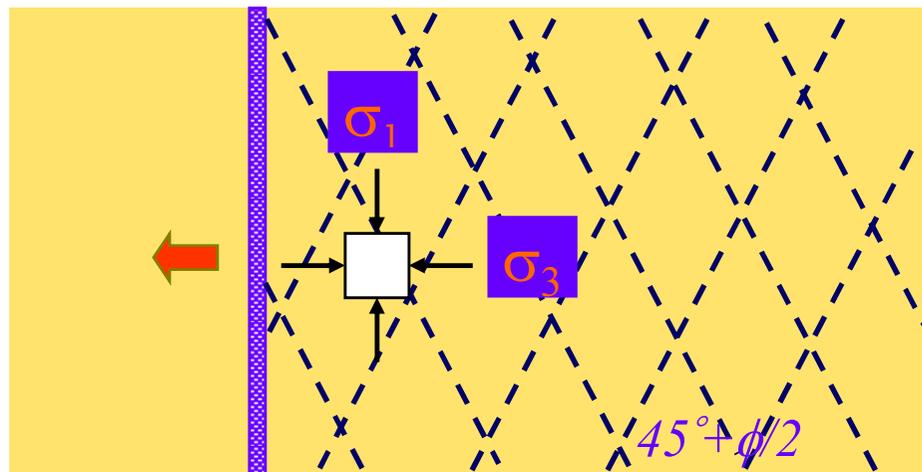
University of Glasgow from
November 1855 until his
death in December 1872

§ 7.3 朗肯 (Rankine) 土压力理论

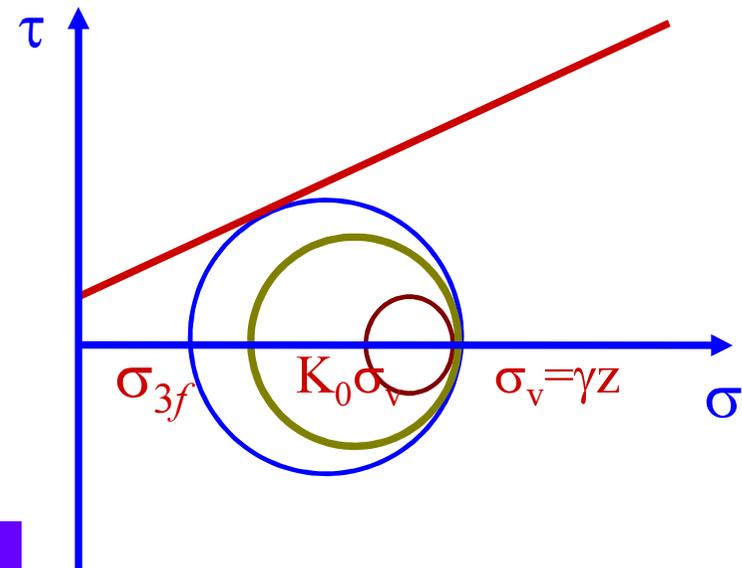
1 朗肯极限平衡应力状态

自重应力作用下，半无限土体内各点的应力从弹性平衡状态发展为极限平衡状态的情况。

进而分别推导出主动(active)和被动(passive)土压力公式



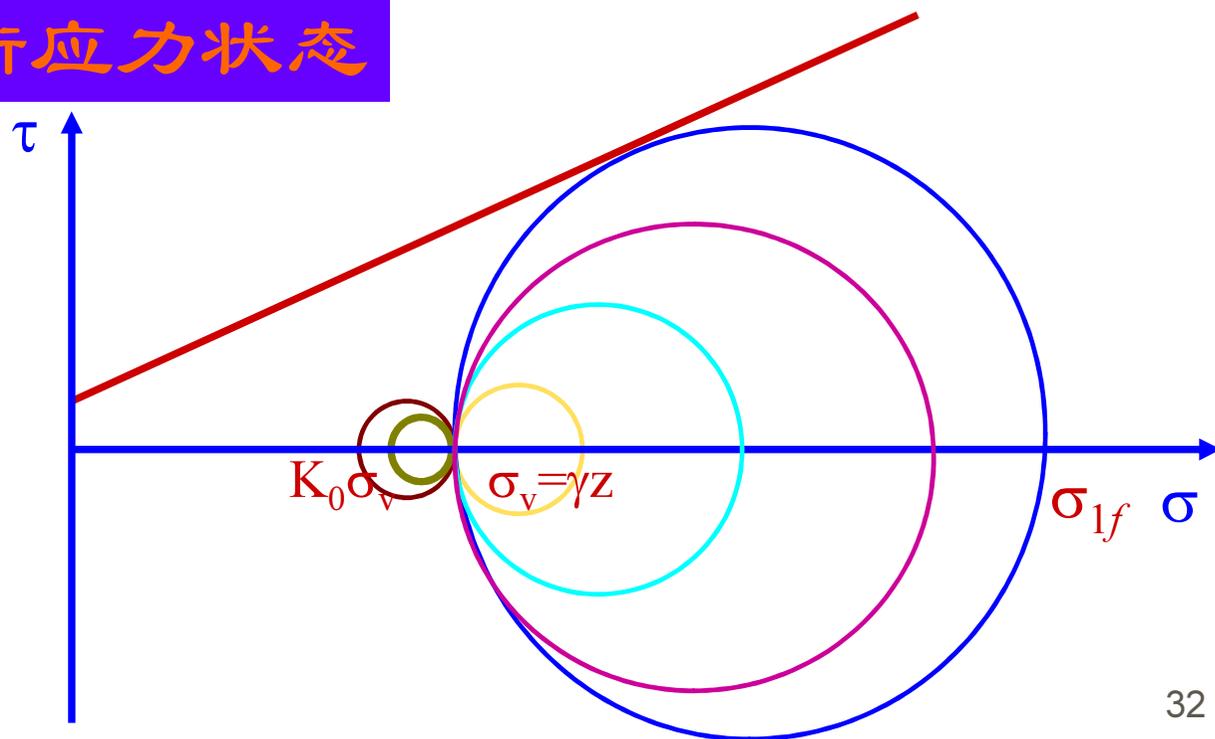
主动极限平衡应力状态



§ 7.3 朗肯土压力理论



被动极限平衡应力状态



P149图7-16

§ 7.3 朗肯土压力理论

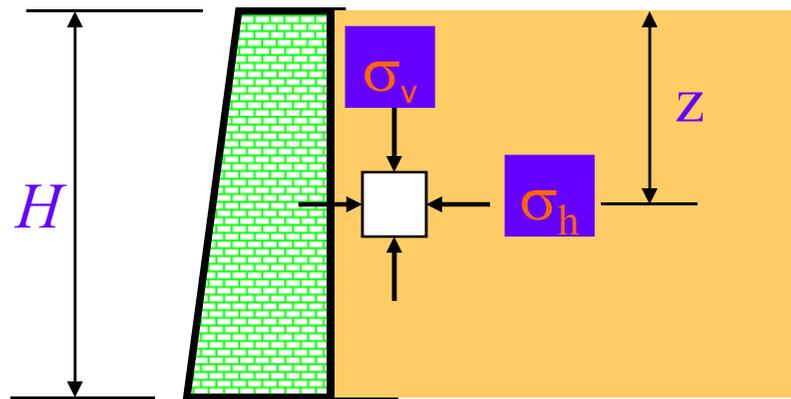
7.3.2 朗肯土压力计算

假定：

墙背垂直光滑

填土表面水平

所以墙背与土体之间没有剪应力



于是：

σ_v 、 σ_h 为主应力，且 $\sigma_v = \gamma z$

§ 7.3 朗肯土压力理论

朗肯主动土压力计算—填土为无粘性土（砂土）

竖向应力为大主应力

$$\sigma_1 = \sigma_v = \gamma z$$

水平向应力为小主应力

$$\sigma_3 = \sigma_h = p_a$$

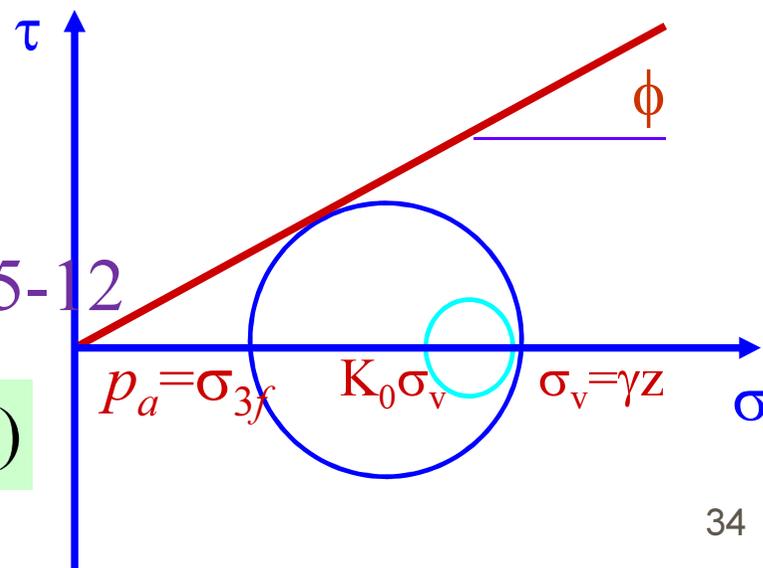
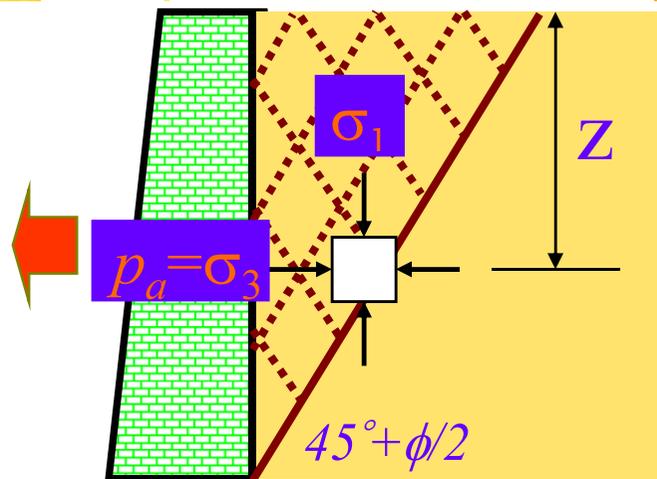
无粘性土的极限平衡条件

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

于是：主动土压力强度

$$p_a = \sigma_h = \sigma_3 = \gamma \cdot z \cdot \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

P146式7-7b



P177 式5-12

§ 7.3 朗肯土压力理论

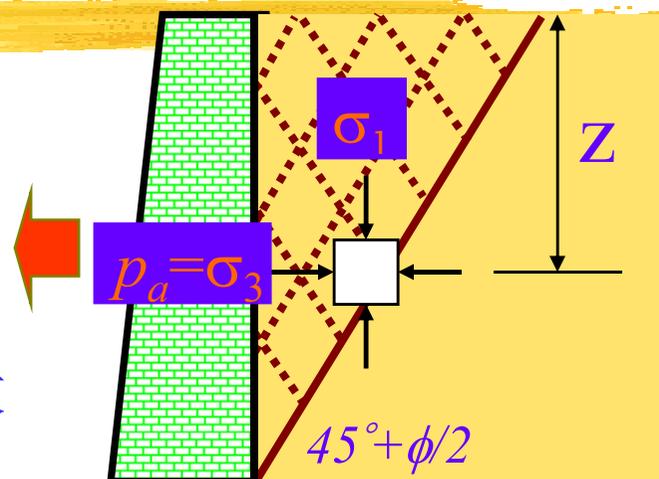
主动土压力强度

$$p_a = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ - \phi/2)$$

$$K_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \phi/2)$$

— 朗肯主动土压力系数

$$p_a = \gamma \cdot z \cdot K_a$$

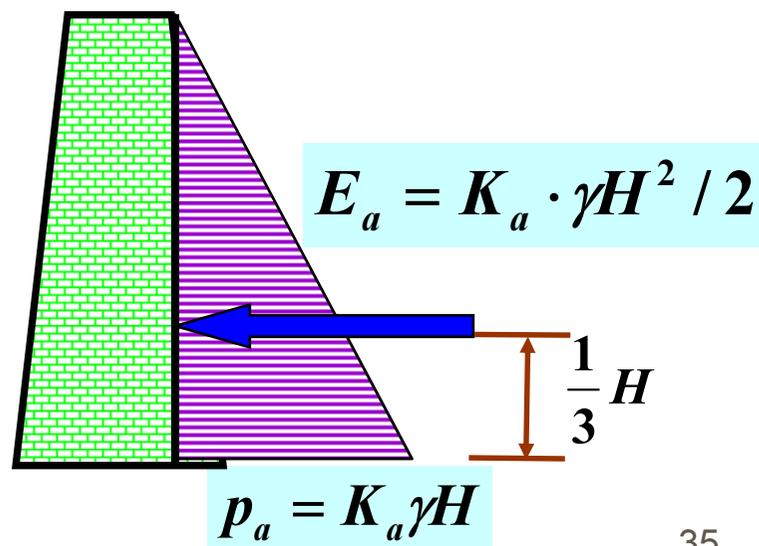


总主动土压力

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

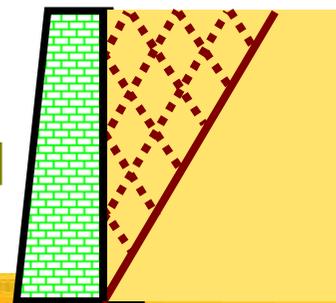
式6-6

式7-8



§ 7.3 朗肯土压力理论

朗肯主动土压力计算—填土为粘性土



竖向应力为大主应力

$$\sigma_1 = \sigma_v = \gamma z$$

水平向应力为小主应力

$$\sigma_3 = \sigma_h = p_a$$

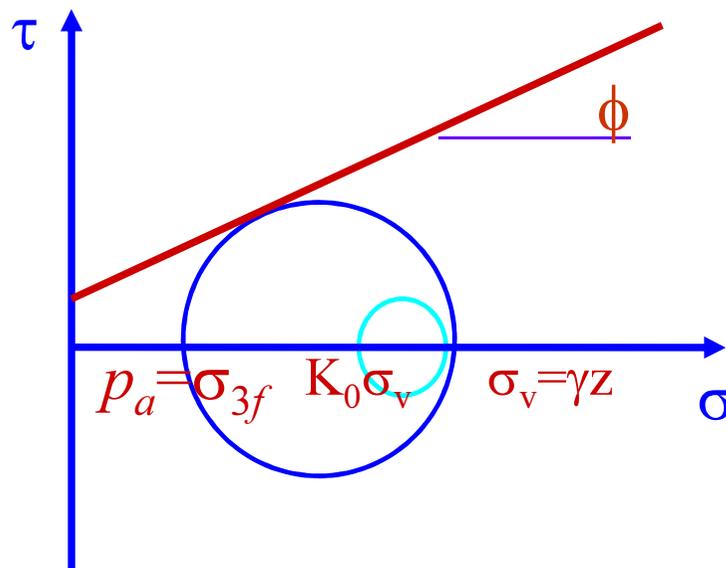
粘性土的极限平衡条件

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2(45^\circ - \phi/2) - 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \phi/2)$$

大减小增

于是：主动土压力强度

$$p_a = \sigma_h = \sigma_3 = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ - \phi/2) - 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \phi/2)$$



§ 7.3 朗肯土压力理论

第二项为c产生的抗力，表现为负的土压力，起减少土压力的作用，为常量，不随深度变化

P226 图6-12

主动土压力强度 负号

$$p_a = \gamma \cdot z \cdot K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

$$K_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \phi/2)$$

— 朗肯主动土压力系数

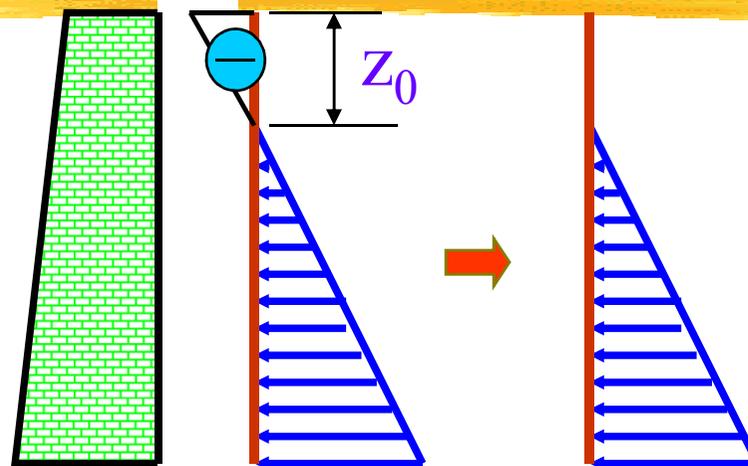
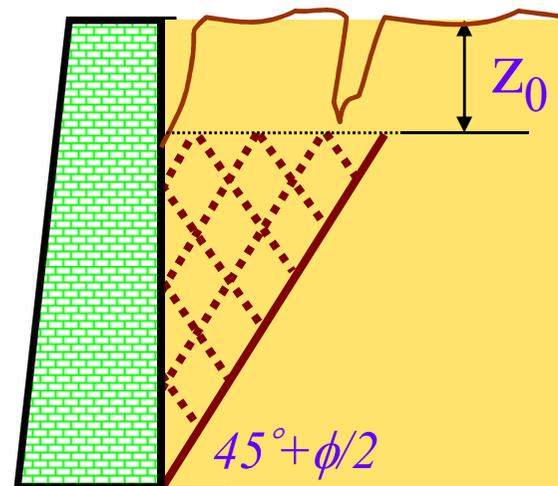


图7-14

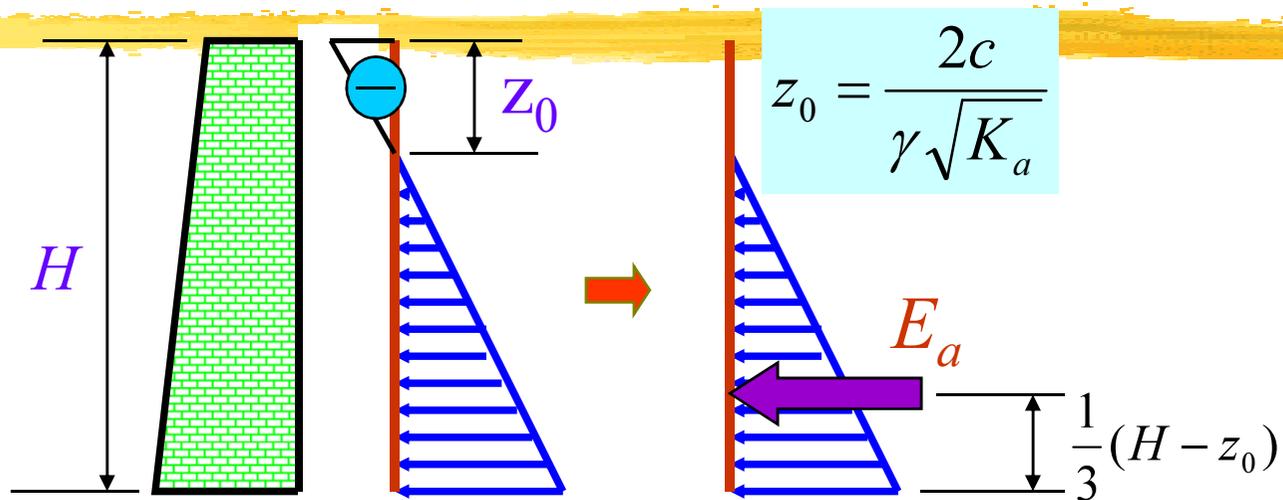
$$z_0 = \frac{2c}{\gamma\sqrt{K_a}}$$

不产生裂缝的最大深度

$$\begin{cases} z < z_0 & p_a = 0 \\ z > z_0 & p_a = \gamma \cdot z \cdot K_a - 2c\sqrt{K_a} \end{cases}$$



§ 7.3 朗肯土压力理论



$$p_a = \gamma H K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

总主动土压力

$$E_a = \frac{1}{2}(\gamma H K_a - 2c\sqrt{K_a})(H - z_0)$$

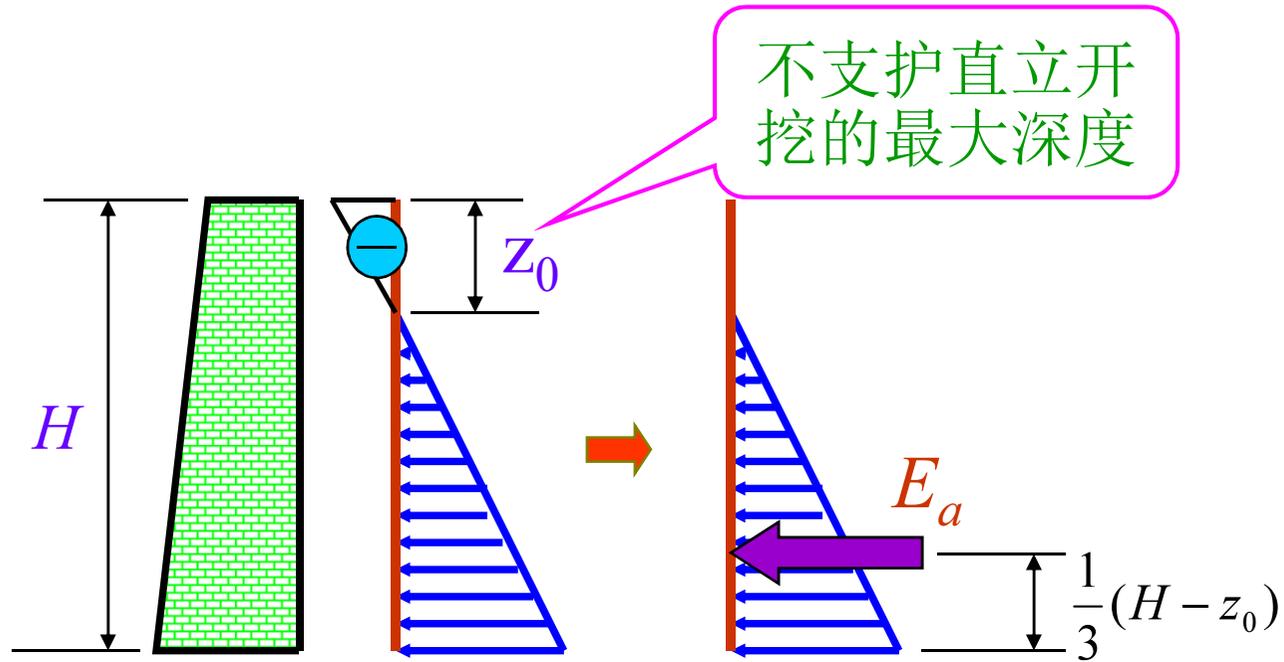
$$= \frac{1}{2}\gamma H^2 K_a - 2cH\sqrt{K_a} + \frac{2c^2}{\gamma}$$

式6-9 p225

P147式7-10ab

§ 7.3 朗肯土压力理论

注意：粘性土的主动土压力



$$p_a = \gamma H K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

§ 7.3 朗肯土压力理论

► 朗肯被动土压力计算—填土为无粘性土（砂土）

P226

竖向应力为小主应力

极为特殊
反转

$$\sigma_3 = \sigma_v = \gamma z$$

水平向应力为大主应力

$$\sigma_1 = \sigma_h = p_p$$

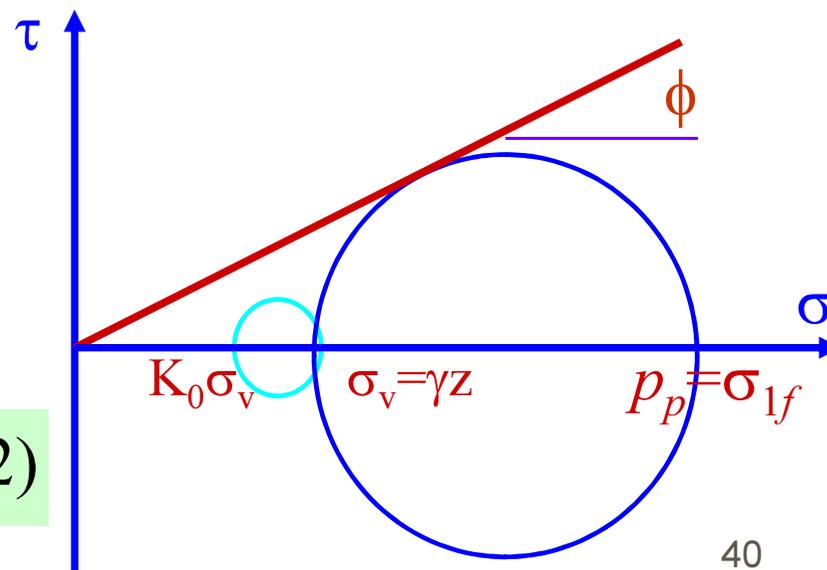
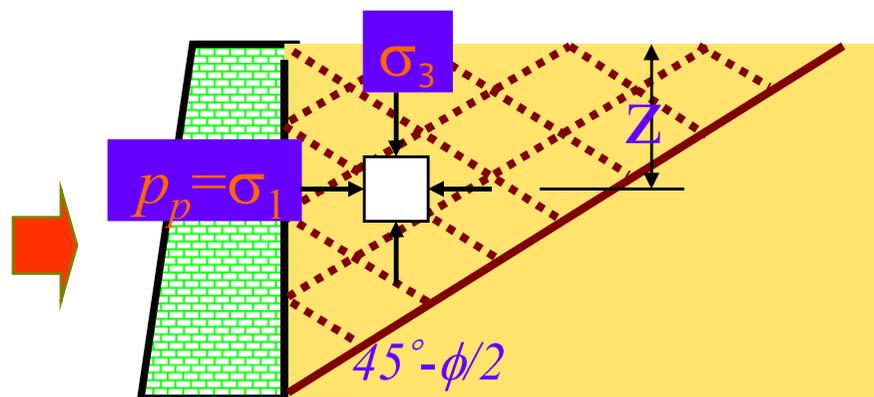
无粘性土的极限平衡条件

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2)$$

于是：被动土压力强度

$$p_p = \sigma_h = \sigma_1 = \gamma \cdot z \cdot \tan^2(45^\circ + \phi/2)$$



§ 7.3 朗肯土压力理论

被动土压力强度

$$p_p = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ + \phi/2)$$

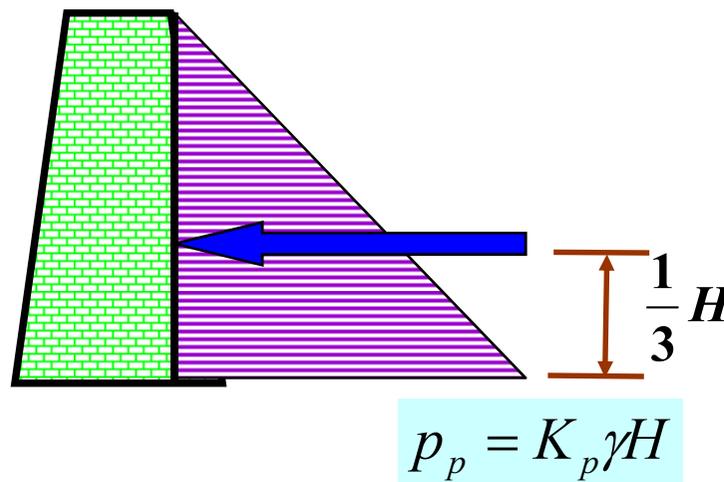
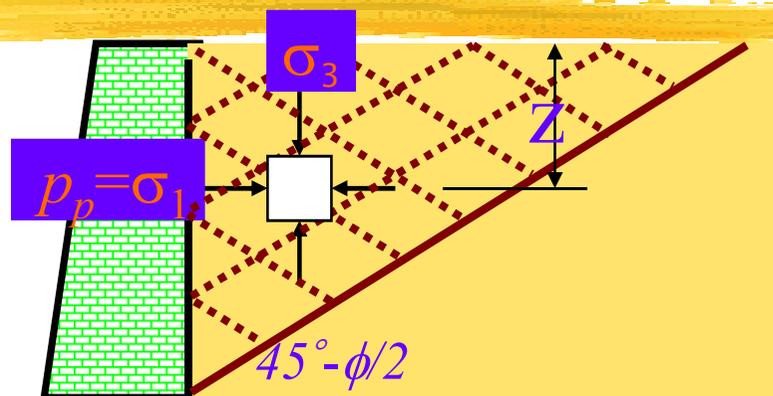
$$K_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \phi/2)$$

— 朗肯被动土压力系数

$$p_p = \gamma \cdot z \cdot K_p$$

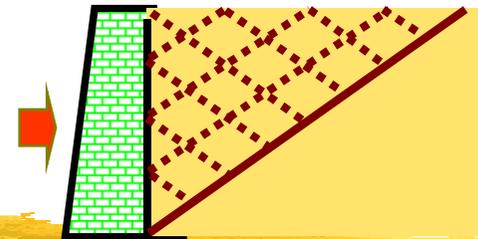
总被动土压力

$$E_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2$$



§ 7.3 朗肯土压力理论

➤ 朗肯被动土压力计算—填土为粘性土



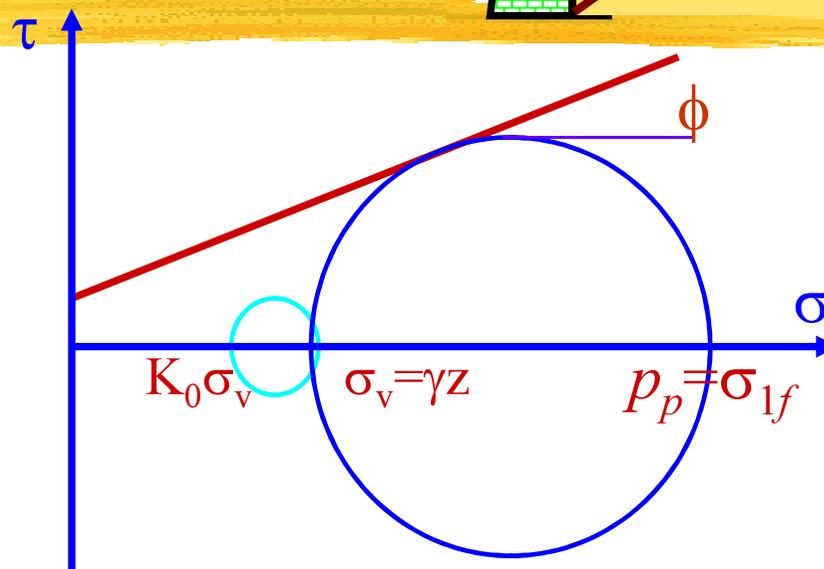
竖向应力为小主应力

$$\sigma_3 = \sigma_v = \gamma z$$

水平向应力为大主应力

$$\sigma_1 = \sigma_h = p_p$$

粘性土的极限平衡条件



$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \phi/2) - 2c \cdot \tan(45^\circ - \phi/2)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2c \cdot \tan(45^\circ + \phi/2)$$

大减小增

于是：被动土压力强度

$$p_p = \sigma_h = \sigma_1 = \gamma \cdot z \cdot \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2c \cdot \tan(45^\circ + \phi/2)$$

§ 7.3 朗肯土压力理论

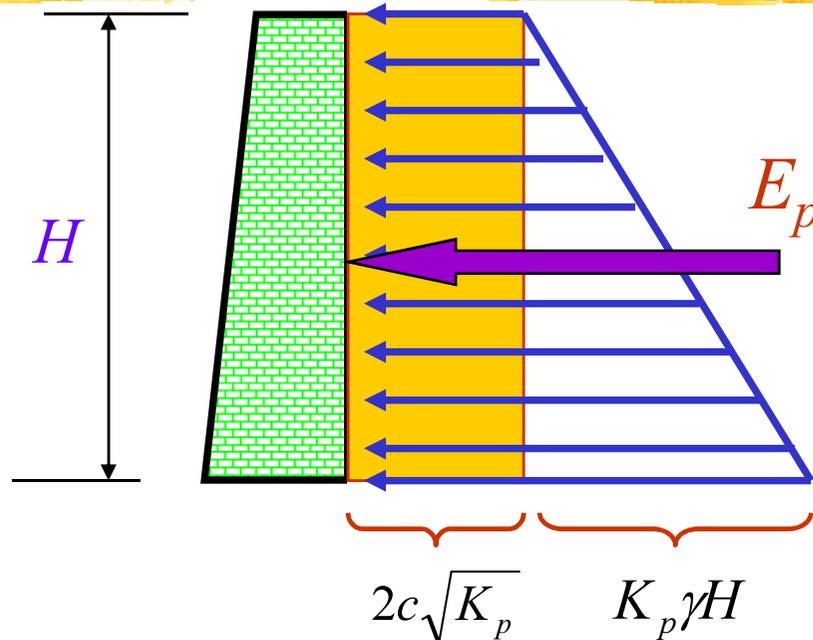
被动土压力强度

正号

$$p_p = \gamma \cdot z \cdot K_p + 2c\sqrt{K_p}$$

$$K_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \phi/2)$$

— 朗肯被动土压力系数



总被动土压力

$$E_p = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_p + 2cH\sqrt{K_p}$$

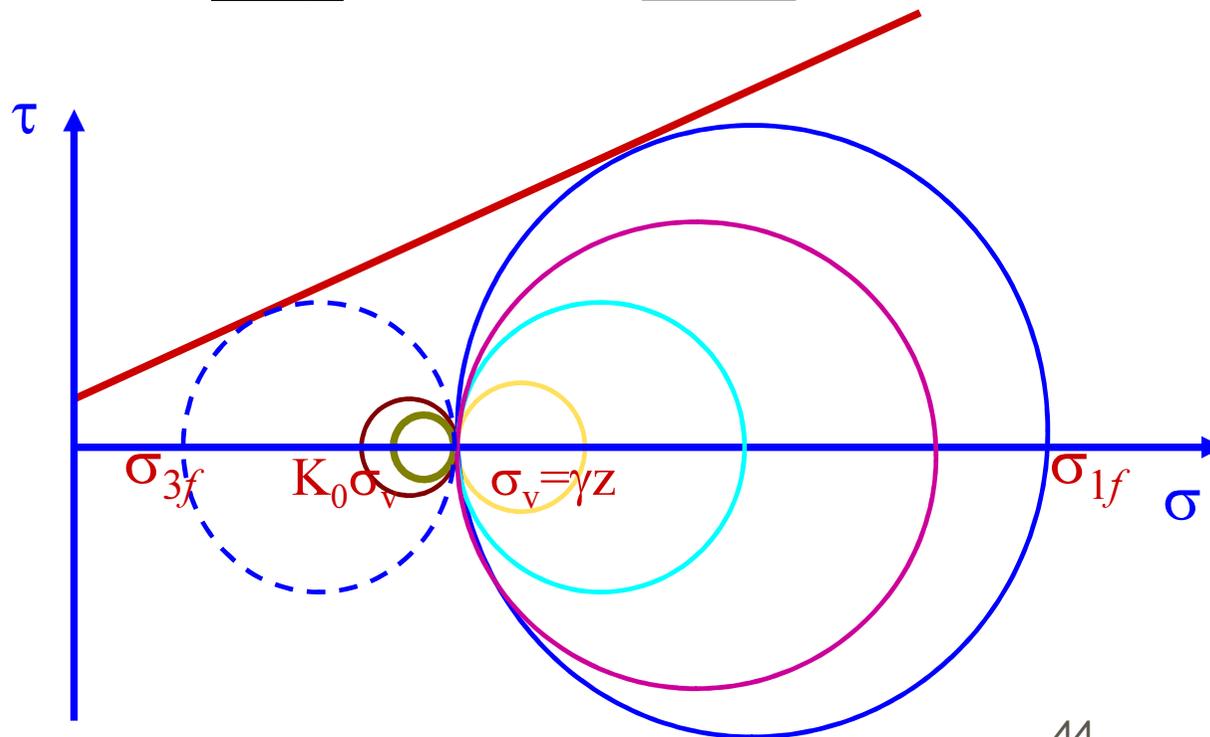
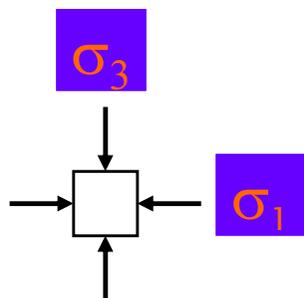
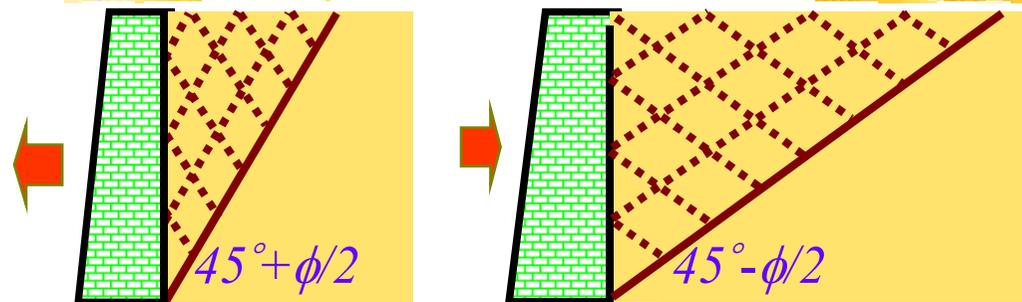
式6-13

P150 式7-12

§ 7.3 朗肯土压力理论

小结：朗肯土压力理论

- ⌘ 墙背垂直光滑
- ⌘ 主动和被动
- ⌘ 极限平衡条件
- ⌘ 砂土和粘性土



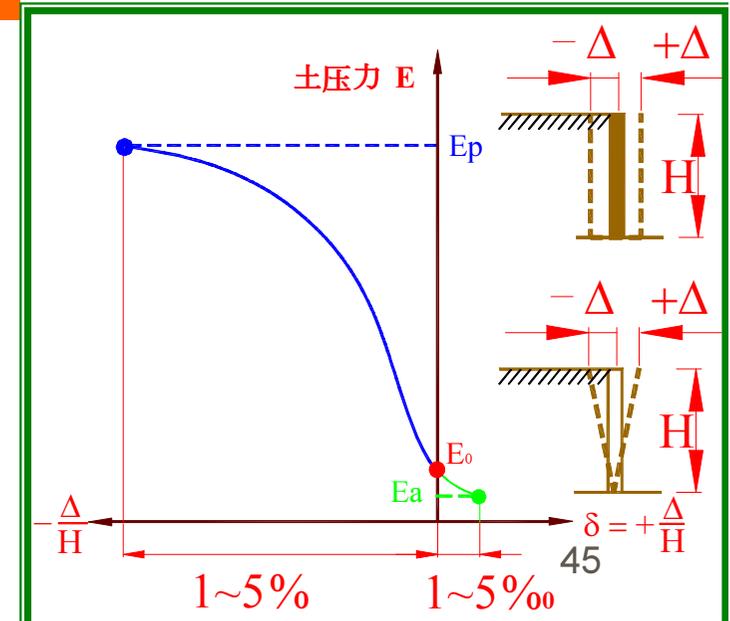
§ 7.3 朗肯土压力理论

主动土压力系数 $K_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \phi/2) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$

被动土压力系数 $K_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \phi/2) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$

静止土压力系数 $K_0 = 1 - \sin \phi$

$$K_a < K_0 < 1 < K_p$$



P152 例题7-3剖析 一起看

例题

【例 6-1】 有一墙背直立、光滑的挡土墙如图6-6所示。求主动土压力及其合力作用点，并绘出压力分布图。

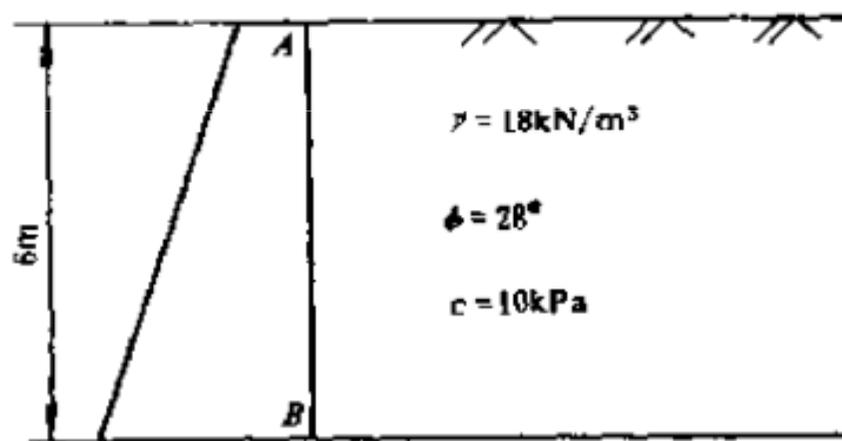


图 6-6 例6-1图

§ 7.4 库仑土压力理论

墙背倾斜、粗糙、填土倾斜时？

库仑土压力理论

库仑

C. A. Coulomb

(1736-1806)



Charles Augustin Coulomb (1736-1806)

§ 7.4 库仑土压力理论

出发点：两点理论出发点不同 P228

墙背倾斜，具有倾角 α

填土表面有倾角 β

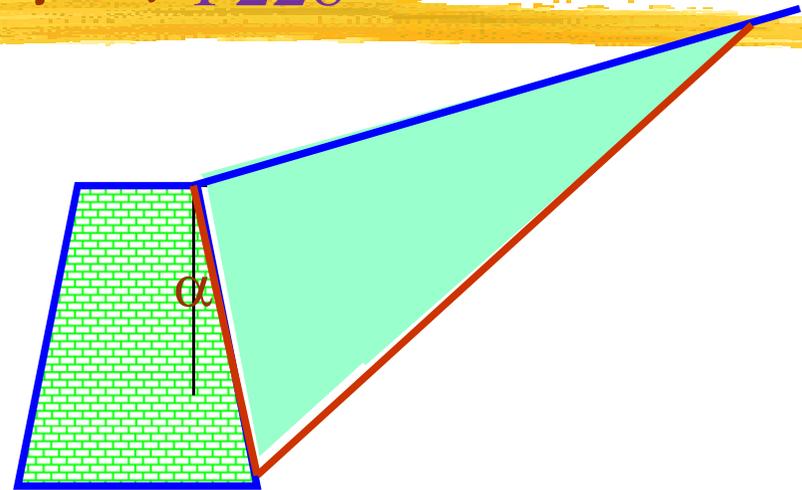
墙背粗糙，与填土摩擦角为 δ

假设条件：

平面滑裂面假设：滑裂面为平面

刚体滑动假设：破坏土楔为刚体

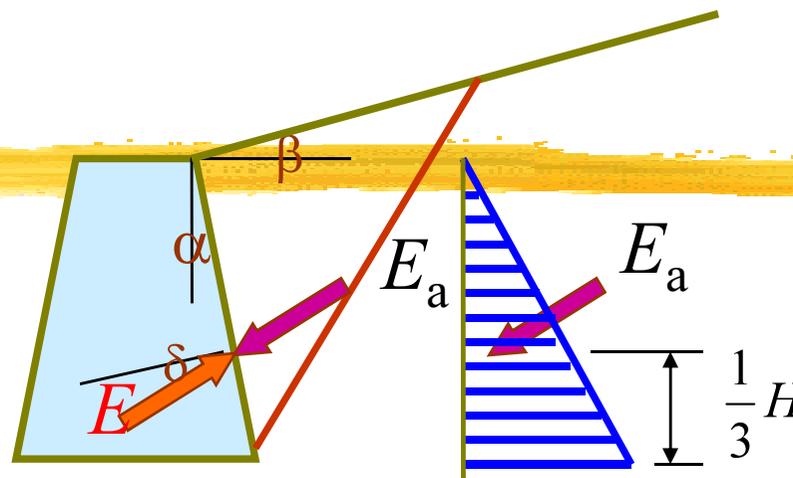
滑动楔体整体处于极限平衡状态



§ 7.4 库仑土压力理论

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a$$

式7-15



$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha + \delta) \cos(\alpha - \beta)}} \right]^2}$$

$\gamma H K_a$

式7-16

6-16

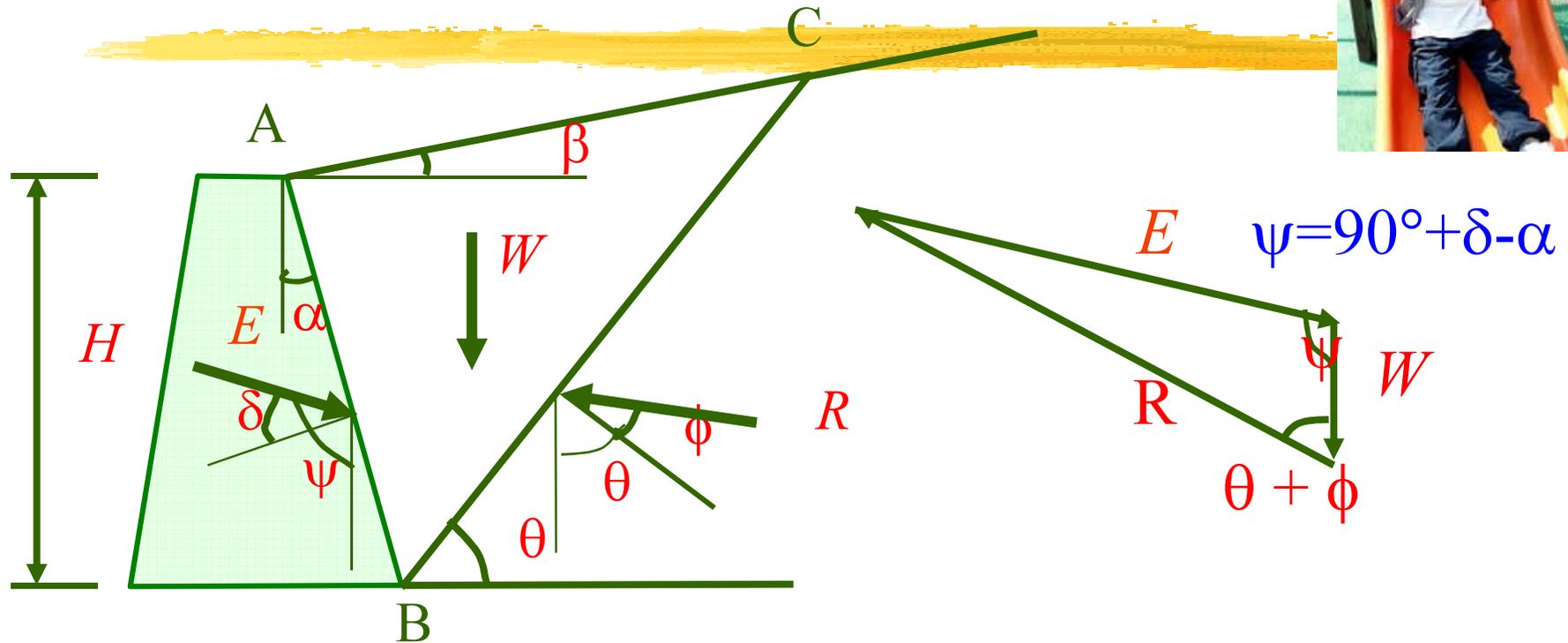
— 库仑主动土压力系数

特例： $\alpha = \delta = \beta = 0$ ，即墙背垂直光滑，填土表面水平时，与朗肯理论等价

土压力分布： 三角形分布

§ 7.4 库仑土压力理论

无粘性土的被动土压力

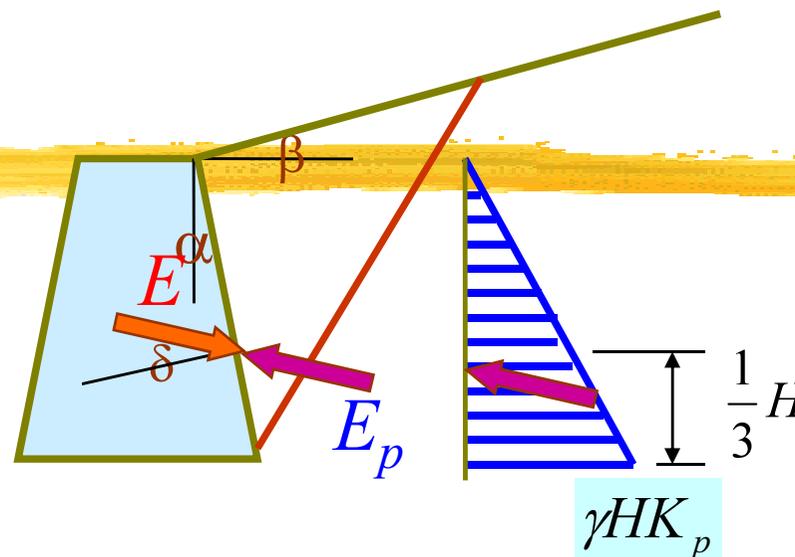


$$E = \frac{W \sin(\theta + \phi)}{\sin[180^\circ - (\theta + \phi + \psi)]} = f(\theta) \rightarrow \text{求极小值} \frac{df}{d\theta} = 0 \rightarrow \theta, E$$

§ 6.4 库仑土压力理论

无粘性土

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p \quad \text{式7-20}$$



$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha - \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha - \beta)}} \right]^2} \quad \text{式7-21}$$

— 库仑被动土压力系数

6-19

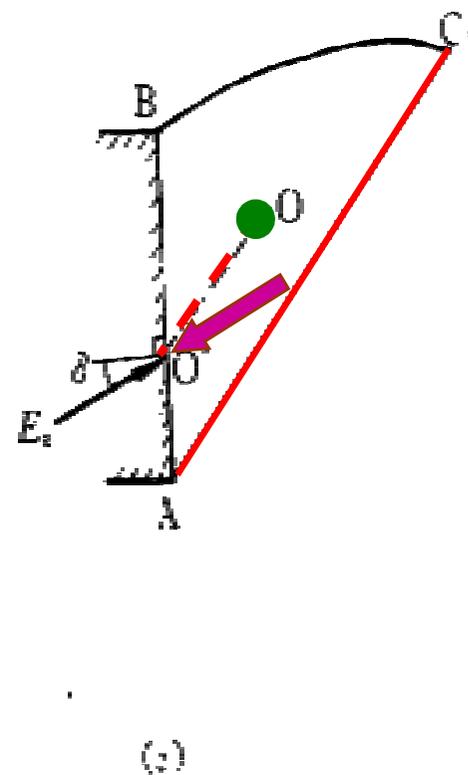
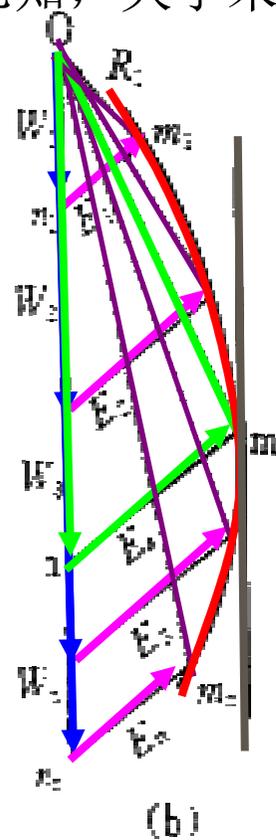
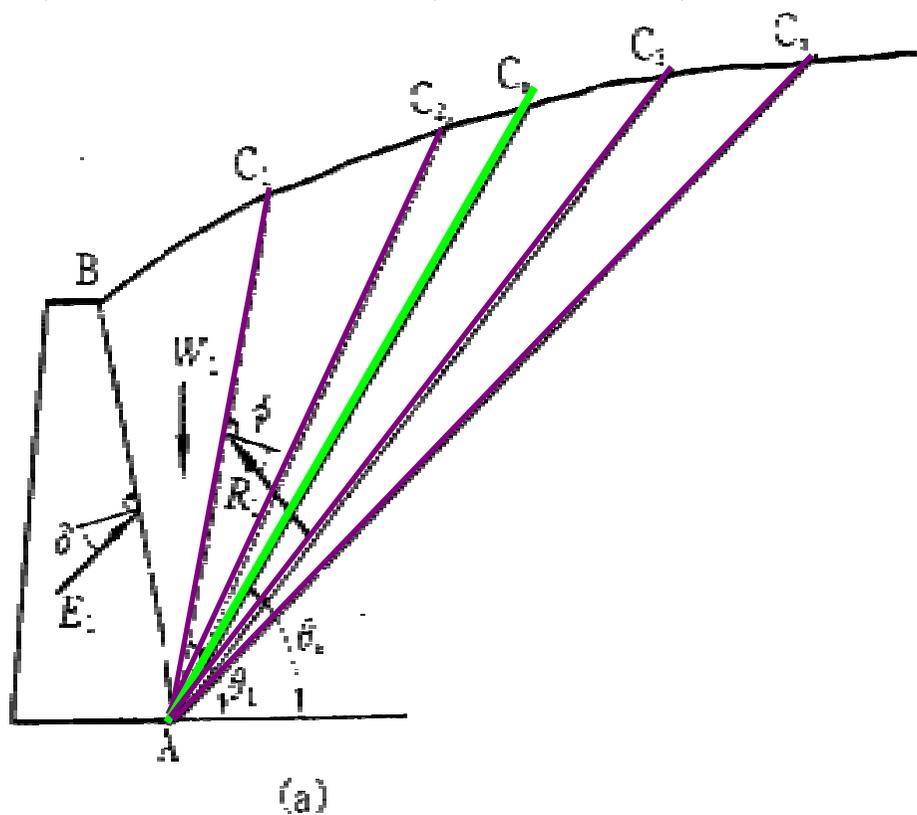
土压力分布：三角形分布

§ 7.4 库仑土压力理论

粘性土 库尔曼 (Culmann) 图解法 P233

——当填土表面不是平面时，库伦公式不再适用
以主动土压力为例

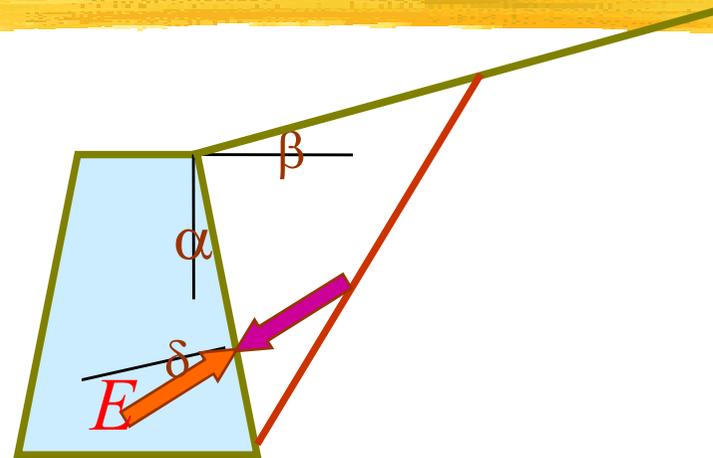
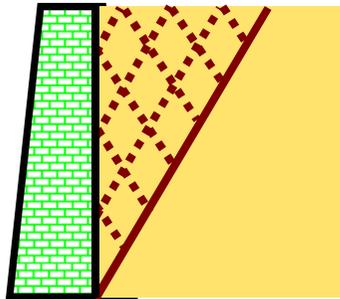
W大小方向已知 反力R与土压力E的方向已知，大小未知



§ 7.5 土压力问题的讨论

➤ 两种土压力理论的比较

1、分析方法

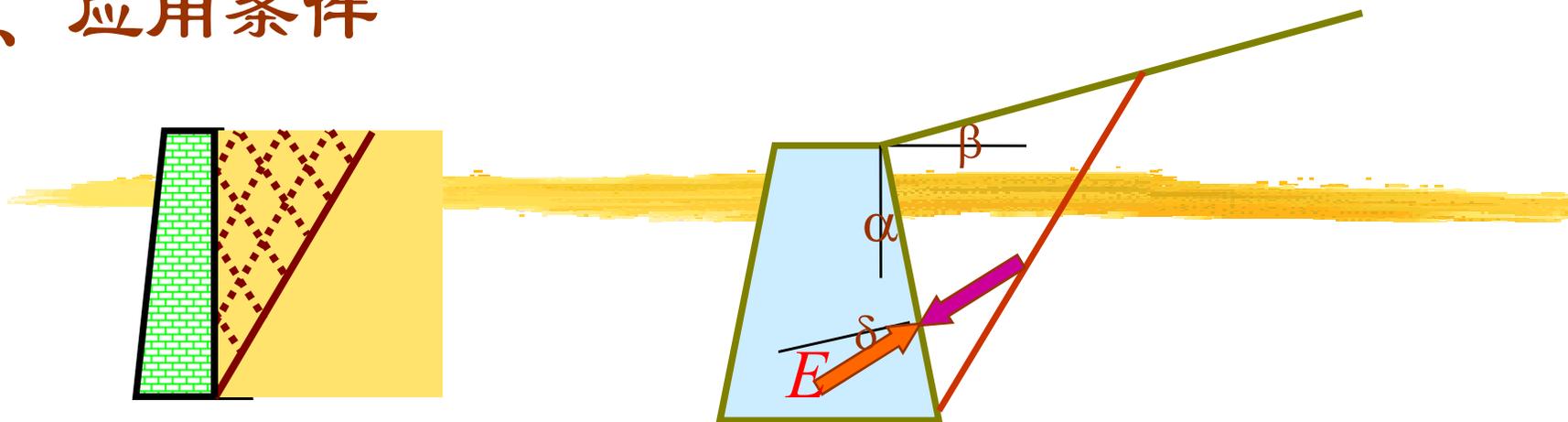


极限平衡状态

朗肯理论	库仑理论
土体内各点均处于极限平衡状态：极限应力法	刚性楔体，滑面上处于极限平衡状态：滑动楔体法
先求土压力强度 p	先求总土压力 E

§ 7.5 土压力问题的讨论

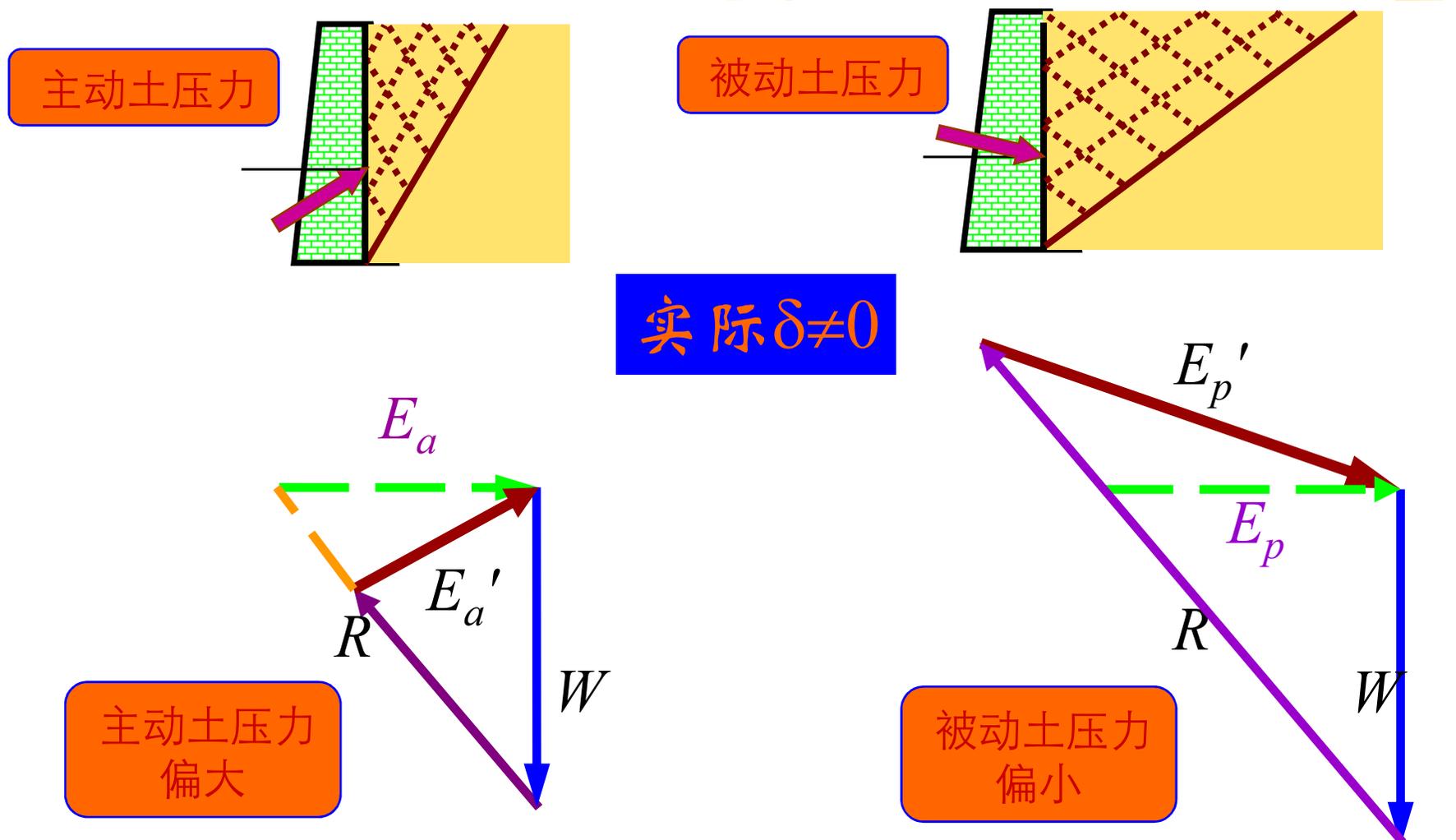
2、应用条件



	朗肯理论	库仑理论
墙背条件	墙背光滑垂直	墙背可以是倾斜粗糙的
填土条件	填土水平	填土表面为水平或者倾斜的

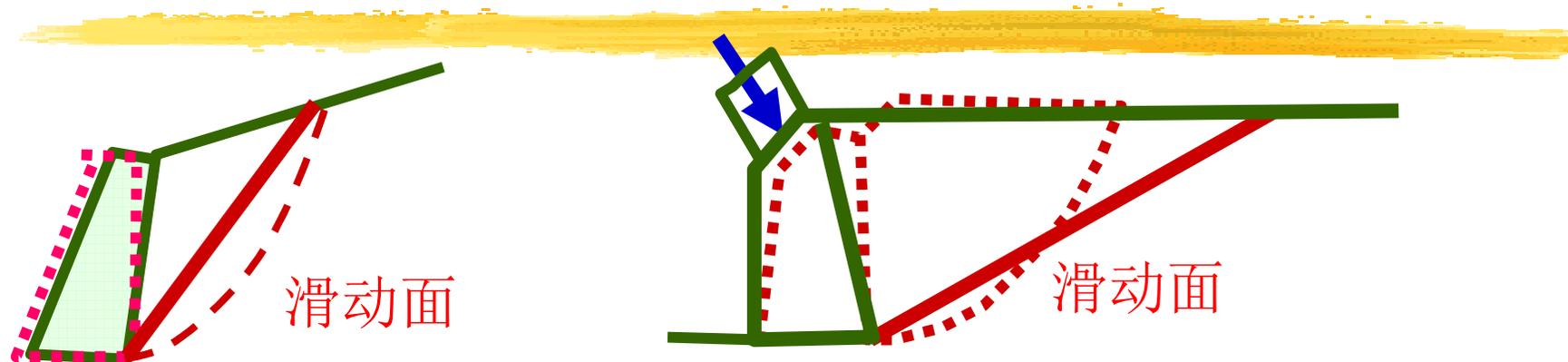
§ 7.5 土压力问题的讨论

3 计算误差——朗肯土压力理论



§ 7.5 土压力问题的讨论

3 计算误差 —— 库仑土压力理论



实际滑裂面不一定是平面

主动土压力搜索得到的不一定是最大值

主动土压力 偏小

被动土压力搜索得到的不一定是最小值

被动土压力 偏大

计算误差 —— 结论

- 对于无粘性土，朗肯理论由于忽略了墙背面的摩擦影响，计算的主动土压力偏大，用库仑理论则比较符合实际。但是，在工程设计中由于考虑到朗肯计算公式简便，误差偏于安全方面，常用朗肯计算。
- 对于有粘聚力的粘性填土，用朗肯土压力公式可以直接计算，用库仑理论往往用折减内摩擦角的办法考虑粘聚力的影响，误差可能较大。
- 计算被动土压力时，无论用库仑理论还是用朗肯理论计算，均有较大误差，为了简单起见，常采用朗肯理论。

在实际工程问题中，土压力计算是比较复杂的。

工程中使用被动土压力较少。因为所需相对位移太大

§ 7.5 土压力问题的讨论

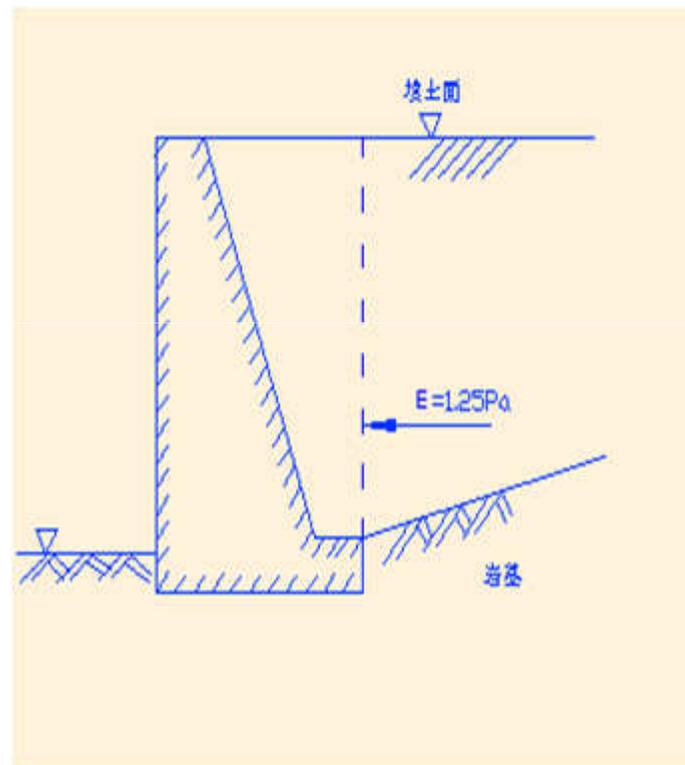
► 三种典型土压力在实际工程中的应用

对于一般的挡土墙，土压力通常都可按主动土压力计算。

对于直接浇注在基岩上的挡土墙在设计中常将主动土压力增大25%作为计算的土压力，如图所示。

被动土压力发生在墙向填土方向的位移比较大的情况，要求位移量达到墙高的0.02到0.05。这样大的位移是工程中所不允许的。因此，在验算挡土墙的稳定性时，不能全部采用被动土压力的数值，通常取其30%。

强调一下



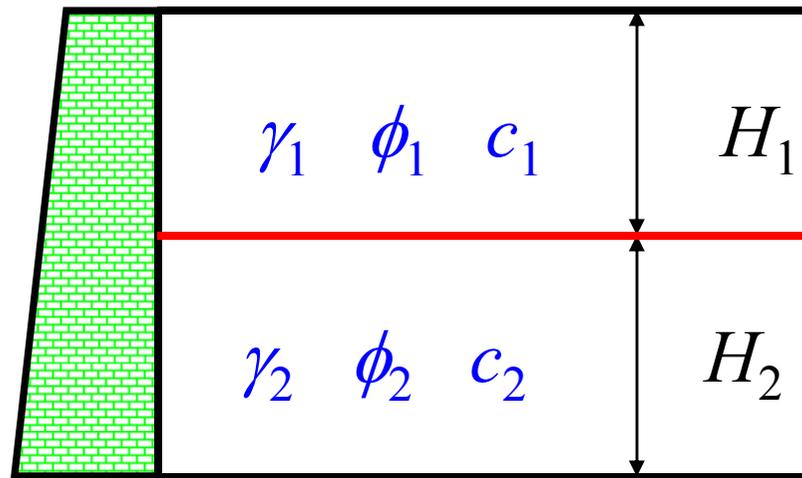
§ 7.6 工程中挡土墙的土压力计算

—几种常见的土压力计算

1. 成层填土情况 P164
2. 填土中有水 P166
3. 填土上有荷载 P162-163
4. 坦墙
5. 折线墙背面上的土压力
6. 开挖情况下的土压力
7. 地震时的土压力

§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

1 成层填土情况



$$p_a = \sigma_h = \sigma_v \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

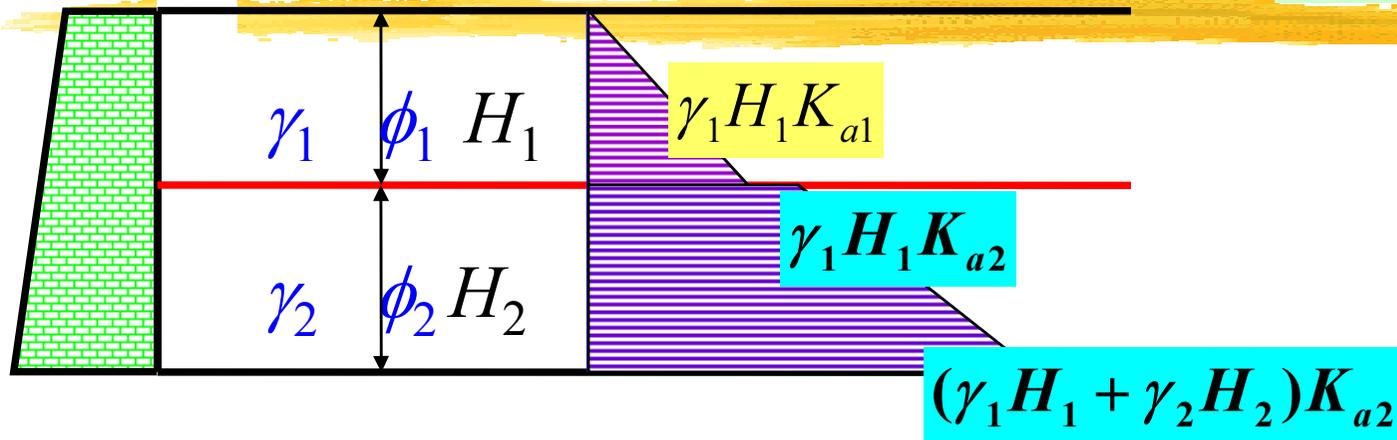
$$= \sigma_v K_a - 2c \sqrt{K_a}$$

§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

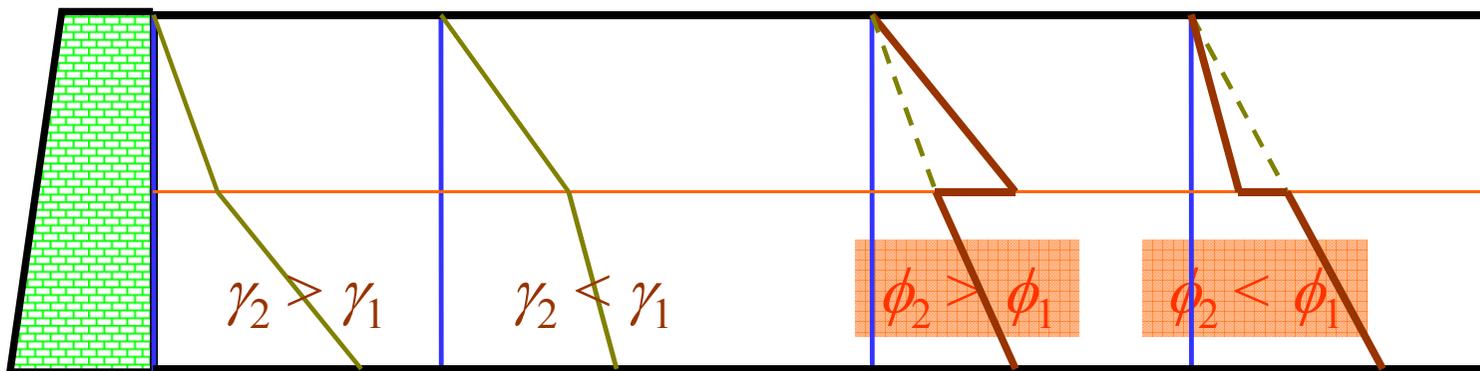
$c_1 = c_2 = 0$ 时

$$p_a = \gamma z K_a = \gamma z \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

$$\frac{dp_a}{dz} = \gamma \cdot K_a$$



P243



$\phi_1 = \phi_2$ 时

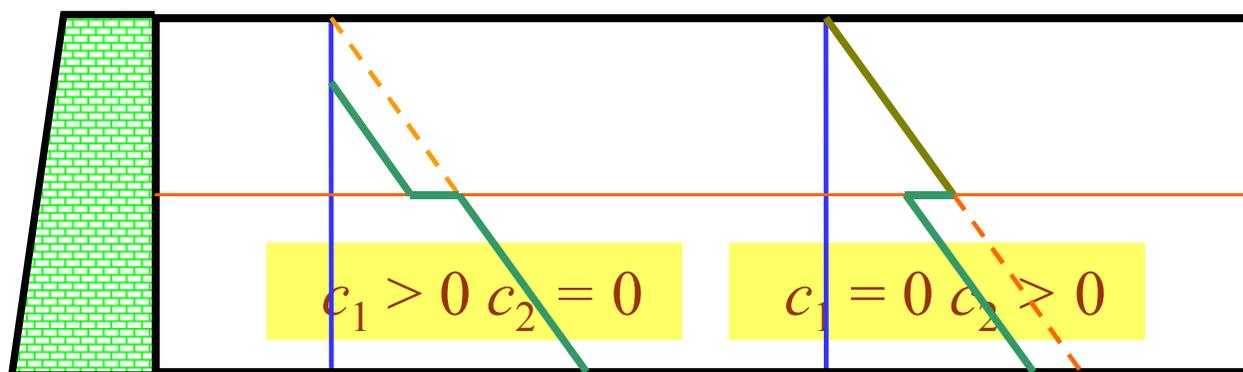
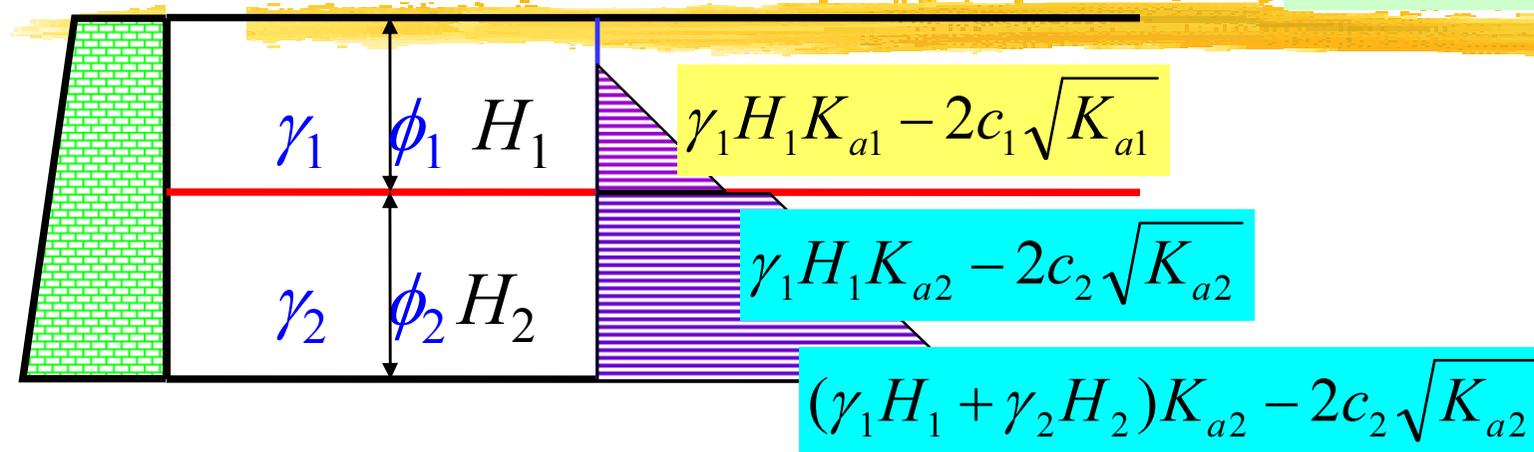
$\gamma_1 = \gamma_2$ 时

§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

c_1 、 c_2 不为0时

$$p_a = \gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

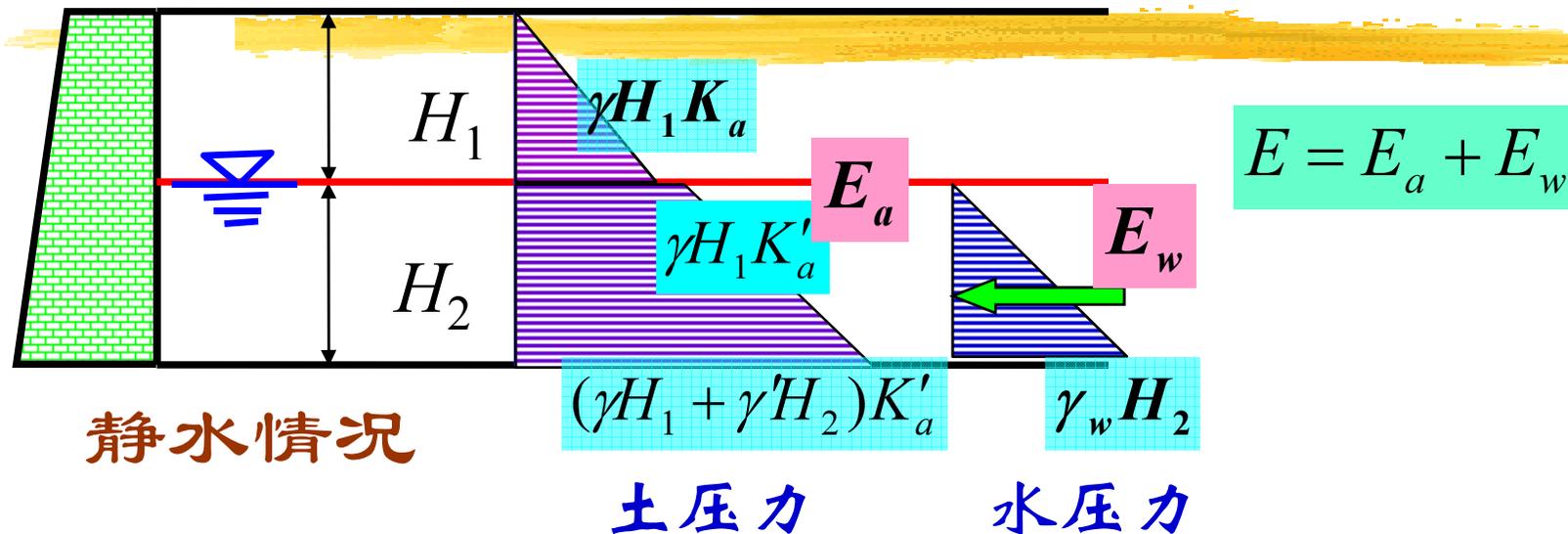
$$\frac{dp_a}{dz} = \gamma \cdot K_a$$



$\gamma_1 = \gamma_2 \quad \phi_2 = \phi_1$ 时

§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

2 填土中有水



$$\sigma_z = \sigma'_z + u$$

土压力 $p'_a = K'_a \sigma'_z$ $K'_a = \tan^2(45^\circ - \phi'/2)$

水压力 $p_u = u$

水下部分用浮容重

例题：某挡土墙高7m，墙背垂直光滑，墙后填土表面水平，墙顶宽0.8m，墙底宽3.2m，墙砌体重度

$\gamma = 22\text{kN/m}^3$ ，基底摩擦系数 $\mu = 0.5$ ，墙后填土面上作用有均布荷载 $q = 10\text{kPa}$ ，墙后填土分两层：

第一层： $\gamma_1 = 17.7\text{kN/m}^3$ ， $\varphi_1 = 30^\circ$ ， $c_1 = 0$ ， $h_1 = 3\text{m}$

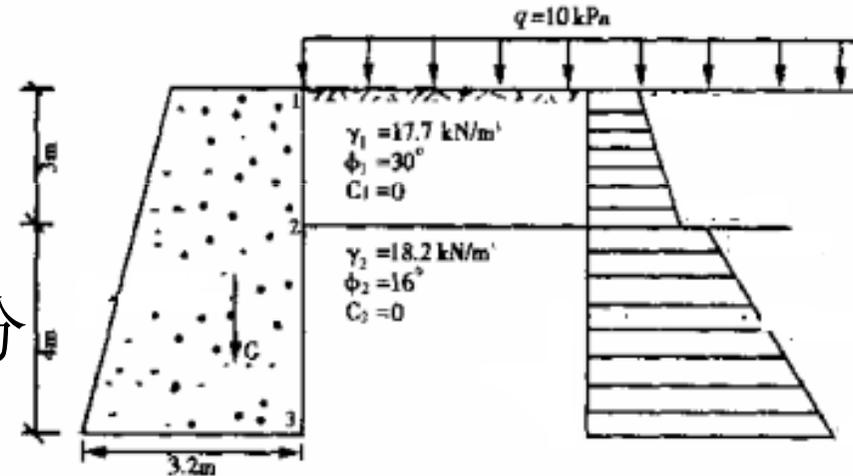
第二层： $\gamma_2 = 18.2\text{kN/m}^3$ ， $\varphi_2 = 16^\circ$ ， $c_2 = 0$ ， $h_2 = 4\text{m}$

与P245 例题6-5类似

(1) 画出主动土压力分布图形

(2) 求主动土压力 E_a

(3) 验算该挡土墙的稳定性

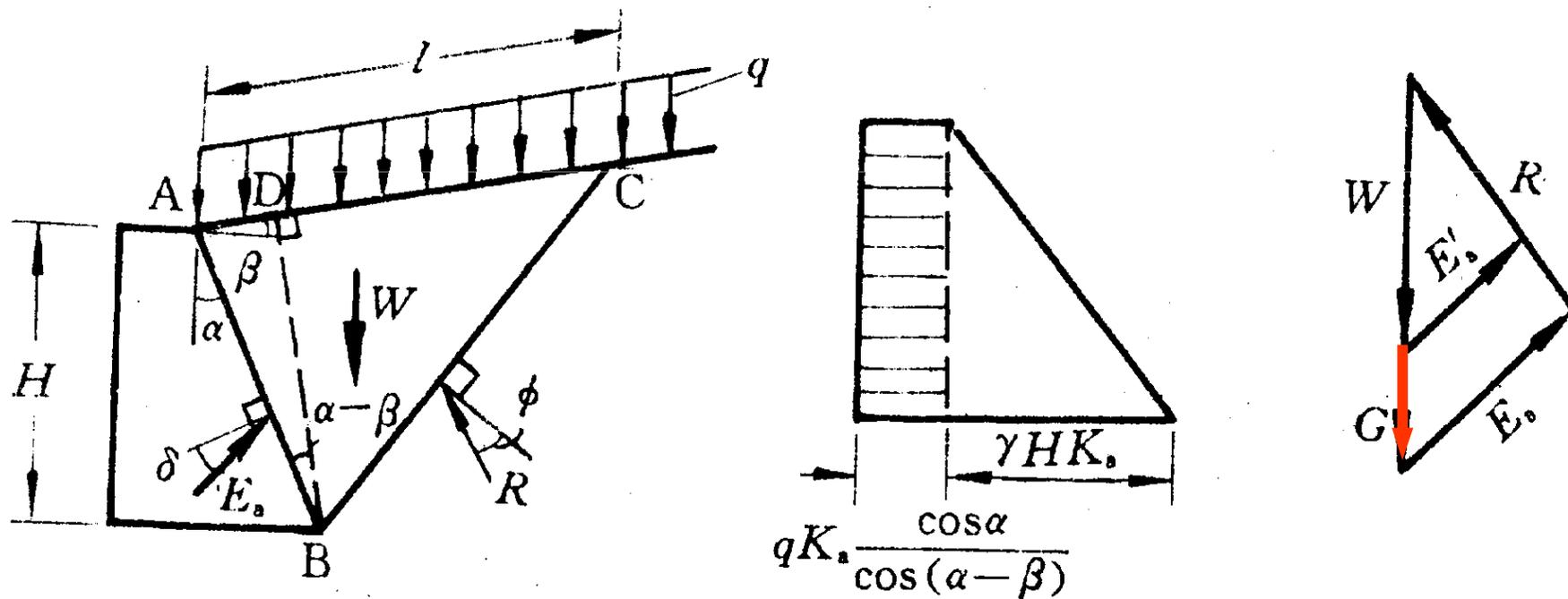


§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

3 填土上有荷载

图6-36

库仑土压力理论

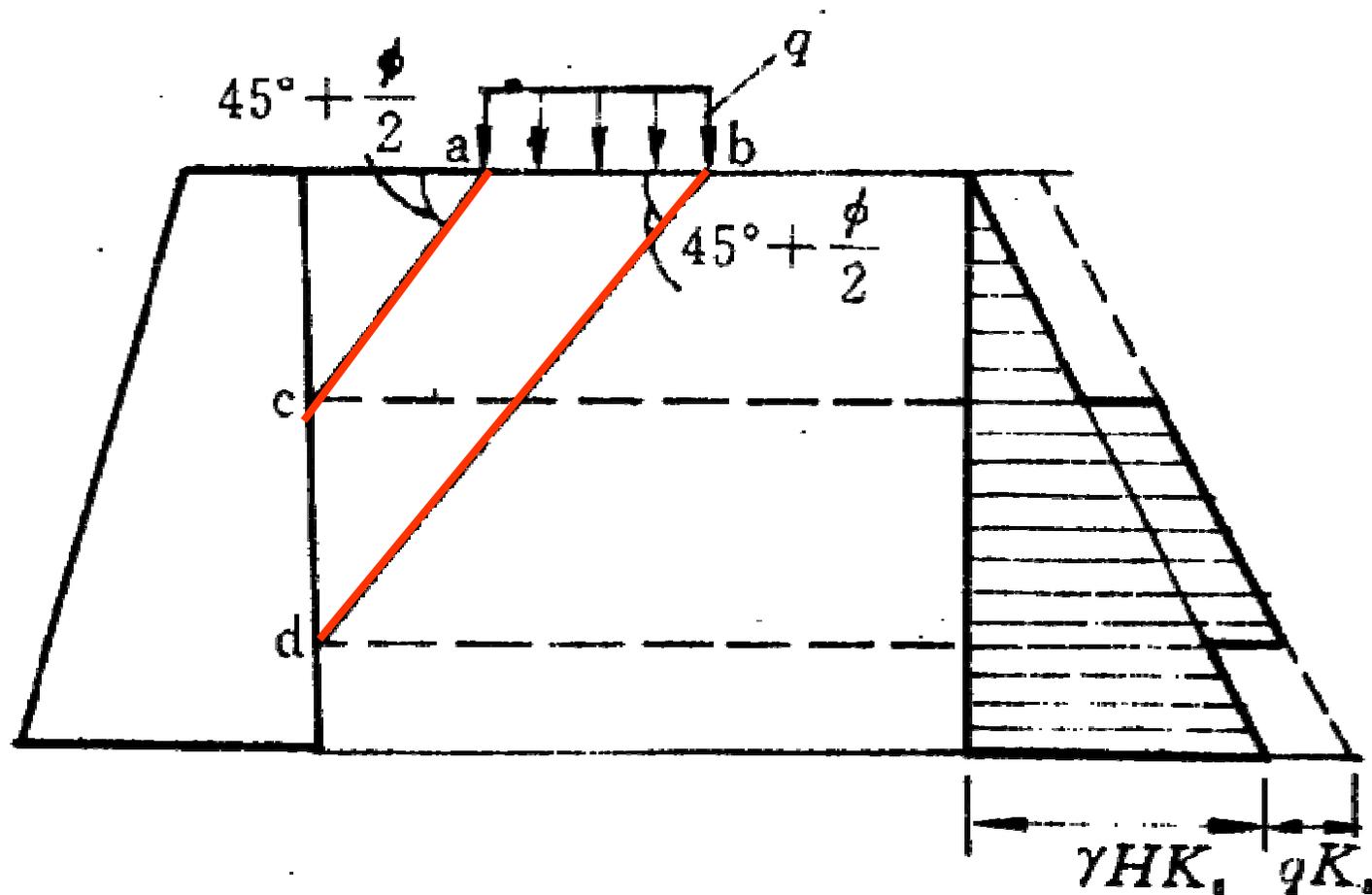


$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a + q H K_a \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha - \beta)}$$

§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

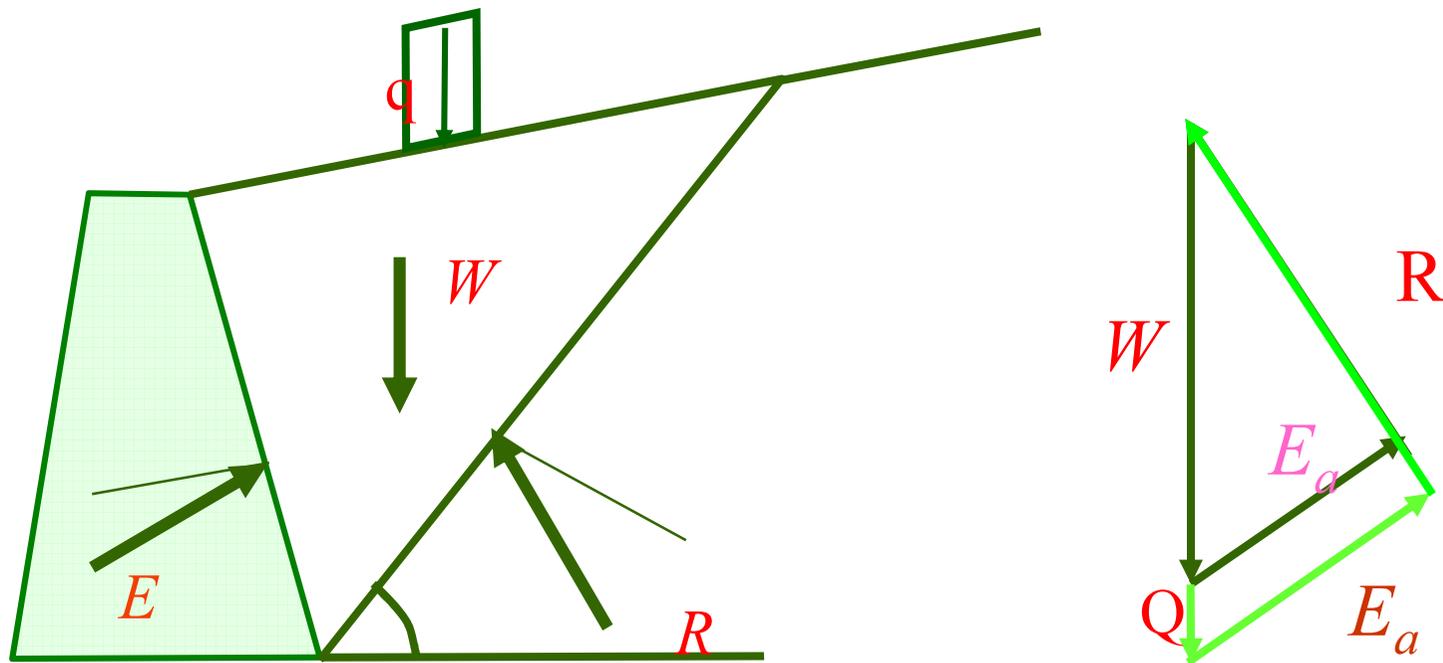
局部荷载——朗肯理论

图6-37



§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

局部荷载——库仑理论

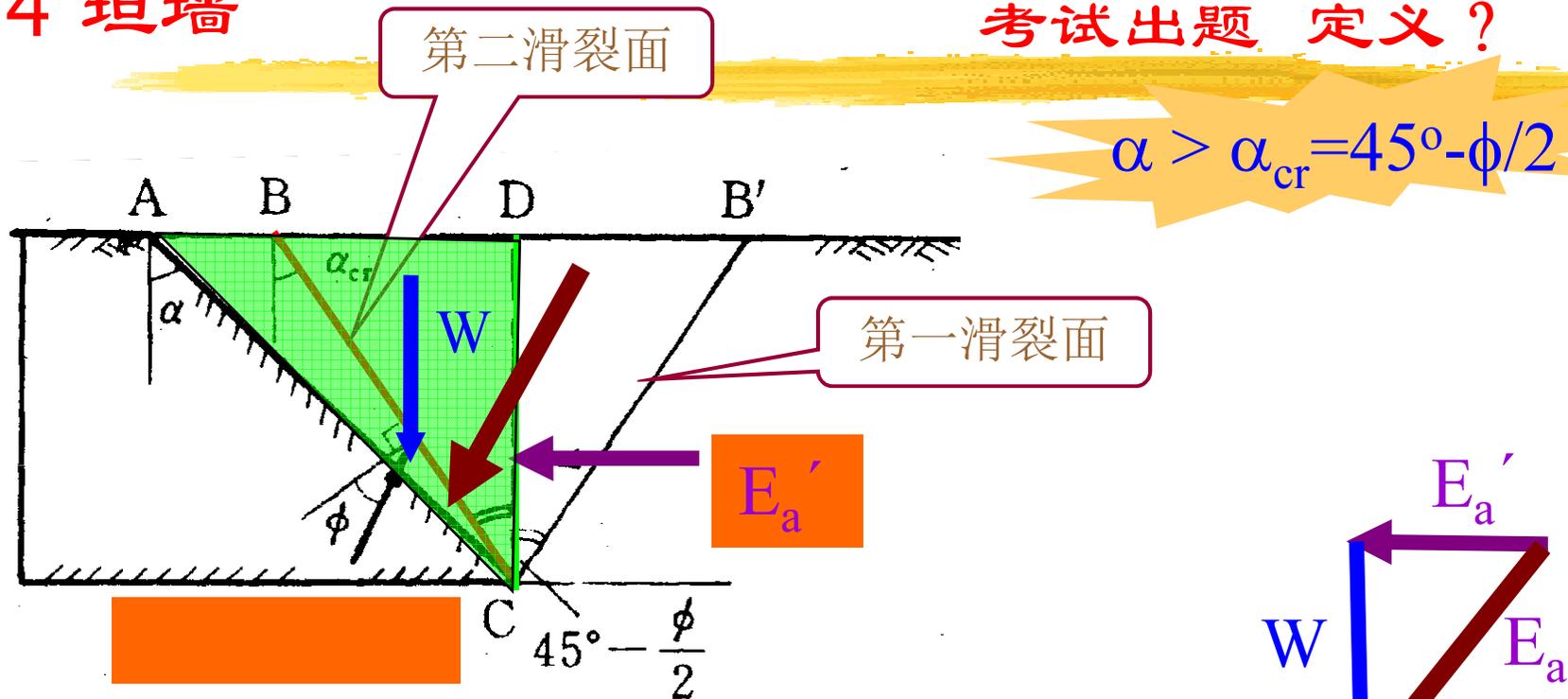


§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

P 236 6.5.2 例题6-3 抗滑稳定安全系数

4 坦墙

考试出题 定义？



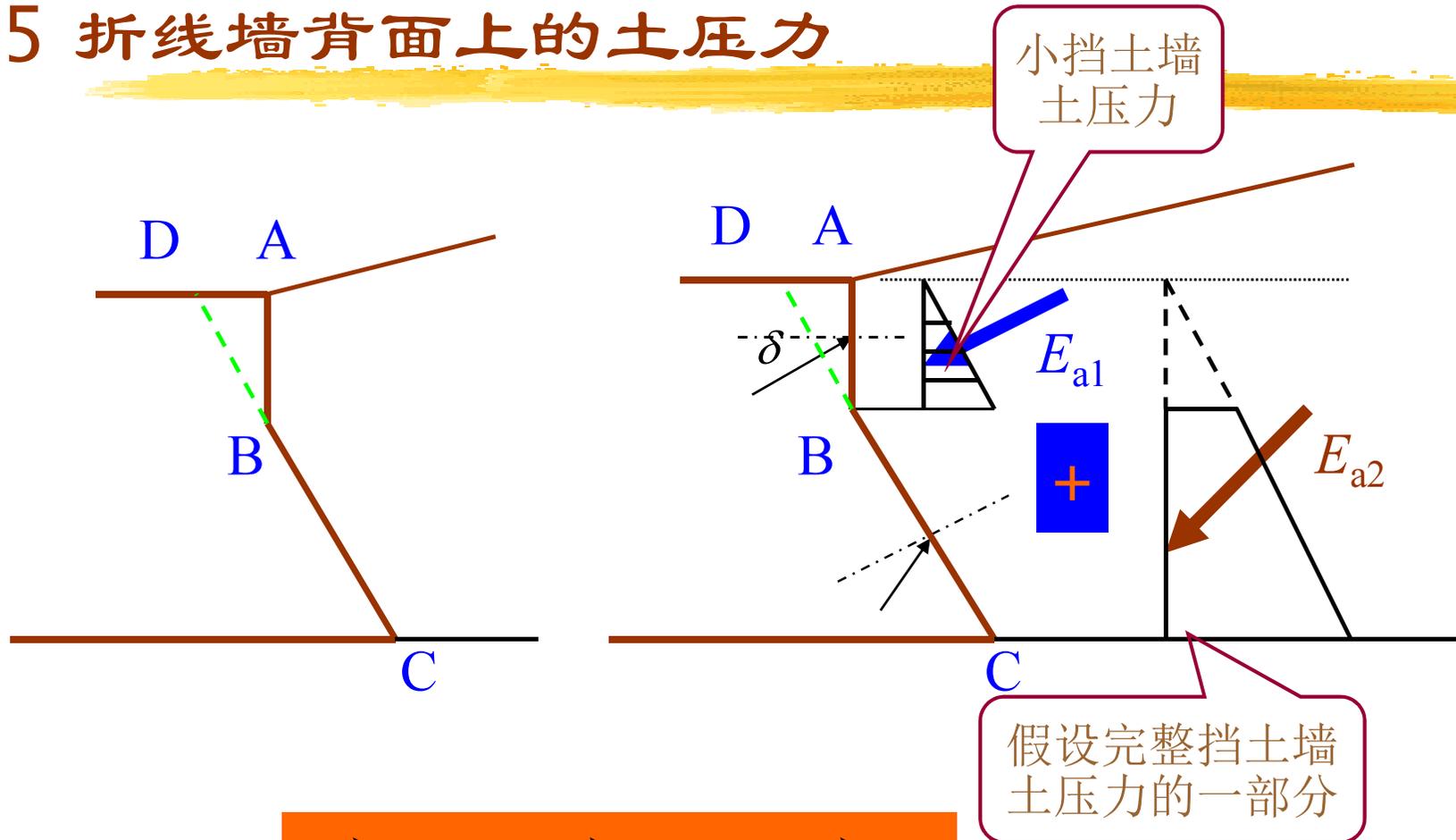
(1) 垂直于假设墙面CD上主动土压力

$$E_a' = 1/2 K_a \gamma H^2$$

(2) 作用在真实墙面AC上的土压力

$$E_a = \sqrt{E_a'^2 + W^2}$$

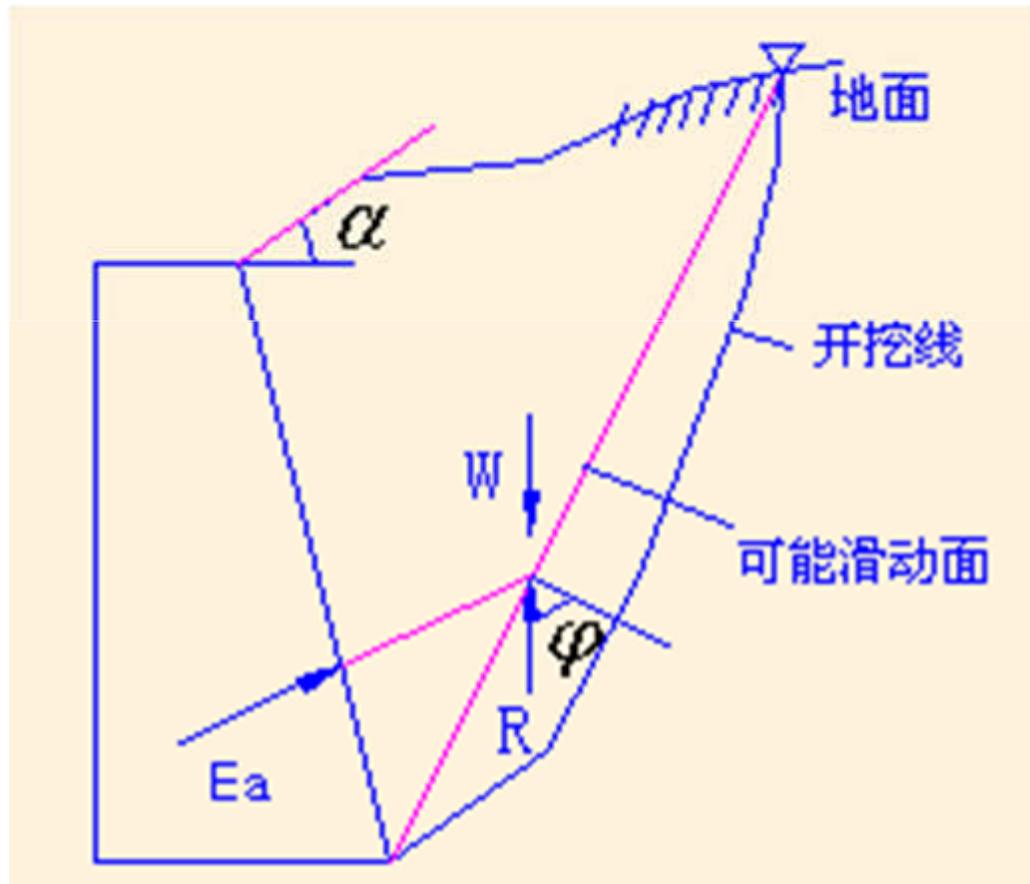
5 折线墙背面上的土压力



$$\vec{E}_a = \vec{E}_{a1} + \vec{E}_{a2}$$

§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

6 开挖情况的土压力



➤ 若开外面较缓，滑动面只可能发生在新土中，则按新土的性质确定土压力。

➤ 若开挖面较陡，先假定开挖面为滑动面，根据滑动土体静力平衡条件，求得土压力；再假定土体全部是老填土性质计算土压力，最后比较，主动土压力取较大值，被动土压力取较小值。

§ 7.6 几种常见的主动土压力计算

(3) 整体绕点B逆时针旋转 θ

$$\beta' = \beta + \theta$$

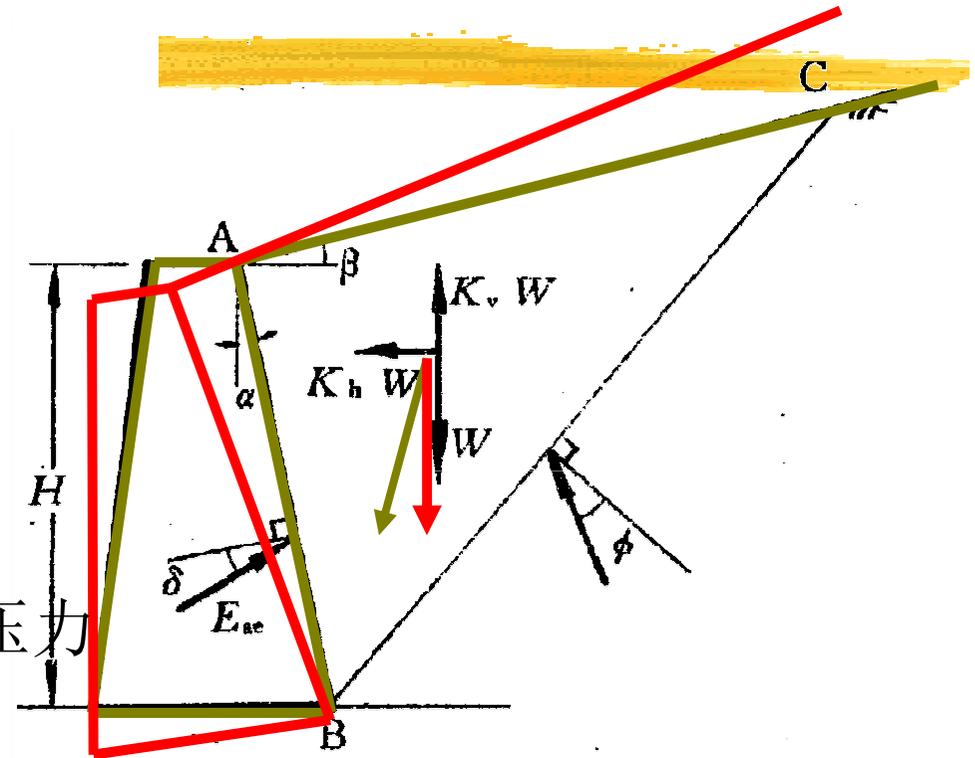
$$\alpha' = \alpha + \theta$$

$$H' = H \cos(\alpha + \theta) / \cos \alpha$$

(4) 用库仑理论得到地震下动土压力

$$E_{ae} = (1 - K_v) / 2 \times \gamma H^2 K_{ae}$$

$$\text{式中: } K_{ae} = f(\theta, \alpha, \beta, \phi, \delta)$$



8 填土性质指标与填土材料的选择

1 填土的性质指标

无粘性土

三轴排水剪或直剪慢剪

粘性土

不高于5米的挡土墙可采用三轴固结不排水剪的总强度指标或直剪固结快剪指标

高度大的挡土墙可以采用三轴不排水剪指标

2 填土材料的选择

颗粒状材料为最好的回填料

粘性土具有蠕变趋势，且透水性较低，引起侧压力会随时间而增加



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