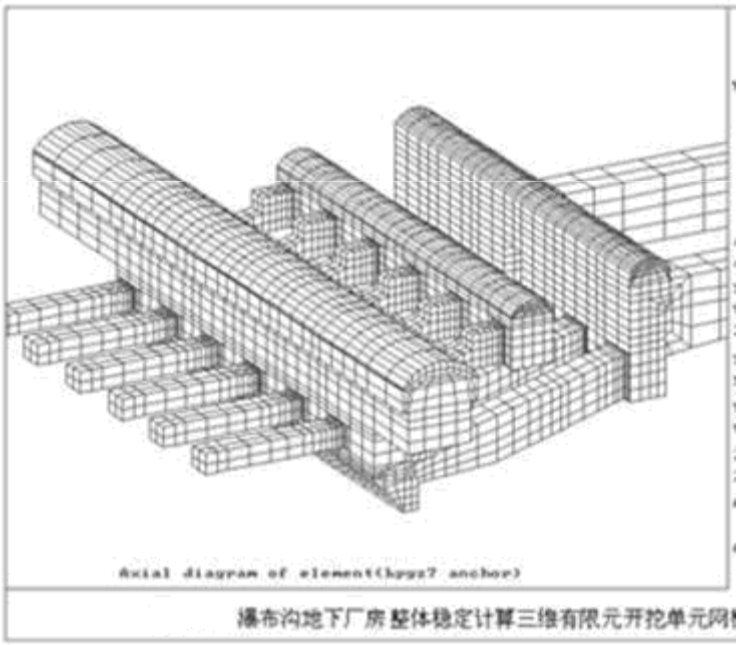
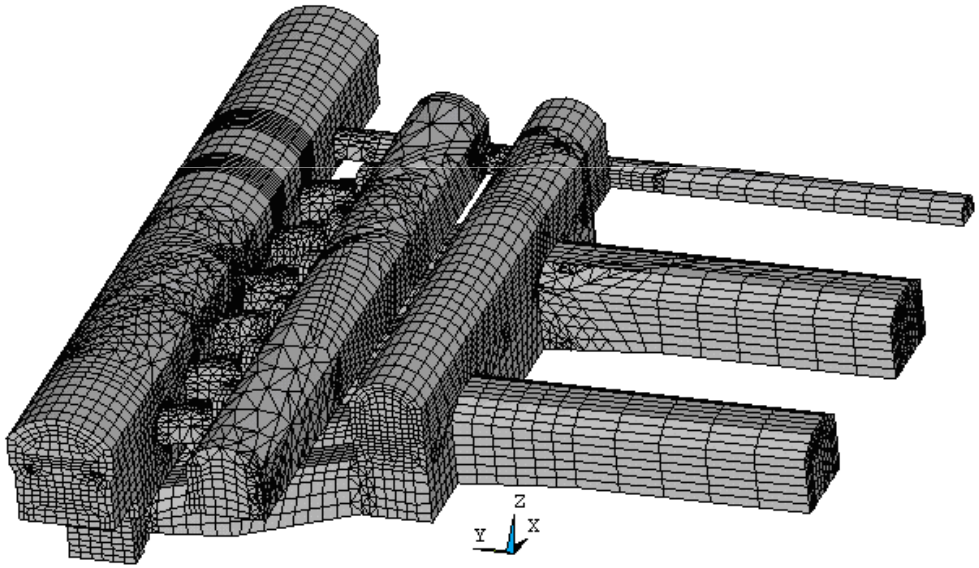
2 地下建筑结构的荷载


Axial diagram of element(hpgz7 anchor)
瀑布沟地下厂房整体稳定计算三维有限元开挖单元网


Z
Y
X

本讲内容

2.1 荷载种类和组合

2.2 荷载确定方法

2.3 岩土体压力的计算方法

2.4 初始地应力、释放荷载与开挖效应

2.5 弹性抗力

2.6 其他荷载

2.1 荷载种类和组合

荷载种类

按存在状态可分为：静荷载、动荷载和活荷载等

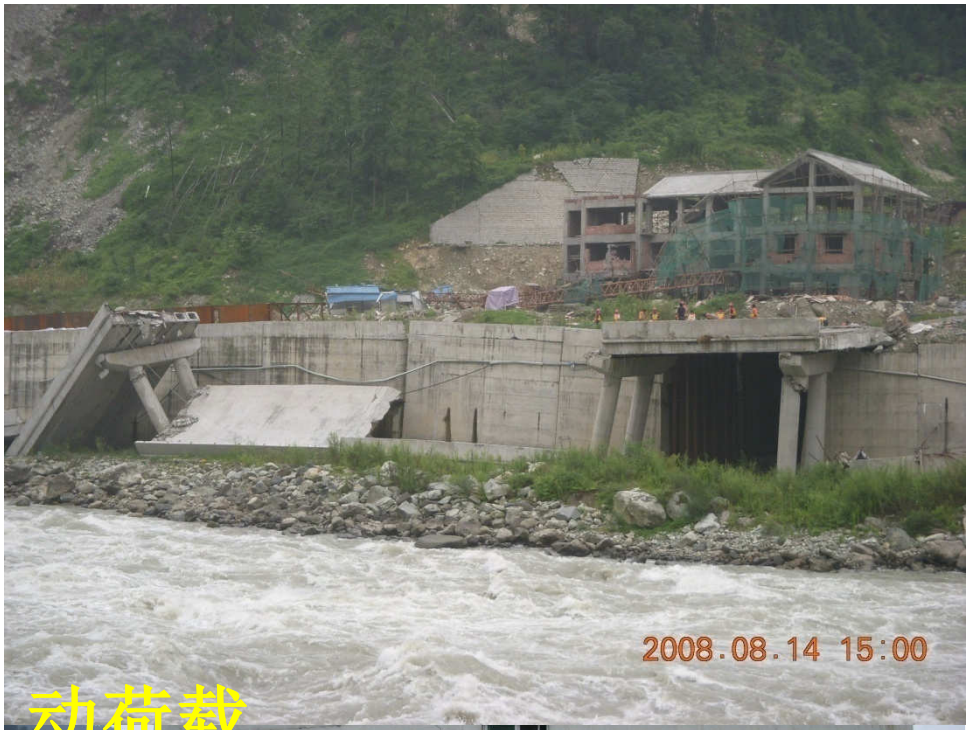
静荷载：又称恒载；

动荷载：这是瞬时作用的动荷载

活荷载：是指在结构物施工和使用期间可能存在的变动荷载，其大小和作用位置都可能变化

其它荷载：混凝土材料收缩（包括早期混凝土的凝缩与日后的干缩）受到约束而产生的内力

静荷载



动荷载

其它荷载

荷载组合

各种荷载对结构可能不是同时作用，需进行最不利情况的组合。先计算个别荷载单独作用下的结构各部件截面的内力，再进行最不利的内力组合，得出各设计控制截面的最大内力。

最不利的荷载组合一般有以下几种情况：

（一）静载；

（二）静载+活载；

（三）静载+动载（原子爆炸动载、炮（炸）弹动载）

表2-1　公路隧道设计规范（JTJ026-90）的隧道荷载

编号	荷载分类		荷载名称
1	永久荷载（恒载）		围岩压力
2			结构自重力
3			填土压力
4			混凝土收缩和徐变影响力
5	可变荷载	基本可变荷载	公路车辆荷载、人群荷载
6			立交公路车辆荷载及其所产生的土压力
7			立交铁路列车活载及其所产生的土压力
8		其它可变荷载	立交渡槽流水压力
9			温度变化的影响力
10			冻胀力
11	偶然荷载		落石冲击力
12			地震力
13			施工荷载

注：[1]设计隧道结构时，按其可能出现的最不利情况组合。

其它建筑设计规范的荷载

编号	荷载分类	荷载名称	荷载分类	
1	永久作用	结构自重	恒载	主要荷载
2		结构附加恒载		
3		围岩压力		
4		土压力		
5		混凝土收缩和徐变的影响		
6	可变作用	列车活载	活载	
7		活载所产生的土压力		
8		公路车辆荷载		
9		冲击力		
10		渡槽水流压力（设计渡槽明洞时）		
11		制动力	附加荷载	
12		温度变化的影响		
13		灌浆压力		
14		冻胀力		
15		施工荷载（施工阶段的某些外力）		
16	偶然作用	落石冲击力	附加荷载	
17		地震力	特殊荷载	

2.2 荷载的确定方法

A 确定依据

依据规范：当前在地下建筑结构设计中试行的规范、技术措施、条例等有多种。有的仍沿用地面建筑的设计规范，设计时应遵守各有关规范。

设计标准

(1) 根据建筑用途、防护等级、地震等级等确定。

(2) 地下建筑结构材料的选用 。

(3) 地下衬砌结构一般为超静定结构，其内力在弹性阶段可按结构力学计算。

(4) 截面计算原则

(5) 安全系数

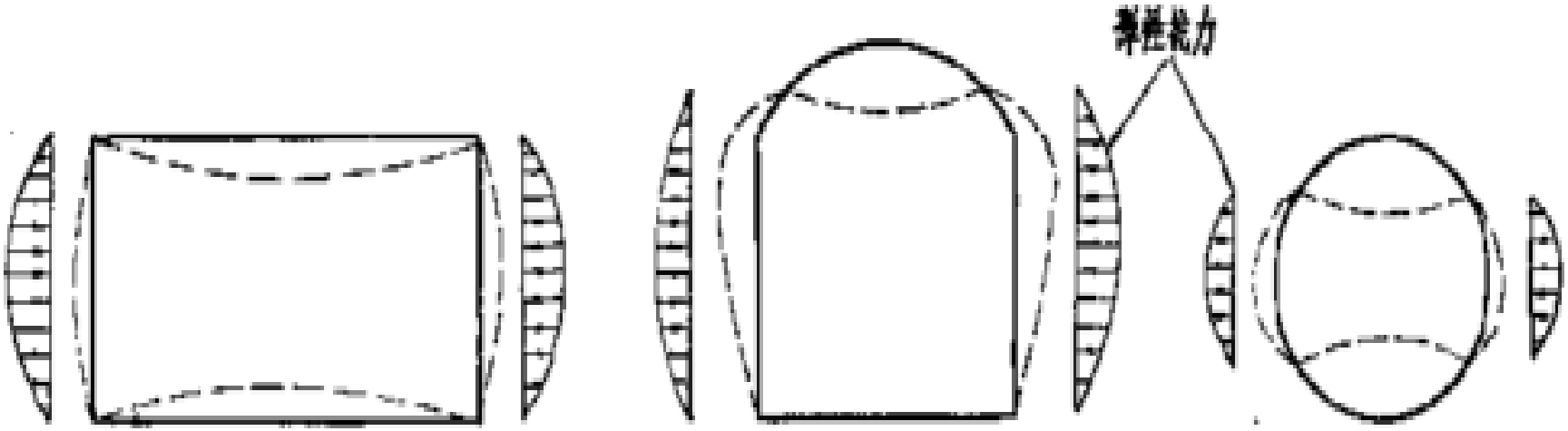
(6) 材料强度指标

B 计算原理

地下结构的计算理论较多地应用以文克尔假定为基础的局部变形理论以及以弹性理论为基础的共同变形理论。

地层对结构的弹性抗力限制了结构的变形，故改善了结构的受力情况。

地下结构在主动荷载作用下会发生变形，而地层阻止这种变形发展，给结构一定的弹性抗力，如下图所示：



拱形、圆形等有跨变结构的弹性抗力作用显著。

而矩形结构的抗力作用较小，在软土中常忽略不计。

C 计算方法

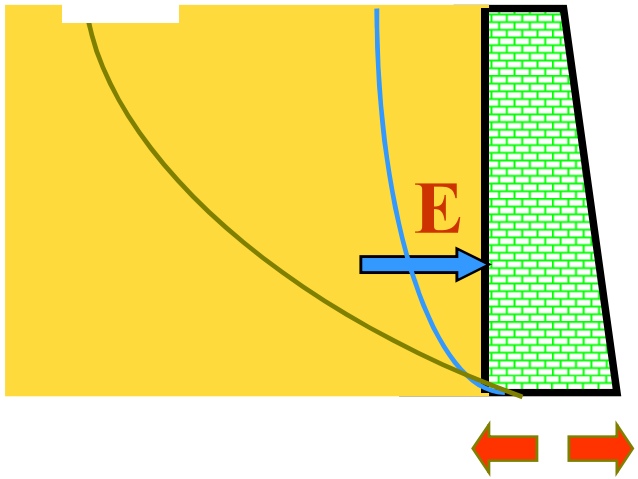
土层地下建筑结构的计算方法有：一般结构力学法，弹性地基梁法（见本书第3章），矩阵分析法，荷载——结构法，地层——结构法（见本书第4章）。近来发展用连续介质力学的有限单元法来计算结构与地层的内力，并进而考虑弹塑性、非线性、粘弹性的计算方法。

D 荷载的计算

地下建筑结构上所承受的荷载有结构自重、地层压力、弹性抗力、地下静水压力、车辆和设备重量及其他使用荷载等。

其中地层压力（包括土压力和围岩压力）是至关重要的荷载。

2.3 岩土体压力的计算



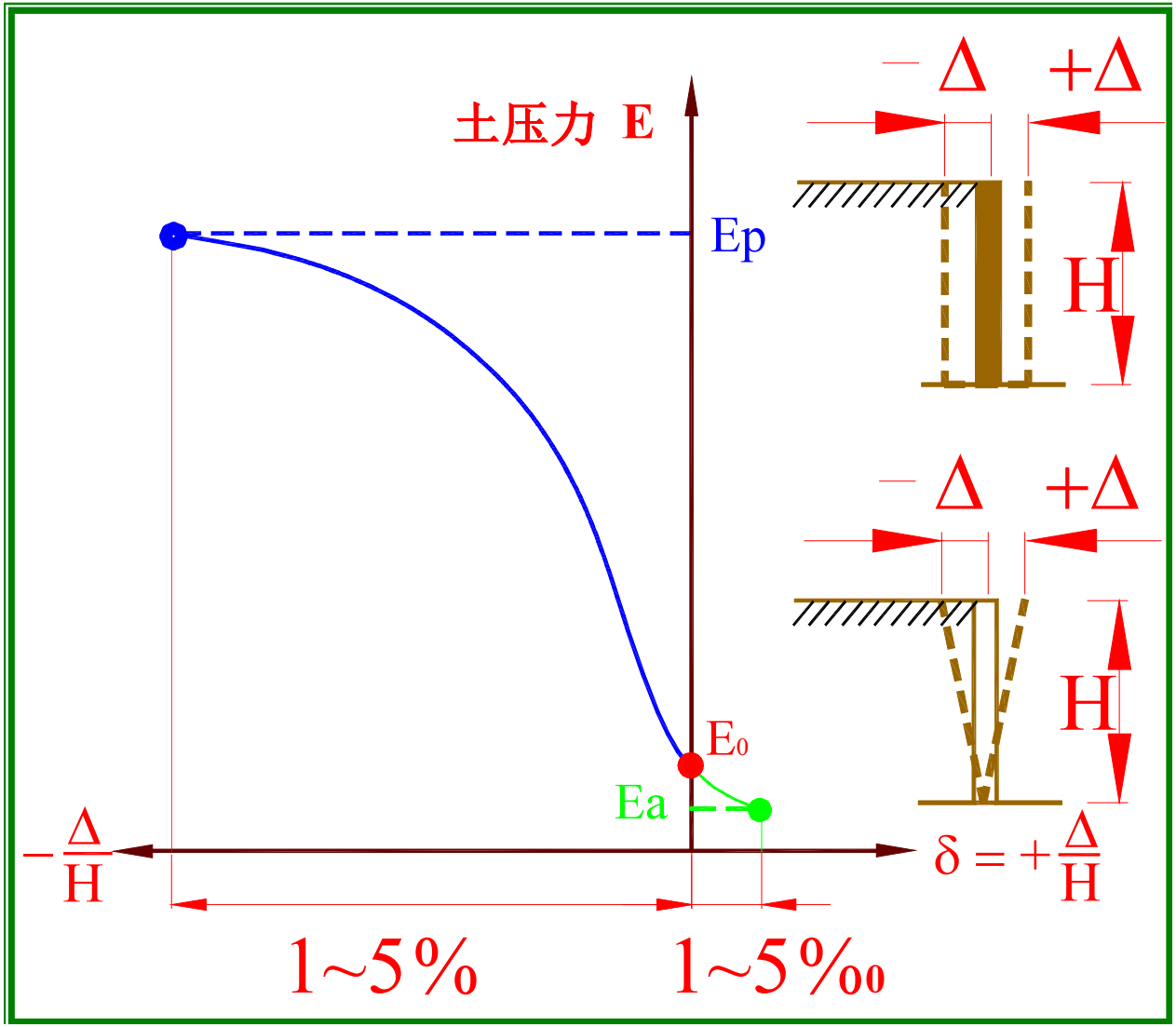
静止土压力 E_0

主动土压力 Ea

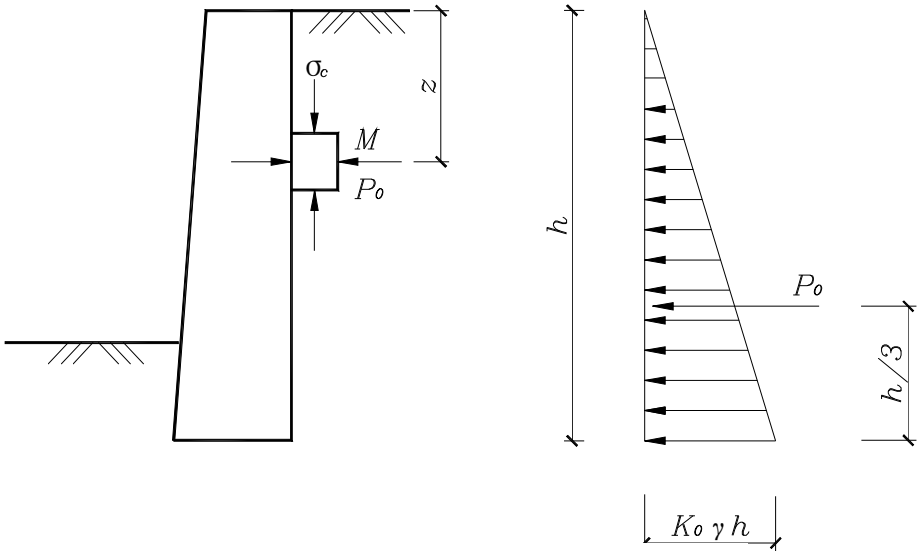
被动土压力 Ep

墙体位移与土压力类型

P9



2.3.1 静止土压力的计算



静止土压力计算图式

在填土表面以下任意深处Z的M点取一单元体（在M点附近一微小正方体），作用于单元体上的力如图所示，其中竖向土的自重应力σ_c，其值等于土柱的重量

$$\sigma_c = \gamma Z$$

式中：γ 土的重度；Z 地面算起至M点的深度

其侧向压力与竖直方向压力之间的关系为

$$p_0 = K_0 \sigma_c = K_0 \gamma Z \qquad (2\text{-}2)$$

$$K_0 = \frac{\mu}{1-\mu} \qquad (2\text{-}3)$$

K_0 静止土压力系数

μ 土的泊松比，其值通常由试验来确定

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

α 经验系数，砂土，粉土取1.0；

黏性土、淤泥质土取0.95。

ϕ' 通过CU试验测定。

2.3.2 库伦土压力理论

A 库伦理论的基本假定

库伦理论是由法国科学家库伦（Coulomb, C.A.）于1773年发表的，主要是针对挡土墙的计算，其计算的基本假定为（图2.4） P14

①挡土墙墙后土体为均质各向同性的无粘性土；

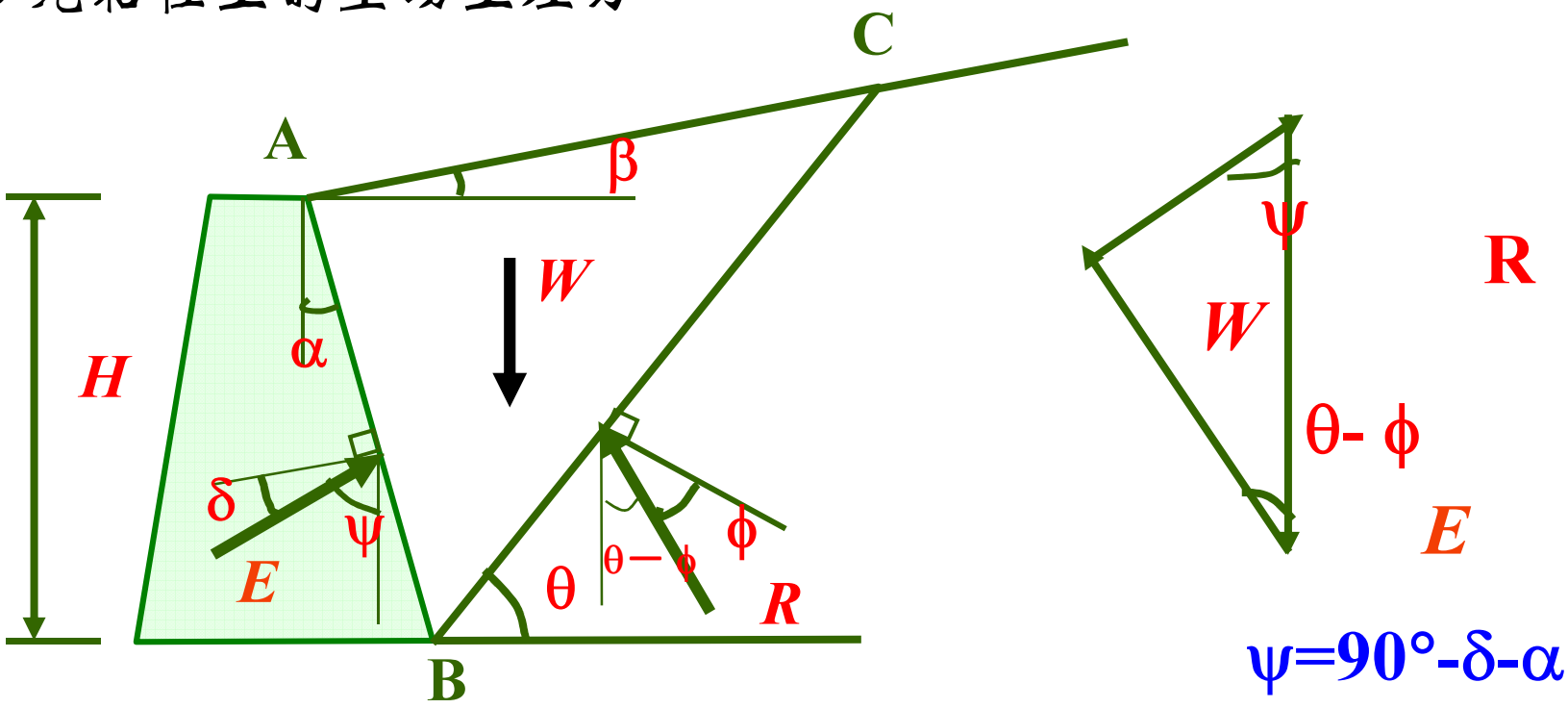
②挡土墙是刚性的且长度很长，属于平面应变问题；

③挡土墙后土体产生主动土压力或被动土压力时，土体形成滑动楔体，滑裂面为通过墙踵的平面；

④墙顶处土体表面可以是水平面，也可以为倾斜面，倾斜面与水平面的夹角为β角；

P13⑤在滑裂面和墙背面上的切向力分别满足极限平衡条件

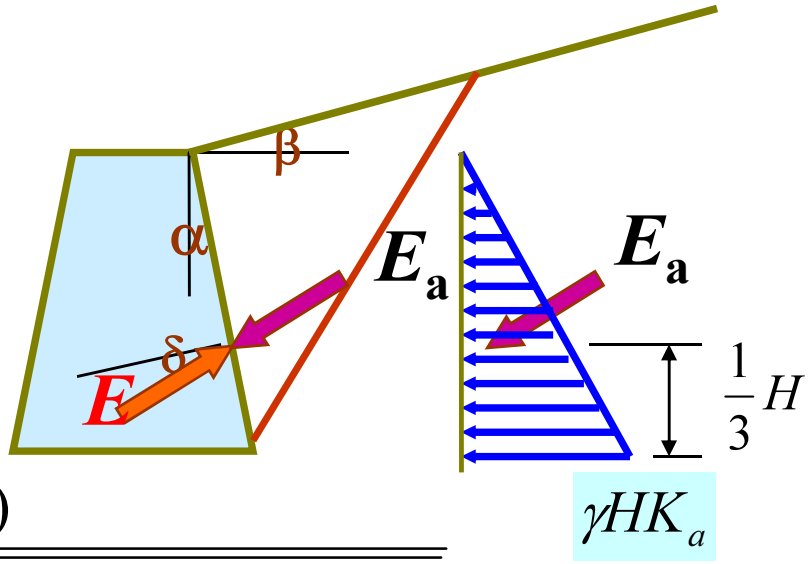
B 无粘性土的主动土压力



$$E=\frac{W\sin(\theta-\phi)}{\sin[180^\circ-(\theta-\phi+\psi)]}=f(\theta)\qquad \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}\theta}=0$$

➡ **θ、E**

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



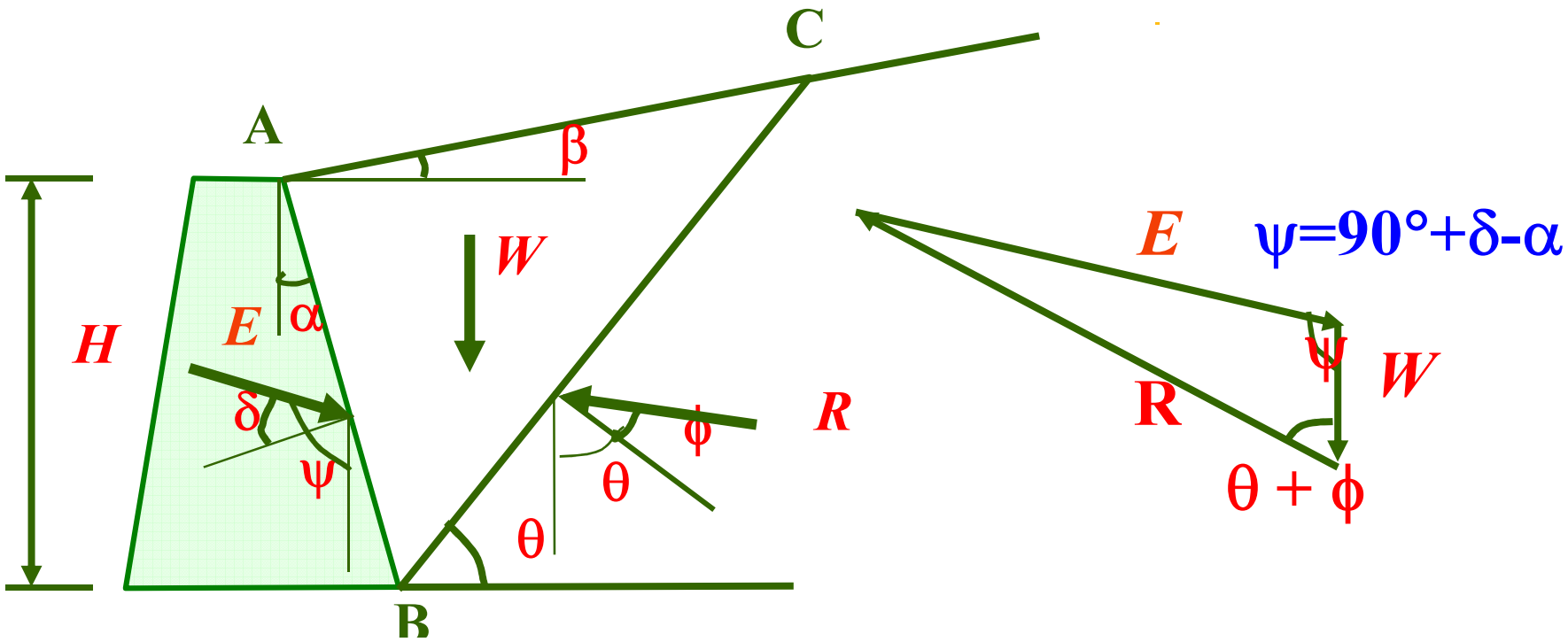
$$K_a = \frac{\cos^2(\phi-\alpha)}{\cos^2\alpha\cos(\alpha+\delta)\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin(\phi+\delta)\sin(\phi-\beta)}{\cos(\alpha+\delta)\cos(\alpha-\beta)}}\right]^2}$$

—库仑主动土压力系数

(2-13)

土压力分布：三角形分布

C 无粘性土的被动土压力



$$K_p = \frac{\cos^2(\phi+\alpha)}{\cos^2\alpha\cos(\alpha-\delta)[1-\sqrt{\dfrac{\sin(\phi+\delta)\sin(\phi+\beta)}{\cos(\alpha-\delta)\cos(\alpha-\beta)}}]^2} \qquad (2\text{-}14)$$

一库仑被动土压力系数

库伦理论的土压力计算公式

当土体滑动楔体处于极限平衡状态，应用静力平衡条件，不难得到作用于挡土墙上的主动土压力P_a和被动土压力P_p

$$P_a = \frac{\sin(\theta-\phi)}{\sin(\alpha+\theta-\phi-\delta)}W \qquad (2\text{-}8)$$

$$P_p = \frac{\sin(\theta+\phi)}{\sin(\alpha+\theta-\phi-\delta)}W \qquad (2\text{-}9)$$

W 滑楔体自重

上式 P_a P_p 都是 θ 的函数，随着 θ 的变化，其主动土压力必然产生在使得 P_a 为最大的滑动楔形面上。而被动土压力必然产生在使得 P_p 为最小的滑动楔形面上。

由此，将 P_a P_p 分别对 θ 求导，求出最危险的滑裂面，即可得到库伦的主动与被动土压力，即

$$P_a = \frac{1}{2}\gamma h^2 K_a \qquad (2\text{-}10)$$

$$P_p = \frac{1}{2}\gamma h^2 K_p \qquad (2\text{-}11)$$

γ 土体的重量

h 挡土墙的高度

说明：根据库仑土压力理论，计算土压力的关键是如何确定主动土压力系数和被动土压力系数。

库伦主动土压力系数K_a和被动土压力系数K_p均为形状参数和土层物性参数 $\alpha, \beta, \phi, \delta$ 的函数

P15 （3）粘性土中等效内摩擦角

P16 （4）粘性土库伦主动土压力公式

2.3.3 朗肯土压力理论

朗肯土压力理论由英国科学家朗肯（Rankine）于1857年提出。朗肯理论的基本假定为

1）挡土墙墙背竖直，墙面为光滑，不计墙面和土层之间的摩擦力；

2）挡土墙后填土的表面为水平面，土体向下和沿水平方向都能伸展到无穷，即为半无限空间

3）挡土墙后填土处于极限平衡状态

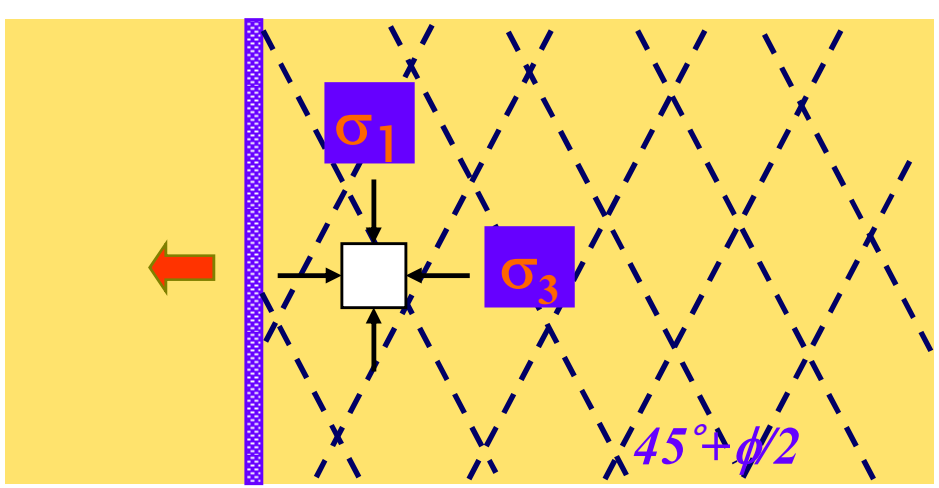
朗肯理论是从弹性半空间的应力状态出发，由土的极限平衡理论导出。在弹性均质的半空间体中，离开地表面的深度为Z出的任一点的竖向应力和水平应力分别为

$$\sigma_z = \gamma z \qquad (2\text{-}30) \qquad\qquad \sigma_x = K_0 \gamma z \qquad (2\text{-}31)$$

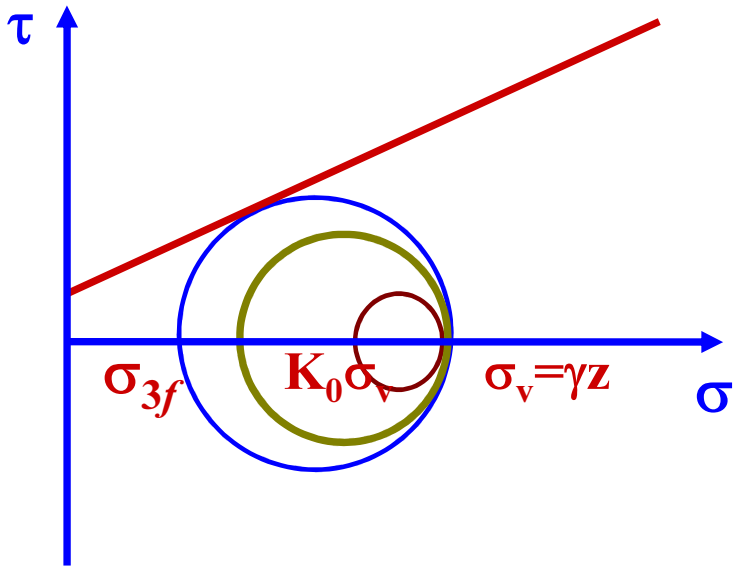
P17

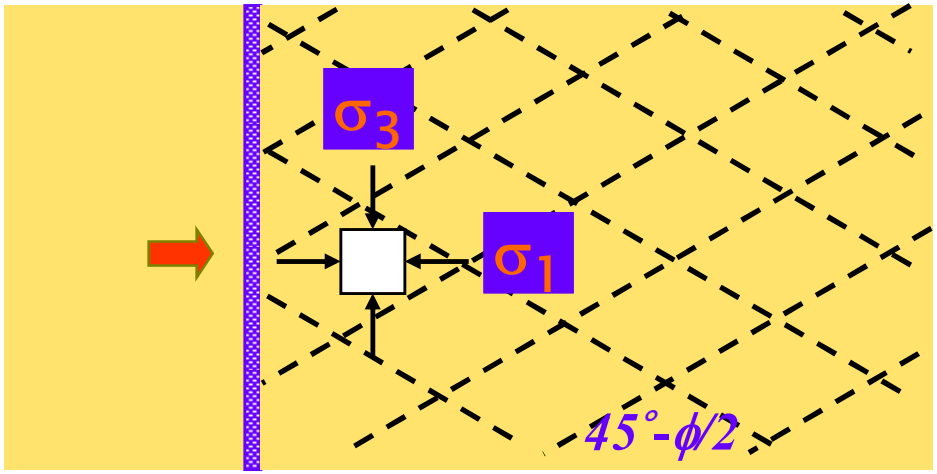
朗肯极限平衡应力状态

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。

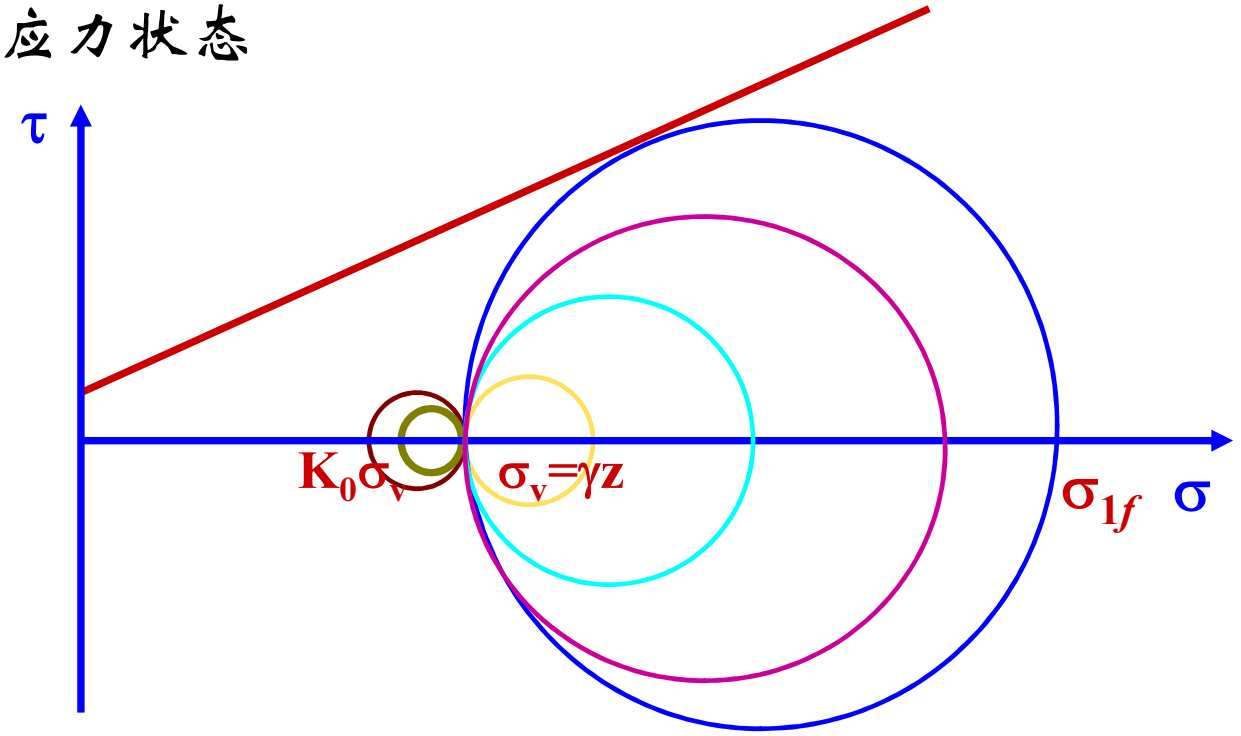


主动极限平衡应力状态





被动极限平衡应力状态



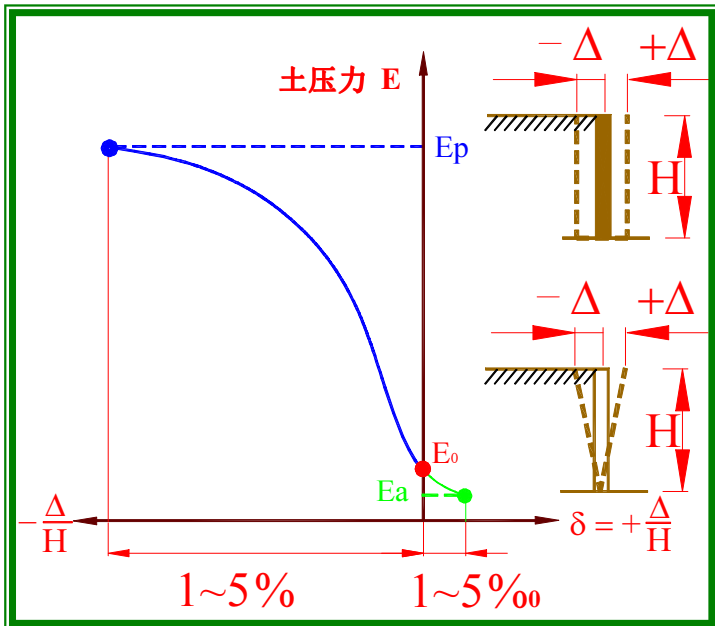
主动土压力系数 $K_a = tg^2(45^\circ - \phi/2) = \dfrac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi}$

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

静止土压力系数 $K_0 = 1-\sin\phi$

$$K_a < K_0 < 1 < K_p$$

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



2.3.4 特殊情况下的土压力

A 分层土的土压力计算

B 不同地面超载作用下的土压力计算与图式

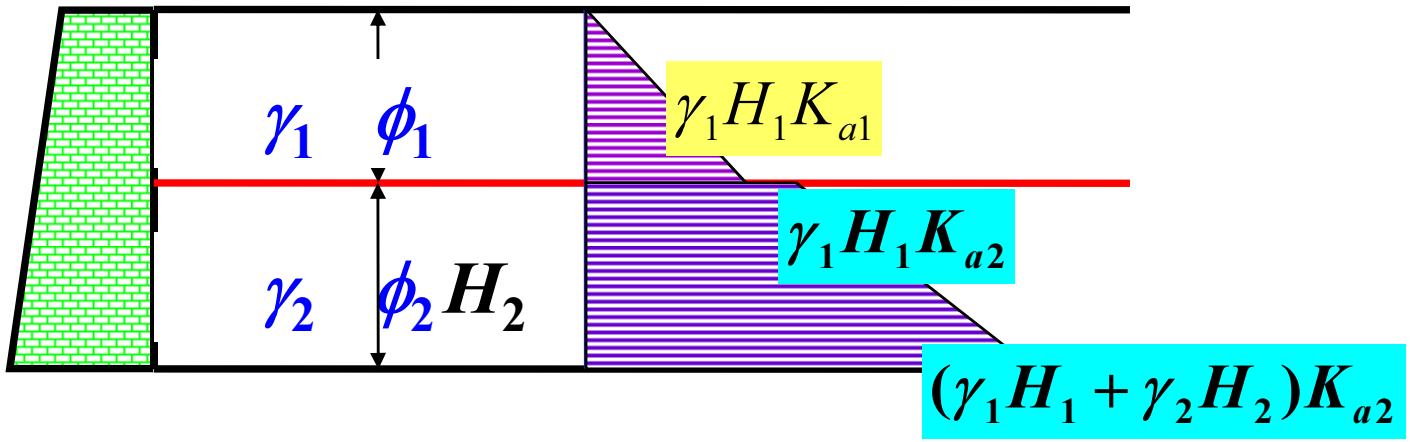
C 考虑地下水时水土压力计算

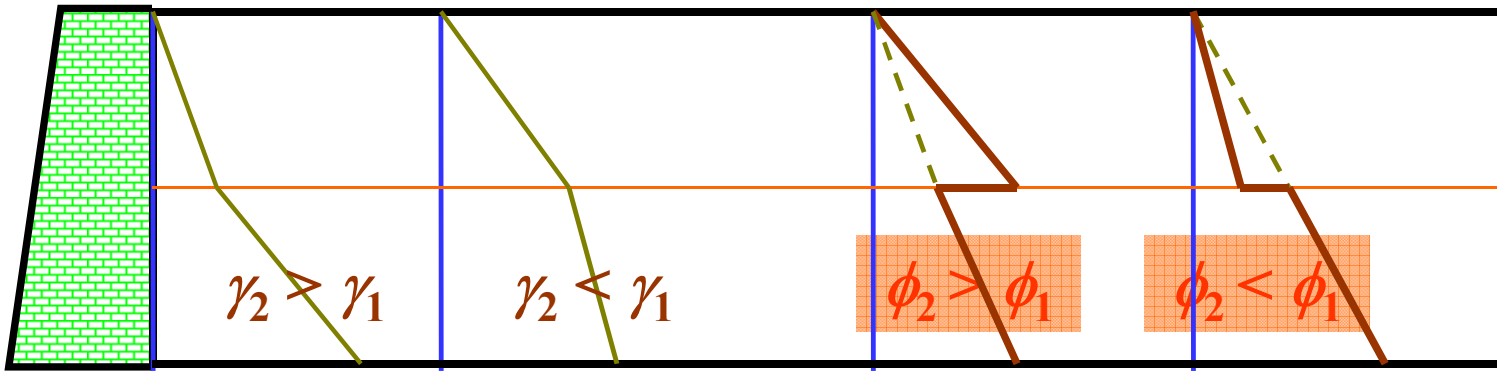
水土压力合算（砂土，粉土）、水土压力分算（黏性土）

A 分层土的土压力计算

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

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





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

B 地面上有超载时的土压力计算

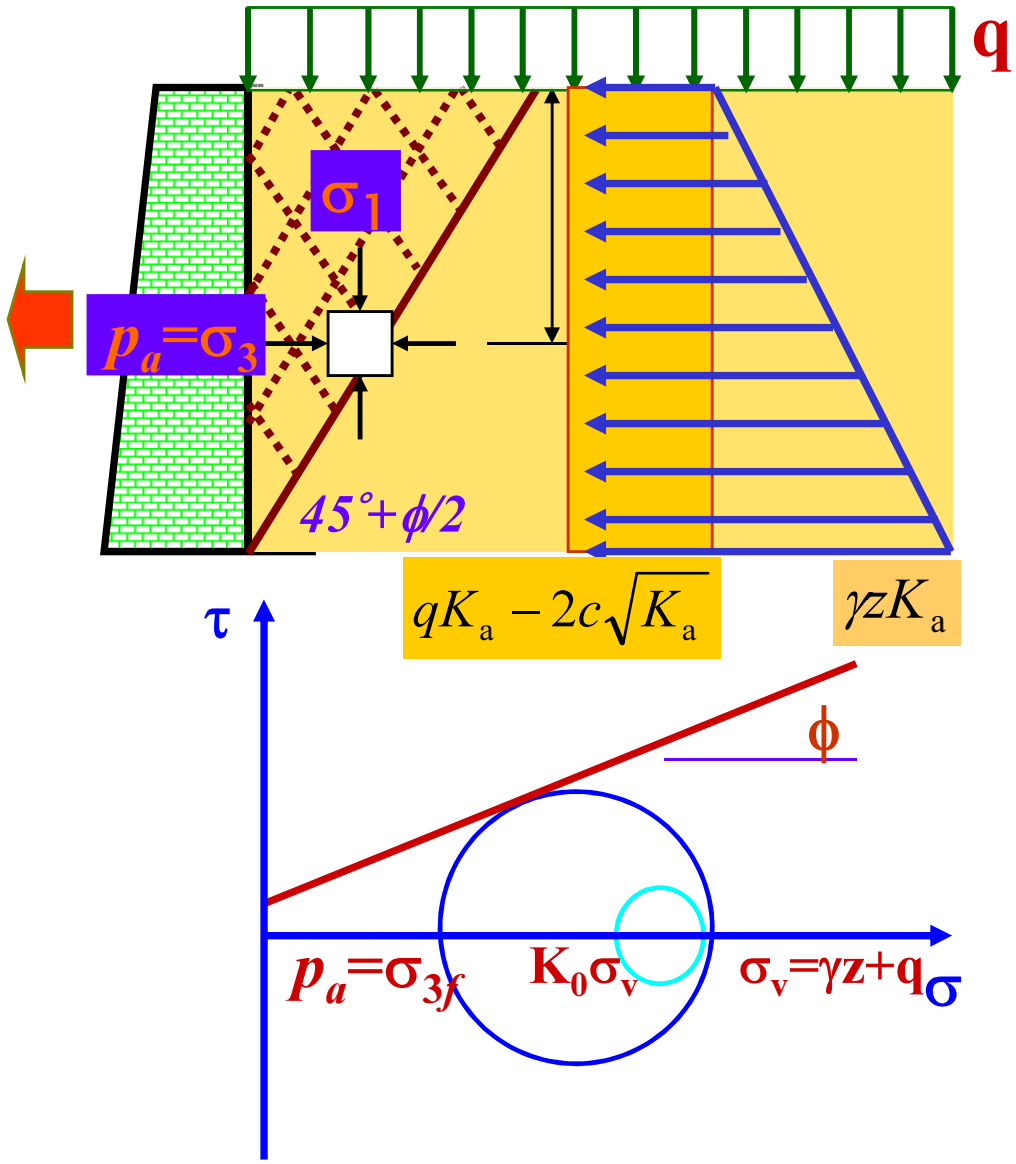
填土上有荷载

朗肯土压力理论

$$\sigma_1 = \gamma \cdot z + q$$

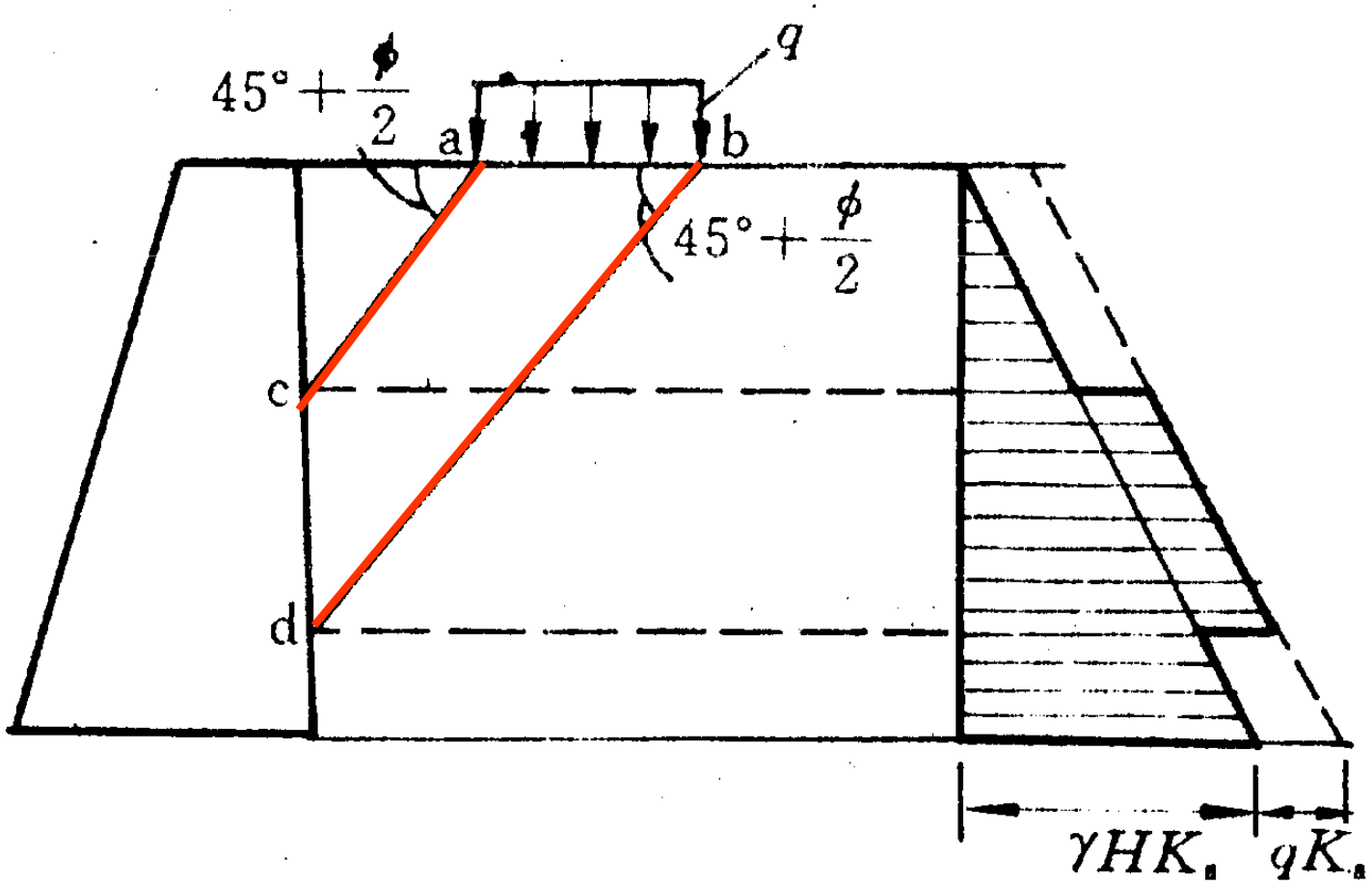
$$p_a = \sigma_3 = (\gamma z + q)K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

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



局部荷载

——朗肯理论



C 考虑地下水时水土压力计算

土的抗剪强度试验方法与指标问题

名称	指标	应用
不排水剪 (快剪)	c_u、ϕ_u c_q、ϕ_q	软土地基 快速施工
固结不排水剪 (固结快剪)	c_{cu}、ϕ_{cu} c_{cq}、ϕ_{cq}	固结完成后 受突然荷载
固结排水剪 (慢剪)	c_d、ϕ_d c_s、ϕ_s	地基透水性强 施工较慢或正常运行期

三种三轴试验的结果对比

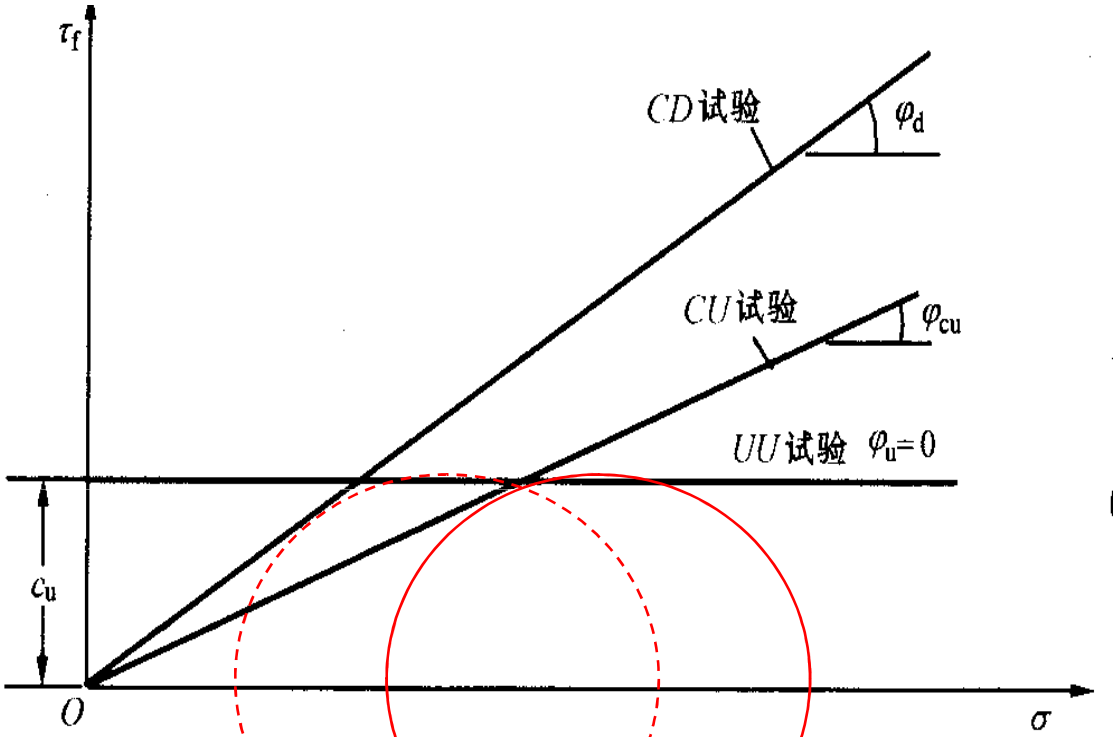
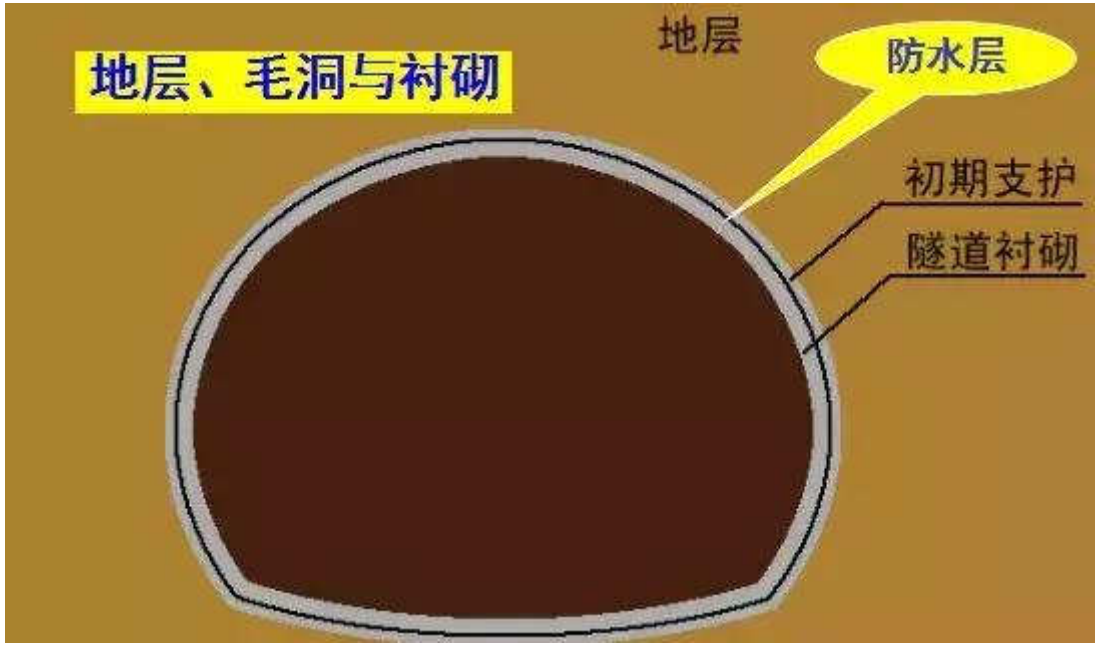


图 5-30　正常固结饱和粘土三种试验结果的强度包线

- 饱和粘土的固结排水剪（CD）的强度＞固结不排水剪(CU)强度＞不固结不排水剪(UU)强度
- 剪切破坏强度是发生剪切变形破坏时的强度。

2.3.5 围岩压力的计算



A 围岩压力及其影响因素

围岩压力的概念

即所谓由于洞室围岩的变形和破坏而作用在支护或衬砌上压力的围岩压力。

围岩压力可分为围岩垂直压力、围岩水平压力及围岩底部压力。

影响围岩压力的因素

(1)洞室的形状和大小

(2)地质构造

(3)支护的型式和刚度

(4)洞室深度

(5)时间

(6)施工方法

B 围岩压力的计算方法

B.1 按松散体理论计算围岩压力

a）垂直围岩压力

① 浅埋结构上的垂直围岩压力

② 深埋结构上的垂直围岩压力

b）水平围岩压力

c）底部围岩压力

B.2 按弹塑性理论计算围岩压力

B.3 按围岩分级和经验公式确定围岩压力

P33

岩体结构面

B.1 按松散体理论计算围岩压力

由于岩体一般总是有一定的裂隙节理，又由于洞室开挖施工的影响，其围岩不可能是一个非常完整的整体，而松散体理论中假定岩石为散粒体，并具有一定的凝聚力，所以用这一理论计算松动围岩压力有时也可以得到较好的效果。

现在把岩体看作是散粒体，并且要使抗剪强度 τ_f 不变，则

$$\tau_f = \sigma f_K$$

由此，对于具有粘聚力的岩石，得

$$f_K = \frac{c + \sigma tg\phi}{\sigma} = \frac{c}{\sigma} + tg\phi$$

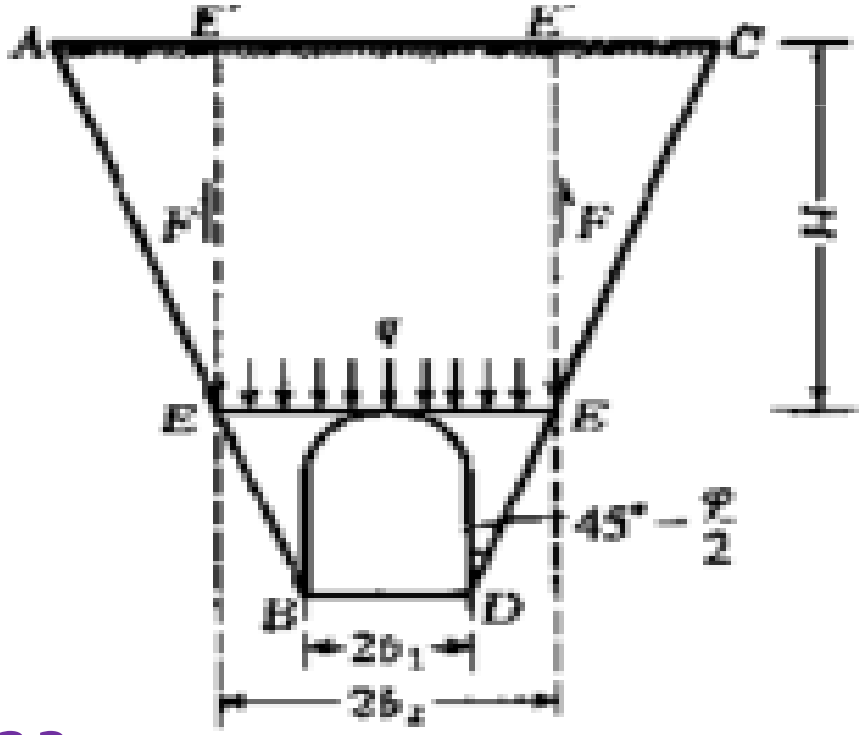
对于砂土及其它松散材料

$$f_K = tg\phi$$

a）垂直围岩压力

① 浅埋结构上的垂直围岩压力

作用在地下结构上的围岩压力为岩石柱重量与两侧所提供摩擦力之差。从洞室底面的两端起可能形成伸延到地面的倾斜破裂面，见下图中的AB和CD。



$$Q_y = G - 2F$$

$$= \gamma H \times 2b_2 - 2 \times \frac{1}{2}\gamma H^2 \tan^2(45^\circ - \frac{\phi_K}{2}) \tan\phi_K$$

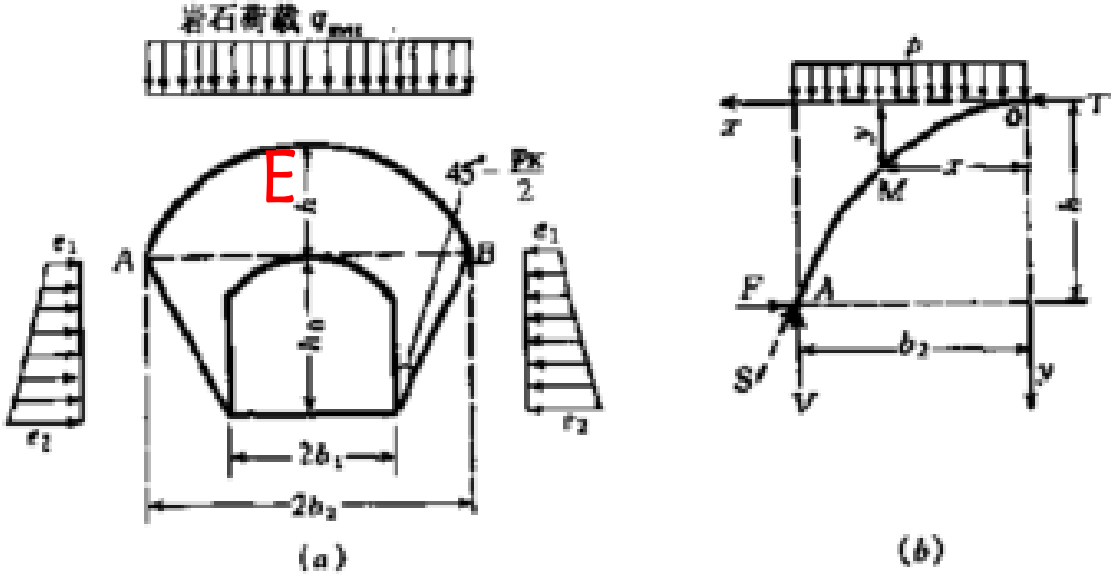
从上式可以看出随着深度的增加，围岩压力逐渐减小，这与实际不符。

该式仅适用于浅埋结构。

P33

② 深埋结构上的垂直围岩压力

随着深度的增加，两侧摩阻力超过了滑移柱的重量。只有AEB以下岩体重量对结构产生压力，又称为压力拱



压力拱能够自然稳定平衡，其上任何一点均无力矩。

只要确定压力拱的形状及高度就可以确定出围岩压力

P34

$$q = \gamma h_1$$

b）水平围岩压力

只是对较松软的岩石才考虑

计算时先求出垂直围岩压力的集度，

而后乘以侧压力系数Ka(主动土压力)

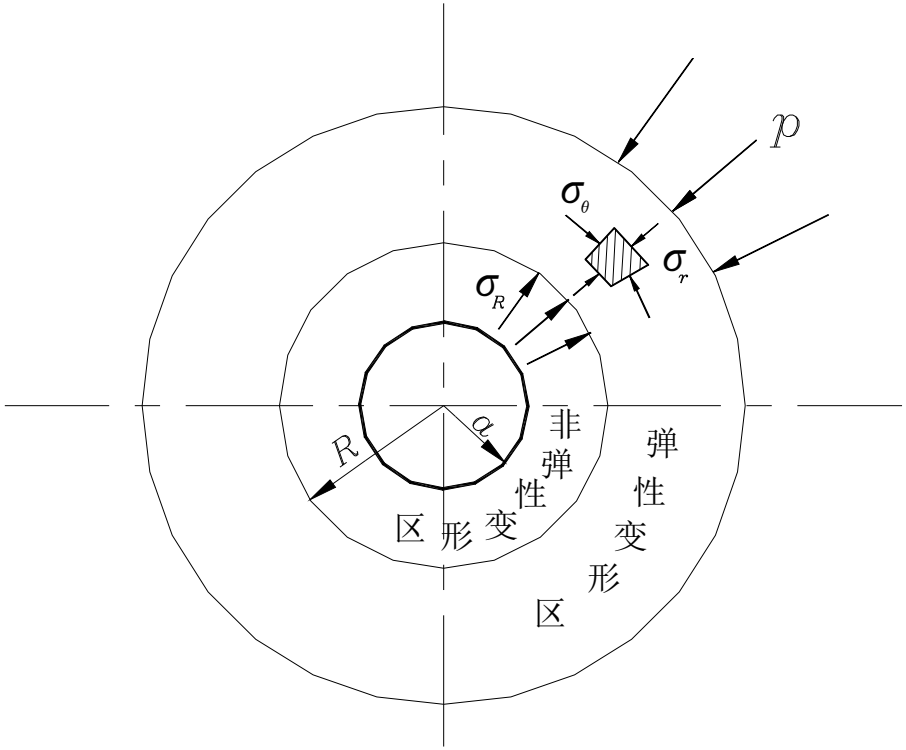
c）底部围岩压力

通常不计算

B.2 按弹塑性体理论计算围岩压力

从理论上讲，弹塑性理论比前面的理论要严密些，但是弹塑性理论的数学运算较复杂，公式也较繁。

在 $r=R$ 的可变范围内出现了塑性区。



P38

图2.24　弹塑性模型计算围岩压力图式

在弹性区和塑性区的交界处分别满足弹性解和塑性解，
据此推导出围岩压力的计算公式

$$p_b = \left[\left(p + c \cdot ctg\varphi\right)\left(1 - \sin\varphi\right)\right]\left(\frac{a}{R}\right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - c \cdot ctg\varphi$$

这就是著名的修正了的芬纳公式 Fenner formula
它表示当岩体性质、埋深等确定的情况下，非弹性变形区
大小与支护对围岩提供的反力间的关系

B.3 按围岩分级和经验公式确定围岩压力

1）垂直围岩压力

围岩垂直压力的综合经验公式为

$$q = k\left(L + \frac{H}{2}\right)\gamma$$

式中

q 均匀分布垂直围岩压力 kPa

γ 岩体容重 kN/m³

K 围岩压力系数

2）水平围岩压力

$$e = \lambda q$$

式中

e 均匀分布水平围岩压力 kPa

λ 侧压力系数

P40

2.4 初始地应力、释放荷载与开挖效应

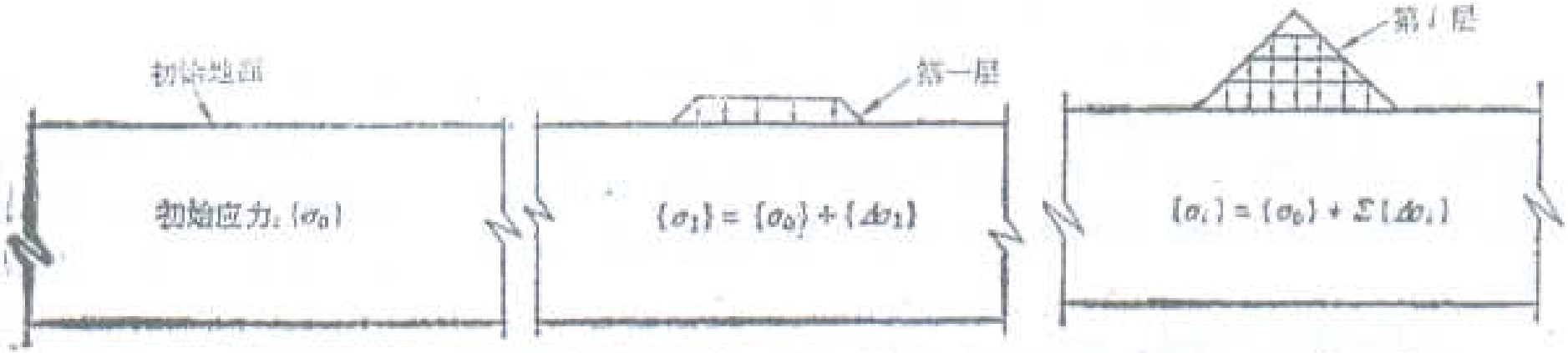
初始地应力一般包括自重应力场和构造应力场，但土层中仅有自重应力场存在，岩层中对于Ⅳ级以下围岩，喷射混凝土层将在同围岩共同变形的过程中对围岩提供支护抗力，使围岩变形得到控制，从而使围岩保持稳定。与此同时，喷层将受到来自围岩的挤压力。这种挤压力由围岩变形引起，常称作“形变压力”。

时间效应：Ⅳ级以下围岩一般呈现塑性和流变特性

初始地应力$\{\sigma_0\}$的确定常需专门研究。对岩石地层，初始地应力可分为自重地应力和构造地应力两部分,而土层一般仅有自重地应力。其中自重地应力可由有限元法求得，构造地应力可由位移反分析方法确定。

释放荷载：可由已知初始地应力或与前一步开挖相应的应力场确定。先求得预计开挖边界上各结点的应力，并假定各结点间应力呈线性分布，然后反转开挖边界上各结点应力的方向(改变其符号)，据以求得释放荷载

采用增量法考虑荷载的逐级施加，模拟填筑和开挖等施工过程。



(a) 初始状态　(b) 第一层填筑　(c) 第 i 层填筑

图7－13 填筑的解析模拟

这样的增量模拟的一般循环形式是

$$\{\sigma_i\}=\{\sigma_0\}+\sum_i\{\Delta\sigma_i\}$$

位移可通过以下的公式算出

$$\{\delta_i\}=\sum_i\{\Delta\delta_i\}$$

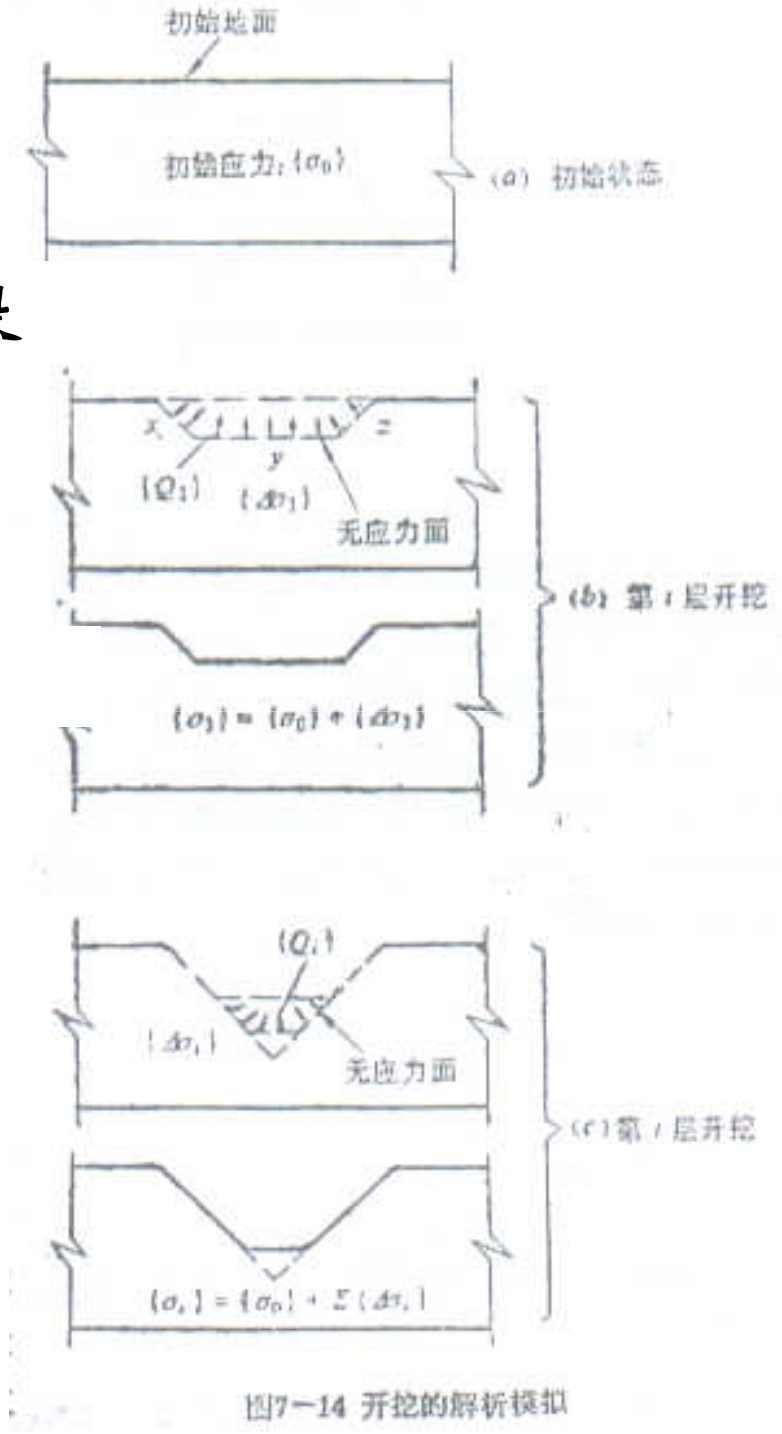


图7—14 开挖的解析模拟

初始地应力场和隧道（隧洞）开挖效应

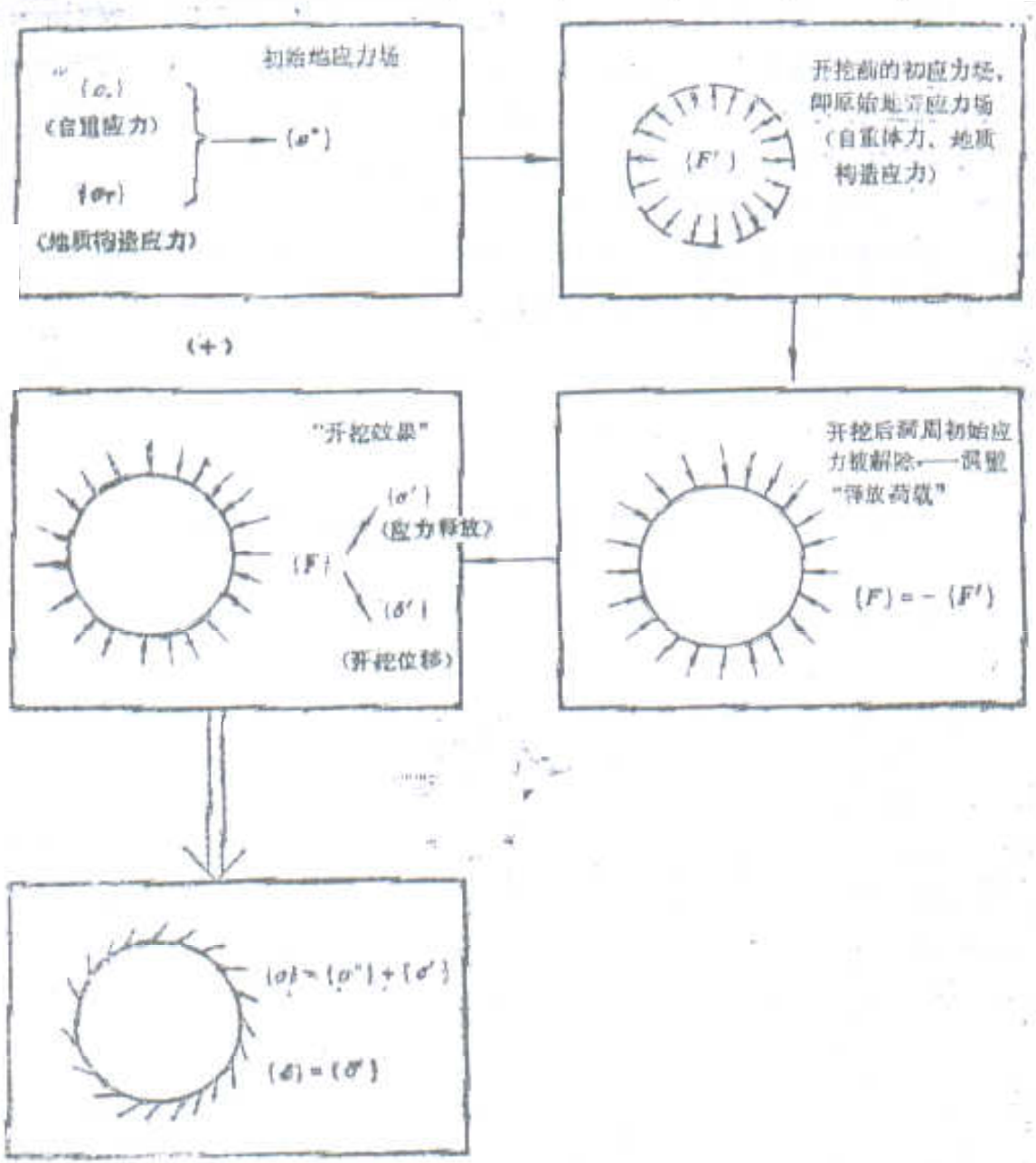
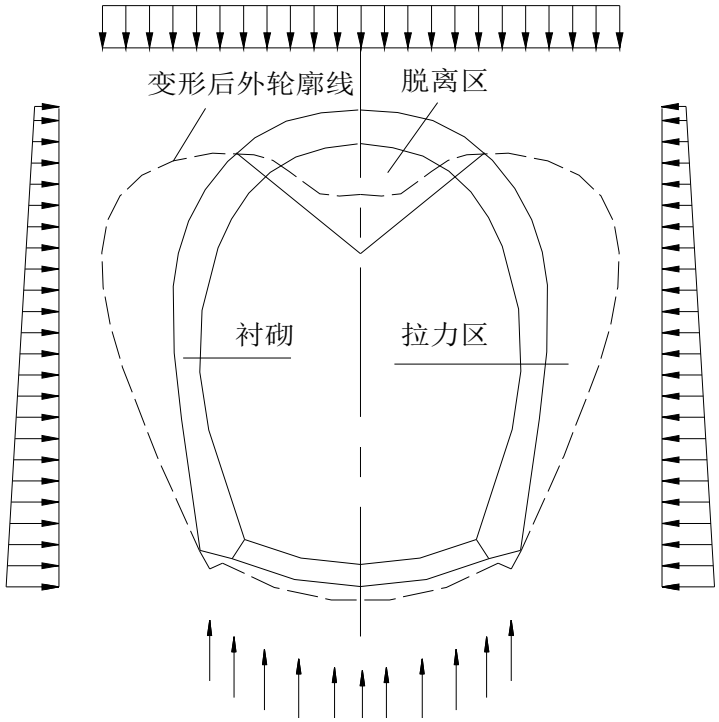


图7-17 隧洞开挖后的应力重分布及二次应力场、位移场

2.5 地层弹性抗力

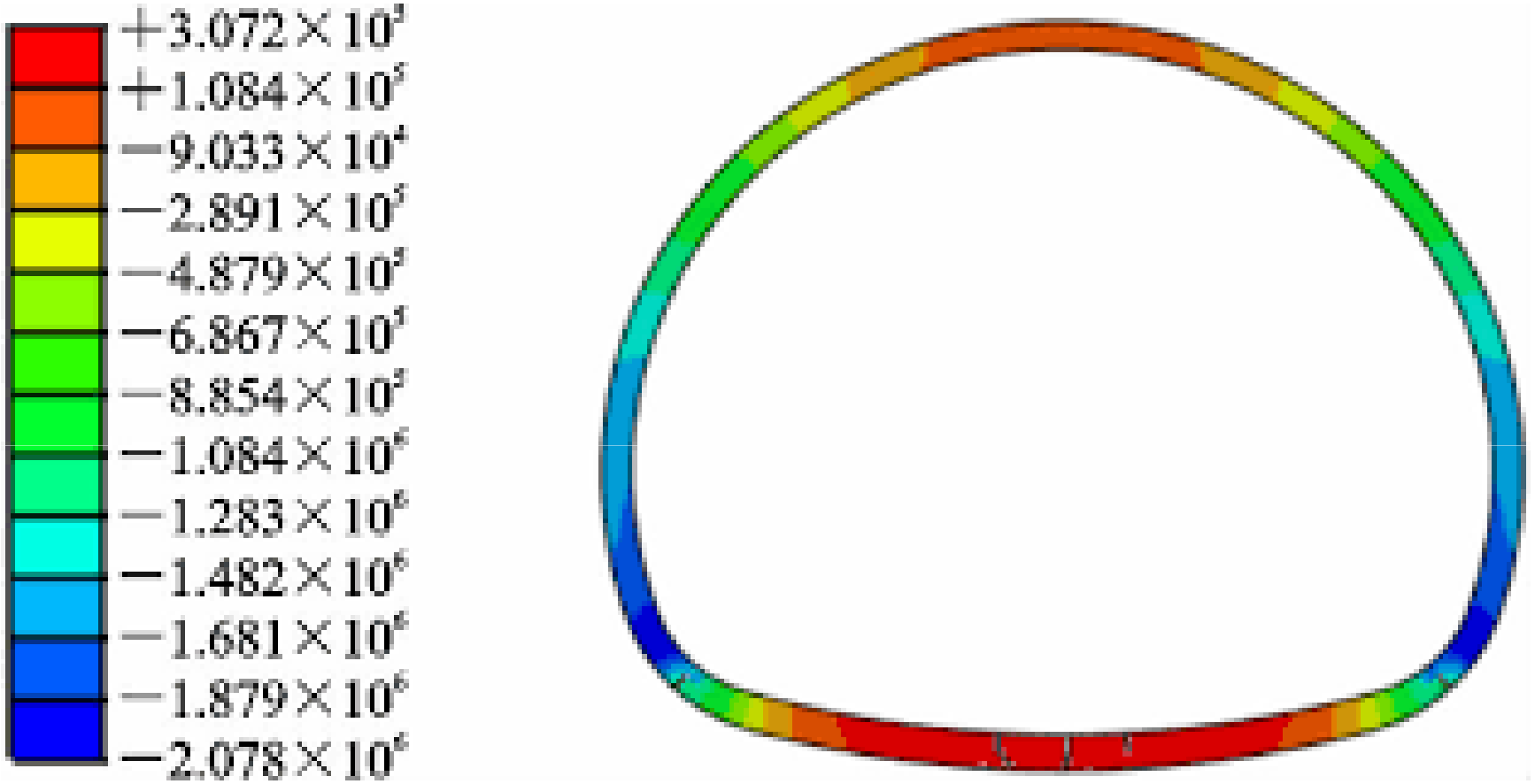
结构在主动荷载作用下，要产生变形。以隧道工程为例，如图2.25所示的曲墙拱形结构，在主动荷载（垂直荷载大于水平荷载）作用下，产生的变形如虚线所示



（被动荷载）

P43

图2.25 衬砌结构在外力作用下的变形规律



大断面隧道仰拱底鼓破坏模式

弹性抗力大小和分布规律不仅决定于结构的变形，还与地层的物理力学性质有着密切的关系。
计算理论：一种是局部变形理论，认为弹性地基某点上施加的外力只会引起该点的沉陷；另一种是共同变形理论，

在局部变形理论中，以熟知的温克尔（Winkler）假设为基础，认为地层的弹性抗力与结构变位成正比，即

$$\sigma = K\delta \tag{2-105}$$

σ 弹性抗力强度（kPa）
K 弹性抗力系数（kN/m^3）
δ 岩土体计算点的位移值（m）

对于各种地下结构和不同介质，弹性抗力系数 K 值不同，可根据工程实践经验或参考相关规范确定。

2.6 结构自重及其它荷载

直杆等最容易计算，拱圈计算烦一些，如下：

（一）将衬砌结构自重简化为垂直均布荷载

当拱圈截面为等截面拱时，结构自重荷载为：

$$q = \gamma d$$

γ 材料容重 (kN/m³)

d 拱顶截面厚变

（二）将结构自重简化为垂直均布荷载和三角形荷载

如图2.26所示，当拱圈为变截面拱时，结构自重荷载可选用如下三个近似公式

$$\begin{cases} q = \gamma d_0 \\ \Delta q = \gamma (d_j - d_0) \end{cases} \qquad \begin{cases} q = \gamma d_0 \\ \Delta q = \gamma \left(\dfrac{d_j}{\cos \phi_j} - d_0 \right) \end{cases} \qquad \begin{cases} q = \gamma d_0 \\ \Delta q = \dfrac{(d_0 + d_j)\phi_j - 2 d_0 \sin \phi_j}{\sin \phi_j} \gamma \end{cases}$$

地下建筑结构除了岩土层压力、结构自重和弹性抗力等荷载外，还可能遇到其他形式的荷载，如灌浆压力、混凝土收缩应力、地下静水压力、温差应力及地震荷载等，这些荷载的计算可参阅有关文献。

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