

# 高等土力学

## (Advanced Soil Mechanics)

### 第三章 土的力学特性

邓岳保

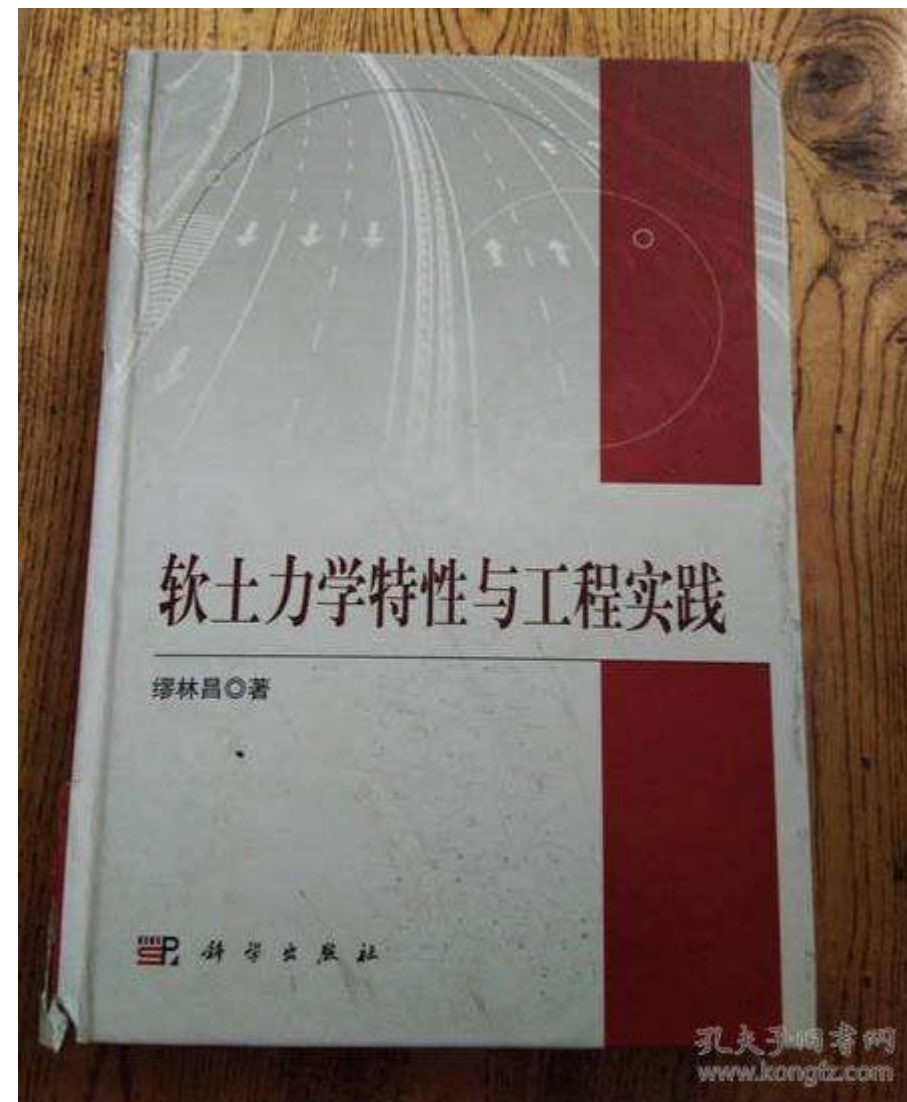
宁波大学岩土工程研究所

## 第三章 土的力学特性

3.1 应力与应变

3.2 土的应力应变特性

3.3 考虑温度的土体力学特性



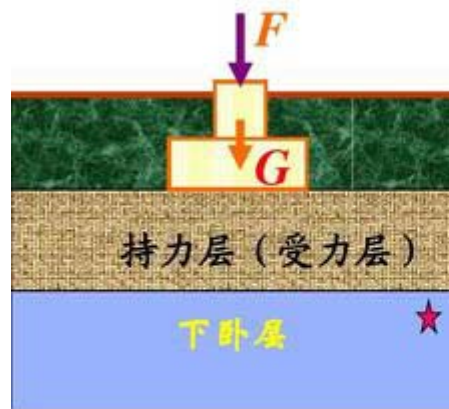
土的力学特性，是指土体在力（应力）作用下的变形过程特点，或应力应变关系。土的力学特性研究是建立土的本构理论的基础，而本构理论的研究又进一步深化对土的力学性质的认识。土的力学特性很多，例如压硬性、剪胀性、非线性、流变性性、各向异性等等。实际上，除了应力引起土体变形，温度也对土体变形产生影响。对此，本章首先介绍土中应力和应变，然后介绍常温下的应力应变特性，最后对考虑温度效应的力学特性进行介绍。



### 3.1 应力与应变

#### 3.1.1 土中应力

#### 3.1.2 土体应变

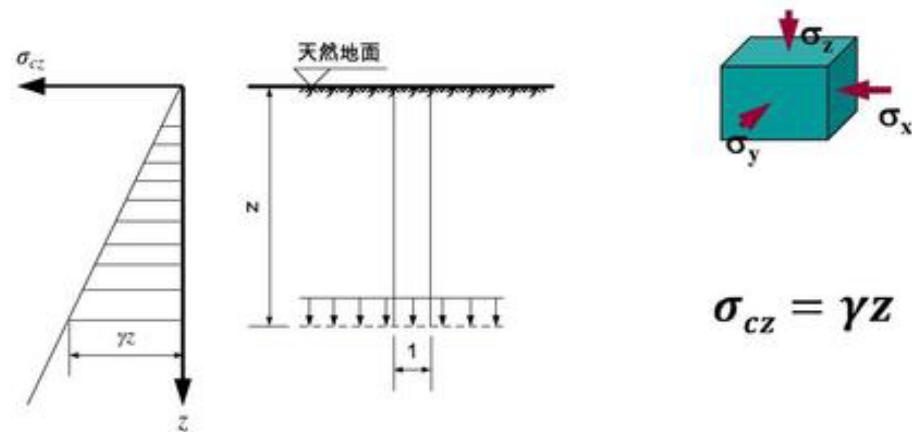
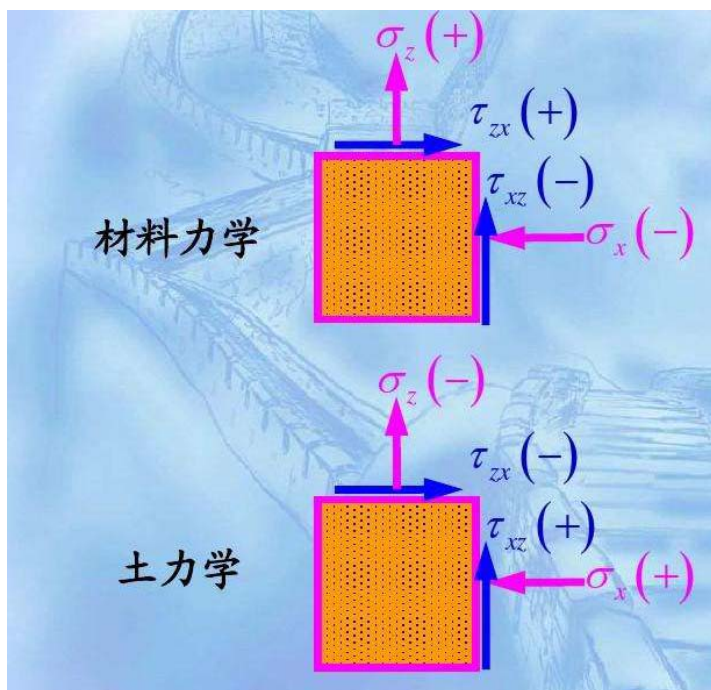


自重应力(overburden stress)

附加应力(additional stress)

有效应力: (effective stress)

孔隙应力(pore stress)

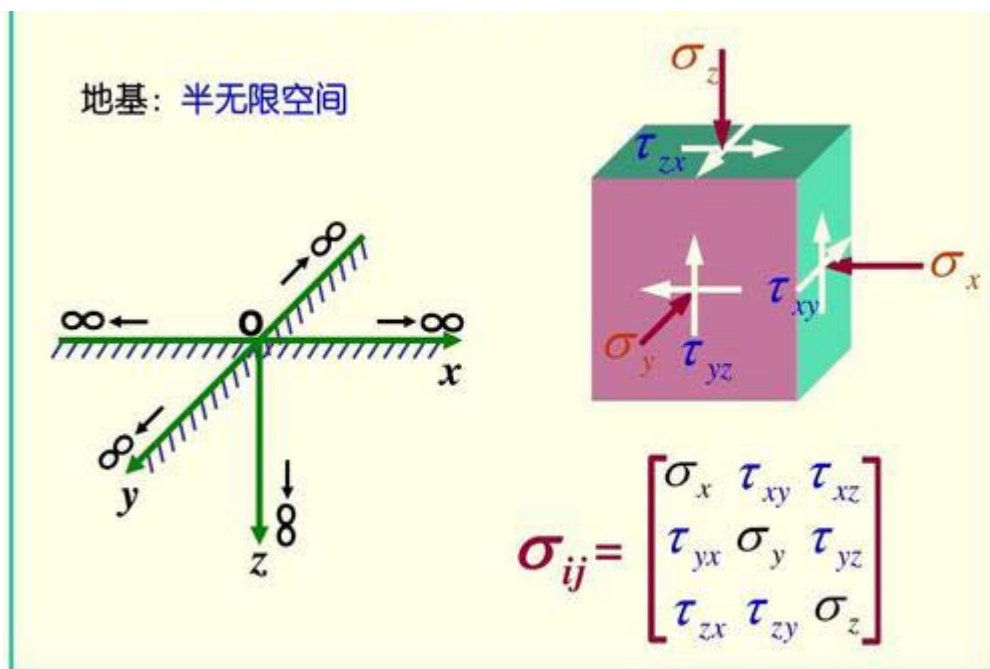


$$\sigma_{cz} = \gamma Z$$

### 3.1.1 土中应力

#### (1) 应力分量和应力张量

土体中一点M (x, y, z) 的应力状态可以用通过该点的微小立方体上的应力分量表示。这个立方体的六个面上作用着九个应力分量：



$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix}$$

应力张量  $\sigma_{ij}$  可以分解为一个各方向应力相等的球应力张量和一个偏应力张量：

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_n & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_n & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_n & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma_n & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \sigma_n \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

其中球应力张量表示为：

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk} = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3-4)$$

偏应力张量表示为：

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_u \delta_{ij} \quad , \quad \delta_{ij} = \begin{cases} =0 & i \neq j \\ =1 & i = j \end{cases} \quad (3-5)$$

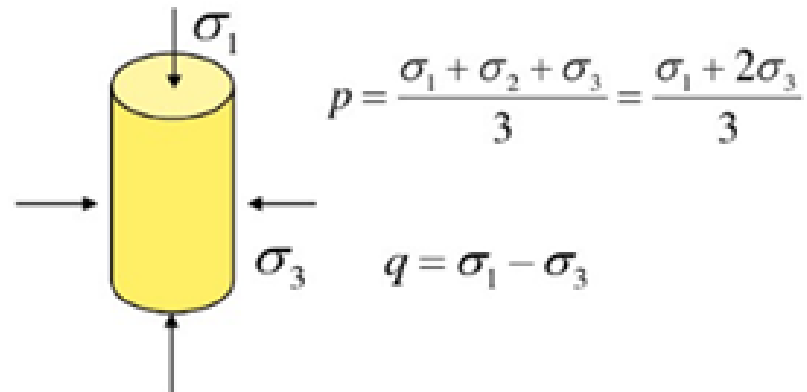
在土力学中常用另外两个应力不变量 $p$ 与 $q$ 。其中， $p$ 为平均主应力：

$$p = \sigma_{aa} = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3-6)$$

$q$ 称为广义剪应力（或等效剪应力）：

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{aa} = \sqrt{3J_2} \quad (3-7)$$

有时也将 $p$ 、 $q$ 分别称为八面体正应力和八面体剪应力。实际上 $q$ 并不是某一具体平面上的剪应力，它只是为了在土力学中表达方便而引入的一个表达式。因为在单轴与三轴压缩的情况下， $q = \sigma$  或者  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ，这是很便利的。



## (2) 应力空间与应力洛德角

所谓主应力空间就是以三个主应力为坐标轴，用应力，如kPa为度量尺度形成的一个空间。在此空间中的一个点P代表一个应力状态 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ （压应力为正）；此空间中的一条线表示了一条应力路径，也就是应力状态连续变化在应力空间形成的轨迹，应力路径可以在不同应力空间或应力平面中表示。

罗德参数 $\mu_\sigma$ ，其定义为：

$$\mu_\sigma = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (3-8)$$

若 $\sigma_2 = \sigma_1$ ， $\mu_\sigma = 1$ ；若 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ ， $\mu_\sigma = 0$ ；若 $\sigma_2 = \sigma_3$ ， $\mu_\sigma = -1$

罗德角 $\theta_\sigma$ 。它是根据应力在 $\pi$ 面（主应力空间内与三坐标轴 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 交角相等的平面）上的位置所确定的角度，与 $\mu_\sigma$ 有如下关系：

$$\theta_\sigma = \operatorname{arctg} \frac{\mu_\sigma}{\sqrt{3}} \quad (3-9)$$

它的变化范围为  $-\pi/6 \sim \pi/6$ 。

毕肖甫（Bishop）参数 $b$ ，其定义为：

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (3-10)$$

当 $\sigma_2 = \sigma_1$ ， $b = 1$ ； $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ ， $b = 1/2$ ； $\sigma_2 = \sigma_3$ ， $b = 0$ 。参数 $b$ 最初出现在 Bishop 的文章中，后来岩土力学文献中广泛使用；它比 $\mu_\sigma$ 更为简单明确。

### 3.1.2 土体应变

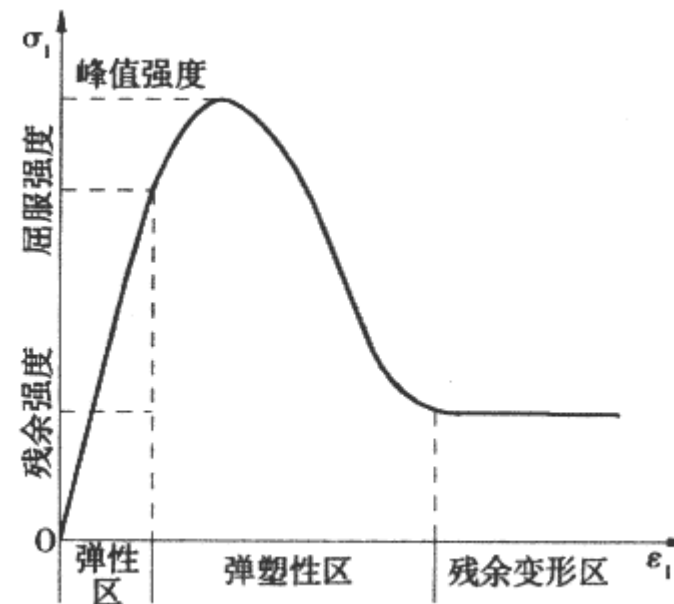
#### (1) 应变张量

与应力一样，一点的应变状态可以用一个二阶的张量——应变张量来表示：

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

由于应变与位移间存在如下关系：

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$



## (2) 球应变张量和偏应变张量

应变张量可分为球张量和偏张量，即：

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_r}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\varepsilon_r}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\varepsilon_v}{3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} - \frac{\varepsilon_r}{3} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} - \frac{\varepsilon_v}{3} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} - \frac{\varepsilon_r}{3} \end{bmatrix}$$

与 $q$ 相对应的偏应变，或称广义剪应变，或等效应变，或应变强度，为：

$$\varepsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (3-11)$$

$\varepsilon_s$ 表示复杂受力状态下的剪切变形。对轴对称三轴试样的变形

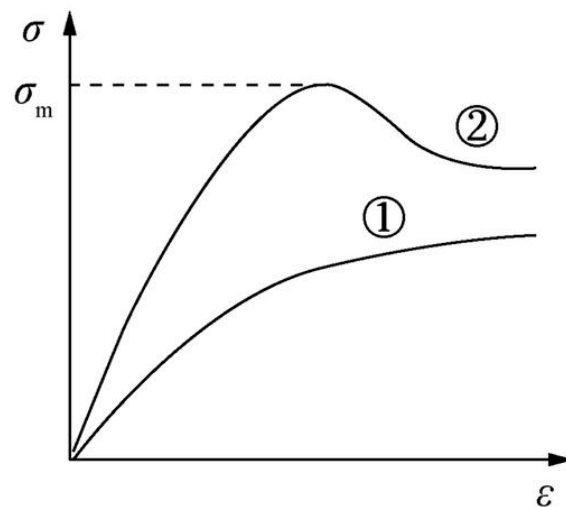
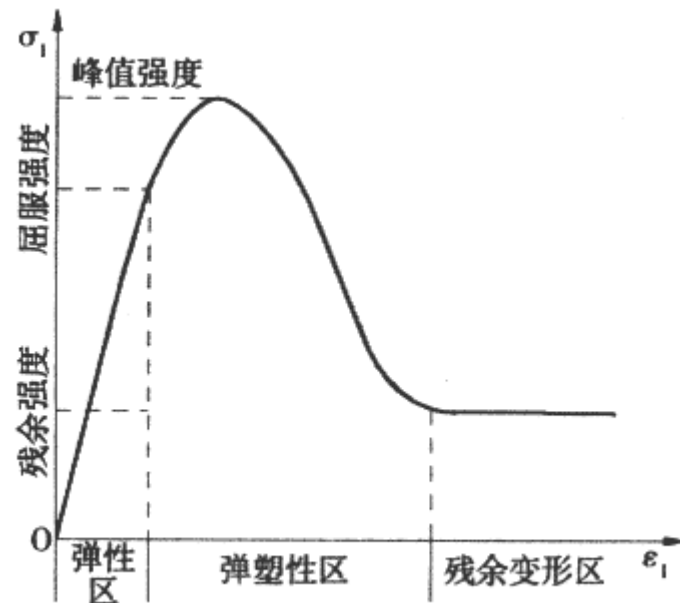
$$\varepsilon_s = \varepsilon_a - \frac{\varepsilon_v}{3} \quad (3-12)$$

通过试验可点绘出剪应变 $\varepsilon_s$ 随球应力 $p$ 减小而增加的关系曲线。当 $x, y, z$ 方向与主应变方向重合时，只有三个主应变  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 和  $\varepsilon_3$ ，对应有三个偏主应变：

$$e_1 = \varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_v}{3}, e_2 = \varepsilon_2 - \frac{\varepsilon_v}{3}, e_3 = \varepsilon_3 - \frac{\varepsilon_v}{3} \quad (3-13)$$

## 3.2 土的应力应变特性

- 3.2.1 非线性和非弹性
- 3.2.2 塑性体积应变和剪胀性
- 3.2.3 塑性剪应变
- 3.2.4 硬化和软化
- 3.2.5 应力路径和应力历史对变形的影响
- 3.2.6 中主应力对变形的影响
- 3.2.7 固结压力的影响
- 3.2.8 各向异性
- 3.2.9 流变性



### 3.2.1 非线性和非弹性

金属和混凝土等坚硬材料，在受轴向拉压时，应力—应变关系如图3.1 (a) 所示。图3.1 (b) 为土的三轴试验得出的轴向应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与轴向应变 $\epsilon_a$ 之间的关系曲线，土体的非线性变形特性比其他材料明显得多。这种非线性变化的产生，就是因为除弹性变形以外还出现了不可恢复的塑性变形。土体是松散介质，受力后颗粒之间的位置调整在荷载卸除后，不能恢复，形成较大的塑性变形。如果加荷到某一应力后再卸荷，曲线将如图3.2所示。

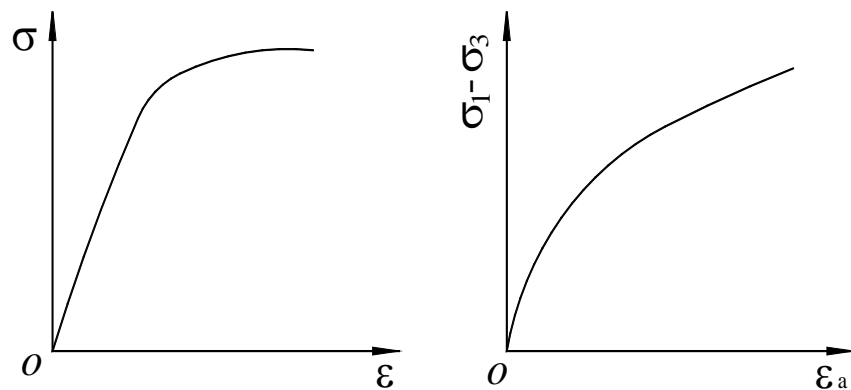


图 3.1 应力—应变关系 (a) 金属；(b) 土体

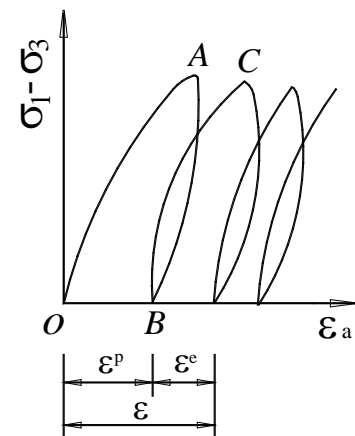


图 3.2 加荷与卸荷的应力应变关系

### 3.2.2 塑性体积应变和剪胀性

库仑摩擦定律是有关压硬性的最早表述，Hvorslev把这一定律推广用于粘性土。至于模量方面，Janbu公式是有关压硬性的最明确的体现：

$$E_i = K Pa(\sigma_3/Pa)^n \quad (3-14)$$

式中：K和n为常数； $\sigma_3$ 为围压。在土力学的理论和实践中，人们无不自觉或不自觉地应用土的这一基本特性。软土的排水固结就是明显的例证，粘土孔隙压力研究的最终目的无非就是为了判断有效压应力可能增加多少。许多工程的成功和失败正是与是否正确运用这一特性有关。例如，软粘土上填土要求慢速施工，硬粘土中开挖则要求快速施工和及时回填。

土体受力后会有明显的塑性体积变形。图3.3为土样在三轴仪中逐步施加各向相等的压力 $p$ 后，再卸除，所得到的 $p$ 与体积应变 $\varepsilon_v$ 之间的关系曲线。可见存在不可恢复的塑性体积应变 $\varepsilon_{pv}$ ，而且它往往比弹性体积应变更大。图3.4可说明这种变形机理。压缩前，颗粒架空，存在较大孔隙；压缩后，有些颗粒挤入原来的孔隙中，颗粒错动，相对位置调整，颗粒间发生着剪切位移。当荷载卸除后，无法恢复到原来的体积，就形成较大的塑性体积变形。

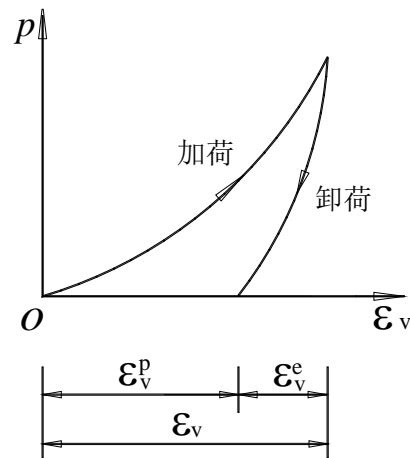


图 3.3  $p$ - $\varepsilon_v$  曲线

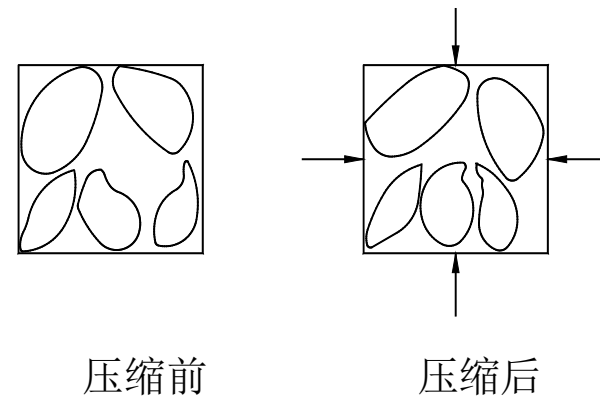
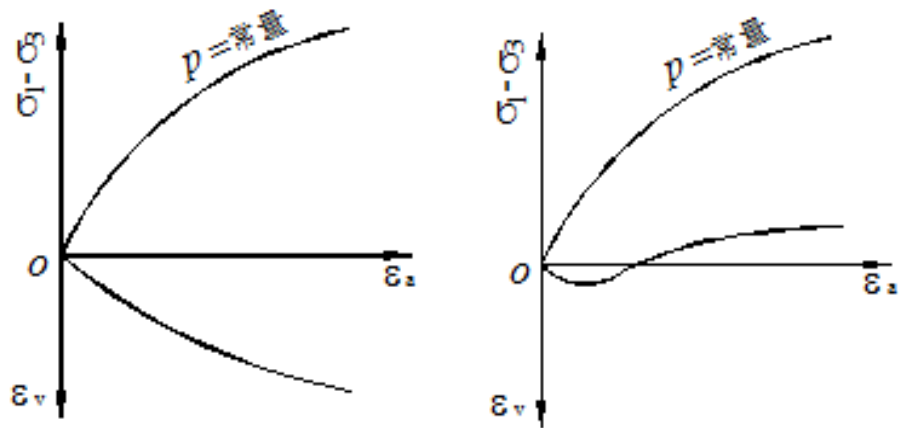


图 3.4 土体的压缩

不仅压力会引起塑性体积变形，而且剪切也会引起塑性体积变形。在三轴仪中对土样施加偏压力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 的同时，减小围压  $\sigma_3$ ，而保持平均法向应力（球应力） $p$  不变。应力—应变曲线如图3.5。尽管体积应力  $p$  不变，但仍有体积应变，可见测得的体积应变完全是剪切造成的。在图3.5 (a) 中，体积应变  $\varepsilon_v$  随偏应力  $\sigma_1 - \sigma_3$  增大而增大。剪切引起的体积收缩，叫剪缩。软土和松砂表现为剪缩。在图3.5 (b) 中，开始阶段为剪缩，以后曲线向上弯曲，即体积膨胀，这种现象叫做剪胀。紧密砂土，超固结粘土，常表现为剪胀。剪切引起的体积变化，不管膨胀还是收缩，都称为**剪胀性**，剪缩是负的剪胀。剪胀性是散粒体的一个非常重要的特性。

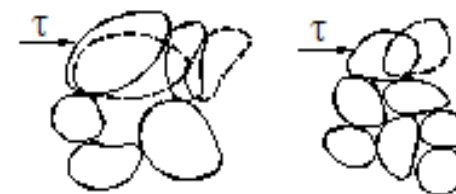
砂土受剪所产生体积变形用图3.6来说明。对于松砂，受剪后某些颗粒填入原来的孔隙，体积减小；对于密砂，原来的孔隙体积较小，受剪时一些颗粒必须上抬才能绕过前面的颗粒产生错动滑移，于是体积膨胀。剪切引起的体积变形与颗粒的错动相关联，当荷载卸除后，便不能恢复，应看作塑性体积变化，另外，根据虎克定律，剪应力不引起弹性体积变形。因此，剪切所引起的体积变形也只能认为全部是塑性变形。



(a) 剪缩

(b) 剪胀

图 3.5 剪切引起的体积应变



(a) 松砂

(b) 密砂

图 3.6 松砂和密砂的剪胀性

### 3.2.3 塑性剪应变

三轴试验中应力变化可以用 $q$ - $p$ 坐标系中的应力路径来表示。这里 $p$ 为球应力； $q$ 为偏应力，或广义剪应力。前面讲到，作用各向相等的球应力，也会引起颗粒间的相对错动滑移。如果初始应力是各向相等的，即不存在初始剪应力，这种微观的错动滑移在各方向是均匀的，宏观上便没有剪应变。如果土体存在初始剪应力，则施加各向相等的正应力增量时，微观错动在各方向上是不均匀的，宏观上就表现为剪应变。这种由球应力引起的剪应变显然是一种不可恢复的塑性变形。对于弹性材料，根据虎克定律，剪应力不引起体积应变，体积应力不引起剪应变。即不存在所谓“交叉影响”。土体却具有这种“交叉影响”，而且往往相当可观，不可忽视。这种“交叉影响”自然要反映到应力—应变关系上。



三轴仪

### 3.2.4 硬化和软化

三轴试验测得的轴向应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与轴向应变的关系曲线有两种形态。图3.7 (a)所示曲线有一直上升的趋势直至破坏，这种形状的应力应变关系叫**硬化型**。软土和松砂表现为这种形态；图3.7 (b)所示曲线前面部分是上升的，应力达到某一峰值后转为下降曲线，即应力在降低，而应变却在增加，这种形态叫做**软化型**。紧密砂和超压密粘土表现为这种形态。另外， $q - \varepsilon_s$  曲线和 $\tau - \gamma$ 关系曲线也有硬化和软化的区别。

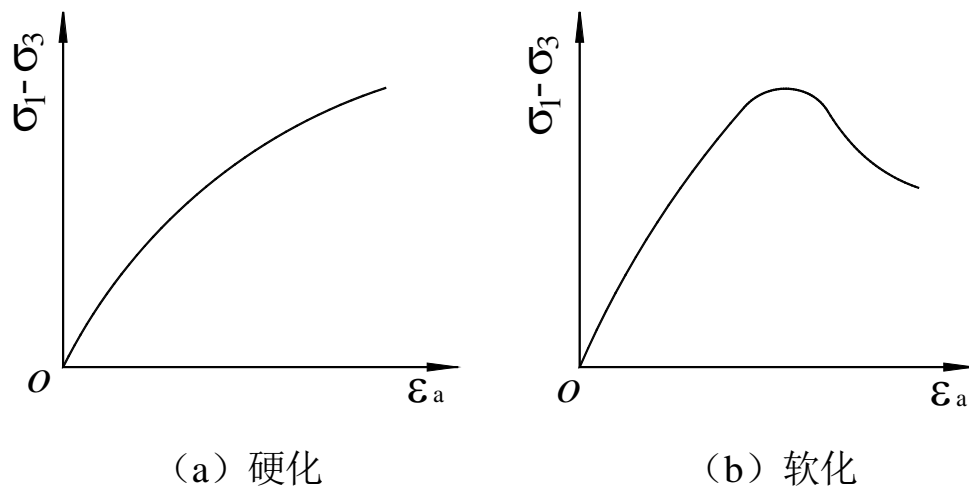


图 3.7 硬化和软化

密砂受剪时，由于颗粒排列紧密，一部分颗粒要滚过另一部分颗粒而产生相对错动，须克服较大的“咬合”作用力，故表现为较高的抗剪强度。而一旦一部分颗粒绕过了另一部分颗粒，结构便变松，抗剪能力减小了，因而表现为软化。超固结粘土剪切破坏后结构凝聚力丧失，也降低强度，表现为软化。对于松砂和软土，剪切过程中结构变得紧密，一般表现为剪缩，因而强度也在提高，呈现硬化特性。硬化和软化与剪缩和剪胀，常有一定联系，但也不是必然联系，软化类型的土往往是剪胀的，剪胀土未必都是软化的。

### 3.2.5 应力路径和应力历史对变形的影响

土体内一点的应力状态可以用三个主应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 来表示。以三个主应力为坐标轴构成一个直角坐标系，叫应力空间。这个空间的一点有三个坐标值，代表某种应力状态。图3.8中的A代表了应力状态 $\sigma_{1A}$ 、 $\sigma_{2A}$ 和 $\sigma_{3A}$ ，而B点表示了另一种应力状态 $\sigma_{1B}$ 、 $\sigma_{2B}$ 和 $\sigma_{3B}$ 。

设土体中一点的初始应力状态如应力空间内A点所示，受力后变化到B。从A到B，可以有各种方式，如 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 按比例增加；或初期 $\sigma_3$ 增加得多， $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 增加得少，而后期反过来；或者其他某种加荷方式。对于一种加荷方式，代表应力状态的点将从A沿某种轨迹移动到B，加荷过程中，应力空间内代表应力状态的点所移动得轨迹，叫应力路径。不同加荷方式可以用不同的应力路径来表示。

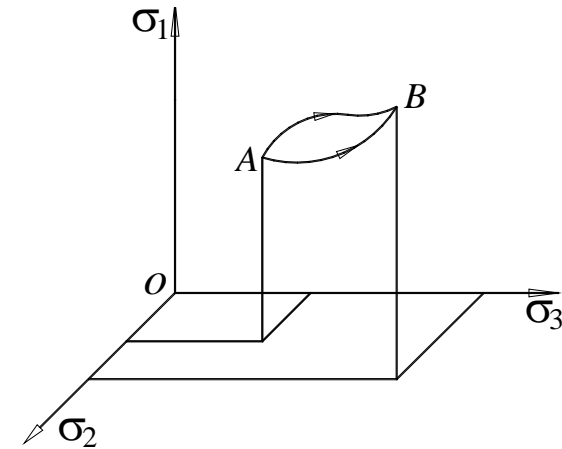


图 3.8 应力空间

图3.9 (a) 中，有两种应力路径：虚线AC表示排水试验得有效应力路径。实线ABC表示先做不排水试验，其有效应力路径为AB，达到接近破坏的B点后，排水固结，保持 $q$ 不变而 $p$ 增加，应力路径为BC。两种应力路径初始和终了应力状态相同，两种路径所对的轴向应变见图3.9 (b)。对于实线，因B点接近破坏线，必然产生较大得轴向应变，因此最终必然较大如图3.9 (b) 中的ABC线所示。反之因虚线远离破坏线，其轴向应变必然较小，如图3.9 (b) 中的AC' 线所示。应力路径对变形的影响是不可忽视的。

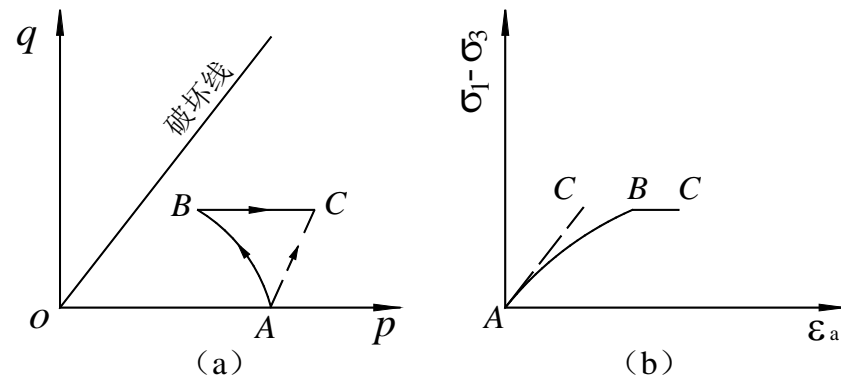


图 3.9 应力路径对变形的影响

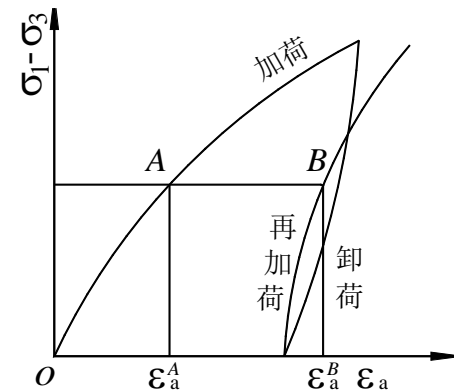


图 3.10 应力历史对变形的影响

应力路径的影响举例：快速打桩与缓慢打桩，前者施工顺畅，后者施工难，因此打桩时建议一气呵成。快速打桩与缓慢打桩对地基边坡的影响；前者使得超静孔压上升，平均有效应力减小，剪切应力增大，接近破坏状态；后者因为孔压及时消散，超静孔压上升没有那么明显，远离破坏线。

应力历史，是指历史上的应力路径。由于塑性变形不可恢复，历史上发生的变形将保存和积累起来。图3.10中，A、B两点具有相同的应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ ，然而A点处于初始加荷曲线上，B点处于再加荷曲线上，两点对应不同的 $\varepsilon_a$ ，它们所处应力-应变关系曲线的斜率也不同。如果施加同样的荷载增量，则对应A状态的土体应变增量，而对应B状态的土体应变增量小。因A、B两点有着不同的应力历史，加荷后就有不同的变形。超固结土比正常固结土变形小，也是这个缘故。



### 3.2.6中主应力对变形的影响

中主应力对土体变形有明显影响。首先，中主应力的变化会影响到土的抗剪强度。试验表明，土在 $\sigma_2 > \sigma_3$ 时抗剪强度比 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时的强度大。平面应变试验所测得的 $\phi$ 一般比三轴试验测得的 $\phi$ 高 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。对于相同的 $\sigma_3$ ，平面应变条件下的最大偏应力，即破坏摩尔圆直径 $(\sigma_1 - \sigma_3) f$ 比轴对称条件下的值大，而破坏时的轴向应变 $\varepsilon_a$ 相近。因此，平面变形条件下的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线必然比散伙走试验时的曲线陡。图3.11中可见，对于同一 $\sigma_3$ ，平面应变试验所测得的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线总是在三轴试验相应曲线的上方，就是由于强度提高了的缘故。另一方面，关于 $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 曲线，图中的平面应变试验结果却在三轴试验结果的下方。在 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 相同条件下，平面应变试验比三轴试验 $\sigma_2$ 大。因此 $p$ 大， $q$ 小，对于剪缩型不大的土， $p$ 的增大对 $\varepsilon_v$ 起主要作用，因此图中平面应变的 $\varepsilon_v$ 较大。如果土体的剪缩性很显著， $q$ 对体积应变的影响成为主要因素，则也有可能出现相反情况。

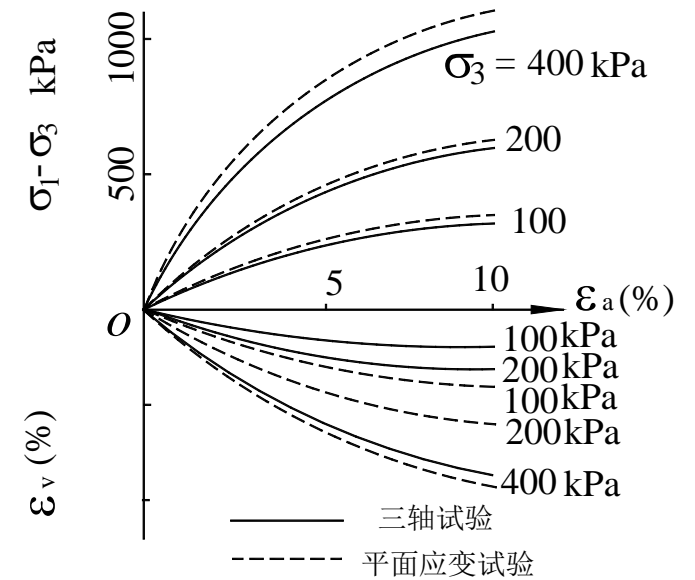


图 3.11 三轴试验和平面应变试验应力—应变关系曲线

中主应力还会改变应力—应变曲线的软化或硬化的形态。图3.12为真三轴仪对砂土所做不同 $b$ 值下的应力—应变试验曲线，当 $b=0$  ( $\sigma_2=\sigma_3$ ) 时， $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_a$ 曲线没有明显的峰值，基本上呈硬化型；但当 $b=0.5$ 时，曲线呈软化型，有明显的峰值；当 $b=1.0$ 时，软化特性更明显，随着 $b$ 的增加材料的破坏更接近脆性破坏，对于 $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ 曲线，随着 $b$ 的增加，体积压缩量增大，而剪胀量减小，这是 $p$ 增加的缘故。

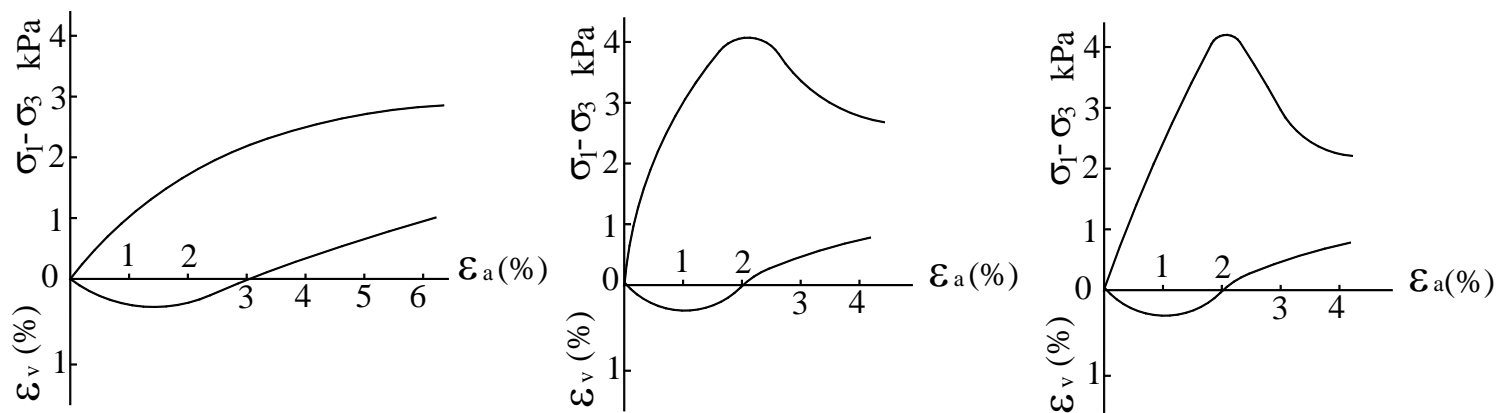


图 3.12 中主应力对应力—应变的影响

### 3.2.7 固结压力的影响

固结压力对土体力学特性的影响显著。

① 强度包线不呈直线，而是呈向下的微弯曲线，如图3.13。这表示有效强度指标  $\phi$  随固结压力的增加而降低，为反映这种变化，可用折线代替曲线，即在不同的压力范围用不同的强度指标（压力低于  $\sigma_A$  用  $\phi_1$ ，高于用  $\phi_2$ ，如图），另一种方法是将  $\phi$  表示成固结压力的函数，常用下式：

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \frac{\sigma_3}{p_a} \quad (3-15)$$

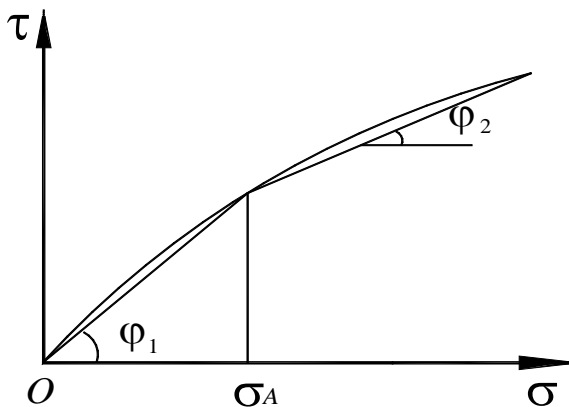


图 3.13 抗剪强度随法向应力的变化

②土的剪胀剪缩性，如紧密砂等，低压状态下，受剪时体积会膨胀，而在高压状态下，则会表现为剪缩性，图3.14为常见的 $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 曲线形态。

③低压软化，高压硬化。在高压下通常 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线是硬化型的，如图3.14所示。

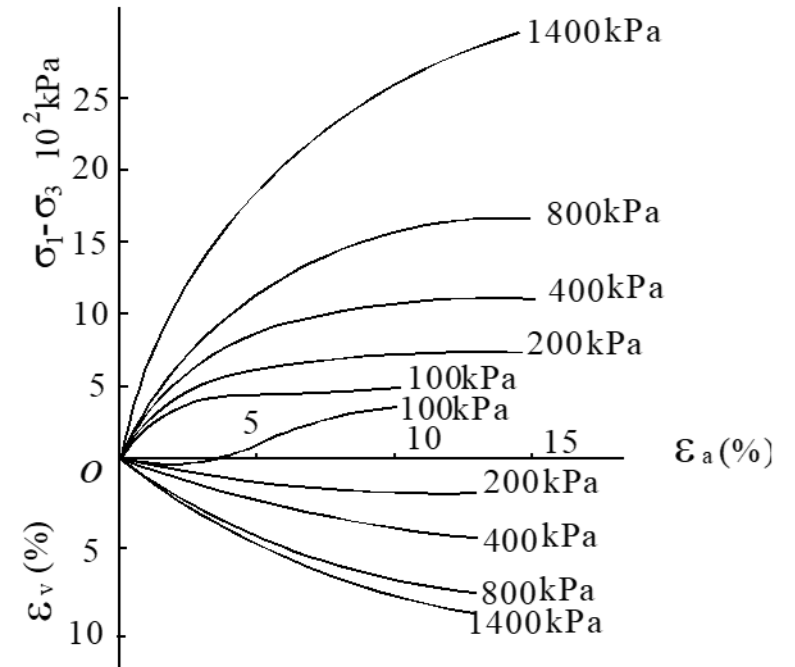


图 3.14 不同围压下的应力—应变关系

### 3.2.8 各向异性

地基土一般是水平向成层。水平和竖直方向土的结构存在差异，使土体在许多方面表现为各向异性。应力—应变关系也不例外，这种叫原生各向异性，此外，各向应力状态不同还能引起新得各向异性。如重塑土，本来不存在土体结构上的两向差异，但只要各向应力不等，在应力—应变关系上就会表现为各向异性，这种情况更具有普遍性。如图3.15，状态A对应的摩尔圆比原来的扩大了，更接近破坏线，而状态B则相反，摩尔圆比原来的缩小了，且远离破坏线。实际举例：某土层土体（竖向应力大于侧向压力），从竖向加压与侧向加压，土体的变形大小不同。竖向加压，变形大；侧向加压，变形小。

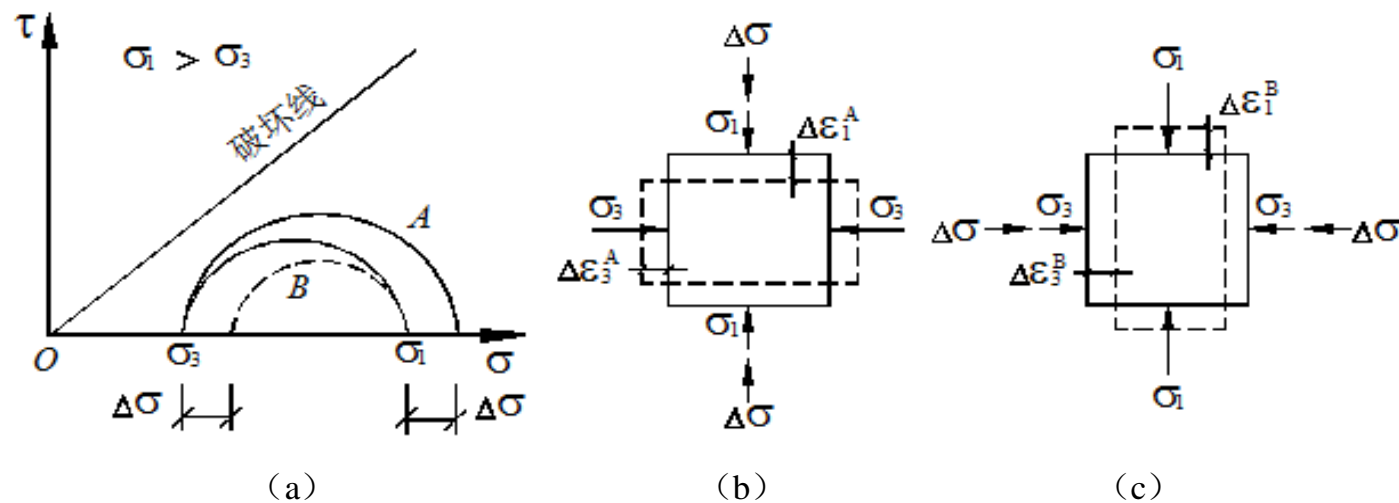


图 3.15 应力引起的各向异性

### 3.2.9 流变性

土体变形与应力和时间有关的现象称为土体的流变现象。比萨斜塔的不断倾斜大概是土体流变性的最著名例子。土的流变机理在于：在骨架应力（有效应力）作用下，土颗粒表面吸附水（气）具有粘滞性，从而使颗粒的重新排列和骨架体的错动具有时间效应，土体变形延迟，即变形与时间有关；而另一方面土体变形受到边界约束，这种约束有阻挡蠕变变形发展趋势，因此土体内部应力随之逐步调整，即应力也与时间有关。

在工程实践中，土体的流变现象主要包括：（1）蠕变——即恒定应力作用下变形随时间增长的现象。（2）松弛——即恒定变形的情况下应力随时间衰变的现象。（3）流动——即给定的时间的变形的速率随应力变化的现象。（4）长期强度随受荷历史变化的现象。

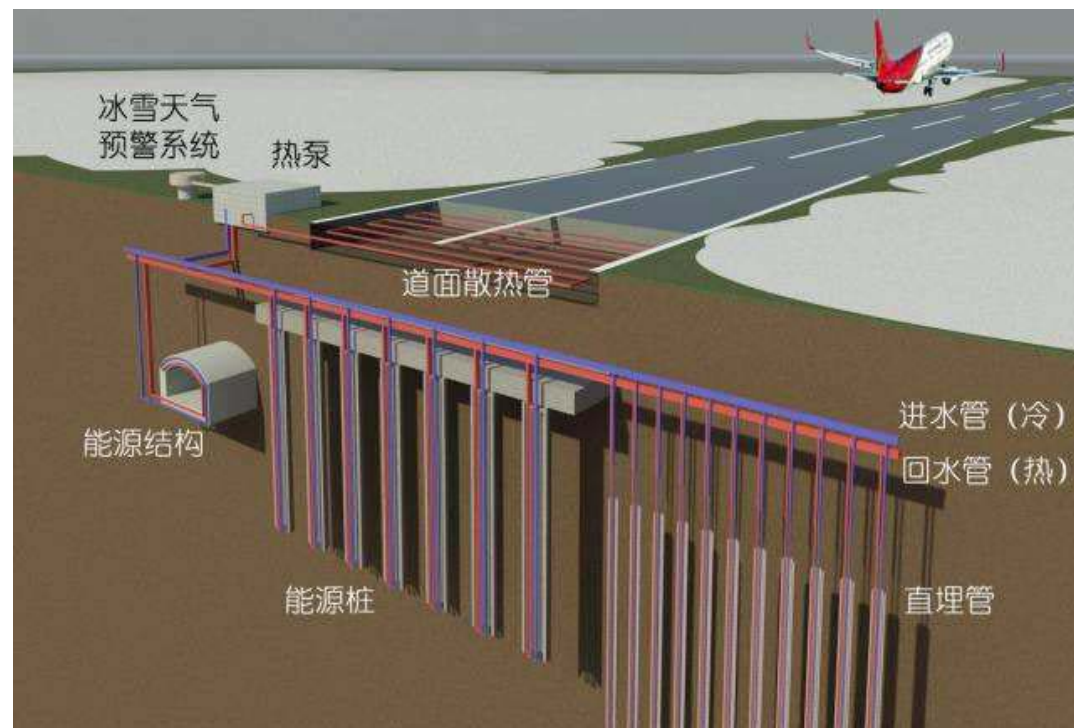
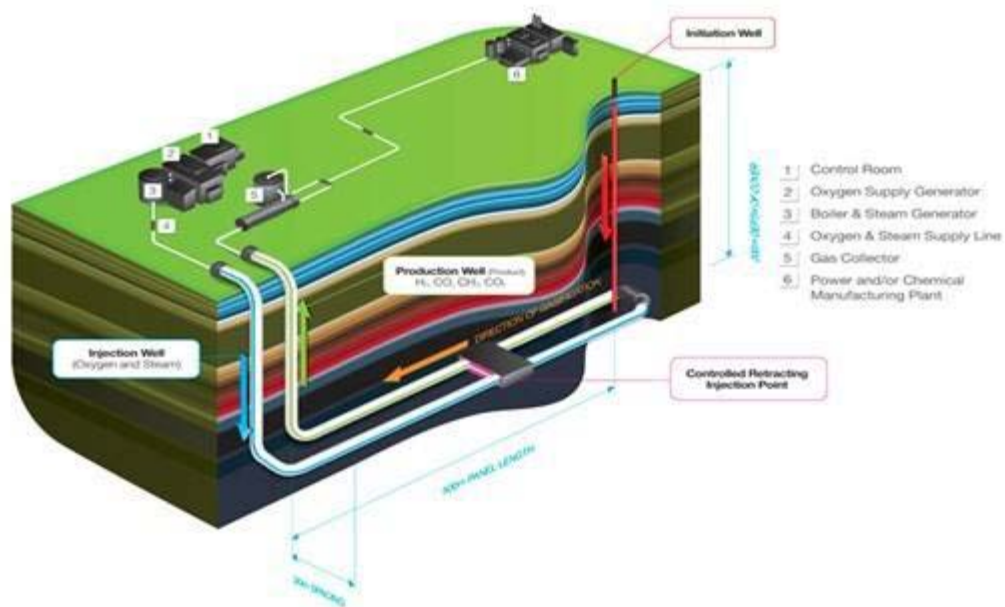
土力学中常把流变分成固结流变和剪切流变，前者又称次固结（属于蠕变）。在沉降分析中主要考虑土体受压时的固结流变特性，强度问题则主要研究土体受剪时的流变特性。土体的流变模型是对土体荷载作用下应力-应变-时间的数学描述。在长期的研究工作中研究者提出了多种流变本构模型，包括：元件模型、屈服面模型、损伤流变模型和经验模型。

### 3.2 考虑温度的土体力学性质

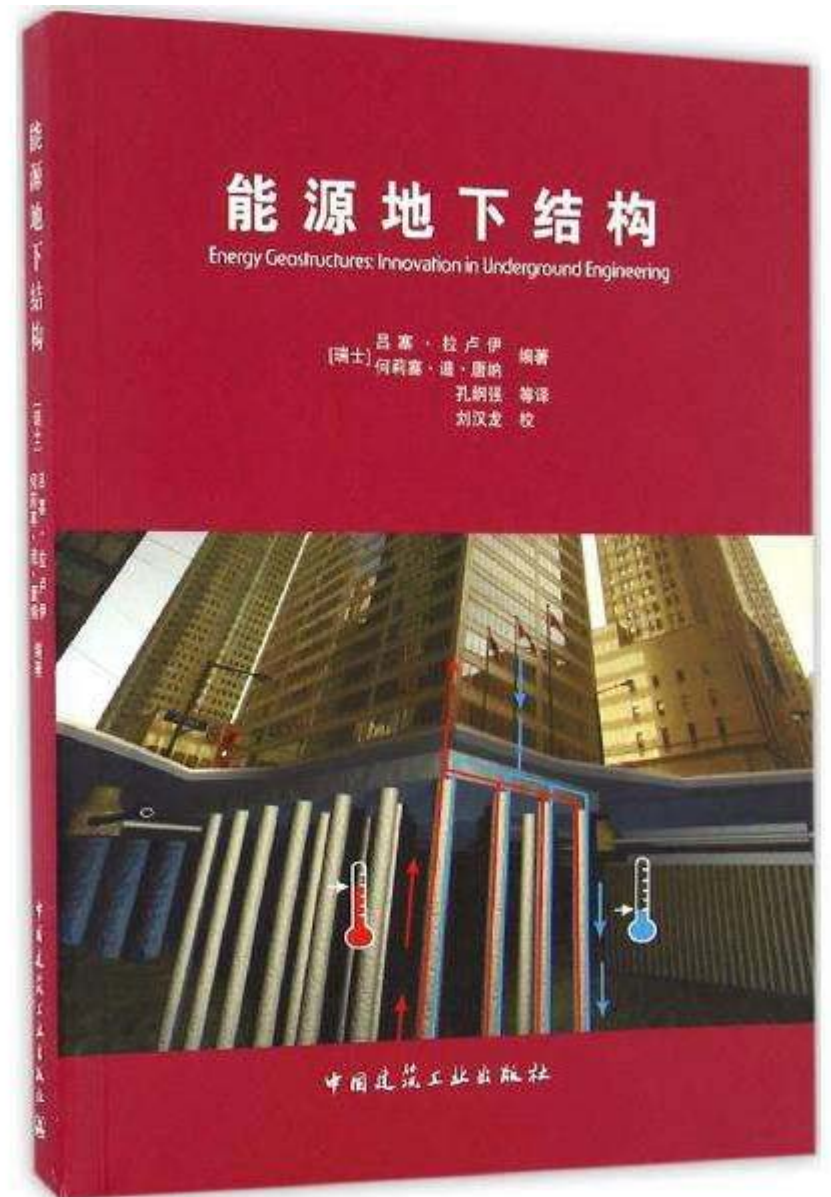
3.3.1 温度对土体渗透特性的影响

3.3.2 温度对土体压缩特性的影响

3.3.3 温度对土体强度特性的影响



随着能源与环境岩土工程的逐渐发展，土体力学特性的温度效应研究引起越来越多的关注。现代岩土工程学已围绕土的温度效应开展了大量研究，可大致概括为如下几个方面。①温度对土的物质成分的影响。如：矿物成分变化、结合水和自由水的转换等；②温度对土的物理性质的影响。如：土的液塑限、水土相互作用以及渗透系数的变化等。③温度对土的力学性质的影响，包括固结和强度性状的影响。④耦合温度的土体本构模型以及在此基础上建立的热一流一力场三场耦合问题计算分析方法等。根据上述研究可以发现，土体温度效应主要是指温度对土体力学性质、物理性质的影响，包括土体渗透系数、孔隙比、先期固结压力以及固结特性等受温度变化的影响。



### 3.3.1 温度对土体渗透特性的影响

国外的研究者主要通过固结试验或者常水头渗透试验取得了不同温度下土样的渗透系数值，并对试验结果进行了分析。Cho等研究表明，温度对软黏土的渗透系数影响较大，随着温度的升高，渗透系数增大。Habibagahi通过试验研究得出：土体渗透性的增加是由于在温度恒定的状态下，土颗粒与自由水分子在渗流作用下逐渐排出，当水膜的厚度随着温度上升而减小以后，土体中的排水通道增大了。以上研究表明渗透系数的增大是因为温度的增加导致孔隙增大。而国内的研究者中，何俊等在黏土渗透性温度效应试验中得出结论显示，且渗透系数的对数与温度有较好的线性正关系。王先锋系统的阐述了温度对饱和土体工程性质的影响，指出升高温度会明显降低饱和土体的孔隙水粘滞系数，由此影响渗透系数。以上研究表明，温度增大，软黏土孔隙水粘滞系数减小，土体孔隙增大，综合导致渗透系数增大。



土的渗透破坏

### 3.3.2 温度对土体压缩特性的影响

#### (1) 加热对土体弹性变形的影响—瞬时沉降

Eriksson研究了不同温度下的软土固结压缩过程，得到如图3.16所示不同温度下的应力应变曲线。

斜率:  $C_c/V$       斜率:  $C_{cT}/V$

斜率:  $C_c/V$

斜率:  $C_{cT}/V$

图 3.16 加热温度对软土固结压缩的影响

基于该试验成果，可得下式：

$$\frac{C_{eT}}{C_e} = \frac{\lg(\sigma'_{y,T0}/\sigma'_0)}{\lg(\sigma'_{y,T}/\sigma'_0)} \quad (3-15)$$

式中： $s'_{y,T0}$ 为土体在常温下的屈服应力，对应于一维固结条件下的先期固结压力 $p_c$ ； $s'_{y,T}$ 为土体在升温下的屈服应力，对应于升温情况下土体表观先期固结压力 $p_{cT}$ 。 $s'_0$ 为土体当前竖向压力；对于正常固结土， $s'_0=s'_{y,T0}$ 。 $C_e$ 为常温下土体回弹指数（超固结段或回弹再压缩指数）； $C_{eT}$ 为 $T$ 温度下土体的回弹指数。根据 $e-\lg s'$ 与 $e-\ln s'$ 曲线关系，回弹参数 $k_T=C_{eT}/(\ln 10)$ 。

## (2) 加热对主固结的影响—固结沉降

① 加热对土体屈服极限影响。随着温度升高，土骨架结构受到冲击，其弹性变形范围缩小，土体更容易屈服：

$$\sigma'_{y,T} = \sigma'_{y,T_0} [1 - \gamma \lg(T/T_0)] \quad (3-16)$$

式中： $\gamma$  为土性参数，通常  $\gamma = 0.3 \sim 0.4$ 。

② 加热对土体压缩指数  $C_c$  或  $I_T$  的影响。国内外学者围绕土体压缩指数的温度效应进行了探讨：有少量文献认为加热影响压缩指数；但一般认为，加热对土体压缩指数  $C_c$  或  $I_T$  的影响很小（有机质土除外），可以忽略不计。

③ 加热对土体主固结过程的影响。固结系数  $c_v$  与不同温度下水的粘滞系数有关，有：

$$c_{vT} = c_v \eta_{T_0} / \eta_T \quad (3-17)$$

式中： $\eta_{T_0}$  和  $\eta_T$  分别为常温和  $T$  温度下水的粘滞系数； $T_0$  通常指  $20^\circ\text{C}$ ； $c_v$  为常温下的固结系数。根据已有研究，在标准大气压下水的粘滞性系数与温度间的经验表达式为： $\eta_T = -0.454 \times 10^{-3} \ln T + 2.349 \times 10^{-3}$ 。

### (3) 加热对蠕变的影响一次固结沉降

加热对主固结结束时间 $t_p$ 有影响； $t_p$ 为主次固结分界点。由于不同温度下土体的固结系数不同，不难得出不同温度下 $t_p$ 不同。

加热对土体次固结系数 $C_{\alpha T}$ 有影响。可用下式表示：

$$\psi_T = A \cdot T \quad (3-18)$$

其中， $\psi_T$ 为在温度 $T$ 时的蠕变指数， $A$ 为和温度有关的参数。根据 $e^{-lgt}$ 和 $e^{-lnt}$ 的关系，易得蠕变参数 $\psi_T = C_{\alpha T} / (\ln 10)$ 。

针对宁波典型软黏土的热固结压缩试验发现，次固结系数 $C_{\alpha T}$ 与温度 $T$ 和应力水平 $p$ 有关。其中，次固结系数受温度影响比较明显；总的趋势为随温度升高，次固结系数增大。根据试验结果，提出如下经验公式：

$$C_{\alpha T} = A \cdot \ln(T/T_0) + B(p) \quad (3-21)$$

式中： $A$ 、 $B$ 为经验参数。

#### (4) 加热对热胀冷缩的影响

材料的热胀冷缩也引起土体的应变，且为热弹性行为。热膨胀系数 $\alpha_T$ （单位 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）与固结压力有关，此外还有土体所处的状态有关。针对宁波滨海软土开热结试验发现，热膨胀系数随竖向压力 $p$ 增大而减小；土体超固结比（OCR）越大，土体所受的约束力越小，热膨胀系数越大；可采用下式来描述：

$$\alpha_T = \alpha_{T100} \left( \frac{p}{100} \right)^{-a} [b \ln(\text{OCR}) + c] \quad (3-22)$$

式中： $\alpha_{T100}$ 为正常固结土（OCR=1）在100kPa竖向压力下的热膨胀系数； $a$ 、 $b$ 和 $c$ 为经验系数，与土的类别及其微观结构等有关。

### 3.3.3 温度对土体强度特性的影响

温度对饱和土强度的影响一直存在着争议。试验结果表明：当温度升高时，抗剪强度降低，而强度包线却增大。

在恒定围压下，室温下土样的强度和初始切线模量大于经过热循环(温度变化为22-100-22°C)后的土样。由此可知，热循环的影响对天然土或许更大。此外，温度历史、加荷载固结，以及其他因素如各向异性、液限等都可影响不同温度下土的剪切强度。但现有研究成果不能解释温度如何改变土的剪切行为，这有待更多的试验来解释。

温度对土体临界状态模型参数的影响已经被许多学者研究讨论过，并证明 $\lambda$ 是与温度无关的。但是在给定任意有效围压下，温度的增加会引起INCL线的平移从而导致 $V$ 减小，现有成果研究大都证实了这一结果。