

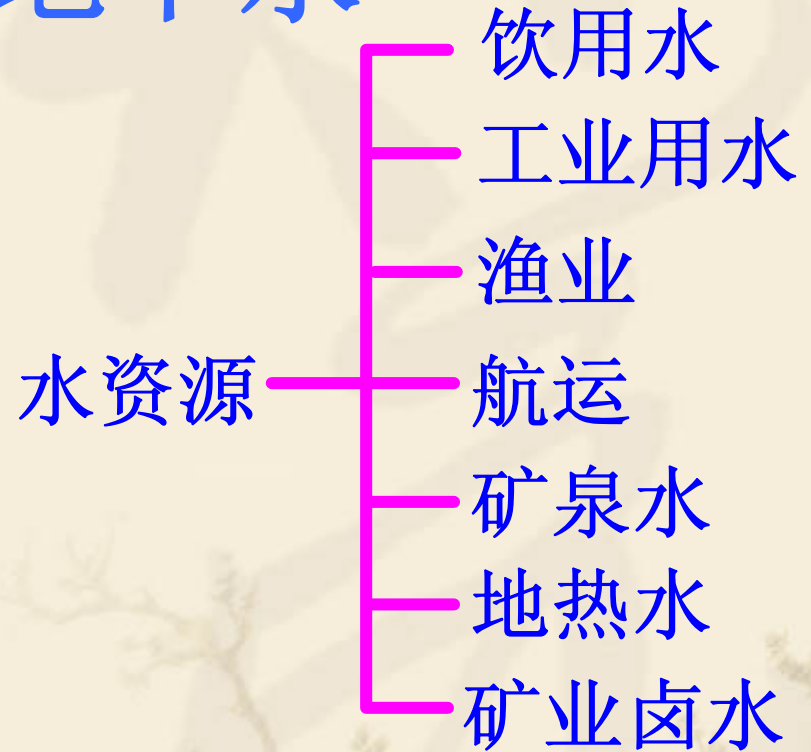
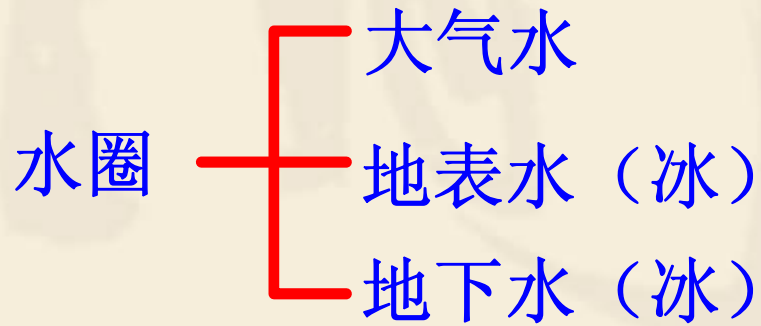
# 第2篇 岩土工程性质

第 4 章 地下水

第 5 章 土的工程性质

第 6 章 岩石及岩体的工程性质

# 第4章 地下水



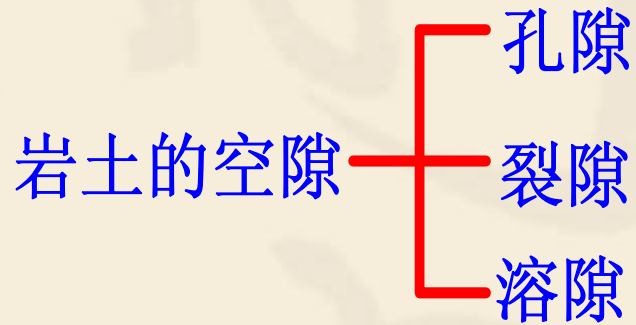
地下水——地下水是赋存于地表以下岩土空隙中的水，主要来源于大气降水、冰雪融水、地面流水、湖水及海水等，经土壤渗入地下形成的。地下水是宝贵的自然资源，可作生活饮用水和工农业生产用水。

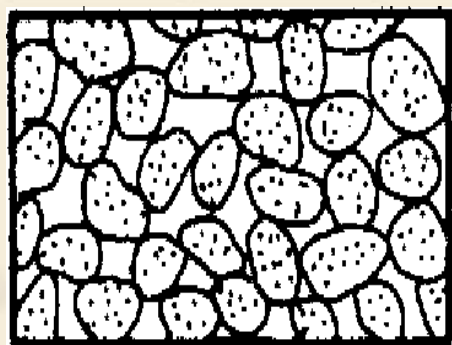
## 地下水的危害

- 地质环境稳定性
- 降低地基承载力
- 砂土液化
- 管涌
- 地面沉降
- 滑坡
- 基坑、隧道涌水

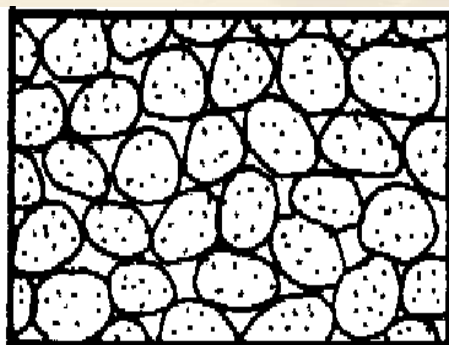
# 4.1 地下水的基本概念

## 4.1.1 岩石的孔隙性

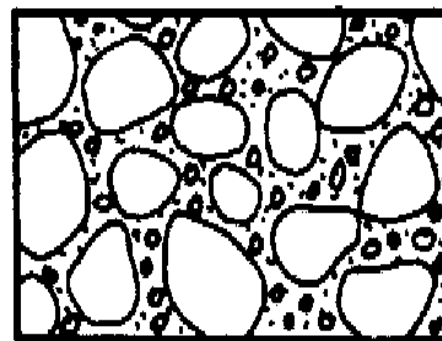




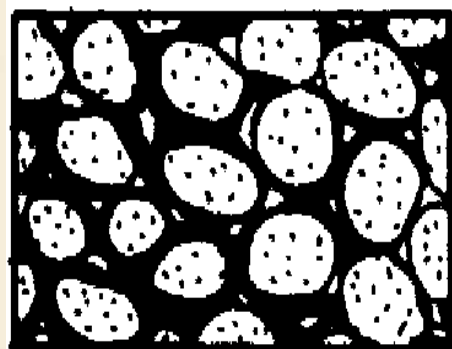
(a)



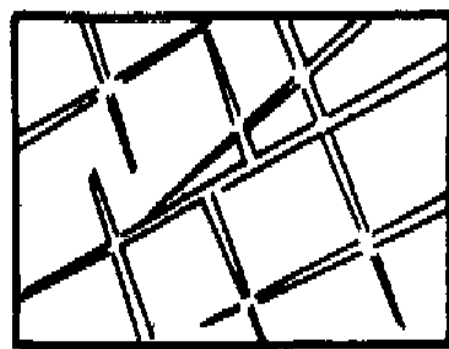
(b)



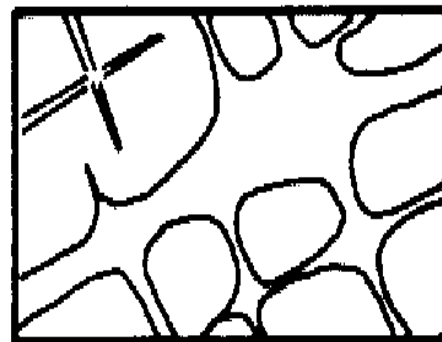
(c)



(d)



(e)



(f)

(a) 分选良好排列疏松的砂

(b) 分选良好排列紧密的砂

(c) 分选不良含泥、砂的砾石

(d) 部分胶结的砂岩

(e) 具有裂隙的岩石

(f) 具有溶隙的可溶岩



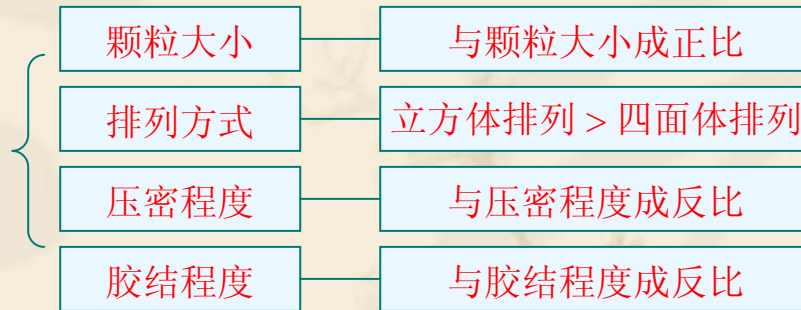
★ 孔隙——松散介质中颗粒或颗粒集合体之间呈小孔状分布的空隙

孔隙率——衡量岩土内空隙发育程度的指标称孔隙率

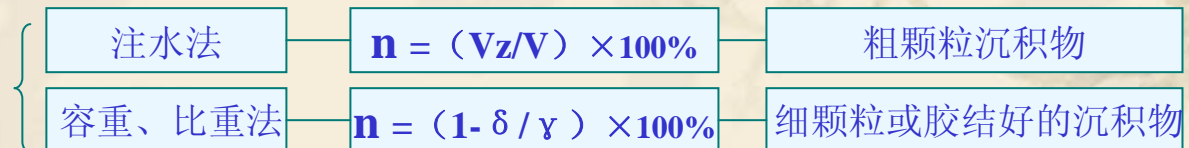
$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\%$$

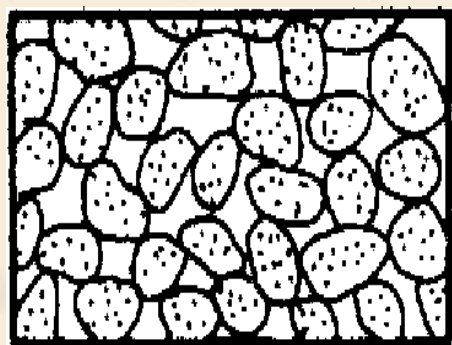
n——孔隙率  
 $V_v$ ——孔隙体积  
 $V$ ——岩石总体积

影响孔隙大小的因素

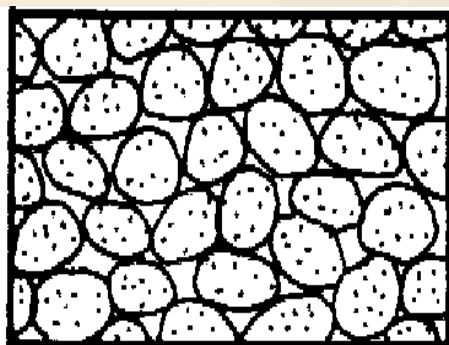


孔隙度的测量

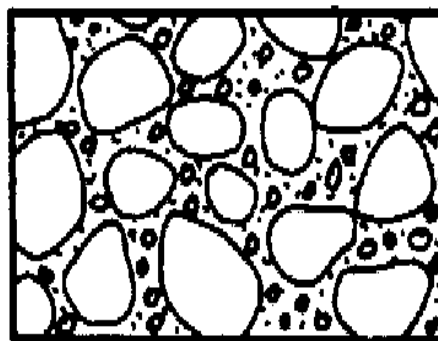




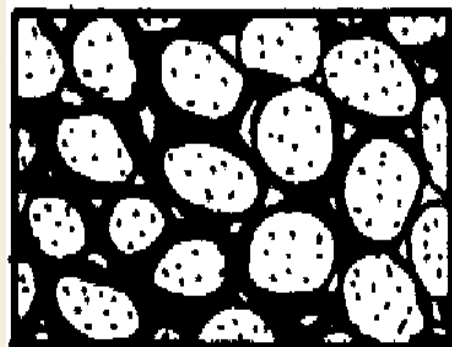
(a)



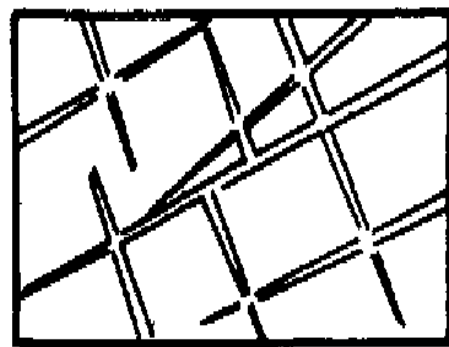
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

(a) 分选良好排列疏松的砂

(b) 分选良好排列紧密的砂

(c) 分选不良含泥、砂的砾石

(d) 部分胶结的砂岩

(e) 具有裂隙的岩石

(f) 具有溶隙的可溶岩

★ 裂隙——岩石受地壳运动及其它内外地质营力作用影响产生的空隙

裂隙率——衡量岩石裂隙发育程度的指标称裂隙率

$$K_T = \frac{V_T}{V} \times 100\%$$

$K_T$ ——裂隙率

$V_T$ ——裂隙体积

$V$ ——岩石总体积

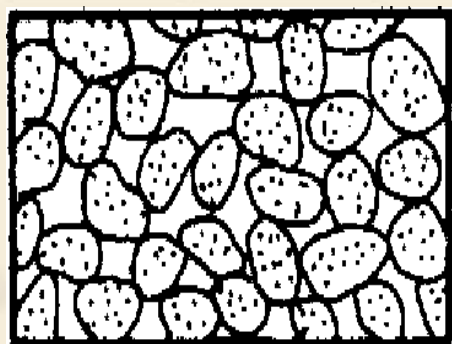
### 裂隙的分类

- 成岩裂隙 ●特 主要发育岩浆岩中，以玄武岩柱状节理最佳，连通、导水性好
- 构造裂隙 ➔ 具有方向性，大小悬殊，分布不均，张裂隙最佳，剪裂隙较差
- 风化裂隙 ●点 分布在地表附近，发育程度受气候、地形、岩性、构造等控制

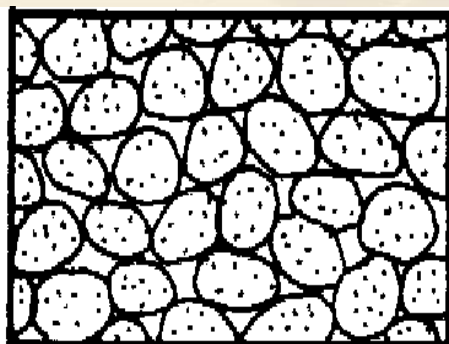
### 裂隙率

- 线裂隙率  $n_T = \sum d / 3 L \times 100\%$  顺着钻进的方向在岩芯面量侧裂隙宽度
- 面裂隙率  $n_T = \sum L \times b / F \times 100\%$   $1 \times 1 \text{ m}^2$  天然露头逐一量侧裂隙的长和宽

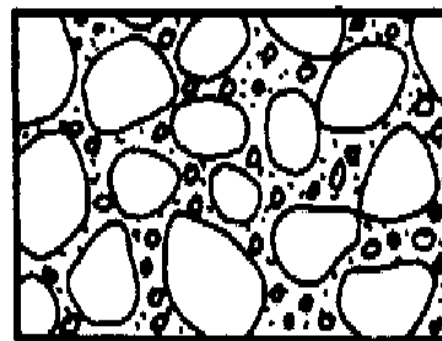




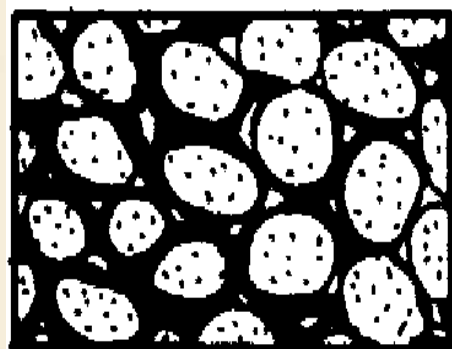
(a)



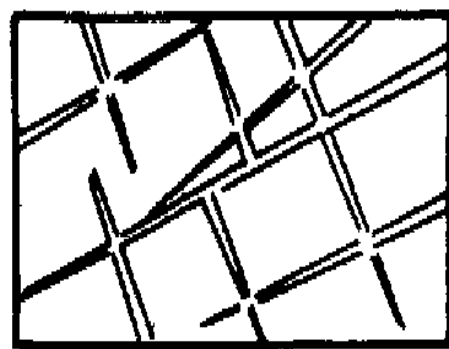
(b)



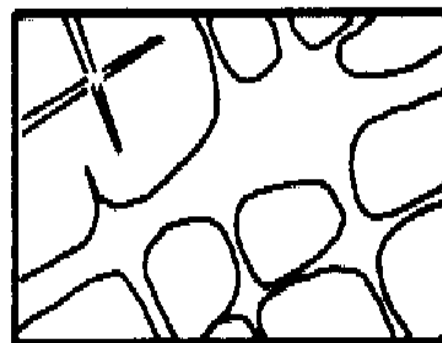
(c)



(d)



(e)



(f)

(a) 分选良好排列疏松的砂

(b) 分选良好排列紧密的砂

(c) 分选不良含泥、砂的砾石

(d) 部分胶结的砂岩

(e) 具有裂隙的岩石

(f) 具有溶隙的可溶岩

★ 溶隙——可溶岩(石灰岩、白云岩等)中的裂隙经地下水流长期溶蚀而形成的空隙

溶隙率——可溶性岩石岩溶发育程度的指标为溶隙率

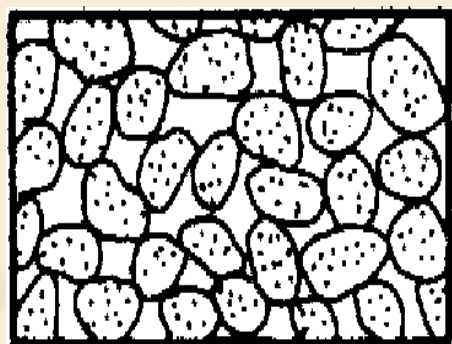
$$K_K = \frac{V_K}{V} \times 100\%$$

$K_K$ —溶隙率

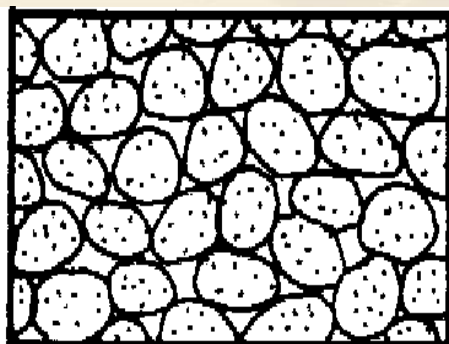
$V_K$ —溶隙体积

$V$ —可溶岩体积

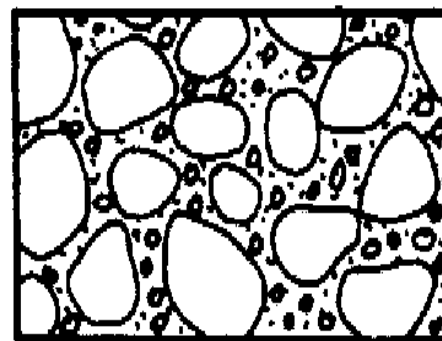
特点：溶隙大小悬殊，分布不均，连通性好。



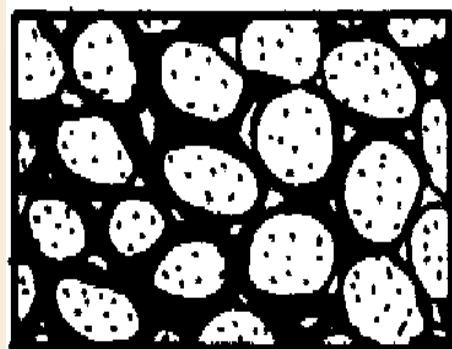
(a)



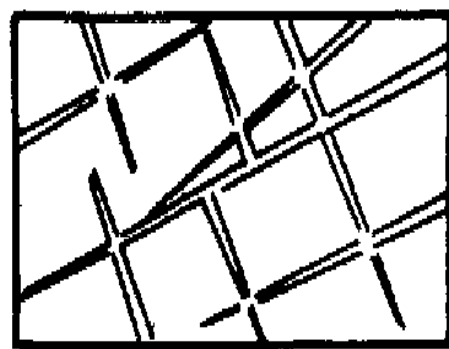
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

(a) 分选良好排列疏松的砂

(b) 分选良好排列紧密的砂

(c) 分选不良含泥、砂的砾石

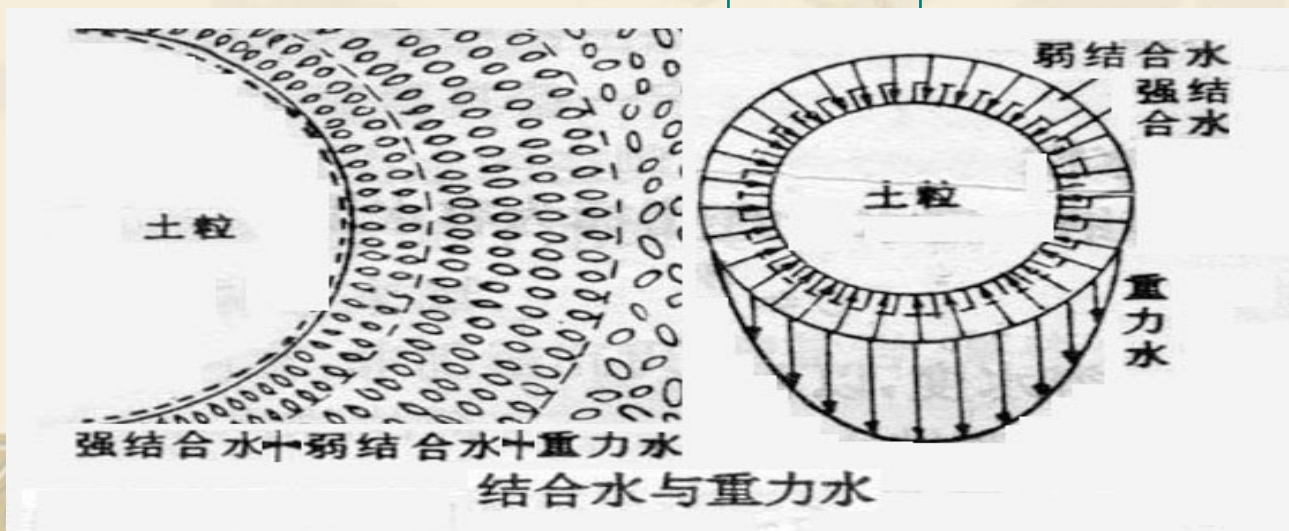
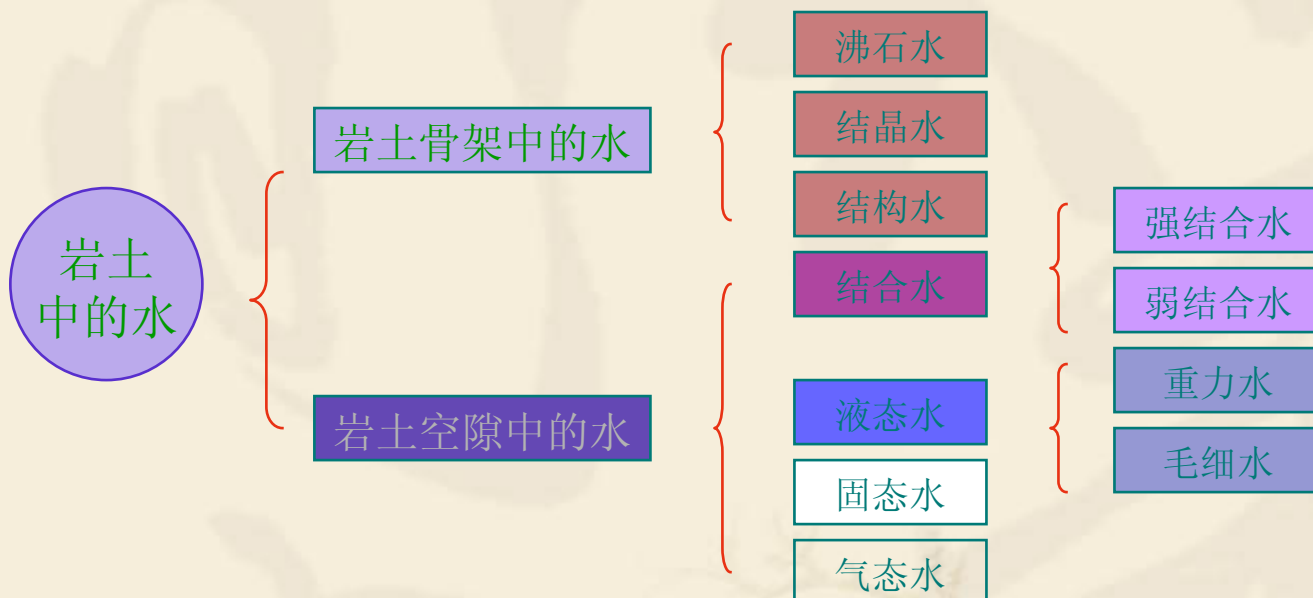
(d) 部分胶结的砂岩

(e) 具有裂隙的岩石

(f) 具有溶隙的可溶岩

# 4.1.2 岩土的水理性质

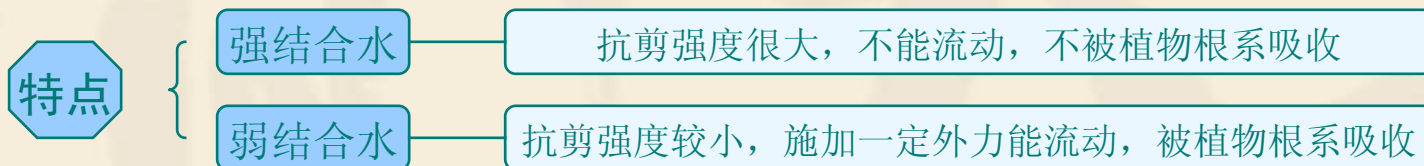
岩石中水的存在形式



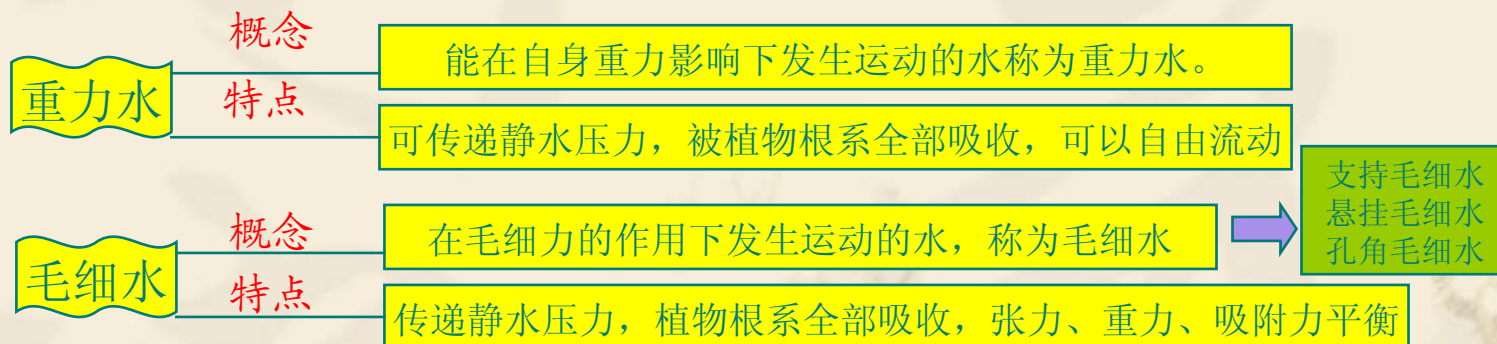


## 一、结合水

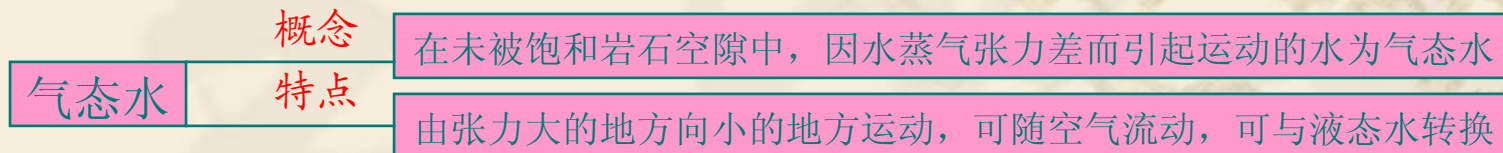
- 1、概念：受固相表面的引力大于分子自身重力的那部分水，称为结合水。
- 2、特点：具有抗剪强度（由内层向外层减弱），一般不能流动，必须施一定外力使其发生变形。



## 二、液态水

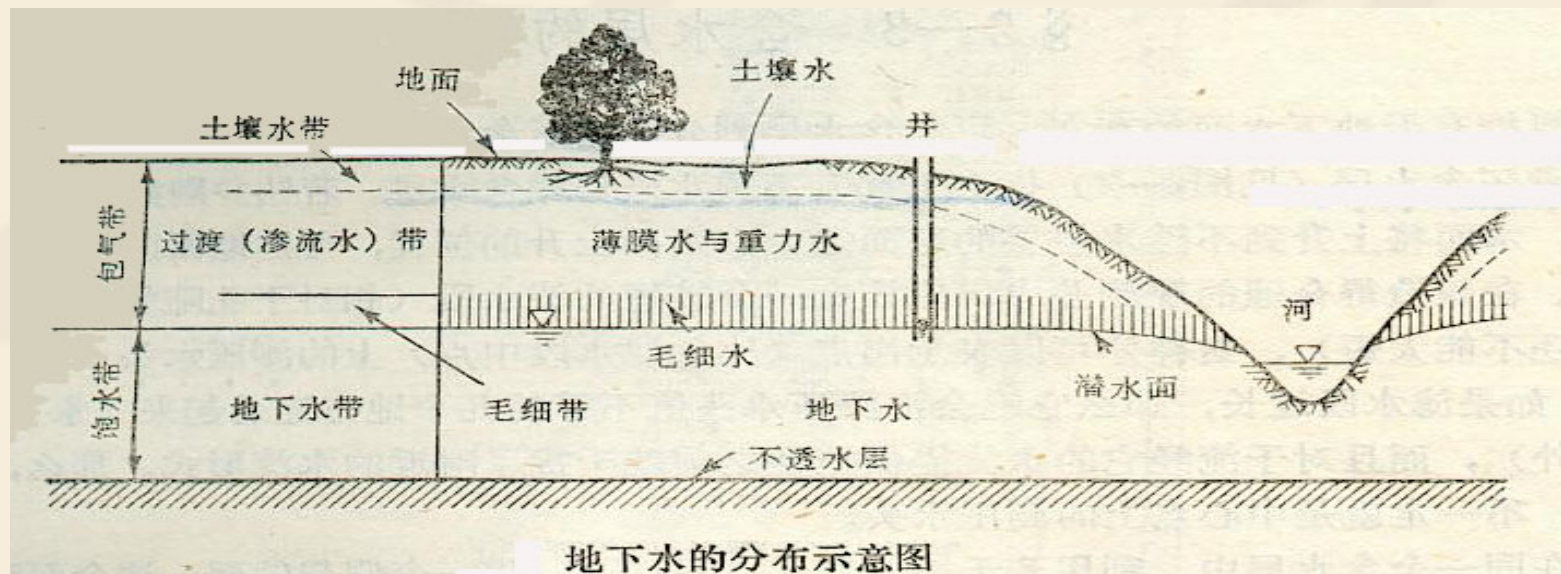


## 三、气态水、固态水、矿物结合水





固态水	概念	在低于冰点时岩石空隙中的水称为固态水
	特点	多年中以固态的形式存在于岩石空隙中，温度低于0℃，不能流动
矿物结合水	概念	赋存于矿物结晶内部的水称矿物结合水，有结构水、结晶水、沸石水
	特点	保存于矿物结晶骨架中，肉眼看不见，加热时可从矿物中分离出来
结构水 结晶水 沸石水		以 $H^+$ 和 $OH^-$ 形式存在于矿物结晶格架的某一位置上的水称为结构水
		以 $H_2O$ 的形式存在于矿物结晶格架的一定位置上的水称为结晶水
		以 $H_2O$ 的形式存在于矿物晶包和晶包之间的水称为沸石水



★容水度——是岩土饱水时所能容纳的最大的水体积与岩土总体积之比，用小数或百分数表示。

$$c = \frac{V_w}{V} \times 100\%$$

★持水度——是指饱水岩土在重力作用下，保持在岩土中水的体积与岩土总体积的比值，用小数或百分数表示。

$$S_r = \frac{V_{wr}}{V} \times 100\% \quad c = S_r - S_y$$

★**给水度**——是饱水岩土在重力作用下能自由流出的水的体积与岩土总体积之比，用小数或百分数表示。给水度等于容水度减去持水度。

$$S_y = \frac{V_{wy}}{V} \times 100\% = \mu \qquad S_y = c - S_r$$

持水度、给水度与颗粒直径的关系

颗粒直径 (mm)	持水度 (%)	给水度 (%)	颗粒直径 (mm)	持水度 (%)	给水度 (%)
>2.00		30-35	0.10-0.05	4.75	10-15
2.00-0.50	1.57	25-30	0.05-0.005	10.18	
0.50-0.25	1.60	20-25	<0.005	44.85	
0.25-0.10	2.73	15-20			



★透水性——透水性是指岩土允许水透过的能力。

$$K \text{ —— } m / d ; \quad cm / s$$

透水性与岩土空隙多少、大小和连通程度有关。  
评价岩土透水性的指标是渗透系数



★含水层——在正常水力梯度下，饱水、透水并能给出一定水量的岩土层称为含水层。

含水层的形成必须具备以下条件：有较大且连通的空隙；与隔水层组合形成储水空间，以便地下水汇集不致流失；要有充分的补水来源。

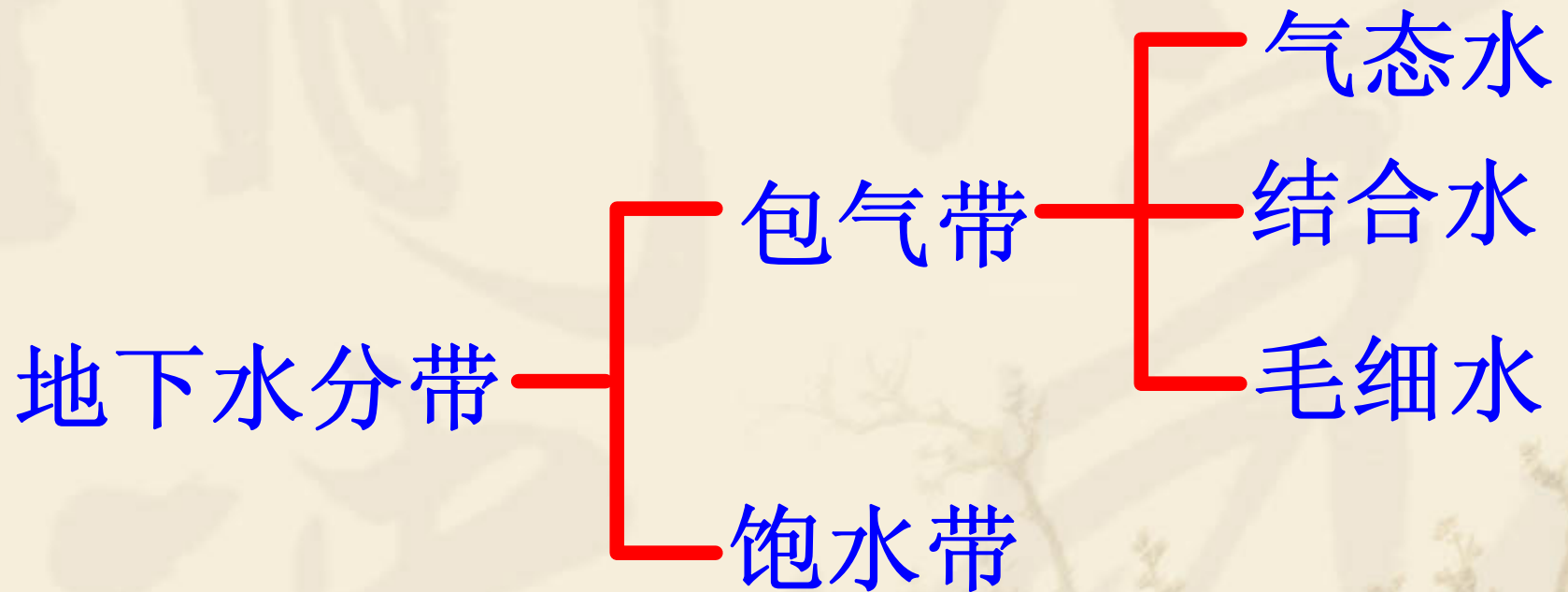
★**隔水层**——把正常水力梯度下不透水或透水相对微弱的岩土层称为隔水层。

有时也把弱透水层称为滞水层。

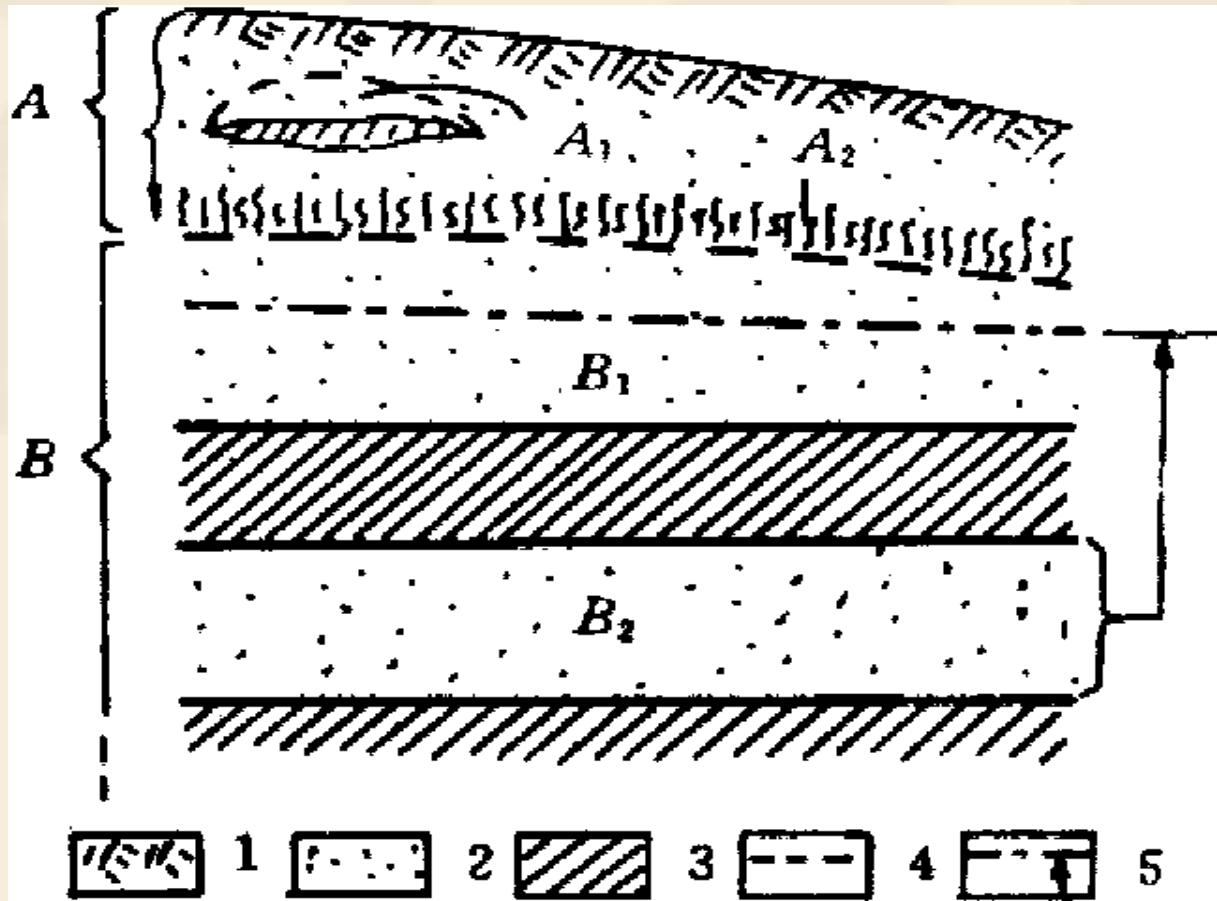
★**毛细性**——土的毛细性指的是土中的水，在毛细张力(负压)作用下，沿毛细孔隙向各个方向运动的性能。

★**毛细上升高度**——在地下水面以上，水在毛细张力作用下，沿毛细孔隙上升到一定高度停止下来

## 4.1.3 地下水的埋藏类型



# 地下水分带



1—土壤      2—含水层      3—隔水层      4—潜水面      5—承压水面

A—包气带

A<sub>1</sub>—上层滞水

A<sub>2</sub>—毛细水带

B—饱水带

B<sub>1</sub>—潜水

B<sub>2</sub>—承压水

# 地下水的埋藏类型

地下水埋藏类型

包气带水

潜水

承压水

地下水介质类型

孔隙水

裂隙水

岩溶水



★ 潜水——潜水是埋藏在地面以下第一个稳定隔水层之上具自由水面的重力水

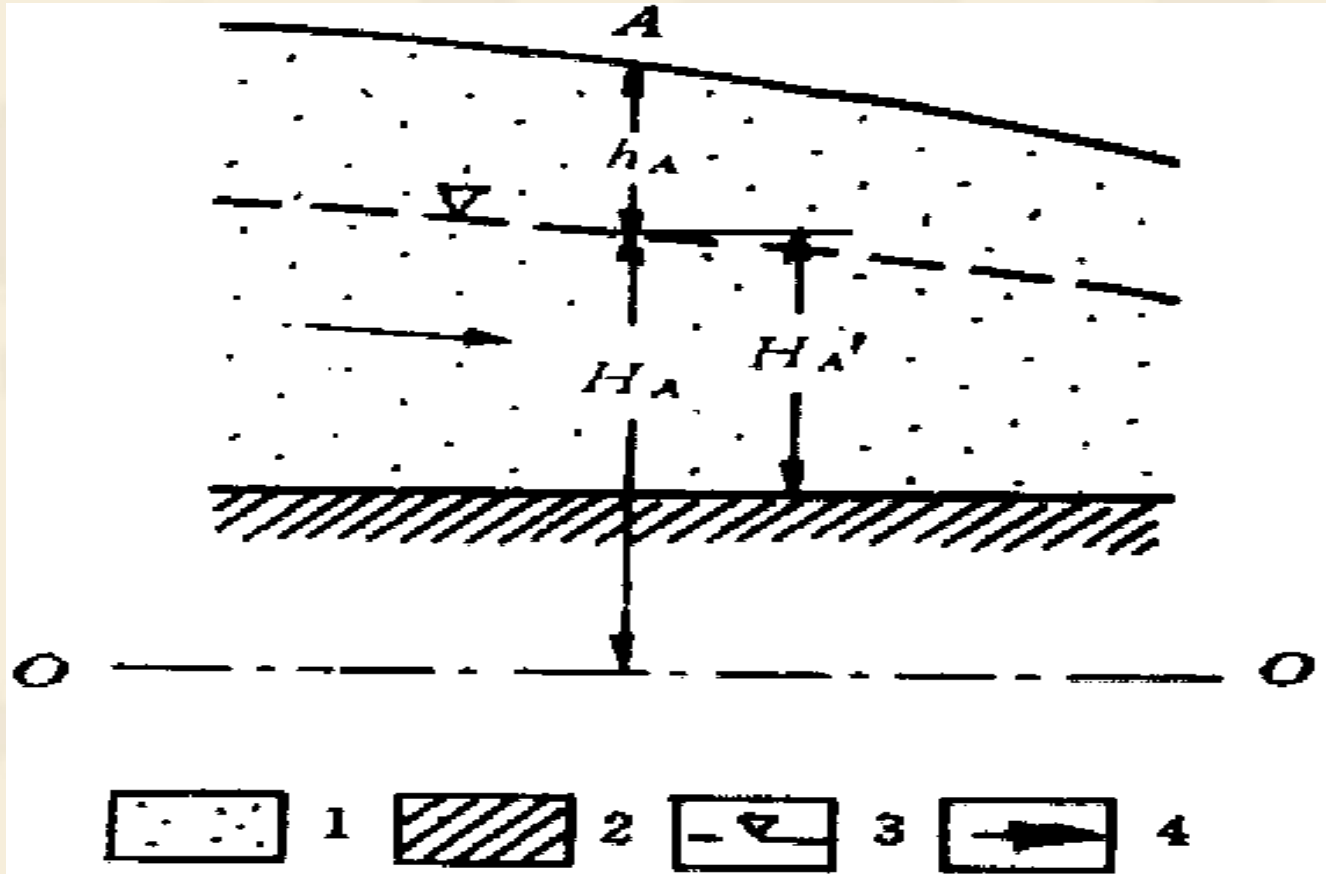
★ 潜水面——潜水的自由水面称潜水面。

★ 潜水位——潜水位水面上任一点的高程称该点的潜水位。

★ 潜水的埋藏深度——自地面某点至潜水面的距离称该点潜水的埋藏深度。

★ 潜水含水层的厚度——潜水面到隔水底板的距离为潜水含水层的厚度。

# 潜水的埋藏



1—含水层      2—隔水层      3—潜水面      4—潜水流向

$h_A$ ——A点的潜水埋藏深度

$H_A$ ——A点的潜水位

$H_A'$ ——A点潜水层的厚度

O-O'——基准面

## ★ 潜水的特征:

- 1) 潜水与大气相通，具自由水面，为无压水；
- 2) 潜水的补给区与分布区一致，直接接受大气降水补给。旱季时，常以蒸发形式排泄；
- 3) 潜水动态受气候影响较大，具有明显的季节性变化特征；
- 4) 潜水易受地面污染的影响；
- 5) 水量丰富的潜水可作为供水水源。

## ★ 潜水等水位线图——就是潜水面上高程相等各点的连线

从潜水等水位线图可获得如下信息：

**确定潜水流向：**垂直于等水位线的方向为潜水流向，箭头由高水位线指向低水位线。

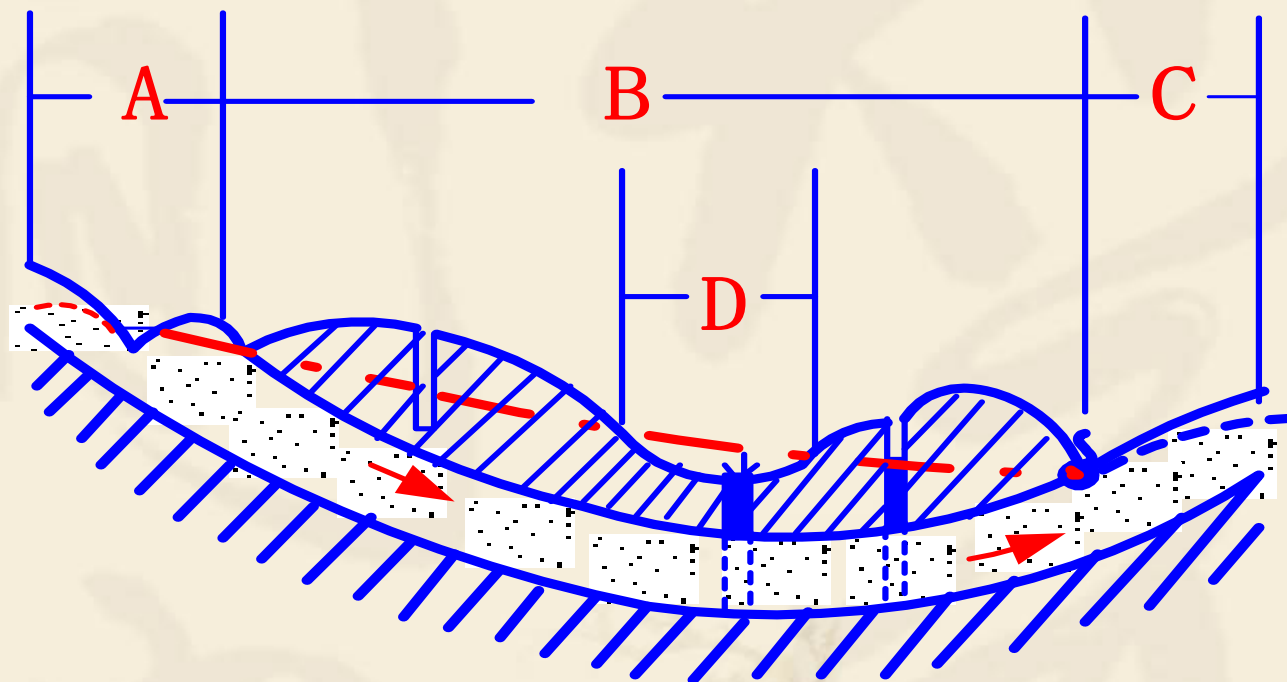
**确定水力坡度：**顺流向取两点，两点间的高差与其水平距离之比为该段的水力坡度。

**确定潜水与地表水之间的关系：**箭尾指向地表水为地表水补给潜水；箭头指向地表水为潜水补给地表水。

**确定潜水埋深，判断泉水、沼泽出露点：**地形等高线与等水位线之差为潜水埋深，二者之差为0时即为泉水、沼泽出露点。

★ 承压水——是充满两个隔水层之间的含水层中的重力水。

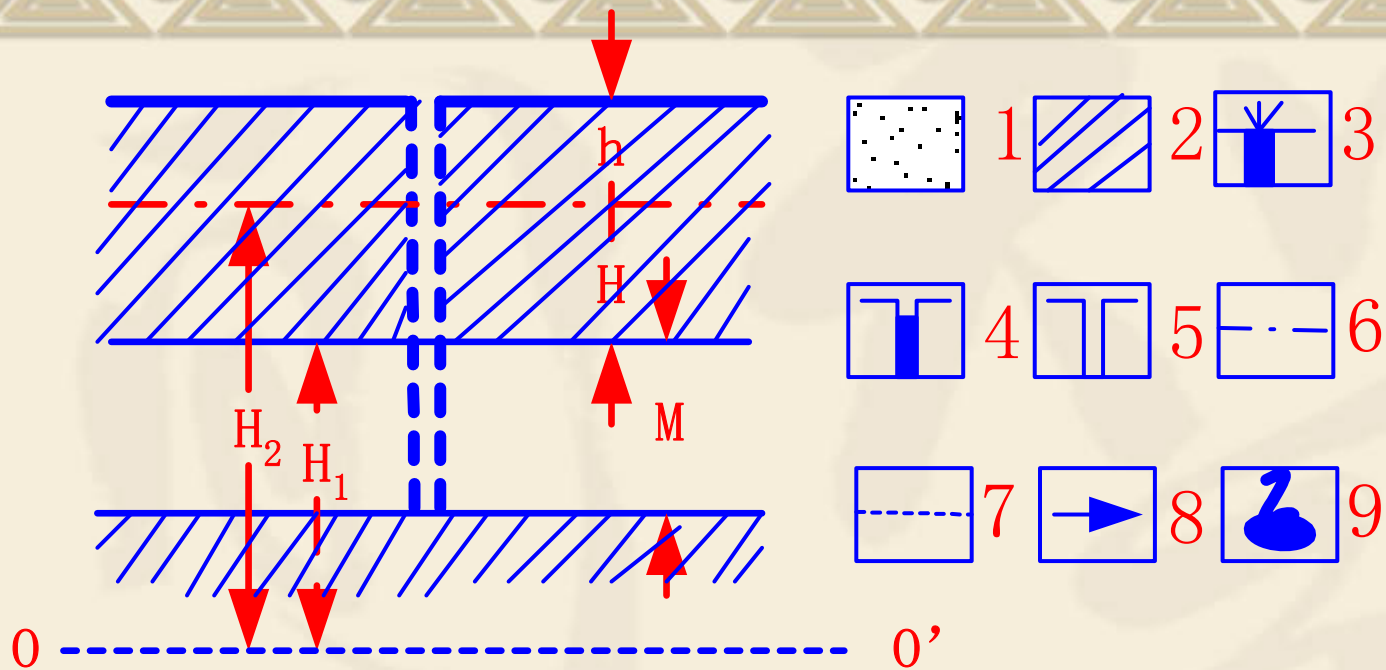
承压含水层



承压含水层分区

- 补给区A
- 迳流区B (自流区D)
- 排泄区C





- 1——承压含水层， 2——隔水层， 3——自流井， 4——非自流井， 5——干井  
 6——承压水位， 7——潜水位， 8——地下水流向， 9——上升泉  
 A——补给区， B——承压区， C——排泄区， D——自流区  
 h——承压水位埋深 M——承压含水层厚度， OO'——基准面  
 H1——初见水位， H2——承压水位， H——承压水头

## ★ 承压水具有如下特征

- 1) 承压水的重要特征是没有自由水面，并承受一定的静水压力。
- 2) 承压含水层的分布区与补给区不一致。
- 3) 承压水的动态比较稳定，受气候影响比较小。
- 4) 承压水不易受地面污染。
- 5) 承压水一般可作为良好的供水水源。

★ 承压水等水压线图——是承压水面上高程相等点的连线图。等水压线图上必须附有地形等高线和顶板等高线。

从承压水等水压线图可获得如下信息：

确定承压水流向：垂直于等水压线的方向为承压水流向，箭头由高水位线指向低水位线。

确定水力坡度：顺流向取两点，两点间的高差与其水平距离之比为该段的水力坡度。

★ 等水位（压）线密，水力坡度大；  
等水位（压）疏，水力坡度小。

★ 泉——地下水在地表的天然露头叫泉(地下水的人工露头叫井)。

(1) 根据补给源及水流特征分为

1) 上升泉； 2) 下降泉

(2) 根据泉水出露原因分为

1) 侵蚀泉； 2) 接触泉； 3) 断层泉

(3) 根据泉水温度分为

1) 冷泉； 2) 温泉

## 4.1.4 不同岩土介质中的地下水

### ★ 孔隙水

孔隙水广泛分布于第四纪松散沉积物中，其分布规律主要受沉积物的成因类型控制。孔隙水最主要的特点是其水量在空间分布上连续性好，相对均匀。孔隙水一般呈层状分布，同一含水层中的水有密切的水力联系，具有统一的地下水面，一般在天然条件下呈层流运动。



# ★ 洪积物中地下水

洪积物是山区洪流携带的碎屑物在山口处堆积而成的。洪积物常分布于山谷与平原交接部位或山间盆地的周缘，地形上构成以山口为顶点的扇形体或锥形体，故称洪积扇或冲积锥。

## 洪积扇中地下水

主要分为三个带：

I—潜水深埋带    II—潜水溢出带    III—潜水下沉带

## ★ 冲积物中地下水

河流上游山间盆地常形成砂砾石河漫滩，厚度不大，由河水补给，水量丰富水质好，可作供水水源。河流中游河谷变宽，形成宽阔的河漫滩和阶地。河漫滩常沉积有上细(粉细砂、粘性土)下粗(砂砾)的二元结构。有时上层构成隔水层，下层为承压含水层。河漫滩和低阶地的含水层常由河水补给，水量丰富，水质好，是很好的供水水源。

## ★ 裂隙水

埋藏于基岩裂隙中的地下水称裂隙水。

由于岩石中裂隙大小悬殊，分布不均匀，所以裂隙水的埋藏、分布和水动力性质都不均匀。裂隙岩石的导水性呈现明显的各向异性。

裂隙水根据裂隙成因不同，可分为风化裂隙水、成岩裂隙水与构造裂隙水。

## ★ 岩溶水

赋存并运移于岩溶化岩层(石灰岩、白云岩)中的水称岩溶水(喀斯特水)。

岩溶常沿可溶岩层的构造裂隙带发育，通过水的溶蚀，常形成管道化岩溶系统，并把大范围的地下水汇集成一个完整的地下河系。

岩溶水空间分布极不均匀，动态变化强烈，流动迅速，排泄集中。



## 4.2 地下水的水质

### 4.2.1 地下水的化学成分

地下水不是纯水，是化学成分十分复杂的天然溶液。组成地壳的**87**种稳定元素中，在地下水中已发现**70**余种。

(1) 主要的气体成分： **$O_2$ 、 $N_2$ 、 $CO_2$ 和 $H_2S$**

(2) 主要的离子成分有 **$K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $HCO_3^-$**

(3) 还有 **$NH_4^+$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Al^{3+}$ 、 $NO_2^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $HSiO_3^-$**

# 地下水水质分析

## 地下水水质分析：简分析、全分析与专门分析3种 地下水水质分析结果表示方法——库尔洛夫式

- 地下水化学成分的分析资料整理：
- 库尔洛夫式：

微量元素、气体成分、矿化度 (g/L)  $\frac{\text{阴离子毫克当量\% (含量>10\%由大到小顺序排列)}}{\text{阳离子毫克当量\% (含量>10\%由大到小顺序排列)}}$  水温

根据库尔洛夫式可对水进行命名，也便于将不同水进行比较。命名时，含量>25%毫克当量的参加命名，先读阴离子，后读阳离子；先读含量少的，后读含量多的。

例：根据水分析资料，某温泉水的总矿化度3.27g/L，各主要离子成分的毫克当量百分数如下：CL<sup>-</sup>占84.76%，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>占14.34%，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>占0.78%；Na<sup>+</sup>占71.63%，Ca<sup>2+</sup>占27.78%，Mg<sup>2+</sup>占0.59%。H<sub>2</sub>S为20.8mg/L，游离CO<sub>2</sub>为31mg/L，H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>为700mg/L，水温52℃。用库尔洛夫式表示。

$$\text{H}^2\text{SO}_3^{0.7}\text{H}_2\text{S}_{0.021}\text{CO}_2^{0.031}\text{M}_{3.27} \frac{\text{CL}_{84.76}\text{SO}_4^{14.34}}{\text{Na}_{71.63}\text{Ca}_{27.78}} \text{t}^\circ 52$$
 命名为：氯化钙钠水

- 地下水化学类型的分类：
- 舒卡列夫分类：根据地下水中六种主要离子（K<sup>+</sup>合并于Na<sup>+</sup>中）及矿化度划分，含量>25%毫克当量的阴、阳离子进行组合，分为49型水。矿化度

分为4组：A组<1.5g/L，B组1.5--10g/L，C组10--40g/L，D组>40g/L。 38

## 4.2.2 地下水的化学性质

### ★ 酸碱度 (pH值)

地下水的酸碱度指的是氢离子浓度，常以pH值表示

地下水按pH值分类

分类	强酸性水	弱酸性水	中性水	弱碱性水	强碱性水
pH值	<5.0	5.0~6.4	6.5~8.0	8.1~10.0	>10.0

### ★ 矿化度 (M)

地下水中各种离子、分子与化合物的总量称矿化度，以g/l或mg/l为单位

地下水按矿化度分类

分类	淡水	微咸水	咸水	盐水	卤水
矿化度, g/l	<1	1~3	3~10	10~50	>50

# ★ 硬度

★ 水中钙、镁离子的含量称水的硬度。

★ 硬度可分为总硬度、暂时硬度和永久硬度。

★ 总硬度是水中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的总量，等于暂时硬度加永久硬度

★ 暂时硬度指水加热沸腾后所损失的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 含量，此时仍保持在水中的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 含量称永久硬度。因此，。

★ 硬度表示方法：

(1) mmol/l

(2) 德国度，1mmol/l=2.8德国度，1德国度相当于7.1mg/l  $\text{Ca}^{2+}$ 或4.3mg/l  $\text{Mg}^{2+}$ 。生活饮用水水质标准规定水的硬度以 $\text{CaCO}_3$ 的mg/l表示，

地下水按总硬度分类

分 类		极软水	软水	微硬水	硬水	极硬水
总硬度	mmol/l	<1.5	1.5~3.0	3.0~6.0	6.0~9.0	>9.0
	德国度	<4.2	4.2~8.4	8.4~16.8	16.8~25.2	>25.2



## 4.2.3 地下水对混凝土的侵蚀性

### ★ 地下水的侵蚀类型：

- ★ 溶出侵蚀
- ★ 碳酸侵蚀
- ★ 硫酸盐侵蚀
- ★ 一般酸性侵蚀
- ★ 镁盐侵蚀

## 4.3 地下水的运动

### 4.3.1 渗流的基本概念

**渗流**——地下水在岩土体空隙中的运动

# ★ 过水断面、渗流速度与实际流速

**过水断面**——垂直渗流方向的含水层截面，它包括岩土层的空隙和颗粒骨架在内的全部截面积。

**实际过水断面**——是该断面中地下水流动的孔隙面积。

**渗流(渗透)速度**——地下水流在某过水断面上的平均流速称，用 $v$ 表示，单位为 $m/d$ 或 $cm/s$ ，即

$$v = \frac{Q}{A}$$

$A$ —过水断面面积， $m^2$ 或 $cm^2$ ；

$Q$ —渗流量， $m^3/d$ 或 $cm^3/s$ 。

**真实流速**——是地下水在过水断面中空隙部分实际流动的平均速度，用 $u$ 表示，单位为m/d或cm/s，

$$u = \frac{Q}{A'} = \frac{Q}{A - n_e}$$

$A'$  —断面中水实际流动的孔隙面积， $m^2$ 或 $cm^2$ ；

$n_e$ —有效孔隙度，百分数。

**有效孔隙度**——指水实际流动的孔隙体积与土体积之比。对于粗粒土来说， $n_e$ 近似于孔隙度 $n$ ；对细粒土， $n_e < n$ ，可用给水度 $\mu$ 表示。

$$v = n_e u \quad \text{或} \quad v = \mu \cdot u$$

2007-4-19 式中 $n_e$ 或 $\mu$ 都总是小于1，故可知渗流速度小于实际流速。 44

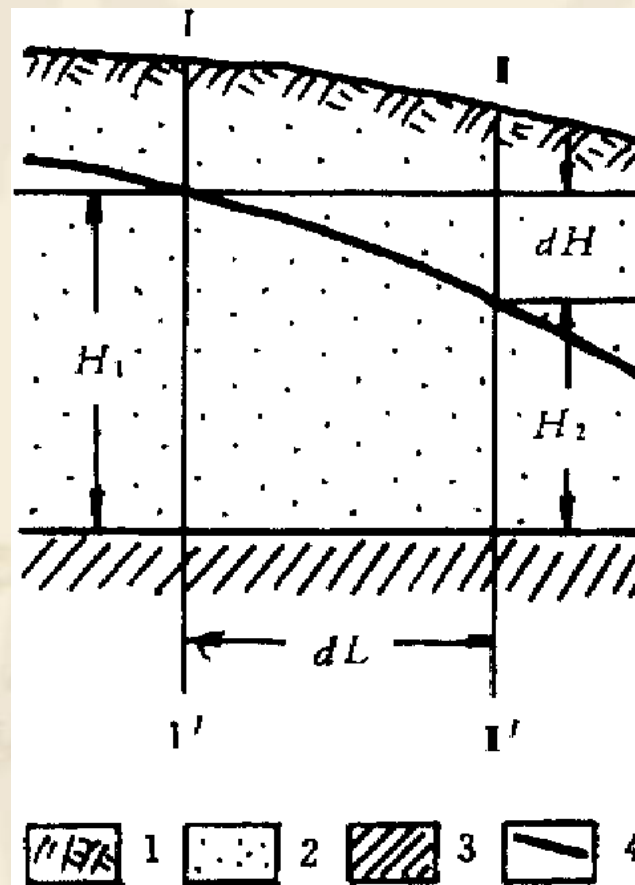


# ★ 水力坡度

渗流中某一点的水力坡度 $J$ 可定义为通过该点单位渗流途径上的水头损失

$$J = -\frac{dH}{dL}$$

- 1—土壤层    2—含水层  
3—隔水层    4—水头降落曲线



# ★ 流网

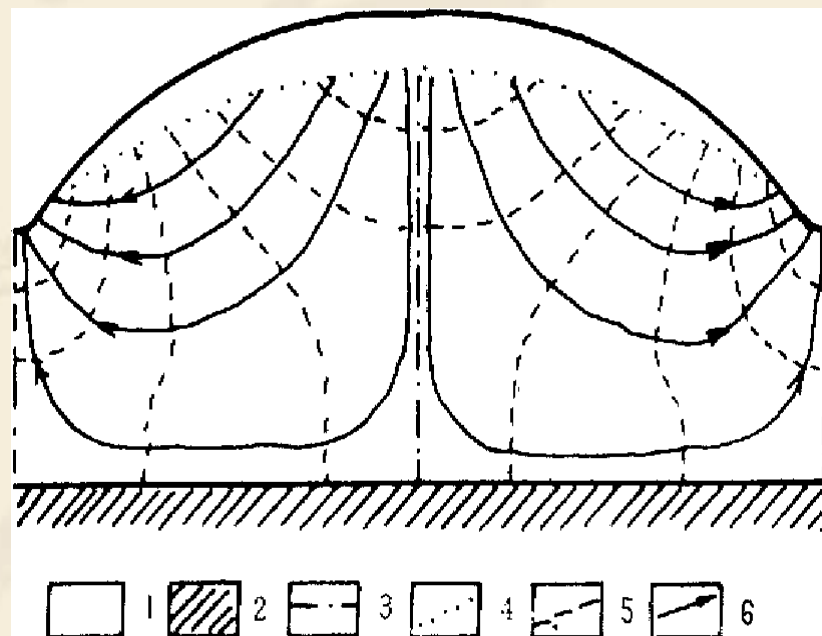
★ 流网——在渗流场某一典型剖面或平面上，由一系列等水头线与流线组成的网络

★ 等水头线——渗流断面中水头值相等点的连线

★ 流线——是渗流断面中某一瞬时的一些线，线上各水质点在此瞬时的流向均与此线相切

等水头线与流线必须正交。

1—含水层 2—隔水层 3—分流线  
4—潜水面 5—等水头线 6—流线



河间地块的流网

(1) 剖面上不同地点地下水的流向不同，由分水岭到河谷，流向从向下到接近水平再向上；

(2) 由分水岭到河谷，流线越来越密集，流量增大，地下径流加强。因此，在河谷或近山地区，流入基坑的水量比其它地方多；

(3) 在河谷或近山地区，基坑越深，坑底承受的水头压力越大。

流网在各向同性介质中为正交网；在各向异性介质中为斜交网。

流网的类型：

**a) 均质各向同性介质中的流网**（图示）

均质：在同一含水层中，各处的渗透系数相等。

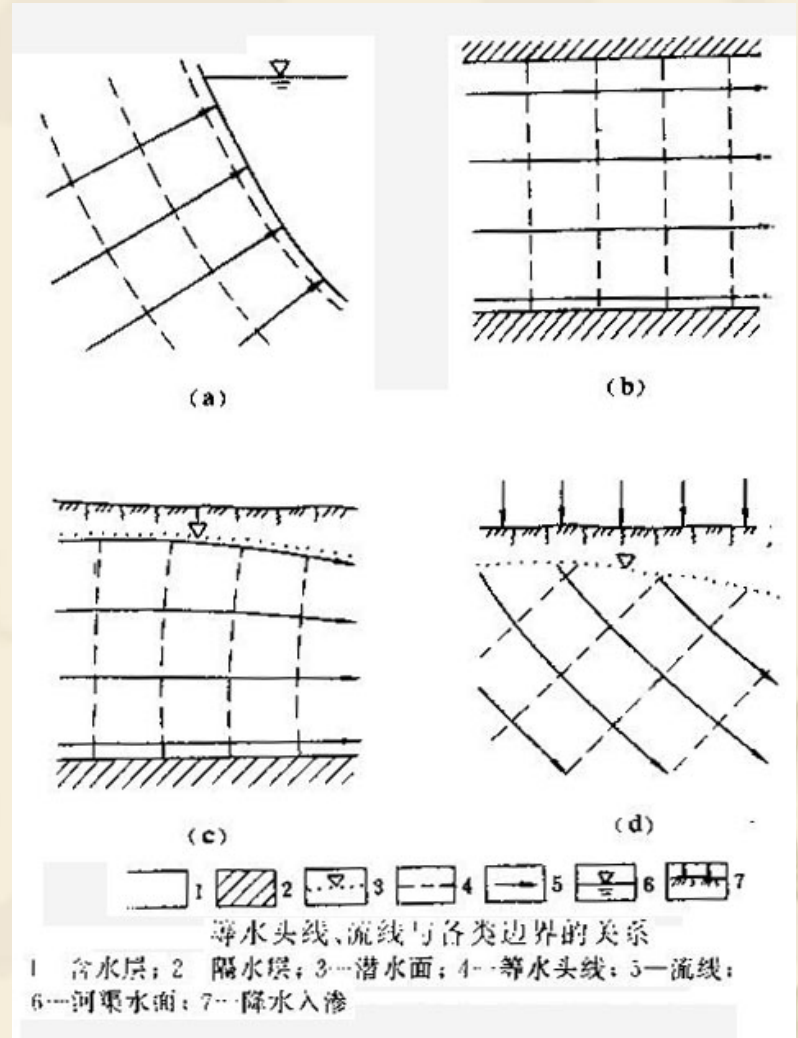
各向同性：含水层中任一点的渗透系数在各个方向无变化。

1) 在河渠附近的流网：地表水体的断面看作等水位面，地表水的湿周是一条等水位线。

2) 承压含水层：隔水边界无水量通过，流线平行隔水边界。

3) 无入渗补给和蒸发排泄时：潜水面是一条流线。

4) 有入渗补给时：潜水面既不是流线，也不是等水位线。





**b)非均质介质中的流网 (如图示):**

非均质: 在同一含水层中, 各处的渗透系数不相等。

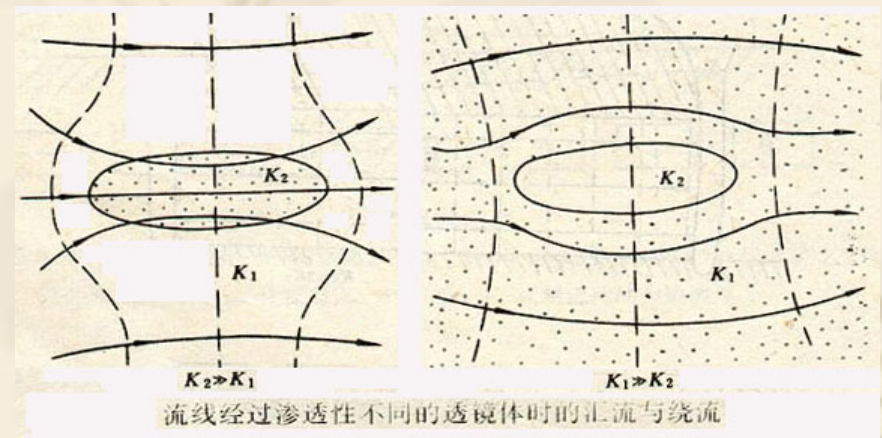
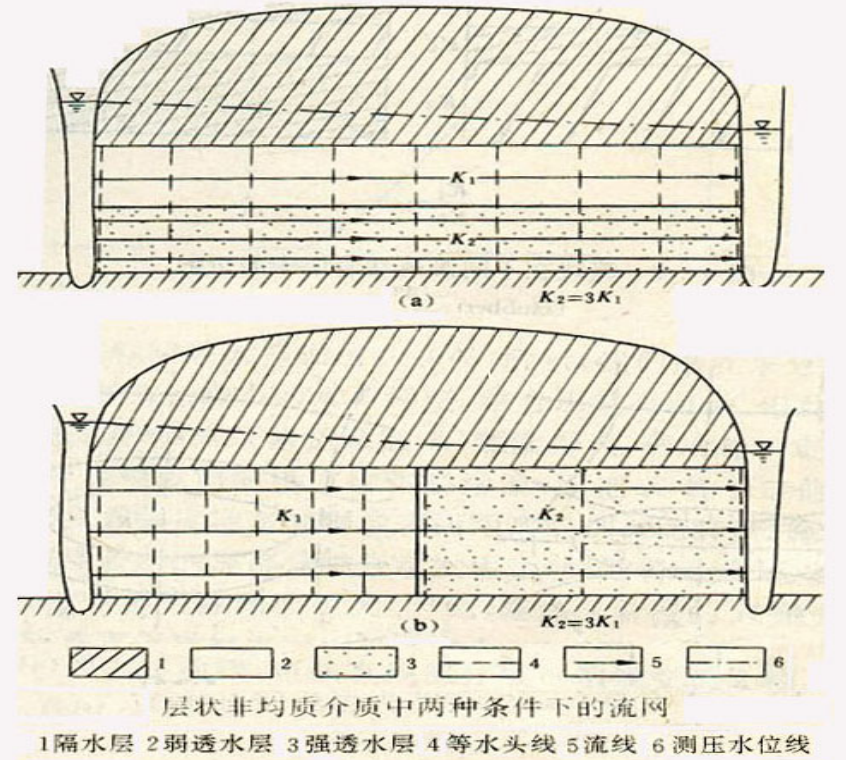
各向异性: 含水层中任一点的渗透系数在各个方向有变化。

两层平行等厚渗透系数分别为 $K_1$ 、 $K_2$ 的岩层,  $K_2=3K_1$ ; 等水位线间隔一致, 流线密度 $K_2$ 为 $K_1$ 的三倍。

流线通过不同渗透性的两套地层  $K_2=3K_1$ , 等水位线密度 $K_1$ 为 $K_2$ 的三倍, 流线相等。

含水层中有强渗透性透镜体时: 流线向其汇聚。

含水层中有弱渗透性透镜体时: 流线将绕流。



1、**均匀流与非均匀流** 沿流程渗流速度不变的渗流称为均匀流，否则是非均匀流

2、**有压流与无压流：**

**有压流：**渗流场中任一点处的压强都不为大气压强（一般大于大气压强）的渗流为有压流。

**无压流：**具有自由表面且表面压强为大气压强的渗流为无压流。

3、**层流与紊流：**地下水在岩石空隙中渗流时，水的质点有秩序、互不混杂有规则的运动称为层流；否则为紊流。

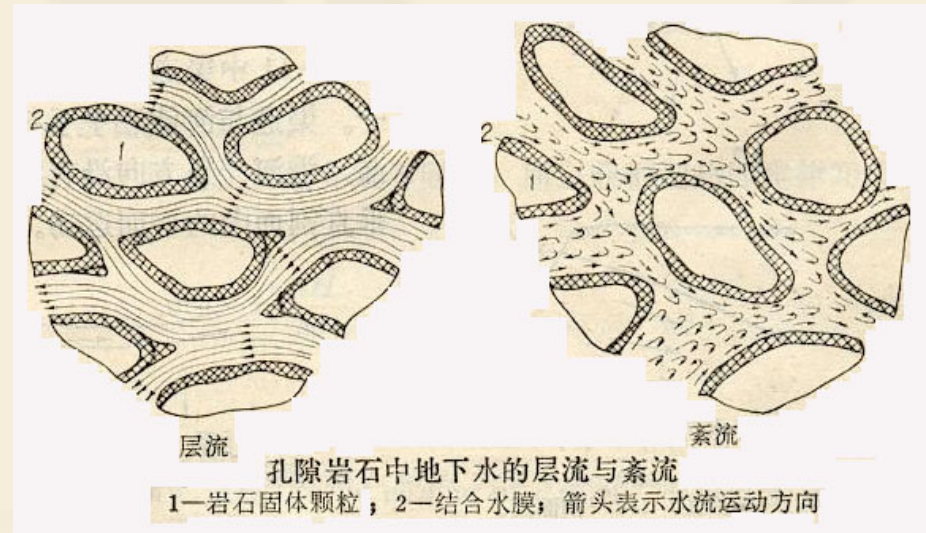
4、**稳定流与非稳定流：**渗流场中任一点处的运动要素（压强、速度等）不随时间变化的渗流称为稳定流，例如水头： $H=f(x,y,z)$ ；否则为非稳定流，例如水头： $H=f(x,y,z,t)$ 。

5、**一维流、二维流、三维流：**

**一维流：**在渗流场中，速度向量与任一坐标轴相一致的渗流称为一维流。

**二维流：**渗流场中，速度向量与某一坐标平面平行的渗流称为二维流。

**三维流：**渗流场中，速度向量不与某一坐标平面或轴线平行的渗流为三维流。



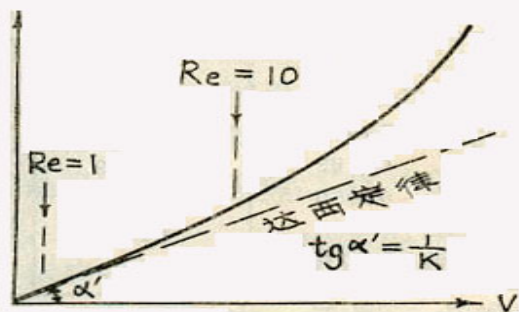
地下水的层流与紊流示意图



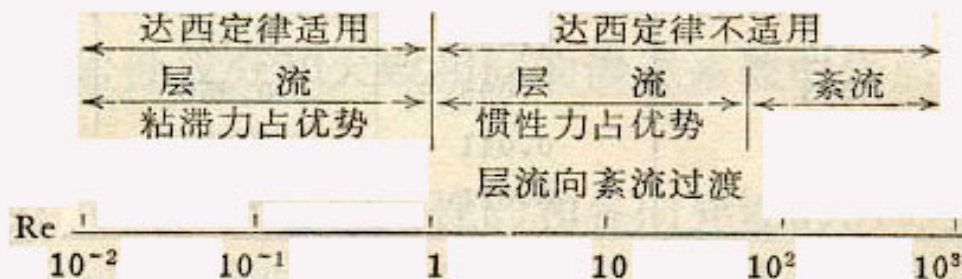
## (2) 达西定律的适用条件

**上限：**近年来研究表明，达西定律并非适用于所有的层流，当雷诺数 $Re$  ( $Re=V \times d / \nu$ ) 增大，水流的惯性作用增强到不可忽略不计时，尽管水流仍保持层流状态，但渗流速度与水力坡度之间却不是线性关系，此时达西定律不适用。因此与粘滞力相比惯性力较小而可忽略不计是达西定律的一个适用条件。通过大量实验研究表明：**只要根据平均粒径计算的雷诺数小于1--10之间的某个值，达西定律就是适用的。**

**下限：**由于岩石空隙中存在结合水，所以地下水在其中运动时，必须在一定水力坡度的作用下，才能突破结合水开始运动，此水力坡度叫起始水力坡度。有些学者把水流运动开始与线性渗透定律相符时的水力坡度作为达西定律适用范围的下限。



渗透速度和水力坡度的实验关系



多孔介质中的水流状态

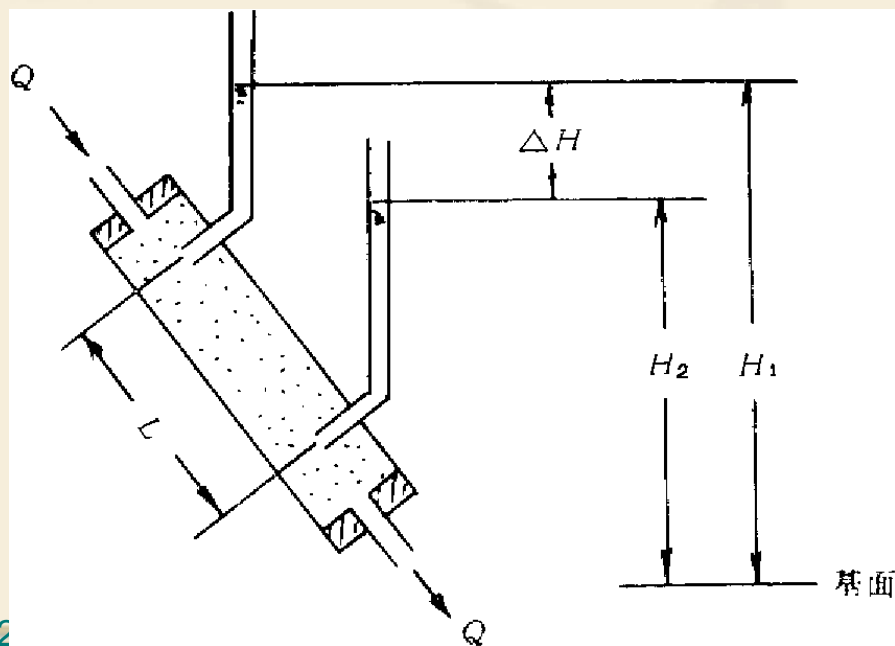
### 二、非线性渗流定律

通过大量实验得知，当地下水为紊流运动时，地下水运动服从哲才定律，即渗流速度与水力坡度的平方根成正比： $V=K \times I^{1/2}$ 。

## 4.3.2 地下水运动的基本定律

### ★ 线性渗透定律—Darcy定律

$$Q = -kA \frac{H_2 - H_1}{L} = kA \frac{\Delta H}{L} = kAJ$$



$$V = kJ$$

$Q$ —渗流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  
 $A$ —过水断面面积,  $\text{cm}^2$ ;  
 $\Delta H$ —水头损失,  $\text{cm}$ ;  
 $L$ —渗流距离,  $\text{cm}$ ;  
 $k$ —渗透系数,  $\text{m/d}$ 或  
 $\text{cm/s}$ ;



## ★ 非线性渗透定律——Chezy定律

当地下水在宽大的空隙中以相当快的速度运动时，呈现紊流运动，即渗透速度与水力坡度的1/2次方成正比

$$V = k \sqrt{J}$$



# Darcy 定律应用举例

水文地质计算剖面，含水层为潜水层，隔水底板水平，

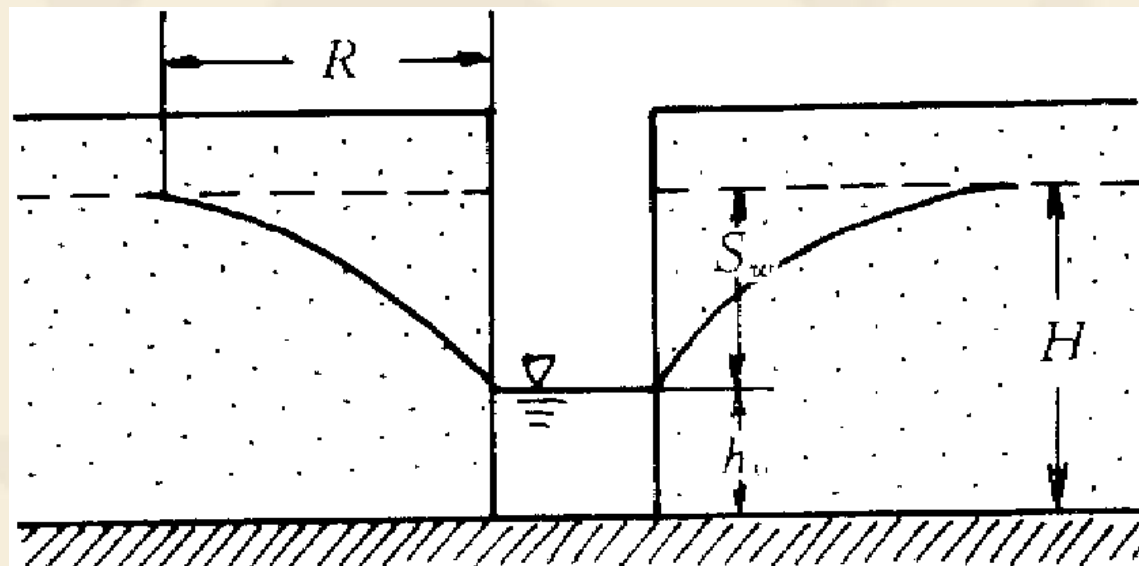
$L=500\text{m}$ ,

$R=70\text{m}$ ,

$H=4.5\text{m}$ ,

$h_0=0.5\text{m}$ ,

$k=6$ .

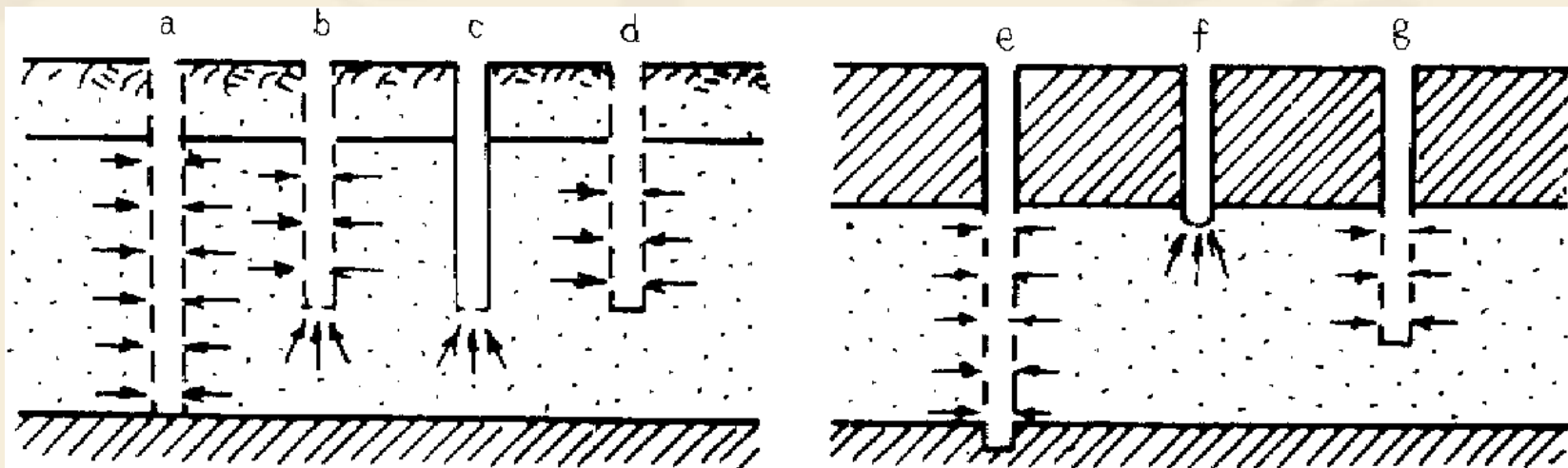


$$Q = 2kAJ = 2kL \frac{H + h_0}{2} \frac{H - h_0}{R} = kL \frac{H^2 - h_0^2}{R}$$

$$Q = 6.8 \times 500 \frac{4.5^2 - 0.5^2}{70} = 971 (\text{m}^3 / \text{d})$$

## 4.3.3 地下水向井的稳定流动

- ★ 井是垂向取水(排水)构筑物
- ★ 按揭露地下水的类型分为潜水井与承压水井
- ★ 按揭露含水层的完整程度和进水条件分为完整井与非完整井
- ★ 潜水完整井、潜水非完整井、承压完整井及承压非完整井



a—潜水完整井  
e—承压完整井

b、c、d—潜水非完整井  
f、g—承压非完整井

1863年法国水力学家Dupuit首先应用Darcy定律导出地下水向井稳定流的涌水量公式，然后Thiem作了补充和修改。

**假设：** 含水层均质各向同性；

含水层等厚，水平埋藏和无限延伸；

抽水过程中地下水来自以井轴为中心 $R$ 为半径的圆柱体的外侧面。

抽水前，天然条件下井中的水位称静水位，开始抽水后井中不断下降的水位称动水位。



# 4.4 地下水与工程建设

## 4.4.1 地下水引起的工程地质问题

地下水引起的  
工程地质问题

地面沉降

地面塌陷

渗透变形（管涌和流土）

基坑突涌

隧道涌水突泥

流砂

边坡失稳（滑坡）

## 4.4.2 基坑排水

### ★ 基坑排水方法

- (1) 明沟排水
- (2) 轻型井点排水
- (3) 深井排水
- (4) 真空排水
- (5) 电渗排水等

# ★ 基坑排水的水文地质监测工作

**(1) 水位观测**

**(2) 地面沉降观测**